

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

活断層データベースの整備

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
- ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
- 地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (1) 地震発生の新たな長期予測
- イ. 内陸地震の長期予測

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
- ウ. 大地震による災害リスク評価手法

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

- (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
- イ. 首都直下地震

(5) 総合的研究との関連：

首都直下地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

活断層の長期評価に資するデータベースであるだけでなく、強震動評価や断層変位による被害の軽減に資する活断層情報を発信する。一方で、活断層研究者のみならず、地震防災に関わるあらゆる人が理解可能なデータ提供を試みる。また、古地震研究に関する他のデータベースとの統合を検討する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

活断層データベースのさらなる活用を目指し、下記の業務を行う。

2019年度には、断層活動イベントのページの改修、調査地の位置精度を向上させる作業、データ入力インターフェイスの作成等の作業を実施する。

2020-2021年度には、活動セグメント内の「セクション（断層線）」および「地点」に関する情報を追加し、各調査地がセクションごとに表示される改修作業を実施する。

2022-2023年度には、表示インターフェイスを改修し、起震断層・活動セグメント・調査地の情報を充実させる。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

新規データの入力として、成果報告書3編（約20断層の調査成果を収録）と学术论文2編に記されている調査地情報をデータ化した。活断層データベースに表示させる活断層図の精度を高度化するため、東北地方と関東地方の活断層で実施された調査の調査地（439地点）について位置精度を確認・修正する作業を実施したほか、関東地方に分布する活断層（20断層）について、縮尺2万5千分の1地形図上に図示できるように、活断層線の位置情報を高精度化した。また、位置精度を向上させた調査地と活断層線を表示できるように、活断層データベースの表示システムを改善した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

活断層データベースで表示させる活断層図を高精度化するために、調査地（約1300地点）と活断層線（約60断層）の位置精度を向上させる作業を実施した。また、活断層データベースの利用者に活断層の位置だけではなく特徴も理解してもらうために、活断層図上で活断層線や調査地をクリックしたときに表示される情報を充実させた。これらの成果について、令和5年度末以降に活断層データベース上で閲覧できるように公開する予定である。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

活断層データベースは、地震現象の解明に貢献するために、これまで実施された約2万地点に及ぶ活断層調査地点の情報を収録しており、現在も新たな研究成果をデータとして収録している。今期には、詳細な活断層図（縮尺5万分の1程度）を公開することによって活断層と構造物の位置関係を認識しやすくするとともに、断層パラメータ等をウェブ上で簡単に確認できるように表示システムを改善することによって活断層による被害への対応に関する検討を容易にすることを目標とし、そのために必要なデータ位置精度更新作業と表示システム改善作業を進めることができた。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

Azuma, T. and Y. Miyamoto, 2013, Recent improvement of the Active Fault Database of Japan, International Union for Quaternary Research (INQUA) 第21回大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

活断層データベースの整備

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

吾妻崇（産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門）、宮下由香里（産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門）、丸山正（産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門）、宮本富士香（産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門）

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：活断層・火山研究部門

電話：029-861-3691

e-mail：

URL：https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：吾妻崇

所属：活断層・火山研究部門

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

主要活断層帯から生じる連動型地震の古地震学的研究

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (1) 地震発生の新たな長期予測
イ. 内陸地震の長期予測

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

主要活断層帯において地質学的・古地震学な調査を実施し過去の地震に伴う複数セグメントの連動履歴を解明し、その発生頻度や地震規模を明らかにする。連動履歴解明のため、セグメント境界周辺において複数回の地震時変位量を復元するための野外調査を5か年で実施する。特に、過去の連動型イベントの判別には地震時変位量と地震断層長のスケーリング則を指標とするため、これまでに主に対象としてきた横ずれ断層だけでなく、逆断層等の断層長と断層幅の比率が異なる事例についても知見を集積する。その結果を基に、連動型古地震像復元手法についての普遍性を検討することを目標とする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

連動履歴を明らかにして連動／非連動を判別し、セグメント境界の連動性評価をおこなう。
2021年度：セグメント境界周辺において、地震時変位量を復元するための調査を実施する。
2022年度：セグメント境界周辺において、地震時変位量を復元するための調査を実施する。地震時変位量等から連動履歴を明らかにして連動／非連動を判別し、セグメント境界の連動性評価をおこなう。
2023年度：セグメント境界周辺において地震時変位量を復元するための調査を実施する。セグメント境界毎の連動性評価を総合し、断層帯の連動履歴をもとに古地震シナリオを作成する。古地震シナリオを反映した規模予測および長期予測の高度化について検討する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

トルコの東アナトリア断層系で2023年に生じたMw7.8カフラマンマラシュ地震を対象に、地震時変位量を復元する古地震学的調査を実施した。2023年地震は長さ約330kmの地表地震断層を生じ、最大

変位 8 m の右横ずれ変位を生じた。2014年にトレンチ調査を実施したカルタル地点においても、2023年地震に伴い横ずれ変位が生じたと推定された。そのため、地震後の2023年10月に2014年トレンチを再掘削し、地震前後の断層の出現形態や過去の活動時期の精緻化、累積横ずれ変位量の計測等を実施した。

カルタル地点は、大規模な被害を生じたカフラマンマラシュから東方約25kmの東アナトリア断層系状に位置する。2014年トレンチでは、断層に直交するトレンチを2条掘削し、シャッターリッジを構成する蛇紋岩と閉塞凹地を埋積する細粒堆積物を境する、明瞭な高角断層を確認していた。断層と地層の切断・被覆関係や変位・変形の程度の差異を基に、5～6回の過去の活動を識別した。ただし、年代測定試料の制約から個別のイベント発生時気を特定するまでには至らなかった。歴史記録では、最新活動は西暦1513年の歴史地震とみられ、甚大な被害記録の範囲から東アナトリア断層系を震源とするとみられていた。先行する歴史地震の候補は西暦1114年であり、これらの歴史地震の発生間隔400と西暦1513年からの経過時間をもとに、近い将来の地震発生可能性が指摘されていた。

2023年10月のトレンチ再掘削調査では、まず2014年トレンチを再掘削した。トレンチ壁面の地層と埋め戻した掘削土が類似であるため、2014年トレンチの壁面を識別し露出させることは容易ではなかったが、当時のグリッドに使用した釘や糸が残存しており、それらを2014年当時の壁面位置の認定に利用した。地表地震断層は、2014年トレンチで識別された断層が上方へ進展し、地表まで切断する様子が確認された。ただし、一部の断層は地表まで進展していなく、イベント解釈で一般的である、断層と地層の切断・被覆関係が過去のイベント層準を示すことが確認された。暫定的な年代測定結果では、2023年地震に先行する活動時期（2014年当時の最新活動）は西暦1054年以降に限定され、約3000年前以降に2023年地震を含み5～6回のイベントが識別されている。また、閉塞凹地からシャッターリッジを横断して排水していたとみられる埋没チャンネル堆積物を基準に累積横ずれ量を計測した。今後、さらに多数の年代測定結果等をもとに、個別の活動時期を特定し、歴史地震との対比や活動間隔の算出、累積横ずれ量と地震イベントとの関係等を検討していく。さらに、2023年地震発生前の長期予測の検証として、発生可能性の検証に加えて、どこまで連動範囲を推定可能であったかを明らかにする。

また、中央構造線断層帯・石鎚山脈北縁区間／北縁西部区間周辺のセグメント境界付近を対象に、横ずれ変位だけでなく、局所的に生じる上下変位を基に過去の連動型イベントを判別する手法の開発に着手した。

なお、本研究の一部はJST・J-RAPID事業の一部、及び文科省委託事業「長大な活断層帯等で発生する地震の評価手法の高度化に関する調査研究」の一部として実施した。関係各位に御礼申し上げます。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

令和元年度：主に糸魚川―静岡構造線断層帯の変位履歴調査の結果をとりまとめ、地震時変位量等に基づき連動／非連動イベントを抽出し、連動履歴を推定した。北部区間から南部区間の連動履歴を整理し、ポアソン過程に基づく連動確率の試算をおこなった。

令和2年度：主に中央構造線断層帯の讃岐山脈南縁東部区間／西部区間を対象に、地震時変位量等に基づき連動／非連動イベントを抽出し、連動履歴を推定した。

令和3年度：主に中央構造線断層帯の讃岐山脈南縁西部区間／石鎚山脈北縁区間を対象に、地震時変位量等に基づき連動／非連動イベントを抽出し、連動履歴を推定した。

令和4年度：主に中央構造線断層帯の石鎚山脈北縁区間／石鎚山脈北縁西部区間を対象に、地震時変位量等に基づき連動／非連動イベントを抽出し、連動履歴を推定した。変位履歴調査の結果をとりまとめ、ポアソン過程に基づく連動確率の試算をおこなった。また、トルコの東アナトリア断層系で生じた2023年カフラマンマラシュ地震の地表地震断層と変位量の分布について、主に衛星写真の判読と変位計測をおこない、5つの断層セグメントの連動型地震であることを推定した。

令和5年度：東アナトリア断層系の2023年カフラマンマラシュ地震を対象に、地震前の2014年に実施したトレンチの再掘削調査を実施し、2023年地震で生じたトレンチの横ずれ変位等を詳細に明らかにした。主に中央構造線断層帯の石鎚山脈北縁区間を対象に、横ずれ変位量だけでなくセグメント境界周辺の上下変位で過去の連動型イベントを判別する手法の開発に着手した。逆断層等の断層長と断層幅の比率が異なる事例の連動性評価手法については、次年度以降に検討することとした。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に

対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

主要活断層帯から生じる連動型地震の発生確率を評価する手法を初めて提示し、長期予測の高度化に貢献した。さらに検討を続けることにより、次に生じる大地震の具体的な連動範囲やその発生可能性を評価可能になり、最大規模のみを想定する評価だけではなく、より現実的・合理的・効率的に被害を軽減するための基礎情報となると期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

近藤久雄,2023,糸魚川-静岡構造線断層帯における連動型巨大地震の発生可能性評価,第四紀研究,<https://doi.org/10.4116/jaqua.63.2219>,査読有,謝辞無

文部科学省研究開発局・国立研究開発法人産業技術総合研究所,2023,「連動型地震の発生予測のための活断層調査研究 令和2～4年度 成果報告書」,文部科学省研究開発局,1-406,査読無,謝辞無

近藤久雄,2023,トルコ南部における活断層分布と地震時の変位,日本地震工学会誌,50,7-10,査読無,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Hisao Kondo, Selim Özalp, Kazutoshi Imanishi,2023,Primary surface rupture and slip distribution associated with Mw7.8& Mw7.5 earthquakes in southern Turkey,日本地球惑星科学連合2023年大会,U13-02

近藤久雄、オザルプ・セリム、ドゥマン・タメール、ヤヴゾール・アイハン、エルマジ・ハサン,2023,トルコ南東部の東アナトリア断層系における2014年トレンチ調査と大地震の空白域,日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS13-10

近藤久雄、セリム・オザルプ、ハサン・エルマジ、タメール・ドゥマン,2023,東アナトリア断層系における2023年Mw7.8地震とカルタル地点のトレンチ調査,日本活断層学会2023年度秋季学術大会,O-8

木村治夫・近藤久雄・黒澤英樹,2023,S波反射法地震探査（横黒第1測線・第2測線）からみた中央構造線断層帯川上断層における浅部地下構造,日本活断層学会2023年度秋季学術大会,O-10

加瀬祐子・近藤久雄・浦田優美,2023,動力学的震源モデルから推定される中央構造線断層帯(四国陸域)の最新イベント像,日本地震学会2023年度秋季大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

主要活断層帯から生じる連動型地震の古地震学的研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 活断層評価研究グループ
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：近藤久雄

所属：産業技術総合研究所活断層・火山研究部門

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地質調査に基づく火山活動履歴の解明と年代測定手法の高度化

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
- ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (4) 中長期的な火山活動の評価
- ア. 火山噴火の長期活動の評価

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
- オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

火山活動の評価と予測の基礎となるデータとして、日本列島の活動的火山の噴火履歴調査を実施し、形成史や噴火履歴を明らかにした火山地質図の整備を推進する。火山に関する基礎データの収集と整理を行い、日本の火山データベースとして維持更新する。また活動的火山で高分解能な噴火履歴を得るために、効率的かつ高精度で若い火山噴出物の年代が測定できる手法を開発する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

将来噴火の可能性の高い活火山の中長期評価と予測のため、火山防災のために監視・観測体制の充実が必要な活火山（50火山）で重点的に火山の形成史・噴火履歴を明らかにした地質図の整備を行う。このうち恵山、御嶽山、日光白根山、雌阿寒岳、秋田焼山、伊豆大島などでは、噴火履歴調査に基づいて数万～数十万年に達する火山体の形成史を明らかにし、あわせて定量的な噴出物量、化学分析、年代測定等の基礎データを取得し、歴史記録を含めた火山全体の活動履歴を明示した火山地質図として整備する。

活動的火山で高分解能な噴火履歴を得るために、10万年前より若い火山噴出物を効率的かつ高精度で測定できる年代測定手法の開発を行う。

日本列島の火山の基礎情報を最新の知見に基づいて収集・整理し、これらを日本の火山データベースとして引き続き整備し公開する。このうち20万分の1スケールでの全国火山図を作成し、火山の形成区分毎に噴出物範囲、噴火年代、噴出量、マグマ化学組成等の科学データを取り入れる。これらの整備により、国土の基礎情報として関係諸機関の利用に供すると共に、火山活動の噴火推移予測に貢献する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

将来噴火する可能性の高い活火山の中長期的活動評価と予測のため、活動的火山の地質図作成を進めた。秋田焼山・御嶽山・雌阿寒岳の火山地質図を取りまとめを進め、秋田焼山の完新世噴火史を雑誌「火山」で公表した。伊豆大島では陸上から沿岸部水深400m程度までの範囲をカバーする陸海シームレス赤色立体地図を作成し、火口位置と噴火履歴を盛り込んだ噴火口図を作成した。岩木山では地表踏査による噴火履歴調査を継続した。大規模火砕流分布図シリーズとして「阿蘇カルデラ阿蘇4火砕流堆積物分布図」「阿蘇カルデラ阿蘇3火砕流堆積物分布図」を整備した。活動的火山で高分解能な噴火履歴を解明するために、御嶽火山・秋田焼山等の岩石試料を対象とした感度法 K-Ar 及び Ar/Ar 年代測定を実施し、10 万年前より若い火山噴出物の噴火年代を明らかにした。日本列島の火山の地質情報を最新の知見に基づいて収集・整理して、日本の火山データベースを更新・拡充した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

将来噴火の可能性の高い活火山の中長期評価と予測のため、気象庁の常時観測50火山を重点として、火山形成史・噴火履歴を明らかにした地質図の整備を行った。恵山、日光白根及び三岳について火山地質図を整備した。秋田焼山は完新世の噴火史を雑誌「火山」で発表した。御嶽山、雌阿寒岳、伊豆大島について成果取りまとめを継続した。火口位置情報と噴火履歴を盛り込んだ噴火口図と火口位置データベースの作成を開始した。10万年前より若い火山噴出物を効率的かつ高精度で測定できる年代測定手法として感度法 K-Ar 年代測定及び Ar/Ar 年代測定手法の開発を行った。低頻度大規模災害対策の基礎資料となる大規模火砕流分布図シリーズの公開を開始し、入戸カルデラ・支笏カルデラ・阿蘇カルデラについて4エピソードの大規模噴火堆積物の地下や海底を含めた分布図・解説書を整備した。日本列島の火山の地質情報を最新の知見に基づいて収集・整理し、これらを日本の火山データベースとして更新・公開した。これらの整備により、国土の基礎情報として関係諸機関の利用に供すると共に、火山活動の噴火推移予測に貢献した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

火山の地質図作成にあたっては、有史時代の活動も含めた完新世の噴火活動史を重視しており、防災対策に資することで目的達成に貢献するものである。令和2年には、産総研が作成した富士火山地質図(第2版)を活用して、富士山火山防災対策会議により富士山の噴石飛散域や溶岩流流下域などの被害想定が見直され、令和4年には山梨県と富士山噴火に備えた連携・協力協定を締結した。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

星住英夫・宝田晋治・宮縁育夫・宮城磯治・山崎 雅・金田泰明・下司信夫,2023,阿蘇カルデラ阿蘇4火砕流堆積物分布図,大規模火砕流分布図,産総研地質調査総合センター,no.,3,査読無,謝辞無

南 裕介・伊藤 順一,草野 有紀,及川 輝樹・大場 司,2023,秋田焼山火山における過去6000年間の爆発的活動による降下火砕物の層序,年代,化学的特徴,火山,68,39-57,doi: 10.18940/kazan.68.2_39,査読有,謝辞無

Nishihara A., Y. Tatsumi, K. Kaneko, J. Kimura, Q. Chang, N. Geshi, T. Miyazaki, B. Vaglarov, H. Hinata and K. Suzuki-Kamata,2024,Voluminous magma formation for the 30-ka Aira caldera-forming eruption in SW Japan: contributions of crust-derived felsic and mafic magmas,Front. Earth. Sci.,11,1283844,doi: 10.3389/feart.2023.1283844,査読有,謝辞無

及川輝樹・池上郁彦・渡部将太,2023,多量の漂流軽石を発生させる噴火—南西諸島における軽石の漂着記録とその給源火山の活動から,火山,68,171-187,doi: 10.18940/kazan.68.3_171,査読有,謝辞無

Conway, C.E., L. R. Pure and O. Ishizuka,2023,An assessment of potential causal links between deglaciation and eruption rates at arc volcanoes,Front. Earth Sci.,11,1082342,doi: 10.3389/feart.2023.1082342,査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

伊藤順一・南 裕介,2023,新聞報道に基づく秋田焼山における明治 20(1887) 年噴火の再評価,日本火山学会秋季大会,P44

石塚 治・井上卓彦・有元 純・川邊禎久・及川輝樹・前野 深,2023,周辺海域を含めた伊豆大島側火山形成場の特徴と 活動時期,日本火山学会秋季大会,A3-01
及川輝樹・山崎誠子,2023,御嶽火山におけるMIS2の氷河の発見ー日本列島におけるlava-ice interactionの初めての報告ー,日本第四紀学会2023年大会,O-07
及川輝樹,2024,福岡ノ場2021年噴火および軽石漂流イベントと国内の軽石漂流イベント,土木学会火山工学研究セミナー浮遊軽石災害セミナー

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：火山：その他：火山地質の情報データベース
概要：日本の火山の地質に関する総合データベース
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：日本全国
調査・観測期間：
公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web）
<https://gbank.gsj.jp/volcano/index.htm>

(11) 次期計画における課題名：

地質調査と年代測定手法の高度化による火山活動履歴の解明とデータベースの整備

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

産業技術総合研究所地質調査総合センター
他機関との共同研究の有無：有
北海道大学,北海道教育大学,秋田大学,信州大学,大阪府立大学,など

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：活断層・火山研究部門 火山活動研究グループ
電話：
e-mail：
URL：<https://unit.aist.go.jp/ievg/actvolcano-rg1/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：古川竜太
所属：活断層・火山研究部門 火山活動研究グループ

阿蘇カルデラ阿蘇4火砕流堆積物分布図
DISTRIBUTION MAP OF ASO-4 IGNIMBRITE AND ASSOCIATED DEPOSITS, ASO CALDERA, JAPAN

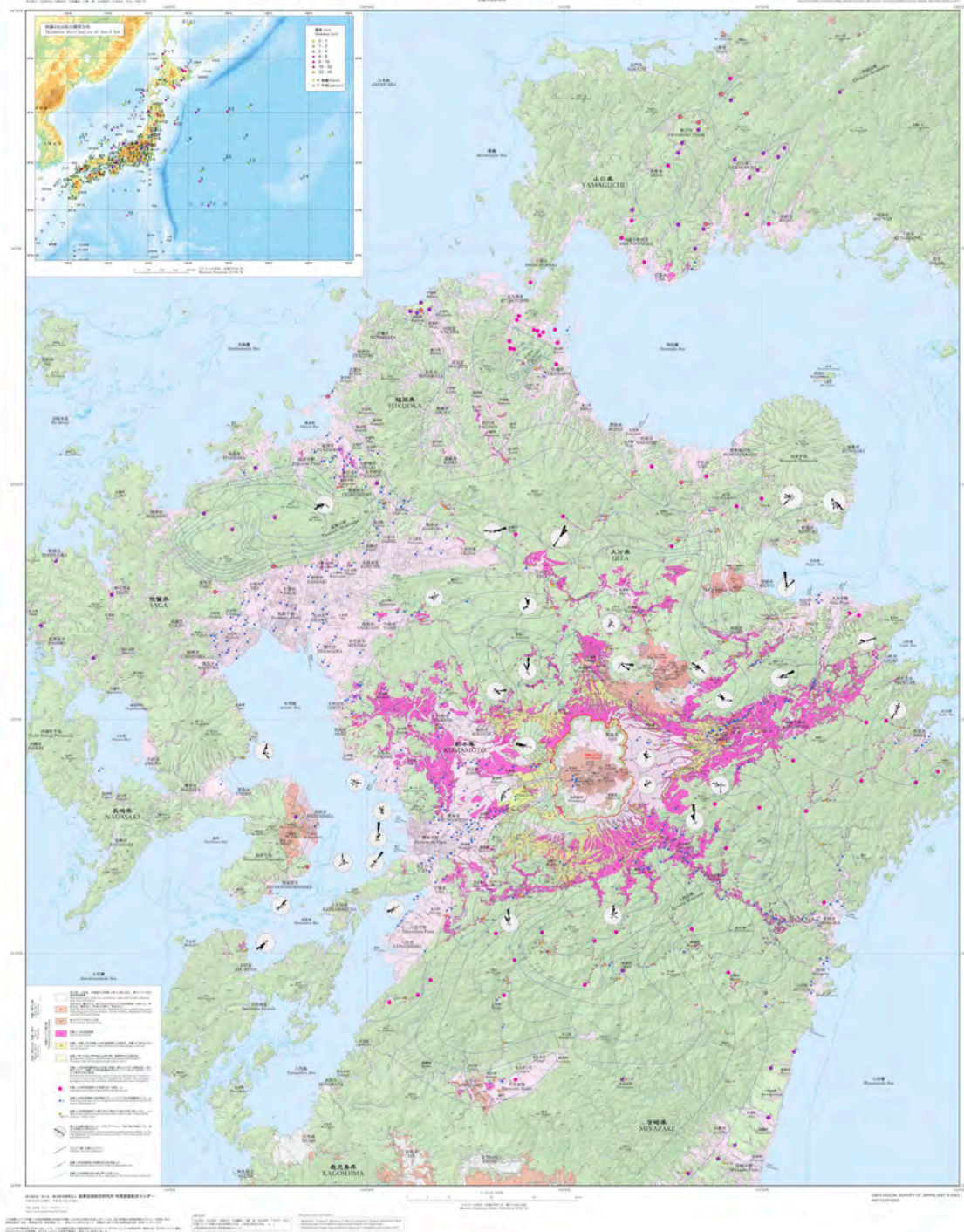


図1
阿蘇カルデラ阿蘇4火砕流堆積物分布図（星住ほか, 2023）

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

津波浸水履歴情報の整備

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
- ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

産業技術総合研究所が実施した津波堆積物調査の地点および論文公表した地質柱状図のデータについて、最新の情報を迅速に公開できるよう整備する。また地質情報に基づいた津波浸水計算結果について、表示できる地域を増やしていく。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

地質情報については、おもに調査が進められている南海トラフ沿いを中心に、論文公表したデータから随時公開していく。また津波浸水計算結果については、おもに千島-日本海溝沿いの沿岸低地について整備を進める。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

津波浸水履歴情報のコンテンツ整備のため、千島海溝沿いの波源に関連して基礎データの収集を進めた。また、房総半島東方沖の波源について、公開用コンテンツの準備を進めた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

福島県相馬市、南相馬市、富岡町、いわき市の一部の地域において、西暦869年貞観地震による津波の推定浸水範囲の情報を整備し、公表した。また同様に、茨城県北茨城市における津波堆積物の情報を整備・公表した。

北海道東部において、千島海溝沿いの波源を推定するための地質学的データの収集を進めた。

千葉県九十九里地域において、日本海溝南部周辺（房総半島東方沖）を波源とする津波の地質データおよび断層パラメータを公開する準備を進めた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

過去に発生した海溝型巨大地震の地質痕跡の分析を行うため、千島海溝沿いの波源に関連したデータの収集を進めることができた。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

伊尾木圭衣・行谷佑一・澤井祐紀・田村明子,2023,津波のシミュレーション,GSJ研究資料集,744

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

海溝型巨大地震の履歴とメカニズム解明

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門海溝型地震履歴研究グループ
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ

電話：029-861-3691

e-mail：

URL：<https://unit.aist.go.jp/ievg/group/subducteq/index.html>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：澤井祐紀

所属：活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地質調査と実験に基づく、断層の力学挙動についての三次元モデルの構築

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

イ. 地震断層滑りのモデル化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

内陸断層の深部、脆性-塑性遷移付近における、応力・歪といった変形の不均質を削剥断層（三重県中央構造線）の地質調査により、断層内部構造形成・発展・力学挙動の物理過程を岩石変形実験により明らかにする。両者の成果を統合し数値計算により、断層深部の変形不均質が断層挙動に及ぼす影響を明らかにする。またこれらの成果に基づき、断層深部に関わる各種観測情報が断層挙動に対し持つ意味を検討する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

2019-2021年度：

(1) 断層の走向方向の、変形条件・変形機構、運動像の三次元分布の解明。三次元地質モデル構築。

(2) 岩石変形実験による構造形成と発展（転位蓄積・動的再結晶・微小空洞形成）と粘弾性を考慮した力学挙動の解析。

2022-2023年度：

地質調査結果、岩石変形実験の知見の統合と、それらに基づく数値計算の枠組み構築。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

内陸断層の深部における地震発生と塑性流動の関わりとして、地震発生層の最深部における延性破壊過程を見出すとともに、その断層挙動への影響、地震発生の物理過程としてのポテンシャルの評価を行った。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

地震発生層の最深部で形成した断層構造が地表に露出する三重県中央構造線において、東西約8 km程度の範囲の調査を行った。塑性変形した岩石から応力と歪を石英の動的再結晶微細構造から読み取る手法を確立し、この方法を踏まえ強い塑性変形により、キャビテーションが起り、さらにその成長と合体により破壊が発生することを見出した。さらにこの構造は断層面全体に発達することから、地震発生層最深部の力学挙動を支配する重要なプロセスであることを見出した。このほか、Na端成分斜長石の焼結方法を確立した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に

対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

多くの内陸地震が発生する地震発生層最深部における、断層挙動を支配する物理現象を見出した。今後、この物理現象の詳細、さらに3次元的な変形の空間分布を地質調査から明らかにすることにより、地震の短期的予測が原理的に可能であるのかの問いに応えることができると考えられる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

Yeo, T., Shigematsu, N., and Wallis, S., 2023, Ductile fracture evolved from creep cavitation in the down-dip extension of seismogenic fault domain, 日本地球惑星科学連合 2023年大会, S-CG50-P07

Yeo, T., Shigematsu, N., Sumita, T., Wallis, S., and Miyakawa, A., 2023, Kilometre-scale fracturing originating in ductile deformation along the down-dip extension of seismogenic fault domain, 日本地球惑星科学連合 2023年大会, S-CG45-P15

イヨトーマス・重松紀生・ウォリスサイモン・住田達哉・張春傑・氏家恒太郎・香取拓馬・宮川歩夢, 2023, 変形中のナノキャビティ形成をきっかけとする km スケールの延性破壊, 日本地質学会第130年学術大会, T1-O-11

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地質調査と実験に基づく震源断層物理モデルの提供

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門地震テクトニクス研究グループ, 産業技術総合研究所 地質情報研究部門地球物理研究グループ, 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門大規模噴火研究グループ

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：部署等名 活断層・火山研究部門

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：重松紀生

所属：活断層・火山研究部門

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

火山性流体観測に基づく噴火発生過程および火山活動推移の解明

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

マグマ噴火を繰り返す火山において、噴火発生や活動推移に伴う火山ガス放出量・組成の特徴と時間変化を把握することにより、火山ガス供給過程の変化の視点からの噴火発生や活動推移のモデル化を行う。地殻へのマグマの貫入や火山ガスの供給による火山体浅部の熱水系の応答について、熱水系シミュレーションにより定量化する手法を、伊豆大島など活動的な火山に適用する。熱水系の卓越する火山において、熱水系の構造及び火山ガス供給系を明らかにし、水蒸気爆発発生に関与する熱水系の実体をモデル化する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

桜島、阿蘇、諏訪之瀬島などマグマ噴火を繰り返す火山において、Multi-GASによる火山ガス組成の連続観測および繰り返し観測を実施し、火山活動推移に伴う火山ガス組成の変化を把握し、火山ガス供給過程のモデル化を行う。伊豆大島において、火山性流体の上昇過程を的確に捉えるため、地中温度の連続観測を開始し、自然電位の連続観測網を拡充する。透水性が悪いため熱水系の流動を規制する変質帯に着目し、その分布を明確にするため、阿蘇、霧島、伊豆大島等の火山において自然電位と電磁探査法を用いた比抵抗調査を行い熱水系のモデル化を進める。雌阿寒岳、十勝岳、樽前山、吾妻山、箱根、弥陀ヶ原、霧島硫黄山などにおいて火山ガスの繰り返し観測を実施し、火山ガス組成変化を把握し、噴気活動変化の評価を行うとともに、その要因となる熱水系のモデル化を進める。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

焼岳にてMulti-GASを用いた火山ガス組成観測を実施し、今まで測定事例がなかった複数噴気の火山ガス組成を新たに把握し、火山ガス供給過程のモデル化を進めた。伊豆大島において自然電位の連続観測を継続するとともに、電磁探査法から得られた比抵抗構造に基づき熱水系の数値シミュレーションを実施し、火山活動の活発化に伴う自然電位変動を評価した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

桜島、阿蘇、諏訪之瀬島、口永良部島、焼岳および霧島硫黄山においてMulti-GAS観測を実施し、火山ガス組成の特徴や変化を明らかにした。桜島および口永良部島においては、活動推移に伴う火山ガス組成の変化に基づき、火山ガス供給過程をモデル化した。Masaya火山においては火山ガスの大気中での酸化作用についての知見をとりまとめた。雌阿寒岳、十勝岳、樽前山、吾妻山、箱根、弥陀ヶ原、霧島硫黄山などにおいて火山ガスの繰り返し観測を実施し組成変化の把握を行なった。火山活動推移に伴う火山ガス放出率および火山ガス組成の観測事例に関する既存文献の調査を行い、火山ガス観測結果のから推定される火山活動推移変化の要因や噴火発生過程についての評価を行なった。また、伊豆大島において、火山性流体の上昇過程を的確に捉えるため、地中温度の連続観測および自然電位の連続観測を実施した。透水性が悪いため熱水系の流動を規制する変質帯に着目し、その分布を明確にするため、阿蘇、霧島、伊豆大島の火山において自然電位と電磁探査法を用いた比抵抗調査を行い熱水系のモデル化を進めた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

火山ガス組成・放出率の各種観測手法を高度化するとともに様々な火山で実施することにより、火山活動推移に伴う火山ガス組成変化を明らかにし、火道内過程の解明に貢献した。火山ガス組成および放出率の変化を高時間分解能で把握する手法の高度化および観測データの充実と火山ガス供給過程のモデル化を進めることにより、火山活動推移の評価手法を確立し災害の軽減に貢献することを目指す。また、熱水系の構造の解明のために自然電位観測および比抵抗構造に基づく数値シミュレーションを実施した。伊豆大島火山では、数値シミュレーションから火山ガスの供給による熱水系の応答モデルを予測するとともに、自然電位の連続観測を継続し、今後の活動の推移を観測モデルの検証を目指す。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

風早竜之介・森俊哉・横尾亮彦・篠原宏志,2023,FTIR観測による阿蘇の火山ガス組成の推定,日本火山学会2023年度秋季大会

松島喜雄,2023,数値シミュレーションおよび野外観測による伊豆大島火山熱水系の考察,日本火山学会2023年度秋季大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

噴出物の物質科学的解析に基づく噴火推移過程とマグマ供給系のモデル化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

他機関との共同研究の有無：有

大湊隆雄, 他数名（東京大学地震研究所）,井口正人, 他数名（京都大学防災研究所）,大倉敬宏, 他数名（京都大学理学部）,田中良, 他数名（北海道大学大学院理学研究院）,森俊哉, 他数名（東京大学大学院理学系研究科）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：活断層・火山研究部門 マグマ活動研究グループ

電話：

e-mail：

URL：<https://unit.aist.go.jp/ievg/group/magma/index.html>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：松島喜雄

所属：活断層・火山研究部門 マグマ活動研究グループ

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

高分解能地殻応力場の解明と造構造場の研究

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

イ. 内陸地震

オ. 構造共通モデルの構築

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

将来発生する地震の最大規模や発生様式の評価を行うため、可能な限り小さな地震まで解析し、高い空間分解能を有する日本列島の地殻応力マップを整備する。様々なデータから地殻応力の不均一の成因を明らかにするとともに、応力場の地域性を考慮し、数値シミュレーションも併用した最大規模評価や活動性評価手法を提案する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度～平成32年度：Hi-netの整備以後蓄積されている定常観測網のデータ解析により、陸域においてはマグニチュード（M）1クラスまで、海域においてはM2クラスまでの地震の発震機構解を推定し、高分解能地殻応力マップを作成する。

平成33年度～平成35年度：断層への応力载荷、歪み場、3次元地殻構造、地質構造、絶対応力や断層強度の指標になり得るb値や応力降下量等を総合的に考察した上で、地殻応力の不均一の成因を明らかにする。その考察をもとに地震発生場の地域性とそのテクトニックな意味を明らかにし、数値シミュレーションを併用した最大規模評価や活動性評価手法を提案する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

内陸活断層への応力载荷機構を探る一環として、下部地殻で発生する地震の性質を調べた（今西・内出, 2023ab）。特に広島県西部直下の深さ約30kmで概ね10km×10km×10kmの空間範囲で発生しているクラスタを対象とし、M1.0以上の231イベントについてモーメントテンソル解を推定した。モーメントテンソル解析は、Dahm (1996)の相対モーメントテンソル法を改良した逐次相対モーメントテンソル法（Imanishi and Uchide, in preparation）を適用し、非ダブルカップル成分も含めた高精度

推定を試みた。ダブルカップル成分に着目すると、逆断層型、横ずれ型、正断層型と様々なタイプが含まれることがわかった。このような狭い領域で多様なタイプの地震が起きていることは珍しく、高間隙水圧により様々な姿勢の既存クラックが破壊している状況が示唆される。また、非ダブルカップル成分に着目すると、微小ではあるものの、推定精度を有意に超える開口と閉口成分を持つ地震が起きていることがわかった。クラックの開口と閉口は約9年の周期性を持っていることから、クラスタ内に流体が周期的に注入されている可能性が示唆された。

震源域の応力状態とそこで発生する地震の発生様式を調査するため、能登半島北東部の群発地震活動の駆動メカニズムを高精度震源分布に基づき検討を行った。今年度はその成果を公表した

(Amezawa et al., 2023)。また、南海トラフの深部低周波微動のマイグレーションを詳細に調べるため、Hough変換を用いた手法を開発した(Sagae et al., 2023)。2024年能登半島地震に関しては、3次元速度構造(Nakajima, 2022)を用いて震源位置を再決定した。2024年能登半島地震の余震のうち海域で発生した地震は、気象庁カタログに比べて、震源深さが5-10 km程度浅くなる傾向が認められた。また、地震予知総合研究振興会が新潟県に展開している稠密観測データを用いて本震のバックプロジェクションを行った。破壊は最初に南西側に進展し、その後北東側の領域を破壊し、全体として約1分間の断層運動であったことが示された。

地震の最大規模評価に向けて、動力的破壊伝播シミュレーションの効率化のため、震源モデルのエネルギー収支によるスクリーニングの適用可能性を検討した。例として中央構造線断層帯(MTL)の讃岐山脈南縁東部区間、同西部区間、石鎚山脈北縁区間、同西部区間を対象とした。すべりモデルと摩擦構成則から計算できるresidual energy (Noda et al., 2021, JGR)と地震モーメントを使うことで、検討した48ケースのうち、合計1/3のパラメータで、連動する断層区間や地震規模の上限を制約することができた(Urata and Kase, in preparation)。動力的シミュレーションを行う前のスクリーニング手法として活用できることが期待される。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

本計画期間における主な成果は以下の通りである。

1) 小地震のメカニズム解を大量に決定し、高分解能地殻応力マップを整備した。計画当初は1943年鳥取地震(M7.2)や2000年鳥取県西部地震(M7.3)が発生した中国地域を対象地域とし、10kmメッシュの応力マップを作成した(今西ほか, 2021)。その後、深層学習によるP波初動極性検出手法(Uchide, 2020)が開発されたことでデータ処理が加速化し、沿岸海域(海岸線から50km以内)を含む地殻浅部(20km以浅)の全国版応力マップを一気に作成することができた(Uchide et al., 2022)。地震発生予測や日本のテクトニクス研究の基礎的な情報として活用されることが期待される成果である。

2) 震源域の応力状態とそこで発生する地震の発生様式を明らかにするため、2013年淡路島の地震(Imanishi et al., 2020)、能登半島北東部の群発地震活動(Amezawa et al., 2023)、2024年能登半島地震、下部地殻で発生する地震活動(今西・内出, 2023ab)等について調査を進めた。

3) 数値シミュレーションを併用した研究として、2018年北海道胆振東部地震(Mj6.7)を扱った。現実的な3次元粘弾性構造に基づく ΔCFF の時間変化を計算し、今後数十年間にわたる影響を定量的に評価した(Ohtani and Imanishi, 2019)。また、プレート境界周辺の地震のメカニズム解がプレート境界のすべり欠損により作られる応力場に調和的か否かを判定し、プレート間固着状態の時空間変化を推定する手法を開発した。この手法を東北沖や南海トラフ沿いに適用したところ、先行研究において報告されている様々な地殻変動と調和的な結果が得られたほか、従来よりも高い時空間分解能で固着状態の変化を捉えられることがわかった(Imanishi and Noda, 2023)。さらに、地震の最大規模評価に向けて、動力的破壊伝播シミュレーションの効率化のため、震源モデルのエネルギー収支によるスクリーニングの適用可能性を検討し、その有効性を確認した(Urata and Kase, in preparation)。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

令和4年度に、構造共通モデルの構築に関して、日本全国の地殻内応力マップ(Uchide et al., 2022)を地殻応力場データベース(<https://gbank.gsj.jp/crstress/>)で公開した。

今後は整備した応力マップを活用した数値シミュレーション手法を開発し、最大規模評価や活動性評価を行っていくことが重要である。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Amezawa, Y., Y. Hiramatsu, A. Miyakawa, K. Imanishi and M. Otsubo, 2023, Long-living Earthquake Swarm and Intermittent Seismicity in the Northeastern Tip of the Noto Peninsula, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 50, <https://doi.org/10.1029/2022GL102670>, 査読有, 謝辞無

Sagae, K., H. Nakahara, T. Nishimura, and K. Imanishi, 2023, Fine structure of tremor migrations beneath the Kii Peninsula, Southwest Japan, extracted with a space-time Hough transform, *J. Geophys. Res.*, 128, <https://doi.org/10.1029/2022JB026248>, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

今西和俊・内出崇彦, 2023a, 下部地殻微小地震の発生メカニズム：広島県西部直下の深部クラスター活動の事例, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS10-01

今西和俊・内出崇彦, 2023b, 下部地殻で発生する微小地震とその発生メカニズム：広島県西部直下の深部クラスター活動の事例, 日本地震学会2023年度秋季大会, S08-28

Imanishi, K. and A. Noda, 2023, Detection of annual-scale variations in interplate coupling by combining intraplate earthquakes and geodetic data: Application to the Tohoku-Oki plate boundary, American Geophysical Union 2023 Fall meeting, S13B-08

内出崇彦・椎名高裕・今西和俊, 2023, 微小地震の震源メカニズム解に基づく日本列島内陸部のストレスマップ, 日本地質学会第130年学術大会, T8-O-4 (招待講演)

浦田優美・加瀬祐子, 2023, 地震シナリオ構築におけるエネルギー収支に基づくスクリーニング手法の開発: 中央構造線断層帯を例に, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS06-P15

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

高分解能地殻応力場の解明と造構造場の研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

今西和俊（産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門）, 内出崇彦（産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門）, 椎名高裕（産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門）, 浦田優美（産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門）

他機関との共同研究の有無：有

安藤亮輔（東京大学大学院理学系研究科）, 大谷真紀子（東京大学地震研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：今西和俊

所属：産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

海溝型巨大地震の履歴とメカニズム解明

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題では日本列島の沿岸地域において地形、地質の調査を行い、史料の情報などと併せ、過去に海域で発生した地震の年代とそれに伴う地殻変動や津波浸水域を明らかにする。得られたデータに基づいて震源・波源のメカニズムを解明する。各地域での目標は以下の通り。

・千島-日本海溝：2011年東北地方太平洋沖地震の破壊領域よりも北および南のプレート境界で発生する巨大地震および津波に関して、履歴を復元し、断層モデルを提案する。

・相模トラフ：房総半島や相模湾沿岸における地震・津波履歴と隆起パターンなどを復元し、関東地震の多様性を評価する。

・南海トラフ：南海トラフから南西諸島にかけての沿岸の各地域において過去に発生した地震の時期とそれに伴う地殻変動や津波浸水域を解明し、地域間の対比から破壊領域を評価する。

・日本海沿岸：歴史地震・津波の記録のある沿岸域を中心に過去に海域で発生した地震の時期とそれに伴う地殻変動や津波浸水域を解明する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

・千島-日本海溝

北海道東部から東北地方にかけての太平洋沿岸において地質調査を実施し、地域ごとに津波浸水域と地殻変動の履歴を復元する。これらのデータに基づいて、17世紀千島のイベントをはじめとした過去の超巨大地震について断層モデルを検討する。

・相模トラフ

房総半島南部沿岸を中心に地形・地質調査を行い、海岸段丘の年代と分布を再評価することで過去

の地震に伴う多様な隆起パターンを復元する。そのデータに基づいて断層モデルを推定し、相模トラフ沿いの地震発生メカニズムを解明する。また史資料の調査から過去の関東地震とその特徴を解明し、履歴を再検討する。

・南海トラフ

南海トラフ沿いの東縁にあたる駿河湾沿岸から東海、紀伊半島、四国、さらに九州・南西諸島にかけての各沿岸において、津波堆積物調査、隆起・沈降痕跡調査、史資料調査を実施する。過去の地震の破壊域を評価するため、各地の調査で得られた試料を詳細に分析し、地域間の対比を試みる。

・日本海沿岸

おもに歴史地震で津波被害や地変の記録のある地域について、地形・地質学的な調査および史資料調査を実施し、過去の地震による津波浸水域や地殻変動の特徴を明らかにして震源・波源の検討を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

今年度の成果の概要は以下の通りである。

【千島－日本海溝】

北海道太平洋沿岸において地質調査を行い、17世紀に発生した巨大津波をはじめとした過去のイベントに関するデータを取得した。また、浸水シミュレーションを行うための地形復元を行った。

【相模トラフ】

1703年元禄津波や相模トラフ沿岸を襲った津波の歴史記録について整理し、野外調査を実行した。

【南海トラフ】

高知県では、須崎市で採取されたコア試料について、珪藻化石分析を行い、過去に発生した地震性地殻変動を検討した。また、東洋町において津波堆積物調査を実施した。三重県南伊勢町の湖底堆積物について、火山灰分析・年代測定を行い、イベント堆積物の形成要因堆積年代の年代を推定した。和歌山県那智勝浦町で採取されたジオスライサー試料について、粒度分析などの室内分析を行った。

【日本海沿岸】

2023年5月5日および2024年1月1日に発生した能登半島地震（M6.5およびM7.6）の隆起地域において、海岸の隆起量を生物遺骸群集の高度分布から推定した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

計画期間中の成果の概要は以下の通りである。

【千島－日本海溝】

北海道東部において、17世紀千島の超巨大地震の再検討のため、無人航空機測量や地中レーダー探査により津波浸水計算の基礎となる古地形の復元を行った。また、当時の浸水域の復元精度を上げるため、17世紀および13世紀の巨大津波によって堆積した津波堆積物の分布データを取得した。この結果を踏まえ、17世紀巨大津波の波源に関する予察的な計算を行った。

【相模トラフ】

房総半島南部沿岸の海岸段丘について掘削調査を行い、得られた試料の年代測定値の統計処理を行うことで、離水年代の再評価を行った。これにより、過去の関東地震の発生年代と再来間隔について復元することができた。また、1703年元禄津波や相模トラフ沿岸を襲った津波の歴史記録について整理を行い、それに関連した野外調査を実行することで、当時の津波の高さについて検討を行った。

【南海トラフ】

紀伊半島東部（南伊勢）、紀伊半島南部（那智勝浦・串本）、高知県南国市、宮崎平野で津波堆積物調査、喜界島で隆起サンゴ調査をそれぞれ実施した。三重県南伊勢町では、過去3000年間において発生した海水の浸水イベントの年代を検討し、歴史記録にある巨大津波の痕跡と考えられるイベント堆積物を発見した。和歌山県橋杭岩の巨礫についてその運搬条件を数値解析し、1707年宝永地震の津波では動かないものが存在することを明らかにし、同津波よりも大きな津波が過去に発生していたことを明らかにした。高知県南国市では、津波の浸水頻度を評価するため、沿岸の砂丘の発達時期を復元した。宮崎県日南市では、津波堆積物の分布と数値計算の結果を比較し、1662年日向灘地震の断層モデルを構築した。

【日本海沿岸】

青森県西部沿岸で津波堆積物調査、島根県西部で1872年浜田地震に関する史料および地形・地質調

査を実施した。また、山形・新潟沿岸の隆起履歴の検討を行った。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望
和歌山県橋杭岩の巨礫についてその運搬条件を数値解析し、1707年宝永地震の津波では動かないものが存在することを明らかにした。これにより、既往最大とされている宝永地震の津波よりも大きな津波が過去に発生していたことを明らかにした。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Matsumoto, D., Sawai, Y., Tanigawa, K., Namegaya, Y., Shishikura, M., Kagohara, K., Fujiwara, O. and T. Shinozaki, 2023, Sedimentary diversity of the 2011 Tohoku-oki tsunami deposits on the Sendai coastal plain and the northern coast of Fukushima Prefecture, Japan, Progress in Earth and Planetary Science, 10, 23, doi: 10.1186/s40645-023-00553-3

Shimada, Y., Sawai, Y., Matsumoto, D., Tanigawa, K., Ito, K., Tamura, T., Namegaya, Y., Shishikura, M. and S. Fujino, 2023, Marine inundation history during the last 3000 years at Lake Kogare-ike, a coastal lake on the Pacific coast of central Japan, Progress in Earth and Planetary Science, 10, 49, doi: 10.1186/s40645-023-00577-9

Shishikura, M., Namegaya, Y., Kaneko, H. and M. Koyama, 2023, Late Holocene tectonics inferred from emerged shoreline features in Higashi-Izu monogenetic volcano field, Central Japan, Tectonophysics, 864, 229985, doi: 10.1016/j.tecto.2023.229985

・学会・シンポジウム等での発表

谷川晃一郎・田村 亨・小森康太郎・根来湧輝, 2023, 高知県南国市における完新世後期の海岸砂丘発達と津波浸水への影響, 日本第四紀学会2023年大会, P-03

松本 弾・澤井祐紀・谷川晃一郎・行谷佑一・宍倉正展・楮原京子・藤原治・篠崎鉄哉, 2023, 2011年津波堆積物にみられる堆積学的特徴の多様性, 日本地質学会第130年学術大会, T6-P-13

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

海溝型巨大地震の履歴とメカニズム解明

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ
他機関との共同研究の有無：有

北海道大学, 秋田大学, 筑波大学, 東京大学, 法政大学, 地域地盤環境研究所

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ

電話：029-861-3691

e-mail：

URL：<https://unit.aist.go.jp/ievg/group/subducteq/index.html>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：澤井祐紀

所属：活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地下水・地殻変動観測による地震予測精度の向上

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

イ. 内陸地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

イ. 観測・解析技術の開発

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

紀伊半島～四国周辺に4点の新規地下水・地殻変動観測施設の整備。南海トラフ沿いの巨大地震想定震源域の深部周辺で発生する短期的ゆっくりすべりの詳細なマッピングの継続。安価かつ高精度な歪観測技術の開発と適用。深部すべりの客観的な検出手法の開発の継続。南海トラフ沿いの巨大地震想定震源域の固着の時間変化の推定。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

地下水・地殻変動観測施設（4点）を新規に整備し、整備済みの16観測点と併せ合計20観測点とする。

産総研・防災科研・気象庁との共同研究により構築した観測システムにより、南海トラフの短期的ゆっくりすべりの高精度モニタリングを継続する。短期的ゆっくりすべりの客観的な検出システムの高度化を行う。

既存未利用井戸を活用した安価かつ高精度な歪観測を実現するために、小型・低廉な歪計の開発及び既存井戸への設置・実証観測を行なう。

水準測量データ・潮位データ等を用いて南海トラフ沿いの巨大地震の想定震源域周辺のプレート間固着の時間変化を推定する。

地下水・地殻変動観測による地震の予知・予測研究の日本における成果を台湾での震災軽減に生かすため、国立成功大学との共同研究を継続する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

産総研と防災科研および気象庁との共同研究に基づき、3機関のひずみ・地下水・傾斜データをリアルタイムで共有して南海トラフ周辺地域の短期的ゆっくりすべり(SSE)を解析するシステムの運用を継続した。2022年11月～2023年10月の間に短期的SSEの断層モデルを40個決定した。香川県綾歌郡綾川町に新規地下水等総合観測施設を設置した。

観測を継続している関東、東海、中部、近畿、四国地方の地下水・ひずみデータ等を地震予知連絡会報で報告した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

産総研と防災科研および気象庁との共同研究に基づき、3機関のひずみ・地下水・傾斜データをリアルタイムで共有して南海トラフ周辺地域の短期的ゆっくりすべり(SSE)を解析するシステムの運用を継続した。安価で短い工期でのボアホールひずみ観測の実現を目的として、小口径の多成分ひずみ計および既存井戸への設置手法を共同で開発し、同ひずみ計を香川県三豊市の既存井戸に設置した。新規地下水等総合観測施設を4カ所設置する計画に対して、計画期間中には和歌山県日高川町と香川県綾川町の2カ所の設置となった。深部すべりの客観的な検出手法の開発は別途科研費で実行し、一定の成果を得た。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

南海トラフ周辺地域の短期的ゆっくりすべり(SSE)の解析を継続し、この間のプレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測に大きく貢献した。また、解析した短期的SSEは南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会、地震調査委員会、地震予知連絡会に報告し、短期的SSEの評価に貢献した。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

北川有一・板場智史・松本則夫・落唯史・木口努・矢部優,2023,紀伊半島～四国の歪・傾斜・地下水観測結果（2022年11月～2023年4月）,地震予知連絡会報,110,311-321,査読無,謝辞無

北川有一・板場智史・松本則夫・落唯史・木口努・矢部優,2024,紀伊半島～四国の歪・傾斜・地下水観測結果（2023年5月～2023年10月）,地震予知連絡会報,111,印刷中,査読無,謝辞無

木口努・今西和俊・松本則夫,2023,岐阜県東部・長野県西部における地殻活動観測結果(2022年11月～2023年4月),地震予知連絡会報,110,182-184,査読無,謝辞無

木口努・今西和俊・松本則夫,2024,岐阜県東部・長野県西部における地殻活動観測結果(2023年5月～2023年10月),地震予知連絡会報,111,印刷中,査読無,謝辞無

木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努・矢部優,2023,東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2022年11月～2023年4月)(67),地震予知連絡会報,110,177-181,査読無,謝辞無

木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努・矢部優,2024,東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2023年5月～2023年10月)(68),地震予知連絡会報,111,印刷中,査読無,謝辞無

北川有一・松本則夫・佐藤努・板場智史・落唯史・木口努・矢部優,2023,近畿地域の地下水位・歪観測結果（2022年11月～2023年4月）,地震予知連絡会報,110,322-325,査読無,謝辞無

北川有一・松本則夫・佐藤努・板場智史・落唯史・木口努・矢部優,2024,近畿地域の地下水位・歪観測結果（2023年5月～2023年10月）,地震予知連絡会報,111,印刷中,査読無,謝辞無

落唯史・矢部優・板場智史・松本則夫・北川有一・木口努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦,2023,東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント（2022年11月～2023年4月）,地震予知連絡会報,110,129-176,査読無,謝辞無

矢部優・落唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・木口努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦,2024,東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント（2023年5月～2023年10月）,地震予知連絡会報,111,印刷中,査読無,謝辞無
北川有一・木口努・松本則夫・千葉昭彦・長谷和則・小野雅弘,2023,産総研日高川和佐観測点の地質概要とコア資料,地質調査総合センター研究資料集,743,査読無,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地下水・地殻変動観測による地震予測精度の向上

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門
他機関との共同研究の有無：有
防災科学技術研究所,気象庁 地震火山部

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

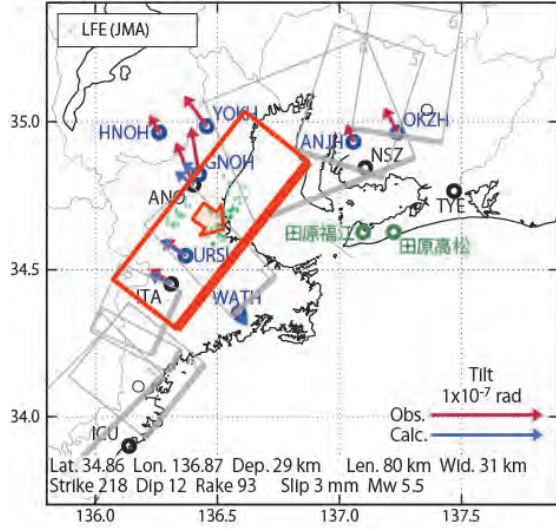
部署名等：活断層・火山研究部門 地震地下水研究グループ
電話：029-861-3656
e-mail：tectono-h@aist.go.jp
URL：https://gbank.gsj.jp/wellweb/GSJ/index.shtml

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：松本則夫
所属：活断層・火山研究部門 地震地下水研究グループ

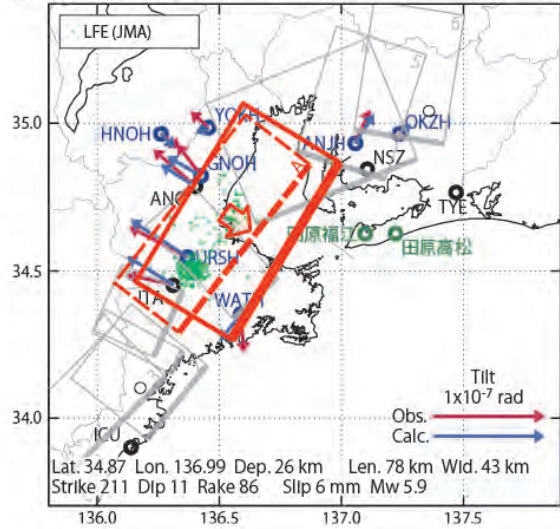
[A] 2023/03/26-28

(b1) 推定した断層モデル



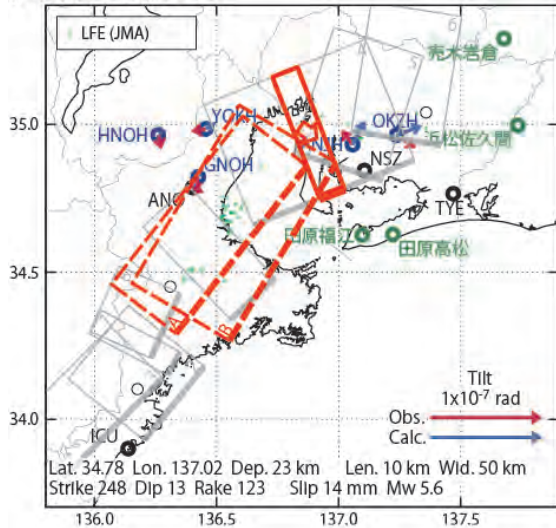
[B] 2023/03/29-31

(b1) 推定した断層モデル



[C] 2023/04/01-04

(b1) 推定した断層モデル



[D] 2023/04/05-07

(b1) 推定した断層モデル

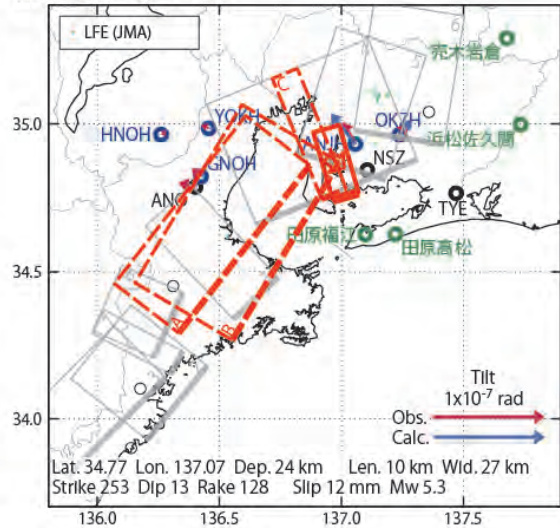


図1 産総研・防災科研のひずみ・傾斜データにより決定した短期的ゆっくりすべりの断層モデルの位置（落・他, 2023）。緑色の丸は同期間の気象庁一元化震源カタログによる深部低周波地震（微動）の震源位置。

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

噴出物の物質科学的解析に基づくマグマ供給系-火道システム発達と噴火推移過程のモデル化

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

火山

(4) 火山現象の解明とモデル化

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

大規模火砕噴火の推移予測のため、歴史時代及び地質時代に発生した大規模噴火の噴火推移をコンパイルした火山噴火推移データベースを整備する。大規模噴火の推移のパターン抽出とそのメカニズムを明らかにするため、大規模火砕噴火の噴出物の岩石学的及び地質学的解析を実施し、マグマ溜まりの物理化学的進化過程、マグマの上昇と火道の形成過程、および噴煙・火砕流等地上における噴出物の挙動に対する解析を実施する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

歴史時代及び地質時代に発生した大規模噴火の推移について、噴火推移をコンパイルした火山噴火推移データベースを整備する。時間分解能の高い歴史記録の残る主に19世紀以降の世界各地の噴火事例を収集したデータベースの作成を実施するとともに、噴出物の地質学的解析から得られる噴火推移情報を収集したデータベースを作成する。また噴出物の保存が良好な桜島・浅間山などで、噴火記録と噴出物の対比・噴出物の岩石学的解析による噴火推移の復元を進める。マグマ溜まりにおけるマグマの蓄積と噴火準備過程の解析のため、噴出物の岩石学的解析によるマグマ溜まり内の温度圧力化学組成等の条件の時間変化の解析を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

大規模噴火に伴うマグマ溜まりの減圧過程を、噴出物中の水の拡散プロファイルから復元する手法を

開発し、始良カルデラや鬼界カルデラの噴出物に適用した。その結果、カルデラ噴火ごとにマグマ溜まりの減圧過程が異なることを見出し、マグマ溜まりの深さや水平規模がマグマ溜まりの減圧過程やその結果として起こるカルデラ陥没のタイミングを規制するというモデルを提唱した。また、桜島大正噴火の噴出物の噴出直前の減圧過程を復元し、大正噴火の大規模軽石噴火を起こしたマグマの上昇速度をおよそ2 m/sと見積もった。噴出物の分布から推測されるマグマ噴出率との関係から、火道の有効断面積を推測した。さらに、割れ目火道の延長から、大正噴火の大規模軽石噴火を起こしたフィードダイクは延長7km、開口幅約1mであったことを推測することができた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

大規模火砕噴火の推移予測のため、歴史時代及び地質時代に発生した大規模噴火の噴火推移をコンパイルした火山噴火推移データベースを整備し、2022年度に公開した。国内外の約20の大規模噴火について統一的な基準で噴火の時系列をコンパイルし、データベース上で表示できるシステムを開発し公開した。また、地質時代の大規模噴火の長期的な噴火推移をコンパイルした「大規模噴火データベース」を作成し、国内の主要8カルデラ火山の噴火の長期的な推移情報を示したデータベースを構築し2022年度に公開した。また、国内の主要な火山が噴出した火山灰粒子画像等を収集した火山灰データベースを2022年度に公開した。

噴出物の保存が良好な桜島・浅間山などで、噴火記録と噴出物の対比・噴出物の岩石学的解析による噴火推移の復元を進め、桜島の大規模軽石噴火の層序と分布からその規模を明らかにし、桜島火山の長期的な活動推移を明らかにした。マグマ溜まりにおけるマグマの蓄積と噴火準備過程の解析のため、始良カルデラや鬼界カルデラ、阿蘇カルデラなどの噴出物の岩石学的解析を行い、大規模な爆発的噴火を引き起こしたマグマ溜まりの貯留深さなどの解析を行うとともに、噴火推移に沿ったマグマ溜まりの圧力変化過程を復元した。また、霧島山新燃岳2018年噴火のマグマ上昇・噴出プロセスを噴出物の構成粒子やその微細組織から復元した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

噴出物を用いた過去および現在の噴火におけるマグマ溜まりや火道内でのマグマの上昇過程を定量的にとらえることに成功し、モニタリングによる火山活動の評価に貢献した。

大規模噴火の推移について各種データベースを構築し、噴火パターンを抽出することにより、中長期的な火山活動の評価手法の開発に貢献した。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Geshi, N., Miyagi, I., Saito, G. & Conway, C.E., 2023, Caldera collapse thresholds correlate with magma chamber dimensions., *Scientific Reports*, 13, 7463, doi.org/10.1038/s41598-023-34411-5, 査読有, 謝辞無

Keller, F., Guillong, M., Geshi, N., Miyakawa, A. & Bachmann, O., 2023, Tracking caldera cycles in the Aso magmatic system – Applications of magnetite composition as a proxy for differentiation., *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 436, 107789, doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107789., 査読有, 謝辞無

Miyagi, I., Hoshizumi, H., Suda, T., Saito, G., Miyabuchi, Y. & Geshi, N., 2023, Importance of long-term shallow degassing of basaltic magma on the genesis of massive felsic magma reservoirs: a case study of Aso Caldera, Kyushu, Japan, *Journal of Petrology*, 64, egad009., doi.org/10.1093/petrology/egad009, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

下司信夫, 2023, 桜島1914年噴火のプリニー式噴火期のマグマ上昇過程, 日本火山学会2023年秋季大会, P07

Geshi, N., Saito, G., Miyagi, I. & Conway C.E., 2023, Decompression of magma chamber toward caldera collapse and eruption of voluminous ignimbrite, The 28th IUGG General Assembly, V06a

Geshi, N. & Takarada, S., 2023, Distribution maps of large-volume ignimbrites in Japan: Visualization of scale and impact of catastrophic caldera-forming eruptions, The 28th IUGG General Assembly, V08a

松本恵子・下司信夫・宮川歩夢・板木拓也,2023,火山活動評価に向けた火山灰粒子画像の自動分類,日本火山学会2023年秋季大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

噴出物の物質科学的解析に基づく噴火推移過程とマグマ供給系のモデル化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門
他機関との共同研究の有無:無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等:産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門
電話:
e-mail:
URL:

(14) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:下司信夫
所属:産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

アジア太平洋地域地震・火山ハザード情報整備

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

イ. 観測・解析技術の開発

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

火山

5 研究を推進するための体制の整備

(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

アジア太平洋地域の地震火山ハザード情報整備、国際標準化、データ共有・相互利用、国際的な連携の推進を目的として、アジア太平洋地域の研究機関と連携し、地震火山活動に関連する地質ハザード情報を取りまとめる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

2019-23年度は、インドネシア、フィリピン、パプアニューギニア、タイ、中国、韓国、シンガポール等のCCOP(東・東南アジア地球科学計画調整委員会)を始めとする、アジア太平洋地域の研究機関と連携し、地震火山総合データベースとして、地震・活断層・津波・火山関連のデータの整備・更新を行う。また、CCOPで進めている地質情報総合共有プロジェクトとの連携を図り、各国の地震火山の地質情報の国際的な共有化を進める。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2023年度は、火山関連データベースとして、大規模噴火の特徴・推移、中長期的前駆活動を取りまとめた大規模噴火データベースの構築を進め、新たに屈斜路カルデラ、鬼界カルデラの情報を収集し、

これまでの摩周・支笏・洞爺・濁川・十和田・始良・阿多・池田カルデラと合わせて合計10つのカルデラ火山の詳細情報を取りまとめた(図1)。目撃事例のある火砕噴火の中長期的・短期的前駆活動、噴火推移情報を取りまとめた噴火推移データベースについても構築を進め、新たに北海道駒ヶ岳1929年噴火、アグン1963年噴火等を追加し、合計18の噴火の詳細情報を取りまとめた(図2)。日本国内外の噴火で噴出した火山灰粒子の実体顕微鏡画像などの情報を収録した火山灰データベースでは、新たに噴出年代別の検索機能を追加するとともに、桜島・スメル・新島・諏訪之瀬島・浅間山・伊豆大島等のデータを追加し、合計の試料数1144、火山灰粒子の画像データ等のコンテンツ数11,949となった(図3)。

「防災・減災のための高精度デジタル地質情報の整備事業」プロジェクトにおいて、火山関連情報のDX化を進めた。火山ハザード情報システムでは、(1) オンラインシミュレーション機能によるリアルタイムハザード評価、(2) 主要火山における噴火パラメータ解析、(3) 降下テフラ等の火山噴出物分布データのデジタル化、(4) 降下テフラのオンライン噴出量解析機能、(5) 火口分布図の表示検索機能、(6) 火山関連データベースとの連携機能を目指し開発を進めている。今年度は、噴火パラメータについて、Energy Coneモデル137ケース、Tephra2モデル61ケース、Titan2Dモデル50ケース、合計248ケースの国内外の火山の解析事例を掲載した(図4)。羅臼・摩周・屈斜路・十勝・有珠・洞爺・樽前・羊蹄・濁川・北海道駒ヶ岳・八甲田・十和田・浅間・富士・霧島・桜島・始良・阿多・口永良部島・カルブコ・ケルフト火山等において、170噴火以上の降下テフラの等層厚線図のデジタル化を行った。また、区間積分法やWeibull法などの4つのモデルにより、降下テフラの等層厚線から噴出量を計算するオンライン降下テフラ噴出量解析システムを開発した。CCOP等アジア各国の地質調査機関とともに、アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムの構築を進めた。

・計画期間中(令和元年度～5年度)の成果の概要

令和元年度は、CCOPを始めとするアジア太平洋地域のアジア太平洋地域の研究機関と協力し、アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムに、地震・火山関連のデータの掲載を行った。また、VEI6以上の24の大規模火砕流堆積物の分布、10の大規模降下テフラの分布、16のカルデラ縁の形状をGISデータとしてとりまとめ公開した。

令和2年度は、支笏、洞爺、濁川、大山、濁川等の大規模噴火の前駆活動と噴火推移をとりまとめ、研究資料集として公開した。また、第四紀の火山噴出物の詳細情報をWebGIS上で閲覧検索できるようにした20万分の1日本火山図を作成し、一般公開を行った。さらに、阿蘇4噴火の噴出量の検討結果を国際誌に掲載した。

令和3年度は、屈斜路、三瓶、鬼界、十和田、鬱陵島、白頭山の大規模噴火の前駆活動と噴火推移をとりまとめ研究資料集として公開した。大規模火砕流分布図シリーズとして、始良カルデラ入戸火砕流分布図を公開した。20万分の1日本火山図の改訂を行うとともに、1万年噴火イベント集について、富士山と桜島を完成させ、全国の活火山データを公開した。

令和4年度は、大規模噴火の特徴・推移、中長期前駆活動を取りまとめた大規模噴火データベース、及び目撃事例のある火砕噴火の中長期的・短期的前駆活動、噴火推移情報を取りまとめた噴火推移データベースを公開した。また、1万以上の火山灰粒子の画像データ等を掲載した火山灰データベースを公開した。

令和5年度は、大規模噴火データベース及び噴火推移データベース、火山灰データベースの構築を継続した。また、新たに「防災・減災のための高精度デジタル地質情報の整備事業」プロジェクトにおいて、火山ハザード情報システムを構築し、248ケースの噴火パラメータ解析、170噴火以上の降下テフラ分布のGIS化、オンライン降下テフラ噴出量解析システムの構築を行った。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

5. 研究を推進するための体制の整備 (3) 研究基盤の開発・整備 エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開において、大規模噴火データベース、噴火推移データベース、火山灰データベースの構築・公開を進めた。これらのデータベースや火山ハザード情報システム、アジア太平洋地域ハザード情報システムは、災害の軽減に貢献できると考えられる。今後も火山関連データベースやハザード情報システムの整備、構築を進めていく予定である。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

宝田晋治・Bandibas, J.・河野裕希・金田泰明・米谷珠萌・長田美里,2023,火山ハザード情報システムの構築,地質調査総合センター速報,84,153-161,査読有,謝辞無

宝田晋治・Bandibas, J.・滝口亜紀・元島温子,2023,火口地形のデジタル化と閲覧検索システムの構築,地質調査総合センター速報,84,49-53,査読有,謝辞無

宝田晋治・Bandibas, J.・河野裕希・池上郁彦・金田泰明・米谷珠萌・長田美里,2023,防災・減災のための火山ハザード情報システムの構築,Proceedings of the International Meeting on Eruption History and Informatics,2023-1,102-106,査読無,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

宝田晋治・Bandibas, J.・河野裕希・米谷珠萌・金田泰明・長田美里・池上郁彦,2023,火山防災のための火山ハザード情報システムの開発,日本火山学会2023年度秋季大会,B3-18

Matsumoto, K., Geshi, N., Takarada, S. and Bandibas, J.,2023,Volcanic Ash Database: a database of microscopic images for petrological monitoring of volcanic activities,日本地球惑星科学連合2023年大会,SVC28-P04

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：ソフトウェア開発（データベース）

概要：大規模噴火データベース。大規模噴火の特徴・推移，中長期的前駆活動を取りまとめている。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：

調査・観測期間：

公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web） <https://gbank.gsj.jp/volcano/ledb/>

項目：ソフトウェア開発（データベース）

概要：噴火推移データベース。目撃事例のある火砕噴火の中長期的・短期的前駆活動、噴火推移情報を取りまとめている。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：

調査・観測期間：

公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web） <https://gbank.gsj.jp/volcano/esdb/>

項目：ソフトウェア開発（データベース）

概要：火山灰データベース。日本国内外の噴火で噴出した火山灰粒子の実体顕微鏡画像などの情報を収録している。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：

調査・観測期間：

公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web）

https://gbank.gsj.jp/volcano/volcanic_ash/

項目：ソフトウェア開発（データベース）

概要：火山ハザード情報システム。オンラインシミュレーション機能によるリアルタイムハザード評価、主要火山における噴火パラメータ解析を実施。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：

調査・観測期間：

公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web） <https://volcano.g-ever1.org/>

項目：ソフトウェア開発（データベース）

概要：アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システム。東・東南アジア地域の地震・火山関連のハザード関連情報を掲載している。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：

調査・観測期間：

公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web） <https://ccop-gsi.org/gsi/geohazard/>

(11) 次期計画における課題名：

地質調査と年代測定手法の高度化による火山活動履歴の解明とデータベースの整備

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：産業技術総合研究所 地質調査総合センター

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宝田晋治

所属：産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

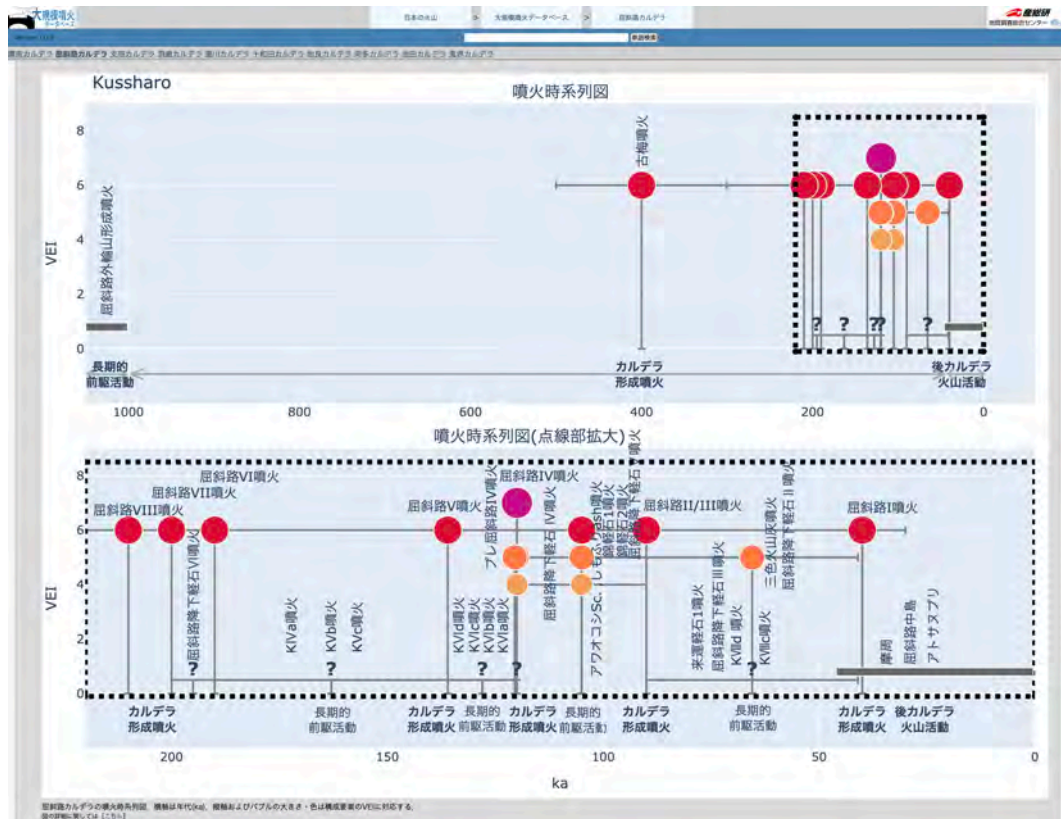


図1. 大規模噴火データベース
屈斜路カルデラ火山の噴火時系列図.

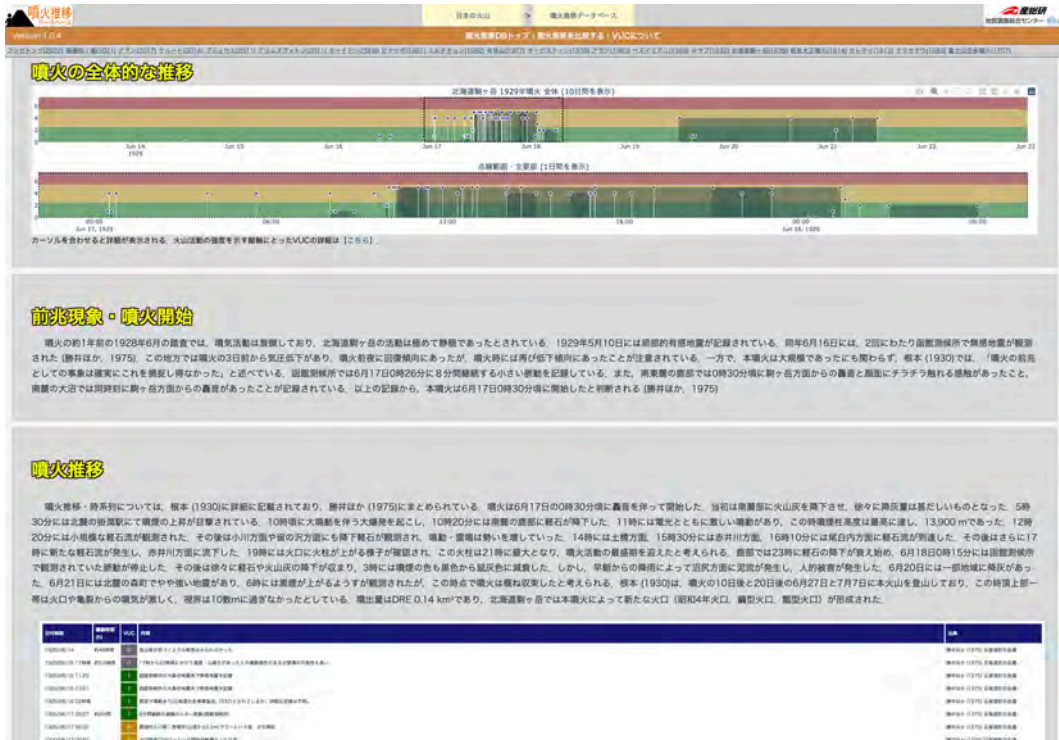


図2. 噴火推移データベース
北海道駒ヶ岳火山1929年噴火の事例。

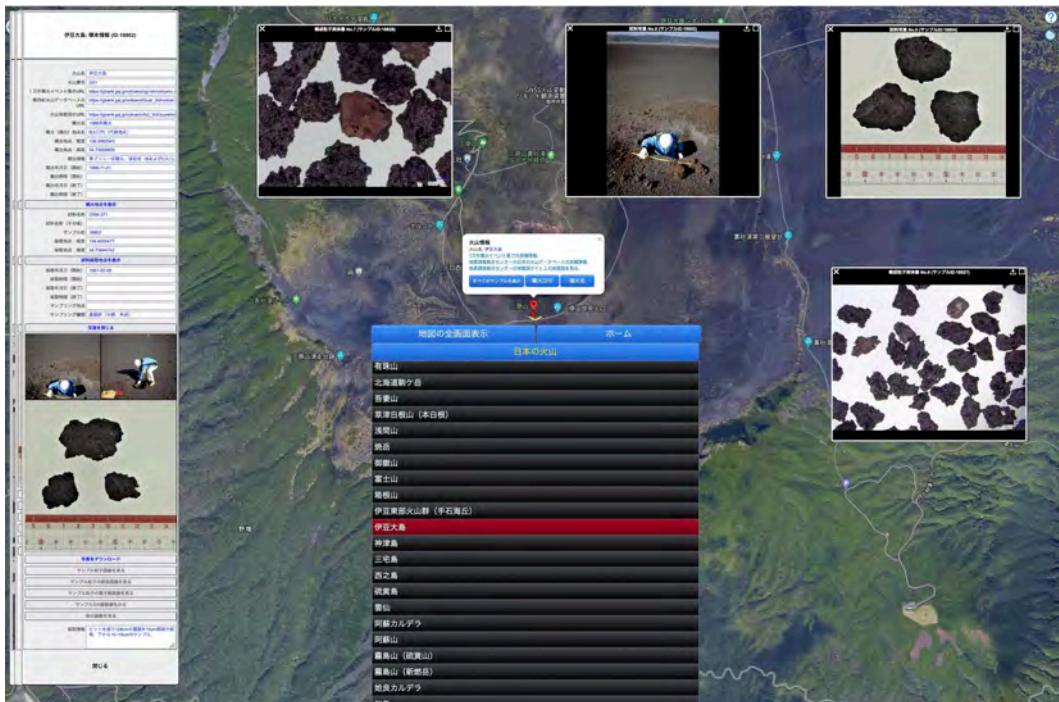


図3. 火山灰データベース
伊豆大島火山 1986年噴火の噴出物の事例

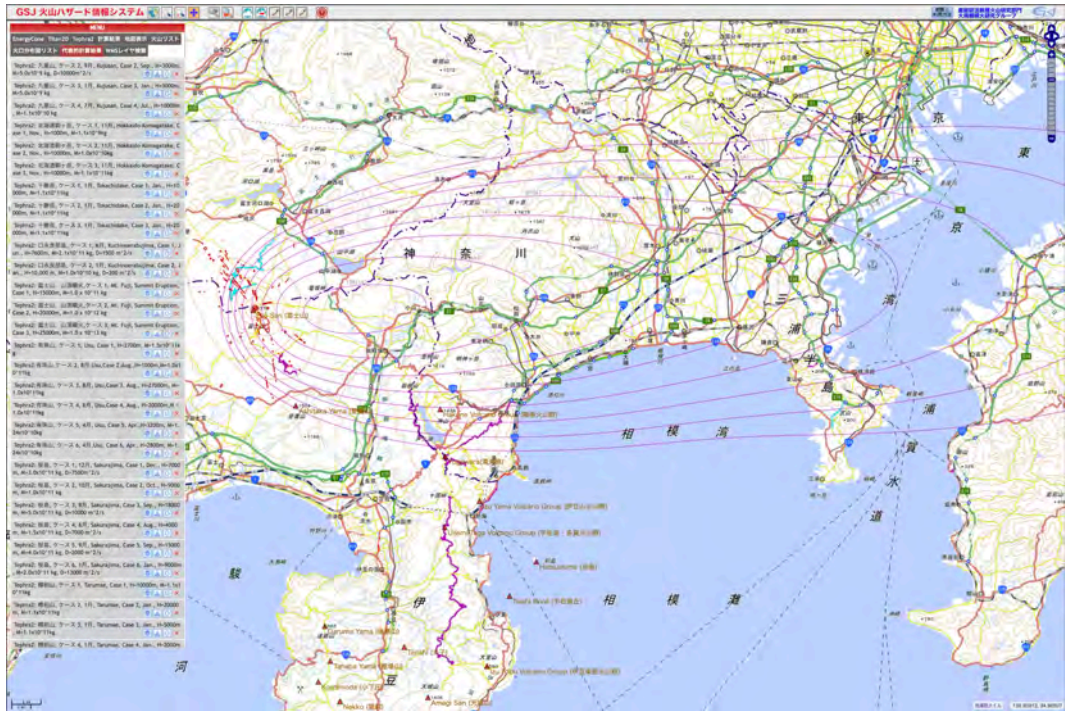


図4. 火山ハザード情報システム
 富士山におけるTephra2による降下テフラの解析事例

(1) 実施機関名：

東京大学大気海洋研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

巨大津波を引き起こす震源断層の実態解明と流体変動モニタリング

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
イ. 地震断層滑りのモデル化

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
オ. 構造共通モデルの構築

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

南海トラフや日本海溝において既存・新規のマルチチャンネル反射法地震探査（Multi-channel Seismic：MCS）データおよび深海掘削（DSDP/ODP/IODP）データを用い、巨大津波を引き起こす震源断層（(1)巨大分岐断層、(2)デコルマ、(3)大規模アウターライズ地震断層）の構造、流体分布、摩擦特性、減衰特性、間隙水圧などを高精度で明らかにする。特に、沈み込みインプットは巨大分岐断層とデコルマの発達過程や間隙水圧変動に最も大きく影響するため、沈み込む直前の深海堆積物と海洋性地殻の3次元形状を明らかにする。巨大分岐断層やデコルマに沿った地震性滑りの将来挙動を予測する上で、断層の物性変動の長期モニタリングは極めて重要である。断層の間隙水圧異常が巨大分岐断層やデコルマに沿った地震発生・破壊エネルギーの伝播に重要な役割を果たすと考えられるため、断層面付近の音響インピーダンスのコントラストを示す反射係数に着目し、反射係数から間隙水圧を推定する手法を新たに開発する。さらに、Time-lapse MCS調査（繰り返し観測により時間変化を捉える調査）により、反射係数（間隙水圧）変動のモニタリング手法を開発する。また、巨大分岐断層や大規模アウターライズ地震断層の海底付近堆積物と海水からヘリウム同位体比（ $3\text{He}/4\text{He}$ ）を定期的に測定し、断層に沿った流体変動をモニタリングする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

【平成31年度】

- (1)断層面付近の音響インピーダンスのコントラストを示す反射係数に着目し、反射係数から間隙水圧を推定する手法の開発に着手する。これは新しいチャレンジである。
- (2)過去に日本海溝や南海トラフで実施されたMCS調査の仕様を検討し、Time-lapse MCS調査に最適な仕様を決定するため、事前調査モデリング（Pre-survey Modeling）を行う。
- (3)宮城沖日本海溝のアウトサイズで高分解能MCSデータを取得する。MCSデータの反射極性（正・負）分布をマッピングし、正断層に沿った流体分布を推定するとともに、正断層の反射係数（Warner, Tectonophysics, 1990）を求める。正断層の活動性や断層強度を評価するため、正断層付近の減衰特性（Tsuru et al., EPS, 2018）を推定する。また、大規模アウトサイズ地震断層の付近でマルチプルコアラーによる表層採泥およびCTD採水を行い、海底堆積物試料と海水試料を採取する。希ガス専用質量分析計を用いて海底堆積物・海水試料に含まれるHe（ヘリウム）を抽出し、He濃度および同位体比（ $3\text{He}/4\text{He}$ ）を測定する。

【平成32年度】

- (1)デコルマの強い固着（Yokota et al., Nature, 2016）を示す四国の足摺岬沖南海トラフに直交する測線上で、デコルマを対象とする新規MCSデータを取得する。また、南海トラフ隣接の四国海盆で沈み込みインプットを対象に、トラフに平行する測線上で新規MCSデータを取得する。
- (2)既存の四国海盆MCSデータを用いた堆積層の岩相層序解析を行い、デコルマ相当層準をマッピングする。また、四国海盆の海洋性地殻最上部の3次元形状を求め、デコルマの発達過程において沈み込む海洋性地殻の影響を解明する。
- (3)既存の四国海盆MCSデータと深海掘削データとの統合解析を行い、堆積層の間隙率と間隙水圧を求め、デコルマ相当層準の剪断強度を明らかにする。
- (4)海底地形データと既存MCS断面図を用い、南海トラフ付加体の傾斜角度とデコルマの傾斜角度を求めることで、Coulomb Wedge Theoryに基づくデコルマの摩擦係数を推定する。
- (5)巨大分岐断層の海底面付近で海底堆積物試料と海水試料を採取し、He濃度および同位体比（ $3\text{He}/4\text{He}$ ）を測定する。

【平成33年度】

- (1)宮城沖日本海溝のアウトサイズで高分解能Time-lapse MCS調査を行い、大規模アウトサイズ地震断層の反射係数を求めることで、間隙水圧の時間変動を推定する。
- (2)大規模アウトサイズ地震断層の付近でマルチプルコアラーによる表層採泥およびCTD採水を行い、海底堆積物試料と海水試料を採取する。希ガス専用質量分析計を用いて海底堆積物・海水試料に含まれるHe（ヘリウム）を抽出し、He濃度および同位体比（ $3\text{He}/4\text{He}$ ）を測定するとともに、平成31年度の測定値との比較を行う。大規模アウトサイズ地震断層に沿ったマントル起源流体のフラックスを推定し、大規模アウトサイズ地震断層の挙動について流体循環の影響を評価する。

【平成34年度】

- (1)デコルマの強い固着（Yokota et al., Nature, 2016）を示す四国の足摺岬沖南海トラフで高分解能Time-lapse MCS調査を行い、デコルマの反射係数を求める。平成32年度のMCSデータから求めた反射係数（間隙水圧）と比較し、デコルマに沿った間隙水圧の時間変動を推定する。
- (2)巨大分岐断層の海底面付近で海底堆積物試料と海水試料を採取し、He濃度および同位体比（ $3\text{He}/4\text{He}$ ）を測定する。平成32年度に測定したHe濃度および同位体比（ $3\text{He}/4\text{He}$ ）と比較し、巨大分岐断層に沿った流体移動の時間変化を推定する。

【平成35年度】

- (1)宮城沖日本海溝のアウトサイズで高分解能Time-lapse MCS調査を行い、大規模アウトサイズ地震断層の反射係数を求める。平成31年度や33年度のMCSデータから求めた反射係数（間隙水圧）と比較し、大規模アウトサイズ地震断層に沿った間隙水圧の時間変動をモニタリングする。
- (2)大規模アウトサイズ地震断層の海底面付近で海底堆積物試料と海水試料を採取し、He濃度および同位体比（ $3\text{He}/4\text{He}$ ）を測定する。平成31年度や33年度に測定したHe濃度および同位体比（ $3\text{He}/4\text{He}$ ）と比較し、大規模アウトサイズ地震断層に沿った流体移動の時間変化をモニタリングする。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2011年の東北沖地震（M 9.0）では、地震に伴う断層滑りが「浅部プレート境界断層」（＝デコル

マ)に沿って海溝軸近傍まで到達し、結果として大きな津波が発生した。デコルマに沿った断層滑りは、上盤プレートの内部構造やデコルマ形状の変形をもたらした可能性が考えられるが、その証拠はこれまで殆ど得られていない。本研究では、2011年東北沖地震のデコルマに沿った地震性滑りの影響を解明するために、東北沖地震前後に宮城沖でJAMSTECが同じ測線上(1999年の測線名MY101と2011年の測線名D13)で取得した反射法地震探査データを再解析し、両結果を比較するTime-lapse MCSデータ解析を実施した。具体的には、反射法地震探査データの重合前深度マイグレーション処理で求めたP波速度構造モデルを用い、Reverse Time Migration (RTM)処理を施すことで、高精度の地殻構造断面図が得られた。両RTM処理結果(図1)では、地震前(MY101 RTM)に比べて、地震後(D13 RTM)のBackstop interface浅部反射面の連続性が著しく高くなっていることが認められる(図1の緑色楕円部分)。これは、東北沖地震に関連し、Backstop interfaceに沿った深部流体の上昇を示唆するものである。一方、デコルマ(図1の水色四角形部分)では、地震後(D13 RTM)のデコルマ反射面が不明瞭となり、デコルマ上下の音響インピーダンスが著しく低下したことを示唆する。その原因として、東北沖地震に伴う上盤プレートの変形(主に、スラスト断層)がデコルマ下部まで影響したため、デコルマ下部の堆積物の流体がスラスト断層に沿って脱水した可能性が考えられる。

加えて、令和5年度には、日本海溝のアウトライズで反射法地震探査を行い、大規模アウトライズ地震断層の地殻構造と物性を調べた。アウトライズに発達する正断層群の活動性を評価するため、反射法地震探査データから推定された断層形状データと地殻応力場データなどを組み合わせ、個々の活断層を対象にSlip tendencyを算出した。また、大規模アウトライズ地震断層の海底面付近で海底堆積物試料と海水試料を採取し、He濃度および同位体比($3\text{He}/4\text{He}$)を測定することで、マントル起源の流体を確認した。令和5年度のHe濃度および同位体比($3\text{He}/4\text{He}$)を過去の測定値と比較することで、大規模アウトライズ地震断層に沿った流体移動の時間変化のモニタリングを続ける。

なお、令和5年度の成果は本課題の5か年計画と概ね一致する。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

海溝の海側には、アウトライズ(海溝外縁隆起帯)と呼ばれる、海洋プレートの屈曲によって生じる地形的高まりが一般的に認められる。アウトライズではプレートの沈み込みに伴う屈曲により海洋プレート浅部に伸張応力場が生じ、海洋性地殻を断ち切る正断層群が発達することによりホルスト・グラベン(地罅・地溝)構造が形成され、正断層型の地震(アウトライズ地震)が海洋プレート内部で発生する。巨大津波を引き起こす大規模なアウトライズ地震は海溝型巨大地震の発生後に連動して発生することが知られている。日本海溝では、1896年明治三陸地震(海溝型巨大地震、M 8.5)の37年後に1933年昭和三陸地震(大規模アウトライズ地震、M 8.1)が発生し、津波災害による約3000名の死者が報告されている。一方、2011年東北地方太平洋沖地震(M 9.0)後には大規模アウトライズ地震が未だに起こっておらず、その切迫度が増している状況にあると考えられる。

2019年4月、宮城沖や三陸沖日本海溝海側のアウトライズでマルチチャンネル反射法地震探査(「新青丸」KS-19-5次航海)を実施した。合計2測線で(全長150 kmの測線1と全長100 kmの測線5)マルチチャンネル反射法地震探査(Multi-channel Seismic: MCS)データを取得した。MCSデータを用いた重合前深度マイグレーション(Pre-stack Depth Migration)処理の結果、ホルスト・グラベン構造を形成する多数の海底活断層(アウトライズ断層)の高解像度構造をイメージングした。2019年8月、「新青丸」KS-19-5次航海で取得したMCS測線上で採泥・採水調査(「新青丸」KS-19-14次航海)を実施した。同海底活断層周辺で採取した表層堆積物の間隙水中にマントル起源のヘリウム同位体($3\text{He}/4\text{He}$)異常を発見した。これは、アウトライズ断層に沿ったマントル流体の上昇(例:湧水)を示唆する。

2020年9月、宮城沖日本海溝海側のアウトライズでマルチチャンネル反射法地震探査(「新青丸」KS-20-14次航海)を実施した。合計2測線でMCSデータを取得した。MCSデータを用いた重合前深度マイグレーション(Pre-stack Depth Migration)処理の結果、ホルスト・グラベン構造を形成する多数の海底活断層(アウトライズ正断層)の高解像度構造をイメージングした。2019年と2020年のMCS断面図でイメージングされたアウトライズ正断層群の特徴(例: fault offset, fault density, fault slope angle, fault type (recent or older) など)と堆積層を調べたところ、三陸沖と宮城沖のアウトライズで正断層の発達様式が著しく異なることが明らかになった。fault offsetの場合、三陸沖の方が宮城沖より大きい。三陸沖ではrecent fault(海溝近くでプレートの折り曲げによる形成した新しい断層、海底面のoffsetは音響基盤のoffsetとほぼ同じ)が主に発達し、宮城沖ではrecent faultとolder fault(中央海嶺でプレートの形成に伴い形成し再活動を繰り返してきた断層、海底面のoffset

に比べて音響基盤のoffsetが著しく大きい)が混在する。また、宮城沖では海洋プレートの基本層序(遠洋性堆積物、チャート層、玄武岩)が維持されながら正断層が発達するが、三陸沖では海溝海側約75 km付近から海溝側へチャート層が不明瞭となり、層厚が著しく減少する。このように三陸沖と宮城沖の OUTER-LIKE で正断層の発達様式が異なる要因はプチスポット火山活動の有無が考えられる。

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)後には大規模 OUTER-LIKE 地震が未だに起こっておらず、その切迫度が増している状況にあると考えられるが、大規模 OUTER-LIKE 地震断層の実態に関する知見は極めて不足している。本研究課題では、日本海溝の海側に発達する大規模 OUTER-LIKE 地震断層の実態(構造、物性、流体循環など)を解明するため、地球物理学データを地球化学データと組み合わせ、海溝海側の正断層を学際・総合的に調べた(Park et al., Scientific Reports, 2021)。反射法探査データを解析し、宮城沖の海溝海側45 km付近で海底面からモホ面を貫きマントルまで発達する大規模な正断層(断層A)のイメージングに成功した。この断層Aは垂直変位約180 m、傾斜角約74°を示し、過去から最近まで繰り返し活動した活断層の可能性が高い。また、断層Aのモホ面付近の反射強度は周囲のモホ面に比べて異常に弱く、断層の繰り返し活動によって透水性の高い破碎帯(幅6 km)が形成され、流体移動が容易になっていることを示唆する。宮城沖の断層Aの破碎帯は、北方160 kmの岩手沖の断層Bや断層Cへほぼ連続する。宮城沖の断層A(サイトPC9)や、岩手沖の断層B(サイトPC6)・断層C(サイトPC7)近傍の海底堆積物中の間隙流体から、ヘリウム同位体比($^3\text{He}/^4\text{He}$)の異常を発見した。これら3つのサイトではヘリウム同位体比($^3\text{He}/^4\text{He}$)が深部へ増加する傾向を示し、マントル由来のヘリウムを含む深部流体が断層A、B、Cに沿って上昇して来たことを示唆する。一方、岩手沖の断層D(サイトPC2)や断層E(サイトPC1)では、底層水と同程度のヘリウム同位体比($^3\text{He}/^4\text{He}$)や $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比が深部へ一定の値を示し、断層D、Eに沿った海水の浸透が示唆された。反射法探査断面図上の正断層付近で得られた流体関与の証拠(ヘリウム同位体比($^3\text{He}/^4\text{He}$)異常と $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比)に基づき、日本海溝 OUTER-LIKE においてマントルと海洋を結ぶ大規模な流体循環モデルを構築した。流体循環は主に南北方向の同じ断層破碎帯に沿って起こるが、破碎帯がある程度厚い(例:断層A付近の幅6 km)場合、破碎帯に直交する東西方向での流体循環も示唆される。今回明らかになった正断層付近でのヘリウム同位体比異常などは、断層に沿った流体(マントル由来の水と海水)移動の証拠となり、大規模な流体循環の可能性を示唆した。海溝に沈み込む前の海洋地殻を断ち切る大規模正断層に沿った流体移動を明らかにしたのは、本研究が初めてである。マントル由来の水は断層面の強度低下をもたらし、流体移動の通路となる南北全長160 km以上の断層破碎帯は大規模 OUTER-LIKE 地震を引き起こす可能性がある。今後、断層に沿ったマントル流体変動の定期的なモニタリングを実施し、流体循環が大規模正断層の挙動に与える影響を解明することは、次の OUTER-LIKE 巨大地震・津波防災対策を推進する上で重要な課題となる。

2011年の東北沖地震(M 9.0)では、地震に伴う断層滑りが「浅部プレート境界断層」(=デコルマ)に沿って海溝軸近傍まで到達し、結果として大きな津波が発生した。一方、これまでの多くの研究では、流体(=水)がデコルマの地震性すべりに深く関与していると推測されてきたが、デコルマの物理物性に関する知見は極めて限定的であった。特に、断層面の強度を規定する間隙水圧の原位置データはデコルマに沿って全く得られていない。本研究では、東北沖の日本海溝に発達しているデコルマの物理物性を解明するため、反射法地震探査データを高精度で解析した。海底下のP波速度構造モデルを用い、デコルマに沿って間隙水圧を定量的に求めた結果、デコルマの間隙水圧が異常に高いことを発見した(Jamali Hondori and Park, Scientific Reports, 2022)。デコルマの断層強度やすべり挙動を評価するために、間隙水圧から有効応力比を求めた結果、プレート間の固着が予想外に弱いことが明らかになり、デコルマが滑りやすい状態にあったことが判明した。デコルマに沿った間隙水圧の異常は、断層面に対する有効応力の低下や地震性滑りをもたらし、2011年東北沖地震(M 9.0)の巨大津波を引き起こした可能性が高い。

デコルマに沿った断層滑りは、上盤プレートの内部構造やデコルマ形状の変形をもたらした可能性が考えられるが、その証拠はこれまで殆ど得られていない。本研究では、2011年東北沖地震のデコルマに沿った地震性滑りの影響を解明するために、東北沖地震前後に宮城沖でJAMSTECが同じ測線上(1999年の測線名MY101と2011年の測線名D13)で取得した反射法地震探査データを再解析し、両結果を比較するTime-lapse MCSデータ解析を実施した。具体的には、反射法地震探査データの重ね合前深度マイグレーション処理で求めたP波速度構造モデルを用い、Reverse Time Migration (RTM)処理を施すことで、高精度の地殻構造断面図が得られた。両RTM処理結果(図1)では、地震前(MY101 RTM)に比べて、地震後(D13 RTM)のBackstop interface浅部反射面の連続性が著しく高くなって

いることが認められる（図1の緑色楕円部分）。これは、東北沖地震に関連し、Backstop interfaceに沿った深部流体の上昇を示唆するものである。一方、デコルマ（図1の水色四角形部分）では、地震後（D13 RTM）のデコルマ反射面が不明瞭となり、デコルマ上下の音響インピーダンスが著しく低下したことを示唆する。その原因として、東北沖地震に伴う上盤プレートの変形（主に、スラスト断層）がデコルマ下部まで影響したため、デコルマ下部の堆積物の流体がスラスト断層に沿って脱水した可能性が考えられる。加えて、令和5年度には、日本海溝の OUTER LAIDZ で反射法地震探査を行い、大規模 OUTER LAIDZ 地震断層の地殻構造と物性を調べた。OUTER LAIDZ に発達する正断層群の活動性を評価するため、反射法地震探査データから推定された断層形状データと地殻応力場データなどを組み合わせ、個々の活断層を対象に Slip tendency を算出した。また、大規模 OUTER LAIDZ 地震断層の海底面付近で海底堆積物試料と海水試料を採取し、He濃度および同位体比（ $3\text{He}/4\text{He}$ ）を測定することで、マントル起源の流体を確認した。令和5年度のHe濃度および同位体比（ $3\text{He}/4\text{He}$ ）を過去の測定値と比較することで、大規模 OUTER LAIDZ 地震断層に沿った流体移動の時間変化のモニタリングを続ける。

なお、これらの研究成果は、本課題の5か年計画と概ね一致している。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

計画期間中（令和元年度～5年度）の成果は、日本海溝海側の太平洋プレート内部で大規模 OUTER LAIDZ 地震を引き起こす断層の実態（構造、物性、流体循環など）を解明したことで、関連の深い建議項目「1(5)ア」の目的達成に貢献している。また、日本海溝沈み込み帯のプレート境界断層に沿った地震性すべりに影響する地殻構造と断層物性を解明したことで、関連の深い建議項目「1(5)ア」の目的達成に貢献している。本研究で明らかになった、デコルマに沿った間隙水圧の異常は、2011年東北沖地震に伴う断層滑りが海溝軸近傍まで至るプロセスに重要な役割を果たし、結果的に大きな津波を引き起こしたと考えられる。日本海溝に発達するデコルマの間隙水圧を初めて定量的に求めたことで、巨大地震・津波を引き起こす震源断層の実態を把握する上で重要な進展があり、これは今後の地震・津波災害の軽減に貢献することになる。本研究手法を日本海溝の広域へ拡張し、また南海トラフにも適用することで、今後の巨大地震や津波防災・減災対策に重要な貢献が期待できる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Jin-Oh Park and Ehsan Jamali Hondori, 2023, Link between the Nankai underthrust turbidites and shallow slow earthquakes, Scientific Reports, 13, 10333, doi:10.1038/s41598-023-37474-6, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Ehsan Jamali Hondori and Jin-Oh Park, 2023, The 2011 Tohoku-Oki Earthquake Near-Trench Structural Evolution by Time-lapse Seismic Depth Imaging, 日本地震学会2023年度秋季大会, S13-02

孫岳・宮川歩夢・尾鼻浩一郎・Jamali Hondori Ehsan・朴進午, 2023, 日本海溝 OUTER LAIDZ の浅部地殻構造および正断層群の活動性評価, 日本地震学会2023年度秋季大会, S06-04

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

巨大地震・津波を引き起こす海底活断層の学際的観測研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

朴進午（東京大学大気海洋研究所）, 芦寿一郎（東京大学大気海洋研究所）, 山口飛鳥（東京大学大気海洋研究所）, 高畑直人（東京大学大気海洋研究所）

他機関との共同研究の有無：有

佐野有司（高知大学 海洋コア総合研究センター）, 鹿見島渉悟（富山大学理学部）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学大気海洋研究所 国際・研究推進チーム

電話：04-7136-6009

e-mail：iarp@aori.u-tokyo.ac.jp

URL：http://www.aori.u-tokyo.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：朴進午

所属：東京大学大気海洋研究所

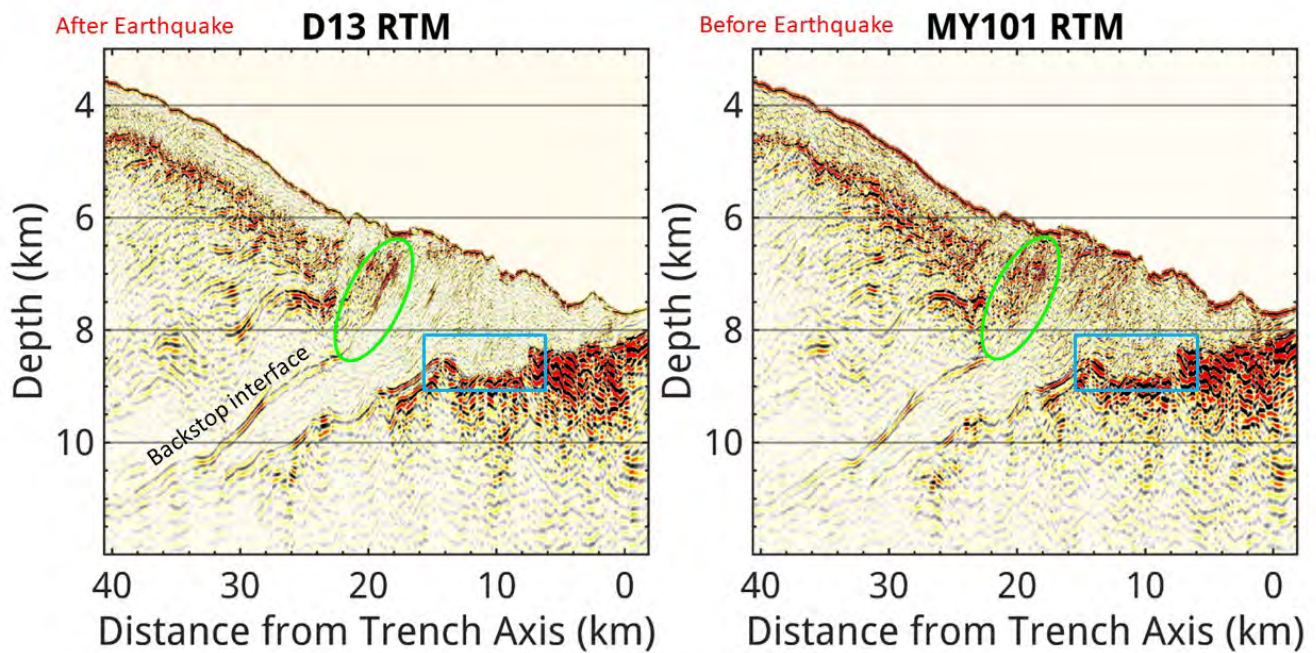


図1. 宮城沖日本海溝の高精度地殻構造断面図。左側の断面図（D13 RTM）は2011年東北沖地震の後に取得した反射法探査データを用い、右側の断面図（MY101 RTM）は地震前（1999年）のデータを使用した。

(1) 実施機関名：

東京大学大気海洋研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地球物理・化学的探査による海底火山および海底熱水活動の調査

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(7) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

海底火山の活動や噴火の可能性を把握する事は、都市の近くに存在する場合や船舶航行における防災に必要不可欠である。とりわけ鹿児島湾から南西諸島海域においては海底火山と関連づけられる熱水活動が水深の浅い海域に多く見られ、過去には噴火による津波被害も報告されている。しかし陸上に比べ海底の火山はほとんど観測されていないのが現状である。

本課題の目的は、陸上の火山・熱水系に比べると観測例が少ない海底熱水活動を評価する新たな手法を開発し火山の活動度を評価することであり、火山性ガスの強力な指標となるヘリウム-3を観測することで、火山噴火予知の研究に海洋地球化学の面からアプローチする。この手法は陸上火山の観測で成果をあげており、海底の火山に応用することが可能である。観測対象として日本近海の鹿児島湾から南西諸島海域および沖縄トラフとその延長にある島弧-背弧海盆系地域において、海底および陸上の火山・熱水活動を調査し、火山活動度の変化や新たな熱水活動域を明らかにすることを目標とする。比較のためにその他の火山海域や非火山性海域、陸上火山でも観測を行なう。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

火山性ガスの強力な指標となるヘリウム-3を中心とした、マグマ・熱水由来の成分の海底火山近傍の海水中の分布とその時系列変化を明らかにし、その分布を詳細な海底地形と比較する事で、海底火山の場所や活動度を把握する事を目的として調査を進める。合わせて近傍の火山島の温泉水に含まれるヘリウム-3などのマグマ由来成分の組成や放出量から火山の特性を把握する。海水や温泉水中での保存性が異なる元素を比較する事で活動的な放出源を特定し、成分増減の経時変化から活動度の変化を検出する事で噴火兆候の長期の変動把握に役立てる。本課題では特に鹿児島湾から南西諸島にかけての海域と近傍島嶼の陸上温泉において、温泉・熱水活動を調査するとともに、中央海嶺など他の海域の海底火山も対象とし、その性質の違いを調べることにより、日本の海底火山のより深い理解を目

指す。

平成31年度については、継続的に調査している海域である南西諸島および鹿児島湾でこれまでに採取した海水試料の分析を進める。この調査を実施するために新青丸共同利用に応募済みである。平成32年度以降については、継続的に調査している海域において、火山性成分の経時変化が見られるかを検証する。公募による海洋調査船のシブタイムが得られない場合には、陸上の調査を重点的に行う。最終的には平成35年度までに、ヘリウム-3を中心とする各種データを得て、火山活動が活発な海域の把握や活動度の経時変化把握に役立つための一次情報を得る。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

種子島沖、喜界島沖から沖縄トラフにかけての南西諸島海域を対象として、深層海水および海底堆積物を採取し海底火山活動を調査した。この調査対象には泥火山も含まれ、ヘリウム-3をトレーサーとしてその成因や活動を明らかにすることを目的として現在化学分析を進めている。種子島沖の泥火山では、堆積物中間隙水のヘリウム同位体比は低く、火山活動と関連があるようには見えないが、すぐ近くの火山フロント上に位置する口永良部島や諏訪之瀬島は活動が依然活発であり、周辺の海底火山活動も注意していく必要がある。一方、東北沖北太平洋アウターライズ海域でも海底堆積物を採取しヘリウムの観測を行なった。調査海域にはプチスポットと呼ばれる海底火山が存在し、またアウターライズ地震を引き起こすとされる海底巨大断層にも着目し、深部流体の存在を調査した。その結果、過去の調査と同様に堆積物中間隙水からマントル由来のヘリウムが検出され、深くなるほど濃度と同位体比が上がることから、深部から流体が継続的に供給されていると推定される。プチスポット火山の発見に加え、巨大断層付近でマントル由来のヘリウムが見つかったことから、アウターライズ海域にマントルにまで到達する大規模な物質循環が存在することが示唆される。プチスポット火山だけでなく巨大断層における深部流体の挙動を調べる上でもヘリウムが有効であることを示しており、地震活動と関連づけて他班との連携も進めているところである。昨年報告した若尊カルデラのヘリウムフラックスの結果についてまとめ、若尊カルデラの活動度の変化と合わせて学会および論文にて発表した。また陸上の火山に関しては、昨年度に採取した木曾御嶽山の温泉水試料のヘリウム同位体分析を進めるとともに、北海道の十勝岳および雌阿寒岳で採取された噴気ガスのヘリウム分析を行ない、台湾北部においては温泉水の調査を行なった。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

学術研究船の研究航海により島原半島周辺、鹿児島湾、南西諸島において海底熱水活動の調査を行った。申請した研究航海が採択されなかった場合は別の研究航海に参加し、非火山海域などで比較のために海水や海底堆積物を採取した。同時に試料採取法や分析法を確認しそれを改良するために役立てた。例えば堆積物は通常マルチプルコアラを用いて採取していたが、より深い堆積物を採集するためにピストンコアラから空気に触れずに堆積物を採取する新たな手法を試みた。その結果、東北沖太平洋の非火山海域ではこれまで見つからないほどの高い同位体比をもったマントル由来のヘリウムを観測することに成功した。この試料採取や分析の手法は今後の海底火山の調査に活かすことができる。鹿児島湾奥に存在する海底火山である若尊カルデラにおいて、定期的にヘリウムの観測を行ない、いくつかの成果を得た。冬季の観測からは、カルデラ内の熱水性ヘリウムが冬季に完全に抜けることがわかった。夏季には海水が層状構造になりカルデラ内に熱水性ヘリウムが蓄積される。この性質を利用して、熱水性ヘリウムのフラックスを見積もることに成功した。2015年に桜島で火山活動が活発化した。桜島と同じマグマだまりを持つとされる海底火山の若尊カルデラでは活動度は変わっていないことをヘリウム-3を用いて明らかにした。福岡ノ場から流れ着いた軽石のヘリウムの分析を行ない、その火山におけるマグマの供給過程について検討した。

計画期間中に複数のメンバーが他機関に異動したため、研究対象を海域から陸上にシフトさせた。陸上火山の調査としては、木曾御嶽山、箱根山で定期的に観測を行なうとともに、立山や阿蘇山、雲仙、十勝岳でも観測を行なった。箱根山において調査してきたヘリウムの観測結果をまとめ、火山性微動や噴火と化学成分変動との関係を学会誌に発表し、ヘリウムが長期的な火山活動評価に役立つことを示した。また、阿蘇山周辺における温泉水のヘリウムの観測結果をまとめ、カルデラ火山の地下構造が成層火山とは異なることを明らかにした。御嶽山火山では長期継続して温泉水のヘリウムを中心とした化学成分の観測を行なっており、噴火前後の火山活動について評価する予定である。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

箱根火山において噴気ガスの化学観測を行ない、火山性微動や噴火と化学成分変動との関係を明らかにした。噴火の前兆が現れにくい水蒸気噴火の場合に、ヘリウムなどの化学成分がどう反応するかを知ることで、火山噴火を支配する熱水系の構造の解明に貢献できる。またヘリウム同位体比はマグマ物質に敏感であり、噴火の予測だけでなく、噴火後の火山の活動度を評価するのにも利用できる可能性を秘めている。桜島と共通のマグマだまりを持つと言われる若尊カルデラにおいて、マグマ由来のヘリウムのフラックスを見積り、桜島と比べると物質供給量は格段に少ないという結果を得た。これはマグマ供給系の構造の解明に貢献できる。またヘリウム同位体比から見た場合、若尊カルデラの火山活動は特に活発にはなっておらず、今後もモニタリングを継続することは重要である。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Giroud, S., Y. Tomonaga, M.S. Brennwald, N. Takahata, T. Shibata, Y. Sano and R. Kipfer, 2023, New experimental approaches enabling the continuous monitoring of gas species in hydrothermal fluids, *Frontiers in Water*, 4, 1032094, doi: 10.3389/frwa.2022.1032094, 査読有, 謝辞無

Hong, J., H. Kim, W. Lee, J. Yu, T.P. Fischer, N. Takahata, Y. Sano, H. Lee, 2023, Fault-related basins as carbon reservoirs: Soil CO₂ emissions in the SE Korean Peninsula, *Catena*, 231, 107300, doi:10.1016/j.catena.2023.107300, 査読有, 謝辞無

Nakajima, T., N. Takahata, H. Obata, T. Kagoshima and Y. Sano, 2024, An easier approach for helium isotope flux estimation in a submerged caldera, *Geochemical Journal*, 10.2343/geochemj.GJ24004, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Nakajima, T., N. Takahata, H. Obata, T. Kagoshima and Y. Sano, 2023, Seasonal overturn and volcanic emissions in Wakamiko submerged caldera, *JpGU*

高畑直人, Nakajima Ma. Teresa, 鹿児島渉悟, 小畑元, 2023, 鹿児島湾における冬季の海水入れ替わりを利用した熱水性ヘリウムフラックスの見積もり, *GEOTRACES Japan meeting*

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：火山：地球化学：採水

概要：白鳳丸KH-23-4次航海を通じて、琉球海溝陸側において海底泥火山の観測を実施した。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：喜界島沖、種子島沖、日向灘

調査・観測期間：2023/8/6-2023/9/1

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地球化学：採水

概要：白鳳丸KH-23-11次航海を通じて、沖縄トラフにおいて間隙流体の観測を実施した。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：沖縄トラフ

調査・観測期間：2023/12/27-2024/1/6

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地球化学：噴気ガス・土壌ガス

概要：台湾・大屯火山群周辺において地下水の観測を実施した。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：台湾・基隆市

調査・観測期間：2024/1/22-2024/1/27

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

(11) 次期計画における課題名：

火山の活動度・噴火ポテンシャル評価を目的とする地球化学的観測研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京大学大気海洋研究所

他機関との共同研究の有無：有

佐野有司（高知大学 海洋コア総合研究センター）, 鹿兒島渉悟（富山大学 理学部）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学大気海洋研究所国際・研究推進チーム

電話：04-7136-6009

e-mail：iarp@aori.u-tokyo.ac.jp

URL：http://www.aori.u-tokyo.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：小畑元

所属：東京大学大気海洋研究所

(1) 実施機関名：

千葉大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

電磁気学的な地震先行現象の総合的研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) 関連研究分野との連携強化

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地震に先行する様々な電磁気現象が報告され、そのうちのいくつかの観測パラメータについては統計的な有意性が示唆される論文が出版されるようになってきた。しかし、1つの観測パラメータの解析では、現実的な予測の観点から、予測成功率が十分であるとはいえない。そこで、統計的な有意性を示す複数の観測パラメータを組み合わせることにより、短期・直前予測の実現に資する研究を実施し、前兆現象の発生や伝搬機構の理解を進める。

また、現在確認されている地震前兆現象として統計的な有意性を示す観測パラメータについて、他の観測点のデータ解析で検証するとともに、地震の規模や深さ、タイプ、時空間的な関係を調査する。前兆現象の物理機構を解明することに資する室内実験や観測研究を実施し、電磁気学的な先行現象発現メカニズムを定性的・定量的に検証する。また自前の観測データ以外に、既存のGNSS-TEC等の他機関データの活用や、中国、台湾、米国、イタリア、ロシア等の研究者とも協力し、国際的に短期地震予測研究を実施する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本計画では、統計的な有意性を示す複数の観測パラメータを組み合わせることにより、短期・直前予測の実現に資する研究を実施する。そのために、前期の課題2501を継続しつつ、次の事項を実施する。(i)地震に伴う電磁気現象を正確に捕捉する観測パラメータの調査と観測・データ蓄積、(ii)データ解析法（予測精度の高度化（信号弁別や時系列データ処理などの信号処理法や統計的評価法）の開発、電磁気学的、力学的、地震学的データとの関連性評価、(iii)室内実験やモデルによる地震電磁気信号発生の物理機構解明、に資する研究を遂行する。(i) (ii)では研究期間全体を通して、衛星・地上マルチセ

ンサネットワークによるリアルタイム監視システムの構築に資する調査研究を実施する。観測パラメータの検討とその統合（SensorWEB、ビッグデータ収集）、予測精度の高度化のための観測や解析技術などを調査・研究する。地上や衛星に搭載されたセンサによって、巨大地震の準備段階で発生する前兆的な異常変動を検知し、海溝部や内陸で発生するM7クラス以上の地震に対して、確度の高い予測情報を出力するシステムの開発を国際共同研究として検討する。地震前兆的な現象を記録している観測パラメータ（ULF電磁場、VLF/VHF電磁場、電離層電子数(GNSS/TEC)、衛星温度異常、GPS地表変位、地震活動度、ラドン濃度等）の地震活動との統計的有意性および前兆性が示されるかどうかを調査検討し、その統合を目指す。また、その物理機構解明に資する調査研究も行う。観測項目は固定せず、研究開発の進展に応じて、追加や削除が可能なopenなシステムとする。いずれの観測項目でも、観測網を良好に維持し、ケーススタディを積み重ねる。また、必要に応じて観測点周辺の比抵抗構造を測定し、また室内実験等を行い、先行現象の発現・伝搬メカニズムの理解を進める。前期の課題2501で作成を開始した第三者が評価可能な電磁気学的な先行現象データベースをさらに充実させる。これらのため、先行現象研究が行われているロシア、キルギス、フランス、中国、台湾、ギリシャ、米国、インド、イタリア等の研究者と連携し、各種既存のデータの発掘・再解析を実施する。

(1)観測

- ・ULF帯、VLF帯、VHF帯電磁場観測を維持、短期予測に資するデータ収集（期間全体）。
- ・地圏一大気圏一電離圏結合の観測学的研究のための観測装置の開発
地震に先行するTEC異常の発生原因の1つと考えられている電場異常について観測学的に検証可能な装置を開発する。地中および地表付近のRn濃度や大気電場等を測定する。着手（初年度）、テスト観測（2-3年度）、定常観測（3-5年度）の予定。

(2)解析

- ・VHF帯観測データについては、予測マップを作成し、統計的な評価を実施する。またリアルタイム解析システムを開発（1-3年度を予定）。
- ・VLF帯観測データについては、波源を自動解析するシステムを構築する（1-2年度を予定）。
- ・GNSS-TEC解析では、Hekiが指摘している直前変動の統計解析に着手（初年度）し、成果をまとめる（2-3年度）。またGNSS-TEC解析の数日前の日変化パターンについては、地磁気擾乱日を考慮した前兆性の評価に着手（初年度）し、Molchan Error Diagram等で評価する（2-3年度）。準リアルタイム解析システムを開発（3-4年度）。
- ・イオノゾンデデータの解析による電離圏電子密度変動と地震との相関の調査（1-3年度）
- ・電離圏トモグラフィによる電離圏電子密度変動の可視化と変動予測（1-5年度）
- ・新規観測パラメータの統計的有意性や前兆性評価の検証（随時）
- ・電磁気学的、力学的、地震学的データとの関連性評価（随時）
- ・各種パラメータの組み合わせによる予測成功確率の変動の調査（2-5年度）。
- ・海外で報告されている衛星観測データ地震前兆現象の検証に着手する（衛星熱赤外データ（TIR：ひまわりやLEOデータなど）、In-situプラズマ計測データ/電磁場データSWARM衛星、中国張衡1号など：初年度）。統計的有意性や前兆性評価の検証（2年度～）
- ・slowslipに関する電磁気データの検討開始（3-5年度）

(3)室内実験および計算機実験

- ・地殻電磁場発生モデルの構築と電離層電子密度変化のシミュレーションを実施し、地震前のTEC異常現象の物理の解明。コード開発（1-4年度）Heki-TEC異常モデル構築検討（5年度）。
- ・地殻温度条件下における応力誘起岩石分極実験の実施（1-3年度）。その結果を用いて、モデルの定量的検証（3-4年度）Heki-TEC異常モデル構築検討（5年度）。

(4)国際ワークショップの開催。

5年度の前半に本研究開発の成果と国際動向を調査するため日本で国際ワークショップを開催する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

- ・今年度の成果の概要

[1] 観測

地圏一大気圏一電離圏結合の観測学的研究のための観測装置の開発

新規観測点の設置と観測点保守に関しては、COVID-19感染症の状況を考慮しつつ予定通り行っている。北海道えりも観測点のULF磁力計装置の移設を9月に実施し、調整を11月に実施した。四国・九州の観測点保守は感染症動向を注意しつつ、3月に実施予定である。

旭観測点に設置した地中ラドン観測器について、不良が発生し修理とWindows11への対応作業を実施した。VLF帯パルス電磁波観測においては、5観測点における観測は概ね順調に行われた。

[2] データ解析について

A. ULF磁場データの地震前兆性に関する統計解析

昨年度に引き続き、統計的有意性、ROC的前兆性の評価を行っている。これらの結果は、地震電磁気現象を理解するのに役立ち、ULF電磁アプローチに基づく予測モデルを改善することができる。この研究で提案された方法論は、予測方針を評価し、短期的な地震予測のために他の種類の測定を最適化するのにも役立つと考えている (Han et al., Entropy 2020)。また他の統計的有意性、ROC的前兆性が確認されたパラメータと合わせて、ETASモデルへの前兆現象の取込みについて引続き調査を行っている。論文や学会での報告はしていないが、柿岡観測点のULF磁場変動について、これまでに報告した論文に基づいたROC調査を行い、予測すべき地震を選定し、そのための最適パラメータを決定した。それを用いた地震予測を現在研究室内で実施している。

B. 地中ラドン濃度解析

昨年度に引き続き、 α 線を計測する地中ラドン濃度観測データの解析を継続中である。旭観測点において深さ60 cmと100 cmに地中ラドン計測装置を設置し、降雨や気象の影響、計算した地中ラドンフラックスの妥当性を検証している。

C. 電離圏電子数変動の解析

(1) 中国地震電磁気衛星 (CSES-1) データ解析 中国・台湾等との共同研究

昨年度に引き続き、2018年2月2日に打ち上げられた中国の地震電磁気衛星 (CSES-1) のIn-situ電離圏電子数変動と地震との関係の調査を行った。解析には全球電離圏マップ (GIMのグリッド全電子数 (TEC) データ) を用いた統計解析も実施している。今年度のトピックスは地震前の電離圏異常と太陽起源 (磁気嵐/宇宙天気) による電離圏異常の空間的解析である。具体的には、地震前の電離圏異常 (PEIA) と太陽活動に起因する電離圏宇宙気象を調査するために中国の地震電磁気衛星 (CSES-1) のIn-situ電離圏電子数変動と全球電離層マップ (GIM) の全電子量 (TEC) を調査した。GIMのTECとCSESの電子密度 (温度) の異常な増加 (あるいは減少) が、震源域において地震の1-5日目に出現することがわかった。一方、宇宙天気に関する異常は、地磁気嵐の期間中にグローバルに発生する。またM7.0の地震に伴うPEIAの電場は、東方向で0.21/0.06 mV/mであり、2018年8月1-3日の午前0時以降/午後0時以降の下向き電場は0.11/0.10 mV/mであった。2018年8月26-28日の磁気嵐期間中の電場は、02:00の深夜以降に西向き/下向き0.17/0.45 mV/m、14:00 LTには0.26/0.26 mV/m東向き/上向きであった。CSES電子密度データの空間解析は、PEIAをグローバルな影響から識別し、震源を特定できる可能性があること、電離層におけるPEIAと嵐に関連した電場を導出するのに有効であることがわかった (Liu et al., Geoscience Lett. 2023)。

(2) Coseismic / Preseismic (直前) 電離圏電子数変動

巨大地震に伴う電離層擾乱は、全電子量 (TEC) の変化として地上の全地球航法衛星システム (GNSS) 受信機で観測することができる。震源からの音響重力波による地震後10分程度の共震擾乱に加え、超巨大地震の直前における変化も報告されている。2008年中国汶川地震 (Mw7.9) では、本震の37分前に擾乱が始まり、バックグラウンド値の5%に達した。Mw7.3以上の過去20ケースの結果は、先行時間は断層の長さで決まり、バックグラウンドに対する異常の強さは断層面積で決定するという単純な関係を示している。2008年汶川地震の直前の異常値は、これらの傾向によく適合しているが、先行時間がやや長く、強度が強いことを示す (Heki et al., Adv. Space Res. 2024)。

2023年2月6日のトルコ東アナトリア断層の地震Mw7.8 (EQ1) が発生した。これは陸上で記録された横ずれ地震の中で最大級のもので、約9時間後にEQ1の北側でMw7.7の地震 (EQ2) が発生した。音響波 (AW) による地震発生時の電離圏電子数変動 (CIP) を調査したところ、観測されたCIP周期はEQ1の方がEQ2よりも幾分長かった。また、EQ1ではCIPの振幅に方位角依存性が見られた。地磁気や視線幾何学などの既知の要因では説明できないCIP振幅の方位依存性を示した。EQ1によるCIPは、断層に沿った一連の震源を想定することにより、よく再現されることが数値実験により明らかになった。振幅と周期の方位依存性は複数の震源からのAWの干渉によるものであった。また、横ずれ地震のCIP振幅は、dip-slip地震よりも小さい傾向があることもわかった (Bagiya et al., GRL 2023)。

昨年度に引き続き、2022年のトンガの火山噴火に伴う電離圏擾乱について解析し、今年度はニュージーランドや台湾上空のTEC異常変動についても調査した (Muafiry et al., JGR 2023, Liu et al., GRL 2023)。気象衛星ひまわり8号の画像は、噴火によって誘導された上層対流圏の擾乱が高度8.2 kmで水平速度約315 m/sのラム波モードで世界中に伝播していることを示している。ニュージーランドではラム波によって励起された津波前方電離圏擾乱と、その後の太平洋を伝播する津波との関連を示唆している。第二の擾乱は噴火の約2時間後に始まった。これはラム波の通過によって励起された内部重力波 (IGW) であると考えられる (Muafiry et al., JGR 2023, Liu et al., GRL 2023)。対流圏のラム波による擾乱 (TAD) が11:30UTに台湾に到達すると、98基の地上気圧計が11:50UT頃に気圧の上昇とピークを記録し、28基の検潮儀が14:30UT頃から17:30UT頃に海面変動の上昇と最大を記録し、イオノゾンデが14:30UT頃に電離層が最高高度に達することを観測している。台湾の10台の磁力計で測定された地球磁場の水平成分の変化は、11:00-12:00UTの対流圏ラム波面到達時には、ほぼすべてトンガ火山の方向を指し、22:00-23:00UTには火山から遠ざかり、高度約130 kmの487 m/sのTAD (または熱圏ラム波面) も活性化していることを示唆している。世界の69個のINTERMAGNET磁力計の磁場変化の水平成分は、トンガ火山噴火によって引き起こされる対流圏と熱圏のラム波が非常に強力で、地球上に強烈なダイナモ電流と電場を誘発することを示唆することがわかった (Liu et al., GRL 2023)。

連続的なプリニアン噴火では、しばしば約3.7 mHzと約4.4 mHzの大気モードが励起され、全地球航法衛星システム (GNSS) 受信機によって電離層全電子量 (TEC) の高調波振動として観測される。このようなTEC振動は、2022年トンガ・ハアパイ海底火山 (HTHH) が噴火した直後に始まった。ここでは、火山から約4000 km以内の観測点におけるGNSSデータを解析し、このような大気モードの時間的・空間的分布を調べたところ、噴火直後から3.7 mHz程度の強いTEC振動が観測され、火山からの音速とともに外側に伝播した。その後、TEC振動は再び強くなり、HTHHから約1400 kmの距離で振幅のピークを示した。このような遠距離磁場振動は、HTHHから約3000 km離れたニュージーランドやソロモン諸島の上空でも発生した。これらの振幅は、0S29固体地球モードの振幅と相関があり、大気モードの維持に、その下の鉛直表面振動が一役買っている可能性を示唆している。遠距離TEC振動の開始は、現地の日の出と同期しており、電離層電子密度の日周変動によって制御されている可能性があることもわかった (Heki, GJI 2024)。

(3) 津波による電子数変動の解析 台湾との共同研究

今年度はニュージーランドや台湾上空のTEC異常変動について調査した (Muafiry et al., JGR 2023, Liu et al., GRL 2023)。気象衛星ひまわり8号の画像は、噴火によって誘導された上層対流圏の擾乱が高度8.2 kmで水平速度約315 m/sのラム波モードで世界中に伝播していることを示している。ニュージーランドではラム波によって励起された津波前方電離圏擾乱と、その後の太平洋を伝播する津波との関連を示唆している。第二の擾乱は、噴火の約2時間後に始まった。これはラム波の通過によって励起された内部重力波 (IGW) であると考えられる (Muafiry et al., JGR 2023, Liu et al., GRL 2023)。対流圏のラム波による擾乱 (TAD) が11:30UTに台湾に到達すると、98基の地上気圧計が11:50UT頃に気圧の上昇とピークを記録し、28基の検潮儀が14:30UT頃から17:30UT頃に海面変動の上昇と最大を記録し、イオノゾンデが14:30UT頃に電離層が最高高度に達することを観測している。台湾の10台の磁力計で測定された地球磁場の水平成分の変化は、11:00-12:00UTの対流圏ラム波面到達時には、ほぼすべてトンガ火山の方向を指し、22:00-23:00UTには火山から遠ざかり、高度約130 kmの487 m/sのTAD (または熱圏ラム波面) も活性化していることを示唆している。世界の69個のINTERMAGNET磁力計の磁場変化の水平成分は、トンガ火山噴火によって引き起こされる対流圏と熱圏のラム波が非常に強力で、地球上に強烈なダイナモ電流と電場を誘発することを示唆することがわかった (Liu et al., GRL 2023)。

(4) イオノゾンデ統計解析

昨年度に引き続き、情報通信機構 (NICT) の国分寺イオノゾンデ観測データの解析を実施するとともに、GPSデータと同様に日々NICTにて公開される4ヵ所のデータを用いてリアルタイム解析を継続して実施している。

(5) 電離圏トモグラフィーによる電離圏電子密度変動の可視化と変動予測

電離圏変動の理解には電離圏電子密度の3次元分布の把握が必要であるが、電離圏擾乱時にこの3次

元密度分布を適切に連続的に再構成することが可能なトモグラフィー手法の開発と準リアルタイム解析手法を開発中である。時空間分解能の向上と精度と計算時間を考慮した調査を行っている。アルゴリズムの基本は昨年度までに開発した手法で、対象とする空間ボックスに対して東西南北上下の6方向への変動に着目して拘束条件をかけるかわりに、上下の2方向(地磁気方向)に限ることにより、変動の大きい擾乱時の電離圏電子密度分布も再現可能にしている (Song et al., JGR SP 2021)。

D. 大気圏熱赤外異常解析 気象衛星ひまわりデータの解析 イタリアとの共同解析

昨年度に引き続きひまわり8-9号については、2018年新燃岳の溶岩噴出を例に、火山活動に伴う温度異常、特に溶岩流出や溶岩ドーム形成に関連する温度異常を検出するアルゴリズムの開発を行っている。具体的には、地殻変動観測衛星ひまわり8号に搭載された高時間分解能センサAdvanced Himawari Imager (AHI) の赤外データを用いて、2018年の新燃岳火口周辺の地表温度の時空間統計解析を行った。雲判別手法や地表面温度変化の特性について、精緻化・高度化した結果、夜間だけでなく太陽光のある日中も含めた10分間サンプリングの輝度温度データを用いて、最初の火山噴火の数時間前に高い特異点異常を検出できることを示した。ひまわり8号の輝度温度データが火山溶岩活動の監視や溶岩流出の迅速な検知に有効であることが示唆された (論文投稿中)。

E. 中国の孔内歪計データの解析 (中国・吉林大学との共同研究)、および地震統計解析 (中国南方科技大学等との共同研究)

前年度に引続き、b値解析を実施している。2024年能登地震や関東地域のb値解析やP値解析対象地域を増加した。また、新たに国内のGNSSデータを用いて (4観測点の対角線の交点における疑似歪を算出)、歪計測の疑似ネットワークを構成し、そのネットワークの関連度の調査研究を2011年東北地震、2018年熊本地震を対象に実施している。

F. VLF帯およびLF帯電磁放射の解析

本研究では雷放電の同定が重要である。そこで、近年世界的に展開されている超低周波 (VLF) 電磁波受信機で測定された空電から雷放電の位置を特定するためのボランティアベースのネットワークであるBlitzortung.orgについて、日本における雷放電の検出効率と位置精度を評価した。その結果、関東など受信局が密集している地域では十分な能力があったが、受信局が少ない地域では十分に検知できていないことがわかった。関東圏の対地雷に対するBlitzortungの最新の検出効率率は約90%であり、平均位置精度はおおよそ 5.6 kmであることがわかった。VLFは長距離伝播するのでBlitzortungの結果には注意する必要がある (Kamogawa et al., Atmosphere 2023)。

LF帯の地震前電磁放射については多くの報告があるが、その多くは狭帯域パルスの強度に関するものであり、発生源の位置に関する議論は少ない。そこで、我々は、LF帯広帯域干渉計の開発を進めている。これまでに、干渉計素子の開発が終了し、素子による連続観測を行っている。波形解析の予備的な結果、対地雷によるLF/VLF波形信号を正常に記録することがわかった。また、上記の対地雷起源の波形とは異なるLF帯信号も検出した。この信号は雲内放電である可能性もあるが、地震に関連している信号である可能性も棄却できないことがわかった (太田らJ. Atmos. Electr. 2023)。

G. 国際ワークショップ等の企画

a. JPGU における国際セッション Interdisciplinary studies on pre-earthquake processes (幕張メッセ、2023年5月22日、講演数：口頭15件、ポスター12件)

b. 7th Int'l Workshop on Earthquake Preparation Process (千葉大学、2023年5月24日- 25日、講演数：口頭31、ポスター16件、参加者約70名 (海外からの参加35名))

・計画期間中 (令和元年度~5年度) の成果の概要

[1] 観測

令和2年度以降COVID-19感染症拡大の影響を受けながらも、その感染状況を考慮しつつ、下記の項目について、保守点検、移設、新規設置等の観測を実施した。

- ・ULF帯、VLF帯、VHF帯電磁場観測を維持、短期予測に資するデータ収集
- ・地圏-大気圏-電離圏結合の観測学的研究のための観測装置の開発
地中ラドン観測装置の開発と定常観測の開始 (大気電場との同時観測)

各年度の主な事項は以下の通り。

R1年度：地震に先行するTEC異常の発生原因の1つと考えられている電場異常について観測学的に調査するラドン観測装置のプロトタイプを房総・旭観測点で運用中であったが、実機が運用可能となり、地中および地表付近のRn濃度や大気電場観測点を茨城・美浦に新たに1か所整備した。旭観測点から利根川沿いに北西約50 kmの地点である。令和元年9-10月の房総半島台風および東日本台風の影響、およびCOVID-19の影響で設置作業は大幅に遅延した。

R2年度：COVID-19感染症拡大の影響で昨年度末に完成予定だった茨城・美浦観測点は2020年9月より、ULF帯電磁場観測、地中・大気ラドン濃度観測、大気電場観測、大気イオン濃度観測、気象観測を開始した。また、昨年度末に予定していた四国・九州の観測点保守作業（ロガー交換等）は2020年11月に実施した。その後COVID-19感染症再拡大のため、遠隔地の保守作業は停滞している。一方、他人と干渉せずに大学から自動車で行き来可能な観測点の保守作業は、緊急宣言時を除いて原則予定通り行っている。北海道えりも観測点の3成分磁力計の観測2020年11月より再開。

R3年度：COVID-19感染症拡大の影響で、他人と干渉せずに大学から自動車で行き来可能な観測点の保守作業は、緊急宣言時を除いて原則予定通り実施した。四国・九州の観測点は感染症の防止措置が解除された11月に実施した。その後COVID-19感染症再拡大のため、遠隔地の保守作業は停滞している。年度内に新規観測点用の臨時観測を房総半島大原で予定している。同観測点は比較的街中にあるが、房総slowslipの発生領域にあるため電磁環境が非常に悪くなければ、ULF帯電磁場観測、地中・大気ラドン濃度観測、大気電場観測、気象観測を設置する予定である。ラドン観測装置に土中水分量・土中温度が観測できるセンサを追加する改良を開発メーカーと行った。比較的強度の強い降雨時にRn fluxが増加する原因が雨水あるいは地下水からの影響かどうかを推定するための改良である。旭観測点において試験観測を開始した。VLF帯パルス電磁波観測においては、東海大学観測点においてセンサ位置の変更を実施した。従来の観測場所が新学部開設のため使用できなくなったため、別の校舎の屋上に移設した。それに伴い、ノイズフィルターの特性の現場試験を行い変更した。5観測点における観測は概ね順調に行われた。

R4年度：COVID-19感染症の状況を考慮しつつ、他人と干渉せずに大学から自動車で行き来可能な観測点の保守作業は、原則予定通り行っている。四国・九州の観測点は感染症動向を注意しつつ、第7波が収束した11-12月に実施した。房総slowslipの発生領域にある大原で臨時観測を実施したが、地下水面が高いこと、電磁環境ノイズが大きいことから、設置を断念した。美浦観測点に設置した地中ラドン観測器について、2022年9月24日の豪雨によって故障し、腐食した回路部等の修理を実施している。VLF帯パルス電磁波観測においては、5観測点における観測は概ね順調に行われた。

R5年度：COVID-19感染症の状況を考慮しつつ予定通り行っている。北海道えりも観測点のULF磁力計装置の移設を9月に実施し、調整を11月に実施した。四国・九州の観測点保守は感染症動向を注意しつつ、3月に実施予定である。旭観測点に設置した地中ラドン観測器について、60 cmと100 cmの2つの異なる深さでの観測を開始した。また機器不良が発生し修理とWin11への対応作業を実施した。VLF帯パルス電磁波観測においては、5観測点における観測は概ね順調に行われた。容量性平板アンテナによるLF帯干渉計システムの開発について予察的な調査を開始した。

[2] データ解析について

概ね順調に計画通り実施してきている。Slowslip 検知用の観測点がCOVID-19問題や観測候補地の地下水や電磁場環境から設置できなかった。

A. ULF磁場データの地震前兆性に関する統計解析

R2年度：Hattori et al., 2013 (Survey in Geophysics) では2000年から2010年に房総半島（清澄観測点）と伊豆（清越観測点）で観測された磁場データについて調査し、観測点付近で発生したある程度の大きさ以上の地震とULF磁場異常の出現には有意相関があることを示した。今年度はHattori et al., 2013と同じデータセットでこれらのデータの地震前兆性についてMolchan's Error Diagram解析に基づき詳細に調査した結果をEntropy (Han et al., 2020) で報告した。確率利得 (PG) と確率差 (D) を導入して、予測パフォーマンスを定量化し、2か所のULF 磁場観測点の最適な予測パラメータを調査した。その結果は、磁場異常に基づく地震予測がランダムな推測よりも大幅に優れていることを示

しており、房総半島（清澄観測点）と伊豆（清越観測点）で観測された磁場データに潜在的に有用な前兆情報が含まれていることを示した。また、先行情報には、明確な震源距離（R）とターゲット地震イベントのサイズ（ E_s ：観測点が受信する地震エネルギー）に依存することを示した。伊豆の清越観測点および房総の清澄観測点での最適なRおよび E_s パラメータは、それぞれ約（100 km、108:75）と（180 km、108:75）であることがわかった。これらの結果は、地震電磁気現象を理解するのに役立つ、ULF電磁アプローチに基づく運用予測モデルを改善することができる。この研究で提案された方法論は、予測方針を評価し、短期的な地震予測のために他の種類の測定を最適化するのにも役立つ可能性がある。

R3年度：昨年度に引き続き、統計的有意性、ROC的前兆性の評価を行っている。これらの結果は、地震電磁気現象を理解するのに役立つ、ULF電磁アプローチに基づく予測モデルを改善することができる。この研究で提案された方法論は、予測方針を評価し、短期的な地震予測のために他の種類の測定を最適化するのにも役立つ可能性がある（Han et al., Entropy 2020）。また他の統計的有意性、ROC的前兆性が確認されたパラメータと合わせて、binary予測の精度向上や数理確率モデルの検討も開始した。また、観測電磁場のノイズ除去法について時間領域で信号を特異スペクトル分解し、太陽起源のグローバル変動（MTのソース信号）とそれ以外の信号に分離するMSSA（Multi-channel Singular Spectrum Analyses）法を開発中である。

R4年度：昨年度に引き続き、統計的有意性、ROC的前兆性の評価を行っている。これらの結果は、地震電磁気現象を理解するのに役立つ、ULF電磁アプローチに基づく予測モデルを改善することができる。この研究で提案された方法論は、予測方針を評価し、短期的な地震予測のために他の種類の測定を最適化するのにも役立つと考えている（Han et al., Entropy 2020）。また他の統計的有意性、ROC的前兆性が確認されたパラメータと合わせて、ETASモデルへの前兆現象の取込みを開始した。まずはULF磁場変動についてROC結果に基づいて、時系列余震予測および本震予測の数理確率モデルの検討をしている。

R5年度：昨年度に引き続き、統計的有意性、ROC的前兆性の評価を行っている。これらの結果は、地震電磁気現象を理解するのに役立つ、ULF電磁アプローチに基づく予測モデルを改善することができる。この研究で提案された方法論は、予測方針を評価し、短期的な地震予測のために他の種類の測定を最適化するのにも役立つと考えている（Han et al., Entropy 2020）。また他の統計的有意性、ROC的前兆性が確認されたパラメータと合わせて、ETASモデルへの前兆現象の取込みについて引き続き調査を行っている。論文や学会での報告はしていないが、柿岡観測点のULF磁場変動について、これまでに報告した論文に基づいたROC調査を行い、予測すべき地震を選定し、そのための最適パラメータを決定した。それを用いた地震予測を現在研究室内で実施している

B. 地中ラドン濃度解析

R1年度：千葉県旭市で観測している地中ラドン濃度と、地殻変動との関係を調査した。浅い地中ラドン濃度は気象要素の影響を受けるため、地殻変動との関係を調査するためには気象の影響を除去する必要がある。マルチチャンネル特異スペクトル解析を地中ラドン濃度、気温、気圧の3チャンネルに適用し、気象要素の影響を除去し、地中ラドンフラックスを推定している。推定したラドンフラックス変動と観測点近傍の地震活動との関係について、累積地震モーメントと E_s 指数を用いて調査した結果、旭観測点直下で地震が発生した数日前に地中ラドンフラックスの 3σ を超える異常を示した。これらの地震は太平洋プレート上盤付近にて逆断層で発生しているという特徴があった。これらのことから、地震準備過程における応力集中によって地表付近の上向きへの地下ガスの流量が増加すると考えられる。地中ラドンフラックスの変動モデルと観測点の応力変化との関係について調査を行った。本研究では、国土地理院のF3解を用いて面積ひずみを求め、地中ラドンフラックスの変動との関連について調査した。その結果、地中ラドンフラックスは、弾性圧縮に対して増加し、弾性膨張に対して減少する傾向がみられた。地中ラドンフラックスの変動は、地殻の応力変化に感度をもつことが示唆され、前兆すべりの大きな巨大地震やスロースリップ地震に対して有効な指標となる可能性があることがわかった。今後は、地殻変動との関連をさらに詳細に調査するとともに、ラドン観測点を2か所増強し、同様な傾向がみられるかどうかを検証する。

R2年度：昨年度に引き続き、 α 線を計測する地中ラドン濃度観測データの解析を実施した。令和2年9月より美浦観測点が新設された。マルチチャンネル特異スペクトル解析を用いて気圧および温度による変動を除去し、ラドンフラックスを求める手法を提案したが、2時間の降雨量が20 mmを超える場合に有意なラドンフラックスの増加があることがわかった。これは、降雨による荷重増加と雨水の浸透による地中ラドンフラックス増加が原因であると考えられ、適切に除去する方法の開発が望まれる。

R3年度：昨年度に引き続き、 α 線を計測する地中ラドン濃度観測データの解析を実施した。令和2年度マルチチャンネル特異スペクトル解析を用いて気圧および温度による変動を除去し、ラドンフラックスを求める手法を提案したが、2時間の降雨量が20 mmを超える場合に有意なラドンフラックスの増加があることがわかった（小島ら J. Atmos. Electr. 2020）。これが降雨による雨水の浸透による地中ラドンフラックス増加が原因であることを観測的に確認し、そのモデルを検討した（根本ら J. Atmos. Electr. 2021）。降雨効果を観測するために複数の土中水分を測定できるように装置の改良を実施し、試験観測を開始した。

R4年度：昨年度に引き続き、 α 線を計測する地中ラドン濃度観測データの解析を継続中である。

R5年度：昨年度に引き続き、 α 線を計測する地中ラドン濃度観測データの解析を継続中である。旭観測点において深さ60 cmと100 cmに地中ラドン計測装置を設置し、降雨や気象の影響、計算した地中ラドンフラックスの妥当性を検証している。

C. 電離圏電子数変動の解析

(1) 中国地震電磁気衛星（CSES-1）データ解析 中国・台湾等との共同研究

R2年度：2018年2月2日に打ち上げられた中国の地震電磁気衛星（CSES-1）のIn-situ 電離圏電子数変動と2018年7-8月にインドネシア・ロンボク島付近で発生したM6クラスの4つの地震との関係を調査した。CSES-1の初期データのチェックを含めて解析を行った。今回は震源が浅い4つの連続する地震（2018年7月28日M6.4、2018年8月5日、9日、19日M6.8、5.9、6.9）に関連する地震前電離層効果の特性を調査した。具体的には、CSES-1に搭載されたラングミュアプローブ（LAP）によって検出された電離層電子密度（Ne）の移動中央値を調査した。その結果、4つの地震のちょうど1、5、2、5日前の7月27日の軌道#2660-0、7月31日の軌道#2721-0と#2728-1、8月7日の軌道#2827-0と#2735-1、8月14日の軌道#2934-0で顕著な電子密度の増加を示した。また、電子数異常を検知した場所は、震源から2000 km 以内の北-北東部であった。これらの軌道と時空間的に近接する軌道データおよび国際電離圏モデル2016（IRI-2016）の予測値とを比較検討したところ、CSES-1のデータは4つの地震に先行する電離圏電子数異常を検知した可能性が高いことを示した。これらの結果をより説得力のあるものにするために、ヨーロッパの軌道決定センター（CODE）が発表している全球電離圏マップ（GIMのグリッド全電子数（TEC）データ（CODE-GIMTEC））を調査したところ、時空間分布の両方で同様の異常を示した。また、CODE-GIMTECを用いて、2007年から2017年にインドネシアで発生した35個の $M \geq 5.8$ 、深さ ≤ 50 kmの地震に対してSuperposed Epoch Analysis（SEA）法を実施したところ、この地域の震源地から2000 km 以内で、地震の1~7日前に電離圏電子数変動の有意な正の異常があったことを示した。CSESによって検出された正のプラズマ摂動は、地震前の地震電離層効果として強く示唆された（Song et al., J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 2020）。

R3年度：中国の地震電磁気衛星（CSES-1）のIn-situ 電離圏電子数変動と2018年7-8月にインドネシアで発生したM6クラスの4つの地震との関係を調査し、地震に先行すると示唆される変動を観測した。さらにヨーロッパの軌道決定センター（CODE）が発表している全球電離圏マップ（GIMのグリッド全電子数（TEC）データ（CODE-GIMTEC））を調査したところ、時空間分布にて同様の異常を示した。また、CODE-GIMTECを用いて、2007年から2017年にインドネシアで発生した35個の $M \geq 5.8$ 、深さ ≤ 50 kmの地震に対して統計解析を実施したところ、この地域の震源地から2000 km以内で、地震の1~7日前に電離圏電子数変動の有意な正の異常があったことを示した。CSESによって検出された正のプラズマ摂動は、地震前の地震電離層効果を強く示唆する結果である（Song et al., J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 2020）。今年度はCSES1データについて、さらに(1)2020年10月30日のトルコの地震（M7.0）、(2)2020年1月28日のジャマイカ地震（M7.7）について調査したところ、(1)のトルコの地震については磁気嵐と重なっており、CSES1 Insitu電離圏電子

関連データには地震に先行する明確な変動は確認できなかった。一方、(2)のジャマイカの地震に関して地震に先行する変動が確認され、GIM-CODEを用いた統計解析を実施中である。

R4年度：中国の地震電磁気衛星（CSES-1）のIn-situ電離圏電子数変動と2023年2月6日にトルコで発生したM7.8クラス地震との関係の調査を開始した。この地震に関してヨーロッパの軌道決定センター（CODE）が発表している全球電離圏マップ（GIMのグリッド全電子数（TEC）データ（CODE-GIMTEC）を用いた統計解も実施した。

R5年度：中国の地震電磁気衛星（CSES-1）のIn-situ電離圏電子数変動と地震との関係の調査を行った。解析には全球電離圏マップ（GIMのグリッド全電子数（TEC）データ）を用いた統計解析も実施している。今年度のトピックスは地震前の電離圏異常と太陽起源（磁気嵐／宇宙天気）による電離圏異常の空間的解析である。具体的には、地震前の電離圏異常（PEIA）と太陽活動に起因する電離圏宇宙気象を調査するために中国の地震電磁気衛星（CSES-1）のIn-situ電離圏電子数変動と全球電離層マップ（GIM）の全電子量（TEC）を調査した。GIMのTECとCSESの電子密度（温度）の異常な増加（あるいは減少）が、震源域において地震の1-5日目に出現することがわかった。一方、宇宙天気に関する異常は、地磁気嵐の期間中にグローバルに発生する。またM7.0の地震に伴うPEIAの電場は、東方向で0.21/0.06 mV/mであり、2018年8月1-3日の午前0時以降/午後0時以降の下向き電場は0.11/0.10 mV/mであった。2018年8月26-28日の磁気嵐期間中の電場は、02:00の深夜以降に西向き/下向き0.17/0.45 mV/m、14:00 LTには0.26/0.26 mV/m東向き/上向きであった。CSES電子密度データの空間解析は、PEIAをグローバルな影響から識別し、震源を特定できる可能性があること、電離層におけるPEIAと嵐に関連した電場を導出するのに有効であることがわかった（Liu et al., Geoscience Lett. 2023）。

(2) Coseismic / Preseismic (直前) 電離圏電子数変動

R2年度：GNSS ネットワークで観測できる地震に伴う電離圏TEC変動の解説論文を発行した。地震の隆起/沈下は音波を励起し、周期が4~5分の成分が電離圏F層に伝播し、TEC振動を引き起こす。そして地震の約10分後に、速度（~1 km/s）で磁気赤道に向かって伝播する突然のTEC振動として出現する。非常に大きな地震の後には、何時間も続く共鳴大気振動が続くことがよくある。レイリー表面波も音波を発生させ、震源地から数千キロメートル離れた場所でTEC振動を引き起こす。大地震の直前に発生するTECの変化は、地震の10-80分前に始まり、破壊しそうな断層の上に正の電子密度異常を作る。18の地震Mw7.3-9.2の比較は、それらの主要な時間、TEC率の変化、および累積的な異常におけるMwとの正の相関を示した。電子密度異常の3次元構造は、電離圏を介した、おそらく表面電荷による電場の浸透によって引き起こされたE x Bドリフトによって形成されることを紹介した

(WileyAGUbook)。また、インドネシアの2010年Merapi火山噴火や2020年8月4日のレバノンの大爆発に関連する電離圏電子密度の擾乱についても解析した（Cahyadi, et al., J. Volc. Geothe. Res. 2020; Kunduet al., Nature Scientific Rep. 2021）。2011年東北地方太平洋沖地震の直前・直後の電離圏トモグラフィもJGR（Musfiry and Heki, 2020）で報告した。

R3年度：地震時電離圏擾乱に含まれる音波成分（AW）と内部重力波成分（IGW）の振幅を、2011年東北沖地震、2010年マウレ地震、2003年十勝沖地震、1994年北海道東方沖地震に加え、津波地震として知られる2010年メンタワイ地震の計5個の地震についてGNSS観測網のデータを解析して求めた。その結果(1)大きな地震ほど大きなIGW/AW比を示すこと、(2)津波地震はそれらのトレンドから大きくずれた大きなIGW/AW比を示すことが明らかになった。これは断層運動が長い時間かけて起こるほど、地殻上下変動もゆっくり進行し、その結果長い周期の大気波動をより効率的に励起することを示唆することがわかった（Heki&Takasaka2021EGU、日置、高坂JpGU2021）。また、GNSSデータを利用したTECデータから浅間山、新燃岳、桜島、口永良部島の2004~2015年の5回の爆発的な火山噴火に対する電離圏応答を比較したところ、電離層のF領域の音波速度で外側に伝播する周期が約80秒のN字型の擾乱を示すことがわかった。これらのTEC擾乱の振幅は、バックグラウンドのVTEC値の数%であることもわかり。火山爆発の強度の新しい指標となることを示した（Cahyadi et al., EPS 2021）。

R4年度：東北地方太平洋沖地震に関して、日本の地磁気共役点であるオーストラリア北部のGNSSに

よって観測された電離圏総電子数 (TEC) を解析したところ、日本で地震直前に観測されたものと同様なTECの正異常があった。異常の開始時間は地震の41.5分前であり、日本で観測された時間に非常に近く、日本とほぼ同じ磁気経度で発生していた。これは、電離層内の電場が大地震の直前に電子を再分布させたというモデルを支持している (He et al., *Frontier in ES* 2022)。地震電離圏擾乱の観測によって、Mw8~9の4つの巨大地震では、マグニチュードが1増加すると内部重力波が10倍強くなることを示した。典型的な津波地震である2010年のインドネシア・メンタワイ地震では、この経験的関係よりも強い内部重力波が励起された一方、励起された音響波の振幅は正常であった。このことはゆっくりとした断層の破壊が長周期の大気波動を効率的に励起することを示唆している (Heki et al., *GRL* 2022)。

トンガの火山噴火に伴う日本やインドネシア上空のTEC異常変動について電離圏擾乱の伝播速度は大気ラム波と同じ速さであり、対流圏からの上方向へのエネルギー漏洩が起源であることを示唆した (Heki, *EPS* 2023; Muafiry et al., *Atmosphere* 2022)。また電離圏擾乱は少なくとも4回日本上空を通過したことを確認した。

R5年度：巨大地震に伴う電離層擾乱は、全電子量 (TEC) の変化として地上の全地球航法衛星システム (GNSS) 受信機で観測することができる。震源からの音響重力波による地震後10分程度の共震擾乱に加え、超巨大地震の直前における変化も報告されている。2008年中国汶川地震 (Mw7.9) では、本震の37分前に擾乱が始まり、バックグラウンド値の5%に達した。Mw7.3以上の過去20ケースの結果は、先行時間は断層の長さで決まり、バックグラウンドに対する異常の強さは断層面積で決定するという単純な関係を示している。2008年汶川地震の直前の異常値は、これらの傾向によく適合しているが、先行時間がやや長く、強度が強いことを示す (Heki et al., *Adv. Space Res.* 2024)。

2023年2月6日のトルコ東アナトリア断層の地震Mw7.8 (EQ1) が発生した。これは陸上で記録された横ずれ地震の中で最大級のもので、約9時間後にEQ1の北側でMw7.7の地震 (EQ2) が発生した。音響波 (AW) による地震発生時の電離圏電子数変動 (CIP) を調査したところ、観測されたCIP周期はEQ1の方がEQ2よりも幾分長かった。また、EQ1ではCIPの振幅に方位角依存性が見られた。地磁気や視線幾何学などの既知の要因では説明できないCIP振幅の方位依存性を示した。EQ1によるCIPは、断層に沿った一連の震源を想定することにより、よく再現されることが数値実験により明らかになった。振幅と周期の方位依存性は複数の震源からのAWの干渉によるものであった。また、横ずれ地震のCIP振幅は、dip-slip地震よりも小さい傾向があることもわかった (Bagiya et al., *GRL* 2023)。

昨年度に引き続き、2022年のトンガの火山噴火に伴う電離圏擾乱について解析し、今年度はニュージーランドや台湾上空のTEC異常変動についても調査した (Muafiry et al., *JGR* 2023, Liu et al., *GRL* 2023)。気象衛星ひまわり8号の画像は、噴火によって誘導された上層対流圏の擾乱が高度8.2 kmで水平速度約315 m/sのラム波モードで世界中に伝播していることを示している。ニュージーランドではラム波によって励起された津波前方電離圏擾乱と、その後の太平洋を伝播する津波との関連を示唆している。第二の擾乱は噴火の約2時間後に始まった。これはラム波の通過によって励起された内部重力波 (IGW) であると考えられる (Muafiry et al., *JGR* 2023, Liu et al., *GRL* 2023)。対流圏のラム波による擾乱 (TAD) が11:30UTに台湾に到達すると、98基の地上気圧計が11:50UT頃に気圧の上昇とピークを記録し、28基の検潮儀が14:30UT頃から17:30UT頃に海面変動の上昇と最大を記録し、イオノゾンデが14:30UT頃に電離層が最高高度に達することを観測している。台湾の10台の磁力計で測定された地球磁場の水平成分の変化は、11:00-12:00UTの対流圏ラム波面到達時には、ほぼすべてトンガ火山の方向を指し、22:00-23:00UTには火山から遠ざかり、高度約130 kmの487 m/sのTAD (または熱圏ラム波面) も活性化していることを示唆している。世界の69個のINTERMAGNET磁力計の磁場変化の水平成分は、トンガ火山噴火によって引き起こされる対流圏と熱圏のラム波が非常に強力で、地球上に強烈なダイナモ電流と電場を誘発することを示唆することがわかった (Liu et al., *GRL* 2023)。

連続的なプリニアン噴火では、しばしば約3.7 mHzと約4.4 mHzの大気モードが励起され、全地球航法衛星システム (GNSS) 受信機によって電離層全電子量 (TEC) の高調波振動として観測される。このようなTEC振動は、2022年トンガ・ハアパイ海底火山 (HTHH) が噴火した直後に始まった。ここでは、火山から約4000 km以内の観測点におけるGNSSデータを解析し、このような大気モードの時間的・空間的分布を調べたところ、噴火直後から3.7 mHz程度の強いTEC振動が観測され、火山からの音速とともに外側に伝播した。その後、TEC振動は再び強くなり、HTHHから約1400 kmの距離で振幅のピークを示した。このような遠距離磁場振動は、HTHHから約3000 km離れたニュージーラン

ドやソロモン諸島の上空でも発生した。これらの振幅は、OS29固体地球モードの振幅と相関があり、大気モードの維持に、その下の鉛直表面振動が一役買っている可能性を示唆している。遠距離TEC振動の開始は、現地の日の出と同期しており、電離層電子密度の日周変動によって制御されている可能性があることもわかった (Heki, GJI 2024)。

(3) 津波による電子数変動の解析 台湾との共同研究

R2年度：大地震の地震波と津波は、震源地と津波発生地域の地表近くで移動性大気擾乱 (TAD) を誘発する可能性がある。これらのTADは、音速で大気から電離層に垂直に伝播し、移動性電離層擾乱 (TID) を形成し、同時に電離圏内で内部重力波を誘導する。Liu et al. (GPS solution, 2019) 2011年のM9.0東北地方太平洋沖地震の際に震源地と津波源地域から離れた電離層電子密度プロファイル調べ、レイリー波と津波の下でより顕著なTIDが誘発されることを発見した。地震波の水平速度は約2-3 km/s、津波の水平速度は2-300 m/sで大きく異なるため、津波によるTEC擾乱と地震によるTEC擾乱は明確に区別できる。2018年9月28日、インドネシア・スラウェシ島でMw7.8の地震が発生し、津波が発生した。5ヵ所の地上GNSS観測点を用いて、このスラウェシ津波によって誘発された15のTTIDを検出し、津波の発生源の場所を推定した (Liu et al., J. Earthquake and Tsunami 2019)。

R3年度：大地震の地震波と津波は、震源地と津波発生地域の地表近くで移動性大気擾乱 (TAD) を誘発する可能性がある。これらのTADは、音速で大気から電離層に垂直に伝播し、移動性電離層擾乱 (TID) を形成し、同時に電離圏内で内部重力波を誘導する。Liu et al. (GPS solution, 2019) では、2011年のM9.0東北地方太平洋沖地震の際に震源地と津波源地域から離れた電離層電子密度プロファイル調べ、レイリー波と津波波の下でより顕著なTIDを誘発できることを発見した。地震波の水平速度は約2-3 km/s、津波の水平速度は2-300 m/sで大きく異なるため、津波によるTEC擾乱と地震によるTEC擾乱を明確に区別できることを示した。項目(5)で開発した線形正則化電離圏トモグラフィーを用いて上述の2011年のM9.0東北地方太平洋沖地震に発震後の3次元構造を調査したところ、地震動の関しては水平方向に速度約2.3-3.3 km/s、津波に関しては水平方向に速度200-230 m/sで電離層中を伝搬する波動を検知できた。これは、昨年度の解析結果と調和的である。また、地震動に関しては垂直方向に450-600 kmの波長があり、津波に関しては垂直方向に約200-250 kmの波長があることも初めてわかった。特に津波に関しては、推定される背景の中性大気が北方向に49.3 m/sで移動することが初めて観測的に推定することができた。これらの数値は大気重力波の条件 (分散式) を満足する合理的な値となっており、津波による電離層の擾乱が大気重力波で発生したことを強く示唆するものである。今後の津波による大気重力波発生の理解に大きく貢献する結果を世界で初めて導出した (宋2022千葉大学大学院融合理工学府博士学位論文)。また、2022年トンガ火山噴火に関する電離圏データの解析にも着手した。

R4年度：津波によっても発生する移動性大気擾乱 (TAD) に関して、トンガの火山噴火に対する応答を解析している。トンガ火山の激しい噴火により、2022年1月15日04:05UTに地表近くにて顕著なTADが発生した。台湾に設置されたフラックスゲート磁力計、気圧計、潮位計およびイオノゾンデデータを使用して、台湾におけるこのTAD応答を調査した。地表付近の大気圧は11:30UTに上昇し始め、11:50UTにピークに達し、海面変動は12:00UTに始まり、14:00UT以降に顕著になった。電離層は12:00UTに突如上昇し、14:30UTに最高高度に達し、東向きの電場が出現したことを示唆した。磁場変化を調査したところ14:00-15:00UTの間に、TADによって生成された東向きのダイナモ電場と調和的な変化が検知された。津波によるTAD変動の解析にも有効な情報が得られたといえる。

R5年度：ニュージーランドや台湾上空のTEC異常変動について調査した。気象衛星ひまわり8号の画像は、噴火によって誘導された上層対流圏の擾乱が高度8.2 kmで水平速度約315 m/sのラム波モードで世界中に伝播していることを示している。ニュージーランドではラム波によって励起された津波前方電離層擾乱と、その後の太平洋を伝播する津波との関連を示唆している。第二の擾乱は、噴火の約2時間後に始まった。これはラム波の通過によって励起された内部重力波 (IGW) であると考えられる (Muafiry et al., JGR 2023, Liu et al., GRL 2023)。対流圏のラム波による擾乱 (TAD) が11:30UTに台湾に到達すると、98基の地上気圧計が11:50UT頃に気圧の上昇とピークを記録し、28基の検潮儀が14:30UT頃から17:30UT頃に海面変動の上昇と最大を記録し、イオノゾンデが14:30UT頃に電離層

が最高高度に達することを観測している。台湾の10台の磁力計で測定された地球磁場の水平成分の変化は、11:00-12:00UTの対流圏ラム波面到達時には、ほぼすべてトンガ火山の方向を指し、22:00-23:00UTには火山から遠ざかり、高度約130 kmの487 m/sのTAD（または熱圏ラム波面）も活性化していることを示唆している。世界の69個のINTERMAGNET磁力計の磁場変化の水平成分は、トンガ火山噴火によって引き起こされる対流圏と熱圏のラム波が非常に強力で、地球上に強烈なダイナモ電流と電場を誘発することを示唆することがわかった（Liu et al., GRL 2023）。

（4）イオノゾンデ統計解析

R1年度：近年、地震に先行する電離圏電子数異常の報告が多くされている。例えば、Kon et al., 2011では、日本上空における電離圏総電子数(TEC)は浅いM>6の地震1-5日前に正の有意相関があることを示した。しかし、GNSSデータは1990年代以降しか存在しない。そこで、1958年以降の長期にわたるデータの存在する地上の電離圏観測機器であるイオノゾンデに注目し、電離圏の最大電子密度

(NmF2)とその高度(hmF2)について地震との相関解析を行った。NmF2とhmF2について前15日間の中央値と四分位範囲(IQR)を用いて、観測値が中央値+1.5IQR、または中央値-1.5IQRを超える場合、異常と定義した。また、電離圏擾乱は地磁気擾乱によっても発生する。したがって、地磁気擾乱に起因する電離圏異常の特徴を調査し、そのデータを取り除いた。イオノゾンデから半径1000 kmおよび半径350 km以内で発生したM \geq 6、深さ \leq 40 kmの地震を解析対象とした。統計解析の手法はSuperposed Epoch Analysis (SEA)である。SEAの結果から、NmF2は半径1000 km以内では地震前6-10日間、半径350 km以内では地震前1-10日間の正の有意な異常を示した。hmF2については有意な異常はなかった。さらに、Molchan's Error Diagram (MED)解析を適用し、NmF2の前兆性の評価を行った。MED解析を最も有意な異常を示した5日カウントで6-10日前、1日カウントでの7日前に適用した。その結果、どちらとも前兆性を示す結果を得た。

R2年度：本報告のULF磁場データの地震前兆性に関する統計解析を情報通信機構の国分寺イオノゾンデ観測データ(1958年1月1日-2019年9月30日)に実施した。NmF2異常が有意に発生する地震の条件(震源の深さ、マグニチュード、震央距離)について統計解析(Superposed Epoch Analysis)を行い調査した。また、NmF2異常が地震に対し最も前兆的となる条件をMolchan's Error Diagram解析を用いて調査した。その結果、NmF2異常は地震との間に有意相関があり、かつ震央距離依存性、震源の深さ依存性、マグニチュード依存性があることがわかった。また、NmF2異常はより震央距離が近い地震ほど、より震源の深さが浅い地震ほど、よりマグニチュードが大きい地震ほど前兆的となることがわかった。特に、震源の深さ20 km以下、震央距離200 km以内、マグニチュード6.4以上の地震を対象とした場合、NmF2異常の10日後に対象の地震の約46%で予測に成功するという結果が得られた。これらの結果は電離圏電子数の異常変動には地震前兆の情報が含まれていることを示唆している。引き続き詳細な調査を実施中である(三石他、令和3年1月8日日本大気電気学会研究発表会online)。

R3年度：情報通信機構(NICT)の国分寺イオノゾンデ観測データの解析を実施するとともに、GPSデータと同様に日々NICTにて公開されるデータを用いてリアルタイム解析が実施できるようにした。NmF2異常が有意に発生する地震の条件(震源の深さ、マグニチュード、震央距離)について、海域で発生する地震と陸域で発生する地震に関する統計解析(Superposed Epoch Analysis)を実施した。対象とした地震は1958年1月1日~2019年9月30日に発生した、国分寺観測点から震央距離350 km以内、マグニチュードM \geq 6.0、震源の深さD \leq 40 kmの地震である。対象の地震の震央分布と地震発生日数は海域71日、陸域19日であった(全解析日数は22553日)。海域地震に関しては地震に6-15日先行して、陸域地震に関しては地震に1-20日先行してNmF2異常が有意に発生することがわかった。対象の地震発生日数が大きく違うため単純には比較できないが、震央が陸上に位置する地震の検知率は9/19で約47%、海上に位置する地震の検知率は19/71で約27%となり、海域地震より陸域地震の方がよりNmF2異常の発生率が高いと考えられることがわかった。また、従来得られていた有意相関や前兆的変動は、地震カタログをシャフルすると消失することを確認した。また、NICTのイオノゾンデデータは国分寺の他に北海道・稚内、鹿児島・山川、沖縄・大宜味にあり、これらのデータ解析にも着手した。

R4年度：情報通信機構(NICT)の国分寺イオノゾンデ観測データの解析を実施するとともに、GPSデータと同様に日々NICTにて公開されるデータを用いてリアルタイム解析を継続して実施している。

R5年度：情報通信機構（NICT）の国分寺イオノゾンデ観測データの解析を実施するとともに、GPSデータと同様に日々NICTにて公開される4カ所のデータを用いてリアルタイム解析を継続して実施している。

（5）電離圏トモグラフィーによる電離圏電子密度変動の可視化と変動予測

R1年度：地震に先行する電離圏電子数の発生物理メカニズムは未解明である。物理機構を推定するために、電離圏電子分布の3次元構造を理解することは重要である。Hirooka et al.,2012では、擾乱電離圏に適用可能な、ニューラルネットを用いた非線形電離圏トモグラフィーを開発し、GEONETデータに適用してきた。しかし、この手法は夜間にTECデータのSN比が低下すると電子密度分布の推定が不安定となる欠点があった。地震先行電離圏異常は昼夜問わず継続的に発生している。したがって、電離圏電子分布の継続的な再構成が可能な電離圏トモグラフィーの開発に着手した。本研究では、Phillips-Tikhonov正則化法とカルマンフィルタを適用した2種類の異なる手法で行う。前者は初期モデルフリー、後者はIRIモデルを初期モデルとする。現在はアルゴリズム有効性の検証中である。

R2年度：Phillips-Tikhonov正則化法およびカルマンフィルタを用いた電離圏トモグラフィーの開発中である。

R3年度：電離圏変動の理解には電離圏電子密度の3次元分布の把握が必要であるが、電離圏擾乱時にこの3次元密度分布を適切に再構成することが可能なトモグラフィー手法はまだ開発されていない。そこで、まず、電離圏電子密度の3次元分布について、従来のカルマンフィルタの計算要件を軽減するために、再帰的な更新プロセスを必要としない、時間に依存しない簡略化されたカルマンフィルタ（SKF）を採用したトモグラフィー手法を開発した。この手法は初期値依存性があり、電離圏電子分布が静穏な場合は、実際に近い電子密度分布を再構成することがわかったが、擾乱時には再構成精度にやや問題があることがわかった（Song et al., J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 2021）。

次に従来の線形正則化法を改良した手法を考案した。従来の方法では、対象とする空間ボクセルに対して東西南北上下の6方向への変動に着目して拘束条件をかけているが、この方法では擾乱時には適切な結果が得られていない。本研究では、この拘束条件を上下の2方向に限ることにより、変動の大きい擾乱時の電離圏電子密度分布も再現可能な手法を開発した。この手法の再構成精度の評価を、国際標準電離圏モデル（IRI）による静穏時の電離圏電子密度や、これに人工的な局所電子密度擾乱を付加した場合において行い、その有効性を担保した（Song et al., JGR SP 2021）。次に、実際のデータを用いて、日本付近の典型的な電離圏電子密度擾乱である大規模・中規模伝搬性電離圏擾乱や、近年わかってきた台風や地震動・津波によって励起された電離圏擾乱を再構成し、これらの電子密度擾乱の3次元構造を解析・考察した。その結果、大規模・中規模伝搬性電離圏擾乱は電離圏不安定、地震動は音波、台風や津波は大気重力波によって電離圏擾乱が励起されていることを示した（宋2022千葉大学大学院融合理工学府博士学位論文）。従来の手法では不可能であった電離圏密度擾乱の3次元構造について、観測に基づいて現実的な空間分布を再構成したことは意義深く、今後、地震や津波に関連する影響の理解や把握に大きく貢献すると期待される。具体的には、津波発生領域の海面変動の検知による新しい津波緊急地震速報の開発や、地震前兆的電離圏変動の理解や物理機構の解明・評価である。

R4年度：電離圏変動の理解には電離圏電子密度の3次元分布の把握が必要であるが、電離圏擾乱時にこの3次元密度分布を適切に連続的に再構成することが可能なトモグラフィー手法はまだ開発されていない。そこで、昨年度線形正則化法を改良した手法を開発した。従来の方法では、対象とする空間ボクセルに対して東西南北上下の6方向への変動に着目して拘束条件をかけるが、この方法では擾乱時には適切な結果が得られなかった。この拘束条件を上下の2方向に限ることにより、変動の大きい擾乱時の電離圏電子密度分布も再現可能にしたことが特徴である（Song et al., JGR SP 2021）。近年わかってきた台風によって励起された電離圏擾乱について開発したトモグラフィーを用いて再構成したところ、擾乱は大気重力波によって励起され、台風の強さだけでなく、中性風の重要性（中性風速度が10-20 m/sで弱い条件であること）も初めて観測学的に示した（Song et al., JGR SP 2022）。2011年東北地方太平洋沖地震に関しても開発した手法を適用したところ、地震動や津波による電離圏変動の高度方向の構造から、前者は音波、後者は大気重力波によって励起されていることが世界で初めて明らかとなった。また、地震前兆的振る舞いについては、震央上空250 kmを中心に電

子密度が減少する領域が、3月8-9日に20時間以上存在し、その周囲では電子密度は増加していることがわかった。この結果は、非線形トモグラフィーによるLiu et al., Wiley 2018の結果 (doi: 10.1002/9781119156949.ch17) と同様であるが、夜間でも安定に再構成でき、連続的に可視化できたことが重要である。

R5年度：電離圏変動の理解には電離圏電子密度の3次元分布の把握が必要であるが、電離圏擾乱時にこの3次元密度分布を適切に連続的に再構成することが可能なトモグラフィー手法の開発と準リアルタイム解析手法を開発中である。時空間分解能の向上と精度と計算時間を考慮した調査を行っている。アルゴリズムの基本は昨年度までに開発した手法で、対象とする空間ボックスに対して東西南北上下の6方向への変動に着目して拘束条件をかけるかわりに、上下の2方向（地磁気方向）に限ることにより、変動の大きい擾乱時の電離圏電子密度分布も再現可能にしている (Song et al., JGR SP 2021)。

D. 大気圏熱赤外異常解析 気象衛星ひまわりデータの解析 イタリアとの共同解析

本研究成果をまとめたN. Genzano, C. Filizzola, K. Hattori, N. Pergola, and V. Tramutoli, Statistical correlation analysis between thermal infrared anomalies 1 observed from MTSATs and large earthquakes occurred in Japan (2005 - 2015), J Geophys. Res. SE, 126, e2020JB020108, 2021, doi/10.1029/2020JB020108 がJGR2021-2022のtop cited articleに選出された。2023年12月現在top10%論文となっている。

R2年度：近年、さまざまな種類の非地震学的パラメータの異常な変動と地震の発生との間の時空間関係が報告されることがよくある。ここでは大気パラメータの異常変動と地震発生との間の時空間関係を統計的に調査した。具体的には衛星熱異常 (SSTA) で、イタリアのTramutoliのグループの手法について調査・解析を実施した。彼らの手法はロバスト衛星技術 (RST) データ分析手法と言われている。この手法を日本の気象衛星MT-SAT1R、MT-SAT2 (ひまわり6-7号) データに応用した。SSTA解析に使用したデータは、2005年6月から2015年12月までの11年間の夜間衛星画像 (波長10.8 μm , 00:30LT) である。解析の概要は (1) SSTA検知には、RSTアプローチとRETIRAインデックスを用いる (Tramutoli et al. 2005)、(2) SSTAと $M_{JMA} \geq 6$ の日本の地震との相関分析は、空間、時間、マグニチュードに関する適切な制約を適用して実行した。解析結果のハイライトは (a) 11年間の観測期間中にわずか29のSSTAが発生、(b) 18のSSTA (つまり、62%) は、地震との見かけの時空間関係で発生、(c) そのうち13個は地震の前に発生したことである。また、Molchan' s Error Diagram解析結果は、「RSTベースの衛星熱異常」と地震発生との偶然では説明できない相関関係があることがわかった。特に、 $M_{JMA} \geq 6.5$ の地震の場合、ランダムな推測に対して最大4.3の確率利得があることがわかった (Genzano et al., JGR SE 2021)。

R3年度：昨年度himawari6-7号を衛星熱赤外温度異常と地震との統計的有意相関とROC解析を用いた前兆性の評価を実施し、地震発生との間の偶然では説明できない相関関係があり、 $M_{JMA} \geq 6.5$ の地震の場合、ランダムな推測に対して最大4.3の確率利得があることを報告した (Genzano et al., JGR SE 2021)。Himawari8-9号についても同様な解析に着手した。

R4年度：一昨年度Himawari6-7号を衛星熱赤外温度異常と地震との統計的有意相関とROC解析を用いた前兆性の評価を実施し、地震発生との間の偶然では説明できない相関関係があり、 $M_{JMA} \geq 6.5$ の地震の場合、ランダムな推測に対して最大4.3の確率利得があることを報告した (Genzano et al., JGR SE 2021)。Himawari8-9号については、バンドや時間分解能も上昇したことから、2018年新燃岳の溶岩噴出を例にその性能の調査と雲判別の精緻化・高度化を実施している。

R5年度：昨年度に引き続きひまわり8-9号については、2018年新燃岳の溶岩噴出を例に、火山活動に伴う温度異常、特に溶岩流出や溶岩ドーム形成に関連する温度異常を検出するアルゴリズムの開発を行っている。具体的には、地殻変動観測衛星ひまわり8号に搭載された高時間分解能センサAdvanced Himawari Imager (AHI) の赤外データを用いて、2018年の新燃岳火口周辺の地表温度の時空間統計解析を行った。雲判別手法や地表面温度変化の特性について、精緻化・高度化した結果、夜間だけでなく太陽光のある日中も含めた10分間サンプリングの輝度温度データを用いて、最初の火山噴火の数時間前に高い特異点異常を検出できることを示した。ひまわり8号の輝度温度データが火山溶岩活動の

監視や溶岩流出の迅速な検知に有効であることが示唆された（論文投稿中）。

E. 中国の孔内歪計データの解析（中国・吉林大学との共同研究）、および地震統計解析（中国南方科技大学との共同研究）

R1年度：大地震発生の前にb値が減少することが数多く報告されている。しかし、 M_c の決め方やb値の推定誤差など、b値変動について定量的に評価することは困難であったため、これらの点を改善するために、(1)GR則に従う最小のMである M_c の時間変化を考慮したb値解析、(2)地震活動の参照期間と対象期間のb値の差異を赤池情報量基準を用いて客観的に評価するパラメータP値を導入したb値解析、を併用する手法を開発した。ここでP値について簡単に説明する。モデルの差の有意性は $\Delta AIC = AIC_1 - AIC_2$ を用いて評価でき、 $\Delta AIC \geq 2$ となれば、モデル1とモデル2は有意に違うとされる。本研究では、地震参考期の地震をブートストラップ法でリサンプルし、地震参照期の代表b値を1000個求める。対象期間のb値、参照期期の代表b値との ΔAIC 値をそれぞれに算出し、 ΔAIC が2以上になる個数をカウントし、その割合をP値（ $P_{\Delta AIC \geq 2}$ ）と定義した。つまり、Pが大きいほど、参照期間と対象期間のb値の違いが大きい判断する。

開発した手法を2003年十勝沖地震M8.0と2011年東北沖地震M9.0の海溝型巨大地震と2008年中国四川地震M8.0と2016年熊本地震M7.3の内陸巨大地震に適用し、事例解析を行った。その結果、海溝型地震について、両者とも地震の数か月～数年前からb値の継続的な低下が見られ、本震の1～3か月前にP値が著しく上昇することがわかった。内陸型地震については、四川地震では、b値の長期的な低下がみられ、震源域におけるP値が地震の3か月前から大きな上昇し、熊本地震では、b値減少は解析期間中に数回あり、P値の上昇とb値減少が同時に発生した回数は2回で、そのうち1つは本震の3か月前から、もう1つは阿蘇山の火山活動による火山性地震による擾乱であることがわかった。すなわち、参照期間との差異を表すP値の増加が地震活動の変化の客観的な変化を示し、海溝型地震、内陸地震とも数か月前からb値の減少とP値の増加を示すことがわかった。

R2年度：中国・四川省－雲南省の龍門山断層帯の南西端にある6つのYRY-4孔内ひずみ計からのデータを分析して、構造ひずみの変化と2013年8月のLushan地震との関係を調査した。適応カルマンフィルタを用いて気圧、潮汐、水位の変化によるひずみ応答を除去して、非構造的擾乱を優先的に分離する状態空間モデルを開発した。既知の変動を除去した歪変動と近似ネグントロピー（ApNe）とb値が導入され、局所的な地震活動と比較された。Lushan地震に最寄りの観測点とさらに2つの観測点では、地震の6～4か月前にほぼ同時に短期間のApNe異常を記録した。またその領域のb値も同時に低いことを示した。孔内歪計からうまく気圧、潮汐、水位の変化に対応する応答を除去できれば、地震前兆的な変動を検出できる可能性があることを示した（Yu et al., IEEE access 2021）。

同上の中国・四川省－雲南省の龍門山断層帯の孔内歪計網の2011-2014年のデータを用いて、大地震に先行する認識可能な歪データの異常変動があるかどうかを調査した。本研究では6か所の孔内歪計データを調査した。各サイトが受信する地震エネルギー E_s を用いて、地震イベントを選択した。各歪計データの相関度を調査するために、マルチチャンネル特異スペクトル解析（MSSA）を用いて、周期成分、地震に関連する成分、ノイズ成分等に分解し、各歪計データの相関度を決定した。ネットワーク結合度数を相関度の高い観測点の組み合わせ数と定義し、全観測期間中の歪データのネットワーク結合度数の変化を調査し、上位20%を異常と定義し、地震との相関を調査した。その結果、ボアホール歪ネットワークの結合度異常と局所的な地震活動（ $E_s > 105$ ）が相関していることを示した。特に、 $E_s > 107$ の13個の地震のうち11個でネットワーク結合度異常が増加していた。また、歪計ネットワーク結合度の強化が規模の大きい地震の前30日以内に出現する傾向が高いこともわかった。MSSAを用いた歪計ネットワークの結合度解析は、地震発生プロセスの理解に役立つ可能性がある（Yu et al., Entropy 2020）。歪異常のモニタリングと局地的な大地震との相関関係が確認されたので、ROCを用いて、歪データに地震前兆情報が含まれるかどうかを評価した。ここでは2010年から2017年の孔内歪計データを使用した。歪計ネットワークは歪計データの地震に関連する異常検知に関する先行研究のEntropy 2020やIEEE Access 2021よりも少し広範囲になる。先行研究同様に歪データのネットワーク異常を調査し、異常を検知した観測点の数 N_{ano} と地震に対する警告時間の長さ T_{alm} を用いたROC曲線によって評価した。その結果、最適な予測は14日以内に $N_{ano} \geq 7$ とし、 $T_{alm} = 1$ 日の場合であることがわかった。また、規模が大きい地震ほど、予測結果がよいことがわかった。ROC調査により、歪データに大地震に関連する先行情報が含まれていることを示した（Yu et al., Remote Sensing 2021）。

R3年度：2008年汶川地震（M8.0）の主破砕帯に沿った地域のb値の時間変化について調査した結果を論文にまとめた（Xie et al., Entropy 2022）。それとともに国内の地震（2011東北地震や2018熊本地震）への応用を開始した。ブーストラップ法と赤池情報量規準（AIC）を組み合わせて、時間変化におけるb値の変化の有意水準を示すパラメータP（ $\Delta AIC \geq 2$ ）値を導入していることが特徴である。その結果主破壊帯のb値は長期的に減少傾向を示していることがわかった。次に初期断裂が始まる小さな領域に注目すると、2008年汶川地震の約3ヶ月前に初期破壊領域でb値が大きく変化しており、かつP値も上昇しており、b値が大地震の前兆現象を監視・検知する潜在的な能力を有していることが示された。

R4年度：新たに国内のGNSSデータを用いて（4観測点の対角線の交点における疑似歪を算出）、歪計測の疑似ネットワークを構成し、そのネットワークの関連度の調査研究に着手した。具体的には2011年東北地震や2018年熊本地震を対象とし、国土地理院のF3解を用いている。b値変動やその参照区間との有意な差を示すP値などの地震活動との比較（Xie et al., Entropy 2022）も同時に行っている。

R5年度：前年度に引続き、b値解析を実施している。2024年能登地震や関東地域のb値解析やP値解析対象地域を増加した。また、新たに国内のGNSSデータを用いて（4観測点の対角線の交点における疑似歪を算出）、歪計測の疑似ネットワークを構成し、そのネットワークの関連度の調査研究を2011年東北地震、2018年熊本地震を対象に実施している。

F. VLF帯およびLF帯電磁放射の解析

R5年度：本研究では雷放電の同定が重要である。そこで、近年世界的に展開されている超低周波（VLF）電磁波受信機で測定された空電から雷放電の位置を特定するためのボランティアベースのネットワークであるBlitzortung.orgについて、日本における雷放電の検出効率と位置精度を評価した。その結果、関東など受信局が密集している地域では十分な能力があったが、受信局が少ない地域では十分に検知できていないことがわかった。関東圏の対地雷に対するBlitzortungの最新の検出効率は約90%であり、平均位置精度はおおよそ5.6 kmであることがわかった。VLFは長距離伝播するのでBlitzortungの結果には注意する必要がある（Kamogawa et al., Atmosphere 2023）。

LF帯の地震前電磁放射については多くの報告があるが、その多くは狭帯域パルスの強度に関するものであり、発生源の位置に関する議論は少ない。そこで、我々は、LF帯広帯域干渉計の開発を進めている。これまでに、干渉計素子の開発が終了し、素子による連続観測を行っている。波形解析の予備的な結果、対地雷によるLF/VLF波形信号を正常に記録することがわかった。また、上記の対地雷起源の波形とは異なるLF帯信号も検出した。この信号は雲内放電である可能性もあるが、地震に関連している信号である可能性も棄却できないことがわかった（太田らJ. Atmos. Electr. 2023）。

G. 国際ワークショップ等の企画

COVID19感染症の影響で国際ワークショップ等は予定通りに開催することができなかった。International Workshop on Earthquake Preparation Process (IWEP) はR2-R4年の3年間開催することができず、R5年に4年ぶりの開催となった。以下に開催状況を示す。

令和元年度：

a. JpGUにおける国際セッションInterdisciplinary studies on pre-earthquake processes（幕張メッセ、2019年5月30日、講演数：口頭12件、ポスター8件）

b. 6th Int'l Workshop on Earthquake Preparation Process（2019年5月31日-6月1日、千葉大学、講演数：口頭31件、ポスター16件、参加者約70名（海外からの参加30名））

令和2年度：

a. JpGUにおける国際セッションInterdisciplinary studies on pre-earthquake processes（幕張メッセ、2020年7月16日、Online開催、講演数：口頭5件、ポスター17件）

b. 7th Int'l Workshop on Earthquake Preparation Process（千葉大学開催予定）は中止。

令和3年度：

a. JpGUにおける国際セッションInterdisciplinary studies on pre-earthquake processes（2021年6月6日、Online開催、講演数：口頭15件、ポスター7件）

令和4年度：

a. JpGUにおける国際セッションInterdisciplinary studies on pre-earthquake processes（2022年5

月22日にhybrid開催、講演数：口頭12件、ポスター8件)

令和5年度：

a. JPGU における国際セッション Interdisciplinary studies on pre-earthquake processes (幕張メッセ、2023年5月22日、講演数：口頭15件、ポスター12件)

b. 7th Int'l Workshop on Earthquake Preparation Process (千葉大学、2023年5月24日-25日、講演数：口頭31、ポスター16件、参加者約70名(海外からの参加35名))

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地震に先行する様々な電磁気現象が報告され、そのうちのいくつかの観測パラメータについては統計的な有意性が示唆される論文が出版されるようになってきた。本事業では地震に関連して発生する電磁気的な現象について、地震との有意相関解析や前兆性を評価するためのROC解析等に基づいて地震活動の短期予測に資する研究を中国、台湾、米国、イタリア、ロシア等の研究者とも協力し、国際的に実施してきた。ULF電磁場変動や電離圏電子数変動、気象衛星ひまわりの衛星熱赤外データの解析結果は統計的には地震前兆的であることが示唆されつつある。また、電離圏電子変動の直前変動についてはその変動の規模と地震の規模等との法則があることを示唆するデータが蓄積されつつある。地震動や津波、規模の大きな火山噴火に起因する電離圏電子数変動は物理機構まで解明されつつある。

本事業において、地球磁場変動や電離圏電子数変動などの地球物理観測データの統計解析により地震との有意相関性や地震前兆性を示す現象の存在が明らかとなってきた一方、単独の現象の解析では、現実的な予測の点からは合格点には至らないこともわかってきた。そこで今後は、本事業の取組みに加えて、機械学習(AI)やデータ同化などの技術を用いて、地球観測ビッグデータの波形解析・特徴量分析を実施し、地震準備過程を精度よく把握・理解するとともに、地震前兆に関する情報をタイムリーに必要な品質で精度よく抽出し、マルチパラメータを入力とするデータ駆動型の地震発生確率数理モデルの構築に資する研究を実施する必要がある。具体的には点過程を仮定したEpidemic Type Aftershock Sequence (ETAS)を手本とする発生確率予測モデルにさまざまな地震前兆現象を組込んだ新しい地震予測手法の確立を目指す。有望な予測パラメータ調査も引き続き実施し、特に電離圏電子数変動の準リアルタイム解析・可視化システムの開発を行う。地中の応力場の変動と前述の電磁気学的パラメータの相関関係を解明する必要があり、ラドン散逸量(地中フラックス)のネットワーク観測や歪のリアルタイム解析技術の開発を実施する必要がある。また自前の観測データ以外に、前述のモデルに組み込む既存の他機関データ(GNSS-TEC等)の活用や、引続き中国、台湾、米国、イタリア、ロシア、インド等の研究者とも協力し、国際的に短期地震予測研究を推進する必要がある。さらに、電磁気学的な先行現象発現メカニズムについて、室内実験等でいくつかの仮説について観測量を定性的・定量的に説明できるかについて検証する必要がある。

また、上記で目指す複数の地球物理学的前兆情報を組込んだ包括的な地震予測確率数理モデルの構築ができ、その短期予測の効果が認定されれば、南海トラフ沿いの巨大地震や首都直下地震の被害軽減への直接的に間接的に担当・貢献でき、その災害の軽減への貢献の観点からの社会的インパクトは大きいと考えられる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

・論文・報告書等

Liu J.-Y., T.-H. Kao, T.-C. Liu, B.-S. Huang, P.-H. Lee, Y.-Y. Sun, C.-H. Chen, K. Hattori, P.-H. Liao, I.-T. Lee, C.-L. Su, C.-T. Terng, and T.-S. Huang, 2023, Magnetic field signatures of tropospheric and thermospheric Lamb modes triggered by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption, *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2023GL105393, doi:10.1029/2023GL105393, 査読有, 謝辞無
太田悠一郎・三浦健伸・吉野千恵・服部克巳・今住則之, 2023, 容量性円形平板アンテナによる地震関連LF帯電磁放射の波形観測システムの開発, *J. Atmospheric Electricity*, Accepted, 査読有, 謝辞有
Liu X., P. Han, K. Hattori, H. Chen, J. Chen, L. Jiao, J. Tu, Y. Lei, and J. Zhao, 2023, Seasonal Variations of Sq Current System in Different Longitudinal Sectors and Solar Activities, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 129, e2023JA031956, doi:10.1029/2023JA031956, 査読有, 謝辞無
Liu J.-Y., X. Shen, F.-Y. Chang, Y.-I. Chen, Y.-Y. Sun, C.-H. Chen, S. Pulnits, K. Hattori, D. Ouzounov, V. Tramutoli, M. Parrot, W.-S. Chen, C.-Y. Liu, F. Zhang, D. Liu, X.-M. Zhang, R. Yan, and Q. Wang, 2023, Spatial analyses on pre-earthquake ionospheric anomalies and magnetic

storms observed by China seismo-electromagnetic satellite in August 2018, *Geoscience Lett.*, 11(4), doi:10.1186/s40562-024-00320-2, 査読有, 謝辞無

Bagiya, M. S., K. Heki, and V. K. Gahalaut, 2023, Anisotropy of the near-field coseismic ionospheric perturbation amplitudes reflecting the source process: The 2023 February Turkey earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2023GL103931, doi:10.1029/2023GL103931, 査読有, 謝辞無

Muafiry, I. N., D. D. Wijaya, I. Meilano, and K. Heki, 2023, Diverse ionospheric disturbances by the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption observed by a dense GNSS array in New Zealand, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 128, e2023JA031486, doi:10.1029/2023JA031486, 査読有, 謝辞無

Tiwari, S. H., M. S. Bagiya, S. Maurya, K. Heki, and A. P. Dimri, 2024, On the role of volcanic plume heights in the excitation of free oscillations of the solid earth and the atmosphere: case study, *Adv. Space Res.*, 73(6), 2988-2998, doi:10.1016/j.asr.2024.01.001, 査読有, 謝辞無

Heki, K., 2024, Atmospheric resonant oscillations by the 2022 January 15 eruption of the Hunga-Tonga Hunga-Ha'apai volcano from GNSS-TEC observations, *Geophys. J. Int.*, 236, 1840-1847, doi:10.1093/gji/ggae023, 査読有, 謝辞無

Heki, K., M. Nakatani, and W. Zhan, 2024, Ionospheric changes immediately before the 2008 Wenchuan earthquake, *Adv. Space Res.*, in press, doi:10.1016/j.asr.2024.02.011, 査読有, 謝辞無

Diba D., M. Uyeshima, M. Ichiki, S. Sakanaka, M. Tamura, Y. Yuan, M. Gresse, Y. Yamaya and Y. Usui, 2023, On a large magmatic fluid reservoir oblique to the volcanic front in the southern part of NE Japan revealed by the magnetotelluric survey, *Earth Planets Space*, 75(146), doi:10.1186/s40623-023-01899-0, 査読有, 謝辞無

Varotsos P. A., N. V. Sarlis, E. S. Skordas, T. Nagao, M. Kamogawa, E. L. Flores-Márquez, A. Ramírez-Rojas, and J. Perez-Oregon, 2023, Improving the Estimation of the Occurrence Time of an Impending Major Earthquake Using the Entropy Change of Seismicity in Natural Time Analysis, *Geosciences*, 13(8), 222, doi:10.3390/geosciences13080222, 査読有, 謝辞無

Kamogawa M., T. Suzuki, H. Fujiwara, T. Narita, E. Wanke, K. Murata, T. Nagao, T. Kodama, J. Izutsu, A. Matsuki, N. Tang, and Y. Minamoto, 2023, Characteristics of the Blitzortung.org Lightning Location Catalog in Japan, *Atmosphere*, 14(10), 1507, doi:10.3390/atmos14101507, 査読有, 謝辞無

Varotsos P.A., N.V. Sarlis, E.S. Skordas, T. Nagao, and M. Kamogawa, 2023, Natural time analysis together with non-extensive statistical mechanics shorten the time window of the impending 2011 Tohoku M9 earthquake in Japan, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 125, 107370, doi:10.1016/j.cnsns.2023.107370, 査読有, 謝辞無

Kamogawa M., T. Suzuki, Y. Minamoto, T. Nagao, T. Kodama, H. Fujiwara, and T. Kudo, 2023, Continued atmospheric electric field measurements following cessation of the long-term water dropper potential equalizer at Kakioka, Japan, *Geosci. Data J.*, 00, 1-9, doi:10.1002/gdj3.224, 査読有, 謝辞無

Mezentsev A., A. P. Nickolaenko, A. V. Shvets, Yu. P. Galuk, A. Yu. Schekotov, M. Hayakawa, R. Romero, J. Izutsu, and I. G. Kudintseva, 2023, Observational and Model Impact of Tonga Volcano Eruption on Schumann Resonance, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 128(7), e2022JD037841, doi:10.1029/2022JD037841, 査読有, 謝辞無

Basak T., Y. Hobara, S. Pal, T. Nakamura, J. Izutsu, and T. Minatohara, 2023, Modeling of Solar Eclipse effects on the sub-ionospheric VLF_LF signals observed by multiple stations over Japan, *Adv. Space Res.*, 73, 736-746, doi:10.1016/j.asr.2023.09.063, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Heki, K. (Invited), 2023, Recent topics in ionospheric seismology and volcanology, IUGG General Assembly, IUGG23-0316

Heki, K. (Invited), 2023, Recent topics on the ionospheric changes immediately before large earthquakes, IUGG General Assembly, IUGG23-1037

Heki, K. (Invited), 2023, What happened in the sky immediately before and after the 2008 Wenchuan earthquake?, TibXS 11th meeting, Dali, China

Heki, K. (Invited),2023,Ionospheric seismology and volcanology,URSI General Assembly
Heki, K., M. Bagiya, and I. N. Muafiry (Invited),2023,Ionospheric disturbances before and after the 2023 February earthquake in Turkey from GNSS-TEC observations,Int. Symp. Satellite Navigation (ISSN 2023), Jiozuo, China
Motojima K. and Y. Goto,2023,Pre-earthquake phenomena in MF radio band propagation around sunset time,Japan Geoscience Union Meeting 2023,MIS04-P10
Motojima K. and Y. Goto,2023,Statistical association of earthquakes and MF radio wave propagation anomalies,7th International Workshop on Earthquake Preparation Process – Observation, Validation, Modeling, Forecasting - (IWEP7), Chiba, Japan
新井海斗・本島邦行,2023,見通し内VHF帯複数放送波の電波伝搬異常と地震発生との関連性解析,電気学会計測研究会,東京都千代田区,IM-23-020
後藤悠希・本島邦行,2023,MF帯放送波の受信可能時間遅延と地震発生との関連性解析,日本地震予知学会 第10回学術講演会,東京都調布市,23-03
櫻井豪流・本島邦行,2023,VHF帯放送波の電波伝搬路に対する伝搬異常を伴った地震の分布,日本地震予知学会 第10回学術講演会,東京都調布市,23-04
山本真行 (Invited),2023,インフラサウンド帯域の開拓と地域防災への応用,IEEE AP-S Kansai Joint Chapter 特別講演会 / 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会 特別講演会,高知県高知市
Yamamoto M. (Invited),2023,Infrasound, inaudible over-pressure waves coupled with many kinds of geophysical events in the atmosphere,TSU (Taiwan Space Union) PRISM Seminar, Online (Taiwan)

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

電磁気学的な各種先行現象の総合的研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

服部克巳（千葉大学大学院理学研究院）,佐藤利典（千葉大学大学院理学研究院）,津村紀子（千葉大学大学院理学研究院）

他機関との共同研究の有無：有

橋本武志（北海道大学大学院理学研究院）,日置幸介（北海道大学大学院理学研究院）,中谷正生（東京大学地震研究所）,上島誠（東京大学地震研究所）,小河勉（東京大学地震研究所）,吉村令慧（京都大学防災研究所）,梅野健（京都大学大学院情報学研究所）,松島健（九州大学大学院理学研究院）,相澤広記（九州大学大学院理学研究院）,山中千博（大阪大学）,長尾年恭（東海大学海洋研究所）,織原義明（東京学芸大学）,鴨川仁（静岡県立大学）,本島邦行（群馬大学）,井筒潤（中部大学）,山本真行（高知工科大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：千葉大学大学院理学研究院

電話：043-290-2801

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：服部克巳

所属：千葉大学大学院理学研究院

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

巨大地震のリスク評価の不確実性に関するパラダイム構築の推進

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

イ. 津波の事前評価手法

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測手法

イ. 津波の即時予測手法

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

火山

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) 関連研究分野との連携強化

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 令和5年度の計画の概要：

【提案の背景】標準的な地震リスク評価手法では、震源・波動伝播・地盤増幅・建物応答・直接的被害・社会的影響に関する研究分野からの知見を統合して、リスクが評価されるが、各研究分野に対応するそれぞれのモジュールに存在する複数モデルの組み合わせることでリスクカーブ群が得られることになる。すなわち、地震リスク評価には、モデルそのもののばらつきのみならず、モデルの相違によるばらつきが伴っている。2022年度までにはこの点について検討するために、各研究分野に存在する多くのモデルをプラットフォームに組み込み、系統的に地震リスクを評価した。その結果、現在一般的に行われている地震リスク評価には非常に大きなばらつきを内包していることを示した。

【震源過程】プレート間巨大地震の強震動生成域に対する距離減衰の特徴をまとめる。プレート間巨大地震の震源像を推定するために、プレート間での地震反射波に着目し、波動論的アプローチで巨大

地震の発生するプレート間の状態を推定し、震源像の予測に繋げることを試みる。

【深部地盤・伝播経路】2次元的ではあるが主に海洋性モホ面より浅部を高い精度と解像度で求めることができる人工震源構造調査で得られるP波速度構造と、精度・解像度のある程度犠牲にしつつもPおよびS波速度構造を3次元的に求めることができるトモグラフィー解析の結果、さらにはプレート境界やモホ面などに代表される構造不均質境界面の形状を3次元で連続的に把握できるレシーバー関数解析に関して、新しい結果を含めてとりまとめ、統合的な3次元地殻構造の構築を行う。また最近になって、西南日本における3次元的な地震波の減衰構造も複数のモデルが提出されつつあり、これらを比較検討しつつ、震源を仮定した場合の地震波伝播過程における減衰量を見積もることも可能となる。このような地震波速度・減衰構造は、断層破壊伝播メカニズムおよび断層境界の形成要因の解明、さらに地震波伝播シミュレーション計算のインプットとして利用され、災害軽減を目的とした研究に貢献する。

【強震動予測】南海トラフをはじめプレート境界で発生する巨大地震は、震源域で発生した地震動や津波が日本列島の広範囲に到達し非常に大きな被害につながる事が考えられる。そのため巨大地震のリスク評価においては、震源域による影響、波動の伝播による影響、観測点近傍の構造による影響等について調べる必要がある。

【浅部地盤構造】現状の土構造物の地震リスク評価において、解析モデルにおける上記のような地盤物性の不確実性の影響を考慮に入れて、検討がなされることは（特に設計実務において）稀である。つまり、不確実性を無視する地盤災害の予測法が、不確実性を考慮した場合と比べて危険側の評価となっている可能性も否定できない。このため、液状化の可能性のある地盤上に構築された直接基礎建物を対象に、地盤物性の空間的不均質性を考慮した有効応力解析を実施する。

【構造物被害予測】近年のフラジリティ曲線の検討例とともに、地震被害ではなく、非線形地震応答解析を援用したフラジリティ曲線の作成方法の開発についても、その可能性を検討する。また、目視調査に代わる新たな方法として、①機械学習を用いた構造被害程度把握の自動化、②ドローンなどの飛行体を用いた広域被害把握、③構造物に設置したセンサーを用いた被害把握の手法に着目し、その概要と実現可能性について調査を行う。災害対応策として採用するためには、その精度評価が重要となるため、特に精度に関する情報の整理を行う。

【リスク評価高度化】これまで高精度姿勢位置情報が付与された写真と緯度経度高度によって表現された点群データや3次元ポリゴン等を、幾何学的情報や特徴点に関する情報などを用いて多角的に照合することにより、撮影された写真にどの建物が写っているのか、あるいは建物のどの部位が写っているのかを自動的に判別する手法を開発してきた。本研究ではこの手法を用いて、異なるスケールのデータを関連付ける。検証用データには、本研究グループがこれまでに撮影・取得してきたデータ（戸建て住宅2軒。UAVによる空撮写真と3Dスキャナによる高密度点群データ）を用いる。

【プラットフォーム高度化】モジュールごとのモデルの数やばらつきが採用するモデルに依存することから、複数モデルを考慮したときのモジュール間のばらつきの違いを公平に評価する統一的な手法が確立されていない。また、より詳細な地震動・リスクの計算手法を考慮したプラットフォームとするためには、用いるモデルが詳細化するため、モデルごとのばらつきの比較がさらに困難となることが予想され、その手法や採用するモデルに対応できるモジュール間のインターフェースについても検討が必要である。さらに、震源モデルについては、津波によるリスク評価に用いられるものや地震サイクルシミュレーションに基づくものを取り込むために、それらの重みの想定などが課題である。2021年度に取りかかり始め、2022年度に議論を深めたこれらの課題に対応するための検討を継続して実施する。

【コンピュータサイエンス】高性能物理シミュレーションと人工知能を融合し、最新の計算機のアーキテクチャーにあわせたアルゴリズムを計算科学・計算機科学的な観点から開発することで、従来を凌駕する規模の問題を高速に解くことを目指す。具体的には、このようなアルゴリズムに基づく地震動解析、地盤増幅解析、地殻変動解析等に適用可能な有限要素法の開発を行うとともに、実問題への適用により手法の課題を抽出する。

【災害リスク情報・ステークホルダ参画】平成3年度の分析結果を反映し、内閣府の南海トラフ地震動想定の評価を行うとともに、前年度の成果にもとづき改良したシステムを用いて、自治体職員に対するヒアリングにもとづき災害シナリオの多様性があることの理解を深めるための方策の検討、さらには検討成果を踏まえシステムのさらなる改良を行う。

(7) 令和5年度の成果の概要：

- ・今年度の成果の概要

【震源過程】プレート境界面における反射係数の違いから摩擦強度の分布を推定し、将来発生する南海トラフ地震の地震像に迫るために、解析に用いる地震波形記録の整理作業を行った。

【強震動予測】南海トラフ巨大地震のリスク評価の向上を目指し、2016年4月1日に紀伊半島沖で発生した地震 (Mj6.5) について、瀬戸内海側、日本海側での違いを見るために、岡山市、鳥取市でのHi-netで観測された地震動スペクトルの比較検討を行った。

【深部地盤・伝播経路】南海地震震源域西端にあたる、豊後水道沖の海域における地殻内地震波速度構造の詳細な解析を進めた。地震波構造調査で取得した海底地震記録に対して走時トモグラフィーおよび全波形インバージョン法を適用し、沈み込んだフィリピン海プレート上の海山に対応するように、P波速度の遅い領域が認められた。S波速度構造については地震波干渉法による解析を進めており、これまでにS波速度構造0.5~1.0 km/sを持つ海底浅部の構造を明らかにしている。さらに本海域周辺での広い範囲における地殻構造の高度化を進めている。

【浅部地盤構造】液状化地盤上に構築された隣接する2つの直接基礎建物の間隔が、地震時の建物傾斜角に及ぼす影響について、遠心力場における一連の模型振動実験により調べた。実験では、建物の幅に対する間隔の比率 (0.05、0.4、0.7、1.0) を変化させたケースに加え、比較対象として1つの建物に対する振動実験も実施した。その結果、建物の幅に対する間隔の比率が小さいと、隣接する2つの建物は互いに向かい合っ倒れ込むように傾斜するのに対し、比率が大きくなると互いに離れるように傾斜する (比率0.7で相対傾斜角が最大となる) ことがわかった。

【構造物被害予測】フラジリティ曲線の高度化と、地震被害発生時に即座に建物・インフラ施設の被災度を判定する技術の概要を調査するとともに、これまでに蓄積された膨大な地震被害写真を機械学習することによる被害判定システムの構築を試みた。来るべき都市直下での地震や東海・東南海・南海地震への備えとして、継続して研究を実施し、災害対応力をさらに高めておく必要がある。

【リスク評価高度化】本研究グループでは、高精度姿勢位置情報が付与された写真と緯度経度高度によって表現された点群データや3次元ポリゴン等を、幾何学的情報や特徴点に関する情報などを用いて多角的に照合することにより、撮影された写真にどの建物が写っているのか、あるいは建物のどの部位が写っているのかを自動的に判別する手法を開発してきた。今年度の研究では、これらを地理空間情報システム上で統合することでリスク評価や被害分析に資するエクスポージャーの情報および被害情報に関するデータベースを構築し、高精度なデータベース構築に向けた課題を抽出した。具体的には、(1) デジタルツインを活用し仮想空間内に被害画像のデータベースを構築するとともに、(2) UAV空撮画像から生成した点群をもとに屋根形状を有する3D建物ポリゴンの作成を試みた。その結果、特定の条件下で、点群生成の精度が低下すること、スマートフォンやタブレットに取り付けた/内蔵されているRTK-GNSSおよび9軸センサの測位・位置推定の誤差が大きくなることにより、エクスポージャーの位置や形状推定や画像の3D建物ポリゴンへのマッピングが正しく行われなくなることが明らかになった。

能登半島地震で土砂災害により道路の分断によって集落が孤立した件について、地震の前後の50cm-DEMを用いた土砂災害予測基本図を用いて、道路被害があった箇所近傍の地形解析を珠洲市逢坂トンネル付近で実施した。土砂が崩落した箇所には、傾斜が大きく斜面下部に上部の土塊を支持する構造がない地形的特徴 (遷急点や遷急線) があった。道路設置の際の切り取りが原因と考えられる箇所や、既往の地すべり地を横断する部分での変位が大きい例があった。

津波被害について、南海・東南海地震津波に対して、断層パラメータの不確実性に対する津波波高のばらつきに対する感度解析を実施した。ついで、津波によって発生する漂流物の挙動について実験結果をもとにモデリングを行い、津波漂流物の漂流特性を明らかにした。

【プラットフォーム構築】南海トラフ沿いで発生する巨大地震により引き起こされる、強震動による建物被害の推定方法について、令和4年度までに木造建物に対して実施してきたが、鉄筋コンクリート造 (RC造) と鉄骨造 (S造) によるものを実施できるように高度化を行った (図1、図2)。これにより、木造、RC造、S造の建築物被害推定を同時に行うことでそれぞれの構造形式に与える影響について検討することができるようになった。また、今後、実際に存在している建築物の位置と構造種別を把握することにより、実在する建物を考慮した建物被害推定を実施するための準備ができた。また、南海トラフ沿いで発生する巨大地震により引き起こされる津波によって引き起こされる災害について、震源パラメータの不確実性を考慮した確率論的評価を実施した。

【コンピュータサイエンス】時刻歴発展問題を対象として、シミュレーション内で生成される過去時間ステップにおける解析結果を学習することで、解析効率を高めるアルゴリズムを開発し、地殻の粘弾性応答解析へ適用した。高詳細な実地殻構造モデルを用いた有限要素法による地殻変動の順解析が

本手法により効率化されることを確認した。今後は、逆解析等との組み合わせにより、プレート間固着状態推定などへの適用が期待される。

【災害リスク情報・ステークホルダ参画】平成3年度の分析結果をもとに改良したシステムにもとづき地表速度での内閣府の南海トラフ地震動想定の評価を行った。また、前年度の成果にもとづき改良したシステムを用い自治体職員に対するヒアリングを実施し、災害シナリオの多様性があることの理解を深めるための方策の検討、さらには検討成果を踏まえシステムのさらなる改良を行う。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

南海トラフ沿いで発生する巨大地震により引き起こされる災害について、震源・波動伝播・地盤増幅・建物応答・直接的被害・社会的影響に関する研究分野からの知見を統合したりリスク評価を実施することで、最新の科学的知見に基づく災害リスクの大きさとそのばらつきを提示することが出来る。これは、それぞれの分野が災害の予測にどれくらい寄与しているかを示すことで、重点的に対策すべき分野や研究資源の配分を検討するための重要な知見となる。また、災害の不確実性を示すことで、備えるべき災害の規模について考えるための情報を提供することが出来る。さらに、マルチハザードについてのリスク評価を可能とし、それぞれのハザードの相互作用を明確にすることができれば、対策の方針を決定するための情報となることが期待される。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

藤本 健太, 宮下 卓也, 森 信人, 志村 智也, 2023, 南海トラフ地震の断層パラメータの不確実性が西日本沿岸の津波波高に与える影響, 土木学会論文集, 79(17), 23-17048, <https://doi.org/10.2208/jscej.23-17048>, 査読有, 謝辞無

Chida, Y., N. Mori, 2023, Numerical modeling of debris transport due to tsunami flow in a coastal urban area, Coastal Engineering, Elsevier, 179, 104243, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104243>, 査読有, 謝辞無

Morgado, Y., O.S. Areu Rangel, O.S. R. Silva-Casarin, T. Miyashita, N. Mori, T. Tomiczek, 2023, Using the SPRC methodology to assess tsunami risk in Zihuatanejo, Mexico, Coastal Engineering Journal, Taylor & Francis, 65(2), 256-276, <https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2172992>, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

ZHANG, Zhuocheng, Kyohei UEDA, Yuko SERIKAWA, 2024, EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON SEISMIC RESPONSE OF ADJACENT STRUCTURES ON LIQUEFIABLE GROUND, DPRI Annual Meeting 2024, P13

泉都喜嗣, 友清衣利子, 西嶋一欽, 中嶋唯貴, 2023, 被害調査資料データベースの構築のための建物3次元ポリゴン作成の試み, 日本建築学会大会学術講演(近畿), 20079

泉都喜嗣, 友清衣利子, 2024, 複雑な屋根形状を有する建物の3次元ポリゴン作成の試み, 日本建築学会九州支部研究発表会, 208

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

加藤尚之（東京大学地震研究所）, 市村強（東京大学地震研究所）, 望月公廣（東京大学地震研究所）, 楠

浩一（東京大学地震研究所）, 毎田悠承（東京大学地震研究所）, 古村孝志（東京大学地震研究所）, 三宅弘恵（東京大学地震研究所）, 武村俊介（東京大学地震研究所）, 悪原岳（東京大学地震研究所）, 飯高隆

（東大情報学環/地震研究所）, 松島信一（京都大学防災研究所）, 宮澤理稔（京都大学防災研究所）, 上田恭平（京都大学防災研究所）, 牧 紀男（京都大学防災研究所）, 西嶋一欽（京都大学防災研究所）, 倉田真宏（京都大学防災研究所）, 森信人（京都大学防災研究所）, 伊藤喜宏（京都大学防災研究所）, 関口春子（京都大学防災研究所）, 澁谷拓郎（京都大学防災研究所）, 浅野公之（京都大学防災研究所）

他機関との共同研究の有無：有

Anurag Sahare (東京都市大学), 芹川由布子 (福井工業高等専門学校), 前田匡樹 (東北大学大学院工学研究科), 松岡昌志 (東京工業大学 環境・社会理工学院), 中村友紀子 (千葉大学大学), 丸山嘉久 (千葉大学大学), 中嶋唯貴 (北海道大学大学院工学研究院), 佐伯琢磨 (神戸学院大学), 友清衣利子 (熊本大学), 神野達夫 (九州大学), 仲西理子 (海洋研究発機構), 山本揚二郎 (海洋研究発機構), 高橋努 (海洋研究発機構)

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学防災研究所
 電話：0774-38-4080
 e-mail：matsushima@sds.dpri.kyoto-u.ac.jp
 URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：松島信一
 所属：京都大学防災研究所

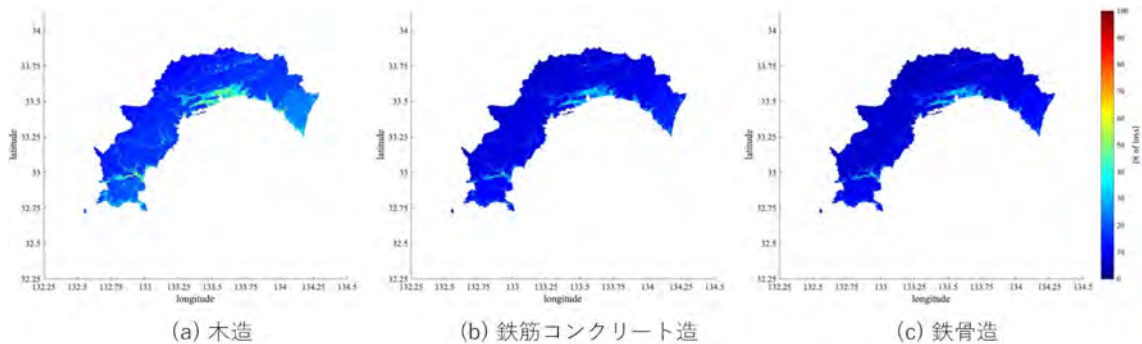


図1 高知県における建物損失率

南海トラフ沿いの巨大地震が発生した際に高知県において生じる構造種別ごとの建物損失率の期待値を示す。最大で、木造では60%、鉄筋コンクリート造と鉄骨造では30%程度である。

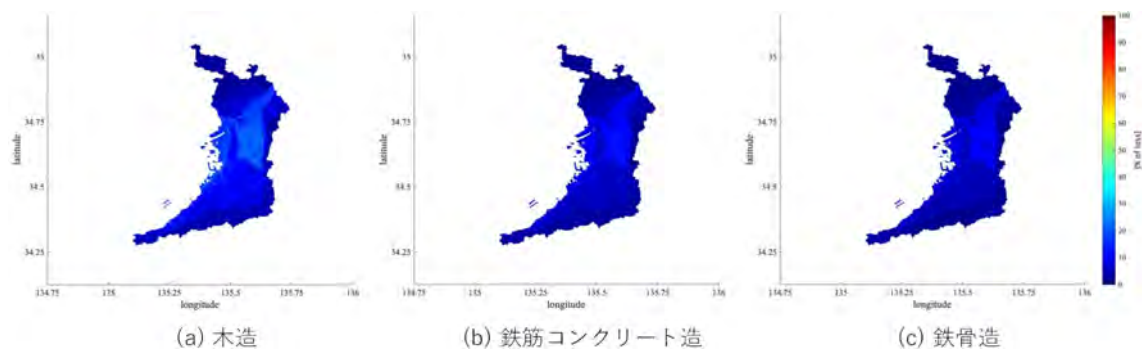


図2 大阪府における鉄骨造の建物損失率

南海トラフ沿いの巨大地震が発生した際に大阪府において生じる構造種別ごとの建物損失率の期待値を示す。最大で、木造では35%、鉄筋コンクリート造と鉄骨造では20%程度である。

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震および豪雨による斜面災害発生個所の事前予測方法の統合

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

イ. 津波の事前評価手法

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測手法

イ. 津波の即時予測手法

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

火山

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 令和5年度の計画の概要：

地震による土砂災害リスクを評価するうえで、斜面に存在する不安定土塊の位置とその崩壊到達範囲を事前に把握することが重要である。これまでの研究により詳細数値地図情報（1m LiDAR-DEM）を用い、地形を視覚的に理解しやすく示す方法を開発し、地震の前後の地形変化を抽出しPIV手法を用いるなどした結果、地すべり・斜面崩壊・平坦地の地盤変状の発生メカニズムが明らかになりつつある。特に、傾斜の大きな斜面に存在する不安定土塊の地震時の移動の初期過程が地表面の振動方向と傾斜方向に大きく関連があることが明らかになってきた。

斜面に存在する不安定土塊の検出方法の高精度化は、地震による地形変化の事例を多く検討することにより達成されると考えられる。1m LiDAR-DEMが全国で公開されるようになり、災害後の測量結果も迅速に公開されるようになっている現状であるが、地震発生を待つ時間の余裕はないと考えられる。土砂災害を引き起こす事例研究は、ほかに豪雨によって発生する斜面崩壊・地すべりで進められているが、地震と豪雨のようないわば異なる外力によって引き起こされる土砂移動の初期過程の比較はこれまでできていない。予察的ではあるが、地震・豪雨による土砂災害発生箇所には、共通する地形条件があると考えられる。それは地形学では侵食前線の到達域の境界部分であり、地震と豪雨による土

砂移動の初期過程の差異を明らかにする必要がある。

地震による土砂災害リスクを評価することを目的として、不安定土塊の存在箇所と地形変化をおこす範囲を視覚的に容易に把握できるよう表示する。これは、詳細数値地形情報（1m LiDAR-DEM）上でハザードマップを作成することである。同様に、豪雨による土砂災害発生危険箇所もハザードマップに示す。この方法は、従来の土砂災害防止法に基づくハザードマップ作成方法と異なる手法であり、土砂災害リスクを視覚的に容易に表示・判断することが可能となる。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2016年熊本地震、2018年胆振東部地震の前後の詳細数値地形図を用いて地形変化部を抽出し、地震により斜面の土塊が移動を始める箇所とその移動様式を検討した。その結果、傾斜が大きく斜面下方に支持する構造のない箇所が最大傾斜方向に移動することが崩壊、土石流や地すべりの端緒となることが明らかになった。また、尾根に亀裂の出現する箇所は、尾根をはさむ斜面の土塊は、最大傾斜方向に変位してその間に位置する尾根で土塊が両側に移動するために陥没や亀裂が生じていることが顕著化になった。これまで集合的に土塊が移動したように考えられていた大規模な崩壊でも、斜面下方に位置する斜面の下部に支持する構造がない部分から順に上部に破壊が遡上する形式と考えると非常に合理的である場合があることが明らかになった。このような下部に支持する構造のない箇所は、地形学的には遷急点あるいは遷急線に相当し、この付近の傾斜が大きい方が不安定で遷急線の場合は線の長さが長く、その遷急線をはさむ線状構造が斜面上方に延びている場合が不安定度が高いことが考えられる。豪雨の場合もこのような地形的特徴を有する箇所に落水線が集中する場合に、不安定度が高いことがわかっているので、このような箇所を抽出することが、位置予測すなわちハザードマップ作成の出発点となる。この箇所は、土砂災害予測基本図を用いると容易に特定することができる。

土砂の移動開始箇所を特定し、次にその土塊が下方に流動または移動する過程を再現し、堆積する範囲を特定することがハザードマップ作成にとって重要である。そのため、土砂流動再現モデルであるiRICを用いて試算をおこなった。この計算を実施する際には、土塊が流動し流下する際に、側岸、流路底面からの取込量を一樣として仮定している場合が多い事の改善をおこなった。-この結果、堆積域の建築物も考慮し、被害範囲のみならず避難方向や経路を考察できる情報を得ることが可能となった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

筒井和男・齊藤隆志,2023,侵食量に着目した土石流被害予測計算の高度化,第43回日本自然災害学会予稿集,p.11-12

筒井和男・齊藤隆志,2024,侵食量に着目した土砂流動モデルによる被害範囲の予測,令和5年度 京都大学防災研究所 研究発表講演会,P18

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

齊藤 隆志（京都大学防災研究所）

他機関との共同研究の有無：有

古谷 元（富山県立大学工学部環境・社会基盤工学科）,中屋志津男（白浜試錐）,筒井和男（和歌山県土砂災害啓発センター）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学防災研究所

電話：0774-38-4102

e-mail：saitou.takashi.2z@kyoto-u.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：齊藤隆志

所属：京都大学防災研究所

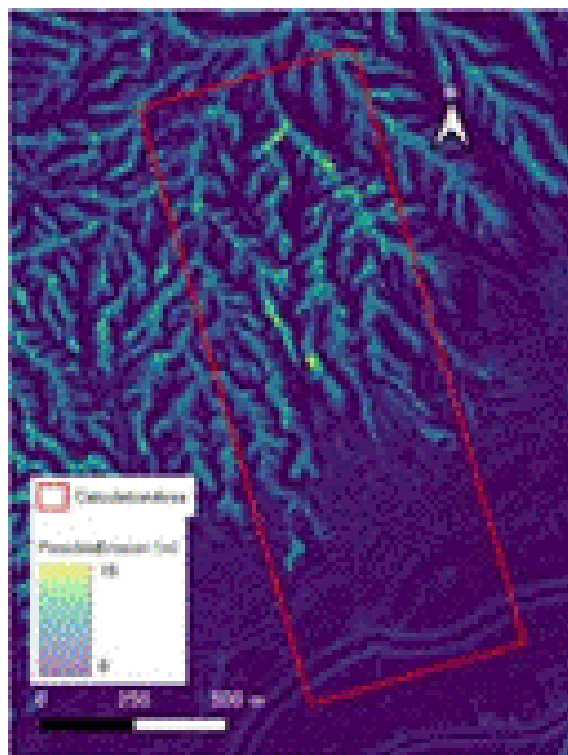


図 1

iRIC計算範囲内の可能侵食量の分布.

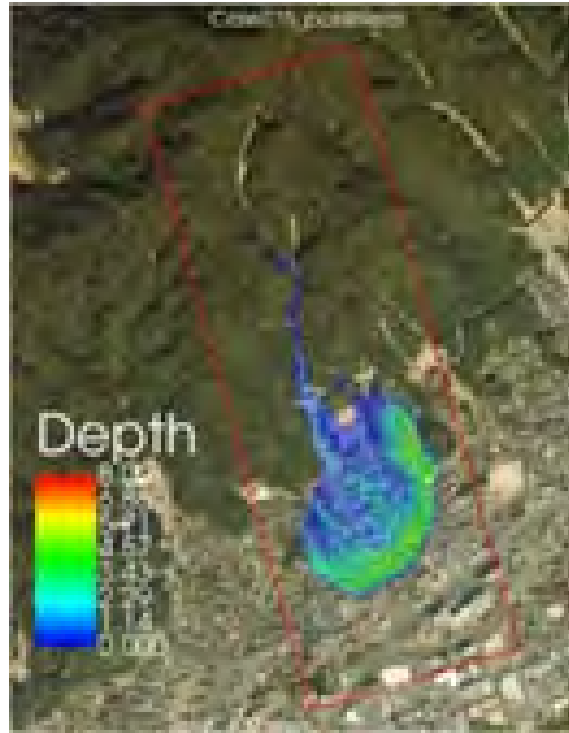


図2
流動深の空間分布の与え方の例（100秒後）

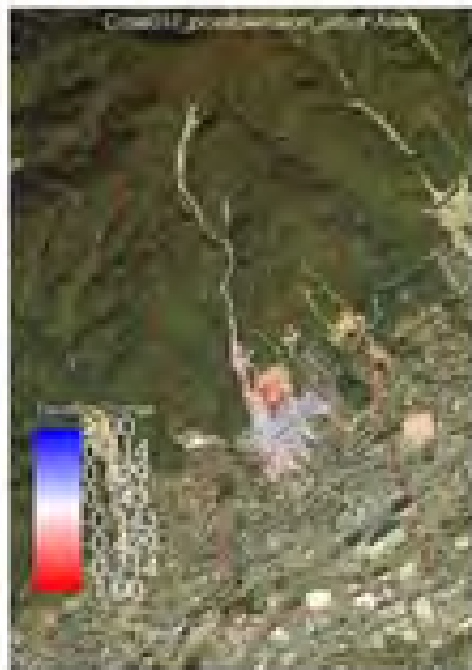


図3
標高変化（150秒後）

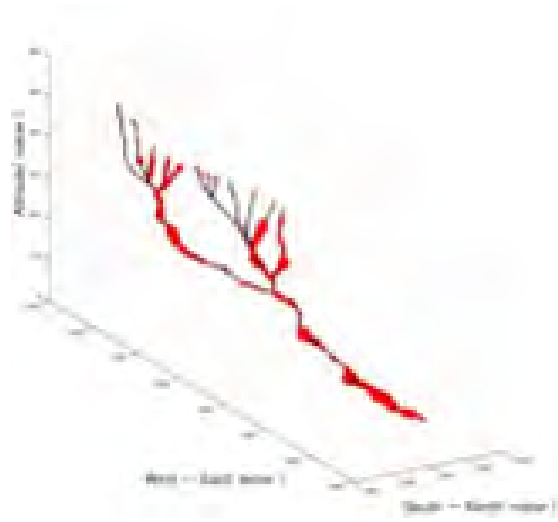


図 4
土石流発生後谷線での侵食量 赤丸の大きさが侵食量を示す.

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

巨大地震に起因するマルチハザードによるリスク評価手法に関する検討

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

イ. 津波の事前評価手法

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測手法

イ. 津波の即時予測手法

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

火山

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) 関連研究分野との連携強化

(5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 令和5年度の計画の概要：

【提案の背景】標準的な地震リスク評価手法では、震源・波動伝播・地盤増幅・建物応答・直接的被害・社会的影響などに関する研究分野からの知見を統合してリスクが評価される。これまでの重点推進研究では、地震リスクとして地震動による被害を対象としているが、南海トラフ沿いで発生する巨大地震により引き起こされる災害は、強震動、津波、地すべり、地盤変状、火災などのマルチハザードによって引き起こされ、多様な災害となることが想定される。

本研究提案は、これらマルチハザードに基づく多様な災害を考慮することを可能とし、巨大地震によるリスク評価を統一的に実施するための課題を洗い出し、巨大地震によるマルチハザードリスク評価を実現するための手法に関して検討する。

【現状の問題点】巨大地震に起因する強震動、津波のリスク評価はそれぞれ独立して行われているこ

とが多い。両者は同じ震源によって引き起こされる事象であるので、地震動と津波によるリスクを考える際には、地震シナリオ、震源パラメータ、発生確率など、震源モデルが両者で統一して扱うべきであるが、そのように扱われている事例は少ない。また、強震動や津波に加え、それらによって引き起こされる地すべり、地盤変状、火災などによるリスクについても独立した事象ではないため、併せて統一的にリスク評価を実施する必要があると考えられる。

【本研究で期待される成果】2022年度には、巨大地震に起因する強震動、津波、地すべり、地盤変状、火災などの事象によるリスクについて、どのようにして統一的に評価出来るかについて議論し、評価方法について検討した。今年度には、実際に統一的に扱った場合と独立して扱った場合のリスク評価結果について議論し、巨大地震によるマルチハザードリスクを評価する方法について考え方を提示する。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

今年度で100年を迎えた1923年関東地震について、震源・地下構造・強震動予測等の歴史的経緯を踏まえて最新の知見を収集し、今後のハザード・災害リスク評価に必要な課題をまとめた。

1923年の関東大震災から100年を契機として、我が国の歴史的な地震火災の教訓を国際的に広く共有し、地震の多い国々での今後の防災に活かすべく、カリフォルニア大学、香港大学、国際基督教大学の研究者らと共同（土木工学、建築火災安全工学、歴史学の国際文工異分野連携）で、東京市で発生した同時多発大規模火災の実態を多面的に整理した。また、近年の地震火災の傾向や国外の地震火災事例も参照し、現代においても潜在する地震火災リスクを見落としてはならないことを強調した。確率論的な津波ハザードとエージェントベースの避難モデリングを組み合わせた統合津波リスクフレームワークを開発した。この枠組みを、人口約2,200人がM9クラスの地震により重大な津波現象に遭遇すると予想される高知県黒潮町佐賀のケースに適用した。まず、2つのマグニチュード（M8.8とM9.0）の確率的震源モデルを生成し、確率論的津波浸水シミュレーションを実行した。次に、MATSimによるエージェントベースの津波避難モデリングを、4つの異なるモード、単一モード（歩行者もしくは自動車）と2つのマルチモードシナリオ（自動車と歩行者の混合）、によるシナリオを考慮して実行した。確率論的津波シミュレーションとエージェントベースの避難モデリング結果を統合してリスクを推定した。また、既存の津波避難場所と津波避難タワーがリスクの軽減に与える影響も評価した。このような統合枠組みは最終的に、津波危険度の高い地域での津波被害軽減戦略を推奨するために使用する。結果として、佐賀地区では重大な津波危険度（最大15メートルの津波深さ）が予想され、到達時間は5分から30分であることを示した。さらに、高台にある避難場所は、特に歩行者モデルとマルチモードモデルの場合は影響を受ける人数が少なくなる（10～100人）ことから、地域住民の人命救助に効果的であることが分かった。ただし、避難手段が車のみの場合は最大1,000人が影響を受ける可能性がある。したがって、沿岸地域の住民には徒歩での避難が推奨される。この研究により、津波被害リスクを軽減するには、十分な高台と垂直避難の場所を特定して確保することが不可欠であることを定量的に示した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

今後のハザード・災害リスク評価に必要な課題をまとめた。

近年の地震火災の傾向や国外の地震火災事例も参照し、現代においても潜在する地震火災リスクを見落としてはならないことを強調した。

南海トラフ沿いの巨大地震による津波被害リスクを軽減するには、十分な高台と垂直避難の場所を特定して確保することが不可欠であることを定量的に示した。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Miyake, Hiroe, James J. Mori, David J. Wald, Hiroshi Kawase, Shinji Toda, P. Martin Mai, 2023, Introduction to the Special Section for the Centennial of the Great 1923 Kanto, Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, 113(5), 1821-1825, <https://doi.org/10.1785/0120230200>, 査読有, 謝辞無
Scawthorn, Charles, Tomoaki Nishino, J. Charles Schencking, Janet Borland, 2023, Kantō

Daikasai: The Great Kantō Fire Following the 1923 Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, 113(5), 1902-1923, <https://doi.org/10.1785/0120230106>, 査読有, 謝辞有
Muhammad, Ario, Raffaele De Risi, Flavia De Luca, Widjo Kongko, Nobuhito Mori, Tomohiro Yasuda, Katsuichiro Goda, 2024, Integrated tsunami risk framework considering agent-based evacuation modelling: The case of Saga, Kochi Prefecture, Japan, International Journal of Disaster Risk Reduction, 101, 104193, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104193>, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

松島信一（京都大学防災研究所）, 森 信人（京都大学防災研究所）, 境 有紀（京都大学防災研究所）, 西嶋一欽（京都大学防災研究所）, 伊藤喜宏（京都大学防災研究所）, 関口春子（京都大学防災研究所）, 齊藤隆志（京都大学防災研究所）, 上田恭平（京都大学防災研究所）, 宮下卓也（京都大学防災研究所）, 西野智研（京都大学防災研究所）, 楠 浩一（東京大学地震研究所）, 市村 強（東京大学地震研究所）, 三宅弘恵（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：無

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学防災研究所

電話：0774-38-4080

e-mail：matsushima@sds.dpri.kyoto-u.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：松島信一

所属：京都大学防災研究所

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

桜島大規模噴火による大量軽石火山灰降下に対する事前広域避難に向けた実践的研究

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究
火山

(4) その他関連する建議の項目：

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 令和5年度の計画の概要：

令和2年度より本拠点間連携共同研究の課題の下で、鹿児島市八幡校区のコミュニティ協議会と長期的に連携し、大量軽石火山灰降下に関するリスクコミュニケーションのためのワークショップを継続的に実施している。本研究課題では、市民が自ら考え動くことをモットーとし、言わば市民コミュニティの体質改善的なアプローチこそが、いざというときの避難を実現するために不可欠であると考えている。本研究では、これまでに築いてきたコミュニティ協議会との取り組みを継続して進めることによって、市民本位となるコミュニティの体質改善に資する、市民と専門家のコミュニケーション・プロセスの方法検討を目的としている。

令和5年度は、。年度内に3～4回のワークショップを行う。具体的には、大規模噴火が迫った段階での避難対応行動について参加者各自に検討をする。さらにその検討結果に基づいて専門家を交えながら問題点や改善点について検討を行う。またこうした検討結果を取りまとめ、情報発信や横展開につなげるための成果物の企画を行う。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和5年度では、合計4回のワークショップを行った。通算で6回目のワークショップでは、大規模噴火が迫った段階での避難対応行動について参加者各自に検討してもらうために、「何とか生き残るシナリオ」を考えるというテーマを設定した。大規模噴火の予兆現象の発生から大規模噴火に至るまでの状況設定を専門家側で作成し、参加者各自で各段階でどのような避難準備あるいは避難を行うかについて検討を行ってもらった。通算7回目のワークショップでは、参加者が各自で検討した生き残るためのシナリオを専門家側でレビューを行い、その問題点や改善点を考えるためのフィードバックを行い、

さらに各自でどのような改善点や自らで解決できない課題についても検討を行ってもらった。通算第8回のワークショップでは、これまで行ってきた検討の内容を取りまとめ形に残すための検討を行った。とりわけ、住民が主体となって成果を取りまとめる点、さらに取りまとめの枠組みについても広報の専門家を交えて検討を行った。こうした集まって議論するだけのワークショップが続くと参加のモチベーションが低下してくる恐れがある。そのため通算第9回は、本プロジェクトとは別の目的で行われた大正噴火の際に降り積もった軽石を掘削したトレンチを実際にワークショップ参加者に見てもらい、身体的に軽石が降り積もった状態を実感する機会を設けた。通算第9回のワークショップは事前に計画をしていなかったが、大規模噴火の様相を身体的に理解する重要な契機であると考え追加的に実施した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本研究は桜島大規模噴火からの被害を最小限に抑制するための避難体制構築について検討したものである。鹿児島市は桜島大規模噴火に対する避難計画を策定しているが、計画自体が不十分な点がいまだ多く、さらに計画通りに社会が動くための準備はかなり不足している。こうした準備を進める上で、市民レベルの検討からボトムアップ的に準備体制を構築していくアプローチを採用しており、本研究はボトムアップの核となる組織化が達成できたものと考え。言うまでもなく、避難体制の構築は災害の軽減に直接的に貢献するものである。今後は、本研究を通じて構築されてきた八幡校区における取り組みをさらに広げる横展開の仕掛けを検討していく必要がある。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

矢守克也, 大西正光, 鈴木駿介, 2023, 火山災害からの避難に関する基礎的考察, 令和4年度防災研究所研究発表講演会

大西正光, 鈴木駿介, 矢守克也, 井口正人, 山泰幸, 中野元太, 竹之内健介, 2023, 長期的視野のリスクコミュニケーション：桜島大規模噴火に備える地域との協働活動, 令和4年度防災研究所研究発表講演会

Masamitsu Onishi, 2023, Implementation Gap: Case of Evacuation from an Inexperienced Hazard, The 13th International Conference of the International Society for the Integrated Disaster Risk Management

大西正光, 2023, 次なる桜島大規模噴火に向けた専門家と地域の共同活動：現在の立ち位置, 2023年度桜島大規模火山噴火総合研究グループ研究集会

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

大西正光（京都大学大学院工学研究科）, 井口正人（京都大学防災研究所）, 矢守克也（京都大学防災研究所）, 竹之内健介（京都大学防災研究所）, 中野元太（京都大学防災研究所）, 前野深（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

山泰幸（関西学院大学）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学大学院工学研究科

電話：075-383-3222

e-mail：onishi.masamitsu.7e@kyoto-u.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：大西 正光

所属：京都大学大学院工学研究科

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

活断層により形成される盆地端部構造と歴史地震の被害分布との関係に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ア. 史料の収集とデータベース化

イ. 考古データの収集・集成と分析

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

本研究ではまず、庄内平野と庄内平野東縁断層帯の境界部における基盤構造の形状や深さを調べるために、詳細な地盤構造調査を行って基盤構造を推定する。また、並行して、歴史地震である1894年（明治27年）庄内地震について、既往の被害に関する文献と併せて古文書の調査などにより、詳細な被害分布について調査する。次に、推定した詳細な基盤構造モデルに基づいて波動伝播解析を行い、既存の深部地盤構造による結果との比較を行うとともに、地質構造との対応や歴史地震の被害分布との対応を確認する。さらに、より細かい被害分布との対応を確認するためには、浅部地盤構造についても調査する必要があるため、更なる地盤構造調査を実施する。

2023年度には、2022年度の調査を踏まえ、庄内平野東縁断層帯周辺において微動観測による深部地盤構造調査を実施し、その結果から基盤構造を推定する。推定した基盤構造に基づく波動伝播解析等により地盤増幅特性を推定し、被害分布との対応を確認する。一方、浅部地盤構造の調査や地質構造との関係から表層地盤による地震動増幅特性が全体の地盤増幅特性に与える影響についても検討する。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

・微動観測の概要

図1に微動のアレイ観測及び単点観測を行った地点と水田・鏡味(2013)における震度7の地点を示す。アレイ観測は計6地点で行ったが、その内3地点は背斜構造が見られる余目周辺で行った。アレイの形状は原則、一辺が45m,15m,5m,1.67mである同心円の正三角形とした。単点観測は主として東西方向に7測線84地点で行い、間隔が狭い所では1km間隔、広い所では2km間隔で観測点を配置した。さらに測線間を補完するように測線外に11か所の観測点を設けた。また、観測には加速度地震計SMAR-6A3PとJU410を用いた。サンプリング周波数は200Hzとし、単点観測では30分以上、アレイ観測では大きさに応じて最低10分以上の計測を行った。

・微動観測記録の解析手法及び得られた結果

単点微動観測記録からは各地点でのH/Vスペクトル比を算出した。まず、得られた加速度時刻歴データを50%オーバーラップさせて40.96秒の小区間に区切り出し、NS・EW・UDの3成分の振幅二乗和が小さい15区間を抽出した。区間の前後1秒にコサインテーパーによる処理を施し、高速フーリエ変換を用いて各区間のフーリエスペクトルを求めた。さらにバンド幅0.1HzのParzenウィンドウを用いて平滑化した後にH/Vを求め、15区間の幾何平均をとった。微動アレイ観測記録からは微動アレイ解析ツールBIDO(ver.3.2)4,5)を用いてSPAC法によりレイリー波の位相速度を求めた。解析パラメータは、セグメント平均の際のセグメント長、セグメント数はそれぞれ10.24秒、10個であり、Parzenウィンドウのバンド幅は0.3Hzとした。解析結果の一例として図2にアレイ2におけるレイリー波位相速度分散曲線を、図3にEWD測線におけるH/Vスペクトル比を示す。位相速度は0.4Hzから12Hz程度まで得られた。H/Vスペクトル比については盆地構造に起因する方位依存性や卓越周期の変化を期待したが、空間的傾向を明確には確認できなかった。

・今後の展望

既存の地下構造モデルを参照しながら、観測記録の分析結果より詳細な地下構造の推定を進める。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

歴史地震の被害分布や被害状況から強震動の生成と被害の発生の関係を定量的に評価するために、強震動予測手法とリスク評価手法の適切な手法を考慮して、これらの手法の検証を行う必要がある。その際、地質学や歴史学の知見を考慮することが重要となる。このことは、「3(1)ア.強震動の事前評価手法」と「3(1)ウ.大地震による災害リスク評価手法」の目的達成に関して、重要な知見を提供できると考えられる。また、「災害の軽減に貢献する」という目標に対しては、本課題の研究成果は、歴史地震の被害情報から強震動生成に関する知見、さらには震源特性に関する知見を抽出することを可能とし、他の歴史地震に適用することで、強震動や震源特性に関する情報がなかった地域でも適用することで新たな知見を得、それを将来の地震災害の軽減に活用できることが期待される。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

松島信一, 山本耕平, 周宇廷, 長嶋史明, 大邑潤三, 加納靖之, 吾妻崇, 石瀬素子, 2023, 1894年庄内地震の地震被害の原因解明のための常時微動に基づく庄内平野の地盤構造の推定, 第16回日本地震工学シンポジウム, Day3-G415-02, なし

山本耕平, 松島信一, 長嶋史明, 周宇廷, ティンザーヤダナー, 五熊大, 2024, 微動のアレイ観測及び単点観測記録に基づく庄内平野の地盤構造推定, 令和5年度京都大学防災研究所研究発表講演会, P25

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

松島信一（京都大学防災研究所）, 加納靖之（東京大学地震研究所）, 大邑潤三（東京大学地震研究所）
他機関との共同研究の有無：有
吾妻崇（産業技術総合研究所）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学 防災研究所
電話：0774-38-4080
e-mail：matsushima@sds.dpri.kyoto-u.ac.jp
URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：松島 信一

所属：京都大学 防災研究所



図1 微動観測点地点

庄内平野で実施した微動観測地点の分布（青マーカーは単点微動観測地点、黄マーカーは微動アレイ観測地点、赤丸は、水田・鏡味(2013)による震度7地点を示す）

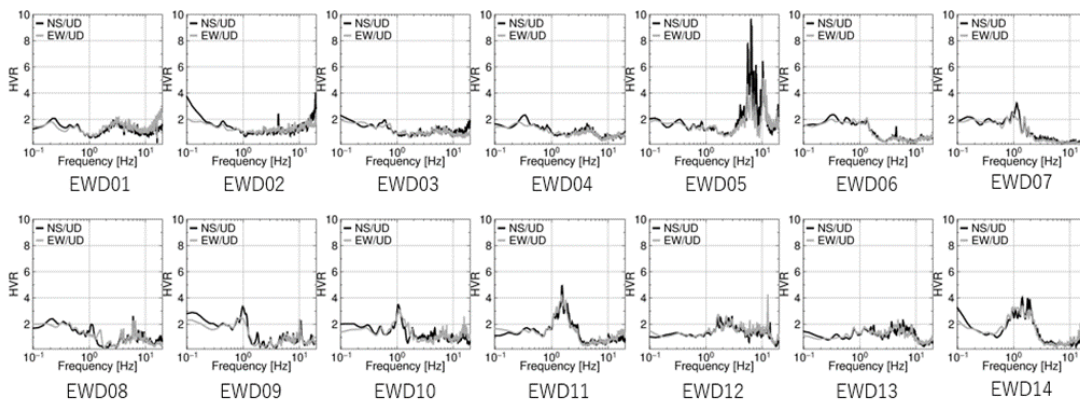


図2 EWD測線の微動水平上下スペクトル比

EWD測線における単点微動観測記録から得られた微動水平上下スペクトル比（水平2成分をそれぞれ上下成分で除したもの）

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

リスクコミュニケーションを推進するための地震・火山災害に関する意識調査の標準的な質問紙設計とその有効性の検証

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

火山

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

地震災害に関する質問紙を設計し、質問紙の有効性を検証するための社会調査を実施する。設計にあたっては先行研究を整理した上で、下記の点に留意する。

地震 標準的項目：ハザード（マグニチュード、震度など）、リスク情報（確率論的地震動予測地図、被害想定など）、警報（緊急地震速報、津波警報など）、地震対策（耐震化、備蓄、保険、訓練など）、地域性の高い項目：南海トラフ地震臨時情報など。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

地震に関する質問紙調査の先行研究をレビューし、先行研究を踏まえつつ、できるだけ標準的な調査項目として、地震に係る用語の認知と備えや準備の状況とした。用語の認知については、ハザード（震度、マグニチュード、震源、震央、本震、余震、長周期地震動、海溝型地震、活断層型地震）、情報（緊急地震速報、津波注意報、津波警報、大津波警報、南海トラフ地震臨時情報、北海道・三陸沖後発地震注意情報、長周期地震動に関する観測情報）、その他（地震予知、地震動予測地図、ローリングストック、フェーズフリー）の20用語を取り上げた。備えや準備については、耐震化・家具固定や飲料水の備蓄などである。

調査対象は、太平洋側、日本海側の地域をできるだけ幅広く選定する方針の下、8市区（仙台市、秋田市、東京23区、新潟市、金沢市、名古屋市、大阪市、鳥取市）を選定した。作成した質問紙票の質問項目をベースに、オンライン調査（サンプル数は各市200、年齢性別で均等割付を行った。なお、鳥取市のみ190である。）を実施し、各地域住民の火山災害に関する意識を明らかにするとともに、設計した調査票の有効性について検討した。調査期間は、2024年1月10日～15日である。1月1日に発生した能登半島地震の直後に行われているため、直近に発生した地震の影響が反映されている可能性が高いことに留意する必要がある。

図は調査結果の一部として、「震度」、「緊急地震速報」、「南海トラフ地震臨時情報」についての認知を図1～3に示す。内容を含めて良く知っている、ある程度知っているをあわせると、全体で震度92.5%、緊急地震速報91.5%、南海トラフ地震臨時情報46.9%であった。南海トラフ地震臨時情報については、名古屋市55.5%が最も高く、新潟市38.0%が最も低かった。

地震への備えや準備として、ここでは家具固定（図4）と食料の備蓄（図5）について調査した（図4、

図5)。家具固定は、大部分固定、一部固定をあわせて仙台市71.0%が最も高く、新潟市43.0%が最も低かった。食料の備蓄は、備蓄がないと回答したのは仙台市26.0%が最も低く、鳥取市43.2%が最も高かった。全体的な傾向として太平洋側の地域では用語の認知や地震への備えや準備が進んでおり、日本海側の地域で低調な傾向が示された。

詳細な分析は今後行う必要があるが、設計した調査票は地震に関する標準的な質問紙として機能すること、本調査票を用いることにより、地域間の地震に関する住民意識や備えや準備の状況について比較が可能であることが確認された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本研究は、地震・火山噴火の災害誘因予測に関する研究成果を災害情報につなげる研究として位置づけられる。本研究成果は、住民の理解を促進させる手法の開発や様々な住民啓発プログラムの開発を行う上で、住民の地震災害に関する意識調査の現状を把握することができる点はもちろんのこと、備えと準備についてどのような課題があるのかを抽出し、今後の改善策について検討したり、自治体の防災施策や住民の研修プログラムの効果測定を行う等、様々な場面で活用されることが期待される。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

秦 康範（山梨大学大学院総合研究部工学域）、牧 紀男（京都大学防災研究所）、関谷 直也（東京大学情報学環）、酒井 慎一（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

佐藤 史弥（山梨大学大学院総合研究部工学域）、吉本 充宏（山梨県富士山科学研究所）、本多 亮（山梨県富士山科学研究所）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：山梨大学 大学院総合研究部工学域

電話：055-220-8533

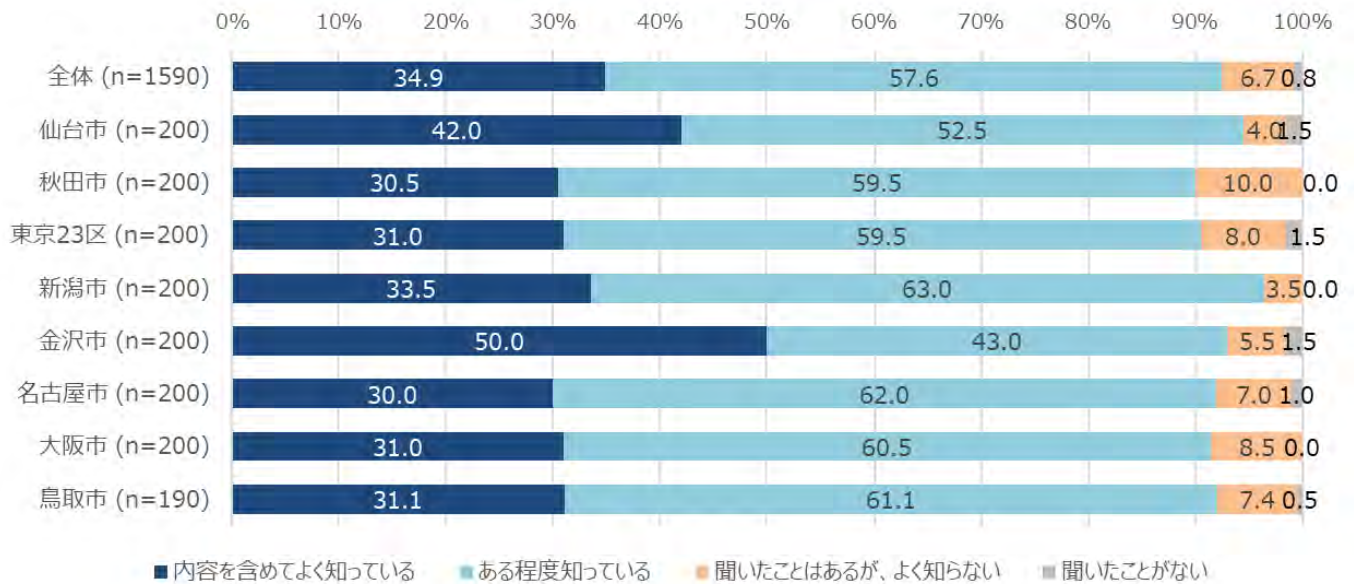
e-mail：yhada@yamanashi.ac.jp

URL：

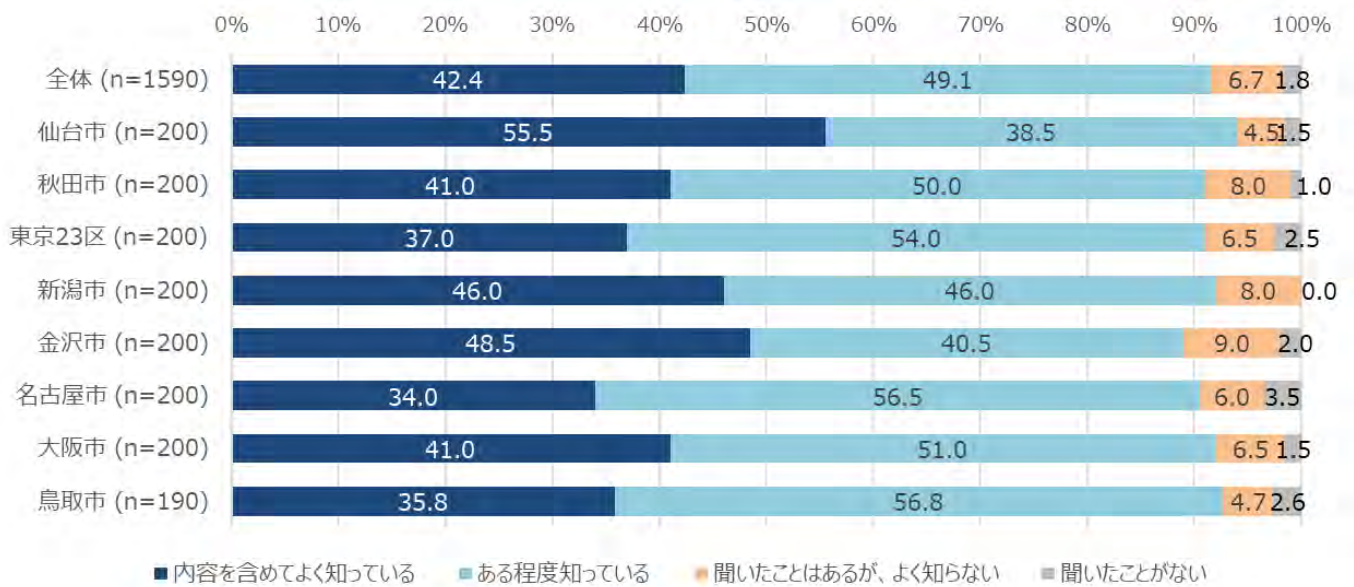
(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：秦 康範

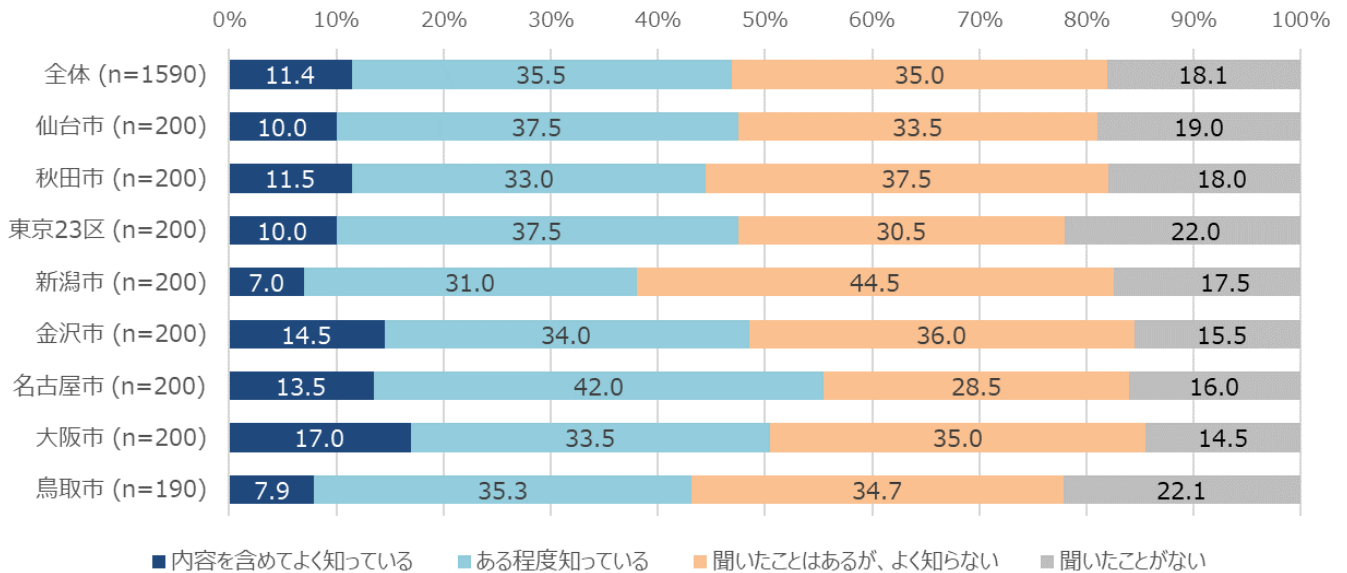
所属：山梨大学 大学院総合研究部工学域



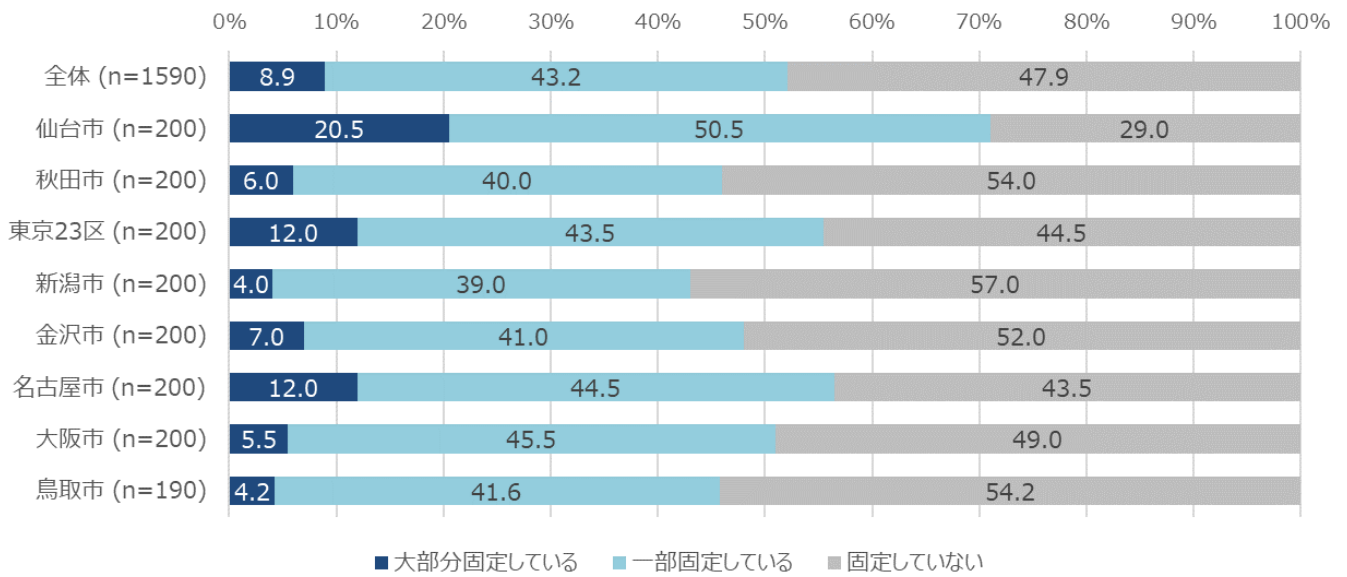
震度の認知



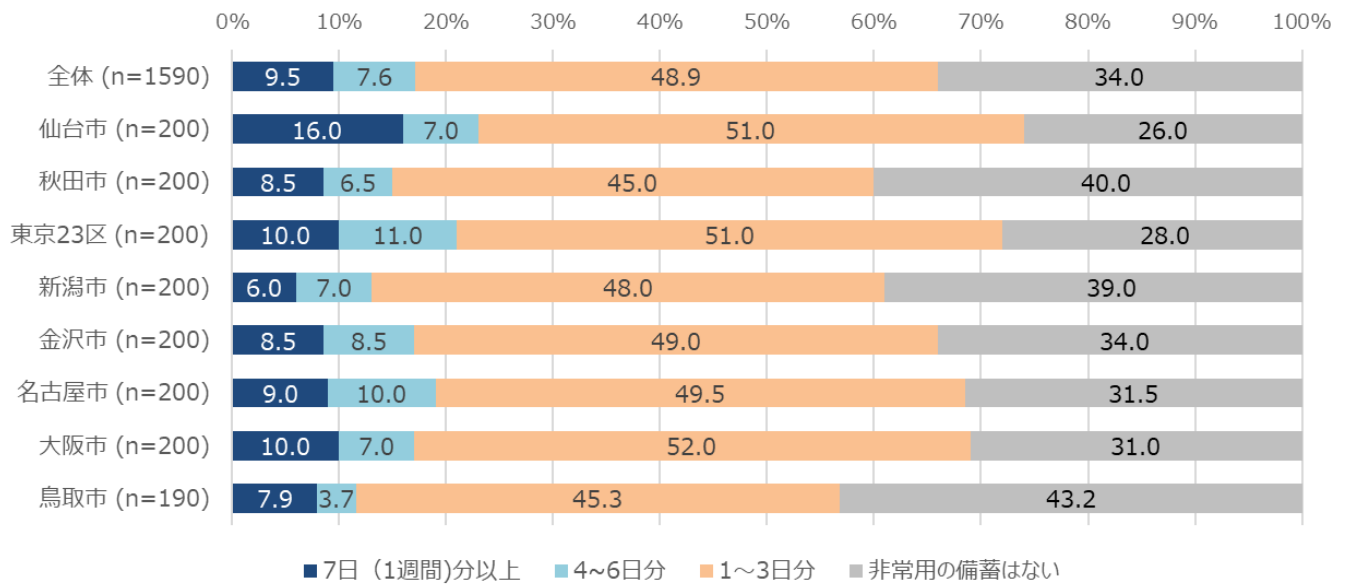
緊急地震速報の認知



南海トラフ地震臨時情報の認知



家具固定の実施状況



食料の備蓄状況

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

1923年関東地震の木造建物被害率に基づく震源破壊プロセスの解明

(3) 関連の深い建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
地震
 - (3) 地震発生過程の解明とモデル化
 - イ. 地震断層滑りのモデル化
- 3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究
 - (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - ア. 強震動の事前評価手法
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - イ. 首都直下地震

(4) その他関連する建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
 - イ. 考古データの収集・集成と分析
 - ウ. 地質データ等の収集・集成と分析
 - (3) 地震発生過程の解明とモデル化
 - イ. 地震断層滑りのモデル化
- 3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究
 - (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - ウ. 大地震による災害リスク評価手法

(5) 総合的研究との関連：

首都直下地震

(6) 令和5年度の計画の概要：

令和5年度には以下の研究項目を実施する予定とした。

1. 大被害地域におけるサイト増幅特性の評価

昨年度選定した強震動計算地点のうち、微動観測ができなかった地点で微動観測を行い、微動の水平上下スペクトル比MHVRを計算する。Kawase et al. (2018) のEMR法では、EMRを任意地点のMHVRに乗じることで擬似地震動水平上下スペクトル比pEHVRを求めることが可能であることから、本手法により大被害地域の地点でpEHVRを求める。求めたpEHVRにNagashima et al. (2014) のEHVR用地盤構造同定手法を適用し、当該地点でのサイト増幅特性を求める。

2. 得られたサイト増幅特性と建物被害の関係性の評価

当該地震でサイト増幅特性がどれほど建物被害に影響したかを把握するため、①で得られた各地点で

のサイト増幅特性と観測建物被害率の関係を把握する。

3. 不均質震源モデルの構築と各地点の強震動の作成

断層面のすべり量・破壊伝播速度の不均質性を考慮した震源モデルを構築することができるSekiguchi and Yoshimi(2011)の手法により1923年関東地震の不均質震源モデルを複数構築する。その上で、仲野・川瀬(2021)の統計的グリーン関数から強震動を不均質震源モデルごとに計算する。その際サイト増幅特性は、大被害地域の地点においては①で求めたEMR法によるサイト特性を用いて詳細に考慮する。

4. 建物被害率の計算

昨年度構築した1923年に対応する建物被害予測モデルに、3で作成した強震動を入力し、建物被害率を計算する。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和5年度の研究においては、昨年度に建物被害に関する資料及び論文より決定した強震動評価地点のうち、

地盤の微動観測を遂行できていなかった地点での観測を引き続き行い、微動の水平上下スペクトル比MHVRを計算した。そしてKawase et al.(2018)の提案した地震動微動補正係数EMRをMHVRに乗じることで擬似地震動水平上下動比pEHVRを求め、それにIto et al.(2021)で提案された上下動補正係数VACFを乗じることで観測地点全地点における疑似サイト増幅特性pHSAFを求めた。

その上でまず、建物倒壊率とpHSAFの一次ピーク振動数を確認した。図1にその結果を示す。多くの地点で一時ピーク振動数は建物の大被害に直結する0.5~2Hzの間にあることが分かった。

さらに建物倒壊率と0.5~2.0Hzにおけるピーク振幅の関係性を確認した。図2にその結果を示す。20地点では0.5~2.0Hzでの振幅が10を超えており、大きな増幅があることが分かった。また、両者には正の相関があり、サイト増幅特性が建物の大被害に寄与したことは明らかだといえることが分かった。一方で、ピーク振幅が大きくなっても、建物被害が大きかった地点もあり、このような地点では、サイト増幅特性以外の要因、すなわちSMGAとの距離やディレクティビティ効果といった震源の影響を建物被害の要因の可能性として考える必要がある。

震源モデルについては、上記で得られたサイト増幅特性が大きくなっても建物被害が大きかった地点の位置関係を拘束条件としてSMGA配置を置き換えたモデルを複数構築した。

当初の計画4の建物被害率計算については、令和6年に入り実行予定であったが、元日に発生した能登半島地震の調査・データ解析のため、着手に至っていない。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

計画通りに実施できていない、複数の震源モデルによる建物被害率の計算を早急にすすめ、年度内の完遂を目指す。

今後は発生する可能性のある首都直下の一回り規模の小さい海溝型地震の地震災害リスクの評価を実施していきたい。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

伊藤恵理・長嶋史明・孫紀凱・川瀬博,2023,1923年関東地震の大被害地域におけるサイト増幅特性の評価,2023年度日本建築学会大会,構造II 21393

伊藤恵理・長嶋史明・孫紀凱・王自謙・川瀬博,2023,1923年関東地震の大被害地域における微動観測データを用いたサイト増幅特性の評価,第16回日本地震工学シンポジウム,Day3-G415-03

Eri ITO, Fumiaki NAGASHIMA, Jikai SUN, Ziqian WANG and Hiroshi KAWASE,2023,Evaluation of the site amplification factors on the severely damaged sites during the 1923 Kanto earthquake

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

伊藤恵理（京都大学防災研究所）,長嶋史明（京都大学防災研究所）,孫ジカイ（京都大学防災研究所）,
川瀬博（京都大学防災研究所）,三宅弘恵（東京大学地震研究所）
他機関との共同研究の有無：無

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学 防災研究所
電話：0774-38-4051
e-mail：ito.eri.4x@kyoto-u.ac.jp
URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：伊藤 恵理
所属：京都大学 防災研究所

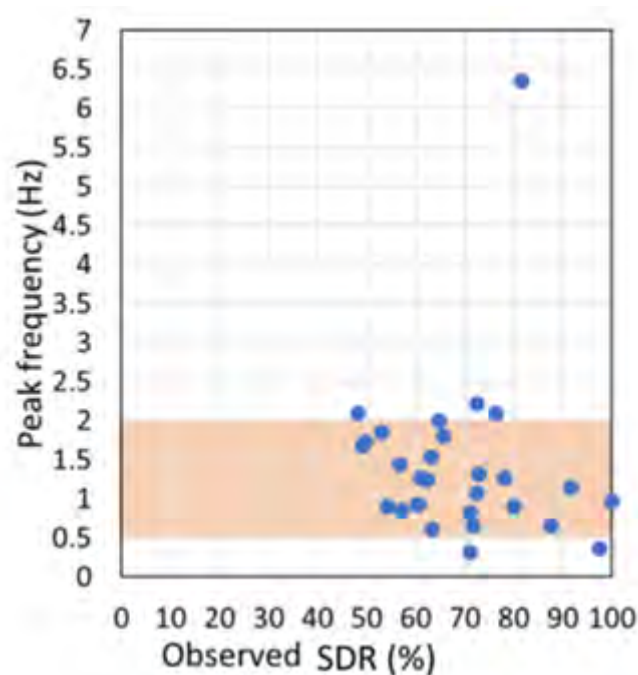


図1 建物被害率と擬似サイト増幅特性の一次ピーク振動数の関係

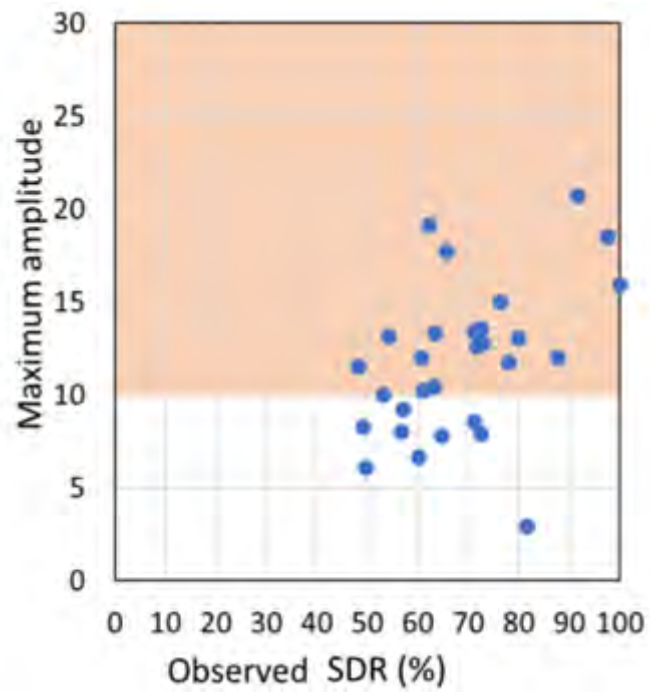


図2 建物被害率と0.5~2.0Hzにおけるピーク振幅の関係

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

既存在来木造建物に大きな被害を引き起こす地震動の発生要因に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測手法

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究
地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
地震

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

イ. 内陸地震

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

昨年度、2003年十勝沖地震のKiK-net厚真のような2秒よりやや長い周期が卓越して揺れの数が多い地震動の発生要因について、過去の震度6弱以上を記録したKiK-net観測点の強震記録を対象として検討を行った結果、AVS30（表層30mの平均せん断波速度）が小さい軟弱地盤で発生していることがわかったが、その条件を満たしても、該当地震動が発生していない場合もあったため、更に、条件の絞り込みを行った。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

その結果、表層地盤については、AVS30が140m/s以下、等価一次周期が1-1.5秒、基盤動（KiK-net観測点の地中記録）の地動最大速度（PGA）が30cm/s以上だと、そのような地震動が発生していることがわかった（図1, 2）。

そして、そのような条件を満たす表層地盤を探すと、埼玉県北西部など、多数存在することがわかった。

一方、開発した実大1層縮約試験体に入力した振動実験は、昨年度、KiK-net厚真を入力して、大きな被害となった試験体に震度6強で短周期が卓越した2003年十勝沖地震のK-NET広尾の強震記録を入力したところ、ほとんど被害が生じないことを確認するとともに、KiK-net厚真と同様の2秒よりやや長い周期が卓越して揺れの数が多い地震動である、2007年新潟県中越沖地震のK-NET柏崎を入力し、こちらも大きな被害となることを確認した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

発生すれば木造家屋の大きな被害を引き起こすことが危惧される、2秒よりやや長い周期が卓越して揺れの数が多い地震動について、その発生条件を具体的に示し、その条件を満たす場所を特定できたことは、災害の軽減に貢献する。今後は、そのような地震動の振幅がより大きくなる可能性について検討して行く。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

藤田雄大, 境有紀, 2023, 表層地盤と基盤動に着目した周期2秒程度で揺れの数が多い地震動の発生条件, 日本建築学会大会

汐満将史, 日塔未来, 境有紀, 五十田博, 江口直希, 藤田雄大, 2023, 2003年十勝沖地震におけるKiK-net厚真を入力した木造建物の振動実験および地震応答解析, 第16回日本地震工学シンポジウム

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

境有紀（京都大学防災研究所）, 松島信一（京都大学防災研究所）, 五十田博（京都大学生存圏研究所）, 三宅弘恵（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：無

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学 防災研究所

電話：0774-38-4045

e-mail：sakai.yuki.4s@kyoto-u.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：境 有紀

所属：京都大学 防災研究所

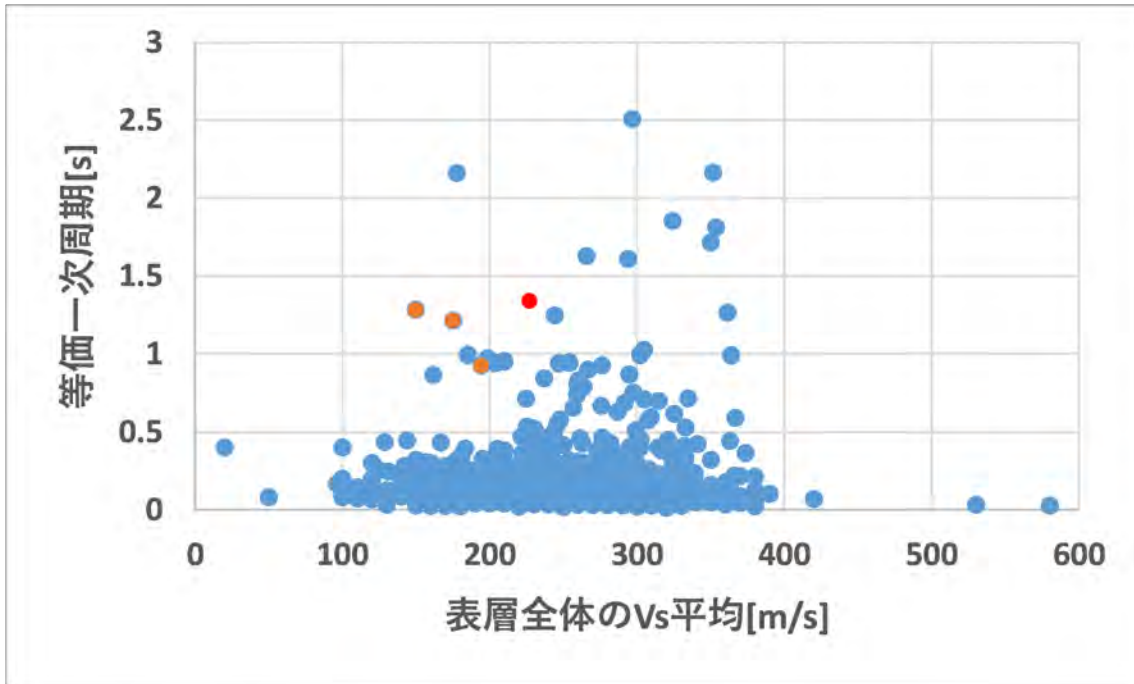


図1 KiK-netで震度6弱以上を記録した地震動の表層全体の V_s と表層地盤の等価一次周期（赤とオレンジは、該当地震動）

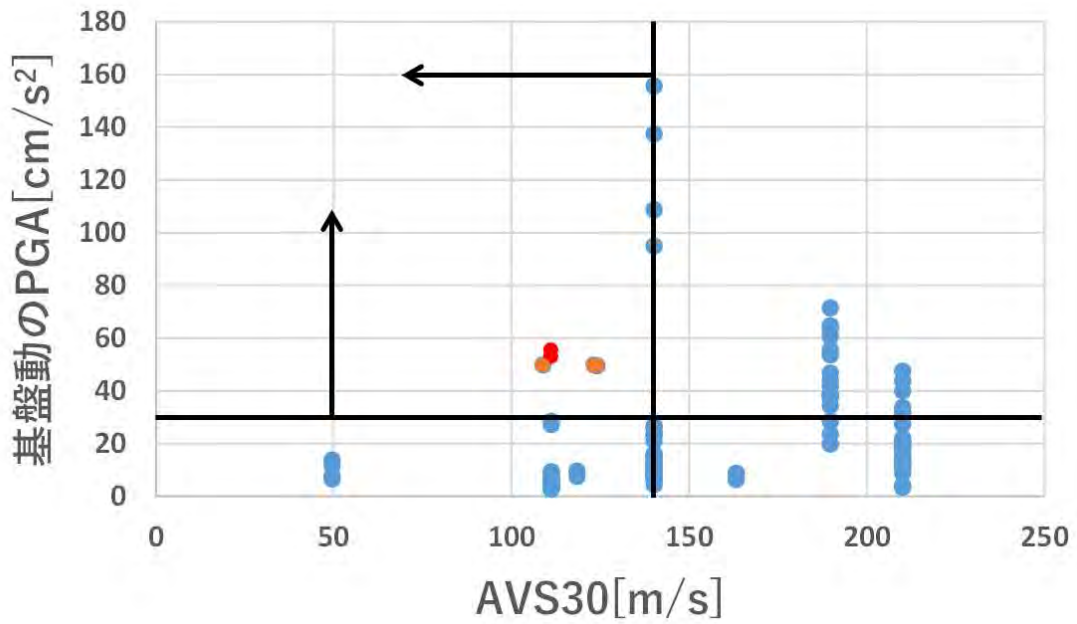


図2 表層全体の V_s が250m/s以下で等価一次周期が1-1.5秒の表層地盤におけるAVS30と 基盤動（KiK-netの地中記録）のPGAの関係（赤とオレンジは、該当地震動）

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

巨大地震・津波を起因とする火災リスク評価の高度化

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

イ. 津波の事前評価手法

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測手法

イ. 津波の即時予測手法

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

火山

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

テーマ1：地震火災・津波火災のリスク評価手法の高度化

地震火災・津波火災のリスク評価を実現するための手法について検討する。具体的には、地震火災や津波火災の進展を火災の発生、初期消火、延焼拡大、消防活動などの複数の要素現象に分割し、不確実性を考慮した各要素現象のモデル化を行い、最終的にそれらを統合する。また、火災の誘因となる地震動や津波の確率論的ハザード評価と統合するための枠組みも検討する。

テーマ2：地震後火災リスク軽減のための避難路照明計画に関する研究

実験は富山県消防学校の主訓練塔にある迷路避難室を利用する。実際の大空間居室は什器等が配置されていて直進することはできない状態を設定し、煙下における照明の誘導効果や空間形状の把握への寄与について検討する。研究当初はLED光源を利用する予定であったが、①建築空間への連続配置の施工の容易さ、②蓄光型誘導標識レベルの照明状態が設定可能であることを考慮し、有機ELを実験光源として用いることに変更した。

テーマ3：地震火災・津波火災の発生・被害拡大を抑制する対応行動モデルの策定

巨大地震・津波を起因とする火災リスクを中短期的に低減する方策としては、地域の人々の消火活動可能性や避難可能性を高めておき、地震・津波発生後の火災の拡大やそれにとまなう人的被害を抑制することである。そこで、1923年の関東大地震による地震火災、1995年の兵庫県南部地震による地震火災、2011年の東北地方太平洋沖地震・津波による津波火災などについての対応行動調査やこれらの火災に対しての人々の意識についての事例研究を参照し、消火活動可能性や避難可能性を高める条件を整理する。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

テーマ1：地震火災・津波火災のリスク評価手法の高度化

地震火災については、地震火災の出火件数予測における認識論的不確実性について検討した。具体的には、1995年から2022年までに日本で発生した6つの地震の出火記録を用いて、人口一人あたりの出火確率と地震動強さ指標の統計的な関係（出火モデル）を推定した。その結果、出火モデルは地震イベントによって大きく変動すること、および、この出火モデルの不確実性は地震火災リスク評価におけるポートフォリオ損失超過曲線を大きく変動させることが分かった。津波火災については、不確実性を考慮した津波起因の石油流出火災の定量的ハザード評価手法を開発した。提案する手法は確率論的津波ハザード評価の拡張であり、津波による石油貯蔵タンクの移動、それに伴う石油の流出、津波による石油の拡がりや燃焼の拡大、火災の熱放射を組み込んでいる。また、断層滑り分布、石油貯蔵タンクの液面高さ、出火の時刻と位置の不確実性を考慮する。確率的に生成される多数のシナリオについて数値シミュレーションを実施し、火災ハザードの定量的尺度である最大放射熱流束の超過確率を面的に表示する。大阪湾岸の石油コンビナートに適用し、南海トラフ地震を想定したケーススタディを通じて、火災がもたらし得る影響に関して理解を深められることが示された。

テーマ2：地震後火災リスク軽減のための避難路照明計画に関する研究

直進以外のルートで出口まで移動しなければいけない実験空間を設定し、床から900mm高さの壁面に連続して有機ELを設置した上で、光源輝度を蓄光型誘導標識レベルの1 cd/m²から高濃度下でも視認可能な1000 cd/m²まで4段階設定し、白煙濃度を0（無煙）～2.0 m⁻¹の濃度での様々な点灯パターンでの避難経路の視野輝度分布を計測した。有機ELを連続的に点灯させることで高濃度下でも迷わずに避難経路をたどれるが、その光源輝度が高すぎると誘導灯に散乱重畳して誘導灯と周囲との輝度対比が減少し視認距離が短くなるため、有機EL光源輝度を適正レベルに設定する必要があることを明らかにした。

テーマ3：地震火災・津波火災の発生・被害拡大を抑制する対応行動モデルの策定

近年の調査研究の傾向としては、阪神・淡路大震災以降の通電火災、電気火災の増加に対応して、地震後の出火危険への対応行動に関する調査研究・検討事例が多い傾向があり、これらに基づいた地震火災の発生予防の施策が展開されている傾向があることを示した。一方、令和6年度には、激震災害となった令和6年1月1日に発生した能登半島地震で現地調査を実施したところ、建物倒壊が起因となった火災の発生が見られ、激震による初期消火の困難性や消防活動の阻害条件の発生によって、大規模延焼火災となった事例が発生した。これは、阪神・淡路大震災時に見られた出火原因が不明とされた大規模火災と同様に激震による消防活動の阻害条件等によるものであったことが想起される。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

リスク評価における不確実性の考慮について新しい方法論を提示することによって、地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化（大地震による災害リスク評価手法）に貢献している。また、将来起こり得る災害の理解を深め、防災対策の合理的な意思決定を支援するツールを提供するものである。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Nishino T,2023,Post-earthquake fire ignition model uncertainty in regional probabilistic shaking-fire cascading multi-hazard risk assessment: A study of earthquakes in

Japan,International Journal of Disaster Risk Reduction,98,104124,査読有,謝辞有

Nishino T, Miyashita T, Mori N,2024,Methodology for probabilistic tsunami-triggered oil spill fire hazard assessment based on Natech cascading disaster modeling,Reliability Engineering & System Safety,242,109789,査読有,謝辞有

Akizuki Y,2024,Evacuation route design based on visibility for reducing evacuation delays,Fire Safety Journal,144,104099,査読有

・学会・シンポジウム等での発表

北後明彦,2023,地震火災・津波火災の発生・被害拡大を抑制する対応行動の事例研究の整理,第16回日

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

西野智研（京都大学防災研究所）,松島信一（京都大学防災研究所）,森信人（京都大学防災研究所）,宮下卓也（京都大学防災研究所）,秋月有紀（富山大学）,仁井大策（京都大学）,北後明彦（神戸大学）
他機関との共同研究の有無：有
鍵屋浩司（東北工業大学）,堀祐治（富山大学）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学防災研究所
電話：0774-38-4047
e-mail：nishino.tomoaki.3c@kyoto-u.ac.jp
URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：西野智研
所属：京都大学 防災研究所

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震ハザードにおける地下構造の影響の定量的評価の研究

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

イ. 津波の事前評価手法

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測手法

イ. 津波の即時予測手法

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

火山

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 令和5年度の計画の概要：

日本列島では複数の海洋プレートが沈み込んでいるためプレート境界での巨大地震の発生が懸念されている。そのため巨大地震の地震ハザードの評価は非常に重要な課題である。特に近い将来発生が懸念される南海トラフでの巨大地震は、多くの災害を引き起こすことが予想される。そのため、南海トラフでの巨大地震の発生を考慮した、防災の推進が求められている。その際に地震ハザード評価の精度向上は重要な課題である。地震ハザード評価の精度向上においては、震源域による影響、波動の伝播による影響、観測点近傍の構造による影響等、さまざまな要因が考えられ、それぞれの要因の影響を明らかにする必要がある。そのためには、地盤構造の推定や距離減衰式や波動伝播のシミュレーションを用いた研究等が重要となる。この課題では、地震ハザード評価の精度向上を目指して研究を進めた。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

関西における大都市は、堆積盆地等比較的柔らかな地盤の上に大きな都市が発達している。ここでは、まず盆地である京都盆地を対象の一つとして研究を進めた。京都盆地は、東西約10km南北約25kmの、大阪層群、段丘堆積物相当層、沖積層に埋積された堆積盆地である。自治体や研究機関等によって実施された地下構造調査によると、堆積層の厚さは盆地中央部を北東-南西方向に延びる宇治川断層より北側では100~300 m程度、南側では400~700 m程度である。対象とする地震は、京都盆地の北西約15 kmで発生した2022年3月31日のMw4.2の地震を用いた。この地震では、最大震度4を亀岡市、京都市で記録している。地震動シミュレーションは、差分法を用いた。最小S波速度は350m/sまで考慮し、堆積層中のグリッド間隔を25 mとして、2 Hzまでを有効周波数とした。計算された波形の時空間分布を見ると、京都盆地の地震動応答は、直達波の後、多重反射、盆地縁部で発生する表面波が、狭い盆地内を交差し、複雑な様相を呈することがわかった。盆地縁の形状は出入りが多く複雑であり、盆地縁で発生した表面波が強め合う尾根が、盆地縁の屈曲部を始点として形成されていることが示唆された。

瀬戸内海沿岸には、岡山や広島等大きな都市が存在している。またそれらの都市は、海拔の低い海岸から山地に向かって広がっており、堆積層の厚さが変化し、地域の特徴の変化が予想される。そのため、それらの地盤構造の特徴を知ることが災害の予測を行う上でひじょうに重要である。そこで、岡山県内において広範囲な領域で高密度な震度観測点における地盤増幅率と地盤構造の推定をおこなった。この研究では、岡山県内にある自治体の震度計観測網（岡山県震度情報ネットワーク）と気象庁の震度観測点や防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netなどの強震観測点の計119地点で観測された地震の波形記録からその各地点の地盤特性を抽出した。地震は、中国地方、四国地方、近畿地方で発生し、岡山県震度情報ネットワークの観測波形記録が入手できたイベント約20個を用いた。地盤特性は地震基盤からの地盤増幅率で、スペクトル・インバージョンによって求めた。その結果、岡山県のほぼ全域において様々な地点の地盤特性を抽出することができた。また、児島湾周辺を中心とする地点の地盤構造の推定や岡山大学津島キャンパスにおける微動探査も行った。これら岡山県における地盤増幅特性や地盤構造モデルは、南海トラフの地震を含む巨大地震に対する防災や減災のための重要な情報となり得ると期待される。

中国四国地方は山間部も多く、南海トラフの巨大地震発生時の地すべりの発生が懸念される。そのため、鳥取県の地すべり地域において中山間地域の不整形地盤が想定される地すべり地域及び断層近傍において、微動および重力探査を実施し、地盤震動特性の把握及び地盤構造の推定を行った。島根県多伎町内の小田地区と田儀地区の地すべり地域では微動探査と重力探査、徳島県三好市の地すべり地域では微動探査、三野断層近傍では動探査と重力探査を実施した。地すべり地域では、滑落崖やその周辺でH/Vの卓越周期が長くなる傾向やピークが大きくなる傾向がみられた。多伎町では大きな移動体ブロック内で複雑に変化する様子、三好市では小ブロック毎に形状が異なることがわかった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(5)-2 南海トラフその巨大地震

近い将来発生が懸念されている南海トラフでのプレート境界での巨大地震に対して、地震ハザードの評価は非常に重要な課題である。地震ハザード評価の精度向上においては、震源域による影響、波動の伝播による影響、観測点近傍の構造による影響等、さまざまな要因が考えられる。さらに、震源域近傍の西南日本においては、多くの都市が点在し、それぞれの地域の特徴を持っている。それらの地域に特徴に対してどのような災害が懸念されるのかについて、いくつかの地域を取り上げ、調査研究を行い、それぞれの地域の懸念材料を明らかにすることができた。今後はさらにそれぞれの要因の影響を明らかにするとともに地域的な特徴も考慮し防災対策を考えていく必要がある。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

野口竜也・河野勝宣,2023,微動観測に基づく地すべり地域－島根県多伎町－の地盤震動特性と地盤構造,日本地震学会2023年度秋季大会,S16P-04

野口竜也・西村武・香川敬生,2023,1943年鳥取地震における吉岡断層近傍の地盤震動特性と地盤構造,第16回日本地震工学シンポジウム,Day1-G417-21

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

野口竜也（鳥取大学）,竹中博士（岡山大学）,飯高隆（東大情報学環/地震研究所）,関口春子（京都大学防災研究所）

他機関との共同研究の有無：有

香川敬生（鳥取大学）,小野祐輔（鳥取大学）,河野勝宣（鳥取大学）,山田伸之（高知大学）,小松正直（岡山大学）,渡邊禎貢（岡山大学）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学 情報学環/地震研究所

電話：03-5841-5804

e-mail：iidaka@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：飯高隆

所属：東京大学 情報学環/地震研究所

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

コミュニティ断層モデルの試作

(3) 関連の深い建議の項目：

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

今年度より、地震・活断層コミュニティで一定のコンセンサスのある国内の3次元断層形状モデルの作成を目的として取り組みを開始し、まず拠点間連携課題として実施する。モデル構築の手順やコンパイル基準は、NZの先行事例（Seebeck et al., 2023）で実績のあるものを採用する。NZは日本とも島弧のテクトニックな条件や観測条件が似通っているところも多く参考になる。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

本年度は試作版の作成として、地震本部の示した全国の主要活断層帯から半数にあたる平均変位速度の高い上位50断層を選定し、3次元断層形状モデルを作成した。モデル作成は、以下の手順で行った。1) 産総研活断層データベースの地表トレースをもとに、副次断層や細かな屈曲を単純な表現にした、単純化地表トレースを作成する。2) 長期評価およびJ-SHISモデルでの傾斜角のカタログ値を用いて、一様傾斜角を仮定して、地表トレースから断層面を地下に延長することで、非平面の3次元断層形状を得る。また、地震活動データを用いて、地震発生層下限を定義して、各断層の下限を与える。モデル作成にあたっては、

今回の試作版は、米国での例（15年以上更新を続け最新はVer. 6.0 (2023)）のように、今後の観測や解釈の発展によりモデル更新していくものの端緒として位置付けられる。今後、ワークショップ形式などで、試作モデルの評価と修正を広くコミュニティに公開して行うことを検討している。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

活断層の3次元形状モデルは、地震発生や地震災害を含む地震・活断層現象に関する大凡の研究の基本を成すものである。その重要性の一方で、観測や解釈の難しさを抱える断層形状について、コミュニティに広く公開し、継続的な評価と更新する枠組みを作ることができる。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

安藤亮輔・吾妻崇・コミュニティ断層モデル有志グループ,2023,コミュニティ断層モデルの構築に向けて,日本地震学会秋季大会,S19P-01

吾妻崇・安藤亮輔・コミュニティ断層モデル有志グループ,2023,日本の主要活断層帯のコミュニティ断層モデルの構築,日本活断層学会秋季学術大会,O-01

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

安藤亮輔（東大理）、後藤浩之（京大・防災研）、金子善宏（京大・防災研）、西村卓也（京大・防災研）、
加藤愛太郎（東大・地震研）

他機関との共同研究の有無：有

吾妻崇（産業技術総合研究所）、内出崇彦（産業技術総合研究所）、松原誠（防災科学技術研究所）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学 大学院理学系研究科

地球惑星科学専攻

電話：03-5841-8329

e-mail：ando@eps.s.u-tokyo.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：安藤 亮輔

所属：京都大学 防災研究所

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

確率論的津波漂流物評価手法構築に向けた数値的検討

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
イ. 津波の事前評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
イ. 津波の即時予測手法

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 令和5年度の計画の概要：

日本海溝や南海トラフなどの代表的な海溝型地震の震源域について、想定震源域津波痕跡や地震波の観測事実を整理し、各沈み込み帯での地震規模や震源パラメータ範囲の力学的限界、および統計的性質での観測によって得られた滑り欠損速度分布や浅部スロー地震の理解を最新の理学的知見について整理進展させる。これらその理学的知見にもとづき成果を受け、従来モデルより高度な物理的拘束条件を反映させることで、ランダムなすべり分布を生成する確率津波モデルの更新を行う。

更新された確率津波モデルを用いて、いくつかのマグニチュードにおける津波初期波源を多数生成し、津波の伝播計算を行う。いくつかの湾もしくは港に着目し、特に漂流物への影響が大きい津波流速について、不確実性の評価を行う。津波シナリオ毎に漂流物計算を実施し、津波側の不確実性がもたらす漂流挙動のばらつきを明らかにする。さらに、漂流物側の不確実性を考慮した場合の漂流計算も実施し、上記の結果と比較することで、津波側の不確実性のみを考慮した場合、漂流物側の不確実性のみを考慮した場合、両方を考慮した場合の結果からそれらのばらつきを評価し、確率論的津波漂流物評価手法の構築のための検討を行う。また国外の津波漂流物研究者との議論・連携を通して、評価手法の構築に向けた検討を加速させる。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和5年度は、沖合観測網と多数の津波シナリオを用いた沿岸域の津波予測システムの構築、津波波源の不確実性を考慮した漂流物の影響評価に関する基礎的検討や漂流物モデルの高度化などにより、防災工学的な側面に立った社会実装のための準備を行った。

まず、沖合観測網S-netが密集して設置されている東北沿岸に着目し、深層学習アルゴリズムの一つであるノイズ除去オートエンコーダ（DAE）モデルにより津波予測システムを開発・構築した。確率論的震源モデル（M7.0-8.8）にもとづく800の津波シナリオの計算を教師データとした。44のS-net観測点における合成津波波形を入力とし、4つの沿岸潮位計における波形を出力とした。別の200の津波シ

ナリオや、2016年福島県沖地震の津波でモデルの性能を検証した結果、構築モデルは沿岸の時系列波形を良好に再現した。将来的には、より多くの津波シナリオを学習し、正断層型や気象津波など異なる種類の津波に対する頑健性を高める見込みである。この成果は、Earth, Planets and Spaceに掲載されている。

南海トラフ想定震源域における断層パラメータの不確実性が津波高さに及ぼす影響についても検討を行った。断層パラメータのうち、断層深さを4種類、すべり角を5種類、確率津波モデルにより生成した100種類のすべり量分布により初期津波波源を生成した。生成した津波波源を用いて津波伝播計算を実施し、西日本沿岸での津波高さを比較した。内閣府モデルに対して断層深さを5km深くした場合に沿岸の津波波高の中央値が外洋で1m程度、内湾で0.4m程度大きくなることなどが分かった。この成果は、土木学会論文集に掲載され11月に行われた海岸工学講演会で口頭発表された。

津波漂流物の影響評価に関する基礎検討として、確率津波モデルを用いて南海トラフ沿いの津波波源を多数生成し、東京湾、伊勢湾を対象にした津波伝播計算を実施し、漂流物の挙動に対して大きな影響を及ぼす津波流速についてばらつきを評価した。今後これらのばらつきが漂流物に及ぼす影響について調査する。

津波漂流物の挙動を推定する数値計算モデルに関して、水槽実験との比較を通じた津波漂流物モデルのモデル改良と精度検証を実施した。実地形のような複雑な海底地形と漂流物底面との局所的な接触や多数陸上構造物との接触による漂流挙動の変化を追跡できるような改良を行うことで、水槽実験における平均的な漂流挙動やそのばらつきを表現可能であることを示した。さらに、津波漂流物の挙動推定における作用力推定方法や漂流物と流体の相互作用方法の精度について検証を行い、これらの手法間の違いについて定量的な評価を行った。これらの成果の一部は11月に行われた海岸工学講演会で口頭発表された。

また、1月に発生した能登半島地震では複数の漁船が能登半島から新潟県沿岸に到達した。1月後半時点で提案されているいくつかの断層パラメータを用いた津波計算及び漂流物計算を実施したところ、津波の伝播だけでは新潟県沿岸への移動を説明できず、潮汐や風の影響を考慮する必要があることを示唆する結果を得た。

5月に開催された津波漂流物に関するワークショップでは、津波漂流物の挙動推定に関する計算精度、予測手法の高度化、今後の国際的な取り組みについて国内外の津波漂流物研究者と議論した。9月には東大地震研佐竹グループと京大防災研森グループによる合同セミナーを開催した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

当該研究は、不確実性の大きい将来の津波に対して、沖合観測網と多数の津波シナリオを用いた沿岸域の津波予測システムの構築や津波波源の不確実性を考慮した漂流物の影響を定量的に評価するための基礎的な検討を行ったものである。今後は、不確実性を考慮した汎用的な漂流物の影響評価手法を構築し、現地適用を進めていく予定である。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・ 論文・報告書等

Nishino, T., Miyashita, T., Mori, N., 2024, Methodology for probabilistic tsunami-triggered oil spill fire hazard assessment based on Natech cascading disaster modeling, Reliability Engineering & System Safety, 242, 109789, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109789>, 査読有, 謝辞有

Fukui, N., Mori, N., Kim, S., Shimura, T., Miyashita, T., 2024, Application of a subgrid-scale urban inundation model for a storm surge simulation: Case study of typhoon Haiyan, Coastal Engineering, 188, 104442, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104442>, 査読有, 謝辞有

Miyashita, T., Nishino, A., Ho, T.-C., Yasuda, T., Mori, N., Shimura, T., Fukui, N., 2023, Multi-scale Simulation of Subsequent Tsunami Waves in Japan Excited by Air Pressure Waves Due to the 2022 Tonga Volcanic Eruption, Pure and Applied

Geophysics, 180(9), 3195–3223, <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03332-9>, 査読有, 謝辞有

Wang, Y., Imai, K., Miyashita, T., Ariyoshi, K., Takahashi, N., Satake, K., 2023, Coastal tsunami prediction in Tohoku region, Japan, based on S-net observations using artificial neural network, Earth, Planets and Space, 75(1), 154, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01912-6>, 査読有, 謝辞有

藤本健太, 宮下卓也, 森信人, 志村智也, 2023, 南海トラフ地震の断層パラメータの不確実性が西日本沿岸の津波波高に与える影響, 土木学会論文集, 79(17), 23-17048, <https://doi.org/10.2208/jscej.23-17048>, 査読有, 謝辞有
西野藍, 宮下卓也, 安田誠宏, 志村智也, 森信人, 2023, 2022年フンガトンガ火山噴火に伴う日本沿岸における最大水位の要因推定, 土木学会論文集, 79(17), 23-17032, <https://doi.org/10.2208/jscej.23-17032>, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

千田優, 森信人, 2023, 実地形への適用性向上を目指した漂流物モデルの開発と検証, 第70回海岸工学講演会

宮下卓也, 2023, 複雑形状をもつ湾における長周期波の応答振動解析, 第13回巨大津波災害に関する合同研究集会

藤本健太, 宮下卓也, 森信人, 志村智也, 2023, 南海トラフ地震の断層パラメータの不確実性が西日本沿岸の津波波高に与える影響, 第70回海岸工学講演会

西野藍, 宮下卓也, 安田誠宏, 志村智也, 森信人, 2023, 2022年フンガトンガ火山噴火に伴う日本沿岸における最大水位の要因推定, 第70回海岸工学講演会

宮下卓也, 森信人, 志村智也, 2023, ヘルムホルツ方程式を用いた日本主要湾における長周期波の振動応答特性の数値的評価, 第70回海岸工学講演会

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

千田 優（港湾空港技術研究所）, 宮下 卓也（京大・防災研）, 森 信人（京大・防災研）, 何 東政（京大・防災研）, 佐竹 健治（東大・地震研）, 古村 孝志（東大・地震研）
他機関との共同研究の有無：無

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 津波高潮研究グループ

電話：046-844-5052

e-mail：chida-y@p.mpat.go.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：千田 優

所属：海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 津波高潮研究グループ

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地盤と建物特性を考慮した建物被害分析と後発地震への応答予報モデルの構築

(3) 関連の深い建議の項目：

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

本課題では、震源特性と伝播経路特性、立地地盤の特性、建物の諸元、さらには建物内の上層階と下層階での被害差などを考慮した高精度地震情報配信手法の開発を命題に、A) 地盤特性と建物特性を考慮した病院建物被害分析、B) 後発地震の予測モデルと建物応答予測情報の検討、に取り組む。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

対象地域の平均的な敷地地盤特性と拠点建物で観測された強震記録を用いて、その地域の任意の地点における入力地震動（地表面地震動）と被害を評価する手法について検討した。評価方法は、地表面－建物間の伝達関数を用いた周波数応答解析により、強震記録から地表面地震動を逆算する方法である。R5年度は、解析モデルに不可欠な基礎－地盤間のインピーダンスを評価した。図1に、対象建物の3D-FEM解析モデルを図1に示す。対象建物の基礎版のみを無質量でモデル化し、インパルス加振によりインピーダンスを算定する。地盤は線形弾性でモデル化する。解析モデルの底面部および側面部には無反射境界を設定し、地盤の半無限性を考慮する。本モデル化手法により、半無限地盤におけるインピーダンスの理論解と概ね整合するインピーダンスを評価できることを別途確認している。図2に得られたインピーダンスのうち、水平成分の実部の特性を示す。今後、得られたインピーダンスを用いた周波数応答解析により地表面地震動を推定し、観測記録との整合性を検討する。

建物特性を考慮した病院建物被害分析として、構造躯体だけではなく、医療機器・非構造部材の評価も含めて病院の機能維持性を評価する手法を構築し、花折断層地震を想定した地震動に対する京都市内の病院機能維持性を評価した。構造躯体についての被害推定では、対象建物について、Google Earth, PLATEAUでの事前調査と現地調査を実施して、建物階数や建物の高さやエキスパンジョイントの有無などを調査した。また、自治体の被害想定に使用されている構造特性係数と建物の等価1次固有周期に対応する加速度応答スペクトルの関係から被害を判定した。図3に構造躯体のみを考慮した場合の被害推定結果を示す。次に、構造躯体の被害判定に、応答スペクトル法と損傷確率関数を利用した非構造部材の被害推定を組み合わせた建物被害の総合判定を実施した。図4に示す総合判定結果では、構造躯体が無損傷の30病院のうち、総合判定で小破に変わった病院が17病院、構造躯体が小破の27病院のうち総合判定で中破に判定が変わった病院が11病院存在し、被災度区分が変化することを確認した。さらに非構造部材まで評価に加えると、構造躯体のみで評価した被害程度に比べて被害程度が大きくなるが、さらに医療機器の評価を加えることでは、被害程度はあまり変化しなかった。ただし、実験結果や実際の被害との対応については、更に検証が必要である。

後発地震の発生確率を評価するため、過去の地震カタログに基づいた地震の発生しやすさ（space-time ETAS model, Ogata 2022）を求めるプロトタイプシステムを構築した。時空間 ETASモデルでは、過去の地震カタログを利用して翌1日に、あるマグニチュード以上の地震が何個発生するかを求

めている。本課題では1日ごとに時空間 ETAS モデルを計算し、その空間分布を分析した。例として、図5に令和5年1月1日に発生した能登半島地震前後における、マグニチュード4以上の後発地震発生数の予測結果を示す。本震発生を受けて、能登半島の震源域及びその周辺で後発地震の発生予測数が大幅に増加している。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地震発生時の建物応答や被害の予測精度を向上し、かつ即時に建物利用者や管理者にその情報を提供することを目的に、利用者が多い大規模な建物や災害拠点となる施設を対象として、対象地域の平均的な敷地地盤特性と拠点建物で観測された強震記録を用いて、その地域の任意の地点における入力地震動（地表面地震動）と被害を評価する手法について検討した。今後は開発した手法の妥当性や有用性について医療関係者と協議し、より実用的な情報の計算手法や推定結果の利用方法について引き続き検討を進める。

また、被災建物の特定機能の継続性を評価する手法として、構造躯体に加えて非構造部材や医療機器の被害を考慮した病院建物被害分析手法の開発に取り組んだ。また、R4年度12月に気象庁により発表があった後発地震情報については、施設に地震計を設置している医療機関でも関心が高く、今後の被害推定配信システムの高度化に向けて、後発地震の予測モデルと建物応答予測情報の検討、に取り組んだ。今後は、

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

倉田 真宏（京大・防災研）、池田芳樹（京大・防災研）、山田 真澄（京大・防災研）、鶴岡 弘（東大・地震研）、楠 浩一（東大・地震研）

他機関との共同研究の有無：有

中川 博人（建築研究所）、柏 尚稔（大阪大学工学研究科）、溜瀨 功史（気象研究所）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学 防災研究所

電話：0774-38-4084

e-mail：kurata.masahiro.5c@kyoto-u.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：倉田 真宏

所属：京都大学防災研究所

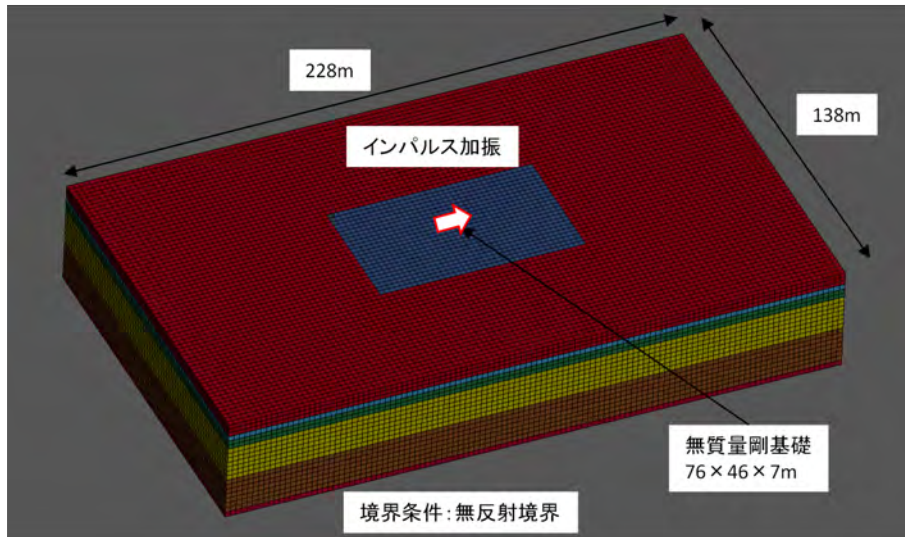


図1 地盤のFEM解析モデル（直接基礎）

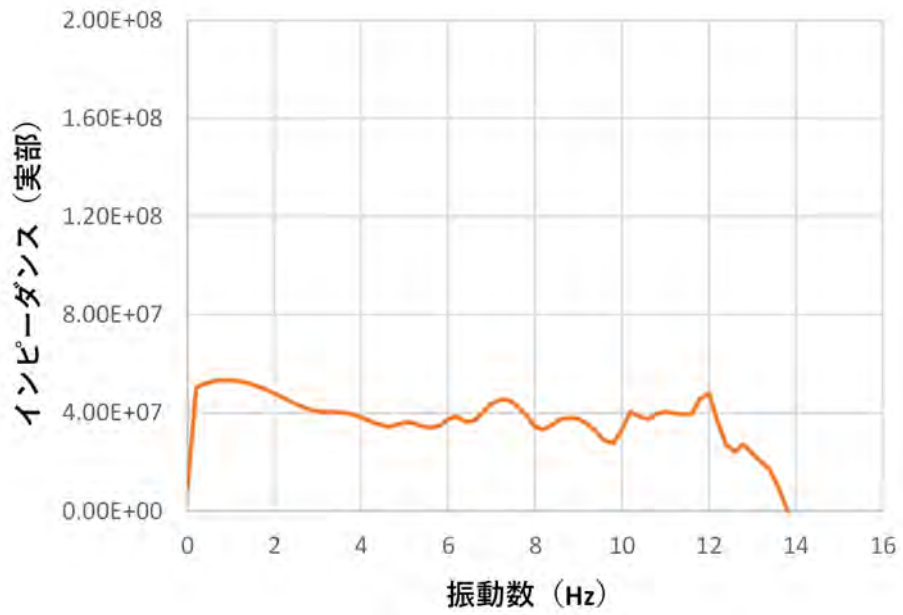


図2 算定されたインピーダンス（実部）

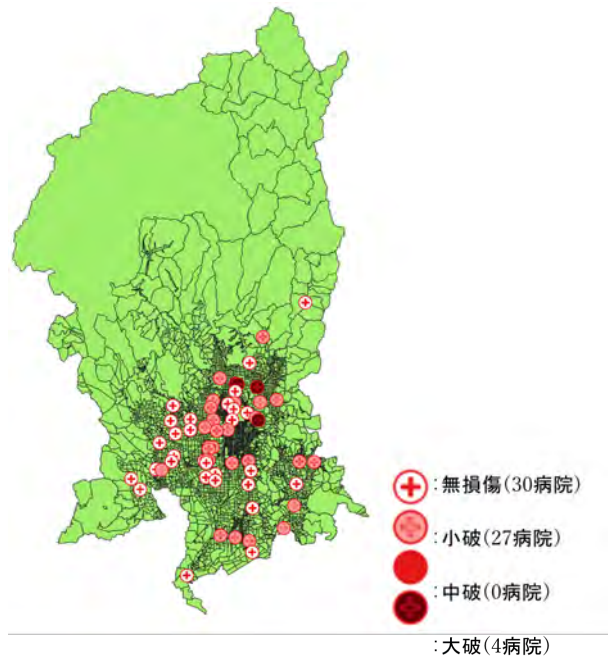


図3 構造躯体の被害（全61病院）

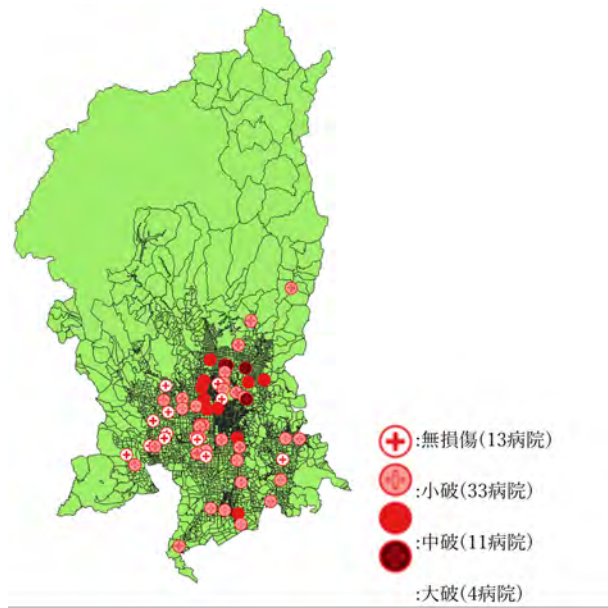


図4 非構造部材を含めた地震被害推定の総合判定（全61病院）

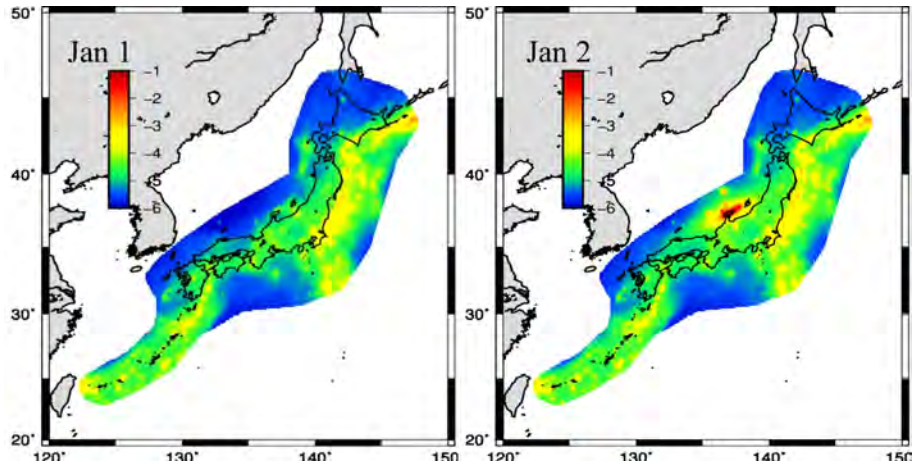


図5 $M > 4$ の地震の発生数の予測

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

土砂災害のサイレントキラーとなる地震による地表変状の研究 2022年12月31日山形県鶴岡市西目の斜面崩壊に与えた2019年山形県沖地震の影響評価

(3) 関連の深い建議の項目：

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

サイレントキラーとは、「それと分かる症状が現れないまま進行し、致命的な合併症を誘発する病気のこと」とされるとされる。地震が起こった後に生じる地表変状で検知することはむずかしいが後に土砂災害の重要なトリガーとなる可能性のある地表変状とは何か、またその検知の方法を研究する。昨年、12月31日に山形県鶴岡市で発生した斜面崩壊は、誘因が融雪水と雨であるとされているが、発生場所が人工の切土開発であったこともあり、その発生の原因は明確ではなく、周辺住民に出された避難命令が融雪期終了までの長期におよぶ影響が甚大な災害である。この斜面崩壊に2019年山形県沖地震の見えなかった地表変状が関与した可能性について検討する。申請者は、これまで拠点間連携共同研究（2021-K-05）により、同じ地すべり地周辺で異なる地形的特徴を持つ箇所（地すべり末端部、中央部、隣接する谷部など）で地震観測を実施して地震に対する応答の差異を明らかにしてきた。末端の斜面下方に支持する構造のない部分、地すべり土塊中央部、隣接する谷部を比較すると、揺れの振幅は、地すべり末端部が最も大きく、その支持する構造がないいわゆる崖に対し震央の方向と崖の方向が直交する場合と崖の方向と震央方向が一致する場合に揺れの振幅が大きいという結果を得ている。このことから、山形県の斜面崩壊には、2019年山形沖の地震の影響があったと考え、この地震によってこの2年半後の斜面崩壊との関係、特に検出ができない程度での地形変化や水文特性に変化が生じていなかったかを検討する。また、2016年熊本地震では、地震後の大きな降雨イベントでは、谷部に土砂が堆積したなどの地表変状が確認されている箇所で土石流などが頻発した。ほかに、申請者は地震直後から一年後の比較的小規模の降雨で崩壊した事例も現地調査で確認した。この場合は、地震後に発生した亀裂が谷部の落水線を横切る箇所に位置し亀裂に流出水が流れ込み崩壊に至った例を確認している。1m-LiDAR DEMによる地形変化検出のみ可能な「なぜこの箇所で発生したのか不明」とされる例である。このような事例を詳細に検討することによって、中規模の土砂災害の発生しなかった地震でも気づかれず数年後に土砂災害を発生する要因や地表変状は何かを特定し、その検出方法の研究の端緒とする。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1970年代に行われた土砂採取によって出現した急傾斜の平坦な切り取り斜面には、2019年山形県沖地震によって生じたと考えられる斜面上部の亀裂と斜面下部の小崩壊があることが、1m-LiDAR DEMを用いた土砂災害予測基本図によって確認された。斜面上部の亀裂は、斜面に浸透する降水や融雪の鉛直浸透を助長し、2022年12月31日に発生した崩壊性の地すべりの発生原因となったと考えられる。斜面下部に存在した小崩壊は、この地震によって生じたと考えられ、今回の崩壊性地すべりの規模を大きくした可能性がある。これは、切り取り斜面の下部に認められる遷急線の一部が破壊され移動していることと関連している。図-5内の赤枠の範囲が崩壊後の土砂災害予測基本図から読み取った崩壊範囲で、斜面下部に上部斜面を支持する構造がなく、これはいわゆる遷急線と一致する。切り取り斜面や盛り土斜面などは、地震後に発生する亀裂の有無、斜面下部の崩壊などのモニタリングを実施する必要があると考えられる。

使用した1m-LiDAR DEMは、鶴岡市農山漁村振興課および山形県庄内総合支庁建設部より提供を受けた。記して、謝意を表す。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

図-1 切土前の西目地区（交差法で立体視可能） 図-2 切土進行中の西目地区

図-3 1976年撮影 切土はほぼ終了 東側から植栽 図-4 2019年山形沖地震後斜面の滑落が見られる

図-4（左）土砂災害予測基本図鳥観図（2023年1月測量実施）

図-5（右）土砂災害予測基本図鳥観図（2019年6月測量実施）赤実線は地すべり部

A:亀裂の位置 地すべりが生じた部分に亀裂または崩壊が見られる 写真は、亀裂の状態を示す

使用した1m-LiDAR DEMは、鶴岡市農山漁村振興課および山形県庄内総合支庁建設部より提供を受けた。記して、謝意を表す。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

齊藤隆志,2023,土砂災害のサイレントキラーとなる地震による地表変状 -鶴岡市西目で発生した地すべりを例として,第43回日本自然災害学会予稿集,p. 125-126

古谷 元・齊藤隆志,2024,土砂災害のサイレントキラーとなる地震による地表変状 -鶴岡市西目で発生した地すべりを例として,令和5年度 京都大学防災研究所 研究発表講演会,P17

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

齊藤 隆志（京大・防災研）,加納靖之（東大・地震研）

他機関との共同研究の有無：有

古市 剛久（森林総合研究所）,古谷 元（富山県立大学）,筒井和男（和歌山県土砂災害啓発センター）,中屋志津男（白浜試験）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学 防災研究所

電話：0774-38-4102

e-mail：saitou.takashi.2z@kyoto-u.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：齊藤 隆志

所属：京都大学 防災研究所

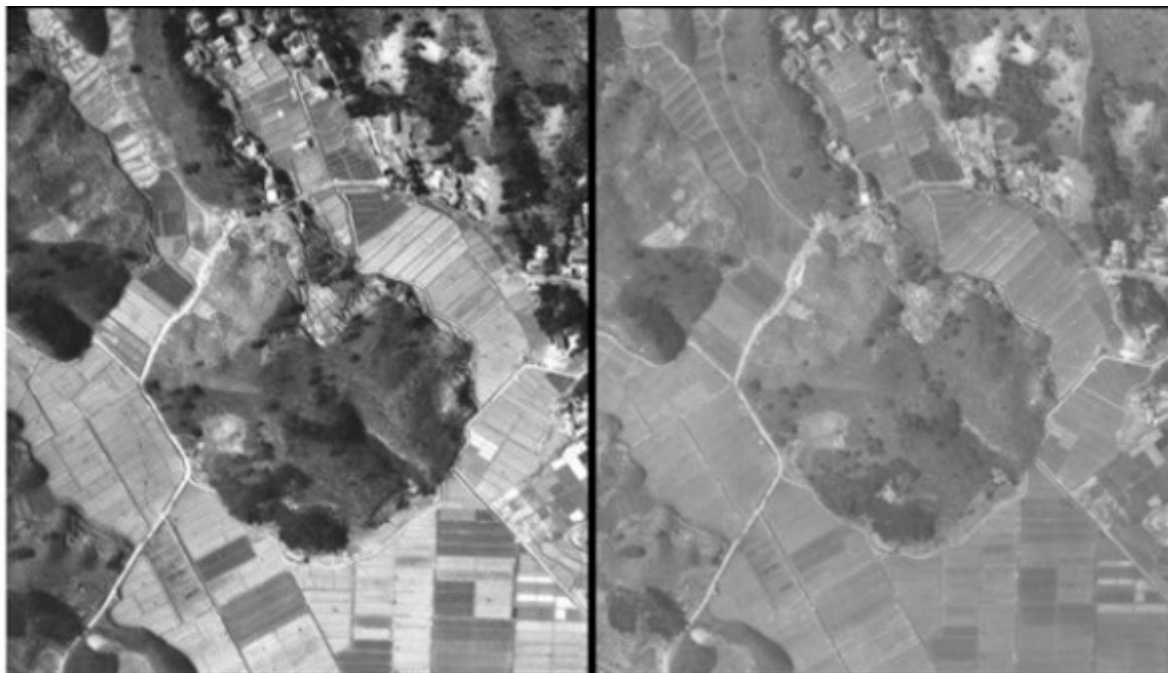


図1
切土前の西目地区（交差法で立体視可能）



図2
切土進行中の西目地区



図3
1976年撮影 切土はほぼ終了 東側から植栽



図4
2019年山形沖地震後斜面の滑落が見られる

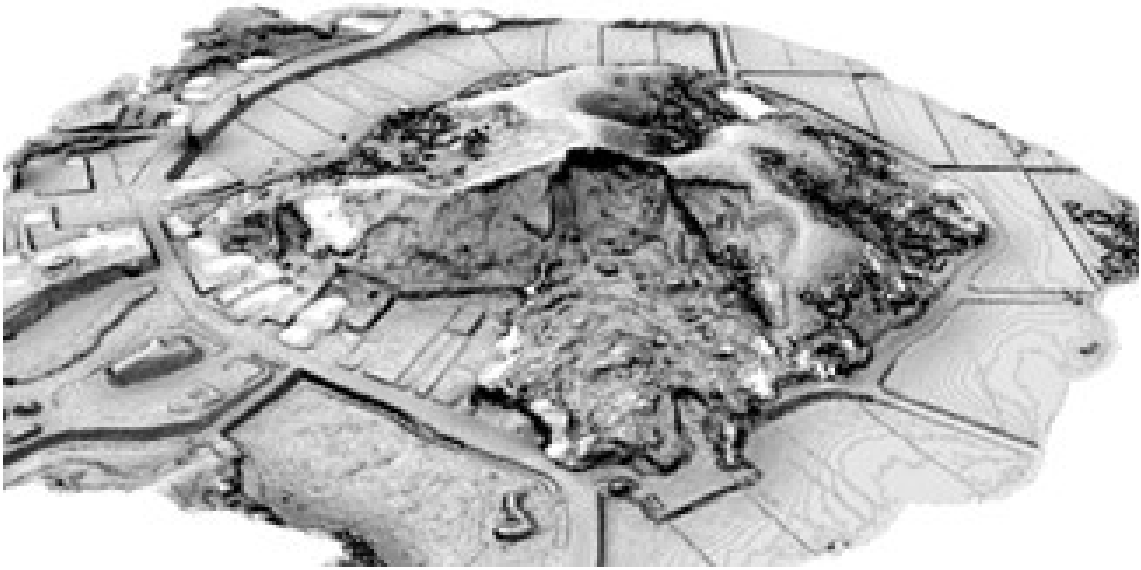


図5
土砂災害予測基本図鳥観図（2023年1月測量実施）



図6
土砂災害予測基本図鳥観図（2019年6月測量実施）赤実線は地すべり部

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

社会の要請に基づく首都圏における災害の誘因予測のための官民連携のフレーム検討・構築

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
- ウ. 大地震による災害リスク評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

本研究は、2023年度に発生から100年を迎える関東地震を機会として、K-NET等観測網を国の防災に係る重要インフラとして整備・運営することの重要性に関する国民認識を醸成することを目的とする。本研究では、産業界の期待を視野に入れ、産業界の参画促進による官民協働による地震観測体制強化の推進、人口・産業の密集地である首都圏経済への甚大な被害の観測体制に基づく最小化方策の確立を目指して、日本の産業界が有する期待の構造化、及び官民連携体制の確立に至るガバナンス要件の決定に関する取組を実施する。

これらの取組として、国内外の研究者からの知見を得るため、2023年度に国内で様々に開催されることが予定されている関東地震100周年イベント（学会、シンポジウム等）と共同で国内外の有識者の招へいを実施する。国外から招へいする有識者については、1）都市災害の経験、2）俯瞰的な地球規模課題における意義、3）国家の防災戦略における誘因予測研究のあるべき姿、4）誘因予測に基づく被害抑止策、5）科学と地域の関係性におけるレジリエンス向上につながるための試みの観点を踏まえて選定する。国内から招へいする有識者については、1）過去の首都圏災害（関東地震）の実際と教訓、2）地球規模の課題である超高齢化社会におけるレジリエンス力強化の課題、3）あらゆる組織の災害時の事業継続力を高めるための誘因予測研究への期待、4）産業界からの要請に基づく災害の誘因予測のための官民連携の提案、5）誘因予測研究結果を災害情報へと展開することで被害軽減を実現の観点を踏まえて選定する。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

日本学術会議が主催した持続可能な社会のための科学と技術に関する国際会議2023「壊滅的災害に対してレジリエントで持続可能な社会への変革」において、過去に壊滅的地震災害のあったトルクメニスタン等国内外の有識者からの知見を得た。また、台湾・国家災害防救科技中心（NCDR: National Science and Technology Center for Disaster Reduction）とのワークショップ及び台湾・国家地震行程研究中心（NCREE: National Center for Research on Earthquake Engineering）の研究者・技術者との会議において、社会のレジリエンス強化のため、地震災害を含む自然災害に関する観測とそのデータの活用方策と情報共有、防災対策のあり方や官民連携、社会的課題の抽出、地震工学の動向や及び地震減災に関する建造物の構造研究について議論を踏まえ、次に関する研究成果を得た：1）災害リスクについての理解の深化と展開、2）災害に対処する新しいガバナンスの確立、3）災害に対する財政支出・人材育成・技術開発投資の確実な実行、4）より良い復興（Build Back Better）を

可能にするための事前方策の確立。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Ahmedova, S.,2023,Focus zones of strong earthquakes occurring in Turkmenistan - Disaster and recovery after Ashgabat earthquakes of 1948,International Conference on Science and Technology for Sustainability 2023 -Transforming Society to Become Resilient and Sustainable beyond Catastrophic Disasters-, Science Council of Japan

Lee, W.S.,2023,Enable an Information Supply Chain for Disaster Risk Management - Innovation, Inclusion and Intelligence,International Conference on Science and Technology for Sustainability 2023 -Transforming Society to Become Resilient and Sustainable beyond Catastrophic Disasters-, Science Council of Japan

Science Council of Japan,2023,Tokyo Statement 2023 "Transforming Society to Become Resilient and Sustainable beyond Catastrophic Disasters",International Conference on Science and Technology for Sustainability 2023 -Transforming Society to Become Resilient and Sustainable beyond Catastrophic Disasters-, Science Council of Japan

Tabata, K.,2023,Achievements and Future Prospects Contributing to the Research Infrastructure for Disaster Risk Reduction with E-Defense,3rd Workshop between the National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience of Japan and the National Science and Technology Center for Disaster Reduction of Taiwan

・学会・シンポジウム等での発表

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

田端 憲太郎（防災科学技術研究所）,多々納 裕一（京大・防災研）,佐竹 健治（東大・地震研）

他機関との共同研究の有無：有

青井 真（防災科学技術研究所）,功刀 卓（防災科学技術研究所）,中島 正愛（株式会社小堀鐸二研究所）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：国立研究開発法人防災科学技術研究所 企画部国際課

電話：029-863-7785

e-mail：kokusai@bosai.go.jp

URL：https://www.bosai.go.jp/

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：田端 憲太郎

所属：防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門（兵庫耐震工学研究センター）

(1) 実施機関名：

拠点間連携共同研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

長寿命化改修を実施した高経年建物の被害把握のための地盤と建物の地震観測に関する基礎的検討

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

(6) 令和5年度の計画の概要：

長寿命化改修を実施した高経年建物の被害把握を目的としている。対象とした建物は平面が9m*84mと細長い平面を有する板状建物であり、振動時にねじれて東西で異なる挙動を示すことが予測されることから、頂部は東西2か所にセンサーを設置している。また、近傍の地盤においても強震観測を続けており、この地盤観測点は建物改修に関係なく今後も観測を継続予定である。

改修工事後に再度建物内にセンサーを設置し、改修を繰り返した高経年建物の改修前後における地震入力、および上部構造の固有振動数の変化、地震時挙動を明らかにすることで、高経年建物の地震時被害把握の精度向上を目指す。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

改修工事が遅延しており現在まだ改修中である。改修前に実施した強震観測、および微動の結果を分析しつつ、既存鉄筋コンクリート建物の観測記録に関する文献調査、改修後の観測を充実させるために準備を行った。既に発表してきた通り、本建物の卓越周期は季節変動しており、その変動幅はコンクリートの剛性の変化だけでは説明がつかないほど大きい。また文献調査の結果によると、サンプル数はとても少ないが、古い建物ほど、且つ大きな地震を受けているほど変動幅が大きくなっている可能性もある。本建物は今回の改修に伴い行ったコンクリートのコア抜き試験ではコンクリート強度が非常に小さいことが判明したため、それを反映した解析モデルを作成して比較した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

強震により建築物が被害をうけたとき、その被害把握を即時に把握することは、迅速かつ真に必要な救助や復旧支援を行うために重要である。

一方、高度経済成長期から60年以上経過したことで増加している高経年建物は、近年の二酸化炭素排出量の削減などを目的として、改築ではなく改修して継続使用することが増加してくと考えられる。

今回対象として建物について、改修後の観測と充実するための準備も行ってきたので、改修が終了し次第、再度観測を実施して、低強度コンクリートによる高経年建物の地震時挙動の把握、強震同時の即時被害把握について検討、精度向上を目指したい。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

中村友紀子（千葉大学大学院）, 境有紀（京大・防災研）, 三宅弘恵（東大・地震研）

他機関との共同研究の有無：無

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：千葉大学 大学院工学研究院

電話：043-290-3144

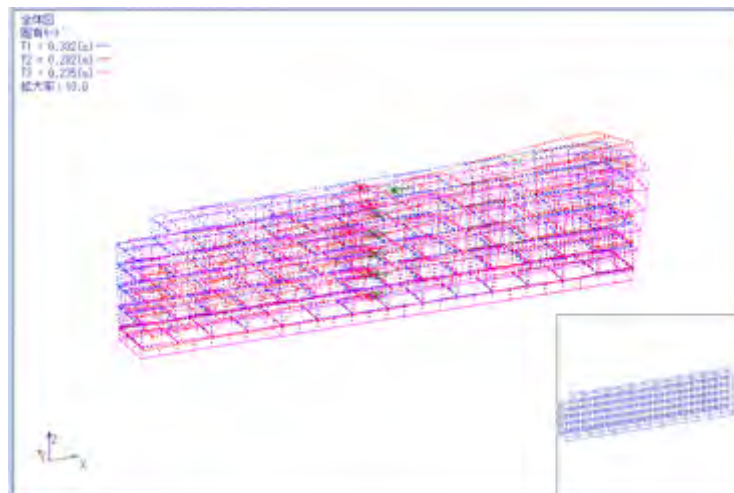
e-mail：nakamura.yukiko@faculty.chiba-u.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

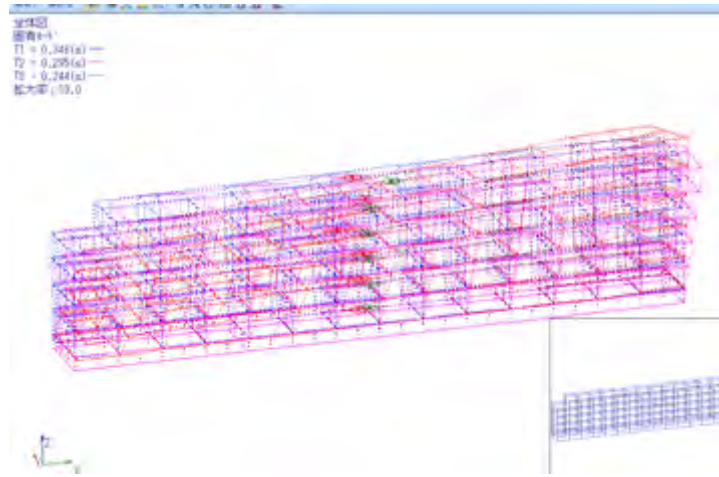
氏名：中村 友紀子

所属：千葉大学 大学院工学研究院



対象建物_3次元解析モデル_モード図

コンクリートの弾性係数は設計基準強度より算定。1次固有周期は0.332秒



対象建物_3次元解析モデル弾性係数修正_モード図

コンクリートの弾性係数は各層ごとのコア抜き試験で最小であった15.43より算定。1次固有周期は0.348秒となったが振動モード形に大きな違いはなかった。

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

津波生成過程の理解に向けた浅部スロー地震の活動様式・発生場の解明とモデル化

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
ア. 地震発生機構の解明

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測
ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

近年、浅部スロー地震と津波波源域が一致するという観測事実がいくつかの地域で得られており、津波生成過程の理解のためには浅部スロー地震の理解が重要である。特に、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では、50mを超える地震時すべり域が沈み込み帯浅部の海溝軸付近に分布し、またほぼ同じ領域で2011年1月末から本発生前までスロー地震が発生していた（図1）。この観測事実は、スロー地震の「ゆっくりとした小さな変位領域」と、通常地震時の「高速の大きな変位領域」がプレート境界面上で共存する可能性を強く示唆する（図2）。しかし、共存するメカニズムについては未だ不明である。特に浅部の大きな地震時すべりは、津波の発生に直接起因するものであり、もし浅部の地震時すべりのポテンシャルを事前に評価できれば津波災害軽減に向けて極めて重要な情報となりうる。

ここでは、浅部における地震時すべりとスロー地震の関係に特に着目し、繰り返し発生する浅部スロー地震の時空間的な特徴、（1）特にプレート境界での微動の詳細な深さ分布、（2）プレート境界でのすべり速度と微動活動を海底地震・測地観測から明らかにし、（4）これらの観測に則した室内せん断摩擦実験を実施することで、スロー地震によって誘発される巨大地震のメカニズム解明を目指す。調査観測の対象地域としては、西南日本で特に低周波微動活動が活発であることが知られている日向灘、および日向灘とは異なる沈み込みテクトニクスでスロー地震活動が確認されているメキシコゲレロ沖を対象とする。日向灘は、南海トラフ沿いの巨大地震想定域の西端に位置しており、この領域におけるプレート境界の挙動が南海トラフ巨大地震の発生にも関与している可能性が指摘されている。

また、約350年前に発生した大地震とそれに伴う大津波発生が、東北地方太平洋沖地震のように浅部スロー地震と関連している可能性が指摘されている。メキシコ沿岸は、過去に発生した巨大地震が海溝沿いに分布しており、南海トラフ同様に巨大地震と大津波の被害を受けてきた地域である。その中で、ゲレロ沖においては、「ゲレロ・ギャップ」と呼ばれる巨大地震空白域が存在しており、将来の巨大地震および大津波の発生が危惧されている領域である。南海トラフ同様に、スロー地震の発生も確認されており、スロー地震に関する多くの研究が進められている。

両領域とも過去数年にわたり長期連続海底地震観測が実施されており、本計画における観測期間を加えた約10年程度に渡る長期的な活動履歴から、浅部スロー地震の時空間的な活動特性を明らかにする。また、海陸の観測記録から、浅部スロー地震活動域である海溝・トラフ軸近傍の応力場や地下構造を調べる。さらに、先述の海底観測で得られる結果に基づき、海底掘削等から取得される物質を用いた室内摩擦実験によりプレート境界近傍の摩擦特性、特にすべりと速度に依存性する摩擦特性を明らかにする。

これらの結果に基づき、浅部スロー地震の詳細な活動様式を明らかにし、浅部スロー地震の発生を支配する場の解明とモデル化を目指すことで、沈み込み帯浅部で発生する津波生成地震および津波地震の発生ポテンシャルの評価に資する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本計画では日向灘で1年半～2年ごと、メキシコ・ゲレロ沖で1年ごとの海底地震・圧力観測を実施する。それぞれの領域で関係する科研費におけるプロジェクトと連携しながら観測を継続する。

2019年度においては、日向灘ですでに科研費で実施している海底観測を継続する。ゲレロ沖の短期型海底圧力計1台、海底地震計6台の設置・回収作業を実施する。ゲレロ沖の長期型海底圧力計4台および海底トランスポンダー4台の回収作業を実施する。メキシコゲレロ沖およびニュージーランド北島東方沖で取得される地震発生帯の構成物質を用いた室内せん断摩擦実験を実施する。

2020年度においては、日向灘の海底地震計8台の設置作業を実施する。ゲレロ沖の海底圧力計1台、海底地震計6台の設置・回収作業を実施する。ゲレロ沖の長期型海底圧力計4台および海底トランスポンダー4台の設置作業を実施する。回収された記録を用いて、浅部スロー地震の活動様式およびその発生場（地下構造、応力場など）の解析に着手する。前年度に引き続き、メキシコゲレロ沖およびニュージーランド北島東方沖で取得される地震発生帯の構成物質を用いた室内せん断摩擦実験を実施する。

2021年度においては、日向灘の海底地震計8台の回収・再設置作業を実施する。ゲレロ沖の海底圧力計1台、海底地震計6台の設置・回収作業を実施する。ゲレロ沖の長期型海底圧力計4台および海底トランスポンダー4台の設置作業を実施する。前年度に引き続き、回収された記録を用いた浅部スロー地震の活動様式およびその発生場（地下構造、応力場など）の調査と、室内せん断摩擦実験を実施する。得られた結果に基づき、浅部スロー地震発生場のモデル化を開始する。

2022年度においては、日向灘の海底地震観測を継続する。ゲレロ沖の海底圧力計1台、海底地震計6台の設置・回収作業を実施する。ゲレロ沖の長期型海底圧力計4台および海底トランスポンダー4台の設置作業を実施する。前年度に引き続き、回収された記録を用いた浅部スロー地震の活動様式およびその発生場（地下構造、応力場など）の調査と、室内せん断摩擦実験を実施する。得られた結果に基づき、浅部スロー地震発生場のモデル化をすすめる。

2023年度においては、設置した海底観測機器の回収作業を両地域で実施する。前年度に引き続き、回収された記録を用いた浅部スロー地震の活動様式およびその発生場（地下構造、応力場など）の調査と、室内せん断摩擦実験を実施する。得られた結果に基づき、浅部スロー地震発生場のモデルを構築する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2017年から2022年にかけて、メキシコ・ゲレロ州沖合に設置された海底地震計の記録を解析した。その結果、これまでに報告したゲレロ地震空白域の西部のテクトニック微動の活動に加えて、低周波地震が存在すること、ゲレロ地震空白域の東部では西部と比べてテクトニック微動の活動が低調なことを確認した。

2017年から2019年にゲレロ地震空白域の西部に設置された海底地震計記録に含まれる特に継続時間の短い微動に対してMatched Filter法を適用し、相関の高い波群を抽出してスタックすることで、2-

8 Hzの帯域に富む地震動を得た。その結果、スタックされた波形上で明瞭なP波及びS波の初動の到達を確認した。検出されたP波とS波の初動を読み取り、Hypomh (Hirata and Matsu'ura, 1987) を用いて震源を決定した。検出された約60個のLFEの震央はテクトニック微動の活動域と概ねよく対応する。LFEの震源の深さは海溝付近が最も浅く、陸側に向かって傾き下がり、その傾斜角は沈み込むプレートの傾斜角と概ね一致する。

2021年から2022年にゲロ地震空白域の東部に設置された海底地震計記録を解析し、テクトニック微動を初めてこの領域で検出した。微動の検出及び震源には改良エンベロープ相関法 (Mizuno and Ide, 2019) を用いた。2021年から2022年までの1年間で観測されたテクトニック微動は、東部で観測されたものと比べて低調である。観測されたテクトニック微動の多くは、2022年9月19日に調査領域の北西約300km離れた地域で発生したM7.6の地震の後に活発化した。

地震発生帯の浅い深さにある粘土断層面のすべりは、摩擦特性だけでなく、粘土鉱物のレオロジーによって制御されている可能性がある。特に沈み込み帯浅部のプレート境界には粘土層が存在するが、そのレオロジー的性質はまだ未解決の問題である。本研究では、粘土鉱物のレオロジー特性を調べて、浅部スロー地震断層の理解とそのモデル化を目的とした室内実験を実施した。ここでは、カオリナイト、イライト、スメクタイトの3種類の粘土鉱物を水で濡らし、特注の高温高压レオメータを用いて動的粘弾性測定を行った。その結果、粘土鉱物の微細構造に起因するレオロジー特性は、振動数、振動振幅、温度、含有水量に依存することを確認した。また、粘土鉱物の種類により、そのレオロジー特性が系統的に変化することを確認した。これらの成果は、浅部スロー地震発生域の断層の粘弾性挙動がそれを構成する粘土鉱物の種類によって異なる可能性を示す。

浅部スロー地震発生域周囲の歪-応力場を表現するモデルを構築した。ここでは特に分岐断層周辺の歪と応力の蓄積過程の理解に向けたモデルを構築した。有限要素法を用いて媒質中の有効粘性の関数としてモデルを構築し、有効粘性が歪と応力の蓄積パターンに及ぼす影響を調べた。その結果、分岐断層と沈み込む海洋地殻で歪と応力が蓄積する傾向があること、その蓄積速度は有効粘性率によって変化することがわかった。特に、歪と応力の蓄積とその緩和は同時であり、有効粘性が大きい場合、その蓄積速度は遅い。得られた結果は、付加体の有効粘性がスロー地震周辺の特にスラブ内地震の発生様式に寄与している可能性を示唆する。

レシーバ解析とS波スプリットングを組み合わせて、S波速度の異方性を四国下で調べた。本研究ではレシーバ関数を時間領域の反復デコンボリューションによって求める。その際、デコンボリューションされるスパイク数を制御する目的でベイズ情報基準を新たに導入した。結果、フィリピン海プレート上面の深度30kmの等深線に沿って、北部と南部で異なるパターンの異方性を検出した。四国南部では、S波速度の速い偏光方位は沈み込むスラブの最大傾斜方向と垂直であるのに対し、北部ではスラブ最大傾斜方向と一致する。特に、四国中東部のテクトニック微動が発生していない領域では、異方性の強度が大きいのと比べて、テクトニック微動の発生域付近では異方性の強度が小さい。観測された異方性の強度をウェッジマンタルの蛇紋岩化で説明する場合、四国北部下のウェッジマンタルのほぼ全てが蛇紋岩化している必要がある。

日向灘では、文科省委託研究「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」と連携して実施していたプレート境界浅部のスロー地震活動の待ち受け観測のため、2022年8月に設置した海底地震計の回収を2023年8月に長崎丸第118次航海にて実施した。また、今年度は観測網を種子島東方沖に移動させ、文科省委託研究と連携して観測を実施した。回収したデータについては、委託研究で回収されたデータとのマージ作業を終え、解析処理を始めた。待ち受け観測中であった2023年4月～6月にかけて、日向灘において浅部スロー地震活動がみられ、観測に成功した。データの処理は現在実施中であるが、陸上の臨時観測点を含む広帯域地震観測網を用いてCMT解析を実施した結果、発生が予想されていた2015年以来の活動であることが分かった。今回の活動ではプレート内とみられる通常の地震活動も海溝軸付近で活発化しており、スロー地震と通常の地震活動との関連性が示唆される。2013年および2015年の海底観測データと陸上の広帯域地震計データを解析し、日向灘浅部スロー地震活動域における浅部微動のエネルギー解放量とVLFEのモーメントを推定した。両者の推定値は同じようなalong-strike方向の変化を示しており、沈み込む九州パラオ海嶺より南側で大きな値を取ることが分かった。九州パラオ海嶺より南側でのマイグレーション速度は速く、スロー地震のパッチサイズが一定であると仮定すると、沈み込む九州パラオ海嶺の南側におけるVLFEの応力降下は、九州パラオ海嶺頂上付近の応力降下の約3倍であると推定された。一方、scaled energyの空間変化は、日向灘の領域内では認められず、九州パラオ海嶺の南側と海嶺頂上付近とではscaled energyの範囲はほぼ同じで、剛性率が同じであるとすれば見かけの応力も似ている可能性がある。日向灘のスロー地震の代表

的なscaled energyの範囲は $10^{-11.5} \sim 10^{-8.5}$ で、南海や日本海溝などスロー地震活動領域と比較して同程度か一桁小さい値であることに加え、日向灘のscaled energyはより広いレンジに分布する。この広いレンジは、日向灘のスロー地震の時定数やスペクトルの特徴の広さを示唆していると考えられ、ブラウン型スロー地震モデルに基づく、この地域のcharacteristic timeのレンジの広さは、スロー地震の震源域の幅の変化を示唆していると考えられる。

2021年～2022年観測のデータについて、文科省委託研究の観測点との併合処理を行い、気象庁一元化カタログに掲載されている地震83個について震源再決定と初動発震機構解の解析を行った。各観測点におけるP波およびS波の到達時、P波初動の極性、上下動成分の最大振幅を手動で検出し、PS変換波の走時から、堆積層補正値を求めた。これらを元に、hypoMH(Hirata and Matsu'ura, 1987)を用いて震源計算を行った。一次元速度構造は地震波構造探査の結果(Arai et al., 2023)から作成し、震源計算で用いるVp/Vs比は、検測値から和達ダイアグラムを作成して得られた1.9を使用した。最終的に残差のRMS値は、P波は0.311 sから0.089 s、S波は1.059 sから0.342 sまで減少し、多くの震源は水平誤差0.5 km、深さ誤差0.4 km程度となり、陸上からの解析に比べ精度の高い震源分布が得られた。気象庁による一元化震源と比較すると、震源は水平方向で北西に約10 km移動し、深さは全体的に浅くなり、多くの震源が15 km付近に集中した。HASH (Hardebeck and Shearer, 2002, 2003)を用いて得られた15個の信頼性の高い発震機構解は全て正断層型を示した。これらの結果は今後精査が必要ではあるが、今回震源再決定を行った地震は、スロー地震活動と同期して発生した地震活動であったため、これまでプレート境界で発生していたと考えられていたが、解析結果はフィリピン海プレート内部で発生していることを示唆している。時空間分布をみると、震源がプレート境界の2 km程度下の場所からプレート境界付近までマイグレーションしているように見える。このことから、日向灘でもプレート内地震が多く発生しているヒ克蘭ギ沈み込み帯と似たメカニズム (Warren-Smith et al., 2019; Nishikawa et al., 2021) で、プレート内地震がスロー地震震源域のdown-dip側で発生している可能性が考えられる。

前年度に構築した1662年日向灘地震のモデル (Ioki et al., 2023) について、宮崎市沿岸部における浸水計算を実施した。浸水計算においては、最も過去に遡れる明治時代の古地図を参考に古地形の復元を行い、構築した断層モデルから計算される津波の浸水範囲がどの程度広がるかを確認した。計算の結果、宮崎市内の多くの場所では沿岸部の砂丘を越えて浸水するケースはまれで、大淀川や清武川、加江田川などの河川からの津波の遡上・越水による浸水が大半であることが確認できた。また、先行研究で示されている浸水域を説明するためには、さらに津波を大きくする必要がありそうであるが、先行研究の値すべてを満足させることも同時に難しそうである。先行研究の値は何かしらの物的証拠があるわけではないため、今後より精査が必要であると考えられることに加え、モデルの高度化には津波堆積物のさらなる調査が必要である。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本研究の5ヵ年では、主として海底観測に基づき (i) 特にプレート境界付近で発生するテクトニック微動の詳細な分布を調べて、(ii) そのすべり速度と微動活動を明らかにし、(iii) 観測結果に則した室内せん断摩擦実験を実施することで、浅部スロー地震の理解を進める。その上で (iv) 浅部スロー地震の発生を支配する場の解明とモデル化を行った。以下に5ヵ年の成果の概要を示す。

(i) テクトニック微動の詳細な時空間分布の理解に向けた研究

メキシコゲレロ州沖合で2017年から2022年まで海底地震・測地観測を実施した。特に海底地震計記録を解析した結果、ゲレロ地震空白域におけるテクトニック微動および低周波地震の活動を確認した。特にゲレロ地震空白域の西部でテクトニック微動の活動は活発であり、東部は主に周囲で発生する大地震により誘発されたものが主である。なお、ゲレロ地震空白域内のスロー地震活動の報告は本研究が初めてである。

観測されたゲレロ地震空白域内のテクトニック微動の震源メカニズム解と地震波放射エネルギーをそれぞれ推定した。結果、震源メカニズム解の多くが逆断層型として説明可能なこと、過去に大地震の発生した領域近くの微動の放射エネルギーが海溝近くの微動と比べて大きいことを指摘し、プレート間固着の空間的な変化に対応して微動の放射エネルギーが変化する可能性に言及した。

テクトニック微動、低周波地震などのスロー地震活動に加えて、海底地震計を用いて微小地震の活動も調べた。結果として、ゲレロ地震空白域内には、スロー地震及び通常の地震活動が極めて低調な領域が存在すること、その領域が残差地形および残差重力の負の領域に位置すること述べた。この解釈としてプレート境界面状の窪みがゲレロ地震空白域に存在する可能性、またその対極の解釈として沈

み込み海山により上盤側で空隙が増加して密度が低下している可能性をそれぞれ指摘した。どちらのモデルが適切かは今後地下の速度構造などから明らかにされるべきものであり、現状は今後の課題である。

日向灘では海底地震観測を実施した。科研費等によりすでに取得された記録の解析も含めて、同地域における詳細なテクトニック微動の活動を明らかにした。2017年12月から2018年に1月にかけて観測された微動活動を調べた結果、2013年の微動活動の一部と活動域がほぼ重なること、2017年の微動のマイグレーションは2013年に観測された微動分布の折れ曲がりの部分で停止したこと、2013年の活動で見られた2回のマイグレーションのうち1回目は今回観測された微動のマイグレーションと同じ場所で停止していたこと、マイグレーションには北から南に急速に伝播する現象（RTT）も含まれること確認した。なお、マイグレーションが停止した領域は、九州パラオ海嶺が沈み込む領域に対応する。これらの結果から、沈み込む海嶺が微動活動域の広がりを規定する構造的要因となる可能性を指摘した。

2021年5月22日に中国で発生したM7.3の地震後、浅部スロー地震活動が1ヶ月程度、断続的に活発化したことを陸上の地震計記録で確認した。特に、6月上旬には通常地震活動が活発化しており、ETASで再現できる確率が 10^{-5} 以下ととても小さく、5月以降継続しているスロー地震活動に関連した活動であることを述べた。これらの活動は、海底に設置した海底地震観測網直下で発生しており、海底地震記録にも、本震の地震波形記録に加えて微動やVLFEが記録されている事を確認した。科省委託研究の観測点との併合処理を行い、エンベロープ相関法によって求められた浅部微動の震央位置は観測網の南東部に多くが位置しており、これまでの日向灘における海底観測で確認されている微動活動域の範囲内に収まっている。

スロー地震活動に同期した地震活動について、気象庁一元化カタログに掲載されている地震83個について震源再決定と初動発震機構解の解析を行った。気象庁による一元化震源と比較すると、震源は水平方向で北西に約10 km移動し、多くの震源が深さ15 km付近に集中、発震機構解は全て正断層型を示した。震源位置が観測網の外に求まったため、より慎重な解析が必要ではあるが、スロー地震に同期した地震活動がフィリピン海プレート内部で発生していることを示唆している。時空間分布をみると、震源がプレート境界の2 km程度下の場所からプレート境界付近までマイグレーションしているようにも見える。このことから、日向灘でもプレート内地震が多く発生しているヒ克蘭ギ沈み込み帯と似たメカニズム（Warren-Smith et al., 2019; Nishikawa et al., 2021）で、プレート内地震がスロー地震震源域のdown-dip側で発生している可能性が考えられる。

(ii) 海底地震・測地観測からプレート境界でのすべり速度と微動活動の理解の高度化に向けた研究
2014年～2017年に日向灘で実施された海底地震観測のデータ解析により、既存の活動領域（西側活動域）よりも東側の活動域の詳細に調べた。結果、東側活動域は西側活動域から東にマイグレーションして海溝軸近傍まで活動が及んだことを確認した。西側活動域のマイグレーション速度は30-60km/dayに対し東側活動域は2～20km/dayと遅い。この違いはプレート間固着の強さの違いを反映しているのかもしれない。

日向灘で実施された海底地震計の方位をRayleigh波粒子軌跡の解析から推定する手法を開発した。広帯域海底地震計（BBOBS）の大半は、 5° 以下、短周期海底地震計（LOBS）の約半数では 12° 以下の推定誤差で方位が決定された。一方で、推定誤差が 20° 以上となるLOBS観測点が見られ、それらは水深に依存することがわかった。特に大きく推定誤差が遷移する水深は2200mから2600mの範囲で、水深が浅いほど推定誤差が大きい。海洋infragravity波とパワースペクトル密度の関係及び海洋におけるノイズ源との比較から、LOBSの方位推定誤差の水深依存性は、海底流がRayleigh波の水平動成分のSN比を下げることで、コンプライアンスノイズがRayleigh波の上下動波形自体を歪めたことによるものと結論づけた。

海底圧力計記録を用いた上下地殻変動の高精度検出に向けて、海底圧両記録の解析手法の開発を進めた。本研究では新たに、2観測点の水深差に依存して相互の観測記録の相関が低下することを見出した。結果、隣接する場合であっても2点間の水深差が大きい場合、結果として海洋起源の圧力変動を共通成分として効率よく除去することができず、推定される地殻変動を過大評価していた可能性を示した。

海底下の地震波速度構造、特にS波構造を求める手法として、H/Vスペクトル法に着目し、観測される常時微動及びS波コーダ部を用いて大水深の海底地震計記録に適用する手法を開発した。福島沖に設置された海底地震計記録に適用し、結果として得られたS波速度は、海底付近で約30m/秒程度と低速で

あった。

海底地震計アレイ記録から微動および微小地震を抽出し、震源を精度良く決定する手法の開発を行なった。まず、福島沖に設置された地震計アレイ記録に対して手法を適用し、テクトニック微動と微小地震の検出を行なった。次に、テクトニック微動の時空間分布を調べて海溝軸方向へのマイグレーションを指摘し、そのマイグレーションに同期する活発海溝付近の微小地震活動の活発化を確認した。つまり、スロー地震の海溝軸方向への伝播に伴い生じる応力擾乱によりプレート近傍またはスラブ内の微小地震活動が活発化した可能性を示した。

陸上地震観測記録を用いたスロー地震発生域周辺の地震波速度構造の推定手法の高度化にも取り組んだ。太平洋スラブ内で発生する近地深発地震記録を用いた紀伊半島北東部のレシーバ関数解析を行った。結果として、従来よりも広帯域の波形記録を解析に含めることで沈み込むフィリピン海プレートの上面及びモホ面の明瞭なイメージングに成功した。また、レシーバ解析とS波スプリッティングを組み合わせたS波速度の異方性の解析手法の開発も行なった。特にレシーバ関数を時間領域の反復デコンボリューションによって求める際、デコンボリューションされるスパイク数を制御する目的でベイズ情報基準を新たに導入した。

日向灘浅部スロー地震活動域における浅部微動のエネルギー解放量とVLFEのモーメントを推定した。両者の推定値は同じようなalong-strike方向の変化を示しており、沈み込む九州パラオ海嶺より南側で大きな値を取ることが分かった。九州パラオ海嶺より南側でのマイグレーション速度は速く、スロー地震のパッチサイズが一定であると仮定すると、沈み込む九州パラオ海嶺の南側におけるVLFEの応力降下は、九州パラオ海嶺頂上付近の応力降下の約3倍であると推定された。一方、scaled energyの空間変化は、日向灘の領域内では認められず、九州パラオ海嶺の南側と海嶺頂上付近とではscaled energyの範囲はほぼ同じで、剛性率が同じであるとすれば見かけの応力も似ている可能性がある。日向灘のスロー地震の代表的なscaled energyの範囲は $10^{-11.5} \sim 10^{-8.5}$ で、南海や日本海溝などスロー地震活動領域と比較して同程度か一桁小さい値であることに加え、日向灘のscaled energyはより広いレンジに分布する。この広いレンジは、日向灘のスロー地震の時定数やスペクトルの特徴の広さを示唆していると考えられ、ブラウン型スロー地震モデルに基づくと、この地域のcharacteristic timeのレンジの広さは、スロー地震の震源域の幅の変化を示唆していると考えられる。

(iii) スロー地震の理解に向けた室内せん断摩擦実験

ニュージーランド北島東方沖で取得された地震発生帯の構成物質を用いた室内せん断摩擦実験の実施に向けて、二軸摩擦試験機を用いた実験環境を整備した。粘土鉱物からなるせん断試料面に縦波と横波を透過弾性波として入射し、せん断面の透過波および反射波の収録が可能な環境において、せん断面で生じるPS変換波の検出をレシーバ関数解析とほぼ同様の手法で解析する手法を開発した。

地震発生帯の浅い深さにある粘土断層面のすべりは、摩擦特性だけでなく、粘土鉱物のレオロジーによって制御されている可能性がある。本研究では、粘土鉱物のレオロジー特性を調べて、浅部スロー地震断層の理解とそのモデル化に資する室内実験を行なった。ここでは、カオリナイト、イライト、スメクタイトの3種類の粘土鉱物を水で濡らし、レオメータを用いた動的粘弾性測定を行った。その結果、粘土鉱物の微細構造に起因するレオロジー特性は、振動数、振動振幅、温度、含有水量に依存すること、粘土鉱物の種類により、そのレオロジー特性が系統的に変化することを確認した。これらの成果は、浅部スロー地震発生域の断層の粘弾性挙動がそれを構成する粘土鉱物の種類によって異なる可能性を示唆する。

(iv) 浅部スロー地震の発生を支配する場の解明とモデル化に向けた研究

日向灘で過去最大級とされている1662年日向灘地震のモデル化を行なった。ここでは、浅部スロー地震の海底地震観測の成果や人工地震波を用いたプレート境界の位置情報に加えて、東北地方太平洋沖地震で得られた浅部スロー地震と巨大地震大すべりの関係など最新の地球物理学研究の知見に基づき新たな断層モデルを構築した。並行して実施した宮崎県沿岸部における津波堆積物の調査結果と断層モデルを用いた津波による浸水シミュレーションにより、この断層モデルの妥当性も評価した。結果として、1662年日向灘地震がM8級巨大地震であった可能性を科学的根拠に基づき初めて示すことができた。得られた結果は、国や日向灘沿岸の地方自治体における地震・津波に対する防災に役立つ基礎資料として注目され、日向灘の地震活動の長期評価の際にも利用された。一方、新たに示された断層モデルは評価点が津波堆積物のみであり、不十分な点もあることは事実である。そこで、宮崎市内の古地形を復元し、現在のモデルで津波の浸水がどの程度広がるか検証を行った。その結果、津波浸

水はほとんどが河川からの遡上・越水によるもので、沿岸部の砂丘が比較的高いため砂丘を超えて浸水するケースは限られることが分かった。また、現在の断層モデルでは先行研究で示された宮崎市内の浸水域を説明するのは難しく、より津波を大きくする必要があったことが示唆される結果となった。しかしながら、先行研究の値は何かしらの物的証拠があるわけではないため、今後より精査が必要であると考えられることに加え、モデルの高度化には津波堆積物のさらなる調査が必要である。本研究の5ヵ年の観測研究で得られた成果に基づき、浅部スロー地震発生域周囲の歪-応力場を表現するモデルを構築した。ここでは特に分岐断層周辺の歪と応力の蓄積過程の理解に向けたモデルを構築した。有限要素法を用いて媒質中の有効粘性の関数としてモデルを構築し、有効粘性が歪と応力の蓄積パターンに及ぼす影響を調べた。その結果、分岐断層と沈み込む海洋地殻で歪と応力が蓄積する傾向があること、その蓄積速度は有効粘性率によって変化することがわかった。特に、歪と応力の蓄積とその緩和は同時であり、有効粘性が大きい場合、その蓄積速度は遅い。得られた結果は、付加体の有効粘性がスロー地震周辺の特にスラブ内地震の発生様式に寄与している可能性を示唆する。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

項目1の「地震・火山現象の解明のための研究」中の(5)「地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化」に資する研究を本課題で実施した。特に、メキシコゲレロ空白域と日向灘の沈み込み帯浅部で発生するスロー地震の発生場の理解に向けて、スロー及び通常地震の地震活動、S波速度構造、レオロジーを観測、実験、数値計算に基づく手法で調べた。本課題で開発された手法及び知見は、今後、環太平洋地域の浅部スロー地震発生域に適用される。特に、浅部スロー地震の理解を含む、比較沈み込み帯地震・津波防災科学として、スロー地震と巨大地震の関係の理解、及び巨大地震・津波に伴う災害の軽減に向けた学際的研究が次の5ヵ年で実施される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Farazi, A. H., Md. S. Hossain, Y. Ito, J. Piña-Flores, A.S.M.M. Kamal, and Md. Z.

Rahman,2023,Shear wave velocity estimation in the Bengal Basin, Bangladesh by HVSR analysis: implications for engineering bedrock depth,J. Applied

Geophysics,211,104967,doi:10.1016/j.jappgeo.2023.104967,査読有,謝辞無

Muramoto, T., Y. Ito, A. Miyakawa, and N. Furuichi,2023,Strain and Stress Accumulation in Viscoelastic Splay Fault and Subducting Oceanic Crust,Geophys. Res.

Lett.,50,e2023GL103496,doi:10.1029/2023GL103496,査読有,謝辞無

Ruan, Y., Y. Ito, and Y. Sawaki,2023,Anisotropic Velocity Structure Beneath Shikoku, Japan: Insights From Receiver Function and Shear Wave Splitting Analyses,J. Geophys. Res:Solid-Earth,128,e2023JB027178,doi:10.1029/2023JB027178,査読有,謝辞有

Muramoto, T., Y. Ito, A. Miyakawa, and N. Furuichi,2024,Viscoelasticity modeling of clay minerals by dynamic viscoelasticity measurement and its implications for earthquake faulting,Tectonophysics,872,230208,doi:10.1016/j.tecto.2024.230208,査読有,謝辞無

Baba, S., S. Takemura, K. Obara, A. Takeo, Y. Yamashita, and M. Shinohara,2024,Spatial variation in shallow slow earthquake activity in Hyuga-nada, southwest Japan,Geophys. J.

Int.,237,271–287,doi:10.1093/gji/ggae039,査読有,謝辞無

Takemura, S. , S. Baba, S. Yabe, Y. Yamashita, K. Shiomi, and T. Matsuzawa,2024,Detectability analysis of very low frequency earthquakes: Methods and application in Nankai using F-net and DONET broadband seismometers,Geophys. J. Int.,237,49–63,doi:10.1093/gji/ggae033,査読有,謝辞無

Akuhara, T., Y. Yamashita, H. Sugioka, and M. Shinohara,2023,Locating tectonic tremors with uncertainty estimates: time- and amplitude-difference optimization, wave propagation-based quality control and Bayesian inversion,Geophys. J.

Int.,253,2727–2742,dio:10.1093/gji/ggad387,査読有,謝辞無

Akuhara, T., Y. Yamashita, S. Ohyanagi, Y. Sawaki, T. Yamada, and M. Shinohara,2023,Shallow Low-Velocity Layer in the Hyuga-Nada Accretionary Prism and Its Hydrological Implications: Insights From a Passive Seismic Array,J. Geophys. Res:Solid

・学会・シンポジウム等での発表

- Ito, Y., S. S. Ohyanagi, R. Plata-Martinez, K. Flores, and G. E. Solimian,2023,Insights into the relationship between seismicity and relief of the plate interface near the trench at the Guerrero seismic gap, Mexico,JpGU2023,SCG45-08
- to, Y., S. S. Ohyanagi, R. Plata-Martinez, K. Flores, Y. Chen and K. Kuniyoshi,2023,Effects of subducting seamount on slow and fast seismicity in the Guerrero Seismic Gap, Mexico,International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquake Science 2023,O08
- Ito, Y., S. S. Ohyanagi, R. Plata-Martinez, K. Flores, Y. Chen and K. Kuniyoshi,2023,Effects of Subducting Seamount on Slow and Fast Seismicity in the Guerrero Seismic Gap, Mexico,AGU23,T31H-0311
- Muramoto, T., Y. Ito, A. Miyakawa and N. Furuichi,2023,Stress accumulation in viscoelastic splay fault and subducting oceanic crust: its effect to intraslab earthquakes,JpGU2023,SCG46-P03
- Flores, K, and Y. Ito,2023,Identification of possible tsunami earthquakes along the Mexican Subduction Zone,AGU23,T31H-0310
- Kuniyoshi, K., Y. Ito, S. Ohyanagi, K. Flores, R. O. Plata-Martinez, Y. Chen, E. S. Garcia, and V. M. Cruz-Atienza,2023,Slow and Fast Earthquake Activity in the Southeastern Guerrero Seismic Gap,AGU23,T31H-0309
- Chen, Y., Y. Ito, M. Shinohara, V. M. Cruz-Atienza, Y. Yamashita, R. O. Plata-Martinez, E. S. Garcia, S. Ohyanagi, K. Flores, and C. Li,2023,New Insight of Low Frequency Earthquakes (LFEs) in Continuous Ocean Bottom Seismometers at the Guerrero Seismic Gap, Mexico,AGU23,T31H-0308
- Takayama, A., Y. Sawaki, Y. Ruan, and Y. Ito,2023,A Preliminary Estimation of Seismic Structures around Slow Earthquake Areas in the Nankai Subduction Zone using Receiver Functions in Multi-frequency Bands,AGU23,T31H0299
- Farazi, A.H., Y. Ito, J. Piña-Flores, E.S.M. Garcia, and S. Ohayanagi,2023,Search for Diffusive Properties in Earthquake Late Coda Recorded by Ocean Bottom Seismometers (OBSs) off Fukushima: Implications for H/V Spectral Ratio,JpGU2023,SSS04-P03
- Mishra, S., Y. Kaneko, B. Chow, Y. Yamashita, and M. Shinohara,2023,Towards adjoint tomography of Nankai and Kyushu subduction zones,JpGU2023,SCG45-P24
- 胡 靚妤・篠原 雅尚・山下 裕亮・山田 知朗・悪原 岳・望月 公廣,2023,Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation, 日本地震学会秋季大会,S09-04
- 悪原 岳・山下 裕亮・杉岡 裕子・Farazi Atikul Haque・大柳 修慧・伊藤 喜宏・荒木 英一郎・利根川 貴志・辻 健・東 龍介・日野 亮太・望月 公廣・武村 俊介・山田 知朗・篠原 雅尚,2023,熊野灘におけるテクトニック微動の分布と伝播に見られる特徴：海底臨時観測網およびDONETによる知見,日本地震学会秋季大会,S09P-08
- 根岸 幹・小原 一成・武村 俊介・悪原 岳・山下 裕亮・杉岡 裕子・篠原 雅尚,2023,Source-Scanning Algorithmを共通的に用いた浅部微動・浅部VLFEの時空間発展の推定,日本地震学会秋季大会,S09-30
- Ioki, K., Y. Yamashita, and Y. Kase,2023,Tsunami inundation area of great earthquake that occurred in the Hyuga-nada,AGU23,NH51D-0484
- Hu, C.Y. , M. Shinohara, Y. Yamashita, T. Yamada, T. Akuhara and K. Mochizuki,2023,Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation,AGU23,T31H-0297
- Mishra, S.P., Y. Kaneko, B. Chow, S. Adachi, Y. Yamashita and M. Shinohara,2023,Towards Adjoint Tomography of the Nankai and Kyushu Subduction Zones,AGU23,S11D-0303

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

伊藤喜宏（京都大学防災研究所）,山下裕亮（京都大学防災研究所）

他機関との共同研究の有無：有

篠原雅尚（東京大学地震研究所）,日野亮太（東北大学）,八木原寛（鹿児島大学）,清水洋（九州大学）,
Matt J.Ikari（ブレーメン大学）,Victor M. Cruz-Atienza（メキシコ国立自治大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学防災研究所

電話：0774-38-4240

e-mail：ito.yoshihiro.4w@kyoto-u.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：伊藤喜宏

所属：京都大学防災研究所

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

南海トラフ巨大地震の予測高度化を目指したフィリピン海スラブ周辺域での総合的観測研究

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
ア. 地震発生機構の解明

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
オ. 構造共通モデルの構築

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測
ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

○四国の新規2測線においてリニアアレイ観測を行う。四国と南九州における既存データも含めたレシーバ関数解析と地震波走時トモグラフィ解析により、フィリピン海スラブの形状モデルと3次元地震波速度構造モデルを更新する。紀伊半島から南九州に至る地域のプレート境界面の状態、およびスラブ起源流体の挙動と地震・火山活動との関係について明らかにする。

○陸上GNSS、地殻変動連続観測（歪計・傾斜計）、海底圧力計、GNSS音響測距結合方式海底地殻変動観測(GNSS-A)などの測地観測データを統合して、幅広い帯域でのプレート境界すべり現象をモニタリングする手法を高度化し、すべり量の小さい短期的SSEからすべり速度の小さい長期的SSEまでSSEの時空間分布を明らかにする。

○紀伊半島と南九州の地殻変動観測点において、これまで蓄積されている地殻変動連続観測のプロマイド記録をデジタル化し、再解析を行う。プロマイド記録のデジタル画像から数値化した上で、現在の観測結果をテンプレートとし、短期的SSEの検出を試みる。前回の南海地震後の短期的SSEの活動度を明らかにできる可能性がある。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

○地震観測による南海トラフ巨大地震の震源域周辺の詳細な不均質構造の推定

四国において、稠密リニアアレイ観測の新規の測線を2本追加し、前期の2測線と合わせて、レシーバ関数解析とトモグラフィ解析を行い、フィリピン海スラブの形状とその周辺の不均質構造を詳細に推定する。南九州においては、前期に取得したデータの再解析によりフィリピン海スラブの形状とその周辺の不均質構造を詳細に推定する。紀伊半島における同様の観測研究から得られた成果と合わせて検討することにより、紀伊半島から南九州までのスラブ形状やその周辺の速度構造を詳細に推定する。その結果から、プレート境界面付近の物性や状態を議論するとともに、強震動予測に寄与できるような速度構造モデルを構築する。

1年次：四国と南九州における既存データの解析。四国における新規測線の観測点の選点調査。

2年次：南九州における既存データの解析。四国における新規1本目の測線での観測開始、および既存データと新規取得データの解析。

3年次：四国における新規2本目の測線での観測開始、既存データと新規取得データの解析、および1本目の測線での観測終了。

4年次：四国における新規取得データの解析、および2本目の測線での観測終了。

5年次：紀伊半島から南九州までのスラブ形状やその周辺の速度構造の総合的な検討。

○測地観測による南海トラフ沿いのSSEモニタリング手法の高度化

GNSSデータや傾斜・歪の連続観測データや海底観測網（水圧計、GNSS-A）のデータを用いて、多様な測地データを解析してSSEを検出する手法の開発を行う。さらに、地域性や継続時間などを考慮してSSEと他のスロー地震（微動、低周波地震、超低周波地震）との関係を明らかにし、スロー地震を用いたモニタリング手法の高度化を行う。また、紀伊水道周辺域や東海地方などの南海トラフ沿岸域における京大防災研独自GNSS観測網の観測を継続する。

1年次：海底観測データを用いたSSE検出手法の開発。GNSS観測の継続及び新規観測点の調査。

2年次：多様な測地データを用いたSSE検出手法の改良。GNSS観測の継続及び新規観測点の設置。

3年次：改良したSSE検出手法の各地域データへの適用。GNSS観測の継続。

4年次：SSE検出手法の適用及びスロー地震間の相互作用に関する考察。GNSS観測の継続。

5年次：SSE検出手法の適用及びスロー地震間の相互作用に関する考察。GNSS観測の継続。

○過去の地殻変動観測記録の再解析

1～5年次：プロマイド記録の撮影をすすめる（紀州観測点および他の観測点の1940年代からのプロマイド記録）。

1～2年次：これまでに撮影したプロマイド記録（紀州観測点、1960年～1974年）のデジタル化と短期的SSEの検出を試みる。またその手法の高度化をはかる。

3～5年次：プロマイド記録（1940年代～1974年）全体の分析と短期的SSEの検出を実施する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

○地震観測による南海トラフ巨大地震の震源域周辺の詳細な不均質構造の推定

四国中部の須崎市から今治市まで南南東-北北西に伸びる測線上に展開した7臨時観測点のメンテナンスとデータ回収を9月に行った。2月にはデータ回収と観測機器の撤収を行い、約2年間の臨時観測を終了した。この測線上の7臨時観測点に加えて、近傍の4定常観測点も利用して、レシーバ関数解析を行い、測線断面におけるS波速度不連続面のイメージングを行った（図1）。図1に示すように、スラブ上面（ST）は、南東側の須崎市の海岸付近で深さ約26 kmにあり、北西側の今治市の海岸付近で約37 kmの深さに達して、スラブの傾斜は、測線の南東部で約5°、深部低周波地震の発生域より北西側で約9°であり、緩いことがわかった。

○測地観測による南海トラフ沿いのSSEモニタリング手法の高度化

GNSSデータを用いて2023年に発生した南海トラフ・南西諸島海溝沿いの短期的SSEの検出を行い、少なくとも15個の短期的SSEと考えられる変位イベントを検出した。また、超低周波地震のバースト的活動が短期的SSEと同期していると仮定し、超低周波地震のバースト時期前後のGNSSデータをスタッキング処理することによって、個別には検出できない小規模なSSEに伴う地殻変動とその断層モデルの推定を行った。日向灘や十勝沖では、超低周波地震の発生時期に海溝向きの系統的な変位が見られ（図2）、沖合の超低周波地震発生域でのプレート境界断層でのすべりで説明できることがわかった。

○過去の地殻変動観測記録の再解析

阿武山観測所に残る記録の整理を行った。昨年度までに公開したデータベースに順次登録した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

○地震観測による南海トラフ巨大地震の震源域周辺の詳細な不均質構造の推定

四国西部の土佐清水－八幡浜測線と中部の須崎－今治測線において、2年間ずつリニアアレイ観測を行い、それぞれの測線断面におけるレシーバ関数イメージを作成し、沈み込むフィリピン海スラブを明瞭にイメージングすることに成功した。その結果、スラブの傾斜は、四国西部では土佐清水－八幡浜測線の南東部で約10°、北西部で約20°であるが、四国中部では須崎－今治測線の南東部で約5°、北西部で約9°であることがわかった。当初の目標は概ね達成されたと言える。

○測地観測による南海トラフ沿いのSSEモニタリング手法の高度化

主にGNSSデータを用いたSSEの検出手法の高度化を行い、南海トラフ・南西諸島海溝域のみならず東北日本やアラスカなどの沈み込み帯のデータに適用して、多くの新たなSSEを検出することに成功した。その結果、SSEの時空間分布を明らかにするとともに、スロー地震間の時空間的關係に関する新たな知見が得られた。複数センサーの統合解析という部分では、十分に成果を挙げられていない点があるものの、当初の目標は概ね達成されたと言える。

○過去の地殻変動観測記録の再解析

紀州観測点のプロマイド記録からスロースリップイベントである可能性があるトランジェントな傾斜変化を検出し、近年観測されたスロースリップイベントを参照してあり得る断層面位置や規模を検討した（Kano and Kano, 2019）。阿武山観測所に残る知覚変動のプロマイド記録を公開するためのデジタルアーカイブを公開した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

「日本周辺及びニュージーランドなどの海外の沈み込み帯において、プレート境界面の形状とプレート境界周辺の地下構造及び応力場、ならびに通常地震活動とスロー地震活動の分布等を明らかにする」という目標に対して、レシーバ関数解析により四国下のフィリピン海プレート境界面の形状を推定すること、およびGNSSデータを用いて短期的SSEを検出解析する新手法により西南日本に加えて東北日本やアラスカでもSSEを検出し、その断層モデルと継続期間を推定することにより貢献した。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Okada, Y., and T. Nishimura, 2023, Systematic detection of short-term slow slip events in southcentral Alaska, *Geophys. Res. Lett.*, 50, doi: 10.1029/2023GL104901, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

澁谷拓郎・中川 潤・長岡愛理, 2024, 南海トラフ巨大地震の予測高度化を目指した地震学的構造研究：四国地域（5）, 京都大学防災研究所令和5年度研究発表講演会, A205

岡田 悠太郎・Freymueller Jeffrey・西村 卓也, 2023, Systematic detection of short-term slow slip events in southcentral Alaska, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SCG45-P38

岡田悠太郎, Jeffrey Freymueller, 西村卓也, 2023, アラスカ中南部クック湾周辺における時定数の異なるスロースリップイベント間の関係, 日本測地学会第138回講演会, 30

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：地震：地震：短周期地震観測

概要：レシーバ関数解析によるフィリピン海プレート形状推定のためのリニアアレイ観測

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：愛媛県久万高原町面河溪 33.7150 133.0932

調査・観測期間：2022/3/22-2024/2/9

公開状況：公開留保中（協議のうえ共同研究として提供可）

(11) 次期計画における課題名：

西南日本と中南米地域における巨大地震の地震津波災害軽減に向けた学際的比較研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

澁谷拓郎（京都大学防災研究所）,西村卓也（京都大学防災研究所）

他機関との共同研究の有無：有

加納靖之（東京大学地震研究）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学防災研究所

電話：0774-38-4192

e-mail：shibutani.takuo.4r@kyoto-u.ac.jp

URL：http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：澁谷拓郎

所属：京都大学防災研究所

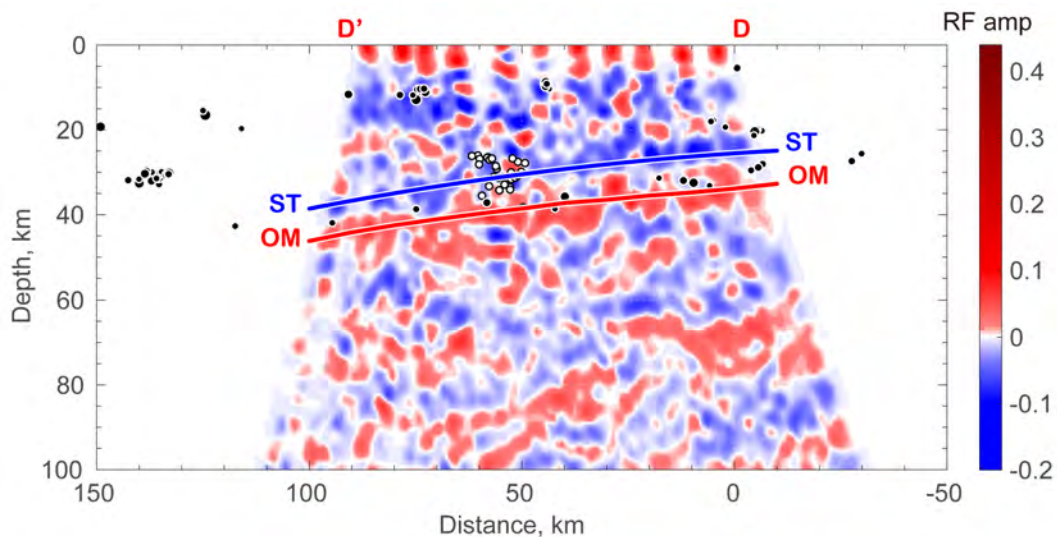


図1 須崎—今治測線におけるレシーバ関数イメージ

STとOMはそれぞれスラブ上面と海洋モホ面を示す。白丸は深部低周波地震、黒丸は通常の地震を示す。

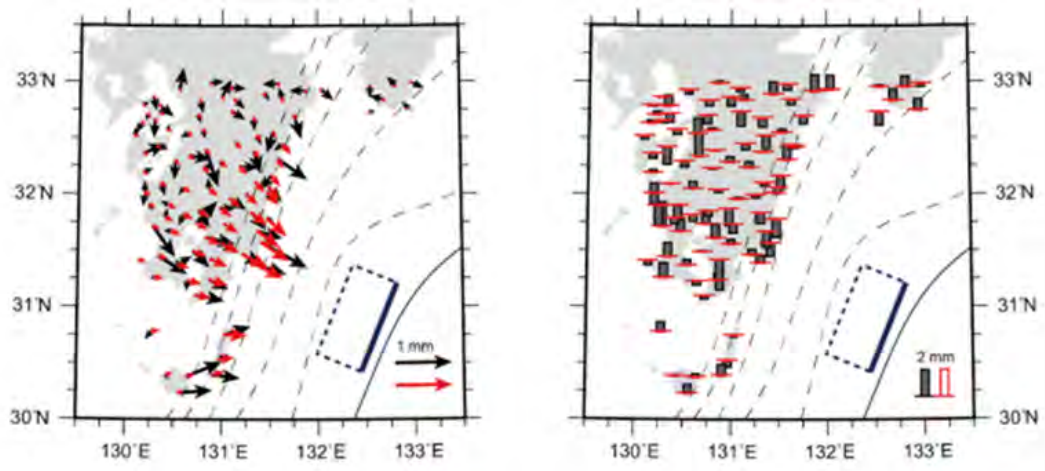


図2 日向灘の超低周波地震と同期する地殻変動と短期的SSEの平均的な断層モデル（岡田, 2024博士論文）。

黒と赤の矢印は、スタッキング処理したGNSS観測点での変位の観測値と計算値を示す。矩形領域が推定された断層モデルの位置。（左）水平変位。（右）上下変位。

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

内陸地震の発生機構と発生場の解明とモデル化

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
 - イ. 内陸地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
 - ア. 地震発生機構の解明
 - イ. 地震断層滑りのモデル化

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
 - オ. 構造共通モデルの構築

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
 - ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
 - イ. 首都直下地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震
首都直下地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地震の発生機構や発生場の解明のためには、断層近傍の応力場および断層の強度の解明が重要である。本研究の主な目的は、西南日本のひずみ集中帯などにおける内陸地震の断層への载荷過程および断層の強度低下過程の解明である。

断層への载荷過程においては、様々な手法を駆使して、内陸地震の断層周辺の不均質構造や変形場を捉えて、応力場の形成過程を解明する。より具体的には、歪集中帯の内部構造や詳細な変形様式の解明、地殻・マントル上部の比抵抗構造の不均質性の解明、内陸地震の断層周辺の3次元の不均質構造、低周波地震活動や応力場の解明等による非弾性変形と断層への応力集中過程の解明、西南日本のブロック断層モデルの高度化と数値シミュレーションによる内陸地震の発生過程の解明、地震活動変化の解明を主な目的とする。また、内陸活断層の数値モデルに応力擾乱を加える数値実験を行い、海溝型巨大地震サイクルに伴う準周期的な応力変動と内陸地震の関係（活動期）について理解する。現計画の期間には、満点方式の高密度地震観測網内において、2018年島根県西部と大阪北部の地震が発生した。鳥取県西部と中部の地震が地震発生域をほとんど断ち切るようなM7クラスの大地震だったのに対して、これらは一回り小さいM6クラスで、余震域は深さ5km以深に限定されているため、両端に加えて浅い側での大地震発生の可能性の評価も必要である。特に、大阪北部の地震は、都市域で発生し、しかも周辺に、上町断層帯や有馬高槻断層帯、宇治川断層など、大都市直下の大きな活断層が複数分布しており、それらへの影響が懸念されているため、山陰地方のひずみ集中帯で得られた知見等も活用して、

地震の発生過程と今後の推移の予測を試みる。

断層の強度低下過程の解明においては、間隙流体圧等の上昇に伴う断層強度の低下を解明する。従来は、断層面での剪断応力の蓄積が重要視されてきたが、2011年東北地方太平洋沖地震後に東日本内陸域の広い範囲で誘発地震が発生したことは、本震の引き起こした応力変化よりも、間隙流体圧等の急激な上昇に伴う断層強度の低下が地震の発生に重要な役割を果たしたことを強く示した (e.g., Terakawa et al. 2013a)。プレート境界から数100km離れた内陸域では、プレート運動による広域応力蓄積レートに比べて、間隙流体圧場の時間変化のスケールは有意に速いと考えられる。このことは、一般的な内陸地震の発生においても、断層強度の低下が重要な役割を果たす可能性があることを意味する。本研究においては、地震メカニズムトモグラフィー法 (FMT法) による三次元間隙流体圧場の時間発展解析 (Terakawa et al., 2013b; Terakawa, 2014) を軸とし、と間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場のモデリング手法 (Terakawa and Hauksson, 2018) 内陸地震の発生における間隙流体圧及び応力の役割を定量的に分析することを目的とする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

・断層帯周辺の稠密地殻変動とモデリング

山陰地方、大阪府北部、跡津川断層系周辺の3つの横ずれ断層が支配的な地域を対象にGNSSとInSARによる稠密地殻変動観測を行い、断層周辺域における歪速度の詳細分布や時間変化の有無を明らかにして、断層帯深部の定常すべりの検出や変形様式の考察を行う。

H31:GNSS観測網の再構築と大阪府北部地域における新規観測点の設置、跡津川断層周辺のInSAR解析

H32:既存GNSSデータに基づくひずみ速度分布の解明、跡津川断層周辺のInSAR解析

H33:新規GNSS観測点のデータも含めた詳細ひずみ速度分布の解明と地殻変動の時間変化の検討、跡津川断層周辺のInSAR解析

H34:新規GNSS観測点のデータも含めた詳細ひずみ速度分布及び時間変化の解明、跡津川断層周辺のInSAR解析、地殻変動モデリング

H35:GNSSデータとInSARデータを統合し、観測された地殻変動に基づくモデリングと考察を行う。

・比抵抗観測とモデル化

中国・四国地方の基盤的比抵抗構造では緯度・経度方向に5分×7.5分の測点密度観測網を展開する。(a)鹿野・吉岡・岩坪断層を含む線状配列をなす地震活動帯、(b)中国地方東部域(地震活動帯から那岐山断層帯を越え吉備高原中北部の鳥取・岡山県境周辺域)ならびに中国地方中北部域(島根県東部地震空白域から鳥取県境付近)において広帯域MT観測を実施する。(c)四国地方では未測定エリアにおいて10分×10分基盤的測点データを取得すべく広帯域MT観測を展開する。以上、測点密度を向上させた3地域における広域的・基盤的比抵抗構造調査をもとに、主に、流体分布の観点から、地殻・マントル上部の空間的構造不均質性を明らかにし、地震・火山現象を支配する場の解明とモデル化に寄与する。

各年度の主な計画は次の通り。H31:中国中北部・東部及び四国地方のMT予備調査と選点完了地域における本観測ならびに既存データを用いた四国地方の基盤的比抵抗構造解析を実施。H32:同じく中国・四国地方のMT予備調査と選点完了地域における本観測を実施。H33:四国地方のMT観測ならびに中国地方の基盤的比抵抗構造解析を実施。H34:四国地方及び中国地方の基盤的比抵抗観測網の未測定エリアにおいて補観測を実施。H35:中国・四国地方の基盤的比抵抗観測の未測定エリアにおいて補観測を実施。中国地方中北部・東部域～四国地方の基盤的比抵抗構造統合モデルを構築し、地震・火山現象を支配する場の解明とモデル化に寄与する。

・高密度地震観測による内陸地震の発生機構と発生場の解明

山陰地方の地震帯、近畿地方中北部や長野県西部地域など西南日本の横ずれ断層の活動域において高密度地震観測を行い、内陸地震の断層周辺の3次元の不均質構造、低周波地震活動や応力場の解明等を行う。特に、大阪北部の余震域とその周辺において高感度地震観測を強化して、有馬高槻断層帯などの断層周辺の3次元の不均質構造、応力場や断層の強度などを推定する。また、震源に極近い観測点の連続波形記録等から前震から本震に至る過程を調査する。また、余震観測等を含む高密度な地震観測網記録に地震波干渉法を適用することによって、都市部での断層構造や浅部地下構造推定の可能性を調べる。

H31:高密度地震観測網の再構築、大阪北部の地震の詳細な余震分布および余震域とその周辺の応力場

の推定、大阪北部の地震の本震前の連続波形記録や測地学的記録の精査、

H32: 大阪北部の地震の余震域とその周辺の3次元不均質構造の推定、大阪北部の地震の本震に至るモデル化

H33: 大阪北部の地震の余震域周辺における低周波地震活動の解明、観測点ペアにおける地震波干渉法の適用

H34: 大阪北部の地震の発生過程と今後の地震活動の推移の予測、全波動場計算の結果と地震波干渉法により得られた疑似地震波形との比較による構造推定と解釈

H35: 統合モデル化、地震波干渉法の都市部地下構造探査への応用可能性の検討、高密度地震観測網の撤収。

・地震の発生における応力と流体の役割の解明

本研究では、プレート運動による応力蓄積率の遅い内陸地域を対象に、地震のメカニズム解から地殻内の絶対応力場、及び地震の発生における応力と流体の役割を定量的に評価することを目指す。このため、内陸域にありながら活発な地震活動が観測される御嶽山周辺域などを対象とする。研究の軸となるFMT法(Terakawa et al., 2010; Terakawa, 2014) と間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場モデリング手法 (Terakawa and Hauksson, 2018) では、地震のメカニズム解をデータとして用いる。このため、研究期間全体を通じて、名古屋大学をはじめとする諸機関の定常地震観測によって得られた良質な地震データから、気象庁カタログには掲載されない微小地震も含めて震源とメカニズム解を推定し、データベースを構築する。

H31-32: FMT法は、応力場と地震メカニズム解の関係から、地殻内の間隙流体圧場を三次元的に推定する手法である。この手法では、応力場のパターンの推定誤差がインバージョン解析のモデル誤差となり、結果に偏りを生じる可能性があることがわかっている (Terakawa, 2017)。このため、応力場の推定誤差を取り入れた定式化を行うことを検討する。

また、これまでの成果により、御嶽山東麓の群発地震発生域に、静水圧を 15 ± 5 MPa程度上回る安定な高圧間隙流体圧場が形成されている可能性があることがわかった (Terakawa, 2017)。本研究では、改良したFMT法と微小地震から求めた局所応力場とその推定誤差 (Terakawa et al., 2016) を用いて、この領域の間隙流体圧分布の時間発展解析を行い、活発な群発地震活動と間隙流体の関係を定量的に明らかにする。

H33-34: 間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場モデリング手法では、文字通り、(応力場の最適面に働く) 間隙流体圧をパラメータに絶対応力場をモデル化し、大地震の引き起こす応力変化や弾性歪エネルギーの変化に基づいて適切な間隙流体圧レベルを推定し、これを通じて絶対応力場を求める (Terakawa and Hauksson, 2018)。この絶対応力場の推定解析を、本研究で推定した大量の地震のメカニズム解に適用し、2017年6月25日の長野県南部の地震 (M 5.6) の発生直前の絶対応力場を推定することを試みる。一方、地震の発生した断層運動のタイプと応力場のパターンの関係を統計的に調べて、観測データから絶対応力場レベルを測る手法について検討することを試みる。地震は既存弱面を利用した応力解放過程であるため、一様な応力場の下においても、ばらついたメカニズム解が観測されることがある。このメカニズム解のばらつきは、経験的に、地震の規模が大きくなるにつれ観測されなくなる傾向があり、ばらつきが観測されなくなる最小マグニチュード (ここでは M_c と定義する) は地域毎に異なる (Terakawa et al., 2012, 2013b; Terakawa, 2014)。本研究では、大量のメカニズム解のデータから、 M_c の分布を場の情報として求めて、絶対応力レベルとの関係を調べる。また、御嶽山周辺域以外の内陸地域 (2016年熊本地震、2009年ラクイラ地震、1992年ランダース地震の震源域など) について、同様な解析により絶対応力場や M_c の分布を推定し、テクトニクスによる絶対応力場の特徴の違いなどを分析することも視野に入れる。

H35: H33-34年度に推定した絶対応力場と間隙流体圧レベルを基に、まず、長野県南部の地震の引き起こす応力変化が原因で余震が活発化すると考えられる地域を調べて、実際の余震活動と比較する。次に、本震による応力変化で説明できない余震活動を特定し、FMT法の考え方を用いて、応力場とメカニズム解の関係から間隙流体圧の影響を定量的に調べることを試みる。

・西南日本の地殻変動と内陸地震の活動期のモデリング

西南日本において内陸域のひずみ集中帯を含む広域地殻変動場をブロック断層モデルを用いてモデル化し、南海トラフの巨大地震サイクルに伴う内陸地震の活動期・静穏期を ΔCFF (Coulomb's Failure Function) とブロック形状に基づくシミュレーションと個別の断層に着目した摩擦構成則を用いたシミュレーションによって再現して、そのメカニズムを明らかにする。

H31: GNSSデータ及びブロック構造に関連する知見の整理、個別の断層に与える長期的滑り速度や地

震発生層の厚さ等の境界条件の整理、シミュレーションプログラムのコーディング

H32: 粘弾性変形を考慮したブロック断層モデルの高度化と Δ CFF及び摩擦構成則を用いた個別断層のシミュレーションの構築、シミュレーションプログラムのコーディング

H33: シミュレーションと実際の地震活動及び地殻変動との比較によるシミュレーションのパラメータのチューニング

H34: シミュレーションと実際の地震活動及び地殻変動との比較によるシミュレーションのパラメータのチューニング、 Δ CFFと摩擦構成則を用いたシミュレーションの統合に関する検討

H35: 内陸地震の活動期のシミュレーションの統合化とまとめ

・地震活動変化

内陸大地震の発生前の地震活動変化はゆっくりすべりによる応力変化(Δ CFS)に起因するという説を、GNSS観測データの解析や地下構造や応力場のデータも含めて検証するとともに、地震活動の異常性を業務的に捉えられるようなモデルとそのソフトウェアを開発し、確率予測が可能になるような統計モデルの提案を目指す。

H31-32: 地震データの整理と予備的な解析。H33: 地震活動変化解析。H34-35: 統計モデル作成。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

○GNSS

島根県西部と大阪府北部周辺におけるGNSS観測点のデータの蓄積により、高精度で詳細な速度分布を得た。速度データの外れ値の基準を定めてひずみ速度の計算から除外することで近畿中国地方地方の合理的なひずみ速度分布を得た（図D1）。また、能登半島におけるGNSS観測を継続し、2023年5月5日の地震（M6.5）の余効変動がおさまりつつある中で、2024年1月1日の地震（M7.6）の地震が発生したことが明らかになった。

○比抵抗観測とモデル化

実施計画をふまえ中国地方中北部・東部地域と四国地方の基盤的比抵抗構造観測データ（図T1、上図）を用いて、1）鳥取東部から中西部地域、2）四国地方中央部地域、3）島根県東部地域、など地域毎の3次元比抵抗構造解析に着手した。また、中国・四国地方の基盤的比抵抗観測の未測定エリアにおいて補観測のための予備観測を実施した。ここでは3次元比抵抗構造解析の例として、1）鳥取-岡山東部から中西部地域において実施された3次元比抵抗構造解析結果について報告する。

構造解析にはCGG社GeoTools/RLM-3Dソフトウェアを用いた3次元比抵抗インバージョンを行った。使用した観測データは、主として、基盤的比抵抗構造調査のために観測空白域において一定の観測点密度を目指し空間サンプルされた「災害の軽減に貢献するための観測研究計画」以降のデータを用いた。インバージョンには周波数264Hzから0.0006866Hzの18周波数帯域でインピーダンスと地磁気変換関数を設定した。また、電場に対して磁場が異なった場所で測定された地点ではその情報を取り入れて計算した。鳥取-岡山東部から中西部地域の3次元モデル解析のために構築した初期モデルの概要は次の通りである。水平方向は、南北、東西方向に計算のコアとなる領域では要素間隔は最小1km×0.75kmとし、その外側では遠方に向かって徐々に間隔を広げ計算領域を設定した（図T1、下図）。また、鉛直下向き深さ方向では、SRTM（Shuttle Radar Topography Mission）の地形標高データを表層については海拔高度まで25m間隔で設定し、海拔高度から5kmまでは1.1倍ずつ、5km以深500kmまでは1.2倍で深くなるほど要素間隔を大きく設定した。400km以深はマントル遷移層・下部マントルの比抵抗値として1 Ω mを与えた。要素総数は1,405,206（99×94×151、大気層は除く）となり、空間領域としては306km×263km×538kmとなった。初期モデルの比抵抗値については、上述の標高地形データを用いて起伏を表現し、海水部分には0.3 Ω m、それ以外の大地には100 Ω mを与えた。

以下に得られた3次元比抵抗モデル（図T2）の特徴を述べる。

- 鳥取・岡山東部から中西部地域では、地殻表層部は数百 Ω m程度の構造がみられる中、深さ数kmから約20kmにかけては全般的に数k Ω m以上の高比抵抗領域と推定された。
- 地殻深部には（深度約20kmから40kmあたりに）には50 Ω m以下の低比抵抗領域が共通して確認された。この低比抵抗領域は、鳥取・兵庫県境付近では北側海岸線付近から南方へ数10km伸びており、その低比抵抗は西方向に延長するが、鳥取県中部から中西部では海岸線付近から約30km南方へずれたところにその中心部がある。この深部低比抵抗領域の規模やつながりは本年度の3次元解析を通して初

めて示された特徴である。

c) 気象庁（2022）によると解析地域の鳥取・岡山県境付近では散発的ながら非火山性の低周波地震の発生が報告されている。この低周波地震が上述の低比抵抗領域の中央部ではなく北部で発生していることは興味深い。

d) 南北方向の構造断面では、1943年鳥取地震（M7.2）や鳥取県中部の地震（1983年、M6.2）、2016年鳥取県中部の地震（M6.6）、鳥取県中西部の地震（2002、M5.3）の地震活動域や大山-蒜山火山群のある北側方向に向けて、高比抵抗領域を南北に分けるようにこの深部低比抵抗領域から比抵抗のやや低い領域（数百 Ωm から1k Ωm ）の延長がみられた。山陰地方の地震活動や第四紀火山の発生場を考える上でこの低比抵抗領域は重要な役割を担っていることが示唆される。また、この高比抵抗領域は鳥取東部と中西部の間で連続していないようにみえる。

本年度の1) 地域に関する構造解析結果は以上の通りであるが、ここで得られた3次元比抵抗構造は第一次モデルと考えている。これは、得られた全ての観測点データを入力して得られた最終的な構造ではなく、主として「災害の軽減に貢献するための観測研究計画」以降に取得されたデータを用いたということ、さらには、山陽地域や四国地方の中央構造線以北などでは地殻深部を議論できる周期帯の測定結果を得てない地点も存在するためである。また、今回用いた観測研究計画以前のデータを統合した構造解析をするためには、従来の複数の観測機器やファームウェアに起因する測定周波数の違いや、観測座標系の違い、解析処理ソフトウェアの相違や測点ごとのS/N比の違いによる解析可能な周波数帯域の問題など、解決すべき問題点も一部残されている。今後期待される太陽活動が活発な時期に行われる補観測による質の高いデータの取得ならびに上述の問題点を補正後、全データを用いた構造解析の実施により、高精度の中国・四国地方の基盤的比抵抗構造が得られることを期待する。

○御嶽山周辺域の地震活動モニタリング

御嶽山周辺域の地震活動を理解するために、名古屋大学を含む諸機関の定常地震観測で得られた連続地震波形データ（2023年1月～2023年12月）に対し、WINシステムのイベント自動検出機能を利用した手動波形読み取り処理を行い、6342個の地震の震源を決定した（図N1）。R5年度は御嶽山周辺域の地震活動が活発であり、震源決定の処理数は去年の約1.3倍であった。とくに活発な活動が観測された地域は、図N1のA～Dの4地域である。領域Aの浅い領域（深さ3km程度）では2023年6月頃から、領域B（深さ5kmと10kmの2つのクラスターがある）では2023年6月中旬頃頃から、領域C（深さ5km）と領域D（深さ10km）では2023年7月中旬ごろから活発な活動が継続している。領域Dの活動は、震源分布から奈良井断層の活動と考えられる。

一方、御嶽山直下の火山性地震については、図N2の赤い点線で示した範囲内で115個の地震の震源が求まった。火山性地震の数は2014年の御嶽山噴火以降減少しているが、活動は継続中で、噴火前の平常状態に戻っていない。また、2014年御嶽山噴火前後で、火山性地震のメカニズム解が東西伸長の正断層型から東西圧縮の逆断層に正反対に変化することに基づき（Terakawa et al., 2016）、2007年の微小噴火の発生日を調べる試みも進められた（Terakawa et al., in prep.）。

○剪断歪エネルギーと応力変化に基づく2016年熊本地震震源域の背景応力場の考察

地震は、地下に蓄えられた弾性歪エネルギーを、断層運動により一気に解放する物理過程である。弾性歪エネルギーは絶対応力の関数であり、地下の応力状態を把握できれば、地震の発生メカニズムの解明に大きく貢献する。しかし、震源域の応力を直接測定することは難しく、とりわけ、偏差応力の大きさを推定することが本質的な課題となっている。本研究では、2016年熊本地震震源周辺域の絶対応力6成分のモデリングを通じて、剪断歪エネルギーの変化と地震前後の応力の向きの変化の両方を分析し、地震前の偏差応力の大きさを調べた（Terakawa et al., submitted）。

まず、熊本地震発生直前（一連の地震活動のスタートとなった最大前震発生直前）の震源周辺域の背景応力場を、実効摩擦係数を支配する無次元間隙流体圧パラメータ（ $C = 0.0, 0.5, 0.9$ ）を変化させて3ケース計算した（Terakawa & Hauksson, 2018）。 $C = 0.0, 0.5, 0.9$ に対応する実効摩擦係数は、 $\mu' = 0.38, 0.19, 0.04$ である。実効摩擦係数が最も大きい $C = 0$ （ $\mu' = 0.38$ ）のモデルはAnderson-Byerleeの岩石の標準状態（摩擦係数0.6、静水圧）に相当し、最も小さい $C = 0.9$ （ $\mu' = 0.04$ ）のモデルは従来の応力インバージョンによる大地震前後の応力変化に基づく偏差応力レベルの推定結果に相当する。次に、熊本地震の本震と最大前震のすべり分布（Asano & Iwata, 2016）からすべりによる応力応答関数（Fukahata & Matsu'ura, 2005）を用いて地震時応力変化を計算した。地

震前の背景応力場と地震時応力変化を合わせれば、仮定した3つの実効摩擦係数に対応して、地震後の絶対応力場を計算することができる。地震前後の全応力成分が得られることで、地震前後の弾性歪エネルギーや地震前後の理論的な応力の向きの変化を直接計算することが可能となる。

エネルギーバランスを考慮すれば、地震で解放される剪断歪エネルギーは少なくとも放射エネルギーよりも大きい必要がある。剪断歪エネルギーの解放量は背景応力場の偏差応力レベルが高いほど大きくなり (Noda et al., 2020; Terakawa et al., 2020), $C = 0.0, 0.5, 0.9$ に対して 4.32×10^{16} , 2.01×10^{16} , 1.64×10^{15} Nm となった。熊本地震の放射エネルギーは地震波の解析や動的破壊シミュレーションにより 2.0×10^{15} Nm程度 (Kanamori et al., 2020; Kaneko & Goto, 2022) と推定されており、これらの結果から $C = 0.9$ の偏差応力レベルは小さすぎることがわかった。

また、すべりに伴う断層面上の剪断応力の変化のパターンは背景応力場の偏差応力レベルには依らない。しかし、断層面上の剪断応力の代わりに偏差応力の大きさをとると、数kmより浅い部分での振る舞いにモデル間で違いがみられた (図N3)。偏差応力が大きく、地殻に剪断歪エネルギーが十分蓄えられている場合は ($C = 0.0, 0.5$)、偏差応力を小さくするようにすべりが進行する ($C = 0.5$ の震源域南部の浅部の一部を除く)。一方、偏差応力が最も小さいモデル ($C = 0.9$) では、偏差応力がすべりと共に増加するか、または一旦減少した後再び増加する。これは、すべりの途中で応力の向きが変化し、すべることで剪断歪エネルギーを増加させてしまうためである。地震はすべりにより剪断歪エネルギーを解放する物理過程であるため、大きくすべった領域では偏差応力が減少するモデル ($C = 0.0, 0.5$) の方が合理的である。

また、熊本地震前後の絶対応力場から、最大前震及び本震による理論的な応力の向きの変化を調べた。偏差応力が最も小さい場合でも、顕著な応力変化が予想されるのは震源断層のごく近傍に限られる (図N4)。そこで、本震後の震源断層付近の実際の応力の向きを評価するために、本震後約3年間に震源断層から10km以内で発生した地震のメカニズム解のすべりベクトルと応力場から予想されるすべりベクトルのなす角 (ミスフィット角) を計算した (図N5)。応力場やメカニズム解の推定誤差を考慮すると、 $\theta \leq 30^\circ$ となる地震は応力場と整合的であると考えられる。布田川断層付近の395個の地震のうち、 $\theta \leq 30^\circ$ となるものの割合は、 $C = 0.0, 0.5, 0.9$ に対して74, 75, 45%となった。日奈久断層付近では、5 km程度の浅部で応力変化が現れることが予想されるため (図N4)、深さ7.5 km以浅の160個の地震のミスフィット角を調べた。となるものの割合は、 $C = 0.0, 0.5, 0.9$ に対して82, 79, 51%となった。これらの結果から、 $C = 0.0$ と 0.5 のモデルが $C = 0.9$ のモデルより応力場に整合的であることがわかった。

本研究による剪断歪エネルギーと応力場の時間変化に基づく分析の結果は、どちらも偏差応力の大きい2つのモデル ($C = 0.0, 0.5$) の方が偏差応力の最も小さいモデル ($C = 0.9$) より合理的であることを示した。この結果、熊本地震震源周辺域の実効摩擦係数は、従来の応力インバージョンによる推定結果 ($\mu' < 0.1$) よりも有意に大きいと考えられる。

○地震活動変化

1) リアルタイムで日本内陸部の地震データが追加されるごとに、標準の時空間ETASモデルと階層ベイズの時空間ETAS(HIST-ETAS)モデルに基づいた短期予測確率の性能を情報利得 (対数尤度) で評価・比較した。ここ2年間の日本内陸部データに関して、結果、地域性が特徴づけられたHIST-ETASモデルが概ね全国的に最も良い予測を与えた。しかし、内陸部の限られた地域、特に能登半島地震の余震域に関しては、全国均一の時空間ETASモデルの方が優れている。これは1923年以来の同地域でのM4クラス以上の地震活動の記録が最近まで殆ど無かったことに起因すると考えられる。

2) 地震活動解析の精度向上のため、気象庁が検出・編集したカタログの殆ど全ての地震を使用するため、まずカタログの地震の検出率をモデル化して推定した。欠測データがモデル推定および予測に与える影響を考慮し、真の地震発生率を計算する方法を開発した。応用として、2024年M7.6能登半島地震や2023年M6.8の地震などの、本震直後の余震活動や群発地震のインバージョンを実行した。主要な副産物として余震欠測の甚だしい本震直後のETASモデルによる余震予測が可能で、これが安定したリアルタイム余震予測を保証できる工夫の実験が課題である。(図S1, S2)

○奥能登における電磁気観測

昨年度から継続している北側クラスタ周辺での陸上地磁気地電流連続観測を継続した。2023年5月5日のMJMA6.5地震の発生時、ならびに、2024年1月1日MJMA7.6地震の発生時には、それぞれ4地点で地震前後の電磁場データの測定に成功した。現在、地震前後の構造変化の有無について検証してい

る。

○分布型音響センシング(DAS)による内陸地震観測を通じた地震発生場の解明

京都府南部の国道9号沿いで行ったDAS測定の実験データ解析を行った。用いた光ケーブルのほぼ真下の地殻内で発生したM2.8地震の後続波に、下部地殻で反射したと考えられるS波が観測されていた。下部地殻内に北側に緩やかに傾斜する低速度の反射面を与える事で、歪み波動場を再現することに成功した。(図D2)

奥能登の能登町～珠洲市間の約27kmの光ケーブルを用いDAS観測を実施し、光ケーブルが架空区間にあっても、地震の揺れを捉えられることを確認した。

・計画期間中(令和元年度～5年度)の成果の概要

○断層帯周辺の稠密地殻変動とモデリング

島根県西部と大阪府北部周辺において、本計画期間に新たに設置されたGNSS観測点のデータを用いることで、ひずみ速度の詳細な分布が明らかになり、山陰ひずみ集中帯の西縁が島根県西部であることや有馬一高槻断層帯周辺に顕著なひずみ集中域があることが明らかになった。また、能登半島におけるGNSS観測データなどの解析から、深部からの流体の上昇とそれによって誘発された非地震性すべりにより、浅部延長で活発な群発地震活動や大地震が引き起こされたことを明らかにした。

○比抵抗観測とモデル化

中国・四国地方の基盤的比抵抗構造研究を実施した。本研究計画では、中国・四国地方の広域的・基盤的比抵抗構造調査データをもとに、主に、流体分布の観点から地殻・マントル上部の空間的構造不均質性を明らかにし、地震・火山現象を支配する場の解明とモデル化に寄与することを到達目標とした。これはそれ以前の「地震予知のための新たな観測研究計画」ならびに「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」において、鳥取大学が進めつつあった活構造(例えば、地震活動や活断層、第四紀火山)と関連する基本的な比抵抗構造の特徴を理解するための特定地域における調査研究を進展させたもので、中国・四国地方の骨格となる基盤的な比抵抗構造を解明する観測研究計画を積極的に推し進めることが重要であるという認識に基づき、本5カ年の観測研究計画を通してMT法を用いた瀬戸内海側の都市部を除き基盤的構造観測を実施した。

ここでははじめに、令和元年度から4年度に実施した観測研究の成果の概要を示す。まず、基盤的比抵抗構造観測を中国地方東部地域と中国地方中部地域の2地域を研究対象域として実施した。前者は、現在地震活動が比較的低調である鹿野・吉岡断層の東端部と東方延長部、ならびに雨滝・釜戸断層や山崎断層帯を横切る地域である。後者は、山陰地方の内陸地震帯内の地震活動が低い地域である地震空白域(石川,1990)の西端部ならびに、南部地域は浅野他(1986)が指摘した地震帯(中野原から三川を通り北西-南東方向に伸びる地震帯(とこれに直交するように三瓶山から海岸線に平行して西南方向に伸びる二つの地震帯の交差するあたりで2018年島根県西部地震(M6.1)が発生した)地域に位置する。これら2地域について得られたデータをもとにした2次元比抵抗構造解析を実施した。

その結果、これら2地域に関する共通した知見としては、上部地殻深度は全般的に高比抵抗領域(数 $k\Omega$ 以上)であること、比抵抗構造と地震活動との関連をみると高比抵抗と低比抵抗の境界部もしくは高比抵抗領域側では地震活動がみられること、これまで山陰地方のM6を超える内陸地震発生域下で指摘された $10\Omega m$ 以下の顕著な深部低比抵抗領域が見られないことなどが示された。そのような共通する構造的背景の中、中国地方東部地域では、鹿野・吉岡断層のまさに東端部にあたる地点や雨滝-釜戸断層の直南地点である地域では、周りと比べて半桁から1桁程度比抵抗が下がるという構造の不連続性が示された。内陸地震発生規模と関連が示唆された。また、中国地方中部地域では、北部日本海側地点ならびに三瓶火山直南地点の地殻浅部には低比抵抗領域が示された。

最終年度である令和5年度は、先述のようにこれまでに得られた基盤的比抵抗構造調査データを3つの地域に分けて3次元構造解析に着手した。その結果として、これまでに山陰地方ならびに四国地方で2次元構造解析から示された地震活動と比抵抗構造に関する知見を3次元解析からも再確認されたことが最大の成果と考える。さらに、山陰地方ではこれまでは議論していなかった地殻内地震下の低比抵抗領域の深部延長の空間的な広がりを推定したことも重要な成果といえよう。特に、その北部領域が低周波地震域と空間的に関連すること、また、その北部延長に山陰地方の地震活動や火山が存在することは興味深い。一方、四国地方では南部においてフィリピン海プレートと関連が示唆される高比抵抗領域の縁をかたち取るように低周波地震が発生していることや、中央構造線南側・外帯の地殻

に共通して存在する、無地震域と関連づけられる低比抵抗領域の広がり3次元構造として示されたことは重要である。これらと地殻内地震や低周波地震域との関連はデータを追加した構造解析により明確になるものと思われる。このようにこれらの地域での初めて実施された3次元比抵抗構造解析による知見は、同地域での地震活動や火山発生場に関するより深い理解のための必要不可欠な基礎データとなる。今後引き続き、得られた全データを利用して全体を統合した3次元基盤的構造を推定する予定である。

珠洲市において群発的地震活動が顕著になった2021年度以降、その活動域周辺の地下比抵抗構造を把握するために、2021年度には陸上32か所、2022年度には陸上25か所の計57か所にて広帯域地磁気地電流観測を実施した。逆解析により推定された3次元比抵抗構造では、初期の活動域（南クラスタ）から北クラスタに至る低比抵抗領域の存在が明らかになった。群発的地震活動は、この低比抵抗領域の上端に位置し、流体の移動・拡散との関連が強く示唆される。この流体の移動・拡散のモニタリングの可能性を検証するために、珠洲市北岸にて長期連続観測を継続している。

○高密度地震観測による内陸地震の発生機構と発生場の解明

山陰地方の地震帯において、地震波トモグラフィー等により不均質構造が推定された。2016年鳥取県中部地震について差応力状態を推定し、地震前に断層端において応力緩和が見られることから、同規模で地震活動が連動する可能性が低いことがわかった。深層学習を用いた走時読み取りプログラムを開発し、未処理であった満点計画の地震データの解析を可能とした。

大阪府北部の地震の詳細な余震分布および余震域とその周辺の応力場の推定を行った。有馬高槻断層帯の北方の下部地殻内に存在することが知られている地震波反射体について、DASによる測定で捉えることに成功した。奥能登の群発地震発生域において、地中・架空の光ケーブルを用いて、地震観測が可能なることを示し、突発災害時などの緊急地震観測を迅速に実施できる可能性があることを確認した。

○地震の発生における応力と流体の役割の解明

R5年度は、御嶽山周辺域の群発地震活動や火山性地震活動を把握するために、定常地震観測網の地震データの分析を進めた。また、2016年熊本地震震源域の背景応力場の偏差応力レベルを調べた。本研究では、背景応力場のモデリングを通じて、剪断歪エネルギーの変化を様々な角度から分析するとともに、応力の向きの時間変化を考慮して、偏差応力の大きさは従来考えられてきた値よりも有意に小さい可能性が高いことを示した。

5か年の計画の中では、弾性歪エネルギーに基づく新しい地震破壊規準を提案し（Terakawa et al., 2020, EPSL）、これが最終年度の背景応力場の推定にもつながっている。また、地震の発生における応力と間隙流体圧の役割に関しては、独自の手法である地震メカニズムトモグラフィー法を軸に、2016年熊本地震後の余震の発生に間隙流体圧上昇が関与していることを初めて定量的に示すことに成功し（Nakagomi et al., 2021, EPS）、また、韓国の地熱発電所の注水によって誘発された2017年浦項地震を駆動した間隙流体圧場を明らかにした（Terakawa et al., 2020, GRL）。また、地震のモーメントテンソルデータから3次元的に応力の向きを推定する独自の手法（CMTデータインバージョン法）を改良し、過去のデータ解析の結果を直接的先験情報として取り入れながら長期間の地震データから精度よく応力場の時空間分布を推定することを可能とした（Terakawa & Matsu'ura, 2023, GJI）。本手法を東北地方太平洋沖地震の震源域を含む東北地方の広い領域の23年間のデータに適用し、この地方の応力場を詳細に分析した。今後、日本列島全域の応力場の推定を目指している。

御嶽山の噴火に関しては、前研究計画の成果により、噴火前後で火山性地震のメカニズム解が東西伸長の正断層型から東西圧縮の逆断層型に正反対に変化することを突きとめた。その後も地震観測とデータ解析を継続することで、2022年2~3月のアンレスト時にも2014年噴火時と同じ領域で東西伸長の正断層運動が活発したことが捕らえられた。これらの観測事実から、噴火日の特定されていない2007年の極微小噴火の噴火日時を推定する取り組みも進んだ（Terakawa et al., in prep.）。

○西南日本の地殻変動と内陸地震の活動期のモデリング

西南日本を模した単純な2次元の斜め沈み込み帯と現実的な3次元の沈み込み帯形状を用いてGNSSデータから推定された固着分布を用い、海溝型地震断層での固着と100-120年周期の大地震による内陸域でのクーロン応力変化について、粘弾性を考慮して計算した。

○地震活動変化

地域性を考慮した階層時空間ETAS (HIST-ETAS) モデルで、リアルタイム予測とシミュレーションを可能にし、動画による可視化を実装し、実データ解析に適用した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

有馬-高槻断層帯周辺や西南日本の地殻変動と内陸地震の活動期のモデリングや鳥取県中部地震の断層周辺の応力場の解析は、1(5)イの内陸地震の断層への応力载荷過程の解明に貢献するものである。直接的先験情報を考慮したテクトニック応力場の推定法の開発と東北地方におけるF-netデータへの適用は、1(3)アの東北地方太平洋沖地震発生後のプレート間の固着状態と、周辺の応力場の時空間変化の解明に貢献するものである。5か年計画中に発生した奥能登の群発地震活動に対し、本課題と関連が深いテーマとして観測研究を実施し一連の地殻活動を捉え、その結果を国の地震調査委員会へ資料提出する等の貢献を行った。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Nishimura, T., Y. Hiramatsu, and Y. Ohta, 2023, Episodic transient deformation revealed by the analysis of multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, central Japan, Scientific Reports, 13, 8381, 10.1038/s41598-023-35459-z, 査読有, 謝辞有

Terakawa, T., K. Asano and Y. Urata, Estimation of background stress in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake sequence based on changes in shear strain energies and coseismic stress rotation

Hainzl, S., Kumazawa, T. and Ogata, Y., 2024, Aftershock forecasts based on incomplete earthquake catalogs: ETASI model application to the 2023 SE Türkiye earthquake sequence, Geophys. J. Int., ggae006, <https://doi.org/10.1093/gji/ggae006>, 査読有, 謝辞無

熊澤貴雄, 尾形良彦, 2023, 非定常ETASモデルから見える能登半島群発地震活動の地域的变化(続報2), 地震予知連絡会会報, 109, 321-325

尾形良彦, 熊澤貴雄, 2023, 2023年2月6日に発生したトルコ中部地震の余震活動について, 地震予知連絡会会報, 110, 426-431

熊澤貴雄, 尾形良彦, 2023, 最近の能登半島群発地震活動の時空間的特徴と2023年5月5日M6.5地震について, 地震予知連絡会会報, 110, 443-450

・学会・シンポジウム等での発表

西村卓也, 2023, 西日本のGNSS速度場の時間変化に基づく粘弾性変形に関する考察, 日本測地学会第140回講演会, 33

Nishimura, T., Y. Hiramatsu, and Y. Ohta, 2023, Transient deformation associated with an earthquake swarm in the Noto Peninsula based on combined analysis of multiple GNSS observation networks, IUGG General Assembly, IUGG23-0754

寺川寿子・浅野公之・浦田優美, 2023, 剪断歪エネルギーに基づく2016年熊本地震震源域の背景応力場の推定, 日本地球惑星連合大会

Toshiko Terakawa, 2023, Estimating the background stress fields in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake based on shear strain energy, The 6th Japan-Taiwan Workshop on Crustal Dynamics

Toshiko Terakawa, K. Asano and Y. Urata, 2023, Estimating the background stress fields in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake based on shear strain energy, IUGG

寺川寿子・浅野公之・浦田優美, 2023, 剪断歪エネルギーと応力場の時間変化から推定した2016年熊本地震震源域の絶対応力場, 日本地震学会秋季大会

Toshiko Terakawa and K. Asano, 2023, Estimating the background stress field in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake based on changes in shear strain energies and coseismic stress rotation, AGU Fall Meeting 2023

尾形良彦, 2023, 地殻活動の予測 (2): 最近の能登半島群発地震活動の時空間的特徴と2023年5月5日M6.5地震について, 第240回地震予知連絡会

熊澤貴雄, 尾形良彦, 2023, M6.5の地震発生に至るまでの地震活動の推移とそれ以降の活動についての解析と評価について, 第240回地震予知連絡会

尾形良彦, 熊澤貴雄, 2023, 系統的な欠測を伴う地震カタログから実際の活動率変化の推定: M6.5 能登半島地震の余震活動について, 第240回地震予知連絡会

熊澤貴雄, 尾形良彦, 2023, 能登半島群発地震の経過と大地震前後の異常活動の解釈, 重点検討課題「予測実験の試行(09) 地震活動の中期予測の検証」の検討, 第241回地震予知連絡会 (招待講演)

Hainzl, S., Kumazawa, T. and Ogata, Y., 2023, Aftershock forecasts based on incomplete earthquake catalogs: ETASI model application to the 2023 SE Türkiye earthquake sequence, AGU Annual Meeting 2023

尾形良彦, 熊澤貴雄, 2023, 系統的な欠測を伴う地震カタログから実際の活動率変化の推定, 日本地震学会2023年度秋季大会

熊澤貴雄, 尾形良彦, 2023, 点過程モデルから見える能登半島群発地震活動の時空間変動について, 日本地震学会2023年度秋季大会

尾形良彦, 2023, 直下型大地震の確率予測について, 2023年度統計関連学会連合大会

熊澤貴雄, 尾形良彦, 2023, 能登半島群発地震の時空間的活動推移の統計的特徴, 2023年度統計関連学会連合大会

尾形良彦, 2023, 時空間ETAS予測との比較による地震活動の多様な特性, 日本地球惑星科学連合2023年大会

熊澤貴雄, 尾形良彦, 2023, 能登半島群発地震の時空間的活動推移の統計的特徴, 日本地球惑星科学連合2023年大会

田中愛幸, 宮澤理稔, 荒木英一郎, 2023, 光ファイバーケーブルを用いた能登半島群発地震のDAS観測, 日本地球惑星科学連合2023年大会, STT42-01招待講演

宮澤理稔, 2023, 京都国道9号における光ファイバセンシングで観測された反射S波から推定される下部地殻構造, 日本地球惑星科学連合2023年大会, STT42-P03

荒木英一郎, 宮澤理稔, 田中愛幸, 2023, 石川県珠洲市トンネル内の光ファイバ歪・地震計およびDAS観測記録の比較, 日本地球惑星科学連合2023年大会, STT42-P04

宮澤理稔, 荒木英一郎, 田中愛幸, 2023, 分布型音響センシング(DAS)技術によって記録された能登半島群発地震活動に伴う強震動, 日本地震学会2023年度秋季大会, S22-07

荒木英一郎, 宮澤理稔, 田中愛幸, 横引貴史, 2023, 石川県珠洲市トンネル内でのTW-COTDR光ファイバセンシング技術による歪観測 (初報), 日本地震学会2023年度秋季大会, S22P-09

船曳祐輝, 宮澤理稔, 2023, 国道9号線沿いのDAS記録によるP波初動の観測, 日本地震学会2023年度秋季大会, S02P-04

塩崎一郎, 宇都智史, 上嶋誠, 飯尾能久, 畑岡寛, 村上英記, 大志万直人, 池添康雄, 山本真二, 2023, 中国・四国地方の基盤的比抵抗構造調査, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SEM14-P17

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

西日本における地殻活動の機動観測を通じた内陸地震に関する総合的研究
 地震の発生における応力と間隙流体圧の役割
 内陸地震域の比抵抗構造再調査と地震発生ポテンシャル評価の有効性検証
 地方自治体の地震災害対策に貢献するための基盤情報の整備と共有

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

京都大学防災研究所

他機関との共同研究の有無: 有

名古屋大学大学院環境学研究科, 鳥取大学大学院工学研究科, 北海道大学大学院理学院理学研究院, 九州大学大学院理学研究院, 東京大学地震研究所, 林能成 (関西大学社会安全学部), 尾形良彦 (統計数理研究所)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学防災研究所

電話：

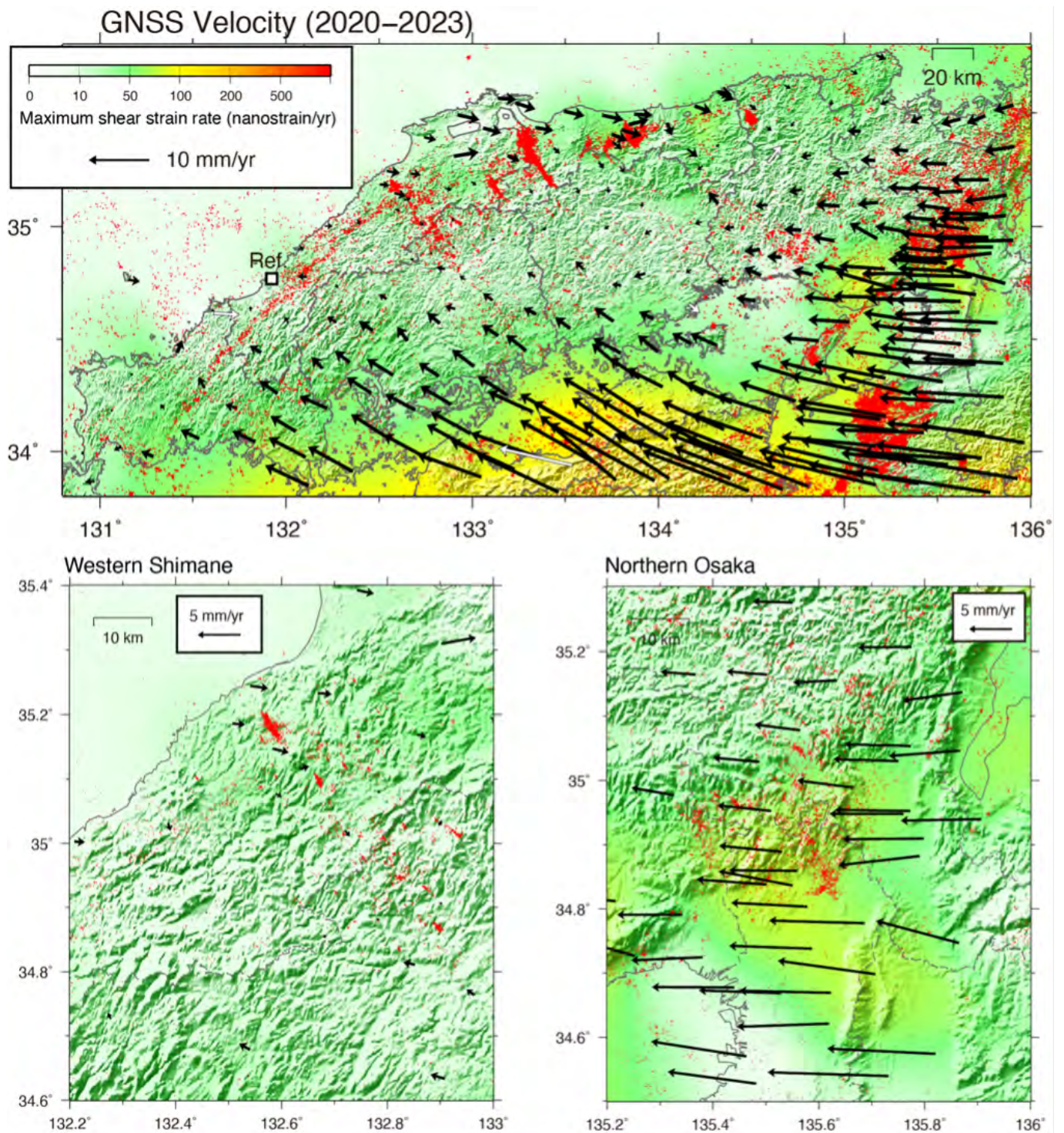
e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宮澤理絵

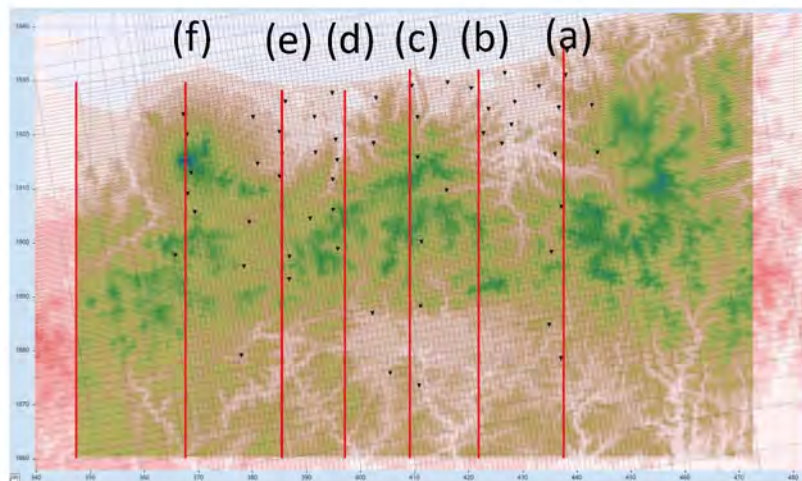
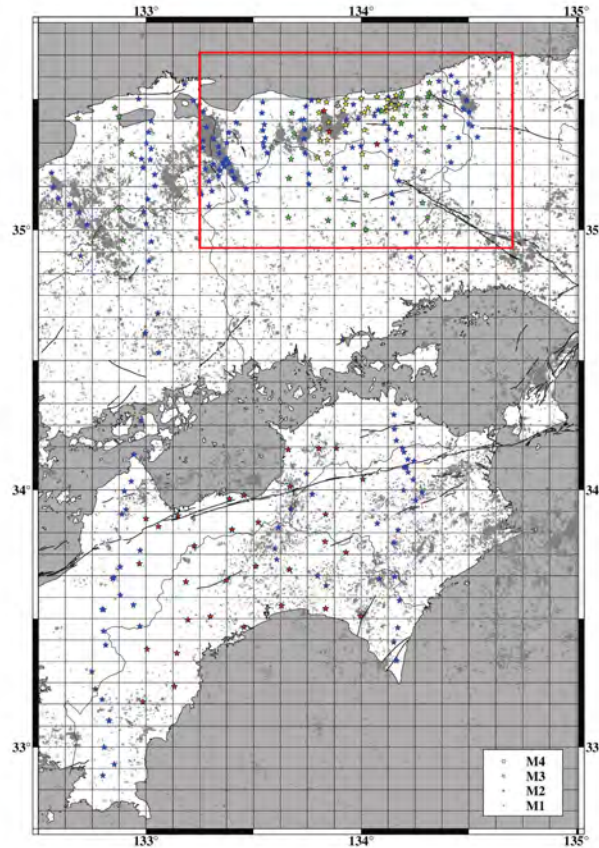
所属：京都大学防災研究所



図D1. 近畿中国地方のGNSS観測に基づく水平変位速度（矢印）と最大せん断ひずみ速度分布（カースケール）

ル)

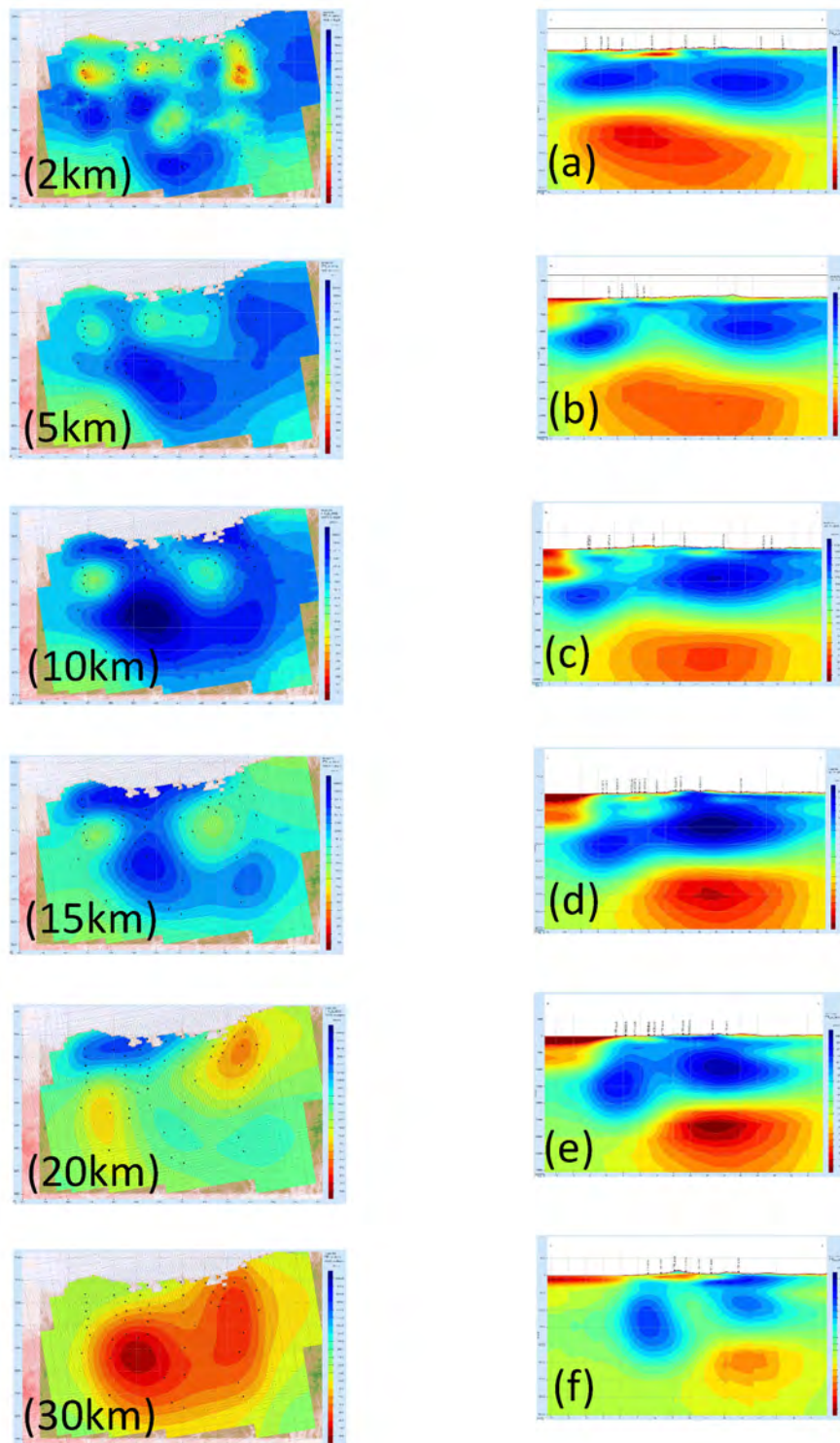
GNSSデータは2020年1月から2023年12月までの平均速度に東北地方太平洋沖地震の粘弾性緩和による余効変動の補正を行なったもの。白矢印は、外れ値処理によりひずみ速度の計算には用いなかった観測点。赤点は、1998年1月から2023年12月までの気象庁一元化震源を表す。ここで示した最大剪断ひずみ速度は、工学的剪断ひずみではないことに注意。左下と右下の図は、島根県西部と大阪府北部周辺域の拡大図。



図T1.中国・四国地方の基盤的比抵抗構造調査における広帯域MT法観測地点分布図(上図)と鳥取東部・中西部地域における3次元構造解析コア領域の水平面図(下図)

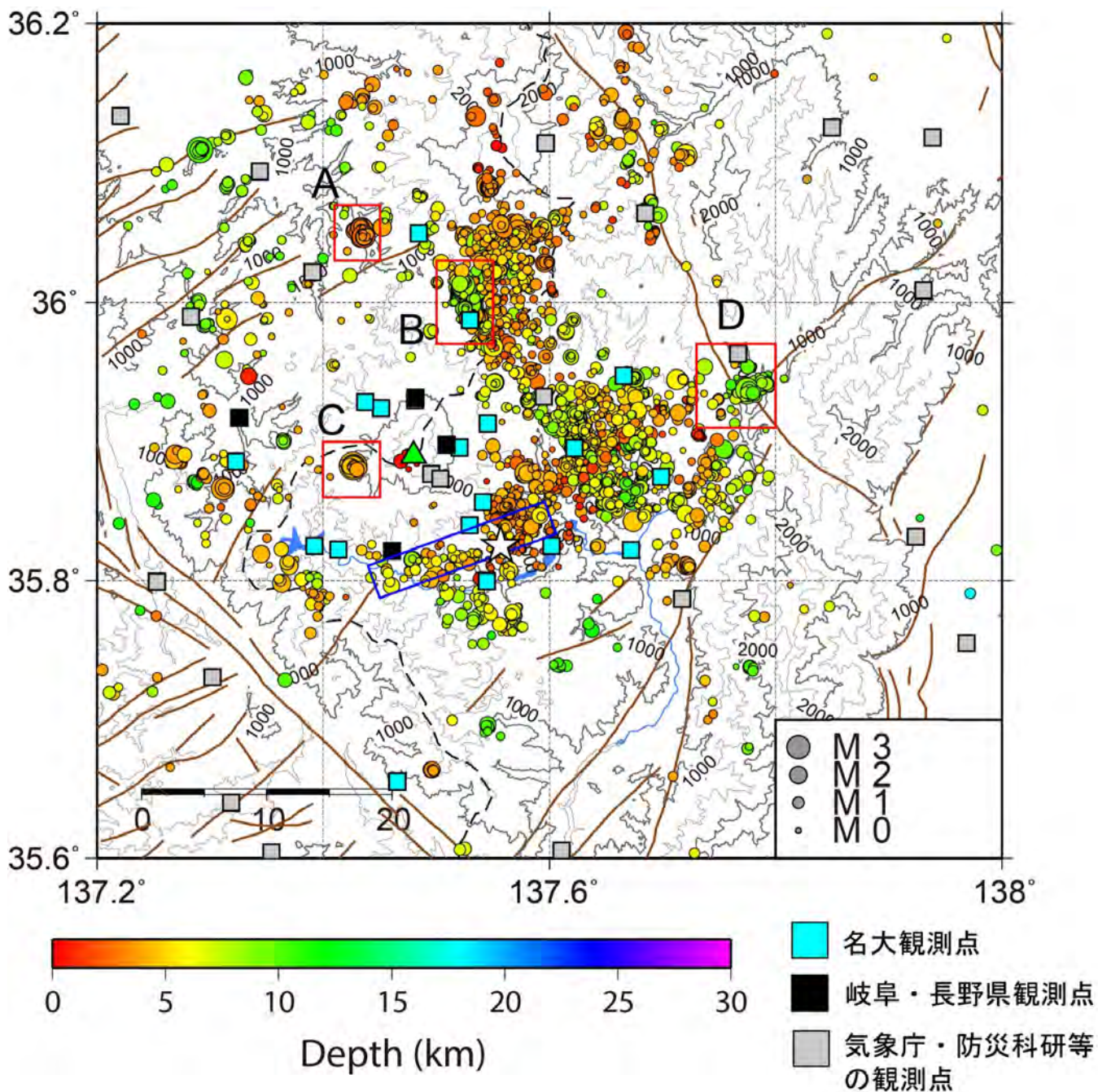
(上図) 「災害の軽減に貢献するための観測研究計画(第2次)」広帯域MT観測地点を緑色★印で示す。また、「災害の軽減に貢献するための観測研究計画」広帯域MT観測地点を赤色★印で示す。それ以前の研究計画お

よび鳥取県環境学術調査による観測地点を青色★印と黄色★印で示す。赤枠は下図のコア領域に対応する。活構造は活断層データベースによる。図には気象庁ホームページ「地震月報」より1997年1月1日～2022年3月31日の期間に深度20kmより以浅で発生した地震の震央データを描画した。図版作成にはGMT (Generic Mapping Tool)を使用した。(下図)3次元構造解析コア領域の水平面図には構造解析結果の図2の右図)(a)～(f)の位置における南北比抵抗構造断面位置を示す。

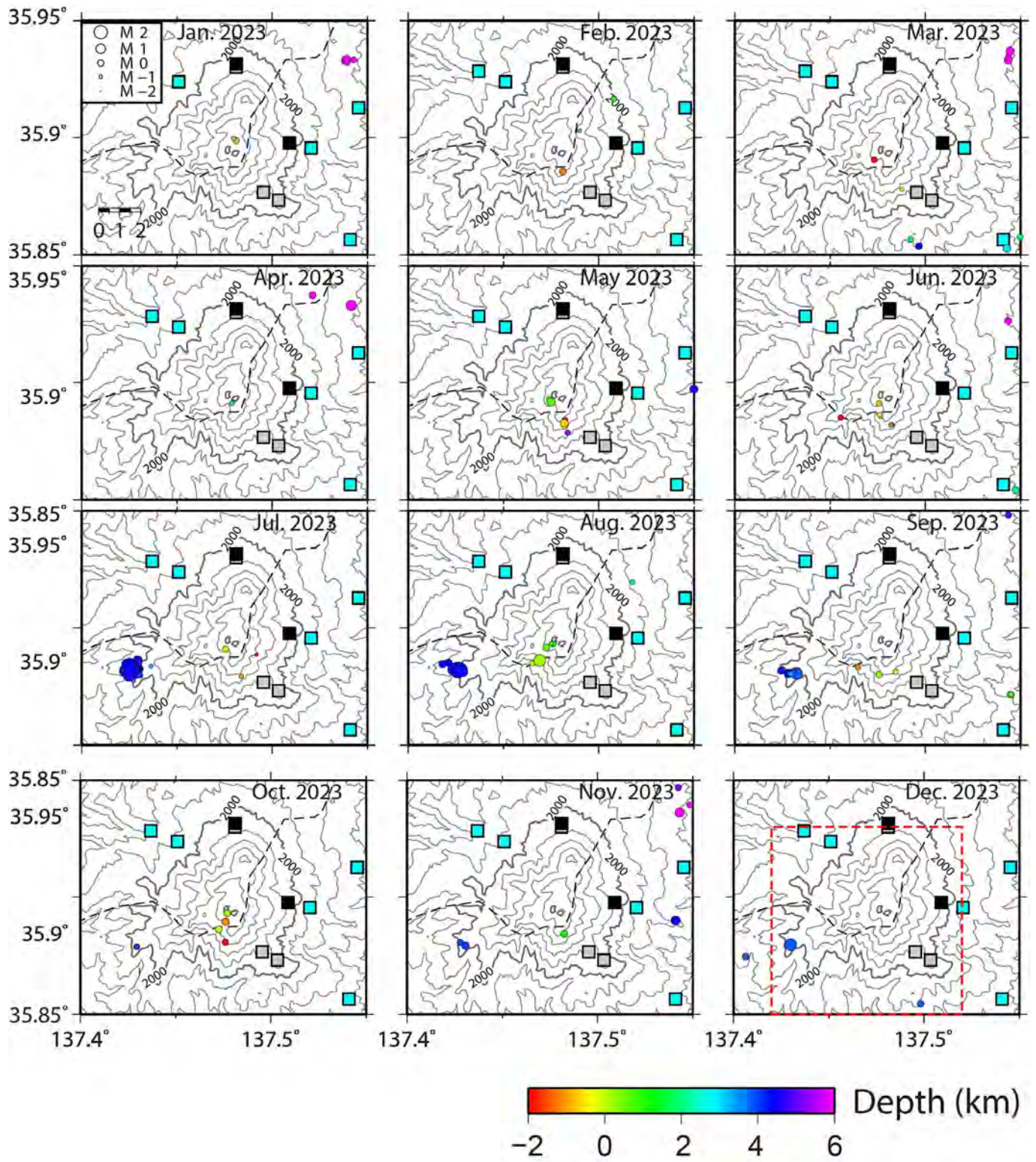


図T2. 鳥取東部・中西部地域における3次元比抵抗構造図

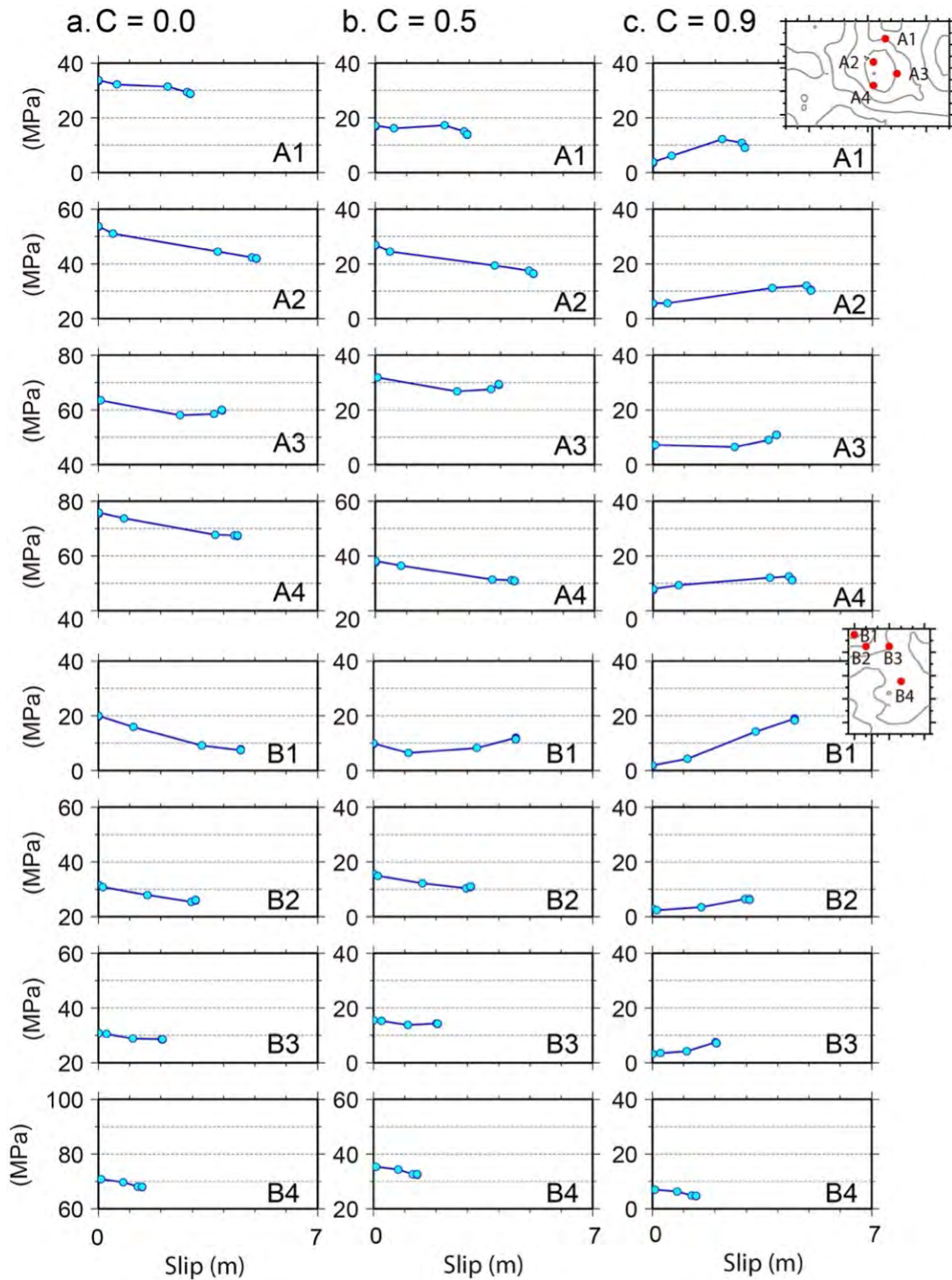
深度別比抵抗平面図(左図)と図T1の(下図)における南北比抵抗断面図。(a)~(f)は図1(下図)における測線名称に対応する。



図N1：御嶽山周辺域の地震活動（2023.1-2023.12）と観測点分布
△は御嶽山，☆と青線の矩形は1984年長野県西部地震の震源と震源断層。

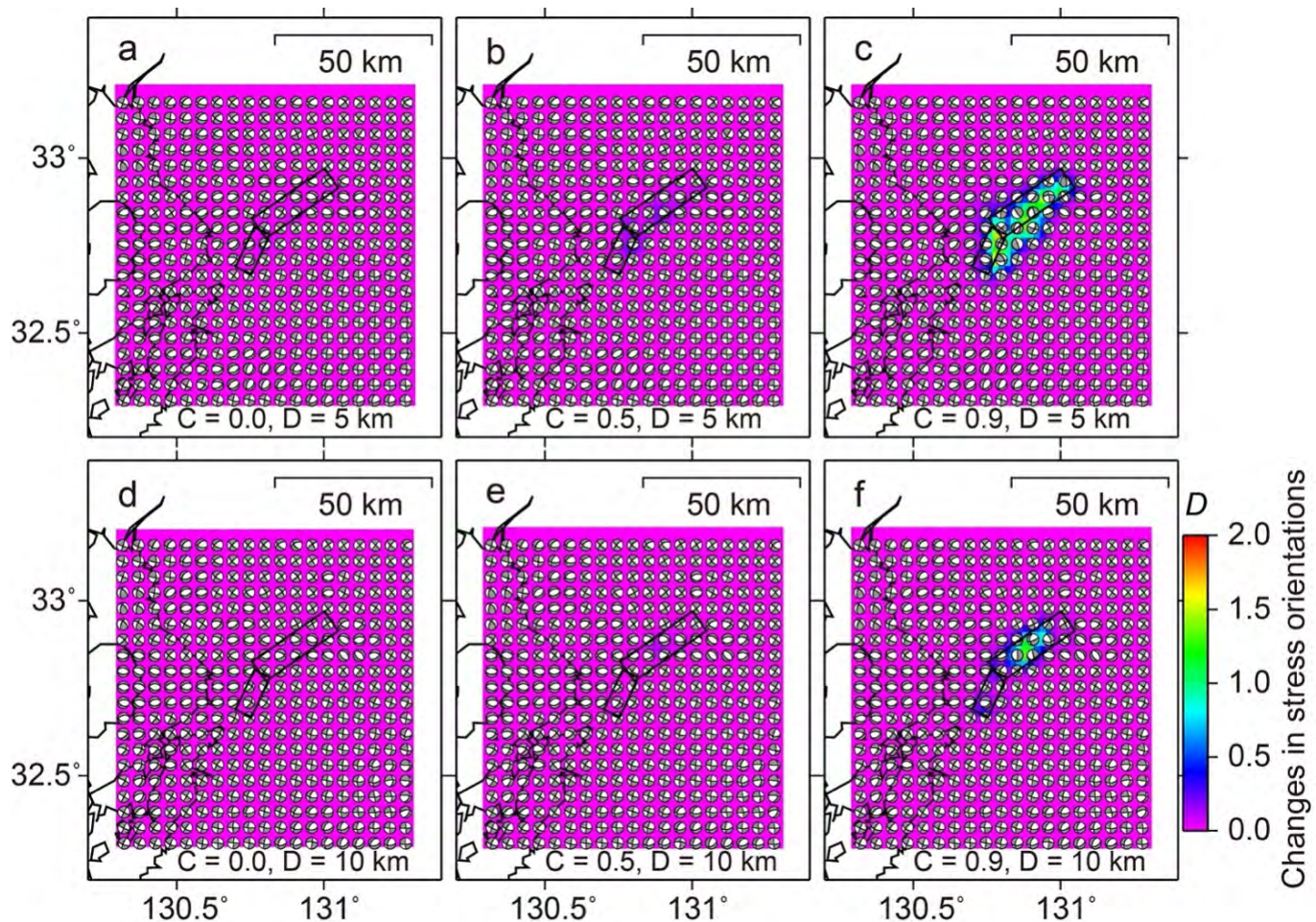


図N2：御嶽山直下で発生した火山性地震の震源分布（2023年1月～12月）
観測点の記号は図N1と同様。



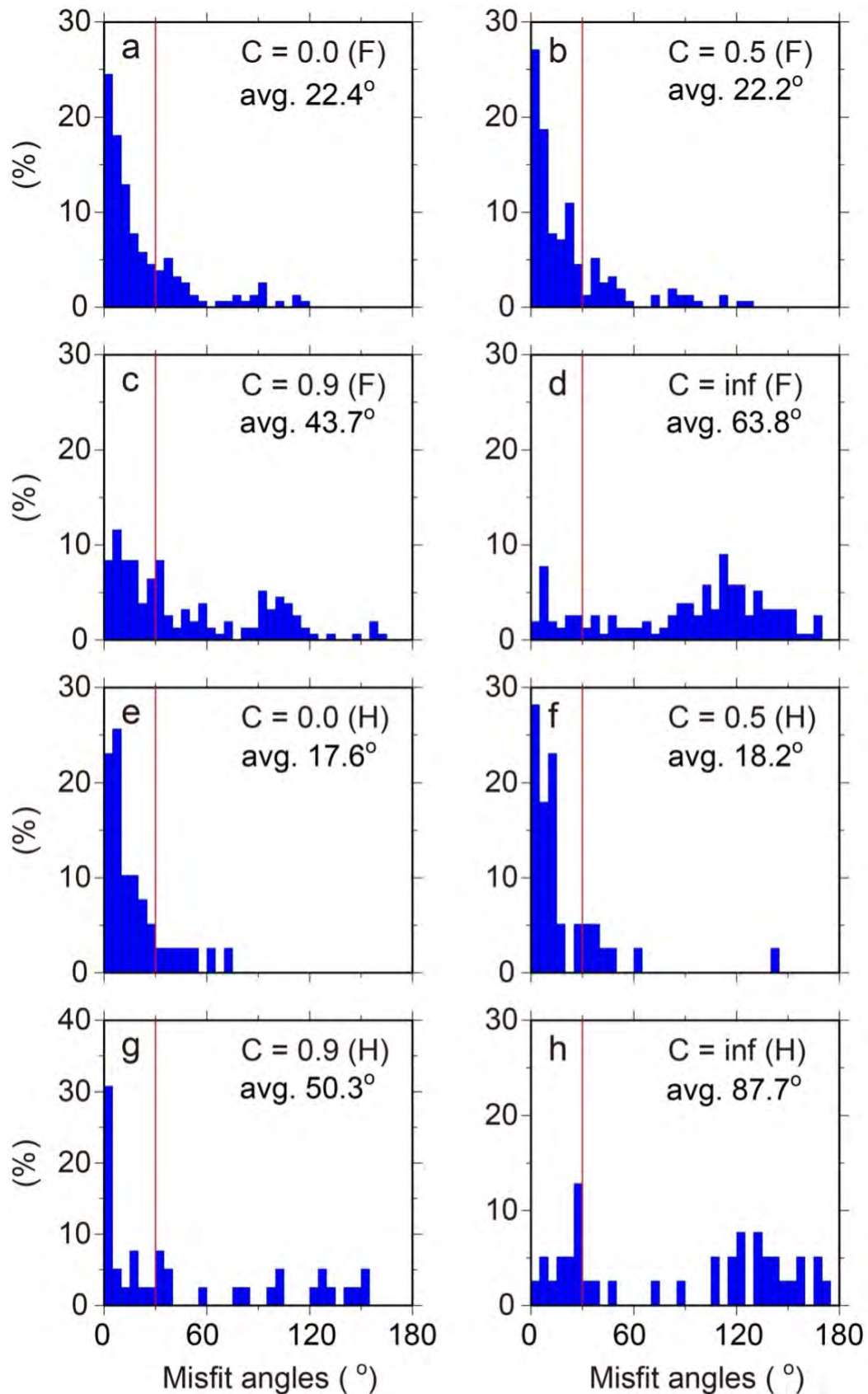
図N3：地震時のすべりに伴う震源域の偏差応力の大きさの変化

a. $C = 0.0$, b. $C = 0.5$ and c. $C = 0.9$. 評価点A1-A4 は布田川断層上, B1-B4 は日奈久断層上に位置している。断層面上の灰色のコンターは, Asano & Iwata (2016)の本震時の滑り分布を示す。

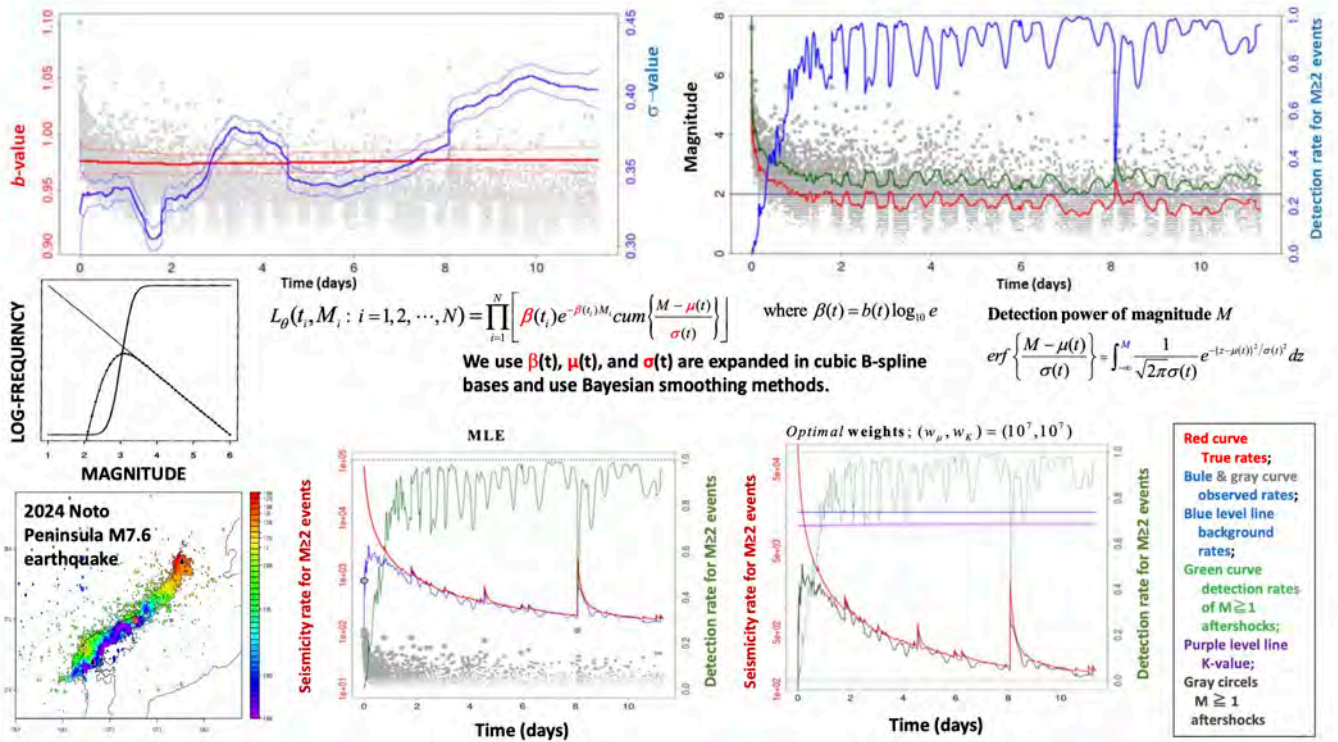


図N4：最大前震及び本震による応力の向きの変化

a-c. 本震後の応力の向き（深さ5 km），**d-f.** 本震後の応力の向き（深さ10 km）．背景のカラースケールは、最大前震前と本震後の応力の向きの変化を「1-応力テンソルの内積」で定義した指標D（ $0 \leq D \leq 1$ ）で表したもので、値が大きいほど変化が大きいことを意味する．



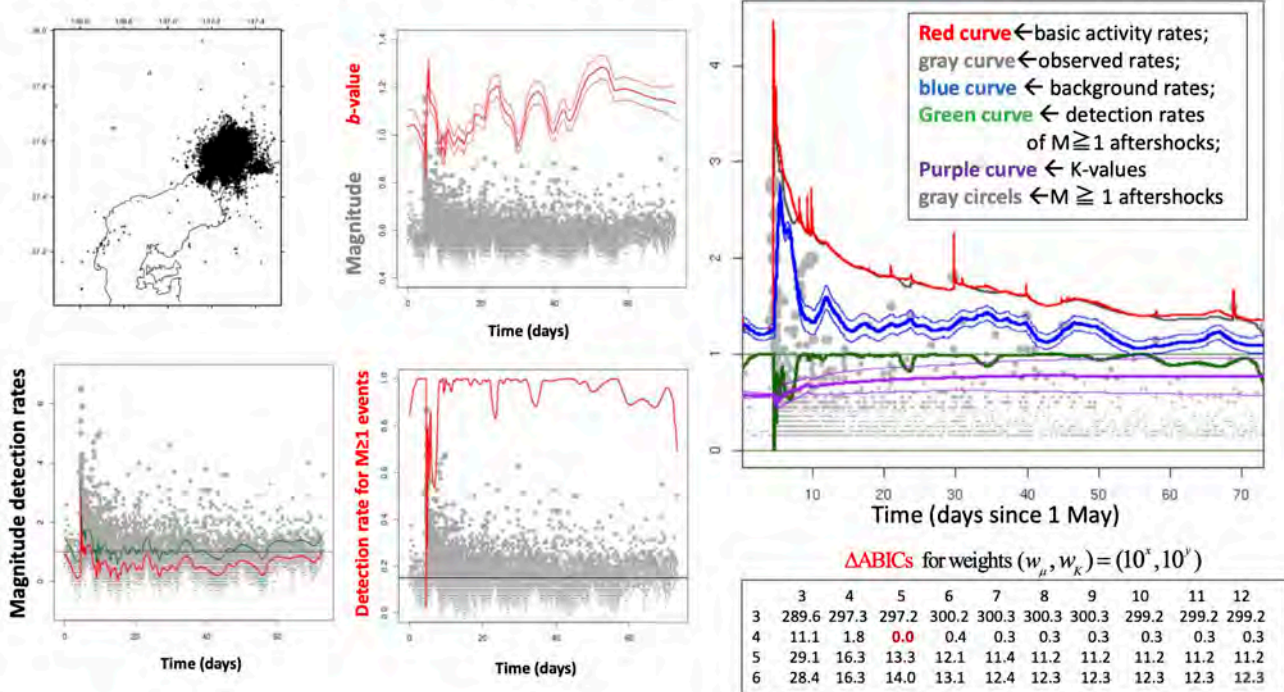
図N5：震源断層周辺域の地震のメカニズム解 (M \times 3) のミスフィット角のヒストグラム
a-d. 布田川断層周辺域のミスフィット角. **e-h.** 日奈久断層周辺域のミスフィット角. 各グラフのCの値は、
 応力モデルのパラメータCを表す. C = infは、背景応力場がリソスタティック状態 (偏差応力の大きさが0)
 の特殊ケースである.



☒S1

Oku-Noto M6.5 Earthquake

Optimal nonstationary ETAS model with $(\hat{w}_\mu, \hat{w}_K) = (10^4, 10^5)$



図S2

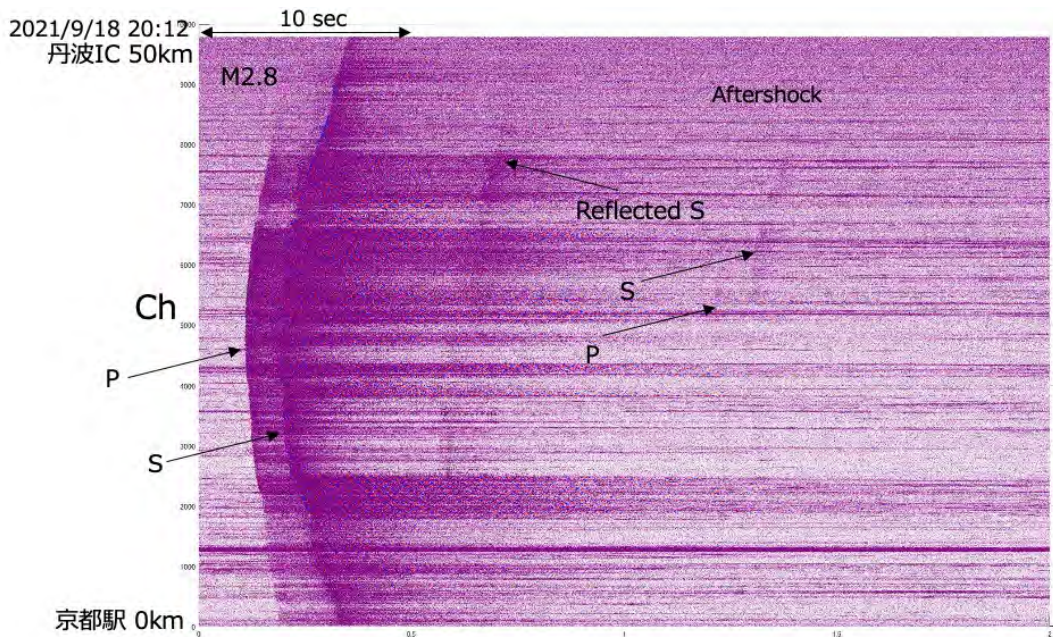


図2D. DASによる内陸地震観測事例
京都府南部で発生したM2.8地震と下部地殻からの反射波、余震。

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

日本列島の地震－火山噴火の基本場解明：地殻とマントルにおける応力、流体-マグマ、温度・流動－変形場

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
オ. 構造共通モデルの構築

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震
イ. 内陸地震
ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

- ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
イ. 首都直下地震
ウ. 千島海溝沿いの巨大地震
エ. 桜島大規模火山噴火
オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

千島海溝沿いの巨大地震

桜島大規模火山噴火

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

日本列島は、地球最大のプレートである太平洋プレートと、それに接するフィリピン海、オホーツク、および巨大な大陸プレートであるユーラシアの合計4つのプレートがせめぎ合う世界最大の変動帯である。日本列島における地震・火山噴火として現れる変動現象を正確に把握して予測につなげるには、これらのプレート間の物質・力学相互作用を含めて、日本列島全体を俯瞰する広域的な場の理解が必要である。このために、地質学・地球物理学・地球化学の手法を統合し、地殻・マントルにおける

*応力場

*岩相-水-マグマの分布と物性

*温度・流動－変形場

を列島規模の大構造および重要地域での詳細研究により、定量化することを大きな目的とする。

基本場とその性質の理解に基づいてこそ、初めて異常が定義・検出でき、またなぜ異常が発生するのか

(例えば破壊、流体やマグマの発生-上昇-噴火といった時空間での局所的突発現象が発生するのか)、その機構に定量的制約が課せられる。「場の不均質」が現れやすい島弧-島弧会合部・遷移部は注目対象領域の一つである。またマグマの生成・移動を取り入れたシミュレーションにより、島弧スケールの基本場と個々の火山がどのように結びつくか(例えば、なぜカルデラ火山のような熱や物質の集中が起こるか)などの研究に道を拓こうとするものである。

上記の多様な場は、従来異なる手法によって研究が進められてきたが、島弧変動現象を物理化学過程としてみた場合、一連の必須要素である。このために、機関の枠を越えた多様な分野から最適なメンバーでそれぞれの場の理解を深化させる:地震メカニズム解と応力場解析(行竹、飯尾)、異なるスケールの空隙・クラックが存在する岩石-流体の V_p - V_s -電気伝導度測定(渡辺)、岩石・流体試料の組成分析・多変量解析に基づく地殻内流体・マグマの分布と循環把握(中村、岩森)、粘弾性体あるいは固液2相流体の理論・数値シミュレーションによる温度場と流動-変形場推定(深畑、岩森)を行う。同時に、それらを比較・統合することで、地震発生場と流体-マグマ発生・噴火場を統一的に理解することを目的とする。これらの基本場の理解に立脚して、温度場、流体-マグマ分布、流動変形を介した地震発生と火山活動の相互作用の理解を目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要:

下記3項目の研究を実施することにより、日本列島変動の基本場(地殻とマントルにおける物性、温度、応力、流動-変形)の解明を目指す。

* 応力場:地殻応力場不均質性の定量的評価及び地震活動の理解

近年応力逆解析法を用いて地震メカニズム解データから地殻応力場の推定が行われ、震源断層近傍の詳細な応力場の空間変化や(例えば、Yukutake et al., 2006; Yoshida et al., 2014)、列島規模での広域応力場の分布(例えば、Terakawa and Matsu'ura, 2010; Yukutake et al., 2015)が得られてきた。一方、応力場の推定においては、通常、(1)地震は断層面上の最大せん断応力方向に滑る、(2)解析領域内では応力場は均質であるという2つの仮定を置く必要がある。しかし、(2)の仮定について実際の地殻内は断層強度と応力場の双方が不均質であるという結果が報告されている

(Rivera and Kanamori, 2002)ほか、応力場が非常に不均質であった場合応力逆解析法の結果にバイアスがかかる可能性も指摘されている(Smith and Dieterich, 2010)。この課題では、仮定した応力場に対する各メカニズム解のMisfit角に着目し、実際に観測された地震メカニズム解データが均質な応力場でどの程度説明可能かどうかMisfit角を基に定量的に評価し、応力場の不均質性についての制約を試みる。メカニズム解の決定誤差が重要になってくるため、2000年鳥取県西部地震震源域で行われた多点稠密地震観測のデータを用いて高精度にメカニズム解を推定し、その結果に基づいて解析を行う予定である。本研究で地震後の震源断層周辺の応力場の不均質性が明らかになれば、応力の絶対値への議論も可能であり、また応力逆解析法の妥当性の評価にもつながる。さらに地震発生及び火山現象と地殻内流体との関係の理解を目指し、火山地熱域及びその周辺で発生する群発地震活動や深部低周波地震について高精度な震源分布や発生域の応力場を明らかにし、その時間空間特性及び周辺地殻構造やテクトニクスとの関係を明らかにする。

* 岩相-水-マグマの分布と物性

地殻やマントルに存在する流体(水を主成分とする)は、地震活動・火山活動において重要な役割を果たしている。その根は、沈み込むプレート(スラブ)にある。従来、沈み込むスラブと、それに由来する流体、流体の移動とマントル・地殻岩石との反応によって生じるマグマの分布は、スラブが均質であることを仮定して解析が進められてきた。しかし近年、沈み込むスラブ物質の不均質(たとえば、海山、断裂帯など)の存在が、沈み込まれる側の地震や火山活動に大きな影響を及ぼしうることが分かってきた(e.g., Nishizawa et al., 2017)。沈み込むスラブの不均質と沈み込まれる側(島弧側)での流体、マグマ活動の関係性を解明するため、火山岩および深部由来流体の採取・分析と、得られたデータのインバージョン解析(機械学習的手法の導入)により、溶融度、スラブ由来流体量、スラブ由来流体の起源物質組成を定量的に求め、日本列島に供給される流体やマグマ生成の基本場解明を目指す。特に、沈み込むスラブ不均質の指標となりうる元素や同位体、および隣り合う火山の違い

(例えば、箱根カルデラ火山と富士成層火山)、構造線・火山周辺の地下水、および島弧-島弧遷移帯(例えば、中部日本弧-東北日本弧; Nakamura et al., 2017)に注目しつつ、研究対象地域を1か所選定し、流体-マグマ研究を進める。並行して、物性実験と地球物理学的観測から流体やマグマの分布・性質特定を目指す。地震波速度、電気伝導度をもとに、地殻やマントルにおける流体の分布を推定するのが、本研究項目の目的である。流体を含む岩石の弾性波速度や電気伝導度に関するモデルは、こ

れまでも多数提案されてきている。しかし、高圧下で実際にどのような空隙が存在しているのかについての理解が不足していた。本研究では、岩石試料として、花崗岩、花崗閃緑岩、閃緑岩、ハンレイ岩、カンラン岩等を使用し、弾性波速度・電気伝導度測定から、圧力増加に伴う空隙の閉鎖、連結度の変化を調べる。また、X線CT観察により、どのような空隙がどのような割合で存在しているか、空隙の全体像を調べるとともに、イオンリングで表面研磨した岩石試料のSEM観察により、高圧でも閉じないアスペクト比の大きな空隙の実体、および異なるスケールの空隙・クラックの物性に及ぼす効果を明らかにする。高圧実験と空隙構造観察を組み合わせることにより、高圧下での空隙構造を理解し、流体を含む岩石の弾性波速度・電気伝導度に関する統一的なモデルを構築する。このモデルを観測データに応用することにより、地殻・マンツルの流体分布を推定する。

* 温度・流動－変形場

島弧スケールの温度場は、マグマ生成を含む化学反応や、岩石物性（特に密度と粘性率）を規定する最重要要素といえる。温度場は、プレート沈み込みとそれに伴うマンツルウエッジ対流、およびマグマや流体の移動の相互作用によって生み出される。本研究項目では、対流－流体発生と移動の数値モデル（e.g., Horiuchi and Iwamori, 2016; Nakao et al., 2016）を発展させ、マグマ生成・移動も再現するより現実的なモデル構築とそれに基づく観測の解釈、および予測を目指す。このモデル化が進めば、将来的には、沈み込むプレートから火山噴火に至るまでの一連のプロセスとその連動の様子を定量的に把握することにつながり、個々の火山と沈み込み帯場の関係性の理解が、飛躍的に進むと期待される。これらの温度場・流動場の理解に根差し、島弧の変形場の理解を目指す。島弧変形場の最も基本的な力学源は、海洋プレートの沈み込みに伴う海陸プレート間の力学的相互作用（プレート境界面に変位の食い違いを与えることによって表現できる）である。最近になって、なぜ島弧－海溝－外縁隆起帯という地形的な凹凸が世界中の沈み込み帯で普遍的に形成されるのか、このモデルに基づきその根本的な物理メカニズムが明らかとなった（Fukahata & Matsu'ura, 2016）。しかし、沈み込むスラブの形状が島弧の走向方向に変化していることから明らかなように、現実の現象をより正確に理解するためには、島弧の縦断方向だけでなくその走向方向の変化も無視できない。さらには、津軽海峡や豊後水道などいわゆる島弧－島弧会合部では、顕著な負の重力異常が島弧側に大きく入り込むといった現象が世界中で一般的に見られる。そこで、本研究では、島弧の走向方向の変化や島弧－島弧会合部に焦点を当てて、2次元モデルから3次元モデルへと物理的な理解を深化させることを目指す。加えて、日本列島のテクトニクスを理解するためには、他の島弧と比較することが重要である。そこで、いわゆる比較沈み込み学についても、地形や重力異常分布、応力状態、火山分布などとの比較を基に研究を進める。

年次計画

平成31年度：2000年鳥取県西部域において実施された多点稠密地震観測データのとりまとめ、メカニズム解の決定を実施。センチメートルスケールのクラック（以降 cm-crack）を含む岩石試料（花崗岩、直径26mm、長さ30mm）および含まない岩石試料（花崗岩、花崗閃緑岩、カンラン岩）について、含水状態での弾性波速度および電気伝導度を封圧下で測定し、空隙の閉鎖にともなう物性の変化を調べる。また、X線CTおよびSEMにより空隙構造の観察を行い、空隙の連結の様子および高圧下でも閉鎖しない空隙を調べる。深部流体の分布が期待される大きな構造線沿い、特にISTL－MTL沿いの湧水組成既存データを精査し、分布の概要を調べる。沈み込んだ海山の影響が明らかなカムチャッカ火山の試料を用い、特徴的成分やその検出方法を探る。島弧粘弾性変形場の3次元モデル構築のため、まず2次元モデルにおいて歪みの振る舞いについて理解を深める。マンツル対流モデルに溶融・メルト組成再現を行うための定式化を行う。

平成32年度：引き続き鳥取県西部域におけるメカニズム解の整備を進めるとともに、Misfit角を用いた断層周辺の応力場不均質に関する解析を進める。前年度に引き続き、cm-crackを含む岩石試料（花崗岩）および含まない岩石試料（花崗岩、花崗閃緑岩、カンラン岩）について、含水状態での弾性波速度および電気伝導度を封圧下で測定し、空隙の閉鎖にともなう物性の変化を調べる。また、X線CTおよびSEMにより空隙構造の観察を行い、空隙の連結の様子および高圧下でも閉鎖しない空隙を調べる。前年の解析に基づき、ISTL－MTL沿い深部流体のサンプリングを行う。沈み込んだ海山が島弧火山岩に及ぼす影響を、特徴的成分に注目しながら化学インバージョンする方法を構築する。同時に、日本の火山で特徴的成分がみられるか、既存データから抽出を試みる。プレート境界形状が海溝の走向方向に変化する場合について計算を実行し、理解を深める。斜め沈み込みの場合に振る舞いがどう変化するかも調べる。他の沈み込み帯についても研究を進める。マンツル対流モデルに溶融・メルト組成再現の定式化を組み込む。水に加え、CO₂を組み込むための定式化を進める。

平成33年度：鳥取県西部域において断層周辺の応力場不均質性を定量的に推定するとともに、本震前の応力場の情報、特にその絶対値についての制約を試みる。cm-crackをやや多く含む岩石試料（花崗岩）について、含水状態での弾性波速度および電気伝導度を封圧下で測定し、空隙の閉鎖にともなう物性の変化を調べる。また、X線CTおよびSEMにより空隙構造の観察を行い、空隙の連結の様子および高圧下でも閉鎖しない空隙を調べる。ISTL-MTL沿い深部流体のサンプリングを継続するとともに、主要・微量・同位体分析を開始する。海山の影響が推定される日本の火山岩のサンプリングを進める。島弧-島弧会合部のように、プレート境界の走向が変化する場合に、海洋プレートの沈み込みによる島弧の変形場がどのようになるのか理解を深める。斜め沈み込みの場合に振る舞いがどう変化するかも調べる。比較沈み込み学についても引き続き研究を進める。水、CO₂を含み、マグマ組成を再現するモデルを構築・実行する。

平成34年度：鳥取県西部域で実施した解析をほかの内陸域の地震活動に適用し、応力場不均質性に関する普遍性を調べる。cm-crackを多く含む岩石試料（花崗岩）について、封圧下での物性測定および空隙構造の観察を行うとともに、粒界クラックおよびcmスケールのクラックを含む岩石の電気伝導度に関するモデルを検討する。深部流体の調査・組成分析を進め、予察的な統計解析により、深部流体のソース・過程の抽出を試みる。海山の影響を抽出するため、火山岩組成の分析（主要・微量・同位体）を進める。並行して組成インバージョンを開始する。地形や重力異常分布、応力状態、火山分布の普遍的特徴と特殊性を、観測データを基に明らかにし、その結果をまとめる。水、CO₂を含み、マグマ組成を再現するモデルを構築・実行する。

平成35年度：これまでの結果に基づいて地殻応力場の不均質性と強度及び絶対応力値に関する議論を進める。前年度に引き続き、cm-crackを多く含む岩石試料（花崗岩）について、封圧下での物性測定および空隙構造の観察を行うとともに、粒界クラックおよびcmスケールのクラックを含む岩石の電気伝導度に関するモデルを構築する。深部流体の調査・組成分析を進め、深部流体、海山からの影響を定量的に結び、流体・マグマ循環を統合する。日本列島を含むいくつかの島弧について、3次元の変形理論モデルを適用し、地形および重力異常などの原因を考察する。水、CO₂を含み、マグマ組成を再現するモデルの結果をまとめ、沈み込み帯の流体・物質循環を統合する。5年間の応力、物性、流体・マグマ生成、数値モデルの結果・知見を総合し、日本列島の基本場を明らかにする。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

本課題は、下記3項目の研究を実施することにより、日本列島変動の基本場（地殻とマントルにおける物性、温度、応力、流動-変形）の解明を目指すものである。

* 応力場：地殻応力場不均質性の定量的評価及び地震活動の理解

* 岩相-水-マグマの分布と物性把握

* 温度・流動-変形場の再現と検証

各サブ課題について、下記を実施し、いずれも概ね計画通りに進展した。

* 応力場：地殻応力場不均質性の定量的評価及び地震活動の理解

今年度は昨年度報告した箱根火山深部で発生した火山性微動（図1, Yukutake et al., 2022）について波形の特徴を再現できるような物理モデルの検討を行った。ここではJulian (1994)により提案された流体と弾性体流路との間の非線形カップリングを考慮したモデルを拡張させた。このモデルはランプドパラメータモデルと呼ばれ、上下の流体リザーバーの間にある平行する2枚の弾性体の板の間で2次元での流体流れを考え振動を励起させる。ただし、Julian (1994)のモデルは震源がモーメントテンソルなど観測量と比較できる形式になっていないので、ここではこのモデルを観測波形と直接比較できるように拡張させた (Ozaki et al., 2023)。ここでは図2で示したように、短軸a、長軸bで断面積 α の楕円形をし、長さLの流路を考えた。断面は薄い楕円形状を仮定するため短軸方向のみに時間変化した振動するモデルを考え、開口クラックで近似できるような変形をすることになる。P1とP2は流路の上流と下流での流体圧を示し、その差が流路での流れを駆動する。流路内での流体の速度の変化が圧力変動を生み、それに対応して壁面が変形するというモデルである。ここでは流体の特性として、マグマと超臨界状態での水を仮定し、下部地殻付近で想定される物性を仮定した。いくつかの基礎基礎方程式から、流路断面積 α と流速とを関連付ける運動方程式を導出しそれらを数値的に解いた。図3で流路の長さLと上流圧力P1に対して、R、振動の周波数、流路の体積がどのように変化するかをマグマと超

臨界水それぞれの場合で示す。Rは安定性解析の結果導かれるパラメータで、流体の流れが連続的な振動を励起するかどうかを決める条件である。Rが1を超えると、連続的な微動が起きるということを意味する。マグマの場合図で示したパラメータ範囲ではレイノルズ数が1000以下となり、流動はラミナ流であることを示し、水の場合レイノルズ数が10の6乗オーダーになり乱流となることを示す結果となった。図3星印で示した場所で、箱根で観測された1Hz付近の周波数や振幅を再現できる現実的なパラメータセットが存在するが明らかになった。さらに、これらのパラメータセットを基に箱根の観測と比較するための、理論地震波形の計算を行った。図3星印で示したパラメータセットでの流路の断面積 α の時間関数を推定した。さらに震源で鉛直な開口クラックを仮定し、グリーン関数をMaeda et al., (2017)で開発されたOpenSWPCコードを使って計算した。断面積の時間関数とグリーン関数を畳み込んで得られた、理論波形を図4に示す。マグマを仮定した理論波形を見ると、片方向に卓越する振幅や尖った波形など、大まかではあるが観測された波形を再現できることが分かった。

* 岩相-水-マグマの分布と物性把握

圧力下におけるクラックの構造を理解するため、封圧下で測定された含水岩石の弾性波速度および電気伝導度をアスペリティ接触を考慮して解析し、クラック閉鎖に伴うアスペリティ接触の増加およびクラック開口減少を定量的に評価した。

クラックを含む岩石についての従来のモデルは、クラックを薄い円盤状またはつぶれた回転楕円体として扱ってきた。クラックの弾性定数への影響は、クラックの半径および数密度で決まるクラック密度で表現される。しかし、クラック閉鎖に伴いクラック表面ではアスペリティ接触が生じる。そのため、従来のモデルは完全に開いたクラックには適用できるが、クラックの閉鎖を考慮することはできなかった。近年、アスペリティ接触によるクラック・コンプライアンス（軟らかさ）の低下に関して理論的な研究が進められてきた。本研究は、Glubokovskikh et al.(2016)のアスペリティ接触モデルを従来のクラック・モデルと結びつけて、アスペリティ接触とクラックとの半径比および接触の数をクラック密度の式に組み込んだ。さらに、Dietrich and Kilgore (1994)の実験をもとに接触面積が圧力と降伏応力の比に比例すると仮定して、弾性波速度の実験データからクラック内のアスペリティ接触の数を評価した（図5）。

なお、常圧においてはアスペリティ接触がないことを仮定した。加圧に伴って、ひとつのクラック内で数百のアスペリティ接触が生じるとともに接触部の拡大が生じることが分かる。また、数の減少は接触部の合体を示唆するものと考えている。クラックの直径として平均粒径500 μm を考えると、接触部のサイズは1 μm のオーダーである。また、最高圧力(180 MPa)でもクラック表面における接触部の面積割合は1.5%程度であり、アスペリティ接触はクラック内の空隙連結にはほとんど影響を与えないことが分かる。そのため、電気伝導度の変化はクラックの平均開口の変化にのみ依存する。数値実験に基づき試料内のクラックは完全に連結した状態（浸透確率=1）と考えられるため、大気圧のクラック密度を基に図6のような平均開口の変化が得られる。

大気圧で推定された平均開口は、水銀圧入法から求められた開口分布と矛盾しない。どの岩石試料でも、圧力10 MPaまでに開口は急減し、その後徐々に減少率が小さくなっている。このことは、低圧でアスペリティが接触したのち、接触部の塑性変形によって接触部分が拡大し、アスペリティの高さが低下することを反映している。庵治花崗岩が他の試料に比べて高圧での開口が有意に大きく、その減少率が小さいのは、粒界クラック表面に見られる特徴的な大きな開口部によるものである（図7）。アスペリティ接触を考慮することによって、弾性波速度・電気伝導度から圧力下におけるクラックの構造を定量的に評価できた。

地殻流体の分布・循環については、以下の研究を行った。日本列島全域のマグマ組成に関する「教師なし機械学習」に分類される多変量統計解析手法を用い、マグマの地域性とその成因が議論された（図8, Iwamori and Nakamura, in press）。この中で、東北～伊豆弧にかけての火山フロントの位置と、沈み込むプレート上面深度が定量的に示され、中部地方での火山フロントが大きく背弧側に折れ曲がると同時に、火山帯の幅も大きくなっていることが定量的に示された（図8b）。これらの組成および火山フロント・火山帯の分布や折れ曲がりの成因として、沈み込むプレート脱水の条件が、

日本列島島弧沿いに大きく変化していることが示され、その条件がマグマの微量元素濃度から定量化された。その結果、中部日本においては、二重に沈み込むプレートがもたらす「冷たいマントル」場のために、プレート脱水がより深部かつ幅広い深度範囲で起こること、また最も深度の深い部分が能登半島の下にあたることを示した。2020年以降引き続き、能登半島の群発地震や地殻変動（隆起）は、これらの深部流体が400万年以降継続し、能登半島の形成や隆起過程が現在も進行中であることを示唆した。また、前年度に引き続き、岩相-水-マグマの地殻および上部マントル条件での地震波速度および電気伝導度を再現するフォワードモデルとそのインバージョンの研究を進めた（図9）。その結果、ベイズ統計・周辺化に基づくインバージョンにより安定的にパラメータ推定を行う手法を開発し、論文として公表した（Kuwatani et al., 2023）。現在、このモデルを用いた実際のデータ解析を進めている。

* 温度・流動－変形場の再現と検証

日本列島が現在、どのような変形運動をしているのか明らかにすることは、「基本場解明」における重要課題である。GNSSデータから歪み速度場が求められてきたが、その観測点間隔は15~20 kmと十分に狭くはない。そのため、安定かつ高い解像度で歪み速度場を推定するためには、先験情報を利用する必要がある。先験情報として、これまでは何らかの平滑化が課されることが普通だった。しかし、例えば活断層周辺に大きな歪みが局在していた場合、平滑化条件を課すと歪みを過小評価してしまう方向にバイアスがかかる。その問題を解決するため、先験情報として平滑化条件に加え新たにスパース条件を導入した。スパース条件は、パラメータの多くがゼロでデータに寄与するものが僅かであることを要請し、適切に使用すれば、少ない情報から全体像を的確に引き出すことができる。簡単のため1次元で定式化し、数値実験により新手法の有効性を調べたところ、データの間隔が広い場合に、また観測誤差が小さい場合に特に有効であることが分かった。そこで、この方法を有馬高槻構造線を横切る測線に対して適用したところ、断層周辺で従来に比べ3割ほど速い歪み速度が推定された。本研究結果は現在投稿準備中である。

島弧では一般にフリーエア重力異常が高くなっているが、その成因については決着が付いていない。そこで、沈み込み帯の各種パラメータ（スラブの年齢、収束速度、沈み込み角など）を収集し相関分析を行うことで、この問題にアプローチした。その結果、島弧の重力異常との相関係数で見ると、浅部のスラブ傾斜角は0.5を辛うじて越えたものの、スラブの年齢、収束速度、曲率等との相関は、0.3前後に留まった。その一方、収束速度と傾斜角の正弦の積を取ると、相関係数は0.7以上に跳ね上がった。収束速度と傾斜角の正弦の積は、沈み込む海洋プレートによる地球深部への物質輸送量に対応しており、海洋プレートの沈み込みと島弧の隆起について、第一近似的には作用（プレート沈み込み）・反作用（島弧の隆起）の法則が成り立っているように見える。本研究結果は現在投稿準備中である。

・ 計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

* 応力場：地殻応力場不均質性の定量的評価及び地震活動の理解

研究期間中においては2000年鳥取県西部地震域において余震のメカニズム解データをもとに余震域の応力場の不均質性の推定を行った。本震前の応力場が均質であるという仮定のもとではあるが、応力場の空間不均質という指標から差応力の絶対レベルの制約を行い、差応力が断層の静摩擦係数0.1程度のレベル（数MPa～数10MPa、すなわち本震応力降下量と同程度）で、本震後の応力場不均質性が再現できることが明らかになった。また箱根火山においては詳細な速度構造を推定し、火山下のマグマ性流体の供給系について明らかにした。さらに箱根火山深部で観測された火山性微動の震源位置や周波数特性などを明らかにし、観測された波形を説明できる物理モデルの考察を行った。

* 岩相-水-マグマの分布と物性把握

地殻には粒界（mmスケール）から断層（kmスケール）まで様々なスケールのクラックが存在しており、それらの多くは流体で満たされている。観測される地震波速度および電気伝導度から地殻の流体分布を推定するためには、流体を含む媒質の理解が不可欠であり、その基礎となるのが圧力下にあるクラックの空隙構造である。本研究では圧力下にあるクラックの空隙構造を理解するため、岩石内のmmスケールおよびcmスケールのクラックについて閉鎖実験を行い、以下のような知見を得た。

- ・圧力下にあるクラックでは多数のアスペリティ接触が生じる。
- ・アスペリティ接触のクラックに対する半径比は、圧力100 MPaで0.001のオーダーであり、圧力とともにほぼ線形に増加する。
- ・クラック面積に対するアスペリティ接触面積の割合が1%程度であっても、クラックのない固体と同様のスティフネス（硬さ）を示しうる。すなわち、弾性的「閉鎖」状態となるが、クラック内の空隙は連結している。
- ・クラック密度が連結経路を形成するのに十分なだけ大きい場合は、電気伝導度はクラック密度と平均開口によって決まる。

地殻流体の分布・循環については、温泉水・鉱泉水・湧水―河川水などの地下水、および火山の溶岩の時空分布や組成に基づき、日本列島の地下の地殻流体（水溶液、超臨界流体、マグマなど）の生成、輸送、起源物質、生成温度―圧力場などを列島スケールでおおまかに制約することができるようになった。特に、組成データの教師なし機械学習手法により、これまで見えなかった構造や関連する成因について、多くの知見が得られた。具体的な事例として、日本列島下の島弧セグメントごとに、沈み込んだプレートからマントルに供給される流体量を定量化し、東北や伊豆弧が低く（0.1~0.2%）、西南日本は比較的多く（~0.5%）、両者をつなぐ中部地方では1%を超える多量の流体が供給されていることが明らかとなった（Nakamura et al., 2019）。また、有馬型塩水・深部流体の性質と分布を、地下水の多変量統計解析から明らかにし、スラブ深度や地殻内の大きな構造線との関連性が発見された（Iwamori et al., 2020; 2023）。また太平洋プレート由来の深部流体が能登半島下にも供給され、能登半島の変動の一因となっていること（Iwamori and Nakamura, in press）、南米チリの三重会合点近傍とその陸側の地震活動・構造やスラブの形状・ダイナミクスの形状を明らかにする研究（Ito et al., 2023; Miller et al., 2023）、全地球の構造とそのダイナミクスの中でプレート沈み込みが果たす役割の研究（Iwamori et al., 2019; 2022）など、沈み込み帯の各地域の特徴を、全体場の中でとらえる研究が進んだ。さらに、地震波速度と電気伝導度の同時解析により、岩質―流体種とそれらの混合割合・幾何形状のパラメーターをベイズ推定にもとづき評価し、Geofluid Mappingを描く手法が構築された（Iwamori et al. 2021; 岩森, 2022; Kuwatani et al., 2023）。

* 温度・流動―変形場の再現と検証

日本列島の変形場について、以下のような一連の成果を挙げた。

GNSS（GPS）などの空間的に離散的な測地データから、空間的に連続な歪み速度場をどのように求めるかは古くからの重要な課題である。既存の方法の問題点を克服するため、Fukahata et al. (1996)を応用したABICを用いた基底関数展開に基づく方法を開発した（Okazaki et al., 2021）。この方法により、新潟神戸歪み集中帯や奥羽脊梁歪み集中帯、さらには茨城県北部から北関東を経て愛知県北部に至る前弧域の低歪み帯などがこれまでの解析よりもより明確に得られることとなった。後者の低歪み帯については、常陸―三河前弧低歪み帯と名付けた。

同手法を異なる3つの期間のGNSSデータに適用することで、時間変化も含めた日本列島の変形場を明らかにした（深畑ほか, 2022）。その結果、日本列島では強弱はあるものの遍く変形が生じており剛体近似に基づくプレートテクトニクスに立脚して地殻変動を解釈することは無理があること、つまりは日高山脈か糸静線かなど日本列島のどこを北米（オホーツク）プレートとユーラシア（アムール）プレートの境界が通るのか長い間議論されてきたが、そのような論争は不毛であることを主張した。代わりに、日本列島が千島弧や東北日本弧などの島弧の集合体から成ることに注目し、島弧間の変動と島弧内の変動とに整理・分類することで日本列島のテクトニクスがより簡明に理解できることを論じた。

東北地方太平洋沖地震前後の測地データを解析することで、弾性歪みと非弾性歪みの分離に留まらず、非弾性歪みを塑性歪みと粘性歪みに分離することに成功した（Fukahata et al. 2020）。

空間的に離散的な測地データから連続な歪み速度場を推定する問題にスパースモデリングを導入することで、歪み速度場の連続性と局在性を客観的に両立させた推定手法を開発した。同手法を有馬高槻構造線に適用し、従来法に比べ約3割大きな歪み速度を得た。

海溝軸の屈曲という3次元的效果を取り入れた沈み込み帯の変位の食い違いモデルを作成し、島弧側に凸に屈曲した海溝軸に対して海洋プレートが沈み込むと島弧側で沈降が、島弧側に凹に屈曲した海溝軸に対して海洋プレートが沈み込むと島弧側で隆起が生じることが数値計算の結果分かった。また、海洋プレートが尾根状に沈み込むと、尾根の直上では沈降が尾根の両脇では隆起が生じることも分かった。これらの結果は、海洋プレートとテーブルクロスとのアナロジーから物理的に理解できる。得られた知見に基づき、日高舟状海盆、関東平野、伊勢湾-敦賀湾沈降帯と紀伊山地・三河高原、豊後水道など、日本列島前弧域の大地形の基本的な成因が理解できるに至った（投稿準備中）。

P波の検出・到達時刻決定・初動極性決定を行う3つの畳み込みニューラルネットワーク(CNN)モデルを作成し、地震波の連続記録データに順次適用することで、専門家と同等以上の精度で自動的にP波の到達時刻と初動極性を決定することに成功した(Hara et al. 2019, 原ほか, 2020)。これらのCNNモデルの作成により、地震波形の読み取りの手間を劇的に減らすことに成功した。当該分野における深層学習の先駆的な適用例の一つである。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生および火山活動を支配する場の解明とモデル

火山深部での連続微動の観測記録の解析を通して、火山深部でのマグマ性流体の供給過程に関する議論が進んだ。

本期間の研究を通して、圧力下にあるクラックの空隙構造の理解を得ることができた。この理解を、本プロジェクトで構築された地震波速度および電気伝導度の解釈に応用することで、より確度の高い流体分布を推定することができる。これは地震発生および火山活動を支配する場の解明に貢献するものである。

日本列島の時空間的変形場の解明、あるいは変形場を解明するための解析手法開発という地震・火山現象の解明の基盤となる研究である。地震・火山現象を根本から明らかにすることに貢献する研究であることから、災害の軽減にも長期的に大いに貢献する。

「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけ

地震波速度および電気伝導度から推定される流体分布は、地震活動、火山活動の予測を行う上で基礎となるデータであり、活動場の理解を通して災害軽減に貢献するものである。

「今後の展望」

地震発生を考えると、流体の情報として必要なのは量よりもむしろ流体圧である。Dietrich and Kilgore (1994)は様々な固体の接触実験から(アスペリティ接触面積/クラック面積)~(圧力/降伏応力)の関係を得たが、接触面内に流体が存在する場合は接触部面積の割合が小さいことから、圧力を(圧力-流体圧)で置き換えることができる。したがって、接触面におけるアスペリティの数について制約を与えることができれば、観測量から流体圧の評価が可能になるはずである。これを実現するため、今後は2つの面の接触に関する数値実験、流体圧をコントロールした物性測定を行う。同時に、定量的なGeofluid Mappingを進めることにより、流体分布や圧を定量的に見積もり、地震・火山・地殻変動との具体的な関係を解明する。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

・論文・報告書等

Ozaki, T, Yukutake, Y, Ichihara, M.,2023,Linking the flow-induced tremor model to the seismological observation: application to the deep harmonic tremor at Hakone volcano, Japan,Earth, Planets and Space,75,doi: 10.1186/s40623-023-01865-w,査読有,謝辞無

Ito, A., Shiobara, H., Miller, M., Sugioka, H., Ojeda, J., Tassara, C., Shinohara, M., Kinoshita, M., Iwamori, H.,2023,Long-term array observation by ocean bottom seismometers at the Chile Triple Junction,J. South Am. Earth Sci.,124,10.1016/j.jsames.2023.104285,査読有,謝辞無

Miller, M., Priestley, K., Tilmann, F., Bataille, K., Iwamori, H.,2023,P wave teleseismic tomography of the subducted Chile rise,J. South Am. Earth

Sci.,128,10.1016/j.jsames.2023.104474,査読有,謝辞無

Kuwatani, T., Nagata, K., Sakai, T., Iwamori, H.,2023,Bayesian inversion of lithology and liquid phase parameters from seismic velocity and electrical conductivity in the crust and uppermost mantle,Journal of Geophysical Research: Solid

Earth,128,e2023JB026836,10.1029/2023JB026836,査読有,謝辞有

Iwamori, H., Nakamura, H.,2024,Bend of volcanic front around Asama Volcano and deep dehydration beneath the Noto peninsula: constraints from regional magma geochemistry.

In:Asama Volcano: Portrait of the most active and hazardous andesitic volcano near the Tokyo metropolitan area (eds. S. Aramaki et al.),Springer,in press,査読無,謝辞有

Ohara, K., Yagi, Y., Yamashita, S., Okuwaki, R., Hirano, S. & Fukahata, Y.,2023,Complex evolution of the 2016 Kaikoura earthquake revealed by teleseismic body waves,Progress in Earth and Planetary Science,10:35,10.1186/s40645-023-00565-z,査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

行竹 洋平、平 貴昭、鬼澤 真也、森田 裕一,2023,地震波干渉法による伊豆大島の長期的な地震波速度構造の推定,日本地震学会秋季大会,S01-06

楠城 一嘉、行竹 洋平、熊澤 貴雄,2023,静岡県伊東沖の地震活動の解析,日本地震学会秋季大会,S09-17

高野 彩香、平松 良浩、行竹 洋平,2023,能登半島北東部の群発地震活動領域の震源メカニズム解と応力場,日本地震学会秋季大会,S22P-04

楠城 一嘉、行竹 洋平、熊澤 貴雄,2023,A preliminary analysis of seismic activity off the coast of Ito, Shizuoka,日本地球惑星科学連合2023年大会,SCG56-P09

Watanabe, T. & Yoshida, K.,2023,Surface topography of grain boundary cracks in a granitic rock,日本地球惑星科学連合2023年大会,SCG56-P10

Mizuki Ishida, Kentaro Nakamura, Hikaru Iwamori, Takahiro Hosono, and Yasuhiro

Kato,2023,Importance of trans-crustal geological processes in understanding the genesis of giant epithermal gold deposits: The case of Hishikari deposit, Japan,EGU General Assembly 2023,EGU23-3728,10.5194/egusphere-egu23-3728

近藤 優子、大林 政行、杉岡 裕子、塩原 肇、伊藤 亜妃、篠原 雅尚、岩森 光ほか,2023,Seismic velocity structure beneath South America from finite-frequency tomography,日本地球惑星科学連合2023年大会,SIT16-01

勝木 悠介、坂田 周平、西澤 達治、高橋 正樹、中井 俊一、中村 仁美、原口 悟、岩森 光,2023,Geochemical variations of volcanic rocks in Mt.Fuji: Magmatic processes identified by Independent Component Analysis,日本地球惑星科学連合2023年大会,SVC36-06

岩森 光、中村 仁美,2023,Central Japan as a cold subduction zone revisited: implications for deep dehydration beneath the Noto peninsula,日本地球惑星科学連合2023年大会,SCG56-03

原口 悟、岩森 光、上木 賢太,2023,日本列島の地質を構成する各岩相の化学組成分布から見る、データの統計的特徴と区分の妥当性,日本地球惑星科学連合2023年大会,MGI29-P05

岩森 光、中村 仁美,2023,冷たい沈み込み帯としての中部日本と能登半島下でのスラブ深部脱水,日本地震学会秋季大会,S22-01

岩森 光・中村仁美・森川徳敏・高橋正明 高橋 浩・坂田周平・原口 悟,2023,九州南部における地下水の組成統計解析と流体循環,日本火山学会秋季大会,B1-09

中村仁美・森川徳敏・岩森 光・坂田周平,2023,始良カルデラにおける地下水の希土類元素組成,日本火山学会秋季大会,A1-12

T Tamura, T Yokoyama, JB Gill, H Iwamori, T Kuritani, K Ueki,2023,Molybdenum isotopic composition in volcanic rocks from Izu arc and Northeast Japan,AGU Fall Meeting,V31D-0127

勝木悠介・坂田周平・西澤達治 高橋正樹・中井俊一・中村仁美 原口 悟・岩森 光,2023,富士山噴出物の化学組成の多変量統計解析,日本火山学会秋季大会,A3-13

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

深畑幸俊（京都大学防災研究所），飯尾能久（京都大学防災研究所）
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学防災研究所
電話：0774-38-4226
e-mail：fukahata@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp
URL：http://www1.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~fukahata/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：深畑幸俊
所属：京都大学防災研究所

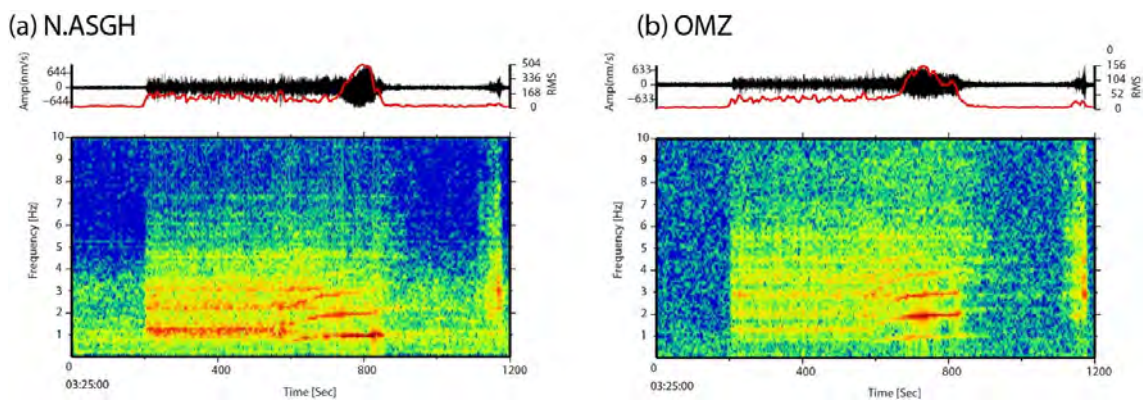


図 1

箱根火山近傍のHi-net南足柄観測点(N.ASGH)及び神奈川県温泉地学研究所大又沢観測点で記録された火山性微動の波形記録（上下成分）とそのランニングスペクトル (Yukutake et al., 2022)。

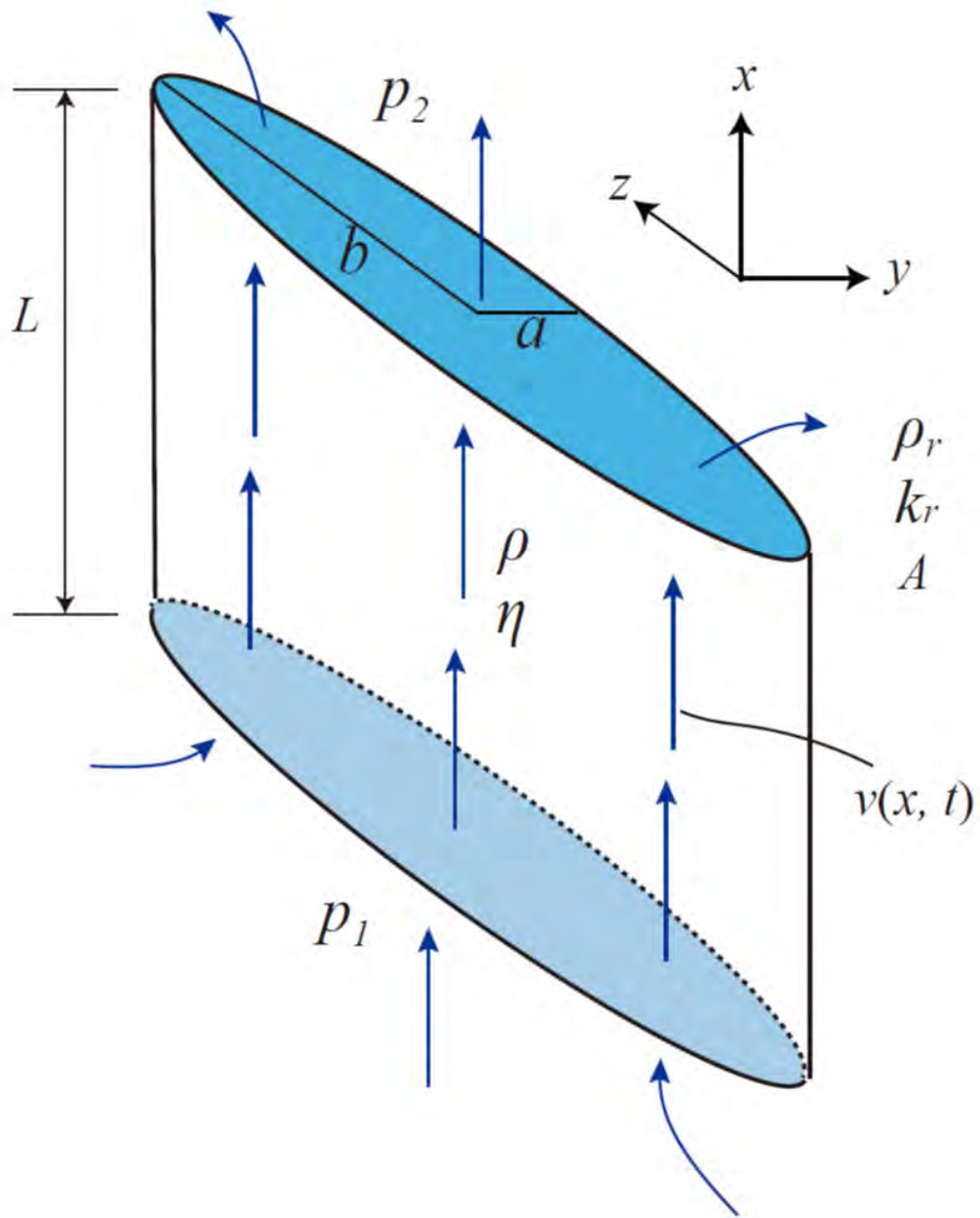


図2
楕円形状の流路を仮定したモデル (Ozaki et al., 2023)。

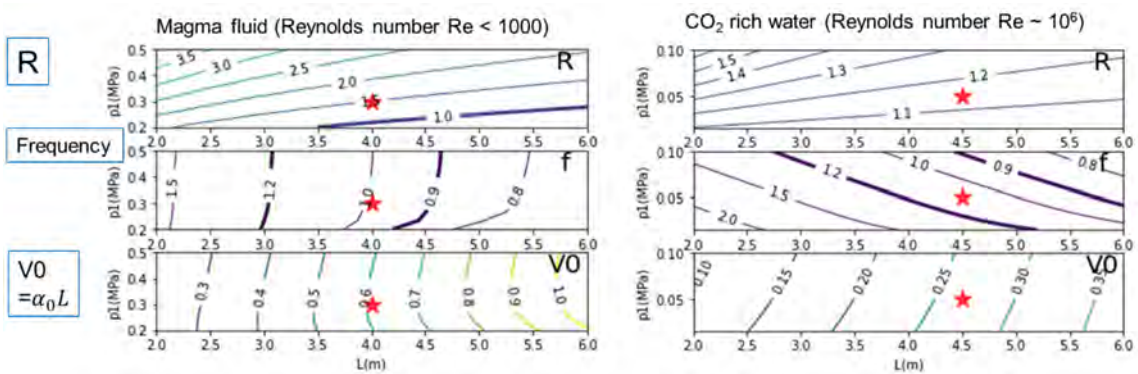


図 3

流路の長さLと上流圧力P1に対する、R、振動の周波数、流路の体積との関係(Ozaki et al., 2023)。

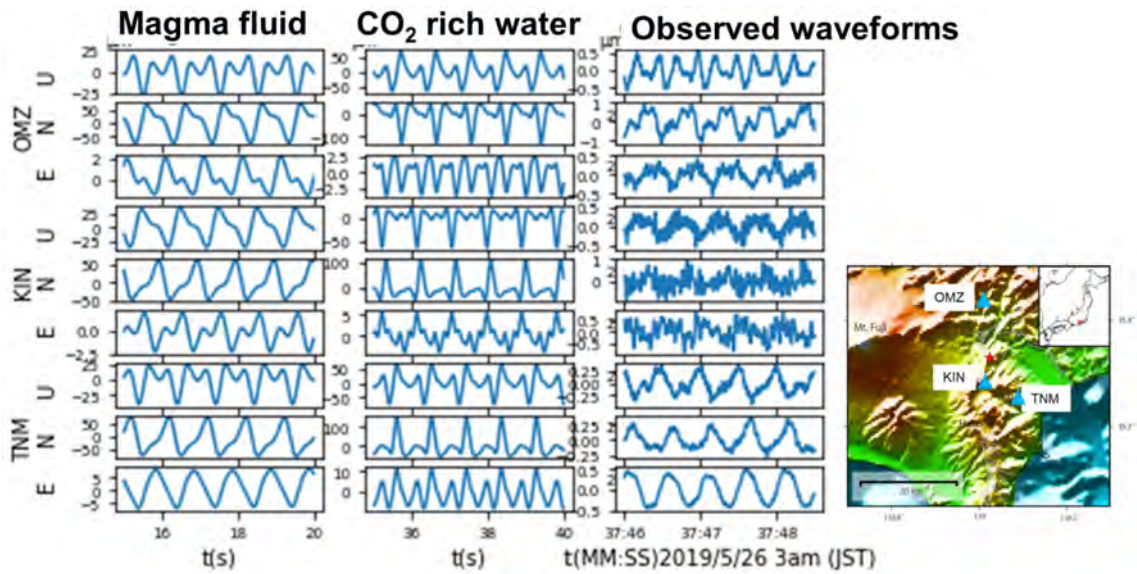


図 4

推定された理論波形（左：マグマ、中央：水）と観測波形（右）との比較。右下に観測点分布図を示す(Ozaki et al., 2023)。

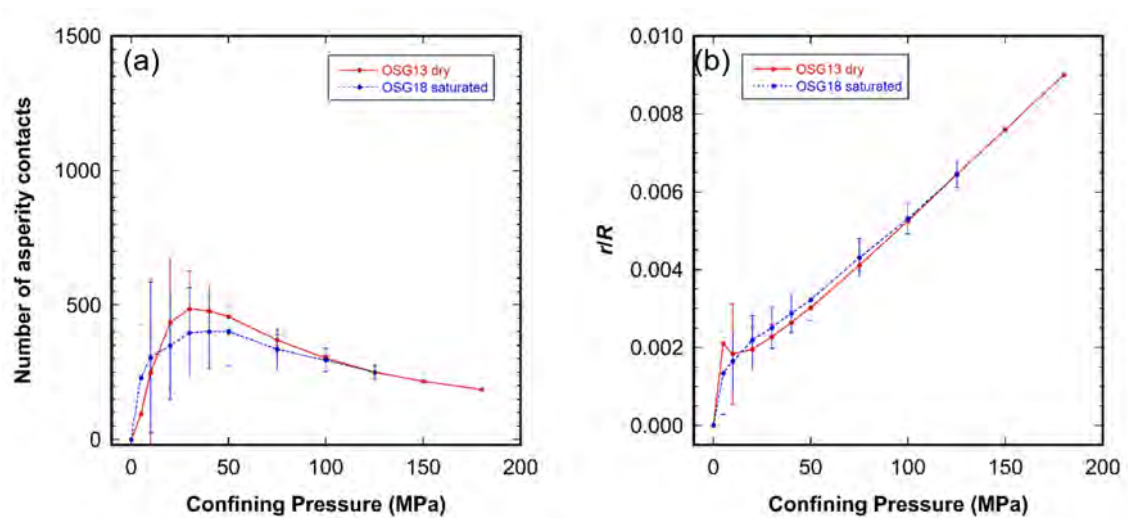


図 5

封圧増加に伴うクラック内のアスペリティ接触の数(a)およびクラックと接触部の半径比(b)の変化。赤丸および青丸は乾燥試料および含水試料を表す。試料は大島花崗岩。含水試料の間隙流体圧を大気圧に保っているため、乾燥試料と含水試料でクラック閉鎖に違いは生じていない。

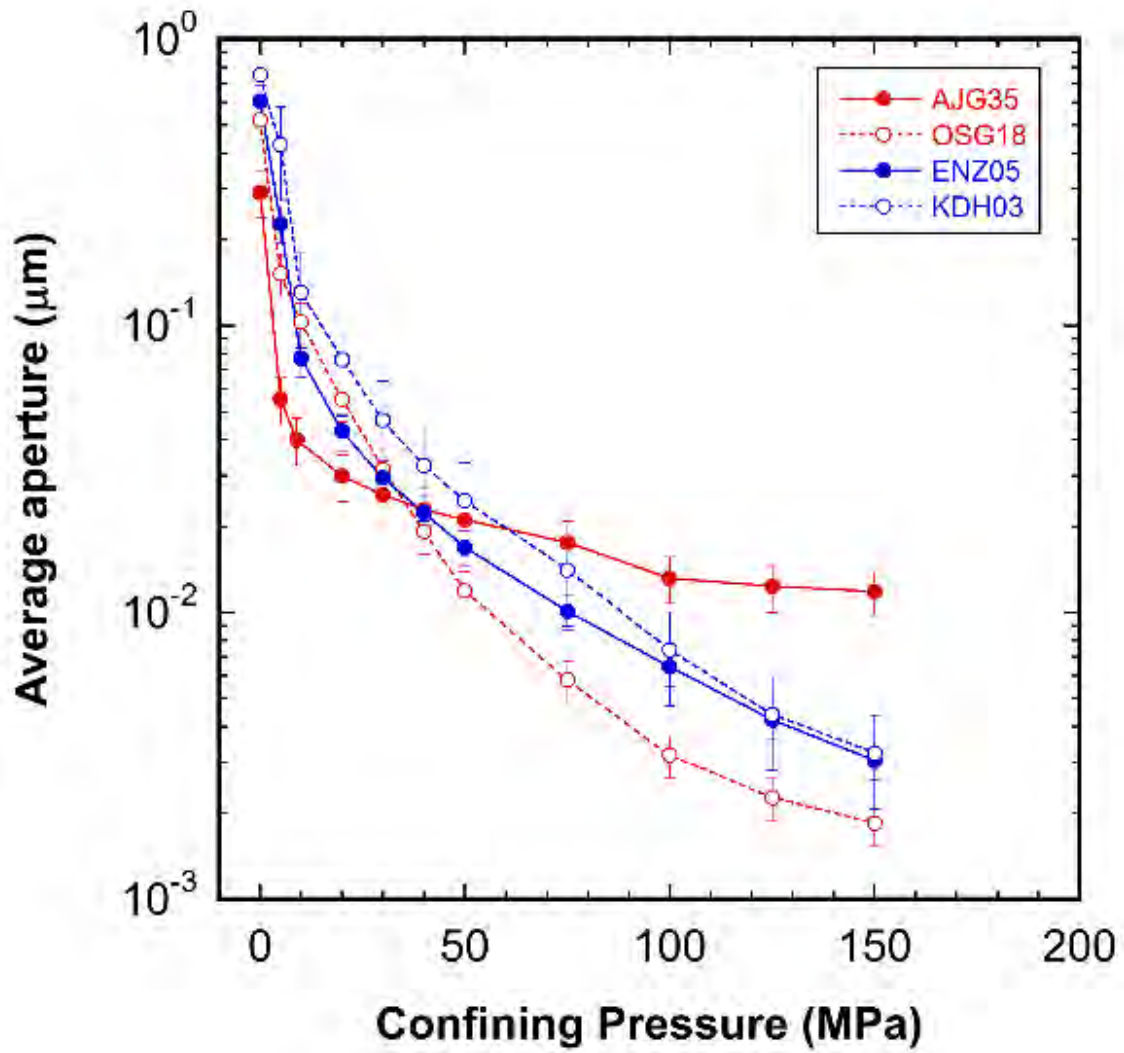


図6
含水試料の電気伝導度から推定されるクラックの平均開口。AJG, OSG, ENZ, KDHは、それぞれ庵治花崗岩、大島花崗岩、塩山花崗閃緑岩、勝原閃緑岩である。

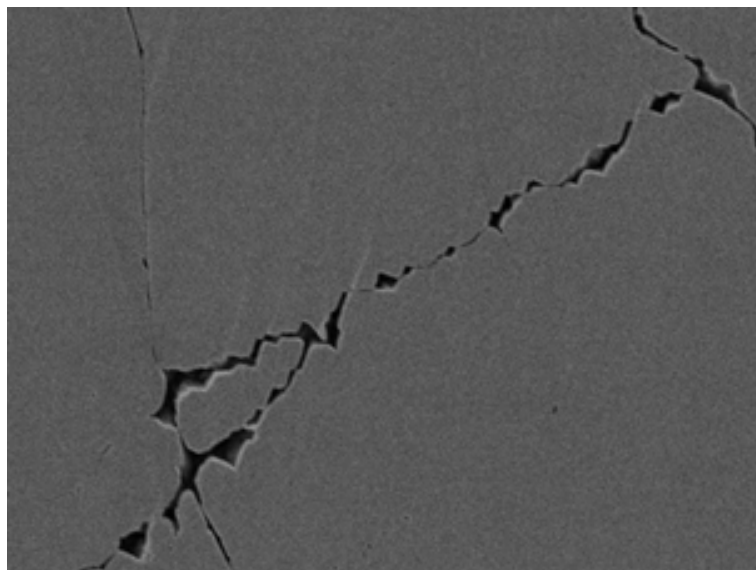


図7

イオンミリングした庵治花崗岩表面のSEM画像（横幅は 50 μm ）。

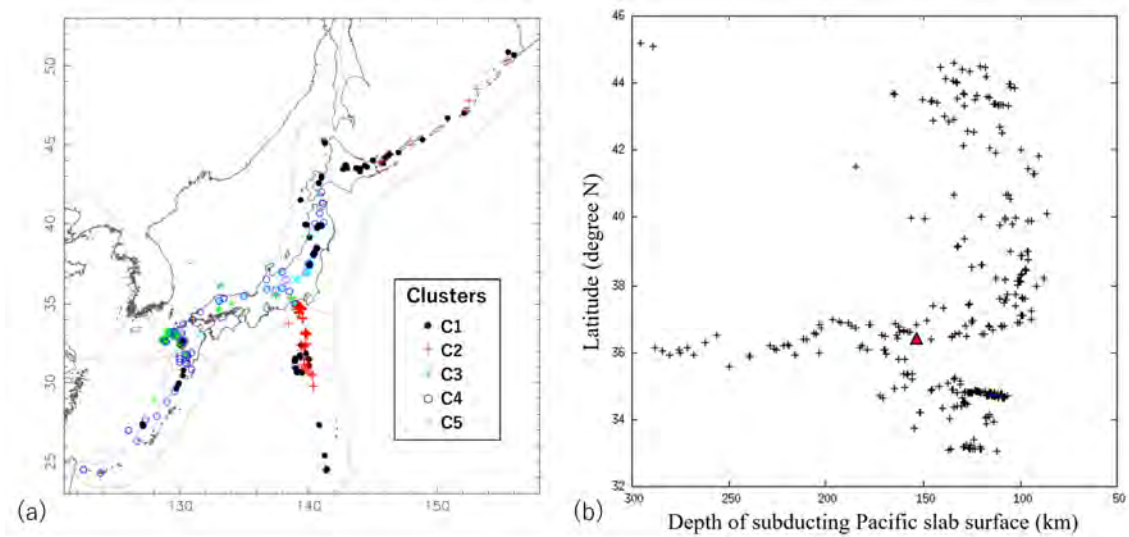


図 8

(a) Geographical distribution of the five compositional clusters from C1 to C5. The plate boundaries are after Bird (2003). (b) Depth of subducting Pacific slab surface beneath the location of the lava samples used in this study. The depth of the Pacific slab surface straight beneath each lava sample (horizontal axis in the figure) is obtained based on the seismically determined slab surface geometry (Fig. 1) and its bicubic interpolation. The depth of the slab surface is then plotted against the latitude of the sample location (vertical axis). The red triangle represents Asama Volcano.

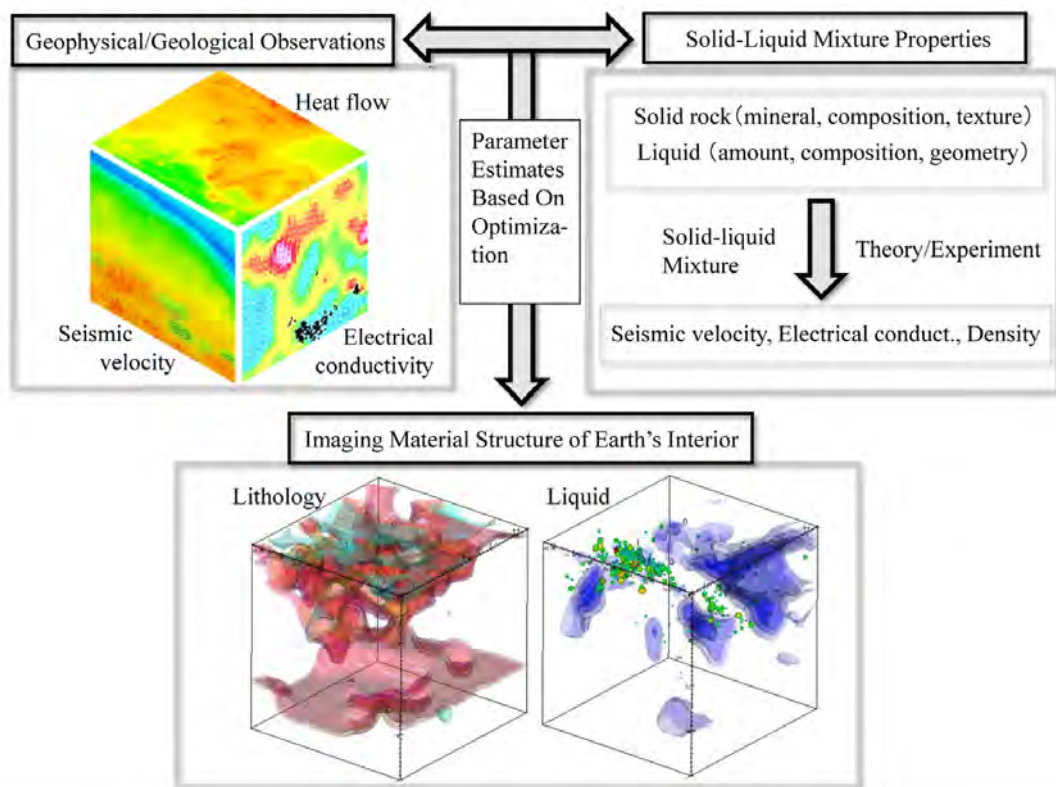


図 9

Overview of the method for subsurface imaging based on the simultaneous analysis of seismic velocity and electrical conductivity.

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

測地観測データに基づく内陸地震長期評価手法の開発

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

イ. 内陸地震の長期予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

イ. 内陸地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

5 研究を推進するための体制の整備

(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(7) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

- ・ GNSS等の測地学的観測データに基づく内陸地震の長期予測手法の開発を行い、日本列島を対象とした地震発生確率の試算を行う。
- ・ 地震活動データに基づき、内陸部の任意の場所について内陸大地震発生の定常確率（永年確率）を求めるとともに、近傍活断層系に基づく時間依存の大地震の長期確率を求める。短期・中期の異常地震活動が認められた場合に、これらを合わせた多重確率予測が準リアルタイムで計算可能になるようにデータベースを作成・準備する。確率予測のばらつきが見えるように複数の予測を目指す。
- ・ 断層への载荷応力変化に応じた地震発生確率変化を定量的に評価するための手法を提案する。
- ・ InSARやGNSS繰り返し観測等から得られるデータを用いて測地学的ひずみ速度推定手法の高度化と観測点密度がひずみ速度推定に与える影響を検討する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題においては、内陸地震の長期予測手法の開発に関して、以下の3つのサブテーマを設け、サブテーマ毎の研究概要を示す。最終的には各サブテーマから得られた成果を総合して、長期予測手法の高度化を目指す。

1. GNSSデータを用いた地震活動の長期予測

・ 応力蓄積速度が一定と考えられるようなバックグラウンドの変形場を、日本列島の過去のGNSSデータから推定し、変位速度場からひずみ速度場を計算する手法の比較検討、標準的解析手法の提案を行う。得られたひずみ速度データに基づき、既往の長期予測手法・モデルを参考にして、予測手法の比較検討を行い、内陸大地震発生の定常確率の計算を行う。日本列島の過去の地震活動を用いて、地震

発生予測モデルの検証とパラメータの最適以下を行う。

- ・測地データに基づいて、これまでに提案されているひずみ速度や地震カタログを用いた内陸地震発生確率推定手法の調査を行う。観測されたひずみ速度や、歴史地震を含む地震カタログを用いて、地震発生確率推定を試行し、地震本部の長期評価や実際の地震活動との比較等を行う。

- ・ブロック断層モデルを用いて、背景地震及びブロック境界沿いの固有地震の長期評価を行う手法を開発する。まず、西南日本のGNSSデータを精査し、ブロック運動モデルの再考を実施する。次に、ブロック内の歪み速度をGNSSデータから推定し、西南日本をテストケースとしてブロック内の歪み速度と地震活動に基づく地震の長期評価の手法の構築・検証を行った後、日本列島規模でのブロック運動モデルを構築し、日本列島規模でのブロック内の歪み速度と地震活動について長期評価の手法を構築・検証を行う。

2. 地震活動を用いた長期予測手法の高度化

- ・検出率を踏まえた「常時地震活動度」を位置に依存するパラメータを持つ時空間ETASモデルの高度化によって求め、Gutenberg-Richter式のb値モデルを併用することによって、各所の大地震の永年発生確率を求める。

- ・大地震の長期評価において繰り返し間隔のばらつきを表すのに用いられるBPT分布の変動係数 α 値などを地域別あるいは断層の空間的特性に基づいて求め、ベイズモデルを用いたロバストな長期確率評価を試作する。

- ・1995年兵庫県南部地震以降に発生した $M \geq 6.8$ の地殻内地震に対して、各地震後に実施された活断層調査データ・地殻変動データをとりまとめて、断層の活動間隔、地殻歪速度、周辺応力変化への応答などから、破壊直前の活断層の状態と地震活動の特徴を抽出する。特に、破壊開始点（震源）と活断層・震源断層の位置関係などに注目する。同様の検討を国外の地殻内大地震に対しても実施する。

3. 多様な測地データを用いた詳細ひずみ速度分布推定手法の検討

- ・衛星SARの干渉解析手法に基づき、主に、跡津川断層、有馬高槻断層帯、中央構造線の周辺において、地震間詳細地殻変動分布を推定する。まず、ALOS-2等のアーカイブ画像を用いたInSAR解析を試行し、GNSSデータとの比較を行い、時系列解析手法やノイズ軽減手法について検討する。次に、有限要素法を用いたすべり速度推定を行って、測地データに基づくすべり速度推定結果と活断層評価（長期評価）におけるすべり速度比較をするとともに、過去の測地測量データとの整合性等との検証を行う。

- ・顕著なひずみ集中や地震火山の相互作用から複雑な地殻変動が観測されている新潟県南部や三宅島などを対象として大学院生を主とする全国の関係機関が参加する稠密GNSS繰り返し観測を行い、観測誤差を考慮した詳細な変形場の解明と既存GNSS連続観測点のデータとの比較を行って、長期予測への利用可能性を検討する。また、観測を通じた次世代研究者・技術者の養成を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1. GNSSデータを用いた地震活動の長期予測

GNSSデータのひずみ速度から地殻内地震の発生確率の試算、東日本とトルコ周辺で実施し、過去の地震活動と整合的であることを確認した。昨年度までに計算した西日本や北海道の試算結果と統合して、日本列島全域の地殻内地震発生確率（図1）を提示するとともに、背景地震活動に基づく地震発生確率と統合した例（図2）についても計算した。内陸で発生する地震活動を解析し、平均変位速度が速い活断層では余震継続時間が短い傾向が見られた。GNSSデータの短波長成分を抽出したひずみ速度場から地震発生確率を計算するスキームを広域的に試行した。ランダムフォレストを用いて地震数・ ab 値・ひずみ速度等から地震数を予測する手法を試行した。

2. 地震活動を用いた長期予測手法の高度化

2023年2月6日にトルコ南東部で発生したカフラマンマラシュ地震シーケンス ($M_w 7.8$, $M_w 7.7$) に着目し、静的応力変化と地震応答との関係を調べた (Toda and Stein, 2024)。最初のパザルジュック地震 ($M_w 7.8$) によって、チャルダック断層の $M_w 7.7$ 震源付近で剪断応力変化が $+0.1\text{MPa}$ 程度になるが、法線応力の増加が著しい ($+0.3\text{MPa}$) (図3)。一方で、 $M_w 7.8$ 震源断層に近い北東側では、剪断応力は顕著に低下する。そのため、法線応力変化が震源核形成に寄与し、剪断応力低下は動的破壊過程にほとんど影響しないとみられる。次に、USGSの震源断層モデルを用いて両地震によるクーロン応力変化 (ΔCFF) を計算した。レシーバ断層は、トルコ防災危機管理庁 (AFAD) のメカニズム

解および周辺活断層情報を参考に設定した。その結果、2つの震源断層の周辺で負の ΔCFF が大きく広がり、2つの震源断層の4つの端部延長で顕著な増加となった(図4)。震源断層沿いの余震を除いて、全体的に周辺域で活動の低下がみられた。断層端延長部で余震活動は集中するが、2020年エラズー地震(M6.8)の震源では2023年本震後の活動がほとんど認められない。エラズー地震そのものによる ΔCFF は-1MPa程度で、2023年本震による+0.1~+0.2MPaを大幅に下回り、単純に応力変化の合計が負となり余震が誘発されなかったという見方もできる。一方で、速度および状態依存摩擦則を考慮した検討でも、同様の結果が再現できる。

3. 多様な測地データを用いた詳細ひずみ速度分布推定手法の検討

InSAR時系列解析とGNSS変位場の融合による歪速度場推定手法の開発に関しては、電離圏擾乱の大きい場合でもロバストな補正項推定が可能な手法を開発し、対流圏遅延補正なども併用し、GNSS観測網だけでは捉えることのできなかつた高精度かつ高空間分解能な地震間歪速度場の検出に成功した

(図5)。新潟・神戸歪集中帯への同手法の適用からは、2014年神城地震発生域周辺の高歪速度、立山・白山・妙高山など火山近傍の引張歪などを捉えた。部分的にクリープしている断層周辺域のInSAR時系列解析結果からは、その変形場の詳細な解析により、固着域の時間変化の検出に成功した(図6)。

稠密GNSS繰り返し観測については、北海道東部屈斜路地域で9月11-15日に実施し、全国の大学・国研等から64名の参加があり、次世代への観測技術の継承を行なった。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

1. GNSS データを用いた地震活動の長期予測

GNSSデータから得られるひずみ速度場から地震発生確率を計算するための手法を整理し、沈み込みプレート間固着の影響をバックスリップモデルを用いて補正し、過去の地震活動によるモーメント速度とGNSSデータに基づくひずみ速度から換算したモーメント速度を整合させるための係数を導入すること(Nishimura, 2022)で日本列島の地殻内地震(M6以上)の30年発生確率の試算を行なった。また、ひずみ速度場に含まれるプレート間固着の影響の補正方法として、バックスリップモデルを用いるものに加えて空間フィルタを用いる方法も行い、地震発生確率評価を行った。

西南日本では、内陸および海底GNSS/A観測データを用いてプレート間固着の分布と内陸断層の固着の状態をブロック運動モデルを用いて推定した。この推定のために、新たな最適化アルゴリズムを組み込んだマルコフ連鎖モンテカルロ法を開発し、モデリングの不確実性の空間的な変動を最小化することで、均一な不確実性を持つ固着分布の推定を可能にした。また、内陸のブロック運動速度とブロック歪みを推定し、地震発生ポテンシャルを推定した(Kimura et al. 2019)。

同様の手法を中南米地域の中央コスタリカ変形帯に適用し、コスタリカとその周辺の地震間のGNSS観測データを用いて、地震の発生ポテンシャルを推定した。観測された地震間の地殻変動が、剛体テクトニックブロックの運動、ブロック境界の固着に伴う弾性変形、および地殻ブロック内の内部ひずみであると仮定しています。ココスプレートの沈み込み境界面上の M_w 8以上の領域の特定と内陸断層に沿った M_w 7以上の地震発生ポテンシャルを推定した。また、地殻ブロック内歪みと長期的な地震の発生モーメントレートとの比較から微小地震の評価も実施した(Carvajal-Soto et al., 2020)。

さらに、2008年から2018年までのGNSS観測データに基づき、ジャワ島の地殻変動データにブロック運動モデルを適用し、地震ポテンシャルを評価した。多くの地震が多発する地域であることから、大きな地震については粘弾性応答など適用することで、余効変動を補正した上でブロック運動モデルを適用した。ブロック境界については、不確定要素が多いため、11の地殻ブロック運動モデルを作成し、AICによって最適モデルを選択した。解析の結果、内陸断層において、 M_w 7.0の地震発生ポテンシャルがあることが示され、ジャワ島の地震リスク評価を実施した(Raharja et al, 2024)。

地殻変動データのみならず地震活動データを含む多項目パラメータから地殻活動予測を行うため機械学習を用いた予測手法スキームの検討を行った。余震継続時間から応力速度を推定する手法の検討を行い、活断層周辺域において手法の有効性を示唆する結果を得た。

2. 地震活動を用いた長期予測手法の高度化

大地震による静的応力変化と地震応答に関する時空間予測モデル手法を確立した(Toda and Stein, 2020)。具体的には、震源メカニズム解を小地震にまで拡張した仮想レシーバ断層カタログを作成、本震によるそれぞれのクーロン応力変化を解き、速度および状態依存摩擦則による時系列を計算する。その後、多様な応力変化・時系列応答の地域的平均像から地震活動を予測する。このモデルを、2011年東北地方太平洋沖地震、2019年リッジレスト地震、2023年トルコカフマンマラシュ地震に適用して、手法の妥当性を確認した(Toda and Stein, 2020; 2022; 2024)。アスペリティ周辺の短期

的余震活動と静穏化、周辺域の長期的な地震活動の活発化、メカニズム解混在域での時系列予測など、複雑性を加味した地震活動の時空間予測を可能とした。

3. 多様な測地データを用いた詳細ひずみ速度分布推定手法の検討

主として、InSAR時系列解析のノイズ軽減による高度化や、その結果をGNSS観測による変位場と融合することによる高精度かつ高空間分解能の歪速度場推定手法の開発および、InSARによる活断層深部断層すべりの検出や特徴解析に取り組んだ。歪速度場推定手法開発に関しては、電離圏や対流圏のロバストな補正をする手法を開発し、InSAR時系列解析の精度を大幅に向上させた。また、GNSS変位場との融合により、GNSS観測網だけでは捉えることのできなかった個々の活断層周辺、火山周辺などの短波長歪場の検出に成功した。InSARによる断層変位場の特徴解析については、部分的にクリープしている断層などに着目し、その固着域の時間変化などを捉えることに成功した。

GNSS繰り返し観測においては、令和元年度に三宅島、4年度に御嶽山、5年度に屈斜路地域を対象に、連続観測点の間を補完した観測を実施するとともに、次世代への技術継承を行なった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本課題においては、5年間でGNSSデータと地震活動データを用いて日本列島の内陸地殻内地震に対する長期発生確率を試算を行い、当初の目的は達成されている。また、大地震などの影響を考慮した地震発生確率の計算手法やInSARデータ等を活用してひずみ速度推定の高度化を行う点についても5年間で成果が得られ、当初の目的を達成することができた。地震本部においては、令和五年に「内陸で発生する地震の調査観測に関する検討ワーキンググループ」が発足し、本課題の成果である長期発生確率手法の結果について報告を行なっている。ワーキンググループにおいても、地震活動データやGNSSデータを用いた予測の有効性について一定の評価が得られており、今後さらに長期評価として実用化するための研究が加速される予定である。よって、本課題は「災害の軽減に貢献する」という目標に対して具体的な一歩を踏み出したものとして、評価されるべきであろう。

次期計画では、GNSSデータや地震活動データを用いた長期予測手法のさらなる高度化に向けて、ひずみ速度の補正方法や各種パラメータの地域依存性に関する研究を行う予定である。イベントにより時間変化する発生確率の計算については、応力载荷速度の変化を加味して、群発地震活動にも適用できるように予測モデルの更新を行う。能登半島群発地震-令和6年能登半島地震の後ろ向き予測 (retrospective forecast) からモデルの適用性を検討し、励起された地震活動近傍の活断層の活動パラメータと融合させた確率変動モデルを構築することを目指す。

InSARとGNSSの融合では、本計画で達成されたこれまでより遥かに高い空間分解能での歪速度場検出を他地域にも展開していくとともに、さらなる気象擾乱補正方法の高度化や、新たに得られる稠密GNSS観測点の活用等による手法の高度化も進めていく。歪速度場から個々の活断層の長期発生予測を試算するとともに、未知の活構造の変形を捉えることができる技術と機械学習も駆使して、平均すべり速度が小さい (年間数mm) である日本の活断層での深部すべりの検出に取り組んでいく予定である。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

・論文・報告書等

Raharja, R, T. Ito, and I. Meilano,2024,Evaluation of earthquake potential using a kinematic crustal block motion model in Java, Indonesia, based on GNSS observation,Journal of Asian Earth Sciences X,11,100171,査読有,謝辞無

Toda, S., and Ross S. Stein,2024,The Role of Stress Transfer in Rupture Nucleation and Inhibition in the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, Sequence, and a One-Year Earthquake Forecast,Seism. Res. Lett.,doi: 10.1785/0220230252,査読有,謝辞無

Miyake, H., J. J. Mori, D. J. Wald, H. Kawase, S. Toda, and P. M. Mai,2023,Introduction to the special section for the centennial of the great 1923 Kanto, Japan, earthquake,Bull. Seism. Soc. Am.,113,1821-1825,doi: 10.1785/0120230200,査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

原太郎・高橋浩晃,2023,内陸地震発生評価に向けた西南日本における地殻変動と地震活動特性の検討,日本地震学会2023年秋季大会,S14-02

藤田知之・高橋浩晃・大園真子,2023,機械学習を用いた内陸地震発生確率の推定スキームの検討,日本地震学会2023年秋季大会,S14-P02
遠田晋次,2023,2023年トルコ, カフラマンマラシュ地震における動的・静的応力伝播と断層の連動・連鎖,日本地球惑星科学連合2023年大会,U13-07
遠田晋次,2023,地質・地形・地震活動情報からの震源断層パラメータの事前予測:2016年熊本地震を例に,日本地球惑星科学連合2023年大会,SCG60-03
遠田晋次・Ross S. Stein,2023,2023年トルコ, カフラマンマラシュ地震による静的応力変化と地震応答,日本地震学会2023年秋季大会,S09-16
Toda, S., and R. S. Stein,2023,The Role of Stress Changes in Rupture Nucleation and Inhibition in the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, Sequence, and a One-Year Earthquake Forecast,AGU fall meeting 2023,T33D-0361
Stein, R., V. Sevilgen, S. Toda, A. Ozbakir, and H. Gonzalez-Huizar,2023,Implications of the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquakes for California,AGU fall meeting 2023,U41C-0875
Hara, Y., and S. Toda,2023,Retrospective Probabilistic Forecast of Rupture Propagation Considering Fault Continuity and Geometry in the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, Earthquake,AGU fall meeting 2023,T33D-0355
尾形良彦,2023,直下型大地震の確率予測について,2023年度統計関連学会連合大会
上田 拓・西村卓也,2023,日本のひずみ集中帯とその周辺域での背景地震活動度とひずみ速度の関係性,日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS10-P15
上田 拓・西村卓也,2023,現在の地殻変動から推定される日本でのせん断ひずみエネルギーの変化と地殻内地震活動との空間的相関関係,日本測地学会第140回講演会,36
上田 拓・西村卓也,2023,現在の地殻変動から推定される日本でのせん断ひずみエネルギーの変化と地殻内地震活動との空間的相関関係,日本地震学会2023年秋季大会,S09-15
西村卓也,2023,測地観測に基づく九州の地殻変動と活断層分布,日本活断層学会2023年秋季学術大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

測地・地震観測データに基づく地殻内地震長期予測手法の高度化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

西村卓也(京都大学防災研究所)

他機関との共同研究の有無:有

高橋浩晃(北海道大学大学院理学研究院),高田陽一郎(北海道大学大学院理学研究院),遠田晋次(東北大学災害科学国際研究所),福島洋(東北大学災害科学国際研究所),三浦哲(東北大学大学院理学研究科),青木陽介(東京大学地震研究所),伊藤武男(名古屋大学大学院環境学研究科),宮崎真一(京都大学大学院理学研究科),松島健(九州大学大学院理学研究院),尾形良彦(統計数理研究所),野村俊一(早稲田大学大学院会計研究科),矢来博司(国土地理院)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等:京都大学防災研究所地震予知研究センター

電話:

e-mail:

URL:<http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

(14) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:西村卓也

所属:京都大学防災研究所地震予知研究センター

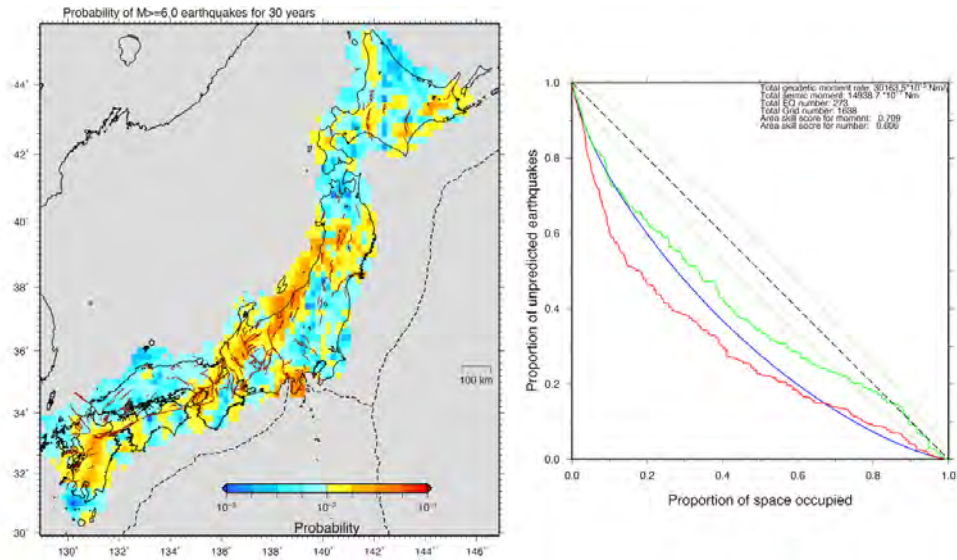


図1 GNSSデータから計算した日本列島の地殻内地震の長期予測と過去地震との整合度
 (左) GNSSデータに基づくM6以上の地殻内地震の30年発生確率 (右) GNSSデータに基づく予測と過去に発生した地震の整合性を表すMolchanダイアグラム。赤線が地震モーメント、緑線が地震数、青線が測地モーメントの集中度を表し、赤線や緑線が対角線より左下に行くほど、予測が適合していることを表す。

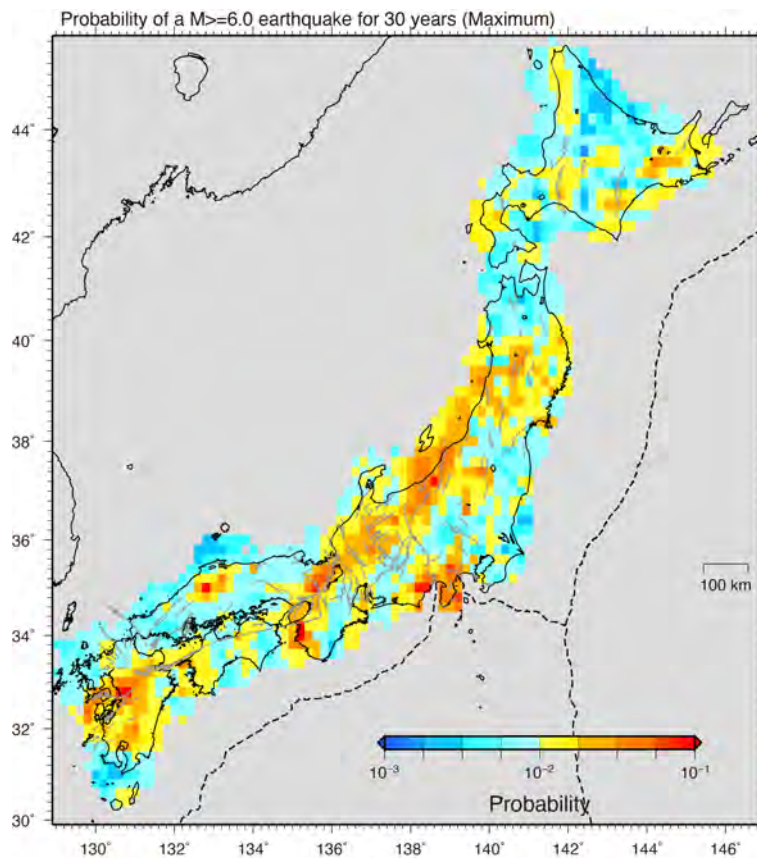


図2 GNSSデータと背景地震活動データ(Ogata, 2022)を統合した地殻内地震の長期予測

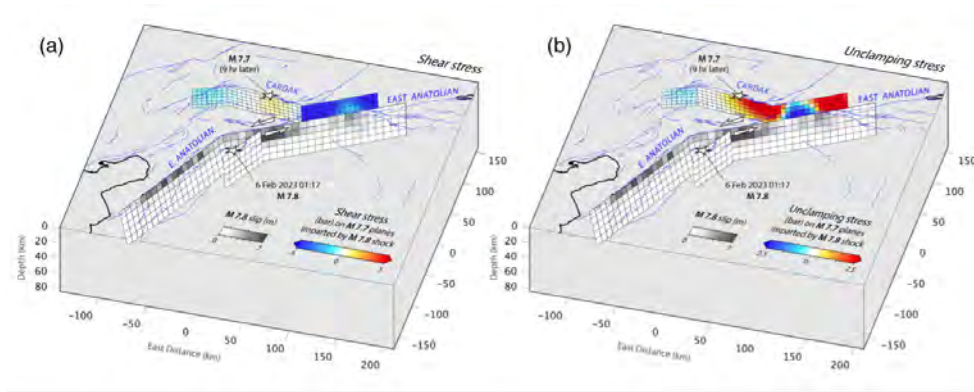


図3 パザルジュック地震によるチャルダック断層への応力変化。
a) 剪断応力変化。b) 法線応力変化。

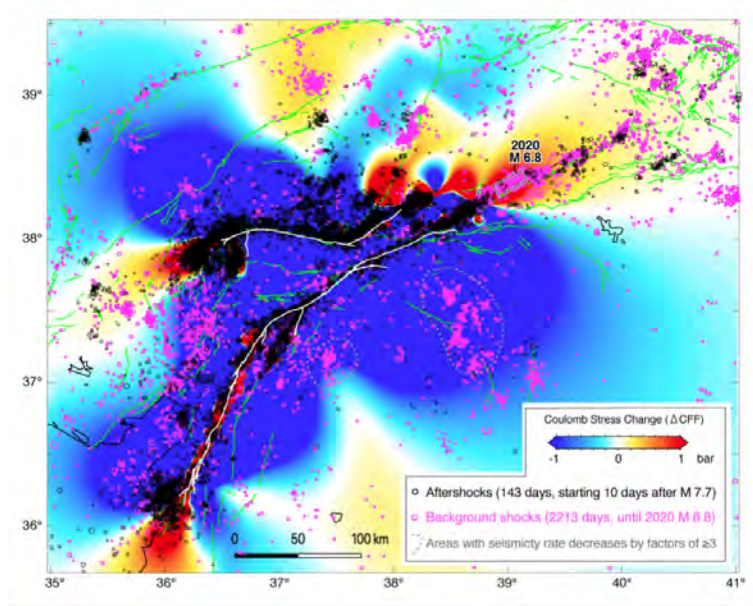


図4 パザルジュック地震とエルビスタン地震による静的クーロン応力変化と本震前後の地震活動（本震前：マゼンタ、本震後：黒）。
白線はUSGSによる地表地震断層分布。緑線は活断層分布（Emre et al., 2018）。

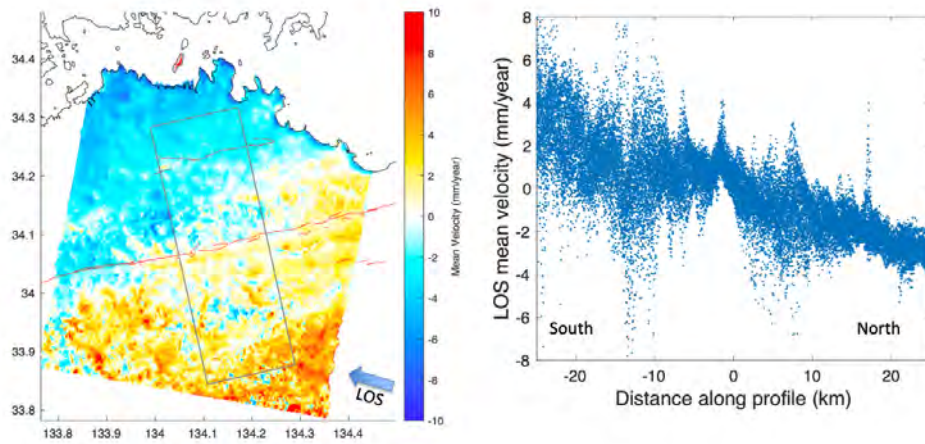


図5 InSAR時系列解析から得られた中央構造線周辺の平均速度場
 (左) 衛星視線方向の速度分布。(右) 左図の四角の範囲内の速度分布。南海トラフにおける沈み込みによる変形が顕著に見えている。

InSAR + GNSS, r : 20 km

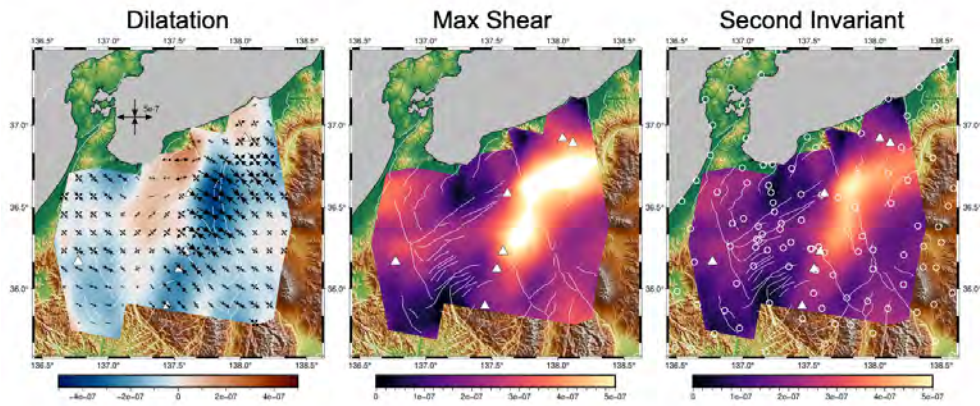


図6 InSARとGNSSデータを統合した後津川断層と糸魚川静岡構造線断層帯周辺のひずみ速度分布
 (左) 面積ひずみ速度。(中) 最大せん断歪速度。(右) ひずみの2次不変量。

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

インドネシアの活動的火山における火山活動推移モデルの構築

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

火山

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

北スマトラのシナブン火山、ジャワ島のグントール、ガルングン、メラピ、ケルート、スメル火山、バリ島のアグン火山、スンバワ島付近のサンゲアン・アピ火山を研究対象とし、それぞれの火山における火山活動推移をまとめたうえで、共通項と抽出した火山活動推移の標準モデルを構築する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

京都大学防災研究所とインドネシア地質庁との学術交流協定に基づく過去25年の研究交流実績と、2009年～2011年度と2014年～2018年度に実施の地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）にて培われた研究実績とインドネシア側の人材と供与観測機材を活用して研究を遂行する。

当面、北スマトラのシナブン火山、ジャワ島のグントール、メラピ、ケルート、スメル火山、バリ島のアグン火山、スンバワ島付近のサンゲアン・アピ火山を研究対象とするが、それ以外の火山におい

て顕著な噴火が発生した場合、機動的な観測を実施するものとする。

年次計画は以下の通りである。

平成31年度

噴火活動中のシナブン火山、スメル火山、アグン火山について、火山活動推移モデルを作成する。

平成32年度

シナブン火山とメラピ火山を対象に水蒸気噴火からマグマ性噴火に至るまでの活動推移をまとめる。

平成33年度

火山性地震の発生頻度が高いが噴火に至らない火山としてグントール火山、サンゲアン・アピ火山の2013年噴火以前の地震活動を中心に火山活動推移をまとめる。

平成34年度

VEI4の規模に達した2014年ケルト火山噴火と2010年メラピ火山噴火に至る地震活動、地盤変動、火山ガス等のデータを再検討し、火山活動推移モデルを構築する。

平成35年度

それぞれの火山における火山活動推移をまとめたうえで、共通項を抽出した火山活動推移の標準モデルを構築する

火山活動推移モデルを定量的に表現するために以下のパラメータを評価する。

(1)噴火直前の火口近傍における傾斜変化量、火山性地震のエネルギー

(2)定常地震およびGNSS観測から得られる、数ヶ月から数年の時間スケールにおけるマグマ蓄積量・率

(3)降灰の現地調査、レーダー観測、噴火地震・微動のエネルギー、傾斜変化量等から推定される噴出物量（噴火の規模評価）

(4)火山ガス放出量

(5)非噴火時の噴煙高度（白煙）から推定される熱エネルギー放出率

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

(1)噴火直前の火口近傍における傾斜変化量、火山性地震のエネルギーの評価はケルト火山において有効であった。(2)定常地震およびGNSS観測から得られる、数ヶ月から数年の時間スケールにおけるマグマ蓄積量・率は、170年間の静穏期にあるグントール火山で有効であった。一方、スメル火山のマグマの供給率は、 $10^6\text{m}^3/\text{年}$ のオーダーと評価されるが、頻繁な噴火と溶岩ドーム形成にマグマは消費されるので、マグマの蓄積はほとんど進んでいない。2022年12月4日にも火砕流を伴う噴火が発生した。2021年の同日にも火砕流を伴う噴火が発生しているが、火山構造性地震や崩落地震（溶岩ドームの一部が崩壊）の発生頻度の増加が見られなかった。2022年の噴火では、火山構造性地震が同年10月から増加した。また、崩落地震も増加した（図1）。2021年では、2009年から成長し続けた溶岩ドームが不安定化し、強い降雨をトリガーとして爆発したのに対し、2022年の火砕流はマグマの供給量の増加によって引き起こされたことが推定される。

(3)降灰の現地調査、レーダー観測、噴火地震・微動のエネルギー、傾斜変化量等から推定される噴出物量（噴火の規模評価）。現地調査による噴出物量の調査はほとんど行うことができなかった。シナブン火山については、噴火地震・微動のエネルギーからブルカノ式噴火に伴う火山灰放出量とその時間推移を評価することができ、溶岩の噴出率低下の延長線上にあることが分かった。2014年1月のマグマ噴火開始以降、噴出率は指数関数的に減少した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

インドネシアの火山の活動から、火山活動推移モデルは以下のようにまとめられる。

1.噴火の前駆活動においては、地盤変動のみの活動から地盤変動に地震活動が加わる活動に推移する。火山構造性地震の発生は応力の増加による岩石のせん断破壊であり、非破壊性マグマ貫入から破壊性貫入へと進展したことを意味する。この推移は2010年メラピ火山噴火と2014年ケルト火山の噴火前駆期においてみられた。さらに、マグマが浅部まで上昇すると熱活動の活発化、火山ガス放出量の増加などが見られる。

2.マグマの貫入速度が大きいと、噴火発生前に単位体積当たりのマグマからの脱ガス量が小さくなるので、多量の揮発性成分を含んだマグマが上昇することになり、噴火はExplosiveになる。一方、貫入速度が小さいと溶岩ドーム形成のようなEffusiveな噴火となる。マグマの貫入速度は噴火様式を決定する

重要なパラメータである。この事例は、メラピ火山の地盤変動と地震活動により明らかにされた。

3.古い噴出物を排出したのち新鮮なマグマの噴出に至る噴火活動推移の典型的なものとして水蒸気噴火からマグマ噴火への推移がある。2013年9月のシナブンにおける水蒸気噴火と2013年12月以降の溶岩ドーム生成、また、2018年5月、6月の水蒸気噴火と8月以降の溶岩ドーム形成（2020年には別の場所にマグマが貫入）があげられる。水蒸気噴火は新鮮なマグマ物質を噴出しない噴火であり、駆動力が地下のマグマにあるとしてもその位置は深い。前駆する過程においては、火山構造性地震は深い場所のみにおいて発生する。水蒸気噴火が発生すると火道内を埋めていた古い噴出物が排出されるので、マグマ本体の上昇が可能となる。したがって、火山構造性地震の震源は浅い場所に移動する（図2）。マグマ噴火の活動が活発化すると応力が解放されるので、火山構造性地震の活動は著しく低下する。同様の古い噴出物を排出したのち新鮮なマグマの噴出に至る事例として、2010年メラピ火山噴火と2014年ケルト火山噴火があげられる。いずれの場合も古い噴出物とは、その前の噴火活動で形成された溶岩ドームであり、初期噴火で破壊された。その後、プリニー式噴火へ移行した。

4.マグマ噴火は揮発性成分が卓越する噴火から脱ガスマグマ物質が卓越する噴火へ推移するという開口した火道からの脱ガスプロセスを見ているものと考えてよい。典型的な噴火推移としてプリニー式噴火から火砕流発生、さらに溶岩流出への様式推移（桜島大正噴火など）があげられる。2014年2月11日ケルト火山噴火では22：50ごろにプリニー式噴火が発生したが、その後火砕流が発生した。溶岩流に至っていないのは、爆発的噴火でマグマを消費できたためであろう。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

火山噴火に前駆する活動と、噴火後の噴火活動推移の標準モデルを構築できた。

災害の軽減の観点からはハザードの種類と規模の予測が重要である。ハザードの種類は噴火様式によるので、噴火活動推移をモデル化することにより、火山災害推移を事前に検討することが可能となった。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・ 論文・報告書等

・ 学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

京都大学防災研究所火山活動研究センター

他機関との共同研究の有無：有

東京大学地震研究所

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：火山活動研究センター

電話：099-293-2058

e-mail：iguchi.masato.8m@kyoto-u.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：井口正人

所属：京都大学防災研究所

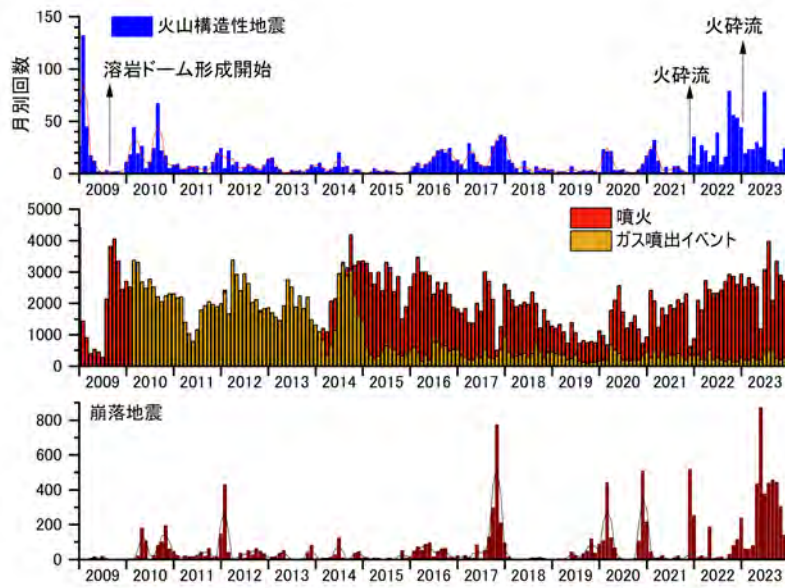


図1 スメル火山における火山性地震の月別発生回数の推移
 上段：火山構造成地震、中段：噴火地震、下段：崩落地震。

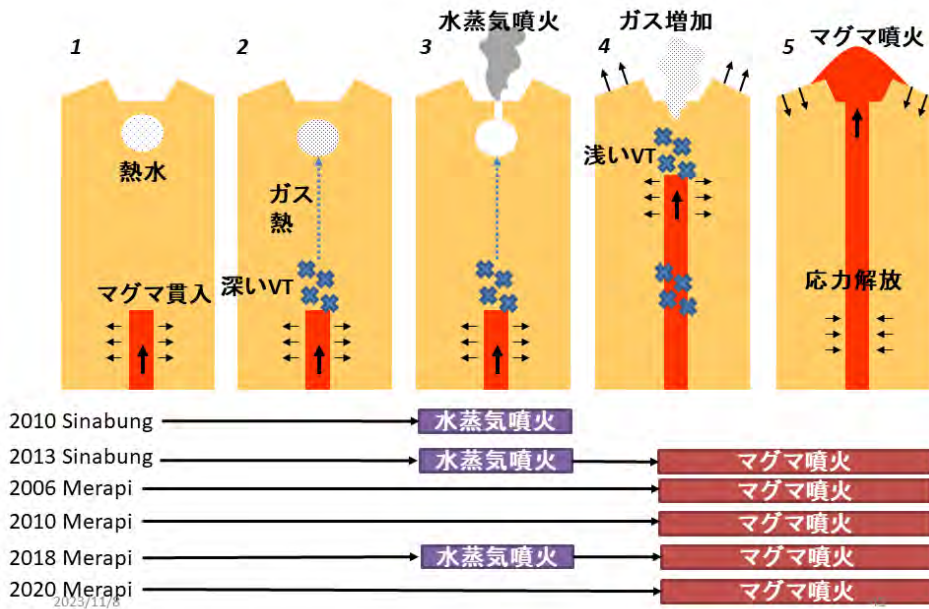


図2 火山構造成人の発生と水蒸気噴火からマグマ噴火への推移モデル

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

桜島火山における火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測のための総合的観測研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

火山

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

火山性流体の貫入・噴出の量やその時間変化率などに着目し、噴火先行現象、噴火発生、噴火規模・様式の変化など、先行現象から噴火終息までの一連の活動推移をモデル化する。現在のデータや試料だけでなく、過去のデータや資料・試料を解析・分析することで、大正噴火クラスの大規模噴火の事象分岐条件も含めた火山活動推移モデルの構築を進め、火山噴火予測手法の高度化をする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

桜島の火山活動推移モデルを構築し、事象分岐条件に各観測および調査から得られるパラメータを付与し、そして予測につなげるために、前計画研究課題「桜島火山におけるマグマ活動発展過程の研究」実施の観測の継続をする。5か年通じて以下の連続観測および調査を実施する。

- ・ 桜島および南九州における稠密連続地震観測
- ・ 桜島および南九州における稠密連続GNSS観測
- ・ 桜島における地殻変動連続観測

- ・MT連続観測
- ・絶対重力計もしくは超伝導重力計による重力連続観測
- ・光学式ディストロメータを用いた火山灰連続観測
- ・温泉ガス連続観測
- ・土壌二酸化炭素放出率観測
- ・火山灰の現地サンプリング調査と岩石組成および付着ガス成分分析
- ・二酸化硫黄放出率観測

また、5か年通じて以下の繰り返し観測を実施する。

- ・重力測定（毎年10月実施）
- ・水準測量（毎年11月実施）
- ・稠密GNSS観測（毎年11月実施）

そのほか、年度毎に以下の観測を実施する。

- ・令和元年（2019年）度においては、人工地震探査を12月第一週に実施する。桜島北部において2014年と2016年実施と同じ測線（爆破6カ所）にて、南側において2013年実施と同じ測線（爆破4カ所）にて探査を実施する。
- ・令和2年（2020年）度においては、鹿児島湾においてキャンペーン海底地震観測を実施する。
- ・令和3年（2021年）度においては、これまで継続してきた絶対重力連続観測から超伝導重力連続観測へ移行する。また、鹿児島湾においてキャンペーン海底地震観測を実施する。
- ・令和4年（2022年）度においては、2019年度実施の人工地震探査と同じ測線と爆破点に人工地震探査を行い、時間変化の検出を試みる。新しく開発する小型拡散放出二酸化炭素率測定装置の設置を行う。
- ・令和5年（2023年）度においては、鹿児島湾においてキャンペーン海底地震観測を実施する。拡散放出二酸化炭素率観測を実施する。

上記は観測実施項目であるが、1980年代からの過去データおよび、大正噴火および昭和噴火の当時の資料・試料を活用して、桜島の火山活動推移モデルを構築と事象分岐条件へのパラメータを付与に役立てる。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2023年2月8日に約5年ぶりに桜島の昭和火口において噴火が再開し、その後、時折噴火したが、2023年8月4日の噴火が直近で最後の昭和火口の噴火であった。昭和火口の噴火再開に前駆して、昭和火口からの噴気の増加と火山性微動の発生と振幅の増加が2023年1月から噴火再開の直前において見られた。噴火の前駆現象は火山活動推移の事象分岐判断において重要である。そこで、昭和火口の再噴火に先行した微動についてアレイ解析とスペクトル解析を行った。アレイ解析から微動は火口近傍の極浅部（海拔1.5 kmよりも浅い震源）からのS波か、表面波であり、微動源の位置は安定していることが分かった（図1）。そして、スペクトル解析から、(A) 短時間のうちに、モノクロ微動、複数の周波数ピークを持つ非モノクロ微動が独立に発生したこと。(B) 2023年1月15日から再噴火まで微動のピーク周波数は消長を繰り返しながらも約1.0, 1.3, 1.7 Hzで安定して継続した（図2）ことが分かった。Girona et al. (2019) のモデルを適用することで、火道の平均放出ガスフラックスの微小な変化によって特徴(A)を説明できることが分かった。また、それぞれのピーク周波数を励起する個別のガス透過キャップとガスポケットの組み合わせが3組存在し、それらが同時または個別に振動することで、特徴(B)が説明される。昭和火口の再噴火でこれらの組み合わせは消失し、一連の火山性微動は発生しなくなったと考えられる。

2014年8月から鹿児島湾奥部にて毎年の繰り返し海底地震観測を行ってきた。若尊カルデラ域の地震検知能力の向上し、若尊カルデラ域で年に2～3回前後の不規則かつ短時間の顕著なバースト活動とバックグラウンドの地震活動の存在が明らかになった。2022年6月～2023年8月においてバースト活動に比べて地震数は少ないがバックグラウンドよりも地震活動度が高かった（図3）。GEONETデータから当該領域の面積歪の変化は、始良カルデラ域の膨張を示すが、若尊カルデラ域の地震活動の変化に伴った面積歪の変化は見られなかった。若尊カルデラ域の地震のメカニズム解は、正断層型が卓越している（図4）。

噴火前傾斜変動の網羅的検知を昨年度から継続し、先行時間や継続時間が長い傾斜変動ほど振幅が

大きい傾向にあること、桜島火山においてはボアホールの観測点の方が地表の観測点よりも傾斜変動の検知率が高いこと明らかにした（図5）。

2017年11月13日南岳の爆発に伴う傾斜ひずみ変化について、開口割れ目モデルを用いた検討を昨年度から行っている。22:07~24:00の高免観測坑道を除く一連の傾斜ひずみ変化に対して2つの開口割れ目モデルを適用したところ、南岳直下から細長く火道状に伸びる割れ目と、深さ1.5 km付近に水平に北岳から南岳にまたがって広がるシル状の構造が得られ、前者が開口、後者が閉口となった。このモデルは高免観測坑道のひずみ変化は説明できないものの傾斜変化は説明することができる（図6）。

2023年11月に桜島内の水準測量路線（桜島西部山腹のハルタ山登山路線および北部山腹の北岳路線の2路線）において一等水準測量の繰返し観測を実施した。また、2021年度に新設した路線である鹿児島湾西部の大崎鼻GNSS点付設の水準点まで、および桜島北部の割石崎GNSS点付設の水準点までのそれぞれの枝線区間においても測量を行った。測量結果から、2022年11月（前回測量）~2023年11月の期間における地盤上下変動量を見積もった。得られた結果から、桜島北岸に近い北岳路線の水準点において、地盤隆起（桜島西岸のS.17を基準として最大約5.8 mm）が生じていることが確認された（図7）。この期間、桜島北部あるいは始良カルデラ地下のマグマ溜まりにおいてマグマの貯留が進行していることを示していると考えられる。一方で、桜島中央部に比較的近い水準点においては、僅かに地盤沈降であることが確認された。南岳直下のマグマ溜りにおいては、この期間、減圧傾向ではあるもののその減圧量はそれほど大きくはないことが示唆される。

2023年10月30日~11月8日に桜島火山およびその周辺でキャンペーン相対重力測定を実施した。今年度は重力変化の空間パターンをより詳細に把握するため、従来の測定点（19点）よりも多い計27点で測定を実施した。本測定で得られた重力値を1998年以降の重力データとともに解析したところ、桜島島内の多くの重力点で重力値が経年的に増加していることが分かった（図8）。この重力増加は、桜島中央部の海拔下2500 mにおける 6.0×10^9 kg/年の質量増加で説明できる（図9）。桜島南麓の有村観測坑道において10月に絶対重力観測を行い、前年同時期との比較で+5.4マイクロガルの重力増加が検出された（図10）。

ブルカノ式噴火に伴う岩塊最大到達距離から推定される放出初速度（ V_{\max} m/s）と、空振増圧相の一回積分最大値（ I_{\max} Pa・s）の関係を、一次元衝撃波管問題を応用した岩塊射出モデル（Alatorre-Ibargüengoitia et al., 2010）に基づいて検討した。図11aの分布は、 V_{\max} の増加には噴火前の過剰圧P（Pa）と岩塊射出時定数を反映する爆発深度d（m）双方の増大が対応することを表す。 I_{\max} に対する V_{\max} の上限式（ $V_{\max}=31I_{\max}^{0.14}$ ）は、岩塊射出モデルの運動方程式に基づく $V_{\max}=2.47P^{0.28}$ と換算される。この式の性質をWilson（1980）による P と V_{\max} の関係式によって検討すると、 V_{\max} の増加には P と揮発性成分量（ n は揮発性成分体積分率）の双方の増大に対応する（図11b）。つまり、 V_{\max} が大きいイベントでは、 P だけでなく揮発性成分による岩塊加速の寄与が大きいことを強く示唆する。

・ 計画期間中（令和元年度~5年度）の成果の概要

火山噴火に先行する傾斜変動を機械的に検知するアルゴリズムを開発した。同アルゴリズムに基づいて桜島を含む全国の活火山を対象に噴火前傾斜変動の有無を網羅的に調査した。その結果、多くの火山において半数程度の噴火に傾斜変動が先行することが明らかになった。桜島火山においては爆発的噴火の方が非爆発的噴火よりも傾斜変動の先行率がやや高いことを見出した。

2017年11月13日22:07に発生した南岳爆発に伴う傾斜ひずみ変化について検討を行ってきた。球状変動源に基づいた解析を行ったところ、南岳下だけでなく中長期的に膨張と収縮を繰り返すとされてきた北岳下の変動源も変動を引き起こしていることが分かった。しかしながら、球状変動源では説明しきれていない傾斜変化もあることから、開口割れ目モデルについても検討を行った。その結果、南岳直下から細長く火道状に伸びる割れ目と、深さ1.5 km付近に水平なシル状の構造が得られた。

桜島火山およびその周辺において、年2~3回の頻度でキャンペーン相対重力測定を実施した。従来の重力測定点は19点であったが、重力変化の空間パターンをより詳細に把握するため、2023年度からは計27点で測定を実施した。また、1990年代以降に測定されていた重力データを整理することで、1998年~2023年の長期にわたる重力時空間変化を把握できるようになった。その結果、この期間には桜島島内の重力値が最大+4.3 microGal/年の速度で経年的に増加していることが分かった。この重力増加は、桜島中央部の海拔下2500 mにおける 6.0×10^9 kg/年の質量増加で再現できる。

桜島有村観測坑道において1年ごとに絶対重力観測を実行した。また、2018-2019年には連続観測を行い、豪雨時の降水に伴う重力変動の傾向を把握することに成功した。噴火回数が低調であった本課題期間（2018年以降）においては、重力値は約3.4 microGal/年のペースで増加を続けていること

が分かった。マグマだまりの膨張・収縮といった力学的過程を考慮するだけではこの重力増を説明することはできない。そのため、重力観測はマグマの脱ガスに伴う密度増加などの物性的過程を捉えている可能性があることが分かった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

噴火災害誘因である火山岩塊の最大到達距離を空気振動から評価できる可能性を見出したことから、災害誘因予測への貢献している。始良カルデラおよび桜島の起震応力場の時間変化がみられないことから、ここ数年の桜島へのマグマ供給率はほぼ一定であったと推察される。桜島直下の圧力源は減圧傾向に引き続きあり、その一方で質量増加が継続していることから、噴火活動は引き続き脱ガス卓越が継続していることが明らかになった。

したがって、全体として噴火活動は低調で、安定したマグマ供給、深部マグマ停滞と脱ガスが卓越する一方で、間欠的なマグマ上昇があったと推察される。また、2023年2月から8月の昭和火口噴火の活動に前駆した2023年1月からの火口からの活発な噴気活動と顕著な火山性は火道浅部への新しいマグマ上昇と、ガスだまりの形成と振動を示唆し、そして噴火開始後に微動が止まったことからガス溜まりが破壊されたと解釈され、噴火事象分岐の理解が進んだ。このことから、火山活動推移モデルの構築と予測に対する重要な知見が得られたと言える。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

風間卓仁・大柳諒・山本圭吾・岡田和見・大島弘光・竹中悠亮・井口正人,2023,桜島火山における繰り返し相対重力測定(2022年10月および2023年2~3月),京都大学防災研究所年報,66B,67-75,査読無,謝辞有

Maeda, Y.,2023,A systematic survey for precursory tilt changes at all monitored eruptions in Japan,J. Volcanol. Geotherm. Res.,439,107831,doi:10.1016/j.jvolgeores.2023.107831,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

八木原 寛・仲谷幸浩・平野舟一郎・為栗 健・中道治久・井口正人,2023,繰り返し海底地震観測による桜島北方海域下の微小VT地震活動,日本火山学会2023年秋季大会,P14

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：火山：地震：DAS観測

概要：桜島一周ルートにてDistributed Acoustic Sensingによる地震観測を行った。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：鹿児島県鹿児島市桜島 31.567 130.6176

調査・観測期間：2023/11/20-2023/12/21

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地殻変動：水準測量

概要：

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：鹿児島県鹿児島市桜島 31.58983 130.60127

調査・観測期間：2023/11/6-2023/11/17

公開状況：公開留保中（協議のうえ共同研究として提供可）

項目：火山：地殻変動：重力測定

概要：キャンペーン相対重力観測

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：鹿児島県鹿児島市桜島 31.58983 130.60127

調査・観測期間：2023/10/30-2023/11/8

公開状況：公開留保中（協議のうえ共同研究として提供可）

項目：火山：地殻変動：重力測定

概要：絶対重力観測

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：鹿児島県鹿児島市有村 31.56006 130.67217

調査・観測期間：昨年度より継続-2023/10/31

公開状況：公開留保中（協議のうえ共同研究として提供可）

(11) 次期計画における課題名：

火山噴出物による災害の軽減のための総合的研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

中道治久（京都大学防災研究所）、井口正人（京都大学防災研究所）、為栗健（京都大学防災研究所）、山本圭吾（京都大学防災研究所）、大見士朗（京都大学防災研究所）、山田大志（京都大学防災研究所）

他機関との共同研究の有無：有

青山裕（北海道大学大学院理学研究院）、西村太志（東北大学大学院理学研究科）、山本希（東北大学大学院理学研究科）、太田雄策（東北大学大学院理学研究科）、森俊哉（東京大学大学院理学系研究科）、今西祐一（東京大学地震研究所）、大湊隆雄（東京大学地震研究所）、西山竜一（東京大学地震研究所）、野上健治（東京工業大学理学院）、神田径（東京工業大学理学院）、堀田耕平（富山大学都市デザイン学部）、前田裕太（名古屋大学大学院環境学研究科）、大倉敬宏（京都大学大学院理学研究科）、横尾亮彦（京都大学大学院理学研究科）、風間卓仁（京都大学大学院理学研究科）、松島健（九州大学大学院理学研究院）、相澤広記（九州大学大学院理学研究院）、中尾茂（鹿児島大学地震火山地域防災センター）、八木原寛（鹿児島大学地震火山地域防災センター）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：火山活動研究センター

電話：099-293-2058

e-mail：nakamiti@svo.dpri.kyoto-u.ac.jp

URL：http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/svo/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：中道治久

所属：京都大学防災研究所火山活動研究センター

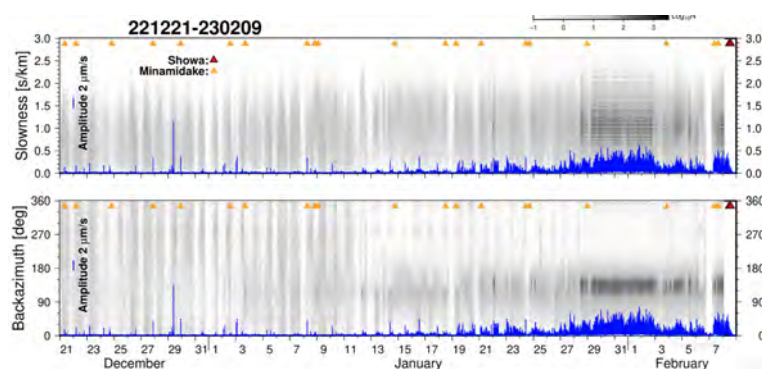


図 1

2022年12月21日から2023年2月7日までの地震計アレイ解析結果。センブランス値が0.45以上の時間窓の時間、スローネス、到来方向の頻度分布。昭和火口の噴火は2023年2月8日に開始。北から120°東の方向がアレイから火口の方向である。

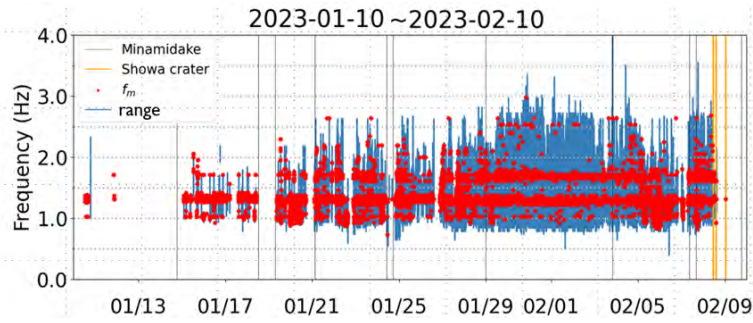


図 2

2023年1月10日から2月10日までのモノクロ微動のピーク周波数(f_m)と非モノクロ微動の周波数幅(range)の変化。●は f_m 、青い実線はrangeを示す。黒色、オレンジ色の縦実線はそれぞれ南岳山頂火口、昭和火口での噴火・爆発の日時を示す。

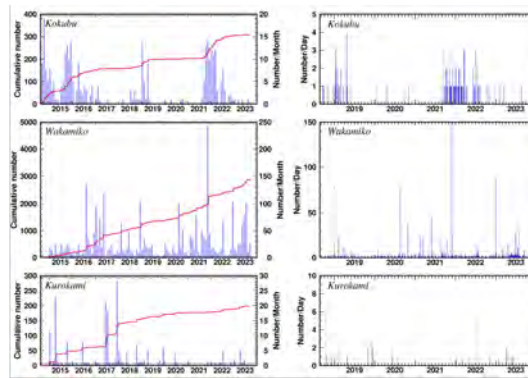


図 3

国分、若尊、黒神領域における地震の発生頻度

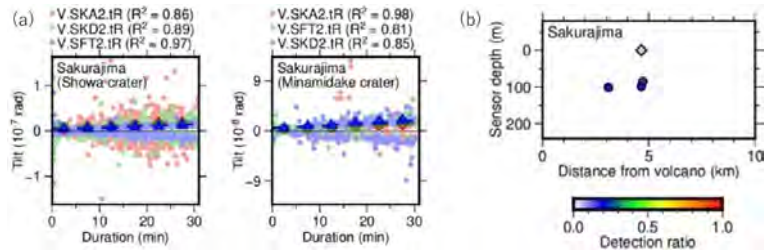


図 5

(a)傾斜変動の継続時間と振幅の関係、(b)観測点別の傾斜変動検知率 (Maeda, 2023)。

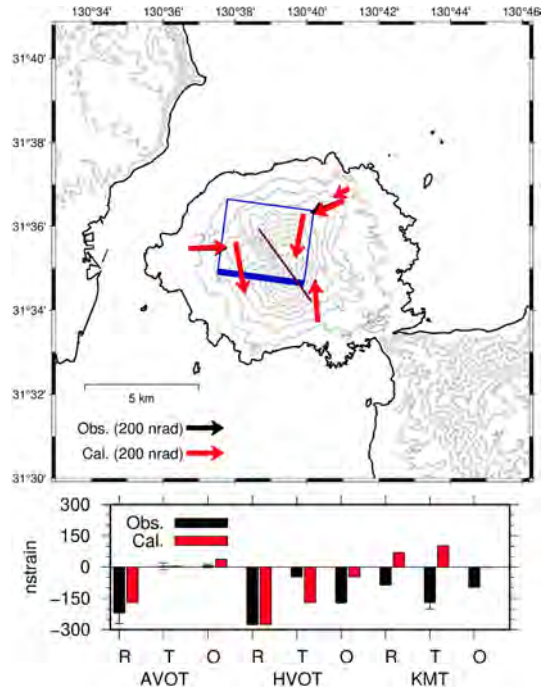


図 6

(上) 2017年11月13日22:07~24:00の傾斜ひずみ変化に対して得られた割れ目（茶色の線，下側が上端）とシル（青色の長方形，太線が上端）。ベクトルは黒が傾斜（沈降方向）の観測値、赤が計算値を示す。
 (下) ひずみの観測値（黒）と計算値（赤）の比較。

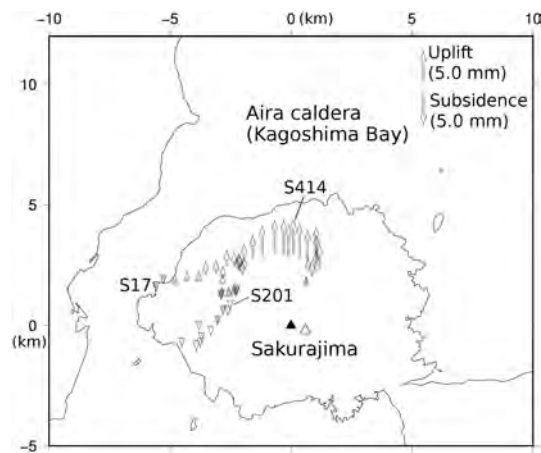


図 7

桜島西岸のS.17を基準点とした、2022年11月~2023年11月の期間の各水準点における地盤上下変動量。黒三角および白三角は、それぞれ南岳火口および昭和火口の位置を示す。

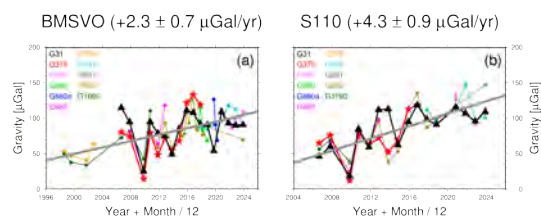


図 8

桜島中央部のBMSVO重力点およびS110重力点における重力時間変化。

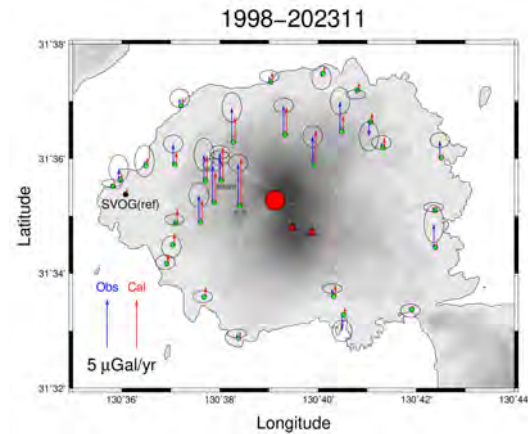


図 9

桜島島内の重力点における重力変化速度の空間分布、および推定された質量変動源の位置。

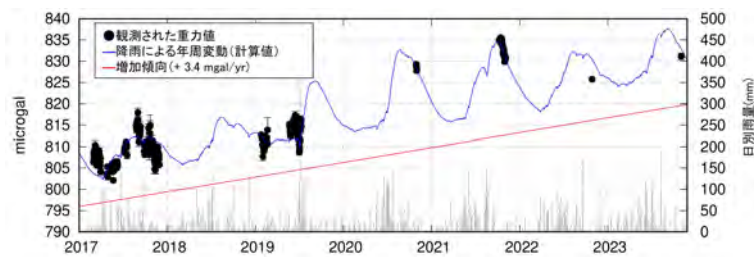


図 1 0

2017年から2023年にかけての有村観測坑道での絶対重力値の変動。降雨による年周変動に加えて、+3.4 microGal/年の重力増加傾向が見られた。

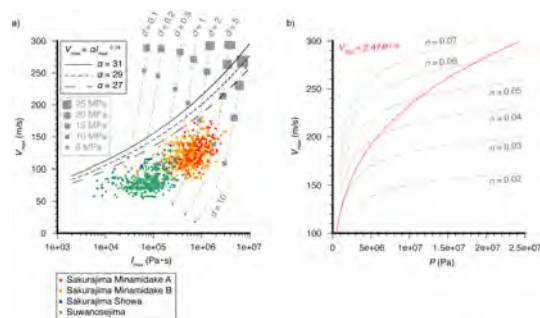


図 1 1

(a) 岩塊最大到達距離から換算される V_{max} と I_{max} の分布。灰色破線は岩塊射出モデル (Alatorre-Ibargüengoitia et al., 2010) から期待されるd毎の V_{max} と圧力積分の関係。(b) Wilson (1980)による岩塊放出モデル (点線) と (a)における I_{max} に対する V_{max} の上限式から期待される P と V_{max} の関係 (赤線)。

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

広帯域強震動予測の高度化に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - ア. 強震動の事前評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
 - ア. 地震動の即時予測手法

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
 - ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本研究においては、前計画において開始し進めてきた広帯域強震動予測手法の高精度化を継続する。震源モデルの高度化としては、広帯域地震波放射特性の再現を目標に、前計画で提案したプレート境界広帯域震源のプロトタイプモデルを実地震記録に適用してモデルの検証と改良を進める。また、同様の震源モデル化手法を内陸地殻内地震にも適用して、モデルの検証と改良を行う。地下構造モデルについては、周波数1Hzの地震動の再現を目標に、既往モデルに対して、中～大規模地震の実地震記録を対象とした地震動シミュレーションによる構造モデルの検証と改良を継続する。特に波形記録を用いたモデルの改良方法の確立を目指す。これらの実施により、より信頼度の高い強震動予測を実現することができる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度：プレート境界地震の広帯域震源モデル・プロトタイプの実地震記録評価への適用と問題点の整理。大阪盆地、奈良盆地等での地盤モデルの地震動応答特性評価。強震観測（中川低地、京都市内）の継続。

平成32年度：広帯域震源モデル・プロトタイプの改良、大阪盆地、奈良盆地等での地盤モデルの地震動応答特性評価継続。地震動再現性のよくない地域における微動・地震観測等の実施。強震観測（中川低地、京都市内）の継続。

平成33年度：プレート境界地震と内陸地殻内地震の震源スケーリング則や不均質性等の違いを考慮した、プレート境界地震の広帯域震源モデルを基礎とした内陸地殻内地震の広帯域震源モデルの開発。大阪盆地、奈良盆地等での地盤モデルの地震動応答特性評価継続。地震動再現性のよくない地域における微動・地震観測等の継続。強震観測（中川低地、京都市内）の継続。

平成34年度：内陸地殻内地震の広帯域震源モデル・プロトタイプの構築と実地震記録への適用による

問題点の整理（新規提案課題「断層破壊過程と極大強震動生成に関する研究」で得られた震源モデルに関する知見があればそれも考慮する）。大阪盆地、奈良盆地等での地震動再現性のよくない地域における微動・地震観測等の実施を踏まえた地盤構造モデル改良。強震観測（中川低地、京都市内）の継続。

平成35年度：プレート境界地震及び内陸地殻内地震の広帯域震源モデルの提案。大阪盆地、奈良盆地等の改良モデルの提案。強震観測（中川低地、京都市内）の継続。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

【自己相関関数による京都・奈良盆地深部地盤構造検証】

強震動予測の高精度化には、本課題で重視して継続的に取り組んできているように、三次元地盤構造モデルの高度化が不可欠である。地震記録を用いた地下構造探査手法として、観測波形の自己相関関数を用いる手法が国内外で利用されている。本研究では、京都盆地及び奈良盆地内を対象に、国立研究開発法人防災科学技術研究所、気象庁、京都市、京都府及び奈良県の強震観測点・震度観測点の波形記録を収集、整理、解析した。このうち、京都府と奈良県については、2022年12月までの震度計波形記録を収集・整理できたため、それらを使用した。京都市についても収集を継続している。収集した波形記録に対し、直達波部分のTransverse成分の自己相関関数を計算し、多数の記録の自己相関関数をスタックすることで得られる盆地基盤面での反射SH波の往復走時を読み取った。スタックにはPhase Weighted Stack法を用い、震央距離と震源深さ、入射角による地震記録選択条件を与えている。得られた反射SH波往復走時を用いて、奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測で更新された深部地盤構造モデルの検証並びにモデル改善が必要な箇所の検討を行った。その結果、奈良盆地の多くの地点では、観測往復走時と理論往復走時の差異は20%以内であるが、山科盆地と京都盆地の境界付近の狭窄部や基盤形状急変部などでは顕著な差異がみられ、より詳細な調査が必要と考えられる地点も見出された。次期計画期間中は、これらの地点で重点的に微動観測等を追加することで、モデルの改善を試みたい。また、平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査で地盤構造モデルが更新されている熊本県地域についても、同様に、地震記録の自己相関関数を用いた地盤構造モデル検証を進めた。

【地震動再現シミュレーションによる京都盆地深部地盤構造モデルの検証】

京都盆地の深部地盤構造モデルの地震波再現性能を検証すること、盆地の地震動応答を分析することを目的に、近傍で発生した中規模地震を対象に2Hzまでの地震動再現シミュレーションを行い、観測記録と比較した。

京都盆地は、東西約10km南北約25kmの大阪層群、段丘堆積物相当層、沖積層に埋積された堆積盆地である。盆地の地下の地質および地震波速度の構造については、京都市、京都府、研究機関、大学等により実施された活構造調査や地下構造調査によって集積されてきた。それらによると、堆積層の厚さは盆地中央部を北東-南西方向に延びる宇治川断層より北側では100～300m程度、南側では400～700m程度である。このような探査や各種観測によるデータを統合して、盆地の3次元地盤構造モデルが作られている。本研究では、2019～2021年度に実施された文部科学省委託研究『奈良盆地東縁断層帯における重点的な調査観測』で作成された3次元地盤構造モデルの京都盆地地域を用いた。

京都盆地の北西約15kmの亀岡盆地では、2022年3～6月に地震活動が活発になりマグニチュード4の地震が4回発生し、そのうち2回では最大震度4が計測された。本研究では、最大震度4を亀岡市、京都市で記録した3月31日のMw4.2の地震を対象とする。地震動シミュレーションにおいて、震源は点震源と仮定し、震源位置・発震時は気象庁一元化震源情報（深さ12.7km）を、メカニズム解は研究開発法人 防災科学技術研究所のF-netによるメカニズム解を用いた。震源時間関数の継続時間は、近傍の岩盤観測点の記録のパルス幅より0.4秒と見積もった。

地震動シミュレーションには、差分法（Pitarka, 1999）を用いた。最小S波速度は350m/sまで考慮し、堆積層中のグリッド間隔を25mとして、2 Hzまでを有効周波数とした。堆積層のQ値には、昨年度本課題で1～2Hzで0.15Vsという値を用いた。

計算結果を、国立研究開発法人防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET）及び基盤強震観測網（KiK-net）、大阪府、京都府および京都市の震度情報ネットワークシステム、関西地震観測研究協議会、京都大学防災研究所の強震記録と比較・検討した。0.1～2Hzの波形の比較では、観測記録が得られた地点のおよそ半数で、振幅レベル、後続波の波束の到来時刻などにおいて、良好な再現が得られ

た。0.1~1.0Hzでは、大多数の観測点で、良好な再現が得られた。しかし、大幅な過大評価・過小評価の地点もある。地盤構造の修正に資する情報を得るため、個々の観測点の波形を分析し観測と計算の波形の違いの原因を探った。KYTH08は、計算波動場では盆地縁で発生した表面波が重なり強め合っ形成された帯状の地域の中にあり最大速度も直達波部分ではなく表面波部分で達成されているが、数百m離れるとその帯の外になり波形としても最大振幅としても観測波形に近づく。これより、盆地縁部の形状のエラーが示唆された。KYTP16は京都盆地の西縁に近い観測点であるが、計算波形は盆地の縁の影響を強く受け盆地の縁の走向に沿った方向に震動方向が卓越している。しかし、観測波形は計算波形に見られるような極端な震動方向の偏向は見られないことから、盆地縁の位置に関して数百m程度のモデル化エラーがある可能性が考えられた。今後、その他の観測点についても観測波形と計算波形の違いの原因について考察を進め、地盤構造モデルの修正の情報を抽出したいと考えている。

【大阪盆地東部の表層地盤の表面波への影響評価】

大阪盆地東部地域において、3次元地盤構造モデル（Sekiguchi et al., 2016）を用いた地震動シミュレーションにより、遠地地震により盆地東縁で励起された表面波のモデリングを行った。表面波の到来時刻と振幅をモデル化することで、表層の厚さ50~250mの低速度層(250m/s)が影響を与えていることを示した。

【再現シミュレーション波の分離波動場による大阪盆地の地震動応答の分析】

2018年大阪府北部の地震について大阪盆地東部・奈良盆地・京都盆地南部を対象に実施した地震動シミュレーションの波動場を上林（2019）の手法でP、SV、SH波へ分離し、表面波の生成・伝播の様子を地震波タイプごとに調べた。また、分離の誤差についても検討した。

・計画期間中（令和元年度~5年度）の成果の概要

本課題では、広帯域強震動予測の高度化のため、強震動予測のための震源断層モデルや広帯域地震動特性に強く関係する浅部・深部地盤構造モデルの検証と改良することを目的としてきた。

これまで別研究プロジェクト等で構築してきた、大阪・京都・奈良盆地の地盤構造モデルに対して、対象地域の各機関の強震観測波形データを収集し、地震動シミュレーションを実施して観測記録と比較することにより、モデルの妥当性や改善点を見出してきた。また、強震観測記録の自己相関関数を用いて盆地基盤面と地表面でのS波多重反射相の検出を行って、モデルとの整合性と改良方針を示した。これらの分析はモデル構築時には陽には用いていないため、検証や改良につなげることができる。また、モデル構築時に用いられていない探査データを取り入れる方法を開発し、モデルの修正を行った。さらに、近江盆地南部の深部地盤構造モデルの構築も開始した。

静岡県及び北陸地域において強震記録を用いたスペクトルインバージョン法で、強震観測点のサイト増幅特性を求め、既往の地盤構造モデルの検証や浅部・深部のS波速度構造を推定した。また、函館平野の微動アレイ調査結果に基づいて構築された深部地盤構造モデルに対して地震動シミュレーションを行い、再現性を検討した。これらの分析調査を継続的に展開していくことにより、各地域の地盤構造モデルの検証・高度化につなげることが期待される。

広帯域強震動予測のための震源断層モデルパラメータ設定については、DPRI09で整理・分析された不均質震源断層モデルのすべり角のばらつきの情報を、今後活用していくことが期待される。

本課題では強震観測（中川低地、京都盆地）を継続しており、周辺の各機関の強震観測点のデータとともに盆地構造の分析に利用した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

強震動予測のための広帯域震源断層モデルパラメータのひとつとして重要なすべり角のばらつきを求めた。強震動予測に不可欠な地盤の地震応答については、日本の各地を対象にサイト増幅特性の解析や地盤構造のモデル化を展開した。特に、大阪、京都、奈良盆地の地盤構造モデルの高度化を実施した。また、地盤応答、地盤構造のデータを蓄積するため、強震観測（中川低地、京都市内）を継続して実施した。

本課題における既往地盤構造モデルの検証を通して、堆積盆地縁部などの基盤形状が大きく変化している場所の近くでは、地震動の再現性能が低くなりやすくなったため、そのような場所のモデルの精緻化に焦点を当てていきたい。また、既往観測データの少ない地域の観測も積極的に実施し、地盤構造モデルの高度化を着実に進めていきたい。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

浅野公之・岩田知孝・関口春子,2024,不均質震源断層モデルのすべり角のばらつき,地震第2
輯,76,287-294,doi:10.4294/zisin.2023-14,査読有,謝辞有

Oprsal, I., H. Sekiguchi, T. Iwata, and J. Burjanek,2023,Influence of low-velocity superficial layer
on long-period basin-induced surface waves in eastern Osaka basin,Earth Planets

Space,75,287-294,doi:10.1186/s40623-023-01804-9,査読有,謝辞有

関口春子・浅野公之・吉見雅行,2023,浅層ポーリングデータを用いた大阪盆地地盤構造モデルの修正,
京都大学防災研究所年報,66B,1-4,査読無,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

浅野公之・関口春子・岩田知孝,2023,強震記録の自己相関関数を用いた京都-奈良盆地深部地盤構造
モデルの検証,第16回日本地震工学シンポジウム,DDay1-G417-15

岩田知孝・浅野公之・宮本英,2023,能登半島北東部の群発地震によるK-NET正院の地震動特性と地下
構造,日本地震学会2023年秋季大会,S22-10

緒方夢顕・浅野公之・岩田知孝,2023,熊本県地域の強震記録のS波自己相関関数を用いた堆積層-基盤
岩速度境界面の検出,日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS09-20

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

広帯域強震動予測のための地盤構造のモデル化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

関口春子（京都大学防災研究所）,岩田知孝（京都大学防災研究所）,浅野公之（京都大学防災研究所）
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学防災研究所

電話：

e-mail：sekiguchi.haruko.6u@kyoto-u.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：関口春子

所属：京都大学防災研究所

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

断層破壊過程と極大強震動生成に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
ア. 強震動の事前評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
ア. 地震動の即時予測手法

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地表地震断層を伴う地震とそうでない地震の震源近傍強震動の特性が異なることが明確になっていることから、地表地震断層の有無による違いを踏まえ、国内外の大～巨大地震の震源域強震動特性と震源過程におけるその生成原因の関係を整理分析を継続し、将来発生する地震時の強震動予測のための震源モデル高度化に寄与する知見を得ることを目的とする。期間内に生じた大～巨大地震の強震記録を用いた震源インバージョンによる震源モデル推定や広帯域強震動シミュレーションによる強震動生成域モデルを構築し、既往震源スケーリング等と比較して、将来予測の震源断層モデルの高度化に資する。

（場合によっては）期間内に生じた地震による極大地震動特性解明のためのサイト特性推定を実施。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

2019年度：既往震源近傍強震記録と震源断層モデルの収集。観測点情報の収集。強震記録等を用いた地震の震源過程解析

2020年度：既往震源近傍強震記録の震源項の分離。観測点情報の収集継続。強震記録等を用いた地震の震源過程解析

2021年度：既往震源近傍強震記録の震源項の分離継続。地表地震断層を生じた地震と生じていない地震の震源近傍強震動記録の特性比較。運動学モデルシミュレーション。強震記録等を用いた地震の震源過程解析

2022年度：震源断層モデルに基づく運動学モデリングの検証。強震記録等を用いた地震の震源過程解析

2023年度：震源近傍強震動特性モデルの既往データによるモデルの検証と改良。強震記録等を用いた地震の震源過程解析

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

【令和6年能登半島地震で観測された強震動特性】

能登半島地震時には家屋等の被害が多数生じた珠洲市正院、穴水町、輪島市等においては、その地域内に強震観測点が設置されていた。これまでに公開されている波形データを過去の被害地震の強震記録と特徴の比較を行った。穴水町穴水（震度7相当）、珠洲市正院（震度6強）といった記録は、震度7となった1995年兵庫県南部地震時のJR鷹取や、2016年熊本地震時の西原村の記録に比べ、擬似速度応答スペクトルは周期1～3秒の周期帯で同等あるいはそれ以上の揺れであった。時刻歴波形で見ると、最大水平地動速度では後者が前者を上回るものの、震動継続時間においては、後者は10秒程度であるものの、前者は1m/sレベルで20-30秒も揺れていた。このような震動特性は、M7.6という大地震が直下で起きたことで、震源断層からの地震動が長く続いたとともに、それぞれ既往の我々の調査等から、周期1秒程度で揺れやすい性質をもっており、大振幅地震動により地盤の非線形化が起きて地盤震動の固有周期が伸びたことで、周期1～3秒の揺れが長時間続いたと考えることができる。引き続き、特別研究促進費（代表：平松良浩金沢大学教授）による調査研究とも連携することで、M7.6の震源破壊過程と能登半島周辺での強震動特性の関係について、分析やモデル化を継続していく必要がある。

【2023年5月5日能登半島北東部の地震M6.5の震源過程、強震動生成モデル】

地震活動が続く能登半島北部において2023年5月5日にM6.5の地震が発生し、珠洲市正院では震度6強を観測して、珠洲市市街地では建物倒壊が起きた。我々は2022年6月19日のM5.4の地震で震度6弱を記録した当該サイトを含めた市街地の数カ所において、微動アレイ観測を実施し、ポーリングデータなどと比較して、正院サイトは周期1秒くらいの地震動が増幅すること、また、この地域は珪藻質泥岩の上に10～数十mの沖積層が堆積しており、この浅部地盤構造が地震動増幅に寄与していることを明らかにしている。

M6.5の地震の震源過程については、能登半島周辺の強震波形（速度、0.1-1 Hz）を用い、マルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン法によって推定した。その結果、破壊開始点（約12 km）より北の浅部に向かって、主として破壊が進行したと推定された。すべり方向は逆断層すべりが卓越し、最大すべり量は約1.0 m、平均すべり量は約0.3 mと推定された。また、M6.5の地震の震源断層は、2022年6月19日のM5.9と同じ断層面（南東に下がる断層面）に載っており、2022年6月19日のM5.9の地震よりも浅い部分を破壊したことが示唆された。

M6.5の断層破壊過程モデルを参照し、震源近傍の観測点の広帯域シミュレーションに基づく強震動生成モデルを求めた。波形からは初期破壊過程があることがわかっていることから、震源から離れたところに強震動生成域の推定を行った。結果、震源より浅い場所に3km四方の強震動生成域をおくことで、広帯域波形の再現ができる。この位置は波形インバージョンによるすべりの大きい領域に対応している。

【不均質断層モデルのすべり角の特性化】

令和4年度に引き続き、国内の地震を対象とした不均質震源断層モデルのすべり角のバラツキに関する検討を継続した。個々の不均質震源断層モデルのすべり角の分布が正規分布に従っているかどうか、尖度や歪度を算出することで確認を行った。以上の成果を取りまとめ、査読論文として公表した。すべり角のばらつきの平均について得られた知見は、今後、震源断層を特定した強震動予測での震源モデル設定への活用が期待される。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本課題では、計画期間中に発生した顕著な地震の震源過程を、強震記録を用いて求め、その特徴をこれまでの解析で進めてきている強震動予測のための震源断層モデルの統計的特徴と比較することにより、モデル設定の妥当性やばらつきを評価するとともに、極大地震動の特徴について震源過程や地盤構造の観点から検討し、それらのモデルの高度化に必要な要素を取り出すことを目的としてきた。

前者においては、2018年北海道胆振東部の地震(M6.7)、2023年能登半島北部のM6.5の地震、そして令和6年（2024年）能登半島地震(M7.6)の分析を進めてきた。2018年北海道胆振東部の地震と2023年能登半島北部M6.5の地震については、強震記録をもちいた断層破壊過程を推定してすべりの特徴を分析するとともに、広帯域地震動シミュレーションにより、強震動生成域（SMGA）の位置を求め、従来の強震動予測のための震源断層モデルの考えが妥当であることを示した一方、通例の地

殻内地震より深い位置で起きた北海道胆振東部の地震は、応力降下量が大きく求められた。この応力降下量の深さ依存性は、静岡県及び北陸地方の強震観測網データに適用されたスペクトルインバージョン法を用いて推定された震源特性にもばらつきが大きいものの、見出すことができた。加えて地表地震断層を伴った2016年熊本地震(M7.3)の浅部のすべりの特徴と強震動への影響を知るため、震源断層が観測点近くに設定する必要がある場合の震源インバージョン法の改良を行った上で不均質すべりを求めたところ、浅部すべりのすべり速度関数は台形状となっていることがわかった。これらの知見は将来予測のための震源のモデル化には考慮していく必要があると考えられる。令和6年能登半島地震の震源過程については、今後の調査結果も含め、近年の観測網の中で生じたM7.6の大地震の震源特性、強震動特性を引き続き分析していく必要がある。

後者においては、2018年胆振東部の地震、2021年2月の福島沖の地震、2024年能登半島地震の震源近傍の大加速度、大速度に見舞われた観測点記録では、表層地盤の非線形効果による大加速度が抑えられる傾向や卓越周期の長周期化が起きていることがわかった。2024年能登半島地震では、微動や小地震での卓越周期が1秒程度である地点で長周期化が起きたことにより、一般家屋により厳しい周期の地震動が長時間続くことで被害が拡大したとも考えられる。こういった極大地震動の特性は、入力にあたる震源特性に加えて、地盤構造による増幅効果をより適切に見積もる必要があり、継続した課題と考えている。

強震動予測に必要な震源断層モデルパラメータ設定の中で、既往の不均質震源断層モデルから得られたすべり角のばらつきを、円周統計学に基づいて求めた。収集することのできた28地震の36震源モデルのすべり角の標準偏差の平均値は20度±5度となった。今後、DPRI08などで行っている広帯域強震動予測のための震源モデル化において、本研究の成果をもとにすべり角の揺らぎを与えることで、より現実的な震源モデルを準備することができると期待される。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

被害地震となった2023年5月能登半島の地震(M6.5)と2024年1月令和6年能登半島地震(M7.6)の強震記録を用いた震源過程を推定し、強震動生成メカニズムに関する知見を得た。破壊的強震動となった珠洲市正院、穴水町、輪島市等において、現時点までに公開されている強震記録を分析し、1995年兵庫県南部地震時に観測されたキラパルスよりも最大地動速度は小さいものの、長時間の断層破壊過程及び観測サイトの浅部地盤構造により、周期1～3秒の強震動が長時間続いたことが大きい建物被害につながったと考えられる。

次期研究計画においても、実際に発生した地震の断層破壊過程の詳細な分析や解析手法開発とともに、そこから得られた知見を取り入れることで、強震動予測手法の高度化を目指していくことが必要となる。特に、次期研究計画では、地殻構造や応力場の不均質性と破壊過程との関係などを重点的に調査し、災害誘因の事前評価としては重要な強震動予測のための震源モデル設定に必要な地震シナリオ想定に有用な知見を得たい。また、過去の地震の断層破壊過程の分析で得られた震源モデルから、平均的な地震像だけではなく、強震動予測に必要な各々の断層パラメータのばらつき(不確実性)を評価することのできる情報を抽出し、広帯域強震動予測に活用できる形で整理・提案することを目標としていく。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

・論文・報告書等

浅野公之・岩田知孝・関口春子,2024,不均質震源断層モデルのすべり角のばらつき,地震第2

輯,76,287-294,doi:10.4294/zisin.2023-14,査読有,謝辞有

岩田知孝,2023,観測地震動に学んだ,第51回地盤震動シンポジウム論文集,,35-42,査読無,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Iwata, T. and K. Asano,2023,Estimation of Rupture Velocities of the Amonos Segment during the 2023 South-Eastern Türkiye Earthquake of Mw 7.8,AGU 2023 Fall Meeting,S13C-0362.

Asano, K. and T. Iwata,2023,Rupture Process and Strong Ground Motions of an M6.5

Earthquake in a Long-lasting Earthquake Swarm in the Northeastern Noto Peninsula,

Japan,AGU 2023 Fall Meeting,S13D-0383

浅野公之・岩田知孝,2023,強震波形記録による2023年5月5日石川県能登地方の地震(M6.5)の震源

過程,日本地震学会2023年秋季大会,S22-08

岩田知孝・浅野公之・宮本英,2023,能登半島北東部の群発地震によるK-NET正院の地震動特性と地下構造,日本地震学会2023年秋季大会,S22-10

宮本 英・浅野公之・岩田知孝,2023,強震動生成メカニズムと動的パラメータとの関係ー平成28年熊本地震を例にー,日本地震学会2023年秋季大会,S15-09

浅野公之・岩田知孝・関口春子,2023,不均質震源断層モデルのすべり角のばらつきの特性化,日本地球惑星科学連合2023年大会,SCG60-P02

岩田知孝・浅野公之,2023,Strong Ground Motion Characteristics of the 2023 South-Eastern Turkey earthquake of Mw 7.8,日本地球惑星科学連合2023年大会,SCG60-02

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

DPRI05 断層破壊過程の解明と強震動予測に関する研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

岩田知孝(京都大学防災研究所),浅野公之(京都大学防災研究所),関口春子(京都大学防災研究所)
他機関との共同研究の有無:無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等:京都大学防災研究所地震災害研究部門強震動研究分野

電話:

e-mail:

URL:<http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

(14) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:岩田知孝

所属:京都大学防災研究所

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

火山地域を含む地震地すべり発生場の評価と斜面における強震動及び不安定化の事前予測手法の展開

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地震動に伴って発生する地すべり現象の発生ポテンシャル評価と事前予測手法のさらなる高度化を進めるため、次の5ヶ年においては、以下の事柄を明らかにする。本研究では、地域的多様性を考慮した災害素因に関する研究（サブテーマ1）、観測による災害誘因メカニズムの検討（サブテーマ2）、阿蘇地域に特化した研究（サブテーマ3）の3つのサブテーマをセットとして推進する。

1) 重力変形斜面において、地震によって崩壊しうる斜面に特徴的な地形と地質構造を現地踏査によって明らかにする。また、既往災害を例とした複数のモデル化を行い、それらを標本として「危険な斜面」をあらためて再定義し、危険箇所の抽出を行う。特に南海トラフ巨大地震時の事例を対象とする。

2) すべり面となりうる降下火砕物の特徴をもとに、地震時に崩壊する危険性の高い降下火砕物の空間分布を、噴火史や給源の位置から推定する。

3) すべり面と想定される層準や移動土塊から試料を採取し、物理特性や動的なせん断挙動を計測する。さらに、崩土の移動特性を把握するため、流動特性をリングせん断試験機によって調べる。

4) 斜面における地震観測について、多点稠密な地震観測・微動観測へと拡張し、地下水圧や傾斜・ひずみ等の斜面の変形に関する観測も新たに実施することで、斜面内での地震動の特徴、ばらつきを

評価するとともに、揺れの特徴や大きさと、地下水の変動量、斜面の永久変形量の関係を明らかにする。

5) 過去の多数の災害事例についてまとめた啓蒙書を出版する。災害が発生していない（未災の）段階で、住民に読んでもらい、将来被りうる災害について身近に考える具体的な材料とすることで、大都市域の盛土斜面をフィールドとして、社会学的な見地から住民が自らのリスクを認識する手法を開発する。

6) 特に、阿蘇地域において、熊本地震時の未崩壊斜面においてボーリング調査、ボーリング試料の土質試験、ボーリング坑内での物理観測を実施して、強震動による地すべり現象発生のポテンシャルを評価する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度（令和1年度）においては、南海トラフ巨大地震をターゲットとし、主に四国山地および沿岸部の急峻斜面において、過去に発生した地震時の重力変形斜面での崩壊事例を収集し、周辺の非崩壊斜面と対比しつつ、崩壊した斜面の地質構造の特徴を抽出する。大規模崩壊の痕跡、重力変形斜面、堰止め湖などの痕跡をGIS上で抽出し、地質・地形調査を行うとともに重点調査箇所の設定を行う。

降下火砕物が厚く覆う東北地方や関東地方を広く調査対象地域として、下記の検討を進める。現地踏査や既存のボーリングデータの解析により、すべり面となる層準を探る。

重力変形斜面や海岸地すべり、盛土斜面などいくつかのタイプの斜面における地震観測網を拡充し、多点稠密な地震観測を展開する（令和5年度まで）。

火山研究センター斜面（高野尾羽溶岩ドーム）のボアホールにおいて傾斜計を設置し観測を開始する。また、GPS観測を継続する。また、高野台地すべりにおけるすべり面近傍のテフラや風化軽石層をサンプリングし、リングせん断実験をおこなうことにより、地震時のせん断挙動を明らかにする。

令和2年度においては、前年までに抽出した斜面について地質構造データを取得すると共にこれらの崩壊について前兆となる地形が存在していたかどうかを議論する。さらに崩壊が繰り返し発生している地域の岩盤劣化プロセスを、必要に応じて実施する地質調査、微地形調査、物理探査、掘削調査などから得られる試料の分析からモデル化し、予想される劣化プロセスとその周辺地形から崩壊危険場および危険範囲の分析を行う（令和4年度まで）。また、降下火砕物の空間分布を推定する方法を模索する。

適宜、地質調査結果に基づいて土質試験を実施し、すべり面の物理特性や動的なせん断挙動、流動特性を調べる（令和4年度まで）。

引き続き多点稠密な地震観測を展開する。また、地下水圧や傾斜・ひずみ等の斜面の変形に関する観測も新たに実施する。さらに、観測記録を解析し、斜面内での地震動の特徴、ばらつきを評価する（令和4年度まで）。

住民との協働イベントの準備を開始する。

火山研究センター斜面では、傾斜観測、および、GPS観測を継続する。また、京都大学火山研究センター斜面、烏帽子岳や長野地区周辺における、2016年熊本地震時に崩壊しなかった斜面でボーリング候補地を選定する。

令和3年度においては、重力変形斜面で地質調査を継続する。また、降下火砕物の層準の空間分布を推定する方法を模索し、噴火史や給源の位置からその分布が推定可能か議論する。適宜、土質試験を実施する。

引き続き地震等の観測と解析をおこない、斜面内での地震動の特徴、ばらつきを評価する。

住民との協働イベントを実施する。

火山研究センター斜面では、傾斜観測、および、GPS観測を継続する。ボーリング掘削を実施し、地質層序を明らかにするとともに、ボーリング坑内での地震動や水圧などの連続観測を実施する。ここで採取されるコアに対しても土質試験を行う。

令和4年度においては、重力変形斜面で地質調査、降下火砕物の分布推定、土質試験を継続する。

地震等の観測を継続する。地下水の変動や斜面の永久変形を引き起こしたイベントについて、その時の地震動記録とともに整理する。

必要に応じて、住民との協働イベントを再度実施する。

火山研究センター斜面では、ボーリング坑内での地震動や水圧、傾斜の観測、および、GPS観測を継続する。また、コアに対して土質試験を行う。

令和5年度においては、四国地域の調査においては、これまでに得られたデータの統合を行い、より有用なハザードマップの作成を行う。火山地域においては、降下火砕物の層準の空間分布から地震動によって崩壊しうる斜面のマッピングが可能か議論する。その際、土質試験の結果を解釈にフィードバックする。

変形と地震動を比較することで、斜面変状にどのような地震動が影響を与えるかの評価をおこない、どのような地盤／斜面がどのような揺れでどの程度塑性化するか、斜面が不安定化した際にどの程度の永久的な変形が残るかを、観測から明らかにした斜面内の地震動のばらつきを参照しながら検討する。

協働イベントの結果を検討する。

火山研究センター斜面では、土質試験結果や、ボアホール坑内観測結果に基づき、すべり面の地震動応答特性（間隙水圧変化や斜面の変形）を明らかにする。そして、南海トラフ巨大地震により誘発される地すべりのポテンシャルを評価する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

崩壊発生場の抽出に関する研究として下記の2点を実施した。まず、四国・九州内における過去の災害履歴を検討した結果、付加体域内に分布する砂岩領域において地すべり・深層崩壊が多発していることが判明した。砂岩が顕著に崩壊を発生させることはこれまで知られていなかったが、特に砂岩地域の中でもメランジュと呼ばれる変形帯の砂岩は深部まで亀裂が形成されており、さらには断層破碎作用によって中小角礫化している場所も分布していることが明らかになった。また、東京都目黒区の谷埋め盛土において、盛土の安定性評価の基本情報を非破壊で抽出できるか検討するため、谷埋め盛土を横切る2測線において約10 m 間隔の稠密微動観測を実施した。その結果、旧谷筋と地山でH/Vスペクトル比の卓越周波数および形状に違いがあることが分かった。一方、卓越周波数から推定されたS波の多重反射が起こっている深度は盛土の層厚よりも数 m 程度大きくなり、旧河川の沖積層の影響も含んでH/Vスペクトル比の卓越周波数が形成されていることが示唆された。

さらに、崩壊発生メカニズムに関する研究として下記の2点を実施した。2022年12月31日に融雪による間隙水圧の上昇で発生したと考えられる山形県鶴岡市の斜面崩壊について、2019年6月18日の山形県沖の地震時に崩壊しなかった理由について現場で採取した試料に対してリングせん断試験を実施することで明らかにした。また、高知県大豊町と北海道釧路町においてそれぞれ5-20 m間隔で複数の地震計を設置する超稠密地震計アレイを構築し、地すべり内での地震動の多様性の特徴を観測から明らかにした。同じ地すべり内であってもある閾値を超えた高周波数帯では観測点固有の増幅を示すことがわかり、従来の地震地すべりの安定計算について高度化できる可能性が示唆された。令和3年度に設営した火山地域の斜面における傾斜計・間隙水圧計・インターバルカメラの観測を継続し、地震から7-8年経過した斜面の変形、および、降雨イベントに対する斜面の水文応答について事例を収集した。

2023年トルコ・シリア地震、2023年5月石川県能登地方の地震、令和6年能登半島地震の現地調査を実施した。2023年トルコ・シリア地震においては再活動型地すべりの拡大などいくつかの型に斜面崩壊が分類できることが分かった。令和5年5月に発生した能登半島地震においては、国土地理院の干渉SAR観測・解析の結果を元に現地調査を実施し、2箇所で低角度で小変位の地すべりが発生していることを確認した。令和6年能登半島地震においては、地すべり地形が同定される斜面や谷埋め盛土の谷頭で大規模崩壊が発生していることが分かった。また、大規模崩壊を起した自然斜面では、崩壊物の流動性が非常に高く、長距離流走していることが見られた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

研究はおおむね計画通りに進行した。

崩壊発生場の抽出に関する成果として、主として南海トラフ巨大地震時の深層崩壊を念頭に置き、過去の斜面崩壊に共通する地質的特徴の洗い出し、高密度航空レーザーデータや国土地理院による干渉SAR解析画像を用いた危険斜面の抽出、地震時に斜面崩壊を発生しうるテフラの分布図（東日本版）の作成をおこなった。

また、崩壊発生メカニズムに関する成果として、地すべり地の空間的に多様な地震動特性の抽出、地すべり変位の地震直前の安全率依存性、盛土材質による間隙水圧応答特性の違い、粘土鉱物ハロイサイトの構造の違いとせん断特性などについて明らかにした。これらのことから、現場安全率や現場地震動を考慮した斜面安定計算手法や地震時の斜面変位の見積もり手法について高度化を進める見通

しを得た。

さらに、地震地すべりの先行降雨の影響を見積もるため、および、強震後の長期的な斜面の変形を明らかにするため、傾斜計・間隙水圧計・インターバルカメラを2016年熊本地震で崩壊した熊本県南阿蘇村のテフラ斜面上方に設置し、令和3年度から観測を継続した。その結果、年間0.005度程度の傾斜変化を伴う定常的な変形が現在も進行していることを確認し、さまざまな降水イベントに対する土壌水分の時間変化を観測できた。地震後の長期的な斜面変形についての知見や先行降雨が地震時地すべりに与える影響を見積もるための基礎情報を得た。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本課題は地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法について高度化を目指すものであるが、斜面崩壊が発生しうる危険斜面の特徴を新たに抽出することによってハザードマップの高精度化に寄与し、地震時の斜面の挙動について地震観測、土質実験などから明らかにすることで、斜面の安定計算に対して新たな視点を提示した。今後、この知見を活用し、具体的なマップの作成や高度化された安定計算手法の開発を進めていくことが必要である。また、火山噴出物による災害誘因の事前評価手法に対しても、本課題で得たテフラの地すべりに関する知見を活用することで、地震時崩壊の事前予測に貢献できる。さらに、本課題では、総合的研究が扱う南海トラフ沿いの巨大地震、首都直下地震、千島海溝沿いの巨大地震で被害が想定されるいずれの地域においても調査を実施し、知見を得ている。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

山崎新太郎,2024,国土地理院・干渉SAR時系列解析結果を用いた四国山地の斜面変動推定領域の抽出,日本地すべり学会誌,査読有,謝辞有

山崎新太郎・渡邊達也,2023,砂岩の風化した断層破碎帯を素因とする破壊的流動性崩壊,日本地すべり学会誌,60,6,doi:10.3313/jls.60.274,査読有,謝辞有

永田秀尚・山崎新太郎,2023,付加体に発達するスラストをすべり面とする熊本県宮目木谷地すべりと2020年7月豪雨による崩壊,日本地すべり学会誌,60,6,doi:10.3313/jls.60.259,査読有,謝辞無

荒井紀之・山崎新太郎・土井一生,2023,三波川帯における深層崩壊斜面の地震動計測－高知県大豊町トウジ山の地すべりを事例として－,日本地すべり学会誌,60,6,doi:10.3313/jls.60.265,査読有,謝辞有

土井一生・釜井俊孝,2023,谷埋め盛土における地震時の過剰間隙水圧の振る舞い－横浜市内における観測データからの結果－,日本地すべり学会誌,60,2,doi:10.3313/jls.60.72,査読有,謝辞有

大澤光・土佐信一・松浦純生・柴崎達也・土井一生・岡本隆,2024,大変位高速地すべりのための高分解観測システムの開発とその観測事例,日本地すべり学会誌,査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

山崎新太郎,2023,特徴的な変形作用を受けた結晶片岩で発生する四国山地の深層崩壊,日本地球惑星科学連合2023年大会,HDS10-03

山崎新太郎,2023,砂岩の変形と風化がもたらした深層崩壊の集中的発生場,日本地質学会第130年学術大会,G3-O-1

山崎新太郎,2023,四国山地の斜面災害発生場の特徴と徳島県・有瀬地すべりに関して,砂防学会中四国支部2023年シンポジウム

山崎新太郎,2023,付加体メランジュの砂岩地域における深層崩壊の多発,日本地すべり学会第62回研究発表会,2-5

土井一生・松浦純生・大澤光・岡本隆・柴崎達也・土佐信一,2023,稠密地震観測から推定される地すべり内の地震波伝播の不均質性(その2),Japan Geoscience Union Meeting 2023,SSS07-P02

王功輝・巫昇山・土井一生・古谷元・渡部直喜,2023,On the initiation and movement of a deep-seated bedrock landslide triggered by the 2018 Hokkaido Eastern Iwate Earthquake,Japan Geoscience Union Meeting 2023,HDS05-P19

大澤光・土井一生・荒井紀之・東良慶・渡壁卓磨・山川陽祐,2023,線状凹地を有する地すべり地における地盤構造の推定,Japan Geoscience Union Meeting 2023,HDS10-02

土井一生・釜井俊孝,2023,谷埋め盛土における稠密常時微動観測,(公社)日本地すべり学会第62回

(2023年度) 研究発表会,2-8

G. Wang, S. Wu, I. Doi, G. Furuya, N. Watanabe,2023,A translational deep-seated bedrock landslide triggered by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake,XIV IAEG Congress 2023,B621

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：地震：地盤：微動探査・弾性波探査・速度検層
概要：谷埋め盛土において稠密常時微動探査をおこなった
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：東京都目黒区
調査・観測期間：2023/3/24-2023/3/24
公開状況：

項目：地震：地震：短周期地震観測
概要：斜面の地震動と変形を計測する
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：高知県大豊町
調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定
公開状況：

項目：地震：地震：短周期地震観測
概要：斜面の地震動を計測する
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：奈良県五條市
調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定
公開状況：

項目：地震：地震：短周期地震観測
概要：斜面の地震動や傾斜、変形を計測する
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：北海道釧路町
調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定
公開状況：

項目：地震：地震：強震動地震観測
概要：斜面の地震動を計測する
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：北海道根室市
調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定
公開状況：

項目：地震：地震：短周期地震観測
概要：斜面の地震動を計測する
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：愛媛県久万高原町
調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定
公開状況：

項目：：斜面の総合計測
概要：斜面の傾斜、水分量、水圧を計測する。
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：熊本県南阿蘇村
調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：

(11) 次期計画における課題名：

地震時地すべりの準備過程から発生後の災害に至るまでの総合的な事前評価手法の高度化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

土井一生（京都大学防災研究所 ※総括、サブテーマ2（主査）、サブテーマ3）、王功輝（京都大学防災研究所 ※サブテーマ1、サブテーマ3、サブテーマ2）、山崎新太郎（京都大学防災研究所 ※サブテーマ1）、松四雄騎（京都大学防災研究所 ※サブテーマ1）

他機関との共同研究の有無：有

千木良雅弘（深田地質研究所 ※サブテーマ1（主査））、大倉敬宏（京都大学大学院理学研究科 ※サブテーマ3（主査））、西山賢一（徳島大学 ※サブテーマ1）、釜井俊孝（所属無 ※サブテーマ2）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学防災研究所

電話：0774-38-4113

e-mail：doi.issei.5e@kyoto-u.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：土井一生

所属：京都大学防災研究所

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

火砕流の発生と流下予測

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

噴火に先行する地盤変動，地震活動，火山ガス放出量などのうち，火砕流発生の予測を可能とするパラメータを抽出する．また，過去の火砕流を伴った噴火の再解析を行い，流下距離からシミュレーションにより火砕流の体積を逆算し，噴火に伴う地盤収縮量から求められる噴出物量と比較することにより火砕流配分比を決定する．最終的には，配分比に基づき火砕流が流下する流域ごとに，先行地盤膨張量と火砕流堆積量，流下距離の関係を示した火砕流ハザードマップを作成し，地盤変動のリアルタイム処理結果と結合することにより，オンラインハザードマップのプロトタイプを試作する．

(7) 本課題の5か年計画の概要：

2019年度においては，過去の火砕流を伴った噴火に前駆する地震，地盤変動，火山ガス放出量などについて再解析を行い，火砕流が発生するときの条件を抽出する．過去の火砕流について流下距離からシミュレーション・フォワードモデリングにより火砕流の量を推定する．降下火山灰の量の把握を含め，火砕流の堆積量を把握するための観測体制を強化する．

2020年度においては，前年度の計画を引き続き実施し，過去の噴火と新たに観測された多くの事例について噴火に伴う地盤収縮量から求められる噴出物量と比較することにより総噴出物量に占める火砕流への配分比を決定する．降下火山灰量を非火砕流により上方へ噴出した噴出物量とし，降下火山灰量を差し引くことにより，火砕流配分比を決定することも試みる．

2021年度においては，火砕流配分比に基づき，桜島の流域ごとに，先行地盤膨張量と火砕流堆積量，流下距離の関係を示した火砕流ハザードマップを作成する．火砕流ハザードマップのセミナーを実施する．

2022年度においては，実際に発生した火砕流の流下範囲と火砕流ハザードマップを比較することに

より、シミュレーション結果を検討し、必要に応じてシミュレーションパラメータのチューニングを行う。火砕流ハザードマップのセミナーを実施する。

2023年度においては、先行する地盤膨張量はオンラインで出力されるデータであり、このデータを入力条件としたオンラインハザードマップを試作する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

昨年度において、地盤変動、火山性地震、空気振動、火山ガス、映像等の観測データから火砕流発生に関わる物理パラメータを見出し、特に地盤変動と火山性地震の前兆群発活動の時間変化から火砕流の発生危険度をリアルタイム判定するロジックを作成した。今年度は過去の火砕流発生時の前駆現象から危険度を判定するパラメータのチューニングを行い、より適切な火砕流発生危険度を判定するロジックに改良を行った。

火砕流の流下距離の推定には事前の膨張量を噴出物量に置き替えて流下距離の予測を行うが、その際に噴出物量のうち火砕流となる噴出物の配分比を推定する必要がある。本来は気象レーダーや映像記録から火砕流となる配分比を予測する予定であったが、本研究期間において顕著な火砕流を伴う噴火が発生しなかったため、2018年に南岳山頂火口で発生した火砕流の観測データから火砕流となる噴出物の配分比を検討した。地盤変動から推定された噴出物量は28万立方mであり、流下した火砕流の距離は1.3kmであった。火砕流の流下シミュレーションを行い、実際に火砕流が流下した方向に1.3km流下させるには噴出物量は10万立方mでよいことから、噴出物のうち火砕流となる割合は0.3程度であることが推定された。

火砕流の発生危険度および流下予測をリアルタイムに判定し描画するシステムの構築を行ってきた。発生危険度については前駆する群発地震活動と地盤変動の膨張・停滞の変化から危険度を上げて危険度を色表示で示し、地盤変動膨張量からその時点で噴火が発生すると火砕流としてどの程度流下するかをリアルタイム表示するシステムを作成している。現在、発生危険度と推定される火砕流流下距離を描画する画面のチューニングを行っている。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

火砕流の発生予測に関して、地盤変動、火山性地震、空気振動、火山ガス、映像等の観測データを収集し、火砕流発生に関わる物理パラメータを明らかにした。火砕流を伴う噴火は長期的に収縮傾向の脱ガスが進んでいる際に発生し、噴火直前に見られる地盤変動の膨張時間、前駆地震の発生頻度と振幅の上昇から火砕流の発生危険度のリアルタイム予測の検討を行った。火砕流を伴う噴火に見られる前駆現象の特徴から火砕流の発生危険度判定を以下のように行った。

- ・中長期的な地盤変動データにおいて収縮かどうかの判定を行い収縮期であればレベルを1にする
- ・地盤変動で膨張（伸縮計記録で10nstrain以上の伸張）があり $5 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 以上の振幅の地震が5回発生すればレベルを2にする
- ・地盤変動の膨張が1分値で前5分平均の1.15以下が10分継続し停滞となったらレベルを3にする
- ・地震の最大振幅が4回以上更新されたらレベルを4にする

それぞれのレベルで72時間以上変化がない場合は判定をリセットする。上記の判定により、2010年以降の火砕流28例のうち、発生時に20例がレベル4、6例がレベル3と判定された。ただし、火砕流を伴わない噴火でも52例がレベル4まで上がることからさらなるパラメータのチューニングが必要ではあるが、火砕流の発生危険度を前駆現象からレベル化できた。

火砕流の流下距離の推定には事前の膨張量を噴出物量に置き替えて流下距離の予測を行うが、その際に噴出物量のうち火砕流となる配分比を推定する必要がある。本来は気象レーダーや映像記録から火砕流となる配分比を予測する予定であったが、本研究期間において顕著な火砕流を伴う噴火が発生しなかったため、2018年に南岳山頂火口で発生した火砕流の観測データから火砕流となる噴出物の配分比を検討した。地盤変動から推定された噴出物量は28万立方mであり、流下した火砕流の距離は1.3kmであった。火砕流の流下シミュレーションを行い、実際に火砕流が流下した方向に1.3km流下させるには噴出物量は10万立方mでよいことから、噴出物のうち火砕流となる割合は0.3程度であることが推定された。

火砕流の発生危険度および流下予測をリアルタイムに判定し描画するシステムの構築を行ってきた。発生危険度については前駆する群発地震活動と地盤変動の膨張・停滞の変化から危険度を上げて危険度を色表示で示し、地盤変動膨張量からその時点で噴火が発生すると火砕流としてどの程度流下する

かをリアルタイム表示するシステムを作成している。現在、発生危険度と推定される火砕流流下距離を描画する画面のチューニングを行っている。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

火砕流は高温の火砕物や火山ガスが山腹斜面を高速で流れ下るもので、火山噴火の中で最も危険な現象の一つであり、火山防災上、その発生予測は必要不可欠である。今年度において観測された前駆現象から火砕流の発生危険度判定の精度が上がり、シミュレーションによる火砕流の流下距離予測と組み合わせて火砕流のリアルタイムハザードマップ描画がほぼ完成した。このことは火山噴出物による災害誘因の即時予測手法の開発に貢献している。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

為栗健・井口正人,2023,火砕流のリアルタイム流下予測,令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会

為栗健,2023,火砕流のリアルタイム予測とハザードマップの作成,2023年度桜島大規模火山噴火総合研究グループ研究集会

為栗健,2024,火砕流の発生と流下予測,2023年度災害誘因評価・即時予測部会研究集会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

火山噴出物の流下による災害のリアルタイムハザードマップの構築

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

為栗健（京都大学防災研究所）,井口正人（京都大学防災研究所）,中道治久（京都大学防災研究所）,山本圭吾（京都大学防災研究所）

他機関との共同研究の有無：有

太田雄策（東北大学大学院理学研究科）,眞木雅之（鹿児島大学地震火山地域防災センター）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：火山活動研究センター

電話：099-293-2058

e-mail：tameguri.takeshi.2u@kyoto-u.ac.jp

URL：http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/svo/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：為栗健

所属：京都大学防災研究所火山活動研究センター

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

噴火後の土石流および泥流の発生に関する観測と予測手法の開発

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

- (3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究
火山

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

火山防災上重要な2つの現象、すなわち火山灰堆積後の降雨による土石流・泥流の発生および噴火時の融雪型火山泥流の発生に関して、その危険度や規模を予測する手法の確立を目的として、桜島火山、焼岳火山、メラピ火山、シナブン火山等の火山を対象に観測と予測モデル開発を行う。噴火後の土石流・泥流の発生の危険度や規模の予測については、火山灰堆積分布および堆積物の物性の時間変化による発生ポテンシャルの変化を解明することが重要である。また、融雪型火山泥流については、火砕流の規模、温度、積雪の量と物性、地盤条件が重要な要因であり、これらを考慮した泥流のシミュレーションモデルの開発が必要である。本研究では以上の点の解明に重点を置き、対象火山について、時間的に変化する泥流・土石流の発生危険度や発生規模を予測する手法を検討するとともに、焼岳については、融雪型火山泥流の発生に関する従来の研究をさらに進展させる。さらに、これらのモデルを使って、噴火後の土石流・泥流の発生基準雨量や融雪型火山泥流に関する火山防災情報が提供できるようにすることを目標とする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

2019年度においては、対象火山である桜島火山、焼岳火山、メラピ火山、シナブン火山の最近の火山噴火活動と火山灰の堆積、噴火後の土石流や泥流、洪水の発生状況について調査し、そのデータを整理する。また、噴火後の土石流や泥流の予測モデルの構築に向けて、土石流や泥流の発生ポテンシャルと関係する流域の諸量を明らかにし、そのデータの取得を行う。

2020年度においても2019年度のデータの収集を継続して行うとともに、入手ができないデータに

についてはその推定方法について検討する。また、流域の火山灰の堆積分布を与条件として土石流や泥流の発生や規模を計算する手法、火砕流の規模や降雪量分布を与条件として融雪型火山泥流を計算する手法について既存の手法を整理し、それらの計算精度の向上も図る。

2021年度においては、これまでの調査結果やデータを使って、噴火後の土石流や泥流の発生ポテンシャルの時間変化のモデルを進める。このポテンシャルは土石流や泥流の発生に伴い軽減すると考えられるので、このモデルには土石流や泥流の発生モデルも組み込む必要がある。融雪型火山泥流については、焼岳火山を対象にしたモデルの構築を進める。

2022年度においては、2021年度に検討を開始した土石流や泥流の発生ポテンシャルのモデルの完成を目指し、土石流や泥流のモデルへの接続を図る。融雪型火山泥流については、焼岳流域に適用し、モデルの問題点を検討する。

2023年度においては、噴火後の火山灰の量とその後の降雨量を入力条件として、土石流や泥流の発生や規模を予測するモデルの完成を目指し、桜島火山等を対象にして、噴火後の土石流や泥流の発生基準雨量について検討する。融雪型火山泥流についても、火砕流の規模や方向、積雪量分布などを入力条件にした泥流の予測モデルの完成を目指し、焼岳火山に適用する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

土石流や泥流の発生や規模を予測するには、斜面における火山灰や土砂の透水性や堆積量の把握が重要である。これは、雨の地盤への透水のしやすさが表面流の量に影響を与えると同時に、土石流や泥流が斜面を流れるときに火山灰や土砂を侵食し、土石流や泥流の規模を大きくするためである。

鹿児島県諏訪之瀬島は、2020年10月から活発な噴火活動を継続しており、集落上流域での土石流発生が心配されている。桜島で開発した調査手法を活用して山腹の火山灰堆積状況、浸透能試験等から土石流発生の危険性を評価した（図1）。2023年現在、集落上流域を火山灰が厚く覆う状況ではなく、少ない雨での土石流発生の可能性は低いと判断している。ただ、集落上流域は噴火前より浸透能が低下し、流出率が上昇しているため、大雨の際は侵食等による土砂流出は生じることがあり、降灰状況等の調査を継続している。焼岳火山北西の足洗谷流域を対象として、土砂動態シミュレーションモデルSiMHiSを用いて土石流発生ポテンシャルの変動に関する検討を行った。足洗谷流域では、凍結・融解作用で基岩が土砂化し、河道に不安定土砂として供給される。過去の観測により、河床に堆積した土砂が豪雨によって土石流化すると示唆されている。そのため、本研究では土石流の起源となりうる源頭部河道での河床堆積物の厚さを土石流ポテンシャルの指標とした。土石流が2019、2020年に発生した2支流（白水谷、黒谷）での土石流発生ポテンシャルを検討した。毎年凍結・融解作用で生産された土砂により河床堆積土砂が増加し、ポテンシャルが、ある程度高まった状態で豪雨を受けると土石流が発生し、堆積物が全て流出することでポテンシャルは0となり、また経年的にポテンシャルが増加していく、というサイクルを再現することができた（図2）。Kinematic Wave法を用いた土石流の流出解析モデルを用いて、桜島有村川流域において2015年～2020年に発生した35件の土石流を対象として、流出波形の再現度が最も高い透水係数、相当粗度の組合せを逆解析した。算出された透水係数と第一有村川橋付近で観測された月降灰量の関係を解析したところ、月降灰量が0.8 mm未満では透水係数が70 mm/hr近くまで大きくなるのに対し、0.8 mm以上になると透水係数が30 mm/hr未満になることがわかった（図3）。融雪火山泥流の発生時の水の供給条件を明らかにするため、積雪層への石礫粒子の貫入実験を行った。その結果、土砂粒子落下時の運動エネルギーと貫入時に土砂が押しつけた積雪質量に明瞭な線形関係が見られることを確認した。さらに、積雪層と加熱土砂との混合を考慮した融雪速度推定法と組み合わせ、焼岳の足洗谷流域に適用し、泥流の発生と流下予測シミュレーションを実施した。石礫の粒径0.05 m、初速150m、温度1000℃、積雪深2.1 mとし、積雪をすべて融かすだけの十分な熱量を持つ石礫の噴出量を与えた場合の最大流動深の経時変化を図4に示す。10 km下流の集落までの泥流の到達時間は約10 min、平均速度は16.7 m/s、25.4 km下流の集落までの到達時間は約50 min、平均速度は8.5 m/sとなった。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

火山防災上重要な2つの現象、すなわち火山灰堆積後の降雨による土石流・泥流の発生および噴火時の融雪型火山泥流の発生に関して、その危険度や規模を予測する手法の確立を目的とし、桜島火山、焼岳火山、メラピ火山等の火山を対象に観測と予測モデル開発を行った。時間的に変化する泥流・土石流の発生危険度や規模を予測する手法を検討するとともに、融雪型火山泥流の発生に関する従来の

研究をさらに進展させた。さらに、これらのモデルを使って、噴火後の土石流・泥流の発生基準雨量や融雪型火山泥流に関する火山防災情報が提供できる知見を得た。以下に個々の研究成果を説明する。

桜島で実施した長期にわたる表面流・土石流観測に基づいて発生降雨条件等を解析した。火山活動が継続する桜島では、火山灰被覆斜面では10分間雨量1.5～2.0mmと小さい降雨で表面流が発生していること、表面流発生は降灰量に敏感に反応していること、近年の降灰量の減少や山腹の対策事業の進捗によって土石流の発生降雨条件やピーク流量等の規模が変化していることが明らかになった。泥流・土石流モデルの高度化に資する現地データを得るために、桜島火山の有村川第3砂防堰堤において土石流の土砂濃度観測を行った。河道の左岸に設置した採水窓を有する観測用ボックスカルバートで土石流の間隙流体のみを導流し、内部のTDR土砂濃度計により土砂濃度を計測した。その結果、土砂濃度の間隙流体は約23～69%で変動しており、間隙流体土砂濃度で土石流全体の濃度の変動を推定できる可能性が示された。Kinematic Wave法を用いた流出解析で、実際の土石流の流出波形を再現できる透水係数、相当粗度を逆解析し、それらを指標に土石流発生時の地表面の状況を評価する手法を提案した。この手法により桜島有村川流域で2015年～2020年に発生した35件の土石流の透水係数、粗度係数を評価した。19件の流出波形の再現性は高かったが（正常型）、16件は再現度が低かった（異常型）。月降灰量を①0.5mm未満、②0.5 mm以上、③1 mm以上に分け、降灰量別の土石流の発生基準雨量をID法で求めたところ、①、②、③の順に発生基準雨量が低下することがわかった。また、異常型の土石流の発生基準雨量は正常型よりも低いことが分かった（図3）。斜面表面における火山噴火堆積物のクラスト化及びクラストの破壊に着目した降雨実験と数値解析を実施し、クラストの形成及び破壊が斜面からの土砂流出特性に与える影響について検討した。その結果、クラスト無しの実験では斜面が広く浸食されて流路が形成された。一方、クラスト有りの実験では雨の強い場所でクラストが破壊されることで洗掘孔が形成され、洗掘孔上流側の土砂が崩落してクラストがさらに破壊されることによってガリが上流に発達する様子が観察された。雪と加熱土砂の混合条件での融雪水量を推定するため、球面座標系の熱伝導方程式を用いて、個々の土砂粒子内部の温度分布変化を求め、熱流束の式から土砂粒子から積雪層へ供給される熱量を求めた。粒径は実験で用いたものと同じ3種類とし、土砂量は1 kgで統一した。融雪開始時と同時に最大の融雪速度を示し、徐々に低下している。また、粒径が小さいほど融雪速度が大きいことがわかる。計算結果と実験結果は同じ傾向を示した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

火山噴出物の堆積や水の浸透特性を考慮した土石流・泥流の発生・流動特性の解析を可能にし、火山地域における土石流・泥流災害の予測を防災対策を検討する上で有用な情報が得られるレベルで可能とした。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Timur ERSOZ, Yutaka GONDA, 2024, Investigation of different lahar types with rainfall intensity duration curves in Arimura river basin of Sakurajima volcano, International Journal of Erosion Control Engineering, 17(1), 1- 14, <https://doi.org/10.13101/ijece.17.1>, 査読有, 謝辞無

Timur Ersöz, Kyoka Haneda, Anna Kuribayashi, Yutaka Gonda, 2023, Temporal changes in lahar sediment run-off characteristics and run-off coefficients in the Arimura River basin of Sakurajima volcano, Japan, Earth Surface Process and Landforms, 48(14), 2682-2703, <https://doi.org/10.1002/esp.5654>, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

地頭蘭隆, 2023, 諏訪之瀬島の降灰状況および土石流発生の危険性確認調査報告, 令和5年度鹿児島県土砂災害対策アドバイザー会議

羽田京香・権田豊・Timur Ersoz, 2023, 桜島有村川流域における土石流の流出解析モデルの改良～表層の浸透過程の再検討～, 令和5年砂防学会研究発表会, 401-402

Timur Ersoz*, Kyoka Haneda, Anna Kuribayashi, Yutaka Gonda, 2023, Temporal Change of Lahar

Runoff Coefficient in Arimura River Basin of Sakurajima Volcano, Proceedings of INTERPRAEVENT 2023, P2-5

Miyata, S., Nonaka, M., Kubo, S., Fukunaga, K., Ando, S., Fujita, M., 2023, A novel approach to measuring pore fluid sediment concentrations of debris flows in a volcanic torrent, 8th International Conference of Debris Flow Hazard Mitigation, 100

中里友輔, 堤大三, 宮田秀介, 山野井一輝, 井口正人, 2023, 火山噴出物の飛来・積雪層貫入・融雪を組み込んだ融雪型火山泥流の解析, 令和5年砂防学会研究発表会, R8-4

宮田秀介, 野中理伸, 藤田正治, 安藤詳平, 久保世紀, 2023, 桜島における土石流間隙流体土砂濃度の観測, 令和5年砂防学会研究発表会, P-111

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

融雪火山泥流の発生・流動と噴火後の土石流・泥流発生ポテンシャルに関する観測と予測手法の開発

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

竹林洋史 (京都大学防災研究所), 宮田秀介 (京都大学防災研究所)

他機関との共同研究の有無: 有

地頭蘭隆 (鹿児島大学地震火山地域防災センター), 堤大三 (三重大学), 権田豊 (新潟大学)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等: 京都大学防災研究所

電話: 075-621-2144

e-mail: takebayashi.hiroshi.6s@kyoto-u.ac.jp

URL:

(14) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名: 竹林洋史

所属: 京都大学防災研究所

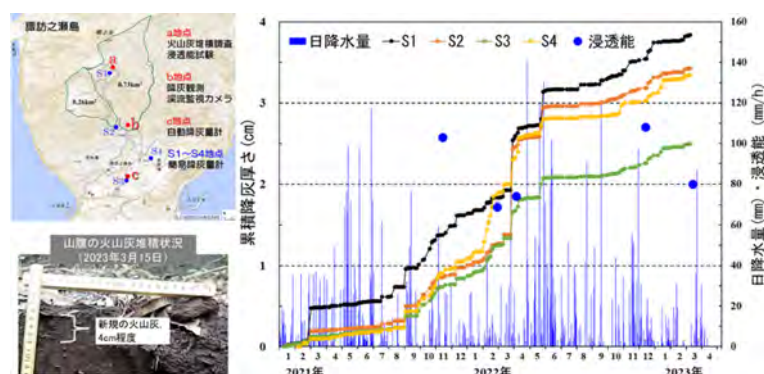


図1 鹿児島県諏訪之瀬島における降灰量, 浸透能の観測結果

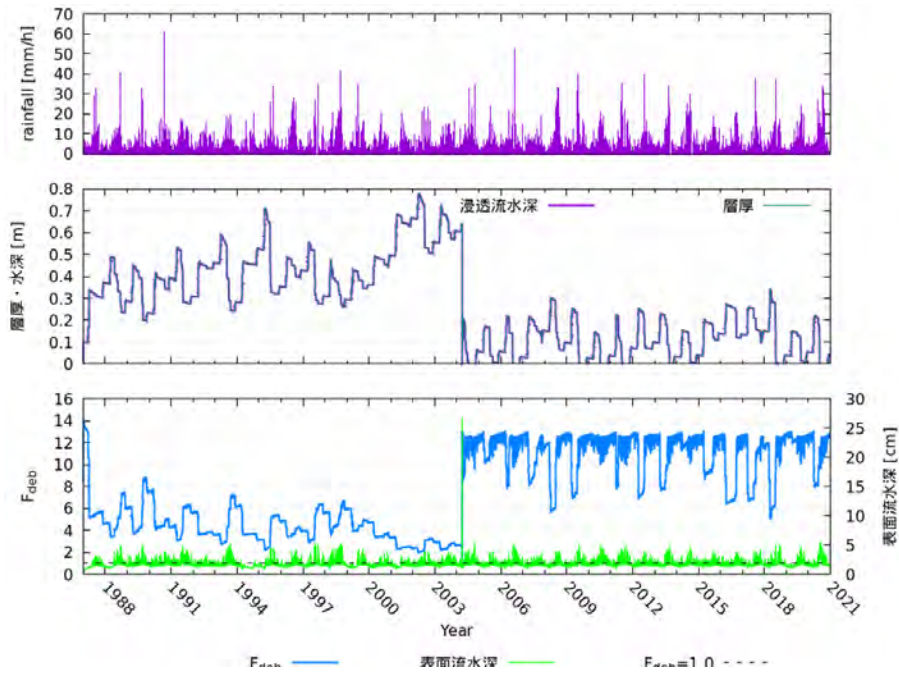


図2 白水谷源頭部河道のシミュレーション結果
 層厚は河道堆積土砂厚 (=土石流ポテンシャル)、Fdebは河床堆積物の安全率を示し、Fdeb<1のときに河床堆積物が起源となった土石流が発生する

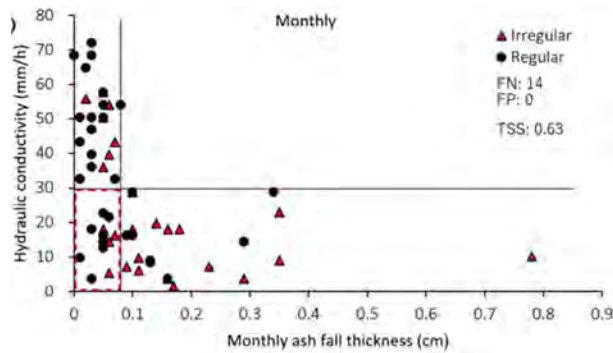


図3 月降灰量と透水係数の関係



図4 最大流動深の経時変化

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

桜島火山における地域との連携による火山災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(3) 関連の深い建議の項目：

- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
 - (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(4) その他関連する建議の項目：

- 3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究
 - (3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究
火山
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - エ. 桜島大規模火山噴火
 - (6) 社会との共通理解の醸成と災害教育
 - (7) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

桜島火山では、現在噴火警戒レベルを事実上3以上で運用しており、火山活動が高まれば住民の避難を伴うレベル4と5と選択肢が狭いのが現状である。噴火警戒レベルが存在する法的・行政的制約のもとに、大規模噴火危機時の対応や事前準備における課題を明らかにする。地域の行政機関やステークホルダーと連携して火山研究の知見を整理し、社会に適切に発信する手法を見出す。懸念されている桜島大規模噴火について、住民や行政に対して防災リテラシーの実態とニーズを明らかにする。住民、報道従事者、行政等の防災担当者などを対象とした公開講座やセミナーなどを通じて火山研究の現状や火山現象の基礎的な理解を進める。大規模噴火に対応するために、地域防災計画の更新や災害対応や復旧・復興の実施において火山研究成果の反映をさせる。そのために、想定噴火による被災予測および復旧・復興への影響予測を高精度化する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

セミナーと講習会を実施し、火山研究成果や火山データを地域防災対策等に反映させることについて検討する。検討項目は以下の通りである。

- (1) 避難計画における火山研究成果の活用
- (2) 様々な噴火シナリオに基づく避難計画の多様化の研究。具体的には、火山活動推移モデル（事象系統図）にリストアップされる噴火規模・様式について、前駆活動及び噴火推移の事象の発現に沿った避難計画策定の可能性について検討する。
- (3) 現状の避難計画の問題点と火山研究による解決の可否の検討による火山研究ニーズの探索。火山研究から想定される今後の噴火活動に対する現状の防災対策の問題点と火山研究によってその問題

が解決可能であるかどうかを検討する。さらに、どのような事前情報が必要であるかを明らかにしていき、研究課題としての解決策を探る。

(4) 火山観測データの見方について講習するとともに、受講者のニーズをつかみ属性に応じたデータ表示の最適化とデータの見方の理解を進め、火山観測データ解析結果の住民や観光客への伝え方の研究をする。そして、研修プログラム構築に反映させる。

令和元年(2019年)度においては、火山研究成果をレビューするセミナーを開催し、その成果の現状の避難計画を含めた防災対策にどのように活用できるかを検討する。火山観測データの見方についての講習をする。

令和2年(2020年)度においては、火山活動推移モデルにある噴火の規模と様式について、前駆活動及び火山噴火推移の事象の発現に沿った避難計画策定の可能性について検討する。引き続き、火山観測データの見方についての講習をする。

令和3年(2021年)度においては、想定される噴火活動に対する現状の防災対策の問題点と火山研究によってその問題が解決可能であるかどうかを検討する。そして、どのような火山情報が必要であるかを調べ、火山研究の課題としての解決策を探る。また、観測データの解析結果の一般への伝え方を検討する。

令和4年(2022年)度においては、観測データの解析結果の一般への伝え方の検討結果を反映したデータ表示システムの作成をする。

令和5年(2023年)度においては、データ表示システムのビジターセンターへの導入と実証実験を行う。以上の検討を踏まえ、火山研究からみた地域防災計画や支援策などへの提言を取りまとめる。

(8) 令和5年度及び計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要:

・今年度の成果の概要

京都大学防災研究所の桜島火山観測所の一般公開行事として、年一回の頻度で桜島にある観測施設を巡るバスツアーが行われてきている。バスの頻度によって参加者数は異なるが、各回において80名から150名の参加者がいる。参加者アンケート調査を行ってきており、調査結果の取りまとめを行った。2023年実施のアンケート調査では、バスツアーを知ったキッカケで最も多いのは知人や家族からの紹介であり、次にSNSや新聞掲載であった(図1)。また、展示および施設で最も興味をもったのは、観測坑道であった(図2)。10年前の調査では、バスツアーは新聞掲載で知った人が多かったが、毎年開催されていることから次第に周知されてきたことが窺えた。また、観測坑道が最も人気があるが、その理由として立ち入ることについての希少性と非日常性が考えられる。これらについての成果を論文として取りまとめた(Nakamichi, 2024)。また、2020年6月の桜島における火山岩塊落下をうけての火山観測情報についてのアンケート調査結果を取りまとめた(中道・阪本, 2023)。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

地域のステイクホルダーと連携して火山研究の知見を整理して、社会に適切に発信する方法を見出すのが目標である。そのために公開講座やセミナーを通じての火山現象の基礎的な理解を住民などに対して進めつつ、防災リテラシーの実態とニーズを明らかにしてきた。当初計画していた火山現象を考慮した避難計画策定の可能性の検討と、火山観測データの見方講習は実施出来なかった。その代わりに以下の取り組みを実施してきて成果を得た。

桜島にて2020年6月に火山岩塊の居住地近傍落下を受けて、鹿児島市と連携して火山防災勉強会を桜島の各地区において複数回実施し、火山観測情報の発信と理解についての住民向け調査を行った。その結果、噴火警戒レベルの認知度は高く、桜島の噴火警戒レベルを正確に把握している人が大多数であるが、岩塊の飛散距離によって噴火警戒レベルが引き上げられる時の距離の認識は高くないことが分かった。この成果は論文(中道・阪本, 2023)として公表し、さらに鹿児島市防災・災害対策委員会ならびに桜島火山防災連絡会に報告した。当初計画にはなかったが、桜島の大規模噴火を想定した広域避難を対処とした意思決定支援システムの検討を行った。このシステムは火山灰の移流拡散シミュレーションに季節毎に想定される気象場を考慮することで、季節毎の火山灰堆積量が得られ、建物ダメージ閾値などによる評価から避難域の設置の想定ができた。さらに、火山観測や火山現象の理解を進めるための桜島火山観測所の活用の検討に着手し、これまでの一般公開の実績を踏まえた参加者の意識調査と観測所をサイエンスミュージアムとしての機能を付与するためのコンテンツ作りを行った。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

桜島の大規模火山噴火を想定した広域避難について意思決定支援システムの検討を進めた。噴石落下を受けての桜島の住民の火山情報のアンケート調査、桜島火山観測所の一般公開参加者のアンケート調査から火山における防災リテラシーの実態の調査を行った。これらによって、関連の最も深い建議の項目である「地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究」と桜島大規模火山噴火の総合的研究に対して直接的な貢献を果たすことで、災害の軽減に貢献する研究にすることができた。今後は防災リテラシーに関する調査結果もとにして、火山観測を通じた一般の方々や行政のリテラシー向上の取り組み方法を構築することが今後の課題である。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Nakamichi, H., 2024, Open-door events of the Sakurajima Volcano Observatory, Kyoto University in the last ten years, J. Disaster Res., 19, 147-153, doi:10.20965/jdr.2024.p0147, 査読有, 謝辞無

Sakamoto, M. and H. Nakamichi, 2024, Open science initiatives by Sakurajima Volcano Observatory, J. Disaster Res., 19, 154-158, doi:10.20965/jdr.2024.p0154, 査読有, 謝辞無

中道治久・阪本真由美, 2023, 桜島火山における2020年6月の火山岩塊落下を受けて実施した火山情報に関する住民意識調査, 京都大学防災研究所年報, 66B, 111-120, 査読無, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

火山噴出物による災害の軽減のための総合的研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

中道治久（京都大学防災研究所）, 井口正人（京都大学防災研究所）, 多々納裕一（京都大学防災研究所）, 大西正光（京都大学防災研究所）

他機関との共同研究の有無：有

兵庫県立大学

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：火山活動研究センター

電話：099-293-2058

e-mail：nakamiti@svo.dpri.kyoto-u.ac.jp

URL：http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/svo/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：中道治久

所属：京都大学防災研究所火山活動研究センター

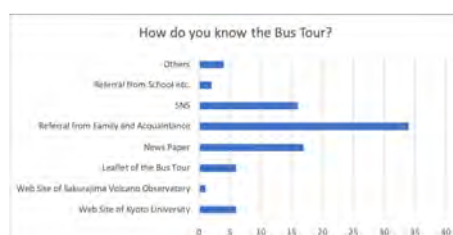


図 1

桜島火山観測所の観測施設を巡るバスツアーの情報入手先の頻度

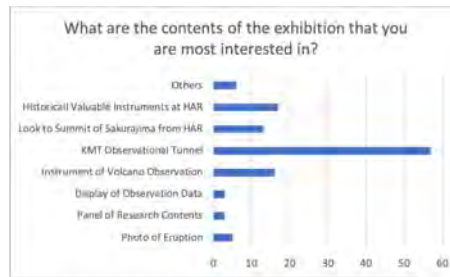


図 2

桜島火山観測所の観測施設を巡るバスツアーで最も興味を持った展示および施設の頻度

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

災害リテラシーの育成のためのオープンサイエンス手法の検討

(3) 関連の深い建議の項目：

- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
 - (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(4) その他関連する建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
 - ア. 史料の収集とデータベース化
- 3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究
 - (3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究
 - 地震
 - 火山
- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
 - (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

「オープンサイエンス」の手法による地震、火山、津波災害データベースの構築・共有を通じた災害リテラシーの育成に向けて研究を実施する。防災リテラシーの向上という課題について、単なる知識提供ではなく、一般市民と地震、火山研究者とが共同して観測研究や災害軽減の取り組みをすすめる「オープンサイエンス」や「オープンデータ」の思想に基づく新しい次世代型地震研究の可能性について検証することを到達目標とする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

以下の3つの研究を行う。(1)地震・津波避難訓練への「オープンサイエンス」導入による防災リテラシー向上、(2)「オープンサイエンス」による自然災害史料の解説と活用、(3)市民参加による内陸地震観測の「オープンサイエンス」化。以上の(1)-(3)の研究の相互の情報交換により、「オープンサイエンス」の観点から、災害リテラシーを育成するための新しい手法を探る。年度ごとの計画は以下の通り。

平成31年度：オープンサイエンス型サイエンスミュージアムの企画、運営。運営、地震・津波避難訓練時の個人行動記録の分析、「みんなで翻刻」の改良、「満点計画」、「0.1満点計画」の検証を実施する。

平成32年度：オープンサイエンスの手法による災害リテラシー育成方法を、サイエンスミュージアム、「満点計画」、改良版「みんなで翻刻」などを通して実施する。

平成33年度：サイエンスミュージアムの運営、「満点計画」、「0.1満点計画」の検証を継続する。地震・津波避難訓練時の個人行動記録のオープンサイエンス的な活用を実施し、「みんなで翻刻」によって得られたテキストの災害リテラシー向上への効果の検証、「満点計画」、「0.1満点計画」の

検証を実施する。

平成34年度：サイエンスミュージアムの運営、「満点計画」、「0.1満点計画」の検証、「みんなで翻刻」によって得られたテキストの災害リテラシー向上への効果の検証を継続する。地震・津波避難訓練時の個人行動記録のオープンサイエンス的な活用と検証を実施する。

平成35年度：オープンサイエンス型手法による災害リテラシーの向上方策について総括的な検討を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

当初の計画に従って、(1)サイエンスミュージアム「阿武山地震観測所」の運営による地震リテラシーの向上、(2)地震・津波避難訓練支援ツール「逃げトレ」の導入による市民参画型地震・津波訓練の推進、(3)自然災害に関する歴史資料の解説を行う「みんなで翻刻」プロジェクトの推進、(4)内陸地震観測「満点計画・0.1満点計画」によるオープンサイエンス型地震学の試行、以上の4つの研究を実施した。主な成果と今後の展望は、以下の通りである。(1)については、そのための制度的基盤としてNPO法人による運営を開始した。(2)については、「逃げトレView」を、高知県等のテストフィールドでの実証実験に供し、パイロット版をフル版へと向上させた。(3)については、「みんなで翻刻」のシステムの運用を継続し、さらに参加者、解析文献数を増加させた。(4)については、本研究の成果を踏まえて新たに開発した教育ツール「満点地震計ボックス」を完成させた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

(1)サイエンスミュージアム「阿武山地震観測所」の運営による地震リテラシーの向上、(2)地震・津波避難訓練支援ツール「逃げトレ」の導入による市民参画型地震・津波訓練の推進、(3)自然災害に関する歴史資料の解説を行う「みんなで翻刻」プロジェクトの推進、(4)内陸地震観測「満点計画・0.1満点計画」によるオープンサイエンス型地震学の試行、以上の4つの研究を実施した。(1)については、基幹施設に5年間に合計5500人を超える市民来訪者を迎えることができ、当初目標は達成された。(2)については、津波避難訓練支援ソフト「逃げトレ」を改変し、訓練に参加した市民の集合的行動データを解析するための「逃げトレView」版を完成させ、当初目標は達成された。(3)については、システム登録者数が当初目標（1万人）に迫る約8500人に到達し、ほぼ目標を達成した。(4)については、これまでに、満点計画への参加がのべ900人以上、教育プログラムの参加がのべ800人以上となり、当初目標はほぼ達成された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

まず、「地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析」のうち、「A.史料の収集とデータベース化」について、本研究の(3)で実施した「自然災害に関する歴史資料の解説を行う「みんなで翻刻」プロジェクト」が、歴史地震や火山噴火などに関する史料を数多く提供し、その目的達成に貢献している。また、「地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究」に対して、本研究は地震・火山現象に関する災害リテラシーの向上手法をオープンサイエンスの観点から数多く提供することによって、その目的達成に貢献している。今後も、両研究は継続されるため、さらなる貢献が期待される。特に、サイエンスミュージアム化された地震観測所と火山観測所との連携には、この方面での成果の継承と発展を期待できる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Yamori, K.,2024,Open science for fostering seismologic science literacy,Journal of Disaster Research,19,139-146,doi: 10.20965/jdr.2024.p0139,査読有,謝辞無

Yamori, K., Iio, Y., and Shiroshita, H.,2022,Open science in seismology: The role of citizen science in the transition from seismic observatory to science museum.https://doi.org/10.5595/001c.35742,Journal of Integrated Disaster Risk Management,,12,1-23,doi: 10.5595/001c.35742,査読有,謝辞無

矢守克也,2021,防災心理学入門,ナカニシヤ出版,査読無,謝辞無

矢守克也・飯尾能久・城下英行,2021,地震学のオープンサイエンスー地震観測所のサイエンスミュー

ジウム・プロジェクトをめぐって ,実験社会心理学研究,69,82-89,査読有,謝辞無

Yamori, K. & Sugiyama, T.,2020,Development and social implementation of smartphone app Nige-Tore for improving tsunami evacuation drills: Synergistic effects between commitment and contingency,International Journal of Disaster Risk Science. DOI 10.1007/s13753-020-00319-1,11,751-761,doi: 10.1007/s13753-020-00319-1,査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Yamori, K., Iio, Y. and Shiroshita, H.,2021,Open science in seismology: The role of citizen science in the transition from seismic observatory to science museum,The 12th Conference of the International Society for Integrated Disaster Risk Management

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

分野横断で取り組む大規模火山噴火災害に伴う大規模広域避難に関する研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

矢守 克也（京都大学防災研究所）,飯尾能久（京都大学防災研究所）

他機関との共同研究の有無：有

大倉敬宏（京都大学大学院理学研究科）,松浦律子（地震予知総合研究振興会）,加納靖之（東京大学地震研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：防災研究所

電話：0774-38-4024

e-mail：yamori@drs.dpri.kyoto-u.ac.jp

URL：http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：矢守 克也

所属：防災研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

歴史地震史料を活用した地震学的解析

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
ア. 史料の収集とデータベース化

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
地震
火山

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
ア. 地震発生機構の解明
イ. 地震断層滑りのモデル化

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明
(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
(7) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

歴史地震史料からは、これまでも過去の地震に関する多くの情報が抽出されてきた。たとえば、いつどこでどの程度の大きさの地震が発生したか（地震の年表）、震源の広がりほどの程度だったか（たとえば南海トラフの巨大地震）、強震動や津波による被害はどの程度であったか、などである。

歴史地震史料には、当時の人々が体験した現象を見たまに記録したと想定できる記述が多数ある。震動の強さや継続時間、地殻変動（地盤や海岸の昇降）、地下水の以上（井戸や温泉）、液状化被害などである。これらの一部は既に活用され、地震学的な解析がなされているが、まだまだ解析されないまま放置されている記述も多い。歴史地震史料の精度（限界）を考慮しつつ、現在の標準的な地震学の手法を用いて解析することにより、過去に発生した地震についてより深く分析をおこなうことを目的とする。上記の諸現象に関する調査のほか、大地震発生後に続発する余震に関する系統的な分析や、本震と大きな余震の分離などもこれまで十分に行なわれておらず重要な課題である。そのためには、地震の専門家でなくとも容易に使うことができる解析ツールの開発や史料の記述を分析できる地震研究者の育成も必要である。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

(a) 解析（計算）ツールの整備：歴史地震史料にあらわれるのは、体感あるいは目視で確認できるような現象である。震動の強さや継続時間、液状化の発生などであれば断層や地盤構造を仮定した全波形の再現、地殻変動や地下水の異常であれば、地殻変動の計算などをより簡単におこない、その結果と史料の記述を対照できるようなツールの整備をおこなう。地震学と歴史学等の双方の専門家が対話しながらツールの整備をすすめるために「古地震研究検討会（仮）」を年1回程度（10月頃）開催し、議論と実装をおこなう。具体的な史料の記述に解析ツールを適用するため、これまでの史料調査を補う調査を実施する。

(b) 史料を解説できる研究者の育成：前観測研究計画では、年2回（おおむね9月と3月、各2泊3日）の合宿形式の勉強会を本課題でも継続する。

5年間を通じて、実際の史料にもとづいて具体的にツールの開発や史料の解説をすすめる。上記の検討会や勉強会を定期的で開催し、ツールの開発と研究者の育成に努める。解析ツールについては、平成33年度を目処に、開発したツールを公開し、試用を受けて改良する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

古文書解説のための定期的な勉強会（週1回、京都とつくばの2か所、オンラインまたはハイブリッド）を継続的に開催している。また、合宿形式の勉強会（2023年8月24日～26日ハイブリッド、2024年3月21日～23日ハイブリッド）を開催した。参加者の解説技術の向上をはかるとともに、これまで歴史地震研究に関わっていなかった研究者や学生、あるいは市民の方々に研究を普及する機会となった。「古地震研究検討会」は開催しなかったが、別プロジェクトの会議内で実施している。

みんなで翻刻に「能登半島の資料を翻刻」プロジェクトを追加した。国会図書館デジタルコレクションで公開されている『賀茂社記録』をみんなで翻刻に登録した。国会図書館の次世代デジタルライブラリーで公開されているテキストデータを活用して、『賀茂社記録』から「地震」をキーワードとして検出された記述を分析し、これまで知られていなかった地震記述を発見した。

1923年対象関東地震の余震に着目し、日記記録と観測記録の比較をおこなった。

地震被害を発生させる諸要因（自然素因・社会素因）は重層的で相互に複雑に関係しており、マルチスケール分析を用い地理学の視点から俯瞰的に捉え、被害発生構造モデルを作成することで理解が進む。このような地震被害のマルチスケール要因分析に関する書籍を出版した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

古文書解説のための定期的な勉強会や合宿形式の勉強会を継続的に開催し、参加者の解説技術の向上をはかるとともに、これまで歴史地震研究に関わっていなかった研究者や学生、あるいは市民の方々に研究を普及する機会となった。「古地震研究検討会」を開催し研究手法やツール開発について議論した。歴史地震研究におけるデジタルアーカイブの活用や人文情報学的手法の導入について検討した。

みんなで翻刻に登録した地震や火山噴火に関連する資料をふくむ多様な資料を分析した。京都周辺の歴史地震のほか洪水などの自然災害についてまとめた一般向けの書籍を出版した。歴史資料の分析により、中世や近世、近代に発生した地震について、より確からしい震源の位置や規模、被害状況などを示した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

データベースやツールの開発や教育を通じて、「1.（1）ア. 史料の収集とデータベース化」およびその解析や、「5.（4）関連研究分野との連携強化」「5.（6）社会との共通理解の醸成と災害教育」「5.（7）次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成」に貢献した。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

大邑潤三,地震被害のマルチスケール要因分析,小さ子社

・学会・シンポジウム等での発表

加納靖之・山本宗尚・橋本雄太・青池亨・中西一郎・大邑潤三・濱野未来,みんなで翻刻「賀茂社関係文書翻刻プロジェクト」から得られた地震記事,第40回歴史地震研究会,P-15

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

歴史地震・噴火に関する分野横断的なデータベースとコミュニティカタログの構築

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

加納靖之(東京大学地震研究所)

他機関との共同研究の有無:有

中西一郎(京都大学大学院理学研究科),小林昭夫(気象研究所),弘瀬冬樹(気象研究所),田中昌之(気象研究所),堀川晴央(産業技術総合研究所),橋本雄太(国立歴史民俗博物館)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等:東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話:03-5841-5787

e-mail:yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL:<https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/>

(14) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:加納靖之

所属:東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

マグマ溜まりの時間発展と噴火様式との関連性

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
火山

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (4) 中長期的な火山活動の評価
ア. 火山噴火の長期活動の評価
(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

マグマの状態と噴火様式について見られた関連性についてより詳しく調べるために、爆発的噴火と非爆発的噴火（溶岩流噴火）を数多く起こしている富士火山に焦点を絞って、噴出物の解析を進める。富士火山では、爆発的噴火が卓越する時期と溶岩流噴火が卓越する時期があるが、両者が混在する時期もある。そこで、様々な時期、様々な様式の噴火による噴出物を網羅的に解析することにより、マグマの状態と噴火様式との関係の定式化を目指す。加えて「中長期の火山活動の評価」と「火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測」をつないで、将来の噴火の様式・規模を検討するためには、マグマの状態の時間発展に関するデータが必須であることから、時間発展が追えるようなある程度連続した期間についての噴出物解析も実施する。

火山噴出物の分析を通じて集めるデータは、マグマの温度、圧力、含水量、組成についてであり、加えて、それらの噴出物をもたらした噴火の様式や規模についての情報を文献から収集する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

5か年の研究期間で、富士火山（新富士火山）の活動期のうち次の4つの時期について試料の分析を行う。（1）溶岩流が卓越する富士宮期、（2）溶岩流が卓越するが爆発的噴火もある須走b期、（3）山頂及び山腹での爆発的噴火が卓越する須走c期（Cal BC 1500年頃～ Cal BC 300年頃）、（4）山腹での割れ目噴火が卓越し溶岩流噴火と小規模な爆発的噴火が頻発している須走d期（Cal BC 300年頃以降）。

2019年度と2020年度には、富士宮期、須走b期、須走c期から幾つかの噴火を取り上げ、噴火様式とマグマの状態についての関係を明確化するための検討を行う。富士火山においては、深部と浅部の2つのマグマ溜まりの存在が示唆されているが、斑晶組成から判断してできるだけ浅部のマグマの影響を受けずに噴火した試料の分析を優先し、深部マグマの状態が噴火様式にどの程度影響するかを評

価する。

2021年度と2022年度には、主に須走d期の試料分析を行う。この時期は最も新しい活動期であるため噴出物の保存状態が良く、ある程度連続した噴火の噴出物採取が可能である。そのような適切な試料を用いることで、噴出物からマグマの状態の時間発展を捉えることが可能か否かの検討を行う。この須走d期は全体としては小規模な噴火が多いが、貞観噴火（溶岩主体）と宝永噴火（爆発的）という新富士火山の活動としては最大規模の様式が異なる噴火を含んでいる。そこで、上述の研究に加えて、貞観噴火と宝永噴火に先立つ数回の噴火の噴出物を分析して、大規模噴火に向けてマグマの状態が変化しているかどうかについても調べる。

2023年は、それまで4年間の研究をとりまとめて、マグマの状態と噴火様式との関係の定式化を行う。集められたマグマの温度、圧力、含水量、組成についてのデータは、浅部マグマ溜まりの影響を評価するために噴火口位置についての情報も加えて、時間空間的に整理する。また、連続する噴火の噴出物について、マグマの状態の時間発展が確認された場合には、それが次の噴火の様式や規模の予想につながるかどうかの検討を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

富士火山では爆発的な噴火と非爆発的な噴火が起きており、その原因をマグマの性質の違いに帰着できるかどうかがかねてより議論されていた。本研究では、統計的な検討が可能のように試料数を大幅に増やし、溶岩10試料およびスコリア6試料について分析をおこなった。試料に含有されるかんらん石斑晶と斜長石斑晶とメルトとの平衡からマグマの温度と含水量を算出し噴火様式との関連を調べた。その結果、噴火前のマグマの含水量が高いほうが爆発的な噴火をする傾向が見えた（図1）。t検定により両者の差異の有意性を検討したところ、「熔岩噴火はスコリア噴火に比べて噴火前のメルトが低含水量」という仮説は統計的に支持された。ただし、含水量の高低と噴火様式の関係は完全に1対1に分離できるものではなく、マグマの上昇経路も噴火様式に影響を及ぼしていることを示唆する結果でもあった。

噴出物の組成や量、噴火間隔の時間発展について、マグマ供給系モデルをもとにして検討に着手した。R4年の成果で示したように、富士山では数百年にわたって深部マグマ単独の活動が示唆される時期がある。また、富士山では砂沢噴火と宝永噴火の2回を除いて、浅部マグマ溜まりが強く関与した噴火は確認されておらず、深部マグマ単独のマグマ供給系モデルをもとにした検討が可能な場であると思われる。また、メルト包有物を使った直接的な水と二酸化炭素の測定や斜長石含水量計での含水量評価から、深部マグマの特徴として、揮発性成分には不飽和である可能性が高い。このため、深部マグマからのマグマ上昇のトリガーはより深部から注入されるマグマにより過剰圧の獲得であると考えられる。加えて、揮発性成分には不飽和であるため、マグマ自身の圧縮率は多少のマグマの分化では大きく変化することはない。以上のような制約条件のもと、実際の噴出量と噴火間隔のデータを検討したところ、マグマ溜まりの実効的な大きさについての制約が得られた（図2）。また、実際の噴火での噴出量が2-3桁にわたって変化していることを説明するためには、マグマが上昇途中で固化してしまい噴火できなくなる量が無視できないこと、弾性的な過剰圧に加えてマグマ溜まりの粘弾性変形によるマグマと周辺物質の密度差の浮力への変換によってマグマの上昇力が維持される場合があること、の2点が必要なことが示唆された。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

将来の噴火の様式や規模が物質科学的に予測できるか否かは、(1)マグマ供給系の連続性が担保されていること、(2)噴火様式がマグマの性質によって支配されていること、の2点に強く依存している。そこで、比較的単純なマグマ供給系が想定され、かつ、爆発的な噴火も非爆発的な噴火も回数も多い富士火山での噴火に焦点を絞り、上記2点在实际の火山で成立しているか否かを検討した。

マグマ供給系の連続性については、山頂・山腹からの爆発的な噴火が連続する約3500年前以降の降下火砕物が連続的に堆積する籠坂峠の露頭で採取した試料について、全岩化学組成、斑晶化学組成、石基組織などについての分析を実施し、上記の期間中にマグマ供給系が2回ほど大きく変化するものの、それ以外の期間については、数百年にわたってマグマや斑晶の組成が連続的に変化していることが確認できた（図3）。また、噴出物の特徴から、浅部マグマの影響をほとんど受けずに深部マグマ溜まりから直接的に地表に噴出する噴火が主体であった時期の存在が確認できた。そこで、単純なマグマ供給系モデル（深部マグマ溜まり単独）にあてはめて、その時代の噴出物量や噴火間隔のデータ

の再現を試みたところ、マグマ溜まりの実効的な大きさについての制約が得られた。さらに、噴出量が数桁にわたって変化していることを考慮すると噴火未遂によって地表に到達しないマグマが多量に存在していることが示唆され、いかにして噴火未遂量を評価するかが今後の噴火予測の精度向上のための課題であることも明らかになった。

噴火様式とマグマの性質との関連については、R5年度の成果に示したように、マグマの含水量はある程度は噴火様式に影響を与えることが確実だが、それ以外の要因（火道広がり、上昇速度など）もまた噴火の様式に影響を与えている可能性が高く、単純にマグマ溜まりでのマグマの性質だけでは帰着できないことがわかった。今後は、確率的な予想ができるよう、さらに解析事例を増やした検討が必要である。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

建議の「1 地震・火山現象の解明のための研究 (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析 ウ. 地質データ等の収集・集成と分析」および「2 地震・火山噴火の予測のための研究 (5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測」の2項目に対して、富士山のマグマ溜まりの時間変化と噴火準備過程について一定の知見を得ることができた。これをもとに、比較的単純なマグマ供給系における噴火予測のためのモデル作りに着手できた。噴出物量だけでなく、その時の噴出物組成を組み合わせることで、より信頼性が高い予測を立てることができるようになることが期待できる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

安田 敦・亀谷伸子・嶋野岳人・吉本充宏・田島靖久,2023,類似したテフラを識別・対比する定量的な方法の数学的な取り扱いについて,月刊地球,45,55-64,査読無,謝辞無

安田 敦,2023,推移予測にはどのような物質科学的データが必要か、間に合うか,防災科学技術研究所研究資料,487,114-118,査読無,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

安田 敦・亀谷伸子・嶋野岳人・田島靖久・吉本充宏・杉山浩平・西澤文勝・金子隆之・藤井敏嗣,2023,富士山のテフラ対比に役立つ鍵層について,日本火山学会秋季大会,P-66

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

安田敦（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：安田敦

所属：東京大学地震研究所

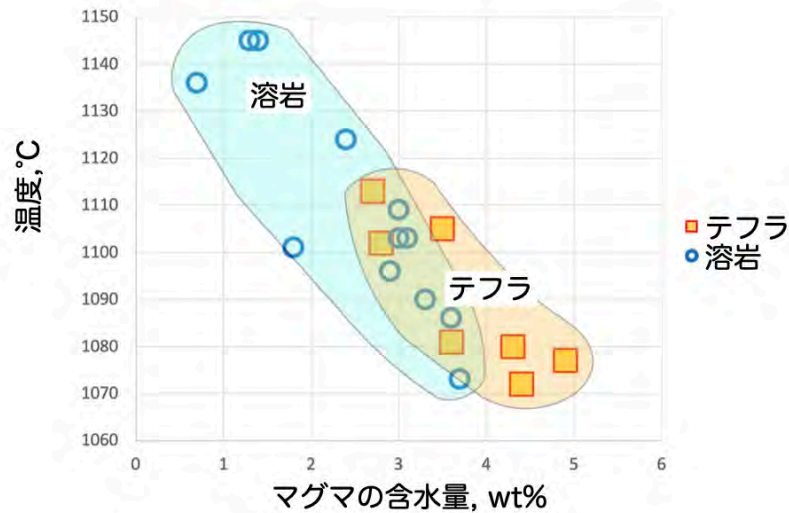


図1 溶岩試料とスコリア試料の含水量と温度

含水量が高いと爆発的な噴火をする傾向が見て取れるが、爆発的噴火と非爆発的噴火の範囲は重なっており、含水量と温度以外に噴火様式を制御する要因があることが示唆される（猪狩、2022, 東京大学修士論文より引用、一部改変；石橋・天野(2017) のデータを含む）。

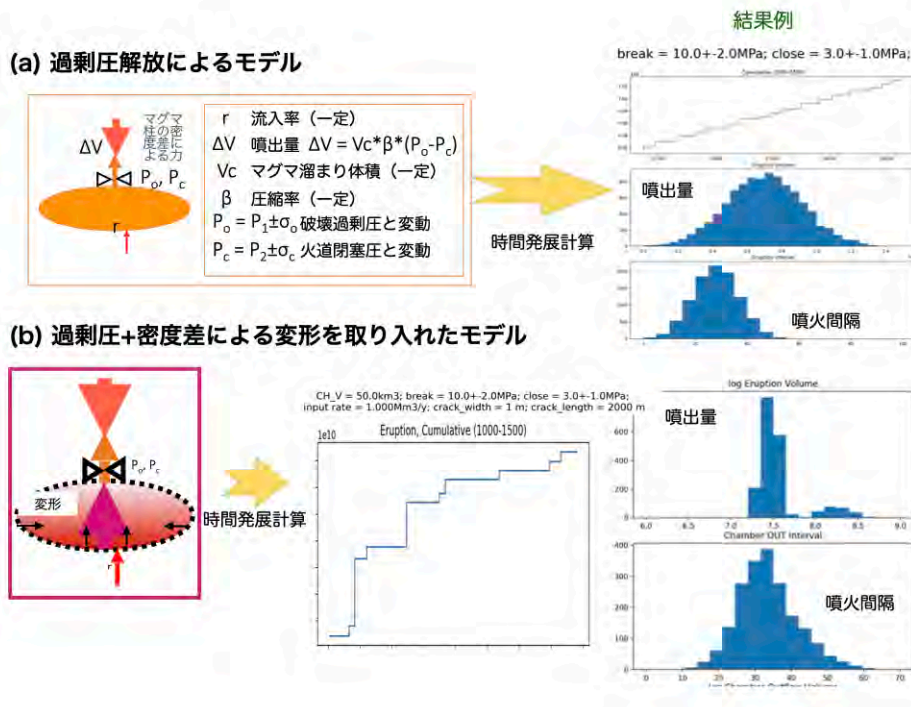


図2 単純なマグマ供給系モデルによる噴火規模と噴火間隔の予測

(a) マグマ溜まりの過剰圧、火道の閉塞圧、マグマ溜まりの実効的大きさ、マグマの圧縮性、下部からのマグマの注入レートを変化させて、実際の富士山での噴火の噴出量、噴火間隔の平均値と分散の再現を試みた。マグマ溜まりの実効的な大きさを15–100 km³、マグマの供給率を1km³/kyとすると観察される富士山の噴火間隔や平均噴出量は説明できる。一方、パラメータを可能と思われる範囲で変化させても、数桁にわたる

噴出量の変動は説明できない。

(b) マグマ溜まりの粘弾性変形を取り入れたモデル。数日間噴火が継続する場合にマグマ溜まりの変形が追従できるという仮定を設けると、桁が変わるような大規模噴火の再現が可能である。

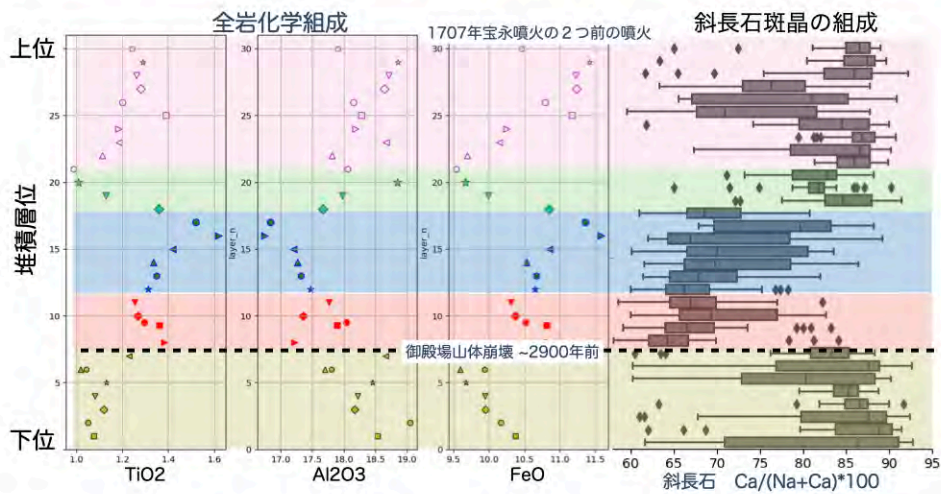


図3 籠坂峠で採取したテフラの時代変化（全岩化学組成と斑晶組成）

いくつかの時代に区分できるが、それらの時代内ではマグマの連続的な変化が観察され、結晶分化和マグマ注入を考えることによって、マグマ溜まりの時間変化をある程度予測できる。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

大規模噴火に伴う諸現象とそれを駆動するマグマ溜り一火道システムの解明

(3) 関連の深い建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
火山

(4) その他関連する建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
 - ウ. 地質データ等の収集・集成と分析
 - (4) 火山現象の解明とモデル化
 - ア. 火山現象の定量化と解明
 - イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化
- 2 地震・火山噴火の予測のための研究
 - (4) 中長期的な火山活動の評価
 - ア. 火山噴火の長期活動の評価
 - (5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題で扱う大規模噴火は、プリニー式・サブプリニー式噴火である。プリニー式噴火に代表される大規模かつ爆発的な火山噴火は、噴出物を広範囲に飛散させるため、多様かつ深刻な災害を広域で引き起こす可能性がある。しかし近代的火山観測網によるVEI4クラス以上の大規模噴火の観測事例は国内にはなく、現象や物理パラメータの時間発展の解明や、想定される災害の種類や規模の評価は不十分である。噴火に伴う諸現象（前駆的現象を含む）の解明とそれらの時空間解像度の向上、災害現象の把握には、噴出物の詳細な解析に加えて、史料データの活用や海外の事例をもとにした比較研究も同時に進める必要がある。本課題ではとくに下記 (a)、(b) の問題点や背景を踏まえ、大規模噴火の実績がある火山を対象に地質調査や物質科学的解析、史料データ等をもとにした噴火推移の再構築、噴出量や噴出率の推定、マグマ溜り一火道系の物理化学状態の推定、またこれらの中長期における変遷を解明することを目的とする。さらに地球物理観測データとの照合を念頭に置き、マグマの蓄積・移動・上昇に関する時間的情報の抽出も試みる。大規模噴火における事象分岐の要因について考察し、事象系統樹へ反映させることも目指す。

(a) プリニー式噴火は爆発的かつ定期的なマグマ噴出による噴煙柱形成で特徴付けられるが、同時に一連の活動で火砕流や溶岩流・ドームを伴うなど噴火推移は単純でないことが多い。また珪長質マグ

マに限らず、安山岩質から玄武岩質までの幅広いマグマ組成で起こり得る。前駆的現象を含めた噴火推移、付随現象の時期や継続時間など噴火推移のパターン、時間スケールの理解が重要である。近代以降については観測記録、歴史時代については古記録も併用した現象及び推移の解明が必要である。

(b) 噴火物理パラメータ（噴出量・噴出率）推定手法は次第に進歩しており、既存手法とともに新たな手法にもとづく再解析により噴出量や噴出率の推定値が大きく変わる可能性がある。これらのデータに基づく噴火規模や強度と物質科学的特徴の変化は、火山の中長期的活動とそれを駆動するマグマ溜り一火道系の進化を理解する上で重要である。またVEI 4以上の噴火は国内での発生頻度は低いですが海外では数年に1回程度発生しており、様々な大規模噴火の共通点や相違点を明らかにする上で重要な情報源になると考えられる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

2019年度においては、伊豆大島で安永噴火をはじめとする大規模噴火を対象に地表踏査や試料採取を行い、地質・物質科学的解析に着手する。噴出物の年代学的解析、古記録の収集・検討を開始する。堆積物・噴出物解析に基づく噴火推移や物理化学パラメータの推定方法を検討する。国内の他の火山（浅間山、霧島山など）についても調査を進めるとともに、従来の研究をもとに大規模噴火の推移やマグマ供給系の特徴について情報を収集する。近現代に海外で発生した大規模噴火を選定し、地質データや観測記録等の収集をはじめめる。

2020年度においては、伊豆大島では地質・物質科学的解析を継続する。代表的な大規模噴火について噴火推移を推定するとともに、テフラデータと物理モデルを用いた解析を行い、噴出量・噴出率およびそれらの変化を明らかにする。岩石微細組織や鉱物化学組成データを基にしたマグマ溜りの温度、圧力、化学組成、物性値等の推定を行い、マグマ溜り一火道系とその変遷の解明を目指す。浅間山、霧島山においても地質調査を進める。国内の他の火山、海外の大規模噴火については必要であれば現地調査を行い、試料採取、地質・物質科学的解析を行う。また海外の新しい事例については地球物理学的観測データとの比較も進める。

2021年度においては、伊豆大島、浅間山、霧島火山の調査を継続し、地質・物質科学的解析を進める。噴出物の年代学的解析、古記録の調査を継続して進める。国内の他の火山、海外の大規模噴火に関する研究も継続し、噴火推移や物理化学パラメータの解明を目指す。

2022年度においては、霧島火山における大規模噴火の地質・物質科学的解析を継続する。地質データに基づく噴火推移の推定、噴出量、噴出率等の解析を行う。岩石組織や鉱物化学組成データを基にしたマグマの温度、圧力、化学組成、物性値等の推定を行い、マグマ溜り一火道系とその変遷の解明を目指す。また、伊豆大島、浅間山、霧島火山では、地球物理観測データとの照合を念頭に置き、マグマの蓄積・移動・上昇の時間スケール、火砕流等の付随現象の時期、噴火の継続時間についても考察する。国内の他の火山、海外の大規模噴火に関する研究も継続する。また大規模噴火の事象分岐の要因について考察する。

2023年度においては、これまでの研究を総括し、前駆的現象を含めた大規模噴火の物理化学パラメータとその推移、付随現象の時期や継続時間など噴火推移のパターン、それを駆動するマグマ溜り一火道システムの状態と（中長期的）時間変化をまとめる。また大規模噴火の事象分岐の要因について考察を進め、事象系統樹へ反映させることを目指す。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

伊豆大島については、歴史時代大規模噴火（Yシリーズ）の噴出物の粒子物性・岩石鉱物化学組成・微細組織の解析を中心に行い、大規模噴火に共通の性質、噴火推移やマグマ溜り条件に制約を与えるための研究を進めた。これまでの研究により、安永噴火（Y1）の爆発的噴火ステージの堆積物は大きく3つのユニット（Unit A, B, C）に区分でき、斜長石斑晶に乏しいマグマがしだいに斜長石斑晶に富むようになること、岩石組織が噴出量や噴出率に対応して変化することなど、噴火様式と噴火推移、噴出マグマの関係を明らかにしてきたが、この研究成果を論文としてまとめ出版した（Ikenaga et al., 2023）。

浅間山については16ka大規模珪長質火砕噴火の一連の活動のうち、2つのプリニー式噴火（YP, YPk）について地質学的、物質科学的研究を進め、それぞれの噴火の推移やマグマ溜り条件を明らかにする研究を進めた。YPおよびYPk降下軽石は、それぞれ上方細粒化と上方粗粒化を示すが、共に上位に

向かって異質岩片が増加する。軽石の見かけ密度はYPでは全体を通してYPkより低いが、発泡組織の解析においてもこれと整合的な結果が得られた。斑晶鉱物はYP、YPkで大差はないが、斑晶量はYPの方が多し。Fe-Ti酸化物温度計から推定されるマグマ温度は820-880°C、斜長石斑晶リムおよび基質ガラス組成とマグマ温度をもとに推定される含水量は4.0-4.6 wt.%、これらの結果と基質ガラス組成および斑晶量を用いて推定されるマグマ粘性は、YPk降下軽石で 10^6 Pa s、YP降下軽石では 10^{7-8} Pa sとなり、YPkの方が1桁以上低い値となった。この違いは主に斑晶量の違いに起因する。火砕物の粒径変化と異質岩片量変化の関係からは、YP噴火では火道壁の破壊と共に噴火強度が減少した一方、YPk噴火では火道径を拡大しながら噴火強度が増していった可能性が示唆される。マグマ蓄積条件の相違は主に斑晶量とマグマ粘性であり、これらの物理量と噴火推移（火砕流発生の有無等）や粒子物性（密度等）に密接な関係があることが予想される。

霧島火山群については、新燃岳、御鉢、えびの高原硫黄山、御池の起源マグマの共通性を明らかにするために、全岩主要、微量元素、Sr-Nd-Pb同位体比組成分析を行った。その結果、新燃岳、御鉢、えびの高原硫黄山は同位体3元素それぞれについてほぼ同様の組成比を有することから共通の起源物質に由来すること、御池は前三者と異なり、地殻物質の混染の影響を強く受けた起源物質に由来することなどを明らかにした。新燃岳、御鉢、えびの高原硫黄山の深部苦鉄質マグマが共通であることは、地球物理学的手法によりこれらの山体直下（深さ9-15 km）に広域に広がるマグマ蓄積領域がイメージされていることと矛盾しない。先行研究とこの岩石学的研究の結果をもとに霧島火山群のマグマ供給系モデルを提案した（川口・他, 2023）。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

伊豆大島については、安永噴火を中心とした大規模噴火の噴火様式およびその推移と、それらを駆動したマグマの蓄積場や上昇過程の描像が明確になった。とくに、大規模噴火の際に時間とともに斜長石斑晶量が増加するという推移パターンを明らかにし（Ikenaga et al. 2023）、大規模噴火の推移予測や伊豆大島の噴火シナリオの改訂に繋がる成果を得た（前野・池永, 2023）。また、一回の大規模噴火の推移で見られる斜長石斑晶量の増加と同様に、中規模噴火から小規模噴火へと数十年かけて推移していく過程で、斜長石斑晶量がしだいに増加していることも明らかとなった。この観察事実は、大規模噴火では短時間でマグマが上昇し爆発的になるのに対し、中規模噴火から小規模噴火への推移ではマグマが時間をかけて上昇し、脱ガスが進むことを示唆する。斜長石斑晶量、噴火規模、時間の関係性を見出したことは、伊豆大島の噴火の中長期予測に貢献する。

伊豆大島の大規模噴火には石基結晶度が高い噴出物が多く、それらの噴火ではマグマ上昇（減圧）時の結晶化に伴う粘性増加が爆発性の増加に寄与した可能性がある一方、安永噴火Unit Cのように噴出率が高い（爆発的）にも関わらず発泡度が低く、石基結晶度が低いという特異な噴出物が存在することも明らかとなった。このことは、爆発的な玄武岩質噴火の際のマグマ上昇パターンには複数のタイプがあることを示唆する。

西之島の近年の噴出物の岩石学的特徴の時系列変化を整理し、マグマ供給系について考察した。2019-2020年噴火における噴火様式や化学組成の劇的な変化は、より深部に由来する苦鉄質マグマの上昇に起因していることが明らかとなった（Maeno et al., 2021）。伊豆大島と西之島の大規模噴火の推移における共通点として、年単位の断続（継続）的かつ弱い活動の後に、それまでとは異なるマグマによる高噴出率の爆発的活動が続くことが挙げられる。このような噴火様式の急変の原因の一つとして、苦鉄質マグマに特徴的な芋づる式のマグマ供給系の構造（化学的性質の異なる岩脈や岩床の集合）が関係している可能性を提案した。

浅間山については、18世紀天明噴火の噴煙柱および火砕流由来の噴出物の物性分析、化学組成分析および発泡組織等の岩石組織の解析を行い、マグマ溜まり条件を明確化した上で、マグマ上昇過程について考察した。その結果、火砕流由来の噴出物で気泡数密度が顕著に大きな値を示すこと、すなわちマグマの減圧率が増加したことを明らかにした。このことは大規模噴火時の噴火様式遷移が、マグマの減圧率（上昇速度）に強く影響を受けていることを示す。また、16 kaの大規模珪長質火砕噴火について、プリニー式噴火の推移やそれを駆動するマグマ溜まり条件（温度、含水量、粘性）を明らかにした。

霧島火山群については、近年の小中規模噴火（2017-2018年新燃岳, Maeno et al., 2023）および歴史時代の大規模噴火（新燃岳享保、御鉢文暦）の噴火様式と推移、噴出物の特徴、マグマ上昇過程を明らかにし、さらに、それらの活動を引き起こしたマグマ供給系の描像を明らかにした。また、霧島火山群全体における完新世の噴火履歴を整理し、噴火推移パターンを明確にした。この噴火推移パター

ンと近年および歴史時代の観測・観察事例（新燃岳、えびの高原硫黄山、御鉢）、マグマ供給系モデルにもとづき、霧島火山群全体に対する火山活動推移モデルを作成した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

伊豆大島についてはこれまでの研究成果を既存の噴火シナリオに反映させることを試みた。既存の噴火シナリオでは噴火規模と噴火推移との関係や、それに関連する観察・観測項目などについて十分に触れられていなかったが、本研究の成果を組み込むことによりこれらの点が従来よりも明確になった。また、本研究が噴火発生時の事象分岐判断の際にどのように貢献できるかを具体的に示すことができた。

霧島火山群や浅間山については、大規模噴火を引き起こすマグマ溜まりの蓄積条件や上昇過程、噴火様式遷移（噴煙中から火砕流への遷移）に関係する減圧率等の物理化学パラメータが明確となったが、これらは事象分岐条件を制約する上で重要である。また、霧島火山群の火山活動推移モデルは、とくに複数の火口を形成している安山岩質火山における噴火推移パターンや事象分岐条件、マグマシステムをどのように結び付けて活動推移を理解できるのかを示すモデルケースであり、課題1(2)だけでなく課題2(5)にも貢献する。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Ikenaga, Y., F. Maeno and A. Yasuda, 2023, Temporal change in eruption style during the basaltic explosive An'ei eruption of the Izu-Oshima volcano, Japan: insights from stratigraphy and chemical composition analyses, *Frontiers in Earth Science*, 11, 172615, doi:10.3389/feart.2023.1172615, 査読有, 謝辞有

Maeno, F., S. Shohata, Y. Suzuki, N. Hokanishi, A. Yasuda, Y. Ikenaga, T. Kaneko and S. Nakada, 2023, Eruption style transition during the 2017–2018 eruptive activity at the Shinmoedake volcano, Kirishima, Japan: surface phenomena and eruptive products, *Earth, Planets and Space*, 75, 76, doi:10.1186/s40623-023-01834-3, 査読有, 謝辞有

Tamura, Y., T. Sato, O. Ishizuka, I.M. McIntosh, K. Yoshida, F. Maeno and Q. Chang, 2023, Genesis and interaction of magmas at Nishinoshima volcano in the Ogasawara arc, western Pacific: new insights from submarine deposits of the 2020 explosive eruptions, *Frontiers in Earth Science*, 11, 137416, doi:10.3389/feart.2023.1137416, 査読有, 謝辞無

杉森玲子・前野 深, 2023, 史料からみた北海道駒ヶ岳1640年噴火, *火山*, 68, 59-73, doi:10.18940/kazan.68.2_59, 査読有, 謝辞無

前野深・池永有弥, 2024, 伊豆大島のマグマ噴出量階段図, *防災科学技術研究所研究資料*, 500, 71-77, なし, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

前野 深・八坂泰河・外西奈津美・安田 敦, 2023, 霧島火山群えびの高原硫黄山溶岩の噴出過程, *日本火山学会2023年秋季大会*, P23

川口允孝・前野 深・安田 敦・田島靖久・佐野貴司・米田成一, 2023, 霧島火山岩類のSr-Nd同位体組成（速報）, *日本火山学会2023年秋季大会*, B1-07

石塚 治・井上卓彦・有元 純・川邊禎久・及川輝樹・前野 深, 2023, 周辺海域を含めた伊豆大島側火山形成場の特徴と活動時期, *日本火山学会2023年秋季大会*, A3-01

図子田和典・前野 深, 2023, プリニー式噴火の推移を決める要因—浅間火山16 ka噴火の例—, *日本火山学会2023年秋季大会*, P59

Maeno, F., 2023, Abrupt changes in eruption style in large-scale eruptions of mafic volcanoes, *IAVCEI Commission on Tephra Hazard Modelling - Advances in Tephra Seminar Series (ATSS)*, Online

前野 深・春田悠祐, 2023, 7.3 ka鬼界カルデラ形成噴火の時系列, *日本地球惑星科学連合2023年大会*, SCG57-P01

春田悠祐・前野 深, 2023, 7.3 ka鬼界カルデラ噴火におけるカルデラ形成に先行するフェーズ, *日本地球惑星科学連合2023年大会*, SCG57-02

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地質および観測に基づく大規模噴火の準備過程と噴火様式遷移の解明

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

前野深（東京大学地震研究所）,安田敦（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

鈴木由希（早稲田大学）,安井真也（日本大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：前野深

所属：東京大学地震研究所火山噴火予知研究センター

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

非線形動力学・計算材料科学との学際連携に基づく地震現象の多様性の統一的理解

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

イ. 地震断層滑りのモデル化

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題では非線形動力学・計算材料科学的アプローチに基づいた地震研究を行う。具体的には、以下3項目について研究を展開し、従来の実験的摩擦研究や地球物理学的モデルとは異なる観点からの理解を提出し、自然現象としての地震に関する理解を深める。

A. 摩擦の速度依存性の微視的モデル 地震は断層・プレート境界の力学的不安定性の結果であり、その本質を理解するためには摩擦法則の理解が必須である。いくつかの仮定を置くと、摩擦の力学的不安定性には定常状態摩擦力が負の滑り速度依存性を持たねばならないことがわかる。ゆえに、定常状態摩擦力が負の速度依存性を示すための微視的物理条件を定量的に詰めることが本質的に重要である。負の速度依存性の本質は、真接触面積の時間依存性（エイジング）にあるとこれまで思われてきた。しかし近年の分子論的スケールの実験によれば、真接触面積ではなく応力そのものがエイジングを示し、真接触部位の局所的な強さも時間とともに増大しうることを意味する。この物理的原因は分子論的な構造緩和と予想される。実際に、結晶構造が乱れたアモルファス系ではこのようなエイジングによる強度回復が知られている。本課題では、分子論的構造緩和を時間依存過程として取り入れた連続体モデルを構築し、摩擦の速度依存性の正負を決める微視的パラメタを同定する。

B. 断層相互作用系フルモデルの効率的シミュレータ開発 断層どうしの相互作用は地震活動の複雑性を決める重要な要因であり、例えば余震の性質（大森則のp値、c値）やGR則のb値にも影響を与えると考えられている。他方、断層多体系の作る地質学的構造（ひずみ集中帯など）とその形成過程は重要な学際的課題だが、そのような長時間スケールの挙動には断層間相互作用のみならず断層強度回復の時間依存性も大きく効くため、計算負荷が非常に高くなる。そのため、定量的なシミュレータ開発がこれまで困難であった。この問題を解決すべく、本課題では点震源多体系を対象を絞ることで効率的なシミュレータ開発を行う。より具体的には、時間発展にkinetic Monte Carlo法を採用し、波数空間で応力再分配を計算することで、計算負荷を大幅に低減する。イベントに伴う弱化と回復過程は考える状況によって変わりうるので、その設定は自由に変えられるよう、汎用性を高めたシミュレータを開発する。開発したコードを用いて、GR則の成立を確認し、b値の時空変動特性について応力の

絶対値や空間不均一性への依存性をノイズ（擾乱）の影響などを定量的に確立する。最終的には媒質の不均一性（特に弾性率の不均一性）を取り扱えるようなアルゴリズムも実装し、空間的な不均一性、特にひずみ集中帯形成過程とそのメカニズムを調べる。

C. 摩擦不安定性におけるノイズや応力摂動の効果に関する力学系理論的研究 現状、摩擦不安定性の理解は速度状態依存摩擦則に基づき分岐現象（Hopf分岐）として理解されているが、実際にはその描像とは矛盾する観測事実が知られるようになってきた。分岐理論においては、不均一性やノイズが分岐の性質を定性的に変えることが知られているが、沈み込み帯においても潮汐やプレート沈み込み速度の変動など、ノイズや摂動としてみなせる要因が多く存在する。ゆえに、このような擾乱を考慮した摩擦不安定性の理論を作り、観測事実を解釈し直す必要がある。本課題では、沈み込み速度の振動や変化が摩擦不安定性に与える影響について、シミュレーションと数理的な解析を行い、観測データと比較する。可能であれば安定性の変化を分岐理論的に理解する。とくに、スロー地震は潮汐などの応力摂動に鋭敏であることが知られているため、分岐点におけるノイズの影響を定式化しその現象論を確立することで、スロー地震への理解を深める。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

A. 摩擦の速度依存性の微視的モデル 2019～2020年度においては、アモルファス系の微視的な変形イベントを熱活性化過程としてモデル化した上で、空間自由度を考えない平均場モデルに基づき、摩擦力の速度依存性を計算する理論的な枠組みを構築する。平均第一到達時間を計算することで巨視的な摩擦ダイナミクスの特徴的時間スケールを評価することで摩擦力を計算する。構造緩和に関わる微視的パラメタが摩擦の速度依存性に及ぼす影響を定量化し、負の速度依存性が実現されるための一般的条件を確立する。2021年度からは空間自由度を考慮した計算を行い、2022～2023年度にかけて負の速度依存性が実現されるためのより一般的な条件を確立する。

B. 断層相互作用系フルモデルの効率的シミュレータ開発 2019年度においては、プロトタイプとして固体アモルファス材料の粗視化モデルに対するkMCシミュレータを構築する。2020年度においてはシミュレーションを実行して、アモルファス固体における塑性現象の臨界的な挙動を調べ、時間的な挙動（特に余震統計と待ち時間分布）および空間的な特性（stress shadow 的な塑性イベントの発生など）、ノイズ（擾乱）の影響などを調べる。2021～2022年度にかけては、前年度までに開発したシミュレータを拡張し、断層多体系や亀裂多体系を取り扱えるよう、イベント頻度と時間依存回復過程をマクロスケールで非熱的にモデル化し、kMCシミュレータへ実装する。2023年度においては、弾性率の不均一性を取り扱えるようにkMCシミュレーションを拡張し、亀裂進展ダイナミクスが本シミュレータで取り扱えるようにする。開発したシミュレータを用いて、空間的な不均一性、特にひずみ集中帯形成過程とそのメカニズムを調べる。

C. 摩擦不安定性におけるノイズや応力摂動の効果に関する力学系理論的研究 2019年度においては、偏微分方程式を系統的に簡略化する非線形動力学分野の手法（縮約理論）を用いて、不均一なプレート境界を速度状態変数摩擦法則でモデル化した偏微分方程式系を、分岐点近傍に注目してより簡素な方程式系へ帰着する。2020年度においては、初年度で導出した偏微分方程式系について、その分岐構造を明らかにする。2021～2023年度においては、分岐点近傍にある系について、ノイズが滑りの安定性に及ぼす効果に関して、シミュレーションと数理的な解析を行い、観測データを比較する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

A. 摩擦の速度依存性の微視的モデル

沈み込み帯浅部の断層物質はスメクタイトなど粘土鉱物を多く含むことが掘削調査から明らかになっている。スメクタイトは低摩擦物質である一方、鱗片状の特有な構造を剪断によって形成することが知られている。一般的に、粒子レベルのマイクロ内部構造とマクロな摩擦特性には密接な関係があり、粘土鉱物についてもその関係は興味を持たれるところである。特に、粘土鉱物特有の平たい粒子形状は内部構造形成に大きな影響を与えることが予想されるが、その微視的機構は検証されていない。このような非球状粒子系における剪断構造形成過程、および構造と摩擦特性の関係を微視的観点から解明することは断層の摩擦研究における重要課題になっている。その目的のためには粒子レベルにおけるマイクロなシミュレーションが有効手段であるが、非球状な粒子を扱うシミュレーションは技術的困難が多く、これまで地震発生論分野ではさほど研究が進んでいなかった。

我々のグループでは、粘土鉱物粒子を回転楕円体として扱う数値計算コードを前年度までで開発した。2023年度においては、開発したコードを用いて本格研究を実施した。単純剪断で定常状態を実現したシミュレーションにおいては、実験と同様に0.1を下回る低い摩擦係数を再現し、摩擦係数が実効法線応力の減少関数であることを発見した。摩擦特性が形状因子にはさほど依存せずHerschel-Bulkley型の構成法則を満たし、その指数が圧力に対して系統的に小さくなることを発見した。これらの結果は、実効圧力が低くなると摩擦係数の絶対値が増加するのみならず、速度強化の度合いも増すことを意味している。この結果は高い流体圧の条件でスロー地震的な遅いすべりが発生しうることを示唆しているが、その定量的条件は速度状態依存摩擦法則の結論とは異なるはずである。このような地震学的意義については、地震発生シミュレーションなどを用いた今後の更なる研究が必要である。

マイクロ内部構造については、回転楕円体が局所的な積層構造を作ることが確認できた。その特徴的サイズは剪断の最中には2粒子分程度であり、すべり速度の減少関数である。これは剪断が積層構造形成を阻害することを意味する。実際、剪断をやめると積層構造の平均サイズは時間とともに増加することを確認し、その時間依存性が対数関数的であることを発見した。これは時間について対数関数的な回復現象は摩擦力についてはよく知られているが、内部構造が同様の回復を示す例として注目し値する。ただし、この系で摩擦力も同時に対数関数的に回復するかはまだよく分かっておらず、今後の精査が必要である。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

A. 摩擦の速度依存性の微視的モデル

A-1 摩擦界面の原子論的詳細に関する一つの有力なモデルは、二つの固体結晶が摩擦面で重なりあって粒界を構成しているというものである。いくつかの特別な場合を除き、粒界では格子構造が著しく乱されアモルファス系によく似た構造をとると考えられている。それに加えて、アスペリティでの応力集中による塑性変形も摩擦面の格子構造を大きく乱す要因として挙げられる。従って、微小なアモルファス系の剪断に伴う構造緩和が摩擦の原子論的過程であると考えてよい。そのような背景と動機から、アモルファス系のレオロジーとその微視的素過程に関する研究を実施した。

まずアモルファス系のレオロジーの微視的素過程に関する研究を行った。アモルファス系の剪断変形においては特有の遅い構造緩和過程が存在し、その遅い緩和がレオロジーを決めているが、この過程はある特定の音波モードによって実現していることが先行研究で知られていた。我々はこの音波モードに注目し、一種の分子動力学法シミュレーションを用いて以下のことを発見した： i) 音波の周波数とマクロな緩和時間の間に簡単な関係が成り立つ、ii) 分子配置の詳細には依存しない、iii) 音波モードは本質的に圧縮・膨張の自由度である。この結果により、マクロなレオロジーを支配する遅い自由度を同定しその頑健性を確かめたことになる。

アモルファス系の剪断変形においては特有の遅い構造緩和過程が存在し、その遅い緩和がレオロジーを決めている。このような遅い緩和に関する一種の粗視化モデルを構築した。原子論的な構造緩和の時間依存性がある特定の関数形を持つときに、速度弱化型摩擦が出現することを発見した。従来知られていた速度弱化メカニズムは接触面積の拡大だったが、ここでのメカニズムによれば、接触面積が一定の場合でも速度弱化が発生する。ii) アモルファス系の簡単なモデルに関する分子動力学シミュレーションを実行し、構造緩和の時系列特性を幅広い密度領域で確認し、臨界密度においては応力の緩和挙動がベキ的になることを確かめた。その遅い緩和を担う実体が孤立した遅いモードであることを確認し、その固有周波数を密度の関数として計算した。

A-2 摩擦に関する同様のテーマとして、より微視的なアプローチによる研究も並行して実施した。一般に摩擦現象は滑り界面での複雑な機械化学的プロセスを伴うが、界面に水が存在する場合は化学的効果に起因すると考えられる異常な摩擦特性が得られることが多い。例えばシリカを多く含む鉱物では超低摩擦が実現することが以前より知られているが、そのメカニズムはまだ謎に包まれている。ここでは、第一原理分子動力学シミュレーションと実験を併用して、シリカと水の低摩擦実現の分子論的メカニズムを研究した。シリカ界面に水が存在する状況においては、摩擦界面に二重層が形成されることを確認した。外側の摩擦層はコロイダルシリカであり、摩擦界面から浮遊しやすい。内側の摩擦層は親水性水和物であり、これは固体と強く結合していることが明らかになった。外側のコロイド状シリカ層が潤滑剤として機能し、摩擦を低減することが確かめられた。滑り界面において、水とコロイド状シリカ層は水和物層の親水性によって保持され、耐荷重能力も高い。表面摩擦層による摩擦の減少と、2番目の摩擦層に関連する耐荷重能力の増加が協働的に超低摩擦を実現しているというシナリオをここでは提案した。

A-3 よく知られている速度状態依存法則について、従来の発展法則ではリミットサイクルが存在しないことを数学的な定理を利用して厳密な形で示すことに成功した。いくつかの代表的な発展法則についてこの作業を行い、radiation dampingなしでは解が発散してしまい周期解が存在しないことを示した。その上で、radiation dampingなしで周期解を実現できる発展法則を複数発見した。これらの発展法則はaging lawの拡張とも見なすことができるが、速度ステップ変化後の緩和過程ではaging lawよりも対称性がよい。さらに、1自由度モデルにおいて実際にradiation dampingなしでリミットサイクルを安定に実現することを示した。

A-4 粘土鉱物粒子を回転楕円体として扱う数値計算コードを開発し、その摩擦特性と内部構造形成過程に関する研究を実施した。単純剪断で定常状態を実現したシミュレーションにおいては、実験と同様に0.1を下回る低い摩擦係数を再現し、摩擦係数が実効法線応力の減少関数であることを発見した。摩擦特性が形状因子にはさほど依存せずHerschel-Bulkley型の構成法則を満たし、その指数が圧力に対して系統的に小さくなることを発見した。これらの結果は、実効圧力が低くなると摩擦係数の絶対値が増加するのみならず、速度強化の度合いも増すことを意味している。この結果は高い流体圧の条件でスロー地震的な遅いすべりが発生しうることを示唆しているが、その定量的条件は速度状態依存摩擦法則の結論とは異なるはずである。このような地震学的意義については、地震発生シミュレーションなどをを用いた今後の更なる研究が必要である。マイクロ内部構造については、回転楕円体が局所的な積層構造を作ることが確認できた。その特徴的サイズは剪断の最中には2粒子分程度であり、すべり速度の減少関数である。これは剪断が積層構造形成を阻害することを意味する。実際、剪断をやめると積層構造の平均サイズは時間とともに増加することを確認し、その時間依存性が対数関数的であることを発見した。これは時間について対数関数的な回復現象は摩擦力についてはよく知られているが、内部構造が同様の回復を示す例として注目に値する。

B. 断層相互作用系フルモデルの効率的シミュレータ開発

B-1 地震活動を統計的に記述する研究には長い歴史があるが、一方でその統計性を破壊の物理モデルに関係づけて理解しようとする試みはそれほど多くない。そのような試みの中で代表的なものとしてはDieterichの核形成理論に基づく地震活動理論が挙げられる。この理論は地震発生場の応力履歴と地震の発生率を関係づけるようになってきているが、例えばマグニチュード履歴などはあらわには考慮されておらず、全て応力履歴に換算しなくてはならない。そしてマグニチュード履歴と応力履歴の関係は、点震源に話を限定してもそれ自体が全く非自明な問題である。ここでは断層破壊の物理過程から出発して、必要最小限な仮定のみを設定して、複雑な地震活動が創発的に現れる仕組みについてのミニマルモデルを与えた。（例えば速度状態依存摩擦法則なども仮定しない）。具体的には、空間的に広がった系を考え、地震は点震源として扱い、発生したモーメントテンソルによる応力場の変化を直接計算することで、断層多体系の長時間ダイナミクスを追うことができる。我々はまずモデルの物理的な検討、効率的なアルゴリズムの考案、および数値計算コードの構築を行った。設定したモデルの概略は以下のものである。i) 任意の点においてクーロン応力が閾値を超えると地震発生する。（ただしこの基準は暫定的なものであり今後いくつか異なった基準を試す予定である）。ii) 地震による応力降下は一定（あるいは一定値の周りに揺らぐ）とし、その応力降下を実現するモーメントテンソルを弾性論に従って求める。iii) これによって周囲の応力場が変化するが、クーロン応力が閾値を越えたサイトでは再びイベントがおこる。これは余震と見なされる。iv) 応力場を計算し直し、応力閾値に達するサイトがなくなるまでiからiiiの手続きを続ける。v) イベントが発生しなくなったら系に載荷する。このモデルのコードを実装し、汎用化と高速化も実施した。gnuプロジェクトの一環であるフリー数値計算ソフトoctave上でシミュレーションが実施できるようコード開発を行い、ベンチマークテストも実施した。その上で、このモデルにおいてグーテンベルク・リヒター則が創発的に出現することを確かめた。これは、弾性理論に基づいた応力緩和を正確に扱っている点において、（短距離相互作用しかモデル化していない）いわゆる自己組織化臨界モデルとは本質的に異なる。同時に、グーテンベルク・リヒター則が成立するために重要となるパラメタを複数同定した。特に、b値はイベント後の応力回復過程にも依存することが明らかになった。

B-2 断層形状の粗さ（ラフネス）に注目し、ラフネスの自己アフィンの性質に起因する応力不均一性が地震発生の統計性に及ぼす影響を調べる研究を実施した。自己アフィンの応力場では不均一性がスケール依存しており、小さなスケールほど不均一性が相対的に大きくなる。従って、応力の不均一性がバリアとして働くモデルを仮定すれば、自己アフィンの応力場からGutenberg-Richter則が自然に結論されることになる。そのような観点から、自己アフィンの不均一応力場における地震発生

過程をモデル化した。これは閾値を超えると地震発生し一定の応力降下が起こるという簡単なモデルであるが、Gutenberg-Richter則と大森則の両方を再現する。さらに、統計力学における概念を用いることで、モデルにおけるランダムな応力場の特性（ハースト指数）が、GR則のb値および大森則のp値に関係づけられることを示した。これらのことを二次元断層と三次元断層の場合に確かめ、モデルに次元依存性がないことも明らかにした。

B-3 地震活動データの解析に新手法を導入し、地震活動の新しい見方を開発することも試みた。これは時系列データを数学的なグラフ（ネットワーク）にマップし、生成されたグラフを複雑ネットワーク分野の理論を用いて解析する方法である。時系列の特性がグラフの特性に写されるので、グラフ解析という従来と全く異なる観点から時系列を解析することが可能になる。微動まで含めた様々な地震活動のマグニチュード時系列を対象とし、それをvisibility graphと呼ばれる手法でグラフにマップした上で、生成されたグラフの性質を解析した。その際、地震活動の特性が「ノード次数分布」と呼ばれる性質によく反映され、マグニチュード時系列がGR則に従ってランダムに生成された場合にはある特定の分布関数に従うことを確かめた。実際の地震時系列に関してもよく似た分布が生成され、一見、「マグニチュードはランダムに決まる」というETAS的な仮説と整合するかに見えるが、Kolmogorov-Smirnov検定を行うと実際のカatalogとランダム生成された時系列とは有意に異なる分布を示すことが明らかになった。これは微妙な差異とはいえ、マグニチュード時系列が統計的に相関を持った時系列であることを示す有力な結果である。

C. 摩擦不安定性における応力摂動効果

C-1 地震発生予測やリスク評価において、地殻応力レベルの推定は本質的に重要である。しかし地震発生場における応力の絶対値は観測不可能なので、何らかの間接的手法の開発が必要とされている。その一つの可能性として、ここでは応力摂動に対する（スロー地震まで含めた）地震発生率の変化に注目する。時間的に変動する応力に対して地震発生率が変動する現象はいくつかの地域で知られている。特に潮汐については応力変動幅がかなりの程度定量的に評価できるので、潮汐応答性の良い微動の場合は応力変化量と微動発生率が定量的に結び付けられている。そこでの結果はDieterich理論を支持しているようにも見えるが、その一方で実効法線応力がたかだか数kPaであると解釈しなくては理論と整合しないという深刻な問題をはらんでいる。このような状況は、滑り核形成過程に代表される地震の準備過程を今一度根底から疑ってみる必要があることを示唆していると思われる。

そこで計画期間の前半においては地震発生における応力摂動の効果をより物理的に解明すべく、高精度の制御と計測が可能な岩石破壊実験において、応力変動効果と微小破壊の関係を定量的に確立することを試みた。パリ・高等師範学校(ENS)との共同研究として行われたこの実験では、流体圧を変動させることによって封圧を変動させ、差応力の変化と微小破壊発生率の関係を調べた。その結果、差応力に対して0.1%程度の微弱な流体圧変動が微小破壊発生率と有意に相関することが確かめられた。この実験では非定常性が強いので、応力絶対値と微小破壊発生率との定量的関係式の確立には至らなかったが、興味深いことに流体圧変動と微小破壊発生率との相関は試料の最終的破壊が近づくにつれて急激に高まった。この結果は、巨大地震の前には潮汐相関が高まるという観測研究と整合的である。

C-2 地震活動に関する自己組織化臨界的なセルモデルについて、周期的応力摂動（正弦波）を加えた際の地震活動の変化を調べた。ここで応力摂動と地震発生率の位相ずれは応力摂動の周期に依存し、短周期においては地震発生率と整合するのは応力の絶対値ではなく時間変化率であることを確認した。応力摂動がより長周期になると位相差は系統的にずれていくが、同時に応力摂動への応答にマグニチュード依存性が見られることを発見した。

C-3 断層面上に速度状態依存摩擦法則を仮定したモデルにおける潮汐応答性も調べ、静的グリーン関数とradiation dampingを仮定した準静的シミュレーションによって不安定滑りの核生成過程に対する応力摂動を直接計算し、地震発生時刻（滑りが高速化する時刻）と応力摂動の位相と振幅に対する関係を定量化した。断層の法線方向応力の摂動についてはLinker-Dieterichによる発展法則を採用し、この効果が応力摂動の位相に対して逆位相で効くことが分かった。指数関数的に特徴的な応力定数の値はDieterich理論と概ね同じであった。

C-4 動的誘発の研究においては、断層面に広く存在する岩石摩耗物（断層ガウジ）に注目し、これを粉体層とみなして粒子レベルの力学まで考慮することでモデルの空間解像度を高めた。これは、地震波が潮汐よりはるかに高周波数の応力変動であるため、より小さいスケールでの物理過程が本質的と考えられることによる。臨界剪断応力の8割程度の応力状態にある粉体層に、地震波を模擬した過渡的な動的歪みを与えて、不安定すべりが誘発される動的歪みの下限値（臨界歪み）をシミュレーション

によって調べた。その結果、臨界歪みは波長に大きく依存し、共鳴波長において顕著に低下することを発見した。共鳴波長においてはまず粉体層全体としての剛性率が低下し、その結果ゆっくりとしたすべりが始まり、ある時点で一気に加速する。このことを確かめた上で、端緒となる剛性率の低下が粒子間のすべりによってもたらされていることを発見した。

ただしシミュレーションにおける臨界歪みの値は 10^{-6} 程度であり、例えばカリフォルニアにおける観測値 10^{-9} とは大きな乖離がある。この乖離はシミュレーションと天然断層のスケールの違いに原因があると考えられるため、系の大きさ（厚み以外の方向の長さ）を系統的に変えたシミュレーションを実施し、臨界歪みが系の大きさにどのように依存するか調べた。その結果、臨界歪みは大きな系で小さくなり、その依存性はベキ法則で記述されることを発見した。このベキ則を十分大きな系まで外挿すると、臨界歪みは共鳴波長の時に 10^{-9} 程度まで低下すると推定され、観測を十分説明しうる。

共鳴波長の時に臨界歪みが顕著に低下するという知見に基づくと、動的誘発の起こりやすさに関して地域依存性があることも説明可能である。実際、日本とカリフォルニアにおける臨界歪みは大きく異なり、日本では 10^{-6} 程度、カリフォルニアでは 10^{-9} 程度であることが知られている。本論文では、この違いを断層破砕帯の典型的な厚みの違いに起因するとして説明している。この説明は外挿に基づく推測とはいえ一定の説得力を持つもので、他地域での観測結果も含めて今後の観測研究による系統的な検証が待たれる。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

災害を与える物理現象は地震波と津波であるが、どちらも断層のすべりによって発生し、すべり様式（加速過程）によってその強度・大きさが決まる。そして断層のすべり様式を決定するのは断層に働く摩擦力である。また、プレート境界・断層における地震発生シナリオを提供する地震発生シミュレーションにおいても、鍵となる仮定は断層の摩擦力である。ゆえに、災害軽減の方策が依って立つべき基礎科学的知識の一つとして断層の摩擦力の理解が重要であることは論を俟たない。

本研究では、そのような観点に立って断層摩擦に関する基礎的研究を実施した。実験室スケールでは概ね正しいことが知られている速度状態依存摩擦法則について新しい発展法則を二つ提唱し、経験的摩擦法則についてより広い視点を提供した。この摩擦法則のもとでは同じ断層がスロー地震と通常の地震を起こすことが可能であり、その必然性と地震学的意義の検討が今後の重要課題となっている。他方、近年では単純な速度状態依存摩擦法則には従わない物質も多々発見されており、経験的摩擦法則の理解を深めることが喫緊の課題になっている。そこで本研究では、通常速度状態依存摩擦法則では記述できないように見える代表例である粘土鉱物の摩擦法則の理解を目指した。これまで困難だった非球形粒子の摩擦・レオロジー特性を離散要素シミュレーションで再現・解明することで、実験が先行していたこの分野の物理的な理解を促進することができた。ここで解明した摩擦特性を簡素な数式で表現し、地震発生シミュレーションに実装することで、地震発生シナリオへ新しい可能性を提示することが今後の重要な課題である。

地震災害軽減のために重要なもう一つの要因は、地震発生長期予測である。これについては、純粋科学として地震発生に潜む規則性を発見していくことがブレイクスルーにつながるため、地震活動の研究は災害軽減において重要な役割を果たしている。その際にETASをはじめとする統計モデルは主要な役割を果たしているが、マグニチュード時系列における相関の有無が本質的に重要である。我々は、グラフ理論という全く異分野における手法を用いて、明確なマグニチュード相関を示した。ただしここではYES/NO型でしか答えられておらず、その相関の具体形を明らかにすることが今後の重要課題として残されている。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

François Pétrelis, Kristel Chanard, Alexandre Schubnel, and Takahiro Hatano, 2023, Earthquake magnitude distribution and aftershocks: A statistical geometry explanation, Phys. Rev. E, 10.1103/PhysRevE.107.034132, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

摩擦運動に対する微細不均質構造の影響と実効的摩擦法則の可能性

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京大学地震研究所,数理系研究部門,東京大学大学院理学系研究科

他機関との共同研究の有無：有

波多野恭弘（大阪大学理学研究科）,新山友暁（金沢大学自然科学研究科）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻理論物質学講座

電話：

e-mail：

URL：<http://thmat8.ess.sci.osaka-u.ac.jp>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：亀伸樹

所属：東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

千島海溝・日本海溝における複合海底地震測地観測によるプレート境界の挙動解明とそのモデル化

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

地震

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

イ. 地震断層滑りのモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(5) 総合的研究との関連：

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

日本海溝，房総半島沖相模トラフの沈み込み型プレート境界における多様なすべり現象の時空間分布を長期海底観測により明らかにする．余効すべりがほとんど起こっていない東北沖地震の本震時すべりが大きかった領域において，プレート内地震活動に着目して，そこでの応力状態を推定することを通して，間接的にプレート境界の力学状態の時空間分布の推定を試みる．また，本震破壊域内においてプレート境界型地震の活動が回復する過程を追跡することで，そこでの巨大地震発生後のプレート境界の固着・すべり状態を把握する．また，東北沖地震後に余効すべりが卓越している領域では，それを背景として発生している多様な低周波微動・（超）低周波地震・周期的スロースリップなどに注目して，プレート間すべり速度の時空間発展や，それらすべり現象の相互作用を明らかにする．

日本海溝と対比的に，近い将来に巨大地震が発生する可能性がある千島海溝根室沖ではGPS/A観測点や海底間音響測距からなる海底測地観測によりプレート間固着の実態，特に固着域の上端の位置を明

らかにする。これに加えて、海底圧力観測の高度化によって鉛直変動場の把握を図り、プレート境界浅部での固着・すべり状態の連続的な変化の理解を試みる。海底測地観測網と陸域GNSS観測網を併合利用することで海域から陸域にかけて長大測地測線を構築し、千島弧のレオロジー構造を考慮することで、より正確なプレート間固着の下端の位置の推定精度を向上させ、来るべき巨大地震の震源域の幅を制約する。

実験・モデル研究では、深海掘削により得られた試料などを用いてプレート境界の状態を再現した摩擦実験により、摩擦構成則パラメータの温度・変位速度・間隙水圧・物質（粘土鉱物含有量など）依存性を明らかにし、それらを反映した数値モデリングによって浅部から深部までのプレート境界のすべり挙動を再現する。さらに、観測により得られた知見と併せて、日本海溝や相模トラフにおけるプレート境界断層の多様なすべりの空間分布、相互作用や時間発展を明らかにするモデルの高度化を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

2019年度：

- ・千島海溝根室沖において、GNSS/A装置及び海底間音響測距装置による海底地殻変動観測を開始する。また根室沖におけるプレート間固着の定量把握のために当該地域のレオロジー構造の検討を開始する。
- ・日本海溝北部東北沖地震震源域外側領域における日本海溝北部におけるGNSS/A観測を実施する。また宮城沖において、長期観測型自己浮上式海底地震計による海底地震観測を実施する。
- ・これまでに得られた海底データを用いて、スロー地震現象の探索やプレート内応力状態の時空間変化推定を行う。
- ・深海掘削により得られた試料などを用いてプレート境界状況を再現した摩擦実験を継続する。

2020年度：

- ・千島海溝根室沖における海底地殻変動観測を継続するとともに、ドリフト自己校正機能付海底圧力観測を実施する。広域地殻変動モデリングのためのレオロジー構造のプロトタイプモデルを構築する。
- ・日本海溝におけるGNSS/A観測を継続・実施する。また、宮城沖における海底地震観測を継続する。
- ・これまでに得られた海底データを用いて、スロー地震現象の探索やプレート内応力状態の時空間変化推定を継続する。
- ・房総半島沖相模トラフ陸側斜面における自己浮上式海底圧力計の回収再設置をおこない、長期にわたる海底上下地殻変動観測を実施する。
- ・初年度に引き続き、深海掘削により得られた試料などを用いてプレート境界状況を再現した摩擦実験を継続する。

2021年度

- ・千島海溝根室沖における海底地殻変動観測を継続し、初期的な水平変位場の検出を試みる。得られた地殻変動場を説明するプレート間固着の予察的モデルを得る。2020年度に設置したドリフト自己校正機能付海底圧力計を回収し、その精度検証を実施する。
- ・日本海溝におけるGNSS/A観測を継続する。また、宮城沖における海底地震観測を継続する。
- ・スロー地震現象の探索およびプレート内応力状態の時空間変化推定を継続する。

引き続き深海掘削やコアリングにより得られた資料を用いたプレート境界状況再現実験を継続する。

2022年度：

- ・千島海溝根室沖における海底地殻変動観測を継続する。機能を改良したドリフト自己校正機能付海底圧力計を海底ケーブル式観測点のごく近傍に投入し、その精度検証を行う。
- ・日本海溝におけるGNSS/A観測を継続する。また、宮城沖における海底地震観測を継続し、地震活動の回復の時空間分布を把握する。
- ・房総半島沖相模トラフ陸側斜面における自己浮上式海底圧力計の回収再設置をおこない、長期にわたる海底上下地殻変動観測を継続する。
- ・前年度に引き続き、深海掘削により得られた試料などを用いてプレート境界状況を再現した摩擦実験を継続しつつ、観測により得られた知見と併せて、実際のすべり現象を説明する予察的なモデルの構築を行う。

2023年度：

- ・千島海溝根室沖における海底地殻変動観測を終了して、成果のとりまとめを行う。また地殻変動場

を説明するプレート間固着モデルを構築する。前年度投入したドリフト自己校正機能付き海底圧力計を用いた観測との比較から、海底ケーブル式観測点の水圧計の長期ドリフト特性の抽出を行う。

- ・日本海溝におけるGNSS/A観測を継続し、変位速度ゆらぎの有無について検証を行う。また、宮城沖における海底地震観測を継続し、東北沖地震以降の地震活動の回復の時空間分布を明らかにする。
- ・房総半島沖相模トラフ陸側斜面における海底上下地殻変動観測の結果をとりまとめ、プレート間滑りを推定する。
- ・過去4年間に実施したプレート境界状況を再現した摩擦実験の結果と、観測により得られた観測により得られた知見と併せて、実際のすべり現象を説明するモデルを提示する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

日本海溝および千島海溝根室沖でのプレート境界浅部の固着・すべり状態を定量評価することを目的としたGNSS-A観測を継続した。2023年4～5月に新青丸とWave Glide（5月に備船により回収）によって根室沖での観測を実施したほか、8～10月に日本海溝沿いでの観測を新青丸とWave Gliderによって、10月に根室沖での観測を備船によってそれぞれ実施した。音響走時検出にはPhase-Only Correlation解析および機械学習（黒須・木戸、2023）を用い、音響測位解析はMCMC法を用いた手法によって、アレイ変位および音速水平勾配構造を推定した。

千島海溝根室沖において2019年から最近までに実施されたGNSS-A観測で得られたデータを用いてアレイ変位速度を求めた。5年間のデータを音速水平勾配の同時推定によりアレイ変位速度の推定精度が向上し、海溝軸海側1点、陸側2点のいずれにおいても、太平洋-オホーツクプレート間の相対速度に近い向き・絶対値の変位速度が得られた。この結果は、根室沖では大きなすべり欠損率が海溝軸近くにまで及んでいることを示唆する（図1）。

日本海溝沿いの水平変位速度分布の分布については、中部で粘弾性緩和による陸向き変位が卓越する状況が継続している一方で、北部・南部では東北沖地震後の余効変動の空間パターンが時間変化していることを示す結果が得られた。

日本海溝北部における浅部テクトニック微動と通常地震の活動の関係について、S-netおよび自己浮上式海底地震計（OBS）による地震観測データにもとに解析を進めた。微動活動のごく近傍のプレート境界上で通常地震が、微動バーストに同期して活発化する現象が繰り返し起こっていることが認められた。微動と連動して活発化する通常地震は群発的に発生する傾向がある他、連動活動の期間中には微動と地震の震央分布が共通の時空間パターンに沿って拡大する様子がしばしば確認される（図2）ことから、こうした連動活動は短期的SSEにより励起されている可能性が高い。連動活動はいくつかの小領域に別れて発生しているが、それらの小領域の空間分布は2011年東北沖地震以前と以後で変化しない。ただし、繰り返す連動活動のイベントごとに活発化する小領域の組み合わせの組み合わせが変化しており、SSEの規模や発生場所の多様性が示唆される。

2011年10月から約1年間および2013年10月から1年間の観測を行った東北沖地震の震源域北部における長期観測型海底地震計データの詳細解析を引き続き行った。この観測は東北沖地震発生後から約3年後までの宮城県沖、岩手県沖の震源域北部の地震活動を把握することを目的としている。また、東北沖地震発生前の2007年から2008年にかけて実施した長期観測型海底地震計による観測データによる震源分布との比較を行った。詳細な震源分布が得られており、発震機構解を含めた地震活動の時空間的な変化を明らかにした。

房総半島沖において、自己浮上式海底圧力計6台での観測を続けている。2024年度に回収、設置予定である。房総沖スロースリップの海底圧力計データの解析を引き続き行った。昨年度までに開発した海洋モデルに対してマルチチャンネル特異スペクトル解析を用いて成分に分け、圧力計データと海洋モデルの相関がよい成分のみを用いて海洋モデルを再合成し、それを圧力計データから除去するという方法を、更新された海洋モデルを用いて、2014年と2018年のデータに適用した。また、海洋変動を除去した後、季節変動等を表すパラメトリックモデルを当てはめ、スロースリップによる変動を抽出した。その結果を用いて、2014年と2018年のスロースリップのすべり分布を求めた。陸上GNSSデータだけの結果と比較して、圧力計データを入れた結果のほうが、すべりの推定誤差が海側で小さくなり、より精度よく求められていることがわかった。すべり分布は、2018年のスロースリップに対しては、圧力計データを入れた結果は、GNSSデータだけの結果と比べて全体のすべり量が下がり、すべりが海側に張り出すようになった（図3）。

蛇紋岩試料を用いた高間隙水圧下における高圧変形実験とフィールド調査に基づいて、間隙水圧変化

に起因した間欠的微動・スリップ（ETS）発生サイクルの地質学的モデルを構築した（図4）。微動は岩石全体に発達する開口破壊および開口・剪断破壊に、短期的スリースリップイベント（SSE）は局所的に発達する粘性剪断帯の活動に、それぞれ対応すると考えられる（図4）。

日本海溝に沈み込む海洋プレート基盤玄武岩および被覆層堆積物のチャート、遠洋性粘土および半遠洋性粘土の4試料について、これまで温度25~200°C、封圧150 MPa、間隙水圧50 MPa、軸方向変位速度0.1~10 $\mu\text{m/s}$ の三軸摩擦実験を行ってきたが、今年度は補完実験を行い、これら4試料の摩擦特性の温度変化を総括した。摩擦構成則による実験データのフィッティングの結果、どの試料でも摩擦構成則定数aは温度変化が小さいのに対し、定数bは100°C以上で温度上昇に伴って大きく増加する傾向を示した。この結果、a - b（正ならば断層運動は安定=非地震性で、負の場合に断層運動が不安定=地震性になり得る）は100°C以上で温度上昇に伴って大きく減少し、正から負へと転じた

（図5）。a - bの正から負への遷移温度を T_{tr} とすると、チャート試料で $50^\circ\text{C} < T_{tr} \leq 100^\circ\text{C}$ 、玄武岩試料で $T_{tr} \approx 100^\circ\text{C}$ 、半遠洋性粘土試料で $100^\circ\text{C} < T_{tr} < 150^\circ\text{C}$ 、遠洋性粘土試料で $150^\circ\text{C} < T_{tr} < 200^\circ\text{C}$ となった（図5）。一方、遠洋性粘土試料の定数bは他の試料と異なり100°Cで最小となり、この結果、a - bも100°Cで最大となった（図5）。これは、この試料に多く含まれるスメクタイトが脱水して難透水性ガウジ層内部の間隙水圧が上昇し、ガウジ粒子の固着を抑制したためと考えられる。地震波形が近地で観測されている2010年インドネシア・メンタワイ津波地震の地域に存在する付加体構造と、すべり分布を説明するように応力降下量を与えて動的破壊のモデル化を行ったところ

（図6a）、津波地震の特徴を定量的に再現することができた（図6b）。1896年明治三陸津波地震も、同様に日本海溝沈み込み帯浅部の付加体が存在する領域で発生したと考えられる。

・計画期間中（令和元年度~5年度）の成果の概要

海域観測研究

17世紀のM9級巨大地震時に千島海溝沿いのプレート境界浅部で大きなすべりが発生した可能性が指摘されている根室沖において、GNSS-A海底地殻変動観測に着手した。観測開始からの5年間の間に得られた観測データの解析により、プレート境界浅部でのすべり欠損速度はこの海域での海陸プレート間の相対速度に近いことが明らかとなった。次の巨大地震の発生に向けて大きなすべり欠損が蓄積されている可能性が高い。

周期的スロースリップを繰り返す三陸沖北部の海溝近傍において、海底での変位速度の時間ゆらぎを検知することを目標とした高頻度GNSS-A観測を実施した。無人機（Wave Glider）を活用することにより毎年2回の観測機会を維持することができた。小繰り返し地震解析からすべり速度の加速が認められる2015年にみられたような変位速度の短期的な加速は検知されなかったが、東北沖地震直後に比べて陸向きの水平変位速度が加速する傾向にあることが明らかとなった（図7）。後述のように浅部テクトニック微動の活動度が長期的に静穏化傾向にあることと合わせると、東北沖地震後の余効すべりはこの海域にまで及んでいたが、そのすべり速度が長期的に減速傾向にあるものと考えられる。

宮城県沖で実施してきたOBS繰り返し観測で得られたデータを用いて再決定した震源分布をもとに、2011年東北地方太平洋沖地震の前後におけるプレート内応力状態を推定した。上盤プレート内地震の発震機構解から応力場がプレート境界面からの距離に応じて変化している。この変化を、東北沖地震に伴う地震時応力変化の結果と仮定すると、地震前の水平面内での差応力の大きさは15MPa程度であると推定される。

日本海溝から千島海溝の海域におけるテクトニック微動の活動について、東北沖地震以前に実施された自己浮上式海底地震計による観測データをもとに解析を進めた。微動活動域は、東北沖地震後に構築されたS-netで検知された微動の活動域と、一部の例外を除いて一致する。東北沖地震以前に同地震の震源域内で見られた微動は、S-net観測では捉えられてない。また、2008年茨城県沖の地震

（M7.0）の直後には、現在の微動活動が活発ではない領域で、微動が発生していたことが明らかとなった。

三陸沖および福島県沖の2016年から2022年の微動活動の時間変化をみると、三陸沖では微動の発生頻度は時間の経過とともに低下している一方で、福島県沖では顕著な時間変化はみられない。微動の活動度に東北沖地震後の余効すべりが影響していると考えられることから、両海域で余効すべりの経時的な減衰の様相が異なっていることを反映していると解釈される。

日本海溝南部では、2011年東北沖地震時の大規模なプレート境界浅部でのすべりは発生せず、地震後に顕著な余効すべりが進行している原因を、すべり様式の境界が重力異常分布の境界と一致していることに注目し、海山の沈み込みに起因するプレート境界沿いの低速度・低密度の薄い層の存在を考慮

した地震サイクルシミュレーションを行った。これにより、深海底タービダイトの分布から明らかにされたM9級巨大地震の発生サイクルをモデル化することに成功した。

日本海溝と千島海溝の会合部におけるプレート境界の挙動を把握するために、海底地震計群列(Array of Array, 以下AoA)による地震・微動観測を、2019年から2022年まで行った。また、2014年度から開始した長期観測型海底地震計による宮城県沖におけるモニタリング観測は、当該領域に日本海溝海底地震津波観測網(S-net)が設置されたことを考慮して、観測網を再構築して、保険各期間中継続した。東北沖地震の震源域北部における長期観測型海底地震計データによる地震活動の時空間把握を行った。岩手県沖において、東北沖地震発生前の2007年から1年間、2011年10月から約1年間および2013年10月から1年間の観測から、精密な震源分布と発震機構解を元めた。その結果、東北沖地震前後で活動域が異なっており、地震後についても震源や発震機構解が時空間変化していることがわかった。房総半島沖において、自己浮上式海底圧力計での観測を行った。この期間には、房総沖でスロースリップは発生しなかったが、以前より観測を継続しているため、2018年に発生したスロースリップも含めて、データの解析手法の開発と海底圧力計データも含めたスロースリップのすべり分布の解明を進めた。

データ解析では、圧力計データから海洋変動を除去する新たな方法を開発した。圧力計データとその場所に対応した海洋モデルデータに対してマルチチャンネル特異スペクトル解析を用いて成分に分け、圧力計データと海洋モデルの相関がよい成分のみを用いて海洋モデルを再合成し、それを圧力計データから除去するという方法である。その結果、単純に圧力計データから海洋モデルを差し引くよりも除去後のデータのばらつきが小さくなり、よりよい除去ができた(図8)。また、海洋変動を除去した後、季節変動等を表すパラメトリックモデルを当てはめ、スロースリップによる変動を抽出した(図8)。その結果を用いて、スロースリップのすべり分布を求めた(図3)。陸上GNSSデータだけの結果と比較して、圧力計データを入れた結果のほうが、すべりの推定誤差が海側で小さくなり、より精度よく求められていることがわかった。すべり分布は、2018年のスロースリップに対しては、圧力計データを入れた結果は、GNSSデータだけの結果と比べて全体のすべり量が下がり、すべりが海側に張り出すようになった。

実験・モデリング研究

北米フランシスカン帯の泥質岩と蛇紋岩、およびそれらの交代岩を用いて熱水摩擦実験を行った結果、SiやCaに富む流体には地震発生帯における断層の強度低下や安定すべりをもたらす効果があることが明らかとなった。また、様々な含有量比からなる石英・滑石混合ガウジを用いた室温摩擦実験の結果、沈み込み帯プレート境界断層帯内の層状珪酸塩鉱物の存在がスロースリップの発生に必要な速度中性条件をもたらしていることが明らかとなった。さらに、蛇紋岩試料を用いた高間隙水圧下における高圧変形実験とフィールド調査に基づいて、間隙水圧変化に起因した間欠的微動・スリップ(ETS)発生サイクルの地質学的モデルを構築した。

日本海溝沈み込み帯の10~20 kmの深度範囲では、宮城沖から福島沖にかけてマグニチュード7以上の大地震や繰り返し地震が発生しているが、三陸沖や茨城沖では微動や超低周波地震などのスロー地震が観測されている。この深度範囲の温度は80~130℃と推定されており、プレート境界断層が沈み込む太平洋プレートの基盤玄武岩または被覆層中に形成されている場合、これまでの実験結果から、宮城沖から福島沖にかけての地震は玄武岩またはチャート層中で発生し、三陸沖や茨城沖のスロー地震は遠洋性粘土層または半遠洋性粘土層中で発生していると想定される。スロー地震は高間隙水圧下で発生していると考えられており、推定温度がスメクタイトの脱水温度範囲内でもあることから、三陸沖北部や茨城沖のスロー地震は遠洋性粘土層中のスメクタイトの脱水に起因した高間隙水圧帯で発生している可能性がある。

千島海溝における、十勝沖、根室沖、浅部アスペリティと動的弱さを考慮した試験数値モデルにより、およそ400年間隔で発生する超巨大地震発生を再現し、固着域の変化を調べた結果、超巨大地震の発生前に浅部アスペリティで固着域が狭まる様子が再現された。1986年明治三陸津波地震の破壊過程を解明するために、速度構造探査から明らかにされている付加体(低剛性率)を考慮した、すべり依存則に基づく動的破壊のモデルを構築した。破壊速度は、付加体のS波速度に規定され、1.5km/sと遅くなることがわかった。さらに付加体内にエネルギーがトラップされ、付加体内では大きな地震動が生じるが、陸域などその外側では地震動が弱くなることがわかった。実際に、地震波形が近地で観測されている2010年インドネシア・メンタワイ津波地震の地域に存在する付加体構造と、すべり分布を説明

するように応力降下量を与えて動的破壊のモデル化を行ったところ、津波地震の特徴を定量的に再現することができた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

千島海溝および日本海溝沿いでGNSS-A海底地殻変動観測を継続して実施してきたことにより、これらの海域におけるプレート間の固着状態が明らかになりつつある。海底地震観測により、低周波微動と通常地震の連動した活動の実態が明らかとなりつつあり、これはスロー地震と通常地震の発生メカニズムの関連性の解明に寄与するものである。東北地震後の微小地震活動により、震源域のプレート固着を推測している。房総半島沖プレート境界でのスロースリップのモニタリングを継続して、プレート間固着状態の推定を行っている。プレート境界を構成する複数種類の物質についての摩擦特性の温度・圧力依存性に関する室内実験や、海溝近傍の低剛性を考慮した津波地震発生モデル構築は、すべりの多様性を生み出す断層面の摩擦特性の理解につながるものである。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Otsuka H., Y. Ohta, R. Hino, T. Kubota, D. Inazu, T. Inoue, N. Takahashi, 2023, Reduction of non-tidal oceanographic fluctuations in ocean-bottom pressure records of DONET using principal component analysis to enhance transient tectonic

detectability, EPS, 75, 10.1186/s40623-023-01862-z, 査読有, 謝辞無

Nakata, R., N. Uchida, T. Hori, R. Hino, 2023, Recurrence intervals for $M > 7$ Miyagi-ken-Oki earthquakes during an M similar to 9 earthquake cycle, PEPS, 10, 10.1186/s40645-023-00566-y, 査読有, 謝辞無

Yin, J., W. Zhu, J. Li, E. Biondi, Y. Miao, Z. J. Spica, L. Viens, M. Shinohara, S. Ide, K. Mochizuki, A. L. Husker, Z. Zhan, 2023, earthquake magnitude with DAS: A transferable data-based scaling relation, Geophys. Res. Lett., 50, e2023GL103045, 10.1029/2023GL103045, 査読有, 謝辞無

Hirauchi, K., Hibi, R., Shirahige, R. and Takemura, T., 2023, Effects of phyllosilicate content on the slip behavior of fault gouge: Insights from room-temperature friction experiments on quartz-talc mixtures, Tectonophysics, 857, 229845, 10.1016/j.tecto.2023.229845, 査読有, 謝辞無

Semba, M., Hirauchi, K., Ohuchi, T., Okamoto, A. and Kouketsu, Y., 2023, Effects of hydrothermal alteration on shear localization and weakening in the mantle lithosphere., Tectonophysics, 868, 230081, 10.1016/j.tecto.2023.230081, 査読有, 謝辞無

Shibazaki, B., 2023, Progress in modeling the Tohoku-oki megathrust earthquake cycle and associated crustal deformation processes, Progress in Earth and Planetary Science, 10, 10.1186/s40645-023-00575-x, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

富田 史章, 2023, 新しいGNSS音響測位解析ソフトウェア (SeaGap) の開発, 日本地球惑星科学連合2023年大会

日野 亮太・久保田 達矢・近貞 直孝・太田 雄策・大塚 英人, 2023, 地殻変動検知に向けたS-net海底水圧データのノイズレベル評価, 日本地球惑星科学連合2023年大会

飯沼 卓史・木戸 元之・福田 達也・太田 雄策・富田 史章・プラタ-マルチネス ライムンド・日野 亮太・高橋 浩晃・堀 高峰, 2023, ウェーブグライダーを用いたGNSS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測 (その4), 日本地球惑星科学連合2023年大会

富田 史章・飯沼 卓史・木戸 元之・太田 雄策・福田 達也・日野 亮太, 2023, 東北沖におけるウェーブグライダーを活用したGNSS音響海底地殻変動観測と成果, 日本地球惑星科学連合2023年大会

大塚 英人・太田 雄策・碓氷 典久・日野 亮太・久保田 達矢, 2023, MRI.COM-JPNモデルを用いた日本近海における海底水圧記録の海洋変動低減効果の定量評価, 日本地球惑星科学連合2023年大会

佐藤 豪大・東 龍介・高木 涼太・日野 亮太・篠原 雅尚, 2023, 稠密OBS観測から検出された日本海溝-千島海溝会合部における地震学的構造の時間変化と地震活動の関係, 日本地球惑星科学連合2023年大会

黒須 直樹・木戸 元之, 2023, CNNを用いたGNSS-acoustic観測で得られた音響波形からの自動走時検出手法の構築, 日本地球惑星科学連合2023年大会

源 孝祐・日野 亮太・松本 一駿,2023,偏波特性を用いた到達時刻差検測法と相対震源決定による日本海溝北部におけるテクトニック微動分布,日本地震学会2023年度秋季大会

松本 一駿・日野 亮太・高橋 秀暢・大柳 修慧・篠原 雅尚・伊藤 喜宏,2023,2011年東北沖地震前後の日本海溝北部における通常地震と浅部テクトニック微動の連動活動,日本地震学会2023年度秋季大会

高木 涼太・東 龍介・日野 亮太・西田 究・篠原 雅尚,2023,常時微動を用いた日本海溝・千島海溝会合部におけるS波速度構造推定,日本地震学会2023年度秋季大会

佐藤 豪大・東 龍介・高木 涼太・日野 亮太・篠原 雅尚,2023,地震波干渉法で検出される海底下構造の時空間変化とその解釈,日本地震学会2023年度秋季大会

黒須 直樹・木戸 元之,2023,GNSS-Acoustic観測の音響波形解析に対する機械学習の適用,日本地震学会2023年度秋季大会

平田 京輔・日野 亮太・大塚 英人・太田 雄策・碓氷 典久,2023,2011年東北沖地震以前の海底水圧データの再解析,日本地震学会2023年度秋季大会

富田 史章・木戸 元之・飯沼 卓史・太田 雄策・日野 亮太・大園 真子・高橋 浩晃・プラタ-マルティネス ライムンド・野 徹雄,中東 和夫,中村 恭之,2023,日本海溝・千島海溝沿いにおけるGNSS音響海底測地観測とその成果,日本地震学会2023年度秋季大会

大塚 英人・太田 雄策・日野 亮太,2023,OBPデータに対するPCA適用によるSSE検出能力の事例研究—ヒクランギ沖, アラスカ半島沖の場合—,日本地震学会2023年度秋季大会

稲津 大祐・伊藤 喜宏・日野 亮太・谷川 亘,2023,2011年東北地震の発生直後に見られた震源直上海底付近の急激な水温上昇について,日本地震学会2023年度秋季大会

木戸 元之・村井 菜々海・飯沼 卓史・福田 達也・太田 雄策・富田 史章,2023,GNSS-A観測時のウェーブライダーの運動姿勢の把握,日本地球惑星科学連合2023年大会

富田 史章,2023,多様な事前分布に基づく音速水平勾配を仮定したGNSS音響測位解析手法の開発,日本測地学会第140回講演会

大塚 英人・太田 雄策・日野 亮太,2023,海底水圧計に主成分分析を適用した非定常地殻変動検出の試み,日本測地学会第140回講演会

飯沼 卓史・木戸 元之・福田 達也・太田 雄策・富田 史章,2023,ウェーブライダーを用いた GNSS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測の今後の展望,日本測地学会第140回講演会

Iinuma, T., M. Kido, F. Tomita, Y. Ohta, T. Fukuda, R. Hino, T. Hori, H. Takahashi, K. Nakahigashi, T. No, Y. Nakamura, M. Ohzono, R. O. Plata-Martinez and D. Sato,2023,GNSS-acoustic observations using manned and unmanned sea surface platforms along the Kurile-Japan Trench to grasp the interplate locking state and the postseismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake,American Geophysical Union Fall Meeting 2023,G43B-0490

Hirata, K., R. Hino, H. Otsuka, Y. Ohta and N. Usui,,2023,Revisiting seafloor pressure records prior to the 2011 Tohoku earthquake,American Geophysical Union Fall Meeting 2023,G43B-0492

Minamoto, K., R. Hino and K. Matsumoto,2023,Precise distribution of tectonic tremors in the northern Japan Trench by relative hypocenter location using polarization-based arrival time picking,American Geophysical Union Fall Meeting 2023,T31H-0292

Kido, K., T. Iinuma, T. Fukuda, Y. Ohta, F. Tomita and N. Murai,2023,Onboard processing and transmission of realtime GNSS-Acoustic data on a waveglider,American Geophysical Union Fall Meeting 2023,G42A-04

Tomita, F. and M. Kido,2023,Development of a new GNSS-acoustic positioning software “SeaGap” and its application,American Geophysical Union Fall Meeting 2023,G42A-08

柴田早希・佐藤利典・村田耕一・碓氷典久・塩原肇・山田知朗・篠原雅尚,2024,海底圧力計データを用いた房総沖スロースリップのすべり分布の推定,海と地球のシンポジウム2023

平松知也・和田壮又・金川久一・澤井みち代,2023,海山由来玄武岩の摩擦特性：沈み込み帯における地震活動との関係,日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS06-P03

金川久一・嵯峨野紗弓・平松知也・和田壮又・澤井みち代,2023,太平洋プレート被覆層遠洋性粘土の日本海溝沈み込み帯浅部における摩擦特性,日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS06-P05

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

海陸プレート境界における海域観測によるプレート間滑りの把握と多様なプレート間すべりのモデル構築

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

篠原雅尚（東京大学地震研究所）,塩原肇（東京大学地震研究所）,望月公廣（東京大学地震研究所）,山田知朗（東京大学地震研究所）,一瀬建日（東京大学地震研究所）,悪原岳（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

日野亮太（東北大学）,木戸元之（東北大学）,太田雄策（東北大学）,東龍介（東北大学）,高橋浩晃（北海道大学）,村井芳夫（北海道大学）,大園真子（北海道大学）,佐藤利典（千葉大学）,伊藤喜宏（京都大学防災研究所）,山下裕亮（京都大学防災研究所）,八木原寛（鹿児島大学）,仲谷幸浩（鹿児島大学）,気象庁,金川久一（千葉大学）,澤井みち代（千葉大学）,平内健一（静岡大学）,廣瀬丈洋（海洋研究開発機構）,谷川亘（海洋研究開発機構）,芝崎文一郎（建築研究所）,野田博之（京都大学）,安藤亮輔（東京大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：篠原雅尚

所属：東京大学地震研究所

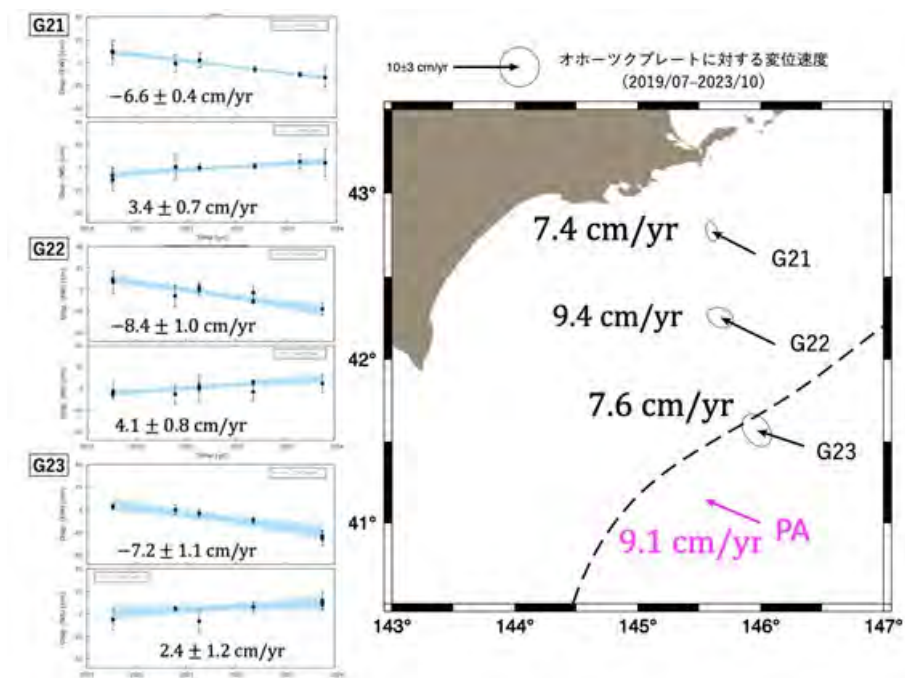


図 1

根室沖におけるGNSS-A海底地殻変動観測の結果。左：2019年の観測開始以来の変位時系列。右：繰り返し観測から推定された変位速度の空間分布。

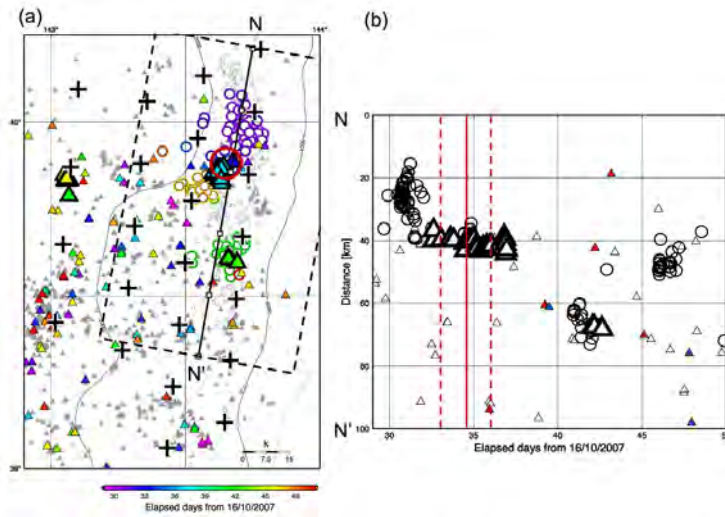


図2

日本海溝北部で観測された浅部テクトニック微動と通常地震が連動する活動の例。(a) 震央分布。この活動期中の微動（丸；発震時で色分け）、活動期以外の微動（灰色の丸）、活動期中の地震（小さい三角；発震時で色分け）、活動期中のswarm（大きな三角；発震時で色分け）、活動期以外の地震（灰色の三角）に分けて示す。(b)測線NN'に投影した時空間分布。破線矩形内のイベントが投影されている。地震を三角で表し、群発活動を形成するものは大きいシンボルで示す。震源深さによって、上盤内：赤、プレート境界近傍：白、下盤内：青で示す。微動は白丸で示している

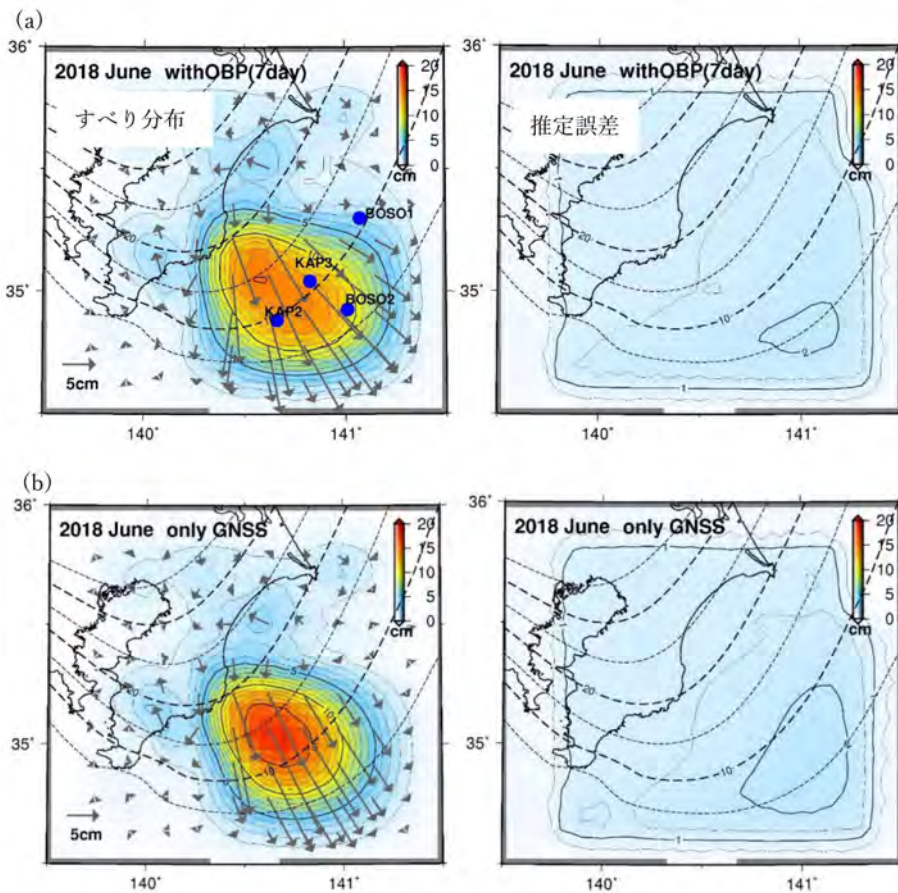


図3

2018年6月に発生したスロースリップのすべり分布（コンター1cm間隔）とその推定誤差（コンター5mm間

隔)。 (a) 圧力計データも含めたデータから求めたもの。 (b) GNSSデータのみから求めたもの。 破線は、プレート境界の深さ（コンターkm間隔）。

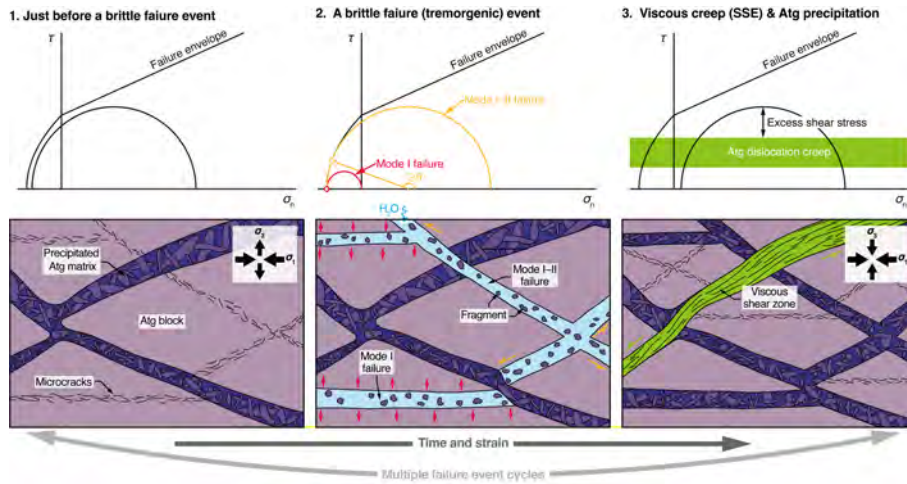


図4
間隙水圧変化に起因したETS発生サイクルの地質学的モデル図。 τ : 剪断応力、 σ_n : 法線応力。

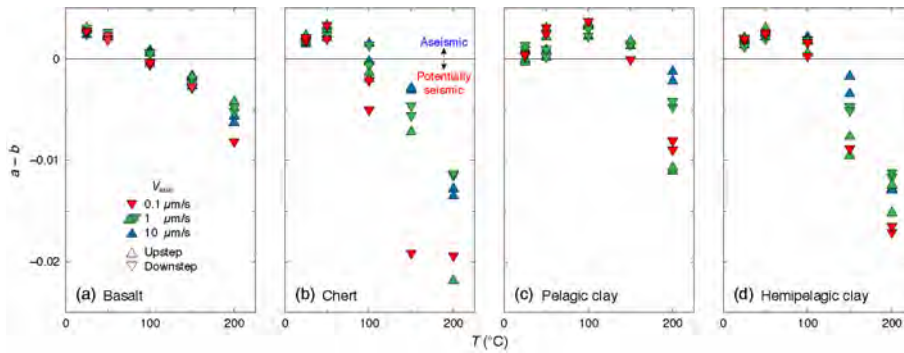


図5
玄武岩試料 (a)、チャート試料 (b)、遠洋性粘土試料 (c)、および半遠洋性粘土試料 (d) の摩擦構成則定数 $a - b$ の温度変化。 T : 温度、 V_{axial} : 軸方向変位速度。

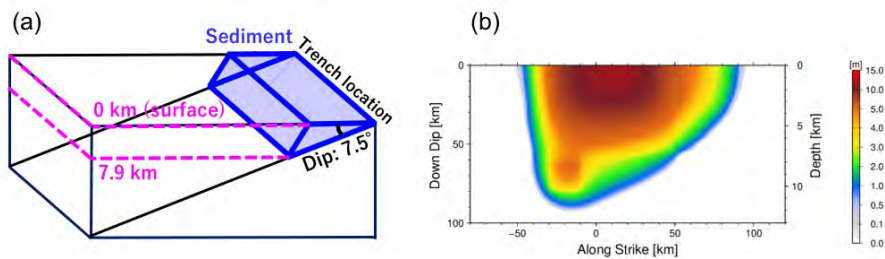


図6
(a) モデルに用いた媒質構造、(b) 動的破壊のモデル化により得られたすべり量分布。

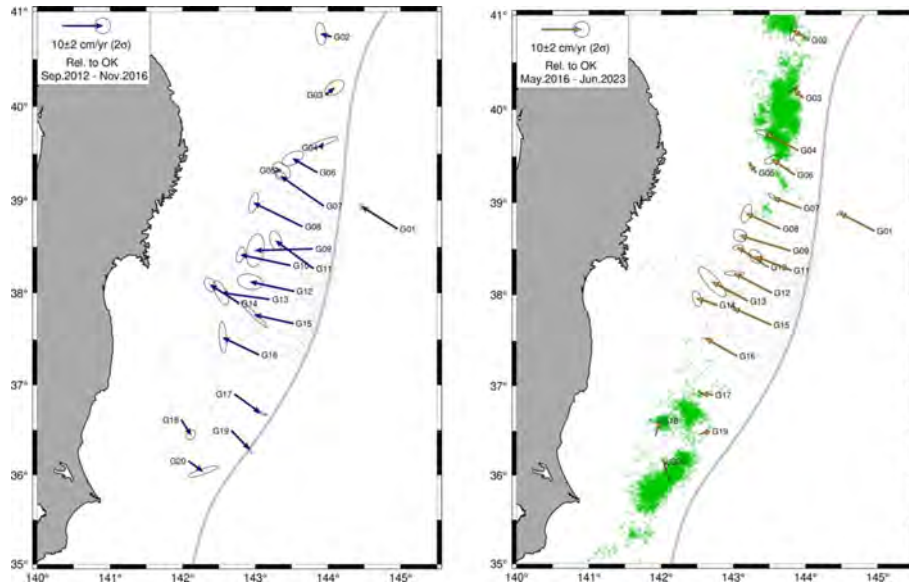


図7

GNSS-A観測による日本海溝沿いの変位速度場。左：2012～2016年のデータから推定された結果。オホーツクプレート基準の速度ベクトルを示す。右：2016～2023年のデータによるもの。緑点はNishikawa et al. (2022)による浅部テクトニック微動の震央。

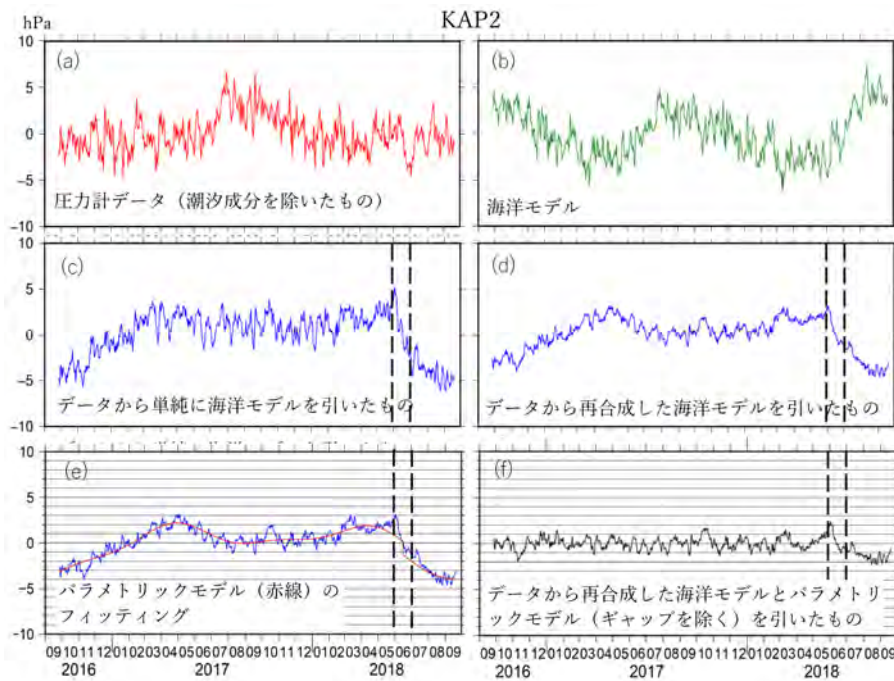


図8

(a) 圧力計データ（潮汐成分を除いたもの）。(b) 海洋モデル。(c) データから単純に海洋モデルを引いたもの。(d) データから再合成した海洋モデルを引いたもの。(e) パラメトリックモデル（赤線）のフィッティング。(f) データから再合成した海洋モデルとパラメトリックモデル（ギャップを除く）を引いたもの。破線はスロースリップの期間を示す。(c),(d)から、再合成したほうがよりよく変動が取り除けていることがわかる。(f)から、スロースリップの前後で1 hPa以上の段差があるのがわかる。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

より現実的な断層面ダイナミクス

(3) 関連の深い建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (3) 地震発生過程の解明とモデル化
 - イ. 地震断層滑りのモデル化

(4) その他関連する建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (3) 地震発生過程の解明とモデル化
 - ア. 地震発生機構の解明
- 2 地震・火山噴火の予測のための研究
 - (2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測
 - ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
 - ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震
千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

様々な滑りイベントが大地震を誘発する可能性が観測から示唆されているが、大地震を対象に経験の蓄積によって誘発確率を推定するには非常に長い時間がかかる。地域によっては、リアルタイムでゆっくり滑りの発展をモニタできる場合があり、予想される推移とそれが地震発生につながる可能性について緊急に評価を迫られる状況が起きうる状況である。断層ダイナミクスにもとづく演繹的なモデルによって、確率的な推移予測を行うには、低速から高速までの変形に対する現実的な断層物性の巨視的な分布と、観測から伺い知れない小規模の不均質が推移にどれくらい影響するかを知ることが必要である。これまでの計画で高度化してきた室内実験、数値実験、理論的考察によって、以下の点を明らかにする。断層深部においては、岩石のバルク流動の実験データを充実させ、理論モデルを用いて外挿する。摩擦実験においては、SSEの有力なメカニズムである、ヒーリングメカニズムのカットオフ現象を解明する。また、動的破壊時の高速滑りに関して最も一般的なメカニズムと期待されるフラッシュヒーティングによる発熱分布をその場観察によって解明する。様々な非線形な摩擦に支配される断層の滑りモードを俯瞰的に理解する数理理論を構築する。一方で、プレート境界にひきずり込まれた堆積物の状態を推察するために、熱水下での粉体の固結の進行に伴う機械・水理物性を実験によって解明するとともに、不均質な材料中での破壊シミュレーションにおいては、計算効率を評価し、その向上を目指す。また、摩擦物性の不均質によって、SSEや余効滑り、粘性緩和、他の地震による応力擾乱などの非定常な载荷への応答にどのようなバリエーションが現われるかを解明する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

室内実験、理論研究、数値シミュレーションは、連携を保ちつつ独立に進める。

A. フラッシュヒーティング、摩擦実験、粉体固結、超低速流動実験を安定して行うため、平成31-32年度に試料アセンブリや温度分布、計測・制御システム等の改良・調整を行い、平成33年度からデータ取得を開始、最終年度には現象論的、もしくは物理ベースの定式化を行う。

B. 数値シミュレーションでは、平成31-32年度に摩擦特性の不均質、非定常的な载荷履歴、粘弾性の効果を調査するためのモデルを作成し、平成33年度からシミュレーション結果の解釈を行う。

C. 不均質媒質中の破壊伝播では、徐々にモデルのスケールを徐々に拡大しながら計算コードの実証を行ない、効率的な実装を目指す。また、断層面での破壊モードの解析的研究においては、より一般的な摩擦則の場合および物性に不均質がある場合への拡張を進める。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

深部地殻の強度は地震発生の理解に重要な基礎情報である。深部地殻変形を支配する石英については水軟化が重要であるため、圧力の効果を無視できない。そこで、熊澤型固体圧式変形試験機を用いて含水細粒石英岩（瑪瑙）の高温高压変形実験を封圧 1.5 GPa、温度 1000°C までの条件で、歪速度を変えて行った。さらに、実験回収試料を解析し、転位クリープの力学特性とも密接に関係する動的再結晶組織が封圧によっても変化することを明らかにした（中小路・清水, 2023JpGU, 2023地質学会）。

昨年度までに、Maxwell粘弾性体中におかれた平面断層上の速度弱化パッチの滑りモードには、Hopf分岐である地震性-非地震性間欠滑りの遷移以外に、永久固着が生じる新たなタイプの遷移が存在することを動的地震サイクル計算により発見した(Miyake and Noda, 2019)。沈み込み帯の深部プレート境界等では実際に発現する可能性があるこの現象について、速度強化物質は速度弱物質より摩擦係数の絶対値が低いという傾向(Ikari et al., 2011)をとり入れた動的地震サイクル計算を行ったところ、摩擦強度コントラストに起因する応力不均質の緩和が速度弱化領域への载荷を損じて永久固着への遷移を助長することを見出した(図1a)。また、自由度を落とした系の解析(図1b)を行い、地震-永久固着のモード遷移がホモクリニック分岐であることを示した(山本・野田, 2022SSJ, 2023JpGU)。

上部地殻の強度については、ほとんどの岩石の摩擦係数が0.6-0.8程度であるというバイアリーの法則が広く受け入れられている。柔らかい粘土鉱物では、この範囲より著しく小さな摩擦係数を示すものも知られているが、それ以外の柔らかい岩石鉱物についてバイアリーの法則が成り立つ理由は明らかではない。そこで、硬度は小さいが板状鉱物でない螢石 (CaF₂) をもちいた摩擦試験を行った(柘植+, 2023JpGU, 2023地質学会)。単結晶をもちいた直接剪断摩擦試験と、粉末試料をもちいた回転摩擦試験を行ったが、水に飽和した条件で、動摩擦係数がいずれも0.5前後のアモンソン・クーロン則に従い、バイアリー則と大きくは変わらない結果が得られた。主要なケイ酸塩鉱物である石英や長石よりはるかに硬度（降伏強度）が小さい螢石でもバイアリー則が成り立つことから、凝着摩擦機構が働いていることが示唆される。

室内実験から提案されたRSF摩擦則の発展則の一つに、Aging lawに剪断応力弱化効果を加えたNagata law (Nagata+, 2012)がある。本年度、これを用いた動的地震サイクル計算で震源核形成過程を調べた(図2)。速度弱化域は地震後の固着し、地震間に剥がれが侵入する。Aging lawでは剥がれ域が核形成サイズに達した時にそのサイズの加速域が生じ、これが慣性項が無視できない地震性速度まで加速して地震に至る。一方、Nagata lawでは剥がれ域と比較して小さな核形成サイズの加速域が生じ、これが地震性の速度まで加速する。他方の極限であるSlip lawでは明確な加速域は生じず、剥がれの先端部の滑り速度が増大しつつ進行し、非常に狭い領域で地震性の速度に達する。前震活動の移動や集中過程との比較から、天然の地震断層が従う摩擦則の詳細が推察できる可能性が考えられる(金木・野田, 2023JpGU)。

RSF摩擦則は一種の遅れ破壊則であり、固着した面に、ある程度以上の一定の剪断応力を掛け続ければ、三次クリープで加速して高速滑りに至るはずである。そこで、RSF摩擦則から予測される三次クリープ挙動(図3)を調べたところ、地滑りの加速などのカタストロフ現象の予測に使用されるVoightの関係式（変形速度と加速度の間の冪乗則）が得られ、その冪数がRSF則の発展則の種類に依存することを見出した(Noda and Chang, 2023, 2023JpGU; Chang+, 2023JpGU)。RSF発展則の関数形

を制限する上で、これまでほとんど実施されていない定応力下でのクリープ試験が有用であると考えられる。

東南海・南海のメガスラスト地震発生パターンは、同時破壊、短い時間差で破壊、別々の時期に破壊、などのバリエーションがあり、走行方向に細かな摩擦不均質を設定することにより過去の巨大地震のシーケンスの再現がなされてきた(Hori, 2006; Hyodo+, 2016; Hirose+, 2022)。連動・非連動のメカニズムを考察するために、実際のプレート境界三次元形状はとりいれつつ、RSF摩擦(発展則はAging law)パラメタの分布をより単純(各々異なる南海アスペリティ・東南海アスペリティ・背景領域の3領域)にしたモデルでサイクルシミュレーションを行なった(岩村, 2024京都大学理学部卒論)。その結果、東南海アスペリティ内の摩擦特性は一様であるにもかかわらず、東南海アスペリティ内西側領域は他領域に比べて地震性にすべる割合が低い傾向がロバストに確認された(図4)。この傾向は、昭和東南海地震のすべり分布(Ichinosé+, 2003; 山中, 2006)と一致する。東南海アスペリティ内西側領域はdipがきついため地震発生領域(速度弱化領域)のdip方向の幅が狭く、これが原因であると考えられる。

断層の高速滑りを模した室内摩擦実験における動的弱化について、近年試料サイズの依存性(大試料が低速で弱化)が指摘された(Yamashita+, 2015)。昨年度、不均質な摩擦発熱および熱膨張がすべり面における垂直応力の不均質を助長・増大する熱弾性不安定(TEI)の発生条件(図5)が岩石の室内摩擦実験に合致する事を指摘し(野田, 2022SSJ; Noda, 2023)、これによる局所的な温度上昇で動的弱化が起きている可能性を示唆した。TEIは試料サイズに反比例する滑り速度 V_{cr} で発生すると予測される。これを確認するために、本年度は、山口大学と協力して試料リング幅が2.9 mm, 13.5 mmの実験を追加し、過去の実験(Yamashita+, 2015, Tsutsumi and Shimamoto, 1997)とあわせて、2.9mm-100mmまで2桁にわたる試料サイズの動的弱化データを比較したところ(図6)、これらが全て、試料サイズから理論的に予測されるTEI条件 V_{cr} の10倍程度の速度で動的弱化を示すことが確認された(野田・大橋, 2023SSJ)。なお、この「10倍程度」の原因については様々な可能性が考えられるが、特定はできていない。

昨年度から、熱・流体・空隙相互作用がある断層挙動を統一的に理解する数理的枠組みの構築を目指している。本年度、シンプルなバネ・ブロックモデルでのエネルギーバランスから、一回の地震の滑り量 u_f の関数 $F(u_f)$ を理論的に導き、この関数の形(原点を通る二重井戸型で、極値はすべて $u_f > 0$ の領域にある)から、ゆっくり地震と高速地震の違いを一次相転移的に理解できることを見出した(e.g., Suzuki and Matsukawa, 2023IUGG; 鈴木・松川, 2023SSJ)。 $F(u_f)$ の物理的中味は、断層滑りの際の摩擦発熱が支配的だと固相と液相の熱膨張率の違いにより断層面上での流体圧 p_f が上昇すること、滑り時に滑り面近傍で空隙が生成する効果が支配的だと p_f は減少すること、 p_f が高い(低い)と有効法線応力と滑り摩擦力が減少(増加)して滑りの加速(減速)が生じることの3つである。これらのプロセスを含むバネ・ブロックモデルのサイクルシミュレーションでは、ゆっくり地震と高速地震の両方のイベントが様々な順序で起きるが、それぞれのイベントについて $F(u_f)$ をみると、極大値が正のときは、物理的に実現される最小の解が非常に小さいためゆっくり地震となり、極大値が負のときは、大きい滑りすなわち高速地震となる。なお、極大値は空隙生成効果が有効なほど上昇する傾向にあり、これは上述の加速・減速の機構と調和的である。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

母岩変形の脆性-塑性遷移に関して、固体圧試験機の精密な力学測定から、深部地殻変形を支配すると思われる石英の転移クリープに対する動的再結晶の影響やその封圧への依存性を見出した。また、地震発生帯最下部を意識した条件で行った、軟岩である石灰岩の高温・高封圧実験で、封圧に近い高間隙水圧のもとで、有効封圧が20-0MPaに減じるにつれ、変形様式がバルク流動から、転移クリープに支配される準脆性破壊に遷移することを確認し、封圧・温度からは延性であるべきこのような条件でも間隙圧は岩石の挙動を脆性化する強い効果をもつことを実証した。

沈み込み帯深部では、母岩が粘弾性流動することを考慮した断層滑りの計算が必要で、前計画で開発した効率的な数値計算手法を用いて平面断層のサイクルシミュレーションを行なった。直感に反して、粘性はSSEのような非地震性の振動解がおきる条件範囲を狭めること、および、大きなアスペリティでは、プレートの相対運動が母岩の粘性流動でまかなわれて断層は永久固着となることを見出した。後者については、速度強化域と速度弱化域の強度コントラストがあれば、さらに永久固着が起きやすい。また、地震-永久固着の遷移は、Hopf分岐である地震-スロー地震の遷移とは違って、ホモクリニック分岐であることを見出した。

いっぽう、より単純な、基板上においた長い粘弾性ブロックを端から押すというモデルの摩擦滑

りを数理的に解析し、伝播する摩擦滑りの定常解として、高速地震とスロー地震があり、これらを摩擦の滑り速度および変位への依存性でマッピングできることを見出した。

現実的な地質環境下での摩擦法則を強化するため、これまでデータの少ない、緑泥石や蛍石など弱鉱物の水飽和条件での摩擦実験を行った。緑泥石100%のガウジ層は広い温度・圧力で速度強化かつ、0.3程度の低い摩擦係数を示した。いっぽう、蛍石では、室温の実験しかしていないが、単結晶の直接接触でもガウジ層でも、硬珪酸塩鉱物とそう変わらない0.5前後の摩擦係数であった。さらに、緑泥石を14%含む深部カタクレサイトを粉砕したガウジの実験では、葉状構造が生じた低速の実験ですら、摩擦係数が低いという緑泥石の特徴は反映されないことを確認した。

脆性一塑性遷移ではマイロナイト構造が生じることが地質観察から知られている。この構造を考慮して脆性滑りと塑性流動に変形を分配する物理モデルを作り、それに基く新たな構成則を提案した。マイロナイト構造を無視していた従来の構成則に比べて、遷移域の強度が大きく低下し、これは実験の結果をよりよく説明できている。

ガウジ層の摩擦に関しては、ミクロン単位の短Dcで解消される時間依存性の対数的ヒーリング(Aging)と、解消にミリメートル級の長Dcが必要な、剪断応力除荷に起因する機械的過圧密の両方の強度回復機構ある。音波透過で、強度回復・滑り弱化的過程を連続的にモニタリングすることにより、この2つの機構に関連する弾性波透過率の変化を峻別することができた。岩石の直接接触面では剪断応力がゼロでもAgingがおきるのに、ガウジ層を挟んだ実験では剪断応力をかなり高く保たないとAging効果が見られないことが知られているが、音波透過では剪断応力の低い場合でもAgingが進行していることがわかり、静摩擦を測定するための再載荷時に過圧密で持ち上げられた高い強度まで応力を上げる際にAging効果によるヒーリングが解消されてしまうというからくりであったことが、音波透過データとの比較からわかった。

従来のRSF実験より高速の領域で摩擦がドラスティックに低下するという動的弱化的は、地震発生のモデリングにとって大変重要な発見である。そのミクロな素過程の有力候補である真実接触部のフラッシュヒーティングを、透明な人工石英単結晶の法線応力0.3 MPa、滑り速度1 m/sでの摩擦滑り中に高速カラーカメラで観察し、融点程度である1900°Cもの高温が生じていることを確認した。

いっぽうで、大きな試料では動的弱化的がずっと低い速度でおきるということが最近報告された。その原因として熱弾性により発熱部の法線応力がますます高まる正のフィードバックを考え、試料サイズの反比例する臨界滑り速度以上では、法線応力の不均質がどんどん極端化することを理論的に見出した。既存の実験と追加実験で得た、2桁にわたる試料サイズの実験データで、動的弱化的の起きる滑り速度が、いずれも理論的に予想される熱弾性不安定の臨界速度の10倍程度であることを確認した。

1自由度バネブロックモデルに周期的に様々な大きさの応力擾乱を与えることで、SSEが大地震をトリガする効果を考察した。大きい応力擾乱であれば、単純な同期パターンが得られるのは直感通りだが、小さな擾乱でも、地震の発生間隔シーケンスは複雑化するものの、擾乱のリズムに同期はしていた。しかし、どの場合でも、地震の発生がとりわけSSEの発生後短期間に集中する傾向はみられなかった。一方、連続弾性体中の断層のサイクル計算では、深部に大きなSSEが地震1サイクルあたり数度おきるような設定の場合、地震の80%は直近のSSEから3日以内に起きることを見出した。連続体中にある現実の断層では、地震サイクルで形成される脆性一塑性遷移域への応力集中によって、メガスラスト地震の震源域であるこの部分の応力擾乱への感受性が著しく高められていることが示唆される。

また、メガスラスト上で起きた比較的大きな地震による動的および静的な応力擾乱の効果を、剪断応力・法線応力への依存性を含むRSF則と、不均質構造・地形形状・粘弾性をとりこんだOpenSWC Ver.5による現実的な応力計算を組み合わせ評価した。2016年4月1日の三重県南東沖の地震(Mjma6.5)について評価したところ、有効法線応力の低い海溝軸付近に動的擾乱からの大きな効果が予想された。実際、この領域では、4月3-18日にSSEやVLFEのまとまった活動が起きた。

RSF摩擦の発展則はいくつか提案されており、発展則によって震源核の加速過程が異なる。比較的新顔である剪断応力弱化的効果を含むNagataの発展則での核形成過程はまだ調べられていなかったため、これを連続弾性体中のサイクル計算で調べ、剪断応力弱化的効果が強いほど核の加速域が狭いことを見出した。また、あまり行なわれていない、摩擦の定応力クリープ試験での3次クリープにおけるVoight則の冪数に着目することによって、RSFの発展則を峻別できるはずであることを理論的に指摘した。

さらに、摩擦発熱と間隙流体の熱膨張、滑りによる空隙形成の相互作用を考慮した1自由度バネブロックモデルのふるまいを数理的に解析し、スロー地震と高速地震が様々な順序でおきるが、滑り時の系のエネルギーを表わす関数の形によって、どちらのイベントがおきるかが言い当てられることを

見い出した。また、弾性体中の平面断層の滑り計算を高速でできるスペクトル境界積分法に多孔質弾性反発効果を組み込むことに成功した。

現実的な不均質構造でのサイクルシミュレーションを行うため付加体構造を単純化した境界積分法によるモデルを作り、低剛性率の付加体があると応力载荷レートが下がることを確認した。また、南海トラフの三次元形状を用いたサイクルシミュレーションにおいて、dipがきつくて速度弱化域のdip方向の幅が小さい東南海アスペリティの西部は、地震時の高速滑り量が小さいという傾向がロバストに現れることを見い出した。実際、昭和東南海での滑り分布にはこの傾向が見られる。また、空間ドメインでの境界積分の新しい時間発展計算スキームを開発した。従来法に比べて、柔軟なメッシュ設定、数値精度の1オーダー改善、モードの混在した破壊でも安定など非常に優れており、必要な計算資源の増加もない。

光速で伝播するため、即時警報の高速化が期待できるP波前重力信号について、F-netの広帯域地震計27点のスタックによって、2011年東北沖地震(M9)時の信号が7シグマを超える圧倒的な有意性をもつことを示した。さらにHi-net傾斜記録中の水平加速度信号を加えて、P波前重力信号から震源のdipとMwが推定できることを示した。また、P波前重力信号は観測サイトの加速度運動でキャンセルされる部分が多くP波着の少し前でようやく顕著になるが、重力勾配や地殻歪み信号など重力変化の空間微分に反応する観測ならこのようなキャンセルの影響を受けず、P波到着のずっと前から検出可能なはずであることを指摘した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本課題で得られた、断層摩擦や母岩の流動レオロジーに関する知識と理解の進展、および断層滑り計算手法の進展、あるいは数理的な滑りモードの理解は、断層深部を含めて物理的に妥当な包括的モデリングに貢献するため、長期・中短期補正に貢献する。各種イベントの相互作用やその確率という見地も取り入れているため、物理モデリングによる予測だけでなく、先行現象に着目した経験的予測にも貢献する。また、断層の状態を音波透過等でモニタするなど、地震の切迫性を評価するための新しいモニタリング項目も提案している。今後、余震・前震・静穏化・b値など地震活動を物理的に捉えられれば、地震予測に対する飛躍的な貢献となりうる。また、P波前重力変化に関しては、即時警報の画期的な高速化ができるはずの観測を提案している。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Noda, H.,2023,Thermoelastic instability on a frictional surface and its implication for size effect in friction experiments,Earth, Planets, and Space,75,doi: 10.1186/s40623-023-01820-9,査読有,謝辞有

Noda, H., and C. Chang,2023,Tertiary creep behavior for various rate- and state-dependent friction laws,Earth and Planetary Science Letters,619,doi: 10.1016/j.epsl.2023.118314,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Suzuki, T., and H. Matsukawa,2023,Condition of transition between slow and fast earthquakes in terms of fluid pressure and porosity,International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023,O33

Suzuki, T., and H. Matsukawa,2023,Systematic understanding of slow and fast earthquakes in terms of the porosity evolution law,IUGG Berlin 2023, the 28th General Assembly,IUGG2023-0621

Suzuki, T., and H. Matsukawa,2023,Effect of the upper limit of the porosity on variation of behavior of slow and fast earthquakes,JpGU Meeting 2023,SCG45-P46

鈴木岳人・松川 宏,2023,ゆっくり・高速地震遷移条件の解析的取り扱いとその妥当性,日本地震学会2023年度秋季大会,S08-11

鈴木岳人・松川 宏,2023,バネ・ブロックモデルにおけるエネルギー保存則に基づくゆっくり・高速地震遷移条件の導出,日本物理学会第78回年次大会,17pC206-14

野田博之・大橋聖和,2023,High-velocity friction experiments for samples of various size: Scale

effect in the critical slip rate for dynamic weakening,日本地震学会2023年度秋季大会,S12P
Chang Chengrui・野田博之・王功輝・山口哲生,2023,Accelerating Creep of Landslide Movement and the Rate- and State-dependent Frictional Behavior in It,JpGU Meeting 2023,HDS05-14
野田博之・Chang Chengrui,2023,Tertiary creep behavior and Voight model for failure prediction expected from various rate-and-state friction laws,JpGU Meeting 2023,SCG45-38
金木俊也・野田博之,2023,速度・状態依存摩擦則で支配される断層においてNagata lawを採用した動的地震サイクルシミュレーションの予察的結果,JpGU Meeting 2023,SSS06-P13
山本誠・野田博之,2023,Homoclinic bifurcation in behavior of an asperity in a viscoelastic medium and effect of strength contrast,JpGU Meeting 2023,SCG50-01
大谷哲人・亀 伸樹,2023,地震のOFCモデルに現れる余震領域の拡大現象,日本地震学会2023年度秋季大会,S08P-17
柘植悠太・清水 以知子・波多野 直哉・檜垣誠妥,2023,蛍石におけるマイクロ摩擦からマクロ摩擦への転移,JpGU Meeting 2023,SCG50-02
柘植悠太・清水 以知子・波多野 直哉・檜垣誠妥・中谷 正生,2023,蛍石(CaF₂)の定常摩擦係数:単結晶試料と粉末試料の比較,日本地質学会,T1-O-8
中小路 一真・清水 以知子,2023,封圧1.5GPaにおけるwet石英の定常再結晶組織,JpGU Meeting 2023,SCG50-07
中小路 一真・清水 以知子,2023,含水石英岩の定常再結晶組織における温度・歪速度・封圧依存性,日本地質学会,T2-O-20
鈴木岳人・松川 宏,2023,バネ・ブロックモデルと熱・流体・空隙効果による微動の成因の理解,日本物理学会2023年春季大会,22pL3-11
清水柗太・鈴木岳人・松川 宏,2023,付加体の圧縮場を模した粉粒体の力学的挙動の粒子間摩擦依存性,日本物理学会2023年春季大会,22pL3-6
鈴木岳人・松川 宏,2023,ネ・ブロックモデルと熱・流体・空隙相互作用に基づく微動の振る舞いの多様性の解析,日本応用数理学会第19回研究部会連合発表会,D3-1-2

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

実験・理論的アプローチによる断層ダイナミクスの高度化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

中谷正生(東京大学地震研究所),亀伸樹(東京大学地震研究所),吉田真吾(東京大学地震研究所)
他機関との共同研究の有無:有

清水以知子(京都大学大学院理学研究科),大谷真紀子(京都大学大学院理学研究科),野田博之(京都大学防災研究所),鈴木岳人(青山学院大学),桑野修(海洋研究開発機構)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等:東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話:03-5841-5787

e-mail:yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL:<https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/>

(14) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:中谷正生

所属:東京大学地震研究所

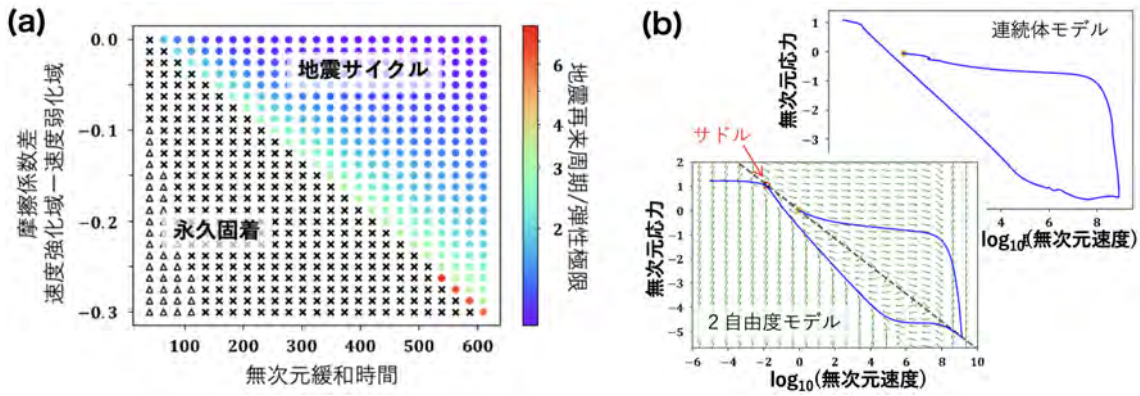


図1. Maxwell粘弾性体中の平面断層における地震—永久固着の滑りモード遷移 (山本・野田, 2023JpGUより改変)

(a) 速度強化域と速度弱化域の強度コントラストの影響。 (b) 永久固着する連続体モデルと2自由度モデルの類似。地震サイクルを表すリミットサイクルに不安定定常解（サドル）が衝突することで非地震性へ遷移する（ホモクリニック分岐）。

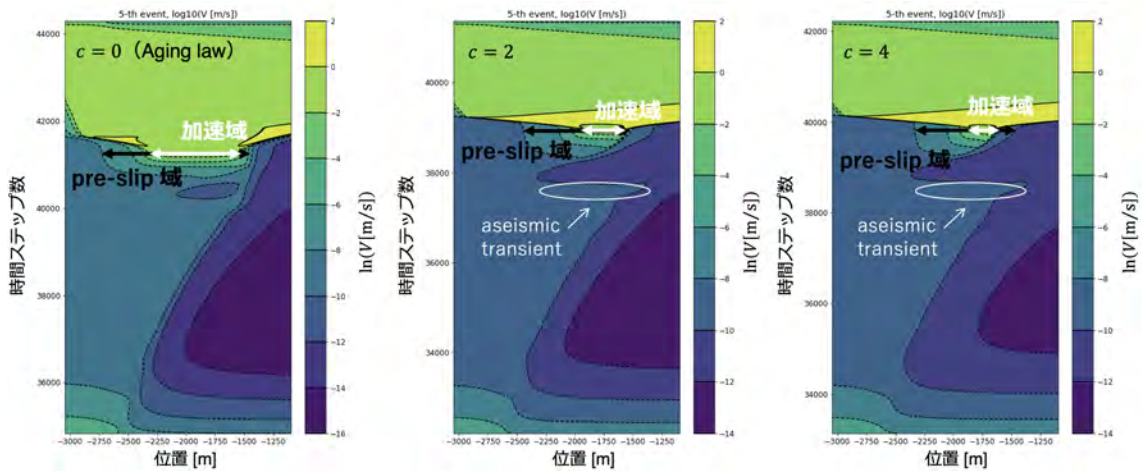


図2. Nagata lawの動的地震サイクル計算 (金木・野田, 2023JpGUより改変)

Mode III の動的地震サイクル計算結果。速度弱化域端部における剥がれの進行から核形成の過程の滑り速度の時空間的分布。Nagata lawの応力弱化効果係数cが大きいほどpre-slip 域 ($V > 10V_{pl}$) に対する核の加速域の比が小さい。

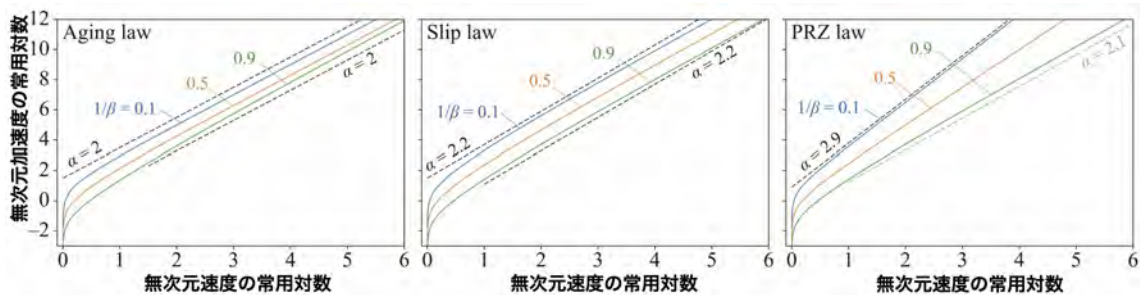


図3. RSF摩擦から期待される三次クリープ (Noda and Chang, 2023より改変)

Voightの法則(加速度が速度の α 乗に比例)に従うが、RSFの発展則の関数形により α は異なる。それぞれの発展則について、RSFパラメタの比 $1/\beta (= a/b)$ が0.1, 0.5, 0.9の場合を示した。

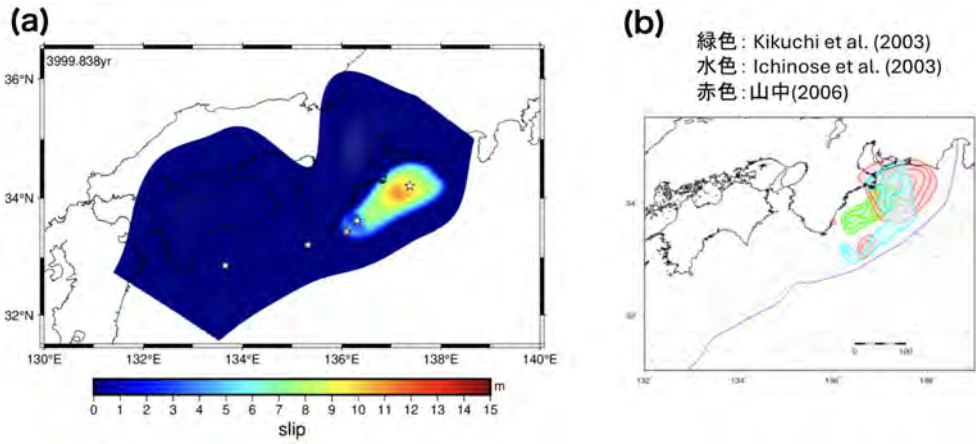


図4. サイクルシミュレーションによる東南海地震の滑り量分布と昭和東南海地震のそれの比較 (岩村, 2024 京都大学理学部卒論より改変)

(a) サイクルシミュレーションによる東南海地震の一例。(b) 昭和東南海地震の滑り分布(地震調査推進本部, 平成25年, https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/nankai_2.pdf, p7図3-17)。

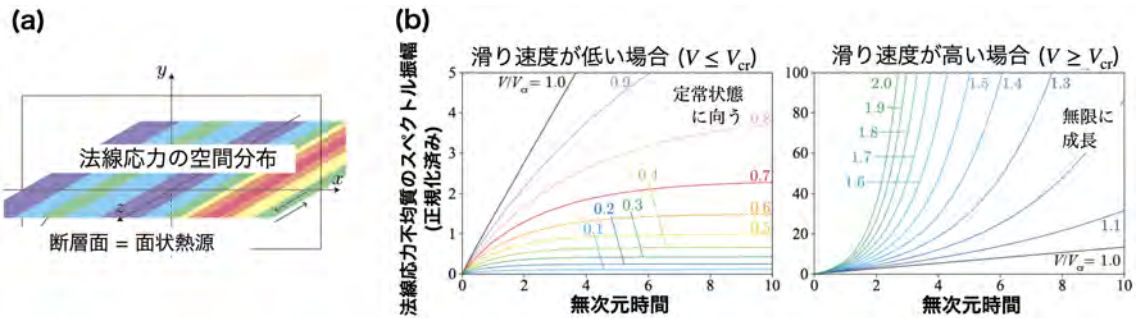


図5. 熱弾性による断層面滑りの不安定化 (Noda, 2023より改変)

(a) 断層滑りの熱弾性不安定の概念図。(b) 理論的に予測される法線応力の空間不均質の時間発展。

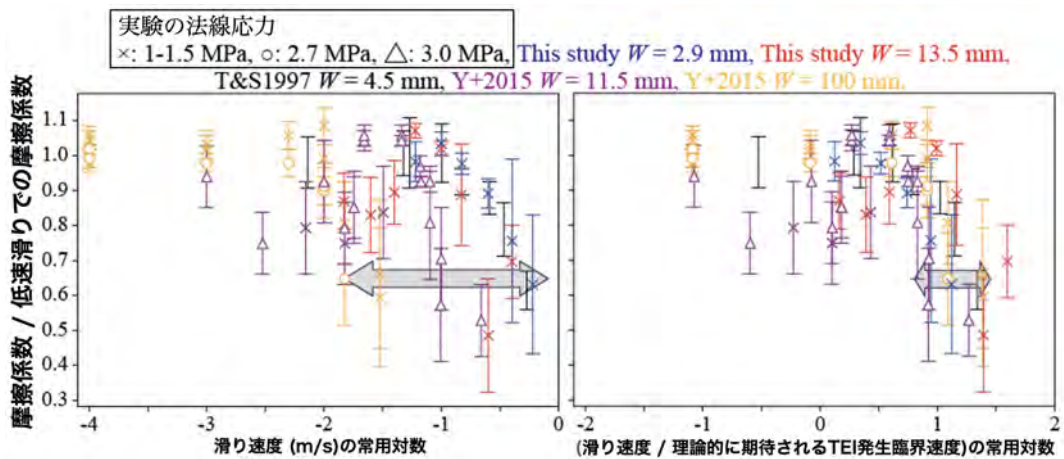


図6. 様々なサイズの試料での動的弱化的比較 (野田・大橋, 2023SSJより改変)

(左)横軸は滑り速度。Y+2015はYamashita+ (2015)の実験結果。T&S1997はTsutsumi and Shimamoto (1997)の実験結果。This studyは、今回新たに行った追加実験でTsutsumi and Shimamoto (1997)が用いた実験装置で行った。(右)横軸を、試料サイズから理論的に予測される熱弾性不安定の臨界速度 V_{cr} で正規化してプロットしなおしたもの。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

多項目観測データの比較研究に基づく噴火過程の理解とモデル構築

(3) 関連の深い建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (4) 火山現象の解明とモデル化
 - ア. 火山現象の定量化と解明

(4) その他関連する建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (4) 火山現象の解明とモデル化
 - イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化
- 2 地震・火山噴火の予測のための研究
 - (4) 中長期的な火山活動の評価
 - イ. モニタリングによる火山活動の評価
 - (5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - エ. 桜島大規模火山噴火
 - オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火
高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

これまでの観測研究計画を通じて火山周辺の多項目観測網が徐々に充実し、火山活動に関するデータの蓄積が進んできた。近年では、阿蘇山、霧島新燃岳、浅間山、口永良部島などの噴火時に火口近傍の観測点による重要なデータが得られ、噴火現象の理解が大きく進んだ。しかしながら、個々の火山に関する理解はある程度進んだものの、火山現象の根底にある物理メカニズムの理解はまだ十分とは言えず、火山活動の予測は未だに経験に頼る部分が多い。多くの火山で得られたデータを比較して共通点・相違点を詳細に検討するとともに、実験や理論的考察とも比較することにより、物理メカニズムの理解が進むことで初めて、物理的理解と観測に基づく火山活動の予測が可能となる。

観測点が整備されており火山現象の観測データが豊富である浅間山・霧島・阿蘇・伊豆大島および、最近顕著な活動があった諏訪之瀬島・西之島などを主たる観測研究の対象火山とし、全国連携で多項目観測の継続・拡充を図ると共に、得られたデータの解析を進め比較研究を行う。多項目観測データに基づき、マグマ蓄積およびマグマ上昇等の噴火準備過程、噴火中の火道内プロセス、噴火が終息に向かう噴火過程のそれぞれの段階について、物理過程のモデル化を進める。得られたそれぞれの過程に関するモデル間の関係を把握し、それらを有機的に結合することにより、火山活動推移全体を記述する火山活動推移モデルの構築に資する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本計画は、「火口近傍での多項目観測」、「比較研究」、「衛星データの活用」、「新たな観測手法の開発」、「モデル実験」の5つの柱からなる。その狙いと実施内容は以下の通り。

1. 火口近傍での多項目観測

数年程度の比較的短かい間隔で噴火を繰り返す火山は噴火の全過程にわたるデータが得やすい。また、現在活動中の火山もデータを得る貴重な機会を提供してくれる。これらを踏まえ、本研究では、浅間山・霧島・阿蘇・伊豆大島・諏訪之瀬島・西之島などを主たる対象とする。対象とする火山において、地震・GNSS・傾斜・重力・電磁気・空振・ガス等の多項目の観測を実施する。また、実施期間中に新たな顕著な火山活動があった場合は観測資源を投入し貴重なデータの獲得を目指す。

2. 比較研究

観測データを蓄積し、国内外の火山における観測・解析事例との比較研究を進めることにより、マグマの蓄積・上昇等の噴火の準備過程から噴火そのものの物理機構、噴火が終息する条件の理解など、噴火準備段階から終息までを含む火山活動全体像の各段階を記述する物理モデルの構築を目指す。例えば、地震・地殻変動・重力・電磁気・火山ガス観測等を統合的に解析することにより、マグマの蓄積位置、蓄積量、マグマ溜まりから地表へのマグマ上昇経路、マグマ流量を把握し、マグマ供給系のモデル化を進める。また、噴火時の地震・地殻変動・空振データの解析に基づき、噴火時の火道プロセスのモデル化を進める。空中磁気データからはマグマの上昇・下降に伴う山体の温度変化の検出や噴火後のマグマの冷却過程の理解を進める。その際、異なる火山のデータ同士の比較や、文献調査による、国内外の火山活動との比較も進める。

3. 衛星データの活用

解析およびモデル化にあたっては、InSARや赤外面像などの衛星データの活用が有効である。次世代SAR衛星の打ち上げに伴うデータ量の加速度的増大に備え、SARデータ解析を自動的に行うシステムを開発する。また、SARで面的に得られる地殻変動場は複雑であり、モデルパラメータの自由度の少ない茂木モデルやダイクモデルでは十分に表現できないことから、地形・複雑な地下構造・複雑な力源の形状などを考慮し、有限要素法などの数値的手法を用いたモデルを開発し、適用する。

衛星赤外面像による東アジア活火山リアルタイム観測・情報発信システムの運用と、噴火データの収集・解析を進め、次世代衛星データへの対応などの高度化を進めるとともに、衛星データを用いた噴火推移の多様性の把握および類型化や火山防災に資する情報発信手法の開発を進める。

4. 新たな観測手法の開発

火口近傍はSNが高く良質なデータが得られるが、観測の実施は容易ではない。火口近傍観測に適した観測装置の開発や、飛行体の活用など観測に必要な様々な技術開発も進める必要がある。近傍観測手法としてドローンなどの飛行体を用いた火山観測手法の開発を進める。具体的には、マルチコプターやペイロードの大きい無人ヘリコプターを用いた空中磁気測量、赤外面像撮影、火山ガスサンプリング、GNSSや地震計モジュールの火口近傍設置手法等の開発を進める。

また、観測が困難な火山を対象とする観測技術開発も必要である。そのために、機動型観測装置として、地震計・空振計・ハイドロフォン・カメラなどのセンサーを任意に選択でき、衛星通信により定期的なモニタリングやデータダウンロードも可能とする可搬性の高いパッケージを開発する。陸上観測のみならず海上観測も想定し、機器開発を進める。

5. モデル実験

噴火がさらに成長するのか、あるいは減衰して終わるのかは、噴火中のある瞬間に噴出するマグマ（噴出マグマ）とその後に続いて噴出するマグマ（駆動マグマ）それぞれの性質や、2つのマグマの関係等によって決まると考えられる。従って、マグマ模擬物質を用いた室内実験やモデリングを行い、噴火開始前のマグマ状態の空間分布が駆動マグマと噴出マグマの挙動や噴火推移に与える影響を明らかにする。さらに、噴出物からマグマ挙動の履歴を読み解くためのモデル構築を行う。そして、噴火開始前のマグマ状態の空間分布を推定するための効果的な観測方法の検討や、噴出推移事例の背後にある共通プロセスの理解につなげる。

以下に、各年度ごとの実施内容をまとめる。

令和元年（2019年）

- ・浅間山・霧島・阿蘇・伊豆大島・諏訪之瀬島等での火口近傍多項目観測を実施
- ・浅間についてデータの再解析を進め、他火山との比較研究を実施
- ・SARデータの自動解析システム開発の開始
- ・衛星赤外面像火山観測システムの機能拡張（新衛星への対応）

- ・無人飛行体による空中磁気観測
- ・無人飛行体用観測モジュール開発
- ・難地域観測用観測機器のプロトタイプ作成
- ・マグマのアナログ物質によるモデル実験

令和2年（2020年）

- ・浅間山・霧島・阿蘇・伊豆大島・諏訪之瀬島等での火口近傍多項目観測を実施
- ・霧島についてデータの再解析を進め、他火山との比較研究を実施
- ・SARデータの自動解析システム開発の継続
- ・衛星赤外面像火山観測システムの機能拡張（観測域の拡大）
- ・無人飛行体による空中磁気観測、機器設置実験
- ・難地域観測用観測機器のプロトタイプ作成
- ・マグマのアナログ物質によるモデル実験

令和3年（2021年）

- ・浅間山・霧島・阿蘇・伊豆大島・諏訪之瀬島等での火口近傍多項目観測を実施
- ・阿蘇についてデータの再解析を進め、他火山との比較研究を実施
- ・SARデータ解析のための有限要素モデルの開発
- ・衛星赤外面像火山観測システムの解析結果を用いた噴火推移の解析
- ・高飛行高度・高ペイロード型無人ヘリに向けた観測モジュールの開発と改良
- ・難地域観測用観測機器の現場テスト
- ・駆動マグマの推定モデルの構築と効果的な観測手法の検討

令和4年（2022年）

- ・浅間山・霧島・阿蘇・伊豆大島・諏訪之瀬島等での火口近傍多項目観測を実施
- ・伊豆大島についてデータの再解析を進め、他火山との比較研究を実施
- ・SARデータ解析のための有限要素モデルの開発
- ・衛星赤外面像火山観測システムの解析結果を用いた噴火推移の解析
- ・無人飛行体による空中磁気観測結果の解析
- ・難地域観測用観測機器の改良
- ・駆動マグマの推定モデルの構築と効果的な観測手法の検討

令和5年（2023年）

- ・浅間山・霧島・阿蘇・伊豆大島・諏訪之瀬島等での火口近傍多項目観測を実施
- ・諏訪之瀬島についてデータの再解析を進め、他火山との比較研究を実施
- ・SARデータ解析のための有限要素モデルの開発
- ・衛星赤外面像火山観測システムにWebベースのシミュレーションシステムを追加
- ・無人飛行体用観測モジュールの設置実験
- ・難地域観測用観測機器の改良と現場テスト
- ・噴火推移事例データの収集調査

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1. 火口近傍での多項目観測

伊豆大島においてドローンを用いた空中磁気探査を実施し、伊豆大島カルデラ内を測線間隔50mで網羅的に測量した。地表から深さ1km程度までの磁化強度分布を求めたところ、A火口直下とB火口列に沿う弱磁化域を見出した（図1）。また、2021年に実施した観測の結果と比較し磁化の強度変化を推定したところ、B火口列下は若干の帯磁、A火口下は若干の消磁を示した（図2）。

2021年に霧島新燃岳で実施した空中磁気測量データの解析を進めた。2021年10月の空中磁気測量では衛星通信を用いることにより、従来は飛行が困難であった領域を含む測量が可能となり新燃岳のほぼ全域に渡る磁化強度分布を求めることができた。新燃岳山体は周囲の火山（韓国岳、獅子戸岳、中岳）に比べて弱磁化であること。2011年、2018年噴火で溶岩に満たされその後溶岩が固結した火口内のみが強く帯磁していること。2011年と2021年に実施した探査結果を比較したところ、火口内は10年間で強く帯磁したが火口外では大きな変化は認められないなど、磁化強度の水平分布から多くの情報が得られた（図3）。新燃岳火口内溶岩のダイポールモーメント変化を推定したところ、2011年噴火により噴出した火口内溶岩の帯磁による帯磁強度変化が2018年噴火の際に噴出した溶岩の帯磁

により加速したことが明瞭に捉えられた（図4）。

霧島火山の地震・空振観測点のデータを解析し、衛星を含む多項目データおよび先行研究の結果と統合して新燃岳と硫黄山の活動を一連のものとして検討した。2017年噴火の半年前から新燃岳火口近傍でSeismic Background Level (SBL)の加速的成長が見られていたが、それは、硫黄山の活動と連動していたようである、一方、新燃岳2017年噴火以降は新燃岳直下で微動の加速的成長が見られ、2018年噴火が発生した。その後、微動源は西方に移動し、2018年4月の硫黄山噴火が発生した(図5)。

2. 比較研究

比較研究の一環として、複数火山で観測される現象の背景にある物理機構のモデル化を進めている。火山でしばしば観測される微動の特徴を説明するモデルとして、調和的微動の非線形振動モデルとして広く応用されているJulian (1994)のモデルを改良し、グリーン関数と畳み込むことで観測波形と比較可能な形にし、箱根火山の深部で発生した調和型微動(Yukutake et al., 2022)の観測波形とよく似た特徴をモデルで再現することに成功した（図6）。

3. 衛星データの活用

衛星赤外面像を用いた方法により、ブルカノ噴火を伴う噴火推移の検討を進めている。近年、衛星観測技術の進歩に伴う頻度観測の向上により、ブルカノ噴火等の短時間スケールの現象の観測が視野に入ってきた。この代表であるひまわり8/9号の10分毎という高頻度衛星赤外面像を用いることにより、ブルカノ噴火およびその発生場をもたらす噴火推移全体を一元的に観測し、活動が推移する中でブルカノ噴火の発生準備がどのように進み、噴火の発生にどのようなプロセスが関係し、次の噴火あるいは終息へと移行するのか、を捉えることができる可能性が出て来た。

本年度は、昨年度に引き続き、ひまわり8号の画像により2018年新燃岳活動の解析を行い、噴火推移の解析と4月4日（5日日本時間）の噴火プロセスの検討を行った。本研究ではひまわり8号の $1.6\mu\text{m}$ 、 $2.3\mu\text{m}$ 、 $3.9\mu\text{m}$ と $11\mu\text{m}$ バンドを使って、熱異常の時間変化を調べた（分解能2 km、観測頻度10分毎）。 $3.9\mu\text{m}$ は高温の熱源に敏感な上に、 $1.6\mu\text{m}$ と $2.3\mu\text{m}$ に比べ太陽光反射光の影響が少なく昼間の時間帯を含めて熱異常を観測することができる利点がある。 $11\mu\text{m}$ バンドは画素内の広い範囲を占める部分の温度を強く反映するため、通常はバックグラウンド温度の指標として利用される。ただし、火砕流等の発生により高温領域が一挙に広がる場合は、熱異常を示すこともある。すべてのデータについて、太陽光の迷光の補正（Kaneko et al. 2018b）、MODTRAN3.7による大気補正（Berk et al. 1989）、放射率の補正（Harris 2013; Walter and Salisbury 1989）を行った。

3-1. 噴火推移を通じての熱異常変化

ひまわり8号赤外面像によって観測された各ステージ（図7 a）の熱異常の時間変化を図7 c-f)に、各日の昼夜を含む24時間の熱異常変化を図8に示す。

火山灰放出ステージ（S1）：噴煙の放出はひまわり8号画像上で確認されるものの、熱異常は検出されない（図7）。

溶岩噴出ステージ（S2）：3月6日は、雲に覆われ始める17時頃までは、ややばらつくが高い熱異常が続く（図7、図8 - 3月6日）。低粘性溶岩の噴出活動において、これと似た様な一定レベルの連続的な熱異常が見られ、これは噴出率が一定であることを示すとされる。新燃の結果も、噴出率が一定であったことを示すと考えらえる。実際、レーダー画像の解析でもこの間の噴出率は一定で $6.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{日}$ と推定されている（NIDE 2018）。一方で、安山岩溶岩の新燃岳の噴出活動では、低粘性溶岩に比べ、同じ噴出率に対して熱異常値が小さくなっている($6.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{日}$ のマグマ噴出率に対する

$1.6\mu\text{m}$ での熱異常値；2018年新燃岳の溶岩： $2 \times 10^6 \text{ W m}^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 、2015年ラウン火山の低粘性溶岩： $13 \times 10^6 \text{ W m}^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ ）。これは高い粘性のため形成される溶岩層が厚くなり、単位噴出体積当たりの表面の高温域が小さくなることが原因と思われる。本ステージでは、溶岩噴出に伴って、水蒸気を含む白色噴煙の活発な放出活動が続いた。これは、火道浅部のマグマから揮発性成分が効率的に抜け放出されていたことを示唆する。これに対応して、 SO_2 放出率も高くなっている（図7b）。

ブルカノ式噴火ステージ（S3）：スパイク的熱異常が3月9日から3月中旬まで多く発生しているが、下旬には規模・頻度ともに低下する（図7、8）。4月に4日に、孤立的で大きなスパイク的熱異常が見られる。後述するように、個々のスパイク的熱異は、ブルカノ式噴火に対応している。本ステージでは、ブルカノ式噴火発生時を除くと、溶岩中央の火口域からの水蒸気を含む白色噴煙の放出は全く認められない。これは前ステージで噴出した溶岩が、大きなキャップロックとして作用していたこと

を示す。SO₂放出率も低下している（図7b）。

このように、2018年新燃岳噴火の中長期的熱異常変化パターンは、熱異常を示さない火山灰放出ステージ（S1）を除くと、溶岩噴出ステージ（S2）からブルカノ式噴火ステージ（S3）への推移変化に対応して、一定の高い熱異常からスパイク的な熱異常の発生へと移行するパターンとなる（図7c-f）。このような熱異常変化パターンは溶岩噴出活動からブルカノ式噴火活動への推移を特徴付けるものと考えられる。

3-2. 個々のブルカノ式噴火が示す熱異常変化

短期スケールでブルカノ式噴火ステージ（S3）を見ると、中長期的変化における個々のスパイク的熱異常は、突然立ち上がり、2～3時間で徐々に低下する急増・漸減の非対称パルス（図8、図9）をなしている。これは、爆発現象から期待される熱異常変化と一致しており、このパルスのピーク部分がブルカノ式噴火の爆発に、漸減部分が放出物表面の冷却過程に対応していると考えられる。ブルカノ式噴火では、爆発に伴って噴煙が発生する。ひまわりの画像によって、熱異常の変化と同期してこのような噴煙が実際に発生しているかの確認を行った。図8に赤矢印（↓）で示したように、全ての熱異常パルスについて噴煙が発生していることが確認された。この具体的な例として3月9日、4月4日の状況を図9に示す。加えて、ブルカノ式噴火では爆発に伴って空振が発生する。図8にブルカノ式噴火と認定される空振の発生時刻（JMA 2018）を黒三角（▲）で示した。図8のように空振の発生と熱異常パルスの発生はほぼ一致している（▲のない非対称熱異常パルスは、気象庁のブルカノ式噴火としての基準を満たさない爆発的噴火と考えられる）。

3-3. 4月4日のブルカノ式噴火に伴う火口域の地形変化

4月4日（日本時間5日）のブルカノ式噴火に伴う熱異常パルスは、冷却期の熱異常の漸減過程の途中でコブ状に熱異常が再上昇している（図9下）。この噴火は今回の活動で発生した一連のブルカノ式噴火の中でも、とりわけ規模の大きいものであった（JMA 2018）。このため、爆発口が深く大きく開き、爆発の後に、内部の溶融状態にある溶岩が表面に絞り出された可能性が考えられる。この爆発の一週間後の4月11日に撮影されたレーダー画像では、先の3月13日の写真で緩やかに凹んでいた場所が、4月4日の噴火に伴ってより大きく凹み、その中心付近に小さな盛り上がり部が形成されているように見える。この盛り上がり部が、絞り出された溶岩の可能性もある。この爆発直前の3月28日の画像にはこの様な地形は存在していない。この後、6月22日にもブルカノ式噴火があり（JMA 2018）、現在この溶岩の盛り上がり地形を確認することはできない。

4. 新たな観測手法の開発

新たな観測手法開発として、伊豆大島においてドローンを用いた空中磁気探査を実施した。重量1.5kg（バッテリー込み）のドローン搭載に特化した軽量磁力計を新たに用いることで、飛行の安全面と飛行時間を拡充することができた（図10）。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

1. 火口近傍での多項目観測

浅間山、霧島山、伊豆大島等において、火口周辺の多項目観測網を用いる観測を実施した。浅間山においては、2007年から2017年の間に得られた多項目データを再検討し、N型地震の出現時期に帯磁傾向が横ばいになることを見出し、N型地震が多発する時期に山体冷却が停滞し、N型地震発生時に浅部に熱水あるいはガスが供給されたことにより冷却の進行が停滞したと解釈した。

伊豆大島、三宅島、霧島山においてはドローンや無人ヘリによる空中磁気測量の実施及びデータ解析を進め、浅部の詳細な構造を推定した。また、繰り返し観測による浅部構造の時間変化も捉えることができた。

西之島では、一時的に火山活動が低下した機会をとらえ2019年9月に上陸し広帯域地震計と空振計からなる観測点を設置した。溶岩流に埋没するまでの観測データを衛星回線経由で回収した。

諏訪之瀬島における地震・空振観測点の観測を実施した。2020年12月28日に爆発的噴火が発生し諏訪之瀬島では初めて噴火警戒レベルが3に引き上げられた際には、GNSS受信機や中継点の保守、地震計や空振計の追加など観測体制の整備および火山灰の採取を行った。空振観測データからはイベント数Nと振幅Aの関係（ $N=kA-2.2$ ）を得た。また、空振振幅と噴煙高度は逆相関の関係にあることを見出した。

阿蘇火山では、5か年の研究計画で多項目観測を継続した。期間中2019年4月にごく小規模な水蒸気噴火が発生し、同年7月からマグマ噴火に移行したのち、2020年6月まで灰噴火が断続的に発生した。また、2021年の10月20日には小規模な水蒸気噴火が発生し、多数の噴石が放出され、噴煙は火口縁上3500mの高度に達し、火砕流は最大で火口の北側1.6kmまで流下した。いずれの水蒸気噴火にも、マグマ溜まりの膨張に対応するGPS基線長の伸び、火口浅部の温度上昇を示す地磁気変化が先行した。そして、LPTの発生回数が急増するとともに火山ガス放出量が増大し、噴火直前には火山性微動の振幅が急増したことが捉えられている。水蒸気噴火後も基線長の伸びは継続しマグマ溜まりは膨張していたと考えられるが、2021年はマグマ噴火に移行することなく、噴火活動は終息した。2019年と2021年の水蒸気噴火後の差異は長周期微動の振幅変化にあり、2019年にはマグマ噴火にいたる過程で、長周期微動の振幅増大が捉えられている。2014年11月のマグマ噴火前にも長周期微動の振幅増大が観測されており、この振幅増大がマグマの上昇に対応している可能性がある(図11)。

イタリアストロンボリ火山の山頂付近における観測データを、山体地形を考慮したモデルを用いて解析し、圧力源と位置や大きさを詳細に推定した。

2. 比較研究

火山の比較研究に活用することを目的とする新たな観測・解析手法の開発を進めた。地震波干渉法に基づく位相の不明瞭な火山性地震や微動の震源決定法を開発し、伊豆大島に適用した。光ファイバーケーブルとDASを利用した観測手法開発を進め、吾妻山で得られたデータに適用したところ、従来手法で決定した震源位置と良い一致を示す結果が得られた。また、同じDASデータにコーダ波規格化法を用いて地盤増幅特性を推定したところ数100m程度のスケールの溶岩流や火山地形の分布とよく一致する結果を得た。本手法は光ケーブルが敷設してあれば適用でき、噴火中でも火口近傍データの取得が可能であり、雷被害の心配もない。

桜島のデータを対象として、観測点間の地震波の相関計算をもとにした火山性地震の分類法の開発と火山性微動の震源決定を行い、複雑な火山性地震の分類を自動処理する方法を提案することができた。桜島火山、口永良部島火山、霧島火山で得られた空振エネルギーと降下火山灰量の関係式に基づき、諏訪之瀬島の2021年7月の噴火活動に伴う降下火山灰量の検討を試みた。噴煙初期浮力と空振エネルギーの関係と、実際の噴煙到達高度から期待される初期浮力を比較すると、諏訪之瀬島の値は他の火山の傾向とは大きく乖離していることがわかり、その理由を明らかにするために火口径や火山ガスに富む高温マグマの寄与を検討した。

3. 衛星データの活用

SARデータの時系列解析のシステムを開発し、有珠山と浅間山のデータに適用して小規模な地殻変動を抽出した。

衛星画像によるリアルタイム火山観測システムの開発を進め、マルチ衛星観測によって、遠隔地火山の噴火推移の観測を行い、得られた情報に基づいて噴火プロセスを推定することが可能であることを具体的事例で示すことができた。2019-2020年西之島の活動では、マルチ衛星観測より、以下の活動情報を得ることができた。① 地形・噴出物分布状況の変化：ALOS-2画像を使用、② 熱異常変化・熱異常に基づく噴出率変化：ひまわり8号画像を使用、③ 火砕丘の地形の変化：ALOS-2画像の判読結果(①)より推定、④ 地形に基づく噴出率変化：ALOS-2画像の判読結果(①)より推定、⑤ 溶岩と火砕岩の割合の変化：ALOS-2画像の判読結果(①)より推定、⑥ SO₂放出量の変化：TORPOMI画像を使用、⑦ 変色海域の発生状況：しきさい画像を使用(図12)。また、マルチ衛星観測の結果から得られた情報を基に噴火プロセスの推定を行うことができた(図13)。

マルチ衛星観測による解析は観測範囲の全ての火山に適用可能であり、西之島の事例と同レベルの解析が内外の遠隔地を含むすべての火山で可能であるという点は、特筆すべき重要な成果である。

4. 新たな観測手法の開発

UAVを活用した火山観測手法の開発として、霧島山、伊豆大島、三宅島における空中磁気観測を実施した。霧島山では、人工衛星経由で遠隔操作された無人ヘリコプターによる空中磁気測量を実施し、基地局からの見通しが無い新燃岳東斜面の測定に成功した。三宅島では電動ドローンと内燃式エンジンを持つ無人ヘリコプターの両方で空中磁気測量を行い、2つの手法のメリットとデメリットをまとめることができた。

噴火のダイナミクスを議論する上で、地震と空振のエネルギー分配は重要なパラメータであることか

ら、地震一空振統合解析手法の開発を進め、様々な火山噴火に応用した。噴火中の地震計と空振計のデータを活用し、地震波成分を分離して地面の空振への応答関数を評価する方法を提案し(Ichihara et al., 2021, EPS)、霧島火山硫黄山2018年噴火時の空振パルスの解析(Muramatsu et al., 2022, JVGR)やフングトンガ=フンガハアパイ火山の推移解明(Ichihara et al., 2022, JpGU)に応用した(図14)。

新しい火山監視手法の開発と応用として、夜の静かな時間帯の背景ノイズレベル(SBL)を調べることで、長期の火山活動の推移を捉えることを提案した。霧島火山では、数か月スケールの噴火の前兆や終息を捉えた。(Ichihara et al., 2023, Sci. Rep.) (図15)。

空振の観測や方向推定にはアレイ観測が効果的であるが、100mスケールのアレイは設置や運用が困難であった。そこで、10mスケールのアレイや空振計ペア観測の手法を考案し、実用化した(ネバドデルルイス火山 (Castano et al., EPS 2020)、富士山の雪氷観測(池田 他、2022)、霧島硫黄山(Yamakawa et al., 2023 EPS) (図16)。

5. モデル実験

火山噴火の爆発性を支配するマグマのレオロジーに関する研究ではこれまで、粘弾性と緩和時間に議論が集中していたが、降伏応力やサスペンションレオロジーに着目し、模擬物質の探索とモデル実験を行った。非線形過渡的なレオロジーと降伏応力の重要性を指摘した。(Sanchez et al., 2023, GRL; Muramatsu et al., 2022, JVGR; Takeda et al., 2020, JVGR 等) (図17)。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

「関連の深い建議の項目」への貢献

本課題は、多項目観測により火山現象を定量的に捉え、その物理メカニズムを解明し、モデル化を進めることを目的としている。浅間山、阿蘇山など、多くの火山において多項目観測を実施し、そのモデル化を進めることができたことから、関連の深い建議の項目への貢献は極めて大きいと自負している。

「災害の軽減に貢献する」という目標に対する位置づけと今後の展望

災害の原因となる自然現象の理解無くしては、それに起因する災害を軽減することなどは到底達成できない。本課題は、火山現象の理解を進めることにより、単なる経験では無く合理的な根拠に基づく災害対策を立てるための基礎的な知見を提供するものであり、「災害の軽減に貢献する」という目標に合致する。自然現象の理解は、ある意味、終わりのない課題である。今後も観測解析手法の高度化、データの取得・蓄積を進めることにより、火山現象の理解を深める事を継続する必要がある。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

・論文・報告書等

Ichihara, M., Kobayashi, T., Maeno, F. et al., 2023, The sequence of the 2017–2018 eruptions and seismo-acoustic activity at Kirishima volcano group, Earth Planets

Space, 75, 144, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01883-8>, 査読有, 謝辞有

Ozaki, T., Yukutake, Y. & Ichihara, M., 2023, Linking the flow-induced tremor model to the seismological observation: application to the deep harmonic tremor at Hakone volcano,

Japan., Earth Planets Space, 75, 111, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01865-w>, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報 :

(11) 次期計画における課題名 :

多項目観測と解析高度化による火山活動の定量的理解

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

大湊隆雄（東京大学地震研究所）,金子隆之（東京大学地震研究所）,市原美恵（東京大学地震研究所）,
小山崇夫（東京大学地震研究所）,青木陽介（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

寅丸敦志（九州大学）,杉岡裕子（神戸大学）,中道治久（京都大学防災研究所）,大倉敬宏（京都大学大学院理学研究科）,西村太志（東北大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：大湊隆雄

所属：東京大学地震研究所

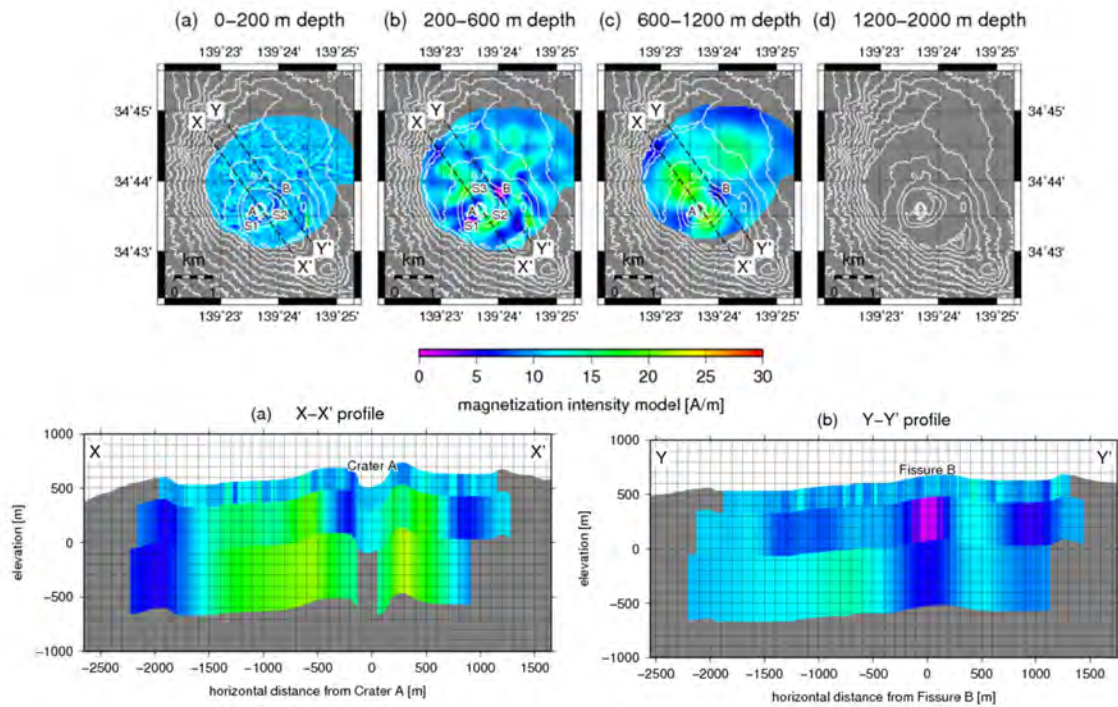


図1 伊豆大島山頂火口の磁化強度分布
A火口直下とB火口列に沿って弱磁化域が見える。

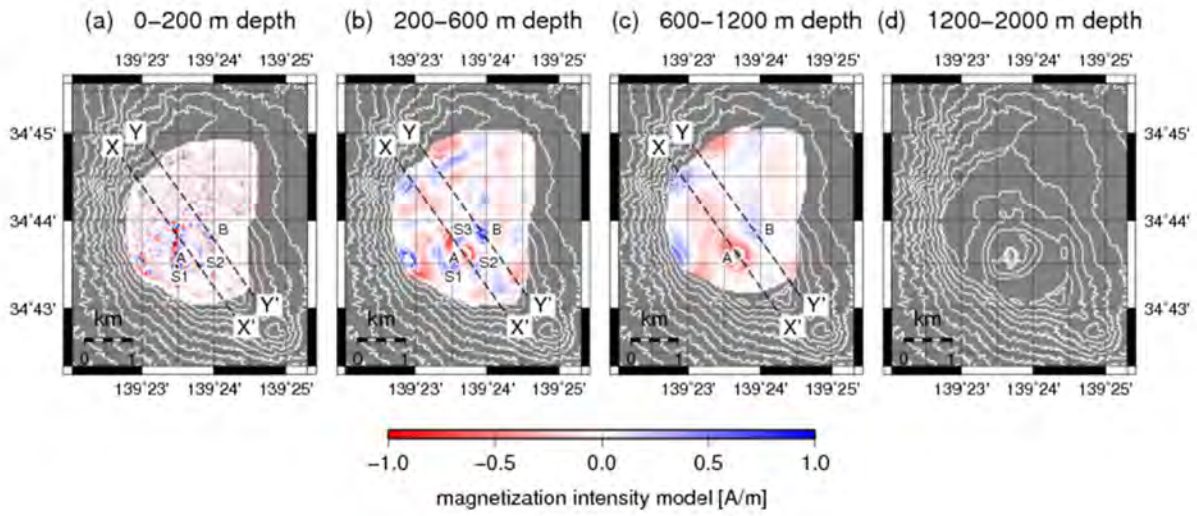


図2 伊豆大島における2021年から2023年の磁化強度変化
 平均磁化強度は12A/m程度であり、それに比較すると変化量は非常に小さい。暫定的な解析結果によると、B火口列下は若干の帯磁、A火口下は若干の消磁を示す。

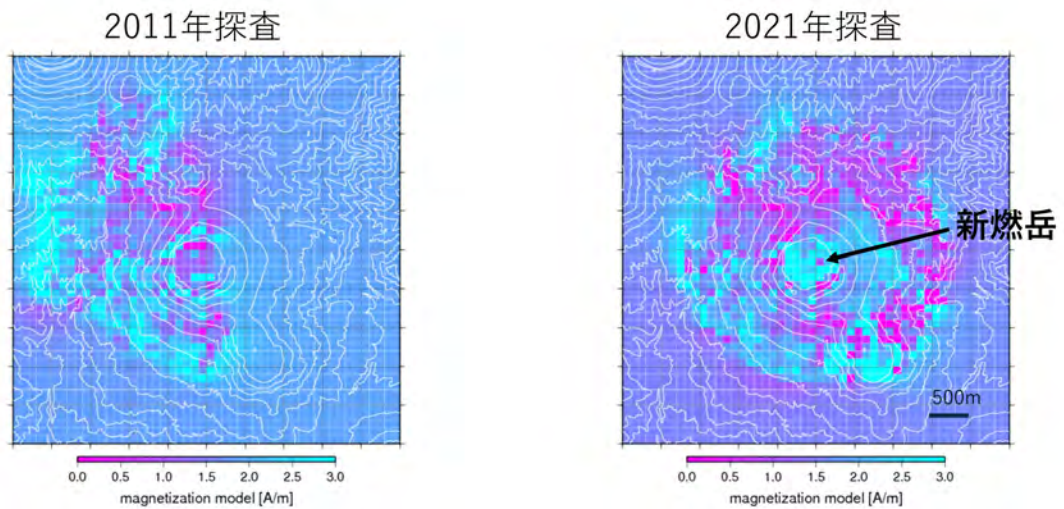


図3 新燃岳山体の磁化強度水平分布
 2011年探査（左図）での飛行は離発着地点から見て見通し範囲に限られたが、2021年探査（右図）では衛星通信を用いたことにより、山体全域をカバーすることができた。新燃岳山体は周囲の火山（韓国岳、獅子

戸岳、中岳) に比べて弱磁化であり火口内のみ強く帯磁している。2度の探査でともデータが得られている山体西側および火口内の10年間の変化を見ると、西斜面では大きな変化がないが溶岩が噴出しその冷却が進む火口内は10年間で強く帯磁した。

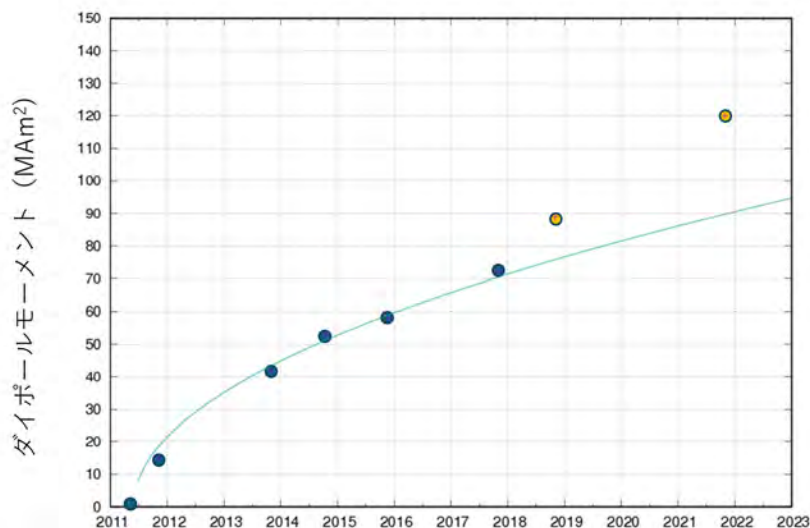


図4 新燃岳火口内溶岩のダイポールモーメントの変化

2018年噴火で新たに溶岩が噴出したことにより、火口内の帯磁強度の増加が加速したことが明瞭に見える。

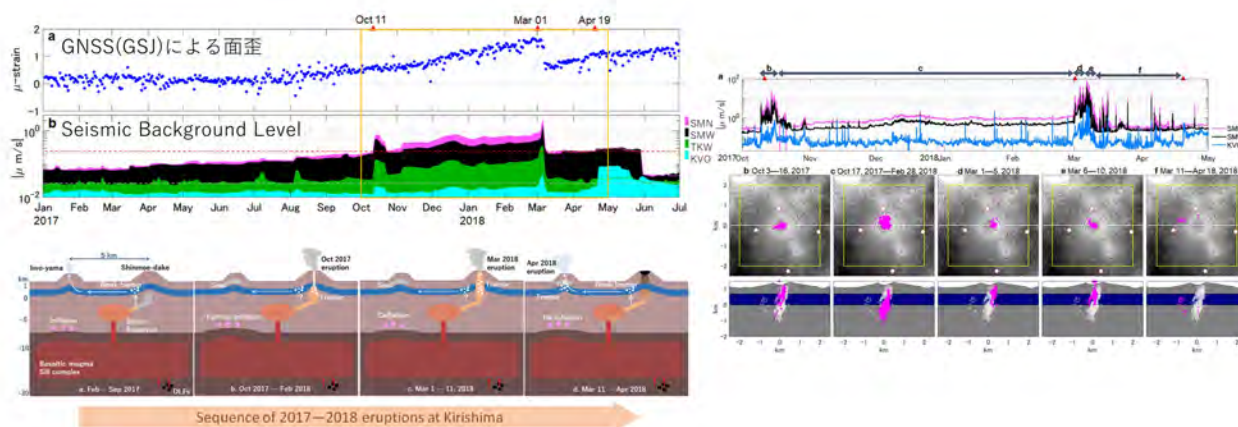


図5 多項目データから見た霧島火山2017-2018噴火の推移

(左上)GNSSによる面歪と霧島火山周辺の4観測点におけるSeismic Background Level (SBL) の時間変化、(左下)新燃岳と硫黄山の連動を示す模式図、(右)左上図の黄色枠の期間における連続微動の振幅および振動源の位置(赤丸)の推移。白丸は全期間の微動源位置。

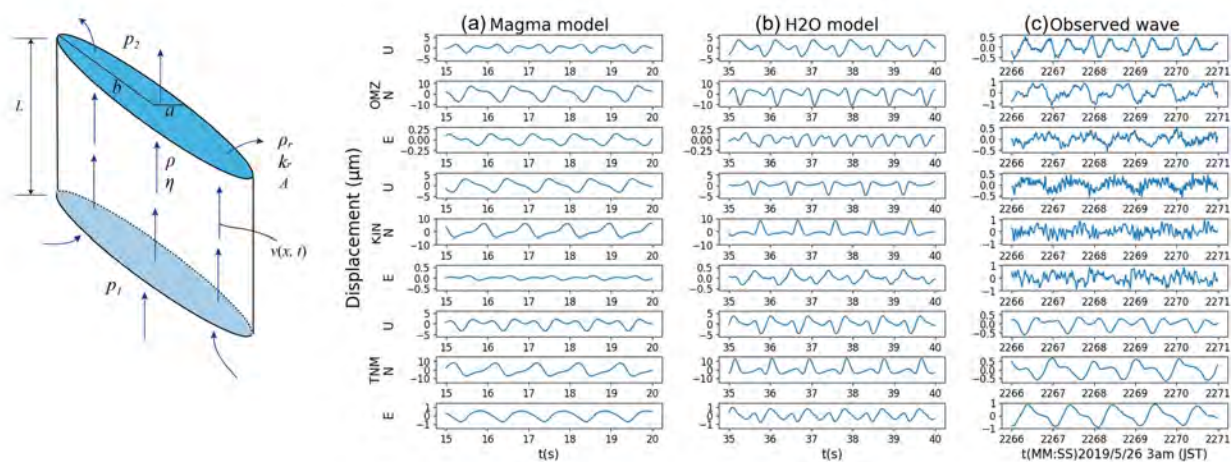


図6 調和的振動の非線形モデル

モデルの形状(左図)と振動体を通る流体の性質による微動波形の違い(マグマ(左)、水(中)、観測波形(右))。

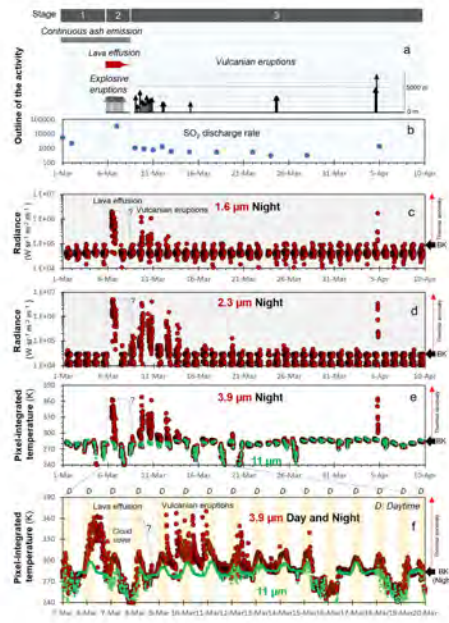


図7 ひまわり8号赤外面像による霧島新燃岳の噴火推移

a. 噴火の概要 b. SO_2 放出率の時間変化 (JMA) c. $1.6 \mu\text{m}$ の熱異常の時間変化 (夜) d. $2.3 \mu\text{m}$ の熱異常の時間変化 (夜) e. $3.9 \mu\text{m}$ の熱異常の時間変化 (夜) f. $3.9 \mu\text{m}$ の熱異常の時間変化 (昼夜)。 $11 \mu\text{m}$ の熱異常はバックグラウンドの指標。

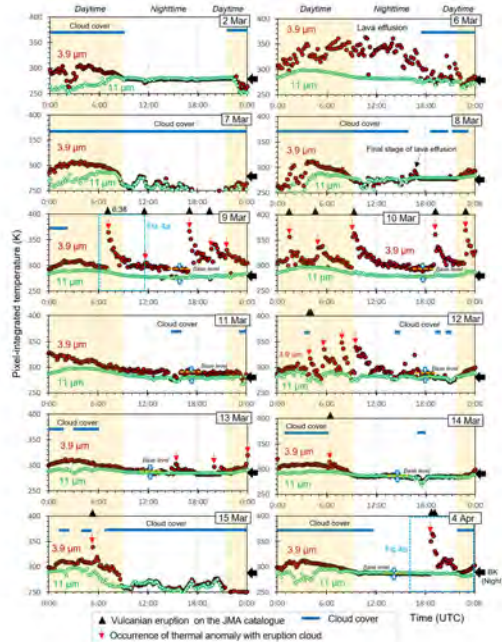


図8 各日の24時間の熱異常 ($3.9 \mu\text{m}$) の時間変化 $11 \mu\text{m}$ の熱異常はバックグラウンドの指標。

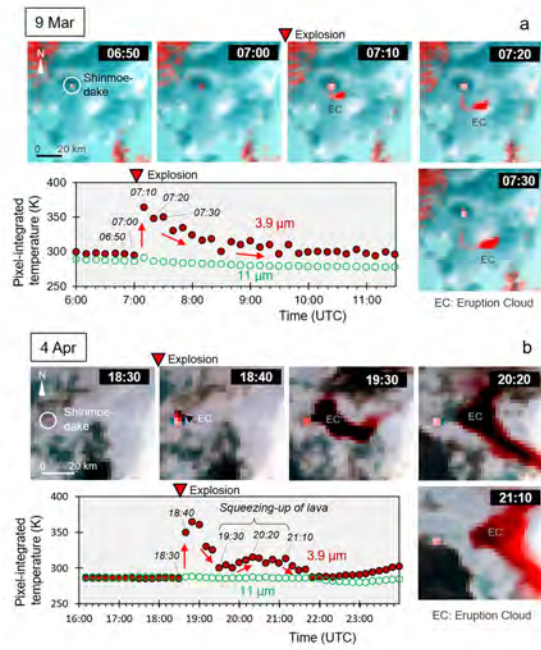
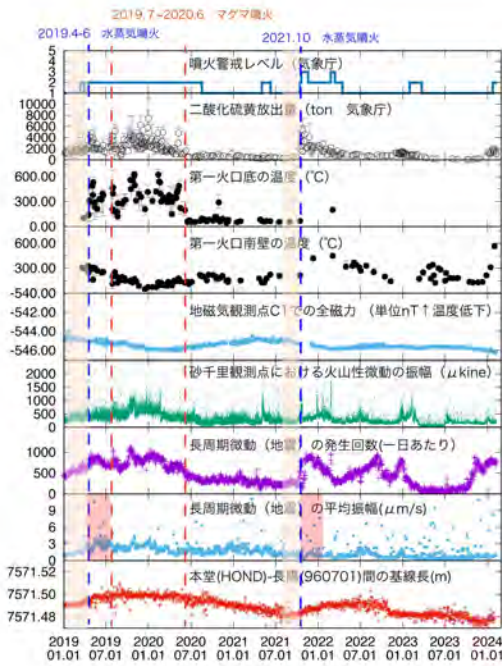


図9 個々のブルカノ式噴火が示す熱異常変化と噴煙の発生状況
上：3月9日、下：4月4日



図10 ドローンによる空中磁気測量で使用したセシウム光ポンピング全磁力計
Geometrics社製 MagArrow



5カ年中 2回の噴火活動

- 2019.4~2020.6 (水蒸気⇒マグマ)
- 2021.10 (水蒸気)

● 水蒸気噴火前の共通点

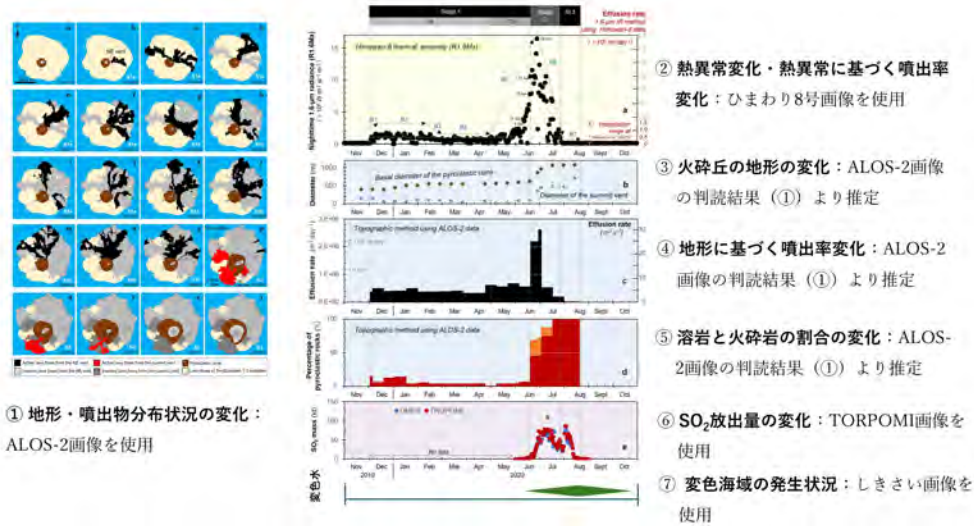
- ・ マグマだまりをはさむ基線長の伸び
- ・ 火口浅部の温度上昇 (地磁気変化)
- ・ 長周期微動の発生回数の急増
- ・ 火山ガス放出量の増大
- ・ 噴火直前の火山性微動の振幅の急増

● 水蒸気噴火後の相違

- ・ 長周期微動の振幅増大の有無
- ✓ 2019年 振幅増大⇒マグマ噴火
- ✓ 2021年 振幅増大なし⇒終息

- 火口直下へのマグマ移動により大振幅の長周期微動が励起か
- 2014年マグマ噴火前も同様

図 1 1 阿蘇山における火山活動推移 (2019年1月~2014年1月)



① 地形・噴出物分布状況の変化：
ALOS-2画像を使用

② 熱異常変化・熱異常に基づく噴出率
変化：ひまわり8号画像を使用

③ 火砕丘の地形の変化：ALOS-2画像
の判読結果 (①) より推定

④ 地形に基づく噴出率変化：ALOS-2
画像の判読結果 (①) より推定

⑤ 溶岩と火砕岩の割合の変化：ALOS-
2画像の判読結果 (①) より推定

⑥ SO₂放出量の変化：TORPOMI画像を
使用

⑦ 変色海域の発生状況：しきさい画像を
使用

図 1 2 マルチ衛星観測で捉えた西之島2019-2020年の活動

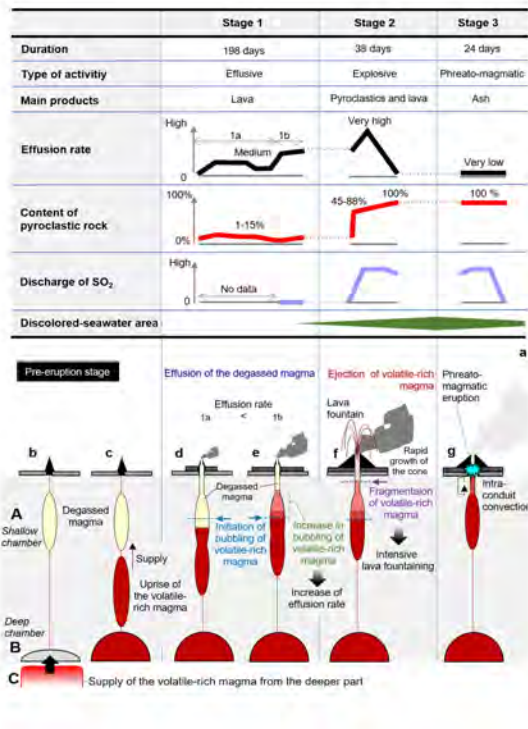


図 1 3 マルチ衛星観測に基づく噴火プロセスの推定（西之島の例）

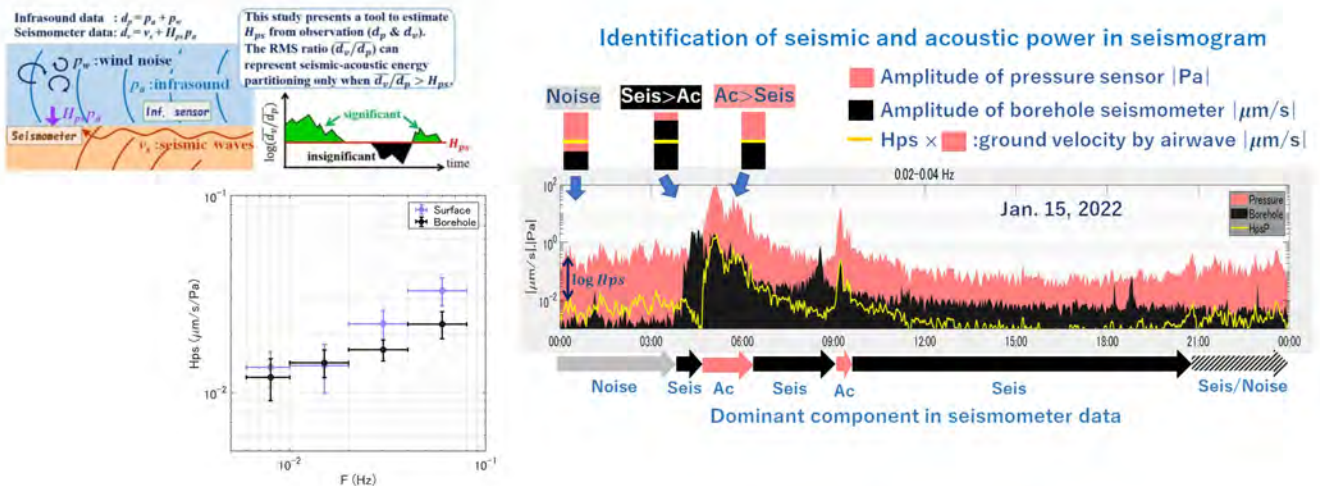


図 1 4 地震-空振統合解析手法の開発と応用

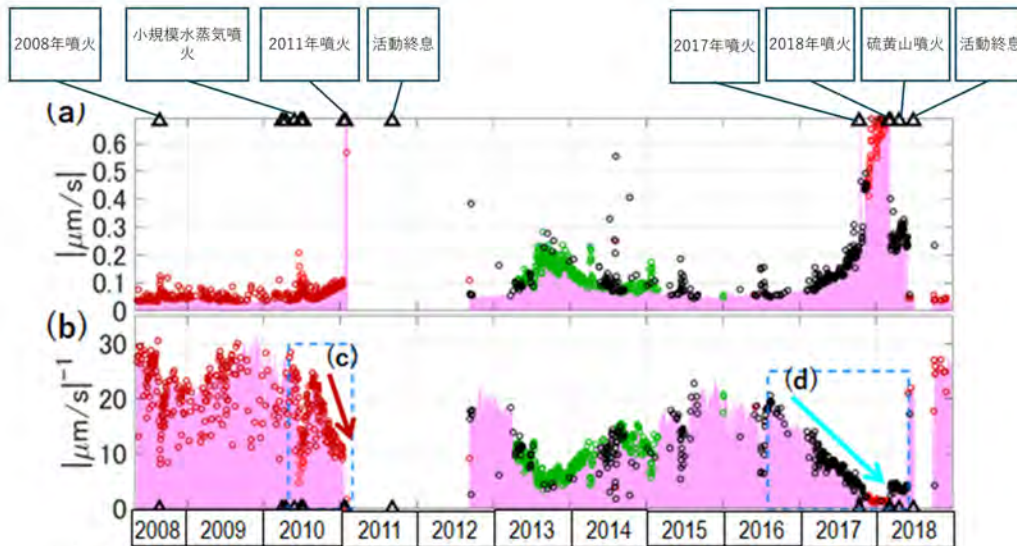


図15 新しい火山監視手法の開発と応用 (SBL 背景ノイズレベル)
火山近傍のSBL変化。赤・緑・黒はクラスター分類した結果

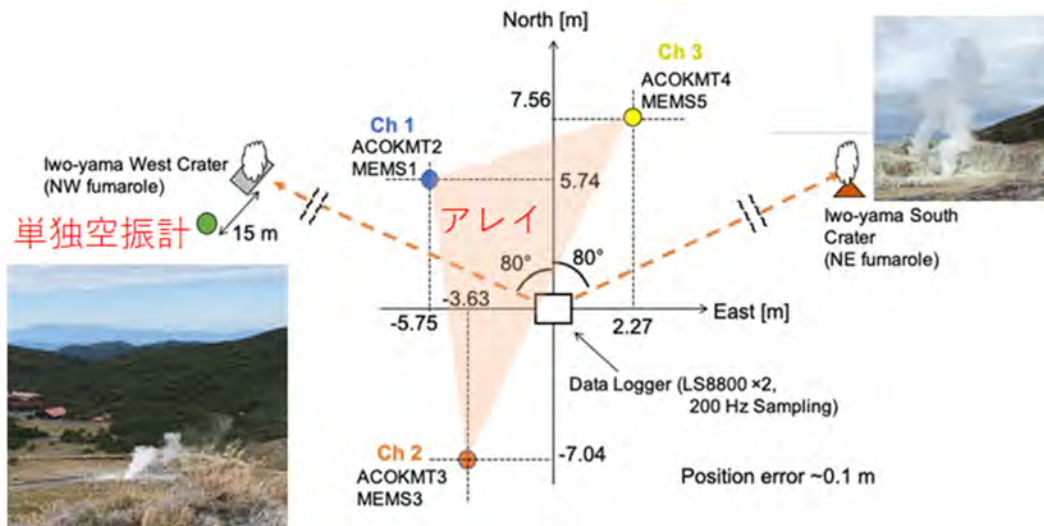
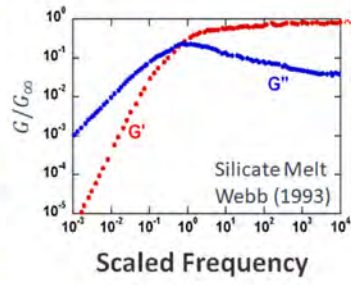
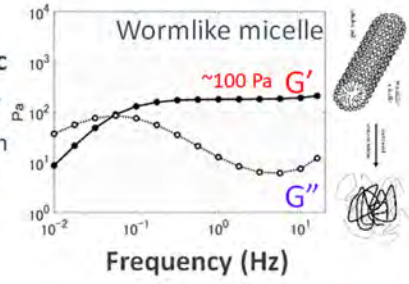


図16 新しい火山監視手法の開発と応用 (10mスケールアレイ観測手法の実用化)
霧島硫黄山の噴気空振観測。開口20mの3要素空振アレイを二つの噴気帯の間に設置した。また、微弱な一方の噴気口近傍に別の空振計を単独で設置した。地震研・九大の合同観測。

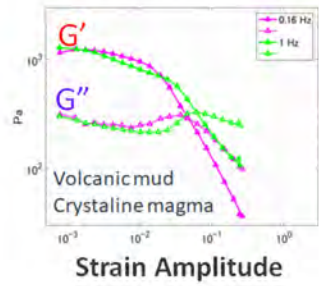
Silicate Melt



Viscoelastic
 Elastic at high frequency



Volcanic mud



Yield strength
 Elastic at small strain

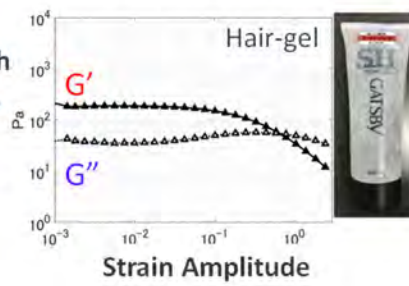


図 1 7 噴火の爆発性を支配するレオロジーの研究

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

日本・NZ国際協力によるヒ克蘭ギ沈み込み帯における多様な地震活動と、その発生環境との関係の解明

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
ア. 地震発生機構の解明
イ. 地震断層滑りのモデル化

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測
ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
(5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本観測研究では北島北東部ギズボーン沖合で日・NZ・米国際共同による海域地震・地殻変動観測を行い、陸域の観測記録とともに2018年に設置された海底掘削孔内ひずみ・温度観測記録とあわせて、多様な断層すべり運動を詳細に把握する。また当海域で2017・2018年に行われた大規模海域構造調査の結果と比較して、その活動とプレート境界の構造的特徴およびその変化との関係について解明する。さらに、2021年頃に発生が予想されている、固着強度遷移域までに及ぶ大規模なスロースリップの直上観測を目的として、遷移域周辺にて国際共同による海域地震・地殻変動観測を実施する。一方陸域においては、スロースリップに伴うプレート境界周辺の構造的特徴の変化を捉えることを目的として、NZでは初めてとなる電話回線を用いたネットワークMT法による電磁気連続観測の計画を策定し、実施に向けた準備を行う。可能であれば、本計画期間中に観測を開始する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

2019年度：

2018年3月終わりから4月前半にかけて、ヒ克蘭ギ沈み込み帯北部において比較的大規模なSSEが発生した。本海域では2018年10月に海底地震計および海底圧力計を設置し、観測を継続しているところ

である。2019年11月に予定しているNZの調査船Tangaroaを用いた航海にて、これらの海底観測機器を回収し、データ解析を始める。この航海では新たに海底地震計などを設置の予定である。

これまでの陸域GNSS観測データから把握される海域におけるスロースリップの繰り返し発生現象から、ヒ克蘭ギ沈み込み帯中部に位置するプレート間固着強度遷移域周辺において、2021年度前後に大規模なスロースリップが発生すると予想されている。上記海底観測機器観測場所については、沈み込み帯北部、あるいは中部に位置するプレート間固着強度遷移域のいずれかを予定しているが、それまでの陸域GNSS観測データから把握されるスロー地震イベントの発生状況を考慮して、国際共同研究参加グループと協議の上、決定する。

NZでの共同研究機関であるGNS Scienceとともに、ヒ克蘭ギ沈み込み帯北部での陸域における電話回線を用いたネットワークMT法による電磁気連続観測の計画の策定を行う。

2020～2023年度：

引き続き海底地震計などを用いた海域観測を継続する。2021年度前後に発生が予想されるプレート間固着強度遷移域周辺で発生する大規模スロースリップを海域で観測した後は、とスロースリップの発生状況を考慮に入れて協議の上、観測網をヒ克蘭ギ沈み込み帯北部に戻すことも検討する。

2017年度に実施した海域での大規模人工震源地震波構造調査など、これまでに実施してきた調査・観測の結果、さらには2018年度からヒ克蘭ギ沈み込み帯北部で稼働している掘削孔内観測データなどを参照しつつ、通常の地震活動からスロースリップまで、多様な断層すべり運動の発生メカニズムについて考察を進める。

ネットワークMT法による電磁気連続観測について、引き続き計画の策定を行う。まずはヒ克蘭ギ沈み込み帯北部での3箇所での観測を念頭に準備を進め、可能であれば観測を開始する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

ヒ克蘭ギ沈み込み帯北部のギズボーン沖では、陸域GNSS観測網からおよそ2年周期でスロースリップイベント（SSE）が発生することが知られていた。2014年5月から2015年6月にかけて、海底地震計、海底圧力計、海底電位磁力計を用いた日本-NZ-米の国際共同による海域地球物理観測（Hikurangi Ocean Bottom Investigation of Tremor and Slow Slip：HOBITSS）を行った。その結果、2014年9月から10月にかけて観測網直下で発生した大規模なSSEの直接観測に成功し、またそれに伴う海域下で発生するテクトニック微動活動を初めて明らかにした（Todd et al., 2018）。一方、海底地震計波形記録上では、Todd et al., (2018)で確認された120個の微動よりも遥かに多くの微動が含まれている可能性が認められることから再解析を実施し、SSE発生直後からバースト的に発生したepisodicな微動も2590個を検出した。さらにこの海域の微動についてそのエネルギーの推定を行ったところ、 $10^2 \sim 10^6$ Jの範囲にあることがわかった。この結果から、この海域で発生するテクトニック微動のエネルギーは、南海トラフ浅部をはじめ、東北沖や十勝沖のものと比較して1桁以上小さいことがわかり、陸域地震観測網からでは海域に発生する微動の確認が困難であり、海域で実施したHOBITSS観測によって初めてその活動が確認できることとなったと言える。

微動のエネルギーが小さいことから、およそ20 km間隔で設置した海底地震計を用いた観測網であっても、その活動を精度良く把握するには注意を払う必要がある。また、微動と検出されたイベント中に、通常の地震が含まれていることは十分に考えられる。このため微動の検出については、複数の検出手法による結果の比較を進めており、また通常の地震については、ディープラーニング技術を用いて検出をし、微動のイベントカタログから取り除く手法を試みている。ディープラーニングによる通常の地震の検出については、HOBITSS観測で確認されたイベントについて、海底地震計の波形記録を教師データとして用いることで、検出の精度を上げることを試みている。陸域観測網では検出されなかった地震についても検出が可能であることを確認しており、さらに到達時刻検出の精度の検証を進めている。

本海域における海域観測については、2018年10月～2019年10月、2021年10月～2022年9月に観測を実施し、さらに2022年10月に海底地震計10台を用いた同様の観測網を構築した。ここで設置した海底地震計については2023年10月に海底地震計9台を回収して整備を行い、同様の観測点配置に再設置して観測を継続している。また2023年10月からは、海底電位磁力計3台を新たに設置し、海底下比抵抗構造の解明を目指している。回収した海底地震計の観測記録は良好であり、特に海域における微動活動に関して解析を進めている。2022年10月から2023年9月までには海域での大規模SSEは発生しておらず、この期間の微動活動については大規模SSEに伴わない定常的な活動と考えられ、微動活動

の発生メカニズムを理解する上で重要な記録と考えられる。

2020年11月には、前述のヒ克蘭ギ沈み込み帯北部からおよそ250 km南の沈み込み帯中部に位置する固着強度遷移域周辺に、海底地震計10台、海底圧力計4台、さらにNZの海底圧力計10台による海底観測網を設置して、1年間の観測を実施した。この海域では約6年に一度の周期でSSEが発生しており、前回の発生が2016年だったことから、2021年から2023年頃に次のSSEの発生が見込まれており、このSSEの直接観測を目指して、海域観測網を展開した。2021年5月には観測網直下で大規模SSEが発生し、これの直接観測に成功した。2021年10月の航海で海底観測機器全台を回収し、解析を進めている。初期的解析結果では、SSE発生以前から微動活動が始まり一度終息するものの、さらにSSEと同期して微動が活動しているようにみえる。また、微動活動の空間分布はプレート境界固着強度分布とよい一致を示しており、プレート境界周辺域における構造との関係が示唆される。また、同時期に展開した陸域観測網を含めて、ディープラーニング手法による通常地震の震源分布解析を進めている。これまでに、陸域観測網で検出された地震のおよそ6倍の数の地震の検出の可能性が示されている。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

2019年から継続して、NZ北島沖ヒ克蘭ギ沈み込み帯で、NZおよびアメリカとの国際共同で海域における地球物理観測を実施してきた。約2年間隔で大規模SSEが発生する北部のギズボーン沖合では、2019年および2023年に発生した大規模SSEを、また約5年周期で大規模SSEが発生する沈み込み帯中部のプレート間固着強度遷移域では2021年5月に発生したイベントの観測網直下での観測に成功した。ギズボーン沖では、SSE発生に伴うテクトニック微動の活動が、SSEの終息からおよそ2週間にわたって続くこと、またその活動域が沈み込む海山の周辺域に限られること、さらにはSSE発生に合わせて活動領域のマイグレーションすることを明らかにした。沈み込む海山と微動活動の間には、微動の発生とともにバースト的に相似地震の活動が始まり、さらに3週間程度にわたって続くことを明らかにした。このように沈み込み構造と、微動および通常地震の発生領域との良い対応が見られることを明らかにするとともに、それらの時空間分布から、多様な断層すべりの発生がプレート境界における流体の蓄積・放出過程で説明できることを示した。

ヒ克蘭ギ沈み込み帯で発生する微動は、南海トラフや三陸沖で発生するプレート境界浅部の微動と比較して、そのエネルギーが1桁程度小さいことを明らかにした。陸域地震観測網では、海域下の微動が確認されてこなかった理由と考えられる。

プレート間固着強度遷移域周辺では、SSE発生の数ヶ月前に大規模な微動活動がそれより北部から南下し、さらにSSE発生に伴ってプレート間固着強度境界に沿って分布すること、したがって微動活動分布がプレート間固着強度と良い相関を持つことを明らかにした。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

NZ北島北東部ギズボーン沖合では、コロナ禍の期間も含め、着実に日・NZ・米国際共同による海域地震・地殻変動観測を継続的に実施しており、陸域の観測記録とともに2018年に設置された海底掘削孔内ひずみ・温度観測記録とあわせた、多様な断層すべり運動を詳細に把握のための研究を進めている。これまでにSSEおよびそれに伴うテクトニック活動の観測網直下での直接観測に成功しており、これらの多様な断層すべりの時空間分布の詳細などを明らかにしている。また、過去の観測記録にさかのぼり、テクトニック微動のエネルギー分布も把握し、地下構造との比較検討ができるようになりつつある。2023年10月からは海底電位磁力計も含めた海域観測網を構築し、電磁気学的地下構造を明らかにした上で、多様な断層滑りの発生メカニズムの解明に向けた観測研究を進めている。

さらに、2021年頃に発生が予想されていた、固着強度遷移域までに及ぶ大規模なスロースリップの直上観測については、海陸統合地震・地殻変動観測網によってその直接観測に成功し、SSEやその周辺域のテクトニック微動活動の詳細な解明を進めている。海底地震計で観測された地震波形記録を教師データとして用いたディープラーニング手法を海陸統合地震観測網の観測記録に適用して、海域から陸域にかけて発生した通常地震の検出から震源決定まで行い、結果の精度の検証を進めている。これまでに陸域観測網において通常の方法で検出された地震よりも6倍程度の地震の検出に成功しており、今後の地震検出の飛躍的な高度化が見込まれる。

NZ北島沖合のヒ克蘭ギ沈み込み帯では、全域にわたって多様な断層すべりが発生している。これまでは特に沈み込み帯北部のギズボーン沖合を中心に観測を実施し、断層すべりの把握を進めてきた。今後、観測範囲を拡大し、地震学・電磁気学的構造と断層すべり活動分布の理解を進め、多様な断層すべりの性質を決定する構造的要因や、その発生メカニズムの解明に向けた研究を進めていく。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

足立舜・Bryant Chow・金子善宏・佐脇泰典・望月公廣・山下裕亮・山田知朗・Martha Savage・Emily Warren-Smith・Katie Jacobs,2023,ニュージーランド北島北東沖の付加体及び浅部ス

ロースリップ発生域へのAdjoint tomographyの適用,日本地球惑星連合2023年大会,SSS08-P04
青山都和子・望月公廣・山下裕亮・山田知朗,2023,ヒクラング沈み込み帯北部におけるテクトニック

微動のエネルギーの時空間分布,日本地球惑星連合2023年大会,SCG45-09

Laura M Wallace・Spahr C Webb・John Boone DeSanto・Yoshihiro Ito・Neville

Palmer・Katherine Woods・C David Chadwell・Demian Saffer・Syuichi Suzuki・Ryota

Hino・Yusuke Yamashita・Kimihiro Mochizuki・Charles A Williams Jr・Erik K

Fredrickson・Earl Davis・Katie Jacobs・Emily Warren-Smith・Martha K Savage,2023,Insights
into the occurrence and characteristics of near-trench megathrust slip behavior at the Hikurangi

subduction zone from almost a decade of seafloor geodetic experiments,AGU Fall Meeting

2023,G24A-07

青山 都和子・望月公廣・山下裕亮・山田知朗・Warren-Smith Emily・Jacobs Katie・Wallace Laura・

Savage Martha・篠原雅尚,2023,ヒクラング沈み込み帯北部におけるテクトニック微動活動とスロー

スリップイベントの時空間関係,日本地震学会2023年度秋季大会,S08P-08

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

ヒクラング沈み込み帯（NZ）における多様な断層すべりの時空間分布と発生環境の解明

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

望月公廣（東京大学地震研究所）,篠原雅尚（東京大学地震研究所）,上嶋誠（東京大学地震研究所）,山
田知朗（東京大学地震研究所）,悪原岳（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

伊藤喜宏（京都大学防災研究所）,山下裕亮（京都大学防災研究所）,木戸元之（東北大学災害科学国際
研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

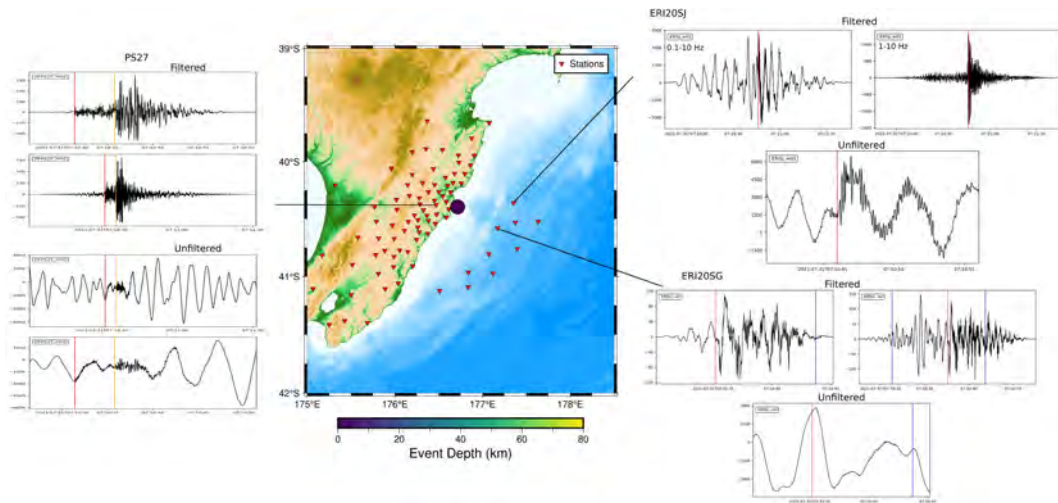
e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

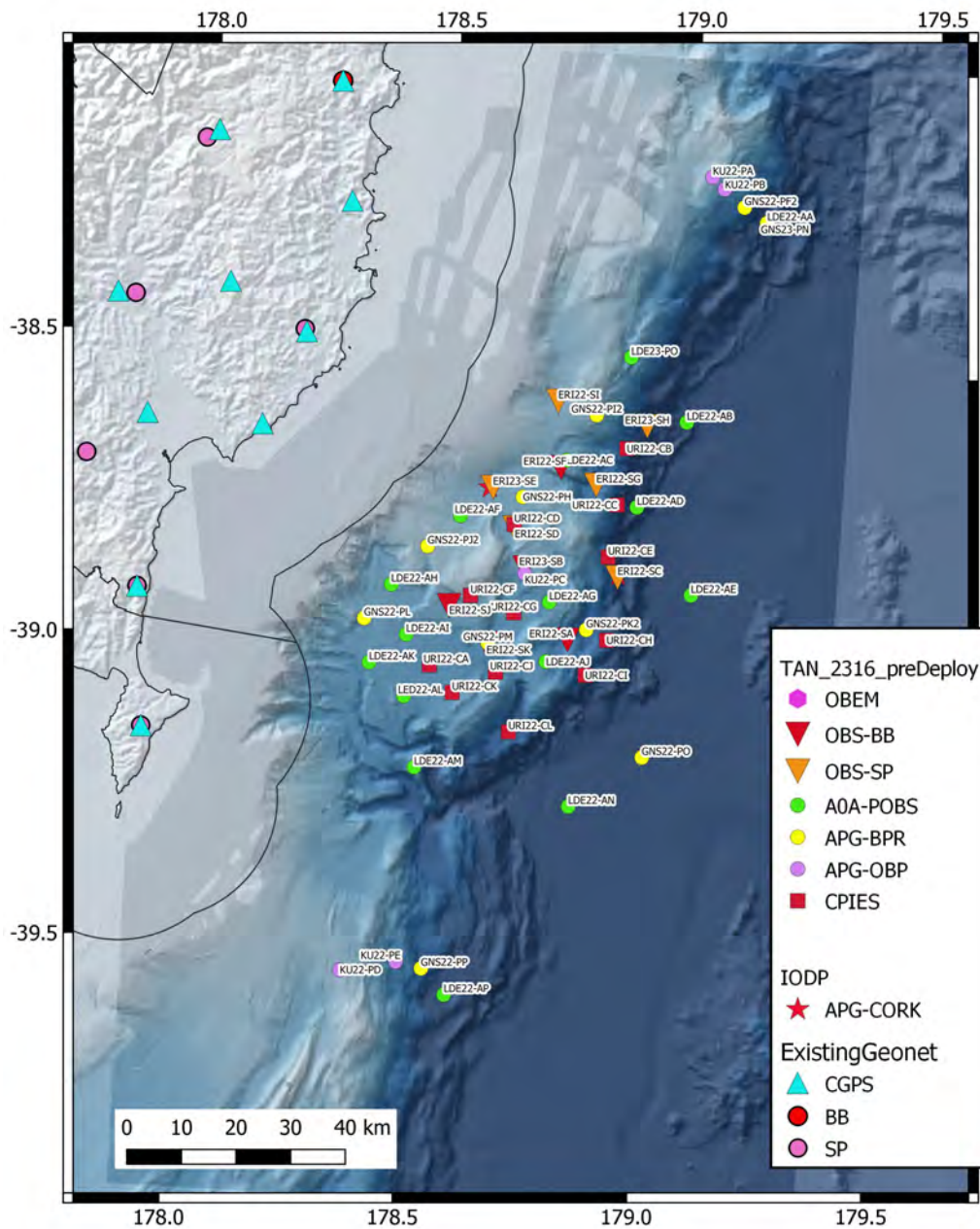
氏名：望月公廣

所属：



ディープラーニング手法を用いた地震検出および検出例

NZヒクランギ沈み込み帯中部，プレート間固着強度遷移域に展開した海陸地震観測網の観測記録にディープラーニング手法を適用して検出，P波およびS波到達時刻の検出結果の例．ディープラーニングには海底地震計で観測された地震波形記録も教師データとして利用している．



2023年10月にヒクランギ沈み込み帯北部ギズボーン沖に設置した海域地球物理観測網 NZ, アメリカとの国際共同で2023年10月に展開した海域地球物理観測網. 今回から, 海底地震計, 海底圧力計に加え, 3台の海底電位磁力計を含んだ観測網を構築した. また, 海底圧力計による海底上下変動の検出精度の向上を目的として, 昨年度から海底流速計も配置し観測を続けている.

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

内陸地震発生ポテンシャルの予測を目指した島弧の地殻応答と断層における地殻内流体の影響の解明

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
イ. 内陸地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
ア. 地震発生機構の解明
- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解
オ. 構造共通モデルの構築

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (1) 地震発生の新たな長期予測
イ. 内陸地震の長期予測

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

この計画では、東北地方太平洋沖地震発生後、M7の福島県浜通りの内陸地震が発生し飛躍的に地震活動の増加した阿武隈山地より南側の、地震活動の増加が見られなかった北関東から2004年新潟県中越地震の震源域を通る島弧を横断する測線を調査対象とする。この測線において臨時地震観測とMT観測をおこなう。この観測研究により、地殻、マンツルの速度構造、減衰構造、比抵抗構造を明らかにする。また、モホ面やプレート境界面等の形状を明瞭にし、この地域の3次元的な構造を明らかにする。この構造は、基本構造モデルのデータとなるとともに、地殻活動のシミュレーションと連携して研究する際の基本データとなる。この測線上には、東北地方太平洋沖地震が発生する以前に発生した中越地震、また、地震後発生した長野県北部の地震が位置し、内陸地震とプレート境界地震の関係を調べることができる。さらに、長野県北部地震の領域は、火山地域であるため、地殻応答の観点から地震と火山の相互作用という視点からも重要な地域である。また、この測線は地殻内流体の存在によって活発になったと考えられるいわき地域の南側に位置し、地震活動の増加が見られなかった地域であるため、地震活動が活発化した地域と活発化しなかった地域との比較から、地殻内流体の影響について明らかにすることができる。この測線で得られたモデルをもとに、地震前後の東北日本弧の地殻活動の変化の再現を調査する。それにより、構造モデルの精緻化が期待できる。このように、地殻内流体と地震発生との関係を調査し、地震発生ポテンシャル評価にむけた研究を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

島弧の地殻・上部マンツルの高精度な不均質構造（3次元地震波速度・減衰・散乱構造、不連続面分布、断層面形状、比抵抗構造など）の推定をおこない島弧横断の地殻・マンツルの不均質構造モデル

の構築を目指す。その構造をもとに、地殻活動のシミュレーションの研究グループと連携し、地震発生ポテンシャルの解明に向けた研究を行う。各年度に下記の観測研究を実施する。

平成31年度には、島弧の地殻・上部マントルの高精度な不均質構造モデル（3次元地震波速度・減衰・散乱構造、不連続面分布、断層面形状など）を構築するためにいわきの地震活動域の南側から中越地域へ抜ける測線において、Hi-net等既存の観測点をもとに空白域を埋めるよう5点程度の地震観測点を展開し、自然地震観測を開始する。

平成32年度には、地震観測を継続するとともに、地震観測が行われている測線において10点のMT観測を実施し、地震学的研究だけでなく電磁気学的研究もおこない、総合的な理解を目指す。

平成33年度には、地震観測を継続するとともに、Hi-net等定常観測点と臨時観測点とのデータを合わせて解析を進め、測線上での地震学的研究による構造の解明を行う。

平成34年度には、地震観測を継続するとともに、電磁気観測では平成32年度に展開した測線での観測を補充する10点でのMT観測を実施する。これにより、島弧断面について2次元的でなく3次元的構造の理解を目指す。

平成35年度には、平成34年度に実施した測線に対して、地震学的研究と電磁気学的研究をもとにした総合モデルを作成する。さらに、それらの結果をもとに地殻内流体と地震の関係を調べる。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

内陸地震は、生活圏に近いところで発生するため、ひとたび発生するとひじょうに大きな災害につながる。そのため、内陸地震発生メカニズムを解明することは、災害を軽減するために非常に重要な課題である。内陸地震のメカニズムを理解するためには、断層への応力集中とひずみの蓄積について理解することが重要である。また、内陸地震発生には地殻内流体の存在が大きく関係していることがわかってきている。そのような地殻内流体が、島弧のシステムの中でどのように生成され、移動し断層近傍に存在するのかについて理解することは内陸地震の発生ポテンシャルを理解する上で重要な研究課題である。2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生し、プレート境界での滑りや余効変動による滑りによって、島弧はひじょうに大きな影響を受けた。地震活動が活発になった地域もあれば、活動が抑えられた地域もあり、東北地方太平洋沖地震による地殻応答の解明は重要な課題となっている。この課題では東北地方太平洋沖地震の発生以降大きな地震活動の変化がみられた、いわき周辺やその南側の地域から日本海側にかけて島弧を横断する測線において観測をおこないデータを獲得し、それらのデータをもとに、地震学的解析や電磁気学的解析を行い、島弧の横断構造を明らかにするとともに、地震活動と地殻流体の存在との関係を明らかにし、内陸地震発生のポテンシャル解明を行うことを目的としている。

今年度はいわきの地震活動域南部の地殻内地震が発生していない地域から新潟に延びる測線において電磁気学的構造について、複数の測線を用いた3次元解析を行った。その結果、明瞭な比抵抗構造が得られた。深さ5kmでは、堆積盆地と平野において低比抵抗域が見られ、前中新世の岩石が露出している山岳地帯では高比抵抗域がイメージされた。さらに深さ10kmでは、那須岳や高原山等火山の周囲に低比抵抗域が存在し、それらの低比抵抗域は深さ20kmまで続いていることがわかった。また、その一部の領域では深さ60kmまで続いている地域も見られる。一方その東側では高比抵抗域が見られ、沈み込む太平洋プレートを表しているものと考えられる。島弧を横切る断面図においては火山の下に上部マントルから地殻に続き明瞭な低比抵抗域が見られる。また、その低比抵抗域の縁に沿って低周波地震が発生しているように見える。

いわき地域の地震活動においては、東北地方太平洋沖地震以降大きく変化し地震が増加した。この地域で観測された地震記録では、地殻内地震について2種類の後続波が観測され、その原因は白田・他(2022)によって調べられた。その結果、深さ約15km～23kmと約26km～34kmに2つの反射面が存在し、これら2つの後続波は、それらの反射面でS波が反射したSxS波であることがわかった。これら2つの反射面のうち深さ約26km～34kmの反射面は、モホ面であることがわかった。一方、深さ約15km～23kmの反射面は、地殻内に存在する境界面であることがわかった。この地殻内の反射面は、観測された反射波の振幅が大きいため、地殻内流体を含む面であることが推定された。また、一連の地震活動の増加は、この地殻内流体と関係する可能性が示唆された。そこで、本研究では、この地域の地震活動の推移と地殻内反射面との関係を調べるとともに、地殻内流体の供給源についても調べるため、この地域の地震活動について詳細に調べた。

この地域の地震活動は、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の発生までは、ひじょうに低調であっ

た。一方、この地域で求められた地殻内反射面の分布は、南北に約20km~30km、東西に20km程度の範囲で検出された[白田・他(2022)]。また、この地殻内反射面は、北東側に約20度程度で傾いていることが示された。そこで、気象庁が決めた震源データと、白田・他(2022)で求められた地殻内反射面の空間的分布を比較することにより、地震活動の時間的推移と反射面との関係を調べた。この地域の地震活動の活発化は、東北地方太平洋沖地震の発生直後から始まった。2011年3月11日に発生した地殻内地震は、反射面の南側の直上で発生している。また、2011年3月11日から4月10日までの地震活動を見ると、地震は反射面の南西の縁をなぞるように活動が活発化していった。この反射面の南西の縁は、この反射面が北東に傾いていることから、傾斜している反射面の浅い辺の直上で発生していったことがわかる。また、反射面の北東側でも活動が活発化した。それらに挟まれる間の領域は比較的活動が低い状態であったが、2011年4月11日に、福島県浜通り地震(Mj,7.0)が発生し、この領域全体を埋めるような形で活動が活発となった。2011年3月11日から2012年3月10日までの1年間の地震活動と反射面の分布とを比べてみると、反射面を中心としてその周囲に広がるような形で地震が発生していることがわかった。

内陸地震の発生と地殻内流体の関係は、これまでに発生した多くの被害地震において示唆されている。この領域においても、検出された反射面は、反射波の振幅が大きいことから、地殻内流体を含んだ層である可能性が示唆されてきた。次に地殻内流体の供給源について考えるためシミュレーションをおこなった。沈み込み帯に伴う水の脱水反応は、多くの研究者によって研究がなされてきた。Iwamori(2007)は、日本列島周下に沈み込む太平洋プレートとフィリピン海プレートからの脱水について調べ、プレートの沈み込みの深さが30km程度の領域において、非常に多くの水が脱水する可能性が示された。そこでこの地域の太平洋プレート、フィリピン海プレートの等深度線を考慮したうえで、この地域の構造をもとにシミュレーション解析をおこなった。この領域での深さ50kmまでの断面図を調べると、太平洋プレートから30kmから50kmの深さにおいて顕著な脱水反応がみられた。一方、地震活動においても沈み込む太平洋プレートの30kmから40kmの深さから、いわきの地震活動の活発域に向かって伸びる地震活動の帯がみられた。この活動はImanishi et al., (2012)によって断層の存在が示唆されている。また、この領域では2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の発生以前にも観測研究がなされている[Shelly et al., (2006)]。彼らの研究によると、この領域では、プレート上面からいわきの領域に向かって高Vp/Vsの帯が確認されている。これらのことから、太平洋プレートの深さ30km-50kmで脱水した水が、プレート上面からいわき地域につながる地震活動の断層間を上昇し、いわき地域に地殻内流体を含んだ反射面を形成し、そこからさらに上昇した流体が断層を弱化させ地震活動の活発化に至ったと考えると全体の活動について説明が可能であることがわかった。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

この計画では、東北地方太平洋沖地震発生後、M7の福島県浜通りの内陸地震が発生し飛躍的に地震活動の増加した阿武隈山地より南側の、地震活動の増加が見られなかった北関東から2004年新潟県中越地震の震源域を通る島弧を横断する測線で電磁気観測と地震観測を行い地殻構造の特徴を抽出するものである。また、前計画で得られた福島県浜通りの内陸地震が発生し飛躍的に地震活動の増加した地域から日本海側にかけての測線と比較検討することにより、内陸地震発生の原因を明らかにし、地震発生ポテンシャル評価の理解を進める研究課題であった。

この計画期間中の解析によって、北茨城-いわき地域は、前計画で地震の多発域の下の深さ15kmから25kmにおいて顕著な反射面の存在が示された。この反射面からの反射波の振幅等から、この反射面は地殻内流体を含む層であることが示された。地殻内流体が存在するのであれば、低比抵抗領域となっている可能性があるため、この反射面が存在する領域の比抵抗構造を調べた。北茨城-いわき地域では、福島県浜通り地震(Mj7.0)の震源域を含めて広範囲に地殻内反射面が存在している。この地域の反射面の分布と比抵抗構造を比べると、深さ14km~16kmでの深さの比抵抗構造は、反射面の中心部分で低いことが分かった。また、この領域は2011年福島県浜通り地震の震源域の直下にあたる。また、比抵抗構造は深さが浅くなるにつれて構造が変化し、地震の多発域では筋状の低比抵抗構造が見られるようになり、活発化した地震の活動はその筋状の低比抵抗域に沿って発生していることが示された。さらに、これらの領域において水の体積分率の推定を行った。その計算における仮定として、完全連結とし、塩分濃度3.6%として計算を行った。福島県浜通り地震(Mj7.0)の震源域の直下の反射面が存在する14km-16kmの深さでは、水の体積分率が1%から数%のひじょうに大きな値を示すことが分かった。一方、福島県浜通り地震(Mj7.0)の震源域の深さ6km周辺での水の体積分率は、0.001%から0.01%とひじょうに小さな値を示した。このように電磁気学的に見てひじょうに微細な構造が得られ

るようになった。さらに、連結構造や塩分濃度の値を仮定した上の結果ではあるが、水の体積分率に関して定量的な評価が可能となった。また、電磁気学的解析から島弧の断面図において火山直下の上部マントルから地殻にかけての低比抵抗域の存在が明瞭となり、その低比抵抗域の周辺で低周波地震が発生しているなど、比抵抗構造との関係が明らかになった。

また、北茨城-いわき地域における地震活動の活発化の原因は謎であったが、本課題のシミュレーション等をもとにした解析によって、沈み込む太平洋プレートの脱水構造とそこから北茨城-いわき地域につながる構造が明らかになり、この太平洋プレートからの脱水がこの一連の地震活動の活発化を引き起こした可能性を示唆することができた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

イ. 内陸地震

建議の1(5)においては、「プレート境界域や海洋プレート内部及び内陸を含む地殻・マントル内の地震発生域及び火山地域において、地震波速度・減衰構造、地震活動、応力場、変形場、比抵抗構造、レオロジー構造等を明らかにすることで、地震や火山活動が発生する場のモデル化を進める」とあり、まさしく、内陸域の地殻・マントル内の地震発生域の地震波構造、比抵抗構造を明らかにした研究であり、建議の記載の目標達成への貢献をしている。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Diba, D., M., Uyeshima, M., Ichiki, et al., 2023, On a large magmatic fluid reservoir oblique to the volcanic front in the southern part of NE Japan revealed by the magnetotelluric survey., Earth Planets Space, 75, 146, doi: 10.1186/s40623-023-01899-0

・学会・シンポジウム等での発表

Diba, D., H. Song, M. Uyeshima, Y. Usui, 2023, 3-D MT inversion using structurally-guided regularization constraint, CA研究会, 2023年12月25日

白井 嘉哉, 上嶋 誠, 坂中 伸也, 橋本 匡, 金子 柊, 市来 雅啓, 海田 俊輝, 山谷 祐介, 木原 平, 小山 崇夫, 宮川 幸治, 平瀬 敬司, 星野 剛右, 富岡 優貴, 井手 健斗, 清水 連太郎, 寺井 吉江 雄太, 小川 康雄, 北岡 紀広, 増田 正孝, 秋山 峻寛, ディバ ディエノ, 一松 駿斗, 村北 貴郁, 中谷内, 渡部 熙, 崎山

律, 2023, Characteristic features of the magnetotelluric response functions in the northern Kanto region, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2023年秋季年会, 2023年9月25日

Diba, D., M. Uyeshima, M. Ichiki, S. Sakanaka, M. Tamura, Y. Yuan, M. Gresse, Y. Yamaya, Y. Usui, 2023, 3-D resistivity structure of the southern part of NE Japan, 日本地球惑星科学連合2023年大会, 2023年5月24日

Diba, D., M. Uyeshima, M. Ichiki, S. Sakanaka, M. Tamura, Y. Yuan, M. Gresse, Y. Yamaya, and Y. Usui, 2023, Magnetotelluric imaging for fluids in the crust and upper mantle beneath the southern part of Northeast Japan subduction zone, IUGG, Berlin, 2023年7月16日

飯高 隆, 白田 優太, 岩森 光, 2023, いわき地域における地震活動の推移と地殻内反射面との関係, 日本地震学会2023年秋季大会, S09-23

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

飯高隆（東京大学大学院情報学環/東京大学地震研究所）, 酒井慎一（東京大学大学院情報学環/東京大学地震研究所）, 上嶋誠（東京大学地震研究所）, 白井嘉哉（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

市來雅啓（東北大学）,坂中伸也（秋田大学）,山谷祐介（産業技術総合研究所）,小川康雄（東京工業大学）,津村紀子（千葉大学）,他、これま で行ってきた内陸地震研究の合同観測の後継の研究運営方式をとり、全国の大学に呼びかけ参加者を募って実施する。

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：飯高隆

所属：東京大学地震研究所・東京大学大学院情報学環

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

東日本における長期的重力変化の観測とモデリング

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
イ. 内陸地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
地震

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

2011年東北地方太平洋沖地震（M9）のあと、東日本を中心とした広い範囲で大きな地殻変動が起きているが、それと同時に大きな重力変化も起きている。この影響は、震源から比較的離れた場所と考えられる松代（長野県）と神岡（岐阜県）の超伝導重力計の記録にも表れており、どちらの地点においても、年間約10マイクロガル（註：地表の重力加速度は約980ガル）という驚くべきレートで重力が小さくなり続けている。地球における重力の源は万有引力（および自転による遠心力）であり、重力加速度の時間変化を精密に観測するという事は、地球を構成する物質の密度分布の変化をとらえるということである。上述の変化は地面の上下変動では説明できず、密度変化をとともなう何らかの現象が日本列島の地下で大規模に進行していることを示している。本研究では、超伝導重力計による重力連続観測を行い、それをベースとした相対重力測定と組み合わせることにより、東日本における重力の時空間変化をかつてない精度で明らかにする。そして、最近新たに開発された、粘弾性地球に対する地震重力変化の理論を観測データに適用することにより、長期的な重力変化を起こしている要因を特定し、地下で進行している物質移動／密度変化の物理過程を解明することを目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本研究では、本州に4ヶ所ある観測点（北から順に、水沢（岩手県）、蔵王（宮城県）、松代（長野県）、神岡（岐阜県）；ただし神岡は現在休止中）における超伝導重力計観測を継続・維持することを基本とする。超伝導重力計は、それ単独では重力加速度の絶対値がわからず、またわずかながら機械的なドリフトがあるので、それらを検定するために絶対重力計による測定を行う。各年度における絶対重力測定の計画は次のようである。

平成31年度 松代、神岡（旧／新）、水沢

平成32年度 松代、神岡（新）、蔵王

平成33年度 松代、神岡（新）、水沢

平成34年度 松代、神岡（新）、蔵王

平成35年度 松代、神岡（新）、水沢

このうち神岡では、2016年まで使用していた重力基準点に加え、重力波望遠鏡KAGRAのために掘削

された坑道内に新たな重力基準点を設定し、初年度に新旧の基準点を接続する。
また、各年度ごとに、絶対重力測定を実施する観測点をベースとし、また超伝導重力計観測点どうしをむすぶような形で、スーパー・ハイブリッド重力測定を実施する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和5年度は、松代観測点（長野県）において、超伝導重力計観測を継続するとともに、絶対重力測定を行った。松代ではCT型036号機およびiGrav型028号機の2台の超伝導重力計が稼働しているが、CT型036号機は支持磁場の最終調整ができていないため試運転の状態と位置づけられていた。しかし、2台から出力される重力データの品質がほぼ同等であることが確認できたので、CT型036号機は磁場の再調整を行わないまま本観測の扱いと判断した。観測地点が地下壕内であることから、周囲の湿度が高いことの影響を受けており、とくにCT型036号機はデューワー内部に氷が発達することによりノイズレベルが著しく上昇した時期があった。絶対重力測定については、ヘリウムガスの影響を考慮して、基準点の廃止および新設を行い、接続のための相対測定も複数回行った。これらの複雑化の要因も考慮に入れた上で、過去の絶対重力測定結果ともあわせて詳しい解析を行った結果、2台の超伝導重力計の機械的ドリフトを精密に検定することができた。ドリフトを補正した後の超伝導重力計データは、この数年間ではほぼ一定と見なすことができ、2011年東北地震の影響による長期的重力変化が松代ではおさまってきていることがわかった。

東日本各地での絶対重力測定に関しては、松代のほか、神岡（岐阜県）、蔵王（宮城県）、富士山（山梨県）、都留（山梨県）において測定を実施した。松代では、絶対重力計を用いて重力の鉛直勾配を測るといった試みを行った（図1）。神岡では2019年以来、4年ぶりの測定となったが、2019年と比較して約4マイクロガルの増加となった。蔵王では、重力値はほぼ前年並みであった。富士山では、前年と比べて明らかな重力減少が見られた。

2011年東北地震後に水沢（岩手県）の超伝導重力計で観測されてきた長期的な重力変化に関しては、超伝導重力計、絶対重力計に加えて衛星重力観測のデータも使用して詳細な検討を進めてきたが、その成果がまとまったので論文として発表した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本課題では、松代（長野県）における超伝導重力計観測および絶対重力測定を中心として、2011年東北地震後の長期的な重力変化について調べてきた。松代では、地震の直後に非常に大きなレートでの重力減少が観測されていたが、計画期間中（令和元年度～5年度）にはそれが徐々に小さくなり、変化が小さくなっていく様子がとらえられた。このことは、地震後の粘弾性緩和の過程を反映していると考えられる。一方で、より震源に近い水沢（岩手県）では、超伝導重力計観測および絶対重力測定により、現在も指数関数的な重力増加が続いていることがわかった。これらのことは、衛星重力観測よりも時間・空間の分解能が高い地上重力観測によってはじめて明らかになったものである。地震後に日本の地下で進行していると考えられる、密度変化をとともなう変動について、具体的な物理モデルを構築するところまでは至っていないが、一つの境界条件を与える貴重なデータを得ることができたと考えている。

東日本各地における絶対重力測定については、必ずしも当初計画の通りではなかったが、期間中に新たに設定した地点も含めてのべ9か所で実施した。このうち弟子屈（北海道）、水沢（岩手県）、蔵王（宮城県）では、それぞれ超伝導重力計のドリフト検定に有用なデータを取得することができた。神岡（岐阜県）での測定は期間中に2回しか実施できなかったが、松代とおおよそ同傾向と見なされる結果が得られた。富士山周辺では、重力サーベ이를想定した3点からなるネットワークを構築し、精力的に測定を行った。また、これらの作業を通じて、器差の検定や勾配測定などに関する新たな技術開発を行うことができたことも、今後の観測研究の展開という意味において重要な意義を持つと考えている。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

巨大地震発生後に継続する広域的な地殻変動は、次の地震への準備過程の現れでもあり、そのメカニズムを理解することは将来の地震災害に備えるうえで重要である。従来の地殻変動研究のほとんどはGNSSなどによる地表面の形状変化の観測に基づいていたが、それらでは見えないような地下の密度変化に関する直接の情報を、本課題では重力観測によって得ることができた。いま地下で起きている、

密度変化をともなう変動について、今後の詳細なモデル化に資するデータを得ることができたと考えている。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Tamura, Y., T. Kazama, R. Nishiyama, K. Matsuo, Y. Imanishi, Y., 2023, Postseismic gravity changes after the 2011 Tohoku earthquake observed by superconducting gravimeters at Mizusawa, Japan, Earth Planets Space, doi:10.21203/rs.3.rs-2740378/v1, 査読有, 謝辞有

今西祐一・西山竜一・本多亮, 2023, 絶対重力計を用いた重力鉛直勾配の測定, 測地学会誌, 69, 8-17, doi:10.11366/sokuchi.69.2, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

今西祐一・田村良明・風間卓仁・西山竜一・松尾功二, 2023, 国立天文台水沢VLBI観測所の超伝導重力計で観測された2011年東北地方太平洋沖地震発生後の重力変化（その2）, 日本地球惑星科学連合2023年大会

今西祐一・西山竜一・本多亮, 2023, 富士山における2台のFG5による絶対重力測定（2022年9月）—相対重力計検定ラインの構築およびFG5の器差検定—, 日本地球惑星科学連合2023年大会

本多亮・今西祐一・西山竜一・名和一成・風間卓仁, 2023, 富士山の重力観測網の構築とその活用, 日本地球惑星科学連合2023年大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

今西祐一（東京大学地震研究所）, 西山竜一（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

三浦哲（東北大学）, 田村良明（国立天文台）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：今西祐一

所属：東京大学地震研究所

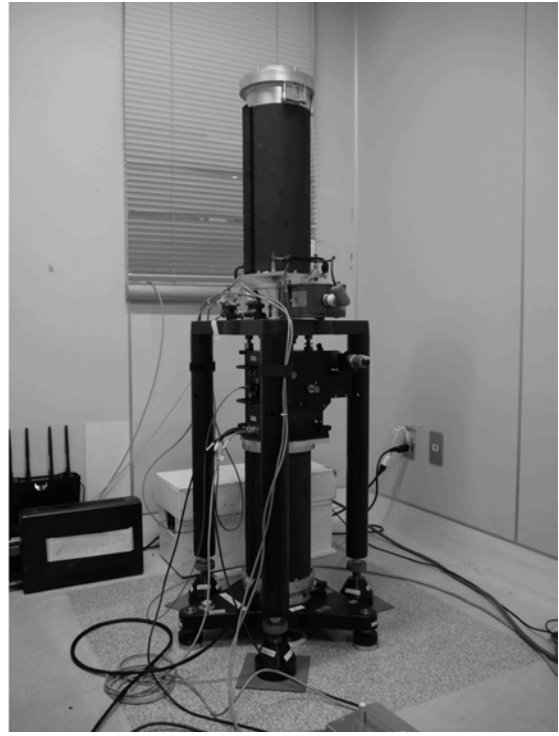
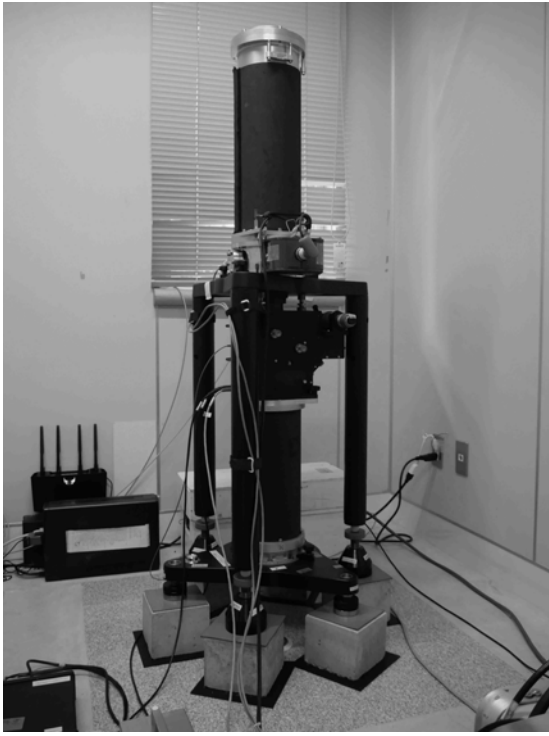


図1

同一地点において絶対重力計を設置する高さを変えることにより、重力の鉛直勾配を精密に測定する実験。左が重力計を「かさ上げ」した状態、右が通常の配置。原理は単純だが、実際には重力加速度の測定値じたいが鉛直勾配に依存するため、結果の解析はかなり複雑なものとなった（今西・ほか、2023）。実施場所は山梨県富士山科学研究所。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震発生予測のための島弧-海溝システムの観測-モデリング統合研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (1) 地震発生 of 新たな長期予測
 - イ. 内陸地震の長期予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
 - ア. 地震発生機構の解明
- (4) 火山現象の解明とモデル化
 - ア. 火山現象の定量化と解明
- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
 - ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (1) 地震発生 of 新たな長期予測
 - ア. 海溝型巨大地震の長期予測
- (4) 中長期的な火山活動の評価
 - ア. 火山噴火の長期活動の評価

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題は、観測と日本列島基本構造モデルの構築・更新と地殻活動予測を統合的に実行し、地殻活動予測、巨大地震発生予測、火山噴火予測を含む多様な地殻活動についての定量的な理解を深めることを目的としており、数値計算、海陸地震観測、日本列島基本構造モデル、長期間地殻変動の4つの研究を実施する。

数値計算：前計画までの成果を踏まえ、日本列島を含む広範な領域（千島弧、東北日本弧、西南日本弧、伊豆小笠原弧、琉球弧、および朝鮮半島、ロシア沿海州、中国沿岸部）を対象として三次元有限要素モデルを構築する。稠密な地殻変動データを用いて、各プレート境界領域で進行するすべり状態と地下の粘性構造を推定する。地殻変動データとしては、国土地理院のGNSSデータに加えて、アメリカのネバダ大学が公開している全世界の地殻変動データが利用可能である。特に、大陸部のデータは深部の粘性構造を推定する上で重要である。推定した粘性構造とすべり速度欠損分布を用いて内部応力状態を求め、地震活動データと比較検討しながら、観測された地殻変動・応力状態と調和的なモデルを求める。このモデルの中に震源断層を置き、それぞれの断層面上に作用するクーロン応力変化を求め、上盤プレート内の地震発生の長期予測を行う。上記で用いた地下構造モデル、震源断層モデルは観測の進展・データの集積に応じて適宜更新し、長期予測も随時更新していく。

海陸地震観測：日本海から日本列島を横切り日本海溝または南海トラフに抜ける長大な測線を設定する。海域部の測線上に長期観測型海底地震計を設置し、長期海底地震観測を実施する。また、陸上に

は地震観測点を設置して、海陸にまたがる測線で地震観測を行う。得られた地震データについて、実体波トモグラフィー・レシーバー関数解析・表面波解析を実施して、深部までの構造を求める。この測線上で大容量エアガンレイ、ハイドロフォンストリーマ、海底地震計による地震波速度構造探査実験を行い、深部構造の解析に必要な測線下の構造の情報を得ることも目標である。

日本列島基本構造モデル：前計画で作成されたプレートモデルを基礎として、本課題の大規模構造探査の観測結果を反映させる。これに加えて、海底ケーブル観測網による海域の震源再決定、Hi-netの震源再決定の結果を用いた広域の地震発生層下限深度を反映させた震源断層モデル・レオロジーモデルの更新など、データの集積に応じたモデルの更新を行う。また、同時に進行するプロジェクトによる反射法探査、活断層・変動地形学的研究などの成果に基づき震源断層モデルの更新を行う。

長期間地殻変動：断層深部形状を考慮し、第四紀後期の西南日本・東北地方の長期間地殻変動を求める。また、過去約1万年間の東北・西南日本のM7級の地震・地殻活動について、スリッププレートなどの新規データの取得と既存研究により明らかにする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31(令和1)(2019)年度

- ・数値計算：日本列島域の三次元有限要素モデルを構築する。千島海溝の固着の進行にともなう北海道地域の震源断層の応力蓄積速度を求める。

- ・海陸地震観測：他プロジェクトにより、東北日本日本海側を主な対象域とした構造探査実験が計画されており、この構造探査と連携する形で、東北日本太平洋側の地震地殻上部マントル構造をもとめる実験を実施する。

- ・日本列島基本構造モデル：同時進行のプロジェクトによる反射法探査、活断層・変動地形学的研究などの成果に基づき震源断層モデルの更新を行う。

- ・長期間地殻変動：反射法地震探査断面に現れた深部断層形状を考慮し、東北日本・日本海側の第四紀後期の長期間地殻変動を求める。また、過去約1万年間の東北・西南日本のM7級の地震・地殻活動について、スリッププレートなどの新規データの取得と既存研究により明らかにする。

令和2年(2020)度

- ・数値計算：南海トラフ・琉球海溝におけるプレート境界プロセスによる西南日本域の震源断層面上のクーロン応力変化を検討する。

- ・海陸地震観測：想定する測線上の海域部に長期観測型海底地震計を設置し、長期海底地震観測を実施す。また、陸上には地震観測点を設置して、海陸にまたがる測線で地震観測を行う。

- ・日本列島基本構造モデル：前計画で作成されたプレートモデルに本課題の大規模構造探査の観測結果を反映させる。また、同時進行のプロジェクトによる反射法探査、活断層・変動地形学的研究などの成果に基づき震源断層モデルの更新を行う。

- ・長期間地殻変動：深部断層形状を考慮し、東北日本太平洋側の第四紀後期の長期間地殻変動を求める。また、過去約1万年間の東北・西南日本のM7級の地震・地殻活動について、スリッププレートなどの新規データの取得と既存研究により明らかにする。

令和3(2021)年度

- ・数値計算：東北地方太平洋沖地震後10年間の粘性緩和にともなう上盤プレート内の震源断層の応力変化を評価する。

- ・海陸地震観測：前年度に設置した長期海底地震計および陸上の地震観測点を回収する。

- ・日本列島基本構造モデル：プレートモデルに大規模構造探査の観測結果の集積に応じてこれを反映させる。また、海底ケーブル観測網による海域の震源再決定がなされた場合のモデルの更新、Hi-netの震源再決定の結果を用いた地震発生層下限深度を反映させた震源断層モデル・レオロジーモデルの更新を行う。また、同時に進行のプロジェクトによる反射法探査、活断層・変動地形学的研究などの成果に基づき震源断層モデルの更新を行う。

- ・長期間地殻変動：深部断層形状を考慮し、西南日本の第四紀後期の長期間地殻変動を求める。また、過去約1万年間の東北・西南日本のM7級の地震・地殻活動について、スリッププレートなどの新規データの取得と既存研究により明らかにする。

令和4(2022)年度

- ・数値計算：関東地方および伊豆小笠原弧の応力状態について、東北沖地震、相模トラフ、伊豆小笠原海溝のプレート境界プロセスの影響を検討する。

- ・海陸地震観測：前年度までに得られた地震データについて、実体波トモグラフィー・レシーバー関数解析・表面波解析などを実施して、深部までの構造を求める。
- ・日本列島基本構造モデル：プレートモデルに大規模構造探査の観測結果の集積に応じてこれを反映させる。また、海底ケーブル観測網による海域の震源再決定がなされた場合のモデルの更新、Hi-netの震源再決定の結果を用いた地震発生層下限深度を反映させた震源断層モデル・レオロジーモデルの更新を行う。また、同時進行のプロジェクトによる反射法探査、活断層・変動地形的研究などの成果に基づき震源断層モデルの更新を行う。
- ・長期間地殻変動：反射法地震探査断面に現れた深部断層形状を考慮し、西南日本の第四紀後期の長期間地殻変動を求める。また、過去約1万年間の東北・西南日本のM7級の地震・地殻活動について、スリッププレートなどの新規データの取得と既存研究により明らかにする。

令和5(2023)年度

- ・数値計算：4年目までに検討したプレート境界プロセス間の相互作用を検討し、今後数十年スケールの応力変化についてまとめを行う。
- ・海陸地震観測：数値モデルによる地震発生ポテンシャルの検討に向けて、これまでの解析結果をとりまとめて、日本列島の基本構造の構築・更新を行う。
- ・日本列島基本構造モデル：大規模構造探査の観測結果や海底ケーブル観測網による海域の震源再決定を反映させたプレートモデルと、同時進行のプロジェクトによる反射法探査、活断層・変動地形的研究、Hi-netの震源再決定結果を用いた地震発生層下限深度を反映させた震源断層・レオロジーモデルの更新についてまとめを行う。
- ・長期間地殻変動：西南日本の第四紀後期の長期間地殻変動と、過去約1万年間の東北・西南日本のM7級の地震・地殻活動について、スリッププレートのとりまとめを行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

数値計算：昨年度に引き続き、数値計算により関東地方の断層における応力を求めた。昨年度は、関東地方においてフィリピン海プレートの影響により数値的に安定な解が得られなかったが、これを改善し、安定的な解を得た（図1）。実効摩擦係数を0.4とし、断層面におけるクーロン破壊応力（ ΔCFS ）を求めた。関東地方北部の断層は、東北沖地震前後で基本的に東北地方の断層と似たような応力を受ける。対して関東地方南部においては、東北沖地震前の固着時は東北地方の断層と異なり、断層にかかる応力は抑制的に働く。東北沖地震後は逆に断層活動に対しては促進的に働く。ただし、その応力の量は0.01 MPaのオーダーである。関東地方の南部の断層形状はフィリピン海プレートの沈み込みの影響をより強く受けているので、東北沖地震による応力も東北、北関東の断層とは異なる挙動を示すものと考えられる。これらの結果は佐藤ほか（2018, 地震予知連絡会会報）の結果と調和的である。

また、2024年M7.6能登半島地震の発生に関し、上記計算で得られた能登半島周囲の震源断層の ΔCFS を1) 南海トラフの固着による効果、2) 東北沖地震前の日本海溝の固着の効果、3) 東北沖地震の余効変動の効果に分けて示す。概して結果は南海トラフの固着と東北沖地震の余効変動の結果が類似した効果を示し、日本海溝の固着の効果と逆になる。能登半島地震の震源断層と考えられるNT6においては、東北沖地震の後は地震を引き起こしにくい応力载荷となった。能登半島地震の発生メカニズムとしては、地下からの流体の影響が指摘されているが（Nakajima, 2022; Nishimura et al., 2023）、地震を引き起こす応力蓄積のメカニズムはいまだ解明されておらず、今後の研究課題である。

参考文献

佐藤比呂志, 橋間昭徳, 石山達也, 関東地域の活構造への東北地方太平洋沖地震の影響について, 地震予知連絡会会報, 99, 420-424 (2018).

Nakajima, J., Crustal structure beneath earthquake swarm in the Noto peninsula, Japan, *Earth, Planets and Space*, 74, 160, (2022), <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01719-x>

Nishimura T., Y. Hiramatsu, and Y. Ohta, Episodic transient deformation revealed by the analysis of multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, central Japan, 13, 8381 (2023), <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35459-z>

海陸地震観測：

(1)2019年東北日本弧中部陸域地震探査の屈折・広角反射法解析

日本海地震・津波調査プロジェクトの一環として2019年に実施した地震探査 (Sato et al., 2020, 佐藤・他, 2020) の陸域部データ(図3)について、前年度までに屈折・広角反射法データ解析によって速度構造モデルを提出してきた (Iwasaki et al., 2021; 2022) 。図4に示したように、これまでの解析から地殻最上部の堆積層部分の構造が測線に沿って大きく変化していることが明らかになっている。実際、このモデルによって観測走時・振幅のおよその特徴はかなりよく説明することができる。しかし、当該測線域が中新世以降の日本海拡大、東からのプレート沈み込み及び火成活動によって著しい変形・改変を受けているにもかかわらず、図4のモデルでは堆積層部分よりも下の上部地殻の構造には大きな変化が検出されていない。このことは、堆積層部分の構造の複雑さによって、データに含まれる堆積層以深の構造情報が十分抽出されずに埋没している可能性を示唆するものかもしれない。この点で、これまでの解析について再検討する必要がある。

本年度は、特に地殻上部の構造に焦点を当て、データ処理・解析手法の見直しとモデルの修正を試みた (Iwasaki et al., 2023a,b) 。具体的には、簡便な走時データのinversion解析とAsymptotic ray theoryに基づく走時・振幅データのforward modellingを組み合わせた総合解析を実施することとした

(図5) 。前者のextended time-term法 (Iwasaki, 2002)を用いたinversion解析は、測線方向に沿っての基盤上部の速度変化の検出を目的とするものである。この解析で得られた結果を元にray-tracingによる走時解析及び理論地震記象 (synthetic seismogram)の計算による振幅解析を行い、特に地殻上部の各層の速度と形状及び層境界の速度コントラストに対するモデルの改訂を行った。尚、今回の一連の解析においても、当該測線の屈曲の影響を抑える目的で、波線追跡の段階で距離補正を行っている。図6には、上述のextended time-term法の結果を示した。図6-(a)は、測線全体を1つのブロックにした場合の結果で、基盤速度とその速度勾配はそれぞれ5.76 km/s、0.06 s⁻¹である。これらの値は測線全体の平均値と言えるもので、実際、図2に示したモデルでの平均的速度 (5.8 km/s) と調和的である。図6-(b)は、測線を西部・中部及び東端部 (北上地域) の3ブロックに分けた場合の結果である。これによれば、測線中部の基盤速度は5.68 km/sで、測線西部及び東端部に較べて0.1 km/s以上低いことが明らかとなった。一方、北上山地に対応する東端部の基盤速度は5.82 km/sとかなり速く、これもこれまでの結果 (図4) を裏付ける結果となった。

また、波線追跡法に基づく走時解析における走時の読み取りの妥当性を評価するために、extended time-term法で求めたtime-termを用いて各shotのtraceに対してstatic correctionを適用し、更に近接した3-7点の受振点のtraceについてstackingを行った。この処理において、これまでの走時読み取りの信頼性の検討のみならずこれまでの読み取り範囲を超えて20-30 km以遠まで初動及び後続波を確認することができ、屈折/広角反射法解析におけるstatic correction及びstacking処理の有効性が示された。次に、図3に示された24点のshot点及び測線西部 (庄内平野-新庄盆地) で行われた反射法測線上の22点のshot点の走時・振幅データに対してray-tracingによる走時解析及びsynthetic seismogramに基づく振幅解析を実施した。その結果から得られた改訂構造モデルを図5に示す。測線西部では、振幅解析によって堆積層内の複雑は層形状と顕著な速度コントラスト (0.5-1 km/s)が明らかとなった。これに対して測線中央部では、堆積層内の速度コントラストは小さい。前回提出したモデル (図4) で理論地震記象を計算すると、地殻最浅部、特に基盤の形状の複雑さのために、初動部分に局所的なshadow zoneが出現してしまう。図6に、shot点 40001 (図3) の場合を例として示した。このshot点では、茶色線で示す複雑な層形状のために、モデル座標で66-70 kmの部分でshadow zoneが出現する (図8-c) 。しかし、実際の観測記録では、shadow zoneに対応する領域である程度のエネルギーを持った初動が確認できる (図8-a) 。今回の解析では、計算上のshadow zoneで観測されている波を、基盤上部の深さ3~4 kmに存在する局所的な速度不連続面 (図8-cにおける緑線で示した面) からの広角反射であると解釈し、これまでのモデルを修正した。その空間的拡がりも、数kmと考えられる。実際、このような解釈で、観測波形を比較的良好に説明することができる (図8-a, b) 。また、測線東端部 (北上山地) の深さ5~6 kmまでの部分を構成する層の速度は5.8-6.2 km/sで、層境界における速度コントラストが0.1 km/s程度と推定される。

これまでの解析 (図4) で示されているように、深さ8~9-12~13 kmには、速度が6.3~6.4-6.4~6.5 km/sの中部地殻が存在すると考えられる。図7に示した今回の振幅解析結果によれば、上部地殻と中部地殻の速度コントラストは、最大で0.1~0.15 km/sであるが、測線方向に15-40 km程度の波長、0.05~0.1 km/s程度の振幅で変化している可能性が高い。

図7には、地震の気象庁一元化震源に基づき、この測線の±20 km以内の幅の領域で2014-2023年に発生した地震を示してある。測線中央部から東部における地殻内地震は深さ12~17 km以浅で発生してい

るが、その多くは上部及び中部地殻に分布していることがわかる。従って、この深さ付近に脆性-延性域の境界があり、本モデルによればその周辺速度は6.4-6.5 km/s程度と推定される。一方、測線西部（モデル座標の0-45 kmの範囲）においては、地震発生域が西に向かって深くなる。この部分の地殻中部の速度は、6.4-6.5 km/sと推定され測線中央部よりやや高いと考えられるが、地震発生域の深さ変化に直接対応するような構造上の知見は、未だ十分には得られていない。

参考文献

- Iwasaki T., 2002. Extended time-term method for identifying lateral structural variations from seismic refraction data, *Earth Planets Space*, 54, 663-677.
- Iwasaki T. et al., 2021. The upper crustal structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling, *JpGU Meeting*, SCG49-05.
- Iwasaki T. et al., 2022. The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling, *JpGU Meeting*, SCG49-05.
- Iwasaki T. et al., 2023a. Lateral structure variation across the central part of the NE Japan Arc deduced from the 2019 onshore seismic profiling – I, *JpGU Meeting*, SCG62-P02.
- Iwasaki T. et al., 2023b. Lateral structure variation across the central part of the NE Japan Arc deduced from the 2019 onshore seismic profiling – II, *The 2023 SSJ Fall meeting*, S06-03.
- Sato H. et al., 2020. Seismic transect across the central part of Northern Honshu, Japan, 2020 *JpGU-AGU Joint Meeting*, MIS03-P05.
- 佐藤・他, 2020. 庄内-新庄測線における深部反射法地震探査, 2020年度学術大会（後援会・シンポジウム）, 石油技術協会, 016.

(2)長期海底地震観測

令和6年1月1日に令和6年能登半島地震が発生した。陸上観測網により決定された余震分布からは、この地震の震源域の東半分は能登半島東部の海底下であることが推定される。余震分布を正確に求めることは、このような島弧の廃校側で発生する大地震の性質を探る上で重要である。そこで、自由落下自己浮上式海底地震計（OBS）を用いた海域緊急余震観測を実施している。本観測は、科学研究費補助金特別研究促進費を受け、東京大学地震研究所・北海道大学大学院理学研究院・東北大学大学院理学研究科・千葉大学大学院理学研究院・東京海洋大学学術研究院海洋資源エネルギー学部門・東海大学海洋学部・京都大学防災研究所・鹿児島大学大学院理工学研究科・海洋研究開発機構の共同研究観測として、実施している。海洋研究開発機構所属学術研究船「白鳳丸」による緊急調査航海（1月16日東京出港-1月23日富山入港）により、OBSの設置を行った。1月18日から設置を開始し、計34台のOBSが震源域に展開され、1月24日に設置した全台で観測が開始された（図9）。設置したOBSの種類と台数は、主に固有周波数4.5Hzの地震計を用いた短期観測型OBS(SPOBS)が26台、固有周波数1Hzの地震計を用いた長期観測型OBS(LTOBS)が5台、広帯域地震計を搭載した広帯域OBS(BBOBS)が3台である。設置したOBSのうち、26台のSPOBSは2月下旬に予定されている令和6年能登半島地震に伴う学術研究船「白鳳丸」緊急調査航海（第二次）により回収を試みる予定である。また、1月に設置したLTOBSとBBOBSについては、半年程度以上の連続観測が可能なため回収せずに観測を継続する共に、「白鳳丸」緊急調査航海（第二次）により、長期観測可能なOBSを20台程度を追加設置し、計28台程度の海底地震観測網にて、長期の余震観測を行う予定である。

日本海大和堆から、大和海盆北部を通り、山形県沖にいたる測線上に、に小型広帯域地震計7台を設置して、令和4年11月から長期海底観測を開始している。設置を実施した航海において、深部構造を求めるための情報として、測線上においてGIガンとハイドロフォンストリーマによる反射法地震探査を行い、浅部構造の把握を行った。令和5年度は、データを蓄積するために、海底における観測を継続した。令和6年度以降に設置した海底地震計を回収して、レーザー関数解析などの深部構造を得るための解析を実施する予定である。

日本列島のような沈み込み帯上盤プレート内の地震発生・地殻変動を定量的に解明していくためには、観測にもとづいた構造の理解が重要である。そこで、最上部マントルまでの詳細な構造を求めるために、令和元年には東北日本中部の新庄から大和確に至る構造探査とともに、太平洋側から日本海溝までの構造探査を行った。日本列島における地震発生・地殻変動の定量的研究には、リソスフェア・ア

セノスフェア境界に至るまでの深部構造を把握することも重要である。太平洋側では、令和元年の構造探査に引き続いて、これまでの観測例が少ない日本海溝海側アウターライズと海溝軸付近に近い日本海溝陸側斜面で構造探査測線上に5台の長期観測型海底地震計を設置して観測を行った。さらに令和4年度には、令和元年度に行った日本海における構造探査測線上に、2022年11月に小型広帯域地震計7台を設置して、長期海底観測を開始した。設置は、海洋研究開発機構所属学術研究船「白鳳丸」KH-22-9次航海にて実施した。同研究航海では、深部構造を求めるための情報として、小型広帯域地震計を設置した測線上において、GIガンとハイドロフォンストリーマによる反射法地震探査を行い、浅部構造の把握を行った。令和5年度は、データを蓄積するために、観測を継続した。令和6年度以降に設置した海底地震計を回収して、レーザー関数解析などの深部構造を得るための解析を実施する予定である。

日本列島基本構造モデル:

森本・富樫断層帯の重点的な調査観測の一環として、同断層帯の断層形状を推定する目的で、断層帯中央部において測線長24 km、中型バイプロサイズ車4台を震源とする深部構造探査を実施した

(図11)。受振点間隔25 m、発振点間隔50 m (断層地表位置近傍の約1 km区間は25 m)、総受振点数約970点である。また、反射法の総発振は約340点、屈折法の集中発振点は6点である。その結果、新第三系～第四系が野町断層・長坂撓曲・野田山撓曲に対応する西急・東緩の非対称背斜構造に参加する構造が確認された。これらは東傾斜の伏在断層によって形成されたと考えられる。一方、測線西部の沖積低地面下に緩やかな背斜状の構造が認められる(図12)。今後、得られた断層構造に基づき断層モデルを構築する。

長期間地殻変動:

能登半島北東部において、海底活断層による長期間地殻変動量を推定するために、海成段丘面の年代推定をおこなうための掘削調査を3箇所で行った。ボーリングコアに含まれる風成層から火山灰分析試料を採取し、段丘面の離水年代を推定すべく広域テフラとの対比を目的とした火山灰分析を実施した。その結果、町田・小池編(2001)によってMIS5eとされたNSO地点(標高約87 m)にて、ローム層からAT(29 ka; 町田・新井,)、シルト層からK-Tz(95 ka)の火山灰が検出された。ローム層の厚さ・風化度、K-Tzの層位から、MIS5eの可能性が高いことがわかった。また、町田・小池編(2001)によってMIS9とされたNST地点(標高約168 m)にて、ローム層からAT(29 ka)およびK-Tz(95 ka)の火山灰が検出された。ローム層の堆積速度一定とすると、ローム層の基底は約249 kaと推定され、MIS7eの可能性があるとわかった。これらの結果から、いずれの地点でも隆起速度は0.7 mm/yr以上と推定された。

参考文献

小池一之・町田 洋(編), 2001, 日本の海成段丘アトラス. 東京大学出版会, 105 p.

町田 洋・新井房夫, 2003, 新編 火山灰アトラス-日本列島とその周辺. 東京大学出版会, 336 p.

・計画期間中(令和元年度～5年度)の成果の概要

・計画期間中(令和元年度～5年度)の成果の概要

数値計算: 上盤プレート内の地震発生長期予測のために、日本列島域の三次元粘弾性有限要素モデルを構築し、GNSSデータによりプレート境界過程を拘束し、得られたプレート境界過程を用いて、日本列島域の断層における応力を求める手法を開発する。これらの手法は、2011年東北沖地震の余効変動による東北地方の震源断層への応力蓄積計算や、琉球-西南日本の固着による西日本の応力蓄積計算に適用され、観測された地震活動と良い一致を見せた。

今後これらの手法を展開していくためには、千島、東北日本、西南日本、琉球、伊豆小笠原などの各島弧-海溝系の相互作用を取り扱う必要がある。特に2024年能登半島地震のような各島弧の境界領域における巨大地震の発生メカニズムの解明には重要な課題である。

・海陸地震観測:

(1)2019年東北日本弧中部陸域地震探査の屈折・広角反射法解析

日本海地震・津波調査プロジェクトの一環として2019(R1)年度に実施した地震探査の陸域部データについて、屈折・広角反射法データ解析によって速度構造モデルを提出してきた。2020(R2)年度までは

走時データ解析を主体として地殻最上部構造の複雑性を明らかにした。更に2021(R3)年度は走時データから、2022(R4)年度は理論地震記象の計算を加えた解析により、地殻・マントル最上部構造を求め、下部地殻構造、地殻マントル遷移層、マントル最上部の反射面の存在など、興味深い成果が得られた。2023(R5)年度は、探査域における日本海拡大以降の地殻変形に対応する不均質構造解明のために、これまでのデータを再吟味・再解析して主として上部・中部地殻の構造変化を明らかにした。

(2)長期海底地震観測

日本列島のような沈み込み帯上盤プレート内の地震発生・地殻変動を定量的に解明していくためには、観測にもとづいた構造の理解が重要である。そこで、最上部マントルまでの詳細な構造を求めるために、令和元年には東北日本中部の新庄から大和確に至る構造探査とともに、太平洋側から日本海溝までの構造探査を行った。この構造探査のために、令和元年8月には、太平洋側の300 kmの区間において、地震研究所が所有するエアガンを複数台用いて同時発震を行った(図10)。エアガンのチャンバー総容量は6000~3000 cu. inchである。

一方、島弧活動の定量的把握には、リソスフェア・アセノスフェア境界に至るまでの深部構造を把握することも重要である。そこで、令和元年8月の海域エアガン発震前に、これまでの観測例が少ない日本海溝側アウターライズと海溝軸付近に近い日本海溝陸側斜面で構造探査測線上に長期観測型海底地震計を設置して、長期海底地震観測を開始した(図10)。設置した長期観測型海底地震計については、令和4年1月に回収を行い、長期の観測データを得ることができた。一方、令和4年度には、令和元年度に行った日本海における構造探査測線上に、令和4年11月に小型広帯域地震計7台を設置して、長期海底観測を開始した(図10)。設置は、海洋研究開発機構所属学術研究船「白鳳丸」KH-22-9次航海にて実施した。同研究航海では、深部構造を求めるための情報として、小型広帯域地震計を設置した測線上において、GIガンとハイドロフォンストリーマによる反射法地震探査を行い、浅部構造の把握を行った。令和5年度はデータを蓄積するために、観測を継続している。令和6年度以降に設置した海底地震計を回収して、これまでに蓄積したデータを用いて、レシーバー関数解析などの深部構造を得るための解析を実施する。日本海では、これまでに長期広帯域海底地震観測が行われている。そこで、日本海下のリソスフェア・アセノスフェア境界の深度を把握するために、高度化したレシーバー関数解析を行った。その結果、日本海盆と大和海盆では、地殻の厚さが大きく異なるにもかかわらず、リソスフェア・アセノスフェア境界の深度は約40 kmとほとんど変わらないことが明らかとなった。一方、大和堆の下ではリソスフェア・アセノスフェア境界の深度が約70 kmと顕著に深くなっている。

・日本列島基本構造モデル:

東北日本弧(青森平野・庄内平野・新庄盆地等)、富士川河口断層帯、中央構造線活断層系、森本・富樫断層帯などで近年取得された反射法地震探査断面について、地質構造解釈・変動地形との整合性の考察を行い、断層モデルを推定した。また、大和特反射の再解析や震源分布・メカニズムに基づき、2018年大阪府北部の地震の震源断層モデルを推定した。

また、日本海地震・津波調査プロジェクトの一環として2020年度に実施された津軽半島横断地殻構造探査の結果などに基づき、東北日本弧とその沿岸海域の震源断層の矩形モデルを作成した。震源断層の位置については、活断層図や地質図、重力異常図などを参考にし、形状については深部反射法地震探査の結果から推定している。日本海と沿岸については、日本海地震・津波調査プロジェクトの成果に基づき、内陸については既存の調査結果をもとに作成した。震源断層としては伏在する断層を考慮して、地質構造に着目して断層を抽出した。このため活断層として記載されていない場合でも、震源断層を想定している。地震発生層の深さは基本的には、Hi-netの観測データによるD90を参考にした。すべり角は、断層すべりは断層面にかかる最大剪断応力の方向に起こると仮定し、Terakawa and Matsu'ura (2010)の広域応力場を用いて求めた。

・長期間地殻変動

庄内-新庄測線沿いの活褶曲や伏在断層による地殻変動を含む長期間地殻変動を明らかにするために、測線周辺の精密数値標高モデルや既存の層序データに基づき、庄内平野・新庄平野の伏在活断層の平均変位速度・長期間地殻変動を推定した。

また、東北日本・日本海側の長期間地殻変動を推定する目的で、葡萄山地南西端に分布する海成中位段丘面および完新世海成段丘(離水ベンチ群およびノッチ)の宇宙線核種による露出年代を推定するための調査を行った。また、比較検討を目的として、テフロクロノロジーに基づき最終間氷期に形成

されたとされる青森県深浦の海成段丘（宮内, 1988; 小池・町田（編）, 2001）にて試料を採取した。採取した試料のうち、最終間氷期に採取した試料について、試料精製を実施し、地表面露出年代推定を実施した。加速器質量分析用に試料の前処理・精製を弘前大学および東京大学タンDEM加速器研究施設にて実施した。また、東京大学タンDEM加速器研究施設にて $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$ の質量分析を行った。得られた $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$ 比から石英中の ^{10}Be 濃度を算出し、その値に基づいて調査地域の地表面露出年代値を推定した。その結果、深浦町行合崎および村上市岩ヶ崎の両地点で、推定された表面露出年代が周辺の段丘面の編年・分布から間接的に推定された海成段丘面の形成年代と矛盾しないことが明らかになった。

また、能登半島北東部において、海底活断層による長期間地殻変動量を推定するために、海成段丘面の年代推定をおこなうための掘削調査を3箇所を実施した。ボーリングコアに含まれる風成層から火山灰分析試料を採取し、段丘面の離水年代を推定すべく広域テフラとの対比を目的とした火山灰分析を実施した。その結果、町田・小池編（2001）によってMIS5eとされたNSO地点（標高約87 m）の海成面がMIS5eに形成された可能性が高いことがわかった。また、町田・小池編（2001）によってMIS9とされたNST地点（標高約168 m）の海成面がMIS7eに形成された可能性があることがわかった。これらの結果から、いずれの地点でも隆起速度は0.7 mm/yr以上と推定された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

海陸地殻構造探査による上盤側プレートの構造推定と粘弾性三次元有限要素法モデルによるプレート境界の固着状態・上盤側プレート内部の応力状態の計算を一体で進めるというコンセプトで、上盤側プレート内の地震発生の長期予測について新しい手法開発を行ってきた。これまで北海道・東北日本・関東地域について解析を進め、着実に成果を挙げつつあり、この点で、課題の進捗状況は「(1) 地震発生の新たな長期予測 イ. 内陸地震の長期予測」の目的に直結している。また、今後は西南日本などより広い領域での適用と更なる手法開発を進めることができると期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Ai, S., T. Akuhara, M. Morishige, K. Yoshizawa, M. Shinohara, and K. Nakahigashi, 2023, Layered evolution of the oceanic lithosphere beneath the Japan Basin, the Sea of Japan, *J. Geophys. Res.*, 128, doi.org/10.1029/2022JB025581, 査読有, 謝辞無

Ishibe, T., T. Terakawa, A. Hasihma, M. Mochizuki, and R. S. Matsu'ura, 2024, Can the regional 3D stress field according to the Wallace-Bott hypothesis predict fault slip directions of future large earthquakes?, *Earth, Planets and Space*, 76, 26, doi.org/10.1186/s40623-023-01955-9, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Iwasaki T., 2023, Lateral structure variation across the central part of the NE Japan Arc deduced from the 2019 onshore seismic profiling - I, *JpGU Meeting*, SCG62-P02

Iwasaki T., 2023, Lateral structure variation across the central part of the NE Japan Arc deduced from the 2019 onshore seismic profiling - II, *The 2023 SSJ Fall meeting*, S06-03

篠原 雅尚・酒井 慎一, 2023, 浅海用係留ブイ方式海底観測システムの開発と実データの評価, *日本地震学会2023年度秋季大会(横浜)*, S02-01

Wakasa, S., T. Ishiyama, D. Hirouchi, N. Matta, N. Fujita, T. Echigo, 2023, 10-Be dating of middle-late Pleistocene uplifted marine terraces in northern Pacific coast of Northeastern Japan, *EGU General Assembly 2023*, EGU23-10655

Tatsuya Ishiyama, Toshimichi Nakanishi, Daisuke Hirouchi, Nobuhisa Matsuta, Naoko Kato, and Hiroshi Sato, 2023, Historical activity of an onshore subduction thrust and related geomorphic changes, northeastern Nankai subduction zone, *EGU General Assembly 2023*, EGU23-6754

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地震発生予測のための島弧-海溝システムの観測-モデリング統合研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

篠原雅尚（東京大学地震研究所）,望月公廣（東京大学地震研究所）,山田知朗（東京大学地震研究所）,
石山達也（東京大学地震研究所）,橋間昭徳（東京大学地震研究所）,悪原岳（東京大学地震研究所）,佐
藤比呂志（東京大学地震研究所）,飯高隆（東京大学大学院情報学環/東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

東北大学,北海道大学,千葉大学,京都大学防災研究所,鹿児島大学,防災科学技術研究所,横浜国立大学,弘前
大学,岩手大学,信州大学,富山大学,岡山大学,広島大学ほか

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：篠原雅尚

所属：東京大学地震研究所

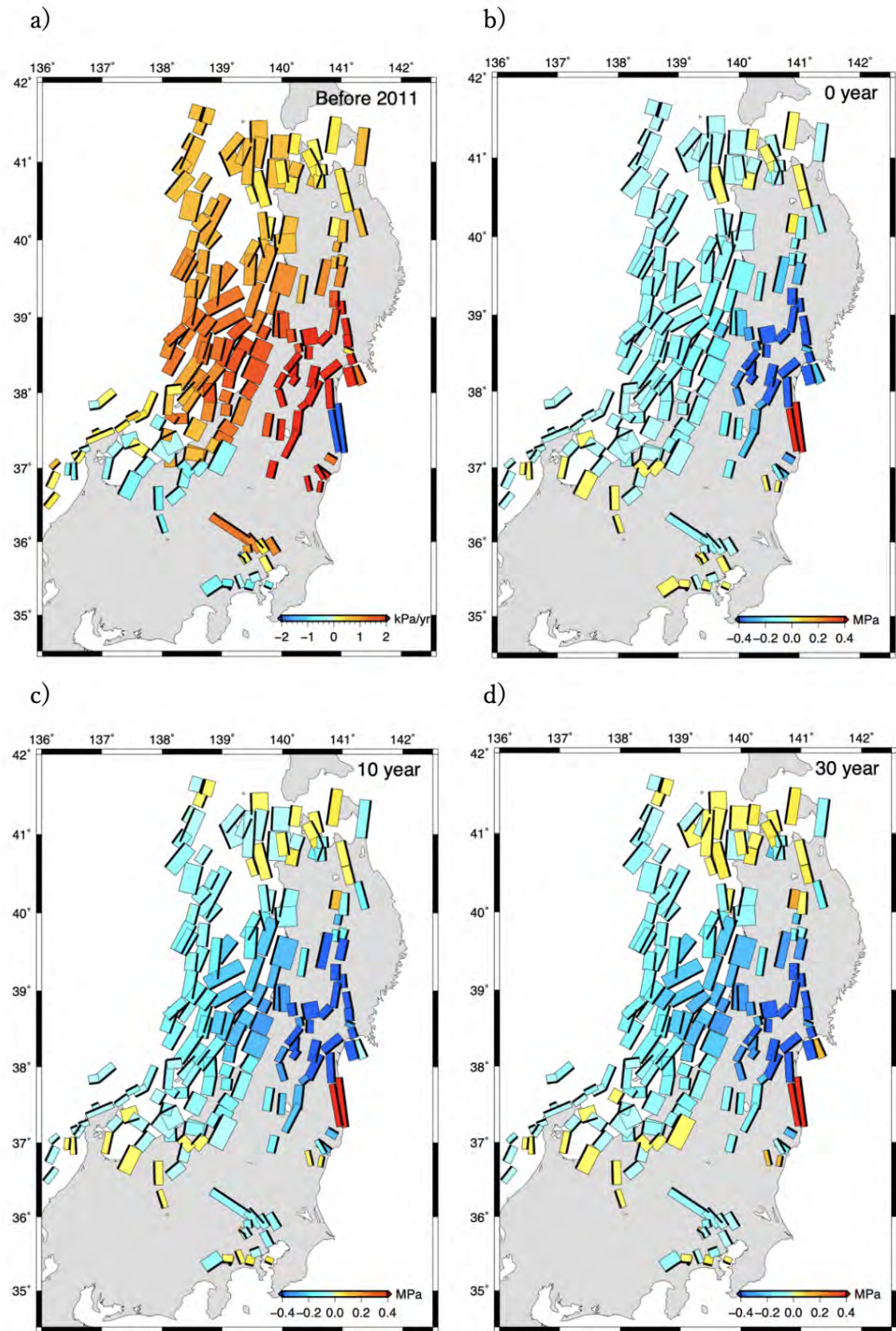


図1 東北-北関東地方の断層における2011年東北沖地震前後の応力 (ΔCFS)。実効摩擦係数の値は0.4とした。a) 東北沖地震前、b) 東北沖地震直後、c) 10年後、d) 30年後

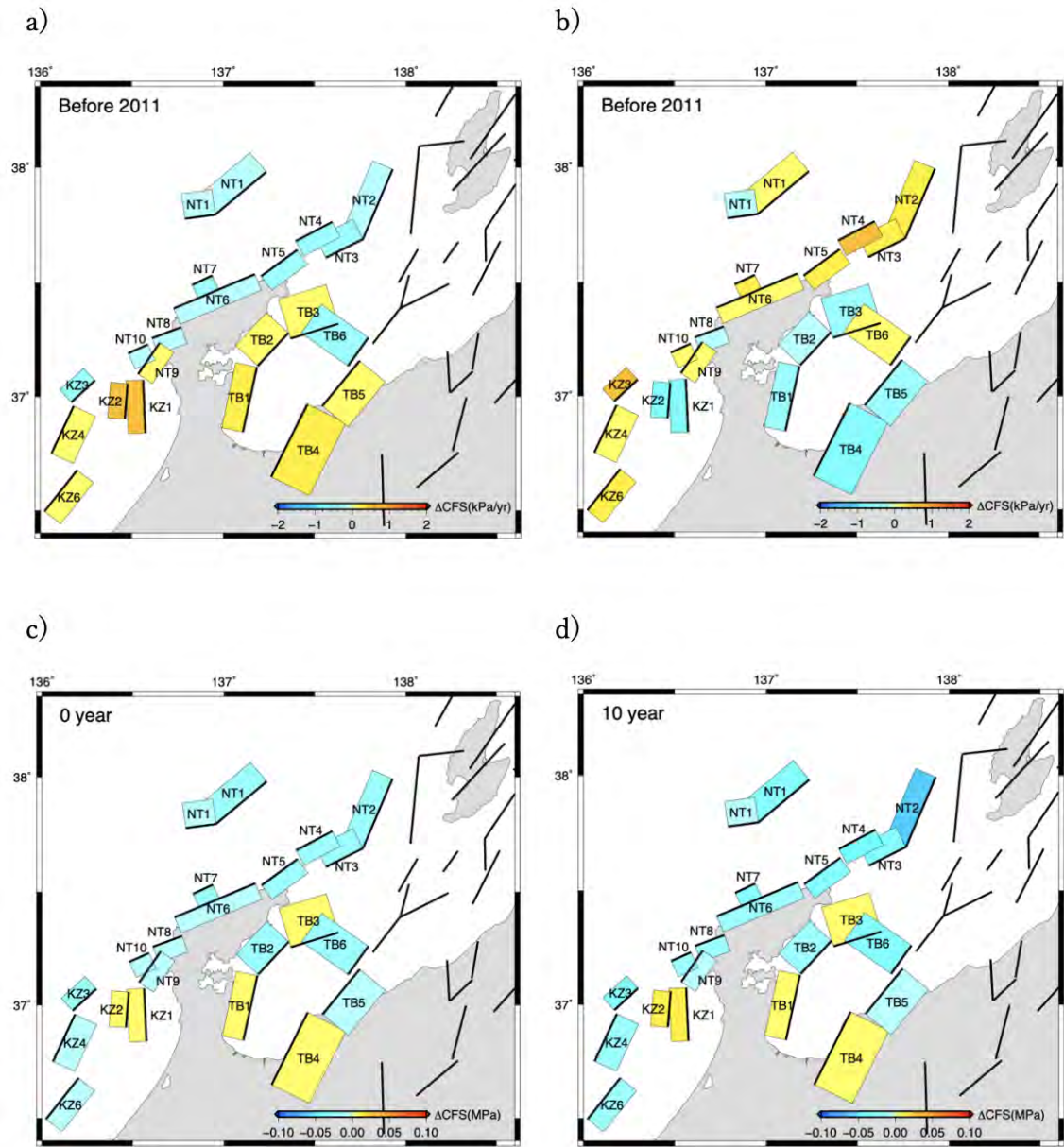


図2 能登半島周辺の震源断層における応力 (ΔCFS)。実効摩擦係数の値は0.4とした。a) 南海トラフの固着による応力、b) 日本海溝の固着による応力、c) 東北沖地震直後、d) 東北沖地震から10年後

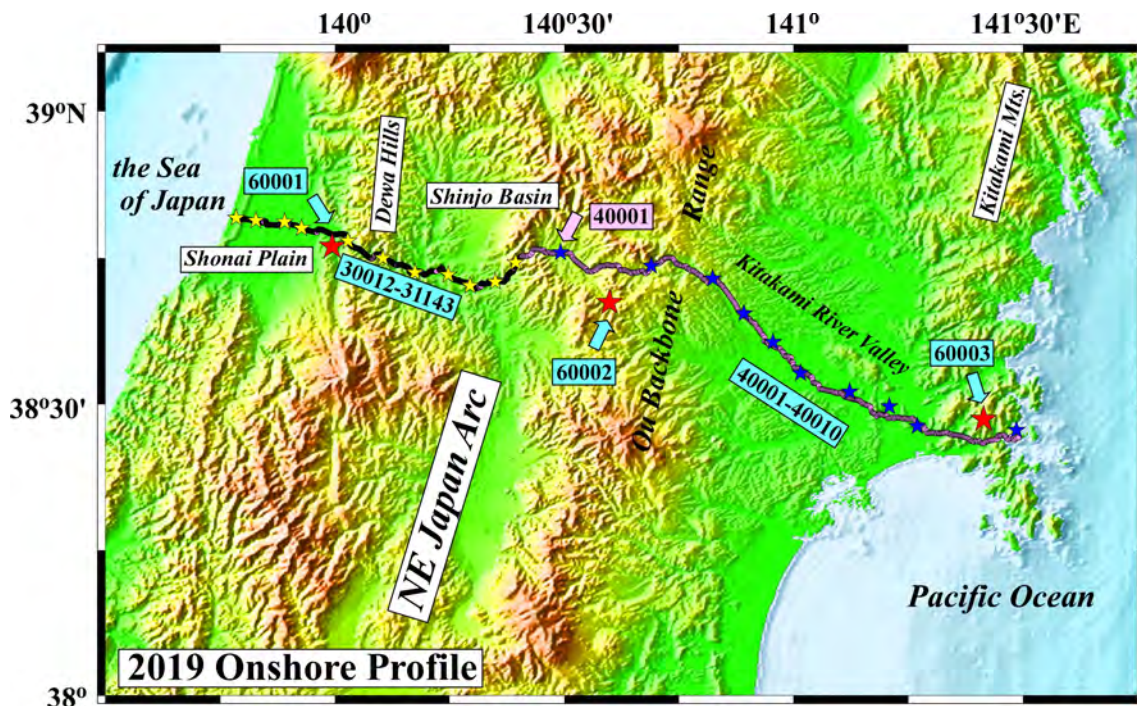


図3 2019年海陸統合構造調査の陸域測線図。

ダイナミト発震点と震源車による多重発震点を、それぞれ赤と黄・青の星印で示した。発震点及び受振点総数は、24及び1,667点である。

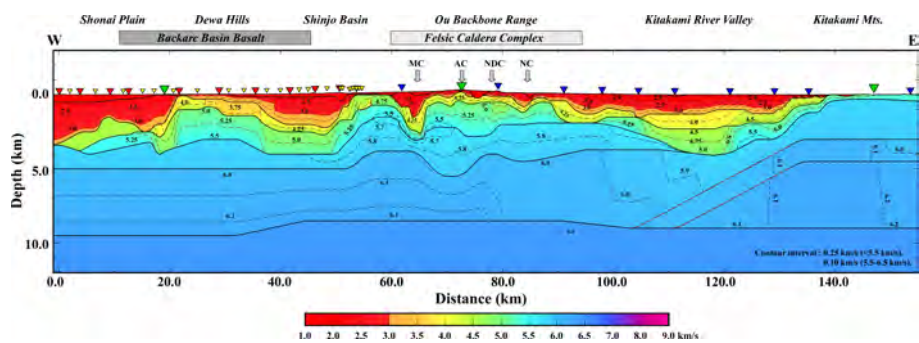


図4 2022年度までの走時及び振幅解析から求めた測線下の浅部構造 (Iwasaki et al., 2022b)。

速度値は、contourで示した。図上部の逆三角印は、発震点位置を示す。緑：ダイナミト発震点。赤及び青：震源車多重発震。Sato et al. (2020)、佐藤・他、2020)の反射断面解釈に基づくカルデラの位置を図上端の矢印で示した。

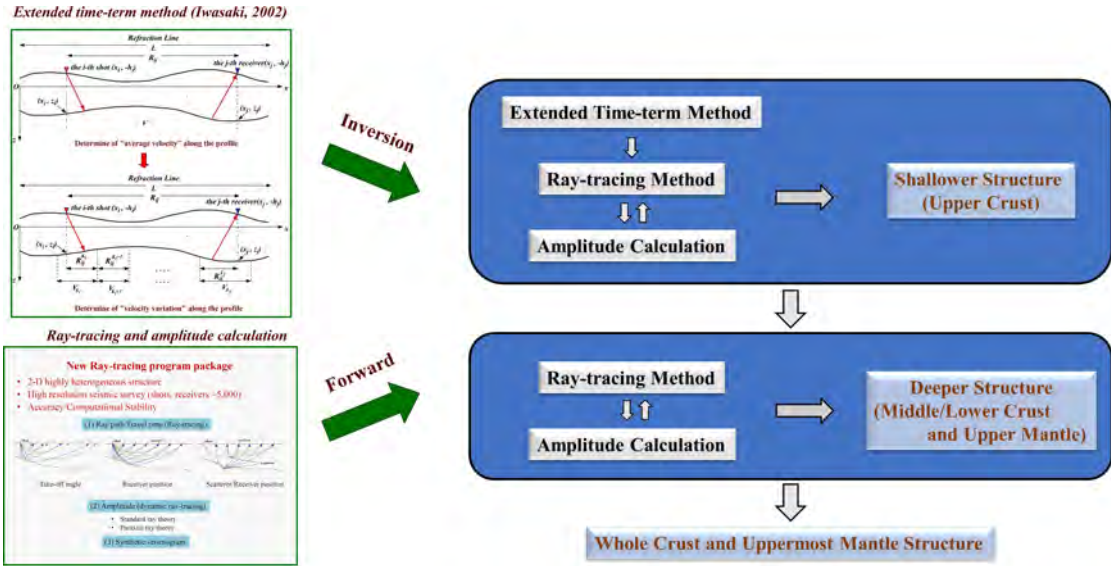


図5 本年度における総合解析のflow chart。Extended time-term法(Iwasaki, 2002)に基づく走時データinversion解析とAsymptotic ray theoryに基づく走時・振幅データのforward modelで構成される。

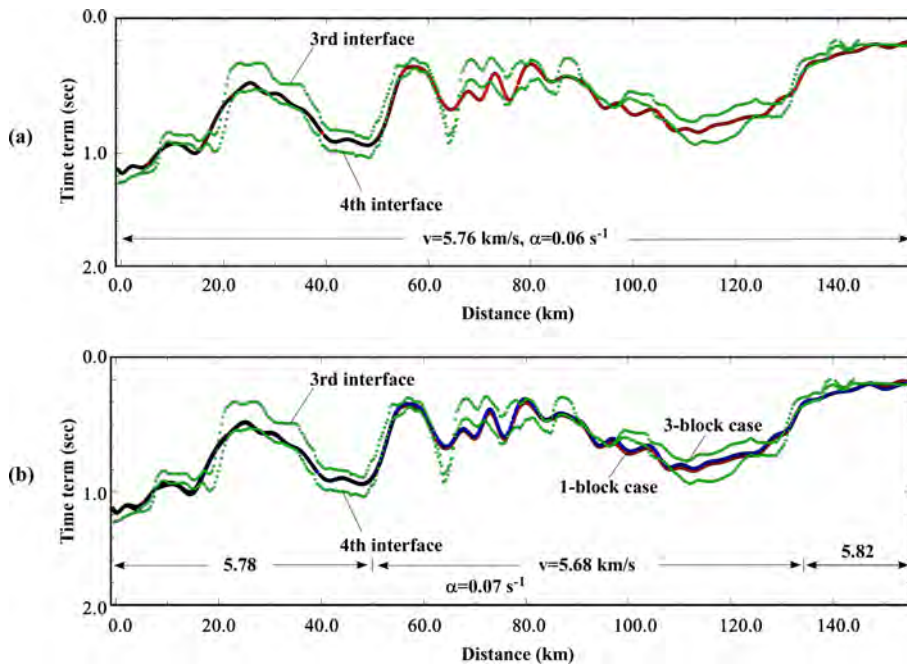


図6 Extended time-term法によるtime-termと基盤速度(v)と平均的速度勾配(α)。(a) 測線全体を1ブロックとした場合。(b) 測線を3つのブロックに分割した場合。緑線は、図2のモデルにおいて計算された、地表から第3及び4番目の層境界までの理論time-term。

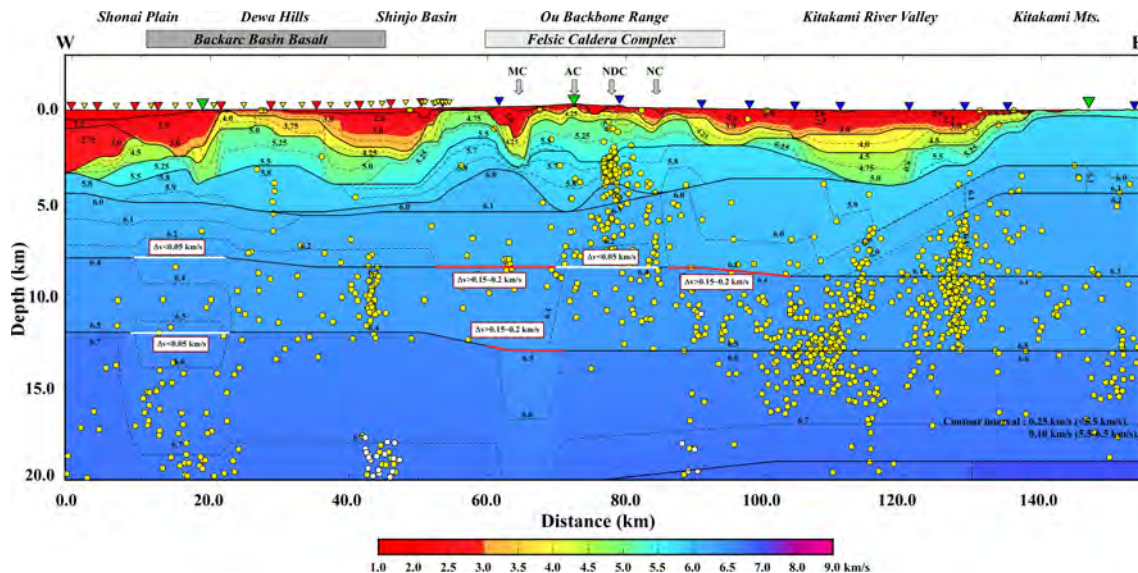


図7 本年度の解析による地殻上部構造。

速度値は、contourで示した。黄丸は、測線に沿って±20km内で2014-2023年までに発生した地震の気象庁一元化震源である。また、白丸は低周波地震の気象庁一元化震源である。図上部の逆三角印は、発震点位置を示す。緑：ダイナマイト発震点。赤及び青：震源車多重発震。Sato et al. (2020a, b) の反射断面解釈に基づくカルデラの位置を図上端の矢印で示した。

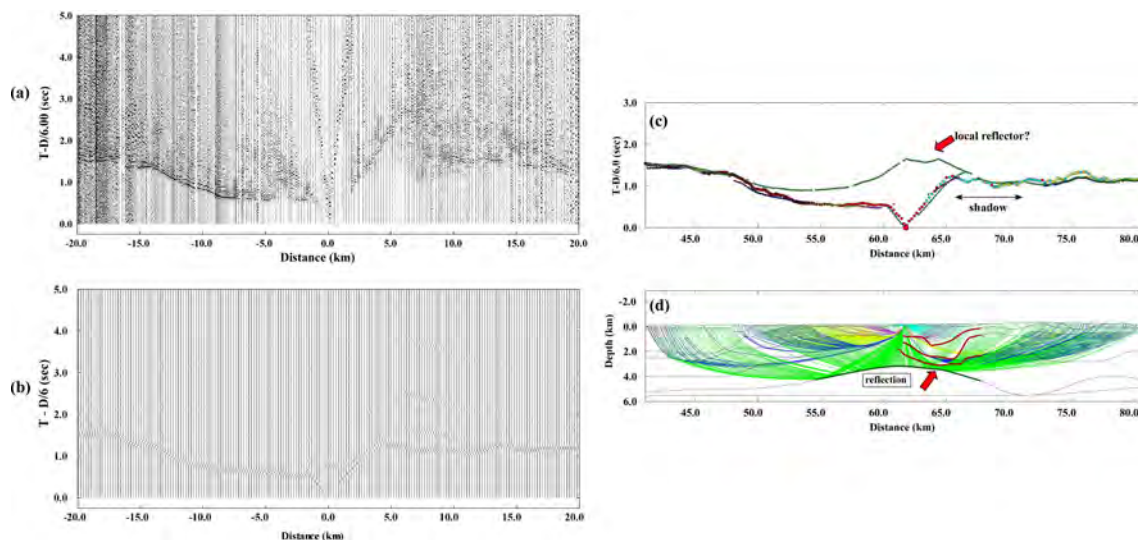


図8 ショット40001 (図3参照) における観測波形と理論波形の比較図。

(a) 観測波形。(b) 図5のモデルから計算された理論波形。(c) 観測走時と理論走時の比較図。(d) 波線図と地殻再浅部の層境界。これまでのモデル(図2)で初動を計算すると、図(d)の茶色の線でしめした複雑な層形状のためにモデル座標の66-70 kmの部分でshadow zoneが出現する(図(c))。しかし、観測波形の対応する領域では、初動が確認できる(図(a))。本解析では、この範囲で観測された波を、図(d)の緑線で示した局所的な速度不連続面からの広角反射波と解釈し、図(b)の理論地震記象を計算した。

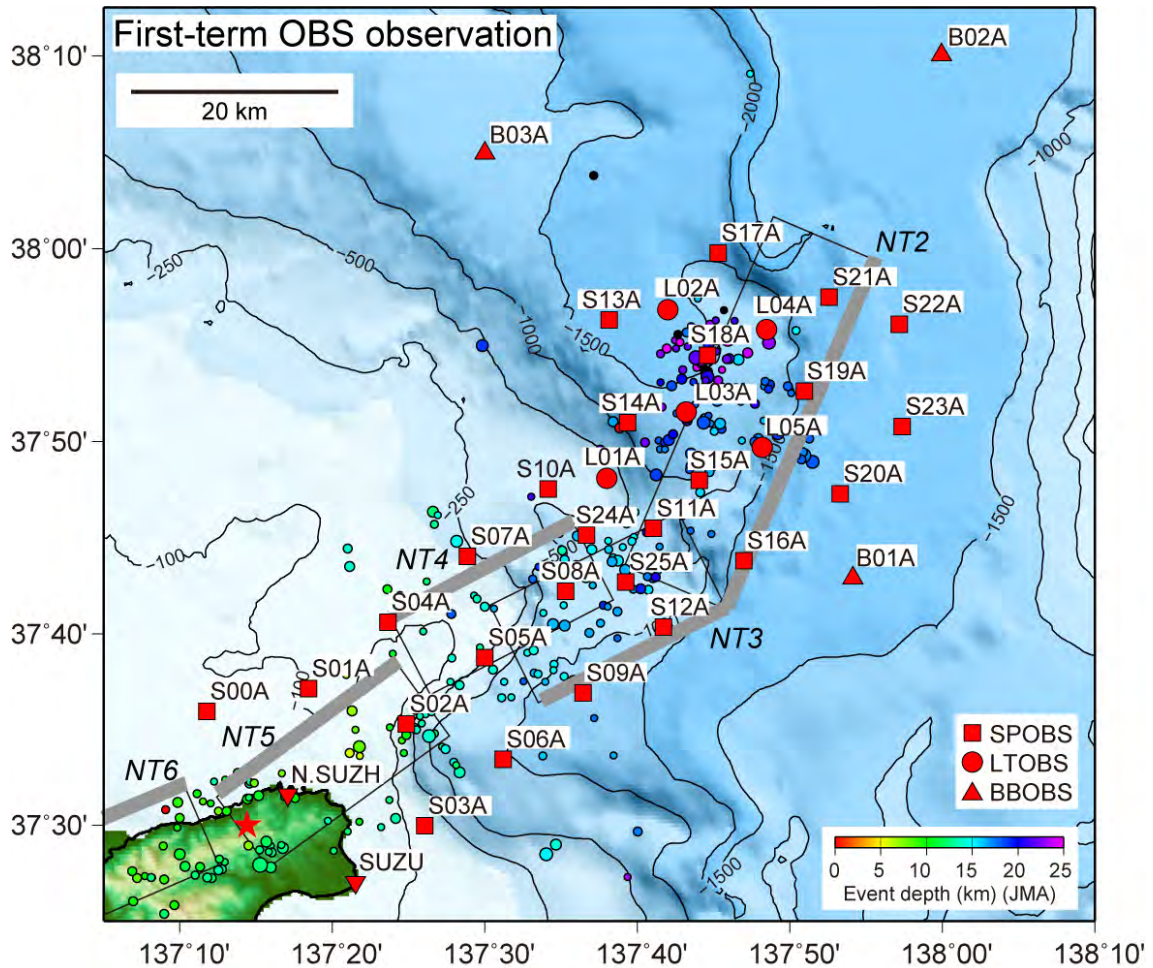


図9 「白鳳丸」による緊急調査航海により設置されたOBSの位置。
 気象庁による令和6年能登半島地震の震央(赤星)。海底観測を開始した1月24日から2月5日までに気象庁が決定したマグニチュード2以上の地震の震央を併せて示す。四角は「日本海地震・津波調査プロジェクト」による断層モデル (NT1 - NT6) であり、灰色太線が上端を示す。地形データは国土地理院および海上保安庁による。

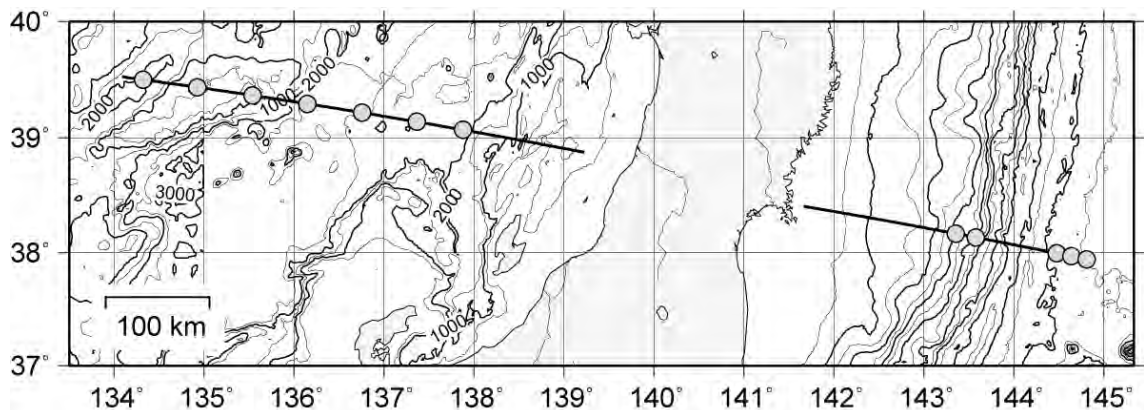


図10 2019年8月及び2022年11月に日本列島島弧深部構造を求めるために設置した長期観測型海底地震計の設置位置(灰丸)。
 設置後に浅部構造を求めるために、太平洋側では大容量エアガン、日本海側ではGIガンによる発震を行った(黒線)。

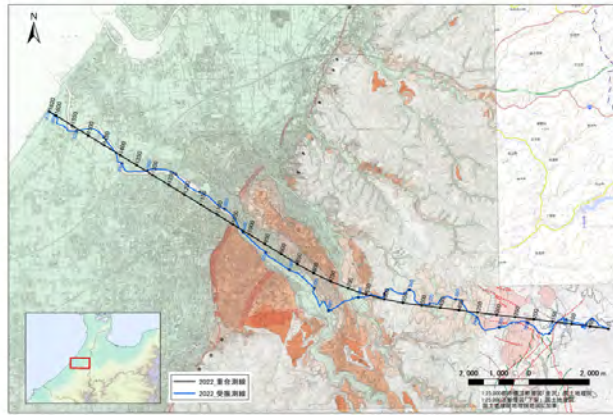


図11 森本・富樫断層帯中央部を横断する深部構造探査の測線位置図。

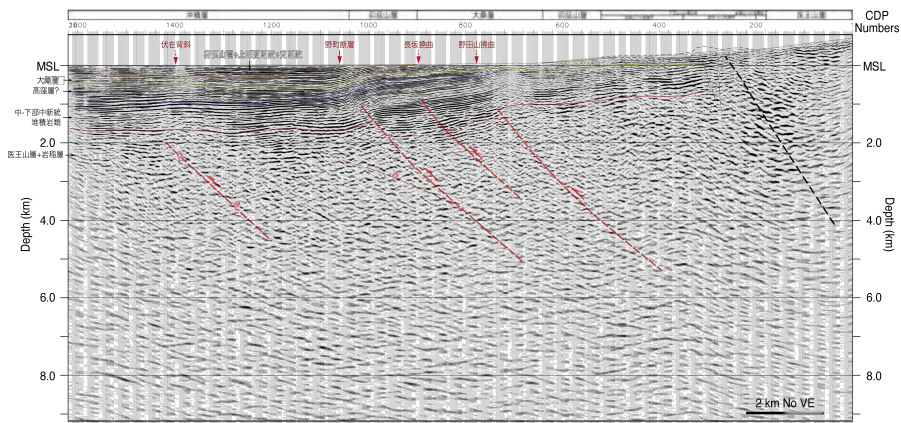


図12 森本・富樫断層帯中央部を横断する深部構造探査の解釈深度断面図。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

スロー地震モニタリングに基づく南海トラフ域の地震発生可能性評価手法に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

オ. 構造共通モデルの構築

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) 関連研究分野との連携強化

(5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

南海トラフ域を中心とし、沈み込みプレート境界で発生する多様な滑り現象をモニタリングすることで、それらの時空間変化を高精度に把握し、スロー地震間の相互作用、スロー地震と地震発生との関係、これらの現象の発生環境としての地下構造異常・流体挙動との関係の解明を通じて、プレート境界すべり特性やプレート境界現象間の相互作用の理解を深める。これら新たに得られる知見に基づき、スロー地震が隣接する巨大地震領域に与える影響、すなわち、スロー地震と同じプレート境界で発生する大地震発生可能性の相対的な変化を評価する手法の開発に貢献する。

サブテーマ毎の到達目標を以下に記す。

1. スロー地震データベースの拡充とスロー地震活動特性の解明

科研費から引き継いでスロー地震データベースを更に拡充し、本地震火山観測研究計画内での利用に留まらず、国内外のスロー地震研究基盤としてその存在価値を高め、地震研究分野におけるわが国の国際的リーダーシップの強化に貢献する。また、これらのカタログを活用しスロー地震の活動特性を正確に把握することで、シミュレーションによる現象再現性の精度向上を通じ、長期的及び中短期的な大地震発生可能性の評価に貢献する。

2. 陸域広帯域地震観測等を用いた超低周波地震活動様式の解明

これまでの本地震火山観測研究計画や科研費等で展開した四国西部・九州東部の広帯域地震観測データ等を用いて、南海トラフ域に発生する超低周波地震のモニタリングを行ない、その活動様式を解明すると共に、他のスロー地震との相互作用などを明らかにする。得られた超低周波地震カタログはスロー地震データベースに登録し、国際的スロー地震研究の推進に貢献する。

3. 深部低周波地震の高速移動現象の解明

スロー地震は、短い長さスケールほど滑りの継続時間が短くなる拡散現象としての性質を有しており、既知のものより高速且つ短い伝播距離で特徴づけられる新たな高速移動現象が存在することが予想される。この新たなモードは、ゆっくり滑りから通常の地震による速い滑りへの遷移的な挙動を知る上で重要である。特に、中短期的な時間スケールにおいて、ゆっくり滑りと地震発生との関連性を考える上で根本的な理解の促進に貢献すると期待される。これまでの機動観測によって取得された地震波形データを用いて、深部低周波地震の高速移動現象の新たなモード検出を目指し、既存の活動様式との比較検討を行う。

4. GNSS観測による豊後水道周辺域でのSSEのモニタリング

豊後水道周辺地域において、これまでに構築してきたGNSS連続観測点における地殻変動観測を継続して実施し、国土地理院等の他機関の観測データもあわせて解析することで、長期的SSEをはじめとする、より長期的なプレート間すべりの動態を把握しスロー地震間の相互作用について理解を深める。同時に、この領域でのすべり特性・プレート間相対運動による歪蓄積と解放の収支を推定し、その発生様式の理解を通じて巨大地震発生様式の解明を目指すことで、地震の長期的予測の高度化に資することを目的とする。

5. 相模トラフ～南海トラフ～琉球海溝におけるフィリピン海プレート沈み込み境界全域の長期的SSEの系統的把握とそのモニタリング

準リアルタイム解析による長期的SSEモニタリング手法の開発をするとともに、フィリピン海プレート上面における長期的SSE活動様式の全容を解明する。

6. スロー地震と中・大規模地震の関係の解明

プレート境界面上の巨大地震震源域周辺に分布するスロー地震域におけるすべり特性の理解をすすめる。

7. 重力・電磁気観測に基づくすべりの時間発展と流体との相互作用の解明

南海トラフ等のスロースリップ域において重力・地磁気観測を実施し、間隙流体の時間変動を捉えることを目指す。プレート境界の応力状態を変化させる間隙流体の移動を明らかにすることは、他のスロー地震及び巨大地震発生域とスロースリップ発生域とがどのように相互作用しているのか解明することに貢献し、中短期予測につながる。

8. スロー地震の滑り特性を規定する地下構造異常の抽出

スロー地震の活動様式に違いがある四国中部から東部にかけての地域で稠密地震観測を実施し、既存稠密地震観測データの再解析結果と合わせて、スロー地震発生域における構造を明らかにする。豊後水道のほぼ中央に位置する水ノ子島に構築した観測点を維持し、取得データの解析から、豊後水道下のプレート形状を明らかにする。これら、明らかになったプレート境界面の形状や境界面近傍の構造不均質と、モニタリングされるスロー地震活動と対応させることで、滑り特性を規定する地下構造異常の特徴を把握する。

9. 南海トラフで浅部スロー地震の滑り特性を規定する地下構造と流体挙動の解明

浅部スロー地震の滑り特性を規定する地下構造と流体挙動を解明する。特に、浅部スロー地震の地域性（発生域 vs. 非発生域）を規定する要因を明らかにするとともに、デコルマやOut-of-sequence-thrust(OOST)断層の構造と流体が浅部スロー地震にどのように影響するかを解明する。また、デコルマやOOST断層の固着（強・弱）と挙動における沈み込む四国海盆堆積物の岩相層序と流体の役割を明らかにする。

10. スロー地震と地震発生との関連性

スロー地震の時空間発展を詳細に調べることで、その周辺域への応力载荷の状況を把握し、地震の発生可能性の相対的变化を推定することを試みる。例えば、房総沖のスロースリップに伴う有感群発地震に関して、地震活動の詳細な時空間発展を把握し、滑りが引き起こす応力変化と比較することで、地震発生を引き起こす条件を探索する。また、大地震の発生に先行する前震活動の解析を行い、スロースリップとの関連性について検討する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1. スロー地震データベースの拡充とスロー地震活動特性の解明

2019年度は、2021年度に科研費から本計画にデータベースを移行するための準備を進め、2020年度は移行作業を実施する。2021から2023年度は、データベースの維持・拡充を継続するとともに、多様なスロー地震カタログを活用してそれぞれの時空間変化や相互作用などを明らかにする。

2. 陸域広帯域地震観測等を用いた超低周波地震活動様式の解明

2019から2020年度は、科研費で実施するため、本計画での経費は必要としない。2021から2023年度は、科研費で展開された広帯域地震観測点の維持、データ収集、解析を行ない、既存の広帯域地震観測網のデータも活用して、超低周波地震の活動特性や他のスロー地震との相互作用を明らかにする。

3. 深部低周波地震の高速移動現象の解明

2019から2020年度は、科研費で実施するため、本計画での経費は必要としない。2021年度は、高密度な機動観測によって取得された地震波形記録に対して、アレイ解析手法等を適用することで、深部低周波地震の詳細な時空間発展を明らかにする。2022から2023年度は、深部低周波地震の高速移動現象を抽出するとともに、既存の活動様式との比較検討を行う。

4. GNSS観測による豊後水道周辺域でのSSEのモニタリング

2019年度においては、前計画・科研費等で構築してきた機動的GNSS連続観測点における地殻変動観測を継続して実施し、国土地理院等の他機関の観測データもあわせてモニタリングを行う。このためのGNSS基線解析環境を構築するとともに、過去の長期間のデータも活用しSSEの把握を進める。2020年度においては、前年度の研究を継続する。2021年度においては、前年度までの研究を継続すると共に、プレート境界面付近における歪収支について検討を進める。2022年度においては、前年度までの研究を継続すると共に、SSE同士の相互作用について検討を進める。2023年度においては、前年度までの研究を継続すると共に、成果の取りまとめをおこなう。

5. 相模トラフ～南海トラフ～琉球海溝におけるフィリピン海プレート沈み込み境界全域の長期的SSEの系統的把握とそのモニタリング

2019年度においては、これまで開発した手法を準リアルタイム解析へ拡張することを検討する。また、関東地方などを中心にSSEの系統的検出を行う。2020年度は、引き続き手法の拡張とSSEの系統的検出を行う。2021年度は、開発した手法に基づく準リアルタイムモニタリングの実施を目指す。2022年度は、モニタリングを継続するとともに、相模トラフから琉球海溝までの領域における長期的SSEのセグメント化や移動などの活動様式を明らかにする。2023年度は、SSE活動様式をさらに検討し、地震活動および微動活動との時空間的な関係性を検討する。

6. スロー地震と中・大規模地震の関係の解明

西南日本および南西諸島における繰り返し地震活動をモニタリングし、SSEや比較的大きな地震の活動状況との関係を調べる。またスロースリップの周期性に関する研究も行う。これらによりプレート境界での地震とスロースリップの関わりの仕方が明らかになれば、中短期予測の精度向上に寄与できる可能性がある。

2019年度は、これまでに得た繰り返し地震のデータにより、西南日本でのスロー地震と中・大規模地震の関係について調べる。2020年度は、これまでに得た繰り返し地震のデータにより、西南日本での周期的なスロースリップについて解析を行う。2021年度は、南西諸島における繰り返し地震を抽出および東北日本との比較を行う。2022年度は、南西諸島におけるスロー地震と中・大規模地震の関係について調べる。2023年度は、スロー地震と中・大規模地震の関係についてモデル化を行う。

7. 重力・電磁気観測に基づくすべりの時間発展と流体との相互作用の解明

重力観測は西南日本のスロースリップ域で2-3年間に1回を行うことを標準とするが、スロースリップの発生に応じて観測頻度を地域間で調整する。

(2019～2022年度)絶対・相対重力観測(東海、四国、宮崎、八重山)、地磁気観測(八重山)、ネットワー

クMT観測（四国）、データ解析、ノイズ補正手法及び既存モデルの改良を行う。（2023年度）同上、成果とりまとめ

8. スロー地震の滑り特性を規定する地下構造異常の抽出

2019から2023年度において、水ノ子島観測点の保守・データ回収作業を実施し、水ノ子島観測点と周辺観測点のデータを用いた解析を実施することで、豊後水道下のプレート構造を把握する。紀伊半島等で取得されている稠密地震観測データの再解析を実施し、スロー地震発生域やその近傍における構造を明らかにする。2021年度は、2022年度から四国で実施する地震観測の現地踏査を実施する。2022から2023年度にかけて、稠密地震観測を実施する。取得した稠密地震観測データの解析を実施し、既存稠密地震観測データの再解析結果と合わせて、スロー地震の滑り特性を規定する地下構造異常を抽出する。

9. 南海トラフで浅部スロー地震の滑り特性を規定する地下構造と流体挙動の解明

2019年度と2021年度においては、既存・新規のマルチチャンネル反射法地震探査（Multi-channel Seismic：MCS）データと深海掘削（ODP/IODP）データを統合し、デコルマ・Out-of-sequence-thrust（OOST）断層や沈み込む四国海盆堆積物の構造的特徴、流体分布、摩擦係数を推定すると共に、海底地殻変動観測（Yokota et al., 2016）から求めたデコルマの固着分布（強・弱）と比較する。2020年度と2022年度においては、既存MCSデータが十分でない浅部スロー地震の発生域と非発生域でTime-lapse MCS調査を行い、デコルマやOOST断層の反射係数を比較することで、間隙水圧の時間変化を推定すると共に、その間の浅部スロー地震発生と比較する。2023年度は、デコルマやOOST断層の構造的特徴と間隙水圧の時間変動に着目し、浅部スロー地震の活動様式との関連性を求め、浅部スロー地震発生に対する断層の地殻構造と流体挙動の影響を解明する。

10. スロー地震と地震発生との関連性

2019から2021年度は、房総沖スロースリップに伴う群発地震活動の震源再決定、Matched filter法による地震活動の再検出を行う。また、小繰り返し地震のモニタリングに関する課題とも連携し、非地震性滑りの時間発展について調べる。2022から2023年度は、房総沖スロースリップと群発地震発生との関連性をスロースリップが引き起こす応力変化に注目して検討する。5か年の実施期間中に大地震が発生した場合は、先行した前震活動や地殻変動に関する解析を実施し、大地震発生に至る直前過程に関する知見を蓄積する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

年次計画に基づいた機動的調査観測を実施するとともに、南海トラフ沿いにおけるスロー地震をモニタリングし、発生状況の把握を行なった。また、スロー地震データベースを安定的に維持・管理するとともに、データ解析手法の開発を進め、既存観測データを用いた繰り返し地震やスロー地震の活動様式、スロー地震発生域の構造・流体挙動の把握、スロー地震と地震発生との関連性に関する研究を進めた。

1. スロー地震データベースの拡充とスロー地震活動特性の解明

科研費・新学術領域研究「スロー地震学」で構築したスロー地震データベースを安定的に維持・管理するとともに、データベースへのカタログ登録を継続的に呼びかけ、現在では約120のカタログが登録されている。

拡充されたスロー地震データベースを活用し、南海トラフ沿いで発生する浅部スロー地震の特徴をまとめた。地震学および測地学的な浅部スロー地震の分布を明らかにするとともに、浅部プレート境界へのインプット、室内実験、プレート境界のすべり欠損や地下構造との対比を実施し、浅部スロー地震の分野間共通理解を目指した（図1）。それらの成果は、Earth, Planets and SpaceへReview paperとして投稿し、受理掲載された（Takemura et al., 2023a）。

海域の定常観測の発展に伴い、DONETやS-netによる浅部微動や浅部超低周波地震の解析が進んでいる。そこで、浅部微動の高精度解析へ向け、海底地震計での高周波地震動の特性を明らかにした（Takemura et al., 2023b）。

2. 陸域広帯域地震観測等を用いた超低周波地震活動様式の解明

機動的広帯域地震観測点11点（四国西部3点、紀伊半島4点、東海4点）と準定常観測点6点（四国西部5点、九州1点）について、継続して現地作業や遠隔作業を含む保守作業を行なった（竹尾・

他, 2023)。また、得られたデータを整理し、公開に向けた作業を行なった。

3. 深部低周波地震の高速移動現象の解明

南海トラフ沈み込み帯の深部低周波地震（LFE）の長期的な挙動に関する理解を深めるために、先行研究（Kato and Nakagawa 2020）によって構築された低周波地震カタログのアップデートを行った。2015年9月から2020年12月までの連続波形記録にテンプレートマッチング法を適用することで約23万個のLFEを検出した。その結果、長期的SSEの規模が大きいほどLFEの活動度も高くなる傾向が見い出された。また、2011年東北地方太平洋沖地震以降、走行方向に四国全体を横断する主要なLFE活動が継続して発生しており、プレート境界の状態が変化した可能性が示唆される。

紀伊半島で発生しているLFEとスラブ内地震の波形を比較分析することで、低周波に卓越するLFEの波形の特徴がプレート境界周辺域の特殊な減衰構造等に寄与するのではなく、スローな震源過程を反映していることを実証した（Wang et al., 2023）。

4. GNSS観測による豊後水道周辺域でのSSEのモニタリング

前計画・科研費等で構築してきた、豊後水道周辺地域におけるGNSS連続観測および座標値解析を継続して実施した。それらの観測データに基づき、2015～2016年頃および2018～2019年頃に豊後水道で発生した2つのスロースリップイベント（SSE）のすべり域を推定した。これらと深部微動活動を比較したところ、豊後水道では微動発生域へのSSEすべりの進展と微動活動により相関が示された（図2）（Hirose et al., 2023）。

GNSSデータのスタッキング解析により2011年東北地方太平洋沖地震の本震発生約2時間前から始まる加速的な先駆すべりの存在を示唆する結果が得られたという報告の検証のため、GNSSとは独立な防災科研Hi-net高感度加速度計（傾斜計）記録を同様な手法で解析した。その結果、ノイズレベルを超えるような数時間の加速的な変動は見られないことが分かった。

5. 相模トラフ～南海トラフ～琉球海溝におけるフィリピン海プレート沈み込み境界全域の長期的SSEの系統的把握とそのモニタリング

今年度までに開発してきた常時微動表面波トモグラフィー手法をS-net及び過去に実施された稠密海底地震観測網のデータに適用し、日本海溝沈み込み帯におけるS波速度構造を推定した（図3）（高木・他, 2023）。その結果、空間的に相補的に分布する微動発生域と大地震すべり域に対応したS波速度構造の空間変化を明らかにした。また、異方性構造の推定へ向けた検証を行い、常時微動源の非等方性の影響をモデリングできた（高木・西田, 2023）。

6. スロー地震と中・大規模地震の関係の解明

巨大地震震源域周辺に分布するスロー地震域におけるすべり特性の理解のため、東北沖での震源決定を進めた。また、世界の地震波形のデータを用い、繰り返し地震を抽出するプログラムの開発を進めた。

7. 重力・電磁気観測に基づくすべりの時間発展と流体との相互作用の解明

昨年度に引き続き、東海、四国南西部、宮崎で絶対・相対重力観測を実施し、重力異常のデータを蓄積した。東海では、この数年のデータ蓄積により、重力異常がプレート境界の浅部に位置する観測点から深部に位置する観測点へ伝播するように見えることが分かった。能登半島の群発地震域で4度、重力観測を実施し、令和5年5月、6年1月に発生した大地震に伴う重力変化を検出した。これらの重力変化は弾性ディスクーション理論では説明できない負の質量変化を含んでおり、現在、この地域に大量に含まれる地殻流体の変動により説明できるか検討している。石垣島のスロースリップ発生域において、時間分解能を大幅に改善した連続観測可能な重力計による観測を継続中である（Tanaka, 2023; Tanaka et al., 2023）。

昨年度に引き続き、四国西部域においてNetwork-MT観測を継続し、そのデータから得られた3次元比抵抗構造に基づいて構造変化検知可能性の検討を行った。さらにスロースリップ域の空間的特性を明らかにするため、四国地方や紀伊半島域での従来のNetwork-MT法観測データをコンパイルし、紀伊半島についてはそのデータに基づいた3次元比抵抗構造推定を行った（Shi・他, 2023; Watanabe et al., 2023）。

8. スロー地震の滑り特性を規定する地下構造異常の抽出

令和3年12月から令和5年3月まで、スロー地震活動様式に違いがある四国東部地域において実施した稠密地震観測で取得したデータを用いた地震波モグラフィ解析を実施し、スロー地震の滑り特性を規定する地下構造の特徴把握を行った(蔵下・他, 2023)。解析に使用した観測点の配置図を図4、得られた南北測線下の地震波速度構造を図5に、東西測線下の地震波速度構造を図6に示す。南北測線下のVp/Vs構造より、深さ15km以深でVp/Vs値の大きな領域が北傾斜で確認できる。既存の四国東部地域における制御震源探査データの解析結果(蔵下・他, 2007)と比較すると、沈み込むフィリピン海プレートの海洋性地殻がVp/Vs値の大きな領域に対応している。南北測線下の深さ20km以深で確認できる北傾斜の震源分布は、フィリピン海プレートの沈み込む方向とほぼ平行に確認でき、地震は沈み込む海洋性地殻下の上部マントル内で発生している。既存の反射法断面図(蔵下・他, 2007)と比較すると、フィリピン海プレート上面近傍の反射層が厚く確認できる領域で、Vp/Vs値が特に大きくなる特徴を示し、流体の存在が示唆される。南北測線下での考察を踏まえると、得られた東西測線下のVp/Vs構造より、深さ30-40kmのVp/Vs値が周囲より大きな領域は、沈み込むフィリピン海プレートの海洋性地殻に対応すると解釈できる。Vp/Vs値は東西方向に変化が確認できる。深部低周波微動活動が活発な領域は、低調な領域に比べてVp/Vs値が高くなる特徴が見られ、深部低周波微動活動度と沈み込むフィリピン海プレート内の構造不均質との関連が示唆される。

9. 南海トラフで浅部スロー地震の滑り特性を規定する地下構造と流体挙動の解明

JAMSTECが過去に南海トラフで取得した反射法探査データを深海掘削データと組み合わせ、海溝で沈み込む深海堆積物を分析した。その結果、中新世に堆積した3つのタービダイトがプレート境界に沿って深部へ沈み込んでいることを発見した(図7)。砂層に富むタービダイトが、スロー地震活動の静穏域(プレート間固着の強い領域とほぼ一致する)に集中して分布している。透水性の優れたタービダイトがプレート境界断層の間隙水圧を低下させ、断層面の剪断強度が大きくなることで、スロー地震活動が静穏化した可能性が考えられる(Park and Jamali Hondori, Scientific Reports, 2023)。今後、南海トラフ沿いのプレート境界断層の間隙水圧を高精度・広域的に調査することで、巨大地震に影響するスロー地震に関する理解が進展し、巨大地震発生予測モデルの高度化への貢献が期待される。なお、令和5年度の成果は本課題の5か年計画と概ね一致する。

10. スロー地震と地震発生との関連性

2020年3月末から半年以上にわたって、岐阜・長野県境付近において群発地震活動が発生した。機械学習モデルによる地震波の読み取りや震源再決定、テンプレートマッチング法を適用することで、約20万個のイベントから成る包括的な地震カタログを構築した。群発地震は主に東西走向もしくは北西-南東走向の高角傾斜の多数の断層面に分布し、活動域は南側から北側へと徐々に拡大した。また、活動域の拡大フロントの移動速度は約10~150 km/日であり、沈み込み帯で見られるスロー地震の移動速度と類似する。流体に駆動されたスロースリップが群発地震の発生に関与している可能性が考えられる(Kato et al., 2023)。

2024年1月1日能登半島地震M7.6の発生前の約1時間前から見られた前震活動について連続波形記録を用いた解析を行った。その結果、M3未満の前震がM7.6の震央近傍約1km以内の狭い範囲に集中して発生していたことが明らかになった。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

1. スロー地震データベースの拡充とスロー地震活動特性の解明

科研費・新学術領域研究「スロー地震学」で構築したスロー地震データベースを安定的に維持・管理するとともに、データベースへのカタログ登録を継続的に呼びかけ、この5年間での登録数は70以上も増加し、全世界におけるスロー地震研究者が活用する研究基盤としての位置づけをさらに強化した。また、スロー地震の活動特性の解明としては、内陸の火山等直下に発生する深部低周波地震の網羅的検出に基づいた活動様式の多様性(Kurihara et al., 2019)、プレート境界に発生するスロー地震活動の多様性と系統性の観点に基づく活動様式の整理(Obara, 2020)、統計モデルに基づく深部低周波微動活動特性の評価手法(Buckby et al., 2020)や、低周波地震の破壊伝播速度(Supino et al., 2020)、深部低周波微動のクラスタリング解析に基づいた中間帯域におけるスロー地震のスケール特性(Aiken and Obara, 2021)、四国におけるBackTrackBB法による深部低周波微動の新たなカタログ構築(Poiata et al., 2021)、コスタリカにおける浅部超低周波地震の検出(Baba et al.,

2021)、紀伊半島南東沖における浅部超低周波地震の発生様式や震源パラメータスケーリング則 (Takemura et al., 2022a; 2022b) などの研究成果を得た。

また、特にこの10年で拡充された浅部スロー地震カタログと地下構造、地質、室内実験研究を統合することで、南海トラフ沿いの浅部スロー地震に関する多面的レビュー論文 (Takemura et al., 2023a) が出版された。

2. 陸域広帯域地震観測等を用いた超低周波地震活動様式の解明

科研費・新学術領域研究「スロー地震学」において展開された機動的広帯域地震観測点 (四国西部6点、紀伊半島4点、東海4点) と準定常観測点 (四国西部5点、九州1点) を維持するなかで、この5年間の間に四国西部の機動的観測点3点を撤収し、残り17点の維持作業とともに、深部超低周波地震の検出手法の改良を継続的に実施してきた。また、東北地方太平洋沖及び西南日本において、沈み込みプレート境界やプレート運動を仮定して計算された理論波形をテンプレートとして、防災科研F-netの連続波形データから超低周波地震を検出し、2011年東北地方太平洋沖地震による影響やプレート間カップリングとの関係性などを明らかにした (Baba et al., 2019; 2020)。

3. 深部低周波地震の高速移動現象の解明

南海トラフ沈み込み帯のLFEの長期的な挙動に関する理解を深めるために、高密度及び高感度の地震計ネットワーク (Hi-net) によって記録された約17年間の連続波形記録に対して、マッチドフィルター法を適用した (2004年4月から2020年12月まで)。その結果、合計で約740,000個のLFEを検出した。2015年までのカタログについては、論文として出版し一般に公開した (Kato and Nakagawa 2020) (図8)。このカタログを分析することで、長さ約15 kmスケールの短い距離においても、LFEは拡散的なパターンで高速移動 (拡散係数 $\sim 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$) を起こすことを新たに発見した。また、主要なエピソード中にLFEの高速な移動が断続的に多数発生していたことも捉えられ、スロースリップには拡散プロセスによって制御される小規模な断層滑りイベントが多数含まれていると考えられる。また、長期的SSEの規模が大きいほどLFEの活動度も高くなる傾向が明瞭になり、SSEから解放される歪みエネルギーがLFEの活動度を制御していると考えられる。さらに、2011年東北地方太平洋沖地震以降、走行方向に四国全体を横断する主要なLFEエピソードが継続的に発生しており、プレート境界の状態が変化した可能性が示唆される。

科研費・新学術領域研究「スロー地震学」において、稠密な地震計アレイを四国西部のLFE発生域の直上に設置し、2019年12月下旬から2020年5月まで連続波形記録を取得した。各地震計アレイの口径は約1~2 kmで、60~100点の3成分短周期地震計 (一部の観測点では上下動成分のみ) から構成される (計340点)。LFEの大規模活動が生じた2020年2月下旬前後約1カ月間の波形データを用いて、センブランス値に基づいてLFE震源の時空間発展を推定した。LFEの震央分布は、現在のフィリピン海プレートの収束方向と平行な西北西-東南東の走向に加えて、過去の収束方向に平行な北西-南東走向の2つの構造で特徴づけられ、プレートの沈み込みにより生成された構造に規定されていると解釈される (図9)。また、プレートの傾斜方向と走向方向の両方向へのLFEの高速移動が見られるとともに、順方向・逆方向の移動が頻繁に生じていることが分かった。

4. GNSS観測による豊後水道周辺域でのSSEのモニタリング

前計画・科研費等で構築してきた、豊後水道周辺地域におけるGNSS連続観測および座標値解析を継続して実施し、SSE発生様式の把握に有用な地殻変動データを取得することができた。

四国で発生している短期的SSEのすべり分布を防災科研傾斜変化 (オフセット) データセットに基づいて推定し、2001年から2019年にかけて発生した61イベントについてすべり分布を求めた。約20年間の短期的SSEの地域による活動様式の違いや、この期間の後半で、より規模の大きいSSEが増える傾向がみられた (Hirose and Kimura, 2020)。

GNSS時系列データから短期的SSEを自動的に検出する手法を新たに開発し、東海~九州地域で1997年から2020年の期間に発生した284イベントを検出した。これには日向灘などこれまでにSSEが未検知だった地域の活動も含まれる (Okada et al., 2022)。

またGNSS観測データに基づき、2015~2016年頃および2018~2019年頃に豊後水道で発生した2つのスロースリップイベント (SSE) のすべり域を推定した。これらと深部微動活動を比較したところ、豊後水道では微動発生域へのSSEすべりの進展と微動活動により相関が示された (図2) (Hirose et al., 2023)。

5. 相模トラフ～南海トラフ～琉球海溝におけるフィリピン海プレート沈み込み境界全域の長期的SSEの系統的把握とそのモニタリング

GNSSデータによる関東地方に沈み込むフィリピン海プレート上面で発生するスロースリップイベント（SSE）の系統的検出を行い、房総半島沖で繰り返し発生するSSEよりも小規模なSSE活動が存在することを明らかにした(高木・他, 2019)。また、当初の計画とは異なるものの、近年急速に発展する海底観測網を活用したスロー地震発生場の解明のため、常時微動表面波トモグラフィーによる海底S波速度構造推定手法の開発・高度化を行なった(Takagi and Nishida, 2022)。

6. スロー地震と中・大規模地震の関係の解明

西南日本において繰り返し地震やスロー地震が空間的に相補的な分布をしていること、異なる種類のスロー地震の活動に相互作用があることを明らかにした。また、九州沖から四国にかけてのプレート境界の深部および浅部で、時間スケールが異なる2つのスロー地震の長距離移動を見出した(Uchida et al., 2020a)。スロー地震と中・大規模地震の関係について調べるために、東北地方で沈み込み帯上盤の流動構造を調べた。S-netおよび陸域観測点でのS波スプリッティングデータから火山フロントを境に前弧では、海溝平行の速いS波の振動方向がみられ、地下に冷たく動かないマントルがあることがわかった(Uchida et al., 2020b)。また、世界の地震波形のデータを用いた、繰り返し地震の抽出のためのプログラム整備を進めた。

7. 重力・電磁気観測に基づくすべりの時間発展と流体との相互作用の解明

東海地方で長期的スロースリップと同期する重力異常を世界で初めて捉え、観測結果が流体移動で説明できることを報告した。その後の観測データの蓄積により、観測された重力変化に小さな位相差があり、質量源が移動する可能性が明らかになった。微動が潮汐に対して時間遅れで発生する観測事実を、流体挙動を考慮した物理モデルで説明することで、プレート境界の摩擦特性や透水構造が制約できることを示した。石垣島では、時間分解能を絶対重力観測から大幅に改善した連続観測可能な重力計を用い、比較的規模の大きいスロースリップの発生中に、地殻上下変動では説明できない重力変化を検出することに成功した(図10)(平松, 2023)。負の重力異常が観測された事実は東海やカスカディアと共通する。能登半島で既存の弾性体理論で説明できない重力変化を捉えた。

豊後水道周辺域でNetwork-MT観測を実施し、広域深部比抵抗構造を推定することで、普通地震、スロー地震の発生域と電気の流れやすい領域(流体の存在を示唆)との関連性を明らかにした。また、四国西部域におけるNetwork-MT観測を継続し、そのデータから得られた3次元比抵抗構造に基づいて構造変化検知可能性の検討を行った。さらにスロースリップ域の空間的特性を明らかにするため、四国地方や紀伊半島域での従来のNetwork-MT法観測データをコンパイルし、紀伊半島についてはそのデータに基づいた3次元比抵抗構造推定を行った(Shi・他, 2023; Watanabe et al., 2023)。

8. スロー地震の滑り特性を規定する地下構造異常の抽出

スロー地震の滑り特性を規定する地下構造異常の抽出を目的とし、豊後水道の中心部に位置する水ノ子島で臨時地震観測を実施するとともに、スロー地震の活動様式に違いがある四国中部から東部にかけての地域で稠密地震観測を実施した。新規に取得した観測データや、深部低周波微動活動が活発な紀伊半島北東部や四国西部で取得されている稠密地震観測データを用いた解析を行い、スロー地震の滑り特性を規定する地下構造の特徴把握を行った。

水ノ子島では、平成28年から現地収録型のレコーダを使用した臨時地震観測を開始した。令和元年11月にメンテナンス作業のため豊後水道水ノ子島の地震観測点を訪れたところ、観測点が消滅していることが判明した。これは台風による高波による影響と考えられた。そのため、観測点再構築に向け、高波にも耐えうる観測点設置方法の検討を開始した。しかし、その後のコロナ禍の影響もあり、令和5年度までに観測を再開することが出来なかった。令和元年までに取得したデータからパワースペクトル密度を計算することでデータの評価を行った。その結果、水ノ子島のような岩礁でも良好な観測環境であることが分かった。さらに、波形データに豊後水道周辺で報告されている深部低周波微動が記録されていることを確認し、水ノ子島のような岩礁でも地震観測が有効であることを示した。

スロー地震の滑り特性を規定する地下構造の特徴を把握する為に、前計画期間中に紀伊半島北東部で取得された稠密地震観測データに地震波トモグラフィー解析、自然地震反射法解析を適応することで、スロー地震の滑り特性に影響を与えている可能性を示唆する流体に起因した不均質構造を示した(Kurashimo et al., 2021a)。現行計画において四国東部で取得した稠密地震観測データに地震波モ

グラフィック解析を適応することで得た地震波速度構造の特徴からも、深部低周波微動活動度との関連が示唆される、沈み込むフィリピン海プレート内の流体に起因する不均質構造が確認できる(蔵下・他, 2023)。また、スロー地震発生におけるプレート境界面近傍の構造を詳細に把握する為に、科研費・新学術領域研究「スロー地震学」によって四国西部で取得した制御震源地殻構造探査データと、それ以前に取得されていた制御震源地殻構造探査データとを統合したデータに対して反射法解析を適応した。得られた反射法反射法断面図からは、プレート境界に沿った反射帯の見え方は、プレートの沈み込む方向と沈み込みに垂直な方向の両方で変化していることが確認できる。明瞭な反射帯が確認できる領域は、Nishimura et al. (2013)で示されたS-SSEの積算滑り量が大きな領域は対応し、反射波の特性の変化と積算滑り量の変化との間には対応関係があるように見える。このことは、プレート境界近傍の構造不均質が断層のすべり挙動に影響を与えている可能性を示唆している(Kurashimo et al., 2021b)。

9. 南海トラフで浅部スロー地震の滑り特性を規定する地下構造と流体挙動の解明

南海トラフで浅部スロー地震の滑り特性を規定する地下構造を解明するため、JAMSTECが過去に南海トラフで取得したマルチチャンネル反射法地震探査(MCS)データの再解釈を行い、深海掘削(OPD/IODP)データとの統合を試みた。結果的に、四国海盆から南海トラフまで分布する3種類のタービダイト(西部タービダイト、中部タービダイト、東部タービダイト)が浅部プレート境界断層(デコルマ)の下部へ沈み込んでいることが明らかになった。南海トラフの陸側へ既に沈み込んでいると推察される3種類のタービダイトの空間分布と、海底地殻変動から推定されたプレート間固着度(カップリング)分布(Yokota et al., 2016)を比較した結果、タービダイトの岩相と形状の違いがプレート間固着度に影響することが示唆される。

室戸岬沖南海トラフの浅部スロー地震に影響する高間隙水圧と比較するため、これまで浅部スロー地震が殆ど報告されていない紀伊半島潮岬沖南海トラフに着目し、浅部デコルマ付近の間隙水圧推定を試みた。本研究のため、JAMSTECが過去に潮岬沖南海トラフで取得したマルチチャンネル反射法地震探査(MCS)データ(測線KI01)を用いた重合前深度マイグレーション(Pre-stack depth migration: PSDM)処理に着手し、P波速度構造を求めた。PSDM断面図では、砂泥互層のタービダイトを含む四国海盆堆積層が浅部デコルマに沿って沈み込んでいるイメージが得られた。透水性の高いタービダイトの沈み込みの場合、泥岩層の沈み込み(例:室戸岬沖南海トラフ)に比べて、間隙率が低下し(例:Hüpers et al., GSA special issue, 2018)、高間隙水圧の形成は困難である。これは、潮岬沖南海トラフのMCS測線KI01付近で浅部スロー地震が殆ど観測されないことと調和的である。また、経験式に基づき、P波速度を間隙率に変換し、有効応力を求める手法(Tobin and Saffer, Geology, 2009; Li et al., Geology, 2018)を駆使して、鉛直有効応力(Vertical effective stress)と過剰間隙水圧比(Overpressure ratio = [pore pressure - hydrostatic pressure] / [lithostatic pressure - hydrostatic pressure])を推定した。これら物性の最終的な推定誤差は最大20%となった。解析の結果、デコルマの物性や付加体の層厚変化に基づき、潮岬沖南海トラフ(測線KI01)のデコルマ発達域は2つの領域に区分できる: Zone 1(海溝軸(0 km)から陸側距離13 kmまで)とZone 2(海溝軸の陸側距離13 kmから30 kmまで)。潮岬沖南海トラフのZone 1の過剰間隙水圧比は室戸岬沖南海トラフより低く、潮岬沖南海トラフのデコルマに沿って沈み込んでいる、透水性の高い砂岩層を含むタービダイトに起因することが考えられる。Zone 2において過剰間隙水圧比が上昇し続けることは、沈み込んでいるタービダイトの排水機能が弱まっているか、または粘土鉱物の脱水反応による流体供給を示唆する。潮岬沖南海トラフの鉛直有効応力は室戸岬沖南海トラフより高く、潮岬沖南海トラフのデコルマがより強く固着していることを示唆する。この結果は、先行研究の南海トラフのすべり欠損分布(Noda et al., JGR, 2018)や浅部超低周波地震発生(Takemura et al., GRL, 2019)とも調和的である。

南海トラフで浅部スロー地震を引き起こす「浅部プレート境界断層」(=デコルマ)の断層強度やすべり挙動を評価するために、比較対象となる日本海溝の反射法地震探査データを解析し、海底下のP波速度構造と間隙水圧を求め、有効応力比(Effective stress ratio = calculated vertical effective stress ÷ expected vertical effective stress under normal consolidation conditions)を推定した(Jamali Hondori and Park, Scientific Reports, 2022)。有効応力比が低いほど断層強度は弱く、滑りやすい。過剰間隙水圧の状態が考えられる四国室戸岬沖南海トラフ(Tobin and Saffer, Geology, 2009)と宮城沖日本海溝(本研究)デコルマの有効応力比を比較した場合、海溝軸に近いZone Iにおいて、南海トラフの有効応力比が日本海溝より著しく低く、南海トラフのデコルマがもっと滑りやす

い、浅部スロー地震発生の容易な状態が考えられる。沈み込む太平洋プレート上面のグラーベン構造の発達域にあたる、日本海溝のZone Iには付加体内部の複数のスラスト断層がグラーベン構造内部まで発達し、スラスト断層の優れた排水作用が相対的に高い有効応力比をもたらした可能性が考えられる。一方、南海トラフのZone Iでは、透水性の低い泥岩層が沈み込み、排水作用が劣ることで、低い有効応力比が維持されていると考えられる。

JAMSTECが過去に南海トラフで取得した反射法探査データを深海掘削データと組み合わせ、海溝で沈み込む深海堆積物を分析した。その結果、中新世に堆積した3つのタービダイトがプレート境界に沿って深部へ沈み込んでいることを発見した(図7)。砂層に富むタービダイトが、スロー地震活動の静穏域(プレート間固着の強い領域とほぼ一致する)に集中して分布している。透水性の優れたタービダイトがプレート境界断層の間隙水圧を低下させ、断層面の剪断強度が大きくなることで、スロー地震活動が静穏化した可能性が考えられる(Park and Jamali Hondori, Scientific Reports, 2023)。

なお、これらの研究成果は、本課題の5か年計画と概ね一致している。

10. スロー地震と地震発生との関連性

深部低周波地震活動の発生タイミングを基準にして、南海トラフ沿いの陸域GNSSデータを重合して短期的SSE発生時の滑り量分布に関する解析を進めた(Kano et al. 2019; Kano and Kato 2020)。深さ約35kmのSSE発生域に加えて、四国西部や四国東部、東海地域においてはわずかな滑りが固着域においても起きていたことを見出した(図11)。固着域の中で確認されたスロースリップという点が特徴的であり、短期的SSEによる固着域への応力载荷過程を理解する上で重要な成果が得られた。また、近年の観測・理論・実験的研究の成果に基づいて大地震発生に至るプロセスの多様性・複雑性を概観し、大地震の発生過程に関する統合的なモデルを提案した(図12)(Kato and Ben-Zion, 2021)。さらに、2013年2月に発生した栃木県北部地震M6.3の前震活動を解析することで、複数の時間スケールにおいて前震活動の段階的な活発化が起きるとともに、約1時間前から前震活動域が拡大したことを明らかにした。時空間スケールは異なるが、2011年東北地方太平洋沖地震の発生前に見られた前震活動域の拡大の様子と類似性が見られ、スロースリップが本震の発生を促した可能性が考えられる。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本研究課題と関連の深い建議の項目(2(2)ア プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測)の目的達成に貢献するために、スロー地震をモニタリングし、発生状況の把握を行っている。また、解析手法の開発も進め、既存観測データを用いた繰り返し地震やスロー地震の活動様式、スロー地震発生域の構造・流体挙動の把握、スロー地震と地震発生との関係に関する研究を進めている。

スロー地震活動は沈み込むプレート境界におけるすべりを反映すると考えられるため、その活動の詳細な描像を解明することは、プレート間すべりを把握しその物理的メカニズムを理解する上で重要である。特に、浅部スロー地震活動が多様であることについては、巨大地震発生域に隣接した浅部プレート境界のせん断応力あるいは流体の時空間変化に対応していると考えられ、巨大地震発生域周辺の不均質性がスロー地震活動によって明らかにされたことは、スロー地震と巨大地震との関連性を議論する上で重要である。今後も、スロー地震モニタリングを継続的かつ詳細に実施することにより、巨大地震発生の切迫度評価に向けた研究に貢献するものと期待される。

地殻変動観測により得られた成果は、各地域におけるプレート間のひずみ収支の把握に必要な不可欠な情報を提供するものである。沈み込みプレート境界面においてSSE発生領域と巨大地震発生領域は大局的には異なると考えられるが、プレート間地震が発生した際にその破壊が深部微動領域などへ伝播するかどうかを決定づける重要な要素の1つとしてひずみ収支が挙げられる。言い換えると、ひずみ収支の把握は巨大地震の規模予測に寄与する。また非地震性すべりの伝播に関する地域特性は巨大地震のひずみ蓄積過程に直接的に影響すると考えられるため、地震の短・中期的な予測精度向上に鍵となる。

GNSSデータによるスロー地震の発生様式及び常時微動によるスロー地震発生場の解明により、スロー地震発生メカニズムの理解に貢献すると期待される。また、スロー地震発生様式とS波速度構造不均質の詳細な理解は、これらに基づくプレート境界固着域及び大地震すべり域分布の把握につながると期待される。

スロースリップや群発地震が発生する地殻流体の豊富な複数の地域において、継続して絶対・相対

重力観測を実施することで、これまでの理論では説明できないような重力変化が生じることが分かってきた。重力の時間変化とスロースリップを含む地震活動との対応を明らかにし、その対応を、流体移動を記述する物理モデルで説明することで、他のサブテーマから明らかにされているスロースリップの多様性に、流体移動がどのように関わっているのか解明することが期待できる。

四国西部や紀伊半島地域において、深部広域構造を決定する上で有利なNetwork-MT観測データをコンパイルし、四国西部域や紀伊半島全域で3次元比抵抗構造を決定した。その結果、中部地殻内の地震発生域が電気の流れにくい高比抵抗域に分布していて、その周辺や下部に流体の存在を示すと思われる低比抵抗域が分布していることが明らかとなった。ただ、四国西部地下の長期的スロースリップ発生域や紀伊半島の深部低周波微動発生域には低比抵抗域は認められず、流体は存在しないか、存在したとしても孤立して存在する可能性が示唆された。今後、さらなる感度検証と、長期的スロースリップが発生したときの構造の時間変化の検知が待たれる。

南海トラフと日本海溝のデコルマに沿った有効応力比を比較し、浅部スロー地震発生について考察したことで、「関連の深い建議の項目」の目的達成に貢献している。今後、浅部スロー地震を引き起こすデコルマの物性解析を継続することで、「災害の軽減に貢献する」とともに、巨大地震とスロー地震との関連性を解明する研究への貢献が期待できる。また、南海トラフのスロー地震活動について、沈み込む深海堆積物の影響を明らかにしたのは、本研究が初めてである。プレート境界断層の間隙水圧の変動に対する深海堆積物の影響を定量化することは、スロー地震の活動様式や発生原因を解明する上で重要である。今後、南海トラフ沿いのプレート境界断層の間隙水圧を高精度・広域的に調査することで、巨大地震に影響するスロー地震に関する理解が進展し、巨大地震発生予測モデルの高度化への貢献が期待される。

このような研究を継続して実施し、スロー地震と同じプレート境界で発生する大地震発生可能性の相対的な変化を評価する研究に貢献し続けることで災害の軽減に貢献する。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Hirose, H., T. Matsushima, T. Tabei, T. Nishimura, 2023, Long-term slow slip events with and without tremor activation in the Bungo Channel and Hyuganada, southwest Japan, Long-term slow slip events with and without tremor activation in the Bungo Channel and Hyuganada, southwest Japan, Earth Planets Space, 77, 75, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01833-4>, 査読有, 謝辞有

廣瀬仁, 2023, statsmodelsを用いたGNSS座標時系列データのスムージング, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 27, 1-8, 査読無, 謝辞無

J.-O. Park and Jamali Hondori, E., 2023, Link between the Nankai underthrust turbidites and shallow slow earthquakes, Scientific

Reports, 13, 10333, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37474-6>, 査読有, 謝辞有

Nishida, K., R. Takagi, and A. Takeo, 2024, Ambient noise multimode surface wave tomography, Prog Earth Planet Sci., 11, 4, <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00605-8>, 査読有, 謝辞無

Takemura, S., Y. Hamada, H. Okuda, Y. Okada, K. Okubo, T. Akuhara, A. Noda and T.

Tonegawa, 2023a, A review of shallow slow earthquakes along the Nankai Trough, Earth Planets Space, 75, 164, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01920-6>, 査読有, 謝辞無

Takemura, S., K. Emoto, and L. Yamaya, 2023b, High-frequency S and S-coda waves at ocean-bottom seismometers, Earth Planets Space, 75, 20, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01778-8>, 査読有, 謝辞無

Wang QY, Frank WB, Abercrombie RE, Obara K and Kato A, 2023, What makes low-frequency earthquakes low frequency, Science Advances, 9, 32, doi: 10.1126/sciadv.adh3688, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

比嘉友香・廣瀬仁・木村武志, 2023, 比嘉友香・廣瀬仁・木村武志, 日本地球惑星科学連合2023大会, SCG55-P02

Higa T., H. Hirose, T. Kimura, 2023, Development of a machine learning model to detect short-

term SSEs from tilt records, International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023, P56
Hirose H., T. Matsushima, T. Tabei, T. Nishimura, 2023, Long-term slow slip events with and without tremor activation in the Bungo Channel and Hyuganada, 日本地球惑星科学連合2023大会, SCG45-04
廣瀬仁・加藤愛太郎・木村武志, 2023, 2011年東北地方太平洋沖地震直前の傾斜変動再訪: スタッキングによる検証, 日本地震学会2023年度秋季大会, S08-15
Kato A, S. Nakagawa K. Fujita, T. Ichimura, and H. Nagao, 2023, A comprehensive earthquake catalog for the 2020 seismic swarm in the central Japan, 日本地球惑星科学連合2023大会, SCG45-15
蔵下英司・飯高隆・津村 紀子, 2023, 四国東部地域における稠密地震観測, 日本地震学会2023年度秋季大会, S02-P12
根岸幹・小原一成・武村俊介・悪原岳・山下裕亮・杉岡裕子・篠原雅尚, 2023, Source-Scanning Algorithmを共通的に用いた浅部微動・浅部VLFEの時空間発展の推定, 日本地震学会2023年度秋季大会, S09-30
Shi Yujie・上嶋誠・村上英記・塩崎一郎・山口覚・白井嘉哉, 2023, 四国中国地方ネットワークMT法観測データ解析, 地震研究所共同利用研究集会「地球電磁気学的手法による地球内部構造研究と室内実験結果の総合解釈」
高木涼太・西田究, 2023, S-netで観測された常時微動表面波の位相速度の方位依存性, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS07-P08
高木涼太・東龍介・日野亮太・西田究・篠原 雅尚, 2023, 常時微動を用いた日本海溝・千島海溝会合部におけるS波速度構造推定, 日本地震学会2023年度秋季大会, S06P-05
Takemura S, 2023, Slow earthquakes around shallower extension of megathrust zone in Nankai, AGU fall meeting 2023, TA51-09 (invited talk)
武村俊介・濱田洋平・奥田花也・岡田悠太郎・大久保蔵馬・悪原岳・野田朱美・利根川貴志, 2023, 南海トラフ浅部スロー地震の理解へ向けた多面的レビュー, 日本地震学会2023年度秋季大会, S09-P01
竹尾明子・宮川幸治・西本太郎・安藤美和子・佐伯綾香・田中伸一・大塚宏徳・藤田親亮・浜本未希・柴田律也・加藤翔太・加藤慎也・増田滉己・加納将行・武村俊介・小原一成, 2023, 深部超低周波地震を対象とした西南日本における広帯域地震観測, 日本地震学会2023年度秋季大会, S02-P05
Tanaka Y., 2023, Terrestrial and satellite gravity observations of earthquake-related phenomena - an overview, 1st Workshop on Earthquake Early Detection using Superconducting Gravimetry
Tanaka Y., Yuichi Hiramatsu, Hiromu Sakaue, Akio Kobayashi and Tadahiro
Tsuyuki, 2023, Gravity anomaly in the slow slip area along the southern Ryukyu subduction zone captured by continuous parallel observation using two gPhoneX gravimeters, AGU fall meeting 2023, T04-04
于凡・Jamali Hondori, E.・朴 進午, 2023, Application of Convolutional Neural Networks for Seismic Velocity Model Building Using “Realistic” Synthetic Data, 日本地震学会2023年度秋季大会, S21-03
Uchida, N, R. Suzuki, W. Zhu, G. C Beroza, T. Nakayama, G. Toyokuni, R. Takagi, R. Azuma, K. Yoshida, A. Hasegawa, 2023, Offshore microseismicity in NE Japan constrained by S-net and PhaseNet: insights on the forearc circulation of fluids and interplate coupling, AGU fall meeting 2023, S43A-03
Watanabe, A., M. Uyeshima, S. Yamaguchi, Y. Usui, H. Murakami, T. OGAWA, N. Oshiman, R. Yoshimura, K. Aizawa, I. Shiozaki, T. Kasaya, 2023, The 3-D electrical conductivity structure modelling of the Network-MT observation dataset in the Kii Peninsula, southwestern Japan, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2023年秋季年会, R003-08
渡部熙・上嶋誠・山口覚・白井嘉哉・村上英記・小河勉・大志万直人・吉村令慧・相澤広記・塩崎一郎・笠谷貴史, 2023, 紀伊半島におけるNetwork-MT法データを用いた広域深部電気比抵抗構造モデリングの現状と解釈について, 地震研究所共同利用研究集会「地球電磁気学的手法による地球内部構造研究と室内実験結果の総合解釈」

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

項目：地震；地震：広帯域地震観測

概要：・四国西部、紀伊半島、東海の14点の機動的広帯域地震観測点で観測を実施した。・スロー地震データベースを整備した。

既存データベースとの関係：スロー地震データベース

<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~sloweq/>

調査・観測地域：

調査・観測期間：

公開状況：

項目：地震：地殻変動：GNSS観測

概要：四国、九州の独自GNSS観測点約30点での連続観測を実施した。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：四国、九州

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（協議のうえ共同研究として提供可）

項目：地震：地殻変動：重力測定

概要：御前崎、菊川、豊橋、宮崎、足摺岬、能登、石垣島で重力測定を実施した。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：宮崎、東海、四国西部、石垣島、能登

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開中（論文・データジャーナル・報告書等）

<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0797-5>

項目：地震：MT・AMT観測

概要：四国西部と九州東部においてNetwork-MT観測を実施した。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：四国西部、九州東部

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

(11) 次期計画における課題名：

南海トラフ域を中心したプレート境界すべりの時空間発展のモデリング・予測に関する研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

蔵下英司（東京大学地震研究所）、小原一成（東京大学地震研究所）、竹尾明子（東京大学地震研究所）、加藤愛太郎（東京大学地震研究所）、上嶋誠（東京大学地震研究所）、小河勉（東京大学地震研究所）、飯高隆（東京大学大学院情報学環/東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

加納将行（東北大学）、内田直希（東北大学）、高木涼太（東北大学）、井出哲（東京大学大学院理学系研究科）、田中愛幸（東京大学大学院理学系研究科）、朴進午（東京大学大気海洋研究所）、中東和夫（東京海洋大学）、津村紀子（千葉大学）、麻生尚文（東京工業大学）、廣瀬仁（神戸大学）、松島健（九州大学）、田部井隆雄（高知大学）、西村卓也（京都大学防災研究所）、松澤孝紀（防災科学技術研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：蔵下英司

所属：東京大学地震研究所

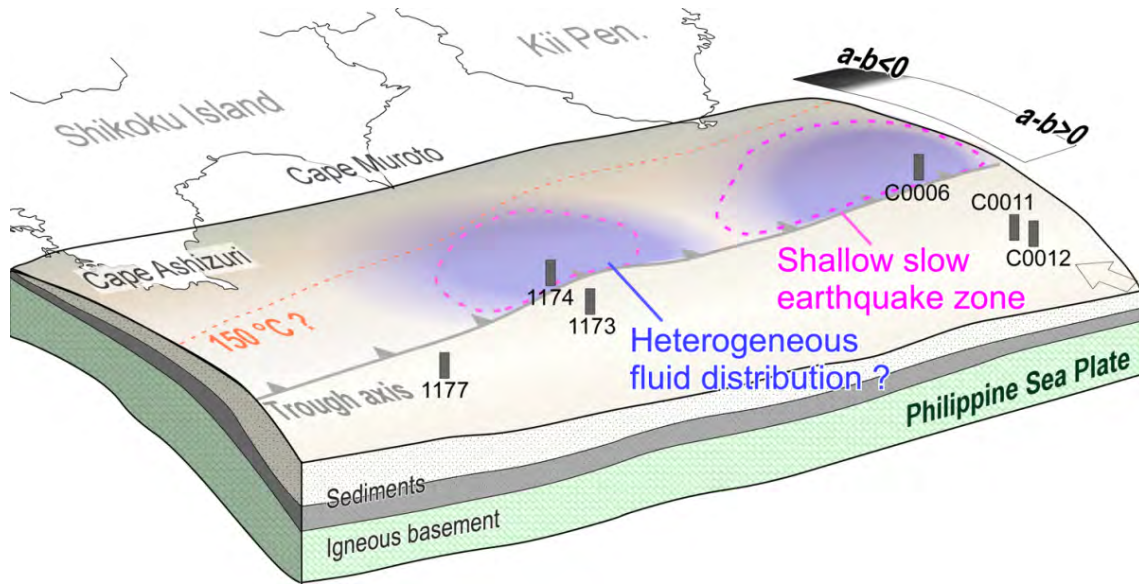


図1: 南海トラフ沿いの浅部スロー地震発生域の概略図。

青色が濃い領域ではプレート境界断層周辺で流体圧が高いと考えられ、浅部スロー地震の活動域とよく一致している。図中の灰色の柱はコアサンプルが得られているボーリングの位置、矢印はフィリピン海プレートの沈み込み方向を示す。

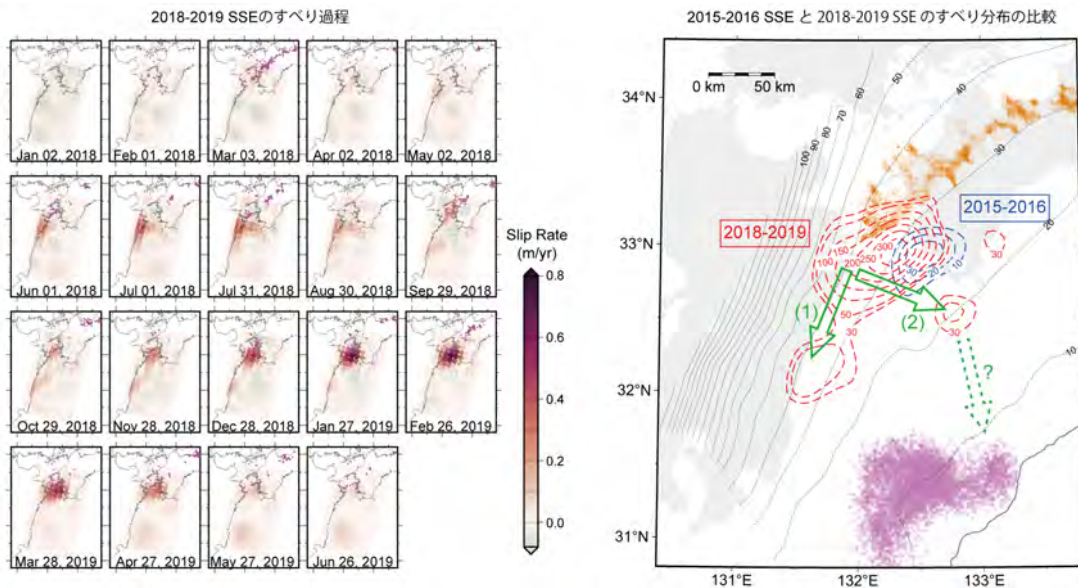


図2: (左) GNSSデータから推定した2018-2019豊後水道・日向灘SSEのすべりの時間発展。各フレームの下に表示した日付におけるプレート境界面上のすべり速度を30日ごとにカースケールで示す。紫色の点は当該時間窓に発生した微動の震央(防災科研の微動カタログによる)。(右) 2015-2016 SSE (青コンター) および2018-2019 SSE (赤コンター) のすべり分布の比較。橙点は深部微動の震央(防災科研カタログ)、紫丸印は浅部微動の震央(Yamashita et al., 2015, 2021)。緑矢印(実線)は2018-2019 SSE期間中に見られたすべり伝播方向、緑矢印(点線)は、存在するかも知れない、より浅部へのすべり伝播経路。

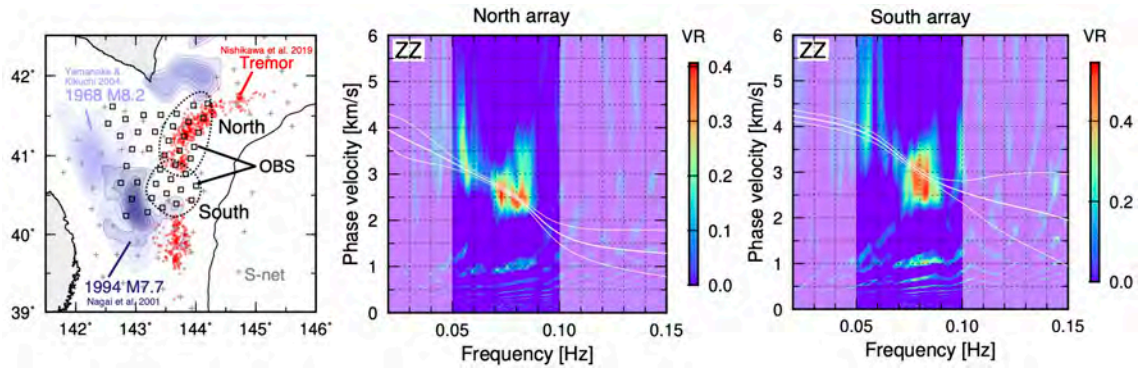


図3: 日本海溝北部における稠密地震観測によるレイリー波位相速度分散曲線。観測網南部の微動空白域では北部の微動発生域に比べて20%程度速度が速い。

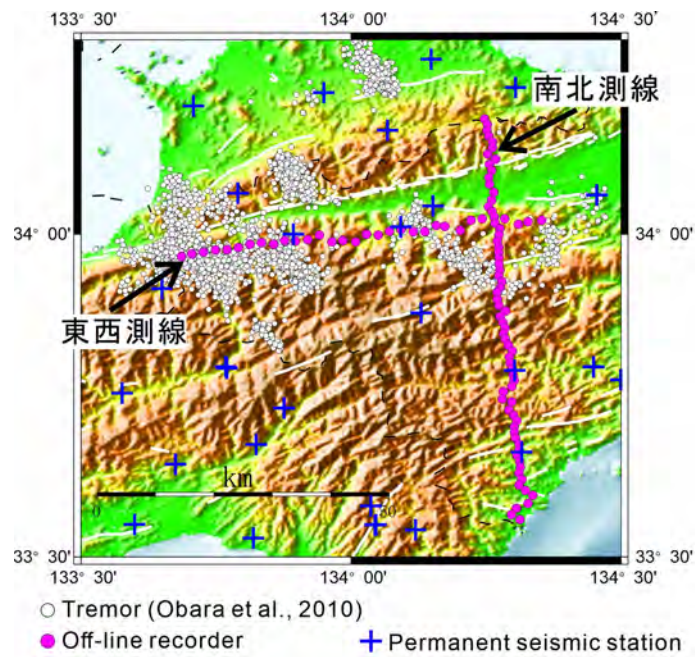


図4: 臨時地震観測点配置図。

紫色丸印が臨時観測点、+が定常観測点、白色丸印は、Obata et al. (2010)で示された深部低周波微動の震央を示す。

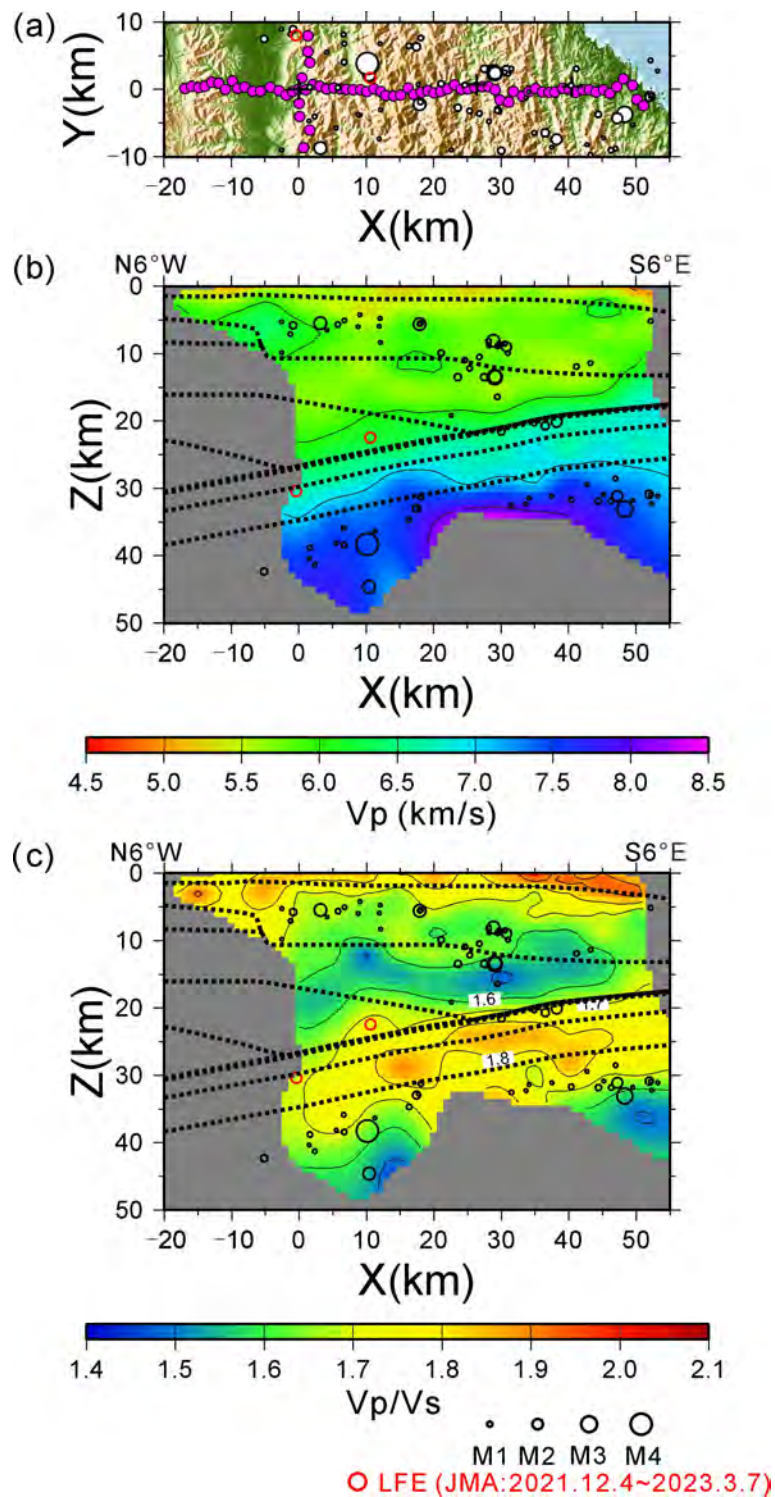


図5: トモグラフィック解析により得られた南北測線下の地震波速度構造と震源分布。波線は、蔵下・他(2007)によって示された南北測線下の速度境界面を示す。(a)観測点配置と震央分布図。紫色丸印が臨時観測点、+が定常観測点。白色丸印は再決定した震央分布を示し、その大きさがマグニチュードを表す。赤色丸印は、観測期間中の気象庁一元化処理による低周波地震の震源を示す。(b) P波速度構造。(c) V_p/V_s 構造。

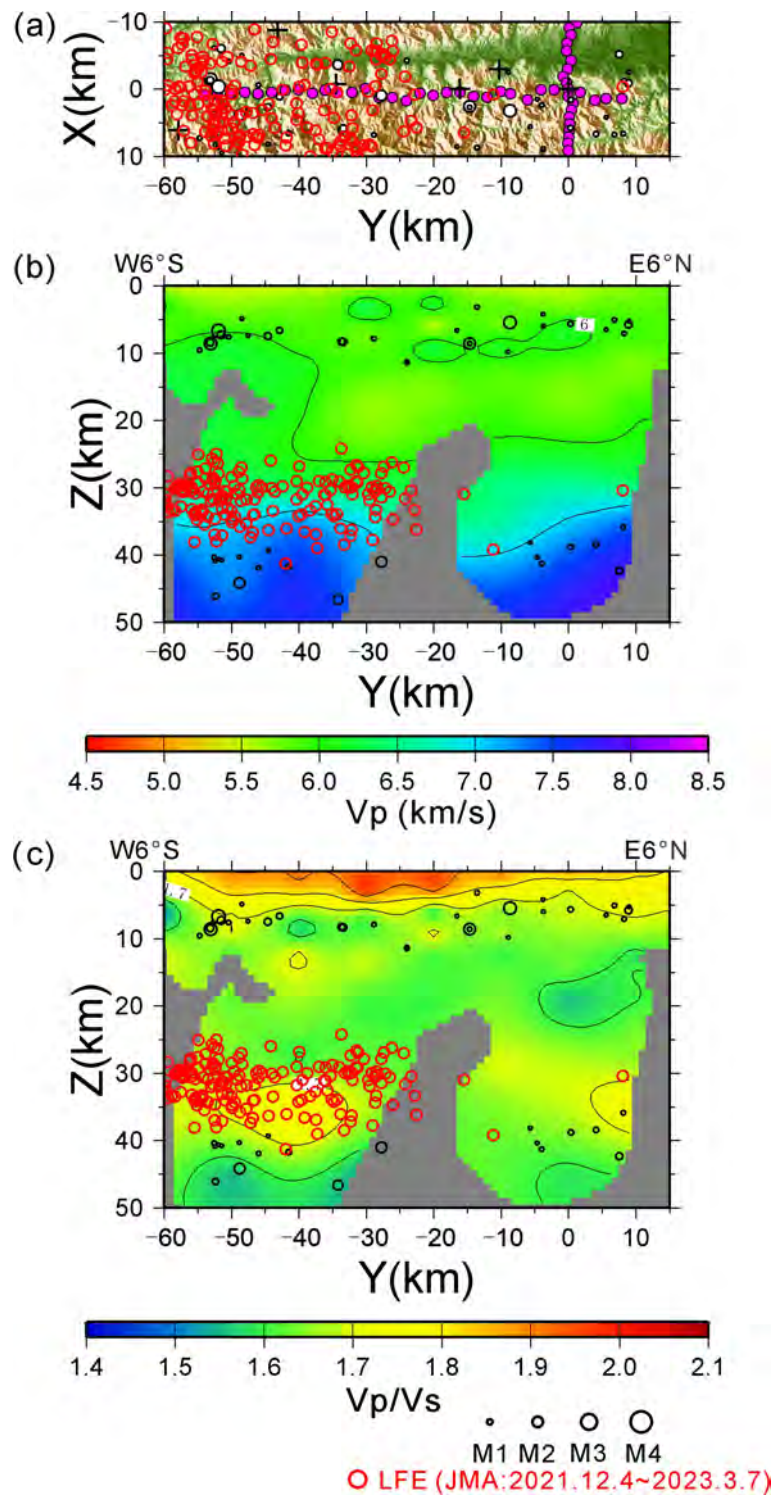


図6： トモグラフィー解析により得られた東西測線下の地震波速度構造と震源分布。
 (a)観測点配置と震央分布図。紫色丸印が臨時観測点、+が定常観測点。白色丸印は再決定した震央分布を示し、その大きさがマグニチュードを表す。赤色丸印は、観測期間中の気象庁一元化処理による低周波地震の震源を示す。(b) P波速度構造。(c) V_p/V_s 構造。

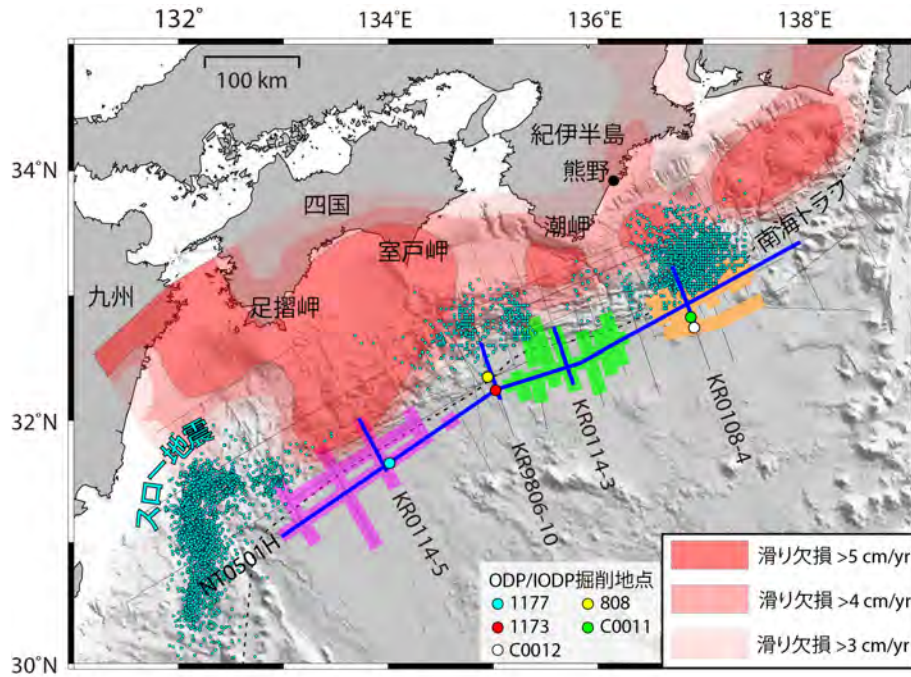


図7：南海トラフ沿いの反射法探査測線とタービダイトの分布。
 反射法探査測線（灰色）上で確認された3つのタービダイト（西側、中央、東側）をそれぞれ紫、緑、オレンジ色で示す。シアン丸は浅部スロー地震（Kano et al., 2018）を示す。プレート間の固着を表す滑り欠損（Yokota et al., 2016）を赤のグラデーションで示す。黒点線は南海トラフの軸を表す。

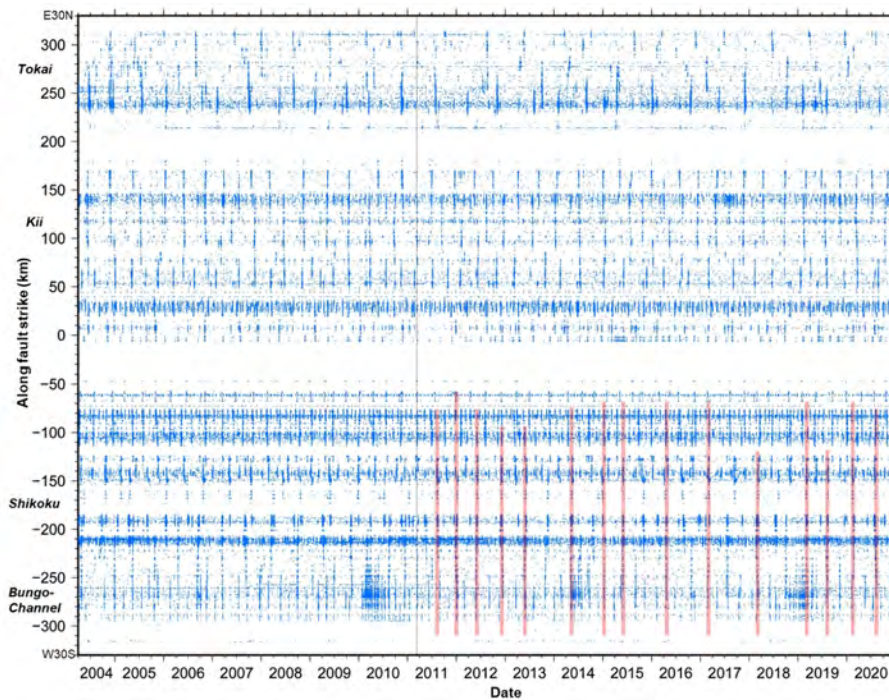


図8：マッチドフィルター法により構築したLFEカタログの時空間分布図（after Kato and Nakagawa 2020）。
 赤色の陰影バーは豊後水道から四国東部までの複数セグメント間の連鎖的な活動を示す。

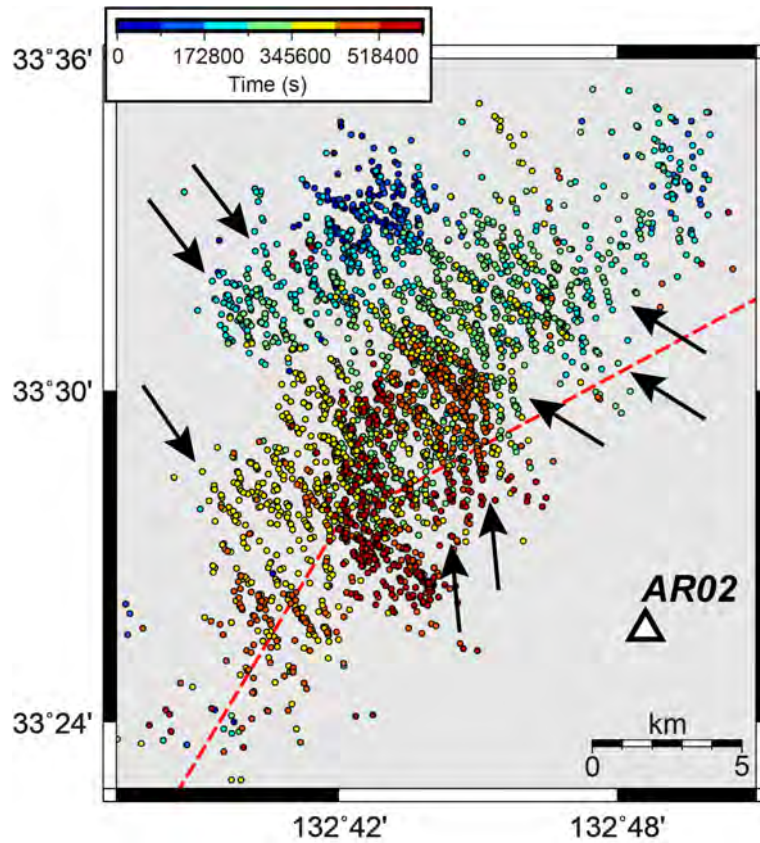


図9：四国西部における稠密地震計アレイ解析によるLFEの震央分布図。色はLFEエピソードの活動開始時刻からの経過時間を表す。三角形は地震計アレイの位置を示す。

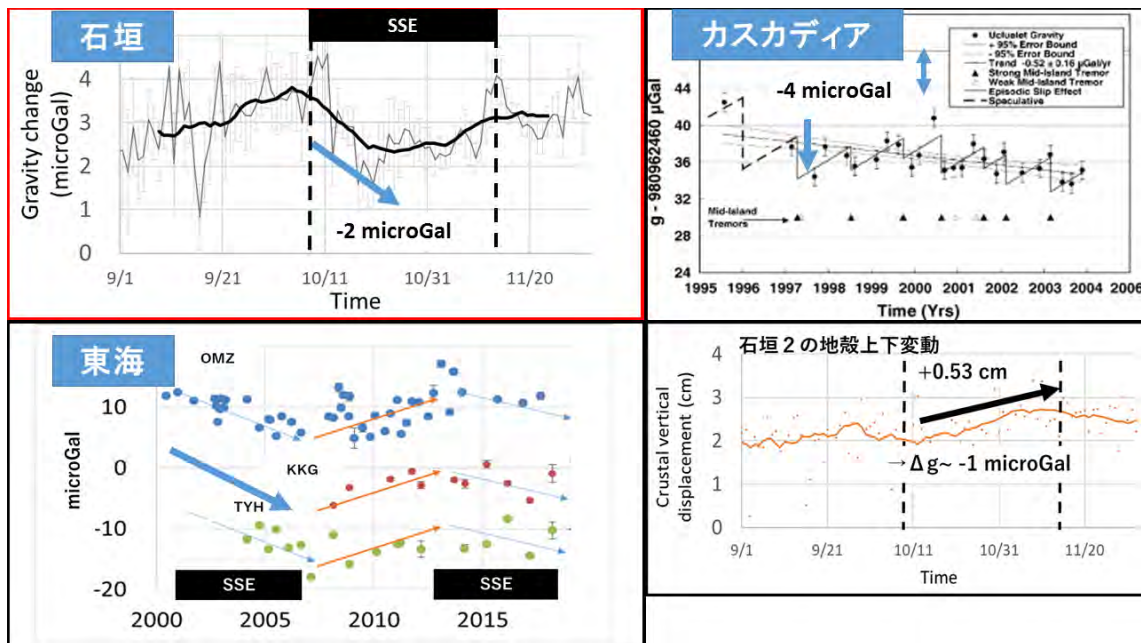


図10: 石垣島で観測されたスロースリップ中の重力変化。スロースリップの開始と同時に重力が約2microGal減少する（左上）。東海（左下）やカスカディア（右上）の観測結果と異なり連続的な重力データを取得した。GNSSによる地殻上下変動の寄与は約-1 microGalで、スロースリップ期間全体にわたり一様な速度で生じるが（右下）、重力変化は期間の前半に起きている。

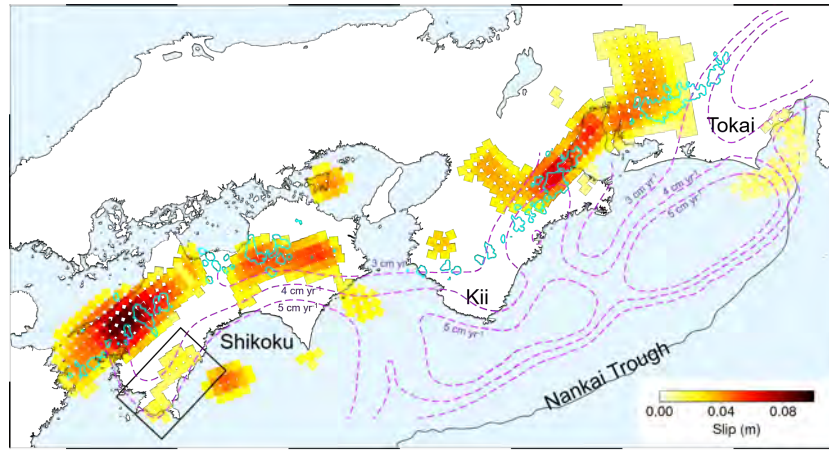


図11：短期的スロースリップ発生時の累積滑り量分布図（Kano and Kato 2020）。水色の線はLFE密度（Kato and Nakagawa 2020）の等高線を、紫色の線は滑り欠損速度(Yokota et al. 2016)の等高線を示す。

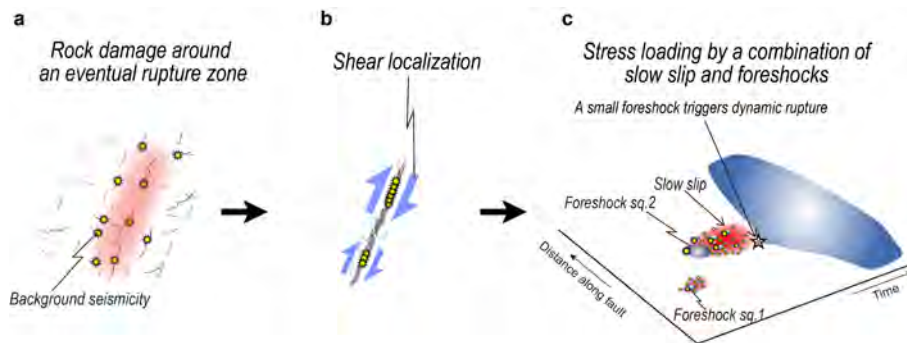


図12: 地震の発生過程を示すモデル。
 (a) 地下の広域変形が、(b) 震源域周辺へと徐々に集中（局在）化し、(c) 大地震の発生直前に前震活動やスロースリップが同時に発生することで断層面近傍に変形の集中（局在）化が進み大地震の発生が促進される。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

経験的アプローチによる大地震の確率予測のパフォーマンス調査

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

真にプロスペクティブな予測実験であるCSEPへの参加を継続するとともに、既存手法の改良・新規手法の提案を目指して、地震活動に関するものをはじめ様々な先行現象のレトロスペクティブな性能評価を独自に押し進める。同程度の先行期間をもつ現象については、それらの発現が関連していないかを調べる。先行性が有意であることが分かっている前震については、現象と地震発生がどのように関連しているのかを仮説し検証する。また、将来的な実用化を意識して、時々刻々更新されるデータに対して、確率予測を柔軟に準リアルタイムで取得するシステムを試作する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

A. CSEPに基く地震活動予測検証実験は、毎年度継続的に実施する。また、CSEPに新たなモデルとして提出可能なアルゴリズムをもつ地震活動の予測手法の同定を平成31年度に行い、平成32年度にモデルコードのプロトタイプを書き、平成33年度にレトロスペクティブな成績評価を行って、平成34-35年度のCSEP実験に提出する。

B. 更新データを用いた準リアルタイム予測システムについては、平成31年度にシステムの全体設計を行い、平成32年度に、最も簡単な予測アルゴリズムによる予測結果のデータベースを準リアルタイムに自動更新するシステムを開発する。平成33年度に、データベースから用途に応じて様々なタイプの予報を柔軟に取り出すシステムを作成する。平成34-35年においては、作成された予報について実用的観点から検討する。

C. 前震の事前識別法に関しては、平成31年度から既存の前震に基く予測手法について、ETAS的クラ

スタリングによる寄与がどの程度であるかの評価を開始し、平成33年度までにまとめる。また、手法の改良・新たな手法については、5年間を通じて手法ごとに、アルゴリズムの作成と成績評価を繰り返す。また、ETAS的クラスタリングについては、5年間を通じて、統計モデルの改良とともに物理的モデルとの整合性を検討する。

D. 年スケールの先行現象であるといわれている地震活動の変化については、b値変化・静穏化・イータ値についての有意性の評価を平成32年度までに完了し、平成33年からは、対象とする地震のM、地域を広げつつ、それらの活動変化指標の相関を評価する。また、M8法、既存の手法との相関も評価する。また、5年間を通じて、様々な活動指標を総合的に評価する手法に対して機械学習等での最適化を試みる。また、RTM等、先行性の検証がなされていないものについて評価を行う。

E. 潮汐・地震波等の過渡入力に対する応答性については、平成33年度までに網羅的検出のアルゴリズムを作成し、平成34-35年度に、地震発生に対する先行性を評価する。

F. 地震活動以外で統計的に有意な先行性が示されている、週スケールの先行時間をULF磁気異常と、GNSS記録の変動について、平成31-32年に両者の相関を調べ、また、5年間を通じて個々の異常を精査する。さらに、他の課題から提案された先行現象候補については、連携して成績評価を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

前計画において、1984年から2011年3月11日までの6つのM7.6以上の日本の大地震全てについて、日本全域の地震マグニチュードの natural time 系列 (e.g., Varotsos+, 2011) の秩序パラメタ変動度の解析から、これら6つの地震の発生時期と場所を数ヶ月、数百km程度に絞り込めた可能性を示した (Sarlis+, 2013, 2015)。その後、さらなる時間の絞り込みに使えそうな現象として、マグニチュード natural time 系列のエントロピーと、時間反転した系列でのその差のゆらぎ、および長距離相関のある系へのエントロピーの拡張である、非加法的な Tsallis エントロピー (e.g., Tsallis, 2009) のゆらぎに、 t の $1/3$ 乗で増える LSW 相転移 (Lifshitz and Slyozov, 1961; Wagner, 1961) と思われる挙動を見出した。2011年3月11日14時46分のM9東北沖地震については、2010年12月22日の父島近海地震 (M7.8, 深さ60 km) や、2011年3月9日11時45分のM7.3前震を契機としてこれらの現象が現れたように見える (Varotsos+, 2023b)。また、2017年6月14日のチアパス地震 (M8.2)、2017年9月19日のメキシコのフラット・スラブでおきたM7.1地震、2019年7月6日のリッジレスト地震 (M7.1) についても、地震発生時刻が近付くにつれて、地震発生時刻を数時間に絞り込むことに役立ちそうな同様の現象が確認できた (Varotsos+, 2023a)。

いっぽうで、大地震の根本的な可予測性を否定する論拠として、次におきる地震のマグニチュードについては、過去の履歴に依存しない固定した確率分布 (GR則など) に従っているという考えがある。カタログにはマグニチュードの相関が見られることがあるのだが、これは初期余震の観測で小さい地震が見逃がされることによる虚像とも考えられ、互角の論争が続いていることを昨年度メタ解析により報告した (Petrillo and Zhuang, 2022)。今年度は、機械学習ピックを用いて作成された Amatrice-Norcia の1年間の高分解能カタログ (Tan+, 2021) に対して、ETAS トリガリングによる各イベント間の親子関係を推定した上で (先行研究は、一定の時空間範囲に入るものを全て比較しており、独立地震も含まれていた)、トリガされたイベントのマグニチュードがトリガしたイベントのマグニチュードと相関するのかを調べた。マグニチュード相関がない場合 (帰無仮説) の挙動は、普通の OFC モデル (Olami+, 1992) に遅れ応力伝播を可能にする延性層をつけて、GRに加えてリアルな感じの余震を産み出せるようにした2層 OFC モデル (Petrillo+, 2020) による合成カタログから作成した。実カタログでも $M > 3$ では相関は見られなかったが、 $M < 3$ では、トリガするイベントとされるイベントのマグニチュードが近いという相関が見られた。実カタログの M_c が3程度であることはマグニチュード閾値を変えて作った CDF の比較から明かであり、この実カタログでみられた相関は小さな地震の取り漏らしによる虚像と考えられる (Petrillo and Zhuang, 2023)。

時間不変のGR則に象徴されるような不可予測性は、破壊開始した地震破壊がマルチスケールで複雑な強度と応力の空間分布のなかでどこまで成長を続けられるかが実質的に偶然で決まる (e.g., Ide and Aochi, 2005) せいであると考えられる。いっぽうで、破壊深さの300℃限界 (これ以深では定常クリープするので、滑り遅れ・応力蓄積がない) のような決定論的な破壊停止要因もたしかにあるが、脆性層で有意な非地震性滑りがない内陸断地震のストライク方向の破壊が断層幾何の巨視的変化部位でないところで停止した2016年鳥取県中部地震 (Mw6.2) のような場合には、そこで停止したことに決定論的な要因はなさそうに思われる。しかし、この事例について、非常に多数の余震の良く決まった

断層面解を用いた高分解能の応力インバージョンを行って、破壊域のstrike両端のすぐ外側では地震前には差応力がほぼゼロ(cf. 滑り域内部は20 MPa以上)だったことがロバストに推定できた。同地域の2000年鳥取県西部地震に関しても同様のことが見受けられる。これらの位置には低速度異常もあり(Iio+, 2021)、これらのケースは、低応力バリアによって発生前から地震がここで停止することが決まっていたと解釈できる(Iio+, 2023)。

他方、2023年モロッコのハイ・アトラス地方の地震(Mw6.8)に対して行った遠地P波によるポテンシー密度テンソル逆解析では、10 kmほどに成長した破壊が直径6 kmほどの高強度バリアにあたってそこへの侵入を拒まれ、1秒かけて回り込んでから結局そのバリアを破壊したという様子がロバストに推定された。この地震に関して近地強震計の記録はないが、このようなギクシャクした破壊は強い短周期地震動を生成するから、深くて(20-30 km)地表まで破壊が到達しなかったわりに大きな被害を出した理由の一つと考えられる(Yagi+, 2024)。

地震観測網の手薄なイタリアのファノ沖合30 kmのアドリア海浅部で2022年11月9日におきた2つのM5+の地震の余震活動について、内陸の2点の地震計だけを使って、最近開発された新しいマスターイベント法(Grigoli+, 2021)で震源再決定を行った。誤差1 kmで良好な位置決定のできた余震分布から本震の断層dip(30-40度)がしっかり押さえられた。これは本震のメカニズム解や、反射法探査の結果と整合的であった。この手法は、地震観測網が手薄な地域での津波リスク評価につながる(An+, 2023JpGU)。また、南海トラフの地震活動監視と津波早期警報に威力を発揮すると期待されているDONETの地震検知能力を、2015年10月1日から2019年4月1日までのデータで評価した。ネットワーク内ではM1以上なら、ネットワークの外でも周辺数十キロではM2以上ならほぼ取り漏らしはない(e.g., Nanjo+, 2023SSJ, 2023AGU)。

歴史記録から過去の地震の情報を得るときには、史料そのものの信頼性に注意する必要がある。寛治6年(1092年)八月三日の越後の大波について、これに関する記述のある26件の史料を精査した。これが地震に関連した事象であることを示唆する史料は、いずれも江戸時代以降の成立であり、また、地震動による具体的な被害を記述した史料もない。いっぽう、八月三ないし四日に日本の広い範囲に洪水や高潮を伴う大規模な気象災害があったことは、同時代および江戸時代以前に成立した史料に記述されている。よって、これは気象災害であって地震はなかった可能性が高い(石辺+, 2024)。また、安政三年十月七日(1856年11月4日)の関東の地震については、立川断層帯付近を震央とし、所沢・東村山(久米川)・立川に震度5弱ないし5強に相当する大被害を引き起こした地震と考えられてきたが、多摩・入間地域の同時代史料多数を精査したところ、この地域に大きな被害があったという記述はなかった。史料で強い揺れの記述があるのは、むしろ東京都中心部より北東側であり、震源が立川断層帯であったということは非常に考えにくい(原田+, 2024)。

また、あまり注目されていない地震関連の災害誘因として、地震活動に伴って地中から火焰が噴出したという記述を、1855年安政江戸地震以前の歴史地震史料から多数見つけた(図1)。これらはいずれも地下に天然ガスを胚胎し、表面ガス兆候が見られる地域にある。噴出火焰から火災に至ったと判断できる証言も複数見つかった。また、地震直前という例も二つ(1703年元禄地震@小田原、1947年善光寺地震@善光寺界限)ある(榎本+, 2023)。

ルーマニアのVrancea地方の中深発地震は、百年に2-3個のM6.5以上の大きな地震を含み、その前に静穏化がおきたケースが知られている。1960-1999年の60 km以深の活動について、Matthews (1988) の β 値を調べたところ、1977年のM7.4に先立って非常に顕著な静穏化があったが、1986のM7.1、1990のM6.9の前には有意な静穏化は見られなかった。また、深さ情報の信頼できる2003-2013のカタログ(この期間にはM5.5以上の地震はおきていない)では、地震活動度は時間変化は見られなかったが、活動域の最深部にあたる140-160 kmでだけ b 値が低いことがわかった。先行研究(Radulian+, 1996; Hurukawa+, 2010)では、ここで次の大地震に向う応力蓄積が進んでいるのではという指摘もある(Enescu+, 2023)。

長期静穏化は $G=2$ 程度の巨大地震発生危険度の高まりを示す(Katsumata and Nakatani, 2021)が、空振りはたくさん含まれている。例えば、2005年以降にPMAP法(Katsumata and Zhuang, 2020)で p 値が0.0007を切る非常に顕著な静穏化を示した7ケースのうち4つは、その後M8以上の地震がおきなかった空振りである(図2)。そのうち静穏化後に中規模地震を含む顕著な群発活動地震がおきた2つの地域の地震テクトニクスを検討した。2009年に群発地震がおきた地域は、もともと地震カップリング率が0に近いセグメントであり(Nocquet+, 2014)、そもそも巨大地震のおきそうな場所でない。ここで起きた静穏化現象は、一時的に固着が強くなって、定常的クリープに伴う地震活動が止んだだけと考えられる。他方、2009年に群発地震がおきた地域は、過去にM8級がおきた高カップリング域の縁

辺部にあたる。2009年の群発地震は震源のmigrationを伴ったので、スロースリップがおきていたことが疑われる。最終的にはM6.6、M6.5もおきており、固着の剥がれが進んだが、サイクルシミュレーションでよく見られるように、まだ応力蓄積が不十分だったために(e.g., Noda+, 2013; Ohtani+, 2019) M8級アスペリティ本体の破壊には進展しなかったのだろうと考えられる(Katsumata, 2023SSJ)。

北海道東方沖の沈み込み帯においては、Katsumata and Nakatani (2021)の解析期間の最後2015年の時点で11年間以上M>5の地震がない状態が続いており、7年の間に75%の確率でMw7.5以上の地震がおきるとの警報が出されていた。また、Matsu'ura(2019)も、千島海溝西端部で2009年からETASモデルから顕著に乖離した静穏化を指摘している。そこで、最近のデータを追加して解析したところ、Katsumata and Nakataniの警報は、根室・十勝沖から千島南部であいかわらずONであった(勝俣, in press)。一方、Matsu'uraの対ETAS静穏化については、地震活動の低調さは減少しているが、まだ-1シグマ未満で停滞しており、静穏化が終了したのかどうかははっきりしない。しかし、その北東側のロシア領の地域では既にETAS効果を伴った活動が現れている。そこで、2011年東北沖地震に起因する粘弾性的影響を計算すると、千島海溝西端部では地震活動を促進するセンスの応力変化が期待されることがわかった。これを考慮すれば、2009年からの静穏化はまだ終了していないと見る方が妥当かもしれない(松浦, in press)。さらに、b値についても最近のデータを含めて検討したところ、2003年十勝沖地震の震源域の東側ではb値減少中で、現在0.6を切っていることがわかった(図3)。この領域はb値の減少に加えて、スロー地震関連現象のおきる領域に隣接しているが重なってはいない(Nishikawa, 2019)という点でも、2011年東北沖地震、2003年十勝沖地震前の状況と似ている(楠城, in press)。また、1983年日本海中部地震の余震域を含む日本海沿岸域で2011年5月に始まった、ETASモデルからの顕著な乖離(ETAS効果による余震が消滅)を示す静穏化についても、その後の状況を調べたところ、2019年の山形県沖地震(M6.7)およびその余震活動にもかかわらず、ETAS効果が復活していないことがわかった(松浦+, 2023JpGU)。

現在進行中の群発的な地震活動がより大きな地震の前震である(i.e., 現時点までの最大地震より大きな地震が近々おきる)確率を、群発活動のさまざまな特徴量からの回帰モデルとして求める確率予測モデルを開発してきた(e.g., 野村・尾形, 2018)。前震である確率が高い活動の特徴は、クラスタ内の大きい方2つのマグニチュード差が小さい、活動に含まれる地震数が少ない、クラスタに含まれるイベント間の距離が大きいなどであり、さらに、地域的な前震確率の大小がある。これらの特徴を併せたモデルを日本の1926-1999年の地震に基いて作成し、2000-2017年10月末までの活動で検証したところ、どちらの場合も、本震発生確率の予測値と実際に本震が発生した割合は、クロス表で同程度によく一致していた。また、ETASによる合成カタログに適用すると実際のカタログに適用したときよりも尤度が有意に下がるので、余震トリガリング効果では説明できない、真の前震の特徴を利用できていることも確認できた。このモデルは群発地震内の最大地震より大きいものが30日以内におきる確率(オッズ)をフィッティングすること(図4)で作成したが、その確率を簡単な方法で任意のM以上の地震が任意の日数内におきる確率に変換できるので、最近群発活動のあった地域に関しては、予測対象地震のスペックを柔軟に設定して確率予報を業務的に行える。本モデルで採用した前震候補活動の特徴量は、小さな地震の取り漏らしの影響を受けにくいという点でも実用的である。これに、群発活動がおきていないところでも地震発生確率を出せるETASモデルを組み合わせてCSEP Japanへの提出を目指している(Nomura and Ogata, 2023)。

日常的な短期地震確率予報発表の試行として、公開されているHi-Net自動処理震源リストを毎日自動的にダウンロードしてカタログを更新し、FORTRANプログラムとして公開されているHIST-ETAS(Ogata+, 2021)で計算したM6以上の地震が1日以内におきる確率の地図を毎日定時にXの鍵付き非公開アカウントに自動ポストするシステムを作った(Nanjo+, 2023JpGU)。

b値を用いた短期的な大地震予測手法として、やや大きな地震後の活発な地震活動に注目する交通信号システム(Gulia and Wiemer, 2019)があるが、地域の特性や短期的な余震の継続時間、カタログの完備マグニチュード下限など、専門家の判断が必要なところがあった。そこで、b positive estimator(van der Elst, 2021)を用いて自動化したコードを作り、専門家の関与なしに数時間以内に交通信号システムが出力を始められるようにした(Gulia+, 2023AGU)。また、2023年2月6日にトルコ南部の東アナトリア断層でおきたM7.8の地震について、この地震の破壊開始域あたりに群発活動があり、2022年後半から、その活動が盛んになるとともに、b値が顕著に低下していたことを見出した(Nanjo+, 2023IUGG)。また、M7.8地震の北東延長では、その9時間後に別の断層でおきたM7.5地震の影響もあってCFFがかなり増加した(Toda+, 2023)のに余震活動が少ない。これは、この部分が2020

年におきたM6.8の破壊域であり、応力が抜けていたからだと考えられる (Nanjo, 2023IUGG, 2023AOGS)。

閾値CCを下げたMF法を用いて、2003-2019年の富士山の下火山性LFEを多数検出した。LFEの活動は、2011年東北沖地震の4日後に富士山の麓地下10kmでおきたM5.9の静岡県地震 (LFE域の応力を0.1-1MPa程度変えたと考えられる) 直後に顕著に活発化し、その後余震的に減衰したが、このLFE活動にETASモデルをあてはめてみると、活動度はまだ東北沖地震以前のレベルに戻ってはならず (図5)、富士山下のマグマシステムは活性化されたままの状態が続いていると考えられる (Nanjo+, 2023)。

固着滑りを同一試料で続けた実験からわかるように、断層面の摩擦特性は累積滑りとともに徐々に変化する (e.g., Urata2017)。物理的な滑りモデルのデータ同化で予測を行う場合には、摩擦特性の変化を捉えて摩擦パラメタを更新すべきである。固着滑りの数値シミュレーションデータを用いて、固着滑りの特徴量 (滑り弱体化レート、イベント間隔) からRSF摩擦パラメタ (a , $b-a$, Dc) を推定するように訓練した機械学習モデル (ランダムフォレスト) によって、室内実験の固着滑り履歴から摩擦特性の変化を推定した。実験での摩擦特性の変化は、ガウジ層の発達による部分が大きいように見える (Ishiyama+, 2024)。

Dieterich(1994)の余震の物理モデルは、RSF則にもとづく遅れ破壊として余震レートを予測するもので、背景応力が一定レートで増加する場合には p 値が1の大森・宇津則が、背景応力が経過時間の対数に従う変化をすれば1以外の p 値が再現できる。これを用いて、実際の余震活動での背景応力の時間変化を推定することを試みた。余震活動はETASに従うクラスタ成分 (二次余震) とDieterichモデルに従う比較的長期的活動変化であるトレンド成分からなると仮定し、さらに、背景応力の変化レートは地震発生時にのみステップ変化すると仮定のもと、1995年神戸地震の余震データに適用したところ、大まかには本震からの経過時間の対数に従いつつ、余震活動の複雑さに呼応した細かな時間変動を伴う背景応力の時間変動を得ることができた (岩田, 2023SSJ)。

余震活動には、上記で考えたような各地震イベントの滑りが母岩の弾性を通じて起こす応力変化によるトリガリング以外に、余効滑りによって駆動されるものもあると考えられている (e.g., Asano+, 2011; Perfettini and Avouac, 2004)。2011年東北沖地震からの10年間の活動にHIST-ETASを適用し、確率的デクラスタ手法 (Zhuang+, 2022) を用いて、観測された地震活動を背景地震活動とトリガリングによる地震活動の時空間分布に分離した (図6)。トリガリングによる活動は本震の大滑り域による静的応力上昇による余震として理解できるものだったが、背景地震活動は大滑り域のdowndip側の余効滑り域と一致し、その活動の時間的減衰は、相似地震 (Igarashi, 2020) や測地観測から推定 (Fukuda and Johnson, 2021) された余効滑りの減速とよく一致しており、余効滑りに駆動された余震活動であったとみるのが妥当である。このような活動の分離解析は、余震活動の理解と予測の向上や、測地データがない場合の余効滑りの推定に役立つだろう (Ueda and Kato, 2023)。

いっぽう、背景地震活動度の時間変動を許す時空間ETASモデルを用いて、2001-2013年の期間の南海トラフでの群発地震を網羅的に検出した。背景地震活動度が2年間の移動平均より2割以上高ければ群発活動だと定義すれば、M1以上の地震の18%が群発活動に含まれ、主に下盤内の活動であった。群発イベントの7割が四国西部から西であり、日向灘が最も多かった。水平位置でみて、群発活動とSSEの発生域はおおまかには相補的だが、四国西部と豊後水道では重なった。また、長期的および短期的SSE活動と群発活動は、全体としては相関がなかったが、1-2割のSSEについては、他地域の先行研究 (e.g., Hirose+, 2014; Nishikawa and Ide, 2017; Peng+, 2021) と同じく群発地震と正の相関があった (Guo+, 2023)。

トレマの活動解析に使われるようになった (Wang+, 2017, 2018) 隠れマルコフモデルの隠れステートの数 m を選ぶのにAICを使うと m が大きすぎ、BICを使うと小さすぎるということが指摘されていた。様々な情報量規準をシミュレーションモデルで試してみたところ、BICにサンプルサイズに依存する項を加えた調整BICが良好であり、紀伊半島のトレマに適用したところ、最適 m が17から19になり、 $m=17$ のモデルでは認識されなかったトレマの活動パターンが拾われるようになった (Buckby+, 2023)。

能登地方の群発地震活動について、2018年始めから2022年末までの20km以浅、M1.3以上の活動をデクラスタした上で、地震発生時の潮汐位相の偏りをみるSchuster検定と、地震発生レートの潮汐振幅に対する依存性をみるHoustonプロット (Houston, 2015) の両方で、この活動が潮汐の影響を受けているかを調べた。この活動は5つのクラスタに分かれておきているが、潮汐相関を示したのは南部領域の深さ14km以深にあるSdクラスタだけであった (図7)。またSdクラスタだけが1.85と異様に高い b

値を示している。震源のマイグレーション (Amezawa+, 2023)、地殻変動 (Nishimura+, 2023)、トモグラフィ (Nakajima, 2022) などから、この領域にはマントル起源の高圧流体の存在が示唆されており、高間隙圧によって絶対強度が低下した中で、潮汐による体積変化に起因する間隙水圧変動による強度変化に敏感に反応していると考えられる (弘瀬+, 2023JpGU, 2023SSJ)。また、この群発活動で2023年5月までにおきた地震の中で一番目と二番目に大きい2023年5月5日のMj6.5、2022年6月19日のMj5.4の直後を含む余震活動について、PhaseNet (Zhu and Beroza, 2019)、REAL (Zhang+, 2019)など最新の技法を用いたカタログをもとにMF (Kato and Ueda, 2019) による検出補強で本震直後の取り漏らしを大幅に減らして、DD (Waldhauser and Ellsworth, 2000) による正確な位置決定をして活動の特徴を調べた (図8)。2023年5月5日のMj6.5は、まず2022年6月19日のMj5.4のラプチャ域を再度滑らせ、さらにその断層の続きを浅部側へとラプチャが広がったものであり、さらに、この地震の直後1000秒間の余震活動は、本震破壊域に沿って深部から浅部へと20 km/hで広がったことがわかった。直後余震のこのような高速拡大が捉えられたのはたぶん世界初だが、この場所では既に深部の高圧流体の存在も推定されており、Mj6.5の本震によって、断層に沿って透水性が大幅に増加した断層バルブ現象(Sibson, 2007)であると考えられる (Kato, 2023)。

2013年4月20日のLushan地震(Ms7.0)は、2008年四川地震 (Ms8.0) がおきた龍門山断層の南部セグメントを破壊した。この周辺400 kmほどの地域では、絶対重力観測点3つと140をこえる相対重力観測点をもちいた年2回の繰り返し重力観測がなされていた。観測が精密になった2010年8月からLushan地震までの間のデータをベイズ同化モデルで逆解析したところ、Lushan地震の震源域南側の広い (200 km) 領域で23 uGal/yr.という、計器誤差や浅部地下水等の変化では到底説明のつかない顕著な重力増加が示唆された (図9)。密度変化が地下の円板状領域でおきたとすると、半径が82 km、厚味0.7 kmの領域が深さ26 kmに推定された。この場所では、2010年8月ごろから群発活動が深さ26 kmから10 km程度にかけて10 m²/s程度の拡散的なmigrationを示したことや、マントル起源流体の検出もあり、大規模な地殻流体の移動がLushan地震に先行したと考えられる(Wang+, 2023)。また、ベイズの逆解析の拘束条件としてよく使われる滑らかさ(空間二階微分)を数値的に求めることが、地球物理のデータモデリングに便利な観測点に即したメッシングであるドロネー分割においては高コストだという問題点に対して、新しい数値計算スキームを提案し、ドロネー分割を用いた重力異常の逆解析で良好に働くことを確認した(Niu+, 2023)。

・計画期間中 (令和元年度～5年度) の成果の概要

地震サイズの根本的な可予測性に関して、様々な観点から検討した。地震の成長を確率的分岐過程とみる分岐クラックモデル(e.g., Vere-Jones, 1977)は、GR則や地震の成長の不規則性を説明できる。このモデルでは個々のイベントのサイズは予測不能だが、成長確率が臨界値になっている臨界ゾーンのサイズが現在可能な最大地震サイズとなるため、大地震発生の必要条件という意味で中期的な先行現象を説明しうる。また、大地震の余震の震源・メカニズム決定による精密な応力逆解析によって、本震の停止が地震発生前の巨視的な低応力バリアに支配されている可能性を示した。一方、精密な震源過程逆解析からは、途中で止まりかけたり、破壊の向きを変えたりという予測の難しそうな成長の様子がいくつかの地震について確認された。また、稠密・広範囲の観測からは、マルチスケールの断層構造の複雑さや、その度合いが、本震の破壊や地域の地震活動の特徴、あるいは速度構造的特徴と関連しているという示唆も得られた。

短期的な可予測性に関して、GR則が時間不変なのかという点に注目した。GR則の履歴依存性を意味するマグニチュードの相関が見られるのはカタログの不完全性による虚像に過ぎない可能性は高いが、他方、前震識別のモデルの中には、GR則の時間的変化を認めた方がデータをよく説明できるものがあることも見い出された。

進行中の群発的な活動により大きな地震が続くかを予測する前震識別のモデルについて、バイナリ(ON-OFF)予測のもの(e.g., Maeda, 1996)も、確率予測のもの(e.g., Ogata and Katsura, 2012)も、ETAS効果による見かけ上の前震では説明できない前震活動の存在によってETASを超える予測能力を発揮していることを示した。前田の前震識別法については、それが好成績な地域の特徴から、スロースリップや流体活動による群発活動を捉えている可能性を提案した。また、確率予測のものは、予測対象のMや期間を柔軟に変えられるようにして実用性を増した。また、群発地震の特徴量から前震確率をはじき出す関数を機械学習によって作成することを試みた。

また、地震群を定義することこそしないが、カリフォルニアの大地震の前には震源域周辺で地震活動の空間的集中化が見られることが指摘されており(Lippiello, 2012)、日本の地震カタログに対して

この空間的集中化指標を計算・可視化するツールを作成した。2014年11月22日の長野県神城断層地震(M6.7)の直前期には、11月18日に集中しておきた前震からの寄与によって非常に強い集中化が検出された。

ETAS効果ではない本物の前震があるとしても、予測ゲインに対する寄与としてはETASで100倍程度、本物の前震でさらに数倍というのが、現状の前震識別の内訳(Nakatani, 2020)であり、この面からもETAS自体の向上も重要である。深さも入力情報とする三次元化、大きな本震を点震源でなく有限サイズの面として扱う有限断層化、広域に適用するために地球の球面形状を扱うなどの改良を進めた。また、予測のロバスト化のために、ETASパラメタの最尤推定値ではなく事後分布に基いて大地震発生確率を予測する方法も開発した。また、ETASを応用したデクラスタ(Zhuang+, 2002)は今や非常に重要な解析手法となり広く使われているが、最近注目されている、リスケールされた時空間距離に着目したデクラスタ手法(Zaliapin and Ben-Zion, 2013)との比較をイタリア北部のカタログで行って見たところ、どちらの方法でもクラスタ分けの結果はよく似ていた。

いっぽう、余震の物理モデルであるDieterichモデルとETASを組み合わせるモデルを提案し、そこから背景応力の時間変化を推定することも試みた。また、動的トリガリングの余震に対する効果を調べるために、北茨城一いわきの稠密観測で捉えた破壊伝播方向の明瞭な地震58個の余震について調べたところ、破壊フロントが向かう側におきた余震のほうが2倍多いことがわかった。

地震直前に連発する前震に関しては、プレスリップに付随するものなのか、カスケード連鎖なのかということが問題になっている(e.g., Gombert, 2018)。気象庁カタログのM4以上でETASモデルから独立地震と判断された約2000個の地震のうち直前10分以内に4つ以上の前震があった数例で、前震は本震の破壊開始点近傍に集中していたが破壊域は互いにあまり重ならず、カスケードであったように見える。他方、2011年東北沖地震の13時間後に長野県北部でおきたM6.2地震では300個近い微小前震があったが、本震断層面に沿う前震の震源移動が見られたことなどから、東北沖地震の大きな表面波に誘起された間隙流体の移動によってゆっくり滑りが始まり、それがM6.2地震の震源核になったことを提案した。

前震の問題以外でも、地震活動の変調から大地震の発生予測に資する情報を得る上で、その活動が、SSEや余効すべりなどの非地震性滑りに付随するものなか、母岩を介して伝達した応力変化によるトリガなのかというのは重要な視点である。東北沖地震の震源域の余震活動についてETASモデルで活動を背景活動とトリガ活動に分離したところ、背景活動と判断される余震は、余効滑りに駆動されていたらしいことが分かった。

地震活動以外の短期先行現象については、中日本5点で行っているVLF帯電磁パルス観測では、正確な波源位置決定に成功し、2017年6月25日のM5.6の2日前に、震源付近から7発の電磁パルスが出ていたことを見出した。このときに中日本で雷はなかった。また、地震に伴って地中から火焰が噴出したという記述を歴史史料から8つの地震について見つけた。これらは天然ガスの分布する地域での地震であった。ほとんどはコサイスマックな現象と思われるが、地震の直前であったという記述も2つの地震について見つかった。

中期的な先行現象ではと考えられている10年程度の長期静穏化について、千島から小笠原の沈み込み域で、学習期間と検証のデータを分けて警報条件の最適化と交差検証を行い、最適な警報の条件が安定して得られ、M7.5以上の数年単位の予測について2倍程度のゲインが得られることを示した。また、これらの静穏化のいくつかがSSEによっておきた可能性を提案した。また、静穏化判定に用いる空間サイズを客観的に自動決定する手法も提案した。長期静穏化による予測には数割の見逃し、空振りがある。南米地域の空振り事例については静穏化につづいて顕著な群発活動がおきた例があり、地域の地震テクトニクスから何がおきたのかを検討した。また、ルーマニアのVrancea地方のプレート内中深発地震域において、M6.9以上の大地震3つのうち一つだけに非常に顕著な静穏化が先行したことを見出した。

次のメガスラスト地震の発生が懸念される北海道東方沖について、中期的先行現象と言われているものの現況を、最近のデータを追加して集中的に検討し、絶対的静穏化およびETAS比の相対的静穏化が継続していることを確認し、さらに、顕著なb値の低下もおきていることを見出した。また、2021年に宮城県沖のプレート境界でおきたM6.9とM6.8の地震の震源域でも、その数年前からb値が顕著に減少していたことを見出した。

マグニチュード系列のnatural time解析では、1984—2011東北沖地震までの日本のM7.6以上の地震6つの全てで数ヶ月以内で先行する異常が生じた(e.g., Varotsos+, 2011)が、さらに、東北沖地震を含むいくつかの大きな地震の数日から数時間前に、マグニチュードnatural time系列のエントロピーと

時間反転系列のエントロピーの差のゆらぎや、Tsallisエントロピーで定義したそれに異常が現れたことを見出した。

地震活動が潮汐に同期するようになることが大地震の中期的先行現象になっていると指摘されているトンガ・ケルマデック地域について、潮汐同期による予測成績を評価し、M6.5以上の地震の30日予測ではゲインが1.7倍程度で、p値は1%を切ることを見出した。

2020年末からの能登地方の群発地震活動については、深部の流体源に近い深さ15-20kmの活動クラスタだけが潮汐相関を示し、また、ここだけb値が異様に高いことを見出した。この領域は非常に間隙圧が高いことが推察される。さらに、この活動の中でおきた2023年5月5日のMj6.5の地震について、最新の技法を用いて、直後を含む余震の検出と精密震源決定を行い、本震直後の1000秒間に余震活動が20 km/hで本震破壊域の深部から浅部へ拡がったことを見出した。本震ラプチャによって断層の透水性が大きく増えた断層バルブ現象であると考えられる。

南海トラフ域の群発地震について、背景活動度の時間変化を許すETASモデルによる網羅的な検出を行いM1以上の地震の18%が群発地震で主に下盤内でおきていることを見出した。SSEとの時空間的相関は、1-2割のSSEについてしか見られなかった。いっぽうでSSE域と群発地震域の水平位置は相補的な地域が多かったが、四国西部と豊後水道では重なっていた。また、南海トラフ域のトレマの時空間に不均質な活動をモデリングする隠れマルコフモデルについては、隠れ状態の数を判断する情報量基準にサンプル数を加味することを提案し、新たな活動パターンが拾えるようになった。

富士山直下のLFEの活動をMF法で多数検出し、これにETASモデルをあてはめたところ、東北沖地震4日後の富士山麓地下10 kmでおきたM5.9の地震の直後にLFEが増え、その後速やかに減少したが、いまだ、東北沖地震前より有意に高いレートでLFE活動が続いていることを見出した。

また、山陰地方と新潟地方の地震活動について、40年間程度のカタログからETASで背景地震のみをとりだしたところ、山陰地方では春と秋に、新潟地方では冬に地震が数十%多いという傾向が非常に高い有意性をもって示された。また、台湾の地震活動に関しても、季節性を見出した。これらは、地表水荷重の影響と解釈できるかもしれない。

比較的大きな地震がおきた場合に、それに続く活発な地震活動のb値を見ることでそのあとさらに大きな地震がおきる可能性を判断する交通信号システムが提案されている。熊本地震、リッジレスト地震、トルコ・シリアの地震等について詳細なb値の時空間変化を調べ、本震の破壊がb値の低下したところでおきた場合も、そうでないところでおきた場合もあることを指摘した。また、余震p値、Lippiello (2012)の空間集中化指標、地殻変動の短期的な変化なども見て、複数の大地震を含むこれらシーケンスを応力の観点から総合的に解釈・評価した。

いっぽう、地震活動以外の大地震の中期的先行現象候補としては、中国の2013年Lushan地震 (Ms7.0) および2017年Jiuzhaigou地震 (Ms7.0) のそれぞれ2、3年前から広域 (100 kmスケール) で大きな地下深部の密度変化があったことを重力の繰り返し観測から見出した。後者については、群発地震のマイグレーション等もみられ、深部からの流体移動があったことを提案した。

また、長期予測の視点から、中国全土での地震発生レートがGNSSから求めた最大剪断歪みの空間分布とよく相関しゲイン2倍程度の情報をもつことを示した。また、四川-雲南地方においては、活断層データと過去の地震活動データからM6以上の地震を予測するモデルを作り、交差検証でゲイン2-4倍程度の予測能力を確認した。また、日本においても歪み集中帯にあるいくつかの地域で、歪み速度と背景地震レートが相関すること、活火山近傍ではさらに活動度が高い傾向を見出した。また、空間的に不均質な観測点から得られるデータを適切に補完、モデル化するための解析技術の開発も行った。

津波や強震動のリスク評価では、おきる地震の滑り方向が重要だが、これを広域応力場から予測するWallace-Bolt仮説を、F-netのメカニズムカタログと比較したところ、最近大きな地震がおきて応力場が変化してしまっていたであろう地域や、観測がまばらでそもそもメカニズム解も、応力場マップも信用できないところ以外では、実際におきた地震の滑り方向は、応力場からの予測とほとんどの場合で一致することがわかった。また、少い観測点で精密な震源決定をする方法を開発し、アドリア海の観測網の手薄なところでおきた地震の破壊面の姿勢を推定することに成功した。

観測データを増強する観点からは、東海地方の気象庁歪み計ネットワークやDONETの検出力評価を行った。また、高品質の震源カタログを作成する新たな方法として、P波やS波のピックという段階を踏まずに、観測波形から走時の確率トレースを計算し、そこから直接震源標定を行うというやり方を考案し、室内AE実験のデータに適用して良好な結果を得た。カタログの向上は直接的に思わぬ発見につながることもあり、例えばMF法を用いて検出限界を下げることで、2015年の小笠原の深発地震 (Mw7.9、深さ700 km)の3ヶ月前から逆大森則に従う30個の前震、大森則に従う20個の余震を

見出した。これらは、通常手法のカタログに基くこれまでの深発地震前後の活動の常識から大きく逸脱した発見である。

また、すべりの物理モデルによる予測などでは、摩擦パラメタが時間とともに変化する可能性も考慮すべきであるが、これを固着滑りの観測時系列から推定する機械学習モデルを開発し、室内実験に適用して良好な結果を得た。

歴史時代の地震情報の正確化についても進展があった。大揺れ以外に対しては、夜間に検出感度が数割下がっていることを、いくつかの史料で見出し、これを補正する方法を提案した。また、史料の成立年代に着目した多数史料精査により、1092年の越後の大波は地震関連現象ではなかったこと、1856年11月4日の関東の強い地震の震源が立川断層帯というのは非常に考えにくいことなど、リスク評価に影響を与える誤りを見出した。

業務的な地震予報では、専門家の判断を仰がずに予測システムを運用する必要がある。ETAS解析のパラメタ変化点の判断、交通信号システムの地域依存パラメタ設定などいくつかの予測手法について、これらを完全に自動で行うアルゴリズムを開発した。また、地震活動データの更新取得から様々な活動指標の解析・予測結果の配信を自動で行うシステムも開発し、試行的に運用している。また、ETASパラメタの推定に大きな障害となる大地震直後の検出漏れを補正して、ロバストにETASを運用する方法を開発した。また、地震活動にもとづく予測モデルを受け付けてプロスペクティブな予測実験を行うCSEP-JAPANでは、10個ほどのモデルの予測実験を継続するとともに、過去に提出されたモデルで提出者の同意が得られたRIモデルについて、モデルの特性を調べるためのレトロスペクティブな予測・評価も行った。また、2011年東北沖地震がその後の地震活動に及ぼしている長期的な影響のモデリングや評価、さらには、その影響下で、以前から同地域で続けていた中小の繰り返し地震の予測実験を継続する手法の開発も行った。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

先行現象による予測については、経験的な予測能力の把握・交差検証、地学的背景の理解が進んだ。地震活動を用いた短期予測については、自動更新する予報配信システムを試作し、また、業務的な地震予報が出せるような実用性を実現するための解析条件設定/変更等の様々な自動化アルゴリズムを開発した。また、余震を含めた地震活動の現象論的モデリング技術を改善したとともに、新たな物理的解釈も提案した。地震やスロー滑りの検出力評価や、新しい検出技術の開発も行った。地震活動以外の先行現象については、観測データのモデリングが向上し、また、観測が強化された項目もあって、新しい先行事例がいくつか見つかった。数年以内の時間スケールで先行現象があった地震では、震源域への高圧流体の浸透を示唆する複数の変化と共起した事例が多く、大地震発生のプロセスに流体移動が関与していた場合に関しては比較的予測しやすいと言えるかもしれない。

時間不変の長期的な大地震発生レートの空間分布についても、向上したデータモデルと先行現象と同様の相関評価の方法を用いることによって様々な観測・観察項目への依存性を定量的に評価できた。また、計器観測の手薄なところ、計器観測のなかった時代の情報についても、補正・補完の方法を進歩させた。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Nomura, S. and Y. Ogata, 2023, Cluster-based foreshock discrimination model with flexible time horizon and mainshock magnitudes, *Progress in Earth and Planetary Science*, 10, 20, doi.org/10.1186/s40645-023-00548-0, 査読有, 謝辞無

Ishibe, T., T. Terakawa, A., Hashima, M. Mochizuki, and R.S. Matsu'ura, in press, Can the Regional 3D Stress Field according to the Wallace-Bott Hypothesis predict fault slip directions of future large earthquakes?, *Earth Planets and Space*, 査読有, 謝辞無

原田智也・西山昭仁・石辺岳男, 2024, 安政三年十月七日（1856年11月4日）関東の地震は立川断層帯で発生した地震ではなかった—多摩・入間地域の同時代史料に無い所沢・東村山・立川の大被害—, *地震第2輯*, 76, 251-285, DOI: 10.4294/zisin.2022-21, 査読有, 謝辞無

石辺岳男・石辺（五島）朋子・片桐昭彦・原田智也・中村亮一・室谷智子・佐竹健治, 2024, 気象災害であった可能性が高い1092年（寛治六年）の越後の大波, *地震第2輯*, 76, 233-250, DOI: 10.4294/zisin.2022-20, 査読有, 謝辞無

石辺岳男・松浦律子・佐竹健治,2023,発生時の無作為（ランダム）性から探る史料中の有感記録の完全性,歴史地震,38,15-27,査読有,謝辞無

楠城一嘉,in press,北海道・東北沖の地震サイズ分布(b値)の時空間変化,地震予知連絡会会報,111,査読無,謝辞有

Nanjo, K.Z., Y. Yukutake, and T. Kumazawa,2023,Activated volcanism of Mount Fuji by the 2011 Japanese large earthquakes,Scientific Reports,13,10562,doi.org/10.1038/s41598-023-37735-4,査読有,謝辞有

勝俣 啓,in press,地震活動静穏化仮説に基づく予測実験,地震予知連絡会会報,111,査読無,謝辞無

岩田貴樹,2023,ETASモデル：クラスター性を表すための点過程モデル,第13回横幹連合コンファレンス予稿集,2022,C-4-4,doi.org/10.11487/oukan.2022.0_C-4-4,査読無,謝辞無

Varotsos, P. A., N. V. Sarlis, E. S. Skordas, T. Nagao, M. Kamogawa, E. L. Flores-Marquez, A. Ramirez-Rojas, and J. Perez-Oregon,2023a,Improving the Estimation of the Occurrence Time of an Impending Major Earthquake Using the Entropy Change of Seismicity in Natural Time Analysis,Geosciences,13,222,doi.org/10.3390/geosciences13080222,査読有,謝辞無

Varotsos, P. A., N.V. Sarlis, E.S. Skordas, T. Nagao, and M. Kamogawa,2023b,Natural time analysis together with non-extensive statistical mechanics shorten the time window of the impending 2011 Tohoku M9 earthquake in Japan,Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,125,107370,doi.org/10.1016/j.cnsns.2023.107370,査読有,謝辞無

榎本祐嗣・長尾年恭・李文超・水原和行・山辺典昭・杉浦繁貴・近藤 斎,2023,歴史地震史料に見る天然ガス由来の火災,歴史地震,38,167-176,査読有,謝辞無

Kato, A.,2024,Implications of Fault-Valve Behavior From Immediate Aftershocks Following the 2023 Mj6.5 Earthquake Beneath the Noto Peninsula, Central Japan,GRL,51,e2023GL106444,doi.org/10.1029/2023GL106444,査読有,謝辞有

Ueda, T. and A. Kato,2023,Aftershocks following the 2011 Tohoku-Oki earthquake driven by both stress transfer and afterslip,Progress in Earth and Planetary Science,10,1-14,doi.org/10.1186/s40645-023-00564-0,査読有,謝辞無

Iio, Y., S. Matsumoto, Y. Yamashita, S. Sakai, K. Tomisaka, M. Sawada, T. Iidaka, T. Iwasaki, M. Kamizono, H. Katao, A. Kato, E. Kurashimo, Y. Teguri, H. Tsuda, and T. Ueno,2023,Spatial change in differential stress magnitudes around the source fault before intraplate earthquakes,Geophysical Journal International,233,1279-1295,doi.org/10.1093/gji/ggac521,査読有,謝辞有

松浦律子・石辺岳男・橋間昭徳,in press,北海道東方沖の相対的地震活動度の静穏化のその後：有意検出から10年後の現状,地震予知連絡会会報,111,査読無,謝辞無

Enescu, B., C. Ghita, I.-A., Moldovan, and M. Radulian,2023,Revisiting Vrancea (Romania) Intermediate-Depth Seismicity: Some Statistical Characteristics and Seismic Quiescence Testing,Geosciences,13,219,doi.org/10.3390/geosciences13070219,査読有,謝辞無

Ishiyama, R., E. Fukuyama, and B. Enescu,2024,Estimation of time-variable friction parameters using machine learning,Geophysical Journal International,236,395-412,doi.org/10.1093/gji/ggad422,査読有,謝辞無

Yagi, Y., R. Okuwaki, S. Hirano, B. Enescu, M. Chikamori, and R. Yamaguchi,2024,Barrier-Induced Rupture Front Disturbances during the 2023 Morocco Earthquake,Seismological Research Letters,XX,1-8,doi.org/10.1785/0220230357,査読有,謝辞無

Buckby, J., T. Wang, D. Fletcher, J. Zhuang, A. Takeo, and K. Obara,2023,Finding the number of latent states in hidden Markov models using information criteria,Environmental and Ecological Statistics,30,797-825,doi:10.1007/s10651-023-0584-5,査読有,謝辞無

Petrillo, G. and J. Zhuang,2023,Verifying the magnitude dependence in earthquake occurrence,Physical Review Letters,131,154101,doi:10.1103/PhysRevLett.131.154101,査読有,謝辞無

Wang, L., S. Chen, J. Zhuang, B. Zhang, W. Shi, J. Yang, and W. Xu,2023,Gravity field changes reveal deep mass transfer before and after the 2013 Lushan earthquake,Communications of Earth & Environment,4,194,doi:10.1038/s43247-023-00860-z,査読有,謝辞無

Niu, Y., J. Zhuang, and Z. Xiong,2023,Second-order smoothness prior over the Delaunay

Tessellation in Bayesian geophysical inversion, *Spatial Statistics*, 54, 100735, doi:10.1016/j.spasta.2023.100735, 査読有, 謝辞無
Guo, Y., J. Zhuang, and H. Zhang, 2023, Characterization of seismicity in Nankai and its association with long-term slow slip events, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128, e2022JB025984, doi:10.1029/2022JB025984, 査読有, 謝辞無
Xiong, Z. and J. Zhuang, 2023, SETAS: A spherical version of the space-time ETAS model, *Seismological Research Letters*, 94, 1676-1688, doi.org/10.1785/0220220198, 査読有, 謝辞有
Heki, K., M. Nakatani, and W. Zhan, in press, Ionospheric changes immediately before the 2008 Wenchuan earthquake, *Advances in Space Research*, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

弘瀬冬樹・溜瀨功史・小林昭夫・前田憲二, 2023, 非定常ETASモデルによる背景地震確率を考慮した能登半島の群発地震と潮汐との関係, *JpGU2023年大会*, SSS10-P02
弘瀬冬樹・溜瀨功史・小林昭夫・前田憲二, 2023, 非定常ETASモデルによる背景地震確率を考慮した能登半島の群発地震と潮汐との関係, *日本地震学会2023年度秋季大会*, S22P-02
石辺岳男・小川陽子・田中裕人・木内亮太・高浜 勉・坂元一雄・西條裕介・古村 美津子・松浦律子, 2023, 震度分布データを用いた機械学習による震源推定の試み, *日本地震学会2023年度秋季大会*, S21-01
松浦律子・石辺岳男, 2023, 十年前に相対的静穏化が検出された北海道南東沖の地震活動度の現在の状態, *日本地震学会2023年度秋季大会*, S09-12
石辺岳男・寺川寿子・橋間昭徳・Thystere Matondo Bantidi・望月将志・松浦律子, 2023, 主要活断層帯を対象とした広域三次元応力場ならびに Wallace-Bott 仮説を用いた断層すべり角推定～断層形状の不確定性が推定に及ぼす影響について～, *日本活断層学会2023年度秋季学術大会*
石辺岳男・水野 嶺・松浦律子・佐竹健治, 2023, 『日光社家御番所日記』に記録された有感地震の発生時刻：有感記録の完全性ならびに地震活動の復元についての検討, *第40回歴史地震研究会*
松浦律子・橋間昭徳・石辺岳男, 2023, 2011年5月から継続中の日本海東縁のETAS効果の消滅について, *JpGU2023年大会*, SSS10-11
Zhuang, J. and Z. Xiong, 2023, Changes of global background and clustering seismicity during past twenty years, *AGU fall meeting*, S33H-0479
楠城一嘉・山本 揚二郎・有吉慶介・堀川博紀・矢田 修一郎・高橋成美, 2023, DONET データを用いた地殻活動モニタリングとb値, ワークショップ：海底ケーブルの科学利用と関連技術に関する将来展望 - 第6回 -
楠城一嘉・山本 揚二郎・有吉慶介・堀川博紀・矢田 修一郎・高橋成美, 2023, DONET の地震検知能力に関する研究, *日本地震学会2023年度秋季大会*
Nanjo, K. Z., Y. Yamamoto, K. Ariyoshi, H. Horikawa, S. Yada, and N. Takahashi, 2023, A completeness analysis of Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET), *AGU fall meeting*, S51D-0233
Zhuang, J., 2023, On extending the ETAS model (invited), *10th International Workshop on Applied Probability (IWAP 2023)*
楠城一嘉・井筒潤・鴨川 仁・堀 高峰・尾池和夫, 2023, Spatial variability of the response of the Nagano seismicity to the 2011 Tohoku-oki earthquake, in Japan, *JpGU2023年大会*, SSS10-13
楠城一嘉, 2023, Hierarchical Space-Time ETAS (HIST-ETAS)モデルを用いたオンライン地震活動評価の実証実験：序報, *JpGU2023年大会*, SSS10-P19
Nanjo, K., 2023, A Preliminary Report on Evaluating Online Seismicity: a Demonstration Experiment Using the Space-time ETAS Model, *AOGS2023*, SE13-A011
Nanjo, K., J. Izutsu, M. Kamogawa, T. Hori, T. Nagao, and K. Oike, 2023, Seismicity before and after the 2023 M7.8 and M7.5 earthquake sequence in Turkey: a preliminary report, *IUGG2023*
楠城一嘉・行竹洋平・熊澤貴雄, 2023, 静岡県伊東沖の地震活動の解析, *日本地震学会2023年度秋季大会*, S09-17
楠城一嘉・行竹洋平・熊澤貴雄, 2023, A preliminary analysis of seismic activity off the coast of Ito, Shizuoka, *JpGU2023年大会*, SVC33-03

Nanjo, K.Z., Y. Yukutake, and T. Kumazawa,2023,Volcanism of Mount Fuji activated by the 2011 Japanese large earthquakes,EGU2023,EGU23-2186
勝俣 啓,2023,南米地域の地震活動静穏化と空振り事例について,日本地震学会2023年度秋季大会,S09-14
Iwata, T.,2023,Flexible estimation approach of background stress changes based on the rate- and state-friction seismicity model,IUGG2023
岩田貴樹,2023,摩擦構成則に基づく背景応力場の時間変動推定,日本地震学会2023年度秋季大会,S09P-15
直井 誠・溜瀨功史・大柳修慧・加藤慎也,2024,一元化震源データを利用した深層学習検測器の再学習の試み,地震研共同利用研究集会:固体地球科学的諸現象の即時解析・即時予測とその利活用:更なる高度化と新たな展開
Enescu, B., K. Furuya, and T. Matsumoto,2023,Investigation of a possible relationship between crustal heat flow and aftershock parameters of inland sequences occurred in Japan after the year 2000,JPGU2023年大会,SSS03-07
An, L., F. Grigoli, and B. Enescu,2023,Off-shore Fault Geometry Revealed from Earthquake Locations Using Inland Seismic Stations: The Case of the 2022 Adriatic Sea Earthquake Sequence,JPGU2023年大会,SSS03-08
Ishiyama, R., B. Enescu, E. Fukuyama, and F. Yamashita,2023,Matched filter detection of foreshocks in a large-scale friction experiment,Matched filter detection of foreshocks in a large-scale friction experiment,SSS06-P07
庄 建倉,2023,Evaluating earthquake forecasting models with likelihood based marginal and conditional scores (invited),第7回 国際ワークショップ「地震準備プロセス」: 観測, 検証, モデリング, 予測 (IWEP7)
Gulia, L., S. Wiemer, E. Biondini, G. Vannucci, and B. Enescu,2023,Overcoming the Achilles' heel of the Foreshock Traffic Light System,AGU fall meeting,S331-0492
Tiampo, K.F., W. Klein, and B. Enescu,2023,Earthquake Forecasting–Applications and Limitations,AGU fall meeting,S331-0497
Petrillo, G., J. Zhuang, and E. Lippiello,2023,Is the stress relaxation relevant for long term forecasting?,EGU General Assembly 2023,EGU23-1035,doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1035

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

経験的アプローチによる大地震の確率予測の高度化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

中谷正生(東京大学地震研究所),鶴岡弘(東京大学地震研究所),加藤愛太郎(東京大学地震研究所),福田淳一(東京大学地震研究所),中川茂樹(東京大学地震研究所)
他機関との共同研究の有無:有
勝俣啓(北海道大学),片尾浩(京都大学防災研究所),直井誠(京都大学防災研究所),Enescu Bogdan(京都大学大学院理学研究科),長尾年恭(東海大学),織原義明(東京学芸大学),楠城一嘉(静岡県立大学),岩田貴樹(県立広島大学),井筒潤(中部大学),弘瀬冬樹(気象研究所),Zhuang Jiancang(統計数理研究所),野村俊一(早稲田大学),石辺岳男(地震予知総合研究振興会),永田広平(気象大学校)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等:東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部
電話:03-5841-5787
e-mail:yotikaku@eri.u-tokyo.ac.jp
URL:https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：中谷正生

所属：東京大学地震研究所



図1. 地震活動に伴って地中から火焰が噴出した歴史地震の震央 (榎本+, 2024より改変)
黒塗りの地域は天然ガス鉱床分布(石油技術境界, 1983)。



2005年以降の南米の静穏化域

PMAP法 (Katsumata and Zhuang, 2020) しきい値 $p < 0.0007$

- | | | |
|-------------------|------------|------|
| 1. 対応イベントなし | 1997~2016年 | 19年間 |
| 2. 対応イベントなし | 1998~2020年 | 22年間 |
| 3. 2009年群発地震 | 1992~2009年 | 17年間 |
| 4. 2014年Iquique地震 | 1989~2013年 | 24年間 |
| 5. 2006年群発地震 | 1993~2006年 | 13年間 |
| 6. 2015年Illapel地震 | 2004~2015年 | 11年間 |
| 7. 2010年Maule地震 | 1994~2009年 | 15年間 |

静穏化してもM8以上の地震が発生しなかった事例

↓
空振り

- 3. 2009年群発地震
- 5. 2006年群発地震

図2. PMAP法による2005年以降の南米の顕著な長期静穏化域とその結末 (勝俣, 2023SSJより改変)
赤く塗ったところが $p < 0.0007$ の静穏化域。

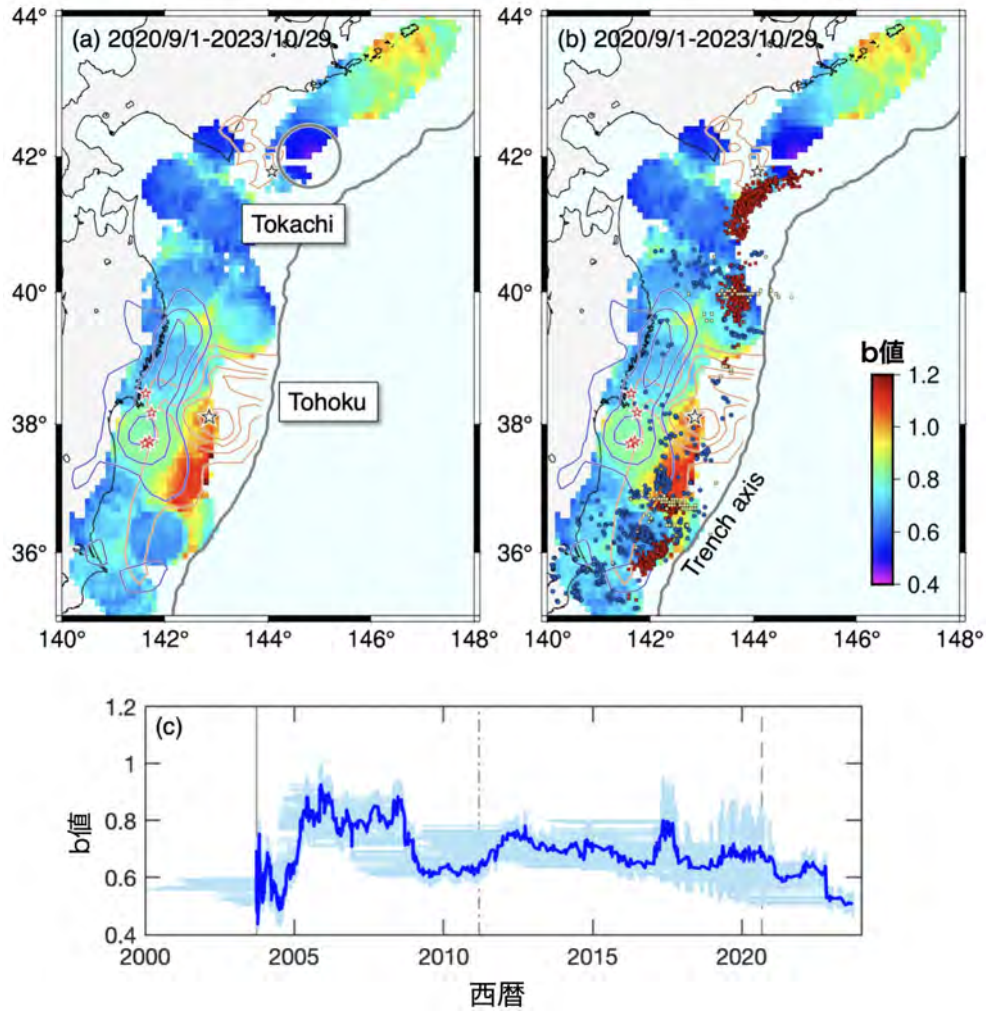


図3. 東北から北海道の太平洋側のb値の時空間変化 (楠城, in pressより改変)

(a) 2020年9月1日から2023年10月29日のM2.5以上で求めたb値の空間分布。黒色の星は東北沖地震と十勝沖地震の震源を示す。オレンジ色と青色のコンターは、それぞれコサイスマックとポストサイスマックの滑り領域を示す(東北沖地震はOzawa+, 2012、十勝沖地震はYagi, 2004より入手)。赤色の星はM6.8以上の地震。(b) スロー地震関連現象(Nishikawa+, 2019)を(a)に重ねたもの。黄色の四角は超低周波地震、青色の丸は繰り返し地震を含む群発地震。(c) (a)に示す直径100kmの円内の地震活動のb値の時間変化。一点鎖線は東北沖地震のタイミング。

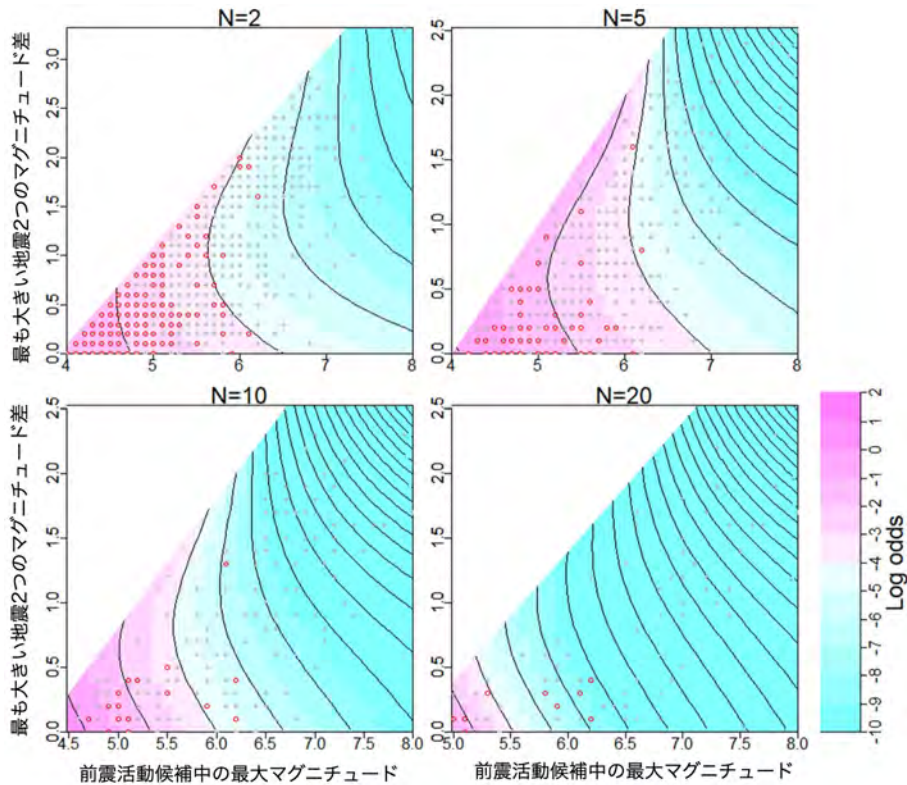


図4. 群発活動が前震である確率の、最大イベント2つのマグニチュード差、最大マグニチュード、クラスタが含むイベント数への依存性 (Nomura and Ogata, 2023より改変)
 対数オッズの上記3変数への依存性をフィットする3次スプラインを、クラスタが含むイベント数Nが2、5、10、20の場合について示した。丸印は前震であった(その後30日以内により大きい地震がおきた)クラスタ、プラス印は前震でなかったクラスタを表す。

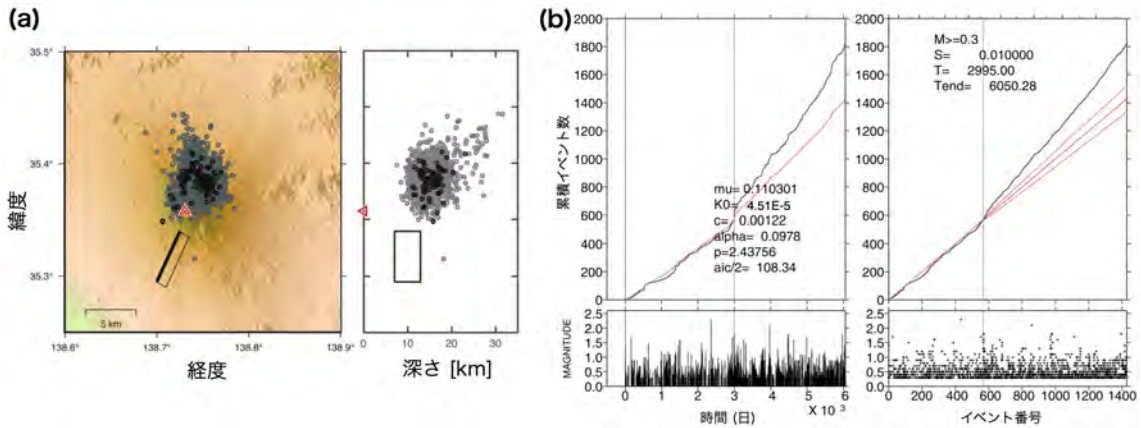


図5. 2011年3月15日の静岡県東部の地震(M5.9)による富士山直下のLFE活動の活発化(Nanjo+, 2023より改変)
 (a) JMAカタログに載っている富士山直下のLFEの分布。うち87個(黒丸)をMF法のテンプレートに用いた。長方形は、2011年3月15日の静岡県東部のM5.9地震の震源域。赤三角は富士山頂の位置。(b) 黒線は2003年から2019年までの富士山直下のLFE(CC=0.25のMFで検出)の累積イベント数。左パネルでは横軸を時刻、右パネルでは横軸をイベント番号(発生順序)としてプロットした。赤線は2011年3月15日の静岡県東部のM5.9地震(縦線のタイミング)の直前までの活動をETASでフィットし、それ以降はそのモデルを外挿したもの。右パネルには外挿の95%CIも示した。

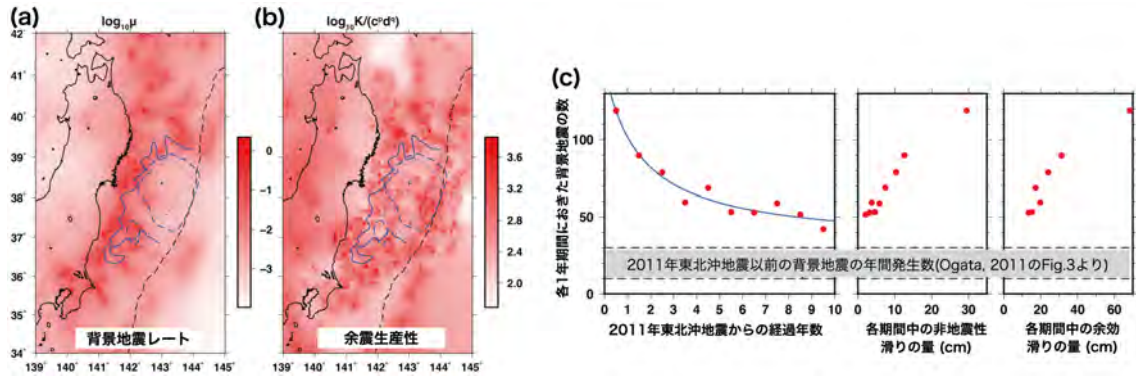


図6. 2011年東北沖地震(M9)の余震を応力変化によるものと余効滑りによるものに分けた解析 (Ueda and Kato, 2023より改変)

HIST-ETASのフィッティングで求めた (a) 背景活動レート、(b) 余震生産性の空間分布。(c) 確率的デクラスタリングで求められた背景活動の地震数は年々減少していて、かつ相似地震カタログ(Igarashi, 2020)から求めた非地震性滑りの量や、測地データから推定(Fukuda and Johnson, 2021)された余効滑りの量に比例している。

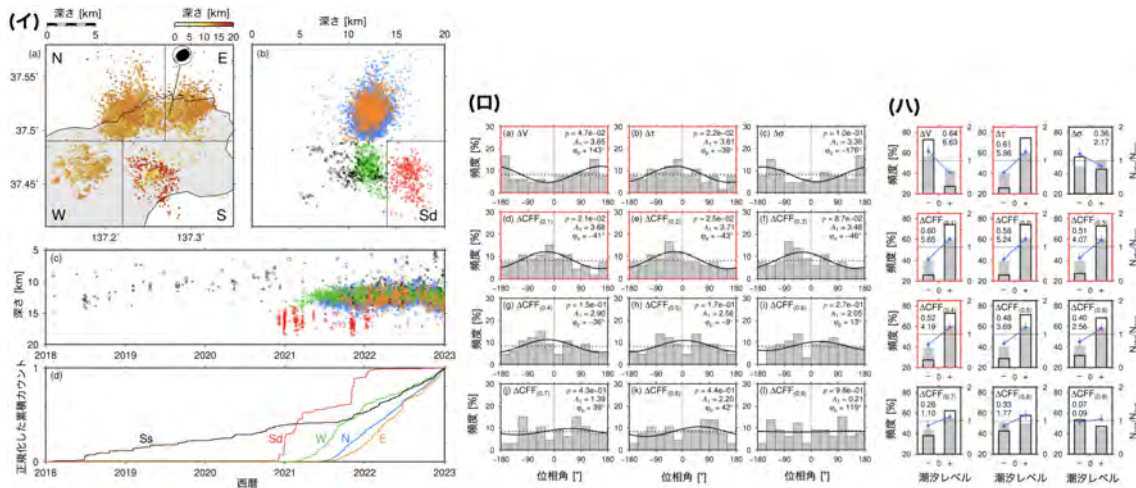


図7. 能登地方の群発地震活動の潮汐相関調査 (弘瀬+, 2023SSJより改変)

(イ) 活動は5つのクラスタ(N, E, W, Ss, Sd)に分かれている。サブパネルb-dでは、カラーコードでクラスタを区別した。サブパネルaのビーチボールは2022年6月19日に領域Eで発生したMj5.4の地震の気象庁CMT解で、今回の群発活動において典型的である。全てのイベントについて潮汐力は、走向45°、傾斜角45°、すべり角90°の断層を仮定して計算した。また、 ΔCFF については、仮定する摩擦係数(下付きカッコ内に記した)を0.1から0.9まで0.1刻みで変えて全て検討した。(ロ) Sdクラスタの活動に対するSchuster検定の結果。p値5%で相関ありとみなせた項目は棒を赤にした。(ハ) Sdクラスタの活動に対するHoustonプロット。応力区間は正負の2分割とした。塗り潰し棒は無相関の場合の期待頻度(N_{exp})。各パネルの上段の数字はNobs/ N_{exp} の差の絶対値で青線の傾斜に対応。下段の数字はカイ二乗値。p値5%(カイ二乗値で3.8415に相当)で相関ありとみなせた項目は棒を赤にした。なお、(ロ)でも(ハ)でも、24時間空かない地震はトリガ関係にあるとみなして先頭の地震だけを残すデクラスタを行った後の66個のイベントを対象としている。

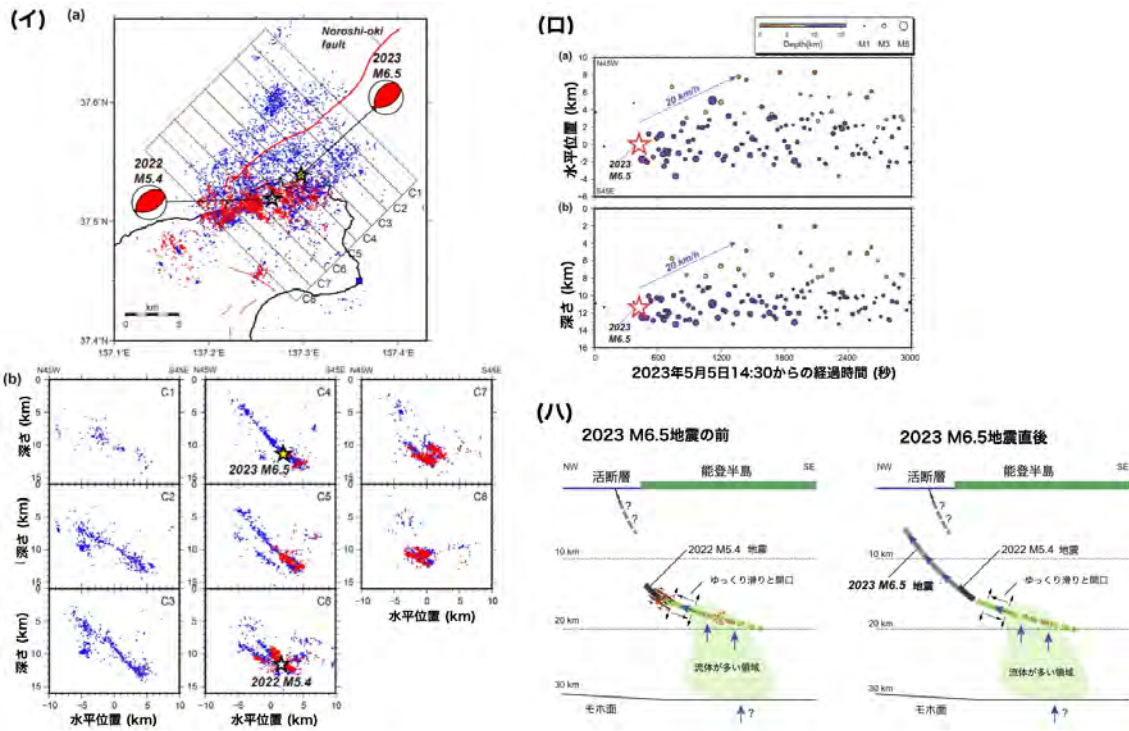


図8. 能登地方の群発地震活動の中でおきた2023年5月5日のMj6.5地震の直後余震活動の精密解析 (Kato, 2024より改変)
 (イ) 2023年5月5日のMj6.5地震の余震分布(青点)と2022年6月19日のMj5.4地震の余震分布(赤点)の比較。
 (ロ) 2023年5月5日のMj6.5地震直後の余震の時空間分布。最初の1000秒くらいは、余震域が時速20kmという高速で拡大した。(ハ) 解釈の模式図。

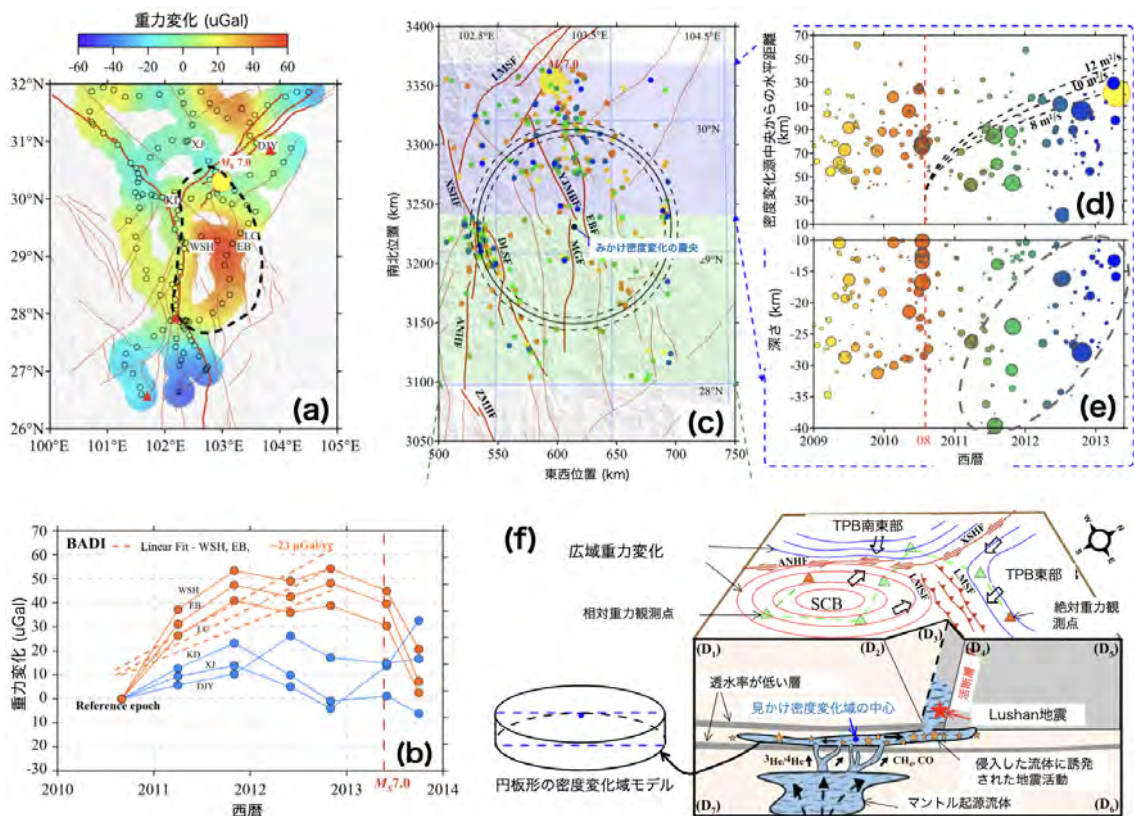


図9. 2013年4月20日のLushan地震(Ms7.0)に先行した重力変化 (Wang+, 2023より改変)

(a) ベイズ的データ同化によるインバージョン結果。2010年8月を基準に2012年10月の変化量を示した。空丸は相対重力観測点。赤三角は絶対重力観測点。大きな黄色丸はLushan地震の震源。(b) (a)に示した6つの地点における重力(ベイズ的データ同化インバージョンの結果)の経時変化。顕著な重力増加が広域的に見られた(a)の点線で囲んだ地域内のものを赤、それ以外の場所のものを青で示した。(c-e) 2009年からLushan地震までの、10 km以深の地震活動。色は発生時期。大きな黄色丸はLushan地震。(c)の円は、円板状を仮定して推定された密度変化域。破曲線は2010年8月に始まったように見える震源マイグレーション。(f) 総合的な解釈。D1-D7はモデル切断面。TPB: チベット高原ブロック。SCB: 南中国ブロック。ANHF: Anninghe断層。XSHF: Xianshuihe断層。LMSF: Longmenshan 断層。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

大規模数値シミュレーションに基づく広帯域強震動災害の事前・即時予測

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - ア. 強震動の事前評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
 - ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震
 - イ. 内陸地震

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - ウ. 大地震による災害リスク評価手法
- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
 - ア. 地震動の即時予測手法
- (3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究
地震

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
 - ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
 - イ. 首都直下地震
 - ウ. 千島海溝沿いの巨大地震
- (3) 研究基盤の開発・整備
 - イ. 観測・解析技術の開発

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

大地震による強い揺れの事前予測と災害の軽減に向け、高性能計算機を用いた大規模数値シミュレーションに基づく広帯域（短周期～長周期）強震動の事前評価、及び地震発生時の即時評価の手法開発を進める。2016年熊本地震や2013年パキスタン地震など、近年の強震動研究から明らかにされた、断層ごく近傍長周期地震動（長周期パルス）や、P波直後に到来する長周期P波（PL波）など、強震動被害の原因となる波動現象の最新の知見を取り入れ、首都直下地震等の内陸地震、そして南海トラフ

地震等の海溝型地震で想定される、広帯域強震動の事前予測により超高層ビル等の共振被害や、大加速度かつ長時間の揺れによる斜面崩壊等の災害発生を予測し災害軽減へと繋げる。また、日本列島に展開されている強震観測網と、将来の海域観測の充実を見据え、リアルタイム強震観測データ同化に基づく、長周期地震動の即時予測に向けた基礎研究を進める。

5カ年の重点課題として、(1)関東平野直下のM7級プレート境界・内地震による長周期地震動の生成可能性と構造物・地盤災害への影響評価、(2)近年の高性能パソコンに適合した広帯域強震動シミュレーションコードと高分解能地下構造モデルの開発、(3)南海・相模トラフ沿い、千島・日本海溝沿いの巨大地震による広帯域強震動の予測とその不確定性の定量化、(4)海・陸リアルタイム強震観測データ同化に基づく強震動（長周期地震動）の即時予測実験に取り組む。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1. 広帯域地震動評価に向けた強震動成因物理メカニズムの解明【H31～35年】

地表断層により生成する断層ごく近傍長周期パルス（Near-field項）の生成要件（震源の深さ、規模、断層すべり角）と断層滑り速度と強震動帯域の関係を、1999台湾集集地震や1999年トルコイズミット地震、2016年熊本地震等の強震観測データを再精査により明確化し、警固断層や上町断層などを対象とした断層ごく近傍強震動の予測を行う。そして、首都圏直下地震として心配される、M7級のフィリピン海プレート境界・内部の地震の発生に伴う、関東平野での長周期（広帯域）地震動の特性（応答スペクトル強度、震動継続時間等）を評価するために、2013年パキスタンの地震(M7.7)や2018年メキシコオアハカ地震(M7.2)など、関東と地震環境が類似する地震波形データの解析と、1923年関東地震の余震記録の再解析を進める。そして海溝型M8級巨大地震と、大規模平野直下のM7大地震の強震動の特性と構造物被害への影響を検証する。さらに、南海トラフ地震の長周期地震動の増幅や継続時間の予測の高度化に向け、表面波の増幅と導波に強く影響する、海域の付加体の内部構造（ V_s 速度勾配、 Q_s 値等）を既往の反射・屈折法研究の精査と、微動及び自然地震のインターフェロメトリーに基づく構造研究（新規計画における京大防災研究所の研究課題）の成果を統合してモデル化し、2004年紀伊半島南東沖地震や2016年三重県沖地震の強震動シミュレーションにより検証する。

2. 広帯域強震動シミュレーションコードの整備・公開【H31～35年】

強震動災害誘因の事前評価に資する高度なコード開発を進め、オープンコードとして研究者コミュニティに公開することで、観測・シミュレーション統合研究や、データ駆動型研究の強化に貢献する。現行の公開コード（OpenSWPC;Maeda et al., 2017）の改良を進め、海溝型巨大地震の強震動評価に不可欠な海底地形と海水／固体境界条件の組み込み、広域強震動・地殻変動評価のための球殻座標（または準球殻座標）への拡張、巨大地震の長時間継続地震動の評価に不可欠な、長時間ステップ安定計算のための単精度／倍精度混合演算の実現、短波長不均質構造による強い散乱下で安定に機能する、高性能PML吸収境界条件と広帯域の減衰（ Q ）モデルの導入、等を進める。そして、リアルタイム地震観測データ同化の実現に向けた、高速ネットワーク（SINET）接続リアルタイム高速計算機（東大情報基盤センターBDEC等）への適合をはかる。

3. 長周期地震動の即時予測に向けた基礎研究【H31～34年】

長周期地震動による災害軽減に向けて、将来の強震観測網のリアルタイムデータ配信と、今後の海域観測網の充実を見据え、観測データ同化にもとづく、大規模平野での長周期地震動の即時予測の実現に向けた基礎開発を進める。K-net, KiK-net等の陸域強震観測データに加え、DONET, S-net及び今後展開が期待される海域強震観測データ同化に基づく、海溝型巨大地震（南海トラフ地震、日本海溝の地震）の長周期地震動の即時予測を目指すとともに、海域強震観測の必要性・有効性を検討する。即時予測の防災への活用を図るために、耐震工学及び社会心理学の研究者と協働により、予測が必要な物理量（加速度値、応答スペクトル、強震動継続時間など）のとその予測誤差、不確定性を含む防災情報の発信、構造物の応急対応等について、関連分野の研究者との協働による総合的研究を進める。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

○ 伝達関数を用いた長周期地震動の即時予測

2観測点間の地震波伝播を表す伝達関数を、2観測点の強震波形データのデコンボリューションから予め求めてデータベース化し、大地震の強震観測記録に伝達関数をコンボリューション（畳み込み）することで、遠地の地点の揺れを即座に予測する手法の有効性を検討した(Enari and Furumura,

2023 ; 江成2024)。新潟周辺の大地震に対する、都心における長周期地震動の即時予測をターゲットとして、20個の地震 (>M5) に対する群馬～横浜地点のHi-net地震観測波形をデコンボリューションし、これらをスタックして2地点間の伝達関数を得た。これを用いて2007年新潟県中越沖地震 (M6.7) の際の横浜地点の長周期地震動の予測を行った結果、観測された長周期地震動の波形と良く一致することを確認した。この手法を用いる前提条件として、震源と入力観測点が波長程度以内に隣接している必要があり、離れた地震に対して広く適用するためには、複数の入力観測点とその伝達関数が必要である。そこで、関東平野周辺の複数の地震観測点を入力観測点とする予測手法の拡張を行い、後続相を含む長周期地震動の全波形の予測性能の向上が確認できた。南海トラフ地震の長周期地震動予測においては、日常的な地震活動が低いことから雑微動を用いたインターフェロメトリ解析に基づく伝達関数の推定を試みた。一般に、インターフェロメトリ解析では、微動源の偏りなどの理由により、得られた伝達関数の絶対振幅が不正確であるため、予めいくつかの予測結果を観測と比較して伝達関数の振幅を補正する必要があることに注意が必要である。なお、畳み込み計算による予測は瞬時に実行可能であり、地震発生からの経過時間とともに最新の観測波形を用いて予測を繰り返しアップデートすることで、予測精度と猶予時間のトレードオフを解消が期待できる。

○ 深層学習による長周期地震動の即時予測に関する研究

震源域近傍で記録された強震波形データを入力として、関東平野の都心部での長周期地震動の速度応答スペクトル (Taya and Furumura, 2023; 田屋2023) 及び地震波形 (Furumura and Oishi, 2023) を予測する深層学習 (CNN) モデルを開発した。能登半島～山形沖の地震をターゲットとして、2004～2011年に発生した、M4.5以上の地震の、入力観測点 (Hi-net群馬観測点 ; TAYHなど) での速度波形と予測地点 (Hi-net横浜観測点 ; YFTH) の速度応答スペクトルの関係を学習し、2011年以降に発生した大地震 (>M6.0) の長周期地震動 (1～10秒) の予測実験を行ない、速度応答スペクトル良い予測性能 (PV; スペクトルの予測/観測比=0.8-1.2) を確認した。一方、2019年山形沖地震のように学習データに含まれない規模の大きな地震 (Mw6.7) や、佐渡沖の地震のように学習データに含まれない場所での地震については予測性能が低くなった (PV=0.5-2)。そこで、多様な位置と規模の地震波形を日本列島の地下構造モデル (JIVSM) を用いた差分法計算 (OpenSWPC) から求め、これを訓練データに加えた強化学習を行ない、CNN予測モデルの汎用性を高めることに成功した。

○ 物理情報ニューラルネットワーク (PINN) による津波伝播予測

深層学習 (CNN) による地震動及び津波伝播の予測の実現に向けて、CNNモデルの学習過程に観測データによる拘束に加えて、波動伝播の物理則を拘束条件とする物理情報ニューラルネットワーク (PINN) の有効性を検討した(古村, 2024)。本実験では、津波シミュレーションの波動伝播過程を、1) 多数の観測点での津波記録と予測波形との残差を最小とする拘束 (データ拘束)、2) 予測結果の津波方程式による解の残差を最小とする拘束 (物理拘束) の2つを拘束条件により訓練を行った。そして、学習を済ませたPINNモデルに任意の地点と時刻を入力とすると、その地点の津波高を出力する予測モデルを構築した。一般に、ニューラルネットワーク (NN) モデルの学習には多量の学習データが必要であり、また学習データの範囲外の予測 (外挿予測) 精度は低い。これに対し、津波伝播の物理の拘束下で学習を行ったPINNは、少ない学習データでの学習効果が高く、また外挿予測においてCNNを越える予測精度の向上が確認でき、津波発生直後の観測データを学習して、未来の時刻の津波の広がり予測への見込みを得た。また、水深パラメータを未知数として、多様な波源に対する津波伝播過程の学習により、水深モデルのインバージョンが可能である。なお、差分法などに基づく地震動・津波予測では、全格子点での波動伝播の陽的 (時間を追った) 計算コストが大きい、CNN (PINN) は計算コストが小さく、かつ任意の地点と時間の津波を瞬時に予測できることから、即時予測への適用可能性がより期待できる。今後、運動方程式を拘束条件とする地震波の伝播予測への拡張を行う予定である。

・ 計画期間中 (令和元年度～5年度) の成果の概要

(1) 広帯域地震動評価に向けた強震動成因物理メカニズムの解明

○ 2001鳥取県西部、2016年鳥取県中部地震など西日本の地殻内地震で観測され、変位振幅から推定するMjの過大評価の原因となる、周期6～20秒のLove波パルスの生成メカニズムを、地下構造とLove波の群速度の分散曲線との特徴から説明した。また、同様の生成メカニズムを持つG波 (周期40-500秒) の生成・伝播特性と合わせて、大地震の表面波による微動や低周波数地震の誘発原因を検討した (Furumura and Kennett, 2020)。

○ 深発地震で太平洋岸での震度が大きくなる異常震域に対し、2013年オホーツク海深発地震 (610

km, Mw8.3) では、稚内や秋田など日本海側の震度が大きな、通常と逆の震度分布となったHi-net波形解析と地震波伝播シミュレーションにより、この原因が、1) 上部/下部マントル境界でのS波のcaustics、2) 地表でのsP変換波とsPL波、3) 地表でのsS反射波であることを確認した (Kennett and Furumura, 2019)。また、ScS波とsS, sSS波が震央距離4000~8000 kmのカザフスタンやモスクワで建物に軽微な被害を起こしたことを確認した (Furumura and Kennett, 2019)。

○ 琉球海溝沿いのフィリピン海プレートの沈み込みに伴うスラブ内地震 (深さ36~260 km) において、太平洋プレート上面でのS波反射により中部日本 (震源距離1500 kmの) に強い揺れが起きる様子を、F-net/Hi-net地震波形解析と地震波伝播シミュレーションから確認した。さらに、太平洋プレートで屈折したS波が660 km境界で広角反射して北海道に強い揺れを起こす過程もシミュレーションから確認した。1911年喜界島地震 (M8) の深さには様々な議論があるが、こうした中部日本や北海道の特異な震度分布がないことから、浅い地震の可能性を指摘した (Furumura and Kennett, 2022)。

((2) 広帯域強震動シミュレーションコード (OpenSWPC) の整備と公開

○ 地震波伝播シミュレーションオープンコード (Open SWPC; Maeda et al., 2017) の国内外からのフィードバックを受けて機能拡張を行った。主な機能として、1) 日本列島全域からグローバル領域の計算のための球殻地球の効果 (Earth flat法) の導入、2) 2次元 (線震源) 計算結果から3次元 (点震源) 波動場への振幅変換ツールの提供、3) 海水層のSOFARチャンネルの導入、3) Pythonによる入力パラメータの設定や可視化処理のユーザインターフェース拡充、4) オンラインドキュメントの整備 (日・英) とクラウド上での実行法の例示、5) 最新のスパコンへの移植と性能チューニング、などである。

○ 最新コード (Ver 5.3.0) は、2023年2月にgitHub (<https://github.com/tkmyd/OpenSWPC>) で公開した。

((3) 長周期地震動の即時予測に向けた基礎研究

○ 強震観測波形データと地震波伝播シミュレーションのデータ同化に基づく、未来の時刻の揺れの広がりや長周期地震動の即時予測に向けた研究開発を行なった。2007年新潟県中越地震や2011年東北地方太平洋沖地震のK-NET、KiK-net強震波形と東大学情報基盤センターのOakforestスパコンの超並列

(2048CPU) 計算により、都心で強い揺れが発生する数十秒前に揺れの波形予測の実現性を確認した (Furumura et al., 2020)。さらに、即時予測の高速化に向けて、同化地点から予測地点の揺れの伝播を伝達関数 (グリーン関数) を用いて瞬時に予測する手法改良を行った (Oba et al., 2019)。

○ 同化波動場からの地震波の逆伝播計算により、震源イメージングを行う新たな手法開発を行なった。KiK-netデータを用いて2004年新潟県中越地震と2008年茨城県沖地震の震源イメージングを実行し、従来のBack Projection法やTime Reversal法に比べて粗い (20 km程度) 観測点配置でもシャープな震源モデルが得られることを確認した (Furumura & Maeda, 2021)。

○ 全国地震観測データ流通ネットワーク (JDXnet) と東大情報基盤センターWisteriaスパコンを結合した、長周期地震動即時予測プロトタイプシステムを開発し、計算一観測データ同化・リアルタイム予測実験を行った。SINETに流した2007年中越沖地震のF-net強震計データ18点とHi-net地震計データ349点をWisteriaのデータ・学習ノード群 (Aquarias) が取り込み前処理を行ないシミュレーションノード群 (Odyssey) に転送してデータ同化を行ない未来の波動場の予測を行った。そして大規模 (2048 CPU) 並列計算により、表面波の伝播速度の8.5倍の速度での高速計算の可能性を確認した (中島ほか、2021)。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

・目標3-(1)-ウに対し、本研究成果は深発巨大地震による強震動の生成メカニズムの解明と予測精度の向上に貢献した。

・目標5-(2)-アに対し、南海トラフにつながる琉球海溝での巨大地震 (1911年喜界島地震) の震源深さを明確化した。

・目標3-(2)-ウに対し、データ同化と深層学習に基づく長周期地震動の即時予測手法を開発した。

・目標5-(3)-イに対し、地震動予測に必要な地震波伝播シミュレーションオープンコードの整備と公開を行った。

本研究課題の成果は、強震動の予測精度の向上に不可欠な地震波の生成・伝播・増幅メカニズムを明確化し、これらを適切に評価した地震波伝播シミュレーション手法の開発と地下構造モデルや震源過

程の研究の発展など必要な研究開発にフィードバックを図るものである。長周期地震動の即時予測手法の開発にかかる成果は大地震発生直後の速やかな災害の発生予測と防災情報の発出に貢献するものであり、関係機関との協力による発展により次世代の地震動予測手法として防災への貢献が期待できる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Furumura, T. and BLN Kennett, 2023, Distinctive seismic reflections from the subducting Pacific slab for earthquakes in the Ryukyu arc, *Geophy. J. Int.*, 233, 1213–1228, <https://doi.org/10.1093/gji/ggac514>, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

古村孝志・大石裕介, 2023, 深層学習に基づく長周期地震動の即時予測実験（その2）高層ビルの揺れの予測, 日本地震学会2023秋期大会, S15P-10

江成徹平・古村孝志, 2023, 強震波形記録による伝達関数を用いた長周期地震動の即時予測の数値実験, 日本地震学会2023秋期大会, S15-02

染矢真好・古村孝志, 2023, Physics-Informed Neural Network (PINN) による地震波伝播の予測：2次元音響場での数値実験, 日本地震学会2023秋期大会, S01-P06

森田寅靖・古村孝志・前田拓人, 2023, アジョイント方程式に基づく、2次元P-SV波動場及び震源推定の試み, 日本地震学会2023秋期大会, S01-10

江成徹平・古村孝志, 2023, 長周期地震動の即時予測に向けた地震波干渉法によるグリーン関数の活用, 日本地球惑星科学連合2023大会, SSS09-15

田屋大輝・古村孝志, 2023, 畳み込みニューラルネットワークによる長周期地震動予測, 日本地球惑星科学連合2023大会, SCG55-13

古村孝志, 2023, 物理情報ニューラルネットワーク (PINN) を用いた津波伝播評価, 日本地球惑星科学連合2023大会, SCG55-P14

Taya D. and T. Furumura, 2023, A forecast of long-period ground motions by using a convolutional neural network, IUGG The 28th General Assembly, Berlin, IUGG23-2681

Taya S. and T. Furumura, 2023, Real-time forecast of long-period ground motions by Green's function obtained from seismic interferometry, IUGG The 28th General Assembly, Berlin, IUGG23-2334

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

データ同化・深層学習に基づく長周期地震動の即時予測

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

古村孝志（東京大学地震研究所）, 三宅弘恵（東京大学地震研究所）, 武村俊介（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

田中淳（東京大学大学院情報学環）, 関谷直也（東京大学大学院情報学環）, 竹中博士（岡山大学）, 前田拓人（弘前大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

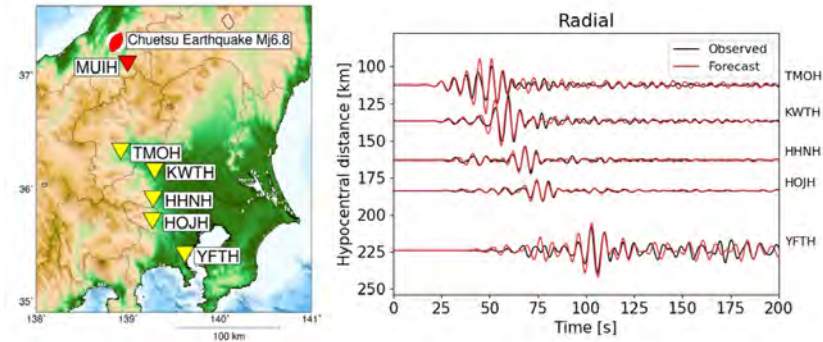
e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

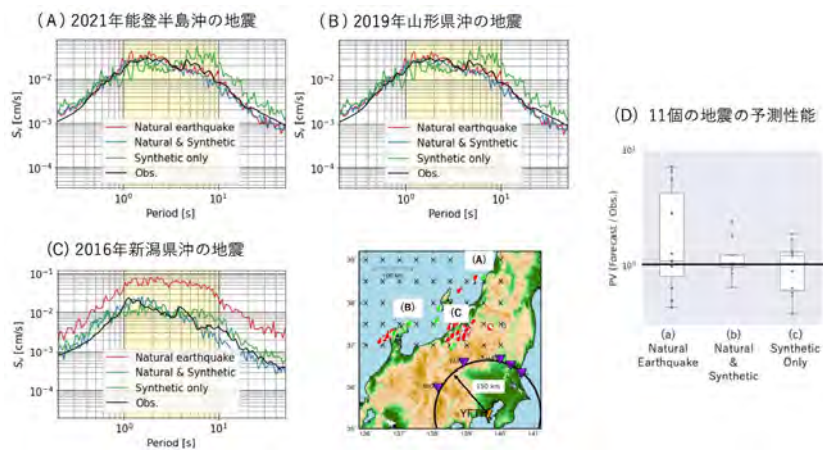
氏名：古村孝志

所属：東京大学地震研究所



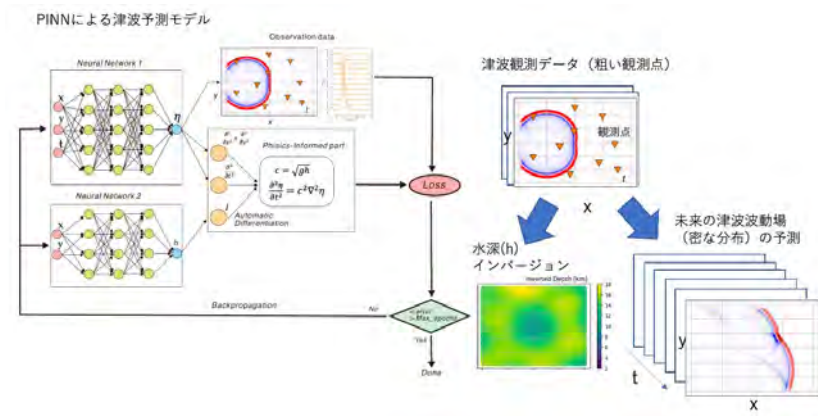
伝達関数を用いた長周期地震動の予測

2004年新潟県中越地震における予測地点（黄色▽）の地震動の予測結果（赤線）と実際の観測波形（黒）の比較。赤▽は入力地点を表す。



深層学習による長周期地震動の予測

(A) 2021年能登半島沖の地震、(B)2019年山形県沖の地震、(C)2016年新潟県沖の地震の長周期地震動の速度応答スペクトルの予測結果と観測データ（黒線）の比較。赤は自然地震波形データの学習、緑は地震波伝播シミュレーション波形データの学習、青は両方を用いた学習モデルによる予測。（D）に評価を行った11個の地震の予測性能（予測/観測比）の分布を四分位図で示す。



PINNモデルを用いた津波予測モデル

粗い観測点での津波データを用いて津波伝播過程を学習したPINNモデルを用いて、未来の時刻の密な波動場を予測する。学習の過程で水深モデルをインバージョンもターゲットとする。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

首都圏の地震被害分布と地震像の解明

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - ア. 強震動の事前評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
 - ア. 地震発生機構の解明

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
 - ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

- イ. 内陸地震

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究

- イ. 首都直下地震

(5) 総合的研究との関連：

首都直下地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

大地震による建物の被害は、必ずしも一様ではなく、不均質が見られるが、その原因は、建物の強度の違いだけでなく、揺れの細かな不均質によるところも考えられる。首都圏には稠密に建物があるため、建物被害の軽減を考える際には、揺れの不均質に応じた的確な対策が必要である。そこで、稠密な観測により稠密な揺れの違いを示し、地形や地下構造のどんなこと関係するのかを明らかにする。近年、首都圏では、被害を伴うような地震が発生していないため、歴史地震の被害分布と対比させ、様々なことが考えられる首都直下地震の地震像に対して、いくつかの候補に絞る。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

令和元年度においては、根津周辺における稠密観測の準備を行う。MeSO-net等の観測記録を用いて首都圏に発生した地震の処理を行う。

令和2年度においては、根津周辺に稠密な観測点を設置し、地形と揺れの関係を明らかにする観測を行う。MeSO-net等の観測記録を用いて首都圏に発生した地震の処理を行う。首都直下地震の地震像を明らかにする研究に関する意見交換会を開く。

令和3年度においては、安政江戸地震時に被害の記載されている根津周辺のお寺等における観測の準備を行う。MeSO-net等の観測記録を用いて首都圏に発生した地震の処理を行う。

令和4年度においては、安政江戸地震時に被害の記載されている根津周辺のお寺等における観測を行う。MeSO-net等の観測記録を用いて首都圏に発生した地震の処理を行う。

令和5年度においては、根津周辺のお寺等における観測データから、現在の揺れの分布と過去の被害との関係を明らかにする。MeSO-net等の観測記録を用いて首都圏に発生した地震の処理を行う。首都直下地震の地震像を明らかにする研究に関する意見交換会を開く。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

谷中・根津・千駄木および上野周辺に設置した臨時観測点をすべて撤収し、この5年間で得られた観測データの解析を進めた。2024年1月10日に、首都直下地震総合研究グループ（参加者10名）で、オンラインの意見交換会を開いた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

現代の地震観測で得られる知見を史料の分析結果と結びつけ、歴史地震の震度を検証および定量化したいと考え、2020年から2024年まで、谷中・根津・千駄木および上野周辺において稠密観測を行った。安政江戸地震の揺れの検証を目的のひとつとし、観測点は同地震の被害史料の分析から被害場所が特定できた地点（主にお寺や神社）とその近隣地点にした。時期によって観測点数は異なるが、約20地点で観測した。この4年間に文京区本郷で震度1以上を記録した地震は200回以上あり、それらのデータを用いた解析結果では、観測点ごとの卓越周波数や振幅の違いが確認できた。その違いは、過去の地震による建物被害の記述の地域差とおおむね対応していた。しかし、いくつか相違する地点も見つかっていて、それらには別の要因を考える必要があると思われる。たとえば、建物の築年数によって強度が低下したり、建築手法の違いによっても耐震強度に違いが出たりする可能性がある。それらの建物に関する情報を知ることは困難であるため、このような現代の地震観測を通して、地下構造や地盤特性以外による揺れと被害の関係性を見いだす必要がある。

毎年、首都直下地震総合研究グループで、オンラインの意見交換会を開いて、課題の進捗状況等の情報交換を行った。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

「地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究」における（1）地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化、ア．強震動の事前評価手法において、これまでは、地下構造や地盤特性を仮定して、強震動を推定していた。そのようにして得られた強震動の分布が、過去の地震による建物被害の分布を表現できているとを確認するため、現代の機器による観測データと比較した。揺れが大きくなると推定された場所と被害が大きかった場所とがおおむね対応するが、必ずしもそうならない事例もあり、その違いには、建物そのものの強度やその他の要因が存在すると考えられる。さらに観測事例を増やして、その関係を精度の良いものにする必要がある。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

首都直下地震

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

酒井慎一（東京大学大学院情報学環/東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：酒井慎一

所属：東京大学地震研究所・東京大学大学院情報学環

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

堆積平野・堆積盆地における地震災害発生機構の解明

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - ウ. 大地震による災害リスク評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - ア. 強震動の事前評価手法
- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
 - ア. 地震動の即時予測手法

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
 - イ. 首都直下地震
- (5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

首都直下地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

大地震による災害リスク評価手法に資するべく、地震災害に関する災害発生機構を重点的に解明する。強震動が増幅する堆積平野・堆積盆地は、災害リスク評価における脆弱性と捉えることができ、特に、増幅率という形で災害誘因の定量化が可能である。本研究では、人口密度が高い堆積平野・堆積盆地における観測、強震観測のデータベース化と解析を行い、地震災害の素因と誘因の関係や災害発生機構を多面的に分析し、災害を制御する要件を明らかにする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

研究期間前半3年間は、強震動による地震災害誘因の分析のため、定常観測に加え臨時観測を含めた堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースを増強し、堆積平野・堆積盆地の地震動増幅特性を定量化する。また、トリガー観測と連続観測が混在した場合の、適切な強震記録データベースの提示方法を理工学の観点から研究する。さらに、これまでに構築した地下構造モデル暫定版を、地震災害誘因の事前評価と即時推定に資するべく新たなモデル化手法を開発する。

研究期間後半2年間は、大地震による災害リスク評価に向けて、堆積平野・堆積盆地における地震動増幅特性と、建物被害や人口被害の脆弱性の研究を推進する。また、首都直下地震や南海トラフ巨大地震を対象に、地震災害の素因と誘因の関係や災害発生機構を多面的に分析し、災害を制御する要件を明らかにする。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

入力予定

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

入力予定

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

入力予定

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Miyake, H., J. J. Mori, D. J. Wald, H. Kawase, S. Toda, and P. M. Mai, 2023, Introduction to the Special Section for the Centennial of the Great 1923 Kanto, Japan, Earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., 113, 1821–1825, 10.1785/0120230200, 査読無

Sung, C.-H., H. Miyake, N. Abrahamson, and N. Morikawa, 2024, Nonergodic Ground-Motion Models for Subduction Zone and Crustal Earthquakes in Japan, Bull. Seismol. Soc. Am., 114, 10.1785/0120230258, 査読有

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：地震：地震：強震動地震観測

概要：

既存データベースとの関係：<https://smsd.eri.u-tokyo.ac.jp/smad/>

調査・観測地域：

調査・観測期間：

公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web）<https://smsd.eri.u-tokyo.ac.jp/smad/>

(11) 次期計画における課題名：

震源から構造物に至る強震観測の連携強化による地震災害発生機構の解明

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

三宅弘恵（東京大学地震研究所）, 古村孝志（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

東京大学大学院情報学環, 北海道大学, 東京工業大, 信州大学, 福井大学, 広島大学, 高知大学, 九州大学, 国立研究開発法人建築研究所

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：<https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：三宅弘恵

所属：東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

堆積物に基づく噴火物理化学パラメータ推定手法の高度化と事象分岐判断への活用

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
- ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
- 火山

(4) 火山現象の解明とモデル化

- ア. 火山現象の定量化と解明
- イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (4) 中長期的な火山活動の評価
- ア. 火山噴火の長期活動の評価

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
- エ. 桜島大規模火山噴火
- オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

1回の噴火の噴出量は噴火の規模を決定するために必要な物理量であり、地表面現象や災害の性質にも密接に関係する。噴出率や噴出物組成とそれらの時間変化は、噴火様式や推移の理解において重要であり、進行中の噴火では推移予測のための基礎データとなる。これらの物理化学パラメータは事象分岐の判断においても重要な要素になる。そのため、活動的火山においては過去の噴火におけるこれらのパラメータを解明することに加えて、噴火開始後には迅速にそれらを明らかにし、事象系統樹における分岐判断に取り入れていくことが重要になる。ただし現状の事象系統樹の試作及び活用において、この点は十分に克服できていない。本課題ではとくに下記(a)~(c)の問題点を踏まえ、活動的火山における将来の噴火を念頭に、噴火時の地表面現象を迅速に把握し、堆積物及び噴出物データをもとに噴火の物理化学パラメータ（噴出量・噴出率など）を推定するための既存手法を見直し、より高度かつ実用的なものへと発展させることを目指す。

(a) 噴火発生時には即時的な現象観察と地質調査を行い、堆積物データをもとに物理化学パラメータとその変化を迅速に決定する必要がある。その際に地震学的・測地学的データなど地球物理学観測と

の照合も行われるべきである。しかし現状、堆積物及び噴出物にもとづくパラメータ推定手法や他の観測データの活用方法は十分に確立されているわけではない。噴出率や噴出量推定にはいくつかの経験則や理論モデルが用いられるが、推定値が定まらない場合が多く、誤差の定量的評価も不十分である。近年の新燃岳噴火などではこの問題が顕在化している。

(b) 事象分岐を判断する上で上記パラメータが重要な役割を担うと考えられるが、具体的に事象系統樹に組み込むためには、分岐の重みについて定量的基準が必要である。

(c) 実際の噴火に際しては、堆積物データをもとに事象分岐の判断を試行し、調査観測研究の成果を迅速に取り入れつつ、噴火事象系統樹を更新していくことも必要である。そのために、噴火発生時には調査観測を全国連携で機動的に実施するとともに、関連機関とも密接に連携する必要がある。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

火山噴火直後に得られる堆積物の地質学的情報（層厚・粒径分布等）を用いて、物理モデルや経験則と組み合わせる噴火物理パラメータ（噴出量・噴出率など）を推定するための既存手法をレビューし、その評価及び改良を行う。近年の霧島山、桜島、浅間山等での噴火や、海外の噴火を対象に堆積物データの再解析を行うとともに、地球物理観測データ等から推定される物理量との照合を行い推定手法の最適化を試みる。また推定値の信頼度評価手法についても検討する。一方物理パラメータに加えて、噴火直後の地表面現象や発生場の把握と、化学組成等物質科学的データについても、その即時把握と活用方法について、事象分岐判断への導入を念頭において検討する。上記火山や他の活動的火山での噴火を想定し、堆積物及び噴出物データの迅速な取得のための機動的観測方法や体制の整備、データ共有方法の検討も同時に進める。とくに上述の(a)~(c)に着目して研究を進める。

2019年度においては、(a)については、噴火堆積物をもとに噴火の物理化学パラメータを見積もるための手法や理論及び経験モデルを整理し、それらの精度と適用性について実際の噴火事例をもとに検討する。また地球物理学的観測データの活用方法について検討し、地質・物質科学的情報と地球物理学的観測から得られる物理量との差異やその原因について、実例をもとに考察する。即時的現象把握に関しては、遠隔観測やドローンの活用方法についても検討する。(c)については、将来の噴火を想定し、噴火の物理量を迅速に把握し、事象系統樹の評価改良を速やかに行うための、機動的かつ効率的な火山噴出物調査手法の提案を目指す。そのための議論を、研究集会などの場を設けて行う。これは2023年度まで年1回を目安に実施する。

2020年度においては、前年度からの(a)に関する研究を継続する。また(b)に対応して、既存研究や海外の事例などをもとに、噴火現象の分岐に関係する地質学、物質科学および地球物理観測にもとづく基準（噴出率変化等）を整理し、事象分岐の重みの論理的、数値的評価方法を探る。

2021年度においては、前年度からの(a)、(b)に対応する研究を継続する。またそれらを踏まえて、霧島山、伊豆大島、浅間山など活動度の高い火山について事象分岐判断基準の評価、改良を進める。

2022年度においては、これまでの研究を総括しつつ、噴火時の地質及び物質科学的データの迅速な収集と現象の即時的把握、噴火物理化学パラメータの解析、事象系統樹や分岐判断への活用方法についてまとめる。また、噴火が想定される火山や噴火中の火山の調査観測を全国連携で機動的に実施する枠組みや、関連機関との連携方法について整理し、噴火の際には実践する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

噴火堆積物解析手法の高度化については、噴出物の迅速なマッピング、噴出量・噴出率の高精度推定を目指した研究を、噴出物時系列解析・分析手法の高度化については、化学組成、組織、色等の情報取得とその活用を目指した研究を複数の火山で実施している。本年度も霧島、阿蘇、諏訪之瀬島、榛名、硫黄島等の火山について、噴火堆積物の解析および噴出物の構成物、組成、組織等の時系列変化を明らかにする研究を進めた。

霧島新燃岳については、2017-2018年噴火の表面現象・噴火様式推移を、噴火時の調査観察（踏査およびドローン）と火山灰の全岩化学組成分析、軽石の物性および組織分析にもとづき詳細に明らかにした。その結果、観測された噴火様式とその変遷は、山頂火口直下の地質構造とマグマ上昇速度の影響を強く受けたこと、爆発と溶岩ドーム形成を同時に発生するハイブリッド噴火により、2011年噴火には認められない高結晶度の軽石が生じたことなどがわかった。高結晶度の軽石は、準プリニー式噴火には至らない程度のゆっくりとしたマグマ上昇速度を反映した噴出物と考えられ、ハイブリッド噴

火特有の噴出物の可能性がある。この研究は、噴出物組織の迅速な解析の重要性を示すとともに、安山岩質マグマの噴火様式多様性の原因の理解を進めることに貢献する (Maeno et al., 2023)。霧島火山群については、これまでの成果を踏まえて、火山活動推移モデルについて検討した。完新世の噴火履歴を整理するとともに、一回の噴火の規模や噴火様式の変化の共通性等を考慮し、噴火推移パターンをType AからGの7タイプに分類した。そして、この噴火推移パターンと近年や歴史時代の観測・観察事例 (新燃岳、えびの高原硫黄山、御鉢)、マグマ供給系モデルにもとづき、霧島火山群全体に対する火山活動推移モデルの試案を作成した。

この試案では、深部および浅部マグマの蓄積や移動に関する観測情報を含む先行現象ステージ、火口位置 (新火口または既存火口) や帯水層に起因する水蒸気爆発の有無に関する情報を含む噴火発生ステージ、噴火開始後の噴火様式分類 (Type A~G) の情報を含む主噴火ステージの3つの段階に分けて、可能性のある噴火事象を網羅的に整理した。また、各噴火事象の発生頻度をもとに、分岐確率についての評価も行った。この評価手法では、既存火道を使う噴火ではおよそ60%が水蒸気噴火で開始し、40%は水蒸気噴火を起こさずにマグマ噴火に至る。また、水蒸気噴火で始まる噴火のうち85%がそのまま終息し、14%がマグマ噴火、残りの1%は山体崩壊に至る。ただしこの手法の問題点として、記録の漏れと休止期の区別や噴火未遂の取り扱いについて十分に考慮できておらず、さらなる検討を要する。

課題参加者による研究集会を2024年2月に実施し、最近の研究成果や次期計画での方向性等について情報交換を行った。とくに噴出物の迅速解析や手法高度化における課題や、噴火対応時の実践、噴火事象の分岐判断への活用方法についての議論を行った。

・計画期間中 (令和元年度~5年度) の成果の概要

霧島火山群については、2017-2018年噴火の表面現象・噴火様式推移を、噴火時の調査観察 (踏査およびドローン) と火山灰の全岩化学組成分析、軽石の物性および組織分析にもとづき詳細に明らかにした。この研究は、噴出物組織の迅速な解析の重要性を示すとともに、安山岩質マグマの噴火様式多様性の原因の理解を進めることに貢献した (Maeno et al., 2023)。また、2017-2018年噴火を含むこれまでの研究成果や、噴火履歴に関する既存研究のレビューに基づき、霧島火山の噴火推移パターンの抽出と近年および歴史時代の観測・観察事例の整理、マグマ供給系のモデル化を行い、火山活動推移モデルを作成した。深部および浅部マグマの蓄積や移動に関する観測情報を含む先行現象ステージ、火口位置 (新火口または既存火口) や帯水層の有無に関する情報を含む噴火発生ステージ、噴火開始後の噴火様式分類の情報を含む主噴火ステージの3つの段階に分けて、可能性のある噴火事象を網羅的に整理するとともに、噴出率等の事象分岐の条件についても検討した。

浅間、阿蘇、諏訪之瀬島、榛名等の火山においては代表的な噴火についての噴出物の構成物、組成、組織の時系列変化を明らかにする研究を進めた。2019年8月に浅間山で発生したごく小規模の噴火では、降灰調査、噴出量推定や火山灰構成物の解析に基づく噴火様式の推定を、課題参加機関と協力して行った。2021年10月阿蘇中岳噴火の際の降灰調査においては、火山データ共有システムJVDNを活用した複数機関による連携調査をはじめて実施し、降灰分布や噴出量の迅速な推定を行った。草津白根火山2018年水蒸気噴火における噴出物分布と複数手法により検討した噴出量に関する論文を出版した (Kametani et al., 2021)。

即時的な噴火現象の把握及び調査の実践の一環として、西之島における2019-2020年噴火の噴出物採取や地形データの取得を、関係機構と協力して実施した。ドローンによる試料採取については従来の手法を改良した吸引法により、200g以上の礫サイズ試料の採取に成功したほか、全岩組成分析により、これまでの安山岩の活動から玄武岩質安山岩の活動に変化したことなどを明らかにした (Maeno et al., 2021)。アクセス困難な地域の試料採取や地形調査の迅速な実施において、ドローンの活用が極めて有効であることが示されたと同時に、他の火山で実施する際の注意点や改善点も見出された。2021年8月に福岡ノ場で発生した大規模海底噴火については、衛星リモセン、インフラサウンドを活用した噴火様式や詳細な時系列にもとづく噴火推移の把握、定常一次元モデルを用いた噴出率等の噴火パラメータの推定、噴出物の化学分析にもとづくマグマの特徴の把握とSO₂収支の推定などを行い、この噴火の全体像と浅海におけるマグマと海水との相互作用のプロセスを明らかにした (Maeno et al., 2022)。また、漂流軽石の気泡組織の解析を進め、マグマ上昇過程やマグマと海水との相互作用のプロセスを解明する研究も進めた。

課題参加者による研究集会を毎年度実施し、本課題の進め方や最新の研究成果等について情報交換を行った。とくに噴出物モニタリングや噴出量・構成物の迅速解析における課題について問題意識を共

有し、手法を高度化させていくこと、そして噴火対応時にいかに実行し、噴火事象の分岐判断に活用していくかについて継続的に議論を行った。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

火山噴火時の即時的現象把握や、噴出量等の噴火パラメータ推定のための調査協力およびデータ共有体制の構築は、課題3(2)ウの大きなテーマであるが、浅間山、阿蘇山での近年の噴火における実践や過去の噴火の解析、研究集会の実施および論文化を通して着実に進んだ。西之島や福徳岡ノ場噴火についてはアクセス困難な火山での噴火対応の実践となったが、リモート地物観測データ、地質物質科学的データ、モデリングを融合させたアプローチの有用性が示された。即時性において課題は残るものの、火山噴火時の現象や噴出物の迅速な把握という点で、データの蓄積や手法の開発は着実に進み、火山災害の軽減に貢献する成果が得られたと言える。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Maeno, F., S. Shohata, Y. Suzuki, N. Hokanishi, A. Yasuda, Y. Ikenaga, T. Kaneko and S. Nakada, 2023, Eruption style transition during the 2017–2018 eruptive activity at the Shinmoedake volcano, Kirishima, Japan: surface phenomena and eruptive products, *Earth, Planets and Space*, 75, 76, doi:10.1186/s40623-023-01834-3, 査読有, 謝辞有

Ichihara, M., T. Kobayashi, F. Maeno, T. Ohminato, A. Watanabe, S. Nakada and T. Kaneko, 2023, The sequence of the 2017–2018 eruptions and seismo-acoustic activity at Kirishima volcano group, *Earth, Planets and Space*, 75, 144, doi:10.1186/s40623-023-01883-8, 査読有, 謝辞無

Benet, D., F. Costa, C. Widiwijayanti, J. Pallister, G. Pedreros, P. Allard, Y. Aoki and F. Maeno, 2024, VolcAshDB: a Volcanic Ash DataBase of classified particle images and features, *Bulletin of Volcanology*, 86, 9, doi:10.1007/s00445-023-01695-4, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

水野 樹・前野 深・谷 健一郎, 2023, 福徳岡ノ場海底火山2021年噴火における漂着軽石・海底軽石の粒子物性と気泡組織, 日本地球惑星科学連合大会, SVC34-P07

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地質・物質データに基づく噴火パラメータの推定と活動推移評価への活用

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

前野深（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

宮縁育夫（熊本大学）, 嶋野岳人（常葉大学）, 鈴木由希（早稲田大学）, 吉本充宏（山梨県富士山科学研究所）, 石塚吉浩（産業技術総合研究所）, 三輪学央（防災科学技術研究所）, 長井雅史（防災科学技術研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：前野深

所属：東京大学地震研究所火山噴火予知研究センター

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

観測研究データへの永続的識別子付与

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

5 研究を推進するための体制の整備

(4) 関連研究分野との連携強化

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

観測研究データに永続的な識別子を付与し、観測研究計画で得られたデータの効率的な公開と利用の促進をはかる。

近年、「オープンデータ」をキーワードに、研究データにもDOI（Digital Object Identifier：論文等の永続的識別子としてよく知られる）などの永続的な識別子をつけるという運動が広まりつつある。データに識別子を付与することにより、データを適切に利用（引用）することができ、また、論文の被引用件数と同様に、利用された履歴を機械的に追跡できるようになるためデータ提供者の評価にもつながる。本計画では、観測研究で得られたデータについて、識別子をつけて公開するための課題を検討し、実際に公開をすすめる。現計画だけでなく過去の計画で取得したデータの公開についても検討する。

専門家だけでなく非専門家も含む幅広い人々がデータを使えるようになれば、これまでにない新しい発想での解析等が実施される可能性がある。また、データに立脚して地震学への理解を広めることができるようになる。そのためには、データを公開するという意思と、公開したデータを管理、追跡する手法とが必要である。すでに多くのデータが公開されているが、すべてのデータに誰でも容易にアクセスできるという状況には至っておらず、改善の余地がある。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題の実施にあたっては、課題番号ERI27「研究成果共有データベースの構築」や、観測実施機関の関連する課題との連携を密にする。

関係者間でデータへのDOI等永続的識別子付与についての情報交換をおこなう。また、5年間の研究期間中に実際のデータのうち、条件の整ったものを対象に永続的識別子を付与して試行的に公開する。DOIの付与には、自ら登録機関に登録する、データジャーナルを出版し、そこにデータペーパーの投稿を受け付ける、既存のデータジャーナルに投稿する、などの手法が考えられる。それぞれの手法の長所・短所などを検討する。また、データの種類やその生産者（観測、実験、数値計算等）によって最適な手法は異なるとも考えられるため、観測研究計画関係者から広く情報提供を求める。

平成31-32年度においては、DOI等の永続的識別子付与と公開について、現状と克服すべき課題を整理する。永続的識別子付与について先行する防災科学技術研究所、海洋研究開発機構、極地研究所、海上保安庁の事例も参考にする。

平成33-34年度においては、前年度までの検討にもとづき、識別子としてDOIを想定し、公開に必要なシステムの要件を検討し、システム開発を開始する。開発したシステムによりDOI付与および公開を実施する。観測研究計画の各担当者から得たデータ公開に関する情報を分析する。

平成35年度においては、前年度までに実施したDOI付与と公開について、利用状況等を確認しながらシステムの改善をおこなう。観測研究データのDOI付与と公開にあたっての課題をまとめる。また、過去の研究計画によって得られたデータに遡ってDOI付与・公開するための課題を検討する。

平成35年度においては、前年度までに実施したDOI付与と公開について、利用状況等を確認しながらシステムの改善をおこなう。観測研究データのDOI付与と公開にあたっての課題をまとめる。また、過去の研究計画によって得られたデータに遡ってDOI付与・公開するための課題を検討する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

東京大学では機関リポジトリ（UTokyo Repository）に外部で公開しているデータベース等のメタデータを登録できる。いくつかのデータを登録し、DOI付与も実現した。機関リポジトリを通じて「データカタログ横断検索システム」やGoogle Dataset Searchなどにも登録される。防災科学技術研究所のMOWLASの観測網に付与されているDOIを用いて、データの引用状況について分析した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

DOI等の永続的識別子付与と公開について、現状と克服すべき課題を整理するため、さらに広く地震学とオープンデータについて議論することを目的として、日本地震学会2019年度秋季大会において特別セッション「オープンデータと地震学」を開催した。このセッションの開催趣旨は「研究データの公開と流通が学術の発展に不可欠な要素であるという考えが広がりつつある。地震学の周辺では、地震波形データをはじめとして公開・流通など先端的な事例がある一方で、データの生産に関わる研究者・技術者の評価などの課題も多い。研究データ共有の手段である永続的識別子付与やデータ出版などの取り組みについて、他の研究分野や国内外の情勢、各大学・研究機関での具体的な取り組みについて情報交換し、地震学の発展に寄与するデータ共有のあり方について考えたい。」とした。17件の口頭発表（うち3件は招待講演）と4件のポスター発表があり、活発な議論と情報交換の場となった[加納・他(2019)]。識別子付与だけでなく、データジャーナルやデータリポジトリの活用の事例や可能性が提示され、また大学・研究機関や様々なプロジェクトにおけるデータの蓄積あるいは公開のためのデータベースの構築・運用の実際や課題など、本研究課題を進めるために重要な情報が得られた。

防災科学技術研究所のMOWLASの観測網については、2019年4月からDOIが付与されている。計画期間中に、機関リポジトリ、データジャーナル、データリポジトリなどさまざまな方法でDOIが付与されるようになった。成果管理システムのソフトウェア等のメタ情報の収集の部分にも反映されている。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

データへの永続的識別子付与の検討を通して「5.（3）研究基盤の開発・整備」に貢献している。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

Kano, Y.,2023,Open Data Produced by “Minna De Honkoku” ,AOGS2023,IG11-A002

加納靖之・橋本雄太,2023,みんなで翻刻が生成したオープンデータ,日本地球惑星科学連合2023年大会, MIS22-P04

久保久彦・汐見勝彦,2023,データDOIの引用情報に基づく防災科研MOWLASデータ活用状況（2019－2022年）把握の試み,日本地震学会2023年度秋季大会,S19-01

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

加納 靖之（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

汐見勝彦（防災科学技術研究所）,高橋浩晃（北海道大学）,内田直希（東北大学）,澁谷拓郎（京都大学
防災研究所）,松島健（九州大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：加納 靖之

所属：東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

データ流通網の高度化

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

全国の陸域、海域および火山周辺に設置された地震・地殻変動などの各種観測網から得られるデータを即時的に流通させるシステムを運用・高度化し、全国の観測研究のデータ流通基盤を整備する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題で取り扱うデータ流通網は、基本的に実施機関および共同研究機関の運営費交付金によって運用・維持されるものである。5カ年を通して、高速広域ネットワークを利用したデータ流通網JDXnetの安定的な運用とその機能の高度化を行う。

- (1) 災害時に強いデータ収集・中継システムの維持とその拡張
- (2) データ蓄積機能を包含するデータ流通システムの開発
- (3) 過去の観測データを含むデータ提供システムの開発
- (4) 接続機関の拡大
- (5) データ流通ワークショップの開催

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

観測データ流通網JDXnetの安定的な運用を継続した。地震データ流通において利用されているデータ交換の新たなプロトコルのテストを実施した。柏にて接続された東京大学情報基盤センターの大規模並列計算機を利用したリアルタイム地震データ解析の開発を引き続き継続した。令和6年3月26日にデータ流通ワークショップを開催予定である。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

全国の陸域、海域および火山周辺に設置された地震・地殻変動などの各種観測網から得られるデータを即時的に流通させるシステムを運用し、全国の観測研究のデータ流通基盤を整備した。今後想定される増大するデータチャンネルへの対応を検討した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

データ流通網の高度化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

鶴岡弘（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

北海道大学,弘前大学,東北大学,東京大学,東京工業大学,名古屋大学,京都大学,高知大学,九州大学,鹿児島大学,防災科学研究所,気象庁,海洋研究開発機構,産業技術総合研究所,国土地理院,地震予知総合研究振興会,国立天文台,北海道,青森県,東京都,神奈川県,静岡県

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：鶴岡弘

所属：東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

光技術を用いた地下深部・火山近傍における地震・地殻変動計測技術の確立

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

イ. 内陸地震

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

断層すべりや応力場など地殻内で起こっている現象を観測結果に基づき定量的に理解するためには、地下深部や断層近傍における観測手法の確立が不可欠である。また、火山観測においては、インフラの乏しい火山体近傍における観測でマグマ移動等に伴う地下深部の質量変動などの監視が必要である。

本研究では、光計測技術を用いた地震計・重力計などのセンサを面的に配置し光ファイバで接続し、従来観測が困難であった地下深部や火山近傍での次世代の光ベースの地震・地殻変動観測網を構築するための手法の確立をめざす。小規模のシステムを構築し、地殻活動や火山活動の観測を行い、手法の有効性を検証する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

光ベースの小規模の地震・重力の計測システムを構築し、地殻活動や火山活動の観測を行い、手法の有効性を検証する。計画前半では、光通信分野の研究機関やメーカーと連携し、長距離伝送試験や複数のセンサに光源を同時配信する光センサ・ネットワーク実験を行い、高温の地下深部あるいは火山活動時にアクセス困難となる火口近傍での地震・地殻変動の観測手法を確立させる。計画後半に同システムを用いた観測を実施する。

2019年度においては、地震計・小型絶対重力計などのセンサに関して、長距離の光ファイバ伝送試験を実施する。

2020年度は、複数のセンサを同一ファイバに接続しそれらの信号を分離する多重化試験を実施する。

2021～2023年度には、野外における予備的な試験観測の実施後、地熱地帯や火山近傍での試験観測とその結果の総括を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

本研究では、光計測技術を用いた地震計・重力計などのセンサを面的に配置し光ファイバで接続し、従来観測が困難であった地下深部や火山近傍での光ベースの地震・地殻変動観測網を構築するための手法の確立をめざす。

2023年度は、重力計に関しては落下装置に関する改良を行なった。野外観測の際の温度変化の影響を受けにくくするため、落体を支持する部分の天板をアルミニウムからチタンに変更し、天板の熱膨張と落体をつかむピエゾ素子の熱膨張が打ち消し合い、温度が変わっても落体の支持位置が変化しないような構成とした。低温室での試験の結果、落下装置の使用温度範囲が従来の $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 程度から $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 程度に拡張できた。火山近傍に位置する蔵王観測所（東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター、宮城県蔵王町）において継続して行なっている重力観測については、小型の組み込み加速度計と低熱膨張材（スーパーインバー）を用いた光学台を使用して、2023年10月24日～31日に実施した。また、同装置を長距離伝送が可能な通信波長帯光源で動作させ（図1）、既知の重力値と整合する結果を得た。

2022年度に製作した光干渉方式の地震計は、市販の地震計で用いられている小型振り子に再帰性の鏡を取り付け、外部の半導体レーザーからの光を光ファイバで導入し、干渉計が構成されている。振り子のコイルに制御をかけることで、0.1～50Hzで速度平坦特性をもつ地震計を試作し、設計通りの特性となっていることが確認されている。2023年度は地震研究所鋸山観測所（千葉県富津市）の坑内観測所で性能評価を行ない、遠地地震等を観測できる性能を確認した（図2）。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

当初計画に沿って、光ベースの小規模の地震・重力の計測システムを構築し、地震や重力等の地殻活動・火山活動の観測を行い、手法の有効性を検証した。重力計に関しては、装置を小型化し性能評価を行なったほか、通信波長帯光源での動作検証、温度や風の影響の評価、野外観測へ向けた改良などを行なった。地震計については通信波長帯で動作する小型の広帯域地震計を試作し、試験観測を行なった。このように、重力計や地震計単体については観測網を構築できるセンサが本計画により開発された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

火山帯の野外環境に近い状態で、長基線光ファイバで光源と接続し動作可能な地震計・重力計が本計画により開発された。インフラの乏しい火山帯における長期の地震・重力観測につながる技術である。今後は複数のセンサを接続し、面的な観測を行なうため、長距離伝送や多重化等の光通信技術を導入して実証を進めていく。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

Akito Araya, Keisuke Onodera, Taichi Kawamura, Takeshi Tsuji, Satoshi Tanaka, 2023, Design and Evaluation of an Optical Interferometric Seismometer for the Construction of a Lunar Seismic Observation Network, Japan Geoscience Union Meeting 2023

新谷昌人・風間卓仁・西島潤・奥野淳一・青山雄一・土井浩一郎・葛西恵介・吉田真人・坪川恒也, 2023, 小型絶対重力計TAG-1の野外観測へ向けた改良と系統誤差評価, 日本測地学会第140回講演会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

光技術を用いた地下深部・火山近傍における地殻活動の観測

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

新谷昌人（東京大学地震研究所）,高森昭光（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

葛西恵介、他2名（東北大学）,福田洋一、他1名（京都大学）,荒木英一郎（海洋研究開発機構）,田村良明（国立天文台）,土井浩一郎、他2名（極地研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：新谷昌人

所属：地震研究所

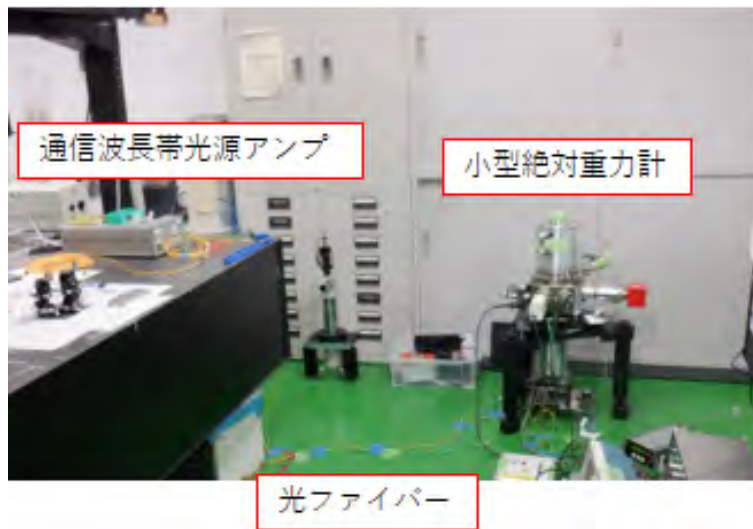


図1 長距離伝送が可能な通信波長帯光源による小型絶対重力計の試験観測（東北大学電気通信研究所）
これまで小型化を行ってきた組み込み加速度計、低熱膨張材（スーパーインバー）を用いた光学台、入射光学ユニットを使用した。

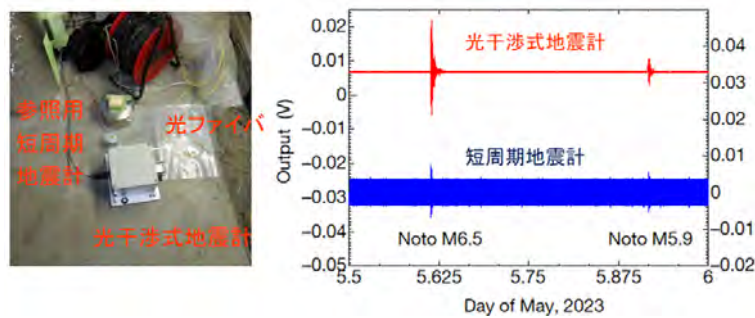


図2 地震研究所鋸山観測所（千葉県富津市）の坑内で実施中の光干渉式地震計の試験観測
2023年5月に起こった能登地震が短周期地震計より明瞭に観測されている。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

高精細ミュオグラフィ画像自動診断による火山活動状況の推移との関連評価

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

2019年度までの研究によって得られるようになった透過像は1枚の画像を得るのに半年かかっている。一方で、2018年度終了時までの技術開発によりミュオグラフィの口径が6㎡に拡張されることで画像取得速度は10倍向上した。したがって、①2019年度以降は1か月に1枚画像が得られる予定である。本研究計画ではこの技術的な到達をもとに、機械学習等による火山活動状況の推移との関連を評価するシステムを構築する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

2019年度：1か月に1枚、高精細画像を出力するシステムを整備する。医用画像用コンピューター自動検出/診断の適用可能性の検討。観測装置の口径を6㎡から10㎡へ拡張する。

2020年度：2019年度に得られた12枚の画像と他の観測で得られた情報を多次元空間上で比較、Deep learningによる特徴量抽出。2020年には24枚の画像が得られるので、それも併せて機械学習する。観測装置の口径をさらに拡大する。

2021年度：2020年度までに得られる36枚の画像の学習結果から画像から噴火の実況を予測する。学習する画像枚数を60枚へと増やす。観測装置の口径をさらに拡大する。

2022年度：100枚を超える透視画像を用いて予測精度の向上を行う。

2023年度：成果を取りまとめる。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2023年2月ごろ、南岳火口から昭和火口に突如として噴火活動が推移した。その後も南岳火口及び昭和火口双方からの噴火が続いている。ミュオグラフィ観測データの解析により、噴火が発生している火口とその火口底下の密度との間に関連があることが見つかった。即ち、南岳火口が噴火している時

には南岳火口下の密度が高く、昭和火口が噴火している時には昭和火口下の密度が高くなっていた。この発見に基づき、噴火活動の分岐現象についても、火口底の下でマグマがどのように移動しているのかを調べることで、その現象理解に貢献できると期待される。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

2019年より、1か月に1枚、高精細画像を出力するシステムの整備、医用画像用コンピューター自動検出/診断の適用可能性の検討、観測装置の口径拡張、複数画像と他の観測で得られた情報を多次元空間上で比較、Deep learningによる特徴量抽出。機械学習、噴火の実況予測、InSAR等のその他の地球物理学的観測データ等を通して、桜島山頂付近の隆起/沈降と噴火の活発期/平穏期との間に負の相関が、また、山頂付近の隆起/沈降と火口底直下の密度の上昇、減少との間に正の相関があるとの兆候が見え、山頂付近に特化した衛星画像解析と比較することの有効性が示された。この発見に基づき、噴火の平穏期には、火道中に高密度のプラグが形成されマグマ性ガスがトラップ、圧縮されることにより山体が膨張する。反対に、噴火の活発期には、プラグが存在しないことからガスが抜け、山体が収縮すると結論づけられた[1]。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本事業は、ハンガリー機関（素粒子物理学）、イタリア機関（火山学）、英国機関（火山学）、チリ機関（火山学）との共同研究を推進する国際共同研究計画である。国際共同研究・国際協力に対して貢献した。素粒子物理学分野との連携を通じた学際的研究の推進を行い異分野連携強化に貢献した。研究を推進するための体制の整備、中項目：(2)研究基盤の開発・整備、小項目：イ.観測・解析技術の開発に貢献した。引き続き国際連携、異分野連携を継続する。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

László Oláh, Giuseppe Gallo, Gergő Hamar, Osamu Kamoshida, Giovanni Leone, Edward W. Llewelin, Domenico Lo Presti, Gábor Nyitrai, Takao Ohminato, Shouhei Ohno, Hiroyuki K. M. Tanaka, Dezső Varga,2023,Muon Imaging of Volcanic Conduit Explains Link Between Eruption Frequency and Ground Deformation,Geophysical Research Letters,50,e2022GL101170,<https://doi.org/10.1029/2022GL101170>

László Oláh, Hiroyuki K.M. Tanaka, Takao Ohminato, Gergő Hamar, Dezső Varga,2019,Plug Formation Imaged Beneath the Active Craters of Sakurajima Volcano With Muography,Geophysical Research Letters,46,10417,<https://doi.org/10.1029/2019GL084784>

László Oláh, Hiroyuki K. M. Tanaka,2022,Machine Learning with Muographic Images as Input: An Application to Volcano Eruption Forecasting,AGU Geophysical Monograph Series,43,<https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch4>

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

田中宏幸（東京大学地震研究所）,林直人（東京大学医学部附属病院）

他機関との共同研究の有無：有

根本充貴（近畿大学）,増谷佳孝（広島市立大学）,Dezso Varga（ハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センター）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部
電話：03-5841-5787
e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp
URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：田中宏幸
所属：地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

海底ケーブルを用いる地震・地殻変動・津波リアムタイム観測技術開発

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
地震

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

イ. 地震断層滑りのモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地震火山噴火発生予測において、海域となっている海洋プレートの沈み込み帯直上における地震・地殻変動・津波観測は本質的な情報を与える。データがリアルタイムで得られる定常的海底観測は、地震火山噴火発生予測のための海洋プレート沈み込みに関する研究に寄与するだけではなく、緊急地震速報の高度化や緊急津波情報の発信など、防災上不可欠の情報を得ることができる。これらの目的のためには、できるだけ高密度で高品質のデータを取得する必要がある。そこで、本研究計画では、定常的な海域観測網のさらなる高度化に取り組む。特に海底ケーブルを用いるリアルタイム観測について、さらに高度化なシステムの開発をめざす。また、海域に観測網を構築するにあたって、コストの問題も考慮する必要がある。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

海底ケーブルを用いる観測技術開発を行う本研究課題では、当該システムの設置に大きな費用がかかるために、技術開発についても、明確な年度計画を設定しづらい。しかしながら、海底システム設置の予算が認められた段階から観測技術開発を始めては、間に合わないのので、可能な開発項目を順次進めて行く。現在は、南海トラフ高知県沖から宮崎県沖の領域に、海底ケーブル観測システムの設置が計画されており、このシステムに貢献することを目標として、下記の開発項目を優先的に実施する。

- ・高信頼性を保ち、大規模展開に適した対費用効果をあげるケーブルシステムの開発
- ・研究の進展に伴い観測高度化可能なシステム
- ・GNSS/Aや海底孔内観測システムなどと統合できるシステムの開発

一方、さらに将来の海底ケーブルを用いる観測技術開発として、

- ・分散型音響センシングなどの最新技術を取り入れたケーブルシステムの開発

を実施する。これは光ファイバーをセンサーとして利用する振動計測技術であり、超高密度の観測データが取得できることが期待される。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

高信頼性を保ち、大規模展開に適した対費用効果をあげるケーブルシステムの開発、研究の進展に伴い観測高度化可能なシステム、GNSS/Aや海底孔内観測システムなどと統合できるシステムの開発については、2014年に復旧した既設の三陸沖海底光ケーブル式地震津波観測システムおよび2015年に設置した新規開発した海底光ケーブル式地震津波観測システムの両方を用いた併行観測を継続しており、両システムの保守および改良を引き続き実施した。分散型音響センシングなどの最新技術を取り入れたケーブルシステムの開発として、三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムの予備光ファイバおよび新潟県粟島周辺に設置されている海底ケーブル地震観測システムのファイバに、DAS計測を適用することによって、空間的に高密度の海底地震観測を実施した。また、これまでに蓄積したデータを用いて、解析を進めた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

定常的な海域観測網の高度化については、2014年に復旧した既設の三陸沖海底光ケーブル式地震津波観測システム（旧システム）および2015年に設置した新規開発した海底光ケーブル式地震津波観測システム（新システム）の両方を用いた併行観測を継続しており、新旧システムの保守および改良も引き続き実施している。新システムでは、2017年に波浪の影響を受けやすい汀部から沖側約30mまでの区間のケーブルの保護対策と、アース電極の沖合への設置作業を実施した。沖合数十mにアース電極を設置し、これまで利用していた汀線部アースと並列に接続した。その結果、給電電圧の変動はほぼ無くなり、安定した運用ができるようになった（図1）。2022年10月には、波浪の影響を受けやすい汀部から沖側約100mまでの区間のケーブルやシーアースの敷設状況を点検するとともに、旧システムのシーアース抵抗値の長期安定化を図るため、アース部周囲に析出している堆積物全体を除去した。2022年1月には、旧システムのGPS受信器の交換を行っているが、2022年10月には新システムのGPS受信器のおよびルビジウム時計の交換を行った。また、2021年度に作成した新システムの地震計と水圧計の記録を、webシステムを通じて、公開するシステムを維持した。また、2023年1月には、光回線を釜石局舎に導入し、インターネット環境の安定化を行った。2023年11月には、通信容量の拡大を行った。

光ファイバセンシング技術の一つであり、振動を計測する分散型音響センシング（Distributed Acoustic Sensing、以下DAS）は、近年様々な分野で応用され始めている。地震関係分野では、資源探査のための構造調査に多く利用されており、地震観測にも適用され始めている。この計測は、光ファイバー末端からレーザー光のパルスを送出し、光ファイバー内の不均質から散乱光を計測し、その変化から、振動を検出する方法である。光ファイバーに沿って、時空間的に密な観測を実施できることが特長である。地震研究所が1996年に設置した三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システム(旧システム)は、伝送路である海底ケーブルに予備の光ファイバーを持っている。この予備光ファイバーに、DAS計測を適用することによって、空間的に高密度の海底地震観測を実施している。2019年2月に最初の観測を行って以来、1回あたりは短期間であるが、これまでに10回以上の観測を行っている。2019年は3回の試験観測を行い、多数の地震が記録されることを確認した。2020年11月にはエアガンとDAS計測による構造調査を実施した。エアガンの発震は、海洋研究開発機構学術調査船白鳳丸KH20-11研究航海にて実施した。白鳳丸はエアガンを曳航しながら、海底ケーブル敷設ルート上に航行し、この間陸上局においてDAS計測を行った。発震は、大型エアガン（Bolt社1500LLエアガン容量1500cubic inches）4基、またはGIガン（容量355cubic inches）2基により行った。。2021年3月には新しく開発された計測装置の試験観測を約3日間行った。新型DAS計測器では、自己ノイズが軽減され、観測可能距離100kmまで地震波形を観測できることを確認した。2022年に、地震研究所に導入されたDAS計測器を用いて、2月終わりから2日程度の試験観測を行い、10月には約2週間の観測を行

い、多数の地震が記録された。どちらの観測も、測定全長は100km、観測点間隔は2m、ゲージ長は100mとした。長いゲージ長を設定することにより、感度の高い計測を試みた。今回導入したDAS計測器は、S/N比がよく、記録区間全体にわたって、地震波を記録することができた(図2)。2023年は、7月、8月から12月にかけて、および2024年1月以降にDAS観測を行っている、これらの観測は、海上制御震源の受震であったり、DAS計測器の性能評価を目的としている。これまでに収録されたデータの解析により、マグニチュード3の地震についてはP波およびS波の到着が明瞭に記録できること、DAS観測の記録は従来の地震計の記録とよい一致を示すこと等が明らかとなった。また、DAS計測の特徴を生かして、これまでよくわからなかった海岸付近から沖合に向けての詳細な地震学的な雑微動の空間変化を明らかにした。DASデータに対して地震波干渉法を用いて表面波の抽出を行い、その位相速度から堆積層最下部から上部地殻の高分解能S波速度構造を推定した。さらに、従来の屈折法解析手法を適用して、水平方向に高分解能なP波速度構造を求めることができた。この結果により、空間的に高分解能なVp/Vs比の推定が可能となった。さらに、地震研究所は、新潟県岩船郡粟島浦村粟島周辺の海域に海底光ケーブル地震観測システムを保有している。このシステムは2010年に設置され、長さは約25kmである。この観測ケーブルの光ファイバを用いて、2023年度からDAS観測を開始した。2023年は、4月、9月及び2024年2月に観測を行った。データの蓄積がまだ十分ではないが、海底ケーブル観測システムからの震央距離が10kmほどでありマグニチュード0の地震が明瞭に観測されており、今後解析を実施する予定である。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

建議では、海域での地震・地殻変動観測の高度化のため、超深海を含む海域で、定常的な海域観測網の高度化等を目的としている。地震研究所で開発・設置し、本研究課題で改良・運用を行っている三陸沖光海底ケーブル式地震津波観測システムは、ICTを用いたインライン型観測ノードとPoE技術によるプラグイン式観測ノードを持つシステムであり、これまであまり例がないハイブリット式システムの改良運用を行うことは、定常的な海域観測網の高度化に寄与する。一方、本研究課題で開発を行っている海底ケーブルに含まれている光ファイバーを用いた分散型音響センシング手法による地震観測は、海底において、空間的に大量なデータ取得を可能とするものであり、これも定常的な海域観測網の高度化に合致している。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Shinohara, M., T. Yamada, T. Akuhara, K. Mochizuki, H. Takano and S. Sakai, 2023, Simultaneous seafloor seismic observation by distributed acoustic sensing and accelerometer using off-Sanriku optical cable observation system, 2023 IEEE Underwater Technology

(UT), 1-5, doi:10.1109/UT49729.2023.10103378, 査読無, 謝辞無

篠原雅尚, 2023, 光ファイバセンシングによる新しい海底地震観測, 地震ジャーナル, 76, 30-39, https://www.jstage.jst.go.jp/article/eqj/2023/76/2023_30/_pdf/-char/ja, 査読無, 謝辞無

Yin, J., W. Zhu, J. Li, E. Biondi, Y. Miao, Z. J. Spica, L. Viens, M. Shinohara, S. Ide, K. Mochizuki, A. L. Husker, and Z. Zhan, 2023, Earthquake magnitude with DAS: A transferable data-based scaling relation, Geophys. Res. Lett., 50, e2023GL103045, <https://doi.org/10.1029/2023GL103045>, 査読有, 謝辞無

Yin, J., W. Zhu, J. Li, E. Biondi, Y. Miao, Z. J. Spica, L. Viens, M. Shinohara, S. Ide, K. Mochizuki, A. L. Husker, and Z. Zhan, 2023, Earthquake magnitude with DAS: A transferable data-based scaling relation, Geophys. Res. Lett., 50, e2023GL103045, <https://doi.org/10.1029/2023GL103045>, 査読有, 謝辞無

Let., 50, e2023GL103045, <https://doi.org/10.1029/2023GL103045>, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

篠原雅尚, 2023, 海域で発生する自然災害の防災・減災に資する海底ケーブル観測システム, 日本海洋政策学会 第15回 年次大会, パネル・ディスカッション

Masanao SHINOHARA, 2023, Pioneering Seafloor Seismic Observations Using Distributed Acoustic Sensing Technology, Twenty-eighth International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-28), Plenary Session III

福島駿・篠原雅尚・望月公廣・山田知朗・日野亮太・東龍介・伊藤喜宏・山下裕亮, 2023, 岩手県三陸沖におけるDASデータを用いた海域浅部P波速度およびVp/Vs構造推定, 日本地震学会2023年秋季大会, S06-02

福島駿・篠原雅尚・望月公廣・山田知朗・日野亮太・東龍介・伊藤喜宏・山下裕亮,2023,岩手県三陸沖における制御地震DAS・OBS記録を用いた上部地殻のP波速度構造,日本地球惑星科学連合大会,SSS12-P11

Masanao Shinohara,2023,Continuous monitoring of earthquakes and tsunamis for seven years by ICT seafloor cable observation system in Japan,SMART Cables, Science and Society Workshop

篠原雅尚・青井真・悪原岳・荒木英一郎・尾鼻浩一郎・木下正高・功刀卓・小平秀一・武田哲也・利根川貴志・中野優・西田究・望月公廣・山田知朗,2023,光ファイバセンシング技術による海底ケーブルを用いた地震地殻変動津波観測：今後の展開,日本地球惑星科学連合大会,STT42-09

福島駿・篠原雅尚・西田究・竹尾明子・山田知朗・蓬田清,2023,DASと3成分地震計によるspatial autocorrelationの定式化とLove波のDAS地震波干渉法への影響,日本地球惑星科学連合大会,SSS07-07
篠原雅尚,2023,光ファイバセンシング技術による新しい海底地震観測,9回海中海底工学フォーラム・ZERO

Masanao Shinohara,2023,Development of ICT seafloor cable observation system and its operation,New Technology-Enabled Discoveries To Understand Earth's Seafloor for Hazards and Sustainability

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

光ケーブル式海底観測システムと分散型音響センシング技術による海域地震観測・解析技術の開発

6. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

篠原雅尚（東京大学地震研究所）,塩原肇（東京大学地震研究所）,望月公廣（東京大学地震研究所）,一瀬建日（東京大学地震研究所）,悪原岳（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

防災科学技術研究所,海洋研究開発機構

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：篠原雅尚

所属：東京大学地震研究所

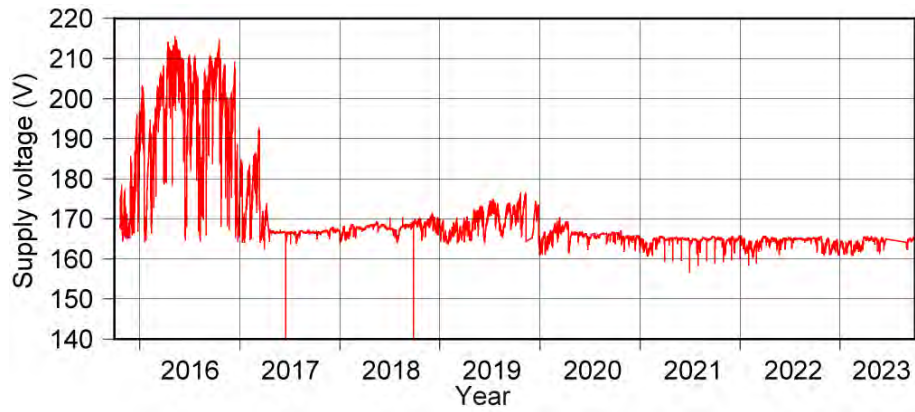


図1

2015年に設置した新システムのシステム電源電圧の変動（設置後から2023年9月まで）。2017年4月に沖合数十mにアース電極を設置し、それまで利用していた汀線部アースと並列に接続した後は、電圧変動は小さくなった。また、雷の影響と思われるノイズの混入は2022年以降局舎アースの工夫により減少した。

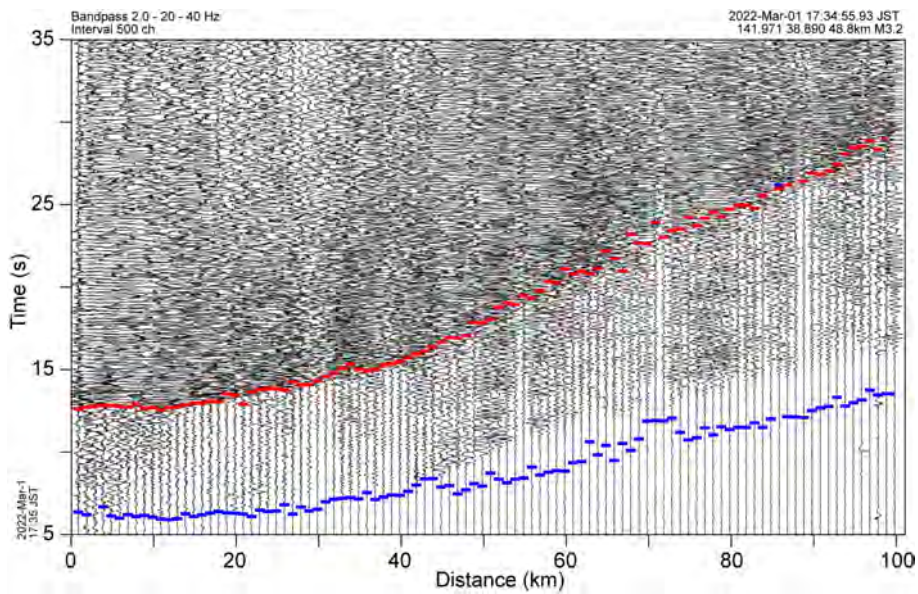


図2

三陸沖光ケーブル観測システムにおけるDAS計測により収録された地震記録例。横軸は陸上局からの距離、縦軸は時間を示す。青線と赤線はP波とS波の初動をそれぞれ示す。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

海底での地震・地殻変動観測に向けた機動的観測技術の高度化

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地震予知の基礎的観測研究を行う上で、海洋プレートの沈み込み帯でのプレート境界地震及びスロースリップイベントが繰り返し発生している場の直上である海底での、地震・地殻変動観測は重要である。陸域と同等な観測をこの海底で実現させるという基本的観点から、これまで長期高密度な機動的な地震観測、機動的強震観測、機動的かつ長期の広帯域地震観測、などをこの十数年の間に実現させてきた。海域での地震・地殻変動観測をより高度化させるため、陸上と同等な広帯域地震観測を海域で機動的に行う技術開発、超深海域での機動的な地震観測の実用化、海底面での機動的な水圧(上下変動)観測と傾斜観測の面的展開技術の実用化、などを今後の技術開発の課題として引き続き取り組む。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本研究課題では、明確な年度計画は設定せず、後述の開発項目のうち予算的裏付けと試験観測が可能となったものを順次進めて行く。その理由として、これらの機器開発の予算はその大部分を科学研究費や運営費交付金(地震研内のセンター経費・所長裁量経費など)で賄っていること、及び試験観測には研究船利用(潜水艇も含む)が必要であり、その実施には近年は特に不確定要素が多いためである。

主たる開発項目は引き続き、

1. 次世代型広帯域海底地震・傾斜計の自律展開設置・自己浮上回収方式への機能高度化、
2. 超深海域で長期(広帯域)地震観測の実用化、
3. 面的展開が可能な海底面での傾斜観測の実用化、
4. 長期安定した精密水圧観測への観測手法と次世代圧力センサーの開発、

とする。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

本課題での主たる開発項目は、

1. 次世代型広帯域海底地震計の自律展開設置・自己浮上回収方式への機能高度化、
 2. 超深海域で長期（広帯域）地震観測の実用化、
 3. 面的展開が可能な海底面での傾斜観測の実用化、
 4. 長期安定した精密水圧観測への観測手法と次世代圧力センサーの開発、
 5. 小型長期観測型海底地震計の機能高度化、
 6. 各種次世代センサーの開発、
- である。

上に示した開発項目番号のうち、以下のものについて開発研究をそれぞれ実施した。

2. は、超深海用広帯域海底地震計（UDBBOBS）の開発として、科研費（学術変革・分担・代表：田中〔2021～2025〕、挑戦的研究〔開拓〕・代表：塩原〔2024～2027〕）を主たる経費としている。2012～2013年に試験した前回の超深海用海底地震計（NUDOBS）の動作方式を踏襲しつつ、全体の大きさ（特に高さ）を抑えつつ、音響トランスポンダを含む動作制御機構の操作性を容易にする改修を、アンカー部の設計も併せて進めた。今回はセンサーを無方向ジオフォン（15Hz）から高感度な広帯域加速度センサー（Silicon Audio社製、SA203POD、3成分）に変更したので、地震観測機能を収納するチタン合金製円筒型耐圧容器とその内部構成を改修した。2024年度に海底での動作確認のための試験観測を想定しているため、今年度内には動作制御機構と耐圧容器を入手し構造的な確認までを済ませると同時に、来年度の試験観測を実施する航海の確保を行う。

4. については、2022年度までに開発および試験観測を完了し、本年度は主に成果公表に努めた。なお、本件で開発・評価を行った圧力センサーはリアムタイム海底観測システムにも実装されている。本年度には、そのシステムの一部が海底に設置された。

5. については、ほぼ開発・評価が完了し、観測に利用できるようになっているために、2021年度以降本年度にかけて実際の観測に応じて運用を行った。従来から地震研究所で運用してきた長期観測型海底地震計と同時に運用しており、海底モニタリング観測における観測周波数帯域拡大を行うことができた。

6. では、2. での適用を念頭にした高感度な広帯域加速度センサーの性能検証・改修作業を製造元と連絡をとりつつ進めている。本センサーはDC成分までの感度は無く、重力加速度（1G）まで測定することは出来ない。しかし、UDBBOBSの耐圧容器にはレベリング機構を組み込める空間は無いので、センサーの傾斜許容範囲が広いこともあり、耐圧容器とセンサーは固定し、その傾斜状態をセンサー内部での情報及び別途搭載する小型の電子コンパス（MEMS加速度計内蔵）で得ることにしている。鉛直・水平成分への再構成は観測データ回収後に行う。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本課題での主たる開発項目は、

1. 次世代型広帯域海底地震計の自律展開設置・自己浮上回収方式への機能高度化、
 2. 超深海域で長期（広帯域）地震観測の実用化、
 3. 面的展開が可能な海底面での傾斜観測の実用化、
 4. 長期安定した精密水圧観測への観測手法と次世代圧力センサーの開発、
 5. 小型長期観測型海底地震計の機能高度化、
 6. 各種次世代センサーの開発、
- である。

1. 2015年度に科研費基盤研究（A）の採択により本格的に開始した、次世代型広帯域海底地震計（BBOBS-NX）の自律展開設置・自己浮上回収方式への機能高度化を更に進めた。2016年度の実海域試験結果とその実用的試験機としての改修成果を基に、自律展開設置・自己浮上方式の新型機（NX-2G）の長期試験観測（福島県沖日本海溝陸側斜面に設置）を2017年4月の研究船航海時に開始し、自由落下設置後の自律動作による観測開始までを船上からの音響通信により確認した。この際の動作は、着底の様子も含め、NX-2Gに取り付けた小型深海用ビデオカメラにより自撮りさせていた。2018年10月の研究船航海で、無人潜水艇（かいこうMk-IV）を用いて観測状態および回収状態へ

の遷移の様子を観察し、錘を含めた機器全体の回収を実施した。海底面が柔らかいこともあり、錘を切り離してセンサー部を堆積層から引き抜き始めると直ちにセンサー部全体が海水中に引き上げられた。ビデオカメラも含めて機器とデータは無事に回収された。同地点では通常型のBBOBSも設置され記録が取られており、NX-2Gとのノイズレベル比較を実施した結果、これまでのBBOBS-NXとBBOBSでの差ほどは水平動ノイズレベルの改善が見られなかった。これは、センサー部と記録部を唯一つなぐ水中ケーブルの引き回しが悪く、ケーブルが十分に海底に落ちていなかったため、海中に浮遊状態にある記録部の振動がセンサー部へ伝わってしまったことによると考えられる。この問題を解決するために示す改修を進め（図1）、2019年8月に再度の長期試験観測を実施する段階にあったが、2週間の航海期間に台風が観測海域を3連続して到来したため、出航すら出来ず観測の実施を断念することになった。2020年度には本試験を実施できる観測航海が確保できていないため、この試験観測は2021年度以降となった。NX-2Gの比較試験観測に向け、2021年5月に観測航海を実施する機会を得たが、悪天候のため再度一切の作業が出来なかった。その後、2年続けて研究船利用が不採択となり、2024年度以降での試験実施を、AORI共同利用以外の可能性も含め検討している。

2. 1990年頃からの課題である、水深6000mを超える超深海域での海底地震観測を実現させるため、2012~2013年に新発想の機構で試験観測を実施したが、水深9200mでの長期観測から回収できなかった。その際の推定問題点を解決し、現代的な広帯域地震観測を可能とする、超深海用広帯域海底地震計（UDBBOBS）の開発を、2021年に科研費（学術変革・分担・代表：田中 [2021~2025]）を得て再開した。小型・低消費電力な広帯域地震観測用センサーとして有力な候補となる加速度センサー（Silicon Audio社、203-60）について、実験室での検証試験を行った。2個の同一形式センサーを用いて、それらの内部雑音が無相関であると仮定すると、その平均的雑音レベルが簡単な計算から得られる、という手法により、やや環境雑音レベルが高い実験室内でも計測が実施可能で、解析区間を吟味すると評価可能な結果が得られ、周期100秒でもNHNM以下と、長周期側での内部ノイズレベルも優秀であることが確認できた。製造会社と、低消費電力化・高感度化・粗傾斜記録出力について改修を進めている（6. と関連）。同時に、この加速度センサーの低ノイズ性能を活かすためにはデータレコーダー入力を差動化する必要が明確になり、UDBBOBS専用のデータレコーダーをOBS用の現行品を基に差動入力仕様へ改修した。また、2023年には科研費（挑戦的研究（開拓）・代表者 [2023~2026]）が本開発研究課題で採択され、UDBBOBSを実現できる見込みが確実になった。超深海用の耐圧容器に納めるために極力容積を抑え、新しい加速度センサーに適合させた（差動入力仕様）、専用収録システムの改修作業も実施した。2012年に試験したNUDOBSはプロトタイプ機として機構・サイズの扱い難い面があったので、今回のUDBBOBSではその点を考慮した機構設計を進め、地震観測機能を内包する耐圧容器の設計も新しい加速度センサーに合わせて行った。2024年度以降での機能試験観測・長期試験観測の実施を予定している。

3. 海底面設置型の機動性を有する広帯域地震・傾斜観測システムの開発と高度化を継続的に進めている。房総沖で長期海底傾斜観測（2年間）を2015年7月に開始したままであったBBOBST-NXを回収するため、研究船公募による無人潜水艇利用を2018年度に申請し、2019年6月に実施する機会があったが、荒天のため観測（潜航）作業が実施出来ず、機器回収・継続的再設置は断念した。2020年度の研究船利用を確保、5年ぶりに2020年10月に「しんかい6500」を用いて回収した。2017年9月に現場へ行った際に音響トランスポンダからの応答が無く、所在が心配であったが、設置時の海底位置において発見された。同時に、広帯域地震・傾斜観測を継続させるため、新たにBBOBST-NXと周囲の環境（流向流速・水温）を計測するべく海底電磁流速計システムもほぼ同じ地点に設置した。回収したデータには、設置時に設定した2年1ヶ月間のデータが欠測無く得られていた。更に、5年経過していたが内部の高安定度の水晶発振器は稼働しており、UTCとの時刻差も4秒程度で、時刻補正も十分な精度で可能であった。また、外装部に取り付けられた高精度水温計（10分サンプリング）は2018年1月までデータ収録していた。広帯域地震（傾斜）センサーのマスポジションは観測初期の大きな変動を除くと2年間にわたり非常に安定していたことがログデータから分かった。海底面での傾斜観測の可能性をよりサポートする結果と判断される。

次世代型広帯域海底地震・傾斜計（BBOBST-NX）による長期海底傾斜観測の、機器近傍の水温を含む2年以上のデータが2020年に得られたが、これまで観測事例が少なく確定できなかった、傾斜データの水温依存性が約-30 micro rad/°Cの温度係数で明確に存在しており、0.1°C度以上の温度変動があると有意な傾斜変動を判別するのに問題となることが分かった。この水温変動の影響を対症療法的に

除去する手法開発を進めると共に、その要因となり得る広帯域地震センサー内部で高精度な温度変化記録を陸上の実験室内で試験計測した。その結果から得られた温度係数は上記の半分程度と小さかったが、地震センサーでの個体差、またはチタン合金製のセンサー部外装自体の伸縮による影響も可能性としては想定される（図2）。

2020年に房総半島沖に設置したBBOBST-NXの回収が出来ない状況が2023年まで続いているが、潜水艇利用が必須であり、機器回収優先で実施できる研究船利用の機会が2024年7月に確保された。

なお、海底面での機動的傾斜観測については、現段階での成果を論文化し、2021年3月に公表された。また、2021年1月後半には、2019年1月にチリ沖に設置したBBOBSを8台（および1Hz長期観測型海底地震計を5台）回収したが、その内6台は広帯域地震センサー、CMG-3Tのマスポジションも連続記録しており、初の機動的海底面傾斜アレイ観測となった。本観測の主目的である、微小地震の震源決定は2年分を完了、2000個以上の地震を検出・震源決定し、2023年2月に初期の解析結果を論文化した。

4. 現在、海底における精密水圧観測には、Paroscientific社の水圧センサを用いていることが多い。このセンサは十分な性能と実績を有しており、これまで津波や地殻変動の観測に用いられてきた。しかし、計測に用いている水晶発振子の発振周波数の長期にわたる直線的変化が見られる場合があることや圧力計測にbourdon管を用いていることから設置位置により絶対値が変化することがある。そこで、2021年度から新しい水圧センサ（横河電機製）の試験評価を開始した。現在我々が用いている水圧計記録収録装置を横河電機製水圧センサに接続し、新しい海底水圧計を製作した。この横河電機製水圧センサ搭載の海底水圧計は2021年8月の東北海洋生態系調査研究船「新青丸」KS21-19航海により、房総半島沖の水深約3400 mの地点に設置された。房総半島沖では、プレート境界スロースリップが発生しており、スロースリップによる海底上下変動をモニタリングするために、海底水圧計ネットワークによる観測が行われている。横河電機製水圧センサ搭載海底水圧計の設置地点は、この従来の海底水圧計ネットワークの1点と同一地点とした。そのために横河電機製水圧センサとParoscientific社の水圧センサの記録を比較可能である。設置された横河電機製水圧センサ搭載海底水圧計は、「新青丸」KS21-26航海により同年11月に回収された。また、試験観測を継続するために、回収と同時に別途横河電機製水圧センサを搭載した海底水圧計を再設置した。再設置した横河電機製センサ搭載海底水圧計は、海洋エンジニアリング「第二開洋丸」にて、2023年3月に回収された。また、2023年9月には、「第二開洋丸」により、海底上下変動観測に用いていたParoscientific社センサ搭載した従来の海底水圧計を回収し、記録の比較が可能となった。解析可能な観測期間全体にわたる水圧ノイズを、Paroscientific社センサと横河電機製水圧センサで比較したところ、50秒よりも長い帯域では、同一のノイズスペクトルが得られた。一方、10秒から50秒の帯域では、Paroscientific社センサと横河電機製水圧センサによるノイズスペクトルに差が見られ、この帯域では横河電機製水圧センサ自体のノイズレベルが、Paroscientific社センサよりも高いことがわかった（図3）。2022年1月に発生したトンガにおける海底火山の大規模噴火による海面変動は、従来のParoscientific社海底水圧計、横河電機製水圧センサ搭載海底水圧計の両方で記録されており、3600秒から10秒の帯域では、ほぼ同一の波形が得られた。これらの結果は、横河電機製水圧センサのノイズレベルはやや高いものの、津波や地殻変動観測に利用可能であることを示している。横河電機製水圧センサの長期変動について、今後検討を行う。

また、2022年9月に、これまで開発・運用してきた、インテリジェント型APGを用いたOBP 6台を、カナダ・バンクーバー島沖で小スパンアレイとして展開、2年間の連続観測中で、2024年7月に回収する予定である。

5. 海底において空間的に高密度なやや広帯域地震観測の実施をめざして、小型広帯域地震計を搭載した長期観測型海底地震計の開発を行い、観測に用いている（図4）。2018年以降、台数の確保に努め2023年には30台規模で観測に用いることができるようになった。自由落下自己浮上式海底地震計は、どのような傾きで海底に着底しても、地震計の鉛直・水平を保持する必要があり、低消費電力で小型の広帯域地震計センサー向けのレベリング装置を開発して、小型広帯域海底地震計に用いている。2021年にレベリング装置の機能強化を行い、レベリング動作時刻記録機能を付した。レベリング動作時刻記録のために時刻モジュール（RTC）を搭載した新しい制御部を開発した。この開発により、レベリング動作時の時刻を個体番号やセンサーの傾斜とともに記録することができるようになった。2022年度以降は、これらの整備を経て、小型広帯域海底地震計を用いた観測をルーチン的に実施

できるようになった。今後も引き続き、今回開発した小型広帯域海底地震計を用いて、空間的に高密度なやや広帯域地震観測を実施する。

6. 超深海域での長期広帯域地震観測を実現させるために有力な候補となる低ノイズの加速度センサー（Silicon Audio社、SA203POD）について、内部ノイズレベル検証試験・専用品開発を進めている。その実地評価を鋸山観測坑および実験室で進めた。観測坑では過去に複数種類のセンサーでの試験観測結果があり、それらとノイズレベルの比較を行った。標準品のセンサーは低感度（差動出力で $6V/m/s^2$ ）であるため、収録システムを含む現在の試験環境ではその低ノイズ特性を活かせないことが判明した。製造会社と、本センサーの低消費電力化・静的傾斜情報取得・高感度化について、2022年12月のAGUでは直接の面談も行い、改修を進めている。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望
項目「4（2）ウ．観測・解析技術の開発」での目的に対しては、必要予算の獲得・海域試験観測の実現に応じた、可能な範囲での技術開発を機器及び解析方法の両面で進めた。本課題では実際の観測研究を念頭にした機器開発を行う方針であり、実用化した要素から研究的観測へ適用している。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

Shiobara, H., Ito, A., Sugioka, H., Shinohara, 2023, Restart of the ultra-deep broadband OBS (UDBBOBS) development, AGU-FM 2023, S11F-0323

Shinohara, M., Aoi, S., Mochizuki, M., Uehira, K., Yamada, T., Kunugi, T., Takeda, T., Noda, R., Iwai, S., 2023, Field evaluation of newly developed MEMS technology silicon resonant sensor for seafloor pressure observation, IUGG 2023, S02P-133

Shinohara, M., Aoi, S., Mochizuki, M., Uehira, K., Yamada, T., Kunugi, T., Takeda, T., Noda, R., Iwai, S., 2023, Seafloor pressure observation for field evaluation of new silicon resonant sensor using MEMS technology, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS12-P07

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

海底での地震・地殻変動観測の高度化に向けた観測技術開発

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

塩原肇（東京大学地震研究所）、篠原雅尚（東京大学地震研究所）、望月公廣（東京大学地震研究所）、山田知朗（東京大学地震研究所）、一瀬建日（東京大学地震研究所）、悪原岳（東京大学地震研究所）
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：塩原 肇

所属：東京大学地震研究所 海半球観測研究センター

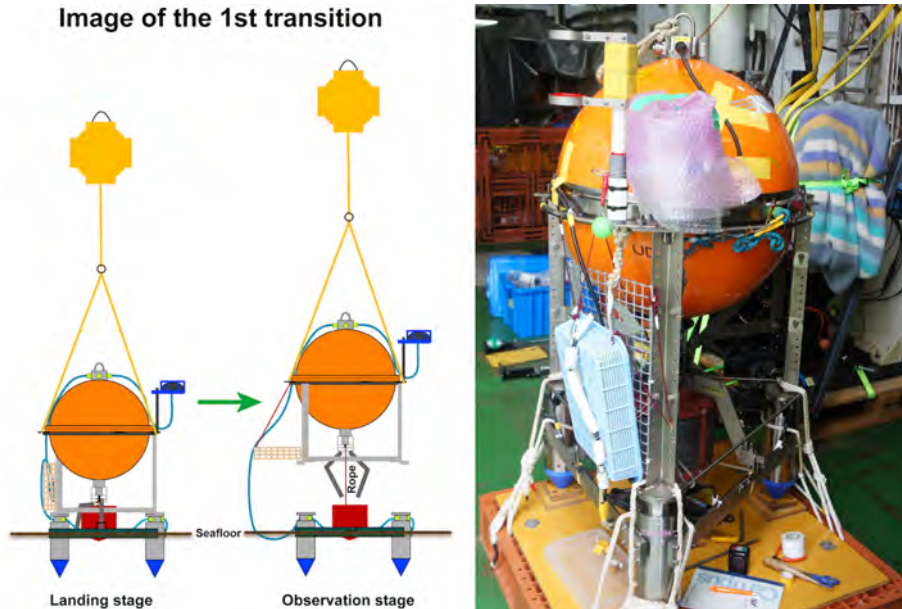


図1 NX-2Gの機能向上

2019年8月に予定されていた長期試験観測に合わせて、水中ケーブルの自己展開方法への改修を行った。着底状態から観測状態への1回目の遷移に伴い、水中ケーブルの下部がセンサー部から離れて着底する構造とした（左図の観測状態〔右側〕を参照）。これにより、底層流による記録部の振動が水中ケーブルを伝搬しセンサー部へ伝わるのを抑制する効果が期待される。右画像は試験観測予定であった航海開始前での設置準備が完成した状態である。

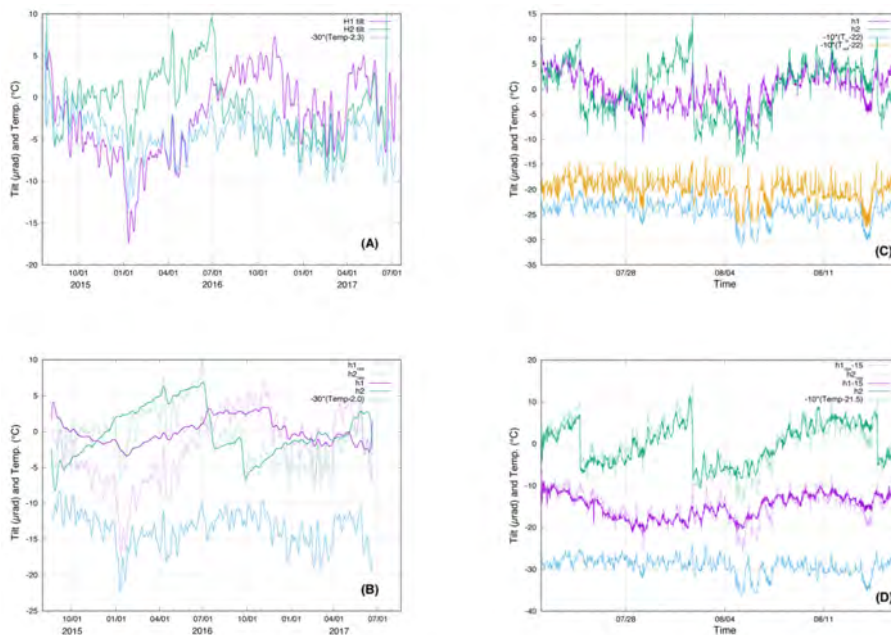


図2 BBOBST-NXおよび別個体の同型式地震センサーによる、傾斜変動への温度変動の影響
房総半島沖で得た2年間の傾斜・水温変動（A）、水温変動の影響を除去した結果（B）。別個体の地震センサーを用いた実験室内での傾斜・センサー内部温度の変動（C）、同様に影響を除去した結果（D）。それぞれの温度影響除去処理で得た代表的温度係数値（-30, -10）を示してあるが、室内試験時の方が小さい結果となった。

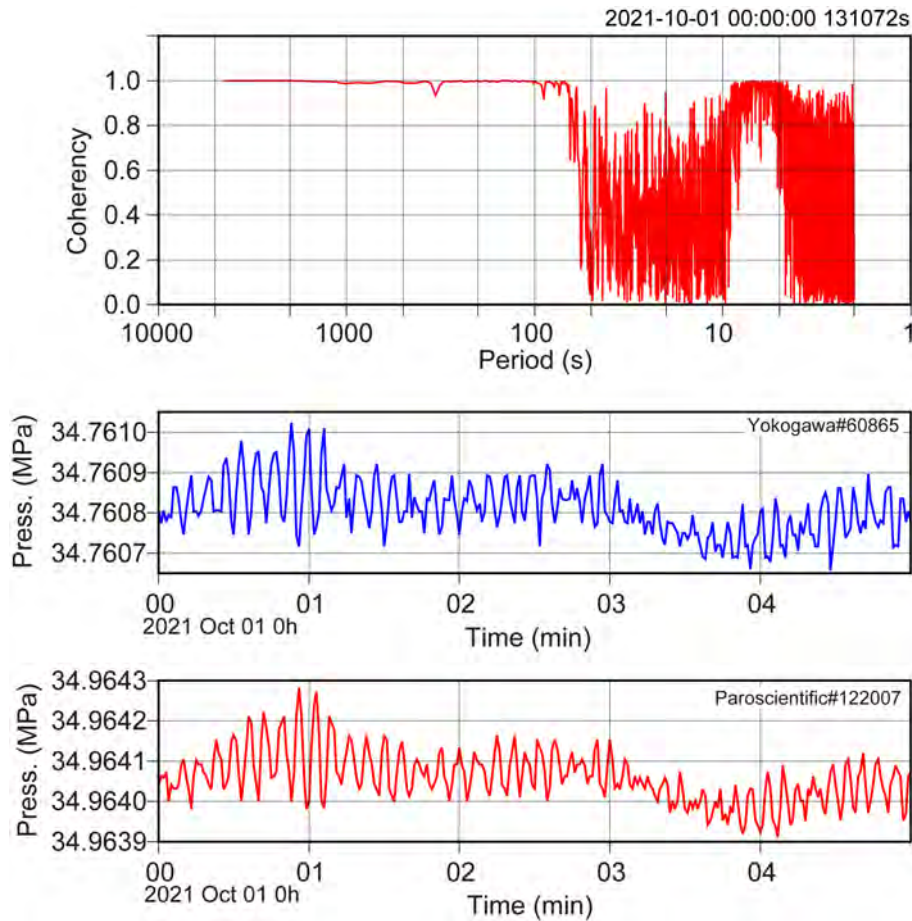


図3 高精度水晶発振子を利用した従来の水圧計とMEMS発振子による水圧計により記録された海底における雑微動の比較

2021年10月1日0時（JST）から36.4時間分のデータを用いて、2つの水圧計のコヒーレンシーを計算した。50秒よりも長い周期帯域では、コヒーレンシーが高く両者はほぼ同じ記録である。一方、50秒よりも短い周期帯域ではMEMS水圧計の自己ノイズがやや高いことを反映して、振幅が1hPaに達していない帯域ではコヒーレンシーが低くなっている。

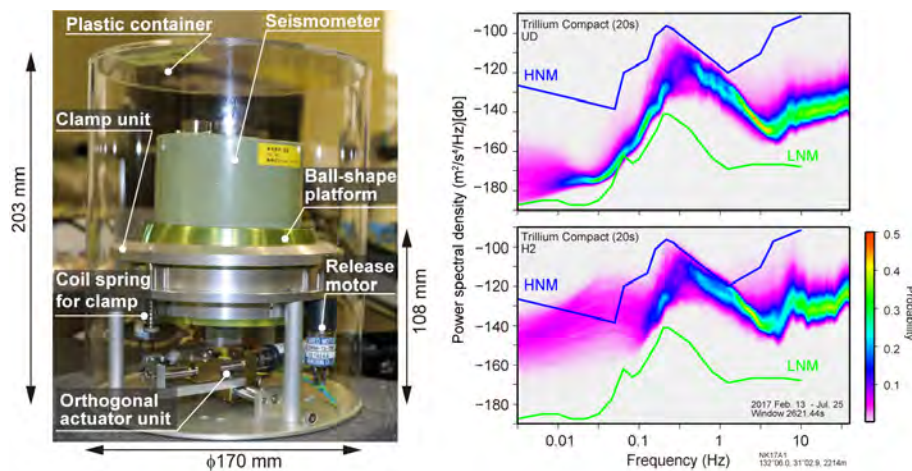


図4 開発した小型広帯域海底地震計のセンサー部（左）と海底における地震学的雑微動ノイズスペクトル（Shinohara et al., 2021）

左：小型広帯域地震計が開発したレベリング装置に搭載されている。レベリング装置は傾き20°までに対応する。軸の駆動はモーターで行い、制御にはマイクロコンピューターを用いている。20秒地震計を搭載した小

型広帯域海底地震計により、収録された海底の地震学的雑微動スペクトル。上が上下動、下が水平動のスペクトルを示す。収録した小型広帯域海底地震計は日向灘の深さ約2200mに設置された。HNMとLNMは陸上観測データから求められたノイズモデル。

Shinohara, M., T. Yamada, H. Shiobara, and Y. Yamashita, Development of a Compact Broadband Ocean-Bottom Seismometer, *Seismol. Res. Lett.*, 92 (6): 3610–3625, <https://doi.org/10.1785/0220210100>, 2021.

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

マルチプラットフォーム次世代WINシステムの開発

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

WIN形式データのリアルタイム伝送が機関の枠を超えた全国規模のデータ流通の基盤となっていること、WINシステムが大学等のデータ処理システムで現在広く使われていること等を踏まえつつ、防災科研や気象庁、海外の関係機関等のデータ伝送システムや対話検測処理システムを参考にしながら、現在のWINシステムに代わるマルチプラットフォームのソフトウェア群（次世代WIN）の検討と試作を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度においては、現WINシステムにおける課題と次世代システムへの要望の集約を行う。平成32年度においては、伝送系システムまたは対話検測処理系システムの検討と試作を開始し、平成33年度に試作品を提供して試用を開始する。平成34年度においては、残りのシステムの試作を開始する。平成35年度には試作プログラムを公開する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和5年度は、前年度まで試作してきた次世代の対話検測処理ソフトウェアに、ランニングスペクトルの表示（図1）や波形の選択部分のスペクトルの表示機能（図2）を追加した。これにより、例えば火山で観測されるような波形やノイズを含んだ波形などの周波数解析が容易に行える。また、伝送系システムの仕様について検討した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

現在大学等で広く使われているwinは基本的にはUNIX上で動作する単色表示で1画面構成のソフトウェアである。開発から四半世紀経過し、情報通信環境が大きく変わったことから、本計画期間中にWindowsやmacOSといった複数のプラットフォーム上で動作する新しい対話検測処理ソフトウェアを開発した（図3）。開発したソフトウェアは、波形表示、手動検測、震源決定プログラム実行機能や地図表示機能といった検測に必要な基本的な機能に加え、メカニズム解の計算や表示、ランニング

スペクトルの表示や波形の選択部分のスペクトルの表示機能を追加した。複数の画面やカラー表示を使って利用しやすくしただけでなく、これまでwinではできなかったメカニズム解の計算やスペクトルの表示も同一画面上でシームレスに行えるようになった。伝送系システムについては、通信プロトコルやデータフォーマット等について地震火山観測に加え最近の情報通信技術で用いられているものも含めて情報収集を進め、次世代として求められる機能等について検討を進めた。その結果、観測機器やデータ収集機器など影響範囲も広範なことから、他課題の成果も踏まえて慎重かつ計画的に開発を進める必要があることがわかった。体制等を整えて次期計画で試作を進めていくこととした。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望
全国規模のデータ流通及びデータ処理で広く用いられているプログラムについて、その近代化と機能向上が着実に進んだ。観測データを利用した研究がより簡便かつ活発に行われ、処理技術の進展によって観測そのものの高度化・効率化が期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

中川茂樹・青山裕・高橋浩晃・前田拓人・山本希・鶴岡弘・青木陽介・内田直希・前田裕太・大見士朗・中道治久・大久保慎人・松島健・八木原寛・汐見勝彦・植平賢司・上田英樹・下山利浩・溜瀧功史・大竹和生・本多亮・関根秀太郎,2023,マルチプラットフォーム次世代WINシステムの開発(3),日本地震学会2023年度秋季大会,S02-04

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

次世代WINシステムの開発

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

中川茂樹（東京大学地震研究所）、鶴岡弘（東京大学地震研究所）、青木陽介（東京大学地震研究所）、内田直希（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

青山裕（北海道大学）、高橋浩晃（北海道大学）、前田拓人（弘前大学）、山本希（東北大学）、前田裕太（名古屋大学）、大見士朗（京都大学）、中道治久（京都大学）、大久保慎人（高知大学）、松島健（九州大学）、八木原寛（鹿児島大学）、汐見勝彦（防災科学技術研究所）、植平賢司（防災科学技術研究所）、上田英樹（防災科学技術研究所）、下山利浩（気象庁）、大竹和生（気象庁地磁気観測所）、溜瀧功史（気象研究所）、本多亮（神奈川県温泉地学研究所）、関根秀太郎（地震予知総合研究振興会）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：中川茂樹

所属：東京大学地震研究所

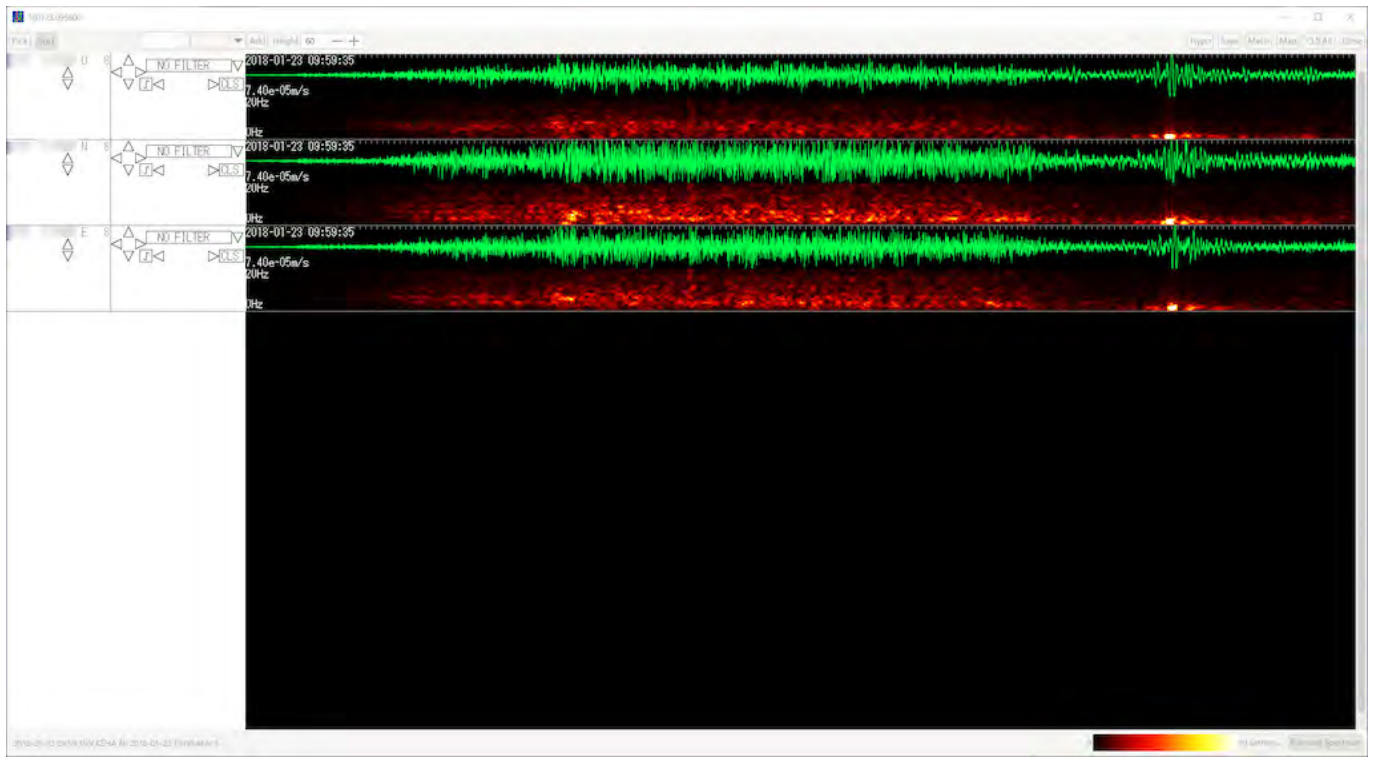


図1 ランニングスペクトルの表示例。

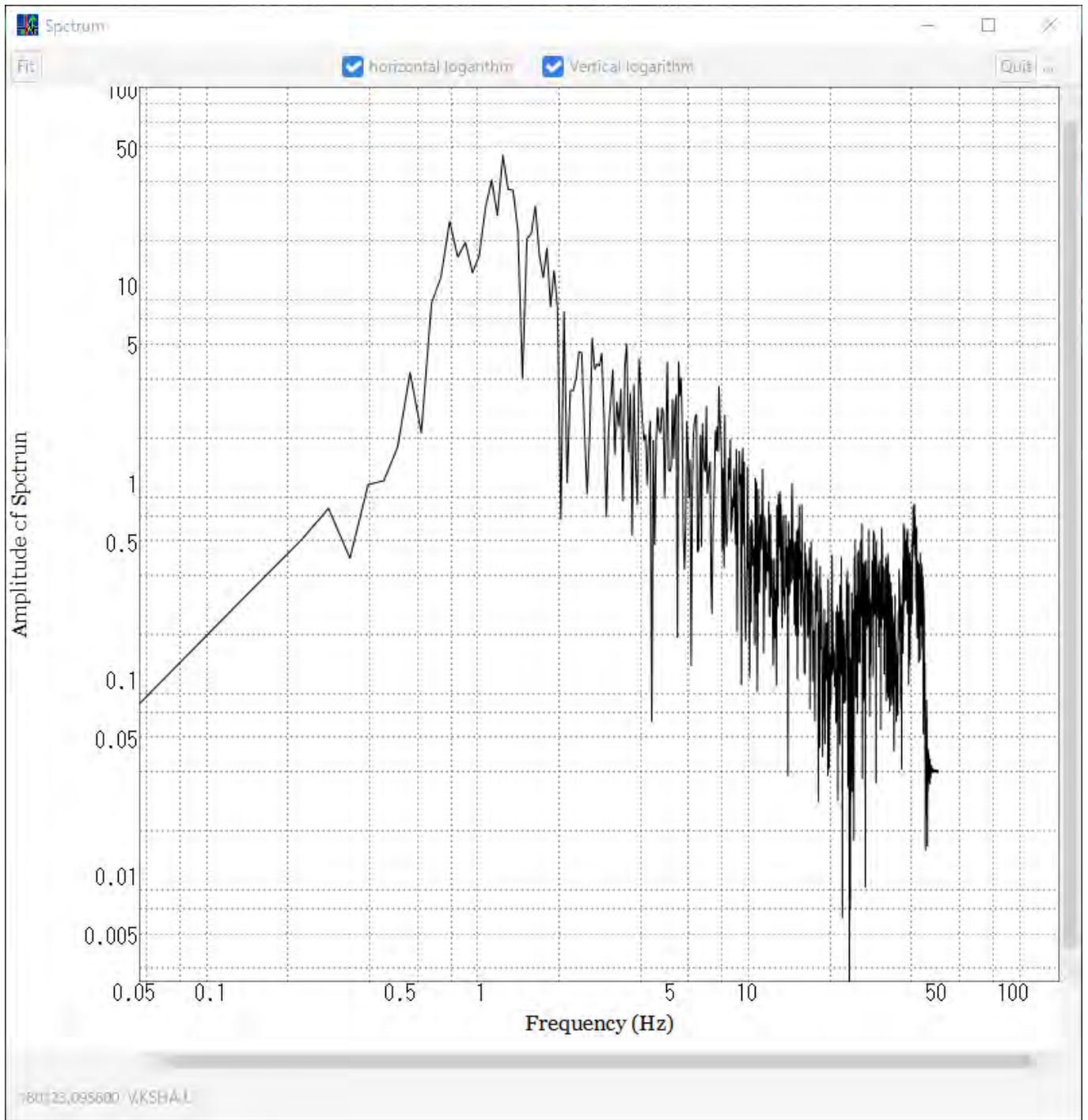


図2 スペクトルの表示例。

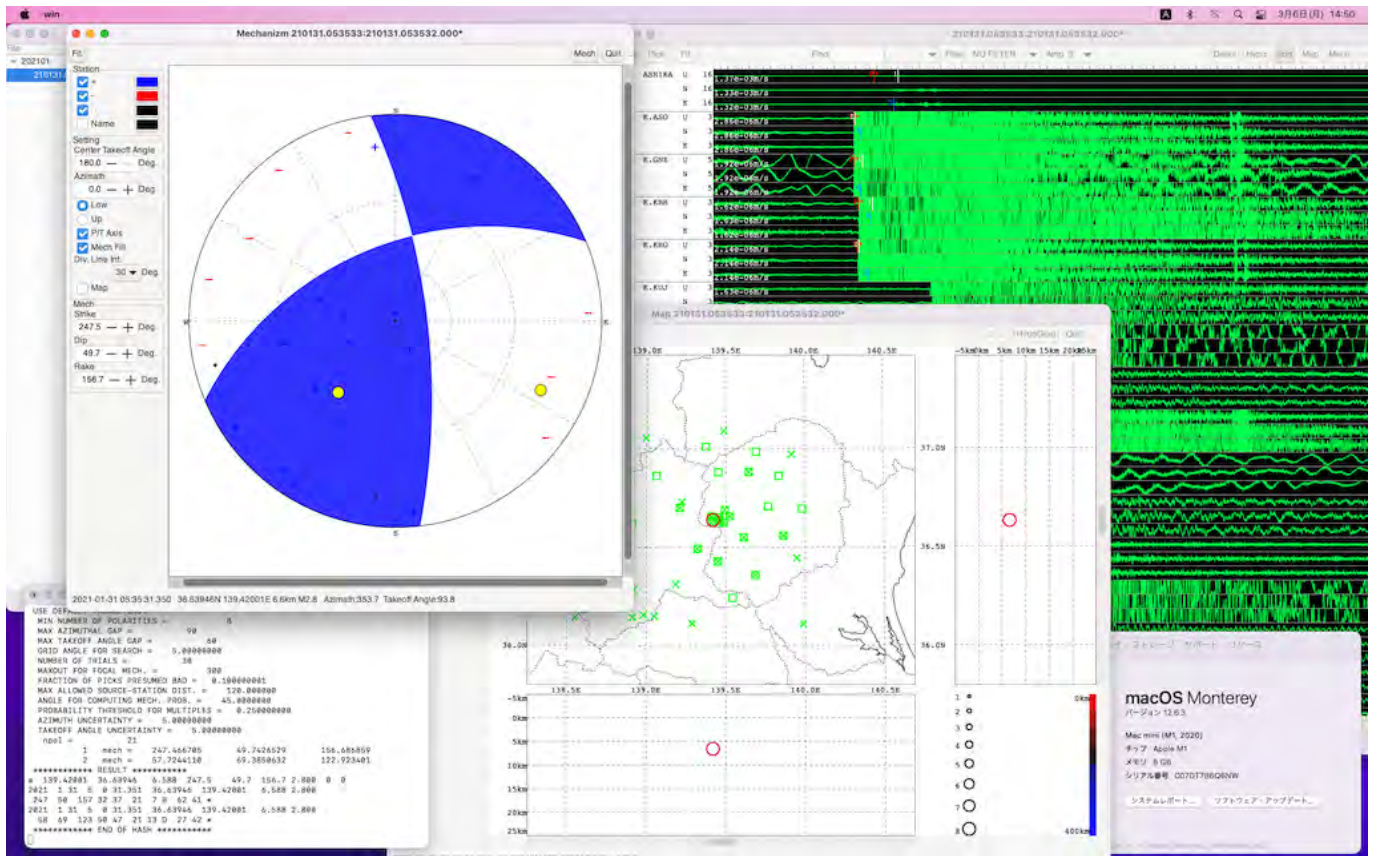


図3 macOS上で動作している様子。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

研究成果共有データベースの構築

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ア. 史料の収集とデータベース化

イ. 考古データの収集・集成と分析

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

地震

火山

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

イ. 地震断層滑りのモデル化

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

イ. 内陸地震

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

オ. 構造共通モデルの構築

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

イ. 内陸地震の長期予測

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - ア. 強震動の事前評価手法
 - イ. 津波の事前評価手法
 - ウ. 大地震による災害リスク評価手法
 - エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法
 - オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法
- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
 - ア. 地震動の即時予測手法
 - イ. 津波の即時予測手法
 - ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法
- (3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究
 - 地震
 - 火山
- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
 - (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明
 - (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (1) 推進体制の整備
 - (3) 研究基盤の開発・整備
 - ア. 観測基盤の整備
 - イ. 観測・解析技術の開発
 - ウ. 地震・火山現象のデータ流通
 - (4) 関連研究分野との連携強化
 - (5) 国際共同研究・国際協力
 - (6) 社会との共通理解の醸成と災害教育
 - (7) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

観測研究計画で得られる成果やデータ、メタデータ情報などを共有し活用するために必要となる制度的・技術的な課題を各部会や関係機関と整理検討し、持続可能なデータベースに向けたポリシーを作成する。策定されたポリシーに基づき、必要とされる場合にはデータアーカイブ作業を運用する体制の整備や、データサーバの製作などを実施する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31～33年度においては、部会や関係機関と成果共有データベースの方向性についての意見交換を実施し、運用体制の持続可能性に十分に配慮したうえで、ポリシーを決定する。データへのdoi付与等についても連携して検討を実施する。

平成33～35年度においては、策定されたポリシーに基づき、研究成果データベースの持続的な運用に必要な制度設計などの作業を実施する。具体的な内容はポリシーに依存するが、例えば、データの取り扱いを支援する専門員の業務仕様の策定や、データサーバの開発などが想定される。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

研究成果共有システムの運用について「運用責任は戦略室とし、戦略室が中心となってポリシーの検討、コンテンツの調整、課題や部会への関係情報収集や依頼、周知広報を継続して実施した。実際のシステム運用は、企画部の学術支援職員と戦略室教員及び課題担当者にて継続して行った。課題間連携及び部会間・総合研究グループ間連携で必要となるメタ情報を中心としてデータの収集を行なった。部会内や部会間・総合研究グループ間連携を促進するための共有オンラインストレージ（Nextcloud）

を継続して運用した。令和4年度における観測や開発したソフトウェア等のメタ情報を整理して研究成果共有システムにて公開を行なった。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

令和1～3年度においては、部会や関係機関と成果共有データベースの方向性についての意見交換を実施し、運用体制の持続可能性に十分に配慮したうえで、建議で実施されている社会調査・ソフトウェア開発・観測・地質調査等を一元的に収集するポリシーを策定した。令和3～5年度においては、策定されたポリシーに基づき、研究成果データベースの持続的な運用に必要な制度設計について企画部の学術支援職員と戦略室教員及び課題担当者が行うとして作業を進めた。データベースとして、「日本列島周辺域のプレート境界面分布」・歴史史料データベースとして「日記史料有感データベース」へのリンク・地殻変動データベースとして「2003年十勝沖地震臨時GPS観測データ」と「地殻変動プロマイド記録」へのリンク・成果論文データベースとして本計画に関連する成果論文一覧が各年度毎に公開された。観測や開発したソフトウェア等のメタ情報について令和3年度および4年度分が公開された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

研究成果共有システムの構築は災害軽減計画においては成果共有の観点から非常に重要である。一方、研究成果共有システムの運用を維持していくための組織等の整備が引き続き重要である。また、サーバ等の維持管理は昨今のセキュリティ事情があり負担軽減等の観点からクラウドサーバ等の活用を積極的に進める必要がある。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

- ・論文・報告書等
- ・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

研究成果共有データベースの構築

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

鶴岡弘（東京大学地震研究所）、地震・火山噴火予知研究協議会企画部研究戦略室(東京大学地震研究所)

他機関との共同研究の有無：有
建議に参加するすべての機関

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部

電話：03-5841-5787

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：鶴岡弘

所属：東京大学地震研究所

災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次） 令和4年度（2022年度）調査・観測等一覧

ご注意：本一覧は各課題の報告書の緯度経度を元にしており、必ずしもすべての調査・観測等を網羅しているわけではありません。[[課題一覧](#)]

[>> 表で表示 <<](#)



公開されている「令和4年度（2022年度）調査・観測等一覧（地図表示）」のスクリーンショット
成果報告書をもとに本年度作成した令和4年度の調査・観測等一覧についての地図表示。各地点のアイコン
をクリックすると、メタ情報の他、課題報告書もリンクから確認することができる。表形式での表示もできる。

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題（または観測項目）名：

内陸の地殻活動の発生・準備過程の解明

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
イ. 内陸地震

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

中長期的な地震発生予測の精度向上に資するため、測地学的手法による内陸地震発生域における震源断層モデル推定手法の高度化及び余効変動の時間変化とそのメカニズムの解明を通して、内陸地震発生域の地殻活動を詳細に理解する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

東北地方太平洋沖地震発生後の新潟県周辺のひずみ集中帯における地殻変動を明らかにするため新潟県佐渡市から五泉市に設置されたGNSS観測点において、最後のキャンペーン観測を実施したのち、観測終了に伴う撤収作業を実施する。また、過去に発生したマグニチュード6～7クラスの地震について、GNSS連続観測データやSAR干渉解析結果を用い、均質構造を仮定した上でのモデル化を行ったのち、有限要素法による数値シミュレーション結果から地下の不均質構造やレオロジーを考慮した震源断層や余効変動源のモデル化を行う。さらに、時間分解能の高いGNSS時系列データを用いて、摩擦則に基づいた余効すべりの時間発展についてモデル化を行うとともに、有限要素法等の数値シミュレーション解析に組み込み、内陸地震発生域の現実的な地下構造を考慮した地震時変動及び余効変動の発生メカニズムについてモデル化を行う。併せて、内陸地震発生域における東北地方太平洋沖地震後の余効変動の影響についても評価を行う。

以上は、国土地理院経費のうち技術研究開発推進費に基づいた計画である。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和4年度に引き続き、熊本地震による粘性変形を補正した上で余効すべりとマグマだまりの体積変化の同時推定を試みた。その結果、地震後に顕著に見られた阿蘇カルデラ内の沈降が、阿蘇カルデラ内の2枚の断層面における正断層的な余効すべりで説明できることを明らかにした。余効すべりと地震時すべりのモーメント比は0.11から0.77となり、標準的なふるまいを示す(例：Churchill et al. (2022)) 一方で、緩和時定数はカルデラ内の断層で非常に大きい値(345.4日)をとり、熱水の影響を受けている可能性があることが分かった。また、阿蘇山のマグマだまりの体積変化には地震をはさんだ顕著な変化はあまり見られず、2015-2016, 2019, 2021の火山活動活発化に対応した体積膨張が見られることを確認した。

令和6年1月1日に発生した令和6年能登半島地震について、電子基準点のGNSS解析および「だい

ち2号」のSARピクセルオフセット解析により地殻変動場を明らかにした。その結果、輪島市周辺で、最大で4m程度の隆起が確認された。得られた地殻変動データを用い、矩形断層を仮定した震源断層モデルおよびすべり分布モデルを構築した。地殻変動からは、能登半島西岸にほぼ南北に延びる断層および能登半島北岸および北西沖に延びる二枚の断層が推定された。これらは地質調査から明らかになっている活動セグメントのトレースとほぼ一致する。

今年度の研究は上記計画通りに実施された。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

・東北地方太平洋沖地震発生後の新潟県周辺のひずみ集中帯における地殻変動を明らかにするため新潟県佐渡市から五泉市に設置されたGNSS観測点において、最後のキャンペーン観測を実施したのち、観測終了に伴う撤収作業を実施した。

・熊本地震による粘性変形を補正した上で余効すべりとマグマだまりの体積変化の同時推定を試みた。粘性変形のモデルとしてはPollitz (2017) を採用し、地震時の震源断層モデルとしてはKobayashi et al. (personal comm.) の矩形断層モデルを用いた。その結果、地震後に顕著に見られた阿蘇カルデラ内の沈降が、阿蘇カルデラ内の2枚の断層面における正断層的な余効すべりで説明できることを明らかにした。また、阿蘇山のマグマだまりの体積変化には地震をはさんだ顕著な変化はあまり見られず、2015-2016, 2019, 2021の火山活動活発化に対応した体積膨張が見られることを確認した。

・令和6年1月1日に発生した令和6年能登半島地震について、電子基準点のGNSS解析および「だいち2号」のSARピクセルオフセット解析により地殻変動場を明らかにした。その結果、輪島市周辺で、最大で4m程度の隆起が確認された。得られた地殻変動データを用い、矩形断層を仮定した震源断層モデルおよびすべり分布モデルを構築した。地殻変動からは、能登半島西岸にほぼ南北に延びる断層および能登半島北岸および北西沖に延びる二枚の断層が推定された。これらは地質調査から明らかになっている活動セグメントのトレースとほぼ一致する。

本研究は計画通りに実施された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地震・火山現象の解明という目的のため、2016年熊本地震を題材に、余効変動のモデル化と地震と火山の相互作用の有無について検討した結果、2016年熊本地震の余効変動は、適切な地震時断層および余効すべり面を設定することで、粘性変形と余効すべりで基本的に説明できること、阿蘇山のマグマだまりに対する地震の影響は顕著でないことを明らかにした。また、「災害の軽減に貢献する」という目標に対して、本課題は素課程である地震時変動および余効変動の理解という目標を立てたが、2016年熊本地震について、その理解を進展する成果が得られている。

今後は2016年熊本地震について粘弾性モデルを高度化し、現実的な地下構造を考慮した地震時変動及び余効変動の発生メカニズムについてモデル化を行うとともに、令和6年能登半島地震など、他の内陸地震にも同様の手法を適用して、比較研究を進めていく必要がある。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

宗包浩志・小林知勝,2023,2016年熊本地震後に続く阿蘇カルデラ内の沈降は火山起源か？—粘性変形、余効すべり、火山性地殻変動の検討—,JpGU 2023,SVC31-11

宗包浩志・小林知勝,2023,2016年熊本地震後に続く阿蘇カルデラ内の沈降は火山起源か？,日本火山学会2023年秋季大会,B3-10,https://doi.org/10.18940/vsj.2023.0_96

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

宗包浩志（国土地理院 地理地殻活動研究センター地殻変動研究室）
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話：029-864-5954
e-mail：gsi-eiss+3@gxb.mlit.go.jp
URL：https://www.gsi.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宗包浩志
所属：国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題（または観測項目）名：

プレート境界面上の滑りと固着の時空間変化の広域的な把握

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

日本を構成するマイクロプレートの動き、海底地殻変動データを解析に取り入れ、広域的な地殻変動データから、日本の主要な領域のプレート間の固着・滑りの推定を行う解析手法を改良し、プレート間の固着・滑りの推定結果の精度を高める。開発された手法を用いて日本のプレート境界の広域的な固着・滑りの時空間変化、ブロック運動の変化の可能性を明らかにする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

令和元年においては、時間依存のブロック断層解析プログラムの改良を行うと共に、Loveless & Meadのブロック断層形状を用いて、各種パラメータの最適化を試みる。令和2-3年においては、時間依存のブロック断層解析プログラムの改良を引き続き行うと共に、ブロック形状の最適化を試みる。令和4-5年においては、ブロック運動が時間的に変化してもよいという条件での解析を行い、ブロック運動の変化の可能性も探る。また定常的な解析・可視化を行えるようにする。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

時間依存のブロック断層モデリングに海底地殻変動データを取り入れ、2014年以降の日本列島のプレート境界の固着状況の変化を調べた。ブロック境界はLoveless & Mead (2010)によった。また、九州南部域でフォワードスリップが出ないような拘束をかけている。その結果、海域での滑り欠損がより明瞭になり、2018年頃から発生した豊後水道のSSE等の固着状況の変化を検出できた。東海地域の沖合での固着が2022年から弱化しSSEの発生を示唆する結果が得られている（図1）。またSuito(2017)、水藤(2017)の成果に基づいて、東北地震、熊本地震の余効変動を補正し、東北地震前の定常変動を地殻変動データから差し引き、南海トラフ域のスロー地震（SSE）を調べた。その結果、2019年初めころの豊後水道、四国中部、紀伊水道の長期的SSEの時空間変化を推定できた

（図2）。2020年半ば頃からの、日向灘南部の長期的SSEは2021年半ばころに終了し、2023年1月から再び始まり、2023年7月頃に終了している。2020年からの紀伊半島で長期的SSE発生している可能性が示された（図3）。また、東海地方でSSEが発生していることが示された。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

令和元年においては、時間依存のブロック断層解析プログラムの改良を行うと共に、Loveless

&Meadのブロック断層形状を用いて、各種パラメータの最適化を試みた。令和2-3年においては、時間依存のブロック断層解析プログラムの改良を引き続き行うと共に、ブロック形状の最適化を試みたが改善はできなかった。令和4-5年においては、ブロック運動が時間的に変化してもよいという条件での解析を行い、ブロック運動の変化の可能性を探ったが有意な結果は得られなかった。また定常的な解析・可視化を行えるようにした。非正常地殻変動に基づくプレート境界上のSSEの広域的な把握が計画期間中に行われ、西南日本のSSEの特徴が調べられた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測において、南海トラフ沿いの東海～種子島にかけての地域の2018年以降の時空間変化が把握できた。時空間変化の把握に基づく予測に関しては、2018年の日向灘北部の長期的SSEの検出において、豊後水道SSEの可能性を指摘しており、実際に2018年末から豊後水道SSEが発生している。また2019年5月の日向灘地震の前に深部プレート面上でのSSEの発生が確認され、日向灘地震の評価に資する事例が得られている。四国中部の長期的SSEと四国北西部の短期的SSEの相関が示された事により、プレート境界の滑り過程の理解に部分的に貢献できたと考えられ、今後のプレート間滑りの予測に貢献すると思われる。2022年10月の大隅半島沖地震後の震源域付近での滑りの検出も、地震活動の予測に資する事例と考えられる。紀伊半島における長期的SSEの可能性は、従来紀伊半島では起きないという推定結果を覆す可能性があり、地震発生予測の上で重要な知見が得られた可能性がある。種子島の長期的SSEと短期的SSEの関係性も、地震活動の予測という観点で重要と考えられる。2023年からの東海の長期的SSEの発生は、東海SSEの再来間隔が10-13年程であるということを示唆し、東海地震を考察する上で重要な貢献と考えられる。今後は、本成果を踏まえてバックスリップの視点に加えて南海トラフ沿いのプレート間滑りを全体として定常的に監視できるものと思われる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Ozawa, S., M. Munekane, H. Suito, 2023, Detection of long-term and short-term slow slip events by network inversion filter, using a very dense GNSS Network in Shikoku, Japan, during 2012-2022, J. Geophys. Res., 128, 10, 査読有, 謝辞有

Ozawa, S., M. Munekane, H. Suito, 2024, Time-dependent modeling of slow-slip events along the Nankai Trough subduction zone, Japan, within the 2018-2023 period, Earth Planets Space, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

小沢慎三郎、宗包浩志、水藤尚, 2023, GEONETで検出された南海トラフ沿いの長期的SSE, 地球惑星科学連合大会2023

小沢慎三郎、宗包浩志、水藤尚, 2023, 2018年以降の西南日本のプレート間すべりの時間変化, 日本地震学会, S-GD02

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

国土地理院 地理地殻活動研究センター地殻変動研究室
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話：029-864-5954

e-mail : gsi-eiss+3@gxb.mlit.go.jp

URL : <https://www.gsi.go.jp>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宗包浩志

所属：国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

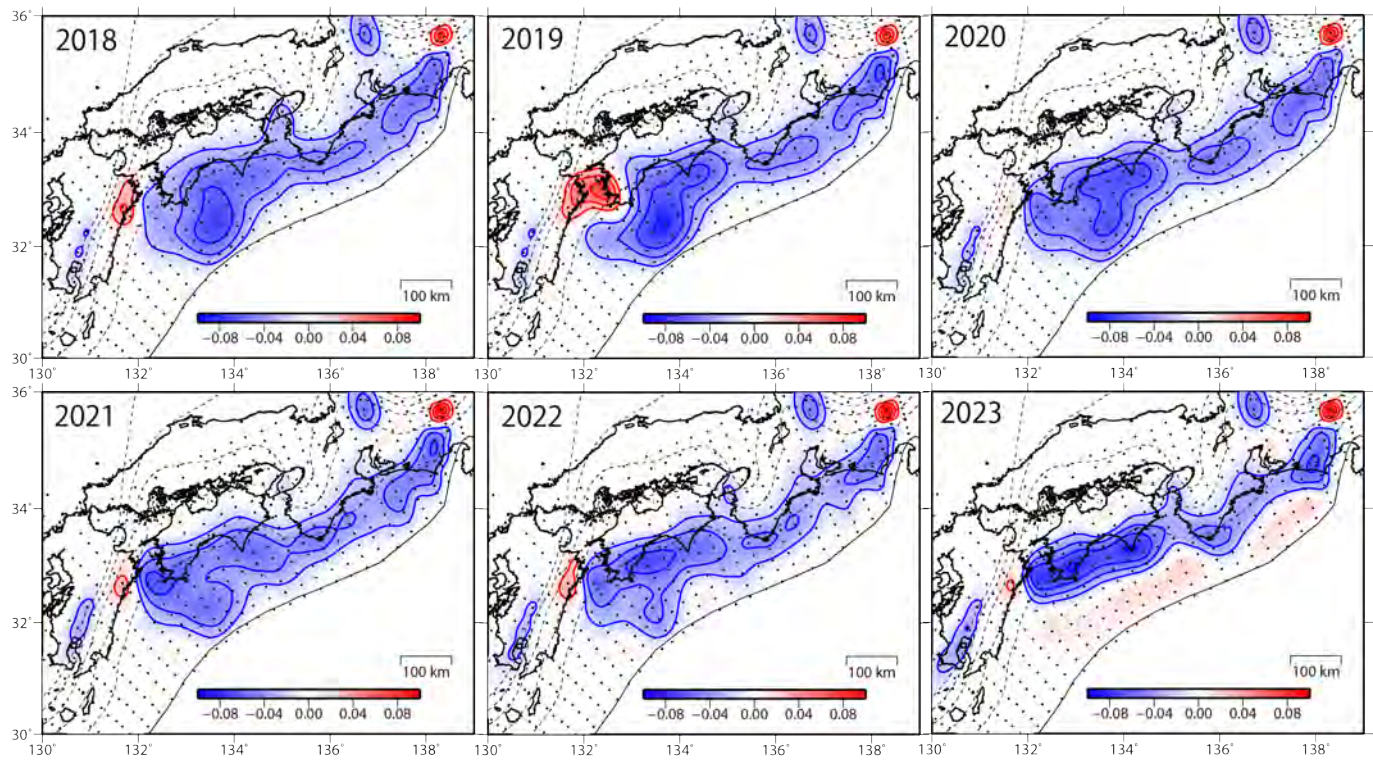


図1 プレート境界の固着と滑り

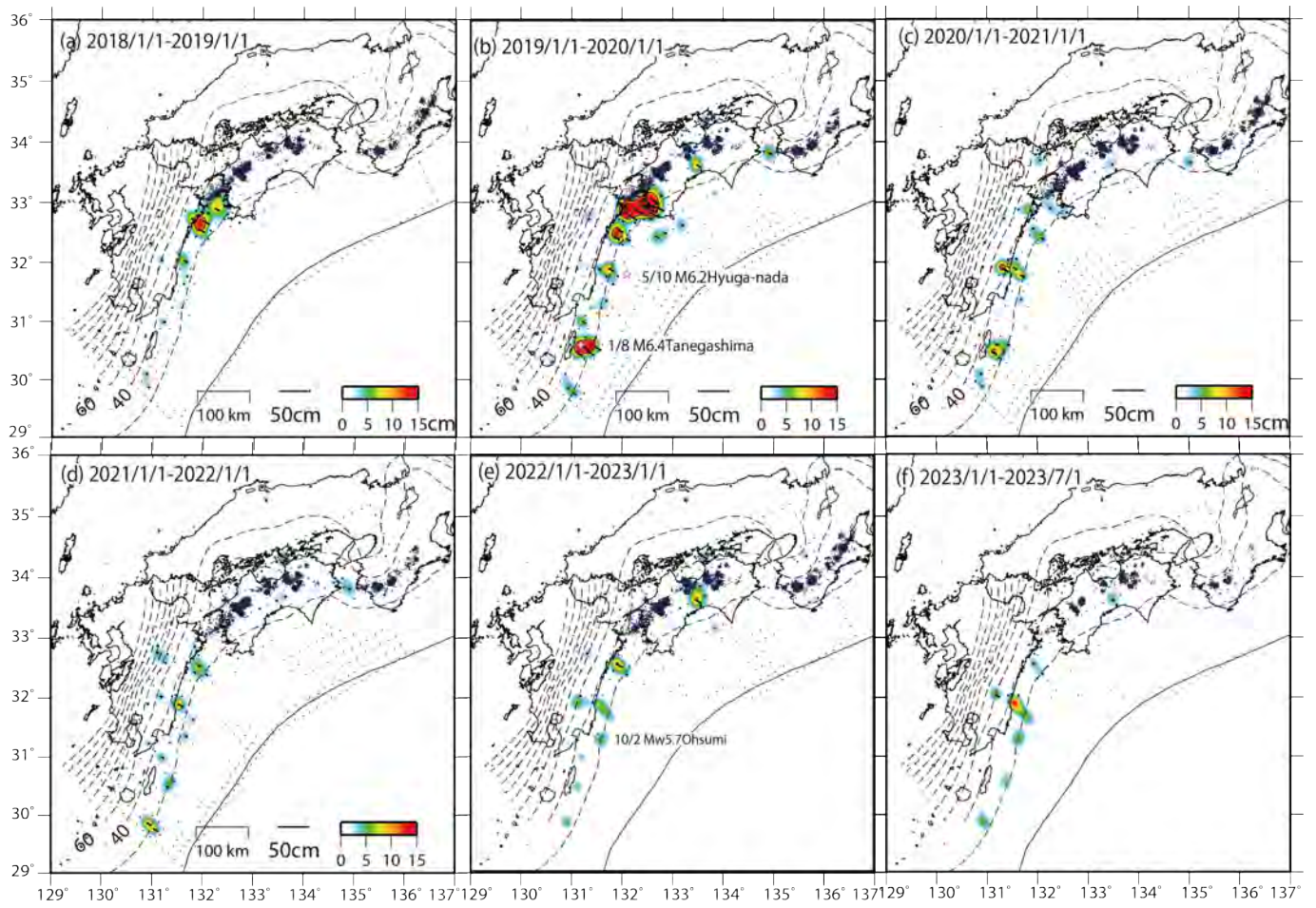


図2 西南日本の長期的SSE

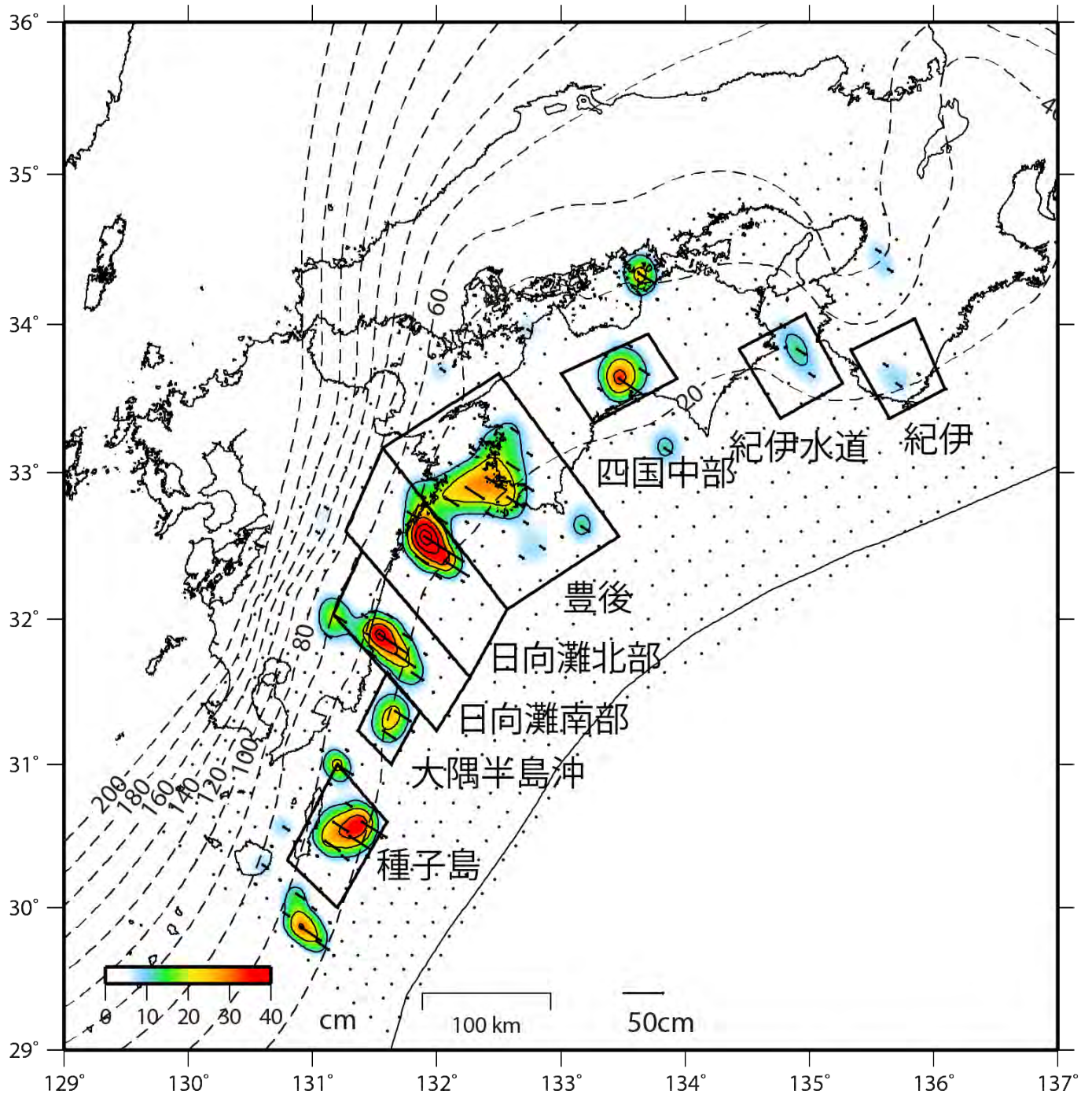


図3 2018-2023年間の西南日本の長期的SSE

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題（または観測項目）名：

火山地域のマグマ供給系のモデリング

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

火山地域のモデルにシル、ダイク、テクトニックな変形を取り入れ、マグマ溜りの膨張・収縮及びマグマの移動まで含めた解析を行えるようにし、開発された手法を用いて特定の火山地域を半自動で解析・監視できるシステムを構築する。構築されたシステムを適用して、マグマ供給系の時間変化に関する知見を得る。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

令和元年度においては、線形の時間依存のインバージョンを用いて伊豆大島、桜島のモデルを構築する。また非線形の時間依存のインバージョン及び粒子フィルターを用いた時間依存のインバージョンを用いて、マグマ溜りの位置変化の推定を試みる。

令和2-3年度においては、伊豆大島、桜島以外の火山地域のモデル化を試みる。

令和4-5年度においては、時間依存のインバージョンにより様々な火山地域のモデリング及び結果の可視化を半自動で行えるシステムの構築を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

時間依存のインバージョンを伊豆大島、桜島、霧島に適用し、解析を継続した。その結果伊豆大島では、膨張収縮を繰り返しながら体積増加が継続していたが、2016年頃から長期的な膨張が停滞していることが確かめられた（図1）。桜島と霧島の統合解析では、広域地殻変動を座標の2次までの関数として考慮し解析中で取り除いている。その結果桜島では膨張収縮を繰り返しながら体積増加が継続していること、直近では桜島の茂木ソースでやや停滞、始良カルデラで膨張が見られる事を確かめた（図2）。また、霧島山のマグマ溜りの体積変化は、2019年頃から停滞しており、2022年から膨張が推定されている（図2）。伊豆大島、桜島・霧島に関し、モニタリングの自動化を行い、HP上で監視できるようにしてある。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

令和元年度においては、線形の時間依存のインバージョンを用いて伊豆大島、桜島のモデルを構築した。また非線形の時間依存のインバージョン及び粒子フィルターを用いた時間依存のインバージョンを用いて、マグマ溜りの位置変化の推定を試みた。令和2-3年度においては、伊豆大島、桜島以

外の火山地域のモデル化を試みた。令和4－5年度においては、時間依存のインバージョンにより様々な火山地域のモデリング及び結果の可視化を半自動で行えるシステムの構築を行った。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

モニタリングによる火山活動の評価において、伊豆大島、桜島・霧島の長期的トレンド変化をモニターすることによって、それぞれの火山の評価に貢献できたと考えられる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

小沢慎三郎、宗包浩志,2024,地殻変動データに基づく力源モデルによる火山活動の監視手法の開発に関する研究,国土地理院調査研究年報

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地理地殻活動研究センター 研究管理課

電話：029-864-5954

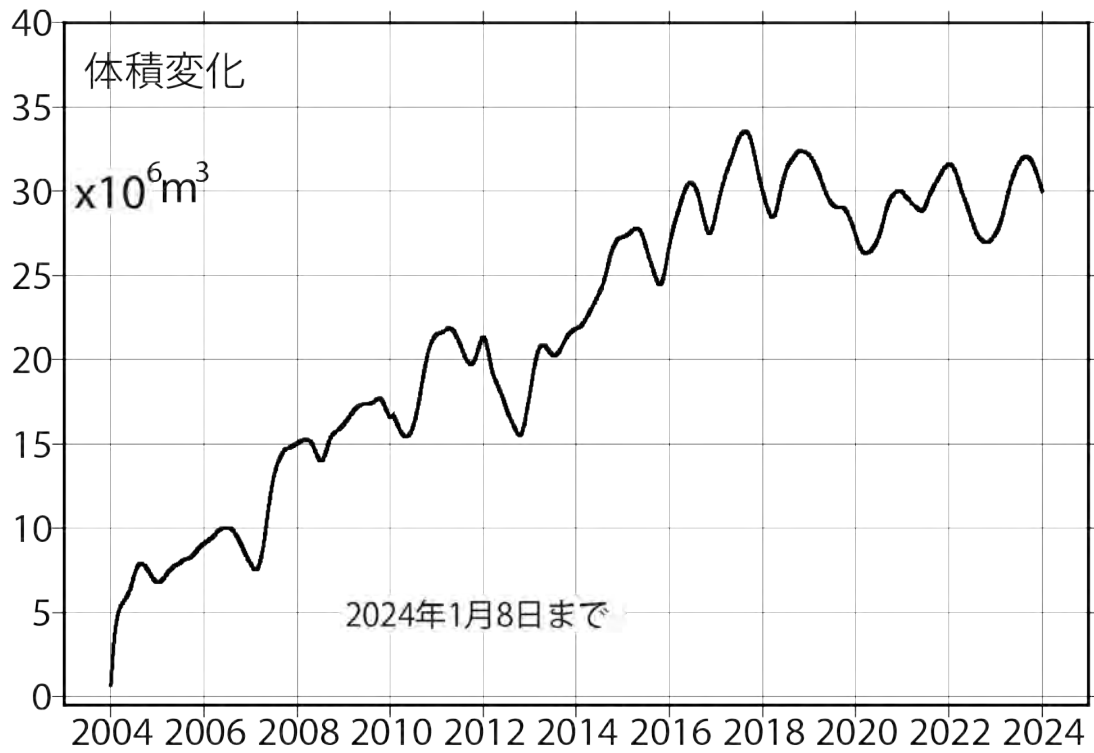
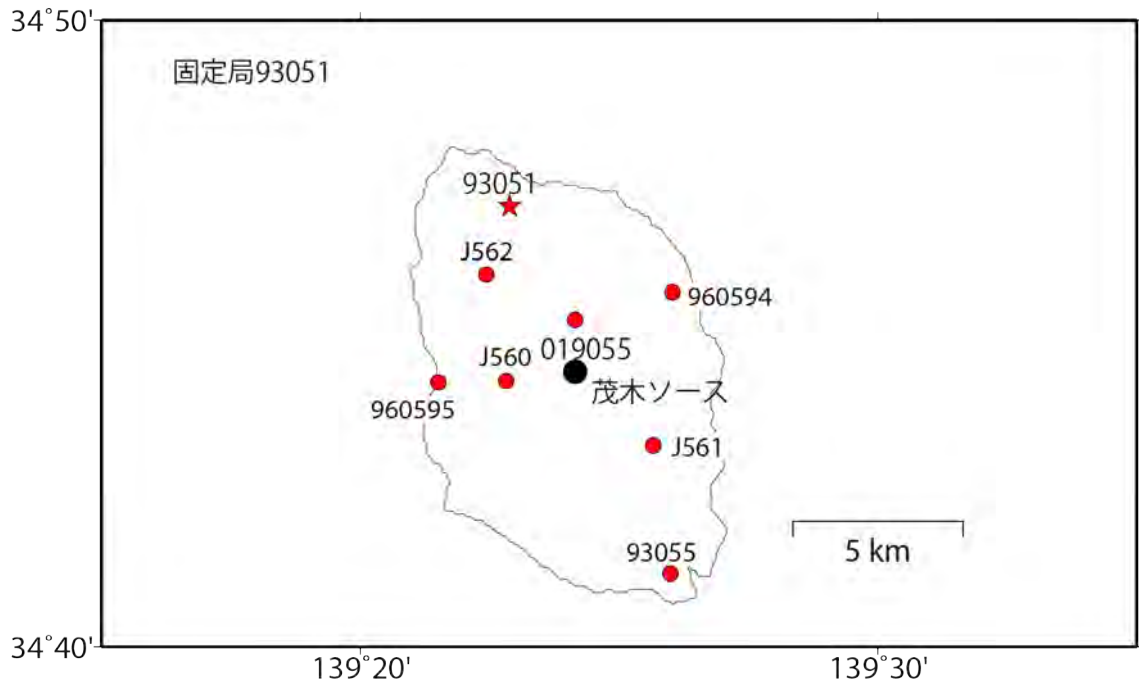
e-mail：gsi-eiss+3@gxb.mlit.go.jp

URL：https://www.gsi.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宗包浩志

所属：国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室



茂木ソース: 緯度 34.74 経度 139.4 深さ 6km

*電子基準点の保守等による変動は補正済

図1 伊豆大島の体積変化

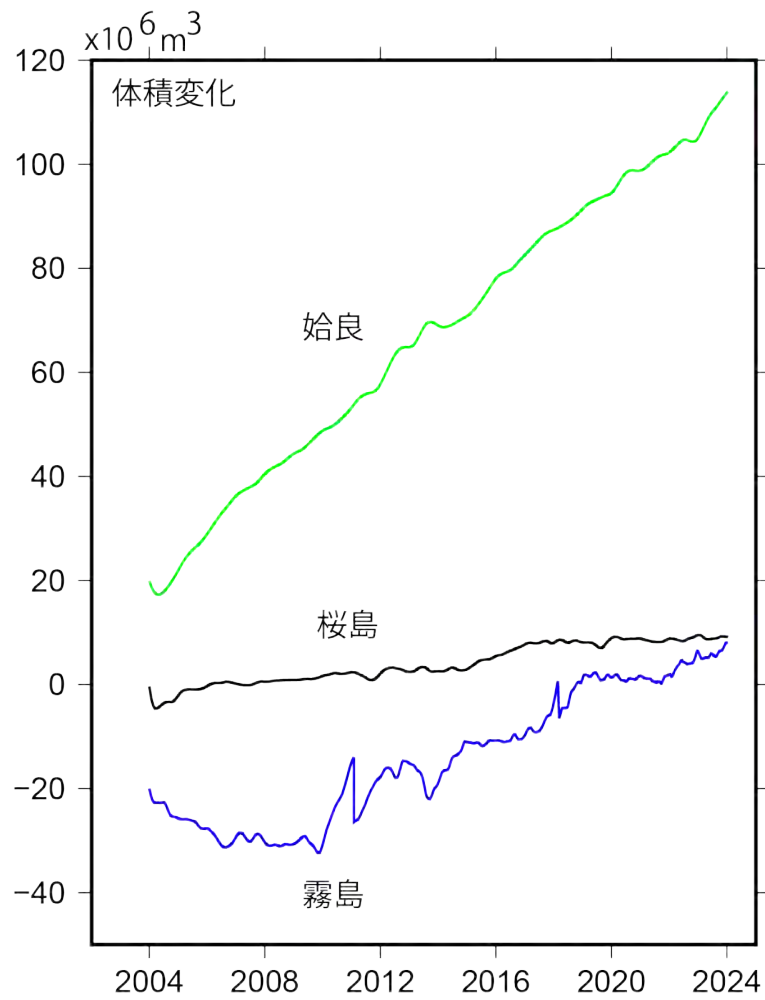
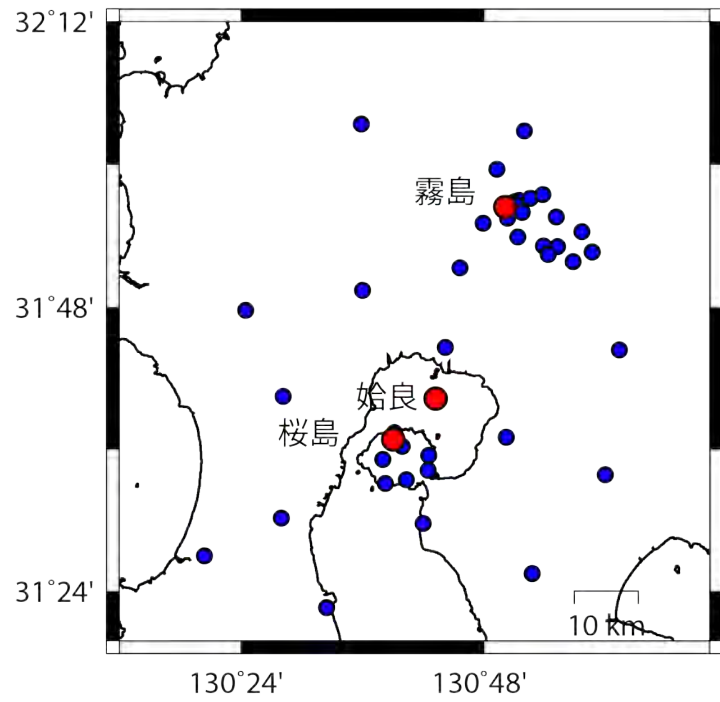


図2 霧島・桜島の体積変化

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題（または観測項目）名：

GNSS連続観測（GEONET）

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測手法

イ. 津波の即時予測手法

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

GEONETによる地殻変動連続観測を着実に継続し、日本列島全域の地殻変動・火山活動のモニタリングシステムの高度化をさらに推進することを目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

全国において、GNSS連続観測点を平均20キロメートル間隔の配置として維持するとともに、観測を継続する。必要に応じて、重点的な観測地域において観測点密度を考慮した観測体制の充実を目指す。また、GNSSの発展・最新のITRF座標系の実現等に伴いGEONETの解析手法の高度化を図る。

加えて、GNSS連続観測（GEONET）による日本列島全域の地殻変動・火山活動のモニタリングを定常的に行い、得られた結果は防災情報への活用のため速やかにホームページなどで公表するとともに、地震調査委員会、火山噴火予知連絡会等に報告する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

全国において、GNSS連続観測点を維持し、観測を継続した。また、新たに国際GNSS事業（IGS）解析センターの認定を受け、GNSS精密暦の提供を開始した。加えて、地殻変動監視において必要となる「電子基準点日々の座標値」の算出を着実に継続した。

また、GEONETによる日本列島全域の地殻変動・火山活動のモニタリングを着実に実施し、令和5年5月5日、令和6年1月1日に発生した石川県能登地方の地震活動に伴う地殻変動を検出した。さらに、2019年春頃から四国中部、2020年夏頃から紀伊半島西部・四国東部や九州南部、2022年初

頭から静岡県西部・愛知県東部で発生したプレート間ゆっくりすべり（スロースリップ）現象に伴う非定常的な地殻変動、硫黄島の火山活動に伴う地殻変動等を検出するなど、防災や地震発生・火山活動のメカニズムに関する研究等に寄与している。これらのモニタリング結果は、速やかにホームページなどで公表するとともに、地震調査委員会、火山噴火予知連絡会等に報告した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

全国約1,300点からなるGEONET（GNSS連続観測システム）を維持・管理し、継続的に観測を行った。これらの日座標値を高い精度で安定的に提供すべく、新型のGPS衛星や国際地球基準座標右傾（ITRF）の更新に対応した解析ストラテジを開発し、令和3年度から運用を開始した。従来から取り組んできたIGSへの観測データの提供に加え、令和5年度にIGS解析センターとしてGNSS精密暦の提供を開始した。当初の計画どおり、GEONETによる日本列島全域の地殻変動・火山活動のモニタリングを着実に実施し、得られた結果は速やかにホームページで公開するとともに、地震調査委員会、火山噴火予知連絡会等に報告した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

平均20km間隔の稠密GNSS連続観測網であるGEONET（GNSS連続観測システム）とそれらの日々の座標値の着実な運用は、地震・火山活動を観測する基盤として重要で、地震・火山研究の推進・高度化に資するものである。これらの役割を果たすために、今後も継続的な解析ストラテジ更新により、安定性・精度の向上が求められる。また、新たに提供を開始したGNSS精密暦は世界最高精度の暦であるIGS暦の算出に貢献するものである。今後、継続的にGNSS精密暦を監視することで、地殻変動やプレート運動の監視基準となる国際地球基準座標系（ITRF）の算出への貢献が期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

Takamatsu, N., S. Abe, K. Ohno, S. Kawamoto, K. Akiyama, 2023, Precise orbits determination results for GNSS using MADOCA, IUGG 2023 Berlin

阿部 聡, 大野圭太郎, 宮崎隆幸, 高松直史, 川元智司, 2023, MADOCAによるGNSS軌道暦推定の評価, 日本地球惑星科学連合2023年大会

小代知波, 大野圭太郎, 高松直史, 若杉貴浩, 秋山恭平, 2023, MADOCAを用いたマルチGNSS軌道情報の解析と公開, 日本測地学会第140回講演会

市村美沙, 吉田賢司, 芝 公成, 矢来博司, 宗包浩志, 2023, GNSS連続観測で捉えた磐梯山の地殻変動, 日本火山学会2023年度秋季大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

GNSS連続観測網の継続・拡充・高度化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

国土地理院 測地観測センター電子基準点課・地殻監視課
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地理地殻活動研究センター 研究管理課

電話：029-864-5954

e-mail：gsi-eiss+3@gxb.mlit.go.jp

URL：https://www.gsi.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宗包浩志

所属：国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地形地殻変動観測

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

日本列島全域の地殻活動のモニタリングシステムの高度化に寄与するため、潮位連続観測データを継続的に取得すると共に、観測システムの更新やデータの共有化を進める。（地殻監視課）

基本測量に関する長期計画の施策を基本に、大規模地震対策特別措置法に基づく「地震防災対策強化地域」など、南海トラフ地震、首都直下地震等が想定される地域を対象として、定期的に水準測量を実施し信頼性のある高精度の地殻上下変動量データを取得する。

火山周辺地域においてREGMOS等による連続観測を継続するとともに、観測システムの更新など観測設備の安定的・継続的な運用を行う。

航空機SARを利用して、活動的な火山における火口等を観測し、噴火前後の変化情報を蓄積する。（測地基準課、電子基準課、地図情報技術開発室）

(7) 本課題の5か年計画の概要：

全国25箇潮場での潮位連続観測を引き続き実施するとともに、日本周辺の海面変動トレンドの定量的な評価を行う。また、潮位データ等を公開するなどデータの共有化を進め、津波等の発生時における予測や終息等の防災情報の発信への活用を図る。（地殻監視課）

「地震防災対策強化地域」など、南海トラフ地震、首都直下地震等が想定される地域の水準路線を対象に、平成31年（令和元年）度においては1,309kmの水準測量を実施し、令和2年度以降においては対象となる水準路線を中心に定常的な観測を実施する。

活動的な火山において電子基準点を補完して詳細な地殻変動を捉えるためREGMOS等による地殻変動連続観測を実施する。

全国の活動的な火山について航空機SARによって観測を実施し、火口付近の地形を明らかにして、地形情報をアーカイブする。また、活発な噴火活動によって災害が発生した際には、噴火前後の変化情報を明らかにする。

（測地基準課、電子基準課、地図情報技術開発室）

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

全国25箇潮場の潮位連続観測を安定的に実施するため、定期的な保守および監視を実施し、これらの潮位観測データを引き続きホームページで公開するとともに、気象庁、国土交通省の防災情報提供

センターに潮位データを提供し、潮位データを共有した。また、潮位連続観測による地殻変動及び海面変動トレンドの把握を行った。また、機動観測として、自動測距測角装置による連続観測を1火山（伊豆大島）で実施し、得られたデータは火山噴火予知連絡会等の会議に報告した。

火山周辺地域において可搬型GNSS連続観測装置（REGMOS）等による連続観測を8火山で実施した。また、活発な地震活動が継続している石川県能登地方で、REGMOSによる地殻変動観測を2か所で観測を継続し、令和6年能登半島地震に伴う地殻変動を捉えた。

令和5年度は、南海トラフ地震防災対策推進地域、南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域等において、地殻変動の動向を把握するために一等水準測量1,015km（御前崎、西伊豆、紀伊南、香川、室戸、日南及び出水地区）を実施した。

全国の活動的な火山について、航空機SARによる観測を5火山で実施し、噴火前の地形情報を取得した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

全国25験潮場の潮位連続観測を安定的に実施するため、計画どおり定期的な保守及び観測システム更新を行い、潮位観測データをホームページから公開するとともに、気象庁、国土交通省の防災情報提供センターに潮位データを共有した。

「地震防災対策強化地域」など、南海トラフ地震、首都直下地震等が想定される地域の水準路線を対象に、計画どおり毎年約1,000kmの水準測量を実施した。

火山周辺地域において計画どおりREGMOSによる連続観測を実施するとともに、一部計画を変更して、活発な地震活動が継続している石川県能登地方でもREGMOSによる地殻変動観測を実施し、令和6年能登半島地震に伴う地殻変動を捉えた。

全国の活動的な火山について、航空機SARによる観測を毎年実施し、噴火前の地形情報を取得するとともに、令和元年8月には浅間山の噴火に伴い緊急観測を実施し噴火前後の画像をホームページから公開した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

全国25験潮場での潮位連続観測を安定的に実施するとともに、潮位データを共有することによって、観測基盤としての潮位観測データの整備に貢献した。また、水準測量、潮位連続観測による地殻変動の把握を継続することにより、地震サイクル全過程の地殻変動データを収集するという目標に貢献した。

火山周辺地域や地震活動の活発な地域において、電子基準点を補完するREGMOSを設置することで火山活動や地震活動の詳細を把握することに貢献した。また、活動的な火山の火口等を対象とした航空機SAR観測では、噴火前の地形情報を新たに取得することで、噴火前後の地形変化を明らかにするために必要な地理空間情報の蓄積に貢献した。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

国土地理院,2023,東海地方の地殻変動,地震予知連絡会会報,110,102-113,査読無,謝辞無

国土地理院,2023,中国・四国地方の地殻変動,地震予知連絡会会報,110,334-339,査読無,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

GNSS連続観測網の継続・拡充・高度化

航空機SAR観測

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

国土地理院 測地観測センター地殻監視課,測地観測センター電子基準課,測地部測地基準課,基本図情報

部地図情報技術開発室
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話：029-864-5954
e-mail：gsi-eiss+3@gxb.mlit.go.jp
URL：https://www.gsi.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宗包浩志
所属：国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題（または観測項目）名：

物理測地観測

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

航空重力測量により全国の高品質な重力データを収集し、全国を網羅する標高基準（ジオイド・モデル）の精度を向上することにより、GNSS測位によって容易に信頼できる標高が得られる環境を整備する。また、地上における重力値の繰り返し観測及び地磁気の連続観測を行い、地震や火山活動の監視、現象の理解等に必要となる基礎資料として提供する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

航空重力計を航空機に搭載し、山間部や沿岸海域を含む全国を網羅した稠密な重力データの測定を令和元年度から4年間かけて順次実施する。得られた重力データを利用して、令和5年度には高精度な精密重力ジオイドの計算を実施する。

また、地震や火山現象の理解とその予測研究に必要な基礎的資料を整備するため、南海トラフ巨大地震の想定震源域における繰り返し絶対重力観測による重力変化の把握を引き続き行うとともに、地磁気の連続観測及び富士山中腹における全磁力連続観測による地磁気変化の監視を継続する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

重力測量は、全国の航空重力測量が完了した。得られた重力データを利用して、精密重力ジオイドの計算を実施した。

地磁気測量は、測地観測所等（鹿野山測地観測所、水沢測地観測所及び全国10か所に設置している地磁気連続観測装置）において、地磁気連続観測データを取得するとともに、地磁気絶対観測等を実施した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

重力測量は、令和元年度から令和5年度にかけて、航空重力計を航空機に搭載し、山間部や沿岸海域を含む全国を網羅した稠密な重力データの測定を実施した。得られた重力データを利用して、精密重力ジオイドの計算を実施した。

地磁気測量は、測地観測所等（鹿野山測地観測所、水沢測地観測所及び全国10か所に設置している地磁気連続観測装置）において、地磁気連続観測データを取得するとともに、地磁気絶対観測等を実施した。これらの結果をもとに全国の地磁気の地理的分布を示した磁気図2020.0年値を作成し公表した。また、令和4年度には測地観測所等の機器更新を行った。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

これまでに得られた航空重力データを含めた重力データを用いて、精密重力ジオイド・モデルを試作した。また、GNSS測量及び水準測量から求めた実測ジオイド高と試作した精密重力ジオイド・モデルを比較した。その結果、精密重力ジオイド・モデルの目標精度3cmを達成していることを確認した。このことから、観測基盤としての精密重力ジオイド・モデルを高精度に整備することができると考えられる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

市村 和輝・中島 正寛・豊福 隆史・酒井 和紀・塩谷 俊治・加藤 知瑛・畔柳 将人・小川 拓真・松尾 功二・林 京之介・井上 武久,2023,釧路・根室地方におけるGNSS/水準測量データを用いた精密重力ジオイド・モデルの精度評価,日本地球惑星科学連合2023年大会,SGD01-10

小川 拓真・中島 正寛・菅原 安宏・酒井 和紀・加藤 知瑛・市村 和輝・松尾 功二,2023,精密重力ジオイド構築に向けた航空重力測量,日本測地学会第140回講演会,025

M. Nakashima・T. Ogawa・Y. Sugawara・K. Sakai・C. Kato・K. Ichimura・K.

Matsuo,2023,Nationwide airborne gravity surveys for developing a new precise gravimetric geoid model in Japan,AGU Fall Meeting 2023,G33A-0531

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

国土地理院 測地部物理測地課

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地理地殻活動研究センター 研究管理課

電話：029-864-5954

e-mail：gsi-eiss+3@gxb.mlit.go.jp

URL：https://www.gsi.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宗包浩志

所属：国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題（または観測項目）名：

宇宙測地技術による地殻変動監視

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地殻変動分布の把握による地震像・火山活動の詳細な解明及び火山活動箇所の正確な把握による災害軽減に活用する。また、今後起こりうる地震や火山噴火の長期予測のため、海外の地殻変動観測事例をできる限り解析する。

日本列島とその周辺海域に展開される地震観測網や地殻変動観測網などの観測基盤を維持するとともに、中長期的視野に立った観測基盤の整備や更新を行っていく。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

陸域観測技術衛星2号（ALOS-2）等のSARデータを使用して日本全国のSAR干渉解析を定常的に実施し、日本国内における火山、地盤沈下等による地殻・地盤変動を検出する。また、国内外で地震が発生した際及び火山活動が活発化した際には、緊急時の現況把握を目的として緊急解析を実施する。さらに、2020年度に打ち上げ予定の先進レーダ衛星（ALOS-4）に対応するため、解析手法やシステム構成の検討を進め、切れ目なく地殻・地盤変動の監視を継続する。

ITRFの構築に貢献し、我が国の測量の基準となる座標系を維持し、また、巨大地震を引き起こすとされているプレート運動を監視するため、IVSと連携してVLBI測量を実施する。具体的には、石岡VLBI観測施設において、IVSの年間計画に基づき国際VLBI観測を実施する。また、IVSが推進する次世代VLBI観測システム（VGOS）による広帯域観測を実施する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

ALOS-2のSARデータを使用して北方四島を含む国土全域を対象に定常的にSAR干渉解析を行った。また、ALOS-2の蓄積された観測データを用いた干渉SAR時系列解析を国内の火山を対象として行ったほか、全国の地盤・地殻変動を把握するため、全国を対象とした干渉SAR時系列解析を実施した。

さらに、国内外で発生した地震や火山活動に伴う地殻変動を検出するため、緊急観測データを用いて解析を実施した。国内で発生した地震では、2023年5月5日に発生した石川県能登地方の地震、2024年1月1日に発生した令和6年能登半島地震において、地震に伴う地殻変動が検出された。

特に、令和6年能登半島地震では能登半島北部の広い範囲で隆起が検出され、輪島市西部では約4mもの隆起が検出された(図1)。この隆起に伴い能登半島北部の海岸線の広い範囲で陸化していることが確認された(図2)。国内の火山活動では、2023年6月に火山活動が活発化した口永良部島において、これまでは地殻変動がほとんど検出されていなかった古岳山頂付近で膨張を示す変動が検出された。2週間ごとに実施されたALOS-2の観測により2023年5月から9月頃まで膨張が継続したことが明らかとなった(図3)。このほか、2019年12月に火山活動が活発化した西之島、2023年10月21日に翁浜沖で噴火が発生した硫黄島について、地殻変動や地形変化の監視を継続して行った。国外では、2023年9月8日(UTC)にモロッコ王国で発生したM6.8の地震において、震央周辺に最大20cm程度の衛星に近づく変動が検出された(図4)。これらの結果は、いずれも国土地理院のHPで公開するとともに、地震調査委員会、地震予知連絡会、火山噴火予知連絡会等の関係機関に報告を行った。

2023年の国際VLBI事業(IVS)の観測計画に基づき、石岡VLBI観測施設においてVLBI国際協働観測を238回実施した。これらのデータを1980年以降世界中で観測されたVLBIデータとともに全地球的に解析し、観測局位置とその変化を求めた。約8年の観測データから、水平2成分、鉛直成分ともに約0.5mmの位置決定精度(標準偏差)で局位置が求められた。また、石岡局の水平速度は約19.8mm/年(方位角134°方向)であった(図5)。これは、通常のプレート運動の成分に東北地方太平洋沖地震の余効変動を含んでいるものと考えられる。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

ALOS-2のSARデータを使用して北方四島を含む国土全域を対象に定常的にSAR干渉解析を行った。さらに、令和3年度からは火山監視に、令和4年度からは全国地盤・地殻変動の監視に干渉SAR時系列解析を導入し解析を行った。干渉SAR時系列解析により、SAR干渉解析では把握が困難な微小な変動が検出された。また、国内外で発生した地震や火山活動に伴う地殻変動を検出するために、ALOS-2の緊急観測データを用いた解析を行った。計画期間中に解析を実施した国内の地震は6件、火山は14火山、国外の地震は9件、火山は4火山であった。これらの解析結果は、国土地理院のHPで公開するとともに、地震調査委員会、地震予知連絡会、火山噴火予知連絡会等の関係機関、国外の事例については現地政府等にも報告を行った。さらに、ALOS-2の後継機であるALOS-4による高頻度観測データを用いた解析を可能とするため、解析手法の高度化やシステム構築を進めた。

ITRFの構築への貢献、我が国の測量の基準となる座標系の維持及びプレート運動の監視のため、石岡VLBI観測施設において、継続してIVSの観測計画に基づきVLBI国際協働観測を実施するとともに、世界中のVLBIデータを用いた全地球的な解析を実施し、観測局位置とその変化を把握した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

ALOS-2のSARデータを使用した全国定常解析、地震発生や火山活動活発化時の緊急解析の実施など、地殻変動の観測基盤の維持に貢献している。

定常的な地盤・地殻変動を監視することにより、災害につながる異常の検出に貢献し、地震や火山活動に伴う地殻変動を把握することで、発生メカニズムの解明や災害の軽減に貢献するものである。今後も観測技術の高度化や観測基盤の整備を進め、地盤・地殻変動を把握するための観測を着実に進める。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

・論文・報告書等

藤原智・三木原香乃・市村美沙・石本正芳・小林知勝,2023,干渉SAR時系列解析によって捉えられたアトサヌプリ火山群の収縮の継続,火山,63,161-169,https://doi.org/10.18940/kazan.68.3_161,査読有

小林知勝,2023,レーダー衛星による地殻変動解析から見た地震像,Bulletin of JAEE,50,査読無

Kobayashi, T., H. Munekane, M. Kuwahara, H. Furui,2023,Insights on the 2023 Kahramanmaraş Earthquake, Turkey, from InSAR: Fault Locations, Rupture Styles, and Induced Deformation,Geophysical Journal

International,236,1068-1088,<https://doi.org/10.1093/gji/ggad464>,査読有

・学会・シンポジウム等での発表

市村美沙・三木原香乃・古居晴菜・雨貝知美・石本正芳・佐藤雄大・小林知勝,2023,ALOS-2観測デー

タを用いた干渉SAR時系列解析による全国地殻・地盤変動監視（東日本）,日本地球惑星科学連合大会,STT39-P01

小林知勝・宗包浩志・桑原將旗・古居晴菜・石本正芳,2023,SARによる地殻変動解析で明らかにされた2023年トルコの地震の断層破壊の詳細,日本地球惑星科学連合大会,U13-03

本田昌樹・高木悠・石垣真史・中久喜智一・吉藤浩之・森克浩・佐藤雄大,2023,石岡VLBI観測施設における国土地理院のVLBI事業の取組,日本地球惑星科学連合大会,SGD01-P13

小林知勝・宗包浩志・桑原將旗・古居晴菜,2023,SARによる地殻変動解析で明らかにされた2023年トルコ・シリア地震の断層破壊の詳細,日本地震学会2023年度秋季大会,S03-01

藤原智・三木原香乃・市村美沙・石本正芳・小林知勝,2023,アトサヌプリ火山群の収縮変位の定量的分析,日本測地学会第140回講演会,P26

藤原智・三木原香乃・市村美沙・石本正芳・小林知勝,2023,アトサヌプリ火山群の収縮変位の定量的分析,日本火山学会2023年度秋季大会,B3-13

Takagi, Y., M. Ishigaki, T. Nakakuki, H. Yoshifuji, M. Honda, K. Mori, and Y. Sato,2023,Status of the Ishioka Geodetic Observing Station,EVGA Meeting 2023,P-23

Ueshiba, H., H. Yoshihujii, M. Honda, and K. Kokado,2023,Status report of Tsukuba VLBI Correlator,15th DiFX Users and Developers meeting

Matsumoto, S., H. Furui, H. Yoshifuji, H. Ueshiba, A. Suzuki, M. Honda, K. Kumagai, T. Kobayashi, and K. Kokado,2023,The 2023 Local-tie surveys conducted by GSI,The 13th General Meeting of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry

Kokado, K., M. Honda, H. Ueshiba, H. Yoshifuji, M. Ishigaki, H. Furui, and A. Suzuki,2023,Activities of GSI on VLBI operation and monitoring,The 13th General Meeting of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry

Ishigaki, M., K. Le Bail, M. Mouyen, R. Haas, and T. Nilsson,2023,How does station position modelling affect the VLBI scale in ITRF2020?,The 13th General Meeting of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

衛星SAR等による地殻変動監視

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

国土地理院 測地部宇宙測地課,地理地殻活動研究センター地殻変動研究室
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話：029-864-5954
e-mail：gsi-eiss+3@gxb.mlit.go.jp
URL：https://www.gsi.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宗包浩志
所属：国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

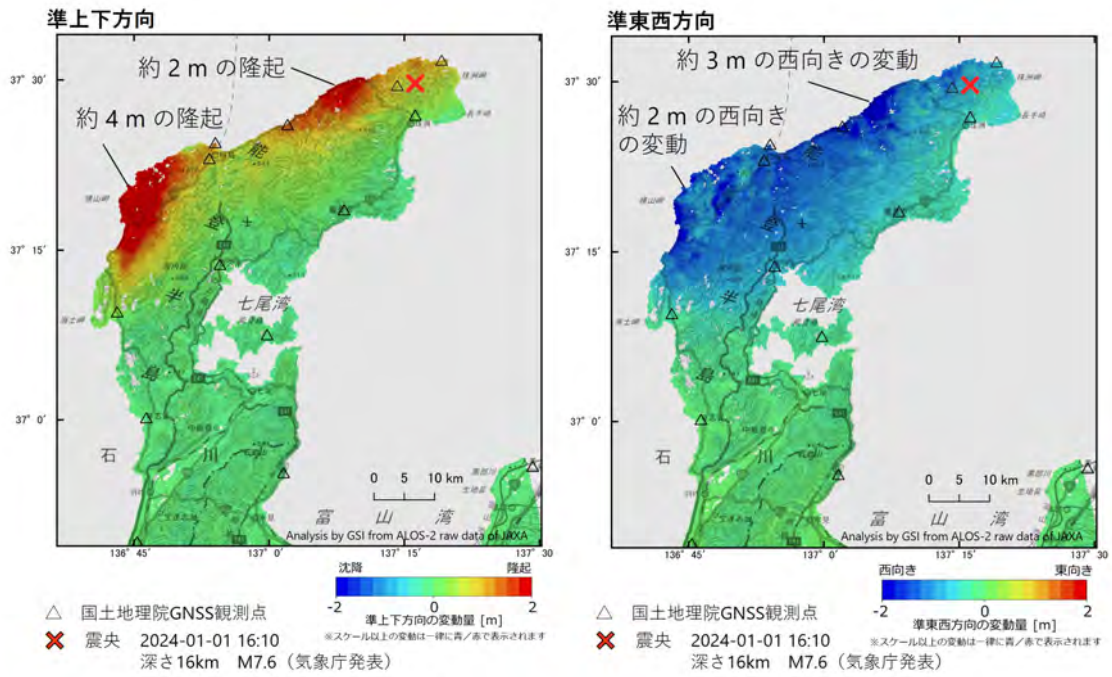


図1 ALOS-2観測データを用いた2.5次元解析による令和6年能登半島地震に伴う地殻変動（左：準上下方向、右：準東西方向の変動分布）

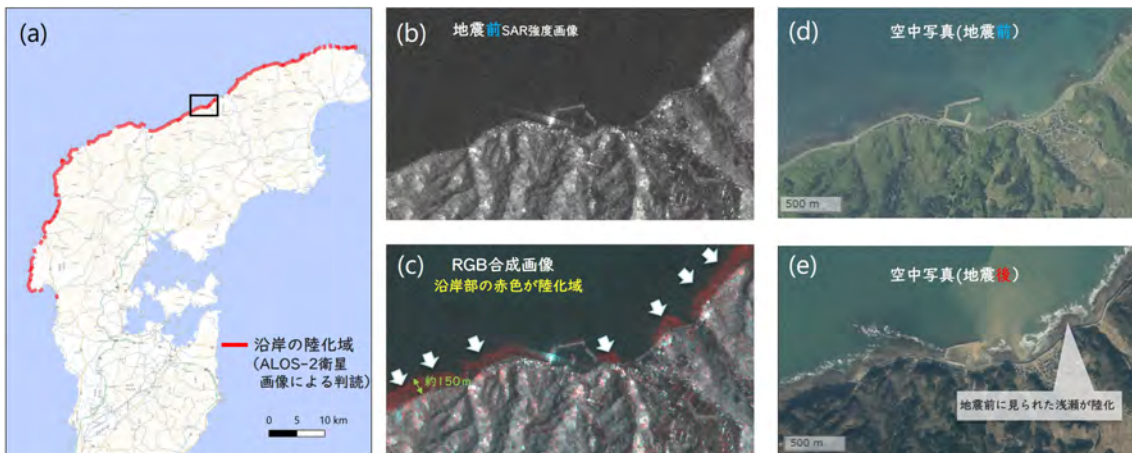


図2 ALOS-2観測データを用いたSAR強度画像による海岸線の陸化域（(a)判読結果、(b)地震前のSAR強度画像、(c)地震前後の強度画像のRGB合成画像、(d)地震前の空中写真、(e)地震後の空中写真）

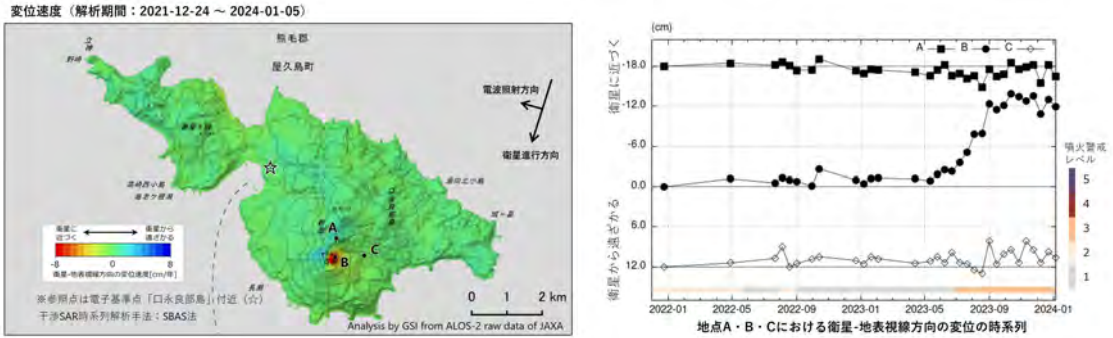


図3 ALOS-2観測データを用いた干渉SAR時系列解析結果（左：2021年12月24日～2024年1月5日の平均速度分布、右：衛星－地表視線方向の変位の時系列）

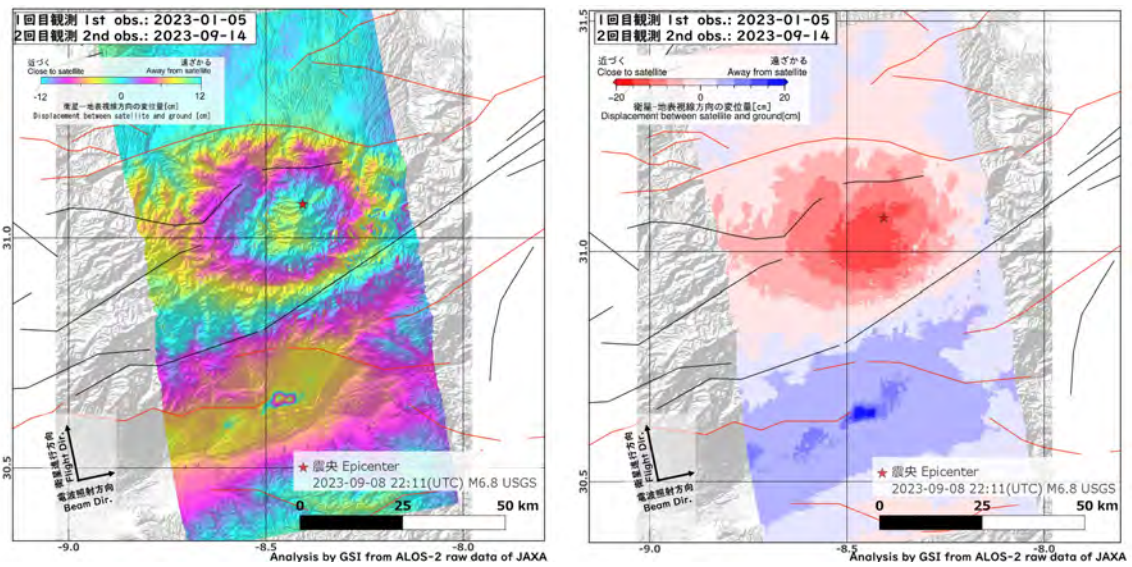


図4 ALOS-2観測データを用いた干渉解析結果（左：SAR干渉画像、右：アンラップ画像）

VLBI観測局の平均的な運動

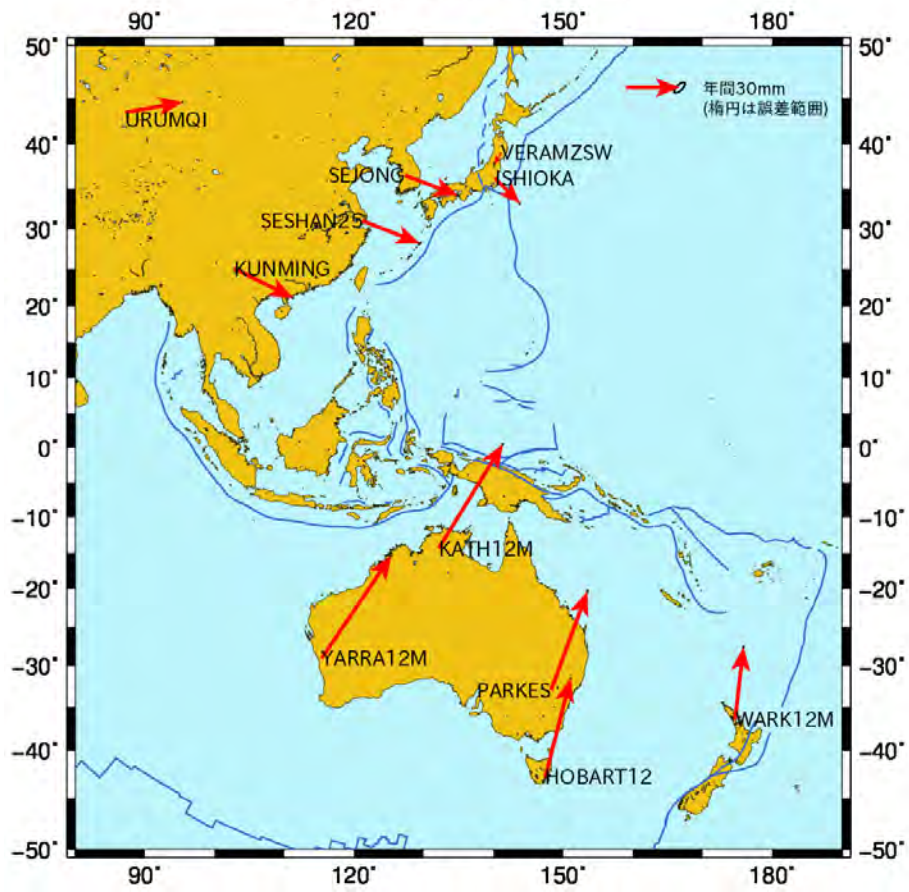


図5 VLBI観測データの解析により得られたアジア・オセアニア地域のVLBI観測局の水平速度

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題（または観測項目）名：

GNSS観測・解析技術の高度化

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測手法

イ. 津波の即時予測手法

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

災害関連情報の迅速な発表に貢献するために、地殻変動を迅速に高い時間分解能で観測し解析するシステムを構築・高度化する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

- ・前期に引き続き、地殻変動を即時的・高時間分解能で把握可能な、電子基準点リアルタイム解析システムの高度化を行う。
- ・地殻変動を迅速に高時間分解能で把握するための電子基準点キネマティック解析システムについて、解析結果の信頼性及び精度を向上させるためにマルチGNSSに対応させるなどの技術開発を行う。
- ・様々な汎用的な機器を用いた民間等のGNSS観測点のデータも取り込み活用することができる地殻変動観測システムの開発を行う。
- ・より信頼性の高い災害関連情報の発信を図るために、得られた地殻変動解析結果の品質評価や異常値を判定する仕組みを構築する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

- ・今年度の成果の概要
- ・全国の電子基準点を対象とした電子基準点リアルタイム解析システム(REGARD)を引き続き運用した。令和6年能登半島地震において、輪島で水平約1.3mの地殻変動をリアルタイムに検知し、「電子基準点日々の座標値」による後処理解と概ね整合する結果を得た。得られた地殻変動は国土地理院HPで公表するとともに、関係機関に断層モデルを含め情報提供を行った。
- ・REGARDにおけるMCMC法による断層推定の本格運用に向けて、関係機関との調整を実施した。また、PPPによる測位の本格運用に向けて、令和4年度に構築したプロトタイプシステムの冗長系を構築した。
- ・REGARDの信頼性向上を目的として導入した、リアルタイム測位解の品質に着目した異常値判定の

仕組みを引き続き運用した。

・千葉県房総半島に設置している、小型で機動性に優れたGNSS観測装置（以下「小型GNSS観測装置」とする）計30点について、前年度に引き続き観測を継続した。観測データを用いてF5準拠の座標値を日々更新することにより、当該地域について、高い配点密度でのGNSS観測および解析を実現した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

・全国の電子基準点を対象とした電子基準点リアルタイム解析システム(REGARD)により、複数の地震（令和元年山形県沖の地震、令和3年5月宮城県沖の地震、令和6年能登半島地震）において、リアルタイムで地殻変動検知と断層モデル推定を行い、関係機関への情報提供を行った。また、MCMC法による断層推定の試験運用を開始し、令和3年の宮城県沖の地震、令和6年能登半島地震において安定的に断層モデルを推定するとともに、不確実性の定量化が可能であることを確認した。さらに、測位解の品質による異常値判定を実装し、REGARDの信頼性の向上を果たした。

・地殻変動に対して頑健性の高いPPP（精密単独測位）に基づくREGARDをプロトタイプシステムとして構築した。

・地殻変動を高時間分解能で把握するための電子基準点キネマティック解析システムについて、前期に構築したPPP-ARによるプロトタイプシステムを用いて試験解析を実施し、解析の安定性向上のための改良を行った。

・近年普及し始めている汎用的なGNSS機器を用いた小型GNSS観測装置を開発した。その地殻変動の把握能力を検証するために、地盤沈下やスロースリップ等による複雑な地表変動が生じている房総半島を試験フィールドに選び、令和2年度に10箇所、令和4年度に20点箇所に本装置を設置し、GNSS連続観測を継続している。

・小型GNSS観測装置の観測データを用いてF5準拠の日々の座標値を算出し、cmの精度で地殻変動を把握できることを確認した。また、房総半島の一部において沈降を確認した。これは千葉県が実施している水準測量によって確認されている地盤沈下と整合的であった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

・電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD) はリアルタイムで地殻変動を観測し、巨大地震後数分での断層推定を目指したシステムである。PPPを用いたREGARDのプロトタイプシステム構築は地殻変動をリアルタイムで確実に捉える上で必要な技術開発であり、REGARDの高度化に資するものである。また、測位解の品質による異常値判定を実装した結果、異常値判定により確実にノイズ事例を棄却することができるようになり、REGARDから発信される地殻変動情報の信頼性の向上に貢献した。

・汎用的なGNSS 機器を用いた機動性の高い小型のGNSS観測装置を用いることで、より高い配点密度でのGNSS観測が可能となった。令和5年度までに、本観測装置の地殻変動監視への適用可能性を評価することができた。これは、今後の本装置を含む高密度のGNSS観測点を用いた地殻変動観測の実用化の可能性を示すものである。

・PPP導入に向けた取組み及び異常値を判定する仕組みの構築は、地殻変動情報の高精度化及び信頼性向上に寄与するもので、災害軽減を目標とする観測研究の推進に貢献する。今後は断層モデル推定手法の改良を進めることで、REGARDシステム全体の高度化が期待される。

・小型GNSS観測装置を含む高密度なGNSS観測点を用いた地殻変動観測の実用化は、GNSSを用いた地殻変動の観測基盤を強化につながり、災害軽減を目標とする観測研究の推進に貢献する。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

Takamatsu, N., K. Ohno, S. Abe, T. Miyazaki, Y. Takei, S. Murakami, and S.

Kawamoto, 2023, Improving REGARD: real-time finite fault estimates with dense GNSS CORS network in Japan, IUGG 2023, Berlin

村上真亮・竹井義貴・大野圭太郎・宮崎隆幸・阿部 聡・高松直史・川元智司, 2023, REGARD: 日本のリアルタイムGNSS解析システムの現状, 日本地球惑星科学連合2023年大会, S-CG53

高松直史・宮崎隆幸・阿部 聡・大野圭太郎・村上真亮・竹井義貴・川元智司, 2023, リアルタイ

△GNSS測位手法の改良－地殻変動の即時把握に向けて－,日本地球惑星科学連合2023年大会,SCG53-P01

高松直史・宮崎隆幸・大野圭太郎・村上真亮・小代知波・太田雄策,2023,リアルタイム GNSS 測位におけるノイズ特性－地殻変動の即時把握の高度化に向けて－,日本測地学会第140回講演会,26

大野圭太郎・太田雄策・高松直史・宗包浩志,2023,推定の不確実性を定量化した圧力源モデルリアルタイム推定手法の開発,日本測地学会第140回講演会,27

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

GNSS連続観測網の継続・拡充・高度化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

国土地理院 地理地殻活動研究センター宇宙測地研究室,測地観測センター電子基準点課
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話：029-864-5954
e-mail：gsi-eiss+3@gxb.mlit.go.jp
URL：https://www.gsi.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宗包浩志
所属：国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題（または観測項目）名：

全国活断層帯情報整備

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

全国の主要な活断層について、位置・地形等のデータベースの充実を図る。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題は、国土地理院経費のうち災害情報整備推進費により主要な活断層について、断層の詳細な位置、関連する地形の分布等の情報を整備・提供するものである。

令和元年度においては、庄川断層帯、長良川上流断層帯、長岡平野西縁断層帯、石狩低地東縁断層帯、糸魚川－静岡構造線断層帯（改訂）、上町断層帯（改訂）の6断層帯を1:25,000活断層図として整備。

令和2～5年においては、26断層帯を整備する予定。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和4年度に調査した、長町－利府線断層帯とその周辺「松島」、会津盆地西縁・東縁断層帯とその周辺「田島」、長野盆地西縁断層帯とその周辺「坂城」、伊那谷断層帯とその周辺「満島」、屏風山・恵那山断層帯及び猿投山断層帯とその周辺「師崎」、弥栄断層とその周辺「浜田南部」「益田南部」、糸魚川－静岡構造線断層帯とその周辺「葦崎 改訂版」の8面について1:25,000活断層図を公開した。

また、雫石盆地西縁－真昼山地東縁断層帯、北上低地西縁断層帯、柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯及び湖北山地断層帯、釜戸断層、鹿野-吉岡断層、上町断層帯、有馬－高槻断層帯及び六甲・淡路島断層帯を調査した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

平成30年度から令和4年度に調査した、「屏風山・恵那山断層帯及び猿投山断層帯とその周辺「師崎」」ほかの43面について1:25,000活断層図を公開した。また、令和元年度から令和5年度において、糸魚川－静岡構造線断層帯ほかを調査した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地震本部が調査対象としている主要活断層帯を優先して、陸域の活断層帯とその周辺について、活

断層の詳細な位置や関連する地形の分布等を表示した「1:25,000活断層図」を整備し、地震本部の調査研究の推進に貢献している。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

岡田真介,2023,1:25,000活断層図 長町一利府線断層帯とその周辺「松島」解説書,国土地理院技術資料D1-No.1082

立石 良,2023,1:25,000活断層図 会津盆地西縁・東縁断層帯とその周辺「田島」解説書,国土地理院技術資料D1-No.1083

田力正好,2023,1:25,000活断層図 長野盆地西縁断層帯とその周辺「坂城」解説書,国土地理院技術資料D1-No.1084

安江健一,2023,1:25,000活断層図 伊那谷断層帯とその周辺「満島」解説書,国土地理院技術資料D1-No.1085

鈴木康弘・石山達也・岡田篤正・安江健一,2023,1:25,000活断層図 屏風山・恵那山断層帯及び猿投山断層帯とその周辺「師崎」解説書,国土地理院技術資料D1-No.1086

熊原康博,2023,1:25,000活断層図 弥栄断層とその周辺「浜田南部」解説書,国土地理院技術資料D1-No.1087

後藤秀昭,2023,1:25,000活断層図 弥栄断層とその周辺「益田南部」解説書,国土地理院技術資料D1-No.1088

中埜貴元,2023,1:25,000活断層図 糸魚川―静岡構造線断層帯とその周辺「韮崎 改訂版」解説書,国土地理院技術資料D1-No.1089

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

国土地理院 応用地理部地理情報処理課
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話：029-864-5954
e-mail：gsi-eiss+3@gxb.mlit.go.jp
URL：https://www.gsi.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宗包浩志
所属：国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題（または観測項目）名：

火山基本図・火山土地条件図整備

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

火山防災のために監視・観測体制の充実等の必要がある50火山について、火山基本図及び火山土地条件図を作成するとともに、それらの数値データ化を進める。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題は、国土地理院経費のうち災害情報整備推進費及び地理空間情報整備・活用等推進費により火山防災地形データとして整備・提供するものである。

令和元年度においては、「箱根山」の火山土地条件調査を実施し、「岩手山」「秋田駒ヶ岳」「日光白根山」の火山基本図整備を実施する。

令和2年度～5年度においては、毎年度1火山程度の火山土地条件調査、毎年3～4火山程度の火山基本図整備を実施し、それらの数値データを整備・提供予定。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和4年度に作成した「北海道駒ヶ岳」、「白山」、「鶴見岳・伽藍岳」、「九重山」（くじゅう連山）の火山基本図を刊行するとともに、数値データを公開した。また、令和4年度に調査を実施した「蔵王山」の火山土地条件図を刊行するとともに、画像データを公開した。

令和5年度においては、「アトサヌプリ」、「樽前山」、「三宅島」「青ヶ島」の火山基本図及び数値データの作成、並びに「焼岳」の火山土地条件調査を実施した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

令和元年度～令和5年度に、「岩手山」、「秋田駒ヶ岳」、「日光白根山」、「十勝岳」、「雌阿寒岳」、「浅間山」、「伊豆大島」、「御嶽山」、「神津島」、「有珠山」、「倶多楽」、「北海道駒ヶ岳」、「白山」、「鶴見岳・伽藍岳」、「九重山」、諏訪之瀬島の火山基本図及び数値データを整備・提供するとともに、「アトサヌプリ」、「樽前山」、「三宅島」、「青ヶ島」の火山基本図及び数値データを作成した。また、「八丈島」の火山土地条件図の整備・提供と、「箱根山」、「浅間山」、「諏訪之瀬島」、「蔵王山」の火山土地条件調査及び火山土地条件図の整備・提供を実施するとともに、「焼岳」の火山土地条件調査を実施した。

火山基本図は、令和元年度に計画の3火山を、その後の4年間で13火山を整備・公開するとともに、

4火山のデータを作成しており、毎年3～4火山程度の整備計画どおり実施した。火山土地条件図は令和元年度に計画どおり「箱根山」の調査を実施するとともに、その後の4年間で4火山の土地条件調査と整備・提供を実施しており、毎年度1火山程度の調査・整備計画どおり実施した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

火山防災に資する基礎的な地理空間情報として、火山基本図及び数値データ並びに火山土地条件図を整備し、これらの成果を関係機関に対して情報提供するとともに、国土地理院のウェブ地図「地理院地図」や同院ウェブサイトで公開を進めることで、火山現象のデータベースの構築と公開に貢献した。

火山基本図には精密な地形が表示されているため、噴火時の防災計画、救助活動等の緊急対策のほか、火山の研究や火山噴火予知等の基礎資料としての活用が期待される。また、火山土地条件図は過去の火山活動によって形成された地形や噴出物の分布、その後の風雨や流水等による侵食作用により形成された地形がわかりやすく表示されており、火山噴火に伴う災害の予測や災害対策立案のほか、火山域における豪雨や地震に伴う土砂災害リスクの評価等の火山砂防への活用が期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

火山・地震防災に資する情報整備

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

国土地理院 応用地理部地理調査課
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話：029-864-5954
e-mail：gsi-eiss+3@gxb.mlit.go.jp
URL：https://www.gsi.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宗包浩志
所属：国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地殻活動データベース整備・更新

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

国土地理院が管理する地殻活動データベースについて、整備および時点更新を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

- ・ 国土地理院が公開するGNSSデータクリアリングハウスの整備を行う。
- ・ 海岸昇降検知センター事務局として潮位データの収集を行う。
- ・ 地殻活動総合解析システムの整備を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・ 今年度の成果の概要

・ 海岸昇降検知センター事務局として潮位データの収集を行った。

・ 海岸昇降検知センターに登録されている験潮場について、毎月の平均潮位をとりまとめてホームページから順次公開するとともに、令和4年度の潮位観測データを潮位年報として取りまとめた。

(<https://cais.gsi.go.jp/cmdc/centerindex.html>)

・ 計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

海岸昇降検知センター事務局として潮位データの収集を行うとともに、海岸昇降検知センターに登録されている験潮場について、毎月の平均潮位をとりまとめてホームページから順次公開し、潮位年報として取りまとめた。

・ 「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地殻変動の理解に資する基礎的な情報として、潮位データの整備を行うことで、地殻変動のデータベースの構築と公開に貢献した。

潮位データは100年以上にわたる地殻変動を連続して記録している唯一のデータであり、地震サイクルの研究等への活用が期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
・論文・報告書等
・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

国土地理院 地理地殻活動研究センター地殻変動研究室,研究管理課,測地観測センター
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話：029-864-5954
e-mail：gsi-eiss+3@gxb.mlit.go.jp
URL：https://www.gsi.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宗包浩志
所属：国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

津波堆積物情報の高度化と実践的活用に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
 - ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (1) 地震発生の新たな長期予測
 - ア. 海溝型巨大地震の長期予測

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
 - ウ. 千島海溝沿いの巨大地震
- (5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題の目的は、(a)津波堆積物の認定、(b)年代決定、(c)津波規模の推定、(d)地点間対比、(e)津波堆積物の保存／消失過程の評価について、それぞれ高度化を実現するための手法を確立し、信頼性の高い地質情報を得ることにある。5ヶ年計画では、総合的研究の項目にある千島海溝沿いの巨大地震を主な対象として(a)-(d)の調査を進め、複数の地点で地震の規模まで含めた発生履歴を明らかにする。特に17世紀と12世紀のイベントについては北海道全体で津波の波高分布を明らかにした上で年代による対比を行い、地殻変動の量も推定する。これにより、最終年度までに波源モデルの構築と信頼性の高く一貫性のある長期評価を実現可能とする。(e)については東北地方の太平洋岸と日本海岸などで地域を厳選し調査を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

前述の(a)-(d)の手法の確立は、国内で実施する津波堆積物調査と分析を通じて行う。(a)は、すでに提唱されている手法と海外の研究者が進めている新しい地球化学的、生物学的手法による認定手順2011年や1983年の津波堆積物など既知の津波堆積物に応用することで検証する。(b)は、現計画の中の拠点間連携課題で現在進められた「津波堆積物の高精度年代決定」の成果を踏まえ、時代や環境が異なる津波堆積物に応用して有効性を検討して効率化を目指す。(c)は、残存する津波堆積物の微細構造から流速と波高を推定する手法の開発、古津波については遡上限界に焦点を当てた丹念な追跡調査、同時期の地殻変動の検出などを通じて評価する手順を検討する。(d)は、年代決定結果と津波と土砂移動の数値計算結果、時代によっては歴史記録との整合性を評価して対比させる手法を検討する。(e)は、過去30年以内に国内外で起きた地震で津波を伴い、その堆積物の一部が残存している事例に

ついて追跡調査を実施する。

平成31-33年度においては、総合的研究の項目にある千島海溝沿いの巨大地震を主な対象に(a)-(d)の調査を進め、平成34-35年度においては、日本海溝沿い、日本海沿岸で調査を実施する。(e)については平成31年度から計画的に調査を実施し、平成32-34年度に海外ではインドネシア、トンガ、ソロモン諸島などで調査を行う。千島海溝沿いの巨大地震については、平成34年度までに複数の地点で地震の規模まで含めた発生履歴を明らかにする。また、北海道の胆振・日高地方や北方領土のデータも詳細に検討し、17世紀と12世紀のイベントについては北海道全体で津波の波高分布を明らかにし、平成35年度までに波源モデルの構築と信頼性の高く一貫性のある長期評価を実現可能とする。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

北海道厚真町で津波堆積物の観察を目的としたトレンチ掘削を行った。厚真町を含む胆振地方東部では、1611年慶長三陸地震津波による津波堆積物が広く分布していることが明らかにされている。トレンチは、広域調査の情報をもとに、津波堆積物の層厚が10-20cmの場所を選んで掘削した。トレンチの大きさは津波の浸入方向に沿って9m、直交する方向に6m、深さは約2mとした。最深部の年代は約3500年前で、泥炭中に17世紀から2700年前までの5層の火山灰層が含まれている。

津波堆積物は主に淘汰の良い細粒砂で構成され、9m長の壁面では層厚は1cmから22cmの範囲で大きくばらつくことが確認できた。層厚のばらつきの一因は、侵食された泥炭ブロックが砂とともに堆積していることである。このブロックは大きなもので幅50cm、高さ20cmほどあり、複数の火山灰層が乱されない状態で含まれているものもある。トレンチ内では、津波堆積物の数cm下位にあるB-Tm火山灰が連続的に堆積していることから、津波がトレンチより海側で泥炭のブロックを削り取って内陸に運び上げる力を保持していたことが伺える。トレンチ壁面の一部では、津波堆積物に層理や級化構造が観察された。また、津波堆積物の粒径は、層厚が厚い地点ほど粗い傾向を示す。これは、地表の凹部を津波堆積物が埋めた後に、より細かい砂を多く含む飛砂に全体が覆われたと仮定すれば説明できる。

津波堆積物をトレンチで詳細に観察する機会は限られている。そのため、今回のトレンチ掘削は、年代決定手法の検証や地中レーダーの実用化といった津波堆積物の調査研究手法の確認と開発にも活用した。また、地域防災への貢献を目指し、トレンチを見ながら住民向けの説明会を実施し、展示用剥ぎ取り標本を作成した。年代については、津波堆積物直下の年代を複数地点で測定し、その年代差について考察した。トレンチ壁面では17世紀の津波堆積物とB-Tm火山灰（946 CE）が連続的に観察できるが、17世紀の津波堆積物とB-Tm間の泥炭は地点ごとに層厚が大きく異なり、津波による侵食・堆積の影響を強く受けていることが示唆される。17世紀の津波堆積物直下の20地点で放射性炭素年代測定を行った結果、年代は数千年の幅を持ち、例えば、17世紀よりも有意に古い年代を示すブロック状の堆積物が、17世紀津波堆積物直下に再堆積していることが確認でき、また、津波堆積物とその直下泥炭の間には17世紀よりも数百年古い泥質層があることがわかった。こうした知見から、津波堆積物直下で年代測定をする際には大いに注意する必要があることが明らかになった。

また、北海道胆振地方東部むかわ町、入鹿別川～鷓川間（およそ4km x 1.5km）の33地点において、1611年津波堆積物の層厚と現地表からの深度を調査し、津波堆積物は入鹿別川周辺では標高5.0m程度まで、むかわ町の市街地では標高6.0 m以上まで分布することを確認した。

さらに、2024年能登半島地震津波に関して、新潟県から石川県の沿岸で津波痕跡の予備調査を実施した。調査は市街地ではなく自然海岸の15地点で行い、津波の高さは2-4m程度、遡上距離は10-200m程度であった。多くの地点で、津波の遡上限界付近でも砂からなる津波堆積物が確認できた。新しく形成された津波痕跡の調査は、津波堆積物の性状と津波の高さとの関係や分布と遡上域の関係などを知り、さらに地層中に保存されるまでの過程を確認する貴重な機会でもある。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

北海道胆振地方の苫小牧市、厚真町、むかわ町において、17世紀の津波堆積物を対象にして、広域な面的分布、格子状に調査点を設けての調査、より高密度の調査、さらにトレンチ発掘調査を実施した。これらを通じて、津波の遡上域全体で見られる傾向（内陸薄層化や内陸細粒化、大きな地形による影響）に加え、局所的な複雑性（津波による侵食や再堆積の影響、微地形の影響）を示すことができ、研究の目的として挙げていた津波堆積物の認定や年代決定手法の検討、高度化につながった。特に年代決定については、侵食場で行うことの危険性がわかり、行うのであればより内陸で薄層化した地点

で実施すべきであることが確認できた。津波規模と地震規模の推定については、津波堆積物を利用した地震前後の地殻変動の推定方法を提唱した。ただ、十勝地方のみでの調査であり、根室地方などへの応用は達成できなかった。地点間対比については、北海道太平洋岸の年代データを増やし、西部については、胆振地方の白老町を挟んで西部が1640年、東部が1611年のイベントであることが強く主張できるようになった。一方、襟裳半島より東においては年代決定された場所が少なく、まだ不明な点が多く残った。津波堆積物の保存と消失については、青森県三沢市で2011年津波を、秋田県能代市において1983年津波の痕跡を調査した。その結果、海岸林の中では津波堆積物はよく保存されていること、堆積当初の生物学的、化学的特徴を保持していることは確認できた。ただ、堆積後の過程で、こうしたシグナルが上下の地層に拡散されることもわかった。素性がわかっている津波堆積物の追跡調査は、今後も継続すべきである。海外の古津波調査はコロナによる渡航規制などもあって実施できなかった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

1- (1) -ウ, 2- (1) -ア, 5- (2) -ウに関して、北海道の苫小牧市, 厚真町, むかわ町で、1611年の慶長地震によるものと推測される津波の痕跡を認定した。低地, 砂丘背後, 河川の近くなど異なる地形において堆積物の分布と堆積時の標高を推定でき、波源の構築や想定波源に基づく津波浸水域の評価に貢献する成果となった。十勝地方の地殻変動歴を明らかにしたことは、千島海溝の巨大地震の発生様式, 17世紀の地震の波源モデルを構築, 評価する上で重要な情報である。同様に、千島海溝を震源とする地震の情報が格段に増したので、災害の軽減にも寄与するものである。また厚真町のトレンチ調査により、津波堆積物が複雑な性状を示すことを明らかにした。トレンチでは津波堆積物直下の年代が侵食や再堆積の影響を強く受けて顕著にばらつくことも示され、ピートサンプラーやジオスライサーの試料で得られた層厚, 粒径, 年代をその場所の代表地とする際に十分な注意を必要とすることがわかった。こうした知見は、今後の調査方法の見直しや公表されている結果の評価にも活かされると期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

Nishimura, Y. and Chiba, T., 2023, Coseismic and postseismic deformation associated with the 17th Century megathrust earthquake along the Kuril Trench estimated by diatom analysis, IUGG, S06

Nishimura, Y., Takashimizu, Y., Ishizawa, T. and Sugawara, D., 2023, Size and recurrence characteristics of the 1611 tsunami along the Pacific coast of southern Hokkaido indicated by tsunami deposit surveys IUGG JP05, IUGG, JP05

西村裕一・千葉 崇, 2023, 珪藻分析で推定した千島海溝沿いの17世紀巨大地震に伴う地殻変動, 日本地球惑星科学連合大会, SSS12-06

岩城昂平・高清水康博・西村裕一, 2023, 北海道勇払平野における17世紀津波堆積物の空間分布と津波の挙動復元, 日本地球惑星科学連合大会, MIS16-07

西村裕一・高清水康博・岩城昂平・石澤堯史・菅原大助・横山祐典・宮入陽介, 2023, 北海道胆振地方東部の厚真町に分布する1611年慶長奥州地震津波の堆積物, 日本地球惑星科学連合大会, MIS16-08

西村裕一・高清水康博・石澤堯史・菅原大助, 2023, 高密度掘削調査で見る津波堆積物の性状, 日本地球惑星科学連合大会, MIS16-P03

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

津波履歴情報の拡充と震波源の評価

(実施機関：東北大学, 参加機関：北海道大学, 新潟大学)

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

西村裕一（北海道大学大学院理学研究院）

他機関との共同研究の有無：有

高清水康博（新潟大学人文社会・教育科学系）,菅原大助（東北大学）,石澤堯史（東北大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

電話：011-706-3591

e-mail：isv-web@mail.sci.hokudai.ac.jp

URL：https://www.sci.hokudai.ac.jp/isv/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：西村裕一

所属：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

大規模噴火に関わるマグマプロセスの時間スケールの解明

(3) 関連の深い建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
- (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
火山

(4) その他関連する建議の項目：

- 2 地震・火山噴火の予測のための研究
- (4) 中長期的な火山活動の評価
ア. 火山噴火の長期活動の評価

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

カルデラ噴火のような大規模な噴火において、マグマはどのような速さでマグマ溜まりに蓄積されるのか、マグマはどのくらいの期間マグマ溜まりに停留するのか、そして噴火を引き起こす準備プロセスはいつから始まるのか、といった時間スケールを明らかにすることは、噴火予測において極めて重要であるが、日本のカルデラ火山においては、このような定量的な情報がほとんど蓄積されていない。そこで本課題では、国内の代表的なカルデラ火山を対象に、ウラン系列放射非平衡を用いた物質科学的研究を実施し、カルデラ噴火を引き起こすような大量のマグマがどのような時間スケールで準備されるのかを明らかにすることを目的とする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本研究で利用するU-Th放射非平衡法では、現在から遡って約1万年前～30万年前の期間に起きたマグマプロセスに対応できることから、この期間内に活動した洞爺、阿蘇、阿多を解析対象とし、さらに余裕があれば屈斜路、阿寒、始良についても解析を進める。U-Th放射非平衡法を適用するにあたっては、マグマ供給系を含めたマグマプロセスについての事前的検討が不可欠であるため、先行研究を十分に吟味した上で、必要に応じて試料の採取、岩石学的・地球化学的解析を行い、マグマの蓄積プロセスや分化プロセスを詳細に明らかにし、U-Th放射非平衡を測定する試料を選定する。

- 1年目： 阿蘇・洞爺を対象とした岩石試料の採取・化学分析
- 2年目： 阿蘇・阿多を対象とした岩石試料の採取・化学分析
- 3年目： 阿蘇・洞爺におけるマグマプロセスの解析
- 4年目： 阿蘇・阿多におけるマグマプロセスの解析
- 5年目： 各火山の代表的な試料のU-Th放射非平衡の測定・時間スケールの抽出

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

今年度は、(1)昨年度に採取した十和田カルデラ噴出物試料についての基礎分析およびU-Th放射非平衡

分析、(2)始良カルデラの後カルデラ活動としての桜島の噴出物についての試料採取および基礎分析、の2点を主に実施した。(1)については十和田火山のEpisode QからAまでを主な対象とした。分析の結果、時代とともに $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ 比は上昇、 $206\text{Pb}/204\text{Pb}$ 比などは減少する傾向が見られたが、Episode L（八戸噴火）の直後、Episode KからFにかけて、その傾向が乱されていることが確認された。このことから、カルデラ噴火によって地下のマグマ系がリセットされ、5千年ほどの時間をかけながらマグマ系の再構築が行われていたことが示唆された。(2)については、桜島の完新世の噴出物を主な対象とした。分析の結果、北岳と南岳の活動にともなう噴出物について、従来から指摘されてきたような主要元素（特に TiO_2 や P_2O_5 含有量）・微量元素組成のみならず、Sr-Nd-Pb同位体比においても両者は明瞭に区別されることが明らかとなった。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本計画期間の全体（令和1-5年度）を通して、(1)火山岩試料を対象としたU-Th放射非平衡分析法の立ち上げ、(2)U-Th放射非平衡法の火山岩試料への適用性の確認、(3)国内のカルデラ火山の噴出物へのU-Th放射非平衡法の適用とマグマプロセスの時間スケール情報の抽出、の3点を主に実施した。(1)については北海道大学において分析法（Thの化学分離、MC-ICP-MSでの分析、および生データのキャリブレーションの方法）のルーチンが確立し、それを踏まえ、(2)として白頭山10世紀噴火の噴出物へ実際に適用することによって、同火山のマグマ供給系の時間発展を明らかにするとともに、U-Th放射非平衡分析法の有用性を確認した（Kuritani et al., 2020）。(3)では、当初は洞爺、阿蘇、阿多、始良、屈斜路を対象としていたが、コロナ禍によるフィールド調査の制約や火山噴出物の保存状態（特に変質の程度）を考慮して、実際には支笏・屈斜路・洞爺・始良・十和田を主な解析対象とした。その結果、例えば支笏カルデラにおいては、カルデラ噴火に関わった一部の珪長質マグマについて、具体的なマグマ生成率（約 $15\text{ km}^3/\text{万年}$ ）を推定することができた。また始良カルデラについては、カルデラ噴火に至る珪長質マグマ系の時間発展を明らかにすることができ、この成果についてはLithos誌に印刷されるに至った（Kuritani, 2023）。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

「地震・火山現象の解明のための研究」における項目「低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明」に関して、本課題研究では、対象とした国内の全てのカルデラ（支笏・屈斜路・洞爺・始良・十和田）において、「噴火直前に蓄積された膨大な量の珪長質マグマは、40万年以上前から存在した主要なマグマ（＝長寿命珪長質マグマ系）と、新しい時期に断続的に生成した付加的なマグマから構成される」という非常に興味深い共通点を見出し、巨大カルデラ噴火に関わるマグマ系の発達過程を根源的に理解するための手がかりが得られた。このことから、今後は巨大カルデラ噴火における長寿命珪長質マグマ系の存在の必然性、および巨大カルデラ噴火後の珪長質マグマ系の再構築プロセスについての検討が必要であると考えている。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Kuritani, T., 2023, Geochemical constraints on the evolution of the magmatic system leading to catastrophic eruptions at Aira Caldera, Japan, *Lithos*, 450-451, 107208, doi: 10.1016/j.lithos.2023.107208, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

栗谷豪・中川光弘・松本亜希子, 2023, 桜島の完新世噴出物のSr-Nd-Pb同位体比分析に基づくマグマ系の進化についての検討, 日本火山学会2023年度秋季大会, P01

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

巨大カルデラ形成噴火後における珪長質マグマ系の再活性化プロセス

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

栗谷豪（北海道大学大学院理学研究院）,中川光弘（北海道大学大学院理学研究院）,吉村俊平（北海道大学大学院理学研究院）,松本亜希子（北海道大学大学院理学研究院）

他機関との共同研究の有無：有

横山哲也（東京工業大学）,柵山徹也（大阪市立大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：北海道大学大学院理学研究院

電話：0117062729

e-mail：kuritani@sci.hokudai.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：栗谷豪

所属：北海道大学大学院理学研究院

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

マグマ脱ガス実験と火山噴出物の揮発性成分解析に基づく噴火分岐メカニズムの解明

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

噴火事象の分岐は、火道上昇中のマグマの発泡・脱ガス現象の起こり方の違いに起因すると考えられている。すなわち、発泡が卓越しマグマ浮力が高まれば爆発的噴火となり、開放系脱ガスが卓越しガスが失われると非爆発的噴火に至ると考えられている。しかし、火道内の各深度で発泡・脱ガスがどのように起きているかは不明であり、噴火分岐の根本的要因は未解明である。そこで本課題では、火山噴出物の揮発性成分の解析と実験室でのマグマ脱ガスシミュレーションを組み合わせることで、噴火分岐の要因を明らかにすることを目標とする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

まず、対象火山として、観測データが揃っており、将来の噴火が危惧され、爆発性の高い安山岩～流紋岩質マグマを噴出する桜島火山・浅間火山・有珠火山などを選定し、噴火様式ごとに火山噴出物を採取し揮発性成分組成の特徴を明らかにする。次に、室内実験でマグマの発泡・脱ガス・圧密を再現し、試料の揮発性成分の特徴を明らかにする。そして、天然と実験を比較し、火道内でどのような脱ガス過程が起きたかを解読する。読みだされた脱ガス過程と噴火様式の関係を検討し、噴火分岐の仕組みを実証的に明らかにする。

令和元年においては、桜島・浅間・有珠を対象とした岩石の採取、および揮発性成分の分析を行う。

令和2年においては、高温高压実験によりマグマ発泡を再現し、揮発性成分の濃度変化を解析する。

令和3年においては、高温高压実験によりマグマの開放系脱ガスを再現し、揮発性成分の濃度変化を解析する。

令和4年においては、天然と実験を比較し、天然の脱ガス過程を解読する。

令和5年においては、脱ガス過程と噴火様式の対応関係を構築し、分岐要因を解明する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

本年度は、新島向山火山の火砕性黒曜石を対象として石基の化学組成及び揮発性成分（H₂O, CO₂, Cl）の濃度分析を行った。火砕性黒曜石は、軽石や火山灰などと一緒にテフラに少量含まれる、ガラス質の礫である。1体積%以下の気泡を含んでおり、気泡は伸長していることが多かった。ガラス組成は軽石のものと一致しており、本質物質と考えられる。複数の礫を分析した結果、H₂O濃度は0.8～2.5wt%、CO₂は4 ppm以下であった。これらの成分の濃度は、1つ1つの礫の中ではほとんど均質であるが、気泡の近傍でわずかに濃度が高く、遠ざかるにつれて低下する傾向があった。一方、Cl濃度については、礫ごとに濃度はあまり変わらないが（800ppm程度）、局所的に高濃度となる箇所があり、例えば気泡の周りでは2000ppmを超えることもあった。また、気泡から十分に離れた箇所でも塩素濃度が高い細長い領域が多く見つかった。気泡の周りで揮発性成分の濃度が高いことから、気泡は溶解中であると考えられる。気泡から離れた箇所に見られた高塩素濃度の筋状の領域は、気泡が伸長した状態で溶解した痕跡と考えられる。以上のことから、マグマは一度発泡して軽石のような状態となり、その後、気泡が溶解したことが示唆される。どういう現象を想定すればこれを説明できるかについては、さらに多くの試料を分析してから判断したい。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本課題は、H₂O、CO₂、塩素などの揮発性成分に着目して天然噴出物の分析を行うことで、上昇するマグマの中で起きている脱ガス過程を解読することを目指すものである。また、天然噴出物のデータをより詳細に解釈するために、制御された環境でマグマの発泡・脱ガスを実験的に再現し、その揮発性成分の分析を行うことも含まれている。これらを行った結果、揮発性成分の中でも特に塩素が脱ガス過程を読み解くのに有用であることが示された。これは、H₂OやCO₂はメルト中の拡散が速いためすぐに均質化してしまうのに対し、塩素の拡散は非常に遅いので、地下で起きた発泡や脱ガス時の不均質が明瞭に残されやすいという性質によるものである。塩素濃度の分布を爆発的噴火および非爆発的噴火の噴出物である、新島向山溶岩（非爆発的噴火）、向山のテフラ（爆発的噴火）、鳴子火山の溶岩（非爆発的噴火）を対象に行った結果、様々な脱ガス現象が存在することを見出した。例えば、溶岩の中には成長している気泡と溶解している気泡が同時に存在すること、溶岩の中ではかつて通気性を持つ気泡がたくさん存在し開放系脱ガスを促進させていたこと、塩素に富むガスによりメルトが腐食され、通路が拡大すること、などが見出された。なお、計画段階で対象予定だった桜島火山・浅間火山・有珠火山などでは、噴出物の石基ガラスの結晶化が進行し、脱ガス時の揮発性成分を読み出すことが難しいことが判明したため、対象火山をよりガラスの多い向山および鳴子に変更した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

従来、噴火しつつあるマグマの中で何が起きているかを噴出物から読み取ることは困難であり、理論モデルで推定したり、減圧発泡実験でマグマの状態を模擬する以外にはほとんど研究が進められてこなかった。本研究により、塩素という、石基ガラス中に普遍的に存在し、かつ分析が簡単な成分を調査することで、上昇するマグマが経験してきた脱ガス過程をある程度読み解くことができるようになった。このことは、「1 地震・火山現象の解明のための研究(4) 火山現象の解明とモデル化 イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化」において、火道内で起きている発泡・脱ガスの様子を明らかにし、噴火の素過程をモデル化するための新しい道具が開発されたことでもある。今後は、塩素の分析を様々な火山の噴出物を対象に適用し、マグマはどのような脱ガス過程を一般的に経験するのか、どういう脱ガスが起こるとどういう噴火になるのか、という点を明らかにしてゆく。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Yoshimura, S.,2023,Carbon dioxide and water in the crust. Part 2: Solubility in silicate melts.,J.Mineral.Petrol.Sci.,118,023,<https://doi.org/10.2465/jmps.221224b>,査読有,謝辞無
Yoshimura, S.,2023,Carbon dioxide and water in the crust. Part 1: Equation of state for the fluid,J.Mineral.Petrol.Sci.,118,022,<https://doi.org/10.2465/jmps.221224a>,査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

菅原維・吉村俊平,2023,流紋岩質溶岩に含まれるスフェルライトとクリスタライトの再現実験,日本鉱物科学会2023年年会,S1-04

吉村俊平,2023,石基ガラスの揮発性成分の濃度分布から推定される発泡マグマの再加圧過程,日本鉱物科学会2023年年会,S1P-02

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

上昇するマグマの脱ガス過程と噴火様式に関する研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

吉村俊平（北海道大学）,栗谷豪（北海道大学）,松本亜希子（北海道大学）,中川光弘（北海道大学）

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：北海道大学大学院理学研究院

電話：

e-mail：shumpyos@sci.hokudai.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：吉村俊平

所属：

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

電磁気・熱・ガス観測に基づく火山活動推移モデルの構築

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

我が国では数10年の休止期を挟んで小規模な噴火を繰り返す火山が多いが、こうした火山の噴火予知は、現状では噴火直前の前兆的地震活動の検知に頼るところが大きく、非噴火期において次の噴火の切迫度を評価する方法は確立されていない。これは、噴火準備過程・噴火・終息過程を通じた火山活動サイクルのモデル化があまり進んでいないためであるが、その根本的な原因として、地震や地盤変動以外の観測項目では、非噴火時を含めた長期間にわたるモニタリングデータが不足しており、火山相互の比較や類型化が十分に行われていないことが背景にある。

本課題では、前建議計画の熱水系卓越型火山の課題等で取り組んだ電磁気・熱・ガスのモニタリング観測を進展させるとともに、新たなチャレンジとして、ドローンを利用した火口近傍の空中磁気反復測量と、遠望カメラ画像の自動解析による噴気放熱率の連続的推定手法の開発を進める。非噴火期を含めた火山活動推移モデルの構築を目指すとともに、研究対象とする火山については順次活動評価を試みる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本研究課題と同様にモニタリング観測による火山活動の評価に取り組む地震・地盤変動モニタリング課題（KUS02）とは相互補完の関係にあるため、合同研究集会を開くなど連携しながら研究を進める。

令和1年度：各火山での地磁気・比抵抗・熱・ガス観測。噴気放熱率推定自動化のスキーム開発。九重山でのドローン空中磁気観測。研究会合。十勝岳の火山活動評価。

令和2年度：各火山での地磁気・比抵抗・熱・ガス観測。噴気放熱率推定自動化ツールの試作。御嶽山でのドローン空中磁気観測。阿蘇山の火山活動評価。

令和3年度：各火山での地磁気・比抵抗・熱・ガス観測。噴気放熱率推定自動処理のテスト運用。蔵王

山でのドローン空中磁気観測。研究会合。吾妻山の火山活動評価。

令和4年度：各火山での地磁気・比抵抗・熱・ガス観測。噴気放熱率推定自動処理を連続遠望画像に適用。草津白根山の火山活動評価。

令和5年度：各火山での地磁気・比抵抗・熱・ガス観測。噴気放熱率推定自動処理を連続遠望画像に適用。研究会合。雌阿寒岳の火山活動評価。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1. 各火山でのモニタリング観測・解析

【雌阿寒岳】ナカマチネシリ火口周辺域で地磁気全磁力繰り返し観測を実施し、2014年頃から始まった消磁傾向が継続していることを明らかにした（北大）。過去約40年の温泉・噴気観測に基づいて雌阿寒岳の熱水系について概念モデルを提示した（道総研）。

【十勝岳】地磁気全磁力連続観測と繰り返し観測を継続。62-2火口周辺の浅部での高温域拡大を示唆する消磁傾向が続いている。さらに、追加で配分いただいた予算でドローンを用いた空中磁気測量を実施した。磁化構造3Dインバージョン解析の結果、活動火口域の地下浅部が低磁化域となっていることが明らかになった。今後、過去の空中磁気測量データとの比較も行い、近年の活動による消磁域の範囲を明らかにするとともに、ドローン磁気測量を繰り返すことで、今後の時間変化モニタリングにも役立てる予定である（北大）。二酸化硫黄放出率観測（人工衛星データ解析+地上トラバース）を実施（図1）。冬期における1000 t/d超えの高放出率の原因について検討した。その結果、風速の過剰見積りに起因する誤差、積雪時の反射率が適切に考慮されていないことによる誤差、積雪と雲の誤認に起因する誤差で、冬季放出率の過剰見積りの大半が説明可能であることがわかった。こうした補正を施すことで、冬季もそれなりの高頻度で高確度のデータが得られる見通しが付いた（東大理・北大）。

【有珠山】山頂火口原内で土壌拡散CO₂フラックスのマッピングを春と秋の2回実施。顕著な異常や変化なし（北大・東大理）。

【吾妻山】本課題で2021年に実施したドローン空中磁気測量データと2013年に国交省が実施した空中磁気測量データを比較し時間変化成分を抽出した。ただし、得られたパターンや振幅は地上の繰り返し観測の結果とは整合性が見られなかった（東北大・北大）。

【伊豆大島】三原山火口原でドローン空中磁気測量を実施した。2021年度とほぼ同様の磁化構造が得られた。2年間の時間変化成分については今後さらに検討が必要（東大震研）。

【ベズィミアニ】今年度は、これまで衛星観測の対象とはされてこなかった非定常的な小型の爆発的噴火の解析に取り組んだ。ひまわり8/9号としきさいの赤外面像解析に基づき、2019年3月のベズィミアニ火山の爆発的噴火の推移を考察したところ、溶岩噴出活動の途上で爆発的噴火に移行した様子が温度変化として捉えられた。昨年度解析した2018年3月の新燃岳噴火（溶岩噴出ステージ終了後に爆発的噴火）とは温度変化の推移に明瞭な違いが見られ、火道最上部の溶岩の浸透性の違いを反映しているのではないかと推測した（東大震研）。

【草津白根山】地磁気全磁力観測を継続して変動源の推定を行うとともに、地磁気データに基づいた数十年スケールの定性的な火山活動推移モデルを提示した。また、草津白根山では、地磁気データはガス組成に基づくVUIと対応がよいことがわかったので、その理由について地下構造モデルとの関係も考察した（東工大）。

【焼岳】4箇所地磁気全磁力の連続観測を継続したが、1箇所は落雷による故障で7月以降欠測となった（追加予算配当で修理中、来春に再稼働予定）。今のところ、火山活動に関係する明瞭な変動は捉えられていない（京大防）。

【霧島山】硫黄山で電磁場の連続観測を継続した。2018年の噴火後、数年の時間スケールで、粘土層内で比抵抗が低下、粘土層下部で比抵抗が上昇したことを明らかにした（九大）。

【九重山】硫黄山で電磁場の連続観測を継続した。長期的な消磁・帯磁の推移に対応した比抵抗変化は認められなかった（九大）。

2. 合同研究集会

2023年12月11日にオンラインでKUS_02との合同研究集会を開催、両課題の関係者約30名が参加した。5年間の成果、今後の方向性、成果の出版について情報共有・意見交換を行った。

3. モニタリングデータに基づく火山活動評価

本課題では、KUS_02と共同で毎年1火山ずつ対象を決めて火山活発化指数（VUI）の試験的導入を進めてきた。今年度は雌阿寒岳を対象とした。2023年8月にオンラインのワーキンググループにてワークシートの作成方針について議論した。VUIワークシートの作成と各種モニタリングデータへの適用は北大が主担当となって作業を進めた。検討にあたっては、気象庁からデータ提供を受けたほか、道総研からいただいた噴気・温泉観測に関する知見を参考にした（図2）。

4. 研究の連携

- ・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況

本課題では、建議項目「2(4)イ. モニタリングによる火山活動の評価」に貢献すべくKUS_02と共同して毎年度1火山についてVUI（火山活発化指数）の試験的導入に取り組んできた。今年度は雌阿寒岳のVUIワークシートを試作し、気象庁から提供を受けた1973年以降の観測データに対して適用した。また、本課題では、観測の多項目化を容易にする技術開発にも取り組んできた。計画最終年度にあたり、遠望監視カメラの連続画像解析に基づくプリュームライズ法噴気放熱率推定ツールを完成させた。

- ・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本課題では、主として建議項目の「2(4)イ. モニタリングによる火山活動の評価」に貢献すべく、課題分担者がそれぞれの担当火山でモニタリング観測を行い、成果を持ち寄るというスタイルで研究を実施した。衛星データの解析も含め、**15を超える火山で電磁気・熱・化学的手法に基づく何らかの継続的な観測が行われた**。力学的観測を担当したKUS_02との連携を図るため、ほぼ毎年合同研究集会を開き、両課題の**目標と成果の共有**に努めた。論文出版につながる研究成果も多数あがっており、**噴火期・非噴火期を通じた継続的観測の有効性**が改めて示された。

また、本課題では、KUS_02と共同してVUI（火山活発化指数）の試験的導入に取り組んだ。VUIは、評価に供する観測項目の選択、閾値の設定、観測項目間の重み付けは重要で、火山ごとの特性に応じて調整する必要があるものの、逆に言えば自由度も高い。5火山（十勝岳、阿蘇山、吾妻山、草津白根山、雌阿寒岳）に対するVUI基準の試作を通じて、**ノウハウの蓄積が進み、作成手順をある程度標準化することができたので、今後ほかの火山への導入も容易になった**と考えている。VUIの利点は、観測データのみに基づくため客観性が高いこと、多項目データを統合するため特定の観測項目のみに評価が偏重しないこと、処理が単純なのでいったん基準を決めれば自動化も可能なことなどにある。こうした特長は、**火山活動の確率的評価・予測を将来進めていく上でも有用性が高い**と考えている。

さらに、本課題では、観測の多項目化を支援する技術開発にも取り組んできた。計画最終年度にあたり、遠望監視カメラの連続画像解析に基づくプリュームライズ法噴気放熱率推定ツールを完成させた。この技術は、**監視現業での火山活動評価における利用だけでなく、遠望カメラが設置された様々な火山の噴気放熱率を半自動的に推定することを可能とするもので、火山研究への利用も広く期待できる**。同様に、火山性の磁場変化を面的に高密度で把握する技術として、ドローンを利用した空中磁気測量にも挑戦した。観測分野におけるドローンの活用は世界的潮流であり、ドローンそのものの性能や可用性が向上したことが大きな要因ではあるが、**本課題の今期5カ年の取組を通じて、ほぼ技術的な問題は解消し実用レベルに到達した**と考えている。

- ・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

「災害の軽減に貢献する」という目標に対して、火山噴火では、災害軽減の行動や対策の判断根拠となる火山活動の正確な把握と評価が必要である。このことは、現在噴火中の火山では当然のことながら非噴火期の火山にも成り立つ。むしろ、我が国では噴火中でない火山の方が大多数である以上、非噴火期の状態をいかに正確に把握し評価するかが肝要とも言える。こうした問題意識に基づいて、本課題では建議項目の「2(4)イ. モニタリングによる火山活動の評価」への貢献を目指した。より具体的には、観測データに基づく中期的な火山活動サイクル（数10年程度）のモデル化や定量評価を大目標に掲げた。こうした中期的なモデル化や評価がこれまであまり進展してこなかった原因として、力学以外の観測項目では、不定期の調査に基づく情報が多く、連続または定期的時系列データに基づく火山相互の比較や類型化が十分でなかったことが背景にある。本課題では、これまで手薄であった火山や観測項目への支援、観測の多項目化を後押しする技術開発、観測データに基づく定量的評価の試み、力学観測課題との目標・成果の共有、の4つに力を入れて取り組んだ結果、**当初設定した個別目標はほぼ全て達成できており、上記の大目標に対しても一定の貢献を果たせた**と考えている。今後

は、本課題で培われた技術や蓄積された知見をさらに継承・発展させ、活動推移モデルに基づく予測の試行と検証へとつなげていくべきであると考え。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Yamaguchi, K., R. Tanaka, M. Morita, T. Mori, R. Kazahaya, 2023, Sulfur dioxide flux measurement at Mount Tokachi, Japan, with TROPospheric Monitoring Instrument, *Front. Earth Sci.*, 11, doi:10.3389/feart.2023.1145343, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

保苜健陽・田中 良, 2023, UAV写真測量と主成分分析を利用した画像解析による十勝岳の表面活動の定量化, 日本地球惑星科学連合, SVC31-P02

伊藤良介・宇津木充, 2023, The study of the multiple parameters estimation method for sparse magnetic inversion analysis, 日本地球惑星科学連合, SEM14-P02

神田 径・田村俊樹・小山崇夫・松永康生, 2023, 草津白根山における2014年および2018年の火山活動に伴う地磁気変化, 日本地球惑星科学連合, SVC30-07

小山崇夫・金子隆之・大湊隆雄・渡邊篤志・行竹洋平・本多嘉明, 2023, 人工衛星経由の遠隔飛行制御による霧島新燃岳全方位無人ヘリ空中磁気測量, 日本地球惑星科学連合, STT40-02

南 拓人・宇津木充・神田 径, 2023, 3-D joint inversion of the AMT and ACTIVE datasets obtained in Aso volcano, 日本地球惑星科学連合, SEM14-P09

田辺暖柊・松島 健・相澤広記・村松 弾, 2023, 霧島・硫黄山西火口の噴気活動と電磁場長期観測, 日本地球惑星科学連合, SVC31-P14

米倉 光・市來雅啓・大熊茂雄・宮川歩夢・田中 良・海田俊輝・柘植鮎太・太田豊宣・橋本武志, 2023, ドローンを使用した吾妻山の空中磁気測量, 日本地球惑星科学連合, STT40-03

Hashimoto, T., H. Aoyama, R. Tanaka, T. Ohkura and T. Mori, 2023, Trial application of the volcanic unrest index (VUI) to Japanese volcanoes: the first example from Mount Tokachidake, *IUGG*, IUGG23-2840

Kanda, W., T. Koyama, Y. Matsunaga, S. Tamura, 2023, Geomagnetic variations associated with the unrest in 2014 and 2018 at the Kusatsu-Shirane Volcano, *IUGG*, JS04p-071

Koyama, T., T. Kaneko, T. Ohminato, A. Watanabe, Y. Honda, T. Akiyama, S.

Tanaka, 2023, Magnetization structure and its temporal change of Miyakejima volcano, Japan, revealed by uncrewed aerial vehicle aeromagnetic survey, *IUGG*, JS04p-073

Yonekura, H., M. Ichiki, S. Okuma, A. Miyakawa, R. Tanaka, T. Kaidao, T. Ayuta, T. Ohta, T. Hashimoto, 2023, An aeromagnetic survey using an unmanned aerial vehicle over Azuma Volcano, NE Japan, *IUGG*, JS04p-078

橋本武志・青山健太郎・井 智史・塚川絢斗・山崎裕二, 2023, 十勝岳における磁場変化と地熱異常域の拡大, 日本火山学会秋季大会, B1-10

小山崇夫・金子隆之・大湊隆雄・渡邊篤志・八木健夫, 2023, 伊豆大島三原山でのドローン空中磁気測量, 日本火山学会秋季大会, P77

藤原季路・寺田暁彦, 2023, 草津白根山活発期における浅部熱水系の変化—湯釜火口湖に対する数値解析からの示唆—, 日本火山学会秋季大会, P56

山口健介・田中 良・森田雅明・森 俊哉・風早竜之介, 2023, 地上観測と衛星観測による十勝岳の二酸化硫黄放出率の推定, 日本火山学会秋季大会, B1-05

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

継続課題ではないが、研究内容やアプローチに近い課題として「熱水系が発達した火山における火山活動活発化事象のモデル化と活動度評価（代表機関：北海道大学）」がある。

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

橋本武志（北海道大学）, 青山裕（北海道大学）, 田中良（北海道大学）

他機関との共同研究の有無：有

市來雅啓（東北大学）, 小山崇夫（東京大学地震研究所）, 金子隆之（東京大学地震研究所）, 森俊哉（東京大学大学院理学系研究科）, 神田径（東京工業大学）, 寺田暁彦（東京工業大学）, 市原寛（名古屋大学大学院環境学研究科）, 宇津木充（京都大学大学院理学研究科）, 大倉敬宏（京都大学大学院理学研究科）, 横尾亮彦（京都大学大学院理学研究科）, 吉村令慧（京都大学防災研究所）, 相澤広記（九州大学大学院理学研究院）, 大場武（東海大学）, 齋藤武士（信州大学）, 高木朗充（気象庁）, 高橋良（北海道立総合研究機構産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

電話：011-706-2892

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：橋本武志

所属：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

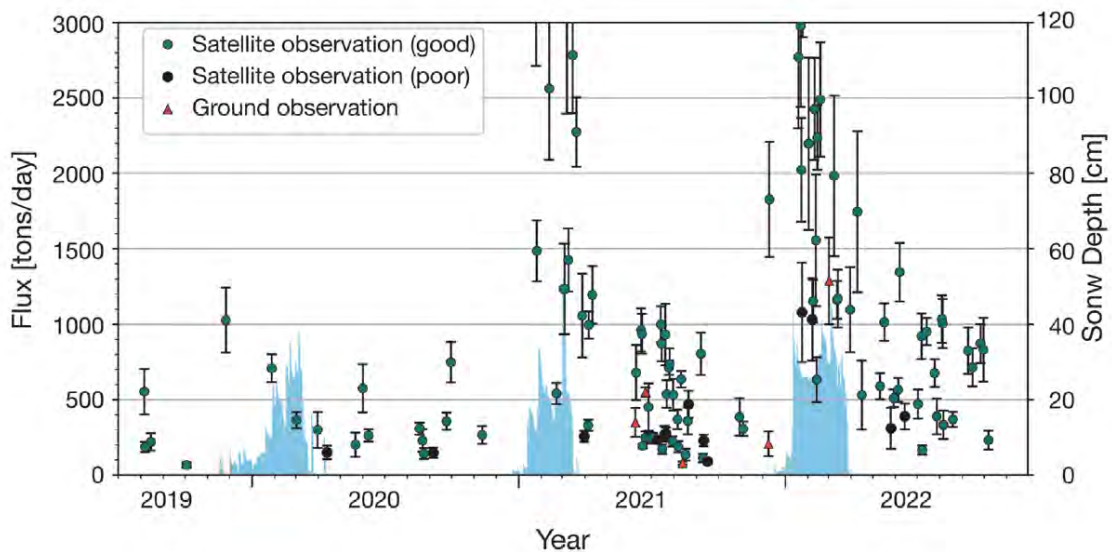


図1：十勝岳の火口から放出された二酸化硫黄放出率の推移（Yamaguchi et al., 2023）

人工衛星データ（OMI, TROPOMI）を利用することで、従来は夏季に限られていた放出率データが通年で推定できるようになった。背景の棒グラフは積雪深を表す。その後の本課題の研究で、冬季の放出率が高い原因についても考察が進められている。

火山名		火山活動指標 (Volcanic Unrest Index: VUI) Worksheet					Latest update: 2024.Feb.09 暫定版		VUI
評価項目		0 No unrest	1 Negligible unrest	2 Minor unrest	3 Moderate unrest	4 Heightened unrest	Score & Unrest mean		
位置情報	座標 (緯度/経度) 緯度: yyyyyy 経度: xxxxxx	0 - 30 非常に少ない	31 - 280 少ない	281 - 702 やや多い	703 - 1300 多い	1301 - 非常に多い			
噴火履歴	過去10日地震回数 噴火回数 深層地震発生数 火山活動数	0 - 30 非常に少ない	31 - 280 少ない	281 - 702 やや多い	703 - 1300 多い	1301 - 非常に多い			
GNSS	長基線GNSS InSAR	2 cm/yr未満 軽微な変動なし	2 cm/yr以上 3 cm/yr未満 軽やかな変動	3 cm/yr以上 7 cm/yr未満 中程度の変動	7 cm/yr以上 20 cm/yr未満 速い変動 (2016-17年以降)	20 cm/yr以上 激激な変動			
噴気	噴気高度 噴気温度 噴気高度	150 m未満 噴気少量、またはごく短い	150 m以上 250 m未満 軽微な噴気	250 m以上 350 m未満 中程度の噴気	350 m以上 600 m未満 上昇中の噴気	600 m以上 高く上昇する噴気			
火口	火口温度 噴気高度	90-150℃ 100℃未満	150-200℃ 100℃以上 200℃未満	200-300℃ 200℃以上 300℃未満	300-500℃ 300℃以上 500℃未満	500℃以上 500℃以上			
地磁気	地磁気変化 (MAG-MAG)	0 nT/yr未満 停滞状態	0 nT/yr以上 10 nT/yr未満 わずかな変動	10 nT/yr以上 20 nT/yr未満 軽微な変動	20 nT/yr以上 30 nT/yr未満 顕著な変動	30 nT/yr以上 2008年以降100%以上			
化学	硫酸塩・硫酸 化学組成・濃度	未検出	未検出	未検出	未検出	未検出			
ガス	噴出ガス組成 (H2O, CO2 >H2S >>SO2 (T<100℃) 噴出)	H2O, CO2 >H2S >>SO2 (T<100℃) 噴出	H2O, CO2, H2S >SO2 >>HCl (T<100℃) 噴出への進展	H2O, CO2, H2S >SO2 >>HCl (T>100℃) 噴出高での化学変化	H2O, CO2 >SO2 >H2S, HCl >H2, CO 化学平衡の移行	H2O, CO2, SO2, HCl, H2, CO > H2S マグマから抽出された組成			
その他	二酸化硫黄噴出率 目撃観測 (未検出)	50 t/day未満 遠方からの観測による検出範囲未満 人工噴射でも検出できないレベル	未検出	未検出	未検出	1000 t/day以上 多量または遠距離からの噴出			

図2：雌阿寒岳VUIワークシート（暫定版）

令和5年度に雌阿寒岳のVUIワークシートを作成した。作業はまだ進行中だが、今のところ、主に気象庁から提供を受けた観測データに基づき、地震活動、GNSS基線長、火口温度、噴気温度、噴気高度、地磁気変化、について評価基準を検討した。

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

巨大地震に伴う海底斜面崩壊による津波の事前評価・即時予測に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
イ. 津波の事前評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
イ. 津波の即時予測手法

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震
千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

海底地すべり（斜面崩壊）による津波について精密な数値計算によるモデル化を行い、深海での海底地すべりから津波励起・伝搬・遡上まで再現できる手法を開発する。さらに、開発した数値計算手法を用いて、過去の海底地すべり津波による近地津波の再現を行い数値計算手法の改良と津波再現性の向上を図る。さらに、南海トラフ沿い及び日本海溝・千島海溝沿いの海底地すべり地形から、地すべり津波の沿岸での津波災害ポテンシャルを評価する。また、そのような地すべり津波が津波観測網（S-NET・DONET）でどのように観測されるかを計算し、津波即時予測への影響を評価するとともに、数値計算結果を津波即時予測に取り込む手法の開発を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

- 平成31年度においては、深海での海底地すべりによる津波数値計算手法の開発を実施。
- 平成32年度においては、開発された津波数値計算手法を用いて、過去の海底地すべりによる津波の再現数値実験を実施するとともに、津波数値計算手法の改良を実施する。
- 平成33年度においては、他の海底地すべりによる津波の再現数値計算実験を実施するとともに、津波数値計算手法のさらなる高度化を実施する。また、南海トラフ沿いや日本海溝・千島海溝沿いの地すべり地形を評価する。
- 平成34年度においては、南海トラフ沿いや日本海溝・千島海溝沿いの地すべり地形から津波数値計算を実施し、津波災害ポテンシャルを評価する。
- 平成35年度においては、それまでの海底地すべり津波が発生した場合の津波即時予測手法の開発を

行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

前年度までに実施してきた1929年Grand Banksの津波の再現実験を完成した。オリジナルのTsunami Square数値計算手法は海底斜面崩壊に対応できるよう改良した。斜面崩壊は地震によりトリガーされたとし、震源近傍の急斜面で最初に発生し、その崩壊が徐々に深海域へと進展するモデルを開発する事で、海底ケーブルの断線時刻を再現し、さらに崩壊量はHalifax（カナダ）の検潮記録を再現することで推定した。崩壊量は540立方kmと推定された（図1）。これまで多くの謎につつまれていた1929年Grand Banksの海底斜面崩壊と津波を定量的に推定することに成功した画期的な成果である。

火山性の山体崩壊の津波の即時予測手法の開発においては、駒ヶ岳山体崩壊に津波について実施した。まず、1640年駒ヶ岳山体崩壊による津波の再現実験を実施し、津波堆積物調査結果や崩壊地形などを再現できる山体崩壊のモデルを推定する事に成功した。さらに、将来発生するであろう山体崩壊による津波の特性を数値実験により明らかにし、将来噴火湾沿岸の津波を予測するための手法開発への基礎的知見を得る事に成功した（図2）。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

巨大地震に伴う海底斜面崩壊による津波の数値計算手法開発し、1929年Grand Banks Tsunamiの再現実験に適用した。海底斜面崩壊による津波の励起の数値計算はTsunami Squareの手法を改良し海底斜面崩壊と津波を同時に計算した。その後、JAGRUSに切り替えて津波のみを計算する手法を開発した。1929年の津波についてはHalifax(カナダ)の検潮記録と海底ケーブルの設題時間を再現できる海底斜面崩壊モデルを推定する事に成功した（図1）。さらに、1946年アリューシャン津波地震の海底地すべりによる沿岸波高の再現数値実験を実施した。1946年アリューシャン地震は現在知られている最も異常な津波地震（Ms7.4, Mt9.3）で、アリューシャン列島沿岸で最大40m近くの津波高が調査されており、比較的局所的な海底地すべりの痕跡も残されていた。この海底地すべりの痕跡と津波のおおよその高さを再現する事にも成功した。さらに南海トラフ域での地すべり再現実験にも成功した。開発された手法は、巨大地震に伴う斜面崩壊による津波のリスクを評価するために用いられる事が期待される。

さらに、火山島の山体崩壊による津波の即時予測手法の開発も行った。2018年アナクラカトア火山噴火（インドネシア）による地すべりにより津波が発生しジャワ島西岸からスマトラ島東岸に津波が押し寄せ被害をおよぼした。本研究では地すべりと津波のモデルをVolcFlowを用いて実施し、地すべりが終了した時点でBussinesqモデル（Yamanaka and Tanioka, 2017）に切り替えて津波計算を実施した。クラカトアでは周辺の諸島に6つの仮想観測点での津波波形が得られるものとして、これらの地点での波形を用いて、ジャワ島西岸やスマトラ島東岸での津波を予測する手法を開発した（図3）。実際にはデータベースを用いて地すべり津波が発生した後3分間のクラカトア諸島周辺の津波を推定し、その情報をインプットとして津波数値計算により沿岸での波高を予測する手法である。本研究結果は火山島噴火による津波の即時予測を可能にするもので、画期的な研究成果である。1640年駒ヶ岳噴火津波についても上記数値計算手法を用いた再現実験に成功し、将来の山体崩壊津波の予測可能とする知見をえる事に成功した。

最後に、地震以外の津波励起の追加的研究として2022年トンガ噴火による津波の数値計算を実施し、大気とカップリングした津波の挙動を解明した。

参考文献

Tanioka, Y., Y. Yamanaka, and T. Nakagaki, Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption, Earth Planet. Space, 74:61, 2022, doi:10.1186/s40623-022-01614-5

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

海底斜面崩壊（海底地すべり）による津波の数値計算手法を開発し、実際に海底斜面崩壊により発生したとされる過去の津波の再現に成功した。海底地すべり津波の事前評価の手法開発に成功した。さ

らに火山噴火に伴う地すべりによる津波の即時予測手法の開発にも成功した。さらなる高度化により、気象庁等の関連防災情報機関への実装までつなげる事が重要であろう。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Ratnasari, R.N., Y. Tanioka, Y. Yamanaka, and I. E. Mulia, 2023, Development of early warning system for tsunami accompanied by collapse of Anak Krakatau volcano, Indonesia, *Frontiers in Earth Science*, 11, 1-13, doi:10.3389/feart.2023.1213493, 査読有, 謝辞有

Tanioka, Y., and Y. Yamanaka, 2023, Recent progress in research on source processes of great earthquakes using tsunami data, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 10, 61, doi:10.1186/s40645-023-00593-9, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Ratnasari, N. R., Y. Tanioka, and Y. Yamanaka, 2023, Development of Real-Time Forecasting Method for Anak Krakatau Volcanic-induced Tsunamis, Indonesia, *IUGG 2023*, 11-20, Berlin, Germany.,

Nakagaki, T., and Y. Tanioka, 2023, Numerical Simulation of Submarine Landslide Tsunami due to the 1946 Aleutian Tsunami Earthquake, *APAC 2023*, 14-17 Nov., Kyoto, Japan

Ratnasari, N. R., Y. Tanioka, Y. Yamanaka, and I. E. Mulia, 2023, Development of Real-Time Forecasting Method for Anak Krakatau Volcanic-induced Tsunamis, Indonesia, *APAC 2023*, 14-17 Nov., Kyoto, Japan

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

北海道大学地震火山研究観測センター

他機関との共同研究の有無：有

柳澤英明（東北学院大学）, 3名（海洋研究開発機構）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地震火山研究観測センター

電話：011-706-3591

e-mail：isv-web@mail.sci.hokudai.ac.jp

URL：https://www.sci.hokudai.ac.jp/isv/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：谷岡勇市郎

所属：北海道大学

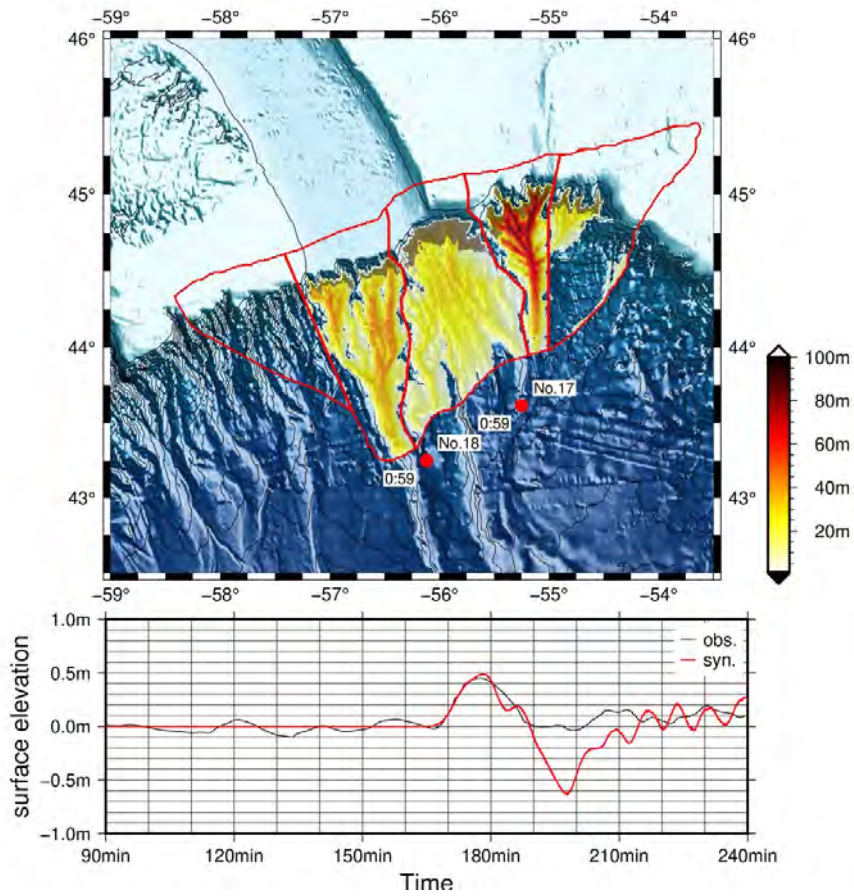


図 1

1929年Grand Banksの海底斜面崩壊による津波の再現実験の結果。上) 斜面崩壊の層厚分布、下) Halifaxの検潮記録と計算記録の比較。

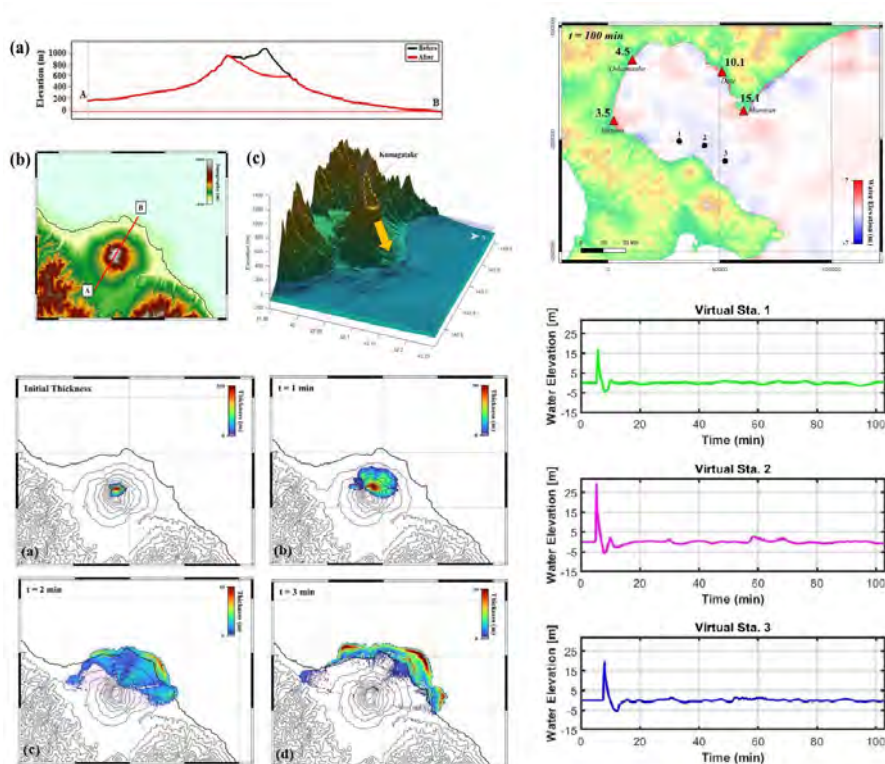


図 2

駒ヶ岳山体崩壊による津波予測手法の開発への研究成果。将来の山体崩壊と津波の 1 ケースについての数値計算結果。左上) 山体崩壊シナリオ、左下) 山体崩壊の数値計算結果、右上) 津波予測のための観測点配置、右下) 3つの観測点での計算津波波形

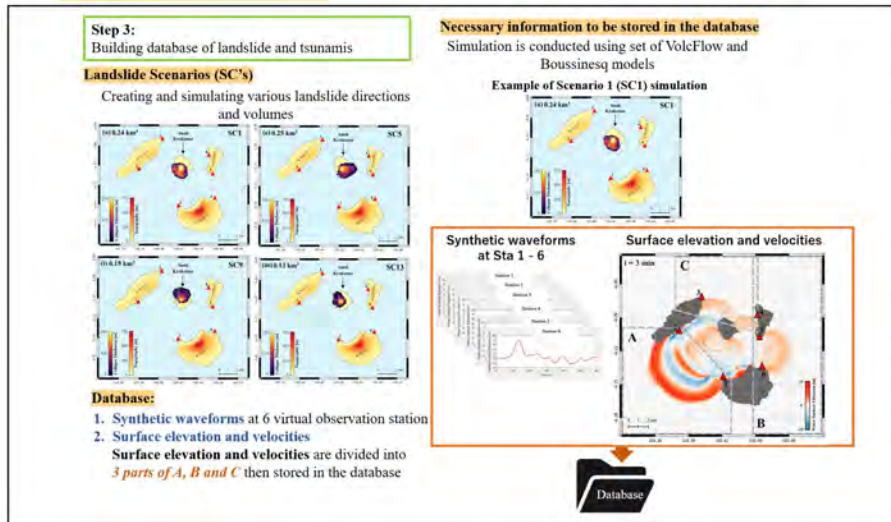


図 3

クラカトア山体崩壊津波の即時予測手法 (Ratnasari et l., 2023)

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

火山活動即時解析表示システムの開発

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究
火山

(4) その他関連する建議の項目：

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

火山噴火が切迫した段階または噴火中には、火山性地震や微動が頻発したり、大きな地盤変動が急激に進行したりする場合がある。このようなケースでは、研究者や現業者が手動で地震波形や地盤変動データを読み取って震源や力源を推定することは多くの場合困難であり、精度を多少犠牲にしてもほぼリアルタイムで自動的に震源や力源が推定できるシステムの方が有用性は高い。そのため、本研究課題では、5年間でこうした自動処理システムを試作するとともに、前建議計画で開発した準リアルタイム火山情報表示システムの追加表示コンテンツとして組み込む。将来的には、こうしたシステムを、現業機関や、地元自治体火山防災協議会メンバーの火山専門家に利用してもらうことで、火山噴火の災害誘因予測を、迅速かつ的確な状況把握と災害対応の支援につなげることを目指す。本計画ではこのための実験的展開も行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

地震波形・GNSS・傾斜計等のデータを即時解析して震源や地盤変動源を表示するシステムを試作する。試作したシステムは、前計画で開発した準リアルタイム火山情報表示システムのコンテンツの一部としても活用し、地元自治体火山防災協議会のメンバーとなる専門家がアドバイスを行うにあたっての支援ツールとしての利用を念頭に置く。これに加えて、自治体の防災担当者へのこの情報表示システムを平常時から活用してもらえるよう、火山以外の観測・防災情報（例えば気象情報や地震活動など）についても、ユーザの要望を取り入れながら改良を進める。R1年度とR2年度は、代表機関と東北大を中心にシステム設計を進め、R3年度以降は九州地方への展開も行う。

令和1年度：地殻変動源自動推定ツール・振幅震源自動推定ツールの設計。前計画で設置したシステムの入替え（北海道・東北）。

令和2年度：システム開発。前計画設置システムの入替え（北海道・東北）。

令和3年度：九州地方へのシステム展開。前計画で設置したシステムの入替え。

令和4年度：システム改修。前計画で設置したシステムの入替え。

令和5年度：九州地方へのシステム展開。5カ年の総括。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

今年度は以下のことを実施した。

1. 北大学外ユーザーに対して、改修後の表示システムを配布した。
2. 表示コンテンツのひとつとして、地盤変動ソースをMCMCインバージョンでリアルタイムに推定するプログラムの開発（東北大と国土地理院との共同開発）を引き続き進めた。
3. 2000年有珠山噴火直前の地殻変動源を仮定した有限要素法数値計算により、現在のGNSS観測点における地殻変動を求めた。さらに、上記のMCMCインバージョンでどの程度正しくソースが推定できるかを検討した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

1. サーバシステムを大幅に改修したことで、今後のバージョンアップにおける対応が容易になった。
2. 地盤変動源をMCMCインバージョンでリアルタイムに推定するプログラムの開発（東北大と国土地理院との共同開発）を進めた（継続中であり今後も取り組む予定）。
3. 次世代火山研究推進事業で有珠山に展開したGNSS常時観測網と、上記2のリアルタイム変動源推定ツールの連動に目処が付いた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本研究では、次世代火山研究推進事業で有珠山に展開中のGNSS観測網にこのシステムを活用することをめざしており、次の有珠山噴火におけるリアルタイムの情報把握に役立てようとしている。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

武田歩真・田中良・中島悠貴・村上亮・鈴木敦夫・山口照寛・青山裕・太田雄策,2023,有珠山におけるマルチGNSS観測データのリアルタイム解析に向けてーキネマティック測位の精度検証ー,日本地球惑星科学連合大会,SVC31-P03

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

橋本武志*課題連絡担当者（北海道大学）,青山裕（北海道大学）,高橋浩晃（北海道大学）,谷岡勇市郎（北海道大学）,大園真子（北海道大学）,田中良（北海道大学）

他機関との共同研究の有無：有

山本希（東北大学）,太田雄策（東北大学）,大倉敬宏（京都大学大学院理学研究科）,松島健（九州大学）,石峯康浩（山梨県富士山科学研究所）,菅野智之（気象庁）,藤田英輔（防災科学技術研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

電話：011-706-2892

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：橋本武志

所属：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地理空間情報の総合的活用による災害への社会的脆弱性克服に関する人間科学的研究

(3) 関連の深い建議の項目：

- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
 - (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(4) その他関連する建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
 - ウ. 地質データ等の収集・集成と分析
- 2 地震・火山噴火の予測のための研究
 - (1) 地震発生の新たな長期予測
 - ア. 海溝型巨大地震の長期予測
- 3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究
 - (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - イ. 津波の事前評価手法
 - (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
 - イ. 津波の即時予測手法
 - (3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究
地震
- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
 - (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - ウ. 千島海溝沿いの巨大地震
 - (3) 研究基盤の開発・整備
 - ウ. 地震・火山現象のデータ流通
 - エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(5) 総合的研究との関連：

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

2007年に地理空間情報活用推進基本法が制定され、それを受けて翌年には地理空間情報活用推進基本計画（一次）が閣議決定された。これらにより日本では法的根拠を持って国家的な地理空間情報の整備や更新が行われるようになった。さらに、東日本大震災の経験により、防災を中心とした地理空間情報の整備や活用が望まれるようになった。そこで、前期の「災害の軽減に貢献するための地震・火山噴火観測研究計画」では、地理空間情報（G空間情報）、GIS（地理情報システム）、衛星測位（GPS、準天頂測位システムなど）を統合活用し、防災・減災に活用するための基礎的システムを開発し、それによって高精度避難ナビゲーションシステムを含む防災・減災のための情報システム構築

などを目指し、成果をあげた。

今期の計画において本研究は、地理空間情報、GIS、衛星測位に現代的ICT技術、AI、IoTなどを統合し、避難行動に関するマイクロジオデータ等を収集して、防災・減災に関して社会的有効性の高い統合的な情報活用システムを開発する。

本研究では開発したシステムを援用し、都市的な地域開発と災害誘因となる自然現象とで人的被害や経済的被害を分析することで災害リスクの解明を行い、その結果から「災害に対する社会的脆弱性（Vulnerability）」について、人文社会科学と自然科学の両方の立場から議論を行う。特に、ここでは地方レベル、市町村レベル、町内会レベルというように空間スケールごとに分析を行ない、各スケールにおける開発と災害リスクの関係やリスク軽減のための課題などを明らかにする。

上記の分析結果を受けて、防災・減災の対策を情報流通の面から検討する。特に、災害リスクを軽減させるために、国、地方自治体、住民組織、住民個人の間で、どのような情報流通を行う必要があるか明らかにし、それによって「災害に対する社会的脆弱性（Vulnerability）」克服のための可能性を探る。

特に本研究は、地震本部により発生が切迫している可能性が高いと評価された千島海溝南部の超巨大地震による津波を想定し、北海道東部太平洋沿岸（釧路市、厚岸町など）の積雪寒冷地を主なフィールドとして研究を進める。これらのフィールドは、道路の凍結や、堆積した雪による歩道の幅員減少など、冬季（積雪期）に避難移動を困難にする要素が増加する。このような状況を想定し、本研究は積雪寒冷地の防災・減災に向けた情報システムの開発と活用についても研究を進める。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度においては、災害の人文社会学的研究に関する地理空間情報、GIS、衛星測位の統合的活用方法の開発を行う。準天頂衛星システムは平成29年度に衛星4機体制となったため、衛星測位で取得できる位置データや標高データの精度が大幅に向上した。当年度には準天頂衛星システムを用いた活用方法の開発と実証実験を行い、さらに従来空間分析手法の改良などを行う。なお、当年度では平成27年国勢調査小地域統計など最新の人口や土地利用を収集し、これまでに収集したデータと融合させて、分析に用いる時空間データベースの作成を行う。

平成32年度においては、地方レベル・市町村レベル・町内会レベルでの人口や土地利用などの地理空間情報を用いた津波浸水による津波被害に関する分析、避難施設と避難困難地域（津波到達までに避難場所に到達できない地域）に関する分析、住民の避難行動に関する分析などを行う。当年度には、積雪寒冷地である北海道全域を対象に、現在、北海道総務部危機対策課が整備を続けている津波浸水想定データを用いて、マクロな視点による津波被害分析を行う。その際には人口や土地利用のデータを時系列的に収集し、GISに取り込んで空間データベースを構築した後に、都市の変化と災害リスクとの関係について分析する。

平成33年度においては、積雪寒冷地である北海道沿岸の事例市町村を選定し、人口、土地利用、津波浸水想定だけではなく、避難施設と避難困難地域に関するデータの収集と分析を行う。事例市町村としては、地震本部により発生が切迫している可能性が高いと評価された千島海溝南部の超巨大地震による津波の浸水想定域が広範囲に及ぶ東部太平洋沿岸の釧路市や厚岸町などとする。道路の凍結や堆積した雪による歩道の幅員減少など、冬季（積雪期）に避難移動を困難にする要素を加え、避難施設や避難ルートなど住民避難に関する地理空間情報を用いて空間データベースを構築する。この分析により、生活レベルのミクロな視点で、各自治体のもつ「災害に対する社会的脆弱性」に関する分析を行う。

平成34年度においては、ここまでの結果を受けて、当年度には事例市町村の津波浸水想定域における町内会レベルもしくは個人レベルの避難に関する分析を行なう。その際には、準天頂生成に対応した津波避難支援ナビゲーションシステムを用い、何が避難の障害になり、何が避難をサポートするのか、ミクロレベルでの地物に関する分析を行う。また、集団での避難実験の移動ログを収集し、個人レベルとは異なる避難の障害を抽出する。最後に各スケールにおける開発と災害リスクの関係やリスク軽減のための課題などを明らかにし、「自助・共助を最適化する公助」について考察を行う。

平成35年度においては、上記の分析を継続しつつ、当年度には自治体・住民組織を対象とした災害関係の情報流通に関する分析を行う。ここでは、防災・減災の対策を、各種避難警報やハザードマップなどを要素とした情報の流通に関して検討する。特に、災害リスクを軽減させるために、国・地方自治体・住民組織・住民個人の間で、どのような情報流通を行う必要があるか、自治体、住民などへ

の聞き取りから明らかにする。また、この情報流通を加速させる手段について、自治体と協力し実証実験を行う。この研究では、自宅から避難場所までの住民行動を総合的に扱い、避難開始や避難場所選定などに関する住民の意思決定についてはファジーAHPなどの手法で分析する。また、避難移動に関しては現実空間の模擬避難実験と仮想空間の避難シミュレーションを統合して分析する。

最終年度である平成36年度には以上の分析成果を統合し、津波災害時の住民避難の課題を抽出し、地域開発と災害に対する関係性を考慮して、災害に関する社会的脆弱性を明らかにする。なお、災害の危険生が高い地域で積雪寒冷地の地域性を考慮した研究を行うために、積雪のある冬季と、積雪のない夏季の2時期での検討に重点を置く。

また、全ての年度を通じて、地域防災のための公開講座や講演会の開催や、自治体防災担当者への講義や防災GISハンズオンセミナーなどを実施する。北海道総務部危機対策課の防災アドバイザー制度を利用して自治体への防災GISの普及を試みるほか、北海道大学と自治体との相互協定等を利用して防災教育活動・地域貢献を実施し、効果的な研究成果の普及手法を探る。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1. 2023年度の成果

2023年度においては、上記の分析を継続しつつ、当年度には自治体・住民組織を対象とした災害関係の情報流通に関する分析を行った。ここでは、防災・減災の対策を、各種避難警報やハザードマップなどを要素とした情報の流通に関して検討した。特に、災害リスクを軽減させるために、国・地方自治体・住民組織・住民個人の間で、どのような情報流通を行う必要があるかを明らかにした（奥野・橋本，2023）。また、この情報流通を加速させる手段について、自治体と協力し実証実験を行った（Fukada et al., 2023）。この研究では、自宅から避難場所までの住民行動を総合的に扱い、避難開始や避難場所選定などに関する住民の意思決定についてはファジーAHPなどの手法で分析した（塩崎・橋本，2021）。また、避難移動に関しては現実空間の模擬避難実験と仮想空間の避難シミュレーションを統合して分析した（塩崎・橋本，2023）。さらに、社会的に防災リテラシーを高める方策として、高校「地理総合」の授業を活用することを考え、その実践や課題について検討した。

2. 高校教育におけるGIS教育と防災リテラシーの向上

2-1 書籍の出版とシンポジウム開催

現代社会における防災リテラシーの向上のために地図活用能力は不可欠であり、この能力の育成に「地理総合」が担う役割は大きいと思われる。2022年4月から日本全国の高校で始まった必修科目「地理総合」ではGIS教育と防災教育が行われ、両者を結び付ける様々な授業の工夫が高校では試みられている。しかし高校では、「地理総合」についての課題も明らかになってきている。この「地理総合」における教育の課題について、GISに注目し、基礎知識、授業実践、評価方法（特に3観点評価）等の点から論じるため、文科省や高校教員だけでなく、高校教員養成に関わる大学教員も交えて2023年9月に『「地理総合」とGIS教育：基礎・実践・評価』（古今書院）を出版した（橋本編，2023）。また、この本の内容を討議するためのシンポジウムを日本地理学会秋季学術大会（関西大学，2022年9月24日）でシンポジウムを開催した（橋本ほか，2023）。シンポジウムの内容は下記の通りである。

2-2 高校における「地理総合」の教育

（1）地理総合・地理探究と探究学習の相互環流（桐蔭学園高等学校 石橋 生）

WigginsとMcTigheが提唱する「逆向き設計」論では、カリキュラムに学習者である生徒の視点を反映させ、教師は希望的観測ではなく意図的設計を行うことが求められている。発表者はこれに基づいた授業の成果を報告した。「地理総合・地理探究」では過去の災害を教えるだけでなく、将来、自らが住む予定の土地で災害リスクを考慮した上で生活するという観点を大切にして、授業設計を行った。帝国書院の高校資料集『新詳地理資料COMPLETE 2023』に掲載されている一人暮らしの物件探しについて、仮説と検証を繰り返しながら、地理院地図や重ねるハザードマップなどを活用し、「地理総合・地理探究」のモデル授業「物件探しから考察する災害リスク調査」を考案した。このモデル授業を発表者は2020年から実施し、2023年からは「地理総合」の1学期のパフォーマンス課題として行った。また、2018年に立ち上げたGISゼミでは、生徒と一緒にGISを活用した地域研究を行いながら、「地理総合・地理探究」のモデル授業の研究実践を行ってきた。さらに、2021年からは地理の授

業から生徒主体のSDGsプロジェクト、沖縄プロジェクト、桐蔭地理メタバースプロジェクトをスタートさせた。大学入試制度が多様化し、総合型選抜の割合が増加傾向で、高校生の間にもどのようなことに興味を持ち、研究してきたことが大学での学びにつながられるのかが問われ、高校生の研究をさらに充実させるためには、学内にとどまらず、学外にもネットワークを広げて、生徒の可能性を広げる教育を実践すること、学習環境を整えることが求められる。

(2) 地図とGISの学習指導におけるルーブリックと観点別評価(東京学芸大学附属高等学校 栗山絵理)

2022(令和4)年度より、高等学校でも3観点による観点別評価が導入され、ルーブリック評価が用いられる場面も増えている。ルーブリックは、縦軸に「評価観点」が、横軸に「評価尺度」が、それぞれ併記された表として示されることが多く、学習者と授業者の評価に関する合意を形成する役割を果たす。今回のシンポジウムでは、発表者の勤務校における「地理総合」の地図とGISの単元における学習指導の取組みを紹介し、実際に使用したルーブリックを示した上で課題を指摘した。2022(令和4)年度に実施した「地理総合」では、5月に「地理院地図でGIS(自然地理分野)」, 6月に「RESASでGIS(人文地理分野)」, 12月に「ハザードマップでGIS(防災分野)」と題して、通年で地図とGISの学習指導を取り入れた。今回は、「ハザードマップでGIS」の生徒の学習への取組みを例示し、ルーブリックの改訂案を示した。3観点における「大変評価できる」状態を、「知識・技能: 自然地形から災害リスクを読み取って抽出し、最寄りの避難所までの道のりを方位や数値で示すことができる」、「思考力・判断力・表現力: 災害発生時に取るべき行動を、3カ所以上について考え、複数の災害リスクを想定して共助の減災案を提案できる」、「主体的に学習に取り組む態度: 授業で学習した内容を身近な地域に応用して考察し、家族など身近な他者と共有して話し合うことができる」と提案した。ルーブリックによる観点別評価の導入は「絶対評価」を促進し、授業者の授業改善につながる。「学習指導案」や「教材」と並んで、学習者のコンピテンシー育成を促すルーブリックを作成できる人材育成が必要である。

(3) 「地理総合」における地図とGISを扱う授業と評価の進め方(群馬県立藤岡中央高等学校 田中隆志)

2022年度実施のアンケート「『地理総合』についての中間まとめ」を基に「地理総合」の実態や課題と、発表者の授業の取組みを報告した。課題では、①授業者に地理専門外が多い点。②地図とGISの基礎基本を扱う導入単元を計画どおりに進められない者が多い点。③アクティブラーニング、作図、地理院地図の取組みが十分でない点。④評価に不安をもつ者が多い点を指摘した。課題への組織的支援では、高校学校教育研究会の地理部会や教職課程を置く大学が、科目を担当する可能性のある教員や学生に指導と評価ができる支援体制を整備すること、評価・総括・作問方法の研修機会を設定することの必要性を述べた。発表者の授業については、紙地図を丁寧な読図や作業の場面で活用したこと、GIS地図について簡易的に操作できるWeb地図を軸にさまざまな学習項目で活用したこと、地図の活用が単に体験に終わらないように学習支援アプリ「ロイロノート」を活用したことを報告した。3観点での評価方法としては、①「知識・技能」で単純な知識・技能を問う考查問題の素点を使用したこと、②「思考・判断・表現」で考查問題の結果や生徒に学習内容をまとめさせた「ふりかえりシートの部分」を用いたこと、③「主体的に学習に取り組む態度」で生徒が調整力を働かせて粘り強く学習に取り組んだかを反映する提出物の提出状況、生徒の変容を反映する「ふりかえりシートの部分」を使ったことを述べ、具体的な成績処理の方法を解説した。

2-3 大学における「地理総合」の教員養成

(1) 大学の教職科目で培うGISの技能と指導法(ノートルダム清心女子大学 森 泰三)

2022年度からの「地理総合」実施に伴い、大学においても教員養成の段階でGISの考え方、技能、評価方法などを培うことが重要になった。しかし、大学の教職課程において、「社会・地歴科教育法」の授業について、地理学を専門とする教員が担当しているとは限らない。その場合、「教科に関する専門的事項」であり学科等の専攻科目である「地理学概論」または「人文地理学」などにおいてGISに関する授業が実施されることが望ましい。教職科目において、地形、防災、農業、地名、地域変容、統計地図などに関するGIS活用の実習を行い、問いの設定や理解させたい事項を考える。たとえば次のような実習である。「地理院地図」の「自分で作る色別標高図」で防災、地形と立地、地形と地名を考える場合、東京都区部の標高図を作成し、荒川流域には標高0m以下の地域が広がっていることから、津波や大雨による浸水について考察する。東京駅付近で西側の洪積台地と東側の沖積平野、いわゆる山の手と下町の境界を理解できる。また、江戸城のあった皇居が洪積台地の端に立地しており、大阪

城や名古屋城などでも類似した立地状況の共通性を考える。GISに関する実習では、情報収集、地図の作成や読取りなどの「知識・技能」、地図表現の工夫や、内容の考察などの「思考力・判断力・表現力」、課題の発見や追求などの「主体的に学習に取り組む態度」について評価できることを確認させる。大学の教職課程において、それらを実践し、教師としてのスキルの向上を図るべきである。

(2) GISで現地の教材を蓄積することの重要性 (奈良大学 木村圭司)

発表者の勤務校へ高校側から出される出張講義への要望として、GISと自然地理学分野を組み合わせる講義して欲しいという依頼が多い。次いで多いのがフィールドワーク、SDGsである。出張授業を行う際、その学校に合わせた内容も大切であるが、それではその場限りとなってしまう、大学教員が高校で授業を行う意義が薄いと感じている。そこで、日本全国で使用できるWebGIS教材の蓄積が必要であると感じた。高校の生徒全員が所有しているICT機器を使って興味のある地域を表示させられれば、普遍的な教材となる。こうした考え方をもとに奈良大学地理学科では学生を中心に、WebGISのデータ集の公表や書籍の刊行などを行っている。実際の高校現場では、偏差値50前後の生徒が最も多いにもかかわらず、そうした高校は学会や学術会議の中心部にいる上位大学の教員との関わりは少なく、シンポジウムなどの場での報告も少ない。「地理総合」は必修であるために、学力中位以下である高校の状況について、今後、正確に把握する必要があるだろう。

(3) 先端技術とGISを活用した防災教育の実践 (星槎道都大学 塩崎大輔)

大学における地理学の講義編成を紹介した上で、大学教育における地理学やGISに関する話題・取組みを紹介した。教育現場における人材不足が深刻であり、教職課程の学生に対する即戦力となる実践力が求められている。またICT教育貢献への期待も持たれている。特に、COVID-19以降、各学校でICT環境が急速に整えられたことで、GISを導入しやすくなっている。ただし、現在在学中の学生は地理必修化以前の学生であるため、大学での地理教育およびGIS教育はきわめて重要である。そこで発表者の勤務校では実践的で分かりやすいGISを活用したカリキュラムの実践を行っている。たとえばGPSとWebGISを組み合わせた防災システムを用いた避難実験を行い、空間的な視点を養うような取組みを行った。これにより地理情報の生成・保存・活用などICT教育に通ずる知識と、GISの知識を実践的に学ぶことができる。高校教育においては3観点評価が導入され、学びに向かう力と主体的に取り組む態度が重要視される。「地理総合」における評価の方法についても、事例を増やし学生にフィードバックする必要がある。

2-4 シンポジウムにおける総合討論

総合討論では、まず高校における指導に関する工夫に関する議論が行われた。GISを使った授業では、機器を操作するため学習のペースに個人差が生じやすく、実際の授業で学習につまずいてしまう生徒も多いことから、その指導に関する工夫については多くの教員が関心を持っている。それに対し発表者からは、アクティブラーニング型授業で、ペアワークやグループワークを行う有効性が指摘された。つまづいている部分を学生が相互に教え合う時間を設けることで、大きく遅れる生徒を出さない工夫が紹介された。

次に、GIS教育で視野を広げる方策に関する質問に対し、発表者からは、ペアワークやグループワークなどで周囲の意見を聞き視野を広げる重要性が示された。また、学外にアンテナを広げ、外部の方々の協力を得ながら授業を行うことなどのアイデアが提案された。さらに、科目横断的な授業や学年縦断的な授業をすることが生徒の視野を広げることに役立つとの意見もあった。

続いて、GIS教育での個別最適化により多様性が失われるのではないかという疑問に対しては、「探究活動」で「疑問・仮説・検証」の一連の過程を経て考察し、結論を口頭発表やポスター発表により他者と共有することで、個別最適化と多様性の拡張を両立できるのではないかという意見があった。ほかに、多様な答えが考えられる問いの設定によりGISの作業をさせることや、個の形成的評価を丁寧に行って個性を伸ばす配慮が必要との意見も出された。

さらに、「歴史総合・地理総合・公共」が1年間で完結せず翌年の探究系科目に持ち込まれる可能性があることについて、発表者からは「地理総合」の内容全部を扱うことは時間的に困難であるため内容精選は必須であること、国立教育政策研究所『指導と評価の一体化 参考資料』が内容精選で参考になることが紹介された。なお「地理総合」で扱うべき学習項目を後日「地理探究」で扱うことは原則的には誤りであることが説明された。

最後に、日本学術会議地理教育分科会が2017年の提言「持続可能な社会づくりに向けた地理教育の充実」に基づいて公開しているWebサイト『地理総合 教材素材集』に関し、今後必要となる教材について質問があった。発表者からは、国土地理院でも地理教育に役立つ多くのコンテンツを整備・更

新しており、これからも充実させる予定であるため、相互に連携することの期待が述べられた。

今回のシンポジウムでは、「地理総合」のGIS教育および防災教育に関する実践、評価、教員養成の現状や課題が紹介された。現在の高校における多くの優れた工夫が見られる中で、それだけでは解決できない問題も多く残されており、地理学関係の学会や日本学術会議などで早急に取り組むべき課題が明らかになった。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

計画期間中の研究は予定通りに実施した。ただし、コロナ禍の影響で調査や分析の順番が前後する場合があった。

今期の研究では、2017年3月に閣議決定された地理空間情報活用推進基本計画（第3期、2017～2022年）に基づいて地理空間情報、GIS、衛星測位に現代的ICT技術、AI、IoTなどを統合し、防災・減災に関して社会的有効性の高い情報システムの構築と活用法開発を行った（図1）。この第3期基本計画の期間中には準天頂衛星「みちびき」2～4号機および初号機後継機が打ち上げられ、高い精度の位置情報が得られるようになった。この衛星測位を活かした避難実験からも防災リテラシーに関する新たな知見を得た。

本研究では開発したシステムを援用し、都市的な地域開発と災害誘因となる自然現象とで人的被害や経済的被害を分析することで災害リスクの解明を行い、その結果から「災害に対する社会的脆弱性（Vulnerability）」について、人文社会科学と自然科学の両方の立場から議論を行った。特に、ここでは地方レベル、市町村レベル、町内会レベルというように空間スケールごとに分析を行ない、各スケールにおける開発と災害リスクの関係やリスク軽減のための課題などを明らかにした。

特に本研究は、地震本部により発生が切迫している可能性が高いと評価された千島海溝南部の超巨大地震による津波を想定し、北海道太平洋沿岸の積雪寒冷地を主なフィールドとして研究を進めた。これらのフィールドは、道路の凍結や、堆積した雪による歩道の幅員減少など、冬季（積雪期）に避難移動を困難にする要素が増加する。このような状況を想定し、本研究は積雪寒冷地の防災・減災に向けた情報システムの開発と活用についても研究を進めた（図2）。

計画期間中に行った研究で、大きな成果が得られたものは、（1）避難困難地域の空間分析法の開発、（2）集団避難実験とGeovisualization（地理的可視化）、（3）WebVR技術による疑似避難訓練システムの開発、（4）津波避難ビルの階段上昇シミュレーション、（5）中学校・高校と連携した防災リテラシー向上の5つである。

（1）避難困難地域の空間分析法の開発（図3）

北海道東部の太平洋沿岸を対象地域として分析を行った結果、浸水想定域人口は、既存の研究結果より低い値となった。また、路面状況が悪く、歩行速度が低くなるに従い、避難困難人口が増加し、昼夜間の差や道路ネットワーク途絶の有無による差は小さくなった。これは、路面状況により移動距離が短くなると、道路ネットワーク途絶があっても迂回できなくなることによると思われる。また、地形や人口分布の関係から、道路ネットワーク途絶の影響は自治体ごとに異なり、画一的な避難対策では対応が難しいと考えられる。このように、本研究で提案した手法では、従来よりも精度の高い結果が得られ、それによって地域特性を反映した津波発生時の問題を明らかにした。

（2）集団避難実験とGeovisualization（地理的可視化）（図4）

北海道内の沿岸7自治体において収集された疑似的津波集団避難行動ログデータおよび地形データを用い、平地と傾斜地による歩行速度の差異を明らかにした。これにより、津波避難に関するシミュレーション研究の基礎データ整備につながるほか、歩行速度及び地形が避難行動に及ぼす影響が明らかとなり、事前に津波災害からの避難計画を検討又は策定する際の基礎資料を作成した。非積雪期においては、平地における平均歩行速度が4.94km/h、傾斜地における平均歩行速度が4.68km/hとなり、傾斜地において歩行速度が低下する傾向が見られた。今回使用したログデータは、大学生、大学院生によるもので、年齢層としては20代が大半を占めているが、高齢者や障がい者、妊婦、幼児等の避難行動要支援者を含む要配慮者が避難する場合、本研究の結果と比べて速度差がより大きくなる可能性がある。なお、本研究の成果の一部は、内閣府が主催する日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震対策検討ワーキンググループの第5回ワーキンググループ（2021年2月26日）で公表された「資料2 被害想定手法について（案）」（23ページ）において冬季の徒歩による避難速度を求めるための資料として用いられた。

（3）WebVR技術による疑似避難訓練システムの開発（図5）

防災・減災対策の課題の1つとして、観光地において地理不慣れな観光客をいかに安全な場所まで

誘導するののかということが挙げられる。観光客が避難所へのルートなどを確認していない場合、避難時に地域住民とは異なる判断や行動を起こすことが考えられる。こうした観光客の行動を推定することは、観光地における地域防災を考える上で重要な要素である。そこで、ICT及びVR技術を用いて、観光地における避難行動を再現できるVR疑似避難訓練システムを開発した。このシステムでは、ユーザはWebブラウザを介してシステムにアクセスすることでWebVRを体験できる。大学生を対象に実験を行ったところ、参加者ごとの異なる避難行動のパターンを明確化できた。また、津波避難情報に関する参加者の意識の変化を明らかにする上で、実験前後に行ったアンケート調査の結果にAHPを施したところ、この体験は、避難開始や避難時間の短縮といった、津波避難時における情報の速さの重要性を認識させる効果が高かった。

(4) 津波避難ビルの階段上昇シミュレーション (図6)

本研究では、北海道東部太平洋沿岸に道営住宅として建築された津波避難ビル内の階段をモデル化し、約1,000名の住民が徒歩で避難ビルへ向かい、ビル内の階段を上って最上階へ避難するまでの行動を、想定したマルチ・エージェント・シミュレーションにより分析した。その際にエージェントの歩行速度は年齢層別に設定した。避難ビル内階段5階の通過率を見ると、避難行動開始から30分時点で住民エージェント全体の約3分の1程度しか5階を通過できなかった。また、当該避難ビルへの到達率と階段上昇開始率の差からは、多数の住民エージェントが当該避難ビルの入口付近で滞留することが判明した。ここで明らかにした課題に関しては、行政機関が津波避難施設を指定する配置計画において、当該避難ビルの入口に誘導員を配置することや、緊急避難場所等へ避難者を分散させ各避難施設に対する避難人数を最適化させること等の検討を行う必要があることを提案した。

(5) 中学校・高校と連携した防災リテラシー向上のための取り組み (図7)

2018(平成30)年に高等学校の学習指導要領が改訂され、2022(令和4)年から高校では「地理総合」が必修化された。この「地理総合」では、現代社会の諸課題を背景として、持続可能な社会づくりに必須となる課題解決力を育むことが目標とされており、「地図や地理情報システムで捉える現代世界」「国際理解と国際協力」「持続可能な地域づくりと私たち」の3つが大きな柱になっている。このうち「地図や地理情報システムと現代世界」では、地図やGISを活用して現代社会の諸課題に取り組む方法を学ぶ。また、「持続可能な地域づくりと私たち」では、自然災害への備えや対応を考える力を養う。自然災害への備えや対応に関する一般的知識を学んだ後は、学校、自宅、通学路など身近な地域での防災を考える教育が重要である。そのために身近な地域に関する教材を準備する「教材の現地化」が大切であり、これを行うためにはマイクロスケールの地図に各種情報を重ね合わせることができ、GISは有効なツールとなる。「地理総合」では、GISを活用して自然災害への備えや対応に関する学習機会を設けることが教育効果を高めるとされる。

本研究では、高等学校の授業に関する研究と大学における教員養成に関する研究を行った。高等学校の授業に関する研究では、実際に教鞭を執っている高校教員の体験をもとにした知見を示した。ここでは、防災などを事例とした「地理総合・地理探究」と探究学習の相互環流、発達段階と学習課程ごとのGIS活用の必要性、学習指導におけるルーブリックと観点別評価、地理的技能と地理的な見方・考え方に注目した授業実践、教員アンケート調査による授業実態と課題、3観点評価による指導と評価の一体化に関する考察などを行った。大学における教員養成に関する研究では、新しい科目に対応した高校教員養成の工夫などを示した。ここでは、大学の教職科目においてGISの考え方・技能・評価方法などを培うことの必要性や、地理教育における先端技術の活用と教育効果を明らかにした。これらのことからGISを用いて地図リテラシーと防災リテラシーを併せて向上させることの重要性を指摘した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

1. 「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況

2007年に制定された地理空間情報活用推進基本法に基づく地理空間情報活用推進基本計画(第3期、2017~2022年)に基づいて地理空間情報、GIS、衛星測位などにVRなど現代的ICT技術をあわせて情報システムの構築と活用法開発を行い、地理情報科学の立場から防災研究を行う事で、新たな防災リテラシーの向上に関する研究を提案した。

特に、第3期基本計画の期間中における準天頂衛星「みちびき」2~4号機および初号機後継機による測位精度向上という利点を活かした避難実験から、個々の人間を単位としたジオマイクロデータを生成し、それを分析することで防災リテラシーに関する新たな知見を得ることができた。

また、避難移動履歴に関するジオマイクロデータとして蓄積された積雪期の歩行速度データが、国の冬季の徒歩避難の速度を求めるための資料（「日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震対策検討ワーキンググループ」第5回会議「資料2 被害想定手法について（案）」）として活用されたことで、積雪寒冷地の防災リテラシー向上に貢献できた。

2. 「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

災害誘因に関する自然科学的研究や、災害素因のハードウェアに関する研究が多く行われる中で、本研究は人間を中心とした災害素因のソフトウェアに関する研究を行った。これにより2011年12月に制定された「津波防災地域づくりに関する法律」における「多重防御」のために不足していた研究を僅かでも補うことができたと考えられる。

また、本研究は地理教育を通じ防災リテラシーの向上を図ることを目指した。2022年から高校で必修化された「地理総合」の内容である「地図や地理情報システムで捉える現代世界」と「持続可能な地域づくりと私たち」（特に防災の部分）を結び付け、継続的に高校生の防災リテラシーを向上させる方策を検討した。

そのために身近な地域に関する教材を準備する「教材の現地化」が大切であることから、地理空間情報、GIS、衛星測位を援用して地元の防災に関する教材作成などの方法を考案し、シンポジウムなどを通じて全国の関係者に研究成果の周知を図った。

今後は、2022年3月に閣議決定された地理空間情報活用推進基本計画（第4期、2022～2027年）に対応し、激甚化・頻発化する自然災害を対象とした地理情報科学の成果の社会的普及に取り組む。

特に、切迫する日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震を対象とし、今期の計画で成果の得られた（1）避難困難地域の空間分析法の開発、（2）集団避難実験とGeovisualization（地理的可視化）、

（3）WebVR技術による疑似避難訓練システムの開発、（4）津波避難ビルの階段上昇シミュレーション、（5）中学校・高校と連携した防災リテラシーの向上の5点について研究の掘り下げを行う。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

橋本 雄一, 三橋 浩志, 大塚 孝泰, 石橋 生, 栗山 絵理, 田中 隆志, 森 泰三, 木村 圭司, 塩崎 大輔, 2023, 「地理総合」とGIS教育—教育の実践・評価および教員養成—, E-journal

GEO, 18(2), 442-445, <https://doi.org/10.4157/ejgeo.18.442>, 査読無, 謝辞無

奥野祐介, 橋本雄一, 2023, 千島海溝沿岸自治体における津波防災対策の現状と課題—北海道釧路市を例として—, 地理情報システム学会講演論文集, 32, D6-02, 査読無, 謝辞有

小野塚仁海, 橋本雄一, 2023, 携帯電話データを用いた災害発生直後の都市における人口分布に関する地理学的研究, 地理情報システム学会講演論文集, 32, F5-02, 査読無, 謝辞有

Hidemi Fukada, Yuichi Hashimoto, Miyuki Oki, Yusuke Okuno, 2023, Proposal and evaluation of tsunami disaster drill support system using tablet computer, International Journal of Information Technology, 15, 4029-4039, <https://doi.org/10.1007/s41870-023-01465-7>, 査読有, 謝辞有

塩崎 大輔, 橋本 雄一, 2023, GPS を用いた非日常空間における津波避難行動に関する空間分析, 情報処理学会研究報告, 2023-IS-165(15), 1-6, 査読無, 謝辞有

工藤 由佳, 橋本 雄一, 2023, 路面状況と道路ネットワーク途絶を考慮した積雪寒冷地における津波避難困難地域の推定—千島海溝地震による津波の浸水想定的事例—, 地理学論

集, 97(1), 1-12, <https://doi.org/10.7886/hgs.97.1>, 査読有, 謝辞有

橋本雄一（編著）, 2023, 「地理総合」とGIS教育：基礎・実践・評価, 古今書院, 査読無, 謝辞有

Daisuke Shiozaki, Yuichi Hashimoto, 2024, System Development for Tsunami Evacuation Drill Using ICT and Tsunami Inundation Simulation Data, Journal of Disaster

Research, 19(1), 72-80, <https://doi.org/10.20965/jdr.2024.p0072>, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

橋本 雄一, 2023, 高校「地理総合」における地理空間情報およびGISの活用と課題, 国土交通省国土地理院 北海道地方測量部 令和5第2回情報共有会合, 招待講演

深田 秀実, 橋本 雄一, 2023, 津波避難ビルにおける屋内階段歩行の上昇速度分析, 危機管理防災学会 第17回研究大会

奥野 祐介, 橋本 雄一, 2023, 千島海溝沿岸自治体における津波防災対策の現状と課題—北海道釧路市を

事例として一、地理情報システム学会第32回学術研究発表大会,D6-02

小野塚 仁海, 橋本 雄一,2023,携帯電話人口統計を用いた災害発生直後の都市における人口分布変化に関する地理学的研究,地理情報システム学会第32回学術研究発表大会,F5-02

橋本 雄一 (オーガナイザー),2023,「地理総合」とGIS教育—教育の実践・評価および教員養成— (趣旨説明),2023年日本地理学会秋季学術大会シンポジウムS2 「地理総合」とGIS教育—教育の実践・評価および教員養成—

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地理空間情報の総合的活用による災害への社会的脆弱性克服に関する応用研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

橋本雄一 (北海道大学文学研究院), 谷岡勇市郎 (北海道大学理学研究院)
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：北海道大学大学院文学研究院
電話：
e-mail：you@let.hokudai.ac.jp
URL：https://www.let.hokudai.ac.jp/staff/4-4-02/

(14) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名：橋本雄一
所属：北海道大学大学院文学研究院

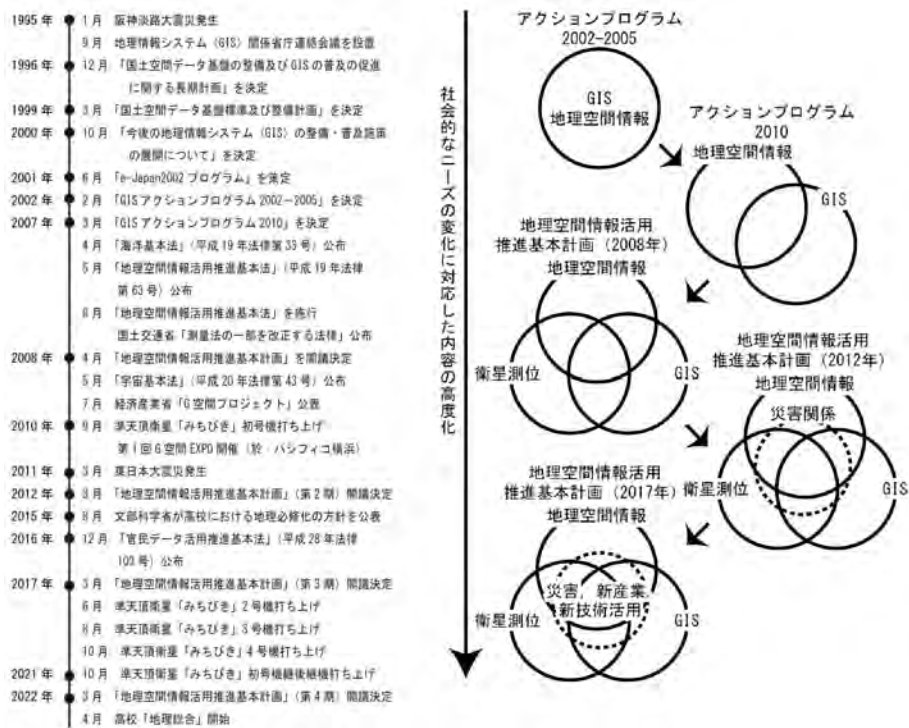


図1 地理空間情報に関する国家計画の推移

第2期 地理空間情報の総合的活用による災害に対する社会的脆弱性克服のための人間科学研究

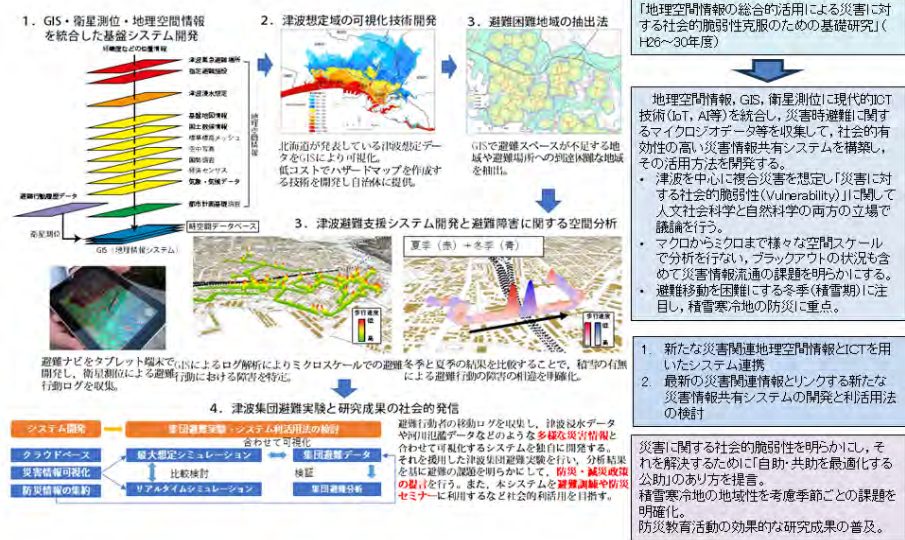


図2 今期の計画の流れ

成果1 避難困難地域の空間分析法開発

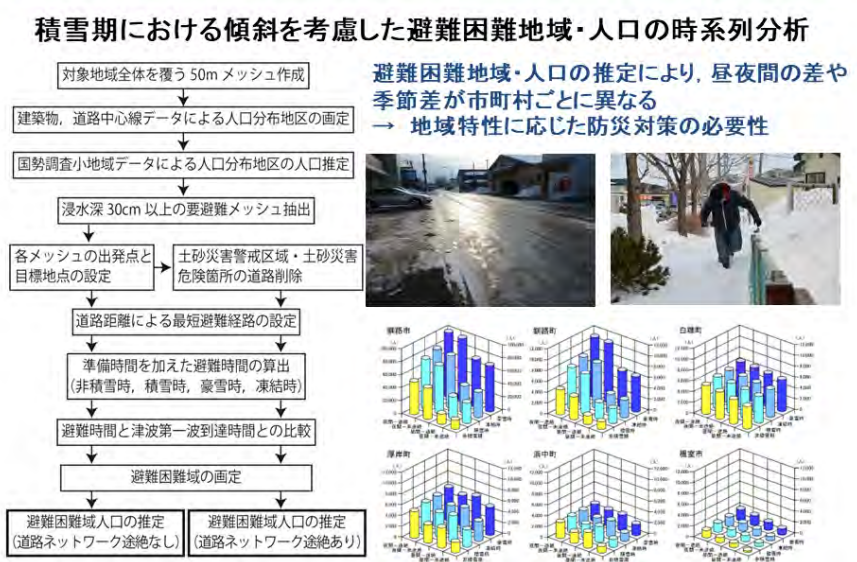


図3 避難困難地域の空間分析法の開発

成果2 集団避難実験とGeovisualization

津波浸水想定拡大に対応した避難実験

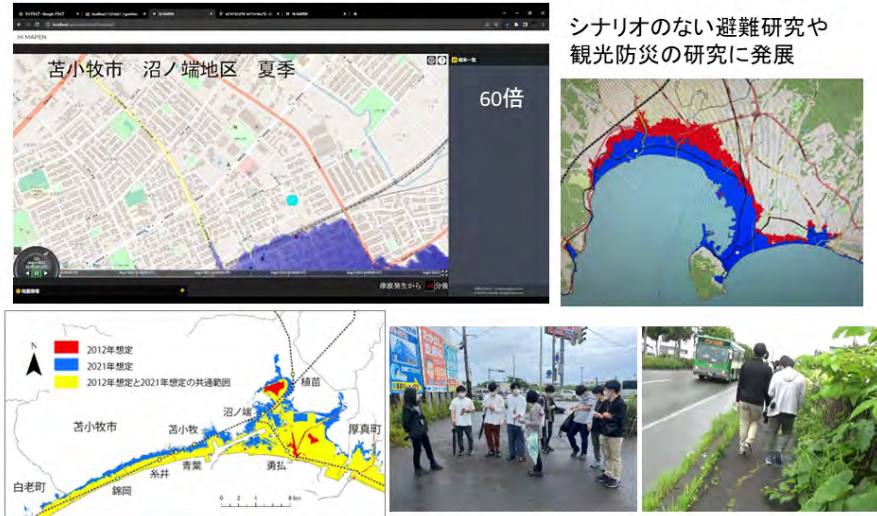


図4 集団避難実験とGeovisualization

成果3 WebVR技術による疑似避難訓練システムの開発

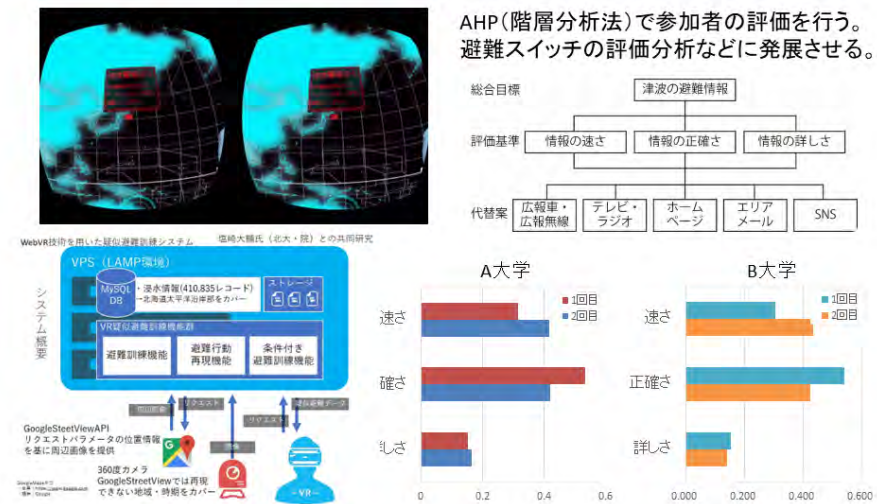


図5 WebVR技術による疑似避難訓練システムの開発

成果4 津波避難ビルの階段上昇シミュレーション

マルチエージェント・シミュレーションにより、避難ビル内における避難者集団の階段上昇を見る。

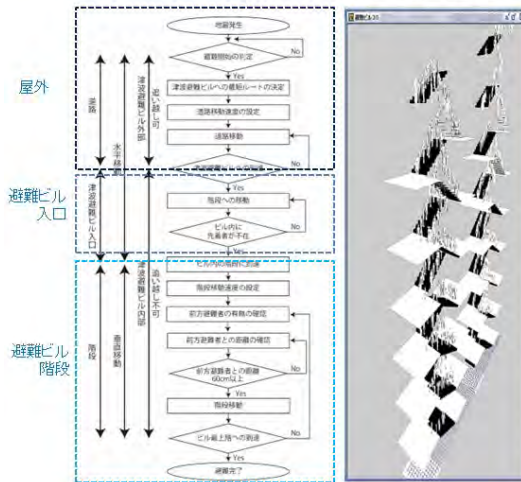


表1 年齢別移動速度設定

年齢層	歩行速度 (m/s)		階段上昇速度 (m/s)	
	男性	女性	男性	女性
10歳未満	1.21	1.21	0.60	0.60
10~19歳	1.32	1.27	0.65	0.63
20~29歳	1.43	1.25	0.71	0.62
30~39歳	1.50	1.18	0.74	0.58
40~49歳	1.38	1.24	0.68	0.61
50~59歳	1.26	1.11	0.62	0.55
60~69歳	1.13	1.00	0.56	0.49
70歳以上	0.69	0.87	0.34	0.43

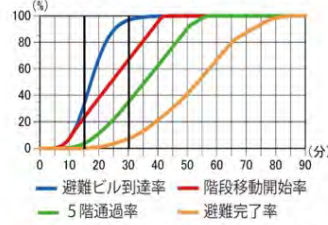


図2 津波避難ビルへの避難率

図1 住民エージェントの行動フロー 深田秀実(小樽商科大学)との共同研究

図6 津波避難ビルの階段上昇シミュレーション

成果5 中学校・高校と連携した防災リテラシー向上

- 2022年度から始まった高校「地理総合」(必修科目)ではGISと防災を学ぶ。災害に関する「教材の現地化」で社会的脆弱性を検討することが望ましい。
- 本来は小中高大で連携した防災リテラシー教育体制の構築が課題



2023年 「地理総合」とGIS教育

論文のほかに書籍の出版を行う。
 ・GISおよび地理空間情報に関する技術普及
 ・防災リテラシー向上のための啓蒙活動



高等学校『地理総合』(必修科目)
 A 地図や地理情報システムで捉える現代世界
 (1) 地図や地理情報システムと現代世界

⇕

C 持続可能な地域づくりと私たち
 (1) 自然環境と防災

2023年シンポジウム (日本地理学会)
 「地理総合」とGIS教育—教育の実践・評価および教員養成—

図7 中学校・高校と連携した防災リテラシーの向上

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地殻変動等多項目データの全国流通一元化公開解析システムの高度化

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

イ. 内陸地震の長期予測

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

イ. 津波の即時予測手法

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

火山

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

イ. 観測・解析技術の開発

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地殻変動連続観測やGNSSなど、地殻変動等の多項目観測データを全国に流通させるシステムを運用・高度化して研究基盤として観測研究を支える。地殻変動研究の基盤となるデータの収集や共有・公開を進めるとともに、新たな観測項目や機能の追加、既存機能の高度化・安定化、新たな接続機関の拡大を目指す。サーバやデータ流通経路を分散化し災害に強いシステムを構築する。技術研修を実施し、地殻変動観測技術の伝承を図る。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

地殻変動連続観測、および、GNSSデータサーバの運用を継続し、地殻変動等多項目データ流通一元化・蓄積・公開を継続して行う。データサーバの安定運用と高度化を図り、新たな観測項目や関係機関からのデータの受け入れを行うためのプロトコルを整備する。データの長期保存を図るため、バックアップ作業を実施する。災害に強いシステムとするため、サーバの分散化やデータ流通経路の多重化を検討する。地殻変動観測技術の伝承を目的とした研修会を実施する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

地殻変動等多項目データの全国流通・一元化・蓄積・公開を行うデータサーバーを安定的に運用し、大学・気象庁等関係機関データの充実を図った。長期間データの簡易解析の機能拡張として、ひずみ解析及びひずみストリーミング解析機能に対し、4成分ひずみ計の場合には成分を選択できる機能を付与した。学部生・大学院生を対象とした地殻変動観測技術の研修を実施した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

期間を通じて、安定的にサーバーの運用を図り、地殻変動連続観測等の多項目観測データの全国流通・一元化を通じてデータの蓄積・公開を実施した。サーバーの更新及びディスクの増設を行った。今期から、気象庁のひずみ計観測網データのリアルタイム流通が実現し、観測網の拡充が図られた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地震・火山の観測研究を支える観測データの流通が着実に実施された。地殻変動連続観測等の多項目データの全国流通・一元化・公開を行う仕組みは本システムのみである。低頻度現象である地震・火山現象の観測研究には長期的かつ多様なセンサーによるモニタリングデータが必要であり、システムを安定的に運用することで、観測研究に必要なひずみ計・傾斜計・重力計・水位計・地震・火山現象のデータ流通・蓄積・公開が行われ、災害軽減研究に必要な不可欠なデータを提供することが出来た。今後も、システムの運用を継続し、地震・火山現象に伴う長周期のシグナルを着実に観測しデータを流通公開出来る体制を維持する必要がある。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地殻変動等多項目観測データの全国流通一元化公開システムの運用と高度化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

高橋浩晃（北海道大学大学院理学研究院）、大園真子（北海道大学大学院理学研究院）

他機関との共同研究の有無：有

岡崎紀俊（北海道立総合研究機構産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所）、田村良明（国立天文台水沢V L B I 観測所）、三浦哲（東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知観測研究センター）、太田雄策（東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知観測研究センター）、名和一成（産業技術総合研究所地質調査総合センター地質情報研究部門）、露木貴裕（気象庁気象研究所）、宮岡一樹（気象庁地震火山部）、新谷昌人（東京大学地震研究所）、板寺一洋（神奈川県温泉地学研究所）、本多亮（神奈川県温泉地学研究所）、原田昌武（神奈川県温泉地学研究所）、道家涼介（神奈川県温泉地学研究所）、鷺谷威（名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター）、伊藤武男（名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター）、山崎健一（京都大学防災研究所附属地震予知研究センター）、山下裕亮（京都大学防災研究所附属地震予知研究センター）、西村卓也（京都大学防災研究所附属地震予知研究センター）、大久保慎人（高知大学自然科学系理学部門）、松島健（九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター）、中尾茂（鹿児島大学地震火山地域防災センター）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

電話：011-706-3591

e-mail : isv-web@mail.sci.hokudai.ac.jp
URL : <https://www.sci.hokudai.ac.jp/isv/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：高橋浩晃

所属：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

千島海溝沿いの巨大地震津波災害軽減に向けた総合研究

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

地震

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

イ. 津波の事前評価手法

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

イ. 津波の即時予測手法

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

(4) 関連研究分野との連携強化

(5) 国際共同研究・国際協力

(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(7) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 総合的研究との関連：

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地震調査研究推進本部は、千島海溝沿いでM8.8程度以上の超巨大地震の発生が切迫していると評価している。千島海溝沿いで超巨大地震が発生すれば、北海道を中心に津波や地震動による広域的な複合災害となる。本研究では、津波堆積物やプレート間固着状況、地震活動などの調査観測から地殻活動の現況把握に必要なデータの取得を目指すとともに、津波・地震動等の事前・即時予測手法の高度化等の防災対策を下支えする研究を実施し、超巨大地震現象の解明に基づく地震津波災害の軽減を目指した基礎的な研究を総合的に実施する。

北海道東部を中心に津波堆積物調査を継続し、千島海溝南部の古地震や古津波履歴の高度化を図る。千島海溝南部の海底地殻変動観測と連携し、北海道陸域を含む広域的な地殻変動場のデータからプレート間固着状況の推定を行う。中長期的な地殻活動の時空間変化を震源カタログや海底地震観測等から調査する。津波の事前・即時予測手法の高度化を実施する。広帯域強震動予測に向けて震源特性や地盤特性を検討するとともに、古地震による液状化履歴の特性を検討する。地殻活動の現況や研究成果を関係機関や社会と共有する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

津波堆積物調査：千島海溝南部沿岸から東北地方太平洋沿岸北部にかけて広域的な津波堆積物調査を継続する。堆積物の堆積構造や層厚などの広域比較から、イベントごとの特徴を抽出し、古津波の多様性と共通性を検討する。

地殻変動観測：千島海溝南部のプレート沈み込み形状や陸上GNSS観測点分布から、効果的にプレート間固着の検出が可能な海底地殻変動観測基準局の配置を検討する。海底地殻変動観測から得られる地殻変動データと、北海道陸域からアジア北東部にかけての広域的な地殻変動データを統合し、十勝根室沖のプレート間固着率の推定を行う。

地殻活動評価：地震カタログ等を用いて、大地震前後や中長期的な地震活動の特徴を定量的に検討する。十勝根室沖で海底地震観測等を実施し、地震活動の空間的な特徴やプレート間固着率との比較を行う。過去の地殻活動を系統的に表現する手法の検討を行う。

津波の事前・即時予測手法の高度化：S-netを用いた津波即時予測手法の高度化を継続する。地震活動や地殻変動観測から得られるプレート間固着率の情報などを用いて、複数の津波事前予測シナリオを作成する。津波避難シミュレーションに、津波事前予測から見積もられる誤差を含めた浸水予測情報を提供する。

強震動予測：千島海溝南部で発生する地震の多様な震源特性を検討する。強震動観測波形や、地盤構造探査から、伝播経路特性や地域ごとの地盤特性を明らかにし、強震動予測の高精度化・広帯域化を試みる。過去の液状化情報を収集し古地震との関係を検討する。

現況データや成果の社会との共有：関係機関等と地殻活動の情報共有を行うとともに、自治体などの防災計画立案を支援し、さらに公開シンポジウム等を通じて地域防災力の向上を目指す。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

胆振管内むかわ町で見出された津波堆積物の高密度掘削・トレンチ調査を行い、津波堆積物層厚や粒形の空間分布特性を明らかにした。また、前回津波年代のピークが明らかに1640年北海道駒ヶ岳山体崩壊津波より前であることが推定された。

根室沖の海底地殻変動基準局において船舶とウエーブライダーを用いた観測を2回実施し観測精度の向上が図られた。沖合観測点においてもプレート相対運動に相当する変位量が得られ、プレート境界浅部まで固着している可能性が引き続き示された。応力条件を拘束したプレート境界滑り欠損推定を実施し、十勝根室沖のプレート境界浅部で高い固着率が推定された。また、応力速度から400年程度の応力蓄積期間でM8.8程度の地震発生の能力を有することが推定された。

伊豆小笠原海溝からカムチャツカ海溝に至る太平洋プレート沈み込み帯で地震活動の静穏化を遡及的に調査して的中率が最大になるパラメータを推定し、現在は十勝根室色丹当沖で警報がオンとなっていることが示された。十勝沖海底地震観測データを用いた地下構造推定のため相互相関解析を行いピークの検出に成功した。プレート境界浅部に低剛性・高間隙圧を示唆する構造が見出された。

津波の非線形効果を考慮したインバージョン手法を開発し2003年十勝沖地震に適用し、波形の再現性が向上し地震モーメントやすべり量分布の改善が見られた。地震動による海底津波計の影響を回避する津波即時予測手法の検討を実施した。

十勝根室沖で発生する地震の震源特性をスペクトルインバージョンで推定する作業を解析対象地震を増やして実施したところ、スラブ内地震では応力降下量が震源深さに比して大きくなること、また、十勝沖地震に比して根室沖で応力降下量が大きいことが示唆された。北海道内の遺跡調査で見出された液状化痕跡情報をコンパイルし、釧路根室圏では過去15000年間に9回程度の噴砂・亀裂イベントが発生した可能性が示された。

北海道・三陸沖後発地震注意情報に関する社会調査を実施し、認知率やその時間変化の基礎データを取得した。日本海溝・千島海溝海溝型地震に関して、北海道の地域減災計画策定、自治体の地震津波対策等において専門的な助言を行った。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

北海道太平洋沿岸で津波堆積物調査が実施され、長期地殻変動の時空間特性や、詳細な津波浸水範囲、高精度な発生年代の検討が進んだ。千島海溝の根室沖に初めて海底地殻変動基準局が設置されて観測が実施され、陸域データを含めた解析から、プレート境界浅部まで高い固着率となっている可能性が示された。千島海溝周辺域の地震活動の時空間特性調査が行われ、長期的な静穏化を適切なパラメータで評価する予測方法の検討が行われた。また、プレート境界浅部構造が明らかにされ、力学的固着と運動学的固着の検討が進んだ。データ同化等を利用した津波の即時予測手法の開発が進められたほか、津波波源の空間特性が浸水浸水予測にもたらず不確実性の検討が行われた。十勝根室沖で発生した地震の震源特性が検討され、応力降下量の地域・深さ特性の検討が進んだ。北海道内の遺跡の液状化痕跡の全道的な網羅的調査が行われ、千島海溝の地震の可能性のあるイベントが見出された。北海道庁や自治体の地震津波被害想定への助言等や、気象台等と共同での自治体向け防災企画の実施、一般市民向けの公開シンポジウムの開催などを行った。運用が始まった北海道・三陸沖後発地震注意情報の認知度調査を実施した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

千島海溝の巨大地震の災害軽減を目指し、ハザード予測の高度化に関係する基礎的研究が総合的に実施された。津波浸水被害対策として、プレート境界浅部までの高い固着率が推定されたことは、津波波源の推定に重要なデータを提供する。津波の事前・即時予測手法の開発は、自治体の津波浸水予測や津波情報の高度化への利活用が期待される。海底地殻変動観測や津波堆積物による長期的な地殻変動データや液状化履歴・震源特性の情報は、地震発生長期評価や地震動予測に資する成果である。広域的な地震活動特性の検討は、後発地震活動評価の基礎資料となる。このように、千島海溝の巨大地震に関する新たな知見が得られてきており、ハザード予測高度化への利活用が見込まれ、災害軽減への貢献が期待される。

千島海溝沿いの巨大地震の総合研究グループは今期から開始されたものであり、調査観測対象が広域かつ多項目にわたることから、研究の継続が必要である。モニタリングを含めた調査観測データの更なる蓄積を図るとともに、得られた多様なデータや解析手法をハザード情報につなげるために必要となるスキームを、社会連携を含めて引き検討する必要がある。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

林能成・高橋浩晃・元吉忠寛,2023,北海道における北海道・三陸沖後発地震注意情報の認識状況とその地域差,社会安全学研究,14,査読無,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

今井俊輔・高橋浩晃,2023,,2023,応力条件を拘束したインバージョン法による千島海溝南部プレート間固着状況,,日本地震学会2023年秋季大会,S03-06

富田史章・木戸元之・飯沼卓史・太田雄策・日野亮太・大園真子・高橋浩晃・プラタ-マルティネ・ライムンド・野徹雄・中東和夫・中村恭之,2023,日本海溝・千島海溝沿いにおける GNSS音響海底 測地観測とその成果,日本地震学会2023年秋季大会,S03-05

飯沼卓史・木戸元之・福田達也・太田雄策・富田史章・プラタ-マルティネス ライムンド・日野亮太・高橋浩晃・堀高峰,2023,ウエーブライダーを用いたGNSS-音響測距結合方式の改定地殻変動観測(その4),地球惑星科学連合2023年大会,SSS12-P01

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

項目: 社会調査: アンケート (インターネット)

概要: 北海道・三陸沖後発地震注意情報に関する社会調査を実施した

既存データベースとの関係:

調査・観測地域: 北海道釧路市・帯広市・旭川市・札幌市・苫小牧市・室蘭市・函館市

調査・観測期間: 2023/12/-2023/12/

公開状況: 公開留保中 (公開時期・ポリシー未定)

項目: 地震: 地殻変動: GNSS音響結合方式海底地殻変動観測

概要: 根室沖のGNSS/A海底基準局3点において船舶及びウエーブライダーによる海底地殻変動観測を実施した

既存データベースとの関係:

調査・観測地域: 北海道根室沖 42.089 146.126

調査・観測期間: 2023/4/-2023/4/

公開状況: 公開留保中 (公開時期・ポリシー未定)

項目: 地震: 地殻変動: GNSS音響結合方式海底地殻変動観測

概要: 根室沖のGNSS/A海底基準局3点において船舶及びウエーブライダーによる海底地殻変動観測を実施した

既存データベースとの関係:

調査・観測地域: 北海道根室沖 42.089 146.126

調査・観測期間: 2023/10/-2023/10/

公開状況: 公開留保中 (公開時期・ポリシー未定)

項目: 地震: 地質: 津波堆積物調査 (露頭断面)

概要: 北海道厚真町においてトレンチ掘削・高密度掘削による津波堆積物調査を実施した

既存データベースとの関係:

調査・観測地域: 北海道厚真町浜厚真 42.5972 141.8638

調査・観測期間: 2023// -2023//

公開状況: 公開留保中 (公開時期・ポリシー未定)

(11) 次期計画における課題名:

千島海溝沿いの巨大地震津波災害軽減に向けた総合研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

高橋浩晃 (北海道大学大学院理学研究院), 谷岡勇市郎 (北海道大学大学院理学研究院), 西村裕一 (北海道大学大学院理学研究院), 勝俣啓 (北海道大学大学院理学研究院), 村井芳夫 (北海道大学大学院理学研究院), 大園真子 (北海道大学大学院理学研究院), 高井伸雄 (北海道大学大学院工学研究院), 橋本雄一 (北海道大学大学院文学研究院)

他機関との共同研究の有無: 有

太田雄策 (東北大学大学院理学研究科), 日野亮太 (東北大学大学院理学研究科), 木戸元之 (東北大学災害科学国際研究所), 東龍介 (東北大学大学院理学研究科), 石丸聡 (北海道立総合研究機構産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所), 大津直 (北海道立総合研究機構産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所), ロシア科学アカデミー極東支部, ロシア科学アカデミー地球物理学調

査所

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

電話：011-706-3591

e-mail：isv-web@mail.sci.hokudai.ac.jp

URL：https://www.sci.hokudai.ac.jp/isv/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：高橋浩晃

所属：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

(1) 実施機関名：

東京大学地震火山史料連携研究機構

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震火山関連史資料に基づく低頻度大規模地震火山災害の調査

(3) 関連の深い建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
 - 地震
 - 火山

(4) その他関連する建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
 - ア. 史料の収集とデータベース化
 - イ. 考古データの収集・集成と分析
- 2 地震・火山噴火の予測のための研究
 - (1) 地震発生の新たな長期予測
 - ア. 海溝型巨大地震の長期予測
 - イ. 内陸地震の長期予測
- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
 - (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
 - (3) 研究基盤の開発・整備
 - エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開
 - (4) 関連研究分野との連携強化

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本研究課題の目的は、史料データ・考古データなどを用いて、過去に発生した地震・津波や火山噴火の実態を分析し、近代以降の機器観測による観測データとの比較・検討を通じて、低頻度ではあるが大規模な地震・火山現象とそれによる災害の実態を解明することである。

平成26年度から実施されている「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」においては、近代的な観測記録が存在しない地震や火山噴火について、地震学や火山学といった理学系の分野だけでなく、歴史学や考古学といった人文学系の分野の研究者も組織的に参加して、連携した研究が実施されている。このような連携研究を主体的に実施しているのが本研究課題であり、史料や考古資料を主軸に据えた研究を基盤として、地震学・火山学や関連諸分野との連携強化を指向した、取りまとめ課題としての役割も有している。

本研究課題では、別の研究課題においてデータ化が進行中の史料データに基づいて、近代以前に発生した地震・津波や火山噴火の現象とその災害の様相を明らかにしていく。史料のデータ化及び史料記述の分析に際しては、東京大学史料編纂所と連携して実施していき、既刊地震史料集に所収されている歴史的に信頼できる史料に加え、新たに調査・収集された史料も活用して、低頻度で大規模な地震・火山現象とそれによる災害の実態を検討する。また、別の研究課題においてデータベース化が進行中の考古データなどを援用して、それらの実態解明を深化させていく。この際に重要になってくるのが史料データと考古データとの統合である。

史料データは被害発生の時期は明確であるが場所は必ずしも明確ではなく、考古データは被害発生の時期に幅があるものの場所は明確である。「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」におけるこれまでの研究では、このような特徴を持った双方のデータについて、被害発生の時期と場所とを結合して連続したデータを作成し、時代・時間情報と位置情報の両方から検索可能なデータベースの構築に向けて、史料・考古の統合データベースの試作版を作成してきた。そこで本研究課題においても、既刊地震史料集を中心とした文献史料に基づく史料データベースと、考古資料に基づく災害痕跡データベースとの統合データベースのシステム構築を目指していく。具体的には、史料記述にある被害発生場所を位置情報（緯度・経度）に変換し、史料データと考古データとの統合分析が可能なデータベース及び地理情報システムを構築する。これによって、位置情報という共通の要素を導入部として、双方のデータベースに収められた様々なデータを統合的に利活用できるようにする。

以上のように、本研究課題では今後の5か年の間に、上記の史料・考古データの統合データベースを構築・改良しつつ、機器観測以前の長期間にわたる地震火山活動の検討に資するための基礎データを作成していき、近代以前の日本列島における低頻度で大規模な地震・津波や火山現象とそれらによる災害の実態を明らかにしていく。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

[平成31・32年度]

別の研究課題において作成された史料データや考古データなどを用いて、近代以前に発生した地震・津波や火山噴火の現象とその災害について、統合的に分析可能なデータベース及び地理情報システムを構築する。また、史料データ・考古データなどから、近代以前の日本列島における地震・津波や火山噴火の現象とその災害の実態を解明する。

[平成33・34年度]

別の研究課題で作成された史料データや考古データなどを用いて、統合データベース及び地理情報システムの構築と改良を継続して実施する。また、これらのデータに基づいて、近代以前の日本列島で発生した地震・津波や火山噴火の現象とその災害の実態を解明し、特に、南海トラフ沿いで発生した巨大地震・津波や西南日本の内陸部で発生した大地震を対象とする。

[平成35年度]

別の研究課題で作成された史料・考古データなどを活用して、統合データベース及び地理情報システムの構築と改良を実施し、公開に向けた整備を行う。また、これらのデータから、近代以前の日本列島で発生した地震・津波や火山噴火の現象とその災害の実態を解明する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

地震史料集テキストデータベース

書名欄に書かれている地名をデータ化を継続した。地震史料集テキストデータベースに収録された史料について、日付などの登録内容の修正を随時おこなった。

地震史料に記載されている歴史地名を現代の位置情報に変換するための地名辞書（Gazetteer）データについての検討を継続した。とくに『日本歴史地名大系』地名項目データセットの活用手法を検討した。

既刊地震史料集のうち、『新収日本地震史料』の編纂時の資料（史料写真）のデジタル化を開始した。

享保十四年の能登半島の地震

令和6年能登半島地震の震源域をふくむ能登半島周辺では歴史時代にもたびたび地震が発生している。

1729年8月1日（享保十四年七月七日）に発生したM6.6～7.0と推定される地震については、家屋の倒壊、土砂くずれなどの被害のようすや、その後の地震活動も記録されている。複数の史料に記載された被害と有感地震数について再検討し、被害についてはWebマップを作成した。

・ 計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要
「地震史料集テキストデータベース」等の公開

UTH_01との連携により、地震史料集テキストデータベースを構築し、公開した。データベースの構築にあたっては、既刊の地震史料集のデータを高精度OCR等によりテキスト化した。本課題以前に実施されていた各種プロジェクトによるテキスト化の成果も活用した。公開用システムについては、書名や史料本文にあらわれる語句のキーワード検索、年月日による索引・検索、歴史地震カタログによる索引、一部の史料については関連する地名からの索引・検索を実装した。書名に付記されている地名を抽出し、地名辞書データを利用して緯度経度を付与し、地図上に表示できるようにした。『増訂大日本地震史料』『日本地震史料』『新収日本地震史料』については、版面画像も表示している。

時間情報および空間情報をもとに、考古分野データベース（「歴史災害痕跡データベース」）や地形・地質分野の各種データベースと連携する方法について検討した。

「わが国の歴史地震の震度分布・等震度線図（改訂版）」[宇佐美（2010）]をもとにIDP（震度データ点）データベースを構築し公開した。

地震火山史料のGISデータ化と分析、およびオープンデータとしての公開を実施した。

個別の歴史地震に関する調査

史料に基づく前近代の奈良における被害地震、日記史料と観測記録に基づく江戸・東京における有感地震、1729年能登半島の地震の被害や有感地震発生数、1854年安政東海地震の発震時、1854年安政東海地震の甲府盆地東部の家屋被害と震度分布、1925年北但馬地震の人的被害の要因、などの調査を実施した。また、既刊の地震史料集に収録されていない地震・火山関連史料を収集・分析した。

研究成果の普及・発信

地震史料シンポジウムII「災害史料研究が拓く歴史学の新たな方法」を開催した。東京大学教養学部前期課程において点学術フロンティア講義「歴史資料と地震・火山噴火」を開講した。

・ 「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

1. (2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明について、南海トラフ沿いの巨大地震・津波や西南日本内陸部など、過去に繰り返し大規模な地震が発生している地域について、海外所在の史料も含め新資料の発掘に努め、低頻度大規模地震の解明に貢献した。地震史料集テキストデータベースの構築、公開は、「史料・考古データ、地質データ等と近代的な観測データの対比・統合」の基盤のひとつとなるものである。また、1. (1) 地震・火山現象に関する史料、考古データ、地質データ等の収集と整理について、史料を地図表示できるようにして利便性の向上をはかり、既刊の地震史料集に収録されていない地震・火山関連史料を収集することにより「ア. 史料の収集とデータベース化」に貢献した。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・ 論文・報告書等

・ 学会・シンポジウム等での発表

加納靖之・大邑潤三,2023,地震史料集テキストデータベース中の地理情報,日本地球惑星科学連合2023年大会,MIS22-P05

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：地震：歴史史料収集

概要：享保十四年七月七日能登の地震について、『菅家見聞集』（宇佐美 [2002] 『日本の歴史地震史料 拾遺 二』 p.96-）に記録されている内容の内容をもとに地図アプリを作成した

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：石川県 37.250980 136.956581

調査・観測期間：

公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web）

<https://storymaps.arcgis.com/stories/7f486ab60acf40be8cb910ffe373839c>

(11) 次期計画における課題名：

歴史地震・噴火に関する分野横断的なデータベースとコミュニティカタログの構築

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

大邑潤三（東京大学地震火山史料連携研究機構）, 佐竹健治（東京大学地震火山史料連携研究機構）

他機関との共同研究の有無：有

杉森玲子（東京大学史料編纂所）, 及川 亘（東京大学史料編纂所）, 荒木裕行（東京大学史料編纂所）,

林 晃弘（東京大学史料編纂所）, 山田太造（東京大学史料編纂所）, 鶴岡 弘（東京大学地震研究所）,

加納靖之（東京大学地震研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：大邑潤三

所属：東京大学地震火山史料連携研究機構

(1) 実施機関名：

東京大学地震火山史料連携研究機構

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震関連史料に基づく近代以前の地震活動の調査

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ア. 史料の収集とデータベース化

イ. 考古データの収集・集成と分析

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

イ. 内陸地震の長期予測

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(3) 研究基盤の開発・整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) 関連研究分野との連携強化

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本研究課題の目的は、日記史料に記されている数百年間に及ぶ有感地震の記録を活用して、近代以前の日本列島において巨大地震・大地震の前後に発生した中・小規模の地震や地震活動の実態などを解明することである。

本研究課題では、別件の研究課題において実施される、近代以前に発生した低頻度の巨大地震・大地震や火山噴火の現象とその災害の実態を解明する研究とは異なり、規模は小さいが高頻度で発生する中・小規模の地震や地震活動などについて、近代以前における有感地震の記録の収集と分析に基づいて実態の解明を試みる。本研究課題は、東京大学のデジタルアーカイブズ構築事業において、平成29年度から東京大学地震火山史料連携研究機構が実施している研究「歴史地震火山活動データベース構築・分析」を基盤としており、史料に基づく研究成果を地震学において活用していくための研究

として位置付けられる。本研究課題を実施する上で基盤となる日記史料に基づく有感地震のデータベース構築については、上記の研究プロジェクトにおいて先行して実施されている。そのため本研究課題では、構築・公開中の日記史料有感地震データベースに基づいて、機器観測以前の長期間にわたる地震活動の時空間分布を明らかにし、近代以前の地震活動のデータと近代的な機器観測によるデータとの比較・検討を実施していく。そして、近代以前における中・小規模の地震の発生状況や地震活動などについて解明することで、長期的な地震活動の全体像把握に貢献することを目指す。特に、今後の5か年の間に、19世紀中頃に発生した南海トラフ沿いでの巨大地震に関して、その前後に発生した中・小規模の地震を含む地震活動の実態を解明したいと考えている。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

[平成31・32年度]

現存する膨大な史料の中から、十数年分の有感地震が記されている日記史料を調査・収集し、日記史料有感地震データベースを構築する。近代以前における有感地震の時空間分布と、近代的な機器観測による地震活動との比較・検討から、近代以前における中・小規模の地震の実態を解明し、巨大地震や大地震との関連性の調査・研究に資するデータセットを作成する。

[平成33・34年度]

日記史料の調査・収集に基づいて、日記史料有感地震データベースの構築と改良を継続して実施する。近代以前における有感地震の時空間分布と、近代的な機器観測による地震活動との比較・検討を行い、近代以前における中・小規模の地震の実態を解明し、巨大地震や大地震との関連性の調査・研究に資するデータセットの作成と改良を実施する。

近代以前の有感地震の時空間分布と、近代的な機器観測による地震活動との比較・検討に基づいて、前近代に南海トラフ沿いで発生した巨大地震や西南日本で発生した大地震と、中・小規模の地震との関係について実態の解明を試みる。

[平成35年度]

日記史料有感地震データベースの構築と改良を継続して実施し、データベースに基づく有感地震の時空間分布と、近代的な機器観測による地震活動との比較・検討から、近代以前における中・小規模地震の実態の解明を試みる。

近代以前の有感地震の時空間分布と、近代的な機器観測による地震活動を比較・検討するためのデータセットを用いて、19世紀中頃に西南日本で発生した中・小規模の地震のカタログ化を試みる。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

● 関東地震の履歴と長期評価

1923年大正関東地震の前の関東地震として、1703年元禄関東地震が古くから知られており、房総半島南部での隆起量や東岸での津波高さが大正関東地震よりも大きかったことから、それぞれ「大正型」「元禄型」関東地震とされてきた。これらに加え、古代～中世の史料に基づき、過去の関東地震の候補について検討した。818年（弘仁九年）の関東諸国の地震ならびに1257年（正嘉元年）の鎌倉の地震については、被害分布や余震の数などから、M8級の関東地震ではなく、小規模・局地的な地震であるとされている。一方、878年（元慶二年）、1293年（正応六年、永仁元年）、1433年（永享五年）、1495年（明応七年）の地震が関東地震の候補であるとされている。そこで、これらの4地震及び1703年（元禄地震）、1923年（大正地震）から、関東地震とみなす地震の組み合わせを変えて、今後30年間の発生確率及びその時間変化を計算した。

正応、明応、元禄、大正の4地震の平均発生間隔は 210 ± 7 年となり、BPT分布のばらつきを示すパラメーターである α が最も小さい（最も規則的である）。この場合、今後30年間の発生確率は、前回地震から160年（西暦2083年頃）まではほとんど0%あるが、その後急に増加し、西暦2127年（前回地震から204年）頃にはほぼ100%となる。一方で、すべての6地震を考慮した場合、発生間隔は $209 \text{年} \pm 117 \text{年}$ とばらつきが大きく、最短は62年（1433～1495年）である。そのため今後30年間の発生確率は地震後すぐに増加し、現時点（地震発生後100年）ですでに19%と、ポアソン過程（13%）よりも高い値を示す。他の場合（3地震、組み合わせを変えた4地震、5地震）はこれらの中間的な値となる。

● 日記史料や年代記の分析

日記史料や年代記に記録されている地震や火山噴火について、記録の収集と分析を進めた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

●日記史料および年代記の調査および分析

日本全国の日記史料の調査により、歴史時代の中小の地震をふくむ地震の発生状況を調査した。既刊の地震史料集のデータ、本課題および関連するプロジェクトによる調査から得られた史料の記述を分析し、巨大地震前後の地震活動の変化について検討した。主な研究対象は以下である：江戸期京都における有感地震、1707年の宝永地震前後の京都における有感地震、1854年東海・南海地震前後の西日本の有感地震、18世紀の宮城県南部の大地震や有感地震、19世紀の南九州を中心とした大地震や有感地震。

年代記については、南九州を中心に各地に残るものを中心に複数の史料の比較検討を行った。

日記史料や年代記から得られた地震の有感地点の分布を、近年観測された地震の震度分布や距離減衰式による震度予測と比較することにより、震源の位置や規模を推定した。また、過去の地震の発生頻度を、過去100年の地震カタログと比較し、過去の地震活動度を検討した。また、日記史料および年代記の調査にあたっては、地震だけでなく、日記史料にあらわれる火山噴火（阿蘇山や桜島の噴火）や天文異常についても分析した。

●巨大地震の履歴

古代～中世の史料に基づき、過去の関東地震の候補について検討し、関東地震とみなす地震の組み合わせを変えて、今後30年間の発生確率及びその時間変化を計算した。

●日記史料有感地震データベース

日記史料有感地震データベースへのデータの追加および機能改善を実施した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

歴史上のどの地震が関東地震であるかの特定によって、今後の発生確率は大きく変化することが明らかになった。史料の収集とデータベース化をさらに進め、史料の吟味・最近の地震との比較をすることにより、過去の関東地震の履歴さらには将来の長期予測の確実性を高めることができる。

5年間を通じて、巨大地震の発生履歴や、長期間にわたる地震活動の分析を行い、2（1）ア．海溝型巨大地震の長期予測に貢献した。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Satake, K.,2022,Recurrence and Long-Term Evaluation of Kanto Earthquakes,Bull. Seism.Soc. Am.,113,1826-1841,doi:10.1785/0120230072,査読有,謝辞有

Albini, P. and Satake, K.,2023,Voices of Foreign Residents in Yokohama and Tokyo at the Time of the 1923 Kanto Earthquake,J. Disaster Res.,18(6),598-610,doi:10.20965/jdr.2023.p0598,査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

佐竹健治・石橋克彦,2023,歴史上の M8 級関東地震の発生履歴と将来の発生確率,第40回歴史地震研究会,0-21

佐竹健治・石橋克彦,2023,歴史上のM8級関東地震の組み合わせによる将来の発生確率,日本地震学会2023 年度秋季大会,S23-02

Satake, K.,2023,Learning Past Disasters and Forecasting Future Earthquakes on the 100th Anniversary of the 1923 Kanto Earthquake,Seismological Society of America 2023 annual meeting

Satake, K.,2023,Recurrence of Kanto earthquakes before 1923 and probability of future occurrence,IUGG General Assembly,IUGG23-0126

Satake, K.,2023,The 1923 and Previous Kanto Earthquakes and Future Probability of Occurrence,AOGS 2023 Annual Meeting,SE03-A001

Satake, K. Ishibashi, K.,2023,Identification of Past Kanto Earthquakes from Ground-shaking and Tsunami Damage Descriptions,AGU 2023 Fall meeting,S42C-04

Urushibara, S., Y. Kano, and J. Ohmura,2023,Seismic Activity in Southern Miyagi Prefecture in

the 18th Century Revealed from "Takano Family Record" ,AOGS 2023 Annual Meeting,SE03-A012

Urushibara, S., Y. Kano, and J. Ohmura,2023,Seismic activity in southern Miyagi Prefecture in the 18th century revealed from "Takano Family Record" ,IUGG General Assembly,IUGG23-4735

漆原惇・加納靖之・大邑 潤三,2023,明和四年(1767年)に発生した2つの被害地震の震源と規模の再検討,日本地球惑星科学連合2023年大会,MIS22-01

水野嶺,2023,慶長九年地震津波に関する新出史料の紹介,第11回歴史地震史料研究会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地震火山関連史料を活用した低頻度大規模地震火山災害の調査

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

佐竹健治（東京大学地震火山史料連携研究機構）

他機関との共同研究の有無：有

杉森玲子（東京大学史料編纂所）,及川 亘（東京大学史料編纂所）,荒木裕行（東京大学史料編纂所）,林晃 弘（東京大学史料編纂所）,山田太造（東京大学史料編纂所）,加納靖之（東京大学地震研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：佐竹健治

所属：東京大学地震火山史料連携研究機構

(1) 実施機関名：

北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

北海道内の活火山の地球物理学的・地球化学的モニタリング

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

北海道における火山噴火災害を軽減するため、特に活動的な火山を対象として継続的な地球物理学的・地球化学的モニタリングを行い、火山活動の現況を把握し、噴火の先行現象やそれに続く火山現象を捉える。また、熱水系の発達している火山（倶多楽など）においては、熱水系の構造や熱水の化学成分の変化などを検討し、観測されている地殻変動や地震活動との関係を明らかにする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

雌阿寒岳、十勝岳、樽前山、倶多楽、有珠山及び北海道駒ヶ岳において、噴火の先行現象などの火山活動の変化を捉えるために、地殻変動や、地温、温泉水・噴気の化学成分・同位体比等の各種モニタリングを継続的に行う。

倶多楽や十勝岳など熱水系の発達している火山については、これまで蓄積したモニタリングデータの再検討を行うとともに、熱水変質調査や電磁探査など多項目の調査・観測を必要に応じて行い、火山体の内部構造や熱水系の構造などを検討する。それによって得られた知見を基に、各火山における適切な観測体制の構築を随時行う。

得られたモニタリングデータなどは気象庁や大学と共有するとともに、地元自治体等へ情報を提供する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

当初の計画通り、雌阿寒岳、十勝岳、樽前山、倶多楽、有珠山及び北海道駒ヶ岳において、地球化学的・地球物理学的モニタリングを継続して行い、火山活動の変化を捉えるためのデータの蓄積を行った。いずれの火山においても、明らかな活動の活発化を示唆する変化は認められなかった。また、雌阿寒岳での長期にわたる温泉・噴気観測の結果をまとめ、熱水系の概念モデルを構築した（Takahashi et al., 2023）。得られたデータについては、気象庁や大学、地元自治体と随時情報を共有している。

<雌阿寒岳>

噴気・温泉水の地球化学的観測、GNSS連続観測及び地下水位連続観測を行った。雌阿寒温泉では2017年頃から温度やCl濃度の上昇が続いている。湯の滝では2018～2022年に温泉水の温度の上昇が認められたが、2023年は低下に転じた。温泉水のClやSO₄濃度は2018年以降低下している。中マチネシリ火口内の熱水活動はここ数年活発な状態で、2020年以降はHCl成分がやや高い傾向がある。また、2018年以降はそれ以前と比較して噴気凝縮水の酸素・水素同位体比が重い値を示し、2023年もその傾向が続いた。長期にわたる（1986年～）温泉・噴気観測の結果をまとめ、雌阿寒岳における熱水系の概念モデルを構築した（Takahashi et al., 2023）。それに基づく、雌阿寒温泉は中マチネシリの活動を、湯の滝やオンネトーはポンマチネシリの活動を反映した変化を示すことが明らかとなった。

<十勝岳>

噴気・温泉水の地球化学的観測、火口域での地温連続観測、GNSS連続観測及び地下水位連続観測を行った。温泉水の化学成分や温度はここ数年ほぼ横ばいで推移しており、2023年も大きな変化は認められなかった。大正火口の噴気の温度（270℃）は2019年頃からわずかに低下する傾向がある。また、凝縮水の酸素・水素同位体比やSO₂濃度は2013年頃から徐々に低下する一方、H₂O濃度は徐々に増加する傾向が続いている。62-1火口域の地温は2014年末から上昇傾向に転じた後、温度が低下する時期を何回か挟んではいるものの、70～80℃で推移している。

<樽前山>

噴気・温泉水の地球化学的観測を行った。A火口とB噴気孔群の噴気温度はそれぞれ約320℃および約200℃で、2012年頃から徐々に低下する傾向が続いている。A火口とB噴気孔群の噴気では2008年から2012年まで硫黄化合物の濃度低下が認められ、それ以降は横ばいで推移していたが、2022年以降はやや上昇した。また、どちらの噴気域でも凝縮水の酸素・水素同位体比は2012年以降、徐々に重くなる傾向が続いているが、2019年頃からはこの傾向が鈍化している。山麓の温泉水の化学成分濃度は、1998年の観測開始以降低下していたが、2011年頃から横ばいとなり、2023年もその傾向が続いた。

<倶多楽>

大正地獄や大湯沼、奥の湯などのほか、地獄谷の主要泉源などでも温泉観測を行った。日和山では噴気凝縮水の酸素・水素同位体比の観測を行った。いずれの観測でも、火山活動に関係する顕著な変化は認められなかった。

<有珠山>

噴気観測と地下水位連続観測を行った。山頂のI火口の噴気温度（約390℃）と噴気凝縮水の酸素・水素同位体比には大きな変化は認められなかった。また、2022年と同様に2023年も火口域の広い範囲で噴気観測を行った（銀沼火口、小有珠、外輪山）。I火口以外の噴気の温度はいずれも100℃程度と低温だったが、銀沼火口や小有珠の噴気はI火口よりもわずかに重い酸素・水素同位体比を示した。一方、外輪山の噴気は軽い同位体比を示した。山麓の地下水位は洞爺湖の水位と連動して変化しており、火山活動と関連すると考えられる変化はなかった。

<北海道駒ヶ岳>

温泉水の地球化学的観測と火口域での噴気温度観測、山麓域での地下水位連続観測を行った。山麓の温泉水の温度・化学成分や、噴気温度に大きな変化はなかった。山麓の地下水位に火山活動に関連した変化は認められなかった。

<その他の火山>

アトサヌプリで噴気観測を、旭岳で温泉観測を、恵山で噴気・温泉観測を行った。これらの火山において、噴気凝縮水の酸素・水素同位体比や、温泉水の温度や化学成分に大きな変化は認められなかった。

・ 計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

雌阿寒岳、十勝岳、樽前山、倶多楽、有珠山及び北海道駒ヶ岳において、地球化学的・地球物理学的モニタリングを継続して行い、火山活動の変化を捉えるためのデータの蓄積を行った。いずれの火山においても、計画期間中に明らかな活動の活発化を示唆する変化は認められなかった。得られたデータについては、気象庁や大学、地元自治体と随時情報を共有し、各火山の監視や防災対策に活用された。

北海道駒ヶ岳や倶多楽（登別地域）については、温泉・噴気観測の結果に加えて、地質学的検討も行い、熱水系のモデルを構築した（Takahashi, 2022；高橋ほか，2022）。また、十勝岳や雌阿寒岳での長期間にわたる温泉・噴気観測の結果をまとめ、温泉や噴気の変化と火山活動との関係を検討した（Takahashi et al., 2019; Takahashi et al., 2023）。これらの成果は、今後のより効果的な火山観測体制の構築に活用する。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本研究での観測で得られた結果は随時気象庁や大学などと情報共有しており、他機関の観測結果と合わせての総合的な火山活動把握に活用されている。また、北海道や地元自治体への情報提供や、地元住民向けの講演会などを行い、火山災害軽減のために活用されている。今後も他機関と連携して継続的に観測を行い、火山活動の変化を捉えるためのデータの蓄積を行っていく。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Takahashi, R., T. Ogino, K. Ohmori and Y. Murayama, 2023, Chemical and thermal changes in hot spring waters and fumarolic gases related to volcanic unrest at Meakandake volcano, Japan: Results of long-term geochemical monitoring from 1986 to 2022, J. Volcanol. Geotherm. Res., 443, doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107934, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

高橋 良, 2023, 活火山内部の熱水変質帯の物質科学的検討, 日本火山学会2023年度秋季大会, A3-10

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：火山：地球化学：噴気ガス・土壌ガス

概要：噴気を採取し、化学成分や同位体比を測定した。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：北海道雌阿寒岳、アトサヌプリ、十勝岳、樽前山、日和山、有珠山、恵山

調査・観測期間：

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地球化学：採水

概要：温泉水を採取し、化学成分や同位体比を測定した。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：北海道雌阿寒岳、十勝岳、旭岳、樽前山、倶多楽、北海道駒ヶ岳、恵山

調査・観測期間：

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

(11) 次期計画における課題名：

北海道内の活動的火山の観測

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

エネルギー・環境・地質研究所地域地質部地質防災グループ

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：北海道立総合研究機構エネルギー・環境・地質研究所

電話：011-747-2454

e-mail：takahashi-ryo@hro.or.jp

URL：http://www.hro.or.jp/eeg.html

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：高橋良

所属：地域地質部 地質防災グループ

(1) 実施機関名：

北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

津波による最大リスク評価手法の開発と防災対策の実証的展開

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
- ウ. 大地震による災害リスク評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

- (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

巨大地震津波の想定において、地震の影響を考慮した避難経路の使用可能性や、積雪寒冷・夜間などの悪条件下での避難速度を明らかにするとともに、屋外での低温環境が避難者に及ぼす影響などを総合的に評価し、津波災害による最大リスクを評価する手法を開発する。更に、地域社会における人口構成、市街地の再編や海岸保全施設等の整備などの経年変化を考慮し、長期的に変動してゆく防災対策の効果を評価する。また本研究では、想定される最大リスクを軽減するための複数の防災対策案について、モデル地域の住民や自治体と共に対策コストや効果、利便性、地域産業への影響などの条件から定量的に評価して優先順位を決定し、津波防災地域づくり計画や津波避難計画に反映させる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本研究課題は北海道立総合研究機構の重点研究として実施しているもので、平成29年度に開始し今年度は最終年度である。これまでに3町において避難経路・避難所の発災時における使用可能性の評価データ、および冬季避難訓練に基づく避難速度の実測データなどを取得している。平成31年度 津波災害に関わるハード・ソフト対策による被害軽減効果を評価し、モデル地域の住民や自治体と共にコスト、利便性、地域産業への影響などの条件を踏まえて定量的に再評価して対策の優先順位を決定し、津波防災地域づくり計画や津波避難計画へ反映する。平成32年度以降は研究計画未定

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

本研究課題は北海道立総合研究機構の重点研究として取り組んでいるもので、主たる研究期間は令和元年で終了している。今年度はこれまでの成果を拡充・適用した「北海道日本海沿岸・オホーツク沿岸の地震津波被害想定」及び「都市部における津波避難手段の多様化による対策効果の評価に関する研究」を実施した。

北海道日本海沿岸・オホーツク沿岸の地震津波被害想定では、北海道庁の地震防災対策における減災目標策定に関するワーキンググループと連携し、日本海沿岸とオホーツク沿岸での地震における津

波及び地震動による北海道の地域特性を反映したハザードの評価及び震被害想定を行った。積雪寒冷地の地域特性に配慮し、冬季条件において避難開始時間の遅れ、避難速度の低下、低体温症のリスクを考慮した被害想定（図1）とした。

都市部における津波避難手段の多様化による対策効果の評価に関する研究では、道東の町で避難訓練とアンケート調査を実施した結果を基に、自動車避難シミュレーションの条件（図2）を設定したモデルを構築した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

地震・津波発生時の避難における積雪寒冷地の地域特性が有する課題について、訓練を通じた実践を通じて得た知見を基に、冬季の避難経路の利用可能性、避難行動、低体温症へのリスク等を考慮した被害想定を北海道庁の関係部署と連携して行った。想定をもとに各種の防災対策事業の効果を検証し、減災効果を評価することにより、減災対策の推進につながる成果を得た。

各年次において、総合的研究「千島海溝贈位の巨大地震」研究集会で地域防災力強化の向上に資する成果を発表・情報共有した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

強振動予測のため北海道の地盤モデルを構築した。地震時の液化化・斜面崩壊にともなうリスクを住民避難シナリオへ組み込んだ自動車避難シミュレーションを実施し、避難時の課題を把握した。津波避難のリスク評価結果を避難行動に反映するために、訓練の実践を通じて課題を把握し、防災教育、訓練方法を提案した。

積雪寒冷地の特性と住民の避難意識・行動の地域性を考慮した北海道の被害想定算定の利用された。今後の対策の選定・推進に活用されることで、災害の軽減に対して大きな貢献が期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

戸松 誠，竹内慎一，川村 壮，今井崇嗣，小野塚仁海,2023,日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に係る被害想定及び防災対策効果に関する研究,地方独立行政法人北海道立総合研究機構 建築研究本部 北方建築総合研究所調査研究報告,434,査読無,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地震・津波災害による地域産業への影響評価手法の開発

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

エネルギー・環境・地質研究所地域地質部地質防災グループ,北方建築総合研究所地域研究部環境防災グループ,林業試験場森林環境部環境グループ

他機関との共同研究の有無：有

田中規夫（埼玉大学大学院・理工学研究科環境科学・社会基盤部門）,橋本雄一（北海道大学大学院・文学研究科人間システム科学専攻）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：北海道立総合研究機構エネルギー・環境・地質研究所

電話：011-747-2447

e-mail：nishina-kenji@hro.or.jp

URL：http://www.hro.or.jp/eeg.html

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：仁科健二
 所属：地質防災グループ

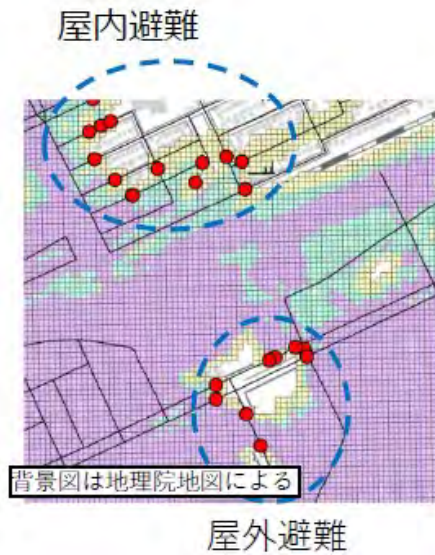


図1 被害想定算出のための低体温症を考慮する際の条件の例
 避難経路が浸水によって遮断される場合に、避難先となりうる建物内に移動できるか否かによって、低体温症リスクの屋外避難者を算出した。

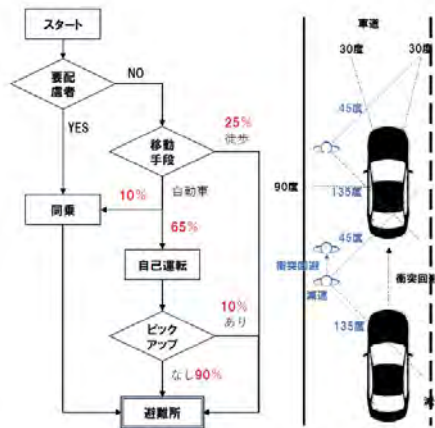


図2 自動車避難シミュレーションモデル
 アンケート調査により避難の際に選択する移動手段と立寄り箇所の地域特性を把握し、自動車避難シミュレーションモデルにパラメーターとして導入した。

(1) 実施機関名：

弘前大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

東北日本弧・千島弧会合部とその周辺における地震発生場の解明

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
イ. 内陸地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
ウ. 地質データ等の収集・集成と分析
(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震
エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
ア. 強震動の事前評価手法

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

千島海溝沿いの巨大地震は地震本部によって高い切迫性が指摘されていて、災害科学的にも重要である。本課題は、東北日本弧・千島弧における地震発生を支配する場の解明を目的に、島弧会合部とその周辺におけるプレート構造、震源分布、応力場、流体分布の推定を、主として陸上の地震観測データを用い、波動伝播シミュレーションを活用した手法開発も含めて行う。目標は、島弧会合部における応力場の把握、及び地殻流体と内陸地震発生との関係の解明である。また、日本海沿岸では太平洋側に比べて砂丘列が発達するため、津波は主に河川遡上して氾濫、または河口部から内陸への氾濫となることが多い。これらの津波堆積物を認定するための新たな手法の開発を試みる。さらに、地震災害誘因の事前評価手法の高度化に資することを目的に、歴史地震発生域を含む領域における堆積層構造の推定を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1. 島弧会合部とその周辺における地震発生場の解明

S-net観測網や、3次元波動伝播シミュレーション技術を活用して、青森県東方沖から千島海溝沿いでの震源とメカニズム解の決定精度を向上させるとともに、地震波形を説明できるプレート構造の推

定を行う〔2019～2020年度〕。これらにより、東北地方北部から日高山脈にかけての海域を含んだ領域での地震発生を規定する応力場について基本的理解を得るとともに、時間発展の枠組みの中での現状認識を行う〔2020～2023〕。また、誘発地震発生域など内陸地震活動が活発な領域では、震源のマイグレーションの解析、S波偏向異方性の時間変化の高精度推定、地殻浅部低周波地震活動の解明、深部低周波地震の波形モデリングを通して、流体と内陸地震発生の関係をこれまで以上に明らかにする〔2019～2021〕。

2. 津波堆積物等の地質学的調査

島弧会合部にあたる北東北の日本海沿岸や下北半島などにおいて津波の履歴や浸水範囲の解析を行い、津波の史料が乏しい江戸中期以前の津波波源の推定に必要な基礎資料を得る。具体的には、地質調査・試料分析・年代測定などを通じて、日本海側の津波堆積物を認定するための新たな調査手法を構築する〔2019～2023〕。2019～2021年度は青森県・秋田県・山形県の日本海沿岸を、2022～2023年度は下北半島の津波堆積物の調査を実施する。

3. 堆積層構造調査

歴史地震発生域の津軽平野南部などにおいて、地震波干渉法による構造推定と波動伝播シミュレーションによる検証を行う〔2019～2021〕。また、地震動と微動探査を用いた表層地盤構造推定を行って干渉法による構造と比較検討し、強震動評価の高度化に資する〔2019～2023〕。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

日本海で発生する地震の周波数特性

火山性低周波地震の検知に用いられたFrequency Index (FI値)を改良することで、日本海東縁で発生する地震の周波数特性の空間分布を調査した。解析対象の地震は日本海東縁で発生した2004年4月から2022年12月までとし、観測点は震央距離から200 km以内で日本海側のものを用いた。FI値は高周波帯と低周波帯の振幅スペクトルの比の対数で定義される量である。ただし、本研究では既往研究と比較して多くの地震と観測点を使用したため、FI値の距離依存性と規模依存性がより強く見られた。そこで、これらの依存性を改善するため補正FI値を新たに導入した。補正FI値は補正前のFI値と、一様均質構造における幾何減衰・内部減衰と円形クラックモデルから期待される震源スペクトル形状から理論的に計算した理論FI値の差として求めた。ここで、平均Q値、平均S波速度、応力降下量の3種類のパラメータを仮定する必要があるが、観測FI値をもっともよく説明できるパラメータの組み合わせを選択した。ある震源に対して条件を満たす観測点で計算された補正FI値を平均することで、その地震の平均補正FIとし、その空間分布を得た。結果、補正FI値は地域によって明瞭な違いが見られた。特に北海道沖、男鹿半島周辺、新潟沖、能登半島周辺の4地域で補正FI値が低く、そのマグニチュードから期待されるよりも低周波の地震波が放射されていることが示唆された。また、既往研究ならびに気象庁のカタログで検出された内陸の低周波地震の分布と本研究の結果を比較したところ、4つの地域全てで周辺の内陸でも低周波地震が存在していた。しかしながら、内陸と海域では発生する深さが異なり、男鹿半島周辺以外の3地域は海域と内陸の低周波地震の発生場所が異なるため、空間的に連続して低周波地震が発生していない。一方、男鹿半島周辺は内陸と海域の低周波地震は同じ場所で発生している。

背弧側からみた地震波エンベロープ拡大

近地地震の高周波地震波の立ち上がりは、場所によって明瞭ではなく、S波最大振幅がS波着信時よりも遅れてやってくることもある。この現象は地震波散乱に伴うエンベロープ拡大現象として理解されており、これまで関東から東北地方太平洋側で発生する海溝型の地震を主に用いた検討がなされ、特に火山フロント近傍の短波長不均質構造との関連が指摘されている。本研究課題では東北地方日本海沖で発生する地震波形記録を用いた解析を実施した。周波数2-32 Hzのオクターブバンド幅の4周波数帯において、S波部分の平均2乗エンベロープ波形の最大値を与える時刻と、JMA2001モデルによる理論S波走時との差をピーク遅延時間として測定し、震源-観測点間の波線が通過するブロックにその値を割り当てた。その結果、ピーク遅延時間には明瞭な地域性が存在し、各ブロックでの最小値ならびに第一四分位値の空間分布から、これまで太平洋側の地震の記録から確かめられていたように、東北地方の火山フロントを構成する第四紀火山を通過する経路で顕著なエンベロープ拡大が発生していることが確認された。

岩木山周辺における長期間構造時間変化推定の試み

これまでに蓄積された基盤的高感度地震観測網の記録を用い、統一的な方法により岩木山およびその周辺で発生する内陸下の低周波地震の発生域周辺地域において、地震波干渉法に基づいて13年間にわたる長期の地震波速度構造の時間変化の調査を試み、地震活動ならびに近傍の電子基準点間の基線長距離を比較した。得られた観測点間相互相関は長期間スケールでは安定しており、本対象地域では2011年東北地方太平洋沖地震直後を含めて全観測点ペアで共通するような大規模な構造時間変化は発生していないことが確認された。一方、より短時間のスケールでは、推定された相互相関関数の時間変化が明瞭な年周変動を示す。これは脈動源の季節変動に伴うものと考えられ、長期間かつ安定的に地殻構造のモニタリングを行うためには、信号処理等によって脈動源の非等方性とその経時変動を低減させる工夫が重要であることが示唆された。

地震波速度変化の地球潮汐歪み応答の推定

前年度に行った地震波速度変化の地球潮汐歪み応答に関する研究の成果が、国際誌に掲載された (Takano and Nishida, 2023)。この研究では、日本全域に展開されているHi-net観測点を用いて、地震波速度変化の潮汐応答の空間分布を推定した。状態空間モデルに基づきカルマンフィルタと最尤法を組み合わせた新手法により、地震波速度変化の潮汐応答を広域に推定した。全国の各Hi-net観測点で1時間ごとに常時微動の自己相関関数9成分を計算し、リファレンス波形に対する1時間ごとの地震波速度変化を計算した。潮汐によるモデル化した速度変化を状態空間モデルに組み込み、カルマンフィルタと最尤法により潮汐による速度変化量と潮汐と速度変化の位相差を推定した。大局的に浅部のS波速度が遅い領域で潮汐歪み応答が大きい傾向が見られた。歪み感度の大きい地域は、高い間隙流体圧やアスペクト比の低いクラックの存在を示唆するものである。

異なる方位の歪みに対する地震波速度変化

前年度に行った異なる方位の歪みに対する地震波速度変化に関する研究の成果が、国際誌に掲載された (Takano et al., 2023)。本研究では、海洋潮汐によって潮汐歪みの主軸が時間変化することに着目し、異なる方向の潮汐歪みに対する地震波速度変化を調べた。東北地域を含む6つの活火山に設置されている地震観測網で記録された約4年間の常時微動の相互相関関数により地震波速度変化を計算した。速度変化の歪み応答には、歪みの方位に対して明瞭な方位依存性が見られた。特に、潮汐歪みが卓越する方位と平行な方向にある観測点ペアで、潮汐歪みによる速度変化が大きくなる傾向が見られた。これは、非線形弾性理論に基づく地震波速度変化と調和的であり、地殻における歪みによって生じる地震波速度変化のメカニズムの理解に繋がるものである。

海底地震観測網での地震波速度変化の海洋潮汐応答

海底地震観測網S-netで記録された常時微動の自己相関関数に対してTakano and Nishida (2023)で提案した手法を適用し、海洋潮汐荷重に伴う地震波速度変化を推定した。これにより、内陸の観測点だけでなく日本海溝周辺から青森県東方沖、千島海溝周辺にかけて統一的に地震波速度変化の潮汐応答を推定することができた。地震波速度変化には日周潮であるK1分潮が卓越し、地震波速度変化の海洋潮汐応答に特徴的な空間パターンも見られた。流体を考慮していない岩石理論に基づく速度変化の応力感度値 (Mavko, 2009)と比較するために、Hi-net観測点とS-net観測点それぞれで得られた地震波速度変化から速度変化の応力感度値を計算した。Hi-net観測点での応力感度値は $4 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ から $5 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$ まで幅広く分布していた。一方、S-net観測点を用いた海域の応力感度値は $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$ から $5 \times 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$ までと岩石理論での応力感度値よりも1オーダー以上大きく求められた。この結果は、日本海溝から千島海溝周辺における高い間隙流体圧の存在を示唆するものである。

常時微動を用いた地震計の時刻ずれ推定の高度化

地震波速度変化を高い時間分解能で推定するために、常時微動の相互相関関数の位相差が用いられている。しかしながら、常時微動の相互相関関数の位相は地震波速度変化だけでなく、地震計の時刻ずれによっても変化する。したがって、高精度に地震波速度変化を推定し地震発生場における構造の時間変化を議論するためには、地震波速度変化と地震計の時刻ずれを切り分けて推定する必要がある。また、地震計の時刻ずれを精度良く補正することで、震源決定の精度も向上する。

本研究では、先行研究で構築された地震波速度変化を推定する状態空間モデルに新たに地震計の時刻

ずれによる項を加え、相互相関関数の地震波速度変化と地震計の時刻ずれを推定する手法を開発した。本手法の有用性を確かめるために、疑似波形にガウシアンノイズを加え、さらに波形に既知の速度変化と時刻ずれを与え、本研究手法と従来手法それぞれで速度変化と時刻ずれを推定した。本手法と従来手法の推定結果を比較したところ、本研究手法ではS/N比の悪い波形に対しても安定して微小な地震波速度変化と時刻ずれを推定できることを示した。

津波堆積物の地質学的調査

これまで東北日本の日本海沿岸で実施したイベント堆積物調査の結果を取りまとめ、堆積学、岩石・鉱物学、古生物学的特徴を整理した。日本海沿岸では季節風の影響で太平洋沿岸に比べて砂丘の発達著しい。そのため、津波は河川を遡上・氾濫して沖積低地に堆積するケース（河川遡上型津波堆積物）と外洋と接続する潟湖に侵入し主に水域で堆積するケース（ラグーン侵入型津波堆積物）に区分される。このうち、河川遡上型津波堆積物は、洪水堆積物との区別が難しいが、洪水堆積物に普遍的に含まれるバブルウォールタイプの火山ガラスが、河川遡上型津波堆積物には認められず、両者の識別に有効であると考えられる。一方、珪藻化石分析の結果、洪水堆積物にも海水生種が含まれる事例が多いことから、珪藻化石の同定によって津波堆積物を識別することには注意が必要である。

強震動評価に資する浅部地盤構造調査

これまでの研究に継続して独自アレー観測ならびに基盤強震計記録を用いた浅部地盤構造の推定を実施した。まず、アレー観測に基づき青森平野の3地点の地下構造を推定した。微動アレー観測から比較的表層のS波速度を逆解析するとともに、地震記録を収集して深い地盤構造をKawase et al.(2011)の拡散波動場理論によって推定した。また、青森県の震度観測点である階上町道仏観測点の近傍でボーリング調査（2022年6月）を行い、その孔を使って地下水位の変動を9ヶ月間計測した（2023年3月まで）。その結果をもとに、地下水位の変動が地盤震動に与える影響について検討した。本ボーリングに基づく弱震時の卓越振動数の検討・強震時の卓越振動数の変化の検討ならびに強震動時の表層付近の剛性低下に関する検討については、2024年の国際会議に投稿し受理済みである。さらに、KiK-net浪江で観測された地中と地表の記録を用い、各層のS波速度と減衰定数を推定した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本研究課題は、大きく(1)地震波形解析に基づく島弧会合部とその周辺における研究、(2)津波堆積物の収集に基づく地質学的研究、(3)強震動評価手法の高度化のための堆積層構造の推定に分けられる。令和5年度については上記項目に詳述されているため、ここでは主に過去4年間の主な成果についてまとめる。

(1)については、プレート境界の地震の広帯域波形解析と3次元地震波動伝播シミュレーションの融合による震源位置およびメカニズム解の検討(R1-R4)、東北地方太平洋沖地震による誘発地震に対する研究として、森吉山付近で発生する群発地震クラスターのコーダ波の顕著な時間変化と地殻流体との関係の検討（R1～R4）と ΔCFF を用いた力学的検討（R4）、内陸下および火山近傍で発生する低周波地震について、波動伝播シミュレーションに基づく特異な波形形状を生じる力学的成因の検討

（R1）、Frequency Indexを用いた雌阿寒岳における低周波地震の検知と繰り返し低周波地震の発見（R2）、低周波地震をターゲットとした函館東部における観測（R1～継続中）とテンプレートマッチング法による解析（R2）、さらにその他の項目として、地殻の地震波速度変化の応力感度解析（R4～R5）、3次元不均質構造下Green関数データベースを用いた東北地方北部のCMT解析（R4）、2018年胆振東部地震震源域におけるS波スプリッティング解析（R2）が実施された。

(2)については、1741渡島大島津波に起源をもつと考えられる十三湖北側のイベント堆積物の検討（R1）、秋田県にかほ市象潟における象潟地震他の津波堆積物の調査（R2～R4）を踏まえ、堆積学・岩石鉱物学・古生物学的な特徴の整理を行った。

(3)については、青森県および周辺地域における地震波干渉法に基づく群速度トモグラフィ（R1）、最大加速度及び最大速度の増幅倍率の入力振幅依存性の検討（R1）、コーダ規格化法による地盤増幅率の推定（R2～R4）平均S波速度とJ-SHISモデルおよび計測深度の検討（R3）、微動アレー観測と基

盤強震観測網記録による地盤構造推定（R4～R5）、地盤増幅の顕著な地点におけるポーリング調査（R4～R5）が実施された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

1(5)イ. 地質データの収集・集成と分析について、これまで調査が相対的に十分ではなかった日本海側における津波堆積物を系統的に行い、歴史時代およびそれより過去の地震発生の理解に資する研究を行った。また、1(5)イ 内陸地震・1(5)ア プレート境界地震と海洋プレート内部の地震については、東北地方北部から北海道南部にかけて既存の基盤地震観測網の記録を用い、地震波シミュレーションやあらたな解析手法開発まで含めた研究を実施した。1(5)エ 地震発生と火山活動の相互理解に資する研究として、内陸下火山近傍で発生する低周波地震の発生機構解明に資する研究を継続的に実施し、一定の成果を得た。さらに3(1)ア 強震動の事前評価手法に直接的に寄与する研究として、既往モデルよりも精細な地盤構造モデルの推定や地盤増幅特性の面的推定を実施した。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Takano, T., & Nishida, K., 2023, Tidal response of seismic wave velocity at shallow crust in Japan, *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL103011, 10.1029/2023GL103011, 査読有, 謝辞無

Takano, T., Nishimura, T., & Nakahara, H., 2023, Anisotropic seismic velocity variations in response to different orientations of tidal deformations, *Geophysical Journal International*, 235, 2716-2726, 10.1093/gji/ggad386, 査読有, 謝辞無

International, 235, 2716-2726, 10.1093/gji/ggad386, 査読有, 謝辞無

寶川瑠璃・前田拓人・高野智也・野口科子, 2023, コード波振幅に基づく青森県周辺の複数観測網におけるサイト増幅特性空間分布の推定, *地震*, 76, 77-92, 10.4294/zisin.2022-18, 査読有, 謝辞無

木村雄大・岡田里奈・梅田浩司, 2023, 下北半島, 関根浜のイベント堆積物について, *東北地域災害科学研究*, 59, 37-40, 査読無, 謝辞無

長尾優樹・岡田里奈・梅田浩司・小林祐登・鎌滝孝信, 投稿中, 1804年象潟地震に伴う津波堆積物, *地質学雑誌*, 査読有, 謝辞無

片岡俊一・佐藤俊明・宮腰淳一・岡田敬一・早川崇, 2024, 1923年関東地震の際の東京における今村式2倍強震計による本震記象とその復元波形の再評価に関する一考察, *地震*, 76, 303-361, 10.4294/zisin.2023-10S, 査読有, 謝辞無

Kataoka S., in press, Site response at the Dobutsu station in Aomori prefecture, Japan during

strong and weak earthquake ground motion, *Proceedings of the 8th International conference on geotechnical earthquake engineering*, 査読有, 謝辞有

片岡俊一, 印刷中, 青森県階上町道仏震度観測点の地盤震動特性, *東北地域災害科学研究*, 60, 査読無, 謝辞有

片山藍貴・前田拓人・高野智也, 印刷中, 地震規模を考慮した地震波スペクトル形状による日本海東縁で発生する地震の特徴, *東北地域災害科学研究*, 60, 査読無, 謝辞無

小菅正裕, 印刷中, 日本海東縁部における震源深さの再検討, *東北地域災害科学研究*, 60, 査読無, 謝辞無

小菅正裕, 印刷中, 内陸下の低周波地震の特徴と発生メカニズム, *東北地域災害科学研究*, 60, 査読無, 謝辞無

渡部大地・前田拓人・高野智也, 2023, 2011年東北地方太平洋沖地震による地震の誘発現象の力学的検討, *東北地域災害科学研究*, 59, 1-6, 査読無, 謝辞無

増永仁・前田拓人・高野智也, 2023, 3次元不均質速度構造モデルを用いた青森県周辺の地震に対するCMT解推定, *東北地域災害科学研究*, 59, 25-30, 査読無, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Nagao, Y., Okada, R., Umeda, K. and Kamataki, 2023, Sedimentological and paleontological evidence of tsunami deposits from the 1804 Kusakata earthquake, northeast Japan, *AGU Fall Meeting 2023*

成田朱音・前田拓人・高野智也, 2023, 地震波干渉法に基づく岩木山周辺の地下構造長期間モニタリングの試み, 令和5年度東北地域災害科学研究集会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

東北北部・北海道南部海陸地域における地震発生場の解明

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

前田拓人（弘前大学理工学研究科）,高野智也（弘前大学理工学研究科）,渡辺和俊（弘前大学理工学研究科）,片岡俊一（弘前大学理工学研究科）,梅田浩司（弘前大学理工学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

坂中伸也（秋田大学国際資源学研究科）,鎌滝孝信（連携研究）（岡山理科大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：弘前大学理工学研究科

電話：0172-39-3608

e-mail：tktmyd@hirosaki-u.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：前田拓人

所属：弘前大学理工学研究科

(1) 実施機関名：

弘前大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

データ同化に基づく津波現況把握と即時予測の高度化

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

イ. 津波の即時予測手法

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

2011年東北地方太平洋沖地震とそれによる東日本大震災を受けて急ピッチで海底における地震・津波観測網の構築が進み、陸・海を統合した地震と津波のモニタリング体制が確立しつつある。これを受けて、特に海域における地震津波等の記録の即時的な利用に基づく地震・津波の即時予測技術の高度化には多大なる期待が寄せられている。日本列島周辺には世界中他に類を見ないような高密度海底・海上津波観測網が敷かれつつあることから、高密度観測に基づく津波即時予測手法の開発および検証研究がきわめて活発に行われている。

これまで開発されてきた多くの津波即時予測技術が災害誘引である地震発生やそれによる地殻変動などの逆推定に基づくものであるのに対し、本課題の申請者らは、それらの災害誘引の地震学的描像に直接立脚せずに高密度観測記録から津波波動場そのものの現況把握を行う「データ同化」に基づく津波即時予測手法を提唱し、その開発を行ってきた。この方法は、複雑な地震断層運動の推定の不確実性に依存せず、また地震情報に依存しないことから海底の斜面崩壊等の非地震性の津波にもそのまま適用可能であると期待されるなど、さまざまな状況下での安定した津波即時予測に適した側面があると考えられる。しかし、この手法は提案されてからまだ日が浅く、真に実用的な津波予測手法に育て上げるためには、まだ多くの積み残しがある。本研究課題では、津波の波動伝播の実況把握から予測を行う時間発展型予測手法としてのデータ同化に基づく津波即時予測手法のさらなる高度化を実施する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本研究計画の津波データ同化技術は、大別してデータ同化に基づく津波の現況把握と、それをを用いた即時予測の部分からなる。解析手法の高度化を行うのはもちろんのことであるが、低頻度巨大災害である津波は実記録に基づく手法の妥当性の検証がそもそも困難であり、津波の数値シミュレーション

に基づく数値実験が決定的に重要である。そこで、地震・津波数値計算技法の開発や、それらの数値シミュレーションに基づく津波即時予測技法の検証も本研究でカバーする。

現況把握においては、海底津波記録がその観測機器の置かれている場所における地殻変動のオフセットの影響を受けること、より即時性を高めようとするほど地震直後の大振幅地震波信号が推定を難しくするという問題が認知されるようになった。前者についてはその対処法の一部はすでにその研究に着手してきたところであり、本研究計画の初期段階において、集中的に検討を行う。また、後者の問題については、これまで我々が開発してきた地震・津波統合シミュレーションのほか、地震動と津波の両方の記録を合成する手法が複数提案されている。大規模かつ現実的な地震・津波の統合的シミュレーション技術の活用によって、よりリアルな津波疑似記録の作成とそれをを用いた津波即時予測実験を本計画で実施し、津波予測手法の即時性の限界点を明らかにする。

後者の即時予測については、これまで現況把握された津波波動場を初期条件とする津波シミュレーション (Maeda et al., 2015; Gusman, et al., 2016) と、その部分にGreen関数の考え方を導入して特定地域の予測を高速に行う方法 (Wang et al., 2017) がある。いずれも広域における津波現況把握から予測を行うため、その場でのシミュレーションあるいは事前のGreen関数の準備に比較的大規模な計算が必要となってしまう。そこで、沖合での同化結果を踏まえて海岸付近の津波増幅の問題を独立に取扱い、データ同化による現況把握・予測とシームレスに接続することにより、本手法に基づく津波即時予測の高精度化にも道筋をつける。

(8) 令和5年度及び計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要:

・今年度の成果の概要

アジョイント方程式に基づく波動場現況推定手法の定式化をさらに拡張し、波動方程式に類するの一般の方程式に対して、その時間発展を支配する微分方程式からアジョイント方程式を最適制御理論に基づいて導出するための一般的な方法論を検討した。その応用として、津波のみならず地震波を記述する弾性体の運動方程式と異方性を含む一般的な線形構成関係式に対するアジョイント方程式も導出した(前田, 2023a)。津波の場合と同様、運動方程式と構成関係式に形式上等価な量(アジョイント変数)に関する方程式を、終端0条件から時間逆方向に解いた初期値時間における解が、観測と予測の間の2乗残差を最小化する目的関数の、初期条件場に対する勾配に関係することが示された。ただし、アジョイント変数が実空間の速度応力にそのまま対応するのではなく、特に応力テンソル相当のアジョイント変数は、弾性コンプライアンステンソルを介して実空間の応力テンソルの更新に寄与することが明らかになった。これは、これまでの津波方程式のアジョイント方程式に数学的に等価な地震波のSH波の方程式系に対して、応力相当のアジョイント変数は剛性率で除すことで実空間の応力に変換していたことを一般化するものである。この定式化により、今後津波のみならず地震波動についてもアジョイント法に基づくデータ同化研究が進むと期待される。

さらに、津波のデータ同化について、昨年度の成果を踏まえてより現実的な海底地形と観測点レイアウトに基づく数値実験を実施した(前田, 2023bc)。東北地方太平洋沖を対象とし、海底地形モデルに2011年東北地方太平洋沖地震の震源を模した非等方Gaussianの初期水位を仮定し、S-net観測点位置における模擬波形をまず作成した。その後、その記録を仮想観測記録として、アジョイント方程式による方法を用いて様々な経過時刻時点、様々な時間窓長における波動場の再構築を試みた。その結果、時刻ゼロの初期水位については、300秒程度以上の時間長の津波記録から、一切の先験的拘束条件なしでほぼ完全な初期水位形状の再現をすることができた。

ただし、そのために必要とされるイタレーション回数は数千回のオーダーと、即時予測への応用を前提とするには現実的でない者であった。そこで、観測点からの逆伝播の際に離散化Gaussian演算子による平滑化を導入したところ、同程度の回を得るためのイタレーション回数が約1/10に削減された。また一方、波動伝播途中の波動場状態、すなわち現況を、この方法によりゼロ初期条件から再現することには失敗した。想定した波動場とは似通っているものの、不自然な短波長成分をもつ波動場状態に収束してしまい、しかもイタレーションを重ねると観測記録はほぼ完全に再現してしまう。これは、(疑似)観測記録に対して推定される波動場の自由度が大きすぎるため起こる、ローカルミニマム問題であると判断した。

そこで、昨年度にアジョイント方程式による逐次的現況把握のために考案した手法を適用した。これ

は、特定の時刻の状態を推定するのにイタレーションを繰り返すのではなく、1イタレーションごとに解析対象の時間区間を未来にスライドさせていく、というものである。この方法では、複雑な波動場をいきなり再現するのではなく、時間ステップごとに少しずつ現実的な波動場に近づけていくことにより、安定的に真の解に近づけていく、というものである。一方、アジョイント法では有限の時間幅の記録を解析に用いるため、解析時間窓が逐次的に未来にスライドすると言っても、ある瞬間の記録は一定の回数のイタレーションで利用され続ける。これが従来 (Maeda et al., 2015) の最適内挿法に基づく逐次的データ同化との大きな違いである。この方法を先の数値実験モデルに適用したところ、時間と共に安定的に波動場を推定することができるようになり、かつイタレーションも不要になったことで計算時間も劇的に減少した。さらに再構築された波動場は従来の最適内挿法に基づく手法によるものよりも人為ノイズが少なく、安定したものとなった。このように、計算コストはやや大きくなるものの即時予測への応用が可能な水準で、これまでの波動場現況評価法よりも高精度な推定ができるようになった。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本計画はMaeda et al. (2015) による最適内挿法に基づくデータ同化による津波即時予測の応用と、次世代に向けた高精度な手法の開発とその準備に大きく分けられる。具体的な成果としては、以下のものが挙げられる。

- Green関数型津波データ同化手法の実観測記録への活用（令和元年度）
- データ同化手法と組み合わせることを前提とした経験的モード分解法に基づく津波検知手法の開発（令和元年度）と実応用（令和2年度～3年度）
- 国外におけるデータ同化手法の応用を念頭においた最適海底津波観測網のデザイン（令和元年度～2年度）
- 疎な観測網に対するデータ同化手法適用法の検討（令和元年度～2年度）
- 地震動や海底の動的変動まで含んだより現実的な数値記録合成法の開発（令和2年度～3年度）
- 津波データ同化手法に関するレビュー論文の出版（令和3年度）
- 新しいリアルタイム津波データ同化手法であるアジョイント法の定式化（令和4年度）
- アジョイント法の一般の波動問題への拡張（令和5年度）
- アジョイント法の数値実験による検証（令和4年度～5年度）

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

関連の深い建議の項目である「3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究 (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化 イ. 津波の即時予測手法」には、『大学は、震源過程など地震学的描像を必要としないデータ同化手法に基づく津波伝播の状況把握から、地震やそれ以外の災害誘因による津波を、可能な限り即時的かつ高精度に推定する手法の開発を行う。』とされており、まさにその目的に沿った研究が実施され、大きな進展があった。この建議がなされた時点における津波のデータ同化手法である最適内挿法は、すでに実用段階にあると言ってよい。また、計画後半で実施されたアジョイント方程式に基づくあらたな方法は、今後も基礎研究を継続することで、その方法のチューニングが必要とされるであろう。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

Kenji Satake, 2023, History and improvements of the Japanese tsunami warning system, 20th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society, OS06-A001

前田拓人, 2023a, 地震・津波波動場の時空間状態を推定するためのアジョイント方程式の導出, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS07-P17

前田拓人, 2023b, アジョイント方程式に基づく津波波動場推定の数値実験, 日本地震学会2023年秋季大会

前田拓人, 2023c, アジョイント法による地震・津波波動場の把握: 最適制御理論に基づく導出と即時予測に向けた数値実験, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震波形解剖学3.0」-高密度観測・高周波

数地震動で視る地殻・マントル不均質構造-

Takuto Maeda,2023d,Forward/inverse problems and data assimilation in earthquake seismology,日本地球惑星科学連合2023年大会,MGI26-05

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

前田拓人（弘前大学理工学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

佐竹健治（東京大学地震研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：弘前大学大学院理工学研究科

電話：0172-39-3505

e-mail：

URL：<http://www.st.hirosaki-u.ac.jp/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：前田拓人

所属：弘前大学大学院理工学研究科

(1) 実施機関名：

兵庫県立大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震・火山観測データを活用した減災・復興モデルの構築とリスクコミュニケーションに資する事例収集

(3) 関連の深い建議の項目：

- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
 - (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(4) その他関連する建議の項目：

- 3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究
 - (3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究
 - 地震
 - 火山
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
 - オ. 高リスク小規模火山噴火
 - (6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震
高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本研究では、過去に発生した災害において、地震・火山観測情報がどのように災害対応・復興に活用されてきたのか、災害対応における意思決定と災害を契機とした被災地の移転再建や生活再建における観測情報の利活用を事例検証を通して明らかにすることを目的とする。また、その社会的知見(災害の教訓)と地震・火山に関する科学的知見(メカニズム)を、市民の防災リテラシー向上と、減災・復興施策(災害対応・事前移住・事前復興計画技術など)に資する災害事例の収集を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

過去の災害事例において、地震・火山観測情報が災害対応・復旧・復興にどのように活用されたのかを、文献調査、現地調査、通時調査を通して検証する。研究実施過程においては、セミナーなどを通して研究成果を社会的に発信するとともに、減災・復興政策に活かすという目的のもとリテラシー向上を図るための人材育成に取り組む。具体的な、検討事項は以下のとおり。

- (1) 地震・噴火発生時の災害対応に活用される観測情報の体系化
- (2) 被災したエリアにおける、生活環境の移転・土地利用規制と生活再建の検討
- (3) 地震・噴火による社会的被害の解明と、その社会的知見(災害の教訓)と地震や火山に関する科学的知見(メカニズム)を生かした、事前復興計画の策定と市民の防災リテラシー向上。

2019年度は、過去に発生した災害（南海地震、阪神・淡路大震災、東日本大震災、熊本地震、伊豆大島、御嶽山噴火、口永良部島噴火など）の災害対応・復旧復興過程において、観測情報がどのように活用されたのかを事例検証を通し明らかにする。

2020年度、21年度は、観測情報に基づく、警戒区域や危険区域の指定などの土地利用規制が、そこに住む住民の暮らしや生活再建にどのような影響を及ぼしたのか、地域住民への調査に基づき検証する。災害復興過程において、警戒区域や危険区域の指定により被災エリアへの立ち入りや再建が規制されたエリア（東日本大震災、有珠山・雲仙岳・伊豆大島・口永良部島など）に着もくし事例検証を行う。2022年度は、被災経験やその後の観測情報提供の仕組みの見直しが、被災地域住民の防災意識や地域の防災計画にどのような影響を及ぼしたのか、阪神・淡路大震災、東日本大震災、熊本地震、御嶽山、口永良部島などの被災地における事例調査から検討する。

2023年度は、これまでの地震や火山噴火による被害状況とその要因の相関関係を考察し、その知見(災害の教訓)と地震や火山に関する科学的知見(メカニズム)を、事前復興や市民の防災リテラシー向上に活用するための方策を検討・実践する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

地震火山観測に関する科学的知見を、事前復興や防災リテラシーに生かすための方策を、火山観測所（桜島火山観測所）による観測データの公開や施設公開等のオープンサイエンスの実践から検討した。また、市民参加による火山観測の仕組み構築の実践に取り組んだ歴史的事例として、有珠山噴火（1910年、1944年、1977年）の取り組みを調査した。明治時代～昭和初期にかけては、火山防災の専門家が限られていたことから、市民の火山に対する理解を深めるのみならず、観測に市民の参画を得る形で協働での火山研究の取り組みが進められた歴史がある。桜島観測所の実践からは、観測所の情報公開プロセスにおいてNPO桜島ミュージアムやジオガイドとの連携が見られる。それにより、観測情報が研究機関とは異なる形でわかりやすく住民に伝えられるようになっている。つまり、多様な団体とのコミュニケーションを通して、科学的な研究が市民（非専門家）により開かれた活動へと変革する過程にあることが示された。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

地震や火山噴火等は不確実性を伴う現象である。したがって地震・火山対策を進めるにあたっては、そのような科学技術情報の特性についてのリテラシーを高める必要がある。そのためのアプローチが、科学者・行政・住民・マスメディア等とのコミュニケーションである。なかでも市民は、災害発生時の行動主体でもあることから、市民の意識を高める必要がある。そこで、本研究では地震火山観測を行なう研究機関と市民とのコミュニケーションに着目し、過去の災害対応の事例分析から、地震火山の観測情報がどのように災害対応・復旧復興に生かされてきたのかを整理するとともに、地震火山観測情報を市民の防災リテラシーに活用するための方策を検討した。

2019年度については、災害対応・復旧復興の基準として活用されている観測情報にはどのような特性があるのかを地域防災計画や過去の災害事例分析から検討した。行政の災害対応において活用される情報のうち、地震については「震度」が、火山については「噴火警戒レベル」が災害対応・避難の判断基準として制度化され運用されている。これらの情報は、観測情報を社会的な被害と結びつけた情報である。例えば、震度については建物等の社会的被害の状況を示す情報であり、噴火警戒警戒レベルについても、噴火が居住地に及ぼす影響を示す情報である。つまり、地震火山観測情報を社会的な被害と情報を結びつけることが、観測情報の運用しやすさにつながることを示された。

2020年度・2021年度は、復興過程における観測情報の活用については、火山噴火後の警戒区域の設定という土地利用規制に着目し、警戒区域の解除がどのように行われたのかを、桜島（大正噴火）、雲仙普賢岳、口永良部島という過去の噴火を事例に検討した。桜島大正噴火については、噴火とそれに伴う溶岩の流出により土地を喪失した住民が多数おり、鹿児島県と国の調整により被災した住民の移住政策がとられた。復興（帰還）のための判断基準が設けられていたわけではなく、住民の自主的な判断により帰還が行われていた。ただし、農業等の被害が深刻であったことから、帰還に際しては被災した農地回復のための補助金を提供する等の政策が行われていた。1991年の雲仙普賢岳の噴火は、住民居住地域に警戒区域を設定した初めての事例であった。警戒区域は火山の活動状況を見ながらきめ細かく検討された。警戒区域解除については、国・市町・消防・警察・自衛隊・測候所・大学等をメンバーとする「警戒区域検討会議」において議論された。これに対し、2015年の口永良部島噴火で

は、県・町・消防・警察・自衛隊・気象庁・研究者等の実務者により構成される火山防災連絡会議が開催され、火山をめぐる情報共有が関係機関により行われた。復興（期間）の判断は会議での議論を踏まえ町が独自に行っていた。日本の防災行政においては、災害に伴う避難のための立退を指示するのは市町村長の役割とされる。しかしながら、火山噴火は発生頻度が低く、過去に大規模噴火を経験したことがない市町村だけで避難をめぐる政策判断を行うことは困難である。噴火時の避難は、地震や火山性微動が増える、実際に噴火が発生する等の現象が顕著であるため政策を決定しやすいが、警戒区域の解除については、地震が収束しつつも、完全になくなるわけではない場合もあり判断は容易ではない。さらに、警戒区域については、警戒区域に設定された地域の人の生業保証や、警戒区域解除後の地域の生活基盤の整備も求められ、火山の活動状況のみでなく、社会政策的な側面も加味して政策を判断しなければならない。以上のことから、観測情報だけで市町村が政策決定を行うことは難しく、過去の噴火対応から得られる知見を生かした市町村の政策判断をサポートする仕組みの整備も重要になることが示された。

2022年度・2023年度は、地震火山観測情報を活用した防災リテラシー向上のための方策として、大学の火山観測所が持つ地震計、観測データ、観測技術に着目し、これらの科学技術情報をどのように防災リテラシーに活用することができるのかを京都大学桜島観測所・阿武山観測所との連携研究により検討した。火山に関する知見があまりない市民、地震観測・技術を活用したオープンリテラシーに取り組んでいる京都大学阿武山サポーター、桜島に詳しいジオガイド等、火山の専門家とのアクション・リサーチの実践からは、地震火山観測情報の公開プロセスにおいて、多様な団体とのコミュニケーションを通して、科学的な研究が市民（非専門家）により開かれた活動へと変革する可能性があることが示された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究であり、科学技術情報を社会被害と結びつけた情報の重要性を示すとともに、防災リテラシー向上の多様な取り組みを連携させることにより新たな知見を得る点において貢献している。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Sakamoto, M., and Nakamichi, H.,2023,Open Science Initiatives by Sakurajima Volcano Observatory,Journal of Disaster Research,19,154-159,https://doi.org/10.20965/jdr.2024.p0154, 査読無,謝辞無

中道治久、阪本真由美,2023,桜島火山における2020年6月の火山岩塊落下を受けて実施した火山情報に関する住民意識調査,京都大学防災研究所年報,66号B,11-120,査読無,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

中井春香、阪本真由美,2023,三河地震を事例とした歴史地震の再現手法の検討について,日本地球惑星科学連合2023年大会,M-IS22

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

大規模噴火対策をめぐる自治体間広域連携

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

阪本真由美（兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科）、室崎益輝（兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科）、森永速男（兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科）、加藤恵正（兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科）、富永良喜（兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科）、紅谷昇平（兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科）、青田良介（兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科）、浦川豪（兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科）

他機関との共同研究の有無：有
永野康行（兵庫県立大学大学院シミュレーション学研究科）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科
電話：078-891-7376
e-mail：
URL：<https://drg-u-hyogo.jp/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：阪本真由美
所属：兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科

(1) 実施機関名：

兵庫県立大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震観測研究の成果を活用した土地利用に係る事例収集に基づく枠組みの提案

(3) 関連の深い建議の項目：

- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
 - (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(4) その他関連する建議の項目：

- 3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究
 - (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - ウ. 大地震による災害リスク評価手法
- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
 - (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
 - イ. 首都直下地震
 - エ. 桜島大規模火山噴火
 - オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震
首都直下地震
桜島大規模火山噴火
高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

これまで、ニュージーランドやトルコ、台湾などにおいて、活断層の近傍における建築制限を含む土地利用規制が進められてきた。日本においては、現在中央構造線近傍における特定建築物の建築制限を徳島県が主体となって実施している。

とはいえ、一部私権を制限することや、その断層が地表面に明確に現れていないことなどから、土地利用規制や建築制限をしても実態としての建物移転はなかなか進まない現状にある。観測技術の進展によって災害誘因の予測が精緻化されてきた現在、それを被害軽減を図る土地利用規制、建築規制にきちんと展開することが可能となっているが、これまでの状況を踏まえると、社会実装時に十分活用できない可能性がある。

そこで、海外事例、さらには徳島での取り組みによる関係機関、当事者の認識等を細かく整理することで、将来に向けた防災・減災の視点を含めた情報共有、対策実施のあり方を検討する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度～33年度までは、特に海外での建築制限の運用実態を把握するための調査を進める。

具体的にはニュージーランド、トルコ、台湾を想定している。規制を進める当局だけでなく、住民や事業者、不動産関連業者への調査を進める。

平成34年度以降は、国内での土地利用規制の運用実態を把握し、災害誘因予測が精緻化された状況下での運用のあり方を検討する。また、東日本大震災被災地における土地利用規制（災害危険区域）の現状把握にもつとめ、時間経過に伴う実態変化を把握する。

平成35年度にはそれらの成果を関連分野に提供・共有し、我が国における観測技術の土地利用規制への活用方策を検討する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

調査の目的

南海トラフ巨大地震により、都市圏に大規模な被害が発生した場合。避難生活の長期化が予測される。そこで、2014年に兵庫県が公表した南海トラフ巨大地震の被害想定から、被害規模が大きい兵庫県沿岸部の都市圏と、被害想定が少ない兵庫県北播磨地域に焦点を当て。被災者の生活環境の早期改善、および有益な避難方法策として、「二地域居住による事前復興対策の可能性」を検討することを目的とし、被災者を受け入れる避難先と想定した地方に居住する住民への意識調査を実施した。

調査対象

調査対象として兵庫県沿岸部から1時間程度の距離にある、兵庫県による南海トラフ巨大地震被害想定で被害が少ない北播磨地域を選定している。さらに同地域内に位置する西脇市芳田地区にある芳田自治協議会に協力を得て、同自治協議会が実施する住民アンケートの設問に、本研究に関する設問を加えて調査を実施した。

対象地区は兵庫県西脇市西南部に位置し、面積は約18km²、市域面積約132km²の約14%を占めており、その大半は山地。農地である。地区人口1,734人、65歳以上人口628人、高齢化率36.2%、世帯数775世帯である（2022年3月末）。なお、同地区は、兵庫県が定める市街化調整区域であり、地区外の住民が転入することが容易ではない地域である。

結果の概要

空き家活用特区制度についてはかなり前向きな意見が多いことが明らかとなった。空き家活用特区制度は、兵庫県が認定し、市街化調整区域内での空き家の活用を促進する制度であるが、人口減少、高齢化、空き家の増加が課題となる地区においては、平時の地域活性化の仕組みとしての期待が高いことが明らかとなった。一方で、都市部から人が流入する際の懸念に関しては特に高齢世代について高く、平時からの実験的な取り組みを通じて関係構築を進めておかないと、新規居住者と旧来からの住民との間に軋轢が生じる可能性も明らかとなった。しかしこのような取組に関心を持つのは30代から50代が多く、次代の地域づくりと都市部の災害対策を掛け合わせることで、都市部と地方部の相互補完関係を構築できる可能性が示唆されている。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

・災害リスクに対する土地利用計画の策定プロセスの整理

地震や津波の被害を受けた被災地における、次のリスクの検討を踏まえた土地利用計画がどのように進められるのかについて、国内外の事例からその実態を整理した。国内では災害危険区域の設定が将来のリスクを減じる土地利用計画として進められるが、必ずしもそれがリスクだけを評価したものではないこと、既存不適格な扱いで時間をかけた土地利用の適正化を図る方法論としても活用しうることを明らかにした。

・リスク地域居住者の意向把握

兵庫県内の南部、南海トラフ巨大地震で大きな被害が想定される地域に居住する住民に対するアンケートなどから、特に生産年齢人口の層で勤務先等が近傍にある場合、災害リスクよりも利便性が優先されて土地や住居の取得がされる傾向が高いことを明らかにした。その上で、地域を離れた場所での避難場所の確保についてもある程度必要性を認識していることを明らかにし、それらの施策を適宜組み合わせることの意義を明らかにした。

・居住地の流動性向上のための施策のあり方検討

二地域居住という、平時のライフスタイルの多様化に合わせた施策が推進されているが、実践している人はまだ極小数である。しかし、地方部には未活用、用途未定の空き家の増加が課題となっており、これらを活用し、レジャー的な二地域居住ではなく、広域避難訓練の一環として二地域居住を位置づけることにより、企業等が連携してそれらの空き家活用の枠組みを作り、それを平時から従業員等が活用することで、フェイズフリーな二地域居住の実現の可能性があることが明らかになった。

・リスクを総有する土地利用方策の調査

リスクのある土地での居住はすぐにはなくならないことも明らかになったが、その地に住みつつ、被害を受けた場合にその被害を減じるための工夫が、日本国内にも堤外地等の土地利用で見られることが整理された。それは土地総有性とも呼べるもので、災害危険区域等の施策と組み合わせることで、緩やかな土地利用規制、被害を受けた場合のその損失の最小化に寄与する可能性が示唆された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Masahiro SAWADA, Takao SATO, 2024, The Possibility of Wide Area Evacuation in the Event of Natural Disasters: A Survey in Amagasaki City, Hyogo Prefecture, Journal of Disaster Research, 19-1, 105-112, 10.20965/jdr.2024.p0105, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

澤田雅浩, 2023, 中小企業における災害対策に関する現状把握 尼崎市におけるアンケートから, 日本地域惑星科学連合 2023大会, HDS07-11

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地震観測研究の成果を活用した今後の土地利用計画手法の提案

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

澤田雅浩（兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科）, 馬場美智子（兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科）, 紅谷昇平（兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科）, 青田亮介（兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科）, 室崎益輝（兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科）

他機関との共同研究の有無：有

照本清峰（関西学院大学総合政策学部）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：減災復興政策研究科

電話：078-891-7376

e-mail：

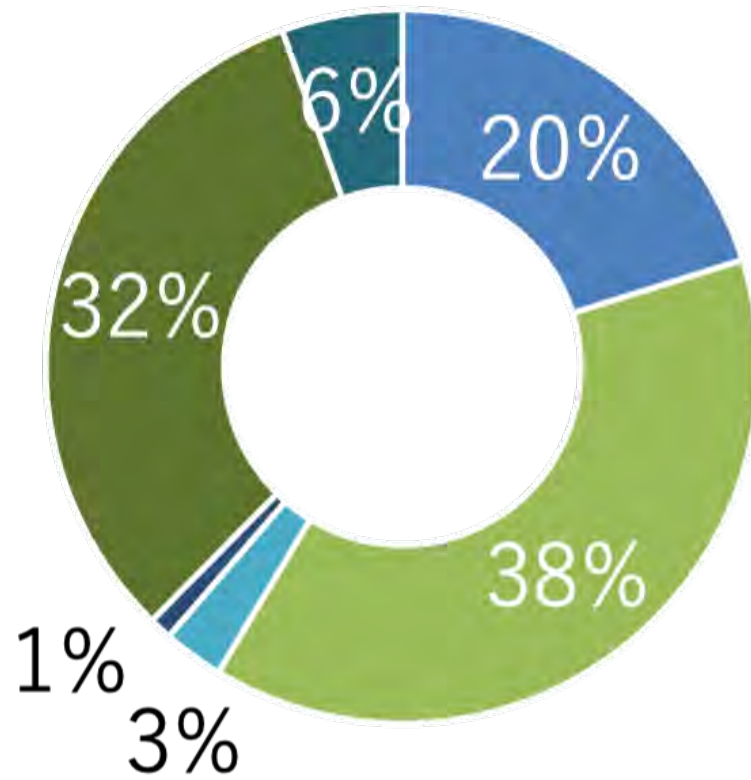
URL：<https://drg-u-hyogo.jp/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：澤田雅浩

所属：減災復興政策研究科

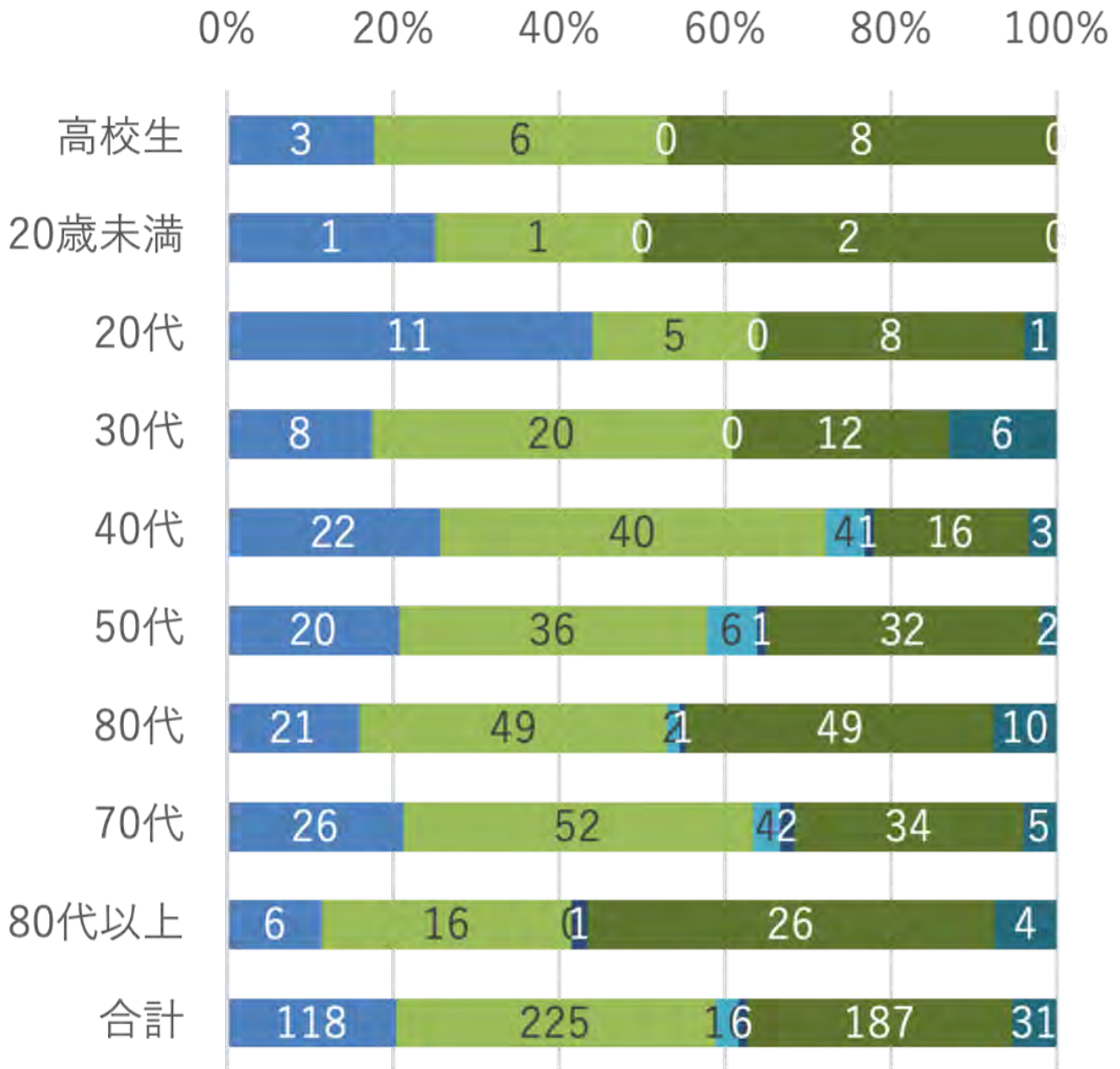
「空き家活用特区制度」の推進について



- ぜひ進めてほしい
- 進めてほしい
- あまり賛同できない
- 賛同できない
- わからない

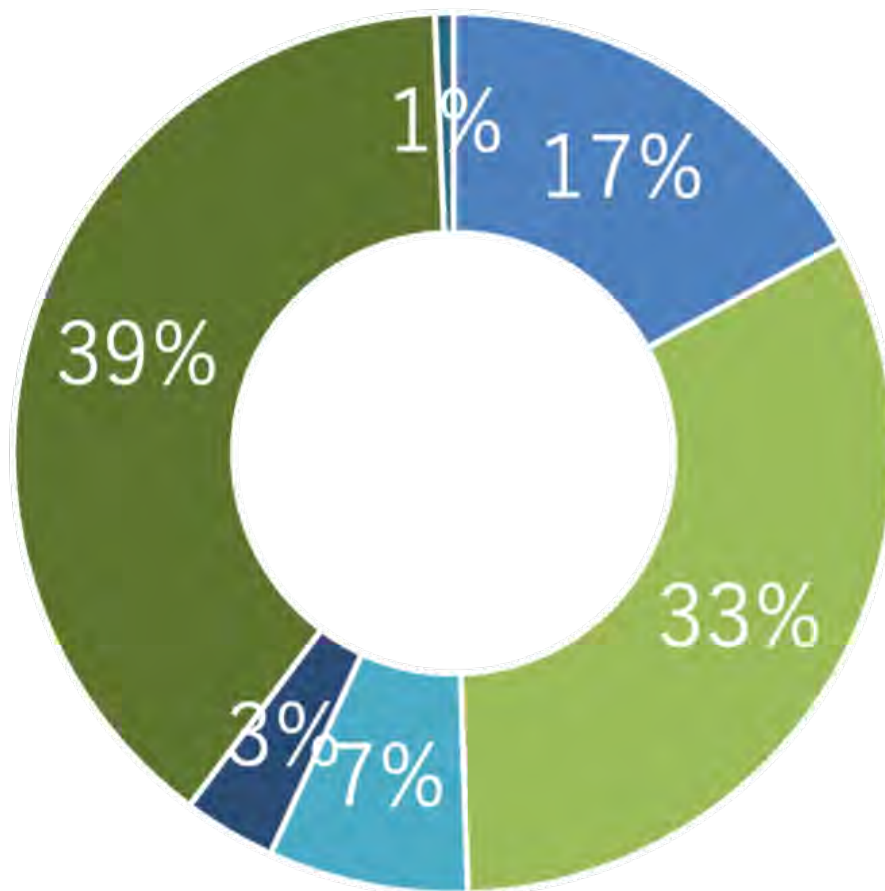
空き家活用特区制度の活用について

「空家活用特区制度」について (世代別)



- ぜひ進めてほしい
- 進めてほしい
- あまり賛同できない
- 賛同できない
- わからない
- 詳しい説明を聞きたい

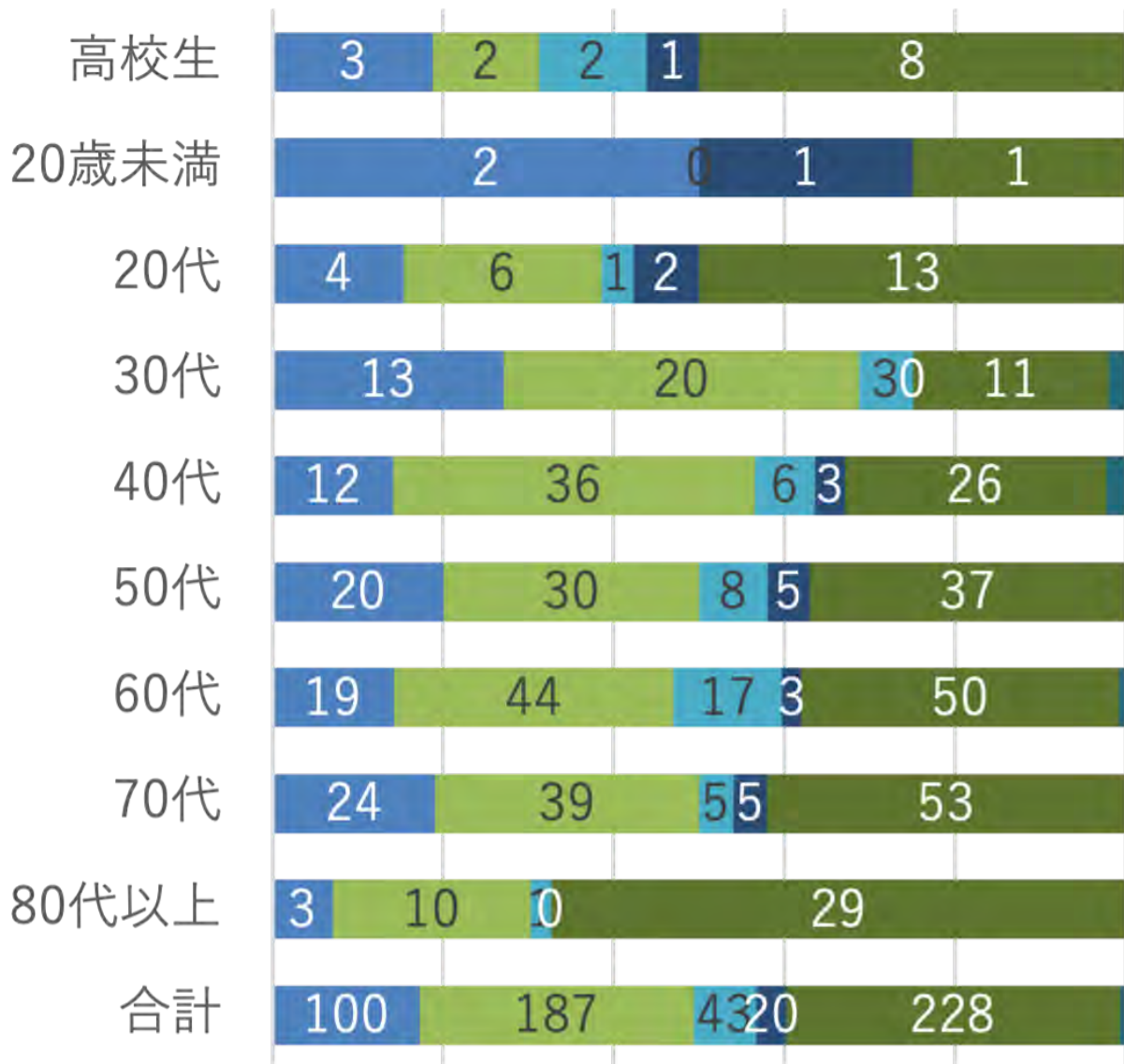
都市在住者が地区に拠点をもつこと について



- 有益である
- ある程度有益である
- あまり有益ではない
- 有益ではない
- わからない
- その他

都市在住者が地区に拠点をもつことについて
(世代別)

0% 20% 40% 60% 80% 100%



- 有益である
- ある程度有益である
- あまり有益ではない
- 有益ではない
- わからない
- その他

二地域居住が都市と地方にもたらす可能性



二地域居住がもたらす都市と地方の効果について

(1) 実施機関名：

東京大学情報学環

(2) 研究課題（または観測項目）名：

ニーズ・アセスメントに基づく地震・火山災害に関する発生確率、被害想定、災害情報のコミュニケーション戦略の開発

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

火山

(4) その他関連する建議の項目：

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本研究では、南海トラフ地震や首都直下地震、大規模噴火災害等の想定災害において、多様なステークスホルダーを対象に、災害の発生確率、被害想定、関連する災害情報（火災情報や降灰情報）をどのような理解・掌握して活用しているかなど情報の理解の現状と課題を明らかにすることを目標とする。これらより一層の活用を図るために地震学・火山学に求められる情報内容や表現、活用条件について考察する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度においては、地震・火山災害情報の活用のための住民の知識体系にかんする基礎的調査を実施する。

平成32年度においては、地震・火山災害情報の活用のための住民の知識体系にかんする基礎的調査の解析を行う。

平成33年度においては、1年目、2年目の成果を元に、地震・火山災害の発生確率、被害想定など災害情報にかんする調査を実施する。

平成34年度においては、地震・火山災害の発生確率、被害想定など災害情報にかんする調査の詳細解析を行う。

平成35年度においては、地震学・火山学のアウトプットに対するニーズや活用実態災害、情報と

しての活用を抑制している要因および課題の明確化する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

今年度の成果として、とりまとめを行った。特に地震に関する認知構造を把握したうえで、住民が理解しうる情報（被害想定）体系を考案した。

本研究ではまず、首都直下地震に関する認知体系について、都民に対するアンケート調査をもとに明らかにした。その結果、そもそも国（内閣府）や東京都の公表している被害想定の内容に対する認知が低く、信頼性に課題があった。また、それらを住民が認知したとしても、その内容に沿った地震対策が行われるわけではないということが実証された。かつ、「都民の考える被害想定」も地震対策に結びついているわけではないことがわかった。

そこで、被害想定という科学的な成果としての情報の活用方策を検討するため、内閣府（2013）が公表した被害想定を基に制作され、実際に放送された『パラレル東京』の前後で、縦断型のアンケート調査を行った。この番組放送前後に、東京都民を対象とし、インターネットパネルを用いた3波の縦断型調査（「パラレル東京」放送直前、直後、3か月後）を実施した。

その結果、第一に、マス・コミュニケーション効果研究における、知識ギャップ仮説をもとに、『パラレル東京』の知識面への効果を分析した。だが、時間が経過するほど、視聴の有無で、知識差が拡大する結果は得られなかった。また、自由記述の結果より、首都直下地震そのものに対するイメージとしては、恐怖や不安などの心理描写が多く、みられた。

第二に、説得コミュニケーションに関する研究を素地に、『パラレル東京』の認知面への効果を分析した。その結果、番組のテーマとして取り上げられたリスク事象ごとで、自分自身が巻き込まれると考える確率は異なっていた。そして、それらの中でも、群集雪崩や将棋倒しに巻き込まれること、大規模な延焼火災に巻き込まれること、工場や建物の爆発被害に巻き込まれること、土砂災害に巻き込まれること、の4つの事象は、放送から約3か月が経過しても、番組視聴前と比べて自分自身が被害にあう可能性があると考えようになったこと、が明らかとなった。つまり、番組としての説得効果があったと考えられた。そして、その要因としては、恐怖感情があるとした。『パラレル東京』は、受け手の恐怖感情を刺激した結果、首都直下地震に関するリスク認知が、視聴前より約3か月にわたって高い状態を維持したと考えられた。

第三に、『パラレル東京』の受け手を類型化し、行動面への効果を分析した。結果として、従前より地震対策行動を数多く行っていた人ほど影響を受けやすいという、マス・コミュニケーション効果研究における、補強効果が確認された。つまり、地震対策を行うきっかけがあれば、その後の地震防災に関する説得的コミュニケーションに接触すると、改めて地震対策が行われることを示している。水・食料の備蓄の確認や、懐中電灯の準備など、地震防災では定期的な確認が必要である。こうした手法の有効性の一端を示していた。

また、『パラレル東京』は、元々、自分自身が被害にあう可能性が低いと考えるような、リスク認知が低い人を中心に効果があった。つまり、認知面では大きな効果があった。そのため、こうした層に対するアプローチが一定程度の防災啓発という観点からみれば効果があるといえる。

ただし、映像による防災啓発は万能ではない。従来よりリスク認知が高いような人びとに対しては、恐怖感情を強く刺激しすぎた結果として、心的外傷（トラウマ）に結びつく可能性が示唆された。そのため、恐怖感情を刺激することで「地震への準備」の動機づけもしつつ、心的外傷（トラウマ）にならないようなバランスが、映像においては求められる。

以上より、住民が地震発生時の被害を想定（イメージ）することは、それほど重要ではない。被害想定という情報の活用を考えたときに、感情を刺激することこそ、地震防災において重要であるという結論が得られた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本研究は、地震学・火山学の成果として可視化・定量化・精緻化されてきている災害情報が、市民・社会の防災対策の推進に必ずしもつながっていないのではないかと問題意識から、地震学・火山学におけるニーズと社会の側のニーズが一致していないこと、地震学者・火山学者と社会の間にコミュニケーションギャップが存在することを解明してきた。そのうえで、地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化、災害情報が災害軽減に有効に活用されるための情報コミュニケーション手法を開発することを目的とした。そこで、下記のアンケート調査を実施し、分析を行った。

- ・地震災害の情報（発生確率）活用に関する住民調査
- ・火山防災の知識に関する基礎的調査
- ・火山情報の自治体ニーズ調査
- ・地震災害の情報（被害想定）活用に関する基礎的調査
- ・地震災害の情報（被害想定）活用に関する住民調査

地震学・火山学の知見を人々の接する災害情報にどのように落とし込むかによって、活用のされ方や理解のされ方、また対策そのものが変化する。我々の研究グループの知見から、災害に関する確率表現のあり方や、映像を用いた災害の表現方法の在り方での災害をどのように表現するかなど情報の特性に応じて、人の認知、記憶の残りやすさ、災害対策への行動意図などが大きく変化することが明らかになりつつある。

これまでの代表的な成果として、地震動予測地図に焦点を絞った研究がある。地震調査研究推進本部が作成している地震動予測地図においては「30年確率」を前提に震度毎に発生確率を計算している。だが、改めて検証すると「10～20年確率」で示した場合に、より「対策の必要性」意識を高めることがわかった。また、20代～40代は「30年確率」で示された場合、50～60年代は「10年確率」で示された際に、最も「対策の必要性」意識が高まるということがわかった。年齢が高いほど、この「対策の必要性」の意識を高める確率年は短くなる。また居住地（日本海沿岸か太平洋沿岸か）によっても意識は変わる。

次に、可視化という点から、想定に関する映像において、人々に認知面でのインパクトをもたらすテーマとそうでないテーマが存在することが明らかとなった。

我々の研究では、地震動予測地図、地震の発生確率情報や被害想定など災害に関する科学的知見について、表現方法によって、また人の属性によって、受け止められ方が大きく変化することが、繰り返し確認されている。確率表現のあり方や、映像を用いた災害の表現方法など情報の特性に応じて、人の認知、記憶の残りやすさ、災害対策への行動意図などが大きく変化することが明らかになりつつある。この結果は頑強である。

これらより、計画通りの実施が行われたといえる。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

建議された「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」の中では「3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究（3）地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究」において、「大地震や火山噴火の予測結果は確率で表されるが、往々にして誤差が大きく数値自体が小さいためにリスクが小さいという印象を与えがちである。」とされている。本研究成果は、この点において直接的な回答をもたらすものである。「10～20年確率」で示した場合に、より「対策の必要性」意識を高めることがわかった。

また、「4. 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究」にある「地震・火山現象の理解・予測の研究成果を社会に適切に還元する」手法についても、「恐怖感情の刺激」が効果的であるという一般の受け止められ方とは真逆の結果を析出した。情報の受け手の恐怖感情を刺激する映像によって、防災意識を向上させることが可能であることを実証した。

これらは、「災害の軽減に貢献する」という目標にまさに合致する研究成果である。今後は、こうした災害誘因予測情報を用いた、感情的アプローチについても研究や、表現技法をさらに要素にわけ、効果的な災害情報とするための表現技法の開発に資する基礎的な知見を析出し、災害情報をデザインする手法について研究する必要がある。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

安本真也・河井大介・齋藤さやか・関谷直也,2024,首都直下地震に関する防災啓発番組の説得的コミュニケーション,社会情報学,査読有

齋藤さやか・安本真也・関谷直也,2024,震動予測地図における確率表現のリスク認知—全国意識調査をもとに,東京大学大学院情報学環紀要 情報学研究・調査研究編,40,査読無

・学会・シンポジウム等での発表

安本真也・葛西優香・富澤周・内田充紀・関谷直也,2023,地震防災における感情的アプローチの可能性—ドラマ「パラレル東京」による認知の変化についての追加分析—,日本災害情報学会第27回学会大会

安本真也,2023,大規模災害時における情報の課題—地震と流言・避難—,第13回災害コミュニケーションシンポジウム (DCS2023) ~関東大震災から100年目の災害情報処理とは~

関谷直也,2023,関東大震災の社会的影響,大正関東地震100年シンポジウム

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

不確かさを含む地震・火山災害に関する災害誘因予測を、効果的な災害情報とするための表現技法に関する認知科学的アプローチ

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

関谷直也 (東京大学情報学環附属総合防災情報研究センター), 田中淳 (東京大学情報学環附属総合防災情報研究センター), 片田敏孝 (東京大学情報学環附属総合防災情報研究センター), 安本真也 (東京大学情報学環附属総合防災情報研究センター)

他機関との共同研究の有無: 有

秦康範 (山梨大学), 斉藤さやか (東北大学)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等: 総合防災情報研究センター

電話: 03-5841-5924

e-mail: cidir@iii.u-tokyo.ac.jp

URL: <http://cidir.iii.u-tokyo.ac.jp/>

(14) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名: 関谷直也

所属: 東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター

(1) 実施機関名：

東北大学災害科学国際研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

東北地方における地震・津波・火山情報に関する歴史資料の所在調査とデータ収集

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
ア. 史料の収集とデータベース化

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題では、東北地方をフィールドとして『新収日本地震史料』や既存の自治体史に部分的に掲載されている災害関係史料の原本の所在を調査し、それらの所蔵機関・所蔵者を訪問して原本全体をデジタルカメラで撮影し、データを収集する。その際、災害史料単体ではなく、それらの史料が含まれる史料群に着目し、従来の災害研究では着目されなかった絵図・地図類や地域の開発や社会変遷が伺える記録類の情報も収集することにする。

新出史料の調査については、2011年の東日本大震災を受けて各地で被災史料の保全活動を実施している自治体や史料保全ネットワークなどと連携し、各地で展開している史料の保全活動と連携しながら、近年の調査で所在が判明した史料群における災害関連資料の有無を確認し、所在が確認された場合にはデータ撮影を実施する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題の実施計画は、5年間の中で東北6県を全て網羅することとし、宮城県における史料所在調査および撮影は随時実施することとし、それ以外の5県については、各1年間をかけて集中的に調査を実施することにする。特に東日本大震災の被災地である地域を優先し、平成31年度においては岩手県、平成32年度においては福島県、平成33年度においては青森県、平成34年度においては山形県、平成35年度においては秋田県という順番で実施することを想定している。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

今年度は、1611年慶長奥州地震津波における関東地域の地震動について、『言緒卿記』の記述の分析をおこなった。『言緒卿記』では慶長16年10月28日（1611年12月2日）条「辰刻大地振」、翌29日条に「至夜地動」と記されているが、この地震の規模についてはこれまで詳しい分析はされず、震度3程度とみる見解などもある。

『言緒卿記』の中に記される地震記事は合計16回、そのうち「大地振」「大地震」と記されているの

は、慶長奥州地震津波と、伝聞で聞いた慶長会津地震の記事、慶長19年10月25日（1614年11月26日）の京都での地震の3回であった。『言緒卿記』では、未刻に「大地震」があったため、作者・山科言緒は二条城に滞在していた徳川家康に面会、その後院に参内し、地震被害の見回りをおこなっている。この地震による京都周辺の被害について、他史料の記述をみると、『当代記』・『慶長日記』（米沢市図書館所蔵）などは二条城周辺には家屋倒壊はなかったものの、天水桶が落下する被害があった。一方、後代の史料となるが『難波戦記』には家屋の転倒、『徳川実紀』では二条城周辺で被害がなかったものの、地震によって死者2名、けが人370人余があったと記される。ここから山科言緒の「大地震」の記述には、震動によって落下物や建物被害が生じる程度、震度4以上の地震動のことであるといえることができる。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

当初は東北地方全域での地震史料調査を予定していたが、新型コロナウイルス流行をうけ、悉皆的な史料調査が実施できず、いくつかの地域に絞っての史料収集と分析となった。

1804年象潟地震について、由利郡関村伝来文書を継続的に調査し、地震発生当時の集落の様子を文書や絵図から再現し、同地における象潟地震の被害の詳細を解明した。

陸前高田市図書館所蔵『古新手鑑』を調査し、同史料に収録される1611年慶長奥州地震津波、1856年安政八戸沖地震津波の情報や、1896年明治三陸地震津波における死者数に関する新たな数値を得た。

2021年には1611年慶長奥州地震津波410周年シンポジウムを開催し、同地震津波について文系・理系双方からの最新の研究成果を報告した。

先行研究においてしばしば指摘されてきた元和2年（1616）仙台地震における津波の存在について、その発端が大槌地方の史料における1611年慶長奥州地震津波の年代の誤記であり、これが1935年に刊行された『宮城県昭和海嘯誌』において元和2年津波と混同され、さらに『増訂大日本地震史料』（1951）に引用されたことによって定着した偽津波であることを明らかとした。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

今期の研究では、東北地方における歴史地震・津波について、新たな史料の発見および再確認により、特に東北地方太平洋沿岸の歴史津波である1611年慶長奥州地震津波、1616年仙台地震、1896年明治三陸地震、1933年昭和三陸地震について新たな情報や分析を得ることができた。また、文系・理系双方からの慶長奥州地震津波についてのシンポジウムを開催するなど学際的連携による歴史災害研究を展開した。今後、新たに得られた史料情報を加えて史料に基づく歴史地震・津波の分析を推進し、地質学や津波工学と連携してこれらの歴史地震・津波についてより詳細な実態解明につなげることを期する。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

蝦名裕一,2023,東北地方太平洋沿岸における歴史津波の評価をめぐって,第2回日本災害・防災考古学会研究会資料・予稿集,2,138-145,doi.10.24484/sitereports.132325,査読無,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

蝦名裕一,2023,東北地方太平洋沿岸における歴史津波の評価をめぐって,第2回日本災害・防災考古学会,10

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

東北地方を中心とする歴史災害の文献・絵図史料収集および地形復原による分析

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

蝦名裕一（東北大学災害科学国際研究所 災害人文社会研究部門）
他機関との共同研究の有無：有

熊谷誠（岩手大学地域防災センター）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学災害科学国際研究所 災害文化アーカイブ研究分野
電話：022-752-2146
e-mail：zisin-yoti@irides.tohoku.ac.jp
URL：http://irides.tohoku.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：蝦名裕一
所属：東北大学災害科学国際研究所

『言緒卿記』に記される慶長奥州地震津波の地震動について

『言緒卿記』に記される地震記録＝16回、うち大地震は3回

和暦	西暦	滞在地	記述
慶長16年10月10日	1611.11.14	三島	今日地振シ了
慶長16年10月15日	1611.11.19	江戸	地振戌刻也
慶長16年10月28日	1611.12.2	江戸	一、辰刻 大地震 一、至夜地動
慶長16年11月2日	1611.12.5	(会津)	一、八月九日ニ会津ノ柳津 大地震 、堂舎仏閣尽破滅之由 (会津地震の伝聞)
慶長19年10月23日	1614.11.24	京都	一、戌刻地振
慶長19年10月25日	1614.11.26	京都	一、今日未刻 大地震 、前大樹ノ御前伺候申了 一、院参仕、地振御見廻ニ致伺候之由申入了
慶長20年4月13日	1615.5.10	京都	一、入夜地震
元和2年9月24日	1616.11.3	小田原	一、戌刻地振
元和2年10月1日	1616.11.9	京都	一、地動、戌刻
元和2年12月17日	1617.1.24	京都	地振
元和3年12月17日	1618.1.13	京都	一、亥刻ニ地振
元和3年12月18日	1618.1.14	京都	一、地振午刻、
元和5年1月11日	1619.2.25	京都	卯刻地振、
元和5年10月11日	1619.11.16	京都	十一日庚申 天晴 地震未刻
元和5年10月25日	1619.11.30	京都	一、寅刻ニ地振
元和5年11月22日	1619.12.27	京都	巳刻地震

山科言緒は江戸滞在中。
28日に大地震、翌日も地震動。

慶長会津地震の伝聞

山科言緒は未刻に大地震があったため、前大樹（家康）の御前に伺う。その後、院に地震見廻りに訪問。

山科言緒が「大地振」「大地震」と記す基準は？

『言緒卿記』の「大地震」の記述について

慶長19年10月25日京都周辺の地震被害について

『駿府記』→後藤光次or林羅山か。江戸時代初期の根本史料。
廿五日、未刻大地震、今日藤堂和泉守・片桐市正召御前、大坂城中取巻人数先手被仰付云々

『慶長日記』→米沢市図書館所蔵、江戸初期の写本
一、廿五日、午刻大地震、然共二条之御屋形ハ無顛倒、折節五山之長老出仕広間之上之天水桶落かゝり出家衆之首にかゝり見苦鋪見得候

『当代記』には家屋の転倒なし。ただし落下物はあり。
『慶長日記』も踏まえれば二条城周辺の家屋転倒が無い、という意味か。

『難波戦記』→寛文年間（1661-1673）に成立した軍記物
十月二十五日申ノ刻、天曇、大地震山崩レ、馱馬死ス、民家多ク顛倒シ、堂社仏閣破壊ニ及ケレハ是唯事ニアラストソ世人申アヘリ

『徳川実紀』→19世紀前半に編纂された史書
この日将軍塚ふたたび鳴動し、又京洛の地大震、禁省はいふもさらなり、月卿雲客をはじめ、市中の家宅、倉庫、寺社、堂塔倒れくづれ、毀傷する者三百七十餘人、死するもの二人、ただし二條の城中はいささかも廃損せず

将軍塚が鳴動。宮中はいうまでもなく、公卿・殿上人をはじめ、市中の建造物が崩れ。けが人370人、死者2人。
ただし二条城は被害が全くなかった。

二条城周辺は被害なし。それ以外の地域で建物被害が生じるほどの揺れ。
=山科言緒が「大地震」と記すのは建物被害が生じるほどの揺れ（=震度4以上）

慶長19年10月26日地震による京都周辺の被害について

(1) 実施機関名：

東北大学災害科学国際研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

GPS-A観測による効率的な上下変動検出技術の開発と根室沖観測への適用

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
ウ. 千島海溝沿いの巨大地震
(3) 研究基盤の開発・整備
イ. 観測・解析技術の開発

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

これまでGPS-A観測は、海域での地殻変動を直上で捉えられる有効な手段として普及してきたが、上下動の計測には移動観測が必要でかつ検出精度も低かったことから、水平変動の検出に重点が置かれてきた。しかし、海底設置トランスポンダを適切なレイアウトで配置して定点観測を実施することで、これまで原理的に上下変動が解けないとされてきた定点観測方式でも上下変動の検出が可能であることがわかってきた。今後のGPS-A観測網の広域展開時に期待される海上自律プラットフォームでの自動観測は、長期観測時の燃料の制限から、推進性能上定点観測に限定される可能性があり、定点観測で水平動と合わせて上下動も計測する方法の開発が望まれている。

一方、千島海溝でのM8.8以上の超巨大地震の今後30年の発生確率が最大で40%に達すとの政府の見解が有り、同海域を対象とした研究計画が同じ項目から申請されている。地震間の地殻変動としては水平変動が卓越しているが、地震時変位や地震後の余効変動では上下動も無視できない存在であることが、2011年の東北沖地震に関する研究で明らかになっている。新たな観測網を構築する千島海溝で、巨大地震に備え上下動検出可能な体制を作っておくことは重要である。

本研究では、コスト効率の高い最適なGPS-A海底局設置レイアウトを精査し、新規観測が予定されている根室沖および現在余効変動による顕著な上下動が見られている東北沖の特定の点で実測データを得ることで、上下変動が検出可能なことを理論と観測の双方から5年以内の実証し、今後の新しいGPS-A観測のモデルケースとして提案することを目標とする。また、5年間の実証データを利用し、千島海溝および日本海溝沿いの海底地殻変動場を把握するのに有用なデータを提供する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

水平方向の地殻変動成分の検出に特化してきた既存の海底局アレイの中央に、海底局を1台追加して配置することにより、通常行われる定点観測で上下動検出が可能であることを実証し、得られるデータは地震の長期評価に利用する。

2019年度は、課題HKD_09およびERI_05と連携し、根室沖に設置予定の3ヶ所のGPS-A観測点の

海底局アレイの中心に、本課題で整備する海底局を追加設置し、アレイ全体の形状決定のための観測をおこなったうえで、上下動検出を可能にするアレイ中心での定点観測を開始する。1キャンペーン観測内のアレイ位置の時系列から、上下変位検出精度の暫定的に検討する。

2020年度と2021年度は、根室沖での繰り返し観測を実施し、初回の上下も含めたアレイ変位を求め、想定される観測精度と照らし合わせ解釈を行うとともに、上下変位推定における観測時の海上プラットフォームの違いの影響を吟味する。また、根室沖での初期観測結果を参考にしつつ、日本海溝沿いに展開している東北大所有のGPS-A観測点の中から適当な1~2点を選定し、別途回収予定の海底局の電池を整備し直し、選定した観測点に追加設置することで、根室沖と同様の上下動検出が可能な状態にし、それらのサイトでも観測を開始する。

2022年度および2023年度は年1回の頻度で観測を継続しデータを集積させる。さらに、既存観測点から上下変動検出が可能な6局等の特別なレイアウトのものを抽出し、近年考案された上下変動を組み込んだ解析アルゴリズムで既存の観測データを再解析し、現状のレイアウトでの上下変動検出精度、誤差要因を把握するとともに、誤差伝搬理論に基づいた最適な観測機器配置レイアウトを提案する。

各年度の観測では、誤差要因について考察できるよう、CTD/XCTD等による海中音速場についても同時計測を実施する。観測で使用する調査船は、別課題で申請した備船によるものの他、海洋研究開発機構の共同利用の機会も併せて利用する予定である。得られた水平・上下変動推定値を、観測を実施した研究課題に還元し、プレート固着状態の推定に役立てるとともに、誤差要因について精査した後に、新しいタイプのGPS-A観測レイアウトとして提案し、他のGPS-A観測を実施している研究機関が利用できるようにする。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2023年度は、課題HKD_09およびERI_05と共同で、共同利用によるGNSS-A観測航海を、千島海溝と日本海溝の両方で実施できた。また、同航海でそれぞれ投入したwavegliderによる最大2ヶ月におよぶ長期観測で、多くの観測点でデータを取得することができ、特に5カ年計画中に新設されたばかりの根室沖の観測点で信頼に足る変位速度を推定可能なデータが蓄積された。これらの成果は上記課題で別途報告する。本計画では特に上下変位推定に着目したが、本計画で提案・実施した、海底局を中心へ追加設置した根室沖のG21・G22・G23の3観測点については、移動観測が十分でないキャンペーンにおいても、上下変位が不定とならずに解けることを実証できた（図1）一方、精度面ではwavegliderと船舶観測とのオフセット、初期音速の実測値がないと精度が劣化する場合があることなどの問題点も明らかとなった。本計画で利用した観測点のうち、回収機構を備えたG23については本年度最終航海で回収に成功し、4年半の設置期間後に電蝕切り離し回収可能な実績を残した。また、音響測距に必要な音響波形の走時読み取りについて、トランスポンダーの種類による相関波形の相違について2022年度に試験データを取得したが、2023年度は、人が読み取った相関波形ピークに基づくテンプレートマッチング方を教師データとして学習させることで、CNNによる機械学習での自動読み取りも可能なことがわかり、今後の大規模観測での解析の省力化、あるいは準リアルタイム処理に役立つ可能性を示した。

2022年度から取り組んでいるwavegliderの姿勢把握について、ロール方向だけでなく、縦方向へ回転して転覆する事例も存在することが判明した（図2）。これは、フロートとグライダーをつなぐアンビリカルケーブルを巻き込む可能性もあるため、運用中にリアルタイムでフロートの姿勢やダメージを受けた場合の状況把握をリアルタイムにできるよう、データ送信のアルゴリズムを改良した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

5年間の成果として、中心海底局の追加による定点観測点のみでの上下変動推定を、数値シミュレーションと実測の両面から実証できた。一方で、精度が低下してしまう場合の条件を精査し、機器によるオフセットと音速の実測がない場合のモデル音速からの乖離度合いに依存することがわかった。また、解析に必要な音響波形の技術的問題について試験観測と解析アルゴリズムの両面から取り組み、将来の機器設計への道筋を示した。さらに、本観測で必須となっているwavegliderの安定運用に向けたリアルタイムでの状態確認を可能にした。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に

対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

「1.(5)ア」の項目に関し、上下変動検出の技術検証を根室沖のサイトで実施することで、固着度合いの推定に資するデータを蓄積することができ、これまでの観測の空白域を埋めている。

「5.(3)イ」の項目に関し、次世代型海底局の設計・実用試験が実施できた他、wavegliderの安定運用に向けたノウハウを蓄積できた

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

Kido, M., T. Iinuma, T. Fukuda, Y. Ohta, F. Tomita, and N. Murai, 2023, Onboard processing and transmission of realtime GNSS-Acoustic data on a waveglider, AGU Fall Meeting 2023, G42A-04

富田史章, 木戸元之, 飯沼卓史, 太田雄策, 日野亮太, 大園真子, 高橋浩晃, プラタ-マルティネス ライムンド, 野徹雄, 中東和夫, 中村恭之, 2023, 日本海溝・千島海溝沿いにおけるGNSS音響海底測地観測とその成果, 日本地震学会2023年度秋季大会, S03-05

黒須直樹, 木戸元之, 2023, GNSS-Acoustic観測の音響波形解析に対する機械学習の適用, 日本地震学会2023年度秋季大会, S21P-14

飯沼卓史, 木戸元之, 福田達也, 太田雄策, 富田史章, プラタ-マルティネス ライムンド, 日野亮太, 高橋浩晃, 堀高峰, 2023, ウェーブグライダーを用いたGNSS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測（その4）, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS12-P0

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

海洋物理モデルと連携したウェーブグライダーを用いたGNSS-A観測の高度化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

木戸元之（東北大学災害科学国際研究所）, 富田史章（東北大学災害科学国際研究所）, 日野亮太（東北大学大学院理学研究科）, 太田雄策（東北大学大学院理学研究科）, 東龍介（東北大学大学院理学研究科）
他機関との共同研究の有無：有

高橋浩晃（北海道大学大学院理学研究院）, 大園真子（北海道大学大学院理学研究院）, 飯沼卓史（海洋研究開発機構）, 堀高峰（海洋研究開発機構）, 尾鼻浩一郎（海洋研究開発機構）, 篠原雅尚（東京大学地震研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学災害科学国際研究所

電話：

e-mail：zisin-yoti@irides.tohoku.ac.jp

URL：http://irides.tohoku.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：木戸元之

所属：東北大学災害科学国際研究所

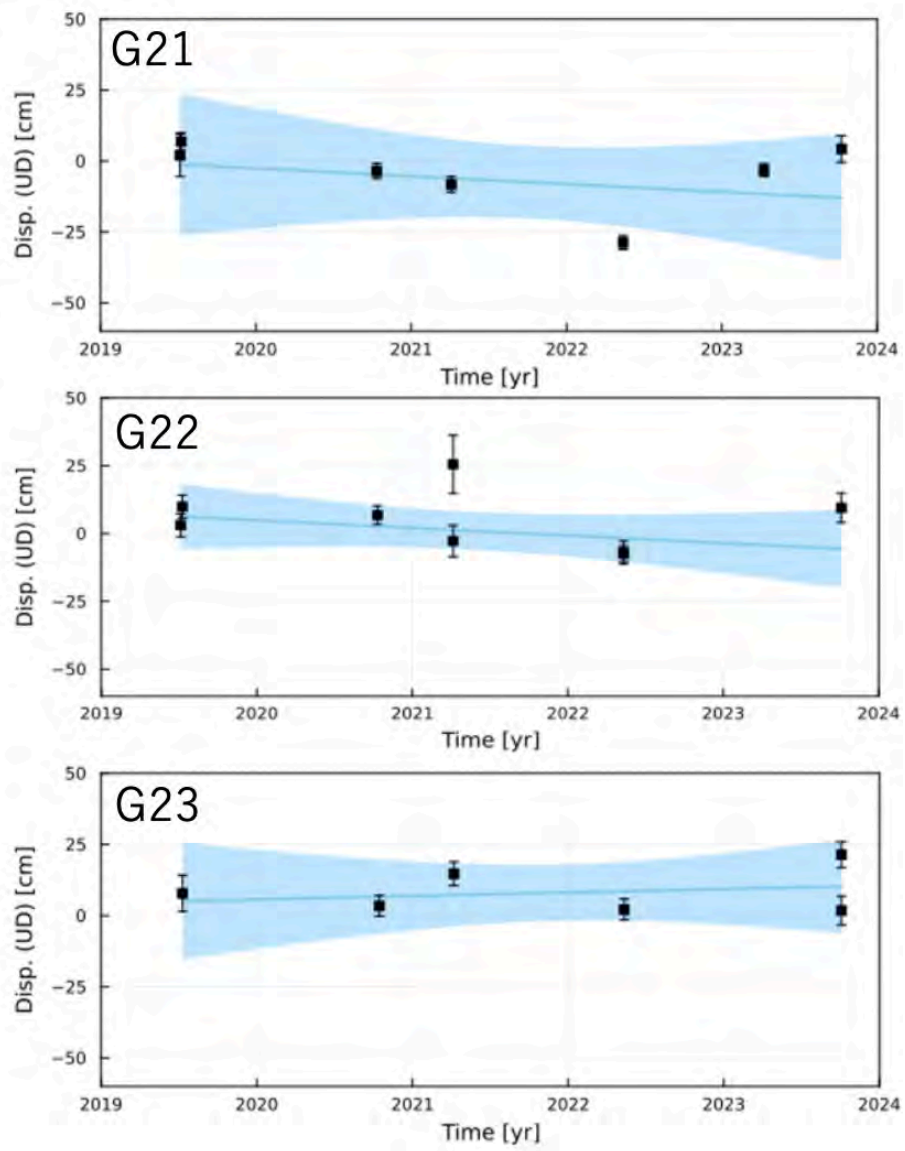


図1：根室沖観測点G21・G22・G23での本計画中の上下変位のキャンペーン観測結果

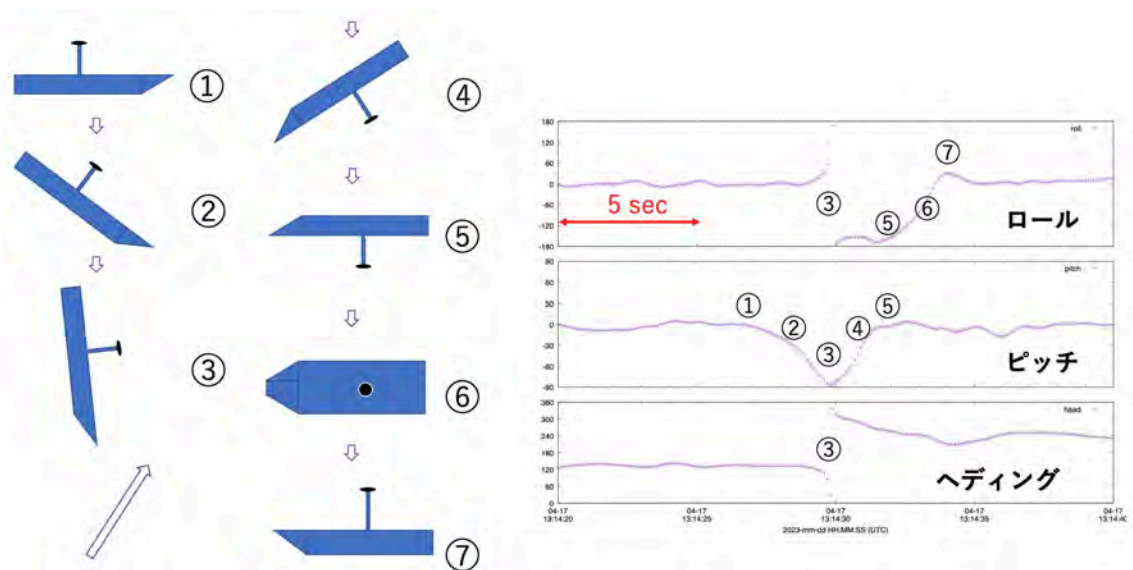


図 2 : wavegliderがピッチ方向に回転し転覆したケースの再現図

(1) 実施機関名：

東北大学災害科学国際研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地表設置型合成開口レーダ(GB-SAR)による地表面変位計測の高精度化

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

オ. 高リスク小規模火山噴火

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

GB-SAR干渉計測では、レーダ電波の地表面の往復時間・位相を計測し、繰り返し計測における位相の変化を計測し、地表面変位を推定している。電波は空中の伝搬速度が、大気に含まれる水蒸気量によって変化する。電波の伝搬速度が変化するとレーダで計測する対象物が変化しなくとも、計測される位相が変化するため、あたかも地表面が変位するような誤差を与える。我々が荒砥沢、南阿蘇で計測したデータにおいて、水蒸気量による誤差は、日変化においても無視できないほどの量であり、そのための大気補正手法を開発してきた。これにより、大気状態が比較的安定している場合、正確な地表面変位の計測が行えることを確認したが、強雨時など補正が十分でない事例も確認している。本研究では、こうした問題を解決することで、GB-SAR干渉計測の精度を向上させ、地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法に資することを目標とする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31-33年度は現在宮城県荒砥沢地区ならびに熊本県南阿蘇村立野に設置している2台のGB-SARの連続計測を継続し、GB-SARデータの取得を行う。合わせて、気象観測ステーションを設置するなどして、局所的な大気情報計測を行う。

広域のGB-SAR計測では、大気補正を計測したレーダデータを用いて行うことが実用上重要であり、本研究ではこれまで計測地域の大気を単純化したモデルで表現し補正に利用してきたが、モデルを高精度化し、時間・空間的にアダプティブな補正手法を開発する。そのために、局所的かつ詳細な大気情報を利用し、手法を検証する。

研究グループが所有するGB-SAR装置は世界的にも数少ないフルポーラリメトリ計測を行える。特に偏波情報を利用した大気補正は世界的に他のグループが実践的なデータを利用して行うことができず、我々は世界に先駆けた研究を行う体制を整えている。

平成34,35年度は発生する火山噴火予兆や地滑り予兆なども考慮しつつ、計測対象を変えて開発した

手法の検証を継続する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

インドネシアのメラピ火山は、過去に溶岩ドームの崩落が頻繁に発生し、大規模な被害を引き起こしてきた。2020年頃から、メラピ山の溶岩ドームの一部が十数メートル変位しており、将来的には崩落し火砕流を引き起こす危険性が懸念されている。この背景から、GB-SAR高精度化アルゴリズムを用いた溶岩ドームの計測を提案し、令和五年度は、その実現に向けた準備を進めた。

具体的には、2023年6月に東北大学の佐藤源之と室蘭工業大学の泉佑太が、インドネシアのエネルギー鉱物資源省地質庁火山地質災害軽減センター（CVGHM）とバンドン工科大学（ITB）を訪問し、メラピ火山とその防災に関する情報交換を行った。その後、CVGHM傘下の地質災害技術研究開発センター（BPPTKG）と、メラピ火山の溶岩ドーム崩落の危険性とGB-SARの有用性について意見交換を行った後、メラピ火山の現地視察を実施した。現在、ITBとGB-SARの輸出入に向けた具体的な準備を進めており、来年度の計測開始を目指している。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

主に山間部での地滑りや氷河計測を対象としたGB-SARデータを活用し、大気誤差補正アルゴリズムを提案してきた。特に、屈折率の変化がInSARの位相に与える影響を統計的に表し、補正手法に組み込むことで、山間部などの大気の状態変化が著しい場所でも高精度に変位を計測できることを実証した。さらに、北海道における三地点の地滑り斜面の計測も行い、現在はインドネシアのメラピ火山の観測に向けて実質的な準備を進めている。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

当該研究では、GB-SARを早期警戒システムに効果的に活用することを目指し、高精度な変位計測を実現するための手法を提案・実証してきた。これは斜面崩壊の事前評価手法の向上に寄与する活動であり、今後は得られた成果を活用してリアルタイム早期警戒システムの構築と社会実装を目指す。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Yuta Izumi, Motoyuki Sato, 2023, Evaluation of Atmospheric Phase Correction Performance in 79 GHz Ground-Based Radar Interferometry: A Comparison with 17 GHz Ground-Based SAR Data, Remote Sensing, 15, <https://doi.org/10.3390/rs15163931>, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Yuta Izumi, Ryuma Saito, Anwer S. Abd El-Hameed, Jun Fujiwara, Motoyuki Sato, 2023, Evaluation of Atmospheric Phase Screen in 79 GHz MIMO Radar Interferometry, IGARSS 2023, doi: 10.1109/IGARSS52108.2023.10281709.

Yuta Izumi, Othmar Frey, Motoyuki Sato, Simone Baffelli, Giovanni Nico, Irena Hajnsek 2023 8th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), 2023, A Novel Atmospheric Phase Correction Based on Kriging Incorporating Temporal Phase Evolution for Ground-Based SAR, 2023 8th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), doi: 10.1109/APSAR58496.2023.10388907.

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

森口周二（東北大学災害科学国際研究所）、佐藤源之（東北大学東北アジア研究センター）
他機関との共同研究の有無：有

泉佑太（室蘭工大）,栗原市,熊谷組,安藤・ハザマ

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学災害科学国際研究所

電話：

e-mail：zisin-yoti@irides.tohoku.ac.jp

URL：https://irides.tohoku.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：森口周二

所属：東北大学 災害科学国際研究所

(1) 実施機関名：

東北大学災害科学国際研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震の事前情報を起点とするハザード事象系統樹の開発

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究
地震

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

南海トラフ沿いの巨大地震について、その震源域周辺で非定常な現象が発生し、発生確率が相対的に高まったと評価された際（「臨時情報」が発表された際）、その後に発生しうる自然現象の推移シナリオやそれらの発生確率およびその幅が把握できるような「ハザード事象系統樹」を作成する。また、当事象系統樹をベースに、臨時情報に対応した防災計画作成の必要がある組織の担当者が、様々な自然現象の推移を理解し計画作成に活用できるツールを開発する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

計画前半においては、南海トラフ沿いで東海側（紀伊半島沖より東側）あるいは南海側（紀伊半島沖より西側）のいずれかを破壊するようなマグニチュード8クラスの巨大地震が発生した場合（「片割れ」ケース）、一段階規模が小さいマグニチュード7クラスの地震が南海トラフ巨大地震想定震源域周辺で発生した場合（「一部割れケース」）、普段観測されないようなゆっくりすべりが発生した場合（「ゆっくりすべりケース」）について、過去の事例研究の整理やグローバル地震カタログの調査などを行いつつ、事象系統樹のプロトタイプを完成させる。

計画後半においては、事象系統樹の末枝で想定される各シナリオ地震による津波浸水の予測・被害推定等の結果を事象系統樹と融合させ、臨時情報に対応した防災計画作成の必要がある組織の担当者が、様々な自然現象の推移を理解し計画作成に活用できるツールを開発する。本ツールの開発においては、想定ユーザーに含まれる地方自治体等の意見を聞き、その概形・表現方法・付加する情報等に反映させる。また、今後の技術発展を見越した事象系統樹の将来進化を検討し、臨時情報に基づく社会対応にとって有用な観測網の提案も行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

高知県において、南海トラフにおけるM8クラスの地震の連発の発生確率等に関する成果報告をするともに、南海トラフ地震臨時情報の実効的活用に向けた課題に関する意見交換を行った。その結果、市民の理解不足や興味不足の課題が浮かび上がり、今後も、臨時情報の啓発等のために連携を継続していく方針を確認した。また、静岡県とも連携し、臨時情報に関する啓発セミナーの講師を務めるなど社会発信をしつつ、自治体やメディア関係者等と意見交換を行った。異常なゆっくりすべりが発生した場合の巨大地震発生確率の評価に関しては、系統的な解析については将来的課題として持ち越すことにし、今年度はGNSS変位データから半自動的にゆっくりすべりを検出するための基礎技術開発を行った。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

1～2年目には、過去約110年間の世界の地震カタログを用いて、M8クラスの地震が近傍で連発する確率（半割れケース）、M7クラスの地震のあとに近傍でM8クラスの地震が発生する確率（一部割れケース）の評価を行った。国の南海トラフ地震臨時情報対応ガイドラインで目安として提示している数字と大筋で整合的であることの確認に加え、確率の信頼区間の評価や異なる時間フレームでの確率の推移の算出も実施した。3～4年目には、南海トラフにおける過去の歴史研究や地質学の研究の文献を系統的にレビューし、過去の南海トラフ地震発生履歴における連発の有無や可能性について再評価した。その結果を用い、南海トラフの固有性を考慮したM8クラス地震の連発確率を評価した。また、半割れ地震が起こったあとの後発地震による津波リスクの評価手法も確立した。4～5年目には、主な想定ユーザーである自治体との意見交換を行い、一連の成果の利活用や今後の展開などについて議論した。自治体とは今後の連携協力の合意が得られ、今後の一層の協働・連携のための足場が固まった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本課題は、主として、災害誘因予測のための研究課題のなかで、特に「地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究」に密接に関連していた。より具体的には、大地震の発生可能性が相対的に高まっていることを示す情報が得られた際に、災害発生の切迫性を社会に的確に伝える方法に関するものであった。本課題では、南海トラフにおけるM8クラスの地震の連発確率を最終的に平易な表で提示した。その数字の意味を説明すれば非専門家でも理解してもらえるとという点で成功であったが、今後は、そのような知見を継続的に社会に説明していく仕組みを考えていくことが重要であると考えられる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

福島洋・中鉢奈津子・栗山進一,2023,行動変容に着目した地震防災の取り組みの試行的体系整理と地震警戒・注意情報の有効活用へ向けた検討,第16回地震工学シンポジウム
福島洋,2023,「南海トラフ地震臨時情報」を知り地震によりよく備える,第153回ふじのくに防災学講座

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

- ・ゆっくりすべりによる大地震発生確率の計算（地震（中短期予測）部会）
- ・南海トラフ地震のリスクに対する住民の行動変容促進のための方法論の研究（南海トラフ総合G）

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

福島洋（東北大学災害科学国際研究所災害評価・低減研究部門）,木戸元之（東北大学災害科学国際研

究所災害評価・低減研究部門),越村俊一(東北大学災害科学国際研究所災害評価・低減研究部門),日野亮太(東北大学大学院理学研究科),太田雄策(東北大学大学院理学研究科)
他機関との共同研究の有無:無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等:東北大学災害科学国際研究所 災害評価・低減研究部門
電話:
e-mail: zisin-yoti@irides.tohoku.ac.jp
URL: <http://irides.tohoku.ac.jp/>

(14) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:福島 洋
所属:東北大学災害科学国際研究所 災害評価・低減研究部門

(1) 実施機関名：

東北大学災害科学国際研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

歴史地形の復元・可視化手法の確立と災害発生要因の分析

(3) 関連の深い建議の項目：

- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(4) その他関連する建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
ア. 史料の収集とデータベース化
5 研究を推進するための体制の整備
(2) 総合的研究
ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本研究においては、明治時代の地籍図や江戸時代の国絵図・村絵図類をもとに、近現代の開発による改変以前の古地形や集落の広がりを復元・可視化することを目的とする。この復元した歴史地形をベースに、特に東日本大震災の被災地となった東北地方太平洋沿岸において発生した地震・津波・洪水といった歴史的な災害を比較し、災害発生時の地形と被害の関連性を明らかにする。加えて、南海トラフ巨大地震の被災地となる東海・紀伊半島・四国地方を例に、歴史的な地形変遷から将来発生が懸念される災害について予測し、災害の予防や防災意識の啓発といった被害軽減への活用をはかる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題では、前半で東北地方を中心とする地形復元を実施し、ここで得られた地形復元の手法を応用して南海トラフ巨大地震の被害範囲とされる地域の地形復元を実施する。平成31年度においては、国土地理院の前身である陸軍陸地測量部によって作成された輯製図・帝国図をベースとして、高度経済成長による大規模開発以前の東北地方沿岸の歴史地形を復元する。これに基づいて、平成32年度は東北地方太平洋沿岸、平成33年度は東北地方日本海沿岸を中心に、各地の古絵図・古地図の情報を収集し、近世期の地形を復元する。ここで確立した歴史地形復元の手法をもとに、平成34年度は東海地方、平成35年度は紀伊半島・四国沿岸の地形復元を実施する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

今年度は、前年度まで進めてきた岩手県宮古市の復原地形の現状と歴史地形の痕跡や2011年の東日本大震災における被害状況を確認するために、フィールドワークを実施した。岩手県宮古市の市街地の南岸を流れる閉伊川の河口に前近代まで存在した砂州が埋め立てられ陸地化した状況や、宮古市街地を流れる山口川では前近代の流路が変更され、旧河道が暗渠化されている現状を確認した。

2011年の東日本大震災においては、かつての砂州を埋め立てた場所に建設されていた当時の宮古市役所庁舎が津波で被災し、また市街地にも山口川の旧河道に沿って津波が侵入しており、歴史地形と2011年の津波被害の間に明確な因果関係があることが確認できた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

今回の研究では、まず東日本大震災の被災地を主なフィールドとして、岩手県から宮城県にかけて旧版地形図からの復原地形を作成、さらに岩手県宮古市、山田町については前近代の絵図史料に基づく歴史地形の復原作業を実施し、GMT（Generic Mapping Tools）を用いて3Dで可視化した。また、宮古市や山田町については、山奈宗真『岩手県沿岸代海嘯部落見取絵図』に記される1896年明治三陸津波の浸水範囲について、復原した歴史地形と重ね合わせて、その浸水範囲を分析をおこなった。宮古市においては、これらの歴史地形が2011年の津波被害とどのような因果関係をもつかフィールドワークを実施して確認した。

また、上記の絵図からの地形復原方法を応用し、1854年安政東海地震の津波被災が描かれた『舞坂宿津波図』や浜名湖に襲来した『安政地震津波被害絵図』の分析して津波痕跡や到達地点を明らかとし、フィールドワークによってそれらの地点を特定した。

当初は東北地方のほか、南海トラフ巨大地震の被害想定地域も幅広く実施する計画であったが、新型コロナウイルス流行による調査や活動の制限があり、一部地域での実施にとどまった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本研究では、旧版地形図や前近代の絵図資料の情報を収集し、これらから復原した歴史地形の分析から、2011年の津波被害のような現在の災害を解明することについて、一定の手法を確立することができた。また、これをGMTによって3Dで可視化することにより、過去の地形と現在の地形の相違について把握し、これに起因する自然災害における被災リスクを用意に把握することが可能となった。今後、この手法を他地域で実践して事例を増やすこと、またこれらのデータについて効果的な周知方法を検討することで、地形の変遷に起因する現在の災害リスクに対する注意喚起へとつながっていくことを期待したい。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Yuichi Ebina and Daisuke Sugawara, 2024, Reconstructing Historical Terrain to Elucidate the Causes of Disaster Occurrence and Improve Disaster Prevention Literacy, JDR Journal of Disaster Research, 19, 38-49, doi: 10.20965/jdr.2024.p0030, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

東北地方を中心とする歴史災害の文献・絵図史料収集および地形復原による分析

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

蝦名裕一（東北大学災害科学国際研究所 災害人文社会研究部門）
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学災害科学国際研究所 災害文化アーカイブ研究分野
電話：022-752-2146
e-mail：zisin-yoti@irides.tohoku.ac.jp
URL：http://irides.tohoku.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

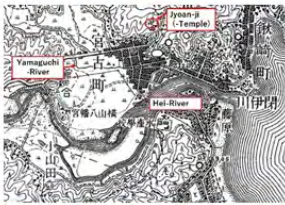
氏名：蝦名裕一

所属：東北大学災害科学国際研究所

IRIDES05 歴史地形の復元・可視化手法の確立と災害発生要因の分析
東北大学災害科学国際研究所 蝦名裕一

岩手県宮古市の歴史地形と2011年東日本大震災の津波被害の関係性について

古絵図・古地図にみる歴史地形



宮古市域のフィールドワーク



前近代から現代までの地形変化
・閉伊川の河口の埋め立て
・閉伊川、山口川の改修

人工的に改変された河川流路や暗渠化
⇒ 2011年の津波被害との因果関係

岩手県宮古市の復元地形とフィールドワーク結果

(1) 実施機関名：

東北大学災害科学国際研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

災害に関わる個人の心理・行動特性とその評価・活用・調整に関わる研究

(3) 関連の深い建議の項目：

- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(4) その他関連する建議の項目：

- 5 研究を推進するための体制の整備
(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育
(7) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

我々は東日本大震災の被災者に取材して、災害の危機を回避し困難を克服する個人の心理・行動特性として「災害を生きる力」の8因子（リーダーシップ・問題対応・愛他性・頑固さ・エチケット・感情抑制・自己超越・能動的健康）を明らかにしてきた(Sugiura et al., 2015)。地震・火山等の自然現象や社会の仕組みに関する知識、また災害予測情報等を、災害対応に活用できるか否かは個人差が大きく、この個人差をよく理解して活用することで、より効果的な防災対策が可能になると期待される。本研究では「災害を生きる力」のうち、災害情報活用に関わる因子に着目し、認知・脳メカニズムレベルでその理解を深め、災害対応チームの構成や研修プログラム開発、一般向けの防災教育やアウトリーチ活動に活用可能な新しい枠組みを提案・検証する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度においては、災害情報を活用する態度・能力・考え方と関係する「災害を生きる力」因子を整理する調査を設計し、平成32年度にこの調査を実施、得られたデータを分析して災害情報活用の社会・心理学的枠組み（いつ誰がどんな文脈で）と、それに貢献する「災害を生きる力」因子を明らかにする。平成33年度に、これらの因子が災害被害の発生抑止・軽減に資する過程について認知仮説を立て実験検証を行い、平成34年度にこれを脳メカニズムレベルで検証する認知課題を設計し、健常大学生を対象に機能的MRIを用いた脳活動計測実験を行う。平成35年度にこのデータを解析し、因子の得点と判断課題時の脳活動との関係を明らかにする。これら一連の知見を統合して、災害情報を活用する「災害を生きる力」因子の認知・脳科学的実体と、これを防災に活用するための考え方のモデルなどを体系化する。なお、部会全体としての研修プログラム構築に知見を提供する予定である。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和5年度は、災害情報が被害の発生抑止・軽減に資する過程を明らかにするための心理実験系（令和3年度に開発）について(1)行動実験データを詳細分析し、これを用いて行った(2)脳活動計測実験（令和4年度に実施）のデータを、災害への適応的個人特性との関係を中心に分析した。

心理実験系は架空災害シナリオを用いた避難意思決定課題 (Takubo et al., 2024a) である。この課題で、実験参加者は、主観的な津波発生リスクの程度が異なる40の架空の地震遭遇シナリオについて、実験的に避難意思決定（避難する／しない）を行った。40のシナリオのうち、20は震度や震源域といったメディアから取得する数値的情報（図1A）から、20は自身の体験で五感から得られる感覚的情報（図1B）から構成されている。これらのシナリオは津波リスク（多数の実験参加者の避難選択率）が非常に低いものから非常に高いものまで均等にばらつくように、オンライン実験によって120の候補シナリオから選抜したものである。

(1) 行動実験データの詳細分析

当該実験はこの避難意思決定課題の妥当性検証を目的に1,200名の一般成人（男性600名・女性600名； 49.5 ± 16.6 (SD)歳）を対象として行ったオンライン実験である。検証として、災害適応的な心理行動特性「災害を生きる力」8因子(Sugiura et al., 2015)のうち、東日本震災における迅速・主体的な津波避難行動と相関した性格特性が、本実験でも同様の避難傾向との相関を示すかに着目している。このような性格特性として、迅速な避難行動との相関が「感情制御」傾向(Sugiura et al., 2015)と、リスク知覚を統制した上で主体的避難に貢献する特性として「リーダーシップ」と「能動的健康」(Sugiura et al., 2019)が、抽出されている。昨年度までの分析では、シナリオ津波リスクと避難意思決定の整合性が高い被験者を「誠意ある実験参加者」として選択して分析し、避難率と「リーダーシップ」と「能動的健康」が正相関することを示した。しかしこの分析では、実験参加者選択で $n=205$ まで絞り込んでいる点で、分析サンプルの母集団代表性に懸念があった。

今年度は、除外サンプルを明らかな不誠実回答者136名に限定し、1,064サンプルを対象に性格特性との相関分析に先立って、避難意思決定の個人差パターンの因子分析を行った。その結果大きく4つの因子が抽出され、その第1因子（リスク感受性：シナリオの津波リスクにかかわらず、避難する傾向）、第2因子（リスク精査傾向：津波リスクの高いシナリオでより避難する傾向）、第3因子（感覚シナリオ高感受性：数値シナリオより感覚シナリオでより避難しやすい傾向）が解釈可能であった。性格特性の影響は年齢・性別・過去の被災経験などを統制した階層的重回帰分析で行い、このうち第1因子（リスク感受性）の得点に対して「感情制御」傾向は正の効果があり、第2因子（リスク精査傾向）の得点に対して「リーダーシップ」は負の効果を持つことが明らかとなった。両結果を総合すると、避難意思決定にあたって津波リスクを精査する傾向は、実際の津波避難においては迅速な反応の阻害（「リーダーシップ」得点と負相関）と関連し、津波リスクに関わらず「まず避難」する意思決定特性（リスク感受性）に「感情抑制」過程が関わる可能性が示唆された。

(2) 脳活動計測実験データの分析

当該実験は代表的な脳計測実験系である機能的MRIを用いて、地震発生時の津波避難意思決定過程の脳基盤可視化を目指した。この避難意思決定課題と統制課題（単純な視覚判断課題）を、58名の20代成人(男性31名・女性27名； 21.51 ± 1.30 (SD)歳)にMRIスキャナー内で行わせ、脳活動を計測した。統制課題の正答率が60%以下の被験者を不誠実回答者として除外し、55サンプルを解析対象とした。被験者ごとに感覚シナリオ・数値シナリオを区別して課題脳反応時系列モデルを作成し、画素毎重回帰分析で脳反応推定値マップを作成した。さらにこれを用いた画素毎被験者間回帰分析として、感覚課題、数値課題、両者平均、の脳反応推定値をそれぞれ従属変数に、「感情制御」得点を独立変数とした単回帰分析と、リスク感受性（各被験者の平均避難率）とリスク精査傾向(標準化シナリオ平均避難率で避難意思決定データを重みづけ)を独立変数とした重回帰分析を行った。

その結果、平均課題脳反応と「感情制御」得点の負相関が感情反応領域（両側島皮質・前帯状回；図2A）で（感覚・数値シナリオでも同様傾向）、感覚課題脳反応とリスク感受性の負相関も感情反応領域（前帯状回；図2B）で、数値課題脳反応とリスク精査傾向の正相関が記憶関連領域（右海馬；図2C）で見られた。これらの結果から、リスクに関わらず「まず避難」する意思決定特性（リスク感受性）やこれと正相関する「感情抑制」特性は、脳内の感情反応領域の抑制と関連することが示唆された。一方、避難意思決定にあたってリスクを精査する傾向は、少なくとも数値シナリオに関しては記憶参照過程との関連が示唆された。

・ 計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本研究では令和元年度に社会調査を実施、災害情報活用の社会・心理学的枠組み（いつ誰がどんな文脈で）の構築を目指し、令和2年度には扱う災害情報とその文脈をメディア情報と緊急時避難意思決定に絞り込んだ。令和3年度は文献調査の結果も援用し、津波避難意思決定の心理実験系を開発、妥当性検証実験を行い、令和4年度に脳計測実験を経て、上述の今年度成果に至った。ほぼ計画通り

の実施実績となった。

迅速・主体的な避難など、人間の災害情報に対する適応的反応の心理過程を理解することは、防災教育など防災リテラシーの向上に向けた、効果的・効率的な災害コミュニケーション戦略に貢献すると期待される。災害避難は「正常化バイアス」といった概念に象徴されるように、無意識的な認知バイアス過程が重要な役割を演じることから、質問紙等の意識的・言語的回答に基づいた研究方法には限界がある。この点で、心理過程を脳内ネットワークの活動として可視化する脳計測実験はこの限界を克服できる可能性がある。

本研究の成果から、リスクに関わらず「まず避難」する意思決定に、脳内の感情反応抑制が重要であることが示唆された。すなわち、被災リスクや避難行動に対する忌避感情が、避難行動を阻害しており、これらを抑制することが防災リテラシー向上の重要課題であるという示唆である。これは正常化バイアスの頑強性の説明となりうるメカニズムであり、「怖がらせれば逃げるだろう」という旧来の災害心理学的発想を否定する知見である。また、一見正しいリスク精査傾向が、実は迅速な避難意思決定に阻害的に働くという知見も重要である。災害情報活用にあたっては、災害リスクを不適切に恐怖感情に訴求したり、学術知見に基づいてリスク精査を促すメッセージを発したりしないよう、工夫が必要と考えられる。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

「4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究-(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究」と「5 計画を推進するための体制の整備-(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育、(7) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成」へ貢献する学術的準備は整ったが、その実践的実現のためには、体制的・資源的課題がある。「災害の軽減に貢献する」という目標に対しても、本研究成果は上述のように極めて重要な災害心理学的知見を提供し、今後実践研究等との連携により貢献の実現が期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Takubo, M., Sugiura, M., Ishibashi, R., Miura, N., Tanabe-Ishibashi, A., 2024a, A Risk-Scrutinizing Attitude is Independent of Risk-Sensitive Attitude and May Hamper a Proper Protective Response: A Tsunami Simulation Experiment., J. Disaster Res., 19, 81-93, doi: 10.20965/jdr.2024.p0081, 査読有, 謝辞有

Takubo, M., Sugiura, M., Ishibashi, R., Miura, N., Tanabe-Ishibashi, A., 2024b, How Disaster Prevention Videos Contribute to Tsunami Evacuation: Subjective Motivation and Risk-Sensitive Attitude in a Simulation Experiment., J. Disaster Res., 19, 94-104, doi: 10.20965/jdr.2024.p0094, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Motoaki Sugiura, Masato Takubo, Ryo Ishibashi, Naoki Miura, Azumi Tanabe, 2023, Development of a fictitious scenario task for tsunami evacuation attitude assessment., Japan Geoscience Union Meeting 2023, HDS07-02

Motoaki Sugiura, Masato Takubo, Ryo Ishibashi, Naoki Miura, Azumi Tanabe, 2023, Differences in neural processes of tsunami evacuation decision-making by information type: an fMRI study., Japan Geoscience Union Meeting 2023, HDS07-P01

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

防災における非合理的な認知・意思決定と行動変容の心理・脳基盤理解

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

杉浦元亮（東北大学災害科学国際研究所）, 佐藤翔輔（東北大学災害科学国際研究所）, 保田真理（東北

大学災害科学国際研究所),水谷大二郎(東北大学災害科学国際研究所),大場健太郎(東北大学加齢医学研究所),石橋遼(東北大学スマート・エイジング学際重点研究センター)

他機関との共同研究の有無:有

浅野竜一(一般社団法人Project72),本多明生(静岡理科大学)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等:認知科学研究分野(加齢医学研究所・人間脳科学研究分野)

電話:

e-mail: zisin-yoti@irides.tohoku.ac.jp

URL: http://www.hubs.idac.tohoku.ac.jp/

(14) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:杉浦元亮

所属:東北大学加齢医学研究所/災害科学国際研究所

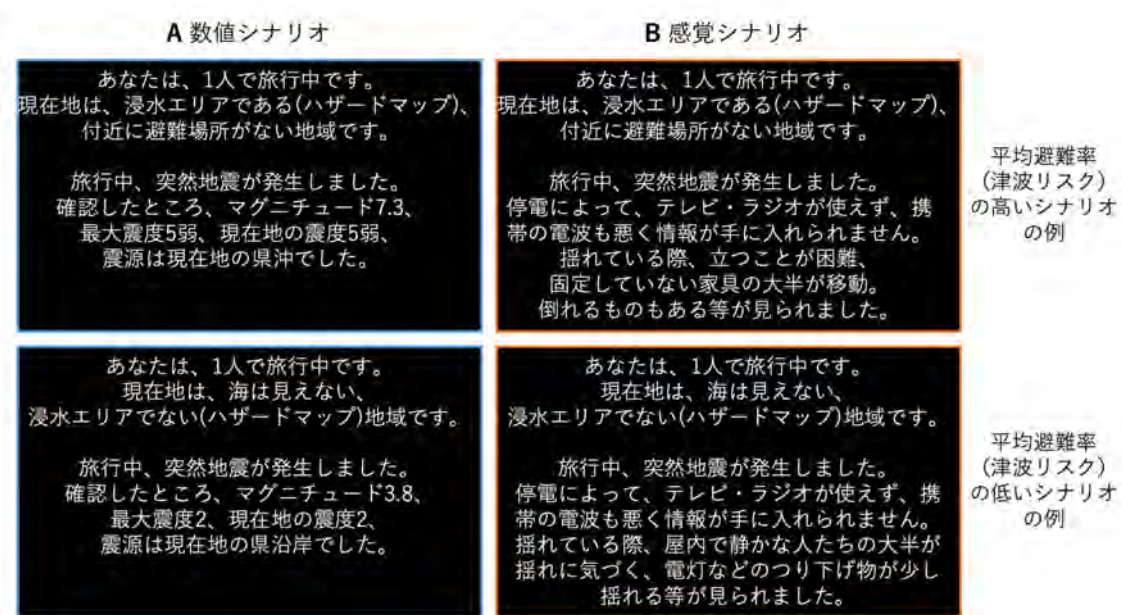


図1 架空災害シナリオを用いた避難意思決定課題

実験参加者は、主観的な津波発生リスクの程度が異なる40の架空の地震遭遇シナリオについて、実験的に避難意思決定(避難する/しない)を行った。40のシナリオのうち、20は震度や震源域といったメディアから取得する数値的情報(A)から、20は自身の体験で五感から得られる感覚的情報(B)から構成されている

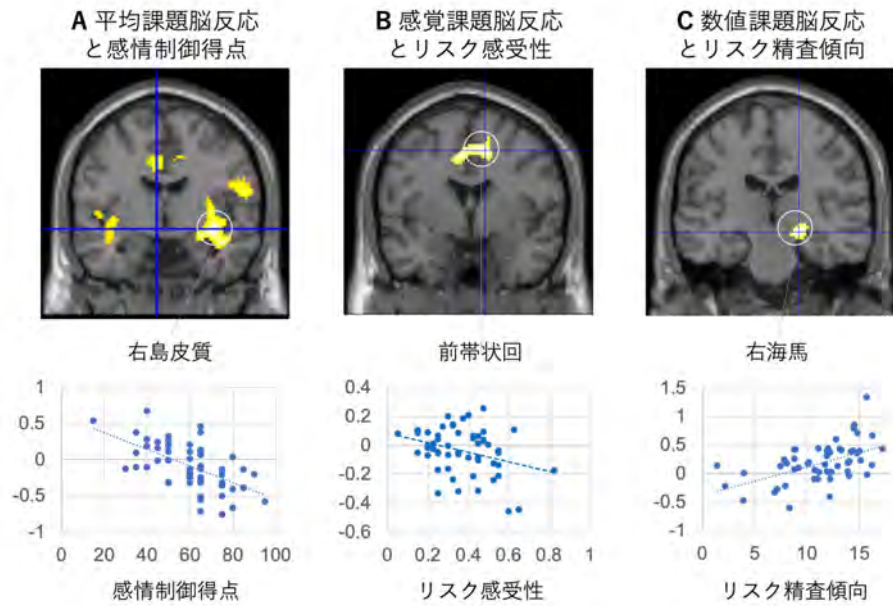


図2 脳活動計測実験データの分析結果

A: 平均課題脳反応と「感情制御」得点の負相関が有意な領域. B: 感覚課題脳反応とリスク感受性の負相関が有意な領域. C: 数値課題脳反応とリスク精査傾向の正相関が有意な領域.

(1) 実施機関名：

海洋研究開発機構

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震発生帯モデリング研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

地震

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

イ. 地震断層滑りのモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

イ. 内陸地震

オ. 構造共通モデルの構築

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

イ. 津波の即時予測手法

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

（国立研究開発法人海洋研究開発機構第4期中期目標より抜粋）

III 1. (3) 海域で発生する地震及び火山活動に関する研究開発

我が国の周辺海域においては、南海トラフ地震や海底カルデラ等、大規模災害をもたらす地震・火山活動が活発であり、防災・減災対策の更なる強化が求められている。そのための具体的な検討を進めるには、海底下で進行する地震・火山活動の実態把握及び長期評価が欠かせないものの、現在は観測

データも十分に揃っていない状況にあり、観測体制の構築と、データの取得・解析を通じたメカニズムの理解等の科学的知見の充実が課題となっている。このため、機構は、地震発生メカニズムの理解、プレート固着の現状把握と推移予測及び海域火山活動の予測研究に資するデータと知見を蓄積し、地震調査研究推進本部、気象庁、防災科学技術研究所、大学等の関係機関に情報提供することで、地震発生帯の現状把握・長期評価及び火山活動評価に貢献する。これを実現するために、大学や防災科学技術研究所等の関係機関と連携して、南海トラフ地震の想定震源域等を中心とした、広域かつ精緻なデータを連続的にリアルタイムで取得する海底地殻変動観測網の整備・高度化を進めるとともに、高精度の海底地下構造調査、海底堆積物・海底下岩石試料の採取・分析を実施する。これにより得られたデータと既存のデータの統合・解析を行うことで、地震発生帯モデル及びプレート固着状態に関する推移予測手法の高度化を行う。また、海域火山に係る先進的な観測手段を確立し、海域火山周辺において火山活動の現状把握を行うとともに、地球内部構造や熱・物質循環機構等の解析を進める。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

国立研究開発法人海洋研究開発機構第4期中期計画に基づき下記の事項について実施する。

地震発生帯の現状把握・長期評価へ貢献するために、地震発生帯の調査観測から得られた最新の観測データに基づき、地震発生メカニズムの理解やプレート固着の現状把握と推移予測に資する知見を蓄積する。そのためには、まず、海域観測で取得した各種データと既存データ等を統合してこれまでに機構で開発された地震発生帯モデルを高精度化し、それらモデルを用いた地震発生帯変動の計算結果と観測データの解析による現状把握及び推移予測の手法を確立する。同時に、これまでに構築してきた即時津波被害予測システムの高度化を進める。得られた知見は、国等の地震・津波被害想定や現状評価のための情報として提供するとともに、情報創生の研究部門とも連携して社会へ情報発信する。具体的には(1)新たな観測システム、調査・観測、実験によって得られたデータを用いた三次元地震発生帯地下構造モデルの構築(2)地震発生帯における地殻活動の変動状況の把握と予測のためのデータ同化手法の高精度化(3)海底地すべり等、地震以外の津波発生源を考慮した、即時津波被害予測システムの高度化等をおこなう。

さらに、これらの進捗状況を踏まえ、(1)高度化された三次元地震発生帯地下構造モデルでの地震の発生、地震波の伝播、津波の発生等の各過程に関するシミュレーションや、地殻活動のデータ解析の実施(2)掘削による実断層サンプルを用いた力学実験結果に基づく、断層運動の力学過程のモデル化(3)データ同化手法を用いたプレート固着状態の推移予測の試行に取り組む。これらにより、地震・津波の発生過程の理解とその予測を進め、得られた知見及びデータを国、関係機関等へ提供する。

(8) 令和5年度及び計画期間中(令和元年度～5年度)の成果の概要：

・今年度の成果の概要

(1) M9サイクル中のM7の繰り返しの変化(Nakata et al. (2023, PEPS))

すべり速度状態依存摩擦則を仮定したプレート境界地震サイクルのシミュレーションによって、M9東北地震タイプの1サイクル中におけるM>7宮城県沖地震タイプの地震の複数回繰り返しのパターンを調べるとともに、M9前後の観測データとの整合性を調べた。M>7地震の繰り返し間隔は、M9直後には、平均的な再来間隔よりも短くなるのに対して、その次は一番長くなり、変化が大きい、その後はばらつきが小さく、平均的な間隔になる。このような再来間隔の変化は、M>7地震のアスペリティ周辺における固着状態やゆっくりしたすべりの時空間変化によるものである。アスペリティ周りの固着・すべりの時空間変化を観測データから調べるには、日本海溝の場合は小繰り返し地震を使うことができる。実際、M9地震前後の約30年間にわたるすべりの時空間変化をシミュレーションの結果と比較したところ、定性的なパターンは調和的であることがわかった。

(2) 粘弾性応答を考慮した南海地震後の内陸やスラブ内応力変化の推定(Hashima et al., 2023 accepted, EPS)

本研究では巨大地震による内陸の震源断層に対する粘弾性緩和を考慮した応力載荷計算を行った。粘弾性緩和は、上盤側だけでなくスラブ下部の低粘性層を考慮する必要性も示されているため、そのような粘性構造を取り入れた大規模3次元有限要素モデルを用いる。計算の結果、西日本の内陸域で広範囲に0.1 MPa以上の応力変化が引き起こされた。しかし、粘弾性緩和の影響は4年間ではほとんど見られなかった。一方、スラブ内部の応力分布は、スラブ下部の低粘性層の粘性緩和の影響によって、低粘性層の影響が無視できないことが示された。また、西南日本の震源断層においてクーロン破壊応力

(Δ CFS) を求めた。 Δ CFSは東南海地震後には中部～近畿地方において正となり、南海地震後に近畿地方や中央構造線の周囲の断層で正となる傾向がある。九州の断層は一貫して負であった。過去に被害地震を起こした断層において Δ CFSとの関連を調べたところ、東南海・南海地震で Δ CFSが正となる断層における地震は、安政(1854年)、昭和(1944年、1946年)の巨大地震後10年程度で発生していた。一方、東南海・南海地震で Δ CFSが負となる断層における地震は、昭和(1944年、1946年)の巨大地震の前50年の間、または近年(1995年以降)発生していた。

・計画期間中(令和元年度～5年度)の成果の概要

(1) ベースとなる地下構造モデルの構築として、全国一次地下構造モデルの大規模地殻変動計算用の有限要素モデルの構築を行い、プレート境界でのすべりにもなう地殻変動のグリーン関数のライブラリを構築・公開した。また、プレート境界から分岐する断層の導入も進めている。全国一次地下構造モデル構築後の構造探査成果を導入した構造モデルの更新が進められているが、有限要素モデル構築は次の課題である。さらに、粘弾性構造を導入して、スラブ内の低粘性層の有無による巨大地震後の地殻変動が海底観測網で捉えられるかどうかの検討等を行った。(2) 現状把握と推移予測のための解析手法高度化と実データ適用については、観測データやモデルの不確さを考慮した固着すべり解析手法を構築した。また、南海トラフ浅部SSEのリアルタイムモニタリングを進め、気象庁検討会や地震調査委員会に定期的に報告している。摩擦パラメータ推定手法の高度化として、余効すべりやSSEの伝播速度等の観測量から摩擦パラメータを推定する手法を開発したり、MCMCによるSSEの摩擦パラメータ推定手法を開発した。(3) 推移予測システムのプロトタイプ構築として、観測データベースの拡充として、DONET水圧計の日変化をリアルタイムに解析できるようにした。また、シミュレーションデータベースの拡充のための準備を進めた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測に向けて、推移予測システムのプロトタイプ構築のための準備を進めるとともに、現状把握や推移予測の手法開発や実データへの適用による手法改善を進めた。今後はこのプロトタイプでの予測の試行を行って妥当性を検証しつつ、順次開発した手法を取り入れてシステムを高度化していく。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

・論文・報告書等

Nakata, R., N. Uchida, T. Hori, and R. Hino, 2023, Recurrence intervals for $M > 7$ Miyagi-ken-Oki earthquakes during an $M \sim 9$ earthquake cycle, Prog. Earth Planet. Sci., 10, 34, doi.org/10.1186/s40645-023-00566-y, 査読有, 謝辞無

Hashima, A., T. Hori, T. Iinuma, S. Murakami, K. Fujita, and Ichimura, T., 2023, Stress change in southwest Japan due to the 1944–1946 Nankai megathrust rupture sequence based on a 3-D heterogeneous rheological model, Earth Planets Space, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

橋間昭徳・堀高峰・飯沼卓史・村上颯太・藤田航平・市村強, 2023, 3次元高詳細構造モデルを用いた1944年東南海・1946年南海地震によるプレート内応力変化計算, 日本地球惑星科学連合2023年大会

加納将行・田中優介・飯沼卓史・堀高峰, 2023, Data assimilation for reproducing and predicting the fault slip behavior in the 2010 Bungo Channel long-term slow slip event, 日本地球惑星科学連合2023年大会

有吉慶介・飯沼卓史・山本揚二郎・宮澤泰正・Varlamov Sergey・松本浩幸・町田祐弥・Saffer Demian・荒木英一郎・矢田修一郎・堀川博紀・末木健太郎・高橋成実・堀高峰・小平秀一, 2023, 孔内観測とDONETから捉えられた浅部スロースリップイベント: 2020年3月と2023年3月との共通点・相違点の考察, 日本地震学会2023年度秋季大会

橋間昭徳・堀高峰・飯沼卓史・藤田航平・村上颯太・市村強, 2023, 2004年紀伊半島沖地震による余効変動解析: 3次元粘弾性構造の影響, 日本地震学会2023年度秋季大会

佐藤大祐・堀高峰・深畑幸俊, 2023, 南海沈み込み帯における、摩擦運動の相補性に基づいた固着域と高滑り欠損域の分離, 日本地震学会2023年度秋季大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地震・津波の発生過程の理解とその予測研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター,地震発生帯研究センター
他機関との共同研究の有無：有
東京大学地震研究所,東北大学

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：海域地震火山部門

電話：

e-mail：

URL：<http://www.jamstec.go.jp/rimg/j/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：堀 高峰

所属：海域地震火山部門地震津波予測研究開発センター

(1) 実施機関名：

海洋研究開発機構

(2) 研究課題（または観測項目）名：

海底広域変動観測研究

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

5 研究を推進するための体制の整備

- (3) 研究基盤の開発・整備
イ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

- (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
地震

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
ア. 地震発生機構の解明
イ. 地震断層滑りのモデル化

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
オ. 構造共通モデルの構築

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (1) 地震発生の新たな長期予測
ア. 海溝型巨大地震の長期予測

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

（国立研究開発法人海洋研究開発機構第4期中期目標より抜粋）

III 1. (3) 海域で発生する地震及び火山活動に関する研究開発

我が国の周辺海域においては、南海トラフ地震や海底カルデラ等、大規模災害をもたらす地震・火山活動が活発であり、防災・減災対策の更なる強化が求められている。そのための具体的な検討を進めるには、海底下で進行する地震・火山活動の実態把握及び長期評価が欠かせないものの、現在は観測データも十分に揃っていない状況にあり、観測体制の構築と、データの取得・解析を通じたメカニズムの理解等の科学的知見の充実が課題となっている。このため、機構は、地震発生メカニズムの理解、プレート固着の現状把握と推移予測及び海域火山活動の予測研究に資するデータと知見を蓄積し、地

震調査研究推進本部、気象庁、防災科学技術研究所、大学等の関係機関に情報提供することで、地震発生帯の現状把握・長期評価及び火山活動評価に貢献する。これを実現するために、大学や防災科学技術研究所等の関係機関と連携して、南海トラフ地震の想定震源域等を中心とした、広域かつ精緻なデータを連続的にリアルタイムで取得する海底地殻変動観測網の整備・高度化を進めるとともに、高精度の海底地下構造調査、海底堆積物・海底下岩石試料の採取・分析を実施する。これにより得られたデータと既存のデータの統合・解析を行うことで、地震発生帯モデル及びプレート固着状態に関する推移予測手法の高度化を行う。また、海域火山に係る先進的な観測手段を確立し、海域火山周辺において火山活動の現状把握を行うとともに、地球内部構造や熱・物質循環機構等の解析を進める。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

国立研究開発法人海洋研究開発機構第4期中期計画に基づき下記の事項について実施する。海底下で発生する地震は、陸域と比較して未だ実態の把握が大幅に遅れている。そこで、地震活動の現状把握と実態解明のために、広域かつ精緻な観測データをリアルタイムで取得する海底地殻変動・地震活動観測技術システムを開発し、展開する。特に、巨大地震・津波の発生源として緊急性や重要性が高い海域を中心に三次元地殻構造や地殻活動、断層物性、地震活動履歴等に係る調査を実施する。また、これら観測システム及び調査によって得られた各種データセットは、地震調査研究推進本部等、我が国の関係機関で地震発生帯の現状評価等に活用されるように広く情報提供する。さらに、これら日本周辺での知見に加えて、アジア太平洋地域の地震・津波の実態解明と防災研究推進のための広域的な共同研究体制を構築する。

具体的には(1)海底地殻変動観測の高度化を目的とした、地震・津波観測監視システム(DONET)設置海域における海域実証試験(2)光ファイバーセンシング等の新たな海底地殻変動・地震活動観測技術や、より広域的な観測を効率的に行うための無人自動観測技術の開発(3)南海トラフ等の重要海域における複雑な断層形状や断層付近の各種物性を三次元的に捉えるための構造探査及び海底地震観測(4)海底堆積物の採取及び解析による地震発生履歴の調査等に取り組む。また、以上の調査・観測から得られたデータを詳細に解析し、地震発生帯の実態把握に係る知見として、国、地方公共団体、関係機関へ提供する。

(8) 令和5年度及び計画期間中(令和元年度～5年度)の成果の概要：

・今年度の成果の概要

今年度も引き続き巨大地震・津波の発生源として緊急性や重要性が高い海域として南海トラフや日本海溝域にて三次元的な地殻構造や地殻活動、断層物性、地震活動履歴等に係る調査を実施するとともに、昨年度までに取得したデータの解析を進めた。具体的には東南海および東海海域において集中的な二次元反射法探査を実施するとともに稠密にOBSを設置して屈折法観測も実施した他、日本海溝北部域において沈み込む前の海洋プレートから沈み込み帯深部にかけて長大な反射法探査を実施した。データ解析については南海トラフ日向灘から熊野灘までの反射法や屈折法データの解析を進め論文として発表した他、千島海溝や日本海溝のデータ解析や論文化、ニュージーランドヒ克蘭ギ沈み込み帯における解析結果の論文化も行った。

・計画期間中(令和元年度～5年度)の成果の概要

巨大地震・津波の発生源として緊急性や重要性が高い海域として南海トラフや日本海溝域にて三次元的な地殻構造や地殻活動、断層物性、地震活動履歴等に係る調査を実施し、解析、成果発表を進めており、概ね計画通りに進んでいる。また、ニュージーランドヒ克蘭ギや北米カスカディアなどの沈み込み帯における研究成果の発表や新たな調査観測に向けた取り組みも進めている。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地震発生帯における様々な研究の基盤的情報となる地下構造を三次元的に明らかにするための取り組みを順調にすすめており、南海トラフ域の三次元構造の高度化、マルチパラメータ化を進めるとともに千島・日本海溝域でも三次元モデルの構築に着手した。今後も引き続き日本周辺を中心とした沈み込み帯地震発生帯において、三次元地下構造を把握するための研究とその成果発表を進めていく。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

- Ryoichiro Agata, Kazuya Shiraishi, Gou Fujie,2023, Bayesian seismic tomography based on velocity-space Stein variational gradient descent for physics-informed neural network, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 61, 1-17, doi:10.1109/TGRS.2023.3295414, 査読有
- Arai, R., S. Miura, Y. Nakamura, G. Fujie, S. Kodaira, Y. Kaiho, K. Mochizuki, R. Nakata, M. Kinoshita, Y. Hashimoto, Y. Hamada, K. Okino,2023, Upper-plate conduits linked to plate boundary that hosts slow earthquakes, Nature Communications, 14, 5101, https://doi.org/10.1038/s41467-023-40762-4, 査読有
- Nakamura, Y., Kodaira, S., Fujie, G., Yamashita, M., Obana, K., Miura, S.,2023, Incoming plate structure at the Japan Trench subduction zone revealed in densely spaced reflection seismic profiles, PEPS, 10:45, https://doi.org/10.1186/s40645-023-00579-7, 査読有
- Bangs, N. L., J. K. Morgan, R. E. Bell, S. Han, R. Arai, S. Kodaira, A. C. Gase, X. Wu, R. Davy, L. Frahm, H. L. Tilley, D. H. N. Barker, J. H. Edwards, H. J. Tobin, Tim Reston, S. A. Henrys, G. F. Moore, D. Bassett, R. Kellett, V. Stucker, B. Fry,2023, Slow slip along the Hikurangi margin linked to fluid-rich sediments trailing subducting seamounts, Nature Geoscience, 16, 505-512, https://doi.org/10.1038/s41561-023-01186-3, 査読有
- Gase, A., N. Bangs, D. Saffer, S. Han, P. Miller, R. Bell, R. Arai, S. Henrys, S. Kodaira, R. Davy, L. Frahm, D. Barker,2023, Subducting volcanoclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip, Science Advances, 9, eadh0150, https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150, 査読有
- Fujie, G. S. Kodaira, K. Obana, Y. Yamamoto, T. Isse, T. Yamada, T. No, Y. Nakamura, S. Miura,2023, The nature of the Pacific plate as subduction inputs to the northeastern Japan arc and its implication for subduction zone processes, Progress in Earth and Planetary Science, 10:50, https://doi.org/10.1186/s40645-023-00578-8, 査読有
- Yamaguchi, H., Kodaira, S., Fujie, G., No, T., Nakamura, Y., Shiraishi, K., Seama, N.,2024, Undulations in subducted oceanic crust correlate with shallow tremor distribution in the Kuril Trench off Hokkaido, Geophysical Research Letters, 51, e2023GL106815, https://doi.org/10.1029/2023GL106815, 査読有
- Takenouchi, S., Tsuji, T., Shiraishi, K., Nakamura Y., Fujie, G., Kodaira, S., Mukumoto, K.,2023, Identification of active faults and tectonic features through heat flow distribution in the Nankai Trough, Japan, based on high-resolution velocity-estimated bottom-simulating reflector depths, Earth Planets Space, 75, 147, https://doi.org/10.1186/s40623-023-01890-9, 査読有
- Schottenfels, E., Regalla, C., Nakamura, Y.,2024, Influence of outer-rise faults on shallow décollement heterogeneity and sediment flux at the Japan trench, Seismica, 2, https://doi.org/10.26443/seismica.v3i1.386, 査読有
- Furuichi, M., J. Chen, D. Nishiura, R. Arai, Y. Yamamoto,2023, Thrust formation using a numerical granular rock box experiment, Tectonophysics, 862, 229963, https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.22996, 査読有
- Li, Y., I. Grevemeyer, S. Kodaira, G. Fujie,2023, Seismic structure of the Izu Arc-Backarc system, J. Geophys. Res., 128, e2023JB027213, https://doi.org/10.1029/2023JB027213, 査読有
- Bassett, D., Fujie, G., Kodaira, S., Arai, R., Yamamoto, Y., Henrys, S., et al.,2023, Heterogeneous crustal structure of the Hikurangi Plateau revealed by SHIRE seismic data: Origin and implications for plate boundary tectonics, Geophysical Research Letters, 50, e2023GL105674, https://doi.org/10.1029/2023GL105674, 査読有
- Takahashi, T., Nakanishi, A., Kodaira, S. & Kaneda, Y.,2023, Estimation of the Hurst exponents of irregularly sampled subsurface fault geometries by the lifting scheme, Geophys. J. Int., 235, 1102-1116, doi: 10.1093/gji/ggad275, 査読有
- Tonegawa, T., Fukao Y.,2023, Mesospheric pressure source from the 2022 Hunga, Tonga eruption excites 3.6-mHz air-sea coupled waves, Science Advances, 9, doi:10.1126/sciadv.adg8036, 査読有

Hutchinson, J., H. Kao, M. Riedel, K. Obana, K. Wang, S. Kodaira, T. Takahashi & Y. Yamamoto, 2023, tectonic evolution of the Nootka fault zone and deformation of the shallow subducted Explorer plate in northern Cascadia as revealed by earthquake distributions and seismic tomography, Scientific Reports, 13, 7873, doi:10.1038/s41598-023-33310-z, 査読有

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

海洋研究開発機構 海域地震火山部門地震発生帯研究センター
他機関との共同研究の有無：有
東京大学地震研究所, 東京大学大気海洋研究所, 東北大学

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：海域地震火山部門
電話：
e-mail：
URL：<http://www.jamstec.go.jp/ceat/j/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：藤江 剛
所属：海域地震火山部門地震発生帯研究センター

(1) 実施機関名：

海洋研究開発機構

(2) 研究課題（または観測項目）名：

海底火山観測研究

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

（国立研究開発法人海洋研究開発機構第4期中期目標より抜粋）

III 1. (3) 海域で発生する地震及び火山活動に関する研究開発

我が国の周辺海域においては、南海トラフ地震や海底カルデラ等、大規模災害をもたらす地震・火山活動が活発であり、防災・減災対策の更なる強化が求められている。そのための具体的な検討を進めるには、海底下で進行する地震・火山活動の実態把握及び長期評価が欠かせないものの、現在は観測データも十分に揃っていない状況にあり、観測体制の構築と、データの取得・解析を通じたメカニズムの理解等の科学的知見の充実が課題となっている。このため、機構は、地震発生メカニズムの理解、プレート固着の現状把握と推移予測及び海域火山活動の予測研究に資するデータと知見を蓄積し、地震調査研究推進本部、気象庁、防災科学技術研究所、大学等の関係機関に情報提供することで、地震発生帯の現状把握・長期評価及び火山活動評価に貢献する。これを実現するために、大学や防災科学技術研究所等の関係機関と連携して、南海トラフ地震の想定震源域等を中心とした、広域かつ精緻なデータを連続的にリアルタイムで取得する海底地殻変動観測網の整備・高度化を進めるとともに、高精度の海底地下構造調査、海底堆積物・海底下岩石試料の採取・分析を実施する。これにより得られたデータと既存のデータの統合・解析を行うことで、地震発生帯モデル及びプレート固着状態に関する推移予測手法の高度化を行う。また、海域火山に係る先進的な観測手段を確立し、海域火山周辺において火山活動の現状把握を行うとともに、地球内部構造や熱・物質循環機構等の解析を進める。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

国立研究開発法人海洋研究開発機構第4期中期計画に基づき下記の事項について実施する。

海底火山の噴火は、突発的かつ大規模な災害をもたらす、また地球環境への影響が非常に大きい。これら火山災害の発生予測や地球環境への影響評価を行うためには、その原因となる熱、マグマ、流体の発生と輸送現象、噴火履歴や噴火推移、更にそれらの準備過程に当たる地球内部活動を理解することが重要である。そこで、本課題では、国際深海科学掘削計画（IODP）の下で地球深部探査船「ちきゅう」等を用いた海洋掘削を推進し、海底火山活動の観測、調査、地質試料の採取分析によって活動履歴、過去の噴火様式等の現状を把握する。また、得られたデータや知見を用いて地球内部構造や物質

の収支等を推定し、火山活動を支配する地球内部 流体やエネルギーの循環機構、マグマ供給の仕組み等を、単体の火山からグローバルな規模まで解明する。

具体的には(1)無人自動観測システムと海底観測機器を組み合わせた海域火山観測システムの開発(2)我が国大規模のカルデラ等を対象とした構造探査、火山体の海底調査、岩石試料の採取(3)火山活動の現状把握とマグマや流体の生成から噴火に至る過程及び様式の理解に基づいて得られる海底火山活動の予測に資するデータ及び知見の国及び大学等研究機関への提供等をおこなう。

これらの進捗状況を踏まえ(1)伊豆・小笠原弧等の海底火山における海域火山観測システムを用いた火山活動の現状把握(2)継続的な各種調査・観測の実施、試料の採取及び分析により蓄積された知見を活用した、国内外の火山の中長期活動や噴火過程の比較検証(3)「ちきゅう」等を用いた火山体深部や海洋地殻の実態と形成過程の解明を目指した海洋掘削を可能とするためのデータ及び研究成果の創出等に取り組む。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

第4期中期計画に基づき令和5年度の主な実施内容、成果は以下の通りである。

(項目1) 海域火山観測システムの開発・システム評価

・CTBTOハイドロフォンアレイとマーメイドのデータを統合的に解析するシステムを開発し、鳥島近海イベントの発生源が嬬婦海山であることを見つけた。

(項目2) 海域火山の構造探査立案・海底火山調査立案・岩石資料採取

・JAMSTEC調査船で、西之島、三宅島、嬬婦海山の調査を行った。

(項目3) 海洋掘削プロジェクトの推進：プロポーザル作成

・学会やワークショップ等において掘削提案を行い、関連研究集会のサポートを行った。

(項目4) 単体の火山からグローバルな規模で火山活動の現状把握と噴火過程・様式の理解に資する研究の推進

・国外の研究機関と連携してトンガ・フンガ火山の海底岩石サンプルの分析・解析を進めた。

(項目5) グローバルな規模での地球内部構造・物質収支の推定、地球内部物質・エネルギーの循環機構やマグマ供給機構の解明：データ取得、データ解析・試料分析

・高度地球化学分析技術の開発を進めた。

・マントル対流データ同化手法を開発した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

・鬼界海底カルデラについての総合調査を行い、人工地震探査によるカルデラの下のマグマだまりの発見、海底から採取されたサンプルの分析から過去の大噴火からのマグマ組成の変遷を明らかにした。

・西之島研究調査において、空中ドローンによる磁気調査データから火山体内部の過去の火道を同定し、岩石サンプル分析から安山岩マグマ以外の過去の活動を見つけた。

・福徳岡ノ場研究では、海底サンプルや漂流軽石の分析データから爆発的噴火のメカニズムを解明、水中音波データから海中での噴火活動をいち早くとらえることに成功、漂流軽石のシミュレーションにより日本沿岸の軽石漂流ハザード評価を行った。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

「火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明」の項目に対して、鬼界カルデラ、福徳岡ノ場、西之島に関する研究が進展した。次年度以降は、三宅島、嬬婦海山、トンガ・フンガの3火山に対するマグマ供給系の構造の解明が進むと思われる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

R. OYANAGI et al.,2023, Metasomatism at a metapelite-ultramafic rock contact at the subduction interface: Insights into mass transfer and fluid flow at the mantle wedge corner, CONTRIBUTIONS TO MINERALOGY AND

PETROLOGY, 178, 27, 10.1007/s00410-023-02011-1, 査読有, 謝辞無

K. YOSHIDA et al., 2023, Oxidation-induced nanolite crystallization triggered the 2021 eruption

of Fukutoku-Oka-no-Ba, Japan, Scientific Reports, 13, 7117, 10.1038/s41598-023-34301-w, 査読有, 謝辞無

A. NAKAO et al., 2023, Regression analysis and variable selection to determine the key subduction-zone parameters that determine the maximum earthquake magnitude, EARTH PLANETS AND SPACE, 75, 78, 10.1186/s40623-023-01839-y, 査読有, 謝辞無

K. YOSHIDA et al., 2023, The proximal volcanoclastic materials of Fukutoku-Oka-no-Ba in the Izu-Bonin arc show contrasting characteristics to the drift pumice of the 2021 eruption, ISLAND ARC, 32, e12498, 10.1111/iar.12498, 査読有, 謝辞無

D. Noto et al., 2023, Stratified horizontal convection, JOURNAL OF FLUID MECHANICS, 970, A21, 10.1017/jfm.2023.625, 査読有, 謝辞無

M. Bayarbold et al., 2023, Multiphase-solid fluid inclusions in HP-LT eclogite facies rock (Zavkhan Terrane, Western Mongolia): evidence for the evolution from saline to hypersaline fluids during metamorphism in subduction zone, CONTRIBUTIONS TO MINERALOGY AND PETROLOGY, 178, 85, 10.1007/s00410-023-02055-3, 査読有, 謝辞無

M. IZUMI et al., 2023, Mantle-wedge alteration facilitates intra-oceanic subduction initiation along a pre-existing fault zone, TECTONOPHYSICS, 861, 229908, 10.1016/j.tecto.2023.229908, 査読有, 謝辞無

M. YOSHIDA, 2023, Stress regime analysis for the transition to a stagnant-lid convection regime in the terrestrial mantle, PLANETARY AND SPACE SCIENCE, 238, 105794, 10.1016/j.pss.2023.105794, 査読有, 謝辞無

M. YOSHIDA, 2024, Effect of the supercontinent cycle on the longest-term sea-level change from a simple conceptual and theoretical model, GONDWANA RESEARCH, 125, 425~445, 10.1016/j.gr.2023.06.015, 査読有, 謝辞無

J. Carlut et al., 2023, Rock magnetic analyses as a tool to investigate diversity of drift pumice clasts: An example from Japan's 2021 Fukutoku-Oka-no-Ba (FOB) eruption, ISLAND ARC, 33, e12507, 10.1111/iar.12507, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

海洋研究開発機構 海域地震火山部門 火山・地球内部研究センター
他機関との共同研究の有無：有
東京大学地震研究所, 神戸大学, 北海道大学工学部, 海上保安庁, 気象庁・気象研究所

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：海域地震火山部門
電話：
e-mail：
URL：<http://www.jamstec.go.jp/rimg/j/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：小野重明
所属：海域地震火山部門 火山・地球内部研究センター

(1) 実施機関名：

海上保安庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

海洋測地の推進

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

SLRの国際共同観測を継続し、日本周辺を含めた広域のプレート相対運動を把握するためのデータを提供し精度向上に貢献する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

下里水路観測所においてSLRの国際共同観測を継続し、日本周辺を含めた広域のプレート相対運動決定に資するデータを取得する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

下里水路観測所においてSLRの国際共同観測を継続し、日本周辺を含めた広域のプレート相対運動決定に資するデータを取得した。11月には、GNSSアンテナとSLR望遠鏡不動点との相対位置関係を求めるためのコロケーション測量を実施した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

下里水路観測所においてSLRの国際共同観測を継続し、日本周辺を含めた広域のプレート相対運動決定に資するデータを取得した。また、令和2年度、令和4年度および令和5年度にGNSSアンテナとSLR望遠鏡不動点との相対位置関係を求めるためのコロケーション測量を実施しており、令和2年度の成果をInternational Earth Rotation and Reference Systems Service（IERS）に報告している。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

海上保安庁,下里水路観測所におけるSLR観測,地震予知連絡会会報,110

・学会・シンポジウム等での発表

中村優斗・永江航也・伊牟田圭・黒田泰成・橋本友寿・横田裕輔,2023,2022年度下里水路観測所SLR/GNSSコロケーション測量について,日本測地学会第140回講演会,69

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

海洋測地の推進

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

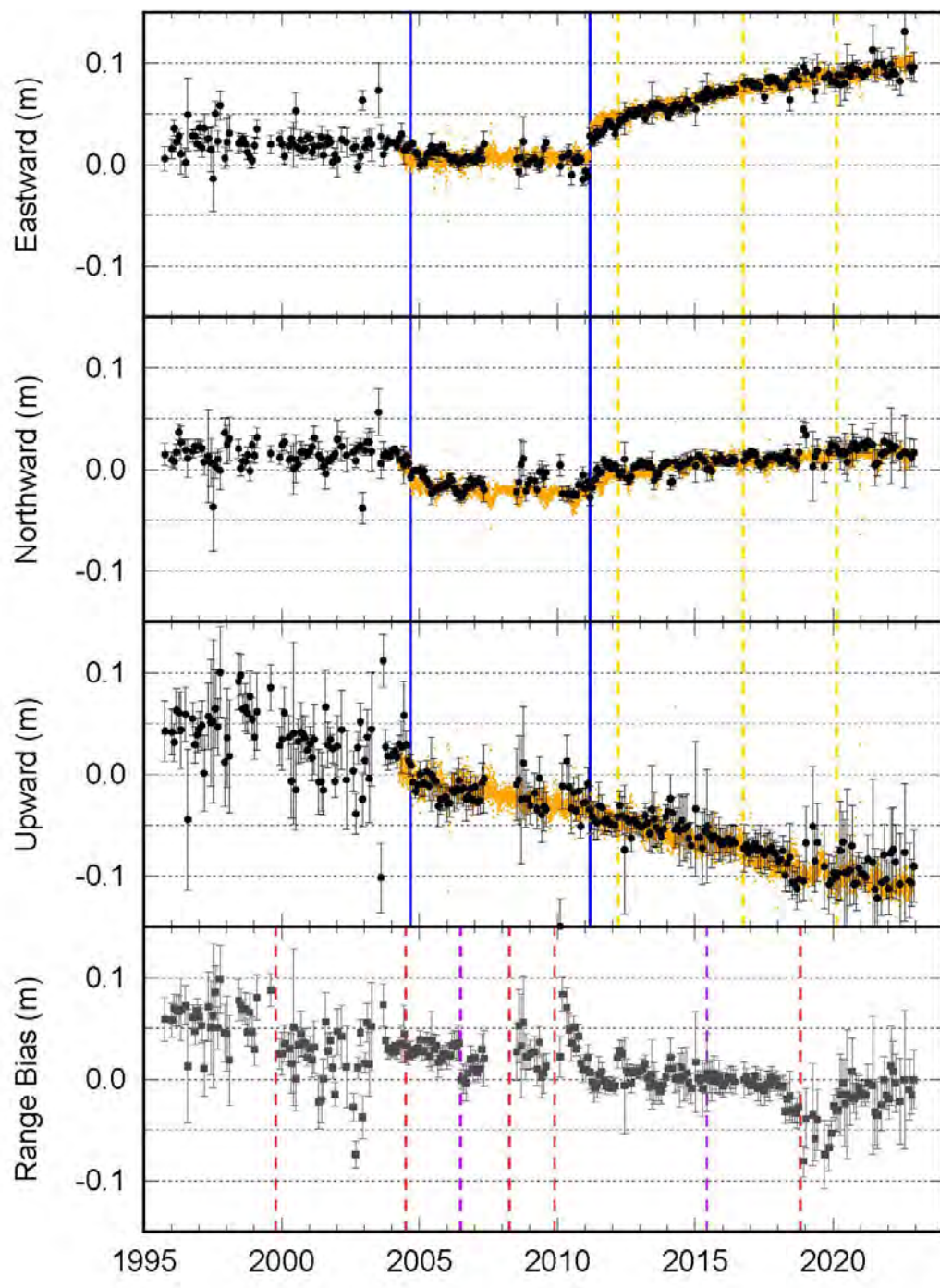
海上保安庁海洋情報部沿岸調査課海洋防災調査室
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：海上保安庁海洋情報部沿岸調査課海洋防災調査室
電話：03-3595-3632
e-mail：下記URLの問い合わせフォームから問い合わせください。
URL：<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：三枝隼
所属：海上保安庁海洋情報部沿岸調査課海洋防災調査室



下里水路観測所のSLR/GNSS観測時系列

ITRF 2014の速度を適用した上で、測地衛星「LAGEOS-I」及び「LAGEOS-II」の測距データを用いて解析した下里レーザー不動点の変位（黒丸）及びレンジバイアスの値（1か月解）並びにGNSS観測点であるIGS観測点「SMST」の変位（黄丸，1日解）． SLRデータの解析には，C5++ソフトウェア（Otsubo et al., 2016 EPS）を，GNSS解析にはRTKLIB version 2.4.2（Takasu, 2013）をスタティックPPPモードで使用した．

変位量は，解が比較的安定している2005年1月の局位置解（北緯33.57769313度，東経135.93703761度，楕円体高101.644 m）を基準とし，局地直交座標系において示している． ITRF 2014における地震に伴う変位は補正していない． エラーバーは1 σ の範囲を示す． 青線は，2004年紀伊半島南東沖地震（M 7.4及びM 6.9，2004年9月5日）及び2011年東北地方太平洋沖地震（M 9.0，2011年3月11日）の発生日を示す． 黄破線，赤破線及び紫破線は，それぞれGNSSアンテナ・レドーム，SLR観測装置及びSLRキャリブレーションターゲットの更新日のうち主要なものを示す．

(1) 実施機関名：

海上保安庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

験潮

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

海上保安庁が所管する常設験潮所において、継続的に験潮データを収集し、地殻変動把握のための基礎データとする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

全国20カ所の常設験潮所において潮汐観測を実施し、国土交通省水管理・国土保全局および港湾局、国土地理院、気象庁と連携し、験潮データをリアルタイムでインターネットにより公開する。
海上保安庁所管の験潮所：竜飛、釜石、横浜、横須賀、千葉、三宅島、神津島、八丈島、徳山、広島、呉、大分、博多、佐世保、厳原、粟島、大泊、西之表、中之島、名瀬。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

全国20カ所の常設験潮所において潮汐観測を実施し、国土交通省水管理・国土保全局および港湾局、国土地理院、気象庁と連携し、験潮データをリアルタイムでインターネットにより公開した。
海上保安庁所管の験潮所：竜飛、釜石、横浜、横須賀、千葉、三宅島、神津島、八丈島、徳山、広島、呉、大分、博多、佐世保、厳原、粟島、大泊、西之表、中之島、名瀬。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

期間中継続して全国20カ所の常設験潮所において潮汐観測を実施し、国土交通省水管理・国土保全局および港湾局、国土地理院、気象庁と連携し、験潮データをリアルタイムでインターネットにより公開した。

海上保安庁所管の験潮所：竜飛、釜石、横浜、横須賀、千葉、三宅島、神津島、八丈島、徳山、広島、呉、大分、博多、佐世保、厳原、粟島、大泊、西之表、中之島、名瀬。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

平時及び災害時に、状況を把握するための基礎資料として活用されており、今後も必要な観測である。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

験潮

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

海上保安庁 海洋情報部沿岸調査課

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：海上保安庁海洋情報部沿岸調査課

電話：03-3595-3636

e-mail：下記URLの問い合わせフォームから問い合わせください。

URL：<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：林王弘道

所属：海上保安庁海洋情報部沿岸調査課

(1) 実施機関名：

海上保安庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

海底地殻変動観測

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

プレート境界の固着状態の把握のため、GNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測を継続する。観測点の増設によって空間分解能の向上を図るとともに、測位精度および時間分解能の向上を目指した技術開発を行い、固着状態の時間変化の把握に努める。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

日本海溝沿い、南海トラフ沿いなど、日本近海の花溝型巨大地震の震源域となる海域において、海底地殻変動観測を継続するとともに、観測の高度化のための技術開発を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

海溝型地震震源域海底において、GNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）による地殻変動観測を継続して実施した。日本海溝沿いにおける観測から、東北地方太平洋沖地震の余効変動が続いていること（図1）、南海トラフ沿いにおける観測から、プレート境界固着の影響による地殻変動を観測している（図2）。

Markov Chain Monte Carlo (MCMC)法を用いた新たな解析手法の検討(Watanabe et al., 2023や数

値シミュレーションによる誤差解析など、さらなる精度向上を目指した解析技術の研究を進めている。また、音響機器の機種依存の誤差が明らかになりつつあり、水槽実験等を通じて機器特性を把握するための研究を進めている（中村他、2023）。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

日本海溝・南海トラフ周辺の海底においてGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）による地殻変動観測を定常的に実施している。観測結果は、地震調査研究推進本部地震調査委員会や気象庁南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会に定期的に報告を行い、地殻活動の現状評価の資料として活用されている。

南海トラフの観測データから浅部スロースリップ由来と考えられる非定常の変動を複数の観測点で検出した（Yokota and Ishikawa, 2020）。

GNSS-Aの最大の誤差要因である海中音速場変動の推定の高度化を進め、新たな手法を実装したソフトウェアのソースコードを公開した（Watanabe et al., 2020）。

東北沖地震後10年にわたる海底地殻変動観測データから、余効変動を詳細に調査した結果、福島県沖の海溝軸付近に大きな地震時すべりが生じていたことを示唆する結果を得た（Watanabe et al., 2021）。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

海域における地殻変動観測を安定的・継続的に実施し、成果を政府関連会議に定期的に報告することで国の地震防災対策に貢献している。また、観測データや解析ソフトウェアを公開することで、海底測地分野の研究の推進に貢献している。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Watanabe, S., T. Ishikawa, Y. Nakamura and Y. Yokota, 2023, Full-Bayes GNSS-A solutions for precise seafloor positioning with single uniform sound speed gradient layer assumption, *Journal of Geodesy*, 97, 89, doi:10.1007/s00190-023-01774-6, 査読有, 謝辞無

中村優斗, 石川直史, 秋山裕平, 渡邊俊一, 黒田泰成, 望月将志, 横田裕輔, 2023, 海底地殻変動観測で用いる海底基準局のディレイタイムの計測について, 海洋情報部研究報告, 61, 19-27, 査読有, 謝辞無

海上保安庁, 2023, 日本海溝沿いの海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 110, 62, 査読無, 謝辞無

海上保安庁, 2023, 南海トラフ沿いの海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 110, 281, 査読無, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Nakamura, Y., Ishikawa, T., Watanabe, S., Nagae, K., Yokota, Y., 2023, Japan Coast Guard's GNSS-A seafloor geodetic observation: analysis scheme and development of data format, EGU General Assembly 2023

Nagae, K., Ishikawa, T., Watanabe, S., Nakamura, Y., Yokota, Y., 2023, Various error factors in GNSS-A seafloor geodetic observation, EGU General Assembly 2023

渡邊俊一, 石川直史, 中村優斗, 永江航也, 横田裕輔, 2023, 広く使えるベイズ情報量基準（WBIC）の適用によるGNSS-A解析ソフトウェアGARPOS-MCMCにおけるモデル評価, JpGU 2024, SGD01-P12

石川直史, 横田裕輔, 永江航也, 中村優斗, 渡邊俊一, 2023, 海上保安庁のGNSS-A海底地殻変動観測の現状と最近の課題, JpGU 2024, SSS12-02

永江航也, 横田裕輔, 石川直史, 渡邊俊一, 中村優斗, 2023, 水槽実験によって明らかになったGNSS-A海底地殻変動観測における機器・角度依存誤差, JpGU 2024, SCG52-04

中村優斗, 横田裕輔, 石川直史, 渡邊俊一, 永江航也, 2023, GNSS-A解析ソフトウェア「GARPOS」の音速場モデルに関する数値的考察, JpGU 2024, SCG52-05

石川直史, 横田裕輔, 永江航也, 中村優斗, 渡邊俊一, 2023, GNSS-A測位で用いられる音響測距技術の諸問題, 海洋音響学会2023年度研究発表会

Watanabe, S., Ishikawa, T., Nakamura, Y., Nagae, K., Yokota, Y., 2023, Another implementation of GARPOS-MCMC for the full-Bayes GNSS-A seafloor precise positioning analysis with the widely applicable Bayesian information criterion, IUGG 2023

Nakamura, Y., Ishikawa, T., Watanabe, S., Nagae, K., Yokota, Y., 2023, Japan Coast Guard's GNSS-A seafloor crustal deformation observation and the data strategy, IUGG 2023

永江航也, 横田裕輔, 石川直史, 渡邊俊一, 中村優斗, 2023, SGO-A での音響信号読み取り方法の改良, 日本測地学会第140回講演会
中村優斗, 石川直史, 横田裕輔, 渡邊俊一, 永江航也, 2023, シンプルな数値モデルとPythonライブラリ「PyMC」によるGNSS-Aの測位精度評価, 日本地震学会2023年度秋季大会, S21P-13
渡邊俊一, 石川直史, 中村優斗, 永江航也, 横田裕輔, 2023, GNSS-A海底地殻変動観測の解析における渡辺ベイズ, 日本地震学会2023年度秋季大会, S21-04
永江航也, 横田裕輔, 石川直史, 渡邊俊一, 中村優斗, 2023, SGO-A観測点における測位解, 日本地震学会2023年度秋季大会, S03P-09
Nakamura, Y., Ishikawa, T., Watanabe, S., Nagae, K., Yokota, Y., 2023, GNSS-A observation of the Japan Coast Guard: a history of two decades, AGU fall meeting 2023, G42A-01
Nagae, K., Ishikawa, T., Watanabe, S., Nakamura, Y., Yokota, Y., 2023, Advance of acoustic signal reading method in GNSS-Acoustic observation, AGU fall meeting 2023, G42A-05
Watanabe, S., Ishikawa, T., Nakamura, Y., Nagae, K., Yokota, Y., 2023, Development of GARPOS-WBIC: GNSS-A seafloor positioning analysis tool with MCMC-based model selection with the widely applicable Bayesian information criterion, AGU fall meeting 2023, G43B-0488

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

項目: 地震: 地殻変動: GNSS音響結合方式海底地殻変動観測

概要: 日本海溝及び南海トラフで実施しているGNSS音響結合方式による海底地殻変動観測の観測データ、解析ソフトウェア、解析結果

既存データベースとの関係:

調査・観測地域:

調査・観測期間:

公開状況: 公開中 (データベース・データリポジトリ・Web)

<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/chikaku/kaitei/sgs/datalist.html> 国会図書館アーカイブ(WARP)に永続保存されている。

<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/13116474/www1.kaiho.mlit.go.jp/chikaku/kaitei/sgs/datalist.html>

(11) 次期計画における課題名:

海底地殻変動観測

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

海上保安庁 海洋情報部沿岸調査課海洋防災調査室

他機関との共同研究の有無: 有

東北大学災害科学国際研究所, 名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター, 東京大学生産技術研究所, 海洋研究開発機構

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等: 海上保安庁海洋情報部沿岸調査課海洋防災調査室

電話: 03-3595-3632

e-mail: 下記URLの問い合わせフォームから問い合わせください。

URL: <https://www1.kaiho.mlit.go.jp/>

(14) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名: 石川直史

所属: 海上保安庁海洋情報部技術・国際課

Site name	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Velocity (cm/yr) (deg)		Period	Data	Update
(1) KAMN	38.89	143.36	5.7	296.7	02/07/2020 - 07/31/2023	10	
(2) KAMS	38.64	143.26	8.5	293.9	10/20/2019 - 07/31/2023	12	
(3) MYGI	38.08	142.92	6.4	285.2	10/20/2019 - 09/03/2023	15	*
(4) MYGW	38.15	142.43	2.9	139.8	03/09/2019 - 03/06/2023	16	
(5) FUKU	37.17	142.08	1.4	199.4	10/19/2019 - 08/01/2023	15	
(6) CHOS	35.50	141.67	1.5	297.5	10/17/2019 - 09/05/2023	13	*
(7) BOSN	34.75	140.50	2.6	356.8	03/05/2019 - 02/17/2023	15	
(8) SAGA	34.96	139.26	3.6	342.4	08/11/2019 - 08/06/2023	15	
GEONET					09/05/2019 - 09/05/2023		

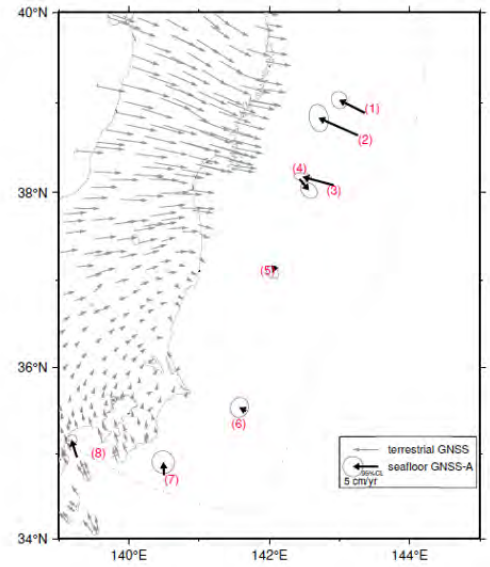


図1 日本海溝沿いの直近約4年間の水平移動速度（北米プレート固定）

Site name	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Velocity (cm/yr) (deg)		Period	Data	Update
(9) TOK1	34.08	138.13	4.8	284.5	11/26/2019 - 12/10/2023	20	*
(10) TOK2	33.88	137.60	4.2	309.7	11/25/2019 - 11/25/2023	18	*
(11) TOK3	34.18	137.39	3.3	288.5	11/13/2019 - 12/10/2023	18	*
(12) ZENW	33.09	137.55	-	-	02/20/2020 - 11/26/2023	12	*
(13) KUM1	33.67	137.00	3.0	304.7	11/24/2019 - 12/10/2023	19	*
(14) KUM2	33.43	136.67	2.4	279.8	11/24/2019 - 12/09/2023	19	*
(15) KUM3	33.33	136.36	3.4	250.9	11/24/2019 - 09/12/2023	18	*
(16) KUM4	33.08	136.64	-	-	02/21/2020 - 11/26/2023	15	*
(17) SLOW	33.16	135.57	4.8	290.1	02/21/2020 - 12/04/2023	17	*
(18) SIO2	32.98	135.99	-	-	03/18/2020 - 12/09/2023	16	*
(19) MRT1	33.35	134.94	3.4	298.8	11/12/2019 - 11/27/2023	15	*
(20) MRT2	32.87	134.81	5.2	285.9	11/11/2019 - 09/12/2023	21	*
(21) MRT3	32.80	135.35	-	-	10/27/2019 - 11/27/2023	16	*
(22) TOS1	32.82	133.67	6.0	297.8	11/21/2019 - 12/04/2023	18	*
(23) TOS2	32.43	134.03	1.9	315.8	11/11/2019 - 09/11/2023	18	*
(24) ASZ1	32.37	133.22	5.1	292.3	11/10/2019 - 09/11/2023	16	*
(25) ASZ2	31.93	133.58	4.9	295.7	11/10/2019 - 11/29/2023	15	*
(26) HYG1	32.38	132.42	4.3	291.7	11/09/2019 - 11/28/2023	16	*
(27) HYG2	31.97	132.49	2.6	296.5	11/10/2019 - 11/29/2023	18	*
GEONET					12/10/2019 - 12/10/2023		

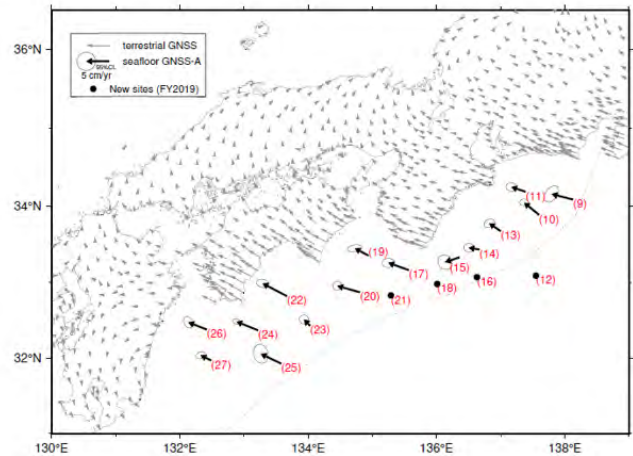


図2 南海トラフ沿いの直近約4年間の水平移動速度（アムールプレート固定）

(1) 実施機関名：

海上保安庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

海域火山観測

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

海域火山の定期巡回監視及び海域火山基礎情報整備を継続して実施する。
海域火山データベースの整備及び公表を継続して行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

海域火山の定期巡回監視及び海域火山基礎情報整備を継続して実施する。
海域火山データベースの整備及び公表を継続して行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

航空機による南方諸島及び南西諸島における海域火山の定期巡回監視観測を実施した。

なお、西之島、硫黄島については監視体制を強化し、毎月1回程度の監視観測を継続して実施した。

また、測量船により鳥島近海の海域火山基礎情報調査を1月に実施した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

航空機による南方諸島及び南西諸島における海域火山の定期巡回監視観測を継続して実施した。

なお、活動的な火山については毎月1回程度の監視観測を継続して実施した。

また、毎年1回程度測量船による海域火山基礎情報調査を実施した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

これらの調査結果は火山噴火予知連絡会に報告するとともに、海域火山データベースに掲載し公表している。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

海域火山観測

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

海上保安庁海洋情報部沿岸調査課海洋防災調査室
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：海上保安庁海洋情報部沿岸調査課海洋防災調査室
電話：03-3595-3607
e-mail：下記URLの問い合わせフォームから問い合わせください。
URL：<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：高梨泰宏
所属：海上保安庁海洋情報部沿岸調査課海洋防災調査室

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震活動・地殻変動監視の高度化に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

プレート境界の固着状態変化を検出するための手法、地殻活動状態の変化を監視する手法を高度化する。また、地震発生シミュレーションにより地震活動履歴の再現と、発生した状態変化の物理的背景の理解を進める。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

南海トラフ沿いで発生しているスロースリップについて、すべりの時空間分布を推定するための手法の改良を行う。地殻活動状態の変化を表す地震活動の様々な指標の特徴を調査し、それらを組み合わせた統合的指標を構築する。地震発生シミュレーションにより、千島海溝域について地震活動履歴の再現を行う。また、プレート境界の固着状態変化、地殻活動状況変化の物理的背景について考察する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

・ETASモデルによる予測地震数と観測地震数の比を、GNSSデータから計算した最大せん断ひずみ速度比に加えて、震央距離、D90、地震波速度構造とも空間相関を比較したが、最大せん断ひずみ速度比との正の相関が最も高く、2012年2月のデータまで拡張しても同様の傾向が見られた。これは、最大せん断ひずみ速度比が、ETASモデルの高精度化に有効である可能性を示唆している。

・能登半島における群発地震活動について潮汐との関係を調査した結果、南東部の深さ14kmより深い領域の活動のみ潮汐相関が示唆された。深部流体によって断層面が強度低下し、潮汐力の影響を相対

的に受けやすいことを反映している可能性がある。

- ・新潟ー神戸歪み集中帯の変形構造を調査するため、GNSSデータをインバージョン解析して、地殻内で発生する非弾性変形の大きさに対応する3次元モーメント密度分布を推定した。その結果、地殻深部は一つの基盤断層を境界とした2つの地殻ブロックが相対運動するのに対し、地殻浅部は活断層に沿って非弾性変形が集中する複雑な構造をしていることが分かった。

- ・近地地震波形を用いた震源過程解析の自動化について、南海トラフ沿いで発生した地震を解析したところ構造不均質の影響により妥当な解が得られなかった。この影響を回避するため、あらかじめ沈み込むプレート面上に小断層を配置して三次元速度構造に基づくグリーン関数を計算しておく手法の開発を進め、プロトタイプを構築した。南海トラフ沿いでは観測事例が少ないため合成波形を作成し、開発した手法の検証を行った。

- ・東海大学と共同で、駿河湾における海底地震計観測を行った。

- ・自動震源に含まれるノイズ等の誤検知を除去するため、機械学習の一種であるアンサンブル学習（ランダムフォレストとAdaBoost）による地震ノイズ判別手法を開発した。学習の結果、AdaBoostでは震源決定数を99%以上保ったまま、ノイズを約1/5（全体の1%に相当）に低減できた。

- ・大地震発生後の余効変動の逐次推定・除去処理について、他の現象が同時に発生している場合にも分離して余効変動を評価できるようにし、2013年から2016年にかけて発生していた東海地方の長期的スロースリップと東北地方太平洋沖地震の余効変動を適切に分離し、長期的スロースリップの監視が行えるようになることを確認した。

- ・地震発生シミュレーションの計算高速化に関する手法について調査し、Hマトリクス法コードを用いることにより、これまで開発してきたコードに比べ、比較に用いたケースでは1/3程度計算時間の短縮が図られることを確認した。

- ・DAS（光ファイバー振動計）による東南海ケーブルを利用した海域での試験観測を開始し、浅海域における波浪によるものなどの振動現象を観測した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

地震活動・地殻変動監視手法に関する技術開発が進展した。大地震発生後の余効変動除去手法開発等、GNSSデータを用いたスロースリップの客観的検知手法の改良やひずみ・傾斜・GNSSの統合インバージョンの手法の開発などの研究が進展した。また、DONETを用いた最大振幅とエネルギー相関のハイブリッド法による浅部低周波地震（微動）検出プログラムの開発や、機械学習を併用した自動震源決定による、ノイズ等の誤検知を低減した地震カタログの作成などの成果が得られた。DAS（分布型音響センシング）の振幅再現性について、加振器を使った調査が進んだ。

地殻活動に関する統合的指標構築に向けた調査を行い、複数の地震活動に関する指標を統合して統計的に異常度を評価し、地震活動状態の変化を定量的に監視する手法を提示するなどの成果が得られた。また、GNSSデータから格子化ひずみ速度場を計算し、大きなひずみ速度を示した地域や時期を抽出するなどの調査が進展した。

地震発生シミュレーションについて、メッシュの細分化、計算の高速化に着手し、短期的スロースリップの再現に向けた成果が得られた。

そのほか、エネルギー収支を考慮した地震発生シナリオ構築の手法を提案し、南海トラフ沿いで発生するプレート境界地震に適用した。また、地震活動に関し、前兆的群発地震活動に基づく地震予測手法によって明らかにされた前震活動の特徴、能登半島における群発地震活動と潮汐との関係、豊後水道の深部微動と潮汐との関係などの研究が進展した。

- ・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

- ・論文・報告書等

安藤忍, 小林昭夫, 2023, 干渉SAR時系列解析手法を用いた御前崎周辺の定常的な地殻変動, 気象研究所研究報告, 71, 1-11, <https://doi.org/10.2467/mripapers.71.1>, 査読有, 謝辞無

気象研究所, 2023, 全国GNSS観測点のプレート沈み込み方向の位置変化, 地震予知連絡会会報, 110, 20-24, 査読無, 謝辞無

気象研究所, 2023, 南海トラフ沿いの長期的スロースリップの客観検知, 地震予知連絡会会報, 110, 20-24, 査読無, 謝辞無

報,110,287-289,査読無,謝辞無

気象研究所,2023,内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測,地震予知連絡会会報,110,307-310,査読無,謝辞無

小林 昭夫,2023,GNSSデータによる非定常地殻変動検知手法の改良ー共通ノイズ除去手法の改善・日向灘への対象領域の拡張・余効変動を除去した非定常変位監視手法の提案ー,気象研究所研究報告,71,13-23,<https://doi.org/10.2467/mripapers.71.13>,査読有,謝辞無

工藤祥太, 下條賢梧, 溜瀧功史,2023,1次元畳み込みニューラルネットワークを用いた地震波形検測.,験震時報,86,4,査読有,謝辞無

Panayotopoulos, Y., H. Baba and T. Nishimiya,2023,Ocean Bottom Seismometers in Suruga Bay reveal a shear zone inside the Philippine Sea plate

slab,Tectonophysics,861,<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229902>,査読有,謝辞無

Saito, T., and A. Noda,2023,Mechanically Coupled Areas on the Plate Interface in the Kanto Region, Central Japan, Generating Great Earthquakes and Slow-Slip Events,Bulletin of the Seismological Society of America,113,1842-1855,<https://doi.org/10.1785/0120230073>,査読有,謝辞無

Takemura, S., Y. Hamada, H. Okuda, Y. Okada, K. Okubo, T. Akuhara, A. Noda, & T.

Tonegawa,2023,A review of shallow slow earthquakes along the Nankai Trough,Earth, Planets and Space,75,164,<https://doi.org/10.1186/s40623-023-01920-6>,査読有,謝辞無

Tamaribuchi, K., S. Kudo, K. Shimojo, and F. Hirose,2023,Detection of hidden earthquakes after the 2011 Tohoku earthquake by automatic hypocenter determination combined with machine learning,Earth, Planets and Space,75,155,<https://doi.org/10.1186/s40623-023-01915-3>,査読有,謝辞無

溜瀧功史, 工藤祥太, 下條賢梧,2023,機械学習を併用した自動震源決定による微小地震の検出,地震予知連絡会会報,110,455-458,査読無,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

弘瀬冬樹, 溜瀧功史, 小林昭夫, 前田憲二,2023,非定常ETASモデルによる背景地震確率を考慮した能登半島の群発地震と潮汐との関係,日本地球惑星科学連合2023年大会,

弘瀬冬樹, 溜瀧功史, 小林昭夫, 前田憲二,2023,非定常ETASモデルによる背景地震確率を考慮した能登半島の群発地震と潮汐との関係,日本地震学会2023年度秋季大会

勝間田明男, 島淳元, 西宮隆仁,2023,能登半島で発生している群発地震について(2),JpGU meeting 2023,SSS10-P03

木村久夫, 山本剛靖, 小林昭夫, 露木貴裕,2023,日本全国を対象とした地殻変動の異常検出の試み,JpGU meeting 2023

Kodera, Y.,2023,Automatic classification of tectonic tremors with an unsupervised machine learning algorithm,JpGU meeting 2023

Kodera, Y.,2023,Automatic unsupervised classification of tectonic tremor signals in continuous seismic records,第28回国際測地学地球物理学連合総会 (IUGG2023)

野田朱美, 齊藤竜彦, 福山英一,2023,新潟ー神戸歪み集中帯の測地学・地質学的観測を説明する深さ依存の変形構造,JpGU meeting 2023

野田朱美,2023,プレート境界の力学的カップリング・インバージョン:地震シナリオの不確定性評価に向けて,震源インバージョンワークショップ~震源インバージョンは地震現象をどこまで解像できるのか~,S08

Noda, A., and T. Saito,2023,Mechanical plate coupling along the Sagami trough estimated from GNSS data and implication for the generation mechanism of great thrust-type earthquakes and slow slip events,International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023

Noda, A.,2023,Stress accumulation on the plate interface in the Kanto region and rupture scenarios for great thrust-type earthquakes,関東地震100年国際シンポジウム

野田朱美,2023,測地データから推定された新潟ー神戸歪み集中帯の変形構造と活断層の関係,「長岡平野西縁断層帯の地震活動性に関する調査研究」研究委員会

野田朱美, 齊藤竜彦,2023,プレート境界の力学的固着の推定と巨大地震シナリオ構築への応用,第16回日本地震工学シンポジウム

中川茂樹, 青山裕, 高橋浩晃, 前田拓人, 山本希, 鶴岡弘, 青木陽介, 内田直希, 前田裕太, 大見士朗, 中道治久, 大久保慎人, 松島健, 八木原寛, 汐見勝彦, 植平賢司, 上田英樹, 下山利浩, 溜瀧功史, 大竹和生, 本多亮, 関根秀太郎, 2023, マルチプラットフォーム次世代WINシステムの開発 (3), 日本地震学会2023年度秋季大会

直井誠, 溜瀧功史, 大柳修慧, 加藤慎也, 2024, 一元化震源データを利用した深層学習検測器の再学習の試み, 東京大学地震研究所共同利用研究集会

西宮隆仁, 弘瀬冬樹, 2023, 疑似観測波形を用いた南海トラフ地震の近地震源過程解析の試み, JpGU meeting 2023, SSS07-P06

西宮隆仁, 弘瀬冬樹, 2023, 南海トラフ沿いのプレート間地震を対象とした近地震源過程解析手法, 日本地震学会2023年度秋季大会

溜瀧功史, 木村久夫, 2023, 自動震源カタログによる2011年東北地方太平洋沖地震後の内陸地震活動度の定量評価, JpGU meeting 2023

Tamaribuchi, K. and H. Kimura, 2023, Detection of hidden earthquakes after the 2011 Mw9.0 Tohoku earthquake and their relation to regional crustal deformation, 第28回国際測地学地球物理学連合総会 (IUGG2023)

Tamaribuchi, K. and H. Kimura, 2023, Relationship between inland seismicity and crustal deformation after the 2011 Tohoku earthquake derived from the refined earthquake catalog, Asia Oceania Geosciences Society 20th Annual Meeting (AOGS2023)

溜瀧功史, 2023, 地震識別手法の高度化に基づく地震動即時予測の改善と特異な地震活動の解明, 日本地震学会2023年度秋季大会, S20-04

溜瀧功史, 木村久夫, 弘瀬冬樹, 山本剛靖, 2023, 2011年東北地方太平洋沖地震後の内陸地震活動と地殻変動の関係, 日本地震学会2023年度秋季大会

溜瀧功史, 2024, 機械学習を実装した自動震源決定システムの開発 (その2), 東京大学地震研究所共同利用研究集会

田中昌之, 小林昭夫, 2023, DASで捉えた人工振動の振幅について (2), JpGU meeting 2023

田中昌之, 2023, 光ファイバセンサの発展と地震観測への活用, 第41回レーザセンシングシンポジウム, S2

田中昌之, 2023, 分布型音響センシング (DAS) を用いた東南海沖ケーブルでの振動観測, 日本地震学会2023年度秋季大会

露木貴裕, 2023, 今津・敦賀での地殻変動連続観測記録における長期的変化, JpGU meeting 2023, SGD02-P10

Panayotopoulos, Y., H. Baba, T. Nishimiya, 2023, Seismological evidence of a shear zone inside the Philippine Sea plate slab in Suruga Bay, 日本地震学会2023年度秋季大会

Yamada, M., K. Tamaribuchi, S. Wu, and D.Y. Chen, 2023, IPFx: extended integrated particle filter method for earthquake early warning and application to the international networks, AGU Fall Meeting 2023, NH13C-0691

山田真澄, 鶴岡弘, 溜瀧功史, 2024, ETASモデルを考慮した震源推定: 能登半島地震のケーススタディ, 東京大学地震研究所共同利用研究集会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

項目: 地震: 地殻変動: ひずみ計観測

概要: 石井式三成分ひずみ計の常時観測を行った。

既存データベースとの関係:

調査・観測地域: 福井敦賀山泉 35.6178 136.0700

調査・観測期間: 昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況: 公開中 (データベース・データリポジトリ・Web)

<https://crust-db.sci.hokudai.ac.jp/db/login.php>

項目: 地震: 地震: 海底地震観測

概要: 駿河湾において自己浮上式海底地震観測を行った。

既存データベースとの関係:

調査・観測地域: 静岡 34.6923 138.5584

調査・観測期間: 昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（協議のうえ共同研究として提供可）

(11) 次期計画における課題名：

地震活動・地殻変動監視の高度化に関する研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁気象研究所地震津波研究部

他機関との共同研究の有無：有

東京大学,富山大学,東海大学

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：気象研究所企画室

電話：029-853-8535

e-mail：ngmn11ts@mri-jma.go.jp

URL：http://www.mri-jma.go.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：露木貴裕

所属：気象研究所地震津波研究部

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地殻変動観測等に基づく火山活動評価の高度化に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

火山内部の状態把握をよりの確に行えるよう地殻変動データなどの解析手法の開発・改善を進め、噴火に至るプロセス等の解明を行うことにより、火山活動評価手法の改善を図る。

[テーマ1] 伊豆大島で地殻変動源解析によりマグマ蓄積量を迅速に把握し、多項目観測を統合したプロダクトと精密に補正した重力観測データを用いて、マグマ上昇の検出・モニタリングを行う。地表面熱・水収支、およびマグマ・揮発性成分収支のモデルを構築し、火山活動評価への活用を図る。他の活動的火山でも活動評価に資する地殻変動等の解析を行う。

[テーマ2] 衛星SAR解析における大気遅延補正を気象モデルを用いて高精度化し、GNSS解析にも気象モデルを導入して、火山における地殻変動検知能力を向上させる。また、火山活動の理解を深めるために、地殻変動から地下の変動源の時空間変化を推定する手法、及び地下のマグマ挙動に伴う地殻変動のシミュレーション手法を開発し、それらの事例解析の比較により解析手法と物理モデルを改良する。

[テーマ3] 火山内部の状態監視や活動の異常検出を目指して、伊豆大島の震動観測データに地震波干渉法を適用し、地下の速度構造の時間変化を検出する手法を開発する。また検出された変化の要因、火山活動との関連を評価する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

[テーマ1]

伊豆大島における各種地殻変動データの取得・収集を継続し、地下のマグマの蓄積量（噴火ポテンシャル）を把握するための解析手法を迅速化する。マグマ上昇検出とモニタリングを目的とした、多項目観測、重力繰返し観測を実施する。そのために重力データ補正技術の向上を図る。

噴火が近づく時期の地下浅部における熱的活動を詳細に把握するために、山頂付近の空中からの熱赤外線繰返し観測、地表での熱収支観測を実施し、熱および水収支のモデルを構築して地表面からの熱・

水の総放出量を定量化する。

他の活動的火山においても火山活動の活発化がみられるような場合に地殻変動等の解析を行う。

[テーマ2]

衛星SARの干渉解析について、気象モデルを用いた対流圏遅延補正プログラムを開発する。補正精度の評価にあたり各種気象モデルによる補正結果を比較検証する。GNSS観測データの解析に、気象モデルによる大気遅延補正を導入するためのプログラムを開発し、パラメータ・プログラムを調整してその有効性を検証する。

地下のマグマの挙動を説明する物理モデルに基づいた地殻変動のシミュレーションプログラム、および観測データの解析による地殻変動源の時空間変化推定プログラムを開発し、両者を事例に適用し比較することにより、解析手法や地下のマグマの物理モデルなどを改良する。

[テーマ3]

伊豆大島の震動観測データに、地震学の分野で知見が深まっている地震計記録の背景雑音 (ambient noise) を用いた解析手法を適用し、火山周辺における地震波速度の時間変化を検出する手法を開発する。また、その要因を評価する中で、実際の火山活動に伴う地震波速度変化の検出を目指す。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

- ・今年度の成果の概要
- ・地殻変動検出の迅速化に向けて、GNSSキネマティック解析のプロトタイプを作成し、監視利用の観点で誤差要因等の調査を進めた。
- ・伊豆大島においてUAVを用いて実施してきた空中熱赤外観測から放熱率を推定するとともに過去の推定値と比較し、現状では活発化の兆候は認められないことを明らかにした。
- ・重力計個体特性の補正法、高さ変化の影響の補正法を構築し、重力観測を伊豆大島のモニタリングに適用した。この結果、山頂へのマグマ上昇を示唆する兆候は認められなかった。
- ・伊豆大島の火山活動の場に関する既存知見の整理と地表面からの揮発性成分放出率の推定を進め、噴火警戒レベルの判定基準に挙げられる現象の背景の理解や監視評価視点のための概念モデル構築を行った。さらに推定した揮発性成分放出率を、地殻変動観測に基づくマグマ蓄積率より推定される地下からの揮発性成分供給率、降水量と比較し、収支に関する定量的検討を行った。
- ・気象庁数値気象モデルを用いたGNSS対流圏遅延補正について、球面地球の効果を導入する等の精緻化を進めた。
- ・マグマ上昇に伴う地殻変動の時間変化を求めるシミュレーション手法を開発し、伊豆大島の地殻変動観測点に実施した。シミュレーションの結果からマグマ上昇位置の違いにより観測される傾斜データの時空間変化の違いを示した。
- ・伊豆大島において地震波干渉法により活動静穏時における地震波速度の時間変化を検出した。地震波速度変化が地殻変動と相関していることを明らかにするとともに、クラスター分析によって地震波速度変化の空間パターンを分類することにより、地下構造との対応関係を把握した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

[テーマ1] 火山活動の活発化や噴火へ至るプロセスの解明

- ・伊豆大島における地殻変動をはじめとする多項目観測により、火山活動評価への適用に向けた観測・解析技術開発と概念モデルの作成を行った。GNSS観測データの後処理により地殻変動源の体積変化量を自動解析し、経年的な山体膨張からすでに前回1986年噴火時の溶岩噴出量に相当するマグマが蓄積していると推定した。また、UAVを用いた夜間空中熱赤外観測から地表面温度分布データ作成までの一連の技術を構築した。これにより得られた地表面温度と副課題2による二酸化硫黄放出率、噴気ガス組成の情報から、地表面からの揮発性成分放出率を推定するとともに、これらをマグマ蓄積率から推定される地下からの揮発性成分供給率、降水量と対比し、収支に関する概念モデルを構築した。地殻変動検出の迅速化の観点からはGNSSキネマティック解析を実施し、監視利用の観点で誤差要因等の調査を進めた。また、山頂三原山へのマグマ上昇に伴い期待される重力変化検出に向けて、重力計のスケール検定・校正によりデータの高精度化を行った。その他、多成分ひずみ計のデータからは、GNSS観測によりカルデラ北部に推定される変動源の周期的膨張・収縮に対応する変化を捉えていることを確認した。
- ・SAR衛星データを用い、全国の火山について地殻変動や地形変化を検出した（霧島山、アトサヌブリ、秋田焼山・八幡平、口永良部島等）。西之島については継続的なデータ解析により活動推移を追

跡し、差分干渉解析から噴火時や非噴火時における地殻変動を検出、強度画像および相関画像から陸域面積および溶岩噴出率を推定した。また、福岡ノ場のSARデータについて、噴火前後の強度画像を比較することにより、新島の出現を確認している。これらの結果は火山噴火予知連絡会での活動評価に活用されるとともに、海域の火山においては火山現象に関する海上警報の発表等に貢献した。

・その他の活動的火山においても地殻変動解析を実施した。吾妻山については、GNSS時系列データの定常トレンドと季節変化による周期成分を取り除き、火山性の地殻変動を抽出・評価した。これにより、火山活動の活発化の際に深部膨張が浅部の地震活動活発化に2~7か月先行して開始するパターンと、深部膨張をほぼ伴わずに浅部の火山活動活発化に至るパターンの2種類に分類した。この結果、地震など他の現象との時空間的な対比関係がより明確となり、2020-21年に深部膨張が進行した際、将来的な噴火警報発表の可能性を視野に、監視上注目すべき現象の把握に役立つなど、地域火山監視・警報センターでの火山活動評価等に利用された。

[テーマ2] 火山活動の解析・評価のための手法開発

干渉SARおよびGNSSの対流圏遅延補正の高精度化

・干渉SAR、GNSSの対流圏遅延補正のために、気象庁の数値気象モデルを用い、任意の方位角・仰角についての数値積分による遅延量を計算するプログラムを開発した。干渉SARについては、このプログラムにより画像中の各点における視線方向遅延量を直接計算し、それをオリジナルの干渉画像から減ずることで良好な結果を得ており、プログラムの業務利用に向けた準備を進めている。GNSSについては、天頂方向遅延量と仰角3度における遅延量から先験的な遅延量モデルを構築し、それを座標値推定に用いることで、既存の対流圏遅延補正モデルとほぼ同等の結果を得た。

・光波測距については、気象庁の数値気象モデルを用いた対流圏遅延補正手法を伊豆大島における連続観測データに適用し、ノイズレベルと斜距離の関係式を導出した。

地殻変動源解析の手法開発

・境界要素法を適用し、山体地形の影響を考慮した地殻変動計算手法を開発した。常時観測火山のうち18火山で山体地形メッシュ作成をできるようにし、圧力源も複数の形状を選択できるようにした。山体地形モデル作成や圧力源モデルの設定に加えて計算結果作図機能を追加し、これらの作業を簡単に行うためのGUIツールを作成した。

・富士山などで、山体地形が観測データに与える影響を評価した結果、圧力源が観測点と同程度の標高にある場合、既存の標高補正茂木モデルでは、観測データを適切に評価できないことを示した。また、三宅島の水準測量データによる圧力源解析では、地形効果などを考慮することで、火山性地震の震源付近に圧力源を推定することができた。

・マグマ上昇に伴う地殻変動の時間変化を求めるシミュレーション手法を開発し、伊豆大島の地殻変動観測点に実施した。シミュレーションの結果からマグマ上昇位置の違いにより観測される傾斜データの時空間変化の違いを示した。

[テーマ3] 監視観測データの活用的高度化

・地震波干渉法による脈動記録を用いた地震波速度変化の検出手法を開発し、伊豆大島において活動静穏時における地震波速度の時間変化を検出した。地震波速度変化が地殻変動と相関していることを明らかにするとともに、クラスター分析によって地震波速度変化の空間パターンを分類することにより、地下構造との対応関係を把握した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

入山 宙・鬼澤真也・新堀敏基・高木朗充,気象庁数値気象モデルを用いた気象補正に伴う光波測距のノイズレベル定量化,験震時報（論文）,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

安藤 忍・鬼澤真也,2023,伊豆大島におけるドローンを用いた熱赤外観測2,日本地球惑星科学連合2023年大会

奥山 哲・安藤 忍・新堀敏基・鬼澤真也,2023,気象研究所におけるGNSS対流圏遅延補正プログラムの開発（第3報）,日本地球惑星科学連合2023年大会

川口亮平,2023,火山の地形を考慮した地殻変動計算システムの開発(2),日本地球惑星科学連合2023年大会

入山 宙・鬼澤真也・新堀敏基・高木朗充,2023,数値気象モデルを用いた気象補正に伴う光波測距のノイズレベル定量化,日本地球惑星科学連合2023年大会

安藤 忍・小久保一哉・川口亮平・木村一洋・山本哲也,2023,伊豆大島多成分ひずみ計における過去10年分の解析,日本測地学会第140回講演会

奥山 哲・安藤 忍・新堀敏基・鬼澤真也,2023,気象研究所におけるGNSS対流圏遅延補正プログラムの開発(第4報),日本測地学会第140回講演会

鬼澤真也・西山竜一・今西祐一・大久保修平・安藤 忍,2023,伊豆大島火山における合同精密重力観測,日本火山学会2023年度秋季大会

川口亮平・鬼澤真也・成田冴理・安藤 忍,2023,伊豆大島のGNSSデータの解析,日本火山学会2023年度秋季大会

奥山 哲・安藤 忍・新堀敏基・鬼澤真也,2023,気象研究所におけるGNSS対流圏遅延補正プログラムの開発,日本火山学会2023年度秋季大会

入山 宙・長岡 優・吉田康宏・鬼澤真也・川口亮平・行竹洋平,2023,伊豆大島における地震波速度変化と地殻変動の関係,日本火山学会2023年度秋季大会

川口亮平,2023,火山地形を考慮した地殻変動計算手法の開発,次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト 合同研究集会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

火山活動の監視・評価及び予測技術に関する研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

気象庁 気象研究所 火山研究部
他機関との共同研究の有無: 無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等: 気象研究所企画室
電話: 029-853-8535
e-mail: ngmn11ts@mri-jma.go.jp
URL: <http://www.mri-jma.go.jp>

(14) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 鬼澤 真也
所属: 気象研究所火山研究部第一研究室

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

火山活動に伴う地殻変動の把握及び評価

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

オ. 高リスク小規模火山噴火

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

火山活動監視・評価の高度化に資するため、全国の火山の地殻変動観測およびデータについて、監視項目の評価と適正化の検討、地殻変動検出のためのノイズ低減に向けた検討を進めるとともに、地殻変動検出時の変動源推定等の解析と結果の噴火予知連絡会等への報告を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

気象庁では常時監視火山をはじめとする活火山において傾斜計やGNSS等の地殻変動観測装置を整備しデータを取得するとともに、関係協力機関から提供を受けたデータを用いて全国の火山活動の監視を行っている。これら監視データにより地殻変動の検出を試みるとともに、活動の活発化に伴い地殻変動が検出された際には、これらのデータを使用し、適宜、変動源推定等の解析を行い、火山噴火予知連絡会等に報告する。また、観測データをより有効に活用し、監視・評価手法を改善していくために以下の検討、技術の高度化を進める。

- ・ GNSS等の異常検知力調査およびこれに則った監視項目の評価、適正化の検討
- ・ 傾斜データ等のノイズ低減によるデータ高品位化のための検討
- ・ H30年度に打ち上げ予定のALOS-4に対応したSARデータ解析環境の構築と地殻変動検出

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・ 今年度の成果の概要

国内の活火山を対象に、火山活動を把握する目的で、地殻変動観測及び解析を行った。口永良部島では、干渉SAR解析で5月頃から8月頃にかけて古岳付近の数百mの範囲で衛星に近づく変動が、またGNSS連続観測で6月頃から10月頃にかけて古岳付近の膨張を示唆する変動が観測された。浅間山では、2023年3月中旬以降、浅間山の西側での膨張を示すと考えられるわずかな傾斜変動が観測され

始め、GNSS観測でも西山麓の基線で伸びが認められた。

地殻変動が見られた火山に対して、GNSSや傾斜計等のデータを用いて変動源推定等の解析を行い、火山活動を評価した。その成果については、火山噴火予知連絡会における火山活動評価、火山活動解説資料等の防災目的の資料等に利用した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

国内の活火山を対象に、火山活動による地殻変動を把握する目的で、GNSSと傾斜計による観測を行った。また、浅間山、八幡平・秋田焼山周辺、口永良部島、諏訪之瀬島、硫黄島、西ノ島等で、衛星データの干渉SAR解析を行った。火山活動が活発化し地殻変動が見られた火山について、地殻変動観測データを用いて変動源推定等の解析を行い、火山活動を評価した。その結果は、火山噴火予知連絡会における火山活動評価、火山活動解説資料等の防災目的の資料等に利用する他、適宜、学会等において発表を行った。

GNSS解析について、2016年以前のデータで時期により解析手法が異なる課題があったことから解析処理手法の検証、評価を行った。傾斜計データについて全国の観測点を対象に検知能力とデータの特徴、気象等によるノイズを調査、整理し、補正技術の適用を検討した。一部の傾斜計については降水補正によりノイズを低減し、火山活動評価技術を改善した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

柳澤宏彰・他,2023,浅間山の2023年3月からの火山活動について,日本火山学会2023年度秋季大会,P58

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

火山活動の総合判断（仮）

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁地震火山部火山監視課,札幌管区气象台,仙台管区气象台,福岡管区气象台,火山監視・警報センター
他機関との共同研究の有無：有

国土地理院,宇宙航空研究開発機構,大学,研究機関,自治体等の火山観測実施機関

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地震火山部管理課 地震調査連絡係長

電話：03-6758-3900(内線：5114)

e-mail：jmajishin_kanrika@met.kishou.go.jp

URL：http://www.jma.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：若生勝

所属：気象庁地震火山部火山監視課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地球電磁気学的手法による火山活動評価の高度化

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

雌阿寒岳、草津白根山など熱水活動の活発な火山において全磁力連続観測および繰返し観測を継続的に実施し、火山活動との対応を調査する。また、火山性磁場変動の抽出の高精度化を図る。これにより、全磁力による火山の熱水系の活動状況をモニタリングする技術を高度化し、水蒸気噴火の前兆的現象を捉えることを目標とする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

雌阿寒岳や草津白根山、伊豆大島などの熱水系の卓越する火山において、全磁力の連続観測および繰返し観測を継続し、火山活動との対応関係を調査する。全磁力の観測結果を解析し、全磁力変化をもたらす熱源位置の推定を行う。また、地殻変動や地震活動、比抵抗構造と熱源の対応を調べ火山内部で発生している物理過程の解明を目指す。平成27年度～30年度に気象庁が水蒸気噴火の予測を目的として整備した樽前山、吾妻山、御嶽山、霧島山、九重山、安達太良山における全磁力観測データの解析を行い、熱活動の状況を分析する。また、これら火山の山麓参照点に設置された三成分磁力計データを外部磁場擾乱補正に適用し、火山性磁場変化の抽出の精度向上を図る。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島にて全磁力連続観測及び繰返し観測を継続し、全磁力から推定した火山浅部の熱的变化と火山活動との対応について調査した。草津白根山におけるシズカ山参照点について、現地調査を行い、変化計を地上に直置きして温度管理する方策を検討し、次期計画にて運用を開始することとなった。伊豆大島の全磁力連続観測網について、火山活動監視に効果的な観測点配置をシミュレーションにより検討した。吾妻山における地磁気3成分繰返し観測の予備調査として、絶対観測並びに、国土地理院の協力のもとでGNSS測量による真方位測定を実施した。また、全磁力観測に現れるDI効果の見掛け変化を補正するために、観測点及び参照点における偏角・伏角を現地で簡便に測定可能な偏角・伏角計の開発を業者の協力のもとで製品化を目指し推進した。更に、リアルタイム火山活動監視へ寄与するために、令和6年度中に気象庁火山監視情報システムと補正済の火山全磁力データ（気象庁整備火山含む）を共有する計画を進めた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

火山の熱水系の活動状況を監視する技術開発のために、雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島など熱水活動の活発な火山をテストフィールドとして、全磁力連続観測及び繰返し観測を継続的に実施し、熱源位置の推定など観測成果は噴火予知連絡会などに報告した。火山性磁場変動を高精度に抽出するために、全磁力に含まれる年周変化やDI効果の見掛け変化を効果的に補正する手法を開発し、全磁力から推定した火山浅部の熱的变化と火山活動との対応について調査した。草津白根山において、安定的に基準点を確保する目的でシズカ山に参照点を設置する計画を進め、変化計を地上に直置きして温度管理する方策を検討し、次期計画にて運用を開始することとなった。伊豆大島の全磁力連続観測網について、火山活動監視に効果的な観測点配置をシミュレーションにより検討した。次期計画にて本格運用する吾妻山における地磁気3成分繰返し観測の予備調査として、吾妻山参照点の収録装置の温度依存性やその低減に関する調査とともに、絶対観測並びに、国土地理院の協力のもとでGNSS測量による真方位測定を実施した。また、DI効果の見掛け変化を補正するために、観測点及び参照点における偏角・伏角を現地で簡便に測定可能な偏角・伏角計の開発を業者の協力のもとで製品化を目指し推進した。更に、リアルタイム火山活動監視へ寄与するために、令和6年度中に気象庁火山監視情報システムと補正済の火山全磁力データ（気象庁整備火山含む）を共有する計画を進めた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

豊留修一・藤原善明・長町信吾・増子徳道・屋良朝之・山崎明・弘田瑛士・栗原正宣,2024,阿蘇山における地磁気観測,地磁気観測所テクニカルレポート,19,査読無

松下拓輝・浅利晴紀・稲村友臣・仰木淳平・平原秀行・有田真・近藤斗真・増子徳道・屋良朝之・谷口秀隆・藤原善明・山際芳雄・秋元良太郎・海田俊輝・市来雅啓,2024,吾妻山大穴火口付近における地磁気ベクトル成分観測の予備調査,Conductivity Anomaly研究会2024年論文集,査読無

・学会・シンポジウム等での発表

浅利晴紀・有田真・秋元良太郎,2023,2022年吾妻山大穴火口浅部の熱的推移について～全磁力連続観測による示唆～,日本地球惑星科学連合2023年大会,SVC33-01

飯塚ふうな・三嶋渉・宮村淳一・橋本武志,2023,樽前山における2021年3月の熱消磁現象と最近の火山活動,日本地球惑星科学連合2023年大会,SVC33-02

Nagamachi, S. and S. Asari,2023,A new method to correct the orientation effect in observations of the total magnetic force for volcanomagnetic monitoring,the 28th IUGG General Assembly (IUGG2023),A23p-327

松下拓輝・浅利晴紀・稲村友臣・仰木淳平・平原秀行・有田真・近藤斗真・増子徳道・屋良朝之・谷口秀隆・藤原善明・山際芳雄・秋元良太郎・海田俊輝・市来雅啓,2023,吾妻山大穴火口付近における地磁気ベクトル成分観測の予備調査,2023年度Conductivity Anomaly研究会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

電磁気による火山活動評価の高度化に向けた調査

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁地磁気観測所

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：気象庁地磁気観測所総務課

電話：0299-43-1151

e-mail : kakioka@met.kishou.go.jp
URL : <https://www.kakioka-jma.go.jp/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：藤原善明
所属：気象庁地磁気観測所技術課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

化学的手法に基づく火山活動監視・予測に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

直接採取した火山ガスや熱水の化学組成及び安定同位体比、並びに火山灰に付着した火山ガス由来成分等の分析を通じて火山ガス活動の理解を深め、個々の火山における火山ガス活動の機構の解明を目指す。

火山ガスの放出率や組成比をモニタリング・評価する技術を開発するとともに、火山ガス活動への理解を踏まえ、地殻変動などの物理観測データも組み合わせた多項目解析を行うことで、火山活動評価への活用を図る。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

吾妻山、箱根山、草津白根山及び霧島山等の活動的火山において採取した火山ガスや熱水の化学組成及び水素・酸素安定同位体比、あるいは火山灰から抽出した水溶性の化学成分を、重量分析や容量分析などの手分析のほかにガスクロマトグラフやイオンクロマトグラフ、分光分析といった機器分析を組み合わせて分析し、火山ガス活動やその起源に関する理解を深め、個々の火山における火山ガス活動の機構の解明を目指す。

火山ガスをセンサー等で測定し火山ガス活動をモニタリングするための研究を行う。具体的には、気象庁が4火山に設置した、多成分火山ガス連続観測装置によるガス成分比のモニタリング技術の向上、気象モデルを用いた二酸化硫黄放出率のモニタリング技術の改善、二酸化炭素等土壌ガスの連続観測あるいは機動観測による噴火ポテンシャル評価等を、吾妻山、草津白根山、伊豆大島、桜島等で行う。また、それらのデータと、地震や地殻変動等の既存の物理観測データを組み合わせた統合解析手法を検討する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

・草津白根山（白根山）において湯釜火口の湖水の化学組成を分析し、2023年4月から11月にかけて、過去の噴火の前後で顕著に増大したことがあるMg/Cl比に大きな変化はない一方、Cl濃度が増加傾向を示す変化を捉えた。霧島山（硫黄山）では硫黄山周辺の熱水の化学組成（Cl/SO₄比）を分析し、2023年5月から活動が高まり、その後10月にピークを迎えたことを捉えた。箱根山では火山ガスの化学組成を分析し、He/CH₄比やCO₂/H₂S比の変化などから箱根山では2023年5月から浅部熱水系に対するマグマ成分の供給量が増加したことを捉えた。これらの成果は随時、火山噴火予知連絡会や地元気象台などに提供した。

・火山監視課が実施する湖水（草津白根山、湯釜火口湖）の化学分析に関し、分析法の助言や比較のための分析値などを提供した。

・火山ガスセンサーを多様な条件で人工的にガス曝露させ、センサーの電圧感度変化の挙動を明らかにし、補正のためのモデル式を推定して気象庁の多成分火山ガス濃度連続観測データのリアルタイム補正のための技術開発を行った。

・伊豆大島での可搬型土壌ガス観測の頻度を高めるとともに、モニタリング可能となるような手法に改良し、気象による効果について検討した。

・伊豆大島のマグマ活動のモニタリングのため、2017年から2024年までに10回の土壌ガス観測を行った。おもに三原山山頂火口内を中心に面的観測を実施し、これまでの7年の放出量は30 ton/day以内で推移し、大きな変動はなかった。この見積もられた放出率30 ton/dayとは、2000年有珠山噴火前の放出率の1割程度にあたる。

・二酸化硫黄放出率モニタリング手法の構築へ向け、二酸化硫黄カラム濃度の連続観測システムを開発し、阿蘇中岳近傍において現地収録型での試験観測を行った。この試験観測では年間を通じたスケジュール運用に成功し、その観測結果から、一部の観測点で生じた光量不足の原因解明、二酸化硫黄放出率の定量に適した観測配置の検討を進めるなど、業務化を意識した今後の観測における課題を明確にした。

・二酸化硫黄放出率の連続観測システムでの検量を可能にするため、準定常ガス拡散モデルを用いた二酸化硫黄カラム濃度分布モデル作成ツールを開発し、その手法を験震時報にて公表した。このツールは既に火山監視業務にも活用されており、機動観測による二酸化硫黄放出率観測を開始する前に当日の火山ガス拡散予測を提供するなど観測業務の支援に用いられている。

・二酸化硫黄放出率の連続観測システムでは、30分大気解析GPVを利用した準定常ガス拡散モデルから二酸化硫黄カラム濃度の理論値を計算し、観測値とフィッティングすることで二酸化硫黄放出率の検量を可能にした。連続観測による検量値と機動観測の検量値との比較を行い、連続観測における観測値の精度評価を進めた。その結果、連続観測と機動観測で得られた二酸化硫黄放出率の時間変化傾向はほぼ一致している結果が得られた。

・気象モデルから得られる3次元風速場をもとに、火口を起点とする前方流跡線解析を行い、Seninel-5p衛星による二酸化硫黄観測と組み合わせることで二酸化硫黄放出率を推定する方法を試みた。同一の事例について、二酸化硫黄プルーム全体が観測可能な場合と、仮にその一部が雲に覆われた場合の2通りに対して、この推定手法を適用し、同程度の放出率を算出できることを確認した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

〔テーマ1〕化学分析に基づく火山活動の理解に関する研究

・2018年には、草津白根山（本白根山）の2018年噴火火山灰を分析し、当該噴火が海拔2000m以深で起きた水蒸気噴火であること、本白根山の山体には少なくとも200℃以上の熱水変質帯が存在することを明らかにした。2019年には浅間山2019年8月噴火の火山灰を分析し、この火山灰は新鮮なマグマ成分を含まないことを明らかにした。2020年には、4～7月頃に発生した長野・岐阜県境付近の地震活動に伴って異常湧出した焼岳山麓の高温泉を分析し、高温泉の化学・同位体の特徴からは焼岳の活発化を示す証拠はないことを指摘した。2021年には、草津白根山湯釜火口の湖水の化学・安定同位体組成を分析し、火口直下のマグマ-熱水系モデルを提案するとともに、噴火の切迫を検知するためにMg/Cl比の観測が有効であることを示した。2022年には、焼岳1962年噴火の火山灰を分析し、当該噴火が水蒸気噴火であったことを裏付ける、熱水系由来の鉱物や水溶性成分を見出した。2023年には、霧島山（硫黄山）周辺の熱水中のCl/SO₄比に着目することで5～10月頃にかけての活発化を捉えた。また箱根山では火山ガスの化学組成変化から2023年4月頃から浅部熱水系に対するマグマ成分の供給が相対的に増加し、この活動は2024年1月現在も解消されていないことを明らかにした。とりわけ箱根山の観測成果は水蒸気噴火のように高リスク小規模噴火の潜在力がある火山でも化学観測によっ

て火山活動評価・異常検知ができる可能性を示す好例となった。これらの成果は随時、火山噴火予知連絡会や査読論文などに報告した。

[テーマ2] 火山ガス活動のモニタリングに関する研究

- ・火山ガスセンサーを多様な条件で人工的にガス曝露させ、センサーの電圧感度変化の挙動を明らかにし、補正のためのモデル式を推定して気象庁の多成分火山ガス濃度連続観測データのリアルタイム補正のための技術開発を行った。
 - ・2018～2019年の吾妻山の火山ガス濃度連続観測データを、多成分のダイアグラムで表現することによりマグマの寄与があった可能性を示し、物理観測データとともに解釈することにより、火山活動の評価に有効であることを示した。
 - ・二酸化硫黄放出率モニタリング手法の構築へ向け、二酸化硫黄カラム濃度の連続観測システムを開発し、阿蘇中岳近傍において現地収録型での試験観測を行った。この試験観測では、一部の観測点で生じた光量不足の要因は解明や、年間を通じたスケジュール運用に成功するなど、業務化を意識した今後の課題を明確にした。
 - ・二酸化硫黄放出率の連続観測システムでの検量を可能にするため、準定常ガス拡散モデルを用いた二酸化硫黄カラム濃度分布モデル作成ツールを開発した。これは火山監視業務にも活用され、機動観測による二酸化硫黄放出率観測を開始する前に当日の火山ガス拡散予測を提供するなど観測業務の支援に用いられている。
 - ・二酸化硫黄放出率の連続観測システムでは、30分大気解析GPVを利用した準定常ガス拡散モデルから二酸化硫黄カラム濃度の理論値を計算し、観測値とフィッティングすることで二酸化硫黄放出率の検量を可能にした。連続観測と機動観測検量値の比較による精度の明確化を進め、機動観測で得られた二酸化硫黄放出率の時間変化とほぼ一致している結果が得られた。
 - ・二酸化硫黄放出率モニタリング手法の高度化のため、高解像度気象シミュレーションから得られた風速場を用いて、阿蘇山火口を放出源とするトレーサ移流拡散の数値実験を、放出率の鉛直分散・トレーサの水平拡散係数を数通り与えて実施した。その結果と、機動観測から得られた二酸化硫黄カラム量分布を組み合わせて、放出率の鉛直プロファイルや拡散係数を最適化する手法の開発を進めた。その結果、火口上空の二酸化硫黄放出率プロファイルの鉛直分散や、トレーサの水平拡散係数を適切に与える必要があることその他、気象条件によりモデルの解像度が二酸化硫黄分布の再現性に影響を与えることが分かった。
 - ・機動観測で実施できる火山ガス成分観測の習熟及びその評価手法の確立のため、ガス検知管を用いた火山ガス成分観測の測定手法とその有用性に関する調査研究を行い、その成果についてとりまとめた。
 - ・口永良部島における2018年から2019年の噴火活動において、多項目解析による火山活動評価手法の検討を行った。二酸化硫黄放出率と地震活動の関係性から、爆発的噴火の発生へ向けての火道閉塞を示唆する二酸化硫黄放出率の低下と地震活動の活発化の変化を明らかにして火道の状態を理解し、活動評価へ活用できる可能性を見いだした。
- ・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

- ・論文・報告書等
河波俊和, 田町勇氣, 森健彦, 2023, 火山ガス拡散予想ツールの開発, 験震時報, 87, 3, 査読有
- ・学会・シンポジウム等での発表
高木 朗充, 新堀 敏基, 2023, Sentinel-5p衛星TROPOMIセンサーと気象庁局地モデルによる二酸化硫黄放出率の監視と西之島の火山活動, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SVC31-19
高木朗充, 松本享, 2023, 気象庁マルチガスデータのリアルタイム補正と火山監視・評価への活用, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SVC33-07
高木朗充, 2023, 衛星から見積もられた火山周辺の二酸化硫黄分布（2018～2023年）, 日本火山学会2023年度秋季大会, B2-01
Takagi, A., and H. Shinohara, 2023, Development of the automatic Multi-gas equipment for

volcano monitoring by JMA,火山ガスワークショップ（火山機動観測実証研究事業）

橋本明弘, 高木朗充, 新堀敏基,2023,衛星観測と前方流跡線解析による二酸化硫黄放出率推定,日本火山学会2023年度秋季大会,P122

森 健彦, 入山宙, 岩本征大, 井上秀穂, 西正儀,2023,阿蘇火山における二酸化硫黄放出率の準連続観測～その2～,日本火山学会2023年度秋季大会,P106

Ohba, T., and M. Yaguchi,2023,Geochemical monitoring of lake water in the Yugama crater and adjacent fumarolic gases reveal the long-term volcanic activity cycles of the Kusatsu-Shirane volcano, Japan,IAVCEI-CVL11 Workshop on Volcanic Lakes

大場武, 谷口無我, 沼波望, 豊島誠也, 安田裕紀, 寺田暁彦,2023,草津白根山における火山ガス組成の時間変化,日本火山学会2023年度秋季大会,B1-01

大場武, 谷口無我, 沼波望, 豊島誠也,2023,箱根山における火山ガス組成の時間変化,日本火山学会2023年度秋季大会,P63

谷口 無我, 大場 武, 福岡管区气象台, 鹿児島地方气象台, 宮崎地方气象台,2023,火山性熱水の化学分析による火山活動評価－霧島山えびの高原(硫黄山)の例－,日本火山学会2023年度秋季大会,P24

谷口 無我, 大場 武, 福岡管区气象台, 鹿児島地方气象台, 宮崎地方气象台,2023,霧島山(硫黄山)2018年火口に湧く強酸性熱水の地球化学的特徴,2023年度 日本地球化学会 第70回年会,PR0142

寺田 暁彦, 若松 海, 水谷 紀章, 角野 浩史, 小長谷 智哉, 大場 武, 高橋 昌孝, 谷口 無我, 高橋 祐希,2023,草津白根山における側噴火発生危険評価：土壌ガスの化学的特徴から示唆される火口周辺地下の物質輸送,日本地球惑星科学連合2023年大会,SVC33-10

谷口 無我, 大場 武,2023,熱水の地球化学的観測による火山活動の評価,日本地球惑星科学連合2023年大会,AHW23-P1

角野 浩史, 長井 雅史, 廣瀬 郁, 三輪 学央, 谷口 無我,2023,噴気・温泉ガスのヘリウム・炭素同位体比からみた硫黄島の火成活動の起源と熱水系,日本地球惑星科学連合2023年大会,SVC31-17

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

火山活動の監視・評価及び予測技術に関する研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象研究所火山研究部第三研究室

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：気象研究所企画室

電話：029-853-8535

e-mail：ngmn11ts@mri-jma.go.jp

URL：http://www.mri-jma.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：坂井孝行

所属：気象研究所

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震動・津波即時予測の高度化に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測手法

イ. 津波の即時予測手法

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地震動即時予測について観測震度に対して予測震度が概ね震度差1以内に収まる精度を目指す。また、震源位置やマグニチュードが決まっていない段階においても震度予測ができる迅速性・堅牢性の向上も目指す。さらに、長周期(おおよそ周期10秒程度まで)の様々な揺れの予測にも対応できるように拡張・強化する。

津波伝播計算における沿岸域での境界条件等を最適化する。それにより、津波伝播計算による日本の沿岸域における第1波到達から後続波、減衰に至るまでの津波全過程予測の精度向上を図る。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

これまで構築してきた揺れから揺れを予測する技術をさらに発展させ、データ同化手法を用いて波動場を正確に推定し、そこから未来の波動場を予測する手法を目指す。これにより、(震度だけではなく)長周期地震動を含めた波形での予測が可能となる。また、海域や陸上の観測網の環境の変化に対応するとともに、波動の同定(P波かS波か)の手法、伝播経路特性や地盤増幅特性の改良を行うことで、緊急地震速報や長周期地震動予測情報の精度向上・迅速化・堅牢化に向けた技術開発を行う。さらには、これらの予測手法は、現場への応用を考慮し、実時間よりも早く計算が行えるようにする。

沖合津波観測データを用いることにより、沿岸津波観測データからよりも正確に津波波源を推定する。推定された津波波源から得られる津波伝播計算結果と観測データとの比較により、沿岸域の地形データや摩擦パラメータ等、津波伝播計算における境界条件を評価し、その最適化を行う。それにより、沿岸域に捕捉され長時間継続する津波の後続波の伝播や減衰過程の予測精度向上を図る。また、これらの成果を活用するなどして、データ同化を含む沖合津波観測データを用いた津波の面的把握技術と津波即時予測技術の改良を進めるとともに、地震波周期の特徴から津波地震の規模を推定する手法の開発、地すべりによる津波発生ポテンシャルの評価、及び新たな津波監視技術の活用可能性に関する調査を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

・地震波伝播シミュレーションに基づいた地震動即時予測の応用として地震波の逆伝播を用いた震度分布の事後推定手法の開発を進め、逆伝播時にも地動速度エンベロープやリアルタイム震度などの地震動観測値を同化することにより、平成28年熊本地震を例に、強い揺れの観測値が得られなかった領域でもある程度その分布が復元できることを明らかにした。

・引き続き減衰・散乱・速度構造などの地下構造の詳細な推定を行った。この成果を地盤増幅特性及び波動場の計算モデルに組み込むことにより、継続時間も含めた揺れの予測精度向上が期待できる。

・観測波形に基づいたサイト特性の推定が困難な地点を対象とする地震動即時予測へ向けて、公開されている地盤情報(J-SHIS)に基づくサイト特性補正を行った地震動即時予測シミュレーションを実施し、その有効性を調査した。

・単独観測点の地震波形から地震波動の伝播方向の観測情報を得るため波形形状を入力とした深層学習による波動伝播方向推定手法の開発を進め、これに開発してきたリアルタイムで推定した震度の距離減衰を組み合わせることで予測性能の高度化が図られるか検証を行った。

・観測点の品質管理の自動化を目的として、周波数やその時間経過を特徴量とし、事前にデータベースを用意しなくとも地震や特徴的ノイズなどを自動で分類・抽出する教師なし機械学習の手法開発を進めた。紀伊半島沖の臨時海底地震観測点の観測記録に適用したところ、誤検知はあるが8割程度のテクトニック微動を検出できた。

・微小な地震の調査観測を主目的として全国に高密度に展開されているHi-net高感度速度計をIPF法やPLUM法へ活用するために検討・開発してきたHi-net速度計の計器補正及び必要な物理量を計算するフィルタや、多地点の観測値を扱えるように改良を行ったIPF法が、令和5年度に気象庁の緊急地震速報に実装された。また多地点のHi-net観測点を利用することから、機械学習に基づいた推論により観測波形の正常/異常を判定し、異常な場合に緊急地震速報への利用を抑止できるよう開発した手法も実装された。

・長周期地震動を観測された揺れから直接予測する手法開発を進めるにあたり、振幅のみならず観測された長周期地震動の位相の情報の重要性の程度について調査を進めた。

・2016年の福島県沖の地震の震源断層モデルを用いたケーススタディから、この場所を震源とする地震による津波が福島県から宮城県沿岸で高くなる条件には、震源断層の走向が強く関係していたが、日本沿岸の他の海域において量的津波予報データベースと実際に発生している地震の走向が異なる場合があり、これらの海域に対してデータベースに新たな津波シナリオを導入した手順と技術的背景を整理した。

・1780年のウルフ島沖の地震による北海道への遠地津波の典拠を確認したところ、北海道に津波が及んだというデータは誤りであったが、他にも、国際的な歴史津波データベースに19世紀以前の日本への遠地津波として登録されている事例について、文献調査により真偽を確認したところ、根拠がない偽津波が約半数を占めていた。

・環太平洋の沈み込み帯へ網羅的に巨大地震を仮定して津波数値計算を実施したところ、千島海溝北部、アリューシャン海溝東部、トンガ・ケルマディック海溝を波源とする場合、日本沿岸に第一波が到達した数十時間後に、それまで減衰傾向を示していた津波高の時間推移が再増大に転じること、その原因はチリ沿岸からの反射波であることを示した。

・2024年1月1日16時10分に発生した能登半島地震への対応として、日本海沿岸で観測された津波の到達時刻から津波の波源域を推定し、その長さが約100 kmにわたり能登半島の島北東方向の沖合まで及ぶこと、富山の検潮所付近にも津波波源が存在した可能性があることを速報した。また、こうした波源域の推定精度を高めるため、石川県・富山県において津波の現地調査を実施した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

揺れから揺れの予測の有効性の実証や緊急地震速報の震度の過大予測を低減する技術の気象庁業務への実装、予測の精度・迅速性・堅牢性の向上に必要な技術開発の進展があった。長周期地震動に関しては短周期の揺れである震度のように伝播を単純化した手法では予測精度の向上等が期待できず、詳細な波動伝播を考慮する必要があることがわかった。地震動即時予測の精度・迅速性・堅牢性を向上させる技術開発に進展がみられた。

津波数値計算に基づく津波全過程予測の開発には至っていないが、遠地津波の経験的な津波全過程予測手法の開発、津波後続波事例の再現計算、沿岸域での摩擦など非線形項の計算への影響の分析や計

算手法の改良、などの成果が得られた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

林豊,2023,1780年ウルフ島地震による日本への津波到達に関する真偽の検証,歴史地震・歴史地震研究会,38,1-14,査読有,謝辞無

Hayashi, Y.,2023,Correction of Applied Equations used to Assess the Amplification between Offshore and Coastal Tsunami Heights,Journal of JSCE・土木学会,11,23-17036,10.2208/journalofjsce.23-17036,査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Ogiso, M.,2023,Estimation of high-frequency source radiation energy of small earthquakes in Japan using seismogram envelopes considering the heterogeneous seismic structure,第28回国際測地学地球物理学連合総会（IUGG2023）,S03p-063,10.57757/IUGG23-0642

Kodera, Y.,2023,Automatic unsupervised classification of tectonic tremor signals in continuous seismic records,第28回国際測地学地球物理学連合総会（IUGG2023）,S04p-320,10.57757/IUGG23-4852

Hayashi, Y., M. Kiyomoto, G. Tange, K. Noguchi, S. Harada, and Y. Nishimae,2023,Modifying the pre-computed tsunami database for real-time tsunami forecasting after the 2016 off-Fukushima earthquake by an unpredicted mechanism,第28回国際測地学地球物理学連合総会（IUGG2023）,IUGG-0781,10.57757/IUGG23-0781

Hayashi, Y.,2023,Examining the reliability of historical teletsunamis reaching Japan using literature review,第28回国際測地学地球物理学連合総会（IUGG2023）,JP05p-084,10.57757/IUGG23-0802

Tsushima, H., Y. Hayashi, and T. Yamamoto,2023,Impact of tsunami measurements from dense offshore network on modeling of tsunami source and propagation,第28回国際測地学地球物理学連合総会（IUGG2023）,IUGG-1610,10.57757/IUGG23-1610

Tsushima, H.,2023,Capability of inversion of dense offshore tsunami measurements to constrain spatio-temporal evolution of tsunami source process,第28回国際測地学地球物理学連合総会（IUGG2023）,JP05p-097,10.57757/IUGG23-3548

Ogiso, M.,2023,Depth dependency in high-frequency source radiation energy of small earthquakes in Japan estimated from full seismogram envelopes,Asia Oceania Geosciences Society 20th Annual Meeting (AOGS2023),SE17-A007

林豊,2023,文献調査による日本への歴史遠地津波の真偽の検証,第40回歴史地震研究会,P-14

Hoshihara, M.,2023,Does moment magnitude matter for earthquake early warning in the near-fault region?,5th International Conference of Earthquake Early Warning

野口恵司, 溜瀨功史, 林元直樹, 小寺祐貴,2023,緊急地震速報の震源推定手法のIPF法への一本化,日本地震学会2023年度秋季大会,S15-01

小寺祐貴,2023,機械学習から推定した伝播方向を用いた地震動即時予測：距離減衰を導入したPLUM法の改善,日本地震学会2023年度秋季大会,S15P-11

溜瀨功史,2023,地震識別手法の高度化に基づく地震動即時予測の改善と特異な地震活動の解明,日本地震学会2023年度秋季大会,S20-04

小木曾仁, 対馬弘晃,2023,海洋波のグラディオメトリ解析(2): 振幅項に着目した2022年トンガ津波の伝播過程,日本地震学会2023年度秋季大会,S17-05

南雅晃,2023,津波数値計算における正確な減衰を表現するための新たな摩擦計算の検討,日本地震学会2023年度秋季大会,S17-06

対馬弘晃, 山本剛靖,2023,環太平洋で発生する津波の顕著後続波の可能性：津波伝播数値計算による試算,日本地震学会2023年度秋季大会,S17P-02

小木曾仁,2023,地震動エネルギーの逆伝播を用いた面的震度分布の事後推定,第16回日本地震工学シン

ポジウム,Day1-G417-26

Minami, M.,2023,Comparison of the Friction Term in Difference Equation of Non-linear Long-wave Equation - Which Method is Superior, the Semi-implicit Method or the Fully Implicit Method?,11th International Conference on Asian and Pacific Coasts 2023,Paper 128

Tsushima, H., Y. Hayashi, and T. Yamamoto,2023,Impact of Tsunami Measurements from Dense Offshore Network on Modeling of Tsunami Source and Propagation: A Case Study of the 2016 Mw 6.9 Off-Fukushima Earthquake,11th International Conference on Asian and Pacific Coasts 2023,Paper 146

Hayashi, Y., M. Kiyomoto, G. Tange, K. Noguchi, S. Harada, and Y. Nishimae,2023,Modification of the pre-computed tsunami database for real-time tsunami forecasting by the JMA: Response to the 2016 off-Fukushima earthquake by the unexpected mechanism,11th International Conference on Asian and Pacific Coasts 2023,Paper 148

対馬弘晃, 山本剛靖,2023,環太平洋で発生する津波の顕著後続波の可能性:津波伝播数値計算による試算,第13回 巨大津波災害に関する合同研究集会,1-1

南雅晃,2023,津波数値計算における正確な減衰を表現するための新たな摩擦計算の検討,第13回 巨大津波災害に関する合同研究集会,2-4

小木曾仁,2023,不均質な地下構造の影響を考慮した地震波エンベロープを利用した震源放射エネルギーの推定,東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震波形解剖学 3.0」-高密度観測・高周波数地震動で見る地殻・マントル不均質構造-,S23-P03

Yamada, M., K. Tamaribuchi, S. Wu, and D.Y. Chen,2023,IPFx: extended integrated particle filter method for earthquake early warning and application to the international networks,AGU Fall Meeting 2023,NH13C-0691

小寺祐貴,2024,機械学習による単独観測点からの波動伝播方向推定およびPLUM法への応用,東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学的諸現象の即時解析・即時予測とその利活用:更なる高度化と新たな展開」,(13)

小木曾仁, 対馬弘晃,2024,海洋波のグラディオメトリ解析:津波即時予測への活用へ向けた検討,東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学的諸現象の即時解析・即時予測とその利活用:更なる高度化と新たな展開」,(20)

Hoshiha, M.,2024,Overview of the 2024 Noto peninsula earthquake,2024 Northern California Earthquake Hazards Workshop

Hoshiha, M.,2024,Review of nationwide earthquake early warning in Japan: 15 years' operation by JMA,2024 Northern California Earthquake Hazards Workshop

Kodera, Y., 2023, Automatic classification of tectonic tremors with an unsupervised machine learning algorithm, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SCG45-P29,

小寺祐貴, 2023, 深層学習を用いた単独観測点からの波動伝播方向推定:波動場実況把握の高度化を目指して,日本地球惑星科学連合2023年大会, SCG53-P03,

小木曾仁, 2023, 面的な地震動即時予測に向けたサイト特性補正の検討,日本地球惑星科学連合2023年大会, SCG53-P04,

小木曾仁, 2023, Wave gradiometryの地震動即時予測への活用可能性の検討,日本地球惑星科学連合2023年大会, SCG53-P05,

下山利浩, 2023, 長周期地震動の即時予測の検討,日本地球惑星科学連合2023年大会, SCG53-P06,

南雅晃, 2023, 津波数値計算における詳細なCFL条件~その計算精度・速度の検討,日本地球惑星科学連合2023年大会, HDS06-13,

対馬弘晃, 2023, 津波伝播数値計算における津波の非線形性に関する考察:2016年11月22日福島県沖地震の事例,日本地球惑星科学連合2023年大会, HDS06-P10,

林豊, 2023, 文献調査による日本への歴史遠地津波の信頼性の検討,日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS13-05,

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地震動・津波即時予測の高度化に関する研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象研究所地震津波研究部

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：気象研究所企画室

電話：029-853-8535

e-mail：ngmn11ts@mri-jma.go.jp

URL：http://www.mri-jma.go.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：林 豊

所属：地震津波研究部

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究
火山

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

気象レーダー等の観測データを用いて、噴火現象の検知や噴煙に含まれる火山灰等の定量的推定手法を開発する。

浮遊火山灰や降灰等を統一的に予測するための新しい移流拡散モデルを開発・改良する。さらに火山灰データ同化システム（プロトタイプ）と結合させることにより、気象レーダー等による観測値と移流拡散モデルの予測値に基づく火山灰データ同化・予測システムを構築する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

活動的な火山である桜島を主対象として、二重偏波レーダーや高速スキャンレーダーなどの先進的な気象レーダーによる噴煙のエコー強度やマルチパラメータを解析することにより、噴火検知技術の開発や噴出する火山灰・礫の量や挙動を定量的に推定するための技術開発を行う。また気象衛星で観測される火山灰から、噴火検知や噴火規模の即時的な推定の研究を行うとともに、噴火発生直後の監視カメラによる爆発映像等を利用し、気象レーダー等による解析結果の検証、火砕流や火山岩塊等の防災上重要な火山現象の解析を行う。

領域移流拡散モデルと全球移流拡散モデルを統一した新しい移流拡散モデルを、堅牢性、速報性、柔軟性および開発管理の観点から設計して開発する。そして供給源および新しい移流拡散モデルとこれまでが開発した火山灰データ同化システム（プロトタイプ）を組み合わせ、火山噴出物に対する観測データの解析から予測までを一貫して実行できる火山灰データ同化・予測システムの構築を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

- ・今年度の成果の概要
- ・気象研究所Xバンドマルチパラメータレーダー（MRI-XMP）による噴煙観測と二次元ビデオディストロメーター（2DVD）による降灰観測を実施し、その観測結果を用いて、噴煙に含まれる火山灰等の分布を定量的に推定する手法の開発を行った。
- ・気象庁移流拡散モデル（JMA-ATM）に新たな物理過程（再飛散過程）を実装した。このモデル改良

に伴い、浮遊火山灰の予測領域が改善した。

・ 気象衛星ひまわりの観測データを用いた火山灰雲の解析値をJMA-ATMの初期値にデータ挿入法を用いて反映させる仕組みを火山灰データ同化・予測システムに実装し、2018年4月4日新燃岳噴火の事例において火山灰雲の定量的な予測が可能であることを示した。

・ 計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

・ 気象庁一般気象レーダーにより噴火事例（2019年8月7日浅間山、2020年1月11日・2月3日口永良部島、等）を解析した。2020年6月4日2時59分桜島爆発的噴火の事例の噴煙高度を解析した結果、火口上約8000m以上に達していたことが分かった。

・ 気象レーダーによる噴煙高度の確率的推定手法について、大気屈折率・地球楕円体の効果の組み込み、ジオイド補正を追加するなどの改良も行ったMPE法（Sato, 2021）を用いて、火山噴火予知連絡会に資料（2021年阿蘇山・諏訪之瀬島噴火事例）を提出した。

・ 二重偏波化された一般気象レーダー（福岡）のデータを用いて、2021年阿蘇山噴火の解析を行った。その結果、10月14日・20日の噴火は共に水物質の寄与が大きかったが、20日の噴火の方が、噴煙内部の火山噴出物（火砕物）の量が多いことを示した。

・ MRI-XMPによる噴煙観測と2DVDによる降灰観測を実施し、その観測結果を用いて、噴煙に含まれる火山灰等の分布を定量的に推定する手法の開発を行った。本手法では、2DVDによって観測された粒径と粒子形状の情報を独立資料として利用する。二重偏波レーダーで観測されたパラメータを説明し得る粒径分布を推定することで、大気中の噴出物量を求めている。

・ 2021年福徳岡ノ場噴火と2022年フンガ・トンガフンガ・ハアパイ火山（トンガ海底火山）噴火について、気象衛星ひまわりの画像解析を行った。衛星視差の影響による傘型噴煙の位置ズレが傘型噴煙の面積・半径の解析に与える影響については、衛星天頂角が極度に開いていない限り、無視できることを示した。

・ 2021年福徳岡ノ場噴火と2022年トンガ海底火山噴火に伴って発生した雷データの比較解析を行い、トンガ海底火山噴火の方が雷活動（ストローク数・エネルギー）で見た規模が大きいことを示した。

・ 領域移流拡散モデルと全球移流拡散モデルを統一したJMA-ATMを開発した。

・ JMA-ATMに新たな物理過程（再飛散過程）を実装した。このモデル改良に伴い、浮遊火山灰の予測領域が改善した。予測領域の衛星画像に対する検証では、衛星視差の影響による灰雲の位置ズレを考慮する必要があることを調査した。

・ 火山灰データ同化システムをJMA-ATMに結合した火山灰データ同化・予測システムを用いて、予報官による衛星解析に対する検証を行い、同システムで作成した初期値を用いることで火山灰雲の中心位置・火山灰雲の面積の予測が改善することを確認した。

・ 気象衛星ひまわりの観測データを用いた火山灰雲の解析値をJMA-ATMの初期値にデータ挿入法を用いて反映させる仕組みを火山灰データ同化・予測システムに実装し、2018年4月4日新燃岳噴火の事例において火山灰雲の定量的な予測が可能であることを示した。また、複数の噴火事例を用いて、本システムに含まれる、火山灰雲の厚さを推定するための経験的なパラメータを決定した。

・ 火山灰データ同化・予測システムにおいて、噴火直後のJMA-ATMの初期値を作成するための噴煙モデルに関して、各種保存則や大気との相互作用を考慮した新たな噴煙モデル（NIKS-1D）の作成に着手した。本モデルの性質調査を行って、現実の噴煙でみられる特徴を再現していることを確認した。

・ 「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・ 論文・報告書等

Ishii, K., M. Hayashi, H. Ishimoto, and T. Shimbori, 2023, Prediction of volcanic ash concentrations in ash clouds from explosive eruptions based on an atmospheric transport model and the Japanese meteorological satellite Himawari-8: A case study for the Kirishima-Shinmoedake eruption on April 4th 2018, Earth Planets Space, 75, 37, doi:

10.1186/s40623-023-01790-y, 査読有, 謝辞無

新堀敏基・林 昌宏・石元裕史, 2023, 気象衛星による大規模噴煙解析—2022年1月15日トンガ海底火山噴火の事例—, 駿震時報, 87, 2, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

佐藤英一,2023,二重偏波気象レーダーによる火山灰の定量的推定について,日本地球惑星科学連合大会,MIS23-P05

佐藤英一,2023,二重偏波気象レーダーによる火山噴煙の観測と応用について,日本火山学会,A1-03

新堀敏基・橋本明弘・石井憲介・林 洋介,2023,移流拡散モデルによる再飛散火山灰予測,日本火山学会,A3-26

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

火山活動の監視・評価及び予測技術に関する研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象研究所火山研究部

他機関との共同研究の有無：有

京都大学防災研究所,鹿児島大学,防災科学技術研究所,東京大学地震研究所

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：気象研究所企画室

電話：029-853-8535

e-mail：ngmn11ts@mri-jma.go.jp

URL：http://www.mri-jma.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：新堀敏基

所属：気象研究所火山研究部第二研究室

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

火山活動の総合判断

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

オ. 高リスク小規模火山噴火

(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

防災関係機関の防災活動に資するため、引き続き全国の火山活動の状況について総合的な判断を実施する。特に噴火が近づいた火山や噴火中の火山について、最新の研究成果に基づき現在の状態から火山噴火や噴火終息に至るまでの過程についての噴火推移の予測を試みる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

火山噴火予知連絡会（定例会、臨時会）、あるいは、規模の大きな噴火発生時等の社会的影響が大きい場合に特定の火山を対象に設置した部会において、噴火発生の可能性や火山活動の推移の予測等について評価し、その結果を火山噴火予知連絡会統一見解等に取りまとめて報道発表や気象庁の火山情報で公表する等により社会に分かりやすく発信するとともに、各地の火山防災協議会にも提供して防災・減災活動を支援する。

また、研究成果・観測結果の情報交換、火山観測データの流通・共有の促進、活発化した火山における臨時観測に係る総合的な調整、研究成果の社会への発信などを通じて、火山噴火予知研究の推進に寄与する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和5年度は、新たな体制となった火山噴火予知連絡会において、第152回（令和5年7月12日）及び第153回（令和6年2月20日予定）の火山噴火予知連絡会定例会を開催し、全国の火山活動の状況について取りまとめた。取りまとめ結果は会議終了後に報道発表し、気象庁の「火山の状況に関する解説情報」でも発表した。

また、口永良部島では、約200年噴火が発生していない古岳火口で火山活動が活発化したことから、火山活動評価検討会の地域会合を開催し（令和6年9月5日）火山活動の総合判断を行った。この会合は火山噴火予知連絡会の新たな体制におけるはじめての地域会合であった。

さらに、火山調査研究検討会設立に向けた準備会では、火山噴火に伴うハザードの評価も行うとしている噴火災害特別委員会について、緊急時に機能するための平時の備えについて検討した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

火山噴火予知連絡会の定例会（第144回～第153回）を開催し、全国の火山活動の状況について取りまとめた。火山活動が活発化し、活動の長期化が懸念された霧島山、草津白根山、口永良部島については、火山噴火予知連絡会のもとにそれぞれ部会を設置し、活動状況の確認、今後の活動の推移、必要な観測及び調査の検討を行った。

また、気象庁における噴火警報発表業務の開始、大学における研究人材の確保や観測網の整備・更新が困難になるなどの火山噴火予知連絡会を取り巻く情勢の変化を踏まえつつ、火山噴火予知連絡会が継続的に火山防災に貢献していくため、火山噴火予知連絡会のあり方を検討した。これを受け、火山噴火予知連絡会は、2023年度より「噴火災害特別委員会」、「火山活動評価検討会」、「火山調査研究検討会（当面は設立に向けた準備会）」の3つの会合に分割する体制とした。

火山活動評価検討会は、口永良部島の活発化を踏まえて2023年9月5日に地域会合を開催し、火山活動の総合判断を行った。火山調査研究検討会の設立に向けた準備会では、火山噴火に伴うハザードの評価も行うとしている噴火災害特別委員会について、緊急時に機能するための平時の備えについて検討した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

火山噴火予知連絡会あり方作業部会による検討を踏まえ設置された噴火災害特別委員会は、これまでの火山噴火予知連絡会が行っていた活動評価に加え、火山噴火によるハザード評価も行うことを役割としており、「災害の軽減に貢献する」という目標に直結する会合である。2024年度の火山調査研究推進本部の設置を踏まえ、火山噴火予知連絡会の役割の見直しを行う予定であるが、火山調査研究検討会の設立に向けた準備会がとりまとめた報告「噴火災害特別委員会が緊急時に機能するための平時の備えについて」は、今後に活かすことができると考えている。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

火山活動の総合判断（仮）

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁地震火山部火山監視課,気象庁地震火山部,札幌管区气象台,仙台管区气象台,福岡管区气象台火山監視・警報センター

他機関との共同研究の有無：有

火山噴火予知連絡会に参画する関係機関

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地震火山部管理課 地震調査連絡係長

電話：03-6758-3900(内線：5114)

e-mail：jmajishin_kanrika@met.kishou.go.jp

URL：http://www.jma.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：碓井勇二

所属：気象庁地震火山部火山監視課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震観測、地殻変動観測

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地震観測網や地殻変動観測網などの観測基盤の維持、関係機関の地震観測データの一元的処理結果の関係機関への提供を継続する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

津波警報や地震情報等を適切に発表するため全国に展開している地震計及び震度計、東海地域を中心に展開しているひずみ計などの観測を継続するとともに、文部科学省と協力して、大学、防災科学技術研究所、海洋研究開発機構など関係機関の地震観測データを合わせて一元的に処理し、その結果を大学、関係機関に提供することにより、研究の推進に資する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

地震観測網や地殻変動観測網などの観測基盤を維持し、関係機関の地震観測データの一元的処理結果の関係機関への提供を行った。

顕著な地震活動や地殻変動観測結果について、定期・臨時に情報発表・記者会見等を行うとともに、南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会や地震調査委員会において報告を行った。

震源データを日々、更新するとともに、2022年9月までの精査後の震源データ（確定値）を公開した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

令和4年度に、気象庁における地震観測データおよび地殻変動データを収集・解析するためのシステム（EPOS：Earthquake Phenomena Observation System 地震活動等総合監視システム）の更新および、文部科学省と共に地震観測データの一元的処理を行うためのシステム（REDC：Regional Earthquake Data Center System 地域地震センターデータ処理システム）の更新を行った。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望
地震観測網や地殻変動観測網などの観測基盤の維持、関係機関の地震観測データの一元的処理結果の関係機関への提供を継続して実施するとともに、顕著な地震活動や地殻変動観測結果について、定期・臨時に情報発表・記者会見等を行い、発生した顕著な地震活動に対する初動防災対応に貢献した。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

- ・論文・報告書等
- ・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

建議項目「6. 観測基盤と研究推進体制の整備（1）観測研究基盤の開発・整備ア. 観測基盤の整備」
地震観測、地殻変動観測

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁地震火山部、気象庁大阪管区气象台気象防災部地震火山課
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：気象庁地震火山部管理課地震調査連絡係長
電話：03-6758-3900 ex.5114
e-mail：jmajishin_kanrika@met.kishou.go.jp
URL：https://www.jma.go.jp/jma/index.html

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：下山利浩
所属：気象庁地震火山部管理課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

潮位観測

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

潮位の連続観測を継続して実施する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

潮位データの伝送を高度化して、障害による欠測を減少させる。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和4年度に光回線化ができなかった箇所について、光回線化を進めた。

潮位データ集約サーバーの保守点検を実施し、経年劣化による欠測のリスクを減らした。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

令和元年度から5年度にかけて、光回線化ができる箇所について、光回線化を進めた。

潮位データ集約サーバーの保守点検を実施し、経年劣化による欠測のリスクを減らした。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

令和元年度から5年度にかけて、光回線化ができる箇所について、光回線化を進めた。

潮位データ集約サーバーの保守点検を実施し、経年劣化による欠測のリスクを減らした。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

潮位観測

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁大気海洋部環境・海洋気象課,地震火山部

他機関との共同研究の有無：有

国土交通省（水管理・国土保全局、港湾局）,国土地理院,海上保安庁と連携した潮位データの一元化

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地震火山部管理課 地震調査連絡係長

電話：03-6758-3900（内線：5114）

e-mail：johokan@eqvol2.kishou.go.jp

URL：https://www.jma.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：鈴木博樹

所属：気象庁大気海洋部環境・海洋気象課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地磁気精密観測

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地球電磁気学的観測による地殻活動及び火山活動の研究に資するため、精密な地磁気観測データを継続して提供する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

日本中央部、北日本、南西日本、日本南方の地磁気基準点である柿岡、女満別、鹿屋、父島の4観測点において、数十年～100年スケールにわたる安定した地磁気観測を実施し、精密な磁場データを毎日リアルタイムで提供する。

あわせて観測データの精度向上及び編集・解析作業の効率化を図る。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

柿岡、女満別、鹿屋及び父島での地磁気4成分観測を実施し、陸域、海域での磁気測量をはじめ、大学等による電磁氣的観測研究あるいは幾つか提案されている日本域における標準的な全磁力磁場モデルの算出方法の検証・改良を進めるために、高精度の地磁気基準値を提供した。

火山活動起源のシグナルを抽出するために用いられる「参照データとの差を求めて局所的な磁場変動だけを取り出す」という手法に加え、地域によって変化の大きさ、傾向が異なることに対処する上で必要となる地域毎の基準値の観測精度を維持するため、地磁気観測点への車両や建築物等による人工的な磁気擾乱の監視観測を維持し、異常値の検出・補正処理を施した。

地磁気活動の月別概況、K指数、地磁気現象、及び確定値等の観測資料を地磁気観測所ホームページ上で毎月公表している。これらのデータの引用・追跡を容易にするため、DOI (Digital Object Identifier) を付与しており、以下の地磁気観測所ホームページで確認することができる。

[URL] https://www.kakioka-jma.go.jp/info/kmo_datadoi.html

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

計画期間を通して安定して高精度の地磁気基準値を提供した。また、データの引用・追跡を容易にするため、令和3年度から地磁気観測所のデータへのDOI (Digital Object Identifier) を開始した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

長期的に安定した高精度の地磁気観測を継続することで、火山活動に伴う地磁気変化を解析するための基準データを提供することができた。また、近年、本研究課題のデータは津波に伴う地磁気変動の研究にも使われており、地球科学・防災の研究基盤データとしての重要性は高まっている。今後も安定性と精度を維持した観測を継続する。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

南拓人・他,2023,Numerical simulation of tsunami and magnetic signals at Chichijima Island, Japan, after the eruption of Hunga volcano, Tonga, on January 15, 2022,日本地球惑星科学連合2023年大会,HDS06-06

T.Minami et al.,2023,Magnetic signatures due to motional induction in the ocean after the 2022 Tonga eruption,第28回IUGG総会,IUGG23-4828

山崎貴之,2023,地磁気現象概況報告 -2023年2月～10月-,STE研究連絡会現象報告会および現象解析ワークショップ

Neesha R Schnepf et al.,2024,Magnetic signatures of the January 15, 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcanic Eruption,2023年AGU秋季大会,GP11A-01

稲村友臣,2024,地磁気現象概況報告（2023年10月～2024年1月）,2023年(令和5年度)・第2回STE(太陽地球環境)現象報告会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地磁気精密観測

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁地磁気観測所

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：気象庁地磁気観測所総務課

電話：0299-43-1151

e-mail：kakioka@met.kishou.go.jp

URL：https://www.kakioka-jma.go.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：仰木淳平

所属：気象庁地磁気観測所観測課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

全国における火山観測の強化

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

オ. 高リスク小規模火山噴火

(3) 研究基盤の開発・整備

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

大学や防災科学技術研究所等関係機関の協力の下、火山噴火予知連絡会で中長期的な火山監視体制の強化が必要とされた50火山の連続的な監視観測を継続する。また、火山活動が活発化した場合には、必要に応じ観測体制を強化する。

これらの観測成果は、噴火警報等の防災情報の発表や火山解説資料の作成に利用するとともに、地震火山月報（カタログ編）や火山年報に取りまとめて公表する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1) 連続的な監視観測

火山噴火予知連絡会で中長期的に観測体制の充実が必要とされた50火山について、全国4か所の火山監視・警報センターにおいて、地震計、空振計、GNSS等により、連続的な監視観測を行う。

火山観測施設の更新計画（5か年）に基づき、平成23年度から実施している観測施設の更新を継続する。

2) 現地調査・機動観測による繰り返し観測等

全国の活火山について、地震観測・GNSS繰り返し観測、熱観測等の計画的な機動観測を実施する。また、阿蘇山、桜島、口永良部島等、火口からの二酸化硫黄ガスの放出が継続している火山については、COMPUSSによる火山ガス放出量の観測を実施する。

火山活動に異常が観測された場合には、緊急的な機動観測を実施し、火山活動の詳細を把握する。

3) 観測成果の公表

各種監視・観測で得られた成果は、噴火警報等の防災情報、火山解説資料等の防災目的の資料等に

利用する他、地震火山月報（カタログ編）や火山年報等により公表する。

4) 観測データの共有

気象庁及び関係機関による新規観測点のデータのうち、火山監視に必要と考えられる観測点についてはデータ交換の対象に追加する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1) 連続的な火山観測

全国の50火山について、全国4か所の火山監視・警報センターにおいて、地震計、空振計、GNSS、監視カメラ等による連続的な監視観測を継続した。

2) 現地調査・機動観測による繰り返し観測等

全国の活火山について、GNSS繰り返し観測、熱観測等の調査的な機動観測を計画的に実施した。また、阿蘇山、桜島等の二酸化硫黄ガス放出が継続している火山については、COMPUSSによる火山ガス放出量の観測を実施したほか、噴火発生や火山活動に変化があった火山では、関係機関の協力を得て上空からの観測を繰り返し実施した。また、ドローンによる可視・熱赤外観測を倶多楽、吾妻山、弥陀ヶ原、口永良部島で実施し、火山活動評価に活用した。

3) 観測成果の公表

各種監視観測で得られた成果は、噴火警報、火山の状況に関する解説情報、火山活動解説資料等の防災目的の情報や資料として公表した他、地震火山月報（防災編）等に取りまとめて公表した。また、気象庁のホームページで常時観測火山（50火山）の観測データを掲載。防災科学技術研究所のホームページ及びJVVDNに気象庁の地震計等のデータを公開している。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

大学や防災科学技術研究所等関係機関の協力の下、火山噴火予知連絡会で中長期的な火山監視体制の強化が必要とされた50火山の連続的な監視観測を継続した。

これらの観測成果は、噴火警報等の防災情報の発表や火山解説資料の作成に利用するとともに、地震火山月報（カタログ編）や火山年報に取りまとめて公表した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

気象庁地震火山部,2023,地震火山月報（防災編）2023年3月号～11月号

気象庁地震火山部,2024,地震火山月報（防災編）2023年12月号～2024年2月号（予定）

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁地震火山部,札幌管区气象台,仙台管区气象台,福岡管区气象台火山監視・警報センター
他機関との共同研究の有無：有

大学・防災科学研究所等の研究機関,自治体・地方整備局等の火山観測実施機関

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：気象庁地震火山部管理課 地震調査連絡係長

電話 : 03-6758-3900 (内線 : 5114)
e-mail : jmajishin_kanrika@met.kishou.go.jp
URL : <https://www.jma.go.jp/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名 : 長谷部大輔
所属 : 地震火山部火山監視課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地磁気観測成果のデータベース化

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地殻活動・火山活動を的確に検出するため、地磁気基準観測および全磁力精密観測の成果を継続してデータベース化する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

柿岡、女満別、鹿屋、父島の4地点（定常観測点）と祓川（調査観測点）の5観測点における地磁気4成分連続観測データを、継続して地磁気観測所データベースに登録、公開するとともに、定常観測点のデータを国際的なデータセンターに提供する。

印画紙に記録された柿岡、女満別、鹿屋の地磁気アナログデータを高時間分解能のデジタルデータへの変換を継続して実施し、過去に遡ってのデータ解析を可能とする。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

計画に基づき、定常観測点の4地点（柿岡、女満別、鹿屋、父島）に、調査観測点の祓川を加えた5観測点における地磁気4成分連続観測データを、月毎に地磁気観測所データベースに登録、公開するとともに、定常観測点のデータを国際的なデータセンターに提供した。

また、今年度の地磁気アナログ記録のデジタルデータ化は、女満別（1962年）、鹿屋（1962～1963年）の地磁気アナログ記録をデジタル画像化したほか、女満別・鹿屋（1967年）のデジタル画像を高時間分解能のデジタルデータへ変換した。さらに、柿岡（1958年）の変換が困難だった顕著現象について、デジタルデータへ変換した。これらのデータについて、年度内にデータベースに登録・公開予定である。

なお、データの引用・追跡を容易にするため、DOI（Digital Object Identifier）を付与しており、以下の地磁気観測所ホームページで確認することができる。

[URL] https://www.kakioka-jma.go.jp/info/kmo_datadoi.html

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

計画に基づき、定常観測点の4地点（柿岡、女満別、鹿屋、父島）に、調査観測点の祓川を加えた5観測点における地磁気4成分連続観測データを、月毎に地磁気観測所データベースに登録、公開するとともに、定常観測点のデータを国際的なデータセンターに提供した。加えて、1983年2月～1993

年3月の柿岡の確定毎秒値を観測所データベースに登録、公開するとともに、国際的なデータセンターに提供した。

また、地磁気アナログ記録のデジタルデータ化は、女満別・鹿屋（1962～1969年）の地磁気アナログ記録をデジタル画像化したほか、女満別・鹿屋（1967～1974年）のデジタル画像を高時間分解能のデジタルデータへ変換した。さらに、柿岡（1957年3月～12月、1958年、1972年5月～11月）の変換が困難だった顕著現象について、デジタルデータへ変換した。これらのデータについて、データベースに登録・公開した。

データの引用・追跡を容易にするため、令和3年度からDOI（Digital Object Identifier）の付与を開始した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地磁気観測データのデータベースへの登録、公開、国際的なデータセンターへの提供、および地磁気アナログデータの高時間分解能デジタルデータへの変換を継続した。地殻活動・火山活動を的確に検出するため、今後も継続する。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

増子徳道、長町信吾、森永健司、山崎貴之、浅井晴紀、仰木淳平、荒木徹、能勢正仁,2023,Digitization project of historical analogue magnetograms in Japan,第28回IUGG総会,IUGG23-1369

浅利晴紀、今城峻,2023,INTERMAGNETの地磁気データベース整備における近年の動向について,地球電磁気・地球惑星圏学会2023年秋季年会,R011-06

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地磁気精密観測

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁地磁気観測所

他機関との共同研究の有無：有

名古屋大学,京都大学

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：気象庁地磁気観測所総務課

電話：0299-43-1151

e-mail：kakioka@met.kishou.go.jp

URL：https://www.kakioka-jma.go.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：谷口 秀隆

所属：気象庁地磁気観測所観測課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

全国地震カタログの作成

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

全国地震カタログを作成する。また、定常的な発震機構解析（初動発震機構解、CMT解）及び大地震時の震源過程解析を実施し、それら成果の関係機関等への提供及び一般への公開を実施する。

海域観測網の地震波形データを一元化処理へ取り込み、地震波形の分析や震源決定等の改善を進める。

大学等の検測値を取り込んで過去にさかのぼった震源決定を行い、全国地震カタログに反映させて総合的な地震カタログを作成する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

各年度において、地震カタログ（震源、発震機構）の作成及び震源過程解析を実施し、関係機関等への提供及び一般への公開を実施する。

一元化処理へのS-netやDONET2等の海底地震計データ活用のルーチン業務開始に向けた準備を行い、平成31年度に運用を開始する。

過去震源の改訂に関しては、5か年計画の前半に1919～1921年の再解析を行うとともに、1976～1997年の期間について大学等の検測値を取り込んだ総合的な地震カタログを適宜作成する。再解析が終了した期間から公開する。

その他、適宜、地震カタログに係る解析・処理の改善を図る。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

地震カタログ（震源、発震機構）を令和3年4月から令和5年3月まで作成し、地震月報（カタログ編）として気象庁ホームページに公開した。

震源過程解析については、令和6年能登半島地震のM7.6のイベント含む国内外の地震について解析を行い断層滑り分布を推定し、解析結果を気象庁ホームページに公開した。

※いずれも令和5年度内に公開予定のものを含む。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

○地震カタログ（震源、発震機構）を令和5年3月まで作成し、地震月報（カタログ編）として気象庁ホームページに公開した（令和5年度内に公開予定のものを含む）。

○令和2年9月から一元化処理に海域観測網（S-net、DONET2）のデータの活用を開始し、同月の地震月報（カタログ編）より海域観測網の検測値及びそれらを用いた震源、初動発震機構解を公開している。また、海域観測網の設置海域における自動震源決定の際にノイズとなるエアガン起源のシグナルの除去ロジックを2021年7月に一元化処理システムに適用した。

○震源過程解析については、近地強震波形または遠地実体波を用いて日本及び海外の地震を解析し、気象庁ホームページ等に公開した。また、2019年6月18日の山形県沖の地震（M6.5）についてはバックプロジェクション法を用いて、震源域における高周波励起源の推定を行った。

○過去震源の改訂については、1919年から1921年の震源再計算を行い、2020年1月に地震月報（カタログ編）に公開した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

地震月報（カタログ編）, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/index.html>

震源過程解析の結果, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/sourceprocess/index.html>

Tamaribuchi, K., F. Hirose, A. Noda, K. Iwakiri and H. Ueno, 2021, Noise classification for the unified earthquake catalog using ensemble learning: the enhanced image of seismic activity along the Japan Trench by the S-net seafloor network, Earth, Planets and Space, 73, doi:10.1186/s40623-021-01411-6

・学会・シンポジウム等での発表

溜淵 功史・岩崎 友里子・岩切 一宏・上野 寛, 2019, 海底地震観測網を活用した自動震源決定（PF法）の評価, 日本地震学会2019年度秋季大会, S09P-19

上野 寛・上田 満治・見須 裕美・横山 博文・岩崎 友里子・岩切 一宏, 2019, 海域観測点の気象庁一元化処理への活用について, 日本地球惑星科学連合2019年度大会, S-SS10-08

岩切 一宏・横山 博文・上田 満治・岩崎 友里子・長谷部 大輔・上野 寛, 2019, 気象庁一元化震源の品質向上への最近の取り組み, 日本地震学会2019年度秋季大会, S23P-02

山本 麦・森脇 健, 2020, Source-Scanning-Algorithm法による地震波放出源の推定, 日本地球惑星連合2020年度大会, SCG70-P01

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

全国地震カタログの作成

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁地震火山部地震火山技術・調査課
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：気象庁地震火山部管理課地震調査連絡係長

電話：03-6758-3900（内線：5114）

e-mail：johokan@eqvol2.kishou.go.jp

URL：https://www.jma.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：森脇健

所属：地震火山部地震火山技術・調査課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

火山現象に関する基礎データの蓄積と活用

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

火山

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

オ. 高リスク小規模火山噴火

(3) 研究基盤の開発・整備

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

全国の活火山のうち、気象庁の常時観測火山（50火山）については観測データの収集を行い、それ以外の活火山も含めた火山機動観測班が計画的あるいは緊急的に実施する機動観測による観測データを収集し、火山現象のデータベースとしてその蓄積を図る。

これらの成果は、噴火警報等の防災情報発表や火山活動解説資料等の作成に利用するとともに、火山月報（カタログ編）や火山年報に取りまとめて公表する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

気象庁が常時観測を行っている50火山については、全国4か所の火山監視・警報センターにおいて、地震計、空振計、GNSS、傾斜計、監視カメラ等の常時観測データの収集、解析を行い、蓄積する。

全国の活火山については、4センターの火山機動観測班が行う地震観測、GNSS繰り返し観測、熱観測、火山ガス観測等の計画的な機動観測により得られたデータを解析し、蓄積する。また、火山活動に異常が認められた場合には、火山機動観測班が出動して行う緊急的な機動観測により収集したデータを解析し、蓄積する。

これらの観測データの蓄積にあたっては、今後の活火山総覧改訂に活用できるようにデータベース化する。

各種観測で得られた成果は、噴火警報等の防災情報や火山活動解説資料等の防災資料の作成に利用するほか、火山月報（カタログ編）や火山年報、火山活動の概況（英文）に取りまとめて気象庁HPにより公表する。

地元自治体による災害対策の意志決定を支援するため、火山防災協議会に対する観測成果の共有を

進める。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

常時観測火山に選定された全国の50活火山について、東京の火山監視・警報センター、札幌、仙台、福岡の地域火山監視・警報センター、及び鹿児島地方気象台において、地震計、空振計、GNSS等の観測データを常時収集するとともにデータの解析を行い、それらの成果の蓄積を進めた。

また、全国の活火山について、計画に沿って地震観測、GNSS繰り返し観測、熱観測等の調査的な機動観測を行い、得られた観測データを解析し、蓄積した。

令和5年度については、桜島、諏訪之瀬島、硫黄島、西之島において噴火が発生したほか、吾妻山、阿蘇山、霧島山（新燃岳）、霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺）、口永良部島において火山活動の高まりがみられた。

これらのデータの蓄積にあたっては、気象庁HPで公開している火山観測データの自動更新や今後の活火山総覧の改訂などに活用できるように引き続きデータベース化を行った。

各種監視・観測で得られた成果は、火山活動評価に活用するとともに、気象庁HPでの速報的な公開や、噴火警報等の防災情報、火山活動解説資料等の防災目的の資料等に随時利用した。定期的な資料としては、月毎の火山活動解説資料（定期）として各火山の活動状況を取りまとめ、いずれも気象庁HPで公表した。

また、引き続き、各火山の火山防災協議会と観測データや火山活動解説コメントの共有を、WEBを通じて行った。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

常時観測火山に選定された全国の50活火山について、東京の火山監視・警報センター、札幌、仙台、福岡の地域火山監視・警報センター、及び鹿児島地方気象台において、地震計、空振計、GNSS等の観測データを常時収集するとともにデータの解析を行い、それらの成果の蓄積を進めた。

また、全国の活火山について、計画に沿って地震観測、GNSS繰り返し観測、熱観測等の調査的な機動観測を行い、得られた観測データを解析し、蓄積した。

期間中には、西之島、硫黄島、福德岡ノ場、阿蘇山、桜島、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島において噴火が発生したほか、十勝岳、吾妻山、磐梯山、浅間山、焼岳、御嶽山、ペヨネース列岩、海德海山、鶴見岳・伽藍岳、霧島山（新燃岳）、霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺）等において火山活動の高まりがみられた。

これらのデータの蓄積にあたっては、気象庁HPで公開している火山観測データの自動更新や今後の活火山総覧の改訂などに活用できるように引き続きデータベース化を行った。

各種監視・観測で得られた成果は、火山活動評価に活用するとともに、気象庁HPでの速報的な公開や、噴火警報等の防災情報、火山活動解説資料等の防災目的の資料等に随時利用した。定期的な資料としては、月毎の火山活動解説資料（定期）として各火山の活動状況を取りまとめた他、それらを年ごとにまとめた資料を作成し、いずれも気象庁HPで公表した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

気象庁,2023,地震・火山月報（防災編）2023年3月号～2024年2月号

気象庁,2024,令和5年（2023年）の火山活動（各火山）

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

火山現象に関する基礎データの蓄積と活用

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁地震火山部,札幌管区气象台,仙台管区气象台,福岡管区气象台火山監視・警報センター
他機関との共同研究の有無：有
大学、防災科学研究所等の研究機関,自治体、地方整備局等の火山観測実施機関

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：気象庁地震火山部管理課地震調査連絡係長
電話：03-6758-3900(内線：5114)
e-mail：jmajishin_kanrika@met.kishou.go.jp
URL：https://www.jma.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：小久保一哉
所属：気象庁地震火山部火山監視課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震・津波・火山防災情報の改善に係る知見・成果の共有

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

津波警報、緊急地震速報、長周期地震動に関する情報、南海トラフ地震に関連する情報、噴火警報、降灰予報などの防災情報の改善のための検討で得られた知見や成果を共有する。これにより、関連の研究の推進に資する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

気象庁の発表する防災情報の改善や高度化に係る知見・成果を、広く大学等関係機関、防災関係機関に気象防災情報として、また、各種情報の検討部会や火山噴火予知連絡会等を通じ、広く共有する。アンケートを実施するなどして、社会の受けとめかたを調査し、その結果を基にして情報内容の改善を図る。また、火山防災協議会などを通じ情報の普及・啓発を図る。

国際共同研究・国際協力については国際地震センター、米国地質調査所、包括的核実験禁止条約機構、米国大学間地震学研究連合（IRIS）及び近隣国との地震観測データの交換などの組織的な連携・協力を通じて、また、航空路火山灰情報センター及び北西太平洋津波情報センターの国際協力業務や開発途上国における地震・火山の観測や津波警報の発表などの体制整備に必要な技術的な支援を通じて、国際的な研究活動の進展に寄与する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

関係機関と連携し、気象庁の発表する防災情報の改善や高度化に係る知見・成果を共有した。今年度新たに実施した主な内容や情報内容の改善は以下のとおり。

・緊急地震速報の震源推定手法について、従来のIPF法を含む複数の手法の併用から、改良を加えたIPF法に一本化する運用を開始（R05.09.26～）

また、昨年度に引き続き以下の内容を実施した。

- ・防災科学技術研究所のDONETやS-net等、関係機関の海底地震・津波観測データ等を活用した地震・津波情報発表
- ・地震防災、津波防災の普及啓発のための気象庁ホームページの改善・国際地震センター、米国地質調査所、包括的核実験禁止条約機構、米国大学間地震学研究連合（IRIS）及び近隣国との地震観測データの交換
- ・国際的な津波情報（北西太平洋津波情報）の提供
- ・津波警報等の視覚的伝達手段として「津波フラッグ」を定め導入推進。
- ・火山噴火応急支援サイトを活用した、最新の観測データを用いた火山活動状況解説、自治体との情報交換

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本計画期間中、関係機関と連携し、津波警報、緊急地震速報、長周期地震動に関する情報、南海トラフ地震に関連する情報、噴火警報、降灰予報などの気象庁の発表する防災情報の改善や高度化に係る知見・成果を共有した。

- ・緊急地震速報評価・改善検討会、同利活用検討作業部会
- ・長周期地震動に関する情報検討会
- ・津波予測技術に関する勉強会
- ・火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方検討会
- ・津波警報等の視覚による伝達のあり方検討会

等を開催して、気象庁から発表する地震・津波に関する防災情報の高度化を図った。

また、定例的に開催している南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会や噴火予知連絡会において定期的な知見・成果の情報共有を行った。

さらに、

- ・防災科学技術研究所のDONETやS-net等、関係機関の海底地震・津波観測データ等を活用した地震・津波情報発表
- ・国際地震センター、米国地質調査所、包括的核実験禁止条約機構、米国大学間地震学研究連合（IRIS）及び近隣国との地震観測データの交換、また、航空路火山灰情報センター及び北西太平洋津波情報センターの国際協力業務や開発途上国における地震・火山の観測や津波警報の発表などの体制整備に必要な技術的な支援を通じて、国際的な研究活動の進展に寄与した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

気象庁,2023,緊急地震速報評価・改善検討会 利活用検討作業部会（報告書）

気象庁,緊急地震速報の利活用の予備調査（2023年5月5日14時42分頃の石川県能登地方の地震（最大震度6強））（速報版、詳細版）

・学会・シンポジウム等での発表

栢野 一正・佐藤 壮・川合 亜紀夫・阿部 正雄・西田 貞明・岡 岳宏・鎌谷 紀子,2023,推計震度分布図の高解像度化・高精度化,日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS09-10

佐藤 壮・川合 亜紀夫・栢野 一正・阿部 正雄・西田 貞明・岡 岳宏・鎌谷 紀子・岩切 一宏・青木 重樹・宮岡 一樹,2023,関東平野北東部で観測された特徴的な計測震度分布,日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS09-09

平野 和幸・今村 翔太・久利 美和・桑山 辰夫・海老田 綾貴,2023,火山噴火等による潮位変化に関する情報について－気象庁の運用－,日本地球惑星科学連合2023年大会,HDS06-07

久利美和・桑山辰夫・山田基史・福満修一郎,2023,気象衛星「ひまわり」の2階差分画像を用いた大規模噴火時の気圧波検知の事例,日本地球惑星科学連合2023年大会,SVC33-05

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地震・津波・火山防災情報の改善に係る知見・成果の共有

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁及び全国気象官署職員
他機関との共同研究の有無：有
様々な関係機関、専門家等と連携

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地震調査連絡係長
電話：03-6758-3900 ex.5114
e-mail：jmajishin_kanrika@met.kishou.go.jp
URL：https://www.jma.go.jp/jma/index.html

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：今村翔太
所属：地震火山部地震津波監視課地震津波防災推進室

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題（または観測項目）名：

防災・減災に関する知識の普及啓発

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(4) その他関連する建議の項目：

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

一般の防災リテラシー向上のため地震・津波及び火山に関する現象や警報をはじめとする防災気象情報に関する、知識、防災・減災等に対する住民の意識の向上に戦略的に取り組む。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

気象庁では、引き続き国や地方自治体等の防災関係機関、教育機関、大学等研究機関と連携しながら、地震・津波及び火山に関する現象や警報をはじめとする防災気象情報（津波警報、緊急地震速報、長周期地震動に関する情報、南海トラフ地震に関連する情報、噴火警報、降灰予報など）に関する、知識、防災・減災等に対する住民の意識の向上に、全庁を挙げて戦略的に取り組む。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

関係機関と連携し、地域の状況にあった様々な手段を用いて地震・津波及び火山に関する知識や防災行動についての普及啓発に継続的に取り組んだ。

今年度新たに実施した主な内容は以下のとおり。

・地震調査研究推進本部と連携した地域講演会等の普及啓発の取組（青森県・神奈川県など）

また、昨年度に引き続き以下の内容を実施した。

・関東大震災100年をきっかけとした地震・津波の備えへの普及啓発

・一般の方々を対象とした巨大地震対策オンライン講演会の開催、アーカイブ配信

・地方自治体等と連携した防災訓練への助言・協力、HP等での相互協力

・教育機関と連携した学校防災教育へ助言・協力

・防災関係機関、民間団体等と連携した出前講座・防災講演会等の実施

- ・報道機関と連携した防災番組への協力
- ・報道機関向け勉強会の実施
- ・わかりやすい防災行動を説明した動画作成・SNSでの普及啓発
- ・南海トラフ地震に関する普及啓発（内閣府・消防庁と協力）
- ・日本海溝・千島海溝で想定されている巨大地震や北海道・三陸沖後発地震注意情報の普及啓発の実施（内閣府・消防庁と協力）
- ・火山との位置関係や地域性を踏まえた火山防災情報の普及啓発の推進

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

計画期間（令和元年度～5年度）を通じて、国や地方自治体等の防災関係機関、報道機関、教育機関、大学等研究機関と連携しながら、地震・津波及び火山に関する現象や警報をはじめとする防災気象情報（津波警報、緊急地震速報、長周期地震動に関する情報、南海トラフ地震に関連する情報、噴火警報、降灰予報など）に関する、知識、防災・減災等に対する住民の意識の向上に取り組んだ。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

- ・論文・報告書等
- ・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

防災・減災に関する知識の普及啓発

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁及び全国気象官署職員
他機関との共同研究の有無：有
様々な関係機関、専門家等と連携

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地震調査連絡係長
電話：03-6758-3900 ex.5114
e-mail：jmajishin_kanrika@met.kishou.go.jp
URL：https://www.jma.go.jp/jma/index.html

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：今村翔太
所属：地震火山部地震津波監視課地震津波防災推進室

(1) 実施機関名：

鹿児島大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

南西諸島北部域におけるプレート間すべりの特性に関する地震・地殻変動観測研究

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

イ. 地震断層滑りのモデル化

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(7) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

平成30年度までの研究成果を踏まえ、地震の検知能力・分解能の向上に特化した小スパン観測網を年度ごとに少しずつ移動させる機動的な海底地震観測を実施する。これを4か年に渡り実施することで、特に1911年喜界島近海地震の想定震源域及びその周辺域を重点的にカバーし、スロー地震活動及び通常の地震活動の観測データを取得する。並行して島嶼域においては、平成30年度まで実施してきたGNSS観測を継続・強化する。

得られた観測データを解析し、1911年喜界島近海地震の想定震源域周辺におけるスロー地震活動（特に低周波微動活動）について、その震源域の広がりや想定震源域との位置関係を明らかにする。また、通常の地震活動との比較を行い、両者間の時空間的な関係について考察する。さらに、日向灘など他地域との比較を行い、類似点・相違点について検討する。

一方、1911年喜界島近海地震の想定震源域およびその周辺域における、島嶼域地震観測のみでは検出できない未知の小規模な相似地震活動について、想定震源域内外での活動分布を明らかにする。また、スロー地震活動（特に低周波微動）の震源分布と比較し、両者の空間的境界を検討する。

併せて島嶼域GNSS観測では、沖縄トラフの拡大とブロック運動をさらに精度を向上させて求め、3次元有限要素解析により南西諸島北部域のプレート間の固着域、固着率を推定する。

以上の地震・地殻変動観測研究の結果を総括し、スロー地震（特に浅部低周波微動）活動、通常の地震活動、相似地震活動、プレート間の固着域と固着率を基に現在の北部南西諸島域のプレート間すべ

りの特性について考察する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

機動的な海底地震観測と島嶼域GNSS観測の実施

1年目の概ね上四半期の期間中に1911年喜界島近海地震の推定震源域付近にLOBSを投入し、小スパン海底地震観測網による観測を開始する（LOBSの第1期観測の開始）。続く2年目においては、概ね上四半期の期間中に第1期観測のLOBSを回収し、新規位置にLOBSを投入しての観測を開始する（LOBSの第2期観測の開始）。以後同様に、3～4年目はLOBSの回収と新規位置にLOBSを投入しての観測開始を繰り返す。5年目に第4期観測のLOBSを回収し、機動的な海底地震観測を終了する。なお、当該観測航海を大学院生等の海域観測実習の場として利活用する。

GNSS観測については、平成30年度までに実施してきた島嶼域観測網を継続するとともに、1年目中に下甕島にGNSS観測点を設置して観測網を強化し、5か年計画の末まで継続する。

スロー地震活動（特に、浅部低周波微動）と通常の地震活動の解析

1年目は、機動的な海底地震観測のデータが未取得のため、喜界島東方沖で過去に実施された別プロジェクトの海底地震観測および平成30年度までの準定常海底地震観測で取得されたデータの再解析を行う。2～5年目は、その年度に回収されたLOBSのデータを用い、低周波微動や通常の地震の震源決定を年次的に実施する。5年目は、5か年分の結果を総括し、低周波微動の震源域、小繰り返し地震を含む通常の地震との時空間的な関係を明らかにし、1911年喜界島沖の地震の想定震源域との関係を議論する。また、スロー地震活動の特徴について、日向灘など他地域との比較を行う。

相似地震の解析

1年目は、平成30年度までの準定常海底地震観測で得られたデータを利用し、島嶼域の地震観測網では検出できない規模の小さいものも含めた相似地震の解析を試行する。2～5年目は、その年度に回収されたLOBSのデータから、相似地震を検出し、震源決定を行う。5年目は、5か年のうちに得られた震源分布から、1911年喜界島近海地震の想定震源域との空間的な関係を明らかにする。また、上記のスロー地震（特に浅部低周波微動）の震源分布と比較検討することで、当該領域におけるプレート境界のすべり特性を議論する。

島嶼域GNSSデータの解析

2年目は、高度化された種子島から奄美大島までのプレート境界を3次元有限要素モデルに組み込む。当該地域のプレート運動を再推定し、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う内部変形を求める。3年目は、新規に追加設置した観測点を含めた測線の解析で得られた沖縄トラフの拡大率を求める。沖縄トラフの拡大率、フィリピン海プレートの沈み込み速度を境界条件とし、前年度に求めた当該地域の内部変形を説明できるように固着域、固着率を求める。4年目は、GNSS連続観測データを使ってスロースリップの検出を行い、検出できたスロースリップの断層モデルを求める。5年目は、固着域、固着率とスロースリップ発生域、繰り返し地震から求めたプレート間の固着の情報を精査する。

観測研究の総括

5年目において、計画期間中のスロー地震（特に浅部低周波微動）活動、通常の地震活動、相似地震活動、プレート間の固着域・固着率の解析結果に基づき、現在の南西諸島北部域のプレート間すべりの特性について考察する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

[1] 機動的な海底地震観測と島嶼域GNSS観測

令和5年度は、4月中旬に海底地震観測を実施し、5か年の観測計画を当初予定通り完了した。海底地震計の回収作業は、長崎大学水産学部附属練習船・長崎丸の教育関係共同利用に基づき実施した。長崎丸第109次航海（2023年4月14日～19日）において、2022年4月中旬に喜界島北東海域に投入した8台の海底地震計から成る小スパン海底地震観測網の回収（第4期終了）を実施した。回収した第4期の8台は、6台が固有周期1秒の長期収録型自己浮上式海底地震計（LOBS：Long-term Ocean Bottom Seismometer）、2台が固有周期120秒の小型広帯域海底地震計（CBBOS：Compact Broadband OBS）で構成されている。データ回収後の時刻較正は正常に完了したが、記録計ログによるとTK2220観測点では、搭載しているモーター駆動式ジンバルに着底10日後から不具合が生じていたとみられる。そのため、海底地震計の傾斜を1日1回測定するタイミングで、波形記録に約20秒間

のノイズが生じていたが、それ以外の時間帯において、地震波の初動到達時に明瞭な進み／遅れがみられないこと、他観測点とコヒーレントなシグナルを記録していたことから、通常地震および微動の震源決定に当該観測点も暫定的に使用している。図1に、令和5年度に回収した第4期（橙○）を含む本観測計画の観測点配置を示す。

展開している小スパン海底地震観測網の観測点間隔は約20 kmで、当該領域における過去の観測と比べ稠密であり、沈み込むフィリピン海プレートと陸側プレートの境界面上で発生する浅部微動や、島嶼域地震観測点のみでは捉えることのできない微小地震の検出および震源決定精度の向上に貢献する。観測領域は、1911年喜界島地震（M8.0）の推定震央（後藤, 2013）（図1：☆）および推定震源域周辺にも相当し、5か年（第1期～第4期）にわたり海底地震計を機動的に展開したことで、通常地震とスロー地震の空間的な棲み分けや時間的対応を議論することが可能になる。

島嶼域GNSS観測に関しては、2018年度までに構築した観測網において観測を継続していた。女島観測点（長崎県五島市）には、長崎丸第109次航海（2023年4月）および第118次航海（2023年7月）により、計2回渡島した。いずれの渡島時もデータ回収に成功し、観測期間中のGNSSデータに欠測はなかった。なお、長崎丸第118次航海には大学院生8名が乗船し、観測実習の場としても活用している。また、横当島観測点（鹿児島県十島村）および宇治島観測点（鹿児島県南さつま市）にはいずれも2023年11月にアクセスし、GNSS受信機の回収および交換を実施した。臥蛇島観測点（鹿児島県十島村）については、気象海況等により今年度の渡島は実施できなかった。

[2] 浅部低周波微動（浅部微動）の活動

令和5年度は令和4年度に設置した20 kmスパンの海底地震計アレイデータを用いて、期間中に発生した浅部低周波微動（以降、浅部微動）の暫定的な解析を実施した。エンベロープ相関法による震源決定の結果、観測期間中の2022年6月と2022年8月～9月にかけて浅部微動エピソードが確認された（図2）。最も活発な活動であった2022年8月～9月のイベントは北東方向と南西方向にバイラテラルにマイグレーションを伴う活動であった。ただし、観測網北側でも活動が見られるが、この領域周辺では通常の地震活動が活発でやや群発的な活動が見られている。実際に検知されたイベントの波形を確認したところ、いくつかのイベントは地震を誤検知したものであることが確認できており、観測網北側のイベントはほとんどが地震とみられる。しかしながら、浅部微動の活動に伴って地震活動も活発化している点は大変興味深く、両者の関係を詳しく調べる必要があると考えられる。今回検出したイベントのうち、地震が多く含まれているとみられる観測網北西側の活動を除けば、ほとんどの活動は観測網南部に位置している。これらの活動は、これまでの観測結果（第1期：2019～2020観測、第2期：2020～2021観測、第3期：2021～2022観測）のうち、down-dip側の活動の北東側延長に対応していることが分かった（図2）。観測網南部以外では、北東部に数は少ないがイベントが確認できているが、観測網北側の地震の誤検知が染み出ている可能性もある。これまでの観測同様、浅部微動のdown-dip側の位置は観測網内に位置しており比較的明瞭に分布していて、深さ15 km程度の場所に位置していることが確認できた。この深さは日向灘の浅部微動活動のdown-dip側の位置と整合的である。また、観測網を北に移動する度に浅部微動の活動域も広がっていったが、今回の観測では観測網の中で活動が不連続になっているように見えることから、喜界島沖から続く活動の北端が見えている可能性がある。ただし、より浅部側の活動は観測網の外になるため、この領域での活動がどのように継続しているかは不明である。今後精査を進め、通常地震分布や構造との対比、これまでの結果との比較を行い、議論を進める必要がある。

[3] 第4期における微小地震活動の特徴と浅部微動との時空間的關係

2023年4月に回収した第4期データを用いて、観測期間中に最も顕著な微動エピソードが確認された2022年8月27日～9月3日の通常地震と微動の時空間的關係を調査した。通常地震の震源決定は、手動検測データに基づき実施した。なお、海底表層の未固結堆積層による走時遅れを補正するために、奄美大島近海で発生した稍深発地震のPS変換波を利用して、観測点補正值を決定・適用して震源計算を行っている。観測点補正前後の走時残差RMS値は、P波が184 msから18 ms、S波が511 msから32 msに減少した。

得られた通常（微小）地震のほとんどは、プレート境界周辺で発生していた（図3）。特に、観測網直下の領域A（TK2210とTK2220観測点の間）と領域B（TK2221とTK2223観測点の間）の2領域では、クラスター状のまとまった活動が確認できる。これらの微小地震と浅部微動の震央分布を比較すると、領域A・領域Bを含めた通常地震の発生域は、微動発生域の縁に位置しているようにみられるが、

過去の第1期～第3期の結果と比べると、両者の発生域がより近接している（一部重なっている）傾向にある。

時空間分布（図4）をみると、8月27日に29°N、130.75°E周辺を起点とした浅部微動の南西方向へのマイグレーションが概ね停止した8月29日に、領域Aでの微小地震活動が発生したことがわかる。

[4] 日向灘中部～南西諸島北部域の準静的すべり速度の時空間変化

本課題では、バースト的な活動を除いたプレート境界域での小繰り返し地震（相似地震）を用い、日向灘から奄美大島にかけての小領域ごとに小繰り返し地震が発生する度に準静的すべり速度を求め、時間変化について調べてきた。この解析においては、陸域の地震観測点の中長期データを用い、前述の海域地震観測のデータは含まれていないため、海域の検知能力は相対的に下がる一方で、広域かつ中長期の時間変化をみることができる。令和5年度は令和3年度報告に記載した改良方法を引き続き用いて解析した（図5）。

各領域の準静的すべり速度は、領域K（トカラ列島南東沖）を除き、2000年前半（2000～2005年）から2015年前後にかけての数年から10年程度は最も小さい。この時期の準静的すべり速度は、領域E（種子島南東沖）を除き1.0～1.5 cm/yr. である。ここで領域Kは、他の領域とは異なる時間推移を呈し、2000年頃から2010年頃にかけては約2.0 km/yr. でこれ以降はさらに速度が低下した。この領域Kを除けば、準静的すべり速度は2015年前後から増加に転じ、2020年前後以降はさらに増加したことが分かった。すなわち、2015年前後以降は日向灘や奄美大島付近までの南西諸島北部は全般的に準静的すべり速度が増加している。この中で、領域B（日向灘南部）、C（都井岬南東沖）、D（種子島東方沖）、H（トカラ列島北東沖）、M（奄美大島付近）は特に2022年頃以降の速度勾配が大きい。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本課題では、南西諸島北部のプレート境界域にLOBSを投入し、当該領域の浅部微動と通常微小地震の観測を行った。投入可能な台数（8台）を効果的に用いるため、これを年次的に移動させ、4か年（第1期～第4期）をかけて1911年喜界島近海地震の推定震源を取り囲む機動的観測を実施した。新型コロナウイルスの影響を受けたものの、概ね計画通りに観測データを取得できた。

取得された観測データを解析した結果、当該領域において浅部微動と通常地震の発生領域に明瞭な相違があることが分かった（図6）。すなわち、プレート境界深さが15～20 kmより海溝側では浅部微動活動が卓越し、これより島弧側では浅部微動は発生せず、通常微小地震活動がプレート境界付近で発生する。

さらに、浅部微動と通常微小地震が時間的空間的に近接して発生した活動が複数検出された。例えば、浅部微動のマイグレーションの移動方向の先で通常微小地震（プレート境界より浅部）が時間的空間的に近接して発生した関係である。この関係からは、まとまった浅部微動活動による応力変化が生じることで、すべりやすい状態にある上盤内の破碎帯で微小地震が誘発されたことが示唆された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本課題では、南西諸島北部域のうち1911年喜界島近海地震（M8.0）の推定震央周辺領域において、浅部微動の発生深さ下限等、当該領域のプレート間すべりの特徴が日向灘と類似した状態であることが分かった。さらに、この領域については、島嶼域の陸上地震観測点データにもとづく中長期のモニタリングからは地震活動の空白域に見えていたが、本課題の海域観測によりプレート境界は浅部微動活動が卓越し、強く固着しているのではないことが分かった。以上の成果は、喜界島近海地震の断層のタイプや発生場に制約を与えるものであり、南西諸島域の地震発生予測に貢献できると考えられる。本課題の対象領域と解明が進んでいる日向灘中南部との間に挟まれた領域は観測が十分でないため、今後は同様の小スパンアレイを北側隣接領域に移して観測研究を行うことを考えている。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Baba S., S. Takemura, K. Obara, A. Takeo, Y. Yamashita, M. Shinohara, 2024, Spatial variation in shallow slow earthquake activity in Hyuga-nada, southwest Japan, *Geophysical Journal International*, 237, 271–287, 査読有

Takemura S., S. Baba, S. Yabe, Y. Yamashita, K. Shiomi, T. Matsuzawa, 2024, Detectability analysis

of very low frequency earthquakes: Methods and application in Nankai using F-net and DONET broadband seismometers, *Geophysical Journal International*, 237, 49-63, 査読有
Akuhara T., Y. Yamashita, H. Sugioka, M. Shinohara, 2023, Locating tectonic tremors with uncertainty estimates: time- and amplitude-difference optimization, wave propagation-based quality control and Bayesian inversion, *Geophysical Journal International*, 235, 2727-2742, 査読有
Akuhara T., Y. Yamashita, S. Ohyanagi, Y. Sawaki, T. Yamada, M. Shinohara, 2023, Shallow Low-Velocity Layer in the Hyuga-Nada Accretionary Prism and Its Hydrological Implications: Insights From a Passive Seismic Array, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128, e2022JB026298, 査読有

・学会・シンポジウム等での発表

Mishra S., Y. Kaneko, B. Chow, Y. Yamashita, M. Shinohara, 2023, Towards adjoint tomography of Nankai and Kyushu subduction zones, *JpGU2023*, SCG45-P24
胡 靚妤・篠原 雅尚・山下 裕亮・山田 知朗・悪原 岳・望月 公廣, 2023, Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation, 日本地震学会2023年度秋季大会, S09-04
柳田 浩嗣・仲谷 幸浩・八木原 寛・平野 舟一郎・小林 励司・山下 裕亮・松島 健・清水 洋・中東 和夫・山田 知朗・篠原 雅尚, 2023, 機動的な海底地震観測によって得られた喜界島東方～北東沖における微小地震活動の時空間的特徴, 日本地震学会2023年度秋季大会, S09P-11
Ioki K., Y. Yamashita, Y. Kase, 2023, Tsunami inundation area of great earthquake that occurred in the Hyuga-nada, Japan, *AGU Fall Meeting 2023*, NH51D-0484
Hu C., M. Shinohara, Y. Yamashita, T. Yamada, T. Akuhara K. Mochizuki, 2023, Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation, *AGU Fall Meeting 2023*, T31H-0297
Mishra S. P., Y. Kaneko¹, B. Chow, S. Adachi, Y. Yamashita, M. Shinohara⁴, 2023, Towards Adjoint Tomography of the Nankai and Kyushu Subduction Zones, *AGU Fall Meeting 2023*, S11D-0303
森本尚里・中東和夫・古山精史朗・山下裕亮・仲谷幸浩・平野舟一郎・八木原寛・宮町宏樹・松島健・山田知朗・篠原雅尚, 2023, Seismic activity in the northernmost Okinawa trough revealed by ocean bottom seismic observations, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SCG52-P16

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

南西諸島北部域における小スパン海底地震観測に基づくプレート間すべり特性の研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

八木原寛（鹿児島大学地震火山地域防災センター）, 仲谷幸浩（鹿児島大学地震火山地域防災センター）, 中尾茂（鹿児島大学地震火山地域防災センター）

他機関との共同研究の有無：有

山下裕亮（京都大学防災研究所）, 中東和夫（東京海洋大学）, 山田知朗（東京大学地震研究所）, 篠原雅尚（東京大学地震研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：南西島弧地震火山観測所

電話：099-244-7411

e-mail：yakiwara@sci.kagoshima-u.ac.jp

URL：http://bousai.kagoshima-u.ac.jp/nansei-toko/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：八木原 寛

所属：南西島弧地震火山観測所

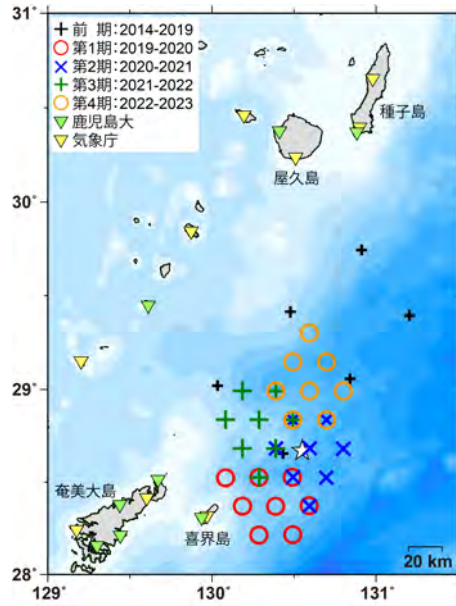


図1：南西諸島北部域における海底および島嶼域の地震観測点配置
 橙○は令和5年度に回収した第4期の観測点を示す。赤○は第1期、青×は第2期、緑+は第3期、黒+は前期計画の観測点である。白☆は1911年M8.0喜界島地震の想定震源（後藤, 2013）を示す。その他は南西諸島北部域における定常地震観測点である。

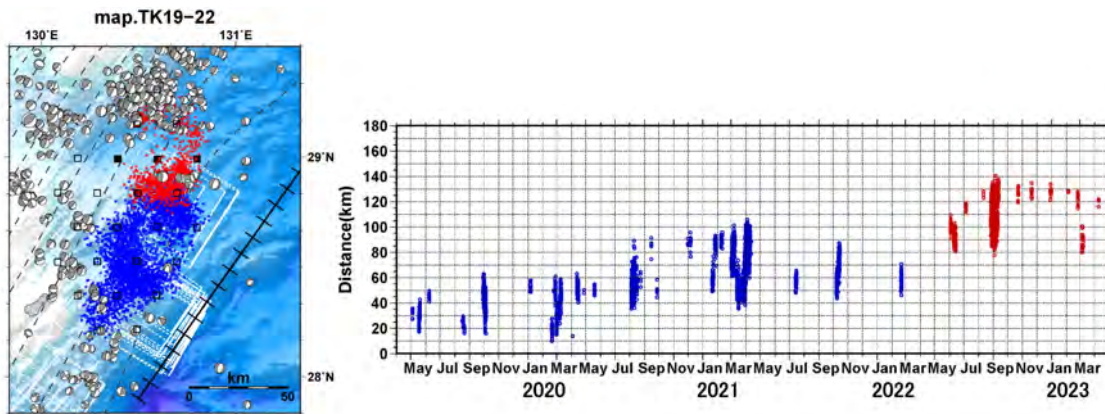


図2：浅部微動の活動（第1期～第3期：青、第4期：赤）
 （左）浅部微動の震央分布。（右）along-strike方向に沿った時空間分布。

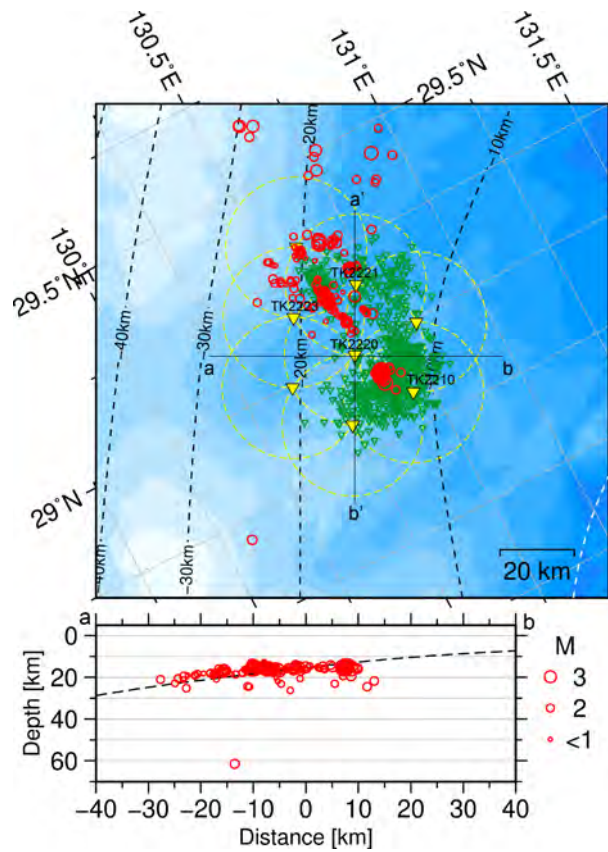


図3：2022年8月27日～9月3日における通常地震（赤○）と微動（緑▽）の震源分布。黄▽は海底地震計、黄破線は各観測点を中心とした半径20 km円で、この範囲の震源決定精度は十分であるといえる。白破線、黒破線はそれぞれIwasaki et al. (2015)の南西諸島海溝軸およびフィリピン海プレート上面深度である。

下図は、フィリピン海プレートの沈み込み方向（a-b）に沿った深さ断面図である。

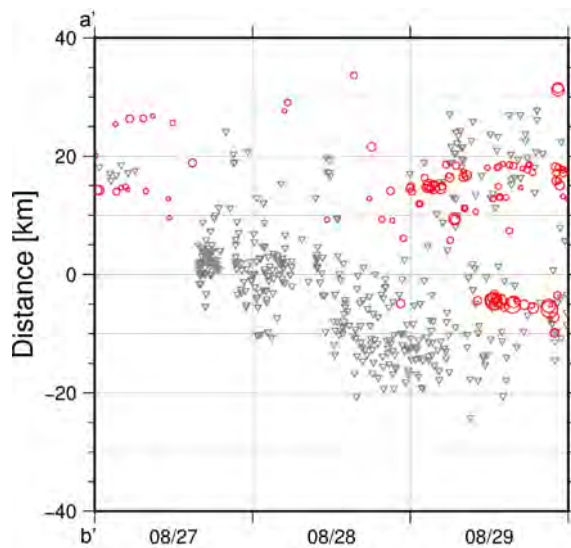


図4：2022年8月27日～8月29日のalong-trench方向（図2の a'-b'）に沿った通常地震（赤○）と微動（灰▽）の時空間分布

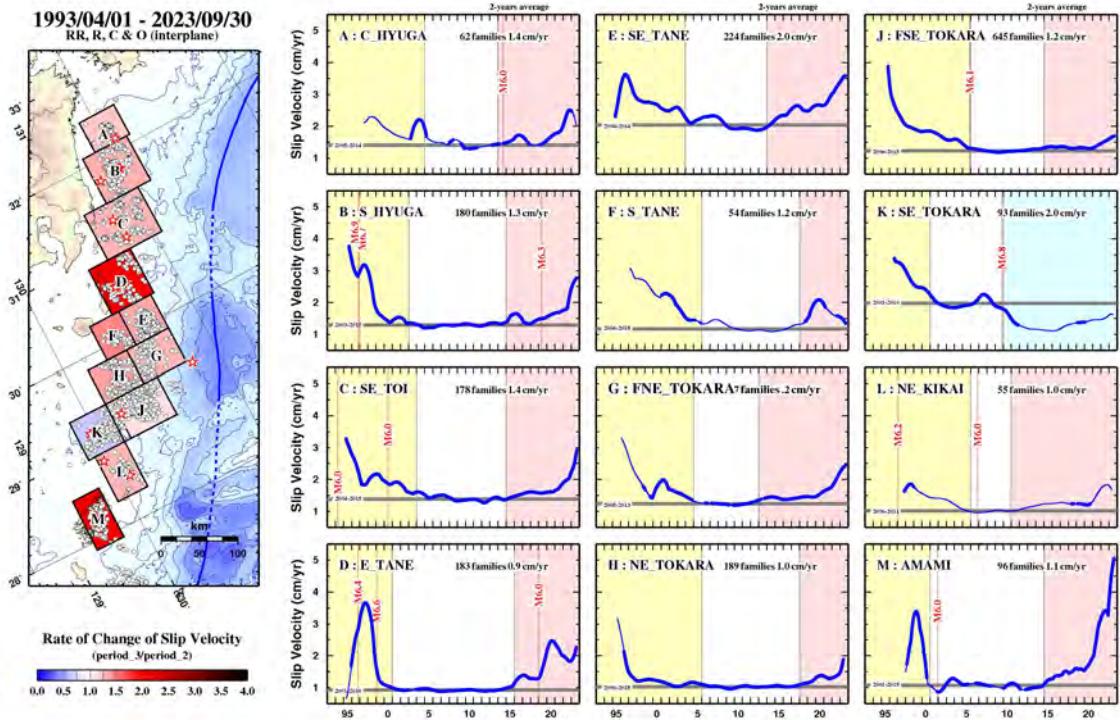


図5：日向灘中部一奄美大島にかけての各小領域における準静的すべり速度の時間変化

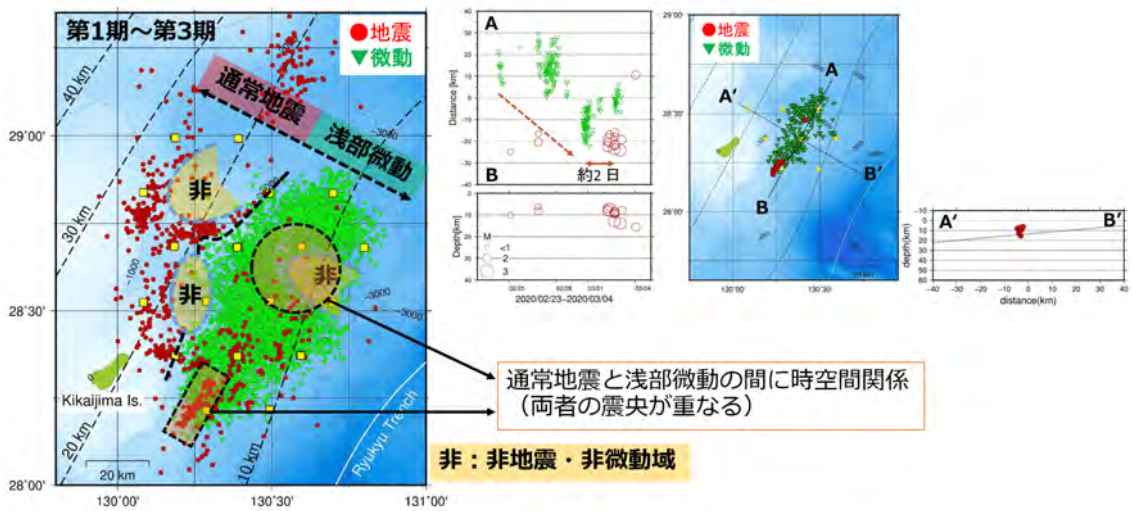


図6：第1期～第3期における浅部微動と通常の微小地震の震央分布、及び両者が時間空間的に近接して発生した事例

(1) 実施機関名：

神戸大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

鬼界海底カルデラにおけるマグマ供給系の構造・進化の解明

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

火山

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

40km³以上のマグマを噴出する「巨大カルデラ噴火」は今後100年で約1%の確率で発生し、その危険値（＝想定犠牲者数×発生確率）は海溝型巨大地震・首都直下地震と同程度の、典型的な低頻度大規模火山現象である。従って、この噴火を引き起こすマグマ供給系の構造と進化並びに活動度の理解と把握は我が国にとって喫緊の課題である。しかしながら、日本列島で地質記録が比較的揃っている過去12万年間に巨大カルデラ噴火を起こした7座の火山で、現在巨大カルデラ噴火につながる可能性のあるマグマ溜りの存在（位置と形状）すら確認できていない。その最大の原因の1つは、陸域火山ではマグマ溜りの確認に有効な大規模稠密構造探査が困難なことにある。

そこで神戸大学では2016年から、附属練習船「深江丸」を用いて海洋研究開発機構などと連携して我が国で唯一海域に存在し、最も直近（7300年前）に巨大カルデラ噴火を起こした「鬼界海底カルデラ」の地球物理学的観測・探査を開始し、カルデラ形成後に巨大溶岩ドームが形成され、それは現在も活動的であることを確認した。

一方で、巨大噴火とカルデラ形成を繰り返す巨大カルデラ火山におけるマグマの進化過程は、岩石学に残された未解決問題の1つであるとともに、その解明は巨大カルデラ火山の活動予測を行う上でも重要な束縛要件を与える。これまでの研究で、巨大カルデラ噴火を起こす中間組成～フェルシクなマグマには、マントルのみならず、下部・上部地殻の物質が関与することが示されている。従って、そのマグマの進化過程の詳細を理解するには、微小域同位体比・微量元素分析法を用いて斑晶鉱物に記録されたマグマ組成の時間変化を読み解き、地球物理学的に得られたマグマ供給系の構造と合わせた包括的な進化モデルの提案が必要不可欠である。

以上の背景、研究の重要性を鑑みて、神戸大学では「鬼界海底カルデラ」に焦点を当てて、以下の点を5年間で明らかにすることを計画している：

a) 海底電位差磁力計などを用いた鬼界カルデラ下のマグマ供給系のイメージング

b) 稠密反射法地震探査、陸上地質調査、ピストンコアリングによる、少なくとも過去3回起きた鬼界巨大カルデラ噴火のマグマ噴出量の推定

c) ドレッジ、簡易ドリリングなどによる海底岩石及び陸上試料の物質科学的解析による、マグマ供給系進化の解明

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本研究課題の目標を達成するために、神戸大学の附属練習船「深江丸」による探査航海を毎年実施し、稠密反射法地震探査と海底電位差磁力計の設置・回収を行う。一方、ピストンコアリング、ドレッジや簡易ドリリングによる試料採取は、海洋研究開発機構の調査船を用いて行う予定である。得られた試料の物質科学的解析は、陸上地質調査により得られた試料を含めて毎年継続的に行う。

海底電位差磁力計（OBEM）による電磁気トモグラフィでは、比抵抗構造の推定により、巨大カルデラ火山のマグマ溜り等の溶融体を含む構造を正確に把握することに重点を置く。具体的には、4台のOBEMの設置・回収を毎年繰り返すことにより、巨大カルデラ火山を横切る2次元測線と山体を覆う面的な観測点での長期海底地磁気観測を実施する。このデータ解析により、巨大カルデラ火山全体の大局的な2次元比抵抗構造と、山体下の上部マントルまでの3次元比抵抗構造を推定する。これにより、マントルダイアピルの規模を把握するだけでなく、深部の部分融解ゾーンやマグマ溜りを把握する。

反射法地震探査を稠密な測線で毎年実施することにより、1) 貫入岩体と、2) 少なくとも過去3回起きた鬼界巨大カルデラ噴火の噴出物と考えられる堆積層の、空間分布や総量の把握を行う。

1) では、二重のカルデラ縁に沿って複数の脈状貫入岩体が存在することを確認しており、この空間分布をより正確に理解する。さらに、これらの岩石試料の採取を、ドレッジや簡易ドリリングにより実施する。得られた岩石については主成分・微量成分・同位体比分析を行い、これらの組成をこれまでに我々が明らかとした鬼界カルデラ地域の岩石の化学的特徴と比較することでカルデラ形成前後のマグマとの成因関係を明らかにする。

2) では反射法地震探査で見いだされた各堆積層を認定し、その連続性を使って各層の空間分布を把握する。このうち、主に鬼界アカホヤ噴火の噴出物と考えられる堆積物を対象にピストンコアリングを実施する。得られた堆積物については火山ガラス組成の分析を行い、 SiO_2 量の異なる2種類の火山ガラスを含むことが特徴的な鬼界アカホヤ噴火噴出物との対比を行い、鬼界アカホヤ噴火の噴出物であることを確認する。この同定対比結果と反射法地震探査で明らかにする堆積層の平面的な広がりや層厚から、海底に堆積した鬼界アカホヤ噴火噴出物の量を推定する。この海底堆積物量と既知の陸上の堆積物量を基に、鬼界アカホヤ噴火の総噴出量を推定することにより、世界で初めて巨大カルデラ噴火に伴う総噴出物量の精密推定を行う。鬼界アカホヤ噴火より古い噴火の噴出物と考えられる堆積層についても、可能な限り試料採取を試みてその分析も行い、鬼界アカホヤ噴火と同様の解析を試みる。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

これまでの研究航海により取得した海底観測を含む地球物理学的観測データの解析と、掘削とピストンコア、ドレッジおよび陸上で採取された得られた堆積物・岩石試料の岩石学的、地球化学的、地質学的解析をさらに進めた。観測データの解析を進めることで、鬼界カルデラ火山下の地殻・マントル構造を推定した。一方、堆積物・岩石試料の物質科学的解析を進めることで、鬼界アカホヤ噴火とその後に活動した溶岩ドームのマグマ供給系の変遷過程についての考察を行った。また、大規模噴火噴出物の堆積物については、掘削とピストンコアにより得られた試料と陸上で採取した試料の化学組成分析、古地磁気測定による定置温度の推定などを進め、海面および海底を流動する火砕流の運搬堆積様式および冷却過程についての検討を行った。

海底電位差磁力計で得られた地磁気観測データの3次元解析により、カルデラ下の深さ1-5 kmに低比抵抗領域の存在を示唆し、海底地震計データによる地震波トモグラフィ解析により、カルデラ下の深さ10-20kmに低速度領域の存在を示唆する予察的な結果がでている。これらの結果は、鬼界カルデラ火山のマグマ溜り等の溶融体を含むマグマ供給系の構造を示唆している。一方、反射法地震探査のデータ解析と試料分析により鬼界アカホヤ噴火の噴出物であると認定した堆積層の厚さの変化が、給源からの積算面積に対して指数関数的に減少することを明らかにした。さらに、その減少の係数が極めて小さいことが、海中では希薄な密度流を形成して広がっていることを示しており、この巨大噴火により発生した大規模な火砕流が、十分な水深のある海中に突入すると、水中では希薄な密度流を形成して広がっていくことを初めて明らかにした。

鬼界火山において7.3kaに起こった大規模噴火である鬼界アカホヤ噴火とその後に活動した溶岩ドームのマグマの変遷について、それぞれの噴出物の斑晶鉱物中のメルトインクルージョンガラスを対象に、SIMSによる揮発元素組成分析、EPMAによる主要元素組成分析、LA-ICPMSによる微量元素組成

分析を行った。Tatsumi et al.(2018)により、鬼界アカホヤ噴火噴出物と溶岩ドーム噴出物において全岩化学組成に明確な変化が見られ、大規模噴火後に新たなマグマ注入が起こったことが指摘されていた。その一方で、2つの噴火噴出物のメルトインクルージョンガラスの組成は、主要および微量元素組成において同一であった。このことは、鬼界アカホヤ噴火のマグマ噴出後に、クリスタルマッシュが残り、そこに新たなメルト主体の組成の異なるマグマが注入することにより、鬼界アカホヤマグマの斑晶と新たなメルトの混合物として溶岩ドームマグマが作られたことを示していると考えられる。その一方でメルトインクルージョンの揮発性元素濃度は、2つの噴火のメルトインクルージョンガラスで異なっている。この理由については現在検討中であるが、鬼界アカホヤ噴火の巨大マグマ溜まり内における深さ（圧力）の違いによる揮発元素挙動の違いにより説明できる可能性がある。以上のことは、大規模噴火後の浅部マグマ過程に新たな知見を与えるものとして、非常に興味深い結果である。

堆積物試料の地質学的研究については以下を行った。鬼界アカホヤ噴火で発生した幸屋火砕流の海域での流動様式を、堆積物の構成物質の変化と定置温度から検討するため、構成物分析と岩石磁気測定を行った。構成物分析の結果、海底の堆積物において岩片の割合がカルデラからの距離とともに急激に減少していることが分かった。海中に突入した幸屋火砕流は水による淘汰を強く受け、特に岩片はその多くがカルデラ縁近傍で淘汰され堆積したと考えられる。岩石磁気測定の分析の結果、給源近傍では、薩摩硫黄島に堆積している噴火の初期に発生したラグブレッチャは高温で定置した一方、竹島で厚く堆積している火砕流本体は低温で定置したことが明らかとなった。さらに海を渡った九州本島では残留磁化の高温成分が揃うため、高温定置を示唆する結果が得られた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本研究では、多数の研究・探査航海を利用するとともに、陸上で調査等により実施した。この研究・探査航海は、具体的には神戸大学の附属練習船「深江丸」による4回の探査航海、JAMSTEC 深海調査研究船「かいらい」によるKR-19-11航海・KR20-11航海、JAMSTEC 海洋調査船「新青丸」によるKS19-17航海・KS-23-3航海、およびJAMSTEC 深海調査研究船「ちきゅう」CK20-S01航海である。

地球物理学的な観測・探査では、これらの研究・探査航海を利用することで、海底地形調査、サブボトムプロファイラー調査、反射法地震探査を行った。そして、海底での長期にわたる電磁場および地震の観測を実施するために、海底電位差磁力計（OBEM）、広帯域海底地震計（BBOBS）、短周期海底地震計（SPOBS）および海底磁力計（OBM）を設置して長期観測を実施し、その後それらの回収を行ってきた。さらに、海底だけでなく、薩摩硫黄島、竹島と黒島の陸上にも磁力計による臨時観測点を設置して地磁気観測を行い、その回収を行った。

試料採取は、KR-19-11航海と、KS19-17航海、およびKR20-11航海において鬼界カルデラとその周辺海域でのドレッジを行い、火山岩試料を採取した。また、CK20-S01航海では竹島北東4km海域で約100mのコア試料を採取した。さらに、KS19-17航海とKR20-11航海では広範囲の21地点でピストンコアを実施し、KM22-01航海では鬼界カルデラ周辺および種子島西方沖の4地点でBMS掘削を行い、海底堆積物のコア試料を採取した。海底の調査に加え、大規模噴火堆積物の分布の調査と岩石学的研究に用いる試料採取のため、黒島、薩摩硫黄島、竹島、および九州島の大隅半島と薩摩半島で地質調査を行った。鬼界葛原噴火で発生した長瀬火砕流に相当する堆積物は黒島、竹島、大隅半島で確認し試料採取を行った。また、鬼界アカホヤ噴火の幸屋火砕流に相当する堆積物は薩摩硫黄島、竹島、大隅半島、薩摩半島において確認し、試料採取を行った。

鬼界カルデラ火山のマグマ溜り等の溶融体を含むマグマ供給系の構造を正確に把握するために、地球物理学的な長期観測で得られたデータの解析を現在も進めている。現時点までに、海底電位差磁力計で得られた地磁気観測データの3次元解析により、カルデラ下の深さ1-5 kmに低比抵抗領域の存在を示唆し、海底地震計データによる地震波トモグラフィ解析により、カルデラ下の深さ10-20kmに低速度領域の存在を示唆する予察的な結果がでている。これらの結果は、マグマ供給系の構造を示唆している。

稠密な測線で実施した反射法地震探査のデータ解析により、反射断面図で見いだされた反射面をもとに層構造を認定した。この反射断面図で得られた層構造と大規模噴火噴出物との対比を行うため、KS19-17、CK20-S01、KR20-11航海で得られた海底堆積物試料について、記載および火山ガラスの化学組成分析、粒度組成分析、構成物分析を行った。CK20-S01の試料では、化学組成分析から2回の大規模火砕流堆積物に相当する堆積物が海底に厚く堆積していることが明らかになった。そして、反射断面図で認定された最上層が鬼界アカホヤ噴出物であることが分かった。ピストンコア試料においても化学組成分析から、海底に広範囲で鬼界アカホヤ噴出物が堆積していることが明らかとなった。

鬼界アカホヤ噴出物である最上層の下面の反射面の連続性を使って、この層の空間分布の把握を進め、その平面的な広がりや層厚からその総量を見積もることができた。すなわち、海底での堆積物量は71km³以上であり、広域火山灰で堆積した噴出量の見積もりと合わせると総噴出量は332-457km³以上（DRE 133-183km³以上）となった。この結果は、アカホヤ噴火が完新世における地球上の火山噴火で、もっとも大きなものであったことを示している。

鬼界アカホヤ噴火の噴出物であると認定した反射断面図の最上層の厚さ変化が、給源からの積算面積に対して指数関数的に減少することを明らかにした。さらに、その減少の係数が極めて小さいことが、海中では希薄な密度流を形成して広がっていることを示しており、この巨大噴火により発生した大規模な火砕流が、十分な水深のある海中に突入すると、水中では希薄な密度流を形成して広がっていくことを初めて明らかにした。なお、カルデラからの距離に伴って低シリカガラスの含有量が低くなる傾向が見られ、このことは遠方に海底において遠方に堆積している火砕流は鬼界アカホヤ噴火の初期の噴出物であることを意味する。

鬼界アカホヤ噴火によって噴出した火砕密度流の海上と海中での堆積物の性質を調べ、海上と陸上では火砕密度流堆積物の性質が大きく異なることが明らかになった。流動堆積機構の違いを明らかにするため、カルデラから約70kmの範囲内の様々な距離における陸上火砕流堆積物（黒島、薩摩硫黄島、竹島、大隅半島、薩摩半島）および海底火砕流堆積物（KS19-17、CK20-S01、KR20-11、KM22-01航海でのコア試料）の粒度分析と構成物分析を行った。粒度分析の結果、カルデラからの距離に応じて堆積物を構成する平均的な粒径（中央粒径）が小さくなる傾向や、粒径のばらつき（淘汰度）が小さくなる傾向が明らかになった。この傾向は陸上よりも海底の堆積物でより顕著である。また、火砕流堆積物の構成物分析の結果、海底の堆積物を構成する岩片の割合がカルデラからの距離と共に急激に減少していることが分かった。

研究航海ならびに陸上で得られた鬼界火山噴出物試料をもとに、岩石学的記載、XRFによる全岩化学分析、EPMAおよびLA-ICPMSによる斑晶、石基、メルトインクルージョンの主要および微量元素組成分析を行い、鬼界火山のマグマの多様性を明らかにし、マグマ発生過程、マグマ供給系の変遷に関する岩石学および地球化学的研究を行った。その結果、以下の成果が得られた。

(1) 3回の大～中規模の火砕流噴火において、マグマ組成の変化が見られ、マグマの起源物質および地殻内分化過程の変化が起こっている。

(2) 直近の大規模噴火である鬼界アカホヤ噴火では、広い組成幅のマグマが噴出するが、それらのマグマは基本的に下部地殻の部分溶融により生成したマグマである。

(3) 鬼界アカホヤ噴火以降のマグマ供給系の変遷について、鬼界アカホヤ噴火の後、直後にはその残りのマグマが活動し、その後に鬼界アカホヤ噴火のマグマと岩石学的性質の異なる新たな珪長質マグマと苦鉄質マグマが浅部における新たなマグマ供給系を作り、この供給系が巨大溶岩ドームおよび現在活動火口がある薩摩硫黄島噴火を引き起こしている（Hamada et al., 2023）。

(4) 鬼界アカホヤ噴火後のマグマの変化は、新たなマグマに完全に置き換わったのではなく、鬼界アカホヤ噴火の後のマグマ溜まりに残された結晶に新たなマグマが混合することにより起こった変化である。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

鬼界カルデラ火山をケーススタディ対象として、マグマ供給系、噴火、流動堆積過程を解明することは、関連する建議項目1-(5)-ウおよび1-(2)で目指すことそのものである。本研究において、これまで理解の進んでいなかったマグマの発生過程および海域火砕流の流動堆積過程に新たな知見を得ることができた。災害軽減への貢献という点において、マグマ供給系を明らかにすることは、マグマの位置と時間スケールを明らかにするという点で、火山噴火予測のための地球物理学的モニタリングの方法を考える上で必須であると考えられる。また、海域火山の噴出物の挙動を明らかにすることは、噴火に伴う津波や噴出物の海上漂流の問題とも関係がある。以上のように本研究は災害軽減のための基礎研究であると位置づけられる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Shimizu, S., R. Nakaoka, N. Seama, K. Suzuki-Kamata, K. Kaneko, K. Kiyosugi, H. Iwamaru, M. Sano, T. Matsuno, H. Sugioka, and Y. Tatsumi, 2023, Submarine pyroclastic deposits from 7.3ka

・学会・シンポジウム等での発表

長屋 暁大・藤江 剛・小平 秀一・田中 聡・山本 揚二郎・杉岡 裕子・宮町 宏樹・松野 哲男・大塚 宏徳・鈴木 啓太・島 伸和, 2023, 屈折法地震探査によって明らかになった鬼界カルデラ海底火山地下の低速度異常, 日本地球惑星科学連合2023年大会

浜田 盛久・羽生 毅・マッキントシュ アイオナ・テハダ マリアルイザ・チャン チン・金子 克哉・木村 純一・清杉 孝司・宮崎 隆・中岡 礼奈・西村 公宏・佐藤 智紀・島 伸和・鈴木 桂子・田中 聡・巽 好幸・上木 賢太, 2023, 7300年前の鬼界アカホヤ噴火以降の海底溶岩ドーム直下マグマ供給系の進化, 日本地球惑星科学連合2023年大会

島 伸和, 2023, 鬼界海底カルデラ火山の集中的な調査研究, 日本地球惑星科学連合2023年大会

McIntosh, I., M. Hamada, T. Hanyu, M. L. Tejada, T. Miyazaki, Q. Chang, B. Vaglarov, K. Kaneko, K. Kiyosugi, R. Nakaoka, K. Suzuki-Kamata, and N. Seama, 2023, Investigating the formation of the Kikai submarine lava dome using matrix glass volatile contents, Japan Geoscience Union Meeting 2023

小畑 拓実・荒木 将允・廣瀬 時・松野 哲男・南 拓人・大塚 宏徳・巽 好幸・杉岡 裕子・羽生 毅・田中 聡・市原 寛・島 伸和, 2023, Imaging 3D resistivity structure under the seafloor of Kikai caldera volcano, 日本地球惑星科学連合2023年大会

中岡 礼奈・豊田 峻大・鈴木 桂子, 2023, 古地磁気測定による鬼界カルデラ, アカホヤ噴火噴出物の定置温度, 日本地球惑星科学連合2023年大会

金子 克哉・西原 歩・菊池 瞭平・新庄 研斗・西村 公彦・木村 純一・Chang Qing・宮崎 隆・羽生 毅・阿蘇 始良, 2023, 鬼界の3つのカルデラ火山におけるマグマ過程の普遍性と個性, 日本地球惑星科学連合2023年大会

小畑 拓実・荒木 将允・廣瀬 時・松野 哲男・南 拓人・大塚 宏徳・巽 好幸・杉岡 裕子・市原 寛・島 伸和, 2023, 鬼界カルデラ火山海底下の三次元比抵抗構造解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会2023年秋季年会

羽生 毅・宮崎 隆・Maria Luisa Tejada・島 伸和・金子 克哉・中岡 礼奈・清杉 孝司・鈴木 桂子・清水 賢・西来 邦章・佐藤 勇輝, 2023, 鬼界カルデラの海底カルデラ壁における掘削, 日本火山学会秋季大会

Tejada, M. L., 羽生 毅・宮崎 隆・浜田 盛久・佐藤 智紀・島 伸和・金子 克哉・中岡 礼奈・清杉 孝司・鈴木 桂子・石塚 治, 2023, 鬼界カルデラのマグマ源とその進化, 日本火山学会秋季大会

浅田 峻, 清杉 孝司, 2023, 陸上堆積物及び海底堆積物の分析に基づく幸屋火砕流の流動堆積機構の解明, 日本火山学会秋季大会

小畑 拓実・荒木 将允・廣瀬 時・松野 哲男・南 拓人, 白井 嘉哉, 大塚 宏徳・巽 好幸・杉岡 裕子, 市原 寛, 島 伸和, 2024, 鬼界カルデラ海底火山周辺における三次元比抵抗構造, 海と地球のシンポジウム2023

Seama, N., A. Nagaya, G. Fujie, S. Shimizu, R. Nakaoka, S. Tanaka, Y. Yamamoto, H. Miyamachi, H. Sugioka, and S. Kodaira, 2024, 7.3 ka Kikai-Akahoya eruption of the Kikai submarine caldera volcano and current status of magma re-injection, International symposium "Submarine caldera volcanoes" Kobe

Hanyu, T., N. Seama, K. Kaneko, Q. Chang, R. Nakaoka, K. Kiyosugi, Y. Yamamoto, T. Matsuno, K. Suzuki-Kamata, and Y. Tatsumi, 2024, Magma evolution from Tozurahara to Akahoya catastrophic eruptions at Kikai Caldera; a study on marine tephra from the Chikyu SCORE core, International symposium "Submarine caldera volcanoes" Kobe

Yamamoto, Y., A. Ito, Y. Ishihara, M. Obayashi, S. Tanaka, H. Nakamichi, H. Yakiwara, Y. Nakatani, H. Sugioka, H. Otsuka, T. Matsuno, and N. Seama, 2024, Seismic velocity structure at Kikai submarine caldera deduced from amphibious passive seismic observation, International symposium "Submarine caldera volcanoes" Kobe

Tejada, M. L. G., T. Hanyu, T. Miyazaki, M. Hamada, Q. Chang, T. Sato, I. McIntosh, K. Ueki, B. Vaglarov, N. Seama, K. Kaneko, R. Nakaoka, K. Kiyosugi, K. Suzuki-Kamata, and O.

Ishizuka, 2024, Magma sources and variability at Kikai Caldera, SW Japan pre-, syn- and post calderagenic eruptions, International symposium "Submarine caldera volcanoes" Kobe

Obata, T., M. Araki, T. Hirose, T. Matsuno, T. Minami, Y. Usui, H. Otsuka, Y. Tatsumi, H. Sugioka, H. Ichihara, and N. Seama, 2024, 3-D resistivity structure under the Kikai submarine caldera volcano, International symposium "Submarine caldera volcanoes" Kobe

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

九州における多様な活火山を対象としたマグマ供給系解明のための総合的研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

巽好幸（神戸大学海洋底探査センター火山学部門）、島伸和（神戸大学海洋底探査センター構造探査部門・理学研究科惑星学専攻）、杉岡裕子（神戸大学海洋底探査センター構造探査部門）、松野哲男（神戸大学海洋底探査センター構造探査部門）、中東和夫（神戸大学海洋底探査センター構造探査部門/東京海洋大学）、佐野守（神戸大学海洋底探査センター探査運用部門）、井和丸光（神戸大学海洋底探査センター探査運用部門）、鈴木桂子（神戸大学海洋底探査センター火山学部門）、金子克哉（神戸大学海洋底探査センター火山学部門・理学研究科惑星学専攻）、清杉孝司（神戸大学海洋底探査センター火山学部門）、中岡玲奈（神戸大学海洋底探査センター火山学部門）、木村純一（神戸大学海洋底探査センター火山学部門/海洋研究開発機構）

他機関との共同研究の有無：有

小平秀一 他9名（海洋研究開発機構海域地震火山部門）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：海洋底探査センター

電話：078-431-4620

e-mail：kobec-office@research.kobe-u.ac.jp

URL：http://www.k-obec.kobe-u.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：島 伸和

所属：理学研究科惑星学専攻 / 海洋底探査センター

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

東京海洋大学練習船での海底地殻変動観測

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

茨城沖の海底局アレイを対象に、DPシステムを用いた定点観測および海底局を結ぶ円周状の航走観測を実施する。また、海中の音速構造を明らかにするためにXCTD/XBT観測も行う。得られたデータを用いて海底局アレイの位置を推定し、過去に行われた研究結果と比較し、海底局アレイの変位を推定する。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2023年10月17日～20日にかけて海洋大学練習船汐路丸を用いて海底地殻変動観測を実施した。対象とした海底局アレイは茨城沖に位置するG18、G20である。G18では6時間2分、G20では6時間14分の連続観測を行った。また、海中音速プロファイル作成のため、両観測点でそれぞれ2回のXCTD観測を実施した。得られたデータを解析し、G18、G20のアレイ位置を求めた。得られたアレイ位置と2017年以前に得られたアレイ位置から茨城沖のアレイ位置の変位方向が2011年東北地方太平洋沖地震直後に比べ変化していることを明らかにした。この結果は茨城沖のプレート境の固着状況が変化したことを反映している可能性がある。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

プレート境界地震の発生予測にはプレート間固着状況の把握が欠かせない。本公募研究で観測を行った茨城沖の海底地殻変動観測点は、日本海溝の他の観測点に比べて観測の機会が少なかった。特にG20観測点では2017年の観測以降は2021年と2023年の汐路丸による観測しか実施されておらず、プレート間固着状況の推定を行うことは困難であった。しかし、汐路丸により海底地殻変動観測を行うことで新たなデータを取得することで茨城沖海底局アレイの時間変化を明らかにすることが出来た。

今後も継続的に汐路丸による海底地殻変動観測を実施することで海溝型地震発生予測に欠かせないプレート間固着状況推定に欠かすことが出来ない海底変位データを得ることが出来る。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

岡山悠宇，中東和夫，木戸元之，富田史章,2023,音速傾斜構造を考慮した東京海洋大学練習船「汐路丸」による海底地殻変動観測のレイ位置推定,日本地球惑星科学連合2023年大会,SCG52-P02
富田史章，木戸元之，飯沼卓史，太田雄策，日野亮太，大園真子，高橋浩晃，プラタ-マルティネスライムンド，野徹雄，中東和夫，中村恭之,2023,日本海溝・千島海溝沿いにおけるGNSS音響海底測地観測とその成果,日本地震学会2023年度秋季大会,S03-05

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

中東和夫（東京海洋大学）,石橋 環（東京海洋大学）,岡山 悠宇（東京海洋大学）,村井 菜々海（東京海洋大学）,森田 龍太郎（東京海洋大学）

他機関との共同研究の有無：有

木戸元之（東北大学）,黒須 直樹（東北大学）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京海洋大学・学術研究院

電話：03-5463-0742

e-mail：knakah0@kaiyodai.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：中東 和夫

所属：東京海洋大学・学術研究院

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

石基組織から読み解く北海道摩周火山の噴火推移過程

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
- ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (4) 火山現象の解明とモデル化
- ア. 火山現象の定量化と解明

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

2023年度は地質調査と放射光分析を実施する。地質調査では摩周火山7600年前カルデラ形成噴火（Ma-f~j）のうち、火砕流堆積物（Ma-f）とその直前の降下軽石（Ma-g）に焦点を当て、地質調査と試料の採取を実施する。火砕流噴火へ移行する際の噴出物の組織変化を明らかにできるように、地質調査では噴出物の下部から上部にかけて連続的に試料を採取し、分析用の試料とする。

採取した試料を湿式分析および兵庫県立大学高度産業科学技術研究所のニュースバル放射光施設ビームラインBL-10にて分析し、軽石の Fe^{3+}/Fe^{2+} 比を分析する。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2023年10月に摩周火山周辺で地質調査を実施した。火砕流堆積物（Ma-f）とその直前の降下軽石（Ma-g）を確認できる露頭にて噴出物の記載と試料採取を行った。採取した試料は超音波洗浄機で洗浄後に恒温器で乾燥し、ふるいにかけて分析用の試料とした。放射光分析を2024年1月にニュースバル放射光施設ビームラインBL-10にて実施する予定であったが、機器不良のために分析が延期となったため、復旧した段階で放射光分析を実施する予定である。湿式分析にて定量した火砕流堆積物中の Fe^{3+}/Fe^{2+} 比はMa-i~Ma-gの軽石と比較して低い傾向があることから、今後詳細な検討が必要であるが、 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比の変化は噴火時の噴煙の温度を反映し、火砕流中堆積物中の軽石の Fe^{3+}/Fe^{2+} 比は火砕流発生時の噴煙の温度低下を記録している可能性がある。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

目の前で噴火している火山が今後どのような活動に移行するのかを推定し、そこから適切な防災・減災対策につなげていくためには、噴火推移と火山噴出物の変化に関するデータを蓄積することが重要である。本研究では火砕流を発生しカルデラ形成した摩周火山の噴火に対して Fe^{3+}/Fe^{2+} 比の変化を見積もり、噴火推移との関係を明らかにした。今後はより詳細に噴火推移と Fe^{3+}/Fe^{2+} 比の関係を調べることで、火砕流発生を予想も資するデータとして Fe^{3+}/Fe^{2+} が有用である可能性を提案できる。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Sano, K., Harada, T., Yamakawa, S., 2024, Analytical method to determine Fe³⁺/Fe²⁺ ratio in pumice: Oxidation process pumice from 7.6 ka Mashu caldera-forming eruption, LASTI Annual Report, in press, 査読無, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

佐野恭平, 原田哲男, 和田恵治, 佐藤鋭一, 2023, 放射光分析と気泡組織解析に基づく北海道摩周火山約7600年前カルデラ形成噴火のマグマ上昇・酸化過程, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SVC31-P01

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

佐野恭平（兵庫県立大学大学院地域資源マネジメント研究科）

他機関との共同研究の有無：有

和田恵治（北海道教育大学旭川校名誉教授）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：兵庫県立大学大学院地域資源マネジメント研究科

電話：0796-34-6079

e-mail：sano@rrm.u-hyogo.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：佐野 恭平

所属：兵庫県立大学大学院地域資源マネジメント研究科

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

阿蘇中岳火山灰の岩石磁氣的性質の時系列変化に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

Anai et al. (2023)で示した、2019-2020年噴火における火山灰の岩石磁気特性の変化を確認したのと同様の手法を用いて、2014-2015年噴火で採取された火山灰試料の解析を行う。灰噴火のみであった2019-2020年噴火に対して、2014-2015年噴火ではストロンボリ式噴火が観測されており、より大規模であった。両噴火の火山灰内部の磁性鉱物（チタン磁鉄鉱粒子）のサイズ分布や組成に違いがあるならば、岩石磁気特性に違いが反映されるはずであり、火道やマグマだまりの物理学的条件の違いを検討できる可能性がある。測定に用いる試料は熊本大学の宮縁教授が定点で定量採取したものをを用いる。これらの試料は噴出量の算定や降灰の方向などの研究に用いられており、これらのデータとの比較も可能である。火口からおよそ1 km圏内の試料について解析を行う予定である。岩石磁気学的分析は、磁性鉱物の磁区構造を把握するためのヒステリシス測定、磁性鉱物のもつキュリー温度推定のための熱磁気分析を行う予定である。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

本研究は、阿蘇中岳の噴火活動で放出された火山灰を複数地で採取したものに対し、岩石磁気測定を行い、その時間軸に沿った変化と火山噴火の時系列変化を比較することを目指している。Anai et al. (2023)では2019-2020年噴火火山灰から得た岩石磁気特性の時間変化は、火映の観測されている期間に対応していることを見出した。今年度は、ストロンボリ噴火にまでいたった2014-2015年噴火火山灰を対象にして、岩石磁気特性についての予察的測定を進めた。

2014年11月から2015年4月までの35試料について、ヒステリシス測定を行った。得られたヒステリシスデータをDay plot上に示した。全体的には擬似単磁区（PSD）の領域にプロットされるが、2019-2020年火山灰と比較すると、やや単磁区（SD）-多磁区（MD）混合曲線に近い。具体的には、飽和磁化に対する飽和磁化の割合（Mrs/Ms）は、2019-2020年火山灰がおよそ0.2-0.5であったのに対し、2014-2015火山灰は0.1-0.4といくらか低い。保磁力に対する残留保磁力の割合（Bcr/Bc）は、2019-2020年火山灰が1.2-4.3であったのに対して、2014-2015火山灰は2.0-8.0程度と高めめの値を示す。このことから、2014-2015年火山灰は2019-2020年火山灰よりも多磁区（MD）

的な粒子の割合が高くなっている。

時系列の変化を見ると、2014年11月から12月にかけて飽和磁化に対する飽和磁化の割合 (Mrs/Ms) が減少傾向に、その後2015年1月下旬にかけては上昇傾向を示し、3月にかけて減少、3月下旬に再度上昇しその後下降して噴火が停止している。このように、噴火期間を通してMrs/Msの値が変動する傾向は2019-2020年火山灰と同様の結果となった。

期間全体でいくつかの試料に対して熱磁気分析を行いその傾向を確認した。その結果、大きく分けて2つのタイプの挙動が確認できた。1つはチタン含有量の多いチタン磁鉄鉱を主体とし、チタン含有量の少ないチタン磁鉄鉱も含まれている2019-2020年火山灰と似たタイプのものであった。もう1つはチタン含有量の少ないチタン磁鉄鉱の割合がチタン含有量の多いチタン磁鉄鉱と同等もしくは大きい(一部ではチタン含有量の少ないチタン磁鉄鉱のみ)試料である。2019-2020年火山灰と比較して、2014-2015年火山灰はより複雑な磁気特性を示しているようであるが、同じ性質のものとならないものをまずは分類し、より詳細に時系列変化を確認する必要がある。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本研究は「火山現象の定量化と解明」に対して、火山現象とそこから得られる物質(火山灰)の岩石磁気特性を関連付けることで火山現象の解明に貢献するものである。具体的には2019-2020年阿蘇中岳噴火に置いて、火山灰の岩石磁気特性を時系列に沿って復元することにより、その変動と火映現象との同時性を見出した。火映現象は火山活動が活発化する時期に観測されるが、詳しい現象解明には至っていない。本研究は、従来研究にはなかった「火山灰の岩石磁気特性の時系列変化」を把握し、その特性が噴火継続期間において一定ではないことを見出した。また、磁性鉱物のキュリー温度やヒステリシスパラメーターが示す磁気特性を得るための条件の推定を行なった。この結果を一連の観測された火山現象と照らし合わせることで、火映現象との関連性が見出された。このことから、磁性鉱物の磁気特性の変化は火道内部の物理条件を反映している可能性が示唆された。

今年度は、2014-2015年の噴火活動で得られた火山灰の磁気特性の解明に着手し、より大規模な火山噴火と磁気特性の時間変化の関連性を示唆する予察的結果が確認できている。より複雑な磁気特性を持つことが示唆されるため、異なる手法も取り入れてより詳細に解析を進めていく。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

・論文・報告書等

Anai, C., T. Ohkura, S. Yoshikawa, and N. Mochizuki, 2023, Temporal change in rock-magnetic properties of volcanic ashes ejected during a 1-year eruption event: a case study on the Aso Nakadake 2019-2020 eruption, Earth Planets Space, 75, 24, doi.org/10.1186/s40623-023-01783-x, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

穴井千里・大倉敬宏・吉川慎・望月伸竜, 2023, 阿蘇中岳火山2019-2020年噴火に伴う噴出火山灰の岩石磁気学的研究 ―噴火プロセスと磁性鉱物の磁気的特徴の変化―, JpGU2023 (ハイライト講演), SEM15-01

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報 :

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

望月伸竜(熊本大学准教授), 坂口拓也(熊本大学大学院生), 日高 龍一郎(熊本大学)
他機関との共同研究の有無 : 有
穴井千里(高知大学特任助教)

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等 : 熊本大学・大学院先端科学研究部
電話 : 096-342-3420

e-mail : mochizuki@kumamoto-u.ac.jp

URL :

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：望月 伸竜

所属：熊本大学・大学院先端科学研究部

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

GNSS-A海底測地観測データの高精度化に向けた精度評価システムの構築

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

イ. 地震断層滑りのモデル化

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 令和5年度の計画の概要：

GNSS-Aの精度は未だ十分に高度化されたとは言えず、誤差の定量評価手法を検討する必要がある。本研究計画ではその手法を開発するとともに結果をオープンデータとして公表することを目的とする。誤差の評価手法として、海底音響基準局との音響測距水槽実験の実施、ハイレートGNSSデータの誤差量の評価のためのGNSS稼働台車による実験、海洋場の評価のためのDONET海底温度計データとの比較を進めている。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

GNSS-Aの音速度場モデルの適切な解釈を可能とする表記法を示した。海底音響基準局との音響測距水槽実験を実施し、実観測データを取得、評価した。また、ハイレートGNSSデータの誤差量の評価を行うため、GNSS稼働台車による実験データの取得を行った。実データとの比較のために、防災科学技術研究所と共同でDONET海底温度計データとの比較も実施した。

GNSS-A誤差源の影響評価のためのデータシステムのベータ版を作成し、公表の準備を進めている。

本研究は、海上保安庁海洋情報部との共同研究に基づき、一部のデータ・物品を利用して実施した。また、海洋情報部の職員の協力のもと実施した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

今後、2(1)ア”海溝型巨大地震の長期予測” に対して、GNSS-Aデータの誤差源の分析が予測に用いられる海底測地データの精度の理解、結果の信頼性の向上に貢献していくものと考えられる。また、GNSS-Aの新しい評価手法は、5(3)イ”観測・解析技術の開発” に大きく貢献している。5(3)エ”地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開” に貢献するための結果の公表については、現在、最終的な準備中である。以上のように「災害の軽減に貢献する」ためのGNSS-Aデータの高度化に貢献しつつあるが、当該成果は誤差の評価手法の開発を実施した段階であり、個別のデータの評価や海洋場の異常検知、分類などの実データの精度向上には至っていない。今後は具体的なGNSS-A解析の性能向上に向けた研究を進める必要がある。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Watanabe, S., Ishikawa, T., Nakamura, Y., and Yokota, Y., 2023, Full-Bayes GNSS-A solution for precise seafloor positioning with single uniform sound speed gradient layer assumption, J. Geod., 97, 79, <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01774-6>, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Yokota, Y., Ishikawa, T., Nagae, K., Watanabe, S., and Nakamura, Y., 2023, Correction for underwater acoustic ranging in GNSS-A related to sound speed structures and signal reading, AGU fall meeting 2023, G43B-0489

Yokota, Y., Hashimoto, T., Yamaura, S., Kaneda, M., Kouno, K., and Hirakawa, Y., 2023, Development of UAV technology to realize high-frequency GNSS-A observation: experimental verification, Slow2Fast Earthquake Workshop 2023, P32

Yokota, Y., Ishikawa, T., Watanabe, S., Nakamura, Y., and Nagae, K., 2023, Advancement of accuracy and frequency of the GNSS-A seafloor crustal deformation observation, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), IUGG23-0238

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

横田裕輔（東京大学生産技術研究所准教授）, 河野賢司（東京大学生産技術研究所）
他機関との共同研究の有無：無

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学生産技術研究所

電話：03-5452-6187

e-mail：yyokota@iis.u-tokyo.ac.jp

URL：https://sgoi.iis.u-tokyo.ac.jp/

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：横田 裕輔

所属：東京大学・生産技術研究所

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

水蒸気噴火を起こす火山の活動把握：火山ガス・火口湖水・温泉水等の化学分析に基づく地球化学的アプローチ

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

オ. 高リスク小規模火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

箱根山、草津白根山、霧島硫黄山など、将来水蒸気噴火が起こり得る火山で、繰り返し火山ガス、火口湖水、温泉水などマグマ起源物質を含む試料を採取・分析し、各種地球物理的情報を合わせて考察することにより、火山体内における火山性流体の挙動を解明し、火山活動を把握する。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

箱根山では、毎月、大涌谷近辺の3カ所の噴気孔で火山ガスを採取し、地震活動との関連を調べた。

草津白根山では、5、7、10月に5カ所の噴気孔で火山ガスを採取し、地震活動との関連を調べた。霧島硫黄山では、6、10月に2カ所の噴気孔で火山ガスを採取し、地震活動との関連を調べた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本研究の主要な目的は、水蒸気噴火を起こす可能性のある火山において、噴気の化学組成・安定同位体比の時間変化を追及することにより、水蒸気噴火のポテンシャルを評価することである。観測により得られた噴気の化学組成・安定同位体比の変動は、地震活動に代表される火山活動の指標と良い相関が確認された。このことは、高リスク小規模火山噴火の典型である水蒸気噴火のポテンシャル推定に貢献している。人的被害をもたらした2014年の御嶽山噴火、2018年の本白根山噴火の噴火形式は水蒸気噴火であり、本研究で実施している地球化学的な観測は、これらの噴火に類似した火山活動予測に貢献すると考えられる。

箱根山

箱根山の大涌谷地熱地帯において、ほぼ毎月火山ガスを三カ所の噴気孔（n, s, c）で採取・分析した。三カ所の噴気孔（n, s, c）の中で噴気cにはSO₂が比較的高濃度で含まれ、隣接する500m深度のボーリング孔から放出される化学組成と類似している。噴気cの化学組成は、およそ500mの地下における火山ガスの組成を代表していると考えられる。また噴気cの化学組成変化は噴気nやsに比べて、地震回数変動との相関が高い。2021年7月から8月にかけて、噴気cのHe/CH₄比は急激に増加し、その後、2023年4月までの期間、緩やかな減少傾向が継続した。2023年4月から5月にかけて、再びHe/CH₄比は急激に増加し、2024年1月まで高い値を維持している。2021年7月から2023年4月ま

では、1年9カ月が経過しており、2023年の活動も約2年周期で活動が活発化するというこれまでの経験則に合致していると考えられる。

霧島硫黄山

2023年6月と12月に霧島硫黄山で噴気の採取・分析を実施した。霧島硫黄山は2018年4月の水蒸気噴火以降、火山活動は穏やかになり、全体的には噴気に含まれるマグマ起源成分であるSO₂の濃度は最盛期より低下した。2017年から継続して観測している噴気cに着目すると、SO₂/CO₂比は、2022年に上昇傾向を示した。しかし2023年に入りSO₂/CO₂比は、ほぼ停滞している。2022年に見られた火山活動の弱い活発化は鎮静化したと考えられる。

草津白根山

2023年5, 7, 10月に、草津白根山で繰り返し噴気を採取・分析した。白根山山頂北側の地熱地帯で採取された3つの噴気では、2022年11月から2023年5月(=期間1とする)にかけて、CO₂/H₂S比は上昇し、He/CO₂比は低下した。2023年5月から7月(=期間2とする)にかけて、CO₂/H₂S比とHe/CO₂比はともに低下した。2023年7月から10月(=期間3とする)にかけて、CO₂/H₂S比は低下し、He/CO₂比は上昇した。Heはもっぱら脱ガスマグマに由来し、CO₂は脱ガスマグマおよび地殻に由来する。H₂Sは熱水系内で生成すると考えられる。脱ガスマグマに由来しない成分の濃度が一定の場合、CO₂/H₂S比とHe/CO₂比はマグマ性ガスの浅部熱水系への供給量を反映し、協調して増減を示すと期待される。上述の期間1, 3で見られた非協調的なCO₂/H₂S比とHe/CO₂比の変動は、熱水系に起源するH₂Sの濃度か、地殻に由来するCO₂濃度の変動が原因と考えられる。地震回数との相関は、CO₂/H₂S比よりもHe/CO₂比が高い。このことからCO₂/H₂S比とHe/CO₂比の間で生じた非協調的な変動は、熱水系成分であるH₂Sの濃度変化が原因である可能性が高いと考えられる。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

- ・論文・報告書等

- ・学会・シンポジウム等での発表

大場武・谷口無我・沼波望・豊島誠也・安田裕紀・寺田暁彦,2023,草津白根山における火山ガス組成の時間変化,日本火山学会2023年秋季大会

谷口無我・大場武・福岡管区気象台・鹿児島地方気象台・宮崎地方気象台,2023,火山性熱水の化学分析による火山活動評価ー霧島山えびの高原(硫黄山)の例ー,日本火山学会2023年秋季大会

大場武・谷口無我・沼波望・豊島誠也,2023,箱根山における火山ガス組成の時間変化,日本火山学会2023年秋季大会

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報 :

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

大場 武(東海大学教授),沼波 望(東海大学総合理工学研究科大学院生),豊島 誠也(東海大学理学研究科大学院生)

他機関との共同研究の有無 : 有

谷口 無我(気象研究所研究官)

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等 : 東海大学理学部

電話 : 0463-58-1211

e-mail : takeshi_ohba@tokai-u.jp

URL :

(12) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：大場 武

所属：東海大学理学部

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

火山活動推移における分岐の要因の解明：蔵王山、過去約800年間の噴出物の事例研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 令和5年度の計画の概要：

蔵王山の約800年前以降の水蒸気噴火に始まる噴火は、水蒸気噴火のみで終息、その後小規模マグマ噴火に至って終息、さらに準プリニー式及び小規模マグマ噴火を経て終息する3ケースがある。本課題では、各ケースのテフラ層の物質科学的特徴を明らかにし、水蒸気噴火からその後の事象への分岐の要因を解明する。また、マグマ噴火に至ったケースの噴火推移に伴うマグマ供給系の変遷を解明する。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

蔵王火山の最新の火口である御釜の活動は約800年前から続いており、御釜を火口とするテフラ層はZa-Ok1～7の7枚が識別されているが、水蒸気噴火に始まる噴火は、水蒸気噴火のみで終息（B）、その後小規模マグマ噴火に至って終息（A1）、さらに中規模寄りの噴火に至りその後小規模マグマ噴火を経て終息する（A2）3ケースがある。これまでに、各コースの代表について物質科学的研究を行い、初期の水蒸気噴火噴出物について以下のことが判明した。

体積は、BとA1よりもA2の方が大きい。構成物は、何れも白色変質岩片を主体とするが、本質物質である黒色とベージュスコリア及び黒色石質岩片を含み、本質物質と変質物質の比率や含まれる変質鉱物の種類はA1, A2, Bに明瞭な差は認められない。一方で、黒色スコリアに対するベージュスコリアの量比はA2の方がA1とBより大きい。また、黒色スコリアの発泡度に相違は認められないが、ベージュスコリアの発泡度はA2の方がA1とBよりやや高い傾向がある。マイクロライト量及びスコリア中の石基ガラスSiO₂量は、何れも黒色の方がベージュスコリアよりも多い傾向にある。以上を総合すると、初期の水蒸気噴火に関与したマグマの量が多いほど、その後の中規模寄りの噴火を含むコースを辿る可能性があることが指摘できる。そしてそれは、噴出物の体積やベージュスコリア/黒色スコリア比やベージュスコリアの発泡度の高さに現れる可能性が指摘できる。また、初期の水蒸気噴火の規模が比較的小さい場合は、水蒸気噴火で終了するか、後にマグマ噴火に至るかは、水蒸気噴火の段階の物質科学的特徴からは判別基準を求めることはできなかった。

次に、A1とA2の代表としてZa-Ok1とZa-Ok5を例に取り、物質科学的特徴から噴火推移の詳細とそれに伴うマグマ供給系の変遷について検討を行った。Za-Ok1とZa-Ok5のマグマ噴火によるレイヤー

は黒色相、青灰色相、褐色相に分類される。水蒸気噴火による白色相の上位に、Ok1では青灰色相、黒色相、白色相を挟んでさらに青灰色相、黒色相、褐色相、青灰色相、黒色相と累重し、Ok5では青灰色相、黒色相、青灰色相と累重している。体積が推定された場合については、白色相、青灰色相、黒色相、褐色相の順に大きかった。なお、Za-Ok1とZa-Ok5全体の体積は前者の方が大きかった。白色相は淘汰が悪く、粘土質成分もかなり認められるのに対し、他の3相は淘汰が良く、同じ地点で採取された試料について比べると、青灰色相、黒色相、褐色相の順に高いところに粒度のピーク値がある。構成物は、白色相は白色変質岩片で特徴づけられるが、スコリアや少量の黒色石質岩片も含む。他の岩相ではスコリア及び黒色石質岩片が主体である。黒色石質岩片に対するスコリアの比率は、褐色相及び黒色相の方が青灰色相よりも大きい。なお、白色相のこの比率は他の3相よりも高い。ベージュスコリアの黒色スコリアに対する比率も他の3相より高い。また、相の違いによらず、黒色スコリアよりベージュスコリアの方が、石基ガラス量、含水量が高く、マイクロライト晶出深度が深い傾向にある。以上を基に各相のマグマ供給系の違いを考える。まず、スコリアと黒色石質岩片の量比から、青灰色相では、黒色相と褐色相よりも新鮮なマグマの関与率が低かった、即ち新鮮なマグマが噴出し難かったと思われる。また、体積は、青灰色相、黒色相、褐色相の順に大きいことも考えると、この順にマグマ上昇量や上昇率が高かったと推定される。なお、白色相では他の3相に比べてスコリアや黒色石質岩片量が少なく、またベージュ/黒色スコリア比が高い。これは他の3相に比べて、新鮮なマグマの関与量が少なかったことに加え、プラグやその下位に存在する停滞マグマが未発達であったと推定され、これは熱水系の存在に起因すると考えられる。

テフラ層序を見ると、白色相、青灰色相、黒色相、褐色相の順に概ね後の方に出現し、A2では褐色相、A1では黒色相に到達すると、そのあとは青灰色相あるいは黒色相が出現している。これは各コースで最大規模に達するまではマグマ上昇量/率が概ね上昇傾向で進んだこと、その後はマグマ上昇量/率がある程度規模が前後しながら終息に向かったと考えられる。また、A2の方がA1よりも初期の白色相の体積が大きいことから、その後のマグマ上昇量/率の増大の到達度は、初期の白色相の体積に相関している可能性が指摘できる。すなわち、噴火推移の分岐は、関与するマグマの量/率が主要因となっていることが指摘できる。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

噴火事象の分岐の要因を解明することは、「地震火山災害軽減研究」（建議）III. 2. (5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測の中核をなすものである。本課題は、最新の火口からの多くの噴火について火山活動推移パターンが類型化された蔵王山において、分岐前の事象の特徴を基に火山活動の分岐の要因の解明を試みたものである。その結果、異なる噴火推移パターンを辿るものを比較した場合に、その噴火推移の違いの主要因がマグマ上昇量/率である可能性が指摘され、それは噴火初期の噴出物の特徴にも一部現れる可能性が指摘された。この成果は火山活動推移のモデルを構築する上で有用な事例となると考えられる。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

伴雅雄、及川輝樹、井村匠、常松佳恵、神秀登、高橋由路,2024,マグマ噴出量階段図の事例：蔵王山, 防災科学技術研究所研究報告, , , 査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

伴雅雄、及川輝樹、井村匠、常松佳恵、神秀登、高橋由路,2023,蔵王火山最新期のテフラ層序の再検討,日本地球惑星連合大会2023,SVC35-P10

伴雅雄、菅野舜、佐藤初洋、井村匠、常松佳恵、長谷川健,2023,東北日本、吾妻山の最新マグマ噴火噴出物をもたらしたマグマ供給系,日本地質学会第130年学術大会,T9-O-3

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

伴 雅雄（山形大学理学部）

他機関との共同研究の有無：無

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：山形大学理学部

電話：023-628-4642

e-mail：ban@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：伴 雅雄

所属：山形大学理学部

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

蔵王・御釜と鳴子・瀧沼における地下熱水系の動的変動に関する比較研究

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

高リスク小規模火山噴火

(6) 令和5年度の計画の概要：

本計画では、2013年以来火山活動の活発化が見られてきた蔵王山の火口湖「御釜」、および現在比較的安定状態にある鳴子火山の火口湖「瀧沼」に対し、水・熱・化学物質収支を定量的・長期的に評価し、これによって地下熱水系の動的変動と火山活動変動との関係を比較検討することを目的とした。現在、両火山は比較的静穏な状態にあるが、本計画の実行により、現在および今後の両火山の活動度評価とその変動予測に資すると考える。令和5年は、両火口湖とその周辺で現地観測を行い、御釜については、令和元年から連続観測を行っている水位・水温のデータを基に、御釜への地下水流入・流出量の変動と熱的条件の変化を量的に求めることを考えた。また、湖水・河川水の化学分析を継続し、地下水による化学負荷量の変動を求め、火山活動と湖水の化学的変化との関係を調べる計画を立てた。他方、瀧沼については、R5年度が最初の観測であり、御釜と同様の観測手法により、水収支評価を行うこと、また湖水・河川水の化学分析や火山ガス濃度測定から、蔵王との活動度の違いを明らかにすることを考えた。さらに両湖での船上観測から、水質構造と季節変化の違いを調べ、各火山の活動との関連をさぐることにした。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

図1に、御釜と瀧沼における観測点の位置を示す。御釜では、令和元年からL地点で水位を連続観測しており、このデータを基に、御釜における地下水流入・流出量の季節変動を求め、御釜の水位・貯留量との関係を調べた。また、最深点MD地点に係留系を用いて水温ロガーを10台設置した。御釜の地下水流入・流出量は、水収支式と化学物資収支式との連立で求めた。水収支式にある湖面蒸発量は、M地点での気象観測で得られた風速・気温・湿度とMD地点の表面水温からバルク法によって求めている。瀧沼では、同様の観測を令和5年4月に開始し、瀧沼における水収支評価を行った。また、今年度は両湖で各3回の船上観測を行い、船上から水質プロファイラーを降ろすことで水質環境構造の違いとその季節変化の違いを明らかにした。さらに、湖水と流入河川水を現地で採取して化学分析を行

い、火山活動の違いを化学的側面から検討した。

図2に、渦沼の最深点(MD点)で得た水質構造の季節変化を示す。6月と8月の受熱期に水深3点で水温と電導度の躍層(図の点線)が見られ、6月から8月にかけて水温は上昇、電導度は減少の傾向が認められた(図の赤い矢印)。最上の第一躍層より下層では無酸素層になるため、下の3つの水深から火山性ガスを含む熱水が貫入していることが示唆された。しかし、この貫入がどのように行われているのかを明らかにするのは、今後の課題である。なお、第一躍層直下にはクロロフィル濃度のピークが存在し、湖水のpHは2.1~2.2の強酸性であるが、光合成生物が存在することがわかった。この生物種の特定も課題の一つである。

図3に、御釜の最深点(MD点)で得た水質構造の季節変化を示す。この湖の場合は、水温躍層が水深2点で存在し、特に下の躍層より下層では電導度と濁度の増加が認められた。これは流入河川である五色川の降雨による土砂流出で懸濁底層流が発生し、最深点に達したことが考えられる。このとき電導度が高いのは、土砂流出と共に湖岸に露出する半水石膏の溶出が起こったためと考えられる。また、湯沼に比べクロロフィル濃度が高く、光合成生物が湯沼より多いと判断される。また、この生物の分解によるDO消費も御釜の方がより高いと思われ、これが底層でのDO減少を引き起こしていると考えられる。この光合成生物に対応して、9月5日に水深11mと15mで採水し、その懸濁物についてDNAを採取し遺伝子解析を行った。その結果、占有率の48.4%が好酸性緑藻の葉緑体、21.3%が好酸性細菌、6.3%が鉄酸化細菌であり、これにより光合成生物の存在が確かめられた。

他方、御釜の湖底での地殻熱流量は、Chikita et al. (2022)によって2.5~2.9 W/m²と求められ、渦沼の場合は、Goto et al. (2023)により23.6 W/m²が得られた。このように、渦沼の方が1桁大きな値をとることが着目される。また、令和5年8月に渦沼および周辺で火山ガス濃度を測定した。結果として、H₂S濃度3.0~4.2% (致死量0.07%)、CO₂濃度>40%(致死量40%)を観測し、いずれも致死量を超える濃度であった。このことから、鳴子火山の活動度は低いといわれるが、今回観測された活発な火山ガスや地下熱水の噴出を与える地下熱水系の構造について、その実相を明らかにする必要がある。

表1は、御釜での水収支と化学物質収支の評価から得られた地下水流入量G_{in}、地下水流出量G_{out}と正味の地下水流入量(G_{in}-G_{out})、および渦沼での水収支評価から得られた正味の地下水流入量の値を示す。なお、ここでの収支期間は無降雨期間を選び、この期間の平均水位と与えた河川流入量R_{in}も示した。御釜の場合、水位低下に応じてG_{out}が減少していることがわかる。渦沼については、化学物質収支を評価するに十分なデータがそろっておらず、G_{in}とG_{out}の分離は今後の課題である。水文学的特徴として、両湖とも一貫してG_{in}よりもG_{out}が大きいことが上げられる。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

今回の研究は、現在比較的静穏な状態にある2つの活火山において、その活動の中心的役割を持つ火口湖に対して、地下熱水系の構造と変動を明らかにすることを目的としている。これによって、今後の活動変動を支配する場を解明し、それをモデル化することに対して、本研究が一翼を担うものと考えている。特に、鳴子・渦沼については、今年度観測を開始したばかりであり、同湖に対し熱・水・化学物質の収支評価を行うには、さらなるデータの蓄積が必要である。蔵王と鳴子は、ともに周辺に温泉街・スキー場等のリゾート地があり、深刻なコロナ禍が空けて観光客の足が向けられる頻度が高くなった。このことから、本研究の目的である地下熱水系の構造と変動の解明は、今後の災害軽減にも資するものと思われる。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

・論文・報告書等

Chikita, K.A., Goto, A., Okada, J., Yamaguchi, T., Miura, S. and Yamamoto, M., 2023, Water Cycles and Geothermal Processes in a Volcanic Crater

Lake, Hydrology, 10, 54, doi:10.3390/hydrology10030054, 査読有, 謝辞有

査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Chikita, K.A., Goto, A., Okada, J., Oyagi, H. and Yamaguchi, T., 2023, A study on water cycles and geothermal processes in a crater lake: Okama in Zao Volcano, JpGU2023, A-HW19-05

後藤章夫・知北和久・岡田 純・大八木英夫・齋藤 圭, 2023, 鳴子火山・渦沼の熱的構造とその変動一序

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

知北 和久（北海道大学理学部）

他機関との共同研究の有無：有

後藤 章夫（東北大学・東北アジア研究センター）,岡田 純（気象庁・気象研究所・火山研究部）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：北海道大学理学部

電話：011-772-4292

e-mail：chikita@sci.hokudai.ac.jp

URL：https://researchmap.jp/read0167130/?lang=japanese

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：知北 和久

所属：北海道大学理学部

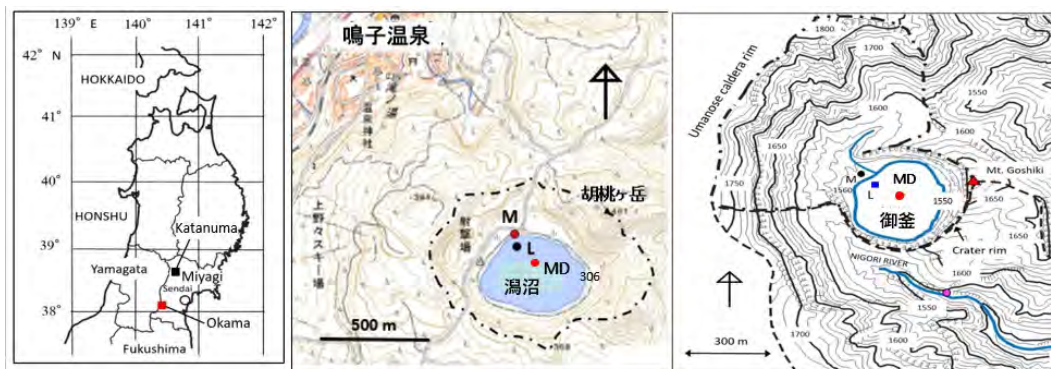


図1.

鳴子・渦沼と蔵王・御釜の位置，および観測点の位置．MDが最深点．一点鎖線は各湖流域の分水界を示す．

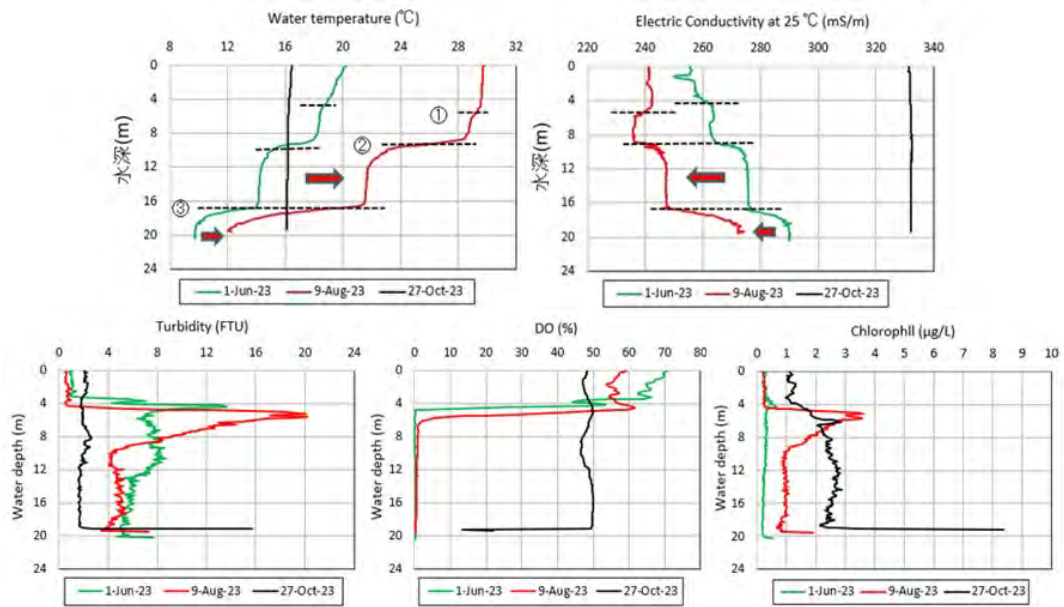


図2. 渦沼の最深点における水質構造の季節変化（水温・25℃電導度・濁度・DO・クロロフィル濃度）。

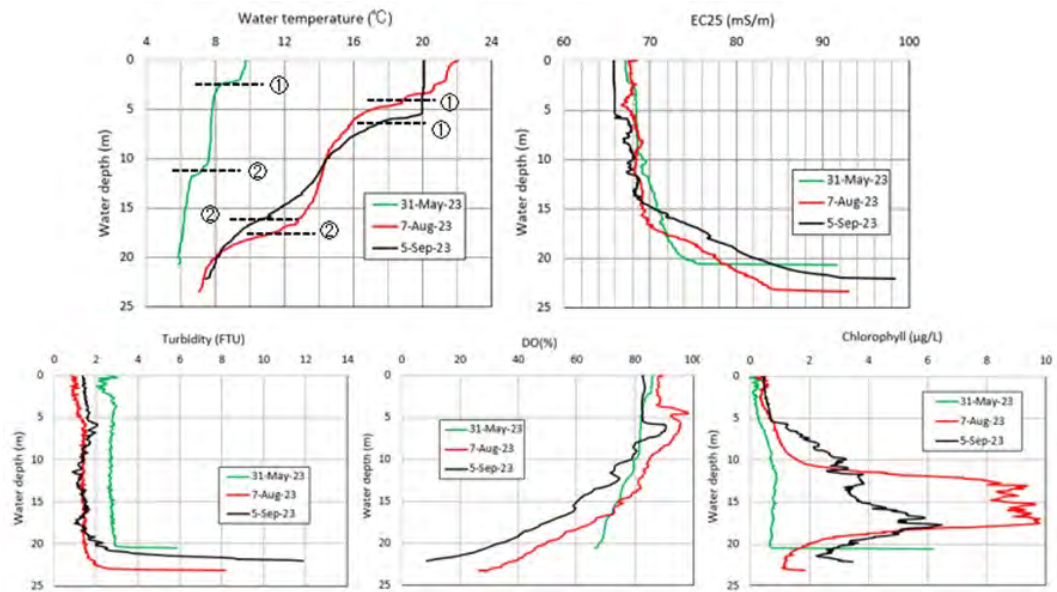


図3. 御釜の最深点における水質構造の季節変化（水温・25℃電導度・濁度・DO・クロロフィル濃度）。

御釜

No.	Period	Lake level (m)	R_{in} (m ³ /s)	$G_{in} - G_{out}$ (m ³ /s)	G_{in} (m ³ /s)	G_{out} (m ³ /s)
(1)	3 - 6 Aug. 2020	5.57	0.00332	- 0.020	0.016	0.036
(2)	19 - 28 Aug. 2020	5.26	0.00332	- 0.035	0.012	0.047
(3)	30 Sep. - 4 Oct. 2020	4.78	0.00212	- 0.028	0.007	0.035
(4)	15-20 July 2021	3.62	0.00289	- 0.007	0.012	0.019
(5)	10-14 Sep. 2021	3.77	0.00274	- 0.013	0.014	0.027

渦沼

No.	Period	Lake level (m)	R_{in} (m ³ /s)	$G_{in} - G_{out}$ (m ³ /s)
(1)	19 - 22 Apr. 2023	1.103	0.0060	- 0.010
(2)	10 - 13 May 2023	1.209	0.0060	- 0.019
(3)	1 - 4 July 2023	1.086	0.0060	- 0.020
(4)	23 - 30 July 2023	1.055	0.0060	- 0.015
(5)	21 - 24 Aug. 2023	0.735	0.0060	- 0.018

表1.

御釜と渦沼の無降雨期間における地下水流入量 G_{in} 、同流出量 G_{out} 、およびその差。河川流入量 R_{in} は観測値を与えている。

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

Web情報から探る地震雲などの宏観異常現象と地震との関係

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

Web上では宏観異常現象に関わる情報が散見される。例えば、地震雲は毎日ツイートされている。しかし、その存在は気象学的には否定されている。ただし、人の感覚が作用してその雲をあやしいと感じる可能性は残っている。本研究ではTwitterのつぶやき情報から、その可能性を統計的に検証する。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1. Yahoo!のリアルタイム検索を用いた調査（令和6年能登半島地震について）

検索ワード「前兆 地震」と「地震雲」の2種類で、X（旧ツイッター）の投稿をピックアップするYahoo!の機能を利用して、能登半島地震前の投稿数の増加や地震を想起させるような投稿があったかを調べた。

投稿数の多少が前兆証言の多少と必ずしもイコールとはいえないが、前兆を投稿する人が増えれば全体の投稿数も増加すると考えられる。

Figure 1は、Yahoo!のリアルタイム検索で、検索ワード「前兆 地震」と「地震雲」の日別の投稿数を示している。いずれも地震が発生した1月1日に投稿数が急増している。ただし、そのほとんどは地震発生後の投稿であり、地震直前に投稿が増えたわけではない。なお、「地震雲」12月27日の投稿数は、前後に比べてやや多い。この日は、愛知県で穴あき雲、関東では波状のうろこ雲またはひつじ雲が観測され、投稿数が多くなった。

能登半島地震の前兆を示すような投稿はあったのか？については、いずれの検索ワードでもなかった、といえる。

「前兆 地震」について、予想震源が示されていたものを以下に示す。括弧内にはその場所での地震を予想する根拠とされる出来事が示されている。

- ・南海トラフ（12/15の三重県で小魚の大量漂着、12/22の室戸沖で深海のダルマザメ捕獲、12/25の三重県南東沖の地震）、
- ・関東地方（12/17の栃木県南部の地震、12/22からの千葉県東方沖の地震、12/27に千葉県市原市で夕方なのに明るすぎる事、12/30, 31の何らかの観測データ）
- ・北海道や青森（12/12の函館イワシ大量死、12/28の何らかの観測データ）
- ・北海道、三陸、岐阜、鹿児島（12/28に地震雲やマグマ誘導で震度5前後）
- ・関東地方・伊豆諸島・小笠原諸島（12/19と12/26に何かの観測データよりM5クラスの地震）

- ・東海地方（12/27の穴あき雲）
- ・淡路島周辺（12/20の竹の開花）
- ・豊後水道周辺（12/25の小さな揺れの地震）
- ・九州南部や沖縄（12/16と12/27の何らかの前兆）

以上が示すように、能登半島の地震を予想していた投稿はなかった。

次に「地震雲」については、観測場所が不明な投稿は毎日あった。以下に観測場所が示されていた投稿を日別に示す。

- ・12/12: 関東地方、横浜市
- ・12/13: 神奈川県、和歌山県、関東地方、富山県高岡市、静岡県南部、川口市
- ・12/14: 千葉県、大宮、小田原市、房総半島東の沖、横浜市、川口市
- ・12/15: 長野県
- ・12/16: 横浜市、川口市
- ・12/17: 関東地方、横浜市
- ・12/18: 富士山、横浜市、茨城県北部の東沖、荒川、川口市
- ・12/19: 千葉県、東京都、大阪～京都、高知県
- ・12/20: 関東地方、東京都、日野市、仙台市、栃木県鹿沼市、秋葉原、横浜市、川口市、葛西
- ・12/21: 関東地方、川口市、富士山
- ・12/22: 横浜市、千葉県、東京都
- ・12/23: 東京都
- ・12/24: 横浜市、埼玉県北部
- ・12/25: 京都市、川口市、名古屋市
- ・12/26: （場所不明のみ）
- ・12/27: 大阪府、東海地方、愛知県周辺、銀座、新宿、東京都、横浜市、横須賀市、静岡県磐田市、姫路市
- ・12/28: （場所不明のみ）
- ・12/29: 静岡県
- ・12/30: 千葉県、愛知県、栃木県東部
- ・12/31: 岡山県、横浜市
- ・1/1: （地震前は2件で場所不明）

能登半島地震の震源に近い投稿としては、12/13の富山県高岡市があるが、能登半島地震を予想した投稿はなかった。ただし、輪島市の2023/12/12～2023/12/31までの天気を調べると、晴れの日は一日もなかった（<https://tenki.jp/past/2023/01/weather/4/20/47600/> 参照）。輪島市周辺では、晴天に雲が浮かぶような状況がほとんどなかったと考えられる。一方、地震雲とされる雲は、日本のどこかで毎日観測されていたことになる。

2. 地震前の海鳴りとキジの鳴き声に関する聞き取り調査

「キジがしきりに鳴けば地震がある」といった言い伝えが日本各地に残っている（大後, 1985）。また、2011年東北地方太平洋沖地震の前日3月10日に、宮城県気仙沼市波路上地区の住民が、激しい海鳴りとキジの鳴き声を2回ずつ聞いていた、とある（河北新報, 2011）。

これを受けて、気仙沼市とその周辺の三陸沿岸で、地震前の海鳴りとキジの鳴き声に関する認知度を探るため、聞き取り調査を行った。

期間：2023年3月20, 21, 29, 30日の計4日間

場所：岩手県大船渡市、陸前高田市および宮城県気仙沼市の漁港を中心とした計31ヶ所

調査人数：58名

調査項目の「地震前に海鳴りを聞いたことがあるか」については、58名全員に尋ねた。「地震前にキジの鳴き声を聞いたことがあるか」については、19ヶ所34名に尋ねた。

海鳴りに関しては、聞いたことがあると答えた人が一人いたが、地震前に聞いたことがある人は一人もいなかった。また、海鳴りを「沖の荒れた天候によって生じた波浪が崩れる際に出す大きな音」と認識している人は少なく、海鳴りといった言葉自体を知らない人もいた。さらに、地震前の地鳴りを海から来る海鳴りと認識していた人もいた。各回答の割合をFig. 2に示す。

海鳴りを実際に聞いたことがある人は一人で、海鳴りが何なのかを知らない人が19名（33%）いたことから、海鳴りは非常に珍しい現象か、あったとしても気づいていない（認知していない）可能性がある。

キジの鳴き声については、地震前や地震時に鳴くと答えた人が23名と、全体の3分の2以上いた（Fig. 3）。そのうち、揺れの前もしくは地鳴りと同時に鳴くと答えた人が20名いた。一方、キジは地震前や地震時に鳴くと答えた人の約6割の人（14名）が、キジは地震がないときでも鳴くと答えた。

地震の揺れの前にキジの鳴き声を聞いたことがある人が20名（59%）いたことから、「地震の前にキジが鳴く」といった言い伝えは正しかったと考えられる。ただし、それは地震の揺れの直前のことである。本間(1942)によれば、「キジはP波発震後1,2秒後のきわめて短周期の部分に敏感のようである」とある。本調査からは、キジはP波に反応していると考えられる。

では、地震の数日前には鳴かないのか？については、明確な証言は得られなかった。その理由としては、仮に鳴っていたとしても、地震直前のことが強く印象に残るため、数日前のことはあったかなかったかすら覚えていない可能性が考えられる。

地震の前以外でもキジは鳴くことにも留意すべきであろう。キジは季節的によくなく時期があるようである。また、天敵に遭遇した場合などにも鳴くらしい。

Fig. 1: 日毎の投稿数の推移（2023/12/12～2024/1/11）

Fig. 2: 海鳴りに関する調査結果

Fig. 3: キジの鳴き声に関する調査結果

<引用文献>

大後美保, 1985, 災害ことわざ辞典, 東京堂出版, 220pp.

河北新報, 2011, “大震災前日に激しい海鳴り・キジの鳴き声 経験上は直後に地震”, 2011年9月1日 河北新報・朝刊・社会面, 26.

本間寧, 1942, 雉と地震, 測候時報, 13(10), p241.

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本研究では地震の先行現象として、主に宏観異常現象を扱っている。本報告でも、地震雲等の宏観異常現象と令和6年能登半島地震との関連について議論した。また、本研究では、Web上に見られる地震予想の情報が「災害の軽減に貢献する」か否かを検証している。現時点では、「災害の軽減に貢献する」ような情報は見い出せていない。しかしながら、データをもとに見出せないことを明確にすることも重要であると考えられる。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

織原義明, 2023, 地震前の海鳴りとキジの鳴き声に関する聞き取り調査, 日本地震予知学会第10回学術講演会アブストラクト集, 23-14

・学会・シンポジウム等での発表

織原義明, 2023, 地震前の海鳴りとキジの鳴き声に関する聞き取り調査, 日本地震予知学会第10回学術講演会, 23-14

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

織原 義明（東京学芸大学教育学部）
他機関との共同研究の有無：有
野田 洋一（NYジオフィールド）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京学芸大学教育学部
電話：042-329-7489
e-mail：orihara@u-gakugei.ac.jp
URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：織原 義明
所属：東京学芸大学教育学部

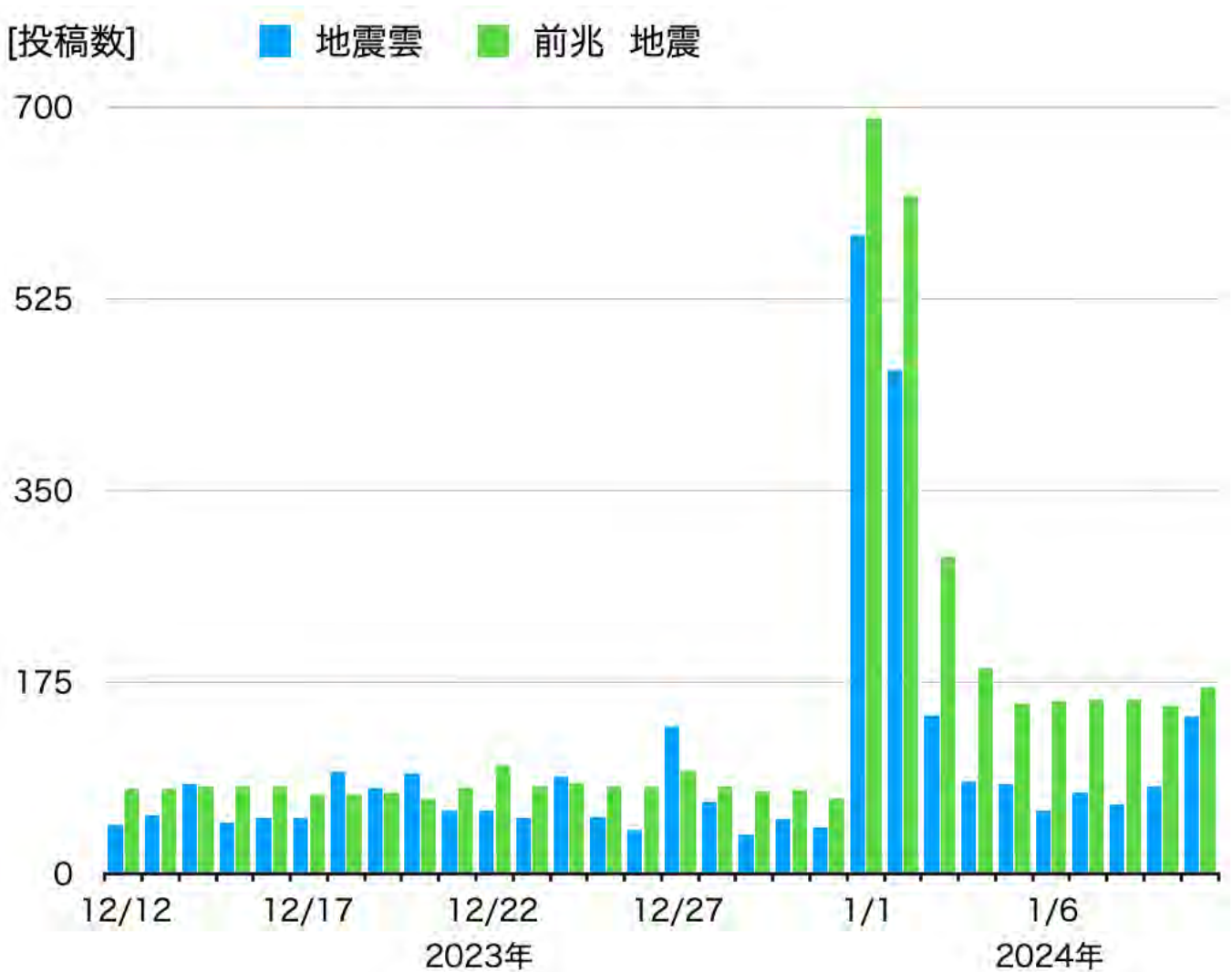


Fig. 1: 日毎の投稿数の推移（2023/12/12～2024/1/11）

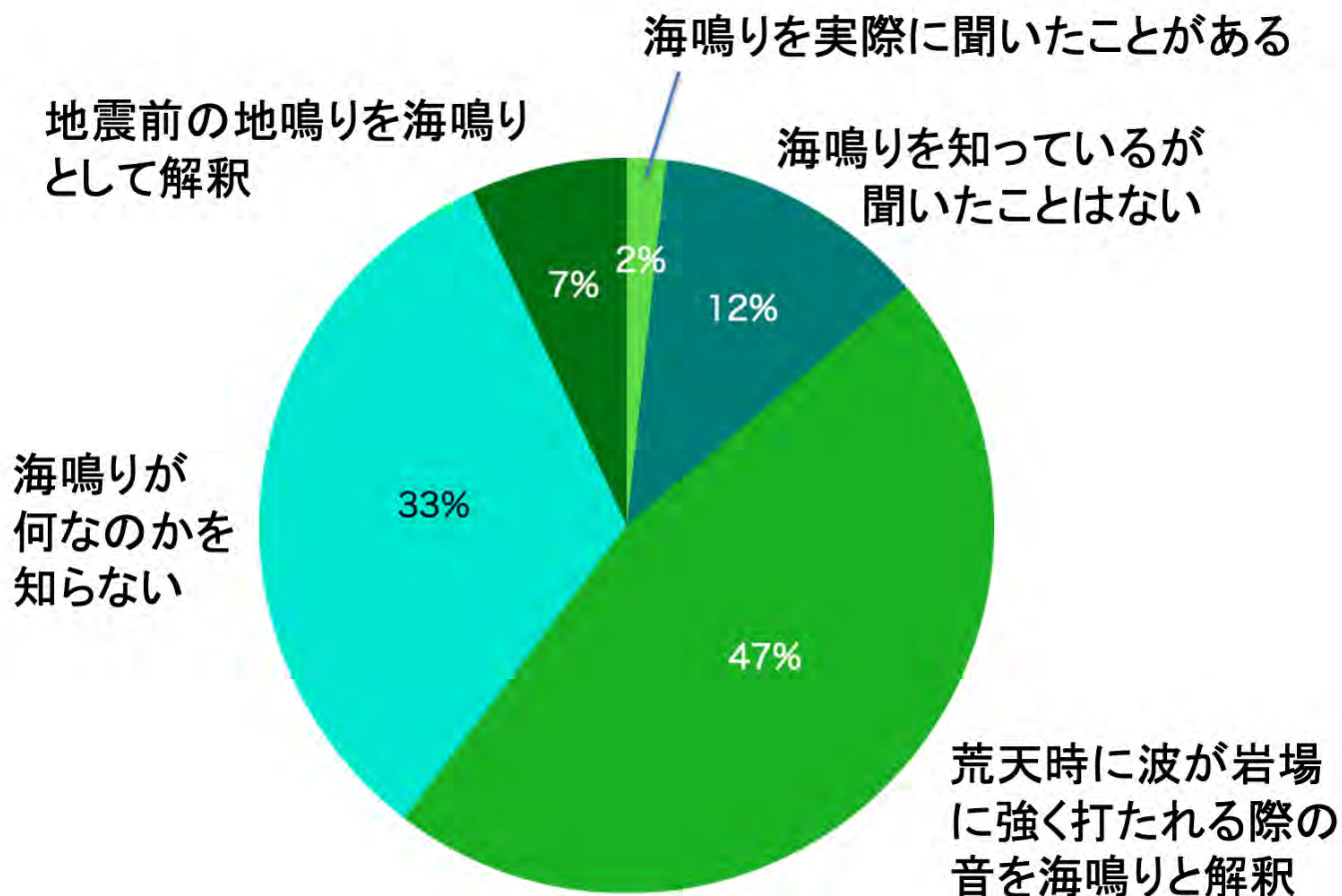
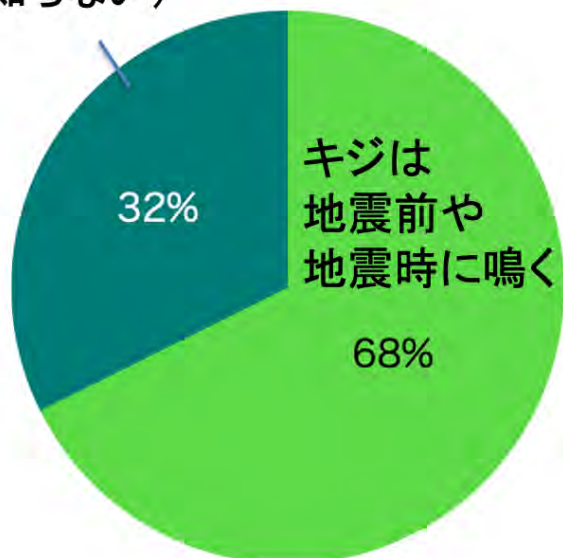


Fig. 2: 海鳴りに関する調査結果

調査対象の34名のうち、
キジの鳴き声は
聞いたことない
(知らない)



キジは地震前や地震時に鳴く(23名)のうち、
地震時以外に
キジが鳴くかは
わからない

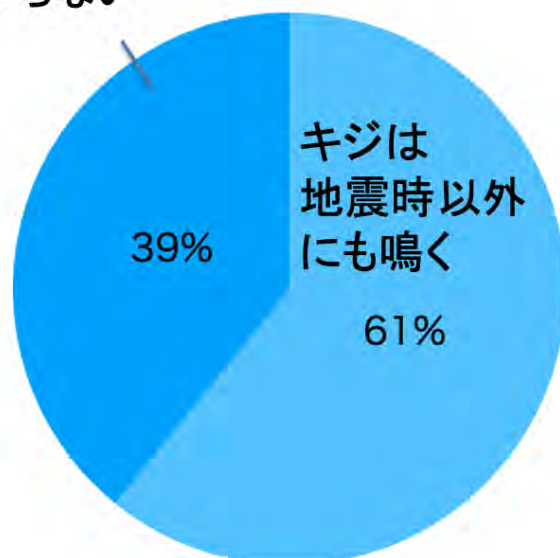


Fig. 3: キジの鳴き声に関する調査結果

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震先行VLF帯電磁波強度減少研究のための超小型衛星：Preludeのフライトモデル開発

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

統計的有意性が報告されている地震先行電離圏現象の物理機構の解明を目的とし、地震先行現象観測研究を低コストで実現するための超小型衛星の設計・開発・宇宙実証を目的とした地震先行現象検証超小型衛星PRELUDE (Precursory electric field observation CubeSat demonstrator)の打ち上げモデル（フライトモデル）の設計・開発を行う。この衛星は、VLF帯（超長波帯）電波の観測に特化した約10cm x 20cm x 30cm、10kgの超小型衛星であり、令和5年度はエンジニアリングモデルの検証およびフライトモデルの設計、開発を実施する。最終段階ではフライトモデル（システム試験後のロケット搭載モデル）の打上げ・運用・データ解析を行うことで先行現象が発生する物理機構の解明に取り組む。提案している衛星は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の革新的衛星技術実証プログラム4号機でのロケットに搭載が決定しており、JAXAに2024年度に納品する予定である。宇宙実証については、JAXAイプシロンロケットに搭載され、2年間の実証実験を行う予定である。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

ミッションデザインに基づき、実現性を確認するためのエンジニアリングモデル(EM)の設計修正を行わない、環境試験（振動試験）および宇宙環境でのシミュレーション（電力、熱、姿勢、通信）により衛星の設計の妥当性とフライトモデル設計・開発に向けた課題を洗い出した。また、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の革新的衛星技術実証機のチームとの打ち合わせを毎月行い、打ち上げロケットとのインターフェース調整と周波数調整を行った。調整によって変化した設計要求に基づき、エンジニアリングモデルの修正・検証とフライトモデルの設計と一部部品の製造を実施した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望
仏のDEMETER衛星のデータを用いて、過去の研究の追解析および電離圏変動解析の理論構築を実施している。これに基づき、PRELUDE衛星のミッション機器（伸展ブーム、電子放出機、データ処理装置）の設計・開発に生かしている。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

山崎政彦,2023,革新的衛星技術実証4号機ロケットに搭載する地震先行現象検知CubeSatのフライトモデルの開発,第十三回気象文化大賞

・学会・シンポジウム等での発表

山崎政彦, 鴨川仁, 岩田隆佑, 保坂勇人, 中泉健太郎, 谷口由奈,2023,地震先行電磁気現象検知衛星PRELUDE衛星の概要,第67回宇宙科学技術連合講演会, OS19-7 革新的衛星技術実証プログラム,3B05

田中勇, 山崎政彦, 鴨川仁,2023,CubeSat用3Uサイズハイブリッド型プラズマ・電場センサー,第67回宇宙科学技術連合講演会,1P15

鴨川仁, 山崎政彦, 保坂勇人, 本山真, 岩田隆佑, 中泉健太郎, 曾根凧紗,2023,地震先行電磁気現象検知衛星PRELUDE のミッション概要,第67回宇宙科学技術連合講演会, OS19-7 革新的衛星技術実証プログラム,3B06

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

山崎 政彦（日本大学理工学部）,岩田 隆佑（日本大学理工学部）,本山 真（日本大学理工学部）,保坂 隼人（日本大学理工学部）

他機関との共同研究の有無：有

鴨川 仁（静岡県立大学）,児玉 哲哉（宇宙航空研究開発機構）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：日本大学理工学部

電話：047-469-5429

e-mail：yamazaki.masahiko@nihon-u.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：山崎 政彦

所属：日本大学理工学部

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

北海道摩周周辺の火山活動と災害ポテンシャルに関する地球化学的観測研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

摩周付近での野外調査を行うことで、温泉の遊離ガスやアトサヌプリの噴気を採取し、化学組成やヘリウム同位体比等を分析する。そして2019年度地震研究所共同利用関連研究課題「北海道摩周周辺における火山熱水活動の地球化学的調査」（代表者：鹿児島渉悟）（2019-Y-火山7）や、2020年度から実施した地震研共同利用関連研究課題「北海道摩周周辺における火山熱水活動の変動に関する地球化学的調査」（代表者：鹿児島渉悟）（2020-KOB013）で得られた遊離ガス・噴気のデータや、摩周湖の観測結果（Igarashi et al., 1992, EPSL）などとの比較を行うことで、現在の摩周周辺における火山活動度について推定を行う。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

これまでの関連研究において、2019年度公募研究課題「北海道摩周周辺における火山熱水活動の地球化学的調査」（代表者：鹿児島渉悟）と2020年度からの公募研究課題「北海道摩周周辺における火山熱水活動の変動に関する地球化学的調査」（代表者：鹿児島渉悟）を通じて、アトサヌプリ・和琴温泉で2017年から2021年にかけて採取された試料に含まれる大気成分を補正したヘリウム同位体比($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比)は2020年11月を除きほぼ等しく、2017年に摩周湖の底層で観測された火山性成分を含むと考えられる流体（Kagoshima et al., 2019, Goldschmidt Abstracts）や、Rouilleau et al. (2015, Chemical Geology) が報告した十勝岳や雌阿寒岳における噴気に近い値を持つことが確認された。2020年11月時点のアトサヌプリの噴気に含まれる $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は他の時期と比較して低い値を持ち、一時的な熱水系状態の変動を検出した可能性がある。本研究期間においても同一サイトで試料を採取済みでありヘリウム同位体比等を測定するための準備を進めている。今後得られるデータをもとに、摩周周辺における熱水系状態・火山活動度について制約を行う計画である。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

北海道・摩周では、火山湖である摩周湖の底部において火山性物質を含むと考えられる流体の放出が確認されているほか、周辺の火山では活発な活動が観測されており、モニタリングによる中長期的な火山状態の把握および噴火活動のポテンシャル評価が重要な地域である。本研究の成果は、当該地域の火山や温泉で放出されるガスに含まれる、マントル起源物質の敏感なトレーサーであるヘリウム同位体などを測定し、熱水系の状態を推定するために有用なデータセットを提供するものである。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Nakajima, T., N. Takahata, H. Obata, T. Kagoshima and Y. Sano, 2024, An easier approach for helium isotope flux estimation in a submerged caldera, *Geochem. J.*, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Sano, Y., Kagoshima, T., Zhang, M. and N. Takahata, 2023, Gas geochemistry of caldera and stratovolcano in Japan, 日本地球惑星科学連合大会2023, SGC37-P06

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：火山：地球化学：噴気ガス・土壌ガス

概要：摩周周辺におけるガス試料の採取を実施した。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：北海道弟子屈町

調査・観測期間：2024/2/2-2024/2/4

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

鹿児島 渉悟（富山大学学術研究部理学系）

他機関との共同研究の有無：無

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：富山大学学術研究部理学系

電話：076-445-6577

e-mail：kagos@sci.u-toyama.ac.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：鹿児島 渉悟

所属：富山大学学術研究部理学系

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題（または観測項目）名：

歴史時代の地震活動解析に向けた有感記録の完全性・均質性の検討

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
ア. 史料の収集とデータベース化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 令和5年度の計画の概要：

史料には被害記述の他に被害を伴わない有感記録が残されていることがあり、史料中の有感記録は従来の被害記述に基づく歴史地震研究とは異なった側面から歴史時代の地震活動を復元できる可能性がある。一方でその定量的な議論には、近代計器観測と同様に記録の完全性・均質性に関する検討を要する。歴史資料に記述された有感記録は体感に基づくものであり、ノイズレベルには依存しない代わりに、一般に人間活動が低い（睡眠時の）夜間の方が活発な（覚醒時の）昼間に比べて少ない可能性が考えられる。また、その特性は公文書であるのか、商人が記した日記であるのかといった記録者の立場や個人の揺れに対する感度等に依拠する可能性がある。そこで本課題では、日記史料有感地震データベース（試作版）に集約されている史料中の有感記録データ等を対象としてSchuster検定を実施し、発生時の無作為性から史料中の有感記録の均質性・完全性について検討を行うとともに、有感記録を用いて歴史時代の地震活動を復元する際の留意点を整理する。また、国立国会図書館や各都道府県立図書館等において日記史料の収集作業を実施し、それらの史料中の有感記録に対しても検討を進める。

(7) 令和5年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

本課題では、日光東照宮社家による社務日誌（日光東照宮社務所編・刊『日光叢書社家御番所日記』全22冊、1931～1939・1970～1982として刊行）を対象として、有感記録の完全性・均質性に関する検討を行った。『日光社家御番所日記』（以下、日記）は、貞享二～明治三（1665～1870）年の日記が現存する。日記には、年中行事を中心とし奉幣・社参・修復・造営など東照宮の運営に関する多様な内容とともに、日々の天候も記載されている。日記中の記述から地震記事とその時刻を抽出し、揺れの程度を「大」、「中」、「小」に分類した。有感記録の発生時の無作為性による完全性の統計学的検討に関する手順は、石辺・他（2023、歴史地震）と同様である。

その結果、貞享2年3月19日（1685/04/02）から明治3年4月11日（1870/05/11）に至る200年弱の期間において、1200件程度の地震記事を抽出した。1日あたりの有感記録数として最も多かったのが、1703年元禄関東地震の発生日である元禄16年11月23日（1703/12/31）であり、六十余度、揺れを感じたと記録されている。また、史料記述から最も強い揺れを記録したと考えられる地震は、宝暦5年3月10日（1755/04/21）の日光付近を震源とした地震であり、詳細な被害が記録されている。これらの抽出された有感記録に対してSchuster検定を行った結果、揺れの程度が「大・中」の記録を用いた場合、「小」の記録を用いた場合、すべての記録を用いた場合のいずれにおいても、発生時が

無作為であったとした場合に偏りが偶然生じる確率が 10^{-10} を下回り、昼間に記録された有感記録数が統計学的に有意に夜間のそれに比べて多いことが示された。一方で揺れの程度が「大」のみの記録を用いた場合には、統計的に有意な発生時の偏りは認められなかった。

『真覚寺日記』における小さな揺れを含めた場合（石辺・他，2023，歴史地震）と同様に、本研究においても、昼間における有感記録数が夜間に比べ顕著に多い傾向が認められた。公務日記においても夜間の有感が漏れなく記録されていない可能性が高いことは、興味深い。これらの結果は、異なる日記間における有感記録数の比較、あるいは近年の計器観測による有感地震回数との比較においては、どの程度漏れなく有感が記録されているのか、慎重に検討する必要性を強く示唆する。特に昼夜間の有感記録回数に顕著な差が見られる史料に対しては、夜間の検知漏れを鑑みて議論するか、何らかの補正の必要があるものと思われる。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本課題を遂行することで、現在地震火山災害軽減研究の一環として収集・整理されている地震現象に関する史料中に記述された有感記録の均質性や完全性に関する検討手法の構築ならびに適用がなされる。これらの検討は今後、史料中の有感記録に基づく歴史時代の地震活動復元、その時空間的特徴ならびに変化に関する議論、ならびに近年の震度データベースとの比較を実施する上で必須である。

史料中の有感記録は、従来の被害分布に基づいた大地震の震源域推定やその類型化に対して新たな視点を取り入れることを可能にし、中小地震を含めた地震活動解析のための基礎データになるものと期待される。また（計器観測時代に発生した地震を含め、）歴史地震の中には実在が疑われる被害地震や、プレート間地震であったのか、プレート内地震であったのか不明な地震が存在する。さらに、歴史地震の規模が過大/過小評価されている可能性もある。これらを適切に類型化・評価することで、過去の地震発生履歴に基づき行われている長期評価など、将来の地震ハザード評価に資するデータになるものと期待される。今後は、近年の震度データとの比較において必要とされる補正方法の検討ならびにその適用を通じて、長期間の地震活動変化について論じる。

(8) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

石辺岳男・松浦律子・佐竹健治,2023,発生時の無作為（ランダム）性から探る史料中の有感記録の完全性,歴史地震,38,15-27,査読有,謝辞有
石辺岳男・石辺（五島）朋子・片桐昭彦・原田智也・中村亮一・室谷智子・佐竹健治,2024,気象災害であった可能性が高い1092年（寛治六年）の越後の大波,地震第2輯,76,233-250,<https://doi.org/10.4294/zisin.2022-20>,査読有,謝辞有
原田智也・西山昭仁・石辺岳男,2024,安政三年十月七日（1856年11月4日）関東の地震は立川断層帯で発生した地震ではなかった—多摩・入間地域の同時代史料に無い所沢・東村山・立川の大被害—,地震第2輯,76,251-285,<https://doi.org/10.4294/zisin.2022-21>,査読有,謝辞無
Ishibe, T., T. Terakawa, A. Hashima, M. Mochizuki, R.S. Matsu'ura,2024,Can the Regional 3D Stress Field according to the Wallace-Bott Hypothesis predict fault slip directions of future large earthquakes?,Earth Planets and Space,査読有

・学会・シンポジウム等での発表

石辺岳男・小川陽子・田中裕人・木内亮太・高浜勉・坂元一雄・西條裕介・古村 美津子・松浦律子,2023,震度分布データを用いた機械学習による震源推定の試み,日本地震学会2023年度秋季大会,S21-01
松浦律子・石辺岳男,2023,十年前に相対的静穏化が検出された北海道南東沖の地震活動度の現在の状態,日本地震学会2023年度秋季大会,S09-12
石辺岳男・寺川寿子・橋間昭徳・Thystere Matondo Bantidi・望月将志・松浦律子,2023,主要活断層帯を対象とした広域三次元応力場ならびに Wallace-Bott 仮説を用いた断層すべり角推定～断層形状の不確定性が推定に及ぼす影響について～,日本活断層学会2023年度秋季学術大会,O-15
西山昭仁・石辺岳男・片桐昭彦,2023,1666年寛文越後高田地震の被害状況の検討,第11回歴史地震史料研究会
石辺岳男・水野嶺・松浦律子・佐竹健治,2023,『日光社家御番所日記』に記録された有感地震の発生

時刻：有感記録の完全性ならびに地震活動の復元についての検討,第40回歴史地震研究会（小田原大会）,O-09

Mohammad Heidarzadeh, Aditya Riadi Gusman, Iyan E Mulia, Takeo Ishibe, Yuchen Wang,2023,Landslide tsunami hazards in Indonesia,Japan Geoscience Union Meeting 2023,HDS06-01

松浦律子・橋間昭徳・石辺岳男,2023,2011年5月から継続中の日本海東縁のETAS効果の消滅について, Japan Geoscience Union Meeting 2023,SSS10-11

(9) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

石辺 岳男（地震予知総合研究振興会地震調査研究センター）,松浦 律子（地震予知総合研究振興会地震調査研究センター）,古村 美津子（地震予知総合研究振興会地震調査研究センター）,赤塚 真弓（地震予知総合研究振興会地震調査研究センター）,田力 正好（地震予知総合研究振興会地震調査研究センター）,岩佐 幸治（地震予知総合研究振興会地震調査研究センター）

他機関との共同研究の有無：有

佐竹 健治（東京大学地震研究所・地震火山史料連携研究機構）,加納 靖之（東京大学地震研究所・地震火山史料連携研究機構）

(11) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地震予知総合研究振興会地震調査研究センター

電話：03-3295-1502

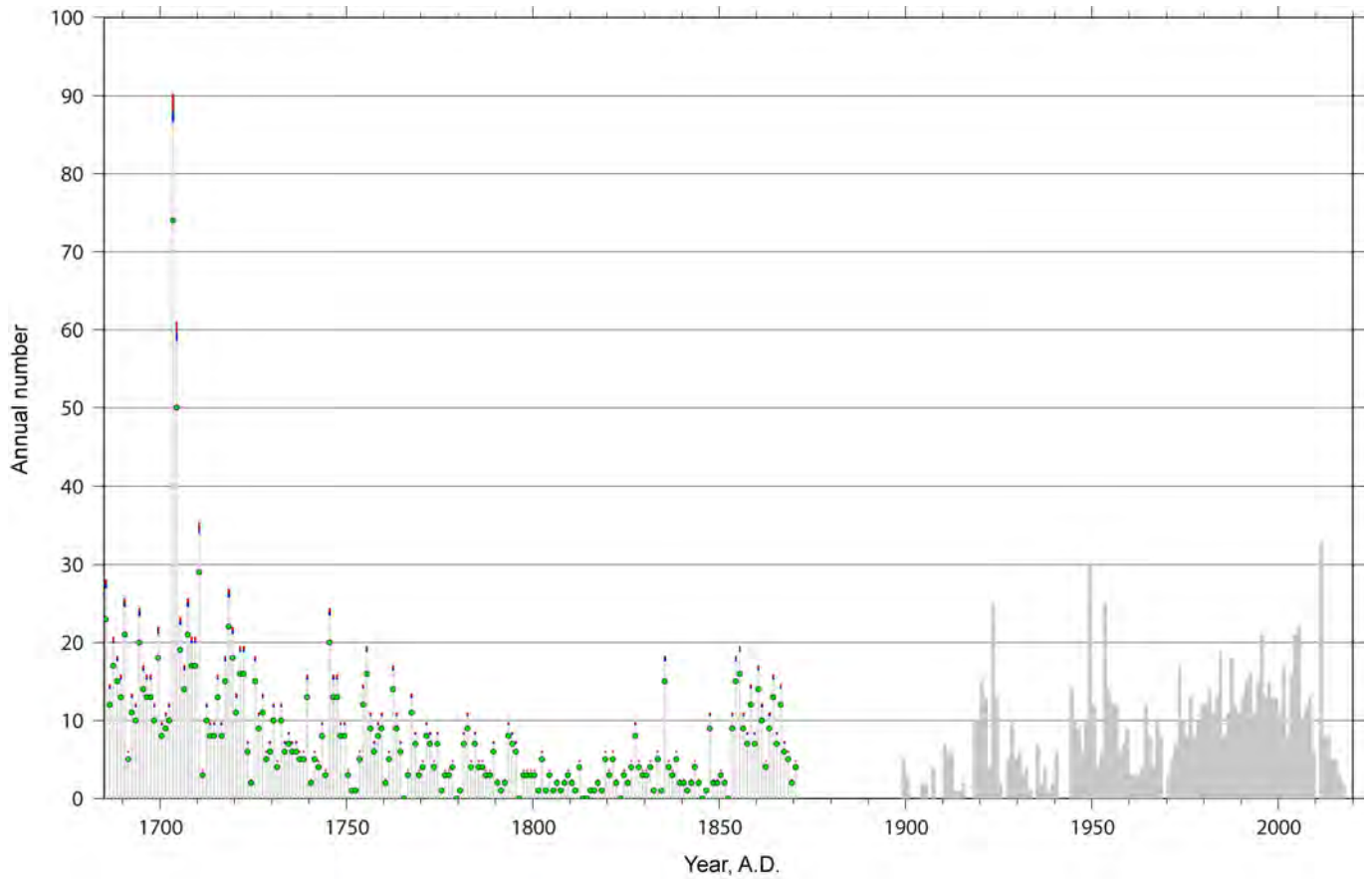
e-mail：ishibe@erc.adep.or.jp

URL：

(12) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：石辺 岳男

所属：地震予知総合研究振興会地震調査研究センター



『日光社家御番所日記』ならびに有感地震データベース（気象庁）による有感記録数の変遷

緑丸：『日光社家御番所日記』から抽出された有感数

棒グラフ：夜間の検知漏れから期待される実際の有感数

灰色棒グラフは気象庁震度データベースによる有感地震回数（震度2以上；足尾（1899-1925）；日光市中宮祠（旧）（1926-2009）；日光市中宮祠（旧2）（2009-2010）；日光市中宮祠（2010-））

(1) 実施機関名：

高知大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震動観測点観測環境の時間変化把握に向けた、解析手法の検討・開発

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(4) 関連研究分野との連携強化

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地震・火山噴火の予測および災害の軽減のために利用される基礎データである地震動観測点における観測状況の健全性を、時間変化を追って把握できる手法の開発を行う。本課題によって観測状況の把握が可能となれば、① 観測点における観測の維持・管理に携わる人的資産の効率的な運用、② 周辺における工事や構造物の建築等によりやむなく観測点の休止・廃止が必要となった場合に同等の観測状況を持つ候補地選定、といった観測点および観測網、付随する施設を維持するために必要な判断基準作成が可能となる。

観測状況把握の重要性が増す一方、観測に携わる人的資産の確保は、多くの機関において大きな負担となっている。これに伴い、観測点の大半が無人となっていることから、観測の質を担保するための観測点における観測状態の監視・把握を遠隔から可能とするシステム開発と導入は必要不可欠である。観測点における観測状態の変化には、主に観測機器の故障や不調と、観測機器の設置状況の変化が含まれる。観測機器が同時に不調となるとは考えづらいため、複数の異なる手法で観測状況を監視できれば、状況の切り分けが可能となる。また、ごく浅層地盤における速度構造変化に注目することで観測機器の設置状況の変化の把握が可能となると考えられる。高知県を含む四国南部では、降り始めからの積算雨量が1000mmを越すことも珍しくない。あわせて大量の降雨は、急傾斜地が多く存在する地域では土砂災害にも繋がる。このことから雨水がごく浅層地盤からより深部へ浸透することによって、周辺地盤に影響を与えていると考えられる。したがって、観測機器の設置状況の変化を地震動観測点下の地震波速度構造の時間変化として抽出できれば、観測状況を把握することが可能となる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題では、ごく浅層地盤における地震波速度構造変化抽出のための常時微動アレイを観測点のごく近傍に連続稼働させると共に、観測記録の自己相関関数の時間変化と共に比較することで、対象深度の異なる観測状態の変化を抽出する観測・解析手法の開発を目指す。

平成31年（令和元年）度：

雨水浸透に伴うごく浅層地盤速度構造の変化抽出のため、微動アレイ観測を常時実施するシステムの

設置を行う。

平成32年（令和2年）度：

四国内に設置してある地震動観測点における過去の波形記録から気象擾乱（大量降雨、気圧変動）や地盤変動に起因する変動現象の抽出を行う。あわせて常時微動アレイの記録を準リアルタイムで解析し、ごく浅層地盤速度構造の変化を抽出する解析手法の開発を行う。

平成33年（令和3年）度：

四国内に設置した地震動観測点の過去の波形記録から気象擾乱（大量降雨、気圧変動）や地盤変動に起因する変動現象の抽出を継続する。あわせて常時微動アレイの記録にごく浅層地盤速度構造の変化を抽出する解析手法を適用する。

平成34年（令和4年）度：

常時微動アレイの運用と変動抽出の解析を継続する。

平成35年（令和5年）度：

課題の取りまとめと実運用可能なシステムへの実装を提言する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和3年度に高知大学 土居地震観測室内と周辺に設置した、3成分広帯域地震計と常時微動アレイの運用を継続した。令和4年度と同様に常時推定している位相速度の時間変化、およびHVSR解析による境界面変動から、気象変動によるごく浅層地盤速度構造の変化が見られた。HVSR解析で見られる境界面変動は、概ね地盤を構成する岩石のS波速度の変動に対応していることから、昨年度までの成果と合わせて、3成分観測記録を用いたHVSR解析を通常の地震動観測に組み合わせることで地震計を設置している地盤状況のモニタリングとして機能させることが可能であるとわかった。

本課題では、実験のため上限500Hzサンプリングでの観測と微動アレイ解析、HVSR解析を行ってきたが、半径2m以内というごく局地的な範囲であっても地震動として観測可能なコヒーレントな信号は概ね20Hzまでの範囲に限定される結果を得た。一般に地震動観測点では、100Hz以上のデータサンプリングと3成分観測が行われているので、地震計を設置している地盤状況にもよるが100Hzデータサンプリングの時間分解能であれば、観測点下数10m以内の地盤状況変化を抽出可能であると考えられる。

加えて、観測成分に余裕があるような状況であれば、複数の上下動1成分のジオフォンを追加することで微動アレイ解析も併せて実施することができ、より精度の高い観測環境変動の検出手法としての利用が可能となる。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

安価な上下動1成分ジオフォンと既設地震動観測点の観測記録を組み合わせ、観測点の設置環境変動をモニタリングできる観測、解析手法を提案した。追加したジオフォンを用いた微動アレイ観測で観測点ごく近傍のS波速度構造を推定しつつ、既設観測点の記録にHVSR解析を適用させることで、既設観測点に見られる気象等外乱による時間変動とごく浅層S波速度構造の変動とを対応させた。

これにより、既設観測に一手間解析を加えることで、安価な観測点設置環境のモニタリング手法として運用できることを示した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

高知大学工学部附属 高知地震観測所,大久保慎人 (高知大学工学部附属 高知地震観測所)
他機関との共同研究の有無：有
産業技術総合研究所,防災科学技術研究所,など5名程度

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：工学部附属 高知地震観測所
電話：
e-mail：okubo@kochi-u.ac.jp
URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：大久保慎人
所属：工学部附属 高知地震観測所

(1) 実施機関名：

高知大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震波形データ流通のための、新WIN伝送プロトコルの検討・開発

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) 関連研究分野との連携強化

(5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

現在、日本（特に大学間）では、地震波形記録を含む各種観測網から得られるデータを即時的に流通させるためにWINシステムの伝送プロトコルを利用している。WINシステムは1990年代のコンピュータ（サーバ、ワークステーションも含む）の処理速度が速くなく、データ伝送のための回線容量も大きくなく、データ伝送速度も高速ではない時代に、ある程度のデータ量の圧縮を行い、多項目の観測データの流通を準リアルタイムで可能とする仕組みとして確立した。そのため、WIN自体のデータフォーマットはごくわずかな時刻情報のみを付与した簡便な形式で、拡張性は乏しいものである。このような設計は、1990年代のワークステーションの数千倍の処理能力と精細な動画をリアルタイム再生可能な通信速度を誰もがスマートフォンとして持ち得る、現在の通信事情にはそぐわない。加えて、WINシステムは、かつての日本独自規格であった「ケータイ」と同様に日本国内のみで使われる仕様・システムとなってしまっており、グローバルスタンダードとなり得ていない。しかしながら、観測点から自律的に多種多様なデータを準リアルタイムで伝送可能な仕組みは、他の波形記録フォーマットSEED (miniSEED) などを用いる仕組みには無い特徴である。自律的なデータ伝送機器として、現在IoT (Internet of Things) が取り上げられており、観測機器がこれに当たると考えれば、データ伝送のためのプロトコル（手順）のみが時代遅れとなっていると言える。したがって、新たなデータ伝送プロトコルの開発は急務である。本課題では、WIN伝送プロトコルが現状抱えている問題点を洗い出し、グローバルスタンダードとなりうる伝送プロトコルへの発展を視野に入れ、次世代仕様のWIN伝送プロトコルの策定・実装を目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題は、5-(3)-アにある、各種観測網から得られるデータを即時的に流通させるシステムの運用に必要な、大容量かつ多項目の観測データを確実に、かつ効率的に流通させるための通信方式の検討・開発を行う。通信方式の中核をなす、伝送プロトコルを策定し、実装するために必要な検討・開発を担う。

平成31年（令和元年）度：

現状のWINシステムおよびWIN伝送プロトコルに関する問題点の洗い出しを行う。
問題点の洗い出しと開発に向け、通信実験テストベッドとなる小規模通信網を構築する。

平成32年（令和2年）度：

新たなWIN伝送プロトコルの策定に向けプロトタイプの作成と仮実装を試みる。

平成33年（令和3年）度：

通信実験テストベッドと多チャンネル・時間分解能が高いデータを用いた実証実験を実施する。

平成34年（令和4年）度：

時期、時間帯を限定し、SINET、JGN等の大規模通信網を用いた実証実験を実施する。

平成35年（令和5年）度：

課題の取りまとめと新プロトコルを実運用可能なシステムへの実装を提言する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和5年度では、WIN波形データ伝送プロトコル(R5.10-Current)の内容を以下のとおりに整理・策定を行なった。

初めに、(1) 広帯域通信基盤を利用した大容量データ伝送を、データセンタ相互間、およびデータセンタ-拠点間で行うため、通信のセキュリティ確保とリアルタイム伝送以外のデータ補完方式を用途ごとに分離するためのEmbedded VPN 層の確立を行う。ここでは、(1. 1) 送受信プログラムで利用するVPN種別を問い合わせ、認証し、(1. 2) VPN確立のための接続認証を行い、

(1. 3) VPN接続の確立を行う。この一連のプロトコルにより、以下の手順で利用する、送受信対象、経路を一意に決定でき、セキュアなデータ共有が可能となる。次に(2) 複数のデータフォーマットや共有・非共有など、送受信を行うデータの属性に応じた伝送を行うためのData Stream Channel 層の確立を行う。ここでは、(2. 1) 送受信するData Formatの種別を送受信相互で問い合わせ、

(2. 2) 認証することで、それぞれの送受信プログラムが許せば、WIN（次期WINデータ伝送プロトコルを含む）のみならずSEED、GPS streamなど様々なデータの伝送を可能とする。認証した伝送データ種別に応じてあらかじめ予約された、もしくはプログラム間で問い合わせ・認証したネットワークPORTの情報を交換すること(2. 3) で、データが伝送されるData Stream Channel 層を限定することができる。この際、同一フォーマットデータで、異なるData Stream Channel 層を利用することを許すことで、共有・非共有、観測網種別の分離（例えば、地震と火山の研究対象による区別、地震計と雨量など同時に利用されない観測による区別）が可能となる。最後に(3) 設定したData Stream Channel 層へのデータ伝送を行う。この際、(3. 1) Data Format 種別による送信プロセスの起動を行い、送信プロセスは受信プロセスに送信可否の問い合わせを行う。(3. 2) 受信プロセスが受け入れ可能となった状態で、送信プロセスへ受信可の応答を返す。以上の確認が取れた場合のみ、新しく策定するWIN伝送フォーマットに従った、データ送信が開始される。以上全ての問い合わせ、認証のプロセスが不可となった場合には、受信側プロセスは従来のWIN伝送を受け入れる（図. 1 参照）。

また、WIN波形データ伝送プロトコル(R5.10-Current)を実装・運用するため、WIN波形データフォーマットにも手を加える必要がある。現状のWIN波形データフォーマットは、伝送帯域が貧弱で観測網規模が小規模であった時代に多数の波形データ効率よく伝送するために、よく考えられたフォーマットである。1990年代ではほぼ回線帯域（Mbps）を占有でき、伝送遅延も最小限に保証された回線を利用できる状況で波形データの伝送が可能であった。一方、今日では超広帯域（100Gbps）な通信が利用可能であるが、一般利用・多分野利用と共用するため、大幅な伝送遅延が生じるようになった。そのような状況を踏まえ、波形データを準リアルタイムで、かつ大幅な欠測が生じないようにするためには、伝送する波形データフォーマットにも工夫が必要となる。本課題で、伝送プロトコルの策定を進めた結果を踏まえ、以下の拡張がWIN 波形データフォーマットに取り込まれることを要望する。現在時刻情報とサンプリング周波数、観測固有のWINIDのみのヘッダ部分には、[Req.DT.1] 伝送プロトコル(2. 1)に必要なデータ種別に関する情報フィールドの追加が必要である。この情報フィールドの追加により、新たなWIN波形データフォーマットとレガシーな波形データフォーマットを共存させることができる。また、世界標準になりつつあるSEEDやGNSSに用いられるBINEX、監視映像などの映像ストリームなどを将来取り込めるようにするべきである。加えて、世界標準化や多国間でのデータ共有に向けた取り組みとして、上記時刻情報が、どの標準時のものかを明らかにする必要がある。

ある。そのため、[Req.DT.2] 時刻情報にタイムゾーン情報を持たせる情報フィールドを追加する必要がある。2011年東北地方太平洋沖地震の際には、観測点および通信網の被災によって生じた、欠測を埋めるための再送要求および遅延による再送データの多重化によって、その後の通信網に輻輳が生じた。このような特定の遅延データパケットにより即時性が必要なデータの通信帯域を占有しないよう、[Req.DT.3] データパケットの有効期限を保持させる。これにより、ある程度の波形データの再送要求による回線輻輳を防ぐ効果が見込める。また、複数経路を経由した波形データや即時利用のみを許すような秘匿データも取り扱えるようになる。さらに即時利用を推進するためには、現状1秒毎のデータサイズで伝送される波形群では不十分であるため、WIN32フォーマットで策定されているような0.1秒毎のデータサイズも共用させることも考慮すべきである。そのため、データの時間サイズを規定し、判別するための[Req. DT.4] データ部のフォーマットを規定する情報フィールドを追加する。また、波形データ部にもネットワーク経路上のデータ破損に対応できるよう、データ部に単位時間観測データ群に対してチェックサムを追加する情報フィールドを設ける。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

計画期間中の成果を取りまとめ、実運用に向けた実装可能な伝送プロトコルとして提言を行った。一つのアプリケーションとしての実装は行っていないが、プロトコル（手順）レベルでの実施・検証は行っており、次期計画での実装を期待する。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望
次世代WIN伝送プロトコルの策定とWIN波形データに必要な追加・修正項目の整理を行なった。新しいWIN波形処理プログラムが準備する際には参考にできると考えられる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

大久保 慎人,2023,WIN波形データ伝送プロトコルの策定-世界標準規格の取り込み-,日本地震学会2023年度秋季大会,S02-P02

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

高知大学工学部附属 高知地震観測所,大久保慎人（高知大学工学部附属 高知地震観測所）
他機関との共同研究の有無：有
東京大学地震研究所,北海道大学,気象庁気象大学校,地震予知総合研究振興会,など5名程度

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：工学部附属 高知地震観測所
電話：
e-mail：okubo@kochi-u.ac.jp
URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：大久保慎人
所属：工学部附属 高知地震観測所

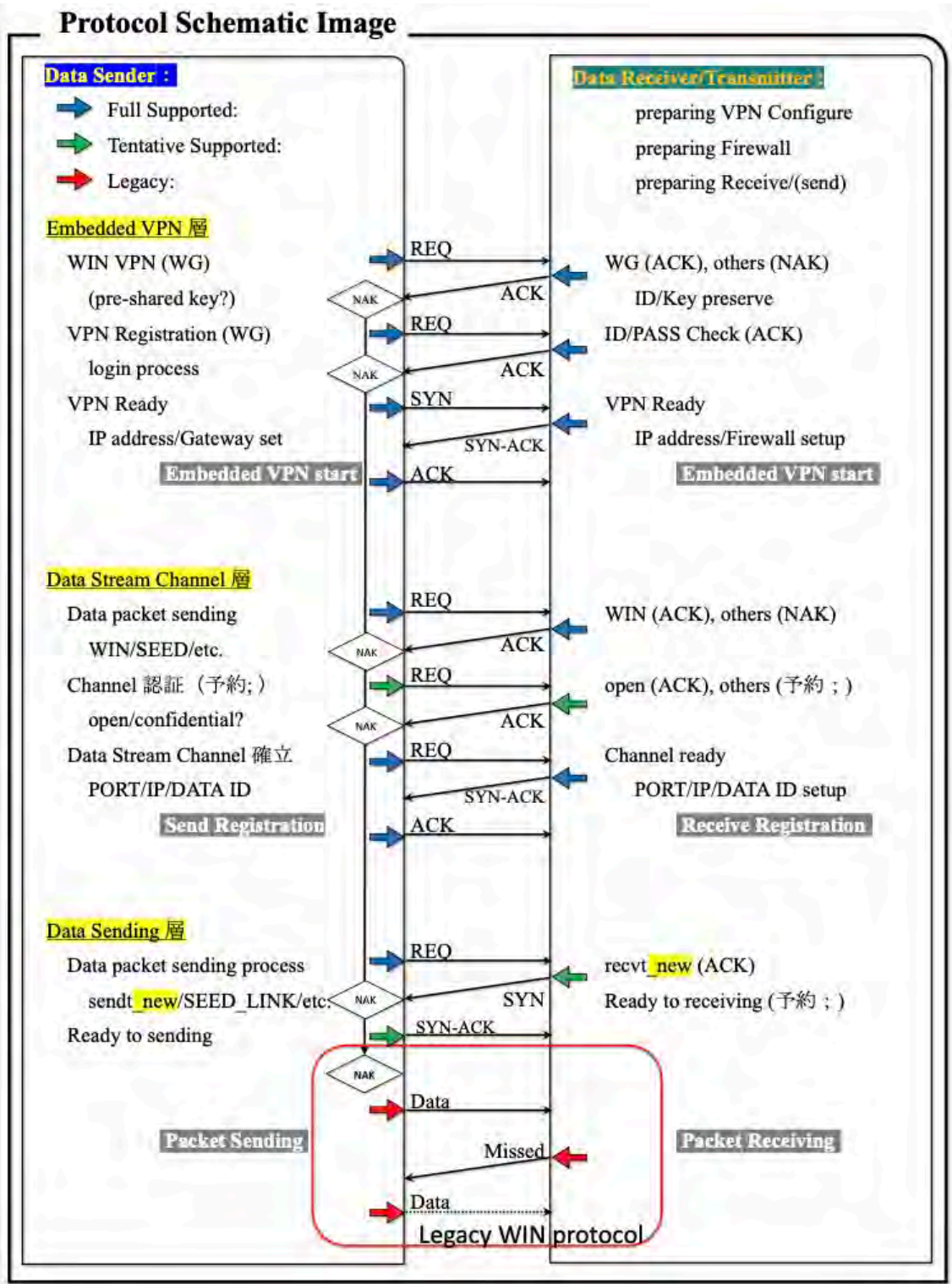


図. 1 WINデータ伝送プロトコル (手順)
WIN波形伝送を行うための手順概要

(1) 実施機関名：

京都大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地殻活動データの同化による沈み込みプレート境界面すべり予測に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

イ. 地震断層滑りのモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

大地震の発生予測へとつながる地震サイクルシミュレーションを行うにあたっては、摩擦構成則に現れる摩擦パラメータやシミュレーションの変数をどのように設定するかが重要である。本課題では、主にスロースリップイベント（SSE）を対象として、摩擦パラメータやシミュレーション変数を推定するためのデータ同化手法を開発し、測地データに適用する。さらに、この結果を基にSSEの発生予測を試行する。また、地震活動・地殻変動データの統合的同化手法、機械学習とデータ同化を組み合わせた手法等のより高度な手法の開発や地震のような「硬い」系へのデータ同化の適用可能性についての検討を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

既に開発されているEnKFやアジョイント法などのデータ同化手法を豊後水道や八重山等のSSEに適用し、推定された摩擦パラメータとシミュレーション変数の初期値に基づく予測実験を実施する。地震活動・地殻変動データの統合的同化手法を開発する。EnKFとアジョイント法を融合したハイブリッ

ドデータ同化法や機械学習とデータ同化を組み合わせた手法等のより高度な手法の開発を行い、SSEに適用する。データ同化手法を地震のような「硬い」系に適用する上での問題点についての検討を行う。データ同化で観測データとして用いるために、八重山における大学独自のGNSS観測を継続する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

(A) アンサンブルカルマンフィルタに基づくスロースリップのデータ同化 ～ 初期アンサンブルの検討

我々はこれまで長期的スロースリップ(L-SSE)を対象に、アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)に基づくデータ同化を適用し、地殻変動データから断層面上の摩擦特性を推定する取り組みを行ってきた。南海トラフの豊後水道で発生するL-SSEは、1985年以降現在までに4回のイベントがGNSS地殻変動データによって捉えられており、イベント毎に異なるすべり分布や(Seshimo & Yoshioka, 2022)、他セグメントへのすべりの伝播(Takagi+, 2019)などの、複雑なすべりの挙動が明らかになっている。EnKFを行う際には豊後水道だけでなく他の領域との相互作用を考慮するモデルにおいて、初期アンサンブルとして断層面上の摩擦パラメタをうまく与えることが必要であると考えられる。そこで我々はL-SSEのセグメント化が摩擦特性不均質に起因するとの考えのもと、観測されるL-SSEのセグメントサイズ・発生間隔やすべり量をもつSSEがどのような摩擦パラメタ分布により生じるかをフォワード計算により調べてきた。昨年度は新たに、一様な均質断層であっても、走向方向に長い断層面では自己組織化される歪みの不均質によりL-SSEのセグメント化・L-SSEの伝播が起きることを見出した(大島, 2023)。またL-SSEのサイズは震源核形成サイズ h^* (Ruina, 1983; Rice, 1993)により決まり、セグメント数は h^* に反比例することを数値実験により示した。本年度は大島(2023)の結果をもとに、均質平面断層面上で起こるSSEセグメンテーションの性質を詳細に調べた。その結果、SSEのセグメント数は概ね h^* に反比例するが、摩擦パラメタの比 a/b 、有効法線応力 σ にも依存し、またL-SSEの伝播方向は摩擦パラメタの組み合わせによって双方向や単方向など様々な向きをとることがわかった。これらL-SSEセグメントのサイズおよび個数、伝播方向は、L-SSE以浅の地震発生領域の固着状態にも依存し、また近隣で地震が発生するなど外部から強い応力擾乱を受けると変化する(図1)。EnKFの適用時には、これら周囲の実際の状況を反映したモデルが必要である。

(B) アンサンブルカルマンフィルタに基づく大地震後の余効変動のデータ同化

昨年度に引き続き、iterative ensemble smootherとensemble transform Kalman filterを用いてパラメタとその不確実性の空間分布を推定する手法の開発を行った。昨年度と比較して、手法の定式化を変更し、より良い推定を行えるようにした。この手法の性能を評価するために、余効変動の物理モデルのパラメタ(プレート境界の摩擦パラメタ、マンツルの粘性率、地震時の応力変化等の空間分布)とその不確実性を推定する数値実験を行った。本手法の利点として、未知パラメタが多数ある場合にも適用可能であることが挙げられる。数値実験により、7000個程度の未知パラメタをリーズナブルな計算コストで推定できることを確認した。

(C) 豊後水道で2010年に発生した長期的SSEを対象に、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた摩擦特性推定手法と断層すべりの短期推移予測手法を開発した。同地域の断層モデルとして、円形パッチでSSE発生域を模したHirahara and Nishikiori (2019)を用いた(図2左)。円形パッチ内外では摩擦特性を一様と仮定し、それぞれの摩擦特性をGNSSデータから推定した。まず、SSE全期間を含む2008.5-2011.5年の地殻変動データを同化すると、データに整合的な摩擦特性が推定された。さらに、現在進行形で発生しているSSEの短期的な推移予測の性能を評価するために、同化するデータの期間を0.5年から3年へと段階的に変化させてデータ同化を実施し、その後のSSEの推移予測を計算した。その結果、断層すべり速度が最大値に達する前の地殻変動データのみでは、その後の推移として高速すべりが予測されるのに対し、断層すべり速度が最大となって以後のデータも併せて同化するとSSEのようなゆっくりとした断層すべりが予測された(図2中)。一方で、SSEが発生するという摩擦特性の事前情報をデータ同化に組み込むと、すべりが最大に達する以前のデータのみを用いてもゆっくりとしたすべりが予測されるという結果になった(図2右)。

(D) 物理深層学習(PINN)を用いた断層すべりモニタリング手法の開発

観測データとモデルの融合による断層すべりモニタリングの新たな方法として、深層学習を用いた物

理方程式の求解手法であるPhysics-Informed Neural Networks (PINN) を用いた断層すべりモニタリング手法を開発した。PINNは初期・境界条件と偏微分方程式を損失関数として取り込み、損失関数を最小化するように学習させることでニューラルネットワーク (NN) を用いて偏微分方程式の解を近似する手法である。PINNでは偏微分方程式の求解という順問題に加え、データとNNの出力の残差を損失関数に加えることで、摩擦特性のようなパラメータを推定する逆問題にも応用が可能である。PINNを用いた断層すべりモニタリング手法に向けて、次元断層すべりモデルであるばねブロックモデルを用いて、(a) SSEを計算する順問題、(b) 摩擦特性の推定を試みる逆問題、さらに(c) 進行中のSSEのすべりの推移予測の試行、を試みた。(a)において、PINNによる断層すべりの数値計算結果が、従来の数値積分による断層すべりの結果と相対誤差10-1程度で一致していることを確認した。(b)について、図3にPINNによる計算結果と、NNの学習に応じた摩擦特性の推定結果を示す。(擬似)観測データの情報を損失関数に加えることで、摩擦特性を正しく推定できていることが分かる。さらに、(c)では観測データの前半部分のみを用いた場合の、摩擦特性の推定とその後のSSEの推移予測を試行した。図4に断層すべりの時系列の例を、図5にNNの初期値を変えて試行した場合の摩擦特性の推定結果のヒストグラムを示す。すべり速度が最大に達する以前の観測データしか用いていない場合(図4左中、図5(a)(b)の400日、500日の例)には、NNの初期値に依存して摩擦特性の推定・すべりの予測ともに成功する場合と失敗する場合が存在したのに対し、最大すべり速度以後(図4右、図5(c)の600日の場合)のデータを用いると摩擦特性の推定やデータが得られていない期間のすべりの推移予測が正しく行えることを確認した。

(E) 応力場空間分布の推定手法の開発

地殻活動モニタリングとその予測においては、GNSSなどのいわゆる地殻変動データを主に用いる。しかしこの種のデータは地表近傍でしか得られないため、地下すべりの時空間発展の推定精度および分解能には限界がある。これを補うために地殻変動以外の他のデータ、例えば地震波データから得られる応力情報を用いることが考えられる。

以前、P波初動極性(押し引き)から直接応力場の空間パターンを推定する手法を開発した(Iwata, 2018, JGR)。手法の特徴は解析対象領域を先験的に分割することなく応力場推定を行う点にある。推定には主応力軸の向きが滑らかに変化する(空間平滑化)制約を課し、平滑化制約の強さも同時に推定する階層ベイズモデルを用いている。

上記手法の改良として、推定の空間解像度を上げることを試みた。以前の手法では、滑らかな応力場(主応力軸の向き)の空間パターンを表現するために節点間隔5kmの3次のB-splineを用いている。節点間隔を短くすれば空間解像度を上げることは出来るが、スプラインの節点間隔は解析領域全体で一定とすることが多く、単純に節点間隔を短くすることは計算負荷の面で困難である。データの生じる地点、即ち震央の空間密度に応じてスプライン密度を変化させることも考えられるが具体的にどうするかは単純ではない。

これに対する方策としてドロネー三角形分割に基づく線形スプラインを用いることを試みた。震央を頂点とする三角形で解析領域を空間分割し(図6)、各三角形内で応力を表すパラメータが線形かつ滑らかに変化するものとする。これにより、データ(震央)の密度に応じて節点密度を変化させる自然な表現が可能となる。

この改良手法により、Iwata(2018)で解析した2000年鳥取県西部地震の余震データから同地震の余震域の応力場空間パターンを(再)推定した。大局的な応力場空間パターンは概ね同じであるが改良手法では方位角の細かい空間変動がより明確となり、推定の空間解像度が上がったことが示された。特に本震震央付近の断層をまたいだ応力場の差異が顕著になった本震震央より南側領域を拡大したものを図7に示す。

2000年鳥取県西部地震については本震震央の南側に(比較的)大きな滑りが生じたことが地震波・地殻変動データから示されている。こういった滑り領域の端では断層を挟んで圧縮場と伸張場が生じる。鳥取県西部地震の断層運動は左ずれであり、背景応力場が(概ね)東西圧縮であることと合わせると、滑り領域南端では断層西側が伸張場、東側が圧縮場となり、最大主応力(σ_1)軸が水平面内においてそれぞれ反時計回り、時計回りに回転されることが力学的に期待される。実際、Iwata(2018)の結果において、その期待に合致する応力の空間的差異を得ることが出来た(図7右)。その一方で同様のことが起きるはずの滑り領域北端では、はっきりとした応力の空間変動が得られなかった。しかし、改良手法による結果では力学的期待(断層西側で伸張場となり σ_1 軸が時計回りに回転、断層東端では圧縮場となり σ_1 軸が反時計回りに回転)と合致するような様相が見て取れる。これらのことから改良

手法がより詳細な応力空間パターン推定に有効であることが示された。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

(A) アンサンブルカルマンフィルタに基づくスロースリップのデータ同化

断層すべりの予測を目標として、地震発生域深部で発生する長期的スロースリップ(L-SSE)を対象に、アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)に基づくデータ同化によって断層の摩擦特性を推定する取り組みを行ってきた。これまでに数値実験により EnKF の有効性を示しており(Hirahara & Nishikiori, 2019)、本計画では豊後水道 L-SSE を対象として実データへ適用した(藤田, 2019)。2009-2011 年の GNSS 地表観測データから推定された断層面におけるすべり速度(横井, 2019)を観測データとし、速度状態依存摩擦則に従う孤立した一様円形パッチを仮定した L-SSE モデルと同化した。その結果、1回の L-SSE 発生を含むこの期間の観測を概ね説明可能なモデルを得ることに成功した。また同化の実現には初期アンサンブルの適切な設定が重要であることを示し、有効な設定方法として予めグリッドサーチによりパラメタ範囲を限定した上で初期アンサンブル分布を選択する手法を提案した(藤田, 2020)。更に、L-SSE 発生期間中において、そのイベントの終了する時期の予測といった数か月程度の短期的な予測可能性を示すことができた(図8)。

一方、観測されている準周期的な繰り返しやイベント毎のすべり分布の変化(Seshimo & Yoshioka, 2022)といった豊後水道 L-SSE の複雑さは、孤立一様パッチモデルでは表現することができない。断層すべりの予測には、同化モデルをさらに高度化(精密化)する必要がある。南海トラフ沿いでは日向灘沖から四国沖へと L-SSE が順々に発生する様子が観察されており(Takagi+, 2019)、複数セグメント間の相互作用が L-SSE 発生の複雑さに大きく寄与していると考えられる。領域を広げ、日向灘沖・四国沖の L-SSE を対象としたデータ同化を行う必要がある。

しかしながら L-SSE セグメント化の物理メカニズムは必ずしも明らかにはなっていない。適切な初期アンサンブル設定には、まずメカニズムの理解を進める必要がある。セグメント化の要因として、摩擦特性不均質や断層面形状の効果が指摘されてきたが(Liu, 2014; Li et al., 2018)、走向方向の不均質がなくとも、走向方向に長い断層では L-SSE のセグメント化・L-SSE の伝播が起こることを数値計算により見出した(大島, 2023; 図9)。すべりの発達に伴い自己組織化された応力不均質がセグメント化の原因と考えられる。一定速度载荷の下で L-SSE の発生場所は固定され、その領域サイズは主に断層幅と摩擦特性に依存する臨界角形成サイズとの比で決まる。ただし近隣の地震発生領域の固着の強さや、地震発生等による大きな応力擾乱によって、L-SSE 発生場所・サイズ・発生間隔が変化する様子も数値実験で観察されており、これらの観測可能な量は均質断層モデルにおいて比較的容易に変化するものである。今後実際の L-SSE 発生場の状況を取り入れた場合に、これら観測量がどの程度変化するのか、更なる研究が必要である。

(B) 大地震後の余効変動のデータ同化

余効すべりと粘弾性緩和を組み合わせた余効変動の物理モデルのパラメータとその不確実性を GNSS による余効変動の観測データから手法を開発した。この手法を 2011 年東北沖地震の余効変動に適用した。この手法は計算コストが高いため、未知パラメータ数が比較的少数のモデルにしか適用できなかった。そこで、多数の未知パラメータを持つモデルに適用可能な手法の開発を行い、その手法のテストを行った。

(C) データ同化・物理深層学習に基づく摩擦特性推定・断層すべり予測手法の開発

地表面で観測された GNSS による地殻変動データから、直接プレート境界面の摩擦特性を推定し、断層すべりの推移予測するデータ同化手法を開発した。アジョイント法については、プログラムの整備により計算時間を短縮し、2003 年十勝沖地震の余効すべり時に得られた GNSS データに適用した。地震後 15 日間に得られた 1 日ごとの GNSS データの同化により摩擦特性の空間分布を推定し、得られた摩擦特性により、その後 15 日間の地殻変動の予測を行い、観測された GNSS 時系列が再現可能であることを検証した(Kano et al. 2020)。さらに、より正確な余効変動の現状把握と推移予測に向けて、地震発生直後の高時間分解能な地殻変動データが重要であることから、データ処理として高サンプリングの GNSS データを Itoh et al. (2021) の手法に基づいて前処理し、地震後 5 日間の 6 時間間隔の変位時系列データを得た。このデータに対して、マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)を用いて摩擦特性の空間分布を推定した。得られた摩擦特性の空間分布で観測変位の時系列データは説明可能であるが、このためには摩擦特性が空間的に不均質である必要があることが分かった。また、2010 年に豊後

水道で発生した長期的SSEのGNSSデータにMCMCを適用し、地殻変動データの再現とSSEの短期推移予測を計算した。その結果、SSEが発生するという摩擦特性の事前情報の有無によって、予測される断層すべりの様式が大きく異なることが分かった。

さらに、データ同化と異なるアプローチとして物理深層学習（PINN）による手法を検討した。ばねブロックモデルを用いて模擬されるSSEを対象に、PINNが断層すべりの数値計算、摩擦特性の推定、断層すべりの短期推移予測に有効であることを確認した。今後、より現実的な問題設定への拡張を通してデータ同化による結果との比較が期待される。

(D) データ同化のための断層すべり推定に関する研究

データ同化研究で使用するために、琉球海溝南西部八重山諸島近傍においてGNSS観測を継続した。感染症流行の影響で一部データが得られていない期間もあるが、およそ6ヶ月周期で繰り返し発生するSSEを継続的に観測することができた。

このデータを用いて複数のSSEの解析を行いすべりの時空間分布を推定した。Kano et al. (2018) は2010-2013年に発生したSSEに伴う断層すべり速度の時間発展の振る舞いがSSE毎に異なることを示していたが、解析期間を拡張し、2013年以降に整備された新規のGNSS観測点のデータを加えることで、計16回のSSEによるすべりの時空間発展を推定した。すべりが推定された位置や再来間隔については先行研究と整合的で、SSEがプレート境界面の同じ場所で繰り返し発生していることを示唆している。この地域のSSEのすべり速度の加減速の時間変化の様式は2通りあることがKano et al. (2018)により報告されているが、新たにゆっくりと加速してすべり速度が最大になった後ゆっくりと減速するすべり様式が見つかった。このパターンの16回のSSEのうち7回発生しており、摩擦特性の時間変化を反映している可能性がある。

一方、定常的な変位速度の解析から八重山諸島周辺における巨大地震発生の可能性について検討した。その結果、八重山諸島の南側のプレート境界においてすべり欠損が17-47 mm/yrであることが分かった。この領域はSSE発生域の浅部に相補的に位置し、プレート境界の摩擦特性などの物理的性質が深さ変化していることを示唆している。同地域では1771年に津波被害をもたらす地震が発生しているが、以降250年間同様のすべり欠損レートで歪を蓄積していると仮定するとMw 7.5に相当するエネルギーが蓄積されている。一方Nakamura (2009)で1771年の津波の波源域とされているプレート境界浅部のすべり欠損は陸域のGNSS観測からでは解明できないため、巨大地震発生ポテンシャルのより正確な評価には今後の海域観測の継続的な実施と観測点の充実が期待される。

(E) 地殻活動のモニタリングおよび予測の精度向上のための応力場の推定手法の開発・高度化

「今年度の成果の概要」(E)の冒頭に示した通り、地殻活動モニタリングとその予測の精度向上に資することを目的として、応力場に関する推定手法の開発・高度化を行ってきた。

メカニズム解に基づく手法に関連しては、通常は推定誤差の大きなメカニズム解は解析から除外してしまうが、推定誤差を正しく見積もることが出来ればその誤差情報を含んだ上で得られたメカニズム解を全て用いることで応力場推定の精度を上げることが可能となる。これを目的としてベイズ推定と棄却法によるランダムサンプリングから、メカニズム解の確率分布を得る手法を提案した。

P波初動極性（押し引き）から直接応力場の空間パターンを推定する手法については、Iwata (2018)で開発した手法を、(大)地震の余震域のような比較的小領域への適用だけでなく、山陰地方全体のようなより広域な応力場への適用を試みるといった手法拡張の試みを行った。また、空間解像度の向上化については「今年度の成果の概要」に示した通りである。一方で、東北地方のような応力比が1または0に近く、中間主応力（ σ_2 ）軸と最小主応力（ σ_3 ）軸あるいは最大主応力（ σ_1 ）軸と中間主応力（ σ_2 ）軸が入れ替わり得るような状況においては、Iwata (2018)の応力空間パターンの表現方法には問題が生じて手法が十分に機能し得ないことを示し、さらなる手法改善が必要であることも分かった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地震波データから得られる応力情報の推定精度・空間分解能を向上させることで、地表近傍で得られる地殻変動データのみでは限界がある地殻活動モニタリングおよびその予測に貢献することを目指してきた。そもそも全般的に応力推定手法そのものに様々な発展の余地があり、直接的に地殻活動モニタリングに貢献できるには至っていないが、ある程度までは貢献への目処を立てることが出来た。これにより「災害の軽減」についても（すぐにではないが）将来的に貢献できる可能性を示せたと考え

えられる。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

予測のための実データを用いたデータ同化システムの構築を目標に据え、これまで実績を積んできた余効変動に加えて、自発的に滑り始めるスロースリップのデータ同化に取り組んだ。同化システムの構築という観点からは、ようやくその入り口に立てたというところである。

目標達成への貢献としては、現時点の成果そのままでは直接貢献することができないが、次期計画でシステムを実データに適用していくことで、貢献できるシステムができると考えている。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

1.Fukushima, R., Kano, M., & Hirahara, K.,2023,Physics-informed neural networks for fault slip monitoring: Simulation, frictional parameter estimation, and prediction on slow slip events in a spring-slider system.,Journal of Geophysical Research: Solid Earth,128,doi:10.1029/2023JB027384,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Masayuki Kano, Yusuke Tanaka, Takeshi Iinuma, Takane Hori,2023,Data assimilation for reproducing and predicting the fault slip behavior in the 2010 Bungo Channel long-term slow slip event,IUGG2023

岩田貴樹,2023,空間分解能向上のための応力空間パターン推定手法の改良,2023年地球惑星科学連合同大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地震サイクルにおける断層すべりのモデリングにおけるデータ同化の研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

宮崎真一（京都大学理学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

福田淳一（東京大学地震研究所）,岩田貴樹（広島県立広島大学）,加納将行（東北大学大学院理学研究科）,平原和朗（理化学研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学理学研究科

電話：075-753-3911

e-mail：miyazaki.shinichi.2m@kyoto-u.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宮崎真一

所属：京都大学理学研究科

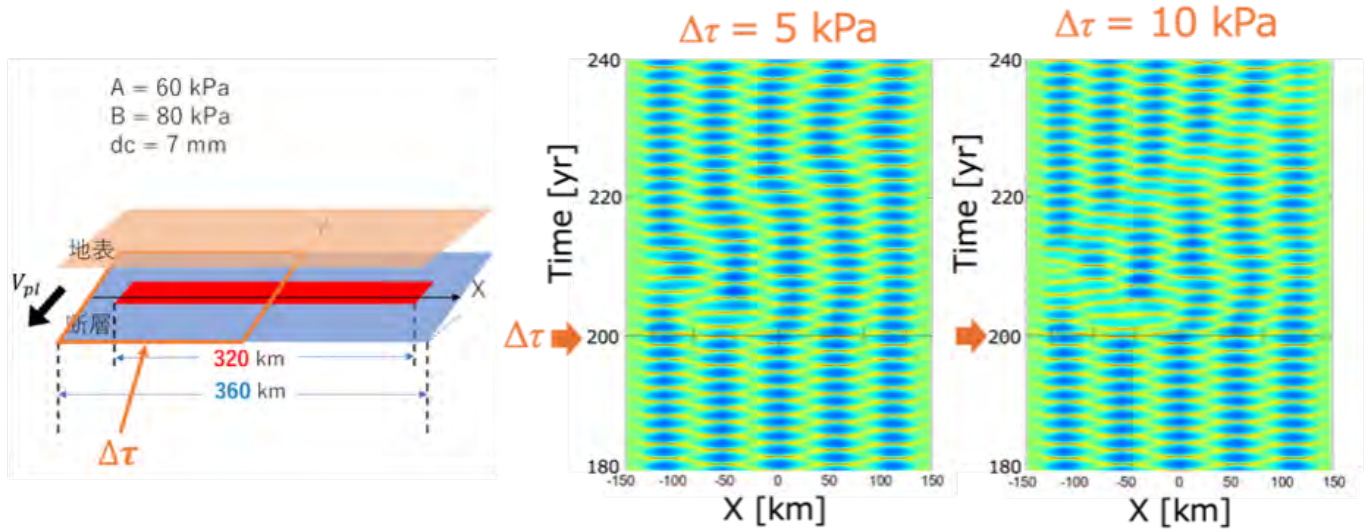


図 1

(左) SSE断層モデル. 時刻 $T = 200\text{yr}$ に $X < 0$ 領域に応力擾乱 $\Delta\tau$ を与えたときの (右) $Y=0$ 上のすべり速度の時間発展. $\Delta\tau$ が大きいとき、応力擾乱前後でSSEのセグメント数が変化する. (錦織 2024, 私信)

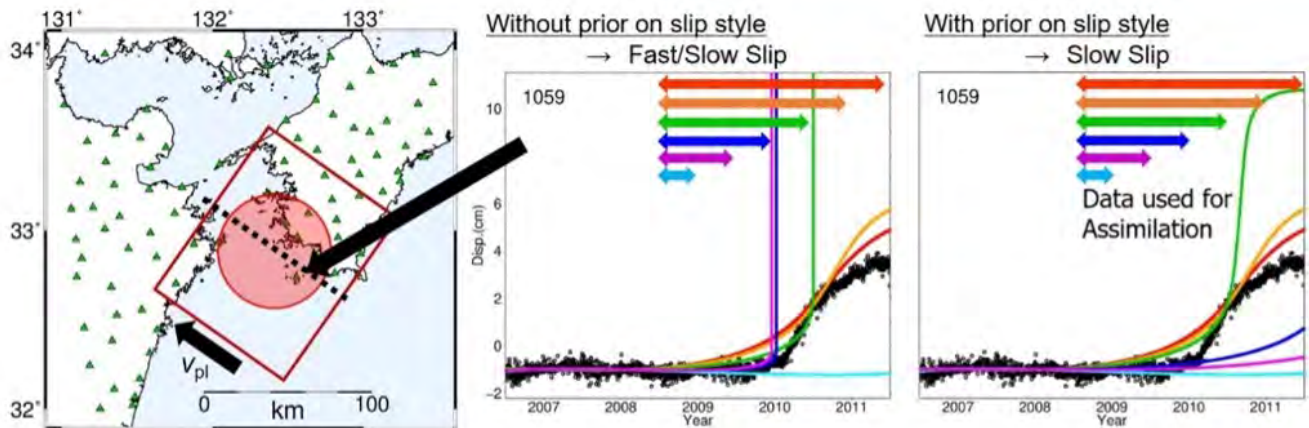


図 2

(左) 断層モデル (Hirahara and Nishikiori, 2019) とGNSS観測点分布. 図中の赤丸で囲まれた円形パッチがSSEを引き起こす. (中・右) 観測点1059におけるGNSS時系列 (黒丸) とデータ同化による地殻変動の計算結果. 線の色は同じ色の矢印で示す期間のデータを同化した場合の計算結果を表す. (中) 断層すべりの様式に関する事前情報を与えない場合、(右) 与えた場合の結果を示す. (Kano et al. in revision)

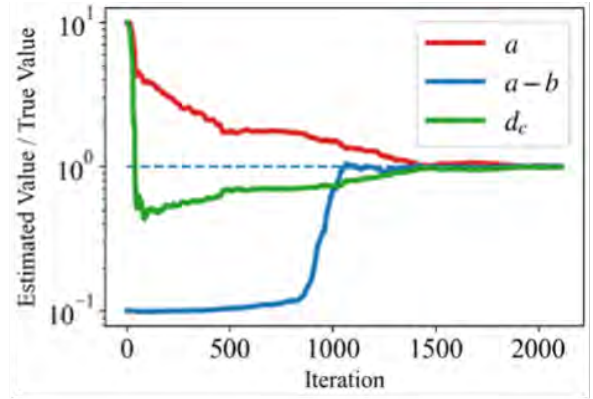
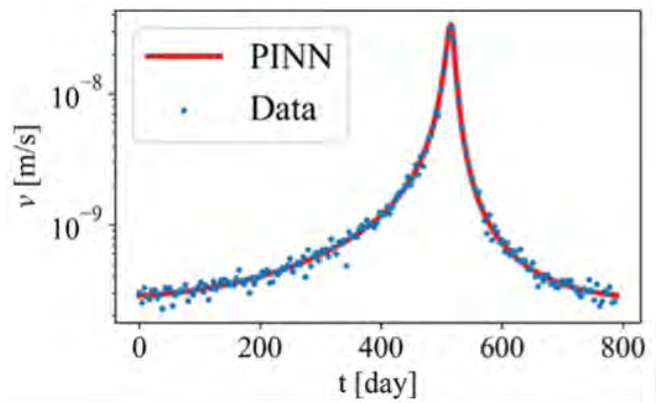


図 3

PINNを用いた摩擦特性の推定結果。(左) 損失関数の計算に用いた擬似データ (青点) とPINNによる断層すべりの計算結果 (赤線)。(右) 摩擦特性推定の推移。(Fukushima et al. 2023)

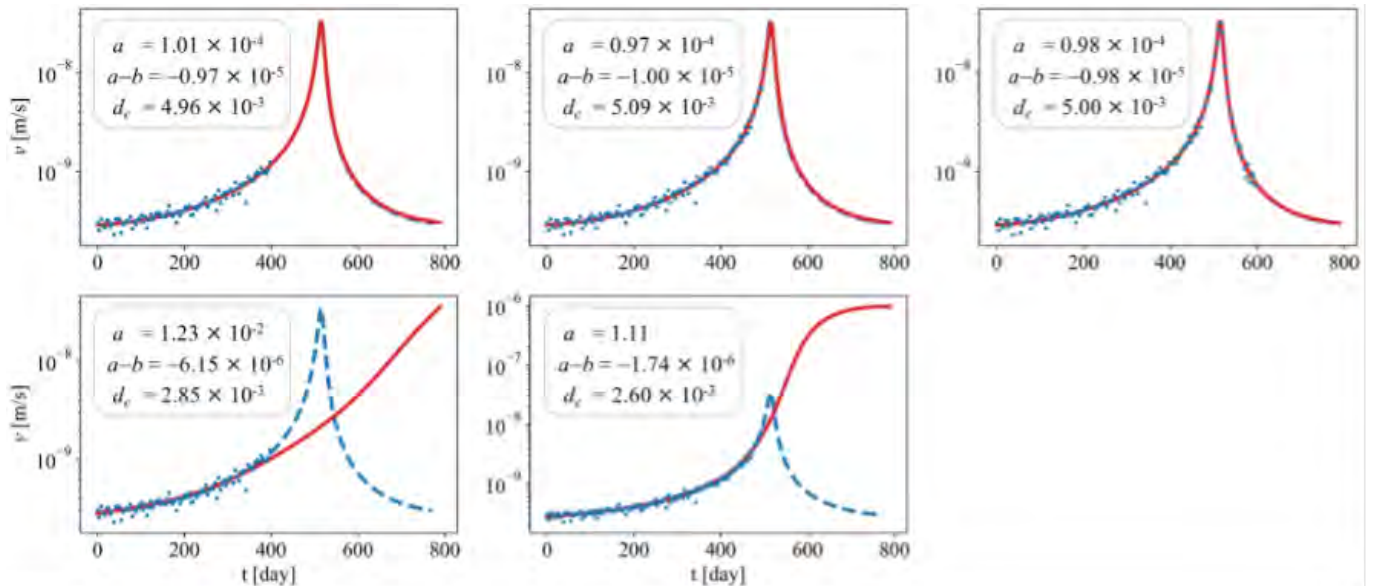


図 4

断層すべりの予測結果の例。青丸が使用した擬似データを、赤線がPINNによる断層すべりの数値計算結果を表す。それぞれ (左) 400日、(中) 500日、(右) 600日のデータを用いた場合の結果を示す。

(Fukushima et al. 2023)

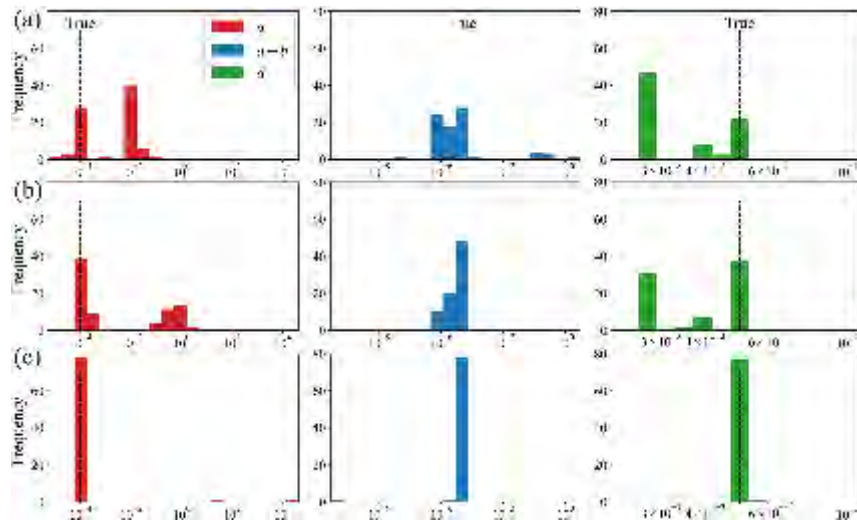


図5
 NNの初期値を変えた場合の摩擦特性の推定結果の頻度分布。それぞれ (a) 400日、(b) 500日、
 (c) 600日のデータを用いた場合の結果を示す。破線はデータ作成に用いた真値を示す。(Fukushima et al. 2023)

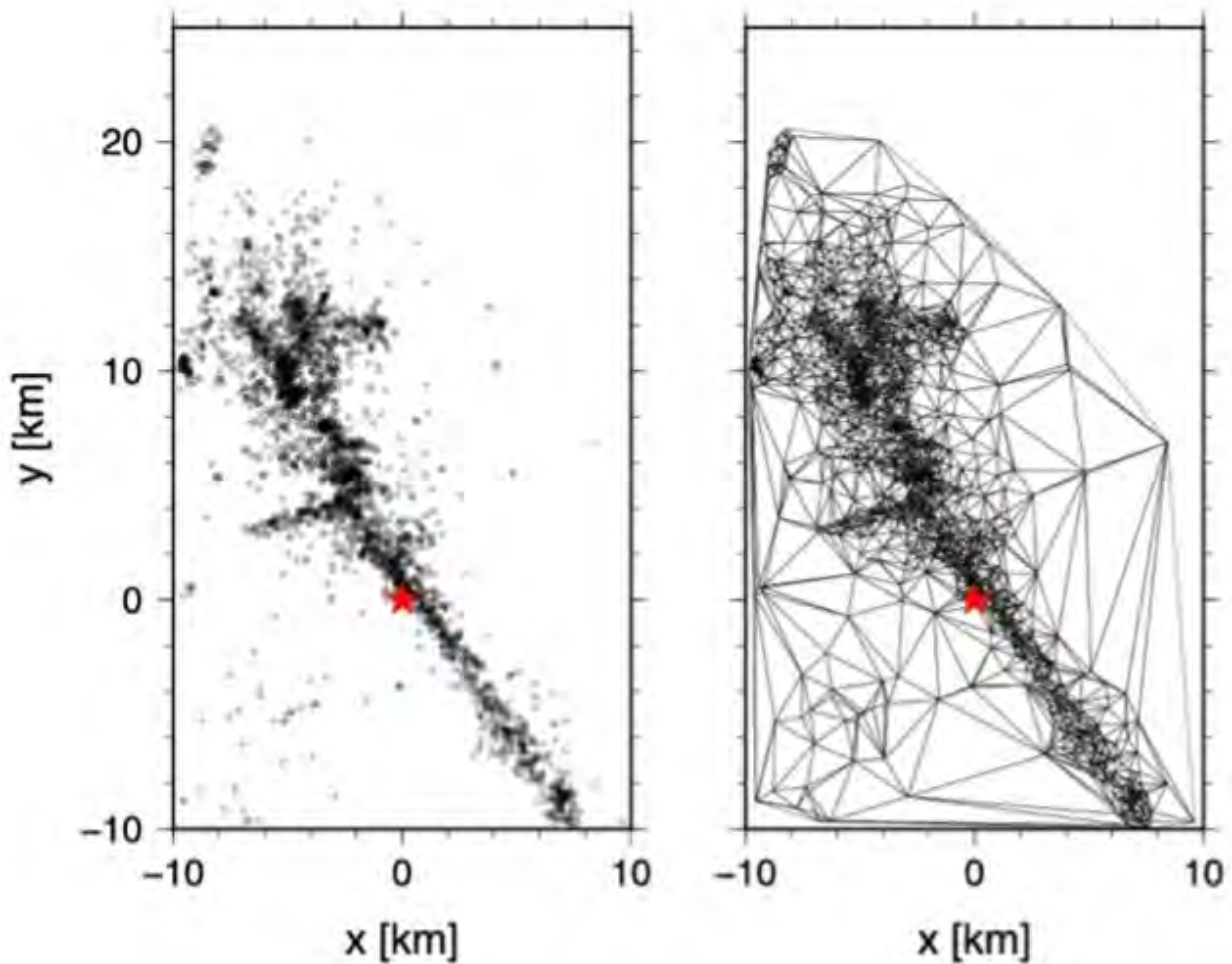


図6
 2000年鳥取県西部地震の余震域における応力空間パターン推定に用いたP波初動極性を得た地震の震央分布

(左図) と、それを頂点としたドロネー三角形分割。赤星印は2000年鳥取県西部地震の本震震央を表す。

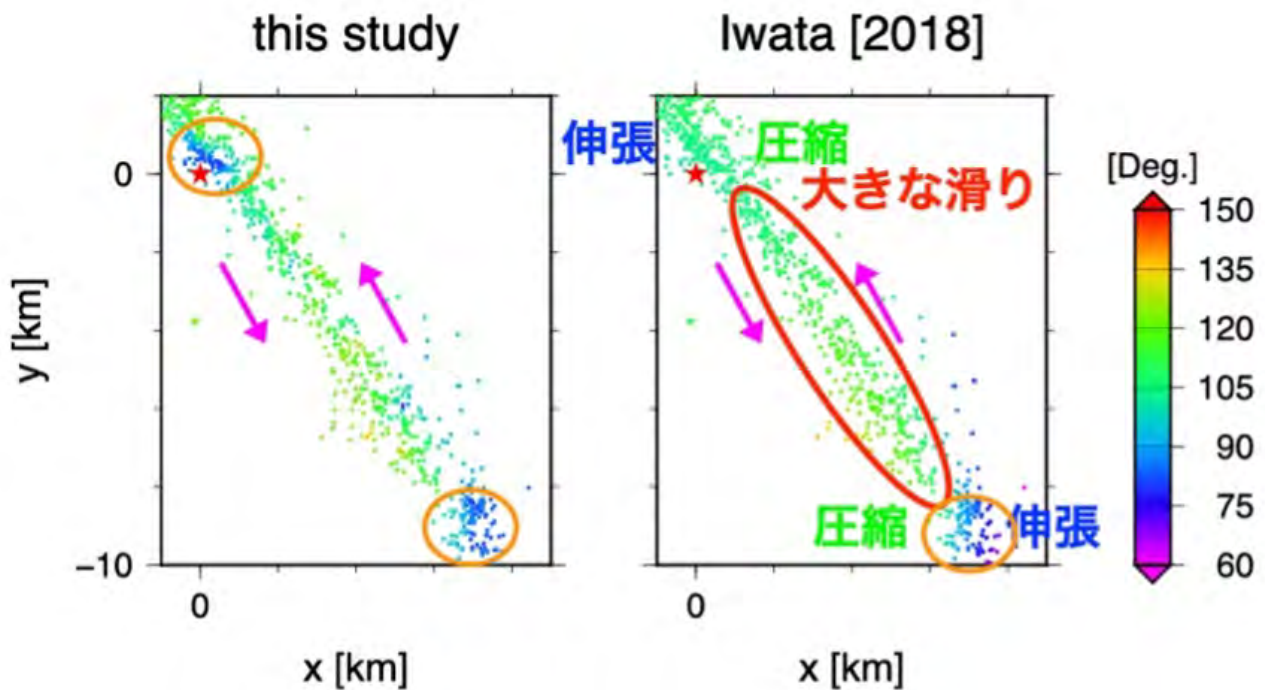


図7

Iwata (2018, JGR)の手法 (“Iwata [2018]”、右図) および改良手法 (“this study”、左図) で推定された最大主応力 (σ_1) 軸の方位角 (水平面に投影した時の、北から時計回りに測った角度)。Iwata (2018) の結果 (右図) では「大きな滑り」のあった領域 (赤楕円で囲った領域) の南端における断層西側と東側での応力場の違い (σ_1 軸の方位角の差異) が明らかであるが、北端でははっきりしない。一方、改良した手法 (左図) では北端・南端とも応力場の違いが顕著に見て取れる (橙色の丸で囲った領域)。なお赤星印は2000年鳥取県西部地震の本震震央を表す。

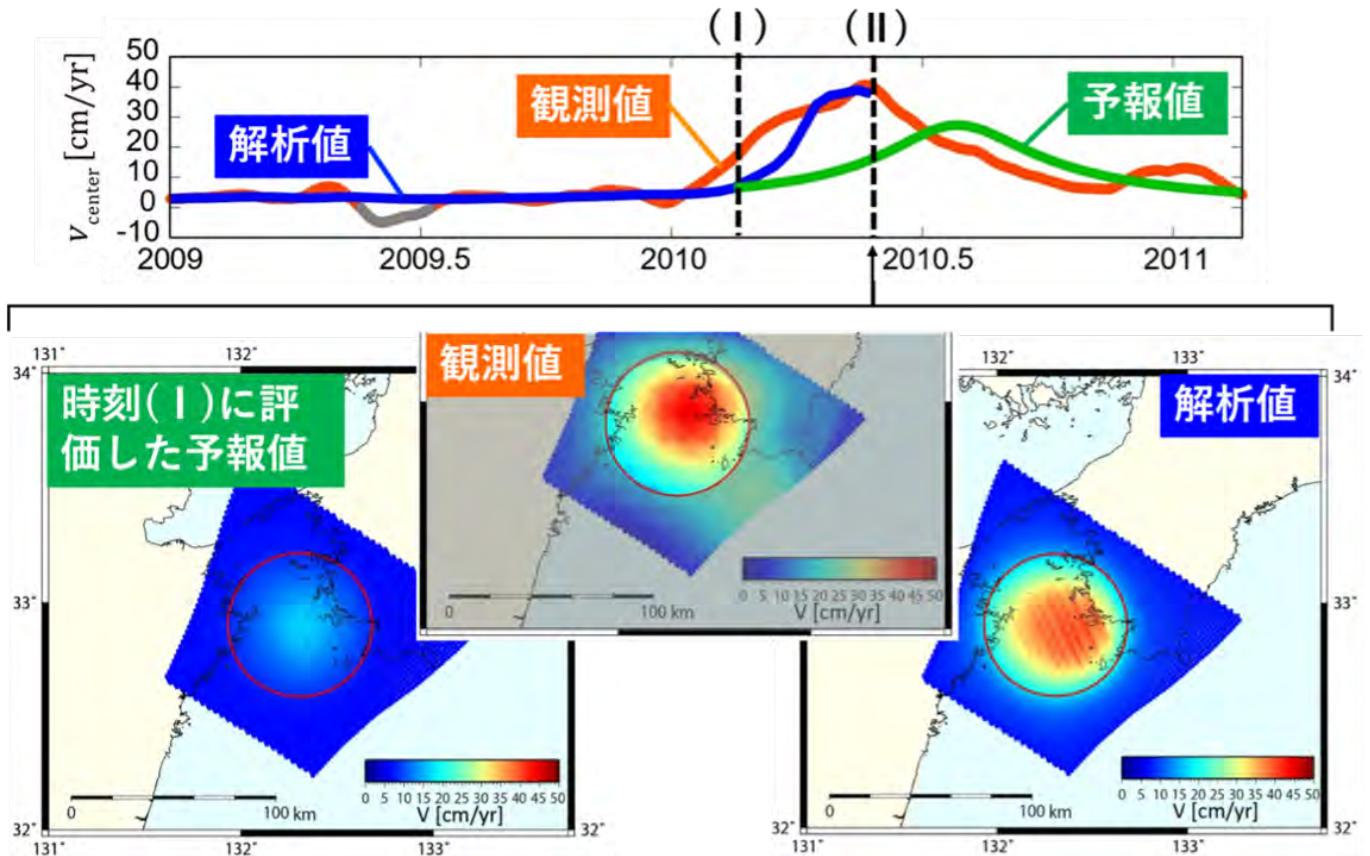


図 8

(上)豊後水道L-SSE中心位置のすべり速度 V_{center} の時間発展。観測値(橙)・各時刻以前のデータを同化した解析値(青)・時刻Iの解析値をもとにした予報値(緑)。(下)時刻IIにおけるすべり速度分布の観測値・解析値・予報値。(藤田2020 に加筆修正)

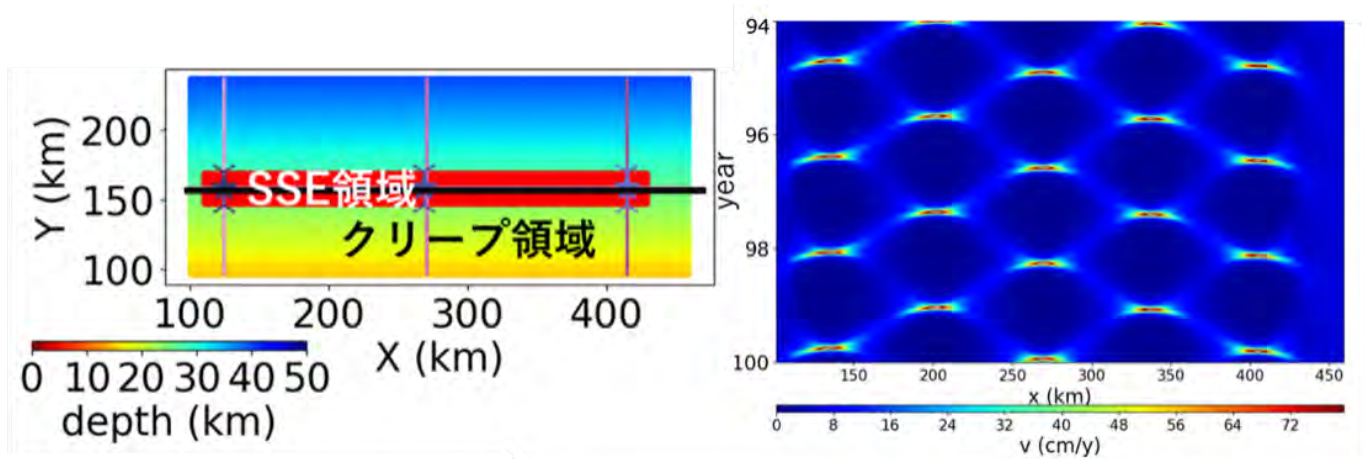


図 9

(左) SSE断層モデル. SSE領域で摩擦パラメタを一様に設定. (右) 左図SSE領域内黒横線上のすべり速度の時間発展. 横軸：走向方向の位置 X [km] 縦軸：時刻[年] (大島,2023)

(1) 実施機関名：

京都大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震・地殻変動モニタリングによる中期的な火山活動の評価

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

我が国には数十年以上の休止期を挟んで噴火を繰り返す火山が多い。しかし、その活動サイクルを通して観測研究が行われている火山はごくわずかである。したがって、その他多くの火山を対象として活動評価をおこなうためには、阿蘇や口永良部島などの火山において、長年にわたる近代的観測により蓄積されてきた多項目観測データの分析を進めて、火山活動推移モデルを構築することが不可欠である。一方、その他の火山においては、それぞれの火山活動サイクルの中でさまざまな段階にあると考えられる複数の火山で、同一の項目でモニタリングを実施し、他火山との比較研究を通して、個々の火山の状態を把握することが必要になる。

そこで、本研究課題では、長期間にわたるデータの存在する観測項目である、火山性地震、地殻変動、重力、応力場などのモニタリングを複数の火山で実施し、それらの比較研究をおこなう。そして、近代的観測研究により蓄積されつつある知見を最大限に活用し、「中長期的な火山活動の評価」を実施する。

全体の到達目標は、予測精度向上や推移モデルの高度化のために、観測データによる噴火推移の支配要因の理解を深め、さらなる観測事例の蓄積により火山活動推移モデルの構築および事象分岐条件の設定をすることである。

本課題の対象火山は、駒ヶ岳・有珠・樽前・十勝・雌阿寒・吾妻・伊豆大島・三宅島・焼岳・御嶽・阿蘇・九重・口永良部島であり、以下に重点的な観測を実施する火山などの到達目標を記す。

有珠：総合観測と集中的な地震観測を実施し、次期噴火にいたる過程で生じる現象をとらえる。

十勝：総合観測を継続し、unrestイベントを含む火山活動推移（特に噴火準備過程）の類型化を行う。

吾妻：火山深部から浅部における火山性流体の分布・挙動を明らかにし、他の研究対象火山における

現象との比較を通じて、中長期的な火山活動の評価を行う。

伊豆大島・三宅島：精密な重力変化の分析により次期噴火にいたる過程で生じる地下のマグマの移動を明らかにする。

焼岳：総合的な観測を継続し、1914年噴火から100年以上が経過した同火山が活動再開に至るまでの推移を把握する。

御嶽：2014年噴火以降に長期にわたり継続している山頂域の地震活動と収縮の発生プロセスを明らかにすること、次の噴火に向けた活動変化を捉える。

阿蘇：噴火サイクルが10~20年と比較的短い阿蘇火山では、そのサイクルを規定する物理量の抽出を目指した多項目モニタリングを実施し、他火山の活動評価の指標を提示する。

口永良部：数ヶ月から数年の時間スケールにおける、マグマ蓄積過程とマグマ蓄積量・率を明らかにする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本研究課題と同様に「モニタリングによる火山活動の評価」に取り組む北大代表の課題「電磁気・熱・ガス観測に基づく火山活動推移モデルの構築」とは相互補完の関係にある。そのため、研究集会を開き密接に連携しながら研究を進め、合同で火山活動評価をおこなう。

本課題では、各火山において、地震観測と地殻変動の連続観測（GNSS and/or 傾斜計）と後述の臨時観測などを実施する。さらに、地震波干渉法による速度構造の時間変化検出や、御嶽山で見られた火山活動にともなう地震活動のメカニズム解の変化検出など、共通の解析手法を適宜各火山のデータに適用することを目的に、各火山担当者の情報交換をすすめる。

また、富山大課題の「富山県弥陀ヶ原火山における地球物理学的観測による火山活動モニタリング」と連携して研究を遂行する。

各年度に実施する観測の内容は以下の通りである。

令和1年度：

御嶽山：In-SAR解析+水収支モデリング、GNSSキャンペーン観測、山頂地震観測

伊豆大島：絶対重力測定および相対重力サーベイ。

三宅島：火山PJと共同で臨時地震観測

阿蘇火山：地震・空振・傾斜計アレイなど多項目観測。年3回の相対重力測定。

口永良部：レーダ観測をふくむ多項目観測の継続、水準測量

令和2年度：

有珠山：次期噴火の準備をとらえるための臨時観測点設置

三宅島：絶対重力測定および相対重力サーベイ。

御嶽山：水準測量、GNSSキャンペーン観測、山頂地震観測

阿蘇火山：多項目観測の継続。絶対重力測定と年3回の相対重力測定。

口永良部：多項目観測の継続、水準測量

令和3年度

有珠山：火山PJと歩調を合わせ臨時地震観測

伊豆大島：絶対重力測定および相対重力サーベイ。

御嶽山：GNSSキャンペーン観測、山頂地震観測

阿蘇火山：年3回の相対重力測定。多項目観測の継続

口永良部：多項目観測の継続、水準測量

令和4年度：

三宅島：絶対重力測定および相対重力サーベイ。

御嶽山：水準測量、山頂地震観測。

阿蘇火山：水準測量。絶対重力測定と年3回の相対重力測定。多項目観測の継続

口永良部：多項目観測の継続、水準測量

令和5年度：

伊豆大島：絶対重力測定および相対重力サーベイ。火山PJと共同で臨時地震観測

御嶽山：山頂地震観測

阿蘇火山：年4回の重力測定。多項目観測の継続

口永良部：多項目観測の継続、水準測量

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

対象火山において地震や地殻変動観測によるモニタリングを継続した。また、電磁気・熱・ガスのモニタリング課題(HKD_04)と共同で2023年12月に研究集会を実施した。この集会では、対象火山におけるこれまでの観測研究成果を担当者間で共有し、「火山活動推移モデルの構築による予測」への道筋や成果とりまとめのための学術論文の特集号発行について議論をおこなった。また、HKD_04と共同で、雌阿寒岳でのVUIを作成した。

【駒ヶ岳・有珠・樽前・十勝・雌阿寒】

道内主要火山において力学観測を継続した。十勝岳では、火口活動に伴う雑微動の調査のため、火口近傍において臨時地震アレイ観測を実施した。有珠山では次期噴火を想定したGNSS観測施設の整備作業と臨時観測を進めたほか、火山PJと連携して有珠山周辺の水準路線の一部において測量を実施した。

【吾妻】

これまで明らかにした吾妻山浅部の流体供給路における多様な振動現象について引き続き観測と解析を進めるとともに、流体流動を直接反映した現象である調和振動型地震の非線形解析を行い流体供給の動態についての情報を得た。

【伊豆大島】

伊豆大島において11月に絶対重力観測を実行した。観測点は麓の東大地震研観測所(OVO)と山頂に近い鏡端局舎(KGM)の2点である。前年同時期との比較でOVOは-16 microGal、KGMは-54 microGalという顕著な重力変化が検出された。これらは2023年の少雨傾向を反映したものである。

【御嶽】

御嶽山浅部の地下構造推定を前年度より継続して行い、成果を論文化した。その知見を用いて噴火準備過程の数値モデリングを試行した。2022年2月～3月の地震活動活発化に伴うメカニズム解の変化を推定した。GNSSとInSARを組合せて2014年噴火以降の長期にわたる地殻変動の浅部変動源を推定した。水準測量を行い、山頂側隆起の傾向を見出した。地震観測、GNSS観測、震源決定を継続して実施した。

【焼岳】

前年に引き続き、多項目観測と冬季のダメージ修復のための機器保守を継続した。また、飛騨山脈脊梁部での群発地震時の有感地震情報発信のための簡易震度計ネットワークが構築途上で試験観測を実施中である。

【阿蘇・九重】

阿蘇火山の複数点において月1回の頻度でキャンペーン相対重力測定を実施した。測定された重力データに対してスケールファクター補正を施すことで、山麓に対する火口周辺部の相対重力値を得た。その結果、2017～2023年の相対重力値は長期的に緩やかな減少を示していることが分かった。この原因には、火口周辺部の直下において熱水等の質量が減少している可能性が考えられる。九重火山では2014年以降干渉SAR解析により硫黄山を中心とした3kmの範囲で山体膨張を示唆する位相変化が見られていた。ただし、その速度は最大5 mm/yrと小さく、周囲のノイズと同程度のSN比であった。この位相変化が真の火山性変動であるかを確かめるためにGNSSデータの時系列解析を実施した。この際、地震や広域テクトニクスの影響を関数モデリングにより除去し火山性変動のみを抽出した。その結果、2012年以降、硫黄山を中心とした放射状に遠ざかる水平変動および硫黄山近傍の隆起が確かめられ、干渉SARによる膨張性変化が火山性変動であることが確実となった。また、これらの変動を説明するためのソースモデル推定も実施した。モデル推定では、従来の弾性体モデルではなく、浅部熱水系でより現実的である多孔質熱弾性変形を考慮した有限要素法解析を実施した。その結果、標高500-900 m程度の膨張源で両データを概ね再現できることがわかった。この標高は九重火山の火砕物と豊肥火山岩類の境界付近に当たることから、構造境界に存在する熱水貯留槽において増圧が進行しつつあると考えられる。

【口永良部島】

2024年1月29日-31日に口永良部島火山において精密水準測量を実施した。測量区間は、全測量路線のうち屋久島町の定める警戒区域外となる路線北側半分の間で、新岳からは約2.3~4.0 kmの距離である。今回の測量における1 km当りの平均自乗誤差は ± 0.17 mm/kmと高精度であった。測量結果から、2021年12月（前回測量）~2024年1月の期間における地盤上下変動量を見積もった。得られた結果から、この期間、路線南部方向（新岳・古岳の方向）に向かって若干の地盤隆起が認められたが、その変動量は僅か（最大でも0.7 mm）であることが確認された。

・計画期間中（令和元年度~5年度）の成果の概要

対象火山において地震や地殻変動観測によるモニタリングを5カ年にわたり継続した。また、電磁気・熱・ガスのモニタリング課題(HKD_04)と共同で定期的に研究集会を実施し、対象火山におけるこれまでの観測研究成果を担当者間で共有し、「火山活動推移モデルの構築による予測」への道筋についての議論をおこなった。

また、HKD_04と共同で、十勝岳、阿蘇火山、吾妻山、草津白根山、雌阿寒岳での火山活動活発化指数(VUI)策定作業をおこなった。

いくつかの火山に活動の類似性が見いだされたほか、噴火発生場のモデルの精緻化が行われた。

北海道

十勝岳では2016年に火口近傍に設置した孔内型の広帯域地震計・傾斜計により、2019年からたびたび明瞭な傾斜変動や長周期地震イベントが観測されるようになった。これらの変動源は、62火口近傍の地下数100mに推定され、噴気を輸送する火道の一時的な狭窄にともなう増圧現象と解釈された。また、2020年に発生したイベントでは火口から3kmほど離れた遠方でも傾斜変動の信号が初めてとらえられ、深部の圧力変動源に関する情報が得られたほか、深部から浅部に移動する地震活動の把握にも成功した。有珠山では測地観測の強化を図り、16点の新規GNSS観測点を整備して繰り返し観測を開始した。

吾妻

吾妻山大穴火口近傍での地震・空振・地殻変動観測を実施し、活動推移とともに変化する各種現象の解析を進め、火口直下の浅部流体系の理解の高度化を進めた。これらの流体供給系およびその時間変化は、ガスや地熱の観測結果とも整合的であり、吾妻山の活動推移把握に資するものである。

伊豆大島

伊豆大島において1年ごとの絶対重力観測を実行した。また、2019-2020年には連続観測を行い、降水により生じる重力変動の傾向を把握することに成功した。2012年から2023年に至る長期の重力変動データを用いて、降水量・地殻変動量を加味したモデリングを行ったところ、伊豆大島直下で蓄積するマグマの密度が 2.3 ± 0.7 g/cm³と推定された。推定密度値に伴う誤差が大きいことは課題ではあるが、重力観測によって噴火準備過程の重要なパラメータを決定できた点は大きな成果である。

御嶽

御嶽山山頂域の10地点で地震観測テレメータ試験を行い、5ヶ年にわたり安定した運用を実現した。そのデータと周辺域の地震観測データを合わせて用いることで高精度な震源決定と地下構造の推定を行った。2022年2月~3月に活発な地震活動が発生し、それに伴うメカニズム解の変化や超長周期地震・傾斜イベントの発震機構推定を行った。機械学習やmatched filter法による微小地震の検知を行った。山頂域の10地点でGNSSキャンペーン観測を毎年実施し、5ヶ年の後半に連続観測点化を行った。そのデータと長期間にわたるInSARのデータを合わせて用いることで2014年噴火以降長期にわたり継続している山頂域の収縮の力源とその時間変化および水収支を推定した。水準測量をほぼ毎年実施し、深部での微弱な地殻変動の長期的な変化の基礎データを得た。

焼岳

多項目観測を遂行し、2020年4月からの群発地震に伴い、焼岳山頂(DP.YKEP)等を含む観測点で地殻変動を検出し、これの解釈として、開口断層モデルを推定し、今回の群発地震活動の発生要因の解釈を行った。

阿蘇九重

阿蘇カルデラ周辺の地殻変動データを解析し、1997年から2015年にかけての変動源の位置と変動量の時間変化を明らかにした。また、マグマ溜まりでの物質収支を求めたところ、2014年のマグマ噴火は噴火以前のマグマ増量分が地表にガスや火砕物として放出されることにより終息したことが明らかになった。

阿蘇火山において、高頻度の相対重力測定を実施し、スケールファクターなどの誤差要因を取り除いたうえで、山麓に対する火口周辺部の相対重力値の長期変化を取得した。その結果、この期間の相対重力値は長期的に緩やかな減少を示していることが分かった。

九重火山において1992年から2021年までの長期間の干渉SAR解析および2012年以降のGNSS解析を実施した。その結果、1995年水蒸気噴火の半年前から前兆的な局所膨張が噴火口近傍で生じていたことが明らかになった。この状況は箱根2015年噴火や霧島硫黄山2018年と酷似している。この類似性から、噴火のリードタイムが数年~数ヶ月程度の事例では時間的に密な干渉SAR観測が噴火地点の予測に資する可能性が高まった。

口永良部島

2019年度~2023年度の5か年間に、口永良部島火山において2019年12月、2020年5月・12月、2021年5月・12月、2024年1月と計6回の精密水準測量を実施した。測量結果から、2019年12月~2020年12月の期間に路線南部方向（新岳の方向）に向かって地盤隆起が確認された。この期間中の2020年1月~5月には新岳において小規模な噴火が繰り返し発生しており、新岳直下での圧力増加を反映した地盤隆起の可能性が考えられる。その後は、2020年12月~2021年5月の期間に路線南部方向に向かってやや地盤沈降した後、2021年12月~2024年1月の期間に僅かに地盤隆起して現在に至っていることが確認された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地球物理学的な観測を複数の火山で実施すること、またいくつかの火山で火山活動活発化指数を作成することにより、関連の深い建議の項目である「モニタリングによる火山活動の評価」の目的達成に大きく貢献している。

火山災害の軽減のためには、噴火が発生するまえに火山活動を適切に評価し、噴火発生時期、噴火規模などを予測することが重要である。本研究は「モニタリングによる火山活動の評価」を通して災害軽減に貢献している。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Maeda Y. and Watanabe T.,2023,Seismic structure and its implication on the hydrothermal system beneath Mt. Ontake, central Japan,Earth Planets

Space,75,https://doi.org/10.1186/s40623-023-01870-z,査読有,謝辞有

鬼澤真也,西山竜一,今西祐一,大久保修平,安藤忍,長岡優,島村哲也,平山康夫,石原昂典,松田健助,金子祐也,上田義浩,谷田部史堯,渡邊篤志,安藤美和子,坂下至功,2023,伊豆大島における火山活動の解明と活動評価への適用に向けた合同重力観測,東京大学地震研究所彙報,97,13-32,査読有,謝辞無

Yamada T., A. Terada, R. Noguchi, W. Kanda, H. Ueda, H. Aoyama, T. Ohkura, Y. Ogawa, T. Tanada,2023,The Onset, Middle, and Climax of Precursory Hydrothermal Intrusion of the 2018 Phreatic Eruption at Kusatsu-Shirane Volcano,Journal of Geophysical Research,Solid Earth 128(11),doi: 10.1029/2023jb026781.,査読有,謝辞無

suge A., H. Aoyama, K. Nogami, F. Akita, K. Kato,2023,Eruption dynamics and plumbing system of Shikabe Geyser in southern Hokkaido, Japan, revealed by field observation inside and outside the conduit,Journal of Volcanology and Geothermal Research,440,1007851,doi:

10.1016/j.jvolgeores.2023.107851,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

若林環,風間卓仁,大島弘光,岡田和見,今西祐一,西山竜一,長縄和洋,大柳諒,大倉敬宏,吉川慎,2023,本

縦断測線を用いたバネ式相対重力計のスケールファクター検定.,JpGU 2023,SGD01-P05
 若林環, 吉川慎, 風間卓仁, 大倉敬宏,2023,阿蘇火山における2017年~2023年の重力時空間変化.,日本火山学会2023秋季大会,P105
 大見士朗,2023,飛騨山脈南部における震度観測ネットワークの構築の実現可能性の研究,JpGU 2023,MIS10-08
 Ohmi, S. and T. Nishimura,2023,Possible Dyke Intrusion Event Inferred from Swarm Activity and Crustal Deformation in the Japan Alps Region, Central Japan, in 2020,AGU Fall Meeting 2023,V11D-0091
 山中 佳子, 前田 裕太, 堀川 信一郎, 寺川 寿子,2023,Matched filter法でみた2022年2月頃に活発化した御嶽山の地震活動,JpGU 2023,SVC30-P01
 村瀬雅之, 山中佳子, 前田裕太, 金 幸隆, 堀川信一郎, 小池遥之, 竹脇 聡, 浅井 岬, 松廣健二郎, 松島 健, 内田和也, 上土井歩佳, 野 辰乃介, 池田宝佑, 鈴木陽太, 吉川 慎, 井上寛之, 若林 環, 成田翔平, 及川 純, 大園真子, 手操佳子, 佐藤明日花, 西田貞明, 百合本岳, 山田 晋也, 金子祐也, 柳澤宏彰, 國友孝洋, 木股文昭,2023,精密水準測量によって検出された御嶽山の上下変動 (2021-2023 年),日本測地学会第140回講演会,37
 前田裕太,2023,御嶽山水蒸気噴火の準備過程: 予備的な数値計算の試行,日本火山学会2023秋季大会
 前田裕太,2023,御嶽山の噴火準備過程,火山噴火と防災および観光シンポジウム2023-草津白根山、御嶽山、箱根山-
 山田大志, 井口正人, 中道治久,2023,口永良部島火山古岳山体におけるモノクロマティック微動,日本火山学会2023秋季大会,B3-01
 成田翔平, 大倉敬宏,2023,GNSS連続観測から示唆される九重火山の山体膨張,日本火山学会2023秋季大会,P95
 大久保美鈴, 大倉敬宏,2023,阿蘇カルデラ周辺の地殻変動源とマグマ供給系,日本火山学会2023秋季大会,B3-11
 小松隼人, 大倉敬宏, 為栗健,2023,阿蘇火山において 2019~2020 年に発生した連続噴火における A 型地震と高周波微動,日本火山学会2023秋季大会,B104
 鬼澤真也, 西山竜一, 今西祐一, 大久保修平, 安藤忍,,2023,伊豆大島火山における合同精密重力観測,日本火山学会2023秋季大会,B2-10
 寺田暁彦・神田 径・小川康雄・山田大志・山本 希・青山 裕・大倉敬宏・大場 武・谷口無我・角野浩史・小長谷智也,2023,草津白根火山のマグマ・熱水供給系,日本火山学会2023秋季大会,B1-12
 松田瑞希・大園真子・青山 裕・田中 良・平戸悠登・岡田和見・高橋浩晃,2023,トサヌプリ火山群周辺の水準測量及び上下変動場の予察的推定,日本火山学会2023秋季大会,P33

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

大倉敬宏(京都大学大学院理学研究科),横尾亮彦(京都大学大学院理学研究科),風間卓人(京都大学大学院理学研究科)

他機関との共同研究の有無: 有

青山裕(北海道大学),橋本武志(北海道大学),村上亮(北海道大学),山本希(東北大学大学院理学研究科),三浦哲(東北大学大学院理学研究科),今西祐一(東京大学地震研究所),大湊隆雄(東京大学地震研究所),寺田暁彦(東京工業大学),前田裕太(名古屋大学),山中佳子(名古屋大学),寺川寿子(名古屋大学),伊藤武男(名古屋大学),大見士朗(京都大学防災研究所),中道治久(京都大学防災研究所),山本圭吾(京都大学防災研究所),村瀬雅之(研究協力者)(日本大学)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等: 火山研究センター

電話: 0967-67-0022

e-mail :

URL :

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：大倉敬宏

所属：火山研究センター

(1) 実施機関名：

京都大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

阿蘇で学ぶ地震・火山災害への備え

(3) 関連の深い建議の項目：

- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
 - (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(4) その他関連する建議の項目：

- 3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究
 - (3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究
 - 地震
 - 火山
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - オ. 高リスク小規模火山噴火
 - (6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(5) 総合的研究との関連：

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

日奈久・布田川断層帯での30年地震発生確率が全国の活断層のうちでは比較的高い部類に属するとされていたにもかかわらず、この情報が地元自治体では共有されていなかった。地震や火山に関する情報を適切な防災行動や防災対応につなげるためには、情報の受け手（一般市民）も地震や火山及びそれらに起因する災害について正しく理解することが必要となる。正しい理解のためには、学習する機会を提供し、理解しやすくする仕組みが必要である。そこで、その機会や仕組みを地震・火山の準リアルタイムデータ表示や震災・火山噴火体験を交えたガイドプログラムの中に実装する。そしてまず第一に、阿蘇にて活動するガイドの防災リテラシーを向上する。次にガイドを仲介媒体として、阿蘇地域を訪れる観光客や他地域の自治体職員の地震や火山にかかる正しい知識を醸成する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

地震・火山の準リアルタイムデータ表示として、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」（平成25～30年度）において北海道大学の島氏が開発した準リアルタイム火山情報表示システムを改良して使用する（以下、表示システムと略）。

阿蘇地域では、火山博物館ガイドセンターやジオパークガイド協会に所属するガイドらが地震災害の語り部などとして活躍している。また彼らは「熊本地震の経験や教訓を伝える修学旅行生向けの学習プログラム」や「震災遺構を巡る観光ツアー」、「2016年10月に爆発的噴火を起した阿蘇火山の案内」などの震災体験を交えたガイドプログラムを既に実行している。本研究課題では、ガイドの情報発信力を高めるため、2～3ヶ月に一回程度、阿蘇火山博物館などにおいてサイエンスカフェを開催する。また、年に1～2回、専門家（地震、火山、災害対応など）による講習会を実施する。また、ガイドと

ともに、阿蘇火山博物館での中高生への教育プログラムを改良し、修学旅行生に自地域でのハザードを認識させるようにする。

なお、部会全体としての研修プログラム構築に知見を提供する予定である。

年次計画は以下の通りである。

R1年度：

○表示システムを熊本県庁と阿蘇地域振興局に設置し、地方自治体関係者の地震や火山情報に対するニーズを調査する。

○阿蘇火山博物館に観光客向けの表示システムを設置し、観光客の地震や火山情報に対するニーズを調査する。

○阿蘇火山博物館を過去に修学旅行で利用した中高の上位5都府県をターゲットに、ハザードマップなどを収集し、その府県向けの学習プログラムを作成し（阿蘇ガイドと協力し情報共有する）、随時実施する。

○阿蘇ガイドを対象とする地震学セミナーを開催する。

R2年度：

○環境省・南阿蘇ビジターセンターに観光客向けの表示システムを設置する。

○阿蘇火山博物館を修学旅行で利用した中高の6~15位の都府県をターゲットに学習プログラムを作成し、随時実施する。

○阿蘇ガイドを対象とした講演会やサイエンスカフェを定期的に関き、地震や火山に関する最新の知見の共有をはかる。また、ガイド講習会の実施する。

R3-5年度：

○阿蘇火山博物館で全都道府県をターゲットに学習プログラムを作成する。

○阿蘇ガイドを対象とした講演会やサイエンスカフェを定期的に関き、地震や火山に関する最新の知見の共有をはかる。

○ガイド講習会を実施する。そのなかで、阪神・淡路大震災等の過去災害における語り部活動の事例を調査し、比較検討することにより、ガイドプログラムの向上をはかる。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

阿蘇山は水蒸気噴火が頻発する火山であり、過去には水蒸気噴火による犠牲者も発生していた。最近では2021年10月20日に水蒸気噴火が発生した。この噴火では、多数の噴石が放出され、噴煙は火口縁上3500mの高度に達し、火砕流は最大で火口の北側1.6kmまで流下した。そして、火口周辺の防護柵や火山ガス検知装置などが破壊されるなどの被害が生じたが、噴火警戒レベルが2の状態での噴火が発生したこともあり、人的被害は発生していない。しかし、噴火発生時に火口から1km~2kmの登山道に10名を超える登山者がいたことなど、防災上の問題点が明らかになった。

火山噴火に対する防災リテラシー向上のためには、噴火による災害事例に基づく災害発生機構の解明が重要である。2021年の阿蘇山噴火は災害にまではいたらなかったが、一歩間違えば人的被害に繋がっていた可能性のあるインシデントである。そこで、これまでの阿蘇山での火山活動とそれによる災害、防災対策、火口周辺の利活用のなどの経緯を文献調査などによって整理し、このインシデント事例の発生過程を、関係者への聞き取り調査と研究代表者の現地での体験にもとづいて整理した。その結果、火山活動の活発化にともない、気象庁からの情報は段階的に発令されていたが、それが速やかなで効果的な登山道閉鎖には繋がらなかった。また、登山者の火山情報収集にも課題があった。すなわち、登山道を規制する側、利用する側いずれにも火山活動の情報は有効活用されていなかったことが明らかになった。今後これらの問題を解決する努力が必要である。

以上の内容をJDRの防災リテラシー特集号において公表した。

阿蘇ジオパークガイド（以下ジオガイド）や震災遺構ガイド（語り部含む）との活動を通じた地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究を今年度も実施した。

また、「火山研究人材育成コンソーシアム構築事業」と協力し、火山防災特別セミナー（2023年11月@御嶽）において、登山地図アプリ開発業者や自治体関係者などと「火山防災の情報発信・広報」をテーマに情報交換やディスカッションを行なった。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

阿蘇ジオパークガイド（以下ジオガイド）や震災遺構ガイド（語り部含む）との活動を通じた地震・

火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究を今年度も実施した。

これらは、ガイドに対してさまざまなアンケートやキーワードチェックを実施することで、ガイドの地球科学や防災に関するリテラシーをチェックしながら実施されている。また、2016年熊本地震の本震で被災した京都大学火山研究センターの復旧プロセスも題材にした。

阿蘇を訪れる観光客の火山防災に関するアンケート調査を実施し、火山活動に関する正確な知識をガイド経由で観光客に伝達するうえでの課題を明らかにした。また、このアンケート結果をステークホルダーと共有し、観光客に属性を意識した防災対策に活用していただいた。

火山研究人材育成コンソーシアムの火山防災特別セミナーと協力し、「阿蘇火山での火山防災への取り組み」の他自治体への紹介、「火山防災の情報発信・広報」に関する登山地図アプリ開発業者を交えた情報交換やディスカッションなどを行なった。

2021年10月20日の噴火の際の問題点を整理し、今後の登山者の防災リテラシー向上のための課題を抽出した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

阿蘇を訪れる観光客に地震災害に関して多くを学んでもらうためには、まず熊本地震震災ミュージアムやジオパークで活動するガイドの地球科学および防災リテラシーを向上することが不可欠であるとの認識のもと、ガイドのリテラシー向上の手法を検討することで「地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究」に貢献することを目指した。

また、火山災害に対する備えという観点からも、ジオパークで活動するガイドの防災リテラシー向上の手法を検討し、「地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究」に貢献した。

いずれも、「災害の軽減に貢献」に直結するものである。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Ohkura, T., 2024, Vulnerability of Aso Volcano's Disaster Mitigation System, as Revealed by the Phreatic Eruption of October 20, 2021, Journal of Disaster Research, 19, 50 - 55, <https://doi.org/10.20965/jdr.2024.p0050>, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

阿蘇山における登山者への効果的な火山情報の伝達手法の構築

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

大倉敬宏（京都大学大学院理学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

池辺伸一郎（阿蘇ジオパーク事務局）、豊村克則（阿蘇火山博物館）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：火山研究センター

電話：0967-67-0022

e-mail：bonkura@aso.vgs.kyoto-u.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：大倉敬宏

所属：火山研究センター

(1) 実施機関名：

九州大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震火山相互作用下の内陸地震空間ポテンシャル評価

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
 - エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
 - ア. 地震発生機構の解明
- (4) 火山現象の解明とモデル化
 - イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化
- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
 - イ. 内陸地震
 - ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明
 - オ. 構造共通モデルの構築

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (1) 地震発生の新たな長期予測
 - イ. 内陸地震の長期予測
- (4) 中長期的な火山活動の評価
 - イ. モニタリングによる火山活動の評価

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - ア. 強震動の事前評価手法

5 研究を推進するための体制の整備

- (1) 推進体制の整備
- (2) 総合的研究
 - オ. 高リスク小規模火山噴火
- (3) 研究基盤の開発・整備
 - ア. 観測基盤の整備
 - エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(5) 総合的研究との関連：

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題では、内陸地震の発生場所や規模の評価を、多項目観測や室内実験を通じて調べ、支配的な要素や、要素間の関係性を見出すことで、評価手法の確立に道筋をつける。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

熊本ー阿蘇火山と、北海道の屈斜路ー阿寒カルデラ周辺を観測重点地域として内陸地震空間ポテンシャル評価の研究を行う。地震発生は、対象地域に働く応力場、断層周辺の力学的応答、地震を発生させる断層面の形状、断層の強度、破壊の開始や停止に対する流体の効果、流体の上昇の効果、という要素に規定されていると考え、以下のような手法に基づきそれぞれの要素の評価を行う。

応力場：地震活動がある領域についてはモーメントテンソルを用いて推定する。地震の起こっていない領域については周辺の応力状態、変形状態から推定し、応力場モデルの構築を行う。機動地震観測により地震活動が活発な地域では水平深さ方向とも5km程度の分解能で推定する。さらに構造情報を入れて、数値計算により不均質な応力場の再現を試みる。応力場が不均質であることが示唆されている天草周辺の非地震帯、警固断層周辺で臨時GNSS観測、地震観測を強化し、不均質な応力場が形成されるメカニズムを推定する。

断層周辺の力学的応答：地震学的、電磁気学的構造、測地学的運動から周辺の地域の弾性的・非弾性的応答を推定し、数値計算により断層に載荷される応力(応力再配分)を推定する。一方、地震による非弾性変形やGNSS観測による地表変位速度データをもとにして、定常変形や大規模地震による応答を求める。

地震を発生させる断層面：主に観測重点地域を対象に地表の活断層の分布、稠密地震活動から見出される震源の面上配列、広帯域MT調査による厚みをもった破碎帯(低比抵抗帯)の形状から推定する。

断層の強度：周辺の地震活動から見積もられる間隙流体圧、応力場と断層面との関係、低比抵抗ー低速度域、断層直上の温泉ガス分析から推定される空隙率、等を用い推定する。流体供給源の位置と化学観測からの流体経路を参考にして、断層の強度低下の可能性を検討する。

流体分布と、流体が地震の開始や停止に及ぼす影響：比抵抗構造、速度構造、減衰構造の3者を推定することにより地下の流体の蓄積場所と、水かガスかマグマかの判別、温度、粘性係数、さらには流体を蓄える亀裂の大きさを推定する。観測重点地域は5~10 km程度の解像度で応力場モデルと組み合わせ、歴史地震の発生した場所の地震ポテンシャルを検討する。さらに、断層端と流体分布の位置関係から、破壊が流体によって停止する可能性を検討する。流体周辺域とその他の地域に分け、初期破壊過程と最終的な地震の規模との関連を統計的に評価する。

流体移動の効果：火山周辺ではマグマの蓄積や粘性緩和によって周辺の応力場が変化し、地震発生につながる事が考えられる。屈斜路ー阿寒カルデラにおいてはGNSS観測などから歪の不均質場を明らかにするとともに、地震活動や火山活動との関連性について検討する。マグマが冷却結晶化する過程で析出した水を含む揮発性成分や、断層地下にもともと蓄積されている流体も移動することにより地震を誘発する可能性がある。熊本ー阿蘇地域の温泉を対象にH₂, 4He, CH₄, N₂, O₂, 36Ar, 40Ar, CO₂, 222Rnのモニタリング連続観測を行い、玄武岩質マグマ起源流体、安山岩質マグマ起源流体、大気の混合比を求め、その時間変化と地震活動との相関を検討する。さらに水の酸素水素同位体比・全炭酸・3He/4He/20Ne比・陰陽イオン・主要ガス・222Rnのサンプリングも定期的に行い、流体の起源を推定し流体供給路を推定する。また、起源の異なる流体が相互に混入することがあるかどうかを調べる。これによって、火山活動との相互作用や地震活動の活動様式について知見を得る。また、断層等でガスサンプリングを実施する。また、流体の起源についての別のアプローチとして、野外の露頭調査からは深成岩体(過去のマグマ溜り)周辺の含水鉱物の分布や、分析による化学組成、さらには冷却結晶化の室内実験において結晶化の進行と発生するガスの挙動を調べ、流体の振る舞いや、流体が深成岩体周辺に100万年単位で蓄積される可能性を検討する。

以上の手法により、過去に大きな地震が起きた地域をモデルケースとして、各要素を推定し、支配的な要素や、要素間の関係性を調べる。これにより内陸地震の空間ポテンシャル評価手法の開発を試みる。

平成31年度は以下の観測調査を行い、既存データと併せて解析を進める。

地震観測：熊本地震震源域、その南部延長部、天草非地震帯および阿蘇を含む領域で稠密地震観測を実施し、地震後応力場推定の精度を向上させるとともに、地震活動様式を詳細に把握することでこれらの時空間変化をとらえるためのデータ取得を開始する。また、既存データの処理解析を進め、布田川ー日奈久断層帯の断層面形状、地震後応力場推定を進める。

測地観測：GNSSによる熊本地震の余効変動観測を継続する。屈斜路ー阿寒カルデラ周辺において連続GNSS観測のデータを収集、解析する。

化学観測：熊本ー阿蘇地域の温泉(3地点)を対象にH₂, 4He, CH₄, N₂, O₂, 36Ar, 40Ar, CO₂, 222Rnのモニタリング連続観測を開始する。

電磁気観測：鶴見岳周辺で10点規模の広帯域MT観測を実施する。

室内実験：アナログ物質を用いて冷却速度が、気泡形成の振る舞いに及ぼす影響を調べるための実験装置のデザインを行う。

重力観測：北海道屈斜路カルデラ・阿寒カルデラ周辺において、これまでの重力観測のデータを整理する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

地震モーメント比を用いた地震発生臨界度評価

マグニチュードと地震発生頻度の関係はグーテンベルグ・リヒター則におおむね従うことが知られ、そのべき定数 b 値は時間空間的に変化することが多く報告されている。特に、 b 値は地殻中の差応力に逆比例することなどが求められている。実験的にはそのみならず、破壊に至る臨界状態によっても変化するという報告もある。

一方、ある領域内で様々な発震機構の地震が発生する場合を考える。多様な地震モーメントテンソルを足し合わせてから計算したモーメントと、個々の地震モーメントの和、これら両者の比（地震モーメント比）を通してみる。弾性ひずみは主応力と45度をなす最大せん断方向の面で滑りが発生するとき最も“効率的”にひずみエネルギーが解放され、比は1になる。既存の亀裂が非最適面でかつ流体圧が高い場合、モーメント比は徐々に低下する。このようにモーメント比は、地震で解放されるモーメントと解放される弾性ひずみの比を表し、地殻の臨界状態を示していると考えられる。そこで、差応力と臨界状態に関係する b 値と、モーメント比を用いて応力状態の評価を試みた。対象を2016年熊本地震発生域として、地震発生前後の発震機構解（Mitsuoka et al. (2022)）と気象庁一元化カタログから得た震源データから解析を行った。2016年4月14日に発生したM6.5以前のデータを解析すると、震源域では b 値の小さい領域がみられたことは従来の研究で指摘されている。さらに地震モーメント比から見るとモーメント比が高い（臨界状態に近い）領域は震源位置近傍に限定される。このように2つの値を用いることでより詳細な地殻応力状態の評価可能性がみいだされた。

九州せん断帯の評価

2016年熊本地震の破壊域の延長上に位置する日奈久断層帯南部では背景の地震活動が活発なうえ、熊本地震によってより応力荷重がすすみ、地震発生ポテンシャルが高まっていると考えられる。この日奈久断層帯南部と周辺領域の応力・変形状態をとらえるため、地震や地殻変動データを詳細に解析した。地震データは九州大学地震火山観測研究センターが日奈久断層帯周辺に設置している稠密地震観測網である0.01満点観測点とその他の臨時・定常地震観測点（図1）を用いた。地殻変動データは国土地理院のGEONETの電子基準点日々の座標値(F5解)を用いて解析を行った。地震観測点の間隔はおよそ5km, GNSS観測点の間隔はおよそ25kmである。地震データからは各地震イベントの震源位置、発生メカニズムを示す発震機構解と、その発震機構解から得られる地震モーメントテンソルを求めた。対象領域を緯度経度0.05°間隔の格子でブロック分けをし、さらに主要断層面(日奈久、緑川断層)をブロック境界とした。各ブロック内で地震モーメントテンソルを足し合わせることで地震発生領域における応力場を推定した。また、GNSSデータからは観測点の各日の位置座標を示す日々の座標値から人為的な変動や季節変動を除去したうえで、定常的な変位速度と単位時間あたりの変形の割合を示す歪み速度を計算することによって日奈久断層帯周辺の歪み速度場を推定した。

解析の結果、日奈久断層帯周辺の領域で応力場と歪み速度場を推定し、両者の主軸の向きを検討した（図2）。断層を挟んだブロックの一部では主応力方向に違いがみられ、断層面が弱い可能性を示唆された。また、推定された主応力、主ひずみ速度を比較したところ、日奈久断層帯の西側では両者ともおよそ南北伸張・東西圧縮の傾向を示していたが、日奈久断層帯の東側の緑川断層周辺において両者の主軸の向きに大きな違いが見られた。これも、断層帯がせん断帯として働いている可能性を示し、地域の応力場不均質を生み出す要因となっていることが示唆される。

変形場

屈斜路カルデラ周辺において、昨年度より継続して連続、キャンペーンGNSS観測を実施した。2021年秋頃から発生した非定常変動は北海道大学、GEONET、ソフトバンクの稠密観測網により引き続き2023年秋頃までカルデラ中央部での明瞭な膨張を示す変動の継続が見られ、また2021-2022年よりも2022-2023年の方が、変動量が大きかったことが分かった。基線長変化は、2013年から2021年ま

での定常的な累積短縮量と2021年から2023年の2年間の累積伸張量が同程度になる基線もあることが分かった。また、上下変動の精度向上を目指すために屈斜路湖畔の約15 kmの道路沿いに新たに水準測量路線を構築し、2023年9月に初回の観測を実施、加えてSAR干渉法やGNSS観測による推定変動源の直上に近い数点では11月にも再度測量を行った。GNSSと水準測量の観測結果を説明する火山性変動源についてモデル化を検討した。1990年代に近い場所で発生した膨張変動は、Fujiwara et al. (2017)により水平板状、球状圧力源が検討されているため、本研究でもそれを参考に2つの変動源を仮定して最適なパラメータを推定した。水平板状では深さ6 km、球状圧力源では深さ4.4 kmのところにもいずれも107 m³オーダーの体積変化を伴う膨張変動源が推定され、RMSで比較すると、球状圧力源を仮定した方が観測値をよく説明する(図6)。推定されたパラメータは1990年代の膨張変動イベントで推定された変動源と近い場所にあると予想されるが、必ずしも全てのパラメータが一致するわけではなく、この地域で発生する膨張、収縮変動の時空間変化を把握するには、継続的なモニタリングを行うことが必要である。

相対重力計による繰り返し重力観測も実施した。2021年を境とするGNSS、水準測量の観測値から予想される重力変化は小さいため、これらのイベントに伴う重力の顕著な変化は見られなかった。観測データの安定性を担保するため、観測網の見直しを行い、それに従った観測を実施した。

2019年までにGNSS観測から得られていた定常的な収縮変形場を説明し、内陸地震発生ポテンシャルとの関係を検討するため、有限要素法を用いた変形モデルの構築を引き続き行った。昨年度までのテクニカルな問題として、プレート収束に起因する西北西-東南東方向の定常的な加圧の期間が短く計算時間が十分でなかったこと、カルデラ外部(特に地下40 km以深)の物性の取り扱いが正しくない可能性が指摘されていたことがあり、その2つについて改善を検討した。定量的評価には至らなかったが、これらを改善することで、カルデラ下の粘性が低い地下構造に対応した不均質なひずみ、応力分布が認められ、カルデラ縁辺部では応力が、カルデラ中央部では地表のひずみや変位が大きくなることが確認された。地震活動はカルデラ縁辺部で比較的多いことが知られていることから、地下の不均質構造がこれらの地震発生に関係することが考えられる。

(謝辞: 本研究で使用したソフトバンクの独自基準点の後処理解析用データは「ソフトバンク独自基準点のデータの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の枠組みを通じて、ソフトバンク株式会社およびALES株式会社より提供を受けたものを使用しました。記して感謝いたします。)

能登半島地震前の応力場

2024年1月1日に発生した能登半島地震(M7.6)は大きな被害をもたらし、現在も活発な余震活動が続いている。この地震に先立ち、2020年から活発な群発地震活動が続き、2023年5月5日にM6.5が発生している。我々は東京大学と共同でこの地域に2022年8月から地震観測点6点を展開し、詳細な発震機構を求めめるために観測を継続している(図3)。我々はM7.6発生前のデータを解析し、発震機構の特徴や応力場について検討した。得られた発震機構の特徴としてはおおむね逆断層の傾向を示している(図4)。一方で、メカニズム解のばらつきも大きい。震源域は半島に位置しているため、観測網のカバレッジが悪く、詳細な発震機構を得ることが難しい。そこで、composite focal mechanismを領域に分けて推定した(図5)。その結果、北西-南東圧縮の傾向がよりはっきりとみられた。さらに、震源域西部の深部?においてはM6.5地震後に西北西-南南東圧縮の傾向がみられ、応力場が変化していることが明らかになった。また浅部においてはM6.5前後で逆断層から横ずれ断層に変化しているように見られ、M6.5地震によって鉛直応力が強まった可能性がある。

比抵抗構造

内陸地震発生域の比抵抗構造に共通した特徴が抽出された。本課題において北海道道東部で実施してきた広帯域MT観測と、論文化されている既存データ(Ichihara et al. 2009, 2013, Inoue et al. 2022)を合わせた合計168カ所の観測点データを用いて、屈斜路-阿寒地域の3次元比抵抗構造を推定し、屈斜路、雌阿寒、両火山直下において低比抵抗体がイメージされ、両者は深くなるにつれ西側に伸びているという結果が得られた。1949年から2015年での規模の大きな(M4-M6)内陸地震はこの2つの低比抵抗体に挟まれた比較的高比抵抗な領域で発生していることが示された。本年度はこれまでの観測点分布を補間するように16ヶ所の広帯域MT観測点を追加し、西に伸びる低比抵抗異常体の深部を制約することを試みた。

前述の北海道道東16点の追加観測データには異常位相が含まれていた。MT法観測では、電場と磁場の位相差が通常(90°)を逸脱した位相差(異常位相: phase out-of-quadrant: POQ)が観測さ

れることがある。モデル計算によって、鉛直に対して傾いた低比抵抗柱がPOQを発生させることが示されている(Inoue and Hashimoto, in revision)。傾いた低比抵抗柱は、マグマ上昇などに関わる流体経路に関わっていると想像できるため、POQに着目することによって、火山下のマグマ供給系のイメージングの高精度化に貢献できる可能性がある。九州でも九重火山、由布鶴見火山、大崩山バソリスにおいてPOQが観測されており、3次元解析から九重火山(Aizawa et al. 2022)、由布鶴見火山(相澤他, 2023)は傾いたもしくは折れ曲がった低比抵抗柱によって説明されることが分かった。

1997年鹿児島県北西部地震(M6)と比抵抗構造の対応を、既存広帯域MTデータ(Umeda et al. 2014)と新規に観測した広帯域MTデータを用いて調べた。観測点数を増やすこと、インピーダンス非対角成分に加えて対角成分と地磁気変換関数も用いること、海を3次元モデルに組み込むこと、等により震源域周辺の詳細な比抵抗構造を推定した。その結果1997年3月、5月の両地震の破壊は低比抵抗体の端部から始まったことが示唆された。3月の地震については東西方向の破壊域を挟むように、その西側と東側に低比抵抗体がイメージングされた。また低比抵抗体には含まれた高比抵抗体は地表の深成岩体の分布とほぼ一致した。本震の破壊域が5kmと小さいこともあり、破壊と比抵抗構造の議論のためには震源域周辺でより空間解像度の高い比抵抗構造を推定する必要性がモデル計算から明らかになったため、2024年3月に追加MT観測を行う。

島原半島全域で2017-2021年にかけて得た70点の広帯域MT観測データの解析から、雲仙1990-1995年噴火のマグマの移動経路は、深さ5kmより深部に存在する100-3000 Ωm 程度の高比抵抗体、およびその上部に位置する1-10 Ωm 程度の低比抵抗体、いずれとも一致せず、両者の境界付近と一致することが分かった(Triahadini et al., 2023)。これらの結果は、高比抵抗体、低比抵抗体、いずれも流体が移動しやすい場所ではなく、その構造境界に流体が多く存在し、その移動が様々な地殻活動を発生させるという、本課題から示唆されてきた描像と一致した。

化学観測

阿蘇内牧温泉(ASO, 深度35m)と2016年熊本地震震源付近の温泉(KUM, 深度1200m)、布田川断層からおよそ10km北側に位置する大谷の湯(OTN, 深度1100m)の3観測点において、繰り返し採取による溶存ガスの希ガス分析および酸素水素同位体分析とイオン分析を行い、深部起源ガスおよび深部起源水が観測点の帯水層に供給されている状況を評価した(Tsunomori et al. 2024)。2013年から2021年の間の深部起源ガスの付加を示す $3\text{He}/4\text{He}$ の値は $3\sim 4\text{Ra}$ (Raは大気の $3\text{He}/4\text{He}$ の値)でほぼ一定であった。 $3\text{He}/4\text{He}$ 値や $4\text{He}/20\text{Ne}$ 値は、2016年熊本地震前後で不連続な変化はみられなかった。これらのことから、3つの観測点の帯水層に対する深部起源ガスの供給状態は安定しており、2016年の地震によって影響されなかった、と考えられる。2021年の間の $\delta\text{D}\cdot\delta 18\text{O}$ の値変化を見ると、ASOの熱水は天水起源である一方、KUMとOTNの熱水には有馬型熱水(深部起源水)の付加が認められた。有馬型熱水の付加を示す指標となるLi/Cl値は、ASOでは火山性熱水の性質を示し、KUMとOTNが有馬型熱水に近い地層水の性質を示して、いずれも海水の値に比べ高い値であった。 $\delta\text{D}\cdot\delta 18\text{O}$ 、Li/Cl値、いずれの値も観測期間中安定していた。以上のことから、阿蘇熊本地域の3つの観測点の帯水層に対する深部起源水の供給状態は安定しており、2016年の地震によって影響されなかった、と考えられる。

阿蘇内牧温泉(ASO, 深度35m)と2016年熊本地震震源付近の温泉(KUM, 深度1200m)において溶存ガスの組成変化の連続測定を継続した。また、得られたデータからの深部起源ガスの量と組成の変化の推定を行った。2022年11月にはKUMからOTNに観測点を移し観測を継続した。ASOの溶存ガス組成は、2021年10月末の阿蘇山の活動活発化の前から不安定になり、活発化ピークの2か月後に大気成分の割合の顕著な増加が捉えられた。この期間中、源泉や配管に人為的な操作による攪乱は記録されていないことから、この変化は熱水溶存ガスの組成変化であると考えて良い。これと同様の変化が40km離れたKUMにおいても同時期に観測された。阿蘇では2022年10月にも火山活動が活発化した。火山活動が活発化して4か月後に溶存ガス組成は再び不連続な変化を示した。今回の溶存ガス濃度の変化は、2021年10月のときの変化と極性が反対であった。すなわち、2021年10月の時は火山活動が活発化してから2か月で深部起源ガスが見かけ上減ったように見えるのに対し、2022年10月の時は活発化してから4か月で深部起源ガスが見かけ上増えたように見える。

野外地質調査

大崩山花崗岩体の調査とサンプルの物質科学的分析から、派生岩脈では定置後マグマの動きはなく、ほぼ熱伝導で冷却し、冷却境界付近からは、石英と斜長石が選択的に急成長し、岩脈中央部に揮発性

成分濃集の証拠である粒径の大きいペグマタイト層を形成したことがわかった。一方、岩体本体との接触部では、熱伝導で冷却した証拠は見られず、冷却結晶化と同時にマグマが運動していたことを示唆する。また、H₂O-CO₂-KClを用いたマグマだまりの冷却を模した室内実験から、冷却面からの針状結晶の急成長によって結晶化フロントで気泡が形成することがわかっている。これらのことから、1) 接触部で結晶過程によって形成した揮発性成分濃集部分は、対流によって内部に移動することによって、マグマだまり全体が揮発性成分に濃集していくこと、2) 接触部で結晶化する鉱物種によって、内部への揮発成分の濃集過程は異なり、黒雲母や角閃石などの含水鉱物が選択的に結晶化した場合、揮発性成分の濃集は起こらないことがわかった。

桜島の歴史時代噴火の噴出量の時系列生成モデルと噴出物の物質科学的分析から、噴出前のマグマだまり中の気泡(Pheno-bubble: 斑泡)量と噴出量に関係があることがわかった。噴出量は、噴出時間によって決まり、噴出時間は、マグマだまりの実効体積弾性率が小さい(圧縮率が大きい)ほど長くなり、そのため噴出量が大きくなるという考え(Hupper and Woods, 2002)と整合的である。マグマだまりの圧縮性を担っている斑泡は、周辺部での結晶化とそれによって吐き出された揮発性成分が対流によってマグマだまり内部へ運ばれたことによって生成したと考えられる。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

内陸地震の空間ポテンシャル評価について5ヵ年を通じて、以下のような結果を得た。

大地震の破壊開始点となる可能性が高い場所は

1. b値が低い場所(規模の大きな地震が相対的に多く起こる場所)
2. モーメント比が高い場所(最適面な地震が多く起こる場所)
3. 低比抵抗体の端部(高温高压のfluid-richな領域の端部)
4. 群発地震活動が過去に見られた場所(地殻に傷がある場所)

であり、

破壊が停止する場所は

5. 高温高压のfluid-richな領域の端部、または破壊強度が強い深成岩体の端部
- である。

火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明について5ヵ年を通じて、以下のような結果を得た。

マグマ供給系については、構造境界がマグマ、および流体の選択的な上昇経路になっている可能性を示唆した。熱水系については、深さ2 kmより浅部に低浸透率な熱水変質層があり、その下部で地震活動が活発であることを示した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

1-(5)-イ 内陸地震

1-(5)-エ 地震発生と火山活動の相互作用の理解

内陸地震の空間ポテンシャル評価について5ヵ年を通じて、以下のような結果を得た。

大地震の破壊開始点となる可能性が高い場所は

1. b値が低い場所(規模の大きな地震が相対的に多く起こる場所)
2. モーメント比が高い場所(最適面な地震が多く起こる場所)
3. 低比抵抗体の端部(高温高压のfluid-richな領域の端部)
4. 群発地震活動が過去に見られた場所(地殻に傷がある場所)

であり、

破壊が停止する場所は

5. 高温高压のfluid-richな領域の端部、または破壊強度が強い深成岩体の端部
- である。

今後、事例研究を増やし有用性を検証する必要がある。

内陸大地震の空間ポテンシャル評価にとって未解決な課題としては、

6. 破壊の進展方向の推定

7. 断層すべりが最も大きい領域の推定

がある。6. は大地震の破壊開始点付近の群発地震の震源メカニズム解析や、ドップラー効果を応用した解析が今後有効と思われる。7. は深さ10km付近の地下構造の空間解像度を数kmに上げること、

ならびに強震動データ解析における不確定性を軽減することが必要と思われる。

1-(5)ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明
マグマ供給系については、構造境界がマグマ、および流体の選択的な上昇経路になっている可能性を示唆した。熱水系については、深さ2 kmより浅部に低浸透率な熱水変質層があり、その下部で地震活動が活発であることを示した。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Toramaru A., Kichise T.,2023,A New Model of Crystallization in Magmas: Impact of Pre-Exponential Factor of Crystal Nucleation Rate on Cooling Rate Exponent and Log-Linear Crystal Size Distribution,Journal of Geophysical Research- Solid Earth. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,128,e2023JB026481,doi:10.1029/2023JB026481,査読有,謝辞有
Huber C.,Toramaru T.,2024,Increase in magma supply to Sakurajima volcano' s (Japan) shallow magma chamber over the past 500 years,Geology,doi:10.1130/G51763.1,査読有,謝辞無
Tsunomori F., Morikawa N., Takahashi M.,2024,Deep-Seated Fluids in Thermal Waters Before and After the 2016 Kumamoto Earthquakes,Groundwater,doi:10.1111/gwat.13394,査読有,謝辞有
Triahadini A., Aizawa K., Hashimoto T. M., Chiba K., Uchida K., Yamamoto Y., Miyano K., Muramatsu D., Aniya S., Okubo A., Kawamura Y.,2023,Magma transport along structural boundaries in the upper crust: Insight from broadband magnetotelluric constraints on the structure beneath Unzen volcano, Japan,Geophysical Journal International,234,1268-1281,doi:10.1093/gji/ggad126,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

KYU_01 断層帯の不均質の実態と現状の把握と地震発生機構の解明
KYU_03 九州地下のマグマ上昇経路と地殻活動の関連性
KYU_02 内陸地震域の比抵抗構造再調査と地震発生ポテンシャル評価の有効性検証
HKD_04 測地・地下構造データに基づく内陸地震・火山活動地域の地殻変形のモデル化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

相澤広記（九州大学）,松本聡（九州大学）,松島健（九州大学）,清水洋（九州大学）,寅丸敦志（九州大学）
他機関との共同研究の有無：有
大園真子（北海道大学）,高橋浩晃（北海道大学）,橋本武志（北海道大学）,角森史昭（東京大学）,中尾茂（鹿児島大学）,小泉尚嗣（滋賀県立大学）,市原寛（名古屋大学）,柴田智郎（京都大学大学院理学研究科）,岡大輔（北海道立総合研究機構産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所）,名和一成（産業技術総合研究所）,森川徳敏（産業技術総合研究所）,志藤あずさ（岡山理科大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：九州大学地震火山観測研究センター
電話：092-802-4347
e-mail：aizawa@sevo.kyushu-u.ac.jp
URL：http://www.sevo.kyushu-u.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：相澤広記
所属：九州大学地震火山観測研究センター

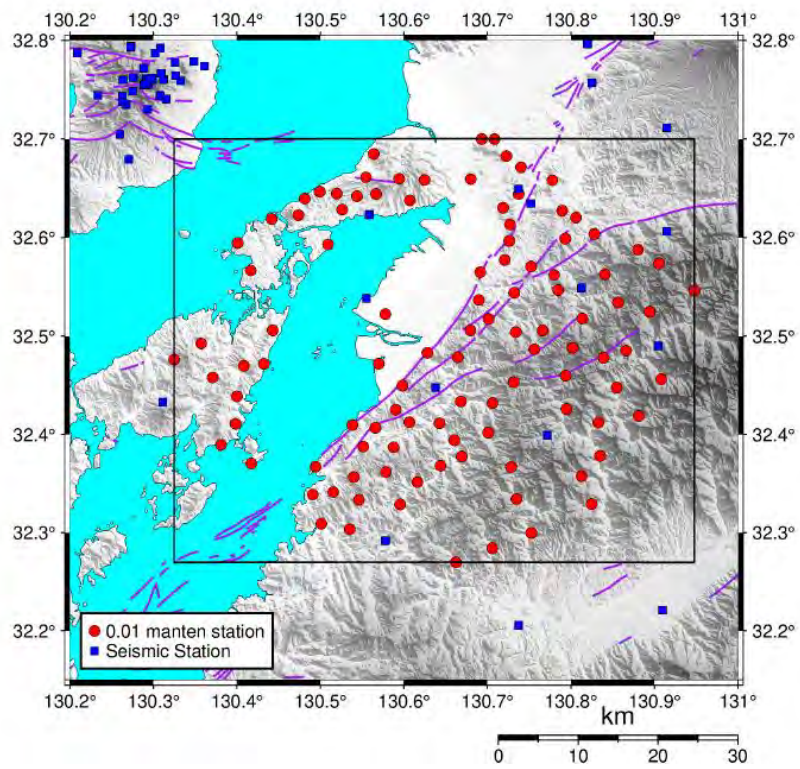


図 1

日奈久断層南部に展開している地震観測点分布。赤丸：”日奈久0.01満点地震観測点“の上下動地震計設置位置、青丸：そのほかの3成分地震観測点。黒枠が解析領域。

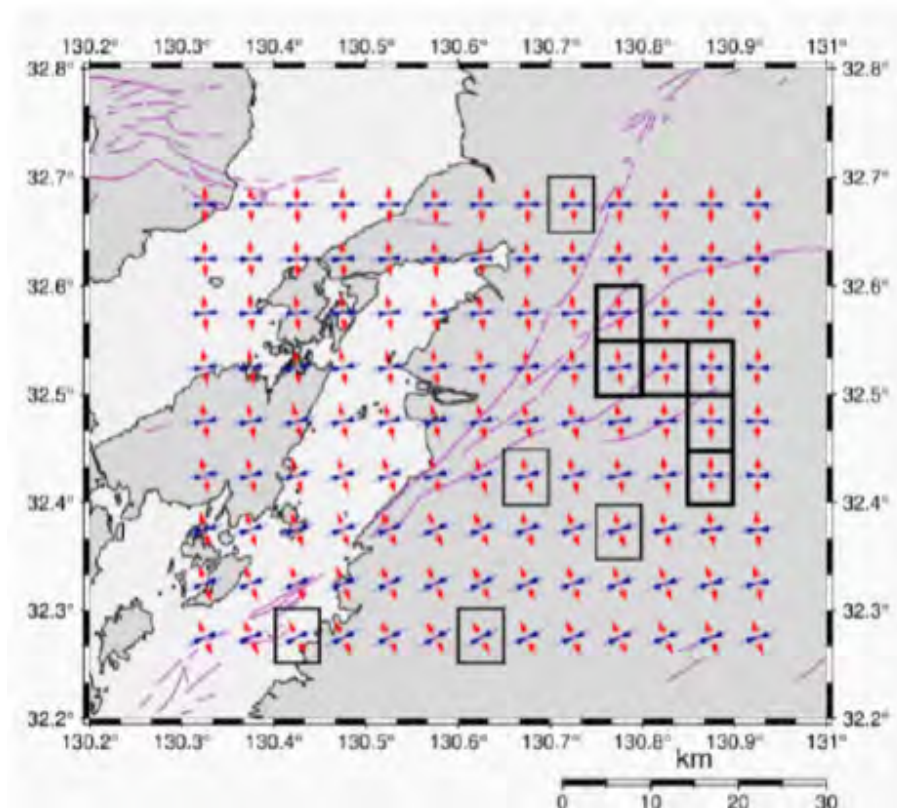
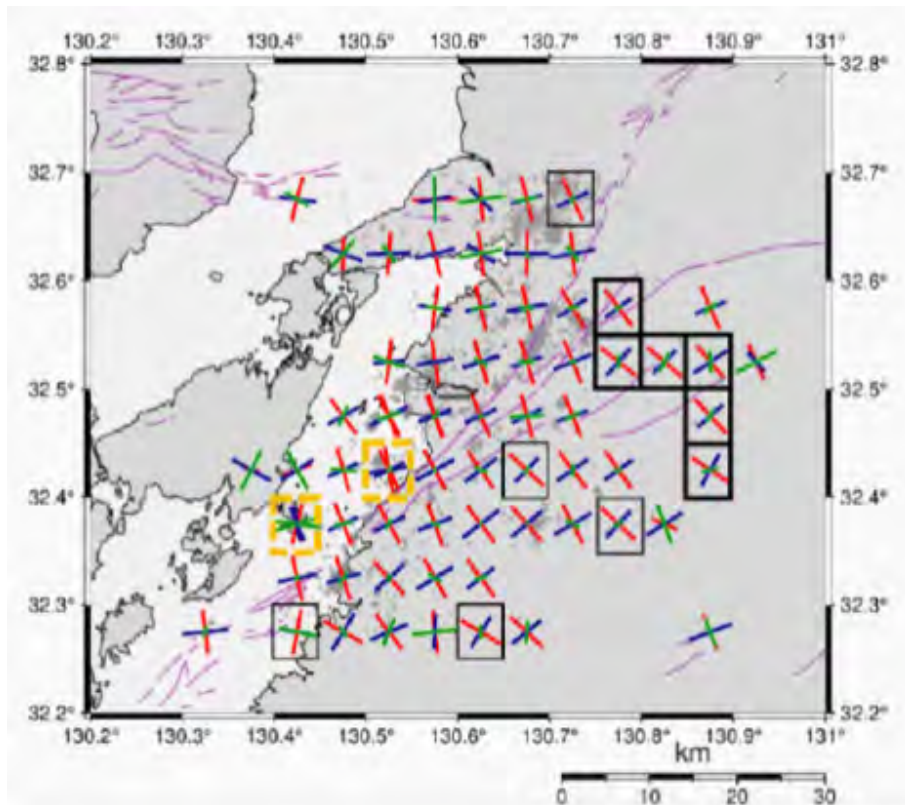


図2

主応力方向と主ひずみ速度方向。上) 地震モーメントテンソルデータから求めた偏差応力の主軸。赤は最大伸長、青は最大圧縮軸方向を示す。黄色枠のブロックでは断層の上盤側とした盤側で違いがみられた場所を示す。下) GNSSデータから計算した主ひずみ速度方向。赤は伸張、青は短縮方向を示す。黒枠で囲まれたブロックは応力とひずみ速度の差異が30度より大きい。

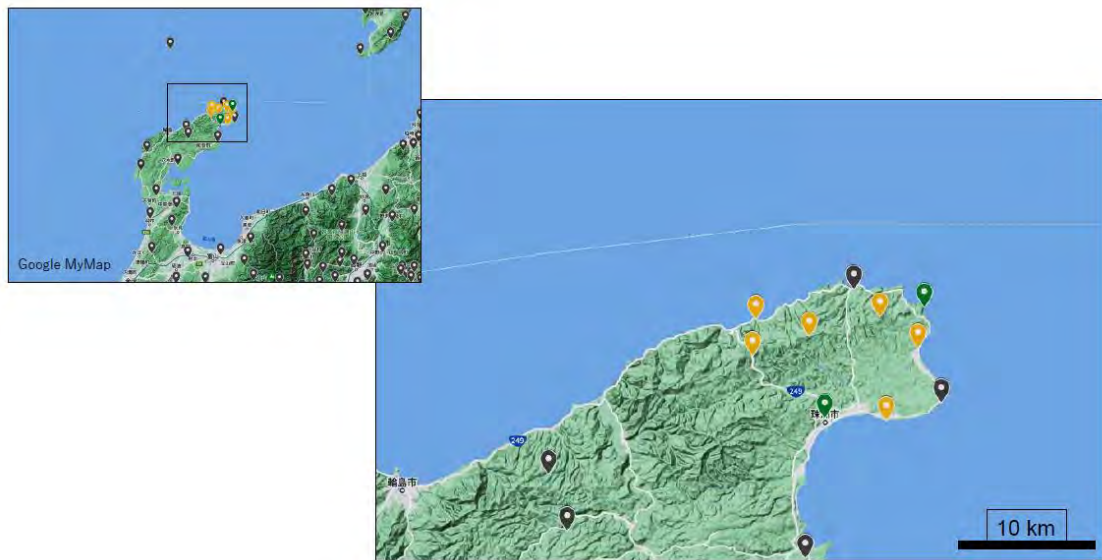


図3

地震観測点分布。能登半島地域に展開している臨時地震観測点（黄色：上下動のみ、準オンライン、緑：東大地震研の3成分地震観測点、オンライン）

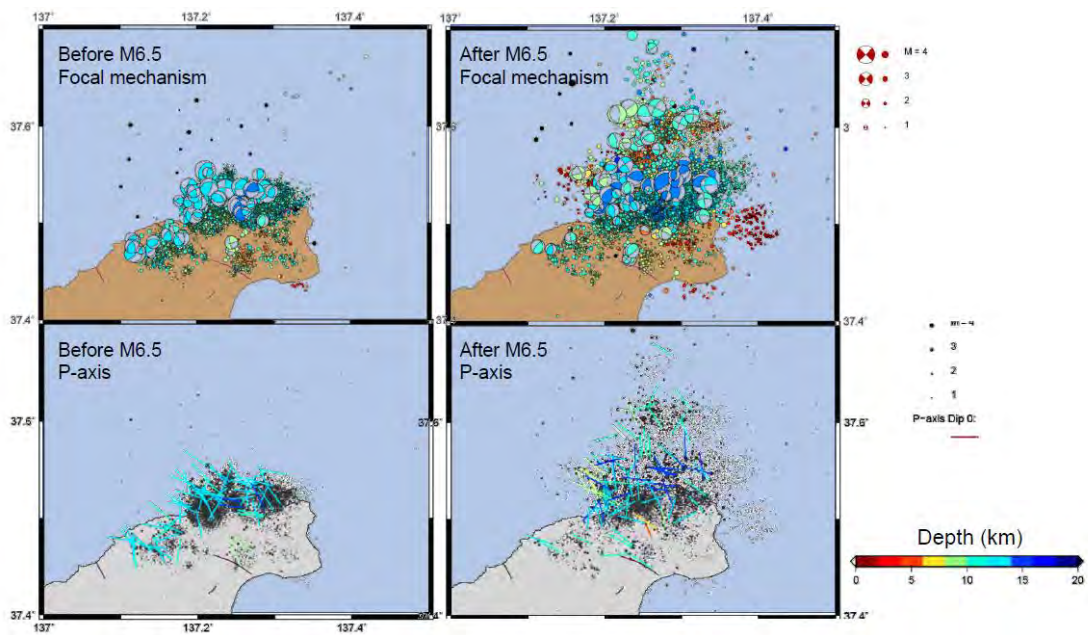


図4

2023年5月5日に発生したM6.5の地震前後の震源分布と発震機構解（上）及びP軸（下）分布。色は深さを表す。震源、初動極性は自動処理によって決定された。

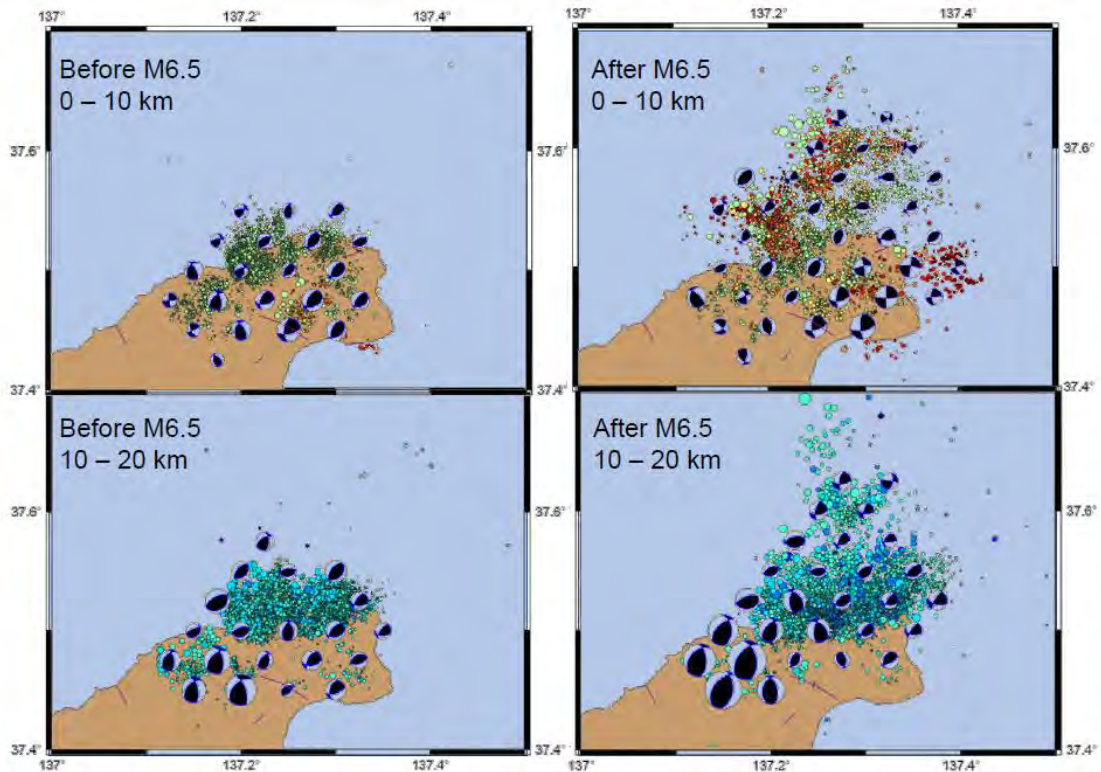


図5
Composite focal mechanismの分布。深さ方向は2レンジ、水平方向は0.05度の幅で0.025度ずつずらしたブロック内で計算した。色丸は震源分布。ビーチボールは下半球投影で大きさは含まれる地震数に比例している。

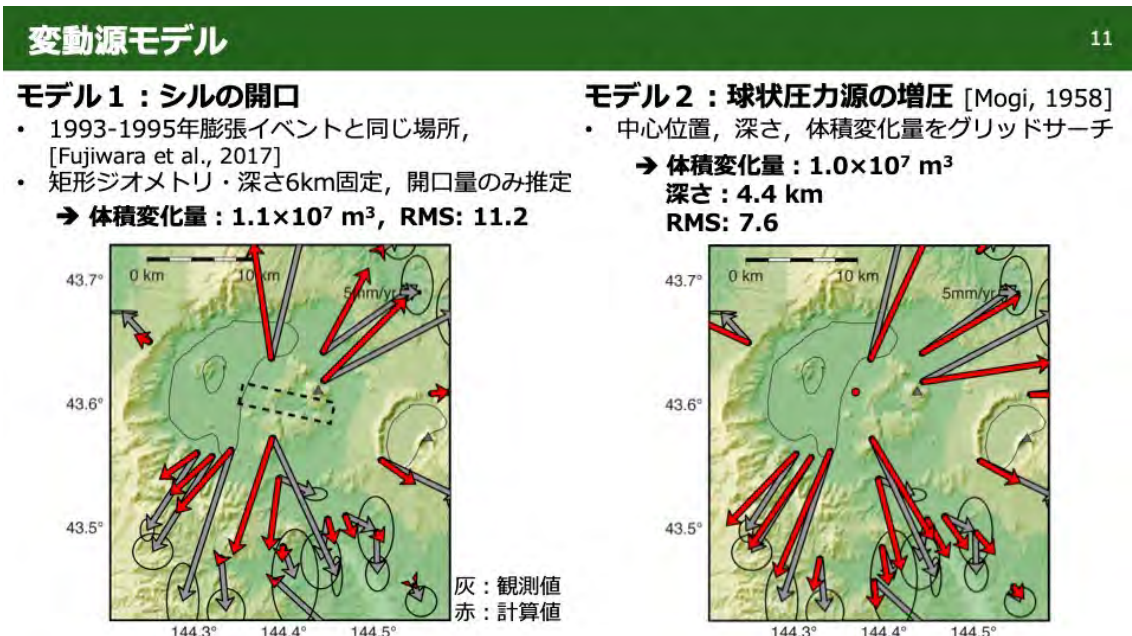


図6
2021年9月から2023年9月までの膨張地殻変動とそのモデル化。モデル1：1993-1995年の膨張イベントを説明した水平板状モデル(Fujiwara et al., 2017)のジオメトリで固定し, 開口量のみを推定した結果, 左：球状圧力源の位置と体積変化量をグリッドサーチで推定した結果。

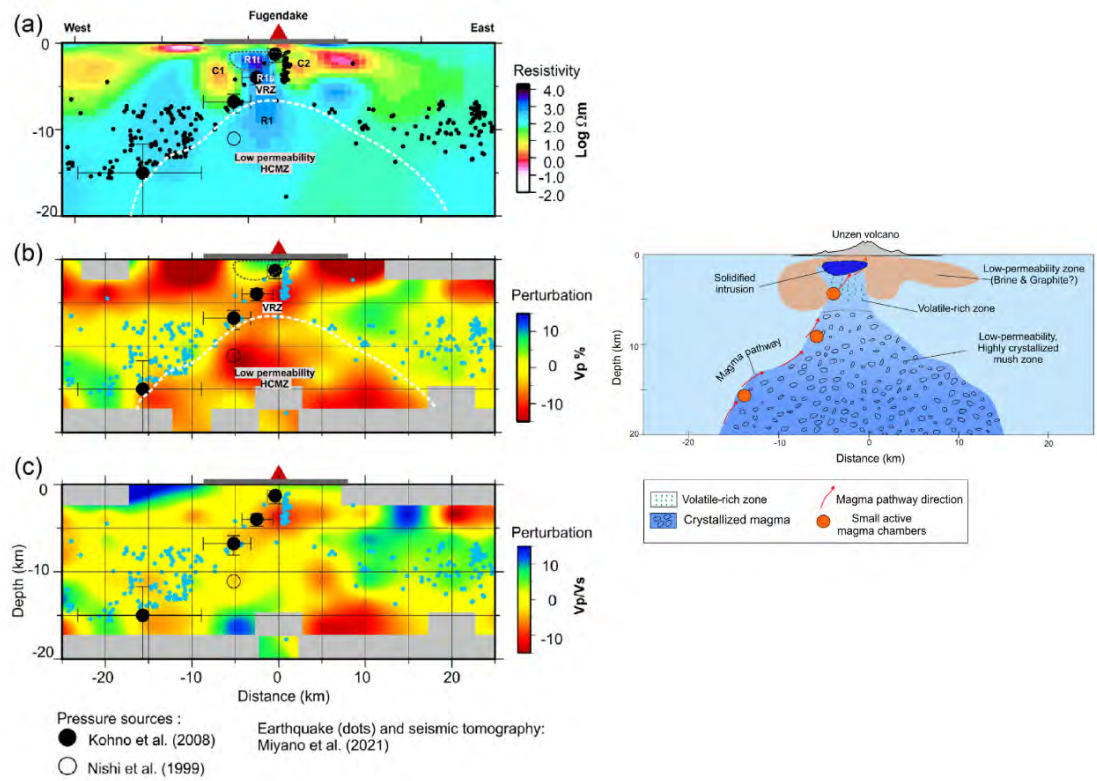


図 7

雲仙火山地下の地下構造とその解釈 (Triahadini et al. 2023)。 (b)(c)の地震波速度構造はMiyano et al. 2021による。 1991-1995年の噴火活動では構造境界をマグマが上昇したと解釈した。

(1) 実施機関名：

山梨県富士山科学研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

富士山の事象系統樹を精緻化するための噴火履歴の研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

火山

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

富士山におけるテフラ層序や年代未詳の噴出物の年代を決定させることにより、噴火履歴を高精度化し、その結果をもとに噴火事象系統樹を精緻化する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

富士山の噴火事象系統樹を精緻化するために、詳細な噴火履歴と噴火推移が必要である。そのため、地質調査およびトレンチ調査を実施し、富士火山東麓におけるテフラ層序の再検討を行う。また、堆積物中の有機分子を使った年代推定手法の検討や古地磁気の永年変化を用いた溶岩の年代決定法を検討し、年代未詳の溶岩やテフラの年代決定を行う。さらに、富士山噴出物の既存研究のデータを集約し、調査研究で得られたデータと共に富士山噴出物データベースを構築し、これらのデータを基に噴火履歴の高精度化、噴火事象系統樹の精緻化に取り組む。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

富士山のマグマ全体の化学的な特徴を把握する為に、文献などから計1417の噴出物の全岩主要元素組成を収集した。次に、構築したデータセットに対しk-平均法クラスタリング解析（KCA）を行った結果、5つのクラスターに分けられた。3つのクラスターは凡そ、星山期、富士宮期、須走期の噴出物にそれぞれ対応し、残り2つは宝永噴火の初期に放出されたデイサイト～安山岩質の軽石に対応する。

続いて主成分分析（PCA）を行った結果、4つの主成分で全体の95%以上を、6つの主成分で全体の98%以上を説明できることが判明した。第1主成分（寄与率54%）の軸では、宝永噴出物中の軽石とその他の玄武岩質の噴出物が明瞭に分かれる。これは、マグマの分化過程あるいはマグマ溜まりの違いを反映している。第2主成分（寄与率28%）の軸では、活動期ごとにデータが分かれ、これは、活動期ごとのマグマの系統的な組成変化・違いを反映している。

詳細なテフラ層序を確立するため、富士山の北麓から東麓の合計17地点の地表露頭調査およびトレンチ調査を実施し、また、山中湖の堆積物コア試料も活用した。調査の際には、露頭での識別が比較的容易な宝永噴出物（Ho）、砂沢スコリア（Zu）、大室降下火砕物（Om）、忍野スコリア（Osi）を指標テフラとして、層序記載をおこなった。テフラ層直下の土壌の放射性炭素年代測定、テフラの全岩化学組成分析および粒子形状測定を実施し、定量データに基づく対比をおこなった結果、北東麓には指標テフラであるZuとHoの間に比較的規模の大きなテフラ層が6枚あることが明らかとなった。それらを暫定的に上位からNE1～NE6とすると、噴火年代は古いものから順に、NE6は約2800～2700年前、NE5は2600～2200年前、NE4は約2300年前、NE3は約1700～1600年前、NE2は約1600～1400年前、NE1は約1300～1000年前である。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

富士山の噴火履歴を精緻化するため、噴出物層序の確立、年代測定（古地磁気年代、放射性炭素年代）を進めた。また、富士山のマグマ組成の特徴を把握するため、噴出物の化学組成分析（全岩化学組成分析、LA-ICP-MS分析）を行うとともに既存文献から噴出物データベースの作成を進めた。その結果、年代未詳であった溶岩流・火砕流堆積物やテフラ層の年代、および宝永山の形成過程が明らかになると共に、湖底堆積物を用いた年代測定手法を確立することができた。また、噴出物の化学組成に関するデータ収集と解析により、富士山のマグマ組成の変化についても検討を始めた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

「関連の深い建議の項目」である2(4)アに関連して、富士山の長期的活動を評価するための噴出物の層序、年代、化学組成などの基礎データの収集と分析が進められている。今後も他機関と連携してデータ蓄積を継続していく。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Yamamoto, S., Kametani, N., Yoshimoto, M., Miyairi, Y., Yokoyama, Y., 2023, Eruptive history of Mt. Fuji over the past 8000 years based on integrated records of lacustrine and terrestrial tephra sequences and radiocarbon dating, *Quaternary Science Advances*, 100091, doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100091, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

勝木悠介・坂田周平・西澤達治・高橋正樹・中井俊一・中村仁美・原口悟・岩森光, 2023, Geochemical variations of volcanic rocks in Mt. Fuji: Magmatic processes identified by Independent Component Analysis, *JpGU2023, SVC36-06*

勝木俊介・坂田周平・西澤達治・高橋正樹・中井俊一・中村仁美・原口悟・岩森光, 2023, 富士山噴出物の化学組成の多変量統計解析, *日本火山学会秋季大会, A3-13*

Katsuki, Y., Sakata, S., Nishizawa, T., Takahashi, M., Nakai, S., Nakamura, H., Haraguchi, S., Iwamori, H., 2024, Chemical Compositional Variation of Basalts of the Fuji Volcano, Central Japan, Decoded by Unsupervised Machine Learning, *AOGS2024, SE14-A006*

亀谷伸子・吉本充宏・山本真也, 2023, 富士火山北麓および東麓のテフラ層序の再検討, *日本火山学会秋季大会, P67*

西澤達治・吉本充宏・亀谷伸子, 2023, 馬伏川岩層なだれ堆積物から探る星山期以前の富士山山体とマグマ活動, *JpGU2023, SVC36-09*

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

富士山の噴火履歴の研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

山梨県富士山科学研究所,富士山火山防災研究センター

他機関との共同研究の有無：有

安田敦（東京大学地震研究所）,岩森光（東京大学地震研究所）,中村美千彦（東北大学理学研究科）,嶋野岳人（鹿児島大学理工学域理学系）,田島靖久（日本工営株式会社中央研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：山梨県富士山科学研究所

電話：0555-72-6211

e-mail：www-admin@mfri.pref.yamanashi.jp

URL：http://www.mfri.pref.yamanashi.jp/index.html

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：吉本充宏

所属：山梨県富士山科学研究所

(1) 実施機関名：

山梨県富士山科学研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

火山モニタリングと地下水流動把握のための多点連続重力観測

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

イ. 観測・解析技術の開発

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題ではこれまで同様、井戸や湧水等での水位観測・水質観測によって富士山麓の水の流れを追うとともに、重力観測を行うことで広域的に水の動きを追うことを試みる。水位観測については可能であれば観測点数の増強を行い、重力連続観測点についても複数点展開する。これまでに明らかになった水理地質構造に基づき地下水流動による重力効果のシミュレーションを行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度～32年度においては重力観測点の整備を行い観測データの即時的流通を図るとともに、水質調査による水理地質構造の解明をすすめる。また、研究所内井戸の水位観測を実施しデータの流通を図る。平成35年度までには、重力観測データ蓄積により季節変動成分が議論できる状態になり、水位観測データを参照することで既知の水理地質構造中での地下水流動による理論重力値を観測値と比較できる状態を目指す。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

今年度は重力観測網の拡充及び、前年度より継続したキャンペーン観測を実施した。これまではスバルラインの起点付近の富士山科学研究所点と終点の5合目点において絶対重力測定が実施できる環境を整備し、中間各点を相対重力計によって測定してきた。今年度は富士山から距離のある都留文科大

学の図書館内の一室に新たな基準点を設け絶対重力測定を実施した。この基準点は富士山科学研究所内の観測点からさらに500mほど標高が低い。これにより富士山重力観測網内の重力差はこれまでよりも大きくなり、引き続き重力測定精度向上のための様々な取り組みに活用できる。また、火山活動による重力変化の可能性が極めて低いこともあり、富士山噴火の際の重力参照点のバックアップ的な役割を果たすことが期待できる。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本研究課題では重力観測網の構築によって火山のモニタリング体制を整えると共に、構築した観測網の特性を活かした重力測定精度向上のための取り組みを実施してきた。5年間の取り組みによって目的に耐えうるクオリティの重力観測網の構築を達成し、その標高差による大きな重力差を活かした相対重力計のスケールファクターの決定や、静穏な環境によって高精度な重力鉛直勾配測定の取り組みなど、重力測定の高度化に努めた。最も課題となりうる陸水補正のための具体的な取り組みには至らなかったが、その準備としての水位観測データや気象観測データの整備を進めた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本研究課題に関連の深い建議の項目は5-(3)研究基盤の開発・整備であり、重力観測網の構築によってその目的は達成された。観測インフラのみならず、重力研究コミュニティの重要な研究ターゲットのひとつとして位置付けられ、定期的な観測が実施されるようになったことが大きな成果と言える。他の火山に比べて想定火口範囲が広く、前兆から噴火に至るまでの時間が短いことも想定される富士山において、地殻変動や地震観測とは独立した物理量である重力観測のネットワークができたことは、火山防災上の重要な成果であると言える。また、現時点では静穏な富士山において、連続及びキャンペーン観測によるデータ蓄積が開始されたことにより、平常時のデータをしっかり把握したうえで、火山活動が活発化した際の異常検知に備えることが可能となる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

今西祐一・西山竜一・本多亮,2023,絶対重力計を用いた重力鉛直勾配の測定,測地学会誌,69,8-17,査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

今西祐一・本多亮・丸藤大樹・西山竜一・名和一成,2023,3つの地点における絶対重力測定によるシントレックスCG-3M重力計の非線形感度曲線の検定,日本測地学会第140回講演会,21

今西祐一・西山竜一・本多亮,2023,富士山における2台のFG5による絶対重力測定（2022年9月）－相対重力計検定ラインの構築およびFG5の器差検定－,地球惑星科学関連学会2023年連合大会,SGD01-P01

本多亮・今西祐一・西山竜一・名和一成・風間卓仁,2023,富士山の重力観測網の構築とその活用,地球惑星科学関連学会2023年連合大会,SGD01-P02

本多亮,2023,重力鉛直勾配測定における再現性の検討,日本測地学会第140回講演会,P15

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

山梨県富士山科学研究所 火山防災研究センター

他機関との共同研究の有無：有

名和一成（産業技術総合研究所）,今西祐一（東京大学地震研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：本多亮

所属：山梨県富士山科学研究所

(1) 実施機関名：

奈良文化財研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

考古・文献資料からみた歴史災害情報の収集とデータベース構築・公開ならびにその地質考古学的解析

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
イ. 考古データの収集・集成と分析

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
地震
火山

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

- (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
エ. 桜島大規模火山噴火
(3) 研究基盤の開発・整備
エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

主に以下の6点の目標を中心に取り組み、データベースの拡充を進める。

目標1) 考古発掘調査から地震、火山噴火現象を示す痕跡を明確に識別する方法の開発と、それらの発生時期特定に関わる調査・記録法の普及・啓発。

目標2) 過去の低頻度巨大地震の発生時期の検証と被災分布や具体的な被災像の追跡。

目標3) 海溝型地震と内陸型地震発生の関係。

目標4) 史料による近世地震・火山噴火記録と発掘調査から検証される災害・被災実像の対比から、先史・古代・中世の地震・火山噴火像についてより具体的な現象像の解明。

目標5) 日本全国の百年から千年単位のスケールでの地震・火山噴火発生像の追跡。

目標6) 埋蔵文化財情報についての地域発信（発掘調査現地説明会、学校教育授業への情報提供、出前講演など）を通し災害履歴情報の共有化を進め、災害知識の定着化を目指す。

本研究課題は、2-1(1)「地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析」、2-1(2)「低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明」、2-2(1)「地震発生の新たな長期予測」、2-2(4)「中長期的な火山活動の評価」、2-4(1)「地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明」に根本的に関わる内容である。その上で目標2)～5)の中でおこなっていくデータベースの拡充は、地震・火山噴火災害についての長期的データの収集と解析を基盤とした、a) 長期間での地

震・火山噴火現象への理解、b)「地震発生の新たな長期予測」や「中長期的な火山活動の評価」に結びつく長期間での地震・火山噴火発生履歴への理解、さらにその履歴からc)長期間での災害および被災履歴の解明に結びつくと考えられる。このような取り組みから、地震・火山噴火発生の時期性や地域性としての実態も見えてくる可能性は高い。またデータ収集をおこなって行く中で、時間・空間スケールの大きく異なる史料、考古、地質学的アプローチやデータについて、共有性や連携強化を進め、災害実像解明に資するデータ基盤作成の強化を図る。

目標1)、5)とした「発掘調査における災害痕跡の調査・記録方法の開発と普及・啓発」と「埋蔵文化財情報についての地域発信を通じた災害履歴情報の共有化と災害知識の定着化」を目指した取り組みは、2-5「研究を推進するための体制の整備」に関わり、データベースの公開によるアウトリーチ活動の活性化を図るだけでなく、2-5(2)「分野横断で取り組む総合的研究を推進する体制」、2-5(3)「研究基盤の開発・整備」、2-5(4)「関連分野との連携強化」を支える基盤情報整備として活動を目指し、さらに文化庁や地方公共団体との連携強化を進めることで、2-5(6)「社会との共通理解の醸成と災害教育」への取り組みを目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

この5か年計画では、(7)の項で示した6つの研究目標について進めていく。このうち、目標1)については科研費(平成30年度科学研究費助成事業(挑戦的研究(開拓)))での採択課題「歴史災害の実像解明への考古・歴史・地質学的複合解析による災害履歴検索地図の開発」としてもすでに着手を始めている。目標2)~5)については、5か年計画で進める研究目標としてデータベースを拡充していく内容であり、目標遂行は当然のことである。目標6)については今後の新しい取り組みの一つとなるが、基幹省庁である文化庁との調整を続けていることと、データベースの運用において最も大きな課題となる基盤情報の取得を、地方公共団体を取り込むことで解決する必要があることから、この目標の遂行は是が非でも進める必要がある。資金等において課題があるが、目標の重要性から行政的な任務遂行に向けた挑戦を進めたい。

目標2)~5)の基盤となる全国の発掘調査成果に基づく災害痕跡データの集成とデータ入力については、年度を区切らず継続的に進め、これまでの実績から今後5年間で10万地点程度のデータ精査を進め、4万点程度の災害痕跡を抽出できる見込みである。その上で、以下の通り次の5か年計画で進める概要工程を示す。またデータ集成組織の更新に向けた基幹省庁との調整は、適宜進める。

【平成31(令和元)年度】

- ・奈良県全体の地震痕跡を中心に地震発生時期の特定と検証をおこなう(目標2、3)。
- ・上記の地震痕跡をもとに近畿エリア(主に兵庫県、大阪府、京都府、和歌山県)の地震痕跡を整理し、被災分布や具体的な被災像の追跡や海溝型地震と内陸型地震発生の関係の検討を進める(目標2、3)。
- ・九州エリア、中国エリア、関東エリアにおける火山噴火災害痕跡を整理し、発掘調査において検証されうる災害の網羅をおこなう(目標4)。
- ・災害痕跡情報の集成や調査研究を通し蓄積される情報を取りまとめ、調査・研究、災害痕跡の記録方法等について検討する(目標1)。
- ・上記の成果についてリーフレットを作成し情報のアウトリーチを進める(目標6)。

【令和2(平成32)年度】

- ・1年目で修正した災害痕跡データを基幹に、東海、四国、九州沿岸の考古災害痕跡データを整理することで、南海トラフ型地震の具体的な地震像の抽出を進める(目標2、3)。
- ・近畿エリア、九州エリア、中国エリア、関東エリアを中心に、近世地震・火山噴火記録と発掘調査資料とを細かく対比し、その実像解明に向けた調査研究を進める(目標4)。
- ・上記の調査研究を基幹に、近畿エリアを中心に史料に残されていない、発掘調査から発見される過去の地震・火山噴火像、記録のない地域や時期における実態解明を進める(目標4)。
- ・上記の成果についてリーフレットを作成し情報のアウトリーチを進める(目標6)。

【令和3(平成33)年度】

- ・南海トラフ型地震の具体的な地震像の抽出を継続して進める(目標2、3)。
- ・日本全国の百年から千年単位のスケールでの地震・火山噴火発生像の追跡を進める(目標5)。
- ・上記の成果についてリーフレットを作成し情報のアウトリーチを進める(目標6)。
- ・埋蔵文化財情報についての地域発信(発掘調査現地説明会、学校教育授業への情報提供、出前講演

など)を通し災害履歴情報の共有化を進め、災害知識の定着化のための試験的作業を進める(目標6)。

【令和4(平成34)年度】

・1~3年目までの作業を進め、データベースやアウトリーチ化を進めると共に、研究内容、東大史料編纂所等との連携データベースの統括を進める。

【令和5(平成35)年度】

・研究内容の総括

(8) 令和5年度及び計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要:

・今年度の成果の概要

1) 全国の考古発掘調査に伴って検出される災害痕跡を集成した「歴史災害痕跡データベース(Historical Disaster Evidence Database: HDE-GISdb)」の一般公開

(<https://hde-gis.nabunken.go.jp/>)を開始した(図1)。また公開に向けて、下記内容について、研究成果をまとめ、反映させた。

a) データベース・レコードを構成するデータ項目の決定(図2)

b) 災害痕跡の表示マーカーについて、デザイン開発を行いデータベース表示に反映させた。デザインについては、Webアンケート調査を用いてデザイン理解度や視認性を調査し、形状や表示色、表示方法の有効性の調査研究成果に基づき決定した(図3)。

c) 「歴史災害痕跡データベース」の有効性の検証を進めた。長岡京跡(京都府)および周辺域や、奈良盆地北部の災害痕跡データの拡充を進め、その分布の特徴について調査を進めた。その結果、地震痕跡が既知の活断層(榎原断層や光明寺断層など)の延長域に分布する傾向や、これまで認識されていなかった軟弱地盤域での分布の集中傾向が明らかとなった(図4)。

d) 遺構や遺物、放射性炭素年代測定による災害痕跡の形成時期の特定から、災害発生時期の検証を進めた。その結果、長岡京跡周辺で検出された地震痕跡は、大きくA)縄文時代晩期中葉~末、B)弥生時代前期末~弥生時代後期末、C)古墳時代、D)平安時代初頭~中世末、E)近世初頭~現代であることが明らかとなった(図5)。

2) 「歴史災害痕跡データベース」のなかで、災害に関わる史料データを表示する機能を搭載した(図6)。またデータ表示に向けて、下記の通りデータ項目を設定した。

a) 1レコードの項目として、i)被害発生場所、ii)災害発生年、iii)災害名、iv)現住所、v)緯度、vi)経度、vii)推定震度、viii)被害状況、ix)史料記述、x)史料名称、xi)史料記述の信ぴょう性の9項目を設定した。

b) 表示マークは気象庁の示す震度階カラーに従った。

c) 推定震度は、宇佐美(1986)の「第4表 歴史地震のための震度表」に基づいて推定し、史料記述の信ぴょう性は、西山(2010)の「表1. 史料記述の信憑性と評価基準」に基づいた。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

本計画期間中の最も大きな成果は、考古発掘調査に伴って検出される災害痕跡を主体に集成した「歴史災害痕跡データベース(Historical Disaster Evidence Database: HDE-GISdb)」の一般公開を開始したことである。これは本計画で課された課題そのものである。

さらに、東京大学史料編纂所の有する災害史料データベースとの連携検索システムを構築するために、「歴史災害痕跡データベース」に歴史資料データ表示機能を搭載し、災害史料をWebGIS上で表示するためのデータレコードについて、前項で記載した通りの11構成項目を設定した。

また、API機能も搭載し、前述の災害史料データベースに加え、様々なデータベースとのリレーションを行える準備をした。

歴史災害痕跡データベースを構成するデータは、地震痕跡については奈良県および京都府を中心に年間8千~1万件のデータを、火山噴火災害については約5千件のデータを蓄積した。このデータ蓄積の過程で、データレコードを構成するデータ項目が確定する成果を得ることができた。このことは、今後データ蓄積がこれまで以上に容易となったことを意味する。全国で年間8千件を上回る発掘調査が行われるなか、データベースの全国化を促進するためのデータ入力体制についての課題が残るが、災害痕跡データを蓄積する方針が一律化した成果は大きい。

また、考古発掘調査における災害痕跡調査法の情報発信については、全国の発掘調査現場に赴き、担当者とともに調査を実践したり、奈良文化財研究所が開催する文化財調査担当者に対する研修にお

いて調査法の普及に努めたりするなど積極的に行っている。

データベースの入力体制についても、まずは兵庫県と連携を進めるなど、全国での対応に向けた取り組みを行っている。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本課題で取り組む「データベースの構築・公開」は、(4) 関連の深い建議の項目に示される「1地震・火山現象の解明のための研究、(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析、イ. 考古データの収集・集成と分析」を反映している。本計画期間中、約6万件の考古発掘調査の成果を精査し、考古発掘調査の成果をどのように活用することで過去の災害の実像に迫れるか試行錯誤を繰り返したが、令和4年度にはその事例成果、そして令和5年度にはデータレコード項目の確定をするに至り、考古発掘調査に伴って検出される災害痕跡について、安定してデータベース化するフローが確定した。このことにより、災害痕跡の分布特性についての議論や、現代の発生災害における被災状況との比較による災害発生メカニズムの解明の糸口がみえてきたと考える。

さらに考古データの集成方法が安定化したことにより、史料（歴史資料）データのデータレコード項目が明確化し、歴史災害痕跡データベース内での検索表示が可能となった。加えてAPI機能も構築したことにより、東京大学史料編纂所の進める史料データベースとの具体的な連動が可能となった。考古発掘調査で得られる情報は表層地質情報に限られるが、前項の図2、図3で示した通り、調査情報を細かく丁寧に救い上げることにより、過去の災害実像や発生時期の検証には大きな可能性があると考えられる。また、日本国内のとくに平野部の都市圏や集住域は「周知の埋蔵文化財包蔵地」と重なるため、大深度の地質調査は容易ではない。本課題を進めるHDE-GISdbは、今後、地質構造や地形構造との相関性について検証を進める必要があるが、そもそも「どこ」で「どのような」調査を進めるべきなのかを絞り込むための基盤情報としても重要な位置づけになり得ると考える。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

村田泰輔,2023,「第6章 科学分析の成果について 2.地震痕跡」『門田遺跡第6次発掘調査報告書』,京都府京田辺市編『京田辺市埋蔵文化財調査報告書』,47,51,査読無,謝辞有

村田泰輔,2023,「4 地質学的調査」『藤原宮大極殿の調査－第210次』,奈良文化財研究所編『発掘調査報告書2023』,16,査読無,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：地震：考古遺跡発掘：歴史災害痕跡データベース

概要：考古発掘調査成果を主体に、過去の災害痕跡情報をデータベース化したもの。

既存データベースとの関係：<https://hde-gis.nabunken.go.jp/>

調査・観測地域：

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web）<https://hde-gis.nabunken.go.jp/>

(11) 次期計画における課題名：

考古・地質・歴史資料による地形発達と地質表層部-深層部応答にみる災害発生メカニズム分析と歴史災害痕跡データベースの拡充構築

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

村田泰輔（奈良文化財研究所埋蔵文化財センター遺跡・調査技術研究室）

他機関との共同研究の有無：有

佐竹健治 他3名（東京大学地震研究所）,榎原雅治 他2名（東京大学史料編纂所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：奈良文化財研究所研究支援推進部総務課総務係
電話：0742-30-6733
e-mail：webinfo@nabunken.go.jp
URL：https://www.nabunken.go.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：村田泰輔
所属：奈良文化財研究所埋蔵文化財センター遺跡・調査技術研究室



図1 データベース入口の画面
「歴史災害痕跡データベース（Historical Disaster Evidence Database: HDE-GISdb）」
(https://hde-gis.nabunken.go.jp/)



図2 1レコード当たりのデータ項目



図3 災害痕跡表示マーカーの設定

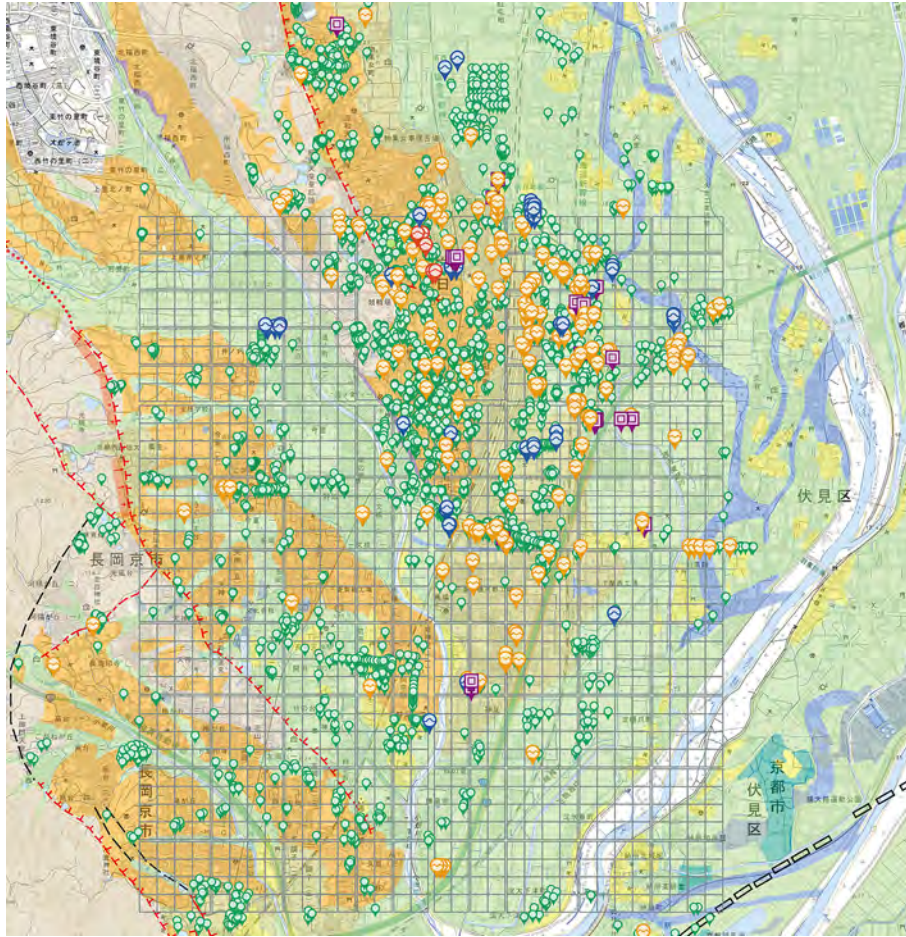


図4 歴史災害痕跡データベース

表示画面とデータベースの有効性の検証を進めた。

地図は地理院地図の「単色地図」と「地形ベクタータイル図」、「都市圏活断層図」、さらに「バーチャル長岡京条坊復元図(https://backy0175.at.webry.info/201711/article_2.html)」をレイヤー表示させている。

(1) 実施機関名：

新潟大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

日本海沿岸地域を中心とした地震・火山現象の解明のための史料収集と解析

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
ア. 史料の収集とデータベース化

(4) その他関連する建議の項目：

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究

イ. 首都直下地震

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本研究は研究計画のうち、1. (1) ア.史料の収集とデータベース化と4. (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明を中心に取り組む。既刊の地震・火山活動関連史料集掲載のうち重要な史料については、改めて原本により校訂し直す。また、日本海側を中心に既刊の史料集に掲載されていない史料を発見することに務める。さらに、各地の地震・火山現象に関連する言語表現の内容を明確にする。半潰等がいかなる被害状況を示しているものかについて明らかにする。その上で、震度推定のための家屋倒壊率の適切な活用方法を提言する。このことによって、近代以降の震度とそれ以前の震度との連続性を確かなものにして行く。家屋倒壊率と地形の関連についても、地積図等の地図を分析して明らかにしていく。

明治・近世の史料をもとに古地形を復元・可視化し、過去の当該地域の地震・火山噴火被害との関連を明らかにする。そのことによって、同地域において次に起きる被害がどのような被害なのかについて予測し、災害予防と防災意識の啓発等への活用を図り、災害の軽減に貢献する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度は各地の文書館・図書館等の史料保存機関に所蔵されている日本海沿岸を中心とした地震・火山現象に関連する近代観測開始以前の史料を調査・収集し、新たな史料については翻刻を行う。災害絵図も収集し、絵図記載の文字の翻刻・トレース図の作成を行う。また、歴史学・考古学・地理学研究者が参加する研究会を開催する。

平成32-34年度は、前年度に引き続き地震・火山現象に関連する近代観測開始以前の史料を調査・収集し、新たな史料については翻刻を行う。災害絵図も収集し、絵図記載の文字の翻刻・トレース図の作成を行う。収集した史料のうち、総家数・倒壊家屋数・即死者数が記載されている近代的な観測データとの比較・検討が可能な良質の史料については被害表等を作成する。歴史学・考古学・地理学研究者が同じ研究対象を共同で研究するとともに、研究会を開催する。

平成35年度は、収集した皆潰・半潰・大破等の家屋被害等級を示すと思われる語句が記載された史料

に記された意味を明らかにし、確実な家屋倒壊率とはどのように導き出すのかを明確にする。さらに、一軒当たり死亡者数の原因を明らかにするため、史料・地形等の検討を行う。また、歴史学・考古学・地理学研究者等が共同で行ってきた研究成果を吟味することにより、異なる学問分野の研究者等の連携研究の方法を明確にする。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1. 日本海沿岸地域を中心とした地震・火山現象を解明するため、各地の史料保存機関に所蔵される史料の調査と分析、既刊の地震・火山噴火史料集に所収される史料の原本調査に基づく校訂作業を実施した。その結果、得られた成果を下記のとおり年代順に記す。

(1) 年代記の史料学的検討による15～16世紀に発生した地震記事の抽出

史料学的な検討を行い、1561年に上野国（現群馬県）で成立し1606年に書写された『新選和漢合図』の1442～1598年の地震関連記事8件（とくに浅間山噴火記事6件）、武蔵国埼玉郡（現熊谷市）伝来の『龍淵寺年代記』の1556～1598年の地震関連記事5件は信憑性が高いことを確認した。

(2) 1751年越後高田地震における家屋全壊率の検討

1751年越後高田地震の名立小泊村の被害を記す文書の原本調査を行い、月橋正樹1942の山抜・築埋の被害数の誤りを確認、山抜・築埋は80軒、家屋全壊率92.3%を導き出した。

(3) 1828年越後三条地震の関連史料の検討

1828年越後三条地震について永青文庫、京都府立京都学・歴史館、新発田市立歴史図書館等の所蔵史料原本を精査し、同年春以降繰り返す豪雨・台風の被災と大飢饉の中で発生した三条地震の被災は多重複合災害であり復興に多年を要したこと、その実態を立体的に明らかにした。

(4) 近世の地震・火山噴火関連史料の原本調査、校訂作業、史料収集

1714年信濃小谷地震に関わる史料調査により高井郡東江部村山田家文書、松代藩『家老日記』に新史料を確認した。1804年出羽象潟地震の出羽庄内藩被害報告書（茨城県立歴史館鹿島（則）家文書）の原本調査を行い、既刊史料集の未読文字等を明らかにした。1858年飛越地震・大町地震関係を中心に長野県大町市の櫻井家文書・清水家文書の原本調査を行った。

(5) 新潟地方気象台所蔵の『管内地震報告』（1915～36年の新潟測候所分2冊、1923～1937年の高田測候所分2冊）を調査し、管内各地で①発震時刻と震動時間、②震度・性質の差異に大きな差異がみられ、各観測所の観測体制に留意し地域差を考慮する必要があるとした。

2. 考古学および地形・地質の調査

(1) 縄文時代晩期における三陸地震津波の考古学的研究

縄文時代晩期（2500-2400calBP）に本州東部で発生した地震活動について考古学的な検討を行った。その結果、①縄文時代最後の地震津波は大洞A' 式期（2500calBP）＝晩期最後段階に発生、この時期の本州東北部では津波のほか、新潟では液状化、鳥海山は山体崩壊、大崎平野では洪水など様々な災害が発生したこと、②その津波が発生後も三陸沿岸の低平地は無人の荒野と化していないこと、③津波直後の弥生時代初期、水稻耕作が津軽平野に伝わるが太平洋側にはすぐ広がらない点はヤマセと共に津波の浸水被害も影響したとみられることなどを確認した。

3. 2024年能登半島地震における新潟市西区の被害に関する検討

(1) 地理学的な観点により調査・検討を行い、新潟市西区（砂丘末端地域）の地盤災害は①地震の揺れにより砂丘構成物が下方へずり落ちたことによる地割れ災害、②地震の揺れにより生じた氾濫原における地盤の液状化による災害であり、砂丘末端の浅層地質は氾濫原を構成する有機物を含む細粒堆積物（泥～細粒砂）と、砂丘を構成する堆積物（主に中粒砂）から成り地下水水位が高く、この地形・地質条件が地盤液状化被害の拡大を招いたとした。

(2) 当該地震で被害の大きかった新潟市の低地、砂丘裾部や信濃川旧河道は、1964年新潟地震でも被害を受けたこと、1833年庄内沖地震でも新潟市内は液状化が起き、海から離れた地域でも家屋被害があり、信濃川旧河道でも家屋被害が起きたことを確認した。

(3) 江戸時代末期頃の絵図（新潟市歴史博物館所蔵）によれば、液状化被害の大きかった砂丘末端地域は当時「水腐地」「谷地」＝低湿地で田畑にも適さず排水が必要な土地であったことを確認した。

4. 歴史学・考古学・地理学研究者が参加する研究会の開催

(1) 第11回歴史地震史料研究会の実施

2023年11月18日に第11回歴史地震史料研究会をオンラインにて開催し、本課題研究者メンバーを中心とした歴史学者13人・考古学者1人・地理学者1人による研究発表・討議を行った（参加者36人）。

(2) 『災害・復興と資料』15号・16号の刊行

2023年3月,主として共同研究メンバーの昨年度の成果を発表する『災害・復興と資料』15号を刊行した.今年度の成果は2024年3月刊行する16号に掲載予定である.

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

主要な成果は下記のとおりである.

- a.史料を収集し,地震による家屋倒壊率と一軒当たり死亡者数について,1751年越後高田地震,1804年象潟地震,1828年三条地震,1854年東海地震の被害事例を分析し,一軒当たり死亡者数が0.27人以上の村は活断層近くの村であり,活断層近くの村では家屋全壊率90%を越えることなどを明らかにした.
- b.1891年濃尾地震では一軒当たり死亡者数が0.20人以上の村の分布により震源域の範囲を把握できることを示した.
- c.各地に残る年代記8点を史料学的に検討し,『常光寺王代記并年代記』の1493~1708年の地震関連記事14件,『三国一覽合運図』龍谷大学本の1361~1516年の20件,同東山文庫本の1361~1498年の6件,『大唐日本王代年代記』の1493~1585年の4件,『年代記配合抄』の1410~1582年の7件,『赤城神社年代記』の1409~1584年の4件,『新選和漢合図』の1442~1598年の8件,『龍淵寺年代記』の1556~1598年の5件は信憑性が高いことを明らかにした.
- d.関東で成立した年代記などを検討し,1454享徳地震が陸奥のみならず関東でも「大地震」と認識される地震であったことを明らかにした.
- e.三河・尾張に残る各年代記,京都・奈良の日記を分析,1498年東海地震に先行する1493年12月7日に京都~遠江の広範囲大地震が発生したことを示した.
- f.1611年会津地震で形成された山崎新湖について,1645年の湖消滅以前に作成された国絵図系統の絵図を網羅的に検討,南葵文庫所蔵「奥州図」から湖の広がりをも復原し,寒川1987の復原図より小さいことを明らかにした.
- g.1707年宝永地震について俳人岡西惟中の地震体験を記す「大地震祈禱連歌」を分析,被害情報の重要性を示した.
- h.1847年善光寺地震の被害について,地震本来の被害,震後の火災,震後の犀川水害,5日後の高田地震被害それぞれの実態を明らかにした.
- i.1847年善光寺地震について何去真光寺村の絵図と「信濃国地震大絵図」を分析,従来知られた浅川原とは別に東方の谷の駒沢川への土砂崩落があり,現長野市街地まで土石流被害をもたらす要因になったとした.
- j.1828年越後三条地震について多くの史料を収集精査し紹介するとともに,豪雨・台風の被災と大飢饉の中で発生した多重複合災害であったこと明らかにした.
- k.1854年南海地震の被害について徳島県海陽町の「宍喰浦荒図面」を地理学的に検討,組頭庄屋クラスの者が宍喰浦で情報収集し,被害状況を観察し詳細に描かれた信頼性の高い資料と評価した.
- l.1854年南海地震の津波被害を記す和歌山県立文書館所蔵「津浪之由来」について分析し,所載の絵図は実際に被害を確認し作成された可能性や,描かれる建物被害の有無と社会経済的要因との関係性を指摘した.
- m.1855年江戸地震の被害境界について武蔵国多摩郡蔵敷(東京都東大和市)名主の『里正日誌』所収「安政二卯年十月二日大地震略記」を検討,四ツ谷通り下町の割から中野宿(中野区)まで辺りになると明らかにした.
- n.1961年長岡地震の災害史料として「長岡市地震災害救助実施要項」,王寺川小学校5年生の文集を分析し,避難や被災直後の実相を明らかにした.
- o.1923年関東地震について新潟県高田村(現柏崎市)神職の日記と『新潟新聞』の当日記事を検討,当時の新潟測候所の所見が1917年以来の測候所の地震観測にあり,所見を述べた佐々木鶴蔵所長の地震学説は日下部四郎太の物理学的地震研究を基礎としていたことを確認した.
- p.縄文時代中期の三陸地震津波について岩手県山田町浜川目沢田1・2遺跡,仙台市上野遺跡など集落遺跡を分析し,大木8-9式期に宮古・山田・大槌湾岸や仙台湾岸まで東日本太平洋岸に広く及んだこと,集落の被災・復興・移転を明らかにした.
- q.縄文時代後期の三陸海岸津波の年代について検討し,海浜集落の衰退から,縄文時代後期前葉の崎山弁天1式期と後期中頃の浜川目沢田式期の直後時期に巨大津波が発生した可能性が高いとした.
- r.地震津波の発生年代の絞り込みには,4000年以上前になるとイベントの放射性炭素年代値にブレが始め,異地点検出のイベントとの対応関係を把握し難くなるため,三陸海岸の津波を事例に,高精度の土器

編年に基づく考古学データを使う方法を提示した。

s.長岡市立中央図書館文書資料室との共編で『災害史研究とチラシ・ポスター・絵葉書の資料学』を刊行し、歴史災害に関わる一枚摺の印刷物に焦点をあて新たな災害資料の可能性を提示した。

t.歴史学・地理学・考古学の成果を報告する研究会を年1回計5回開催した。

u.共同研究メンバーの成果を発表する『災害・復興と資料』を年1回5号分刊行した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本研究では、研究計画のうち、1(1)ア.史料の収集とデータベース化と4(1)地震・火山噴火の災害事例による災害事例による災害発生機構の解明を中心に取り組んだ。とくに1707年宝永地震、1828年越後三条地震、1847年善光寺地震、1854年東海・南海地震、1855年江戸地震、1923年関東地震等の近世・近代の地震について、既刊の地震・火山活動関連史料集掲載のうち重要な史料を調査し、原本校訂すると共に、既刊の史料集に掲載されていない史料を発見し紹介・分析を行った。これらの成果は史料の収集とデータベース化に十分寄与できるものであり所期の目的は達したといえる。さらに地震による家屋倒潰率と一軒当たり死亡者数については、1751年越後高田地震、1804年象潟地震、1828年三条地震、1854年東海地震、1891年濃尾地震等を事例として史料収集・分析して成果をあげ、過去の地震の震度推定のために必要なデータを提供することができた。

また、年代記の史料学的検討により15～16世紀の地方で発生した地震・火山噴火を抽出し、絵図等の分析により古地形を復元・可視化し過去の地震・火山噴火被害との関連を示し、考古学の発掘調査により集落・住居の移動から津波被災を明らかにした。従来あまり注目されてこなかった年代記・絵図や考古学資料など、今後新たな地震・火山史資料として活用拡大できることを提示できたことは次期計画に向けても意義は大きい。これらの新たな史資料を分析し、今後の被害の予測や、災害予防と防災意識の啓発等への活用を図り、災害の軽減に貢献したい。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

小野映介,2023,平安京左京南部における地形環境変遷と地盤環境,第11回歴史地震史料研究会講演要旨集,5-6,査読無,謝辞有

片桐昭彦,2023,中世関東の災害記録としての年代記—『年代記配合抄』・『赤城神社年代記』一,災害・復興と資料,15,27-37,査読有,謝辞有

片桐昭彦,2023,『新選和漢合図』にみる地震・噴火,第40回歴史地震研究会(小田原大会)講演要旨集,28,査読無,謝辞無

片桐昭彦,2023,中世武蔵国における地震と年代記,多摩のあゆみ,192,14-23,査読無,謝辞無

片桐昭彦,2023,明応4年8月15日の「洪水」は地震津波か,第11回歴史地震史料研究会講演要旨集,9-10,査読無,謝辞有

齋藤瑞穂・鈴木正博,2023,縄文三陸地震津波研究(6)—縄文時代最後の地震・津波は弥生化をどのくらい妨げたか?—,第11回歴史地震史料研究会講演要旨集,1-4,査読無,謝辞有

中村元,2023,1920・30年代地方測候所の地震調査について—新潟測候所の事例に即して,第11回歴史地震史料研究会講演要旨集,43-45,査読無,謝辞有

原直史,2023,大名留守居廻状と災害情報の共有—文政11年三条地震を中心に,災害・復興と資料,15,11-19,査読有,謝辞有

原直史,2023,文政11(1828)年複合災害の様相—豪雨・飢饉・台風・地震—,第11回歴史地震史料研究会講演要旨集,25-29,査読無,謝辞有

原田和彦,2023,渡辺敏と善光寺地震研究,災害・復興と資料,15,56-72,査読有,謝辞有

原田和彦,2023,安政江戸地震と松代藩の対応,第11回歴史地震史料研究会講演要旨集,38-40,査読無,謝辞有

矢田俊文,2023,八戸藩における1843年・1858年の地震による津波被害,第11回歴史地震史料研究会講演要旨集,30-32,査読無,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

小野映介・小岩直人・柴正敏・高橋未央,2023,津軽平野中部における完新世の堆積環境変遷と地形変化,日本地理学会2023年秋季学術大会,P012

小野映介,2023,平安京左京南部における地形環境変遷と地盤環境,第11回歴史地震史料研究会,2
片桐昭彦,2023,『新選和漢合図』にみる地震・噴火,第40回歴史地震研究会(小田原大会),O-28
片桐昭彦,2023,明応4年8月15日の「洪水」は地震津波か,第11回歴史地震史料研究会,4
齋藤瑞穂・鈴木正博,2023,縄文三陸地震津波研究(6)―縄文時代最後の地震・津波は弥生化をどのくらい妨げたか?―,第11回歴史地震史料研究会,1
中村元,2023,1920・30年代地方測候所の地震調査について―新潟測候所の事例に即して,第11回歴史地震史料研究会,15
原直史,2023,文政11(1828)年複合災害の様相―豪雨・飢饉・台風・地震―,第11回歴史地震史料研究会,9
原田和彦,2023,安政江戸地震と松代藩の対応,第11回歴史地震史料研究会,13
矢田俊文,2023,八戸藩における1843年・1858年の地震による津波被害,第11回歴史地震史料研究会,10

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

日本海沿岸地域を中心とした地震・火山噴火関連災害の解明のための史料収集と解析

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

片桐昭彦(新潟大学災害・復興科学研究所),北村繁(新潟大学教育学部),清水香(新潟大学人文学部),中村元(新潟大学人文学部),原直史(新潟大学人文学部),堀健彦(新潟大学人文学部),矢田俊文(新潟大学人文学部)

他機関との共同研究の有無:有

齋藤瑞穂(神戸女子大学文学部),小野映介(駒澤大学文学部),原田和彦(長野市立博物館)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等:新潟大学災害・復興科学研究所

電話:025-262-6542

e-mail:katagiri@human.niigata-u.ac.jp

URL:

(14) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:片桐昭彦

所属:新潟大学災害・復興科学研究所

(1) 実施機関名：

新潟大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震・火山噴火災害における被害軽減のために利活用可能な要素・知識体系の整理・検証

(3) 関連の深い建議の項目：

- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
- (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(4) その他関連する建議の項目：

- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
 - (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
 - ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震
千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地震・火山災害の研究成果を活用し、災害軽減に効果的に生かすためには、研究成果を理解するための枠組みを国民1人1人が持つことが理想である。ところが、熊本地震調査において「断層があることは知っていたが、その断層が地震を引き起こすことを知らなかった」と答えた回答者が相当数のにのぼり、この理想を現実とすることが、被害軽減の大きな課題である。では、理学研究が基本となる地震・火山災害の研究内容を理解するためにどのような理解枠組みを持つべきか、その知識体系はこれまで整理されてこなかった。

本研究では、平時より防災・災害対策にかかわる行政や関係機関の職員を対象に、必要な要素や枠組みを検証しながら、理解枠組みの検討を実施する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

初年度においては、地震・火山研究者が「理解してほしいこと」、職員が「理解したいこと（疑問に思っていること）」を明らかにし、要素の洗い出しを実施する。

2年目においては、要素に基づき、知識体系の範囲と枠組みを仮説化する。

3年目においては、仮説化された枠組みをもとに、研修プログラムを構築する。

4年目においては、研修プログラムを実装することで、効果検証を実施する。

5年目においては、研修プログラムを標準化し、プログラムの展開を図る。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

これまでに仮説化された理解枠組み(1)育成したい人材の特性(2)能力(3)態度(4)貢献において、観測

研究計画の成果を活用し、研修プログラムを構築。具体的には、令和4年度までに策定した研修プログラムを活用し、育成対象者からのフィードバックを得て、研修プログラムの実装環境を整え、災害・防災対策担当者における研修プログラムを体験することで、業務において、研修プログラムで得た知識がそのような「態度」「能力」「貢献」を明らかにし、研修体系の整備を進めた。

また、関東地震100周年を契機として、開催されるイベント等の機会を捉え、本コミュニティがこれまで同定した知見を整理し、(1)現象と被害(2)地震の過去と未来(3)新たな研究について、啓発コンテンツを開発し発信につとめた。特に関東地震と南海トラフ地震の共通性と独自性を整理することで、地震現象の理解枠組みの整理を実施した。

併せて2024年1月1日に発生した能登半島地震において、これまでの理解枠組みと研究コンテンツ開発の技術を活かし、応援職員の研修コンテンツの整備と実装を行った

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

初年度においては、地震・火山研究者が「理解してほしいこと」、職員が「理解したいこと（疑問に思っていること）」を明らかにし、要素の洗い出しを実施した。1) 理解枠組みを醸成することで「育成したい人材」、2) 理解枠組み醸成のための「育成対象の同定」、3) 理解枠組みのためのデータ収集のための「育成プログラムのプロトタイプ」の作成、を実施した。

令和2年度(初年度)に実施した地震・火山研究者が「理解してほしいこと」、職員が「理解したいこと（疑問に思っていること）」における要素の洗い出しの実施を基にして、地震・火山研究者が「理解してほしいこと」を主題に座学部分の研修プログラムを試行的に作成した。1) 研修項目ごとに学習目標を検討、2) 地震研究者による研修スライドの作成ならびに指導上の留意点を作成、3) 育成フレームにおける知識を評価するために確認テストの作成、を実施した。併せて育成のための研修方法の検討を行った。Web環境を活用した1) オンライン研修、2) オンデマンド研修、3) リアルタイム研修、ハイブリッド型研修の構成要素1) 座学、2) 動画、3) 演習、等の組み合わせによる、自治体職員に対する業務手順に沿った研修プログラムにおいて、これらの方法を検討した。

令和3年度（2021年度）：初年度に構築・収集した研修プログラムの素材を活用し、昨年度には仮説化した知識体系の範囲と枠組みに基づき、研修プログラムの暫定版を構築し、自治体職員等に試験的に実施をした。この結果に基づく検証をフィードバックしながら、3年目においては、自治体職員向けに、研修プログラムを構築。当該年度は、要素化した「地震・火山研究者が理解してほしいこと」を、自治体職員のニーズを元に再構成した。さらに再構成した要素に基づき、研修プログラムを引き続き構築し、自治体職員に対して試験的に実施した。

令和4年度（2022年度）：初年度に構築・収集した研修プログラムの素材を活用し、昨年度には仮説化した知識体系の範囲と枠組みに基づき、研修プログラムの暫定版を構築し、自治体職員等に試験的に実施をした。この結果に基づく検証をフィードバックしながら、3年目においては、自治体職員向けに、研修プログラムを構築した。多くの自治体職員を輩出している大学において、学生を対象として、研修プログラムの実装・検証を実施した。当該年度は、要素化した「地震・火山研究者が理解してほしいこと」を、自治体職員のニーズを元に再構成し、地震の基礎知識習得にかかる研修プログラムを1編、火山の基礎知識取得にかかる研修プログラムを8編、シナリオ作成、収録を実施した。また、次年度の関東地震/関東大震災100周年に向けて、報道やイベント等の機会が多くなり、国内外の関心が高まると想定されることを契機としてコンテンツ作りを実施した。特に津波を伴った地震災害としての関東地震に着目し、南海トラフ地震との比較の中で、より理解を深め、また観測研究への関心の喚起をねらいとして作成した。

令和5年度（2023年度）：仮説化された枠組みをもとに、研修プログラムを構築。具体的には、令和4年度までに策定した研修プログラムを活用し、育成対象者からのフィードバックを得て、研修プログラムの実装環境を整え、災害・防災対策担当者における研修プログラムを体験することで、業務において、研修プログラムで得た知識がそのような「態度」「能力」「貢献」を明らかにし、研修体系の整備を進めた。関東地震100周年を契機として、開催されるイベント等の機会を捉え、成果の発信につとめた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

●関連の深い建議の項目：

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

→本項目に直接的に貢献し、繰り返し使えるコンテンツを開発し、公開した。今後も後継プロジェクトにおいて、本試みの継続を計画している

●その他関連する建議の項目：

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1)地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

→地震火山観測研究の知見の理解枠組みの構築、特に災害発生機構の理解は、研究者以外の実務者・一般の防災行動の醸成に寄与するものであり、研修コンテンツの発信において、一定程度貢献できた。今後も後継プロジェクトにおいて、本試みの継続を行う

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

田村圭子（新潟大学危機管理本部危機管理室/災害・復興科学研究所）

他機関との共同研究の有無：有

加藤尚之（東京大学地震研究所）,森田裕一（東京大学地震研究所）,木村玲欧（兵庫県立大学環境人間学部）,井ノ口宗成（富山大学都市デザイン学部）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：新潟大学危機管理室（総務部総務課）

電話：025-262-6022

e-mail：rmo-jimu@adm.niigata-u.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：田村圭子

所属：新潟大学 危機管理本部危機管理室/災害・復興科学研究所（兼務）



関東地震100周年を契機とした本コミュニティからの理解枠組みの発信事例

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

古文書解読による南海トラフ巨大歴史地震像の解明 ～歴史地震情報の可視化システムの構築とその活用～

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
ア. 史料の収集とデータベース化

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
地震

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
ア. 地震発生機構の解明

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
イ. 内陸地震

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
(4) 関連研究分野との連携強化

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

史料収集をしてみると、揺れの細かい情報、余震の情報、津波が到来した時刻や到来方向など様々な情報が書き残されていることがわかった。本研究ではこれまでに収集された史料から得られた南海トラフ巨大歴史地震の地震活動、地殻変動、津波、人的・建物的被害状況などの情報をGISを用いて面的に整理、可視化し、現在得られている地震・地殻変動・地盤情報や過去の地形など様々な地図情報と併せて検討できる仕組みを構築することを目的とする。将来的にはこれを用いて南海トラフ巨大地震の震源過程の解明を試みる。

歴史地震史料はこれまでも宇佐美らによって多くの史料が集められている。またこれらの信憑性も検討しより精度のよい史料DBが史料編纂所によって現計画で構築されつつある。ただし史料は膨大で、これらを使いこなし地震学的解明を行うにはよっぽどこれらの史料を読み尽くした人でないと難しく、現時点では震度分布や津波高分布を求めたり、個々の史料の信憑性を追求する研究が多い。この原因の1つに、様々な時代に様々な地点で史料が書かれているため、それらの地理的關係を頭で整理することが難しいと言う点が挙げられる。そこでこれまでに得られた史料を地図情報として整理してみようというのが今回の課題である。本研究ではe-コミマップを活用する。今回の可視化はとりあえず南海

トラフ巨大地震をターゲットとして高知県，和歌山県，三重県，愛知県，静岡県について構築を行い，地震毎に同じ地域での被害の違い等を比較することで南海トラフ巨大地震の震源過程の特徴を検討する．また南海トラフ巨大地震に関連する内陸での被害地震についても合わせて検討する．

また，各地にはまだ翻刻されていない史料もたくさんあることから南海トラフ巨大地震に関する古文書調査，翻刻も並行して行う．またどの史料にどの地震の情報があるのか，すでに出版された史料集を元に検索ができるシステムを現計画で構築したが，その後収集された史料についても追加し検索できるようDBの更新も行う．

(7) 本課題の5か年計画の概要：

・史料調査および検索システム開発：今後も新たな史料の調査は重要である．各地の図書館や史料館などで収集されている史料だけでなく個人所蔵の史料なども可能であれば収集する．収集された史料についてはDB化を行い，検索システムで検索できるようにし研究者間での情報共有を図る．また検索システムについてもより活用がしやすいよう改良を加える．

・歴史地震史料の可視化：すでに調査された地震情報をe-コミマップを用いて面的に整理し，現在わかっている様々な情報と併せて検討できる仕組みを構築する．構築に当っては情報をさまざまな角度で比較検討ができるよう工夫する．また地図やその他資料でデジタル化されていないものについてはデジタル化をし，e-コミマップで使えるようにする．史料がどの地点の情報であるかを特定することは難しいが，現在地方史を中心に集めた史料があり，まずは地域単位で地図上に整理する．その上で現地調査や資料調査などを行い，わかった情報からさらに特定の場所に整理する．このように可視化された史料からそれぞれの地震の相違点を明確化し，南海トラフ巨大歴史地震の地震像解明を目指す．また史料調査では南海トラフ巨大地震だけでなく同時代に発生した内陸被害地震に関する情報も得られることが多いことから，これらについても併せ可視化を行う．初年度はe-コミマップ上での表現方法の検討を行う．

各年度の主な計画は、

H31: 史料収集，検索システムの改良，歴史地震史料の可視化手法の検討

H32: 史料収集，検索システムDB更新，歴史地震史料の可視化手法の改良

H33: 史料収集，検索システムDB更新，歴史地震史料の可視化

H34: 史料収集，検索システムDB更新，歴史地震史料の可視化

H35: 史料収集，検索システムDB更新，歴史地震史料の可視化，南海トラフ巨大歴史地震の比較検討．

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

史料収集および歴史地震資料の可視化ともに計画通りに実施した．この成果は以下の通り．

◎史料収集

昨年度に引き続き，安政東海・南海地震，安政江戸地震について書かれている大沢家本願寺関係文書の翻刻をおこなった．また鳥羽御城石垣御修復一件（鳥羽藩士による安政東海地震・津波での鳥羽城の被害と石垣修復に関する記録），違変記（福岡藩士による災害等の記録の集成）の翻刻を進め，「鳥羽御城石垣御修復一件」についてはその翻刻と解説集を発行した．

◎歴史地震史料の可視化

昨年度までの三重県の歴史地震史料の可視化によって過去の南海トラフ地震の比較検討が可能であることがわかり，史料の可視化の重要性，有効性を示すことができた．そこで今年度は静岡県，和歌山県，高知県に対して史料の可視化を行うため，入力史料の収集を行うとともに一部e-コミマップへの入力を行った．また，南海トラフ巨大地震の前に発生した内陸被害地震の1つである安政伊賀上野地震についても可視化を行い，表層地盤と被害の関係を確認した．今後南海トラフ巨大地震の破壊過程を考える上で参考になる津波堆積物調査の結果もこのe-コミマップで合わせて見られるよう入力を行った．作業を行っている中で，三重県および和歌山県の一部の地域では地震後浜に集まって評議するといった特徴的な避難行動があることもわかった．

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

史料収集および歴史地震資料の可視化ともに計画通りに実施した．

◎史料収集

新たに見つかった安政東海・南海地震，安政江戸地震について書かれている大沢家本願寺関係文書（岐阜市・大沢喜久氏蔵）について史料調査を行い，それらの翻刻と目録作成を行った．また災害かわら版（公益社団法人全国市有物件災害共済会蔵），鳥羽御城石垣御修復一件（鳥羽藩士による安政東海地震・津波での鳥羽城の被害と石垣修復に関する記録），違変記（福岡藩士による災害等の記録の集成）の翻刻を進めた．また，災害かわら版については，その解説書を出版するとともに，各種防災イベント等におけるワークショップに活用している．

◎歴史地震史料検索システムの改良

これまで構築してきた地震史料検索システム高速化のためのDBの再構築，更新を行い，検索後の表示方法などシステムの改良も行った．またこれとは別に宇佐美龍夫氏が収集整理してきた日本歴史地震総表2020についてもWEB上で検索できるシステムを新たに構築した．

◎歴史地震史料の可視化

・寺院の建物被害を用いた歴史を通じて地震の揺れの強さを示す指標の検討

近代以降地震観測網が整備されるまでは住家被害率を指標として震度が評価されてきており，これらを統一的に評価するためには，歴史を通じて地震の揺れの強さを示す指標を得る事は重要な意味を持つと考えられる．そこでここでは，近世以降現代に至るまで，江戸時代の寺請制度から続く檀家制度により日本全国の各集落に広く分布して来た寺院の建物被害に着目した．一般に寺院建築は平面的に大きな広がりを持ち，多スパンの軸組で構成されることが多いため住家に比べ耐震性能が高いと考えられ，揺れの強さを評価できるレンジが広いと考えられる．地震外力と寺院建築の変形性能の関係，および，文献記録からの寺院被害推定の便宜を踏まえ，寺院被害程度を以下の4段階のレベル（「倒壊」：再建が必要で記録に残る．「大破」：大きな残留変形が残り使用不可・大規模改修または建替えが必要で記録に残る可能性大．「中破」：補修後使用可能・土壁に大きなひび割れが入るなどの被害はあるもののその後も相当期間継続使用可能で記録にのこる可能性は小さい．「無被害小破」：地震の大きさにもよるが多数の寺院が無被害小破であり記録されない場合がほとんど．）に分け，GISで可視化を行った．そこで三河地震の寺院被害調査を行ったところ，今回設定した寺院被害程度の評価方法が地域の揺れの強さを示す指標として有効であること，住家に比べ寺院の強度・変形性能は大きいことが推察された．

・フリーGISのe-コミマップを用いた南海トラフ巨大地震史料の見える化

これまでに多くの研究者によってたくさんの史料が収集されているが，それらの情報の場所の特定を1つ1つ行うことは非常に労力を必要とする．そこでここではある程度歴史家や郷土史家等により地域が特定されている情報をe-コミマップに inputs する情報とした．三重県，愛知県，静岡県，和歌山県，高知県の地方史および郷土史に掲載された史料収集を行い，順次e-コミマップに inputs していった．まだ全部の inputs が終わったわけではないが，三重県，愛知県，静岡県についてはかなり inputs が進んだ．さらにこれまでに inputs した三重県の史料から宝永地震，安政東海地震，昭和東南海地震について比較検討をおこなった．その結果いくつかの特徴が見えてきた．例えば，紀北以南での津波到来時刻を宝永と比較すると，宝永地震では揺れがおさまってから津波が来るまでに飯を炊くくらいの時間があつたが，安政地震ではすぐにやってくる．時間差はあるものの被害そのものは宝永，安政とも大きな被害がでており，これまでに推定された浸水高をみてもさほどの違いはない．このことから宝永の方が規模は大きかったことが想像される．昭和東南海地震でもこの地域には5～20分程度で津波がきている．これらことから，安政や昭和では少なくとも紀北以南に近いところに震源域があるが，宝永ではそこは滑っていないということが出来るだろう．もし現在求められているアスペリティが繰り返し滑っているという考え方(Yamanaka&Kikuchi,2004)に基づいてYokota et al.(2016)で求められたアスペリティ分布で考えると，昭和東南海地震と安政東海地震では熊野灘の大きなアスペリティが滑ったが，宝永地震ではこのアスペリティは滑らなかった可能性がある．また安政東海地震では全般的に三重県海岸周辺では大きな津波被害を被っているが，南伊勢市東部では比較的被害が少ない．これもYokota et al.(2016)で求められたアスペリティ分布を考えると説明が付きそうである．これらのことから，宝永地震＝安政東海地震＋安政南海地震ではない可能性がでてきた．

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本課題では新しい史料の収集を行うとともに，今後の理学的活用をめざして史料を地図上に可視化を行っている．ここで可視化できた三重県の史料から宝永地震，安政東海地震，昭和東南海地震について比較検討をし，その震源過程についても考察をおこなった．これらは建議1(2)，1(3)および5(2)アの

目的達成に貢献している。現在、三重県について入力途中であるが、避難行動についての特徴も少しずつ見えてきており4(1)へも今後貢献できると考えている。過去の南海トラフ地震の破壊過程がどのようなものであったかを解明することは将来の南海トラフ地震の災害軽減に貢献することが期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

山中佳子,2023,「高知県神社明細帳」にみる南海トラフ地震,中部「歴史地震」研究年報,11,149-157,査読無

石川寛,2023,「安政東海地震における尾張徳川家の救済活動」,愛知県公文書館研究紀要,創刊号,101-107,査読有

名古屋大学減災連携研究センター古文書勉強会,2023,西尾市教育委員会所蔵 田中長嶺『尾濃震災凶録』翻刻,謝辞有

減災古文書研究会,2024,『鳥羽御城石垣御修復一件』翻刻,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

平井敬,2023,減災古文書研究会の活動紹介,関西歴史災害研究懇談会

山中佳子,2023,南海トラフ巨大地震解明に向けた史料の見える化 その2,中部『歴史地震』研究懇談会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

史料の可視化から解明する南海トラフ巨大歴史地震像

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

山中佳子（名古屋大学大学院環境学研究科）,石川寛（名古屋大学文学部）,武村雅之（名古屋大学減災連携研究センター）,都築充雄（名古屋大学減災連携研究センター）,倉田和己（名古屋大学減災連携研究センター）,蛭川理紗（名古屋大学減災連携研究センター）

他機関との共同研究の有無：有

平井敬（兵庫県公立大学法人 兵庫県立大学 大学院減災復興政策研究科）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター

電話：052-789-3046

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：山中佳子

所属：名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

南西諸島海溝におけるプレート間固着状態の解明

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
地震

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

南西諸島海溝の中南部では、1791年と1771年にそれぞれ沖縄本島南東沖と先島諸島南方沖で津波を伴うM8クラスの花溝型巨大地震が発生したとして海溝軸近傍に津波の波源域が求められている。特に1771年の地震は八重山地震として知られている。したがって、南海トラフの延長である南西諸島海溝も、低頻度であっても海溝型地震の発生ポテンシャルを有していると考えられる。しかし、地球物理学的観測による現在のプレート間固着状態や固着域の広がりには明らかになっていない。そのため、地震本部による海溝型地震の長期評価も手つかずの状態である。よって、プレート間固着状態の現状把握が急がれる。

そこで、GNSS—音響方式による海底地殻変動観測（以下、単に「海底地殻変動観測」という）によって実測したすべり欠損レートをもとに、沖縄本島から先島諸島にかけての海域における大まかなプレート間の固着域の広がりや固着率（固着の有無を含む）を5ヶ年で明らかにする。さらに、低周波地震・超低周波地震の分布・活動度等もふまえて、当該海域のプレート間固着状態を統一的に解釈し、同海域における海溝型地震の発生ポテンシャルの評価に生かす。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

○海底地殻変動観測と固着状態の把握

南西諸島海溝沿いに既に設置されている3ヶ所の観測点（沖縄本島—宮古島間2ヶ所；西表島沖1ヶ所）において海底地殻変動観測を実施する。沖縄本島—宮古島間では初年度から4年目まで年1回、西表島では2年目から4年目まで年1回の観測を行う。特に、沖縄本島—宮古島間は島嶼が存在せず、

地殻変動観測の空白域となっている海域であり、これらの点での観測を本研究で新たに開始する。

5ヶ年の観測で得たデータをもとに各観測点での平均的な変位速度を求める。得られた海域の変位速度場とGEONETによる陸域の変位速度場をもとにバックスリップモデルを適用し、プレート境界面上のすべり欠損レートを推定する。その際、フィリピン海プレートの運動はMORVELによるモデルを採用する。以上により、対象海域におけるプレート間固着の状態と分布を明らかにする。

○プレート間固着の統一的解釈

プレート間の固着度合いは、低周波地震等のひずみ解放現象の活動度と相補的であると考えられる。また、超低周波地震の潮汐荷重応答の地域性からプレート境界面の滑りやすさ（固着度合い）に違いがあるとの報告がある（Nakamura and Kakazu, 2017）。そこで、海底地殻変動観測を実施する約5年間について、低周波地震（気象庁の短周期地震計記録を利用）および超低周波地震（F-net等の広帯域地震計記録を利用）の系統的な解析を行い、それらの活動域と活動度を把握するとともに、超低周波地震の潮汐荷重応答の詳細な地域性を明らかにし、海底地殻変動観測結果とあわせてプレート間固着状態を統一的に解釈する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

○海底地殻変動観測

沖縄本島から宮古島間の海溝軸付近のプレート深度10km弱の海底に設置している2ヵ所（RKC, RKD；図1）において海底地殻変動観測を実施した。実施日と観測回数は以下の通りである：

RKC：2016.09.29-30（本計画期間外），2019.9.24，2021.09.20-21，2023.10.18-19（4回）

RKD：2016.9.29（本計画期間外），2021.09.21，2022.08.17-18（3回）

さらに、別経費で実施しているRKB観測点（図1）でも、本計画期間中に5回の海底地殻変動観測を行うとともに、既に観測を終了しているRKA観測点（図1）のデータも再解析した。

以上、4観測点について、海底局位置座標の時系列に直線フィッティングして得られる沖縄本島－宮古島間を固定した場合の変位速度ベクトルを次のとおり求めた（図2）：

RKA：N20±24°W方向に52±21mm/yr

RKB：N18±7°W方向に21±7mm/yr

RKC：N158°W方向に4mm/yr（暫定値）

RKD：N84°W方向に9mm/yr（暫定値）

RKA, RKBについては、すでにTadokoro et al. [2018]で報告しているとおり、プレート間固着を示す結果が得られている。一方、沖縄本島－宮古島間のRKC, RKDについては、現時点ではプレート間固着を示す積極的な証拠は得られていない。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

○波照間島沖での海底地殻変動観測

波照間島沖での1観測点において、2020年9月8-9日に海底地殻変動観測を実施した。この観測点は揚子江プレートに対して南に64.2±11.2mm/yr、東に25.8±9.8mm/yrで動いており、すなわち、約7cm/yrの伸張があることが分かった。この伸張の大きさは、西表島、波照間島と同程度かそれ以上である。また、約25mm/yrの非常に速い沈降も併せて観測され、これらの結果は高速の海溝後退による前弧プリズムの薄化を示していると考えられる。本研究では海溝軸付近での固着状態は不明であり、ごく浅い未固結のウェッジ部分だけが固着して津波地震のようなイベントを引き起こすことは否定できない。

○超低周波地震の震央分布

観測点密度が極めて低いために検知能力が低かった沖縄本島－宮古島間における超低周波地震の震央決定を行った。解析期間は2015年6月～2019年12月であり、防災科学技術研究所のF-net観測点、および地震予知総合研究振興会による沖永良部島、久米島、宮古島、多良間島波照間島に設置した臨時観測点で収録された上下動波形に0.05～0.1Hzのバンドパスフィルタをかけた後にテンプレートマッチング法 [Asano et al., 2015] を適用した。

その結果、宮古海峡では深さ10～15kmの範囲に超低周波地震がスポット的に発生していることが明らかになった。一方、沖縄本島南東海域では、Nishimura [2014]によるスロースリップの発生域とTadokoro et al. [2018]によるプレート間固着域の隙間に沿って深さ12～15kmの範囲に帯状に発生

していることが明らかになった。両海域ともに超低周波地震の発生域と低角逆断層型地震の発生域は相補的であった。このようなすべり現象の棲み分けは、南西諸島海溝沿いにおけるプレート間の摩擦状態の不均質を示していると考えられる。

○プレート間固着の統一的理解

以上の解析結果を組み合わせることで、南西諸島海溝沿いにおけるプレート間のすべり／摩擦状態の不均質性が明らかになりつつある。すなわち、沖縄本島南東海域では、プレート間の浅部に固着域が存在し、そのdown dip側にはSSE（スロースリップイベント）は発生する領域が存在し、両者の間（プレート深度15km程度）にはVLFE（超低周波地震）とLFE（低周波地震）が発生する領域が存在する。これとは対照的に、沖縄本島-宮古島間では固着域が存在せず、VLFEが逆断層型地震と相補的に分布する。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

南西諸島周辺については、地震発生の特性を明らかにするための十分な知見が得られていないことや、長大な設定領域において発生する場所を特定できないこと等を理由に、地震調査研究推進本部では、第二版（令和4年）においても長期予測が行われていない。海溝型巨大地震の長期予測のためには、まず、対象地域におけるプレート間固着状態の把握が重要である。ところが、本研究課題で対象としている沖縄本島-宮古島間には島嶼が存在しないため、陸上のGNSS観測網の空白域となっており、当該海域におけるプレート間の固着状態を把握するためには海底地殻変動のモニタリングが不可欠である。対象海域でのプレート間固着の可能性が低いことを示す観測結果が得られつつあり、これは、南西諸島周辺の長期評価の更なる高度化に資する成果である。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

田所敬一・中村 衛・小池遙之、松廣健二郎、2023、南海トラフ軸および南西諸島海溝軸付近のプレート間固着状態、地球惑星科学連合2023年大会、SCG52-P01

中畑遼祐・生田領野・田所敬一・原田 靖、2023、琉球海溝南西端、波照間海盆において取得したGNSS-Aデータの再解析、日本地震学会2023年秋季大会、S03-12

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

南海トラフ・南西諸島海溝域における海溝型地震発生場の解明

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

田所敬一（名古屋大学）

他機関との共同研究の有無：有

中村 衛（琉球大学）、生田領野（静岡大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：名古屋大学環境学研究科

電話：052-789-3046

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：田所敬一
 所属：名古屋大学環境学研究科

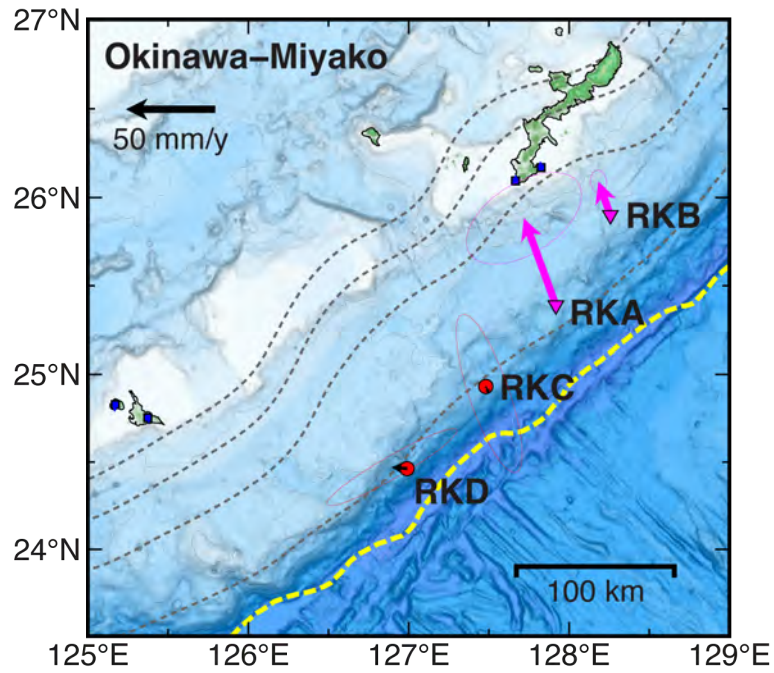


図1：海底地殻変動観測で得られた変位速度ベクトル（暫定）。
 沖縄本島一宮古島間固定。図2に時系列を示した4つのGEONET観測点（青四角）における変位速度の平均を各海底地殻変動観測点での変位速度から差し引いた。

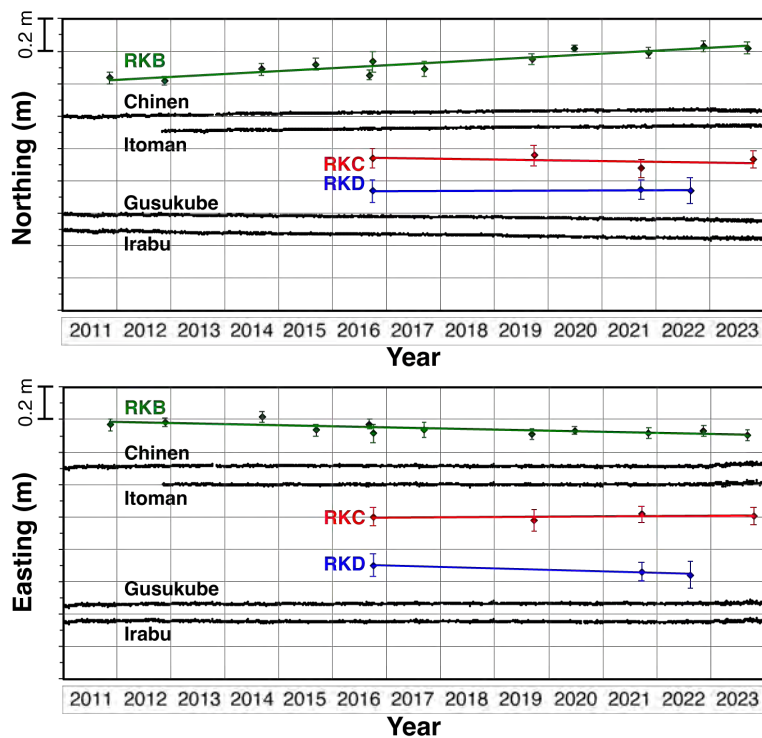


図2：沖縄本島南東方（RKB）および沖縄本島一宮古島間（RKC，RKD）における海底地殻変動観測結果の時系列。
 ITRF2014準拠。周辺のGEONET観測点（知念，糸満，城辺，伊良部）の時系列も併せて示す。GEONET観測点の時系列には国土地理院によるF5解を用いた。

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

変動地形学的手法による内陸地震発生モデルと活断層長期評価手法の再検討

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (1) 地震発生の新たな長期予測
- イ. 内陸地震の長期予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
- ウ. 地質データ等の収集・集成と分析
- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
- イ. 内陸地震

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

5 研究を推進するための体制の整備

- (4) 関連研究分野との連携強化

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地震調査研究推進本部において20年以上にわたり、主要活断層の長期評価が行われてきた。この成果は防災上重要な活断層が認知されたことにある。しかし近年発生した内陸直下地震の中には、実際に破壊した活断層区間が評価結果と整合しない例や、一見整合的でも実際は十分な予測精度を有していなかった例が多々ある。こうした問題の背景には、活断層の長さや規模を最大に見積もった固有地震の単純な繰り返しを仮定していたこと、ひとまわり小さなM6級地震で出現する地表地震断層の地形形成への寄与を評価できていないこと、断層ごとの構造的な特徴を重視した評価手法ではなかったこと、解釈に任意性もある活断層の活動履歴データに過度に依存したこと、活断層分布の知られていない場所で変位が生じたことなどがある。本研究は、これらの課題解決をめざして以下の点を検討し、活断層長期評価に資する新たな活動モデルの構築をめざす。基本的には近年地表地震断層を出現させた地震について、地震規模や断層長、断層位置、変位量が従来の予測とどう異なり、何が評価できていなかったのかを明確にする。その上で、地震時の地表地震断層トレースおよび変位量分布、変動地形による断層分布と累積変位量・平均変位速度分布とそのパターンを比較して、断層分布と累積変位量や平均変位速度の分布パターンから予測される断層活動を検証する。加えて断層線の分岐形状なども参考に地震ごとの破壊範囲の多様性や断層構造の複雑性を考慮した地震発生モデルの構築を目指す。当研究グループはこれまで10年以上にわたって、活動履歴データを活用しつつも、活断層線の形状や平均変位速度の走向方向の分布を重視した活動予測に取り組んできた。その成果を、活断層の長期評価手法の改良という形に集約する。断層変位地形を詳細に観察すると、近年出現した地表地震断層近傍に、地震時には活動しなかった活断層が見つかる。また地表地震断層の変位量分布が変動地形からわかる累積変位量分布・平均変位速度分布と一致しない事例もある。こうした活断層を含む活動履歴

や変位量分布パターンを説明できる震源断層モデルが必要である。そのためには断層最大長に拘らない過去複数回における地震時活動区間の特定と、各々の地震時に発生した地表地震断層の変位量分布を明らかにして、累積的な変位量分布を説明できる適切な震源断層モデルが重要であり、2014年長野県北部の地震や2004年新潟県中越地震のような一回り小さな活動も考慮に入れる必要がある。地表変位の証拠が残らない活動については、地震観測データからの検討も必要である。こうした情報を総合して、活断層のセグメンテーション・グルーピングに焦点を当て、本課題によって、蓄積された活断層情報と実際に発生した物理現象との関連性を考えることで、新たな活断層長期評価手法を再検討する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

近年発生した内陸地震（2016年熊本地震、2014年長野県北部の地震など）を対象に、変動地形学・第四紀地質学・古地震学的な調査研究に基づき、地表地震断層の幾何学的形状や地震時変位量分布などのパラメーターを、活動しなかった断層を含む断層系全体の累積変位量分布・活動履歴と過去複数回の一回変位量・浅層部の地下構造・地質構造などと総合的に解釈する。調査結果と観測事実に基づき、地表地震断層トレースの諸特徴と震源断層や地震時すべり量、断層破壊過程との関連性を、海外の事例も含めて詳細に検討し、地震毎の地震の規模・破壊領域・地表変位のばらつきなどを説明する活断層の地震発生・震源断層モデルを構築し、内陸地震の長期予測の高度化を図る。なお、研究期間中に地表地震断層を伴う内陸地震が発生した場合は、その地震も同様に重点的な調査研究を行う。

平成31(令和1)年度においては、2016年熊本地震や2014年長野県北部の地震に伴う地表地震断層などを対象に変動地形調査・トレンチ掘削による古地震調査を実施し、内陸地震に伴う地表地震断層の諸特徴（過去の地震発生時期・地震時変位量）を推定する。これらのデータと地表地震断層と地震時の断層破壊過程の関係を考察するとともに、既往研究のレビューを行い、断層活動の多様性を考慮した活断層における地震発生モデルを立てる。令和2年度においては、上記のモデルをトレンチ掘削調査などから検証し、活断層で発生する地震の多様性を明らかにする。令和3年度においては、地表地震断層と活断層・変動地形との関係を明らかにするための戦略的古地震調査を実施する。令和4年度においては、地表地震断層と活断層・変動地形との関係を明らかにするための浅層反射法地震探査を実施し、地表地震断層・変動地形の震源断層モデルの再構築を試みる。令和5年度においては、補足的な調査を行い震源断層とリンクした断層活動の多様性を考慮した活断層における地震発生モデルの高度化を実現する

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和5年度は、2016年熊本地震や2014年長野県北部の地震の地震後に実施された調査と本課題で行ってきた調査結果をもとに、内陸地震の長期予測の高度化に向けた検討を行った。加えて、昨年度までに引き続き、根尾谷断層と阿寺断層を対象に、活断層で発生する地震の地震像の解明に関する検討を行った。また、令和6年能登半島地震の発生に伴い、海陸境界部で発生する地震の地震発生・震源断層モデルの構築に資する海岸隆起データの取得と、上盤側にあたる陸上部で見られた変動地形についての調査をおこなった。

2016年熊本地震の評価：地震後に実施された複数のトレンチ掘削調査の結果を総合すると、布田川断層における2016年熊本地震の一つ前の活動時期が約2,000年前であり、二つ前の活動時期が約4,000年である可能性が高い（図1）。平均活動間隔は2,000年前後と推定される。この結果は、地震時の変位量と累積変位量に基づいて算定された活動間隔（石村，2019）とも調和的である。日奈久断層高野－白旗区間では、2016年熊本地震では垂直変位をほとんど伴わない純粋な右横ずれ変位の地表地震断層が生じた御船町高木におけるトレンチ掘削調査の結果、布田川断層と同様に一つ前の活動が2,251-1,561 calBPで、2016年熊本地震と同様な横ずれ変位が主体の変位が生じたと考えられ、ひとつ前の地震は2016年熊本地震と類似していた可能性が高い。一方で、この地点では東側低下の断層崖が発達している。トレンチ壁面の地層の変形構造に基づくと、二つ前の活動は3,977-2,768 calBPと推定され、変位地形と調和的な東側が低下する変位が主体であり、布田川断層の活動時期とは対応しない。高野－白旗区間では、ほかにも布田川断層の活動時期とは対応しない活動履歴が示されており（Shirahama et al., 2020），二つ前の活動は熊本地震のように布田川断層と日奈久断層高野－白旗区間が同時に活動していない可能性がある。また、高野－白旗区間の活断層トレースの幾何学形状をみ

ると、区間の南端部や北端部でトレースが分岐しており、これらの分岐トレースでは2016年熊本地震に伴い明瞭な地表地震断層が生じていない。したがって、高野-白旗区間では2016年熊本地震のような布田川断層が主体となる活動のほかに、分岐トレースを活動させるような日奈久断層主体の活動や高野-白旗区間単独の活動が存在する可能性が考えられる。このように布田川断層と日奈久断層の接続部に位置する本区間は、両断層の影響下にあり、複雑な地下構造、地表形状、活動履歴を有するものと推定される。

2014年長野県北部の地震の評価：地震後に実施された複数のトレンチ掘削調査の結果を総合すると、神城断層における2014年長野県北部の地震の一つ前の活動時期は約300年前であり、正徳4年(1714)年の小谷地震が対応している。二つ前の活動時期は塩島で行われたトレンチ掘削調査の結果、1,698-312calBPと推定され西暦841年か762年の地震に対応する可能性が高い。ひとつ前の地震は地表地震断層が出現した位置や、変位量や変位パターンから2014年長野県北部地震と全く同じではないが類似しており、二つ前の地震は2014年長野県北部地震より規模も変位量も地表地震断層が出現した範囲も大きく、蕨平の低位段丘のずれ量より変位ベクトルも異なることが分かった。

このような活断層面に変位を及ぼす地震が複数ある現象が普遍的であるかの検証が必要である。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

本課題は新型コロナウイルス感染症の影響で調査などに制限があり、地震観測データからの検討などは到達目標に達しなかった。しかしながら、2014年長野県北部の地震や2016年熊本地震の地震後に実施された多くの調査と本課題の調査によって、断層の変位ベクトル、活断層トレース毎の活動履歴、変位速度分布に着目することで複数のタイプの地震を分離できる可能性を示せた。また、活断層の接続部や末端において特に地震による違いが出やすい可能性も示唆された。阿寺断層では、活断層の接続部や末端部は地質構造の影響を受けている可能性があることを示唆することができた。整備の進む航空レーザー測量データを活用した詳細な地形判読により、糸静線南部では新たな変動地形が発見され、根尾谷断層においても従来は認識できなかった段丘崖の横ずれ変位と宇宙線生成核種年代測定から、この活断層の横ずれ平均変位速度が過小評価されている可能性が示された。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

史料・考古データとして知られていた1714年に糸静線活断層帯北部で発生した正徳の地震が2014年と同様な規模の地震であり、地表地震断層を出現させる地表変位をもたらしていたことが明確となり、史料地震の地震像の解明に貢献した。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

・論文・報告書等

山中 蛍・後藤秀昭,2023,糸魚川-静岡構造線活断層系白州断層の平均変位速度と完新世後半の古地震,地理学評論,96,291-315

・学会・シンポジウム等での発表

小倉祐弥・金田平太郎・太田凌嘉・松四雄騎・松崎浩之,2023,宇宙線生成核種 ^{10}Be を用いた深度断面法による活断層の平均変位速度推定—根尾谷断層,能郷地区中位段丘面を例として—,日本活断層学会2023年度秋季学術大会,P-8

宇治拓海・安江健一,2023,阿寺断層帯中北部周辺に分布する割れ目の特徴—破碎帯の形成過程と変位センスの変化—,JpGU 2023,HDS09-P04

安江健一・土井駿仁・細矢卓志・中瀬千遥・後藤 慧,2023,UAV レーザ測量による阿寺断層中部の微地形調査(その1),日本活断層学会2023年度秋季学術大会,P-9

細矢卓志・中瀬千遥・後藤 慧・安江健一・土井駿仁,2023,UAV レーザ測量による阿寺断層中部の微地形調査(その2),日本活断層学会2023年度秋季学術大会,P-10

安江健一・原田隼輔・國分(齋藤)陽子・廣内大助,2023,阿寺断層帯中部におけるピット調査と放射性炭素年代測定,日本活断層学会2023年度秋季学術大会,P-12

岡田真介・石山達也・松多信尚・越谷 信・野田克也・片山寧々・馬 博文・及川兼史朗・田村 全・太田 麗・白金美里,2023,糸魚川-静岡構造線断層帯北部・大町市平海ノ口における浅層反射法地震探査,日本地球惑星科学連合2023年大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

大規模活断層帯の活動・構造の複雑性を考慮した内陸地震長期予測モデルの構築

新しい観測技術に基づく活断層の位置・形状・活動性の解明

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

鈴木康弘（名古屋大学）

他機関との共同研究の有無：有

石山達也（東京大学地震研究所）, 杉戸信彦（法政大学）, 後藤秀昭（広島大学）, 熊原康博（広島大学）, 中田高（広島大学）, 金田平太郎（中央大学）, 松多信尚（岡山大学）, 廣内大助（信州大学）, 石村大輔（都立大）, 岡田真介（岩手大学）, 楮原京子（山口大学）, 渡辺満久（東洋大学）, 澤祥（国立鶴岡工業高等専門学校）, 等

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：名古屋大学減災連携研究センター

電話：052-789-3468

e-mail：

URL：<http://www.gensai.nagoya-u.ac.jp/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：鈴木康弘

所属：名古屋大学減災連携研究センター

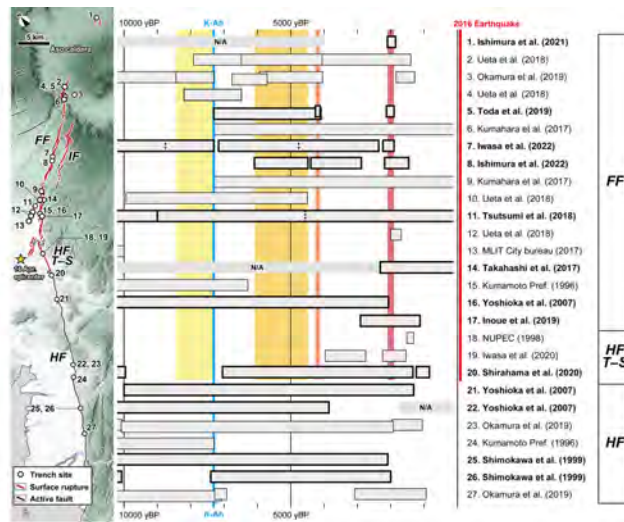


図1 布田川-日奈久断層帯の活動履歴の時空間分布

FF：布田川断層，HF：日奈久断層，T-S：高野-白旗区間，IF：出ノ口断層

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

南海トラフ域におけるプレート間固着・滑りの時空間変化の把握

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

海溝型巨大地震発生の予測のためには、プレート間の固着による定常的なすべり欠損の蓄積と、地震間の間欠的なすべり欠損の解消をもたらすゆっくり滑り等の地殻活動の把握の両方が欠かせない。特に、現行計画で得られた南海トラフ域におけるすべり欠損分布の解釈には、沈み込む側のプレート、特に伊豆マイクロプレートの境界と運動の把握が決定的に重要であることが明らかになった。また、海底地殻変動観測による変位速度の空間的不均質性の解釈には、プレート境界面上でのすべり欠損以外にも陸棚外縁撓曲付近でのひずみ蓄積等の可能性も考慮する必要があることが示唆された。

そこで、本研究では、海域での測地学的観測に加え、現行の地殻変動観測網の制約を克服するために変動地形の分布や変位様式の把握といった変動地形学的調査も併せて行い、伊豆マイクロプレートの境界（特に西端部）と運動の把握を行う。さらに、変動地形学的調査から陸棚外縁撓曲付近でのひずみ蓄積過程も推定する。これらの全てをふまえて、海陸における地殻変動観測結果からより現実的なプレート間固着状態の把握を行う。これと並行して、5年間にわたる連続的な陸上GNSSおよびアクロスによるモニタリングによって、測地学的アプローチと弾性波動学的アプローチの両面から地殻活動の現状を把握する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

南海トラフ域東部を対象として、以下に詳しく述べる1) 変動地形学的、2) 測地学的、3) 弾性波動学的アプローチから各種観測・調査を行う。海域地殻変動観測結果と変動地形学的調査をもとに、ブロック運動モデルによって南海トラフ沿いのすべり欠損の空間分布の把握を行う。また、陸上GNSSとアクロスを用いた連続モニタリングから、定常時やゆっくり滑り時におけるプレート境界領域の物性変化を捉える。

1) 変動地形学的アプローチ

海底地形調査：

銭洲海嶺西端付近、ならびに志摩海脚において、海底地形詳細調査、ならびに浅層地質構造探査を行う。銭洲海嶺西端付近では、変動地形の連続性から伊豆マイクロプレートの西端部の境界を明らかにするとともに、変動地形の位置・形状から伊豆マイクロプレートの挙動の推定を試みる。陸棚外縁撓曲付近でのひずみ蓄積等が海底地殻変動観測による変位速度の不均質性に与える影響を探るため、志摩海脚でも調査を行う。

陸域地形調査：

陸棚外縁撓曲の活動度等を明らかにするため、紀伊半島等の沿岸部で活構造等の地形と地質を調査する。

2) 測地学的アプローチ

海域地殻変動観測：

南海トラフ地震震源域の浅部におけるすべり欠損の空間分布の把握のために、海上保安庁の観測点が設置されていないトラフ軸近傍の1ヵ所で海底地殻変動観測を2年に1回行う。また、伊豆マイクロプレートの西側境界の大まかな位置を推定するとともに沈み込むプレートの運動を実測するため、南海トラフの海側（沈み込むプレート側）の1ヵ所において2年に1回の頻度で海底地殻変動観測を行う。

伊豆マイクロプレートの動きを把握するため、銭洲岩礁にて2年に1回の頻度でキャンペーンGNSS観測を行う。

得られた観測結果をもとに、変動地形学的知見もふまえて、ブロック運動モデルにより南海トラフ域のプレート間固着状態を把握する。

陸上GNSS観測：

南海トラフ地震震源域の深部におけるスロースリップ等による変動の把握のため、三重県、愛知県、和歌山県内の12ヵ所でGEONETの観測点の間を埋める形でGNSS連続観測を実施する。

3) 弾性波動学的アプローチ

アクロス：

プレート境界面における固着やすべり現象に伴う定常・非定常な物性変化を地震波速度変化等から捉えるため、東海地方の2ヵ所でアクロスの連続運転を行い、定常地震観測点で捉えられた信号記録の解析を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

○海底地殻変動観測

観測結果については5か年の成果で述べる。南海トラフ軸近傍の陸側の観測点TCAと沈み込むプレート側の観測点TOAにおける海底ベンチマーク位置決定結果の時系列（アムールプレート固定）を図1に示す。この解析結果は、各観測点に設置している3つの海底局が作る三角形のベンチマーク形状を固定して求めている（これを統合解析と呼ぶ）。固定した形状は、各エポックの座標を単独で決定した（これを単独解析と呼ぶ）際の三角形の形を平均したものである。統合解析を行う理由は、単独解析で生じる海底ベンチマーク位置と海中音速構造のトレードオフを軽減するためであるが、図1の時系列では、幾つかのエポックでトレンドから外れたベンチマーク位置が決定されている。特に、TCAの2014年（エポック#1401）と2017年（#1709）、TOAの2016年5月（#1605）でその傾向が顕著である。これらのエポックでは、単独解析による海底ベンチマーク形状（図2）が他のエポックよりも

(やや)大きく決定されている。これらのエポックでは海底ベンチマークを深い位置に決定して、その深さに合うように音速構造を推定しているが、これが正しく推定されていない可能性が高い。今後、観測回数の蓄積と同時に、海底ベンチマークの形状等にも注目して再解析を行うことで、変位速度ベクトルの誤差の原因を軽減する必要がある。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

南海トラフ域東部を対象として、以下に詳しく述べる1) 変動地形学的、2) 測地学的、3) 弾性波動学的アプローチから各種観測・調査を行った。1)と2)の成果については図3にまとめた。

1) 変動地形学的アプローチ

○変動地形学的見地による伊豆マイクロプレートの西端部の境界

2020年2月2日～4日に海洋エンジニアリング（株）の第二開洋丸によって、銭洲海嶺西端およびその延長部における海底地形詳細調査と浅層地質構造探査を行った。調査海域は、海底地殻変動観測点（TOA）が設置されている地点を含む長辺約42km、短辺約20.5kmの範囲である。当該海域の水深は3500～4200m程度である。

海底地形詳細調査は、マルチビーム測深機EM304を用いて行った。北東－南西方向に全長約42kmの測線を約3.3km間隔で6本設定し、測深を行った。詳細解析の結果、銭洲海嶺・檜野崎海丘間の西半部の海域に、檜野崎海丘の南東縁基部から北東方向に延びる北西側隆起を示す撓曲崖が確認された。西側測線上での上下変位量は累積で約30～35mと見積もられる。

浅層地質構造探査は、サブボトムプロファイラTOPAS PS18を用いて行った。檜野崎海丘～銭洲海嶺間に全長約15kmの測線を北西－南東方向に2本設定した。海底地形詳細調査から明らかになった撓曲崖の直下には逆断層運動を示す構造が見られないため、断層本体は探査深度よりもさらに深部に存在するものと考えられる。

両者の結果をもとに解釈すると、上記の撓曲崖のほかには海底面まで変位させる明瞭な変位地形が周辺には見られないため、この撓曲崖を形成した断層が伊豆マイクロプレートとフィリピン海プレートとの境界である可能性が極めて高く、その境界は檜野崎海丘の南東縁基部に位置する活断層（徳山ほか、2001）へと続いていると考えられる。また、調査海域において横ずれを示す地形的な証拠は検出できないため、両プレートの境界の西端部での横ずれ成分は、有るとしても極めて小さいと考えられる。浅層地質構造探査の記録によると、この撓曲崖の北西側と南東側にも構造の小規模な不連続が数多く見られる。しかし、これらは変位量の累積が小さいため、伊豆マイクロプレート内および沈み込む直前のフィリピン海プレートの内部変形によるものであると考えられる。

○変動地形学的見地による陸棚外縁撓曲の活動度

志摩海脚付近において、海洋エンジニアリング株式会社の第二開洋丸（842トン）によって、2021年11月25日～27日に海底地形調査と浅層地質構造探査を実施した。対象海域は、志摩海脚付近の長辺約40 km、短辺約33.5 kmの範囲（一部を除く）であり、水深は800～2000 m程度である。海底地形調査はマルチビーム測深機EM304を用いて実施し、長辺方向（北東方向）に30～40 km程度の測線を設け、3～4 km程度の測線間隔で計10測線の測深を行った。浅層地質構造探査はサブボトムプロファイラTOPAS PS18を用いて実施し、北西方向の1測線（長さ約19 km）においてデータを取得した。

今回得られた海底地形データに基づく1秒グリッドDEMを用いて検討した結果、以下の事柄が明らかになった：1) 熊野灘から志摩海脚付近にかけて分布する活断層は、トレースが屈曲に富み、北側隆起を示す；2) 志摩海脚付近から遠州灘にかけて分布する活断層は、トレースが比較的直線的であり、北側隆起に加えて右横ずれを示す；3) 志摩海脚付近の活断層は、トレースが西方に向かって多数に分岐し、北側または南側隆起を示す。また、活断層トレースは全体として志摩海脚付近で左ステップしている。

2) 測地学的アプローチ

○海底地殻変動観測

南海トラフ軸近傍の陸側の観測点TCAと沈み込むプレート側の観測点TOAにおいて海底地殻変動観測を実施した。TCA観測点では2021年2月3日と2022年8月23日の2回、TOAでは2021年2月3日の

1回実施した。観測開始当初からの合計観測回数はTCAが9回、TOAが7回である。

これらの全データも含めたTCA、TOAにおける解析、および熊野海盆の他の観測点（KMN、KMC、KMS、KME）のデータの再解析を実施した。MORVEL [DeMets et al., 2010; 2011] をもとにして剛体運動成分を取り除くことで得られたアムールプレートに対する変位速度ベクトルの方向と大きさは、以下の通りである：

KMN : $N76\pm 9^{\circ}W$, $43\pm 5\text{mm/yr}$

KMC : $N75\pm 37^{\circ}W$, $31\pm 22\text{mm/yr}$

KMS : $N73\pm 10^{\circ}W$, $41\pm 7\text{mm/yr}$

KME : $N82\pm 22^{\circ}W$, $41\pm 13\text{mm/yr}$

TCA : $N75\pm 25^{\circ}W$, $36\pm 15\text{mm/yr}$

TOA : $N70\pm 26^{\circ}W$, $50\pm 21\text{mm/yr}$

TOA観測点の変位速度ベクトルは、MORVEL [DeMets et al., 2010; 2011] から推定される理論的な変位速度ベクトル ($N60^{\circ}W$, 58mm/yr) と概ね一致しており、主として沈み込んでくるフィリピン海プレートの運動を反映していると言える。ただし、変動地形学的見地による調査から、この海域直下にはフィリピン海プレートの内部変形を示唆する複数の構造の不連続が見られるため、TOA観測点の変位速度にはフィリピン海プレートの内部変形も含まれている可能性がある。TCA観測点における変位速度ベクトルの大きさは、現段階までの観測結果によると、MORVELによるアムールプレートに対するフィリピン海プレートの相対運動の大きさの6割程度である。熊野海盆および南海トラフ近傍の観測点と、紀伊半島のGEONET観測点における日々の座標値から得られる地殻変動場（変位速度の大きさのプロファイル）とそれに基づくフォワードモデリングの結果、熊野灘では固着率が90%程度、トラフ軸近傍では70%程度であることが明らかになった。

○銭洲岩礁でのキャンペーンGNSS観測

2021年7月30日と、2022年7月22日・24日に銭洲岩礁におけるGNSSキャンペーン観測を実施した。1996年以降、高知大学とともに26年間に計14回のキャンペーン観測を実施しており、これらすべてのデータを再解析した。銭洲岩礁周辺のGEONET 8カ所のRINEXデータを用いて座標値をF5解に強く拘束するように解析した。2000年三宅島噴火に伴ってステップ状の基線長変化が観測されたため、2000年以降の約20年間の基線長変化に着目した。その結果、銭洲岩礁と南伊豆2は基線長変化が無く、両観測点は同じブロックに属していると考えられる。一方、銭洲岩礁—新島間には有意な基線長変化が観測されており、両観測点は異なるブロックに属していると思われる。新島と神津島はやや異なる動きをしており、新島—神津島間にブロック境界が存在するものと考えられる。また、八丈および御蔵島のGEONET観測点と銭洲岩礁との間には有意な基線長変化が見られない。

銭洲岩礁におけるGNSS観測の連続観測をめざして、2022年に機材一式を設置した。低消費電力のGNSS受信機であるu-blox社のZED-F9Pを用いて、機材やバッテリーなどの小型化を行なった。GNSS機材一式はペリカンケースに入れて防水対策を施し、その上に波浪の影響を受けにくい形状のステンレス製カバーを設置した。受信データはオフライン収録であるため、渡航時に回収を行う必要がある。

3) 弾性波動学的アプローチ (アクロス)

ノイズ変化に影響されないアクロス信号の振幅時間変化の評価方法の開発を行い、野島断層近傍におけるACROSSの観測データに適用した。その結果、2000年鳥取県西部地震と2001年芸予地震の際にアクロス信号の振幅が小さくなったことが明らかになった。これらの地震時には地盤の地震波速度が減少し、さらにS波の速度変化に異方性があることが明らかになっている [Ikuta et al., 2002]。本手法の適用により、S波の振幅変化にも異方性があり、鳥取県西部地震ではS波の速度減少がより大きな方向の振幅がより減少していたことが分かった。これらの現象は、震動によってクラックが開き、地盤の減衰が増大したことで統一的に説明できる。本成果により、アクロス信号の振幅を用いて地震時の地盤による減衰や異方性の変化のモニタリングが可能になった。

岐阜県土岐市のACROSS震源装置を10年間にわたって連続稼働し、主としてHi-net八百津（震央距離11km）で記録された信号に対してTsuji et al. [2022] の手法を用いて解析を行ったところ、2011年東北地方太平洋沖地震による明瞭な走時変化が確認された。愛知県豊橋市にある名古屋大学三河観測所では、P波を効率的に発震できる新型の震源装置を1年間あまり連続稼働し、主として名大三河（震

央距離200m)で記録された信号を用いてP波速度とS波速度の変化の同時測定を行った。地震波速度の変化をO' Connel and Budiansky [1974]の結果を用いてクラック密度と飽和度で解釈したところ、乾燥時のクラック密度と飽和度の減少、降雨時のクラック密度と飽和度の上昇がACROSS信号の解析からモニターできることが明らかになった [Suzuki et al., 2021]。

静岡県森町に設置されているACROSS震源から約3km離れた場所に地震計を設計し、地震波速度に現れる浅部地下水の影響を検討した。降雨のデータからタンクモデルを用いて仮想的な地下水位に換算し、観測された弾性波の走時変化と比較した。その結果、後続波の走時には降雨に直ちに応答し、徐々に戻るような変動が見られた。この走時変動は、5~20日の時定数で減衰させた換算地下水位との間に良い相関があることが分かった。また、地震計アレイ直下にボアホールを掘削し、地下水位を実測したが、現場の地下水位は降雨に対する遅延が大きく地震波走時の変化との間では相関が小さく、走時変化は広域で応答の速い水の変化と相関が良いことが分かった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

南海トラフ地震の想定震源域直上における海底での地殻変動を実測し、トラフ軸近傍から陸域に至る大まかなプレート間固着分布が明らかになった。また、海底地形調査によって海底活断層の分布・変位様式が明らかになった。これらの成果は、南海トラフ地震の発生予測に資する基礎的な知見を提供するものである。

アクロス連続稼働によって得られたデータから物性の時間変化を得るための解析手法を確立し、実際に物性の時間変化が捉えられた。このことは、地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測への道を拓く成果である。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

田所 敬一、中村 衛、小池 遥之、松廣 健二郎,2023,南海トラフ軸および南西諸島海溝軸付近のプレート間固着状態,地球惑星科学連合2023年大会,SCG52-P01

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報 :

(11) 次期計画における課題名 :

南海トラフ・南西諸島海溝域における海溝型地震発生場の解明

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

田所敬一(名古屋大学),伊藤武男(名古屋大学),山岡耕春(名古屋大学),渡辺俊樹(名古屋大学),鈴木康弘(名古屋大学)

他機関との共同研究の有無 : 有

田部井隆雄(高知大学),生田領野(静岡大学),杉戸信彦(法政大学),松多信尚(岡山大学)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等 : 名古屋大学環境学研究科

電話 : 052-789-3046

e-mail :

URL :

(14) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名 : 田所敬一

所属 : 名古屋大学環境学研究科

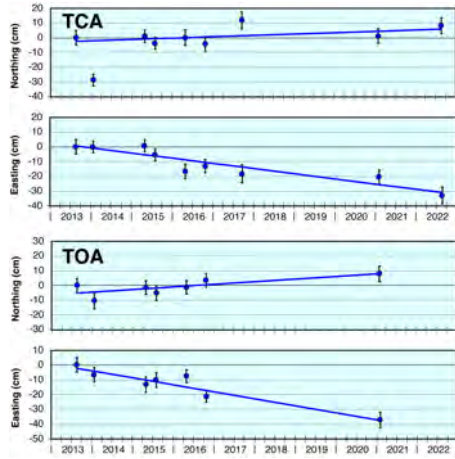


図1：南海トラフ軸近傍における海底地殻変動観測結果。
 (上) TCA観測点、(下) TOA観測点。アムールプレート固定の時系列を示す。

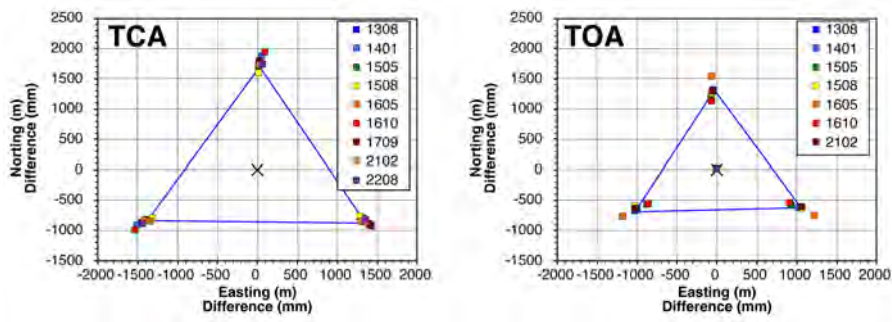


図2：単独解析で決定された海底ベンチマーク形状。
 (左) TCA観測点、(右) TOA観測点。最初のエポックからの変動分を各頂点の位置にmm単位で示す。凡例の4桁の数字はエポック番号(年の下2桁月2桁からなる)。

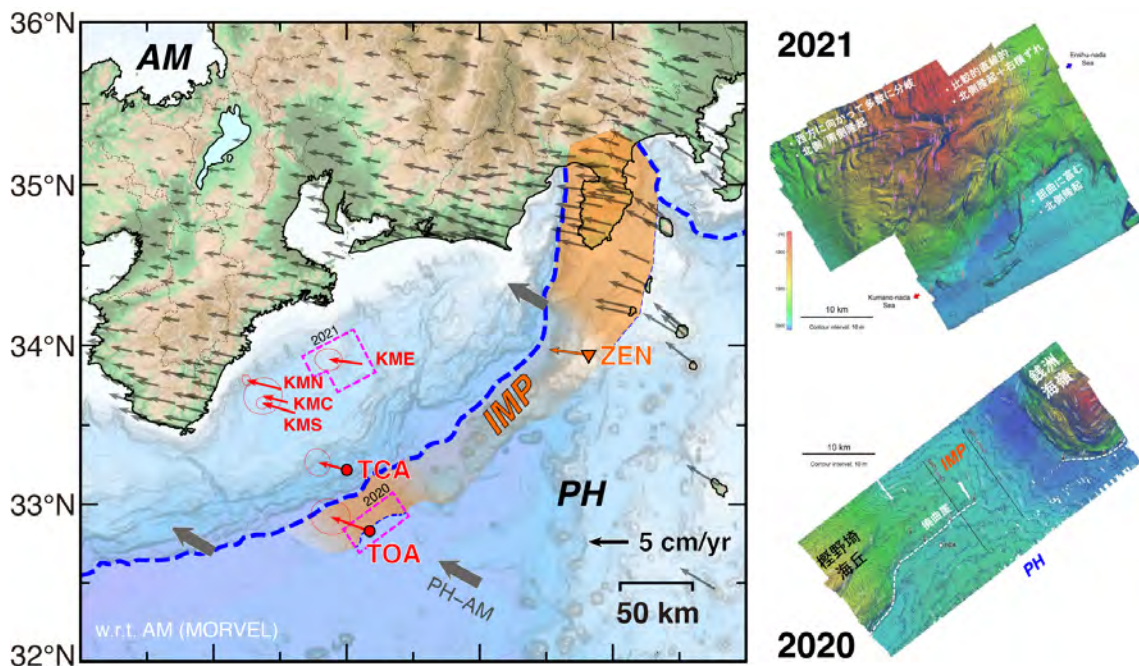


図3：海域における変動地形学的、および測地学的見地からの成果のまとめ。

赤矢印：海底地殻変動観測

橙矢印：銭洲岩礁キャンペーンGNSS

桃矩形：海底地形調査の範囲（得られた結果と解釈を右に示す）

陸上の変位速度ベクトルは国土地理院GEONETによる。

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地表地震断層の特性を重視した断層近傍の強震動ハザード評価

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
ア. 強震動の事前評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
ウ. 大地震による災害リスク評価手法
- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
ア. 地震動の即時予測手法

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本研究においては、地表地震断層の詳細な特性を考慮して、断層近傍の強震記録を再現できる強震動シミュレーション手法を開発する。地表地震断層のごく近傍の詳細な建物被害分析結果に注目した強震動シミュレーションは新たな取り組みである。活断層から発生する地震予測に関する従来のパラメータステディは約1秒以上の長周期成分を対象としたものが多く、建物被害に大きな影響を及ぼす1秒以下の短周期成分を考慮した研究例は少なかった。これらの周期帯をあわせて広帯域地震動を評価するためには、地震基盤以浅の地表地震断層近傍域における詳細な地盤構造モデルを構築する必要がある。

従来の地表地震断層の研究は、変位量の記載や個々のセグメントの特徴の把握にとどまっていた。強震動との関係を議論するためには、起震断層帯全体の中で相互に関連する地震断層形状の正確な把握や、変位量の空間的変化を高解像度で把握し直ることが求められる。本研究では熊本地震の地震断層の再検討を行うが、いわゆる活断層としての活動性に関する情報は別プロジェクトで得られる成果を用い、強震動予測に適したデータベース化を行う。

最終的に、熊本地震等の事例について新たな強震動評価手法を用いた強震動分布を再現し、建物被害との整合性を確認する。その上で、海外の事例を含めた他地域への適用を試行する。他地域への適用に当たっては、従来からの変動地形学的活断層調査結果を参考にする。なお、期間内に新たな地震断層が出現した場合は、これを検討対象に加える。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度は、「熊本地震の益城町と南阿蘇村を事例とした基礎データ収集・感度解析」として以下の項目を実施する。

- 1) 強震動計算モデルへ組み込むため、地表地震断層の詳細な形態的特徴を精査し、破壊開始点、変位

量分布のデータベースを作成する。

2) 航空写真と現地調査結果を総合して、地震断層近傍全域における全壊家屋分布図を作成する。建築構造情報を考慮したデータベース作成。

3) 地震動記録の再検討。全壊家屋分布を説明できる強震動計算モデルを構築する。

平成32～33年度は、「熊本地震の地震断層周辺全域への適用・モデル改良」として以下の項目を実施する。

1) 熊本地震の地震断層近傍の全域について強震動モデルによる計算を適用する

2) 強震動の出現に著しい地域差があることに注目して、地震断層・活断層の特徴との相関を分析する

3) 強震動の地域差を表現できる強震動モデルを検討し、モデルの高度化を目指す。

平成34～35年度は、「他地域・他の活断層へ試行」として以下の項目を実施する。

1) 新たな強震動評価手法を他の活断層へ適用し、強震動予測地図を作成する。

2) 活断層データとしては、他の課題（「変動地形学的手法による内陸地震発生モデルと活断層長期評価手法の再検討」(2. (1) イ. 内陸地震の長期予測)の成果を活用する。

3) 活断層の強震動評価手法として一般化させ、地震本部において活用可能な形を目指す。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和5年度は、地表付近の強震動計算の高度化に資するため、とくに震源断層浅部の破壊進展を新たにモデル化して強震動を試算した。これにより2016年熊本地震で観測された地表地震断層近傍の地震動の再現や、強震動ハザード評価の高度化を目指した。この評価手法のデータに資するため、変動地形学的調査においては熊本地震時の地震断層変位量を幅1km程度の変形を含めて再評価した。

主な実施項目は、(1)強震動計算における浅部震源断層のモデル化の検討、(2)熊本地震の地表地震断層近傍の長波長変形の定量化、である。(1)変動学的知見等を踏まえた詳細な地表地震断層の属性を組み入れたモデルに基づく強震動計算の高度化に資するため、今年度は断層浅部（地震発生層以浅）の破壊進展のモデル化方法について既往文献等の調査に基づいて震源断層モデル化手法を試作した。具体的には、まず、すべり時間関数形状・すべり量・ライズタイムについて複数の手法に基づきモデル化に必要なパラメータやそれぞれのモデルの特徴を整理した。続いて、震源断層が地表に達する断層モデルを想定し、断層浅部のモデル化におけるすべり時間関数、すべり量、破壊伝播速度についてパラメータスタディを行って断層近傍強震動の計算結果に与える影響を調べた。

(2)熊本地震の際に出現した地震断層近傍の数百メートルの範囲の地盤変形が、観測された強震動波形や構造物の甚大な被害発生に影響した可能性を検討するため、名古屋大学等は地震前後のLiDARデータを再解析した。その結果、地震断層による地表変形は幅1000m程度のゾーンに長波長変形として現れていて、これまで報告されている、線状のずれや食い違いのみで検討した地震断層変位量は過小評価だったことが判明した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本研究は、地震の災害誘因の事前評価手法の高度化として、強震動の事前評価手法の改良を目指した。これを実現させるためには、従来は個別に行われていた活断層研究と強震動研究が連携する必要があり、今期は主に熊本地震を対象にした共同研究をスタートさせ、糸魚川－静岡構造線や屏風山・恵那山断層帯などへの展開を開始した。

主な成果は、①熊本地震の際の建物被害を分析し、地表地震断層から百メートルの範囲に集中すること、被害率と断層距離との間に負の相関があること、またその原因を地盤効果等で説明できないことを明らかにした。②地下2km以深にのみ震源断層モデルを想定する従来の手法では地表変位や地震動を説明できないことを明らかにした。③地表地震断層と深部の震源断層モデルを接合させる手法を検討し、新たな強震動発生モデルの検討を開始した。④すべり量、破壊伝播速度についてパラメータスタディを行って断層近傍強震動の計算結果に与える影響を検討した。⑤地表地震断層に伴う地表の長波長変形の存在を確認し、これを考慮すると地震断層変位量は従来の2～3倍であることを明らかにした。

以上の成果は次期計画に引き継がれるべきものである。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本研究は、地震の災害誘因の事前評価手法の高度化として、強震動の事前評価手法の改良を目指している。地震断層近傍における強震動発生メカニズムを明らかにすることで、内陸直下地震の際に甚大な被害を生じる震度7になりえる地域（いわゆる震災の帯）を、活断層情報を基にした浅部断層モデルを従来の特性化震源モデルに組み入れることで、事前に従来よりも精度よく予測できるようにする。そのために活断層研究と強震動研究が連携する。これはまさに異なる研究分野・研究手法を融合して被害軽減に資する共同研究である。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

大熊祐里英・隈元 崇,2024,文禄五年閏七月九日の伊予・豊後地震に関する特性化震源モデルを用いた中央構造線活断層帯の断層パラメータの検証,文明動態学,3,21-40,Doi 10.18926/66189.,査読有,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

山下日和・鈴木康弘・向山 栄・室井翔太・山下久美子・福場俊和・村木昌弘・杉本 惇・小俣雅志,2023,2016年熊本地震の地表地震断層周辺における地表変形特性の分析,2023年日本活断層学会学術大会

野上風馬・野口 朗・隈元 崇,2023,ETAS 地震発生シミュレーションによる背景地震の規模別頻度分布評価,2023年日本活断層学会学術大会

岩城麻子・森川信之・先名重樹・藤原広行・鈴木康弘,2023,活断層の詳細位置形状を取り入れた断層近傍の強震動予測,第16回日本地震工学シンポジウム論文集, G417-13.

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地表地震断層の特性を考慮した断層近傍の強震動ハザード評価

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

鈴木康弘（名古屋大学）

他機関との共同研究の有無：有

隈元崇（岡山大学）,中田高（広島大学）,渡辺満久（東洋大学）,藤原広行（防災科学技術研究所）,森川信之（防災科学技術研究所）,中村洋光（防災科学技術研究所）,先名重樹（防災科学技術研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：地震火山研究センター

電話：052-789-3046

e-mail：

URL：<https://www.seis.nagoya-u.ac.jp/center/index.html>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：鈴木康弘

所属：名古屋大学

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

被害の地域的な発現過程とコミュニティの社会・空間構造に着目した地震・津波災害発生機構に関する文理融合的研究

(3) 関連の深い建議の項目：

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

これまでの人文社会科学的な災害研究では、情報伝達や避難行動といった「どのように（how）対応したのか」を問題とするものが多く、「なぜ（why）災害が発生したのか」を、災害前や復興後における被災地の社会構造に遡及して解明するものはほとんどない。防災リテラシーの向上のためには、自然災害が社会的構築物であるという基本的な認識の上で、いわゆる緊急対応のみならず、長期間にわたる自然ハザードと地域社会との関係という統合的観点からハザードが災害に転換する構造的脈絡を明らかにする必要がある。

それゆえ、本研究では、同一のハザード（地震、津波、火山噴火など）の外力がかかっても地域ごとに被害や対応の現れ方が異なる過程に着目し、そこにどのような社会的要因が介在しているのかを脆弱性概念に基づいて分析する。脆弱性は土地利用、社会的凝集性、災害文化、災害対策の4側面から捉えられ、工業化や都市化といった構造的要因によって長期的に変化する。本研究では、自然的・社会的特性の異なる地域社会を取り上げ、それぞれについて脆弱性各側面の具体的項目を定量的・定性的に調べるとともに、ハザード外力の地域差と重ね合わせ、災害発生メカニズムやその規定因を明らかにする。それによって、災害軽減のためにどのような社会的対応が求められるかを明確にする。

具体的には、（1）東日本大震災などの過去の災害を事例に、以上のような地域的差異に着目する視点からハザード外力と脆弱性との相互既定関係を検証し、また、復興後の社会変動によって生じた地域社会における脆弱性の再編様式を明らかにする。（2）東海地域に焦点を置き、地形や集落立地、経済・人口規模や都市システム、災害履歴などを指標に地域的な類型化を行い、ハザードの将来予測と重ね合わせながら、地域類型ごとの脆弱性の内容について比較検討する。（3）コミュニティ防災の全国的な先進事例も参照しながら、以上の結果をもとに、災害軽減のためにどのような社会的対応が求められるかを地域単位で検討し、地域特性に応じたコミュニティ防災の条件や課題について提言を試みる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

2019年度：東日本大震災被災地のコミュニティ組織を対象に、他のプロジェクトと連携して2018年度に実施した質問紙調査の分析結果と、その回答者に対する、復興後の災害対応の変化などに関する追跡調査（インタビュー調査）をもとに、これまで行ってきた東日本大震災研究の総括を行うとともに、ハザード外力と脆弱性との相互既定関係について理論化を図る。なお、各年次、コミュニティ防災の取り組み担当者を招聘し、全国的な先進事例に関する定例研究会を開催する。

2020年度：東海地域（愛知・三重・静岡県）、とりわけ南海トラフ地震で津波被害が想定される自治体において予備調査を行うとともに、各種統計などをもとに、ハザードなどの自然的特性と、都市規模や都市システムといった社会的特性から、大都市地域、地方中都市、小都市・農村部、沿岸漁村部といった地域構造に基づく地域類型マップを作成し、予備調査の結果と合わせ、詳細分析の対象地域社会を選定する。

2021年度：地域類型の異なる複数の地域社会（自治体およびコミュニティ）において、（1）地域の自然特性と社会特性、および近年の社会・経済変動を調査し、データベースを作成するとともに、（2）少なくとも第2次世界大戦後の災害履歴を、ハザードの特徴や被害状況のみならず、防災対応や復興プロセスも考慮して整理し、災害発生メカニズムにかかる政策的・地域的要因に関する考察を行い、（3）地域類型間（自治体およびコミュニティのレベル）の比較検討と、地域差をもたらす社会的要因を解明する。インタビュー調査を中心とした現地調査を基本とするが、必要に応じてサーベイ調査も実施する。

2022年度：前年度の活動を複数の地域社会において実施し、調査結果を蓄積するとともに、とりわけ東日本大震災後の法改正や住民の意識変化等に伴う自治体の防災対策の改変やそのコミュニティに対する影響に関して知見を得る。

2023年度：それまでの活動を継続し、蓄積された調査結果の理論的集約を進める。なお、各年次における研究成果は、国内外の学術会議で発表するとともに、学術論文として公表するほか、公開研究会の開催などを通じて地元還元を努める。最終的には、可能な限り、報告書や図書（専門書や一般書）の刊行を目指す。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

・南海トラフ地震対策に関する研究として、ハザードの規模が上方修正された後の高知県高知市の防災やコミュニティの変動に関する調査を継続的に行ってきた。その成果を題材に用いて、ハザードの科学的理解や制御をノルムとする「上流の防災リテラシー」とは区別される、社会的な観点に立った災害・防災の捉え方を「下流の防災リテラシー」として概念化し、その特徴をJDRの論文にまとめた（Fig. 1）。

・東日本大震災後、被災地の防災は強化されたのかについて、宮城県女川町を事例に検証を行った。震災後の高台移転や嵩上げによって津波からの安全性は向上した一方で、女川町では住宅再建過程で世帯の分解・縮小が顕著に進んだこと、震災前と比較してコミュニティの近隣関係、地域活動、生活条件は顕著に衰退、悪化したこと、地域の防災活動も著しく停滞した状態にあり、また地域防災と原発防災の乖離がみられることを明らかにした（Fig. 2）。以上の研究成果は学会で報告し、現在報告書を作成中である。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

(1) 東日本大震災の研究

・震災時の防災

震災時の緊急避難行動に関して漁村地区と市街地で顕著な地域差があったこと、そうした地域差は地震・津波に関する科学的リテラシーの差異よりも、過去の災害経験の記憶の地域的継承の有無や、生業・生活スタイルと自然環境条件の関わりの差異に起因するところが大きいことを明らかにした。

・震災後の防災

震災後の復興・防災政策では移転による津波リスクの回避が図られたが、住宅再建過程で世帯の分解・縮小が顕著に進んだこと、ハード防災とソフト防災の現状評価にズレが生じていること、特に高台移転地で地域防災が停滞し、生活条件も顕著に悪化したことを明らかにした。

(2) 南海トラフ地震対策の研究

・伊勢湾台風後の開発と防災（名古屋市）

南海トラフ地震の津波浸水想定域と伊勢湾台風の浸水域はほぼ重なるため、伊勢湾台風後の被災地の土地利用変化や社会変動について調査した。その結果、伊勢湾沿岸の構造物対策は強化された一方で、災害後に開発が進んだことで暴露性はむしろ拡大したこと、脱工業化期には高齢者、外国人等の災害弱者の低地への集中が進んだことを明らかにした（Fig. 3）。コミュニティ防災に関しては旧住民が主導的な役割を担ってきたが、今日では様々な点で限界に直面しており、事業所防災との連携が必要であることを提言した。

・漁村地区の防災（三重県南部）

三重県南部沿岸地域では過疎・高齢化に関連する地域防災の課題について現地調査を行った。知見として、南伊勢町では長大な海岸地形と財政的な制約から、防潮堤等の構造物対策が事実上放置されていること、大紀町では東日本大震災後に防潮堤を整備したことで住民の防災意識が顕著に低下したこと等が明らかになった。

・新想定に対する社会的反作用（高知市）

高知県高知市では新想定後に津波防災対策が格段に強化された一方で、階層的なバイアスを伴った居住地移転が活発化した。その実態を現地でのヒアリング調査や小地域統計のデータを用いて分析し、防災対策の推進によって階層的周辺層の津波浸水域への偏在が進むという矛盾が生じたことを明らかにした（Fig. 4）。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本研究課題は、従来の理学的、科学技術的な観点を中心とした防災の考え方を社会科学的な観点から相対化し、理系と文系の補完関係を強化することで防災リテラシーの向上（「関連の深い建議の項目」）を図ることを目的とするものである。この点に関し、理系的な防災の観点では見落とされがちな防災の問題点を現地調査を通して数多く明らかにしたこと、また理学的防災と社会科学防災の異同や接点に関する理論的論稿をまとめたことは成果である。「災害の軽減に貢献する」という目標に関しては、即効的な効果はそれほど期待できないものの、防災をハザード対策に特化せず、地域の様々な生活課題との関連の中で捉え、持続可能性との折り合いを探ったという点で、一定の貢献があるものと考えられる。

しかし、理系の研究者と研究成果の共有はある程度進んだが、研究の連携という点での成果は少ない。今後は理系の研究者と現地調査をともにし、異なった観点から得られた知見の関連性について議論を深め、防災リテラシーの共創を目指すことを今後の課題としたい。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Kenji Muroi, 2024, Literacy for Disaster Resilience from “Downstream” : From a Case Study of the Nankai Trough Earthquake Countermeasures in Kochi City, Journal of Disaster Research, Vol.19, No.1, 113-123, 査読有, 謝辞無

田中重好, 2024, 「復興の優等生」は復興の最適解か—宮城県岩沼市を事例にして, 名古屋大学社会学論集, Vol.44, 査読無, 謝辞無

Jia Xu, Makoto Takahashi, and Weifu Li, 2024, Identifying vulnerable populations in urban society: a case study in a flood-prone district of Wuhan, China, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol.24, No.1, 179 - 197, 査読有, 謝辞無

Shigeyoshi Tanaka, 2023, The 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami: The highest casualties and largest reconstruction funds—Characteristics of major disasters and future challenges in developed countries, Japanese Journal of Sociology, Vol.32, Issue 1, 7-24, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

室井研二, 2023, 震災復興条件不利地域の研究—三陸地方を中心に, 日本社会分析学会第146回研究例会
室井研二, 2023, 南海トラフ地震の被害想定と社会変動, 日本地球惑星科学連合2023年大会

田中重好, 2023, 大規模災害からの復興の地域的最適解に関する総合的研究2023（6）「復興の最適解」という問い, 第96回日本社会学会大会

高橋誠・室井研二,2023,東日本大震災からの復興によって被災地は災害に強くなったのか,名古屋地理学会研究報告会

高橋誠、井ノ口宗成、木村玲欧,2023,防災リテラシー研究の現状と課題,日本地球惑星科学連合2023年大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

南海トラフ地震対策の地域的最適解に関する文理融合型研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

室井研二（名古屋大学環境学研究科）,高橋誠（名古屋大学環境学研究科）,山岡耕春（名古屋大学環境学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

堀和明（東北大学）,黒田由彦（椋山女学園大学）,田中重好（尚絅学院大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：室井研二

所属：環境学研究科

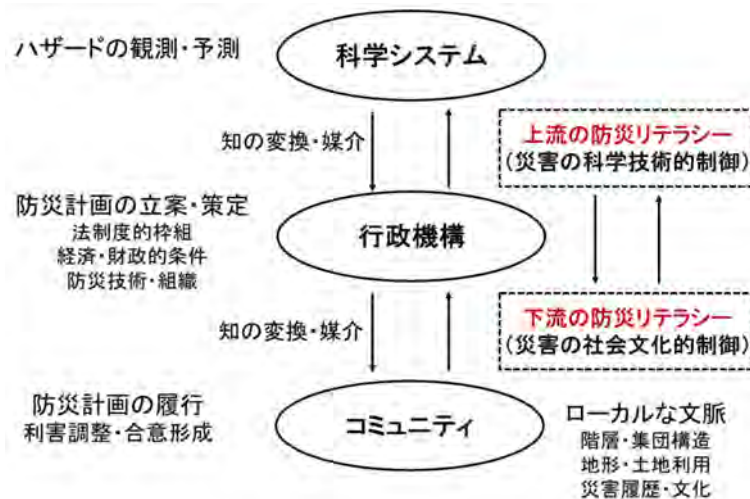


Fig. 1. 防災リテラシーの「上流」と「下流」

防災・復興の課題-女川の事例-

津波防災に特化した防災

- 高台移転(災害公営住宅)
 - 世帯の分解・高齢小世帯の増加
 - 共助の衰退、高齢層の社会的孤立
- 地域防災と原発防災の分離
 - 原発事故への高い危機意識 ⇔ 地域防災の停滞

復興を契機とした開発(創造的復興)

職住分離のゾーニングと「コンパクトシティ」

拠点地区

商業・観光開発→交流人口拡大、賑わい創出



漁村地区

拠点地区からの分離→生活条件(公共交通、通学)悪化

高台移転地

コミュニティ形成への政策的対応の欠如、空家増加

Fig. 2. 震災後の防災(女川町)

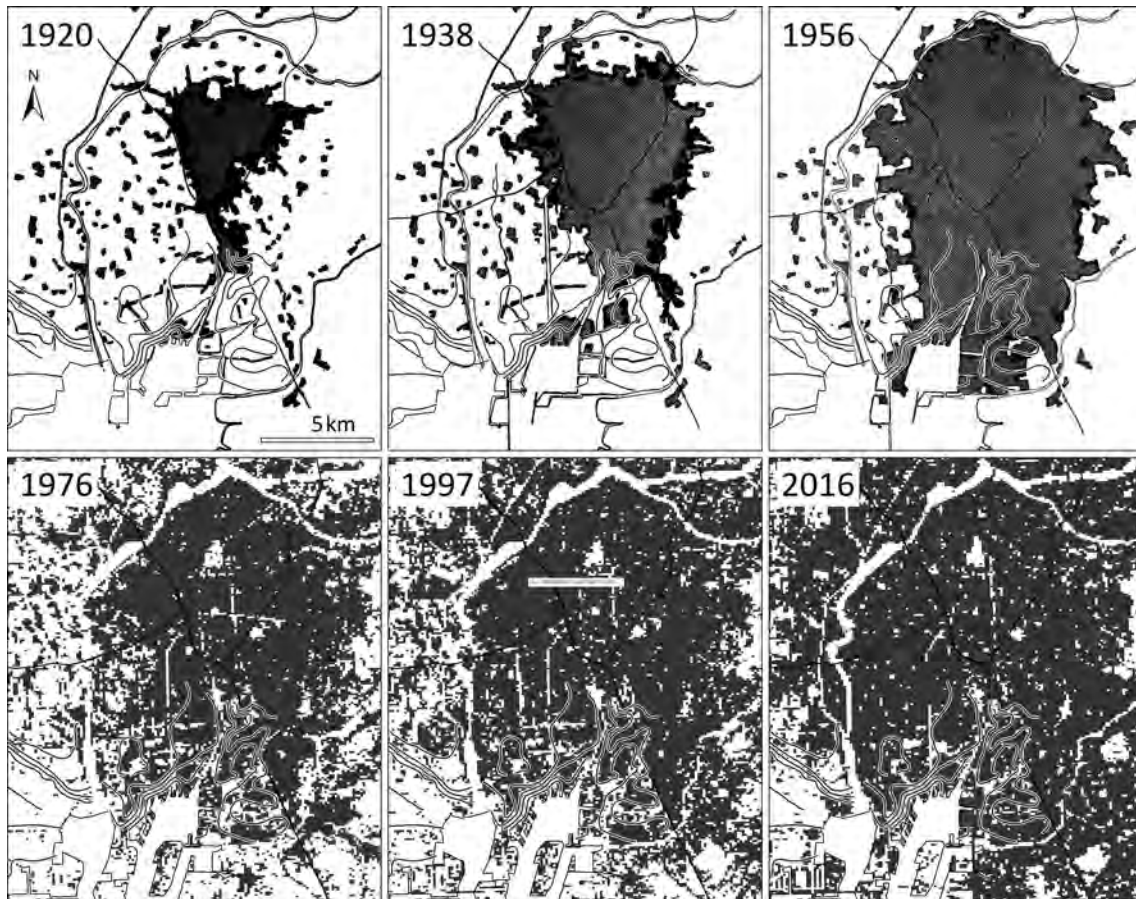


Fig. 3. 伊勢湾台風前後の名古屋市街地の拡大

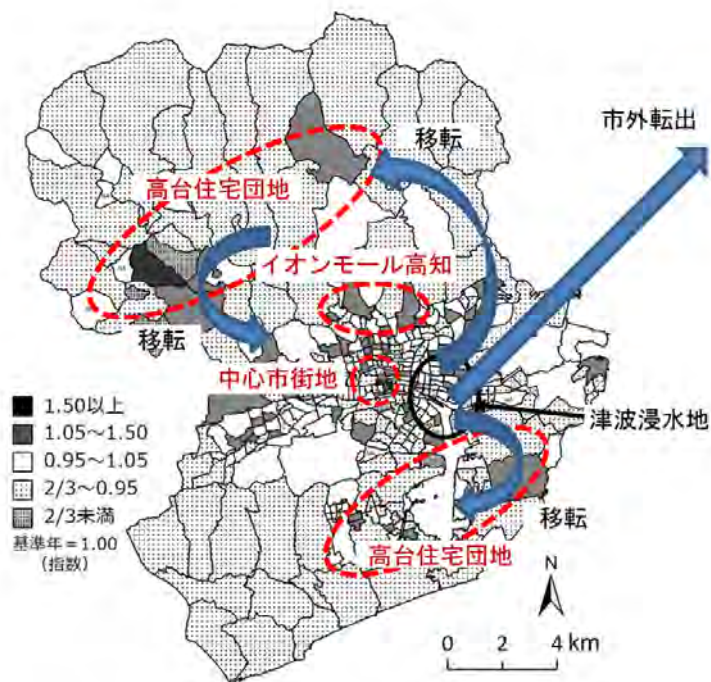


Fig. 4. 新想定後の人口分布の変化(高知市:2010-15)

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

御嶽山地域の防災力向上の総合的推進に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(4) その他関連する建議の項目：

- 5 研究を推進するための体制の整備
(2) 総合的研究
オ. 高リスク小規模火山噴火
(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(5) 総合的研究との関連：

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

2014年御嶽山噴火後の御嶽山地域において、地元ステークホルダーを主体とした総合的防災力推進に研究機関として貢献する方法論の確立のため、そのプロセスに関する記録を残すとともに有効性を検証する。ステークホルダーの代表として、御嶽山火山マイスターを対象として、名古屋大学御嶽山火山研究施設と連携した活動に焦点を絞る。不確実性が高い情報を受けた際に、専門家からどのような情報を提供するのかが、地元ステークホルダーはどのような対応をとり得るかに着目する。研究期間の前半3年間は長野県からの寄附による名古屋大学御嶽山火山研究施設が運営されており、その期間に地元と名大との顔の見える関係を構築し長期的に継続できるものにするとし、その成果としての後半2年間を検証する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

名古屋大学環境学研究科地震火山研究センターに御嶽山火山防災寄附分野が設置されている3年間は、御嶽山火山研究施設に専門家（名古屋大学特任准教授）と長野県からの出向職員（名古屋大学研究協力員）が御嶽山地域に常駐するので、その期間に地元との顔の見える関係（火山マイスター制度を通じた火山リテラシーの向上）を図るとともに、名古屋に常駐する研究者と火山マイスターや地元防災担当者との良好な連携体制を築く。後半の2年間では、その関係を維持・発展させるための取り組みを行う。5年間を通じたプロセスの記録と課題の抽出を行い、パイロットケースの成果として残す。活動を記録する作業は、専門家の指導のもとで主に外部に委託し、研究者の負担軽減を図る。また部会全体としての研修プログラム構築に知見を提供する。

初年度から3年間は、御嶽山火山研究施設の常駐専門家が中心となり、長野県や地元防災担当者の協力を得ながら、御嶽山火山マイスター等の火山リテラシー向上に貢献する。具体的には火山の基礎知識、御嶽山や御嶽山地域の自然に関する知識、噴火予知連絡会の資料の読み解き等を通じた火山活動やハザードの理解、御嶽山火山防災協議会や御嶽山緊急砂防計画検討会との交流を企画する。火山マイスターは長野県のみならず今後は岐阜県側からの参加も想定されているため、御嶽山地域全域へ

の火山リテラシー向上の足がかりになる。また年に1-2回、名古屋大学の研究者との交流の機会を作り、寄附分野終了後につなげる。

4~5年度は、火山マイスターや地元の防災担当者と協力しながら、年3-4回程度の交流を進める。また年3回開催される噴火予知連絡会本会議資料の読み解きなどを通じ、定期的に顔を合わせる関係を構築する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

○令和5年度は、2014年噴火以降の御嶽山地域の火山防災リテラシー向上に関する活動と他の火山地域の活動を比較し、位置づけるために、前年度に開所した御嶽山ビジターセンター（やまテラス王滝、さとテラス三岳）の活用状況や御嶽山火山マイスターの活動、名古屋大学御嶽山火山研究施設との交流の状況を引き続き取材した。前年度に続き、火山研究施設主催で、登山者を対象にした避難訓練（防災科技研のビーコンを使った登山者動向把握実験「御嶽山チャレンジ」と同時開催）が行われた。また、草津地域で行われた水蒸気噴火及び防災と観光シンポジウムで自治体担当者や火山マイスターが発表を行う、雲仙地域・阿蘇地域へ御嶽山火山マイスターが視察訪問するなど他地域との交流も始まっている。御嶽山火山マイスターによる地元小学生に対する火山防災教育活動や登山者アンケート等の活動は引き続き行われており、長野市など他の地域で御嶽山ビジターセンターの展示を紹介し、火山マイスターによるレクチャーなどを行う「移動ビジターセンター」も何度かも試みられている。○前年度から行っている御嶽山火山マイスターの火山防災・火山リテラシー向上の取り組みと複数の火山地域における取り組みとの比較研究をまとめた。本内容は当初の予定にはなかったが、部会での議論を受けて令和3年度から実施しているものである。今年度はこれまでに訪問調査を行った磐梯山噴火記念館、箱根ジオミュージアム、富士山研究所、雲仙岳災害記念館、桜島ミュージアムの各組織、御嶽山火山マイスターのモデルである洞爺湖・有珠火山マイスターについて下記の項目について比較を行い、特に平常時と災害発生時の役割、火山研究者との交流、地域住民と観光客・登山客への啓発、地域住民の火山防災に対する意識の比較について論文にまとめた。

各火山地域に共通する主な課題として「噴火災害経験の継承」、「地域住民への火山防災啓発」、「登山者・観光客への火山防災啓発」、「観光と防災の両立」の4つが挙げられる（図1）。噴火災害経験の継承に関しては、有珠山地域や御嶽山地域では毎年火山マイスターの認定試験が行われ、新たなマイスターが増えていくことで、火山防災意識を持続し、噴火災害経験を継承していく仕組みがある。図2に各地域で行われている住民、観光客・登山客に対する火山防災啓発の試みを子供、大人に分けて示した。特に登山者への火山防災啓発に関して、御嶽山地域では登山ルートでの啓発活動や登山者を対象とした避難訓練など独自の試みが行われている。これは2014年の噴火では火口付近にいた多くの登山客が犠牲になったことが背景としてある。一方、地域への直接的な被害はなかったため、地域の火山防災意識はあまり高くない傾向がある。地域住民に対する啓発として、火山の災害（噴火だけでなく土石流や岩屑なだれなど）と恵み（火山活動に関連する地形など）の両面を知ってもらうためのさらなる活動が必要である他の火山地域からは火山防災のあり方を見直す契機となった御嶽山への関心が寄せられており、相互交流や情報交換が有益であると考えられる。

調査項目

1. 役割

- 1-1. 地元から期待されている役割
- 1-2. 噴火時（災害発生時）の役割
- 1-3. 防災における役割
- 1-4. 観光・地域振興における役割
- 1-5. その他

2. 人的交流について

- 2-1. 火山研究者との交流の状況
- 2-2. 火山以外の研究者との交流の状況
- 2-3. 地元住民との交流の状況
- 2-4. 地元行政との交流の状況
- 2-5. 地元事業者との交流の状況
- 2-6. 地元以外の事業者との交流状況

- 2-7. 観光客・登山者との交流の状況
- 2-8. 子供たち（小中高）との交流の状況
- 3. 施設について（博物館・ビジターセンター等の施設がどのように活用されているか）
 - 3-1. 施設の概要
 - 3-2. 施設の活用方法
 - 3-3. ジオガイド等にどのように活用されているか。
 - 3-4. 防災および観光における役割や効果
 - 3-5. 施設・展示の更新状況
- 4. 野外見学地
 - 4-1. 野外見学地点の概要
 - 4-2. 野外見学地点の活用状況
 - 4-3. ジオガイド等にどのように活用されているか。
- 5. 広報（活動を知ってもらう取り組みについて）
 - 5-1. SNSの利用
 - 5-2. SNS以外の利用、マスメディアとの関係
 - 5-3. 学会などの活動
- 6. 課題と今後について
 - 6-1. 人的ひろがり・連携について
 - 6-2. 予算について
 - 6-3. 施設の発展について
- 7. 地域の背景
 - 7-1. 地元人たちの火山に対する意識とその変遷
 - 7-2. 火山に関する地域の実情と関係者の対応

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

令和1年度は名古屋大学環境学研究科地震火山研究センターの御嶽山火山防災寄附分野のメンバーが、木曾町にある名古屋大学御嶽山火山研究施設を活用し、木曾町・王滝村で開催されたマイスター関連行事の顧問的役割を果たし、運営に協力した。また、マイスターの活動について、研究や検証が可能となるような記録集を作成した。年度の前半にはマイスターが発足した初年度の平成30年度の活動について、議事録やFACEBOOKの公開記事を用いて作成した。令和1年度の活動については、マイスター関連行事や定例会議の取材を行い、記録した。令和1年度にはマイスター主催の火山専門家講演会やフィールドワーク、洞爺湖有珠火山マイスターとの交流事業、ロープウェイ駅での安全登山啓発活動などが行われた。

令和2年度も御嶽山地域が主催する御嶽山火山マイスターが、地元と専門家との仲立ちに果たす役割を明らかにする目的で、御嶽山火山マイスターの活動に関する記録集を作成するとともに、マイスターへのインタビューを行い、マイスターの意識調査を行った。

令和2年度は、御嶽山親子登山として、御嶽崩れの見学、火山学会公開講座に協力したパブリックビューイング、オンラインを利用したマイスター主催講演会が行われた。令和2年度は、新型コロナウイルス感染拡大で、木曾地域外の人との物理的接触が制限され、対外的な活動縮小を余儀なくされたが、その中で、地元小学生対象のイベントは行われ、会議・講演会でオンライン利用が広がった。

マイスターへの質問項目は以下のとおりである。

- ・マイスターになって変わったこと
- ・マイスターの活動が自分の仕事にどのように活かされているか？
- ・マイスターの活動によって地元の人や周りの人の火山防災の意識、関心は高まっていると感じるか？
- ・今後どのように活動していきたいか？
- ・マイスターネットワークを通じて噴火経験をどのように継承していこうと考えているか？
- ・今、活動する上で、困っていること。
- ・新型コロナウイルス感染拡大の影響について
- ・2022年度に開設されるビジターセンターの活用について

インタビューの結果、以下の課題があることがわかった。

マイスター志望者、基礎講習受講者が減っていること。マイスターの認知度が低いこと。マイスターになったことのメリットがわかりにくいこと。会議の時間が長いこと。観光シーズンに行われるイベ

ントに、（本業が忙しく）、参加できないこと。コロナウイルス感染拡大のため、活動ができず、実感がなかったこと。などであった。

令和3年度は、前年度までの実施された、御嶽山火山マイスターの活動に関する記録を作成するために、開催された会合や活動に関する取材を行った。コロナ禍における活動に制限があることからマイスターの活動も少なく、5月24日に開催されたマイスター総会および認証式の記録を作成するに留まった。

また、令和3年度から、御嶽山火山マイスターの火山防災・火山リテラシー向上の取り組みにおける位置づけを明らかにするために、複数の火山における取り組みとの比較研究を開始した。計画にはないが、部会での議論を受けて実施することとした。令和3年度は磐梯山、雲仙、桜島を訪問し、磐梯山噴火記念館、雲仙岳災害記念館、桜島ミュージアム（桜島ビジターセンター）を訪問し、代表者にインタビューを行い、ジオサイト等を見学し活用状況を調査した。

令和4年度は、令和3年度から開始した御嶽山火山マイスターと他火山地域との比較研究に関して、前年度の調査地域に加え、阿蘇山、富士山、箱根山の各地域を訪問し、阿蘇火山博物館、富士山科学研究所、箱根ジオミュージアムの代表者や研究・教育担当者にインタビューを行った。比較研究の成果はJpGU、火山学会で発表した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

長野県の御嶽山地域では、平成29年度より御嶽山火山マイスター制度をはじめ、地元木曾町に設置された名古屋大学の御嶽山火山研究施設と連携して活動している。また、2022年に御嶽山ビジターセンター（さとテラス王滝、やまテラス三岳）が開所された。

本課題では令和3年度から御嶽山地域との比較のため、磐梯山、箱根山、富士山、雲仙岳、阿蘇山、桜島の各地域を訪問し、火山防災啓発に関わる組織・施設の代表者や担当者にインタビュー調査を行った。

火山噴火のような比較的頻度の低い災害においては、平常時の防災リテラシー向上が災害の軽減につながる面が大きいと考えられ、災害記憶の伝承や防災教育を持続していくことが重要である。また、火山地域では観光が重要な生業となっているため、防災を強調したくないという考えがあり、災害の記憶を継承し、防災リテラシーを向上させていくためには工夫が必要である。そのような中、火山に関する知識の啓発普及に先駆的な火山博物館、ビジターセンター等の代表者にインタビュー調査し、地域の防災リテラシー向上につながる活動や工夫を情報収集・交換することは有効であると考えられる。調査結果は、調査に協力していただいた他火山地域の機関にもフィードバックしている。また、御嶽山火山マイスターの活動記録やインタビュー記録は、御嶽山火山マイスターの今後の活動や他火山地域の防災教育活動に資するものであると考えられる。特に小規模高リスクの噴火災害に関しては、登山者への啓発に関する御嶽山地域での試みや火山マイスターの活動などを他地域へ伝え、各火山の状況に応じて活用していただくことが災害の軽減に資すると考えられる。

また、火山地域の相互連携を深めることも、災害記憶の伝承や火山防災教育の持続に役立つと考えられる。御嶽山火山マイスターによる雲仙地域・阿蘇地域への訪問など他地域との交流も始まっている。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Horii, M., Yamaoka, K., Kim, H.-Y., Takewaki, S. and Kunitomo, T., 2024, Comparative Study of Literacy Enhancement on Volcanic Disaster Reduction for the Residents and Visitors in Mt. Ontakesan and Other Volcanic Areas, J. Disaster Res., 19, 159, doi: 10.20965/jdr.2024.p0159, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

堀井雅恵・山岡耕春・金幸隆・竹脇聡・國友孝洋, 2023, 他地域との比較から見た御嶽山地域の火山防災リテラシー向上の取り組みの特徴, 日本地球惑星科学連合2023年大会, HDS07-06
堀井雅恵・山岡耕春・金幸隆・竹脇聡・國友孝洋, 2023, 2014年噴火以降の御嶽山地域の火山防災啓発活動の相対的位置づけ-他火山地域との比較から-, 日本火山学会2023年度秋季大会, B3-21, DOI:10.18904/2023.vsj.0_107.

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

山岡耕春（名古屋大学環境学研究科）,金幸隆（名古屋大学環境学研究科）,竹脇聡（名古屋大学環境学研究科）,堀井雅恵（名古屋大学環境学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

竹下欣宏（信州大学教育学部）,秦康範（山梨大学総合研究部）,阪本真由美（兵庫県立大学減災復興政策研究科）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：名古屋大学環境学研究科地震火山研究センター

電話：052-789-3046

e-mail：

URL：www.seis.nagoya-u.ac.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：山岡耕春

所属：名古屋大学環境学研究科地震火山研究センター

火山防災啓発における課題と各地域の対応

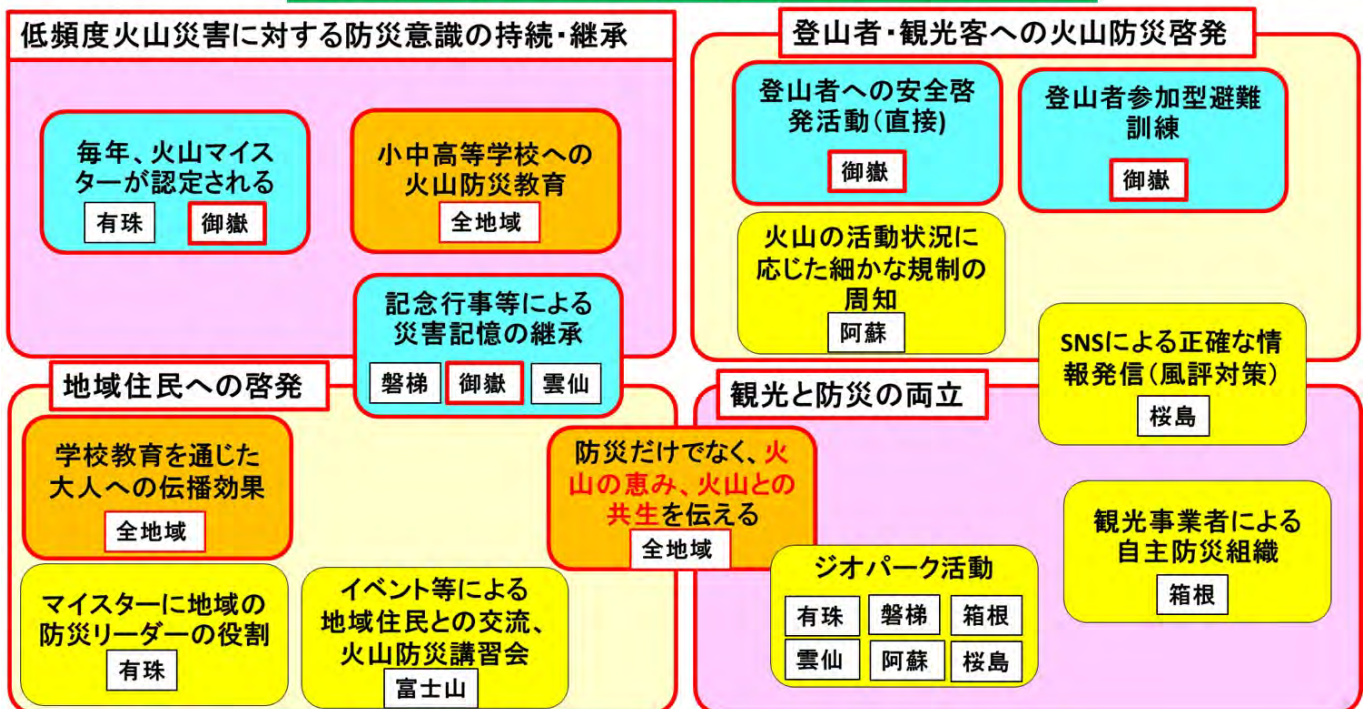


図1：火山防災啓発に関する課題と各地域の対応

調査した施設・組織/ 火山防災啓発の対象	地域		外部	
	地元小中高	地域住民	小中高生	観光客/登山客/研修
御嶽山火山マイスター・御嶽山vc	親子登山・ジュニアマイスター制度・講座	講座に地元の人が集まらない。関心低い。	修学旅行がなかったため、誘致している。出張vc	麓の観光低調 / 安全登山啓発・避難訓練 / 今後研修増
洞爺湖有珠火山マイスター	減災教育の講座に講師派遣	地域の防災リーダーとして啓発	修学旅行、講座や野外授業	ガイド活動 / - / 自治体等の研修多
磐梯山噴火記念館	出前授業やフィールド授業	噴火後100年以上たち危機感が薄れている	修学旅行、林間学校で講義	来館者多 / 少数 / 研修
箱根ジオミュージアム	館内での授業・地学実習	町民無料期間にイベントを行う。	修学旅行、講座や野外見学	来館者多 / 少数 / 研修
富士山科学研究所	出前授業や学習支援	ハザードマップ等の住民説明会、イベント	修学旅行・校外学習(近隣)	少数 / (ガイド研修) / 自治体等の研修多
雲仙岳災害記念館	出前授業・親子登山・ジュニアマイスター	災害経験者の語り部活動・慰霊行事	修学旅行、講座や野外見学	来館者多 / 少数 / 研修
阿蘇火山博物館 (館内に阿蘇山上vc)	出前授業や学習支援、フィールド授業、ジュニアガイド講座	一般向け講座も行っているが、住民の防災意識は意外と低い	修学旅行多、講座や野外見学	来館者多 / ガイド・規制周知 / 研修
桜島ミュージアム・桜島vc	専門家派遣事業による講座・総合学習	観光業、移住など地域振興としての関わり	修学旅行、講座や野外見学	来館者多 SNS発信 / - / 観光の研修

図2：調査した各組織・施設で行われている住民、観光客・登山客に対する火山防災啓発の試み

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

小電力・小型・携帯テレメータ地震観測装置の改良開発

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

イ. 内陸地震

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

火山の直近や大地震後の余震活動が活発な地域での地震テレメータ観測では、迅速なデータ取得開始はもちろん、作業者の安全を確保するためにも高い機動性が求められる。近年では携帯網を利用する機動テレメータ観測が主力となりつつあるが、汎用の携帯端末（ルータ）の利用が一般的であり消費電力が高く、中長期の観測では商用電源が確保されることが設置条件となる。特に電源の確保の難しい非常時や火口近傍での観測では、オフライン観測となることが多く、即時性が必要な研究や防災情報の発信に生かすことができない。このような問題を解決するため、携帯網を利用した機動地震観測に求められる小型化・軽量化・小電力化・使いやすさ（汎用性、現場作業の簡略化）を追求した地震テレメータ観測装置が必要である。

現在プロトタイプ地震テレメータ観測装置を用いて御嶽山山頂でテスト観測を行っている。その中で色々と改良すべき点が見つかっている。そこでテスト観測をしながら問題点を改良し、安定的に確実に観測できる小電力・小型・携帯テレメータ地震観測装置の開発を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

名古屋大学が開発を行ってきた小型軽量地震テレメータ装置は現在御嶽山山頂で試験運用中であるが、すでになんらかの既知の課題がでてきている。例えば、ファームウェアでは、小電力化のひとつの方法として間欠送信による準リアルタイムテレメータを行う仕様となっているが、未送信の古いデータから送信を開始するため電波環境の不安定な場所では送信が大幅に遅れ、リアルタイム性が失われる。ほかにも弱電波地域の通信、蓄電量が減った時の通信、設定変更のリモート操作などが検討課題である。ハードウェアでは通信速度の向上、さらには次世代通信規格への対応、より高度な電源管理など

が課題となっている。これらの課題を解決するため、ファームウェア改良、ハードウェア改良を行う。また、データを受けるサーバ側でも運用状況の情報管理システムを改良する。さらに現在行っている試験運用状況を検証し、より使いやすい安定したシステムへの改良を試みる。

各年度の主な計画は、

H31: 現試験運用機の検証、開発の基本構想・方針決定、部品選定

H32: 試作機ハードウェア組み上げ、ファームウェア作成、試作機用サーバ作成

H33: 長期での評価試験、中間評価、ハードウェア再構成・再構築、サーバ改良

H34: ファームウェア刷新、筐体作成、サーバ改良

H35: 試作機のテスト運用、評価

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

●当初の計画通り試作機のテスト運用、評価実施した。改良を施した現用機（3G通信）を御嶽山山頂の試験観測地10点に配置し、通年地震テレメータ観測の実地試験を継続した。改良以降、電力供給量が低下する冬季の運用成績が改善された。5カ年の計画で、大きな問題を発生することなく、保守負担の少ない安定した運用が実現されており、完成度の高い観測機器として評価している。

●昨年度までに設計・制作した後継機（LTE通信）用の充放電モジュールを実装し動作試験を行った。

●開発ベースとなる後継機（アディコ社製QR001）に使用している4G(LTE)通信モジュールの運用試験を行った。この通信モジュールはCat-1Mという低消費を目的とする通信規格を使用しているが、キャリアの選択の自由度や運用コストの面から不利になることが考えられる。そのため、より汎用的な規格を使用するモジュールへの変更も視野に入れた。

●後継機を防水筐体に収納する際のインターフェイスなどのレイアウト設計（現用機との置換方法）の検討をおこなった。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

現用機のソフト・ハード面での改良を行い、御嶽山山頂での試験観測地で運用を続けた。令和2年度には融雪期に起こった防水筐体の浸水事故を受けて主に外部防水筐体の仕様の検討・修正を行った。その他、ファームウェアの修正（未送信データを古い順で送るために通信状態が悪い場所ではリアルタイム性が失われる）、改良（供給電力が低下した際に必要最低限の情報のみ伝送し、データ収録に電力を優先させる）や集録サーバにおけるステータスデータの管理・表示方法の検討、改良を進めた。令和4年度には御嶽山山頂の全ての試験観測地（10点）において、改良機による実地試験に移行した。二冬にわたる冬季の運用成績は良好であったことから、厳しい環境下での運用が可能な機器として評価できる。2022年2月に御嶽山の火山活動が活発化したが、その時もリアルタイムでの山頂部のデータ取得ができ、その後の解析にも貢献した。

これまでの改良機による御嶽山山頂観測で大きな問題も発生せず、安定して運用ができる目処がたったことや、携帯3Gサービスの終了を2026年に迎えることから、令和3年度には、現用機の試験運用は継続する一方で、改良開発を終了しLTE(4G)サービスに対応する次世代機開発に着手した。開発ベースにはアディコ社製QR001を選定し、これまでのノウハウを活かして充放電モジュールの開発・制作、充放電モジュールの運用試験、通信モジュールの再選定や通信試験、現用機から後継機にスムーズに移行するため現用機の防水筐体への収納方法などの検討を行った。

大きな問題もなく、上記計画通りに実施できた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

●本課題で開発を行っている軽量装置は、被害地震直後の余震観測や火口域での観測など危険が伴うような場所でのすばやい観測に適した装置であり、建議の目標に書かれた「連続多点地震観測手法の高度化」に適した装置である。

●2022年2月からの御嶽山の火山活動の活発化（噴火警戒レベル2引上げ）の際は、リアルタイムで取得したデータから解析を進め現象の把握に貢献した（「地震・火山噴火の予測のための研究」）。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Y. Maeda, T. Watanabe, 2023, Seismic structure and its implication on the hydrothermal system beneath Mt. Ontake, central Japan, Earth, Planets and Space, 75:115, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

山中佳子、前田裕太、堀川信一郎、寺川寿子, 2023, Matched filter法でみた2022年2月頃に活発化した御嶽山の地震活動, 2023年度日本地球惑星科学連合大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

4G/LTEを用いた小電力・軽量小型テレメータ地震観測装置の改良開発

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

山中佳子 (名古屋大学大学院環境学研究科), 前田裕太 (名古屋大学大学院環境学研究科), 寺川寿子 (名古屋大学大学院環境学研究科), 堀川信一郎 (名古屋大学大学院環境学研究科)
他機関との共同研究の有無: 無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等: 名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター

電話: 052-789-3046

e-mail:

URL:

(14) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名: 山中佳子

所属: 名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター

(1) 実施機関名：

情報通信研究機構

(2) 研究課題（または観測項目）名：

先端リモートセンシングによる地震及び火山の被害状況把握技術の高度化

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

イ. 観測・解析技術の開発

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

航空機SARを用いた地震及び火山による災害状況を把握する技術の発展的な開発を行うとともに、これまで収集した航空機SARデータの公開を推進する。災害時等には航空機SARの積極的な運用を行う。また、航空機SAR以外のリモートセンサを活用する技術を開発する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

NICTは、世界最高レベルの機能・性能を有するPi-SAR X3を令和2年度に開発した。令和3年度は、Pi-SAR X3の初期機能・性能確認試験を実施して、試験観測を行える体制を構築する。令和4年度からは、Pi-SAR X3の試験観測を開始し、土地利用、森林破壊、海洋油汚染、海洋波浪等、地球環境に関するメカニズムを解明するための研究や地震、津波、火山噴火、洪水等の自然災害における被災状況把握のための研究等を実施予定。

また、地震や火山等の自然災害発生時には、その被災状況把握のための観測法や観測データの解析法について研究開発を行なっていく予定。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

機械学習を用いてPi-SAR観測データから浸水領域を抽出するモデルを構築するなど、データ解析手法の開発を行った。また、CSAR（Circular SAR）の机上検討を行った。Pi-SAR X3の観測では、能登半島地震の被災エリアの15cm分解能での観測を実施した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

世界最高レベルの機能・性能を有するPi-SAR X3を開発し、その初期機能・性能確認試験を実施した。その後、富士山をはじめとする平時の火山や2024年1月の能登半島地震被災エリアなどの観測データを取得した。また、機械学習を利用した情報分析技術の開発を行った。研究開発は計画通りに進捗。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

Pi-SAR X3による15cm分解能での火山観測が成功したことで、新たな火山の観測を推進するための体制が整備され、今後の火山災害の軽減に貢献できる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

児島 正一郎 他,2023,DeepLab v3+を用いたPi-SAR2画像からの浸水被害地域の抽出解析,土木学会論文集,79,1,<https://doi.org/10.2208/jscej.23-17199>

Gocho, M.,2023,Sparse Reconstruction and Resolution Improvement of Synthetic Aperture Radar Using Deconvolution ISTA,IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS,106,1363,<https://doi.org/10.1587/transcom.2023CEP0013>

・学会・シンポジウム等での発表

児島 正一郎,2023,セマンティックセグメンテーションを用いた高分解能航空機搭載合成開口レーダーの3偏波合成画像からの土地被覆分類の初期結果,日本写真測量学会 令和5年度秋季学術講演会

児島 正一郎 他,2023,Pi-SAR X3の準リアルタイムデータ伝送システム,日本リモートセンシング学会学術講演会

Kojima et al.,2023,DEVELOPMENT STATUS OF NICT' S NEW X-BAND AIRBORNE SAR (PI-SAR X3),IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium

上本 純平,2023,DTMを用いた干渉SARパラメータ推定手法の衛星SARへの適用,日本リモートセンシング学会 学術講演会

牛腸 正則,2023,CWレーダとCSAR観測を用いた二次元イメージングの初期検討,電子情報通信学会ソサイエティ大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

先端リモートセンシングによる地震及び火山の被害状況把握技術の高度化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

情報通信研究機構 電磁波研究所

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：情報通信研究機構広報部

電話：042-327-5322

e-mail：publicity@nict.go.jp

URL：http://www.nict.go.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：上本 純平

所属：情報通信研究機構 電磁波研究所

(1) 実施機関名：

防災科学技術研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

多角的火山活動評価に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ア. 史料の収集とデータベース化

イ. 考古データの収集・集成と分析

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

火山

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

イ. 内陸地震

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

オ. 構造共通モデルの構築

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

5 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

基盤的火山観測網・リモートセンシング技術等による多項目の火山観測データの活用、火山活動及び火山災害の推移を予測する技術開発、火山災害による被害の軽減につなげるためのリスクコミュニケーションの在り方に関する研究を実施し、火山災害軽減のための技術開発を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題は、防災科学技術研究所の第4期中長期計画（H28-H34）に基づいたものである。基盤的火山観測網、火山ガス・地殻変動・温度の把握を目的としたリモートセンシング技術等による多項目の火山観測データを活用し、多様な火山現象のメカニズムの解明や火山災害過程を把握するための研究開発を進める。

また、事象系統樹は、地域住民、地方公共団体や政府が、噴火災害の恐れのある噴火活動に対して、その火山活動や噴火現象の推移の全体像を把握し、適切な判断をする基本となるもので、社会的に重要である。この事象系統樹による推移予測技術の開発、実験的・数値的手法による多様な火山現象を再現する物理モデルの構築などにより、火山活動及び火山災害の推移を予測する技術開発を実施する。さらに、水蒸気噴火の先行現象の研究等に資するため、火口付近を含む火山体周辺において火山観測網を補完する機動的な調査観測を行うほか、噴火様式の変化を早期に捉えるため、遠隔で火山ガスや火山灰等の分析を行うモニタリング技術を開発する。

災害リスク情報に関する研究と連携し、火山活動と火山災害に関する空間的・時間的情報を一元化し、火山防災に関わる住民・国・地方公共団体・研究機関が迅速に共有・利活用できるシステムを開発する。また、火山専門家の知見を社会に効果的に伝える手法の開発等、火山災害による被害の軽減につなげるためのリスクコミュニケーションの在り方に関する研究を実施する。国内の火山研究の活性化と成果の社会実装を推進するため、大学・研究機関・火山防災協議会等との連携を強化し、研究実施体制の強化・充実を図る。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

火山災害の予測力・予防力・対応力向上に関する研究開発

(1)火山活動の予測技術開発

火山観測網やリモートセンシング技術、物質科学調査等を活用した噴火のリアルタイム把握技術とシミュレーション技術の連携により、噴火によるハザードの即時予測技術を開発した。さらに火山活動の推移予測の研究を実施した。

(2)レジリエンスの向上のための取組

火山ハザードの把握と評価から、社会の曝露度・脆弱性を鑑みたレジリエンス向上のための情報の作成に関する研究開発を実施した。

(3)JVVDNシステムの活用と連携推進

社会のレジリエンス向上に資する情報プロダクトを提供し、JVVDNシステム（火山観測データ一元化共有システム）の利活用を進めた。さらに、JVVDNシステムを活用し、分野や組織を超えた研究実施体制の強化・充実に取り組んだ。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

国立研究開発法人 防災科学技術研究所火山防災研究部門

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：防災科学技術研究所 企画部広報課

電話：029-851-7611

e-mail：toiawase@bosai.go.jp

URL：http://www.bosai.go.jp/index.html

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：藤田英輔

所属：火山防災研究部門

(1) 実施機関名：

防災科学技術研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震・津波予測技術の戦略的高度化研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

イ. 内陸地震の長期予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

オ. 構造共通モデルの構築

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

防災科研陸海統合地震津波火山観測網(MOWLAS) 観測データに加えて、GEONET等様々な機関のデータや機動的な調査観測のデータを最大限活用した研究開発を実施することにより、地震および津波にかかる防災・減災に貢献しうる情報ならびにそれを提供するための手法を開発することを目指す。特に、陸海統合地震津波火山観測網より得られるデータのモニタリング研究により、多様な情報からなる地震カタログの作成を進めるとともに、地震発生の長期評価の発展につながる地震発生モデル構築を目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

陸海統合地震津波火山観測網MOWLAS や必要に応じて実施する臨時観測、その他国内外の機関より

公表される観測データから、通常の地震ならびにスロー地震の検出、震源決定、発震機構解、断層モデル等の推定を自動的かつ高精度に実施するための手法開発・高度化を行い、その活動状況を逐次的にモニタリングすることで、多様な情報からなる地震カタログを作成する。得られたカタログについて、防災科学技術研究所による別課題「巨大地震による潜在的ハザードの把握に関する研究」と協力し、モニタリング成果を活かした地震発生モデル構築および数値シミュレーション研究を行う。本課題に得られた成果を国民に対してわかりやすく情報発信出来るような工夫を進める。また、地震調査委員会等の政府委員会に随時提供する。

なお、本課題は防災科学技術研究所の中長期計画に基づく運営費交付金によるプロジェクト研究の一環として実施される。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS）等の観測データを用いた地殻活動モニタリングを継続するとともに、その高度化並びにモニタリング結果の評価を進めた。

東北地方太平洋沖を対象に、3次元地震波速度構造に基づくグリーン関数を使用し、日本海溝海底地震津波観測網（S-net）及び広帯域地震観測網（F-net）観測波形を用いたセントロイド・モーメントテンソル（CMT）解析を行った。本解析により、従来の1次元速度構造及びF-net観測波形のみを用いた解析と比較して、CMT解の空間解像度が向上した。この海域の将来の地震動予測に向け、S-net観測点における非線形サイト応答特性を調査した結果、S-netサイトでは、陸域に設置された強震観測点のサイトに比べて小さな最大加速度においても大きな非線形性が生じることを確認した。これは、軟らかい海洋底堆積物の存在に起因すると考えられる。

南海トラフ海域においては、3次元速度構造を用いた自動震源計算システムを用いて、初動極性に基づく発震機構解の再決定を行った。1次元速度構造では、F-netによるモーメントテンソル解と大きく異なる結果になる地震に対して、適切な3次元速度構造があれば解の改善が見られることを示した。一方、南海トラフ浅部域に発生する微動の規格化エネルギー分布を評価した。これにより、浅部プレート境界のスロー地震発生域におけるすべり収支を見積もることが可能になった。また、微動活動の実態把握に資するため、地震・津波観測監視システム（DONET）のデータを使用した微動検知における検知エネルギー下限を評価した。関東東海地殻活動観測網のアナログ地震計記録をデジタルデータ化することで、過去のスロー地震（微動）活動の解明を試みた。自動デジタイズ手法と補正方法の開発、最終的な手動での確認の後、エンベロープ相関法による解析を適用することで、1988年4月に愛知県東部から長野県南部で発生した微動の発生源の推定に成功した。

強震波形記録を用いた令和6年能登半島地震（Mw7.5）の震源過程解析を行った。その結果、破壊開始からしばらくは顕著な破壊は見られず、破壊開始15秒後に破壊開始点より浅い領域にて破壊が生じたのち、破壊開始30秒からは破壊開始点の北東側および南西側のすべり領域において主たる破壊が起きていたことが分かった。2023年10月9日に鳥島近海で発生した津波の発生メカニズムの解明に向けた津波の波源分布推定のため、防災科研の沖合津波観測網の解析に着手した。

モニタリング手法高度化の一環として、走時読取値について地震ごとのグルーピングおよび位相の区別をすることなく、震源を決定する手法を開発した。大地震直後の地震活動の概要を把握する手法として活用可能である。また、海域で発生する大地震について、津波記録から求められる津波波源データを用いた断層モデル推定手法を開発した。これにより、陸上GNSSデータだけでは解像度が低くなる海域浅部の地震について、津波波源データを用いることで断層モデルをよりよく推定できることを示した。

既存のF-netモーメントテンソルカタログの地震情報に対して、グラフベースの非線形次元削減を用いたデータ可視化を適用し、得られる結果である埋め込みマップが地震メカニズムの地域特性を直感的かつ客観的に理解するために有用であることを示した。さらに、同手法で得られる埋め込みマップは、地震活動の時間変化の可視化や過去イベントとの類似検索にも利用できることを示した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

MOWLAS等の観測データを用いたモニタリング技術の高度化により、地殻活動の適確な現況把握に努めた。さらに、様々な観測データやモニタリングによって得られた地震カタログ等に基づき、将来的に大規模な地震の震源域となりうる領域の推定に資するための研究開発を進めた。

東北地方太平洋沖で発生する地震活動について、S-netデータの活用を進めた。S-net各観測点で推定

した観測点補正值と簡易的な3次元地震波速度構造を用いた震源決定を行った結果、従来の震源カタログで見られた震源のばらつきが低下し、太平洋プレートの沈み込み等に沿った震源分布が明確化した。S-net及びF-netの観測波形と3次元速度構造に基づくグリーン関数を使用したCMT解析を実施し、従来の解析と比較してCMT解の解像度が向上することを確認した。S-net観測記録の詳細解析により、十勝沖・三陸沖の日本海溝近傍で発生する微動活動の検出に成功した。この活動は海溝型巨大地震の震源域浅部側に隣接して分布すること、プレートの走向に沿う帯状の領域内で2つのクラスタを形成し、両クラスタ間には巨大地震の破壊開始域や余震活動が分布することが明らかになった。岩手県沖や茨城県沖では、プレート境界型大地震の破壊領域はスロー地震の活動域とは空間的に相補的である一方、大地震の前震や余震の多くがスロー地震の活動域で発生していることが判明した。これらの結果を踏まえ、S-netデータを用いた日本海溝沿いの微動検知の自動処理化を進めた。

海域で発生する大地震に対し、従来の地震・地殻変動データに加え、水圧計記録に含まれる地震動成分や津波波源データを活用した断層モデル推定手法を開発した。陸域観測網だけでは十分な解像度が得られない日本海溝や伊豆・小笠原海溝周辺で発生した様々な地震の断層サイズやすべり分布、応力降下量等の高精度な推定が可能となったことにより、2011年東北地方太平洋沖地震による応力場の変化や2016年福島県沖の地震時のひずみ変化等について定量的な考察を行うことに成功した。

南海トラフ周辺域の地震の発生場所を迅速かつ高精度に把握するため、3次元速度構造を用いた自動震源計算システム並びに自動CMT解析システムの開発を進めた。南海トラフ浅部域に発生する微動活動に対し、DONET観測記録を用いたモニタリングシステムを開発、試験運用を開始した。本システムの結果を用いて微動の規格化エネルギー分布を評価することにより、浅部プレート境界のスロー地震発生域におけるすべり収支を見積もることが可能になった。また、微動活動の実態把握に資するため、DONETデータを使用した微動検知における検知エネルギー下限を評価した。

西南日本周辺で発生するスロー地震の発生メカニズム解明に資するため、数値シミュレーションによるスロー地震活動の包括的なモデリングを進めた結果、計算機上において、巨大地震震源域の深部側で繰り返し発生するスロースリップイベント（SSE）に加え、日向灘北部・南部を震源域とする長期的SSE及び日向灘から足摺沖で発生するSSEの再来間隔の地域的違いの再現に成功した。このシミュレーションの更なるパラメタチューニングに資するため、関東東海地殻活動観測網のアナログ地震計記録をデジタルデータ化する手法を開発し、エンベロープ相関法による解析を適用することで、1988年4月に愛知県東部から長野県南部で発生した微動源の推定に成功した。

日向灘から南西諸島海溝に沿った領域において、F-netデータ及び臨時観測データに基づき、浅部超低周波地震の詳細な震源カタログを整備した。このカタログと気象庁一元化震源カタログを比較した結果、種子島・屋久島からトカラ列島の沖では地震・超低周波地震が同期する活動が見出された一方、日向灘や奄美大島沖ではこのような傾向が明瞭ではないことが分かった。この結果は、プレート間の挙動の特徴を表している可能性がある。

MOWLAS等における自然地震観測データ並びに日本海で実施された反射法探査による観測データを用いた地震波トモグラフィ解析を行い、日本列島近海を含む高精度な3次元地震波速度構造を推定した。この結果を防災科研Hi-netのwebサイトから公開した。3次元速度構造を用いて再決定した震源カタログに基づき、日本列島内陸におけるD90（当該地域で発生する地震数の90%がこれより浅部に存在するという深さ）の分布を求めるとともに、この分布は地下の温度が300℃となる深さ（D300℃）分布と基本的に同傾向にあることを示した。この結果は、地震活動が少ない地域における地震発生層下限の評価において、D300℃が一つの指標となり得ることを意味する。

モニタリング手法高度化の一環として、走時読取値について地震毎のグルーピングおよび位相の区別をすることなく、震源を決定する手法を開発した。この手法は、大地震直後の地震活動の概要を把握する方法として発展することが期待される。また、最短経路法を用いて、複雑な3次元地下構造モデルにも安定的かつ効率的に走時計算可能な手法を開発し、震源決定やトモグラフィ解析等への応用について検討した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

海溝型巨大地震に対しては、様々なデータの統合解析から東北地方太平洋沖地震時の詳細なすべり分布や歪みエネルギー蓄積状況を示すことに成功した。また、通常の地震活動やスロー地震活動の現況を詳細に把握するモニタリング技術の開発並びにスロー地震の数値シミュレーションの精緻化を通じ、巨大地震震源域の想定や震源域への応力载荷を評価するための基礎となるデータ構築を進めた。

内陸地震については、地下構造と詳細な震源分布の対比から、規模の大きな地震の震源域となり得る場所に関する知見を収集した。得られた成果は地震調査委員会や南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会等に提出され、現況評価資料として活用された。本件による研究成果は地震津波現象の予測力の向上につながるだけでなく、現況並びに将来発生する地震像の把握を通じて、地震被害低減のための予防力の強化に寄与することが期待される。そのため、今後はモニタリング並びにシミュレーション項目の多様化、精緻化を進めるとともに、それらの成果を巨大地震発生や連鎖の物理プロセス解明に向けた研究につなげる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Dhakai, Y. P., and T. Kunugi, 2023, Preliminary analysis of nonlinear site response at the S-net seafloor sites during three Mw 7 class earthquakes, *Frontiers in Earth Science*, 11, 1180289, doi: 10.3389/feart.2023.1180289, 査読有, 謝辞無

Kubo, H., T. Kimura, and K. Shiomi, 2023, Exploratory data analysis of earthquake moment tensor catalog in Japan using non-linear graph-based dimensionality reduction, *Pure Appl. Geophys.*, 180, 2689-2703, doi: 10.1007/s00024-023-03296-w, 査読有, 謝辞無

Kubo, H., T. Kubota, W. Suzuki, and T. Nakamura, 2023, On the use of tsunami-source data for high-resolution fault imaging of offshore earthquakes, *Earth, Planets and Space*, 75, 125, doi: 10.1186/s40623-023-01878-5, 査読有, 謝辞無

太田和晃・松澤孝紀・汐見勝彦, 2023, 南海トラフ浅部の微動活動（2023年2月～2023年4月）, 地震予知連絡会会報, 110, 278-280, 査読無, 謝辞無

関口渉次, 2024, 観測点から逆伝播する波面の重複点検出による簡易震源決定法, *地震* 2, 76, 219-232, doi: 10.4294/zisin.2023-12, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Dhakai, Y. P., R. Nakamura, T. Kunugi, and S. Aoi, 2023, Preliminary study of three-dimensional attenuation structure using S-net strong-motion data, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS04-P01

久保田達矢・齊藤竜彦・野田朱美, 2023, 力学的先験条件を考慮した2011年東北地震の三陸沖浅部の地震時すべり・応力降下分布の推定, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS04-P10

松澤孝紀・武田哲也, 2023, Trial tremor location using analog seismograms of the Kanto-Tokai Observation Network, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SCG45-20

関口渉次, 2023, 観測点からの逆伝播を利用した震源推定方法において出現する見かけの震源, 日本地球惑星科学連合2023年大会, STT41-P05

久保田達矢, 2023, 固体・流体地球を考慮した海底圧力データ解析による地震・津波・火山噴火現象に関する研究, 日本地震学会2023年度秋季大会, S20-03

松澤孝紀・武田哲也, 2023, 1988年4月に東海地方で発生した短期的SSE時のアナログ波形記録を用いた微動活動の解析, 日本地震学会2023年度秋季大会, S09-25

太田和晃, 2023, DONETデータを用いた南海トラフ浅部微動の検知能力, 日本地震学会2023年度秋季大会, S09P-13

汐見勝彦・松原誠・関口渉次, 2023, 南海トラフ周辺を対象とした三次元地震波速度構造に基づく初動発震機構解の推定, 日本地震学会2023年度秋季大会, S09-07

山谷里奈・久保久彦・汐見勝彦・武村俊介, 2023, S-net観測波形を用いたM6クラス地震のセントロイド・モーメントテンソル解析, 日本地震学会2023年度秋季大会, S01-03

Dhakai, Y.P. and T. Kunugi, 2023, Analysis of seafloor strong motion data recorded by S-net in the Japan Trench area, AGU2023, S04-04

Kubo, H., T. Kimura, and K. Shiomi, 2023, Visualization of temporal changes in seismic activity around Japan by applying graph-based dimensionality reduction to the regional moment tensor catalog, AGU2023, S31E-0386

Kubota, T., T. Saito, and R. Hino, 2023, Reliable stress-drop estimation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake using tsunami records just above the large slip area reveals the mechanics of trench-breaching coseismic slip, AGU2023, T44A-07

Matsuzawa, T. and T. Takeda,2023,Locating tectonic tremor in the Tokai region, Japan, using analog seismograms on recording paper of the Kanto-Tokai Observation Network,AGU2023,T31H-0293
Shiomi, K., M. Matsubara, and S. Sekiguchi,2023,Automatic hypocenter relocation system using 3D seismic velocity models for the Nankai Trough area, Japan,AGU2023,S51D-0239
Yamaya, L., H. Kubo, K. Shiomi, and S. Takemura,2023,Centroid moment tensor inversion for M6-class offshore earthquakes including data from the Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench,AGU2023,S51D-0241
久保田達矢・三反畑修・齊藤竜彦,2023,2023年10月9日鳥島南西沖津波(2)：津波の発生位置の推定,2023年度東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震波形解剖学3.0」－高密度観測・高周波地震動で見る地殻・マントル不均質構造－,S23-19
Matsuzawa, T. and T. Takeda,2023,Preliminary study of tectonic tremor location using analog seismograms on recording paper of the Kanto-Tokai Observation Network,The 28th IUGG General Assembly,IUGG23-2831
Matsuzawa, T. and T. Takeda,2023,Tremor activity in April 1988 revealed from analog seismograms of the Kanto-Tokai Observation Network,International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023
山谷里奈・武村俊介・久保久彦・齊藤竜彦・汐見勝彦,2023,海洋性レイリー波を用いた海域地震の高解像度なCMT解析の展望,2023年度東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震波形解剖学3.0」－高密度観測・高周波地震動で見る地殻・マントル不均質構造－,S23-P02

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地震の逐次的評価に関する技術開発

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

防災科学技術研究所 地震津波火山ネットワークセンター
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：防災科学技術研究所 企画部広報課
電話：029-856-1611
e-mail：toiawase@bosai.go.jp
URL：http://www.bosai.go.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：汐見勝彦
所属：防災科学技術研究所 地震津波火山ネットワークセンター

(1) 実施機関名：

防災科学技術研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

巨大地震による潜在的ハザードの把握に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

イ. 内陸地震の長期予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題は、防災科学技術研究所の中期目標達成のために支出されている運営費交付金によって行われている。そのため、ここでは第4期中長期計画期間が終了する平成34年度末までの到達目標を記述する。

今後発生が懸念される首都直下地震をはじめとする内陸部を震源とする地震、南海トラフや日本海溝等における海溝型巨大地震およびそれともなう津波による被害の軽減に向けた研究開発に取り組む。具体的には、室内実験および大規模シミュレーション等の成果に基づき、地震発生長期評価の高度化に資する地震発生モデルを構築する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題は、防災科学技術研究所の中期目標達成のために支出されている運営費交付金によって行われている。そのため、ここでは第4期中長期計画期間前半の平成31年度末までの計画概要を記述する。室内実験によって明らかにした破壊法則や観測から得られた地震発生場等の知見を大規模シミュレーションに組み込み、南海トラフにおける海溝型巨大地震、及び内陸大地震の発生多様性を検討し、大地震発生シナリオ作成の高度化を実現する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

関東地方のGNSS記録を解析することで、相模トラフにおける応力蓄積レート分布を推定した。特に応力蓄積レートの高い領域を力学的固着箇所として4箇所確認することができた。3箇所は1703年元禄関東地震・1923年大正関東地震の震源域に対応し、1箇所は房総スロー地震のすべり域に対応している。スロー地震による応力解消と周囲への応力载荷を考慮し、1703年・1923年関東地震から現在までの間に力学的固着へ蓄積される応力量を見積もった。房総半島南部の固着域は1703年から蓄積が続くため、より多くの歪みエネルギーが蓄積することになる。3つの力学的固着域の破壊の組み合わせを考え、6通りの破壊シナリオ（地震時すべり分布）を想定した。房総半島南部の力学的固着が連動破壊した場合、 $M>7.8$ の大地震を引き起こすことが可能な歪みエネルギーが蓄積しているを見積もった。

超大型岩石摩擦試験機で使用する岩石試料（模擬断層面：6 m×0.5m）に局所的な現象をモニターするためのひずみゲージや弾性波センサー等を設置して測定環境を構築し、一定荷重・一定速度での基礎実験を実施して断層破壊伝播に関するデータを収録した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

将来起こりうる大地震の規模と場所を想定するための力学的アプローチの研究開発に取り組んできた。特に、

- ・現実なすべり分布を持つ地震の歪みエネルギーの解放
- ・巨大地震の発生に伴うエネルギー収支

に関する理論的研究を行い、

- ・プレート境界での力学的固着分布（剪断応力速度分布）を推定する解析手法
- ・力学的固着域の破壊による巨大地震発生のシナリオ作成方法

を開発した。これらを実際に得られている地殻変動記録に適用し、将来、南海トラフ及び相模トラフで起こりうる巨大地震の破壊シナリオをそれぞれ10通り、6通り提案した。

断層面の不均質が断層破壊過程やその準備過程に与える影響を調べるため、防災科研つくば本所の大型振動台を利用した岩石摩擦実験を実施した。その結果、断層面が均質な場合には単純な震源核形成を経て本震に至るのに対し、不均質な場合にはその過程が複雑化し破壊伝播速度が4桁の範囲に及ぶことを明らかにした。断層面の不均質がさらに増加した場合には明瞭な震源核形成は確認されず、代わりに前震活動が加速して本震に至るカスケードアップが発生していることが明らかとなった。また、4m長岩石試料を用いた摩擦実験では、本震直前に観測された前震がプレスリップの通過にともなって引き起こされており、局所的载荷速度が高いほど大規模な前震が発生する傾向にあることが判明した。

これらの成果をさらに発展させるため、接触面積が6 m×0.5mとなる岩石試料対を使った実験が可能な超大型岩石摩擦試験機を開発し、各種センサーの設置等の測定環境を構築して基礎実験をおこなった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地震発生の長期予測手法の開発に対して貢献する。特に、応力蓄積量の定量化と摩擦法則の解明に基づく力学的な枠組みでの長期予測手法の確立を目指してきた。南海トラフ・相模トラフにおいて将来起こりうる大地震の破壊シナリオを提案することができた。今後、応力蓄積量の信頼度を高めるために、歴史地震データを取り込むなどの研究開発が重要である

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

- ・論文・報告書等

Saito, T and A. Noda, 2023, Mechanically coupled areas on the plate interface in the Kanto region, central Japan, generating great earthquakes and slow-slip events, Bull. Seismol. Soc. Am., 113(5), 1842-1855, <https://doi.org/10.1785/0120230073>, 査読有, 謝辞無

- ・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

大地震の発生機構の理解と予測に関する研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

国立研究開発法人 防災科学技術研究所地震津波防災研究部門
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：防災科学技術研究所 企画部広報課
電話：029-851-7611
e-mail：toiawase@bosai.go.jp
URL：http://www.bosai.go.jp/index.html

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：齊藤竜彦
所属：防災科学技術研究所 地震津波防災研究部門

(1) 実施機関名：

防災科学技術研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

自然災害ハザード・リスク評価と情報の利活用に関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(4) その他関連する建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

イ. 津波の事前評価手法

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

平時から発災時、復旧・復興時の幅広いタイムスケールの中で、各セクターの適切な対応を支援できるよう次の目標を達成する。全国地震動予測地図及び全国を対象とした津波ハザード評価の高度化とともに、全国概観版及び地域の詳細な情報提供を目的とした地域詳細版の地震及び津波のリスク評価研究を実施し、各セクターによるリスクマネジメントを支援可能にする。風水害や土砂災害等の各種自然災害のハザード・リスク評価を統合したマルチハザード・リスク評価手法を開発する。災害情報収集技術や実被害情報と推定情報の融合技術によるリアルタイム被害推定・状況把握システムを開発し、情報提供可能にする。ハザード・リスク評価やリアルタイムシステムの開発基盤として、防災シミュレーションプラットフォームを開発する。研究成果の地域での防災対策や国際的な枠組みでの活用を進める。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

<2019年度>

全国を対象とした地震ハザード・リスク評価手法の高度化及び評価に必要な基盤情報の整備を進めるとともに、地域への展開を支援・促進するためモデル地域を対象とした地震ハザード・リスク評価手

法の開発に着手する。これらの検討を踏まえた地震のハザード・リスク情報ステーションの開発を行い、情報の試験提供を行う。全国を対象とした津波ハザード評価手法の高度化及び評価に必要な基盤情報の整備を進めつつ、全国を対象とした津波ハザード評価を踏まえた建物被害や人的被害等の津波リスク評価に着手する。津波のハザード・リスク情報ステーションの開発を行い、情報の試験公開を行う。モデル地域を対象とした津波ハザード評価手法の開発に着手する。

<2020年度>

全国を対象とした地震ハザード・リスク評価手法の高度化及び評価に必要な基盤情報の整備を進めるとともに、モデル地域を対象とした地震ハザード・リスク評価手法を高度化する。これらの検討を踏まえた地震のハザード・リスク情報ステーションの開発を行い、情報の試験提供を進める。全国を対象とした津波ハザード評価手法の高度化及び評価に必要な基盤情報の整備を進め、情報の試験提供を行う。また、全国を対象とした津波ハザード評価を踏まえた建物被害や人的被害等の津波リスク評価を実施し、リスクマネジメントに資する研究に着手する。さらにモデル地域を対象とした津波ハザード評価手法を高度化し、リスク評価手法の開発に着手する。

<2021年度>

全国を対象とした地震ハザード・リスク評価手法の高度化及び評価に必要な基盤情報の整備を進めるとともに、モデル地域の拡大を図り、地震ハザード・リスク評価手法を高度化する。これらの検討を踏まえた地震のハザード・リスク情報ステーションの開発を行い、情報の本格的な提供を検討する。全国を対象とした津波ハザード評価手法の高度化及び評価に必要な基盤情報の整備を進め、情報の本格的な提供を検討する。また、全国を対象とした津波ハザード評価を踏まえた建物被害や人的被害等の津波リスク評価を実施し、リスクマネジメントに資する研究を実施する。さらにモデル地域を対象とした津波ハザード・リスク評価手法を高度化し、リスクマネジメントに資する研究に着手する。津波のハザード・リスク情報ステーションの開発を進める。

<2022年度>

社会実装に向けて全国概観版及び、モデル地域を対象とした地震ハザード・リスク評価手法の評価、検証、改良を行い、地震ハザード・リスク情報ステーションを高度化し、情報の本格的な提供を実施する。全国を対象とした津波ハザード・リスク評価を実施するとともに、モデル地域を対象とした津波ハザード・リスク評価手法を高度化し、リスクマネジメントに資する研究を実施する。モデル地域を対象とした津波ハザード・リスク評価手法を高度化し、リスクマネジメントに資する研究を実施する。これらの検討を踏まえた津波のハザード・リスク情報ステーションを高度化し、情報の本格的な提供を実施する。

<2023年度>

社会実装に向けて全国概観版及び、モデル地域を対象とした地震及び津波のハザード・リスク評価手法の評価、検証、改良を行い、地震及び津波のハザード・リスク情報ステーションを構築する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

地震ハザード評価については、過去の経験や知見が十分でない低頻度の大規模災害に対して不確実さを適切に考慮できるハザード・リスク評価手法高度化のため、南海トラフ地震を対象とした認識論的不確実性を考慮するための枠組みの構築に着手するとともに、地震ハザードの基盤情報として、2024年起点の確率論的地震動予測地図を作成し、基盤となる強震動観測記録、地下構造、活断層のデータベース群へのデータの追加を行った。津波ハザード評価については、津波ハザードステーション(J-THIS)に防災科研の津波ハザード評価に関する研究成果を紹介するWebサイトJ-THIS Labsを新設し、南海トラフ沿いで発生する地震の最大クラスを含む多様性を考慮した確率論的津波ハザード情報を公開した。南海トラフ巨大地震のリスク評価として、地震発生の多様性を構成する多数の地震から具体の対策を検討するための代表的な地震を抽出することを目的として、被害評価に基づく特徴量を用いた地震像の類型化を実施した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

全体として計画通り地震・津波を統合したハザード・リスク情報ステーションの開発に向けた基盤の構築が進み、地震発生の多様性、不確実性を考慮したモデルや、新しい微地形区分および関東地方の「浅部・深部統合地盤モデル」を取り入れた地震調査研究推進本部の全国地震動予測地図2020年版や南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価として公表され、その後の改良に貢献すること

ができた。地震ハザードステーション（J-SHIS）を高度化するとともに、津波ハザードステーション（J-THIS）及びJ-SHIS Map Rを開発・公開した。これらを連携することにより基盤情報を提供するための地震及び津波ハザード・リスクステーションとして完成することができた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

自然災害ハザード・リスク評価と情報の利活用に関する研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

防災科学技術研究所 マルチハザードリスク評価研究部門
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：マルチハザードリスク評価研究部門

電話：

e-mail：

URL：<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：中村洋光

所属：防災科学技術研究所

(1) 実施機関名：

防災科学技術研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

基盤的観測網の運用

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

(4) その他関連する建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS）及び首都圏地震観測網（MeSO-net）を安定的に運用するとともに、良質な地震等の観測データの取得・流通を図り、防災科学技術研究所を始めとする関係機関における研究、その他の業務の遂行や我が国の地震調査研究の発展に貢献する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS）である、陸域の基盤的地震観測網(高感度地震観測網(Hi-net)、強震観測網(K-NET)・基盤強震観測網(KiK-net)・広帯域地震観測網(F-net))・基盤的火山観測網(V-net)、海域の基盤的観測網(日本海溝海底地震津波観測網(S-net)・地震・津波観測監視システム(DONET))および首都圏地震観測網（MeSO-net）について安定的な運用を継続するとともに、海陸統合データベースを構築し、良質な地震等の観測データの取得・流通を図り、防災科学技術研究所を始めとする関係機関における研究、その他の業務の遂行や我が国の地震調査研究の発展に貢献する。さらに、南海トラフの想定震源域のうちDONETではカバーされていない海域（高知県沖～日向灘）に、南海トラフ海底地震津波観測網(N-net)を構築する。

既存の火山観測施設や基盤的火山観測網を含め、重点的に観測を強化すべき火山について観測施設の運用を行いつつ、これにより得られる観測データについては、全国の大学が運用する観測網のデー

タとの共有化を引き続き進め、大学等の火山防災の基礎研究の振興や気象庁の監視業務の推進、さらには地方防災行政の関係機関の情報共有化に貢献する。

MOWLAS等によって得られたデータを定常的に蓄積し、波形データベースを構築する。また、「日本列島標準モデル」に組み込む各種構造の推定・多機能地震カタログの整備を進める。

MOWLASデータを用いた解析結果等については、発災時を含め地震調査委員会等の関係機関へ速やかに提供する。

なお、本課題は防災科学技術研究所の中長期計画に基づく運営費交付金により実施される。また、防災科学技術研究所の中長期計画は2022年度末までなので、それ以降の計画については見直す可能性がある。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

引き続き、陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS）及び首都圏地震観測網（MeSO-net）の安定した運用により得られたデータを集約・公開するとともに、被害地震等の発生に際してはその活動状況のモニタリング結果を地震調査委員会・地震予知連絡会等またはWebを通して随時提供した。

石川県能登地方において2023年5月5日14時42分にMj6.5、同日21時58分にMj5.9の地震が発生した。これらM5を超える地震は、2001年夏ごろに活性化した地震活動の北側で発生し、M5を超える地震を含めた地震活動は2001年夏ごろ以降の地震活動域と重なるが、さらに北（海）側にも分布していることを示した。DD法を用いた震源分布から、余震は北東－南西に15km程度、北西－南東に10km程度の領域内に南東傾斜で分布していること、最大余震は本震の断層面よりも深部で発生したことがわかった。また、本地震発生と15時間の高周波エネルギー輻射量について調べたところ、本震のエネルギー輻射量に対する余震からの積算エネルギー輻射量の割合は42%であった。

2023年10月9日午前5時～6時半頃に鳥島近海においてM4～5地震が10回以上発生し、関東から沖縄の広い範囲で津波が観測された。F-net広帯域地震計の記録は、2～6 Hzの帯域では直達波に比べてフェーズが顕著であるという特徴を持つことを示した。DONET及びS-netでは地震規模から予想されるよりも大きな振幅の水圧変動が記録された。

能登地方における5月5日Mj6.5の地震以降の活発な地震活動は時間の経過とともに発生数が減少していたが、2024年1月1日に能登半島地震（Mj7.6、最大震度7強）が発生し、その後の地震活動が北東－南西方向約160kmにわたって分布していることがわかった。発生日には強震観測網サイトより令和6年能登半島地震による強震動ページを公開し、その後数日以内にMOWLAS特集ページ、能登半島版強震モニタを公開した。また、1月2日の地震調査委員会臨時会及び11日の地震調査委員会1月定例会には、詳細震源分布、F-netによるメカニズム解、強震動、震源過程、高周波エネルギー輻射量について資料を提出し、直ちにWebで公開した。また、この地震の発生により大規模な停電が発生したが、リモート監視により観測点の状況を随時確認し、停電した10観測点の保守作業を複数回実施することにより観測網の維持管理に努めた。

N-netにおいては、沖合システムと沿岸システムの2つのシステムのうち、沖合システム18台において製造を終え、積込み前に観測機器とケーブルを接続した状態でのシステムアセンブリ試験を実施した上で、10月よりケーブル敷設船に積込み、海底への敷設を実施した。また串間および室戸ジオパーク陸上局内に陸上部機器を設置しシステムの動作確認をし、海底からのデータ取得が可能になった。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

計画期間中を通して、陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS）及び首都圏地震観測網（MeSO-net）を安定して運用し、2017年3月以前のMeSO-net波形データも含めて、データの収集・管理・公開を行った。また、地震・低周波地震・超低周波地震・スロースリップイベントについてイベント検出、震源位置・震源メカニズム解・断層モデルの推定、余震活動の予測等を継続して行った。さらに、国内のみならず、遠方で発生した地震や津波の活動状況のモニタリング結果を国民に対してわかりやすく情報発信を行うとともに、地震調査委員会・地震予知連絡会等に随時提供した。

このほか、「長周期地震動の予測情報に関する実証実験」において、実験参加機関の大学や民間企業、事前に登録をした一般ユーザーに対して予測情報を配信し、その利活用方法の検討などを気象庁も加えて進めた。緊急地震速報の長周期地震動の予報業務許可制度が開始された直後の2020年9月に長周期地震動の予報業務許可を速やかに取得し、予報情報として長周期地震動モニタを公開した。

N-netの整備は、海底観測機器に組み入れる新規津波計などの開発、海底観測機器の試作機製作、性

能確認のための試験の実施し、特に水圧計については長期信頼性確認等のために1年以上をかけ確認試験を実施した。海洋調査結果を踏まえた上で沖合システムと沿岸システムの2つの海底ケーブルの敷設ルート案を策定し、宮崎県には串間陸上局を新設し、また高知県には室戸ジオパーク陸上局を既存のDONET2と共用することにして、ケーブル両端で陸揚げができるようにした。沖合システムにおいては、観測機器等の製造を終えた後、海底への敷設を実施して、海底からのデータ取得が可能になった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

陸海統合地震津波火山観測網（MOWLAS）及び首都圏地震観測網（MeSO-net）で得られたデータを集約・公開することにより、地震津波火山観測研究全体を発展させ、社会が持つ防災・減災能力の向上に貢献している。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

浅野陽一,2023,日本周辺における浅部超低周波地震活動（2022年11月～2023年4月）,地震予知連絡会会報,110,4-8,査読無

浅野陽一,2024,日本周辺における浅部超低周波地震活動（2023年5月～10月）,地震予知連絡会会報,111,査読無

木村武志,2023,（2022年11月～2023年4月）,地震予知連絡会会報,110,340-345,査読無

木村武志,2024,西南日本における短期的スロースリップイベント（2023年5月～2023年10月）,地震予知連絡会会報,111,査読無

久保久彦,2023,地震動予測への機械学習技術の適用,地震予知連絡会会報,地震予知連絡会会報,110,459-461,査読無

松原誠,2023,Double-Difference法による2023年5月5日能登地方の震源分布,地震予知連絡会会報,110,185-188,査読無

松澤孝紀・田中佐千子・小原一成,2023,西南日本における深部低周波微動活動（2022年11月～2023年4月）,地震予知連絡会会報,110,329-333,査読無

松澤孝紀・田中佐千子・小原一成,2024,西南日本における深部低周波微動活動（2023年5月～2023年10月）,地震予知連絡会会報,111,査読無

西澤あずさ・植平賢司・望月将志,2024,2023年8月25日三陸沖の地震（Mj6.0）の震源域近傍の地震活動の推移,地震予知連絡会会報,111,査読無

太田和晃・松澤孝紀・汐見勝彦,2023,南海トラフ浅部の微動活動（2023年2月-2023年4月）,地震予知連絡会会報,110,278-280,査読無

太田和晃・松澤孝紀・汐見勝彦,2024,南海トラフ浅部の微動活動（2023年8月-2023年10月）,地震予知連絡会会報,111,査読無

澤崎郁,2023,2023年5月5日石川県能登地方の地震による高周波エネルギー輻射量,地震予知連絡会会報,110,189-192,査読無

関口渉次,2023,南海トラフ周辺における最近の傾斜変動（2022年11月～2023年4月）,地震予知連絡会会報,110,290-306,査読無

関口渉次,2024,南海トラフ周辺における最近の傾斜変動（2023年5月～2023年10月）,地震予知連絡会会報,111,査読無

・学会・シンポジウム等での発表

青井真・武田哲也・功刀卓・篠原雅尚・三好崇之・植平賢司・望月将志・高橋成実,2023,南海トラフ地震の想定震源域における観測空白域の解消を目指したN-netの構築,日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS12-09

三好崇之・青井真・武田哲也・功刀卓・篠原雅尚,2023,N-netによる地震動と津波の早期検知,日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS12-P08

野田隆一郎・大町敏彦・吉田隆司・岩井滋人・篠原雅尚・青井真・功刀卓・武田哲也,2023,高精度な海底圧力観測におけるシリコン振動式圧力センサの有効性,日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS12-P06

篠原雅尚・青井真・望月将志・植平賢司・山田知朗・功刀卓・武田哲也・野田隆一郎・岩井滋人,2023,MES技術を用いた新しいシリコン振動式圧力センサの性能評価海底観測,日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS12-P07
武田哲也・青井真・功刀卓・篠原雅尚・三好崇之・植平賢司・望月将志・高橋成実,2023,Core Device for Nankai Trough Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis (N-net),日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS12-10
Aoi, S. T. Takeda, T. Kunugi, M. Shinohara, T. Miyoshi, K. Uehira, M. Mochizuki, N. Takahashi,2023,A new seafloor cable-type observation network in the western half of the anticipated Nankai Trough earthquake source area: N-net,IUGG,IUGG23-1127
Miyoshi, T., T. Takeda, S. Aoi, M. Shinohara,2023,Nankai Trough Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis (N-net) : Contribution to Early Detection of Seismic Waves and Tsunamis,IUGG,S02p-126
Shinohara, M., S. Aoi, M. Mochizuki, K. Uehira, T. Yamada, T. Kunugi, T. Takeda, R. Noda, S. Iwai,2023,Field evaluation of newly developed MEMS technology silicon resonant sensor for seafloor pressure observation,IUGG,S02p-133
Takeda, T., S. Aoi, T. Kunugi, M. Shinohara, T. Miyoshi, K. Uehira, M. Mochizuki, N. Ta,2023,System Design of Nankai Trough Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis (N-net) and its Long-Term Reliability,IUGG,S02p-135

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

基盤的観測網の運用

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

防災科学技術研究所 地震津波火山ネットワークセンター
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：防災科学技術研究所 企画部広報課
電話：029-863-7672
e-mail：toiawase@bosai.go.jp
URL：http://bosai.go.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：青井真
所属：地震津波火山ネットワークセンター

(1) 実施機関名：

立命館大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

南アフリカ大深度金鉱山からの地震発生場における応力と物質の直接調査

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

イ. 地震断層滑りのモデル化

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

イ. 内陸地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

5 研究を推進するための体制の整備

(5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

これまでの5年間で成功した、上述の、世界初の地震発生深度での直接総合調査を、次の5年間でさらに推し進める。それによって、地震発生場の地質と構造、絶対応力の空間変化、摩擦特性や、地震発生場の破壊と地殻流体との物理化学的関係の理解を深める。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

次の5年間では、ICDP DSeis計画(2016-2019)で地震発生場から掘削回収できたコアの岩石力学・地質学・化学的解析を進める。孔内物理検層や、地震波反射法探査、地震観測のデータとの比較も進める。これらには他予算や高知コアセンターとの共同利用も活用する。他予算がさらに獲得できれば、追加の掘削や孔内物理検層、孔内観測を行ったりする。これらを進めるために、本計画では南アフリカなどでの渉外活動や、アメリカとドイツが主導する水とガスの観測との協力・連携も続ける。

平成31/令和元年度は、現有コアとデータの解析を進める。採択されている高知コアセンター共同利用によってコアの解析を進める。採択されている別予算で国際ワークショップを開催し、成果をまとめ、追加掘削計画を固める。

令和2年度以降は、地震発生場の直接調査範囲を拡大するための新たな他予算の獲得を目指す。獲得がなかった場合は掘削や検層を加え、孔内稠密地震観測網の構築を始める。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

国内出張も国外出張も、コロナ・パンデミックによる制限が大幅に緩和され、2023年6月には、南アフリカ金鉱山の地下約3kmで、故障していた超塩水採取システムの復旧作業を、我々と、南アフリカ・アメリカの協力によって成功させることができた。この採取システムは、オークニー地震の地震発生帯に迫る掘削孔に設置されていたものである。

EGU 2024、JpGU 2023、Goldschmidt 2023 (招待講演)、ICDP +25 Conference (招待ポスター)では、前年度までの成果（超塩水の化学・同位体分析に基づく超塩水起源モデルの提案論文、および、SEM-EDS 100点分析に基づいたEPMA9元素マッピングの機会学習分類の検証、再開できた現地孔内観測活動など）を報告することができた。

2024年1月15日に、PROTEA計画（PRObing The hEArt of earthquakes; 2014年OrkneyM5.5地震の強震動発生源を掘削調査する計画）のpre-proposalをICDPに提出することができた。PROTEAの掘削ターゲット域（東西南北に一辺2～3 km×2～3 kmの領域）をカバーするように、既存の掘削孔、および、新しい掘削孔、さらに、それらの地下掘削サイトを結ぶ坑道を利用し、DASとGeophone nodeの統合観測を行い、能動・受動震源による地震波探査を行う計画が含まれる。南アフリカがECの研究ファンドで入手できたシステムを用いる予定である。

2024年1月22日～24日、南アフリカWitwatersrand大学においてPROTEA計画のキックオフ会議「DSeis-PROTEA meeting」を開催することができた。DSeis計画の成果、この5年間に進展があった地震学や岩盤工学における新技術、PROTEA計画の科学的Goalと実現可能性について議論された。南アフリカ、日本、アメリカ、ドイツ、インド、カナダ、ポーランド、中国、台湾から、70名の参加・登録があった。

2014年OrkneyM5.5地震の、余震の筋が密集する領域において、波形相互相関を用いて、より小さな余震のDouble Difference法による精密震源再決定に成功した（藤田、立命館大学本年度修士論文（予定））。複雑な3次元速度構造が災いし、既往研究では、震源距離が近い観測点の走時と、遠い観測点の走時を同時に説明することが困難であったが、複雑な3次元速度構造を忠実に走時計算に取り入れれば、すべての観測走時を統一的に説明できることが実証された（小川、立命館大学本年度修士論文（予定））。小川の取り組みは、Orkney M5.5地震の本震時の強震発生源が、PROTEA計画による掘削調査が可能な範囲にあるかを議論するために、重要な参考情報となった。さらに、余震が面状分布する場所で回収された超苦鉄質ダイクは、南東に約20度で傾斜する母岩層やそこに貫入するドレライト質シルと交差している。ダイクは、上部マントルが大深度で部分熔融したマグマが起源であり、母岩層やシル層の化学・鉱物組成が深さによって異なるために、ダイクと母岩の境界面（すなわち余震面）の上に、接触熱変成や熱水変質による、母岩層の層境界に平行な筋状の物性異常を生じ得ることがわかり始めた。これらは、大場（立命館大学本年度修士論文（予定））にまとめられつつある。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

2018年度までに、余震発生帯ではあるが、地下2.9 kmから地震発生場に掘削を到達させ、世界で初めて、活発な活動がある地震発生場から、総延長1.6mの試料をフルコア回収することに成功していた。この地震発生場は、2014年にMoab Khotsong金鉱山の下で発生したM5.5オークニー地震の余震発生域上端部であった。多くの掘削区間で、孔内検層にも成功していた（Nkosi et al. JRMMS 2022）。

2019年には、掘削コアの弾性変形量を測定し岩盤応力を推定する方法（DCDA法）や、1996年に行われた3D反射法地震探査データの再解析などを始めることができていた。また、孔内検層が困難であった、最も重要な掘削回収コア百数十m分を、2019年に高知大学海洋コア国際研究所に輸入し、ほぼ全てのコアの非破壊分析と、一部のコアの粉末全岩分析などが始まった（Miyamoto et al. JRL 2022）。

コロナ・パンデミック期は、南アフリカはもちろん、高知大学海洋コア国際研究所への出張も、大幅に制限され、南アフリカでの現地活動や、輸入コアの高知大学海洋コア国際研究所での直接分析による研究成果を出すことに困難が続いていた。高知大学海洋コア国際研究所の出張分析は2021年度には1回だけ10日間程度の期間だけ分析を行うことができ、2022年度からは南アフリカ金鉱山での現地地下孔内検層は現地業者に依頼して部分的に再開することができ始めた。余震発生帯から回収した試料の摩擦特性はMiyamoto et al. (2022)が予察的な実験結果を、Yabe et al. (2023 JpGU)がWet条件の回収試料（talcを多く含む）の実験を行うことができ、摩擦係数が小さく、速度強化型であることを

明かにできた。これら以外にも、パンデミック期でも実施可能だったデータ分析を継続し、上述した今年度の成果に繋がった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地震発生場に到達する掘削調査での直接検証はこれまでに成功事例がなかった。オークニー地震の規模はM5.5ではあるが、アメリカがパークフィールドでサンアンドレアス断層の集中観測を行っていたときのターゲット地震（M6繰り返し地震）の規模に近い。サンアンドレアス断層の掘削計画では地震活動が活発な深度まで掘削が到達していないため、DSeis計画では地震発生場の概念モデルを実証するための重要な試みを成功させたと自己評価したい。掘削調査できた領域は緑色片岩相の変成を受けており、上部マントル物質が部分熔融して上位層に貫入し、上位層の種類によって、ダイクとの接触熱変成や熱水変質が異なるために、筋状の物質不均質が上位層に沿ってできうることを実証できた意義は大きい。

日本の災害の軽減には、まだ直接貢献し始めることができていない。しかし、南アフリカ金鉱山では採掘を止めれば地震活動を制御でき、地震ハザードが懸念される高応力岩盤での応力測定技術の社会実装に成功したため、南アフリカ金鉱山の災害の軽減には貢献し始めている。

DSeis計画の後継掘削計画を推進できれば、他の計画で得ることが容易でない、重要な知見を得ることができると期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

Ogasawara, H. and the ICDP DSeis team, 2023, ICDP Drilling into Seismogenic zones in South African mines (DSeis; 2016 – onwards), EGU General Assembly

2023, EGU23-4104, 10.5194/egusphere-egu23-4104

矢部康男・小笠原宏・D. Raymond・M. Musa, 2023, Rock friction in and around aftershock cloud of the Orkney earthquake, South Africa, drilled by ICDP-DSeis project, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS06-P06

小笠原宏・土山明・松野淳也・矢部康男・松崎琢也・山本裕二・阪口賢祐・大場誠也・藤谷恵・深尾侑紀・山口明音・鈴木皓一郎・小川巧太郎・藤田蕉・DSeis Team, 2023, ICDP DSeis: 2014年オークニー地震の余震発生帯をホストしている lamprophyre ダイクの鉱物組み合わせと変質の空間変化, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SCG47-05

Ogasawara, H. and the DSeis team, 2023, ICDP DSeis: the FY2023 activity of the drilling into seismogenic zones of M2.0-5.5 earthquakes in South African gold mines, 日本地球惑星科学連合2023年大会, MGI28-04

Ogasawara, H. and the DSeis team, 2023, DSeis: Drilling into Seismogenic zones in South African gold mines, ICDP 25+ Conference on Scientific Drilling

Nisson, D.M., T.L. Kieft, H. Drake, O. Warr, B.S. Lollar, H. Ogasawara, S.M. Perl, B.M. Friefeld, J. Castillo, M. Whitehouse, E. Kooijman, T.C. Onstott, 2023, Radiolysis-Driven Evolution of an Ancient Subsurface Habitable Brine in the Witwatersrand Basin, South Africa, GoldSchmidt 2023

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

小笠原宏（立命館大学）

他機関との共同研究の有無：有

矢部康男（東北大学）, 森谷祐一（東北大学）, 坂口清敏（東北大学）, 伊藤高敏（東北大学）, 船戸明雄（深田地質研究所）, 廣野哲朗（大阪大学）, 石井紘（地震予知総合研究振興会）, 中尾茂（鹿児島大学）,

大久保慎人（高知大学）,山本裕二（高知大学）,小村健太郎（防災科学技術研究所）,松原誠（防災科学技術研究所）,今西和俊（産業技術総合研究所）,三宅弘恵（東京大学地震研究所）,加藤愛太郎（東京大学）,Jim Mori（京都大学）,直井誠（京都大学）,参加他国 南アフリカ,アメリカ,ドイツ,スイス,インド,イスラエル,オーストラリア

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：立命館大学 研究部 リサーチオフィス(BKC) P J 管理担当

電話：077-561-2802

e-mail：ml-b-kanri@ml.ritsumei.ac.jp

URL：http://www.ritsumei.ac.jp/research/center/sci eng/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：小笠原宏

所属：理工学部

(1) 実施機関名：

立命館大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震に先行する極微小な前震活動の異常度評価と発生環境の評価

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

イ. 地震断層滑りのモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

イ. 内陸地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

自然地震における前震活動の存在は、地震計によるリモート・センシングが可能な現象であり、地震発生予測の確度を上げるための鍵となる。防災科研Hi-netに代表される高感度連続地震観測のおかげで、日本においては極微小な前震の検出も可能であり、現行計画において極微小な繰り返し前震の検出アルゴリズムも提案できた。また2011年に長野県中部で発生したある地震（Mj5.4）の繰り返し前震について、本震に先行する2年程度においては直前においてのみ検出されることが示された。これは、2007年能登半島地震や2008年岩手・宮城内陸地震において、数週間の解析ながら確認された現象と同様である。

しかしながらテンプレートとなる地震波形は、現時点では本震発生後に前震として認められたものを用いたある種の「事後予測」にあたる。そこで、本課題では、2つのアプローチでこの問題の解決を図る。一つ目の目標は、日常的に発生する微小地震記録をテンプレートとして用いた場合に、極微小な繰り返し前震活動が異常活動として認識されるか否か、すなわち「本震」の発生という情報を持たない状況で「本震」の発生をどの程度の確率で予測できるか、を明らかにすることである。二つ目の目標は、テンプレートを必要としない繰り返し地震活動を抽出する手法を確立し、それを適用することで微小繰り返し前震活動の検出を目指すことである。

また、実験室で実施される破壊試験や固着すべり試験時に観測される微小な繰り返し破壊を活用して、繰り返し前震の発生様式、発生機構を明らかにすることも本課題の目的とする。

これらの取り組みを通じて、繰り返し前震活動について、その活動およびイベント自身の異常さを利用して、大地震の発生確率評価にどの程度利用できるかを明らかにすることを目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

研究目的の達成のために、以下のような年度計画で課題を遂行する。なお、成果の取りまとめは随

時実施する。

【令和1年度】近年に大規模地震が発生した地域、定常地震活動度の高い地域、定常地震活動度の低い地域、大地震の切迫度が高いと評価されている地域等から、研究対象領域を抽出し、気象庁一元化震源カタログよりテンプレートとして使用する微小地震を設定する。現行計画で開発したアルゴリズムに従い、繰り返し活動の抽出をおこなう。データ量が多いため、高速化のためのアルゴリズムの改良も進める。また、二軸せん断試験で得られた波形の解析を高度化するために、実験時に貼り付けられていた弾性波トランスデューサの計器特性を精査するための検定試験を実施する。

【令和2年度】令和1年度に引き続き、繰り返し活動の抽出をおこなう。また、抽出された繰り返し活動の特徴を調べ、極微小な繰り返し前震活動に共通する特徴の有無について検討する。テンプレートを必要としない繰り返し地震活動抽出のためのアルゴリズムの検討、解析コードの開発をおこなう。また、前年度に得られた計器特性を利用して二軸せん断試験で得られた波形解析を進める。

【令和3年度】令和1, 2年度までに開発された手法に基づき、引き続き繰り返し活動の抽出をおこない、抽出された繰り返し活動の特徴から、繰り返し前震活動に共通する特徴の有無について検討する。また、二軸せん断試験時の前震的微小破壊について、载荷や破壊面形成と微小繰り返し破壊の時空間的な関係を調べる。

【令和4年度】令和1, 2, 3年度に引き続き、繰り返し活動の抽出をおこなう。繰り返し活動の出現に対する大地震の付随確率を求め、大地震の発生確率評価をおこなう。

【令和5年度】大地震に先行して発生する繰り返し前震活動について、実験室で得られた知見と照らし合わせ、繰り返し前震活動の物理的な位置づけを考察するとともに、この活動の特異性について評価する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

【データ解析（高速化された波形相互相関計算の実装）】地震波形と連続波形の相互相関関数を計算することで、膨大な連続波形データに埋もれた微弱な地震波形を抽出し、カタログ化されていない微小地震を新たに発見できる。令和4年度には連続波形記録同士の総当たり計算について検討し、外挿すれば2ヶ月ぶんの連続波形を24時間程度で処理できる目処も立った。しかし年単位の処理などデータ量が多くなると連続波形記録を現在の一般的なワークステーションが搭載可能なメモリに格納できないためそのまま利用することはできない。

そこで令和5年度は、気象庁一元化震源カタログに記載済みの地震の波形記録をテンプレートとして活用することとし、テンプレート群と連続波形記録の相互相関の高速計算について検討することとした。計算には、新たに開発された高速処理アルゴリズムDiallelXを用いた。広く行なわれている正規化相互相関関数の全チャンネル平均値（NCC）の計算にあたっては、計算機上、離散 Fourier 逆変換（IDFT）にかかる時間が処理のボトルネックとなっていることが考えられる。しかし新しいアルゴリズム DiallelX においては、IDFT を実施する前に平均値を計算することで、IDFT の回数を、全チャンネル数の逆数倍に削減することができる。

2021年以降活動度が高まっている能登半島珠洲市付近の群発地震活動を対象として、テストを実施した。2017年1月～2022年7月までの67カ月間の防災科研Hi-net連続波形記録、および同期間に発生した地震（気象庁一元化震源カタログ記載済みであり、2022年6月19日に発生したMj 5.4の地震の震央から水平距離10 km以内で発生したMj -1.0以上の地震）928個ぶんのテンプレート波形記録（珠洲と柳田の2観測点3成分の計6成分）を使用した。市販の24コア搭載 CPU のPC環境において2.5時間程度で処理できることがわかった。暫定的な結果ではあるが、群発活動開始後には多数の高NCCを示す波形ペアが検出されただけでなく、群発活動開始前にも高NCCを示す波形ペアが検出された（図1）。このうち、2019年9月2日1時42分の地震（Mj0.4）記録と似た波形を示した2019年2月18日21時46分（図2）は気象庁一元化震源カタログに地震は記載されておらず、カタログ未記載の相似地震を検出した可能性がある。今後、このような大規模地震発生と直接関係しない類似波形ペアについて、詳細に調べていく必要がある。

【室内実験（低摩擦領域を含む供試体による破壊試験）】室内実験において前震的微小破壊（アコースティック・エミッション、以下AE）イベントの発生状況を調べるために、人為的に低摩擦面を試料内部に配置する手法を検討した。天然岩石試料中に低摩擦面を埋め込むことは極めて困難であるため、セメントモルタル試料を使用した。傾けた円筒容器にセメントモルタルを流し入れることで下層を作

成し、低摩擦面としてテフロンシートを下層表面上に配置する。円筒容器を立てて再度セメントモルタルを流し入れることで上層を作成し、試料を完成させる。なお、上層の流し入れを下層の完全硬化後におこなう、あるいは硬化前であっても表面処理をせずにおこなうと、上層と下層の境界全体が低摩擦面となり、破壊強度を有意に下回る低強度での破壊に至ったため、下層表面には表面処理を実施した。このようにして確立された作成手順をもとに試料を作成し、一軸圧縮破壊試験を実施した。

試験機の性能上、軸応力を破壊に向けて制御することが困難であるため、クリープ試験を実施したが、クリープ開始後1時間以上経過しても破壊に至らず、AE活動も低調であったため、载荷をリスタートしたところ、数分後に突然制御が不安定になり、軸応力が振動したのちに試料が破壊した。破壊は、一軸破壊的な縦割れとせん断破壊が混在するようなモードで発生し、せん断破壊部分の一部にテフロンシートの面が含まれていた。震源決定の精度の課題もあり、縦割れとせん断破壊のいずれが先行したか、低摩擦面が破壊過程にどのように寄与したかについて、判断するまでには至らなかったが、低摩擦面が最終破断面の一部に含まれていたことから、試料内部に破壊に寄与する低摩擦面を含む試料の作成に成功したと言える。今後、低摩擦面と前震的AE活動との関係、前震的AEの震源パラメタの特徴などについて検討できるものと期待される。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

【自然地震における前震活動探索】防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）に代表される連続波形記録から未知の地震によるシグナルを検出することは、大地震に先行する極微小前震の発生様式を理解する上で不可欠である。本課題では、大規模データを処理することを念頭に置き、連続波形記録から極微小な地震による記録を抽出する手法について以下のように多面的に検討を進めてきた。

代表的な波形類似度の指標としては相互相関係数（CC）が挙げられる。CCが高いとよく似た波形、とされるが、その閾値については感覚的に定めるケースが散見された。そこで具体的に相似地震波形と判断するCCの閾値を客観的に決定する方法を新たに提案した。この方法は、大きいCCを示す外れ値の上位いくつまでを相似地震波形とみなすのが合理的かを、赤池情報量規準(AIC)によって判断するものである。

未知の地震波形を抽出するためには、既知の地震波形記録とのCCを求めること（テンプレート・マッチング）が一般的である。しかし、全く新規の波形同士のペアを検出するためには、すべての連続波形から切り出された短時間波形同士の類似度を評価する（以下、総当たり）ことが求められる。ただし、総当たりを実施するためには莫大な計算コストを必要とするため、改善が必須であった。そこで2つのアプローチによる改善を実施した。

まず、CC計算法に代わるものとしてハッシュ法を採用し、従来とは異なる2つの新たな関数を提案し、その評価を実施した。その結果、偽陽性や偽陰性がCCによる探索よりは多いものの、類似波形の探索に有効であることが示された。同時に、CCによる「類似度」とは異なる「類似度」で評価していることも明らかになった。それぞれの「類似度」が震源のどのような特徴を反映するものであるかについては、今後の評価対象である。

次に、総当たりCCの計算の高速化も実現させた。具体的には、連続波形から切り出した全ての固定長の窓に対し、Fourierスペクトルを事前に計算しておき、それら同士の積のFourier逆変換を計算するコードを実装した。市販の64コア搭載CPUによるベンチマークの結果、100 Hzの波形15チャンネル（5観測点の3成分）に相当するデータであっても、2週間ぶんの連続波形を5時間程度で処理できることがわかった。また計算時間が連続波形長さの2乗に比例して増大することを実機でも確認し、外挿すれば2ヶ月ぶんの連続波形を24時間程度で処理できる見込みも立った。

一方、年単位の処理などデータ量が多くなると連続波形記録を現在の一般的なワークステーションが搭載可能なメモリに格納できないためそのまま利用することはできないため、改めてテンプレート・マッチングによるCC計算の高速化を検討した。新たに開発された高速処理アルゴリズムは、多成分の記録を用いて抽出する際に特に威力を発揮するものであり、従来の高速計算手法よりも有意に高速化され、類似波形ペアの検出に有用であることが確認された。

【室内実験】室内実験においては、破壊試験や固着すべり試験時に観測される微小な繰り返し破壊を活用して、繰り返し前震の発生様式、発生機構を明らかにすることを目指した。

第一に前震的微小破壊（アコースティック・エミッション、以下AE）イベントの発生位置と断層面の空間的な関係を調べることは重要であり、これまでに実施された大型二軸せん断試験、高圧三軸圧縮試験に加え、新規に実施する一軸圧縮破壊試験のAEの震源精度について検討した。特にAEイベントの

震源と断層面などの試料内部の不均質との位置関係を明らかにするためには、相対的な分布だけでなく、絶対位置精度の評価が重要となるため、2種類の絶対震源位置推定の精度評価を実施した。

大型二軸せん断試験で使用した岩石試料の断層面上、および円筒形アクリル試料の内部に人工的に震源を配置し、そこから弾性波を放射させ、その震源を推定した。その結果、トランスデューサ配置に大きな偏りがない限りは、真の震源に対して数mm以内に震源が推定できることが明らかにされたが、逆に言えば数mm程度の絶対誤差が見込まれる、という結果になった。

一方、高圧三軸圧縮試験では10 mm弱のスケールの試料を使用し、試料の外に配置されるアンビルに直径数mmの弾性波センサを貼り付けて計測することになるため、震源決定精度については慎重に検討せざるを得ない。仮想震源をコンピュータ内で再現してその計算走時を利用して絶対震源位置の推定精度評価を実施したところ、試料から離れた位置で計測することの影響は大きくないものの、 ± 0.1 マイクロ秒以内の一樣乱数ノイズを計算走時に加算した場合には、 0.5 ± 0.5 mm程度の位置ずれが発生することが明らかになった。すなわち、先駆的研究のサンプリング速度では不十分であり、100 Msps でかつ、高周波まで受感できるトランスデューサを用いた計測が必須であることがわかった。

また、前震的AEがいつどこで、どのように発生するかを調べるための模擬試料の作成方法についても検討した。セメントモルタルの内部にテフロンシート（低摩擦面）を埋設した試料の作成手法を確立し、実際に作成した試料を用いて一軸圧縮試験を実施したところ、低摩擦面を含む破断面を形成して試料が破壊することが明らかにされた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地震に先行する極微小な前震活動の異常度評価のためには、前震発生期間、前震発生域だけでなく、一般的な地震活動も含めた類似波形検出が必要であり、そのためには、計算の高速化の課題を避けて通ることはできない。この点に関して成果が上がっており、実装を果たしたことにより目的の達成に着手に向かっていく。また前震の発生環境の評価については、室内実験によるアプローチで実施しているが、試料内に摩擦強度の不均質を与えることが有効であるが、そのような試料の作成手順を確立したことで、発生環境の理解に向けて前進した。

確率を付す形で前震が発生した可能性を本震発生前に把握することができれば、災害の軽減につながることは明らかであり、次期計画においても引き続き目的達成に向けて研究を進める。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

Teruki Inanishi, Hironori Kawakata, Shiro Hirano, Masayuki Nakayama, 2023, Source parameters of AE events in uniaxial compression tests of cement mortar specimens, AGU 2023 Fall Meeting
稲西 輝紀・川方 裕則・平野 史朗・中山 雅之, 2023, Elastic wave transmission experiment to evaluate the accuracy of absolute AE locations in an acrylic cylindrical specimen, 日本地球惑星科学連合2023年大会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

大規模地震に先行する微小繰り返し地震と大規模地震をとみなさない微小繰り返し地震の特徴抽出

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

川方裕則（立命館大学理工学部）, 平野史朗（立命館大学理工学部）

他機関との共同研究の有無：有

土井一生（京都大学防災研究所）, 吉光奈奈（京都大学大学院工学研究科）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：立命館大学研究部BKCリサーチオフィス
電話：077-561-2802
e-mail：ml-b-kanri@ml.ritsumei.ac.jp
URL：http://www.ritsumei.ac.jp/research/center/sci/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：川方裕則
所属：立命館大学理工学部

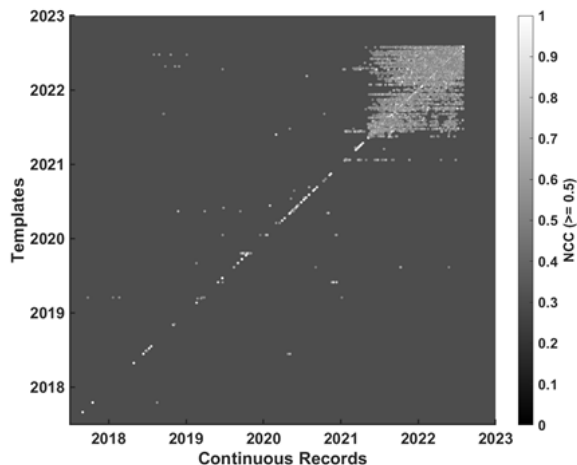


図1. テンプレート波形記録と連続波形記録の間のNCC（0.5以上のもののみを表示）。

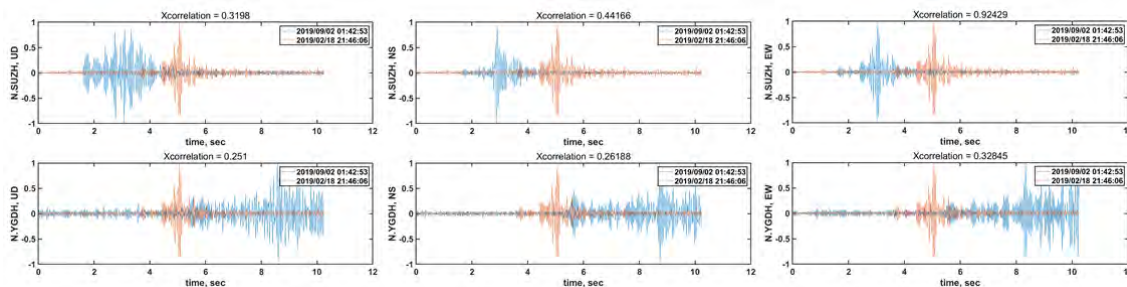


図2. 新たに検出された類似波形ペアの例。
振幅はそれぞれ最大値で規格化されており、時刻においてはずれを含んでいる。

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

国際共同研究によるニュージーランドにおける地震発生機構の解明

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

イ. 内陸地震

5 研究を推進するための体制の整備

(5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

日本と同様に沈み込み帯に位置するニュージーランドにおいて地震観測を実施し、地震発生過程の理解を普遍化する。ニュージーランドでは、南島北部において、2010年・2011年クライストチャーチ地震や2016年カイコウラ地震が発生し、甚大な被害を生じた。カイコウラ地震・クライストチャーチ地震は、地震時あるいは地震後に複数の断層が連動して破壊した地震であると考えられており、2016年熊本地震において指摘されたような複雑な断層系の相互作用や断層端の特性の理解の上で最適な対象である。研究担当者がカイコウラ地震発生前から実施中の南島北部での臨時地震観測を継続し、複数の断層が様々な時定数で連動破壊した原因を明らかにする。特に、非弾性変形や応力・流体との関わりを明らかにする。また、内陸断層とプレート境界との連動の検討を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

カイコウラ地震・クライストチャーチ地震両震源域を含む領域でこれまで行ってきた臨時観測データの解析を進めるとともに、両地震の地震後過程のモニタリングやより詳細な構造を求めるため、臨時観測を継続する。

研究担当者らは、これまでの研究から、日本の内陸地震について、下部地殻の構造、特に流体の分布が内陸地震の発生規模や活動範囲を規定する可能性を示してきた（業績1～3）。本課題の対象領域においても同様の下部地殻の不均質構造は、研究担当者らの予備的な研究結果からも見えてくる。そのような知見を踏まえ、複数断層の連動破壊・遅れ破壊に地殻下部の構造や流体の存在が関わる可能性を検討する。そのために、以下の観測解析を、データの蓄積状況・一次処理状況に応じて、順次実施する。

高精度震源決定により、地震発生下限深度分布を正確に推定する。また、地震断層とされた断層群との対応関係から各断層の位置や形状を正確に推定する。多数のメカニズム解を正確に推定し、応力テンソルインバージョンやS波スプリッティングにより、偏差応力の向きや大きさ、強度や間隙流体圧を

求める。地震波トモグラフィや地震波反射面の分布により流体を含む領域を求め、強度と水との関わりを明らかにする。地震波形・地震波干渉法による地下構造の時空間変化の推定を行い、応力場や流体挙動の時間変化を把握する。

地震観測結果と地質学・地形学的知見を総合化し、ニュージーランド南島北部のテクトニクス下における、複雑な断層の分布およびその原因を把握する。地震発生下限深度分布や地震観測で得られた構造・応力場等の比較から地殻内の非弾性変形域を抽出する。非弾性変形域の広がりや詳細に把握した断層の形状や応力-強度状態に基づき、カイコウラ地震・クライストチャーチ地震の連動破壊や遅れ破壊を説明可能なモデルの構築を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

(1) ニュージーランド北島のヒ克蘭ギ沈み込み帯におけるスロースリップと周辺の地震活動の関係

ニュージーランド北島のヒ克蘭ギ沈み込み帯で発生する地震をオーストラリアプレート内の地震、太平洋プレート内の地震、プレート境界の地震に分類することに成功した。沿岸で発生するオーストラリアプレート内地震は微動発生域に隣接していることが分かった。これらの地震の発生タイミングはスロースリップイベントの発生を表すGNSSの過渡的な東向き変位の現れるタイミングとの検討を行った。

(2) ニュージーランド南島北部の断層と応力場の関係

ニュージーランド南島北部に展開した臨時地震観測網のデータを用いて、応力場の推定を行った。さらに推定された応力場に基づき、過去の大規模～中規模地震の断層や活断層との関係を検討した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

カイコウラ地震について、地震活動・地震波速度構造・地震波反射面・応力場・S波スプリッティング・常時微動による地殻浅部の地震波速度変化等の包括的な研究群を実施し、カイコウラ地震の連動破壊とその背景の理解を深めた。

ニュージーランド北島のヒ克蘭ギ沈み込み帯において、地震活動とスロースリップとの関係を示した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

カイコウラ地震について得られた知見・特に連動破壊とその背景の理解を進めるとともに、さらにカイコウラ地震周辺を含めた南島北部全域に拡大し災害軽減に活用すべき情報の抽出に努める。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

田上 綾香・松野 弥愛・岡田 知己・Martha Savage・John Townend・松本 聡・河村 優太・飯尾 能久・佐藤 将・平原 聡・木村 洲徳・Stephen Bannister・John Ristau・Richard Sibson,2023,1929年ニュージーランドBuller地震（Mw 7.3）のその4つの大規模余震（Mw > 6）に対する影響,日本地球惑星連合2023年大会,SSS06-07

田上 綾香・松野 弥愛・岡田 知己・Martha Savage・John Townend・松本 聡・河村 優太・飯尾 能久・佐藤 将・平原 聡・木村 洲徳・Stephen Bannister・John Ristau,2023,ニュージーランド南島北東部の応力場と1990年Lake Tennyson地震の断層活動の評価,日本地震学会2023年秋季大会,S08P-02

Ayaka Tagami, Miu Matsuno, Tomomi Okada, Martha K Savage, John Townend, Satoshi Matsumoto, Yuta Kawamura, Yoshihisa Iio, Tadashi Sato, Satoshi Hirahara, Shuutoku Kimura, Stephen C Bannister, Johannes Peter Ristau, Francesca Ghisetti and Richard H Sibson,2023,Fault re-activation in an inversion tectonic region, northwestern South Island, New

Zealand,AGU 2024 Fall Meeting,S21D-0328

立岩 和也・Calum Chamberlain・Martha Savage・岡田 知己,2023,Spatiotemporal distribution of regular earthquakes and slow slip events in the Hikurangi subduction zone, New Zealand,日本地球惑星連合2023年大会,SSS06-06

John Townend, Caroline Francois-Holden, Calum John Chamberlain, Emily Warren-Smith, Ilma Juarez-Garfias, Olivia Pita-Sllim, Kasper van Wijk, Marine Denolle, Andrew Curtis and Hiroe Miyake,2023,Initial Noise Field, Green's Function, and Seismicity Results from the Southern Alps Long Skinny Array (SALSA), Alpine Fault, New Zealand,AGU 2024 Fall Meeting,S33D-0436

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

国際共同研究によるニュージーランドにおける地震発生機構の解明

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

岡田知己（東北大学大学院理学研究科）,高木涼太（東北大学大学院理学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

飯尾能久（京都大学）,松本聡（九州大学）,Richard H Sibson（オタゴ大学）,Stephen Bannister（GNS Science）,Martha K Savage（ビクトリア大学ウェリントン）,Calum Chamberlain（ビクトリア大学ウェリントン）,Jarg Pettinga（カンタバリー大学）,Clifford H Thurber（ウィスコンシン大学マディソン校）,安藤亮輔（東京大学大学院理学系研究科）,井出哲（東京大学大学院理学系研究科）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp

URL：www.aob.gp.tohoku.ac.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：岡田知己

所属：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

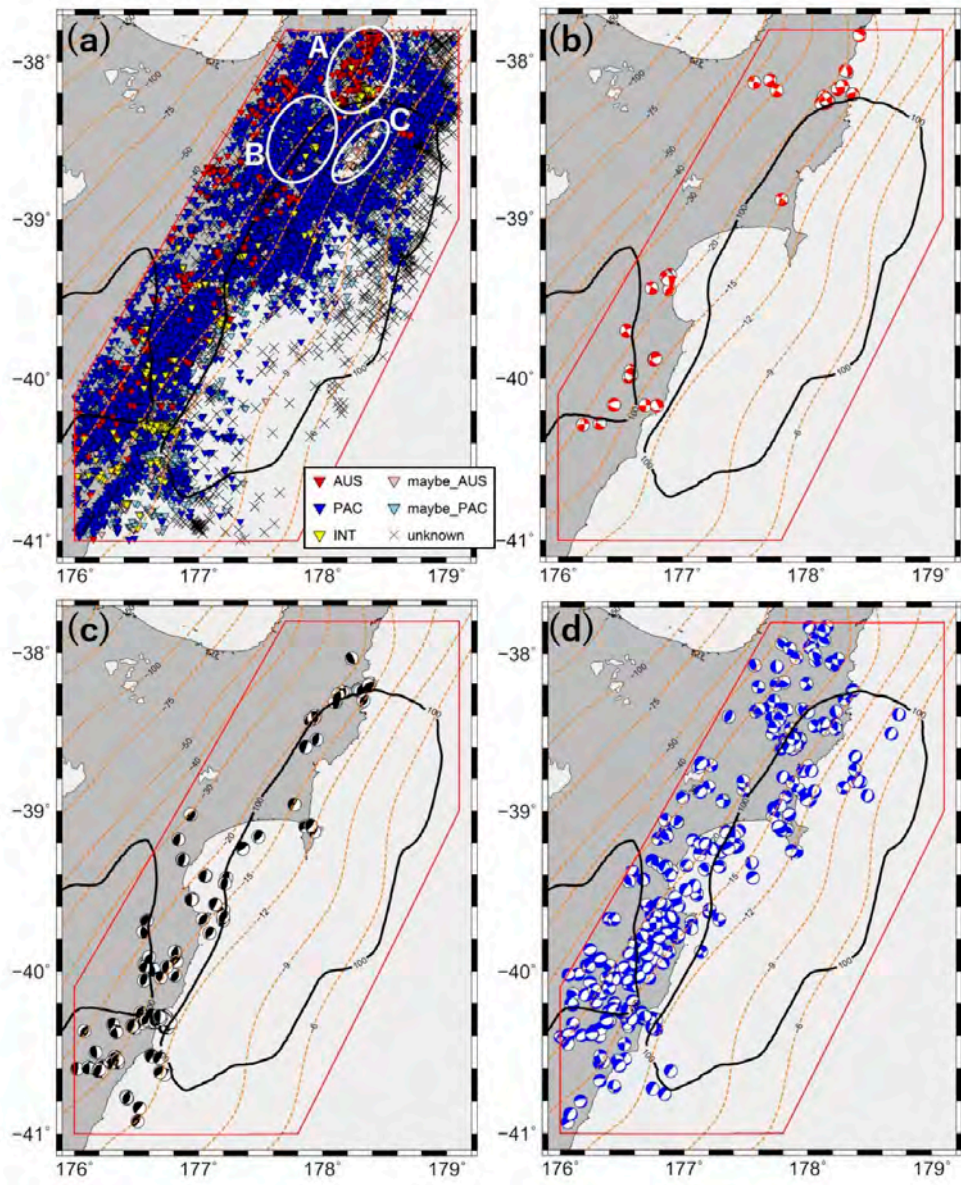


図1. ニュージーランド ヒクランギ沈み込み帯における分類した地震の震央分布

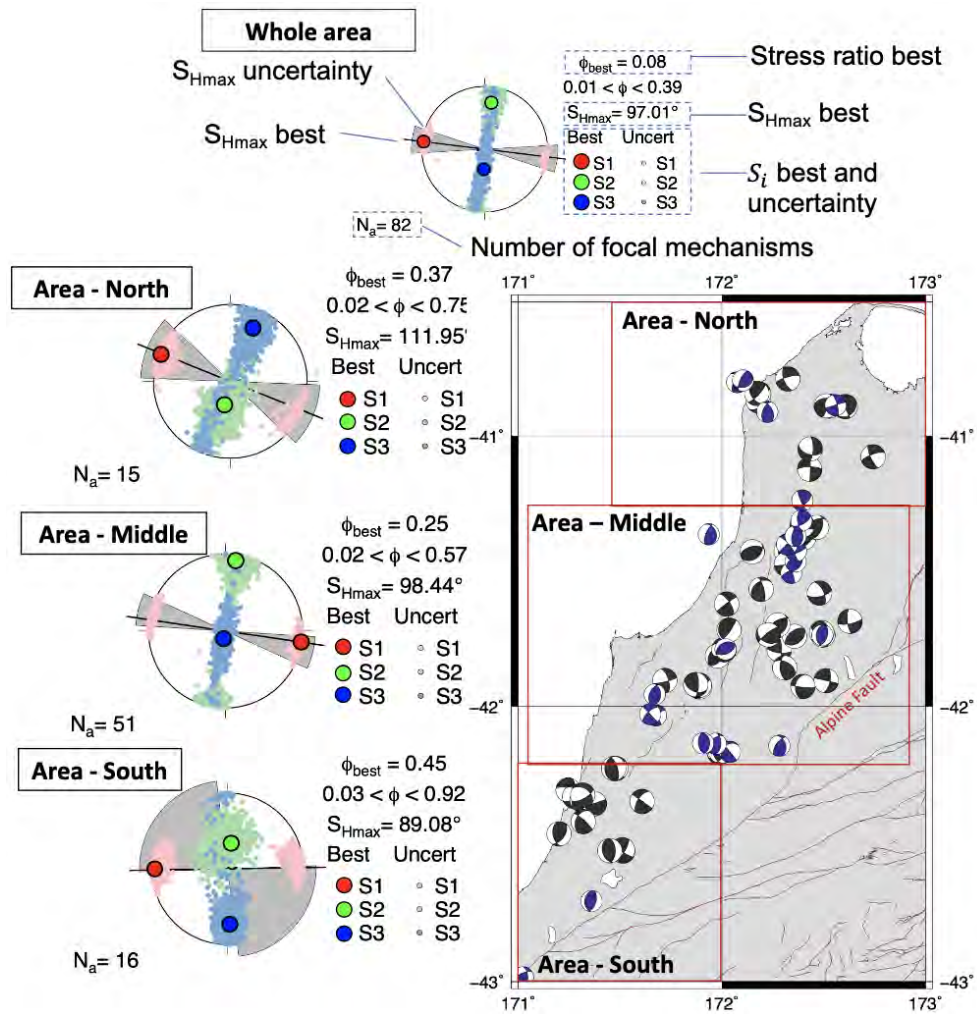


図 2. ニュージーランド南島北西部における応力場

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

流体の寄与に注目した地震断層すべり物理モデルの高度化

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

イ. 地震断層滑りのモデル化

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

イ. 内陸地震

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

流体が深部に局所的に豊富に存在していると、そこで歪速度が上昇しやすくなり、その浅部に応力・歪が集中しやすくなると考えられる。また、断層中に流体があれば、間隙圧が上昇して強度が低下すると考えられる。このように流体は地震発生に大きくかかわっていると考えられていたが、多くは定性的な理解にとどまり、定量的な理解が進んだのはごく最近のことである。このような定量的な検討から、地震発生域では差応力が小さく、断層の強度がこれまで考えられていた値の1/10程度と極めて低いことが次第に明らかになって来ており、その原因としてはやはり断層の中の流体の可能性が一番高いと考えられている。しかし、その流体が断層に及ぼす影響や流体の存在形態はまだ必ずしもよくわかっていない。このような問題意識のもと、下記のサブテーマを実施し、これらを統合することにより、特に流体の寄与に注目して地震断層すべり物理モデルの高度化を目指す。

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

地震断層すべりの理解の上で応力と強度を正しく把握することが重要である。応力については主応力の方向と応力比の情報に加えて、大地震やかぶり圧の影響を正しく評価することにより、差応力の大きさについても情報が得られつつある。今後、高精度・多量の震源分布と発震機構解を利用し、小規模な地形や中規模地震が応力場に与える影響から、差応力の大きさの分布を高精度で推定することを目指す。さらに地震の振幅情報も用いて、発震機構解と応力場と観測点補正值を同時に推定する新しい手法を開発する。また、大地震による構造の時空間変化を推定し、それと地震活動や応力の時空間変化と比較することにより、地震活動に対する流体の寄与についてより詳細に明らかにする。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

速度・状態依存摩擦則の微視的過程は真実接点における圧力溶解クリープであり、その振る舞いは雰囲気中の水蒸気量に依存することが最近の実験で示されている。一方、摩擦すべりに伴って局所的な脆性破壊（AE）が発生することや、脆性破壊強度が雰囲気中の水蒸気量に依存することは知られているが、これらが複合して摩擦の振る舞いにどのような影響を与えているのかは調べられていない。本サブテーマでは水蒸気量を制御した雰囲気中で摩擦実験を行い、摩擦の振る舞いとAE活動の関係を調べることで、脆性破壊の水蒸気量依存性が摩擦強度の環境依存性に及ぼす影響を明らかにする。こ

の成果は微小地震活動モニタリングに基づくプレート境界の摩擦特性の推定や固着状態の評価にも貢献し得る。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

地殻流体が地震の発生に強く関与していることが指摘されているが、地震に関与する地殻流体の物理化学的性質および動的挙動についての知識は希薄である。特に地震発生帯やその直下での温度・圧力条件での地殻流体の基本的性質についての理解が進んでおらず、状態方程式、化学反応性、流体分子構造、輸送現象の解析などが未整備の状態である。本サブテーマでは、地殻流体の熱物理、化学反応、分子構造、輸送現象、破壊現象間の関わりについて先端設備を用いた室内実験や数値シミュレーションにより明らかにするとともに、地上に露出した化石地震発生帯の野外観察との情報を融合させて、地震発生における地殻流体の役割と振る舞いについての検討を進める。

4) 高温高压状態における地殻流体の存在形態の解明

地球物理学的に観測される地震波速度と電気伝導度から、岩石の粒間に存在する地殻流体の存在量・組成・存在形態を見積るには変数が過剰であり、岩石相など何らかの仮定を置く必要がある。もし流体の化学組成と間隙流体の存在形態・電気比抵抗との間の関係式を新たに与えることができれば、制約条件が増え、流体量などのより正確な推定が可能となる。地殻流体は、有馬型熱水に代表されるようにCO₂とNaClの濃度が高いと考えられているが、この両成分は、流体の二面角に対して相反する効果を与え、両者が共存した場合の二面角がどのような挙動を示すかについては殆ど知られていない。そこで、H₂O、CO₂、NaCl三成分系の流体と鉱物間の二面角を高温高压実験によって決定する。

5) 下部地殻のレオロジーにおける流体（水・メルト）の効果の解明

地震波トモグラフィや電磁気探査から断層深部延長の下部地殻に流体（水や部分溶融体）の存在が示唆され、流体の存在による歪局所化が断層深部への局所的ローディングを引き起こす可能性が指摘されている。つまり、流体の存在は、断層の強度を低下させるのみならず、断層のローディング機構にも深くかかわっている可能性がある。そこで、下部地殻条件における流体の効果を明らかにするために、実験室において下部地殻の温度圧力を発生することのできる試験機を用いて、下部地殻岩石のレオロジーに及ぼす流体の効果を明らかにする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

● 1年目（令和元年度）

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

2011年東北地方太平洋沖地震後の応力場の時空間変化を追跡し、歪速度場の時空間変化と比較することにより、応力の時空間変化の原因を探る。中規模地震の破壊過程を詳細に調べることにより、強度の不均質性と破壊の不均質性の関係を検討する。ニュージーランド等、海外の応力場と日本の応力場の違いと共通性を検討する。応力場を推定する新たな手法の開発に着手する。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

試料室を外気と隔離できるようにしたロータリー式低速せん断試験機（最大すべり速度は約0.8 mm/s、法線応力は15MPaまで）で摩擦すべり実験を行い、水蒸気量が摩擦強度や摩擦のパラメータ、AE活動に及ぼす影響を調べる。現状では、試料室の雰囲気制御は乾燥状態（湿度がほぼ0%）、飽和状態（湿度がほぼ100%）、室内状態の3通りに限られている。初年度は実験を行いつつ、雰囲気制御範囲を広げるよう試験機の改良を行う。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

超臨界地殻流体の300-500℃、50-1000 MPaでの状態方程式と、その条件での岩石と流体の反応についての状態方程式や熱力学データが全く不足している。特に、地殻流体の平衡計算をする上で重要となる電荷のある溶存種について熱力学データについて、既存のデータには存在しない超臨界、気相領域まで経験的に外挿することを試み、実験によって検証する。

鉱物界面での純水の構造化を調べた実験装置と技術を用いて、H₂O-NaCl-CO₂の混合流体と鉱物との相互作用および鉱物界面での流体分子を調べる。さらに、既に開発している超臨界条件における真三軸応力発生ならびに水圧破碎装置を用いて、300-500℃、50-150 MPa条件での岩石内の3次元き裂の優先流路の形成の時間発展ならびに地殻流体透水性に関する流体流動実験に着手する。また、三波川変成帯、東北地方の花崗岩類と接触変成岩における流体通路（鉱物充填脈）の分布、特性を評価し、沈み込み帯と地殻における流体の物理化学的特性とその動的挙動を調べる。

4) 高温高压状態における地殻流体の存在形態の解明

鉱物の界面エネルギー異方性が比較的小さく、いわゆる組織平衡の状態を想定しやすい、最上部マントルを構成する主要鉱物である橄欖石の、 H_2O 、 CO_2 、 $NaCl$ 三成分系流体との二面角を、ピストンシリンダー装置を用いて1-4 GPa, 900-1200 °Cの条件で実験を行う（高圧側では $MgCO_3$ が共存する条件となる）。

5) 下部地殻のレオロジーにおける流体（水・メルト）の効果の解明

下部地殻を構成する鉱物粉末を焼結し人工多結晶体を焼結する。さらに細粒変成岩試料を出発試料として、下部地殻の温度・圧力を発生することのできる変形試験機を用いてこれらの多結晶体の変形実験を行い、下部地殻の変形における流体の効果調べる。

●2-4年目（令和2-4年度）

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

応力場の推定手法の開発を継続し、実施しやすい地域から随時応力場の推定を行っていく。合わせて誤差の評価も行うことにより、差応力の推定範囲を正しく見積もる。顕著な応力変化が見られた地域において地震波干渉法等により構造の時空間変化を推定し、地殻流体と地震発生との関係を明らかにする。また、海外も含めた様々な地域での応力推定結果を比較し、地殻流体の観点から、応力場や強度の地域性の解釈を行う。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

改良された試験機を用いて、より多様な雰囲気中で摩擦の振る舞いとAE活動の関係を調べることで、脆性破壊の水蒸気量依存性が摩擦強度の環境依存性に及ぼす影響を明らかにする。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

H31年度に開発された計算コードを用いて、既存の H_2O - $NaCl$ - CO_2 系流体中の石英の溶解実験データから、同系流体の誘電率を見積もる。鉱物界面での流体の状態・挙動の実験を継続し、 H_2O - $NaCl$ - CO_2 の混合流体と鉱物との相互作用および鉱物界面での流体分子を明らかにする。流体流動実験を継続し、岩石内の3次元き裂の優先流路の形成の時間発展と地殻流体透水性を明らかにする。さらに、領家変成帯や三波川変成帯における流体通路の調査を継続し、母岩の温度構造と流体の物理化学的特性との関係を明らかにする。

4) 高温高圧状態における地殻流体の存在形態の解明

2年目は橄欖石の実験を継続する。二面角は、鉱物表面の分極度と、流体の分子スケール構造によって決定され、後者の方が前者に比べて、温度圧力条件によって大きく変化すると考えられるため、橄欖石の実験結果を解析することで、他の鉱物と三成分系流体との間の二面角についても、流体組成による変化傾向が推定できる。そこで3年目は石英・輝石など地殻を構成する主要構成鉱物と三成分系地殻流体との二面角についての見積りを行う。地殻流体の電気比抵抗と化学組成の関係については、近年、市来らによるモデル化が進んでいるので、以上によって求めた地殻流体組成と流体形状の関係式と併せることで、宮城県北部地域など地震波トモグラフィやMT法の同時観測が行われている地域について、地殻流体量の再見積もりを4年目に行う。

5) 下部地殻のレオロジーにおける流体（水・メルト）の効果の解明

人工および天然の変成岩類多結晶体の変形実験を継続し、下部地殻の変形における流体の効果明らかにする。特に岩石の組成や流体量、実験の温度・圧力・ひずみ速度を制御することで、岩石の強度に対する反応（含水反応）などの効果を定量的に評価し、下部地殻レオロジーに及ぼす流体（水・メルト）の効果定量的に評価する。

●5年目（令和5年度）

各サブテーマにおいて最終的な解析を行い、それらを取りまとめて、流体が断層に及ぼす影響や流体の存在形態を明らかにすることにより、流体の寄与を考慮した新たな地震断層すべり物理モデルを提案する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

科研費（特別研究促進費）「2023年5月5日の地震を含む能登半島北東部陸海域で継続する地震と災害の総合調査」に参加し、能登半島の北東部において、地震波速度構造を推定した。低ブーゲー重力異常域の直下の2023年M6.5地震及びそれらの余震や関係する群発地震域の深部は、高 V_p 、（低 V_s ）高 V_p/V_s となっており、その周囲は低 V_p 、低 V_p/V_s となっている。高 V_p/V_s 領域は第三紀に形成された

カルデラの古いマグマ溜まりで、そこから周囲への水の移動により地震活動が生じるとともに、 SiO_2 が濃集して低 V_p/V_s 域を形成したと考えられる。

2020年末から継続する能登半島の群発地震を詳細に調べ、この群発地震が、地殻深部から複数の面構造を通して浅部に移動した流体により発生した可能性が高いことを示した(図1)。この活動中に2023年5月5日に珠洲で発生したM6.5の地震も、流体移動により引き起こされた可能性が高いことを示した。

箱根火山における2009年、2015年、2019年の群発地震の比較を行った結果、いずれの期間においても震源はほぼ鉛直な面上に分布し、かつ面上で地震活動が移動していることが確認できた。一方、2015年群発地震活動ではほかの活動と比較して移動速度が1桁大きく、さらに近傍の観測点の傾斜計に有意な変動が記録されており、この変動は右横ずれ変位の断層運動で概ね説明できることが分かった(図2)。2015年の群発地震活動期間中には火山浅部に大量の熱水が供給されたことを示唆する現象が確認されており、こうした熱水の供給により断層の摩擦特性が変化し、非地震性すべりが促進された可能性がある。

内陸及び海底の稠密地震観測網に対して今年度までに開発してきた常時微動トモグラフィー手法を適用することで、表面波位相速度分布と地殻内の詳細な3次元S波速度構造を推定し、地震発生に寄与する流体分布の不均質性を示唆する結果を得た(図3)。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

昨年度から引き続き実験を行い、結果の再現性を確認するとともに、法線応力の異なる条件での実験も行った。ここでは法線応力5 MPaでの結果について報告する。昨年度は、実験ごとのノイズレベルに応じてA Eの検知レベルを定めていたが、あらためて、すべての実験で共通の検知レベルでA Eの検出をやり直したところ、A E活動の湿度依存性を明瞭に描き出すことができた(図4)。この結果に基づいて、A E活動のパラメータと速度・状態依存摩擦則のパラメータが湿度に依存するメカニズムを検討し、真実接触面積の時間依存性が圧力溶解クリープによって生じることに起因すると解釈した。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

地震に伴う流体相変化(流体圧変化)が断層面の力学的特性に与える影響の解明を目的とした熱水条件における室内実験から、流体の相変化に伴う急減な減圧によって岩石に多数の微小き裂が造成され、岩石の強度が大幅に減少することを明らかにした。また、断層面が急減圧破碎を受けることで、摩擦係数が大幅に減少すると同時に、連続的なゆっくりすべりが起きやすくなることを発見した(図5)。

4) 高温高压状態における地殻流体の存在形態の解明

楔形マントル最上部条件での間隙流体の形態と連結度は、地震・電磁気観測によって流体の存在(量)を調べるために不可欠な情報である。本年度は、カンラン石-多成分系流体の界面エネルギー異方性に注目し、スラブ流体に含まれる塩成分(NaCl)が、等方的な場合より流体の連結度を大きく下げることを見出した(図6)。またマントルの流動によって結晶格子定向配列LPOが形成されている場所では、流体の連結度とそれに関する物性値にも異方性が生じることが予想された。

5) 下部地殻のレオロジーにおける流体(水・メルト)の効果の解明

本研究では下部地殻のレオロジーに対する水や粒径の効果を明らかにするために、粒径や含水量等を制御した長石多結晶体制成を行った。これまでの鑄込み法を使った曹灰長石の大気圧下での焼結では、焼結体の粒界にいくつかポアが残ることが課題であった。そこで、本年は、高压下での焼結が可能な熱間等方圧加工法(HIP)を用いた焼結を行った。昨年度と同様に、遊星ボールミルで、マダガスカル産灰長石単結晶を300 nm以下に粉碎した灰長石微粉末を鑄込み法で成形した後、ホットプレス装置(産業技術総合研究所中部センター High Multi)による高压下での焼結実験を行った。得られた多結晶体の電子顕微鏡写真を図7に示す。得られた多結晶体は、粒界や粒子3重点などにもポアが見られない、非常に緻密な多結晶体制成することに成功した。得られた多結晶体の密度は、 2.69 g/cm^3 であり、灰長石の密度とも調和的である。この試料を使って、予察的な粒成長実験を行ったところ、これまでに報告されている灰長石の粒成長則(Rybacki et al., 2000)よりも遅いことが明らかになった。一方で、図7の矢印部に示すように、今回の焼結試料には粉碎中に混入したと考えられる不純物が粒界に偏析していることから、今後はより組成を制御した粉末試料を作成することで、より均質かつ緻密な多結晶体制成が可能となると考えられる。本研究は、産業総合研究所との共同研究である。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

2011年東北地方太平洋沖地震後に東北日本で発生した群発地震を精査し、それらが、東北沖地震による深部流体の浅部への過程で引き起こされたことを示した。流体移動が、群発地震だけでなく、2023年5月M6.5珠洲の地震や2019年M6.7山形沖の地震、2017年M5.3鹿児島湾等の本震-余震系列を引き起こした可能性も示した。そのような流体移動の際の地震滑り・非地震性すべりの特徴を、地震波形解析および断層摩擦構成則に基づく数値シミュレーションにより調べた。

箱根火山を研究調査域として、群発地震活動と地殻流体及び非地震性すべりとの関係について、地震及び地殻変動データをもとに検証を行った。その結果、いくつかの群発地震クラスターについては明確に非地震性すべりの寄与が推定された。従来、内陸や火山地熱域での群発地震の発生には高圧の流体の寄与が指摘されていたが、本研究ではそれに加えて非地震性すべりも群発地震の発生に重要な役割を果たしていることが観測データから明らかになった。

堆積層や海水層の存在により複雑化する表面波伝播を有効に扱える常時微動トモグラフィー手法を開発・高度化できた。S-netや稠密地震観測網に適用することで、地震発生場の詳細なS波速度構造を得られるようになった。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

未固結の堆積物が介在していると考えられているプレート境界浅部において、地震活動の時空間変化から断層の摩擦特性を推定する手掛かりを得るため、湿度の異なる雰囲気下で、石英ガウジを用いた摩擦実験を行い、速度・状態依存摩擦則のパラメータとAE活動のパラメータの相関を調べた。AE活動から摩擦パラメータを定量的に推定する手掛かりはまだ得られていないが、AE活動と摩擦特性が相関を持って湿度に依存することが確かめられた（図8）。これは、真実接触面積の時間依存性が圧力溶解クリープによって生じることを反映していると解釈できる。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

高温変成岩や蛇紋岩中の鉱物脈と母岩との反応帯の解析から、中下部地殻やマントルウェッジの破壊に伴う単一き裂の流体活動時間、誘発地震マグニチュードおよび流体移動速度が、スロー地震のスケールリング則にのることを発見した（図9）。室内実験では地震に伴う流体圧変化が断層滑り特性に与える影響を解明した。また、 H_2O-CO_2 流体と岩石の反応が破壊を伴いながら自己加速的に進むことを野外調査および室内実験から明らかにし、地球内部の水・二酸化炭素循環とプレート境界の流体化学、地震活動を結びつける新しい研究を開拓している。

4) 高温高圧状態における地殻流体の存在形態の解明

地殻直下のマントルでの流体分布を捉えるため、地球物理学的な観測結果を解釈するために必要な、間隙流体の形態と連結度、流体を含む岩石の電気比抵抗を、系統的な実験によって明らかにした（図10）。特に、幅広い温度（800～1100°）・圧力（1～3GPa）範囲で、従来は求められていなかった、塩濃度や CO_2 の効果、界面エネルギー異方性の効果を明らかにした。またその結果、蛇紋岩形成領域と部分熔融領域の間に、スラブ流体が浸透流として移動できる窓のような領域があり、それを通じて前弧下にスラブ流体が直接到達できることもわかった。また、石英の超臨界水に対する溶解度のアルカリ濃度依存性や溶解析出作用の速度など、断層のシーリングの素過程に関する理解が進んだ。

5) 下部地殻のレオロジーにおける流体（水・メルト）の効果の解明

下部地殻の代表的鉱物である灰長石の含水下での変形実験から、変形機構に及ぼす含水量の効果を明らかにし、セラミックス焼結で用いられる鋳込み法とホットプレス装置を用いて、粒径や含水量等を制御した緻密な斜長石多結晶体の作成に成功した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

サブテーマ1では、関連の深い建議の項目の目的である、観測データと数値シミュレーションの比較による断層滑りのダイナミクスの解明に貢献し、流体が地震発生に関係している証拠を積み上げることができた。また、群発地震の発生においては間隙流体圧の増加に加えて、それに伴う非地震性すべりが地震発生に重要な役割を果たしている可能性を指摘するなど、群発地震の発生モデル化のための重要な知見が得られた。特に、2024年能登半島地震の発生前まで群発地震が発生しており、そこに至るまでの群発地震の詳細を明らかにしたことは、群発地震のみならず大地震の発生に至る過程の解明にも役立つものと考えられる。

一方、このような観測から水と地震の関係が推定されても、それがどのように関係するのか、また、

その水はどのように断層に供給されるのかは、実験や野外観察が重要となる。

サブテーマ2の成果は、地震活動や断層の安定性に及ぼす水の影響は、間隙水圧等の力学的な効果のみならず、化学的作用が重要であることを示している。さらに、サブテーマ5の成果は、水の存在が下部地殻の変形特性を規定することを示しており、物性実験に資する多結晶体を合成したことは、下部地殻岩石の物性解明を通して、断層にどのように歪が集中していくのか、その地震発生準備過程の解明に貢献できると考えられる。

サブテーマ3は、中下部地殻やマントルにおける破壊について、観測と物質科学を時間・流体量・流体移動速度で結びつける新しい研究を開拓しつつあり、さらに断層破壊に伴う断層面の流体圧変化が断層すべり特性に与える影響についての実験的検討を通じ、流体が関与する断層すべり挙動と地震活動やスロー地震との関係を示してきた。

沈み込み帯では、マントルから地殻への流体の付加が地殻内地震を誘発する可能性が指摘されており、マントル最上部での流体の存在量の把握が地殻内地震の発生メカニズムの理解と中長期予測に重要だと考えられる。サブテーマ4で系統的に実施した、沈み込み帯の楔形マントル条件におけるカンラン石-多成分系流体の組織平衡および電気比抵抗測定に関する一連の実験は、地震波および電気比抵抗観測から島弧下マントル内の流体分布を推定するうえで重要な貢献ができると考えられる。

以上、本研究では、地震発生に水が関与している様々な証拠の積み上げのみならず、断層への水の供給過程の新しいモデルの構築、水の存在による下部地殻の変形特性変化や断層への化学的影響の解明、水による非地震性滑りの誘発の発見等、地震断層滑りに関する水の様々な影響を明らかにしてきた。水は群発地震において極めて重要な役割を果たすと考えられるが、2024年の能登半島地震は、群発地震のみならず通常の大地震の発生も水が大きく関与していることを明らかに示しており、今後、この分野のさらなる発展が、大地震の発生ポテンシャルの解明にも役立つものと期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Huang, Y., T. Nakatani, S. Sawa, G. Wu, M. Nakamura, and C. McCammon, 2023, Effect of faceting on olivine wetting properties, *Amer. Mineral.*, 108, 2244–2259, doi:10.2138/am-2022-8808, 査読有, 謝辞有

Masuti, S., J. Muto, and E. Rybacki, 2023, Transient creep of quartz and granulite at high temperature under wet conditions, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 128, e2023JB027762, doi:10.1029/2023JB027762, 査読有

Mindaleva, D., M. Uno, and N. Tsuchiya, 2023, Short-lived and voluminous fluid-flow in a single fracture related to seismic events in the middle crust, *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2022GL099892, doi:10.1029/2022GL099892, 査読有

Nishida, K., R. Takagi, and A. Takeo, 2024, Ambient noise multimode surface wave tomography, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 11, 4, doi:10.1186/s40645-023-00605-8, 査読有

Okada, T., M.K. Savage, S. Sakai, K. Yoshida, N. Uchida, R. Takagi, S. Kimura, S. Hirahara, A. Tagami, R. Fujimura, T. Matsuzawa, E. Kurashimo, and Y. Hiramatsu, 2024, Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm and their relation with earthquake swarm activity in the Noto Peninsula, central Japan, *Earth Planets Space*, 76, 24, doi:10.1186/s40623-024-01974-0, 査読有, 謝辞有

Uno, M., A. Okamoto, T. Akatsuka, and N. Tsuchiya, 2023, Continuous thermal structures of the present-day and contact-metamorphic geothermal systems revealed by drill cuttings in the Kakkonda geothermal field, *Japan, Geothermics*, 115, 102806, doi:10.1016/j.geothermics.2023.102806, 査読有

Yoshida, K., R. Oyanagi, M. Kimura, O. Plümper, M. Fukuyama, and A. Okamoto, 2023, Geological records of transient fluid drainage into the shallow mantle wedge, *Sci. Adv.*, 9, eade6674, doi:10.1126/sciadv.ade6674, 査読有

Yoshida, K., M. Uno, T. Matsuzawa, Y. Yukutake, Y. Mukuhira, H. Sato, and T. Yoshida, 2023, Upward earthquake swarm migration in the northeastern Noto peninsula, Japan, initiated from a deep ring-shaped cluster: possibility of fluid leakage from a hidden magma system, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 128, e2022JB026047, doi:10.1029/2022jb026047, 査読有, 謝辞有

Yoshida, K., N. Uchida, Y. Matsumoto, M. Orimo, T. Okada, S. Hirahara, S. Kimura, and R. Hino, 2023, Updip fluid flow in the crust of the northeastern Noto peninsula, Japan, triggered the 2023 Mw6.2 Suzu earthquake during swarm activity, *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2023GL106023, doi:10.1029/2023GL106023, 査読有, 謝辞有

Yukutake, Y., A. Kim, and T. Ohminato, 2023, Reappraisal of volcanic seismicity at the Kirishima volcano using machine learning, *Earth Planets Space*, 75, 183, doi:10.1186/s40623-023-01939-9, 査読有

・学会・シンポジウム等での発表

Okamoto, A., K. Yoshida, S. Okino, and R. Oyanagi, 2023, Fluid flow and fluid-rock interactions at shallow mantle wedge, International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes, Keynote

宇野正起, 2023, 地質学からみたプレート境界深部の流体活動と岩石破壊, Slow-to-Fast地震学国際研究会 前日若手イベント, 招待講演

Uno, M., 2023, Reaction-induced fracturing and enhanced permeability during fluid-rock reactions and their perspectives for mineral carbonation, Geo-processes in Mineral Carbon Storage (GMCS) seminar, Invited

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

東北地方をはじめとした沈み込み帯で発生する内陸地震の総合的研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

中村美千彦 (東北大学大学院理学研究科), 武藤潤 (東北大学大学院理学研究科), 矢部康男 (東北大学大学院理学研究科), 岡田知己 (東北大学大学院理学研究科), 吉田圭佑 (東北大学大学院理学研究科), 高木涼太 (東北大学大学院理学研究科), 松澤暢 (東北大学大学院理学研究科)

他機関との共同研究の有無: 有

土屋範芳 (東北大学環境科学研究科先進社会環境学専攻), 岡本敦 (東北大学環境科学研究科), 宇野正起 (東北大学環境科学研究科), 行竹洋平 (東京大学地震研究所)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等: 東北大学 大学院理学研究科

電話: 022-225-1950

e-mail: zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp

URL: <http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/>

(14) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名: 松澤暢

所属: 東北大学 大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

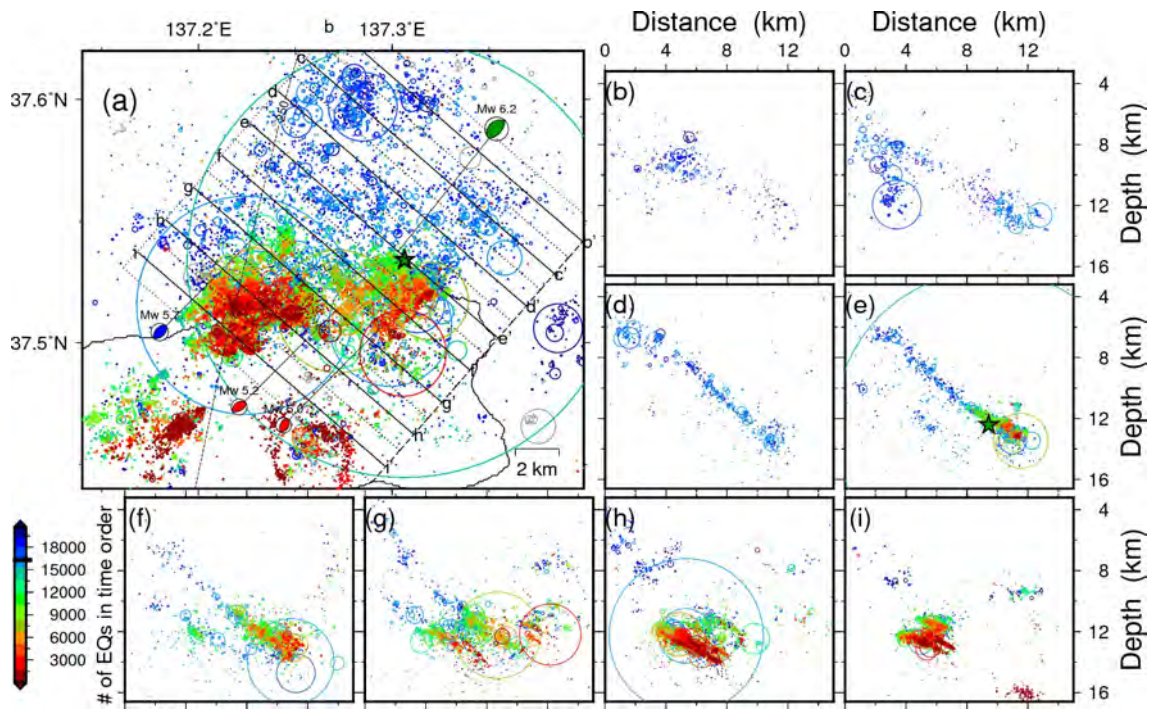


図1. 2023年に能登半島北東端で発生したM6.5の地震前後の地震活動 (Yosida et al., 2023, GRL)。(a) 震央分布。(b)-(i) 図a で示した各断面での震源分布。色はその地震が発生した順番を表す。

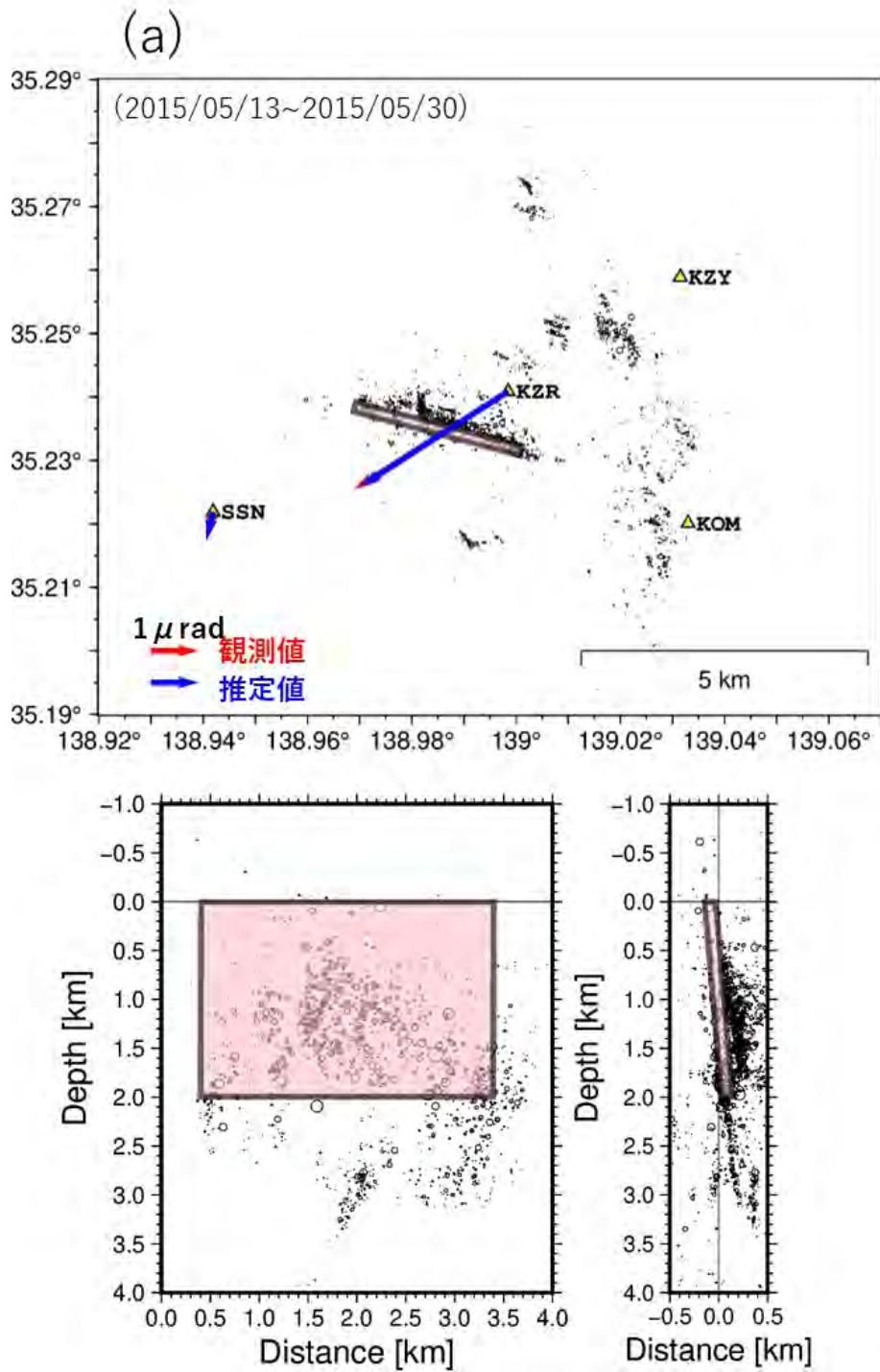


図2. 2015年5月の箱根火山群発地震時の傾斜計データを基に推定された断層モデル。設定した断層面の位置及び姿勢を矩形で示す。赤矢印および青矢印はそれぞれ観測および最適モデルから得られる理論傾斜ベクトルを示す。黒点は震央分布を示す。下図で深さ断面図を示す。

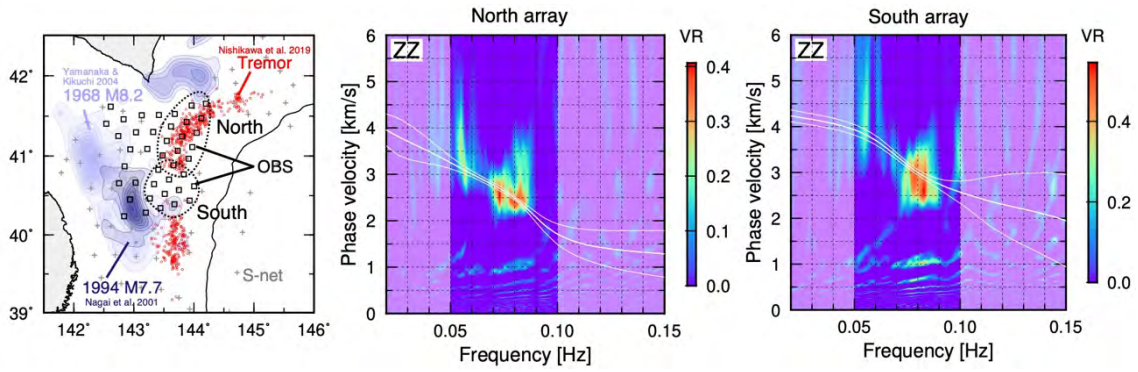


図3. 日本海溝北部におけるレイリー波位相速度の空間変化。
観測網北部の微動発生域では南部に比べて速度が有意に遅い。

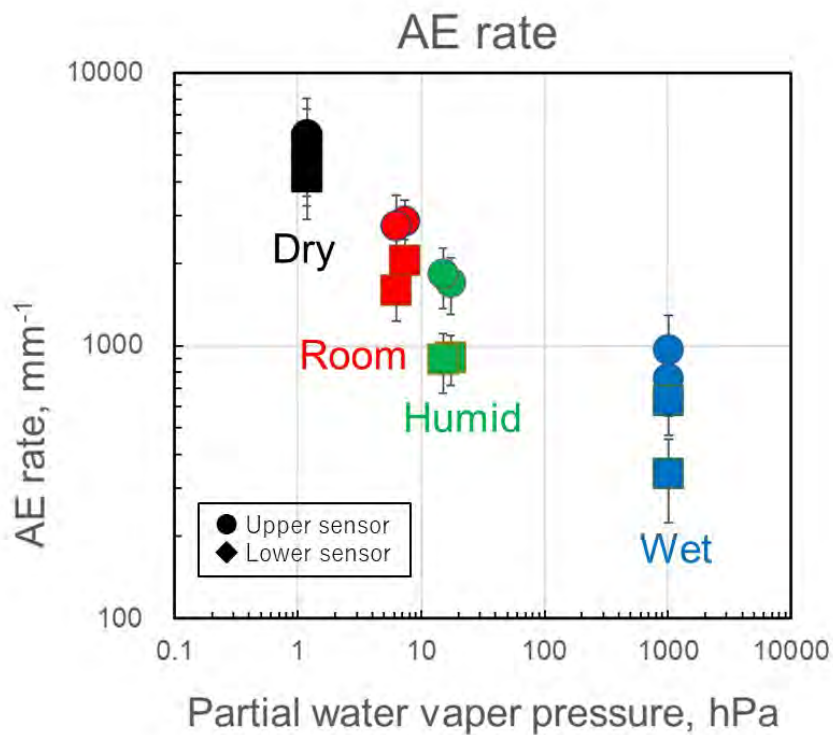


図4. AEレート（単位すべり量当たりのAE発生数）の水蒸気分圧依存性。
黒、赤、緑、青のシンボルは、それぞれ、乾燥（ $\sim 5\%RH$ ）、室内（ $\sim 50\%RH$ ）、湿潤（ $100\%RH$ ）、加水（水で飽和しているが、間隙水圧は制御していない）条件で得られたデータ。水蒸気分圧は、大気圧を1013 hPaとして、Tetens (1930) の式により求めた。

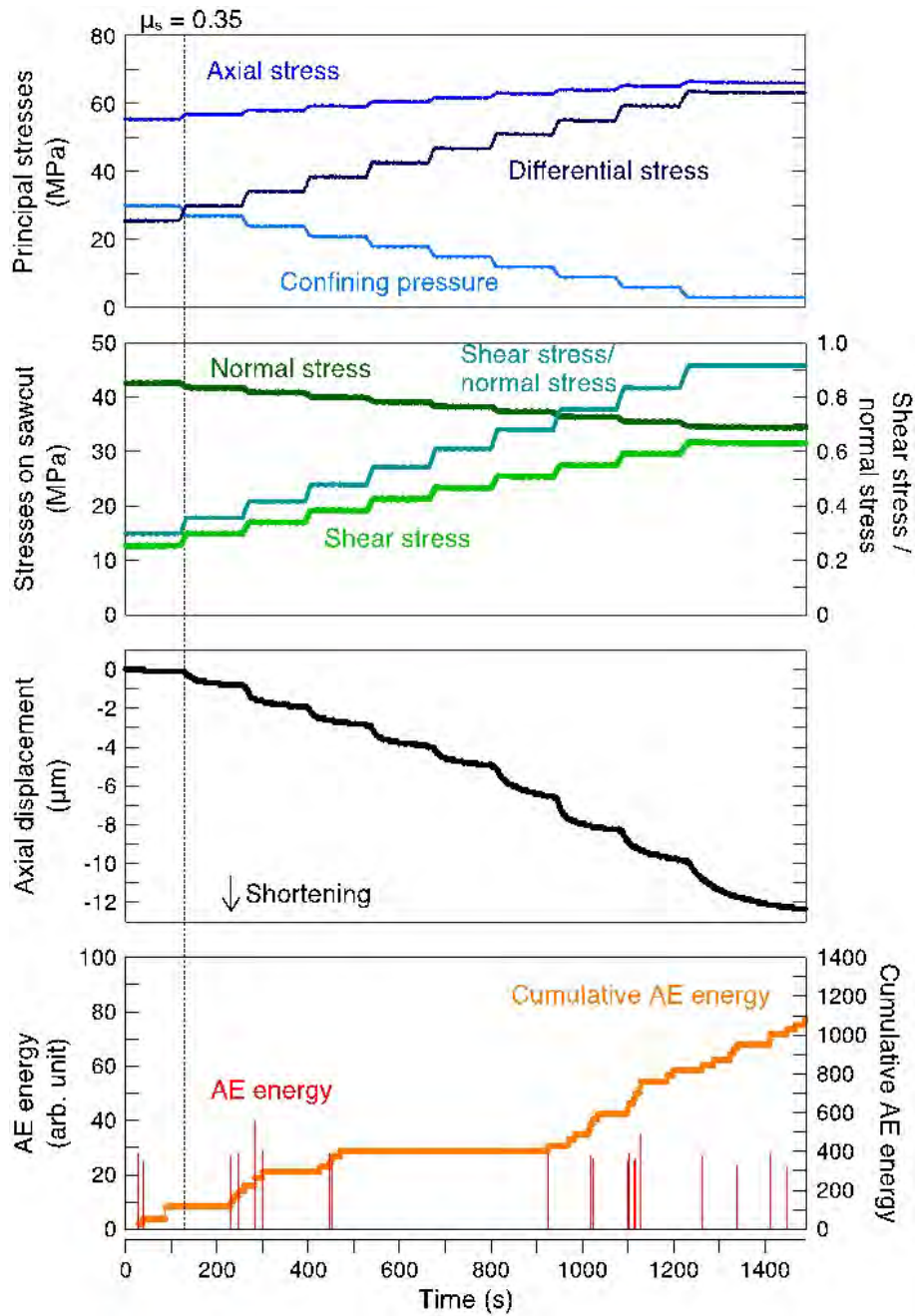


図5. 300度で急減圧破砕後の試料を使用したせん断すべり実験結果。
 封圧を段階的に減少させることで差応力を増加させる。各段階で連続的な遅いすべり ($\sim 0.1 \mu\text{m/s}$) が確認された。

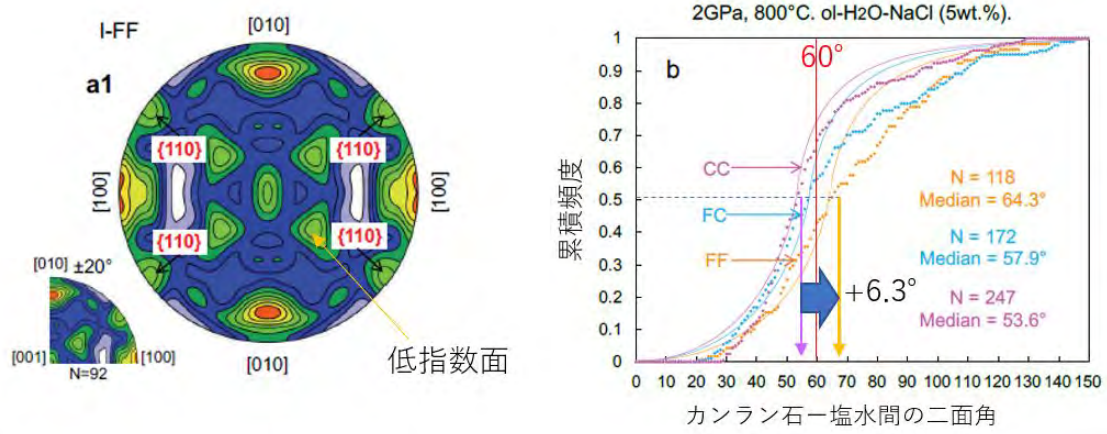


図6. カンラン石-塩水系における，流体を囲む結晶面の極表示（EBSD）（左）と二面角の累積頻度（右）。カンラン石-塩水系では，界面エネルギー異方性の効果により，約1/3の三重点でカンラン石の低指数面が現れる（faceting；左）。ファセットに挟まれる二面角は純水の場合に比べて約6°大きくなり60°を超え（右），流体の連結性が低下すると予想される。

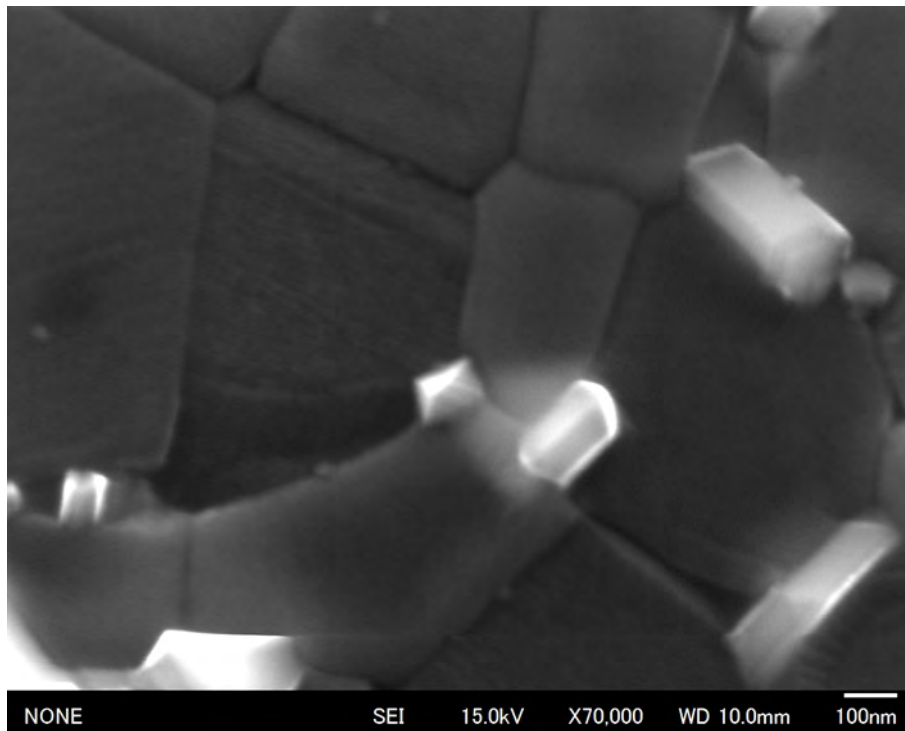


図7. 鋳込み法とホットプレスにより焼結した曹灰長石多結晶体。

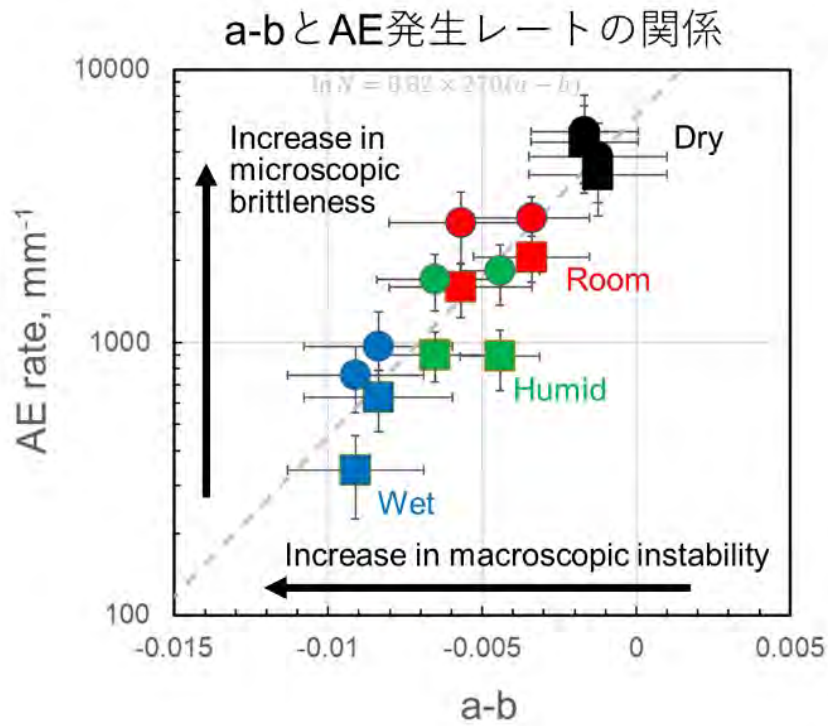


図8. 摩擦係数のすべり速度依存性（速度・状態依存摩擦則のa-b）とAEレート（N）の関係。灰色破線は、すべてのデータを用いて最尤推定した指数関数。水蒸気量が増加するのに伴い、a-bはより負の値となり、AEレートは低下する。このことは、水蒸気量の増加に伴い、圧力溶解クリープが加速することで微視的な脆性は低下するが、真実接触面積の時間依存性が顕著になるので、巨視的な不安定性は強まることを示唆する。

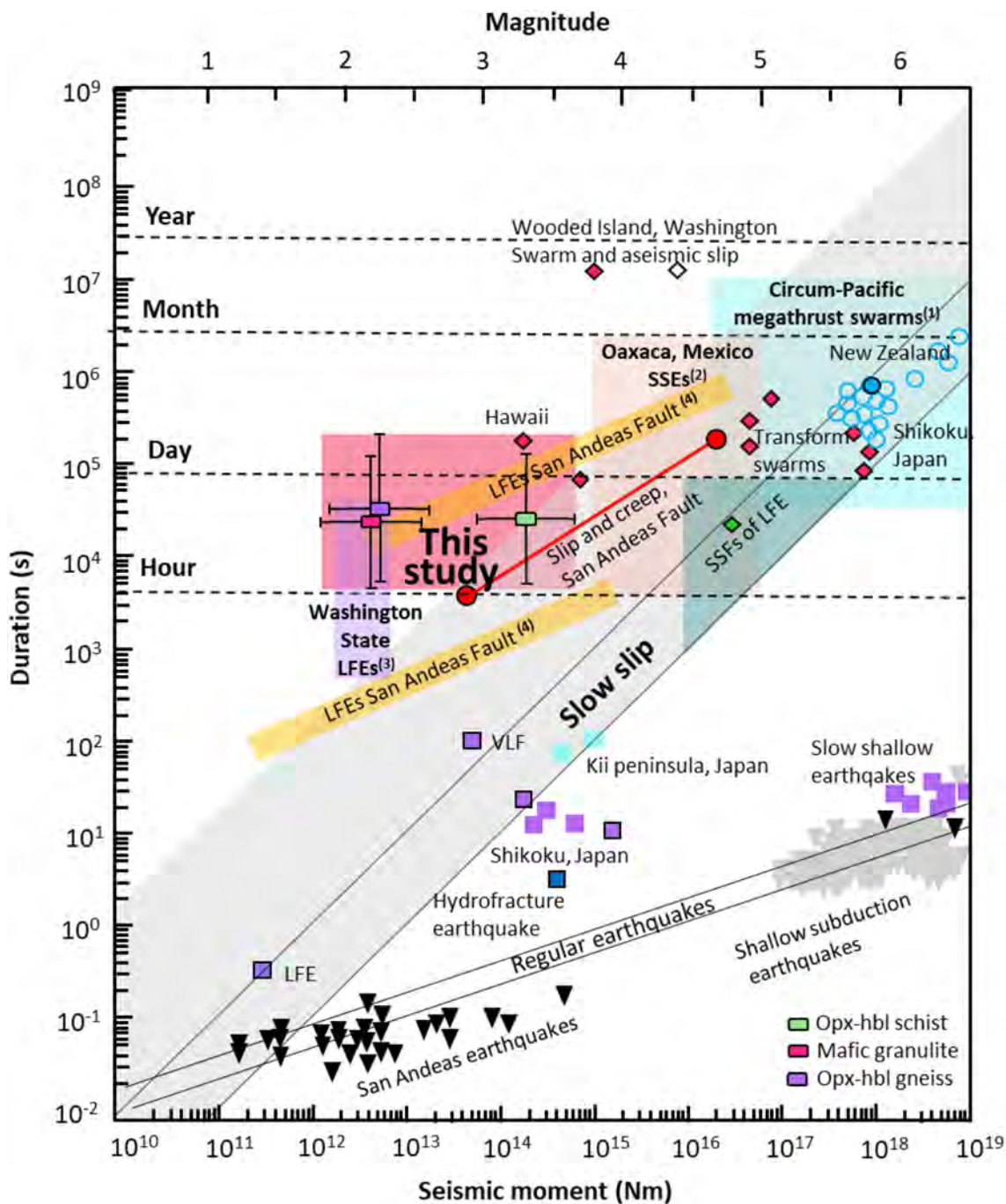


図9. 高温変成岩中の鉱物脈から推定された流体活動時間-誘発地震モーメントの関係(赤ハッチ)およびスロー地震のスケーリング則 (Mindaleva et al., 2023)。
 高温変成岩中の鉱物脈の流体活動時間およびその流体総量からMcGarrの式により推定した誘発地震モーメントは、スロー地震の継続時間-地震モーメントのスケーリング則にのる。

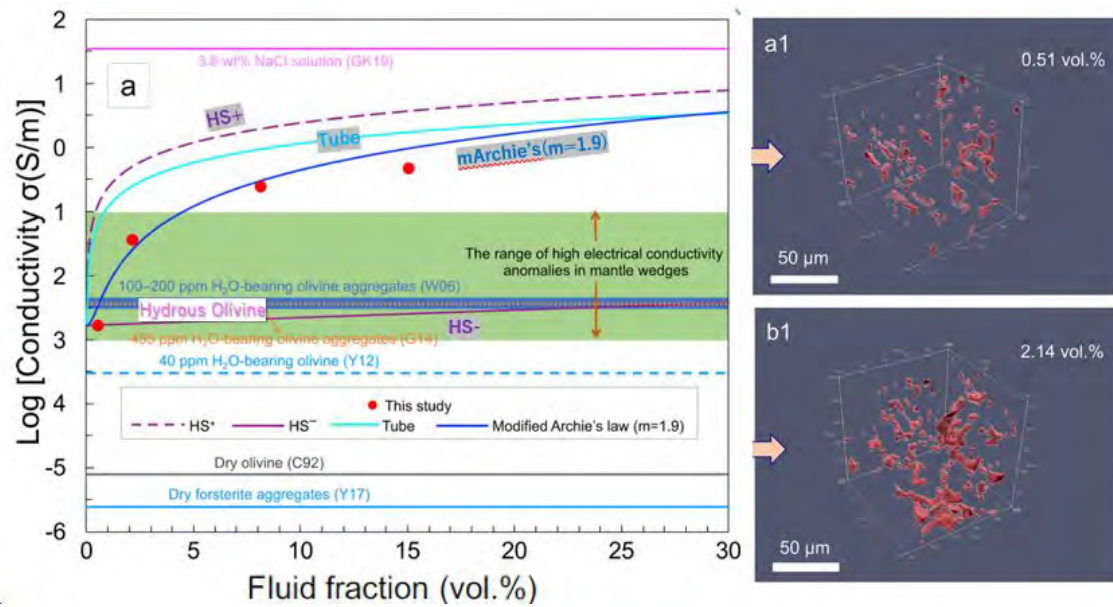


図10. 高温高圧下電気伝導度その場測定実験の結果。

カンラン石-5.8 wt%塩水系の電気伝導度はModified Archie's lawに従う ($m=1.9$) ことが示された (左)。前弧深部の高電気伝導度 (>0.01 S/m : 緑領域) を説明するには塩濃度5.0 wt.% NaClとして >1.0 vol.% の流体が必要と見積られる。塩水の連結閾値は0.5~2.1vol.%の間にあり、放射光X線CTによる3次元組織観察の結果 (右) とよく一致する。

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

噴火発生時刻の即時把握と噴火ダイナミクスの研究

(3) 関連の深い建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (4) 火山現象の解明とモデル化
 - ア. 火山現象の定量化と解明

(4) その他関連する建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (4) 火山現象の解明とモデル化
 - イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化
- 3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究
 - (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
 - ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

噴火の発生時刻は、山体変形現象や火道内マグマ上昇、爆発過程の理解をする上で最も基本的な情報である。従来、空振観測や映像観測等を用いて発生時刻が測定されていたが、風や雲の影響を受け、必ずしも安定した観測ができていたわけではない。本研究は、電荷した噴出物が大気中に放出されたことにより擾乱を受ける空中電位を測定することにより、噴火の発生時刻の測定を行う。また、空振計小アレー観測も行い、到来方向等の情報を抽出することにより、噴火発生を検知率をあげる。噴火に伴う山体変形や地震波形の解析も合わせて行い、噴火のダイナミクスの解明が進める。また、噴火発生時の即時把握法の開発も試みる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1980年代に空中電位の観測例がある桜島や諏訪之瀬島など噴火が繰り返し発生している火山を第一のターゲットとする(1-2年目)。また、近い内に噴火発生が予想される浅間山、草津白根山、十勝岳などにも計測器を展開する(3-5年目)。噴火起源の擾乱であるか判断できるよう、火口近傍、山麓、やや離れた遠方に、空中電位計を設置し、常時観測を行う。また、火道内現象との因果関係を知るため、内1点には地震計や空振計も合わせて設置する。噴火に伴い現れる空中電位波形の把握やノイズの特性把握を進める。また、定常観測網のデータも利用しながら、噴火直前の地震発生源や空振発生源の位置や発生時間と噴出物が火口から放出される時間を比較することにより、火道内のダイナミクスの理解を進める。

令和1年度(平成31年度)は爆発的噴火が発生する桜島において、空中電位信号を効果的に記録できるよう、火口からの距離をいくつか変えて観測を行い、観測点場所を選択する。また、空振計アレー

を設置し、到来方向や微弱な噴火信号の検知アルゴリズムを構築する。その知見をもとに、令和2年度は諏訪之瀬島、令和3年度は浅間山、令和4年度は草津白根山、令和5年度は十勝岳に設置する。

観測を開始した火山においては、空中電位信号や空振波の発現時刻と火口映像記録を比較するとともに、噴火発生検知のアルゴリズムを開発し、噴火発生の自動検知システムの構築を進める。また、噴火規模や様式と空中電位の発現や波形の特徴を調べる。また、空中電位の発現時刻を火口底からの噴出開始時刻とし、爆発地震の発震時や震源深度、発生メカニズム、山体変形を及ぼす圧力源の時空間分布との関係を調べる。これらの観測量と火道およびマグマ溜まり内の火山性流体モデルの比較を行い、噴火発生機構を明らかにする。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

浅間山および霧島で空中電界変動の観測を継続したが、噴火の発生はなかった。

昨年度行った、2012年から2020年に発生した爆発的噴火に伴う地震と空振波、および傾斜計の解析結果に加え、これまでに報告されている噴火時の地盤変動を引き起こした火山性圧力源の位置や、ブルカノ式噴火に伴い噴出された本質物質の物質科学的データ分析の結果、および火道流モデルに基づく数値計算結果をもとに、桜島の浅部マグマ供給系をモデル化し、爆発的噴火機構を以下のように考察した。

爆発的噴火は、火道流モデルの結果に基づき、火道内を上昇するマグマにより火口下深さ0.5-1km付近が増圧火口直下の増圧により数十mほどの領域が増圧（体積増）を引き起こすことが契機となると推察された。その直上で火口底から深さ数百メートル付近での膨張源により爆発地震のP波を励起し、その結果、約0.2秒後に火口底が盛り上がり、空振初動を励起する。さらに約0.5秒後に火口底が破壊し、噴火が発生する。このとき、大振幅の空気振動や爆発地震の主要動が励起される。火山物質の噴出に伴い、南岳A火口の下方にある火道やマグマ溜まりが収縮する。大きな噴火の場合は深さ数kmまで収縮が達する。2018年には昭和火口から南岳火口へ噴火が移行した結果、爆発地震や空振波の励起源もそれぞれの火口下および火口底となったが、噴出物の全岩組成は共通のマグマ溜まりに起源をもつことを示す。以上から、南岳A火口下にあるマグマ溜まりから南岳A、B火口、昭和火口へ火道が枝分かれしていると推定された。地震計アレーおよびDAS観測のデータを用いて噴火に伴う地震波を解析したところ、噴火発生から数十秒以上にわたり火口極浅部から地震波が励起されていることがわかった。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

2019年11月から2020年6月まで観測を行った桜島の空中電界変動観測により、地震波や空振波の記録なしで、空中電界変動が観測されるものが半数にのぼることが明らかとなった。地盤変動記録をもとにした噴火の検知法も提案されている（井口、2021）ことから

空中電位計もあわせて火山周辺に展開することにより、噴火発生の検知レベルを向上させることができることが明らかとなった。また浅間山、霧島、阿蘇山に空中電界変動観測を展開した。桜島で観測される地震、空振、傾斜変動データをもとに、南岳A、B火口および昭和火口での噴火活動を調べた結果、爆発的噴火の励起源はそれぞれの火口底直下にあるものの、マグマ供給源は共通で南岳A火口下にあることが明らかとなった。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Nishimura, T., Kozono, T., Nakagawa, M., Matsumoto, A., and Iguchi, M., accepted, Vulcanian eruptions at Sakurajima Volcano: geophysical data, numerical modelling, and petrological evidence, Bull Volcanology, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

西村太志・田口貴美子・中原 恒・畑 誠斗・中道治久・高橋龍平・江本賢太郎・濱中 悟・小園誠史・長妻 努・村田健史・菊田和孝, 2023, DAS 観測による桜島の爆発地震の解析, 日本火山学会2023年度秋季大会, P09

長谷川誉久・西村太志,2023,桜島火山における爆発地震波形の数値計算,日本火山学会2023年度秋季大会,P11

西村太志・江本賢太郎・中道治久・濱中悟・中原恒・田口貴美子,2023,2022年光ファイバーとDAS観測による桜島の地震動記録,日本地球惑星科学連合2023年大会,ST42-07

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

西村太志（東北大学）,小園誠史（東北大学）

他機関との共同研究の有無：有

青山裕（北海道大学）,大湊隆雄（東京大学）,神田径（東京工業大学）,井口正人（京都大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学 大学院理学研究科

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp

URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：西村太志

所属：東北大学大学院理学研究科

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

浅部貫入マグマの結晶化速度と噴火挙動の推定手法の開発

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

1. 半深成岩が形成されるような低圧高温条件で一定以上の時間が経過すると、マグマの結晶量が増加し、結晶のネットワークが形成されてほぼ流動できない状態となる。そこでマグマの結晶化実験を系統的に進め、火山浅部に貫入したマグマが流動性を失うまでの時間を明らかにする。これにより、新たな貫入が認められなくなってからどれくらいの時間が経過すれば、マグマ噴火の危険性が低下するかを定量的に把握し、噴火警戒レベル引き下げの科学的判断基準の向上にも貢献できるようにする。

2. 火山灰や軽石などの火砕物の帯磁率に基づき、マグマの活動度推移を即時把握する手法を開発する。帯磁率は少量の試料粉末により1分以内で測定することができるため、火山活動推移の即時把握に利用できると考えられる。多様な化学組成、噴出形態の火砕物の帯磁率を測定して全体的傾向を掴むとともに、一連の噴火活動事例における帯磁率の経時変化を調べる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1. 半深成岩形成実験：貫入マグマの低圧高温の条件は、主に外熱式ガス圧装置を用いて再現する。出発物質には、安山岩質軽石を用いる。平成31年度は温度・圧力・時間などの基本的な条件を系統的に変えた実験を実施し、実験産物の鉱物学的な解析を行って、反応の素過程を考察する。平成32年度は、ハロゲン元素などの反応速度に対する効果や、実験産物の空隙率などを評価したうえで、結果を論文として投稿する。また、天然の溶岩ドームにおいて類似の組織を持つ岩石サンプルを観察し、実験結果との比較を行って、溶岩ドーム形成におけるマグマの結晶化と自爆性との関係を考察し、論文として投稿する。

2. 火砕岩帯磁率の火山活動評価への応用：帯磁率は、試料に含まれる磁鉄鉱の量と磁区サイズに依存するので、たとえば長時間、地下に滞留して析出ラメラが形成された磁鉄鉱を含むマグマや、地下浅

部で磁鉄鉱ナノライトの結晶作用が進行したマグマでは、上昇すると考えられる。また、熱水変質により磁鉄鉱が硫化物に変質すると帯磁率はほぼ0となる。すなわち、火山灰の構成粒子の種類や割合、本質マグマの性質などが変化すると、帯磁率も変化することが予想される。これを実用化するため、平成31年度は、霧島火山新燃岳2017~2018年活動時の噴出物について、帯磁率の火山活動評価への有効性を示す論文を投稿する。令和2年度以降は、噴出物の全岩化学組成や斑晶量などについて幅広いサンプルの帯磁率データを収集し、応用可能性を上げた論文を作成する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度~5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

沈み込み帯のマグマは少なくとも上部地殻では水に飽和しており、結晶化する過程で大量の水を放出する。粘性が高く拡散速度の遅い石基のメルトでは結晶の晶出が大幅に遅れ、その結果大きな過冷却が生じる。圧力が低い地表付近では、析出したごく少量の水でもマグマの数%もの体積のガスが発生し、溶岩が爆発するリスクとなる。本年度は、珪長質の溶岩ドームやブルカノ式噴火の降灰火砕物で一般的に観察される、ガラスを含まない角ばった細孔と短冊状斜長石によって特徴づけられる「ディクティタキシティック」組織の実験的および記載岩石学的研究を行った。この組織は、マグマの上昇・噴火の最終段階において、その微細孔ネットワークが浸透的な脱ガスを可能にするため、火山噴火の爆発性を制御する可能性がある。しかし、気相成長クリストバライトを伴うことが多いディクティタキシティック組織の形成条件や速度論については、未だ不明な点が多い。我々は、流紋岩質ガラスを含む安山岩質マグマから、半深成岩の形成条件にあたるソリダスに近い水飽和の条件下（10-20MPa、850℃：ソリダス温度から±10MPa、±20℃）で、ディクティタキシティック組織と気相鉱物であるクリストバライトおよびアルカリ長石が生成されることを見いだした（図1）。このような結晶化では、過冷却メルトの不一致蒸発がまず進行し、次いでクリストバライトとアルカリ長石の析出が起こる。ハロゲンによるメルトの溶脱や、ガス圧によるフィルタープレッシング（メルトの押し出し）のような、以前に提案されたメカニズムは特に必要ない。ハロゲンの濃度に関係なく、石基のディクティタキシティック組織の形成は4-8日以内に完了する（図1）。

同組織を持った天然の溶岩の産状を実験産物と比較し、浸透率を測定するため、新鮮な溶岩ドーム内部が露出する十和田火山御倉山溶岩ドーム（後カルデラ期・7.6cal kyr BP; 工藤, 2010）の露頭での産状を記載し、浸透率を測定するとともにガスピクノメーターにより空隙構造を分析した。調査した露頭は同溶岩ドームの南南東から西北西縁にかけて露出する比高約50 mの急崖部の一部である。露頭表面の大部分は平滑であり、冷却節理の表面が露出していると考えられる。表面の大部分は薄赤紫色で、一方、破断面内部は灰色であった。連結・全空隙率;浸透率は、灰色試料で約30-34%, 32-36%, $4.78 \times 10^{-15} \sim 9.65 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、赤色で23-27%, 27-30%, $1.22 \times 10^{-15} \sim 2.68 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ であり（R3年度報告から数値を訂正）、灰色試料は赤色試料に比べて統計的に有意に空隙率・浸透率ともに高かった。空隙率に対する浸透率の値は、溶岩ドームからの脱ガス経路の一つとされているtuffsite脈の報告値(Kendrick et al., 2016)よりも少なくとも2桁程度低い（図2）、本組織が溶岩ドーム内部で全体的に形成されていれば、断面積は2桁以上大きく、脱ガスに対する効果は脈状の脱ガス経路以上に効果的になる。また孤立空隙率はごく小さく、絶対浸透率の低さは空隙の開口径が小さいことによるサイズ効果による。

ディクティタキシティック組織を持つ試料の空隙率は、もともとのマグマが持っていた気泡量と、その後の蒸発凝縮作用による変化の二段階で考えることができる。赤色と灰色の試料の露頭での分布は、節理の表面と内部の違いなので、初期の気泡量が系統的に異なるとは考えにくく、蒸発凝縮作用の進行度の違いによると思われる。節理面近傍（赤色試料）は内部（灰色）より冷却が速いと考えられることから、赤色と灰色試料の空隙率・浸透率の違いは、赤色部で蒸発作用が進行しなかったか、あるいは節理面を流れるガスからの凝縮作用が内部より効果的に進んだかの二つの可能性がある。

・計画期間中（令和元年度~5年度）の成果の概要

1.霧島火山新燃岳2011年噴火の石質岩片（溶岩餅由来）サンプルを用い、溶岩ドーム形成におけるマグマの結晶化と自爆性との関係を考察した。その結果、ナノライトの結晶化により、石基結晶度は5~45日で9.1 vol%上昇し、メルトとマグマの粘性をそれぞれ $10^{6.1-7.4}$ と $10^{7.0-8.3} \text{ Pa s}$ から $10^{8.2-9.7}$ と $10^{8.2-9.7} \text{ Pa s}$ に上昇させることがわかった（Mujin, Nakamura, Matsumoto, Bull Volcanol., 2020）。この粘性上昇により気泡過剰圧による破砕条件を超えることが示され、ナノライトの結晶化が、溶岩ドームを構成するマグマの破砕が起こる十分条件決定している可能性があることがわかった（図3）。

一方、溶岩ドームの爆発が起こるためには、揮発性成分の析出による過剰圧の蓄積が必要である。溶岩ドーム内部のマグマは、しばしば多孔質のディクティタキシティックと呼ばれる組織を形成することが知られている。本研究による再現実験によって、この組織が、半深成岩の形成条件にあたるソリダスに近い水飽和の条件下（10-20MPa、850℃：ソリダス温度から±10MPa、±20℃）で、4-8日程度で形成されることが明らかとなった（Sakurai, Nakamura et al., Contrib. Mineral. Petrol., 2024）以内に完了する。同組織を持った天然の溶岩の産状を実験産物と比較し、浸透率を測定するため、新鮮な溶岩ドーム内部が露出する十和田火山御倉山溶岩ドームの連結・全空隙率;浸透率は、灰色試料で約30-34%, 32-36%, 4.78×10^{-15} - $9.65 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、赤色で23-27%, 27-30%, 1.22×10^{-15} - $2.68 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ であり（図2）、このような組織が溶岩ドーム内に広く分布している場合、溶岩ドームからの脱ガス経路の一つとされているtuffisite脈の報告値(Kendrick et al., 2016)よりも高いガス流束を賄い溶岩ドームの爆発を抑制すると考えられる。

以上から、ナノライトの結晶化速度、およびディクティタキシティック組織の形成速度を組み込んだモデル化が、溶岩ドームの爆発による災害の軽減に貢献すると考えられる。

2. マグマ水蒸気噴火からマグマ噴火に移行した、霧島火山新燃岳の2018年3月1日～4月5日噴火についてMatsumoto and Geshi (2021)が記載したものと同一火山灰試料の帯磁率を測定したところ、付着した硫酸成分で変質した1試料を除き、異なる場所で異なる採取者により採取された火山灰と同様の増加傾向が確認された。これにより、サンプリングに関する再現性が確認された。また帯磁率の増加傾向は、Matsumoto and Geshi (2021)の記載的分類による本質・類質粒子の割合の増加傾向と概ね一致し、マグマ噴火に近づくにつれて、帯磁率が相対的に低い異質粒子の量比が減っていく変化が捉えられていることが確認された。

火砕物中の岩石磁気の起源を調べるため、桜島大正噴火軽石と、それを出発物質とした石基結晶化実験産物の低温熱磁気測定をSQUID磁化測定装置により行った。等温残留磁化測定から、石基の結晶化成分（磁鉄鉱ナノライトの細粒成分および磁鉄鉱ウルトラナノライト）が明確に区別できた。この変化は、一般の帯磁率測定では計測されない可能性があり、フィールドでの迅速分析ではなく、石基結晶度を定量的に評価する手法として利用できると考えられる。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

溶岩ドームの形成は、日本のような沈み込み帯での普遍的な火山噴火様式の一つである。溶岩ドーム形成初期のマグマに含まれる1 wt%程度の水でも地表付近の圧力では高い発泡度に至り、実際、溶岩ドームはブルカノ式爆発やメラピ型火砕流を伴うことがあるため、ドーム溶岩の爆発性や自破砕性を左右するガス浸透性構造を理解することは重要である。今後、上昇してきたマグマの発泡による過剰圧蓄積速度とディクティタキシティック組織の形成による浸透率の上昇・過剰圧解消速度のバランスを考慮したモデリングを追加することで、マグマが自爆性を持つ定置速度条件の指標が得られる可能性がある。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Sakurai, R., M. Nakamura, S. Okumura, M. Mujin, T. Nakatani, 2024, Vapor phase crystallization from a hydrous silicate melt: an experimental simulation of diktytaxitic texture, accepted

・学会・シンポジウム等での発表

関谷夏子・中村美千彦・新谷直己・竹内晋吾・諏訪 由起子, 2023, 十和田火山御倉山溶岩ドームディクティタキシティック組織部の浸透率と空隙構造, 日本地球惑星科学連合大会, SVC29-P13

Aulia Syafitri・新谷直己・無盡真弓・中村美千彦・味喜大介・井口正人, 2023, 桜島火山ブルカノ式噴火の減圧による斜長石成長速度とナノライト核生成率, 日本火山学会秋季大会, A1-09

無盡真弓・安川宙葵・大槻静香・中村美千彦, 2023, 安山岩軽石の石基の結晶化過程：低圧加熱実験からの制約, 日本火山学会秋季大会, A2-05

新谷竹望・坂内野乃・安川宙葵 Loïc MAINGAULT・新谷直己・無盡真弓・中村美千彦・味喜大介・井口正人・小林哲夫・安田敦, 2023, 桜島火山におけるマグマ上昇のガス収支と噴火様式, 日本火山学会秋季大会, A1-14

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

中村美千彦（東北大学大学院理学研究科）, 無盡真弓（東北大学大学院理学研究科）
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学 大学院理学研究科
電話：022-225-1950
e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp
URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：中村美千彦
所属：東北大学理学研究科

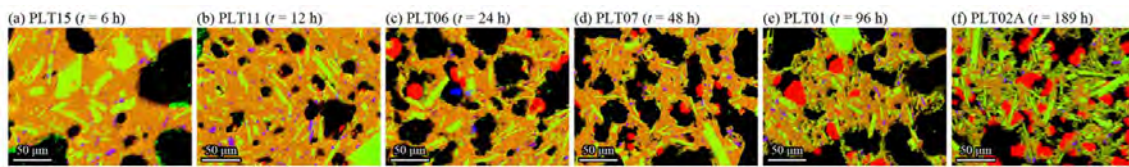


図1 ディクティタキシティック組織の再現実験産物 (元素マップ：赤=Si, 緑=Al, 青=Mg)

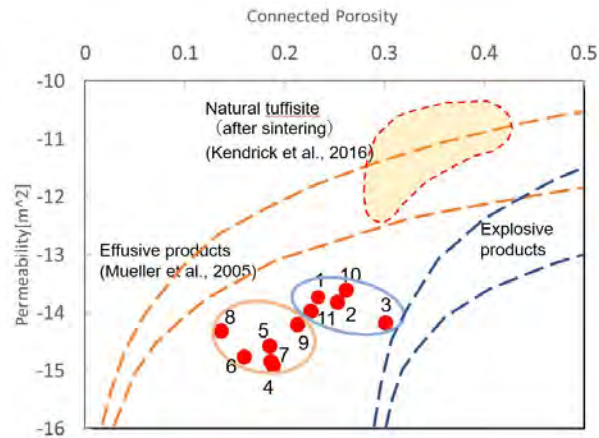


図2 御倉山溶岩ドームサンプルの連結空隙率－浸透率図（R3年度報告を訂正）

霧島・新燃岳 Jan - Mar 2011

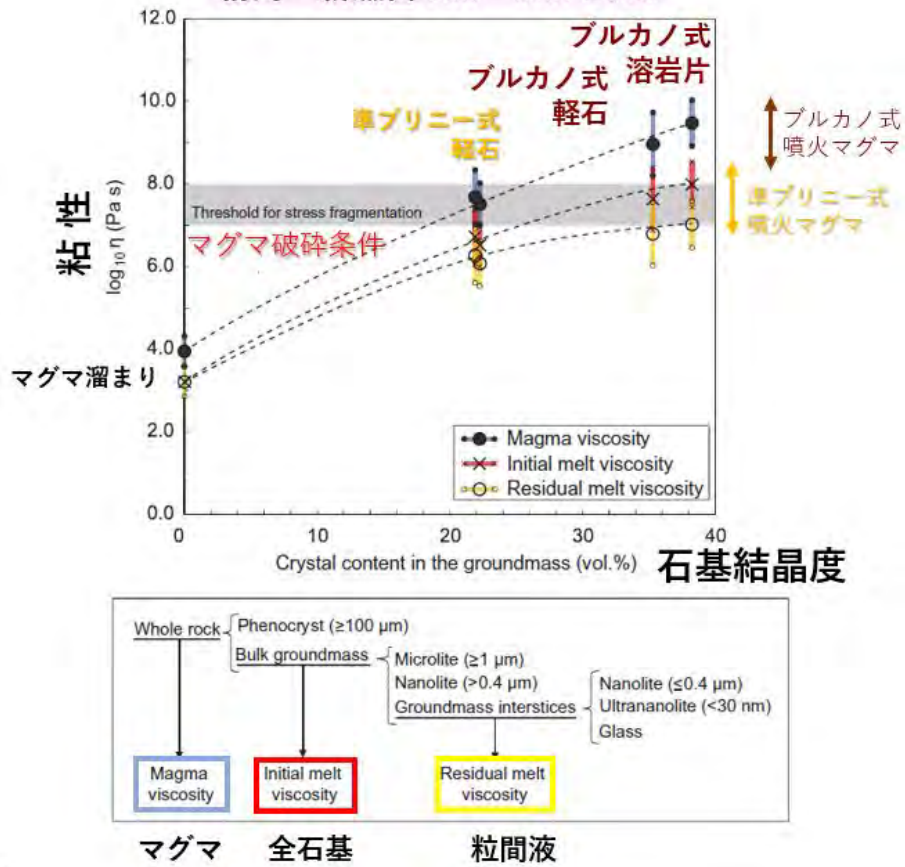


図3 新燃岳マagmaの結晶化による粘性上昇

ブルカーノ式噴火噴出物の粘性は石基ナノライトの晶出で引張応力による応力破碎の閾値(~5MPa) を超える

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

世界各地の大地震発生域との比較研究に基づく地震・火山現象の理解

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
 - ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
 - ア. 地震発生機構の解明
- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
 - ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明
 - オ. 構造共通モデルの構築

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
 - ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
 - イ. 首都直下地震
 - ウ. 千島海溝沿いの巨大地震
 - エ. 桜島大規模火山噴火
 - オ. 高リスク小規模火山噴火
- (6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

世界各地のプレート沈み込み帯における地震波トモグラフィ解析の結果を比較することで、プレート沈み込みに伴う地震発生メカニズムの共通点・多様性を明らかにし、大規模な地震・火山噴火発生場に対する理解を深める。これにより低頻度災害の発生メカニズムに関する知見を効率よく増やすことができ、また国際貢献にも繋がると期待される。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

2019年度においては、フィリピン沈み込み帯の3次元地震波速度構造を求め、地震発生と島弧マグマ生成のメカニズムを調べる。
2020年度においては、アラスカ沈み込み帯の3次元地震波速度構造を求め、地震発生と島弧マグマ生成のメカニズムを調べる。
2021年度においては、アメリカとカナダの西部にあるCascadia沈み込み帯の3次元地震波速度構造を求め、地震発生と島弧マグマ生成のメカニズムを調べる。
2022年度においては、アジア大陸東部の3次元地震波速度構造を求め、大陸内部の地震発生機構とプレート内部火山の起源を調べる。

2023年度においては、中国大陸西部の3次元地震波速度構造を求め、インドプレートの沈み込みに伴う地震発生メカニズムを調べる。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1. 近地地震と遠地地震からの大量のP波走時データの同時インバージョンを行い、中国大陸の中部、南東部と南西部の地殻と上部マントルの高分解能3次元P波速度構造と異方性分布を求めた。その結果、南西側からのインドプレートの沈み込みと東側からの太平洋プレートとフィリピン海プレートの深い沈み込みは中国大陸内部の地震・火山活動、断層運動、造山運動および鉱産の生成に重要な影響を与えたことがわかった (Xi et al., 2023; Li et al., 2023; Xia et al., 2023; Guo et al., 2024)。特にこれまで謎だった中国山西省にある大同火山の起源はマントル遷移層にある停滞スラブの下部マントルへの落下に伴う熱いマントル上昇流であることがわかった (Guo et al., 2024)。

2. マルチスケールグローバルトモグラフィー法を使って北極圏地域の全マントル3次元P波速度構造を調べた。その結果、カナダからグリーンランドまでの地域下に、下部マントルの最上部に停滞スラブが検出され、その上にbig mantle wedge (BMW)が形成されていることが分かった。また、BMW中の熱いマントル上昇流によって、リソスフェアにリフト帯ができ、カナダとグリーンランドの分離が生じたと思われる (Toyokuni & Zhao, 2023)。

3. 北スマトラ地域に設置された19点の定常地震観測点と147点の臨時地震観測点で記録された大量の近地地震と遠地地震の走時データを使って地殻と上部マントルの3次元P波速度構造を調べた。その結果、沈み込んでいるIndia-Australianスラブの下にある熱いマントル上昇流がスラブ窓 (slab window) を通りマントルウェッジに侵入し、マントルウェッジ内の熱いマントル上昇流 (corner flow) と合流してToba火山の7.4万年前の巨大噴火を引き起こしたことがわかった (Hu et al., 2023)。

4. 最新の傾斜対称軸異方性トモグラフィー法を使い、アラスカ地域の定常と臨時地震観測点で記録された大量の近地地震と遠地地震の走時データを解析し、地殻と上部マントルの3次元P波速度構造と異方性分布を調べた。その結果、沈み込んでいる太平洋スラブがアラスカ西部下のマントル遷移層に平となり、スラブの上にbig mantle wedge (BMW)が形成され、BMW内の熱いマントル上昇流によってアラスカ西部とBering海にあるプレート内部火山が生まれたことがわかった (Liang et al., 2024)。

5. これまでの約10年間に世界各地で行われた地震波異方性トモグラフィーとマントルダイナミクスに関する研究のレビューを行った (Zhao et al., 2023a; Zhao et al., 2023b)。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

最新の地震波トモグラフィー法を駆使し、日本列島、中国大陸、台湾、フィリピン、東南アジア、アラスカとアメリカ大陸などの世界各地の地殻と上部マントルの高分解能3次元速度構造と異方性構造を調べた。その結果、以下のような新知見を得た。

1. 地殻大地震、プレート境界型地震とスラブ内地震の震源域に顕著な構造不均質が検出された。特に流体を反映する低速度・高ポアソン比の異常体が存在し、断層破壊と大地震の発生に寄与した (Toyokuni et al., 2021; Zhao, 2021; Wang et al., 2023; Zhao et al., 2024)。

2. 地殻と上部マントルに地震波異方性が普遍に存在する。沈み込んでいるスラブの上と下にスラブに引きずられるマントル対流を反映する異方性を検出された。スラブの中には化石異方性とouter-riseでできた正断層による異方性を検出された (Wang & Zhao, 2021; Wang et al., 2022; Zhao et al., 2023a, 2023b)。

3. 多くの沈み込み帯では、スラブの下に熱いマントル上昇流が見られる。それはスラブ内地震とプレート境界型地震の発生に影響を及ぼす (Zhao & Hua, 2021; Fan & Zhao, 2021; Toyokuni et al., 2022; Hu et al., 2023)。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

日本列島のみでなく、世界多くの地域下の地殻・上部マントルの3次元地震波速度と異方性構造の研究によって、地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化およびプレート境界型地震と海洋プレート内部の地震の発生メカニズムの解明に新しい情報を提供した。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Hu, H., D. Zhao, J. Lin, S. Pilia, 2023, A slab window beneath North Sumatra revealed by P-wave mantle tomography, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JB025976, 10.1029/2022JB025976

Li, S., G. Jiang, D. Zhao, G. Zhang, Q. Lü, D. Shi, G. Chai, 2023, Deep geodynamics and metallogenic mechanism of the South China block: New insight from mantle tomography, *Tectonophysics*, 869, 230107, 10.1016/j.tecto.2023.230107

Wang, Z.W., D. Zhao, X. Chen, 2023, Fine structure of the subducting slab and the 2022 M7.4 Fukushima-Oki intraslab earthquake, *Seismol. Res. Lett.*, 94, 17-25, 10.1785/0220220234

Xi, J., G. Jiang, D. Zhao, G. Zhang, L. She, Q. Lü, D. Shi, 2023, Hot mantle upwelling and Mesozoic mineralization in Southeast China, *J. Asian Earth Sci.*, 258, 105648, 10.1016/j.jseaes.2023.105648

Xia, S., J. Lin, D. Zhao, J. Cao, C. Zhang, X. Wang, K. Wan, C. Fan, 2023, The 4 January 2020 offshore Pearl River Estuary earthquake sequence in South China: Implications for seismic potential of the NW-striking local faults, *J. Asian Earth*

Sci., 258, 105697, 10.1016/j.jseaes.2023.105697

Zhao, D., X. Liu, Z. Wang, T. Gou, 2023a, Seismic anisotropy tomography and mantle dynamics, *Surveys in Geophysics*, 44, 947-982, 10.1007/s10712-022-09764-7

Zhao, D., J. Wang, Z. Huang, X. Liu, Z. Wang, 2023b, Seismic anisotropy and geodynamics of the East Japan subduction zone, *Journal of Geodynamics*, 156, 101975, 10.1016/j.jog.2023.101975

Toyokuni, G., D. Zhao, 2023, Ancient slabs beneath Arctic and surroundings: Izanagi, Farallon, and in-betweens, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 10, 64, 10.1186/s40645-023-00595-7

Liang, X., D. Zhao, Y. Hua, Y. Xu, 2024, Big mantle wedge and intraplate volcanism in Alaska: Insight from anisotropic tomography, *J. Geophys.*

Res., 129, e2023JB027617, 10.1029/2023JB027617

Zhao, D., X. Liang, G. Toyokuni, Y. Hua, Y. Xu, 2024, Cause of enigmatic upper-mantle earthquakes in central Wyoming, *Seismol. Res. Lett.*, 95, 印刷中

Guo, H., D. Zhao, Z. Ding, 2024, Anisotropic tomography and mantle dynamics of the North China Craton, *Geophys. J. Int.*, 236, 1455-1470, 10.1093/gji/ggad497

・学会・シンポジウム等での発表

趙大鵬, 2023, 地震波トモグラフィーから見た地震火山活動と地球内部ダイナミクス, 日本地震学会2023年度秋季大会, S20-01, (招待講演)

鈴木 基矢・趙 大鵬・豊国 源知, 2023, S-net・Hi-netの近地・遠地地震データによる日本列島下の3次元P波・S波速度トモグラフィー, 日本地震学会2023年度秋季大会, S04-03

高田 大輔・豊国 源知・趙 大鵬, 2023, 地震波速度異方性を考慮したマルチスケール・グローバルトモグラフィー手法の開発, 日本地震学会2023年度秋季大会, S07-09

Zhao, D., G. Toyokuni, Z.W. Wang, 2023, Seismic structure and anisotropy of Tohoku forearc: new insight into seismotectonics and subduction dynamics, アメリカ地球物理学連合2023年度秋季大会, T04-1369294

Zhao, D., G. Toyokuni, Y. Hua, Z.W. Wang, 2023, Slabs, plumes and intraplate volcanism in SE Asia, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SIT17-04

趙大鵬, Z.W. Wang, 2023, 地震波トモグラフィーと異方性から見たスラブ内の含水亀裂と地震発生, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SCG58-06, (招待講演)

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

日本海溝における構造解析

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

趙大鵬（東北大学大学院理学研究科）, 豊国源知（東北大学大学院理学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

中国南京大学, 中国科学院, 中国地震局, 吉林大学, 中山大学, 西北大学

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科

電話：022-225-1950

e-mail：zhao@tohoku.ac.jp

URL：www.aob.gp.tohoku.ac.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：趙 大鵬

所属：東北大学 大学院理学研究科

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

スラブ内地震の発生メカニズムに関する研究

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
ア. 地震発生機構の解明
イ. 地震断層滑りのモデル化

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
イ. 首都直下地震
ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

首都直下地震
千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題は海陸の地震観測と室内実験によって、スラブ内地震の発生する場所、条件、様式、それらのスラブごとの差異といった、スラブ内地震の基本的枠組みの包括的な理解を目指す。海域観測では、日本海溝海側での海底地震観測網で観測された東北地方下の地震を解析することで、沈み込む海洋プレート内に存在する断層の広がりや把握を目指す。また、東北地方の二重深発地震面の下面に沿う地震波速度・減衰構造やスラブ内地震の応力降下量、地震波エネルギー放射効率といった断層運動に関する物理量を精査し、上面地震と下面地震との発生要因の相違を明らかにする。さらに、室内実験では、スラブ構成岩石を主として相転移断層形成・脱水脆化・塑性不安定性に伴う断層形成機構を実験的に検証し、温度・圧力・岩石種ごとの主要断層形成機構を把握する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

海域地震観測：アウターライズ正断層地震の断層下端深さの把握を目的とし、1933年昭和三陸地震および2011年宮城県沖地震の震源域直上での海底地震観測網で観測された稍深発地震の解析を行う。解析で用いる稍深発地震震源－観測点間波線経路は、余震活動を用いた地震波トモグラフィでは推定が難しい大地震断層の深部側を通るため、仮に破碎や含水化が断層の深部に及んでいれば、それに関連した低速度異常の検知が期待される。平成31、32年度では、1933年地震震源域の海底自然地震観測記録から稍深発地震波の見かけ速度の変化を調べ、波線追跡法を用いて1933年地震断層にかかわる走時異常の下端深さの把握を試みる。平成33、34年度は、2011年地震震源域での地震観測記録について

て同様の手順を踏んだ解析を行う。ここでの観測点分布は1933年震源域とほぼ同じだが、断層サイズが異なるので検出される走時異常の分布の広がりも異なることが予想される。平成34年度以降は、三陸沖と宮城県沖で得られた結果と既往の地震波速度研究とを総合して比較し、大断層形成にかかわる構造改変の様子を明らかにする。2011、1933年地震震源域での海底観測記録は海洋研究開発機構から提供を受ける。

陸域地震観測：平成31、32年度は、日本列島で発生するスラブ内地震の波形解析により、静的応力降下量や地震波エネルギー放射効率を推定し、震源パラメータに地域変化や深さ変化、規模依存があるかを確認する。また、深発地震の走時地震活動の抽出も行う。平成33、34年度には、太平洋スラブの下面地震発生場の理解を深めることを目的として、北海道・東北地方で得られた稍深発～深発地震波形を解析する。その際、スラブの異方性を考慮した速度構造、およびS波減衰構造の推定を行うことで、スラブ内不均質構造を明らかにする。平成34年度以降は、一連の解析で得られた結果を総合的に解釈し、上面地震と下面地震との発生要因の相違を明らかにするとともに、スラブ内地震の発生モデルを高度化する。

室内実験：含水鉱物（蛇紋石、緑泥石、ローソナイトなど）の脱水反応やオリビン-スピネル相転移に伴う断層形成機構の把握を目的として、稍深発～深発地震発生域の温度・圧力条件が発生可能な岩石変形試験機（固体圧変形試験装置およびD-DIA型変形試験装置）を用いて高温高圧実験を行う。鉱物種ごとに異なる温度・圧力条件化での摩擦不安定性や降伏強度および不安定すべり時の応力降下量の変化、変形特性を調べる。先の研究成果によりローソナイトは脱水を伴わずとも破壊が生じることが明らかとなり、鉱物種によって異なる変形・破壊特性を示すことが予想された。そこで、平成31年度では、ローソナイトや他の含水鉱物でも同様の実験を行い、脱水前後、どのタイミングで不安定すべりを引き起こすかの検証を行う。平成32～34年度では、間隙水圧を制御したセル（金属ジャケット使用）を開発し、脱水脆性化の有無を調べる。こちらも鉱物種による違いを検討する。平成35年度では、スラブ内に存在する岩石を作成し、多相系での脱水脆性化について検証を行う。また、オリビン-スピネル相転移についても、実際のマントルに存在するオリビンを出発物質として用いた相転移を伴う変形実験を行い、断層形成が起こるか検討をする。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

海域地震観測

北海道沖千島海溝の海溝軸から海溝海側アウターライズにおける地震活動を、海底地震計による臨時観測とS-netのデータを用いて解析した。解析の結果からは、千島海溝の海溝軸海側（南側）約100km程度の範囲で地震活動が見られた。千島海溝にほぼ平行なホルスト・グラベン構造に沿う線状分布や、T軸が千島海溝にほぼ直交する正断層型の震源メカニズムが得られており、千島海溝からの沈み込みに伴う海洋プレートの変形を反映していると考えられる。一方2012年3月にMw6.9の地震が発生した襟裳海山周辺では、日本海溝にほぼ平行な線状分布や、T軸が日本海溝に直交する正断層型の震源メカニズムが推定された。千島海溝と日本海溝の接合部において、海洋プレート内で複雑な変形が生じていることが示唆される。

2021年と2022年に福島県沖で発生したスラブ内地震（Mw7.1、7.4）の震源断層周辺の余震活動を把握するため、精密余震震源（Yoshida, 2023）のクラスタリングを行った。主成分分析によって余震分布の密集具合を把握しながらDBSCANによるクラスタリングを繰り返して分離した6つのクラスターに対し最小二乗法で断層面をフィッティングした。得られた断層モデルはKobayashi et al. (2023) と概ね整合するが、2021年地震の余震が本震断層とその共役断層で活動しつつ2022年地震の本震断層でも活発化していたことが判明し、2022年地震の発生には近接する2021年地震が影響した可能性が指摘された。さらに、2022年地震の余震分布はKobayashi et al. ではモデル化されていない断層構造を複数示しており、スラブ内浅部で地震を発生させている断層の複雑性が示唆される。

日本海溝海側斜面の地震活動からアウターライズ断層の形状と分布を再評価するため、機械学習による臨時OBS観測データ（Obana et al., 2023）の地震イベント検出を開始した。Obana et al.による検測と照合すると、検測時刻の違いは数サンプル程度であり十分な精度であることが確かめられた。一方、P波の後続波やS波後のS/Nが悪い時刻に誤検測が起こる例も見受けられた。Obana et al.による検測値を学習させることで検測の正確性が向上すると期待される。

Hi-netとS-netで記録された近地・遠地地震の走時データから太平洋スラブ内構造を推定した。日本海溝中北部の太平洋スラブ内では二重深発地震面の下面の活動がアウターライズ域から始まっており、

周辺は島弧下の活動域と同様の低地震波速度異常になっていることが明らかになった。

爆発的噴火を生じさせることで知られているスマトラ島Toba火山直下において、スラブ下からの上昇流がスラブを貫通して島弧に至る様子がトモグラフィ解析によりイメージングされた。スマトラ島下には古い拡大軸や断裂帯を有するオーストラリアプレートが沈み込んでおり、拡大軸等の脆い部分が穴となって上昇流の貫通経路となったと考えられる。

陸域地震観測

レーンバー関数解析により、西南日本における410 kmおよび660 km速度不連続面を推定したところ、準安定オリビン領域の存在を示唆する結果が得られた。一方で、深発地震の活動がマントル遷移層よりも浅いところで終わるため、地震活動と準安定オリビン領域との関係性についてはさらなる検証が必要である。

スラブ内で発生する繰り返し地震について同一グループに属する地震の場合には規模が異なっても断層サイズはほぼ同じであることを明らかにした。

室内実験

沈み込むスラブ浅部温度圧力条件下にて、熱水変質の進行するハルツバーガイト試料の変形実験を行った。その結果、熱水変質に伴ってハルツバーガイトの強度低下が進行していく様子が確認された。この実験結果は、沈み込むスラブの流動強度は、半脆性流動における破砕と熱水変質によって支配されることを示唆している。

深発地震発生メカニズムとして、かんらん石の相転移に伴って断層が形成される相転移断層運動モデルが有力視されている。地震波観測により、相転移断層運動モデルにおけるG-R則のb値が沈み込むスラブの温度により異なることが明らかにされているが、その原因は不明である。かんらん石のアナログ物質であるゲルマニウムかんらん石を固体圧変形試験機を用いて変形させ、断層形成に伴って生じるAE (Acoustic emission)を校正されたAE素子で計測することで、b値や地震波特性を調べた。結果、岩石組織の不均質性が深発地震のb値に影響しうることを明らかにした。

・ 計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

海域観測によって、沈み込む太平洋スラブ内部の正断層地震発生層深さの下限が東北沖地震後に深くなったことが明らかにされ、そのメカニズムとして、この周辺の摩擦強度が間隙流体の浸透によってもともと低かったために少しの応力変化で活動が顕在化したことを提案した。また、千島海溝～日本海溝の海溝海側斜面には最大で100kmにもおよぶアウターライズ正断層が存在することを明らかにした。地震波トモグラフィから、2021年と2022年の福島県沖のスラブ内大地震が、そうしたアウターライズ大断層の再活動で発生した可能性を指摘し、それらの余震が共役や二重の位置関係を持つ複数の断層で複雑に活動したことを明らかにした。加えて、比較的均質だと思われていた海洋プレートの構造が沈み込みの過程で強く広範囲に不均質化していることや、日本海溝中北部のアウターライズ域では二重深発地震面の下面活動域が島弧下の活動域と同様に低地震波速度異常となっていることがわかった。陸域観測では、スラブ内相似地震のグループ内での応力降下と放射エネルギー効率の比較から、共通断層面であっても支配的な破壊プロセスが異なることを示唆した。東北地方の上面地震帯のようにdowndip-compression場であっても逆断層型地震に近接して正断層型地震が発生しことから、きわめて局所的に地殻物質のエクロジャイト化による引張場が形成されていることを示唆した。また、スラブ内地震の場合には、同程度のマグニチュードの地殻・プレート境界地震に比べて破壊の継続時間が短く短周期地震動を励起しやすいこと、スラブ内の地震活動深さとプレート年代が相関することが明らかとなった。脱水変形実験から、ローソナイトの安定領域内においても不安定すべりが観察された一方で、脱水時にはゆっくりとした応力降下イベントが観察された。断層沿いには極細粒の非晶質物質が存在することから、非晶質物質や間隙流体の存在が深発地震域でのすべり挙動を制御していると考えられる。Geカンラン石を用いた変形実験では、低温環境でもごく少量の水で蛇紋岩化することのほか、特定の温度で卓越する圧力誘起相転移でカンラン石のナノ粒子が生成し、ナノ多結晶体への剪断集中が深発地震を引き起こすというメカニズムを提案した。さらに、Geカンラン石の粒径の違いが相転移断層形成におけるb値に影響しうるということが明らかとなった。ハルツバーガイトの変形実験によって、沈み込むスラブの流動強度が半脆性流動における破砕と熱水変質によって支配されることが明らかとなった。

・ 「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に

対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

海域での地震観測網の増強と観測頻度の増加により、アウターライズ域における潜在断層の把握が大きく進んだことは、当該領域で発生が危惧される津波被害を予測する上で極めて重要な成果といえる。さらに、S-netによるトモグラフィ解析の高度化によって前弧域下のスラブ内大地震震源域を低地震波速度異常として検出できるようになり、スラブ内潜在断層の分布把握につながる成果が得られている。首都直下に沈み込むフィリピン海スラブ内の地震活動の実態の理解が進んだ。スラブ内地震では短周期地震動により木造家屋に被害が生じることがあり、スラブ内地震の破壊継続時間の推定は短周期地震動の励起メカニズムの理解に寄与するものである。室内実験では、深発地震の発生には構成岩石の各種相転移が重要であることを示した。特に、相転移断層運動モデルに示された岩石の粒径依存性とb値への影響は、深発地震が稍深発～前弧域深度の地震と同様に既往断層の再運動であるかの理解に向けた手がかりと成り得、スラブ内地震の発生機構の理解に資する成果が得られつつある。

本課題は次期計画における課題「スラブ内地震・深発地震の発生場・発生機構の解明」に引き継ぎ、地震波解析手法の高度化を進め、スラブ形状やそこでの岩石物性、将来スラブ内地震発生場となるアウターライズ断層の活動様式と含水化の関係を解明する。得られた結果に基づき、スラブ内地震発生場の原位置に存在する岩石種、発生する物性変化を推定し、岩石実験を行う条件の制約に用いる。さらに、地震波形と地震活動の解析により、スラブ内地震の震源過程および地震活動の特徴量を推定し、岩石実験で発生する破壊との比較により、原位置で起こっている現象を制約する。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

- Jia, R., D. Zhao, 2023, Anisotropic tomography of the East Japan subduction zone: influence of inversion algorithms, *Geophys. J. Int.*, 234, 2199-2213, doi:10.1093/gji/ggad197, 査読有, 謝辞無
- Hu, H., D. Zhao, J. Lin, S. Pilia, 2023, A slab window beneath North Sumatra revealed by P-wave mantle tomography, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JB025976, doi:10.1029/2022JB025976, 査読有, 謝辞無
- Hua, Y., D. Zhao, Y. Xu, 2023, P and S wave anisotropic tomography of the Banda subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, e2023GL105611, doi:10.1029/2023GL105611, 査読有, 謝辞無
- Ohuchi, T., 2023, In situ X-ray and acoustic observations of deep seismic faulting upon phase transitions in mantle olivine, *Spring-8 Research Frontiers* 2022, 98-99, doi:10.1038/s41467-022-32923-8, 査読有, 謝辞無
- 大内智博, 鳴瀬善久, 松浦雅, 2023, 高压下におけるザクロ石角閃岩及びエクロジヤイトの一軸圧縮変形実験と微小破壊音測定, *高压力の科学と技術*, 33, 査読無, 謝辞無
- Sawa, S., Muto, J., and Nagahama, H., 2023, Modeling of olivine-spinel phase transformation of germanate olivine (Mg_2GeO_4) by using the phase-field method, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, doi:10.1016/j.pepi.2023.107060, 査読有, 謝辞無
- Semba, M., Hirauchi, K., Ohuchi, T., Okamoto, A., and Kouketsu, Y., 2023, Effects of hydrothermal alteration on shear localization and weakening in the mantle lithosphere, *Tectonophysics*, 868, 230081, doi:10.1016/j.tecto.2023.230081, 査読有, 謝辞無
- Quan, W., X. Liu, D. Zhao, S. Li, 2023, Seismic evidence for slab detachment beneath the Taiwan Orogen, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 610, 118131, doi:10.1016/j.epsl.2023.118131, 査読有, 謝辞無
- Wang, Z.W., D. Zhao, X. Chen, 2023, Fine structure of the subducting slab and the 2022 M7.4 Fukushima-Oki intraslab earthquake, *Seismol. Res. Lett.*, 94, 17-25, doi:http://dx.doi.org/10.1785/0220220234, 査読有, 謝辞無
- Xie, F., Z. Wang, D. Zhao, R. Gao, X. Chen, 2023, Seismic imaging of the Java subduction zone: New insight into arc volcanism and seismogenesis, *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2023.229810, 査読有, 謝辞無
- Yuan, T., Z. Wang, D. Zhao, R. Gao, X. Chen, 2024, Seismic evidence for break-off of the Molucca Sea slab, *Tectonophysics*, 854, 229810, doi:10.1016/j.tecto.2024.230218, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

- 宮崎一希・中島淳一・吉岡祥一, 2023, レシーバー関数を用いたオリビン準安定領域のイメージング, 日本地震学会2023年度秋季大会

Miyazaki, K., Nakajima, J., 2023, Seismic Imaging of the Metastable Olivine Wedge beneath Central Japan, 2023 AGU Fall meeting

尾鼻 浩一郎、野 徹雄、三浦 亮、中村 恭之、藤江 剛、今井 健太郎、三浦 誠一、小平 秀一、2023、海底地震観測による北海道沖南部千島海溝アウターライズ域の地震活動、日本地震学会2023年度秋季大会、S09-05

Sawa, S., Miyajima, N., Gasc, J., Schubnel, A., Baisset, M., Muto, J., 2023, b values dependency on olivine grain size in phase transformation faulting: Implication for deep-focus earthquakes, International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2024, Tokyo

Zhao, D., G. Toyokuni, Z. Wang, 2023, Seismic structure and anisotropy of Tohoku forearc: new insight into seismotectonics and subduction dynamics, 2023 Fall AGU meeting

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

スラブ内地震・深発地震の発生場・発生機構の解明

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東龍介（東北大学）、松澤暢（東北大学）、日野亮太（東北大学）、内田直希（東北大学）、矢部康夫（東北大学）、鈴木昭夫（東北大学）、武藤潤（東北大学）、白石令（東北大学）、趙大鵬（東北大学）、澤燦道（東北大学）

他機関との共同研究の有無：有

中島淳一（東京工業大学）、麻生尚文（東京工業大学）、小平秀一（海洋研究開発機構）、尾鼻浩一郎（海洋研究開発機構）、藤江剛（海洋研究開発機構）、大内智博（愛媛大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp

URL：http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：東龍介

所属：東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地殻応答による断層への応力载荷過程と断層間相互作用の解明と予測

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
イ. 内陸地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
ア. 地震発生機構の解明
(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

東北地方、特に東北地方太平洋沖地震が発生した後に地震活動の変化が見られた秋田県を中心とする東北地方中北部領域などの領域で、東北沖地震後のひずみ場、地震活動や応力場・地殻流体の挙動に伴う強度の時間変化をモニタリングし、東北地方の陸域地殻の東北沖地震後約12年間の応答（余効変動）について知見を得る。また、活断層が複雑に分布する宮城県中部～山形県南部～福島県北部における地震活動の理解を深め、複雑な断層系における応力・ひずみ蓄積過程や断層間の相互作用の理解に貢献する。

また余効変動のような遷移的な変形挙動を予測する岩石力学的データは乏しく、余効変動の盛衰を占う余効すべりと粘弾性緩和の定量的な区分は未だ困難である。そこで本研究では、広範な上部マントル温度条件下でのカンラン石試料の応力緩和実験も行い、東北沖地震の余効変動を予測する遷移流動挙動のレオロジー解明を目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1年目：長期にわたって継続するための測地観測網・地震観測網の整備を行う。

前計画の課題：1203や科研費・新学術領域「地殻ダイナミクス」で設置した臨時観測点を再編し、またこれまでオフラインで行ってきた観測をオンライン化する等、長期観測に対応する。さらに、これまで観測・理解が手薄だった領域の強化として、宮城県中部～山形県南部～福島県北部において臨時地震観測網を整備する。それぞれの観測点間隔は、地震発生層の厚さ（約10-20km）を考慮し、約15km程度とし、また既存観測点の配置を考慮し、計約30点の地震観測点を整備する。比抵抗構造探査については、前年度までに整理・統合したデータを利用し、新潟県村上市～福島県相馬市の二次元測線の解析を進める。実験については、既設の実験機材の整備を行う。領域内の断層浅部・深部構造探査等の結果について既往研究の成果・データ等の収集およびコンパイルを行うとともに、機材調整および測線設定と下見を進める。

2年目以降：測地観測網・地震観測網の整備および比抵抗観測を進める。各項目において整備した

観測網や実験装置を利用し、過去に設置した観測点のデータと合わせて、各解析・実験を順次進める。

ひずみ分布やメカニズム解・応力場・地殻流体および強度分布・震源分布・地震活動を精度良く推定しそれらの時空間変化を捉える。

さらに、宮城県中部～山形県南部～福島県北部において臨時地震観測データを活用し、震源分布・応力場・地震波速度構造を精度良く推定する。Matched Filter法などを用いて、気象庁の一元化処理など定常観測網では検出できない地震活動を抽出する。宮城県・福島県沖のS-netのデータを併用し、沿岸域の地震活動や地殻構造の推定を行う。既往の断層浅部・深部構造探査結果を踏まえ、領域内の断層構造探査を行う。飯豊山や朝日岳周辺で得られているMTデータもコンパイルし、宮城県中部～山形県南部～福島県北部の3次元地殻比抵抗構造を高解像度で推定する。得られた地震学的構造と比抵抗構造などとの比較を行うとともに、地震活動・ひずみ場や応力場の時空間分布との関係を明らかにする。長町-利府線断層帯と仙台平野南部の伏在活断層を含む双葉断層帯の関係について、それぞれの断層帯の接合部付近（福島県新地町～宮城県山元町）において重力探査を実施する。それぞれの断層帯の端部において断層と直交する方向に複数本の測線を設定する。またそれぞれの断層帯間においても断層の走向と直交する測線を設定し、測定を行うことにより、地下構造の連続性を明らかにする。また、既往反射法地震探査データ等と比較を行う。

得られた観測結果を基に以下の検討を行う。長町-利府線断層帯と福島盆地西縁断層帯の連続性について、検討を行う。長町-利府断層帯と双葉断層帯の関係（連続性の有無）について、検討を行う。福島盆地西縁断層帯と会津盆地東縁・西縁断層帯の関係について、東北中部（岩手山～横手盆地東縁断層帯・北上低地西縁断層帯～栗駒山）で得られている東北脊梁部の構造モデル（いわゆる長谷川モデル）との比較を行う。吾妻山や蔵王山などこの領域に分布する火山の構造と各断層帯との関係について検討を行う。

上記の地震観測による応力やGNSSによるひずみの時空間分布について数値モデルによる余効変動・地殻応答の再現を行う。その際に使用するレオロジー構造モデルを、比抵抗構造や地震波速度構造を考慮し作成する。特に、微細組織を制御した人工カンラン岩試料（多結晶および単結晶）を用いて、地震による応力変化を模したクリープ試験、応力ステップ試験を行い、遷移流動挙動の力学特性を測定する。微細組織観察と力学データの解析と既存のカンラン岩のレオロジーデータを組み合わせ、遷移流動挙動を表現するレオロジーモデルの探求を行い、遷移挙動の素過程解明を行う。

東北沖地震からの時間が経過するにつれて、余効変動はより広域に生じるものと考えられる。東北地方のみならず、より広域の構造モデルも作成し、モデル化を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要
東北地方中南部の研究

これまで検討を行った双葉断層北方の仙台平野南部に存在する伏在断層（岡田真介・他、2023；図1）について簡便法による震度予測を行った（岡田知己・岡田真介、2024；図2）。断層の浅部延長と山地に挟まれた帯状の領域では震度7程度が推定された。

能登半島の地震活動の研究

2020年末から継続する能登半島の群発地震を詳細に調べ、この群発地震が複数の面構造を通して浅部に移動していたこと、その開始部付近の地震波反射面が存在していたことを示した。その結果から、この群発地震活動と2023年5月5日に珠洲で発生したM6.5の地震が流体移動とそれに引き起こされた非地震性変形により引き起こされた可能性が高いことを示した（Yoshida et al., 2023a, 2023b; 図3）。また、群発地震震源域の地震波速度構造を推定した。その結果、群発活動が開始した南部においては、活動域の深部に高Vp、高Vp/Vsの領域を確認した。この原因は古いマグマ溜まりと高い圧力の水が考えられ、この領域の地震活動と流体との関連が示唆される。また、S波スプリッティング解析を行なった。群発地震震源域の南部は応力による異方性、北部は断層などの構造による異方性が確認された。北部では断層などの構造が発達しており地震活動もより活発であると推察される（Okada et al., 2024；図4）。

比抵抗構造探査

会津盆地西縁・東縁断層帯、大峠カルデラ、吾妻山を含む一連の3次元比抵抗構造をFEMTIC (Usui 2015)で再解析し、これらの下部地殻の低比抵抗体が相互に繋がっていることが明確になった。東北南部の脊梁下の下部地殻のマグマ・流体の貯留槽は広域に共通していることが明確になった。それらは、中部地殻から上部地殻にかけて、会津盆地西縁・東縁断層帯（大峠カルデラ）と吾妻山との2つに分岐して上昇していることが比抵抗構造から確認できた。会津盆地西縁・東縁断層帯（大峠カルデラ）下の低比抵抗体は深さ20 km下に存在し、地震波反射面がその低比抵抗の直上部20 kmより浅い処に分布して明瞭に分布が棲み分けしている様子を捉えることができた。

- ・吾妻山直下に下部地殻から上部地殻浅部まで鉛直に連続的な低比抵抗体を初めて確認できた。その低比抵抗の東縁の20 km付近に深部低周波地震が見える。この結果は、吾妻山で観測したMTデータを東北地方の地殻構造解析データに統合した新しい成果である。

- ・ERI09との共同成果として、沼沢下にも同様の下部地殻低比抵抗体が存在しており、それらが会津盆地や吾妻山に向かって東側に延長していることを明らかにした。両者が繋がっている直接的証拠はないが、その可能性は高いと解釈している。

下部地殻の遷移流動挙動

地殻岩石の遷移クリープは、大規模な大陸地震後の余効変形などの時間依存性の地質学的プロセスを説明するのに重要である。これまで、地殻を構成する主要鉱物の石英と長石の定常クリープ流動則はよく知られているが、遷移クリープとその背後にある物理的メカニズムは未だ明らかではない。本研究は、ガス圧試験機を使ったWet条件下でのグラニュライトの変形実験データを使い、マルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法を使用した非線形バーガーズモデルで、遷移クリープの流動則パラメータの導出を行った (Matusi et al., 2023 : 図5)。

モデリングの結果、グラニュライトの遷移挙動は温度によって異なり、中温 (1050 ~ 1100°C) および高温 (1125 ~ 1150°C) での活性化エネルギーは 280 ± 30 および 220 ± 20 kJ/mol、応力指数は 1.0 ± 0.2 および 0.9 ± 0.1 であった。得られた遷移クリープの応力指数と活性化エネルギーは、定常状態のクリープパラメータよりも小さく、以前に得られたかんらん石の過渡クリープの結果 (Masuti & Barbot, 2021, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01543-9>) とも調和的である。この結果を地殻深部で起こる余効変動に外挿すると、地震後には、これまで考えられていたよりも長く遷移クリープが続く可能性があることが示唆される。

余効変動を高精度で再現するGNSS時系列モデルの提唱

2011年東北地方太平洋沖地震後の地震後の全地球航法衛星システム (GNSS) 時系列は、多くの場合、1つ以上の対数減衰関数と指数減衰関数によって経験的に説明されてきた (Tobita, Fujiwara,)。ただし、これらの減衰関数を含む関数モデルは、さまざまな変形メカニズムを区分し、その物理過程を明らかにすることは困難である。ここでは、過去10年間の力学的な余効変動モデルで利用されていたべき乗流動速や速度強化摩擦を組み込んだ新しい関数モデルを提案した (Dhar and Muto, 2023 ; 図6)。この関数モデルにより現在も顕著な地震後の隆起が続いている沿岸地域を含む内陸のGNSSステーションの10年にわたる時系列を正確に予測することに成功した (図6右)。さらに、関数モデルは余効変動の主要メカニズムである粘弾性緩和と余効滑りを区分することができ、得られた粘弾性緩和と余効滑りの区分はこれまでの力学的なモデルとも調和的である。以上から、この物理ベースの関数モデルは、長期GNSS時系列をプレート界面と周囲の粘弾性マントルにおける2つの支配的なメカニズムに分割することで、長期のGNSS時系列を予測するプロセスを容易にする効果的なツールである。この手法は、GNSS連続記録が得られる他地域にも適用可能で、巨大地震後の地盤変動解析や津波防災に大きく貢献することが可能である。

・計画期間中 (令和元年度~5年度) の成果の概要

双葉断層北方の仙台平野南部に存在する伏在断層について浅部構造・重力探査や地震観測を行い、その形状・断層長と震度予測を行った。R1年度には、既存測定点の重力値と整合させるため、産業技術総合研究所の検定路線を用いて、重力計スケールファクターの調整を行った。R2~R4年度においては、

既存の反射法地震探査測線よりも南側の伏在活断層の連続性を評価するために、合計10本の東西方向の測線を設定し、相対重力測定を行った。測定点間隔は標準250 mとした。これらの結果を詳細に検討した結果、伏在活断層による重力変化と反射法地震探査で確認されている現在は活動していない断層による重力変化の2つを追跡することが可能であることが分かった。これらの連続性は山元町高瀬付近よりも南方へは連続していないことから、仙台平野南部の伏在活断層は、名取市から山元町までの約25.5 km連続した構造を持つことが分かった。また、仙台湾を含めた周辺の地質分布・地質構造から、仙台平野南部の伏在活断層は、仙台湾内の正断層（巨理沖断層）と角田盆地を形成する割山隆起帯西側の正断層構造に規制されて、活動している可能性が高いと考えられる。

東北沖地震による誘発地震活動の発生場所が、東北沖地震以前の応力場の空間不均質に強く規定されていたことを明らかにした。

東北沖地震後に東北日本各地で発生した群発地震や2019年山形沖のM6.7地震、能登半島の群発地震と2023年M6.5の地震、2019年鹿児島湾M5.3の地震、函館周辺の浅部低周波地震が、深部起源流体の浅部への移動の過程で発生したことを示した。

地震波形解析により推定可能な震源時間関数や破壊伝播方向・減衰構造に基づき、間隙水圧・断層強度の時間変化の情報抽出が可能であることを示した。

地震波のdepth phaseにより、東北日本太平洋沖上盤プレート内地震の深さと応力状態を明らかにした。

常時微動表面波トモグラフィーの高度化に成功した。多成分相互相関関数を利用したマルチモード表面波分散曲線のロバストな推定手法を考案し、複雑な表面波伝播を示す海底観測や短期観測データに対しても汎用性のある解析手法を確立した。

当初計画していた東北地方全域の地殻比抵抗構造を推定する為のデータコンパイルは予定通り推進し、600点を超える観測点のコンパイルを達成することができた。

コンパイルしたデータから解明された主な成果は

1) 東北脊梁周辺の地震活動域直下の下部地殻と火山直下の下部地殻のマグマ・流体貯留槽と思われるものはかなりの部分が共通化していることが地震波速度構造だけでなく比抵抗構造からも精緻化されてきた。それらは中部地殻から上部地殻の地震震源域や火山に分岐して上昇してきているが、低比抵抗と高比抵抗の境界付近に通常地震だけでなく、地震波反射面、低周波地震も発生していることが確認できた。

2) 背弧側や前弧側については1)のような低比抵抗構造と地震活動域や活断層との対応関係は捉えられておらず、むしろ高比抵抗領域で地震活動や活断層との関連が深くなっている。そのような例として背弧側は庄内平野東縁断層帯や双葉断層帯を上げることができる。但しそれらの地域では中央脊梁に比べると観測点密度が疎である為今後の課題として残る。

東北沖地震の余効変動モデリングを通じて、東北日本弧のレオロジー不均質を明らかにした。具体的には、非線形レオロジーとRSF摩擦則を考慮することで、沿岸部の隆起が深部余効すべりであること、コールドノーズの形状が島弧に沿って変化があることを明らかにし、これらの非線形レオロジー特性を考慮した地震後10年間のGNSS時系列を高精度で再現する関数モデルを提唱した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

関連の深い建議の項目は

1 地震・火山現象の解明のための研究 (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化 イ. 内陸地震であった。

仙台平野南部の伏在活断層についてその形状・断層長の推定とそれに基づく震度予測を行った。近年、平野下に伏在する活断層（活構造）が反射法地震探査等で明らかになってきている。平野部には一般的に人口が集中することから、活構造の評価は防災・減災上も重要である。伏在活断層（活構造）による地震災害の軽減評価には、まず活断層（活構造）の長さや周辺の活断層との関係を明らかにし、その活断層（活構造）の長さから地震規模の推定や地震動予測につなげる必要がある。反射法地震探査と合わせて、重力探査によって空間方向への活断層（活構造）の連続性を明らかにすることは、非常に有効な手段である。また、東北日本弧では、中新世の正断層構造（インバージョンテクトニクス）に、現在の活構造が支配されているケースも多いため、長大な活断層と正断層構造との関係を精査す

ることは、活断層のセグメンテーションに関する知見を得られる可能性もある。
観測データ解析と数値シミュレーション結果に基づき、断層滑りのダイナミクスの解明に貢献した。
大きな被害をもたらした2024年能登半島地震発生に至るまでの群発地震の詳細を明らかにした研究成果を公表した。

開発した常時微動表面波トモグラフィー手法は地震発生層を含む地殻構造の推定に有用であり、地震発生場及び構造不均質や流体分布と地震発生機構の関係解明につながる。

地殻比抵抗構造の展望として、2)にあげられる背弧域と前弧域の観測の強化の他、及び比抵抗構造と地震学的構造を入力データとして地下の岩相、流体分布、温度構造を推定する手法の開発と推定が重要である。

内陸地震発生を規定する巨大地震後の島弧の不均質な変形場を高精度で把握することに成功した。また地殻不均質性も考慮した岩石物性に根ざす余効変動モデルの構築により、巨大地震後の地殻変動の高精度（地盤高さ）予測だけでなく、余効変動と地震活動との関係も定量的な評価が可能になる。

以上の研究成果を引き続き発展させるとともに、研究成果を活用した災害軽減に向けた取り組みを進める必要がある。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Diba, D., M. Uyeshima, M. Ichiki, S. Sakanaka, M. Tamura, Y. Yuan, M. Gresse, Y. Yamaya, Y. Usui, 2023, On a large magmatic fluid reservoir oblique to the volcanic front in the southern part of NE Japan revealed by the magnetotelluric survey, *Earth, Planets Sp.*, 75, 146, 10.1186/s40623-023-01899-0, 査読有, 謝辞有

Dhar, S., and J. Muto, 2023, Function model based on nonlinear transient rheology of rocks: An analysis of decadal GNSS time series after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL103259, 10.1029/2023GL103259, 査読有, 謝辞有

岡田知己・岡田真介, 2024, 仙台平野南部の伏在活断層の震度予測の試み, *東北地域災害科学研究*, 印刷中, 査読無, 謝辞有

Okada, T., M.K. Savage, S. Sakai, K. Yoshida, N. Uchida, R. Takagi, S. Kimura, S. Hirahara, A. Tagami, R. Fujimura, T. Matsuzawa, E. Kurashimo, Y. Hiramatsu, 2024, Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm and their relation with earthquake swarm activity in the Noto Peninsula, central Japan, *Earth, Planets Sp.*, 76, 24, 10.1186/s40623-024-01974-0, 査読有, 謝辞有

Masuti, S., J. Muto, E. Rybacki, 2023, Transient creep of quartz and granulite at high temperature under wet conditions, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128, e2023JB027762, 10.1029/2023JB027762, 査読有, 謝辞有

Nishida, K., R. Takagi, A. Takeo, 2024, Ambient noise multimode surface wave tomography, *Progress in Earth and Planetary Science*, in press, 査読有, 謝辞有

Yoshida, K., M. Uno, T. Matsuzawa, Y. Yukutake, Y. Mukuhira, H. Sato, T. Yoshida, 2023, Upward Earthquake Swarm Migration in the Northeastern Noto Peninsula, Japan, Initiated From a Deep Ring-Shaped Cluster: Possibility of Fluid Leakage From a Hidden Magma System, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128, 10.1029/2022jb026047, 査読有, 謝辞有

Yoshida, K., N. Uchida, Y. Matsumoto, M. Orimo, T. Okada, S. Hirahara, S. Kimura, R.

Hino, 2023, Updip Fluid Flow in the Crust of the Northeastern Noto Peninsula, Japan, Triggered the 2023 Mw6.2 Suzu Earthquake During Swarm Activity, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Diba, D., M. Uyeshima, M. Ichiki, S. Sakanaka, M. Tamura, Y. Yuan, M. Gresse, Y. Yamaya, Y. Usui, 2023, 3-D resistivity structure of the southern part of NE Japan, 日本地球惑星科学連合2023年大会

久保 久彦・吉田 圭佑, 2023, 非線形次元圧縮と階層型クラスタリングを用いた日本の地殻内地震の震源時間関数のグルーピング, 日本地球惑星科学連合2023年大会

増田章吾・小川康雄・市来雅啓, 2023a, 東北地方中央部における3次元地殻流体分布, 日本地球惑星科学

連合2023年大会

Masuda, S., Ogawa, Y. and Ichiki, M., 2023b, Imaging of NE Japan volcanic arc by wide-band magnetotellurics, IUGG 2023

増田章吾・小川康雄・市來雅啓, 2023c, 東北日本弧における地殻流体分布と地殻変動, 日本火山学会 2023 年度秋季大会

増田章吾・小川康雄・市來雅啓, 2023d, 東北日本弧における広域地殻流体分布, CA研究会

松本 圭晶・吉田 圭佑・内田 直希・豊国 源知・松澤 暢, 2023a, 福島-茨城沖で多発している上盤プレート内正断層型地震の断層構造, 日本地球惑星科学連合2023年大会

松本 圭晶・吉田 圭佑・内田 直希・久保田 達矢・松澤 暢, 2023b, 2016年に福島-茨城沖で発生したMw7.0の正断層型地震周辺における高精度震源決定: S-netデータを用いた解析, 日本地震学会2023年度秋季大会

棕平 祐輔・宇野 正起・吉田 圭佑, 2023, Slab-derived fluid storage in the crust elucidated by earthquake swarm, 日本地球惑星科学連合2023年大会

岡田真介・岡田知己・越谷 信・住田達哉・新沼徹磨・田中美咲・平出裕博, 2023, 地下構造探査から明らかになった仙台平野南部の伏在活断層, 令和5年度東北地域災害科学研究集会

岡田 知己・岡田 真介, 2023, 海岸平野伏在断層の強震動予測の試み - 仙台平野南部伏在断層 (仮称) を例として, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SCG60-10

Tomomi Okada, Martha K Savage, Shin'ichi Sakai, Keisuke Yoshida, Naoki Uchida, Ryota Takagi, Shuutoku Kimura, Satoshi Hirahara, Ayaka Tagami, Ryotaro Fujimura, Toru Matsuzawa, Eiji Kurashimo and Yoshihiro Hiramatsu, 2023a, Stress and structural controls on S-wave polarization anisotropy in the focal area of the Noto Peninsula earthquake swarm in Japan, Geoscience Society of New Zealand Annual Conference

Tomomi Okada, Martha K Savage, Shin'ichi Sakai, Keisuke Yoshida, Naoki Uchida, Ryota Takagi, Shuutoku Kimura, Satoshi Hirahara, Ayaka Tagami, Ryotaro Fujimura, Toru Matsuzawa, Eiji Kurashimo and Yoshihiro Hiramatsu, 2023b, Seismic imaging of the Noto Peninsula earthquake swarm in Japan using temporal seismic stations, AGU Fall Meeting 2023, S13D-0385

織茂 雅希・吉田 圭佑・松澤 暢・平 貴昭・江本 賢太郎・長谷川 昭, 2023a, 2008年岩手・宮城内陸地震震源域とその周辺地域における通常地震と低周波地震の震源スペクトルと地震波放射エネルギーの比較, 日本地球惑星科学連合2023年大会

織茂 雅希・吉田 圭佑・松澤 暢・長谷川 昭, 2023b, 地震波放射エネルギーに基づいた 2016 年熊本地震の前駆的地震活動の評価: 間隙水圧と载荷速度変化の影響, 日本地震学会2023年度秋季大会

高木涼太・岡田知己, 2023, 地震計ノードを用いた 常時微動観測に基づく 能登半島下のS波速度構造推定, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震波形解剖学 3.0」 - 高密度観測・高周波数地震動で視る地殻・マントル不均質構造 -

吉田 圭佑・松本 圭晶・織茂 雅希, 2023a, Double-difference法による大量地震の効率的な震源再決定と高精度震源分布のリアルタイム・モニタリング, 日本地球惑星科学連合2023年大会

吉田 圭佑・江本 賢太郎・武村 俊介・松澤 暢, 2023b, Near-field Waveform Modeling and Source Characterization of Small Earthquakes in Northern Ibaraki Prefecture, 日本地球惑星科学連合2023年大会

吉田 圭佑, 2023a, Moment-rate functions of repeating earthquakes of varying magnitude and surrounding earthquake distribution, 日本地球惑星科学連合2023年大会

吉田 圭佑・福島 洋, 2023, Possibility of shallow repeating aseismic slip associated with the 2011 Mw5.8 and 2016 Mw5.9 crustal earthquakes in northern Ibaraki Prefecture, Japan, 日本地球惑星科学連合2023年大会

吉田 圭佑, 2023b, 2020年末ごろから継続する能登半島北東部の群発地震活動中に発生した 2023年 MJMA 6.5 珠洲市の地震, 日本地震学会2023年度秋季大会

若尾 尚幸・本山 葵・市來 雅啓・小川 康雄・上嶋 誠・浅森 浩一・内田 利弘・長谷 英彰・小山 崇夫・坂中 伸也, 山谷 祐介, 相澤 広記, 海田 俊輝, 2023, 東北地方南部の広域地殻比抵抗構造探査 (続報), 日本地球惑星科学連合2023年大会, SEM14-P16

若尾尚幸・本山葵・市來雅啓・小川康雄・上嶋誠・浅森浩一・内田利弘・長谷英彰・小山崇夫・坂中伸也・山谷祐介・相澤広記・海田俊輝, 2023, 東北地方南部の広帯域MTによる広域地殻比抵抗構造推定について, CA研究会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

東北地方をはじめとした沈み込み帯の内陸地震の総合的研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

岡田知己（東北大学大学院理学研究科）、松澤暢（東北大学大学院理学研究科）、高木涼太（東北大学大学院理学研究科）、吉田圭佑（東北大学大学院理学研究科）、内田直希（東北大学大学院理学研究科）、市來雅啓（東北大学大学院理学研究科）、三浦哲（東北大学大学院理学研究科）、武藤潤（東北大学大学院理学研究科）、矢部康男（東北大学大学院理学研究科）、山本希（東北大学大学院理学研究科）、太田雄策（東北大学大学院理学研究科）、日野亮太（東北大学大学院理学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

芝崎文一郎（建築研究所）、岡田真介（岩手大学）、福島洋（東北大学災害科学国際研究所）、勝俣啓（北海道大学）、高橋浩晃（北海道大学）、前田拓人（弘前大学）、山中佳子（名古屋大学）、片尾浩（京都大学防災研究所）、松島健（九州大学）、八木原寛（鹿児島大学）、坂中伸也（秋田大学）、上嶋誠（東京大学地震研究所）、大園真子（東京大学地震研究所）、小川康雄（東京工業大学）、山谷祐介（産業技術総合研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp

URL：www.aob.gp.tohoku.ac.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：岡田知己

所属：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

伏在断層 南端部の連続性

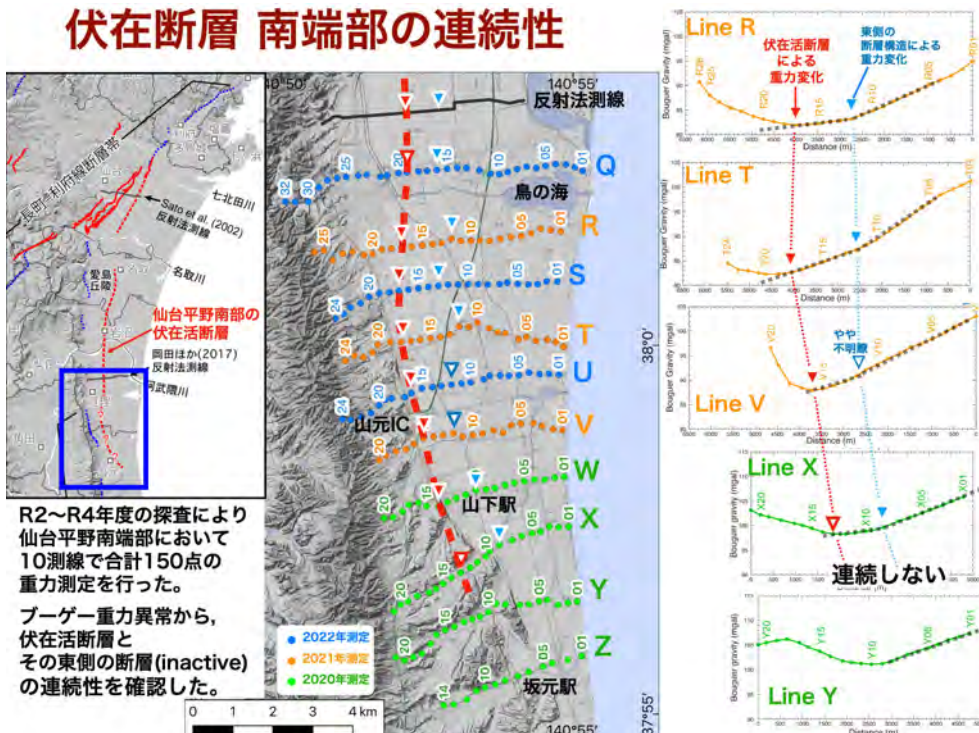


図1. R2~R5年度に行った重力探査（既存の反射法地震探査測線から南部にかけての地域）仙台平野南部の
伏在活断層の連続性
岡田真介・他（2023）

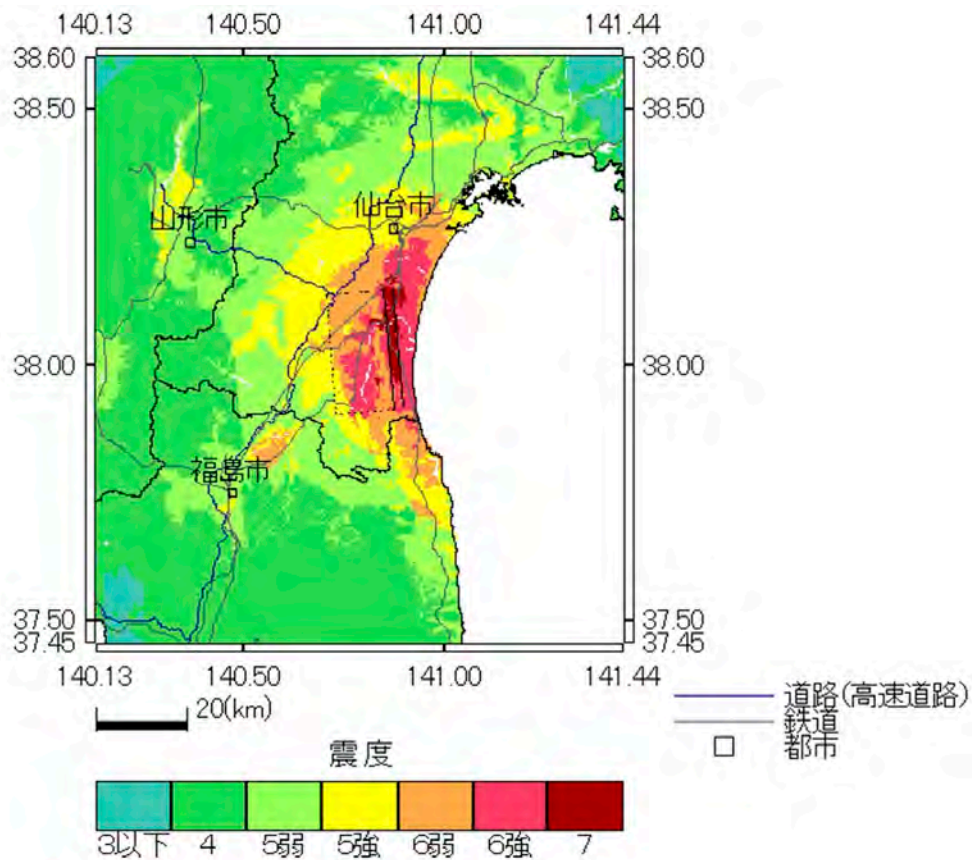


図2. 仙台平野南部の伏在断層による震度分布の予測.
岡田知己・岡田真介（2024）

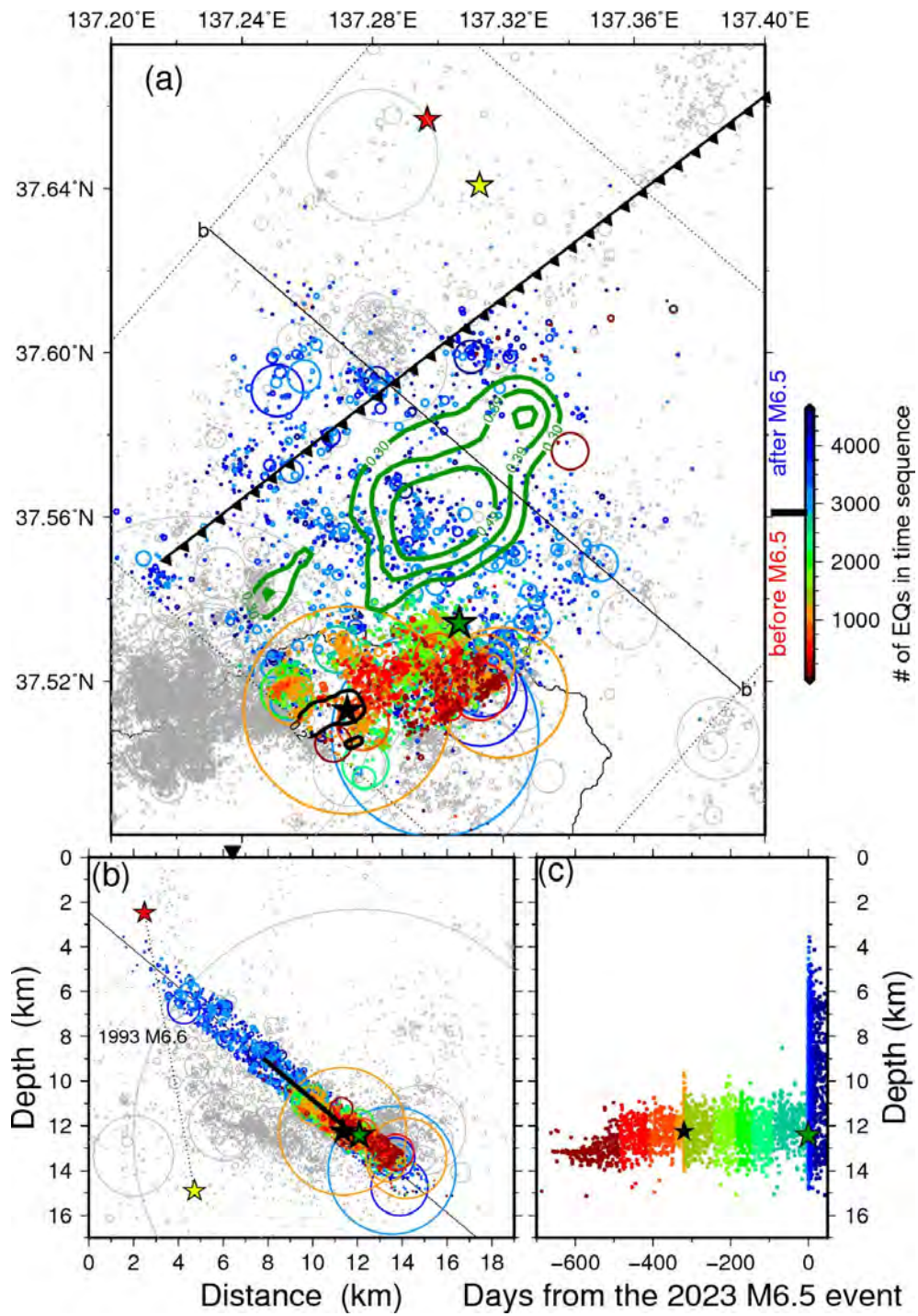


図3. 能登半島の地震活動: 珠洲沖活断層セグメント・1993年 M6.6地震と 2023年 M6.5地震の関係
Yoshida et al. (2023b)

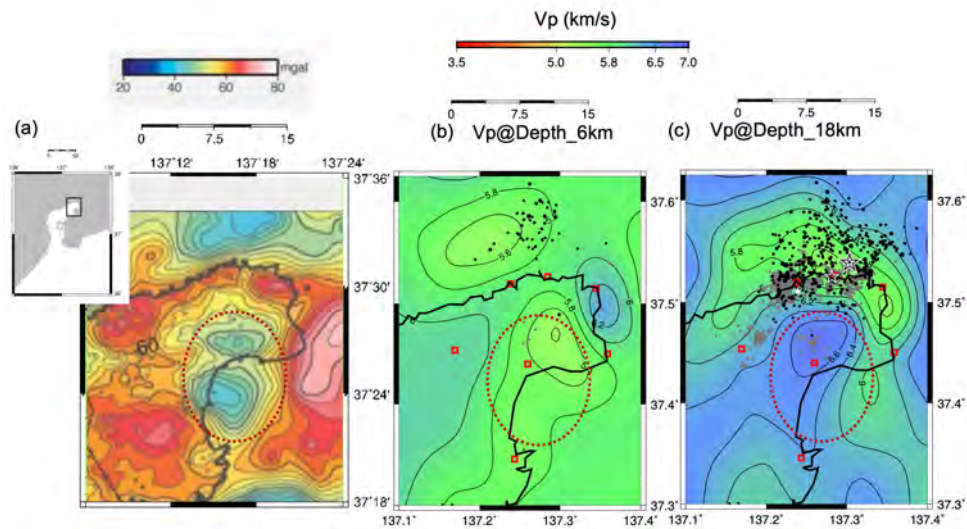


図4. 能登半島北東部の地殻構造 (Okada et al., 2024)

a) 澤田・他 (2012)によるブーゲー重力異常。赤点線の楕円は低重力異常域を示す。(b) 深さ6kmのVp、灰色は2018年から2023年のM6.5地震前までの地震。白星は2022年M5.4の地震。黒は2023年のM6.5地震以降の地震。黒星は2023年M6.5の地震。赤四角は使用した観測点。(c) 深さ18kmのVp。

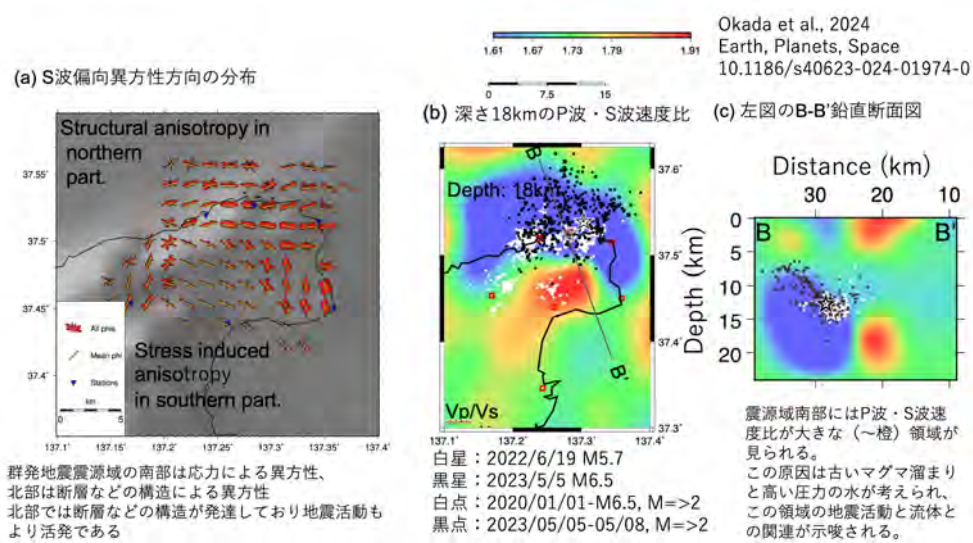
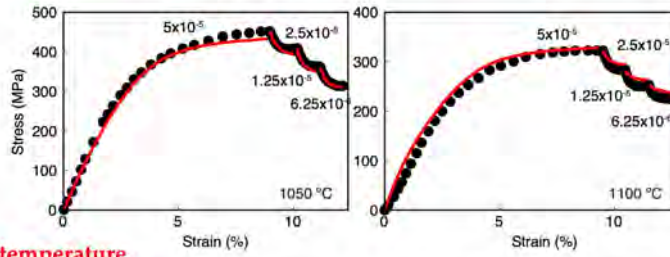


図5. (a) 能登半島群発地震震源域におけるS波偏向異方性方向。(b)深さ18kmにおけるVp/Vs構造 (c) B-B'断面図

Okada et al. (2024)

実験値の応力-歪曲線の再現

Mid-temperature



High-temperature

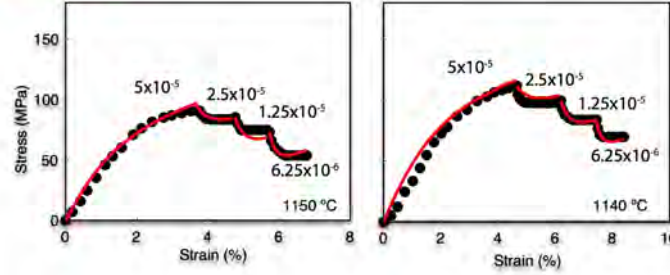


図6. グラニュライドの遷移挙動のモデル化
Masuti et al. (2023)

関数モデル

提案した関数モデル

$$D(t) = C_1 \phi_{VR}(t) + C_2 \phi_{AS}(t) + C_3 + Vt$$

粘弾性緩和による変位

$$\phi_{VR} = \left[2 - \left(1 + \frac{t}{\tau_1} \right)^{-0.5} - \left(1 + \frac{t}{\tau_2} \right)^{-0.5} \right]$$

余効すべりによる変位

$$\phi_{AS} = \left[1 - 2\lambda \coth^{-1} \left(e^{\frac{0.0533}{\lambda} t} \coth \frac{1}{2\lambda} \right) \right]$$

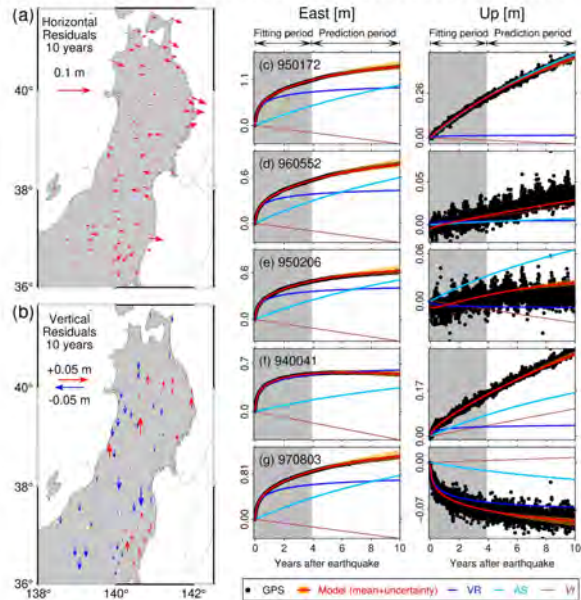


図7. 提案した関数モデルによる2011年東北地方太平洋地震後の変位 (AS: afterslip, VS: viscous relaxation)

Dhar and Muto (2023)

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

集中地震観測による火山体構造・火山現象発生場の解明

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

近年、高精度の多項目火山観測の拡充により、噴火に先行する中長期的なマグマだまりの変動や、噴火直前の火山体浅部における諸火山現象が検出・解明されつつある。このような一連の火山現象を支配するやや深部から浅部までのマグマ供給系・熱水系を含む火山体構造を明らかにすることは、現象の理解・噴火活動の推移予測（噴火事象系統樹の分岐過程）の基礎情報となるとともに、噴火事象系統樹・噴火活動推移モデルにおける時間発展の把握・理解にとって不可欠である。

これまでの噴火予知計画や地震火山観測研究計画においては、人工地震を用いた火山体構造探査が全国の活火山で継続的に行われ、その結果、火山浅部の詳細な地震波速度構造が明らかになり、火山現象の理解の進展に貢献してきた。しかしながら、浅部に低速度構造をもつ火山体構造故に、マグマだまりが存在するやや深部（～地下10 km弱）の構造の理解は十分とは言い難い。一方で、近年の地震波干渉法等の地震波伝播理論・解析手法の発展により、やや深部の地震波速度構造、さらには構造異方性を推定できる可能性が示されつつある。

そこで本研究課題では、マグマだまり及び浅部の両者において火山活動に伴う変動が見られている蔵王山及び箱根山をテストフィールドとして、それぞれ約2年間の集中地震観測を全国連携で実施し、やや深部から浅部にかけての地震波速度構造を推定することで、火山性流体の分布・供給路を明らかにし、噴火活動推移のモデル化に資する基礎情報を得ることを目指す。具体的には、地震波干渉法に

よる表面波解析により速度構造及び異方性の推定を行うとともに、既存データも併用して自然地震トモグラフィの分解能向上を図り、火山体やや深部構造の推定方法の確立を目指す。また、想定火口域近傍に観光客等が訪れる両火山において観測研究を進めることにより、防災対策に必要なとなる中長期的な噴火ポテンシャルや切迫度の評価のための科学的情報を取得し、火山災害軽減に資することを旨とする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

やや深部（～約10 km）から浅部までの火山体構造推定のために、蔵王山及び箱根山の周辺約30 km四方に臨時地震観測点20～30点を展開する。それぞれの火山において約2年間の連続観測を実施し、地震波干渉法解析・自然地震トモグラフィに必要なデータを取得し、既設地震観測点のデータも用いて火山体構造推定を行う。箱根山における観測は、神奈川県温泉地学研究所の支援を受けつつ実施する。

両火山においては、地震学的・電磁気学的な広域構造等についての既往研究結果があるため、これらの結果と本研究課題で得られた構造との統合的な解釈を進め、火山性流体の分布を明らかにする。また、各手法によって推定した構造の比較を行い、火山体構造推定の高度化に向けた検討を進める。各年度では、以下のように研究を実施する。

2019年度：既存データ・既往研究結果をもとにした予備解析を進めるとともに、観測・解析の事前シミュレーションを行い、観測点配置等の検討を行う。

2020年度：蔵王山周辺に観測点を展開し、地震観測を開始する。得られたデータをもとに構造解析に着手し、観測データの質のチェック・予備解析を行う。

2021年度：蔵王山における観測を積雪期前まで継続し、解析データの蓄積を行う。年度後半に箱根山周辺に観測点を展開し、地震観測を開始する。

2022年度：蔵王山で得られたデータを用いて構造解析を進めるとともに、得られた構造を用いた震源再決定等を行い、火山現象とその発生場の関連を検討する。また、観測期間中の構造時間変化の抽出を行う。また、箱根山における保守作業において回収したデータを用いた構造解析に着手する。

2023年度：箱根山における観測を継続するとともに、箱根山の構造解析を進める。両火山で得られた構造をもとに、火山性流体の分布形態・供給路の推定を行い、火山活動評価に資する情報の抽出を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

本課題では、蔵王山（令和3年から）及び箱根山（令和3年から令和5年）において臨時地震観測網を展開し、構造解析に必要なデータの蓄積を進め、火山体構造の推定を進めてきた。令和5年度には、前年度に引き続き、両火山で取得したデータに地震波干渉法を適用し、表面波解析を進めるとともに、蔵王山については山頂域周辺の既設観測点のデータも含めた解析を進めた。蔵王山については、火山体周辺部で推定された広域の基盤的構造の上に中央部では数百mの薄い山体構造が重なる特徴的な構造とともに、想定火口域（馬の背カルデラ）を中心として深部から浅部につながる低速度領域が存在することが明らかになった。この低速度領域は、蔵王山の火山活動活発化時に観測された地殻変動や長周期地震の発生源を含むものであり、蔵王山直下のマグマ・熱水供給系を反映していると考えられる。箱根山については、一部期間のデータを用いて前年度に予察的な解析を行ったが、全期間のデータを用いた解析結果においてもカルデラ内の浅部低速度構造や丹那・平山断層を境とする東西の構造差異が確認できた。また、カルデラ南東側にのびる低速度領域が認められた。これらの構造は、震源分布などを基に先行研究（例えば、Yukutake et al., 2011）で指摘されている中央火口丘直下の地震発生領域内（深さ6 km以浅）の破碎帯に起因するものと考えられる。このような浅部の構造は、定常観測網等を用いた自然地震トモグラフィでは十分な解像が困難であるため、火山活動を支配する流体供給系の分布形態や供給路の解明に本課題で実施したような集中観測や解析が有用であることを示す。また、蔵王山・箱根山に加えて、御嶽山や阿蘇山でもやや深部から浅部にかけての構造推定を進め、火山性流体の分布・供給路についての知見を蓄積した。御嶽山では、山頂域の機動観測点及び周辺域の定常地震観測網のデータを使用し、山頂から深さ5 km付近までの地震波速度構造と反射面を推定し、マグマだまり上面の可能性のある反射面、流体移動に対してバリアの役目を果たす低浸透率層の境界面、その層を貫通する準鉛直の震源分布（流体供給路と推定）などがイメージングされ、流体・熱輸

送に関する描像が得られた。阿蘇山においては、熊本地震余震観測の臨時点を含む稠密観測網のデータを使用し、自然地震トモグラフィを行うことで深さ約6 kmのマグマだまりから地表につながる低速領域をイメージングした。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本課題では、蔵王山と箱根山における臨時地震観測と地震波干渉法を中心とした解析を行い、火山活動推移を支配するやや深部から浅部の火山体構造の推定を進めた。また、火山噴火予知計画で実施された人工地震火山体構造探査のデータを活用して複数の火山における地震波散乱係数を系統的に推定し、地震波モード変換と多重散乱についてモデリングを行うことで地震波干渉法の理論的背景となる雑微動の等方性やエネルギー等分配についての知見を蓄積した。また、それらの知見を背景として、雑微動や自然地震のコーダ波を用いた自己相関関数（疑似反射断面）を求め、磐梯山や御嶽山の山体内反射構造の推定を行うなど、従来の人工地震構造探査や自然地震トモグラフィとは異なる観点から火山体構造推定を行う手法の検証と適用を行うことができた。

また、得られた火山体構造を用いた震源再決定なども行い、各種の火山現象発生領域と火山体構造の関係の理解が進んだ。さらに、研究期間中に課題参加者による研究集会を実施し、各自が研究対象とする火山における火山体構造と火山現象の関係などについて情報交換と意見交換を行い、研究の方向性などについて議論を行った。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

火山体構造の推定と火山現象の関係の理解は、1（5）ウ「火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明」の目標に直接的に関係するものであるが、従来と異なる地震波干渉法解析や自己相関関数解析による構造推定とその基礎となる知見の蓄積を進めたことは建議項目に一定の貢献をするものであると考えられる。課題参加者の多くは観測に基づく火山活動推移のモデル化も進めており、火山現象発生場と火山活動推移の関係を整理できたこともできた。また、地震波干渉法解析等による異方性構造も含めた火山体構造推定のような火山現象理解の深化と火山活動推移のモデル構築や予測試行に結び付く今後の研究方向性も検討することができた。本課題で臨時地震観測を実施した火山はいずれも観光地でもあり、小規模の火山活動でも火山災害に結び付くリスクのある火山でもある。そのような両火山において、火山活動を支配する場の情報を蓄積していくことは、災害軽減のために必要となる火山活動の正確な把握と評価にも資すると思われる。今後も本課題で得られた知見をさらに継承・発展させ、火山現象発生場の理解を通じた火山活動推移の予測試行やその検証へつなげていくことが重要であると考えられる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Maeda, Y. and T. Watanabe, 2023, Seismic structure and its implication on the hydrothermal system beneath Mt. Ontake, central Japan, Earth Planets Space, 75, 115, doi:

10.1186/s40623-023-01870-z, 査読有, 謝辞有

山本 希, 2023, 多項目観測による火山活動推移の把握と現象理解, 防災科学技術研究所研究資料, 487, 75, 査読無, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

山本希・秋山翔希・青山裕・大湊隆雄・寺田暁彦・前田裕太・大倉敬宏・松島健・中道治久・本多亮, 2023, 箱根山における臨時地震観測と地震波干渉法を用いた表面波解析, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SVC31-P07

池谷拓馬・山本希, 2023, 蔵王山における深部低周波地震のダブルカップル・非ダブルカップル成分の継続時間, 日本火山学会2023年度秋季大会, P47

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：地震：地震：短周期地震観測

概要：蔵王山周辺における臨時地震観測

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：宮城県蔵王町蔵王山 38.1199 140.4525
調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定
公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：地震：地震：短周期地震観測
概要：箱根山周辺における臨時地震観測
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：神奈川県箱根町箱根山 35.8617 138.9785
調査・観測期間：昨年度より継続-2023/6/
公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

(11) 次期計画における課題名：

同様のアプローチの研究課題として「地震及び測地観測によるマグマ供給系・熱水系構造の推定（代表機関：東北大学）」が挙げられる。

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

山本 希（東北大学大学院理学研究科）,岡田知己（東北大学大学院理学研究科）,高木涼太（東北大学大学院理学研究科）,西村太志（東北大学大学院理学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

青山裕（北海道大学大学院理学研究院）,大湊隆雄（東京大学地震研究所）,寺田暁彦（東京工業大学理学院）,前田裕太（名古屋大学大学院環境学研究科）,大倉敬宏（京都大学大学院理学研究科）,松島健（九州大学大学院理学研究院）,中道治久（京都大学防災研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター
電話：022-225-1950
e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp
URL：www.aob.gp.tohoku.ac.jp

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：山本 希
所属：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

繰り返し地震再来特性の理解に基づく地殻活動モニタリング

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

イ. 地震断層滑りのモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

イ. 内陸地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

イ. 首都直下地震

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

(3) 研究基盤の開発・整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

繰り返し地震を用いて断層面の固着状態の時間・空間的变化をモニタリングする手法を高精度化し、地殻活動の理解を進め、地震発生予測の高度化に資する。そのため、プレート境界および内陸地域で発生する繰り返し地震のカタログを整備する。さらに、繰り返し地震の再来特性を理解し、大地震の発生モデルの構築に寄与することで、将来発生する大地震の地震像およびその変動範囲の推定に役立てることを目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1. 繰り返し地震カタログの更新

前計画で作成した日本の小～中規模の繰り返し地震カタログをアップデートし繰り返し地震活動のモニタリングを行う(2019-2023)。地震の震源再決定、発震機構解の推定および地震波速度構造の時間変化の推定を行い、同一場所での地震の再来を検証する(2020-2023)。また、日本のHi-net以前の大学観測データやS-netやDONET等の新規データの活用も検討し、より長期間および小規模の繰り返し地震の活動を把握する(2020-2023)。また、世界の繰り返し地震活動についても調べ、テクトニクスの違いによる繰り返し地震の特徴の共通点・相違点についての知見を新たに得る(2020-2022)。

2. 断層面固着状態の推定

沈み込むプレート境界および内陸活断層における固着状態の時間・空間的变化をモニタリングする手法を高精度化する。特に、すべりレートの推定に用いるスケーリング則の検討を行う(2019-2023)。震源過程解析や地震波形のシミュレーション、繰り返し地震以外の地震等を用い、すべり推定手法の検討を行う(2019-2023)。さらに、繰り返し地震と通常地震やスロー地震の関係を調査する(2019-2020)。

また、南アフリカ大深度金鉱山において見つかっている、破壊サイズ数十mmという超微小繰り返し地震についても解析を行う(2019-2023)。同観測では14ヶ月の期間に最大50回もの繰り返しを確認されており、活動パターンや震源特性の時間変化を短い時間で検出できると期待される。

3. 地震再来特性の解明

繰り返し地震に見られる再来間隔・規模の揺らぎの特徴や原因を、地震の震源過程解析、統計解析および数値シミュレーションにより明らかにする(2019-2023)。また、中小の繰り返し地震の特性を解明することが大地震の地震像の推定に役立つかどうか調べるために、規模の異なる繰り返し地震の性質を比較検討する(2022-2023)。

4. 重点地域における地震観測

島嶼部地震観測空白域での地震カタログの構築および沿岸・内陸地域において小規模繰り返し地震群発生の特徴を詳細に調べるため、小笠原諸島伊豆鳥島・房総半島・釜石地域など重要な既存の臨時観測点を維持するとともに内陸の地震活動をターゲットとした調査観測も行う(2019-2023)。伊豆鳥島の観測では、この地域の繰り返し地震は、数年程度という比較的長い発生間隔を持つと期待されるため、今期の観測の継続・定期的な保守によりこの地域の繰り返し地震の有無が調査できる。釜石地域においては、計画期間中にM5程度の地震の発生が予測される。この地震の近傍に構築したオフライン観測の継続により、微小地震活動を通じM5程度繰り返し地震の1サイクルにおける準備過程を調べる。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

[繰り返し地震カタログの更新]

・日本全国の定常観測網で観測された地震波形データを蓄積し、日本列島周辺で発生した繰り返し地震活動の検出を行った。その結果、スラブ内地震の余震中にも繰り返し地震活動が確認された。そこで、スラブ内地震の影響を避けるよう繰り返し地震とその周辺で発生する地震活動を選択使用し、プレート間非地震性すべりの時空間変化の推定を試みた。その結果、2021年以降に宮城県沖・福島県沖で発生したいずれのスラブ内大地震発生後においてもプレート間非地震性すべりの加速が見られた。スラブ内大地震の発生によりプレート間の応力が増加してプレート間非地震性すべりが生じ、また、プレート間のすべりによる応力増加がスラブ内のダウンディップコンプレッション型地震の発生を促した可能性を示唆している。

・東北沖において、ケーブル式の海底地震観測網であるS-netの活用し、小さな地震まで繰り返し地震の解析に用いるため、深層学習モデル(PhaseNet)による地震の検出を行い、気象庁によるカタログの1.6-6倍程度の地震を同定することができた(Uchida et al. AGU, 2023)。

[断層面固着状態の推定]

・地震波形の相関データを用いて東北日本沖合で発生した2003年から2023年の地震の震源を再決定し、繰り返し地震の検出を行った。断層サイズ相当離れた距離で繰り返し地震が集中する繰り返し地震の集中域が多く存在することが明らかになった。それら繰り返し地震の震源時間関数を推定し、東

北沖地震後の規模変化の際には継続時間と振幅の双方が変化していたことを示した。

・2023年3月に熊野灘で浅部SSEが発生したことを海底のボアホール観測から明らかにした。海洋研究開発機構では、間隙圧変化から海底地殻変動による体積歪変化をナノスケールで抽出する手法を確立し、今回のSSEは発生から1日後に検出することが可能となった。

[地震再来特性の解明]

・茨城県北部地域で2011年と2016年に発生し、地殻変動データ等から繰り返し地震と考えられていたMw5.8地震が、実際には異なる領域を破壊した地震であったことを波形インバージョンから示した(吉田・福島, JpGU, 2023)。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

[繰り返し地震カタログの更新]

・計画期間全体を通して日本全国の定常観測網で観測された地震波形データを蓄積し、日本列島周辺及び世界で発生した繰り返し地震活動の検出を行った。得られた繰り返し地震のうち、長期的に活動が継続する地震群の多くは、沈み込むプレートの境界で発生している一方、地殻浅部で発生している地震群の多くは、バースト的な活動を示していた。また、日本の内陸域においても繰り返し地震の抽出を行い、繰り返し地震の可能性のある複数の地殻内地震群を発見した。

・波形相関を用いた類似波形探索は、ノイズに埋もれた微小なイベントの抽出を可能とし、地震活動解析において重要な役割を果たしているが、計算コストが大きく大規模なデータセットへの適用は簡単ではない。そこで、深層学習に基づくカタログ作成手法、及び近似近傍探索技術を応用した高速類似波形探索手法の検討を行った。類似波形探索手法においては、既存手法であるFAST(Yoon et al. 2015)のテストを行うとともに、深層Hashing技術を利用することで、波形の情報をよりコンパクトなバイナリコードに圧縮し、FAST法が抱えていたメモリ消費が大きいという問題を解決することができた。

[断層面固着状態の推定]

・作成した繰り返し地震カタログを用いて、日本列島周辺及び世界の沈み込み帯におけるすべりの空間分布・時間変化の特徴を調べた。その結果、プレート境界型巨大地震発生サイクルにおいてプレート間すべり速度が長期的に変化する傾向を明らかにできた。すべり速度は地震発生直後に急激に増加し、その後10年程度かけて徐々に減少する一方、地震発生から30年以上経過すると徐々に増加していく傾向が見られる。これらは余効すべりの発生及び応力レベルの上昇と関連していると示唆される。さらに、東北地方太平洋沖地震発生後のすべり状況変化について調査を進めたところ、宮城県北部では現在も余効すべりが継続している一方、その他の地域では地震発生後数年の間にほぼ収束したこと、2021年以降に発生した大地震発生に伴い小規模なプレート間非地震性すべりが発生したことを確認した。

・Brownian Passage Time (BPT) 分布更新過程から拡張した繰り返し地震群に対する時空間点過程モデルを用いて、1993年7月から2016年8月までの東日本太平洋プレート沈み込み帯におけるプレート境界上の準静的滑りの時空間的变化をスプライン関数により推定した。特に、2011年東北地方太平洋沖地震後の滑り速度の時空間変化から、2016年までに東北沖の滑り速度がほぼ2010年以前の水準に戻っていく様子や、2012年と2015年の二度にわたり三陸沖の同じ領域においてM6台の地震を伴う滑り加速が発生した様子が捉えられた。

・S-net観測データを用いて、東日本太平洋プレート境界地震の破壊伝播方向を網羅的に推定した。その結果updip方向に破壊が進展する機会が多いことを明らかにした。また、2021年3月に宮城沖で発生したMw7.0地震について、Mw5-6の準繰り返し地震から破壊が開始したことを示した。このことは、地震性滑りの階層性および規模の大きな地震の開始の仕方について重要な知見である。さらに、2015年に宮城沖で発生したMw6.8地震が、それまでMw6.0-6.3の地震を生じさせていた地震パッチと隣接する領域による連動破壊であったことを示した。

・トルコアナトリア断層での繰り返し地震分布を推定し、過去の大地震の破壊域の端に分布していること、繰り返し地震の積算すべりから一部では、プレートの相対運動速度に近い速度で非地震的に変位していることを明らかにした(図2、Uchida et al., 2019)。

[地震再来特性の解明]

・階層ベイズ型時空間ETAS モデルによる東北沖地域の常時地震活動度 (1926-1995: $M \geq 5$) のpatternは選定期間 (1926-2012: $M \geq 5$) でも不変で、推定期間外の大地震の震央(centroid epicenter) や「繰り返し地震」の震央との良好な対応を示した。また日本内陸部の常時地震活動度と内陸部地殻 (上盤側プレート) 内の「繰り返し地震」 (五十嵐2019 地震学会) で大きめの地震直後のもの (バースト型) を除いた非バースト型の震央分布と階層ベイズ時空間ETAS モデルによる日本内陸部の常時地震活動度 (1926 1995: $M \geq 4$) との良好な対応を見出した。

・これまでに開発した小～中規模の繰り返し地震活動に対する非定常更新過程モデルを拡張し、相対的な応力蓄積率の時空間変化を時間域の自然3次スプライン関数と空間域の薄板スプライン関数とのテンソル積表現により推定した上で、その将来推移を短期的に予測して繰り返し地震の将来発生確率を評価する手法を開発した。提案手法を東北地方太平洋沖に存在する小～中規模の繰り返し地震群の2014～2020年の発生データへと適用し、2020年中の四半期毎の繰り返し地震発生確率を評価した上で発生実績との比較検証を行った結果、ポアソン過程に比べて十分に高い予測性能が示された。

・大地震後の余震誘発により発生間隔が急激に変化する中小規模の繰り返し地震に対する非定常更新過程を提案した(野村・田中, 2021)。提案モデルでは、上に述べた非定常更新過程の相対的な蓄積率の推移を、定数と大地震後の余震誘発効果の和で表現しており、将来の蓄積率の推移を予測することで、大地震後の余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の将来予測が可能となる。提案手法を東北地方太平洋沖に存在する中規模の繰り返し地震群の2019年までの発生データへと適用し、2011年東北地方太平洋沖地震以降の余震発生頻度の時間推移を大森・宇津の法則に従って推定および予測した上で、将来の繰り返し地震の発生確率の評価を与えた

・相似地震の揺らぎの要因の一つである余効すべりの伝播現象について、伝播速度と摩擦特性との関係式を導出することに成功した。これにより、大規模な地震が起きてから非相似地震が発生するまでの時間差から摩擦特性を絞り込むことが期待される

[重点地域における地震観測]

2002年から継続している伊豆鳥島における地震観測 (2Hz 上下1成分) を継続した。2015年からは、新衛星携帯電話による3成分 (1Hz 上下動 + 2成分傾斜計) の地震観測システムを増設し、必要日時のデータをリモートで回収可能となっている。令和元年度は、新システムの連続地震波形データを現地回収するとともに、旧システムの2Hz地震計が故障したため交換作業を行った。山階島研職員に依頼して連続データが含まれているCFカードの回収を複数回行った。電源としているソーラーパネルの枠の腐食が激しく、近い将来本格的な補修が必要になっている。鳥島近海では、2023年10月に特異な津波を発生させたイベントが起きたが、トリガ形式の旧システムにおいて、この地震波形を捉えることができた。ソースに近い貴重なデータとして活用できる可能性がある。

・釜石市周辺では2018年より岩手県釜石市周辺に13点の臨時観測点を設置し、小さな地震まで含めた地震活動を調査してきた (図3)。地震計は主に固有周期2Hzの地震計を用い、バッテリー (一部ソーラーパネル併用) による電源を用い低消費電力型のデータロガーでCFカードに収録した (図3)。データの回収およびバッテリーの交換は、東北大学遠野地震観測所から3ヶ月に1回程度の頻度で行った (図3)。この観測網に関して東北沖地震から10年が経ち十分なデータが得られたことから撤収を行なった。観測網の効果を調べるために、2018年8月1日から10日の10日間について、臨時観測点のデータ使用前後の釜石沖地震周辺の地震の震源分布を比較した。鈴木(2022)が東北地方の地震波形データを用いて作成した深層学習モデルを用い、P波・S波の到着時刻を自動で読み取った。この深層学習モデルは、Zhan and Beroza (2019)により開発されたPhaseNetというプログラムについて、東北地方の地震データ約90万個を学習させたものである。その後REAL (Zhang et al., 2019)と呼ばれるプログラ

ムで、地震ごとに読み取り値をまとめ、さらにWINと呼ばれるプログラム (Hirata and Matsu'ura, 1987)で震源の決定を行った。2018年8月時点で収録を開始していた6点の観測点を使用した場合とそうでない場合を比較すると、およそ1.7倍の個数の地震が検知できるようになった

- ・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望
- ・繰り返し地震のモニタリングを通して、地震の発生サイクルにおける断層面のすべり・固着状態の短期・局所的な変動から長期・広域にわたる変化を明らかにできた。地震の再来特性の調査および断層面固着状態の推定のさらなる高精度化により、将来発生する大地震の発生ポテンシャルや発生予測につながる事が期待できる。
- ・高精度震源再決定に基づき、大量の繰り返し地震を検出することが可能なことを示し、プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測のための基礎データ構築に貢献した。宮城県気仙沼沖において、今後も Mw6.3規模の地震が頻発する可能性が高いことを示した。
- ・本課題の中で開発した深層Hash法に基づく類似波形探索技術は、日本の定常観測データやDASなどの大規模データセットからより良い地震カタログを作成することに貢献すると期待できる。計算コストの優位性は明確に示せたものの、生成可能なカタログは、波形相関を用いる手法に及ばないことも明らかになっており、訓練データや損失関数を修正することで、この課題の解決に取り組みたい。また、アナログ波形記録から類似波形を探索することにも応用できる可能性があり、それらからの繰り返し地震探索等を通じて、プレート境界挙動の解明に貢献できると期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

- ・論文・報告書等

Makoto Naoi and Shiro Hirano, Efficient similar waveform search using short binary code obtained by deep hashing technique, Geophys. J. Int., 査読有, 謝辞無

- ・学会・シンポジウム等での発表

直井誠, 平野史朗, 2023, 深層Hashingによる効率的な類似波形探索, 2023年度 人工知能学会全国大会, 1L3-OS-17-02

直井誠, 平野史朗, 2023, 深層Hashingによる類似波形を持つイベントの効率的探索, 地球惑星連合大会, SCG55-05

Nomura, S., M. Tanaka, 2023, Forecasting repeating earthquakes with a nonstationary renewal process, 27th APRIA 2023 Annual Conference

吉田 圭佑, 2023, Moment-rate functions of repeating earthquakes of varying magnitude and surrounding earthquake distribution, 日本地球惑星科学連合2023年大会

吉田 圭佑, 福島 洋, 2023, Possibility of shallow repeating aseismic slip associated with the 2011 Mw5.8 and 2016 Mw5.9 crustal earthquakes in northern Ibaraki Prefecture, Japan, 日本地球惑星科学連合2023年大会

吉田 圭佑, 松本 圭晶, 織茂 雅希, 2023, Double-difference法による大量地震の効率的な震源再決定と高精度震源分布のリアルタイム・モニタリング, 日本地球惑星科学連合2023年大会

Naoki Uchida, Rintaro Suzuki, Weiqiang Zhu, Gregory C Beroza, Takashi Nakayama, Genti Toyokuni, Ryota Takagi, Ryosuke Azuma, Keisuke Yoshida, Akira Hasegawa, 2023, Offshore microseismicity in NE Japan constrained by S-net and PhaseNet: insights on the forearc circulation of fluids and interplate coupling, 2023 AGU Fall Meeting, S43A-03

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：地震：地震：短周期地震観測

概要：テスト

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：宮城県仙台市八木山

調査・観測期間：2021// - 2024//

公開状況：

(11) 次期計画における課題名：

繰り返し地震を用いた地殻活動と地震再来特性の研究

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

内田直希（東北大学）,松澤暢（東北大学）,吉田圭佑（東北大学）

他機関との共同研究の有無：有

五十嵐俊博（東京大学地震研究所）,加藤愛太郎（東京大学地震研究所）,加藤尚之（東京大学地震研究所）,前田拓人（弘前大学）,直井誠（京都大学防災研究所）,山下裕亮（京都大学防災研究所）,松島健（九州大学）,木村尚紀（防災科学技術研究所）,松原誠（防災科学技術研究所）,有吉慶介（海洋研究開発機構）,鹿児島大学,金沢大学,横浜市立大学,首都大学東京,統計数理研究所,気象研究所,UC Berkeley,早稲田大学の研究者とも連携して実施

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科

電話：022-225-1950

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：内田直希

所属：東北大学理学研究科・東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地殻変動に伴う大気中ラドン濃度変動

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

イ. 内陸地震の長期予測

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題では、地殻変動や地震・火山活動のデータに限らず、地球潮汐データ、電磁気学的データ（たとえば、大気電位データ）、地下水データなどと大気中ラドン濃度との関連を求め先行現象の発現メカニズムを解明し、中短期の地震・火山噴火先行現象の統計的評価に着手することを目的とする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

令和元年度(平成31年度)は、地殻変動モニタリングに使用できる放射線施設に協力を求め、全国をくまなくカバーすることのできる全国放射線管理施設ネットワークの拡大を進める。大学及び研究機関の各放射線管理施設から得られた排気データを用いて、広域な大気中ラドン濃度変動解析を進める。大気中ラドン濃度の異常変動発現メカニズムを解明すると共に、機械学習等のデータ駆動手法を取り入れた中短期の地震・火山噴火先行現象の統計的評価を試みる。

令和2年度以降においても、地殻変動モニタリングに使用できる放射線施設に協力を求め、全国をくまなくカバーすることのできる全国放射線管理施設ネットワークの拡大を進めつつ、広域な大気中ラドン濃度変動解析を行う。各年度において大気中ラドン濃度の異常変動発現メカニズムを解明と機械学習等のデータ駆動手法を取り入れた中短期の地震・火山噴火先行現象の統計的評価を試みる。

各年度において、得られた研究成果を研究成果報告会、国際会議や国際学術雑誌や出版物に公表するほか、学内のHPでの掲載やプレスリリース等を通じ報道機関などへも公表する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1) 全国規模で混の放射線管理施設のモニタリングネットワークの構築や測定データの解析

令和5年度までに27施設の全国医薬系放射線管理施設が参画した。今年度は、福島県立医科大学（福島県）から2017年1月以降のデータと札幌医科大学（北海道）から2018年9月以降のデータを入手し、解析を進めている。さらに、これまでに得られている他の放射線管理施設の大気中ラドン濃度変動データの解析を進めた。学会や論文等で解析データの公表が可能になった際に、協力事業所名を公表する。また全国の放射線管理施設で長期間の大気中ラドン濃度計測データを持つ協力機関を新たに探し、ネットワーク拡大を進めている。

2) 1995年兵庫県南部地震前における大気中ラドン濃度の日変動について

令和4年の成果の概要「2）1995年兵庫県南部地震前におけるラドン濃度の日変動について」を踏まえ、今年度は混合層の高さと大気中ラドン濃度との関係に注目し、1995年兵庫県南部地震前における大気中ラドン濃度の日変動を解析した。大気境界層内において、日中は空気の混合が活発となる。日の出頃の最も混合層の高さが低いときに、大気中ラドン濃度は最大となり、その後混合層の発達とともに、空気の混合が進み、ラドン濃度が下降する。芦屋断層上の神戸薬科大学で測定した1月1日から1月16日のデータ（平常時：1991年から1994年の期間；兵庫県南部地震前：1995年）について安岡が調べた結果、地震前において日の出頃の最も混合層の高さが低い時のラドン蓄積量は低く、測定場所付近のラドン散逸が減少していた。また気温が上昇する8時から12時にかけてラドン濃度は減少せず異常に高い値であった。ラドン濃度から日平均値を差し引いた値であるラドン濃度残差と混合層の高さの解析から、地震前の12時の値は平常時から推定した95%予測区間を超えて、明らかな異常値を示した。これは、混合層の発達に伴う拡散によって、震央域付近のラドン濃度の高い空気が観測地点に流れ込み、地震直前の1995年1月の12時の大気中ラドン濃度が有意に高くなっていたと考えられる。

3) 機械学習や統計的時系列モデルによる地震活動に伴う大気中ラドン濃度の異常検知

令和4年の成果の概要「2）機械学習による地震活動に伴う大気中ラドン濃度の異常検知」を踏まえ、今年度は兵庫県南部地震（1995年1月17日： M_w 6.9）と東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日： M_w 9.0）の発生前における大気中ラドン濃度に対してランダムフォレスト解析に基づく異常検知を行った。Tsuchiya et al. (2023) Proc. the 24th Workshop on Environmental Radioactivity, KEK, Tsukuba, Japanで以下のように報告した。

神戸薬科大学で観測された大気中ラドン濃度データを用いて、1984年から1988年までの地震活動の少ない期間を平年変動（教師データ）とし、兵庫県南部地震発生前の1990年から1995年の期間の大気中ラドン濃度を予測し、実際に観測されたデータとの比較を行った。その結果1994年末から観測値が予測値を上回る期間が続いていたことが明らかとなった。地震発生の25日前には予測値と観測値の差分から計算された標準偏差の3倍を上回る濃度だった。これらの結果から、兵庫県南部地震発生前に異常な大気中ラドン濃度の増加が起こっていたことが明らかとなった。また、1990年から1991年には地震発生前の地震の静穏化が原因と考えられる大気中ラドン濃度の低下も確認された。

福島県立医科大学で観測された大気中ラドン濃度と線形関係にある電離電流値を、大気中ラドン濃度に対応する指標として用い、地震活動の少ない期間を平年変動（教師データ：2002年から2007年）とし、東北地方太平洋沖地震の発生前の期間（2008年から2011年）の電離電流値を予測した。その結果予測値と観測値の差分から計算された標準偏差の3倍を上回る濃度が、2010年10月末に観測されていた。大気中ラドン濃度は季節変動をしており、例年冬に高いピークを持つ変動していた。しかし、2010年において秋から冬にかけての早い時期の大気中ラドン濃度変動は高いピークを呈していた。これらの異常から、東北地方太平洋沖地震前に大気中ラドン濃度の異常な増加が起こっていたことが明らかとなった。また、2008年の岩手宮城内陸地震の1週間前に東北地方太平洋沖地震前と同様に標準偏差の3倍を上回る濃度だった。

さらに今年度は統計的時系列解析モデルとして、SARIMA-GARCHモデルによる大気中ラドン濃度変動の時系列解析による異常検知を行った。季節性除去の手法とは異なる手法により大気中ラドン濃度変動の異常度の定量化を行った。従来の異常検出の手法は平常期間の選定によって解析結果も左右される。そこで大気中ラドン濃度変動データの解析に季節性に対応した線形時系列モデルの1つであ

るSARIMAモデル及び標準偏差変動を想定したGARCHモデルを併せて使用した。このSARIMA-GARCHモデルは、より柔軟に季節性を減らすことが可能であり、モデル選択時の曖昧性も存在しないため従来の手法と比較して、より適切な結果が得られる可能性がある。モデルの適用によって得られる標準偏差変動を異常度変動とみなして解析期間中に発生した地震との対応付けを明示的に行い、先行研究と比較しながら解析結果の妥当性について三浦が予察的検討を行った。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

令和元年度（平成31年度）以降、地殻変動モニタリングに使用できる放射線施設に協力を求め、全国をくまなくカバーすることのできる全国医科薬科系放射線管理施設ネットワークの拡大を進めた。大学及び研究機関の各放射線管理施設から得られた排気データを用いて、広域な大気中ラドン濃度変動解析を進め、27施設が現在まで参画している。大気中ラドン濃度の異常変動発現メカニズムを解明すると共に、機械学習等のデータ駆動手法（ランダムフォレストによる異常検知）および統計的時系列解析モデル（SARIMA-GARCHモデルによる時系列解析など）を取り入れた中短期の地震・火山噴火先行現象の統計的評価を試みてきた。

具体的には、これまで全国のRI施設ネットワークを用いて、地震活動・地殻変動と大気中ラドン濃度変動との関係を明らかにするとともに、地下でのラドン動態を明らかにする環境放射線測定および各種計測機器を用いたラドン測定を行ってきた。Omori et al. (2021 Sci. Rep.) は、兵庫県南部地震前に変動が報告されている神戸薬科大学での大気中ラドン濃度変動データを用いて分潮解析を行った。主要分潮であるK1（日月合成日周潮）については、1984年～1988年ではその周期が認められなかったが、兵庫県南部地震前の1990年～1994年の期間では認められた。この時期は、地震観測（京大理学部・東大地震研、1995）や地殻歪（大地の伸縮）観測（京大大学院理学研究科・京大防災研、1996）で異常が認められた時期と一致しており、これがラドンの周期的な変化を引き起こす原因になったと考えられる。また、2018年6月18日に発生した大阪北部地震発生前後に大阪医科薬科大学で観測された大気中ラドン濃度データを詳細に解析し、2014年から観測されていた大気中ラドン濃度は、地震の約1年前から減少し、本震後2020年6月まで低くかったことを明らかにした（Muto et al., 2021 Sci. Rep.）。一方、観測点周辺での地震活動は地震前に比べて減少していた。さらに、本震後の地震活動も余震域を除く近畿地方全域で低下しており、このことが地震後もラドン濃度が増加しなかった原因として考えられる。更に、地下でのラドン動態を明らかにするために、空間線量率の高い黒色頁岩の露出する牡鹿半島において空間線量率と降雪の影響を明らかにすると共に（Tamakuma et al., 2021 Radiat. Environ. Med.）、RAD7、PicoRad、監視モニタなどによるラドン濃度測定法の確立を目指した計測研究を行っている（Higuchi et al., 2019 Radiat. Procet. Dos., Wakabayashi et al., 2019 Radioisotopes）。また得られたデータを用いて、機械学習等のデータ駆動手法（ランダムフォレストによる異常検知）および統計的時系列解析モデル（SARIMA-GARCHモデルによる時系列解析など）を取り入れた中短期の地震・火山噴火先行現象の統計的評価を試みてきた（Tsuchiya et al. 2023 Proceedings of the 24th Workshop on Environmental Radioactivity, KEK, Tsukuba, Japan）。各年度において、得られた研究成果を研究成果報告会、国際会議や国際学術雑誌や出版物に公表するほか、学内のHPでの掲載やプレスリリース等を通じ報道機関などへも公表した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本課題は、機械学習等のデータ駆動手法（ランダムフォレストによる異常検知）および統計的時系列解析モデル（SARIMA-GARCHモデルによる時系列解析など）により、全国のRI施設で計測される高時間分解能の大気中ラドン濃度データを対象に地震・火山噴火の予測の可能性を探るものであり、固体地球科学以外の多様な観測データに基づく経験的な予測手法構築に貢献しうるものである。また、地殻変動現象に対して、放射化学や環境科学などの関連分野を通じた学際的なアプローチで取り組んできた。今後も引き続き、全国RI施設ネットワークの拡大を続け、地殻変動に関連した大気中ラドン濃度変動のメカニズム解明と先行傾向の統計的評価を目指す。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Tsuchiya, M., H. Nagahama, J. Muto, M. Hirano and Y. Yasuoka, 2023, Detecting earthquake precursor phenomena in atmosphere radon concentration fluctuations using Random Forest

analysis, Proceedings of the 24th Workshop on Environmental Radioactivity, KEK, Tsukuba, Japan, Bessho, K., H. Matsumura and G. Yoshida (eds.), 104-109.

西尾友克, 安岡由美, 長濱裕幸, 平野光浩, 武藤 潤, 向 高弘, 2023, 1995年兵庫県南部地震直前における大気中ラドン濃度変動と気温の解析, Proceedings of the 24th Workshop on Environmental Radioactivity, KEK, Tsukuba, Japan, Bessho, K., H. Matsumura and G. Yoshida (eds.), 98-103.

川本奈々帆, 齋藤華子, 武本樹音, 合田奈央, 安岡由美, 長濱裕幸, 武藤 潤, 床次眞司, 細田正洋, 大森康孝, 2023, 活性炭捕集器による屋内ラドン濃度のスクリーニング測定, Proceedings of the 24th Workshop on Environmental Radioactivity, KEK, Tsukuba, Japan, Bessho, K., H. Matsumura and G. Yoshida (eds.), 93-97.

栗山あかね, 樋口 舞, 西村夏樹, 森花 恵, 安岡由美, 長濱裕幸, 武藤 潤, 細田正洋, 床次眞司, 大森康孝, 2023, 排気モニタによる大気中ラドン濃度の測定, Proceedings of the 24th Workshop on Environmental Radioactivity, KEK, Tsukuba, Japan, Bessho, K., H. Matsumura and G. Yoshida (eds.), 87-92.

・学会・シンポジウム等での発表

土谷真由, 長濱裕幸, 武藤 潤, 平野光浩, 安岡由美, 2023, ランダムフォレスト解析を用いた大気中ラドン濃度変動による地震の先行現象の検出, 日本地球惑星科学連合2023.

武本樹音, 川本奈々帆, 安岡由美, 長濱裕幸, 武藤 潤, 床次眞司, 細田正洋, 大森康孝, 飯本武志, 向 高弘, 2023, 活性炭捕集器による屋内ラドン濃度の測定, 第60回アイソトープ・放射線研究発表会.

松原賢哉, 安岡由美, 長濱裕幸, 武藤 潤, 尾上昌平, 向 高弘, 2023, 鹿児島における大気中ラドン濃度変動, 第60回アイソトープ・放射線研究発表会.

Yasuoka, Y., J. Takemoto, N. Kawamoto, N. Goda, H. Saito, H. Nagahama, J. Muto, S. Tokonami, M. Hosoda, Y. Omori, T. Iimoto and T. Mukai, 2023, Determination of screening values for radon concentration in indoor air using an activated-charcoal radon collector, International Symposium on Natural and Artificial Radiation Exposures and Radiological Protection Studies (NARE2023), Hirosaki.

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地殻変動に伴う大気中ラドン濃度変動

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

長濱裕幸（東北大学大学院理学研究科）, 武藤潤（東北大学大学院理学研究科）
他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科
電話：022-225-1950
e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp
URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：長濱裕幸
所属：東北大学大学院理学研究科地学専攻

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

多項目観測データに基づく火山活動のモデル化と活動分岐判断指標の作成

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

全国の主要な火山について、これまでに得られている地球物理学的、物質科学的データをもとに、火山活動や噴火活動について分岐指標を整理し、分岐判定に対する論理的評価方法を開発する。また、山体構造や周辺テクトニクスを考慮に入れた火山活動をモデル化する。火山活動の活発化や噴火発生時の現象理解や事象分岐の予測に役立てるために、時系列上に、起こりうる火山現象と期待される地球物理学的観測量や噴出物特性をまとめる。加えて、観測量や噴出物特性を説明する物理化学的解釈やモデルを提示する。噴火を繰り返している国内の火山については、個別に火山活動および噴火活動のモデルを提示し、噴火事例の少ない火山については、他火山の事象との比較検討などを通して、特徴的な分岐現象や定常時の活動に着目したモデルを提示することを目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

これまでの地球物理学的観測研究、地質・岩石学的研究の成果に加え、次期研究計画等で実施される研究課題の成果を取り入れ、樽前山、岩手山、吾妻山、蔵王山、草津白根山、箱根山、伊豆大島、三宅島、浅間山、雲仙岳、阿蘇山、霧島山などを候補として、火山活動のモデル化を行う。

令和1年度（平成31年度）は、噴火事例の有無、観測データの充実度等を指標に、研究対象とする火山を選定し、分類方法やモデル化の方法を検討する。近代的な観測が始まって以降に噴火事例が複数

ある火山、一例しかない火山、あるいは、全くない火山があるので、近代観測以降の噴火発生数、静穏期の長さ、観測項目数等を考慮し、対象する火山や特徴的な分岐指標等を決定する。

令和2年度目および3年度目は、過去のデータ等をもとに各火山等でモデル化を進める。令和4年度目は、各火山等のモデルを比較検討し、共通点や相違点を洗い出し、平均的な描像や特異性を視点に加え、モデルをできるだけ一般化する。令和5年度目は、全体のモデルを俯瞰し、よりわかりやすい表現等を取り入れたモデルの提示方法を検討する。

年に数回、各大学や国の機関に所属する担当者とともに研究集会を実施し、各火山の活動モデル化を進める。また、最終年度を目処に、成果報告書などにまとめる。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

観測データの解析結果や物質科学的データの分析結果を整理して、火山活動推移のモデル化や噴火事象系統樹の分岐判断指標の作成や、分岐判断に重要な事象の解析を進めた。

十勝岳は噴気活動の回復（火道閉塞の解消）に伴って浅部の地盤変動が膨張から収縮に転じることは、マグマから供給される熱や物質の供給と地表への放出のバランスがとれる方向への変化と考察した。噴気活動の回復過程では顕著な傾斜変動イベントが繰り返し観測され、地表面下200-500m付近の浅部と海水面下1km付近の深部に圧力変動源の存在が推定されたことで、地下構造と力学変動源の対応付けを行った。

阿蘇火山で噴火に前駆する火山性構造地震に着目し、Matched Filter法を用いて地震の検出を行い、地震エネルギーと噴火規模や噴火様式との関係を調べた。噴火様式による比較では、前駆地震のエネルギーは、水蒸気噴火、マグマ水蒸気噴火、マグマ噴火の順に大きくなっていった。また、2015年と2016年のマグマ水蒸気噴火の前駆地震を比較すると、2016年の爆発的噴火直前のエネルギー放出率が2015年噴火の約50倍であったことが明らかになった。

吾妻山では、同期して発生する長周期地震と浅部地殻変動の発生機構と体積変化を推定し、深部からの供給と地表への放出による流体の収支を明らかにした。また、調和振動型微動が流体の流動による非線形振動によることを示し、浅部流体系における多様の振動現象と流体供給についての考察を行った。

2023年2月に約5年ぶりに噴火が再開した桜島昭和火口では、噴火に前駆して噴気の増加と火山性微動活動の活発化が観測された。地震計アレイ解析を行った結果、昭和火口の噴火に前駆した微動は、実体波もしくは表面波からなり、時間的に変化しない火口下の極浅いところを震源としていたことがわかった。微動は昭和火口の噴火発生によって消滅したことから、その震源域と想定される火口直下にあったガスポケットが噴火によって破壊されたと推察した。

近年の日本で発生した火山噴火について、前駆する群発地震のピークから噴火までの時間（噴火前駆時間）と、噴火に伴う噴出物量の両対数の関係を調べたところ、概ね負の相関がみられた。これは噴出量の大きい噴火の噴火前駆時間ほど短いことを示すと推察した。

日本火山活動総覧にある各火山の有史以来の活動から、「噴火」「地震」の用語を切り出して時系列化し、全国の火山の噴火活動や地震活動、および両者の相互関係を調べた。比較的噴火の多い火山では、数十年から百年ほどの時間スケールで噴火活動が活発化する火山があることがわかった。また、噴火発生の数年前に地震活動が活発化しているような特徴は見いだせなかった。

日本国内外の噴火に関連する火山活動の推移の基本的なモデルをまとめた。1) 噴火前駆過程においては地盤変動のみが起きる非破壊性マグマ貫入から火山構造性地震も発生する破壊性貫入へ移行する。2) マグマの爆発力は貫入速度が決める。3) 古い噴出物を排出したのち新鮮なマグマが噴出する。4) マグマ噴火は揮発性成分が卓越する噴火から脱ガスマグマ物質が卓越する噴火へ移行する。

地震観測により得られた御嶽山の地下構造モデルを使用し、噴火準備過程の数値モデリングを行った。地下からの高温流体の注入により圧力が短時間で増大して火山構造性地震を引き起こす一方、温度上昇は遅れて起きること、温度が比較的低温の場合には噴火直前まで地下水の気化が起きず前兆現象に乏しくなる場合があることを示した。

マグマ起源物質の上昇を詳細に評価するために、草津白根山の湯釜火口湖を対象とした熱・物質収支モデルを構築して数値計算を行った。また、新たに考案した湖水濃度時系列データによる湖底熱活動の迅速評価を継続した。これらの結果と地球物理観測との比較から、同火山において複数のマグマ流体起源が存在するとした。

Unrestを模した数値実験により、さまざまなシナリオで多項目観測との対応が検討できるようになっ

てきた。非噴火期の「火山活動推移モデル」を探索することで、観測データに基づく定量的火山活動評価や予測の試行に活用できる可能性を議論した。

噴火活動の即時把握のため、AI技術を用いた画像解析による火山灰粒子の自動鑑定・分類手法の開発を行った。火山灰粒子の特徴を的確に抽出するための撮像条件や画像解析条件の最適化、教師データセットの作成を行った。その結果、試料前処理から撮像、2000粒子以上の解析・分類までを10分程度で実行可能とした。これらを阿蘇山や桜島の火山灰粒子の構成粒子解析に応用した結果、火山活動の推移変化を検知することができた。

霧島火山群の中長期の噴火履歴と近年の噴火推移をもとに、事象分岐のパラメータや条件について検討し、噴火事象系統樹（推移モデル）の叩き台を作成した。具体的には、完新世以降の活動中心の噴火履歴や、2011年や2017-2018年の活動推移、マグマ供給系モデルなどを考慮しマグマの上昇パターンを整理した上で、「先行現象」「噴火発生」「主噴火」の各ステージの事象や推移、注目すべき観測量等を網羅的に表現する事象系統樹を提案した。

硫黄島の非常に活発な火山活動は地下のマグマ供給系が駆動していると考えられるが、硫黄島2022年噴火による軽石岩塊を岩石学的に解析することで、マグマの温度・圧力・深度を推定した。その結果、この噴火の前には地下1~2 kmに温度970 °Cのマグマが存在したことが分かった。硫黄島のマグマ供給系は深度1~2 kmから10 kmにわたって存在し、活発な火山活動を駆動していると考えた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

観測データの解析結果や物質科学的データの分析結果を整理して、火山活動推移のモデル化や噴火事象系統樹の分岐判断指標の作成や、分岐判断に重要な事象の解析を進めた。

地震、地盤変動、磁場変動、熱変動といった地球物理学的データとして、吾妻山や十勝岳の火山浅部力学源の時空間分布に基づく火山活動の理解とモデル化や、マグマ挙動の理解に基づく噴火直前の前兆現象（地震・地盤変動）の理解や噴火発生の評価が行われた。また、火口湖の熱・物質収支モデルの構築、火山噴出物の全岩組成や斑晶量などの物質科学的データや噴出物量や岩脈分布等の地質学的データなどを測定量とした噴火様式や推移の特徴抽出などが行われた。また、多孔媒質中での熱流体モデルに基づき数値計算が行われ、さまざまなシナリオで地球物理学的観測量を求め、火山活動推移モデルを検討した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Honda A, Kanda W, Koyama T, Takakura S, Matsunaga Y, Nishizawa T, Ikezawa S, 2023, Shallow resistivity structure around the 2018 craters of Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by audio-frequency magnetotellurics, *Earth Planets Space*, 75, 43, doi.org/10.1186/s40623-023-01799-3, 査読有, 謝辞無

Yamada T, Terada A, Noguchi R, Kanda W, Ueda H, Aoyama H, Ohkura T, Ogawa Y, Tanada T, 2023, The Onset, middle, and climax of precursory hydrothermal intrusion of the 2018 phreatic eruption at Kusatsu-Shirane volcano, *J Geophys Res Solid Earth*, 128, e2023JB026781, doi.org/10.1029/2023JB026781, 査読有, 謝辞有

Sibaja BJ, Terada A, Alfaro-Solis R, Cambronero-Luna M, Umaña-Castro D, Porrás-Ramírez D, Sánchez-Gutiérrez R, Godfrey I, Martínez-Cruz M, 2023, Unmanned Aerial Vehicle applications monitoring volcanic lake waters in Costa Rica, *Drone Systems and Applications*, 11, 1-14, doi.org/10.1139/dsa-2022-0023, 査読有

Terada A, Kuwahara T, in press, Yugama crater lake: A sensitive window into the magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane volcano, In: Ohba, T., Terada, A. (eds) *Monograph Kusatsu-Shirane, Active Volcanoes of the*

World, doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107831, 査読有, 謝辞有

Maeda Y, 2023, A systematic survey for precursory tilt changes at all monitored eruptions in Japan., *J Volcanol Geotherm Res*, 439, 107831, doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107831, 査読有, 謝辞有

橋本武志・宇津木充・大倉敬宏・神田 径・寺田暁彦・三浦 哲・井口正人,2019,非マグマ性の火山活動に伴う消磁及び地盤変動のソースの特徴,火山,64,103-119,doi:10.18940/kazan.64.2_103,査読有,謝辞有

橋本武志,2021,火山の活動不安定評価における熱消磁現象の活用と噴火予測の可能性,地学雑誌,130,771-781,doi:10.5026/jgeography.130.771,査読有,謝辞有

Hashimoto, T.,2022,Post-Eruptive Persistent Cooling Beneath the Summit Crater of Usu Volcano as Revealed by Magnetic Repeat Surveys,J Disast Res,17,630-638,doi:10.20965/jdr.2022.p0630,査読有,謝辞無

Miwa, T., Nagai, M., Ueda, H., and Yokoo, A.,2023,Classification of Volcanic Ash Particles with a Convolutional Neural Network on RGB Microphotographs: Towards Real-Time Monitoring of an Ongoing Eruption,防災科学研究報告,88,1-7,査読無

Ikenaga, Y., Maeno, F., and Yasuda, A.,2023,Temporal change in eruption style during the basaltic explosive An'ei eruption of the Izu-Oshima volcano, Japan: insights from stratigraphy and chemical composition analyses,Frontiers in Earth

Science,11,172615,doi.org/10.3389/feart.2023.1172615,査読有,謝辞有

Maeno, F., Shohata, S., Suzuki, Y., Hokanishi, N., Yasuda, A., Ikenaga, Y., Kaneko, T. and Nakada, S.,2023,Eruption style transition during the 2017-2018 eruptive activity at the Shinmoedake volcano, Kirishima, Japan: surface phenomena and eruptive products,Earth, Planets and Space,75,76,doi.org/10.1186/s40623-023-01834-3,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表
2023

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

西村太志（東北大学）,山本希（東北大学）

他機関との共同研究の有無：有

橋本武志（北海道大学）,中川光弘（北海道大学）,青山裕（北海道大学）,大湊隆雄（東京大学）,前野深（東京大学）,神田径（東京工業大学）,寺田暁彦（東京工業大学）,前田裕太（名古屋大学）,井口正人（京都大学）,大倉敬宏（京都大学）,中道治久（京都大学）,高木朗充（気象庁）,藤田英輔（防災科学技術研究所）,三輪学央（防災科学技術研究所）,下司信夫（産業技術総合研究所）,篠原宏志（産業技術総合研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学 大学院理学研究科

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp

URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：西村太志

所属：東北大学大学院理学研究科

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

海陸測地データを活用したプレート境界面すべり即時把握能力の向上とそれにもとづく津波即時推定手法の高度化

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

イ. 津波の即時予測手法

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

GNSSデータや海底水圧計など、海陸の測地データを活用したプレート境界面におけるすべりの即時的な把握能力向上を目指した技術開発およびそれにもとづく津波即時推定手法の高度化を行う。

プレート境界すべりの時空間把握（地震間、地震時、地震後）を即時的に行い、その推移予測を行うことは、地震発生予測を行う上で基盤となる技術である。特に陸上GNSSに代表される測地観測データや、繰り返し地震等の地震学的データによる日～月～年単位でのプレート間カップリング状態の把握はこれまでに数多くの成果を挙げている。しかしそれらの結果を推移予測に活用していくためには、推定精度および時間分解能の向上が必須である。特に高い時間分解能を持つGNSSでは、主として対流圏遅延等の影響によって数十分～1日程度の時間帯域における精度劣化が大きく、こうした時間帯域の地殻変動把握の障害となっている(例えば、Hirata and Ohta, EPS, 2016)。また海底における圧力観測は上下地殻変動場を連続的に把握できるという点で大きな利点を持つが、センサー固有のドリフトが大きく、特に数ヶ月以上の時定数を持つような地殻変動場、例えば地震間のひずみ蓄積や地震後の余効変動等の把握に困難性が存在する。

一方、より短い時間帯域の現象である地震時の断層すべりの即時推定に関しては、国土地理院と東北大学が開発を進めているリアルタイムGNSSを用いた地震時断層即時推定システム（REGARD, Kawamoto et al., JGR, 2017）の運用がすでに開始されており、実際の地震規模推定等に活用されている。しかしREGARDでは陸上GNSSによって得られた永久変位データのみを用いていることから震源域から遠く離れた海溝軸近傍での断層すべりを高い精度で推定することが難しく、推定誤差の定量的な把握が難しいという問題点がある。

こうした背景を受けて、本研究課題では様々な時間帯域(年, 月, 日, 分)におけるプレート間カップリングを、海陸測地データ(GNSSおよび海底圧力計)観測・解析の高度化にもとづいてシームレスに把握する能力の向上を目指す。また、そうした精度向上と並行して、リアルタイムGNSSによって推定されるプレート境界型地震および海域で発生する地震の断層モデルが持つ不確実性を定量的に明らかにする手法を確立する。同手法については、国土地理院と東北大学が共同開発しているREGARDへの実装を目指す。さらに、S-netやDONET等の沖合津波観測で実際に観測される津波記録を用いて、陸上GNSSから即時的に推定される断層モデルが持つ不確実性を低減させる統合インバージョン手法(例えばtFISH/RAPiD, Tsushima et al., GRL, 2014)の高度化を併せて行う。申請者らは、スーパーコンピュータを利用したリアルタイム津波浸水被害予測技術の高度化に取り組んでおり、即時的に得られる断層モデルのリアルタイム浸水予測の精度向上における優位性を実証するとともに、それら断層モデル等の不確実性が沿岸津波波高および津波浸水予測に与える影響を併せて検討し、それら不確実な情報をどのように災害情報に結びつけるべきかについて検討を進める。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度：キネマティックGNSSの感度が大きく低下する時間帯域における対流圏遅延と地殻変動場の高い精度の分離を目指し、搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法による1日以下の時間帯域におけるモニタリング能力の精度検証を行う。また海底水圧計の長期ドリフトの室内実験での把握実験を行う。また実海底環境下でドリフト特性をその場で把握できる観測機材の開発を開始する。さらにリアルタイムGNSSによる震源断層即時推定における不確実性の定量把握をマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)で行うための技術開発を行う。

平成32, 33, 34年度：搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法による1日以下の時間帯域におけるモニタリング能力の向上のために、対流圏遅延推定のためのハイパーパラメータ等の最適化を行う。室内実験での海底水圧計の長期ドリフトの把握結果を基に、実海底環境下でドリフト特性をその場で把握できる観測機材の開発を継続し、実海域での試験観測を行う。実海域での試験観測は主として、根室沖のS-net観測点近傍で行う(根室沖における海底測地観測に関する研究課題と密接に連携)。MCMC法で与えられた断層モデルの不確実性を沖合津波観測データで更新していく手法の高度化のための開発を行い、数値実験や既往地震等によってその性能を定量的に評価する。さらにこれら不確実な情報の災害情報への活用について特に津波浸水被害に着目して検討を行う。

平成35年度：搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法による地震現象モニタリング能力の定量評価を行う。海底環境下でドリフト特性をその場で把握できる観測機材による既設海底水圧計等のドリフト推定を試みる。断層モデルの不確実性の災害情報へ活用する方策を特に津波浸水被害に注力してまとめる。

(8) 令和5年度及び計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要：

・今年度の成果の概要

(1)リアルタイムGNSSによる震源断層即時推定手法の高度化とその社会実装の加速

リアルタイムGNSSによる震源断層即時推定における不確実性の定量評価をマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)で行うための技術開発および同技術の国土地理院リアルタイム地殻変動監視システム(REGARD)への技術移転を継続して進めた。

R4年度までに開発したMCMC法によるすべり分布推定手法の高度化を実施した。具体的には断層すべりが自己相似性を持つという仮定のもと、von Karmanの自己相関関数(von Karman ACF)による制約を与えたすべり分布推定手法を高度化し、屈曲した断層面、具体的にはプレート境界等においても、同仮定を拘束条件として、すべり分布を推定する手法を確立した。同手法を、1707年宝永地震を模したすべり分布を真値として、それから期待される陸上GNSS観測点における変位を計算し、それにノイズを付加した上で適用した。その結果、屈曲した断層面であるプレート境界面においてもvon Karman ACFを拘束条件としてすべり分布推定ができることを明らかにした。

国土地理院で運用しているREGARDへと技術移転した1枚矩形断層推定をMCMC法によってリアルタイムで実現するアルゴリズム”Real-time automatic uncertainty estimation of the coseismic single rectangular fault model based on GNSS data (RUNE)”の精度評価を継続した。2024年1月1日に発生した能登半島地震発生時に、RUNEによって断層モデルを自動推定することに成功した。推定された地震規模はMw7.4であり、地震規模はおおよそ正確に推定することに成功した。データの

欠落等により能登半島内で使用できた観測点が減少したことから、断層の傾斜角を過小評価するなどの課題も確認できた。

(2)海底水圧計に含まれる非潮汐海洋成分の高精度除去手法の開発による地殻変動検出能力の向上
海底水圧計は、海底における地殻上下変動場を連続的に捉えることができる重要なセンサーである。一方で、観測する水圧には機器特有のドリフト成分や非潮汐海洋変動成分などが重畳し、それらを適切に分離、除去することが高精度地殻変動観測の観点から重要である。これらの背景にもとづき、R5年度は、R4年度に構築した主成分分析を用いたノイズ低減手法を高度化した。具体的には、期間を通して安定して主成分に現れる海洋変動成分を基準として、それらとの比較から未知の非定常地殻変動を検出するアルゴリズムを開発した。同手法を水圧データからSSEに起因する非定常地殻変動が検出されたとされているアラスカ半島の水圧計ネットワークに適用した結果、海洋変動成分を誤認知した可能性があることを指摘した。

(3)民間GNSS観測網の活用による超稠密地殻変動モニタリング手法の開発

R4年度に構築した「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の活動を活性化させ、3300点超の全データを専用線経由でソフトバンクから東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センターに集約し、それらをコンソーシアム加盟機関に提供する枠組みを構築するとともに、それらデータのルーチ的な日座標解析のシステム構築を実現した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

R1年度：搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法 (Phase To Slip, 以下PTS) の性能評価を目的とし、2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0)とそれに引き続く岩手県沖地震 (Mw 7.4) および最大余震である茨城沖地震 (Mw 7.8) に対して同手法を適用し、地震時すべりを連続して捉えることに成功した。実海底環境下でドリフト特性をその場で把握できる海底圧力観測システムのプロトタイプ機を開発し、同機を実海域に短期間設置することでその動作確認を行った。リアルタイムGNSSによる震源断層即時推定における不確実性の定量評価をマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) で行うための技術開発を行い、単一の矩形断層モデルをリアルタイムGNSSによる永久変位場から推定するReal-time automatic UNcertainty Estimation of the coseismic single rectangular fault model based on GNSS data (RUNE) を開発した。

R2年度：搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法 (Phase To Slip, 以下PTS) を用いて2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0)とそれに引き続く地震直後の余効すべりの時空間発展推定を高い精度で推定することに成功した。実海底環境下でドリフト特性をその場で把握できる海底水圧計 (OBP) 観測システムのプロトタイプ機を用いた長期実海域試験を行い、設計した機構が正常に機能していることを確認した。RUNEアルゴリズムの国土地理院REGARDシステムへの技術移転を進め、リアルタイムGNSSデータから推定された変位場との組み合わせによる動作試験を開始した。同アルゴリズムを2021年2月13日に発生した福島県沖の地震 (M7.3) へREGARDで得られた実際の変位場を入力値として適用した結果、Mwの中央値がMw7.14の南東に傾き下がる高角の逆断層のモデルを推定することに成功した。

R3年度：ハミルトニアンモンテカルロ法 (HMC法)を用いた1枚矩形断層モデル推定アルゴリズムの開発を行い、メトロポリスヘイスティングス(M-H)と比較して数%程度の連鎖数で必要な事後確率分布が得られることを明らかにした。実海底環境下でドリフト特性をその場で把握できる海底水圧計 (A-0A OBP) 観測システムのプロトタイプ機を用いた長期試験観測をDONET2C-10ノードのごく近傍で行い、A-0-Aを適用することで、長期ドリフトを減少可能であることを示した。ソフトバンクが運用する独自GNSS観測網データを用いて、2021年2月13日に福島沖で発生したM7.3の地震による地震時地殻変動場を検出することに成功した。同結果は、民間GNSS観測点によって地殻変動場の議論が可能であることを示唆する。

R4年度：HMC法を用いて地震時のすべり分布を推定する手法の開発を行った。また、仮定する断層幾何の不確実性を定量評価する手法を提案した。すべり推定時の正規化の手法として、断層すべりが

自己相似性を持つという仮定のもと、von Karman の自己相関関数 (von Karman ACF) による制約を与えたすべり分布推定手法の開発を行った。具体的には、従来ハイパーパラメータとして扱われていた相関距離も同時に推定する手法を開発した。数値実験の結果、観測網が十分に断層面をカバーしている場合、相関距離を正しくかつその誤差の幅とともに推定できることを初めて実証した。RUNEの精度評価を継続し、2022年3月16日に発生した福島沖地震において、RUNEによって断層モデルを自動推定することに成功した。これらの結果を受け、RUNEは次期のREGARD内の1枚矩形断層推定のメインアルゴリズムとして実装・運用されることが決定した。

R5年度：von Karman ACF) による制約を与えたすべり分布推定手法を高度化し、屈曲した断層面、具体的にはプレート境界等においても、同仮定を拘束条件として、すべり分布を推定する手法を確立した。海底水圧計に含まれる非潮汐海洋成分の高精度除去手法を高度化した。具体的には、期間を通して安定して主成分に現れる海洋変動成分を基準として、それらとの比較から未知の非定常地殻変動を検出するアルゴリズムを開発した。同手法を水圧データからSSEに起因する非定常地殻変動が検出されたとされているアラスカ半島の水圧計ネットワークに適用した結果、海洋変動成分を誤認知した可能性があることを指摘した。R4年度に構築した「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の活動を活発化させ、3300点超の全データを専用線経由でソフトバンクから東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センターに集約し、それらをコンソーシアム加盟機関に提供する枠組みを構築するとともに、それらデータのルーチン的な日座標解析のシステム構築を実現した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本課題で開発を行ったリアルタイムGNSSによる1枚矩形断層推定アルゴリズム (“Real-time automatic uncertainty estimation of the coseismic single rectangular fault model based on GNSS data (RUNE)”, Ohno, Ohta et al., EPS, 2021) がREGARDの1枚矩形断層推定のメインアルゴリズムとして活用される目処がついたことは、開発した成果の社会実装という観点できわめて重要である。現在、同手法を火山における力源推定に活用するための手法の高度化にも着手しており、その発展性も高いと考える。また、民間GNSS観測網の一つであるソフトバンク独自基準点網を地球科学に活用するための基盤整備を「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」という形で実現し、かつ全データをコンソーシアムに集約し、活用できる体制を構築したことは、地震学や火山学のみならず、幅広い地球科学分野への波及効果という観点からもきわめて重要な成果と考える。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Otsuka H., Y. Ohta, R. Hino, T. Kubota, D. Inazu, T. Inoue, N. Takahashi, 2023, Non-tidal oceanographic fluctuation characteristics recorded in DONET ocean-bottom pressure time series using principal component analysis, Earth Planets Space, 75, 112, 10.1186/s40623-023-01862-z, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Kyosuke Hirata, Ryota Hino, Hideto Otsuka, Yusaku Ohta, Norihisa Usui, 2023, Revisiting seafloor pressure records prior to the 2011 Tohoku earthquake, AGU Fall Meeting 2023, G43B-0492

Taisuke Yamada, Yusaku Ohta, 2023, Evaluation of self-similarity of a coseismic slip by estimating a correlation length in von Karman autocorrelation, AGU Fall Meeting 2023, T33E-0240

平田 京輔, 日野 亮太, 大塚 英人, 太田 雄策, 碓氷 典久, 2023, 2011年東北沖地震以前の海底水圧データの再解析, 日本地震学会2023年度秋季大会, S43-07

大塚 英人, 太田 雄策, 日野 亮太, 2023, OBPデータに対するPCA適用によるSSE検出能力の事例研究ーヒクラング沖, アラスカ半島沖の場合ー, 日本地震学会2023年度秋季大会, S43-08

大野圭太郎, 太田雄策, 高松直史, 宗包浩志, 2023, 推定の不確実性を定量化した圧力源モデルリアルタイム推定手法の開発, 日本測地学会第140回講演会, 27

高松直史, 宮崎隆幸, 大野圭太郎, 村上真亮, 小代知波, 太田雄策, 2023, リアルタイム GNSS 測位にお

るノイズ特性 -地殻変動の即時把握の高度化に向けて-,日本測地学会第140回講演会,26
山田太介, 太田雄策,2023,すべり分布推定における相関距離の同時評価とその適用,日本測地学会第140回講演会,P27
大塚英人, 太田雄策, 日野亮太,2023,海底水圧計に主成分分析を適用した非定常地殻変動検出の試み,日本測地学会第140回講演会,04
Taisuke Yamada, Yusaku Ohta,2023,Development of the simultaneous estimation method of slip distribution and its correlation length based on the assumption of self-similarity,28th IUGG General Assembly,IUGG23-0630
H. Otsuka, Y. Ohta, R. Hino, T. Kubota, D. Inazu, T. Inoue, N. Takahashi,2023,Evaluation of the ability to extract crustal deformation signal from ocean bottom pressure time series using principal component analysis,28th IUGG General Assembly,IUGG23-1390
Yusaku Ohta,2023,A review of the contribution of real-time GNSS to disaster prevention and mitigation in Japan,28th IUGG General Assembly,IUGG23-1032
Yusaku Ohta, Keitaro Ohno, ABE Satoshi, Takayuki Miyazaki, Naofumi Takamatsu, Satoshi Kawamoto,2023,Development of a fault model estimation method based on real-time MCMC and its implementation to a real GNSS network,28th IUGG General Assembly,IUGG23-0751
武田 歩真, 田中 良, 中島 悠貴, 村上 亮, 鈴木 敦夫, 山口 照寛, 青山 裕, 太田 雄策,2023,有珠山におけるマルチGNSS観測データのリアルタイム解析に向けてーキネマティック測位の精度検証ー,日本地球惑星科学連合2023年大会,SVC31-P03
日野 亮太, 久保田 達矢, 近貞 直孝, 太田 雄策, 大塚 英人,2023,地殻変動検知に向けたS-net海底水圧データのノイズレベル評価,日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS12-P05
大塚 英人, 太田 雄策, 碓氷 典久, 日野 亮太, 久保田 達矢,2023,MRI.COM-JPNモデルを用いた日本近海における海底水圧記録の海洋変動低減効果の定量評価,日本地球惑星科学連合2023年大会,SSS12-07
山田 太介, 太田 雄策,2023,自己相似性を仮定したすべり分布推定における相関距離の同時推定,日本地球惑星科学連合2023年大会,STT44-03

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

リアルタイムGNSSデータに基づく断層すべり即時把握手法の高度化とその社会実装

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

太田雄策（東北大学大学院理学研究科）,日野亮太（東北大学大学院理学研究科）,越村俊一（東北大学災害科学国際研究所）

他機関との共同研究の有無：有

国土交通省国土地理院測地観測センター,産業技術総合研究所計量標準総合センター

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：太田雄策

所属：東北大学大学院理学研究科

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震・火山データの無線伝送技術の開発

(3) 関連の深い建議の項目：

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

イ. 内陸地震

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震

火山

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

オ. 高リスク小規模火山噴火

(3) 研究基盤の開発・整備

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本研究では、地震や火山のオンライン観測のための無線データ伝送技術を開発し、地震や火山現象の把握および解明に資する。

短期間に多数の観測点の設置が必要な余震観測は、電源や通信を短期間に確保することが一般的に難しいため、そのほとんどがオフラインで運用されている。リアルタイム観測が可能になれば、余震活動状況の詳細のより早い把握ができる。火山観測においては、火口近傍等商用の回線・携帯網での接続が難しい場所が多く、このような場所での多項目オンライン観測が可能になれば、火山活動の推移の把握に大変有効である。

最近の無線通信の制度面の動向として、2012年の電波法の改正に伴って920MHz帯が新たに無線通信用に割り当てられたことで、帯域幅および出力がおおよそ2倍となり、多くの通信モジュールが提供されるようになった。また、本建議に基づく地震予知又は火山噴火予知のための観測用に割り当てられている400MHz帯について、九州総合通信局のもとでこの帯域の有効利用に関する調査検討が行わ

れ、近い将来に通信の高速化が可能になる制度改正が見込まれる。さらに技術面の動向として、近年の社会的ニーズにより、いわゆるLPWA（Low Power Wide Area）などの長距離・低消費電力の無線伝送技術が発展し、“モノがインターネットにつながる”社会に近づきつつある。LPWAの中には、プライベートLoRaのような基地局不要の通信規格もあり、自営センサーネットワークなどへの応用が急速に広まっている。

そこで本研究では、このような制度的・技術的發展を地震・火山観測に取り込み、地理的な制約や既存インフラにあまり依存しない機動性や自由度の高い地震・火山観測の実現を目指して、観測センサーを自営網によりインターネットにつなげるための無線伝送システムの技術開発を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

自営無線伝送技術の長所の1つとして、既存のインフラに頼ることなく、必要な場所で使用できるということがある。そのため、地方部や火山近傍など電源・通信インフラが整っていない場所での連続観測のほか、大地震の発生や噴火の兆候・発生といった緊急に観測システムの構築が必要な場面において役立てられると考えられる。本研究では、地震計や傾斜計・GNSS・画像など多項目の観測データについて、気象条件・設置条件の異なる国内の様々なフィールドにおいて伝送試験を行い、地震・火山活動状況の迅速な把握に役立てるための技術開発を行う。

多様な観測データの伝送に対応するため、情報通信機構の持つ多様な無線技術を応用し、観測項目にあった無線伝送方法・伝送方式を検討する。低速だが長距離・低消費電力を特徴とするLPWAについては、ガスの検針や気象データ等のデータ量の少ない通信での活用例はあるものの、高サンプリングレートが要求される地震波はデータ量が格段に大きく伝送容量が不足する可能性がある。そこで様々な通信規格を比較検討するほか、通信速度に応じたシステムを開発する。速度が不足する場合には観測点側に配置したコンピュータによるエッジコンピューティングにより、地震波の位相読み取りや波形相関による位相差データ作成等を行ったり、観測データのランニングスペクトル画像を作成したりし、一次処理済みの情報を伝送するなどの工夫をして、自営システムとして地震・火山活動状況の迅速な把握に役立てられるものを目指す。

一方、規格改正による新たな利用形態が期待される400MHz帯の利用については、免許帯であり、地震・火山観測用に最適化できる可能性がある。現在、920MHz帯ですすめているLPWA等の新たな技術を活用し、400MHz帯での新たな無線観測システムの開発にあたる。これについては、H33頃の規格改正を見据え地震観測機器のメーカーとの共同開発を行う。

他課題との連携については、桜島大規模火山噴火・蔵王の火山での観測、内陸地震の発生機構の解明に関する課題と連携していく。また、火山プロジェクトでの緊急観測への活用も視野に入れる。これにより内陸の新たな余震観測のプロトタイプの完成および活発な火山での長距離無線伝送に道を拓く。各年度の計画は以下の通りである。

2019年度

内陸地震および火山近傍における無線伝送のためのシステム要件の検討およびシステム開発を行う。吾妻山における傾斜計データの無線伝送を試みる。約2年後の法改正を見越して400MHz帯長距離無線機材の開発に着手する。

2020年度

システム開発を継続するとともに、920MHz帯において実際の内陸地震火山観測現場でのフェージビリティスタディを行う。内陸地震は中規模地震の余震活動をターゲットとし、課題の洗い出しを行う。火山では吾妻山等の観測現場での、課題の洗い出しを行う。

2021年度

前年度得られた課題の解決を行うとともに、実際の大規模内陸余震観測への無線システム組み込みに関する検討を行う。また、エッジ処理による地震波検知の試行を行う。法改正後に400MHz帯を利用した試験機をテストする。

2022年度

GNSS等地震波以外のデータ伝送に関してのシステム開発に着手する。また、省電力性・可搬性・観測点展開の容易性などの向上に務める。さらに、エッジ処理による精密震源決定の試行を行う。データ流通網への接続試験を行う。稠密地震観測・定常観測点データのバックアップ等他のアプリケーションの検討も行う。

2023年度

観測の現場での長期安定性の検証のほか、データ流通網への即時接続・エッジ部分とセンター側での処理の最適化などトータルシステムとしての完成度の向上をはかる。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

- ・今年度の成果の概要
- ・各大学の無線使用状況について、情報交換をおこなった。また情報通信研究機構と大学の間で情報交換を行い、特にDR-IoT等地震・火山観測に有効に活用できる可能性がある無線技術について最新の動向の把握に努めた。

- ・北大では400MHz帯の無線装置が今課題期間中に16回線から9回線に減った。現在引用中の内訳としては火山の観測のためのものが多い。十勝岳の十勝坑道の観測点では、送信アンテナが火山ガスと削剥・凍結による腐食で倒壊し、昨年9月に支柱の再建とアンテナの付け直しを行った。一方、テレメータ観測全体として、ADSL観測点について、伝送経路の変更作業を進める必要があるほか、メタル回線の専用線もサービス終了に向けた対応が必要になる。

- ・京都大学防災研究所では、国立大学法人施設災害復旧事業費の交付を受けて、口永良部島の火山観測点の復旧を進めてきた。復旧事業のうち口永良部島無線テレメータ装置を政府調達として導入を進めてきた。そして、2023年9月末に契約し、2024年3月末の導入するように進めてきた。しかし、2024年1月下旬現在において口永良部島の噴火警戒レベルが3であり、無線テレメータ装置のうち固定無線局の3箇所がすべて立入規制区域内にある状態であり、噴火警戒レベルが引き下げられる最短日が2024年3月中旬であることが分かった。そのため、口永良部島無線テレメータ装置の契約変更を行い、2025年3月末までの納入期限に変更手続きを進めてきた。なお、無線局変更申請は2024年1月に終えており、同年2月8日付けにて2局分の無線局変更許可通知書と1局分の無線局指定変更・変更許可通知書を受領済みである。来年度以降に、無線テレメータ装置を設置して、落成検査を行い工事完了届と点検結果報告書の提出をすることによって、無線局免許状を受ける予定である。

- ・東北大では、広域火山観測網について、全キャリアが圏外となる2点以外について全点を冗長化した4G携帯回線化した。観測・伝送装置を低消費電力化・DC駆動に切り替えたことで、非常時においても蓄電池で長時間の観測継続が可能となった。また、稼働状況についてzabbixで一括監視できるようになった。低速サンプリングデータについては、920MHzLoRaでの通信試験を引きつづき実施した。さらにStarLink衛星通信を用いたデータ伝送の試行を行い、winシステムを用いた地震観測データの伝送に問題ないことを確認した。ただし、消費電力等が大きいことや着雪の影響については今後の課題である。また、能登半島北東部で2022年より実施した臨時地震観測データを用いて、群発地震震源域のS波スプリッティングと地震波速度構造を推定することができた。R4年度に構築した「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」の活動の一環として、RTCM形式でのソフトバンク独自基準点のリアルタイムGNSSデータ数点の提供を受け、その地殻変動観測の観点からの精度評価を開始した。

- ・RaspberryPi-4による観測点側での機械学習を用いたエッジ処理を試行し、メモリ消費・処理時間ともに実用可能であることを確認した。ただし、こちらも消費電力が大きい（6W弱）ため、機動観測等での常用は難しい状況である。また、エッジ処理に向け、WINフォーマットに波形を簡単に機械学習プログラムへの入力波形に変換できるプログラムを作成した。さらに高精度相対震源再決定手法であるDouble-difference法を修正し、より少ないメモリと計算時間で効率的に震源の再決定を行うことができるプログラムを作成した。

- ・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

- ・2019年度に北海道にて課題の研究集会を開催するとともに、フィールド試験・巡検を行なった。樽前山周辺でメンバーが集まって920MHz帯の省電力無線通信試験を行なった。この試験では、情報通信研究機構が中心となって開発されたLoRa試験機およびLoRaを用いたWIN波形伝送用無線機の2つを用いた電波の伝播試験を行なった。その結果、周波数帯が低く電波の回り込みが期待できるLoRaであっても、写真のように限定された見通しの環境では通信範囲が限定されるため、ある程度の見通しが必要であることがわかった。また、同じ見通しであっても、樽前山7合目のように、より高所に設置した端末であれば、より長距離でも安定した通信が見込めることがわかった。

・400MHz 予知研究用の免許帯については、機器開発に向けて、全国の400MHz帯無線機所有の大学・研究機関の研究者と研究集会等で意見聴取を行い、現状や新無線形式に帯するニーズの調査を行った。また新たな無線機器に必要な仕様について協議を重ねた。総務省総合通信基盤局において事業説明を行い、法整備や実験用免許についての協力を要請した。さらに、無線機器メーカーと打合せを行い、機器の開発についてとされる機能、市場ニーズ等について意見交換を行った。しかし、無線による観測のニーズが思ったほどないことなどの理由で、機器開発には至らず、大学および情報通信研究機構で400MHz免許帯の活用方法について、継続的に議論するにとどまった。

・各大学で無線機器の更新・活用を進めた。例えば、口永良部島では、400MHz帯無線送信機およびデジタイザを更新や新たな地震観測点の設置を行った。北海道内の火山（樽前山・雌阿寒岳）において、新スプリアス規制に対応した400MHz帯の無線機を2台導入したほか、十勝岳の観測点のアンテナの更新を行った。

・920MHz LoRaでの通信試験を吾妻山および蔵王山で継続して行うほか、無線システムと接続を行う携帯系の通信の検討のため、情報通信研究機構のIoTゲートウェイと学術情報ネットワーク（Sinet）の広域データ収集基盤のプロジェクト申請を行い、動作確認やデータ流通網への接続テストを行った。

・エッジ処理の活用による地震・火山活動のモニタリングに向けて、機械学習による1観測点の連続波形からのP波S波の同定プログラムであるPhaseNetの性能評価や高精度相対震源再決定手法であるDouble-difference法を修正し、より少ないメモリと計算時間で効率的に震源の再決定を行うことができるプログラムの作成などを行った。また、RaspberryPi-4による観測点側での機械学習を用いたエッジ処理を試行も行った。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

災害の軽減に貢献するための情報を得る基礎となる観測データの取得に関して、複数機関での開発と情報交換により、データ取得の高度化に貢献している。また、地殻内の地震活動をモニタリングする上で必要な震源決定精度の向上を効率的に行うアルゴリズムを作成したことにより、観測・解析技術の開発に貢献している。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Okada, T., Savage, M.K., Sakai, S., Yoshida, K., Uchida, N., Takagi, R., Kimura, S., Hirahara, S., Tagami, A., Fujimura, R., Matsuzawa, T., Kurashimo, E., Yoshihiro, 2024, Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm and their relation with earthquake swarm activity in the Noto Peninsula, central Japan, Earth, Planets Sp., 76, 24, doi:10.1186/s40623-024-01974-0, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

吉田 圭佑, 松本 圭晶, 織茂 雅希, 2023, Double-difference法による大量地震の効率的な震源再決定と高精度震源分布のリアルタイム・モニタリング, 日本地球惑星科学連合2023年大会
Naoki Uchida, Rintaro Suzuki, Weiqiang Zhu, Gregory C Beroza, Takashi Nakayama, Genti Toyokuni, Ryota Takagi, Ryosuke Azuma, Keisuke Yoshida, Akira Hasegawa, 2023, Offshore microseismicity in NE Japan constrained by S-net and PhaseNet: insights on the forearc circulation of fluids and interplate coupling, 2023 AGU Fall Meeting, S43A-03

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

内田直希（東北大学理学研究科）,岡田知己（東北大学理学研究科）,山本希（東北大学理学研究科）,太田雄策（東北大学理学研究科）,吉田圭佑（東北大学理学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

青山裕（北海道大学）,中道治久（京都大学）,松島健（九州大学）,佐藤剛至（情報通信研究機構）,天間克宏（情報通信研究機構）,大和田泰伯（情報通信研究機構）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科

電話：022-225-1950

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：内田直希

所属：東北大学理学研究科・東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京工業大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

海域火山活動に伴う熱水活動の実験的研究と観測研究

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

海域火山活動時に発現する変色海水について、熱水の組成変化を実験的に明らかにする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度は、変色海水の採取・分析法について、検討を行う。

平成32～34年度は、変色海水の原因である熱水について、その組成変化に関する実験的研究を行う。

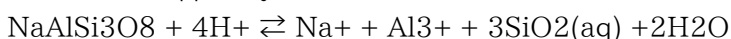
平成35年度は、5年間のとりまとめを行う。

海域火山活動の観測研究については、5年間を通じて実施する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

酸性度を一定にして塩化物溶液の濃度を変えた岩石-酸性塩化物溶液実験を行なった。酸性化したNaCl溶液による岩石からのFe, Al, Siの溶出は、酸性化した海水を酸媒体として用いた場合と全く同じパターンを示した。酸性化KCl水溶液によるFe, Al, Siの溶出はNa水溶液と同様であったが、岩石からのこれらの成分の溶出性への影響はNa水溶液よりも低かった。一方、CaおよびMg塩化物酸性溶液は、濃度にかかわらず、岩石からのこれらの成分の溶出性に影響を及ぼさなかった。この結果は、主にNaがAlとSiの溶脱を抑制していることを示しており、AlとSiは以下の反応式で溶脱がコントロールされていると言える。



長石の加水分解反応は、二段階に分かれており、第1段階は、長石骨格中のNa+1つとH+1つとの交換反応である。第2段階は、長石骨格中の1つのAl³⁺と3つのH₃O⁺との交換反応であり、Siに富む前駆錯体を形成する。そして、Si-O結合の加水分解によりSiが溶脱する。Na⁺とH⁺との交換反応は比較的速いため、この反応の律速段階にはなり得ない。岩石からのAlとSiの除去は、長石からのそれと非常に似ているが、今回の反応実験では、酸性溶液が岩石と反応し、平衡から遠ざかっているにもかかわらず、岩石からのAlとSiの溶脱は酸性溶液中のNa濃度の増加とともに著しく減少し、あたか

もNa-長石ネットワークの溶解反応の見かけの平衡がLe Chatelierの原理に従ってシフトしたかのようであった。この結果は、長石の分解過程とは逆に酸性媒体中のNaが溶解反応速度を制御していることを示唆している。

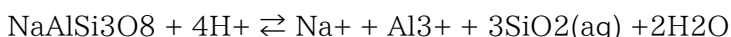
・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

海底火山活動中に発生する顕著な火山現象の一つに、海底火山の火口上部の海面が青白色、乳白色、黄緑色、黄色、赤褐色に変色する変色海水がある。これは、海底火山から放出された酸性の熱水が海水と中和され、熱水中のSi、Al、Feが共沈して生成するSiO₂-Al₂O₃-Fe₂O₃-H₂O沈殿物によるものである。陸域の火山の場合、マグマから放出される火山ガスと天水起源の流動する地下水が火山体の浅部にある熱水系を形成する。熱水系では気液分離が起こり、気相は噴気ガスとして、液相は温泉水として放出される。海底火山では熱水系を形成するのはマグマからの火山ガスと海水であると考えられることから、岩石-酸性化海水反応実験を行い組成変化と火山活動との関連を考察した。

実験で使用した岩石試料は、2013年以來繰り返し噴火が続いている西之島の溶岩流から採取したガラス質安山岩を用いた。これをメノウ乳鉢で粉碎し、ふるいにかけて106～75 mmに揃えたものを0.20 g用いた。反応容器として50 mLのプラスチックボトルを使用し、バッチシステムで酸性度を一定にして海水濃度を変える実験、塩化物溶液の濃度を変える実験、海水濃度一定で、酸性度を変える実験を行った。これらの実験は電気オープンを使用して80°C±1°Cで行った。すべての実験において、反応時間は72時間の予備実験の結果に基づいて48時間とした。反応後のサンプル溶液はディスポーザブルメンブレンフィルターでろ過し、試料溶液中のFe、Al、Siの濃度はICP発光分析法により測定した。

酸性度を一定にして海水濃度を変えた実験結果を図1に示す。反応溶液中の海水の割合が60%までは海水の割合が増えるにつれてSiとAlの溶脱量が顕著に減少するが、それ以上海水の割合が増えても溶脱量に大きな変化はない。これに対して、Feの溶脱量は海水の割合に関係なく変化は僅かだった。この結果は、岩石と酸性化した海水との相互作用によって生成される熱水の化学組成は海水の関与の程度に依存し、海水の割合が高くなるほど熱水中のFeの割合が高くなることを示している。

酸性度を一定にして塩化物溶液の濃度を変えた実験結果を図2に示す。酸性化したNaCl溶液による岩石からのFe、Al、Siの溶出は、酸性化した海水を酸媒体として用いた場合と全く同じパターンを示した。酸性化KCl水溶液によるFe、Al、Siの溶出はNa水溶液と同様であったが、岩石からのこれらの成分の溶出性への影響はNa水溶液よりも低かった。一方、CaおよびMg塩化物酸性溶液は、濃度にかかわらず、岩石からのこれらの成分の溶出性に影響を及ぼさなかった。この結果は、主にNaがAlとSiの溶脱を抑制していることを示しており、AlとSiは以下の反応式で溶脱がコントロールされていると言える。



長石の加水分解反応は、二段階に分かれており、第1段階は、長石骨格中のNa+1つとH+1つとの交換反応である。第2段階は、長石骨格中の1つのAl³⁺と3つのH₃O⁺との交換反応であり、Siに富む前駆錯体を形成する。そして、Si-O結合の加水分解によりSiが溶脱する。Na+とH+との交換反応は比較的速いため、この反応の律速段階にはなり得ない。岩石からのAlとSiの除去は、長石からのそれと非常によく似ているが、今回の反応実験では、酸性溶液が岩石と反応し、平衡から遠ざかっているにもかかわらず、岩石からのAlとSiの溶脱は酸性溶液中のNa濃度の増加とともに著しく減少し、あたかもNa-長石ネットワークの溶解反応の見かけの平衡がLe Chatelierの原理に従ってシフトしたかのようであった。この結果は、長石の分解過程とは逆に酸性媒体中のNaが溶解反応速度を制御していることを示唆している。

海水濃度一定で、酸性度を変えた実験結果を図3に示す。海水の割合が98%の反応溶液で酸性度を低下させると、各成分の溶脱量は減少するが、Feの溶脱は、pH3を超えると3つの成分の中で最も顕著に減少し、Siの溶脱の減少はAlのそれよりも遥かに遅かった。これらの結果は、酸性溶液の酸性度の影響はFeに対してもっとも大きく影響し、熱水の酸性度が低いほど熱水中のSiの割合が増加しFeの割合が減少することを示している。

岩石-酸性化海水反応実験から、強酸性条件下で生成した熱水はFeの割合が高く、弱酸性化するにつれてFeの割合が激減する。Alの割合も弱酸性化に伴い減少し、最終的にはSiの割合の高い熱水が生成する。これを火山活動の消長に置き換えると、マグマから放出される揮発性成分の化学的性質から、火山活動の活発化に伴ってハロゲン化水素やSO₂の割合が増えて生成する熱水は強酸性化し、逆に沈静化すると揮発性成分の寄与が少なくなり、これらの成分の割合は著しく減少してH₂SやCO₂が主成

分となるため弱酸性化する。従って、火山活動の活発化に伴い、生成する熱水はFeの割合が高く、沈静化にともなってFeとAlの割合が低くなり、Siの割合の高い熱水が生成する。

2019年から2023年までの西之島の航空機観測の結果を図4に示す。2019年から2020年にかけては中央火口からの噴火や新たな火口を開いて溶岩の流出があったが、それ以降は中央火口丘やその外斜面での噴気活動が中心である。変色域の発生状況は、2020年までは噴火中でも希薄な変色域が北西岸を中心に狭い範囲で広がっていたが、2021年以降、島の海岸部全域に拡大しており、海流によって数10キロ～100キロの変色域が観察される場合があった。これは、物質の放出形態としては2019年～2020年は熱水の放出はわずかで、マグマからのガスの放出がほとんどであったが、それ以降は熱水の放出が中心になってきたことを示しており、火山体内部における熱水系の発達が起きていることを意味しているものと考えられる。

西之島で観測されている濃厚な褐色系の変色海水は湧出する熱水中のFeの割合が非常に高いことを示しているが、これまでの酸性溶液－岩石の反応では説明できなかった。今回の実験によって岩石が強酸性化海水と反応することによって生成する熱水はFeの割合が高くなることが明らかになった。また、酸性化海水の酸性度の低下に伴って生成する熱水は、Feの割合が極めて低くSiの割合が非常に高いことから、火山活動の静穏化によって生成する変色海水の色調は薄い白色系になることも実験的に示すことができた。これは福徳岡ノ場2021年噴火以降の変色海水の色調変化と一致している。

南硫黄島での変色域の発生状況を図5に示す。この島は北福徳カルデラの南縁に位置し、福徳岡ノ場海底火山に隣接する、ポストカルデラの活動でできたものであるが、現在は火山活動は認められておらず、活火山ではない。ところが、約20年前から北岸～東岸にかけての広いエリアで変色域がほぼ常時認められており、熱水放出の火山活動が再開した可能性がある。色調からは、熱水の酸性度は決して低くなく、今後の推移に注目する必要がある。この近海には地球物理学的リアルタイムモニタリングをしている観測点がないため、衛星や航空機による監視が今後は重要な役割を果たすと考える。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

野上健治（東京工業大学）

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京工業大学科学技術創成研究院 多元レジリエンス研究センター

電話：0279-88-7715

e-mail：nogami.k.aa@m.titech.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：野上健治

所属：東京工業大学科学技術創成研究院 多元レジリエンス研究センター

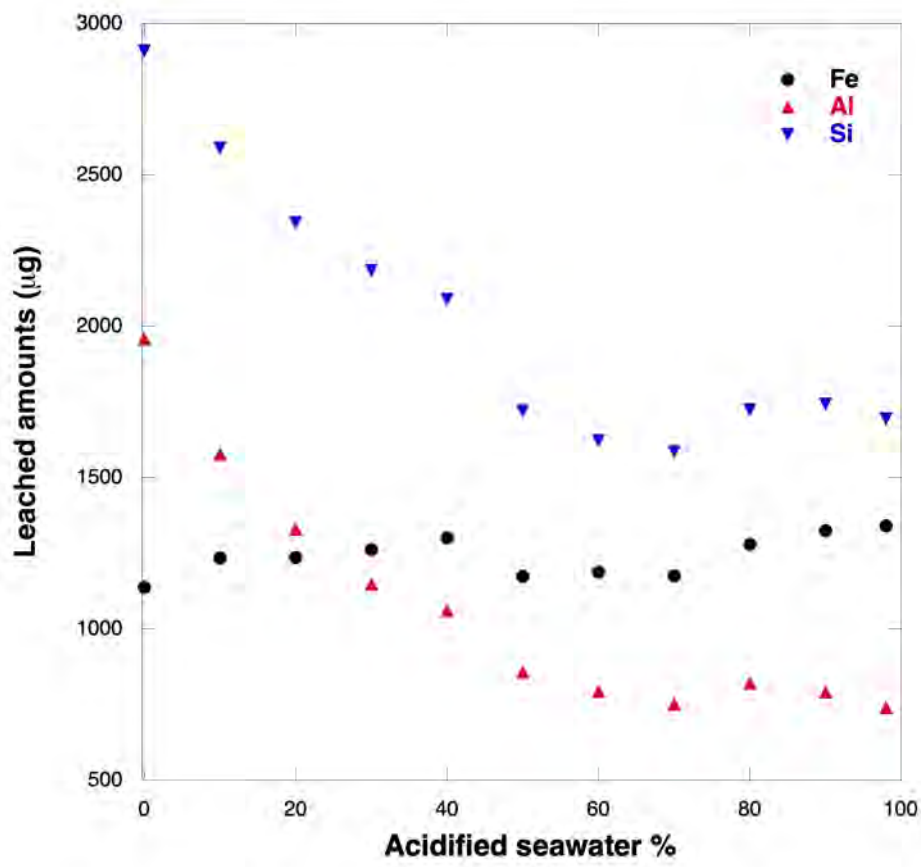


図1 酸性化海水の割合に対するFe, Al, Si溶脱量の変化

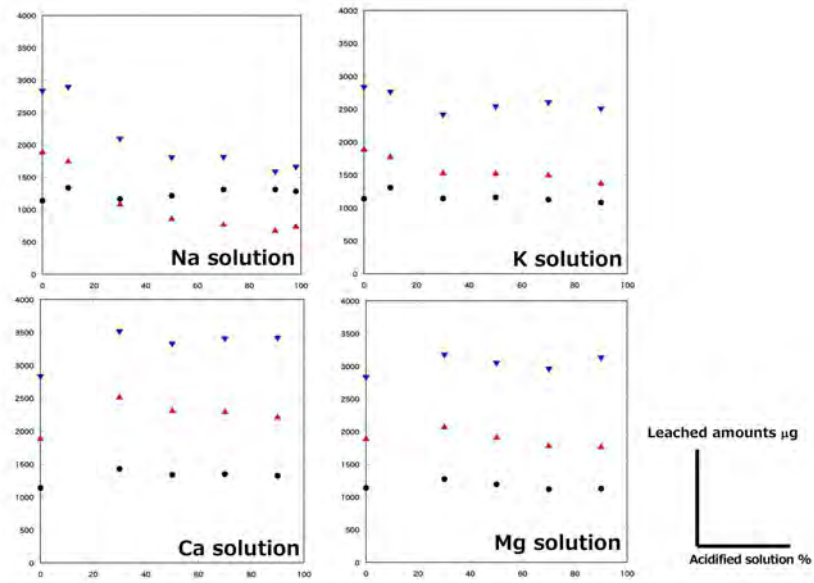


図2 酸性化塩化物溶液割合に対するFe, Al, Si溶脱量の変化

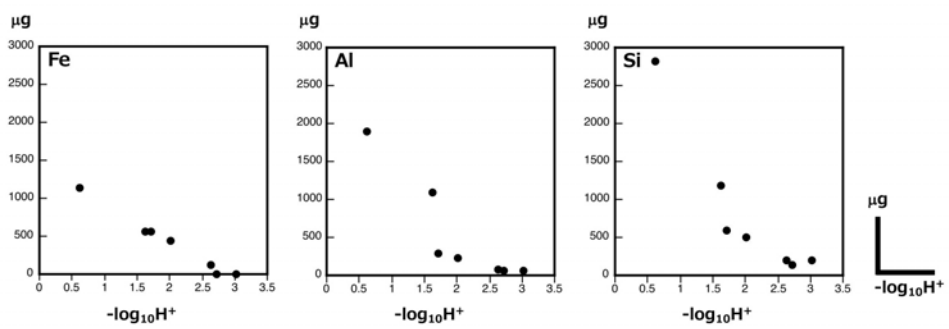


図3 酸性度の変化に対するFe, Al, Si溶脱量の変化

西之島 2019~2023年の活動の変遷

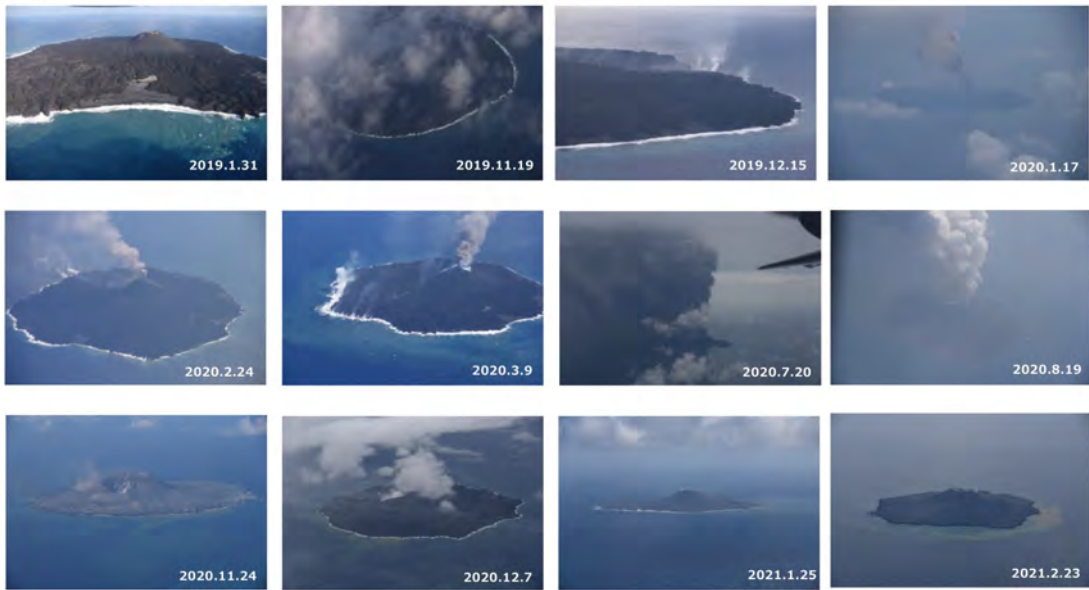


図4 2019年以降の西之島の火山活動（1）



図4 2019年以降の西之島の火山活動（2）



図4 2019年以降の西之島の火山活動（3）

南硫黄島



図5 南硫黄島における変色海水の発生状況

(1) 実施機関名：

東京工業大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

小型拡散放出二酸化炭素率測定装置の開発

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

火山活動にともなって放出されるマグマ起源の二酸化炭素を面的に捉えるための測定装置を開発する

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度は、装置の基本的な設計を行う。

平成32～33年度は、装置の試作を行う。

平成34年度は、試作した装置を使い、桜島などの火山での観測を行う。

平成35年度はこれらの成果のとりまとめを行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2023年度に新たにこのスペックに適応したモバイルバッテリーの性能調査を行い、連続観測を行ったところ、このバッテリーでも1データ1ファイルになる現象が発生した。これについて、再度詳しく調査した結果、この装置では、省電力のためにリフレッシュ中にはすべての動作装置がシャットダウンする仕様としていたが、モバイルバッテリー内部に保護回路があり、電流が流れない場合にはモバイルバッテリーの保護回路が作動してこの結果、毎回リセットしていたため、このような現象が大きかったことがわかった。モバイルバッテリーは取扱が簡単であるもののブラックボックス化しているので、瞬間最大電流値が大きいrechargeableな自動車に搭載している電池に再度載せ替えて動作させたところ、問題が解決した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

マグマ中の揮発性成分のうち、CO₂の脱ガスが進行することでマグマの密度が低下し、密度中立しているマグマ溜まりからのマグマの上昇を引き起こされる。CO₂は岩石や熱水に対して反応性に乏しいため、脱ガスしたCO₂は地表へと上昇して、火山体の表面から大気中に拡散放出される。従って、マグマの上昇を伴う様なマグマ噴火の前兆現象として、visualに捉えられないCO₂の拡散放出を検知できることが鍵となる。これまでCO₂の拡散放出を測定する方法はあったが、基本的にキャンペーン観測であり、定点観測の場合には電力と装置を設置するスペースの問題があり、実用化されているところは極めて限られているのが現状である。今計画では拡散放出されるCO₂を同時多点観測するための小型可搬式自動観測装置として定体積中のCO₂濃度の上昇速度を測定するチャンバメソッドをベースとして、開発を目指した。

初年度である2019年に次の様な基本設計を行い、1) チャンバーに自動開閉装置がある 2) 濃度測定およびリフレッシュのインターバルを任意に決められる 3) GNSSで観測点を測位し、刻時する 4) データの収録インターバルを任意に決められる 5) 長期間測定するための省電力化 6) 現行品よりも低価格 な設計とパーツ選定を行った。CO₂センサーとして広く使われているフィガロ技研社製CDM7160 (図1) を採用した。このセンサーは、ポンプシステムを必要とせず、消費電力も低く抑えられると判断し、これに合わせて、本体コントロール用のボードとPC用ソフトウェアの作成を依頼した。

2020年に、チャンバーのサイズを2種類のパイロット装置 (以下、TIT meter) を作成し、CO₂標準ガスを用いて、繰り返し測定実験を行った。放出率はチャンバーの大小とも同じ結果を得られデータを取ることができたが、既製品であるWEST社製の装置 (以下WESTmeter) との性能比較試験を行った結果、TIT meter はWEST meter と比べてわずかに低く求められた。

2021年に、フィールドテストを草津白根山および有珠山において実施した。草津白根山殺生河原におけるフィールドテストでは、TIT meter とWEST meter との比較を殺生河原の噴気地帯で行った。その結果、fluxの低い場合にはTIT meter による測定結果はWEST meter のそれと一致しているが、fluxの高い場合にはWEST meter よりもTIT meter の方が低く測定されることがわかった。室内実験では濃度の高いCO₂でもfluxの低い場合には問題にはならなかったが、field testの結果、低い濃度であってもfluxの高い場合には一致しないことがわかった。TIT meter で使っているセンサーは、センサー保護膜がありそれで光路の妨げになる粒子等をフィルターしているが、fluxの高い場合にはそれによってCO₂の拡散が律速され、センサーへの拡散を妨げられたことによると考えられる。有珠火山におけるフィールドテストでは、次世代人材育成事業の野外実習の機会に有珠火山の山頂火口原内で面的観測を実施し、同時にWEST meter との比較を行った。その結果、殺生河原での結果と同様に、fluxの高い場合にはTIT meter はWEST meter によりも過小評価することがわかった。さらに、フィールドで測定する場合に、接地が不安定になることがあること、長時間の連続観測は電力不足が発生し、途中で動作が停止していた。この結果をうけて、電源システムを大容量のLi ionバッテリーに変更する改造を行なうこととした。

本研究では、安価で汎用品であるFigaro社製のCO₂センサーCDM7160を使用していたが、ガス濃度が高くてもfluxの低い時には問題にはならなかったセンサー保護膜が、fluxが高くなると低濃度であってもセンサー部への拡散を妨げることが殺生河原でのfield testで明らかになった。さらに、このセンサーのキーパーツである受光素子を製造している半導体メーカーの工場が大規模火災に見舞われ、生産復旧に1年以上の期間を要することが判明した。この結果、受光素子の代替部品がなく、Figaro社がこのセンサーの生産を止め廃盤となった。センサー故障や劣化の場合には交換部品が存在しないため、新たに測定方式の異なるセンサーを探すことになった。

2022年に代替品として省電力で廉価、安定性に優れたセンサーを新たに探した結果、CO₂センサーCDM7160の代替センサーとして、SenseAir社製K30 (~10000 ppm) (以下SenseAir meter) を採用した。このセンサーは測定気体を強制的にセンサー部に吹き込むタイプで、2秒間隔で濃度測定ができ、プレヒートが1分以内と非常に短いのが特徴である。これまでに試作している自律式チャンバー内の大気をこのセンサーに吹き込み、測定後の気体を再びチャンバーに戻すためのポンプシステムを接続した。その他、基本的な設計をやり直すこととし、本体コントロール用のボードとポンプシステム、PC用ソフトウェアの作成を依頼した。

Senseair meterの性能試験を行うため、同一チャンバーに既存のWEST meterも接続し、TIT meterも含めた3つの測定方式によってCO₂の測定を実施した。これらの3つのセンサーによる同時測定の結果、1000ppmCO₂標準ガスを使った場合、Senseair meterとWEST meterで求めた放出率は一致したが、TIT meterで求めた放出率はこれらに比べて低く求められた (図1)。1000ppmCO₂標準ガス

に100%CO₂を混入させた場合も同様で、濃度ではなく、fluxの高い場合にはCDM7160ではセンサー保護膜の拡散が律速となることが示された。以上の結果から、これまでに作成した自律式CO₂測定装置のセンサーをCDM7160からSenseair社製K-30に置き換えることで、WEST社製CO₂ flux meterと同等の性能が期待できる。

測定器を直接地面に設置した場合に、チャンバーと地面の間に隙間ができてしまい、正しいデータが出ないことが有珠山での観測で示された。これらの性能試験結果を踏まえて、測定装置の設置台座の設計と製作を行った。また、電源をLi ionバッテリーに交換し、フィールドテストを実施したが、その際に、1データ1ファイルになる不具合がわかった。安定化電源で測定した場合にはこの現象は見られなかったが、フィールドと同じモバイルバッテリーで測定した場合にこの現象が確認された。原因追求をメーカーと共同で実施した結果、上下駆動用モーター、ファンモーター、ポンプモーターの3つのモーターが同時に駆動する時、電圧低下が発生してCPUの再起動を繰り返し、その結果1データ1ファイルになる現象が発生する事がわかった。モバイルバッテリーの出力電流がこの装置においては充分ではなく、その結果として装置のシステムが不安定化したことが原因であった。瞬間最大電流値を引き上げる必要があることがわかった。

2023年度に新たにこのスペックに適應したモバイルバッテリーの性能調査を行い、連続観測を行ったところ、このバッテリーでも1データ1ファイルになる現象が発生した。これについて、再度詳しく調査した結果、この装置では、省電力のためにリフレッシュ中にはすべての動作装置がシャットダウンする仕様としていたが、モバイルバッテリー内部に保護回路があり、電流が流れない場合にはモバイルバッテリーの保護回路が作動してこの結果、毎回リセットしていたため、このような現象が大きかったことがわかった。モバイルバッテリーは取扱が簡単であるもののブラックボックス化しているので、瞬間最大電流値が大きいrechargeableな自動車に搭載している電池に再度載せ替えて動作させたところ、問題が解決した。

5年間の研究の結果、当初の目標であったスペックの、世界初の拡散放出CO₂自動測定装置を作成することができた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

二酸化炭素放出率連続観測システムの開発

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

野上健治（東京工業大学）

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京工業大学科学技術創成研究院 多元レジリエンス研究センター

電話：0279-88-7715

e-mail：nogami.k.aa@m.titech.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：野上健治

所属：東京工業大学科学技術創成研究院 多元レジリエンス研究センター

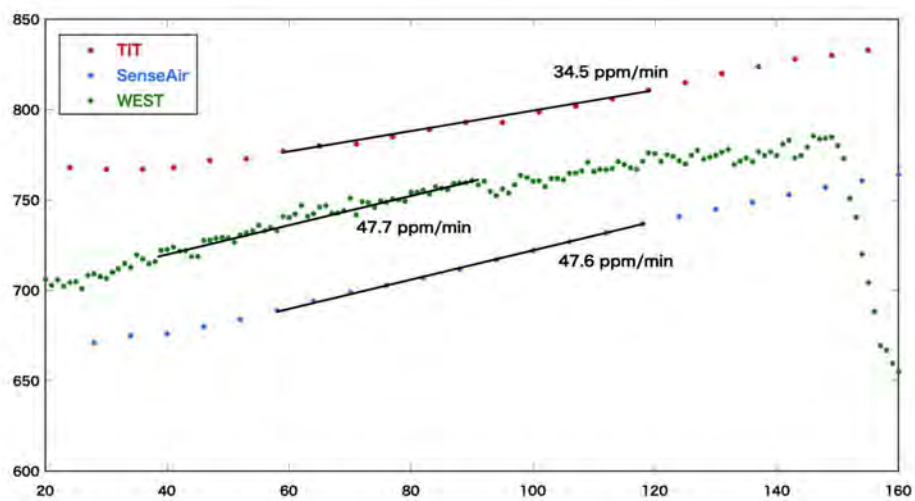


図1 3種の異なるセンサーによるflux測定テスト

(1) 実施機関名：

東京工業大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

水蒸気噴火の準備過程を捉えるための火山熱水系構造モデルの精緻化

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

オ. 高リスク小規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題では、浅部熱水系への流体供給源であるマグマだまりや、Brittle-Plastic境界（地表下2-3 km付近）以深に貯留されている高温・高圧の熱水の挙動を観測から伺い知るために、これまで判明している領域よりもやや深い場所の地下構造と、その周辺の熱水流動との関係を明らかにすることを目標とする。そのために、草津白根、御嶽および伊豆大島火山の3火山において電磁気学的な構造探査を基軸とした観測研究を実施する。本課題では、得られた地下比抵抗構造の特徴を、地球物理・地球化学的な観測成果と比較することで解釈する。すなわち、山体スケールで地震・地殻変動等の観測とデータ解析を進めるほか、火口周辺に加えて、やや広域を対象として噴気ガスや温泉等の試料採取する、あるいは既存データを収集する。このように得られた諸成果を整理することで、地下数～10 km程度までのやや深い領域までの構造と流体輸送との関係を研究する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1年目：草津白根、伊豆大島および御嶽火山（以下、対象3火山と呼ぶ）においてMT観測等の電磁気学的構造探査を実施。草津白根火山では地球物理観測（地震・地殻変動、全磁力および温度観測）、

および地球化学的調査（広域での温泉水採取、および火口周辺での繰り返しサンプリング）を実施
2年目：対象3火山において電磁気学的構造探査を実施。草津白根火山では地球物理観測および地球化学的調査を継続
3年目：対象3火山において比抵抗構造解析を進めるほか、必要に応じて補充観測を実施。草津白根火山では温泉および震源分布等の解析を行うほか、地球物理観測および地球化学的調査を継続
4年目：対象3火山において比抵抗構造を求める。伊豆大島ではCSEM連続観測を実施。草津白根火山では温泉および震源分布等の解析を行うほか、地球物理観測および地球化学的調査を継続
5年目：対象3火山において得られた比抵抗構造を、地球物理および地球化学的調査結果に基づき解釈する。伊豆大島ではCSEM連続観測を継続。草津白根火山では地球物理観測および地球化学的調査を継続

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

（草津白根山）

2018年に噴火した本白根火砕丘において実施した稠密MT観測の結果、同火山の浅部には白根火砕丘のような釣鐘状 cap rock が発達していないこと等が明らかとなった（Honda et al., 2023）。2014年から活発化していた白根火砕丘では、地震活動は低下し、拡大していた震源分布が2014年以前に戻ったこと、それまで観測されていた浅部増圧が2022年から減圧に転じたこと等を捉えた（東工大、第153回予知連資料、2024）。

2018年本白根山噴火発生時に観測されたVLPを再解析した結果、鉛直開口クラックよりも浅部にシル状の圧力変動源が見出された。これは、開口クラックを通じて上昇してきた流体が一時的に滞留したことを示唆する（Yamada et al., 2023）。噴火しなかった2011年の事象では、クラックの開口は観測されたもののVLPは発生していない。このVLPは、噴火発生の分岐条件を理解するために重要である。

地球化学的観測結果の解析高度化のために、湯釜火口湖の水・熱収支を再現する数値モデルを構築した。これにより、各溶存化学成分や同位体の時間変動を定量的に解析できる（Terada and Kuwahara, in press）。ドローンを用いた火口湖水の遠隔採水技術がウインチを用いるなど向上した。この手法を技術移転し、同様の観測がPoas火山（コスタリカ国）でも定常的に実施されるようになった（Sibaja et al., 2023）。

草津白根山湯釜火口周辺の固定MT観測点8点で広帯域電磁場の連続観測を行い、同時に山麓から高精度に制御された人工電流を送信した。解析については、昨年度のデータについて人工信号源に対する応答関数を求める重み付きスタッキング法を適用して応答関数を高精度で求めた。

（伊豆大島）

これまでに取得したデータ解析を実施し、A火口周辺とB火口列の地下浅部が他と比して、低比抵抗を示すことがわかった。このことは、両火口下に火山性流体が存在し、熱水変質が起きていることが示唆し、空中磁気測量解析の結果がB火口列に沿って弱磁化を示していることと整合的である。また、中央火口側からカルデラ縁に向かって浅部比抵抗値が高くなっており、ACTIVE観測から推定された構造とも一致する。以上のことは、中央火口直下に熱水上昇系が存在し、上昇が高止まったのちに周囲に拡散流下していることを示していると考えられる。

また、全磁力連続モニタリングを継続し、1986年噴火以降の帯磁傾向がほぼ収束し、現在は停滞傾向にあることが認められた。一方で、ACTIVE連続観測からは、帯水層上面の昇降による年周変化による変動は見られる程度で、火山下浅部に異状が認められなかった。

（御嶽山）

御嶽山の火山活動域付近の浅部(地表～数km程度)比抵抗構造を得るために、御嶽山山頂部の3地点にてAMT/広帯域MT観測を実施した。過年度の観測により御嶽山はノイズレベルが非常に高い地域であることが判明している。この問題に対して、2022年観測と同様、大容量の太陽光パネルおよびバッテリーを用いた数ヶ月間の長期間観測を行うことによって対応した。その結果、地磁気嵐期間を含む電磁場データを取得することに成功し、周波数10k～0.01Hzの良好なMTインピーダンスを推定することができた。得られたMTインピーダンスは2014年火口付近が低比抵抗の傾向を示し、熱水や変質粘土等が分布すると思われる。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

(草津白根山)

年度計画に従って実施した。すなわち、噴火発生場の特徴という静的な知見に加えて、流体流動という動的な情報を与えることで、水蒸気噴火と unrest の関係を具体的に描像した。例えば草津白根火山については比抵抗構造の全体像が判明し、白根火砕丘の地下浅部に釣鐘状に広がる cap rock のほか、その下の海拔 0 km から海拔 4 km 程度の広い範囲に流体貯留域、およびマグマだまりに対応すると思われる低比抵抗域が見つかった (Matsunaga et al., 2020; Tseng et al., 2020; Matsunaga et al., 2022)。2018 年本白根山に関しては、その直下に繰り返し開閉する鉛直開口クラックが見出されたほか、噴火前後の流体移動と構造との関係が議論された (Yamada et al., 2021; Terada et al., 2021; Yamada et al., 2023; Honda et al., 2023)。さらに、湖水や火山ガスの化学的特徴を解析する手法が新たに提案され、マグマガスや地下水循環の時間変動が示唆された (寺田, 2018; Yaguchi et al., 2021; Terada et al., 2022; Obase et al., 2022; Terada and Kuwahara, in press)。ドローン (Terada et al., 2018; 橋本・他, 2018; James et al., 2020; Sibaja et al., 2023) や、電磁アクロスといった新しい観測システムの試験運用も実施され、水蒸気噴火発生場に関する観測手法が拡充された。

(伊豆大島)

コロナ禍により現地観測の制約は受けたものの、5 年間で当初計画通りに実施した。成果としては、熱水変質と見られる低比抵抗域があり、熱水対流系がカルデラ周囲に流下する傾向が検出されたことにある。また、これらの傾向は、磁化構造解析や ACTIVE 観測データを支持する。連続観測からは、現時点では浅部に変化は認められないが、前回噴火以降の磁化強度変化に転換がみられ、今後の継続的なモニタリングの重要性が示唆された。

(御嶽山)

山中中腹部から山頂部の計 12 地点 (延べ 18 点) において、AMT/広帯域 MT 観測を実施した。初年度 (2019 年度) の観測により、御嶽山地域は MT データに対するノイズレベルが非常に高いことが判明した。そのため、2019 年度以降は大容量のソーラーパネルとバッテリーを用いた長期観測により、地磁気擾乱が大きい期間をとらえる計画に切り替えた。2020-2021 年はそのための試験観測などを御嶽山中腹域などで実施した。2022-2023 年度は山頂域で長期間観測を実施した。これにより火山活動域を含む御嶽山山頂行き南部から中部域の徒歩で到達可能な場所において、最低限の MT 観測データを得ることができた。現時点での解析によると、火口部付近の観測点で推定した MT インピーダンスから、地表よりおよそ 100 m より深部において 7 ohm-m 以下の低比抵抗層が存在することが見積もられている。この層は、火山活動による熱水が変質粘土層の存在を示唆している。今後は三次元比抵抗構造解析を行い、より詳細な比抵抗分布を解析する必要がある。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

草津白根山では、火口周辺で継続した高密度観測により活動評価の質的向上に資するデータを継続的に取得しながら、その火山学的理解を深めることができた。すなわち、草津白根山の浅部には熱水だまりが存在し、それは unrest を引き起こすばかりでなく、深部から供給された流体を緩衝する役割を担っている。一方で、より深い場所に self-sealed zone に覆われたもう一つの熱水貯留域が存在している。それが地表面と鉛直クラックで接続されることで、前兆に乏しい水蒸気噴火を駆動していると思われる。これらの結果は、他火山で取得されるモニタリングデータを解釈し、火山活動評価を行うために有益と思われる。

伊豆大島では、浅部熱水系についての知見を得ることに成功した。一方で、マグマ溜りの検出には至っておらず、その達成には周辺海域を含めたより広域の探査が今後必要であると考えられる。また、次の噴火の準備活動による浅部異常を捉えるためにも、連続観測モニタリングを継続していくことが重要である。

御嶽山では、徒歩での到達可能な観測点において、解析に耐えうる最低限の精度で AMT/WMT 観測データを得られたことから、ほぼ当初計画通りの成果を得たといえる。なお、御嶽山の MT 観測は本計画により初めて実施するため、過去の観測による蓄積がなかったことから、今後の MT 法観測の基盤となる重要なデータを得ることができたといえる。

(9) 令和 5 年度の成果に関連の深いもので、令和 5 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

・論文・報告書等

Honda A, Kanda W, Koyama T, Takakura S, Matsunaga Y, Nishizawa T, Ikezawa S, 2023, Shallow resistivity structure around the 2018 craters of Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, revealed by audio-frequency magnetotellurics, *Earth Planets Space*, 75, 43, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01799-3>, 査読有, 謝辞無

Yamada T, Terada A, Noguchi R, Kanda W, Ueda H, Aoyama H, Ohkura T, Ogawa Y, Tanada T, 2023, The Onset, middle, and climax of precursory hydrothermal intrusion of the 2018 phreatic eruption at Kusatsu-Shirane volcano, *J Geophys Res Solid Earth*, 128, e2023JB026781, <https://doi.org/10.1029/2023JB026781>, 査読有, 謝辞有

Sibaja BJ, Terada A, Alfaro-Solís R, Cambronero-Luna M, Umaña-Castro D, Porras-Ramírez D, Sánchez-Gutiérrez R, Godfrey I, Martínez-Cruz M, 2023, Unmanned Aerial Vehicle applications monitoring volcanic lake waters in Costa Rica, *Drone Systems and Applications*, 11, 1-14, <https://doi.org/10.1139/dsa-2022-0023>, 査読有, 謝辞有

Terada A, Kuwahara T, in press, A sensitive window into the magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane volcano, *Monograph Kusatsu-Shirane, Active Volcanoes of the World*, Springer, 査読有, 謝辞有

Matsunaga Y, Kanda W, in press, Magnetotelluric imaging of the magmatic-hydrothermal system of Kusatsu-Shirane Volcano, *Monograph Kusatsu-Shirane, Active Volcanoes of the World*, Springer, 査読有, 謝辞有

気象庁地磁気観測所・気象庁地震火山部・東京大学地震研究所, 2023, 伊豆大島における地磁気全磁力変化, 第152回火山噴火予知連絡会資料, 査読無, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Kanda W, Koyama T, Matsunaga Y, Tamura S, 2023, Geomagnetic variations associated with the unrest in 2014 and 2018 at the Kusatsu-Shirane Volcano, *IUGG2023, JS04p-071*

Matsunaga Y, Kanda W, 2023, Numerical simulation of hydrothermal circulation within active volcanoes: Constraints from resistivity structure models, *Numerical simulation of hydrothermal circulation within active volcanoes: Constraints from resistivity structure models, IUGG2023, JS04p-076*

Terada A, Wakamatsu K, Mizutani N, Sumino H, Obase T, Ohba T, Takahashi M, Yaguchi M, Takahashi Y, 2023, Assessment of lateral eruption hazards at Kusatsu-Shirane volcano: subsurface volcanic gas transport suggested by soil gas chemistry, *Volcanic Gas Workshop*, 10

Ishizu K, Ogawa Y, Tseng KH, Serita S, Kunitomo T, Minami T, Ichihara H, Caldwell TG, Heise W, Bertrand EA, 2023, Application of EM-ACROSS to investigate of underground structures of the Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, *JpGU2023, SEM14-10*

小川康雄, 2023, 電磁誘導を用いた地殻構造探査, 2023年度CA研究会

大石健登・小山崇夫・上嶋誠・馬場聖至・白井嘉哉・多田訓子・田中聡, 2023, 2021年度伊豆大島MT観測データ初期解析, 2023年度CA研究会

市原寛・桑谷立・多田訓子・永田賢二, 2023, グリッドサーチによるモデルパラメータの確率分布推定: 地磁気異常問題へ適用, 2023年度CA研究会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

項目: 火山: 地温測定 (現地・DTS)
概要: DTS試験観測 (側線長1.2km)
既存データベースとの関係:
調査・観測地域: 群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275
調査・観測期間: 昨年度より継続-2023/10/31
公開状況: 公開留保中 (公開時期・ポリシー未定)

項目: 火山: 地震: 短周期地震観測
概要: 定常・臨時観測 (14点)
既存データベースとの関係:
調査・観測地域: 群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定
公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地震：広帯域地震観測

概要：定常観測（3点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：空振観測

概要：定常観測（1点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地殻変動：傾斜計観測

概要：定常観測（ボアホール3点，地表付近3点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地殻変動：GNSS観測

概要：連続・繰り返し観測（14点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：その他

概要：定常観測（湖面水位1点・水温5点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地殻変動；地下水位観測

概要：定常観測（1点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：構造：MT・AMT観測

概要：電磁ACROSS

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：2023/7/-2023/10/

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：磁力観測（全磁力・3成分）

概要：定常観測（4点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地球化学：噴気ガス・土壌ガス

概要：噴気（定期採取5か所），土壌ガス（臨時採取，多点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：地球化学：採水

概要：湯釜火口湖（定期採取，1か所）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：遠望観測（カメラ）

概要：湯釜火口内（1か所）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：

項目：火山：熱映像・噴気温度

概要：夜間空中観測（2-3年に1回），30m深地下水温度（定常1点），80m坑井内水晶温度計観測（定常1点）

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：群馬県草津町草津白根山 36.643889 137.5275

調査・観測期間：昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：火山：構造：MT・AMT観測

概要：御嶽山山頂部の3地点にてAMT/広帯域MT観測を実施

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：水蒸気噴火を起こし得る火山活動不安定における観測データ理解の深化 35.893094 137.480644

調査・観測期間：2023/6/-2023/9/

公開状況：

(11) 次期計画における課題名：

水蒸気噴火を起こし得る火山活動不安定における観測データ理解の深化

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

寺田暁彦（東京工業大学），神田 徑（東京工業大学），小川康雄（東京工業大学），野上健治（東京工業大学）

他機関との共同研究の有無：有

青山 裕（北海道大学），山本 希（東北大学），小山崇夫（東京大学地震研），市原 寛（名古屋大学），前田裕太（名古屋大学），渡辺俊樹（名古屋大学），大倉敬宏（京都大学），角野浩史※研究協力者（東京

大学先端科学技術研究センター), 鬼澤真也※研究協力者 (気象庁気象研究所), 山田大志※研究協力者 (防災科学技術研究所)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京工業大学科学技術創成研究院 多元レジリエンス研究センター

電話：

e-mail：

URL：<http://www.ksvo.titech.ac.jp/jpn/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：寺田暁彦

所属：東京工業大学科学技術創成研究院 多元レジリエンス研究センター

(1) 実施機関名：

鳥取大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地方自治体の地震被害想定，災害リスク評価を高度化するための基盤整備

(3) 関連の深い建議の項目：

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - ウ. 大地震による災害リスク評価手法

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (1) 地震発生の新たな長期予測
 - イ. 内陸地震の長期予測

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
 - ア. 地震動の即時予測手法

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

- (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

鳥取大学が立地する鳥取県は山陰ひずみ集中帯に含まれ，1943年鳥取地震をはじめ複数の被害地震が発生している。大学と県は防災顧問の制度を活用して連携し，地震被害想定の方策などに先進的な概念を導入して来た経緯がある。その実施に際して，大学が積極的に情報提供をおこなっているものの，地下構造モデル策定に必要なデータは都市圏に比べて乏しい。

そこで，地震被害想定における不確実性を低減することを目的として，地下構造モデル構築に必要な探査をより充実し，次期被害想定に用いることができるデータベースを充実する。特に，広域の地震動想定でおおざなりにされがちな山間部での地下構造モデル作成の高度化を図る。また構造物被害の評価では，地域固有の条件を考慮した上で総合的なリスク評価の高度化を進め，新たな条件設定で現状の予測の再評価をおこなう。また，その結果を県民に伝えるために有効な手段について，対象自治体と連携して策定する。同時に，鳥取県震度計ネットワークを用いたリアルタイム震度予測を自治体の地震防災体制に積極的に活用するための方法を模索して実装する。

本観測研究計画では，災害誘因毎にパイロット地域を設けて，防災実務者と連携を図ることが重要と考えている。本提案は主として鳥取県を対象に実施する計画としているが，地震動評価，災害リスク評価に直接的に必要な研究に留まらず，得られた成果を災害実務に役立てることを目的として地域に還元する方法論の検討を指向する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年・令和元年度には，鳥取県内で地下構造情報の乏しい領域で，主に微動探査・重力探査を用いた現地観測を実施する。加えて，鳥取県震度計ネットワークを用いた地震動即時予測について，自治体ので実務に活用できるシステムを模索した開発をおこなう。

令和2年度には、鳥取県内での現地観測に基づく地下構造モデルの構築を継続実施する。また、鳥取県に固有の建物条件、人口構成、産業条件などを取り入れた、地域に固有の災害リスク評価手法の検討を始める。

令和3年度には、自治体の意見を参考にしつつ、鳥取県内の地震災害リスクを県民に分かり易く伝えるためのHPの構築を始める。また、現地観測に基づく地下構造モデルの構築を継続する。

令和4年度には、新たな情報および条件に基づく災害リスク評価の試算を始める。また、地下構造モデルの更新を目的とした現地観測と地震災害リスクを県民に分かり易く伝えるためのHPの構築を継続する。

令和5年度には、得られた情報および条件に基づく災害リスク評価を実施し、その結果を県民に分かり易く伝えるためのHPを鳥取県と連携して実装する。また、地下構造モデルの更新を目的とした現地観測を継続実施する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

(1) 令和5年度に鳥取県内で実施した微動観測は鳥取市浜坂地区および湯山地区(鳥取砂丘の南)のみだが、拠点間連携研究(CTOC42)と協働で島根県多伎町および徳島県三好市の地すべり地域における微動および重力観測を実施しており、その成果は鳥取県内の同様の地形に反映させることが期待される。また、鳥取大学キャンパスおよび県中部において独自の地震観測を継続している。これらの調査結果は、Web-GISを構築して研究室HPを介して閲覧可能としている。

(2) 鳥取平野を対象に、鳥取県の地震被害想定(2018年度)に用いられた地下構造モデルを新たな視点で更新した。平野内の地震観測点において拡散波動場理論を介して地震基盤までの地下構造モデルを推定して物性の標準値を設定し、微動大アレイ観測点での位相速度分散曲線と微動H/Vの卓越周期を満足するよう標準値に基づく地下構造を推定した。これら地震波速度に基づく層境界と面的に実施されている重力異常に基づく密度層境界の対応を吟味して、重力異常の形状を用いたRBF法(CGにおける点群補間に活用されている)による面的補完をおこなうことで、対象領域で実施された微動観測を満足する3次元地下構造モデルを構築した(図-1)。得られたモデルを従来モデルに埋め込むことで、予測震度分布影響評価をおこなう。

(3) 鳥取市鹿野町に立地し、1943年鳥取地震を経験した伝統的木造建築物(文久年間1861-1863建築)において実施した微動観測結果に整合するように稠密にモデル化し(図-2)、個別要素法による震動実験をおこなった。その結果、現在の住宅に適用される、固有振動数と減衰および地盤に対する応答倍率から評価される簡易判定よりも高い耐震性を有することが示唆された。鳥取県内のみならず、他地域の伝統的木造建築物への応用が期待される。

(4) 鳥取県の地盤震動特性や地震活動を県民に伝えるため、積極的に地域の講演会に参加している。これらの話題提供内容をまとめたスライドショーを研究室HPの中でWeb公開している(図-3)。対応が計画より遅くなったが、講演会で紹介するなど普及とコンテンツの充実に努めたい。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

(1) 鳥取県内を中心に、微動および重力探査を実施し、地盤震動特性および地下構造を把握し、Web-GISとしてとりまとめた。対象としては、地震被害に影響する厚い堆積層を有する地域を均一に測定することを主としつつ、地すべり地形、切盛造成地、地表地震断層ごく近傍など、山間部での地震被害が懸念される領域にも広げた。

(2) 地下構造モデルを更新し得る情報が蓄積された鳥取平野を対象に、拡散波動場理論を介した地震観測記録の解析、微動探査および重力探査の結果を活用し、コンピュータグラフィックスの分野で点群データの補間に用いられるRBF(Radial Basis Function)法を用いて新たなモデル化をおこなった。2018年度に鳥取県が実施した地震被害想定で用いられた地下構造モデルの対象領域を新モデルで置き換え、それが震度分布に与える影響を検討している。

(3) 常時微動を用いて建物振動特性を把握するため、複数台の地震計による同時観測から並進およびね

じれ振動を分離し、人力加振によらずとも減衰特性を抽出できるRD法の導入により、簡易判定に必要な固有周期と減衰および地盤に対する振動倍率を評価するルーチンを確立した。県内の伝統的木造建築物を微動観測結果を介して個別要素法でモデル化し、震動実験をおこなうことで簡易判定の位置づけを示唆することができた。この結果は、他地域の伝統的木造建築物への応用も期待される。

(4)鳥取県内34計測震度観測点からの1秒パケットでリアルタイム震度を表示するWeb公開（クローズ・ネットワーク）するシステムを構築した。順調に稼働し鳥取県庁でも表示されているが、市町村への普及は進んでいない。令和6年能登半島地震における県内のリアルタイム表示例などを用いて、今後も普及に努めたい。

(5)鳥取県内での住民向け講演会などのコンテンツを活用し、鳥取県の地震活動や想定される被害の要因などを解説するスライドショーを作成して研究室HPで公開している。対応が計画より遅くなったため普及や自治体との連携が進んでいないが、住民向け講習会などの場を積極的に活用した普及活動をおこない、地震被害軽減に向けた取り組みを継続したい。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

鳥取県をテストフィールドとして、大地震による災害リスクの事前評価において大きな影響を及ぼす地下構造について、主に微動を用いた調査をおこなった成果をWeb-GISでデータベース化した。また、鳥取市域について従来の地下構造モデルの更新を試みたので、予測震度分布への影響評価をおこなう。県民向けの普及を目指したWebでの情報提供が遅くなり、今後の普及に期待する。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

西田良平・香川敬生・池本美緒・横山展宏・村瀬謙介・櫻井修,2023,鳥取の震災-あの日から80年過去から学び備える今-,(一社)鳥取市社会教育事業団,査読無,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

香川敬生・末久由香子・野口竜也,2023,1927年北丹後地震で現れた郷村断層近傍の震動特性と地盤構造,JpGU 2023,SSS09-P13

野口竜也・黒岩綾香・今津慶大・西村武・香川敬生,2023,稠密微動観測に基づく堆積層の急変地域における地盤構造の推定,JpGU 2023SSS09-P03,SSS09-P03

末久由香子・香川敬生・野口竜也,2023,微動探査から推定される郷村断層(京都府京丹後市)近傍の地盤構造,第75回 2032年度（令和5年）土木学会中国支部部研究発表会,I-5

日高一・香川敬生・野口竜也,2023,微動観測による鳥取県第2庁舎の振動特性の把握,第75回 2032年度（令和5年）土木学会中国支部部研究発表会,I-6

野口竜也・河野勝宣,2023,微動観測に基づく地すべり地域—鳥根県多伎町—の地盤震動特性と地盤構造,日本地震学会2023年度秋季大会,S16P-04

野口竜也・西村武・香川敬生,2023,1943年鳥取地震における吉岡断層近傍の地盤振動特性と地盤構造,第16回日本地震工学シンポジウム,G417-21

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

地方自治体の地震災害対策に貢献するための基盤情報の整備と共有

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

香川敬生（鳥取大学大学院工学研究科）,野口竜也（鳥取大学大学院工学研究科）

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

電話：0857-31-5641

e-mail：kagawa@tottori-u.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：香川敬生

所属：鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

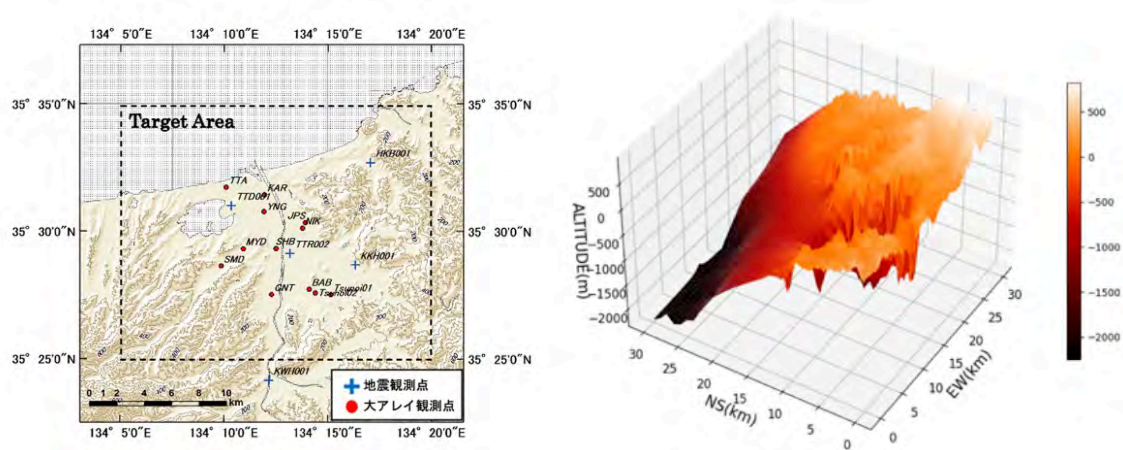


図-1 鳥取平野の基盤構造モデル
(左：対象領域，右：3次元基盤標高)

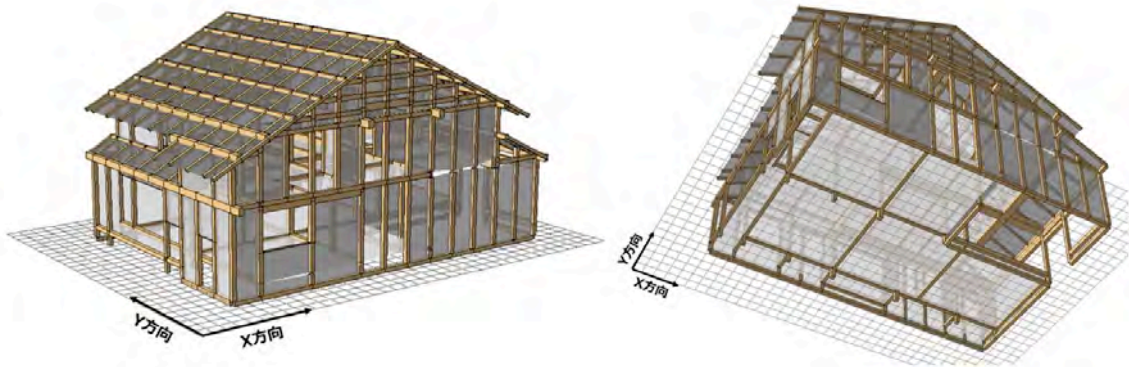


図-2 1943年鳥取地震を経験した伝統構法建築物のモデル
(左：北東側から，右：基礎側から)



図-3 ホームページによるコンテンツの公開
 (<https://geosd-tottori-u.jimdosite.com/>鳥取県の地震)

(1) 実施機関名：

富山大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

極小規模噴火を含めた草津白根火山の噴火履歴の解明と噴火ポテンシャル評価

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
- ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究

オ. 高リスク小規模火山噴火

- (6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(5) 総合的研究との関連：

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

(1) 地表調査及びトレンチ調査と放射性炭素年代測定により、極小規模～小規模噴火も含めた、草津白根火山山頂部での噴火履歴（噴火の様式・推移・規模・年代及び発生地点）の全容を解明する。

(2) 噴出物の物質科学的解析により、草津白根火山のマグマ溜りと熱水系の深度、温度、化学的状態、規模（空間的広がり）とその時間変遷を解明する。

(3) 上記（1）と（2）を総合し、草津白根火山の山頂部各域の噴火発生ポテンシャルを評価する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31年度には、白根火砕丘群の噴火履歴解明のため、湯釜・湊釜・水釜の火口壁沿いで噴出物層序調査を行う。白根火砕丘群東斜面では大・小のトレンチ調査を実施し、極小規模～小規模噴火のテフラの洗い出しを行う。テフラ中の材やテフラ層間の黒土の放射性炭素年代測定を行い、各テフラの年代を決定する。火山岩塊の定方位試料については岩石磁気解析を行い、定置年代・温度を決定し、温度データを基に噴火様式を特定する。火山灰試料については物質科学的解析を行い、各噴火時のマグマ溜り（マグマ噴火の場合）・熱水変質帯（水蒸気噴火の場合）の物理化学的状態を推定する。また、草津白根火山東麓の青葉山付近で地表調査とトレンチ調査を行い、同火山のテフラの層序の骨格を確立する。採取したテフラ試料については物質科学的解析を行い、熱水変質帯の物理化学的状態の

時間的変遷（熱水による酸化・還元状態の変化や熱水変質による再帯磁現象の有無の検証を含む）を検討する。

平成32年度には、白根火砕丘群での噴出物層序調査と東麓でのテフラ層序調査を継続することに加え、本白根及び白根火砕丘群の間に点在する小火口群について、火口近傍での地表調査とトレンチ調査を行い、火口の形成年代、火口を形成した噴火の様式・規模・推移を明らかにする。採取試料については前年度と同様の分析を行い、各噴火時のマグマ溜り・熱水変質帯の物理化学的状態のデータを蓄積する。

平成33年度には、本白根火砕丘群の山頂域に見られる火口列で地表調査とトレンチ調査を行い、噴火履歴を明らかにする。採取試料については、平成31・32年度と同様の分析を行う。

平成34年度には、本白根火砕丘群の山頂域に見られる火口列で地表調査とトレンチ調査を継続する。採取試料については、前年度までと同様の分析を行う。

平成35年度には、前年度までの研究成果を総括し、草津白根火山の山頂部各域の噴火発生ポテンシャル評価を行う。また、成果報告会を草津町で開催する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

本年度は研究計画通り、前年度までの研究成果を総括し、草津白根火山の山頂部各域の噴火発生ポテンシャル評価を行い、シンポジウムを草津町で開催した。また、前年度から継続して、テフラの層序調査及び物質科学的・岩石磁気学的解析を行った。

(1) 噴火発生ポテンシャル評価：前年度までに草津白根火山の山頂部の3つの火砕丘群（南から北へ、本白根火砕丘群、逢ノ峰火砕丘群、白根火砕丘群）についてマグマ噴火噴出物の層序が確立できた。各マグマ噴火噴出物の年代測定も行われ、本白根火砕丘群では新本白根火砕丘の年代が未確定に終わったものの、本白根西火砕丘、古本白根火砕丘、鏡池火砕丘、鏡池北火砕丘の噴出年代が明らかになった。白根火砕丘群では、白根東溶岩の年代が未確定に終わったものの、平米池溶岩、香草溶岩、白根北火砕丘、湯釜火砕丘、水釜溶岩ドームの噴出年代が、同様の年代測定法によりによりほぼ明らかにされた。逢ノ峰火砕丘群については、火砕丘本体の年代は現時点では想定中であり未確定であるが、同火砕丘群の弓池火口で起きた最後のマグマ噴火の年代は確定した。

各マグマ噴火噴出物の年代測定と併せ、噴出量をQGISの不規則三角網内挿機能を用いて計測した。マグマ噴出量と噴火年代と総合することにより、各火砕丘群の積算マグマ噴出量階段図を作成した

(図1)。これにより、各火砕丘群のマグマ噴火ポテンシャルの評価が可能となった。草津白根火山全体を見たときには、約5000年前の殺生溶岩の噴火後は活動が低調化したことが明らかになった。また、約2000年前には白根火砕丘群と本白根火砕丘群が相次いでマグマ噴火を起こしたことが明らかになるなど、火砕丘群間でマグマ噴火の連動があったことを覗わせる知見が得られた。

(2) 草津町でのシンポジウム開催：11月17日・18日に草津町で「草津白根山シンポジウム2023」を開催した。本年度は本白根火砕丘群が水蒸気噴火を起こして5年目であり、噴火前から本白根火砕丘群の噴火履歴調査を進め、噴火時にも火山灰分布調査に携わった石崎、亀谷も講演を行った。富山大学も主催機関としてこのシンポジウムに関わった。会場の草津町のホテルには約80人が、また、オンラインでも約200人が参加した。18日には草津白根山で現地見学会も実施した。

(3) 継続調査の成果：白根火砕丘群周辺の合計8地点のテフラ調査、土壌の放射性炭素年代測定を実施した。渋峠周辺の標高2106m地点には、露頭最下部に孀恋軽石（約11000年前）が見られ、その上位に13枚のテフラ層（層厚1～15cm）が堆積している。これらはさらに北側の横手山や志賀山周辺では確認できないため、白根火砕丘起源のテフラであると判断される。露頭中位部には軽石層（層厚3cm、約4700年前）と新鮮なラピリ層（層厚1cm、約3900年前）が見られ、いずれもマグマ噴火の堆積物と考えられる。その上位には灰色～白色のテフラ層（層厚2cm以下）が10枚見られ、これらは水蒸気噴火の堆積物であると考えられる。採取したテフラ試料のXRD分析を現在進めている。

草津白根山東麓の露頭2ヶ所から採取した完新世堆積物を対象に岩石磁気分析を行った。高温・低温磁気分析の結果、試料内の主要な磁性鉱物はチタノマグネタイトと考えられるが、チタンの割合はほぼ一定であることが示唆され、キュリー温度による層毎の特徴付けは難しい。熱磁気分析と初磁化率の温度変化の加熱曲線の挙動を対比した結果、類似する変化と異なる変化の2パターンが示された。得られた類似性からパターンマッチングによる2地点の露頭の対比を行った結果、噴火様式が推定されユニット境界が示唆された。層相での堆積物の対比が困難でも詳細な岩石磁気分析によるユニット境界の推

定の可能性を指摘できた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本課題はほぼ当初の計画通りに実施され、以下の成果をあげた。

（1）草津白根火山の最近の活動場である本白根火砕丘群、逢ノ峰火砕丘群、白根火砕丘群について、山頂域に分布するマグマ噴火噴出物の層序が解明され、噴出量・全岩化学組成もほぼ明らかになった。これにより本火山のマグマ噴出物に関する地質学的岩石学的知見が大幅に刷新された。積算マグマ噴出量階段図も完成し、各火砕丘群の噴火ポテンシャルを評価することができた。マグマ噴火噴出物についての物質科学的解析も計画的に進められ、最近の3つの活動場でのマグマ噴火が、共通するデイサイト質マグマとそこへ噴火毎に供給された苦鉄質マグマの混合により開始されたことが明らかになった。このデイサイト質マグマ溜りは隣接する志賀火山でもマグマ噴火活動に関与していた可能性が高いことがわかり、今後は志賀火山噴出物についての詳細な物質科学的解析を展開していく。

（2）山頂域から山麓に分布するテフラ調査を実施し、14C年代測定、粒子構成比、XRD分析を踏まえて、完新世のテフラ層序を確立した。また、2018年噴火と同規模の極小規模な水蒸気噴火についても、火口近傍での掘削調査により噴火年代が決定できた。これらの結果、火砕丘（群）ごとの噴火履歴が明らかになった。白根火砕丘群は約16000～3800年前にマグマ噴火、約7600年前～明治時代まで水蒸気噴火を10回以上発生した。一方、本白根火砕丘群は約11000～1400年前までマグマ噴火、約4800～400年前には水蒸気噴火を発生した。このように、両火砕丘群はマグマ噴火主体の活動から水蒸気噴火主体の活動へ推移したことがわかった。草津白根火山の水蒸気噴火テフラには硫酸塩鉱物であるミョウバン石と強酸性環境で生成するシリカ鉱物が産することから、硫酸酸性の熱水が継続的に活動してきた可能性が高い。また、テフラ層の分布域や層厚から、本白根火砕丘群よりも白根火砕丘群のほうが水蒸気噴火の頻度・規模が共に大きいと考えられる。本課題により、複数の活動場をもつ火山について、極小規模噴火を含めた噴火履歴を明らかにする手法が確立されつつある。次期課題でも、関係機関と連携しながら噴火履歴の精緻化に取り組む。

隣接する志賀火山においても水蒸気噴火テフラの物質科学的解析が進行中であり、東工大グループによるMT探査により解明されてきた草津白根火山―志賀火山の熱水系の構造・規模に関する知見に本研究で得られた物質科学的情報を加えることで、熱水系の構造に関する知見の精緻化を進めていきたい。

（3）テフラ層の古地磁気・岩石磁気分析からは以下のような知見が得られた。岩石磁気分析の結果、試料内の主要な磁性鉱物はチタノマグネタイトと考えられる。古地磁気解析から、安定な磁化成分をテフラ試料で同定した。各層準の平均磁化方位と既報の古地磁気永年変化曲線（BIWA SV-3）（Ali et al., 1999）を比較し、テフラ層の年代を推定した結果、14C年代と概ね矛盾のない古地磁気年代が得られ、噴出物の年代測定として古地磁気学的手法の有効性が示された。また、熱磁気分析と初磁化率の温度変化では、加熱曲線において異なる2つ挙動が得られた。結果から2露頭間でパターンマッチングを行い、ユニット境界の推定と露頭間の対比がなされた。なお、初磁化率の温度変化で認められた顕著な変化は、磁選試料を用いることで、硫化物や水酸化鉄などの熱水変質鉱物の実験中に熱変質したと考えられる。これらの熱水変質鉱物は水蒸気噴火の噴出物に富んでおり、岩石磁気分析から露頭対比や噴火様式の推定の可能性が指摘できた。今後は、同様な古地磁気・岩石磁気による手法を異なる露頭に対応し、妥当性・汎用性の検証が望まれる。

（4）最終年度には草津町でシンポジウムを開催し、本課題で得られた成果を市民に還元することができた。アンケート結果を今後の同種シンポジウムの開催の際に活かしたい。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

「1 (1)ウ. 地質データ等の収集・集成と分析」に関連した貢献としては、最近2万年間の草津白根火山の噴火の履歴が噴出物の年代測定及びテフラ層序学的研究により解明され、積算マグマ噴出量階段ダイヤグラムを作成することができたことが挙げられる。これにより、本白根火砕丘群及び白根火砕丘群で発生したマグマ噴火の年代・頻度・噴火規模・噴火様式についての基礎データがほぼ揃い、それらを総合した階段図から草津白根火山の最近の活動場である本白根、逢ノ峰、白根の各火砕丘群の長期活動評価（2 (4) アとも関連）する）も可能となった。また、噴出物の物質科学的解析により、それぞれの火砕丘群の地下に単一のデイサイト質マグマが存在し、そこに多様な組成の苦鉄質マグマが注入することでマグマ噴火が発生することを明らかにした点、水蒸気噴火のテフラが白根火砕丘群起源のもので本白根火砕丘群起源のもので熱水変質鉱物の構成比（特に石英/クリストバライト比）が異なり、地下の熱水系の物理化学的状態が火砕丘群ごとに異なっていることが明らかになったことも、今

後の火山活動評価を行う上で重要な基礎データになるであろう。

本課題では、これまで噴火履歴がよくわかっていなかった小火口や火口列の活動履歴（噴火規模は2018年噴火と同規模と推測される）がほぼ解明された。特に重要な成果は、一部の火口列が1000年間ほど活動を繰り返していたことを明らかにしたことである。この成果は、草津白根火山のような観光地化した高リスク火山における将来の噴火リスク評価のために重要な基礎データになる。

本課題で得られた知見・成果は、本年度に草津町で開催したシンポジウムにより地元住民に還元することができた。このシンポジウムを通して、地元住民が火山研究者に対して求めるものに耳を傾ける機会が得られただけでなく、地元行政や住民の防災リテラシーの醸成にもつながったと思われる。今後も、箱根火山や阿蘇火山、御嶽火山などで実施予定であり、今後もアウトリーチ活動に貢献していく予定である。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

石崎泰男・沼田和佳子・亀谷伸子,2023,草津白根火山のマグマ噴出量階段図,防災科学技術研究所研究報告,査読無,謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

石崎泰男,2023,草津白根火山の形成史,草津白根山シンポジウム2023

亀谷伸子,2023,本白根山2018年噴火,草津白根山シンポジウム2023

Sawada N., Kametani N., Kawasaki K., Ishizaki Y., Terada A.,2023,Eruption style of the Kusatsu-Shirane volcano, Gunma: a preliminary rock magnetic approach,Japan Geoscience Union Meeting 2023,SEM15-P07

Sawada N., Kametani N., Kawasaki K., Ishizaki Y., Terada A.,2023,A preliminary rock magnetic results of the Kusatsu-Shirane volcano, Japan,Asia Oceania Geosciences Society 2023,SE16-A008

沼田和佳子・亀谷伸子・石崎泰男・長谷部徳子・石川尚人,2023,積算噴出量階段ダイアグラムによる草津白根火山のマグマ噴火ポテンシャルの評価,2023年度日本地球惑星科学連合大会,SVC36-P04

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

火口近傍の噴火堆積物の層序と時系列変動にもとづく小規模噴火の噴火履歴・噴火過程の解明

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

石崎泰男（富山大学都市デザイン学部）,川崎一雄（富山大学都市デザイン学部）

他機関との共同研究の有無：有

吉本充宏（山梨県富士山科学研究所）,亀谷伸子（山梨県富士山科学研究所）,寺田暁彦（東京工業大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：富山大学大学院理工学研究部（都市デザイン学）

電話：076-445-6656

e-mail：ishizaki@sus.u-toyama.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：石崎泰男

所属：富山大学大学院理工学研究部（都市デザイン学）

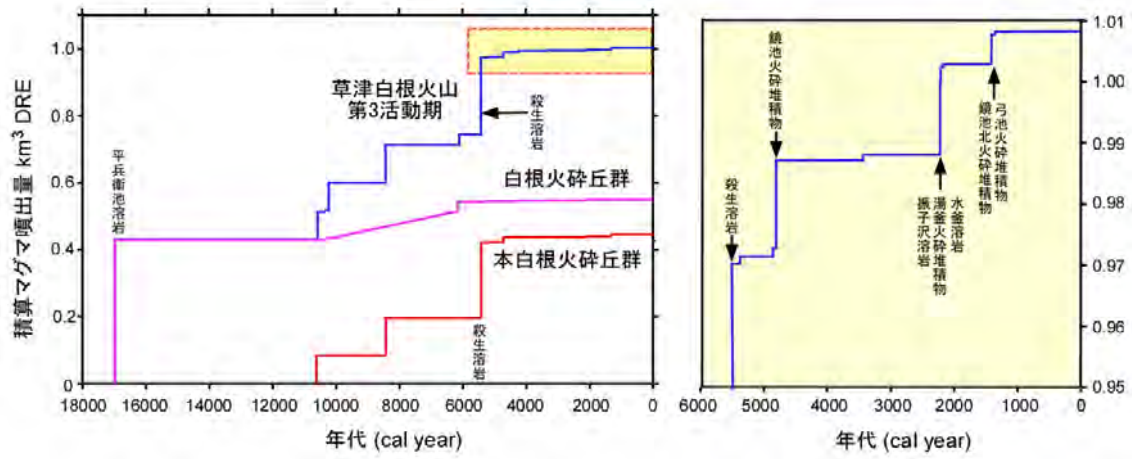


図1. 草津白根火山のマグマ噴出量階段図

最近18000年間の階段図（左）と最近6000年間の階段図（右）。逢ノ峰火砕丘群の噴出量は、白根火砕丘群と一括して示した。第3活動期は、平兵衛池溶岩の噴出から始まる草津白根火山の最新の活動期のことである。

(1) 実施機関名：

富山大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

富山県弥陀ヶ原火山における地球物理学的観測による火山活動モニタリング

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

5 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

(2) 総合的研究

オ. 高リスク小規模火山噴火

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(5) 総合的研究との関連：

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

1. 地殻変動観測

富山大学により2015年から行われている精密水準測量の水準点は地獄谷の南東部に偏っており、かつ上下変動のみしか検出できないため、変動源の形状を一意に特定することは難しい。また、地獄谷内は大部分が砂地であり、水準点を面的に拡張することも困難である。そこで、本研究では精密水準測量と合わせてGPS測量を実施する。現在、弥陀ヶ原火山周辺には、地獄谷から数km離れた位置にGEONET観測点と富山大学浄土山観測点の2点のGPS観測点がある。一方で、水蒸気爆発に関連しそうな熱水だまりは浅部にあると考えられており、その膨張に伴う地殻変動の検出可能領域は極めて狭い範囲に限られることが予想される。地獄谷周辺におけるGPS観測網をより強化することで、熱水だまりの活動とその形態を明らかにしていくことが出来ると期待される。地下深部にあると考えられるマグマだまりの形態を明らかにするために、現状の観測点を含む広域の観測網も合わせて拡充していく。

2. 地震観測

弥陀ヶ原火山で最近活発化している噴気活動に伴う振動を長期的にモニタリングすることで、噴気活動を定量化できることが期待される。また、深部低周波地震を長期的にモニタリングし精査することで、マグマの供給・蓄積の様子を把握することができる可能性がある。一方、マグマや熱水が急激に貫入するなど、地下で何かしらのイベントが発生した場合、火山構造性地震といった低周波地震とは異なるタイプの火山性地震が発生すると考えられる。長期にわたって地震観測を実施し、記録を蓄積

することで、平時の弥陀ヶ原火山の状況や活動に伴う変化、水蒸気噴火やマグマ噴火の前兆現象を捉えることができると期待される。

3. 熱活動観測

これまでの富山大の調査により、地獄谷内の噴気帯が拡大していることが確認できた。地表調査のみでは、地獄谷内全域の噴気帯の盛衰や地表の温度状況とその変化を正確に把握することは困難なため、赤外線サーモグラフィカメラを搭載したドローンシステム（UAV）を観測に導入し、上空から地獄谷全域の熱活動のモニタリングを行う。上記1・2の観測データと総合することにより、地殻変動と熱活動の盛衰との相関・因果関係が解明できると期待される。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

水蒸気噴火やマグマ噴火が発生する可能性のある弥陀ヶ原火山の火山過程を明らかにするために、地獄谷の地球物理学的観測を行う。観測を通して、熱水だまりやマグマだまりの形態、地殻変動と熱活動の盛衰との相関・因果関係の解明を図る。

平成31年度においては、地獄谷周辺にGPS観測点や地震観測点の選定・設置を行い、観測・データの蓄積を開始する。精密水準測量は秋に引き続き行う。UAVによる熱活動観測は秋に実施する。

平成32年度においては、地殻変動観測、地震観測および熱活動観測を継続し、データを蓄積することで弥陀ヶ原火山における進行しつつある火山過程の解明を図る。また、観測点のメンテナンスも随時行う。

平成33年度においては、前年度までの研究で不足している観測点分布を検討し、必要に応じて地殻変動・地震観測網の拡充を図る。地殻変動観測、地震観測および熱活動観測は引き続き継続する。

平成34年度においては、地殻変動観測、地震観測および熱活動観測を継続し、データを蓄積することで弥陀ヶ原火山における進行しつつある火山過程やその変化の解明を図る。

平成35年度においては、引き続き地殻変動観測、地震観測および熱活動観測を継続し、データを蓄積することで弥陀ヶ原火山における進行しつつある火山過程やその変化のさらに詳細な解明を図る。さらに、ここまで蓄積されたデータの整理、とりまとめを行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

1. 地殻変動観測

2021～2022年に水準測量とGPS観測により検出された変動は2020～2021年のシル（堀田ほか，2023）では説明できない（Hotta, AGU2022）。そこで、両者を統合したデータに開口割れ目モデルを適用したところ、地獄谷下深さ6.8 mに西南西―東北東方向に走向を持つほぼ鉛直な36.2 cm開口する割れ目が得られ、帯水層と解釈された（図1；堀田ほか，JpGU2023）。一方，2022～2023年には、水準測量から地獄谷西部（八幡・百姓地獄）と東部（新噴気帯）で最大0.5 cmの沈降が、中央部（鍛冶屋・紺屋地獄）では最大0.4 cmの隆起が検出された。この変動は2021～2022年に得られた割れ目とほぼ同じ位置の地獄谷下深さ22.7 mで西南西―東北東に走向をもつほぼ鉛直な割れ目が2.51 cm閉口することで再現できる。体積減少量は2,420 m³である（図2；堀田ほか，火山学会2023）。後述する八幡地獄にある青緑色の池の規模が拡大したことや、百姓地獄で熱泥が発生したとみられることから、この1年間のトータルでは放出過多により変動源が3年ぶりに体積減少となったと考えられる。一方で最近では百姓地獄の噴気の勢いが低下しており、現時点では蓄積過多に転じている可能性もある。なお、今年度から水準路線を1本追加し、次期計画の予備調査としてUAVによるレーザー測量も実施した。これらに関しては次期計画で精査していく。

2. 地震観測

本建議で実施している地震観測から、有峰湖周辺で跡津川断層より北の茂住祐延断層に沿う地震活動がとらえられている（図3）。これは和田ほか（2007）でも指摘されている活動であり、この地震活動を精査するために、有峰湖付近で新たに臨時観測を開始した。

以前から地震波の減衰が異常に大きなことが知られている飛騨山脈を含む中部日本の減衰構造をトモグラフィ法により推定した。現在のところ予備調査の段階であるが、地殻上部において減衰が最も大きいという結果を得た。東北地方などの火山帯では地殻上部よりも地殻下部において減衰が大きいという調査結果があるが、それとは異なった結果となった。

飛騨山脈にある各深部低周波地震（DLF）クラスターの活動に違いがあるか調査した。DLFの発生す

る深さ範囲及びDLFの平均マグニチュードと有史以来の水蒸気噴火回数に正の相関があること、ピーク周波数にはクラスターごとの違いは小さく、ピーク周波数と深さ及びマグニチュードの間には明瞭な相関が見られないこと、波動の継続時間とマグニチュードの間には正の相関のあることなどが確認された。

3. 熱活動観測ほか

次期計画の予備調査としてUAVによるレーザー測量と並行した熱観測を実施した。次期計画で精査していく。

本年度、地獄谷内及びその周辺域で起きた最も顕著な変化の一つに、ソウメン滝の水の消失が挙げられる(図4)。現地調査を行った結果、ソウメン滝の滝口の上流域に割れ目が形成され、その割れ目に水が流入することでソウメン滝から落下する水が消失したことが明らかになった。この割れ目は、約10万年前に形成された称名滝火砕流堆積物(溶結凝灰岩)の柱状節理の柱面沿いの節理が拡大したことで形成されたと推測される(図5)。割れ目に流入した水は、北方の谷沿いで潜流爆となって流出していることが確認された。なお、この潜流爆は、4万年前に形成された玉殿溶岩と称名滝火砕流堆積物の境界面付近に形成されている。潜流爆化した地点は、以前の熱観測でも高温の熱水が流出していることが確認されており、以前から熱水の通路が潜在爆付近に形成されていたようである(図4)。前年に引き続き弥陀ヶ原火山地獄谷の熱水ガス溜まりの状態を捉えるため、百姓地獄において噴気観測を行った。騒音センサーで測定した百姓地獄における噴気音の経時変化を図1に示す。今年度最初の観測である7月30日に67dBであった音圧レベルが、8月29日には54 dBまで低下し、その後わずかに増加したものの58 dB付近で推移した。噴気音の音圧レベルに対応して噴気量も変動している(図6)。現在の噴気活動から、熱水ガス溜まりの圧力を推定した。噴気は熱水ガス溜まりと地表との圧力差によって駆動される。熱水ガス溜まりの天井の深さを50 m、噴気の経路は鉛直な円筒と仮定する。最も勢いのよい噴気の速さは1 m/s程度であり、乱流の抵抗則を適用すると大気圧よりも300 Pa程度だけ高いと推定される。経路が多少流れにくい状況を考えても、大気圧との差は1000 Pa以下である。水蒸気噴火で深さ10 mより浅部の土砂を吹き飛ばすと考えた場合、最低でも0.3 MPaが必要である。現在の熱水ガス溜まりは、地表に盛んに噴気を放出しているため、それだけの圧力は発生していない。熱水ガス溜まりから水蒸気噴火が発生するためには、現在活動している噴気の経路が閉塞して圧力が高まる必要がある。騒音センサーによる噴気音観測は、噴気活動を定量的に捉える有効な手段であり、次期計画ではインターネット接続による連続観測を行う予定である。

地表で観測される、噴気活動、温泉活動、地盤変動を、熱水ガス溜まりと関係づけるためには、経路など浅部構造(深さ100 m以下)の理解が不可欠である。今年度は地下構造を推定する試みとして、地中レーダー探査を百姓地獄北部で実施した。浅部に水が多く存在しているため、深さ4 m程度までの構造しか得られなかった(図7)。次期計画では、電気探査で浅部構造を調査することを計画している。

・計画期間中(令和元年度～5年度)の成果の概要

1. 地殻変動観測

2015年から毎年実施している水準測量から2017～2020年に地盤の収縮(Hotta et al., 2022)、2020～2022年は膨張(堀田ほか, 2023; 堀田ほか, JpGU2023)、2022～2023年は一転して収縮(図2; 堀田ほか, 火山学会2023)となった。また、2016～2020年、2021～2023年は開口割れ目(図1および2; Hotta et al., 2022; 堀田ほか, JpGU2023; 堀田ほか, 火山学会2023)、2020～2021年はシル(堀田ほか, 2023)で説明できる変動であった。なお、上下変動だけでなく、水平変動も検出するために、2021年から夏季のGPS連続観測を実施し、水準測量とGPS観測のデータを統合した解析も実施した(図1; 堀田ほか, JpGU2023)。

2. 地震観測

京都大学の協力を得て、立山カルデラに2点、馬場島・浄土山にそれぞれ1点臨時地震観測点を整備し、WINシステムの解析環境も整備した。周辺のV-netや気象庁、京都大学や東京大学のデータも用いて震源決定したところ、図3に示すように次のことが分かった。(1)地獄谷周辺では頻度は少ないが深さ1 km程度の浅い地震が発生した。(2)2020年9月末～10月にかけて剣岳北方5 km前後で群発地震が発生した。(3)跡津川断層沿いに立山カルデラの多枝原付近を境に震源の深さが変化しており、跡津川断層はこのあたりまで伸びている可能性がある。(4)有峰湖周辺では震源が跡津川断層より北の茂住祐延断層に沿っている。この有峰湖周辺の地震活動を精査するために、最終年度に有峰湖付近で新たに臨時観測を開始した。

3. 熱活動観測ほか

地獄谷内の各噴気帯では、年ごとに噴気口や熱水孔の位置が変化していることが明らかになった。特に顕著な変化が新噴気帯、紺屋地獄、新大安地獄で確認された。新噴気帯では噴気孔が大規模な陥没地になったことや、紺屋地獄では熱水孔の位置の変化やどの火山の形成・消失が繰り返された(図8)。また、地獄谷中央部の八幡地獄では、2018年に突如灰色の熱水の噴出が始まり、その後、2019年からは地下から供給される熱水の色調が青色に変化した(図9)。このような噴気帯の活動状況の変化が地盤変動等にどのように関連しているのかは現在検討中である。

騒音センサーを用いた観測が今年度からのため定量的な比較は難しいが、画像を比較すると百姓地獄の噴気孔は2020年、2021年に比べるとだいぶ活動が低調になっている。また、地獄谷内の他地域でも、噴気孔の閉塞と新たな噴気孔の形成が繰り返されてきている。噴気孔の閉塞は、前述したように熱水ガス溜まりの圧力上昇そして水蒸気噴火につながる可能性があるため、噴気経路の閉塞や形成のメカニズムを理解することが重要であると考えている。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

1. 「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況

主に水準測量やGPSといった測地データを用いてガスだまりや熱水・ガスの供給路をモデル化し、その体積の経年変化を明らかにしてきた。また、ガスだまりや熱水・ガスの供給路が膨張・収縮することにより生じる隆起や沈降が検出される領域と熱活動の変化が大きい領域が対応していることも分かってきた。

2. 「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

測地学的観測や熱観測を行うことで立山火山で過去にも発生した水蒸気噴火に備えることはもちろんのこと、地震観測を実施することで茂住祐延断層に沿った地震活動など内陸地震研究にも貢献できる可能性がある。次期計画では火山災害だけにとらわれず地震災害といった点にも貢献していきたい。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

・論文・報告書等

堀田耕平・高橋秀徳・本田裕也・剣持拓未,2023,水準測量から明らかになった立山火山地獄谷の再隆起—2020年9月~2021年9月—,火山,68,2,10.18940/kazan.68.2_83,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

堀田耕平・瀧大輝・前田知秀,2023,2022年9月に実施された立山火山地獄谷における水準測量,日本地球惑星連合2023年度大会,SVC31-P06

堀田耕平・久志勘太・吉田有希,2023,2023年8月に実施された立山火山地獄谷における水準測量,日本火山学会2023年度秋季大会,P86

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報 :

(11) 次期計画における課題名 :

弥陀ヶ原火山およびその周辺における地球物理学的観測による火山・地震活動モニタリング

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

渡邊了(富山大学都市デザイン学部),石崎泰男(富山大学都市デザイン学部),堀田耕平(富山大学都市デザイン学部)

他機関との共同研究の有無 : 有

京都大学課題(KUS02)と連携を行う

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等 : 富山大学理工学研究部(都市デザイン)

電話 : 076-445-6555

e-mail : hotta@sus.u-toyama.ac.jp

URL :

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：堀田耕平

所属：富山大学工学研究部（都市デザイン）

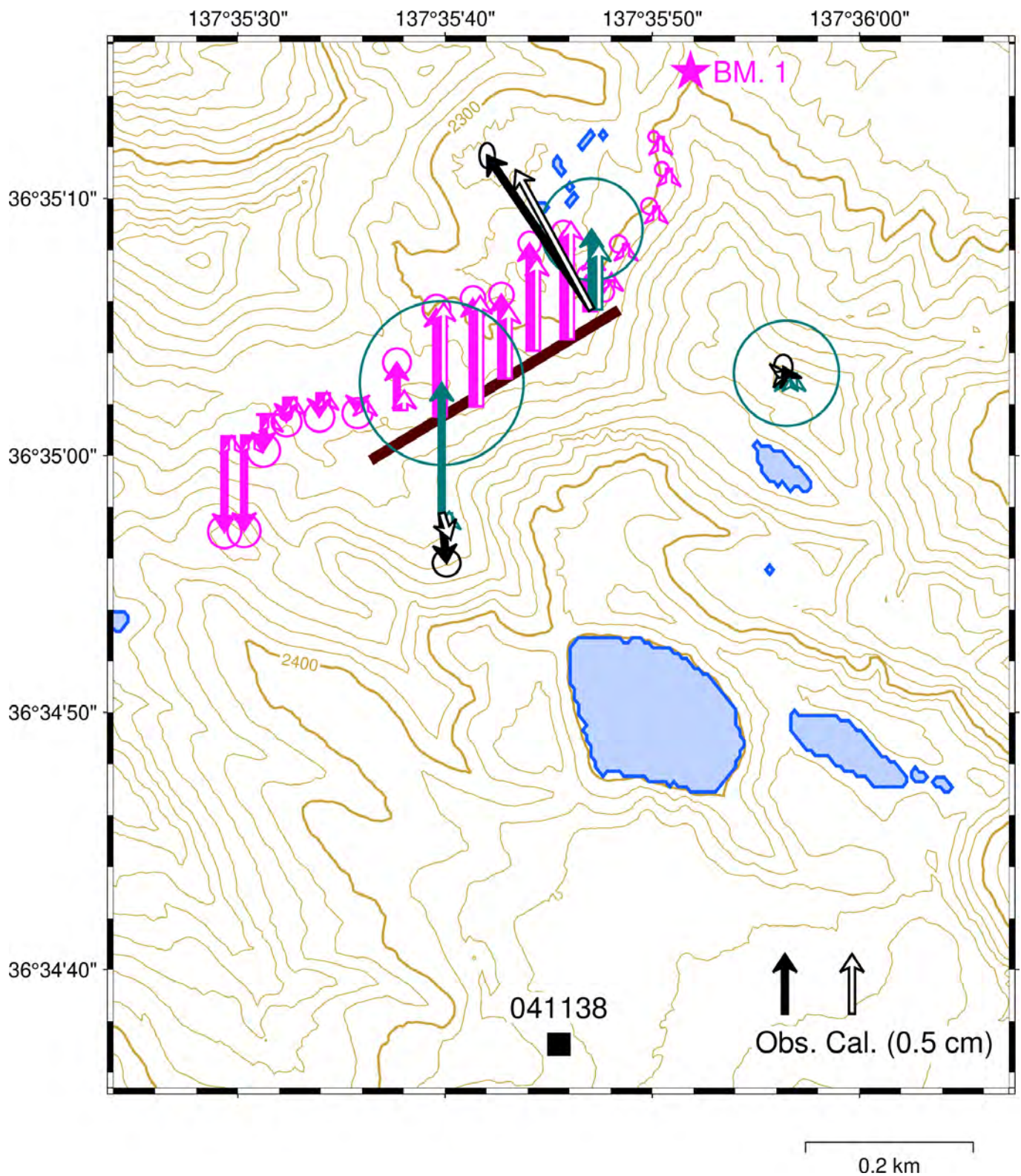


図1：2021～2022年の水準測量とGPSデータの統合解析結果。

ベクトルはピンクは水準測量の上下変動，黒がGPSの水平変動，緑がGPSの上下変動を表し，塗りつぶしが観測値，白抜きが計算値である。茶色い線は得られた割れ目の位置を示す。

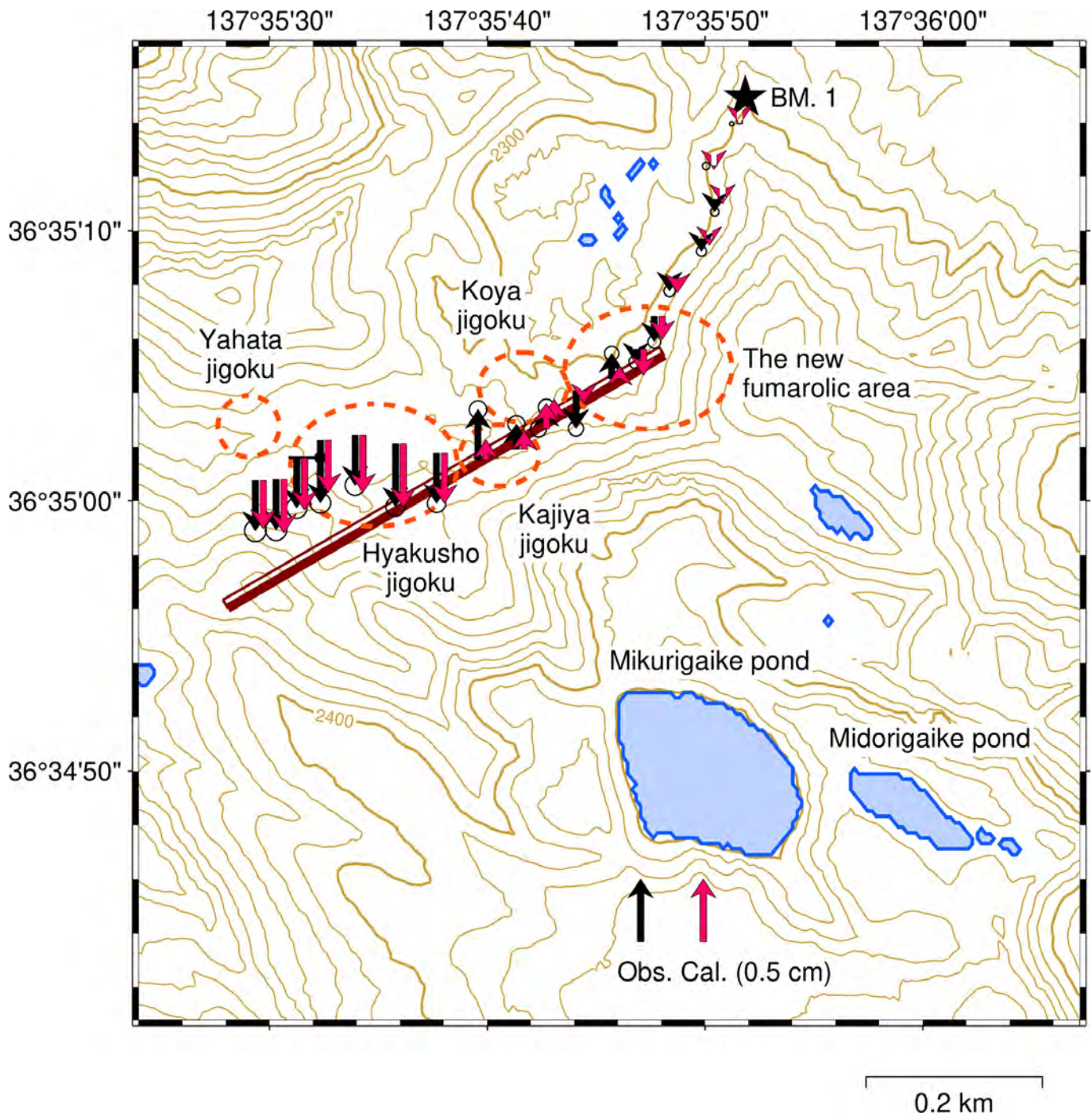


図2：2022～2023年の水準測量の解析結果。
 ベクトルは黒が観測値，赤が計算値を示す。茶色い長方形は得られた割れ目の位置（太線は上端）を示す。

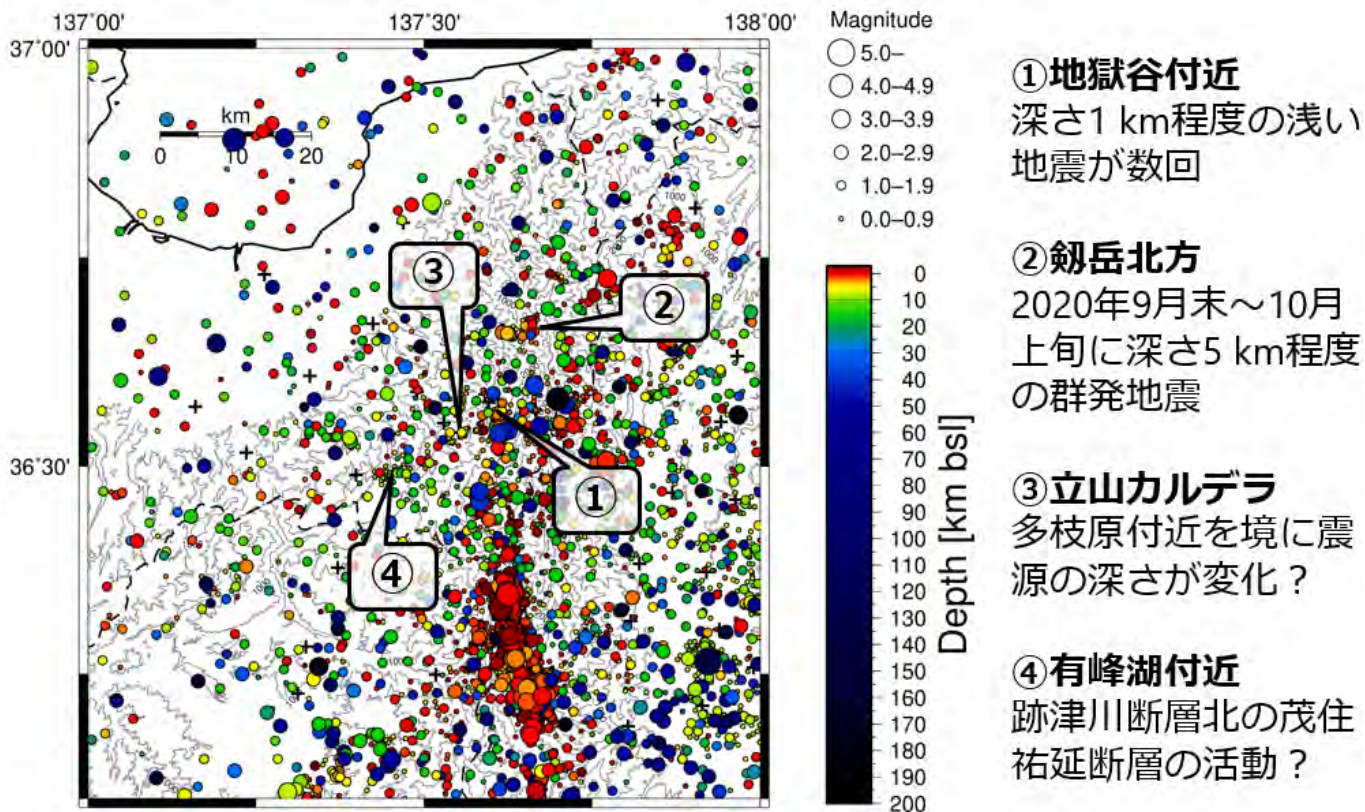


図3 : 2020年9月23日～2021年9月30日の震源分布図。

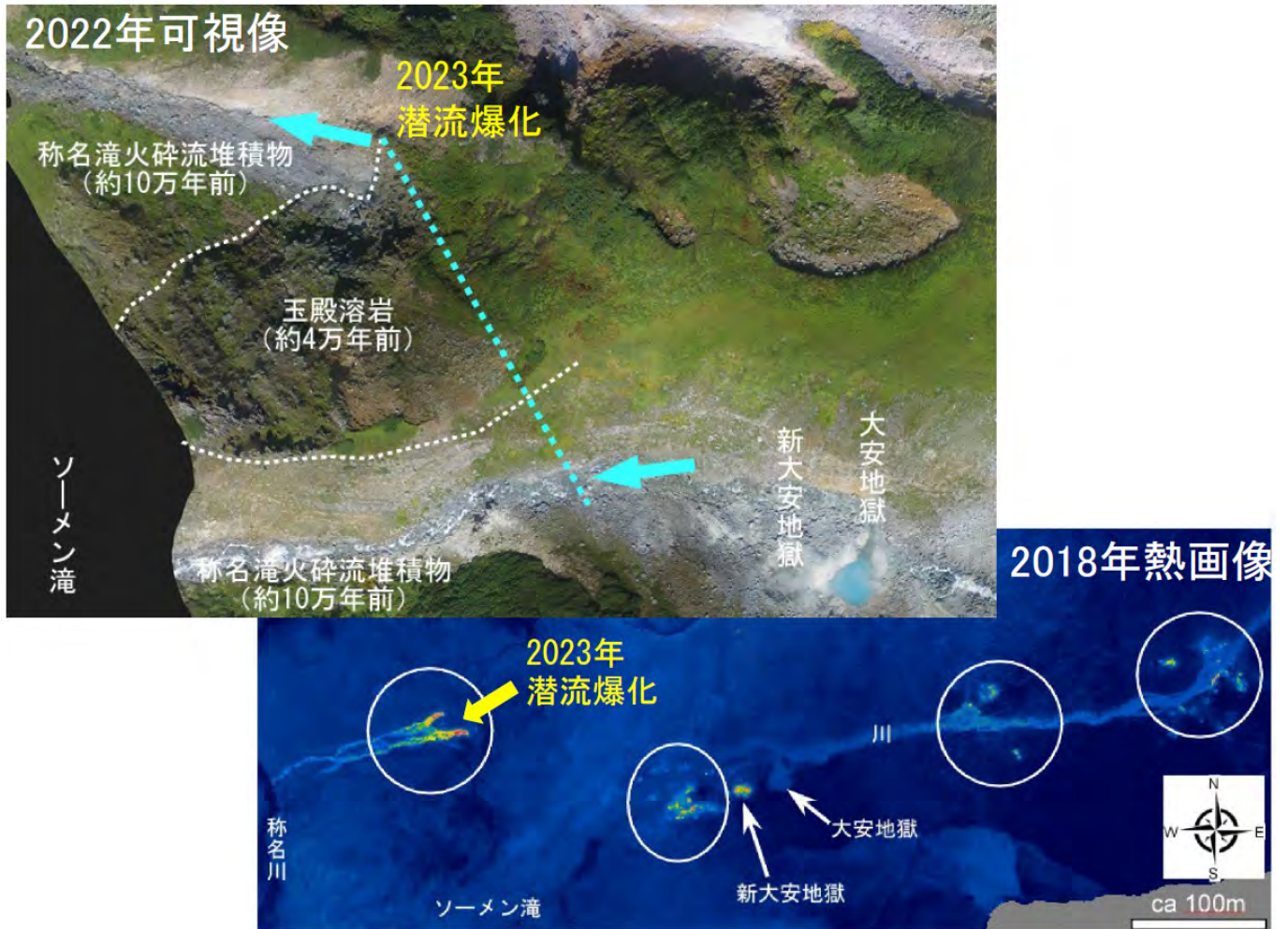


図4：ソーメン滝上流部での水の消失。



https://en.wikipedia.org/wiki/Columnar_jointing



- 河床に露出している称名滝火砕流堆積物(溶結凝灰岩)
- 河床に見られる割れ目は、溶結凝灰岩に発達した柱状節理の上面に相当する
- 柱状節理の柱面の割れ目の拡大が水の消失の原因では？

図5：ソーマン滝上流部での水の消失と火山活動の関係。

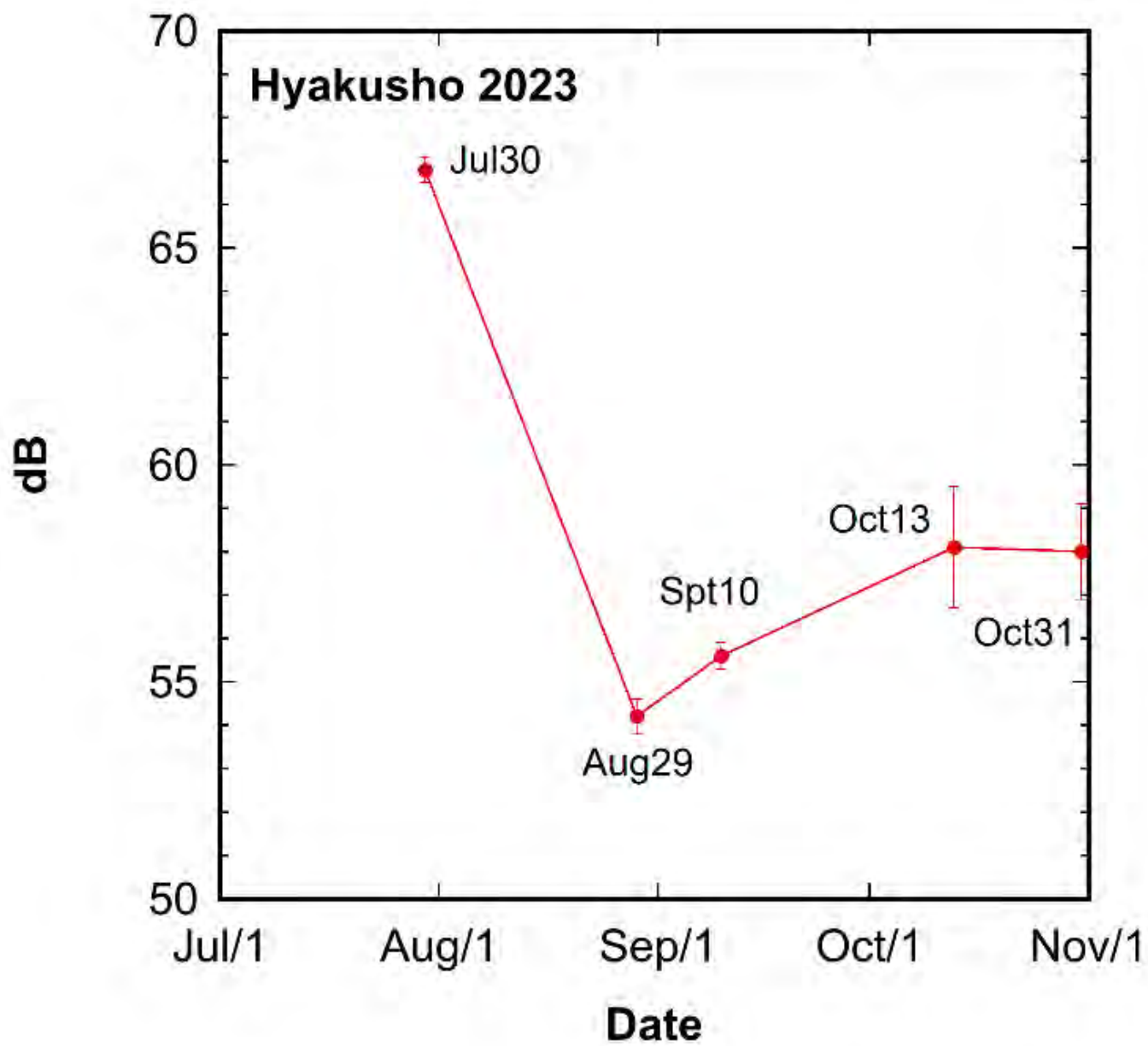


図6：百姓地獄における噴気音レベルの推移。

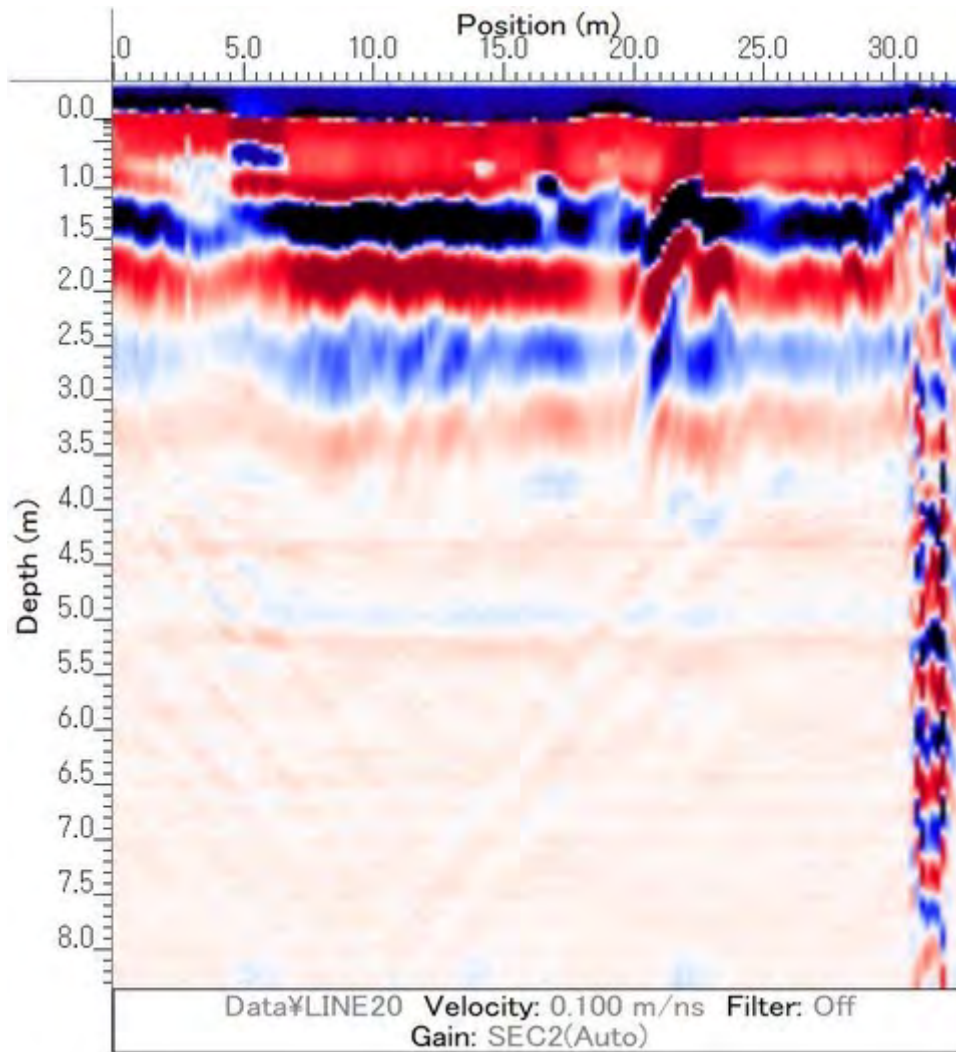


図7：百姓地獄北部で実施した地中レーダー探査の結果（2023年10月17日）。側線は南北方向。

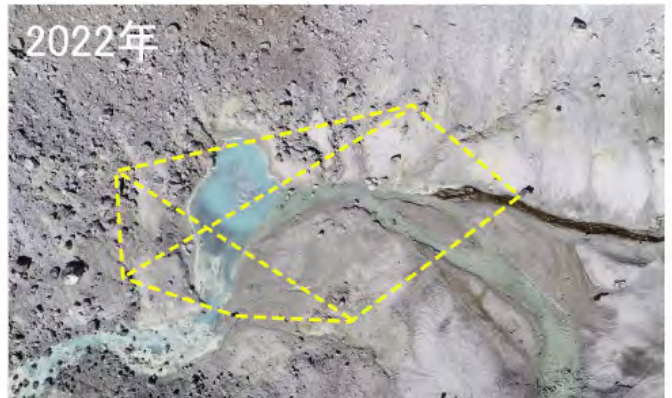
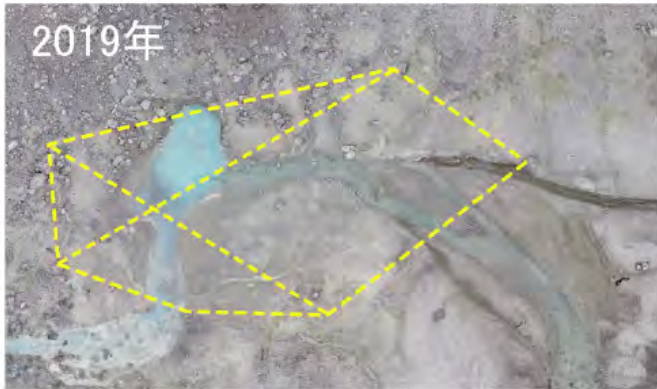
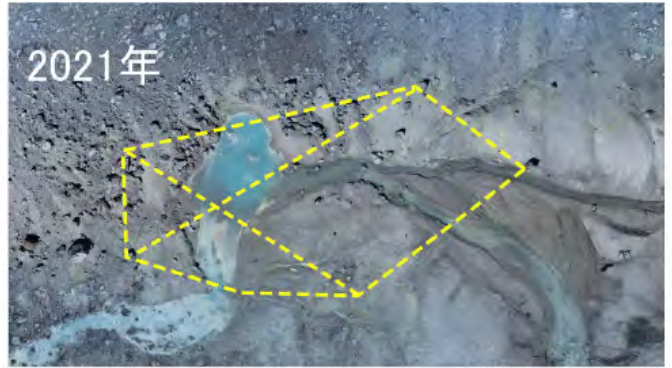
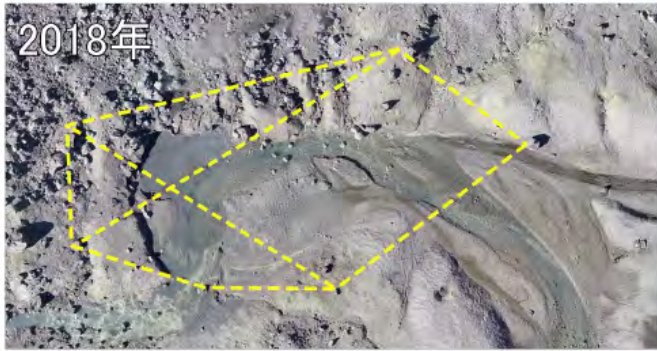
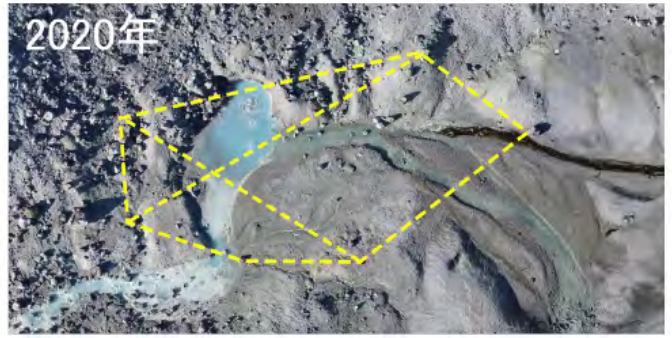
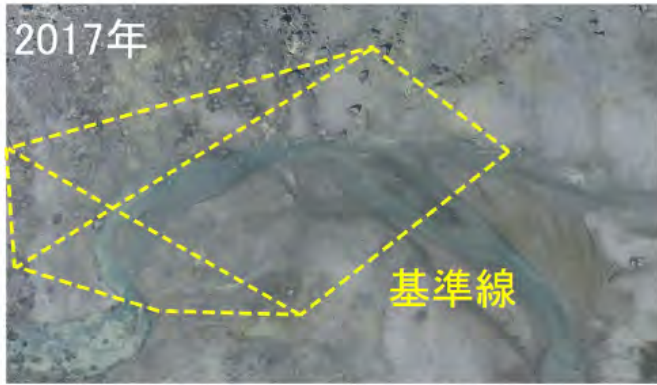


図8：噴気孔・熱水孔の位置の移動（八幡地獄）。

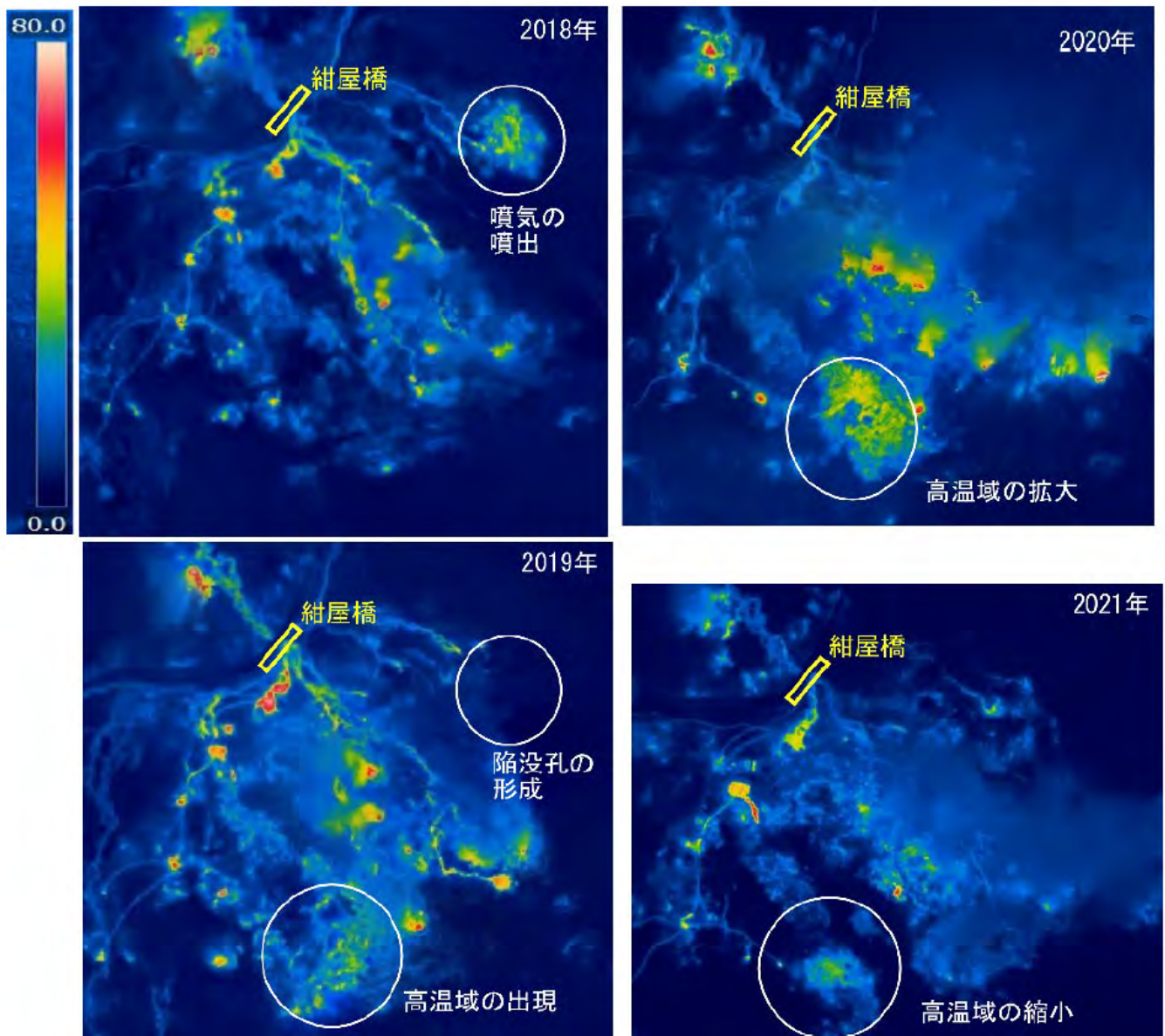


図9：刻々と変化する噴気帯・熱水孔・新噴気帯。

(1) 実施機関名：

富山大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震学・火山学の知見に基づくコンパクトシティをデザインする情報科学からの被災生活シミュレーション

(3) 関連の深い建議の項目：

- 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究
 - (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

(4) その他関連する建議の項目：

- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - オ. 高リスク小規模火山噴火
 - (3) 研究基盤の開発・整備
 - ウ. 地震・火山現象のデータ流通
 - (6) 社会との共通理解の醸成と災害教育
 - (7) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 総合的研究との関連：

高リスク小規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

近年、人口減少・少子高齢化による人口減少が進む中、地方創生を目指し、コンパクトシティのあり方について議論がされている。富山市では、ライトレールを中心に対策を講じ、「世界先進モデル都市」に選ばれ、我が国でもコンパクトシティの成功事例として扱われている。富山県を広く見れば、黒部・立山方面においては、観光が盛んであり、まちの維持を支える大きな柱となっている。しかしながら、弥陀ヶ原の火山噴火のリスクを保有しており、ひとたび噴火災害が発生すると、観光事業に大きな打撃を与える。また、それら地域からの避難者の受け入れや対応において、地域間連携が求められ、直接的な被害を受けない富山市において、その災害への対応策（避難者受け入れ・応援体制等）の検討が求められる。一般的な「まちづくり」の観点の主眼は、平時の生活・都市計画となっており、かならずしも、地震や火山の発生を中心とはしていない。その地域で暮らす住民に視点を移せば、そのまちの人の暮らし方を大きく変えることが想定され、命を守る安全確保行動に加え、被災者生活としてのあり方や他地域住民との連携など、視野を広げなければならない。そこで、本研究では、平時の利便性を維持しながらも、個人や地域属性に応じて、地震・火山の知見を活用した事業継続性の高い「まちづくり」と「災害時の行動計画」を、「都市計画」と「行動情報学」の観点から追求する。本研究を推進するにあたり、平時の生活の質を確保しながらも、環境への配慮を行うとともに、災害に強いまちづくりが求められる。本学の強みを活かし、デザイン学（ユニバーサルデザイン）の観点から、誰もがその時々状況（次の変動）を、実感を伴って確実に理解できる（伝わる）ことを前提とした情報発信の方策を検討する。また、まちを構成する社会資産を単純に実装するのではなく、持続可能なSDGsの視点から、グリーンインフラを通じた社会の強化と、個人・地域の防災リテラシーの向上をめざし、「にぎわいのあるまちづくり」と「災害を乗り越える力を持つ地域づくり」を融合させた、新しい社会の形成と、それを支える情報コミュニケーションに必要な知識体系、基盤構築を推

進する。

とくに、まちの中で暮らす人の行動をICTツールや社会サービス利用等から把握し、個人防災力と「まち」が持つ地震・火山への対抗力の効果的な融合の形を解明する。研究成果をとりまとめ、個人・地域属性に応じた災害時行動計画とまちを融合した新しい都市の形をデザインし、全国の地方都市・中核都市への展開を目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

H31年度においては、「個人・地域特性の計測方法・評価軸の設計、地震・火山の災害が生活にあたる影響把握生活モデルの設計」を目指す。富山をフィールドとして、地震・火山のリスクを評価するとともに、地域に対して与える影響範囲を解明する。この影響を個人や地域単位で把握するためには、それらにかかる情報を取得するための仕組みが必要となる。個人や地域特性に対して、それらの活動を通して社会とインタラクションを行う中で情報を取得するものとし、計測方法を設計する。また、個人や地域の行動・活動と災害リスクとの関係性を解明しつつ、行動・活動変化を定量的に分析するための評価軸を検討する。この個人・地域の生活にかかる計測・評価に基づき、リスクと向き合う中で変化を継続的に把握するための生活モデルを検討する。

H32年度においては、「IoTをベースとした社会サービスとのインタラクションを可能とするまちづくりのデザイン」を目指す。初年度で設計された生活モデルにもとづき、個人・地域の行動・活動変化の継続的な把握を実現するための「まちづくりデザイン」を推進する。近年のICTの進展にともない、IoT (Internet of Things) が着目を浴びている。本研究においても、IoTの活用を視野に入れ、どのような社会的な計測が可能となるかを検討する。また、個人や地域が活動を続ける中で発生する社会サービスとのインタラクションから、その行動・活動変化を捉える方策を検討する。平常時の生活まで視野を広げ、まちづくりの知見を活かしながら、リスクや影響の把握に展開可能な仕組みとするべく、どのようにまちをデザインすべきかについてのモデル構築を検討する。

H33年度においては、「IoTを活用した地震・火山の科学的知見に基づく地域の強さ・弱さの計測実施、分析手法の確立」を目指す。IoTを例としたICTツールを通して計測される各種の情報をもとに、地震・火山のリスクや社会に与える影響と照らし合わせ、個人・地域の強さ・弱さを計測・分析する。例として、地震や火山の発生確率や、影響規模、範囲を特定し、その地域に居住する個人・地域、さらには、その地域への流入・流出する観光資源を対象として、影響度を分析する。ここで扱う個人や観光資源は、流動的に変化することから、時系列的な特徴をとらえ、強さ・弱さを継続的に計測しながら、その分析手法を確立する。これは、まちづくりのデザイン過程において、ハード・ソフトの両面にフィードバックするものであり、デザインに必要な要素とかけあわせ、分析結果の効果的な利活用を視野に入れた手法確立を推進する。

H34年度においては、「地域の強さ・弱さの具体的な評価実施、まちづくりへの反映方策モデルの構築」を目指し、まちづくりデザインの具体的な方策を追求する。地域を構成する要素として、ハードの観点から、地域が保有する資源の脆弱性評価を行うとともに、地震や火山災害が発生した際の影響度を、地域の各資源に対して分析を行う。これにより、災害発生時に利活用を期待できる資源が明確化され、それらを社会から得られる1つのサービスとして位置づけ、ソフト面との連携をはかる。ソフトの観点からは、個人や地域の災害に対する強さ・弱さを分析し、命の安全確保行動の期待値の明確化、その後の被災生活における適応可能性や被災生活で必要となるサービスの具体化を進める。これらの高度化を実現するために、「まち」として事前整備および事後の災害対応を通して実装可能な事項を解明し、その運用モデルを確立する。これを基盤として、リスクを想定した個人・地域の被災生活シミュレーションのモデルに反映し、一元的な仕組みとしての確立を目指す。

H35年度においては、『富山を事例とした人や地域属性に応じた事業継続性の高い「まちづくり」と「災害時の行動計画」のクラウドを介した社会発信、全国からの学びを可能とする環境整備』を目指す。4年次までで構築したモデルを中心として、モデル運用にかかる入力・出力を、クラウド上で扱い、シミュレーションを実現できる仕組み・基盤の整備と社会発信を推進する。富山というフィールドを通して、直下型地震や火山噴火による直接的な被害からの被災生活シミュレーション、避難者や仮住まい生活者の受け入れによる「まち」変化にともなう個人・地域の被災生活シミュレーション、観光資源の変化にともなう被災生活シミュレーション等を総合的に試行できる仕組みを実現する。これらをクラウド上で展開することで、富山内の各個人・地域が自由に利用できるだけでなく、他地域からの利用も可能とする。クラウド上で運用する中で、利用実態をさらに分析することにより、利用頻度

から見た社会への貢献度を評価するだけでなく、利用目的の展開可能性や他の仕組みとの連携可能性についても把握する。これらは、本研究で実装する仕組みに対してのユーザーインタラクションの結果を活用する。また、他地域のリスクや生活実態にかかるデータ群を入力値として受け付けた上でシミュレーション可能な仕組みとする。これにより、全国からの学びを可能とする1つの環境として整備されるとともに、学びの結果を継続的に把握・分析することにより、本仕組みの発展が期待できると考える。

なお、部会全体としての研修プログラム構築に知見を提供する予定である。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

令和5年度は最終年度ということもあり、防災リテラシーの向上に資するべく、避難行動に特化しハザードの理解および建物構造、家族構成、避難方法についての理解を深めるための仕掛けとしてタイムライン作成支援ツールの開発と検証を実施した。また、生活再建支援に焦点をあてて、相談対応に関するデータ分析を実施し、対話型での相談対応システムの基礎を整備した。さらに、令和6年元旦に能登半島地震が発生したことを受け、富山県内でも家屋の被害が多数発生し、特に被害が集中した氷見市をフィールドとして、これまでに蓄積された住家被害認定調査・罹災証明書交付にかかる知見を元に、現場支援のあり方について実地研究を実施した。

(1) 防災リテラシー向上に資するタイムライン作成支援ツールの整備

2011年の東日本大震災以降、確実な避難を支えるために「地区避難計画」の策定が進められている。同様にして、逃げ遅れゼロを目指し、避難時要支援者を対象とした個別避難計画の策定も重要視されている。内閣府は令和3年度より「個別避難計画作成モデル事業」を立ち上げ、全国展開を推進している。一方で、総務省の調査によれば、全国の市区町村1,740団体のうち、個別避難計画の未策定団体は574団体（33.0%）といわれている。全国の市区町村で個別避難計画を策定するためには、自治体の働きかけも必須である一方で、住民側の協力も欠かせない。防災分野のDX推進において、個別避難計画に対する住民の行動変容は取り組むべき課題の1つと考えられる。

一方で、生活再建支援に視点を向ければ、生活実態にあわせた支援が前提となっており、必ずしも行政が有する情報だけでは不十分である。現に、過去災害では対面式での罹災証明書交付を機会として位置づけ、被災者への聞き取りにより生活実態を把握し、適切な生活再建支援の基礎とした事例もある。しかし、罹災証明書交付に必要な住家被害認定調査や罹災証明書交付そのものに時間と労力を要することから、自己判定方式での被害調査も検討がなされている。この方式が適切に運用されるためには、行政側が何を知らうとしているかを住民側が理解する必要もある。生活実態に基づくのであれば住民自身が最もその状況を理解していることから、必要な情報を明示化し、事前から管理できていれば、災害時に不要な混乱を避けられると考えられる。すなわち、ICTを効果的に援用し、事前より住民の意識を向上させ、必要情報を適切に管理するように誘導することで、効果的な生活再建支援が期待できるものの、住民自身が平時から生活再建を意識することは非常に希である。

そこで本研究では、ICTを活用したアプリを整備することで、住民の生活再建に対するリテラシーの向上をめざし、特に既往の災害で課題となっている生活実態に関する情報を対象として、課題解決策を探ることとした。具体的には、各個人に対して、事前からの被災者登録を基本として、避難計画策定を支援するツールの設計・開発を実施した。避難計画策定の過程において、ICTの利点を活かし、利用者に対して防災にかかるリテラシーを向上させるために、利用者からの入力に応じて助言を提示する機能を実装した。特に、ハザード情報の理解、避難方法選択の要件となる情報の理解、避難にかかる基本行動の理解の3つの理解を醸成させられるように、機能設計を実施し、1つのクラウドサービスとしてプロトタイプ版を開発した。

プロトタイプ版に対して、サービス提供側として自治体職員、サービス利用者側として2つの属性群の学生より有用性ならびに機能性について評価を得た。自治体職員からの評価は定性評価とし、その中で多言語展開や個々の自治体事情に応じたカスタマイズの可能性について意見を得た。一方、学生からの評価は定量評価とし、利用実態の分析と、利用後のアンケート調査による評価分析を実施した。この学生評価では、2つの講義を対象として被験者を2群に分け、その評価結果から共通点および相違点を明らかとした。特に、防災に関する基礎知識の差から回答および評価に差が出ていることが確認された。これにより、本研究で開発したツールを活用し、防災リテラシー向上を図るためには、事前の基礎学習が望ましいと考えられた。この観点から、基礎学習の環境を整備し、それを受講させ、そ

の後に行動を検討させるといった流れをパッケージ化することが重要であると考えられた。あわせて、本研究で開発したツールには、被災者生活再建支援において必要となる生活実態に関する情報を、簡易的に取得する機能を組み入れている。この機能についても、避難計画策定の枠組みの中で使われながらも、必要な情報を確実に取得できていた。利用者からすれば、避難という分かりやすい目的に対して検討したことが、結果として被災者生活再建支援にまで効果を発揮し、より効率的な支援の実現に寄与できると考えられる。アンケート調査結果においても、学生という生活事情が影響し、世帯構成に対する意識は低かったが、建物情報に対する意識は高まったことが確認された。本研究で開発したツールでは、それらの検討事項を記録しており、情報を構造的に管理することで、必要に応じてそれらの情報を活用できるように整備した。

本研究で開発したツールは、プロトタイプ版であり、機能が不十分な点や動作検証が十分でない点も残っている。今後が発生が予想される様々な大規模災害を乗り越えるためには、各個人がそれぞれの状況に適した避難を確実に推進するが望ましく、そのためにも個人の防災リテラシーの向上を推進しなければならない。一方で、公的支援の役割を担う行政職員においても、住民の取り組みや準備状況を把握し、必要な支援を迅速かつ確実に提供しなければならない。そのためにも、ICTを活用した共通基盤の上で、お互いのコミュニケーションが図られるよう、環境整備とサービス提供が必要と考える。その点において、本研究では1つのサービス実装として寄与できていると考えられる。

(2) 生活再建支援の相談対応に関するデータ分析

生活再建支援にかかる相談では、被災者のそれぞれの事情に応じて、提供可能な支援とニーズをマッチングさせ、その方向性を示す必要がある。一方で、これまでは支援制度の説明文書や手引きを参照し、行政職員が有する知識をもって対応を進めてきた。これらは支援制度の概要が示されるだけであり、被災者側の相談ニーズについて体系化されたものはない。

そこで、本研究では2007年新潟県中越沖地震における柏崎市の対応を事例として、相談窓口で記録された対応記録および課題を文章化したデータを分析することで、相談内容の傾向を導出した。また、その後の支援の申請状況から、被災者の特徴を特定し、支援の予測に資する基礎分析を実施した。具体的には、中越沖地震の際に柏崎市では長期的な生活再建が余儀なくされたことから、復興支援室を設立し、生活再建に関する専用の相談窓口を開設した。特に仮設住宅入居者および住家が全壊した世帯を対象に、継続的な相談対応を実施し、それらを記録した。この記録データに対して、1つの文章ごとに発生する名詞に着目し、共起ネットワーク分析を実施することで、その傾向を明らかにした。具体的には、記録の残された780件の対応記録から、8,178個の文章を抽出し、6,293種類、計10,1436個の名詞を抽出した。これらの名詞に対して、各文章内での共起状態を分析することで、名詞間の強いつながりを把握するとともに、相談内容の全体における傾向を解明した。結果として、復興支援策に関する問い合わせや再建相談に加えて、仮設住宅の退去に関する相談、建物の再築に関する業者・工事に関する相談、さらには公営住宅への入居希望等についての相談が強い共起を示した。すなわち、被災者の再建を推進する上では、住宅の再建方法のあり方やその後の方針についての情報を提示する必要があることが明らかとなった。

一方で、住宅の再建方法には応急住宅修理を選択する方法もある。応急住宅修理では、支援対象となる修理箇所および支給限度額が決められているため、必ずしも支援額が被災者の再建に必要な経費とはいえない。そのため支給実績だけでは、被災者が必要とした経費額は把握できない。そこで、災害種別は異なるが、2023年8月豪雨における新潟県関川村を事例として分析を実施した。本事例の選定理由は、申請時において修繕に必要な見積書が添付されていたためである。個人属性および世帯構成、住家の被害程度等の説明変数を用いて重回帰分析を実施したところ、乳幼児を有する世帯では修繕費が高くなる傾向が明らかとなった。地震災害と風水害で被害の程度や修繕の対象範囲が異なるものの、被災者がどの要素を重要視しているかについて、本研究を通して1つの知見が得られたと考えられる。

(3) 令和6年能登半島地震における氷見市を対象とした住家被害認定調査・罹災証明書交付の効果的な運用方法の検討

令和6年元旦には、石川県の能登半島を震源とした能登半島地震が発生した。石川県の珠洲市や輪島市、内灘町では揺れだけでなく津波や延焼火災、液状化等により多くの住家被害が発生した。富山県においても、氷見市・高岡市・射水市の沿岸部を中心として液状化が発生するとともに、県内で軽微ではあるが多くの住家被害が発生し、その数は10,000棟近くとなっている。特に氷見市では、震度5強が観測された程度であったにもかかわらず、軟弱地盤の影響を受け、全壊157棟、大規模半壊42棟、中

規模半壊54棟、半壊249棟、準半壊601棟、一部損壊2,970棟の住家被害が発生している（令和6年2月27日時点）。

この結果は罹災証明書交付における住家の被害程度の結果であり、この罹災証明書交付に至るまでには効率的な住家被害認定調査が必要であった。また、罹災証明書交付においても住民の納得性を高め、たうで効率的な対応が必要であった。いずれも処理すべき件数が多く、氷見市の担当職員数は限られていたことから、住家被害認定調査には福島県から、罹災証明書交付には岡山県から対口支援の枠組みで応援を受けた。これらの業務は長期にわたることから、応援職員は定期的に交代することが前提となり、継続的な質の確保が課題となった。この課題に対して、本事例研究では、富山県のリエゾン担当職員らとともに、以下の7つの要素について検討を重ね、それぞれの素材を整備することにより、安定的で効率的な業務運用を実現した。

- 1) 発行方針を明確化し地域性と被害特性を示した認識統一のための事前教育資料
- 2) 状況見積もりと資源見積もりを含めた業務予定
- 3) 動線を考慮した交付会場設計
- 4) 窓口数を考慮した役割編成（業務所掌）
- 5) 各日の業務実施工程表
- 6) 日々の対応から発生する課題への対応策を示したQ&A集
- 7) 誰もが容易に業務実現可能な支援ツール

特に、1)、2)については記載すべき事項は統一化しながら、応援の入れ替わり時期にあわせて内容を更新することで、全体方針を一貫した上で最新の状況を共有し、円滑な入れ替えを可能とした。また6)については、日々のふりかえりの中で発生した課題に対して、市としての統一的な見解を示すことで、対応する班や窓口で質がばらつかないように調整するとともに、応援の入れ替わり時期の引き継ぎ事項として活用した。また、7)については過去の災害対応で得た知見にもとづき機能を最小限に絞り込むことで、ツール使用にかかる事前教育の時間削減に努めるとともに、システム操作上のミスを最小限にとどめた。

本研究は実施途上にあり、上記に示した7つの要素が十分な効果を発揮したかの検証には至っていない。しかしながら、住家被害認定調査では約4,200件の調査が確実に完了し、約5,300件の罹災証明書が交付された（令和6年2月27日時点）。また罹災証明書交付においては、納得性の高い対応が進められた結果として、不服申し立てによる二次調査希望が全体の4.7%にとどまっている。過去の災害事例と比較しても、現時点では非常に少ない希望率となっており、本研究の取り組みによって一定の効果が得られたと考えている。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

井ノ口 宗成,2023,被災者生活再建支援を見据えたマイタイムライン策定支援ツールの提案,電子情報通信学会 信学技報,vol.123, no.31,52-57,査読無,謝辞有

宮崎 太良・井ノ口 宗成,2023,参画型リスクマップ作成システムにおける実証実験の自由記述データの分析～取得情報の自立化をめざして～,電子情報通信学会 信学技報,vol.123, no.218,6-11,査読無,謝辞無

井ノ口 宗成,2023,生活再建を中心とした共起ネットワークの年次変化の把握～東日本大震災に関する新聞記事を事例として～,情報科学技術フォーラム講演論文集,22,359-362,査読無,謝辞有

Munenari INOBUCHI,2024,Development of Cloud-Based Support Tools for Effective Evacuation Focusing on Time-Phase from Pre-Registration to Post-Incident Response to Improve Literacy for Disaster Resilience,Journal of Disaster Research,vol.19, no.1,56-71,10.20965/jdr.2024.p0056,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

井ノ口 宗成・田村 圭子,2023,被災者生活再建支援の対応記録に基づく相談内容の傾向分析,日本地球惑星科学連合2023年大会,HDS07-09

宮崎 太良・井ノ口 宗成,2023,クラウドソーシングを活用した社会素因リスクマップの策定支援ツールの開発,日本地球惑星科学連合2023年大会,HDS07-P03

井ノ口 宗成・田村 圭子・堀江 啓,2023,非住家を含む建物被害認定調査における効率的なデータマネジメントツールの開発 -2022年福島沖地震を事例として-,日本地球惑星科学連合2023年大会,HDS07-P02

田村 圭子・木村 玲欧・加藤 尚之・井ノ口 宗成,2023,地震・火山噴火災害における被害軽減のために利活用可能な要素・知識体系の整理・検証～地震の基礎知識を学ぶ～,日本地球惑星科学連合2023年大会,HDS07-05

高橋 誠・井ノ口 宗成・木村 玲欧,2023,防災リテラシー研究の現状と課題,日本地球惑星科学連合2023年大会,HDS07-01

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

災害誘因に基づく人の移動行動の想定・推定モデルによる避難リテラシーの向上

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

井ノ口宗成（富山大学）,渡邊了（富山大学）,久保田善明（富山大学）,中川大（富山大学）,原隆史（富山大学）,堀田裕弘（富山大学）,矢口忠憲（富山大学）,安江健一（富山大学）,立石良（富山大学）,阿久井康平（富山大学）

他機関との共同研究の有無：有

森嶋厚行（筑波大学）,北原格（筑波大学）,元谷豊（(株)サイエンスクラフト）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：理工系事務部理工系総務課（都市デザイン学部担当）

電話：076-445-6918

e-mail：

URL：<https://www.sus.u-toyama.ac.jp/>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：井ノ口宗成

所属：都市デザイン学部

(1) 実施機関名：

東京大学史料編纂所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震火山関連史料の収集・分析とデータベースの構築・公開

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
ア. 史料の収集とデータベース化

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
イ. 考古データの収集・集成と分析
(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

地震

火山

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (1) 地震発生の新たな長期予測
ア. 海溝型巨大地震の長期予測
イ. 内陸地震の長期予測

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

5 研究を推進するための体制の整備

- (3) 研究基盤の開発・整備
エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開
(4) 関連研究分野との連携強化

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本研究課題の目的は、地震火山関連史料の収集と分析に基づいてデータベースを構築し、史料記述の検討に基づいて、地震・津波や火山噴火の現象とその災害の実態解明に資する近代以前の史料データを作成するとともに、関連する諸研究における利便性の向上に努めることである。

平成26年度から実施されている「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」においては、近代的な観測記録が存在しない地震や火山噴火について、地震学や火山学といった理学系の分野だけでなく、史料の取り扱いに慣れた歴史学の研究者も組織的に参加して、連携した研究が実施されている。このような連携研究を歴史学側から主体的に実施しているのが本研究課題であり、地震火山関連史料データベースの構築・公開を主軸に据えた研究を基盤とし、このデータベースを通じて地震学・火山学や関連諸分野との連携強化を指向している。

本研究課題では、既刊地震史料集に所収されている史料を中心として、地震火山関連史料データベースの構築を実施する。既刊地震史料集には、近代以前の地震・火山噴火について研究する上で貴重な史料が所収されているが、紙幅が限定された編集の都合上、省略されてしまった部分が多く存在して

いる。また、原典とした史料の刊本が不適当な場合や、史料集には相応しくない書籍や報告書からの引用文が所収されている場合があり、そのままの状態では地震学や火山学の研究に利用するには問題がある。そのため、既刊地震史料集に所収されている個々の史料の記述内容については、原典史料を用いた確認と修正・補筆を行う校訂作業が必要となる。

これまで、既刊地震史料集の校訂作業では紙媒体を用いて紙面上で作業を行っており、必ずしも効率的な手法ではなかった。そこで今後、本研究課題では、史料の校訂作業における新たな手法の開発に着手し、実用化していく計画である。これによって、既刊地震史料集の校訂作業を、従来よりも進捗させることができると考える。また、これまでの地震火山関連史料データベースの構築作業についても、新たに全文デジタルデータ化を基盤とした構築方法を導入し、従来の紙媒体上での編集から史料データを用いた編集作業へと手法を転換して、作業全体の効率化・迅速化を目指していく。これらの新たな手法の開発・導入によって、本研究課題では今後の5か年の間に、既刊地震史料集の全文デジタルデータ化を完了させ、史料本文の校訂作業を大幅に進捗させて、構築中の地震火山関連史料データベースを公開する計画である。

さらに、日本全国の主要な史資料保管機関で収集・所蔵されている史料を調査し、地震・津波や火山噴火の現象とその災害に関連する近代以前の史料を収集して翻刻を行う。これらの新史料についても、デジタルデータ化を実施して地震火山関連史料データベースに組み込んでいく。

本研究課題で構築する地震火山関連史料データベースでは、史料本文を単にデジタルデータ化するだけでなく、史料本文を分析してそこに記されている被害発生場所に現在の緯度・経度の情報を付与し、地理情報システム上で表示できるようにする。このような史料分析と位置情報への変換については、東京大学地震火山史料連携研究機構と協力して進めていく。このような取り組みは、別の研究課題において実施される、地震火山関連史料データベースと考古資料災害痕跡データベースとの統合データベースの構築に、大いに寄与できると考える。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

[平成31年度]

史料の校訂作業における新たな手法を開発・実用化し、既刊地震史料集に所収の史料について校訂作業を実施していく。また、地震火山関連史料データベースの構築作業について、新たに全文デジタルデータ化を基盤とした構築方法を導入し、従来の紙媒体上での編集から史料データを用いた編集作業へと手法を転換する。これらによって、歴史的に信頼できる史料に基づいた史料データベースを構築していく。さらに、現存する膨大な史料の中から、近代以前の地震・津波や火山噴火に関連する新たな史料を調査・収集する。

[平成32・33・34年度]

既刊地震史料集に所収の史料について、新たな手法による校訂作業を実施していき、歴史的に信頼できる史料に基づいた史料データベースを構築・改良していく。また、近代以前の地震・津波や火山噴火に関連する新たな史料の調査・収集を実施する。

[平成35年度]

既刊地震史料集に所収の史料について、新たな手法による校訂作業を実施し、また、近代以前の地震・津波や火山噴火に関連する新たな史料を調査・収集して、歴史的に信頼できる史料に基づいた史料データベースを構築・改良する。この史料データベースの公開に向けて、内容の最終的な確認作業を行う。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

- 1) 引き続き地震史料集テキストデータベースの原典による史料校訂、およびデータ修正の作業を進めた。今年度は、新収3別・4別の史料校訂、すでに史料校訂の済んでいる増訂2・新収3についてはデータ修正を行った。
- 2) 史料と史料に登場する地名の関係を、Web GISベースのシステムを介して可視化するために、令和3年度より、自然言語処理を専門家とする情報工学研究者と連携して、AIによる史料中の地名表現の自動抽出、および地名表現のマークアップに取り組んでいる。今年度は新収3・4を対象に、学習データの追加、および実践的な自動地名付与を行った。
- 3) 今年度は本研究課題に関連して以下の史料調査を実施した。①山口県文書館では毛利家文庫「浦日

記」を調査した。「浦日記」は既刊史料集に部分的に採録されているが、未採録の記事について調査を作成した。その過程で既刊史料集に示された記主の所在地（震動の記録された場所）について多数の要訂正箇所があることが判明した。②公益財団法人宇和島伊達文化保存会では「宇和島伊達家文書」・「桜田家文書」を調査し、天保十四年三月二十六日に蝦夷地で起こった地震津波に関する松前藩士山田三郎（三川）の六月二十六日（天保十四年）付書状を発見した。③佐伯市歴史資料館では「佐伯藩郡方町方御用日記」を調査し、全くの未知ではないが既刊史料集未採録の嘉永七年（安政元年）十一月四日・同五日・同七日の東南海地震に関する佐伯藩におけるまとまった記録を確認した。④熊本博物館では肥後国玉名郡の住人坂本淳蔵が著した「東海道地震記録」を調査した。坂本は公務で相模国に赴く途中、伊勢国で嘉永七年十一月四日の東海地震に遭う。その後同二十二日に相模国三浦郡の天津陣屋に着くまでの記録である。今後史料の詳細を検討し、公表する予定である。また同館では「加賀山家文書」のうち「日録」を調査し、未知の地震に関する記事を発見した。その他、熊本大学附属図書館寄託「永青文庫史料」・同館所蔵「古閑家文書」、および鹿児島大学附属図書館所蔵「肝付家文書」の調査を行った。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

1) HMEV01と連携して、高精度OCRによるテキスト化の方式を導入することにより、本計画期間中に既刊地震史料集全28巻（計22,771頁）全ての全文デジタルデータ化が完了し、地震史料集テキストデータベース（<https://materials.utkozisin.org/>）として公開した。公開に際しては利用の便宜のために、用語・年月日による基本検索のほかに、①年月ごとの地震史料数の一覧表から検索する方法、②史料の所在地名から検索する方法、③理科年表掲載の歴史地震名から検索する方法を整備した。

また既刊地震史料集に所収されている史料の原典に当たって記事の史料校訂・増補をする作業について、従来紙に出力して紙面上で作業を行っていたものを、新たに開発したTXTファイルからXMLファイルへの変換システムを導入することで、紙媒体を介さずにデジタルデータ上での校訂作業が可能となった。これにより、これまで膨大な時間と労力を要していた既刊地震史料集の校訂作業について、作業負担の軽減化と効率化を図った。現在、予定している全10冊（増訂1・2・3、新収1・2・2別・3・3別・4・4別、うち新収1・2別は別プロジェクトにより公開済）のうち、増訂1～3、新収2・3については史料校訂が終了し、データ修正と公開の準備を進めているところである。新収3別・4別については史料校訂が6割程度進捗している。新収4については未着手で、新収5以降と併せて次期計画において進める予定である。

2) 史料と史料に登場する地名の関係を、Web GISベースのシステムを介して可視化（地図上に表示）するために、令和3年度より、自然言語処理を専門家とする情報工学研究者と連携して、AIによる史料中の地名表現の自動抽出、および地名表現のマークアップに取り組んでいる。自動抽出の性能の確認と実践を行うにあたり、自動抽出した結果に対して人手で地名表現の修正を行い、フィードバックさせることで、強化学習を行い、さらなる自動抽出の性能向上を図っている。令和4年度には学習データを利用することにより、F値（＝適合率と再現率の調和平均）が約0.54から約0.775に向上したことから、人手による抽出には及ばないが、利用可能な性能と判断した。令和5年度までに新収1～4を対象に、学習データの追加、および実践的な自動地名付与を行った。

また、Web GISベースに、史料と地名の関係を可視化するためには、緯度経度等の空間データ付与が必須であることから、自動的に緯度経度を付与する手法についても検討を開始した。これは、自然言語処理を応用し、史料に記述されている地名表現とその係り受けに注目する方式であり、上記の地名自動抽出において連携している情報工学研究者とともに実施している。地名の自動抽出と同様に、確認した地名抽出結果を学習データとしてフィールドバックすることで性能を向上させていく。

これまで地震史料集の巻ごとに自動抽出と強化学習を行ってきたが、今後はある程度の性能向上を見たタイミングで、残りの全巻を対象に自動的に地名抽出・空間データ付与を行う予定である。

3) 本計画期間中には以下の史料調査を実施し、地震史料テキストデータベース

（<https://materials.utkozisin.org/>）に収録されているデータの校正および追加収録するデータの収集、日記史料有感地震データベース（<http://wwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/HEVA-DB/>）に追加収録するデータの整理を行った。

①弘前市立弘前図書館「弘前藩庁日記」「金木屋日記」、②もりおか歴史文化館「盛岡藩 覚書」、③奥会津博物館「室井哲之輔文書『農業覚日記』」、④茨城県立歴史館「石河明善日記」、⑤千葉県文書館「治助日記」、⑥市川市立市川歴史博物館「大屋家日記」、⑦国立国会図書館『江間日記』（刊本）、⑧国文学研究資料館「万相場日記」「依田家日記」「古河家日記」「飛騨高山町会所

日記」「津山藩町奉行所日記」、⑨明治大学博物館「内藤家文書『延岡藩日記』『万覚記』『普請方日記』『豊後国千歳役所日記』」、⑩上野学園大学音楽史研究所「芝家日記」、⑪倉敷市歴史資料整備室「米屋三宅家文書」「大江三宅家文書」「繁屋中原家文書」「大橋紀寛家文書」「西原家文書」、⑫広島県立文書館「土屋日記」（原本は広島県立歴史博物館所蔵）、⑬山口県文書館毛利家文庫「浦日記」「中島市郎兵衛日記」、⑭香川県立ミュージアム「多度津藩日記」、⑮宇和島伊達文化保存会「宇和島伊達家文書」「桜田家文書」、⑯伊予小松温芳図書館「小松藩会所日記」、⑰佐伯市歴史資料館「佐伯藩家老日記」「御用日記」「郡方町方御用日記」、⑱佐賀県立図書館「坂部日記」、⑲長崎歴史文化博物館「要録」「嘉永七寅島原記録」「神代鍋島家日記」、⑳熊本大学附属図書館「永青文庫史料」「古閑家文書」、㉑熊本県立図書館「林桜園日記」「下林家（保範）日記」、㉒熊本博物館「加賀山家文書『日録』」「東海道地震記録」、㉓熊本県博物館ネットワークセンター「高森町瀬井家資料『瀬井家日記』」、㉔熊本市立図書館「武藤文書『正観寺年代記』」「甲斐亀右衛門一代節用記」、㉕都城島津邸「都城島津邸所蔵島津家文書『安山松巖記年代実録』『和朝年代記』」、㉖鹿児島大学附属図書館「肝付家文書」

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望
既刊地震史料集の電子化を完了し、地震史料集テキストデータベースを公開していることによって、建議の計画の概要2-1(1)に「長期間における地震・火山現象とそれに伴う災害を正確に把握するために、史料・考古データ、地質データ等を収集して調査・分析を行うことで、データベースを整備・拡充する」に、また、19世紀九州地域の有感地震記録を広く収集することによって、(2)に「低頻度で大規模な地震・火山噴火現象の発生履歴、規模、場所を解明するために、史料・考古データ、地質データ等の分析を行う」とあることに貢献できた。これは、計画の実施内容1-1アに「大学は、既刊の地震・火山関連史料集のデータベースを構築する」とある計画にも該当する。今後は史料テキストの修正・補充、地名への位置情報付与とその地図表示の実現、史料の活用による地震・噴火の研究が課題となる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

榎原雅治・水野嶺・加納靖之,2023,19世紀前半九州中南部における地震記録一天保・弘化の「大地震」一,歴史地震,38,37-49,査読有,謝辞有

杉森玲子・榎原雅治,2023,歴史資料から読み解く大地震,「関東地震」「南海トラフ地震」に備える(予知協),6-7

栗畑光博・水野嶺,2023,中世における桜島火山噴火の年代と災害,第2回日本災害・防災考古学界研究会資料・予稿集,40-47

・学会・シンポジウム等での発表

水野嶺・榎原雅治,2023,19世紀前半の阿蘇山火山活動履歴の再構築,京都大学火山研究所・熱学研究施設セミナー

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：地震：歴史史料収集

概要：歴史地震の記録の調査のため、下記の史料所蔵機関で19世紀の日記史料を中心に調査を実施した。山口県文書館毛利家文庫・宇和島伊達文化保存会・佐伯市歴史資料館・鹿児島大学附属図書館
既存データベースとの関係：地震史料テキストデータベース <https://materials.utkozisin.org/>

調査・観測地域：

調査・観測期間：

公開状況：

項目：地震：歴史史料収集

概要：歴史地震の記録の調査のため、下記の史料所蔵機関で19世紀の日記史料を中心に調査を実施した。山口県文書館毛利家文庫・宇和島伊達文化保存会・佐伯市歴史資料館・鹿児島大学附属図書館
既存データベースとの関係：日記史料有感地震データベース

<http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/HEVA-DB/>

調査・観測地域：
調査・観測期間：
公開状況：

(11) 次期計画における課題名：

史料による近代以前の地震・火山活動の調査・分析とその公開

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

杉森玲子（東京大学史料編纂所）, 及川亘（東京大学史料編纂所）, 荒木裕行（東京大学史料編纂所）, 林晃弘（東京大学史料編纂所）, 山田太造（東京大学史料編纂所）, 小瀬玄士（東京大学史料編纂所）, 小林優里（東京大学史料編纂所）

他機関との共同研究の有無：有

佐竹健治（東京大学地震火山史料連携研究機構）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：及川 亘

所属：東京大学史料編纂所

(1) 実施機関名：

東京大学史料編纂所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

近代以前の地震・火山災害に関する多角的研究

(3) 関連の深い建議の項目：

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ア. 史料の収集とデータベース化

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

地震

火山

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

5 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) 関連研究分野との連携強化

(5) 総合的研究との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本研究課題では、現代とは異なる社会状況の下で発生した災害時における人々の行動や対応、復旧・復興過程などの事例を集積し、時代的・地域的な特性を導き出して、今後の防災・減災施策、復興施策などの検討に資する事例の提示を目指している。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

[平成31・32・33・34年度]

現存する膨大な史料の中から、近代以前の地震・火山災害に関連する新たな史料を調査・収集・翻刻する。既存の史料に新たな史料を加えて、近代以前に発生した地震・火山災害などについて、当時の人々の行動や対応、復旧・復興過程などについて検討し、災害事例を集積する。

[平成35年度]

近代以前の地震・火山災害に関連する新たな史料を調査・収集・翻刻する。近代以前に発生した地震・火山災害などについて、当時の人々の行動や対応、復旧・復興過程などについて検討し、災害事例を集積する。このような検討に基づいて、自然災害における地震・火山災害の特徴を解明し、今後の防災・減災施策、復興施策などの検討に資する事例の提示を目指す。

なお最終年度には、部会全体としての研修プログラム構築に際して、近代以前の地震・火山災害への対応の事例に基づいた知見を提供する予定である。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

・1640年北海道駒ヶ岳噴火に関して、噴火と同時代の史料の調査・分析から、7月31日の噴火以前にも火山活動がみられた可能性があること、山が崩れて蝦夷と松前の間の海域に生じた山は、現在も鹿部沖の海域に残る流れ山の存在とも矛盾しないこと、新しく出来た山には当時、海上に露出していたものもあったと考えられること、などの知見が得られた。

・1855年安政江戸地震で怪我人が出た状況について、地震後の調査をまとめた史料をもとに整理し、「江戸大地震之図」にも同様の描写があることを確認した。また、安政江戸地震の経験に基づく教訓を継承する難しさを示す事例や、地震対策となる地震口が1910年代にも東京で採用されていた事例を検討した。

・1923年大正関東地震に伴う火災で、東京帝国大学では図書館等の多くの蔵書が焼失したが、貴重書として史料が保管されていた場所が、震災時の搬出には不便な位置であった点が災いしたことなどを明らかにし、史料の防災対策の難しさを指摘した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

・1855年安政江戸地震による被害と復旧の様子が描かれた「江戸大地震之図」（東京大学史料編纂所蔵島津家文書）について、文献史料や「安政大地震絵巻」（三康図書館所蔵）などとあわせて検討した結果、一般的な被害等の様子を描いたものではなく、特定の場所や出来事を事実に基づいて描いた絵画史料であることが判明した。本史料は、地震や火事による被害と人々の行動や対応、復旧の過程を視覚的に示すものであり、文献史料との照合からは、江戸では繰り返される火事で蓄積された災害対応の経験が震災でも活用されたことを読み取れる。

・1640年北海道駒ヶ岳噴火に関して、従来参照されてきたものより噴火に近い時期の同時代史料から噴火に関する記述を見出すとともに、編纂物についても典拠に遡って記述を精査し、その一部に対して火山学的な検討を加えた。その結果、噴火の推移に関する従来の理解には再検討の余地があることが判明した。

・1707年富士山噴火に伴う降砂で、江戸でも人々の生活に影響が出たが、噴火が終息した翌日に約30cmの積雪があってからは、砂の記事はみられず、少なくとも一時的には砂の吹上げが抑えられた可能性があることなどを明らかにした。

・1923年大正関東地震に伴う火災で東京帝国大学所蔵史料が焼失した事例を検討し、史料の防災対策の難しさを指摘した。

・同和火災コレクション（同和火災海上保険の初代社長である廣瀬鉞太郎氏が収集した地震、火災、台風、落雷、津波、噴火、伝染病などに関する史料群）が「伝える—災害の記憶展」（京都文化博物館〈2021年3月20日～5月16日〉ほか）と題して、初めて本格的に一般公開されるにあたり、コレクションの調査と展示の監修を行った。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

上記の成果を通じて、4. (1) 「地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明」に貢献した。また、「地震・火山研究で得られた知見の社会への発信に関しては、地域の行政機関やステークホルダーと連携する」（建議のⅢ「計画の実施内容」）ことにも貢献した。このように、災害事例を集積し、その研究成果を社会に発信することは、「災害の軽減に貢献する」という目標に近づく一助となりうる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

杉森玲子, 前野深, 2023, 史料からみた北海道駒ヶ岳1640年噴火, 火山, 68(2), 59-73, https://doi.org/10.18940/kazan.68.2_59, 査読有, 謝辞有

杉森玲子, 榎原雅治, 2023, 歴史資料から読み解く大地震, 「関東地震」「南海トラフ地震」に備える, 6-7, 査読無, 謝辞無

Reiko Sugimori, 2024, Damage by the 1855 Edo Earthquake and Response to the Disaster—Study Based on Edo Ohjishin no Zu (Picture Scroll of the 1855 Edo Earthquake)—, Journal of Disaster Research, 19(1), 38-49, 10.20965/jdr.2024.p0038, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

杉森玲子,2023,関東大震災と東京大学所蔵史料,第40回歴史地震研究会,O-05

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

史料による近代以前の地震・火山活動の調査・分析とその公開

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

杉森玲子（東京大学史料編纂所）,及川亘（東京大学史料編纂所）,荒木裕行（東京大学史料編纂所）,林晃弘（東京大学史料編纂所）,小瀬玄士（東京大学史料編纂所）,山田太造（東京大学史料編纂所）,小林優里（東京大学史料編纂所）

他機関との共同研究の有無：有

大邑潤三（東京大学地震火山史料連携研究機構）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：杉森玲子

所属：東京大学史料編纂所

(1) 実施機関名：

東京大学理学系研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

沿岸巨礫を用いた古津波評価法の検討：南海トラフ～琉球海溝の連動可能性評価に向けて

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (1) 地震発生の新たな長期予測
ア. 海溝型巨大地震の長期予測

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

我が国の沿岸部では、日本海溝沿いや琉球海溝沿いを中心として津波（津波石）や台風の高波で打ち上げられた巨礫群が沿岸部に堆積している。これらは、現在から数千年前の間に発生した津波あるいは高波で打ち上げられ、その後も移動を繰り返して現在のサイズ・空間分布を形成していることから、この間の津波・高波の履歴と規模の情報を保持していると考えられる。そのため、巨礫のサイズ・空間分布、打ち上げ年代から、過去数千年にわたる時間スケールでの津波と高波の履歴と規模（既往最大クラスを含む）を時空間的に復元できる可能性がある。しかしながら、既往研究は認定と規模推定の定量的評価に課題が残り、津波規模などの実態は十分解明されていない。そこで本研究では、現地調査、試料分析、数値計算により、沿岸巨礫を用いた古津波評価法の検討を行う。さらに、特に琉球列島北部に分布する巨礫群を活用することにより、南海トラフ～琉球海溝の連動可能性評価を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本研究計画は、(1) 現地調査、(2) 年代測定及び統計処理、(3) 数値計算、で構成され、以下を5年計画で実施する。

現地調査：本研究では、津波・高波履歴と規模復元に有効な地域を全国の中から厳選して、主に平成31～34年度にかけて調査を実施する。また、琉球列島においては、津波・高波の規模推定のために台湾の沿岸巨礫分布の情報が重要であるため、台湾も対象地域とする。津波石は、特に巨大津波の規模と履歴に注目するため、高い標高または供給源からの移動距離が長い巨礫群を調査する。また、津波発生日代の理解には砂礫質津波堆積物の情報も重要であり、同時に現地調査を実施する。一方、台風の高波で打ち上げられた巨礫群は沖縄・奄美諸島に広く分布しており、近年の台風で移動した巨礫を空中写真で確認し、サイズ・空間分布を調査する。

年代測定：琉球列島においては津波石を用いた津波発生年代に関する研究が行われてきた。しかしながら、推定津波年代にばらつきがあり、統一的な理解が得られていない。これは、測定試料選定、暦年較正、年代値の解釈の違いによる。そこで、既往研究のうちハマサンゴ巨礫等の信頼性の高い巨礫年代を測定したデータを厳選するとともに、調査で採取する資料を用いて追加の放射性炭素あるいはウラン・トリウム年代測定を平成32～35年度にかけて行う。そして、バイズ理論に基づき年代結果を統計処理し、津波履歴を高精度で復元する。

数値計算：＜津波規模評価＞巨大津波に特化した解析を行うため、特に高い標高に堆積する津波石の打ち上げ計算を行う。数値計算による検討は平成31～35年度の各年度に、現地データや地形データが収集できた地域から順次実施する。具体的には、巨礫移動の水理実験により精度検証を行った上で、鉛直方向の流速、加速度等を考慮した津波計算を実施し、崖上の巨礫打ち上げを説明できる入射波条件を推定する。その結果を制約条件とし、津波波源モデルを推定する。一方、台風の高波での打ち上げが確認できる巨礫群は、津波規模の上限値を推定するために活用することができる。まず、数値計算により推定される台風の高波の波浪強度を推定する。そのうえで、現在の巨礫のサイズ・空間分布を維持できる規模の津波を繰り返し計算により推定し、過去数千年程度の間に発生した可能性のある地震・津波規模を評価する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

琉球海溝南部に面する先島諸島（石垣島、西表島等）および琉球海溝北部に面する奄美諸島（奄美大島）において現地調査を行った。具体的には、LiDAR等の測量機器を用いて、これらの地域で報告されている地殻変動の地形学的痕跡の定量化を行った。また、津波石をはじめとする過去の津波、地震の地質痕跡の年代測定用試料を取得し、年代測定を実施した。琉球列島南部については、歴史記録や地質記録を制約条件として、1771年明和天津波とそれより前の先史時代の津波波源の検討を行い、いずれも津波地震による可能性が高いことを明らかにした。また、昨年度実施した津波石の3D計測結果について学術論文にまとめて出版した。琉球列島南部や北部を対象として行ってきた多点放射性炭素年代測定についても昨年度から引き続き実施して、論文化に向けて必要な測定データを得ることができた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本研究では、現地調査、試料分析、数値計算により、沿岸巨礫を用いた古津波評価法の検討を行った。さらに、特に琉球列島北部に分布する巨礫群を活用することにより、南海トラフー琉球海溝の連動可能性評価を行った。具体的な成果を以下に挙げる。

沖縄県の水納島を対象として古津波堆積物調査を実施し、琉球海溝南部の過去約1000年間の古津波履歴を明らかにした（Fujita et al., 2020 PEPS）。また、台風起源と考えられるサンゴ礁上の巨礫群を制約条件として活用することにより、これらの巨礫をより内陸に運搬する規模の津波はサンゴ礁形成後に発生していないとの仮定のもとで最大津波規模を数値計算により推定し、それを説明できる地震規模を推定する手法を開発した。この成果のうち、琉球海溝中部での成果を取りまとめた

（Minamidate et al., 2022 EPSL）。また、10 mを超えるような巨大な津波石について、通常通りの測量が難しく従来は形状を把握できなかったため、数値計算による巨礫規模の復元が困難であった。この問題に対し、LiDARを活用することで植生下の巨礫の形状を復元することに成功した

（Nakata et al., 2023 Scientific Reports）。このように、本課題から複数の学術論文として成果が出されており、既に長期評価にも引用されるなどの実績がある。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本課題は、過去の地震津波履歴や規模を把握するためのものであり、これまで挙げた成果は関連の深い項目（1（1）ウ：地質データ等の収集・集成と分析）の趣旨に合致している。すでに本課題から複数の学術論文として成果が出されており、長期評価にも引用されるなどの実績がある。本課題で検討している過去の地震津波の履歴と規模の情報は、津波評価においてもっとも基礎となる情報であり、災害軽減に資する直接的情報を提供できていると考えている。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Nakata, K., Yanagisawa, H., Goto, K., 2023, A new point cloud processing method unveiled hidden coastal boulders from deep vegetation, Scientific

Reports, 13, 10918, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37985-2>, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

中田光紀, 後藤和久, 柳澤英明, 2023, 植生に覆われた津波石の3D測量, 日本堆積学会, No. O17

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

フィリピン海プレート縁辺の海溝沿いを対象とした古津波履歴と規模の高精度復元

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

後藤和久（東京大学大学院理学系研究科）

他機関との共同研究の有無：有

森信人（京都大学防災研究所）, 横山祐典（東京大学大気海洋研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：後藤和久

所属：東京大学大学院理学系研究科

(1) 実施機関名：

東京大学理学系研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

巨大地震に伴う粘弾性余効変動の解明

(3) 関連の深い建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
- (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
地震

(4) その他関連する建議の項目：

- 2 地震・火山噴火の予測のための研究
- (1) 地震発生の新たな長期予測
- ア. 海溝型巨大地震の長期予測
- イ. 内陸地震の長期予測
- (2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測
- ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測
- 5 研究を推進するための体制の整備
- (2) 総合的研究
- ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

海底地殻変動観測によって、東北地方太平洋沖地震後から継続している地殻変動のメカニズムとして、粘弾性変形が重要であることが判明した。本課題は、海陸の地殻変動データに加え、今後のデータ取得が進む衛星重力データの利用まで視野に入れた、広域粘弾性変形モデルを開発することで、地震サイクルの各段階における列島規模の地殻変動の理解を深めることを目的とする。5か年の間に、プレート沈み込み境界の形状、密度・弾性・粘性の不均質構造、自己重力を考慮した球体地球モデルにおける粘弾性変形の計算手法を確立し、日本列島で発生した過去の巨大地震へ適用するとともに、既存手法との差を明らかにすることを目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成31・32年度に、既存モデルと提案モデルとの比較による、曲率や自己重力の影響の評価を行う。平成33・34年度において、提案モデルへ水平不均質構造を取り込み、平成35年度にプレート境界形状等を考慮した、巨大地震による余効変動のシミュレーションを実施する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

3次元的な密度・弾性構造を取り入れた重力場変化の計算手法を論文で公表した。現実的なプレート境界形状を考慮した1次元球対称モデルと半無限モデルを用いて、地震時の断層すべりをGNSS地殻変

動データのインバージョンで推定した。その結果、層構造、曲率、自己重力を取り入れることでABIC、RMSとも改善することが分かった。また、均質な半無限モデルでは、海溝軸付近のすべりの不確かさを過小評価していることが明らかになった。せん断すべりに加え開口成分での計算をできるよう拡張した。さらに、粘弾性変形の非線形レオロジーへの拡張に着手し、衛星重力観測で捉えられるような長波長の変動において、地震直後に有効粘性率が低下することを数値計算により示した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

測地データを有効活用するための新たな球モデルの開発①と、既存モデルと球モデルの比較に基づいて定量的に球モデルの有用性を示すこと②の2つを実施してきた。①のモデル開発では、線形レオロジー、自己重力を厳密に考慮した上で3次元的な弾性・密度・粘性を取り入れて粘弾性変形を計算する手法を開口成分まで含めて開発した。さらに、非線形レオロジーの場合の計算手法の開発を開始した。②については、既往研究のほとんどがフォワード計算を用いて限られたモデルを比較するのにとどまっていたものを、現実的なプレート境界形状を考慮するとともに、より包括的かつ一貫した手法でモデル差を評価した結果、層構造、自己重力を考慮した球モデルによって、沈み込み帯で発生する巨大地震に伴う海溝から陸域の遠地までの地殻変動データを最も整合的に説明できることを示した。また、同モデルによって、不確かさのより現実に即した見積もりが可能となることを明らかにした。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

本課題で開発した球モデルに基づく計算手法は、全球的な変形および重力場の変化を容易かつ正確に計算が可能である。今後の展望として2つ挙げる。

1. 本手法で計算したグリーン関数をプレート境界の固着状態の推定に用いたり、地震発生サイクル予測シミュレーションへ取り込むことで、列島規模でのそれらの計算の信頼度をより高めることができる。なお、本手法で計算した長波長の変動は、局所的な不均質の考慮に適したいわゆる高詳細モデルでの計算に取り込むことができ、全球規模の計算が負荷を高めることなく行える。

2. ESA、NASAの共同で新しい衛星重力ミッションMAGICが2026年より開始予定である。時間分解能が既存衛星重力ミッションの1か月に対して、数日まで飛躍的に改善される。巨大地震直後の粘弾性の重要性が2011年東北地方太平洋沖地震により明らかとなっているが、本研究で開発中の球モデルは、巨大地震に伴う粘弾性変形による重力変化を非線形効果も含めて正確に計算できる。このため、海底地殻変動に加えて新しいリモートのセンサーである衛星重力観測を有効活用することが可能となる。衛星重力観測は、海域の変動も監視できるため、陸上GNSS局や海底観測局の数が少ない領域では特に有用である。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Tanaka, Y., V. Klemann, Z. Martinec, 2023, An Estimate of the Effect of 3D Heterogeneous Density Distribution on Coseismic Deformation Using a Spectral Finite-Element Approach, International Association of Geodesy Symposia, 10.1007/1345_2023_236, 査読有, 謝辞無

高田大成, 2024, 地震時地殻変動モデリングにおける地球の曲率と自己重力の影響, 修士論文（東京大学大学院理学系研究科）, 査読無

金子直樹, 2024, 点源の体積膨張に伴う地殻変動における自己重力の影響の理論的見積もり, 修士論文（東京大学大学院理学系研究科）, 査読無

・学会・シンポジウム等での発表

Yoshiyuki Tanaka, 2023, Terrestrial and satellite gravity observations of earthquake-related phenomena -an overview, 1st Workshop on Earthquake Early Detection using Superconducting Gravimetry, IV-2

Yoshiyuki TANAKA, Kazuma Nakakoji, Meike Meike Bagge, Henryk Dobslaw, Volker Klemann and Zdeněk Martinec, 2023, Development of a viscoelastic postseismic deformation theory based on nonlinear rheology for advanced satellite gravity missions, ESA & NASA MAGIC Science and Applications Workshop 2023, 3-12

中小路一真, 田中愛幸, 2023, 人工衛星重力ミッション高度化へ向けた、非線形レオロジーを考慮した粘

弾性変形理論の開発 (I) ,日本測地学会第140回講演会

金子直樹, 田中愛幸,2023,体積膨張に伴う地殻変動における自己重力の影響の見積もり,日本火山学会2023年度秋季大会,P130

高田大成, 田中愛幸,2023,地殻変動モデリングにおけるGreen関数の比較と2011年東北地方太平洋沖地震の地震時断層すべり推定への適用,日本地球惑星科学連合大会

高田大成, 田中愛幸,2023,地殻変動モデリングにおけるGreen関数の比較 (II) ,日本測地学会第140回講演会

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

先進的な測地観測データの有効利用に向けた広域地殻変動モデルの開発

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

田中愛幸 (東京大学大学院理学系研究科)

他機関との共同研究の有無: 無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等:

電話:

e-mail:

URL:

(14) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名: 田中愛幸

所属: 東京大学大学院理学系研究科

(1) 実施機関名：

東京大学理学系研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地震発生場のテクトニクスとマルチスケール地震現象の予測可能性

(3) 関連の深い建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (3) 地震発生過程の解明とモデル化
 - ア. 地震発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

- 1 地震・火山現象の解明のための研究
 - (3) 地震発生過程の解明とモデル化
 - イ. 地震断層滑りのモデル化
- 2 地震・火山噴火の予測のための研究
 - (1) 地震発生の新たな長期予測
 - ア. 海溝型巨大地震の長期予測
 - (2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測
 - ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測
 - イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験
 - (3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測
- 5 研究を推進するための体制の整備
 - (2) 総合的研究
 - ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
 - ウ. 千島海溝沿いの巨大地震
 - (3) 研究基盤の開発・整備
 - イ. 観測・解析技術の開発
 - (5) 国際共同研究・国際協力
 - (7) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震
千島海溝沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

地震発生場の不均質性をどのように定量化するか、という問題は震源物理学の主要な問題の一つである。1980年代に「アスペリティ」や「バリア」として認識された2元的な不均質性は、繰り返し発生する特徴的な地震の振る舞いを説明するものの、微小スケールから巨大地震までのマルチスケールな地震現象の振る舞いを説明するには単純すぎた。それに代わるものとして2005年以来、本研究代表者らが提案している階層パッチモデルは、地震現象のマルチスケールな側面の多くを説明する。特に2011年東北沖地震が政府の想定を超えた規模の超巨大地震として発生して以来、階層性の理解が地震の予測可能性にとって重要であることが明らかになってきた。また階層性に影響を及ぼす要因として、プレートの相対速度や熱的構造など、地域的なテクトニクスの違いがあることが全世界規模の研

究により明らかになってきた。

次期計画では、現行計画で得られた知見を元に、データ解析と数値モデリングを組み合わせ、様々なテクトニクス環境条件と階層性の定量化を進め、マルチスケール地震現象の予測可能性を検討する。具体的には様々な地域で地域ごとに異なる階層構造を特徴づける地震活動パラメタの推定を行うとともに、地域を絞って大きさの異なる地震の破壊過程の高精度イメージングによって地域的な階層構造の定量化およびスケールリングを行う。世界各地の沈み込み帯を比較することで、テクトニクス環境条件とスケールリングや階層性パラメタの関連性を調べる。一方で数値モデリングにより階層性パラメタが予測可能性に及ぼす影響を明らかにする。

計画遂行にあたっては、先端的なデータ解析研究と数値モデリング研究を遂行する一方で、これらの研究に用いる手法の簡便化、標準化を通じて、次世代研究者養成のための教育ツールの開発も行う。実際の研究の一部に学生を参加させることで研究者養成も行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

小規模から超巨大地震まで、個々の破壊プロセスが含む階層性と、複雑系の相互作用として出現する地震活動の階層性をデータ分析によって定量化し、数値モデリングで予測可能性を検討する。既存の高精度階層性イメージング手法を新しいデータに適用するとともに、先端計算科学の知見を取り入れて新たな階層性分析手法を開発する。これらの分析結果と数値モデリングによって階層性が予測可能性に及ぼす影響を評価する。日本周辺の沈み込み帯での地域研究を基盤として、世界各地の沈み込み帯を対象とすることで、異なるテクトニクスの影響を検討する。そのためにチリ、メキシコ、台湾など世界各地の研究機関と国際協力を進める。データ解析、モデリングの手法を標準化し、次世代研究者養成のための教育ツールを開発する。年度ごとの研究計画は以下の通り。

初年度：日本周辺における高精度階層性イメージング、階層性モデリング手法開発
階層性抽出のための新技術開発、地域研究のための予備解析

2年度目：高精度階層性イメージングの他地域への適用準備、階層性モデリング適用
新技術の適用、既存データ解析・モデリング手法の標準化

3～4年度目：多数の地域での各種分析手法の適用、階層性モデリングによる評価、
標準化した手法を用いた研究教育実施

5年度目：各種分析手法の適用、階層性モデリングによる評価、研究の取りまとめ
標準化した手法を用いた研究教育実施

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

今年度は確率論的予測手法の改善、階層性モデリングの素過程の研究、および実際の場合での評価、研究とりまとめとしての、地震とスロー地震の本質的な違いについての考察を行ったスロー地震活動の確率論的予測手法の改善のための新たなデータ分析手法として、テクトニック微動の特徴量を用いた微動の自動判別法を開発し、それをもとに微動クラスターの同定を行った。この結果は米国地球物理学学会での講演を経て、現在論文としてまとめる段階である。階層性モデリングの素過程としての動的震源核形成過程について、破壊伝播速度とカスケード可能性の関係についてまとめた論文を、Earth Planets and Space誌にて出版した。また現実的な階層構造を仮定した、準動的な地震サイクルシミュレーションを東北沖において行い、階層の深さによる地震サイクルの違いを考察した。小さな階層の存在が系全体のふるまいに与える影響は少ないが、破壊開始点の位置などにより個々の破壊プロセスを規定する可能性が高い。本研究も、米国地球物理学学会での講演を経て、現在論文としてまとめる段階である。ここ数年の研究のまとめとして、2007年に提唱した普通の地震とスロー地震のスケール法則の見直しを行った。その結果、地震とスロー地震は異なるスケール則に従い、その違いは支配法則（波動方程式と拡散方程式）の違いであることがわかった。そして地震とは地震波動によって階層的な破壊成長が促進されるプロセスであることを明らかにした。この内容はProceedings of National Academy of Sciences誌に公表された。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本研究は、階層的な地震現象のイメージングからスタートした。本研究では、その開始時に、北海道から東北沖の沈み込み帯において、M4.5以上の大地震と、M4以下の中小地震の波形の立ち上がり

網羅的に比較した結果、多くの大地震の組が立ち上がり、小地震と同じであることを発見していた。これは階層的な地震破壊を示唆する強力な証拠であった(Ide, 2019, Nature)。研究計画の序盤では、この立ち上がりが類似した地震波の検出法を改良し、地震の震源（破壊開始点）の精密震源決定法を開発した。この手法により、破壊開始点の相対位置とセントロイドの相対位置を独立に高精度で決定可能となった。この手法を東北地方の沈み込み帯のうち、那珂沖、釧路沖、つくばに適用した(Chang and Ide, 2021, JGR)。これらの地域では、異なるサイズの地震の破壊開始点が集中する場所が数か所発見され、これらの場所が特に地震の開始しやすい場所になっていることが分かった。同時にある一つの場所から始まる地震でもM2-3程度、M4程度、M5程度と異なる階層まで成長することも判明した。つまり個々の地域で階層的なパッチが相互作用しながら破壊を繰り返すという地震の基本的な震源の性質をある程度定量的に解明することができた。この手法のコードは公開されている。

階層性を持つ地震発生帯と比較対象となるのが、周辺のスロー地震発生地域である。本研究では、スロー地震のうち、特にテクトニック微動を詳細に分析するためのツールの整備も行った。ほぼ本研究開始時に完成した微動検出ツール(Mizuno and Ide, EPS, 2019)、テクトニック微動の複雑な地震波形からインパルス応答を抽出する新たな統計的手法(Ide, JGR, 2021)、および本年度開発した、特徴量抽出による詳細カタログ構築法など、今後も役立つツールを整備することができた。これらの手法を用いてカタログを作成し、更新過程を用いた微動活動の予測手法を世界で初めて開発した(Ide and Nomura, PEPS, 2022)。この手法では微動の予測のために、微動活動の標準化を行う。これは世界各地で発生しているスロー地震活動を地域的なテクトニクスと対比させて研究するために役立つ。

上記の各種震源イメージング手法の開発と並行して、様々なモデリング研究も進めた。動的破壊核形成過程においては、破壊の伝播速度が速いほど、階層間のカスケード確率が高くなる。この関係を定量化することに成功した(Uemura et al., 2023, EPS)。また階層パッチモデルの現実の場への適用を目指して、日本海溝沈み込み帯の一部に、地震発生履歴に基づいて階層パッチモデルを構成し、速度状態破壊依存摩擦則を用いた準動的な地震サイクル地震活動シミュレーションの枠組みを構築した。データ解析と数値モデリングを通じて小地震から大地震までの地震発生プロセスを階層性を軸として研究するという当初の目的は相当に達成された。計画の初期段階では強調していなかったが、地震の理解には、それと対照すべきスロー地震の理解も欠かせなかった。本研究では、両者を比較しながら研究することで、普通の地震が持つ階層性の意味を明らかにすることができ、それが最終年度のまとめ的な成果である、スロー地震と普通の地震は何が違うか？という論文(Ide and Beroza, 2023, PNAS)へとつながった。両者が異なる物理プロセス（波動と拡散）であることは、異なるスケール法則に現れている。さらに地震が波動プロセスであるがために、破壊すべりとともに伝わる地震波動が、階層間のカスケード確率を大幅に増やすことができる、という普通の地震の性質をあぶりだすことに成功した。当該論文の結語としたように、地震研究者にとって地震は普通の現象だが、地球内部の変形プロセスとしては、珍しいものであるという認識が、本研究が5年間で到達した成果のまとめといえる。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

「1 地震・火山現象の解明のための研究、(3) 地震発生過程の解明とモデル化、ア. 地震発生機構の解明、」の一課題としては、地震発生機構における階層性の意味を明らかにし、データ解析による定量化とモデリングにおける利用法開発において、一定の成果を上げた本研究は十分な貢献をしたと考えている。「階層性を持つ断層等の構造における破壊すべりのカスケード」が地震の発生メカニズムである、という認識がより確かになったことは、直前予知のような予測手法では災害の軽減に貢献することは難しいことを明らかにしたともいえる。一方で特定の地域における階層性の把握が重要であることを示したことで、今後は各地域における階層性の理解が重要となる。その方向性を示したことは、長期的な災害の軽減につながる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Ide, S. and G. C. Beroza, 2023, Slow earthquake scaling reconsidered as a boundary between distinct modes of rupture propagation, PNAS, 120, e2222102120, 10.1073/pnas.2222102120, 査読有, 謝辞有

Uemura, K., S. Ide, H. Aochi, 2023, Dynamic nucleation as a cascade-up of earthquakes

depending on rupture propagation velocity, Earth, Planets and Space, 75, 123, 10.1186/s40623-023-01866-9, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(11) 次期計画における課題名:

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

井出哲 (東京大学大学院理学系研究科)

他機関との共同研究の有無: 有

Hideo Aochi (フランスBRGM), Victor Manuel Cruz Atienza (メキシコ国立自治大学), Sergio Ruiz (チリ大学), Kate Huihsuan Chen (台湾国立師範大学)

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等:

電話:

e-mail:

URL:

(14) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名: 井出哲

所属: 東京大学大学院理学系研究科

(1) 実施機関名：

東京大学理学系研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地殻流体の化学的観測による地震火山活動評価システムの高度化と応用

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
イ. 内陸地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測
(4) 中長期的な火山活動の評価
イ. モニタリングによる火山活動の評価

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
イ. 首都直下地震
(3) 研究基盤の開発・整備
イ. 観測・解析技術の開発

(5) 総合的研究との関連：

首都直下地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

これまでに開発してきた四重極質量分析計による観測システムを高度化し本宮観測点などにおいて観測を実施し、周囲の地震火山活動とHe,N₂,Arの組成の時間変化との対応を明らかにする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題では、本宮観測点などにおいて地下水・噴気観測を実施する。採取した地下水や噴気のガス成分の組成を、四重極質量分析計によって連続的に計測する。

毎年2回の地下水・噴気サンプリングを行い、³He/⁴Heをはじめ測定可能な全ての化学分析を実施する。³He/⁴Heの分析と酸素水素同位体比の測定は産総研で実施する。

これらの分析結果を集約するとともに、それぞれの地域での地殻変動や火山活動の情報を収集し、周囲の地震火山活動とHe,N₂,Arの組成の時間変化との対応を明らかにする。また、データが蓄積された段階で「先行現象に基づく地震発生の確率予測」を主課題としているグループとデータを共有し、データを評価する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

2022年9月から2023年9月は三重県度会郡大紀町の大紀観測点で観測を行った。大紀観測点の溶存ガスは、酸素濃度で大気量を見積もると40%が大気起源であり、60%近くの深部起源ガスが含まれていることが分かった。観測期間中の通常の地震は0回、深部低周波地震は6回あったが、これらに応答するような溶存ガス組成の変化検出できなかった。質量スペクトルをGiggenbachの方法で自動解析すると、大紀観測点の溶存ガスが高濃度で安山岩質マグマ端成分のガスを含んでいることを突き止めることができた。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

この研究の目的は、温泉溶存ガス連続測定システムの高度化を行って実用性を検討するとともに、紀伊半島直下の深部低周波地震の活動を、温泉に溶存するガスの連続観測によって検出が可能かを明らかにすることであった。このために、深部低周波地震の震源域があつて第四期火山が確認されていない紀伊半島の3つの温泉で観測を行った。その結果、温泉溶存ガスの連続観測によって、深部低周波地震の活動と関連していそうな変化を検出することはできなかったが次の成果を得た。

【新しい自動サンプリング装置を用いた地殻流体連続観測システムの開発】（投稿準備中）

1. 温泉水の採水・溶存ガスの抽出と分析までを全自動で行う装置を開発した。
2. 得られた質量数スペクトルをGiggenbachの方法で自動解析するシステムを開発した。
3. これらを組み合わせたシステムにより、地殻流体の化学観測システムの高度化を行うことができた。

1997年に五十嵐によって初めて開発された、地下水溶存ガスを四重極質量分析計でその場観察する手法(Igarashi+(1997))は、その後改良を加えられながらいくつかの研究で使われてきた(Tsunomori+(2008), Fu+(2021))。これらの研究では温泉遊離ガスを測定に使用してきたが、遊離ガスが少ない場合は溶存ガスを積極的に抽出することが求められる。そこで本研究ではまず、溶存ガスを積極的に抽出する仕組みを導入した自動サンプリング装置の製作を行うことで、地殻流体の化学的観測システムの高度化を目指した。そして、この装置を用い、深部低周波地震の震源域で第四期火山が確認されていない紀伊半島の3つの温泉で観測を行い、深部低周波地震を温泉溶存ガスの組成変化で検出できないかを検討することを目指した。

連続観測に先だって、Morikawa+(2016)で報告された温泉のうち、本宮観測点(HON)・川湯温泉(KWY)・阿曾温泉(TAI)について、温泉水の酸素水素同位体比およびヘリウム同位体比を分析した。酸素水素同位体比は、日本の平均的な値の範囲内であり、天水線に乗っていたことから、これらの観測点の水は天水起源であり、いわゆるマグマ水を含んでいないことがわかった。一方、ヘリウム同位体比は大気の値で規格化した値で4.5Raから5.8Raであり、これら観測点の溶存ガスが深部起源のガスを多く含んでいることが確かめられた。そこで、2021年6月から12月までは、産総研が水位観測を行っている本宮観測点で、続いて2022年1月から7月までは、本宮観測点から南に2kmの位置にある川湯観測点で、そして、2022年9月から2023年9月は三重県度会郡大紀町の大紀観測点で観測を行った。

本宮観測点の溶存ガスは、酸素の量から評価すると大気に二酸化炭素とメタンが追加されたような組成で、酸素濃度によって見積もると90%以上が大気起源ガスであった。観測期間中、2021年10月5日のポンプメンテナンスの時の不連続な変化を除いて、組成は安定して推移した。また、通常の地震は4回、深部低周波地震は25回あったが、これらに応答するような溶存ガス組成の特徴的な変化は観測できなかった。川湯観測点の溶存ガスは、本宮観測点と同様に評価すると85%が大気起源ガスであった。組成は安定して推移した。観測期間中の通常の地震は4回、深部低周波地震は28回あったが、これらに応答するような溶存ガス組成の特徴的な変化は観測できなかった。大紀観測点の溶存ガスは、酸素濃度で大気量を見積もると40%が大気起源であり、60%近くの深部起源ガスが含まれていることが分かった。観測期間中の通常の地震は0回、深部低周波地震は6回あったが、これらに応答するような溶存ガス組成の変化検出できなかった。

いずれの観測点の溶存ガス組成の時間変化にも紀伊半島で発生した地震に対する応答は検出されず、紀伊半島直下の深部低周波地震の発生に呼応するような変化も検出できなかった。本計画の当初目的の一つであった、地下水観測にもとづく深部起源ガスの観測によって深部低周波地震の検出は、残念ながらできなかった。しかし一方で、もう一つの目的であった安定して測定を行う測定システムの高度化には成功し、いずれの観測点でも得られた質量スペクトルをGiggenbachの方法で自動解析するこ

とができた。この結果、3つの観測点のうち、HONとKQYの溶存ガスはほぼ大気起源のものであったが、TAIの溶存ガスが高濃度で安山岩質マグマ端成分のガスを含んでいることを突き止めることができた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望
製作したガス連続観測システムは、高度化できただけでなく、観測点の移動も容易にできるものとなったことから、今後の地殻流体や火山ガスなどを移動観測することが可能になり、地震・火山活動の推移モニタリングに応用できる。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Tsunomori,F., Morikawa, N. and Takahashi, M.,2024,Deep-Seated Fluids in Thermal Waters Before and After the 2016 Kumamoto Earthquakes,Groundwater,10.1111/gwat.13394,査読有,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

角森史昭・森川徳敏・高橋雅明・川端訓代,2023,地震火山相互作用の検出を目的とした地下水溶存ガスの連続観測,JpGU2023,C001421

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

項目：地震：地球化学観測（採水・同位体等）

概要：温泉水の採水・溶存ガスの抽出と分析までを全自動で行う装置を開発し、得られた質量数スペクトルをGiggenbachの方法で自動解析するシステムを開発した

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：三重県度会郡大紀町阿曾 34.340510 136.409909

調査・観測期間：2022/9/-2023/9/

公開状況：公開留保中（協議のうえ共同研究として提供可）

(11) 次期計画における課題名：

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

角森史昭（東京大学大学院理学系研究科）

他機関との共同研究の有無：有

小泉尚嗣（滋賀県立大学）,森川徳敏（産業技術総合研究所）,川端訓代（鹿児島大学）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設

電話：

e-mail：

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：角森史昭

所属：東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設

(1) 実施機関名：

東京大学理学系研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

物理モデルと地形・地質学およびテクトニックな観測データを統合した地震発生の長期予測手法の開発と検証

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

- (1) 地震発生の新たな長期予測
 - イ. 内陸地震の長期予測

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

- (1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析
 - ウ. 地質データ等の収集・集成と分析
- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
 - ア. 地震発生機構の解明
 - イ. 地震断層滑りのモデル化
- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
 - ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震
 - イ. 内陸地震
 - オ. 構造共通モデルの構築

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
 - ア. 強震動の事前評価手法

5 研究を推進するための体制の整備

- (2) 総合的研究
 - ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
- (5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本研究では、地震発生の長期予測を、物理的客観性と定量性の向上を目的とし、地震発生シミュレーション手法の高度化と検証、定量的な変動地形解析手法の開発を行う。それぞれの課題について、5か年での到達目標を以下の様に設定する。シミュレーション研究においては、国内外のいくつかの内陸大地震を対象に、観測データとシミュレーション結果を比較することにより、予測手法の系統的な検証を順次行う。物理モデル構築に当たっては、共同研究により、応力場や断層形状等の地震発生場のモデルを構築し、古地震データから応力蓄積率を推定する。大規模並列計算により順問題を多数回解くことで、動的破壊過程（地震の位置、規模、時期を含む）とそのばらつきを定量化し、観測データと比較することで、その再現性や予測性能を検証する。また、古地震による地殻変動量とその時期といった地形・地質データの高精度化のために、数値的な地形解析手法の開発と検証を行う。そのため

に、ドローンを用いた高空間分解能な数値標高データの取得と精度検証、段丘堆積物等の年代測定を、合わせて行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

地震発生予測手法の開発と検証については、年次ごとに、既往の顕著な地震イベントから一つを選んで、検証を実施していく。初年度においては、2016年熊本地震を対象とする。モデルの構築にあたっては、産業技術総合研究所と共同研究を行い、応力場と断層形状モデルの構築、ならびに古地震データの収集・解析を行う。シミュレーション結果を地震時の強震動とSAR等の地殻変動データと比較し、再現性等を評価する。2年目から5年目においては、同様の検証を2000年鳥取県西部地震、2004年中越地震、2011年福島県浜通の地震、2014年長野県北部の地震、2016年ニュージーランド（カイコウラ）地震、2018年北海道胆振東部地震などを対象として、順次実施する。ニュージーランドの事例については、現地の研究者と共同する。

定量的な古地殻変動解析手法の開発については、以下の通り行う。初年度においては、地形解析アルゴリズムを整備した上で、房総半島南部に適用し、海岸段丘の自動検出を行う。段丘の形成年代を推定するため掘削による段丘堆積物の取得と年代測定を行う。

2年目においては、海岸段丘を対象としたドローン測量による数値標高モデルの取得（DEM）と精度を検証する。解析ソフトを用いて房総半島南部での地殻変動量の推定を行い、引き続き、未調査地点において段丘堆積物の取得と年代測定を実施する。3～5年目においては、対象を南海トラフの海溝型地震として、同様に海岸段丘の検出と年代測定を行う。調査地点は、富士川河口地域などを想定する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

物理モデルおよびシミュレーションによる長期予測手法の検証および高度化と、地形地質データの定量化手法の開発を行った。

2023年トルコ東部の地震系列と2024年能登半島地震の動的破壊シミュレーションを行い、破壊過程に対する断層形状と広域応力場の効果を調べた。また、滑り逆解析結果と比較することで、Ando et al. (2017)などこの間の解析で用いている応力場と摩擦係数および断層形状の設定に関する標準化手法を検証した。その結果、事後推定の滑り分布を用いるパラメータ調整なしで、破壊経路の時刻歴や滑り分布などの主要な特徴が再現された。ただし、トルコ東部の後発地震の領域では、地震前の応力場推定データに信頼性の高いものが無かったため、余震発震機構を用いた応力場推定を行い使用した。地震サイクルシミュレーションでは、前年度に構築したGNSSデータおよび発震機構解による広域応力場という観測データを反映した物理モデル化手法を、中央構造線活断層帯に適用した。地震本部長期評価で両論併記された当該断層の鉛直と北傾斜の二つの断層形状モデルについて、平均滑り速度をシミュレーションで求めて比較したところ、鉛直断層モデルでは長期評価で示された滑り速度の、水平成分、傾斜成分をファクターで一致するのに対して、着た傾斜断層モデルではオーダーで不一致となることを示した。

地形地質データの定量化の課題においては、地形地質学的に得られた平均滑り速度の水平、傾斜成分と地震観測で得られた応力場の情報を用いて、地下の断層傾の斜角を求める逆解析手法を開発した（Tang and Ando, 2024）。また、この手法を単純化したものを、日本国内の主要活断層帯について地震本部長期評価のカタログ値について適用し、手法の妥当性と既存データの限界を議論した。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本課題は、従来別々に扱われてきた地形・地質学データと地球物理学データを物理シミュレーションという共通のプラットフォームの上で、統合して扱うことのできる方法論の構築を目的として実施してきた。シミュレーション研究においては、2016年熊本地震、2016年カイコウラ（ニュージーランド）地震、2011年茨城県北部の地震、2023年トルコ東部の地震、2024年能登半島地震の動的破壊シミュレーションを行い、標準的なモデル化手法の構築と観測データとの比較による検証を行ってきた。その結果、地震前の応力情報と非平面の断層形状をシミュレーションの入力とできれば、相当程度の再現能力があることが示された。

さらに、準動的な地震繰り返し過程のシミュレーションでは、GNSSのひずみ速度と応力場の観測情報

を取り入れる新しいモデル化手法を構築した。このモデル化手法を中央構造線活断層帯に適用して、平均滑り速度を地形・地質学的に得られた平均変位速度のデータで検証し、モデルの適用可能性を示した。

また、長期テクトニック変動を地形・地質データから定量的に解析するために、数値標高モデルデータの機械学習を用いた解析手法の開発や、試料年代の時空間分布からイベント年代を客観的に推定する手法を構築した。この手法を、房総半島南部の隆起地形に適用し、関東地震の発生履歴にあらたな拘束を与えた。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望
複数の地震イベント、活断層帯について動的・準動的シミュレーションの結果と観測データを比較して、再現性を評価している。評価事例を増やすことができおり、地球物理学的観測データと物理モデリングを用いた長期予測手法の高度化に貢献している。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Tang, R. and R. Ando, 2024, A systematic scheme to develop dynamic earthquake rupture scenarios: a case study on the Wenchuan-Maoxian Fault in the Longmen Shan, China, thrust belt, Earth Planet Space, 76, 2, 査読有, 謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Ando, R., A. Pinar, D. Kalafat, H. Ozener and Y. Yamamoto, 2023, Preliminary results of dynamic rupture simulation of the 2023, Kahramanmaras and Ekinozu, Turkey, earthquake sequence, Japan Geophysical Union, U13-05

Ando, R. and S. Ozawa, 2023, Accelerating Boundary Element Method for fully- and Quasi-dynamic Earthquake Simulations, AOGS, SE02-A021

Ando, R., A. Pinar, D. Kalafat, H. Ozener and Y. Yamamoto, 2023, Dynamic Rupture Simulation Reveals Fault Geometrical Effect on the 2023, Kahramanmaras and Ekinozu, Turkiye, Earthquake Sequence, American Geophysical Union Fall meeting, T32B-03

Ando, R., A. Pinar, D. Kalafat, H. Ozener and Y. Yamamoto, 2023, Dynamic Rupture Simulation Reveals Fault Geometrical Effect on the 2023, Kahramanmaras and Ekinozu, Turkiye, Earthquake Sequence, 日本地震学会秋季大会, S08-05

Ando, R., A. Pinar, D. Kalafat, H. Ozener and Y. Yamamoto, 2023, 3-D Fault Geometrical Effect on the 2023, Kahramanmaras and Ekinozu, Turkiye, Earthquake Sequence Revealed by Dynamic Rupture Simulation, 日本活断層学会秋季学術大会, O-09

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報：

(11) 次期計画における課題名：

観測データと物理シミュレーションを統合した地震発生長期予測手法の構築と予測実験

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

安藤亮輔（東京大学大学院理学系研究科）

他機関との共同研究の有無：有

宍倉正展（産業技術総合研究所）, 宮下由香里（産業技術総合研究所）, 今西和俊（産業技術総合研究所）

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学大学院理学系研究科

電話：

e-mail：

URL : <http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~ando>

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名 : 安藤亮輔

所属 : 東京大学大学院理学系研究科

(1) 実施機関名：

東京大学理学系研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

遠隔地火山、特に離島火山における火山ガスモニタリングの高度化

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

イ. モニタリングによる火山活動の評価

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 火山現象の解明とモデル化

ア. 火山現象の定量化と解明

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

火山

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

エ. 桜島大規模火山噴火

(5) 総合的研究との関連：

桜島大規模火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

前期計画で開発した山ガス放出率観測のための簡易型トラバース測定装置を定期フェリーに搭載することで口永良部島の二酸化硫黄放出率の繰返し測定が確立され、公共交通など定期運行されている移動体を使用した二酸化硫黄放出率測定が、離島や遠隔地の火山で有効な手法であることを示した。本課題では、二酸化硫黄放出率の観測頻度が非常に低い他の離島火山や遠隔地火山に、さらに高度化した簡易型トラバース装置を展開することで、これまでより頻繁に二酸化硫黄放出率が測定できるようにする。また、これまで火山ガス放出量のみであったが、火山ガスの質にあたるガス組成（ $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比）の測定にまで観測項目を広げることにより、モニタリング技術をさらに高度化し、火山噴火の中期予測に貢献するような火山ガスデータの提供を目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

令和元年度および2年度においては、測定装置の開発・高度化と測定基盤の確立を行う。簡易型二酸化硫黄装置をさらに改良し高度化するとともに、火山ガス組成用の小型装置の開発を行う。また、装置の設置ための交渉や、各火山における測定条件に対応した装置やシステムのチューニングを行う。口永良部島の観測の継続及び、測定開始できた火山の観測を継続する。

令和3年度から5年度においては、観測が開始できた火山の観測の維持し継続する。質の良い測定データがとれるようになったら、気象庁やその他の機関に測定で得られたデータを提供することで、火山活動評価に貢献する。最終年度に向けて、開発・確立した装置、および測定手法の技術移転を目指す。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要：

・今年度の成果の概要

南西諸島の離島火山での二酸化硫黄放出率の観測を、観測装置のメンテナンスを行いつつ継続した。昨年度の通信機器の入れ替え以降、これまでよりも安定してデータ転送が行えるようになったが、薩摩硫黄島の航路では、依然として携帯通信網の問題で転送が失敗することがあったため、データ転送の方法の改良した。また、薩摩硫黄島航路では、9月のドック入り後、しばらく正常に測定できなくなるトラブルも発生したが、修理を行い解決した。

口永良部島の二酸化硫黄放出率は、令和3年度以降、数十ton/day以下が続き、令和4年度以降は二酸化硫黄を検出できない測定日が増加していた。今期前半もその傾向が続いていたため、2014年8月以降続いてきた活発な噴煙活動が終わると考えていた。しかし、地震回数が6月末以降が増加し、7月中旬からさらなる増加が観測されたの呼応して、二酸化硫黄放出率も7月20日には約2年ぶりに100 ton/dayを超える値が観測された。その後、8月には400 ton/dayを超える放出率まで上昇した。9月以降は放出率は緩やかに減少し、2024年に入ってから100 ton/day以下レベルまで下がっている。今回の二酸化硫黄放出率の上昇は、梅雨の時期と南寄りの風が卓越する夏季におこったため、測定頻度が極めて低く、6月末の十数 ton/dayのレベルから7月20日の100 ton/day、そして8月中旬の400強 ton/dayまでの上昇過程についてはとらえることができなかった。

諏訪之瀬島の二酸化硫黄放出率は、これまで通り100 ton/dayから2000 ton/dayまで推移した。今年度は2000 ton/dayを超える放出が5月に1度のみ観測されたが、例年に比べて2000 ton/dayを超える回数が少なく、測定全体でも1000 ton/dayを超える割合が低かった。この傾向は、2019年後半から2022年末までの高い火山性地震回数や爆発回数に比べ、2023年の火山性地震の回数や爆発回数が低かったことと調和的である。

薩摩硫黄島の二酸化硫黄放出率はこれまで同様に1000±500 ton/dayで推移した。2019年12月の観測開始以来、この火山が安定したガス放出を続けていることがわかる。中之島火山の二酸化硫黄放出率は今年度は5月3日に1度だけ41 ton/dayが測定されただけで、昨年7回に比べ測定回数は大幅に少なかった。中之島が二酸化硫黄放出を定常的に続けていることが明らかなのである。

遠隔地火山の二酸化硫黄放出率測定の一環でHKD_04の課題と協力しつつ、十勝岳の二酸化硫黄放出率測定の高度化も行った。昨年度末と今年度に11月末に冬期のフラックス測定の高度化と、適切な高度の風速を使用するための、噴煙高度測定を実施した。

火山ガス組成測定用の装置に関しては、昨年度末にはドローンを使用して、8月には持ち運び可能な装置での噴気化学組成の測定を実施した。また、二酸化硫黄と硫化水素に関しては、フェリーでの二酸化硫黄放出率測定と並行して測定できるよう改良を行い、2024年に入ってから繰り返し測定を開始した。薩摩硫黄島では二酸化硫黄/硫化水素比が5～10の予察的な結果が得られている。この比の範囲は山頂近傍で採取された高温火山ガスの比の範囲（Shinohara et al., 1993）に入るものである。

・計画期間中（令和元年度～5年度）の成果の概要

本研究課題では、遠隔地火山や離島火山における火山ガスモニタリングの高度化を目指し、研究を進めてきた。前期の研究課題で簡易型二酸化硫黄装置を開発し、口永良部島での二酸化硫黄放出率測定を確立していたが、今期は装置をさらに改良し、薩摩硫黄島、諏訪之瀬島、中之島の離島火山においても、それぞれ公共のフェリーを活用して、二酸化硫黄放出率のモニタリング体制を確立した。

今期の口永良部島の測定では、2015年の噴火、2018-2019年の噴火活動期と同様に2020年噴火活動期に前駆して二酸化硫黄放出率の上昇が観測された。また、2023年7月以降にも二酸化硫黄放出率の上昇がみられたが、噴火活動には至っていない。薩摩硫黄島の二酸化硫黄放出率は、この4年間500-1500 ton/dayで安定して推移し、現在の活動レベルでの放出率のベースラインが明らかとなっ

た。諏訪之瀬島では、通常数百から2000 ton/dayで推移し、活動が活発なときや噴火時に2000 ton/dayを超えるような二酸化硫黄放出率がみられた。また、測定数は少ないが中之島も一日あたり数十トンで定常的に二酸化硫黄を放出していることが明らかになった。本研究により、いずれの火山においても、二酸化硫黄放出率の測定回数が大幅に増えたことが最大の成果であり、これまで火山ガスの情報が限られていた離島火山の活動レベルを火山ガス情報で把握できるようになった。実際、これらの4つの離島火山の測定データは、気象庁福岡管区气象台と準リアルタイムに共有されており、それぞれの火山の活動評価に役立っている。特に口永良部島、薩摩硫黄島、諏訪之瀬島の3火山においては、日々の活動評価だけでなく、毎月気象庁が報告している各火山の火山活動解説資料

(https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/monthly_vact.php)に反映されている。離島火山の二酸化硫黄放出率測定に関しては、本研究課題の取り組みにより、その実用性と有効性が十分に実証できたものと考えている。

本課題では、火山ガス放出率だけでなく、火山ガス化学組成の情報のモニタリングの高度化も行ってきた。離島・遠隔地火山での火山ガス組成の測定をより簡便にするための小型かつ自動化されたマルチガス測定装置の開発や漂ってきた火山ガスのSO₂/H₂S比をフェリーでモニタリングするシステムの開発を行った。前者に関しては、小型化と簡便化により、ドローンに搭載してのモニタリングの実証を行った。また、後者に関しては現在では薩摩硫黄島の航路だけであるが、2024年2月から、二酸化硫黄放出率測定と同時に海面近くに流れてきた火山ガスのSO₂/H₂S比をモニタリングするシステムを確立し、稼働を開始した。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

建議項目「2 地震・火山噴火の予測のための研究(4) 中長期的な火山活動の評価 イ. モニタリングによる火山活動の評価」では、数ヶ月から数年の中期的時間スケールの評価に関してモニタリングを行い、火山の状態を把握すること、新たなモニタリング技術及び解析手法の開発を進めること、そして得られたデータを用いて中期的時間スケール火山現象と噴火発生を定量的に評価することが目標として設定されている。本研究課題の取り組みにより、特に離島火山での火山ガスモニタリング技術が高度化され、それらの火山での火山活動評価、状況把握は大いに進展した。また、前期から今期にかけて、口永良部島では2015年の噴火、2018-2019年の噴火活動期、2020年の噴火活動期があったか、いずれの噴火期においても事前に二酸化硫黄放出率の大きな上昇がみられており、他の地球物理学的観測項目と組み合わせることにより、中期的な時間スケールにおいて定量的な評価にも大きく近づいたものと考えている。

さらに、本研究課題では離島火山での火山ガス組成(SO₂/H₂S比)の新しいモニタリング技術を開発した。今後モニタリングを継続し、二酸化硫黄放出率と火山ガス組成の両データを駆使することで、離島火山の活動評価や状態把握の高度化がさらに進展することが期待される。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

・論文・報告書等

Yamaguchi, K., R. Tanaka, M. Morita, T. Mori, R. Kazahaya, 2023, Sulfur dioxide flux measurement at Mount Tokachi, Japan, with TROPOspheric Monitoring Instrument, Front. Earth Sci., 11, doi:10.3389/feart.2023.1145343, 査読有

・学会・シンポジウム等での発表

森 俊哉, 2023, 二酸化硫黄放出率トラバース測定中の噴煙高度推定, 日本火山学会秋季大会, P121

山口健介・田中 良・森田雅明・森 俊哉・風早竜之介, 2023, 地上観測と衛星観測による十勝岳の二酸化硫黄放出率の推定, 日本火山学会秋季大会, B1-05

森 俊哉, 2023, 火山性流体研究に基づく活動評価・予測, シンポジウム「火山噴火の中長期的予測に向けた研究の現状と今後の課題」(地震・火山噴火予知研究協議会、火山計画推進部会 主催)

(10) 令和5年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報 :

(11) 次期計画における課題名：

「ERI_04: 多項目観測と解析高度化による火山活動の定量的理解」の一部が該当

(12) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

森 俊哉（東京大学大学院理学系研究科）

他機関との共同研究の有無：無

(13) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東京大学大学院理学系研究科

電話：03-5841-4649

e-mail：mori@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp

URL：

(14) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：森 俊哉

所属：東京大学大学院理学系研究科