

「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2年度年次報告

【成果の概要】

令和3年9月

科学技術・学術審議会測地学分科会

地震火山観測研究計画部会

目 次

【令和2年度の成果の概要】

1. はじめに.....	1
2. 令和2年度に発生した重要な地震と本研究計画の活動について.....	6
2-1. 2021年2月13日の福島県沖の地震（M7.3）と3月20日の宮城県沖の地震（M6.9）.....	6
2-2. 地震・火山噴火予知研究協議会 地震長期予測ワークショップについて.....	7
3. 令和2年度の成果の概要.....	9
3-1. 地震・火山現象の解明のための研究.....	9
3-2. 地震・火山噴火の予測のための研究.....	19
3-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究.....	24
3-4. 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.....	31
3-5. 研究を推進するための体制の整備.....	35
4. まとめ.....	43
用語解説.....	45
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） 実施機関.....	67
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2年度研究課題一覧.....	68

【参考資料】

計画推進部会および総合研究グループ等別の成果.....	75
1（1）地震（現象解明）.....	77
1（2）地震（長期予測）.....	117
1（3）地震（中短期予測）.....	132
1（4）火山.....	180
1（5）災害誘因評価・即時予測.....	202
1（6）防災リテラシー.....	227
1（7）史料・考古.....	238
1（8）観測研究基盤.....	249
2（1）南海トラフ沿いの巨大地震.....	257
2（2）首都直下地震.....	260
2（3）千島海溝沿いの巨大地震.....	263
2（4）桜島大規模火山噴火.....	267
2（5）高リスク小規模火山噴火.....	273
3 拠点間連携共同研究.....	280

[令和2年度の成果の概要]

1. はじめに

「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）」（以下、「本研究計画」という。）は、科学技術・学術審議会において平成31年に建議され、平成31年度（令和元年度）から5か年計画として実施されている。本研究計画は、平成26年度から5年間実施された「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の方針を踏襲して、地震・火山現象の根本的理解、発生予測、災害誘因*予測、災害情報の活用に関する研究を実施する。加えて、防災対策の推進について、国民や社会の共通理解の醸成を効果的に図るための手法開発に関する研究を新たに開始した。本研究計画では、災害の軽減に貢献することを意識した研究を推進するという視点をより明確にし、関連研究分野との一層の連携強化を通じて、観測研究の成果を最大限に活用して災害軽減に役立てるための方策の研究等を進めている。

本研究計画は以下の5つの大項目で構成される。

1. 地震・火山現象の解明のための研究
2. 地震・火山噴火の予測のための研究
3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究
4. 地震・火山噴火に対する防災リテラシーの向上のための研究
5. 研究を推進するための体制の整備

上記大項目のうち、1は地震・火山災害の根本原因である地震・火山現象そのものの理解を深めるため、低頻度大規模現象を含む多様な地震・火山現象の特性を把握し、それらが発生する仕組みの解明を目指した研究を行うものであり、次の中項目からなる。

- (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) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
- (4) 火山現象の解明とモデル化
- (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

2は、1で得られた科学的理解に基づき地震・火山噴火の予測手法や活動の推移予測手法の開発を目指した研究を行うものであり、次の中項目からなる。

- (1) 地震発生の新たな長期予測
- (2) 地殻活動*モニタリングに基づく地震発生予測
- (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
- (5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

3は、地震・火山噴火が引き起こす地震動や津波、火山噴出物、斜面崩壊などの災害誘因を事前及び発生後即時的に高精度に予測する手法の開発を進めるとともに、災害誘因予測を災害情報につなげる研究を行うものであり、次の中項目からなる。

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
- (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

4は、過去の地震・火山噴火によって引き起こされた災害誘因が社会素因*へ与える作用に焦点を当てながら、その災害発生の仕組みや要因を解明するとともに、災害の軽減に結びつく効果的な知識要素を特定し、防災リテラシー向上に資する実践的な開発・研究を行うものであり、次の中項目からなる。

- (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は、計画全体を組織的に推進する体制の整備や、基礎的な観測体制の強化を図るものであり、本研究計画全体の研究基盤の開発・整備が含まれ、次の中項目に分けられている。

- (1) 推進体制の整備
- (2) 分野横断で取り組む総合研究を推進する体制
- (3) 研究基盤の開発・整備
- (4) 関連研究分野との連携の強化
- (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

本研究計画においては、成果の社会実装を将来的に目指すとともに、地震学・火山学的な見地のみならず災害科学的な観点も重視する。そのため、大項目2の「地震・火山噴火の予測のための研究」においては、研究成果の出口が意識されている。このような観点から、「地震発生の新たな長期予測」、「地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測」、「火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測」の3つが重点的に取り組む研究として位置づけられている。その背景には、蓄積されつつある地震・地殻変動*等の観測データや基礎的な研究成果を、過去の大地震の発生履歴の知見に依存してきた地震発生の長期評価*に活用するための手法や、プレート境界*での滑りの時空間変化の推定等を通して中短期での大地震の発生確率の計算に活用するための手法の開発が期待されていること、噴火事象系統樹*における分岐確率や論理の根拠となり得る観測・分析データが本研究計画等を通じて徐々に蓄積されてきたことなどがある。

さらに、地震・火山災害が災害誘因と災害素因*の相互作用により発生することを考慮し、本研究計画では、地震学・火山学の研究者と災害や防災に関連する理学，工学，人文・社会科学などの分野の研究者の協力を深化させ、災害科学としての取組を図る。これを具体化するため、大項目5の「研究を推進するための体制の整備」の中に「分野横断で取り組む総合研究を推進する体制」を中項目として位置付け、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、という5つの課題設定を行い、それぞれに対応する総合研究グループを組織した。本研究計画から、大きな災害につながる低頻度大規模地震として千島海溝沿いの巨大地震を総合研究の対象とすることになった。また、高リスク小規模火山噴火は、火口や噴気地が観光スポットになっている場合などにおける、規模は小さくとも災害リスクの高い火山現象に着目する、本研究計画で新設された総合研究グループであり、このグループでは、予測困難性と社会的要因に着目して、まず研究の方向性から検討を始め、文理融合研究課題のシーズを育てることを目標としている。

令和2年度の本研究計画は、国立大学法人等、国立研究開発法人、独立行政法人、政府機関、公設試験研究機関¹が策定した170の実施計画（個別課題）及び公募による12の実施計画（個別課題）、拠点間連携共同研究²としての25の実施計画（個別課題）からなっている。また、この個別課題の成果は、年次報告【機関別】（文部科学省及び地震・火山噴火予知研究協議会³のホームページに掲載）に取りまとめられている。これらの個別課題による研究成果をもとに、本研究計画の項目別に令和2年度の成果を取りまとめたものが本報告書である。

本報告書の作成にあたっては、難解な学術用語をなるべく避け、平易な文章で学術的成果を記述することを心がけた。説明が冗長となることを避けるためにやむを得ず専門用語等を使用する場合には、本報告書付録の「用語解説」⁴のページで当該用語を解説しているので、必要に応じて参照されたい。

¹ 国立大学法人等（北海道大学，弘前大学，東北大学，秋田大学，新潟大学，東京大学，東京工業大学，千葉大学，富山大学，名古屋大学，京都大学，神戸大学，鳥取大学，高知大学，九州大学，鹿児島大学，兵庫県立大学，立命館大学），国立研究開発法人（情報通信研究機構，防災科学技術研究所，海洋研究開発機構，産業技術総合研究所），独立行政法人（国立文化財機構），政府機関（国土地理院，気象庁，海上保安庁），公設試験研究機関（北海道立総合研究機構，山梨県富士山科学研究所）

² 「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所が連携して進める共同研究。南海トラフ沿いの巨大地震を対象とし、重点的に推進すべき防災・減災に資する研究を募集する「重点推進研究」と、地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究に関連する研究課題を公募する「一般課題型研究」からなる。

³ 東京大学地震研究所には、本研究計画で立案された研究を推進する目的で地震・火山噴火予知研究協議会が設置されている。

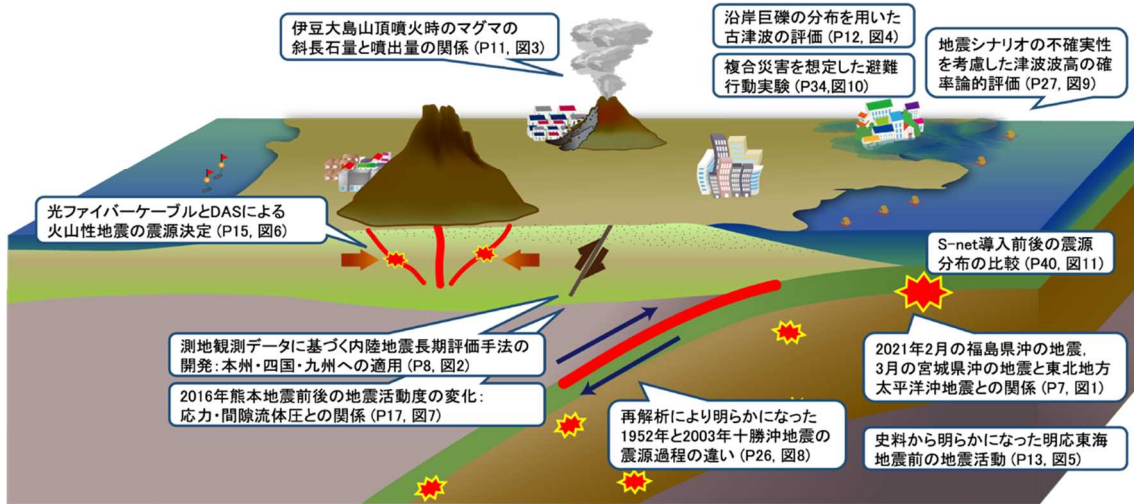
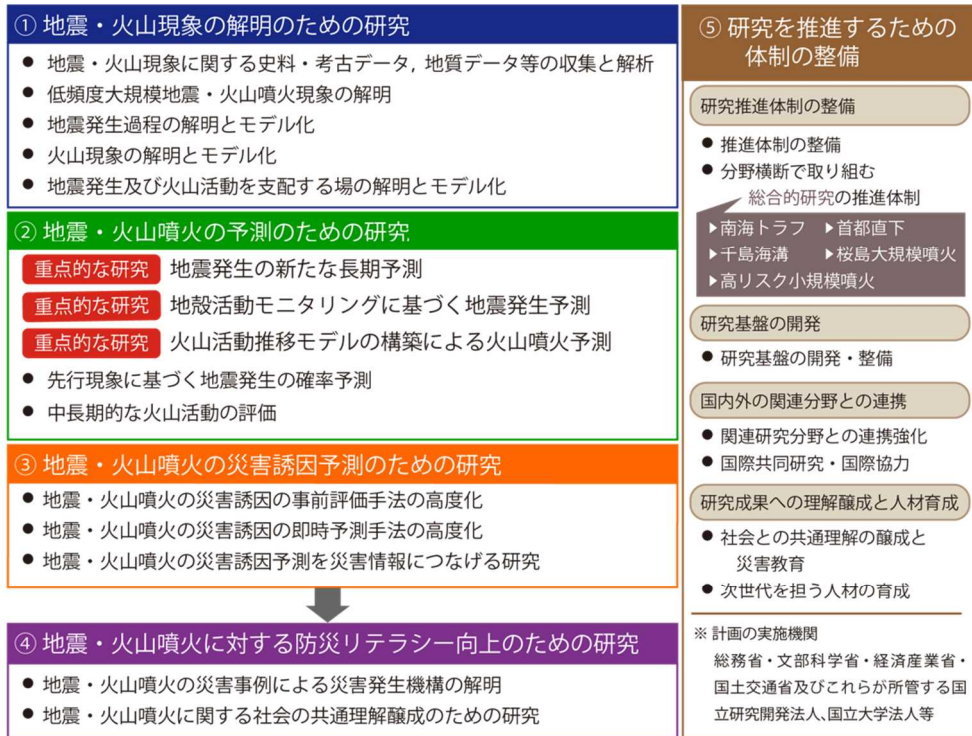
⁴ 用語解説に掲載している用語に、下線（破線）と*を付記している。

また、本報告書では、研究課題を[xxxx01]のように課題番号で示している。それぞれの研究実施機関・研究課題名・研究代表者については「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（令和2年度）研究課題一覧」のページを参照されたい。

参考資料には「地震・火山噴火予知研究協議会が取りまとめた計画推進部会及び総合研究グループ等別の成果」を添付した⁵。これは上記の中項目別あるいは研究テーマ別に学術報告として成果を取りまとめたものであり、より詳細な成果が報告されているので参考にされたい。

⁵ 研究分野毎に効率的かつ調和的に研究を推進するために、地震・火山噴火予知研究協議会には8の計画推進部会と5の総合研究グループが設置された。

災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究



成果の概要概念図

災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究（第2次）令和2年度成果のまとめ。災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究の全体像を描き，その主要な成果を吹き出しで記述した。詳しくは吹き出しに記載されたページと図を参照。

2. 令和2年度に発生した重要な地震と本研究計画の活動について

2-1. 2021年2月13日の福島県沖の地震(M7.3)と3月20日の宮城県沖の地震(M6.9)

令和2年度は、2011年東北地方太平洋沖地震(東北沖地震)の発生から10年目の年であった。このマグニチュード*(M)9の超巨大地震に伴うM7以上の大きな余震*は、2016年11月22日の福島県沖の地震(M7.4)以降しばらく発生していなかったが、2021年2月13日23時07分に福島県北部の沖合でM7.3(Mw7.1)の地震が発生した。この地震で、福島県国見町、相馬市、新地町および宮城県蔵王町で震度6強を観測し、死者1名、負傷者186名、全壊家屋24棟、半壊67棟、一部破損4545棟の大きな被害を生じた。2016年の地震は陸側のプレート*内の浅い正断層*型の地震であったが、今回の地震は沈み込んだ太平洋プレート内で発生した逆断層*型の地震であった。

さらに2021年3月20日18時09分には、牡鹿半島近傍の宮城県沖でM6.9(Mw7.0)の地震が発生し、宮城県で最大震度5強を観測し、負傷者11名、一部破損家屋2棟の被害を生じた。この地震は、2011年東北沖地震と同様に、陸のプレートと太平洋プレートとの境界面で発生した低角逆断層型の地震であり、その震源域は2011年東北沖地震震源域の深部延長に位置していた。

2011年東北沖地震時のプレート境界面での大きな滑りにより、主破壊域を含む広い範囲で東西圧縮の応力*が解放された。しかし、主破壊域端部のプレート境界面では逆に東西圧縮の応力が増加しているために、3月20日の宮城県沖の地震のようなプレート境界型地震が起こりやすくなっていると考えられる。また、沈み込んだ太平洋プレート内でも、主破壊域の深部延長付近では東西圧縮の応力が増加して、2月13日のような逆断層型の地震が生じやすくなっている。一方、上盤側の陸のプレート内でも局所的に東西引張の応力が強まった場所があり、2016年11月22日の地震のような正断層型の地震が起こりやすくなっている。更に、下盤側の太平洋プレート内部の海溝近くでも東西引張の応力が強まって正断層型の地震(いわゆる「アウターライズ地震*」)が起こりやすくなっている。これらの地震のおおよその位置関係と応力の向き、断層滑り方向を図1に示す。

このように2011年東北沖地震がもたらした応力変化により、図1aに示したように、2011年東北沖地震の主破壊域では現在、地震活動が低調となっているものの、その周囲では地震活動が活発な状況が、本震*から10年が経過した現在も続いている。陸に近い場所で大きな地震が生じれば、強震動*により大きな被害が生じ、海溝に近い場所で大きな地震が生じれば、津波により大きな被害が生じることになるため、今後の地震活動の推移に注意を払う必要がある。特に3月20日の地震の東側には1978年の宮城県沖地震(M7.4)の主破壊域があり、この地震の再来にも注意する必要がある。

2021年2月の福島県沖の地震、3月の宮城県沖の地震と 東北地方太平洋沖地震との関係

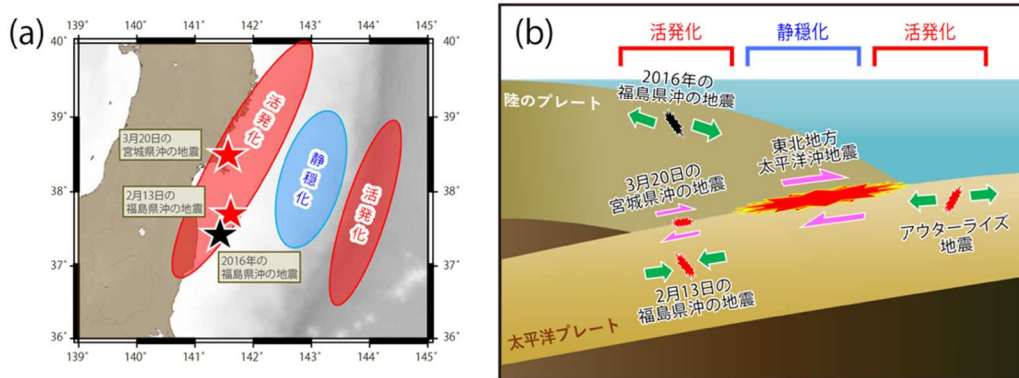


図1．2021年2月の福島県沖の地震，3月の宮城県沖の地震と東北地方太平洋沖地震との関係

(a) 2011年東北沖地震後に地震活動が活発化した領域（赤）と静穏化した領域（青）の概略。最近発生したM7前後の余震を星印で示す。(b) 2011年東北沖地震発生後に地震活動が活発化した領域の模式図。主たる地震の破壊域を赤色および黒色，断層の滑り方向を桃色矢印，応力の向きを緑色矢印で示す。

2-2. 地震・火山噴火予知研究協議会 地震長期予測ワークショップについて

本研究計画においては，学術研究の成果をより有効に活用するために，地震・火山災害軽減のための課題に直面している地震調査研究推進本部*（地震本部）や行政機関等と連携強化を図ることの重要性が述べられている。そこで，建議の重点課題である「地震発生 の長期予測」に関する研究成果を軸にして，地震本部との連携に向けた現状と問題意識を共有し，地震本部の成果に繋がる新たな手法や知見について検討するために，令和2年12月14日に地震長期予測ワークショップをオンラインで開催した。

ワークショップでは，現在の長期評価手法のレビューによる現状認識に加えて，地震本部・第3期総合基本施策で列挙されている「当面10年間に取り組むべき地震調査研究*」のうち，海溝型地震の発生予測手法の高度化と内陸で発生する地震の長期予測手法の高度化の2項目に焦点を絞って議論を行った。海溝型地震の発生については，測地データからプレート境界面の固着状態及び応力分布を推定し，現実的な地震シナリオを評価する手法が提案された。内陸で発生する地震に関しては，測地データや地震活動データを用いた新たな長期予測手法が提案された（図2）。そこで，内陸地震*の新たな長期予測手法の具体的な検討を進めるために，地殻*内地震発生確率評価手法検討ワーキンググループを結成した。ワーキンググループは戦略室及び地震(長期予測)部会の関係者ら計8名のメンバーから構成さ

れ、これまでに2回の検討会を実施し、活断層*の地域評価を含めた現状の地震本部の長期評価のレビューと、測地・地震活動データに基づく新たな長期予測との融合方法について議論を行なった。

測地観測データに基づく 内陸地震長期評価手法の開発：本州・四国・九州への適用

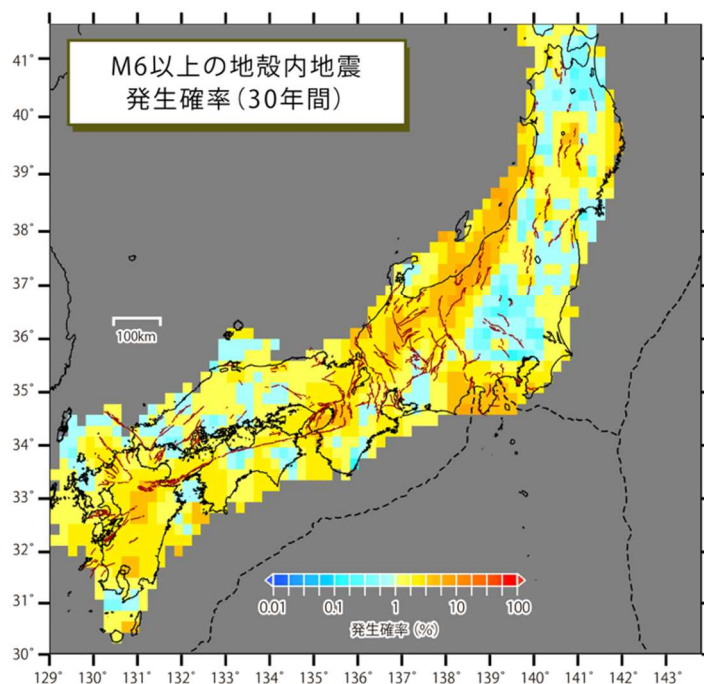


図2. 測地観測データに基づく内陸地震長期評価手法の開発：本州・四国・九州への適用
GNSS*観測データに基づく内陸地震の長期評価について、昨年度の西日本に加え、東日本へも手法を適用した。本年度の成果により、新潟-神戸ひずみ*集中帯、南関東・伊豆地方、奥羽脊梁山地で地震発生確率が高いことが新たに分かった。

3. 令和2年度の成果の概要

3-1. 地震・火山現象の解明のための研究

地震・火山現象の包括的な理解と解明を進めることで、大地震や火山噴火の発生予測や災害誘因予測の高度化を実現することを目指し、史料・考古・地質データ等に基づく低頻度大規模現象に関する研究や、観測・数値シミュレーション*・実験等に基づく地震・火山現象の解明とモデル化、現象が発生する場の地下構造や応力等に関する研究を継続した。

(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

長期間における地震・火山現象とそれに伴う災害を把握するため、史料・考古・地質データ等の収集とデータベースの整備拡充、収集されたデータの分析を継続した。

ア. 史料の収集とデータベース化

既刊地震史料の全文デジタル化において、高精度文字認識ソフトウェアの導入などで効率化を実現し、全体の90%を超える工程が完了した^[UTH_01]。新収日本地震史料などの宇佐美龍夫収集資料から、日本の有史以来明治5年までの24,361件の地震を1行1地震として整理した日本歴史地震総表2020を作成するとともに、webから検索できるシステムを構築し公開した^[NGY_01]。

中世の史料である「三国一覧合運図」の龍谷大学本と東山文庫本、及び「大唐日本王代年代記」が同時代史料であることを確認し、1361年から1585年までの30件の地震記事が信頼できることを明らかにした^[NGT_01]。また、史料の有感地震の記録から、1855年安政遠江・駿河の地震は静岡県焼津市付近を震源とする内陸地震だった可能性が明らかになった^[HMEV02]。

イ. 考古データの収集・集成と分析

奈良盆地東縁断層と生駒断層周辺の遺跡で確認された地すべり*や液状化*の痕跡は、9世紀-11世紀、15世紀-16世紀、17世紀-18世紀に集中しており、史料に記述のある9世紀以降の地震に対応している可能性が示された^[NAB_01]。三陸海岸の海浜遺跡が縄文後期前葉（約3660年前-4000年前）と縄文後期中頃（約3330-3660年前）に中断衰退しており、これらの時期に巨大津波が発生していた可能性が示された^[NGT_01]。

噴火災害については、南九州の桜島を中心とした、縄文時代から江戸時代にかけての約4000カ所の遺跡の情報に基づいて、降灰範囲だけでなく、噴火に先行する液状化や噴砂など、様々な災害痕跡を集成した。また、桜島大正噴火の降灰範囲については、これまでの桜島の東側のみであったとする定説を覆す知見が得られた。こうした成果から、今後降灰災害シミュレーションの更新や深化の促進が期待される^[NAB_01]。

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

北海道太平洋沿岸の津波堆積物*の詳細な年代測定によって、12世紀と17世紀のイベントについて、十勝地域と釧路根室地域とで発生年代が異なる可能性が示された。十勝沿岸河口域の珪藻分析から、10世紀から18世紀までの連続的な地殻上下変動の時系列が明らかにされ、12-13世紀に発生した超巨大地震後から続いた隆起が14-15世紀に沈降に転じたことと、17世紀イベントの変動量が12世紀に比べ2倍程度大きかった可能性が示された^[HKD_01]。布田川断層系と日奈久断層系の合流部に近い御船町高木でトレンチ調査*を実施し、2016年熊本地震の明瞭な痕跡が残っていないこと、それ以前の2回のイベントの変位の様式が熊本地震とは異なることを明らかにした^[NGY_03]。富士火山の爆発的噴火の噴出物解析によって、御殿場岩屑なだれ以降の数百年間にわたり、石基*の斜長石量の急減やガラス量の急増が続いたことが明らかになり、山体崩壊によって荷重が減ったことで、マグマ*が上昇しやすくなった可能性が示された^[ERI_02]。20世紀の伊豆大島山頂噴火の文献データを再整理したところ、マグマ噴出量の大きな噴火ほど斜長石の量が少ないことがわかり、噴火規模予測の指標として斜長石量が使える可能性が示された(図3)^[ERI_03]。草津白根火山の地質調査によって、本白根火砕丘*群および白根火砕丘群の活動年代が明らかになり、主要テフラ*の層序*と年代、物質科学的データをもとに完新世*の噴火履歴が整理された^[TYM_01]。将来の噴火の可能性が高い活火山の中長期的活動評価と予測のため、火山地質図の作成およびその基礎となる調査が進められた。そして、日本の火山データベースについては、択捉島と富士山の完新世噴火イベントのデータ作成と公開、重要火山の火口図作成が開始された^[AIST03]。

伊豆大島山頂噴火時のマグマの斜長石量と噴出量の関係

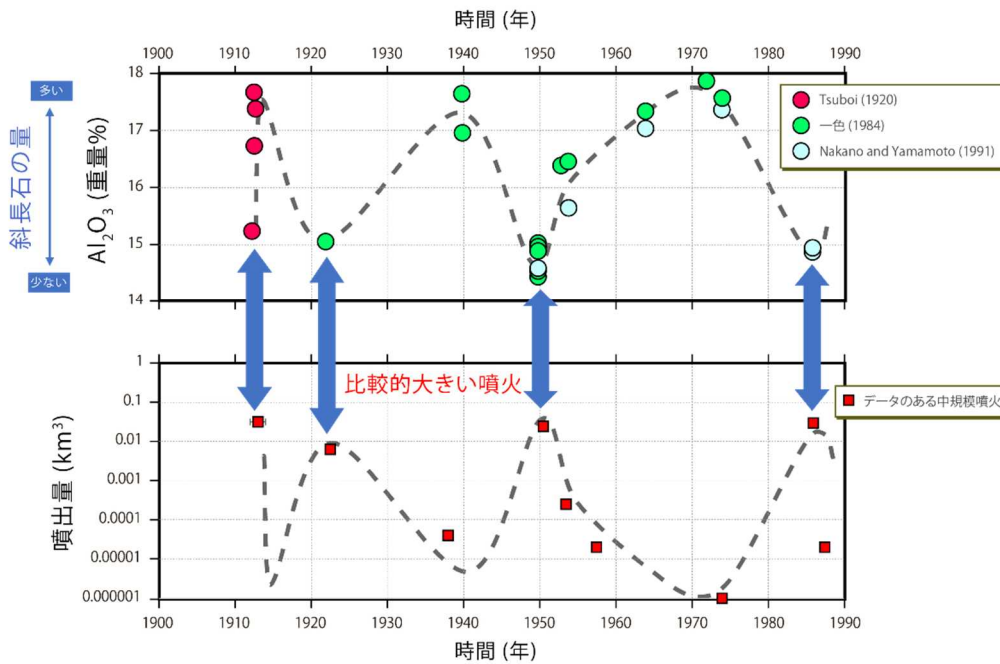


図3. 伊豆大島山頂噴火時のマグマの斜長石量と噴出量の関係

文献データを再整理したところ、20世紀の伊豆大島山頂噴火では、数ヶ月から数10年の時間スケールで見ると、比較的大きな噴火の噴出物の斜長石量と噴出量は逆相関の関係になっている可能性が示された。すなわち、噴出量の予測のための指標として斜長石量が使えうる可能性があることがわかった。

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

近代的な観測データと史料・考古・地質データ等を統合し、近代的な観測開始以前の低頻度大規模現象をはじめとした地震・津波・火山噴火の発生履歴の解明を進めるため以下の研究を実施した。

琉球列島中部沿岸に存在する巨礫の空間分布を制約条件とする数値計算を行い、既往の津波及び地震規模の上限を推定した(図4)^[UTS_01]。京都・奈良の日記史料と東海地方の年代記「大唐日本王代年代記」「常光寺王代記并年代記」の信頼できる地震記事との比較検討を行ない、明応2年(1493年)10月から12月、静岡県浜松市、愛知県知多郡から京都・奈良を含む地域で地震が高頻度で続いたことを確認した(図5)^[NGT_01]。今後、近代的な機器観測に基づくデータとの比較・検討の進展が期待される。安政東海地震の発生時刻を外国船の航海日誌等から特定し、遠地験潮記録から推定される時刻と整合的であることを確認した^[HMEV_01]。史料と気象庁震度データベースから江戸・東京の過去350年間の有感地震数を整理し、元禄や安政江戸地震による有感地震数の増加などの時間変化を検出した^[KOB002]。

文禄5年(1596年)の文献史料で畿内や美濃に降ったとされる「長く白い毛」について検討した。別の史料によれば、この前後に台風が九州を通過していたことから、気象庁の台風データベースで風向風速を検証した結果、これが浅間山からもたらされたペレの毛(マグマが噴火時に急冷して糸状になったもの)である可能性が高いことがわかった^[UTH_01]。伊豆大島の12-18世紀に発生した大規模噴火、浅間山の天明噴火、霧島山の新燃岳享保噴火について、層序の特徴、岩石鉱物化学組成*、組織解析等の分析が進められ、噴火様式*や噴火推移との関係が検討された。また、霧島山の13世紀御鉢噴火については、新たな堆積物データを考慮した結果、従来の推定よりも大規模な噴火である可能性が示された^[ERI_03]。屈斜路カルデラ噴出物の化学分析とU-Th放射非平衡*分析によって、カルデラ噴火*に先立つ珪長質マグマの大量生成に3万年程度を要していたとする予察的結果が示された^[HKD_02]。全岩化学組成分析から、屈斜路カルデラの活動における中島の位置付けが明らかになり、野外調査からアトサヌプリやリシリ溶岩ドーム*のテフラ分布や層序が整理された^[KOB004]。鬼界カルデラで、反射法地震探査及び海底地磁気観測のデータ解析、堆積物・岩石試料の解析が進められ、鬼界アコハヤ噴火噴出物の面的広がりや総量が見積もられた^[KOB01]。

沿岸巨礫の分布を用いた古津波の評価



図4. 沿岸巨礫の分布を用いた古津波の評価

沖縄県久高島の岩礁に堆積する巨礫の分布は、台風などの高潮によって現在の分布になっていることが分かった。過去に津波が発生していたとしても、岩礁が形成された時代(3500年前)以降、Mw8.3を超えるような地震・津波は発生していないと推察される(Minamidate et al., Sci. Rep., 2020に加筆)。

史料から明らかになった明応東海地震前の地震活動



図5. 史料から明らかになった明応東海地震前の地震活動

同時代の信頼できる史料である京都・奈良の日記と東海地方の年代記を比較検討して、その時代の地震活動について調べた結果、1498年明応東海地震の5年前に京都・奈良から静岡県浜松地域にかけて大きな地震が頻発していたことが明らかになった。これは東海地震の前の地震活動を理解する上でも重要な情報である（史料出典：大倉精神文化研究所附属図書館，愛知学院大学図書館情報センター）。

（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

日本海溝から採取した試料を用いた摩擦実験を実施し、摩擦係数は粘土鉱物含有量の増加に伴い系統的に低下し、温度の上昇に伴い増加する傾向があることがわかった^[ERI_05]。この結果は、プレート境界の摩擦特性*の水平不均質が、粘土鉱物含有量を反映している可能性を示唆する。中下部地殻での岩石破壊にともなう水理学パラメータを制約するため、天然の岩石-流体反応帯から間隙流体圧*や浸透率*を推定する新たな手法を開発し、破碎された地殻では未破壊地殻に比べて時間～年スケールで浸透率が数桁上昇するという結果が得られた^[THK_02]。一方、波形の立ち上がりを利用した精密震源決定法を開発し、震源の集中度合いから地震の発生しやすい場所を推定する試みもなされた^[UTS_03]。

イ. 地震断層滑りのモデル化

複雑な断層形状や破壊様式の動的地震破壊過程^{*}を、安定かつ高速に再現する数値計算手法の開発が進んだ^[ERI_06]。大型振動台を用いたメートルスケールの摩擦実験から速度・状態依存摩擦構成則に関するパラメータを取得し、先行研究の結果と調和的であることを確認した^[NIED02]。また、水・二酸化炭素・塩の多成分流体の実験により、塩がかんらん石の親水性を効果的に高めることがわかった。多成分流体と反応したかんらん石は融液^{*}に近い状態となり、地震波トモグラフィ^{*}による弾性^{*}的性質の違いに基づき、水などの流体と区別できる可能性があることもわかった^[THK_02]。

(4) 火山現象の解明とモデル化

火山で発生する様々な現象を定量的に捉えるため、地球物理学的な解析手法の開発やマグマ溜まり^{*}から火道^{*}を通り地表に至るマグマの上昇過程を解明するために必要な火道内現象のモデル化を進めており、以下の研究を実施した。

ア. 火山現象の定量化と解明

西之島では、2019年の噴火活動の推移を広帯域地震および空振観測で捉えることに成功した。時間とともに地震波の卓越周波数が低周波数側にシフトしたことや、振動軌跡^{*}の変化からマグマ供給系の変化および圧力源の移動が推定された。吾妻山に敷設されている光ファイバーケーブルを用いた分散型音響センシング (DAS)^{*}のデータを用いて、火山性地震^{*}の震源決定と浅部地盤構造の推定が行われた。火山研究のための新たな観測手法として期待される(図6)^[ERI_07]。桜島では、Multi-GAS^{*}やセスナ機による火山ガス^{*}組成観測が行われた。SO₂/H₂S比は1-1000の範囲で大きく変動しており、比が30を超えるのは火山灰^{*}放出時に限られることや、比が1-30の変動範囲では爆発頻度と相関があることが分かった^[AIST06]。

光ファイバーケーブルとDASによる火山性地震の震源決定

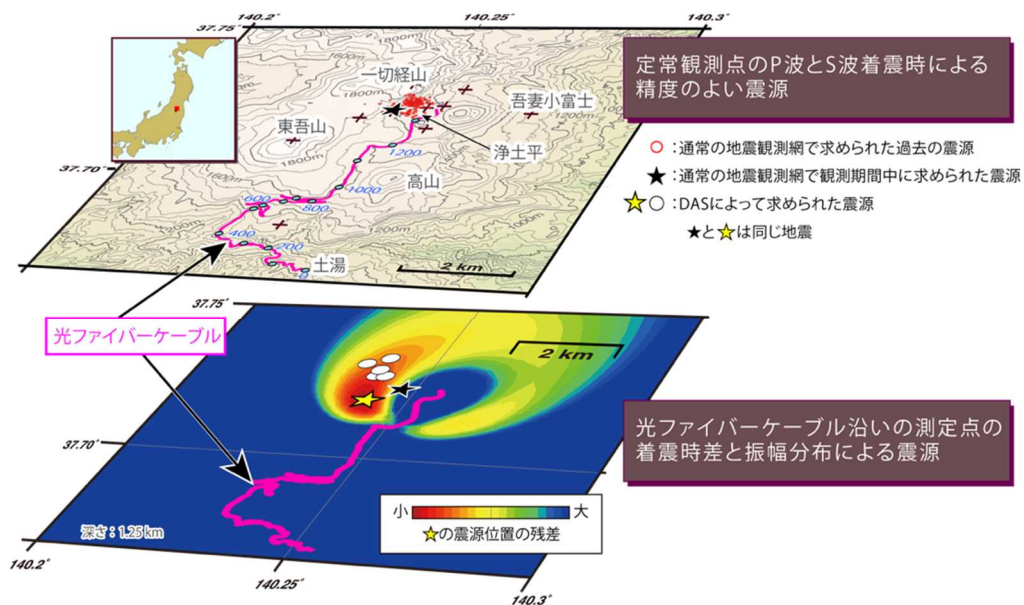


図6. 光ファイバーケーブルとDASによる火山性地震の震源決定

通信用の光ファイバーケーブルを振動センサーとして利用する新手法を用いて、吾妻山で火山性地震の震源推定を行った。通常の震源推定は、地震計観測網（上図の+印）の地震波の到達時間差を解析して行われる。光ファイバーケーブルを利用して推定した震源は、既存の方法による推定結果ともよく合うことが示された。この観測手法は遠隔操作が可能であることや、光ファイバーケーブルは埋設されており噴火時でも火山灰や火山弾による損傷のリスクが少ないため、火山での運用に適している（Nishimura et al., Sci. Rep., 2021 に加筆）。

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

霧島火山新燃岳 2011 年噴火の石質岩片サンプルを観察・分析し、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、ナノライトの晶出により石基結晶度が5日～45日間で9.1 vol%上昇してメルト粘性が増加し、気泡過剰圧が破碎閾値を超えることで溶岩ドームにおける爆発性の獲得が説明できることが分かった^[THK_04]。

(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

地震や火山噴火が発生する場のモデル化を進めるため、プレート境界域、海洋プレート内部、内陸域及び火山地域において、地震波速度構造や比抵抗*構造、応力や変形場等を明

らかにするための研究を実施した。また、地震活動と火山活動の相互作用についての研究を進めた。

ア. プレート境界地震*と海洋プレート内部の地震

海域の地震・地殻変動観測の充実により、プレート境界やスラブ内の震源域に関する様々な研究が進んだ。S-net*で観測された常時微動*記録に地震波干渉法*を適用し、2011年東北沖地震の大滑り域などでS波*速度が速い傾向があることがわかった^[THK_02]。日向灘から奄美大島にわたる地域で発生する小繰り返し地震*を利用して、フィリピン海プレートの準静的滑り速度が求められた。この地域では全体的に滑り速度が増加しており、とくに、M6クラスの地震が発生している種子島東方・奄美大島付近・大隅半島南東沖において、2016年以降の滑り速度の増加は周囲より相対的に大きいことが明らかになった^[KGS01]。

スロー地震*に関しては、海底圧力計観測から、2018年房総沖スロースリップ*に伴う隆起を検出した^[ERI_05]。日向灘や熊野灘では、通常地震活動とスロー地震の発生位置の違いや、地質構造やテクトニクスとスロー地震の発生分布との関係が詳細に調べられた^[DPRI01, JAMS02]。また、四国西部の深部低周波微動*については、フィリピン海プレートからの脱水がその発生に関与している可能性が示された^[NIED02]。

プレート内地震については、スラブ内の温度圧力条件下でのエクロジヤイト*の形成やロニソソ石*の脱水反応といった物質の振る舞いとスラブ内地震の発生メカニズムとの関係が調べられた^[THK_06]。スラブ内地震である2018年アンカレッジ地震(Mw7.1, 米国)の震源域の上下に、スラブの脱水による流体を示す顕著な高ポアソン比の異常体が検出された^[THK_05]。

また、プレート境界地震の滑りモデルの高度化を目指し、日本海溝と南海トラフにおける単位滑りに対する地表での弾性応答のグリーン関数ライブラリを整備した^[JAMS01]。

イ. 内陸地震

内陸地震の発生には、地殻内流体が重要な役割を果たすと考えられている。このような背景の下、2016年熊本地震震源域をはじめとした内陸地域で、様々な手法により地殻内流体を検出し、地震の発生メカニズムとの関係を調べる研究が進んだ。2016年熊本地震については、地震のメカニズム解*から間隙流体圧レベルを推定する逆解析法と地震時応力変化の計算を組み合わせ、地震前後の地震活動度の変化における間隙流体圧と応力の役割について調べられた。この結果、従来から指摘されているクローン応力変化*(ΔCFS)の上昇だけでなく、間隙流体圧の上昇が地震活動度の増加に影響を与えていることがわかった。

(図7)^[DPRI03]。また、地球電磁気学的観測による比抵抗分布の推定に基づき、地殻内の流体分布と内陸地震震源域との位置関係が調べられた。熊本地震震源域においては、地震波速度構造と比抵抗探査結果から、地震時滑り域の端部が低速度領域や低比抵抗体の端部などの構造的特徴を持つことが明らかになった^[KYU_01]。この他にも、内陸地震の震源域直下に流体が存在することが示唆されたことは興味深い^[ERI_09, THK_07]。

地殻変動データから、下部地殻のレオロジー*に関する研究成果も得られた。余効滑り*と粘弾性*変形を分離する手法により熊本地震の余効変動*データを分析し、下部地殻の粘性係数が $2\text{-}5 \times 10^{18}$ Pa \cdot s 程度であると見積もられた^[GSI_01]。2011年東北沖地震の余効変動データからマントルウエッジ*の高粘性領域の幅を推定し、福島県付近に比べ宮城県付近の方が狭くなっている可能性が示唆された^[THK_07]。

3次元速度構造モデルを用いた詳細な震源分布から、陸域地震活動の下限深さの空間分布は、地下温度 300 度の空間分布と同じ傾向を示すことが明らかになった^[NIED02]。これは、地震活動の少ない地域においても、地下の温度分布から地震発生層*の下限を把握できることを意味する。

2016年熊本地震前後の地震活動度の変化：応力・間隙流体圧との関係

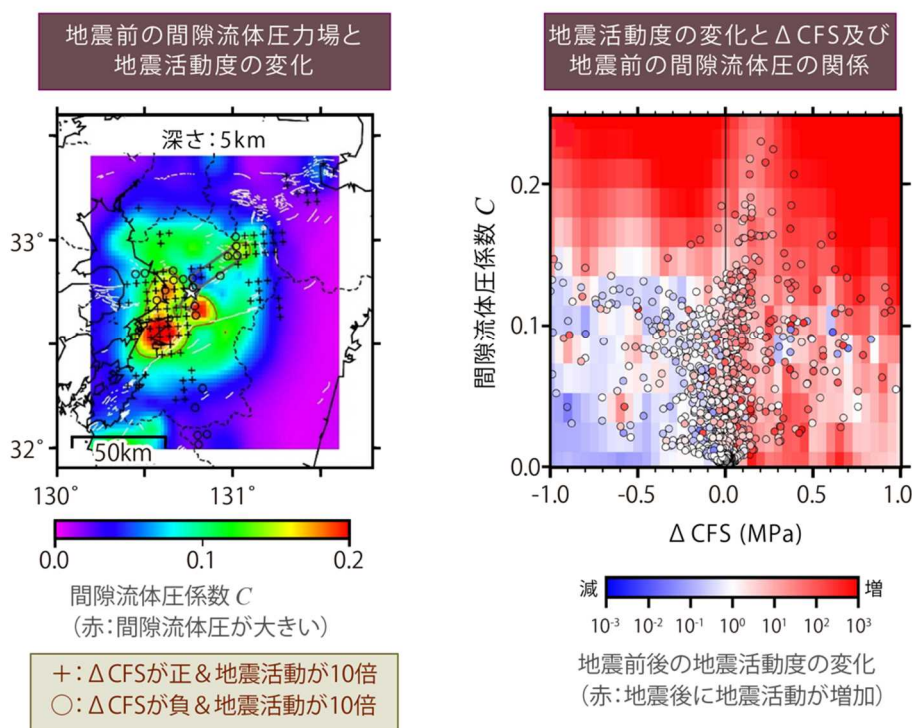


図 7. 2016年熊本地震前後の地震活動度の変化：応力・間隙流体圧との関係

2016年熊本地震前の地下の間隙流体圧力場、熊本地震による応力場の変化から求めた各地の Δ CFS と熊本地震前後の地震活動度の変化を比較した。間隙流体圧係数は、間隙流体圧の静水圧からのずれを、静岩圧と静水圧の差で規格化した無次元量である。右図の○は評価点での地震活動度の変化である。 Δ CFS が正となる場所では熊本地震後の地震活動が活発になったことに加え、 Δ CFS が負となる地域でも、間隙流体圧のレベルが地震前から高かった地域で地震活動度が上昇していること等が明らかになった (Nakagomi et al., Earth Planet. Space, 2021 に加筆)。

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

海洋研究開発機構の研究船「かいれい」による調査・探査航海により、鬼界海底カルデラで航走調査・長期海底観測機器の設置・試料採取が行われた^[JAMS03, KOBE01]。火山性流体の分布や運動によって生じた火山体浅部の構造不均質性を過去の火山人工地震探査のデータを活用して推定したところ、阿蘇山・霧島山・磐梯山・岩手山のいずれにも共通した特徴が見られることがわかった^[THK_08]。草津白根山で行われた広帯域 MT 観測*により、深さ 10 km 程度までの 3 次元比抵抗構造が明らかとなり、深部マグマ溜まりから供給されるマグマ性流体の上昇経路のモデルが示された^[TIT_03]。

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

下部地殻の非弾性*ひずみを推定する手法を開発し、地震活動が活発な別府島原地溝帯で非弾性ひずみ速度*が大きいことを明らかにした。また、地温勾配が大きいために地震発生層が薄く、下部地殻には低速度異常が見られる別府阿蘇地域では、顕著に非弾性ひずみ速度が大きいことがわかった^[KYU_01]。

オ. 構造共通モデルの構築

中国地方で発生する地震のメカニズム解を小地震まで含めて推定し、10 km メッシュの応力マップを作成した。当該地域にあるほとんどの主要活断層は、現在の応力場の下で地震が発生しやすい条件を満たしていることが明らかになった^[AIST07]。近年取得された反射法地震探査データ等の統合解析を実施し、日本海及びその沿岸域、東北日本の青森平野や庄内平野、富士川河口断層帯、中央構造線断層系などの断層モデルを推定した^[ERI_11]。

3-2. 地震・火山噴火の予測のための研究

地震・火山噴火現象の観測・実験・理論研究に基づき、地震発生や火山噴火の予測手法の構築に関する研究を実施した。長期的な地震・火山噴火発生履歴に加えて、地殻変動や地震活動等の観測データを活用することで、地震発生の新たな長期予測手法の構築及び中長期的な火山活動評価手法の開発を行った。また、地殻活動の観測データの解析と、理論・実験等に基づく物理的解釈・数理モデル化、様々な自然現象の変調と地震発生の相関調査を通して、地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測及び先行現象に基づく地震発生確率予測に関する研究を行った。さらに、想定される火山現象を網羅してその時間的連関を整理した噴火事象系統樹の高度化を進めるとともに、火山活動推移モデルの構築に向けた研究を進めた。

(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

南西諸島海溝沿いの沖縄本島南東沖と波照間島南方沖で、GNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測*を実施した。過去の観測データと合わせて地殻変動速度を推定すると、沖縄本島沖では海溝付近のプレート間固着*が示唆される。一方、波照間島沖では、沖縄トラフの伸張変形を支持する結果が得られたが、海溝軸付近の固着状態を拘束することは現状では難しいことがわかった^[NGY_02]。

南海トラフ沿いの固着状況から応力分布をモデル化し、今後起こりうる複数の海溝型巨大地震の発生シナリオを作成した。破壊シナリオの中から実現性の高いものを選択するために、経験的摩擦則とエネルギーバランスに基づく手法の開発を進めた^[NIED02]。

イ. 内陸地震の長期予測

内陸地震の新たな長期予測手法の構築を目指して、GNSS連続観測システム(GEONET*)の測地データから推定されるひずみ速度分布に基づいて、東日本の内陸地震の発生確率を試算した。ひずみ速度を応力蓄積率に相当するモーメント*速度に換算し、過去の地震の発生状況から経験的に地震発生率を見積もり、ポアソン過程*を仮定することで、約20 km四方の格子内において、今後30年間にM6以上の内陸地震が発生する確率を計算した。その結果、日本海東縁～新潟-神戸ひずみ集中帯、南関東・伊豆地方、奥羽脊梁山地沿いで1%を超える高い値を示した(図2)^[DPRI05]。

西南日本に沈み込むフィリピン海プレートの運動と上盤プレート内の地震活動の関連性を明らかにするために、粘弾性を考慮した有限要素モデルと測地データを用いて、プレート間固着が引き起こす主要な震源断層におけるクーロン応力変化(ΔCFS)を計算した。九州では、近年発生した3つのM7級の内陸地震を含め ΔCFS が正となる震源断層が多く存在することがわかった。これらの震源断層では、プレート間の固着が進むことで断層破壊を促進

する方向に応力が载荷されていると推察される^[ERI_11]。

大地震が連発して発生する事例は多く、近年では2016年熊本地震や2019年リッジレスト地震(M7.1, 米国)などが例として挙げられる。このような連発する大地震の活動予測を行うために、応力変化を考慮した地震応答予測モデルを改良し、リッジレスト地震に適用したところ、震源域周辺の地震活動の推移を的確に説明することができた。また、近傍の主要活断層帯で、このモデルの予測と既往の地質学的な長期評価と組み合わせることにより、より現実的な予測確率と確率利得が示された^[DPRI05]。

この他にも、現実的な初期応力場と断層形状を取り入れた動的破壊過程予測手法の開発や、伏在断層の長期的な変位速度の推定なども行われた^[UTS_02, ERI_11]。

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

A. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

スロー地震と繰り返し地震の活動の検出を中心として、プレート境界面での非地震性滑り^{*}の状態を調べ、これを巨大地震の発生予測につなげることを目指した研究が多く進められた。まず、プレート境界の滑りをモニタリングする上で有用な、長期間にわたる繰り返し地震カタログ^{*}や南海トラフ沿いの低周波・超低周波地震^{*}カタログ、短期的SSE^{*}カタログ等を公表したことが挙げられる^[THK_09, ERI_12]。また、南海トラフ周辺地域を対象に、3次元地震波速度構造を用いた自動セントロイドモーメントテンソル(CMT^{*})解析システムの開発に加えて、S-net データを用いた日本海溝沿いの低周波微動検出の自動処理化に着手した^[NIED02]。大規模地震の発生を念頭に置き、即時に震源や断層運動様式を推定する解析システムの改良も行われた^[NIED02]。

観測網の充実やスロー地震検出の解析手法の高度化により、スロー地震の発生様式の理解が大きく前進した。四国地域における短期的SSEについて、2001年-2019年の傾斜変化のデータに基づいて滑り分布が推定され、累積滑り量は空間的に不均一であることや、滑り域は2012年頃を境に南海トラフの走向方向へ拡大している傾向があることがわかった^[ERI_12]。また、深部超低周波地震はプレートの固着率^{*}が低い場所でしか起きていないのに対し、浅部超低周波地震は様々な大きさの固着率の場所で発生しており、プレート境界浅部における強い不均質性が示唆される^[ERI_12]。2019年豊後水道の長期的SSEの発生前後に、日向灘北部や四国中部において小規模な長期的SSEが起きていたことが捉えられ、スロースリップ間の相互作用に関する新たな知見が得られた^[ERI_12, GSI_02]。

岩手北部～青森沖にかけて、1年前後の周期で太平洋プレートの滑り速度が変化する領域があり、その領域の周辺では、滑り速度が速い時期に中規模地震(M4-6)の地震活動度が高くなる傾向、同時にb値^{*}が小さくなる傾向が見い出された^[THK_09]。この他に、スロー地震の振る舞いや大地震の余効変動データからプレート境界面の摩擦特性を推定する研究なども進められている^[ERI_12, KUS_01]。

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

地震活動の変調をとらえ、これを大地震の発生予測につなげることを目指した研究が行われた。出発点となるのは、地震活動を独立地震*と先行する地震により誘発された地震に分けて把握すること(デクラスタリング)である。イタリア北東部の地震データ(1977-2018年)に2つの代表的なデクラスタリング手法を適用し、結果に大きな違いがないことを確認するとともに、独立地震の割合が全体の50%強であることを示した^[ERI_13]。

内陸の繰り返し地震に関しても進展があった。函館地方の非火山性低周波地震*と通常地震に関する詳細な分析により、深さ15-35 kmにかけて低周波地震のみが起きる傾いた円柱状のクラスタ*があり、その延長線に位置する深さ約10 kmで低周波地震と通常地震が混在して発生する領域があることが示された。通常地震の活動には繰り返し地震が含まれており、これらの地震活動は深部流体によって断層内の間隙流体圧*が一時的に上昇することで発生している可能性が示された^[THK_09]。

2000年鳥取県西部地震の震源域における多点・高密度地震観測(計1000点)により、断層面の幾何学的複雑さが地震破壊に影響を与えることが分かった。高精度な震源は、長さ約20 kmの主断層付近に分布するほか、5 kmから30 mまでの様々な大きさに鉛直板状に分布し、小スケール断層の雁行配列まで観測された^[ERI_13]。大地震の断層形状の複雑さを直接マルチスケールで明らかにした観測例であり、地震発生予測の研究を新たな段階に進める契機となる可能性がある。

手法の開発としては、大地震発生後数時間程度の連続波形記録から、揺れの最大振幅の超過確率に基づいて、その後の余震活動の推移を予測する手法が挙げられる。この手法は震源カタログを必要とせず、1つの観測点の地震波形のみで計算できる点が特徴である^[NIED02]。

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

ある地域で地震活動が高まった際に、より大きな地震へとつながるのか、つまり観測された地震活動がより大きな地震の前震*となりうるのかを識別するための手法開発が進められた。具体的には、岩手-宮城県沖・茨城県沖・伊豆諸島・長野県北中部の4地域において、前震識別法(Maeda, 1996)をETASモデル*に基づいて作成された模擬地震カタログ(独立地震のランダムな発生と独立地震により誘発された余震活動だけで構成された地震活動)と実データカタログの両方に適用し、本震発生の予測性能を比較した。いずれの地域でも、実データに適用した場合の方が高い予測性能を示し、前震識別法は前震活動に関連する物理的特徴をうまく抽出できる手法であることがわかった。上記のプレート境界の2地域(岩手-宮城県沖及び茨城県沖)は、群発地震*やスロー地震が観測されている地域であり、SSEによって誘発された地震活動が前震として捉えられている可能性がある。一方、地殻内の2地域(伊豆諸島及び長野県北中部)では、地殻内流体に関連する群発地震が前震として発生していることが示唆される^[ERI_13]。

2019年リッジレスト地震(米国)では、最初にM6.4の地震により共役な二つの断層が動き、そのうちの一つの断層において34時間後にM7.1の地震が発生した。M7.1が発生した断層で、M6.4の震源からM7.1の震源までの約5 kmの区間において、b値が小さい値をとることがわかった^[ERI_13]。類似の特徴は、2016年熊本地震の最初の前震(M6.5)の震源域南部でも捉えられたが、本震の震源付近では本震の発生直前までにb値が上昇に転じたという報告もある。b値のモニタリングは大地震後の地震活動の推移を予測する上で重要な知見となる可能性があるが、更なる研究が必要である。

(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

山中湖南方で実施したトレンチ調査により見出されたテフラ層から、富士山は過去約4000年間に少なくとも14回噴火したことが明らかになった。富士山麓の古地磁気方位データをもとに、紀元前1000年から西暦1100年までの古地磁気永年変化曲線を作成し、噴火履歴調査のための基礎資料とした^[MFRI01]。伊豆大島、浅間山、霧島山において、過去数百年の噴火を対象とした噴出物の地質調査を行い、テフラ層の区分やその特徴の明確化、岩石鉱物化学組成・組織などの物質科学的情報の収集を進めた^[ERI_03]。草津白根山本白根及び白根火砕丘群について、地表調査とトレンチ調査から、火口の形成年代や噴火様式等を明らかにした^[TYM_01]。雌阿寒岳、秋田焼山、御嶽山及び日光白根山において、火口周辺域を含むトレンチ調査や地表踏査による噴火履歴調査を行った。白山および御嶽山では、高分解能の噴火履歴を得るために、 $K-Ar^*$ 及び Ar/Ar^* 年代データの比較研究および10万年前より若い火山噴出物の年代測定を実施した^[AIST03]。十勝岳のヌッカクシ火口の調査から、約1800年前までの $マダマ噴火^*$ 活動後は $水蒸気噴火^*$ および小規模な山体崩壊が散発的に発生していたことがわかった。このことは、小規模噴火が現在活発な活動を示す火口以外でも発生しうる事を示しており、今後同じような火口の活動評価を行なう必要があることが改めて示された^[THK_11]。

イ. モニタリングによる火山活動の評価

各種観測データに基づき数年から数十年スケールの中期的な火山活動評価(特に $unrest^*$ 事象の定量的評価)を行うにあたり、ニュージーランドで開発された $火山活発化指数^*$ (Volcanic Unrest Index)を日本の火山に適用するための方法を検討し、十勝岳のVUI毎月値を1970年から2019年について算出した^[HKD_04, KUS_02]。

十勝岳、蔵王山、吾妻山、草津白根山、伊豆大島、焼岳における全磁力観測、北海道駒ヶ岳、有珠山、樽前山、十勝岳、雌阿寒岳、吾妻山、焼岳、御嶽山、阿蘇山、九重山、口永良部島における地震および地殻変動の連続観測を実施し、中長期活動を評価するための時系列データを取得した^[HKD_04, KUS_02]。十勝岳では、2020年9月14日の傾斜変動と微動の振幅比の変化が捉えられ、火山性流体等に起因する活動が浅くなっていることが示唆された。ま

た、機械学習による微小地震の自動検知アルゴリズムを開発し、御嶽山の微小地震に適用した^[KUS_02]。

GNSSデータに対して時間依存インバージョン*の手法を草津白根山、浅間山、伊豆大島、桜島、霧島山に適用し、マグマ溜まりの時間変化を推定した。特に桜島と霧島では両者のGNSSデータの統合解析を行い、桜島と始良カルデラでの体積膨張、霧島での2018年噴火前・噴火時・噴火後それぞれの地殻変動源の位置と変動量が推定された^[GSI_03]。

簡易トラバース装置を用いて、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島の二酸化硫黄放出率の観測を行った。2020年に噴火活動が活発化した諏訪之瀬島では、二酸化硫黄放出率の変化と爆発回数や地震活動との関係は明確でないことが分かった^[UTS_06]。焼岳における2020年4月の群発地震時に観測された山麓での異常湧出の高温泉は、化学組成と安定同位体比の分析から、焼岳の火山活動と直接的な関係はないことが明らかとなった^[JMA_05]。

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

インドネシアのメラピ火山について、マグマの貫入速度と噴火規模および様式との関係を調べた結果、貫入速度が検出限界未満の場合は水蒸気爆発、3000-4000 m³/dayおよび380,000 m³/dayの場合は溶岩ドーム形成噴火、3,160,000 m³/dayの場合はプリニー式噴火と分類された^[DPR106]。世界で発生する地震および火山噴火のデータを系統的に解析した結果、大地震の発生による応力変化が膨張となる火山において、噴火発生の頻度が2～3倍程度、地震発生後数年間高まることが分かった^[THK_11]。火山活動の変化に対する火口湖の応答について、湖水の熱・化学パラメータの数値的検討を行った。その結果、草津白根山の湯釜の湖水濃度が、湖底に供給される流体と平衡に達するまでに要する時間は約8年であることが明らかになった。10年単位の変動を示す湯釜の活動を湖水の成分濃度の変化から判断する場合、このような応答特性を考慮する必要があることがわかった^[THK_11]。伊豆大島の大規模噴火初期と中規模噴火は、噴出物中の長石量が少なく、マグマ組成や岩石組織は類似している一方、小規模噴火では長石に富んでいた。また、大規模噴火では、長石量は短時間で増大していた。これらのことから、地下のマグマの急上昇や脱ガス過程と関連して、規模と噴出物に関連性があることが推察された^[THK_11]。

3-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

災害の発生の直接的な原因となる、地震動、津波、火山噴出物、斜面崩壊などの災害誘因を高精度に事前・即時予測することを目指して、観測、探査、実験等に基づく災害誘因生成メカニズムの解明に関する研究や、災害誘因予測計算の高精度化と高速化の研究を進めた。また、災害誘因に加え、自然や社会に潜在する脆弱性などの災害素因を考慮した災害リスク評価手法の高度化の研究、災害誘因情報の効果的発信方法を模索する研究を進めた。

(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

強震動の事前評価手法を高度化するため、震源のモデル化手法の高度化やそれに資する知見を得るための過去の地震の震源過程*の分析、震源から地表までの地下構造のモデル化、震源や地下構造との関連における強震動の生成メカニズムの分析、地震波伝播シミュレーション手法の高度化を行った。

震源モデルの高度化については、想定し得る最大の地震動の生成メカニズム解明のため、国内で発生した地震の既往の震源断層不均質滑りモデルの特徴を抽出した。1つの地震における断層面上の滑り角のゆらぎは約20度であることや、強震動生成域の応力降下量*には明瞭な深さ依存性があることがわかった^[DPRI09]。

2016年熊本地震本震の震源過程について、詳細な断層面形状や信頼性の高い地盤構造モデルを用いた再解析を行った。大局的には従来の結果と同様に、布田川断層で大きな滑りが求まり、更に地表近くにも有意な滑りが推定された。この滑り分布による地震動の計算波形は、震源域北端の阿蘇カルデラ内の記録の特徴をよく再現できた^[DPRI09]。また、断層浅部の滑り量や断層面形状など活断層研究から得られる情報を滑りモデルに取り入れることで、地震動の再現性が向上することも確認された^[NGY_05]。

地下構造モデルの高度化について、低次元有限要素法のコードをGPU上で実装することにより地盤増幅解析を実現し、これを人工知能と組み合わせ、高速に地盤内部構造を推定する手法を開発した^[CTOC01]。紀伊半島南東沖で実施された構造調査測線の周囲で発生した地震のうち635個について、DONET*の検測値と構造調査で得られた速度構造を用い、震源の再決定を行った。得られた震源はJMAカタログよりも全体的に浅く、特に2016年4月1日に三重県南東沖で発生したM6.5の地震は、プレート境界地震である可能性が高いことを示した^[CTOC03]。

強震動評価の高度化に向けて、太平洋スラブ内の深発地震により励起される強震動を評価するため、北西太平洋でのOBS観測で得られた海洋リソスフェア*を伝播する波の方位依存性を分析したところ、海洋プレート内にN45°E方向に長軸（相関距離20 km）、N135°Eに短軸（相関距離0.25 kmと2 km）を持つマルチスケールな短波長不均質構造が推定された^[ERI_14]。

沈み込み帯で発生するプレート間大地震・巨大地震に伴う強震動の距離減衰の特徴を調べるために、2003年十勝沖地震、2011年東北沖地震の強震動を解析し、強震動生成域の規

模とそこからの距離を用いて距離減衰を予測するモデル式を作成した^[CTOC01]。

強震観測点におけるサイト特性*評価手法の開発では、多国間共同研究が進められており、フランス・グルノーブル盆地や米国・インペリアルバレーにおける地下構造を明らかにする取り組みがなされた^[CTOC05]。

イ. 津波の事前評価手法

大地震にともなう海底斜面崩壊による津波である1929年グランドバンクス津波（米国）の再現数値実験を行った。海底ケーブルが切断された位置に基づいて海底地すべり域を仮定し、海底地すべりの数値計算手法を改良して津波の再現計算を行い、観測波形をおおよそ再現できることを明らかにした^[HKD_05]。

津波の波線追跡の新技术を開発し、津波第1波や反射波の波線と海底地形との関係を明らかにした。また、日本海における60断層について、断層面上の滑り分布の不均質性を考慮した7万通り以上のシナリオを想定し、日本海沿岸の約150の市町村ごとの確率論的な津波高さを計算した。津波計算手法の高速化も進めた^[CTOC04]。南海トラフでも、滑り遅れ分布に基づいてシナリオ地震の震源モデルを生成する手法を構築した^[JAMS01]。

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

強震動による地震災害誘因の分析のため、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た。また、2003年と1952年の十勝沖地震について、最新のプレート形状と地下構造モデルを使用し、近地と遠地の古い地震波形記録を精査して震源インバージョンを行った。その結果、1952年十勝沖地震では、Mw6.1の初期破壊に続いてMw8.1の十勝沖でのdown-dip方向への破壊があり、さらに破壊は東方向へ伝播してMw8.0の規模の厚岸沖の破壊が生じていたことが明らかになった。この地震の震源時間関数は、十勝沖と厚岸沖の破壊に対応する2つのピークを示している。これに対して2003年十勝沖地震は十勝沖のMw8.1のdown-dip方向への破壊のみであり、両者には明瞭な相違が確認された(図8)^[ERI_16]。

鳥取県内の堆積平野を中心とした地域で実施した微動探査記録の総合的利活用を目指し、データベースおよびGIS*による表示システムを構築した^[TTR_01]。津波避難データの取得のために、千島海溝周辺海溝型地震により大津波が想定されている中学校において避難訓練を実施した。群衆・高齢者装具・車いす・自力避難困難者のリヤカー運搬等、避難条件の違いによる避難速度の違いをGPSで計測した。また、学習効果を確認するため、訓練後のアンケートの分析も進めた^[HRO_02]。

防災計画策定においては、災害シナリオ評価結果がシナリオ・手法の組み合わせによりばらつきを持つことを適切に理解する必要がある、そのためのシステム開発と対象地域の拡大を進めている^[CTOC02]。

災害被害予測における不確実性の定量化への期待が高まってきている背景から、自然災害による被害をサロゲートモデル*と数値解析を組み合わせることで、低計算コストで確率

論的に評価する枠組みを提案し、南海トラフの巨大地震の津波被害の確率評価に適用することでその有用性を確認した(図9) [CTOC18]。

2018年北海道胆振東部地震を例に、想定地震に対する既往の被害推定手法の妥当性を検討した。被災3町全世帯アンケートより胆振東部地震の被災町の負傷率を推定し、既往の各種方法による推計値と比較したところ、従来の建物被害との相関関係に重点を置いた人的被害評価法では十分でない可能性があることがわかった [CTOC17]。

文化財等の災害の予測や被災状況の把握を目的とし、都道府県の指定文化財、登録文化財、指定外の文化財約23000件について位置情報を入力した文化遺産災害情報マップを作成した。加えて、2021年2月13日に発生した福島県沖を震源とするM7.3の地震について、文化遺産災害情報マップに推定震度分布や建物被害推定情報を重ね合わせて、文化遺産の被災可能性の高い場所を可視化し、これを東北大学災害科学国際研究所や歴史資料保全に関わる地元のNPOと共有して被災状況調査を実施した [CTOC19]。

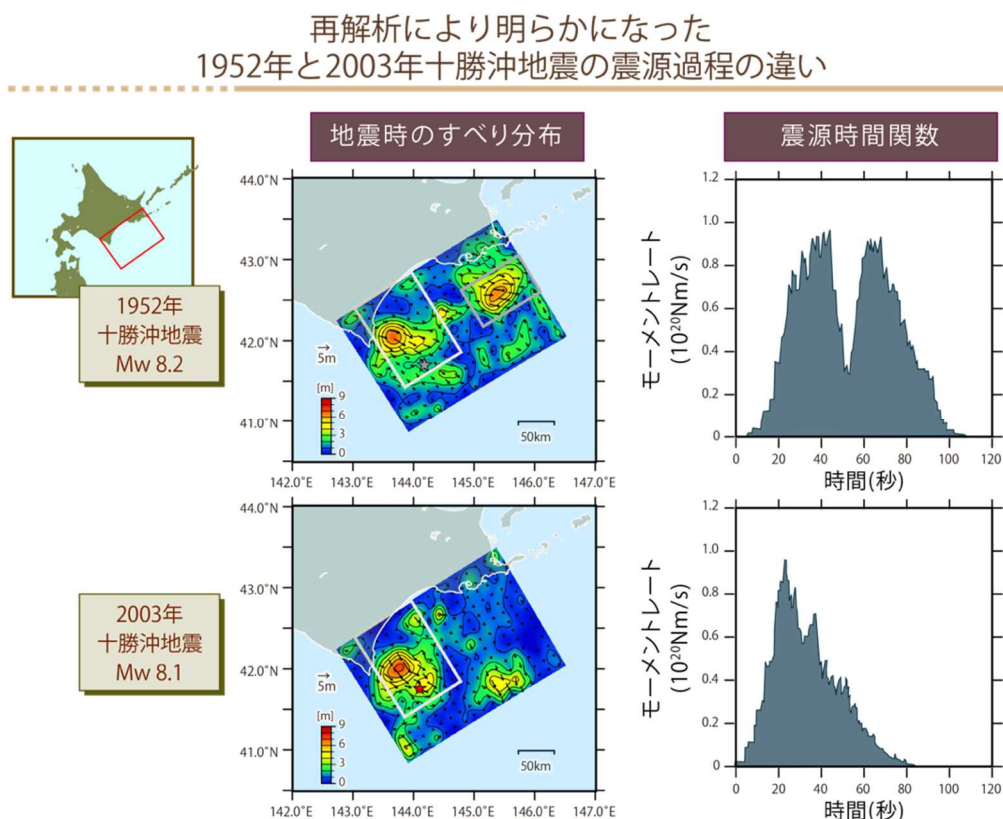


図8. 再解析により明らかになった1952年と2003年十勝沖地震の震源過程の違い

1952年十勝沖地震、2003年十勝沖地震について、これまでの観測記録を集めて再解析した結果、2つの地震が異なる特徴を持つことが明らかになった。☆は初期破壊の位置。1952年十勝地震では、2003年十勝沖地震と同様の滑り域(図中の白い□)に加え、厚岸沖(図中の灰色の□)でも滑りが生じていたことが明らかになった(Kobayashi et al., JGR, 2021に加筆)。

地震シナリオの不確実性を考慮した津波波高の確率論的評価

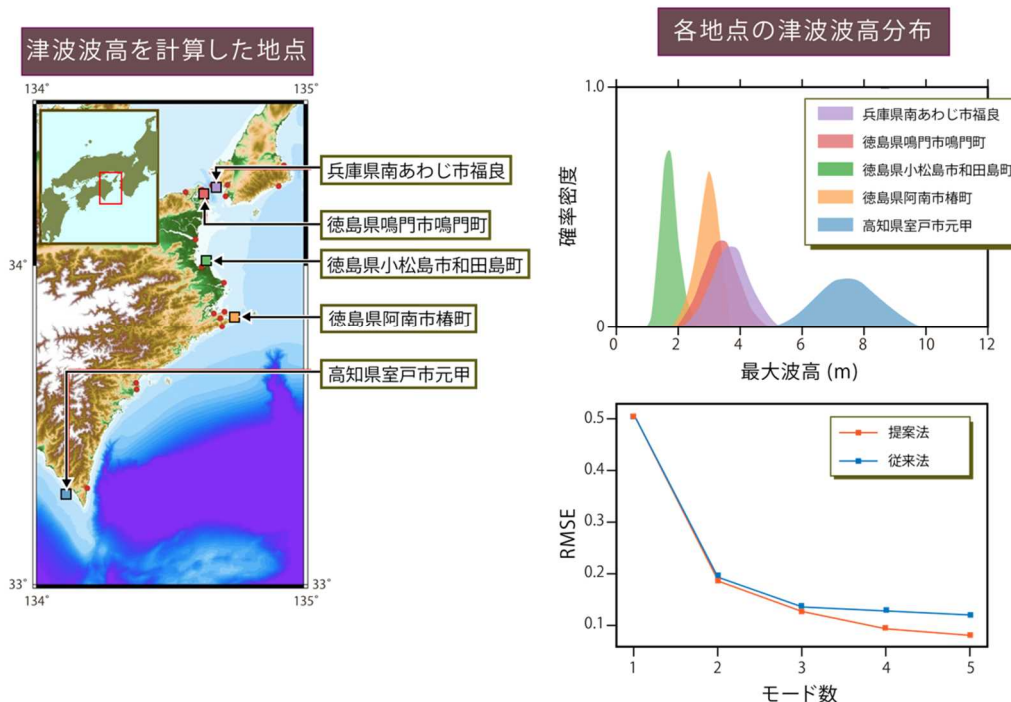


図9. 地震シナリオの不確実性を考慮した津波波高の確率論的評価

解析対象地域である四国地方・淡路島周辺での地形の解像度を段階的に上げ、2次元差分法を用いた解析を実施し、対象とした5点（左図）を含む25箇所における最大波高を計算した。その際、断層パラメータには内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会による「断層パラメータ_ケース03」を基本とし、滑り角と滑り量に±25%までの変動を与えた。その中で25例の計算結果を基礎データとしたサロゲートモデルを用いて、滑り角と滑り量のばらつきを考慮した場合の最大波高の確率分布を求めた結果、各観測点の分布の特徴が異なること（右上図）や、最大波高の近似を工夫した提案手法では、モデルのパラメータ（モード数）を増やすごとに従来の手法と比べて誤差(RMSE)が減少し、推定精度が向上すること（右下図）がわかった。

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

四国の主要国道沿いにおいて、0.5 m-超高密度DEM*を用いて、重力変形、地すべり、過去の崩壊痕跡、急崖など、項目別に分類した危険斜面の分布を抽出した。北海道東部の海岸地すべり土塊において継続している多項目観測データから、波浪を原因とした浸食により不安定化が促進しており、これまでに報告された事例よりも弱い地震動で変位したことが明らかになった^[DPRI10]。

地表設置型合成開口レーダーの大気補正手法を開発し、mmオーダーの変化を捕捉できるようになった。さらに小規模な地すべりの表面状態の変化から土砂すべりの兆候と思われる

る現象を捉えることに成功した^[IRID03]。地震前後の1m-LiDAR* DEMを用いて特徴的な地物の移動方向と変位の大きさを得る手法を開発することにより、地震断層の地表変位や地すべり性の移動土塊の検出が可能となった^[CTOC14]。

2018年北海道胆振東部地震発災地の山地斜面におけるテフラの供給と再堆積を、テフラの給源火山の噴火史に基づいてシミュレートし、その結果をテフラ堆積量の実測値と比較することによりシミュレーションの精度検証をおこない、適切なパラメータを付与するうえで有益な情報を得た。また、水文観測および化学・鉍物分析によって、テフラ累層中での長期間にわたる間隙水の不均質な透過とそれに伴う風化変質を調べるとともに、粘土鉍物に吸着蓄積する大気由来の宇宙線生成核種¹⁰Beを分析して、テフラの強度低下をもたらす粘土化の進行過程を調べた^[CTOC15]。

オ. 火山噴火による災害誘因の事前評価手法

桜島火山における地球物理学的観測量と火砕流*流動を関連付けるパラメータ群の精査を行った。その結果、火砕流をともなう噴火47例中27例にみられた顕著な前震活動の多くは、噴火前の膨張レートが減少もしくは停止する際に活発化すること、また火砕流を伴う噴火は噴火後の収縮量が大きいことなどが明らかになった^[DPRI11]。

(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

大地震の震源即時推定に向け、強震観測データと地震波伝播シミュレーションのデータ同化*にもとづく震源イメージングの有効性を検証した。同手法によりKiK-netデータを用いて2008年茨城県沖地震の震源イメージングを行なったところ、発震時に震源近傍に初期波動場が良好に再構築され、データ同化を行わない従来のイメージング法と比較して震源像をより明瞭に推定できることが示された^[ERI_14]。令和元年度に引き続き3次元差分法に基づく地震波伝播シミュレーションのオープンコード (OpenSWPC, Maeda et al., 2017) の改良、機能拡張を進め、2020年8月13日にVer. 5.10をGitHubに公開した^[ERI_14]。

“揺れから揺れを予測する” PLUM法*において、P波*を検知する方法を発展させ、初期破壊のP波の上下動成分のみから得られる震度を予測に用いることで地盤増幅特性*が不明な観測点でも適用できる方法を開発し、約2割の地震において従来のPLUM法よりも迅速に警報を発表できることを確認した。この改良法と従来法を柔軟に組み合わせることで、従来よりも迅速な震度予測が可能となる。また、断層破壊全体を反映する地震の規模の即時推定をしてから地震動を予測する方法では強い揺れに間に合わない場合でも、密な観測網が利用可能な状況では、PLUM法によって迅速な警報を発信できる場合があることを事例検証により示した^[JMA_06]。

イ. 津波の即時予測*手法

任意の時系列信号を逐次的に処理することでデータの蓄積を待たずに複数の振動パターンに分解することのできる手法（経験的モード分解法）を適用し、ノイズ成分、地震動、潮汐成分等を含む実データからの津波信号の効果的な抽出を試みた。海底における津波記録の場合には、ごく微小な津波から2011年東北沖地震による巨大津波まで、特定の次数範囲のモードに顕著な振幅の信号が現れることを見出した。さらに、地震・津波双方を含む現実に近い記録を数値的に合成し、予測手法のテストを行うというプロセスを実現するため、地震・津波運動を計算できる融合数値計算法と海底圧力を再現できる地震津波シミュレーション手法をシームレスにつなぎ、実用的かつ現実的な不均質構造を組み込んだシステムを実装し、既存手法との比較を行った^[HRS_02]。

GNSSの搬送波位相*変化から断層滑りを直接推定する手法の性能評価のため、2011年東北沖地震とそれに引き続く地震直後の余効滑りの時空間発展を推定した。地震時滑りによる各観測点の地表変位を搬送波位相変化に反映させることで、本震、大きな余震、および余効滑りを連続的に抽出することに成功した。海底の動きを迅速にとらえることを目指し、実海底環境下でドリフト特性を把握できる海底水圧計観測システムのプロトタイプ機を用いて三陸沖北部の水深4178 m地点で観測を行い、データを取得することに成功した^[THK_12]。

津波の減衰予測に関しても、その性能評価が進んだ。近地津波については沿岸津波観測データへのリアルタイム回帰分析手法を、遠地津波については経験的減衰式を過去の事例に適用して予測性能を評価したところ、いずれも概ね±12時間の幅で減衰予測できることがわかった。また、地震波形の周期成分ごとの振幅分布から津波地震*の規模を推定する手法を考案した^[JMA_06]。

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

火山灰堆積後の土石流発生の予測モデル構築のため、降灰によるクラスト*に覆われた斜面表面に対する降雨流出・土砂流出に関する室内実験を行った結果、クラストの存在が表面流量を増加させることや侵食の発達過程に影響を与えることがわかった。また、数値シミュレーションにより、流路の形成、侵食過程などをある程度再現することができた。さらに、焼岳を対象として噴火後60年間の土石流発生ポテンシャルの変化について調べ、土石流発生ポテンシャルが下がっている状況で発生した土石流は、源頭部に集中した強度の大きい降雨が誘因であったことを明らかにした^[DPRI_12]。

気象レーダーを用い、2020年6月4日に発生した桜島爆発的噴火の噴煙高度が火口上約8000 m以上に達していたことを明らかにした。領域移流拡散モデルと全球移流拡散モデルを統一した新しい気象庁移流拡散モデル（JMA-ATM）を開発し、JMA-ATMと結合した火山灰データ同化・予測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と面積の予測が改善することを確認した^[JMA_07]。

(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

地震発生確率に関する意識について、確率を計算する期間を変えた場合、人の意識はどのように変わるのかについてアンケート調査を行ったところ、確率の高低にかかわらず、10～20年間の確率を計算した場合に不安を感じる人の割合が最も高くなった^[III_01]。

南海トラフでM8クラス以上（半割れ）およびM7クラス（一部割れ）の地震が発生した後に、M8クラスの地震が後発する確率を把握するために、最近100年間のグローバルな地震カタログを用いた世界の事例を信頼区間も含めて分析した。その結果、例えばM8クラスの地震発生後から1週間以内にM8クラスの地震が発生する確率は2.9%（30回に1回程度）となり、政府がガイドラインで目安として提示している数字と整合的となった。一方で、ガイドラインで「程度」としている部分については幅があることに留意すべきことなどが明らかになった^[IRID04]。

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構築のため、振幅を用いた震源自動推定ツールと火山性地殻変動源自動推定ツールの開発に取り組んだ^[HKD_06]。

3-4. 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

地震・火山現象の理解・予測を災害の軽減につなげるための災害科学の確立を目標として、理学・工学・人文社会科学の研究者が連携して災害の発生要因を災害誘因と災害素因とに関連づけて解明する研究が実施された。また、社会における防災リテラシーの実態調査や災害軽減に効果的な知識体系要素の探求などを通して、地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解を醸成するための研究が実施された。

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

社会とのかかわりにおいて地震・火山噴火災害の発生機構を理解するためには、災害事象を、それが生じる場所や地域の歴史的・地理的特性と関連づけて分析することが重要である。安政江戸地震（1855年）に関する重要な史料として「安政大地震絵巻」（三康図書館所蔵）を取り上げ、昨年度検討した「江戸大地震之図」（東京大学史料編纂所所蔵）との比較によって、個々の絵が描写する場所や時間を詳細に検討し、地震の揺れに関する検討材料になりうる記述があることなど、絵巻の史料としての信頼性や可能性を明らかにした^[UTH_02]。津波は災害誘因としての場所限定性が強い。安政東海地震津波（1854年）の被災地である浜名湖周辺、特に、浜名湖南東岸と北東岸について、現存する寺社や歴史的建造物などの位置をもとに地理的位置の同定を行い、それぞれ「舞坂宿津波図」と「安政地震津波被害絵図」から街並みや古地形を復元するとともに浸水地点を判定した^[IRID05]。

近年の地震・津波災害についての研究も実施した。2011年東北沖地震（東日本大震災）を事例に、震災後における避難・土地利用・防災施設を組み合わせた総合的防災政策の政策効果を検証するため、被害から復興に至る地域社会の長期変動について調査した。三陸地域では、漁村の災害文化に対する過小評価と防災施設への依存、防潮堤計画と地域防災計画の分離、防災集団移転事業における避難道計画の不備などを指摘した。また仙台平野では、基幹産業である農業生産と防災集団移転中心の土地利用規制とのミスマッチ、長期にわたる広域的な交通障害による人口流出などによって生活基盤の脆弱化が進んでいることを明らかにした^[NGY_06]。土地利用計画と防災政策とのバランスは重要な政策的課題である。南海トラフ地震の発生が想定される和歌山県那智勝浦町を事例に事前復興と津波対策の取り組みについて調査し、想定される被害の大きさと対策とのギャップを指摘した^[HGY_02]。土地や住宅の問題は地域による差異が大きく、災害の軽減を図るためには、地域の実情を調査し、より効果的な対策を考える必要がある。富山県を事例に国勢調査の「世帯構造等基本集計」から住宅の保有構造（持ち家と借家）と建物構造（木造と非木造）を調べた結果、それぞれ全国に比して持ち家と木造の比率が圧倒的に高いことがわかった。富山県のような地方圏では、持ち家・木造住宅を想定したシステムを早急に整備する必要があることを指摘した^[TYM_03]。

防災教育における地震災害事例に関する研究成果の活用について、兵庫県を対象に調査

した結果、阪神・淡路大震災（1995年兵庫県南部地震）は、学校における防災教育が本格的に導入されるきっかけとなり、地震発生メカニズムや被害が兵庫県内の副読本すべてに掲載されているが、震災を経験した教員の高齢化により、被災経験を主題とした授業の実施機会が減少し、対照的に南海トラフ地震を主題とした教材利用が増えていることが明らかになった。一方、1925年北但大震災の事例は、主な被災地であった豊岡市城崎町の学校教育において現在も継続して活用されており、その要因として災害記憶の継承に対するコミュニティの役割が重要であることを指摘した^[HYG_01]。

（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

将来発生が懸念される地震・火山災害に着目し、社会における防災リテラシーの実態を調査した。また調査結果に基づき、社会が被害の発生を抑止、あるいは軽減する対策を考えるために必要な知識体系を明らかにすることを目指した。また、知識体系を明らかにする過程で、必要な知識要素を特定し、それらの要素を組み合わせることで、実践的な研修プログラムを構築した。さらに、研修プログラムを特定の地域で実装し、実効性を高めるためにその効果の検証も行った。

北海道稚内市での北海道大学の学生を対象とした避難実験から収集した避難移動履歴データを用いて、地震による津波と土砂災害との複合災害を想定して集団避難行動の空間分析を行った。その結果、津波のみの場合には避難時間に猶予が見られるが、複合災害の場合には時間的な猶予がほとんどなく、より迅速に避難を開始する必要性が明らかになった。また、参加者に避難実験結果をフィードバックした結果、特に避難行動速度と事前防災学習の重要性に関して参加者の意識に変化が見られ、津波からの避難を検討する際の基礎的な課題が明らかになった（図10）^[HKD_07]。

認知科学のアプローチから、南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域在住の成人から得られたデータを分析した。その結果、避難するか否かを判断する上で参考にする情報・知識は、津波の特性や被害の予測、避難所の利用可能性や避難生活の見通し、居住地の位置や海拔、自治体やマスメディアなどの情報源といったカテゴリーに整理することができた。さらに、避難判断の参考とする情報元として、メディアから発信されたものに絞った場合、発信者・発信ツール・発信内容の3つのカテゴリーの重要性が明らかになった。今後、これを元にメディアの災害情報が被害の発生抑止・軽減に資する過程とその個人差を明らかにする検証実験を行う^[IRID06]。

桜島は現在活動中の火山のうち人口50万以上の大都市に最も近接する火山であり、科学者と市民との共同によって観測から防災に至る一連の対応システムの構築が試みられている。2020年6月4日の噴火を受け、鹿児島市や気象庁と連携して火山防災勉強会を開催し、噴石飛散や噴火警戒レベルなどについて住民の認知度を調査した。その結果、桜島火山の噴火警戒レベルの意味や、噴石の飛散距離によって噴火警戒レベルが上がることに対する認知度はかなり高いものの、噴火警戒レベル5の基準である噴石の飛散距離はほとんど知ら

れておらず、被害に直結する具体的な数値について認知度を上げる必要があることを指摘した^[DPRI13]。

一方、2014年に深刻な御嶽山噴火被害を経験した長野県木曾地域は、観光地に位置しながらも超過疎の問題を抱えており、大学と自治体とが共同して、地元地域の火山防災力の向上を図る担い手として火山マイスターの制度を整備してきた。本年度は、引き続き活動記録を蓄積するとともに、火山マイスターに対するインタビュー調査と結果の予察的な質的分析を行った。そこで抽出された課題は、マイスター自身の知識レベルの問題というよりも、制度設計や具体的な運営、活動を取り巻く外的環境にかかわることが明らかになった^[NGY_06]。

近年大規模な地震や火山噴火が発生した熊本県阿蘇地域では、研究者と国や地元行政機関などが連携して、地震・火山観測の準リアルタイムデータ表示の設置とともに、ジオパークガイドの養成を通して防災リテラシーの向上を図る方策を展開してきた。とりわけ、阿蘇火山博物館を訪れる修学旅行生を対象としたガイドプログラム(防災教育プログラム)作成のため、熊本県観光統計表の教育旅行来熊者発地リストから上位都道府県を抽出し、そのニーズを把握するとともに、対象都道府県の防災マップの収集を開始した。また、都道府県自治体職員を主対象とした火山防災特別セミナーにおいて「高リスク・小規模噴火との共存」にかかわる講習を実践し、講習資料を整備した^[KUS_03]。

防災リテラシー向上のための研修プログラムの開発については、試行段階において、研修の対象や方法を明確化することが重要であり、本年度は、実務者(行政担当)を対象に、地震・火山研究者が「理解してほしいこと」に基づく座学部分の研修プログラムを試行的に作成した。具体的には、研修項目ごとに学習目標を検討、地震研究者による研修スライドと指導上の留意点を作成、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、Web環境を活用したオンライン研修・オンデマンド研修・リアルタイム研修・ハイブリッド型研修、また構成要素として座学・動画・演習等の組み合わせといった研修方法について、自治体の業務手順に沿った研修プログラムにおいて検討した^[NGT_02]。

また、オープンサイエンス手法(市民参画型科学、市民参画型データ収集・管理)を、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向上、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、自然災害に関する歴史資料の「みんなで翻刻」プロジェクト、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試行といった4つの取り組みに具体的に導入し、防災リテラシーの向上に対する可能性を検討した。とりわけ市民参加型であるがゆえに、感染症拡大の状況下において、研究者と市民、また市民同士の対面コミュニケーションに限界を抱える一方で、オンラインツールを用いた手法の可能性も明らかになった^[DPRI14]。

複合災害を想定した避難行動実験

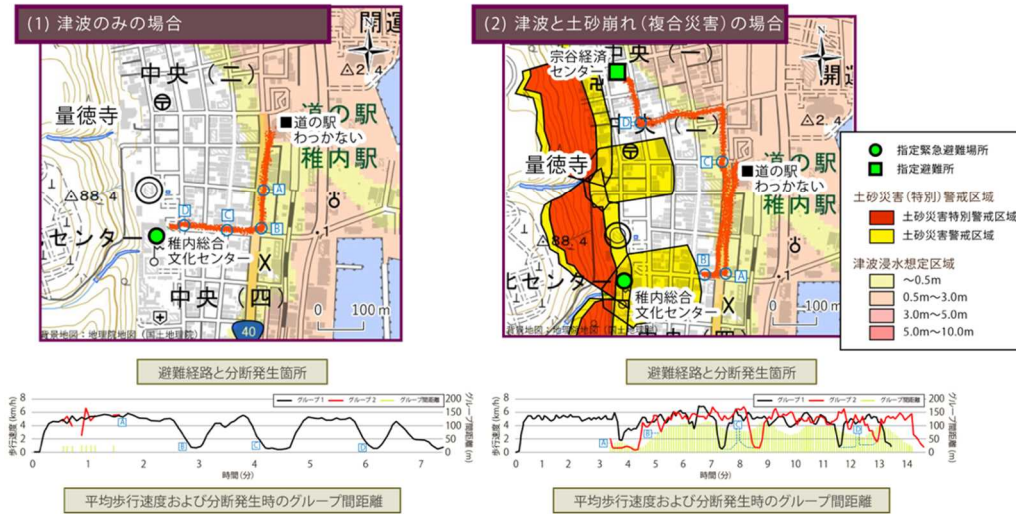


図 10. 複合災害を想定した避難行動実験

北海道稚内市を対象地域として、地震による津波と土砂災害との複合災害を想定した避難行動実験の結果。地図上の赤点があらかじめ指定された避難経路を示し、グラフは平均歩行速度及び分断発生時のグループ間距離を示している。津波のみを想定した場合、道の駅わっかないから避難場所（地図中の緑丸）へ8分以内に移動が完了し、津波到達までの時間的余裕がある（左の地図とグラフ）。一方、地震により土砂崩れが発生し、当初目標としていた避難場所へ移動できないことを想定した場合、歩行速度は津波のみの場合と大きくは変わらず、A地点で二つのグループに分かれ、グループ間の差はB地点でさらに広がった。そして、その差は別の避難所（地図中の緑四角）へ移動するまでに縮まらなかった。最終的に、遅い方のグループの避難完了までに14分以上を要した。

3-5. 研究を推進するための体制の整備

本研究計画で得られる研究成果を災害の軽減に効果的に役立てられるように、参加機関で緊密な情報共有を図った。また、基盤的な観測網の維持・整備を行うとともに、観測データや研究成果をデータベース化し、これらを共有することにより効率的に研究を進めた。同時に、観測技術の開発及び高度化に取り組んだ。さらに、学際的に研究を進めるため関連分野との連携を強化するとともに、地震・火山噴火現象や災害に関する知見を広げるために国際的な共同研究を推進した。

(1) 推進体制の整備

地震学・火山学の成果を災害軽減に活用する観点から、地震学と火山学を中核とし、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの分野を含む、総合的な学際研究として本研究計画を推進している。また、地震本部や行政機関等と連携し、基礎研究の成果を発展させ、社会実装につながることを目指している。測地学分科会*は、計画の進捗状況を把握し行政や社会のニーズを踏まえた計画の推進につとめた。地震・火山噴火予知研究協議会は、大学、行政機関、国立研究開発法人等の委員から構成され、密接に情報交換をしながら計画を推進している。協議会には企画部*が設置され、専任教員が研究の進捗状況の把握や研究者間の連絡調整に従事している。企画部内の戦略室では、計画全体の方向性について検討し、研究成果の取りまとめを行っている。協議会には研究内容で分類した8つの計画推進部会を設置し、すべての研究課題はいずれかの計画推進部会に所属し、情報交換を行いながら研究を進めている。年度末には協議会主催で成果報告シンポジウムを開催し、計画全体の進捗状況を確認するとともに、情報交換を行った。今年度は、新型コロナウイルス感染症の観測研究計画への影響を調査し、計画の変更等の適切な対応を行った。また、地震本部との技術的・制度的な連携強化の一貫として、地震本部が「当面10年間に取り組むべき地震調査研究」の一つとしている「内陸で発生する地震の長期予測手法の高度化」に関するワークショップを2020年12月に開催した。

地震予知連絡会*は、モニタリング手法の高度化に資する役割を担うため、年4回定期的に会議を開催し、地震活動・地殻変動などに関するモニタリング結果の情報交換を行い、関係各機関の情報の共有を行っている。

火山噴火予知連絡会*は、定例会を2度開催するとともに、4月に口永良部島部会を設置したほか、霧島山部会と草津白根山部会でそれぞれの火山の活動を検討した^[JMA_08]。

・ 拠点間連携共同研究

災害や防災に関連する研究者と協働して計画を推進するためには、「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所と、「自然災害に関する総合防災学の

共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所とが連携して計画を進めることが有効である。このため、前研究計画から両研究所が各分野で連携し、共同研究を進めている。両拠点の研究者が中核となってテーマを決め、それを実現するための研究について全国の研究者からの提案・参画を募集して全国規模の共同研究を進める「重点推進研究」と、ボトムアップ研究を公募する「一般課題型研究」を実施している。

重点推進研究では「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^[CTOC01]」を総括研究として実施し、「ばらつきのある被害リスク評価をふまえた防災計画の検討^[CTOC02]」, 「定常的地震活動の震源および地震波速度構造の精度向上による地震波動場推定の高度化^[CTOC03]」を特定型として進めた。一般課題型研究では、地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化の研究, 即時予測手法の高度化の研究, および災害誘因予測を災害情報につなげる研究を実施した。

(2) 分野横断で取り組む総合的研究を推進する体制

以下の5項目については、それらが発生した場合の社会への影響の重大さに鑑み、研究分野横断による総合的な研究として実施している。

・ 南海トラフ沿いの巨大地震

地震・測地観測網で得られたプレート間固着やスロー地震の知見に基づき、南海トラフ沿いの巨大地震の広帯域震源モデルを構築する。その上で地震波および津波の伝播モデルに基づき、西南日本地域の強震動および津波浸水モデルを提示することを目的とする。今年度は、防災科学技術研究所により提案された、応力分布モデルに基づく地震発生シナリオの作成手法^[NIED03]を検討し、現状の測地観測から得られた知見を反映した震源モデル・シナリオの設定の可能性を議論した。また、スロー地震のモニタリング結果に基づく地震シナリオの高度化についても検討し、海底地形またはプレート境界面形状や固着率との比較の重要性を指摘した。

・ 首都直下地震

首都直下地震は、一旦発生すれば首都機能や我が国の経済活動全体に深刻なダメージを与える可能性が高い。想定される多様な震源について、発生メカニズムや発生可能性を評価できるようになることを目標とする。新潟大学は、『里正日誌』所収「安政二卯年十月二日大地震略記」に基づき、安政2年の江戸地震の被害の境界地域を検討した^[NGT_01]。東京大学地震研究所は、現代の地震観測で得られる知見を用いて、安政江戸地震の震度を検証および定量化する狙いで、根津周辺における稠密観測を開始した^[ERI_15]。東京大学情報学環は、住民の災害に関する意識調査分析（ドラマ『パラレル東京』や関連するNHKスペシャルを軸とした、首都直下地震や災害に関する調査の解析）を実施した^[IIL_01]。そのほか、首都直下地

震に関連する課題の研究者による意見交換会をオンラインで行った。

・ 千島海溝沿いの巨大地震

千島海溝沿いでは、津波堆積物の調査により、2011年東北沖地震と類似した巨大地震が繰り返し発生していることが明らかにされている。政府の地震本部はM8.8程度以上の超巨大地震の発生が切迫している可能性が高いと評価しており、津波や地震動による大きな被害が予想される。

千島海溝沿いで発生する巨大地震による災害の軽減を目指し、本年度は、十勝・根室沖のS-net観測点のデータを用いることにより、地震発生後数分以内に津波浸水の予測が可能な即時津波浸水予測手法を開発した^[HKD_09]。根室沖の陸側プレート前縁部の地震波トモグラフィ解析から低V_p堆積物ウェッジ構造を求め、その構造が2011年東北沖地震時に海溝軸に至る大滑りを起こした宮城沖のものと類似していることを指摘した。千島海溝での超巨大地震発生時にも、海溝軸まで滑りが到達する可能性がある^[ERI_05]。根室・釧路管内の縄文以降の遺跡報告を網羅的に調査した結果、過去1万年に最大8回の液状化痕跡が認められた。この回数は、津波堆積物から推定されているイベント数の半分程度である^[HKD_09]。液状化痕跡と津波堆積物の年代を比較することで、地震動と津波規模の関連性が明らかになる可能性がある。

・ 桜島大規模火山噴火

活発な噴火活動を60年以上続け、今後、大規模噴火の発生が予想される桜島を対象に、各研究項目間で緊密な連携と成果の共有を図り、住民避難を視野に入れた総合的研究を推進している。

マグマの動きとマグマ供給系の理解に関しては、2015年8月15日に発生した開口性のマグマ貫入イベントと同時に発生した群発地震の関係を調べた。また、従来は球状圧力源の組み合わせで説明されてきた桜島のマグマ供給系モデルに開口性割れ目を加えたモデルの検討を進めた^[DPRI07]。大規模噴火の発生予測に資するため、小型センサーを用いて二酸化炭素濃度を測定するためのパラメータの検討を進めた^[TIT_02]。マグマの貫入速度と噴火様式に関しては、マグマの貫入速度が小さく、非爆発的な噴火になった事例としてインドネシアのシナブン火山とメラピ火山の噴火プロセスを明らかにし、桜島におけるマグマの貫入速度と噴火様式との比較をおこなった^[DPRI06]。

大規模噴火発生時の噴火活動推移把握のための観測技術として、衛星やドローンを用いた観測手法の開発^[ERI_07, JMA_03]や2012年7月から新たに日本国内で利用可能となった920 MHz帯を用いた地震データ伝送手法の開発^[THK_13]、遠望観測の強化^[JMA_12]、SO₂の簡易トラバース測定^[UTS_06]を継続した。

近世末の遺構発掘による降下火山灰分布の調査を行い、降灰分布は気象条件の影響を強く受けることが明らかになり^[NAB_01]、今後のハザード予測には風速場の時間発展などを組み

込むことが重要であることが分かった。2009年以降の火砕流発生事例の解析から、噴火活動の後半の脱ガスが進んだ状態で火砕流が発生しやすいことが判った^[DPRI11]。降灰の土石流や洪水発生への影響に関し、降灰によるクラストが斜面を覆うと表面流量が増えることを室内実験により明らかにした^[DPRI12]。

防災リテラシー向上に関しては、2020年6月4日に発生し、火山岩塊が居住地に達した噴火に関するアンケートを行い、噴火警戒レベルの認知度は高いが警戒を要する範囲の認識が不十分であることが判った^[DPRI13]。また、鹿児島市内への大量降灰災害に市街地側住民の事前避難を実現することにつながる研究に着手した^[CTOC16]。

・ 高リスク小規模火山噴火

噴気地帯や山頂火口近傍には、多くの観光客や登山客が訪れるため、小規模な噴火でも人的・物的被害が生ずる場合がある。また、小規模な噴火は発生頻度が相対的に高いことから、観光客や登山客等の災害リスクの低減という観点から重要な研究対象である。

災害情報の発信に関する研究として、VUI（火山活発化指数）を十勝岳について試算し、阿蘇中岳についてもVUI算出基準の検討を開始した^[HKD_04, KUS_02]。また、災害情報の発信に関する研究の問題点を整理するため、a)情報を発信すべき対象、b)現在使われている防災資料の内容、c)噴火警戒レベルと小規模噴火、d)モニタリングは誰が行うか、の4項目について検討を進めた。

小規模噴火の発生する場の把握に関しては、白根火砕丘群形成史の解明のため地質図の試作と各火砕丘の活動年代推定を実施した^[TYM_01]。また、草津白根火山において広帯域MT観測による3次元比抵抗構造モデルの構築を行うとともに、御嶽山で比抵抗構造モデル推定のための試験観測を実施した^[TIT_03]。

火山の活動把握に関しては、白根火砕丘周辺における多項目観測の継続^[TIT_03]、伊豆大島における人工電流源による地下比抵抗連続モニタリングの継続^[TIT_03]、弥陀ヶ原における水準測量、GPS繰り返し観測、地震観測、ドローンによる熱観測^[TYM_02]、を行った。また、北海道駒ヶ岳・有珠・樽前・十勝・雌阿寒・吾妻山・伊豆大島・焼岳・御嶽・阿蘇・九重においても各種観測を継続している^[KUS_02]。基盤的火山観測網（V-net）等のJVDN*システムに集約されたデータの活用も進めている^[NIED01]。また、多数の登山客が訪れる富士山において全磁力連続観測を実施した^[GSI_06]。小規模火山噴火に関する研究を推進するため、活火山の常時監視体制の継続や、地震計や監視カメラの増強を進めている^[JMA_12]。

噴火の予測に関する研究として、課題番号THK_11との合同研究集会を実施し、意見交換を行った。

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

防災科学技術研究所は、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、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行った^[NIED_05]。

国土地理院は、全国に展開されたGNSS連続観測システム (GEONET*)を維持するとともに国際GNSS事業 (IGS)へ参画し、観測データの提供を行った。また、西之島では、火山活動が活発化した2019年12月以降、溶岩*等によるとみられる地形や海岸線の変化の様子を検出した^[GSI_04, GSI_07]。

気象庁は地震観測網や地殻変動観測網などの観測基盤の維持を継続し、関係機関の地震観測データを一元的処理した結果を公開し、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^[JMA_09]。また、草津白根山に埋設型の地震計・傾斜計及び空振計を整備した^[JMA_12]。

海上保安庁は、海域火山の定期巡回監視観測を実施するとともに、西之島において監視体制を強化した^[JCG_04]。

大学は、観測データ流通網JDxnet*の安定的な運用を継続し、また、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開始した^[ERI_19]。高知大学は、地震動観測記録のモニタリングを準リアルタイムで行うシステムを構築した^[KOC_01]。

イ. 観測・解析技術の開発

東京大学地震研究所は、三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムの予備の光ファイバーケーブルを活用して、分散型音響センシングによる構造調査を実施した^[ERI_22]。東北大学は、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、動作確認を行った^[THK_13]。情報通信研究機構は、次世代航空機搭載SAR*の開発のため、機械学習をベースにした土地被覆分類に関する研究などを進めた^[NICT01]。

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

北海道大学は、新たに気象庁のひずみ計観測網の25観測点141チャンネルのデータ流通及び収集、産業技術総合研究所の超伝導重力計データのオフライン収録を開始した^[HKD_08]。東京大学地震研究所は、次世代の対話検出処理系システムについて試作を開始した^[ERI_24]。

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

気象庁は、日本海溝海底地震津波観測網 (S-net)の観測データを一元化処理業務へ取り組むためのシステム等の準備を進め、震源決定のルーチン業務を2020年9月から開始した(図11)^[JMA_14]。産業技術総合研究所は、支笏、洞爺、濁川、大山、十和田、阿蘇、鬼界、

屈斜路火山における大規模噴火の前駆活動と噴火推移をとりまとめ、その成果の一部をGSJ研究資料集として公開した^[AIST11]。国土地理院は、浅間山の火山土地条件調査を実施するとともに、十勝岳などの火山基本図及び数値データを整備した^[GSI_10, GSI_09]。地震・火山噴火予知研究協議会では、戦略室が主導して、研究成果共有サーバ (evrss) に、日本列島周辺域のプレート境界面分布、日記史料有感データベース、2003年十勝沖地震臨時GPS観測データなどへのリンク登録を行なった^[ERI_25]。

S-net導入前後の震源分布の比較

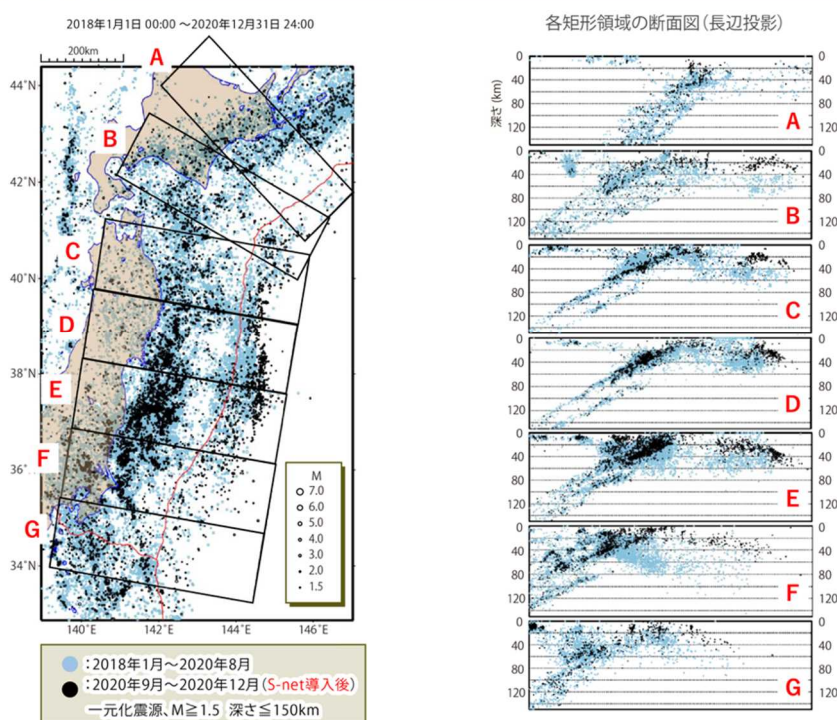


図 11. S-net 導入前後の震源分布の比較

気象庁は、2020年9月から、S-netの地震観測データを取り込んだ一元化震源処理のルーチン業務を開始した。東北日本の震源分布について、S-netのデータ導入前(2018年1月から2020年8月まで、薄青)とS-net導入後(2020年9月から2020年12月まで、黒)を比較すると、S-netデータを用いた震源決定では震源の深さが系統的に浅くなる傾向があることがわかった。S-net導入により海域の地震観測点が増えたことにより、従来よりも精度よく震源の推定ができるようになったと考えられる。

(4) 関連研究分野との連携強化

理学，工学，人文・社会科学などの関連研究分野間で連携し，地震・火山研究の成果を災害軽減に役立てる。低頻度大規模地震・火山噴火現象の具体的な規模，発生頻度，発生機構等を明らかにするために，近代観測以前の地震・火山現象の解明を目指し，引き続き歴史学・考古学と連携して計画を進めた。また，進展の著しい数理学，情報科学，計算機・計算科学等の研究分野の成果も取り入れつつ研究を進めた。

(5) 国際共同研究・国際協力

新型コロナウイルス感染拡大の影響を受け，海外への渡航，海外からの研究者の受け入れ等が厳しく制限されている中でも，オンラインを活用するなど，制限下でも可能な観測研究を実施した。

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，地震発生機構の解明のための国際共同研究を進めている。今年度は，臨時観測網の2013年から2018年までのデータを用いて，2016年カイコウラ地震震源域のS波速度異方性*構造解析を行った^[THK_01]。2020年11月にニュージーランドの調査観測船Tangaroaを用いて，ヒ克蘭ギ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，さらにニュージーランドの海底圧力計10台による海底観測網を設置した^[ERI_08]。コロナ禍で海外渡航が大幅に制限される中，日本人研究者は最小限の3人が入国を許可された。

プレート沈み込み帯周辺の国際共同研究においては，メキシコ・ゲレロ州沖合で回収された地震計記録の解析，微小地震活動および低周波微動の分布と海底地形との比較から，ゲレロ空白域内の浅部プレート境界の一部で，通常の地震や低周波微動のいずれも発生しない領域が存在することが分かった。プレート境界面上の窪みに蓄積する海洋性堆積物がゲレロ地震空白域の要因となっている可能性を示唆した^[DPR101]。また，アラスカ南部地域の地殻および上部マントルの地震波速度とポアソン比の3次元微細構造解析から，2018年11月30日アンカレッジ地震(Mw7.1)と1964年アラスカ巨大地震の震源域の構造と発生メカニズムについて，太平洋スラブの脱水と震源域の構造不均質の関係を指摘した^[THK_05]。

フランスや米国との共同研究では，地震動のデータを使って詳細な地下構造を明らかにした。グルノーブル盆地で得られた速度構造は，地質境界の約2.5倍の深さのところで地震基盤に達することを明らかにした。インペリアルバレーでは，盆地全体の構造を明らかにするために，強震動波形の長周期域の水平上下スペクトル比が重要な情報を持つことが示された^[CTOC05]。

インドネシアの火山を対象とした国際共同研究では，2020年8月に噴火したシナブン火山と2021年1月に噴火したメラピ火山について水蒸気噴火からマグマ噴火に至るまでの10年を超える期間における活動推移を，主に地震活動と地盤変動に着目して整理し，メラピ火山におけるマグマの貫入速度と噴火規模および様式との関係を定量的に明らかにした

[DPRI06]。

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 国際共同観測を 48 回実施した^[GSI_07]。石岡局の水平速度は約 22.5 mm/年 (方位角 134° 方向) であった。これは、通常のプレート運動の成分に 2011 年東北沖地震の余効変動を含んでいるものと考えられる。

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^[JCG 01]。

(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

社会との共通理解の醸成を図るために、地震・火山噴火現象及び地震・火山災害に関するアウトリーチ活動を積極的、かつ組織的に展開した。

地震・火山噴火予知研究協議会は、本研究計画や、これを推進するための組織である協議会を紹介するためのパンフレットを作成し、広報活動に活用した。また、地震研究所広報アウトリーチ室と共同で、報道関係者等を対象とする地震・火山噴火予知研究のサイエンスカフェを開催するなど、地震・火山噴火現象の予知研究や研究活動の現状を理解してもらうための取組を継続的に行っている。

大学は、地震・火山現象の基礎的な理解を深めてもらうため、小中高生、住民、行政等の防災担当者、報道関係者等を対象とした公開講義、セミナー、ラボツアーなどを行った。

気象庁は、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。

(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

現地での防災対応に携わる都道府県自治体職員を主対象とした火山防災特別セミナーにおいて「高リスク・小規模噴火との共存」にかかわる講習を实践し、講習資料を整備した^[KUS_03]。また、実務者 (行政担当) を対象に、防災リテラシー向上のための研修プログラムの開発を進めており、地震・火山研究者が「理解してほしいこと」に基づく座学部分の研修プログラムを試行的に作成した^[NGT_02]。

大学や研究機関は、それぞれにおいて観測研究に携わる研究者のキャリアパスを確保するための若手教員のポストの確保に務めている。地震・火山噴火予知研究協議会でも令和 2 年度に 1 名の特任研究員を雇用し、人材育成の一端を担っている。また、火山分野においては、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト*において、本研究計画にも参画する大学や研究機関が、火山研究者を志す全国の大学院生に実習や講義などを行い、若手育成に取り組んだ。

4. まとめ

「災害軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」の2年度目となる令和2年度は、新型コロナウイルス感染拡大の影響を受け、国内外での人流に大きな制限が課せられる中で、観測研究を中心とした本研究計画にも少なからず影響があった。しかし、テレワークやオンライン会議を取り入れた新しい生活スタイルが浸透し、逆に研究者間の距離が縮まった側面も見られ、これまでの観測データの蓄積と広い分野の研究者の連携により、5つの大項目・3つの重点研究・5つの総合研究で多くの成果が得られた。

最近の海域での地震・地殻変動観測技術の向上と体制強化の成果は大きく、沈み込み帯で発生する多様な地震現象の解明が進んだ。とくに、微弱なシグナルから多くのスロー地震や繰り返し地震が精度良く検出されるようになり、プレート境界面の摩擦特性分布やテクトニクスとの関係、海溝型巨大地震の発生との関係などが様々な角度から議論できるようになった。内陸域には多項目の稠密観測網が整備され、内陸地震の発生に間隙流体が重要な役割を果たすことを示す研究成果が多く上げられた。一方、プレート境界やスラブ内の巨大地震の発生にも間隙流体の関与が報告されており、大変興味深い。これらの研究成果を背景に、震源モデルの高度化は現実味を帯び始め、その成果に基づく強震動・津波災害の事前評価や誘因予測は確実に前進しているといえよう。

重点研究の1つである「地震発生の新たな長期予測」については、新しく設置されたワーキンググループの下で、測地・地震活動データを活用して、地震発生の長期予測に役立つ新たな手法の試行が始まった。また、「火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測」においては、火山における多項目観測データの解析結果や物質科学的データの分析結果の整理がさらに進むとともに、噴火事象の分岐点遷移を表すパラメータ間の相互関係が徐々に明らかにされるなど、着実な進展がみられている。

防災リテラシー向上を目指した研究では、近年の災害を事例にした、災害復興、防災対策、防災教育などの社会対応に関する分析が行なわれ、今後に向けた課題が検討され始めている。また、社会における防災リテラシーの実態やニーズに関する調査に基づいてリテラシー向上のために必要とされる知識要素を探り、防災減災でのキーパーソンとなる実務者や有志市民を対象とした教材や研修プログラムの開発に繋げるような取組も進展している。一方、直接的な研修とは異なり、オープンサイエンスの手法なども活用した、市民が地震・火山・津波災害に関する研究に参加・参画するという取組も進められている。

5つの総合研究の1つである「千島海溝沿いの巨大地震」は、本研究計画から新たにスタートしたものであるが、観測に基づく震源モデルの提示から即時災害予測、地域防災までの道筋が見え始め、理学・工学・人文・社会科学等の関連研究分野の連携が功を奏している。

「南海トラフ沿いの巨大地震」では、地殻変動観測に基づく震源モデルを作成し、エネルギーバランスを制約条件に現実的なシナリオを提示する新たな研究が進み、過去の観測記録・歴史記録に頼っていた地震シナリオの構築から前進した。今後大規模噴火の発生が予想さ

れる桜島を対象にした「桜島大規模火山噴火」では、近世末の遺構発掘調査の結果から今後のハザード評価を深化させる必要性が指摘されるなど、多分野間の連携がさらに推進されている。

令和2年度は、2011年東北沖地震の発生から十年目の節目でもあった。年度末には、福島県沖と宮城県沖でM7クラスの地震が発生し、これらは超巨大地震による応力変化を反映したものであると考えられる。大規模地震・火山噴火は、ひとたび発生すれば、我々の生活に甚大な被害を及ぼす。長い時間スケールでの地球の応答を踏まえて、現象の解明から発生予測、そして災害軽減に貢献する観測研究を継続することの意義は確かに大きい。

用語解説

アウターライズ地震

海溝で陸域下に沈み込もうとする海洋プレートがたわむことによって、海溝軸より海側（外側）近傍に形成される海底の高まりをアウターライズ域といい、アウターライズ域で発生する地震をアウターライズ地震と呼ぶ。

インバージョン

インバージョン解析（逆解析）の略称。結果から原因を推定する数学的解析法のことをいう。推定したい事象（原因）をモデル変数で表現し、物理モデルを介して事象と観測データ（結果）と結びつけ、観測データを合理的に説明できるモデル変数を推定する。

液状化

地震による振動により、地盤が液体状になる現象。地上の建造物が沈下や傾斜したり、地中の水道管などが浮き上がったりする。

エクロジャイト

沈み込んだ海洋プレート表層の玄武岩が、高温高压下で変成してできた密度の高い岩石。柘榴（ザクロ）石と輝石を主成分とするので、榴輝岩とも呼ばれる。

応力（場）

岩盤等の物体内部に考えた仮想的な面に作用する、単位面積当たりの力。応力の単位は Pa（パスカル）。面に対して垂直な方向の力を垂直応力または法線応力、面に平行な力をせん断応力とよぶ。物体内部の応力の分布を応力場という。震源域の応力が岩盤または断層の強度に達したときに地震が発生すると考えられている。

応力降下量

地震発生時の断層滑りにより、断層面にかかるせん断応力が変化した量のこと。地震発生前に比べて低下した場合を正にとる。

海底地殻変動観測

海底の地殻変動を観測すること。海底地殻変動観測には以下のような手法がある。

- ・GNSS-音響測距結合方式: 海上の船舶やブイの位置を GNSS によって精密に決定し、それらと海底に設置された音響トランスポンダー（基準局）との距離を、音波を用いて測定することにより、基準局の位置を推定する手法。
- ・海底間音響測距: 音波を用いて海底の2点間の距離を測定することにより、地殻変動(相対変位)を連続的に観測する手法。
- ・海底圧力観測: 海底で圧力変化を観測し、上下方向の変位を算出する手法。
- ・孔内観測: 掘削された孔（ボアホール）の内部において、長期間にわたって地震動やひずみ・傾斜などを観測する手法。

化学組成

ある物質を構成する元素や化合物などの化学成分が、それぞれどのくらいの比率で含まれているかを示したもの。

学術情報ネットワーク（SINET）

日本全国の大学・研究機関等の学術情報基盤として、国立情報学研究所が構築、運用している情報通信ネットワーク。

火砕丘

繰り返し小規模な噴火を繰り返した火口のまわりに火山砕屑物が積もってできた円錐形の地形。

火砕流

高温の火山噴出物が、高温の火山ガスや取り込んだ空気とともに高速で火山体斜面を流下する現象。噴火によって火口から噴出した噴煙柱の崩壊や、溶岩ドームの崩落により発生する。火口から長距離にわたって流下して大きな被害を及ぼす。

火山ガス

地下のマグマに溶けている揮発性成分が、圧力低下などにより発泡して地表に放出されたもの。火山ガスの主成分は水蒸気（ H_2O ）であり、その他に、二酸化炭素（ CO_2 ）、二酸化硫黄（ SO_2 ）、硫化水素（ H_2S ）、塩化水素（ HCl ）、フッ化水素（ HF ）、水素（ H_2 ）などの成分が含まれる。

火山活発化指数

unrest の項を参照。

火山性地震

火山活動に伴って起こる地震。火山内部の応力場や流体の状態を反映していると考えられている。

火山灰

火山噴火により噴出した固体のうち、直径 2 mm 未満の細かい破片。

火山噴火予知連絡会

火山噴火予知計画（文部省測地学審議会（現文部科学省科学技術・学術審議会）の建議）により、昭和 49 年に設置された機関（事務局は気象庁）。関係機関の研究及び業務に関する成果及び情報の交換、火山現象についての総合的判断を行うこと等を目的とする。年に 2 回開催する定例会では全国の火山活動について総合的に検討を行う。火山噴火などの異常時には、臨時に開催し、火山活動について検討を行う。



<https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/CCPVE.html>

活断層

地質時代でいう第四紀後期（数十万年前～現在）に繰り返し地震を発生させ、地表近傍まで食い違い変位を生じさせてきた断層。今後も同様の地震を発生させると考えられる。

火道

地下のマグマ溜まりから地表へ至るまでのマグマの上昇経路のこと。

カルデラ（噴火）

カルデラは、大規模な噴火の後に生じる、輪郭が円形またはそれに近い大きな陥没地形のこと。カルデラを形成する噴火様式をカルデラ噴火という。

間隙流体圧

土や岩石中の粒子間のすきま（間隙）に入り込んだ流体（多くの場合は水）の圧力。間隙水圧ともいう。

完新世

地質時代の区分のひとつで、最終氷期が終わった約1万年前から現在までを指す。

企画部

建議に基づく研究全体を円滑に実施するため、研究計画の企画、立案、調整を行う、地震・火山噴火予知研究協議会の下に設けられた組織。

逆断層

断層面に沿って主として上下方向にずれた断層のうち、浅い側（上盤）の岩盤がずり上がる場合を逆断層という。

強震記録

強震動の項を参照。

強震動

被害を及ぼすような強い地震動（揺れ）のこと。強震動を振り切れることなく記録した波形データを強震記録という。

クラスタ

一般には集団や群れのことであるが、ここでは地震が、ある特定の場所、あるいは、時刻に集中して発生している状態、またはそのような地震の集合体のことを意味する。ある基準により、クラスタを形成していると判断される地震群を地震カタログから取り除く操作をデクラスタリングという。

クラスト

土層の表面が硬化して形成される透水性の低い皮膜のこと。火山灰の表層では石膏成分（硫酸カルシウム+水）により形成されることが多い。

繰り返し地震

発生場所（震源）、発震機構解、マグニチュードがほぼ同じで、概ね一定の間隔で繰り返し発生している地震のこと。

クーロン応力変化（ Δ CFS）

ある断層に作用するせん断応力と、その断層の摩擦係数と法線応力の積で表現される断層強度（クーロンの破壊規準）の差をクーロン破壊応力（Coulomb

Failure Stress, CFS) といい、その断層がどの程度破壊されやすい状態にあるのかを表す指標のひとつである。クーロン応力変化 (Δ CFS) は、周辺で発生した地震等の影響による、この指標の変化であり、 Δ CFS が正のとき、断層がより破壊されやすくなると考えられる。

群発地震

本震や余震という区別ができず、ある期間に比較的狭い地域で集中的に発生する一連の地震。

傾斜計

地表面の勾配（傾き）の変化を測定する計器。

航空機搭載 SAR

SAR の項を参照。

固着率

プレート境界断層に沿ったプレート相対運動の累積変位のうち、定常的な断層滑りで解消されない累積変位の割合。

災害素因

災害誘因を受けた際に生じる被害・損失の規模や様態を左右する、地形・地盤などの自然環境の脆弱性（自然素因）や、構造物・人間社会の脆弱性（社会素因）のこと。

災害誘因

災害をもたらす原因（加害力、外力）のこと。英語ではハザード (hazard) という。地震や火山噴火による災害は災害誘因である地震動、津波、火山灰や溶岩の噴出などの外力が災害素因に作用することで引き起こされる。

サイト特性

増幅特性の項を参照。

サロゲートモデル

ある現象を表現する数理モデルを構成する数式に含まれるパラメータの値を適切に設定（最適化）するためには、試行計算を繰り返し、その結果が、実際に起きた現象（観測データ）と一致するように調整する必要がある。し

かし、数式が複雑であったり、パラメータ数が膨大であったりすると、このための計算コストが非常に高くなり、現象の定量的な理解の妨げとなることがある。そこで、少数の試行計算の結果を学習データとした機械学習によって、パラメータの最適化を行う手法が提案されている。この手法をサロゲートモデル、あるいは代理モデルという。

事象系統樹

時間と共に進行する一連の事象（イベント）を網羅的に列挙し、それら相互の関係と時間発展（事象分岐）を樹形図（イベントツリー）として整理したもの。それぞれの分岐には、地質学的情報、観測データ、理論などに基づいて確率が付与されることもある。火山活動に関して作成されたものを噴火事象系統樹という。

地震・火山噴火予知研究協議会

科学技術・学術審議会（測地学分科会）による建議に基づく地震及び火山噴火の観測研究に関して、関係機関の連携を緊密にして観測研究計画を協議し、研究の有効な推進を図ることを目的として東京大学地震研究所に設置されている組織。予知協と略称されることもある。

<https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/>



地震カタログ

地震の発生時刻や震源、規模（マグニチュード）などの情報をまとめたデータベースのこと。

地震性滑り

地震波の放射を伴う断層滑り。顕著な地震波の放射を伴わない断層滑りを非地震性滑りと呼ぶ。

地震調査研究推進本部

地震調査研究推進本部は行政施策に直結すべき地震に関する調査研究の責任体制を明らかにし、これを政府として一元的に推進するため、地震防災対策特別措置法に基づき政府の特別の機関として 1995 年 7 月に総理府（現在の所管は文部科学省）に設置された。地震調査委員会は、地震調査研究推進本部の下に設置され、関係行政機関（気象庁、国土地理院など）や大学等の調査結果を収集、整理、分析し、



これに基づき地震活動に関して総合的な評価を行う。地震本部と略称されることもある。<https://www.jishin.go.jp/>

地震動の即時予測

地震の発生直後に、地震の揺れを感知した地震計のデータを用いて、まだ揺れの到達していない場所での地震動を可能な限り素早く予測する技術のこと。よく知られているものとしては、気象庁で運用されている「緊急地震速報」がある。

地震波干渉法

2つの観測点で記録された地動の波形を比較することで、それらの間を伝わる地震波を抽出する手法。地震探査と違い、人工震源を使わずに地下構造を探査することができる。

地震発生層

地殻のうち地震の発生する深さの範囲。地殻深部になると高温になり、地震が発生しにくくなるため、場所により地下の温度が異なると、地震発生層の厚さも異なる。

地震波トモグラフィー

多数の地震計で観測された、多数の地震からの地震波の到着時刻や振幅から、地球内部の状態（地震波が伝わる速さや伝わりやすさの分布）を推定する手法。また、この解析によって推定された地球内部の状態分布図を指すこともある。一般に、高温あるいは、多くの流体または亀裂を含んでいる岩盤では地震波は伝わりにくく（減衰が大きい）、伝わる速さも遅くなると考えられている。

地震予知連絡会

地震予知の実用化を促進する旨の閣議了解（昭和43年5月）及び測地学審議会建議（昭和43年7月）に基づいて、地震予知に関する調査・観測・研究結果等の情報の交換とそれらに基づく学術的な検討を行うため、昭和44年4月に発足した組織。国土地理院が事務局を務める。<https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/>



地すべり

斜面の一部あるいは全部が地下水等の影響と重力によって移動する現象。

次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト

平成 26 年の御嶽山の噴火等を踏まえ、火山災害の軽減に資する火山研究の推進、広く社会で活躍する火山研究人材の裾野を拡大するとともに、火山に関する広範な知識と高度な技能を有する火山研究者となる素養のある人材を育成することを目的として、文部科学省が平成 28 年度から実施している 10 か年（予定）のプロジェクト。
<http://www.kazan-pj.jp/>



地盤増幅特性

表層地盤の影響で地震の揺れが増幅される特性のこと。サイト特性ともいう。

シミュレーション

実際の事象を、その事象を支配している法則に基づいてほぼ同様となるように組み立てた模擬空間で再現試行すること。コンピュータを用いた数値シミュレーションを指すことが多い。本計画では、強震動や地震発生サイクル等のシミュレーションが行われる。

社会素因

災害素因のうち、人口・建物・施設など人間・社会にかかわる素因。自然素因と対をなす。

首都圏地震観測網

首都圏地域で発生する地震の研究と、その被害軽減を目的に、首都圏（東京都、茨城県、神奈川県、千葉県、山梨県、埼玉県）の約 300 カ所に設置された坑井式地震計で構成され、防災科学技術研究所が運用している観測網。通称の MeS0-net（メソネット）は、Metropolitan Seismic Observation network の略。
<https://www.mesonet.bosai.go.jp/mrportal/top>



首都直下地震

首都圏の直下を震源として発生する地震の総称で、特定の地震を指すものではない。内閣府の首都直下地震モデル検討会では、近い将来に発生が予想される M7-8 クラスの地震として、20 以上の地震の想定を行っている。

<http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/index.html>



震源過程

地震は震源域において断層面が滑ることによって生じる。このとき断層面上で滑りが伝播する過程のことを震源過程という。断層面上での力の釣り合い等の物理法則を考慮せずに、断層面上の滑りの速さや向きの時空間変化を推定する運動学的なもの、破壊や摩擦の物理法則と連続体力学を用いて断層の滑り伝播過程を動力的に記述した「動的（地震）破壊過程」とに大別できる。

振動軌跡

地表あるいは地中のある点（観測点）が、地震等による揺れの間どのように動いたのかを表したもの。

浸透率

岩石などの多孔質媒質内において、流体がどの程度流れやすいのかを表す指標。媒質に含まれる亀裂の大きさや量、形状、亀裂同士の連結状態を反映する。

水蒸気噴火

マグマなどの熱によって火山体内部または地表付近の水が気化して体積が膨張することで、水蒸気が急激に噴出する現象のこと。噴火口付近の岩石が砕け、火山岩塊や細粒火山灰が飛散する。

スロー地震

通常の地震のように断層が急激に滑ることなく、ゆっくりと滑ることによって、蓄積されたひずみエネルギーを解消させる現象。ゆっくり地震ともいう。近年の観測により、超低周波地震、微動、スロースリップ等、様々な時定数を持つスロー地震があることが明らかとなっている。

スロースリップ

断層面やプレート境界面で発生する非地震性滑りで、非定常なゆっくりとした滑り。長いものでは継続時間が数年に及ぶものもある。ゆっくり滑り、スロースリップイベント（SSE）ともいう。

静穏化

地震活動や火山活動が以前の活動よりも相対的に低下している現象。

正断層

断層面に沿って主として上下方向にずれた断層のうち、浅い側（上盤）の岩盤がずり落ちる場合を正断層という。

石基

火山岩を構成する組織のひとつ。火山岩中の非常に細かい鉱物粒子からなる緻密な組織を石基と呼び、比較的大きな粒である鉱物結晶を斑晶と呼ぶ。

先行現象

地震や火山噴火の発生前に震源域や火山の周辺で発生するさまざまな異常現象。土地の隆起・沈降，地震活動の変化，電磁気異常，地下水の変化などが報告されている。前兆現象と呼ばれることもある。

前震

本震の近傍で本震発生前に起きる地震のこと。

層序

地層の重なっている順序のこと。

測地学分科会

文部科学大臣の諮問に応じて、科学技術や学術の振興に関する調査審議をし、答申をする科学技術・学術審議会の下に設置され、測地学及び政府機関が行う測地事業計画に関する調査審議を行う組織。地震や火山の研究も測地学の一分野としてとらえられている。



https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/index.htm

弾性・非弾性

外力によって変形した物質が、そのひずみを元に戻そうとする力を生じる性質を弾性といい、そのような性質でないものを非弾性という。非弾性で媒質が変形することを非弾性変形という。非弾性的性質には、粘性や塑性などの性質が含まれる。地殻の上部は主に弾性的性質を持つが、深部になると粘弾性的性質や塑性的性質を持つことが知られている。内陸地震の発生のメカニズムを理解するためには、粘弾性的性質や塑性的性質を持つ層の影響を理解することが重要であると考えられている。

地殻

地球の固体部分を構成する大きな成層構造のうち、一番外側の層。地殻の内側はマントルと呼ばれている。地殻は海洋地殻と大陸地殻に分類され、海洋地殻は約 6 km のほぼ均一な厚さであるのに対し、大陸地殻は平均的には 30 km 程度の厚さであるが、場所によっては 60～70 km にも及ぶ場所がある。地殻の浅い部分を上部地殻、深い部分を下部地殻と呼ぶ。上部地殻と下部地殻の間に、中部地殻が存在する場合もある。

地殻活動

地殻内で発生する現象全般の総称。

地殻変動

地震などの断層運動や火山活動などの地下の活動によって地表に生じた変位やひずみ、傾斜の変化。地盤変動ともいう。

地盤変動

地殻変動の項を参照。

長期評価

地震発生可能性の長期評価の略。主要な活断層で繰り返し発生する地震や海溝型地震を対象に、地震の規模や一定期間内に地震が発生する確率を予測したもの。

超低周波地震

短周期成分がほとんど含まれず長周期成分が卓越する地震波を放射する地震で、20～200 秒程度の帯域に卓越した周期を持つもの。ゆっくり滑りや火山活動にともなって生じる。

津波地震

地震動から推定される地震の規模（マグニチュード）に比べて大きな津波を生じる地震。

津波堆積物

津波によって運ばれた砂や礫などが堆積したもの。これらの調査により、過去の津波の発生年代や浸水規模を推定することができる。

津波の即時予測

地震の発生直後に、沿岸部に到達する津波の高さを可能な限り素早く予測する技術。

低周波地震

短周期成分がほとんど含まれず長周期成分が卓越する地震波を放射する地震で、2～8 Hz 程度の帯域に卓越した周期を持つもの。ゆっくり滑りや火山活動にともなって生じる。

低周波微動

数分から数日の間、断続的に微弱な低周波振動（数 Hz～10 Hz）を発生する現象。低周波地震の重ね合わせと考えられている。

データ同化

複雑な現象の高精度予測のために、数値シミュレーションの結果として得られる物理量が観測データをなるべく再現できるように、適切な初期値や境界値、各種パラメータを推定する手法。

テフラ

噴火によって噴煙や火砕流として噴出した火山砕屑物（火山弾、軽石、火山灰など）が地表に堆積した物。

動的（地震）破壊過程

震源過程の項を参照。

当面 10 年間に取り組むべき地震調査研究

地震本部が、2019 年に取りまとめた「地震調査研究の推進について ―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策（第 3 期）―」において挙げられた、今後 10 年間に取り組むべき調査・研究項目。

https://www.jishin.go.jp/about/activity/policy_revised/



独立地震

周辺地域で先行して発生した地震の影響を受けることなく発生したと考えられる地震。

トレンチ調査

地質調査法のひとつで、地表から溝状に掘り込み、地表では観測できない地層を新たに露出させ、断面を観察する手法。地震分野では過去の断層運動の年代や周囲の環境の調査、火山分野では過去の噴火史を調査するために有力な方法である。

内陸地震

陸のプレートの地殻内で発生する地震。

熱水系

地熱地帯や火山の地下で形成される、熱水が貯留・循環している領域のこと。

粘弾性

加えられた力に応じて変形し、力を除くともとの形に戻る弾性的性質と、加えられている力に応じた速さで時間とともに変形が進行する粘性的性質をあわせ持つ性質。

ひずみ

岩盤（プレート）などの変形の程度をあらわす量。単位長さ当たりの変位量で定義される。ひずみの空間的な分布の状態をひずみ場という。

ひずみ速度

単位時間当たりのひずみの変化率。ひずみ速度の空間的な分布の状態をひずみ速度場という。測地観測や地形から推定される地殻のひずみ速度が大きい領域はひずみ集中帯と呼ばれる。

比抵抗

単位断面積・単位長さ当たりの電気抵抗値のこと。電気伝導度の逆数。マグマの周辺では高温や流体の存在によって低い比抵抗値を示すことが多いため、地中の比抵抗の分布（比抵抗構造）を調べることで火山噴火の発生ポテンシャルや地下のマグマの状態を把握する研究が進められている。また、地震の破壊領域と地中の比抵抗構造との関連が注目されている。

微動

長時間にわたって継続する、振幅の小さい地震動のこと。地震等が起こらなくても、波浪や風、人間活動などによって定常的に生じる振動を常時微動と

いう。

プレート

地球表面は、地殻と、十分に冷却して固くなっている最上部マントルとを合わせた、厚さ 100 km 程度の複数の固い岩石の層で覆われている。この岩石層をプレートとよび、その動きをプレート運動という。また、隣り合う2つのプレートの境界がプレート境界である。プレート境界で発生する地震はプレート境界地震、プレートの内部で発生する地震はプレート内地震と呼ばれる。

プレート境界

プレートの項を参照。

プレート境界地震

プレートの項を参照。

プレート間固着

プレート境界においてずれ運動がない状態のこと。

噴火事象系統樹

事象系統樹の項を参照。

噴火様式

噴火時にマグマが地表に噴出する場合、噴火の様子はマグマの性質や破砕の程度などによって異なり、いくつかのタイプに識別される。その異なる噴火の様子を噴火様式という。

分散型音響センシング (DAS)

光ファイバーに微小な振動や変形を加えたときに生じるわずかな屈折率の変化を検出することで、光ファイバーケーブルに沿った振動や変形を空間的に連続して計測する技術。DAS は Distributed Acoustic Sensing の略。分散型音響計測システムともいう。

ポアソン過程

事象の発生確率が時間に依存せずに常に一定（先行する事象の発生や、その後の経過時間が、後続の事象の発生確率に影響を与えない）であるような過

程。

放射非平衡

放射性元素が崩壊する過程で生じる中間壊変生成核種の存在比が、堆積・浸食・火山活動等の地学的な過程により、崩壊定数から想定される平衡状態の存在比からずれることがある。これを放射非平衡といい、平衡状態に戻るまでの存在比の変化は時間の関数となる。岩石に含まれる放射非平衡状態の元素の存在比を測定することで、ずれが生じてからの時間を知ることができる。

本震, 余震

比較的大きな地震が発生すると、その近くで最初の地震より小さな地震が直後から続発する。この最初の大きな地震のことを本震、その後が続発する地震を余震という。

マグニチュード (M)

地震の規模を表す指標。推定に使うデータやデータ処理の方法により、同一の地震でもマグニチュードが異なることがある。また、どのようなデータや手法で推定されたのかを明示するために、M に添え字をつけることがある。例えば、M_{jma} は、気象庁によって推定されたマグニチュード、M_w は、CMT 解析により求められた地震モーメントに基づくマグニチュードであることを示す。

マグマ (マグマの結晶化, 上昇, 発達, 流動, 破碎, 脱ガス)

岩石物質が高温で部分熔融し、メルトと結晶と揮発性 (ガス) 成分が混合したもの。日本列島下では、主として沈み込むプレートが持ち込む水によりマントルが部分熔融することで生成する。上昇途中では周囲の岩石と密度が釣り合う場所に滞留してマグマ溜まりを作る。マグマ溜まりに滞留する間に結晶化が進んだり (結晶分化)、地殻内を上昇する途中で地殻物質を取り込んだりすることで多様な組成のマグマができる (マグマの発達)。マグマ溜まりの圧力が高まるとマグマは上昇を始める。上昇中はメルト中に溶け込んでいた揮発性成分が気泡となり (脱ガス) 密度を下げるため、マグマの上昇が加速される。マグマ中のケイ素の量により粘性が大きく異なり、ケイ素が少ない玄武岩質マグマは粘性が低いために流動性が高く、穏やかな噴火をしやすい。ケイ素が多い流紋岩質マグマは粘性が高く、爆発的噴火になりやすい。火道内のマグマ中にあるガス成分が周辺岩体への浸透・拡散や地表での噴気として系外へ排出されることを系外脱ガスという。系外脱ガスの量は噴火の

爆発性を左右する。マグマ中の気泡の割合が増えると液体部分が細かくちぎれ、大小さまざまな破片になる。これをマグマの破碎という。最も細かく砕けたマグマが火山灰になる。

マグマ貫入

地下のマグマが岩盤に割れ目をつくりながら移動する現象。

マグマ溜まり

マグマの項を参照。

マグマ噴火

噴出物のほとんどがマグマ物質からなる噴火のことで、ストロンボリ式噴火、プリニー式噴火、溶岩流の噴火などがこれにあたる。

摩擦特性

断層に作用する応力や断層の滑り速度、周辺の温度、間隙流体圧等に対する、断層の摩擦強度の依存性。

マントルウェッジ

海溝から沈み込んだ海のプレート（スラブ）と、上盤の陸のプレートに挟まれたくさび（ウェッジ）形のマントルの領域。

メカニズム解

地震時の断層運動を、断層面の向き（走向、傾斜角）と相対滑りの向き（滑り角）によって表現したもののこと。発震機構解あるいは発震機構ともいう。地震波の放射パターン（地震波の初動の振動方向）から求められたものを初動解と呼ぶ。メカニズム解のタイプは、正断層型、逆断層型、横ずれ断層型に大別される。震源域の応力場を知る手がかりとなる観測データである。

モーメント

地震モーメントの略。地震の規模を表す最も基本的な量。地震断層の面積と滑り量及び剛性率（岩盤の変形のしにくさを表す物性値）の積で計算される。非地震性滑りによる断層運動の規模を表すために用いられることもある。

融液

ある物質の温度が融点以上になり、融けてできた液体。メルトともよばれる。

溶岩

火山噴火時に火口から流出したマグマ物質。冷え固まって岩石となった後も「溶岩」と呼ばれる。

溶岩ドーム

火口から押し出された粘性の高い溶岩が、山体を流れ下ることなく固まってできたドーム状の地形。溶岩の塊そのものを指すこともある。

余効滑り

地震が発生したのと同じの断層面上で、地震の後に起こるゆっくりとした滑り。

余効変動

地震の後に、余効滑りや粘弾性変形などによって、震源域あるいはその周囲で発生する地殻変動。

余震

本震，余震の項を参照。

陸海統合地震津波火山観測網

防災科学技術研究所が運用する、全国の陸域から海域までを網羅する地震・津波・火山の観測網の総称。略称はMOWLAS（モウラス：Monitoring of Waves on Land and Seafloorの略）。

<https://www.mowlas.bosai.go.jp/mowlas/>

以下の7つの基盤観測網から構成される。



陸域の基盤観測網

- ・高感度地震観測網（Hi-net）：全国に展開された約800点の高感度地震計からなる坑井式微小地震観測網。

<https://www.hinet.bosai.go.jp/?LANG=ja>

- ・全国強震観測網（K-NET）：全国に、約20km間隔で設置された1000点以上の地表強震観測点からなる観測網。
- ・基盤強震観測網（KiK-net）：全国に展開された約700点の強震観測点からなる観測網。各観測点で、地表と地中の双方に強震計が設置されている。

<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>



- ・広帯域地震観測網 (F-net) : 全国に展開された約 70 点の広帯域地震観測点からなる観測網。

<https://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=ja>

- ・基盤的火山観測網 (V-net) : 全国の 16 火山に設置された坑井式地震計・傾斜計と広帯域地震計, GNSS などからなる観測網。 <https://www.vnet.bosai.go.jp/>



海域の基盤観測網

- ・日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) : 日本海溝沿いの海底に設置した, 地震計と津波計が一体となった観測装置を光海底ケーブルで接続した観測網。観測装置は 150 カ所, ケーブル総延長は約 5,700 km である。

<https://www.seafloor.bosai.go.jp/S-net/>

- ・地震・津波観測監視システム (DONET) : 海底に設置された地震計や水圧計などの観測機器ネットワークによって, 地殻変動, 地震動, 津波などを計測する。南海トラフの地震及び津波を常時観測監視するため, 熊野灘沖に展開されたシステム (DONET 1) と, 紀伊水道沖に展開されたシステム (DONET 2) からなる。
<https://www.seafloor.bosai.go.jp/DONET/>



リソスフェア

岩石圏ともいい, 地殻からマントル最上部の固い部分を総称したもの。指し示す範囲は, プレートとほぼ同一である。

レオロジー

物質の変形や流動の大きさや速さと, 単位面積あたりに働く力 (応力) の関係。

ローソン石

冷たい海洋地殻の沈み込みに伴う, 低温高压下で生じる変成岩に特徴的な造岩鉱物。重量比で約 11.5% という大量の水を結晶中に含むことができる。650°C 以上になると, 灰長石と水に分解する。

Ar/Ar 法

放射年代測定法のひとつのアルゴン - アルゴン法。岩石・鉱物試料に中性子を照射することで試料中の ^{39}K の一部を ^{39}Ar に変換し, その量から試料中の

Kの量を推定する。この量と放射性崩壊起源の ^{40}Ar との同位体比から年代を求めるのはK-Ar法と同じだが、この手法にはAr同位体比の測定のみで年代決定できる利点がある。

b 値

地震の規模別頻度を、横軸にマグニチュード、縦軸に地震の発生数の対数を取ってプロットした際の傾きの大きさ。通常は0.7~1.0程度である。

CMT

CMTは、Centroid Moment Tensorの略。震源で生じた岩盤の変形様式を、地震波形の解析から求めたもの。メカニズム解の推定では、岩盤の変形は断層運動のみによると仮定するのに対して、CMT解では、断層運動のほかに、膨張や収縮のような体積変化も考慮することができる。

DEM

Digital Elevation Modelの略。地表面を等間隔の正方形に区切り、それぞれの正方形の中心点の標高の数値データを与える。

DONET

陸海統合地震津波火山観測網の項を参照。

ETAS モデル

ETASは、Epidemic Type Aftershock Sequenceの略。すべての地震が余震を持つと考え、地震活動を数個のパラメータで定量化する統計的地震活動モデル。

GEONET

国土地理院が運用するGNSS連続観測システムのこと。全国に展開された約1300ヶ所の電子基準点とつくば市にあるGEONET中央局からなる。



<https://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/eiseisokuchi41012.html>

GIS

地理情報システム (Geographic Information System) の略。地理的位置に関する情報を持ったデータ (空間データ) を総合的に管理・加工し、視覚的に表示し、時間や空間の面から分析できる技術である。

GNSS

全球測位衛星システム (Global Navigation Satellite System) の略称。地球上での位置決めや時刻同期を目的とした電波を発射する人工衛星群，地上の支援システム，及び電波を受信して三次元的な地球上の位置や正確な時刻を知る目的で使用する利用者群の総称。アメリカ合衆国が構築した GPS，ロシアの GLONASS や，ヨーロッパ連合 (EU) の Galileo ，日本の QZSS などのシステムがある。

GNSS の搬送波位相

受信機で復調した GNSS 測位信号の搬送波位相角を連続的に測定したもの。精度の高い測定が可能のため，精密測位に使用される。

JDXnet

全国地震観測データ流通ネットワーク (Japan Data eXchange network)。日本列島に展開されている地震観測点のデータの全国規模のリアルタイム流通ネットワーク。

JVDN

Japan Volcanological Data Network の略。火山研究の発展と火山防災の推進のため，大学や研究機関，行政機関が持っている観測データの流通・共有を目的として開発されたデータベース。<https://jvdm.bosai.go.jp/portal/ja>



K-Ar 法

放射年代測定法のひとつのカリウム - アルゴン法。カリウムの放射性同位体 ^{40}K が，半減期約 12.5 億年で ^{40}Ca と ^{40}Ar に放射性崩壊することから，岩石・鉱物試料に含まれる ^{40}K と ^{40}Ar の量比を求めて，鉱物が生成した年代を算出する方法。

LiDAR

Light Detection and Ranging の略。光を用いたリモートセンシング技術のひとつ。パルス状に照射したレーザーの反射光や散乱光を観測して，測定対象物までの距離や対象物の性状を計測する技術。

MT 観測 (MT 探査, MT 法)

物理探査の手法のひとつで，電気伝導度など地下の電気的性質を調査する手

法。地表で電場と磁場を測定し、地表に入射する電磁場とそれによって地中で誘導される電磁場との関係を用いて、地中の比抵抗構造を算出する。地磁気地電流法 (Magnetotelluric method) とも呼ばれる。

Multi-GAS

Multicomponent Gas Analyzer System の略。1 台で複数成分のガスの濃度を測定できる装置。

P 波

Primary wave (第一波) または Pressure wave (圧力波) の略。進行方向と平行に振動する弾性波。固体・液体・気体を伝わることができる。P 波の伝播速度は、 V_p と略記されることが多い。

PLUM 法

Propagation of Local Undamped Motion 法の略称。震源や地震の規模の推定は行わず、震度を予測しようとする地点の周辺の地震計で観測された揺れの強さから、直接、予測対象地点の震度を予想する、地震動の即時予測のための新しい手法。巨大地震が発生した際でも精度良く震度が求められる。気象庁が発表する緊急地震速報の震度予測に用いられている。

SAR

SAR は Synthetic Aperture Radar (合成開口レーダー) の略。レーダーを搭載する人工衛星や航空機が移動中に得たデータを合成することで移動方向の開口面を大きく拡大し、大型アンテナと同等の高い分解能を実現したレーダーシステム。干渉 SAR (Interferometric SAR, InSAR) は、同じ場所を撮影した時期の異なる 2 回の画像の差をとる (干渉させる) ことにより地表面の変動を詳細に捉える手法である。

SSE

スロースリップの項を参照。

S-net

陸海統合地震津波火山観測網の項を参照。

S 波

Secondary wave (第二波) または Shear wave (ねじれ波, たわみ波もしくは

せん断波) の略。進行方向と直交する面内で振動する弾性波。固体のみを伝わるができる。S波の伝播速度は、 V_s と略記されることが多い。

S波速度異方性

S波の伝わる速さが、その振動方向によって異なること。異方性は、地殻内の亀裂やマントル内の鉱物結晶が一定の方向に配向することで生じると考えられている。前者は地殻内の応力場を、後者はマントルのダイナミクスを解明する手掛かりとなる。

unrest (アンレスト)

火山活動の状態(火山性地震や噴気量など)が平常のレベルより高まること。アンレストが生じてても、噴火に至るとは限らない。また、火山活動の定性的な不安定化を意味するアンレストを、多項目のデータを参照して定量的に表現するコミュニケーション・ツールとして、近年、VUI (Volcanic Unrest Index, 火山活発化指数) と呼ばれる指標が提案されている。

VLBI (超長基線電波干渉法)

Very Long Baseline Interferometry の略。はるか遠くにある天体から放射される電波を利用して、アンテナ間の正確な距離を測定する手法。数千キロメートル離れたアンテナの距離も、わずか数ミリメートルの精度で測ることができる。

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） 実施機関

総務省	国立研究開発法人情報通信研究機構
文部科学省	国立大学法人等 北海道大学大学院理学研究院 弘前大学大学院理工学研究科 東北大学大学院理学研究科 東北大学災害科学国際研究所 秋田大学大学院国際資源学研究科 新潟大学災害・復興科学研究所 東京大学大学院理学系研究科 東京大学大学院情報学環 東京大学地震研究所（共同利用・共同研究拠点） 東京大学大気海洋研究所 東京大学史料編纂所 東京大学地震火山史料連携研究機構 東京工業大学理学院火山流体研究センター 千葉大学大学院理学研究院 富山大学学術研究部都市デザイン学系 名古屋大学大学院環境学研究科 京都大学大学院理学研究科 京都大学防災研究所（共同利用・共同研究拠点） 神戸大学海洋底探査センター 鳥取大学大学院工学研究科 高知大学理工学部 九州大学大学院理学研究院 鹿児島大学地震火山地域防災センター 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科 立命館大学総合科学技術研究機構
	国立研究開発法人防災科学技術研究所
	国立研究開発法人海洋研究開発機構
	独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所
経済産業省	国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター
国土交通省	国土地理院
	気象庁
	海上保安庁海洋情報部
都道府県	地方独立行政法人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
	山梨県富士山科学研究所

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2年度研究課題一覧

実施機関名	課題番号	研究課題名	研究代表者
北海道大学	HKD_01	津波堆積物情報の高度化と実践的活用に関する研究	西村裕一
	HKD_02	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	栗谷豪
	HKD_03	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	吉村俊平
	HKD_04	電磁気・熱・ガス観測に基づく火山活動推移モデルの構築	橋本武志
	HKD_05	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	谷岡勇市郎
	HKD_06	火山活動即時解析表示システムの開発	橋本武志
	HKD_07	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	橋本雄一
	HKD_08	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	高橋浩晃
	HKD_09	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	高橋浩晃
弘前大学	HRS_01	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	小菅正裕
	HRS_02	データ同化に基づく津波現況把握と即時予測の高度化	前田拓人
東北大学	THK_01	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	岡田知己
	THK_02	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	松澤暢
	THK_03	噴火発生時刻の即時把握と噴火ダイナミクスの研究	西村太志
	THK_04	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	中村美千彦
	THK_05	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	趙大鵬
	THK_06	スラブ内地震の発生メカニズムに関する研究	東龍介
	THK_07	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	岡田知己
	THK_08	集中地震観測による火山体構造・火山現象発生場の解明	山本希
	THK_09	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	内田直希
	THK_10	地殻変動に伴う大気中ラドン濃度変動	長濱裕幸
	THK_11	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	西村太志
	THK_12	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	太田雄策
	THK_13	地震・火山データの無線伝送技術の開発	内田直希
東北大学災害科学国際研究所	IRID01	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	蝦名裕一
	IRID02	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	木戸元之
	IRID03	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	佐藤源之
	IRID04	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	福島洋
	IRID05	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	蝦名裕一
	IRID06	災害に関わる個人の心理・行動特性とその評価・活用・調整に関する研究	杉浦元亮
新潟大学	NGT_01	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	片桐昭彦
	NGT_02	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	田村圭子
東京大学地震研究所	ERI_01	歴史地震史料を活用した地震学的解析	加納靖之
	ERI_02	マグマ溜まりの時間発展と噴火様式との関連性	安田敦

	ERI_03	大規模噴火に伴う諸現象とそれを駆動するマグマ溜り—火道システムの解明	前野深
	ERI_04	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	亀伸樹
	ERI_05	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	篠原雅尚
	ERI_06	より現実的な断層面ダイナミクス	中谷正生
	ERI_07	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	大湊隆雄
	ERI_08	日本・NZ 国際協力によるヒクラング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	望月公廣
	ERI_09	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	飯高隆
	ERI_10	東日本における長期的重力変化の観測とモデリング	今西祐一
	ERI_11	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	篠原雅尚
	ERI_12	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	蔵下英司
	ERI_13	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	中谷正生
	ERI_14	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	古村孝志
	ERI_15	首都圏の地震被害分布と地震像の解明	酒井慎一
	ERI_16	堆積平野・堆積盆地における地震災害発生機構の解明	三宅弘恵
	ERI_17	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	前野深
	ERI_18	観測研究データへの永続的識別子付与	加納靖之
	ERI_19	データ流通網の高度化	鶴岡弘
	ERI_20	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	新谷昌人
	ERI_21	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相関評価	田中宏幸
	ERI_22	海底ケーブルを用いる地震・地殻変動・津波リアルタイム観測技術開発	篠原雅尚
	ERI_23	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	塩原肇
	ERI_24	マルチプラットフォーム次世代 WIN システムの開発	中川茂樹
	ERI_25	研究成果共有データベースの構築	鶴岡弘
東京大学理学系研究科	UTS_01	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	後藤和久
	UTS_02	巨大地震に伴う粘弾性余効変動の解明	田中愛幸
	UTS_03	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	井出哲
	UTS_04	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	角森史昭
	UTS_05	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	安藤亮輔
	UTS_06	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	森俊哉
東京大学情報学環	III_01	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	関谷直也
東京大学史料編纂所	UTH_01	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	榎原雅治
	UTH_02	近代以前の地震・火山災害に関する多角的研究	杉森玲子
東京大学大気海洋研究所	AORI01	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	朴進午
	AORI02	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	佐野有司
東京大学地震火山史料連携研究機構	HMEV01	地震火山関連史料に基づく低頻度大規模地震火山災害の調査	佐竹健治
	HMEV02	地震関連史料に基づく近代以前の地震活動の調査	榎原雅治

東京工業大学	TIT_01	海域火山活動に伴う熱水活動の実験的研究と観測研究	野上健治
	TIT_02	小型拡散放出二酸化炭素率測定装置の開発	野上健治
	TIT_03	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	寺田暁彦
千葉大学	CBA_01	電磁気学的な地震先行現象の総合的研究	服部克巳
富山大学	TYM_01	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	石崎泰男
	TYM_02	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	堀田耕平
	TYM_03	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	井ノ口宗成
名古屋大学	NGY_01	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～	山中佳子
	NGY_02	南西諸島海溝におけるプレート間固着状態の解明	田所敬一
	NGY_03	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	鈴木康弘
	NGY_04	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	田所敬一
	NGY_05	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	鈴木康弘
	NGY_06	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	室井研二
	NGY_07	御嶽山地域の防災力向上の総合的推進に関する研究	山岡耕春
	NGY_08	小電力・小型・携帯テレメータ地震観測装置の改良開発	山中佳子
京都大学防災研究所	DPRI01	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	伊藤喜宏
	DPRI02	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	澁谷拓郎
	DPRI03	内陸地震の発生機構と発生場の解明とモデル化	飯尾能久
	DPRI04	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	深畑幸俊
	DPRI05	測地観測データに基づく内陸地震長期評価手法の開発	西村卓也
	DPRI06	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	井口正人
	DPRI07	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	中道治久
	DPRI08	広帯域強震動予測の高度化に関する研究	関口春子
	DPRI09	断層破壊過程と極大強震動生成に関する研究	岩田知孝
	DPRI10	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	釜井俊孝
	DPRI11	火砕流の発生と流下予測	為栗健
	DPRI12	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	藤田正治
	DPRI13	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	中道治久
	DPRI14	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	矢守克也
京都大学理学研究科	KUS_01	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	宮崎真一
	KUS_02	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	大倉敬宏
	KUS_03	阿蘇で学ぶ地震・火山災害への備え	大倉敬宏
奈良文化財研究所	NAB_01	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	村田泰輔
神戸大学	KOBE01	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	島伸和
鳥取大学	TTR_01	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	香川敬生

高知大学	KOC_01	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	大久保慎人
	KOC_02	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	大久保慎人
九州大学	KYU_01	地震火山相互作用下の内陸地震空間ポテンシャル評価	相澤広記
鹿児島大学	KGSM01	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	八木原寛
兵庫県立大学	HYG_01	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	阪本真由美
	HYG_02	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	澤田雅浩
立命館大学	RTM_01	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	小笠原宏
	RTM_02	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	川方裕則
情報通信研究機構	NICT01	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	中川勝広
防災科学技術研究所	NIED01	多角的火山活動評価に関する研究	藤田英輔
	NIED02	地震・津波予測技術の戦略的高度化研究	汐見勝彦
	NIED03	巨大地震による潜在的ハザードの把握に関する研究	齊藤竜彦
	NIED04	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	藤原広行
	NIED05	基盤的観測網の運用	青井真
海洋研究開発機構	JAMS01	地震発生帯モデリング研究	堀高峰
	JAMS02	海底広域変動観測研究	石原靖
	JAMS03	海底火山観測研究	石原靖
産業技術総合研究所	AIST01	活断層データベースの整備	吾妻崇
	AIST02	主要活断層帯から生じる連動型地震の古地震学的研究	近藤久雄
	AIST03	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	石塚吉浩
	AIST04	津波浸水履歴情報の整備	宍倉正展
	AIST05	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	重松紀生
	AIST06	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	篠原宏志
	AIST07	高分解能地殻応力場の解明と造構造場の研究	今西和俊
	AIST08	海溝型巨大地震の履歴とメカニズム解明	宍倉正展
	AIST09	地下水・地殻変動観測による地震予測精度の向上	松本則夫
	AIST10	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	下司信夫
	AIST11	アジア太平洋地域地震・火山ハザード情報整備	宝田晋治
国土地理院	GSI_01	内陸の地殻活動の発生・準備過程の解明	宗包浩志
	GSI_02	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	宗包浩志
	GSI_03	火山地域のマグマ供給系のモデリング	宗包浩志
	GSI_04	GNSS 連続観測(GEONET)	宗包浩志
	GSI_05	地形地殻変動観測	宗包浩志
	GSI_06	物理測地観測	宗包浩志
	GSI_07	宇宙測地技術による地殻変動監視	宗包浩志
	GSI_08	GNSS 観測・解析技術の高度化	宗包浩志
	GSI_09	全国活断層帯情報整備	宗包浩志
	GSI_10	火山基本図・火山土地条件図整備	宗包浩志
	GSI_11	地殻活動データベース整備・更新	宗包浩志
気象庁	JMA_01	地震活動・地殻変動監視の高度化に関する研究	小林昭夫
	JMA_02	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	小久保一哉

	JMA_03	火山活動に伴う地殻変動の把握及び評価	潟山弘明
	JMA_04	地球電磁気学的手法による火山活動評価の高度化	山崎明
	JMA_05	化学的手法に基づく火山活動監視・予測に関する研究	菅野智之
	JMA_06	地震動・津波即時予測の高度化に関する研究	山本剛靖
	JMA_07	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	新堀敏基
	JMA_08	火山活動の総合判断	高木朗充
	JMA_09	地震観測、地殻変動観測	鎌谷紀子
	JMA_10	潮位観測	市川真人
	JMA_11	地磁気精密観測	山際龍太郎
	JMA_12	全国における火山観測の強化	重野伸昭
	JMA_13	地磁気観測成果のデータベース化	有田真
	JMA_14	全国地震カタログの作成	岩切一宏
	JMA_15	火山現象に関する基礎データの蓄積と活用	山本哲也
	JMA_16	地震・津波・火山防災情報の改善に係る知見・成果の共有	福満修一郎
	JMA_17	防災・減災に関する知識の普及啓発	福満修一郎
海上保安庁	JCG_01	海洋測地の推進	渡邊俊一
	JCG_02	験潮	林王弘道
	JCG_03	海底地殻変動観測	石川直史
	JCG_04	海域火山観測	藤原琢磨
北海道立総合研究機構	HRO_01	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	高橋良
	HRO_02	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	川上源太郎
山梨県富士山科学研究所	MFRJ01	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	吉本充宏
	MFRJ02	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	本多亮
公募研究	KOBO02	有感地震記述ならびに震度の距離減衰式に基づく地震活動解析	石辺岳男
	KOBO04	カルデラ・リサージェンスモデルに基づく北海道屈斜路カルデラの大規模噴火予測	後藤芳彦
	KOBO06	火山活動推移に対応したマグマ供給系の変遷モデルの構築	佐藤鋭一
	KOBO07	地震先行 VLF 帯電磁波強度減少研究のための超小型衛星のエンジニアリングモデルの製作	児玉哲哉
	KOBO08	行政等が所有する宏観異常現象に関わるデータを用いた地震発生の確率予測	織原義明
	KOBO09	地震先行 VLF 帯電磁波強度減少の統計的評価と発生メカニズムの解明	鴨川仁
	KOBO11	水蒸気噴火が懸念される火山におけるマグマ起源流体の挙動解明と火山活動評価	大場武
	KOBO12	火山ガス観測による焼岳火山の活動評価とガス輸送システムの解明	齋藤武士
	KOBO13	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	鹿児島渉悟
	KOBO15	蔵王山、過去約 800 年間の活動の噴火推移の類型化	伴雅雄
	KOBO17	富士山頂における全磁力通年観測	長尾年恭
	KOBO18	みんなで拓本ー地震・津波・火山噴火伝承碑のデジタル収集と解説	上相英之
拠点間連携共同研究	CTOC01	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	加藤尚之・松島信一
	CTOC02	ばらつきのある被害リスク評価をふまえた防災計画の検討	牧紀男
	CTOC03	定常的地震活動の震源および地震波速度構造の精度向上による地震波動場推定の高度化	望月公廣
	CTOC04	不均質な断層すべり分布を考慮した津波の確率論的予測と不確実性の評価	佐竹健治

CTOC05	強震観測点におけるサイト特性評価手法の開発に関する多国間共同研究 Multi-national joint-research on the development of the evaluation scheme for site characteristics at strong motion observation sites	川瀬博
CTOC07	強震動のブラインド予測のための共用地盤モデルの構築に関する研究	山中浩明
CTOC08	火山砕屑物からなる斜面の崩壊に対する地震とその前後の降雨の影響評価	渦岡良介
CTOC09	活断層における地殻変動に伴う盆地形成過程から推定される盆地端部での基盤構造を考慮した地震動増幅特性に関する研究	松島信一
CTOC10	建物の応答を考慮した高精度地震情報配信手法の開発	倉田真宏
CTOC12	訪日外国人旅行者に対する地震・火山に関する情報提供と風評被害対策に関する事例分析 —2018年胆振東部地震、2018年大阪府北部地震、2018年草津白根噴火、2015年箱根山噴火を対象として—	秦康範
CTOC14	巨大地震による斜面災害発生個所の事前予測方法の検討	齊藤隆志
CTOC15	テフラ堆積域における地震動に伴う斜面崩壊の発生場と規模の予測	松四雄騎
CTOC16	桜島大規模火山噴火を対象とした事前避難を実現するためのリスクコミュニケーション方法に関する実践的研究	大西正光
CTOC17	地震発生の切迫性を伝える災害情報モデルとシナリオの構築～北海道胆振東部地震からみえた新たな課題としての複合連鎖問題の解釈を通して～	岡田成幸
CTOC18	地震シナリオの不確実性を考慮した津波被害の確率論的評価	浅井光輝
CTOC19	文化財等の所在情報と災害情報の重ね合わせによる文化財等災害予測マップの構築と活用	蝦名裕一

[参 考 资 料]

II. 計画推進部会および総合研究グループ等別の成果

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（第2次）」（建議）に示された実施内容について、令和2年度の成果を計画推進部会および総合研究グループ等別に学術報告として取りまとめた。

この報告は、地震・噴火予知研究協議会¹⁾に設置された8の計画推進部会と分野横断で取り組む総合研究を推進する体制として5の総合研究グループ、及び地震火山観測研究を災害研究に結びつけるための共同研究を実施する東京大学地震研究所と京都大学防災研究所の拠点間連携委員会²⁾の責任で編集したものである。

この報告に基づいて、難解な学術用語をなるべく言い換え、平易な文章で表現して書き直したものが、本編の「令和元年度の成果の概要」である。本編の「令和元年度の成果の概要」の内容について、さらに詳細を知りたい場合、原著論文を参照したい場合には、以下の報告をご参照いただきたい。

○東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会

「地震（現象解明）」計画推進部会長	飯高 隆（東京大学大学院情報学環）
副部会長	望月公廣（東京大学地震研究所）
副部会長	岡田知己（東北大学大学院理学研究科）
「地震（長期予測）」計画推進部会長	西村卓也（京都大学防災研究所）
副部会長	宍倉正展（産業技術総合研究所）
「地震（中短期予測）」計画推進部会長	中谷正生（東京大学地震研究所）
副部会長	内田直希（東北大学大学院理学研究科）
「火山」計画推進部会長	中道治久（京都大学防災研究所）
副部会長	前野 深（東京大学地震研究所）
「災害誘因評価・即時予測」計画推進部会長	太田雄策（東北大学大学院理学研究科）
副部会長	三宅弘恵（東京大学地震研究所）
「防災リテラシー」計画推進部会長	高橋 誠（名古屋大学大学院環境学研究科）
副部会長	井ノ口宗成（富山大学都市デザイン学部）
「史料・考古」計画推進部会長	榎原雅治（東京大学史料編纂所）
副部会長	山中佳子（名古屋大学大学院環境学研究科）
「観測研究基盤」計画推進部会長	鶴岡 弘（東京大学地震研究所）
副部会長	青山 裕（北海道大学大学院理学研究院）
「南海トラフ沿いの巨大地震」総合研究グループリーダー	伊藤喜宏（京都大学防災研究所）
「首都直下地震」総合研究グループリーダー	酒井慎一（東京大学地震研究所）
「千島海溝沿いの巨大地震」総合研究グループリーダー	高橋浩晃（北海道大学大学院理学研究院）
「桜島大規模火山噴火」総合研究グループリーダー	井口正人（京都大学防災研究所）
「高リスク小規模火山噴火」総合研究グループリーダー	大湊隆雄（東京大学地震研究所）

○東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究委員会

委員長	松島信一（京都大学防災研究所）
副委員長	加藤尚之（東京大学地震研究所）

-
- 1) 東京大学地震研究所には、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画で立案された研究を推進することを目的に設立された地震・火山噴火予知研究協議会がある。ここでは、本観測研究計画に参加する全国の大学等が連携し、研究機関と協力しながら研究を推進している。また、科学技術・学術審議会測地分科会地震火山観測研究計画部会では、大学、研究機関、行政機関が連携して計画の推進を図っている。地震・火山噴火予知研究協議会には、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の、効率的かつ調和的な実施を推進するために、8の計画推進部会と5の総合研究グループが設置されている。
 - 2) 「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所は、地震や火山噴火の現象解明・予測の研究成果を災害軽減につなげるための組織的な共同研究を実施するために、拠点間連携共同研究委員会を設置している。

1 (1) 地震 (現象解明)

「地震 (現象解明)」計画推進部会長 飯高 隆

(東京大学・大学院情報学環)

副部会長 望月公廣

(東京大学・地震研究所)

副部会長 岡田知己

(東北大学・理学研究科)

地震や火山噴火が多発する我が国において、地震、火山噴火及びこれらによる災害を科学的に解明することにより、災害軽減に貢献することを目指して、地震・火山の観測研究を推進することは非常に重要である。地震が、どこで、いつ、どのようなメカニズムで、どのような頻度で発生したかについての解明は基本的な情報となる。地震現象の根本的な理解を深めるためには、低頻度大規模現象を含む地震現象の多様性について特性を理解し、それらの現象が発生する仕組みや発生する場について観測研究・理論研究・実験研究の多方面からアプローチすることが大切である。

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

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

日本海溝に沿った約250kmの範囲で取得された海底堆積層コアから、2011年の東北地方太平洋沖地震の影響を放射性同位体元素の濃縮度から特定した(海洋開発研究機構[課題番号: JAMS02])。地震時に形成された音響的に透明で均質な層は、通常起こる高周波の地震動、および上盤プレートの物性に起因する低周波かつ長時間の地震動に関連して堆積した可能性を明らかにした。また、琉球海溝における海底堆積物の解釈を目的として、水深6,147 mから採取したコアに対して解析を行った。XRFコアスキャナーによる1 mm間隔の化学組成データから、36枚のタービダイトを識別した。さらに、Zr/Rbピークが主に粒径を反映すること、半遠洋性泥はタービダイトに比べて全有機炭素と全窒素の含有量がやや高いという特徴、また磁気測定結果から、台湾からの堆積物の供給が高い時期があった可能性があることを明らかにした。

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

低頻度で大規模な地震現象の発生履歴、規模、場所の解明は重要な課題である。2011年東北地方太平洋沖地震発生域周辺の地震波構造調査の結果から、非常に大きな浅部滑りがあった箇所には逆断層とそれによる変形構造が見られ、浅部滑りが小さかった場所にはそのような構造は見られないこと、さらに主破壊域北側海溝軸付近で報告されている津波波源域では海溝軸陸側の海底で斜面崩壊が認められることがわかった(海洋開発研究機構[課題番号: JAMS02])。沈み込み帯浅部の構造的な特徴は、巨大地震の浅部滑りと関連している可能性があることを示唆していると考えられる。

17 世紀に超巨大地震が発生し、近い将来にも巨大地震が発生する可能性がある千島海溝根室沖で実施された地震波構造調査のデータを用いて、走時トモグラフィ解析を行った（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_05]）。海溝軸周辺に海底地震計を展開することにより、先行研究より陸側プレート最前縁部の構造モデルの分解能が改善され、断層すべりが海溝軸まで達した、日本海溝北部に類似した低 V_p の堆積物ウェッジが存在することが明らかとなった。このウェッジの分布が、17 世紀超巨大地震の津波堆積物分布を再現するためのモデルに設定された海溝沿いの断層の位置と概ね対応することがわかった（図 1）。

この構造調査と同じ根室沖の海域にて、GNSS/A (GPS/A) 観測が実施された。2 回の測距の結果を比較すると、いずれの観測点においても 9cm/a 以上の速度で北西に変位していることを示す結果となった（図 2）（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_05]、東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID02]）。根室沖に設置した 3 箇所の GNSS-A 観測点（G21, G22, G23）のうち、プレート運動より大きな速度となった G21 では誤差が大きいものと見られる一方で、太平洋プレート上に設置した G23 はプレート運動に近い速度が得られ、G22 からは全体としての強い固着が覗かれる結果となった。上下変位速度については、中心海底局設置によって大幅な精度の向上が確認できたが、現段階では固着について言及できる精度ではない。観測データがもつ誤差を考慮すると、今後同様の観測を継続することで、プレート境界浅部における固着状態を明らかにすることが期待できる。

一方、日本海溝沿い、および南海トラフ沿いの海溝型地震震源域海底においても、GNSS-A による地殻変動観測を継続している（海上保安庁[課題番号：JCG_03]）。日本海溝沿いでは、東北地方太平洋沖地震の余効変動が続いていることが明らかとなり（図 3）、南海トラフ沿いでは、プレート境界固着の影響による地殻変動がとらえられている（図 4）。観測データ誤差の共分散項の導入や事前分布を制御するハイパーパラメータを ABIC で選択するなど、統計学的に適切な手法を用いることで、GNSS-A の最大の誤差要因である音速変動を適切に推定することを可能とした。一方、観測の効率化に向け、海上における測量船の観測範囲及び海底局アレイのサイズが測位精度に与える影響についてシミュレーションによる検証を行った結果、これまでの観測アレイのサイズが最適であることが確認された。このように海底地殻変動観測の高度化を進めており、大地震発生ポテンシャルの把握に向けた海域下プレート境界における固着状況のモニタリングが可能になりつつある。

低頻度大規模地震は国内での発生回数も限られるため、このような地震を理解するためには海外での観測も重要である。メキシコ・ゲレロ州沖合で回収された地震計記録を解析し、微小地震活動および低周波微動の分布を求め、海底地形（残差地形）と比較した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]）。結果として、ゲレロ空白域内の浅部プレート境界の一部では、通常地震や低周波微動のいずれも発生しない領域が存在し、これらの領域はプレート境界面上の窪みに起因すると考えられる残差地形の負の領域に対応することが分かった。この窪地に蓄積して沈み込む海洋性堆積物がゲレロ地震空白域の要因となっている可能性が考えられる。

また、1964 年 3 月 27 日に $M_w9.2$ の巨大地震が発生したアラスカにおいては、アラスカ南部地域の地殻および上部マントルの地震波速度とポアソン比の 3 次元微細構造を明

らかにし、2018年11月30日に起こった Anchorage 地震 (Mw7.1) と 1964年アラスカ巨大地震の震源域の構造と発生メカニズムについて調べた (東北大学[課題番号: THK_05])。その結果、2018年 Anchorage 地震 (Mw 7.1) は沈み込んでいる太平洋スラブの中で起こった正断層型の地震であったことがわかった。震源の上下に顕著な低速度・高ポアソン比の異常体が存在し、スラブの脱水による流体を反映するものと考えられる。一方、1964年アラスカ巨大地震 (Mw9.2) の震源は megathrust zone における構造の急変部に位置し、震源真上の北米プレートに顕著な高ポアソン比の異常体が存在することがわかった。太平洋スラブの脱水と震源域の構造不均質がこれらの大地震の発生に影響を及ぼしたと考えられる。

海陸地殻変動観測に加え衛星による重力観測のデータの利用も視野に入れた広域粘弾性変形モデルを構築し、低頻度の巨大地震発生サイクルにおける地殻変動のふるまいを理解するための理論的研究も進められている (東京大学理学系研究科[課題番号: UTS_02])。M9 規模の矩形断層が引き起こす地震時の弾性変形について、半無限モデル (Okada) と球体モデル (PREM) に対するフォワードモデリングを行った結果、震央付近から最大変位が生じる地点までの変動量はほぼ一致するものの、その外側 (海溝側、陸側) では半無限モデルの振幅が非常に大きくなることが分かった。また、球モデルにおいて弾性定数の水平不均質を考慮して地震時の弾性変形を計算する手法を開発した。2次元モデルにおける予備的な計算を行ったところ、震源での弾性定数の水平不均質の効果が大きいことが分かった。

(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

日本海溝に沈み込む海洋プレートの基盤岩から被覆層堆積物までの試料について、日本海溝沈み込み帯浅部の温度・封圧・間隙水圧条件下で三軸摩擦実験を行い、摩擦特性の温度変化について再検討した (東京大学地震研究所[課題番号: ERI_05])。実験の結果、定常摩擦係数 μ_{ss} は粘土鉱物含有量の増加に伴い系統的に低下し、また温度上昇に伴い増加する傾向が認められた。一方、 $a-b$ 値は温度上昇に伴い減少し、チャート試料は50~100 °C、玄武岩試料は約100 °C、半遠洋性粘土試料は100~150 °C、遠洋性粘土試料は150~200 °Cでそれぞれ正から負へと変化し、負になる温度は粘土鉱物含有量が多いほど高くなった (図5)。この実験結果は、同一温度 (深度) でも断層帯構成物質 (粘土鉱物含有量) の相違によって非地震性~地震性の多様な断層運動が起こることを意味しており、日本海溝沈み込み帯で観察される南北方向の地震活動の不均質が断層帯構成物質 (粘土鉱物含有量) の不均質を反映していることを示唆している。

中下部地殻での岩石破壊にともなう水理学パラメータを制約するために、天然の岩石一流体反応帯から流体活動時間・流体圧・浸透率を制約する新たな手法を確立した (東北大学[課題番号: THK_02])。未破壊の地殻の浸透率は $10^{-22} - 10^{-20} \text{ m}^2$ と非常に低く、き裂を含む破砕された地殻の浸透率は $10^{-16} - 10^{-10} \text{ m}^2$ と数桁上昇することを示した。従来の地殻浸透率見積り (10^{-18} m^2 ; e.g., Ingebritsen and Manning, 2010) は百万年スケールの時間平均であったが、本研究によってその平均浸透率が、未破壊地殻 ($10^{-22} - 10^{-20} \text{ m}^2$)

の破壊による時間～年スケールでの浸透率上昇によって説明できるとともに、中下部地殻における地殻流体圧・浸透率変動の物質科学的な証拠をつかむことにも成功している。これらのことから、地震発生と流体のエピソディックな振る舞いの時空間分解が期待できる。一方、立ち上がりが類似した地震波の検出法を改良し、震源（破壊開始点）の精密決定法を開発した（東京大学理学系研究科[課題番号：UTS_03]）。この手法により、破壊開始点およびセントロイドの相対位置それぞれを独立に、高精度で決定できるようになった。小地震では破壊開始点とセントロイドの位置は同一とみなすと、地震発生域に小地震からなる座標系を設定して、その上に大地震の破壊開始点とセントロイドをマップすることが可能になる。この手法を常陸那珂沖ほか数地域の繰り返し地震を含む地震活動に適用した。常陸那珂沖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。

イ. 地震断層滑りのモデル化

アスペリティでの応力集中による塑性変形は、摩擦面の原子格子構造を大きく乱す要因として挙げられ、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という背景と動機から、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が行なわれた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_04]）。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、剪断変形におけるアモルファス系特有の遅い構造緩和過程によって接触面積が一定の場合でも速度弱化が発生する可能性が示された。また簡単な分子動力学シミュレーションによって、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が確かめられた。

空間ドメインでの境界積分法については、摩擦法則に基づいて断層の滑りの時空間発展を計算するシミュレーションにおいて広く用いられている。この方法において、従来の手法に比べて圧倒的に広い条件で数値的に容易な時間発展計算手法を見つけた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_06]）。このことにより計算メッシュが柔軟に設定できるので断層の不均質をとりこんだ動的シミュレーションが容易になり、また、破壊モードが混在していても安定に計算できるので、非平面な断層を扱うにも有利になると考えられる。さらに、タイムステップを大きくとることができて計算速度も改善することができるようになった。

昨年度、水と塩の二成分流体の二面角を調べ、わずか1～数 wt. %の塩が加わるだけで、二面角が純水の場合よりも大きく低下し、カンラン石の表面を良く濡らすようになることを明らかにした（東北大学[課題番号：THK_02]）。これは、沈み込み流体が蛇紋岩として固定される前弧域と、流体がマントルを融解させる領域の間に、マントル岩の粒間に流体が共存する領域があり、沈み込んだ流体がマントルを浸透して前弧域に直接抜けている可能性を示している。しかし、もう一つの重要な副成分である二酸化炭素は、塩とは反対に二面角を増加させるため、塩と二酸化炭素の効果の競合関係を理解する必要がある。このような問題意識の下、多成分流体の実験を行った結果、二酸化炭素と比べて塩の方が二面角に効果的に作用するため、多成分流体がカンラン石表面を良く濡らすこ

とを突き止めた（東北大学[課題番号：THK_02]）。さらに、沈み込み帯相当の低温高压条件下では、カンラン石の炭酸塩化反応により、流体中の二酸化炭素濃度が大幅に低下するとともに、生成した直方輝石と菱苦土石の影響により、さらに二面角が低下することが明らかになった（図6）。また、多成分流体は二面角が小さく、岩石の溶けた融液に近い分布形態を示す一方で、流体と融液では、弾性的性質に差があることから、地震波トモグラフィデータに基づいて、楔形マントル内の流体と融液を区別してマッピングできる可能性がある。

南アフリカ金鉱山での観測研究もすすみ、M5.5の地震断層が確認された Lamprophyre dyke の Intact 部分では、XRD 分析によってタルクや黒雲母などが確認されていた（立命館大学[課題番号：RTM_01]）。その Intact 部分の高知コアセンターでの V_p 、密度、磁化率の非破壊分析結果と比較したところ、タルクを多く検出した Lamprophyre dyke の密度と磁化率が有意に高く、 V_p が有意に低いことが明らかになった（立命館大学[課題番号：RTM_01]）。

（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

海溝の海側には、一般的にアウターライズ（海溝外縁隆起帯）と呼ばれる地形的高まりが認められる。これはプレートの沈み込みに伴う屈曲によって形成され、海洋プレート浅部は伸張応力場となる。そのため海洋性地殻を断ち切る正断層群が発達するとともにホルスト・グラベン（地塁・地溝）構造が形成され、正断層型の地震（アウターライズ地震）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ター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。宮城沖と三陸沖のアウターライズで反射法地震探査を実施し、ホルスト・グラベン構造を形成する多数の海底活断層（アウターライズ正断層）の高解像度構造をイメージングした（東京大学大気海洋研究所[課題番号：AORI01]）。その結果、三陸沖と宮城沖のアウター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。三陸沖では主に海溝近傍でプレートの折り曲げによって形成した新しい断層が発達しているのに対し、宮城沖では新しい断層と古い断層が混在して存在する。また、宮城沖では堆積層の基本層序（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アウターライズ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。

S-net で観測された常時微動記録に地震波干渉法を適用し、観測網全域にわたる表面波トモグラフィを行った（東北大学[課題番号：THK_02]）。特に、マルチモードの表面波分散曲線の推定手法を開発し、レイリー波基本モード・1次高次モードおよびラブ波基本モードの位相速度マップの推定に成功した（図7）。三陸沖北部の前弧最先端部において周期 14 秒のラブ波位相速度が低速度となっており、Tsuru et al. (2002) によって構造探査から得られている沈み込む堆積層厚の空間分布と調和的である。また、2011 年東北沖地震の大すべり域（Iinuma et al., 20012）と根室沖の微小地震空白域（Takahashi

and Kasahara, 2007) では高速度であり、プレート境界におけるすべり様式と S 波速度構造の対応関係が示唆される。

房総半島沖では自己浮上式海底圧力計 2 台を今年度新たに設置し、計 6 台での観測を続けている。また、2018年に発生した房総沖スロースリップについて、海底圧力計データの解析を行った(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_05])。4 台の圧力計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、海洋変動と思われる成分を除去し、残りの成分にパラメトリックモデルを当てはめてスロースリップによる変動の抽出を試みた。その結果、全 4 地点で 1-2 cm の隆起が見られた。

四国南東部の徳島県海陽町から 2000 年鳥取県西部地震の震源域の北端付近に位置する米子市まで南南東-北北西に延びる測線において、南東部で 2014 年~2017 年に行われたリニアアレイ観測で得られたレシーバ関数と北西部で 2002 年~2004 年の合同観測で得られたレシーバ関数(Ueno et al., 2006)を用いて、レシーバ関数イメージを作成した(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI02])。その結果、フィリピン海スラブ内の海洋モホ面とフィリピン海スラブの上面が明瞭にイメージされ、四国東部下に沈み込むフィリピン海プレートはとても緩やかな傾斜(約 6 度)で、少なくとも中国地方の中ほどまで存在していることがわかった。また、大陸モホ面は測線北端の深さ 30 km から南端の深さ 15 km まで南南東上がりにフィリピン海スラブの上方に位置していると考えられるが、測線の両端部以外では明瞭にイメージされなかった。徳島市から愛媛県西予市まで東北東-西南西に延びる測線においてもレシーバ関数を追加して、レシーバ関数イメージが更新された(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI02])。

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、その地震発生前 2 年間の準静的すべり速度を求め、時間変化について調べた(鹿児島大学[課題番号:KGSM01])。その結果、日向灘中部から奄美大島にかけての広域で準静的すべり速度が概ね全般的に増加していること、この中でも M6.3 が発生した日向灘中部、M6.0 が発生した種子島東方、奄美大島付近と大隅半島南東沖は周囲に比べて準静的すべり速度の増加が相対的に大きいことがわかった。これとは逆に、奄美大島北東沖では準静的すべり速度が明瞭に低下していることがわかった(図 8)。

南西諸島海溝において、令和元年度に設置した 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)の震源決定を実施した(鹿児島大学[課題番号:KGSM01])。最も活発な活動は令和元年(2019 年)9 月から 10 月にかけて発生した。また、マイグレーションを伴う活動も複数回確認されたが、マイグレーション方向は南北両方向に存在している。また、断続的な活動ながらゆっくりとした速度でマイグレーションしている様な活動も見られ、この地域において複数のスロー地震活動パターンがあることが示唆された。浅部微動の分布は、前計画中に実施された臨時観測から求められている分布とも非常によく似ており、観測点数や配置が全く異なる観測網で同じような分布が得られたことから、浅部微動の分布形状の特徴は、この領域において普遍的なものである可能性が高い。

南海トラフ熊野灘での浅部低周波地震(VLFE)については、既存三次元地震探査データの再解析に基づき、地質構造と発生分布の関係を明らかにした(海洋研究開発機構[課題番号:JAMS02])。沈み込む海洋地殻の上面には地殻内断層に起因する起伏に富み、その

上に位置する付加体には覆瓦衝上断層が発達しており、半遠洋性泥質物を主体とする厚い底付けされた堆積層の内部に衝上断層群のデタッチメントが複数確認された。さらに、衝上断層群を切る横ずれを伴う共役な断層群が認められ、プレート沈み込み方向と斜交する最大水平圧縮応力の方向が特定された。また、最大水平圧縮応力の方向は、局在する VLFE と海洋地殻隆起部との位置的關係および低角逆断層型 VLFE のすべり方向と調和的であった。以上から、南海トラフ熊野灘では海洋地殻上面の起伏が上載堆積物内の応力場に影響を与え、堆積層内の既存すべり面に沿う VLFE の発生に寄与していると考えられる。

日向灘では、浅部低周波微動震源域下端と小繰り返し地震発生領域上端の境界付近に観測網を構築し、スロー地震と通常地震の境界領域における地震活動、特にそれらの震源の位置関係や深さの議論を進めるための観測を開始した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI01]）。一方、これまでの観測で得られたデータの解析を進め、2017年～2018年にかけて発生した浅部微動活動の時空間発展を明らかにした。2013年と2015年にもマイグレーションを伴う比較的規模の大きな浅部微動活動が確認されているが、2017～2018年の活動はそれらに匹敵する活動であった。南から北へのマイグレーションと RTR を伴っていること、間を空けて複数回マイグレーションが発生していたこと、さらには観測網が全く異なっているにもかかわらず震央位置がほぼ同じ場所に決まっていることから、2017～2018年の活動は2013年活動の再来であったとも考えられる。この微動活動の南限が種子島東方沖まで連続的に広がっていることが確認されるとともに、その分布や活動度が九州パラオ海嶺の沈み込み構造によって規定されていると想定される。

日向灘ではさらに、3年間に3回にわたって発生した浅部超低周波地震活動の震央分布を調べたところ、沈み込んだ九州パラオ海嶺上の活動は深さ10 kmより深く、それから東に外れた活動は10 kmよりも浅いプレート境界で発生していることが明らかとなった（海洋研究開発機構[課題番号：JAMS02]）。低周波地震の活動に関しても、九州パラオ海嶺の沈み込み構造が影響していることが示唆される。

このようなプレート境界浅部におけるスロー地震については、海外における観測研究も進められている。2018年10月にヒクランギ沈み込み帯北部のギズボーン沖に設置し、2019年10月に回収された5台の海底地震計で取得したデータの解析がおこなわれた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_08]）。この観測期間中の2019年3月から4月にかけて、観測網直下で大規模なスロースリップ（SSE）が発生し、これに伴って活発な微動も観測された。この領域では、2014年にSSEが発生し、そのすべりは沈み込む太平洋プレート上の海山を避けるように分布しており、またそれに伴う微動がその海山上に限って活動していることがわかっていた。2019年3月のSSEに伴う微動活動は、2014年の微動活動と同様、SSEのすべりが終息する時期に活動が活発化し、およそ3週間にわたって継続したことがわかった。その活動規模は2014年の活動を遥かに凌ぐものではあるが、活動分布は2014年と同様に沈み込む海山上で発生していることが明らかとなった。本海域では国際協力で3次元屈折法地震波構造調査を実施しており、3次元P波速度構造とその方位異方性構造を推定した（海洋研究開発機構[課題番号：JAMS02]）。付加体内P波速度の速い軸はプレート沈み込み方向におおむね一致し、クラックの偏向と断層に沿って発達する粘土鉱物の層構造を反映していると考えられる。沈み込む海山の本体と考えら

れる高速度体も3次元的にイメージングされた。これらの結果から、海域下プレート境界における低周波地震の発生様式には、沈み込むプレートの表面形状が影響している可能性が示されている。

プレート内地震の研究では、東北地方・北海道下の上面地震帯の深さ 100-130 km で発生する6つの地震クラスターについて、波形相関走時差 DD 法による精密震源推定およびメカニズム解を推定した（東北大学[課題番号：THK_06]）。その結果、どのクラスターも 1-2 km 四方の領域で主に逆断層型の地震活動であることがわかった。5つのクラスターでは正断層型地震も伴い、逆断層震源より浅い側で多く発生した。こうした downdip compression 場にもかかわらず発生する正断層地震は、地殻物質のエクロジヤイト化による引張場が原因であると解釈した。このことから、エクロジヤイト化に伴う引張場の形成は極めて局所的であることが示唆される。

冷たい沈み込み帯における稍深発地震の原因の1つは、主要な含水鉱物であるローソナイトの脱水である可能性が提案されている。しかし、実験的研究は限られており、ローソナイトの脱水を伴う変形メカニズムは不明である。そこで、スラブ内地震の発生条件を模擬した、沈み込みに伴う加熱と変形が同時進行する変形実験をおこなったところ、ローソナイトの安定領域（500-550°C）内で、断層形成と応力降下を伴うすべりのイベントが観察された（東北大学[課題番号：THK_06]）。微細組織観察からは、断層に沿って極細粒の非晶質物質が存在することが明らかになった。一方、脱水条件での変形実験では、脱水に伴い歪軟化するものの、急激な応力降下は見られなかったため、今後は実験で形成された断層物質の比較を行い、摩擦不安定性のメカニズムを明らかにしていく必要がある。

イ. 内陸地震

内陸地震発生に関しては、地殻内流体の影響が大きいと考えられている。そのため、地球電磁気学的観測研究による地震発生場の研究が多くなされた。中国・四国地方の MT 観測予備調査ならびに四国地方の基盤的比抵抗構造解析を実施した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI03]）。三瓶山周辺域では全般的に地殻は高比抵抗領域として推定された。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以外には低比抵抗領域はみられない。これらの構造は、北部の地殻浅部低比抵抗領域の位置などを除けば塩崎（1993）の研究結果と調和的である。浅野・他（1986）が指摘した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）が発生したが、今回推定された北部の高/低比抵抗境界は、この地震の震源と関連するものかもしれないが、これまで山陰地方で指摘された $10 \Omega \cdot \text{m}$ 以下の地殻深部低比抵抗領域がみられないなどの相違点がある。また、三瓶山周辺から南東方向に伸びる地震活動は高比抵抗領域に対応している（図9）。島根県東部地域は山陰地方の地震活動の帯の中にあって無地震域を形成している場所であり、既存研究からこの地域では、三瓶山周辺域と比べ低比抵抗な地殻構造が示されている（例えば、Shiozaki et al, 2006）。二つの地域の地震活動にみられる違いと比抵抗構造の違いがどのように関連するのか、水平方向の連続性を明らかにする本観測を実施することは、同地域の地震活動や応力の集中・緩和を

考える上で重要である。島弧の軸方向の面的な基盤的比抵抗構造研究の必要性が示された（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI03]）。

地震メカニズムトモグラフィ法（FMT法，Terakawa et al., 2010）による間隙流体圧場の推定と地震時応力変化による ΔCFS の計算を通じて、2016年熊本地震前後の地震活動度の変化における応力と間隙流体圧場の影響を定量的に調べた（Nakagomi et al., 2021）（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI03]）。図10は、地震時応力変化による ΔCFS 及び熊本地震発生前の間隙流体圧係数 C と地震活動度の変化の関係を表している。ここで、間隙流体圧係数 C は、間隙流体圧の静水圧からのずれを静岩圧と静水圧の差で規格化した無次元量である。図11は、地震活動度の顕著な変化（10倍以上の増減）があった領域を ΔCFS の分布上に表示したものである。これらの結果から、大きな特徴として、 $\Delta CFS > 0$ の領域では地震活動度が増加し、 $\Delta CFS < 0$ の領域では地震活動度が減少する傾向が捉えられた。このことは、観測された地震活動度の変化は概ね地震時応力変化で説明できることを意味する。一方、本震前の C 値が高い地域ほど、本震後に地震活動度が増加する傾向があることがわかった。図12は、地震活動度の増加があった領域を間隙流体圧分布上に表示したものである。とくに、熊本地震の震源断層の南側のセグメント付近の高圧間隙流体圧域では、熊本地震後に地震活動度が大きく増加する傾向があった。これは、 ΔCFS だけでなく、本震前の間隙流体圧場も地震活動度の変化に影響を与えていることを示している。 $\Delta CFS < 0$ にも拘わらず熊本地震後に地震活動度が増加した地域で発生した地震は、全体の約14~39%（評価点から3 km及び5 km以内で発生した地震の割合）を占めた。このような ΔCFS からの予想に反して地震活動度が増加する傾向は、 ΔCFS の負の影響が小さいほど、 C 値が高いほど顕著になる（図10）。これらの結果は、応力変化で説明できる余震活動の中に、間隙流体圧の上昇による断層強度の影響を受けて発生したものもあることを示唆する。

北茨城 - いわき地域は、前計画で地震の多発域の下15 kmから25 km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（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_09]）。反射面が存在する深さ14 km~16 km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、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を示した。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。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14 km - 16 kmの深さでは、水の体積分率が1%から数%の、非常に大きな値を示すことが分かった（図13a）。一方、福島県浜通り地震（Mj7.0）の震源域の深さ6 km周辺での水の体積分率は、0.001%から0.01%と非常に小さな値を示した（図13b）。

東北地方の地殻3次元比抵抗構造推定のため、これまで取得されている広帯域MTデータのコンパイルと解析を実施した（東北大学[課題番号：THK_07]）。秋田市雄和地区の秋田空港付近から、仙北市角館町にかけてのほぼ北緯39°36'の緯線に沿う東西測線で、新たに得られたデータを加えた計17測点のデータを用い、2次元比抵抗断面モデルを得

た(図 14)。地震活動は、測線中央部の地殻内に存在する高比抵抗部内部から低比抵抗部の境界にかけて顕著であることが分かった。

2011 年東北沖地震後に山形-福島県境付近に発生した群発地震において、様々なパラメータが 50 日ないし 100 日程度の時定数で急変していることが示されてきたが、今年度、震源域内の詳細な減衰構造 (Q^{-1} 値) の時間変化を調べた結果、やはり同様の時定数で変化していることがわかった(図 15)(東北大学[課題番号: THK_02])。この減衰の時間変化が間隙流体圧の変化に起因しているのであれば、この手法により断層帯内の間隙流体圧の時間変化を調べられる可能性がある。

物質科学的観点から地殻内流体について調べる研究もおこなわれた。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を作成した(京都大学防災研究所[課題番号: DPRI04])。上部および中部地殻には、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いる。観測された電気伝導度構造から地殻の流体分布を推定するためには、様々なスケールのクラックが、それぞれ高圧下でどのような伝導経路として機能するかを理解することが必要である。粒界スケールのクラックについて理解するため、封圧下での含水岩石(庵治花崗岩)の弾性波速度・電気伝導度測定を行ってきた。開いた粒界においては、粒界の開口の大きな部分が高圧下でも開いた状態を維持すること、それが連結して伝導経路として機能していることが分かった。

地下深部の断層の位置を推定する研究もおこなわれた。大阪府北部の地震の余震データを用いて、有馬高槻断層帯(ATL)の深部の位置の推定を行った(京都大学防災研究所[課題番号: DPRI03])。今年は ATL の深部と余震域の相対的な位置関係の推定を試みた。このことは、大阪府北部の地震がどの活断層に関係した地震であるのかという未解決の問題や、今後の地震活動の推移を考える上で、重要な基礎的な知見を提供するものである。大阪府北部の地震の震源断層は、ATL の断層帯の北端に、その北側を限られた可能性が高い。断層帯の南端の位置については、そもそも明瞭な端があるのかも含めて今後の課題であるが、大阪府北部の震源断層は、ATL の断層帯の内部で発生した可能性が示唆される。特に、震源断層の北限が ATL によって限られていることは、この地震が、最深部から始まったにも関わらず、深さ 10 km 程度以深に断層が限られ浅部に破壊が進展しなかった M6 クラスの地震となったことと関係しているものと考えられる。

地震が発生した際に、地震断層の破壊の停止がどのような理由によって起こるかという問題は重要な課題である。断層の破壊の停止と地下構造の関係の研究も進められた。2016 年熊本地震合同地震観測データおよび 2016 年熊本地震以前のデータをもとに震源域の三次元地震波速度構造を決定し、震源再決定および震源メカニズムの推定を行った(九州大学[課題番号: KYU_01])。この研究で得られた速度構造と、MJ 7.3 の地震のすべり分布(Asano and Iwata, 2016)とを比較すると、すべりの大きかった領域は、 $V_p=6.0$ km/s、 $V_s=3.5$ km/s 程度の中庸な速度を持つ領域に対応している。また、より鮮明にイメージングされた阿蘇山西側にある低速度領域は、すべりの大きかった領域の端に分布しており、低速度領域の存在により主要な破壊が停止したと解釈できる(図 16)。

熊本地震震源域周辺の比抵抗構造からは内陸地震ポテンシャル評価をする上で重要な結果が得られた(九州大学[課題番号: KYU_01])。前震、本震を含め M5 以上の規模の大き

い地震は低比抵抗体の近傍で破壊が開始する一方で、M5 より規模が小さい地震は低比抵抗領域から離れた場所でも破壊が開始することが示唆された。また、低比抵抗体内部でも破壊は開始するが、それらはすべて規模が小さい地震であることが示された。低比抵抗体の端部付近から破壊が開始すると規模の大きい地震に成長しやすいことを示した結果であり、高温、高間隙水圧領域から外側に向かって破壊が開始すると破壊が成長しやすいと解釈された。一方、破壊の停止については、熊本地震の本震および前震の破壊停止位置が低比抵抗体の端部に相当することから、高温、高間隙水圧領域に向かって破壊が進展すると、破壊が停止しやすいことが示唆された。しかしながら、本震の大すべり域近傍にもやや低比抵抗な領域が存在し、高温（200–400 °C）、高間隙水圧領域に向かって破壊が進展しても、かならずしも破壊は停止せず、場合によっては破壊が加速されることも示唆された。

断層に対する応力载荷も重要な問題である。地震発生ポテンシャルを評価するうえで重要な要素の一つは下部地殻から地震発生層への応力载荷が挙げられる。そこで地震発生層での応力場が応力の連続性から下部地殻に影響していると考え、下部地殻の非弾性ひずみを検出する手法を開発した（九州大学[課題番号：KYU_01]）。その結果、地震活動が活発な別府一島原地域において下部地殻の非弾性ひずみレートが高いことが見いだされた。特に別府一阿蘇地域においては顕著であり、この領域は地温勾配が高く、低速度異常が下部地殻にあり、地震発生層が薄い領域であった。このことから、この領域の下部地殻においては相対的に粘性が低く、高いひずみレートで変形し、その結果として上部地殻に応力が载荷され、高い地震活動がみられると解釈できる。さらに、緑川断層など、別府一島原地域の西部の断層領域においては上部地殻の主応力方向と地表での主ひずみレート方向が斜交していることから、断層強度が弱いことが示唆された。このように、変形レート・応力を統合的に解釈することによって、下部地殻の非弾性ひずみの不均質によって、地震発生層である上部地殻に応力場が形成される様子をモデリングすることが可能となった(図 17)。

平成 28 年（2016 年）熊本地震による余効変動について、Tomita et al. (2020)の手法に倣い、余効すべりと粘弾性変形それぞれの寄与を同時に推定する手法を試験的に導入した（国土地理院[課題番号：GSI_01]）。厚さ 25 km の弾性層及びその下の Maxwell 粘弾性層の 2 層からなる半無限媒質を仮定し、Fukahata and Matsu'ura (2005)のプログラムを用いて、弾性及び粘弾性グリーン関数を計算した。地震時のすべり量については、3 枚の矩形断層（矢来・他, 2016）を仮定した。地震後 1 年間の水平方向の変位から粘弾性変形を考慮した余効すべりの推定を、MCMC 法を用いて行ったところ、粘弾性層の粘性率が 2×10^{18} Pa s 程度であれば観測データを最もよく説明できることが分かった(図 18)。また、同様の解析を地震後 3 年間の変位を用いて行ったところ、観測データを最もよく説明する粘性率は 5×10^{18} Pa s 程度であった。これらの結果は、粘弾性層における粘性率の時間変化を反映している可能性がある。

島弧全体の構造を考慮した研究もおこなわれた。3 次元余効変動解析から、2011–2016 年までの余効変動解析を実施した（東北大学[課題番号：THK_07]）。GEONET と東北大の持つ宮城–山形、福島–新潟の稠密観測から島弧に沿う南北方向での余効変動の変化を明らかにし、モデル計算から地下のレオロジー構造の不均質性を調べた(図 19)。2 つの測線

での観測を、海溝平行成分、直交成分、垂直成分に分け、モデルとの詳細比較を行い、福島測線に比べ、宮城測線の方が、前弧の高粘性領域（コールドノーズ）が狭いことが明らかになった。

重力の観測量を用いた研究も進められた。長野県松代における超伝導重力計 iGrav (28号機) の観測を維持するとともに、各地で稼働している超伝導重力計の観測点において、絶対重力測定を実施した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_10]）。弟子屈の超伝導重力計（iGrav、17号機）は機械的ドリフトが検定された。国立天文台水沢 VLBI 観測所（岩手県）において、ここ数年続いている重力減少の傾向が引き続き見られた。気象庁松代地震観測所（長野県）においては、2019年までの重力減少の傾向と反して、重力増加を示す結果が得られた。

重力の観測値から伏在断層を検出する研究も進められた（東北大学[課題番号：THK_07]）。仙台平野南部は、長町—利府線断層帯の南方に位置し、また双葉断層の北部延長域でもあり、活断層が隣接する複雑な地域である。宮城県名取市から亘理町を経て南部へ連続すると考えられる伏在活断層と双葉断層帯との関係を明らかにするために、仙台平野南部の宮城県山元町周辺において、重力探査を実施し、伏在活断層の連続性を明らかにすることを試みた。調査測線の北側2本では、微小ではあるが伏在活断層に関連する重力変化を捉えたが、南側の2本の測線では、その延長部分に有意な重力変化はなかった(図 20)。このことから、愛島丘陵から南方へ連続する伏在活断層は、宮城県亘理郡山元町付近が南端となっていると判断した。

海外での陸上観測の研究もおこなわれ、カイクウラ地震に関係した応力再配分を確認することを目的に、定常地震観測網と本課題で実施した臨時観測網のデータを用いて、カイクウラ地震震源域のS波スプリッティング解析を行った（東北大学[課題番号：THK_01]）。期間は2013年から2018年である。得られた速いS波の振動方向には空間変化が見られ、原因について検討をした結果、断層などの構造的異方性や応力による異方性など複数の要因が考えられた。S波スプリッティング解析と V_p/V_s 比の時間変化の検討を行ったが、震源分布の違いに応じ異なる異方性領域を通過したことが原因として考えられた。また、多様なテクトニック環境下でのスロー地震発生メカニズムを理解するために、カイクウラ地震震源域を含むマルボロ断層系において、微動活動の検出と震源決定を行った。その結果、高精度化された震源位置決定により、微動発生域が領域内の特定の位置にクラスター状に存在している様子が明らかとなった。

地球化学的手法を用いた観測研究も進められ、装置を再設置して、和歌山県の本宮観測点での観測を再開することを目指して作業を行った（東京大学理学系研究科[課題番号：UTS_04]）。 4He , N_2 , Ar の計測精度を向上させるために、スペクトルの解析を面積積算法に変更することで、質量数決定精度を改善した。

物質科学的研究も進められた。内陸断層の深部、脆性-塑性遷移付近の岩石変形の物理的性質の3次元構造モデルを地質調査から明らかにし、地震の破壊開始と断層深部の塑性流動との関わりを明らかにするために、調査範囲を断層の走向方向に7km程度に拡大し、この範囲の調査を開始した（産業技術総合研究所[課題番号：AIST05]）。一方、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で明らかにするための準備段階として斜長石の粒成長実験を実施した。まず、斜長石のNa端成分である曹長石の焼結

体合成に成功し、この焼結体を用い融点（1100 °C）に比較的近い 1065 °C、1050 °C、1030 °Cにおいて粒成長実験を実施し、粒成長の活性化エネルギーを含む基本パラメータを決定した。この結果、曹長石の粒成長は 1050 °Cという高温においても 1 μm から 10 μm に成長するのに 1 世紀かかるという非常に遅い粒成長カインेटクスが明らかになった。曹長石は地殻の幅広い条件で安定に存在する主要構成鉱物である。今回の実験結果は、曹長石の粒径依存クリープが地殻の幅広い条件で発現しうる地殻のレオロジーを考える上でも重要な変形機構であることが示唆された。

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

地殻浅部での低周波地震活動が見られる可能性がある地域として、北海道雌阿寒岳周辺で発生した地震を対象に、Frequency Index を用いて低周波地震の識別を行なった（弘前大学理工学研究科[課題番号：HRS_01]）。その結果、地殻浅部の低周波地震の中で火山活動との対応が見られない地震群が、雌阿寒岳北方で発生していたことがわかった。また、地殻深部低周波地震の中で、波形がよく似た地震が 1 週間程度の間隔で繰り返したことを見いだした。この繰り返し低周波地震とも呼ぶべき現象は、深部低周波地震の発生メカニズムを考える上での有用な観測例である。

オ. 構造共通モデルの構築

中国地域の地殻内応力マップを作成するため、過去12年間にわたるマグニチュード 1.5以上の地震の発震機構解を決定した（産業技術総合研究所[課題番号：AIST07]）。気象庁一元化カタログもコンパイルし、10 kmメッシュの応力マップとして纏めた。この応力マップをもとに、地震調査研究推進本部地震調査委員会（2016）が評価対象とした30の活断層の活動性評価を行ったところ、28断層が現在の応力場、一般的な摩擦係数のもとで再活動する条件を満たしていることがわかった。残りの 2 断層が再活動するためには、異常間隙水圧の発生や隣接する活断層の破壊に伴う応力変化でトリガーされるなどの外的要因が必要になると考えられる。また、島根県・鳥取県の日本海側になると応力方位が時計回りに約20° 回転して西北西－東南東方向を示すようになる原因について、先行研究で提案されている下部地殻における非地震性変形のほか、地震発生層深部の高重力異常帯に引き起こされる応力擾乱にある可能性を示した。

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

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、歴史地震学における震度の検証ならびにその定量化を図るため、根津周辺における稠密観測を開始した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_15]）。観測点は 1855 年安政江戸地震の被害史料の分析から被害場所が特定できた地点とその近隣地点に設置し観測点数は 19 点となった。暫定的な結果では、観測点ごとの卓越周波数や振幅の違いが確認できている。

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

海底において空間的に高密度でやや広帯域である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や固有周期120秒を用いた小型広帯域地震計を製作してきた（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_23]）。120秒計を用いた台数の確保に努め、今年度には20台規模で観測に用いることができるようになった。海底での記録の蓄積から雑微動レベルについての知見が蓄積され、上下動成分ではセンサー帯域において低いレベルにとどまるが、水平動成分の雑微動レベルが上下動成分よりも高いことが確認されつつある。しかし、海底における雑微動レベルは一般的な地震観測としては低いレベルであり、スロー地震だけではなく、遠地地震・深発地震なども明瞭に記録された。

海底光ファイバー歪計や海底傾斜計による観測技術の開発を継続しておこなった（海洋研究開発機構[課題番号：JAMS02]）。掘削孔内の間隙水圧や傾斜計では2020年12月～2021年1月にかけて起こった南海トラフの近傍で発生したゆっくり滑りの検出に成功した。その変動量はトラフ近傍のごく浅い断層でのスロースリップによりモデル化されることが示され、その領域はこの期間中での低周波微動の発生域と整合的であることが分かった。

これまでの課題と今後の展望

低頻度で大規模な地震現象の発生履歴、規模、場所の解明は重要な課題である。近い将来発生が懸念される根室沖においてGNSS-Aを用いた海底地殻変動の観測研究が進み、データが取得できるようになった。安定した結果が得られるようになるとプレート間の固着状況についての情報が得られることが期待される。また、日本全体のプレート境界での固着状況の把握に対して、東北沖を含む日本海溝や南海トラフにおけるGNSS-Aを用いた海底地殻変動の観測も継続され、プレート間固着状況がモニタリングできるようになってきている。低頻度で大規模な地震現象の理解に向けて、メキシコやアラスカなど海外における低頻度巨大地震発生域における観測研究も進み、現象の包括的な理解が進んでいる。地震発生過程の解明とモデル化においては、アスペリティの階層性についても研究が行われ、理解が進展している。日向灘や南西諸島については微動現象やスロースリップについての観測による理解が進み、ニュージーランド等海外での観測事例のデータも積み重ねられ、沈み込みの多様性の理解についても進展がみられる。実験室でのサンプリング物質を用いた研究など、観測研究に加え物質科学的見地からの研究も進み、地震現象に対して包括的な理解が進んでいる。内陸地震に関しては、断層形状/微細構造・応力・強度の3要素の把握が順調に進んでおり、特に強度低下の原因として注目されてきた地殻内流体の関与については、2016年熊本地震などにおいてこの考えを支持する多くの成果が得られつつある。また、次のステップとして、地殻内流体の量や圧力の定量化が重要な課題であるが、水の体積分率の推定など定量的理解も進んでいる。前計画から続けられている粘弾性構造を含めた島弧モデルによるシミュレーションを用いた研究もなされ、列島規模での応力場・地殻変動・ひずみ場の時空間変化の理解が進みつつある。

このように様々な沈み込み帯での構造の解明や特徴の抽出が進んでいる。今後、得られた成果を予測に生かすためには、モデル化に向けた研究が必要であると考えられる。また、スロー地震や微動活動の現象解明にもとづき、プレート境界地震に関しての滑りの多様性の理解を進めていく必要がある。内陸地震においては、地殻内流体の関与を裏付ける成果が得られつつあるので、今後は定性的な理解の事例を加えていくとともに、定量的解析の研究も進めていく必要がある。さらに、地殻内流体の理解も踏まえた各地震・各地域の内陸地震発生過程のモデル化も重要なテーマである。このように、多様性の理解やその普遍性の抽出など、現象を理解する研究は進んでいるが、今後予測につなげるためには、モデル化をどう進めていくかが重要な課題となると考えられる。

成果リスト

- Abdallah, S., M. Utsugi, K. Aizawa, M. Uyeshima, W. Kanda, T. Koyama, and T. Shiotani, 2020, Three-dimensional electrical resistivity structure of the Kuju volcanic group, Central Kyushu, Japan revealed by magnetotelluric survey data, *J. Volcanol. Geothermal. Res.*, 400, 106898, doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.106898.
- Aizawa, K., S. Takakura, H. Asaue, K. Koike, R. Yoshimura, K. Yamazaki, S. Komatsu, M. Utsugi, H. Inoue, K. Tsukamoto, M. Uyeshima, T. Koyama, W. Kanda, T. Yoshinaga, N. Matsushima, K. Uchida, Y. Tsukashima, T. Matsushima, H. Ichihara, D. Muramatsu, Y. Teguri, A. Shito, S. Matsumoto and H. Shimizu, 2021, Electrical conductive fluid-rich zones and their influence on the earthquake initiation, growth, and arrest processes: observations from the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Kyushu Island, Japan, *Earth Planet. Space*, 73, 12, doi:10.1186/s40623-020-01340-w.
- Arai, R., S. Kodaira, S. Henrys, N. Bangs, K. Obana, G. Fujie, S. Miura, D. Barker, D. Basset2, R. Bell, K. Mochizuki, R. Kellett, V. Stucker, B. Fry and NZ3D Team, 2020, Three-dimensional P-wave velocity structure of the northern Hikurangi margin from the NZ3D experiment: Evidence for fault-bound anisotropy, *J. Geophys. Res.*, 125(12), e2020JB020433, doi:10.1029/2020JB020433-NA.
- Assah, A.N.E., T. Yokoyama, F.T. Aka, H. Iwamori, T. Kuritani, T. Usui, M.G. Dedzo, J. Tamen, T. Hasegawa, E.M. Fozing, M.J. Wirmvem, and A.L. Nche, 2020, Major/trace elements and Sr-Nd-Pb isotope systematics of lavas from lakes Barombi Mbo and Barombi Koto in the Kumba graben, Cameroon volcanic line: Constraints on petrogenesis, *J. African Earth Sci.*, 161, 103675, doi:10.1016/j.jafrearsci.2019.103675.
- Azuma, R., S. Kodaira, R. Hino, G. Fujie, K. Obana, F. Tomita, and Y. Ohta, 2020, Crustal structure of the incoming Pacific Plate off Hokkaido, the southern Kuril Trench subduction zone, by an active-source seismic survey using dense linear OBS array, AGU Fall Meeting 2020, T018-0004.
- Chang, J-H., J-O. Park, T-T. Chen, A. Yamaguchi, T. Tsuru, Y. Sano, H-H. Hsu, K. Shirai, T. Kagoshima, K. Tanaka, and C. Tamura, 2020, Structural-morphological and

sedimentary features of forearc slope off Miyagi, NE Japan: implications for development of forearc basins and plumbing systems, *Geo-Marine Lett.*, doi.org/10.1007/s00367-020-00636-w.

Farazi, A.H., E.S.M. Garcia, and Y. Ito, 2020, Stability of ambient noise H/V spectra obtained from OBS near the Japan Trench, Events, EGU General Assembly 2020, EGU2020-3999, doi:10.5194/egusphere-egu2020-3999.

Fukahata, Y., A. Meneses-Gutierrez, and T. Sagiya, 2020, Detection of plastic strain using GNSS data of pre- and post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki Earthquake, *Earth Planet. Space*, 72:18, doi:10.1186/s40623-020-1144-1.

Fukahata, Y., K. Oohashi, Y. Takada, and A. Tanaka, 2020, Overview of the special issue Crustal dynamics (Part I): Toward the integration of geology and Geophysics, *地学雑誌*, 129(4), 443-445, doi:10.5026/jgeography.129.443.

深畑幸俊・大橋聖和・高田陽一郎・田中明子, 2020, 特集号「地殻ダイナミクス (Part II) -地質学と地球物理学の融合に向けて-」巻頭言, *地学雑誌*, 129(4), 447-450, doi:10.5026/jgeography.129.447.

Fukai, M., Y. Ogawa, S. Takakura, and M. Mishina, 2020, 3D imaging of NE Japan forearc: implications for fluid distribution and transport, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SEM21-05.

Garcia, E.S.M. and Y. Ito, 2020, Incoming Plate Faulting at the Outer Slope of the Middle America Trench offshore Mexico, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SCG62-P01.

Gou, T., D. Zhao, Z. Huang, and L. Wang, 2020, Structural heterogeneity in source zones of the 2018 Anchorage intraslab earthquake and the 1964 Alaska megathrust earthquake, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 21, e2019GC008812, doi:10.1029/2019GC008812.

Graham, K.M., M.K. Savage, R. Arnold, H.J. Zal, T. Okada, Y. Iio, and S. Matsumoto, 2020, Spatio-temporal analysis of seismic anisotropy associated with the Cook Strait and Kaikoura earthquake sequences in New Zealand, *Geophys. J. Int.*, 223(3), 1987-2008, doi:10.1093/gji/ggaa433.

Hamada, M., H. Iwamori, P.A. Brandl, T. Ushikubo, K. Shimizu, M. Ito, H. Li, and I.P. Savov, 2020, Temporal evolution of proto-Izu-Bonin-Mariana arc volcanism over 10 Ma: Constraints from statistical analysis of melt inclusion compositions, *J. Petrol.*, 61(1), egaa022, doi:10.1093/petrology/egaa022.

Hashimoto, T.M., K. Aizawa, Y. Hayashida, Y. Yuasa, T. Matsushima, Y. Yamamoto, K. Tsukamoto, K. Miyano, S. Matsumoto, and H. Shimizu, 2020, Joint seismological-magnetotelluric investigation of shallow and implosive non-DC and DC earthquakes beneath the gravitationally unstable Heisei-Shinzan Lava Dome, Unzen Volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 406, 107066, doi:10.1016/j.volgeores.2020.107066.

Henry, S., D. Eberhart-Phillips, D. Bassett, R. Sutherland, D. Okaya, M. Savage, D. Evanzia, T. Stern, H. Sato, K. Mochizuki, T. Iwasaki, E. Kurashimo, A. Sewarc, and A. Wech, 2020, Upper plate heterogeneity along the southern Hikurangi margin, New Zealand, *Geophys. Res. Lett.*, 47(4), e2019GL085511, doi:10.1029/2019GL085511.

- 平出裕博, 2021, 仙台平野南部における伏在活断層の南方への連続性, 岩手大学卒業論文.
- Hirauchi, K., Y. Yoshida, Y. Yabe, and J. Muto, 2020, Slow stick-slip failure in halite gouge caused by brittle-plastic fault heterogeneity, *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 21(9), e2020GC009165, doi:10.1029/2020GC009165.
- Hirauchi, K., I. Katayama, and Y. Kouketsu, 2020, Semi-brittle deformation of antigorite serpentinite under forearc mantle wedge conditions, *J. Struct. Geol.*, 140, 104151, doi:10.1016/j.jsg.2020.104151.
- Honsho, C., M. Kido, T. Ichikawa, T. Ohashi, T. Kawakami, and H. Fujimoto, 2021, Application of phase-only correlation to travel-time determination in GNSS-Acoustic positioning, *Front. Earth Sci.*, 9:600732, doi:10.3389/feart.2021.600732.
- 本莊千枝・木戸元之・富田史章・太田雄策・市川俊人・大橋徹・川上太一, 2020, GNSS-Acoustic 測位精度向上にむけた解析手法の改良—位相相関を用いた走時決定と地球潮汐の影響評価—, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SCG66-04.
- Hsiung, K-H., T. Kanamatsu, K. Ikehara, K. Usami, C-H. Horng, N. Ohkouchi, N-O. Ogawa, S. Saito, and M. Murayama, 2021, X-ray fluorescence core scanning, magnetic signatures, and organic geochemistry analyses of Ryukyu Trench sediments: turbidites and hemipelagites., *Prog. Earth Planet. Sci.*, 8:2, doi:10.1186/s40645-020-00396-2.
- Hua, Y., D. Zhao, G. Toyokuni, and Y. Xu, 2020, Tomography of the source zone of the great 2011 Tohoku earthquake, *Nat. Commun.*, 11, 1163, doi:10.1038/s41467-020-14745-8.
- Huang, Y., T. Nakatani, M. Nakamura, and C. McCammon, 2020, Experimental constraint on grain-scale fluid connectivity in subduction zones, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 552, 116610, doi:10.1016/j.epsl.2020.116610.
- Hutchinson, J., H. Kao, M. Riedel, K. Obana, K. Wang, S. Kodaira, T. Takahashi, and Y. Yamamoto, 2020, Significant geometric variation of the subducted plate beneath the northernmost Cascadia subduction zone and its tectonic implications as revealed by the 2014 Mw 6.4 earthquake sequence, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 551, 116569, doi:10.1016/j.epsl.2020.116569.
- Ichiki, M., T. Kaida, T. Nakayama, S. Miura, M. Yamamoto, Y. Morita, and M. Uyeshima, 2021, Magma reservoir beneath Azumayama Volcano, NE Japan as inferred from three-dimensional electrical resistivity image by magnetotellurics, *Earth Planets Space*, submitted.
- 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, 2020, Stationarity of aftershock activities of the 2016 Central Tottori Prefecture earthquake revealed by dense seismic observation, *Earth Planet. Space*, 72:42, doi:10.1186/s40623-020-01161-x.
- 加納靖之, 2020, 紀伊半島における土地傾斜ブロマイド記録のデジタルアーカイブ構築, 東京大学地震研究所技術研究報告, 26, 印刷中.
- 今西和俊・内出崇彦・椎名高裕・松下レイケン・中井未里, 2020, 中国地域の地殻内応力マップ

の作成，地質調査研究報告，受理.

- Imanishi, K., M. Ohtani, and T. Uchide, 2020, Driving stress and seismotectonic implications of the 2013 Mw5.8 Awaji Island earthquake, southwestern Japan, based on earthquake focal mechanisms before and after the mainshock, *Earth Planet. Space*, 72:158, doi:10.1186/s40623-020-01292-1.
- 今西祐一・西山竜一, 2020, 弟子屈における絶対重力測定(2019年および2020年), 東京大学地震研究所彙報, 95(1-4), 9-13.
- Iwamori, H., H. Nakamura, Q. Chang, N. Morikawa, and S. Haraguchi, 2020, Multivariate statistical analyses of rare earth element compositions of spring waters from the Arima and Kii areas, Southwest Japan, *Geochem. J.*, 54(4), 165-182, doi:10.2343/geochemj.2.0583.
- Kanagawa, K., H. Murayama, A. Sugita, M. Takahashi, M. Sawai, N. Furukawa, and T. Hirose, 2020, Weakening of quartz rocks at subseismic slip rates due to frictional heating, but not to lubrication by wear materials of hydrated amorphous silica or silica gel, *Tectonophys.*, 784, 228429, doi:10.1016/j.tecto.2020.228429.
- Kanagawa, K., S. Sagano, T. Nakanishi, J. Fujimori, and M. Sawai, 2020, Frictional properties of incoming sediments and rocks at shallow conditions of the Japan Trench subduction zone, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SCG61-03.
- 金川久一・杉田明日郁・高橋美紀・澤井みち代, 2020, 準地震性変位速度における石英質岩石の摩擦発熱による弱化, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS15-12.
- Kaneki, S. and H. Noda, 2020, On approximations of EASY%Ro solutions to estimate maximum temperature from vitrinite reflectance, *地質学雑誌*, 126(11), 655 - 661, doi:105575/geosoc.2020.0035.
- 亀伸樹, 2020, 地震発生を重力でとらえる—P波到着前の地震シグナル検知—, *地震ジャーナル*, 69, 55-58.
- Kame, N., 2021, Pre-p gravity signals from dynamic earthquake rupture: modelling and observations, *Phill. Trans. A*, 379, 1-13, doi:10.1098/rsta.20200136.
- Kashiwagi, H., J. Nakajima, Y. Yukutake, R. Honda, Y. Abe, and S. Sakai, 2020, Seismic constraint on the fluid-bearing systems feeding Hakone volcano, central Japan, *J. Geophys. Res.*, 125, e2020JB020341, doi:10.1029/2020JB020341.
- 川畑亮二・宗包浩志, 2021, MCMC法を用いた震源断層及びすべり分布モデル推定のためのプロトタイププログラムの開発, *国土地理院時報*, 134.
- Kawakubo, S., R. Azuma, R. Hino, H. Takahashi, K. Ohta, and M. Shinohara, 2020, Shallow low-frequency tremor activity off Erimo, Hokkaido from 2006 to 2007 revealed from pop-up type ocean bottom seismometers, *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A01-04.
- 河村優太・松本 聡・岡田知己・松野弥愛・飯尾能久・佐藤 将・Stephen Bannister・John Ristau・Martha Savage・Clifford Thurber・Richard Sibson, 2020, 高精度震源決定による2016年ニュージーランドカイクウラ地震におけるプレート境界面と断層形状の関係, *日本地震学会2020年度秋季大会*, S09-20.
- 木戸元之, 移動観測・海上多点観測を含むGNSS-音響観測の観測条件について, *日本測地学会第*

134 回講演会, 47.

- Kimura, M., 2021, Detection and quantification of pre-P gravity signals from the 2011 Tohoku-Oki earthquake—Proposal of pre-P gravity seismology through observation and theoretical modeling—, Doctoral Dissertation, University of Tokyo, Japan.
- 木村友季保・木戸元之・太田雄策・本荘千枝・富田史章, 2020, 根室沖の水平・鉛直地殻変動検出のための中心海底局を加えたアレイを用いた GNSS-音響観測, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, MIS13-P01.
- Kumazawa, T., Y. Ogata, and S. Toda, 2020, Wide-area seismicity anomalies before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. J. Int.*, 223(2), 1304-1312, doi:10.1093/gji/ggaa356.
- 熊澤貴雄・尾形良彦, 2020, 群発地震活動の非定常 ETAS モデルによる検出と測地学データに基づく予測可能性について, *地震予知連絡会会報*, 103(12-12), 378-384.
- Machida, Y., S. Nishida, T. Kimura, and E. Araki, 2020, Mobile pressure calibrator for the development of submarine geodetic monitoring systems, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2020JB020284, doi:10.1029/2020JB020284.
- Matsumoto, H. and E. Araki, 2021, Drift characteristics of DONET pressure sensors determined from in-situ and experimental measurements, *Front. Earth Sci.*, 8:600966, doi:10.3389/feart.2020.600966.
- Matsumoto, H., E. Araki, T. Kimura, G. Fujie, K. Shiraishi, T. Tonegawa, K. Obana, R. Arai, Y. Kaiho, Y. Nakamura, T. Yokobiki, S. Kodaira, N. Takahashi, R. Ellwood, V. Yartsev, and M. Karrenbach, Detection of hydroacoustic signals on a fiber-optic submarine cable, *Sci. Rep.*, 11, 2797, doi:10.1038/s41598-021-82093-8.
- Matsumoto, S., T. Okada, T. Terakawa, M. Uyeshima and Y. Iio, 2020, The advancement of research on inland earthquake generation 2014-2018, *J. Disast. Res.*, 15, 96-105, doi:10.20965/jdr.2020.p0096.
- 松本 聡・河村優太・岡田知己・松野弥愛・飯尾能久・Rick Sibson・Martha Savage・Kenny Graham・鈴木真奈美・Stephen Bannister, 2020, 2016 年カニコウラ地震震源域下の S 波反射面の検出およびその本震・余震活動との関連, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS11-03.
- 松野弥愛, 2020, 2016 年ニュージーランド・カニコウラ地震震源域における応力場の時空間変化, 東北大学修士論文.
- Matsushima, N., M. Utsugi, S. Takakura, T. Yamasaki, M. Hata, T. Hashimoto, and M. Uyeshima, 2020, Magmatic-hydrothermal system of Aso Volcano, Japan, from electrical resistivity structures, *Earth Planet. Space*, 72:57, doi:10.1186/s40623-020-01180-8.
- McHugh, C., M. Seeberb, L. Rasburyc, T. Strasserd, M. Kioka, A. Kanamatsu, T. Ikehara, and K. Usami, 2020, Isotopic and sedimentary signature of megathrust ruptures along the Japan subduction margin, *Marine Geology*, 428, 106283, doi:10.1016/j.margeo.2020.106283.
- Mindaleva, D., M. Uno, F. Higashino, T. Nagaya, A. Okamoto, and N. Tsuchiya, 2020, Rapid fluid infiltration and permeability enhancement during middle-lower crustal

- fracturing: Evidence from amphibolite-granulite-facies fluid-rock reaction zones, Sør Rondane Mountains, East Antarctica, *Lithos*, 372-373, 105521, doi:10.1016/j.lithos.2020.105521.
- Mitogawa, T. and T. Nishimura, 2020, Coulomb stress change on inland faults during megathrust earthquake cycle in southwest Japan, *Earth Planet. Space*, 72:60, doi:10.1186/s40623-020-01174-6.
- Nishimura, T., 2020, Slow slip events in the Kanto and Tokai regions of central Japan detected using GNSS data during 1994-2020, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 22(2), e2020GC009329, doi:10.1029/2020GC009329.
- Mitsuoka, A., A. Shito, S. Matsumoto, Y. Yamashita, M. Nakamoto, S. Sakai, Y. Iio, H. Shimizu, K. Goto, T. Okada, M. Ohzono, Y. Yamanaka, M. Kosuga, M. Yoshimi and Y. Asano, 2020, Spatiotemporal Change in the Stress State Around the Hypocentral Area of the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2019JB018515, doi:10.1029/2019JB018515.
- Mitsuoka, T., A. Toramaru, A. Harijoko, and H.E. Wibowo, 2021, Eruption types and conduit dynamics of Kulkan and Genteng volcanoes of the Ijen volcanic complex, Indonesia, *Memoirs of the Faculty of Sciences, Kyushu University, Series D Earth and Planetary Sciences, Volume XXXV, 1, 1-17.*
- 水田達也・岡田知己・Savage Martha・高木涼太・吉田圭佑・八木原寛・松島 健・片尾 浩・山中佳子・小菅正裕・勝俣 啓・大園真子・中山貴史・平原 聡・河野俊夫・松澤 暢・2011年東北地方太平洋沖地震緊急観測グループ, 2020, S波スプリッティング解析による東北地方の地震波速度異方性測定(2), 日本地震学会 2020年度秋季大会, S06P-03.
- Mngadi, S., A. Tsutsumi, Y. Onoe, M.S.D. Manzi, R. Durrheim, Y. Yabe, H. Ogasawara, S. Kaneki, N. Wechsler, A. Ward, M. Naoi, H. Moriya, and M. Nakatani, 2020, The effect of a gouge layer on rupture propagation along brittle shear fractures in deep and high-stress mines, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 137, doi:10.1016/j.ijrmms.2020.104454.
- Motoyama, A., M. Ichiki, Y. Ogawa, M. Uyeshima, K. Asamori, T. Uchida, T. Koyama, S. Sakanaka, H. Hase, K. Aizawa, and Y. Yamaya, 2020, A three-dimensional electrical conductivity model of the crust beneath the southern Tohoku district, NE Japan, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SIT24-P03.*
- 村田耕一・佐藤利典・塩原 肇・篠原雅尚・山田知朗, 2020, マルチチャンネル特異スペクトル解析とパラメトリック関数のフィッティングを併用した海底圧力計データの解析, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS14-P15, 2020.*
- 永田広平・中谷正生・吉田真吾, 2020, 透過弾性波を用いたガウジ層内を含む断層内部状態の観察, 日本地震学会 2020年度秋季大会, S12-P04.
- Nakagomi, K., T. Terakawa, S. Matsumoto, and S. Horikawa, 2021, Stress and pore-fluid pressure control of seismicity rate changes following the 2016 Kumamoto earthquake, Japan, *Earth Planet. Space*, 73:11, doi:10.1186/s40623-020-01329-5.
- Nakamura, H., A. Sano, S. Kagami, T. Yokoyama, A. Ishikawa, T. Komiya, and H. Iwamori,

2020, Compositional heterogeneity of Archean mantle estimated from Sr and Nd isotopic systematics of basaltic rocks from North Pole, Australia, and the Isua supracrustal belt, Greenland, *Precambrian Res.*, 347, 105803, doi:10.1016/j.precamres.2020.105803.

Nakamura Y., T. Fujiwara, S. Kodaira, S. Miura, and K. Obana, 2020, Correlation of frontal prism structures and slope failures near the trench axis with shallow megathrust slip at the Japan Trench, *Sci. Rep.*, 10:11607 doi:10.1038/s41598-020-68449-6.

Nakata, R., T. Hori, and R. Hino, 2020, Modelling of spontaneous and periodic slow slip in the northern part of the Japan Trench, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SCG61-P04.

仲谷幸浩・八木原寛・平野舟一郎・中尾 茂・宮町宏樹・小林励司・山下裕亮・清水 洋・松島 健・内田和也・中東和夫・阿部英二・山田知朗・篠原雅尚, 2020, 南西諸島海溝北部の準定常海底地震観測網により検出された相似地震の発生間隔と空間分布, *日本地震学会 2020 年度秋季大会*, S22-05.

Nakatani, Y., H. Yakiwara, S. Hirano, R. Kobayashi, H. Miyamachi, S. Nakao, Y. Yamashita, K. Uchida, T. Matsushima, H. Shimizu, K. N., T. Yamada, H. Abe, and M. Shinohara, 2020, Similar earthquake activity in the northern part of the Ryukyu subduction zone observed by onshore and offshore seismic data, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SSS03-P10.

Noda, H., D.S.K. Sato, and Y. Kurihara, 2020, Comparison of two time-marching schemes for dynamic rupture simulation with a space-domain BIEM, *Earth Planet. Space*, 72:76, doi:10.1186/s40623-020-01202-5.

Noda, H. and K. Okazaki, 2020, A fault constitutive law in a brittle-plastic transitional regime accounting for geometry of deformation in a shear zone, *JpGU-AGU Joint Meeting*, SSS15-08.

Noda, H., 2021, Shear strength of a shear zone in the brittle-plastic transition based on tensorial strain partitioning, *J. Struct. Geol.*, in press.

野村俊一・尾形良彦, 2020, 多様な予測方式に対する前震識別モデルとその予測性能評価, *地震予知連絡会会報*, 103 (12-8), 361-366.

小笠原宏, 2020, 南アフリカ大深度金鉱山の地震リスク低減 - 2010~2015 年度 SATREPS 研究成果の概要 -, *地震ジャーナル*, 70, 32-41.

Ogasawara, H., B. Liebenberg, Y. Yabe, Y. Yokoyama, T. Hirono, D.M. Nisson, T.C. Onstott, T.L. Kieft, E. van Heerden, T. Wiersberg, T. Noda, M.S.D. Manzi, S.B. Mngadi, R.J. Durrheim, Y. Yamamoto, T. Ito, A. Funato, M. Ziegler, J.J. Mori, C. Dinske and the DSeis team, 2020, The seismogenic zones of an M2.0-5.5 earthquakes successfully recovered in deep South African gold mines: the outcomes and the follow-up plan, *EGU General Assembly 2020*, EGU2020-12094, doi:10.5194/egusphere-egu2020-12094.

Ogata, Y., K. Katsura, M. Tanemura, D. Harte, and J. Zhuang, 2021, Bayesian seismicity analysis based on Delaunay triangle nets: Hierarchical Space-Time Point Process Models (HIST-PPM; including HIST-ETAS model) *Computer Science Monograph No. 35*,

- Institute of Statistical Mathematics, <https://www.ism.ac.jp/editsec/csm/index.html>.
- Ogata, Y., 2021, Visualizing heterogeneities of earthquake hypocenter catalogs: modeling, analysis, and compensation, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 8:8, doi:10.1186/s40645-020-00401-8.
- Ogata, Y. and T. Omi, 2020, Statistical monitoring and early forecasting of the earthquake sequence: Case studies after the 2019 M 6.4 Searles Valley earthquake, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 110(4), 1781-1798, doi:10.1785/0120200023.
- 尾形良彦, 2020, 階層的時空間 ETAS モデルによる短期・中期予測, 地震予知連絡会会報, 103(12-13), 385-387.
- Ohtani, M., M. Nakatani, and N. Kame, 2021, Time to seismic failure induced by repeating SSEs in a single-degree-of-freedom spring-slider model, *Geophys. J. Int.*, 224(2), 1242-1255, doi:10.1093/gji/ggaa489.
- Okada, T., M. Matsuno, S. Matsumoto, Y. Kawamura, Y. Iio, T. Sato, T. Nakayama, S. Hirahara, S. Bannister, J. Ristau, M. Savage, C. Thurber, and R. Sibson, 2020, Possible involvement of overpressured fluid in multi-fault rupture inferred from seismic observations of the 2016 Kaikoura earthquake, Annual Conference of Geoscience Society of New Zealand, Christchurch, New Zealand.
- 大橋聖和・竹下 徹・平内健一, 2020, 断層帯と断層レオロジーの進化, 地学雑誌, 129(4), 473-489, doi:10.5026/jgeography.129.473.
- 大竹和機・亀 伸樹・大谷真紀子, 2020, 構造不均質中の2次元地震サイクルシミュレーションで必要となる静的XBIEM核関数の全導出, 日本地震学会2020年度秋季大会, S08P-11.
- Ootani, Y., J. Xu, N. Takahashi, K. Akagami, S. Sakaki, Y. Wang, N. Ozawa, T. Hatano, K. Adachi, and M. Kubo, 2020, Self-Formed Double Tribolayers Play Collaborative Roles in Achieving Super-Low Friction in Aqueous Environment, *J. Phys. Chem. C*, 124, 15, 8295-8303, doi:10.1021/acs.jpcc.0c02068.
- Plata-Martinez R.O., S. Ide, M. Shinohara, E.S.M. Garcia S., N. Mizun, L.A. Dominguez, T. Taira, Y. Yamashita, A. Toh, T. Yamada, J.A. Real, V.M. Cruz-Atienza, A. Husker, and Y. Ito, 2020, First detection of shallow tremor at the Guerrero gap, Mexico, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, S-CG58.
- Plata-Martinez R.O., Y. Ito, and V.M. Cruz-Atienza, 2020, Explorando nuestro planeta para descifrar sus secretos: ejemplo de un proyecto multidisciplinario entre México y Japón, Reunión Anual de la Union Geofísica Mexicana 2020, SE12-01.
- Plata-Martinez R.O., S. Ide, M. Shinohara, E.S.M. Garcia S., N. Mizun, L.A. Dominguez, T. Taira, Y. Yamashita, A. Toh, T. Yamada, J.A. Real, V.M. Cruz-Atienza, A. Husker, and Y. Ito, 2020, Shallow slow earthquakes and mechanical properties at the Guerrero seismic Gap, Mexico, AGU Fall Meeting 2020, S027-0013.
- Romanet, P., F.A. Antoniow, R. Ando, S. Bannister, C. Chamberlain, Y. Iio, S. Matsumoto, T. Okada, R.H. Sibson, A. Toh, and S. Ide, 2021, Detection of tremor in the Marlborough region and its relationship with the 2016 Mw 7.9 Kaikoura (New Zealand) earthquake, EGU General Assembly 2020, EGU21-637, doi:10.5194/egusphere-egu21-637.

- Roy R. and T. Hatano, 2020, Creep failure in a threshold activated dynamics: Role of temperature during a sub-critical loading, *Phys. Rev. Res.*, 2, 023104, doi:10.1103/PhysRevResearch.2.023104.
- Saitoh, K., T. Hatano, A. Ikeda, and B.P. Tighe, 2020, Stress Relaxation above and below the Jamming Transition, *Phys. Rev. Lett.* 124, 118001, doi:10.1103/PhysRevLett.124.118001.
- Sano, Y., T. Kagoshima, N. Takahata, K. Shirai, J-O. Park, G.T. Snyder, T. Shibata, J. Yamamoto, Y. Nishio, Ai-Ti Chen, S. Xu, D. Zhao, and D.L. Pinti, 2020, Groundwater Anomaly Related to CCS-CO2 Injection and the 2018 Hokkaido Eastern Ibari Earthquake in Japan, *Front. Earth Sci.*, 8:611010, doi:10.3389/feart.2020.611010.
- Sato, Y., S. Shinzato, T. Ohmura, T. Hatano, and S. Ogata, 2020, Unique universal scaling in nanoindentation pop-ins, *Nat. Commun.*, 11, 4177, doi:10.1038/s41467-020-17918-7.
- Sawai, M., J. Fukaumi, M. Takahashi, Y. Hayasaka, and K. Kanagawa, 2020, Frictional properties of greenstone: Effects of the seamount subduction on faulting at the subduction zone, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SCG57-P03.
- Sawa, S., N. Miyajima, J. Muto, and H. Nagahama, accepted, Strain-induced partial serpentinization of germanate olivine with a small amount of water, *Am. Mineral.*, doi:10.2138/am-2021-7735.
- Sawa, S., N. Miyajima, J. Muto, and H. Nagahama, 2020, Strain-induced partial serpentinization of germanate olivine under unsaturated, limited amount of water, *The 61st High Pressure Conference of Japan*.
- Sawa, S., N. Miyajima, J. Muto, and H. Nagahama, 2021, Microstructure evolution of olivine-spinel phase transformation under differential stress for deep-focus earthquakes by phase field method, *ICOTOM 19 (March 1-4, 2021)*.
- Sawaki, Y., Y. Ito, K. Ohta, T. Shibutani, and T. Iwata, 2020, A new approach to clarify slow earthquake source regions: Multi-band receiver function analysis including local deep-focus events, *EGU General Assembly 2020*, EGU2020-4921, doi:10.5194/egusphere-egu2020-4921.
- Sawaki, Y., Y. Ito, K. Ohta, T. Shibutani, and T. Iwata, 2020, Multi-band receiver function analysis including Local Deep-focus Events in Northeastern Kii, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SCG58-14.
- 佐脇泰典・植村美優・片山郁夫・伊藤喜宏, 2020, 室内摩擦実験におけるレシーバ関数法の適用, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SSS15-P16.
- Seki, K., W. Kanda, K. Mannen, S. Takakura, T. Koyama, R. Noguchi, Y. Yukutake, M. Ishikawa, M. Fukai, M. Harada, and Y. Abe, 2021, Imaging the source region of the 2015 phreatic eruption at Owakudani, Hakone Volcano, Japan, using high-density audio-frequency magnetotellurics, *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2020GL091568, doi:10.1029/2020GL091568.
- 澁谷拓郎・中川潤・長岡愛理・三浦勉・山下裕亮・山崎健一・小松信太郎, 2020, 四国下に沈

み込むフィリピン海プレートのレシーバ関数イメージング (3) , 日本地震学会 2020 年度秋季大会, S06-08.

Shito, A., S. Matsumoto, T. Ohkura, H. Shimizu, S. Sakai, Y. Iio, H. Takahashi, H. Yakiwara, T. Watanabe, M. Kosuga, T. Okada, M. Yoshimi, and Y. Asano, 2020, 3-D intrinsic and scattering seismic attenuation structures beneath Kyushu, Japan. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2019JB018742, doi:10.1029/2019JB018742.

志藤あずさ・光岡郁穂・松本 聡・松島 健・相澤広記・清水 洋・内田和也・神菌めぐみ・手操佳子・中元真美・宮町凜太郎・一柳昌義・大園真子・岡田和見・勝俣 啓・高田真秀・高橋浩晃・谷岡勇市郎・山口照寛・小菅正裕・東 龍介・内田直希・江本賢太郎・太田雄策・岡田知己・海田俊輝・小園誠史・鈴木秀市・高木涼太・出町知嗣・中原 恒・中山貴史・平原 聡・松澤暢・三浦 哲・山本 希・今西和俊・内出崇彦・吉見雅行・青井 真・浅野陽一・上野友岳・藤田英輔・阿部英二・飯高 隆・岩崎貴哉・加藤愛太郎・蔵下英司・酒井慎一・椎名高裕・芹澤正人・田中伸一・中川茂樹・平田 直・増田正孝・宮川幸治・八木健夫・渡邊篤志・後藤和彦・伊藤武男・奥田 隆・寺川寿子・堀川信一郎・前田裕太・松廣健二郎・山中佳子・渡辺俊樹・飯尾能久・片尾 浩・加納靖之・津田寛大・三浦 勉・村本智也・山下裕亮・大久保慎人・山品匡史・大倉敬宏・中尾 茂・平野舟一郎・宮町宏樹・八木原寛, 2020, 2016 年熊本地震合同地震観測データ —地震学的解析の基礎的資料として—, *地震* 2, 73, 149-157, doi:10.4294/zisin.2019-11.

清水以知子・岡本あゆみ・A. Niemeijer・中谷正生・荒井 駿・C. Spiers・竹下 徹・上田匡将, 2020, 中央構造線の断層強度と脆性-延性遷移, *JpGU-AGU Joint Meeting*, SCG63-12.

Shimizu, K., Y. Yagi, R. Okuwaki, and Y. Fukahata, 2020, Development of an inversion method to extract information on fault geometry from teleseismic data, *Geophys. J. Int.*, 220, 1055-1065, doi:10.1093/gji/ggz496.

Shimizu, K., Y. Yagi, R. Okuwaki, and Y. Fukahata, 2021, Construction of fault geometry by finite-fault inversion of teleseismic data, *Geophys. J. Int.*, 224, 1003-1014, doi:10.1093/gji/ggaa501.

Shinohara, M., T. Yamada, K. Uehira, S. Sakai, H. Shiobara, and T. Kanazawa, 2021, Development and operation of an Ocean Bottom Cable Seismic and Tsunami observation system (OBCST) in the source region of the Tohoku-oki earthquake, *Earth Space Sci.*, 8(3), e2020EA001359, doi:10.1029/2020EA001359.

Shiobara, H, A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara, and T. Sato, 2021, Tilt observations at the seafloor by mobile ocean bottom seismometers, *Front. Earth Sci.*, 8:599810, doi:10.3389/feart.2020.599810.

塩原 肇・杉岡裕子・太田豊宣・大西信人, 2020, -自律型新方式海底地震計の開発試験に向けた深海用-小型ビデオカメラの開発, *東京大学地震研究所技術研究報告*, 26, 1-9.

Shiraishi K., Y. Yamada, M. Nakano, M. Kinoshita, and G. Kimura, 2020, Three-dimensional topographic relief of the oceanic crust may control the occurrence of shallow very-low-frequency earthquakes in the Nankai Trough off Kumano, *Earth, Planet. Space*, 72:72, doi:10.1186/s40623-020-01204-3.

Shiraishi, R., J. Muto, A. Tsunoda, S. Sawa, and A. Suzuki, 2020, Semi-brittle behavior

of lawsonite in high pressure deformation experiments, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SCG69-02.

白石令・武藤潤・久保友明・森悠一郎・本田陸人・肥後祐司・丹下慶範, 2020, 高温高圧下におけるローソナイトの変形挙動, 第61回高圧討論会, 2P28.

Suzuki, T., 2020, Introducing linear marginal stability hypothesis for obtaining slip-front-propagation velocity with the slip- and slip-velocity-dependent friction law, AGU Fall Meeting, S31-0012.

Suzuki, T. and H. Matsukawa, 2020a, Systematic understanding of slip-front-propagation velocity with the slip-velocity-dependent friction law, Slow Earthquakes Workshop, P-C2-07.

Suzuki, T. and H. Matsukawa, 2020b, Slip-front-propagation velocity with non-vanishing friction stress at infinitely large slip velocity, JpGU-AGU Joint Meeting, SCG58-31, 12-15 July, online.

鈴木岳人, 2020, 2種類の滑り端伝播と線形臨界定性解析によるその伝播速度の解析, 日本地震学会2020年度秋季大会, S08-16.

Suzuki, T., 2021, Characteristic sensitivity of turbulent flow within a porous medium under initial conditions, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 90, 024401, doi:10.7566/JPSJ.90.024401.

Tanaka, Y., V. Klemann, and Z. Martinec, 2020, Estimating the effects of laterally heterogeneous elasticity on coseismic deformation -a rotationally symmetric case, AGU Fall Meeting 2020, G53B-0615.

Takagi, R., G. Toyokuni, and N. Chikasada, 2021, Ambient noise correlation analysis of the S-net records: extracting surface wave signals below instrument noise levels, *Geophys. J. Int.*, 224, 1640-1657, doi:10.1093/gji/ggaa548.

Takahashi, H., R. Hino, N. Uchida, K. Ohta, and M. Shinohara, 2020, Low-frequency tremor activity along northern Japan Trench before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, AGU Fall Meeting 2020, T003-0013.

田上綾香, 2020, 日本海東縁地域の応力場と発生した地震の断層面との関係, 東北大学修士論文.

Terakawa, T., W. Seo, K.H. Kim, and J.H. Ree, 2020, 3D pore-fluid pressures in source region of 2017 Pohang earthquake inferred from earthquake focal mechanisms, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2019GL085964.

寺川寿子・中込広大・松本聡・堀川信一郎・2016年熊本地震合同地震観測グループ, 2016年熊本地震の余震発生における間隙流体圧の影響, JpGU-AGU Joint Meeting, SSS15-14.

寺川寿子・Wooseok Seo・Kwang-Hee Kim・Jin-Han Ree, 2017年韓国浦項地震の発生メカニズム, 日本地震学会2020年度秋季大会, S08-03.

Tomonaga, Y., K. Yagasaki, J.-O. Park, J. Ashi, S. Toyoda, N. Takahata, and Y. Sano, 2020, Fluid dynamics along the Nankai Trough: He isotopes reveal direct seafloor mantle-fluid emission in the Kumano Basin (southwest Japan), *ACS Earth Space Chem.*, 4(11), 2105-2112, doi:10.1021/acsearthspacechem.0c00229.

Tonegawa, T., Y. Yamashita, T. Takahashi, M. Shinohara, Y. Ishihara, S. Kodaira and Y.

- Kaneda, 2020, Spatial relationship between shallow very low frequency earthquakes and the subducted Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-nada region of the Nankai subduction zone, *Geophys. J. Int.*, 222, 1542-1554, doi:10.1093/gji/ggaa264.
- Tonegawa, T., T. Kimura, and E. Araki, 2021, Near-field body-wave extraction from ambient seafloor noise in the nankai subduction zone, *Front. Earth Sci.*, 8, 699, doi:10.3389/feart.2020.610993.
- 土山 絢子・中島 淳一, 2020, 深発の相似地震における震源パラメータの多様性, 日本地震学会 2020 年度秋季大会, S09-24.
- Tsuru, T., J.-O. Park, K. Amakasu, T. No, K. Arai, T. Inoue, S. Furuyama, K. Uchida, and Y. Nakamura, 2020, Possible fluid discharge associated with faults observed by a high-resolution dense-2D seismic reflection survey in Uchiura Bay off Numazu, Japan, *Earth Planet. Space*, 72:121, doi:10.1186/s40623-020-01242-x.
- Uchide, T., 2020, Focal mechanisms of small earthquakes beneath the Japanese islands based on first-motion polarities picked using deep learning, *Geophys. J. Int.*, 223(3), 1658-1671, doi:10.1093/gji/ggaa401.
- Ueda, T., A. Kato, Y. Ogata, and L. Yamaya, 2021, Spatial Variations in Seismicity Characteristics in and Around the Source Region of the 2019 Yamagata-Oki Earthquake, Japan, *Earth Planet. Space*, doi:10.1186/s40623-020-01325-9.
- Ueki, K., T. Kuwatani, A. Okamoto, S. Akaho, and H. Iwamori, 2020, Thermodynamic modeling of hydrous-melt-olivine equilibrium using exhaustive variable selection, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 300, 106430, doi:10.1016/j.pepi.2020.106430.
- Wang, Z.W., and D. Zhao, 2021, 3D anisotropic structure of the Japan subduction zone, *Sci. Adv.* 7, eabc9620, doi:10.1126/sciadv.abc9620.
- Yabe, Y., M. Kanematsu, M. Higashi, R. Tadokoro, S. Yoshida, K. Sugimura, H. Ogasawara, T. Ito, A. Funato, M. Ziegler, B. Liebenberg, B. Watson, S. Mngadi, M. Manzi, and R. Durrheim, 2020, Stress state in the upper margin of the aftershock zone of the 2014 Orkney earthquake (M5.5), South Africa, estimated from analyses of drill cores and borehole breakouts of ICDP-DSeis drillings, EGU General Assembly 2020, EGU2020-3288, doi:10.5194/egusphere-egu2020-3288.
- Yabe, S., Y. Hamada, and T. Suzuki, 2020, Competing thermal pressurization and dilatancy hardening realizes coexistence of fast and slow slip on the shallow plate boundary fault, AGU Fall Meeting, S31-0004.
- 矢部 優, 鈴木 岳人, 2020, スロー地震と巨大地震が共存する浅部デコルマの断層破壊メカニズム: 掘削試料を用いた断層破壊数値計算による検討, JpGU-AGU Joint Meeting, SSS15-18.
- Yamasaki, T., H. Takahashi, M. Ohzono, T. J. Wright, and T. Kobayashi, 2020, Time influence of elastic thickness non-uniformity of viscoelastic crustal response to magma emplacement: application to the Kutcharo caldera, eastern Hokkaido, Japan, *Geophys. J. Int.*, 224, 701-718, doi:10.1093/gji/ggaa440.
- Yamashita S. and A. Toramaru, 2020, Control of magma plumbing systems on long term eruptive behavior of Sakurajima volcano: Insights from CSD (Crystal Size

Distribution) analysis, Dynamic Magma Evolution, Geophysical Monograph 254, First Edition, Edited by Francesco Vetere, doi:10.1002/9781119521143.ch4.

山下裕亮・仲谷幸浩・八木原寛・平野舟一郎・中尾 茂・宮町宏樹・小林励司・清水 洋・松島 健・内田和也・中東和夫・阿部英二・山田知朗・篠原雅尚, 2020, 喜界島東方海域における浅部低周波微動活動(その1), 日本地震学会2020年度秋季大会, S22P-04.

Yamashita, Y., M. Shinohara, H. Sugioka, and A. Ito, 2020, Shallow low-frequency tremor at Hyuga-nada (2017-2018), Slow Earthquakes Workshop 2020, P-A01-16.

Yamashita, Y., K. Mochizuki, M.K. Savage, E. Warren-Smith, and L.M. Wallace, 2020, Ocean bottom seismological observation of slow earthquake activity in the northern part of the Hikurangi subduction margin, New Zealand, AGU Fall meeting 2020, T017-0001.

Yamaguchi, Y., S. Biswas, T. Hatano, and L. Goehring, 2020, Failure processes of cemented granular materials, Phys. Rev. E 102, 052903, doi:10.1103/PhysRevE.102.052903.

Ye, T., X. Chen, Q. Huang, L. Zhao, Y. Zhang, and M. Uyeshima, 2020, Bifurcated crustal channel flow and seismogenic structures of intraplate earthquakes in western Yunnan, China as revealed by three-dimensional magnetotelluric imaging, J. Geophys. Res.: Solid Earth, 125, e2019JB018991, doi:10.1029/2019JB018991.

Yoshida, K., T. Taira, Y. Matsumoto, T. Saito, K. Emoto, and T. Matsuzawa, 2020, Stress release process along an intraplate fault analogous to the plate boundary: A case study of the 2017 M5.2 Akita-Daisen earthquake, NE Japan, J Geophys. Res.: Solid Earth, 125(5), e2020JB019527, doi.10.1029/2020JB019527.

吉田圭佑・松澤 暢, 2020, 近年の地震観測により得られた東北日本の応力場の不均質性と断層強度および地震発生機構の関係, 地学雑誌, 129(4), 451 - 471, doi:10.5026/jgeography.129.451.

Yoshida, K., 2021, Detection of temporal change in near-source attenuation during intense fluid-driven seismicity following the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Geophys. J. Int., 224, 138-150, doi:10.1093/gji/ggaa421.

Yoshida, K., A. Hasegawa, S. Noguchi, and K. Kasahara, 2020, Low-frequency earthquakes observed in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan, Geophys. J. Int., 223, 1724-1740, doi:10.1093/gji/ggaa418.

Yoshida, K., N. Uchida, S. Hirahara, T. Nakayama, T. Matsuzawa, T. Okada, Y. Matsumoto, and A. Hasegawa, 2020, 2019 M6.7 Yamagata-Oki earthquake in the stress shadow of 2011 Tohoku-Oki earthquake: Was it caused by the reduction in fault strength?, Tectonophys., 793, 228609, doi:10.1016/j.tecto.2020.228609.

Yu, Z. and D. Zhao, 2020, Seismic evidence for water transportation in the forearc off Northern Japan, J. Geophys. Res.: Solid Earth, 125, e2019JB018600, doi:10.1029/2019JB018600.

行竹洋平, 2020, 箱根火山の深部低周波地震, 地震ジャーナル, 69, 31-41.

- Yukutake, Y., T. Iwata, and Y. Iio, 2020, Estimation of the heterogeneity of stress fields using misfit angles in focal mechanisms. *Tectonophys.*, 290, 228553, doi:10.1016/j.tecto.2020.228553.
- Zhao, D., 2021, Seismic imaging of northwest pacific and east Asia: New insight into volcanism, seismogenesis and geodynamics, *Earth Sci. Rev.*, 214, 103507, doi:10.1016/j.earscirev.2021.103507.

根室沖17世紀地震震源域周辺のプレート境界構造

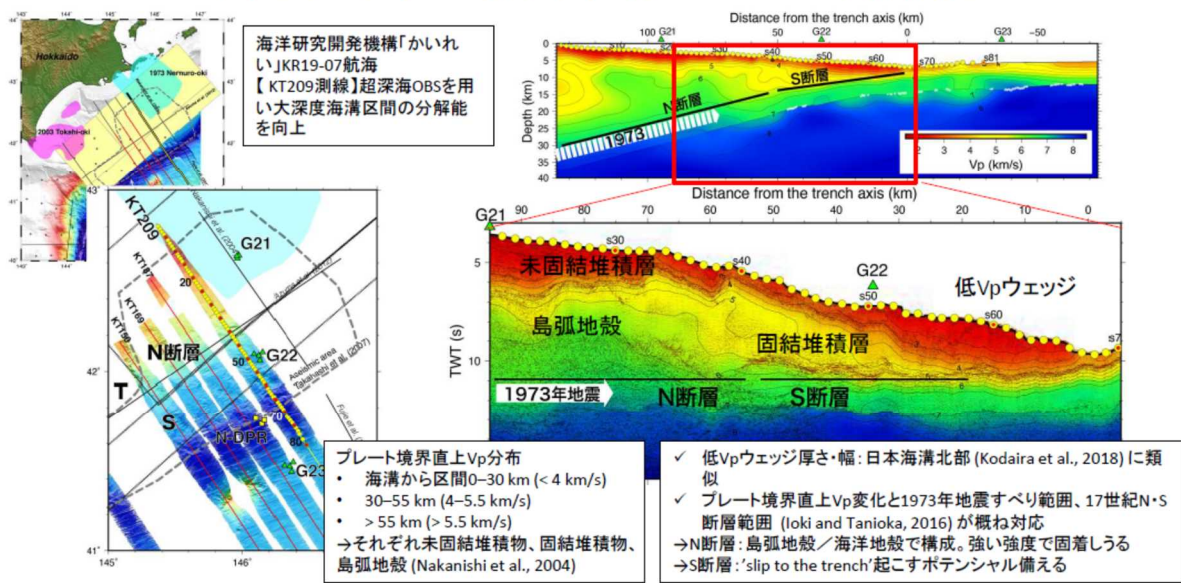


図1. 根室沖17世紀地震震源域周辺のプレート境界構造 (東京大学地震研究所[課題番号: ERI_05])。

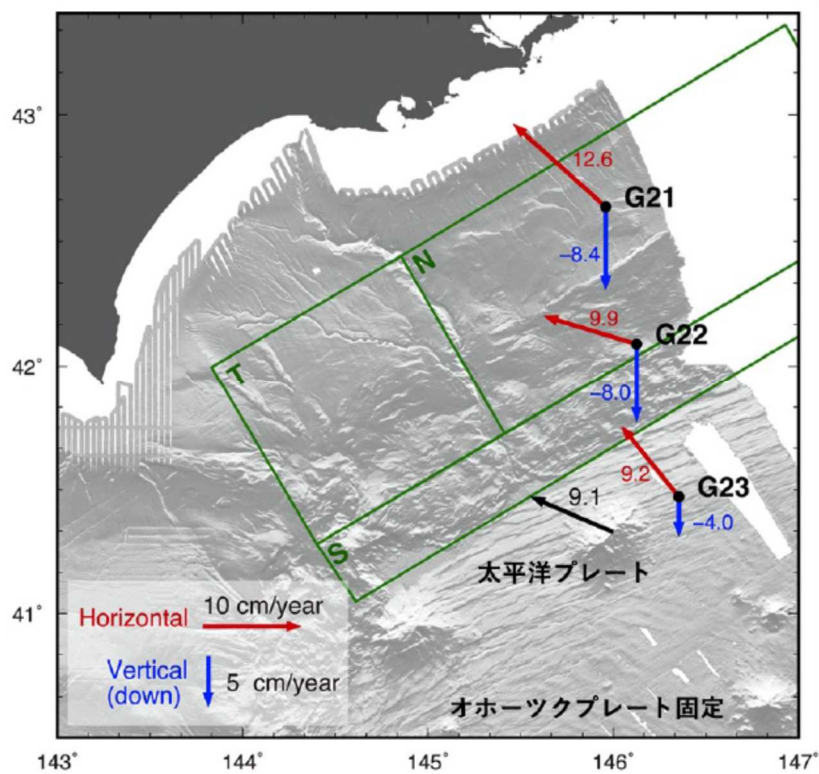


図 2 . GNSS-A による地殻変動の暫定推定結果 (東京大学地震研究所 [課題番号 : ERI_05]、東北大学災害科学国際研究所 [課題番号 : IRID02])
 15 ヶ月の間をあけた 2 回の GPS-A 観測から得られた地殻変動速度の暫定的な推定結果。水平動を赤、上下動を青ベクトルで示す。緑の矩形は Ioki and Tanioka (2016) による 17 世紀型超巨大地震の想定断層。

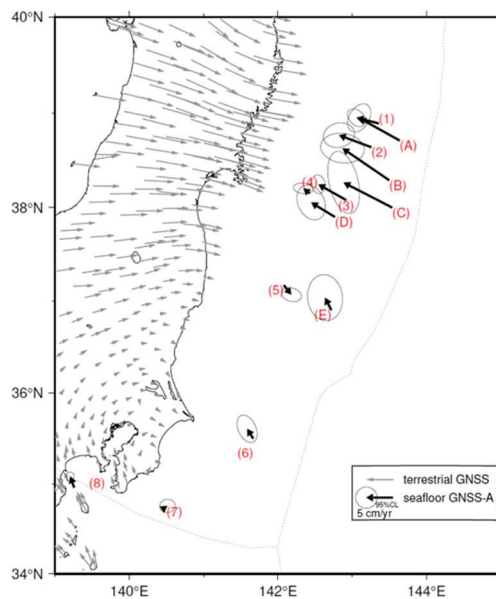


図 3 . 日本海溝沿いの直近約 4 年間の水平移動速度 (海上保安庁 [課題番号 : JCG_03])
 北米プレートを固定している。

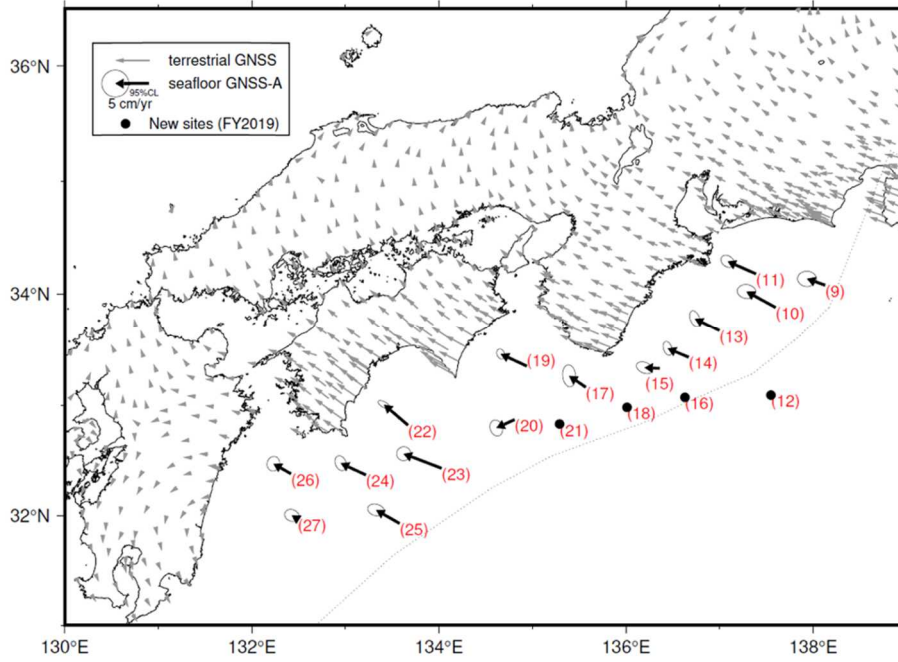


図 4. 南海トラフ沿いの直近約 4 年間の水平移動速度 (海上保安庁 [課題番号: JCG_03]) アムールプレートを固定している。

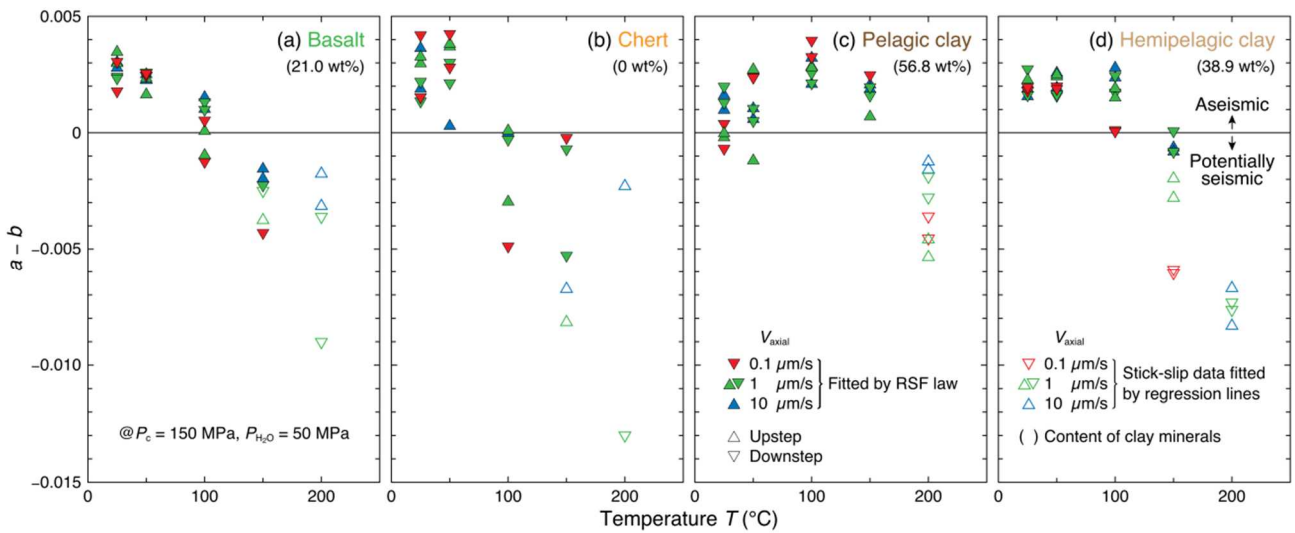


図 5. 玄武岩試料 (a)、チャート試料 (b)、遠洋性粘土試料 (c) および半遠洋性粘土試料 (d) の $a - b$ 値の温度変化 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_05])

() 内の数値は各試料の粘土鉱物含有量。

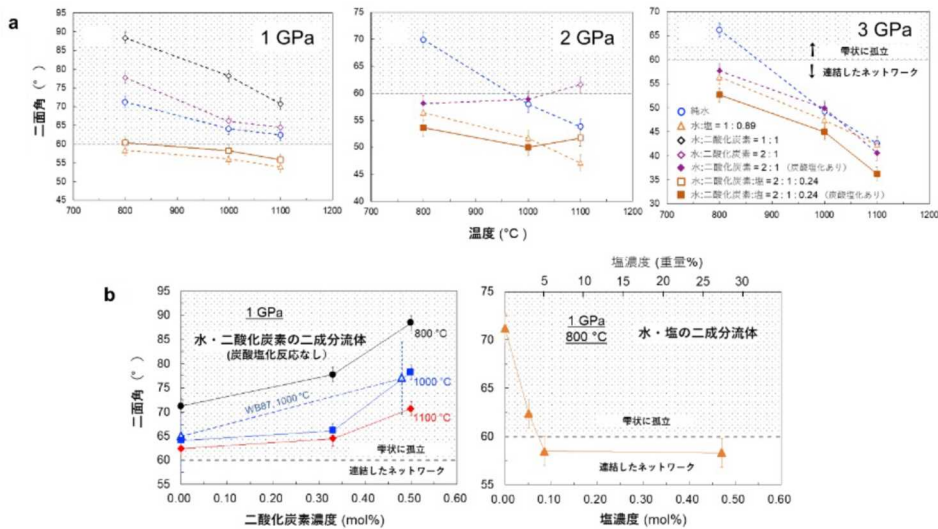
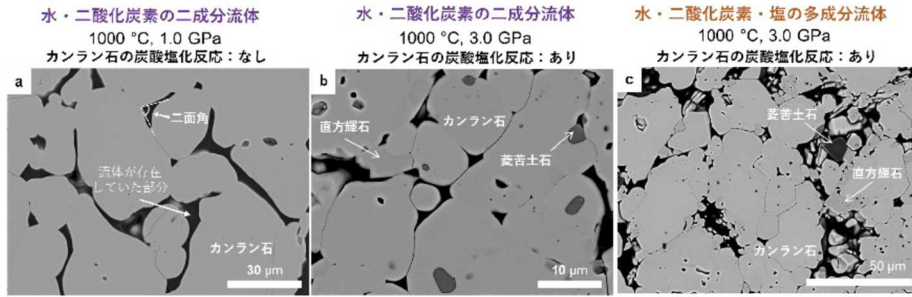


図 6. カンラン石の粒間における超臨界流体（東北大学[課題番号：THK_02]、Huang et al., 2020）

上) 超臨界流体を粒間に含んだカンラン石（マントルの主要構成鉱物）の多結晶体（実験産物）の電子顕微鏡写真。暗い部分が高温高压下で流体が存在していた部分。(a)水・二酸化炭素の二成分流体では、カンラン石の炭酸塩化が起こらない低压条件下で、図の二面角が 60° より大きくなり流体は孤立して存在する。(b)高压条件になると、炭酸塩化が起こり、直方輝石と炭酸塩鉱物の菱苦土石が生じる。炭酸塩化の効果で、二面角が 60° より小さくなり、3次元的に鉱物の稜に沿って連結した流体ネットワークが形成される。(c)水・二酸化炭素・塩の多成分系になると、カンラン石の炭酸塩化の効果に加え、流体中の塩の効果で二面角がさらに小さくなる。

下) 超臨界流体-カンラン石間の二面角（実験結果）。(a) 温度圧力依存性。水・二酸化炭素・塩からなる多成分流体の二面角（濃いオレンジ色の凡例）は、カンラン石の炭酸塩化が起こらない高温低压条件では、 800°C 、 1.0 GPa の条件を除き、二面角が 60° より小さくなるが、水・塩の2成分流体の二面角（黄色い凡例）よりは大きい。一方、カンラン石の炭酸塩化が起こる低温高压条件では、常に二面角が 60° より小さくなり、すべての実験系の中で、二面角が最も小さくなる。流体中の成分比はモル数で表している。(b) 二面角の二酸化炭素濃度および塩濃度依存性。純水に二酸化炭素が少量加わっても、二面角は緩やかにしか上昇しない一方、塩が少量加わると二面角は急激に減少する。ゆえに、二酸化炭素および塩を少量含む多成分流体では、塩の二面角を減少させる効果が、二酸化炭素の二面角を増加させる効果を上回る。

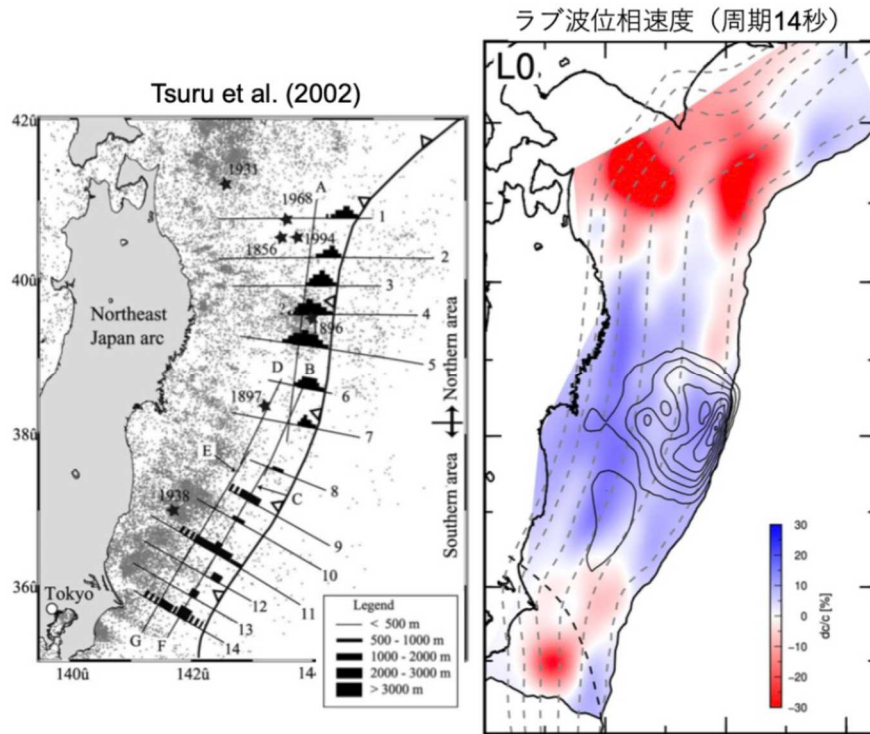


図7. Tsuru et al. (2002) による低速度物質の空間分布 (左) と S-net 常時微動データから推定したラブ波位相速度マップ (右) (東北大学[課題番号: THK_02])
 点線のコンターはプレート境界等深線 (Kita et al., 2010、 Nakajima and Hasegawa, 2006)、実線コンターは 2011 年東北沖地震のすべり分布 (Iinuma et al., 2012) を示す。

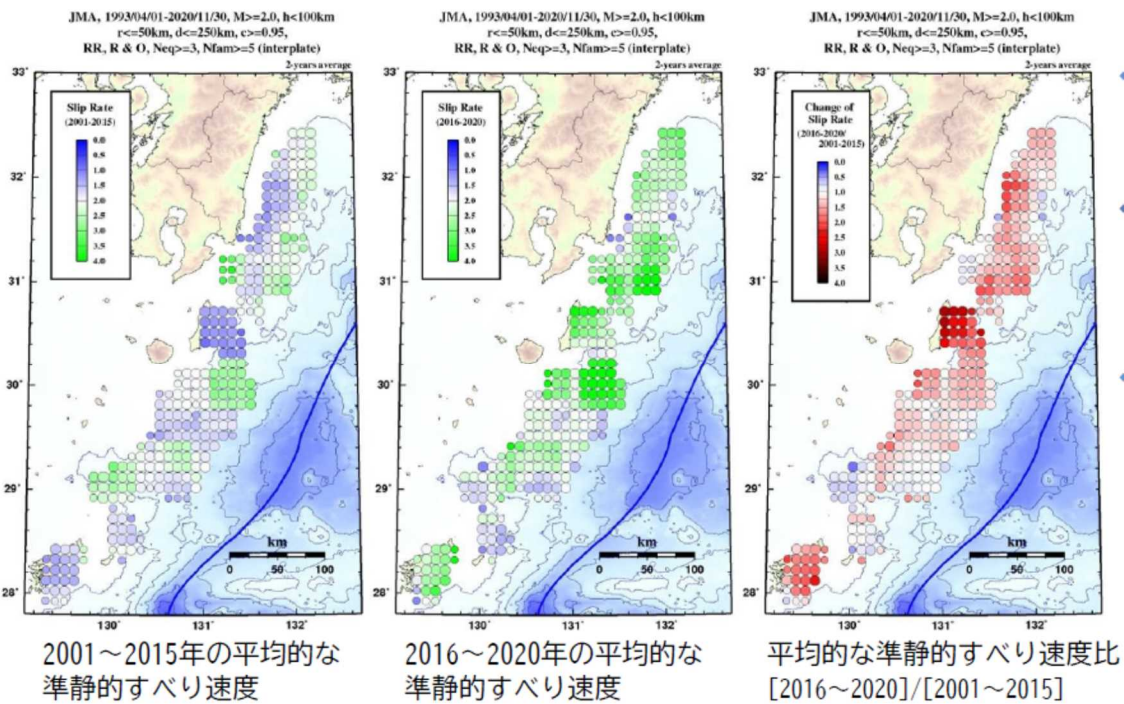


図8. 日向灘-南西諸島北部域の準静的すべり速度の時空間変化 (鹿児島大学[課題番号: KGSM01])。

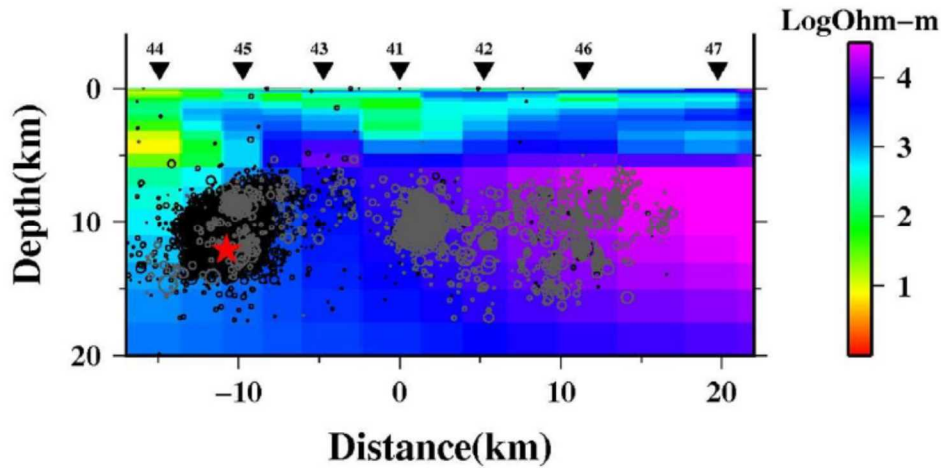


図 9. 三瓶山周辺域の 2 次元比抵抗構造断面図 (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI03]) 測線を中心として幅±5km の範囲に含まれる震源データ (灰色: 2000 年 1 月 1 日~2018 年 3 月 31 日、黒色: 2018 年 4 月 1 日~2018 年 12 月 31 日) を気象庁ホームページ「地震月報」よりダウンロードして描画した。2018 年島根県西部地震の震源を赤星印★でプロットした。

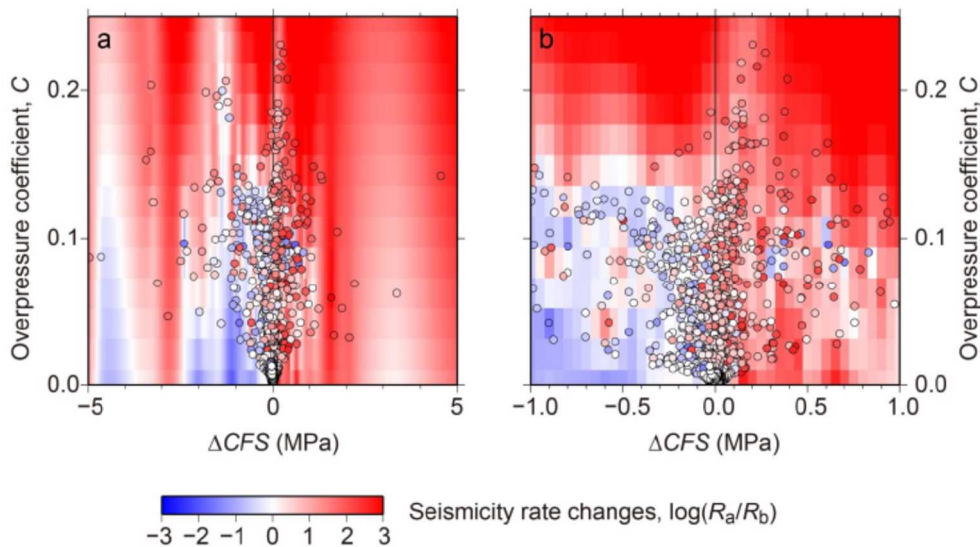


図 10. 2016 年熊本地震による ΔCFS 及び地震前の間隙流体圧と地震活動度の変化の関係 (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI03]、Nakagomi et al., 2021)

a. $-5 \text{ MPa} \leq \Delta CFS \leq 5 \text{ MPa}$ 、 b. $-1 \text{ MPa} \leq \Delta CFS \leq 1 \text{ MPa}$ 。 間隙流体圧係数 C は、 $C = (P_f - P_H) / (P_L - P_H)$ で定義される無次元数である (P_f : 間隙流体圧, P_H : 静水圧, P_L : 静岩圧)。地震活動度の変化は、地震前 3 年間 (2013 年 4 月 14 日~2016 年 4 月 13 日) の地震数 (R_b) に対する地震後 3 年間 (2016 年 4 月 14 日~2019 年 4 月 13 日) の地震数 (R_a) の比で表現した。○は各評価点での結果で、○のカラーは地震活動度の変化を示す。背景のカラーは、これらの結果を補間したものである。

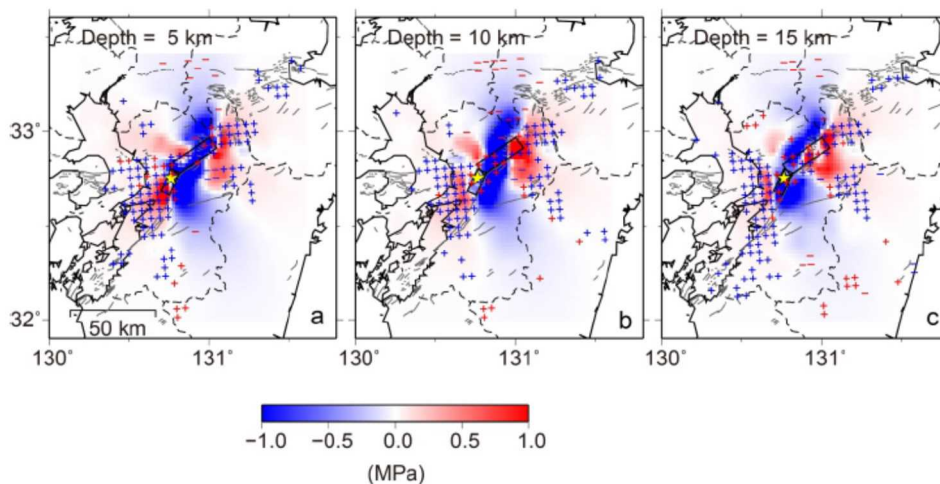


図 11. ΔCFS と地震活動度の変化の関係（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI03]）。
 a-c は、それぞれ、深さ 5 km、10 km、15 km の結果を示す。青と赤の+は、 $\Delta CFS > 0$ 及び $\Delta CFS < 0$ の領域で、熊本地震後に地震活動が 10 倍以上に増加した領域である。青と赤の-は、 $\Delta CFS > 0$ 及び $\Delta CFS < 0$ の領域で、熊本地震後に地震活動が 1/10 以下に減少した領域である。 ΔCFS の値は、-1 MPa~1 MPa までの範囲内で打ち切って表示している。☆は 2016 年熊本地震の震源、矩形は熊本地震震源断層の北部及び南部セグメント (Asano and Iwata, 2016)、点線は県境、グレーの線は活断層を表す。

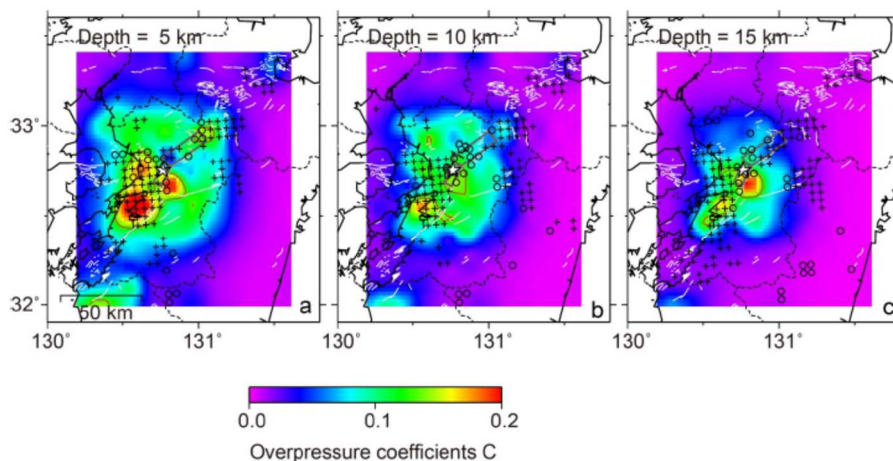


図 12. 間隙流体圧係数と地震活動度の増加の関係（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI03]）
 a-c は、それぞれ、深さ 5 km、10 km、15 km の結果を示す。+及び○は、 $\Delta CFS > 0$ 及び $\Delta CFS < 0$ の領域で、熊本地震後に地震活動が増加した領域を示す。カラーは間隙流体圧係数 C の値を示す。赤い線は、 $C=0.13$ のコンター線を示す。☆は 2016 年熊本地震の震源、矩形は熊本地震震源断層の北部及び南部セグメント (Asano and Iwata, 2016)、点線は県境、グレーの線は活断層を表す。

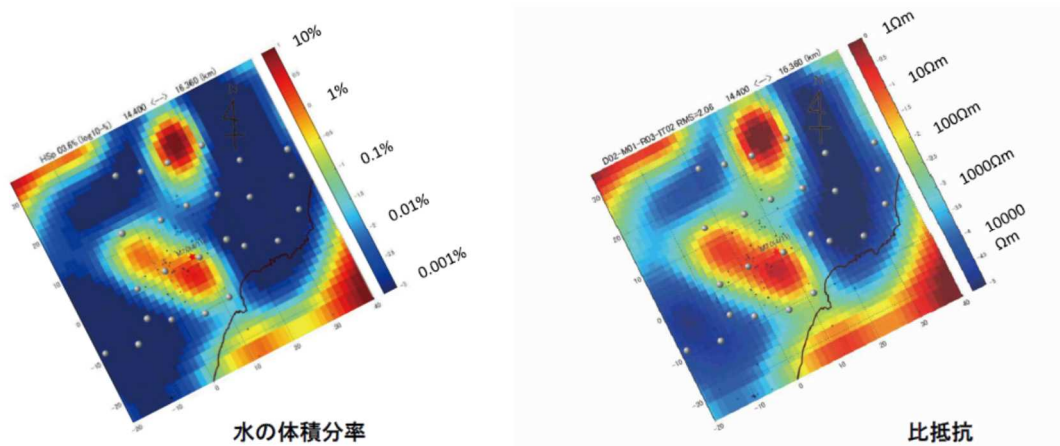


図 13 a . 比抵抗構造と水の体積分率(15 km 周辺)(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_09])

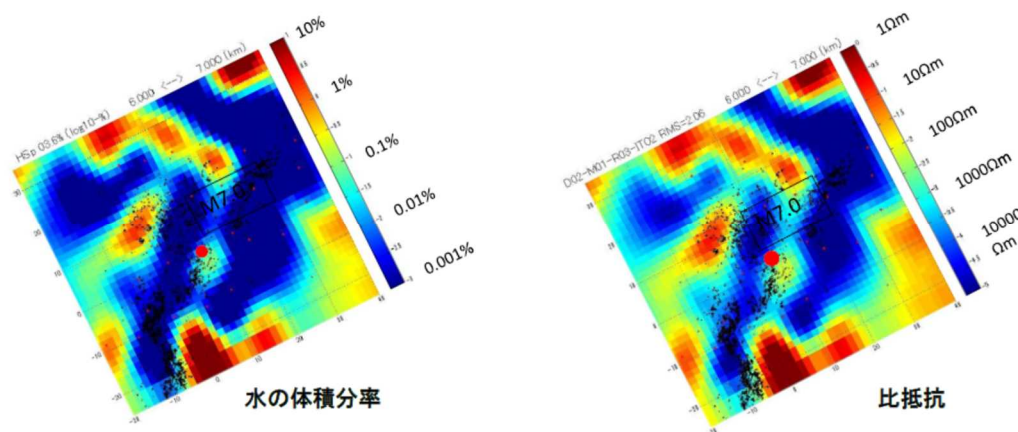


図 13 b . 比抵抗構造と水の体積分率(7 km 周辺)(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_09])

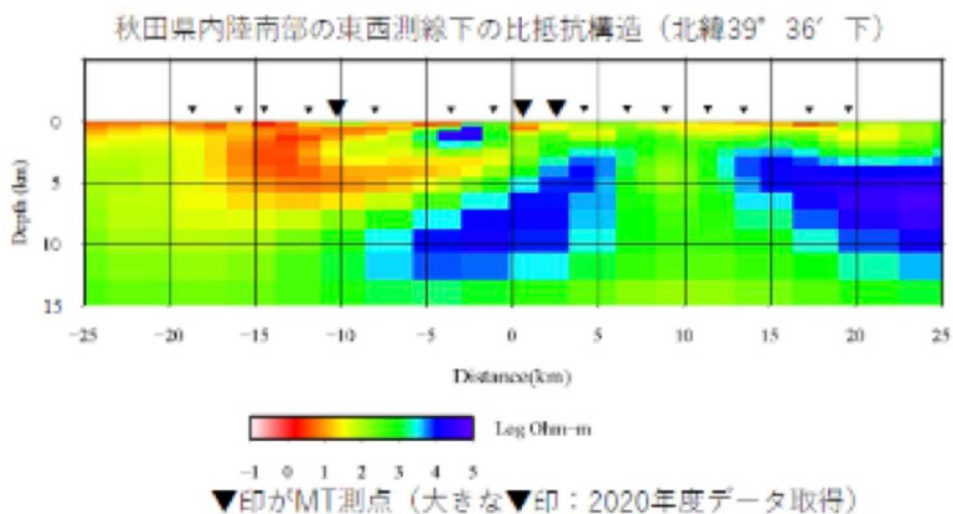


図 14. 秋田市雄和地区の秋田空港付近から、仙北市角館町にかけてのほぼ北緯 39° 36' の緯線に沿う東西測線での比抵抗構造 (東北大学[課題番号:THK_07])

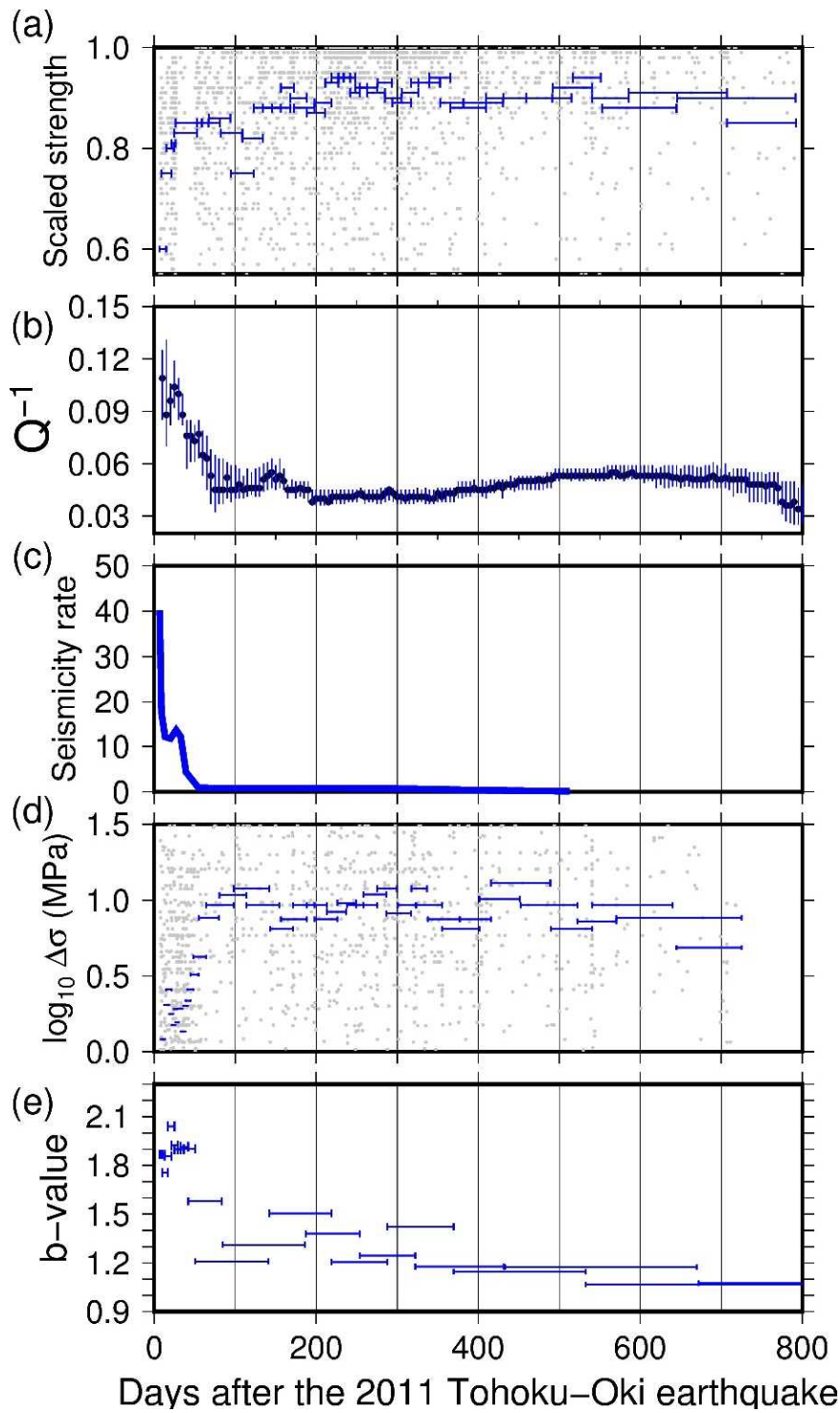


図 15. 2011 年東北沖地震後に山形-福島県境で発生した群発地震およびその地震発生域の様々なパラメータ（東北大学[課題番号：THK_02]、Yoshida, 2021）

(a) Scaled Strength, (b) Q^{-1} , (c) Seismicity Rate, (d) $\Delta \sigma$, (e) b 値)の時間変化。

地震波速度構造 (熊本)

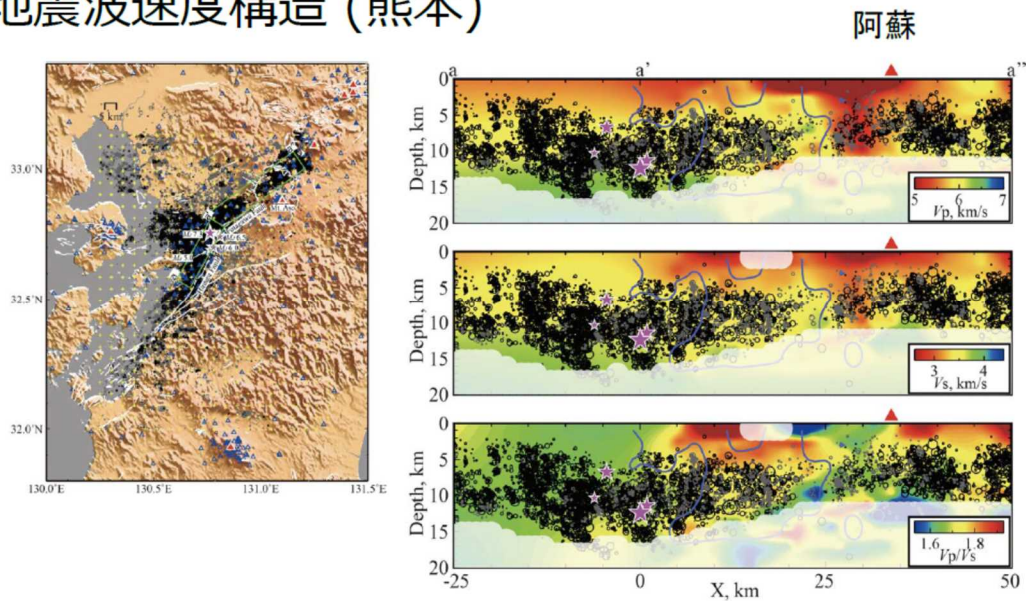


図 16. 地震波速度構造と滑り分布 (九州大学[課題番号: KYU_01])

(左図) 震源分布図、(右図上) 震源分布断面図とP波速度構造、(右図中) 震源分布断面図とS波速度構造、(右図下) 震源分布断面図と V_p/V_s 構造。

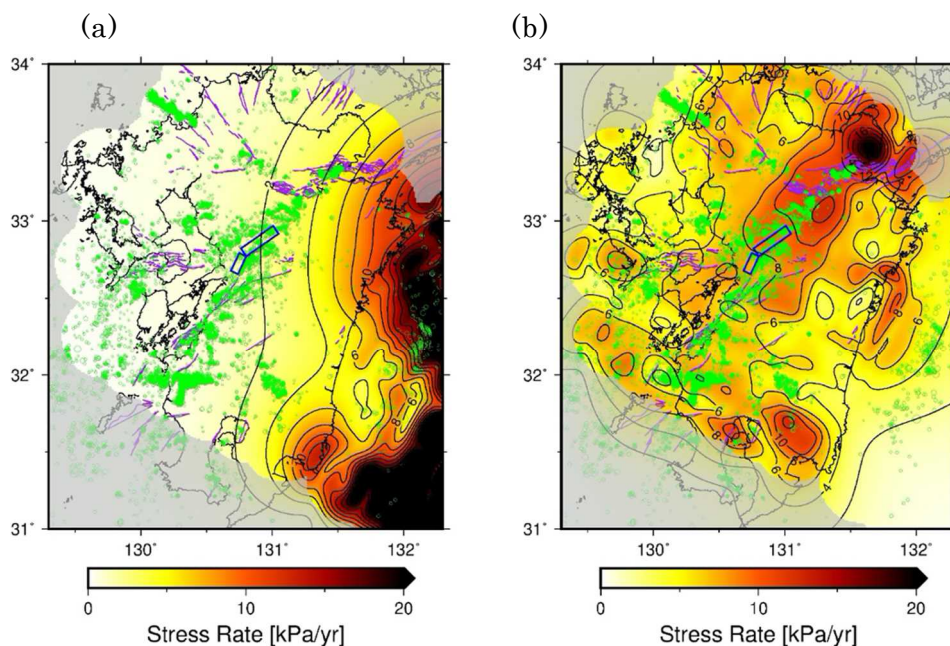


図 17. 深さ 7km での応力変化速度と地震活動 (九州大学[課題番号: KYU_01]、Yuasa and Matsumoto, submitted)

(a) プレート間固着による応力変化と震源分布(緑丸)、(b) 下部地殻の非弾性変形による応力変化と震源分布(緑丸)。

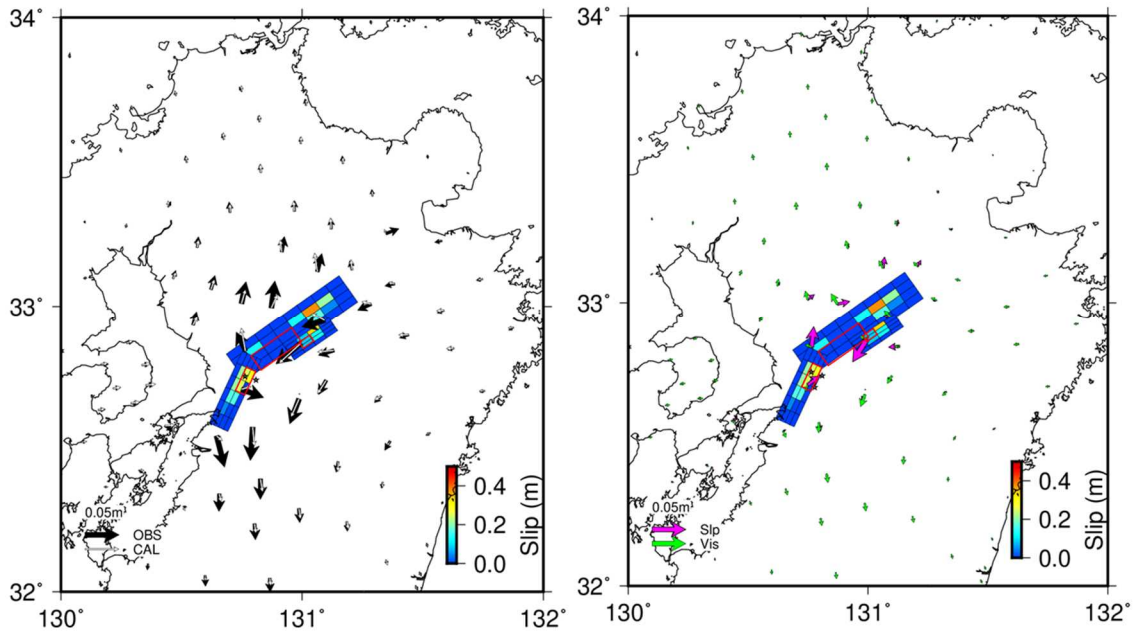


図 18. 平成 28 年（2016 年）熊本地震後 1 年間の変動量から推定した余効すべり分布（国土地理院[課題番号：GSI_01]）。

（左）水平方向の変位の観測値（黒）及び計算値（白）。（右）水平方向の変位の計算値のうち、余効すべり（マゼンタ）及び粘弾性変形（緑）の寄与。地震時のすべりを与えた断層パッチ（矢来ほか 2016）を赤枠で囲っている。なお、上端を除く断層端のすべり量は 0 に固定している。粘性率は 2×10^{18} Pa s を使用した。

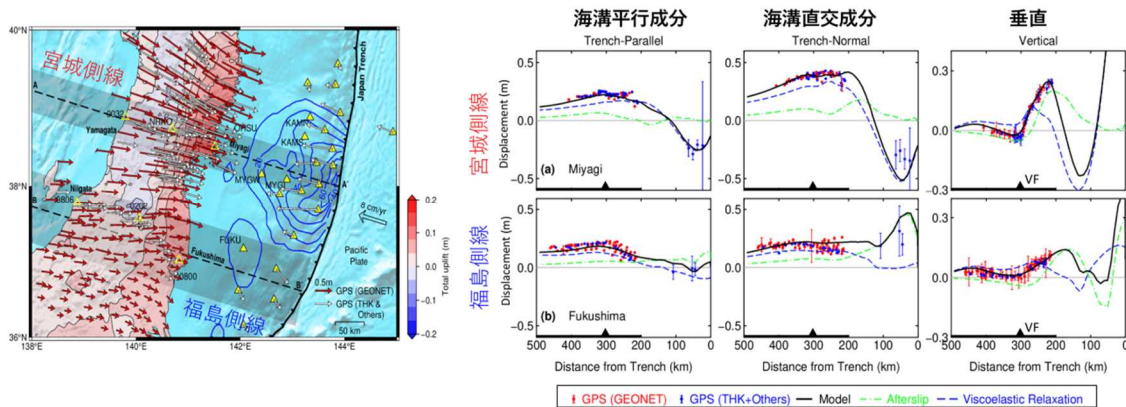


図 19. 2011-2016 年までの東北沖地震の余効変動解析（東北大学[課題番号：THK_07]）
 GEONET と東北大の持つ宮城-山形、福島-新潟の稠密 GNSS 観測から島弧に沿う南北方向での余効変動の変化を解明。2 つの側線での観測を、海溝平行成分、直交成分、垂直成分に分け、モデルとの詳細比較（右）。上段が、宮城測線、下段が、福島測線。線の色は計算値を表す。緑：余効滑りによる変位、青：粘弾性緩和による変位、黒：余効滑りと粘弾性の合算変位（モデル計算）、赤シンボル：GEONET 観測値、青シンボル：東北大の稠密観測値。

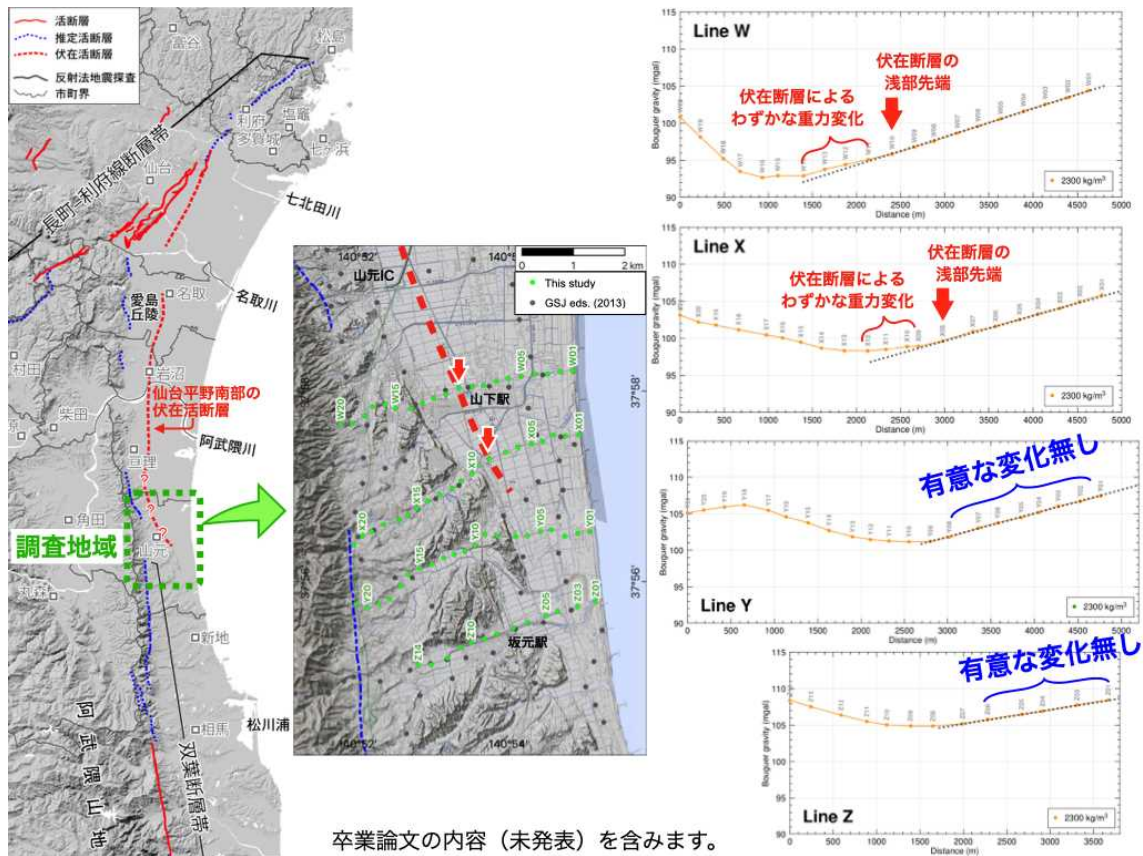


図 20. 仙台平野南部，宮城県山元町付近でのブーゲー重力異常の結果（東北大学[課題番号：THK_07]、平出，2021）。

仮定密度は 2300 kg/m^3 を適用した。4 測線のうち北側 2 本では、微小ではあるが伏在活断層に関連する重力変化を捉えたが、南側の 2 本の測線では、その延長部分に伏在活断層によると考えられる有意な重力変化はなかった。測線西側の高ブーゲー重力異常は、阿武隈山地の頂部付近に分布する白亜紀後期の花崗閃緑岩に伴う重力変化であり、伏在活断層に伴う重力変化は、その東側に検出される。

1 (2) 地震 (長期予測)

「地震 (長期予測)」計画推進部会長 西村卓也

(京都大学防災研究所)

副部会長 宍倉正展

(産業技術総合研究所)

大地震の長期予測は、日本国内では地震調査研究推進本部による長期評価という形で実施され、その評価結果は全国地震動予測地図などの形で社会に公表されている。大地震の長期予測は、災害軽減や防災対策の立案に役立てられることが期待されるが、大地震の発生は極めて低頻度な現象であるため、おもに過去の地震の発生履歴に基づいて行われてきた長期予測には大きな不確定性が伴っている。本部会では、地質・地形データや史料・考古データを活用して地震の発生や地殻変動の履歴を解明する手法の高度化を進めるとともに、各地域での調査から過去の履歴データを蓄積して、大地震の予測精度の向上を目指した観測研究を行う。さらに、これまでは十分に活用されていなかった地殻変動や地震活動などの地球物理学的観測データや地震発生の物理モデルの利用により、長期予測手法の高度化を目指した観測研究を行う。以下では、本部会に属する各課題について令和2(2021)年度の成果の概略と今後の展望について述べる。

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

1707年の宝永南海地震前後の京都における有感地震の推移について、京都の2か所で記された日記史料に基づき調査した。どちらの日記史料にも地震直後の約1ヶ月間は有感地震が頻繁に記されているが、地震から1～数年後には、地震前と同じ年1回程度に減少し、減少後の数年間で見ると、宝永地震前後で顕著な差は見られないことがわかった。また、日記史料有感地震データベースと気象庁の震度データベースを比較して、地震の震央候補を推定する手法の改良に取り組み、19世紀中頃に発生した地震の震央推定に向けた研究を実施した。1855年の安政遠江・駿河の地震と安政米子の地震について震央の推定を試みた結果、前者の地震は現在の静岡県焼津市域の近傍で発生した内陸地震であった可能性がある。また後者の地震は、米子城での被害が前年(1854年)の嘉永(安政)南海地震による被害であったと考えられ、京都近傍で発生した内陸地震であった可能性がある(東京大学地震火山史料連携研究機構[課題番号:HMEV02])。

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

海溝型地震の発生履歴に関する調査としては、引き続き沿岸での津波堆積物や巨礫群を用いた古津波と、海岸段丘地形や生物痕跡に基づく地震性隆起の評価が行われた。北海道太平洋岸の津波堆積物について年代測定の追加により、17世紀のイベントだけでなく12世紀のイベントについても、十勝地域と釧路根室地域とで年代が異なることが示唆された。また、十勝の当縁川河口域において、珪藻分析から10世紀から18世紀までの地殻変動史を構築し、14-15世紀頃に地震間地殻変動が隆起から沈降に転じたことと17世紀のイベントの変動量が12世紀と比べて2倍程度大きかったことがわかった(北

海道大学〔課題番号：HKD_01〕）。さらに北海道東部において、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が行われた（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。

南海トラフ沿いでは、高知県、愛媛県、宮崎県で津波堆積物調査が実施された（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。南西諸島海溝沿いでは、喜界島で隆起サンゴ調査、宮古島で巨礫の分布調査がそれぞれ行われた（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。琉球列島中部では、台風の高波起源の巨礫が存在しており、過去に津波が発生していたとしてもこれらの巨礫のサイズ・空間分布は大幅に変わらなかったと考えられることから、現在の巨礫分布を制約条件とする津波数値計算により、既往の津波および地震の規模の上限値を推定した（東京大学大学院理学系研究科〔課題番号：UTS_01〕）。

相模トラフ沿いで発生する関東地震に関連する房総半島南部の沼段丘面に対して、数値標高モデル（DEM）に基づく海岸段丘面の標高分布をK-meansクラスタリング法を用いて区分する地形解析アルゴリズムを構築し、従来の目視ベースの地形判読による段丘区分を見直す結果を得た（Komori et al., 2020）。また、段丘面形成年代の推定手法の高度化を行い、再堆積効果を定量的に考慮したベイズ推定を用いて、多くの年代値データから信頼度を含めて年代推定できる手法を開発した（東京大学大学院理学系研究科〔課題番号：UTS_02〕、産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。

内陸地震の発生履歴に関する調査としては、中央構造線断層帯の讃岐山脈南縁区間鳴門南断層において三次元的トレンチ調査を実施した。古地震イベントは不確かなものを含めて3回が検出され、最新イベントは12世紀ないし鎌倉時代以降に生じたと推定される。この結果は、最新活動が16世紀以降であるとする多くの先行研究と矛盾しないものである（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST02〕）。2016年熊本地震の震源断層である布田川―日奈久断層帯については、御船町高木においてトレンチ調査を行い、2251-1561 calBPと3977-2768 calBPの少なくとも2回のイベントと、トレンチ壁面には明瞭な痕跡を残していない2016年熊本地震の計3回の断層運動があったことが明らかになった。2016年熊本地震はほぼ純粋な右横ずれで、それ以前のイベントはそれぞれ右横ずれと東側が低下する変位が主体であった。このような活動毎に異なる変形様式が見られることは、布田川断層帯と日奈久断層帯の活動セグメントが重複する地点であることが原因である可能性があり、1900 calBP頃のイベントは布田川断層帯の活動、3400 calBP頃のイベントは日奈久断層帯の活動であった可能性がある（図1）（名古屋大学〔課題番号：NGY_03〕）。糸魚川-静岡構造線活断層系南部周辺では航空レーザ測量（LiDAR）に基づく数値標高モデルから変動地形の再判読と地表踏査を行い、詳細な活断層の分布が明らかとなった。これにより明らかになった白州断層においてトレンチ調査を行ったところ、最近2回の断層運動が確認された。最新活動の上下変位量は1回前のイベントより2倍以上大きい可能性があり、この違いは、2回の活動が異なる区間で発生し、最新活動ではより長い区間で変位が生じたためである可能性がある（名古屋大学〔課題番号：NGY_03〕）。また、日本海沿岸域の島根県西部では、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。生物痕跡から地震時に1 m程度の隆起が推定されたが、隆起量にはかなりの地域差があることがわかった（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕、宍倉・他、2020）。

これらの地質データを簡単に検索、表示できるデータベースは、引き続き充実が図られている。産業技術総合研究所では、活断層及び津波浸水履歴情報を「活断層データベース」「津波堆積物データベース」として整備しており、「活断層データベース」では活断層の断層線や調査地の位置精度の向上が行われた（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST01、AIST04〕）。

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震断層滑りのモデル化

変斑レイ岩の摩擦特性のスケール依存性を確認するため、E-ディフェンス施設における大型振動台を利用して低速～中速域のすべり速度でメートルスケールのガウジ摩擦実験を実施した。そこで得られた実験データを解析し、速度-状態依存摩擦構成則のパラメタが過去の研究成果と調和的であることを確認した。また4 m長岩石試料を用いた摩擦実験を実施し、増強した測定網により詳細な弾性波データを収録した(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02])。

(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

100 kmスケールの地下構造の不確かさを考慮するために、多数の地下構造モデルの候補をアンサンブルの形で取り込むことができる断層すべり推定手法を開発し、数値実験により有効性を確かめた(海洋研究開発機構 [課題番号: JAMS01]、Agata et al., 2021)。日本海溝と南海トラフ沿いのプレート境界での単位すべりに対する地表での弾性応答のグリーン関数ライブラリを構築した。ライブラリでは、世界測地系で用いられる準坳楕円体や全球でのジオイドモデルと日本列島の地下構造として全国一次地下構造モデルを取り入れており、ユーザが容易に地下構造不均質の影響を考慮して地殻変動をモデル化できる環境が整備された(海洋研究開発機構 [課題番号: JAMS01]、Hori et al., 2021)。

基盤的地震観測網で観測された遠地地震波形データの解析から、四国西部下に沈み込むフィリピン海プレートからの脱水が、その上部のマントルウェッジの蛇紋岩化や深部低周波微動の発生に寄与していることを示した(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02]、Shiomi et al., 2021)。

イ. 内陸地震

令和元年度に実施された東北日本を横断する日本海溝から大和堆までの海陸合同構造探査のデータを用いて、陸域部における波線追跡法を用いたモデル構築を行った。上部地殻基盤層(いわゆる6 km/s層)より浅部の構造は、4層の堆積層でモデル化された。各々の速度は、1.6-2.0、1.8-3.5、3.5-4.5及び4.5-5.5 km/sと推定される。堆積層全体の厚さは、測線東端部を除いて3.5-5 kmで、著しい変形を示す(図2)(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_11])。様々な観測データや得られた地震カタログ等を用いて、将来的に大地震の震源域となりうる領域を把握するための研究開発を進めた。東北地方太平洋沖地震によって東北日本・中部日本の内陸域にもたらされた剪断ひずみエネルギー変化と地震活動の変化を比較したところ、剪断ひずみエネルギーが増加した地域と東北地方太平洋沖地震後に地震活動が活発化した地域が良く対応することを明らかにした(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02])。陸域地殻内地震の地震発生層の下限について、三次元地震波速度構造を使って再決定した震源に基づく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)とD300℃(地下の温度が300℃となる深さ)の分布は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は、D300℃が一つの指標となり得ることを意味する(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02])。

オ. 構造共通モデルの構築

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、琵琶湖西岸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、日本海とその沿岸海域について、反射法地震探査などの資料をとりまとめて震源断層モデルを作成した（図3）（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_11〕）。

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

南西諸島海溝沿いでは、沖縄本島南東沖と波照間島沖でそれぞれGNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測を実施した。過去の観測データと合わせて地殻変動速度を推定すると、沖縄本島南東沖では沖縄本島（沖縄ブロック）に対して北に 17.0 ± 0.95 mm/yr、西に 4.7 ± 0.96 mm/yrの変位速度が得られた。この結果は、海溝付近のプレート間固着を示唆するものである。一方、波照間島南方沖の速度は、揚子江プレートに対して南に 64.2 ± 11.2 mm/yr、東に 25.8 ± 9.8 mm/yrであり、沖縄トラフにおける伸張を示す。この伸張の速度は、西表島、波照間島と同程度かそれ以上である。また、約25 mm/yrの非常に速い沈降も併せて観測され、高速の海溝後退による前弧プリズムの薄化を示唆するものであるが、このデータのみで海溝軸付近の固着状態を拘束することは難しい（名古屋大学〔課題番号：NGY_02〕）。

南海トラフ沿いの海溝型巨大地震を引き起こす応力蓄積の状況を明らかにするために作成した応力分布モデルをもとに、今後起こりうる大地震発生シナリオを作成した。さらに、作成した破壊シナリオの中から実現性の高いシナリオを選択することを目的に、経験的摩擦則とエネルギーバランスを利用する基本手法の開発を開始した（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED02〕）。

イ. 内陸地震の長期予測

構造探査が行われた庄内-新庄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における平均変位速度などのこの地域の活褶曲や伏在断層による長期間地殻変動を推定した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_11〕）。

西南日本における沈み込み帯でのプレート間固着と上盤プレート内部の地震活動の関連性を明らかにするために、日本列島域の粘弾性を考慮した有限要素モデルを作成し、地殻変動データのインバージョンにより、南西諸島海溝-南海トラフ沿いのすべり欠損速度分布を求めた。得られたすべり欠損速度分布を用いて、有限要素モデルにより西南日本の震源断層におけるクーロン応力変化（ ΔCFF ）を求めた。九州では ΔCFF が正の震源断層が多く、近年発生した3つのM7級地震の震源断層も正であった。これらの断層では、プレート境界での力学的作用により、破壊を促進する方向に応力がかかっていることを意味している（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_11〕）。

物理モデルと観測データの統合による地震規模を含む動的破壊過程予測手法の開発と検証のために、2018年北海道胆振東部地震を対象として解析を行った。本地震を選択したのは、余震分布と発震機構の観測から示唆される震源の複雑性の効果を調べることを重視したためである。断層形状を余震分布から広域応力場を事前の地震活動から拘束して、動力学的破壊シミュレーションを行った（図4）。運動学的滑りインバージョン結果で推定された動的破壊過程と滑りの空間分布の主たる特徴が、シミ

ュレーションにより再現されることが確認された。これは、それら動的パラメタが非平面的な断層形状を反映した初期応力分布に強く依存したためと解釈される（東京大学大学院理学系研究科 [課題番号：UTS_02]、Hisakawa et al., 2020）。

大地震が連発したり、大地震により周辺の地震活動度が変化した事例は多く、布田川―日奈久断層帯での2016年熊本地震や米国東カリフォルニア剪断帯の2019年リッジレスト地震はその一例である。このような活動を予測するために速度および状態依存型クーロンモデルを改良し（図5a）、リッジレスト地震の地震活動に適用した。その結果、同地震の推移と周辺の地震活動を的確に説明することができた（図5b）。特に、近傍の主要活断層帯であるガーロック断層やサンアンドレアス断層モハベ区間で、地質学的長期評価と組み合わせることにより、より現実的な予測確率と確率利得を提示することができた（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI05]、Toda and Stein, 2020）。測地データから内陸地震の発生ポテンシャルを評価するために、今年度は東日本を対象にSavage and Simpson(1997)の手法を用いてGNSS測地ひずみ速度をモーメント速度に換算し、内陸地震の発生確率の試算を行った。ポアソン過程を仮定した場合の30年間に各0.2度グリッドでM6.8以上の内陸地震が発生する確率は、日本海東縁～新潟―神戸ひずみ集中帯、南関東・伊豆地方、奥羽脊梁山地沿いで1%を超え、高くなった（図6）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI05]）。

（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

GNSSデータと時間依存のブロック断層解析手法を用いて、Loveless and Meade(2010)の断層形状に基づいた全国の断層すべりの解析を行った。その結果、日向灘、豊後水道、四国中部、紀伊水道、志摩半島でSSEを検出した。志摩半島では、SSE が2017年3月頃から2018年3月頃までと、2019年1月頃から2020年4月頃まで発生した。四国中部では、2019年1月頃からSSEが始まり、2020年末に終息している。紀伊水道でのSSEは、2019年4月頃から始まり、2020年末に終息している。2018年6月頃から始まった日向灘北部SSEは2019年初めまでに豊後水道に移動し、2019年中頃に終息したが、2020年7月頃から日向灘北部と南部で再び発生している事がわかった（国土地理院 [課題番号：GSI_02]）。

防災科学技術研究所では、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、その高度化に努めた。東北地方太平洋沖地震のような大規模な地震の発生を念頭に、即時震源パラメタ解析システムAQUAの改良を行った。具体的には、一定規模以上の地震が発生したと判断された場合、広帯域地震計に代えて速度型強震計のデータを解析対象とするとともに、断層破壊の継続時間を考慮した解析パラメタに切り替える等の仕組みを導入した。その結果、東北地方太平洋沖地震の再現では約7分後に低角逆断層型Mw8.6の解が得られたほか、リアルタイム処理でM7以上の4地震を適切に処理することに成功した(防災科学技術研究所 [課題番号：NIED02]、Kimura et al., 2020)。S-netデータを用いた高精度震源決定のため、S-net観測点周辺で実施されたマルチチャンネル反射法地震データから観測点補正値を求めた。さらに、一次元速度構造と補正値に基づく震源位置を、稠密な臨時海底地震観測により求められた震源位置と比較し、処理のルーティン化に向けた課題を抽出、検討した(防災科学技術研究所 [課題番号：NIED02])。南海トラフ周辺地域を対象に、三次元地震波速度構造を用いたセントロイドモーメントテンソル(CMT)解析を自動的に実施するためのシステム開発を行った。スロー地震に関しては、S-netデータを用いた日本海溝沿いの低周波微動検知の自動処理に着手した。大地震発生後数時間程度の連続波形記録から、揺れの最大振幅の超過確率を用いる

ことにより、その後の余震活動の推移を予測する手法を開発した。この手法は震源カタログを必要とせず、単点の地震波形のみを用いることが大きな特徴である(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02])。

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

南海トラフでのプレート境界巨大地震における津波シナリオを策定するために、震源域での滑り分布の長期間の平均と考えられるプレート境界での滑り遅れ速度に比例する確率分布にもとづき、シナリオ地震の震源断層上の滑り分布をランダムに生成する手法を構築した(海洋研究開発機構 [課題番号: JAMS01]、Nakano et al., 2020)。

5. 計画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

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手法の開発を行い、野島断層近傍におけるアクロスの観測に適用した。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、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た(Ikuta et al., 2002)が、S波の振幅変化にも異方性があり、鳥取県西部地震では速度と振幅の減少の大きな方向が一致していることがわかった。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。以上のことから、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であることが示された(名古屋大学 [課題番号: NGY_04])。

海域に拡充された地震観測網によって取得した地震波形データの評価を行った。日本海溝海底地震津波観測網(S-net)等のインライン型の海底観測網では、約3 Hz以上の周波数帯域において、観測波形に筐体の固有振動が含まれることを確認するとともに、この事象の特徴精査、原因の考察を行った(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02]、Sawazaki et al., 2020)。海底圧力計記録に関しては、2010年チリ地震時の地震計データとの比較検討を通じ、海底圧力計が地震による表面波(レイリー波)およびその分散性を明瞭に観測する能力があることを示した(防災科学技術研究所 [課題番号: NIED02]、Kubota et al., 2020)。

これまでの課題と今後の展望

2年目を迎える本計画において「地震(長期予測)」計画推進部会に所属する各課題では、最終的なアウトプットが地震調査研究推進本部の長期評価の高度化に貢献することを目標として、個々の研究が実施された。今年度はコロナ禍のため、特にフィールドでの調査が大きく制限され、計画通りに研究を進められなかった課題もあるが、その分、室内での分析や考察、定常観測網のデータや過去に取得されたデータを用いた解析、数値実験に基づく解析などが進められ、予定以上の成果も挙がっている。その中でも、地質痕跡から過去に発生した大地震を明らかにするだけでなく、過去に発生した津波・地震の規模の上限値を制約する研究が、琉球諸島中部における沿岸巨礫を用いた解析や日向灘

沿岸地域における津波堆積物の調査に基づいて行われていることは、該当地域での長期予測において重要な知見を提供するものである。また、海底地殻変動観測により南西諸島域におけるデータの蓄積により、島嶼部とは速度場が異なっていることがほぼ確実にようになってきており、この地域の地震発生ポテンシャルを示す重要なデータである。

GNSSデータを用いたプレート間の固着、SSEなどのすべりのモニタリングについても着実に高度化が進められている。地下の断層すべりによって生じる地表での地殻変動については、均質半無限弾性体を仮定した研究が広く行われてきたが、観測精度の向上や海域などの断層近傍での観測が増えるにつれ、地下構造の不均質や地形の影響は無視できなくなりつつある。今年度の成果として、地下構造の不確定性を考慮したインバージョン手法が提案されたり、南海トラフや日本海溝域での地下構造を考慮した地表地殻変動の数値ライブラリーが公開され、各研究者が比較的簡便に不均質の影響を考慮した解析ができるような環境が整備されつつあることは、モニタリングの高度化においても大きく貢献する研究である。

本計画の重点的な観測研究と位置づけられている新たな長期予測手法については、前年度から引き続き、GNSS等によって観測された地殻変動データから試算された内陸地震の発生確率が、歴史地震や最近100年間の背景地震活動度と比較され、統合的な地域とそうでない地域があることがわかってきた。地殻変動データなどを用いた新たな長期予測の実用化には、まだ多くの課題が残されているが、少なくとも定量的な試算と過去の地震活動との比較が本部会も協力して組織的に実施されていることは特筆すべきであろう。また、地震等による応力変化を地震活動予測に組み入れた予測手法は、実際の地震活動に合わせてパラメータを調整することにより、実際の地震活動が良く説明できることが示されており、今後さらに実用化に向けた研究が進められるべきである。物理モデルと観測データに基づいた応力分布などを用いて、実際に発生した地震の震源過程を説明する研究やエネルギーバランスから巨大地震の発生シナリオを制約する研究も確実な成果を挙げており、来年度以降も研究を継続することにより、長期予測手法の高度化に貢献することが期待できる。

成果リスト

- Agata, R., A. Kasahara and Y. Yagi, 2021, A Bayesian inference framework for fault slip distributions based on ensemble modeling of the uncertainty of underground structure - With a focus on uncertain fault dip, *Geophys. J. Int.*, 225, 1392-1411, doi:10.1093/gji/ggab033.
- Fujita, R., K. Goto, Y. Iryu, and T. Abe, 2020, Millennial paleotsunami history at Minna Island, southern Ryukyu Islands, Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.* 7:53, doi:10.1186/s40645-020-00365-9.
- Hisakawa, T., R. Ando, T. E. Yano, M. Matsubara, 2020, Dynamic rupture simulation of 2018, Hokkaido Eastern Iburi earthquake: Role of non-planar geometry, *Earth Planet. Space*, 72:36, doi:10.1186/s40623-020-01160-y.
- Hashima, A., Sato, H., and Sato, T., 2020, Stress loading and the occurrence of normal-type earthquakes under Boso Peninsula, Japan, *Earth Planet. Space*, doi:10.1186/s40623-020-01201-6
- Hori, T., R. Agata, T. Ichimura, K. Fujita, T. Yamaguchi and T. Iinuma, 2021, High Fidelity Elastic Green's Functions for Subduction Zone Models Consistent With the Global Standard Geodetic Reference System, *Earth Planet. Space*, 73:41, doi:10.1186/s40623-021-01370-y.

- 岩田貴樹・尾形良彦, 2020, Gutenberg-Richter則におけるa値の最尤推定, 地震2, 73, 93-96, doi: 10.4294/zisin.2020-1.
- Kimura, H., T. Kimura, Y. Asano, T. Kunugi, and S. Aoi, 2020, An improved rapid-source parameter determination system (AQUA) for giant earthquakes, IEEE Syst. J., 14, 3, 3451-3462, doi:10.1109/JSYST.2020.2983430.
- Kubo, H. and T. Nishikawa, 2020, Relationship of preseismic, coseismic, and postseismic fault ruptures of two large interplate aftershocks of the 2011 Tohoku earthquake with slow-earthquake activity, Sci. Rep., 10, 12044, doi:10.1038/s41598-020-68692-x.
- Kubota, T., T. Saito, N. Y. Chikasada and W. Suzuki, 2020, Ultra-broadband seismic and tsunami wave observation of high-sampling ocean-bottom pressure gauge covering periods from seconds to hours, Earth Space Sci., 7, e2020EA011972, doi:10.1029/2020EA001197.
- Kumazawa, T., Ogata, Y. and Toda, S., 2020, Wide-area seismicity anomalies before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Geophys. J. Int., 223, 1304-1312, doi:10.1093/gji/ggaa356.
- 熊澤貴雄・尾形良彦, 2020, 群発地震活動の非定常ETASモデルによる検出と測地学データに基づく予測可能性について, 地震予知連絡会会報, 103, 378-384.
- Ogata, Y., Katsura, K., Tanemura, M., Harte D., and Zhuang J., 2021, Bayesian Seismicity Analysis based on Delaunay Triangle Nets: Hierarchical Space-Time Point Process Models (HIST-PPM; including HIST-ETAS model) Computer Science Monograph No. 35.
- Ogata, Y. and Omi, T., 2020, Statistical Monitoring and Early Forecasting of the Earthquake Sequence: Case Studies after the 2019 M 6.4 Searles Valley Earthquake, California, Bull. Seismol. Soc. Am., 110(4), 1781-1798, doi:10.1785/0120200023.
- 尾形良彦, 2020, 階層的時空間ETASモデルによる短期・中期予測, 地震予知連絡会会報, 103, 385-387.
- Ozawa S, Kawabata, R, Kokado K, Yarai, H., 2020, Long-term slow slip events along the Nankai trough delayed by the 2016 Kumamoto earthquake, Japan, Earth Planet. Space, 72:61, doi:10.1186/s40623-020-01189-z.
- 小沢慎三郎, 2020, 広域地殻変動データに基づくプレート境界の固着とすべりの時間変化に関する研究, 国土地理院調査研究年報 (令和2年度) .
- Nakano, M., S. Murphy, R. Agata, Y. Igarashi, M. Okada and T. Hori, 2020, Self-similar stochastic slip distributions on a non-planar fault for tsunami scenarios for megathrust earthquakes, Prog. Earth Planet. Sci., 7:45, doi:10.1186/s40645-020-00360-0.
- Sawai, Y., 2020, Subduction zone paleoseismology along the Pacific coast of northeast Japan -progress and remaining problems-, Earth-Sci. Rev., 208, 103261, doi:10.1016/j.earscirev.2020.103261.
- Sawazaki, K. and T. Nakamura, 2020, "N"-shaped Y/X coda spectral ratio observed for in-line-type OBS networks; S-net and ETMC: interpretation based on natural vibration of pressure vessel, Earth Planet. Space, 72:130, doi:10.1186/s40623-020-01255-6.
- Shiomi, K., T. Takeda, and T. Ueno, 2021, Seismological evidence of a dehydration reaction in the subducting oceanic crust beneath western Shikoku in southwest Japan, Geophys. J. Int., 224, 1, 151-168, doi:10.1093/gji/ggaa423.

- 宍倉正展・行谷佑一・前杢英明・越後智雄, 2020, 1872年浜田地震による石見畳ヶ浦の隆起—離水生物遺骸群集と地形データによる検証—, 地震 2, 73, 159-177, doi:10.4294/zisin.2020-4.
- 宍倉正展・越後智雄・行谷佑一, 2020, 能登半島北部沿岸の低位段丘および離水生物遺骸群集の高度分布からみた海域活断層の活動性, 活断層研究, 53, 33-49.
- 高橋浩晃, 2020, 北海道胆振東部地震などの地表に痕跡を残さない地震の特徴, 地震予知連絡会会報, 104, 467-469.
- Takahashi, N., and S. Toda, 2021, Evaluating variability in coseismic slips of paleoearthquakes from an incomplete slip history: an example from displaced terrace flights across the Kamishiro fault, central Japan, Prog. Earth Planet. Sci., 8:15, doi:10.1186/s40645-021-00407-w.
- 高橋直也・内田嗣人・池田倫治・遠田晋次, 2020, 2019年カリフォルニア州リッジレスト地震の概要と最近の地震断層調査の動向, 活断層研究, 53, 51-65.
- Toda, S. and R. S. Stein, 2020, Long- and Short-term stress interaction of the 2019 Ridgecrest sequence and Coulomb-based earthquake forecasts, Bull. Seismol. Soc. Am., 110, 1765-1780, doi:10.1785/0120200169.
- Ueda, T., A. Kato, Y. Ogata, and L. Yamaya, 2021, Spatial Variations in Seismicity Characteristics in and Around the Source Region of the 2019 Yamagata-Oki Earthquake, Japan, Earth Planet. Space, 73, 40, doi:10.1186/s40623-020-01325-9.
- Wallis, S. R., F. Maeno, and S. Toda, 2020, Encyclopedia of Geology 2nd Edition Tectonics and Structural Geology: Japan and Korean Peninsula, 526-543, ISBN:978-0-08-102909-1, Academic Press Elsevier Ltd..

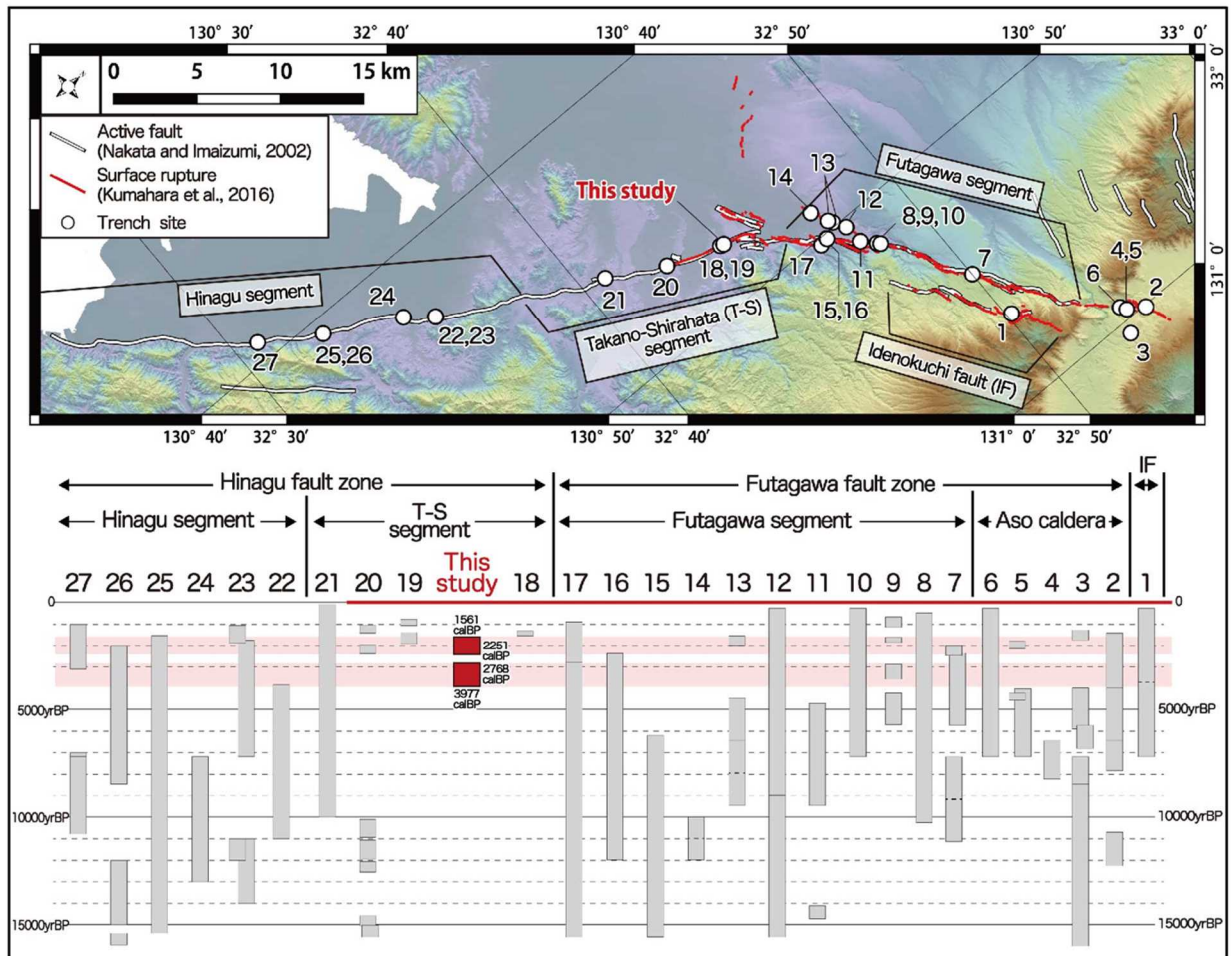
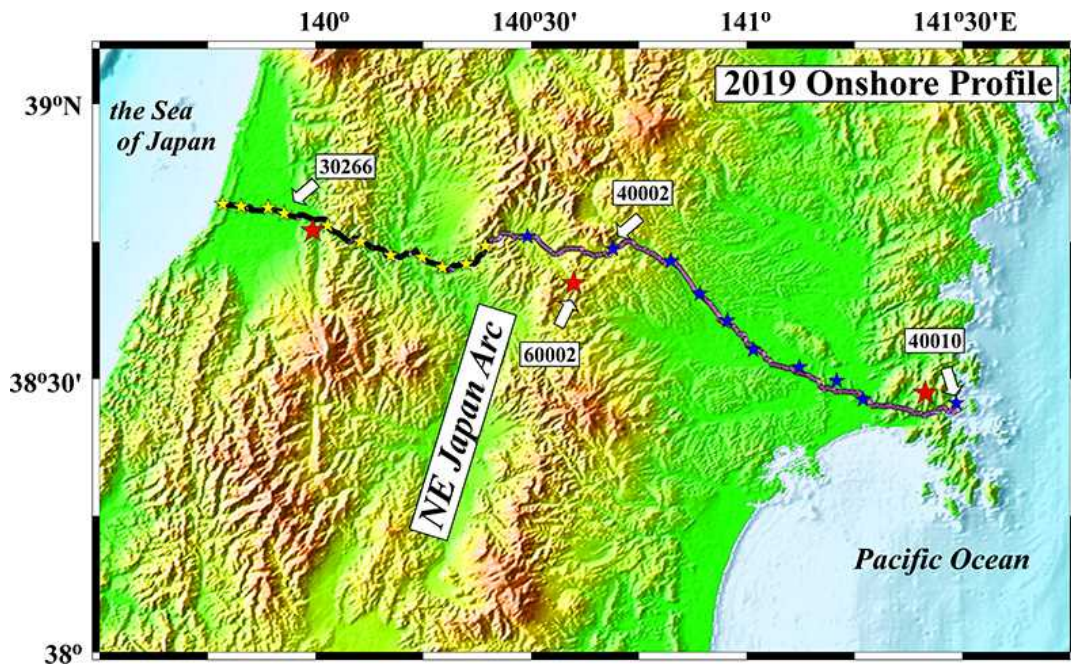


図1. 2016年熊本地震で地表地震断層が現れた御舟町高木トレンチにおける布田川・日奈久断層帯との連動性(予察) (名古屋大学 [課題番号: NGY_03])

(a)



(b)

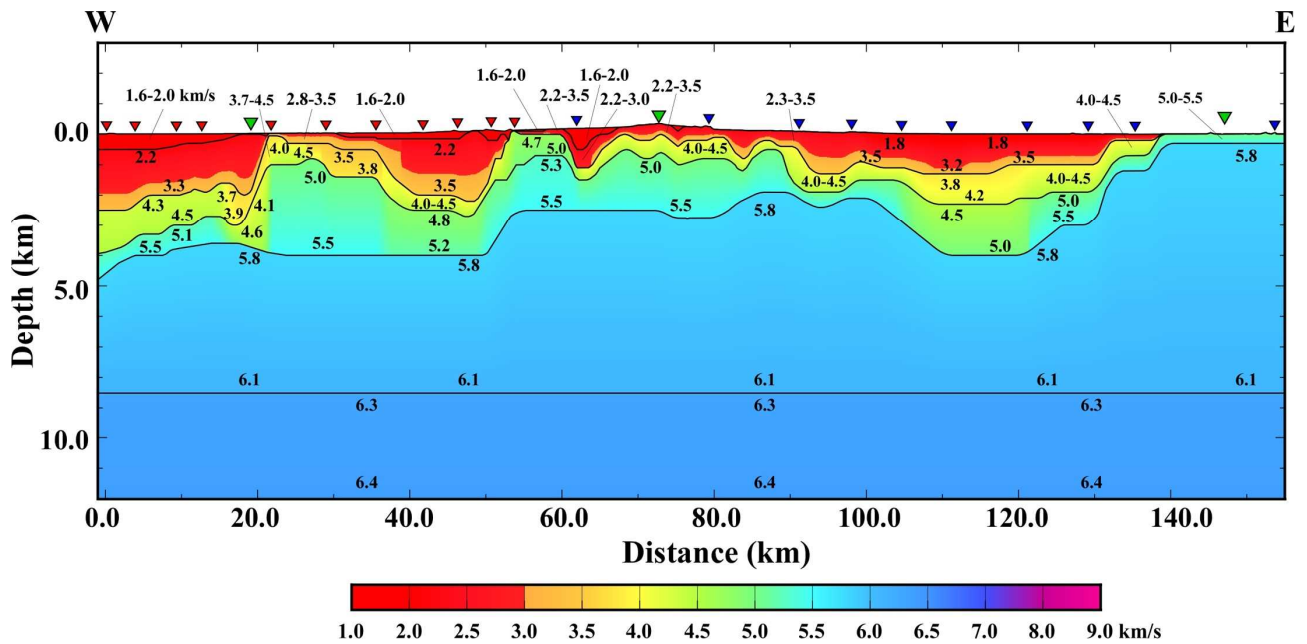


図2. 東北日本を横断する構造探査(令和元年度実施)の陸域部の測線と地殻浅部の暫定速度構造モデル(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_11])

(a) 測線図。ダイナマイ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。
(b) 波線追跡法で求めた暫定P波速度構造モデル。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。

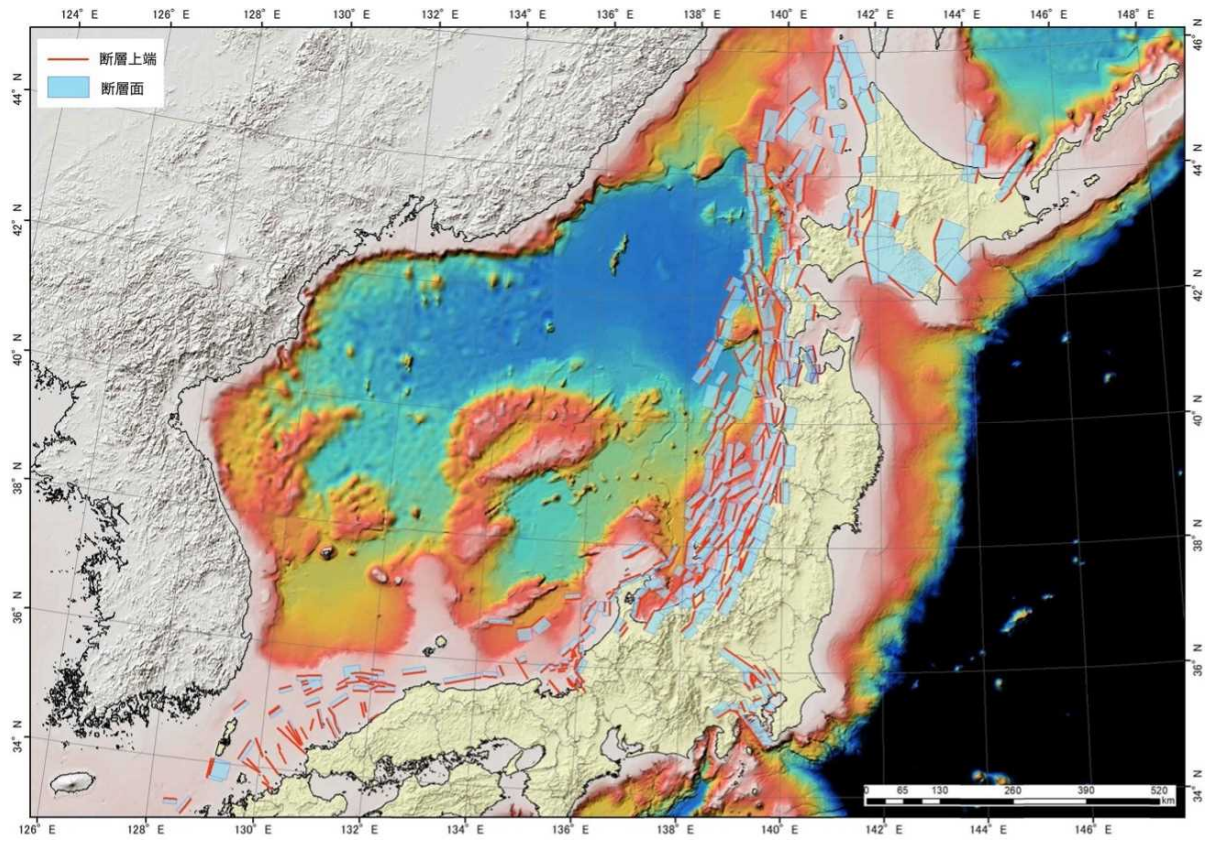


図3. 日本海及び沿岸地域における震源断層の矩形モデル(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_11]、佐藤・他, 2020)

関東地域は Ishiyama et al. (2013)による。

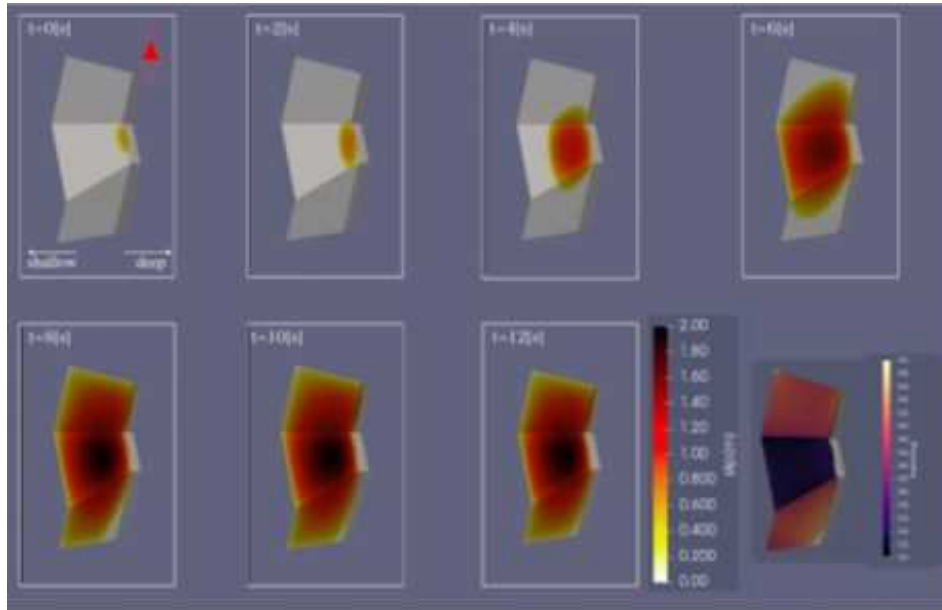
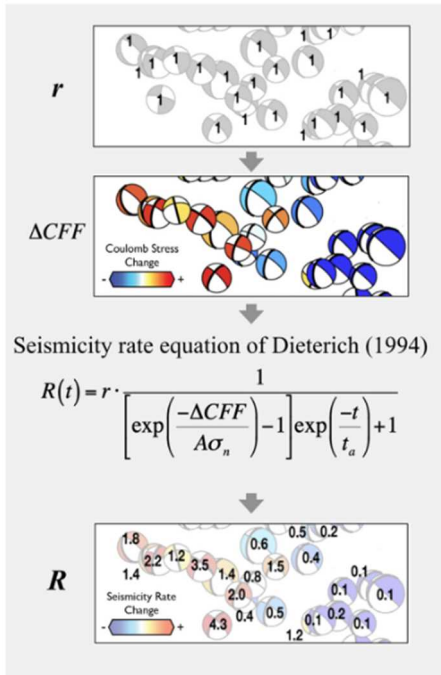


図4. 2018年胆振東部地震の動的破壊シミュレーション(東京大学理学系研究科[課題番号:UTS_05]、Hisakawa et al., 2020)

滑り量の2秒ごとのスナップショットと滑り角の空間分布(右下)。断層傾斜が高角となっている断層深部の滑りが抑制され、断層走向が変化している中部の滑り角が変化しているが、運動学的な滑りインバージョン結果と調和的である。

(a)



(b)

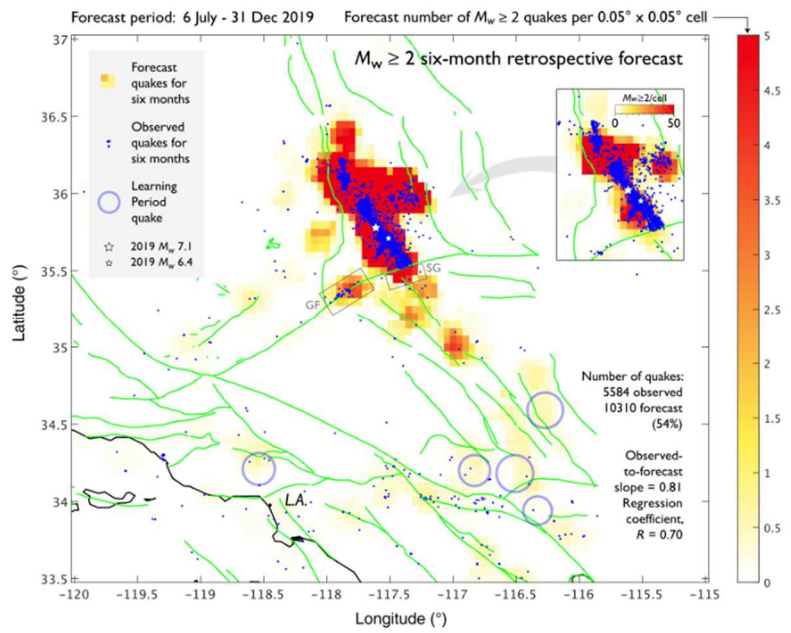


図5. 2019年リッジレスト地震に適用した応力変化—地震応答予測手法と予測結果（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI05]、Toda and Stein, 2020）

(a) 予測手法の概念図。常時活動時の個々の地震レートを基準として（1段目の r ）それぞれのメカニズム解節面へのクーロン応力変化を計算し（2段目）、Dieterich(1994)の速度および状態依存則から個々に直接レート変化 (R) を求め、空間スムージングによって地震活動変化をマッピングする（4段目）。

(b) リッジレスト地震後6ヵ月間の予測（カラースケール）と観測された地震（青点）。予測と観測された地震の分布は概ね整合する。GFはガーロック断層帯のうち、地震活動が活発化した区間。

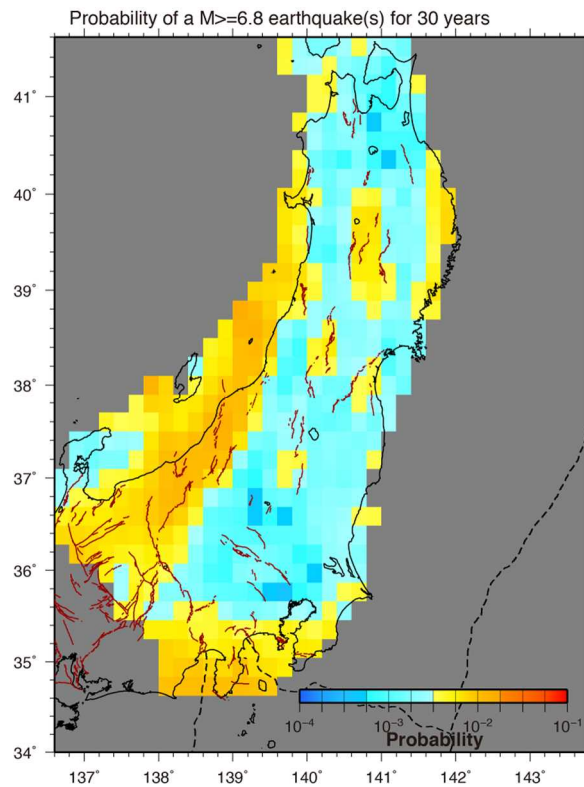


図6. 東日本のGNSSデータに基づく30年間にM6.8以上の内陸地震が発生する確率の試算例（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI05〕）

カラスケールは、 0.2° 毎のグリッドにおける発生確率を表す。用いたGNSSデータの期間は、2005年5月-2008年4月。

1 (3) 地震 (中短期予測)

「地震 (中短期予測)」計画推進部会長 中谷正生

(東京大学地震研究所)

副部会長 内田直希

(東北大学大学院理学研究科)

本部会では、地震発生確率が高まっている状態を定量的に評価する手法の開発を目的として、地殻活動のモニタリングや物理的解釈・数理モデル化、様々な自然現象の変調と地震発生との相関に関する調査などを行っている。

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

プレート境界の固着・滑りの時空間履歴は、地震発生への影響が物理的に明らかであり、予測への演繹的アプローチが考えやすい。本項目では、スロー地震と繰り返し地震の検出を中心とした、非地震性滑りのモニタリングに基づく物理モデルの構築と予測を目指して研究を行っている。

繰り返し地震は、プレート境界・断層の滑りを監視するすぐれた方法である。今年度、日本全国の定常地震観測データに基づく包括的な繰り返し地震カタログを出版した。同様のスコープをもつ以前のカタログ (Igarashi, 2010) は、2002年1月-2009年12月をカバーしていたが、今回は気象庁カタログに加えて地震研の震源カタログも用いることで、中日本を中心とする一部の地域については1981年からカバーできた。波形の相互相関を基準として、1981年7月18日から2019年12月18日までの期間に11,677グループ41,735イベントを繰り返し地震と認定しカタログ化して、一般に公開した (図1a)。長期的に活動が継続する繰り返し地震群の多くは沈み込むプレートの境界で発生しており、一方、地殻浅部で発生している繰り返し地震群の多くはバースト的な活動を示している。さらに、作成した繰り返し地震カタログを用いて、日本列島周辺の沈み込み帯における滑りの空間分布・時間変化の特徴を調べた (図1b)。得られた平均滑り速度は、プレート間巨大地震とその余効滑りの影響が見られる地域を除くと、プレート間の相対運動速度よりも遅い傾向が見られ、プレート境界面の固着状況を反映している (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、Igarashi, 2020)。

島嶼部観測空白域を減らすために2002年から始めた伊豆鳥島での地震観測は継続できている。また、繰り返し地震活動の更新過程によるモデル化に基づく、プレート準静的滑りの時空間変化の推定手法 (Nomura et al., 2017) のプログラムを、統計解析ソフトウェアRからMATLABへ移植し高速化した (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、野村, 2020)。

南海トラフでおきる長期的・短期的なスロースリップ・イベント (SSE) については、GNSS・地下水・歪み・傾斜の定常観測データから準リアルタイムで自動検出と滑り量推定が行われている (気象庁 [課題番号: JMA_01]、産業技術総合研究所 [課題番号: AIST09]、

矢部・他，2020；2021)。GNSSを用いたSSEの客観検出に関しては、南海トラフ地震臨時情報の発出も含む監視業務での役割を検討した(気象庁[課題番号：JMA_01]、小林，2021)。

最近の目立ったイベントとしては、2017年春から2018年秋にかけて発生した志摩半島付近の長期的SSEが、2019年半ばから2020年半ばにかけて再び発生したことがあげられる(気象庁[課題番号：JMA_01]、気象研究所，2020a)。また、2019年豊後水道の長期的SSE(GNSS座標とひずみ計データの統合インバージョンからMw6.8相当)の影響を簡易的に除去したGNSSデータから、2019年に四国中部にも小規模な長期的SSE(Mw6.1)が発生していたことがわかった(気象庁[課題番号：JMA_01]、気象研究所，2020b)。2019年豊後水道の長期的SSEは予期されていたので、周辺地域には基盤的観測網のGNSS局を補完するようにならかじめ追加されたGNSS局があり、これらのデータも加えた解析(図2)からは、2019年豊後水道の大きなイベントの前後に日向灘北部や四国中部で小規模な長期的SSEが見つかった(東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12])。また、この地域に展開・維持している機動的広帯域地震計のデータを用いて超低周波地震(VLFE、0.02-0.05 Hz帯域)の検出能力を上げ、豊後水道では通常は約3か月間隔でエピソード的に発生する深部VLFEが、長期的SSE継続期間中には1か月以下の短い間隔でバースト的に発生することを見い出した。さらに、四国西部の低周波地震(LFE、1-10 Hz)発生域直上に4ヶ所設置した短周期地震計の小型(口径1-2 km)稠密アレーでは、2019年12月下旬から2020年5月まで連続波形が取得され、センブルンス解析によってLFEが数分の間100 km/hで高速移動する現象を捉えた(東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12])。

近年では、世界中の様々なグループが様々なタイプのスロー地震の検出手段を進化させており、本計画で維持・管理しているスロー地震データベースには約50種類のカatalogが登録されている。様々なスロー地震Catalogに基いて、多様性と系統性の観点から、日本のスロー地震活動の特徴や相互作用について整理を行った(東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]、Obara，2020)。

LFEはスロー地震の中では最も短周期である。LFEのモーメントと破壊時間のスケールリング則を得ることは、これまでSN比の低さから困難であったが、四国西部の1万イベント以上のLFE波形を精査することで、通常地震と同じくモーメントが破壊継続時間(コーナー周波数の逆数)の3乗に比例する相似性(いわゆるストレスドロップ一定則)があてはまることを見い出された。ただし、ストレスドロップ(と破壊伝播速度の積)の値は、通常地震より2-3桁低く、また、コーナー周波数より高い周波数成分は、通常地震は周波数の2乗で落ちてゆくがLFEは3乗で落ちる。これらは、LFEの正体解明につながる重要な発見である(東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]、Supino et al.，2020)。

LFEについて南海トラフでの長期的な挙動を見極めるために、2004年4月から2015年8月までのHi-net連続地震波形に、マッチドフィルター法を適用し、約51万個のLFEを検出し、スロー地震データベースでCatalogを公開した。この数は同期間の気象庁一元化処理震源Catalogに比べて約23倍多く、LFEの特徴的な活動パターンがいくつか見い出された。解析期間中に豊後水道で半年程度持続する長期的SSEが三度あり、それらの最中には、プレート境界の走向方向にゆっくりと移動するLFEの群発的な活動が頻繁に見られ、それは長期的SSEのMwが大きいくほど顕著であった。このようなLFEの長距離・低速移動は、豊後水道SSEの期間以外でも、南海トラフ全域で解析期間全体を通じて繰り返し起きていた。

これは、Mw6.0程度以上のSSEに伴うETS活動の一端であると考えられ、既によく知られている同時期の微動の活動と同様に、拡散係数 $10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ 程度の拡散的なパターンの移動形式を示し、10日ほどかけてゆっくりと100 kmほど移動する。さらに、今回LFEの検出密度が激増したことにより、このような低速・長距離移動現象の中に、15 kmほどの短距離を10分程度で高速に移動する小スケールのLFE活動が多数含まれていることが見い出された。拡散的なパターンをあてはめると拡散係数は $10^5 \text{ m}^2/\text{s}$ 程度となる。また、今回のカタログでは、2011年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）M9.0以降、豊後水道から四国東部までの250 kmという長距離にわたって、巨視的なセグメント境界を超えてLFEの活動が同期する傾向が見受けられる。理由は不明だが、Takagi et al. (2016) が示した豊後水道から四国中央部まで延びる小規模な長期的SSEの影響で滑りイベントの連結性が高まったのかもしれない。後述する、短期的SSEのサイズ増加 (Hirose and Kimura, 2020) と関係するのかもしれない (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Kato and Nakagawa, 2020)。

また、前計画において、紀伊半島の12年間の深部LFEの空間的にセグメント化した活動の相互作用パターンを、点過程用に開発した新たな隠れマルコフモデルで記述した (Wang et al., 2018)。今年度は、隠れマルコフモデルの当てはまりを評価する新たな方法を提案し、紀伊半島の例について検討した (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Buckby et al., 2020)。

0.02-0.05 Hz帯域のスロー地震である超低周波地震 (VLFE) について、プレート境界での滑りイベント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のF-net連続波形をスキャンすることで、2003年から2019年の西南日本と東北地方太平洋沖の網羅的なVLFEカタログを作成した。浅部VLFEによるモーメント解放レートは深部VLFEより大きく、プレート境界浅部の不均質性が強いことが示唆される (図3)。プレート境界のカップリング率との関係 (図4) をみると、深部VLFEはカップリング率が0.5以下のところでしかおきないのに対して、浅部VLFEは様々なカップリング率の場所でおき、その活動度はカップリング率と逆相関を示す。浅部VLFEは地震波速度の遅い領域の周辺にみられる傾向もあり、流体の影響が示唆される (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Baba et al., 2020a; 2020b)。

一方、紀伊半島沖では、海底ボアホール内間隙水圧計が新たにDONETに接続され、データがリアルタイム伝送されて多くの浅部VLFEのモニタリングが可能になった。2020年3月に海溝近くで発生した浅部VLFEについて周辺の3つの間隙水圧計の記録 (図5) から、滑りは海溝に向かって伝播したが、最も海溝側のボアホール付近までは到達しなかったことが判明した (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、Ariyoshi et al., 2021)。

短期的SSEは継続時間が1週間程度のスロー地震である。四国で発生している短期的SSEについて、防災科学技術研究所のHi-netによる傾斜変化 (オフセット) データセットに基づいて、2001年から2019年にかけて発生した61イベントのすべり分布を推定した (図6)。短期的SSEによるすべり量は空間的に一様でなく、18年間の累積すべり量の分布によれば四国のETS領域が3つに区分されることが分かった。また、すべり領域のスラブ走向方向への長さは、2012年頃を境に、それ以降のSSEではより大規模のものが増えた (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Hirose and Kimura, 2020)。

以上のように、観測と解析の高度化、そして、良質なデータの蓄積が進んだことによってスロー地震の発生様式の理解は飛躍的に進展している。スロー地震の滑りが固着した大地震の震源域への応力载荷を進行させることは弾性論から明らかであるが、固着域にわずかな滑りを起こさせる例が観測からみつきり始めている。昨年度、LFEのタイミングを基準に四国西部のGNSSデータを重合することで、深部で短期的SSEが発生している最中に、固着域の深い側においても僅かな滑りが起きることを見出した (Kano et al., 2019) が、今年度は解析領域を拡げ、四国東部と東海地域でも同様の現象を見出した (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Kano and Kato, 2020)。

日本海溝の沈み込み帯では、前計画において、岩手県沖のプレート境界浅部のスロースリップが顕著な3年周期の変動を示し、M5以上の地震の多くはスロースリップが速い時期に起きていることを見出した (Uchida et al., 2016)。本年度は、Mw6.5以上の地震がなかった1996年から2003年前半の時期の繰り返し地震と陸域GNSS観測データに基づいて、スロースリップの時空間分布と地震活動の関係を調べた。岩手北部から青森にかけて、プレート境界深部で平均3 cm/年を超える滑りが続いているカップリングの弱い領域と、それをとりまくように存在するカップリングの強い領域があり、低カップリング域の滑りレート(3ヶ月窓の移動平均)は1年前後の周期で消長していること、滑りレートが高い時期には高カップリング域でのM4-6の地震活動度が高く、またb値が小さくなる傾向が見い出された。低カップリング域の滑りによる高カップリング域への応力载荷レートは、低カップリング域の滑りレートに合わせて0.5-1.2 MPa/yr程度の範囲で増減しており、これが地震活動の消長をもたらすと解釈できる。なお、期間中に高カップリング域でおきた5つのM6前半の地震のうち3つが载荷レートの高い時期におきていた (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Khoshrmanesh et al., 2020)。

スロー地震の振舞いからプレート境界の摩擦特性に関する知見を得ることもできる。本計画では、スロー地震に伴う流体移動 (Tanaka et al., 2018) を検出するための重力及び電磁気観測を行っている。本年度も、観測とデータの検討を継続した。本計画で使用している相対重力計の性能評価を行い、スロースリップが検出できる帯域を明らかにした (Tanaka et al., 2020a; 2020b)。また、四国西部で継続しているNetwork-MTデータから得られた3次元比抵抗構造に基づいて、構造変化検知の可能性を検討した (Uyeshima et al., 2020)。さらに、スロースリップに対する潮汐力の影響を、すべり面のダイラタンシーを考慮して物理的にモデル化し、深部低周波微動の潮汐応答の観察からスロースリップ域の摩擦特性を制約できる可能性を示した (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Sakamoto and Tanaka, 2020a; 2020b)。

観測データから、プレート境界の滑り履歴と摩擦特性を同時に推定するデータ同化 (加納, 2020, for review) は、原理的には、そのまま今後の滑り予測にも使えるはずである。SSEは、地震サイクルに比べれば支配方程式系がステップでないため、データ同化やそれによる予測が成功しやすいと期待されており、琉球海溝南西部八重山諸島近傍でおよそ6ヶ月周期で繰り返すSSEに焦点を絞ったGNSS観測を継続している。2013年以降に整備された新規の観測点も含めたデータ解析で、2010-2019年のあいだに16回のSSEによるすべり時空間発展が推定された。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、今回の解析で、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という新たなパターンが見つかった。このパターンのSSEは16回中7回発生した（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_01]）。

代表的な手法の一つであるアンサンブル・カルマンフィルタを用いたデータ同化によって、豊後水道に一つの長期的SSEパッチを置いたモデルで滑りの再現と予測ができることを昨年度までに示した。今年度は、四国中部から日向灘にかけて南海トラフの走向に沿って長期SSEの再来間隔等に多様性があることを扱うために、まず複数のSSEパッチが相互作用するフォワードモデルを用いて多様性をもたらす要因を探った。SSEの基本的なふるまいはSSEパッチの幅と震源核臨界サイズの比で決まると考えられていたが、実際には、ほぼ全てのモデルパラメータが再来間隔に影響することがわかり、さらに、固着率と法線応力の不均質により走行方向での再来間隔、最大すべり速度、継続時間の変動が生じることが確認された（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_01]）。また、地震サイクルのデータ同化に機械学習を用いる試みとして、サイクルが繰返すにつれて固着-滑りの大きさや間隔が徐々に変わっていく室内摩擦実験で得られた剪断応力・変位の時系列データ（Urata et al., 2018）に対して、1自由度の固着-滑りシミュレーションで作成したデータを用いて訓練したランダムフォレストモデルを適用し、速度・状態依存摩擦則を規定する摩擦パラメータの変化を推定した（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_13]、石山・他, 2020）。

昨年度までに開発した、地表面の変位データからアジョイント法によりプレート境界面の摩擦特性を直接推定する手法を、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GNSSデータに同化することで摩擦特性の空間分布を推定し、それを用いて、その後15日間の地殻変動が良好に予測できた（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_01]、Kano et al., 2020）。

複雑な物理メカニズムに支配された系のデータ同化を可能にするために、フォワードモデルの計算コストが高い場合に効率的にモデルパラメータを推定する手法開発を進めている。粘弾性応答と余効滑りの両方がおきている2011年東北沖地震後の地殻変動データに基いて、地震時のすべり分布、これに対する平滑化パラメータ、断層の摩擦パラメータ $(a-b)\sigma$ 、海洋・大陸マントルのMaxwell及びKelvin粘性率の6つを未知パラメータとし、これらの事後確率分布を求めることに昨年度成功した。本年度は、同じデータに基づいて、推定パラメータ間のトレードオフの情報も含む二次元の同時事後確率分布を求めることに成功した（京都大学理学研究科[課題番号：KUS_01]）。

室内実験では、音波の透過率や反射率が断層の摩擦強度を線形に反映することが知られており（Nagata et al., 2008;2012）、プレート境界等の強度変化を監視できる可能性が指摘されている（Kame et al., 2014）。本年度、ガウジ層を挟む模擬断層での音波透過率を調べることで、ガウジ層がない場合でも見られた時間依存性の摩擦強度変化（いわゆるlogtヒーリング）に対応した音波透過率の変化を確認した。さらに、ガウジ粒子の幾何学的再配置による構造変化を反映した非時間依存性の圧密強化メカニズム（Nakatani, 1998）に対応する音波透過率の変化も捉えた。しかし、logtヒーリングは、

断層全体としての摩擦強度には反映されないバルク部分でもさかんに起きており、ガウジが無い場合 (Nagata et al., 2008; 2012) のように音波透過率と断層強度が一对一に対応するわけではないことがわかった (気象庁 [課題番号: JMA_01]、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_06]、永田・他, 2020)。

プレート間固着の時間変化を推定し、その発展を予測するためには、プレート境界周辺の物性や応力を知ることも重要である。摩擦や水理特性に大きな影響を与える粘土鉱物の含有量を、基礎的な検層種目である電気比抵抗検層と自然ガンマ線検層のデータから経験的に推定する手法を、南海トラフ付加体のデータに基づいて開発した (図7)。本手法によって、コアの取得が難しい地層でも、検層データから詳細な粘土鉱物量比の深さ分布を推定することが可能となる (産業技術総合研究所 [課題番号: AIST09]、Yabe et al., 2020b)。

南海トラフデコルマ付近の浅部VLFEの要因として高間隙水圧が想定されている。浅部VLFEの活動が活発な室戸沖では、実際に高間隙水圧が確認されており (Tobin and Saffer, 2009)、この領域に沈み込む半遠洋性の泥岩層の低い透水性がデコルマの高間隙水圧をもたらしたと考えられる。そこで、逆に浅部VLFEがほとんど観測されない潮岬沖の構造を調べるため、マルチチャンネル反射法地震探査データ (測線KI01) を解析し (図8、9)、浅部デコルマ全域にわたるような低Vp層が存在しないこと、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ことがわかった。透水性の高いタービダイトが沈み込む潮岬沖のデコルマでは、高間隙水圧が生成されにくいと推察されるため、浅部VLFEが検出されていないことと整合的である (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])。

南海トラフにおけるスロー地震発生域の構造的特徴について、昨年度は、紀伊半島北東部の甲賀-南伊勢測線での結果を報告した。本年度は、紀伊半島南部と四国西部の結果を報告する。紀伊半島南部のみなべー下北山測線は、深部LFE発生域の直上にある。これらのLFEはフィリピン海プレート上面に対応すると解釈できる明瞭な反射帯 (深さ27-35 km) 付近でおきており、LFE発生域ではVpの低下が見られる。四国西部では、制御震源探査データの反射法断面図から、深さ25-33 kmにフィリピン海プレート上面に対応すると解釈できる反射帯が見えた。反射の程度は傾斜方向・走向方向どちらにも変化しており、短期的SSEの積算すべり量 (Nishimura et al., 2013) が大きいところに明瞭な反射帯がある傾向が見い出せた (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Kurashimo et al., 2020)。

東北日本においては、S-netで得られるようになった、太平洋側海域観測点での地震波形のS波偏向異方性を調べることで、前弧側のマントルウエッジは顕著なS波偏向異方性を持たないことが判明した。背弧側のマントルがスラブの沈み込みと調和的な流動を示唆する異方性を示すのとは対照的で、前弧側のマントルウエッジは固くて流動していないと考えられる。これは、沈み込み帯の変形や地震・火山活動を支配する重要な基本構造だろう (図10) (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Uchida et al., 2020a)。

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

地震活動は20世紀前半からの網羅的観測データがあり、予測手法の検証・実践に関して格段のポテンシャルを有しているため活発な研究が続けられている。地震活動の様々な変調が地震の先行現象ではないかと提案されており、少なくとも、短期的な地震活動のクラスタリング（余震的トリガ）は、明らかに存在する強い規則性であり、地震の確率予測に利用できる。

地震活動を独立地震とトリガされた地震に分けて把握すること（デクラスタ）は、今では地震活動解析の第一歩となっている。恣意的な基準を導入しないデクラスタ手法として、ETASを応用した方法（e.g., Zhuang et al., 2002）に加えて、リスケールされた時空間距離での最近接イベントとの距離に着目するZaliapin and Ben-Zion (2013) の手法がよく使われるようになってきている。本年度は、イタリア北東部の1977-2018年のカタログ（M2.0まで完備、約4000イベント）に対して、この二つの方法でのデクラスタリング結果を比較した。検出されたクラスタ内部でのイベント間のリンクの仕方は（当然）異っていたが、クラスタ分けの結果は各クラスタが含むイベントの構成を含めて非常によく一致していた。どちらの結果でも、地震の半分強は独立地震であり、その8分の1程度に、前震もしくは余震、あるいはその両方が伴った。非独立地震のうち9割弱は、クラスタ内の最大地震より後におきた余震、1割強は前におきた前震であった（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、Varini et al., 2020）。

中規模繰り返し地震について、発生状況のモニタリングから発生確率をプロスペクティブに予測する実験を継続的に行っている（気象庁 [課題番号：JMA_01]、気象研究所、2020d）。そこでは、発生間隔が一定の平均値をもつ定常的な統計分布に従うことを前提に、様々な定常更新過程による予測の性能を評価していたのだが、2011年東北沖地震以後の釜石沖繰り返し地震のように、周辺で起きた大地震の影響を受けて定常性が崩れることがある（図11）。このような場合でも、平均的な発生レートの変化に明かな法則性があれば、それに従って相対的な時間進行率を変化させることで、従来の定常更新過程モデルによる予測実験が継続できることを示した（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]、野村・田中，2021）。なお、釜石沖については、活動を詳細に把握するための13点による陸域臨時観測を維持している（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]）。

プレート境界の繰り返し地震は背景の非地震性滑りによって繰り返し載荷される小さな固着パッチの繰り返し破壊であるという解釈が確立しているが、観測例が増えてきた内陸の繰り返し地震については現象論的特徴も物理解釈も定まったものがない。昨年度、内陸地殻（上盤側プレート）内の繰り返し地震（五十嵐，2019）のうち、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ものの震央分布が、ETASモデルの背景活動度 μ （余震的トリガの影響を除いた、独立地震の発生レート）の空間分布と似ていることを指摘したが、今年度、その相関が有意であることが示された。また、バースト型については、中越沖、兵庫県南部、鳥取県中部、熊本など15地震の余震中の繰り返し地震の減衰や継続時間を調べ、地震ごとに大きな違いがあることがわかった。繰り返し地震が本震断層の余効滑りで駆動されたとすると、余効滑りが本震による応力変化だけでなく、流体が関与しての強度変化の影響を受けることで、余効滑りに大きなバリエーションが出るということかもしれない（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]、尾形，2021）。

内陸で繰り返し地震が見られた2つの興味深い事例について、詳細で包括的な解析を行った。まず、昨年度報告した、函館での非火山性LFEと通常地震(M1級)を含むクラスタについては、下部地殻の深さ15~35 kmにかけてLFEのみが起きる傾いた円柱状のクラスタがあり、その延長線に位置する上部地殻の深さ10 kmあたりで、LFEと通常地震が混在して活動していることがわかった。通常地震には明らかな繰り返し地震が含まれていて、それらは、応力降下量が小さい、繰り返し間隔が短い(10分程度)など、人工注水で誘発される繰り返し地震(e.g., Lengline et al., 2014)に似ていた。深部からの流体によって間隙圧が上昇することにより発生している可能性があり、その場合には、下部地殻のLFEクラスタと合せて水道になっているのかもしれない(東北大学理学研究科[課題番号:THK_09]、Yoshida et al., 2020a)。一方、2017年に秋田大仙市でおきたM5.3の地震については、一枚の断層上で、前震・本震・余震の破壊域が棲み分け、さらに本震破壊開始点にむかう前震活動の移動、余震活動域の拡大が見い出された。プレート境界の地震と同じように、本震前後の非地震性滑りがあった可能性がある。実際、余震フロントでは繰り返し地震も見い出された(東北大学理学研究科[課題番号:THK_09]、Yoshida et al., 2020b)。

繰り返し地震に限らず、地震活動の特徴の地域性を理解することは、経験的な確率予測の助けとなる。グーテンベルグ-リヒター則のa値は、地域の地震活動度の指標のひとつであるが、その最尤推定量と推定誤差の計算方法、統計学的根拠については、これを明示した文献が見あたらないので、解説論文にまとめた(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_12]、京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01]、岩田・尾形, 2020)。

階層的時空間ETASモデルにおける背景地震活動度 μ も地域の地震活動度の指標である。日本海東縁地域で近接しておきた1964年新潟地震(Mj7.5)と2019年山形地震(Mj6.7)周辺地域の地震活動(1998-2019年, Mj1.8以上)に、背景地震活動度 μ と余震生産性Kの空間分布のロバストな特徴が見つかり、地学的特徴との対応を検討した(図12)。 μ は東西短縮の歪み速度(Menesses-Gutierrez and Sagiya, 2016)と正の相関をもち、両地震とも、新潟-神戸歪み集中帯の北部延長とされる速い東西短縮の地域でおきた東西圧縮の逆断層地震である。また、新潟地震の震源域はKが低く地震発生深度でのP波速度(Matsubara et al., 2020)が高い。山形地震の震源域はこの逆である。岩石実験での微小破壊の活動を参考にすれば、山形地震の震源域のほうが地殻の損傷程度が高く、脆性破壊が拡がりにくいと解釈できる。山形地震の震源域に新潟地震の破壊域が侵入しなかったのは、そのせいかもしれない(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、Ueda et al., 2021)。

このように、地殻構造の不均質を精度よく決めることの意義は、今後ますます高まると思われる。最近よく使われるようになった速度推定手法である空間自己相関(SPAC)法について、小規模アレー観測に適用する際の解析可能波長の上限が、アレーサイズに信号対雑音比の平方根を乗じた程度であることを理論的に示し、また表層減衰の推定に使える可能性も示した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01]、長・岩田, 2020、Cho and Iwata, 2021)。

一方、断層面の幾何学的複雑さが地震破壊に与える影響も近年さまざまな事例で示唆されている。今年度は、2000年鳥取県西部地震(Mj7.3)の破壊域(水平方向30 km、鉛直

方向15 kmの鉛直な左横ずれ断層)を覆う地表に約1 km間隔で面的に配置された地震計1000点のアレーで得た、2017年4月から2018年4月までの13ヶ月間の連続記録を解析した。得られたカタログはM-0.6まで完備で、4033個の微小地震(最大でM2.6)の震源分布は、2000年の地震直後の余震域全体にわたって、いまだに集中的な活動(本震破壊面を描き出すような余震分布)が保たれていることを示しており(図13a)、現代の技術による超高感度観測で超微小地震まで観測することで、昔の地震の破壊面の情報を得られる可能性がある。圧倒的な観測点密度を利用して、必要な場合には数mの相対精度で決定された震源は、長さ約20 kmの主断層以外にも5 km(図13a)から30 m(図13b)までの様々な大きさの明瞭な鉛直板状の分布を示し、小スケール断層の雁行配列(図13b)まで描き出されている。2000年の地震では主断層と平行および共役な方向の、あらゆるスケールの横ずれ断層が動いたと考えられる。また、図13bのような小さな面上でも活動の移動が観察され、その速度(約30 m/日)からして流体移動が関与が推察される。また、この観測ではP波速度のトモグラフィも0.5 kmという高い空間分解能が達成された(図13c)。2000年地震の破壊開始点から走向に沿って約6 km北に明瞭な速度境界があり、それより南東の高速度域では震源が主断層に集中しているのに対して、北西の低速度域でははっきりした主断層がなく、多数の共役面を含む複雑な分布をしている。2000年の地震で大きな滑りがあったのは南東側の高速度域で、北西側の低速度域は連続性のよい長い断層がない未熟な剪断帯の段階と考えられる(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、Kato et al., 2021)。地震の決定論的予知が原理的に困難であると考えられる主要な理論的根拠は、断層のフラクタル的な不均質である(e.g., Ide and Aochi, 2005)から、大地震の断層の複雑さを直接マルチスケールで捉えた鳥取の観測は、地震の可予測性の研究を新たな段階に進める契機となりえよう。

微小地震のメカニズム解からは、さまざまなスケールでの応力場、あるいは断層の構造を得ることが期待される。そのためには、地震のメカニズム解を極力多く集めることが重要である。通常は誤差の大きいメカニズム解は解析に利用されないが、誤差を正しく見積もることが出来れば、その誤差情報も含んだ上で得られたメカニズム解を全て用いた解析が可能となる。そこで、P波初動極性(押し引き)データを元にしたメカニズム解の誤差を推定する手法を開発した。ある地震に対して得られたP波初動のデータに対し、適当なメカニズム解を仮定すると、そのメカニズム解から期待される極性と合致しているものの個数・全体の個数・極性が合致する確率から、尤度(データとモデルの合い具合に関する統計的評価関数)を作ることが出来る。これに節面の向きおよび極性が合致する確率が一様分布に従うという仮定を置き、これをベイズ推定における事前分布として先の尤度と掛け合わせることでメカニズム解の事後分布を得る。ただし、事後分布を解析的に得ることは困難であるため、棄却法(von Neumann, 1951)によるサンプリングで近似的に得ることとした。これにより多数のメカニズム解の集合、即ちメカニズム解の確率分布を得ることが出来た。この分布全体を用いることで、応力場推定など、メカニズム解を元にした様々な統計的推定を従来よりも合理的に行い得る(京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01]、Yukutake et al., 2020)。

上述の2000年鳥取県西部地震でもそうであったが、やはり内陸地震である1976年唐山地震(M7.8)の破壊域でもいまだに地震活動が見られ、最近では2019年12月5日に豊南地

区でM4.5が起きている。余震継続期間は地域のテクトニック载荷レートに反比例するという、速度・状態依存摩擦則のもつ遅れ破壊的性質に基く余震の物理モデル (Dieterich, 1994; Toda and Stein, 2018) からは、唐山の余震は100年以上続くと考えられる (e.g., Zhong and Shi, 2012)。そこで今年度、唐山地震震源域を含む約300 km四方程度の領域について、1970年から2019年12月5日までの地震活動を有限断層ETASモデル (Guo et al., 2017; 2019) を用いて解析した。その結果、現在の地震活動は、独立地震と過去の地震の余震がほぼ半々な、余震期と通常期の境目の状態であることが示唆された。また、現在の独立地震の活動度は、唐山地震前の数年間におけるレベルより明らかに低い。これは単に余震期が終わったということでは説明できず、唐山地震後はテクトニックな応力载荷速度が低下したと考えられる (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Liu et al., 2021)。

地震活動の評価による地震発生予測を業務的に行う場合の問題点を洗い出すために、データの取り込みと予測のアップデートを自動的に行なう試行的な準リアルタイムシステムの開発を継続している。今年度は、種々の情報を重ねあわせて対話的に表示するマッピングツールを使いやすくするため、GISソフトウェアを用いたものを試作した。また、2020年11月6-7日に青森県沖でM5.5とM5.2の地震が近接しておきたため、昨年度開発した計算・マッピングツール (井筒ら, 2019) を用いて、前震識別手法として提案されている短期的な空間集中化指標 (Lippiello et al., 2012) の推移を見守った。この2つの地震によって集中化スコアは上がり、2020年12月31日時点でも高止まりしているが、これはその後の地震活動が低調であったために値が更新されないだけである。また、この地震から150 kmほど南西で12月12日にM5.6、50 kmほど西で12月22日にM6.5の地震が起きたが、それらに先立つ地震活動の集中化はなく、12月22日の地震はむしろ活動の分散化傾向がみられる場所で起きたものであった (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])。この青森県沖の地震活動を受けて、COVID-19感染症のため再開が遅れていた北海道えりも観測点の3成分磁力計の観測を2020年11月中に再開した (千葉大学 [課題番号: CBA_01])。

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

地震先行現象の候補として提案されている様々な自然現象について、地震発生との相関の有無と程度を評価しておけば、その知見を経験的に地震発生確率の予測に取り入れることができるし、物理ベースの演繹的予測法のヒントになることも期待できる。先行現象に関する国際ワークショップとして千葉大で開催予定であった7th Int'l Workshop on Earthquake Preparation Processは、COVID-19感染症の影響を受け中止した。JpGU-AGU2020の国際セッションInterdisciplinary studies on pre-earthquake processesはオンラインで開催した (千葉大学 [課題番号: CBA_01])。

どんなものであろうと、何らかの自然現象がおきるとそのあと地震の確率が高いという先行性 (Nakatani, 2020) の有無や程度を検証するには、地震の前だけでなく、普段からどの程度異常が起きているかを知ることが必要である。そのために、非研究目的で行政等が観測していた様々なデータを集めている。宮城県は漁海況調査として、沿岸と

沖で海水温と塩分の定点観測を長期にわたって行っている。このデータ（書類）のデジタル化が1978年度分まで完了したので、1978年2月20日のM6.7地震、1978年6月12日のM7.4宮城県沖地震の震源に近い定点観測3地点（大島、江ノ島、田代島、いずれも宮城県）の海水温データ変化を時系列プロットしてみた。地震に先行する時期に3地点に共通した顕著な異常はみられなかったが、江ノ島においては1978年1月始めにトレンドよりも高温を示す日が数日あった（図14）。しかし、これはプロット期間中に何度も見られる程度の変動である。また、1日以内の変動に異常がみられるかもしれないと考え、各日の午前10時と午後3時の差の時系列をつくってみたが、地震に関係していそうな異常は見うけられない（公募研究、東京学芸大学〔課題番号：KOB008〕）。

日本のプレート境界沿いの中規模繰り返し地震について、近傍のM6クラス以上の地震との関係を調査した。中規模繰り返し地震の発生間隔が平均よりも長くなった後、複数の系列にて常にはないが、次の繰り返し地震までの間に近傍でM6クラス以上の地震の発生が見られた。ただし、2011年東北沖地震以降、その影響を受けた系列では繰り返し間隔が非常に短かつ非定常になり、そのような関係をうかがい知ることができない（気象庁〔課題番号：JMA_01〕、東北大学理学研究科〔課題番号：THK_09〕）。

短期的な前震活動は、飛び抜けて高い確率ゲインを示す先行現象で、その先行傾向の有意性には疑いがない。しかし、地震活動の活発化を先行現象とみなすわけだから、本震が前震の余震としておきたものを捉えているだけ（Helmstetter et al., 2003、Felzer et al., 2015）である可能性があり、それだけでは、本震につながる特別な物理過程（e.g., Kamogawa et al., 2019、Lippiello et al., 2012; 2019）が存在するという証拠にはならない（Nakatani, 2020）。この疑いを晴らすには、ETASモデルによって作製した人工的なカタログ（つまり、独立地震のランダムな発生と余震的トリガ効果だけで構成された地震活動）に対して、主張する前震現象を用いた予測を行い、同じ方法を実カタログに適用した場合よりも予測性能が劣ることを示せばよい。数十キロ四方内に一定規模（ M_{f0} ）以上の地震数個（ N_f ）が数日（ T_f ）以内に起きた場合に、そのあと数日（ T_a ）以内に、予測のターゲットとする大きな（ $\geq M_{m0}$ ）地震がおきるというアラームを立てるMaeda（1996）の前震識別法（以後M法）について、昨年度は伊豆諸島地域でのみ予察的な解析を行った（弘瀬ら, 2019、前田ら, 2020）が、本年度はM法が特によい成績（確率ゲイン300-1600）を示す伊豆諸島、長野県北中部、岩手・宮城県沖、茨城県沖の4地域（前田・弘瀬, 2016）で本格的な検証を行った。人工カタログを作るためのETASパラメタはそれぞれの地域に合わせたものを用い、さらに、人工カタログに対するM法の適用においては、各地域で1000通り作成した人工カタログのそれぞれについてM法のパラメタを最適化し、人工カタログにとって不利にならないよう工夫した。成績の比較表を図15に示すが、いずれの地域でも実カタログに対しての方が成績がよい（確率ゲインで1.16-5.64倍高い）。人工カタログに対しても70-500と、1よりずっと大きい確率ゲインで予測できているので、余震トリガ効果に助けられている面はあるにせよ、それだけではない、物理的な前震ならではの特徴を利用できていると言える。実際、各地域で予測ターゲットとした地震の前の地震活動を比べてみると（図16）、ETASカタログと実カタログでは明らかに時間的推移の特徴が異っている（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕、弘・他, 2020a、Hirose et al., submitted）。

そこで、どのような物理過程がM法の拾い上げる特徴的な前震を産み出しているかを推察するために、M法による予測成績の空間分布を、それぞれの地域での既知の地震テクトニクス情報と比較した。プレート境界である岩手・宮城県沖および茨城県沖でM法が成功するのは、VLF（超低周波地震）や微動の見られる地域に隣接し、且つ背景地震の群発活動（Nishikawa et al., 2019）が見られる地域であり（図17a、17b）、SSEによる地震活動がM法で前震として捉えられている可能性がある。また、M法が成功するのは、そのような背景地震の群発活動のなかでも、プレート境界直上の低速度異常域（縁の部分）である（図17c）。さらに、岩手県沖（図18の領域N）に関しては、ターゲット地震もアラームも、大部分はUchida et al. (2016) が見つけた3.09年周期のプレート間滑り速度の増減リズムにおいて、ゆっくり滑りが速い時期に発生しており、予測が成功したのは全てがそのような時期であった。このことも、SSEに引き起こされる群発活動が前震として拾い上げられているという推察を支持する。

一方地殻内地震では、流体活動に関連する群発活動を前震として捉えていると推察される。長野県北中部でM法が成功するのは、新潟－神戸歪み集中帯および糸魚川－静岡構造線である（図19a、19b）。ただし、図中cの地震はM法に予知されたことになっているが、2011年東北沖地震の13時間後で、また、適中アラームとなった地震ともやや離れているので、前震－本震の関係ではなく、どちらも極度に頻発していた誘発群発活動の一環ということにすぎない可能性が高い。そうすると、M法が成功するのは新潟焼岳以西ということになり、ここは流体（部分熔融）やマグマ活動によると思われる低速度異常が地殻から上部マントルまでひろがっている（Nakajima and Hasegawa, 2007）地域である。伊豆諸島に関しては、活動的な火山列からなる七島・硫黄島海嶺に沿ってほぼ満遍なくM法が成功している（図19c、19d）。なかでも、マグマ貫入に伴う地殻変動と群発地震の対応がよい（e.g., Kumazawa et al., 2016）ことで有名な伊豆半島東部は、予知率12/13、適中率5/6と抜群の成績であり、M法はマグマ活動にともなう群発地震を前兆としてとらえていると推察される。また、例外的に成績が悪い（空振りアラームのみが27個もある）新島付近は、流紋岩質で中部地殻が薄いなど、伊豆諸島の中では特異な地質構造をもつことも注目される（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、弘瀬ら, 2020b、Hirose et al., submitted）。

上述のM法においてもそうであったが、経験的な先行現象の研究では、余震的トリガリング（ETAS）効果から数百倍程度の確率ゲイン、本震につながる特別な物理過程から産み出されたと思われる異常現象から数倍の確率ゲインが得られることが多い（Nakatani, 2020, for review）。かつて地震予知の本筋と期待された、「壊れ始め」という特別な物理過程から派生する決定論的な前兆に期待された姿からはほど遠いが、これは、一旦開始した地震破壊がどこまで成長するかが、実質的には確率的なプロセス（e.g., Ide and Aochi, 2005、Noda et al., 2013）であるせいだと考えられている（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、中谷, 2020a; 2020b）。

今年度、確率的な地震破壊成長の抽象的微視モデルである分岐クラックモデル（図20a、Vere-Jones, 1977）に臨界ゾーンという概念を導入して、可予測性に関する上述のような経験的特徴を整理する枠組みが提案された。このモデルは、一つの微小クラックの破壊が、ある確率で次世代における隣接の微小クラックの破壊をトリガするということを

繰り返す確率過程で、1つのクラックがトリガするクラックの数の期待値 ν (臨界度) が 1 未満なら破壊のカスケードは速やかに終息、1 なら必ず終息するけれども寿命が長くなる。このモデルによる地震のサイズ分布は図20bのようになり、 $\nu < 1$ では、システムサイズとは無関係に地震サイズに上限がある。モデルの破壊単位(微小クラック)を岩石破壊のAE程度と仮定すれば、 $\nu < 1$ における上限サイズはM-2.5程度となり、一般的な観測下限より小さい範囲に留まる。すなわち、通常の観測で捉えられている地震は、基本的に $\nu = 1$ のゾーン(臨界ゾーン)でしか発生せず、現在可能な地震の最大サイズは連続的な臨界ゾーンのサイズと考えられる。臨界ゾーンでおきる地震の破壊の成長は複雑(図20c)で、個々の地震のサイズを決定論的に予測できないことには変わりはないが、臨界ゾーンの検出によって、地震発生の必要条件が整っている時空間を同定できれば、確率ゲインが上乘せできるはずである。 ν が低い側から1に迫ることは、物理的には強度の余裕が高い側からゼロに漸近することに対応するだろう。

臨界ゾーンの見地からは、先行異常は決定論的な震源核のように破壊開始点付近に限定されず、臨界ゾーン全体でみられると考えられる。このことは、経験的に提案されている低確率ゲインの先行現象[e.g., モーメント放出の加速(Bowman et al., 1998)、b値の低下(Nanjo et al., 2012)、地球潮汐による載荷/除荷時の地震活動変化の比(Yin et al., 2006)、重力変化(Chen et al., 2016)、電磁気変化(e.g., Han et al., 2017、Zhuang et al., 2013)、GPS変位異常(Wang et al., 2013)など]が広範囲に観測されることと調和的である。とくにb値については、図20bで上限サイズより小さい直線部分のb値(=0.75)が自然地震でのb=1より小さいことに注意すれば、先行現象としてのb値の低下は、 ν が1に迫るときに上限サイズが増加して、b=0.75の部分が観測にかかるようになったと解釈できる。また、この上限マグニチュードの上昇は、ETASの背景地震発生レートやクラスタリングの強さの時間の上昇としても捉えられるはずである。間接的ではあるが、Mignan (2014) は、本震のマグニチュードよりも3以上小さなマグニチュードから構成される地震活動を検出できた場合には、定常ETASから外れる前震が見つかる傾向があると指摘している(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13]、Zhuang et al., 2021)。

非常に小さい地震を検出する手法として、既知のテンプレート地震との波形相関をとることがおこなわれているが、バイアスのかからない一様な検出のためには、本来すべての連続波形から切り出された短時間波形同士の相互相関を計算する(以下、総当たり)ことが求められる。Yoon et al. (2015) は、スペクトログラムによる特徴抽出の結果(FingerPrint)に局所鋭敏性ハッシュによる高速検索(類似音声信号の探知に用いられる)を用いて総当たりによる地震検出方法を提案した。昨年度、この方法で特徴抽出を行う関数として別のものを2種類用いることで、計算時間が劇的に短縮し、且つ、FingerPrintよりも検知された相似波形同士の相関係数が概して高いことがわかった(駒形・他, 2020)。本年度は、2018年大阪府北部の地震(Mj6.1)発生直後の活動(震央近傍のHi-net観測点における6分間の連続波形)を対象に総当たりによる性能評価を試みた。その結果、特徴抽出関数を用いて得られる類似度と、元の波形の相互相関の順位相関が必ずしも高くない、すなわち、同じペアであっても用いる手法ごとに「類似の程度」の高低が異なる場合があることが判明した。いずれの手法においても気象庁一元化地震

カタログに掲載のない波形を検出したが、検出される波形は一部異なっており、ペアも一部異なった。そのため、単なる「計算コストを削減した代替手法の性能評価」とどまらず、どのような特徴を共有する場合にいずれの指標において高い類似度と評価されるかを精査する必要が出てきた。このことは、「検出」という観点からは後退にも見えるが、特徴抽出という点において高度化への有意義な知見が得られたといえる（立命館大学〔課題番号：RTM_02〕）。

先述の臨界ゾーン（Zhuang et al., 2021）に関連する先行現象の候補の中でも、b 値の低下は多数の事例が報告されている。2016年熊本地震による剪断ひずみエネルギー変化の空間分布（Noda et al., 2020）を b 値の変化の空間分布と比べたところ、剪断歪みエネルギーが増加した場所では、一連の活動の開始前に比べて b 値が有意に低下していた（気象庁〔課題番号：JMA_01〕）。

M6.4地震の34時間後にM7.1地震（7月5日）がおきた2019年のリッジレスト地震に関して、詳細な地震活動の解析を行なった（図21）。まずM6.4地震の前10年間には、この地震の震源の周囲10 kmに集中した b 値の顕著な低下域が認められた。M6.4の地震は共役な二つの断層が滑ったものであり、そのうちのひとつでM7.1の地震が発生した。M6.4の直接的な余震活動は両方の断層で見られたが、M7.1が起きる方の断層の、M6.4の震源からM7.1の震源までの約5 kmの区間において低い b 値が見られた。この部分では余震活動の減衰が悪く（大森—宇津則の p 値が低い）、また、M6.4の地震によってクーロン破壊応力が顕著に増したはずの場所である。よって、観察された b 値の低下は、期待通り応力の増加を捉えたと思われる。さらに、短期的前震の特徴であると指摘されているLippiello et al. (2012) の空間集中化傾向がこの領域に限定して見られることも確認された。M6.4地震以降の34時間にこの領域の損傷が急激に進んだという、物理的な意味での前震活動であった可能性が示唆される（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕、Nanjo, 2020a; 2020b; 2020c、楠城, 2020b）。

上述のリッジレスト地震の例のように、b 値の低いところで大きな地震が発生し、そのあと b 値が下がったところで短時間のうちにまた大きな地震が起きたという事例は、世界でいくつか知られている。大きな地震がおきた直後は地震数が多いので短時間で b 値を評価でき、また地震活動が高くて大地震のベースレートも高くなっているから、それに b 値の増減を加味すれば、かなり大きな地震発生確率を予報できる可能性がある。Gulia and Wiemer (2019) は、世界のM6地震の例を調べ、地震が起きた直後の b 値がそれ以前より10 %以上高くなった19例では、その後M6以上は起きなかった（真陰性）に対して、10 %以上低くなった4例のうち3例でもう一度M6以上がおきた（真陽性）と報告している。2016年熊本地震系列は真陽性のうちのひとつに数えられているが、Nanjo et al. (2019) の高分解能の解析では、一発目（4月14日、M6.5）直後の数時間にはその余震域全体で b 値が低下したものの、そのあと本震がおきるまでの1日間は、余震域北部の b 値は逆に高くなっており、本震（4月15日、M7.3）はその領域で起きたので、データを丁寧にみて予報を出していれば偽陰性を出してしまっただと指摘した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕、楠城, 2020a）。しかし、これを偽陰性に数えたとしても、適中率は2/4であり、M6以上が短期間に連発するベース確率を5 %（Reasenbergs and Jones, 1990、Roeloffs and Gloyz, 2017）としても確率ゲインが10倍あり、p 値も1.4 %で、や

はり有意な予測性が認められる。したがって、Gulia and Wiemer (2019) が指摘するように、大きな地震がおきたあとの b 値を見てもう一発が来る確率を予報することは十分検討に値するだろう。なお、Gulia and Wiemer (2019) では accuracy 95 % という数字があげられているが、これは、検証された例のほとんどを占める真陰性ケースからの貢献が主であり、これをもってこの手法が高性能だと受けとるべきではない。むしろ、 b 値が低下した場合の $M6$ 以上の地震発生確率 ($3/4$ もしくは $2/4$) がベースレート 5 % に比べて 10-15 倍になっているという確率ゲインが適切な性能指標であろう。これは、余震トリガリング効果以外の先行現象の確率ゲインとしては、最も高い部類である。一方、陰性 19 例のうち、地震がおきたケース (偽陰性) が 0 であったということを経験情報ととらえれば、ベースレートで 95 % だった安全率が 100 % になったということだから、確率ゲインは 1 をわずかに超える程度である。

このように、大きな地震が発生した後の b 値をモニタリングすることで、そのあと大きな地震がもう一度起きる確率の有効な予報ができる可能性がある。本年度、国内の $M6.5$ 以上の内陸地震周辺の $M2.0$ 以上の地震活動について、 M 系列データの積算の傾きの変化を見ることで平均的な規模の時間変化を調査した結果、検知力低下の疑われる地震直後の期間を除いても、数ヶ月程度以上にわたり徐々に平均的な地震規模が低下 (すなわち b 値が増加) する傾向が見られた (気象庁 [課題番号: JMA_01])。これは、大多数の場合には b 値が上り、2 発目の大地震はやってこないという Gulia and Wiemer (2019) の論と整合的である。

スロー地震や震源核のプレスリップのように、地震発生を促進する効果が単純な力学から期待できるもの以外にも、地殻変動データの正体不明な異常が有意な地震先行傾向をもつ例が知られている (e.g., Wang et al., 2013)。本年度は、2008 年の四川大地震 $M8.0$ を契機に、龍門山断層帯周辺 600 km 四方程度の範囲に設置された 4 成分ボアールひずみ計 (YRY-4、設置深度約 50 m、1 分サンプリング) 6 台の記録を様々な観点から解析し、地震先行現象らしきものが見られないか探索した。

この地域で 2013 年 4 月 20 日におきた Lushan 地震 ($Mw6.6$) に関しては、GNSS (Xu et al., 2019) や、震源に最も近い YRY-4 型歪み計 (Chi et al., 2013) で、4 日前及び 4-6 ヶ月前に異常があったと報告されている。そこで、YRY-4 歪み計 6 台の記録それぞれに対して適応カルマンフィルターを用いて、気圧、潮汐、水位の影響を除去した歪みデータ時系列 (2011 年 1 月 1 日から 2014 年 1 月 1 日まで) から、最も乱雑な状態であるガウス分布に比してのエントロピーの低さの指標であるネグントロピー (Hyvarinen and Oja, 2000) の時系列を求めたところ、Lushan 地震の 4-6 ヶ月前に、短期間の増加が何度も起きていた。これらの異常は、Lushan 地震に近い 3 つの観測点でほぼ同時に起きていた。また、同じ時期に b 値がやや低下していた (千葉大学 [課題番号: CBA_01]、Yu et al., 2021 a)。

次に、同じ歪みデータの観測点間の相関に着目した。今回は、マルチチャンネル特異スペクトル解析で周期成分 (主に潮汐) とランダムノイズを除いた残りの歪み時系列データに着目し、1 日単位で全ての観測点ペアの相関係数を求めた。各日において、0.8 を超える相関係数が出た観測点の組み合わせの割合をネットワーク結合度と定義し、これが 80 % を超える日を異常結合日とみなして、地震のエネルギーに観測点までの距離を加

味したEs指数 (e.g., Han et al., 2014) と比較した。Es $>10^7$ J/km²である地震が13個 (Ms4.6-7.0) あったが、そのうち11個では20-60日前に異常結合日が頻発しており、異常頻度ピークから地震までの時間は30日以内であった (千葉大学 [課題番号: CBA_01]、Yu et al., 2020)。

さらに、異常結合が地震に先行する傾向が統計的に有意と言えるかを調べるためにROC解析を行った。ただし今回は、上記2つの研究より北の観測点も使い、ネットワークの南北範囲は1500 kmほどにわたる。また、調査期間も拡大して2010年1月1日から2017年8月10日までとした。地球潮汐除去等の前段処理は行わなかった。予測対象をEs $>10^7$ J/km²の地震 (26個, Ms4.9-7.0) とした場合、直近14日中7日以上でネットワーク結合度異常がある場合に、1日長のアラームを出すとした場合が最も成績がよかった。この条件で異常判定の閾値を変えて作ったROCカーブは、ランダム予測のはるかに上を推移し (AUC=0.81)、先行傾向の有意性を示した。また、予測対象を規模の小さな地震にすると予知率が下がることから、この前兆は大きな地震の前の方が現れやすい、もしくは、異常が大きくて見付きやすいという本震サイズへの依存性を持つようだ (千葉大学 [課題番号: CBA_01]、Yu et al., 2021b)。

このように、離れた観測点間の相関が強くなることが大地震の先行現象となることは、複雑系物理における協調臨界現象と関係するかもしれない。先行現象候補として地殻変動の空間相関が検討されたのは今回が始めてだと思うが、地震活動に関しては、カリフォルニアの大地震の数年前に地震活動の相関距離が増加することが多いと報告されている (Zoller et al., 2001)。また、日本のいくつかの大地震の発生数ヶ月前にナチュラルタイム秩序パラメータの低下がおきたことを以前に報告したが (Sarlis et al., 2013; 2015)、この現象について、ROC解析で先行傾向の有意性が示された (Sarlis et al., 2020)。

地殻流体に見られる変動もしばしば地震に先行することがある。兵庫県南部地震 (1995年1月17日、Mw6.9) の4ヶ月前ごろから、阪神間の地下水中の塩素濃度 (Tsunogai and Wakita, 1995) やラドン濃度 (Igarashi et al., 1995) が顕著に上昇したのは有名だが、これらと軌を一にする変動が、神戸薬科大学で観測されていた大気中ラドン濃度に見つかった (Yasuoka and Shiogi, 1997)。これらの短期的な先行現象は、大気中ラドン濃度を含めて、阪神間の地殻変動が圧縮から伸長に転じ、また地下水湧出量の顕著な増加なども見られた1994年秋から始まっており、同じプロセスの結果である可能性が高い (Omori et al., 2009)。これに対して、1991-1994年の時期には、地殻変動の変調 (六甲の隆起、東西短縮の鈍化など)、地震活動の変調 (b値、静穏化など) などが知られており、兵庫県南部地震の中期的前兆だった可能性が指摘されている。昨年度までに報告してきた、1990-1994年の期間から現れ始めた大気中ラドン濃度のK1分潮 (周期23.934時間) 応答は、時期からみて、これらに関連した中期前兆であった可能性を指摘した。さらに、K1応答での大気ラドン濃度の感度 (=大気ラドン濃度の変動/地殻歪みの変動) は、短期前兆でのその25倍程度であったことを見出した。よって、K1に応答した大気ラドン濃度変化は、短期前兆に対して推測されている断層帯透水性の変化とは違うメカニズムによるもので、様々な状況証拠から判断して、マントル流体の湧昇が原因ではないかと提案した (東北大学 [課題番号: THK_10]、Omori et al., 2021)。

地殻の透水性の変化は、地殻流体に見られる先行現象において、まず第一に検討されるメカニズムである。昨年度、愛知県西尾市の観測井で物理検層とVSPにより検出した透水性亀裂の向きと水圧破碎法から得た応力場の関係について解析し、現在の応力場と直接関係付けて説明するのは難しいことを報告した（木口・桑原，2019）。今年度は、愛知県、紀伊半島、四国の16の観測井の各種孔井内測定データ（図22）から、透水性亀裂の向きは応力方位よりも全亀裂の走向に支配される傾向があり、また全亀裂の卓越方向は地質構造の特徴的な方向に近い傾向があることがわかった（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST09〕、木口・桑原，2021）。

大気中ラドン濃度に反映される固体地球側の要素は地表ラドン散逸率だが、散逸率の変化をもたらす地殻内プロセスは、上述の神戸地震の例で論じたように、一つではない。そのプロセスを解明するために、地表から放出されるラドンを捕集し、それを測定器にポンプで導入することで地表ラドン散逸率を測定するとともに、土壌中の深さ20、40、80 cmの3地点でラドン濃度を測定し、両者を比較した。測定場所は茨城県に位置する棚倉破碎帯の南端（地質：新第三系泥岩、白亜系花崗岩、土壌：粗粒灰色低地土壌）を選定した。調査の結果、土壌ラドン濃度変化とラドン散逸率変化の明確な関係性は認められなかった。土壌ラドン濃度は、夏から秋は土壌水分の変化に依存したものの、冬は土壌水分が高いため水分の変化に依存しなかった。また、明らかな周期的変動は認められなかった。一方、ラドン散逸率は日変動を示し、周期的な気温と地温の変化に従った。降雨による散逸率の上昇が見られたが、これは、測定系の直下が降雨の影響を受けていないことによる人為的な要因と、土壌に浸透した雨水が土壌中の空気を圧縮したことによる移流発生によると考えられる（東北大学〔課題番号：THK_10〕、大森，2020）。

昨年度、千葉県旭市の千葉大観測点における地中ラドン濃度観測データに対して、マルチチャンネル特異スペクトル解析により気圧および温度による変動を除去して地表ラドン散逸率を推定することを提案したが（小島ら，2020）、このデータにおいても2時間の降雨量が20 mmを超える場合に、推定された地表ラドン散逸率に有意な増加があることがわかった。やはり、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る。また、昨年度茨城県三浦に作った同様の総合観測点（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）のデータ取得が2020年9月に開始した（千葉大学〔課題番号：CBA_01〕）。

宮城県牡鹿半島にある宮城県原子力センターモニタリングステーション（女川、小積、飯小浜地区）でアルファガードを使用して観測されている大気中ラドン濃度データの時間変化については、これまで何度か報告して来た。今年度は、この地域における大気中ラドン濃度の空間分布の特徴を見るために、2010年3月に行った、空間放射線量率の自動車走行サーベイの結果を解析した。先行研究において太平洋沿岸地域では降雪による線量率の変化は生じないと報告されていたが、サーベイの結果では降雪により線量率の上昇が認められた。これは、空気中を浮遊するラドン子孫核種（大陸性気団によって冬季にアジアから運ばれてくる）が降雪にとらえられて地表に沈着したことによるものだろう。一方、線量率の大局的な空間分布は、宮城県牡鹿半島の中部と東部で高く、南部と北西部で低い。この分布は地表地質の分布と対応を示しており、黒色頁岩（有機物に富む泥岩、有機物が分解されない還元的な環境で堆積するため水溶性ウランが流れ込むと還元され

て析出しやすくなる) に富むジュラ系の砂岩泥岩互層が高線量率地域であり、ここが牡鹿半島で測定されるラドンの主な供給源になっている能性がある(東北大学[課題番号: THK_10]、Tamakuma et al., 2021)。

本計画も参画している医薬系放射線管理施設を中心とした大気中ラドン濃度のモニタリングネットワークには現在25施設が参画している。放射線管理施設では、放射性同位元素の漏洩を監視する排気モニタ(通気式電離箱)が稼働しているが、屋外空気の放射線管理施設への換気回数が多ければ、排気モニタから大気中ラドン濃度が推定できるはずで、その検証を行っている。今年度は従来より長期間のデータを用いた検証を行い、換気回数が13回/時間である施設では、壁材等によるオフセットを差し引くだけで、排気モニタから屋外ラドン濃度を概ね推定(相関係数0.85)できることがわかった(東北大学[課題番号: THK_10]、森・他, 2020)。

衛星画像等でみられる熱異常が地震に先行したという例は多い(e.g., Tramutoli et al., 2005)。今年度、日本の気象衛星ひまわり6、7号のデータの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)にロバスト衛星技術データ分析手法(Tramutoli, 1998; 2007, Eleftheriou et al., 2016)を用いて、晴天地域での衛星熱異常(3.5 σ 以上)を検出し、デクラスタした地震カタログと比較したROC解析により先行性があるかを検討した(図23)。異常から30日長のアラームを、Dobrovolsky et al. (1979)の経験式によって、 $M \geq 6$ が対象の場合は半径380 km、 $M \geq 6.5$ が対象なら半径623 kmの範囲に出した場合、 $M \geq 6$ 対象では警報分率が1.7%で予知率7.5%、 $M \geq 6.5$ 対象では警報分率が3.6%で予知率16%が達成された。いずれも確率ゲインは4倍を超え、またp値は5%以下であり、今回定義された衛星熱異常は有意な先行性をもっているといえる。また、対象時空間で合計29回の異常のうち、その後30日以内に $M \geq 6$ がおきたケースが13例と適中率は非常に高い。解析対象時空間には、2011年東北沖地震に関連する余震活動が多くあり、東北地方によく出現する異常であれば、みかけ上地震と相関がよくなるという批判があるが、今回の29個の異常のうち2011年東北沖地震の余震の時空間窓に入るものは数個しかなく、その疑いは小さい。さらに、地震の場所を保ったまま発生時期をランダム化した疑似カタログでは、衛星熱異常との相関がみられないことも確認できている(千葉大学[課題番号: CBA_01]、Genzano et al., 2021)。

前計画において、気象庁柿岡でのULF地磁気異常のROC解析を行い、周辺100 km以内の $E_s > 10^8 \text{ J/km}^2$ 地震に対してリードタイム10日程度の先行傾向があることを報告した(Han et al., 2017)。本計画で維持している千葉大学の清越観測点(伊豆半島)と清澄観測点(房総半島)のULF磁場データについては、発震時刻でそろえてスタックした時系列解析(Hattori et al., 2013)およびROC解析(Hattori and Han, 2018)から同様の短期的先行傾向があることが指摘されている。本年度は、予測対象とする地震の大きさや、観測点からの距離によって、予測性能がどう変化するかを調べた(図24)。確率ゲインが最大になるのは、清越では、距離100 km以内、 $E_s > 10^{8.75} \text{ J/km}^2$ を、清澄では、距離180 km以内、 $E_s > 10^{8.75} \text{ J/km}^2$ を対象にしたときで、どちらもp値<5%をクリアしている。また、予知率から警報分率を引いたものは、(偶然の時の一致でない)前兆がつく地震の割合ということになるが、これについても同様の地震を対象にした場合が好成績であった。これらの解析から、大きな地震のほうが前兆が付きやすいという傾向も見てと

れる（千葉大学 [課題番号：CBA_01]、Han et al., 2020）。

上述のULF磁場に対するのと同様のアプローチで、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）の地震前兆性に関する統計解析を進めている。今年度は、NmF2異常は地震との間に有意相関があり、より震央距離が近い地震ほど、より震源が浅い地震ほど、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。NmF2異常から10日長のアラームを出すと、震源の深さ20 km以浅、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て予知率が46 %であった（千葉大学 [課題番号：CBA_01]、三石・他、2021）。

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）の初期データのチェックをかねて、In-situ電離圏電子数変動（ラングミュアプローブによって検出された電離層電子密度の移動中央値）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つの浅い地震（7月28日M6.4、8月5日M6.8、8月9日M5.9、8月19日M6.9）との関係を調査したところ、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がみつかった。これらの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と考えられる。さらに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が発表している全球電離圏マップ（CODE-GIMTEC）を調査したところ、時空間分布の両方で同様の異常があった。そこで、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、発震時刻でそろえてスタックした時系列をみると、震源から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が判明した（千葉大学 [課題番号：CBA_01]、Song et al., 2020）。

フランスのDEMETER衛星が捉えた、リードタイム4時間以内で先行傾向が見られるVLF帯電場強度異常について、雷放電起源のホイスラー波を利用して、電離圏D領域の電子密度の増加によるものであると、昨年度までに提案した。本年度は、VLF帯航行用電波（雷電波と違って周波数が一定であり、送信出力強度も一定であるため信頼性の高い評価が期待できる）を用いても、先行的なD領域電子密度上昇が確認できることを示した（公募研究、静岡県立大学 [課題番号：KOB009]）。また、VLF帯電場強度の計測に特化した小型衛星を多数うちあげるPrelude計画は、ミッションデザインおよび概念設計に基づき、実現性を確認するためのエンジニアリングモデルの製作を行ない、目的を達成するには6Uサイズ（10×20×30 cm）のCubeSatで実現可能とわかった。DEMETER（130 kg）での観測力を超えるミッションを、6U（10 kg程度）のCubeSatで実現できることになる（公募研究、宇宙航空研究開発機構 [課題番号：KOB007]、山崎、2020）。

巨大地震の数十分前に報告されている先行的なTEC変動（e.g., Heki and Enomoto, 2015）及び、地震によって引き起こされる地震時のTEC変動を概観した解説論文（Heki, 2020）を書いた。地震の隆起/沈下は音波を励起し、周期4-5分の成分が電離圏F層に伝播してTEC振動を引き起こすので、地震の約10分後に、約1 km/sの速度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多い。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。一方、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として現れる。Mw7.3-9.2の地震18個の直前変動は、リードタイム、TECの変化率、および累積的な異常振幅の観点でMwと正の相関を示した。先行的な電子密度異常の3次元構造（チリの地震、He and Heki, 2016）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ExBドリフトによって形成される（Kelly et al., 2017）ことを示唆する。解説論文の執筆後に、新たに2011年東北沖地震の直前・直後の電離圏トモグラフィー（Muafiry and Heki, 2020）を行ったところ、先行的な異常と本震後の異常（主に津波による）の場所がずれていること、また、先行的な異常は陸域に限られることが見いだされた。これらは、上述の大枠の理解と整合的である（千葉大学[課題番号:CBA_01]）。

一方、2011年東北沖地震に関して、震源から遠く離れた場所での津波による電離層の擾乱は、上述の理解から予想されるよりも顕著に大きかったことが見いだされており（Liu et al., 2019）、現在その原因を考察している。いずれにしろ、津波やレーリー波に誘起される電離層の擾乱は、その移動速度から容易に見分けがつく。2018年9月28日、インドネシア・スラウェシ島のMw7.8の地震で大きな津波が発生したが、電離層の擾乱を解析することで津波の波源を特定することができた（Liu et al., 2020）。また、インドネシアの2010年Merapi火山噴火（Cahyadi, et al., 2020）、2020年8月4日のレバノンの大爆発（Kunduet al., 2021）に関連する電離圏電子密度の擾乱が確認できた。大規模な災害事象の迅速な把握に役立つ可能性がある（千葉大学[課題番号:CBA_01]）。

これまでの課題と今後の展望

様々な観測で、良質なデータがそれなりの期間蓄積され、解析技術の進歩にも助けられて、様々な興味深い事実が見いだされた。また、スロースリップや地震活動、地震波速度構造などの地学条件も、観測と解析の時空間分解能が向上して、それらの不均質に相関が見えるようになってきた。前震のつきやすさの地域性が、定量的な地学条件と比較できたのは、画期的である。データ同化等の物理モデリング技術の開発も進展し、これまで計算量の壁でできなかったことが少しずつできるようになってきている。

なかでも、地震活動については、検出下限を下げるとイベント数がGR則に従って増えるために、時空間分解能もベキ的に改善する。このような技術の改善で、大地震では時間のかかる経験を積むスピードを上げることがひとつの現実的な方向であろう。その場合には、小地震での知識が大地震に通用するかが問題になるが、それに関して、先行現象の現われる割合が本震のサイズによることが示され始めたのは重要である。

また、前震について、本震との因果関係を問うような検証がされたのは意義深い。また、先行現象と本震の関係について提唱された臨界ゾーンという概念は、今後の中短期予測の研究発展を大きく加速するかもしれない。

成果リスト

- Abdallah, S., M. Utsugi, K. Aizawa, M. Uyeshima, W. Kanda, T. Koyama, and T. Shiotani, 2020, Three-dimensional electrical resistivity structure of the Kuju volcanic group, Central Kyushu, Japan revealed by magnetotelluric survey data, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 400, 106898, doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.106898.
- Ariyoshi K., T. Inuma, M. Nakano, T. Kimura, E. Araki, Y. Machida, K. Sueki, S. Yada, T. Nishiyama, K. Suzuki, T. Hori, N. Takahashi, and S. Kodaira, 2021, Characteristics of slow slip event in March 2020 revealed from borehole and DONET observatories, *Front. Earth Sci.*, 8:600793, doi:10.3389/feart.2020.600793.
- Baba, S., A. Takeo, K. Obara, T. Matsuzawa, and T. Maeda, 2020a, Comprehensive detection of very low frequency earthquakes off the Hokkaido and Tohoku Pacific coasts, northeastern Japan, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, doi:10.1029/2019JB017988.
- Baba, S., S. Takemura, K. Obara, and A. Noda, 2020b, Slow earthquakes illuminating interplate coupling heterogeneities in subduction zones, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2020GL088089.
- Buckby, J., T. Wang, J. Zhuang, and K. Obara, 2020, Model checking for hidden Markov models, *J. Comput. Graph. Stat.*, 29(4), 859–874, doi:10.1080/10618600.2020.17.
- Cahyadi, M. N., R. W. Rahayu, K. Heki, and Y. Nakashima, 2020, Harmonic ionospheric oscillation by the 2010 eruption of the Merapi volcano, Indonesia, and the relevance of its amplitude to the mass eruption rate, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 405, 107047, doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.107047.
- Chang, J.-H., J.-O. Park, T.-T. Chen, A. Yamaguchi, T. Tsuru, Y. Sano, H.-H. Hsu, K. Shirai, T. Kagoshima, K. Tanaka, and C. Tamura, 2020, Structural-morphological and sedimentary features of forearc slope off Miyagi, NE Japan: implications for development of forearc basins and plumbing systems, *Geo-Marine Letters*, doi:10.1007/s00367-020-00636-w.
- Chen, H., R. Wang, M. Miao, X. Liu, Y. Ma, K. Hattori, and P. Han, 2020, A statistical study of the correlation between geomagnetic storms and $M \geq 7.0$ global earthquakes during 1957–2020, *Entropy*, 22(11), 1270, doi:10.3390/e22111270.
- 長 郁夫・岩田貴樹, 2020, SPAC法の解析可能最大波長とSN比の関係式, 日本地震学会2020年度秋季大会, S15P-18.
- Cho, I. and T. Iwata, 2021, Limits and benefits of the spatial autocorrelation microtremor array method due to the incoherent noise, with special reference to the analysis of long wavelength ranges, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, 2020JB019850, doi:10.1029/2020JB019850 (in press).
- Chujo, N., H. Hirose, and T. Kimura, 2020a, Slip distributions of short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula based on NIED Hi-net tilt measurements, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SCG58-P22.
- Chujo, N., H. Hirose, and T. Kimura, 2020b, Slip distributions of short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula based on NIED Hi-net tilt measurements, *Slow*

Earthquakes Workshop 2020, P-A02-01.

- Enomoto, Y., K. Heki, T. Yamabe, S. Sugiura, and H. Kondo, 2020, A possible causal mechanism of geomagnetic variations as observed immediately before and after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Open J. Earthq. Res.*, 9, 33-49, doi:10.4236/ojer.2020.92003.
- Genzano, N., C. Filizzola, K. Hattori, N. Pergola, and V. Tramutoli, 2021, Statistical correlation analysis between thermal infrared anomalies observed from MTSATs and large earthquakes occurred in Japan (2005-2015), *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126(2), doi:10.1029/2020JB020108.
- Han, P., J. Zhuang, K. Hattori, C.-H. Chen, F. Febriani, H. Chen, C. Yoshino, and S. Yoshida, 2020, Assessing the potential earthquake precursory information in ULF magnetic data recorded in Kanto, Japan during 2000-2010: distance and magnitude dependences, *Entropy*, 22, 859, doi:10.3390/e22080859.
- Hashima, A., H. Sato, and T. Sato, 2020, Stress loading and the occurrence of normal-type earthquakes under Boso Peninsula, Japan, *Earth Planet. Space*, 72:79, doi:10.1186/s40623-020-01201-6.
- Heki, K., 2020, Chapter 5-3: Ionospheric disturbances related to earthquakes in *Advances in ionospheric research: Current understanding and challenges*, Wiley/AGU Book Space Physics and Aeronomy, Volume 3, edited by C. Huang and G. Lu, pp.320, ISBN:978-1-119-50755-0 (preprint).
- Hirose, F., K. Tamaribuchi, and K. Maeda, submitted to JGR, Does a stationary ETAS model dream of foreshocks? Application of an earthquake forecasting method based on swarm-like activity to synthetic catalogs produced by ETAS models.
- 弘瀬冬樹・溜淵功史・前田憲二, 2020a, 自然地震カタログと時空間ETASカタログに内在する前震活動の特徴の違い:群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測モデルを用いた検証, JpGU-AGU Joint Meeting, SSS13-03.
- 弘瀬冬樹・溜淵功史・前田憲二, 2020b, ETASモデルは前震の夢を見るか?:群発的地震活動に基づく地震予測手法を用いた検証, 日本地震学会2020年度秋季大会, S09P-08.
- 廣瀬仁・卯川知希, 2020, 地震数データから応力変化量を推定する手法の試行, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 24, 10-17.
- Hirose, H. and T. Kimura, 2020, Slip distributions of short-term slow slip events in Shikoku, southwest Japan from 2001 to 2019 based on tilt change measurements, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2020JB019601. doi:10.1029/2020JB019601.
- 廣瀬仁・木村武志, 2020a, Slip distributions of short-term slow slip events in Shikoku, southwest Japan from 2001 to 2019 based on tilt change measurements, スロー地震学 A01-A02班合同オンライン研究会.
- 廣瀬仁・木村武志, 2020b, Slip distributions of short-term slow slip events in Shikoku, southwest Japan from 2001 to 2019 based on tilt change measurements, *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A02-02.
- Huang, Q., P. Han, K. Hattori, and H. Ren, 2020, Electromagnetic Signals Associated

With Earthquakes: A Review of Observations, Data Processing, and Mechanisms in China, Seismoelectric Exploration: Theory, Experiments, and Applications, edited by Grobbe, N., Revil, A., Zhu, Z., Slob, E, Wiley, 415-436, doi:10.1002/9781119156949.ch26.

- Igarashi, T., 2020, Catalog of small repeating earthquakes for the Japanese Islands, Earth Planet. Space, 72:73, doi:10.1186/s40623-020-01205-2.
- 池田里奈・吉田圭佑・高橋 諒・松澤 暢・長谷川昭, 2020, 2011年東北沖地震後から福島-茨城県境周辺で活発化した地震活動に見られる内陸の繰り返し地震, 日本地震学会2020年度秋季大会, S09P-05.
- 石山 諒・福山英一・B. Enescu, 2020, Temporally variable estimation of friction parameters using machine learning, 日本地震学会2020年度秋季大会, S08-21.
- 岩田貴樹・尾形良彦, 2020, Gutenberg-Richter則におけるa値の最尤推定, 地震2, 73, 93-96, doi:10.4294/zisin.2020-1.
- 金子 柊・茂木 透・服部克巳, 2020, マルチチャンネル特異スペクトル解析(MSSA)を用いたMTデータのノイズ除去法の開発, J. Atmospheric Electricity, 39(1), 37-41, doi:10.1541/jae.39.37.
- 加納将行, 2020, データ同化に基づく断層すべりの理解・予測と波動場推定の高度化に向けた研究, 地震, 73, 69-91, doi:10.4294/zisin.2019-9.
- Kano, M. and A. Kato, 2020, Detailed spatial slip distribution for short-term slow slip events along the Nankai subduction zone, southwest Japan, J. Geophys. Res.: Solid Earth, 125, e2020JB019613, doi:10.1029/2020JB019613.
- Kano, M., S. Miyazaki, Y. Ishikawa, and K. Hirahara, 2020, Adjoint-based direct data assimilation of GNSS time series for optimizing frictional parameters and predicting postseismic deformation following the 2003 Tokachi-oki earthquake, Earth Planet. Space, 72, 159, doi:10.1186/s40623-020-01293-0.
- Kato, A. and S. Nakagawa, 2020, Detection of deep low-frequency earthquakes in the Nankai subduction zone over 11 years using a matched filter technique, Earth Planet. Space, 72:128, doi:10.1186/s40623-020-01257-4.
- Kato, A., S. Sakai, S. Matsumoto, and Y. Iio, 2021, Conjugate faulting and structural complexity on the young fault system associated with the 2000 Tottori earthquake, Commun. Earth Environ., 2, 13, doi:10.1038/s43247-020-00086-3.
- 川畑拓矢・上野玄太・中野慎也・藤井陽介・三好建正・小守信正・増田周平・眞木貴史・土居知将・野村俊一・雨宮 新・山崎 哲・露木 義, 2020, 第10回データ同化ワークショップの報告, 天気, 67(8), 27-30.
- Khoshmanesh, M., M. Shirzaei, and N. Uchida, 2020, Deep slow-slip events promote seismicity in northeastern Japan megathrust, Earth Planet. Sci. Lett., 540, 116261, doi:10.1016/j.epsl.2020.116261.
- 木口努・桑原保人, 2021, 地下透水性亀裂の方向の支配要因:産総研地下水等総合観測井(愛知県・紀伊半島~四国)の16地点の孔井内測定データからの考察, 活断層・古地震研究報告, 20 (印刷中).

- 木口努・今西和俊・松本則夫, 2020a, 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果(2019年11月～2020年4月), 地震予知連絡会報, 104, 272-273.
- 木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努・矢部優, 2020b, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2019年11月～2020年4月)(61), 地震予知連絡会会報, 104, 265-271.
- 木口努・今西和俊・松本則夫, 2021a, 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果(2020年5月～2020年10月), 地震予知連絡会報, 105 (印刷中).
- 木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努・矢部優, 2021b, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2020年5月～2020年10月)(62), 地震予知連絡会会報, 105 (印刷中).
- 気象研究所, 2020a, 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, 104, 366-368.
- 気象研究所, 2020b, 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, 104, 22-26.
- 気象研究所, 2020c, 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, 104, 369-372.
- 気象研究所, 2020d, 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率(2020), 地震予知連絡会会報, 104, 448-452.
- 気象研究所(勝間田明男), 2020, 天竜船明レーザー式変位計による地殻変動観測, 地震予知連絡会会報, 104, 212-215.
- 北川有一・板場智史・松本則夫・落唯史・木口努, 2020a, 紀伊半島～四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2019年11月～2020年4月), 地震予知連絡会会報, 104, 373-383.
- 北川有一・板場智史・武田直人・松本則夫・落唯史・木口努・矢部優, 2021, 紀伊半島～四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2020年5月～2030年10月), 地震予知連絡会会報, 105 (印刷中).
- Kitagawa, Y., N. Matsumoto, and T. Kimura, 2020, Estimation of fault models for short-term slow slip events from groundwater pressure in soft sedimentary layers, *Earth Planet. Space*, 72:90, doi:10.1186/s40623-020-01218-x.
- 北川有一・松本則夫・佐藤努・板場智史・落唯史・木口努・矢部優, 2020b, 近畿地域の地下水位・歪観測結果(2019年11月～2020年4月), 地震予知連絡会会報, 104, 384-387.
- 小林昭夫, 2021, GNSSによる長期的スロースリップ客観検出手法の応用ー短期的スロースリップの検出と長期的スロースリップの規模推定ー, 気象研究所研究報告, 69, 1-14.
- 児玉哲哉, 2020, 地震予防説: Bertholon's Earthquake Rodを求めて, 第7回日本地震予知学会学術講演会.
- 小島春奈・吉野千恵・根本和秀・服部克巳・小西敏春・古屋隆一, 2020, 千葉県旭観測点における地中ラドン濃度のマルチチャンネル特異スペクトル解析: 地中ラドンフラックス変動の推定と地震活動との関係の序報, *J. Atmospheric Electricity*, 39, 46-51, doi:10.1541/jae.39.46.
- 駒形亮太・平野史朗・川方裕則・直井誠, 2020, Locality Sensitive Hashingを用いた波形の特徴抽出と類似波形検出, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS12-P02.
- Kundu, B., B. Senapati, A. Matsushita, and K. Heki, 2021, Atmospheric wave energy of

- the 2020 August 4 explosion in Beirut, Lebanon, from ionospheric disturbances, *Sci. Rep.*, 11, 2793, doi:10.1038/s41598-021-82355-5.
- Kurashimo, E, K. Mochizuki, T. Iidaka and K. Obara, 2020, Seismic reflection profiling across deep low-frequency tremor zone in western Shikoku, southwestern Japan, *JpGU-AGU joint Meeting 2020*, SCG58-P17.
- Liu, J.-Y., C.-Y., Liu, Y.-I. Chen, T.-R. Wu, M.-J. Chung, T.-C. Liu, Y.-L. Tsai, L. C. Chang, C.-K. Chao, D. Ouzounov, and K. Hattori, 2020, The Source Detection of 28 September 2018 Sulawesi Tsunami by Using Ionospheric GNSS Total Electron Content Disturbance, *Geosci. Lett.*, 7, 11, doi:10.1186/s40562-020-00160-w.
- Liu, Y., J. Zhuang, and C. Jiang, 2021, Background seismicity before and after the 1976 Ms7.8 Tangshan earthquake: Is its aftershock sequence still continuing?, *Seismol. Res. Lett.*, 92(2A), 877-885, doi:10.1785/0220200179.
- 前田憲二・弘瀬冬樹・溜淵功史, 2020, 群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測手法(5):最近の活動事例による検証とETASモデルとの比較, *地震予知連絡会会報*, 103, 356-360.
- Matsumoto, S., T. Okada, T. Terakawa, M. Uyeshima, and Y. Iio, 2020, The Advancement of Research on Inland Earthquake Generation 2014-2018, *J. Disaster Res.*, 15(2), 96-105, doi:10.20965/jdr.2020.p0096.
- Matsushima, N., M. Utsugi, S. Takakura, T. Yamasaki, M. Hata, T. Hashimoto, and M. Uyeshima, 2020, Magmatic-hydrothermal system of Aso Volcano, Japan, inferred from electrical resistivity structures, *Earth Planet. Space*, 72:57, doi:10.1186/s40623-020-01180-8.
- 宮岡一樹・小林昭夫, 2020, 南海トラフ地域のスロー地震(2)気象庁・気象研究所による観測, *地震予知連絡会50年のあゆみ*, 148-150.
- 森花恵・安岡由美・三浦直・吉井未来・飯本武志・床次眞司・長濱裕幸・向高弘, 2020, 排気モニタによる大気中ラドン濃度の推定, *日本保健物理学会第53回研究発表会Web大会*, 2-5.
- Muafiry, I. N. and K. Heki, 2020, 3D tomography of the ionospheric anomalies immediately before and after the 2011 Tohoku-oki (Mw9.0) earthquake, *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 125, e2020JA027993, doi: 10.1029/2020JA027993.
- 長尾年恭・鴨川仁, 2020, 地震・火山噴火予知研究と電磁気観測, *日本磁気学会『まぐね』*, 15(5), 264-271.
- 中谷正生, 2020a, あんた、地震の何なのさ?-短期前兆のメタ理論と予知の可能性, *東京大学地震研究所公開講義*, 9月21日, オンライン.
- 中谷正生, 2020b, 階層的アスペリティを前提とした短期前兆のメカニズムについて, *第229回地震予知連絡会重点検討課題「予測実験の試行」(07)*.
- 中谷正生, 2020c, 地震に先行する現象の評価:災害情報への利用可能性, *地震・火山噴火予測研究のサイエンスカフェ第3回*.
- Nakatani, M., 2020, Evaluation of phenomena preceding earthquakes and earthquake predictability, *J. Disast. Res.*, 15(2), 112-143, doi:10.20965/jdr.2020.p0112

- Nanjo, K. Z., 2020a, Were changes in stress state responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes?, *Nat. Commun.*, 11:3082, doi:10.1038/s41467-020-16867-5.
- Nanjo, K. Z., 2020b, Changes in stress state associated with the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes, *JpGU-AGU Joint Meeting*, SSS08-06.
- Nanjo, K., 2020c, Changes in stress state and seismicity pattern responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes, *AGU fall meeting*, S029-0007.
- Nanjo, K. Z., 2020d, Capability of Tokai strainmeter network to detect and locate a slow slip: First results, *Pure Appl. Geophys.*, 177, 2701-2718, doi:10.1007/s00024-019-02367-1.
- 楠城一嘉, 2020a, b値にもとづく大地震発生予測のモデルのレビュー, 第229回地震予知連絡会重点検討課題「予測実験の試行」(07).
- 楠城一嘉, 2020b, 小さな地震が大地震を探るカギ?—カリフォルニアの直下型大地震の解析から異常をとらえ、防災につなげる, *academist journal*, <https://academist-cf.com/journal/?p=14310>.
- 野村俊一, 2020, 繰り返し地震に基づくプレート間滑り速度の時空間変動の逆推定, 統計数理研究所共同研究集会「諸科学における大規模データと統計数理モデリング」.
- 野村俊一・尾形良彦, 2020, 多様な予測方式に対する前震識別モデルとその予測性能評価, 地震予知連絡会会報, 103, 361-366.
- Obara, K., 2020, Characteristic activities of slow earthquakes in Japan, *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 90, 29-315, doi:10.2183/pjab.96.022.
- Obara, K. and T. Nishimura, 2020, Main results from the program promotion panel for subduction-zone earthquakes, *J. Disast. Res.*, 15, 87-95, doi:10.20965/jdr.2020.p0087.
- 岡田悠太郎・西村卓也・田部井隆雄・松島健・廣瀬仁, 2020, GNSSデータを用いた短期的スロースリップイベントの検出手法の開発と南海沈み込み帯への適用, 日本測地学会第134回講演会, 27.
- Okada, Y., T. Nishimura, T. Tabei, T. Matsushima, H. Hirose, 2020a, Detection of short-term slow slip events and estimation of their duration by using three components of GNSS data in the Nankai subduction zone, southwest Japan, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SCG58-08.
- Okada, Y., T. Nishimura, T. Tabei, T. Matsushima, and H. Hirose, 2020b, Development of the Detection Method for Short-term Slow Slip Events by Using GNSS Data And its application to the Nankai Subduction Zone, *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A02-05.
- 大森康孝, 2020, 地表ラドン散逸率の変動要因: 多深度土壌ラドン濃度測定に基づく検討, 日本保健物理学会第53回研究発表会Web大会, 2-8.
- Omori, Y., H. Nagahama, Y. Yasuoka, and J. Muto, 2021, Radon degassing triggered by tidal loading before an earthquake, *Sci. Rep.*, 11, 4092, doi:10.1038/s41598-021-83499-0.
- 織原義明, 2020, 「深海魚出現は地震の前兆」は本当か?, 日本地震学会広報誌「なみふる」, 121,

6-7.

- Parrot, M., V. Tramutoli, Tiger J.Y. Liu, S. Pulinets, D. Ouzounov, N. Genzano, M. Lisi, K. Hattori, and A. Namgaladze, 2021, Atmospheric and ionospheric coupling phenomena associated with large earthquakes, *Eur. Phys. J. Special Topics*, 230, 197-225, doi:10.1140/epjst/e2020-000251-3.
- 坂本龍之輔, 田中愛幸, 2020, ばねブロックモデルでの周期外力に対するダイラタンシー効果, 日本物理学会, 75.
- Sakamoto, R., and Y. Tanaka, 2020a, A physical model of tremor response to periodic external stress in poroelastic medium, JpGU-AGU joint Meeting 2020, SCG58-P19.
- Sakamoto R., and Y. Tanaka, 2020b, A physical model of tremor response to external stress in poroelastic medium, AGU Fall Meeting 2020, S031-0001.
- Sano, Y., T. Kagoshima, N. Takahata, K. Shirai, J.-O. Park, G. T. Snyder, T. Shibata, J. Yamamoto, Y. Nishio, A-T Chen, S. Xu, D. Zhao, and D. L. Pinti, 2020, Groundwater anomaly related to CCS-CO2 injection and the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake in Japan, *Front. Earth Sci.*, 8:611010, doi:10.3389/feart.2020.611010.
- Shiozaki, I., T. Uto, M. Uyeshima, H. Hataoka, H. Murakami, N. Oshiman, Y. Iio, and K. Ando, 2020, A research report on the fundamental investigations of an electrical resistivity structure beneath Chugoku and Shikoku regions, southwestern Japan, 2019, JpGU-AGU joint Meeting 2020, SEM21-P03.
- Song, R., K. Hattori, X. Zhang, and S. Saito, 2020, Seismic-ionospheric effects prior to four earthquakes in Indonesia detected by the China Seismo-Electromagnetic Satellite, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.*, 205, doi:10.1016/j.jastp.2020.105291.
- Supino, M., N. Poiata, G. Festa, J.P. Vilotte, C. Satriano, and K. Obara, 2020, Self-similarity of low-frequency earthquakes, *Sci. Rep.*, 10, doi:10.1038/s41598-020-63584-6.
- Susukida, Y., K. Katsumata, M. Ichianagi, M. Ohzono, H. Aoyama, R. Tanaka, M. Takada, T. Yamaguchi, K. Okada, , H. Takahashi, S. Sakai, S. Matsumoto, T. Okada, T. Matsuzawa, H. Miyamachi, S. Hirano, Y. Yamanaka, S. Horikawa, M. Kosuga, H. Katao, Y. Iio, A. Nagaoka, N. Tsumura, T. Ueno, and The Group for the Aftershock Observations of the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, 2021, Focal mechanisms and the stress field in the aftershock area of the 2018 Hokkaido Eastern Iburu earthquake (M-JMA=6.7), *Earth Planet. Space*, 73:1, doi:10.1186/s40623-020-01323-x.
- Takagi, R., N. Uchida, and K. Obara, 2020, Detection of slow slip events on the Philippine Sea plate beneath the Kanto region, Slow Earthquakes Workshop 2020, P-A02-06.
- 高風佑衣・安岡由美・細田正洋・床次眞司・長濱裕幸・岩岡和輝・向 高弘, 2020, 空気用ラドンモニタを用いた水中ラドン濃度測定におけるスクリーニング法の検討, 日本保健物理学会第53回研究発表会Web大会, 2-10.
- Tamakuma, Y., M. Hosoda, Y. Omori, H. Nagahama, T. Ishikawa, M. Shimo, and S. Tokonami,

- 2021, Car-borne survey for a black shale area and influence of snowfall on absorbed dose rate in air of a coastal area, *Radiat. Environ. Medicine*, 10, 2 (in press).
- Tanaka, Y., C. Shibata, Y. Tamura, and A. Kobayashi, 2020a, Calibration of portable relative gravimeters toward the detection of gravity signals accompanied by slow slip events, *JpGU-AGU joint Meeting 2020*, SCG58-06.
- Tanaka, Y., C. Shibata, Y. Tamura, and A. Kobayashi, 2020b, Toward the detection of gravity signals accompanied by slow slip events, *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A02-07.
- Teshiba, S. and H. Hirose, 2020a, Spatiotemporal evolution of interplate slip in the Hyuganada and the Bungo Channel from 1996 to 2000 based on GNSS data, *JpGU-AGU Joint meeting 2020*, SCG58-P38.
- Teshiba, S. and H. Hirose, 2020b, Slow slip events in the afterslip area of the 1996 Hyuganada earthquakes, based on GNSS data, *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A02-08.
- Teshiba, S. and H. Hirose, 2020c, Slow Slip Events in the Afterslip Area of the 1996 Hyuganada Earthquakes, Southwest Japan, Based on GNSS Data, *AGU Fall Meeting 2020*, S027-0015.
- Tomita, F., T. Iinuma, Y. Ohta, R. Hino, M. Kido, and N. Uchida, 2020, Improvement on spatial resolution of a coseismic slip distribution using postseismic geodetic data through a viscoelastic inversion, *Earth Planet. Space*, 72:84, doi:10.1186/s40623-020-01207-0.
- Tomonaga, Y., K. Yagasaki, J.-O. Park, J. Ashi, S. Toyoda, N. Takahata, and Y. Sano, 2020, Fluid dynamics along the Nankai Trough: He isotopes reveal direct seafloor mantle-fluid emission in the Kumano Basin (southwest Japan), *ACS Earth and Space Chemistry*, 4 (11), 2105-2112, DOI:10.1021/ac-searthspacechem.0c00229.
- Tsuru, T., J.-O. Park, K. Amakasu, T. No, K. Arai, T. Inoue, S. Furuyama, K. Uchida, and Y. Nakamura, 2020, Possible fluid discharge associated with faults observed by a high-resolution dense-2D seismic reflection survey in Uchiura Bay off Numazu, Japan, *Earth Planet. Space*, 72, 121, doi:10.1186/s40623-020-01242-x.
- Tsutsumi, R., K. Hattori, C. Yoshino, and N. Genzano, 2020, Detection of thermal changes related to the 2011 Shinmoedake volcano activity, Japan: Spatiotemporal variation of singularity of MODIS data after discriminating false changes due to cloud, *Remote Sensing*, 12, 2637, doi:10.3390/rs12162637.
- Uchida, N., J. Nakajima, K. Wang, R. Takagi, K. Yoshida, T. Nakayama, R. Hino, T. Okada, and Y. Asano, 2020a, Stagnant forearc mantle wedge inferred from mapping of shear-wave anisotropy using S-net seafloor seismometers, *Nat. Commun.*, 11(1), 5676, doi:10.1038/s41467-020-19541-y.
- Uchida, N., R. Takagi, Y. Asano, and K. Obara, 2020b, Migration of shallow and deep slow earthquakes toward the locked segment of the Nankai megathrust, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 115986, doi:10.1016/j.epsl.2019.115986.

- Ueda, T., A. Kato, Y. Ogata, and L. Yamaya, 2021, Spatial variations in seismicity characteristics in and around the source region of the 2019 Yamagata-Oki Earthquake, Japan, *Earth Planet. Space*, 73:40, doi:10.1186/s40623-020-01325-9.
- Ukawa, T. and H. Hirose, 2020a, An estimation of stress changes based on earthquake swarm seismicity accompanied by Boso slow slip events, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SCG58-P39.
- Ukawa, T. and H. Hirose, 2020b, 房総スロースリップイベントに伴う群発地震活動に基づく応力変化の推定, *Slow Earthquakes Workshop 2020*, P-A02-09.
- Uyeshima, M., R. Yoshimura, M. Hata, H. Ichihara, and K. Aizawa, 2020, On 3-D resistivity structure in the SW part of Shikoku-Island, SW Japan, and sensitivity of the Network-MT responses to the structure, *JpGU-AGU joint Meeting 2020*, SCG58-P11.
- Varini, E., A. Peresan, and J. Zhuang, 2020, Topological comparison between the stochastic and the nearest-neighbour earthquake declustering methods through network analysis, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125(8), e2020JB019718, doi:10.1029/2020JB019718.
- Wada, Y., T. Enoto, Y. Nakamura, T. Morimoto, M. Sato, T. Ushio, K. Nakazawa, T. Yuasa, D. Yonetoku, T. Sawano, M. Kamogawa, H. Sakai, Y. Furuta, K. Makishima, and H. Tsuchiya, 2020, High peak-current lightning discharges associated with downward terrestrial Gamma-ray flashes, *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 125(4), e2019JD031730, doi:10.1029/2019JD031730.
- 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, 2020, 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 (2019年11月~2020年4月) 地震予知連絡会会報, 104, 216-264.
- 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, 2021, 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 (2020年5月~2020年10月), 地震予知連絡会会報, 105 (印刷中).
- Yabe S., K. Imanishi, and K. Nishida, 2020a, Two-step seismic noise reduction caused by COVID-19 induced reduction in social activity in metropolitan Tokyo, Japan, *Earth Planet. Space*, 72, 167, doi:10.1186/s40623-020-01298-9.
- Yabe, S., R. Fukuchi, Y. Hamada, and G. Kimura, 2020b, A new method for the empirical conversion of logging data to clay mineral fraction in the Nankai accretionary prism, *Earth Planet. Space*, 72, 166, doi:10.1186/s40623-020-01303-1.
- 山崎政彦, 2020, 地震先行現象検出特化型 CubeSat のエンジニアリング・モデル製作, 第十回 気象文化大賞.
- Ye, T., X. Chen, Q. Huang, L. Zhao, Y. Zhang, and M. Uyeshima, 2020, Bifurcated Crustal Channel Flow and Seismogenic Structures of Intraplate Earthquakes in Western Yunnan, China as Revealed by Three-Dimensional Magnetotelluric Imaging, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125(9), e2019JB018991, doi:10.1029/2019JB018991.
- 吉田圭佑・高木涼太・内田直希・池田里奈, 2020, 東北地方太平洋沖で発生した小中地震の破壊伝播指向性と応力降下量: S-net を用いた解析, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SSS15-

- Yoshida, K., A. Hasegawa, S. Noguchi, and K. Kasahara, 2020a, Low-frequency earthquakes observed in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan, *Geophys. J. Int.*, 223, 1724-1740, doi:10.1093/gji/ggaa418.
- Yoshida, K., T. Taira, Y. Matsumoto, T. Saito, K. Emoto, and T. Matsuzawa, 2020b, Stress Release Process Along an Intraplate Fault Analogous to the Plate Boundary: A Case Study of the 2017 M5.2 Akita-Daisen Earthquake, NE Japan, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2020JB019527, doi.org/10.1029/2020JB019527.
- Yu, Z., K. Hattori, K. Zhu, C. Chi, M. Fan, and X. He, 2020, Detecting earthquake-related anomalies of a borehole strain network based on multi-channel singular spectrum analysis, *Entropy*, 22, 1086, doi:10.3390/e22101086.
- Yu, Z., K. Zhu, K. Hattori, C. Chi, M. Fan, K. Li, X. He, and W. Xie, 2021a, Investigation of pre-seismic borehole strain data associated with the 2013 Lushan earthquake, *IEEE Access*, 9, 12167-12179, doi:10.1109/ACCESS.2021.3051614.
- Yu, Z., K. Hattori, K. Zhu, M. Fan, D. Marchetti, X. He, and C. Chi, 2021b, Evaluation of pre-earthquake anomalies of borehole strain network by using Receiver Operating Characteristic Curve, *Remote Sensing*, 13(3), 515, doi:10.3390/rs13030515.
- Yuan, Y., M. Uyeshima, Q. Huang, J. Tang, Q. Li, and Y. Teng, 2020, Continental-scale deep electrical resistivity structure beneath China, *Tectonophys.*, 790, 228559, doi:10.1016/j.tecto.2020.228559.
- Yukutake, Y., T. Iwata, and Y. Iio, 2020, Estimation of the heterogeneity of stress fields using misfit angles in focal mechanisms, *Tectonophys.*, 790, 228553, doi:10.1016/j.tecto.2020.228553.
- Zhuang, J., M. Matsu'ura, and P. Han, 2021, Critical zone of the branching crack model for earthquakes: Inherent randomness, earthquake predictability, and precursor modelling, *European Physical Journal Special Topics*, 230:409-424, in "The Global Earthquake Forecasting System: Towards Using Non-seismic Precursors for the Prediction of Large Earthquakes" (Eds. F. Freund, A. Mignan, G. Ouillon, and D. Sornette), doi:10.1140/epjst/e2020-000272-7.

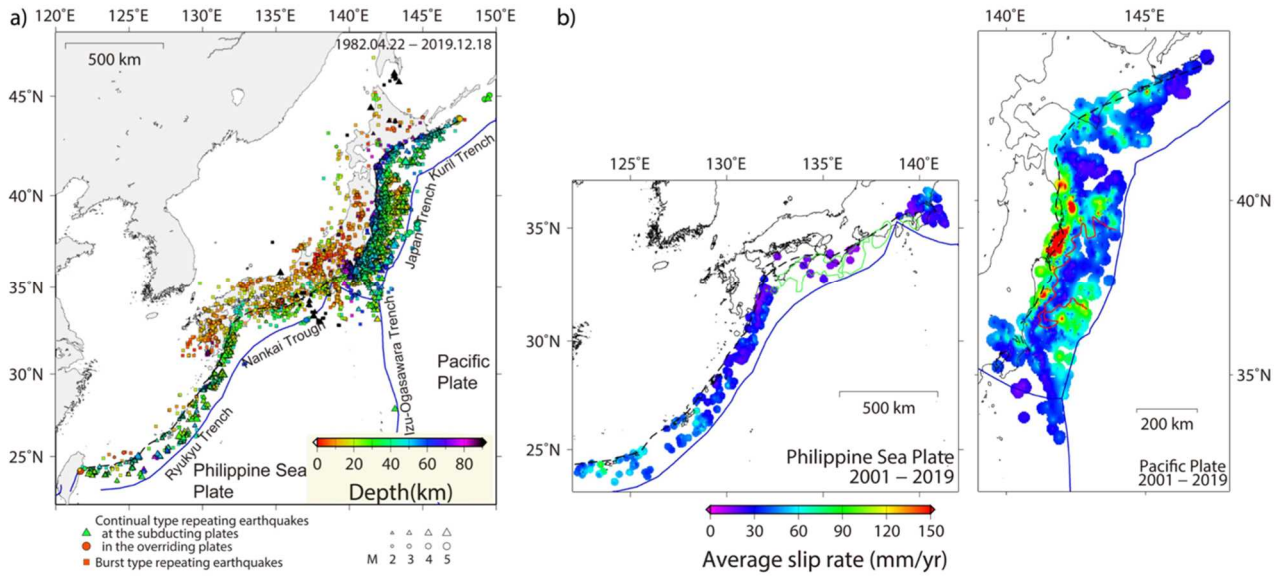


図1. 日本列島周辺における小繰り返し地震（東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、Igarashi, 2020 より改変）

a) 空間分布。

b) 繰り返し地震から推定された平均すべり速度。

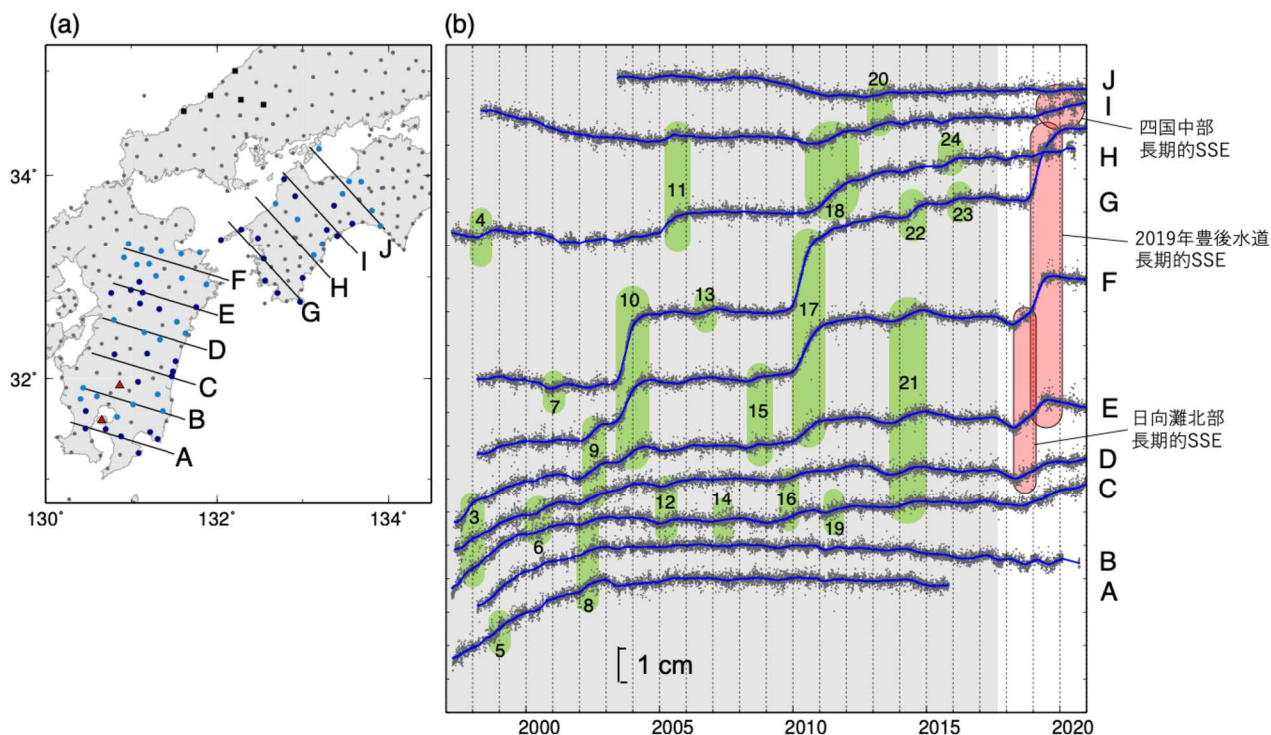


図 2. 定常観測点と臨時観測点の GNSS 記録を測線にそって重合した時系列による長期的 SSE の検出 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])

(a) GNSS 観測点分布。各測線に沿った色付きの観測点を使用。

(b) 各側線の観測点でスタックした測線と平行方向の変位時系列。灰色は Takagi et al. (2019) の解析期間。2017 年 10 月以降は新たに追加した期間。緑色の範囲は Takagi et al. (2019) によって検出された長期的 SSE。

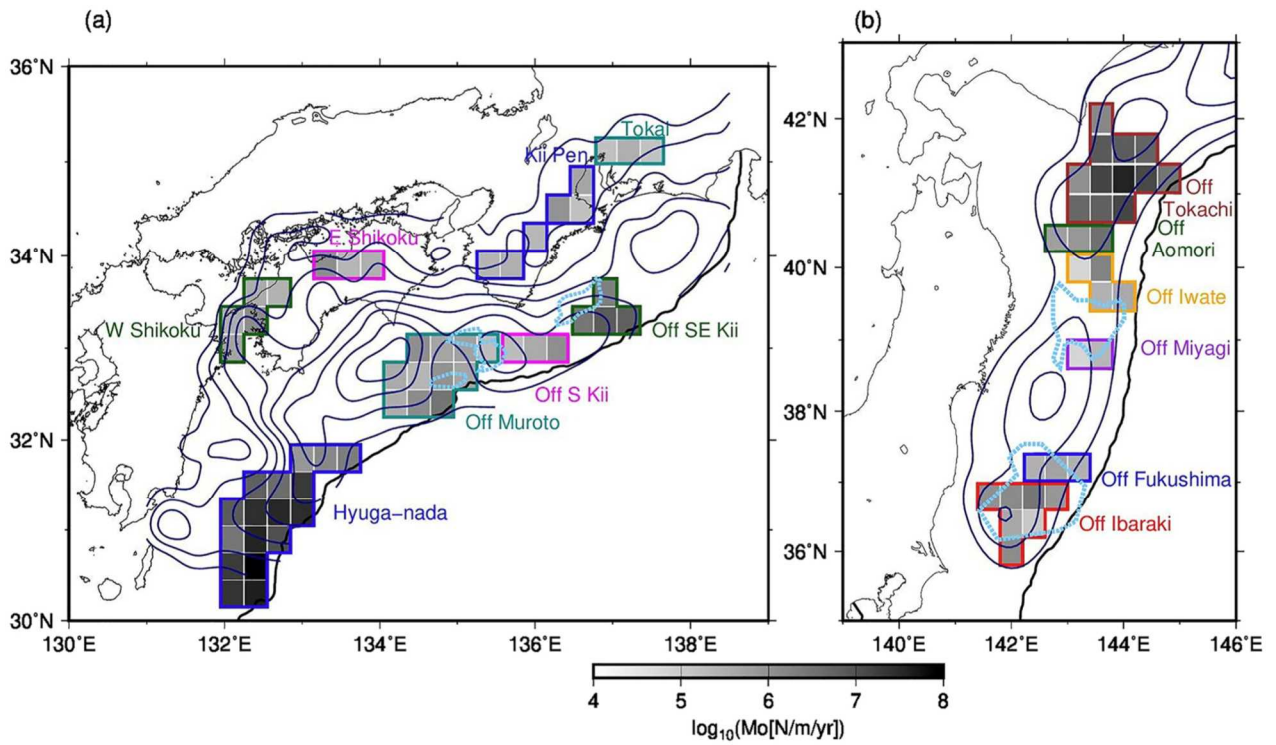


図 3. 超低周波地震 (VLFE) による地震モーメント解法レートの分布 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Baba et al., 2020b より改変)

(a) 西南日本、(b) 東北日本。

コンターは各地域のすべり欠損速度((a):10 mm/年間隔、(b):30 mm/年間隔)。薄青点線は各地域の地震波速度の遅い領域を示す。

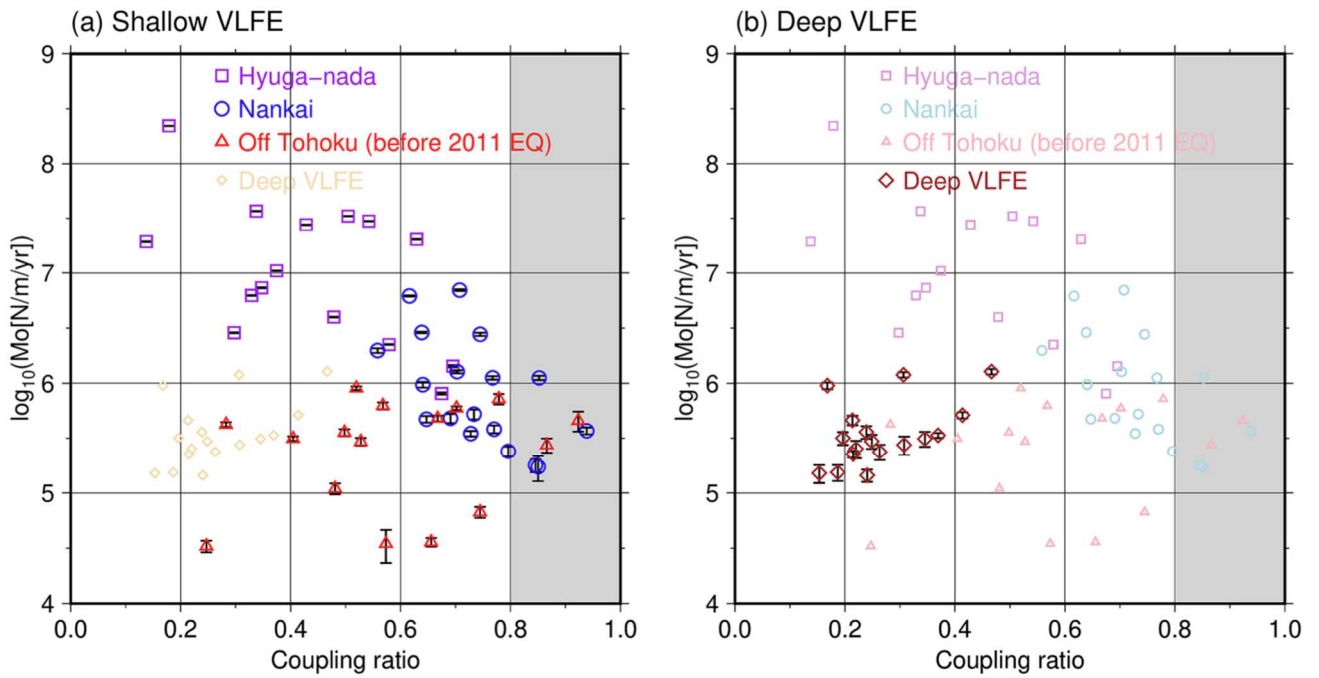


図4. 超低周波地震 (VLFE) の地震モーメント解放レートの常用対数 (縦軸) とカップリング率 (横軸) の関係 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、Baba et al., 2020b より改変)

(a) 浅部超低周波地震、(b) 深部超低周波地震。

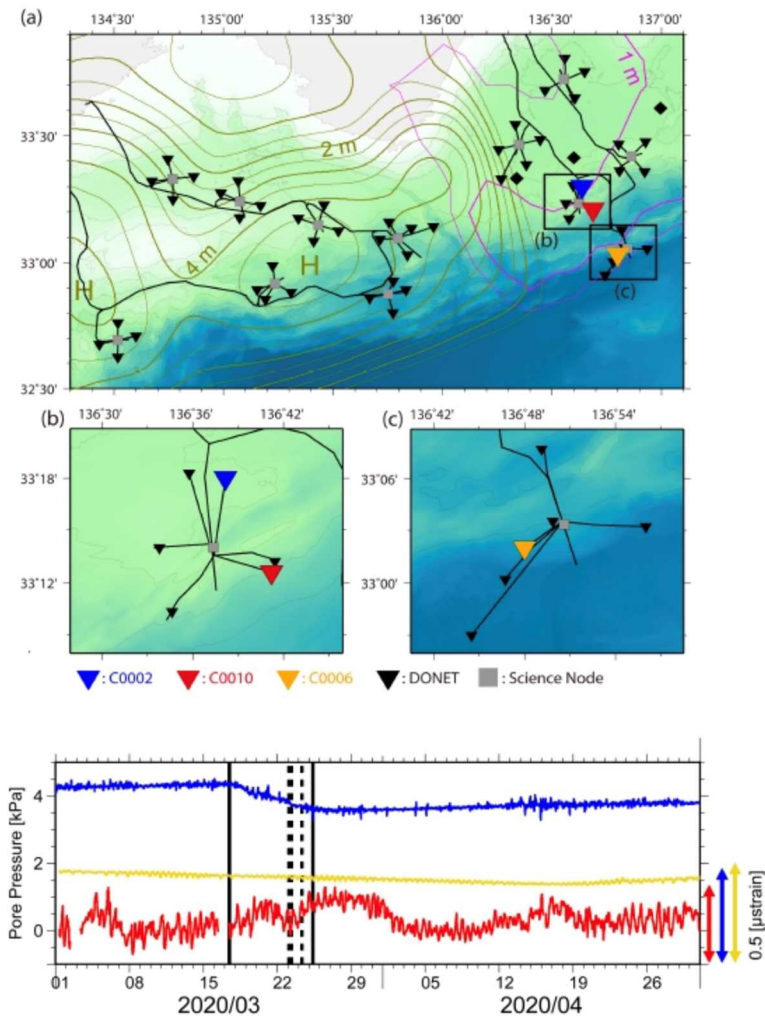


図 5 . DONET へ接続された孔内観測点(逆三角)とその記録(下) (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、Ariyoshi et al., 2021 より改変)
 間隙水圧記録の色はそれぞれの観測点に対応する。

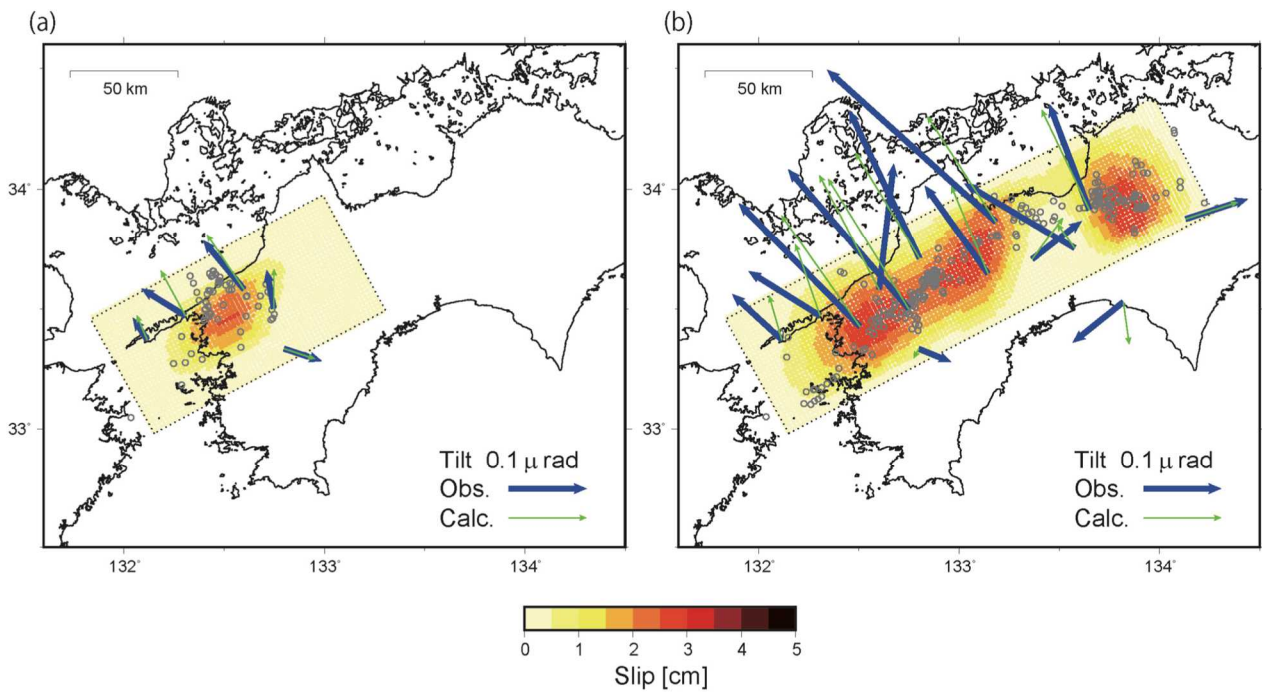


図 6．四国で発生した短期的 SSE のすべり分布の例（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12]、Hirose and Kimura, 2020 より改変）

(a) 2006 年 4 月の SSE、(b) 2018 年 2 月の SSE。

すべり量を色で表す。青の矢印は観測された傾斜変化ベクトル、緑の矢印は計算された傾斜変化ベクトル。灰色の円はそれぞれの SSE 継続中に発生した微動の震央。

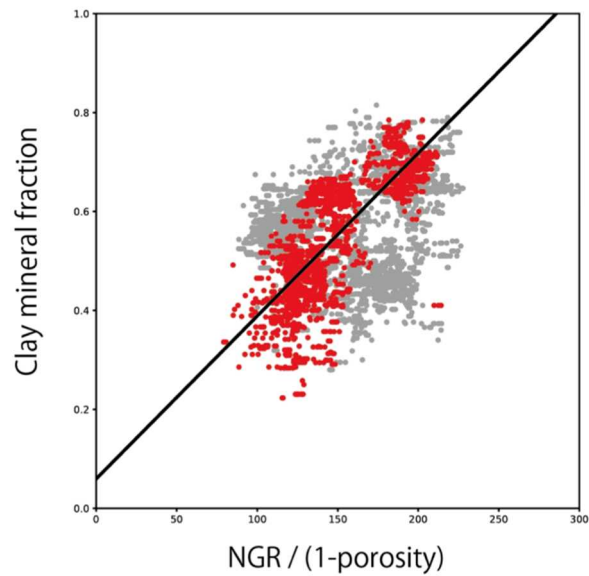


図 7. 南海トラフにおける検層データとコア計測粘土鉱物量比のコンパイル結果（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST09]、Yabe et al., 2020b より改変）
 横軸は自然ガンマ線検層のデータを電気比抵抗検層のデータを用いて推定した空隙率を用いて規格化した値を示す。縦軸は取得したコアを用いて XRD によって計測された粘土鉱物量比。灰色の点は全てのデータをプロットしている。これらのうちから火山灰を多く含むなど傾向が異なると考えられる層を除いたデータ(赤点)は線形のトレンドを示しており、これを用いて経験式を構築した。

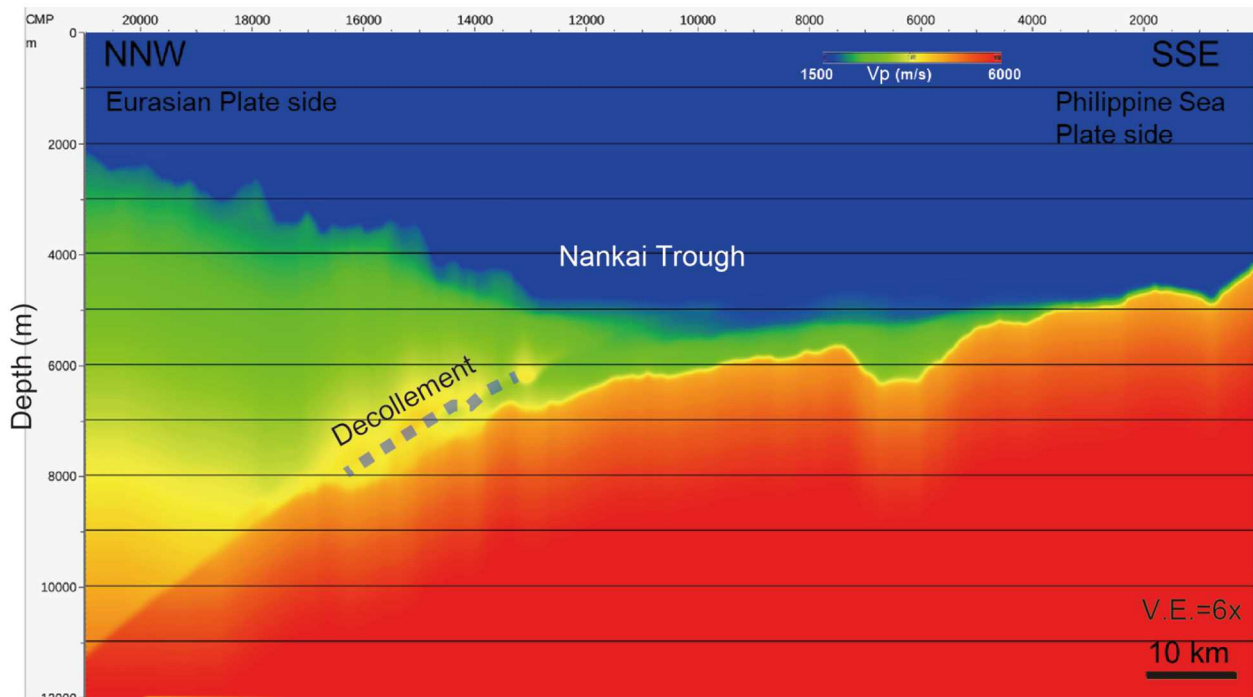


図 8. マルチャンネル反射法地震探査データ (測線 KI01) の暫定的な P 波速度構造モデル (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])
 PSDM (重合前深度マイグレーション) 処理によって P 波速度構造モデルを推定した。灰色の点線は浅部デコルマ表す。

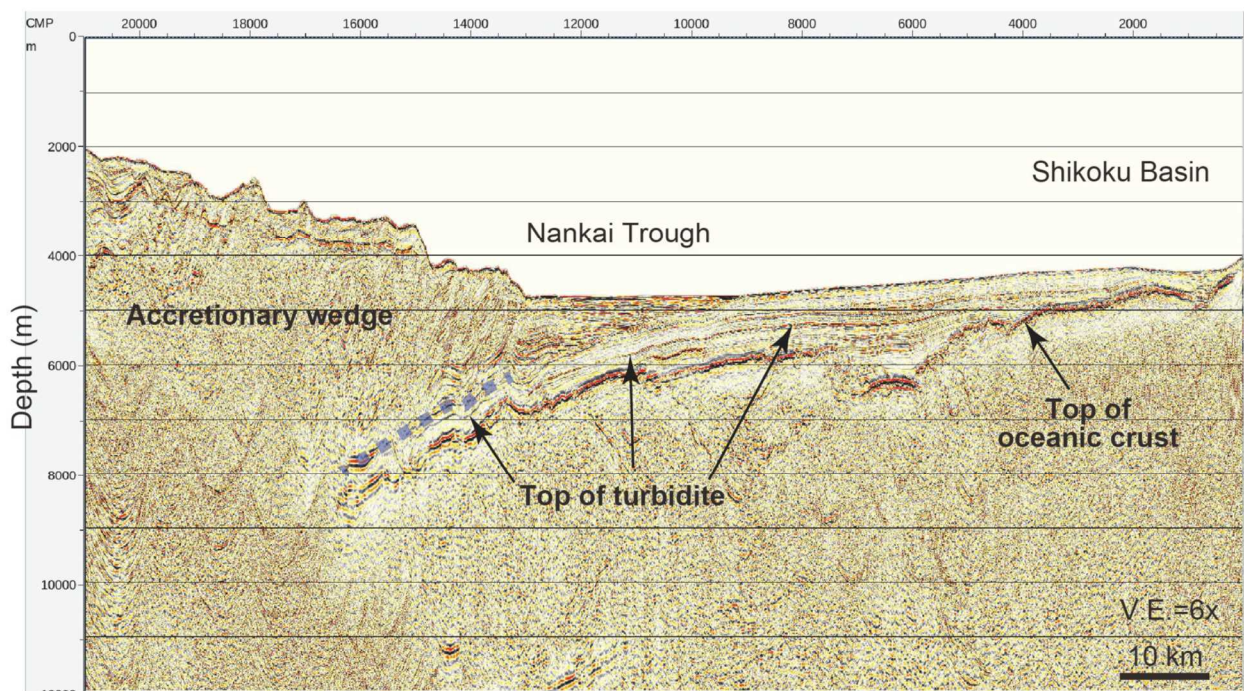


図 9. マルチャンネル反射法地震探査データ (測線 KI01) の暫定的な PSDM 断面図 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])
 灰色の点線は浅部デコルマを表す。

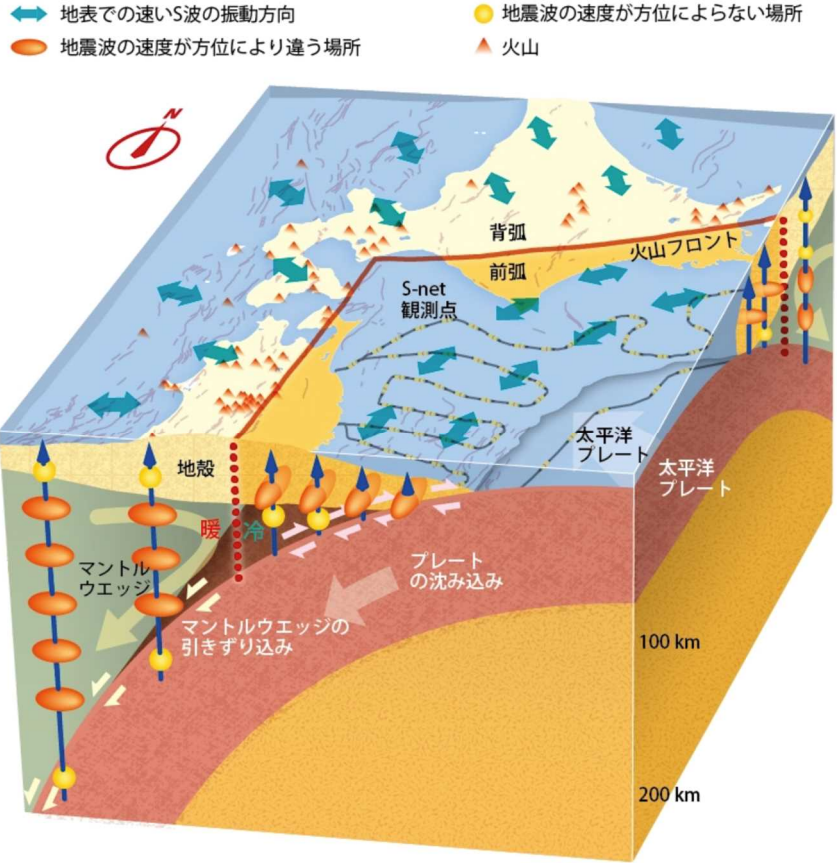


図 10. S波偏光異方性の分布から推察される東北日本のプレートダイナミクス（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12]、Uchida et al., 2020 より改変）
 地表の三角は火山、赤線は火山フロント、青い両矢印は観測された速いS波の振動方向。黄色と灰色の曲線は海底のS-netの観測点とケーブル。地下の楕円体は推定された地震の波が伝わる速度が方向により異なる場所、球は地震の波が伝わる速度が振動方向によらない場所を示す。太平洋プレート上面に沿った浅部でのピンクの小さい矢印はプレート境界を境とした食い違い、深部でのうす緑色の矢印はマントルウエッジ領域を引きずり込む運動を表す。マントルウエッジ領域の大きく曲がった矢印は、この領域での流動を表す。

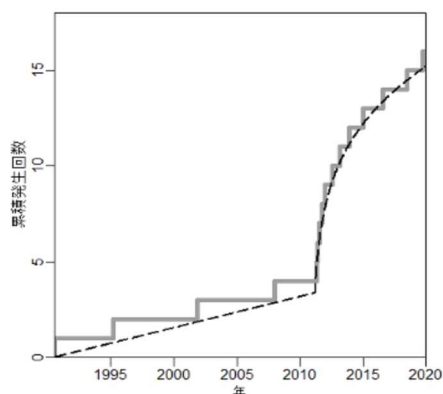


図 11. 釜石沖の繰り返し地震系列 (2019 年末までの発生状況) (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09]、野村・田中, 2021 より改変)

点線は 2011 年東北沖地震後の発生間隔の系統的变化を大森・宇津則の形でフィットしたもの。

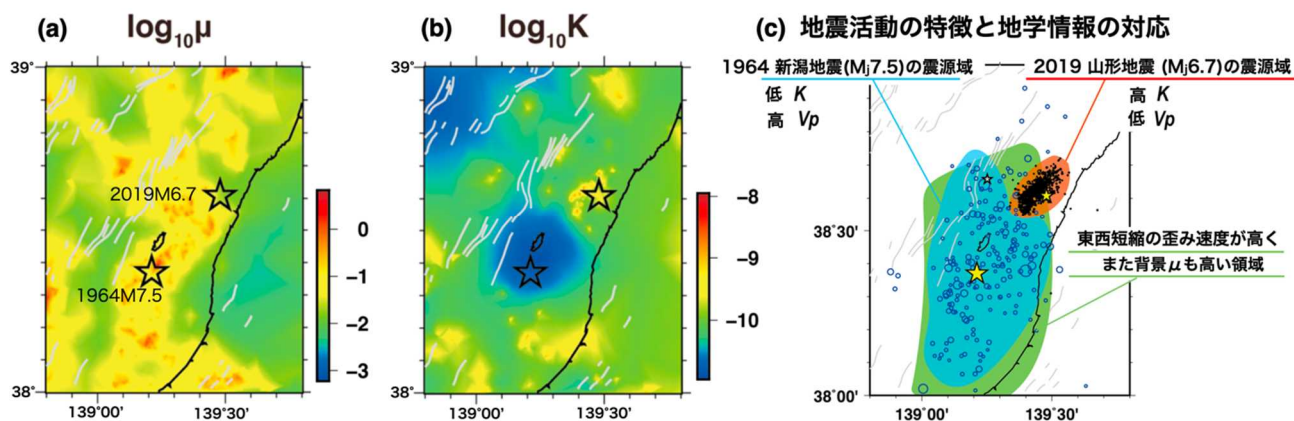


図 12. 日本海東縁地域の時空間 ETAS パラメタの空間分布と歪み速度、P 波速度の比較 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Ueda et al., 2021 より改変)

(a) 独立地震発生レート μ の空間分布、(b) 余震生産性 K の空間分布、(c) 東西短縮速度および P 波速度の空間分布との対応のまとめ。

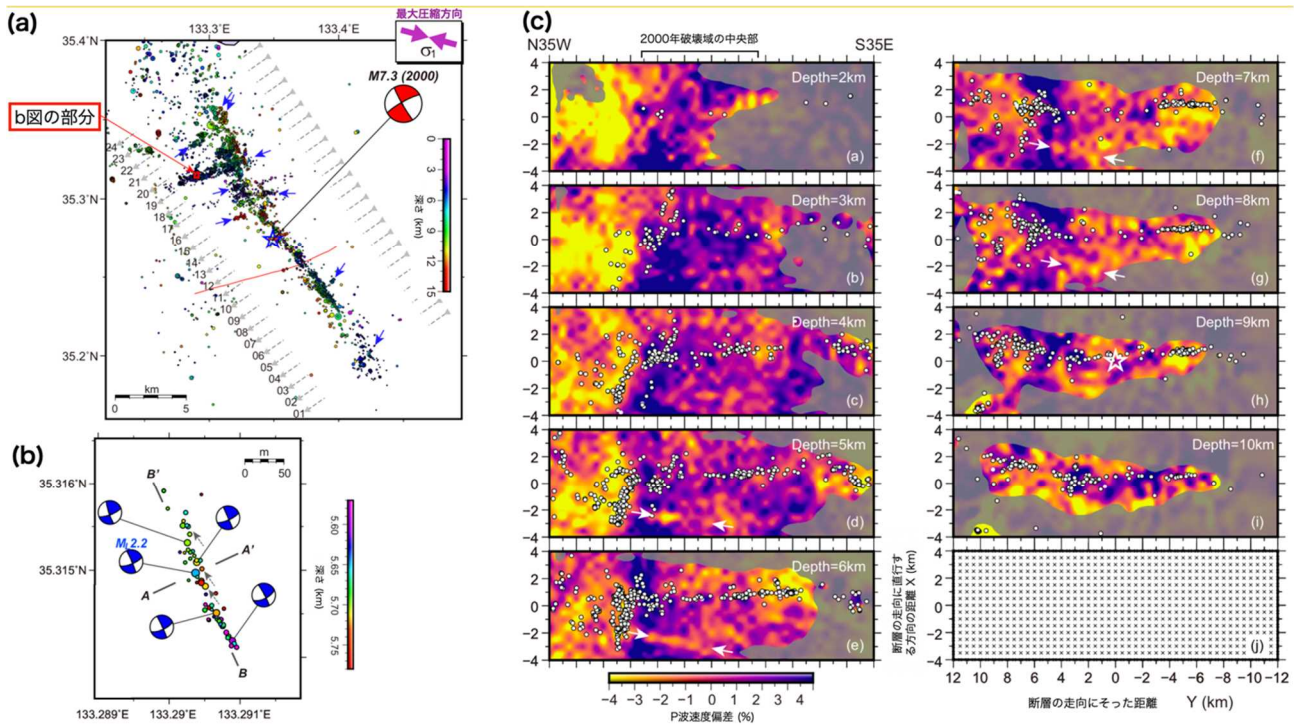


図 13. 2000 年鳥取県西部地震の震源域での超稠密アレーによる観測結果(2017 年 4 月-2018 年 4 月) (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Kato et al., 2021 より改変)
 (a) 震源分布。青い矢印は、本震断層に共役な走向をもつ鉛直な板状クラスタ。(b) a 図の一部の拡大。点線矢印の走向をもつ 30 m 程度の鉛直板状クラスタが雁行配列している。これらの地震は、2017 年 12 月の M2.2 の地震の余震活動 (約 2 日間) と、5 日後から 4 日間続いた群発的活動として発生した。(c) P 波速度のトモグラフィ結果。白丸は 2000 年鳥取県西部地震 (白星 (気象庁)) の再決定された余震分布。

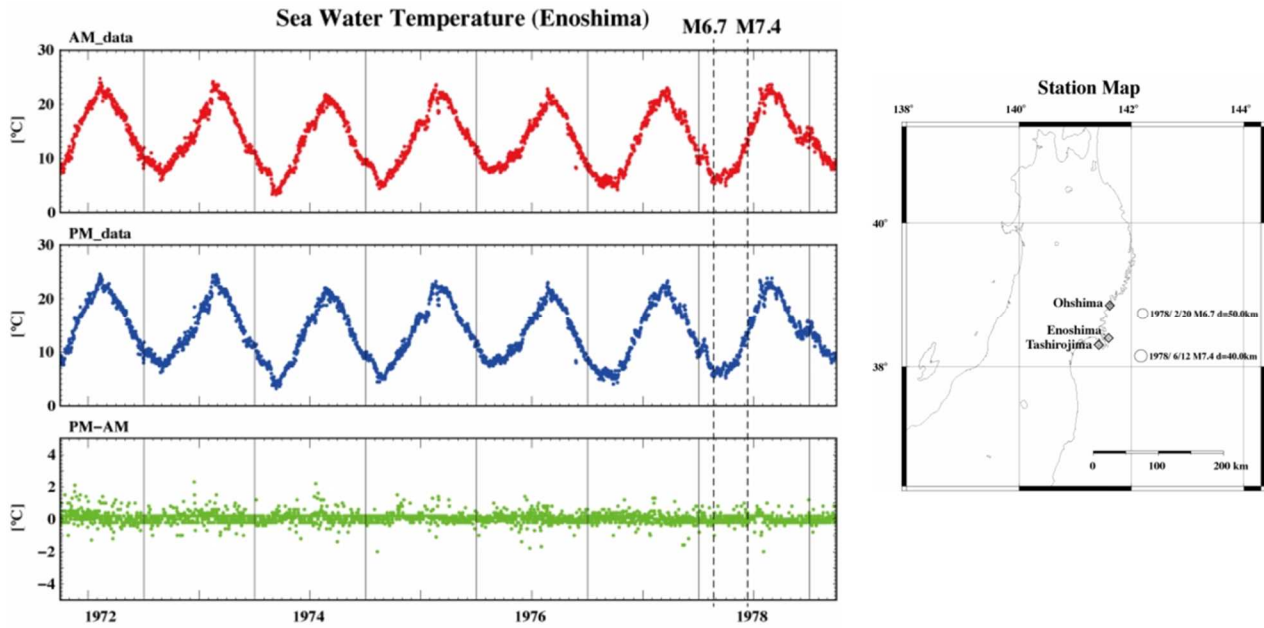


図 14. 宮城県江ノ島の海水温記録（公募研究、東京学芸大学 [課題番号：KOB008]）
AM は午前 10 時、PM は午後 3 時。

適用対象	期間	M法のパラメタ					予知率		適中率		ゲイン
		M_{f0}	T_f (日)	N_f	T_a (日)	M_{m0}	%	対象地震数	%	アラーム数	
岩手・宮城県沖 (実カタログ)	1961-2010	5.0	9	3	4	6.0	33.3	24	24.4	41	340.5
岩手・宮城県沖 (ETASカタログ)	1961-2010	5.0	1	2	2	6.0	9.1	20	8.3	25	292.7
茨城県沖 (実カタログ)	1961-2010	5.0	3	2	1	6.0	66.7	6	30.8	13	1567.5
茨城県沖 (ETASカタログ)	1961-2010	5.0	1	2	1	6.0	14.3	8	15.4	8	446.5
長野県北中部 (実カタログ)	1998-2019	2.0	1	5	5	5.0	40.0	15	9.6	73	439.9
長野県北中部 (ETASカタログ)	1998-2019	2.0	4	2	4	5.0	29.6	26	0.7	1299	78.0
伊豆諸島 (実カタログ)	1977-2019	3.0	1	2	4	5.0	72.3	65	20.1	314	338.0
伊豆諸島 (ETASカタログ)	1977-2019	3.0	1	2	2	5.0	68.4	128	9.0	1331	133.4

図 15. M法 (Maeda, 1996) 前震識別を実カタログと ETAS による合成カタログに適用した場合の成績の比較 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Hirose et al., submitted より改変)

ETAS シミュレーションによる合成カタログは各地域で 1000 回の試行で作成し、1000 回の試行のそれぞれに対して M 法のパラメタを最適化したので、ETAS カタログでの最適パラメータと成績は、1000 回試行の中央値を示した。また、適中したアラームの数と予知できたターゲット地震の数が必ずしも一致しないのは、1つのアラームで複数個のターゲット地震が予知できた場合があるからである。

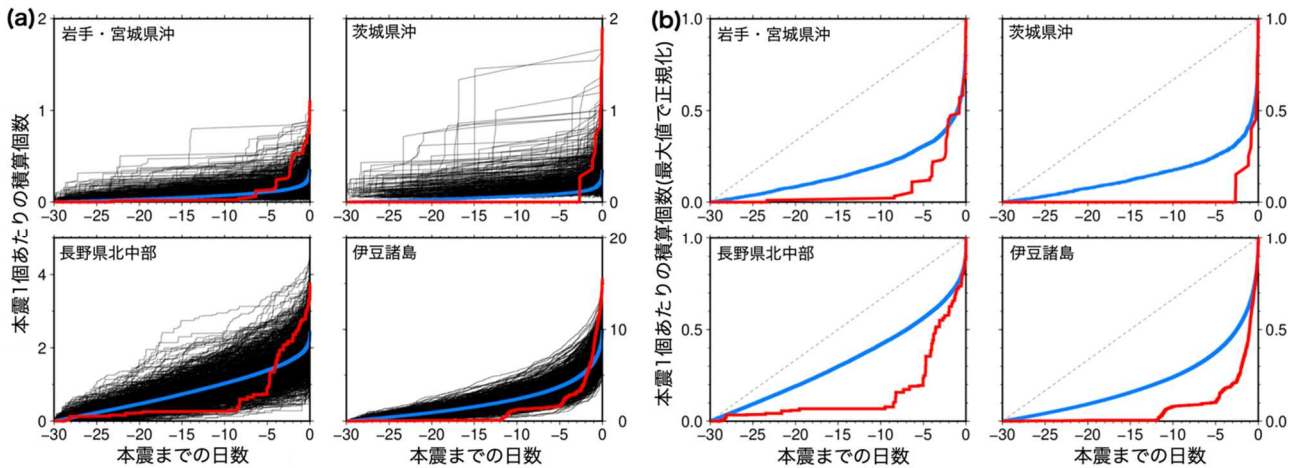


図 16. 前震活動の時間推移 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Hirose et al., submitted より改変)

赤線は実カタログ、黒細線は ETAS シミュレーションによる合成カタログ (1000 回の試行)、青線は ETAS カタログの平均。いずれのカタログでも、M法の成否にかかわらずそこに含まれる全てのターゲット地震前 30 日間の活動をスタックして、ターゲット地震 1 個あたりの個数になおして示した。(b) では、前震活動の時間的特徴が比較しやすいよう縦軸を正規化して示した。実カタログでは地震前数日に強く集中していることがわかる。

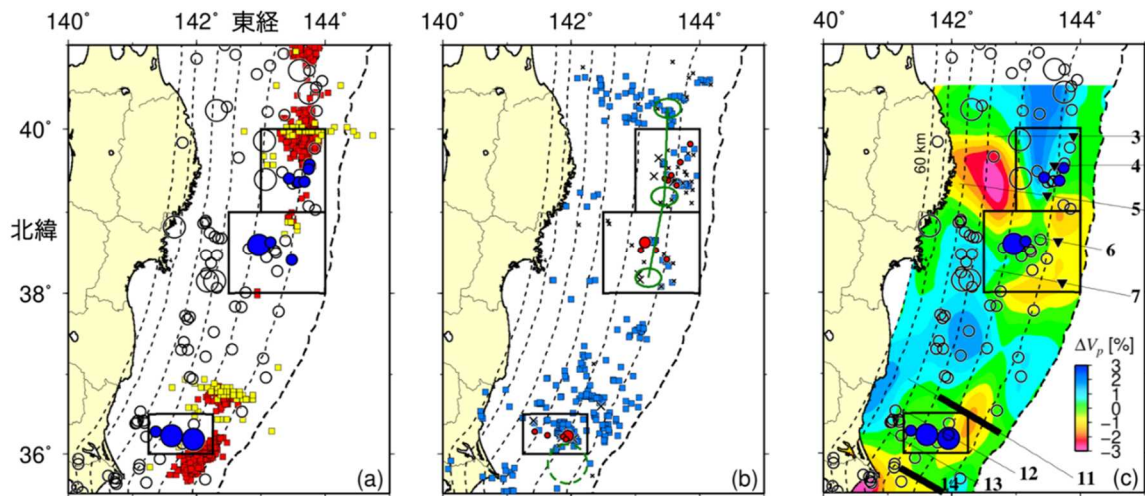


図 17. 日本海溝地域の地震テクトニクスとM法予測の当たり外れ (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Hirose et al., submitted より改変)

点線は太平洋プレート上面の等深線 (10km 間隔)。

(a)、(c) 青丸: 予知された対象地震。白丸: 見逃がした対象地震、(b) 赤丸: 適中アラームとなった地震。x 印: 空振りアラームとなった地震。

(a、b) では岩手・宮城県沖に、(c) では茨城県沖に最適化したM法のパラメタを日本海溝域全てに適用したので予測結果が微妙に異っている。地震テクトニクス情報としては、(a) には Nishikawa et al. (2019) による継続時間 80 秒以上の微動 (赤四角) と VLF (黄四角) を、(b) には Nishikawa et al. (2019) による背景地震の群発活動 (青四角) を、(c) には Hua et al. (2020) による太平洋プレート上面での P 波速度偏差を示した。

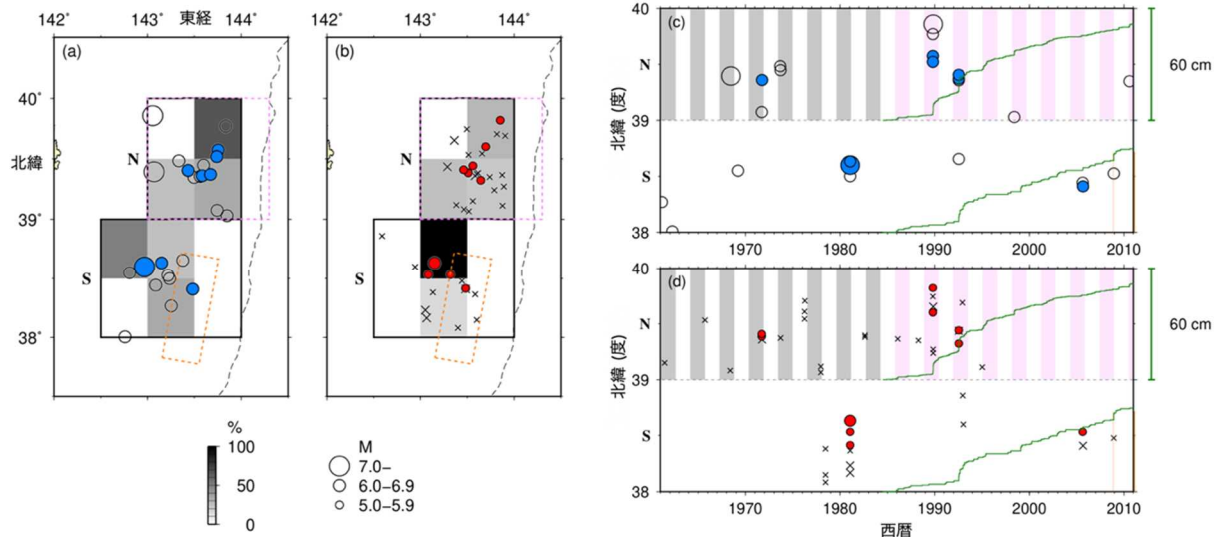


図 18. 岩手県沖（領域N）と宮城県沖（領域S）でのM法予測の当たり外れとスロースリップの周期性（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、Hirose et al., submitted より改変）

青丸、白丸、赤丸、x印の意味は図 17 と同じ。（a）のグレースケールは予知率。（b）のグレースケールは適中率。（a、b）のピンク破線は Uchida et al. (2016) が 3.09 年周期のスロースリップの加減速をみつけた領域。オレンジ破線は Ito et al. (2013) によって SSE が検出された領域。（c、d）のストライプは Uchida et al. (2016) の 3.09 年周期のスロースリップのリズムでの速期。ただし 1984.5 年以前はそれ以降のリズムを外挿した。（c、d）の緑線は、繰り返し地震から推定した領域N、領域Sそれぞれの累積すべり量。オレンジの縦線は Ito et al. (2013) の見つけた SSE の時期。

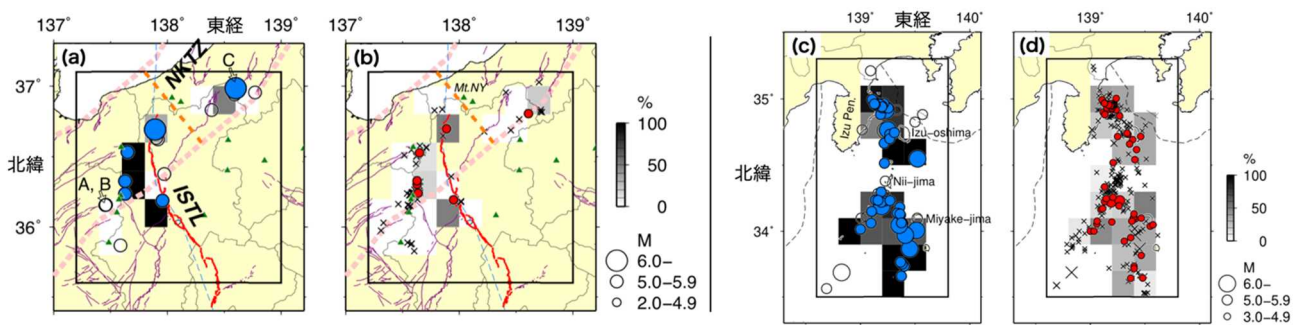


図 19. 長野県北中部と伊豆諸島におけるM法予測の当たり外れ（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、Hirose et al., submitted より改変）

青丸、白丸、赤丸、x印の意味は図 17 と同じ。

（a）長野県北中部の予知率、（b）長野県北中部の適中率、（c）伊豆諸島の予知率、（d）伊豆諸島の適中率。

（a、b）で青い破線はアムールプレートとオホーツクプレートの境界（Bird, 2003）。二本の平行なピンク破線の間が新潟－神戸歪み集中帯（NKTZ）。オレンジ破線は地殻速度偏差（Nakajima and Hasegawa, 2007）に見られる境界。赤い線分たちは糸魚川－静岡構造線（ISTL）。三角印は活火山。Mt. NY は新潟焼岳。

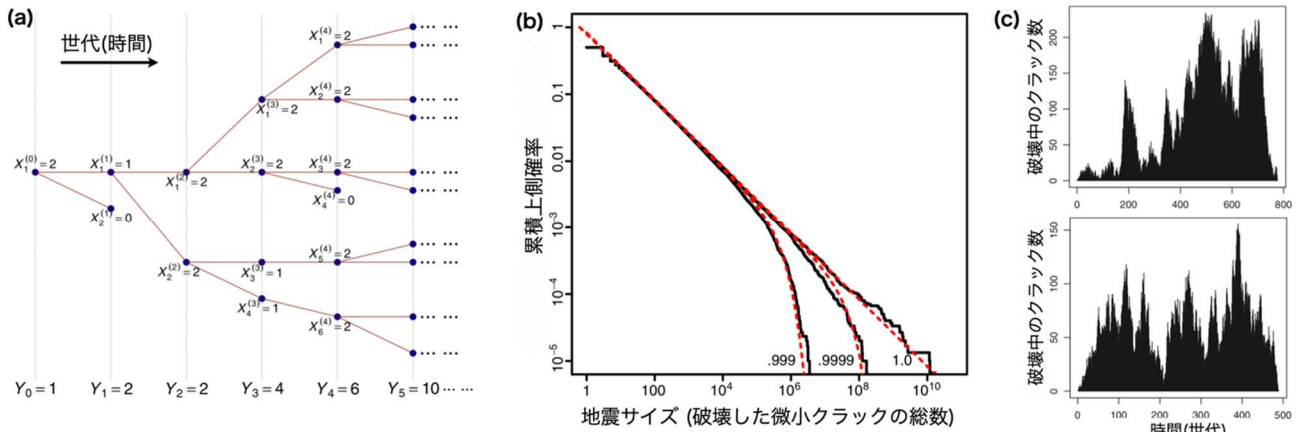


図 20. 分岐クラックモデルとそのふるまい（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、Zhuang et al., 2021 より改変）

(a) 分岐クラックモデルの時間発展の様子。第 $n+1$ 世代に破壊する微小クラックの数 Y_{n+1} は、第 n 世代の各クラック $X_j^{(n)}$ に直接トリガされたクラックの総数である。

(b) ν が 0.999, 0.9999, 1 の場合のサイズ頻度分布。赤破線は打ち切り Pareto ($\nu < 1$ の場合) もしくは Pareto ($\nu = 1$ の場合) 関数による漸近線。

(c) $\nu = 1$ の二分岐モデルで起きた大地震 2 例の震源時間関数。いったん終息しかけてから、それ以前にも増して大きなモーメントレートが出るような不規則性は分岐クラックモデルの本質的なランダム性の顕れである。

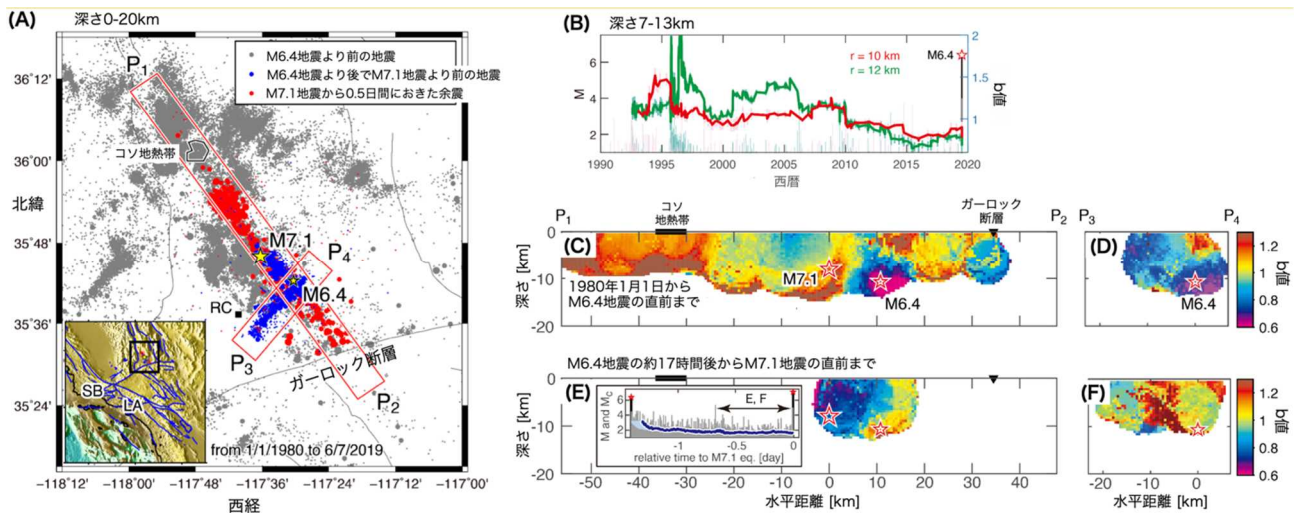


図 21. 2019 年リッジレスト地震に至る期間の地震活動（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、Nanjo, 2020a より改変）

(A) 1980 年以降の地震活動の分布。

(B) M6.4 地震までの震源周辺の b 値の推移。灰色は MT ダイアグラム。

(C、D) M6.4 地震までの b 値の分布の鉛直断面投影図。

(E、F) M6.4 地震から M7.1 地震までの期間の b 値の分布の鉛直断面投影図。ただし、M6.4 地震直後のデータは信頼性が落ちるため、後半のみで b 値を計算した。

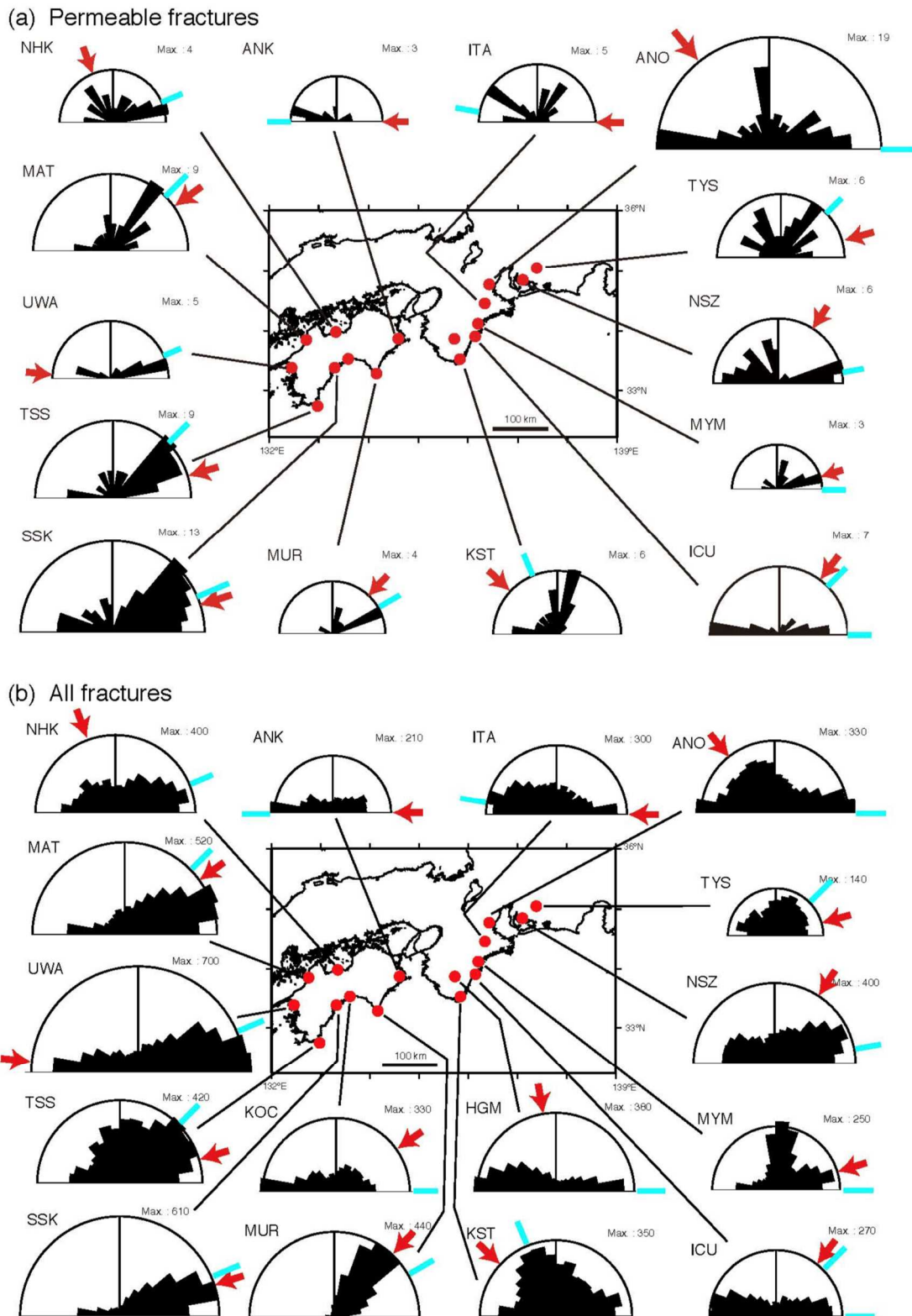


図 22. 16 地点の観測井孔壁面に見られる亀裂の走向のローズダイアグラムの分布図（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST09]、木口・桑原，2021 より改変）

（a）透水性亀裂、（b）全亀裂。

各観測点の応力方位（赤矢印）と地質構造の特徴的な方向（青実線）も示す。（a）と（b）のローズダイアグラムの大きさは、それぞれの図のローズダイアグラムの最大数の平方根に比例。

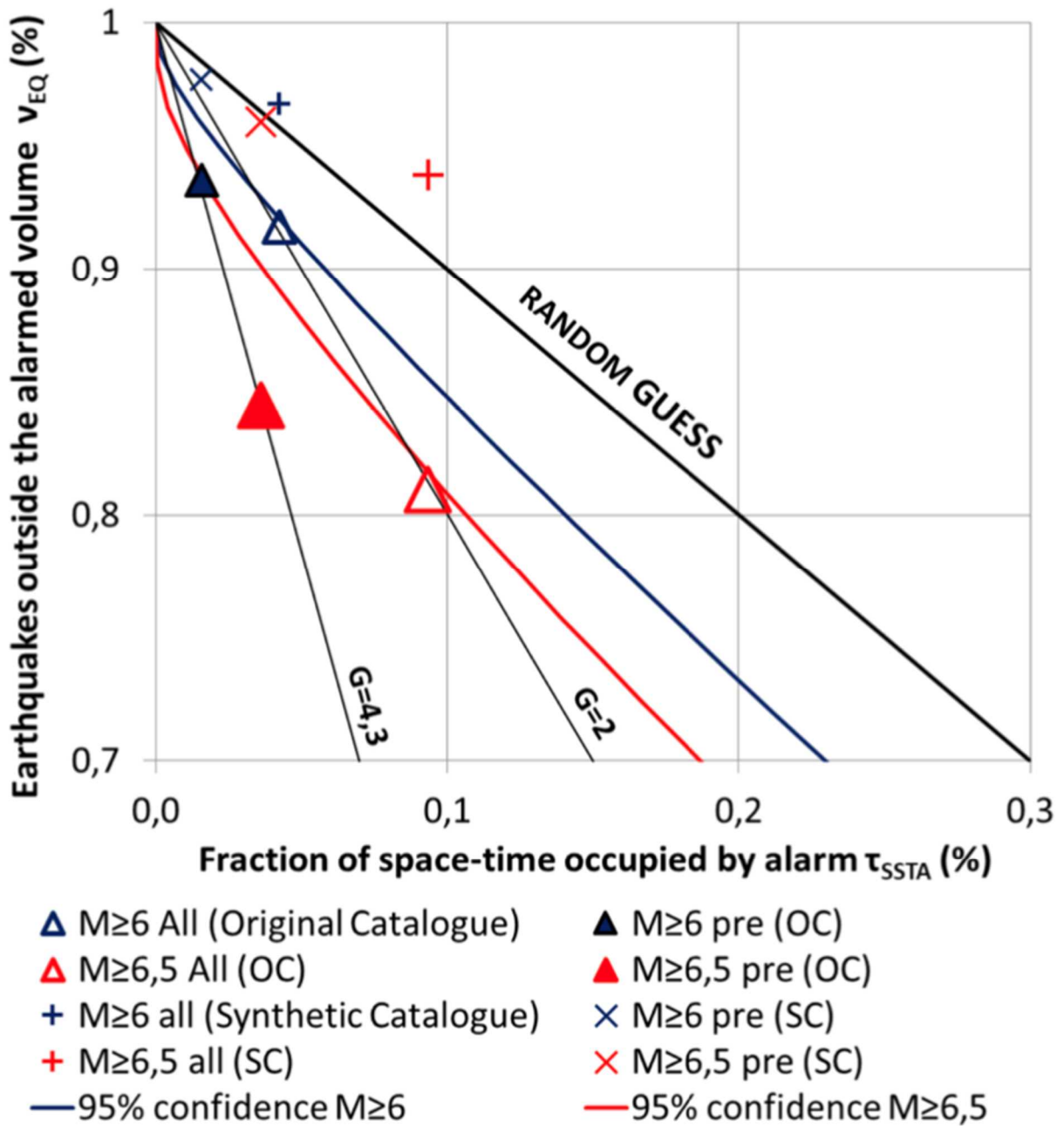


図 23. ひまわり 6、7号で観測された衛星熱異常と地震の相関を示す ROC ダイアグラム (千葉大学 [課題番号: CBA_01]、Genzano et al., 2021 より改変)
 縦軸は見逃し率 (=1-予知率)、横軸は警報分率 (予測対象時空間にしめるアラーム領域の割合)。pre は地震の前 30 日の間に異常があったかを、all は地震の前 30 日から地震後 15 日の間に異常があったかを調べたもの。

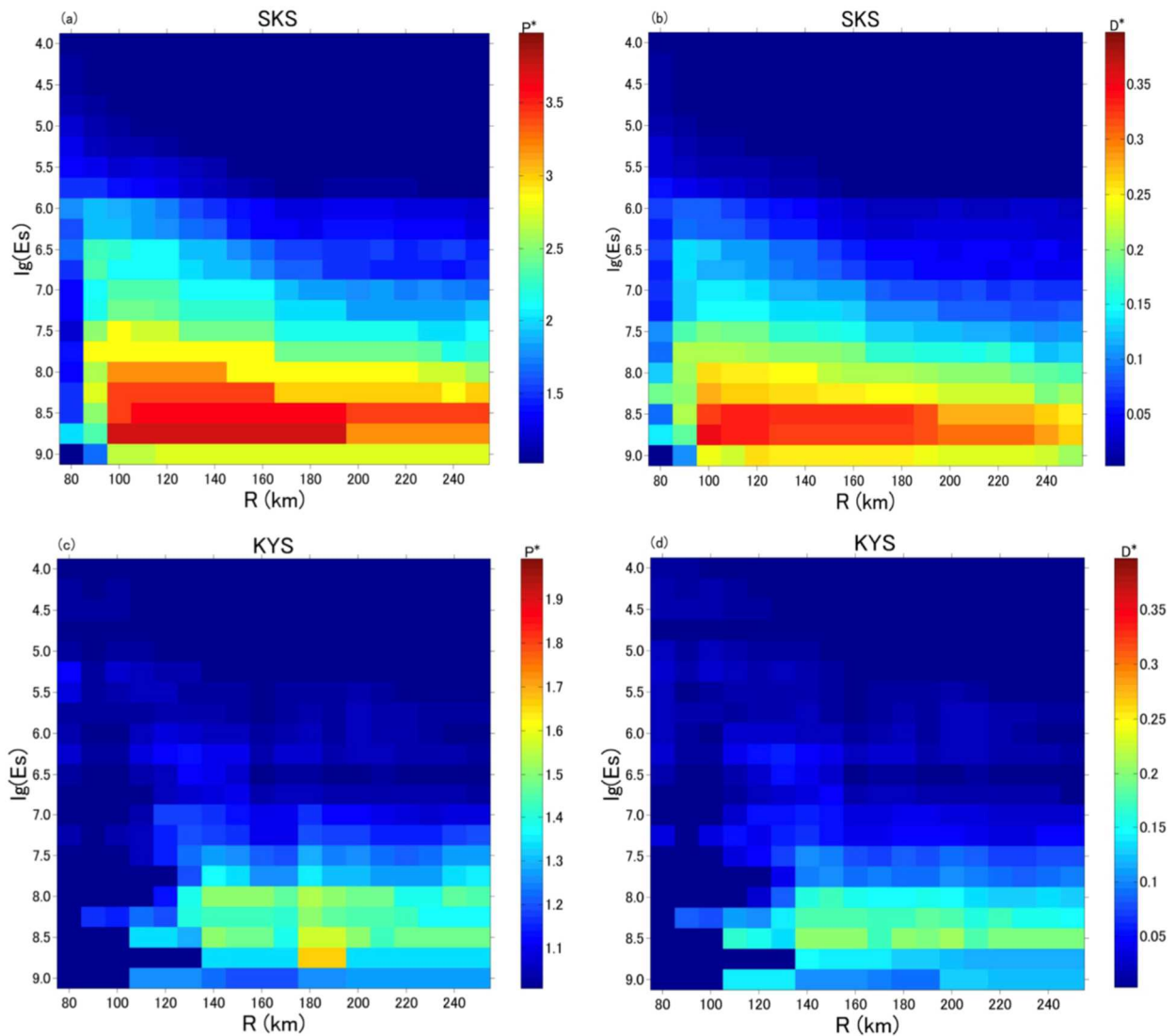


図 24. ULF 地磁気異常による地震予測性能に関する図。縦軸は予測対象地震の大きさ (E_s)、横軸は観測点からの距離 R を表す (千葉大学 [課題番号: CBA_01]、Han et al., 2020 より改変)

SKS は千葉大学の清越観測点 (伊豆半島)、KYS は千葉大学の清澄観測点 (房総半島)。 P^* は、「予知率/p 値 5 %を達成するための予知率」として定義され、この値が 1 を超えていれば、前兆性が統計的に有意と認められる。また、同じ警報分率、予測対象地震数のもとでは、「予知率/警報分率」で定義される確率ゲインの単調増加関数になるので、 P^* が大きいほど予測の効率がよいことになる。 D^* は、「予知率-p 値 5 %を達成するための予知率」として定義され、この値が正であれば、前兆性が統計的に有意と認められる。また、(予知率-警報分率)で定義される実効予知率 (Nakatani, 2020) の単調増加関数になるので、この値が大きいほど、地震に前兆がつく割合が高いことになる。

1 (4) 火山

「火山」計画推進部会長 中道治久
(京都大学防災研究所)
副部会長 前野 深
(東京大学地震研究所)

火山の噴火災害を軽減するためには、火山噴火の発生の場所・規模・時期を予測することおよび火山噴火現象に対応する噴火災害の推移を予測することが重要である。またこれらの予測のためには、火山噴火現象の解明することも重要である。「火山」計画推進部会では、「火山活動の事象分岐の条件・論理を明らかにし、火山活動推移モデルを構築し、発災の原因である火山噴火を予測すること」を上位目標にすえ、低頻度で大規模な現象を含む火山現象の解明とモデル化、火山活動を支配する場の解明とモデル化、中長期的な火山活動の評価、観測手法の開発および体制の整備に関する研究を推進している。

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

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

長期間における火山現象とそれに伴う災害を正確に把握するためには、地質データ等を収集して調査・分析を行い、データベースを整備・拡充することが重要である。

東京大学地震研究所は、マグマの状態と噴火様式の関連性を明らかにするために、富士火山の爆発的噴火による噴出物の石基組織解析を行い、全岩および鉱物化学組成と石基組織との関係について調べている。令和2年度は御殿場岩屑なだれ以降の数百年継続した石基の斜長石量の急減やガラス量の急増を説明するマグマ供給系について検討し、深部マグマ溜まりから上昇したマグマが速い上昇速度を維持したまま噴火に至った可能性や、深部マグマで結晶分化が進行し少量のマグマでも噴出しやすい環境が実現していた可能性を指摘した(図1)。山体崩壊による荷重減少は、深部から上昇するマグマを浅部層でトラップされにくくし、また上昇の加速度を大きくすると解釈した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_02])。

富山大学は、本白根火砕丘群山頂域に見られる小火口群の火口近傍調査を行い、3つの小火口の活動年代を約1700年前、約700年、約2700年と決定した。また、白根火砕丘群の地質図を試作するとともに、涸釜火砕丘が約6000年前、湯釜火砕丘が約2000年前以降に活動したことを明らかにした。さらに、主要テフラの層序と年代、物質科学的データをもとに草津白根火山の完新世噴火履歴を整理し(図2)、これまでの成果について論文化した(富山大学[課題番号:TYM_01]、石崎・他、2020、亀谷・他、印刷中)。

産業技術総合研究所は、将来の噴火の可能性が高い活火山の中長期的活動評価と予測のため火山地質図作成を進めており、令和2年度は恵山火山の地質図を印刷段階としたほか、伊豆大島では海陸をつなぐための沿岸部水深400m程度までの範囲で精密海底地形地質調査を実施した。雌阿寒岳火山、日光白根火山、秋田焼山火山、御嶽火山においては、活動履歴解明のための噴火履歴調査を進めた。日本の火山データベースについては、

択捉島と富士山の完新世噴火イベントのデータ作成と公開を行い、重要火山の火口図作成を開始した（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST03〕）。

（２）低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

低頻度で大規模な火山噴火現象の発生履歴、規模等を解明するためには、史料・考古データ、地質データ等の分析を着実に進める必要がある。

東京大学地震研究所は、伊豆大島においてYシリーズ大規模噴火（Y1、Y2、Y4、Y6）堆積物の詳細なユニット区分を行い、層序毎の特徴、岩石鉱物化学組成・組織の変化を明らかにし、噴火様式や推移との関係を調べた。Y1やY4で見られる噴火後半での斑晶量増加や、噴出率・噴火様式と対応した石基組織の変化、密度など粒子物性の変化を明確にした。浅間山については18世紀天明噴火堆積物の地質調査、化学組成分析および岩石組織の解析を進めた。その結果、噴煙柱形成時よりも火砕流（吾妻火砕流）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を明らかにし、気泡数密度の変化と噴火様式の変化の関係について考察を進めた。霧島山では18世紀新燃岳享保噴火の基礎的な岩石学的情報の収集を進めた。また、13世紀御鉢噴火については新たな堆積物データを考慮して噴出量を推定した結果、総噴出量が従来の1.5～2倍まで増え、13世紀噴火が従来の推定よりも大規模な噴火の可能性を示した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_03〕）。

カルデラ噴火については、噴火準備段階からの活動の推移・履歴を把握するとともに、その推定精度を上げる手法の開発・改良を進める必要がある。

北海道大学は、大量のマグマの蓄積と噴火の準備過程の時間スケールを明らかにするために、ウラン系列放射非平衡を用いた物質科学的研究を進めている。令和2年度は、屈斜路カルデラを対象に、化学分析とU-Th放射非平衡分析を行った結果、予察的ではあるが、珪長質マグマの生成に3万年程度の時間を要していた可能性が明らかになった。また前年度に完成したU-Th放射非平衡の分析法について、白頭山のカルデラ噴出物への適用例を国際誌にて出版した（北海道大学〔課題番号：HKD_02〕、Kuritani et al., 2020）。

公募研究にて屈斜路カルデラ内の中島火山における全岩化学組成分析値が得られ、リサージュントドームやカルデラ内のオヤコツドームと同じ組成トレンドを示すことなど、屈斜路カルデラの活動における中島火山の位置付けが明らかになった。また、アトサヌプリ溶岩ドーム山頂部における野外調査によりテフラの詳細な分布域が明らかになったほか、リシリ溶岩ドームについてはテフラ層序が整理され、リシリ火砕流堆積物の詳細な分布域が明らかになった（公募研究、室蘭工業大学〔課題番号：KOB004〕）。

神戸大学は、鬼界カルデラにおいて調査・探査航海を実施し、長期海底観測機器の設置（図3）とピストンコアラーやドレッジによる試料採取を行った。これまでに取得した反射法地震探査及び長期海底地磁気観測のデータ解析と、堆積物・岩石試料の物質科学的解析を進めた。反射法地震探査データについては、各堆積物層の認定と空間分布の把握を進め、鬼界アカホヤ噴火噴出物と考えられる堆積層の面的広がりや総量を見積もった。また、ピストンコアに含まれる火山灰のガラス化学組成が鬼界アカホヤ噴火の火山灰の特徴と類似することを確認した（神戸大学〔課題番号：KOB001〕）。

(4) 火山現象の解明とモデル化

多様な火山現象を理解するためには、多項目の観測を行い、進行する火山現象を時空間的に定量化するとともに、火山噴出物の分析、マグマの物理・化学的な実験および数理モデルによる理論解析を行う必要がある。

東京大学地震研究所は、西之島にて衛星テレメータ観測を行い、2019年の噴火活動の推移を広帯域地震および空振観測にて捉え、活動の推移とともに地震波の卓越周波数が低周波数側にシフトしたことと振動軌跡の変化からマグマ供給系の変化および圧力源の移動を推定した(図4、大湊・渡邊, 2020)。また、火山の比較研究のための新たな観測手法の開発を進めており、その一環として吾妻山の麓から山頂近くまで敷設されている光ファイバーケーブルを用いたDAS(分散型音響計測システム)のデータから火山性地震の震源決定と浅部地盤構造の推定を行った。そして、火山性地震の震源決定への有効性と、コーダ波規格化法による地盤特性の推定から数100mスケールの溶岩流や火山地形の分布との一致を見いだした(図5、Nishimura et al., 2021)(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_07])。

東北大学大学院理学研究科は、霧島火山新燃岳2011年噴火の石質岩片サンプルを観察・分析し、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、ナノライトの晶出により石基結晶度が5日~45日で9.1 vol%上昇してメルト粘性が増加し、気泡過剰圧が破碎閾値を超えることで溶岩ドームにおける爆発性の獲得が説明できるとした(図6、Mujin and Nakamura, 2020)(東北大学大学院理学研究科[課題番号: THK_04])。

産業技術総合研究所は、桜島火山におけるMulti-GASを用いた火山ガス組成の連続観測、セナ機による繰り返し観測の結果を解析し、火山ガス組成の特徴と活動推移に伴う組成の変化を明らかにした。そして、桜島の火山ガスのCO₂/S比はほぼ一定であるのに対し、SO₂/H₂S比は1-1000と大きく変動し、比が30を超える場合は火山灰放出時に限って観測され、比が1-30となる変動は爆発頻度と相関があることが分かった(産業技術総合研究所[課題番号: AIST06]、Shinohara et al., 2020)。

(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

火山地域において、地震波速度・減衰構造や比抵抗構造等を明らかにすることを通じて、火山活動を支配する場のモデル化を進める必要がある。

海洋研究開発機構と神戸大学は、海洋研究開発機構の研究船「かいらい」によるKR20-11航海により、鬼界海底カルデラを対象に、航走調査と長期海底観測機器の設置、試料採取を行った(図3)(海洋研究開発機構[課題番号: JAMS03]、神戸大学[課題番号: KOBE01]、かいらいKR20-11次研究航海報告, 2020)。

東北大学大学院理学研究科は、過去の火山人工地震探査のデータを用いて多重等方散乱モデルを仮定してP-S散乱係数の推定を行った。そして、阿蘇山、霧島山、磐梯山、岩手山のいずれの火山においても4-8Hz帯と8-16Hz帯においてP-S散乱係数は約0.7 km⁻¹と推定された(図7)(東北大学大学院理学研究科[課題番号: THK_08])。

東京工業大学は、草津白根火山の深さ10 km程度までの3次元比抵抗構造を明らかにす

るために、草津白根火山から半径10 kmの領域で広帯域MT観測を実施した。そして、3次元比抵抗構造モデルの構築を行った結果、深部マグマ溜まりからマグマ性流体の供給路に相当すると思われる低比抵抗構造を見出した(図8)(東京工業大学[課題番号:TIT_03]、Tseng et al., 2020)。

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

火山噴火の長期活動については、火山ごとに噴火の特徴と履歴を明らかにするとともに、年代測定精度の向上や階段ダイアグラムの高精度化、物質科学的解析に基づいて評価を行う必要がある。

山梨県富士山科学研究所は、山中湖の表層堆積物の放射性炭素年代測定を行い、全有機炭素が表層水中の溶存無機炭素とよく一致する年代を示すこと、リザーバー年代の補正により全有機炭素が堆積物の年代推定に利用可能であることを明らかにした。山中湖南方で実施したトレンチ調査では、過去約4000年間のテフラ層を少なくとも14枚見出し、東麓から北麓までのテフラ層の連続性を確認した。また、富士山麓の古地磁気方位データを蓄積し、ABICを用いて紀元前1000年から西暦1100年までの古地磁気永年変化曲線を作成した(図9)。さらに、宝永山を構成する岩石や赤岩凝灰角礫岩層の全岩化学組成、古地磁気方位がともに1707年宝永噴出物と一致し、宝永山が宝永噴出物の堆積により形成されたことを明らかにした(山梨県富士山科学研究所[課題番号:MFRI_01])。

東京大学地震研究所は、伊豆大島、浅間山、霧島山において、過去数100年の噴火を対象とした噴出物の地質調査を行い、テフラ層の区分や特徴の明確化と、岩石鉱物化学組成・組織など物質科学的情報の収集を進めた(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_03])。

富山大学は草津白根火山本白根及び白根火砕丘群において地表調査とトレンチ調査を行い、火口の形成年代や噴火様式等を明らかにした(富山大学[課題番号:TYM_01])。

産業技術総合研究所は、雌阿寒岳及び秋田焼山では火口周辺域を含むトレンチ調査を、御嶽山及び日光白根山では地表踏査を実施し、噴火履歴調査を進めた。また、高分解能の噴火履歴を得るために、白山火山及び御嶽火山の岩石試料を対象としたK-Ar及びAr/Ar年代データの比較研究と、10万年前より若い火山噴出物の年代測定を実施した(産業技術総合研究所[課題番号:AIST03])。

イ. モニタリングによる火山活動の評価

火山活動について数ヶ月から数年の中期的な時間スケールについては、多項目の地球物理学的・地球化学的なモニタリングにより火山の状態を把握することで、火山現象と噴火の関係を定量的に明らかにする必要がある。

北海道大学と京都大学大学院理学研究科は、各種観測データに基づき数年から数10年スケールの中期的な火山活動評価(特にunrest事象の定量的評価)を行うにあたり、ニュージーランドで開発された火山活発化指数(Volcanic Unrest Index)を日本の火山に適用するための検討をし、十勝岳のVUI毎月値を1970年から2019年について算出した(橋本・

他、2020、北海道大学〔課題番号：HKD_04〕、京都大学大学院理学研究科〔課題番号：KUS_02〕）。

北海道大学は、十勝岳、蔵王山、吾妻山、草津白根山、伊豆大島、焼岳にて全磁力観測を行った（北海道大学〔課題番号：HKD_04〕）。

京都大学大学院理学研究科は、北海道駒ヶ岳、有珠山、樽前山、十勝岳、雌阿寒岳、吾妻山、焼岳、御嶽山、阿蘇山、九重山、口永良部島において地震および地殻変動の連続観測を実施した。十勝岳の観測網（青山・他、2020）によって得られたデータを解析した結果、2020年9月14日の傾斜変動に伴って観測された微動の振幅比から震源が浅くなったことが示唆された（図10）。また、機械学習による微小地震検知アルゴリズムを開発して御嶽山の山頂域試験観測点と定常観測点のデータに適用して微小地震の自動検知に成功した（Maeda et al., 2021）（京都大学大学院理学研究科〔課題番号：KUS_02〕）。

東京大学大学院理学系研究科は、簡易トラバース装置を用いて薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島の二酸化硫黄放出率の観測を行い、2020年に噴火活動が活発化した諏訪之瀬島において二酸化硫黄放出率が 1000 ± 500 ton/dayであり、放出率が高い時期と低い時期があるが、爆発回数や地震活動との関係は明確でないことが分かった（東京大学大学院理学系研究科〔課題番号：UTS_06〕）。

国土地理院は、GNSSデータに対して時間依存インバージョンの手法を草津白根山、浅間山、伊豆大島、桜島、霧島山に適用し、マグマ溜まりの時間変化を推定した。そして、桜島と霧島の統合解析により桜島と始良カルデラでの体積膨張、霧島での2018年噴火前・噴火時・噴火後の膨張・収縮・膨張がそれぞれ推定された（図11）（国土地理院〔課題番号：GSI_03〕）。

気象庁は、2020年4月からの焼岳付近の群発地震時に異常湧出した焼岳山麓の高温泉の化学組成と安定同位体比の分析を行い、高温泉の異常湧出は焼岳の火山活動と直接的な関係はないことを明らかにした（気象庁〔課題番号：JMA_05〕、Yaguchi, 2020）。

（5）火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

噴火事象系統樹をさらに発展させ、火山噴火に先行する現象、噴火発生、噴火規模や様式の時間変化、終息までを一連の現象として捉えた火山活動推移モデルを構築する必要がある。

京都大学防災研究所は、インドネシアの火山を対象として研究を進めており、2020年8月に噴火したシナブン火山と2021年1月に噴火したメラピ火山について水蒸気噴火からマグマ噴火に至るまでの10年を超える期間における活動推移を、主に地震活動と地盤変動に着目してまとめた。メラピ火山におけるマグマの貫入速度と噴火規模および様式との関係は、水蒸気噴火の場合は検出限界未満、 $3000 \sim 4000$ m³/dayおよび $380,000$ m³/dayの場合は溶岩ドーム形成噴火、 $3,160,000$ m³/dayの場合はプリニー式噴火に対応していることが分かった（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI06〕）。

京都大学防災研究所は、桜島火山を対象に地震、GNSS、伸縮、傾斜、ガスの連続観測ならびに火山灰のサンプリング調査を行った。Koike and Nakamichi (2021) は2015年8月15日に発生した群発火山構造的な地震の震源とメカニズムの時空間変化から、地殻の岩石強度が温度および封圧の関数にて浅部から深部へ増大することを考慮してダイクの膨

張過程と地震発生機構との関係を議論した(図12)。Hotta and Iguchi (2021) は、2017年11月13日に発生した南岳爆発に伴う傾斜・ひずみ変化を山頂付近の深さが異なる二つの圧力源と、桜島北部の収縮圧力源にて説明した(図13)。2020年に水準測量と相対重力測定を行い、過去15年の地盤上下変動と重力変化から、桜島中央部において有意な地盤変動はなく、桜島中央部の浅部の質量増加が示唆された(風間・他, 2020、大柳・他, 2020) (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI07])。

東北大学大学院理学研究科は、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と噴火事象系統樹の分岐判断指標の作成を進めた。その一環として、大地震の発生による噴火の誘発について全世界データの系統的解析を行い、大地震の発生による膨張域にある火山噴火活動が数年間において2～3倍程度高まることが分かった(西村・他, 2020)。また、火山性地震の活動度を系統的・定量的に評価するためにETASモデルを震源カタログデータに適用した(前田・他, 2020) (東北大学大学院理学研究科 [課題番号: THK_11])。

公募研究では、大雪山の御鉢平カルデラの山頂部と山麓の堆積物の古地磁気方位測定、層序解析、噴出物分析を行った。その結果、北東山麓と南西山麓に分布する火砕流堆積物と山頂部の層雲峡部層は古地磁気方位が一致し、特徴的に深成岩片を含むことから同じ噴火堆積物であるが、北一北東山麓の火砕流堆積物は古地磁気方位が山頂堆積物と一致しないため御鉢平カルデラ起源ではないことが示唆された(公募研究, 北海道教育大学 [課題番号: KOB006]、Yasuda et al., 2020)。

公募研究では、蔵王火山の御釜の噴火活動について、7枚のテフラ層の年代を決定し、テフラ層の種類の変化を解明した(公募研究, 山形大学 [課題番号: KOB015]、Takebe et al., 2021)。

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

噴火発生直後に、火山噴出物などの災害誘因を高精度かつ即時的に予測する手法を開発することは重要である。

東京大学地震研究所は、堆積物解析手法の高度化(噴出物の迅速なマッピング、噴出量・噴出率の高精度推定)と、噴出物時系列解析・分析手法の高度化(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活動的火山で実施している。霧島新燃岳については前年度から引き続き噴出物の解析を進め、2011年や2018年噴火の解析結果の噴火現象把握や予測への活用について検討するとともに、18世紀享保噴火も踏まえた噴火事象系統樹の作成を進めた。また、阿蘇、諏訪之瀬島、榛名、富士山等の火山においては噴出物の構成物、組成、組織の時系列変化を明らかにする研究を進めた。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、気象研究所や海洋研究開発機構と協力して実施した(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_17])。

5. 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

火山災害の軽減するためには、火山活動の推移を把握し、必要に応じて発生しうる火山災害への対策を講じる必要がある。

気象庁は、2回の火山噴火予知連絡会本会議を開催し、全国の火山活動の状況についての検討を行った。また、本会議とは別に火山活動の検討が必要とされた火山では、部会を設置して集中検討体制を確保することとしており、口永良部島部会を2020年4月と12月の2回、霧島山部会と草津白根山部会を12月にそれぞれ開催し、火山活動の検討を行った。さらに、2021年3月に火山活動評価検討会を開催し、今後の活火山の選定作業の進め方等について検討を行った（気象庁〔課題番号：JMA_08〕）。

(3) 研究基盤の開発・整備

火山現象の解明と予測のための研究を進め、災害関連情報の迅速な発信や、火山活動評価の高度化をするためには、観測基盤を維持・整備するとともに、必要に応じて観測体制の強化をする必要がある。

気象庁は、草津白根山に埋設型の地震計・傾斜計および空振計を整備するとともに、全国3箇所に火山監視カメラを増設した。また、GNSS繰り返し測定や熱の機動観測を実施し、口永良部島、阿蘇山、桜島などにおいて二酸化硫黄放出率観測を実施した（気象庁〔課題番号：JMA_12〕）。

東京大学地震研究所は、光計測技術を用いた地震計と重力計を開発して光ファイバで接続し、地下深部や火山近傍に観測網を構築するための手法の確立を目指しており、小型絶対重力計を開発して蔵王火山に設置して観測を実施するとともに、さらなる小型化を進めた（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_20〕、Araya et al., 2020、新谷, 2020a, 2020b）。

東京大学地震研究所は、2019年度に開発した超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムを桜島火山に設置して観測を開始し、従来よりも短時間に高精細透視画像を取得することに成功した。また、機械学習による噴火判定プログラムを開発して透視画像データに適用することにより、学習データ期間外のデータにおいて7割を超える正答率を得た（図14、Nomura et al., 2020）（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_21〕）。

海上保安庁は海域火山（薩摩硫黄島、口永良部島、口之島、諏訪之瀬島、横当島、西之島、南硫黄島、福德岡ノ場、硫黄島）の定期巡回監視を実施した。さらに、西之島については監視体制を強化し、監視観測を継続している（図15）。また、海域火山基礎情報調査「伊豆東部火山群（手石海丘）」を実施した（海上保安庁〔課題番号：JCG_04〕）。

山梨県富士山科学研究所は、富士山を対象に井戸および湧水における水位および水質観測と広域の重力観測を実施した。その一環として、により富士北麓地域の水理地質構造の概要がとりまとめられた（内山, 2020）。また、山梨県富士山科学研究所内基準点の国土地理院による1等重力点としての運用が開始され、同点における連続重力観測と5合目における繰り返し重力測定が行われた（山梨県富士山科学研究所〔課題番号：MFRI02〕）。

これまでの課題と今後の展望

「火山」計画推進部会は、41の研究計画課題に加えて、公募研究7課題の計48課題をかかえる地震火山観測研究計画における最大の計画推進部会（以下、部会）である。そのため、課題間の連携やそれぞれの課題における研究の深化のための取り組みも部会の役割として重要である。令和2年度は部会に関係する総合研究グループの研究集会を開催した。桜島大規模噴火総合研究グループ研究集会を兼ねて桜島火山観測所60周年記念研究集会を11月10日・11日に鹿児島市で開催したほか、東北大学大学院理学研究科の研究課題〔課題番号：THK_11〕と高リスク小規模火山噴火総合研究グループの合同研究集会を1月12日・15日にオンラインで開催した。そして、部会全体の研究集会を3月3日・4日にオンラインで開催した。このように、各課題は部会と総合研究グループの両方で研究の議論を進める形が定着したと言える。

過去10年間の計画ならびに現計画における観測研究では多項目観測を中心に据えて実施しており、現計画では観測から得られる多項目パラメータによる火山活動推移モデルの構築に軸足を置いている。部会のそれぞれの課題における研究の深化に伴い、個々の課題から出た成果と関連する他課題の成果の比較を通じて、火山活動の状態や分岐・遷移を表すパラメータ間の相互関係が見えてきたのが令和2年度の成果の特徴である。

東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_02〕の成果から、富士山御殿場岩屑なだれの時期前後で噴出物の石基組織に顕著な変化が観察されているが、この変化の原因として岩屑なだれ（山体崩壊）の発生により地殻への荷重が急減し、マグマが浮力を獲得した可能性が指摘されている。これは組成比という物質化学パラメータが荷重という火山構造と関係することを示唆する。また、東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_03〕の成果から、伊豆大島の中小規模噴火のマグマ中の斑晶斜長石の割合が、噴出量と逆相関の関係をもつことが見出された。これは斜長石斑晶量という物質化学パラメータが噴出量という物理量と関係していることを示唆している。京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI07〕の成果から、桜島において2017年終わり以降の南岳噴火活動期は、火山灰量は少ないが、二酸化硫黄放出率は高い状態にあり、その間の桜島中央部の地盤変動はほとんど変化していないにもかかわらず重力が増加していることが分かった。これはマグマからの脱ガスの進行と脱ガス後のマグマ密度増加を示唆しており、東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_21〕のミュオグラフィからイメージされた2019年から2020年の南岳火口直下における密度増加がこれに対応していると考えられる。このように火山灰量や重力変化量やガス放出率といった物理量と、密度分布といった火山構造との関係が見えてきた。

今後は、観測から得られる物理パラメータ、噴出物分析から得られる物質化学パラメータ、そして火山構造の相互の関係についての議論をさらに深め、火山活動の状態や分岐・遷移の理解、火山活動推移モデル構築に反映させていきたい。

この一年においては顕著な火山災害は無かったが、これまでの活動度を考慮すれば今期の計画中に国内の火山で災害をおよぼす噴火はあると考えるのが自然である。そのような緊急性の高い噴火が発生した場合に、集中的に調査・観測を実施することができる研究体制を強化するために、本部会は地震・火山噴火予知研究協議会企画部・戦略室と連携し、特別研究促進費による研究の立ち上げと実施を主導する。同時に、本部会は次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの火山噴火緊急観測部会と連携し、内閣府の火山

防災に関わる調査企画委員会が検討してきた研究の方向性を踏まえた現地調査・観測の実施に貢献する。令和3年度は、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）の折り返し点であり、中間評価を受けるとともに次期計画の立案に着手すべき時期である。また、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの後半5年間の始まりでもあり、こちらについても、次期プロジェクトを見据える時期となっている。

成果リスト

- 青山 裕・田中 良・橋本武志・村上 亮・成田翔平, 2020, 十勝岳の火口近傍における力学観測：序報, 北海道大学地球物理学研究報告, 83, 25-48, doi:10.14943/gbhu.83.25.
- Araya, A., K. Kasai, M. Yoshida, M. Nakazawa and T. Tsubokawa, 2020, Evaluation of systematic errors in the compact absolute gravimeter TAG-1 for network monitoring of volcanic activities, International Association of Geodesy Symposia, Springer, Berlin-Heidelberg, doi:10.1007/1345_2020_107.
- 新谷昌人, 2020, 光ファイバーネットワークを用いた火山活動監視のための重力計測技術に関する研究, 東北大学電気通信研究所研究活動報告, 26, 205-207.
- 新谷昌人, 2020, 重力加速度計測による地殻変動・火山活動観測技術, 電子情報通信学会誌, 103, 9, 938-944.
- Conway, C.E., Chamberlain, K.J., Harigane, Y., Morgan, D.J., Wilson, and C.J.N., 2020, Rapid assembly of high-Mg andesites and dacites by magma mixing at a continental arc stratovolcano. *Geology*, 48(10), doi:10.1130/G47614.1.
- 橋本武志・青山 裕・田中 良・大倉敬宏・森 俊哉, 2020, 十勝岳の火山活発化指数(VUI)基準の試作, 日本火山学会2020年度秋季大会, 02-20.
- 石崎泰男・濁川 暁・亀谷伸子・吉本充宏・寺田暁彦, 2020, 草津白根火山, 本白根火砕丘群の地質と形成史, 地質学雑誌, 126(9), 473-491, doi:10.5575/geosoc.2020.0022.
- かいいいKR20-11次研究航海報告, 2020, On Board Cruise Report.
- 亀谷伸子・石崎泰男・勝岡菜々子・吉本充宏・寺田暁彦, 草津白根火山, 白根火砕丘群南麓の白根南火口列と弓池マールの噴火様式と活動年代, 火山, 66(1), 1-19, doi:10.18940/kazan.66.1_1.
- 風間卓仁・山本圭吾・大柳 諒・岡田和見・大島弘光・井口正人, 2020, 桜島火山における繰り返し相対重力測定(2019年5月~2020年3月), 京都大学防災研究所年報, 63B, 108-117.
- Koike, M. and H. Nakamichi, 2021, Dike inflation process beneath Sakurajima volcano, Japan, during the earthquake swarm of August 15, 2015, *Front. Earth Sci.* 8, 600223, doi:10.3389/feart.2020.600223.
- Kuritani, T., Nakagawa, M., Nishimoto, J., Yokoyama, T. and Miyamoto, T., 2020, Magma plumbing system for the Millennium Eruption at Changbaishan volcano, China: constraints from whole-rock U-Th disequilibrium, *Lithos*, 366-367, 105564, doi:10.1016/j.lithos.2020.105564.
- 前田裕太, 2020, 気象庁一元化震源とETASモデルによる火山活動定量化の試み, JpGU-AGU Joint Meeting, SVC45-P37.

- Maeda, Y., Y. Yamanaka, T. Ito and S. Horikawa, 2021, Machine learning based detection of volcano seismicity using the spatial pattern of amplitudes, *Geophys. J. Int.*, 225, 416-444, doi:10.1093/gji/ggaa593.
- 前野深・吉本充宏, 2020, 西之島噴火による地形・地質・噴出物の特徴とその変化, *小笠原研究*, 46, 37-51.
- Mujin, M. and M. Nakamura, 2020, Late-stage groundmass differentiation as a record of magma stagnation, fragmentation, and rewelding, *Bull. Volcanol.*, 82, 48, doi:10.1007/s00445-020-01389-1.
- 西村太志, 2020, 大地震による火山噴火の誘発の要因, *日本火山学会2020年秋季大会*, 02-18.
- Nishimura, T., K., Emoto, H. Nakahara, S. Miura, M. Yamamoto, S. Sugimura, A. Ishikawa and T. Kimura, 2021, Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acousting sensing system, *Sci. Rep.*, 11, 6319, doi:10.1038/s41598-021-85621-8.
- Nomura, Y., M. Nemoto, N. Hayashi, S. Hanaoka, M. Murata, T. Yoshikawa, Y. Masutani, E. Maeda, O. Abe and H.K.M. Tanaka, 2020, Pilot study of eruption forecasting with muography using conventional neural network, *Scientific Reports* 10, 5272, doi:10.1038/s41598-020-62342-y.
- Ohashi, M., Ichihara, M., Maeno, F., Kennedy, B. and Gravley, D., 2020, Quantitative measurement of bubble textures in pumice clasts using a digital stereo microscope with low-angled ring illumination, *Earth Planet. Space*, 72, 185, doi:10.1186/s40623-020-01320-0.
- 及川輝樹・谷健一郎, 2020, 伊豆諸島, 利島火山の新期活動の年代:¹⁴C年代値と地形判読を基に, *火山*, 65, 83-87, doi:10.18940/kazan.65.3_83.
- 大湊隆雄・渡邊篤志, 2020, 2019年西之島における地震・空振観測, *小笠原研究*, 46, 53-68.
- 大柳 諒・風間卓仁・山本圭吾・井口正人, 2020, 桜島火山における長期的重力増加: 1975年～1999年, *日本火山学会2020年度秋季大会*, 02-14.
- 小沢慎三郎・矢来博司, 2020, 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(第10年次), *国土地理院調査研究年報*.
- Shinohara, H., R. Kazahaya, T. Ohminato, T. Kaneko, U. Tsunogai and M. Morita, 2020, Variation of volcanic gas composition at a poorly accessible volcano: Sakurajima, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 407, doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.107098.
- Tajima, Y., Nakada, S., Maeno, F., Huruzono, T., Takahashi, M., Inamura, A., Matsushima, T., Nagai, M. and Funasaki, J., 2020, Shallow magmatic hydrothermal eruption in April 2018 on Ebinokogen Ioyama Volcano in Kirishima Volcano Group, Kyushu, Japan, *Geosciences*, 10, 183, doi:10.3390/geosciences10050183.
- Takebe, M., Y. Nishi and M. Ban, 2021, Evolution of the calc-alkaline magma feeding system of the Komakusadaira pyroclasts in Zao Volcano, NE Japan, *Bull. Volcanol.*, 83, 12, doi:10.1007/s00445-020-01430-3.
- Tseng, K-H., Y. Ogawa, Nurhasan, S.B. Tank, N. Ujihara, Y. Honkura, A. Terada, Y. Usui and W. Kanda, 2020, Anatomy of active volcanic edifice at the Kusatsu-Shirane

volcano, Japan, by magnetotellurics: hydrothermal implications for volcanic unrests, Earth Planet. Space, 72, 161, doi:10.1186/s40623-020-01283-2.

内山 高, 2020, 富士火山北麓および富士五湖の水文地質構造と水文学的特徴, 地学雑誌 129, 697-724, doi:10.5026/jgeography.129.697.

Yaguchi, M., 2020, Abnormal discharge of high-temperature hot spring water observed at the abandoned well in the Okuhida hot spring area during the earthquake swarm occurred at Gifu-Nagano district, central Japan, Journal of Hot Spring Sciences, 70, 70-79.

山元孝広・中野 俊・石塚吉浩・高田 亮, 2020, 新期富士火山降下火砕物の再記載と噴出量の見積もり, 地質調査研究報告, 71, 517-580.

Yasuda, Y., E. Sato and K. Suzuki-Kamata, 2020, Paleomagnetic constraints on a time-stratigraphic framework for the evolution of Ohachidaira volcano and the summit caldera, central Hokkaido, Japan, Bull. Volcanol., 82, 71, doi:10.1007/s00445-020-01403-6.

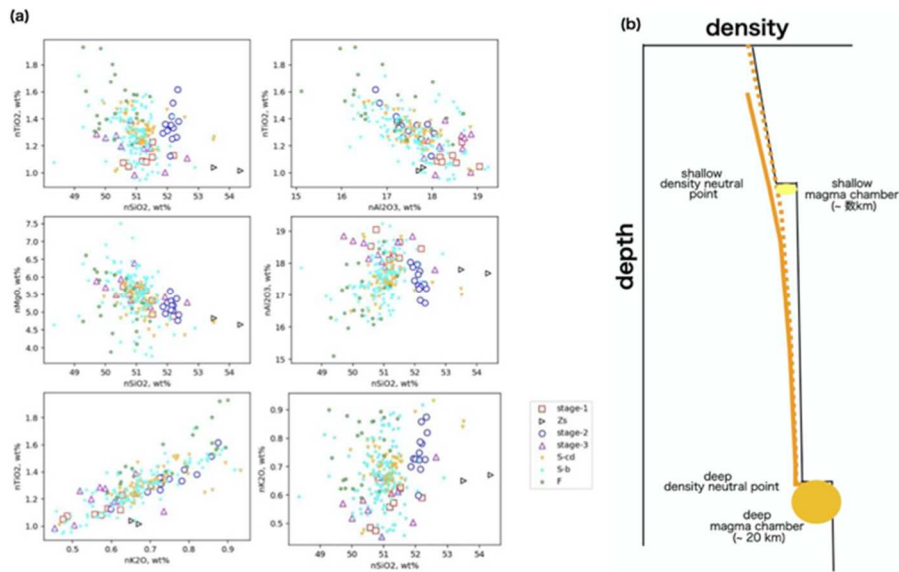


図1. 富士山における全岩化学組成と密度成層から見たマグマ供給系の模式図（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_02]）

a：全岩化学組成（F：富士宮期，S-b：須走b期，S-cd：須走cおよびd期，Zs：砂沢噴火）。

b：密度成層から見たマグマ供給系の模式図。黒線は地殻と山体構成物の密度、橙色破線は深部から上昇するマグマの密度変化を示す。表層荷重が減少すると橙色破線から橙色実線のように上昇するマグマの密度は変化する。

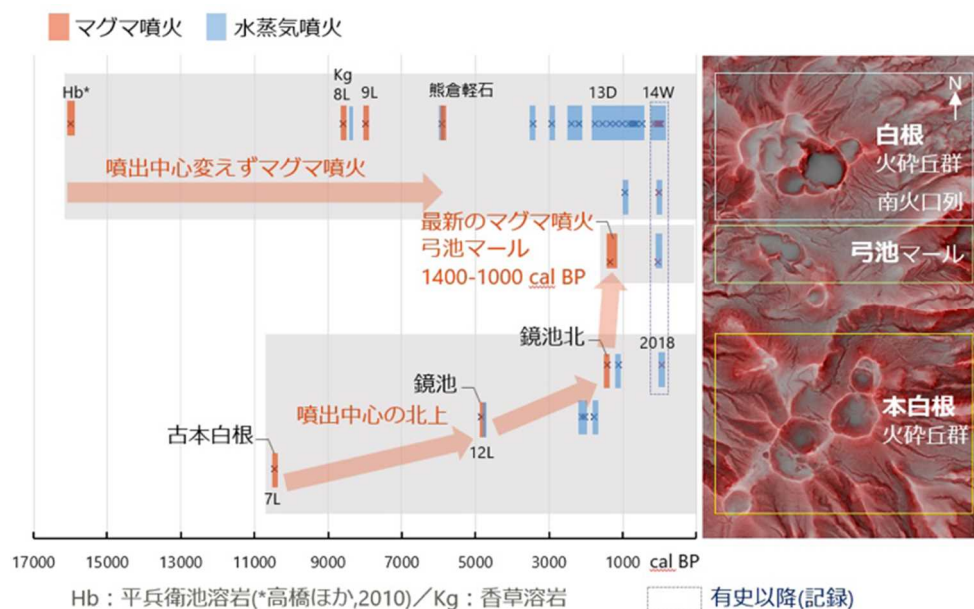


図2. テフラ層序から見た草津白根火山の完新世噴火履歴のまとめ（富山大学 [課題番号：TYM_01]）

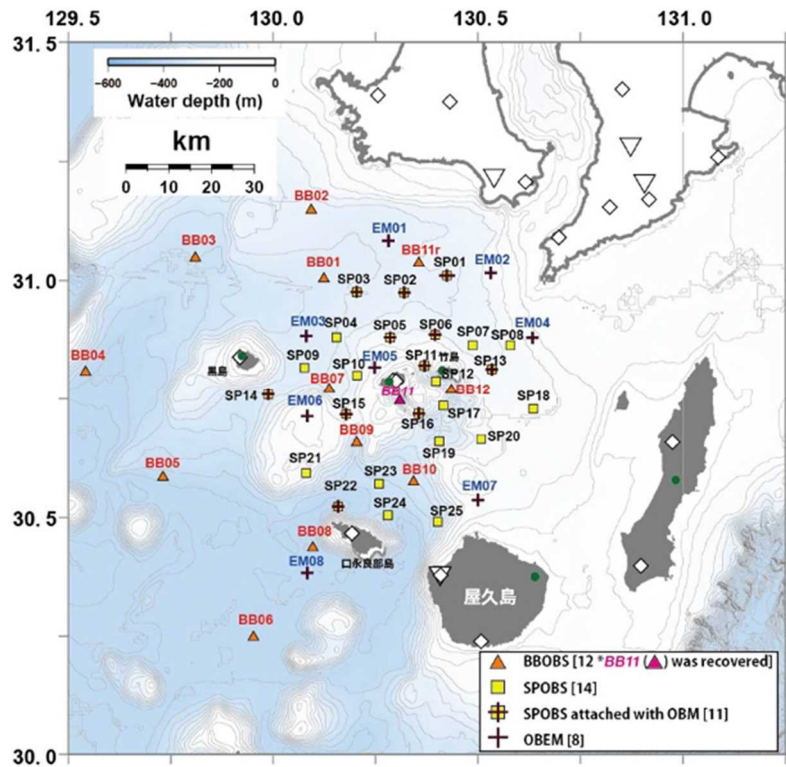


図 3. 広帯域海底地震計(BBOBS)・海底電位差磁力計 (OBEM) ・海底磁力計(OBM) の設置地点 (神戸大学 [課題番号: KOBE01])

かいいいKR20-11次研究航海報告 (2020) On Board Cruise Reportにもとづく。同航海で設置された海洋研究開発機構所有の機器も示されている。

西之島2019-2020噴火時の、粒子軌道・卓越周波数の時間変化

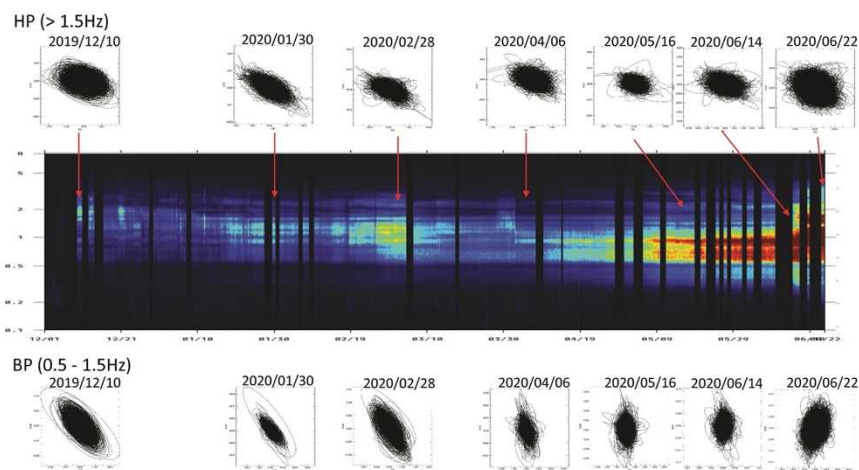


図 4. 西之島の地震計で得られたランニングスペクトルと粒子軌道 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_07]、大湊・渡邊, 2020)

- 1 段目 : 1.5 Hz のハイパスフィルタを適用した場合の粒子軌道
- 2 段目 : ランニングスペクトル
- 3 段目 : 0.5-1.5 Hz のバンドパスフィルタを適用した場合の粒子軌道

光ファイバーケーブルとDAS(分散型音響計測システム)による
火山性地震の震源決定

光ファイバーケーブルに沿った近接測定点の着信時差と振幅分布を用いて吾妻山の火山性地震6個の震源決定を行った。
P波、S波の着信時により決められている震源とよい一致を示す。

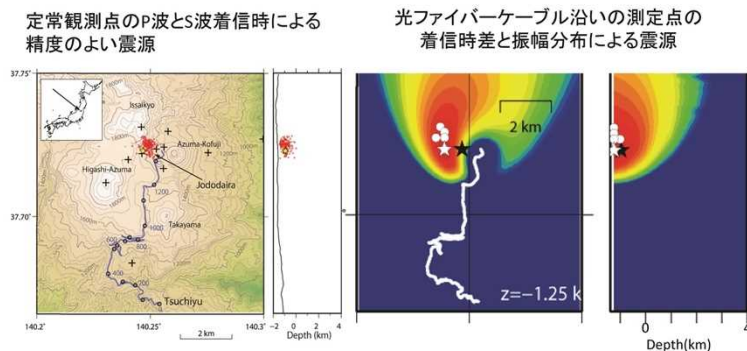


図5. 光ファイバーとDASによる火山性地震の震源決定 (東京大学地震研究所[課題番号:ERI_07]、Nishimura et al., 2021)

左: P波、S波の読み取り値を用いた従来手法で得られた震源 (赤点)
右: 光ファイバーケーブルのデータによる震源

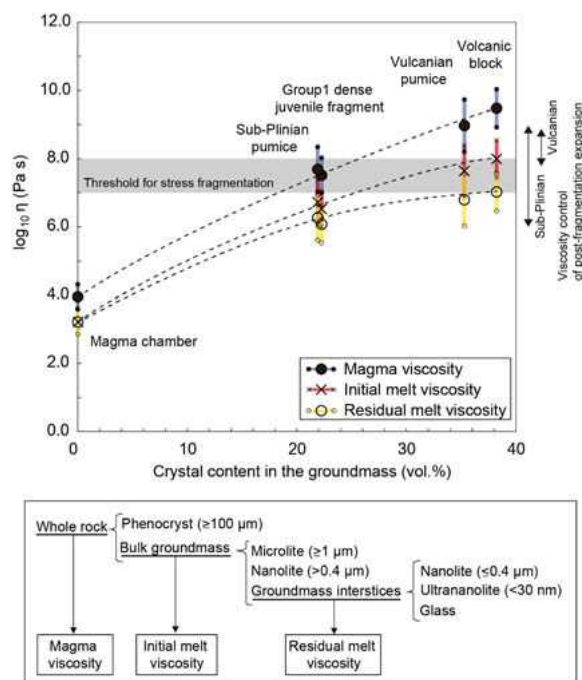


図6. 結晶量と粘性の関係 (上段) および石基ナノライトの新燃岳マグマの粘性上昇模式図 (下段) (東北大学大学院理学研究科[課題番号:THK_04]、Mujin and Nakamura, 2020)

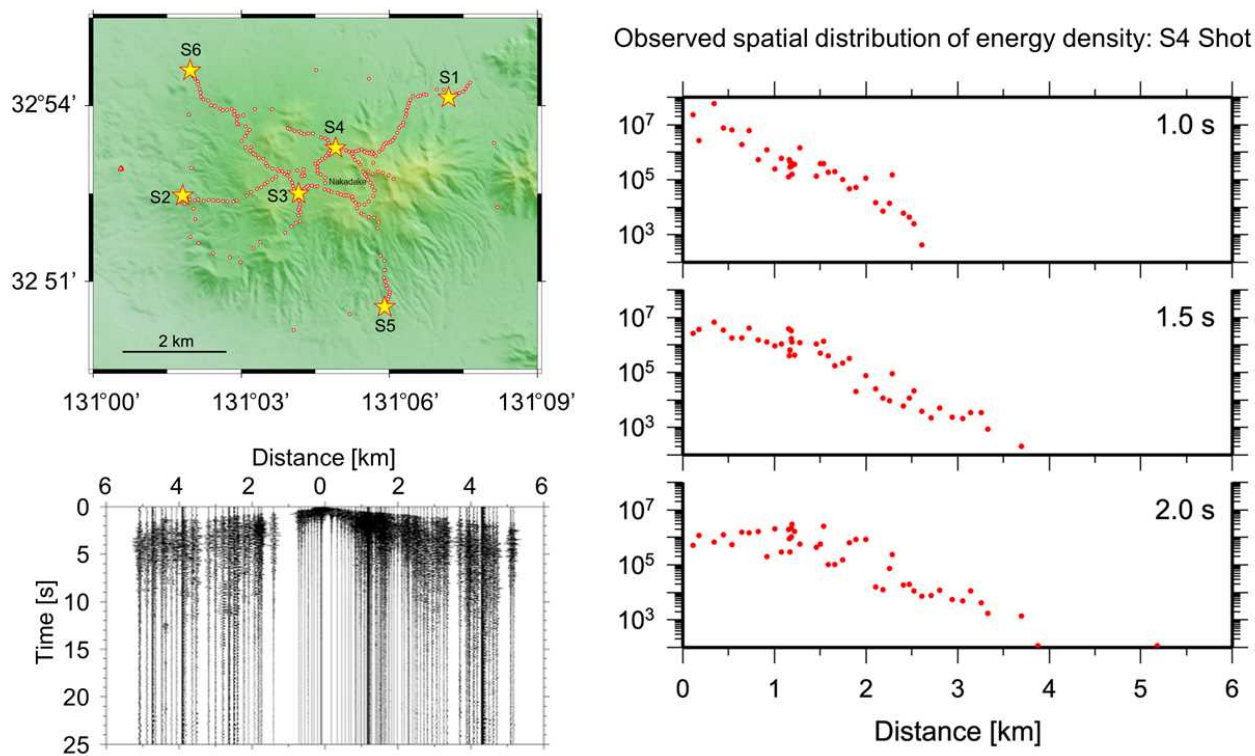


図7. 阿蘇山における人工地震火山体構造探査記録を用いた変換散乱係数推定結果（東北大学大学院理学研究科[課題番号:THK_08]）

左図（上段）：観測点（赤丸）と発破点（星印）の分布

左図（下段）：S4発破のペーストアップ記録

右図：各時刻におけるエネルギー密度空間分布（S4発破）

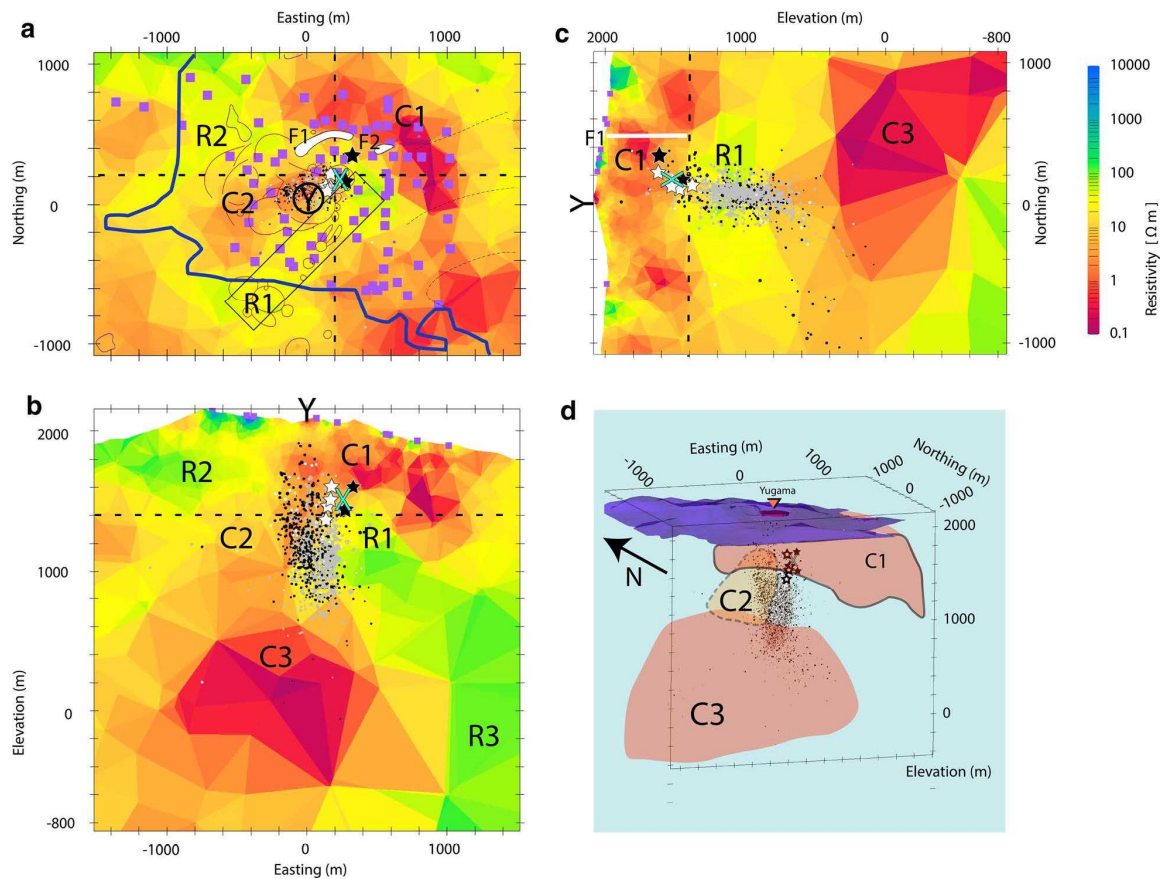


図 8. 草津白根火山の比抵抗構造 (東京工業大学[課題番号: TIT_03])

- a: 標高1400 mの水平断面における比抵抗構造
- b: 東西断面 (図aの横の破線) における比抵抗構造
- c: 南北断面 (図aの縦の破線) における比抵抗構造
- d: 比抵抗構造に見られる低比抵抗体の3次元表示

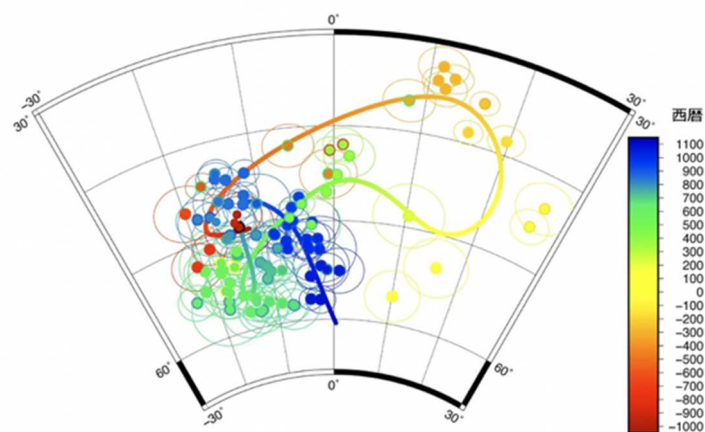


図 9. 富士山の古地磁気方位測定結果と古地磁気永年変化曲線 (山梨県富士山科学研究所 [課題番号: MFRI01])

過去1万年に噴火したと推定されている火山噴出物を176地点で採取・分析した111データに基づきABICが最小となるような曲線を描画したもの。

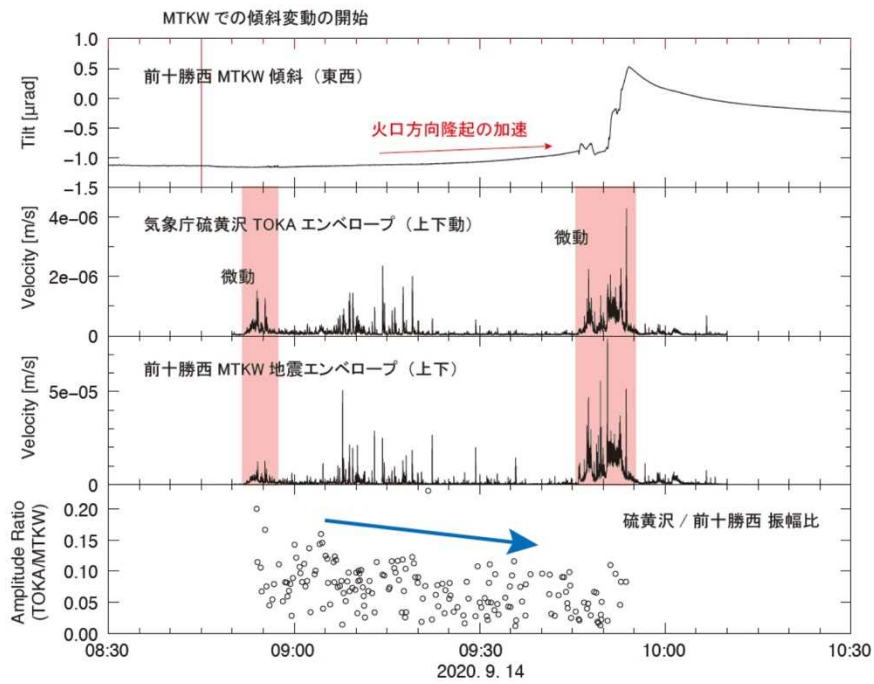


図10. 9月14日の傾斜変動イベント（京都大学大学院理学研究科[課題番号：KUS_02]）

- 1 段目：北大前十勝西観測点で得られた傾斜東西動
- 2 段目：気象庁硫黄沢（山麓）の地震波形高周波エンベロープ
- 3 段目：前十勝西（火口近傍）の地震波形高周波エンベロープ

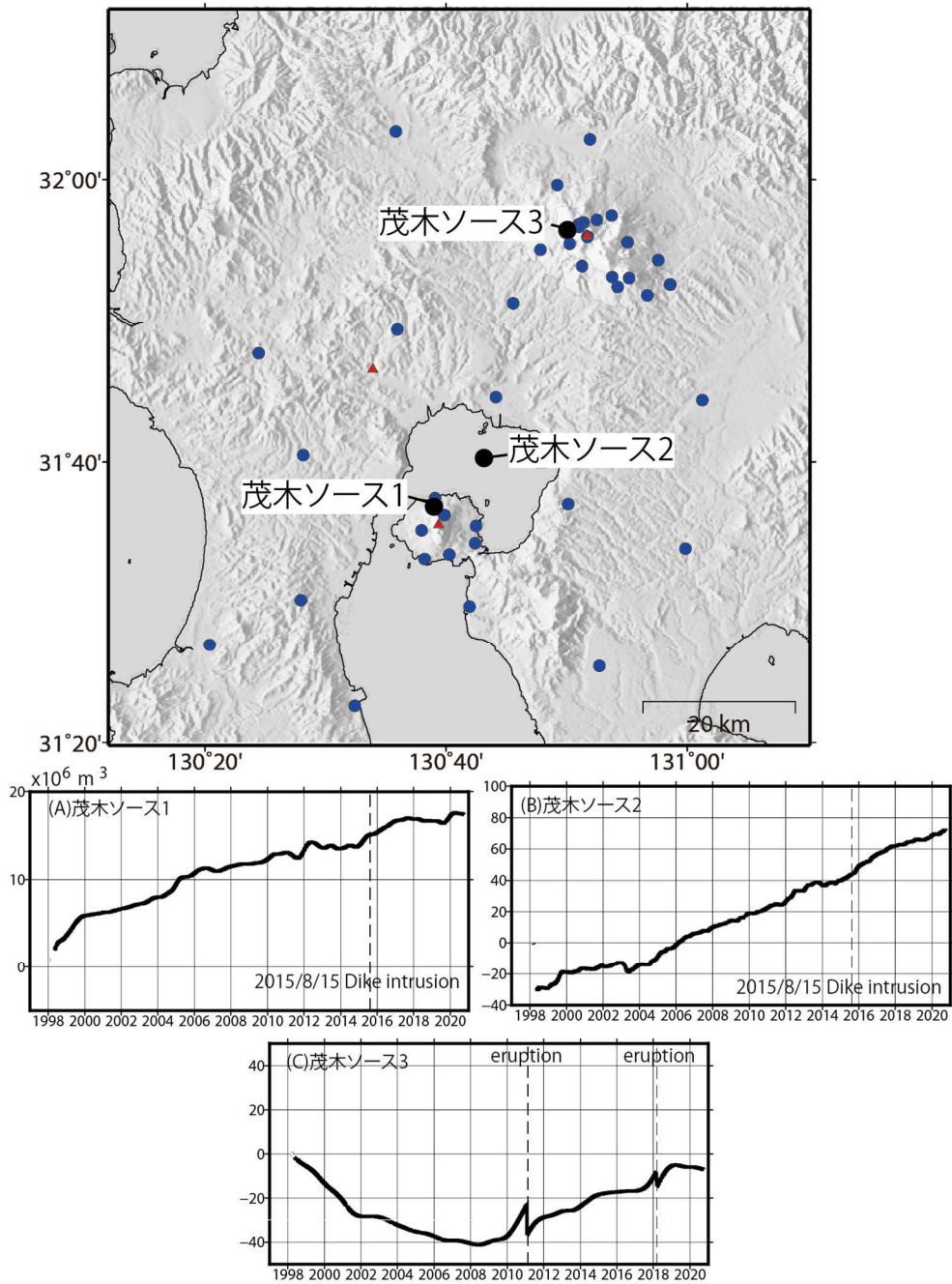


図11. 霧島山と桜島の配置図と茂木ソースの体積変化（国土地理院[課題番号：GSI_03]）
 上段：霧島山と桜島の配置と茂木ソースの位置
 下段：茂木ソースの体積変化。（A）桜島直下、（B）始良カルデラ直下、（C）霧島山直下

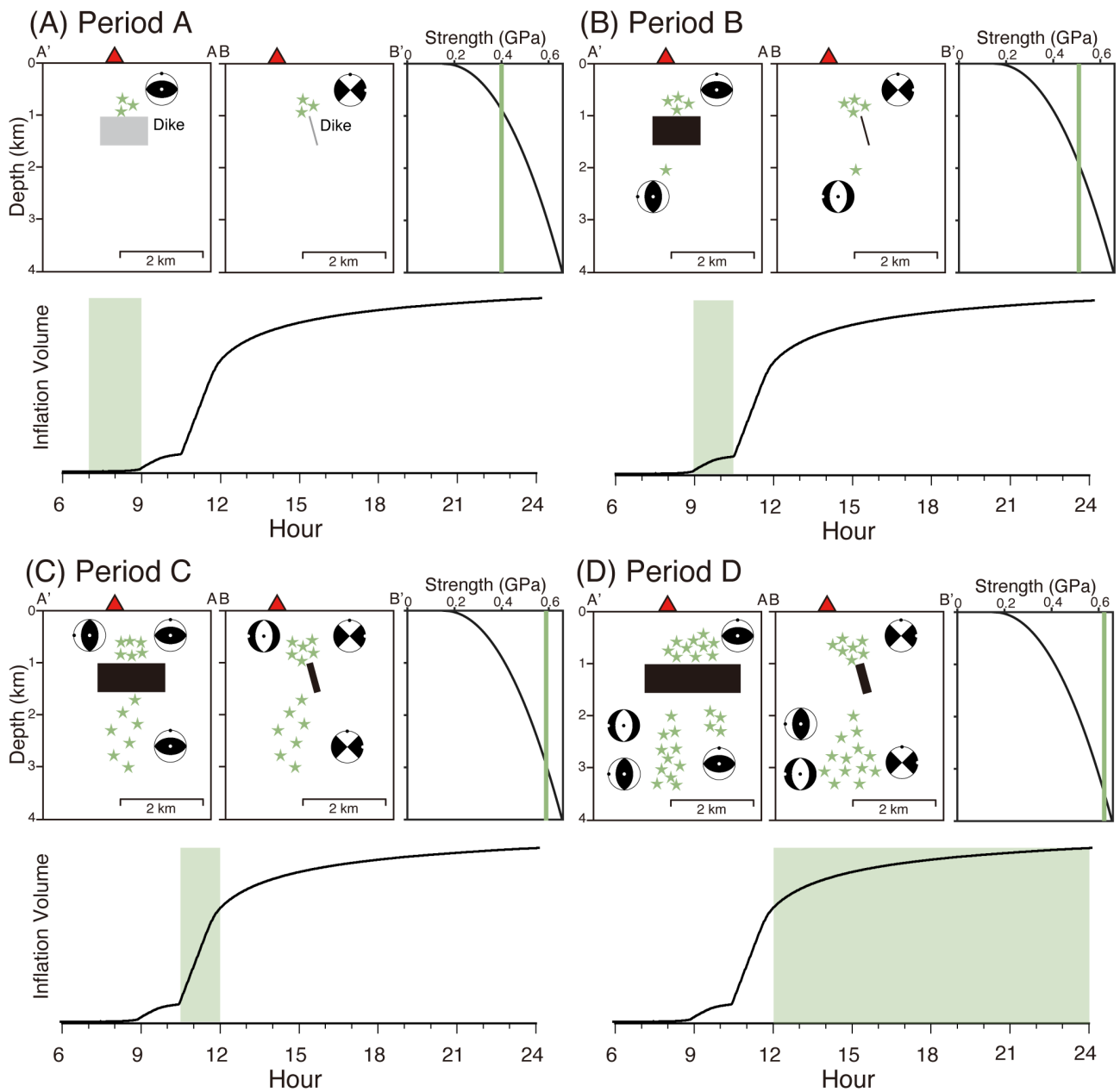


図12. 2015年8月15日のダイク膨張による桜島の群発地震発生概念図（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI07]、Koike and Nakamichi, 2021）

(A) 7時～9時、(B) 9時～10時30分、(C) 10時30分～12時、(D) 12時～24時

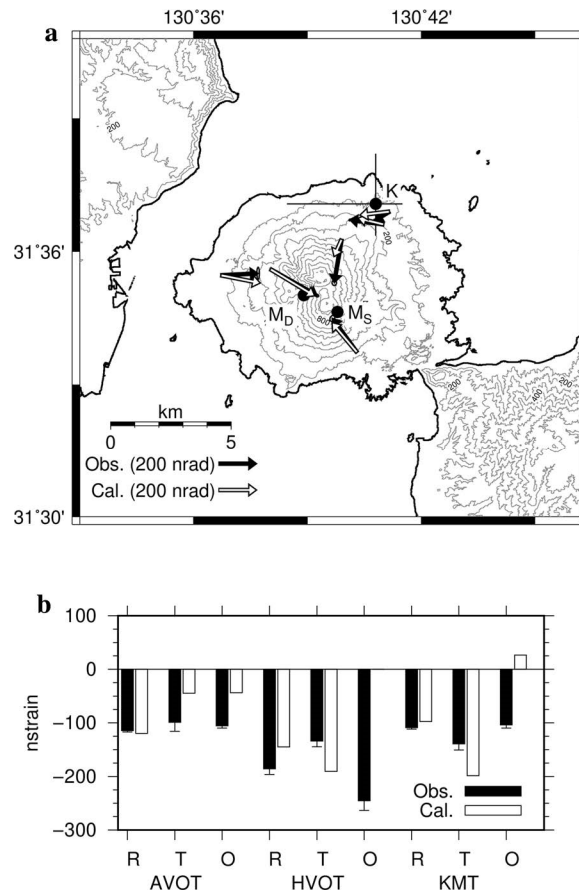


図13. 南岳爆発に伴う地盤変動のモデリング結果（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI07]、Hotta and Iguchi, 2021）

上段：3つの球状圧力源の位置と傾斜変化ベクトルのフィッティング

下段：ひずみ変化のフィッティング

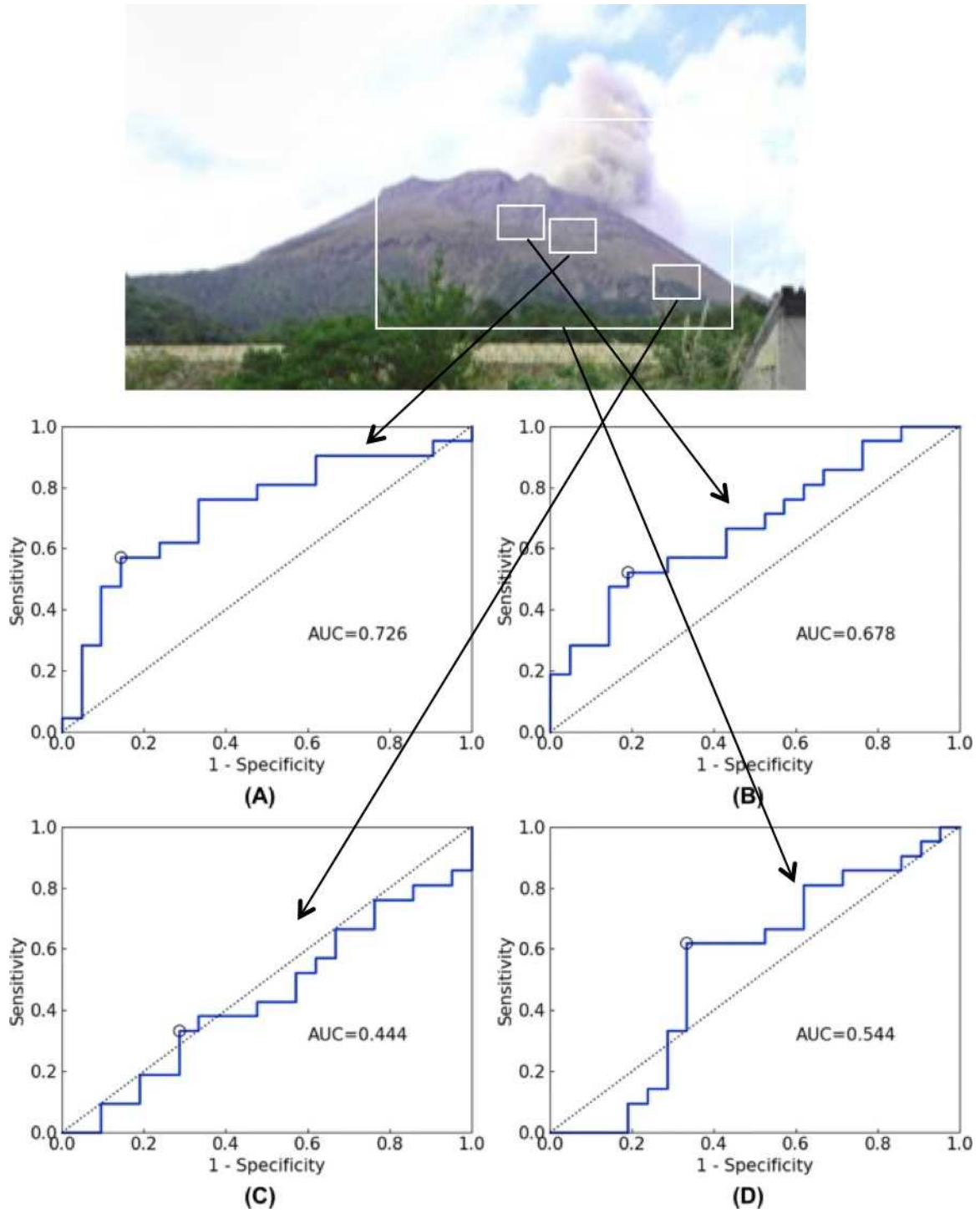


図14. 機械学習による噴火判定プログラムを学習データ期間外のデータに提供することにより得られたReceiver Operating Characteristic曲線（東京大学地震研究所[課題番号: ERI_21]、Nomura et al., 2020）



図15. 海域火山の定期巡回監視観測により捉えられた西之島の噴火の様子（海上保安庁
[課題番号：JCG_04]）

1 (5) 災害誘因評価・即時予測

「災害誘因評価・即時予測」計画推進部会長 太田雄策

(東北大学大学院理学研究科)

副部会長 三宅弘恵

(東京大学地震研究所)

地震・火山噴火という自然現象が引き起こす地震動、津波、火山噴出物、斜面崩壊等の災害誘因は自然や社会に潜在的に存在する脆弱性等の災害素因に働きかけ、これらの総合作用に応じて様々な規模の災害が発生する。すなわち災害誘因評価の高度化は、災害軽減を果たすために有効な手段である。こうした観点から、「災害誘因評価・即時予測部会」では災害誘因や災害リスクを事前に高い精度で評価する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化」ならびに地震や火山噴火が発生した直後に高精度かつ即時的に災害誘因を予測する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化」を推進するとともに、それら災害誘因予測を効果的に防災対策の推進に結びつけるための「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」を進める。

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

○震源モデルの高度化

極大地震動生成メカニズム解明のため、強震動記録を用いた震源断層不均質すべりモデルおよび広帯域強震動シミュレーションによる震源モデルの特性抽出を行った。前者については、国内で発生した地震の既往の解析結果のすべり方向やすべり時間関数の特徴を抽出したところ、すべり角のゆらぎが約20度となった。後者については、強震動生成域の応力降下量の深さ依存性を精査したところ、明瞭な深さ依存性が確認された(図1)。これらの成果は、地震シナリオを策定する際に有用な情報となりうる(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI09])。

2016年熊本地震本震の震源過程の再解析と強震動シミュレーションを実施し、特に破壊伝播方向の阿蘇カルデラ内の観測記録との比較を行った。Mitsuoka et al. (2020)の地震活動分布を参考にすることで、より適切な断層面を設定し、さらに断層パッチのサイズをより細かくするとともに、各断層のモデルパラメータをコントロールポイントで与え、各断層でのすべりは内挿によって解を得る方法を用いた。さらに微動アレイ探査等の結果にもとづく、より信頼性の高い地盤速度構造モデル(例えば、Senna et al., 2018; Asano et al., 2019)を用い、周期1-20秒の帯域における震源インバージョンを行った。得られた結果は大局的にはAsano and Iwata (2016)と類似し、布田川断層に対応する震源断層面で地中に大きなすべりが求まる一方、浅部地表近くにもすべりが得られた。また浅部のすべり速度関数が台形の形状を示す一方、深部ではKostrov型の形状を示していることも明らかになった(図2)。得られたすべり分布による計算波形は、震源域北端の

阿蘇カルデラ内の記録の特徴をよく再現できた（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI09〕）。

2016年熊本地震の地震動の再現性向上を目指し、強震波形インバージョンによる震源モデルの地表付近部分に観測された地表変位量を付与し、地震動のフォワードシミュレーションを実施した。同結果を益城町における変位波形と比較したところ、地震動の再現性が向上することを確認した。また、強震動予測用震源モデルへの活断層情報の反映を目指し、布田川断層の強震動予測のための特性化震源モデルに対して、地表断層形状を事前情報として取り入れた場合の、断層近傍の予測地震動（変位分布や最大速度分布）への影響を調査した。その結果、従来の矩形断層による予測値とは大きく異なる結果（図3）となり、断層浅部のすべり量やすべり速度関数、断層面全体の巨視的形狀、大きさ、地震規模の設定方法など、活断層研究から得られる情報が重要であることが改めて明らかになった（名古屋大学〔課題番号：NGY_05〕）。

○地下構造モデルの高度化

2018年大阪府北部の地震の観測波形データの再現シミュレーションを通じて、堆積層Q値の検討を行った。大阪平野中心部のQ値は、0.1～0.5 Hzで $Q=0.45V_s$ 、0.5～1.0 Hzで $Q=0.26V_s$ 、1.0～2.0 Hzで $Q=0.15V_s$ とモデル化された（Sekiguchi et al., 2020）。大阪・京都堆積盆地内の強震観測波形のS波部分の自己相関関数を用いて堆積盆地基盤面からのS波の多重反射波の検出を試みるとともに、既存の堆積盆地構造モデルとの比較を行ない、モデルの妥当性を検証した。同地域内の計79の強震観測点を対象に自己相関関数解析を行ったところ多くの観測点で反射波が検出され、得られた反射波応答の時間と既存モデルを用いて計算した反射波の往復走時は多くの地点で既存モデル（Sekiguchi et al., 2016）とよく対応し、同モデルの妥当性が評価できた（図4）（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI08〕、福留・他，2021）。

○強震動評価の高度化

太平洋スラブの深発地震による強震動評価のために、北西大西洋でのOBS観測によって求められた海洋リソスフェアを選択的に伝播する波の方位依存性から、海洋プレート内の短波長不均質構造を推定した。太平洋プレート内部には水平方向の相関距離が数km、鉛直方向が0.5 km程度の短波長不均質構造がラミナ構造を持って発達している。これによって高周波（>1-2 Hz）の地震波が強い前方多重散乱を起こし、ラミナに沿って伝播することで、海域で観測されるPn/Sn波（Po/So波）は高周波数に富んだ長いコーダを持つ。これらの特徴を地震波伝播の3次元差分法シミュレーションから再現を試みたところ、短波長不均質構造はN45° E方向に長軸（相関距離20 km）を持ち、これに直交するN135° Eに単軸（相関距離0.25 kmと2 km）を持つマルチスケールな不均質な構造を仮定することで、観測データをよく説明できることが確認できた（図5）（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_14〕）。

イ. 津波の事前評価手法

巨大地震にともなう海底斜面崩壊による津波の数値計算手法の開発を継続し、1929年 Grand Banks Tsunamiの再現数値実験を行った。同津波では地震直後に海底ケーブルが破断され、海底地すべりが発生していたことが明らかになっている。本年度は海底地すべり域を海底ケーブルが切断された位置より仮定し、海底地すべりの数値計算手法である TsunamiSquares (Xiao et al., 2015) を改良し、さまざまな海底地すべりモデルを試行錯誤的に仮定することで、実際の津波の観測値の再現を試みた。その結果、観測波形をおおよそ再現できることを明らかにした (図6) (北海道大学 [課題番号: HKD_05])。

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

強震動による地震災害誘因の分析のため、堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースの増強を完了した。また国内外の強震動記録の分析を行い、2003年と1952年の十勝沖地震の震源解析を行った。解析においては最新のプレート形状と地下構造モデルを使用するとともに、使用する観測点を両イベントで揃え、近地と遠地の古記録を改めて精査した。その結果、1952年十勝沖地震はMw6.1の初期破壊に引き続きMw8.1のdown-dip方向への破壊、さらにMw8.0の規模での厚岸沖への破壊が生じたことが明らかになった。これに対して2003年十勝沖地震は十勝沖単体でのMw8.1のdown-dip方向への破壊であり、両者には明瞭な相違が確認された (図7) (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_16]、Kobayashi et al., 2021)。

地盤震動特性および地下構造モデルが把握されていない山間部において、微動を用いた面的な調査を実施した。その結果、堆積層と基盤層のコントラストによる卓越周期の分布と、アレイ観測によって把握した表層地震波速度を用いた層厚モデルを得ることができた (図8)。これまでの鳥取県内の堆積平野を中心とした微動探査 (単点3成分およびアレイ観測) 記録の総合的利活用を目指したデータベースおよびGISによる表示システムを構築した (鳥取大学 [課題番号: TTR_01])。

多様な津波避難データの取得のために、千島海溝周辺海溝型地震により大津波が想定されている中学校において避難訓練を実施し、GPSによる避難速度の計測 (群衆、高齢者装具、車いす、自力避難困難者のリヤカー運搬) を行った。また、避難訓練による学習効果を確認するため、訓練後のアンケートをテキストマイニングで分析した。その結果、中学校の学年によって記述が明瞭に異なることが明らかになった (図9) (北海道立総合研究機構 [課題番号: HR0_02])。

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

近年入手可能になってきた0.5 mという超高密度DEMから不安定斜面を分析した。四国の主要国道沿いにおいて、重力変形、地すべり、過去の崩壊痕跡、急崖など、項目別に分類した危険斜面の分布を抽出した (図10)。水域に隣接した箇所における地すべりのモデルケースとして、地震活動が活発な北海道東部の海岸地すべりににおける地震動や地すべりの変位等の多項目観測を継続した。今年度は、地震動が入力された際に、どの程度の地すべりが生じるのかを実証的に明らかにした。その結果、地すべりの不安定化が促進し、定常的な地すべりの活動が見られた期間においては、非常に小さな地震動 (最大加速度

が10-20 gal)でも地すべりが促進されることが明らかになった(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI10])。

GB-SAR(地表設置型合成開口レーダ)の宮城県荒砥沢地区および熊本県阿蘇村立野における連続観測を継続するとともに、大気補正による変位の精密推定手法を開発した。斜面で発生する地表面変位は局所的であり、かつ大気は空間的・時間的に穏やかな変化をするという仮定にもとづく大気補正手法を開発・適用した結果、GB-SARによってmmオーダーの変化を捕捉できることを明らかにした(図11)。さらにポーラメトリ計測によるデータ間の相関を利用したアルファ・エントリピ解析を小規模な地すべりに適用した結果、表面状態の変化から土砂すべりの兆候と思われる現象を捉えることに成功した(東北大学災害科学国際研究所[課題番号:IRID03])。

オ. 火山噴火による災害誘因の事前評価手法

桜島火山における地球物理学的観測量と火砕流流動を関連付けるパラメータ群の精査を行った。その結果、火砕流をとまなう47例の過去事例のうち27例で顕著な前震活動が発生していること、噴火前に地盤変動から把握される膨張レートが減少もしくは停止することがあり、前震活動はその際に多く発生すること、また火砕流を伴う噴火は噴火後の収縮量が大きいことなどが明らかになった(図12)。また、火砕流の流下パターンや堆積量を知るために、桜島島内の黒神観測点において小型船舶レーダーを用いた観測を開始した(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI11])。

(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

大地震の震源即時推定に向け、強震観測データと地震波伝播シミュレーションのデータ同化にもとづく、震源イメージングの有効性を検証した。同手法はデータ同化を行わない従来のBack Projection法やTime Reversal法に比べて、観測データの誤差(粗い観測点間隔による波動場構築の限界を含む)と波動伝播シミュレーションの誤差の両方を適切に考慮した高解像度の震源イメージングが期待できる。同手法を用いて2008年茨城県沖地震のKiK-netデータを用いた震源イメージングを行なったところ、発震時に震源近傍に初期波動場が良好に再構築され、データ同化を行わない従来のイメージング法と比較して震源像をより明瞭に推定できることなどが明らかになった(図13)(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_14]、Furumura et al., 2020)。令和元年度に引き続き3次元差分法に基づく地震波伝播シミュレーションのオープンコード(OpenSWPC, Maeda et al., 2017)の改良、機能拡張を進め、2020年8月13日にVer. 5.10をGitHubに公開した。また論文等からの引用のために研究データリポジトリZenodoにコードを登録し、doiを取得した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_14])。

PLUM法の高度化について、P波を検知する方法を発展させ、初期破壊のP波の上下動成分のみから得られる震度を予測に用いることにより、地盤増幅特性が不明な観測点でも適用できる手法を開発した。同手法を用いると、約2割の地震において従来のPLUM法よりも迅速に警報を発表できることを確認した(図14)。データ同化と波動伝播シミュレ

ーションを組み合わせた地震動予測について、計算時間短縮のためMPIやOpenMPを用いた並列化及びMPI通信の効率化に取り組んだ。また、密な観測網が利用可能な状況では、(断層破壊の全体を捉える) Mwの即時推定では強い揺れに間に合わず、揺れをモニターする方法が有効であることを事例検証をもとにまとめた(気象庁[課題番号: JMA_06])。

イ. 津波の即時予測手法

実際の沖合圧力計データに含まれるノイズ成分や地震動、潮汐成分などをデータの蓄積を待たずに逐次適用可能な経験的モード分解法(Ensemble Empirical Mode Decomposition; EEMD)を海底圧力計記録の津波信号に適用し、津波信号の効果的な抽出を試みた。EEMD法は任意の時系列信号を複数のモードに分解する方法であり、おおむね低次のモードほど高周波に富む傾向を持つ。海底における津波記録の場合には、ごく微小な津波から2011年東北地方太平洋沖地震による巨大津波まで、このEEMD法で分解された特定の次数範囲のモードに顕著な振幅の信号が現れることを見出した(図15)(Wang et al., 2020a)。また、2020年5月にクレタ島で津波が観測された地中海東部のイベントに対して、データ同化による津波即時予測を実現するための最適な海底津波観測網の検討を実施した(Wang et al., 2020b)。さらに、地震・津波双方を含むできるだけ現実的な記録を数値的に合成し、それに対して予測手法のテストを行うというプロセスを実現するために、3次元的地震・津波運動を計算できる融合数値計算法(Maeda and Furumura, 2013)から海底圧力を再現できる地震津波シミュレーション手法(Saito et al., 2016)をシームレスにつなぎ、実用的かつ現実の不均質構造を組み込んだ地震にともなう全波現象を実現するための実装を行ない、既存手法との比較を行った(弘前大学[課題番号:HRS_02])。

GNSSの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)とそれに引き続く地震直後の余効すべりの時空間発展推定を行った。推定時には、推定された地震時すべりから期待される各観測点における地表変位を搬送波位相変化に反映させることで、断層推定の安定性を向上させる初期座標リセットの方法を適用した。これによって地震時および引き続く大きな余震、および地震直後の余効すべりを連続的に抽出することに成功した(図16)。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実海域試験を行った。具体的には2019年11月9日から2020年6月21日までの226日間、三陸沖北部の水深4178 m地点で観測を行い、データを取得することに成功した(東北大学大学院理学研究科[課題番号:THK_12]、田中・他, 2020、太田・他, 2020)。

津波後続波・減衰過程の予測について検討した。近地津波について、沿岸津波観測データへのリアルタイム回帰分析による予測手法を2011年東北地方太平洋沖地震津波に適用して予測性能を評価した。遠地津波についても、過去事例から得た減衰過程の特徴に基づく減衰式を2010年チリ中部沿岸の地震津波に適用して予測性能を評価した。いずれも概ね±12時間の幅で減衰予測できることを示した(図17)。津波地震の規模推定について地震観測波形から周期ごとの振幅分布を求め、様々な破壊継続時間を仮定した理論分布と比較して最も合う破壊継続時間を推定し、振幅比から地震の規模を推定する手法を

考案した。世界各地で発生した津波地震の理論地震波形を用いて検証し、その有効性を確認した（気象庁 [課題番号：JMA_06]）。

ウ．火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

火山灰堆積後の土石流発生の予測モデル構築のため、降灰によるクラストが斜面表面を覆った条件に対する降雨流出・土砂流出に関する室内実験を行い、この流出過程に及ぼすクラストの影響について検討した。クラストの存在により浸透過程が異なるため、クラストの存在が表面流量を増加させることが分かった。また、斜面の侵食強度の弱い個所、または降雨強度が大きい個所で侵食が始まり、そこから侵食が発達することが分かった。これに関する数値シミュレーションも行い、流路の形成、侵食過程などがある程度再現できた（図18）。焼岳を対象として、噴火後60年間の土石流発生ポテンシャルの変化について検討し、噴火直後土石流の多発により発生ポテンシャルが下がっている状況で発生した土石流の誘因として、源頭部に集中した強度の大きい降雨が重要であることを明らかにした（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI_12]）。

気象庁一般気象レーダーを用いて、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8000 m以上に達していたことを明らかにした。2DVDによって直接観測された降灰データを用いて、気象レーダーによる解析結果を検証するためのスキームを考案した。領域移流拡散モデルと全球移流拡散モデルを統一した新しい気象庁移流拡散モデル（JMA-ATM）を開発した。JMA-ATMと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（図19）（気象庁 [課題番号：JMA_07]）。

（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

地震災害等、災害情報や防災に関する全国を対象としたアンケート調査を実施した。地震発生確率に関する意識について、確率を計算する期間を変えた場合、人の意識はどのように変わるのかについて調査を行い、どの程度不安を感じるかを調べた。例えば日本海側の地震発生確率については、「30年に3.0%」、「30年に26.0%」、「30年に50.2%」のいずれの場合でも、10～20年確率で不安を示す人の割合がピークを示すとともに、特に50～60代は10～20年確率で不安を感じる割合のピークが大きいことが分かった。同様に「自身の対策の必要性」においても10～20年確率で不安を感じる割合のピークが大きいことが明らかになった（図20）（東京大学情報学環 [課題番号：III_01]）。

M8クラス以上（半割れ）およびM7クラス（一部割れ）の地震発生後に後発する地震の発生確率について、最近100年間のグローバルな地震カタログを用いて信頼区間も含めて計算した。その結果、例えば半割れケース（M8+→M8+）では1週間以内に発生する確率は2.9%（30回に1回程度）となり、その確率利得は通常の130倍程度となった。これらの結果は、政府がガイドラインで目安として提示している数字と大部分で整合的である一方で、ガイドラインで「程度」としている部分（例えば「十数回に一回程度」は、「数回に一回～数十回に一回」など）には幅があることに留意すべきことなどが明らかになった

(図21) (東北大学災害科学国際研究所 [課題番号: IRID04])。

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の開発を進めた。今年度は特に、振幅震源自動推定ツールと火山性地殻変動源自動推定ツールの開発に取り組んだ。振幅震源自動推定ツールについて、Battaglia and Aki (2003) および Kumagai et al. (2010) の解析手法を用いて、北海道大学において昨年度導入した解析サーバー上で、試作プログラムの動作確認を行った。WINシステムでテレメータされている地震波形のデータを用いて、専用の解析サーバー上で震源を逐次推定し、結果を画像として保存していく処理となっている。今年度は、十勝岳のデータについてSTA/LTAでトリガーをかけ、イベント発生時にのみ震源を探索するモードで試験を行い、設定パラメータを評価した。処理結果の表示部では、Webベースのビューワを開発した(図22) (北海道大学 [課題番号: HKD_06])。

これまでの課題と今後の展望

「災害誘因評価・即時予測部会」では災害誘因や災害リスクを事前に高い精度で評価する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化」ならびに地震や火山噴火が発生した直後に高精度かつ即時的に災害誘因を予測する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化」を推進するとともに、それら災害誘因予測を効果的に防災対策の推進に結びつけるための「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」を進めている。計画2年目である本年度においては、それぞれの研究課題において既往研究の高度化や新たな取り組みに関して成果が着実に得られつつある。今後は課題間の連携や、拠点間連携共同研究との連携等を一層進展させることで、成果を最大化すること、および開発された技術ほかを現業機関他と連携して社会実装を進めることが課題と考える。以下に、各小項目において取り組むべき事項および展望についてとくに令和3年度に焦点を当てて示す。

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

強震動生成メカニズム把握のため、強震記録を用いた震源インバージョンを継続する。モデルパラメータの強震動への影響を検討する。強震記録が得られているサイトの地盤構造モデルの検討を継続する。

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、当初計画に従い、熊本地震を事例とした強震動分布を説明できる計算モデルを確立することを目指す。

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する内陸地殻内地震の広帯域震源モデルを開発する。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を継続する。地震動再現性のよくない地域、地下構造情報の少ない地域における微動・地震観測等を継続する。

地殻・マントル及び海洋プレート内の不均質構造を高密度強震観測データと地震波伝播シミュレーションから推定し、広帯域(短周期～長周期)強震動の事前評価の精度向上に取り組む。強震動の事前評価モデルの改善に向けて、南西諸島域の地盤構造モデルの改良を実施するとともに、FAMT (first-motion augmented moment tensor) 法による CMT

解析を継続する。

1929年 Grand Banks Tsunam の再現実験をまとめる。第2段階として、海底地すべり発生による津波励起が知られている 1998年パプアニューギニア地震津波・1946年アリューシャン地震津波への適用を試みる。また、日本での海底地すべり地形の解析を開始する。

堆積平野・堆積盆地の地震動増幅特性の定量化を進める。

鳥取県内の地震動予測高度化のため、主に微動探査・重力探査・観測地震動の解析を通じた地盤震動特性および地下構造の把握、および GIS データベースの拡充を継続的に実施する。鳥取県震度計ネットワークを用いた Web ベースのリアルタイム震度表示システムおよび上記 GIS データベースについて、自治体での利活用を促すとともに、利用に関する意見を収集する。

南海トラフ地震における過去の崩壊地および周辺部における地質調査について事例を増やす。特に、埋積された直立板状の構造が存在しうる斜面や岩塔状（香川県五剣山の例）の斜面があるかを、四国南北横断の重要道路（国道 32、33、194 号線）周辺を中心に調査するとともに、斜面における多項目観測について継続する。地震動と地すべり内の変位や変形、過剰間隙水圧の大きさと比較し、それらの関係性を明らかにするとともに、斜面の不安定化のメカニズムを考察する。

宮城県荒砥沢地区に設置している GB-SAR については連続計測を継続し、GB-SAR データの取得を継続する。現在開発中の MIMO レーダによる計測システムの置換を検討し、長期モニタリングの信頼性向上をめざす。

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。噴出物の降下火山灰量と火砕流となった噴出物の配分比を見積り流下距離を推定するシュミレーションについては、配分比を変えながらそれぞれについて計算を行なう。さらにレーダー観測を臨時的に継続し、火砕流を検知可能か実証を行い、火山灰の上方への移動量と火砕流となって山腹を下降する量を検出可能か調べる。

（2）地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

強震観測データと地震波伝播シミュレーションの同化に基づく震源モデルおよび長周期地震動の即時予測手法について、日本海溝や南海トラフの巨大地震に適用させるための手法改良を進める。地震波伝播計算と強震動被害の事前評価の高度化に向け、地震波伝播オープンコード（OpenSWPC）の機能拡張と、令和3年度に東大情報基盤センターに導入される、高性能スパコン（BDEC）での性能チューニングを進める。

PLUM 法の改良を進め、伝播経路特性については地下構造の精緻化を図る。地盤増幅特性のうち位相特性を検討し、長周期地震動を含めた即時予測における継続時間の予測に対する精度向上の研究を進める。データ同化手法や波動伝播シミュレーションの効率性を検討し、予測モデルの構築に着手する。

津波検知を含めたデータ同化に基づく即時予測手法の実観測記録への適用をさらに推し進め、常時モニタリング・津波検知・現況把握そして予測という一連の津波即時予測の信頼性をさらに向上させる。また、不均質な地殻構造と海底地形を組み込んだ現実的地

震津波シミュレーションを実施し、その結果にデータ同化を適用することで、「答えのある」現実的な問題に対してどこまで津波即時予測手法が迫れるかの検討を行う。

GNSS の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) の性能評価を継続し、未知パラメータ間の相関等についてより詳細な検討を行うとともに、その適用可能範囲を明らかにする。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海底圧力観測システムのプロトタイプ機について複数海域における長期海域試験を実施し、そのドリフト除去能力について定量評価を行う。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継続する。

これまでに収集・整理した津波後続波の観測事例を再現する津波波源の推定、及び長時間津波伝播計算による後続波と減衰過程の再現に基づき、沿岸域地形データ等の計算条件設定を改良して、その再現精度の向上を図る。それらの結果に基づき、津波継続時間予測手法を改良する。

これまでの調査や実験、シミュレーションによる検討結果を使って、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化を進める。融雪型火山泥流について、焼岳火山を対象にしたモデルの構築を進める。

二重偏波気象レーダー等による噴煙の観測結果から、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に着手する。前年度までに開発した新しい移流拡散モデルへ、凝集・再飛散過程等の導入に着手する。火山灰データ同化・予測システムについて、実事例実験による評価に着手する。

(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・災害の情報活用 (発生確率、被害想定等) に関する住民調査を前提に、地震災害の発生確率、被害想定などに限定した分析を行う。

半割れケースと一部割れケースの両方について引き続き検討を進めた上で、「理解・気づきツール」として参照可能な確率推移表として整理する。また、南海トラフ地域の特殊性についても検討したうえで、計算した確率値の利用の考え方についても整理する。

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について、今年度までに試作した振幅震源推定コンテンツを表示システムに取り込む作業を行う。地殻変動源推定コンテンツについては引き続きプログラムの制作を進める。

成果リスト

青田裕樹・大園真子・高橋浩晃・太田雄策, 2020, 陸域GEONET による北海道根室沖のプレート間固着推定の限界と新設GNSSA 観測点による推定範囲の検討, 日本地震学会講演予稿集, S03-07.

浅野公之・岩田知孝・関口春子・杉山長志, 2021, 近江盆地南部における微動アレイ探査, 令和2年度京都大学防災研究所研究発表講演会, A117.

荒井紀之・千木良雅弘・土井一生, 2020, 重力変形斜面の降雨・地震時挙動の観測, JpGU-AGU Joint

Meeting 2020, HDS09-07..

- 荒井紀之・山崎新太郎・土井一生, 2021, 山地斜面の降雨・地震時挙動の観測, 令和2年度京都大学防災研究所研究発表講演会, P120.
- Chen, L.-W., T. Taira, and H. Miyake, 2020, Decade-long temporal variation of near-surface seismic velocity and S wave azimuthal anisotropy in Southern Hokkaido, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS12-01.
- Doi, I., S. Matsuura, H. Osawa, T. Shibasaki, and S. Tosa, 2020, Effects of Coastal Erosion on Landslide Activity Revealed by Multi-sensor Observations, *Earth Surf. Processes Landf.*, 45, 10, 2291-2299, doi:10.1002/esp.4880.
- 土井一生・東良慶・前中裕貴・釜井俊孝, 2020, 北海道厚真町の造成地における2018年北海道胆振東部地震時の変状と地下構造との関係, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, HDS09-P04.
- 土井一生・松浦純生・大澤光・柴崎達也・土佐信一, 2020, 平坦な地形面をなす地すべりの地震動の震動特性 —近接して設置した地震計による地震波形記録の解析—, 日本地すべり学会研究発表会山梨大会, 17.
- 土井一生・釜井俊孝・東良慶・王功輝, 2021, 平成30年大阪府北部の地震における高槻市内および枚方市内の斜面災害調査, *らんどすらいど*, 36, 23-32.
- 福留脩太・浅野公之・岩田知孝, 2021, 強震波形記録の自己相関関数解析による京都盆地, 大阪平野での基盤面深度の推定, 令和2年度京都大学防災研究所研究発表講演会, A116.
- Furumura, T., and T. Maeda, 2020, High-resolution source imaging based on time-reversal wave propagation simulations using assimilated dense seismic records, *Geophys. J. Int.*, 225, 1, 140-157, doi:10.1093/gji/gga.
- Furumura, T., and BLN Kennett, 2020, Azimuthal variation of lithospheric heterogeneity in the northwest Pacific inferred from Po/So propagation characteristics, 日本地震学会2020年度秋季大会, 10月30日.
- Hoshiba, M., 2020, Too-late warnings by estimating M_w : Earthquake early warning in the near-fault region, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 110(3), 1276-1288, doi:10.1785/0120190306
- Ichiyanagi, M., V. Mikhaylov, D. Kostylev, Y. Levin, and H. Takahashi, 2020, Evaluation for hypocenter estimation error in the southwestern Kuril trench using Japan and Russia joint seismic data, *Earth Planet. Space*, 72, 86, doi:10.1186/s40623-020-01215-0.
- Iwaki, A., N. Morikawa, H. Fujiwara, T. Kumamoto, Y. Okuma, and H. Kimura, 2020, Simulation of nearfault ground motion for the 2016 Kumamoto earthquake (Mj7.3) considering the surface rupture geometry, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS04-14.
- 岩城麻子・森川信之・前田宜浩・藤原広行, 2020, 強震動予測レシピによる2016年熊本地震 (Mj7.3の強震動シミュレーション), 日本地震工学会2020年大会, T2020-81.
- Izumi, Y., G. Nico, and M. Sato, 2020, A time-series clustering approach for atmospheric propagation delay compensation in Ground-based radar interferometry, In International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Hawaii (USA), July 2020.
- Izumi, Y., L. Zou, K. Kikuta, and M. Sato, 2020, Iterative Atmospheric Phase Screen

- Compensation for Near-Real-Time Ground-Based InSAR Measurements Over a Mountainous Slope, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 58, 5955-5968, doi:10.1109/TGRS.2020.2973533.
- Kagawa, T., and Y. Ohta, 2020, Prior and Real-Time Estimations of Ground Motions, Tsunamis, and Other Geodynamic Hazards, *J. Disaster Res.*, 15(2), 144-151, doi:10.20965/jdr.2020.p0144.
- 香川敬生・星山賢太郎・野口竜也, 2020, 2000年鳥取県西部地震による気象庁境港観測点における非線形地盤応答特性と境港市役所における観測記録の再現, *土木学会論文集A1, Vol.76, No.4(地震工学論文集第39巻)*, pp. I 163-I 171.
- 香川敬生・野口竜也・山田浩二・竹本哲也, 2020, S波反射法地震探査および常時微動を用いた1943年鳥取地震で出現した鹿野断層近傍の地盤構造, *日本地震学会2020年度秋季大会*, S16P-08.
- Katsumata, A., M. Tanaka, and T. Nishimiya, 2021, Rapid estimation of tsunami earthquake magnitudes at local distance, *Earth Planet. Space* (submitted).
- Katsumata, K., and J. Zhuang, 2020, A New Method for Imaging Seismic Quiescence and Its Application to the Mw = 8.3 Kurile Islands Earthquake on 15 November 2006, *Pure Appl. Geophys.*, 177, 3619-3630, doi:10.1007/s00024-020-02498-w.
- Kilb, D., J. Bunn, J. Saunders, E. Cochran, S. Minson, A. Baltay, C. O' Rourke, M. Hoshiaba, and Y. Kodera, 2021, The PLUM earthquake early warning algorithm: A case study of west coast, USA, *J. Geophys. Res.* (submitted).
- Kobayashi, H., K. Koketsu, H. Miyake, and H. Kanamori, 2021, Similarities and differences in the rupture processes of the 1952 and 2003 Tokachi-oki earthquakes, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2020JB020585, doi:10.1029/2020JB020585.
- 小林和生・岡野三里・西村武・野口竜也・香川敬生, 2020, 稠密微動探査による1943年鳥取地震の鹿野断層ごく近傍における地盤震動特性の把握, *令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会*, CS10-12.
- 小林正直・藤田正治・竹林洋史・宮田秀介・山野井一輝・坂井紀之, 2020, 昭和37年焼岳噴火後の足洗谷における土石流の発生, *令和2年度砂防学会研究発表会概要集*, 167.
- Li, X., J. Bo, I. Doi, G. Wang, and T. Kamai, 2020, Microtremor Survey and Spectrum Analysis of a Coseismic Landslide: a Case Study in Subao Village, Ningxia, China, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, HDS09-P06.
- Minson, S., J. Saunders, J. Bunn, E. Cochran, A. Baltay, D. Kilb, M. Hoshiaba, and Y. Kodera, 2020, Real-Time Performance of the PLUM Earthquake Early Warning Method during the 2019 M6.4 and 7.1 Ridgecrest, California, Earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 110(4), 1887-1903, doi:10.1785/0120200021.
- Miyake, H., T. Taira, and L.-W. Chen, 2020, Impact of seismic velocity change on ground motion modeling, *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SSS04-08.
- Nakagaki, T., and Y. Tanioka, 2020, Numerical Simulation of Submarine Landslide Tsunami due to the 1929 Grand Banks Earthquake, *JpGU 2020*, HDS11-P01.
- Nakata, K., A. Katsumata, and A. Muhari, 2020, Submarine landslide source models

- consistent with multiple tsunami records of the 2018 Palu tsunami, Sulawesi, Indonesia, *Earth Planet. Space*, 72, 44, doi:10.1186/s40623-020-01169-3.
- Nishimura, I., T. Noguchi, and T. Kagawa, 2020, Estimation of Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics in the Damaged Areas due to the 2016 Central Tottori Prefecture Earthquake, Japan, 10th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials and Environment, GX185.
- 西村武・野口竜也・香川敬生, 2020, 2016年鳥取県中部の地震の被害地域における地盤構造推定と地盤震動特性の把握, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS04-P13.
- 西村武・野口竜也・香川敬生, 2020, 2016年鳥取県中部の地震の被害地域における地盤震動特性とその影響, 第40回土木学会地震工学研究発表会, D12-1613.
- 西村裕一・A. Shisikin・清水康博・菅原大輔・石澤堯, 2020, 色丹島のテフラと津波堆積物: 2019年調査の概要, 地球惑星科学連合, MIS01-P01.
- 野口竜也・西村武・香川敬生, 2020, 鳥取県中部における重力基盤構造の推定, 日本地震学会2020年度秋季大会, S16P-09.
- 野口竜也・小林和生・西村武・香川敬生, 2020, 1943年鳥取地震の鹿野・吉岡断層における稠密微動観測に基づく地盤震動特性の把握, 第40回土木学会地震工学研究発表会, D13-1633.
- 野口竜也・西田広大・西村卓也・香川敬生, 2020, 微動観測に基づく鳥取県大山町の避難施設の振動特性および御来屋地区における地盤構造調査, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, CS10-48.
- 野口竜也・小林和生・岡野三里・西村武・香川敬生, 2020, 1943年鳥取地震の鹿野断層における稠密微動観測, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS16-P08.
- Oba, A., T. Furumura, and T. Maeda, 2020, Data-assimilation-based early forecasting of long-period ground motions for large earthquakes along the Nankai Trough, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2019JB019047.
- 太田雄策・日野亮太・佐藤真樹子・鈴木秀市・梶川宏明・小島時彦, 2020, 非定常地殻変動の把握を目指したA-0-A方式による深海対応海底水圧計ドリフト補正システムの開発(第3報), 日本測地学会第134回講演会, 51.
- 齋藤さやか・安本真也・関谷直也, 2020, 地震対策意図と心理的背景—地震動予測地図に関するプレ意識調査からの検討, 第47回地域安全学会研究発表会(秋季), 20.
- Sekiguchi, H., K. Asano, and T. Iwata, 2020, Ground motion simulation of an Mw 5.5 earthquake in the Osaka basin, Japan, Fall Meeting of American Geophysical Union, S060-0008.
- Shigefuji, M., N. Takai, S. M. Bijukchhen, M. Bhattarai, C. Timsina, S. Singh, H. Miyake, and K. Koketsu, 2020, Basement structure in the Kathmandu Valley, Nepal using received function analysis, Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1d-0048.
- 新堀敏基・石井憲介, 2021, 気象庁移流拡散モデル設計書, 気象研究所技術報告, 84. (in press).
- Susukida, Y., K. Katsumata, M. Ichiyonagi, M. Ohzono, H. Aoyama, R. Tanaka, M. Takada, T. Yamaguchi, K. Okada, H. Takahashi, S. Sakai, S. Matsumoto, T. Okada, T. Matsuzawa, H. Miyamachi, S. Hirano, Y. Yamanaka, S. Horikawa, M. Kosuga, H. Katao, Y. Iio, A.

Nagaoka, N. Tsumura, T. Ueno, and The Group for the aftershock Observations of the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, 2020, Focal mechanisms and the stress field in the after-shock area of the 2018 Hokkaido Eastern Iburu earthquake (MJMA = 6.7), *Earth Planet. Space*, 73, 1, doi:10.1186/s40623-020-01323-x.

田中優介・太田雄策・宮崎真一, 2020, PTS 解析による2011年東北地方太平洋沖地震の地震時すべりから初期余効すべりまでの連続的な推定, 日本測地学会第134回講演会, 12.

Tanioka, Y., 2020, Improvement of near-field tsunami forecasting method using ocean-bottom pressure sensor network (S-net). *Earth Planet. Space*, 72, 132, doi:10.1186/s40623-020-01268-1.

Tanioka, Y., 2020, Tsunami modeling by marine landslides and reduction of disasters, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, HDS11-05.

Tanircan, G., H. Miyake, O. Ozel, H. Yamanaka, K. Chimoto, S. Tsuno, N. Takai, and O. Kaplan, 2020, Strong ground motion simulation of the 1956 (Mw6.5) Eskişehir, Turkey earthquake, *Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1d-0114.

Tran, M. T., V. Vi, H. Miyake, K. Irikura, and D. Bui, 2020, Empirical Green's function simulations toward site-specific ground motion prediction in Vietnam, *Pure Appl. Geophys.*, 177, 2281-2298, doi:10.1007/s00024-020-02491-3.

王功輝・馬寧・土井一生・古谷元・渡部直喜・石丸聡・小安浩理, 2020, Seismic site response of tephra slope: a case study for the landslides triggered by the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, JpGU-AGU Joint Meeting 2020, HDS09-P05.

王功輝・松島信一・古谷元・李孝波・常承睿・黄超, 2021, 振動台実験による地震時テフラ斜面の安定性評価, 令和2年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D310.

Wang, Y., K. Satake, T. Maeda, M. Shinohara, and S. Sakai, 2020a, A Method of Real-Time Tsunami Detection Using Ensemble Empirical Mode Decomposition, *Seismol. Res. Lett.*, 91(5), 2851-2861, doi:10.1785/0220200115.

Wang, Y., M. Heidarzadeh, K. Satake, I. E. Mulia, I. E., and M. Yamada, 2020b, A Tsunami Warning System Based on Offshore Bottom Pressure Gauges and Data Assimilation for Crete Island in the Eastern Mediterranean Basin, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125(10), doi:10.1029/2020jb020293.

Yamanaka, H., K. Chimoto, O. Ozel, O. Ozmen, S. Arslan, E. Yalcinkaya, M. Tun, E. Pekkan, S. Tsuno, O. Kaplan, H. Miyake, G. Tanircan, N. Takai, E. Ate, K. Tekin, A. Sezen, T. Ozturk, M. Alkan, M. Nurlu, S. Citak, O. Karagoz, K. Hatayama, M. Ohori, M. Mirzaoglu, O. Sipahi, M. Morita, S. Sasano, and Y. Fujita, 2020, Microtremor explorations for shallow S-wave velocity profiles at strong motion stations in Turkey, *Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 1f-0013.

安本真也・河井大介・齋藤さやか・関谷直也, 2020, 首都直下地震に関する防災啓発番組による知識獲得—知識ギャップ仮説に着目して—, 日本心理学会第84回大会.

安本真也・河井大介・齋藤さやか・関谷直也, 2021, パネル調査に基づくドラマ「パラレル東京」

の効果－首都直下地震への対策－，東京大学大学院情報学環紀要情報学研究，37，73-150.
吉田昌平・香川敬生・野口竜也・西村武，2020，常時微動探査及び余震観測記録に基づく弓ヶ浜
半島の地盤構造モデルの構築，令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会，CS10-44.

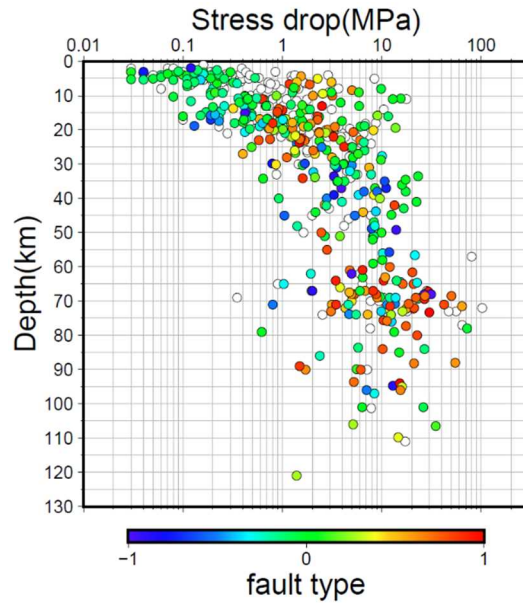


図1. 静岡県強震観測点データを用いて分離した震源特性（南関東・静岡・愛知・岐阜・長野県の地震）（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI09]）
 応力降下量（Bruneの応力降下量）に深さ依存性がある。

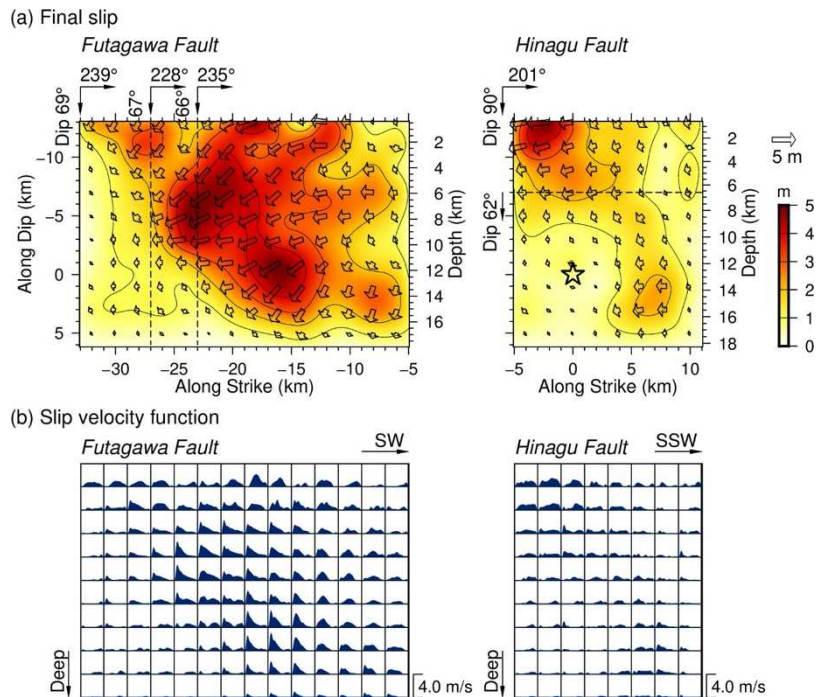


図2. 2016年熊本地震本震の震源課程の再解析結果（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI09]）
 すべり量分布およびすべり速度関数をそれぞれ示す。

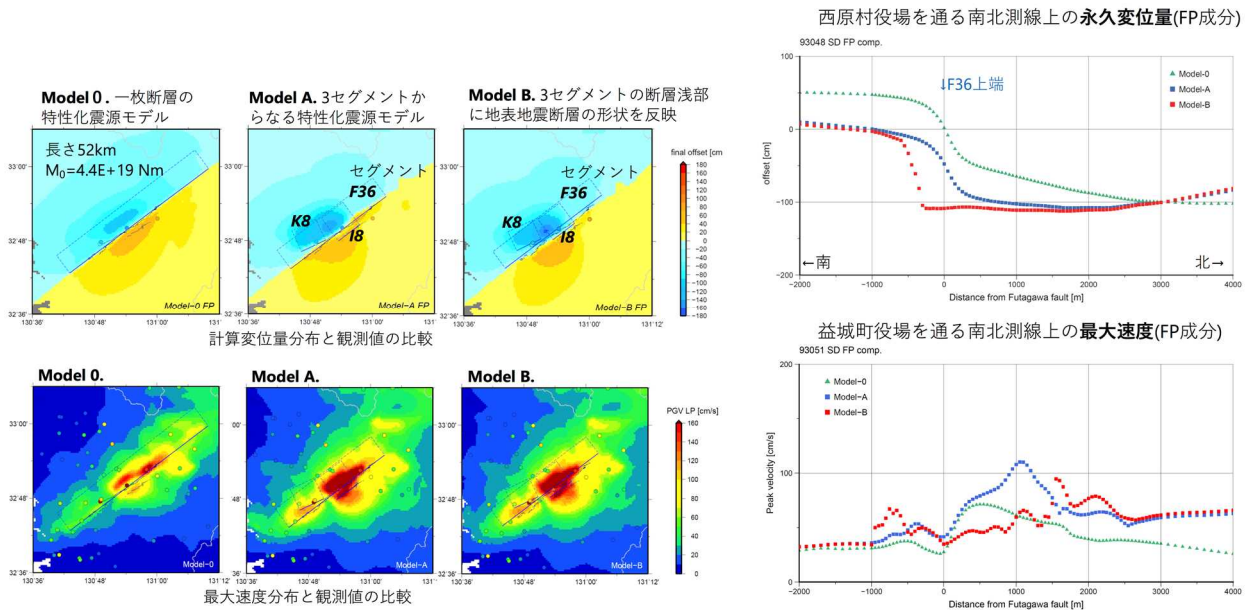


図3. 布田川断層の強震動予測のための特性化震源モデルに対して、地表断層形状を事前情報として取り入れた場合の、断層近傍の予測地震動(変位分布や最大速度分布)への影響評価結果(名古屋大学 [課題番号: NGY_05])

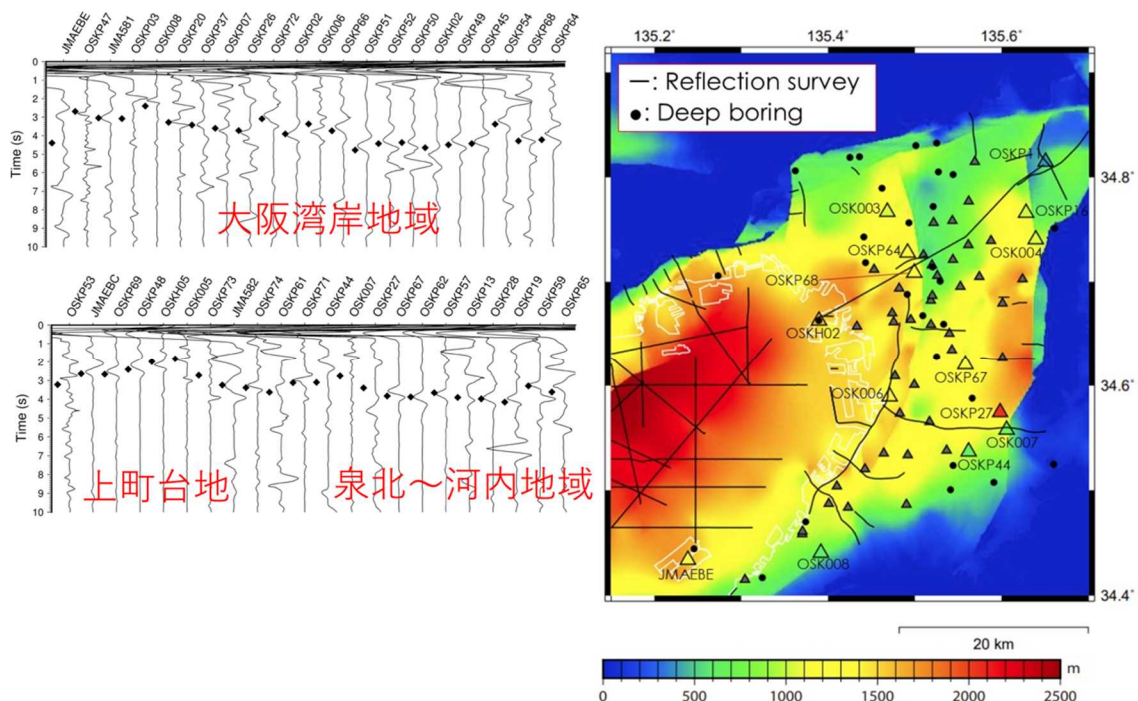
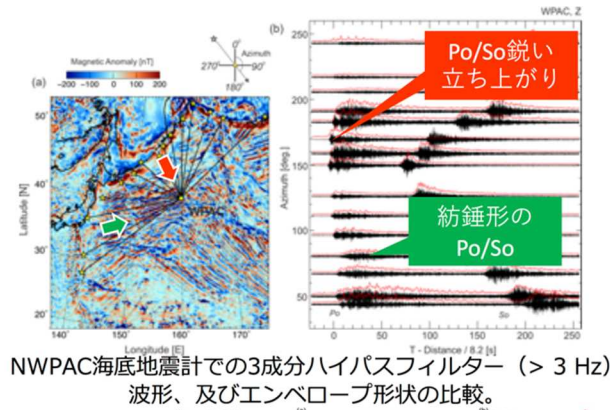


図4. 大阪盆地・京都盆地の強震記録に自己相関関数解析を適用して得た反射波走時を用いて既往の堆積盆地速度構造モデルを検証した結果(京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI08])



NWPAC海底地震計での3成分ハイパスフィルター (> 3 Hz) 波形、及びエンベロープ形状の比較。

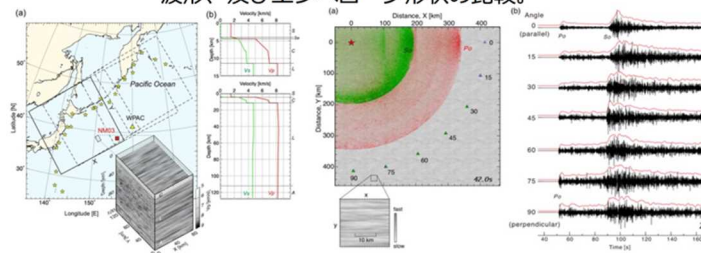


図5. 上段：地震の規模と震央距離がほぼ等しい(A)カムチャツカ半島沖の地震と(B)東北沖の地震におけるNWPAC海底地震計での3成分ハイパスフィルター(>3 Hz)波形、及びエンベロープ形状の比較(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_14])
左図には、震央と観測点、海底での地磁気異常のリニアメントを示す。下段：仮定した太平洋プレート内の不均質構造とそれを用いたFDMによる波動伝播計算。

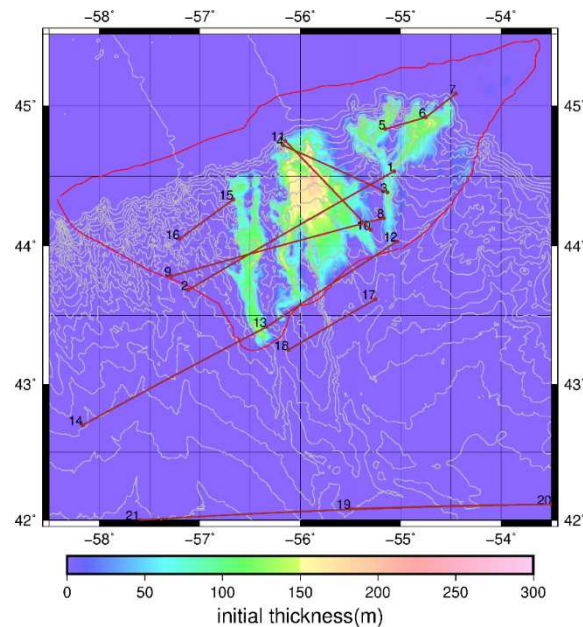


図6. 1929年Grand Banks地震にともなう地すべりの発生した場所と層厚(北海道大学[課題番号:HKD_05])
赤線は地すべりにより切断された海底ケーブル・番号は切断された位置を示す)。

2003年十勝沖 Mw8.1
遠地・強震・測地データを
ジョイントして使用

2003年十勝沖 Mw8.1
遠地・強震データ観測点を
1952年十勝沖解析と揃える

1952年十勝沖 Mw8.2
遠地・近地データを最大限
ジョイントして使用

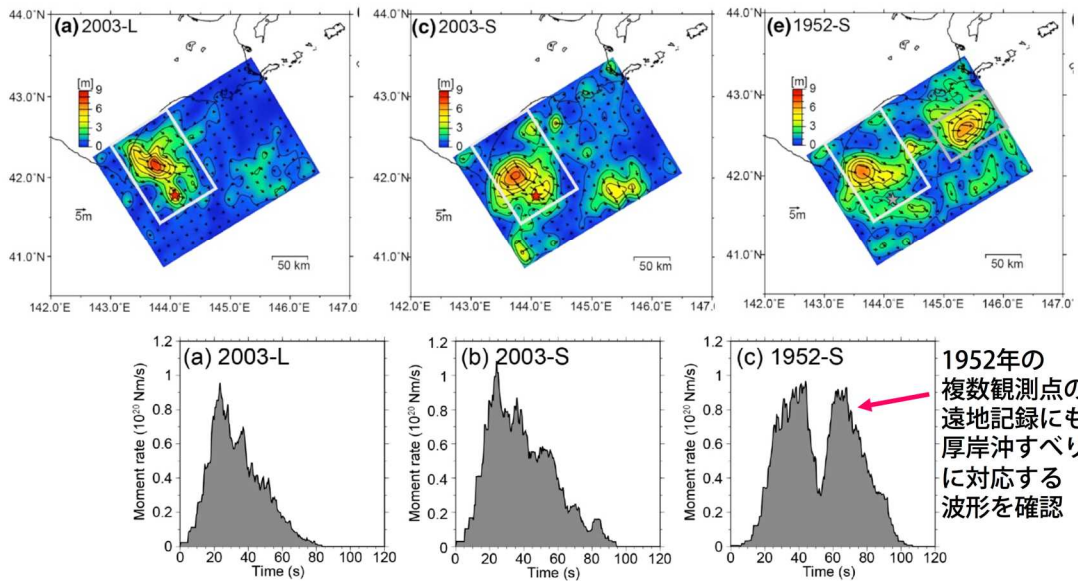


図7. 再解析により推定した2003年十勝沖地震および1952年十勝沖地震のすべり分布
(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_16]、Kobayashi et al., 2021)

地すべり地形部での微動H/V

地すべり堆積物の影響が
卓越周期に見られる

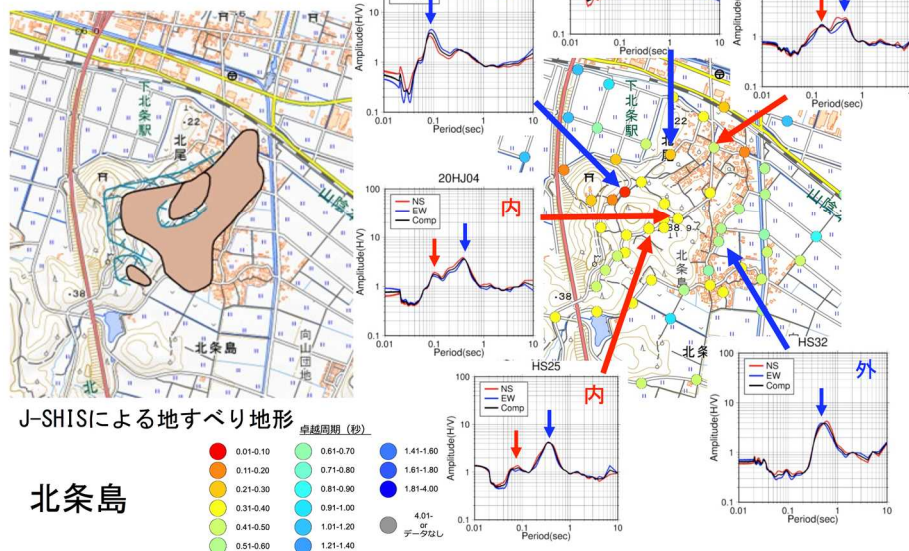


図8. 地盤震動特性および地下構造モデルが把握されていない山間部における、微動を用いた面的調査の実施結果 (鳥取大学 [課題番号: TTR_01])

2016年鳥取県中部の地震で被害が見られた北条島は地すべり地形となっており、地すべり部の外ではより深い境界による卓越周期が見られる (青矢印)。地すべり地形内部ではさらに周期の短い卓越が見られ (赤矢印)、地すべり堆積物の影響と考えられる。

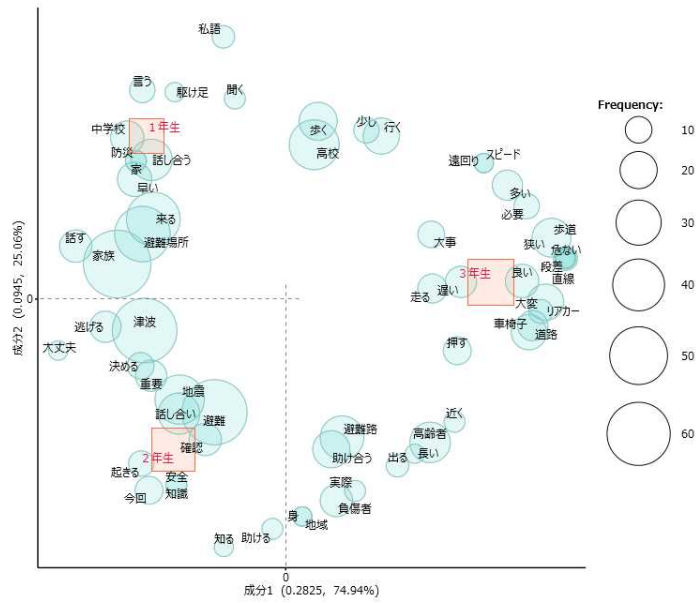


図 9. 避難訓練による学習効果の確認訓練終了後の自由記述アンケート結果（北海道立総合研究機構 [課題番号：HR0_02]）
 テキストマイニングにより、避難訓練参加者に対する防災学習効果を把握した。



図 10. 0.5mDEM に基づく重力変形、地すべり、過去の崩壊痕跡、急崖など、項目別に分類した危険斜面の分布（国道 194 号線の例）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI10]）
 挿入写真は、長期的な重力変形の影響を受けていると判断された四国の主要国道沿いの斜面における斜面上方の段差亀裂の様子を示す。

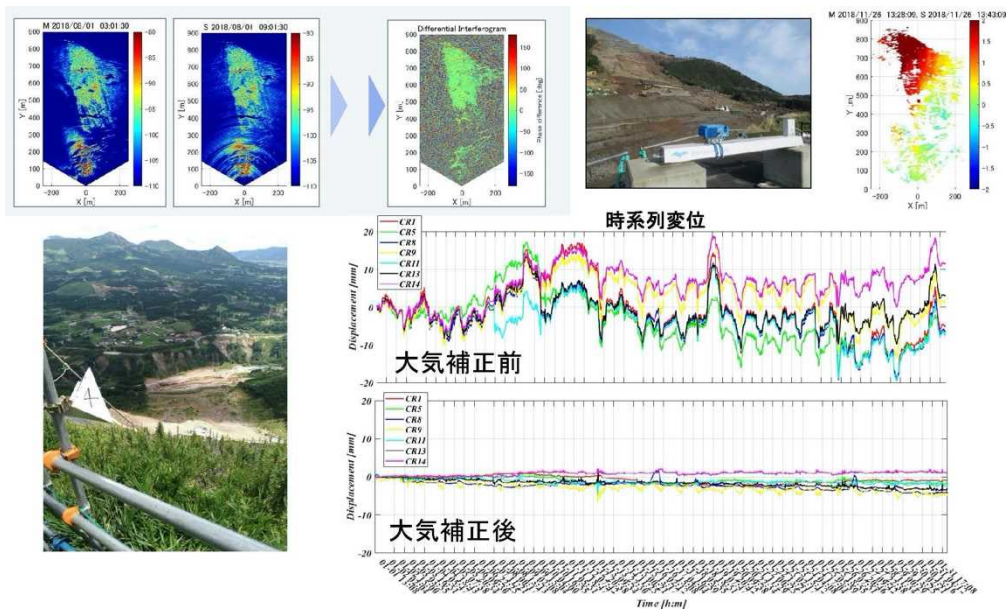
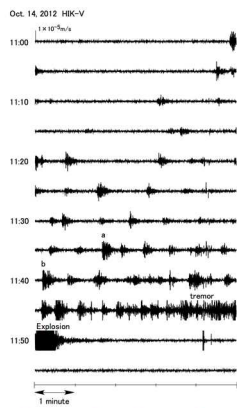


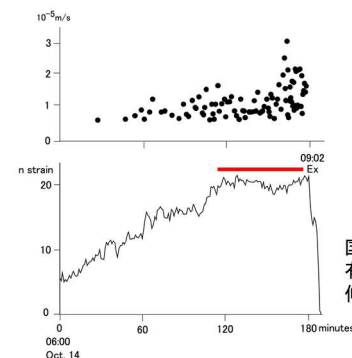
図 11. 観測範囲がカルデラ内部となる南阿蘇村立野における GB-SAR による 1 ヶ月分の計測結果（東北大学災害科学国際研究所 [課題番号：IRID03]）
 同地域は山間部であり、大きな大気誤差が発生する。大気補正をしないと大きな変位が現れるが、大気補正が正しく行われることでこの誤差を取り除くことができる。この結果から明らかなように、本 GB-SAR による観測では mm オーダーの変化を捉えられることが分かる。

噴火の前駆地震



火砕流を伴う噴火47例のうち
 27例で顕著な前駆地震が発生している

前駆地震と地盤変動(噴火前の膨張)



噴火前に膨張レートが減少、もしくは停止することがあり、前駆地震はその際に多く発生する

火砕流を伴う噴火の膨張停止時間は30分以上である

図 12. 地球物理学的観測と火砕流流動を関連付けるパラメータ群の精査結果（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI11]）
 火砕流をともなう 47 例の過去事例のうち 27 例で顕著な前震活動が発生していること、噴火前に地盤変動から把握される膨張レートが減少もしくは停止することがあり、前震活動はその際に多く発生すること、また火砕流を伴う噴火は噴火後の収縮量が大きいことなどが明らかになった。

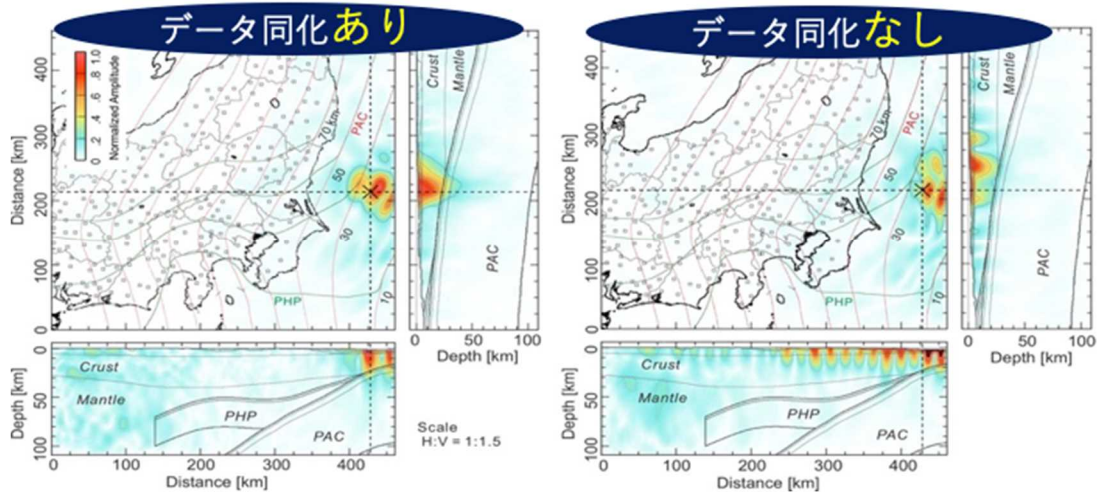


図 13. 時間逆転 FDM 計算+データ同化による 2008 年茨城県沖の地震 (Mw6.8) の震源イメージング結果 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_14]、Furumura et al., 2020)

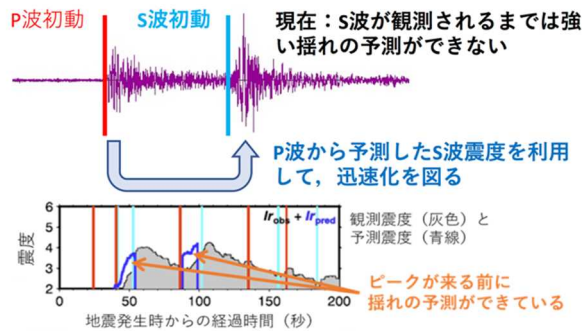


図 14. P波を検知する方法を發展させ、初期破壊のP波の上下動成分のみから得られる震度を予測に用いることにより、地盤増幅特性が不明な観測点でも適用できる手法の概念図 (気象庁 [課題番号: JMA_06])

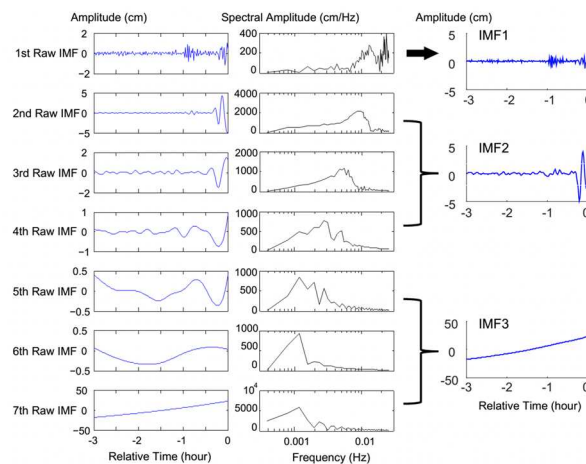


図 15. 経験的モード分解法 (Ensemble Empirical Mode Decomposition; EEMD) の海底圧力計記録の津波信号への適用結果 (弘前大学 [課題番号: HRS_02]、Wang et al., 2020a)

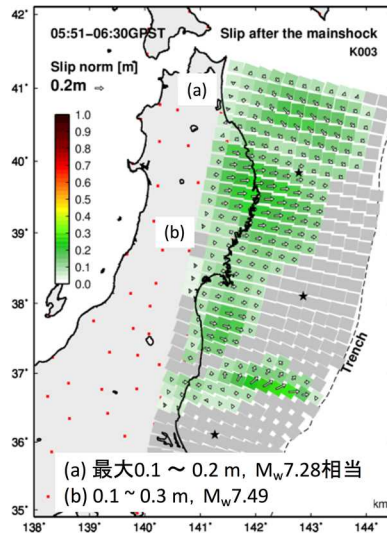


図 16. PTS によって推定された 2011 年東北地方太平洋沖地震直後の余効すべり分布（東北大学大学院理学研究科 [課題番号：THK_12]、田中・他，2020）

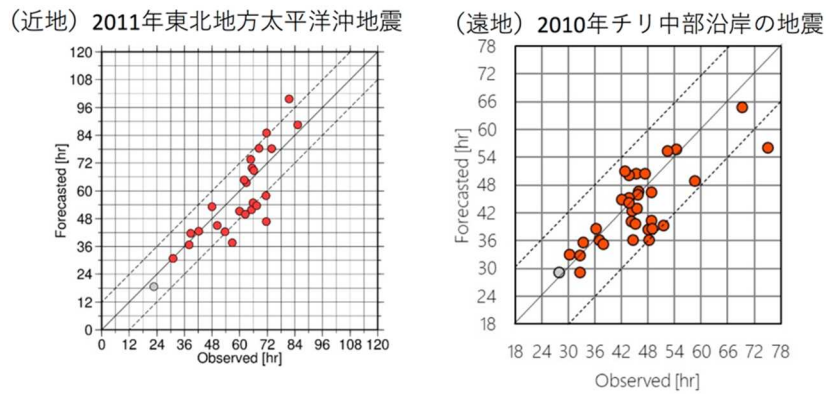


図 17. 津波後続波・減衰過程の予測についての検討結果（気象庁 [課題番号：JMA_06]）
 左図：近地津波について、沿岸津波観測データへのリアルタイム回帰分析による予測手法を 2011 年東北地方太平洋沖地震津波に適用して予測性能を評価した結果
 右図：遠地津波について、過去事例から得た減衰過程の特徴に基づく減衰式を 2010 年チリ中部沿岸の地震津波に適用して予測性能を評価した結果

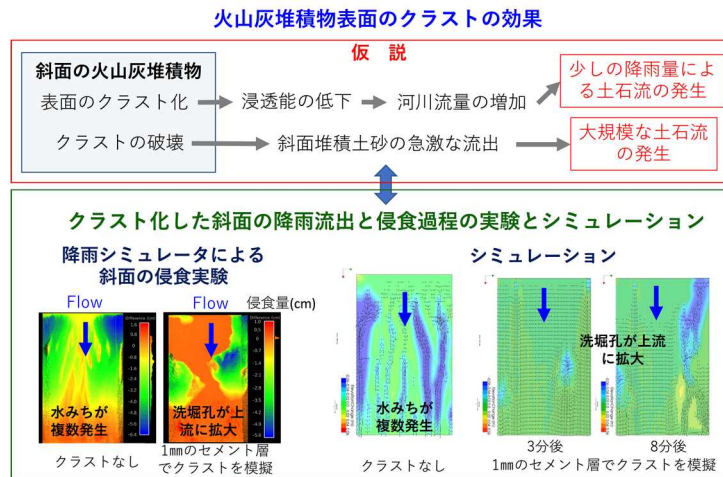


図 18. 降雨流出・土砂流出におけるクラストの存在の影響評価のための数値シミュレーション結果（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI_12]）

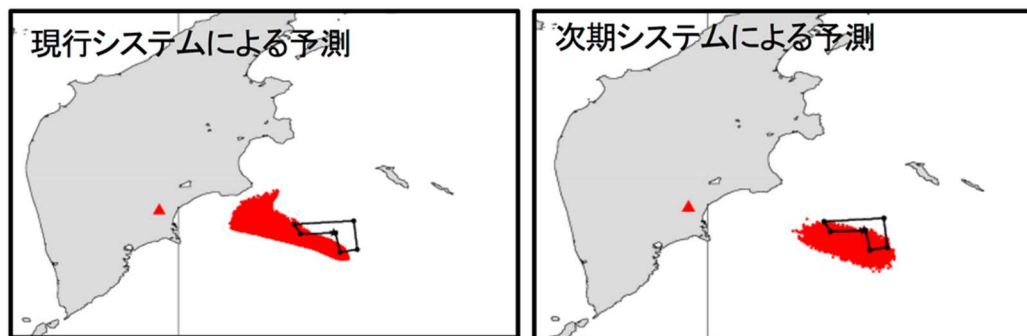


図 19. 次期システムを用いた火山灰予測の改善例（気象庁 [課題番号：JMA_07]）
 2020年6月2日のロシアのカリムスキー山（図中の▲）の噴火にともなう火山灰雲の予測の例。左図に現行システムによる予測、右図に現在現業化を進めている次期システムによる予測結果を示す。いずれも予報官が解析した火山灰雲の領域を用いて作成した初期値を使って計算した6時間後の予測結果（図中の●）。図中の黒い線は、同時刻における衛星解析で検出した火山灰雲の領域（実況）。

日本海側の地震発生確率に関する意識

Q13-1.地震の発生確率について、次のような表現で示された場合、どの程度「不安」を感じますか。それぞれあてはまるものを1つだけお選びください。

－「1.非常に不安を感じる」、「2.不安を感じる」、「3.どちらかといえば不安を感じる」、「4.どちらかといえば不安を感じない」、「5.不安を感じない」、「6.まったく不安を感じない」のうち、1～3を回答した人の割合をグラフにした。

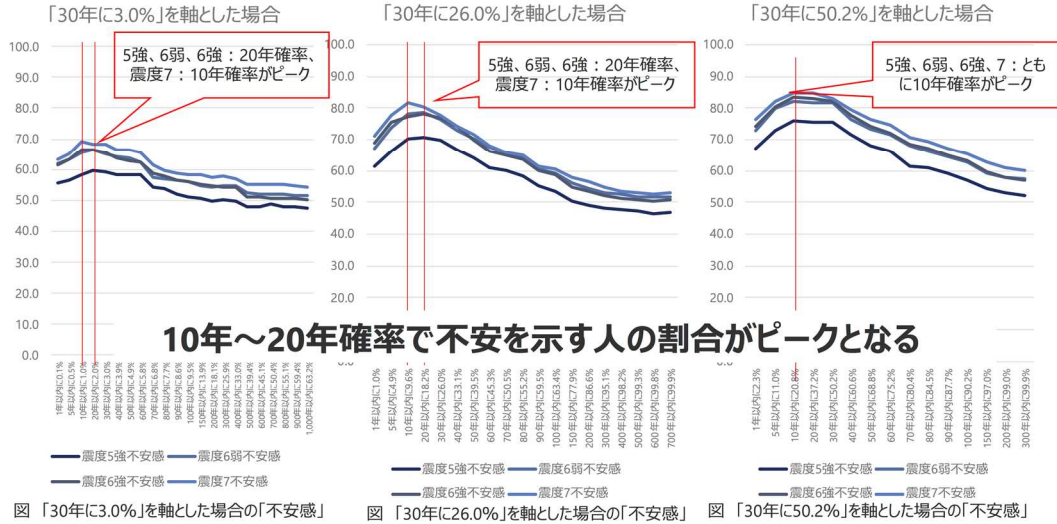


図 20. 地震発生確率に関する意識について、確率を計算する期間を変えた場合、人の意識はどのように変わるのかについて調査結果の一例（東京大学情報学環 [課題番号：III_01]）

	先行研究 (橋本・横田, 2019; ガイドライン)	本研究 (ポアソン・ISC-GEM使用・ 沈み込み帯に限定なしの 場合)	備考
半割れケース (M8+ → M8+) 一週間以内の発生確率	6.8% (7/103) 「十数回に一回程度」	2.9% (3/105) （「30回に1回程度」） (0.59～8.1%)	後発地震のマグニチュードの 仮定の違い(本研究は8.0、 橋本・横田は7.8)
// 確率利得	「通常の100倍程度 の確率」	130倍 (28～380倍)	整合的
一部割れケース (M7クラス → M8+) 一週間以内の発生確率	0.42% (6/1437) 「数百回に一回程度」	0.59% (8/1354) （「200回に1回程度」） (0.26～1.2%)	(先行研究における仮定等 が見つからず詳細不明)
// 確率利得	「通常の数倍程度 の確率」	28倍 (12～55倍)	本研究の結果のほうが大き い
M7クラス → M7クラス 一週間以内の発生確率	—	5.2% (71/1354) （「20回に1回程度」）	期待される通り、「半割れ ケース」と同程度の確率

図 21. M8 クラス以上(半割れ)および M7 クラス(一部割れ)の地震発生後に後発する地震の発生確率について、最近 100 年間のグローバルな地震カタログを用いて信頼区間も含めて計算した結果および先行研究との比較(東北大学災害科学国際研究所[課題番号: IRID04])

・振幅震源自動推定ツール

Amplitude Source Location法に基づく震動源の自動推定
(Battaglia & Aki, 2003; Kumagai et al. 2010 の手法に基づく処理結果の表示をシステムに追加)

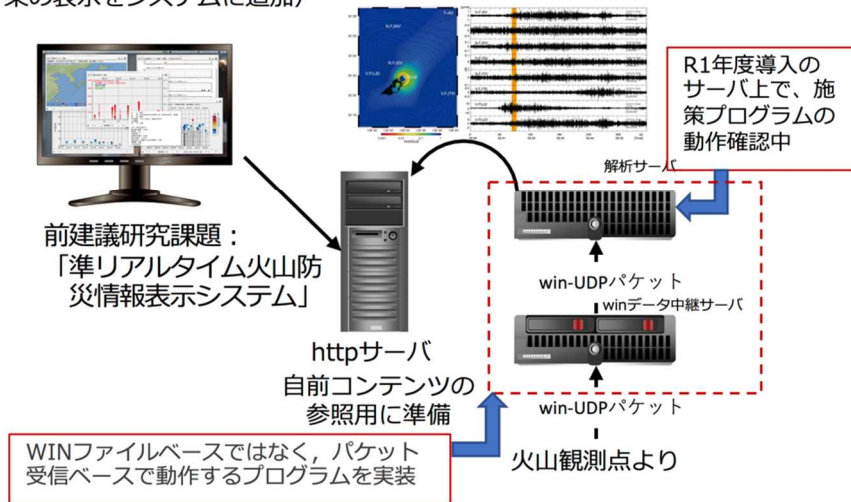


図 22. 地震波形・GNSS・傾斜計等のデータを即時解析して震源や地盤変動源を表示するシステムのうち、振幅震源自動推定ツールの開発・動作確認状況(北海道大学[課題番号: HKD_06])

1 (6) 防災リテラシー

「防災リテラシー」計画推進部会長 高橋 誠

(名古屋大学大学院環境学研究科)

副部会長 井ノ口 宗成

(富山大学都市デザイン学部)

地震・火山噴火現象の理解・予測を災害の軽減につなげるためには、地震・火山噴火といった自然現象に起因する災害誘因（外力）だけでなく、地形・地盤などの自然環境や、人間の持つ特性や社会の仕組みといった災害素因（自然素因と社会素因）を理解し、地震・火山噴火による災害の発生機構を総合的に解明することが必要であり、また、それらの研究成果を社会に対して適切に還元することが求められる。そのためには、社会が地震・火山噴火災害による被害の発生を抑止したり軽減したりするために必要とされる知識体系を明らかにすることが必要である。

現時点における研究成果に鑑みると、災害誘因としての自然事象に関する理解や予知・予測、災害誘因と災害素因との結び付きによって災害が発生する要因や機構に関する理解から、被害が発生した場合の対応にかかわる方策を得ることによって、災害の軽減を図ることが目指されている。とりわけ災害素因については、構造物や土地利用にとどまらず、人間の認知や行動、社会体制などにおける脆弱性の理解、災害シナリオの作成や災害情報の発信といった災害予防の側面に重点が置かれる。また、過去の地震・津波・火山災害事例を対象に、被害・応急・復旧・復興といった災害過程に沿った社会の回復力に焦点を当てた研究が行われている。一方、社会における防災リテラシーの実態やニーズに関する調査に基づいてその向上のために必要とされる知識要素を探り、教材や研修プログラムの開発につなげるような実践的な試みも行われている。

防災リテラシー部会は、基本部分を前計画における地震・火山災害部会から引き継ぎながら新たに設置された。防災・減災に対する社会の要請を意識し、理学・工学・人文社会科学の研究者が連携することによって、災害事例に基づき、災害の発生要因を災害誘因と災害素因とに関連づけて解明する研究を従前どおり推進する。また、マイクロジオデータやオープンサイエンスの手法なども活用し、産業界や行政機関、一般市民などのステークホルダーとの連携を深めつつ、社会における防災リテラシーの実態調査や災害軽減に効果的な知識体系要素の探求などを通して、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行うものである。

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

社会とのかかわりにおいて地震・火山噴火災害の発生機構を理解するためには、災害事象を、それが生じる場所や地域の歴史的・地理的特性と関連づけて分析することが重要である。近代以前の歴史災害の場合、現存する記録は限られており、その信頼性についての史料批判が不可欠である。本年度は、安政江戸地震（1855年）に関する重要な史料として「安政大地震絵巻」（三康図書館所蔵）を取り上げ、昨年度検討した「江戸大地震

之図」(東京大学史料編纂所所蔵)との比較によって、個々の絵が描写する場所や時間を詳細に検討した。たとえば、谷中天王寺五重塔九輪落下の描写は後の実測図と照合することで地震の揺れに関する検討材料になりうることなど(図1)、絵巻の史料としての信頼性や可能性を明らかにした(東京大学史料編纂所[課題番号:UTH_02])。

災害誘因としての場所限定性の強い津波については、安政東海地震津波(1858年)の被災地である浜名湖周辺の古地形復元と津波到達点の判定に取り組んだ。近世絵図に描かれた津波被害のようすを地理情報システム(GIS)上で分析するためには、その場所の地理的位置の同定(ジオコーディング)が不可欠である。浜名湖南東岸と北東岸について、現存する寺社や歴史的建造物などの位置をもとに、それぞれ「舞坂宿津波図」と「安政地震津波被害絵図」から街並みや古地形を復元するとともに浸水地点を判定した(図2)(東北大学災害科学国際研究所[課題番号:IRID05])。

現代の地震・津波災害については、2011年東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)を事例に被害から復興に至る地域社会の長期変動について調査し、震災後における避難・土地利用・防災施設を組み合わせた総合的防災政策の政策効果を検証した(図3)。その結果、三陸地域では、漁村の災害文化に対する過小評価と防災施設への依存、防潮堤計画と地域防災計画の分離、防災集団移転事業における避難道計画の不備などを指摘した。また仙台平野では、基幹産業である農業生産と防災集団移転中心の土地利用規制とのミスマッチ、長期にわたる広域的な交通障害による人口流出などによって生活基盤の脆弱化が進んでいることを明らかにした(名古屋大学[課題番号:NGY_06])。

土地利用計画と防災政策とのバランスは重要な政策的課題であり、この点に焦点を当て、南海トラフ地震の発生が想定される和歌山県那智勝浦町を事例に事前復興と津波対策の取り組みについて調査し、想定される被害の大きさと対策とのギャップを指摘した。那智勝浦町では、津波リスクが十分に認知され、緊急避難対策や公共施設の事前移転計画が講じられているが、住宅移転計画の議論が進まない背景に、費用負担をめぐって合意形成を図ることが容易ではない上に、地籍調査が遅れているために土地所有者の把握が難しく(図4)、世界遺産周辺地域の開発規制などによって移転適地が大幅に不足している現状が明らかになった(兵庫県立大学[課題番号:HGY_02])。

こうした土地や住宅の問題は地域による差異が大きく、災害の軽減を図るためには、地域の実情を調査し、より効果的な対策を考える必要がある。富山県を事例に国勢調査の「世帯構造等基本集計」から住宅の保有構造(持ち家と借家)と建物構造(木造と非木造)を調べた結果、それぞれ全国に比して持ち家と木造の比率が圧倒的に高いことがわかった(図5)。被災者生活再建支援の可否や程度は、罹災証明書に記載される「家屋の被災程度」によって変わるが、内閣府の指針では住家被害認定調査の方法が建物構造によって異なるため、富山県のような地方圏では、持ち家・木造住宅を想定したシステムを早急に整備する必要があることを指摘した(富山大学[課題番号:TYM_03])。

災害は、場合によっては被災地域に長期にわたる影響を与える。防災教育における地震災害事例に関する研究成果の活用について、兵庫県を対象に調査した結果、阪神・淡路大震災(1995年兵庫県南部地震)は、学校における防災教育が本格的に導入されるきっかけとなり、地震発生メカニズムや被害が兵庫県内の副読本すべてに掲載されているが、震災を経験した教員の高齢化により、被災経験を主題とした授業の実施機会が減少

し、対照的に南海トラフ地震を主題とした教材利用が増えていることが明らかになった。一方、約 95 年前の 1925 年北但大震災の事例は、主な被災地であった豊岡市城崎町の学校教育において現在も継続して活用されており、その要因として災害記憶の継承に対するコミュニティの役割が重要であることを指摘した（図 6）（兵庫県立大学 [課題番号：HYG_01]、Sakamoto, 2021）。

（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

社会における防災リテラシーの実態の把握については、応急期を想定したシナリオに基づいて、個人レベルにおけるリスク認知や避難行動の量的分析に取り組んだ。

まず、北海道稚内市での避難実験から収集した避難移動履歴データを用いて、地震による津波と土砂災害との複合災害を想定して集団避難行動の空間分析を行った。その結果、津波のみの場合には避難時間に猶予が見られるが、複合災害の場合には時間的な猶予がほとんどなく、より迅速に避難を開始する必要性が明らかになった（図 7）。また、参加者に避難実験結果をフィードバックした結果、特に避難行動速度と事前防災学習に関して参加者の意識に変化が見られ、津波からの避難を検討する際の基礎的な課題が明らかになった（北海道大学 [課題番号：HKD_07]）。

また認知科学のアプローチから、南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域在住の成人から得られたデータを分析した。その結果、避難するか否かを判断する上で参考にする情報・知識は、津波の特性や被害の予測、避難所の利用可能性や避難生活の見通し、居住地の位置や海拔、自治体やマスメディアなどの情報源といったカテゴリーに整理できるが、メディア情報に絞った場合、発信者・発信ツール・発信内容の 3次元において、災害情報が被害の発生抑止・軽減に資する過程と、その個人差が捉えられることを仮説的に提示した（図 8）（東北大学災害科学国際研究所 [課題番号：IRID06]）。

地震・火山噴火に関する一般市民の科学的知識レベルの向上は、緊急性の高い火山噴火災害の場合喫緊の課題であり、その際、地元のステークホルダーとどのように連携するかということが重要な検討項目である。

桜島は現在活動中の火山のうち人口 50 万以上の大都市に最も近接する火山であり、科学者と市民との共同によって観測から防災に至る一連の対応システムの構築が試みられている。2020 年 6 月 4 日噴火を受け、鹿児島市や気象庁と連携して火山防災勉強会を開催し、噴石飛散や噴火警戒レベルなどについて住民の認知度を調査した。その結果、桜島火山の噴火警戒レベルの意味や、噴石の飛散距離によって噴火警戒レベルが上がることに對する認知度はかなり高いものの、噴火警戒レベル 5 の基準である噴石の飛散距離はほとんど知られておらず（図 9）、被害に直結する具体的な数値について認知度を上げる必要があることを指摘した（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI13]）。

一方、2014 年に深刻な御岳山噴火被害を経験した長野県木曾地域は、観光地に位置しながらも超過疎の問題を抱えており、大学と自治体とが共同して、地元地域の火山防災力の向上を図る担い手として火山マイスターの制度を整備してきた。本年度は、引き続き活動記録を蓄積するとともに、火山マイスターに対するインタビュー調査と結果の予察的な質的分析を行った（図 10）。そこで抽出された課題は、マイスター自身の知識レベルの問題というよりも、制度設計や具体的な運営、活動を取り巻く外的環境にかかわる

ことが明らかになった（名古屋大学〔課題番号：NGY_06〕）。

近年大規模な地震や火山噴火が発生した熊本県阿蘇地域では、研究者と国や地元行政機関などが連携して、地震・火山観測の準リアルタイムデータ表示の設置とともに、ジオパークガイドの養成を通して防災リテラシーの向上を図る方策を展開してきた。とりわけ、阿蘇火山博物館を訪れる修学旅行生を対象としたガイドプログラム（防災教育プログラム）作成のため、熊本県観光統計表の教育旅行来熊者発地リストから上位都道府県を抽出し、そのニーズを把握するとともに、対象都道府県の防災マップの収集を開始した。また、都道府県自治体職員を主対象とした火山防災特別セミナーにおいて「高リスク・小規模噴火との共存」にかかわる講習を実践し、講習資料を整備した（図11）（京都大学理学研究科〔課題番号：KUS_03〕）。

防災リテラシー向上のための研修プログラムの開発については、試行段階において、研修の対象や方法を明確化することが重要であり、本年度は、実務者（行政担当）を対象に、地震・火山研究者が「理解してほしいこと」に基づく座学部分の研修プログラムを試行的に作成した（図12）。具体的には、研修項目ごとに学習目標を検討、地震研究者による研修スライドと指導上の留意点を作成、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、Web環境を活用したオンライン研修・オンデマンド研修・リアルタイム研修・ハイブリッド型研修、また構成要素として座学・動画・演習等の組み合わせといった研修方法について、自治体の業務手順に沿った研修プログラムにおいて検討した（新潟大学〔課題番号：NGT_02〕）。

最後に、オープンサイエンス手法（市民参画型科学、市民参画型データ収集・管理）を、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向上、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、自然災害に関する歴史資料の「みんなで翻刻」プロジェクト、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試行といった4つの取り組みに具体的に導入し、防災リテラシーの向上に対する可能性を検討した（図13）。とりわけ市民参加型であるがゆえに、感染症拡大の状況下において、研究者と市民、また市民同士の対面コミュニケーションに限界を抱える一方で、オンラインツールを用いた手法の可能性も明らかになった（図13）（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI14〕）。

これまでの課題と今後の展望

昨年度から開始された観測研究計画においては、地震・火山噴火現象の理解・予測を災害の軽減につなげるための災害科学の確立を目標として、防災・減災に対する社会の要請を意識しながら、全国の大学における理学・工学・人文社会科学の研究者が連携することによって、地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の研究と、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実施してきた。

具体的に、地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の研究においては、近世・近代の史料を批判的に検討し、被害の状況や社会の対応を分析した。また東日本大震災などの近年の災害を事例にしなが、災害復興や防災対策、防災教育などの社会対応の課題について検討した。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に関しては、災害の社会素因である脆弱性を個人レベルで評価・可視化する手法を開発

するとともに、社会の防災リテラシーの水準を把握した。また、オープンサイエンスやリスクコミュニケーションなど新しい手法を取り入れ、行政機関や一般市民などと連携しながらリスク認知能力を涵養したり知識レベルの向上させたりする取り組みを開始し、具体的に研修プログラムを試作し実践した。

今後は、過去2年間における検討をさらに深化させながら理論構築を進めていくことが重要である。地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の研究においては、史料データベースといった歴史資料などに基づき過去の地震・津波・火山災害などの自然災害事例を蓄積し、当時の人々の対応や教訓、復興過程などについて総合的に検討する。また、災害誘因の事前評価と災害素因、とりわけ脆弱性概念とを結び付けて災害発生機構の理論を洗練させ、とりわけ災害の予測や予防、災害対応にかかわる知識要素を検討することによって防災リテラシーの体系化を図る。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においては、社会における防災リテラシーの実態やニーズの把握にさらに努めるとともに、前段にかかわる最新研究成果を取り入れながら、行政職員やボランティアなど、対象を絞った講習・研修プログラムの試行とフィードバックを重ねていくすることも必要である。その際、ジオマイクロデータやGISを利用した空間分析法の構築、地震・火山情報の配信システムの整備、オープンサイエンスやワークショップといった市民参加型リスクコミュニケーションなど、新しい手法の開発を継続させることが重要である。

成果リスト

- 蝦名裕一・今井健太郎・大林涼子・柄本邦明・都司嘉宣, 2020, 古絵図に基づく安政東海地震の浜名湖周辺における津波浸水域の分析, 歴史地震, 35, 187-206.
- 蝦名裕一・森口周二・呉修一・菅原大助, 2020, 岩手県岩泉町における歴史地形と台風被害の関連性の解明, JpGU-AGU Joint Meeting, MIS28-07.
- Goltz, J., G. Nakano, H. Park, and K. Yamori, 2020, Earthquake ground motion and human behavior: using DYFI data to assess behavioral response to earthquakes, Earthquake Spectra, doi:10.1177/8755293019899958.
- Iguchi, M., 2020, Resilience to Volcano- and Landslide-Related Hazards, in Disaster Risk Reduction and Resilience: Disaster and Risk Research: GADRI Book Series, ed. by M. Yokomatsu and S. Hochrainer-Stigler, Springer, 25-44, doi:10.1007/978-981-15-4320-3_3.
- Iguchi, M., 2021, Chapter 18 Volcano emergency planning at Sakurajima volcano, in Forecasting and Planning for Volcanic Hazards, Risks, and Disasters: Hazards and Disasters Series Volume 2, ed. by P. Papale, Elsevier, 635-668, doi:10.1016/B978-0-12-818082-2.00018-4.
- 加納靖之・杉森玲子・榎原雅治・佐竹健治, 2021, 歴史のなかの地震・噴火—過去がしめす未来, 東京大学出版会, 228pp.
- 工藤由佳・橋本雄一, 2020, 積雪寒冷都市における複合災害時の避難困難地域に関する空間分析—北海道留萌市の津波浸水想定域の事例, 地理情報システム学会講演論文集, 29, CD-ROM.

- 三好達也・橋本雄一，2020，新型コロナ禍における北海道のGISコミュニティ活動，地理情報システム学会講演論文集，29，CD-ROM.
- 室井研二，2020，臨海工業都市の災害—伊勢湾台風後のコミュニティと災害脆弱性，東海社会学会年報，12，15-31.
- 奥野祐介・塩崎大輔・橋本雄一，2020，疑似的津波集団避難に関する移動軌跡データ分析，地理情報システム学会講演論文集，29，CD-ROM.
- 小野塚仁海・橋本雄一，2020，携帯電話人口統計を援用した大規模停電を伴う地震災害の避難行動推定，地理情報システム学会講演論文集，29，CD-ROM.
- Sakamoto, M., 2020, Disaster memories in museums and disaster recovery: disaster reduction institute and 1995 Hanshin-Awaji earthquake recovery, 7th World Conference on Earthquake Engineering, 10a-009, 1-10.
- Sakamoto, M., 2021, Transferring historical disaster memories: the 1925 North Tajima earthquake, *J. Disaster Res.*, 16(1), 163-169, doi:10.20965/jdr.2021.p0163.
- 塩崎大輔・橋本雄一，2020，登記情報を用いたスキーリゾート地区における不動産の空間分析，地理情報システム学会講演論文集，29，CD-ROM.
- Sugiura, M., R. Nouchi, A. Honda, S. Sato, T. Abe, and F. Imamura, 2020, Survival-oriented personality factors are associated with various types of social support in an emergency disaster situation, *PLoS One*, 15(2), doi: 10.1371/journal.pone.0228875.
- 高橋誠，2020，海から遠いまち—伊勢湾台風被災地における土地利用変化と災害暴露性，東海社会学会年報，12，32-45.
- 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—地震観測所のサイエンスミュージアム・プロジェクトをめぐって，*実験社会心理学研究*，60(2)，82-99.
- Yamori, K., and Sugiyama, T., 2020, Development and social implementation of smartphone app Nige-Tore for improving tsunami evacuation drills: synergistic effects between commitment and contingency, *Int. J. Disaster Risk Sci.*, 11, 751-761, doi:10.1007/s13753-020-00319-1.



図1. 安政江戸地震に関する「安政大地震絵巻」の描写と他の資料との照合(東京大学史料編纂所 [課題番号: UTH_02])

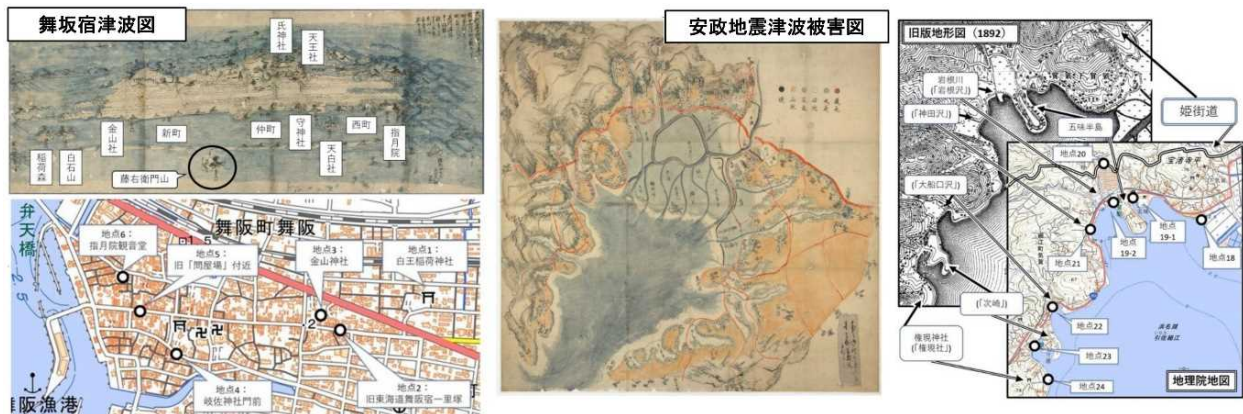


図2. 絵図に見る浜名湖周辺の安政津波の被害と地理的位置の同定(東北大学災害科学国際研究所 [課題番号: IRID05])

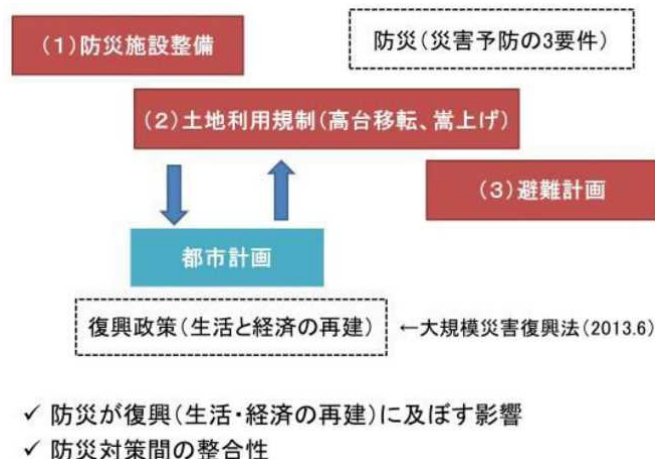


図3. 東日本大震災後の復興事業と防災対策との関係(名古屋大学 [課題番号: NGY_06])

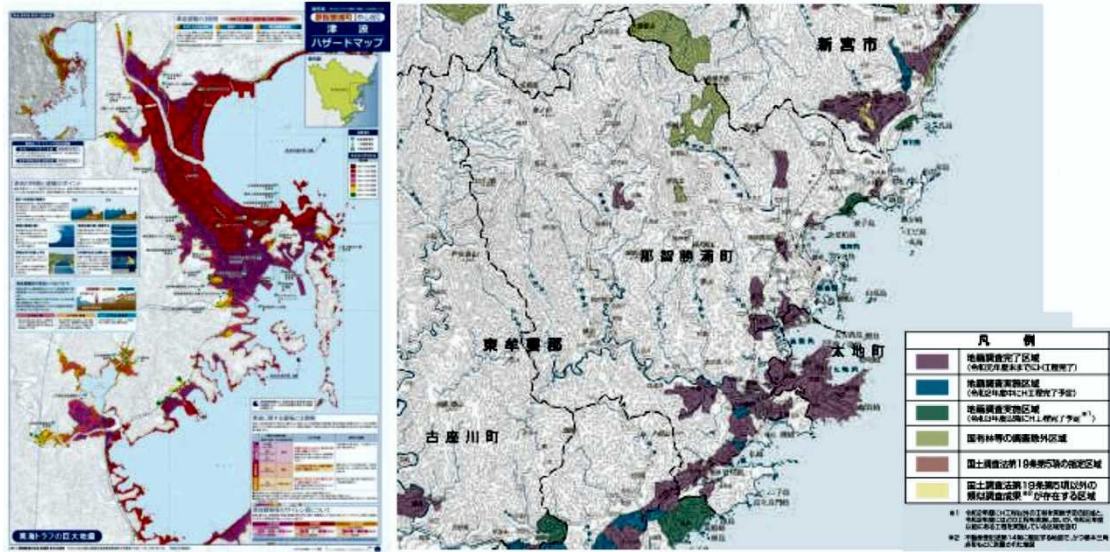


図4. 那智勝浦町における津波危険地域（左）と地籍調査の進捗状況（右）（兵庫県立大学 [課題番号：HGY_02]）
左図の赤色の区域が津波危険地域、右図の紫色の部分在地籍調査完了区域、無色の部分が未実施区域を示す。

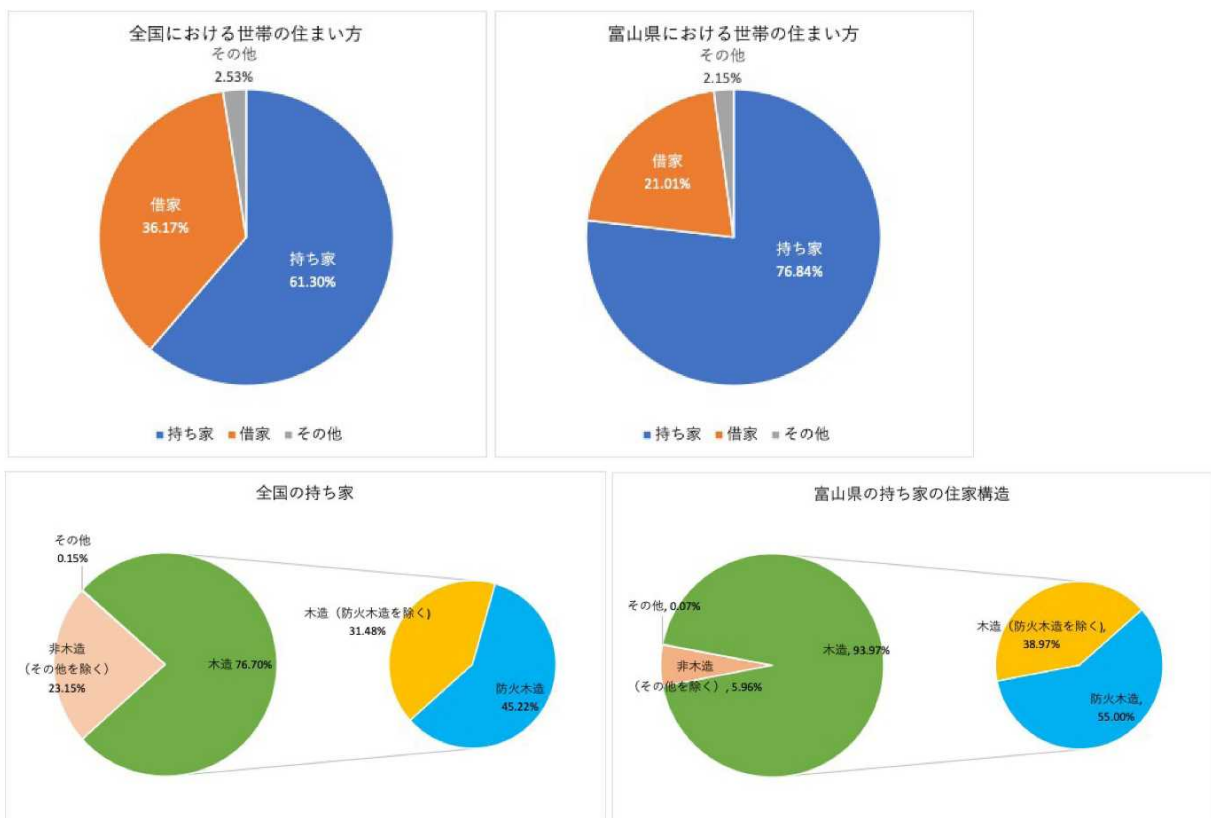


図5. 全国と富山県における住宅の保有構造（上）と建物構造（下）（富山大学 [課題番号：TYM_03]）



図6. 1925年北但大震災の災害記憶を継承する豊岡市のコミュニティの取り組み（兵庫県立大学 [課題番号：HYG_01]）

左図：北但大震災についての学校の歴史記録
 中図：寺院で執り行われる地震記念式典
 右図：コミュニティで維持される地震記念碑

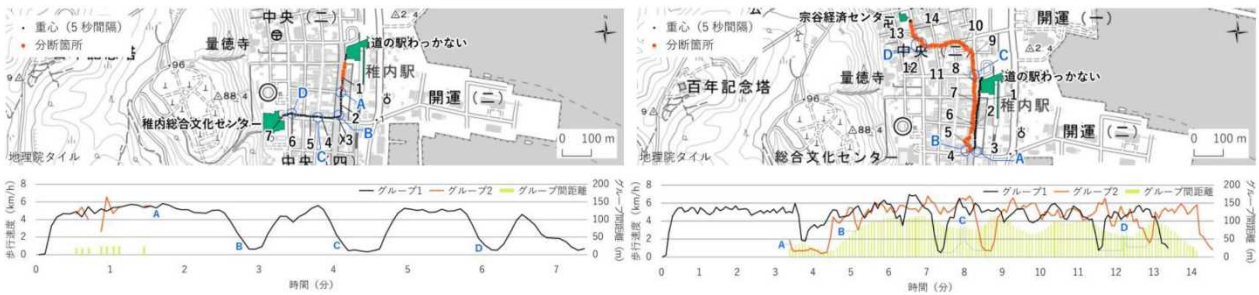


図7. 津波（左）と複合災害（右）のシナリオにおける避難行動実験の空間分析結果（北海道大学 [課題番号：HKD_07]）

上図：分断発生箇所
 下図：平均歩行速度および分断発生時のグループ間距離

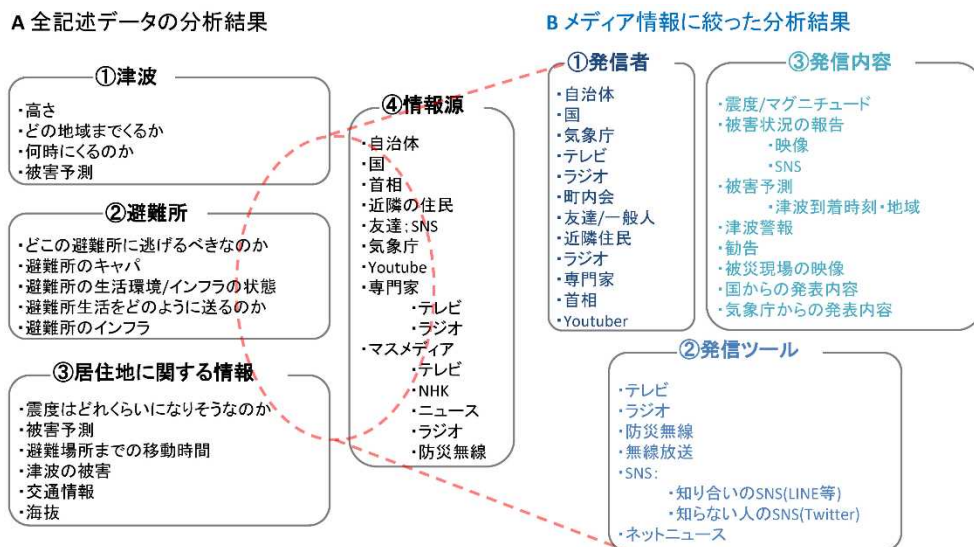


図8. 避難するか否か判断する上で参考にする情報・知識の抽出結果（東北大学災害科学国際研究所 [課題番号：IRID06]）

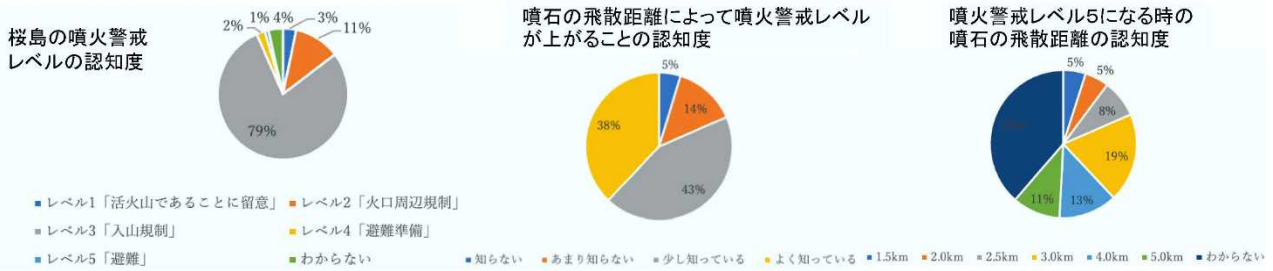


図 9. 桜島火山の噴火警戒レベル噴石の飛散距離に関する住民の認知度（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI13]）

インタビュー項目

- ・ 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？
- ・ マイスターの活動が、地元や周りの人の火山防災意識向上に役立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、ビジターセンターの活用について

↓

- ・ マイスター志望者、基礎講習受講者が減っている。マイスターの認知度が低い。
- ・ マイスターのメリットが見えにくい
- ・ 「特権」があればいいのではないか(例えば、規制区域に入れるなど)？
- ・ 会議の時間が長い。
- ・ 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。
- ・ 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。

図 10. 御嶽山火山マイスターへのインタビュー調査から抽出した課題の予察的結果（名古屋大学 [課題番号：NGY_06]）

図 11. 阿蘇から他自治体の防災担当職員へ伝えるべき「高リスク・小規模噴火との共存の」に関する講習教材（部分）（京都大学理学研究科 [課題番号：KUS_03]）

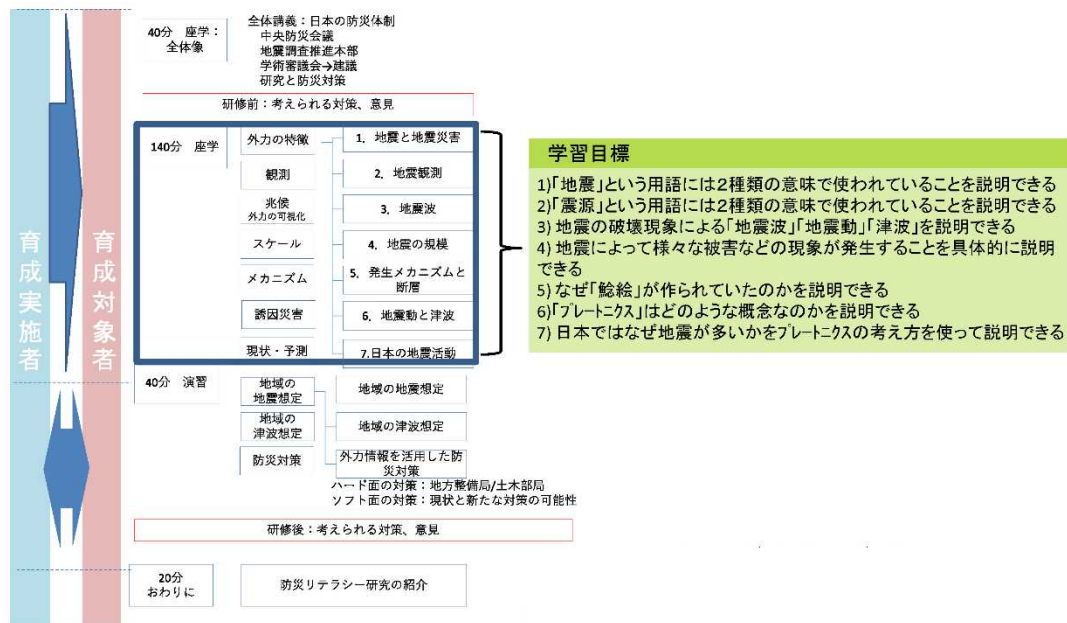


図 12. 防災リテラシー育成プログラム（地震）のプロトタイプと学習目標（新潟大学 [課題番号：NGT_02]）

- (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：
コロナ禍のため、サイエンスミュージアムでの活動がほぼ休止に追い込まれた。このため、本年度は、災害リテラシー向上の基盤施設としてのサイエンスミュージアムを、今後安定的に運用するための制度的基盤作りに専心した。その結果、本年度内に「特定非営利活動法人阿武山地震・防災サイエンスミュージアム」を発足させ、(a)地震観測、観測網の重要性を自治体関係者に理解してもらうためのプログラムの設定、(b)阿武山観測所内外でのアウトリーチ活動の推進母体とすることになった。
- (2) 地震・津波避難訓練「逃げトレ」の導入・運用：
南海トラフ地震の臨時情報発表時の事前避難を念頭に、津波避難訓練支援ソフト「逃げトレ」を改変し、避難訓練に参加した一般市民の行動データを事前避難の要不要の診断に活用するためのシステムのパイロット版を制作した。同時に、USGS のDYFI プロジェクトとの共同により、地震の体感データを広く市民から収集し、地震の被害状況の即時把握等につなげるシステムをオープンサイエンスとリンクさせるための研究も継続実施し、学術論文として成果を公表した。
- (3) 自然災害史料「みんなで翻刻」プロジェクトの推進：
過去の地震・津波災害の記録と推定される記述が含まれる歴史資料（古文書等）を市民参加で解読する作業を主とする「みんなで翻刻」のシステムを一昨年7月にリニューアルした。今年度、登録者数がこれまでに目標の半数以上の7300人に到達し、翻刻された文字数も昨年から700万字増えて1300万字に上った。海外で所蔵されている日本資料も追加するなど、順調にプロジェクトが進んでいる。歴史学、考古学との学際連携により、地震学を中心とする災害リテラシーの裾野の拡大に寄与している。
- (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：
稠密内陸地震観測研究である「満点計画」、「0.1満点計画」の中核を担う「満点地震計」による小中学生対象の防災授業、参画型観測活動を継続し、今年度も、リモートを交えすでに計8回実施した。のべ200人以上の児童・生徒が参加した。同時に、大阪府北部地震の後に、のべ100人の市民参画を得て展開した観測網から得られるデータの分析も継続中である。あわせて、これらの参加型観測研究が防災リテラシーの向上に及ぼす効果と可能性について検証中である。

図 13. オープンサイエンスによる防災リテラシー育成における課題の抽出（例示）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI14]）

1 (7) 史料・考古

「史料・考古」計画推進部会長 榎原雅治
(東京大学史料編纂所)
副部会長 山中佳子
(名古屋大学大学院環境学研究科)

日本列島において近代的な観測機器による地震観測が開始されたのは明治時代前期以降であり、それ以前に発生した地震・火山噴火現象、またはそれらによる災害に関する知見を得るためには、歴史資料に基づく地震や火山噴火の情報が不可欠である。日本における地震火山関連の文献史料の収集・編纂とそれらを用いた地震や火山噴火の研究は、明治時代後期より実施されており、各種の地震史料集や火山噴火史料集が刊行されている。

本観測研究計画の「史料・考古」部会では、これまでに蓄積されてきた地震・火山噴火関連の文献史料データを電子化することによって一層の活用の便をはかるとともに、全国の考古遺跡に残された災害痕跡の情報を収集し、さらに文献史料と考古資料のデータの統合的な検索ができる体制を構築することをめざしている。この文献史料、考古資料のデータの収集と整理は、歴史学研究者と地震学研究者とで議論を継続しながら実施している。これによって、観測データのない近代以前の地震・火山噴火の実態についての信頼性の高い情報を提供し、地震・火山活動の研究や長期予測に資することとともに、これらのデータを活用した新たな研究手法の検討やその利用も重要な研究課題である。

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

史料や考古資料の分析に基づいて、近代的な機器観測が開始される前に発生した低頻度で大規模な地震・火山噴火やそれらによる災害を調査・研究することにより、今後発生するそれらの現象や災害の様相を予測し、その被害の軽減に貢献できると考えられる。近代的な機器観測が開始されたのは明治時代以降であり、百数十年から数百年の期間において同一地域で発生する低頻度大規模地震や火山噴火の情報はほとんど取得されていない。しかし歴史学や考古学で用いられる史料や考古資料には、地震や火山噴火に関連した記述や災害痕跡が含まれている。このような史料や考古資料を地震学や火山学の研究に役立てるためには、従来のような史資料の収集・編纂のみに止まらず、観測データとの比較・検討を目的としたデジタルデータ化とデータベースの構築が必要になってくる。これによって、地震学や火山学の研究に史料や考古資料を活用する際の利便性が向上するだけでなく、信頼性の高い史料・考古データをデータベース化することで、歴史地震や火山噴火の研究における信頼性を高めていけると考える。

ア. 史料の収集とデータベース化

・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

前年度に引き続き、既刊地震史料集の電子テキスト化を進めた。高精度 OCR によるテ

キスト化の方式を導入したことによって、作業効率、精度とも大幅に上がり、本年度は8冊 7988 ページの電子テキスト化を達成した。これによって全体の 91%の工程を終了したことになる。また、既刊史料集に収録されている史料の原典による校訂と未収録の史料記事の補充を進めた。現在、予定全9冊のうち3冊の校訂・データ修正を終えている。さらに3冊の校訂を終え、データを修正中である。また構築した地震史料データベースを利用しやすい形で公開するための検索方法を検討し、a.年月単位の地震史料数一覧表から検索する方法、b.『理科年表』掲載の地震から検索する方法、c.地震史料の所在地名から検索する方法を構築した(東京大学史料編纂所[課題番号:UTH_01])。また史料データと考古データを統合的に分析することを可能とするために、既刊地震史料集のテキストデータベースのAPIを設計した(東京大学地震火山史料連携研究機構[課題番号:HMEV01])。

宇佐美龍夫氏がこれまで収集し整理してきた史料に載っていた24361件すべての地震を1行1地震として整理した日本歴史地震総表2020が完成した。それぞれ有感だった地名も合せて載せられている。今年度はこれらを検索できるシステムを構築した。ユーザーのニーズを考えると、年月日からの検索だけでなく有感地域での検索も必要だろうと考えたが、日本歴史地震総表に載っている地名は史料の年代によっても異なり、ユーザーが入力するのはたやすくはない。そこですべての有感地点名が何県に存在するのかの対応表を作り、現在の県名から検索できるようにした。検索サイトは以下のとおり。<http://www.evr.c.seis.nagoya-u.ac.jp/sohyo/> (名古屋大学[課題番号:NGY_01])。

・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

今年度はかつての気仙郡今泉町(現在の陸前高田市気仙町)の住人吉田東岬(1840生~1921没)が記した『古新手鑑』の解説・分析をおこなった。『古新手鑑』は、『新収日本地震史料』に一部解説文が収録されているが、多くの部分が未翻刻のままであった。中扉には「仙台旧藩治宙定例御用手鑑」・「天変地異抜抜書」とあり、安政元年(1854)伊豆地震、安政2年(1855)江戸地震、安政3年(1856)八戸沖津波、安政4年(1857)冷害、安政5年(1858)彗星、明治29年(1896)三陸津波について記述されている。また明治三陸津波部分には、慶長16年(1611)地震津波の記述が加えられている。慶長16年(1611)慶長奥州地震津波については、気仙郡今泉・高田・浜田の三ヶ村で100余名の溺死者があったとし、この情報は気仙大肝入職の山田六郎兵衛から吉田氏に引き継がれた文書に基づいているとしている。安政3年(1856)八戸沖地震については、家屋への被害やけが人はないとしているが、「神崎前」や「八日町裏通り」、「鉄砲町」の道路などが津波に浸水したと記している。明治29年(1896)の明治三陸津波の記述では、気仙郡各地の死者について「戸籍面におゐての調」として、各村の死者数を記す。しかし、この死者数については、従来把握されていた岩手県警の調書や、山奈宗真の『大海嘯取調書』と死者数が大きく食い違う結果となった(表1参照)。現段階では、山奈の数値が「最も信頼がおける」とされているが、当時の戸籍を調べたとする『古新手鑑』の死者数の出現により、明治三陸津波の死者数は再検討される必要性が出てきた(東北大学災害科学国際研究所[課題番号:IRID01])。

・史料を地震研究に活用する方法についての検討

北但馬地震は1925年5月23日11時10分頃に発生したM6.8の内陸型地震であり、震央は兵庫県円山川河口付近と考えられている。先行研究によると、起震断層や震央の直近では、家屋倒壊が瞬時に引き起こされることなどの理由で、人的被害が拡大する傾向にあるとされる。これにより人的被害の分布は、観測記録のない歴史地震の起震断層を特定するのに有効であるとする研究もある。本研究では発災直後に救援に出動した、旧海軍舞鶴要港部の史料を使用して、当時の状況を明らかにした。本地震における震央直近の地域では、建物倒壊が多数発生し、一部の集落では火災が拡大しているが、死亡率が低い地域が存在する。逆に震央から離れているが死亡率が非常に高い地域が存在する。史料からこれらの地域の被害発生プロセスを明らかにすると、地域の生業や建築様式の違い、火災の程度、救援の有無など、複数の要因が重層的に作用して人的被害を拡大・縮小させていることが明らかとなった。地震による人的被害の程度は単純に震央距離のみで説明できるものではないことの一例を示した。また本地震が発生した大正末期は、大正関東地震を教訓として、陸軍などそれまで難しかった師管や衛戍地を越えた軍隊の災害出動を準備していた時期にあたる。本地震における軍隊の出動記録を検討したところ、旧陸軍が演習を名目として衛戍地外に災害出動を行うなど、軍隊が迅速かつ柔軟に出動している事が明らかになった(東京大学地震火山史料連携研究機構[課題番号:HMEV01])。

中世の畿内以外での地震情報を収集するためには年代記が欠かせないが、その史料価値については未解明な点が多い。本年度は『三国一覧合運図』龍谷大学本・東山文庫本、および『大唐日本王代年代記』(愛知学院大学 図書館所蔵)から同時代的に加筆された記事を抽出し、史料学的に検討した。その結果、龍谷大学本・東山文庫本は少なくとも観応2年(1351)以降、『大唐日本王代年代記』は文明7年(1475)以降の記事は同時代史料であることを確認した。すなわち、龍谷大学本の康安元年(1361)6月22日～永正16年(1516)3月18日の間の20件、東山文庫本の康安元年6月22日～明応7年(1498)8月25日の間の6件、『大唐日本王代年代記』の明応2年(1493)10月晦日～天正13年11月29日(1585年1月18日)の間の4件の地震記事は信頼できることを明らかにした(新潟大学[課題番号:NGT_01])。

・歴史災害研究のオープンサイエンス化に向けた検討

合宿形式の古文書解読のための勉強会(9月と3月の2回、各3日間、オンライン)、および定期的な勉強会を開催した。参加者の解読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。近江八幡の商家当主の日記「市田家日記」にある地震の有感地点を日記原本の調査に基づいて特定した(服部・他, 2020)。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。欧州の歴史地震データベース(AHEAD、the European Archive of Historical Earthquake Data 1000-1899)で用いられているツールを活用して、歴史地震の震度データベースを試作した。市民参加型の歴史資料解読プロジェクト「みんなで翻刻」に、国立国会図書館等が所蔵する地震史料を追加した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_01])。

イ. 考古データの収集・集成と分析

・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

本年度は、①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、②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・火山噴火像の実態解明を進めることを大きな課題とした。①については、近畿エリアの地震痕跡と、九州エリアの火山噴火痕跡の調査で進展があった。近畿エリアの奈良盆地東縁断層と生駒断層周辺において、上位段丘や丘陵上の遺跡群で多くの地すべりや地割れによる遺跡の被災痕跡が、丘陵下や低湿地部で液状化による噴砂痕跡や建物群の不等沈下痕跡が数多く確認された（図1）。これらの多くは9世紀～11世紀、15世紀～16世紀、17世紀～18世紀に集中しており、それぞれ『日本三代実録』、『後二条関白師通記』、『中右記』、『後愚昧記』、『嘉元記』、『三綱所日記』などに記録される地震に対応する可能性があり、現在その検証作業を進めている（図2）。またこれらの地震痕跡については、9世紀以前に発生した震度5弱以上の地震痕跡も多くみられる。史料そのものが少ない古代のものであり、古代の地震の解明のために重要な成果といえるだろう。

火山噴火災害については、桜島大規模火山噴火総合研究グループとの共同研究を中心に進んでいる。桜島、南九州市、鹿児島市、始良市、霧島市、曾於市、垂水市、志布志市の約4千遺跡について位置と層序の情報をとりまとめ、その中から火山噴火災害を中心に様々な災害痕跡を集成した（図3）。その結果、遺構内に認められる降下火山灰の一次堆積の情報から、これまでに認識されていなかった知見が得られ始めたり、火山噴火に先行する液状化や噴砂といった地震痕跡が見つかったりしている。例えば祇園之洲砲台跡や鹿児島紡績所跡（鹿児島市）など、近世末の遺跡の遺構を被覆する降下火山灰層の事例では、まず火山灰は大正3年（1914）の噴火であることがわかった。この火山噴火による被災は、これまで、火山灰堆積物の調査や降下火山灰シミュレーションから、桜島より東側のみに影響したと考えられていた。しかし当該火山灰は、桜島の西側に位置する2つの遺跡からも発見された。このような事例の集成は、災害シミュレーションの更新や深化を促進する効果があると考えられる（奈良文化財研究所〔課題番号：NAB_01〕）。

・縄文三陸地震津波の解明のための考古学的調査

縄文時代中期後期（4490-3220 calBP）の津波の研究を実施した。考古学では、岩手県南部5地点から導かれた3800-3650BPイベント、および宮城県大谷海岸のコアから抽出された3500BPイベントを、相原（2012）が縄文時代後期前葉の堀之内1式～加曾利B1式後半頃にあて、後期遺跡の減少傾向をこの津波の存在と関連付けて理解してきた。一方、近年の高田・他（2016）の津波堆積物研究では、縄文時代後期の時間幅のなかで3800BP、3500BP、3300BPという複数の巨大津波が発生した可能性が指摘される。そうした動向をふまえつつ、齋藤・鈴木（2020）は新報告された遺跡と既報告の例を洗い直し、あらためて考古学の立場から津波の発生年代と頻度を提示している。分析の結果、a. 縄文時代後期前葉の崎山弁天1式期と、b. 後期中頃の浜川目沢田式期の直後に海浜集落が衰退しており、三陸海岸ではこの両時期に巨大津波が発生している可能性が高いことを指摘する

に至った。東京湾岸の貝塚遺跡でも、この a・b の津波と同じ考古年代に貝塚遺跡が中断・衰退し、また日本海側（新潟）では b の時期に液状化を引き起こす大地震が発生している。この 2 回の津波が発生した頃が、関東地方や日本海側でも大地震・津波の発生する活動期であることは間違いなく、人類活動にも大きなダメージをあたえたことが判明した（新潟大学 [課題番号：NGT_01]）。

（2）低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

近代的な機器観測による観測データ取得開始以前に発生した地震・火山噴火について知るためには、歴史学や考古学で用いる史料や考古資料に基づいて、調査・研究を実施していく必要がある。これらの史料や考古資料をデータベース化し、位置情報や時間情報を付与して被害分布図等を作成することによって、近代的な機器観測に基づく観測データとの比較・検討が可能になる。このような被害分布図等を活用して、前近代に発生した低頻度大規模地震や火山噴火現象とそれらによる災害の実態を解明することは、長期的な災害対策の策定に寄与できると考える。

・多言語の地震火山関連史料による安政東海地震の発震時刻の検討

安政東海地震について記す史料には、地震が起きた時刻を嘉永 7 年 11 月 4 日（1855 年 12 月 23 日）の「五ツ時過」（午前 8 時過ぎ）とするものや、「四時少々前」（午前 10 時前）とするものなどがあり、日本の史料から推定される発震時には幅がある。このとき下田では、国境画定と開国をめぐって、ディアナ号に乗ってきたロシア使節と江戸幕府の役人との間で条約交渉が行われており、地震の約 1 ヶ月後には日米和親条約を批准する目的でアメリカ使節も来航したため、地震や津波についての情報は海外にも伝えられた。英語で記された当時の新聞記事のうちディアナ号の航海日誌との関連がみてとれるものでは、発震時を 9:15（上海、アメリカの新聞）、または 9:45（イギリスの新聞）としている。揺れが続いた時間についてもそれぞれ 2～3 分、約 1 分としている点で違いがある。ロシア語で記されたディアナ号の航海日誌原本の該当部分を確認したところ、発震時に関しては英語で at 9:45 となる記述があり、揺れは約 1 分と記されていた。その通りに伝えていたのはイギリスの新聞記事であったことになり、情報が伝わった経緯の違いや翻訳に伴う問題から、航海日誌とは異なる記述が生じたと考えられる。ただし、発震時については 15 分刻みで出来事を記す航海日誌の書き方をふまえると、9:45 ちょうどでなく、9:45 から 10:00 の間に地震が起きた、と理解するのが妥当である（有泉和子氏のご教示による）。安政東海地震に伴う津波はアメリカ西海岸にも到達したが、その記録の解析から導かれる発震時は 9:46 となり（Kusumoto et al., 2020）、航海日誌の記述と重なる。また、地震当日の下田の日の出（6:48）と日の入り（16:38）の時刻から計算すると、「五ツ時」は 8:03、「四時」は 9:53 となり、「四時少々前」（「村垣淡路守公務日記」）に地震が起きたとする記述は航海日誌から知られる発震時と整合的であったといえる（東京大学地震火山史料連携研究機構 [課題番号：HMEV01]）。

・1493 年 12 月 7 日・8 日の地震の検討

京都の日記史料『後法興院記』『親長卿記』『御湯殿上日記』、奈良の日記史料『大乘院

寺社雑事記』に記された明応2年10月30日（ユリウス暦1493年12月7日・8日）午前3時～5時頃に発生した「大地震」について、東海地方の年代記『大唐日本王代年代記』『常光寺王代記并年代記』の信頼できる地震記事との比較検討を行った。前者は現愛知県知多郡東浦町、後者は現静岡県浜松市で体験した記事である。その結果、a.明応2年10月29日午後7～9時頃に静岡県浜松市を含む地域で、また翌30日午前3～5時頃に愛知県知多郡から京都・奈良を含む地域で「大地震」が感知されたこと、b.余震は、京都・奈良では11月3日まで記録されているのに対し、浜松を含む地域では11月5日まで毎日、その後も1～2日おきに4～5回、そして12月4日には再び「大地震」が感知されており、地震が高頻度で長期間続いたことを確認した（新潟大学〔課題番号：NGT_01〕）。1498年の明応東海地震との関連でも注目されることであろう。

・文献史料を活用した火山の噴火履歴に関する検討

文禄5年閏7月（ユリウス暦1596年9月）の文献史料で、畿内や美濃に降下したとされる「長く白い毛」について検討した。これがいわゆるペレーの毛であることは火山学者によって指摘されているが、どこから噴出されたものであるかについては、江戸初期の史料によって浅間山であるとする説と、偏西風を考えると浅間山の噴出物が京都に届くことはないとする説がある。本課題では、当該日に鹿児島に滞在していた人物の日記から、この前後、九州は台風に見舞われていたと考えられることに注目した。この日記に記された鹿児島での天候記述に整合的な台風の事例を気象庁の公開する台風データベースで求めると、1996年の台風12号、2005年の台風14号が求められた。ついで気象庁の過去の気象データによって、これらの台風が九州通過中の京都および松本の風向や風速を検証すると、風速10メートル前後の東寄りの風が吹いていたことがわかった。これによって文禄5年閏7月に京都に降下したペレーの毛は浅間山から運ばれてきたものであった可能性が高いと考えられる（東京大学史料編纂所〔課題番号：UTH_01〕）。

・災害記憶を守り伝えるための実践

低頻度だが大規模な被害をもたらした地震・津波の経験の記録は、石造物の碑文として屋外の公開の場所に残されている場合が少なくない。しかし、その公開性を重視すれば、長期の風雨や日射などにさらされて石造物の経年劣化が進み、文字の判読が困難になっていくことは避けられない。一方で伝統的な拓本は石造物を汚損する可能性も指摘されている。そこで、照明方法の工夫とデジタル画像処理の技術によって、非接触、非汚損で石造物に刻まれた災害記憶の現状保存する方法を考案し、その実践を行った（図4）（公募研究、奈良文化財研究所〔課題番号：KOB018〕）。

・有感地震記述ならびに震度の距離減衰式に基づく地震活動解析

有感地震記述に基づく地震活動解析には、（1）距離減衰式（等）の震度再現手法の構築とその検証、（2）日記等に記述されている有感地震記録の品質（均質性や完全性）調査ならびに（3）近年の震度データを用いた地震活動変化等の分析・調査が重要である。震度の計算に用いてきた、地表における計測震度の多次元距離減衰式のパラメータをアップデートした（Matsuura et al., 2018）。近年に発生した中規模以上の地震について

距離減衰式と観測された震度分布の残差分布を整理した。Satake and Ishibe (2020)では、均質な地震活動推定へ向けて日記中の天気の記述を用い、『津軽藩御日記』と『榊原藩日記』ならびに気象庁震度データベースから過去 350 年間の江戸・東京の有感地震を整理した。その結果、1703 年元禄関東地震や 1923 年大正関東地震、1855 年安政江戸地震などの大地震発生後の余震活動に伴う顕著な有感地震回数の突出などの有感地震数の時間的変化が見出された。た勝浦市墨名観測点で有感となった地震の震源分布ならびに震央距離に対する累積確率分布とスロースリップイベント (SSE) の発生履歴の検討から、顕著な大地震に伴わない有感地震回数の突出は、群発的活動の発生を示唆しており、史料中の有感地震記録からも群発的活動或いは SSE の発生を検出できる可能性が示された。(公募研究, 地震予知総合研究振興会 [課題番号: KOB002])

これまでの課題と今後の展望

前期観測研究計画の開始以来、既刊地震史料集の電子テキスト化と考古資料による災害痕跡情報の集約は史料・考古部会の最大の課題であったが、前者は次年度に完了できる見通しとなった。後者も文化庁の支援を受けて、全国の考古遺跡による災害痕跡情報を集約するシステムを整えることができた。既刊地震史料集を利用しやすくするための方策も講じることができた。それによって個別の地震の実態についての事例研究も提示することができた。

また、前期観測研究計画以来、地震学と歴史学・考古学の研究者の討議を重ねることによって、解明すべき課題、重点的に調査すべき課題が共有されてきたことは大きな成果である。史料調査も地震学的に必要と考えられる地域・時代に照準を合わせて実施している。

こうした成果を踏まえ、今後の課題としては、①既刊地震史料集中の地名に位置情報を付与して利便性を高めること、②それによって、文献史料と考古資料の横断検索を実現すること、③調査結果を分かりやすい形で公開すること、④史料情報の地震学、火山学への活用方法の検討、があげられる。

成果リスト

榎原雅治, 2020, 文禄 5 年豊後地震に関する文献史学からの検討, 日本歴史, 856, 18-36.

蝦名裕一, 2020, 慶長奥州地震津波に関する史料の記述と伝承の継承, 第37回歴史地震研究会 (オンライン伊賀大会) 講演要旨集, 6.

蝦名裕一, 2020, 『古新手鑑』にみる旧気仙郡の歴史津波, 2020年歴史地震史料研究会講演要旨集, 17-19.

五島朋子・中村亮一・石辺岳男・室谷智子・佐竹健治, 2020, 1092年(寛治六年八月三日)の地震津波は気象災害であった可能性, 日本地震学会2020年度秋季大会予稿集, S10P-07.

原直史, 2020, 文政11年再論, 2020年歴史地震史料研究会講演要旨集, 28-30.

原田和彦, 2020, 一八四七年善光寺地震における善光寺町の被害, 災害・復興と資料, 12, 64-72.

原田和彦, 2020, 江戸時代における上越地方の地震活動について—北信濃との関係から—, 2020

- 年歴史地震史料研究会講演要旨集, 24-27.
- 服部健太郎・中西一郎・大邑潤三, 2020, 日記の筆者が地震動を感じた地点の時間変化: 近江八幡「市田家日記」の場合, 地震2, 73, 65-68, doi:10.4294/zisin.2019-10.
- 堀 健彦, 2020, 『震潮記』所載「穴喰浦荒凶面」の基礎的考察—1854年南海地震津波被害を考えるために—, 災害・復興と資料, 12, 38-48.
- 堀 健彦, 2020, 1854年南海地震による津波被害絵図について—一紀伊国「津波之由来」所載絵図の検討—, 2020年歴史地震史料研究会講演要旨集, 31-32.
- 石辺岳男・松浦律子・古村美津子・赤塚真弓・田力正好・岩佐幸治・榎原雅治・佐竹健治, 2020, 有感地震記述ならびに震度の距離減衰式に基づく地震活動解析に向けて, 第37回歴史地震研究会(オンライン伊賀大会)講演要旨集, 1.
- 岩橋清美・大邑潤三・加納靖之, 2020, 文理融合によって切り拓く歴史地震研究の現在—一八三〇年文政京都地震を事例にして—, 地方史研究, 70(3), 75-79.
- 加納靖之・杉森玲子・榎原雅治・佐竹健治, 2021, 歴史のなかの地震・噴火—過去がしめす未来, 東京大学出版会, 260p.
- 片桐昭彦, 2020, 災害記録としての『常光寺王代記并年代記』, 災害・復興と資料, 12, 8-19.
- 片桐昭彦, 2020, 『三国一覽合運図』にみる中世の地震と災害, 2020年歴史地震史料研究会講演要旨集, 14-16.
- 北村 繁, 伊藤響平, 弘前城に達する岩城山の山体崩壊堆積物, 2020年歴史地震史料研究会講演要旨集, 8-10.
- Matsu'ura, R. S., H. Tanaka, M. Furumura, T. Takahama, and A. Noda, 2020, A new ground-motion prediction equation of Japanese instrumental seismic intensities reflecting source type characteristics in Japan, Bull. Seismol. Soc. Am., 110(6), 2661-2692.
- 村田泰輔, 2020, 災害痕跡データベースの構築—災害の軽減に向けた考古学の新たな挑戦—, 學士會会報, 942, 57-70.
- 村田泰輔, 2021, 論説 災害痕跡データベースの構築・公開に向けて—考古学の新たな挑戦, 地域防災, 36, 4-9.
- 村田泰輔・大澤正吾, 2020, 藤原宮下層運河SD1901Aの検討—第198次, 奈良文化財研究所紀要2020, 92-102.
- 村田泰輔, 2020, 5 地震痕跡, 桑田訓也ほか「平城宮第一次大極殿院東方の調査—第612次」, 奈良文化財研究所紀要2020, 140-143.
- 中村 元, 2020, 1961年長岡地震に関する歴史資料と災害状況, 災害・復興と資料, 12, 7-27.
- 中村 元, 2020, 1923年関東大震災時の新潟県刈羽郡における災害情報について, 2020年歴史地震史料研究会講演要旨集, 42-44.
- 大邑潤三, 2020, 1925年北但馬地震における震央付近の人的被害と救援活動—海軍史料の分析を中心に—, 歴史地震, 35, 177-186.
- 大邑潤三, 2020, 特集デジタル・ヒストリーの諸実践: 歴史災害研究におけるGIS活用の試み, クリオ, 34, 139-140.
- 大邑潤三, 2020, 「災害碑」という概念と分類方法の検討, 歴史都市防災論文集, 14, 115-122.
- 齋藤瑞穂, 2020, 特論1714年信濃小谷地震と姫川の天然ダム, 前近代歴史地震史料研究会(編)「歴史学による前近代歴史地震史料集2—近世以前地震家屋倒壊率・死亡者数基礎史料—」,

新潟大学人文学部, 109-118.

齋藤瑞穂, 2020, 縄文三陸地震津波への接近, 考古学ジャーナル, 738, 50-53.

齋藤瑞穂, 鈴木正博, 2020, 縄文三陸地震津波再々論—縄文時代後期の山田湾津波と復興, 2020年歴史地震史料研究会講演要旨集, 1-7.

Satake, K., and T. Ishibe, 2020, Toward homogeneous estimate of seismicity from historical materials: number of felt earthquakes in Tokyo since 1668, Seismol. Res. Lett., doi:10.1785/0220200060.

山村紀香・加納靖之, 2020, 1586年天正地震の震源断層推定の試み—液状化履歴地点における液状化可能性の検討から—, 地震2, 73, 97-110, doi:10.4294/zisin.2019-7.

山中佳子・宇佐美龍夫, 2020, 歴史地震総表のWEB検索システムの構築, 日本地震学会2020年度秋季大会予稿集, S10P-01.

矢田俊文, 2020, 俳人岡西惟中と一七〇七年宝永地震における大坂の被害数, 災害・復興と資料, 12, 1-7.

矢田俊文, 2020, 1855年安政江戸地震被害の境界と1856年安政台風による多摩地域の被害, 2020年歴史地震史料研究会講演要旨集, 33-35.

表1. 明治29年(1896)の明治三陸津波による史料ごとの被害者数の違い

村名	項目	山奈宗真	『古新し鑑』	村名	項目	山奈宗真	『古新し鑑』	村名	項目	山奈宗真	『古新し鑑』
唐丹村	全人口	2535	2793	赤崎村	全人口	3136	3112	小友村	全人口	778	2617
	死亡(合計)	1684	2135		死亡(合計)	455	455		死亡(合計)	211	203
吉浜村	全人口	1059	1065	大船渡村	全人口	1433	2346	米崎村	全人口	259	3813
	死亡(合計)	204	194		死亡(合計)	110	97		死亡(合計)	25	11
越喜来村	全人口	2395	2391	末崎村	全人口	1721	1881	高田町	全人口	111	3418
	死亡(合計)	460	430		死亡(合計)	676	620		死亡(合計)	22	19
綾里村	全人口	2251	2767	広田村	全人口	2092	3144	気仙村	全人口	1017	3816
	死亡(合計)	1269	1347		死亡(合計)	518	570		死亡(合計)	42	42

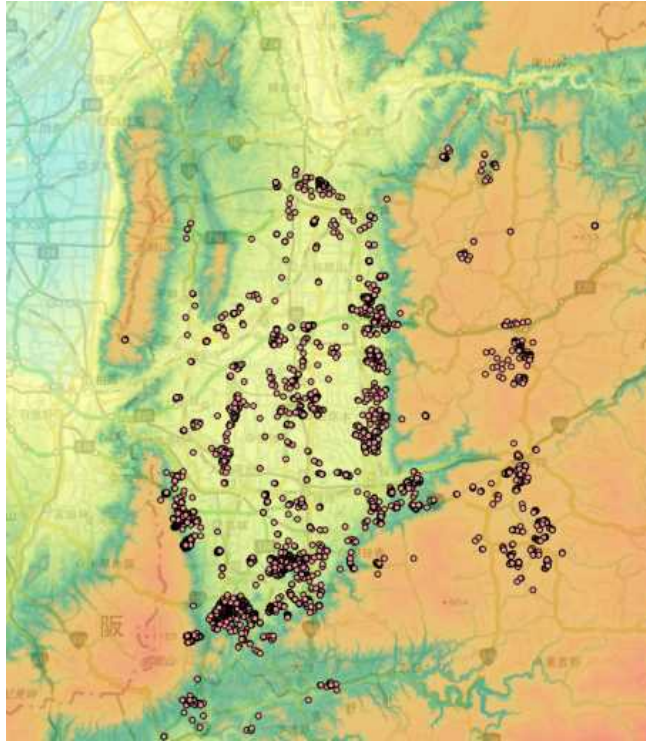


図1. 奈良盆地において考古データから災害痕跡が明らかになった地点の分布（奈良文化財研究所 [課題番号：NAB_01]）

奈良時代以降から平安時代までの間で歴史記録に残る主な大地震
 美濃地震(天平17年)【745年】 宇佐美龍夫『日本被害地震総覧』2003、東京大学出版会
 美濃・飛騨・信濃地震(天平宝字6年)【762年】 宇佐美龍夫『日本被害地震総覧』2003、東京大学出版会
 京都地震(天長4年)【827年】 宇佐美龍夫『日本被害地震総覧』2003、東京大学出版会
 信濃地震(承和8年)【841年】 宇佐美龍夫『日本被害地震総覧』2003、東京大学出版会
 伊豆地震(承和8年)【841年】 萩原尊禮編『古地震』1982、東京大学出版会
 奈良地震(斉衡2年)【855年】 『奈良六大寺大観第七巻』1968、岩波書店



図2. 平城宮の遺跡で見つかった古代の噴砂の痕跡の例（奈良文化財研究所 [課題番号：NAB_01]）

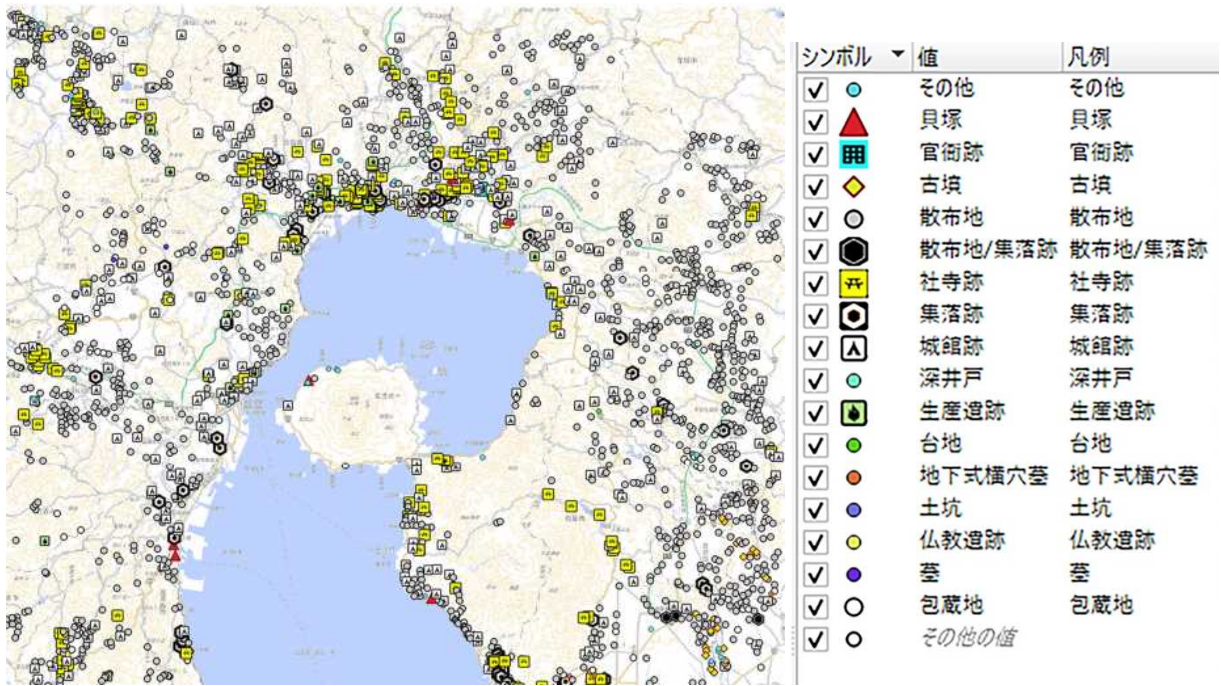


図3. 考古学データによる桜島周縁地域の災害痕跡（奈良文化財研究所〔課題番号：NAB_01〕）



図4. 安政東海地震の津波を記した碑文(左)とそのデジタル判読(三重県度会郡大紀町錦 金蔵寺) (公募研究, 奈良文化財研究所〔課題番号：K0B018〕)

1 (8) 観測研究基盤

「観測研究基盤」計画推進部会長 鶴岡 弘
(東京大学地震研究所)
副部会長 青山 裕
(北海道大学)

地震火山研究にとって重要・不可欠である観測データを安定的かつ継続的に取得するために、日本全国に展開されている陸域および海域の地震、地殻変動、津波、潮位、電磁気、重力等の観測基盤を維持すること(観測基盤の整備)、さらにこれらの観測データの解析技術等の開発・高度化(観測・解析技術の開発)を進展させること、観測データをリアルタイムに効率的に流通する基盤(地震・火山現象のデータ流通)を維持するとともに、観測データの公開や研究成果を共有するシステムの開発(地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開)を観測研究部会において引き続き粛々と進めている。以下に令和2年度の成果の概要をまとめた。

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

防災科学研究所は、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、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および震源位置、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行った。さらにその活動状況のモニタリング結果を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を行った。2020年3月13日02時18分に石川県能登地方で発生した地震(Mj5.5)に関して、MOWLASの観測記録を用いた解析を行い、Hi-netデータの3成分合成地震波形エンベロープから、この地震後10日間のエネルギー輻射量(4-20 Hz)を推定した。地震発生から10日後の時点で、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0.18%であり、2007年能登半島地震(Mj6.9、2.3%)や2016年熊本地震(Mj7.3、12.7%)よりも小さいことが明らかとなった(防災科学技術研究所[課題番号:NIED05])。気象庁は地震観測網や地殻変動観測網などの観測基盤の維持を継続し、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実施し、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(気象庁[課題番号:JMA_09])。国土地理院は、全国においてGNSS連続観測点を維持するとともに観測を継続し、さらに国際GNSS事業(IGS)へ参画し、観測データの提供を行った。加えて、最新のGPS衛星およびITRFに対応したGNSS連続観測(GEONET)の新しい解析ストラテジを開発した(国土地理院[課題番号:GSI_04])。様々な汎用的な機器を用いた地殻変動観測システムの開発に関しては、近年普及し始めている廉価版のGNSS機器を用いたGNSS連続観測装置を開発し、令和3年2月に千葉県長生郡市の10箇所に装置を設置しGNSS連続観測を開始した(国土地理院[課題番号:GSI_08])。さらに緊急解析により、国内外で発生した地震や火山活動に伴う地

殻変動を検出した。西之島では、火山活動が活発した2019年12月以降、溶岩等によるとみられる地形や海岸線の変化の様子を検出した(図1)(国土地理院[課題番号:GSI_07])。

大学は、観測データ流通網JDXnetの安定的な運用を継続し、スイッチの老朽化に対応するため、JDX-東大地震研間のスイッチの交換を実施した。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開始した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_19])。高知大学においては、地震動観測記録のモニタリングを準リアルタイムで行うシステムを構築し、運用を行なった。あわせて、ごく浅層の地盤構造を常時モニタリングするため、サンプリング周波数500 Hzでの観測を実施するとともに、地震計設置位置下の地盤の固有周波数解析を常時行なった(高知大学[課題番号:KOC_01])。

気象庁、国土地理院及び海上保安庁は、潮位連続観測を継続した(気象庁[課題番号:JMA_10]、国土地理院[GSI_05]、海上保安庁[JCG_02])。気象庁は、柿岡、女満別、鹿屋、父島での地磁気4成分観測、及びいわき北浦での全磁力精密連続観測を実施し、高精度の地磁気基準値を引き続き提供した(気象庁[課題番号:JMA_11])。国土地理院は、重力測量について航空重力測量に必要な飛行場重力点の設置を、女満別、丘珠、鹿児島各飛行場にて実施した(国土地理院[課題番号:GSI_06])。山梨県富士山科学研究所は、河口湖周辺の水位観測を継続するとともに、富士北麓地域の水理地質構造についてはその概要を取りまとめる作業を行った(山梨県富士山科学研究所[課題番号:MFRI02])。北海道立総合研究機構は、雄阿寒岳、十勝岳、樽前山、倶多楽、有珠山および北海道駒ヶ岳において地球物理学的・地球化学的モニタリングを継続し、火山活動の変化を捉えるためのデータの蓄積を行った(北海道立総合研究機構[課題番号:HR0_01])。

気象庁は、全国の50活火山について、全国4カ所の火山監視・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。令和2年度は、草津白根山に埋設型の地震計・傾斜計及び空振計を整備した。また、全国3箇所に監視カメラを増設した(気象庁[課題番号:JMA_12])。

イ. 観測・解析技術の開発

東京大学地震研究所は、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(DAS)を利用した地震観測を実施している。1996年に設置した三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムの予備の光ファイバーケーブルを活用して、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を航行し、この間陸上局においてDAS計測を行った。DAS計測は、測定全長100 kmまたは80 km、チャンネル間隔5 mとして、エアガン発震時間帯を含む5日間の連続観測を行った(図2)(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_22])。

大学は、新たな無線通信帯域・技術を活用した地震火山データ伝送システムの開発及びこれを利用した地震・火山活動状況を高精度かつ迅速に把握可能なシステムの開発を進めている。東北大学においては、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、動作確認を行った(東北大学大学院理学研究科[課

題番号：THK_13])。名古屋大学においては、小電力、小型・携帯テレメータ地震観測装置の改良開発を実施している。現ファームウェアは、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リアルタイム性が失われるという問題があり、指定期間のデータを優先して送信するコマンドを改良し、通信が切断した場合にも再接続を行うなどのエラー処理が適切に行われるようにした(名古屋大学[課題番号：NGY_08])。

情報通信研究機構においては、地震や火山等の自然災害発生時における被災地の状況把握を詳細かつ迅速に行うための次世代航空機東西SARの開発を実施している。令和2年度においては、①機械学習をベースにした土地被覆分類に関する研究、②地表三次元イメージングによる地表構造物の分離抽出技術に関する研究、③次世代航空機搭載合成開口レーダーの研究開発を実施した(情報通信研究機構[課題番号：NICT01])。

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

北海道大学は、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の一元的な流通とデータの蓄積などを行った。地殻変動連続観測では、新たに気象庁のひずみ計観測網の25観測点141チャンネルの流通収集が開始された。また、産業技術総合研究所の超伝導重力計データのオフライン収録も開始した。データ提供機関の新規加入があったため協定書の改定を実施した。GNSSデータでは、1995年兵庫県南部地震時に実施された臨時観測データのアーカイブ作業を実施した(北海道大学[課題番号：HKD_08])。

東京大学地震研究所は、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っている。令和2年度においては、次世代の対話検出処理系システムについて試作を開始した。昨年度に行った検討をもとに、対話検出ソフトウェアのベース部分を作成した。これは複数のプラットフォーム上で動作し、波形表示と手動検出の最小限の機能を備えており、今後の機能拡張を可能とした(東京大学地震研究所[課題番号：ERI_24])。高知大学においては、課題番号：ERI_24と連携し、新たな伝送プロトコルに関しては、前年度検討を行った現状システムの問題点の洗い出しをもとに、最低限必要な要件の洗い出しと拡張仕様として準備すべき項目について検討した(高知大学[課題番号：KOC_02])。

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

東京大学地震研究所は、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ため、地球惑星科学連合大会や地球電磁気学会において、地震学分野でのデータ公開に関する取り組みについて報告した。関連分野での取り組みや今後の協力関係など、本研究課題を進めるために重要な情報が得られた。また、本計画に関連するデータ公開の状況や今後の予定についてアンケートを実施した(東京大学地震研究所[課題番号：ERI_18])。

気象庁は、地震カタログ(震源、発震機構)を2019年8月分まで作成し、地震月報(カタログ編)として公開した。海域観測網の観測データを一元化処理業務へ取り込むためのシステム等の準備を進め、震源決定のルーチン業務を2020年9月から開始した。震源過程解析については、海外で発生したイベントについて、遠地実体波を用いて断層すべり分布を推定した結果を公開した(気象庁[課題番号：JMA_14])。定常観測点の4地点

(柿岡、女満別、鹿屋、父島)に、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。地磁気アナログ記録のデジタルデータ化は、女満別(1966~1967年)、鹿屋(1967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(1971~1972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(気象庁[課題番号:JMA_13])。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(気象庁[課題番号:JMA_15])。

産業技術総合研究所は、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の取りまとめを進めている。令和2年度においては支笏、洞爺、濁川、大山、十和田、阿蘇、鬼界、屈斜路火山における大規模噴火の前駆活動と噴火推移をとりまとめた。その成果の一部をGSJ研究資料集として公開した。また、大規模噴火の前駆活動と噴火推移をとりまとめた大規模噴火データベースの構築を進めた。さらに、第四紀の火山噴出物の詳細情報をWebGISで閲覧できるようにした20万分の1日本火山図を作成し、一般公開を始めた(図3)。火砕流堆積物や岩屑なだれ堆積物などの第四紀火山噴出物の情報が詳細にわかるシステムとなり、多くのユーザーに利用された(産業技術総合研究所[課題番号:AIST11])。

国土地理院は、令和2年度においては、「浅間山」の火山土地条件調査を実施し、「十勝岳」、「雌阿寒岳」、「浅間山」、「伊豆大島」の火山基本図及び数値データを整備した。令和元年度に調査を実施した、石狩低地東縁断層帯とその周辺「鶴川」、長岡平野西縁断層帯とその周辺「弥彦」、「三条」等の1:25,000活断層図を整備・公開した(国土地理院[課題番号:GSI_10, GSI_09])。

データベースの方向性について検討をさらに実施し、現有の研究成果共有システムのさらなる活用で調整をおこなった。サーバーの運用体制やポリシーについて安定的な運用を実現する仕組みの検討を行った。

戦略室を主導として、研究成果共有システムの具体的な構築に向けた検討を進めた。具体的には格納を行う情報・データの検討を実施するとともに、コンテンツの整理を先行的に進めた。令和2年度においては、研究成果共有サーバ(evrss)へのデータ登録作業を開始した。地殻構造データベースとして前計画で整備された「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格納された。地震活動解析ソフトウェアとして「XETAS」が登録された(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_25])。

これまでの課題と今後の展望

地震・火山・防災研究にとって不可欠である観測データを安定的かつ継続的に取得することの技術的な課題等はクリアできているが、観測データおよび解析結果等を有効に

活用し研究を加速するための流通、データベース化、公開は時間とコストの問題もあり進捗についてはゆっくり進められているのが現状である。特にデータ公開については、昨今のセキュリティ事情も影響し、個々で進められる段階から集約化が求められている。一方クラウドも普及しつつあるが、大規模データベースを長期にわたり維持するという観点からはまだまだ検証が必要と考えられる。来年度にむけては、これらの課題を解決し、研究成果共有システムをのさらなる構築が求められる。

成果リスト

- Aoi, S., Y. Asano, T. Kunugi, T. Kimura, K. Uehira, N. Takahashi, H. Ueda, K. Shiomi, T. Matsumoto, and H. Fujiwara, 2020, MOWLAS: NIED observation network for earthquake, tsunami and volcano, *Earth Planet. Space*, 72, 126, doi:10.1186/s40623-020-01250-x.
- Kurihara, S., M. Nakashima, T. Kodama, K. Iio, S. Ohmori, M. Handa, E. Kichiraku, K. Matsuo, H. Kawawa, and K. Ochi, 2020, The airborne gravity survey for development of a new precise gravimetric geoid model in Japan, *AGU Fall Meeting 2020*, 670012.
- 中川弘之・宮原伐折羅・宗包浩志, 2020, 精密単独測位 (PPP-AR) を用いたGNSS定常解析システムの開発, *国土地理院時報*, 133, 77-86.
- Bernard, B., Takarada, S., Andrade, S.D. and Dufresne, A., 2020, Terminology and strategy to describe large volcanic landslides and debris avalanches, in *Volcanic debris avalanches -from collapse to hazards-*, eds. Matteo, R., Dufresne, A. and Procter, J., (Springer), 51-73.
- 宝田晋治・Bandibas, J., 2020, 東・東南アジア地域の大規模火砕流, 降下テフラ及びカルデラ, *Proceedings of the International Meeting on Eruption History and Informatics*, 2019-2, 115-118.
- Takarada, S. and J. Bandibas, 2020, Volcanic hazards information and assessment systems, in *Forecasting and Planning for Volcanic Hazards, Risks, and Disasters*, ed. P. Papale, (Elsevier), 565-584.
- Takarada, S. and H. Hoshizumi, 2020, Distribution and eruptive volume of Aso-4 pyroclastic density current and tephra fall deposits, Japan: a M8 super-eruption, *Front. Earth Sci.*, 8:170, doi:10.3389/feart.2020.00170.
- Arima, Y., S. Kojima, J. Uemoto, and T. Konno, 2020, Semi-supervised land cover classification using Pi-SAR2 observation data, *Geoscience and Remote Sensing Symposium 2020*, 2755-2758.
- 牛腸正則, 児島正一郎, 山田寛喜, ESPRIT-TomoSARを用いたマルチベースライン航空機SARデータの三次元イメージング, *電子情報通信学会和文論文誌*, J103-B, 8, 321-331.
- Gocho, M., S. Kojima, and H. Yamada, 2020, Limitation of parallel assumption in repeat-pass InSAR using nonparallel orbits, *IEICE Communications Express (ComEX)*, X9-B, 12, 586-592, doi:10.1587/comex.2020C0L0013.
- Gocho, M., and H. Yamada, 2020, A proposal for sparse deconvolution using ISTA with low computational complexity, *2020 International Conference on Emerging Technologies*

for Communications (ICETC2020), G1-3, CD-ROM.

内山 高, 2020, 富士火山北麓および富士五湖の水文地質構造と水文学的特徴, 地学雑誌, 129, 697-724, doi:10.5026/jgeography.129.697.

高橋 良・伊藤久敏, 2020, 岩石学的特徴とU-Pb年代に基づく函館市街地下の軽石堆積物の給源の検討, 火山, 65, 69-82, doi:10.18940/kazan.65.3_69.

Shinohara, M., T. Yamada, K. Uehira, S. Sakai, H. Shiobara, and T. Kanazawa, 2021, Development and operation of an Ocean Bottom Cable Seismic and Tsunami observation system (OBCST) in the source region of the Tohoku-oki earthquake, Earth Space Sci., 8(3), e2020EA001359, doi:10.1029/2020EA001359.

中川茂樹・加藤愛太郎, 2020, WINフォーマットデータをObsPyで読み込む新しいモジュール, 東京大学地震研究所技術研究報告, 印刷中.

Maeda, Y., Y. Yamanaka, T. Ito, and S. Horikawa, 2021, Machine learning based detection of volcano seismicity using the spatial pattern of amplitudes, Geophys. J. Int., 225(1), 416-444, doi:10.1093/gji/ggaa593.

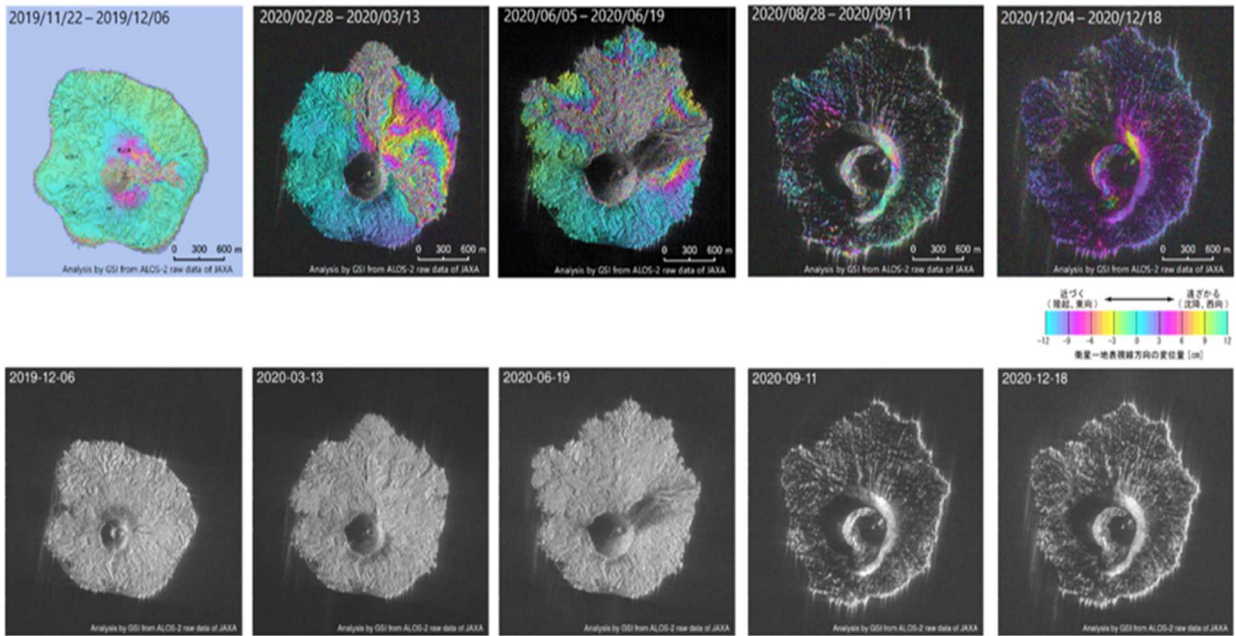


図 1. 西之島のSAR干渉解析結果（2019年11月22日～2020年12月18日）（国土地理院 [課題番号：GSI_07]）

上段：干渉画像

下段：強度画像

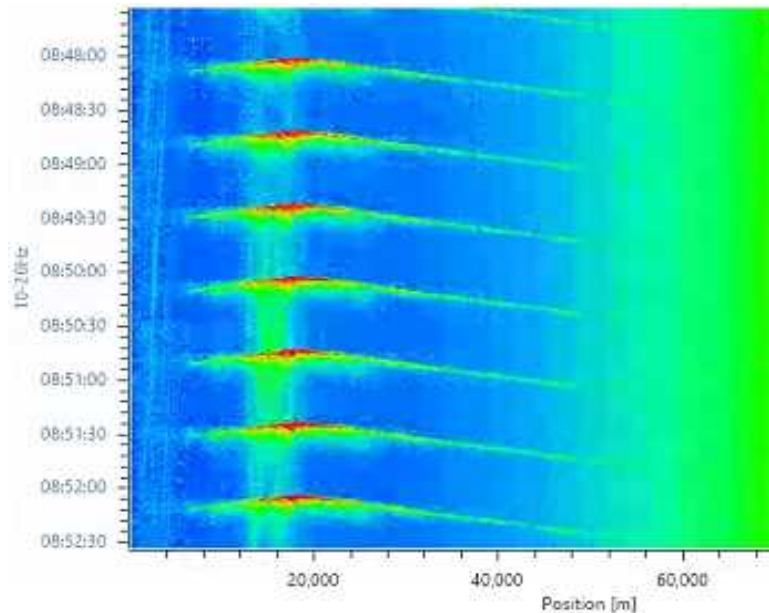


図 2. DAS計測により記録されたエアガンの例（東京大学地震研究所[課題番号:ERI_22]）
1996年に設置した三陸沖海底光ケーブル式地震津波観測システムの空き光ファイバーを用いて、敷設ルート上で発震されたエアガン観測を行った。横軸は陸上局からの距離、縦軸は時間である。一定時間間隔で発震されるエアガンからの信号が明瞭に記録されている。

る。

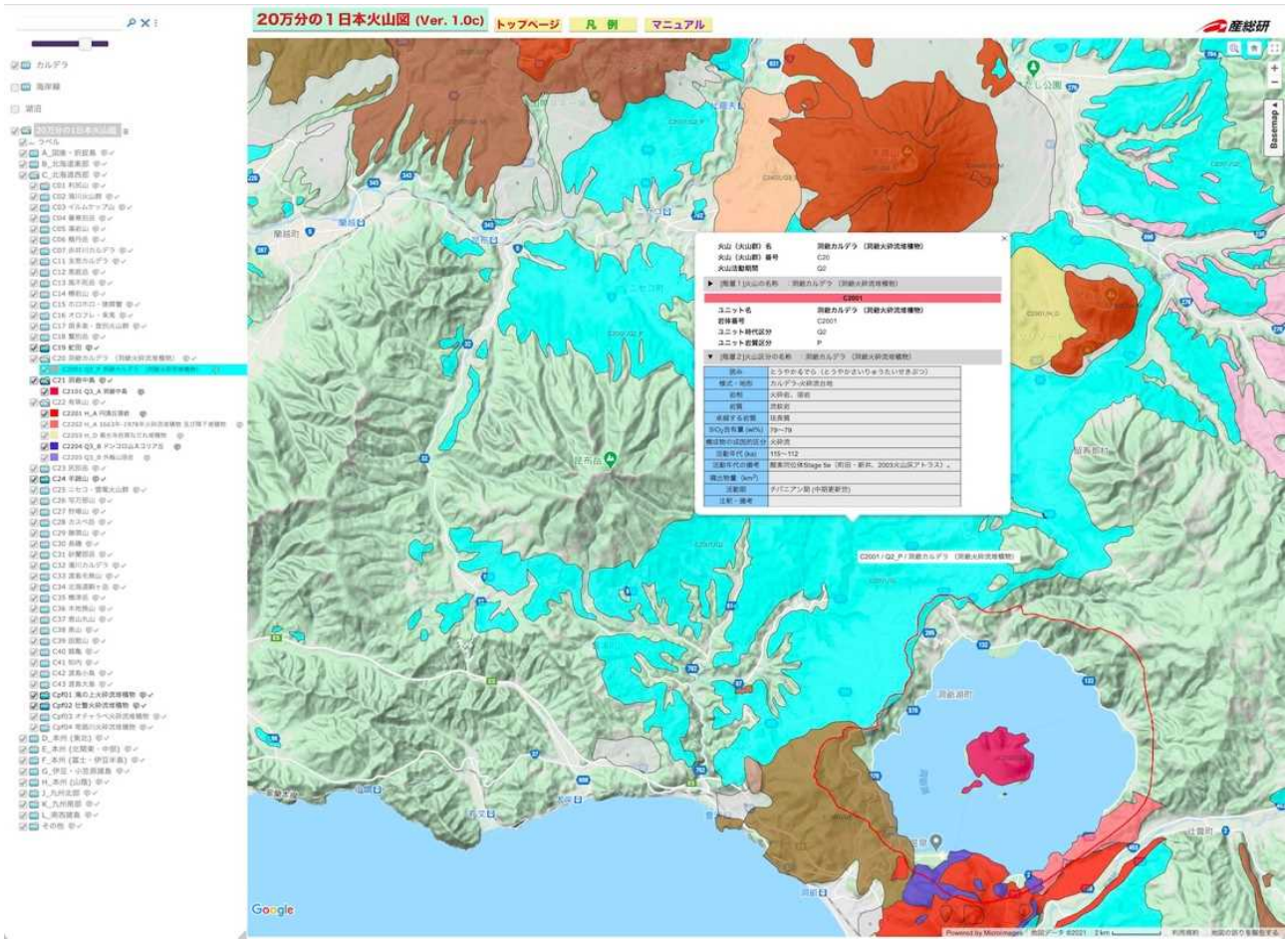


図3. 20万分の1日本火山図の閲覧検索サイト(産業技術総合研究所[課題番号:AIST11])
第四紀火山噴出物の分布や詳細情報を表示できる。

2 (1) 南海トラフ沿いの巨大地震

「南海トラフ沿いの巨大地震」総合研究グループリーダー 伊藤喜宏
(京都大学防災研究所)

1. 目的

内閣府および地震調査研究推進本部により調査された南海トラフ沿いの巨大地震の地震シナリオおよび強震動予測はすでに公開されている。しかしながら、これまでに示された地震シナリオおよび強震動予測は過去の観測記録および歴史資料に基づいて構築されたものであり、現状の測地・地震観測により得られた知見を十分反映していない。南海トラフ巨大地震総合研究グループ（以下、南海総合G）では、南海トラフ巨大地震に関連した50課題の成果に基づき、地震・測地観測網で得られたプレート間固着やスロー地震の知見に基づき南海トラフ沿いの巨大地震の広帯域震源モデルの構築を目指す。さらに、地震波および津波の伝播モデルに基づき、西南日本地域の強震動および津波浸水モデルの提示を目的とする。

2. 拠点間連携のフレームワークの利用

前5カ年計画の東京大学地震研究所と京都大学防災研究所の拠点間連携共同研究（H26-H30）では、地震時のリスク評価の高精度化を目的として、震源モデル・シナリオ、地震波速度・減衰構造、浅部地盤応答、および構造物の脆弱性の各モデルを総合的に考慮したリスク評価の手法の提案および高精度化に関する研究が進められた。特に各課題が提案する複数の最適モデルを組み合わせることで不確実性を含む地震リスク評価の計算手法が提案された。南海総合Gでは、前計画の拠点間連携で得られた成果に基づき、各課題で得られた成果を実際に使用して、震源モデル・シナリオ、地震波伝播そして工学的基盤までの地震動を計算することを目的とする。その上で、必要なアウトプットを関連課題の要請に基づき情報を提供することとする。前5カ年計画の拠点間連携で研究対象とした大阪府および高知県について、浅部地盤応答も含めた地震動を求めて、構造物の脆弱性評価や地すべりのリスク評価などに活用する。

3. 震源モデル・シナリオの高度化に向けた今年度の取り組み

今年度は特に測地学・地震学モニタリングにより得られる知見に基づく地震シナリオの作成の準備に向けて関連課題の成果を調査した。特に、防災科学技術研究所では、地震発生長期評価の高度化に向けた地震発生モデルの構築を目的として、応力分布モデルに基づく地震発生シナリオの作成手法が提案された。ここでは、プレート間固着をGNSS連続記録から推定し、プレート境界での応力蓄積速度を求め、局所的な歪速度を可視化し、将来発生しうる地震シナリオを選定する。開発された手法では、まずGNSS観測記録から南海トラフのプレート境界のせん断応力の変化率を求め、次に得られた応力変化率に基づき、歴史資料を含めてこれまでに観測されていないシナリオを含む南海トラフで将来発生可能な多様な巨大地震シナリオが作成される。ここでは、地震発生条件として地震により地殻から失われる歪みエネルギーと断層面で摩擦により散逸するエネルギーの差

が正となる破壊条件を加えることで、得られたプレート間固着分布から、歪みの蓄積期間の長さに基づき破壊が発生しない地震シナリオが棄却される（防災科学技術研究所〔課題番号 NIED03〕）。この手法の応用により、現状の測地観測から得られた知見を反映した震源モデル・シナリオの設定が可能となる。

4. スロー地震のモニタリングに基づく地震シナリオの高度化への貢献

スロー地震のモニタリング結果に基づく地震シナリオの高度化への貢献についても検討した。京都大学防災研究所では、日向灘やメキシコ・ゲレロ地震空白域沖合に海底地震計を設置し、浅部沈み込み帯で発生する微動のモニタリングを行った。日向灘の微動について 2013 年および 2017-2018 年の微動活動を精査し、特に微動のマイグレーションの様式が比較された。結果、微動の発生場所は 2013 年と 2017-2018 年でほぼ同じであり、南から北に活動域が RTR (Rapid Tremore Reversal) を含みながらマイグレーションし、その北端部が九州パラオ海嶺の沈み込み部に一致することが示された。また、ゲレロ空白域沖合で発生する低周波微動と海底地形を比較したところ、微動も通常の地震活動も発生していない領域がプレート境界面上の窪みに相当する可能性が示唆された。つまり、日向灘およびメキシコ共に海底地形、さらには沈み込むプレート境界面の形状が微動活動、すなわちスロー地震の発生様式を規定している可能性を示す（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI01〕）。さらに、東京大学地震研究所は、日本海溝と南海トラフ沿いで発生した超低周波地震のモニタリングから、特に浅部超低周波地震の活動が活発な領域では、プレート間固着率が小さく、スロー地震の活動とプレート間固着に負の相関がある可能性を示した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_12〕）。

これらの研究事例のようにスロー地震活動と海底地形またはプレート境界面形状や固着率との比較を進めることで、特に沈み込み帯浅部における破壊シナリオの設定およびその高度化が実現されるかもしれない。

5. これまでの課題と今後の展望

南海総合Gでは、地震・測地観測記録および最新の研究事例から想定される「科学的に最も起こりうる震源モデルと強震動予測モデル」の構築を目的とする。防災科学技術研究所の成果として、この目的に到達する上で極めて重要な成果が上述のように示された。海洋研究開発機構は今後の計画として、これまでの地震発生帯モデルを高度化し、観測データとモデルから計算される固着率の時間推移から地震シナリオを求める新たな手法の開発を提案している（海洋研究開発機構〔課題番号：JAMS01〕）。将来的には、固着率の時間変化を観測からの推定値を入力するデータ同化により固着率の推移の予測を目指す。観測とモデルに則した地震シナリオのより高度な絞り込みが今後可能となるかもしれない。

一構造物等への影響を考慮した場合、1 Hz前後の帯域の地震動の予測が極めて重要となる（例えば、京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI08〕）。先述したような測地学的に得られるプレート間固着に基づくモデルから予測される地震時すべり域が、強震動生成域となるか慎重に検討する必要があるだろう。実際、2011年東北地方太平洋沖地震の海溝付近の大すべり域と強震動生成域は一致していない。一方で、同領域で過去に発生したマ

グニチュード7クラスの地震で推定された強震動生成域と2011年の本震時のそれらとはよく一致する。これらの観測結果や歴史記録等から、強震動生成域の設定を適切に設定することが、南海総合Gの目指す「南海トラフ沿いの巨大地震の広帯域震源モデル」の構築に極めて重要となる。

上記の点を考慮した上で、社会科学に関連した研究課題や地すべり等に関する研究課題と連携しなければならない。その上で、必要とされる強震動予測をいくつかの空間スケールで提供し、ある自治体の脆弱性評価や地すべりリスクの評価などに役立てる必要がある。さらに、ここで想定される地震シナリオに基づき、津波の浸水モデルや輻合災害の評価も今後の課題となる。

成果リスト

特になし

2 (2) 首都直下地震

「首都直下地震」総合研究グループリーダー 酒井慎一
(東京大学情報学環・東京大学地震研究所)

1. はじめに

首都直下地震に関しては「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）の推進について（建議）」の中で「分野横断で取り組む総合的研究」の一つとして位置づけられている。この総合研究は前計画から始まった新しいカテゴリーで「地震学・火山学的な見地のみならず災害科学的な重要性も鑑みて、複数の実施項目を横断する総合的な研究として推進する。総合的な研究を通して、専門分野の枠を超えた学際連携を現状よりも一層進め、地震学・火山学の成果を災害の軽減につなげるための方策を提案する。」とされ、他の8つの計画部会とは違った観点から結び付けた体制で研究が進められている。

第5章「研究を推進するための体制の整備」（2）分野横断で取り組む総合的研究を推進する体制の項では「首都直下地震は、一旦発生すれば首都機能や我が国の経済活動全体に深刻なダメージを与える可能性が高い。想定される多様な震源について、発生メカニズムや発生可能性を評価する研究を進める。詳細な地盤構造や多様な震源モデルによる揺れの予測に、稠密観測データや地震史料の情報を反映し、新たな地震動予測手法の開発を目指す。また、複雑な地殻構造を用いた大規模数値シミュレーションに基づいて、地震動を高精度に予測する手法を高度化する。さらに、各項目の研究成果を有機的に結び付け、高度に集約化された社会環境下での防災リテラシー向上に資する総合的研究を実施する。」と書かれ、首都直下地震ならではの総合的な成果が期待されている。

しかし、地震・火山現象の解明のための研究、地震・火山噴火の予測のための研究、地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究、地震・火山噴火に対する防災リテラシーの向上のための研究の4分野に、広くまたがるような総合的な研究課題は存在しない。そのため今年度は、それぞれの研究課題の中から首都直下地震に関連したものを集め、それら同士をつなげていくことを本総合研究グループの目標とした。

2. 令和2年度の成果

産業技術総合研究所は、房総半島南部沿岸の海岸段丘について年代測定値の統計処理を行うことで、離水年代の検討を行った（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST08]）。

東北大学は、東北地方・北海道下の上面地震帯の深さ100-130 kmで発生する6つの地震クラスターについて、波形相関走時差DD法による精密震源推定およびメカニズム解を推定した。その結果、全てのクラスターが1-2 km四方の領域で発生する、主に逆断層型の地震活動であることがわかった。5つのクラスターでは正断層型地震も伴い、それらは逆断層の震源より浅い側で多く発生した。こうした圧縮場にもかかわらず発生する正断層型地震は、地殻物質のエクロジャイト化による引張場の形成が原因であると解釈した。エクロジャイト化に伴う引張場の形成は極めて局所的であることが示唆される。また、中部日本下の深さ350 kmで発生する深発相似地震5グループ11個の震源を hypoDD

により再決定し、メカニズム解を調べた。波形と P 波極性分布の類似性、震源の相対位置関係に基づくと、各々の地震はグループごとに共通の断層面上で発生しているが、震源は共通断層面上の別々の場所に位置することがわかった。さらに、応力降下量と地震波放射エネルギーの関係性を調べると、相似地震であっても放射効率・応力降下量ともにばらつきがあり、物理パラメーターの多様性が見られた。これは同一スラブの同じ深さ（環境）の地震や共通断層面上の深発相似地震において、破壊の進展プロセスに対する thermal instability の寄与が異なる可能性を示唆する。その要因として、断層表面における鉱物粒径の違い、初期粘性、断層の成長度などが考えられる（東北大学大学院理学研究科 [課題番号：THK_06]）。

千葉大学は、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。また、データの地震前兆性について、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ーを調査した。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、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 パラメーターは、それぞれ約（100 km、 $10^{8.75}$ ）と（180 km、 $10^{8.75}$ ）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ち、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（千葉大学 [課題番号：CBA_01]）。

新潟大学は、安政2年（1855）10月2日の江戸地震の被害の境界地域を検討するため、武蔵国多摩郡蔵敷村（東京都東大和市）の名主内野左衛門が記した『里正日誌』所収「安政二卯年十月二日大地震略記」を中心に検討した。地震発生時に横山町二丁目（日本橋）にいた左衛門が、翌日夕刻に帰宅するまでの道程で実見した被害状況の記事を分析した結果、四ツ谷通り下町の割から中野宿（中野区）までのあたりが被害の境界となることを明らかにした。この境界地域は、村岸・矢田（2016）で被害の境界とした甲州道中の代田橋（世田谷区）付近と対応している（新潟大学 [課題番号：NGT_01]）。

東京大学地震研究所は、これまで3次元差分法によるK-NET、KiK-net強震波形記録と地震波伝播シミュレーションとデータ同化した波動場を初期値として、高速計算から未来の時刻の長周期地震動を予測する手法開発を進めてきた。この同化波動場は、時間を反転させた運動方程式を用いた逆伝播シミュレーションにより、初期波動場（震源）のイメージングにも有効である。そこで、大地震の震源即時推定に向け、強震観測データと地震波逆伝播シミュレーションのデータ同化に基づく震源イメージングの有効性を検討した。本手法はデータ同化を行わない従来のBack Projection法やTime Reversal法（Migration法）に比べて、観測データの誤差（粗い観測点間隔による波動場構築の限界を含む）と波動伝播シミュレーションの誤差（地下構造モデルの不確定性による）の両方を適切に考慮した、高解像度の震源イメージングが期待できる。本手法を用いて2004年

新潟県中越地震と2008年茨城県沖地震のKiK-netデータを用いた震源イメージングを行ない、発震時に震源近傍に初期波動場が良好に再構築されることを確認した。また、データ同化を行わない従来のイメージング方法に比べてシャープな震源像が求まることや、Synthetic波形データを用いたより深い地震（40 km、80 km）のケースでも震源イメージングが適切に実行可能であることを確認した（東京大学地震研究所[課題番号:ERI_14]）。

東京大学地震研究所は、根津周辺における稠密観測を開始した。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する狙いで、安政江戸地震の揺れの検証を目的のひとつとし、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とその近隣地点を観測点にした。2020年9月より根津神社、天王寺、寛永寺、不忍池とその周辺地域へ観測点を徐々に追加していき、2020年12月上旬に観測点数は19点となった。一部のデータを用いた暫定的な結果では、観測点ごとの卓越周波数や振幅の違いが確認できている（東京大学地震研究所[課題番号:ERI_15]）。

東京大学情報学環は、令和2年度において（1）住民の災害に関する意識調査分析（ドラマ『パラレル東京』や関連するNHKスペシャルを軸とした、首都直下地震や災害に関する調査の解析）と、（2）地震災害等の発生確率、被害想定、関連する災害情報などに関する住民調査を実施した。（1）では、実施したパネル調査の結果を解析し、首都直下地震と防災についてのキャンペーン報道による影響や効果を分析し、報告につなげた。（2）では、2020年11月には、地震災害等、災害情報や防災に関する全国を対象としたアンケート調査を実施した（東京大学情報学環[課題番号:III_01]）。

そのほか、2021年1月22日に首都直下地震に関する意見交換会をオンラインで行った。関連する課題の研究者たち十数名が集まり、それぞれの研究成果を紹介した。今後の総合研究としての研究計画の進め方を議論し、まずは連携できる課題同士を探すところから始めることとしたが、コロナ禍で上手くいかない点もあったことが報告された。

3. 今後の展望

首都直下地震が発生した場合には、我が国の首都機能や経済活動全体に深刻なダメージを与える可能性が高いことから、分野横断的に取り組む総合的な研究として推進するテーマの一つとされてきた。ただ、広い分野にまたがるような総合的な研究課題がないため、研究課題の中から首都直下地震に関連した研究成果を集めて統合させることを、本総合研究グループの目標とする。

成果リスト

特になし

2 (3) 千島海溝沿いの巨大地震

「千島海溝沿いの巨大地震」総合研究グループリーダー 高橋浩晃
(北海道大学大学院理学研究院)

1. はじめに

太平洋プレートが沈み込む千島海溝南部では、過去約 6,500 年間の津波堆積物の解析から超巨大津波が繰り返し発生してきたことが明らかにされている。国の地震調査研究推進本部の長期評価では、千島海溝南部での M8.8 程度以上の平均発生間隔は約 340~380 年、最新発生時期は 17 世紀前半であり、30 年発生確率 7~40 %で発生が切迫しているとしている。内閣府による概要報告では、太平洋沿岸部では最大震度 7 の揺れとなり、地震発生後 20~30 分で高さ 20 m を超える津波が到達するとされており、大きな被害が予見される。一回り小さな根室沖の領域においては、M7.8~8.5 程度の巨大地震の 30 年以内発生確率が 80 %程度と極めて高い値となっている。

総合研究グループでは、千島海溝沿いの巨大地震をターゲットとした課題の成果に加え、建議研究で行われている汎用的なハザード評価手法や防災リテラシー研究の成果を有機的かつ総合的に取り入れることで、超巨大地震による地震動や津波による災害の軽減を目指す。総合研究グループが目指すアウトプットは、ハザードの事前情報とその振幅を適切に評価に取り込むために必要となる要素技術の検討から、最適な津波避難計画の評価手法に代表される地域の災害予防スキームを支えることで、地域防災力の向上を図ることである。

地域防災計画における津波避難計画は、ある 1 つの事前予測シナリオに基づいたものであるが、実際の地震動や津波浸水は必ず予測とは異なる形で発現する。津波避難計画策定に用いる事前予測シナリオは、想定の変幅が反映された形で検討されるべきであるが、その評価方法は確立されていない。ハザードの即時予測情報は、事前予測の不確実性を補完する情報と位置付けることができる。千島海溝南部でも運用が開始された S-net を最大限活用し、津波即時予測の技術開発を進展させることが重要である。

ハザード予測の変幅は、震源域での津波励起や強震動生成特性に大きく依存する。海底地殻変動観測によるプレート間固着分布の情報や、地震波速度構造・スローイベントの空間分布などの地震発生場に関する情報からは、地震時すべり分布の事前予測に関する知見が得られることが期待されている。一方、津波避難計画における避難時間の予測においても、地域の避難経路・住民の年齢構成・天候などの社会環境要因も大きな振幅を内包しており、ハザードと連関されたばらつきの検討が必要である。総合研究グループでは、自然ハザードと社会環境のパラメータを関係させて検討することで、冗長性が内包された災害対策につながる成果の提供を目指す。

2. 令和 2 年度の主な成果

千島海溝南部には S-net が運用されている。事前のハザード予測に基づいて計画された津波避難を実効的なものにするため、リアルタイム海底観測網のデータを活用した津波即時予測手法の開発は極めて重要な課題である。これまで実施してきた仮想的な海底津

波観測点分布を用いた実用可能性試験を進展させ、本年度は実際の十勝根室沖のS-net観測点分布を用いた新たな即時津波浸水予測手法の開発が行われた。データ同化による即時津波浸水予測を行うため、想定震源域に仮想グリッドを生成し、S-net観測点での観測津波波形に適切な距離重みをつけて外挿することで、各ノードでの津波波形を合成する手法を開発した。各グリッド点での合成津波波形と、事前にデータベース化された浸水パターンを利用することで、地震発生後数分以内に津波浸水の即時予測が可能であることが示された（北海道大学〔課題番号：HKD_09〕）。

プレート間固着の空間分布は津波励起特性に関係している可能性があり、津波浸水の事前予測の観点で重要な情報である。令和元年度に根室沖に設置された3か所の海底地殻変動基準局において2回目の測定が実施され、予察的な変位ベクトルの推定に成功した。来年度以降に3回目の測定が行われれば、誤差評価を含めた変位ベクトルの推定が可能となり、プレート間固着の空間分布に関する新たな情報が得られることが期待される（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID02〕、東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_05〕、北海道大学〔課題番号：HKD_09〕）。根室沖の陸側プレート前縁部の走時トモグラフィ解析から、低 V_p 堆積物のウェッジ構造が見いだされた。この構造の特徴は、2011年東北沖地震時に海溝軸に至る大すべりを起こした宮城沖と類似しており、その空間分布が17世紀初頭の超巨大地震の断層位置と概ね対応することから、超巨大地震時には海溝軸まですべりが到達する可能性がある（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_05〕）。

地震サイクルを超えた地殻変動の情報は、断層モデルや長期的な地震間地殻変動モデルの評価に重要な示唆を与える。十勝管内沿岸河口域での淡水汽水珪藻比率プロファイル時系列から、1,000年間に及ぶ地殻上下変動の連続的な変化が解明された。12-13世紀超巨大地震の後から続いた隆起が14-15世紀頃から沈降に転じ、17世紀超巨大地震後は現在まで隆起が続いていることが示された。現在観測されている地殻変動の評価や、粘弾性構造を用いた地震サイクルシミュレーションの妥当性など、地震発生予測に関する幅広い分野に影響を与える重要な成果である。また、17世紀地震時には顕著な地殻上下変動が見られておらず、海岸線付近が超巨大地震発生時の断層下端部に相当している可能性がある（北海道大学〔課題番号：HKD_01〕）。

超巨大地震発生時は北海道全域で強い揺れとなることが予想され、札幌都市圏をはじめとする広域的かつ広帯域な地震動予測を進める必要がある。本年度は、過去に千島海溝南部で発生した中規模地震を用いた地震動の距離減衰特性が検討された。プレート境界地震では現有の減衰式とほぼ同等の振幅特性が見られたが、スラブ内地震では1 Hz以上の高周波数帯域でプレート境界地震に比べ数倍から10倍程度の振幅を有していた。2011年東北沖地震では、スラブ内を震源とする余震も多く発生している。超巨大地震発生後のスラブ内余震が、本震よりも強い短周期レベルの地震動をもたらすことで、構造物に本震時以上の被害を引き起こす可能性がある。

根室・釧路管内の縄文以降の遺跡報告を網羅的に調査した結果、過去1万年に最大8回の液状化痕跡が認められた。この回数は、津波堆積物から推定されているイベント数の半分程度である（北海道大学〔課題番号：HKD_09〕）。津波堆積物の詳細な年代測定からは、17世紀と12世紀のイベントの年代が十勝地域と釧路根室地域で異なる可能性が示唆されており（北海道大学〔課題番号：HKD_01〕）、液状化痕跡と津波堆積物の年代を比

較することで、地震動と津波規模の関連性が明らかになる可能性がある。

地域防災力の向上を目指し、釧路・室蘭・函館地方気象台等と連携して自治体職員向けの勉強会を実施した。自治体の防災担当者は数年ごとに異動する。新たな担当者が効率的に基礎知識を得られる仕組みの1つとして、今般急速に普及し親和性が高まったオンライン・オンデマンド方式での試行をした。北海道太平洋沿岸のほぼすべての自治体が参加し、オンデマンド版では1か月間の視聴期間中に累計1万アクセス以上を記録し、多くのニーズがあることが実証できた（北海道大学〔課題番号：HKD_09〕）。オンライン・オンデマンド方式は、従来の講習会のような参集時間の制約を受けにくく、北海道のような広域自治体や、緊急対応が必要となる防災部局では特に効果が大きい。地域防災力向上の有効なツールとして活用していくことが重要である。

3. これまでの課題と今後の展望

内閣府では、千島海溝南部の超巨大地震による最大の地震動とL2津波の浸水予測を概要報告として2020年4月に公表した。一方、基礎自治体では、財政や人的資源の関係から、最大ハザード対策は困難な場合が多く、最頻ハザード予測への要望がある。ハザードの規模別発生確率評価や、事前予測の信頼区間の評価方法について、検討を始める必要がある。実際の社会システムでの不確実性の取り扱いも未解決な課題であり、今後の研究の進展を適切に取り込んでいくことが必要である。

ハザードの事前予測の振れ幅を検討する材料として、地殻活動データの活用や震源特性の多様性の統計的検討が挙げられる。来年度以降、海底地殻変動観測によるプレート間固着の空間分布が明らかになることが期待されているが、これを先験情報として津波浸水推定に取り入れる手法の検討が予定されている。

津波避難計画では、徒歩速度と津波避難場所との関係から避難困難地区の検討が行われる。釧路市の平野部では高台避難が困難なことから、緊急避難場所として津波避難ビルの指定が進められている。津波避難ビルの入り口に集まってきた多様な年齢構成の住民が、基準水位以上の高さへ階段を順番に上っていくのには多くの時間を要することが予想される。ハザードの不確実性の検討とともに、避難時の集団行動に伴って発生する遅れ時間など、避難計画を構成する社会的要素の評価も今後検討すべき課題である。また、大規模災害は低頻度であり、その発現までには相当の時間を要する場合がある。ハザード評価をリスク評価につなげるには、地方で急速に進行する人口減少など、長期的な社会素因の変動も考慮する必要がある。

基礎自治体では、職員数の削減に比して膨大な業務量の増加があり、地域の災害対策に投入されるべき人的資源を圧迫している現実がある。防災リテラシーの向上を目指すには、今般急速に普及したオンライン・オンデマンド等を積極的に導入して定型業務の革新的な効率化を図るとともに、研究成果や施策を網羅かつ俯瞰した統合化された情報を共有する方法を検討することが必要である。

成果リスト

Tanioka, Y., 2020, Improvement of near-field tsunami forecasting method using ocean-bottom pressure sensor network (S-net), Earth Planet. Space, 72, 132, doi: 10.1186/s40623-020-01268-1.

2 (4) 桜島大規模火山噴火

「桜島大規模火山噴火」グループリーダー 井口正人
(京都大学防災研究所)

活発な噴火活動を60年以上続け、今後大規模噴火の発生が予想される桜島を対象に、各研究項目間で緊密な連携と成果の共有を図り、住民避難を視野に入れた総合的研究を推進する。観測研究を通じて、マグマの動きとマグマ供給系への理解を深め火山活動推移モデルを高度化することで、噴火発生予測研究を進展させる。噴火発生前の規模の予測と、噴火発生直後の噴出物の把握を即時的に行うことで災害予測研究を進める。災害予測に基づき、住民への情報伝達などの火山災害情報に関する研究と、避難や交通網の復旧などの対策に資する研究を行う。他の火山における類似研究と連携し、都市、中山間地域、離島などの地理的、社会的環境による対策の違いなど幅広い研究を目指す。本総合研究グループの研究項目と各課題担当は図1に示す通りであり、異なる部会に属する27の研究課題が参画している。令和2年度は、11月に対面とオンラインによるハイブリッド研究集会を開催した。本報告では、研究集会とグループに参画している課題の成果から大規模噴火研究に資する知見を取りまとめた。

マグマの動きとマグマ供給系への理解

桜島では1955年10月以降、南岳あるいはその東山腹の昭和火口において噴火活動が続いており、最近の火山活動においてもマグマ供給系に関する知見が蓄積されつつある。2015年8月15日に1000回近い群発地震を伴った開口性のマグマ貫入イベントが発生した。割れ目は広域応力場に整合的な東南東-西北西方向に開口したが、北北東-南南西方向に延びる割れ目の走向に沿って、開口の前半では浅部で、後半ではやや深部において地震が発生した(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI07])。また、解析例が一例と少ないものの、規模の大きい南岳の爆発に伴う地盤変動は、南岳直下の浅部とより深部に位置する2つの収縮力源により説明され、深部の収縮力源は北岳からさらに北東方向に伸びる割れ目の収縮による可能性があることが示された(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI07])。これまで、桜島の地盤変動を励起する圧力源として球状圧力源がしばしば適用されてきたが、よりマグマの移動しやすい開口性の割れ目がマグマの貫入の初期段階では支配的である可能性がある。

1914年噴火後の地盤変動測定により、桜島の北部は北へ、南部は南へそれぞれ数メートル変位したことが知られており、橋本・多田(1988)は開口量20mの東西方向の割れ目を考えたが、東西方向の割れ目は先に述べた北北東-南南西方向の割れ目(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI07])に共役的である。2015年8月15日に発生した群発地震活動の後半に発生したやや深部の地震活動は、共役的に発展しようとした断層の初期段階を見ているのかもしれない。したがって、広域応力場に整合的な断層の動きだけでなく、共役的な地震活動にも注目する必要がある。

災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)において、火山活動推移モデルの構築は重点課題とされており、桜島の大規模噴火の発生予測においても最も

重要な観点に位置付けられる。昨年度の報告で述べたように、大規模噴火に至る前駆過程として、始良カルデラ下のマグマ溜まりの膨張による地殻内応力集中による桜島から離れた場所での地震発生（1913年6月）、桜島島内での二酸化炭素濃度の増加（7月）、桜島島内の弾性変形を伴う非地震性地盤変動（7月～12月）、噴火の30時間前から始まった群発地震と急速な地盤変動というプロセスを推定した。このうち、注目すべきは地中からの二酸化炭素の発散量の増加であり、本総合研究グループでも小型センサーで二酸化炭素濃度の上昇を測定するためのパラメータの検討が進められた（東京工業大学〔課題番号：TIT_02〕）。

桜島の多様な噴火活動において、マグマの貫入速度が大きい場合は爆発的な噴火（explosive）、小さい場合は溶岩の噴出のような穏やかな噴火（effusive）になることを昨年度の報告で述べた。今年度はマグマの貫入速度が小さく、effusiveな噴火となったインドネシアのシナブン火山とメラピ火山において水蒸気噴火から溶岩ドーム形成に至るプロセスを明らかにし（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI06〕）、マグマの貫入速度とその後の噴火規模・様式に明瞭な対応があるという主張を強化した。

大規模噴火発生時の噴火活動推移把握のための観測技術

大規模噴火が始まるとその噴火活動の推移が最も注目される。1914年桜島噴火は、プリニー式噴火で始まり、火砕流発生を経て溶岩流出で終息した。このような大規模噴火発生時には観測インフラが破壊されるため観測の維持は容易ではないが、近年はこのような状況においても観測の継続を可能にする様々な観測技術の発展が進んでいる。衛星画像によるリアルタイム火山観測（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_07〕）や干渉SARによる地盤変動の把握（気象庁〔課題番号：JMA_03〕）は、火山周辺の観測インフラに依存しない。また、ドローンを用いた観測技術（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_07〕）は火山活動下においても安全性の高い観測が可能であるし、920 MHz帯を用いた地震波形伝送（東北大学〔課題番号：THK_13〕）は、応急的な観測網の復旧に有望である。古典的ではあるが、カメラによる遠望観測の強化（気象庁〔課題番号：JMA_12〕）は必須である。火山ガスについては、簡易トラバース装置を用いた二酸化硫黄放出率の測定（東京大学理学系研究科〔課題番号：UTS_06〕）が機動的である。

ハザード予測

大規模噴火では、降下火山灰・軽石、火砕流、溶岩流、地震、津波、土石流など様々な現象がハザード要因となる。このうち、降下火山灰・軽石の拡散と降下域に関して、桜島の1914年噴火では、初期フェーズであるプリニー式噴火によって多量の火山・軽石が桜島の南東方向に降下したことはよく知られているが、桜島の西方についても、その方向に位置する祇園之洲砲台跡や鹿児島紡績所跡（鹿児島市）など、近世末の遺跡の遺構の発掘からこれらを被覆する降下火山灰層が発見されている（奈良文化財研究所埋蔵文化財センター〔課題番号：NAB_01〕）。これらの火山灰は、プリニー式噴火後の溶岩噴出に伴うブルカノ式噴火により放出されたものであり、気象条件によってハザードは常に変わりうることを示している。大規模噴火では噴火活動は長期間継続することが多いので、風速場の変化も予測する必要がある。次世代火山研究推進事業のうち「リアルタイムの

火山灰ハザード評価手法の開発」では噴火発生に伴う諸現象を即時的に解析して火山灰の拡散範囲をシミュレーションにより予測するだけでなく、噴火前の地盤の膨張量から噴出マグマ量を予測し、火山近傍の高分解能の風速データをもとに噴火発生前の拡散予測も行われているが、噴出率と風速場の時間発展を考慮した、より実践的なシステムへ発展させる必要がある。

1914年桜島噴火でも噴火開始から1日後に火砕流の発生が見られる（小林，1982）。2009年以降の昭和火口噴火による火砕流発生事例の解析から、火砕流は半年から1年に及ぶ一連の噴火活動期のうち後半部分にあたる、新鮮なマグマが放出し終わり脱ガスが進んだマグマが噴火により放出される地盤変動の収縮期に発生しやすいことがわかった（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI11〕）。このことは、大規模噴火においても噴火活動がある程度進行した後に火砕流が発生することと整合的である。

1914年噴火後には多量の軽石・火山灰が降下した大隅半島側で、降雨がトリガーとなる土石流あるいは洪水が頻発した。降灰によるクラストが斜面表面を覆った条件に対する降雨流出・土砂流出に関する室内実験により、クラストの存在が表面流量を増加させることが分かった（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI12〕）。

防災リテラシーの向上

桜島の大規模噴火を想定した防災リテラシーの向上においては、現在の火山活動状態と今後中期的に起こりうる噴火への認識、噴火前後の危機的状況における避難等の行動、避難時の災害イメージの醸成、復旧・復興への行動イメージなどを考慮する必要がある。桜島では2020年6月4日の爆発によって火山岩塊が火口から南西3.3 kmの居住地域まで達した。本来、噴火警戒レベルが5に引き上げられる重大な事象であったことから、桜島に居住する住民へのアンケート調査をおこなった。その結果、気象庁の発表する噴火警戒レベルとその対応については認知度が高いものの、警戒を要する範囲については認知が不十分であることがわかった（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI13〕）。一方、大規模噴火によって鹿児島市街地側への大量降灰災害に対して、大幅に被災影響を軽減できると考えられる市街地側住民の事前避難を実現を目指し、火山の予知・予測情報が適切な避難へと結びつくような情報の作成と、ワークショップにおける専門家と住民との対話を通じて共創する研究に着手した（拠点間連携共同研究〔課題番号：CT0C16〕）。

これまでの課題と今後の展望

火山災害では避難をもってその対策とするので、避難対応が最も重要である。桜島から全島避難には時間を要するので、噴火警戒レベル4、5の発表、さらに、避難の意思決定のタイミングが避難対策の成否を決定づける。現在は、噴火警戒レベルの判定基準が公表されているので、火山活動が基準を満たしさえすれば、避難行動を開始できる。判定基準は1914年噴火の事例を参考に決定されているが、次の大規模噴火でも同様の規模の地震活動が発現する保証はない。さらに、鹿児島市は鹿児島市街地域からの避難を地域防災計画に組み込んだが、避難対象人口が10万～20万人と見積られる避難の実施は桜島島内からの避難よりもさらに多くの時間を要する。鹿児島市街地側の避難における課題は以下の通りである。①避難のための時間を稼ぐため、2～3日前における噴火の前

兆現象の検知と噴火発生の切迫度評価の高度化、②プリニー式噴火継続中の時間帯を通しての風速場の高精度の予測、③プリニー式噴火の後も溶岩流出を伴いながら火山灰の放出は長期間続くので、長期継続降灰への対応。④鹿児島市側において避難という対応があることを周知させること（桜島では、過去の噴火の経験と50年に及ぶ避難訓練により十分なリテラシーがあるのに対し、鹿児島市においては不十分）、⑤大規模噴火を踏まえた降灰強度のレベル化。

火山活動が噴火警戒レベルの判定基準を満たしてくれればよいが、より複雑な現象を示すことも十分あり得るので、むしろ、過去に住民の避難が行われた火山における避難の意思決定に至るまでの事例プロセスを調査すべきと考える。

令和3年度においても12月に総合研究グループの研究成果、課題間連携を確認する研究集会を行い、総合的な研究を推進する。

成果リスト

- Brown, J. R., R. N. Taylor, and M. Iguchi, 2020, Using high-resolution Pb isotopes to unravel the petrogenesis of Sakurajima volcano, Japan, *Bull. Volcanol.* 82, 36, doi:10.1007/s00445-020-1371-0.
- Nomura, Y., M. Nemoto, N. Hayashi, S. Hanaoka, M. Murata, T. Yoshikawa, Y. Masutani, E. Maeda, O. Abe, and H. K. M. Tanaka, 2020, Pilot study of eruption forecasting with muography using convolutional neural network, *Scientific Reports* volume 10, 5272. doi.org/10.1038/s41598-020-62342-y.
- 平野舟一郎・八木原寛・仲谷幸浩・後藤和彦, 2020, 2017年の臨時地震観測による鹿児島湾・喜入沖の震源分布と発震機構—鹿児島地溝形成に伴う断層に沿った顕著な地震活動—, *鹿児島大学理学部紀要*, 53, 32-44, <http://hdl.handle.net/10232/00031553>.
- Hotta, K. and M. Iguchi, 2021, Tilt and strain change during the explosion at Minamidake, Sakurajima, on November 13, 2017, *Earth Planet. Space* 73, 70, doi:10.1186/s40623-021-01392-6.
- Iguchi, M., H. Nakamichi, and T. Tameguri, 2020, Integrated study on forecasting volcanic hazards of Sakurajima volcano, Japan, *J. Disaster Res.*, 15, 174-186, doi:10.20965/jdr.2020.p0174.
- Iguchi, M., 2020, Chapter 3 Resilience to Volcano- and Landslide-Related Hazards, in “Disaster Risk Reduction and Resilience”, ed. by M. Yokomatsu and S. Hochrainer-Stigler, *Disaster and Risk Research: GADRI Book Series*, Springer, 25-44, doi:10.1007/978-981-15-4320-3_3.
- Iguchi, M., 2021, Chapter 18 Volcano emergency planning at Sakurajima volcano, in “Forecasting and Planning for Volcanic Hazards, Risks, and Disasters Volume 2”, ed. by P. Papale, *Hazards and Disasters Series*, Elsevier, 635-668, doi:10.1016/B978-0-12-818082-2.00018-4.
- Ishii, K., A. Yokoo, M. Iguchi, and E. Fujita, 2020, Utilizing the solution of sound

diffraction by a thin screen to evaluate infrasound waves attenuated around volcano topography, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 402, 106983, doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.106983.

風間卓仁・山本圭吾・大柳諒・岡田和見・大島弘光・井口正人, 2020, 桜島火山における繰り返し相対重力測定 (2019年5月～2020年3月), *京都大学防災研究所年報*, 63B, 108-117, <http://hdl.handle.net/2433/260813>.

Koike, M. and H. Nakamichi, 2021, Dike inflation process beneath Sakurajima volcano, Japan, during the earthquake swarm of August 15, 2015, *Front. Earth Sci.* 8, 600223, doi:10.3389/feart.2020.600223.

Le, H.V., T. Murata, and M. Iguchi, 2020, Can Eruptions Be Predicted? Short-Term Prediction of Volcanic Eruptions via Attention-Based Long Short-Term Memory, *AAAI-20/IAAI-20 Technical Tracks*, 08, 34, 13320-13325, doi:10.1609/aaai.v34i08.7043.

Maher, S. P., R. S. Matoza, C. D. de Groot-Hedlin, K. L. Gee, D. Fee, and A. Yokoo, 2020, Investigating spectral distortion of local volcano infrasound by nonlinear propagation at Sakurajima Volcano, Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth* 125, e2019JB018284, doi:10.1029/2019JB018284.

村田泰輔, 2020, 災害痕跡データベースの構築－災害の軽減に向けた考古学の新たな挑戦－, 佐藤禎一(編)「*學士會会報*」, 一般社団法人学士会, 942, 57-70.

村田泰輔, 2021, 論説 災害痕跡データベースの構築・公開に向けて～考古学の新たな挑戦, 西藤公司(編)「*地域防災*」, 一般財団法人日本防火・防災協会, 36, 4-9.

中道治久・他, 2020, 2019年桜島火山人工地震探査の概要と過去の探査との比較, *京都大学防災研究所年報*, 63B, 100-107, <http://hdl.handle.net/2433/260812>.

Shinohara, H., R. Kazahaya, T. Ohminato, T. Kaneko, U. Tsunogai, and M. Morita, 2020, Variation of volcanic gas composition at a poorly accessible volcano: Sakurajima, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 407, 107098, doi:10.1016/j.jvolgeores.2020.107098.

Yamasaki, T., F. Sigmundsson, and M. Iguchi, 2020, Viscoelastic crustal response to magma supply and discharge in the upper crust: Implications for the uplift of the Aira caldera before and after the 1914 eruption of the Sakurajima volcano, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 531, 115981, doi:10.1016/j.epsl.2019.115981.

研究項目と各課題担当

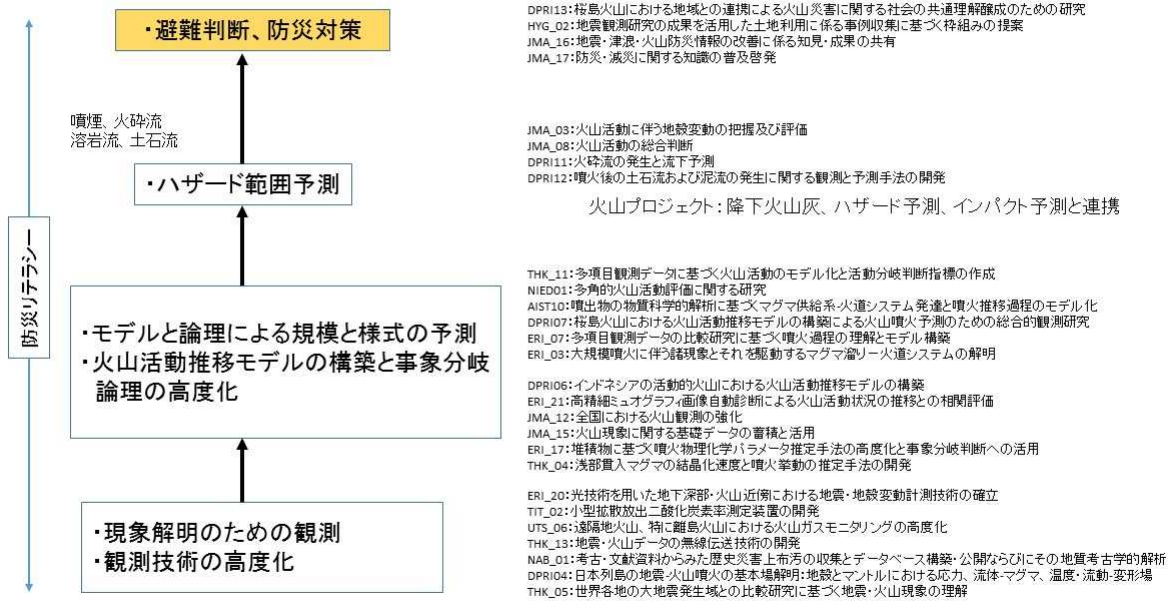


図 1. 桜島総合研究グループの研究項目と各課題

2 (5) 高リスク小規模火山噴火

「高リスク小規模火山噴火」総合研究グループリーダー 大湊隆雄
(東京大学地震研究所)

1. 目的

火山では、噴気地帯や山頂火口近傍に多くの観光客や登山客が訪れたり、観光施設が設けられている場合が多く、平成 26 年の御嶽山噴火や平成 30 年の草津本白根山噴火のように、規模が小さくても人的・物的被害等が生ずる場合がある。また小規模な噴火は発生頻度が相対的に高いことから、観光客や登山客等の災害リスクの低減という観点から重要な研究対象である。そこで、噴火災害に関する資料の収集、地質調査による水蒸気爆発等の噴火履歴調査、各種観測による活動把握、災害誘因である噴石や土石流などの予測研究、災害情報の発信に関する研究等を実施する。これらの成果を総合的に検討し、研究の課題や方向性を明らかにする。

2. 実施方法

(1) 既存課題の成果を活用

- ・ 噴火災害資料の収集、災害発生状況の整理、災害発生時の火口からの距離等の文献調査、災害関連学会での情報収集
- ・ 地質調査による水蒸気爆発等の噴火履歴調査
- ・ 地球物理・地球化学的各種観測による活動把握
- ・ 比抵抗調査等による熱水系の構造探査による水蒸気噴火ポテンシャルの評価
- ・ 災害情報の発信に関する研究の活用（御嶽山、本白根の事例研究など）

(2) 建議の研究の枠外（社会科学、災害科学分野など）の成果を活用

- ・ 災害関連学会等からの情報収集
- ・ 社会科学、災害科学分野等の研究者に、火山分野への応用を検討してもらうための方策（集会・セミナー等）の検討

(3) 既存研究成果を精査し、研究分野の過不足の有無を洗い出し、あらたな研究課題や研究の方向性の提案につなげる。

(4) 上記に関連する研究集会の企画

3. 本年度の実施内容

本総合研究グループと関連する各分野の連携を整理するための連携図（図 1）を作成した。作成した図に基づいて関連分野の成果の取り入れ方や研究の過不足等について検討を進め、本総合研究で取り組むべき研究項目とその進捗状況を以下の様に整理した。

研究項目	進捗
1) 災害情報の発信に関する研究	→ 関連する研究課題はあるが、まだ問題点の整理が必要な段階
2) 小規模噴火の発生する場の把握	→ 関係各課題で実施中

- 3) 観測による火山の活動把握 → 関係各課題で実施中
- 4) 噴火の予測に関する研究 → 関係各課題で実施中
- 5) 小規模噴火災害の資料収集 → 未実施

本総合研究に関連する成果を研究項目毎に整理すると以下の様になる。

1) 災害情報の発信に関する研究

ニュージーランドで開発された VUI (火山活発化指数) を日本の火山に適用するための具体的な検討が始まっている。これは噴火前の各種観測データの変化から火山活動の活発化の度合いを客観的に評価する試みであり、その成果は本総合研究の対象である高リスク小規模噴火の評価にも応用され、災害情報としてどのような情報が発信可能であるかを評価することに繋がる。本年度は、昨年度作成した基準に基づいて、気象庁・北大・道総研等のデータを用いて十勝岳の VUI 毎月値を、1970 年から 2019 年について算出している。また阿蘇山中岳について VUI 基準を検討している(北海道大学[課題番号:HKD_04]、京都大学理学研究科 [課題番号:KUS_02])。

災害情報の発信に関する研究の問題点を整理するため、今年度は以下の 4 項目について検討した。

- a) 情報を発信すべき対象
- b) 現在使われている防災資料の内容
- c) 噴火警戒レベルと小規模噴火
- d) モニタリングは誰が行うか

a) 情報を発信すべき対象

本総合研究において対象とする高リスク小規模噴火については、地元住民に加えて観光客、登山客が情報発信の対象となる。地元住民に対しては防災マップの配布などにより情報発信を行うことが一般的と考えられるが、観光客や登山客についてはその行動を把握することが先決であり、情報発信の方法はその後に検討することになる。登山客の行動を把握する先駆的な試みとして富士山チャレンジプラットフォームが実施した「富士山チャレンジ」という取り組みがある。これは登山客にビーコンを配布し、その行動パターンを把握し登山者の安全対策に資するという試みであり、得られたノウハウや情報は本総合研究課題にとっても極めて重要である。この取り組みの実施者との連携や得られた成果の活用を次年度以降検討したい。

b) 防災資料の内容

火山周辺の自治体が発行している火山防災ハンドブックの例として、2009年に発行された御嶽山火山防災ハンドブックを取り上げる。これを見ると「火山噴火は事前に予測できる」、「小規模噴火は大規模噴火の前触れであり、大規模噴火になる前に避難すれば良い」という印象を与えかねない記述となっている。小規模噴火は前兆が捉えにくく不意打ちとなる場合があるし、小規模噴火であっても火口近傍に人が居れば被害が出る。

2014年の御嶽山噴火で被害にあった方々が、仮にこの情報に事前に接していたとしても、被害軽減に役立ったかどうかは疑問が残る。

次に、2014年10月の御嶽山噴火後に発行された噴火シナリオにおいて記述がどのように変わったのかを調べたところ、火山活動は徐々にエスカレートし大きな噴火に繋がるという記述が再び採用されており、2014年噴火と同じことが起きた場合にどのように対応するか、という点に重きを置いて書かれているという印象を受ける。しかし、前回の噴火と全く同じことが再び起きる可能性はそれほど高くはない。また、観測網が以前よりも整備されたとはいえ、前兆的な地震活動や地殻変動をリアルタイムで評価し適切に対応できる保証もない。防災対策を取るためには都合が良いのかもしれないが、噴火による被害の低減という観点からは噴火前の内容から大きく改善されたとは言い難い。

c) 噴火警戒レベルと小規模噴火

気象庁が発表する噴火警戒レベルと高リスク小規模噴火の関係も検討した。噴火警戒レベルは「わかりやすい指標である」、「防災対応との親和性が高い」という利点があるため広く認知され、防災対応の指標として使われており、比較的規模の大きい噴火に対しては概ね有効に機能していると考えられる。しかしこの噴火警戒レベルが小規模噴火に対しても有効であるとは限らない。現行の説明を読むと、大規模噴火に向けてレベル1からレベル5に向けて段階を踏んで活動がエスカレートするとの印象を与えかねない。また、レベル1は安全である、との印象も与える。小規模噴火に関しては噴火前にレベルが1段ずつ順序良く上がるとは限らないし、レベル1であっても必ずしも安全ではない。例えば、2014年の御嶽山噴火はレベル1の状態で噴火が発生し、噴火後にレベル3に引き上げられた。2019年の浅間山の小噴火も同様である。この噴火もレベル1で発生しレベル3への引き上げは噴火後であった。大規模噴火に関しては、マグマの移動を伴うことが多く、前駆的な活動が発生する。そのため、地震発生数や地殻変動などの観測指標が徐々に高くなり噴火に至る場合が多いことから、噴火警戒レベルは有効に働く場合が多い。これに対し、必ずしもマグマの移動を伴わない小規模噴火は事前のシグナルが微弱であり、現行の噴火警戒レベルが有効に機能するとは限らない。

d) モニタリングの実施主体は誰か？

火山活動に伴うハザードは極めて多様である。溶岩流や噴石、降灰の他に火山ガスの噴出も被害者の発生につながっている。地震や地殻変動、遠望観測は気象庁が担っている。また、山頂火口からの火山ガス放出も気象庁によりモニターされている火山は多い。しかし、登山道沿いの小規模な噴気孔における火山ガスモニタリングは誰が実施しているのだろうか？岩手、宮城県の県境に位置する栗駒山では地元自治体が主体となってモニタリングを実施している。他の火山においても地元自治体を実施している例が多いと思われるが、火山によってはその火山に関心を持つ研究者任せか、あるいはそもそもモニタリングが実施されていない場合があるかもしれない。モニタリングの実態を調査した上で、モニタリングの対象から漏れている事例はないか、モニタリングはどこが担うべきかという重要な問題に関する議論を開始する必要がある。

2) 小規模噴火の発生する場の把握

本白根火砕丘群の山頂域に分布する小火口の活動年代を検討し、各火口を形成した水蒸気噴火の発生年代を推定した。水蒸気噴火の発生場として国内外に有名な白根火砕丘群 (SPCG) の形成史の解明のため地質図の試作と各火砕丘の活動年代推定を実施した (富山大学 [課題番号: TYM_01])。

草津白根火山において広帯域 MT 観測による 3次元比抵抗構造モデルの構築を行い、深部マグマ溜りからのマグマ性流体の供給路に相当すると思われる構造を見出した。御嶽山においては長周期 MT レスポンスを得るための試験観測を実施し、未変質の新期御岳溶岩を反映する高抵抗層を見出した。2014年噴火口近傍は、表層付近から少なくとも深度 500 m までは低比抵抗層が存在し、噴火に関与した流体の存在が示唆された (東京工業大学 [課題番号: TIT_03])。

3) 観測による火山の活動把握

地球物理・地球化学的各種観測による活動把握

白根火砕丘周辺における多項目観測を継続し、活動の低下傾向を示す様々な観測的事実が得られた。本白根山 2018年噴火時に発生した火山性微動の発生位置から、噴火に関与した流体が北方由来であることが示唆された。また、噴火発生時の傾斜変動と噴火噴煙放熱量の比較から、噴火に関与した熱水が比較的低温であった可能性が示唆された (東京工業大学 [課題番号: TIT_03])。

伊豆大島においては、人工電流源による地下比抵抗連続モニタリング (ACTIVE) を継続した。また直流法による比抵抗モニタリングも実施したが、いずれも顕著な変動は認められなかった (東京工業大学 [課題番号: TIT_03])。

弥陀ヶ原火山において、多項目の地球物理的観測を実施している。地獄谷遊歩道沿いで実施した水準測量では 2.9 cm/年の沈降が検出され、近年活発な噴気活動が継続している紺屋地獄・新噴気帯付近ではほぼ鉛直なダイクが閉口したことが推定された。また過去の年変化は一定ではなく、噴気活動の盛衰や地下からの熱水の供給量の変化に対応していることが示唆された。地獄谷内に設置した GPS ベンチマークの繰り返し観測を 2020年 8月と 10月にそれぞれ実施した (富山大学 [課題番号: TYM_02])。

百姓地獄北東部の噴気孔近傍において地動観測を行い、周波数 6-8 Hz および 65 Hz 付近が卓越する振動が観測された。65 Hz 付近の振動は、噴気孔で発生している空力音によるものと考えられる。また、弥陀ヶ原火山全体の活動状況を把握する観点から広域地震観測も開始した (富山大学 [課題番号: TYM_02])。

ドローンを用いて地獄谷内の熱観測を行い、熱活動の詳細な変化を明らかにするとともに、地獄谷内の熱水・噴気の温度分布図を作成した。干渉 SAR による地表の隆起を比較し、隆起量が大きい地点ほど高温の熱水・噴気が噴出しているという傾向を見出した (富山大学 [課題番号: TYM_02])。

駒ヶ岳・有珠・樽前・十勝・雌阿寒では地震・地殻変動観測を継続している。吾妻山においても、広帯域地震計による機動観測点における観測を維持・継続した。伊豆大島では絶対重力観測を継続的に実施している。焼岳においても地震・傾斜計・GPS から成る多項目観測を継続している。御嶽山では微小地震観測や GNSS キャンペーン観測を実施

している。阿蘇・九重では相対重力観測や微動のアレイ解析、GNSSやInSARによる地殻変動の抽出を行った。口永良部島では地震及びGNSSの連続観測を実施した（京都大学理学研究科〔課題番号：KUS_02〕）。

多項目観測データによる火山現象・災害過程の把握のための研究を進め、基盤的火山観測網（V-net）等のJVNDNシステムに集約されたデータの活用を進めている（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED01〕）。

火山活動の監視、現象の理解等に必要となる基礎資料を提供するため、熊本において絶対重力観測を実施した。また、富士山において全磁力連続観測を実施した（国土地理院〔課題番号：GSI_06〕）。

小規模火山噴火に関する研究を推進するためには、火口近傍の観測体制の充実が不可欠である。活火山の常時監視体制の継続や、地震計や監視カメラの増強が進められている（気象庁〔課題番号：JMA_12〕）。

4) 噴火の予測に関する研究

噴火の予測に関する関連研究分野との連携として「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（東北大学〔課題番号：THK_11〕）」との合同研究集会を1月12日と1月15日の2日に分けて実施した。

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時小系統樹の分岐判断指標の作成を進めた。吾妻山や十勝岳を対象に火山性地震発生域や膨張・収縮源、低比抵抗領域、活動様式について比較研究が進んでおり、また、十勝岳の熱水系を念頭に熱水流動シミュレーションによる地下の熱水系のふるまいが調べられている。火山活動の変化に対する火口湖の応答について、湖水の熱・化学パラメータの数値的検討を行った。十勝岳の三段山山体の活動中に起こった山体崩壊により生じた、ヌッカクシ火口において調査した。マグマ噴火は約1800年前まであり、その後は水蒸気噴火および小規模な山体崩壊が散発的に発生していることがわかった。小規模噴火の発生については、現在活発な活動を示す火口以外も対象として、調査・評価する必要があることが改めて示唆された（東北大学〔課題番号：THK_11〕）。

4. これまでの課題と今後の展望

・これまでの課題

火山活動による人的被害の程度は必ずしも噴火規模に依らない。噴火が発生する場所からの「距離」が人的被害の規模を大きく左右する。大規模噴火であっても十分な距離まで避難できれば人的被害は生じない。逆に小規模噴火であっても近くで発生すれば人的被害はまぬかれない。

マグマ噴火等の大規模噴火の場合はほとんどの場合明瞭な先行現象があり、噴火前に避難し人的被害が少ない場合が多い。また、噴火規模が大きくても周囲に人がいなければ被害が無い。これに対し、水蒸気噴火、ガス噴出、ガスの滞留等の比較的規模の小さい火山活動については、先行する現象が弱いかあるいは無いために事前把握が難しく、危険性がわかりにくい。噴気地帯などはそのまま観光スポットになっていることも多く、観光客や登山客が危険性がわからないまま接近し、被害が出る場合がある。

小規模噴火にもかかわらず高リスクである理由の一つは、上記で述べたように発生場所や時期が予測困難だという点である。また、高リスクであるもう一つの理由として社会的要因も考えられる。各自治体が発行する防災マップや、噴火に関する情報発信を担う気象庁が設定している噴火警戒レベルを見ると、防災マップの多くは噴火がある程度予測できることを前提とした記述となっており、高リスク小規模噴火に関する記述はほとんど見られず、危険性の存在が周知されにくい。噴火警戒レベルについても、非専門家が正確にその内容を理解しているとは考えにくく、専門家と非専門家の認識が大きく乖離している可能性がある。例えば、レベル1であれば安全であると考え、火口付近に無防備に接近して突発的な噴火に巻き込まれるという事が起こり得る。

・今後の展望

本課題のターゲットである小規模火山噴火は、データの収集が難しく、科学的な研究の対象とするためには困難を伴うため、観測研究計画の中でこれを明示的にターゲットとする研究は限られていた。しかしながら、小規模ゆえに発生頻度が高く人的被害も少ない現象に対して、被害低減につながる具体的な方策を探るための研究は本観測研究計画の中で実施されてしかるべきものであった。そこで、2019年度に始まった観測研究計画において「高リスク小規模火山噴火研究グループ」を立ち上げ、その活動を開始した。

本総合研究は、予測困難性と社会的要因に着目して研究の方向性を検討し、将来の研究課題のシーズを育てることを目標とする。予測困難性に関しては、これまでの知見を活用することで予測可能性を高めることはできないか、あるいは、予測可能性を高めるためにはどのような研究を新たに立ち上げるべきか、という観点から検討を進める。社会的要因に関しては、専門家と非専門家の認識のギャップを埋め、どうすれば非専門家が危険性を正しく理解することができるのか、そのためには何をすべきか、という観点から社会科学的、防災科学的研究の方向性に関して検討を進める。

2年目となる今年度は、関連する研究課題の整理と問題点の洗い出しを進めた。本総合研究で実施すべき研究項目を以下の5つに整理した。1) 災害情報の発信に関する研究、2) 小規模噴火の発生する場の把握、3) 観測による火山の活動把握、4) 噴火の予測に関する研究、5) 小規模噴火災害の資料収集。2)～4)については関連する研究課題の成果が少しずつ現れているが、1)に関しては、関連する研究課題のうち社会学的、情報学的な課題の取り込みが不十分であり、次年度以降の課題である。また、5)に関しては現状は未実施であり、次年度以降に実施予定である。

成果リスト

特になし

総合研究グループ「高リスク小規模噴火」関連各分野の連携図

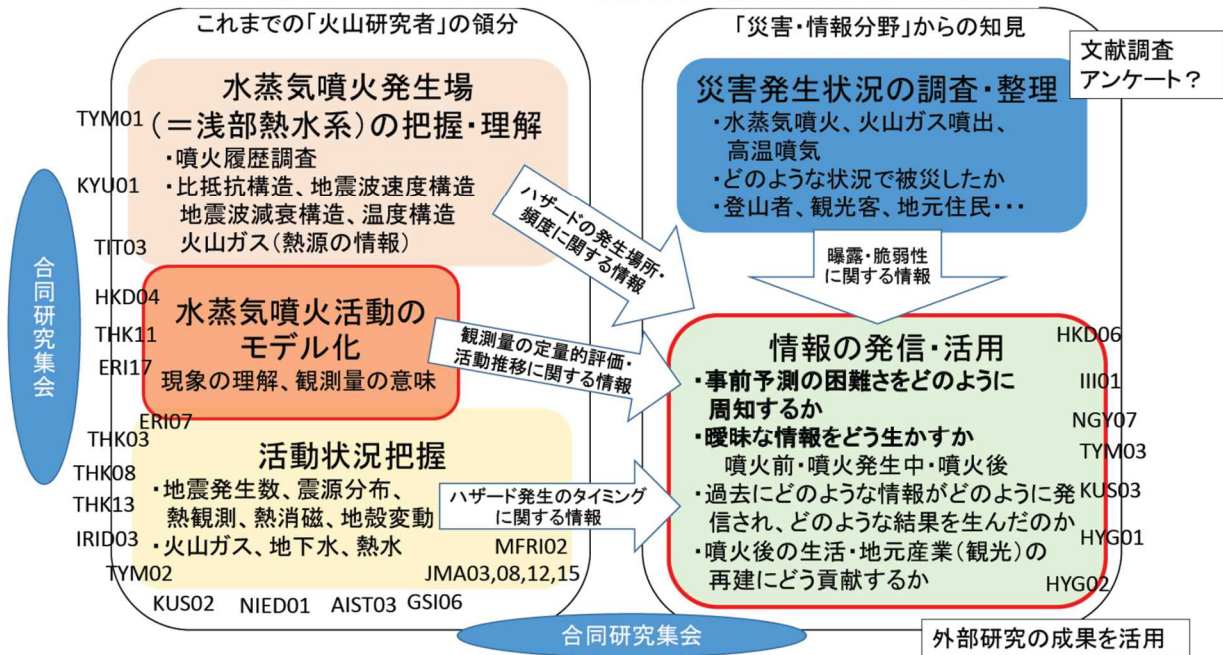


図1. 本総合研究グループと他課題の連携図。関連する課題番号も示す。従来型の火山研究課題は、現象の解明や予測のための研究が多く、図の左側の枠に入る。図の右上に示される災害・情報分野に関する研究課題は無いいため、外部からの知見をどのように取り込むかが課題である。右下は、災害軽減に関連する情報をどのように発信すべきかという、本総合研究で最も重要な内容が含まれている。この内容に向けて、建議の研究における各課題の成果をどのように統合していくかを検討することが、本総合研究の主目的となる。

3 拠点間連携共同研究

東京大学地震研究所・京都大学防災研究所 拠点間連携共同研究委員会
委員長 松島信一
(京都大学防災研究所)
副委員長 加藤尚之
(東京大学地震研究所)

これまでの地震・火山観測研究計画では、地震や火山噴火の発生の予測を最大の目標とし、それにより地震や火山噴火による災害の軽減を目指してきた。しかし平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の発生により多くの犠牲者が出たことを踏まえ、地震や火山噴火の科学的な予測が極めて困難であっても、現在の地震学や火山学には災害軽減に役立てられる多くの知見が集積されていることから、平成26年度から開始された「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」(建議)において大きく方針を変更した。即ち、地震や火山噴火の発生予測の実現を重点とした方針から、それらの予測を目指す研究を継続しつつも、地震・火山噴火災害をもたらす誘因の予測研究も組織的・体系的に進める方針に転換した。そのため、地震学や火山学を中核としつつも、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの分野の研究者が参加して、協働して推進することになった。

これまでの建議に基づく観測研究計画では、自然現象である地震発生や火山噴火現象の理解に基づきそれらの科学的な予測を目指すという考え方から、「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所が中核となって計画を推進してきた。しかし災害や防災に関連する研究者と協働して計画を推進するためには、東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所とが連携して計画を進めることが有効であるとの結論に至り、両研究所が協働し、それぞれの分野の共同利用・共同研究拠点として、連携して共同研究を進めることとなった。具体的には、両拠点の研究者が中核となって建議に沿った大テーマを決め、それを実現するための研究について全国の研究者からの提案・参画を募集して全国規模の共同研究を進める「重点課題研究」と両拠点がそれぞれ関連が深い地震火山研究コミュニティと自然災害研究コミュニティの2つの学術コミュニティに呼びかけ建議の主旨を踏まえたボトムアップ研究を公募する「一般課題型研究」を実施している。

1. 重点推進研究

(1) 総括研究

総括研究は「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」と題し、2019年度に引き続き(1)震源過程、(2)伝播・深部地盤構造、(3)強震動予測、(4)浅部地盤構造、(5)構造物被害予測、(6)リスク評価の研究グループに分かれ、それぞれの分野におけるリスク評価の不確かさの要因についての検討を進めるとともに、これらの知見を統合するための(7)プラットフォーム構築グループ、(8)ステークホルダの参画に関する研究グループおよび(9)大規模計算のためのコンピュータサイエ

ンスグループの9グループで実施した（拠点間連携共同研究〔課題番号：CT0C01〕）。

震源過程および強震動予測について、プレートの沈み込み帯で発生するプレート間大地震・巨大地震に伴う強震動の距離減衰の特徴を調べるために、2003年十勝沖地震、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netで観測された強震動を解析した。浅部地盤構造の影響を表層30 mの時間平均S波速度である V_{s30} により補正したほか、地震ハザード評価の側面から震源に近い前弧側の記録のみを用いた。この様にして求めたPGA及びPGVに対し、強震動生成域の M_w とそこからの距離とを用いて予測するモデル式を作製した（図1）。また、距離減衰式の高度化に向けて、周期ごとの応答スペクトルを考慮した解析の必要性や最大変位や永久変位など問題となるテーマについて議論した。

深部地盤および伝播経路については、DONET観測点の2点以上でP/S波検測値がある地震のうち、紀伊半島南東沖で実施された構造調査測線周囲の地震635個について、JMAによるDONETの検測値のみを用いて震源の再決定を行った。この時、それぞれのDONET観測点における地震波速度構造は、南海トラフ沿いで実施された構造調査をもとに構築されたP波速度構造を参照した。さらに、堆積層による地震波到達時間の遅れについて各観測点での観測点補正値を求め、震源決定解析に適用した。解析結果として611個の地震について、震源が再決定された。これらの震源はJMAカタログ震源よりも全体的に～10 km程度浅く、特に $M6.5$ の地震はプレート境界付近に求まった。

浅部地盤構造に関しては、地盤物性の不確実性を考慮した地盤災害リスク評価のため、中空ねじりせん断試験機を用いて液状化特性に関するばらつきの検討を行った（図2）。土の相対密度やせん断応力比といった定量化が可能な指標の影響に加え、実験者の違いといった定量化が難しい指標の影響についても分析した。

構造物被害予測について、建物の被害状況の早期把握のため、現行の応急危険度判定手法の制定の経緯について調査するとともに、衛星画像利用の有効性、加速度記録を用いた即時判定の有効性について確認を行った。また、これまでの鉄筋コンクリート部材の実験データベースを用いて、柱・梁・耐震壁について損傷の生じ始める降伏点変形の推定方法とその精度について検討を行った。

リスク評価については、リスク分析および被害分析に必要なエクスポージャに関する情報に対して、UAV空撮を用いて高精度かつ半自動的に収集・整理する手法に関する基本的な検討を行なった。具体的には、広域UAV空撮画像から点群データを生成し、生成された点群データを処理することで、地域内の個々の建物に対して建物高さや平面などの基本的なパラメータを実用的な精度で推定可能であることを明らかにした。一方、1m-LiDAR DEMを用い特徴的な地物を認識可能な図を作成した。地震前後の2枚の図で特徴的な地物の追跡を行い、広い範囲で地表の移動方向と変位の大きさを示すことで、地震断層と考えられる地表変位と地震で変位した地すべり土塊の検出が可能となった。

プラットフォーム構築としては、地震時の総合的な影響評価にむけて、過去の南海トラフ巨大地震での建物被害と現在の地震リスク評価手法により推定される建物被害を比較することで、震源域から山陰地方にかけての地域の減衰特性が過大評価されていることを示した。また、地震リスク評価の応用としてライフライン（水道管）のリスク評価を行う為の被害関数について、2016年熊本地震における被害データをもとに検討した（図

3)。

コンピュータサイエンスでは、開発をすすめてきた低次有限要素を用いた解析コードを拡張し、また、GPUへの実装を行うことで、従来よりもさらに高速な地盤増幅解析を実現した。さらに、本解析手法と最適化過程を学習する人工知能を組み合わせることで高速な地盤内部構造推定のための手法を開発した。

ステークホルダ参画については、災害リスク評価結果は想定シナリオ・手法により変化するため、防災計画を策定する場合には災害リスク評価にばらつきが存在することを踏まえる必要がある。大阪府、高知県において、震源モデルの違い、工学的基盤での地震動のばらつき、表層地盤における増幅特性のばらつき、を考慮した組み合わせによる計算を表示するシステムの開発を継続して行い、地方自治体のハザード評価結果との比較を行えるようにした。

(2) 特定型 (その1)

「ばらつきのある被害リスク評価をふまえた防災計画の検討 [課題番号:CTOC02]」においては、災害リスク評価のばらつきを理解することが重要であり、計画の目的に応じて適切な災害リスク評価結果を選択することが重要となることを踏まえて研究を進めた。ばらつきのある被害リスク評価を防災計画に、災害リスク評価結果は想定シナリオ・手法により変化する。したがって、防災計画を策定する場合には、災害リスク評価にばらつきが存在することを踏まえる必要がある。そのためには、災害リスク評価のばらつきを理解することが重要であり、計画の目的に応じて適切な災害リスク評価結果を選択することが重要となる。昨年度開発したシナリオ・手法の組み合わせにより変化する災害シナリオ評価結果を適切に理解することが可能なシステムの改良・対象地域の拡大を行った。図4に地震動推定のばらつきの推定の方法、図5に高知県での試行結果を示している。図5では行政の評価結果が、様々な地震動推定の中で大きめに評価している場合は赤系、小さめに評価している場合は青系で示しているが、目的に応じて、逆(大きめが青、小さめが赤)の表示も可能となっている。行政の地震動推定結果が、提案されている様々な地震動の中の位置づけを示している。20%以下(小さめに評価)に位置する場合は青、80%以上(大きめに評価)に位置する場合は赤にしている(拠点間連携共同研究 [課題番号:CTOC02])。

(3) 特定型 (その3)

「定常的地震活動の震源および地震波速度構造の精度向上による地震波動場推定の高度化 [課題番号:CTOC03]」では、2020年度は気象庁一元化震源カタログにある紀伊半島南島沖で実施された構造調査測線の周囲140 km四方で発生した地震のうち、DONET観測点2点以上でP/S波検測値がある地震を抽出し、DONETの検測値のみを用いて震源の再決定を行った。この時、それぞれのDONET観測点における地震波速度構造は、南海トラフ沿いで実施された構造調査をもとに構築された既往のP波速度構造を参照して決定した。S波速度構造はP波速度を参照して決定するとともに、堆積層中の極端に遅いS波速度については、S波到達時間に補正を施す観測点補正值を求め、震源決定解析に適用することとした。解析結果として611個の地震の震源を再決定した。これらの震源はJMAカタログ震源

よりも全体的に～10 km程度浅く求まっている。例えば2016年4月1日に発生した三重県南島沖のM6.5の地震については、他の詳しい解析から求められている深さ（例えば地震調査委員会資料）と整合的である。一方で、DONET観測点の検測値が3点以下の地震については、再決定された地震の分布にもばらつきが認められるため、より限定した領域の地震についての解析が必要と考えられる。南海トラフ沿い海域下の地震については、プレート境界付近の海洋性地殻内と海洋性マントル最上部の2グループがあることが知られている。モホ面を挟んで、陸域で観測される地震動の大きさに大きな違いがあることが報告されている。本研究で再決定された震源（図6 a）は、JMAカタログ震源（図6 b）よりも全体的に浅く求まった。特にM6.5の地震はプレート境界付近に求まり、陸域での地震の評価には重要である（拠点間連携共同研究〔課題番号：CTOC03〕）。

（3）特定型（その2）

「巨大地震による斜面災害発生個所の事前予測方法の検討[CTOC14]」では、不安定土塊の存在位置を検出する方法として、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た。この手法を用い、既往の地震による土砂災害事例から、地震前と地震後の地形変化を比較し、不安定土塊として危険度の高い部分を抽出する方法を得た。これは、既往の侵食や崩壊が起こっておらず、斜面の下部からの侵食や道路建設などの人工改変による切り取りで、その上部斜面を支持物質が存在していない部分であることが判明してきている。この地形の視覚化手法を用い、2016年熊本地震と2018年北海道胆振東部地震の前後比較を詳細に実施することによって、地震による崩壊発生の力学的モデルを提案する。

京都大学火山研究センター周辺で発生したいくつかの斜面崩壊・地すべりを事例として、2016年熊本地震の前後に得られた1m-LiDAR DEMを用いて、土砂移動発生箇所の特徴と断層運動による地表の卓越振動方向の関係、斜面崩壊・地すべりの発生した箇所と隣接する発生しなかった箇所の斜面縦断形状を現象の前後で比較した。

重要な結果として、地表の卓越振動方向と発生箇所の斜面方向は、北北西―南南東とほぼ一致していた。また、崩壊が発生した箇所、斜面には、斜面下方に崖・段差などの上部斜面を支持する構造がなく、斜面上方にはいわゆる潜在不安定土層が存在していた。

熊本地震で得られた知見をもとに、2018年北海道胆振東部地震の前（5m DEM）と後（1m-LiDAR DEM）の比較を行った。震源が深く、地表の卓越振動方向と崩壊が発生した箇所に明瞭な方向の卓越性は認められなかったが、斜面崩壊・地すべりの発生した箇所には、熊本地震の結果で得られた地形的特徴が認められた。

これらの事例比較に用いた詳細数値地図情報（1m-LiDAR-DEM）を使い、地形を視覚的に理解しやすく示す図（土砂災害予測基本図：図7）は、潜在崩壊土層を検出することに有効であることも確認された。地震前後の図（土砂災害予測基本図）を用いて、PIV（Particle Image Velocimetry）を用いて、地表面に出現した地表変位を追跡する解析をおこなった。その結果、断層運動の周辺の地表の移動方向を2次元で、方向と大きさを図示することが可能となった（図8）。また、これまで認識されなかった地すべり性の移動土塊の検出が可能となった（拠点間連携共同研究〔課題番号：CTOC14〕）。

2. 一般課題型研究

地震・火山噴火という自然現象が引き起こす地震動、津波、火山噴出物、斜面崩壊などの災害誘因が、自然や社会に潜在的に存在する脆弱性などの災害素因に働きかけ、これらの誘因と素因の組み合わせと相互作用の状態に応じて様々な規模の災害が発生する。そのため災害誘因予測の高度化は、災害の軽減に結びつく有効な手段の一つである。このような視点から、一般課題型研究では、災害誘因や災害リスクを事前に高い精度で評価する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化の研究」、地震や火山噴火が発生した直後に、高精度かつ即時的に災害誘因を予測する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化の研究」、災害誘因予測を防災対策の推進に効果的に結びつけるための「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」に関連する研究を公募した。

2020年度は新規5課題が東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究委員会の審査を経て採択された。また、2019年度からの継続課題6課題、研究期間延長課題1課題が実施された。

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化の研究

「不均質な断層すべり分布を考慮した津波の確率論的予測と不確実性の評価[CTOC04]」では、東大地震研の佐竹グループと京大防災研の森グループが定期的（年3回程度）にワークショップを開催し、確定論的な津波解析結果と確率論的な予測手法に関する情報を交換し、確率論的な手法の高度化に向けた共同研究を行うことを目的とした。世界のM9クラスの超巨大地震についての研究成果に基づく確率論的な津波高の推定手法を南海トラフの地震に適用する。引き続き拠点間連携の重点推進研究に反映するための準備を行う。

2020年度は2020年9月24日にオンラインで、両グループの合同セミナーを行った。東大関係者、京大防災研関係者それぞれ4名ずつ、合計8名が研究内容を発表し、情報交換を行った。発表者と内容は以下の通り。

1. Tsunami kernels and their applications (Takenori Shimosono, UTCivil)
2. Tsunami Resonance Characterization in Japan due to Transpacific sources: Response on the Bay and Continental Shelf (Yuchen Wang, ERI)
3. Tsunami Ray Tracing Method and Analyses of Bathymetry Effect off Honshu, Japan (Tungcheng Ho, DPRI)
4. Mechanism of unexpected tsunamis caused by peculiar volcanic earthquake at submarine calderas (Osamu Sandanbata, NIED)
5. Application of an Adaptive Mesh Refinement Method to tsunami simulations (Takuya Miyahsita, DPRI)
6. Regional probabilistic tsunami hazard assessment associated with active faults along the eastern margin of the Sea of Japan (Iyan Mulia, ERI)
7. Physical and Numerical Modeling of Tsunami Inundation In Coastal Urban Area (Nobuki Fukui, DPRI)
8. Experimental study of debris motion using urban city model and its

characteristics (Yu Chida, PARI)

2019年度に東大の佐竹グループから京大の森グループへ異動した何東政氏は、2018年インドネシア（スラウェシ）地震について、断層面上のすべりの不均質性や、そのモデルに基づくパル湾における津波の浸水についての論文を改訂・投稿した。また、津波の波線追跡の新手法を開発し、津波第1波や反射波の波線と海底地形との関係を明らかにした。この他、日本海における60断層について、断層面上のすべり分布の不均質性を考慮した7万通り以上のシナリオを想定し、日本海沿岸の約150の市町村ごとの確率論的な津波高さを計算した（図9）。計算ステップごとに空間解像度や時間刻み幅が動的に変化する適合格子細分化法（AMR法）の数値モデルを用いて、南海トラフ沿いで発生する巨大地震を対象に津波計算を行い、その精度検証を進めた。AMR法の格子分割基準を変化させた感度分析を行い、精度を保ちつつ計算負荷を減少させる格子分割条件を求め、水深を閾値に格子解像度のレベルに上限を設けることで、計算に要する時間を有効に削減できることがわかった（拠点間連携共同研究〔課題番号：CTOC04〕）。

「強震観測点におけるサイト特性評価手法の開発に関する多国間共同研究[CTOC05]」では、多国間の国際共同研究を計画していたが、コロナ禍により海外から共同研究者を招聘することも当方から先方に渡航することもかなわず、我が国で開催を予定していたESG6国際シンポジウムも延期を余儀なくされたので、メールによる打ち合わせで共著論文を執筆し、またウェブ開催の国際会議に投稿・参加することで研究成果の公表を推進した。

フランスとの共同研究ではグルノーブル盆地に地震動の水平上下比EHVRを用いた逆算手法と微動の水平上下比MHVRを用いるEMR法を適用してその地下構造を明らかにし、さらにそれが既存の方法で得られていた盆地の速度構造とどのような関係にあるかについて詳細な解析を加えた。その結果、得られた速度構造は、それまで推定されていたように、深さ数100 mから1 km程度のところに存在する地質学的境界で直ちに地震基盤のS波速度（ >3 km/s）になるのではなく、そこから速度が漸増し、地質境界の平均的に2.5倍の深さのところで地震基盤に達するという速度構造であることが明らかとなった。地質境界はS波速度1.3 km/s以上となる深さZ1.3に相当し、Z1.3の空間分布が地質境界の深さ分布に対応することを明らかにした。

イタリアとの共同研究では、先方の研究者がコロナ禍により、地震計観測網のメンテナンス作業に専念する必要が生じ、共同研究に関するアマトリーチェ地域の速度構造同定の研究については大きな進展が得られなかった。

米国との共同研究では南カリフォルニアにおける強震観測点のデータ解析を進め、我が国と同様な方法により、地震基盤から上の速度構造が得られることを複数地点で確認することができた。特にインペリアルバレーの周期8秒に達する長周期域の水平上下スペクトル比に見られる顕著なピークはその地震基盤深さが5 km以上であることを示しており、盆地全体の構造を明らかにするのに、強震観測点の長周期域の水平上下スペクトル比が極めて有効であることを示した。それに対して微動の長周期域の水平上下スペクトル比は地震動のそれとは振幅が一致しておらず、計測システムに課題がある可能性が指摘された。これについては日本側研究者が現地に行って通常システムで計測する以

外にその妥当性を確認するすべがなく、コロナ禍の落ち着くのを待って現地計測に再度チャレンジする予定である（拠点間連携共同研究〔課題番号：CTOC05〕）。

「強震動のブラインド予測のための共用地盤モデルの構築に関する研究[CTOC07]」では、ESG6の強震動のブラインド予測のために、既往の地下構造情報および現地調査の結果から、熊本テストサイトの1次元共用地盤モデルの最終案を作成した。地震動のブラインド予測のBP1の地盤モデルの推定の終了後に、この1次元共用地盤モデルがブラインド予測参加者に提供され、BP2および3で使用できることとなった。

また、熊本テストサイト周辺では、既存の強震観測点が少なく、テストサイトの地震動の空間的広がりなどを検討することが難しいことを考慮して、テストサイト周辺で臨時地震観測を行った。図10に示すように、テストサイトは、熊本平野西部のJR貨物熊本駅付近の強震観測点であり、その周辺の200 m程度の狭い範囲の20地点に強震計を設置した。ESG6のブラインド予測のテストサイトは、臨時観測の観測点16の近傍にある。臨時観測点の多く（観測点1～11）は、北東―南西方向に並んでいる。観測点数は少ないが、直交する方向にも観測点（観測点14～21）を配置した。また、ブラインド予測での岩盤サイトの観測点である金峰山のSEV0地点（九州大学地震火山観測研究センターの熊本地震観測点）でも臨時強震観測を行った。さらに、図11に示すテストサイト近傍の3階建てのRC造建物の各階にも地震計を設置した。観測は、2020年3月から9月までの約半年間、継続された。

臨時観測の記録のなかで最も震源距離が長い薩摩半島西方沖の地震（2020年5月3日20時54分、深さ10 km、M6.2）の南北方向の加速度記録を図12に示す。左図は、広帯域（周期0.1～10秒）の加速度波形であり、岩盤サイトのSEV0を除いて、各地点の波形はよく類似している。周期5～10秒の長周期帯域では、位相まで含めて、各地点の波形はよく一致している。SEV0の波形も他の地点との差異が少なくなっている。一方、周期0.1～1秒の短周期成分では、波形は似ているが、振幅は地点ごとに異なっている。テストサイト近傍の観測点16に対する各点の水平成分のフーリエスペクトルの比を図13に示す。スペクトルの算出には、水平2成分の相乗平均を用い、スペクトル比は、33地震の記録を平均した値である。スペクトル比は、周期0.5秒以上の帯域では、ほぼ1倍であり、この周期帯域の地震動特性は、テストサイト周辺でほぼ同様であると考えられる。一方、周期0.5秒以下ではスペクトル比の変動が大きくなり、各観測点はテストサイトの地震動特性と異なる特性を持っている。とくに、周期0.3秒付近では1倍を下回る地点が多く、周期0.2秒付近では1倍を超える地点が多い。テストサイト周辺200 m程度の範囲では、地震動の特性はほぼ同じであると考えられる。テストサイト周辺では周期0.3秒以下に影響を与える極表層部を除いて地盤構造に大きな変化はなく、1次元速度構造モデルの仮定が成り立ち、地下構造の不整形性の影響が小さいことを示唆している。各観測点では簡易な表面波探査も実施しており、今後それらのデータも併せて各地点の極表層地盤の影響を評価する。

なお、コロナ禍のためにESG6の開催が2021年3月から同年8月に延期になり、ESG6での議論を通じて行う予定であった地盤モデルの共用化のための研究者間の合意形成に関する検討を実施することができなかった（拠点間連携共同研究〔課題番号：CTOC07〕）。

「火山砕屑物からなる斜面の崩壊に対する地震とその前後の降雨の影響評価[CTOC08]」では、京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を用い、年度当初の計画通り模型実験を行った。計画では火山性砕屑物を使用する予定であったが、入手が容易であったマサ土を利用した。加振の有無、降雨量を変化させた遠心模型実験の結果、以下のことが明らかとなった。斜面の密度や含水比を調整することで加振により斜面にクラックを発生させることができた。その後の降雨では、加振の有無によって斜面の変状形態が異なる結果となり、加振ありのケースでは加振で発生したクラックを起点とした破壊が進行した（図14）。この結果は、地震後の降雨といった複合外力に対する斜面の安定性評価手法の高度化に寄与するものであるが、定量的な評価には至っていない。今後、数値解析も併用して地震後の降雨がクリティカルとなる条件を明らかにする必要がある（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC08]）。

「活断層における地殻変動に伴う盆地形成過程から推定される盆地端部での基盤構造を考慮した地震動増幅特性に関する研究[CTOC09]」では、2019年度に邑知潟平野南西部で実施した研究に引き続き、北東部の深い地盤構造を推定するため、図15に示す地点において常時微動単点観測を行い、1地点で常時微動アレイ観測を行った。アレイ半径はLL:135 m、L:45 m、M:15 m、S:5 m、SS:1.5 m、SSS:0.5 mの6サイズとし、LL、Lは60分、M、Sは30分、SS、SSSは15分の同時観測とした。また、盆地を横切る方向に測線1、2、3の3測線を、盆地に沿う方向に測線4の1測線を設定し、計32地点で常時微動単点観測を行った。各単点観測点で独立して30分の観測を行った。

単点観測点での解析は以下の手順で行った。まず、観測によって得られた30分間分の加速度時刻歴データを50%オーバーラップさせ、40.96秒の小区間に切り出す。次に、切り出した各小区間でNS、EW、UD成分のフーリエスペクトルを計算し、NS/UD、EW/UDのフーリエスペクトル比(MHVR)を算出する。このようにして算出された小区間ごとのスペクトル比の平均をMHVRとした（図16）。ただし、ノイズの影響を取り除くため、ノイズの大きい区間を30%除外した。

各地点でのMHVRの1次ピーク振動数を読み取り、その分布を調べた（図17）。ただし、ピークが不明瞭な点については無理に読み取っていない。図17(a)～(d)を見ると、1-3～1-4、2-2～2-3、3-2～3-で1次ピーク振動数が急激に変化しており、周辺に盆地と山の境界が存在すると予想される。また、1-4から1-10、2-4から2-に向かうにつれて1次ピーク振動数が徐々に小さくなり、測線1、測線2は南東に向かうにつれて地下構造が深くなるのが分かる。さらに、測線4では4-6に向かうにつれて1次ピーク振動数が徐々に小さくなり、北東に向かうほど地下構造が深くなると推測される（拠点間連携共同研究[課題番号：CTOC09]）。

「テフラ堆積域における地震動に伴う斜面崩壊の発生場と規模の予測[CTOC15]」では、社会状況の変化によりフィールド調査の実施における制約等が生じた。多人数が参加しての調査計画を見直し、少人数・少数機関・限定期間での調査に切り替え、分析やデータ解析・モデリングに重点を置いて進めることで、内容的にはおおむね計画通りに研究を前進させることができた。

テフラの給源火山の噴火史に基づき、山地の斜面におけるテフラの供給と再堆積のシミュレーションを行うプログラムを開発し、火山学的に復元されたアイソパックマップに基づくテフラの降下供給量の空間分布を入力として、地形に依存したテフラの二次移動を計算した。本年度は胆振東部地震での発災地を対象に、地形条件の異なる多数地点で鉛直試孔の断面記載により実際のテフラ堆積量を測定してモデルの精度と確度の検証を行った。気候条件や過去の気候変動の履歴がテフラの再移動に与えた影響も考察でき、適切なパラメータを付与するうえで有益な情報を得ることができた。

テフラのもつ水理・力学的な物性についても、降下堆積以降の風化作用による透水性の減少や保水性の増大、あるいはせん断強度の低下といった斜面災害に関連する特性の定量的なデータを充実させることができた。また、定置後数千年程度の長い時間スケールでの、元素の溶脱やガラス基質の水和と粘土鉱物の沈殿といった化学・鉱物組成の変化が、どのような機構によって進行するのかについて詳細な検討を行った。間隙水圧計と土壌水分計を用いた稠密水文観測およびX線蛍光分析とX線回折分析による化学・鉱物分析によって、テフラ累層中での長期間にわたる間隙水の不均質な透過とそれに伴う風化変質を追跡した。また、降水浸透とともに供給され粘土鉱物に吸着蓄積する大気由来の宇宙線生成核種¹⁰Beの加速器質量分析を行うことで、テフラの強度低下をもたらす粘土化の進行過程を検討した。軽石を母材とするハロイサイトが、テフラ累層中に偏在することで、将来的にすべり面となりうる水理・力学的な不連続面を生じさせることが明らかとなってきた。

現在は、テフラの空間的な累積を再現するモデルと、累層中での不均質な風化過程および物性変化を定量化するモデルをカップリングさせ、地形効果による震動増幅を考慮しつつ、任意地点におけるテフラの厚みとせん断強度にもとづき、斜面の崩壊に要する下限の水平加速度あるいは累積変位量を、地理情報システム上で表示した革新的な地震時斜面崩壊感度地図 (Landslide susceptibility map) を提示すべく、モデリングを進めている (拠点間連携共同研究 [課題番号:CTOC15])。

「地震シナリオの不確実性を考慮した津波被害の確率論的評価[CTOC18]」では、災害被害予測における不確実性の定量化への期待が高まってきている背景から、一般の自然災害による被害を低計算コストで確率論的に評価する枠組みを提案し、津波被害の確率評価に対して提案手法を適用することでその有用性を確認した。本研究で提示したサロゲートモデルを数値解析と組み合わせることで、計算資源を抑えながらも効率的に災害の確率論的評価が可能であることを示した (図18)。内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会の「断層パラメータ_ケース03」14)に対応する津波を対象とした。これは紀伊半島沖から四国にかけて大すべり域を想定したケースである。解析対象地域である四国地方・淡路島周辺での解像度を上昇させるようにネスティングを行った。5点の観測点における最大波高を計測した。提案手法は特に高次モードに対する回帰式の精度を向上することで、高度化を図った。5点の観測点での最大波高を提案するサロゲートモデルで評価した。また、従来モデルにおいて問題視されてきた回帰式の選定などに関する問題をカーネルリッジ回帰 (KRR) を導入することで解決し、KRRを用いれば、より忠実度の高いサロゲートモデルの構築が可能であることを示した (拠点間連携共同研究 [課題番号:

CT0C18]) 。

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化の研究

「建物の応答を考慮した高精度地震情報配信手法の開発[CT0C10]」では、建築研究所から提供を受けた建物観測記録を用いて、地震時の建物応答の揺れ継続時間の定義を再検討し、予測式を構築した。また京都市内の病院施設への地震情報配信システムとして、データ通信専用のSIMカードを利用した方式を検討した。得られた知見は次の通りである。

- A) 動的相互作用に振幅依存性があり、東北地方太平洋沖地震の本震では固有振動数は低下し、減衰が増加する傾向にあった(図19)。連成系(SI20)の固有振動数は建物系(SIS0)よりも低く、モード減衰は連成系の方が高い傾向であった。ただし、その増減幅は建物によって異なっていた。本震では、地震動が大きくなると固有振動数が低下する現象が見られた。本震とその30分後の余震では、固有振動数が建物系と連成系でほぼ平行に推移しており、固有振動数の違いは時間に関係なく一定を保つ傾向があった。
- B) 建物内の居住者に揺れ継続時間の情報を提供するための推定式を構築するべく、既往の提案式で用いられている95%のエネルギー継続時間ではなく、震度x以上の継続時間、という閾値を定義に利用した。建物基礎と自由地盤で観測された揺れ継続時間を比較した結果、大きな違いはなかったため、建物基礎の記録を自由地盤の記録と同等に取り扱った。建物頂部で観測された揺れ継続時間を予測する経験式(地震のマグニチュード、震源距離、震源深さ、地盤情報、建物階数の関数)を作成した。図20に、自由地盤(Yamada2021FF)と建物頂部(Yamada2021Top)の2種類の揺れ継続時間予測式を示す。建物頂部の揺れ継続時間予測式は、建物階数を考慮した方が相関は良くなる。ただし、単純な経験式では建物の個性を十分には表現しきれず、統一的な経験式の限界も明らかとなった。
- C) 京都大学医学部附属病院で展開する地震観測網への高精度地震情報配信手法の適用を検討した。近隣地域の病院施設の情報配信や新たな観測点の設置方法について議論した結果、現地に記録収集サーバーを設けない形での観測方法を模索することとなった。具体的には、京都市左京区に位置する2病院から設置許可を得て、データ通信用SIMカードを用いて、Web上のレンタルサーバーに観測データを送信するシステムの構築を試みた。病院施設への立ち入りが制限されているため、今年度は防災研究所内で試運用するにとどめる。
- (拠点間連携共同研究[課題番号:CT0C10]。)

(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

「訪日外国人旅行者に対する地震・火山に関する情報提供と風評被害対策に関する事例分析 - 2018年胆振東部地震、2018年大阪府北部地震、2018年草津白根噴火、2015年箱根山噴火を対象として - [CT0C12]」では、2019年度に引き続き新型コロナの影響が継続しており、宿泊施設へのアンケート調査の実施が予定通りに実施できず、調査の実施が令和3年3月にずれ込んでいる状況である。そのため、宿泊施設へのアンケート調査の結果については、報告書を登録する現時点では間に合わない状況である(拠点間連携共

同研究〔課題番号：CT0C12〕）。

「桜島大規模火山噴火を対象とした事前避難を実現するためのリスクコミュニケーション方法に関する実践的研究〔CT0C16〕」は、桜島の大規模噴火によって生じる可能性がある市街地側への大量降灰災害に対して、大幅に被災影響を軽減できると考えられる市街地側住民の事前避難を実現を目指し、火山の予知・予測情報が適切な避難へと結びつくような情報の作成を、ワークショップにおける専門家と住民との対話を通じて共創することを目的としている。最も重要な構成要素は、ワークショップ（WS）の実施と結果の分析であり、WSの構成、日程まで確定し準備を進めていた。しかし、新型コロナウイルス感染拡大に伴う1月からの京都府を含む非常事態宣言発出により、研究代表者及び分担者が市民と車座での話し合う形式を含むWSの実施が困難となった。ワークショップの前段階で、既に大量降灰に関する情報の見せ方に関するたたき台の案は、既に検討しているが、これらの情報が住民にどう受け取られるか、また一緒に情報を検討していく共創の過程は実現できておらず、来年度に繰り越して実施する予定である（拠点間連携共同研究〔課題番号：CT0C18〕）。

「地震発生 of 切迫性を伝える災害情報モデルとシナリオの構築～北海道胆振東部地震からみえた新たな課題としての複合連鎖問題の解釈を通して～〔CT0C17〕」は、想定地震に対し種々の被害推定手法で試算し実際の被害との乖離を解釈することで、将来的被害想定及び災害情報の在り方を検討することを目的とする。北海道防災会議が2011年3月に公表した「北海道の想定地震」のうち、胆振東部地震に最も近似したパラメータを持つものは「胆振東部地震断層帯南部（断層パラメータモデル30_5）である。想定地震はM7.7（Mw7.2）で、実際に起こった胆振東部地震はM6.7（Mw6.6）であり災害誘因として想定した1/30以下のエネルギー放出であったが、全道の震度分布（想定震度と計測震度比較）は相似性を有していた。震度値は想定地震が大きいものの、厚真・安平・むかわの被災3町についてはほぼ同等であったため、木造住家被害及び人的被害についてそれぞれの評価結果の比較を行った。さらに評価手法の精度に踏み込むため、胆振東部地震の計測震度を入力とした比較も行った。

比較したのは、想定手法の日本標準である内閣府の方法（南海トラフ巨大地震の被害推定方法）と北海道の住家耐震評点に配慮した北海道防災会議の方法、並びに人的被害については住家特性と室内散乱及び居住者の避難行動能力を考慮した岡田・他（2018）の3者である。

木造住家被害については、想定地震の入力が大きいためいずれも過大評価とはなっているが、内閣府の方法は全・半壊数共に被害実数の10倍以上の推定値を与えており、一方で北海道の住居特性を考慮した道防災会議の方法は実態に近い結果を与えており、被害評価において住家の地域特性に配慮する重要性が確認された。

人的被害については、死・重傷・軽傷の分類で数値比較を行った。課題として浮上したのは負傷者の公表実数値の信頼性である。公表値は市町村が収集したデータを都道府県対策本部が集計したものであるが、市町村は負傷者については消防により救急搬送された患者数や当該地域の第3次救急病院等の患者数を集計するに止まることが多く、当該

地域で発生した負傷者でも他市町村の病院で治療を受けた場合など見逃していることが多い。本調査では被災3町全世帯アンケート調査を実施しており、それによれば「重傷者無し」と公表している町の住民のなかにも、骨折で他市中央病院に入院したケースも数例確認している。負傷者に関しては公表値は全数捕捉したものではないことに注意する必要がある。被害想定に当たり、単に軽傷・重傷という分類で推計するのはあまり意味がない。救急病院搬送を必要とする重篤者（ISS \geq 12.5あるいは16）を重傷とし、推計することに医療体制・防災を計画する上で有意な情報となる。この観点より、全世帯アンケートより胆振東部地震の被災町の負傷率をISSで推定し負傷程度を定義し直すことで、各種方法による推計値と比較した。その結果、従来からの建物被害との相関関係に重点を置いた人的被害評価法では、対策に十分な情報並びに精度が保証できないことを示し得た（拠点間連携共同研究〔課題番号：CT0C17〕）。

「文化財等の所在情報と災害情報の重ね合わせによる文化財等災害予測マップの構築と活用[CT0C19]」では、2020年度は都道府県の指定文化財、登録文化財、指定外の文化財約23000件について位置情報を入力した文化遺産災害情報マップを作成した。同時に、これらの公開にむけてeコミマップ版も作成した（図21）。

加えて、2021年2月13日に発生した福島沖を震源とする地震では、宮城県・福島県において震度6強を観測した事態をうけ、作成していた文化遺産災害情報マップに防災科学研究所クライシスレスポンスサイトで公開された推定震度分布や建物被害推定の情報を重ね合わせ、被災した文化遺産の可能性の高い場所を可視化した（図21、図22）。この情報を、東北大学災害科学国際研究所やNP0法人宮城歴史資料保全ネットワーク、ふくしま歴史資料保存ネットワークの歴史研究者と共有し、震度の大きかった宮城県山元町、蔵王町、福島県新地町、相馬市において文化遺産災害情報マップを活用した被災状況調査を実施した（図23）。一方、被害の大きかったと予想される福島県桑折町、国見町、郡山市などについて、文化遺産災害情報マップから被災の可能性のある文化遺産についてリストアップ作業を実施し、来たるべき被災地調査に向けて情報を整理している状況である（拠点間連携共同研究〔課題番号：CT0C19〕）。

これまでの課題と今後の展望

これまでの地震・火山観測研究計画では、地震や火山噴火の発生の予測を最大の目標とし、それにより地震や火山噴火による災害の軽減を目指してきたが、災害の軽減への貢献が限定的であることから、前計画から地震・火山噴火災害をもたらす誘因の予測研究を新たに組織的・体系的に進める方針に転換した。そのため、地震学や火山学を中核としつつも、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの分野の研究者が参加して、協働して推進することになり、主に全国の工学、人文・社会科学の分野の研究者が拠点間連携共同研究を推進してきた。

拠点間連携共同研究の重点推進研究は「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」を主要テーマとして推進し、総括研究において震源から被害予測及びそのステークホルダまでの伝達までを一貫して行い、さらにその成果のフィードバックを行うことで、研究の方向性を議論している。また、総括型で出た課題などを特定

型において掘り下げ、その成果を総括型にフィードバックするとともに、さらに総括型で新たに出た課題を特定型で掘り下げる、という循環により研究の高度化を目指している。

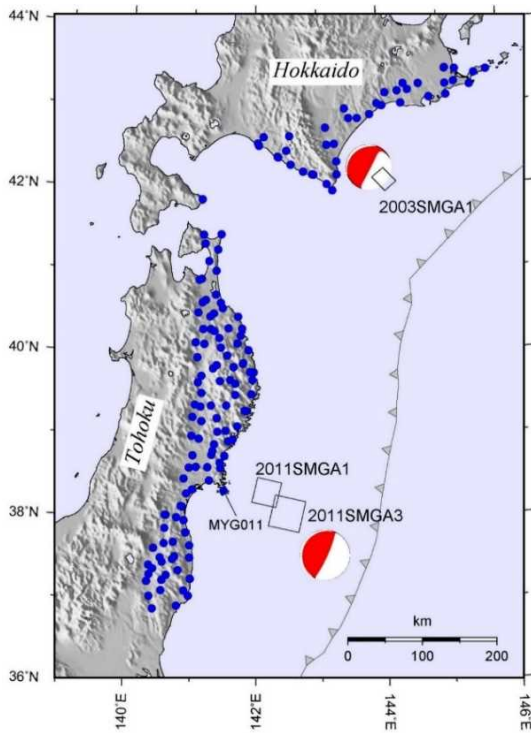
今後は、重点推進研究を進めることと並行して、一般課題型研究で提案されてきている研究課題による成果や手法などを取り込む枠組みを構築することで、災害の軽減に貢献するための研究を継続して行う。そのためには、実際に被害を受ける構造物や社会システムに直接携わっている工学、人文・社会科学の分野が理学分野の成果を咀嚼して活用出来るような体制を整える必要がある。つまり、観測計画において、これまでの理学的な観測網の維持だけではなく、工学、人文・社会科学に必要な観測計画の立案が必要になると思われる。

成果リスト

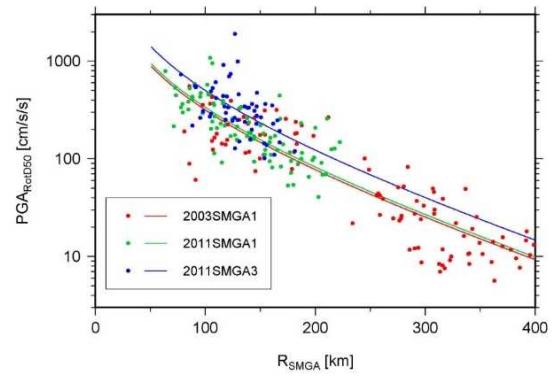
- 千田 優, 福井信気, 森 信人, 安田誠宏, 山本剛士, 2020, 漂流物と流れ場の時空間計測データを用いた複雑流れ場における津波漂流物挙動の解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 76 (2), I_313-I_318, doi:10.2208/kaigan.76.2_I_313.
- 福井信気, 森 信人, Che-Wei Chang, 千田 優, 安田誠宏, 山本剛士, 2020, 沿岸市街地模型を用いた津波・高潮浸水実験と解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 76 (2), I_373-I_378, doi:10.2208/kaigan.76.2_I_373.
- Gehl, P., S. Matsushima, and S. Masuda, 2020, Investigation of damage to the water network of Uki City from the 2016 Kumamoto earthquake: derivation of damage functions and construction of infrastructure loss scenarios, Bull. Earthquake Eng., 19, 685-711, doi:10.1007/s10518-020-01001-z.
- Goda, K., T. Yasuda, N. Mori, A. Muhammad, R. De Risi, and F. De Luca, 2020, Uncertainty quantification of tsunami inundation in Kuroshio, Kochi Prefecture, Japan, using the Nankai-Tonankai megathrust rupture scenarios, Nat. Hazards Earth Sys. Sci., 20, 3039-3056, doi:10.5194/nhess-20-3039-2020.
- 秦 康範, 2020, 訪日外国人への災害情報提供の現状と課題, IATSS Review (国際交通安全学会誌), 45(1), 28-35, doi:10.24572/iatssreview.45.1_28.
- Ho, T.-C., S. Watada, and K. Satake, 2020, Minimum Travel-time Path for Tsunamis, American Geophysical Union, 2020 Fall meeting abstract, NH014-0025.
- Ho, T.-C., S. Watada, K. Satake, and N. Mori, 2021, Tsunami Ray Tracing Method for Shortest Travel-Time Path: Application to Near- and Far-field Tsunami and Wave Reflection, AOGS 2021 meeting abstract.
- Ho, T.-C., S. Watada, K. Satake, and N. Mori, 2021, The Shortest Travel-time Tsunami Ray Tracing Method and Application to Tsunamis near Japan, International Tsunami Symposium abstract.
- Ho, T.-C., K. Satake, S. Watada, M.-C. Hsieh, R.Y. Chuang, Y. Aoki, I. E. Mulia, A. R. Gusman, and C.-H. Lu, 2021, Tsunami induced by the strike-slip Fault of the 2018

- Palu earthquake ($M_w=7.5$), Sulawesi Island, Indonesia, submitted to Earth Space Science.
- Ito, E., H. Kawase, C. Cornou, and F. Nagashima, 2020, Inversion of Velocity Structures in The Grenoble Basin Using Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios, 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan - September 13th to 18th 2020 Paper #C001205.
- Ito, E., C. Cornou, F. Nagashima, and H. Kawase, 2021, Estimation of velocity structures in the Grenoble Basin using pseudo earthquake horizontal-to-vertical spectral ratio from microtremors, Bull. Seismol. Soc. Am., 111(2), 627-653, doi:10.1785/0120200211.
- Kawase, H., E. Ito, and K. Nakano, 2020, Empirical Horizontal Site Amplification Factor (HSAF) from Observed Earthquake Horizontal-to-Vertical Ratio (EHVR) and Vertical Amplification Correction Function (VACF), Annual Meeting of Seismol. Soci. Am..
- Kawase, H., E. Ito, and K. Nakano, 2020, Direct Estimation of S-Wave Site Amplification Factors From Horizontal-to-Vertical Ratios of Earthquakes, 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan - September 13th to 18th 2020 Paper #C000856.
- Matsushima, S., 2020, Core-to-Core Collaborative Research between Earthquake Research Institute, University of Tokyo and Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University during FY2014 to FY2018, J. Disaster Res., 15(2), 187-201, doi:10.20965/jdr.2020.p0187.
- 松島信一, Pierre GEHL, 2021, 2016年熊本地震による宇城市での被害情報に基づく水道管ネットワークの被害関数の構築, 令和2年度京都大学防災研究所研究発表講演会, A303.
- 宮下卓也, GOMEZ-RAMOS Octavio, 森 信人, 2020, 適合格子細分化法を用いた南海トラフ沿いの巨大地震津波の数値計算, 土木学会論文集B2(海岸工学), 76(2), I_289-I_294, doi:10.2208/kaigan.76.2_I_289.
- Miyashita, T., N. Mori, and K. Goda, 2020, Uncertainty of probabilistic tsunami hazard assessment of Zihuatanejo (Mexico) due to the representation of tsunami variability, Coast. Eng. J., 62(3), 413-428, doi:10.1080/21664250.2020.1780676.
- 宮澤理稔, 木内亮太, 額額一起, 2020, プレート間巨大地震の強震動生成域のための距離減衰式, 日本地震学会2020年度秋季大会, S15-13.
- Mulia, I.E., T. Ishibe, K. Satake, A.R. Gusman, and S. Murotani, 2020, Regional probabilistic tsunami hazard assessment associated with active faults along the eastern margin of the Sea of Japan, Earth Planet. Space, 72, 123, doi:10.1186/s40623-020-01256-5.
- Nagashima, F., Y. Mori, E. Ito, and H. Kawase, 2020, Velocity structure inversion based on diffuse field concept for earthquake, together with the earthquake-to-microtremor ratio (EMR) method for microtremors, Annual Meeting of Seismol. Soc. Am..
- 中山智貴, 松島信一, 2021, 常時微動を用いた邑知潟平野北東部における地盤構造推定, 京都大学防災研究所令和2年度研究発表講演会, P119.

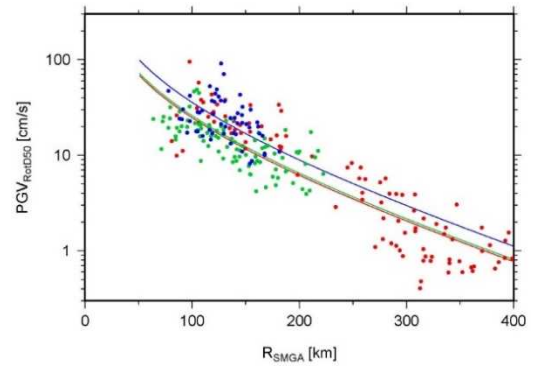
- 齊藤隆志, 2021, 粒子画像追跡法を用いた熊本地震前後の地表変動検出, 令和2年度京都大学防災研究所研究発表講演会, A305.
- 齊藤隆志, 2021, 2016年熊本地震によってカルデラ周辺に生じた地表変動の分類と特徴, 日本自然災害学会講演会予稿集.
- Xu J., R. Uzuoka, and K.Ueda, 2021, Response of Slopes to Earthquakes and Rainfall, In: Tiwari B., Sassa K., Bobrowsky P.T., Takara K. (eds) Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk. WLF 2020. ICL Contribution to Landslide Disaster Risk Reduction. Springer, Cham., doi:10.1007/978-3-030-60706-7_30.
- 山中浩明, 津野靖士, 重藤迪子, 神野達夫, 地元孝輔, 松島 健, 松島信一, 2020, 強震動ブラインド予測の熊本テストサイト周辺での臨時強震観測, 日本地震工学会第15回年次大会梗概集, B-5-2.



(a) 2003年十勝沖地震と平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の強震動生成域と解析に用いた観測点位置

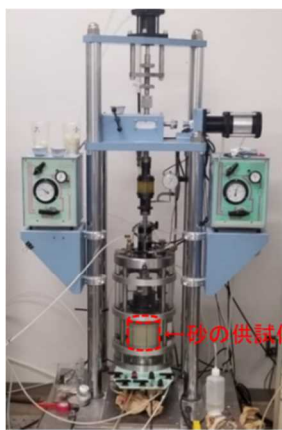


(b) RotD50の最大加速度 (PGA)

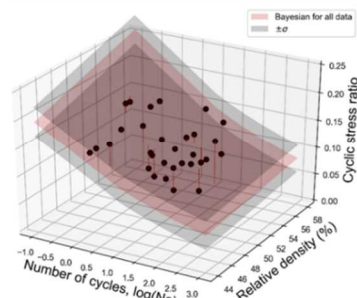


(c) RotD50の最大速度 (PGV)

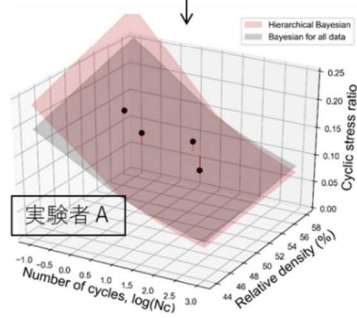
図1. 強震動生成域に特化した地震動の距離減衰式の開発 [課題番号: CT0C01]



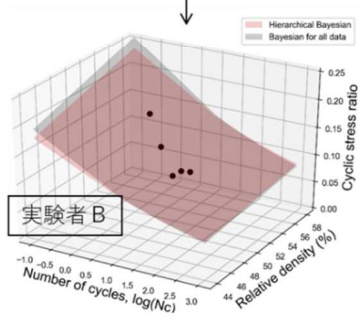
中空ねじりせん断試験機



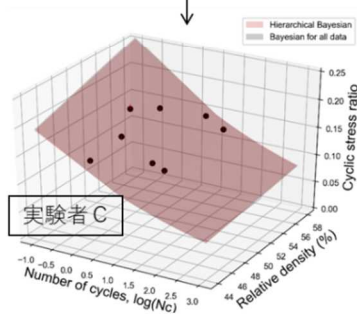
階層ベイズモデルの適用



実験者A



実験者B



実験者C

図2. 室内試験による土の液状化特性に関する“不確実性”の評価 [課題番号: CT0C01]

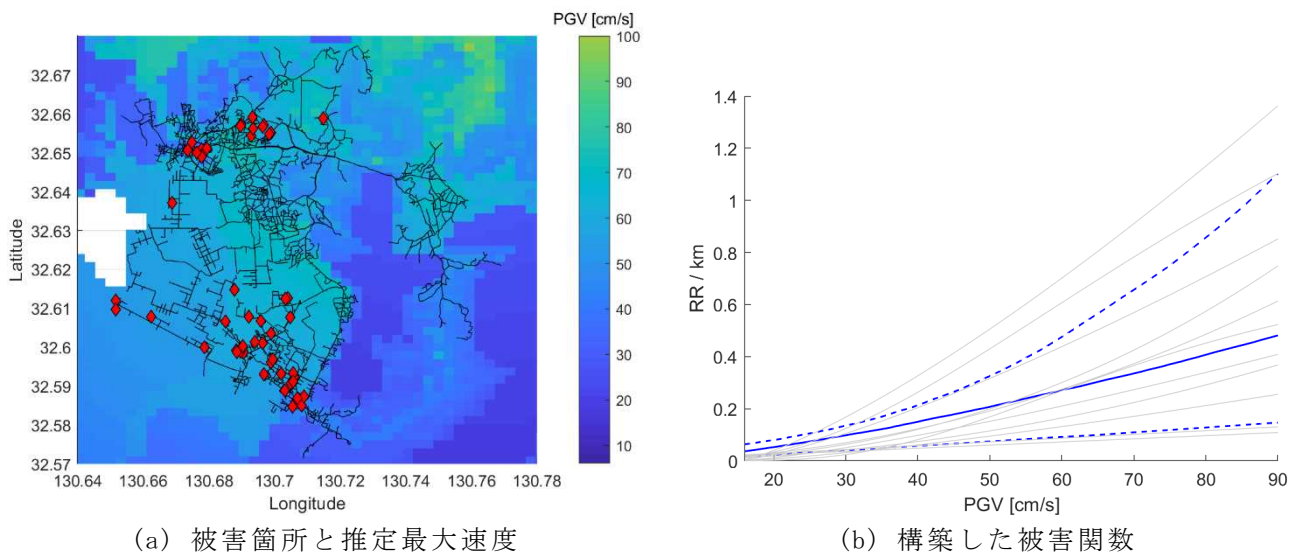


図3. ベイズ更新を考慮した延性材料の小管径（50～100 mm）水道管の被害関数の構築（Gehl et al., 2020） [課題番号：CTOC01]

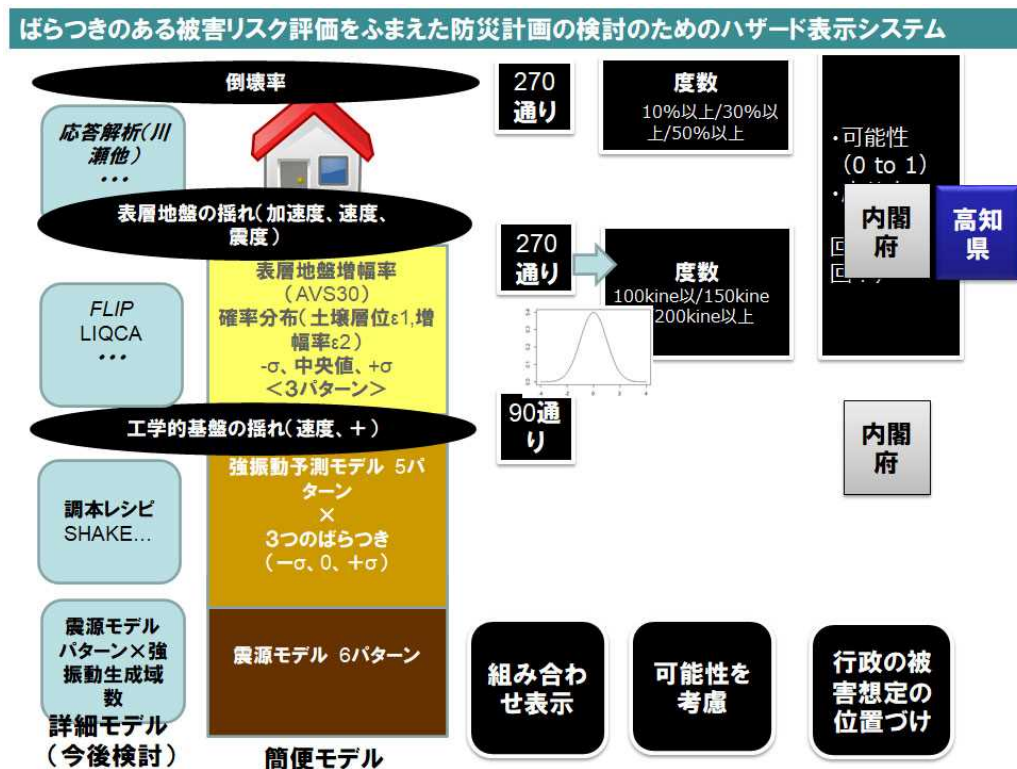


図4. ばらつきのある被害リスク評価をふまえた防災計画の検討のためのハザード表示システム [課題番号：CTOC02]

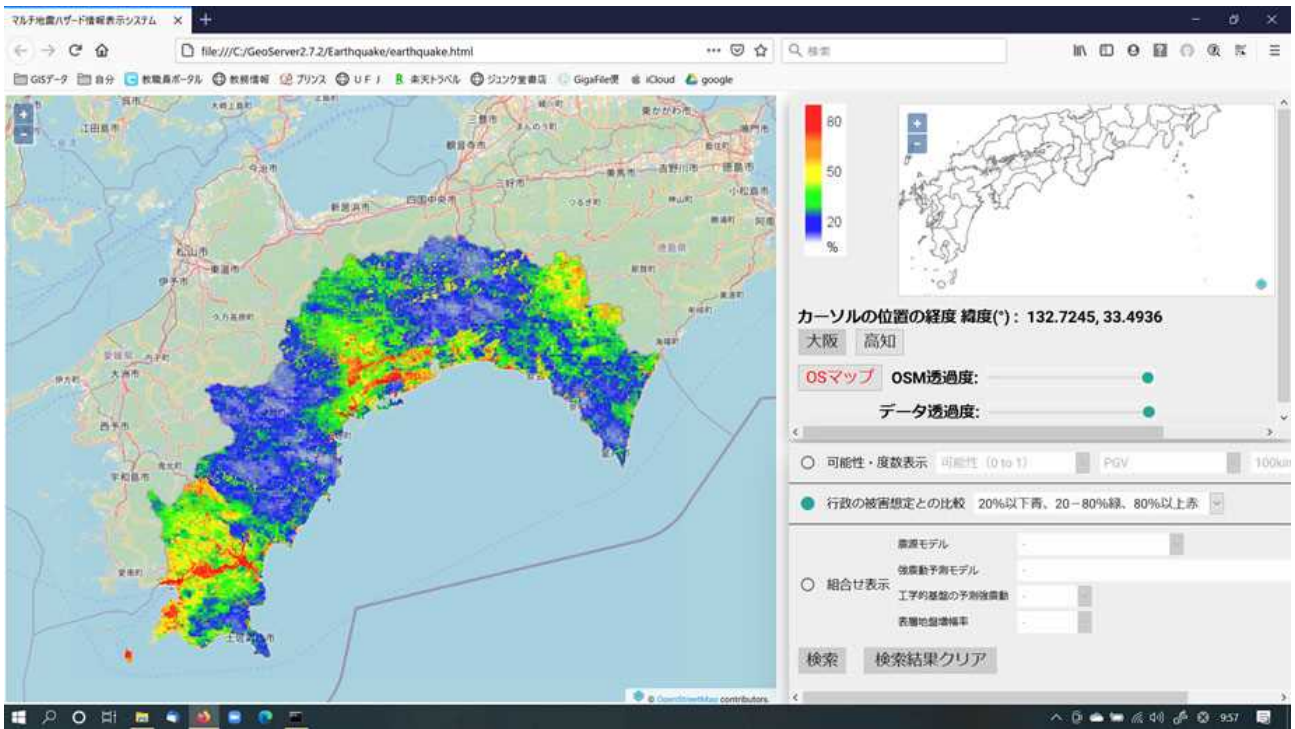
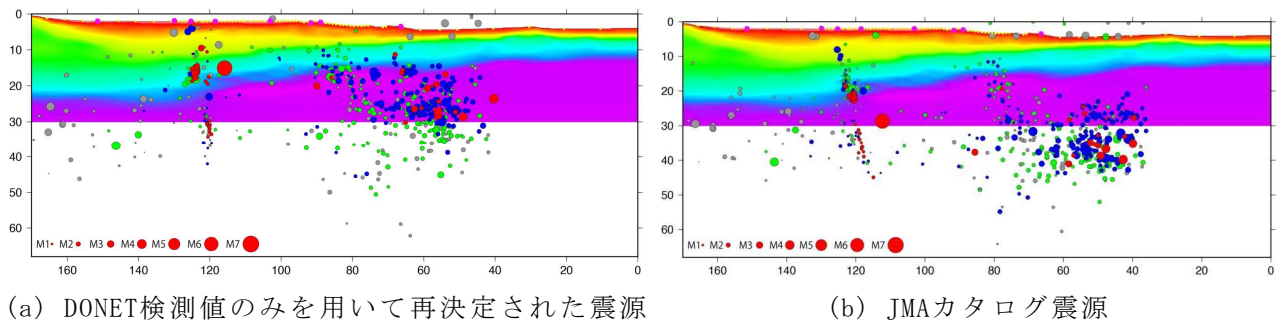


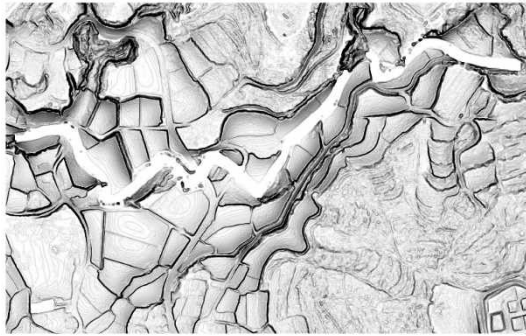
図 5. 南海トラフ地震の被害想定のはらつき [課題番号 : CT0C02]



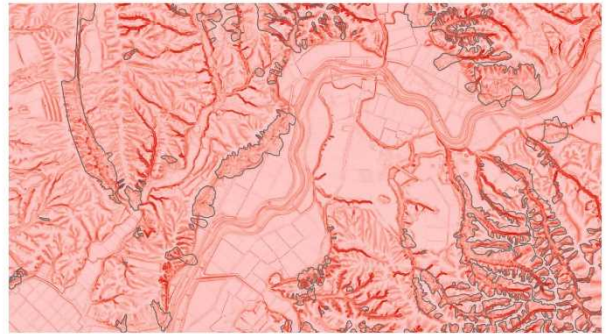
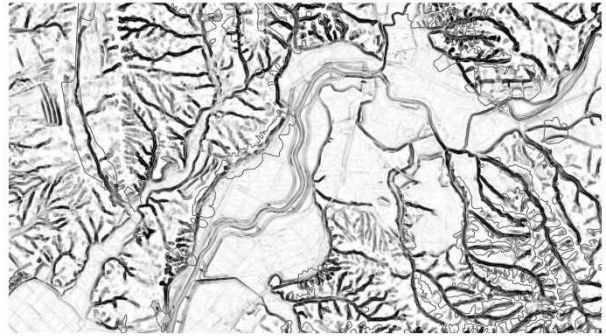
(a) DONET検測値のみを用いて再決定された震源

(b) JMAカタログ震源

図 6. 南海トラフ沿い海域下の震源の比較 [課題番号 : CT0C03]

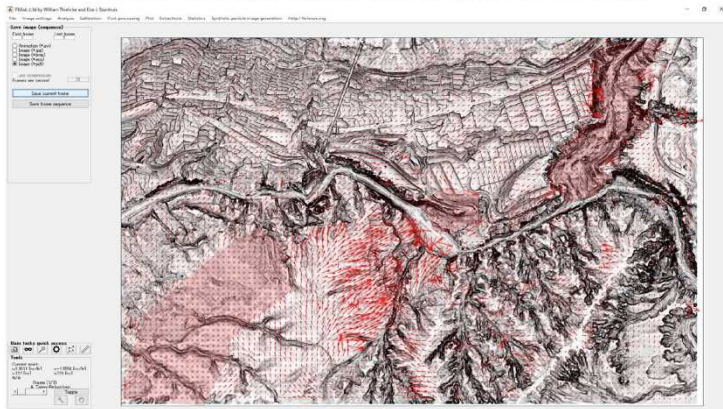


熊本地震，京都大学火山研究センター付近の土砂災害予測基本図
(上：地震前，下：地震後)



東胆振地震，厚真町吉野付近の土砂災害予測基本図
(上：地震前 5m DEM，下：地震後 1m-LiDAR DEM)

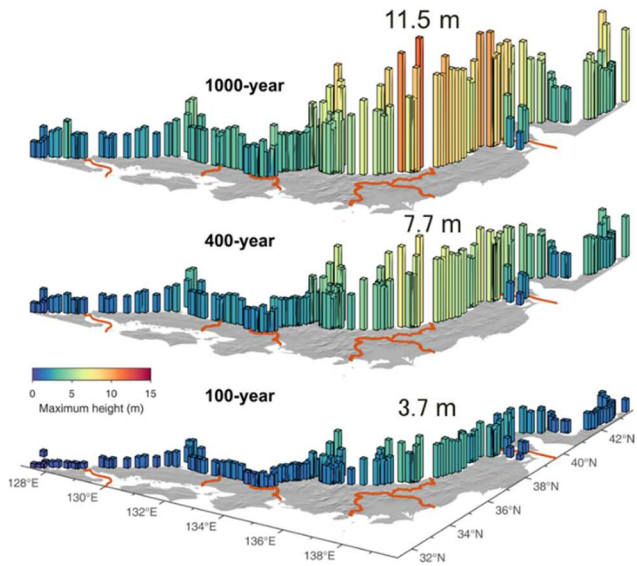
図 7. 地震前後の土砂災害予測基本図比較 (左：2016年熊本地震 右：2019年北海道胆振東部地震) [課題番号：CT0C14]



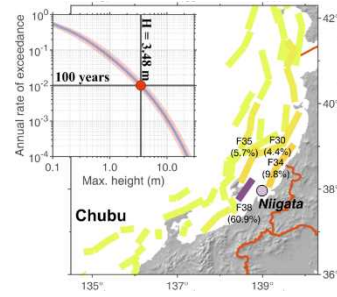
2016年熊本地震立野地区の土砂災害予測基本図
(左上：地震前 右上：地震後)

同地区で地震前後の土砂災害基本図を用いて、PIV (Particle Image Velocimetry)手法で地表変位を検出した結果 (左下)
この図には、平坦な地域では断層運動による右横ずれと斜面部での複雑な変位が認められる。また、これまで認識されなかった地すべり性の移動土塊が検出された。

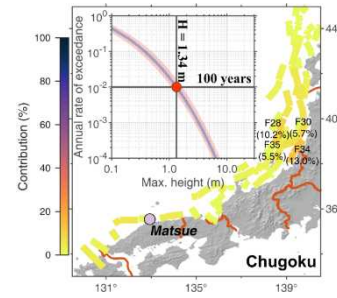
図 8. 2016年熊本地震立野地区での地表変位の検出 [課題番号：CT0C14]



(a) 津波ハザードマップ（100年、400年、1000年の繰返し間隔の場合）



(b) 新潟でのハザードカーブと震源の影響度



(c) 松江でのハザードカーブと震源の影響度

図9. 日本海における確率論的津波ハザード評価 (Mulia et al., 2020) [課題番号:CTOC04]

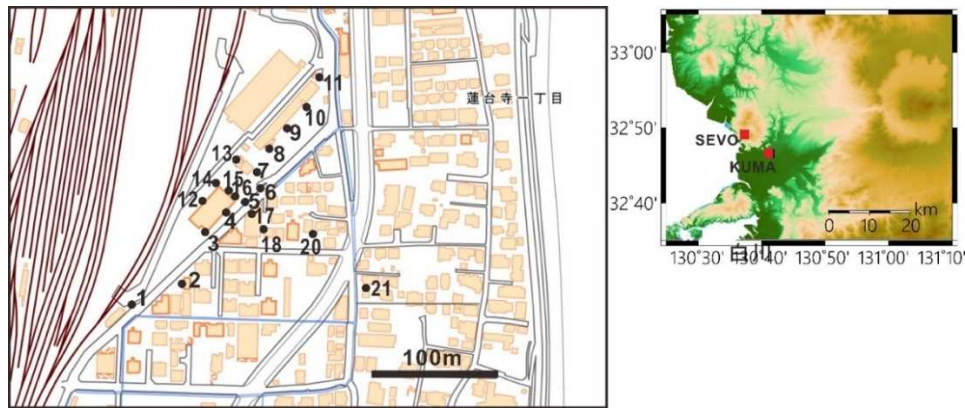


図10. 地震動のブラインド予測テストサイトの臨時観測点の位置(左)とテストサイトの位置(右) [課題番号:CTOC07]



図11. テストサイトの位置と建物での臨時地震観測 [課題番号:CTOC07]

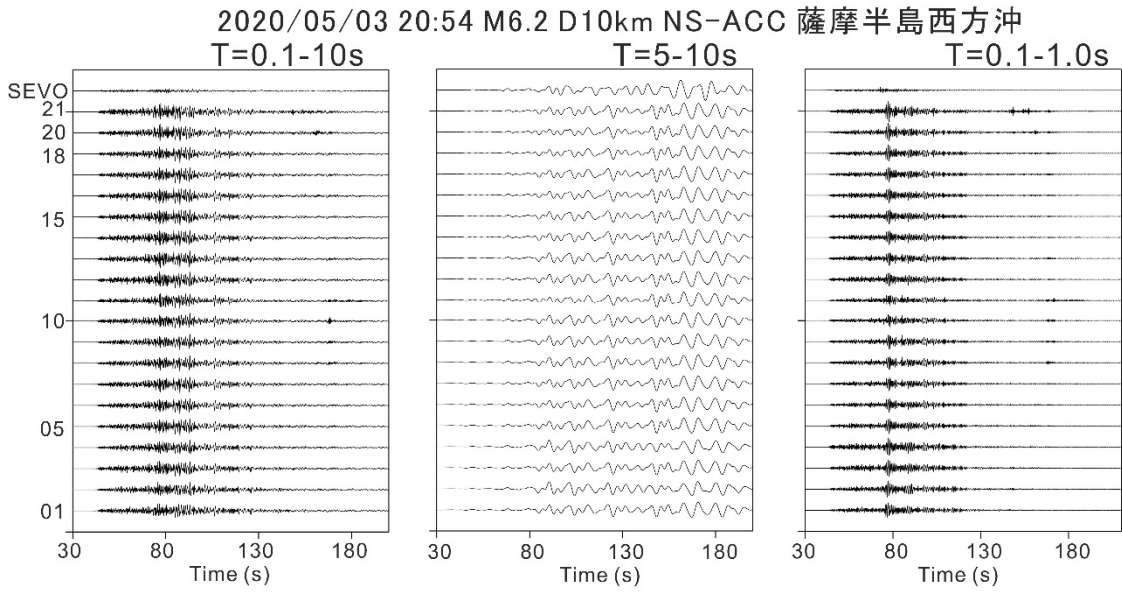


図12. 薩摩半島西方沖の地震(2020年5月3日)の南北方向の加速度記録の例[課題番号:CT0C07]
 左は周期0.1~10秒、中は周期5~10秒、右は周期0.1~1秒のフィルター処理をした加速度を示す。

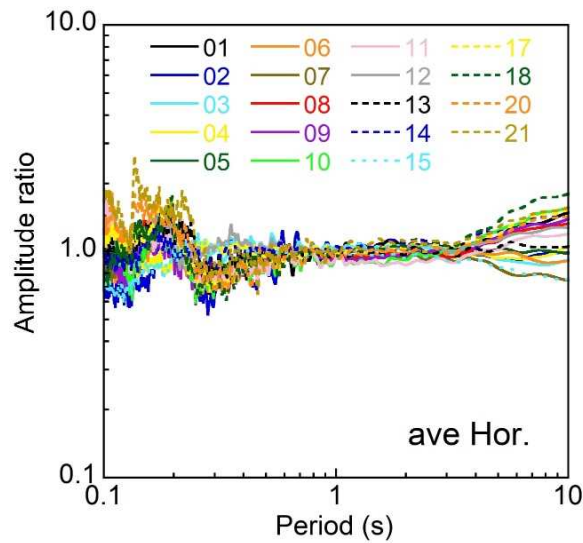


図13. 得られた33地震の観測点16(テストサイト近傍)に対する水平成分のスペクトル比の平均値 [課題番号:CT0C07]

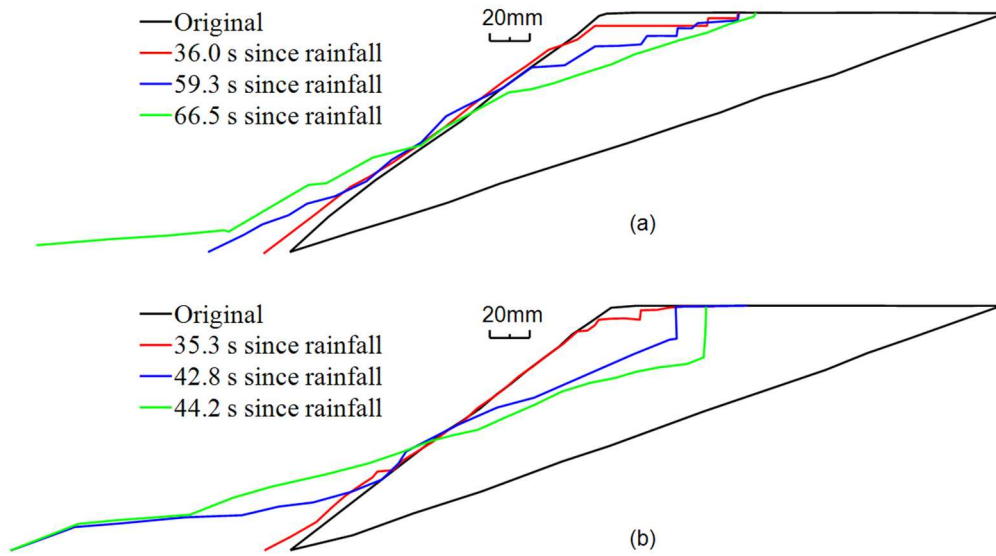


図14. 加振の有無による降雨時の変状の違い [課題番号：CT0C08]

(a) 加振なしでは降雨の蓄積とともに法肩の沈下や法尻の水平変位が徐々に増加しているが、
 (b) 加振ありでは法肩で大きな段差がみられ変状が急激に進行した。

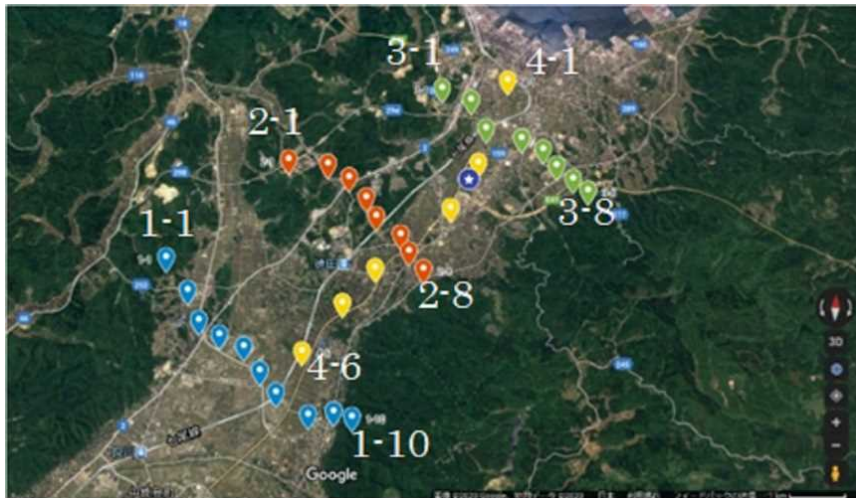
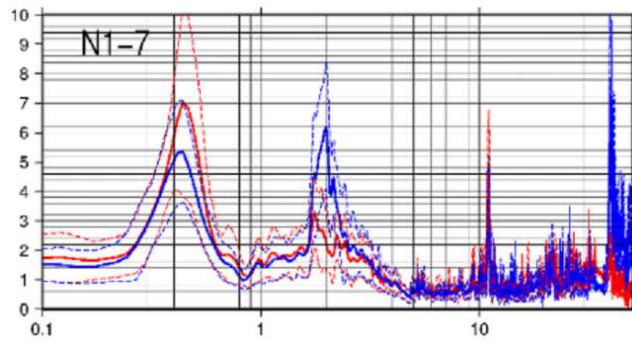
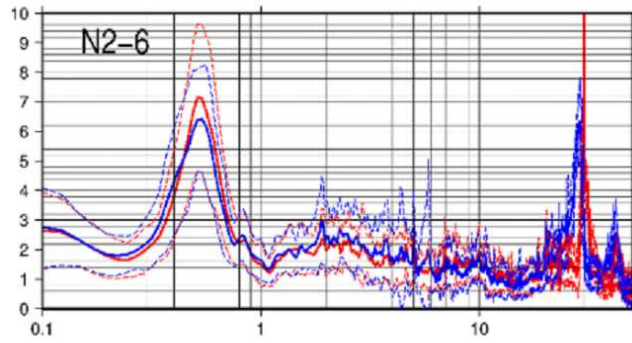


図15. 邑知潟平野北東部における微動観測点配置 (Google Mapに加筆) [課題番号：CT0C09]



(a) 1-7 地点



(b) 2-6 地点

図16. 観測微動水平上下スペクトル比の例（青：観測NS/UD、赤：観測EW/UD） [課題番号：CTOC09]

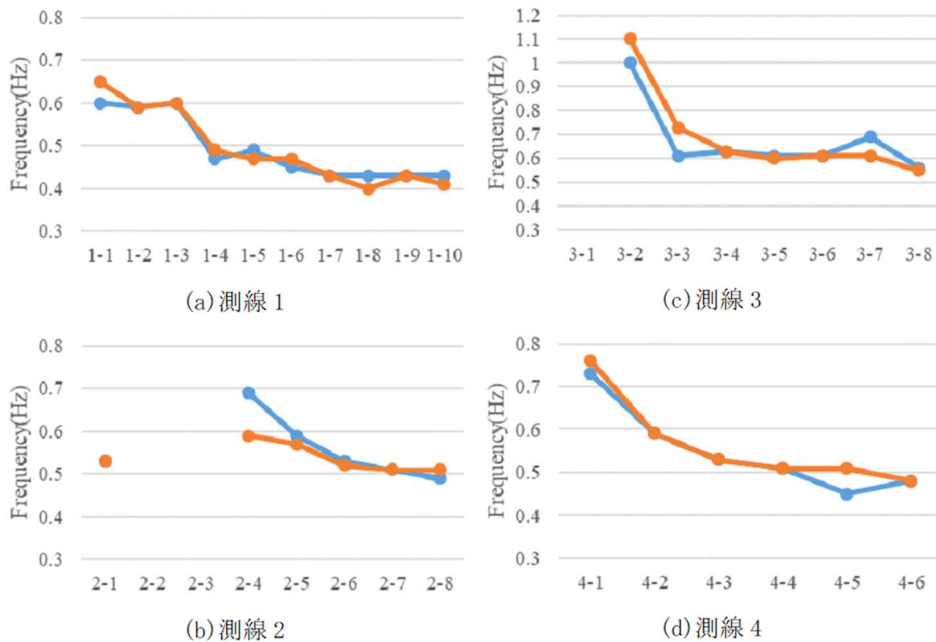
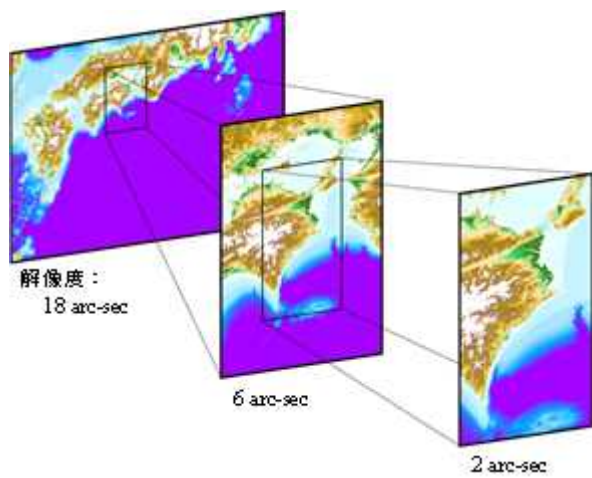
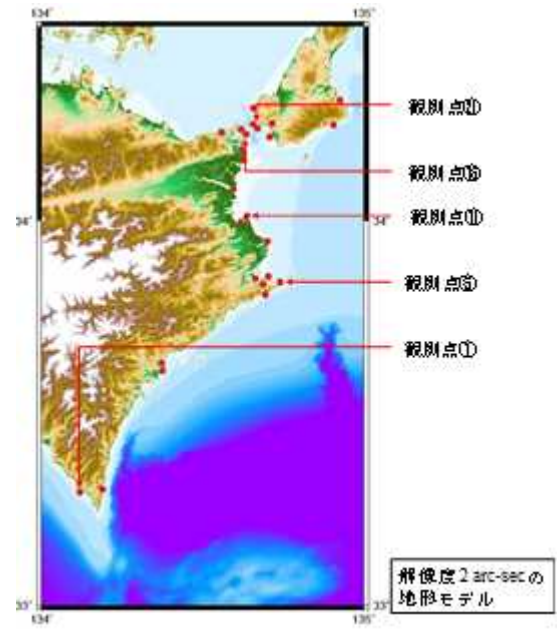


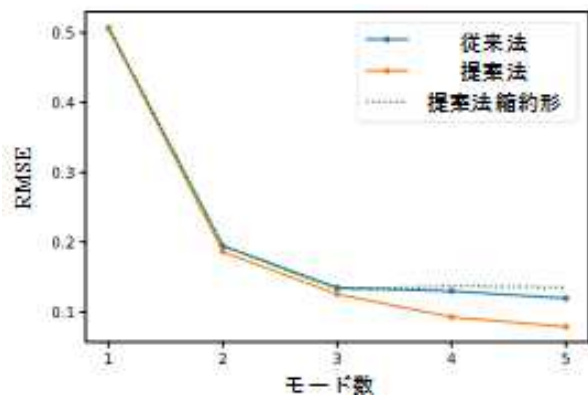
図17. 測線 1～4 の観測水平上下スペクトル比の1次ピーク振動数 [課題番号：CTOC09]



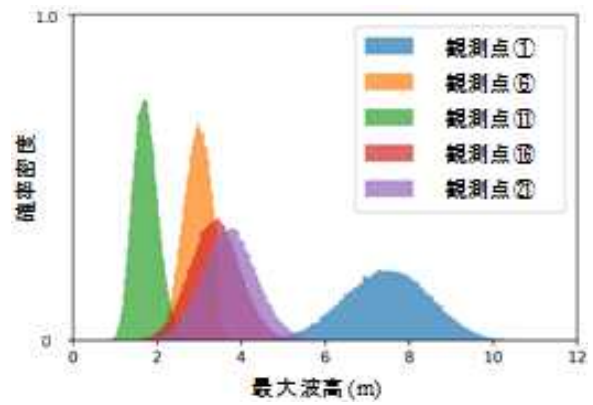
(a) 解析対象



(b) 津波観測点



(c) 従来法との比較



(d) 最大波高の確率分布

図18. 本研究で提示したサロゲートモデルと数値解析を組み合わせた結果と従来法との比較 [課題番号: CT0C18]

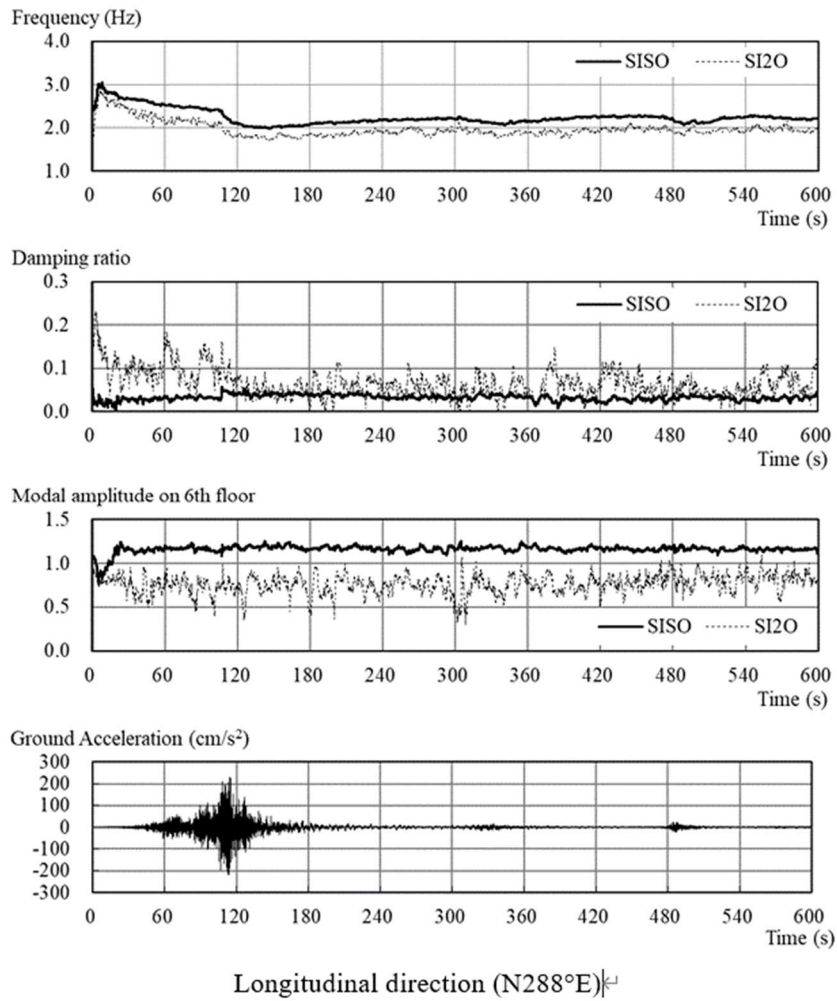


図19. 動的相互作用の振幅依存性（2011年東北地方太平洋沖地震）[課題番号：CTOC10]

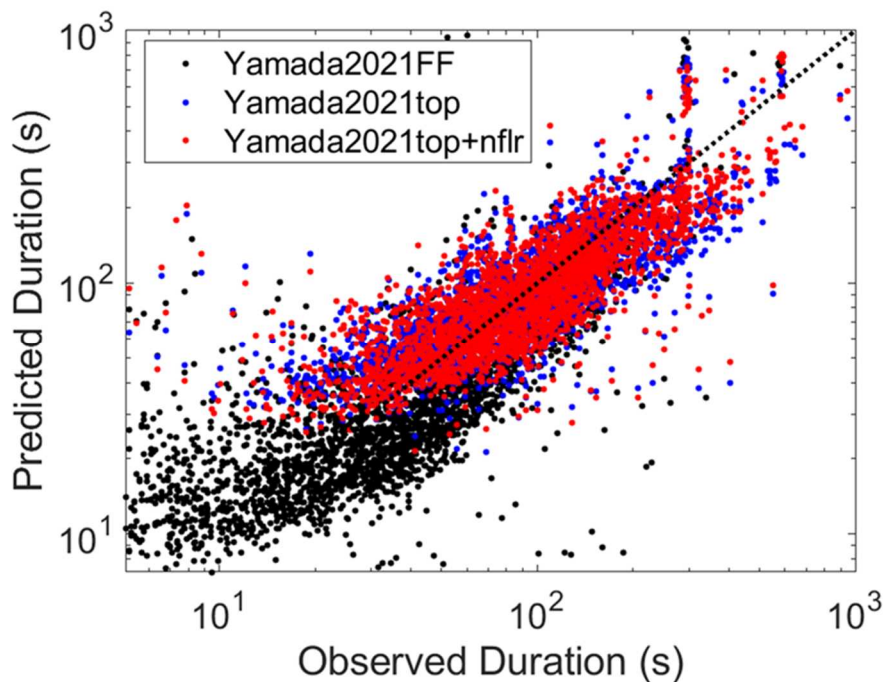


図20. 構築した揺れ継続時間予測式と観測データの比較[課題番号：CTOC10]



図21. eコミマップ版文化遺産マップと2021年2月13日の地震の推定震度[課題番号：CTOC19]



図22. 2021年2月13日の地震の推定震度と文化遺産の位置情報[課題番号：CTOC19]

2021年2月17日（水） 第1次現状確認調査
文化遺産マップを手がかりに
宮城県南部から福島県沿岸北部を調査



図23. 文化遺産マップを活用した被災状況調査[課題番号：CTOC19]