

(1) 実施機関名：

情報通信研究機構

(2) 研究課題(または観測項目)名：

先端リモートセンシング技術による地震及び火山の災害把握技術の開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

平成 25 年度までの成果を引き継ぎ、航空機 SAR による地震及び火山の災害把握技術の発展的な開発を行うとともに、データの公開の推進と災害時等には Pi-SAR2 の必要な運用を行う。また、航空機 SAR 以外のリモートセンサを活用する技術を開発する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

情報通信研究機構の第 3 期中期計画期間である平成 27 年度までにおいては、以下の研究活動の実施を計画している。平成 28 年度以降については、次期中期計画の策定に合わせて検討を進める。

平成 25 年度までの成果を引き継ぎ、Pi-SAR2 による地震・火山災害時の被害判読等の技術開発を進めるほか、Pi-SAR および Pi-SAR2 のデータ検索システムの公開・運用を進めることにより、災害軽減のための情報の高度化の研究に資する。また、実際の災害発生時には、Pi-SAR2 の積極的な運用と迅速なデータ配布・公開を行う。

さらに、航空機 SAR 以外の先進的リモートセンサを活用した地震及び火山災害のモニタリング技術についても検討をすすめる。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 30 年度においても、航空機 SAR である Pi-SAR・Pi-SAR2 により取得した観測データについて、観測データ検索・配信システムにて公開した。

シングルパス SAR 観測による高度計測など航空機 SAR が持つ特性を活用するため、土砂崩れの体積推定に関する検討 [Uemoto et al. (2018)] や津波による浸水域の抽出法の開発 [児島・他 (2018)] を行った。

干渉 SAR による絶対高度計測には GCP(地上参照点)が必要となるが、地震や火山で地形自体が変化している場合には GCP を取得することが困難になる問題点がある。これを解決するために、干渉

SAR とレーダーグラメトリの融合することで GCP を必要としない絶対高度計測法について検討した [Ito et al. (2018)]。また、レーダーグラメトリを用いた地表の水平移動検出に関する検討を行った [今井・他 (2018)]。

計画期間中においては、航空機 SAR である Pi-SAR・Pi-SAR2 により火山地域や地震被害地域の観測を適宜実施するとともに、取得した観測データについては観測データ検索・配信システムにて公開した。また、??噴?予知連絡会??活動評価検討会報告(平成 21 年 6 月報告 参考資料 1 (監視・観測体制の充実等が必要な??の選定理由取りまとめ資料))で記載されている??(99 箇所)のうち、平常時における??観測を 41 箇所完了させた。

合わせて、SAR により取得された観測データを活用するため、地震・??災害時の被害判読等の技術開発を行った。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Uemoto J., T. Moriyama, A. Nadai, S. Kojima, T. Umehara, Landslide detection based on height and amplitude differences using pre- and post-event airborne X-band SAR data, *Natural Hazards*. doi: 10.1007/s11069-018-3492-8

児島正一郎, 有馬悠馬, 山本和朋, 是津耕司, Pi-SAR X2 と GIS データを用いた浸水領域の抽出, 日本リモートセンシング学会第 65 回学術講演会論文集, 291-292.

Ito, K., S. Hishinuma, T. Aoki, J. Uemoto, and S. Uratsuka, Towards on-board elevation measurement using interferometry and radargrammetry from single-pass SAR images, in "Proceedings of International Symposium on Remote Sensing 2018", 22-27 July 2018, Valencia, Spain, 5816-5819. doi: 10.1109/IGARSS.2018.8517651

今井陽稀, 伊藤康一, 青木孝文, 上本純平, 浦塚清峰, 航空機 SAR 画像を用いた地震による地表変動の観測に関する検討, 日本リモートセンシング学会第 65 回学術講演会論文集, 201-204.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画における「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」において、現計画に引き続き i-SAR・Pi-SAR2 による観測データを公開する観測データ検索・配信システムの運用を?う(ウ、エ)とともに、災害軽減に有効な情報提供に向けた航空機 SAR による災害把握技術の?度化(ア、イ)を?う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

情報通信研究機構 電磁波研究所
他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 情報通信研究機構広報部
電話 : 042-327-5322
e-mail : publicity@nict.go.jp
URL : <http://www.nict.go.jp/>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名 : 中川 勝広
所属 : 情報通信研究機構 電磁波研究所 リモートセンシング研究室

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地質および物質科学的データに基づく低頻度大規模火山現象およびその準備過程の研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料，考古データ，地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ア. 史料の収集とデータベース化

ウ. 地質データ等の収集と整理

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

イ. 熱水系の卓越する火山

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

低頻度大規模火山現象としてカルデラ形成噴火と、大規模山体崩壊現象を研究対象とする。まず過去に発生した大規模カルデラ形成噴火を対象として、主として地質学的手法により、先行する噴火の有無を確認し、その時期と規模・様式・推移等について明らかにする。またカルデラ形成噴火についても、噴火開始から終了までの推移を詳細に復元する。そして物質科学的手法により、マグマ供給系の実体と時間変化を明らかにする。とくに、大規模噴火に至るまでのマグマ蓄積過程や周期性を定量的に理解し、マグマプロセスやその変化について時間軸を明確にして議論する。そして先行噴火からカルデラ形成噴火にかけてのマグマ供給系の生成・移動・蓄積という準備過程、そしてカルデラ形成噴火過程について明らかにすることを目的とする。そのことによりカルデラ形成噴火における、観測可能な前兆現象の種類と規模について議論できる材料を提供することを目指す。大規模山体崩壊現象では、記録の残る国内の過去の山体崩壊事例について、前兆現象および崩壊の推移について再検討する。また火山活動とは関係なく大地震によって誘発される火山体崩壊事例も、それらの分布と発生頻度について検討する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

○カルデラ形成噴火：基礎的な火山地質学的研究が行われており、形成年代が比較的新しく、異なる規模という観点から、VEI=7 として始良および支笏、VEI=6~7 として鬼界および摩周を対象とする。

これらについて表層地質調査およびボーリング・トレンチにより、カルデラ噴火の推移について、特に最初期の噴火に注目して、層序を確立する。さらにカルデラ形成噴火前の噴火活動について、特に中小規模の噴火の有無を明らかにする。これらに加えて必要に応じて K-Ar および炭素同位体による年代測定も実施する。また海外の事例を文献、あるいは必要に応じて現地調査から再検討する。さらに、規模は小さいが VEI=5 クラスの国内の歴史時代の噴火事例についても先行・前兆現象を中心に検討する。本研究で得られた高精度・高分解能の噴火層序に基づき、分析試料を採取する。噴出物は通常の記載を経た後、XRF により大量の試料について、高精度の主・微量成分組成を求める。さらにその中から選んだ代表的試料について ICP-MS により希土類元素などの微量成分、そして質量分析計により Sr、Nd および Pb 同位体組成を求める。また U-Th 放射非平衡のシステムイクスの検討も行う。また噴出物中の火山ガラスや鉱物組成を EPMA によって求め、FE-SEM により鉱物の組成累帯構造を検討する。これらにより大規模珪長質マグマ系の生成・噴火過程、特に噴火直前のプロセスを、時間軸をもとに明らかにする。

○大規模山体崩壊：研究対象は記録が豊富に残る磐梯山 1888 年と雲仙眉山 1792 年および十勝岳 1926 年である。この中で十勝岳は別課題でも主研究対象であるが、前兆現象の解析は本課題でも実施する。これらの事例について古記録の再検討を行い、崩壊の前兆・先行現象の種類と発生時期、そして崩壊現象の経緯を再検討する。これらは地形解析および現地調査で検証する。また火山噴火とは関係ないが日本海東縁の古い火山体には大規模崩壊地形が多数認められ、これらは日本海東縁を震源とする地震との関連が疑われる。これらは地形解析や現地調査により、崩壊地形の分布・規模を明らかにし、発生頻度も検討を試みる。

平成 26 年度では、まず研究集会を行い現状認識と 5 年間の研究計画について議論する。カルデラ火山については表層地質調査と噴出物採取を行い、ボーリング地点やトレンチ地点の選定を行う。また物質科学的解析を進める。山体崩壊については地形解析を行い、眉山については古記録調査を行う。平成 27 年度では、カルデラ火山については表層地質調査と噴出物採取を継続するとともに、トレンチ調査（始良および鬼界）とボーリング（始良または鬼界）を実施する。噴出物の物質科学的解析は継続し、特に同位体比分析も開始する。山体崩壊について地形解析を続け、眉山では古記録調査に加え現地調査を実施し、磐梯山については古記録調査を開始する。平成 28 年度では、カルデラ火山の表層地質調査と噴出物採取は継続し、ボーリング地点の選定（各カルデラ）を行う。また北海道ではトレンチを実施する。物質科学的解析は継続し、同位体比分析と鉱物の組成累帯構造解析を重点に行う。山体崩壊では磐梯山・眉山の古記録調査のまとめと地質調査を実施し、日本海東縁の火山については地質調査を実施する。また研究集会を開き研究進捗状況を確認する。平成 29 年度は、カルデラ火山においてボーリングおよびトレンチを実施する（対象は研究進捗状況で決定する）。噴出物の物質科学的解析は継続し、同位体比分析と鉱物の組成累帯構造解析を重点に行う。山体崩壊について補充調査を行う。平成 30 年度は両方の課題について補充地質調査および噴出物解析を行う。研究集会を開催し研究のとりまとめを行う。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要：

1 . 平成 30 年度成果概要：カルデラ火山

鬼界火山：カルデラ形成噴火（アカホヤ噴火）のステージ 1（プリニー式噴火）とステージ 2（クワイマックス）の間の時間間隙について、地質調査によりステージ 1 の堆積物上に時間間隙を示すチャネル構造を確認した。その時間スケールを堆積物溶結・冷却モデルにより少なくとも数日から 1 週間と見積もった（図 1）。さらに両ステージの噴火機構を議論するために軽石試料の発泡組織を検討したところ、ステージ 2 において大きな気泡が多く、またそれらが伸張していることがわかった。このことから噴火機構の違いとカルデラ形成機構との関連について検討を行っている。また鬼界アカホヤ噴火に伴い発生した津波の研究も進め、従来、カルデラ陥没や火砕流流入により津波が発生したとの仮説が提唱されていたが、津波堆積物とアカホヤ噴火堆積物との層序関係を調べた結果、噴火に連動して発生した巨大地震に伴う津波であった可能性を指摘した。

摩周火山：カルデラ形成噴火堆積物の噴火様式・構成物の時間推移を検討し、下位から噴煙柱形成・崩壊フェーズ、マグマ水蒸気噴火フェーズそしてカルデラ形成フェーズの、噴火様式の異なる3つに区分できることを明らかにした。この結果からカルデラ形成は単一のマグマ溜りからのプリニー式噴火から噴煙柱崩壊という単純なモデルでは説明できないことが明らかになった。また H29 年度に実施したボーリングコアの解析を進めた(図2)。その結果、1.2~2 万年の堆積物が欠如しており、最終氷期の氷食作用を受けていると考えられる。しかしそれ以深では摩周成層火山形成期に対応する堆積物を回収できた。それらは火山豆石を特徴的に含む層が複数認められ、外来水の影響によるマグマ水蒸気噴火が頻発していたことが明らかになった。

支笏火山：本課題研究と別課題による研究として 4.6 万年前のカルデラ形成噴火堆積物について、層相と本質物のタイプそして異質岩片の量により、下位から A~F の 6 つのユニットに細分した。そして噴火はマグマ水蒸気噴火(ユニット A)、噴煙柱形成・崩壊(ユニット B)、クライマックス噴火(ユニット C)そして後カルデラ噴火(ユニット D~F)と推移したこと、さらにユニット B と C、そして C と D の間で時間間隙があることを明らかにした(図3)。特に C と D の時間間隙が長いこと、さらに D からマグマタイプが異なることから、支笏カルデラ形成噴火堆積物をユニット A~C と再定義した。

その他の火山：支笏火山においてはカルデラ形成噴火に先行する 6 万年前の社台噴火(VEI=6)について噴火推移を検討し成果を印刷した。伊豆大島の 18 世紀の安永大噴火について、堆積物層序の再構築、古文書との比較、物質科学的検討を行った結果、噴火最盛期が従来の考えより半年ほど遅い、1778 年 11 月であったことがわかった(図4)。また噴出量の時間変遷をもとにすると、1 年以上弱い噴火が継続した後に、短い時間で最盛期を迎え、主要な堆積物を形成したことも明らかとなった。中朝国境の白頭山のマントルプリュームの上昇の駆動力について、玄武岩試料を物質科学的に解析し、マントルポテンシャル温度を求めた。その結果から、プリュームとして上昇するための密度低下の原因は、沈み込む太平洋プレートによって輸送・蓄積された水であるとした。

2. 平成 30 年度成果概要：大規模山体崩壊

前年度に引き続き、雲仙嶽噴火・崩壊(島原大変)の 1792 年の活動の総括をめざして、史料を整理して古記録の解析を行った。今年度は、雲仙活断層群が活動したという視点から諸現象の因果関係を解明し、そして前山(眉山)崩壊の目撃者、被災者の体験聞き書き情報の解析から崩壊過程の推移を検討した。その結果、片山(1974)による 4 段階の地震・噴火活動推移区分が妥当であることを確認した。そして火山活動と連動した雲仙活断層群は従来考えられていたより長く、そして南北に拡大したこと、さらにその活動によって多くの地割れが形成、そして山腹の地下水系が破壊されたことがわかった。これらのことから、崩壊の本質は眉山山麓付近の岩石中の間隙水圧の上昇によって起こった液状化と、引き続く地すべりと考えた片山(1974)や太田(1984)を支持する結果となった(表1・図5)。

3. 計画期間中の成果の概要

大規模噴火：計画期間中、大規模噴火についてはまず地質学的手法を用いて、カルデラ形成噴火の推移を明らかにすること、さらに前駆活動の有無とその様式を明らかにすることを目指した。対象火山は鬼界、支笏および摩周である。鬼界および摩周では 100m を超える深度の掘削も行った。さらにこれらの火山では復元した噴火推移に基づいて岩石試料を採取し、岩石学的検討を加えた。この岩石学的検討は前記の火山に加えて、始良および屈斜路でも行った。その結果、カルデラ形成噴火に先行する噴火活動は鬼界では認められたが、支笏や摩周では確認できなかった。九州では阿蘇でも先行噴火活動が認識されているが、北海道では洞爺でも知られていないことから、先行活動の有無はカルデラ火山地域のテクトニクス場の違いと関連している可能性がある。また検討したカルデラ噴火の推移は、いずれの火山でも噴煙柱形成・崩壊のステージとクライマックスのステージに大別されることがわかった。また両ステージ間には比較的長い時間間隙が存在する事、あるいはそれぞれのステージでの噴火推移についてもこれまで考えられている以上に複雑であることがわかった。これらの噴火をもたらしたマグマ系は、単一の巨大な(成層)マグマ溜りではないことも明らかになった。これまでは単一の巨大な珪長質マグマ溜りからのプリニー式噴火で、大量のマグマが噴出することで陥没が起こり、それによってクライマックス噴火が発生し、カルデラが形成されるというモデルが一般的であった。し

かし計画期間中の研究によって、時間間隙の存在や噴火推移の中でのカルデラ形成時期の多様性が明らかになった。また記録の残るやや規模の小さいカルデラ噴火(VEI=6)と比較すると、VEI=7クラスの巨大噴火ではより長期間をかけてカルデラが形成されていることも明らかになった(図6)。この期間中に検討できた噴火事例は限られており、活動時期や火山の置かれているテクトニクス場も考慮して、更なる事例研究を積み重ねることが、低頻度大規模噴火現象を理解するために重要であると指摘できる。

大規模山体崩壊：江戸時代の史料などから国内の火山の噴火履歴・推移を地震活動との関連を含め、高い分解能で理解することをめざして、北海道駒ヶ岳、渡島大島、磐梯山および雲仙について研究を進めた。研究期間内にいくつかの火山の噴火史料集として、江戸時代を中心に既往の研究に対して高い分解能で噴火(と関連する可能性のある地震の)推移を明らかにするとともに、突発的な地変に当時の行政担当者がとった対応についても示し、理学的な研究と防災対応の基礎資料になる成果を得た。個々の史料の成り立ちを示して信頼性を確保するとともに、所蔵者を明らかにして、検証可能な形で公表した。

- (9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
長谷川健・松本 亜希子・東宮 昭彦・中川 光弘, 2018, 大規模カルデラ形成噴火と活動的後カルデラ火山。地学雑誌, **127**, 289-301。
長谷川健・望月伸竜・大岩根尚, 2018, 堆積物から超大規模噴火の継続時間を読み取る方法, 地学雑誌, **127**, 273-288。
廣瀬 亘・川上源太郎・長谷川健・林 圭一・渡辺真人, 2018, 網走地域の地質(5万分の一地質図幅および説明書), 産業技術総合研究所地質調査総合センター, pp. 66。
Kaneko, T., K. Takasaki, F. Maeno, M.J. Wooster, and A. Yasuda, 2018, Himawari-8 infrared observations of the June-August 2015 Mt Raung eruption, Indonesia. *Earth Planets Space*, **70**, 89。
Kuritani, T., A. Yamaguchi, S. Fukumitsu, M. Nakagawa, A. Matsumoto, T. Yokoyama, 2018, Magma plumbing system at Izu-Oshima Volcano, Japan: constraints from petrological and geochemical analyses. *Frontiers in Earth Science* **6**:178, doi:10.3389/feart.2018.00178。
Maeno, F., S. Nakada, M. Yoshimoto, T. Shimano, N. Hokanishi, A. Zaennudin, and M. Iguchi, 2019, Eruption pattern and a long-term magma discharge rate over the past 100 years at Kelud volcano, Indonesia. *J. Disaster Res.*, **14**, 1, 27-39。
Maeno, F., S. Nakada, M. Yoshimoto, T. Shimano, N. Hokanishi, A. Zaennudin, and M. Iguchi, A sequence of a plinian eruption preceded by dome destruction at Kelud volcano, Indonesia, on February 13, 2014, revealed from tephra fallout and pyroclastic density current deposits. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, in press。
Matsumoto, A., T. Hasegawa, M. Nakagawa, 2018, Petrology of the 120 ka Caldera-Forming Eruption of Kutcharo Volcano, Eastern Hokkaido, Japan: Coexistence of Multiple Silicic Magmas and their Relationship with Mafic Magmas, *J. Petrol.*, **59**, 771-793。
Matsumoto, A., M. Nakagawa, Reconstruction of the eruptive history of Usu volcano, Hokkaido, Japan, inferred from petrological correlation between tephra and dome lavas. *Island Arc*, in press。
宮坂瑞穂・中川光弘, 2018, 支笏火山 60 ka 社台噴火の噴火推移。地学雑誌, **127**, 229-246。
Nakada, S., F. Maeno, M. Yoshimoto, N. Hokanishi, T. Shimano, A. Zaennudin, and M. Iguchi, 2019, Eruption scenarios of active volcanoes in Indonesia. *J. Disaster Res.*, **14**, 1, 40-50。
Nakada, S., A. Zaennudin, M. Yoshimoto, F. Maeno, Y. Suzuki, N. Hokanishi, H. Sasaki, M. Iguchi, T. Ohkura, H. Gunawan, and H. Triastuty, Growth process of the lava dome/flow complex at Sinabung Volcano during 2013-2016. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, in press。
中川 光弘・宮坂 瑞穂・三浦 大助・上澤 真平, 2018, 南西北海道, 石狩低地帯におけるテフラ層序学: 支笏-洞爺火山地域の噴火履歴。地質学雑誌, **124**, 473-489。

- 中川光弘・宮坂瑞穂・富島千晴・松本亜希子・長谷龍一, 2018, 支笏湖南方地域の火口近傍堆積物層序からみた 46 ka 支笏カルデラ形成噴火推移. 地学雑誌, **127**, 247-271.
- Nanayama, F. and F. Maeno, 2018, Evidence on the Koseda coast of Yakushima Island of a tsunami during the 7.3 ka Kikai caldera eruption. Island Arc, doi:10.1111/iar.12291.
- Suzuki, Y., F. Maeno, M. Nagai, H. Shibutani, S. Shimizu, and S. Nakada, 2018, Conduit processes during the climactic phase of the Shinmoe-dake 2011 eruption (Japan): Insights into intermittent explosive activity and transition in eruption style of andesitic magma. J. Volcanol. Geotherm. Res., **358**, 87-104, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2018.02.008.
- Yoshimura, S., T. Kuritani, A. Matsumoto, M. Nakagawa, 2019, Fingerprint of silicic magma degassing visualised through chlorine microscopy. Scientific Reports, 9: **786**, doi:10.1038/s41598-018-37374-0.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

該当しない。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

北海道大学大学院理学研究院 中川光弘・栗谷 豪・松本亜希子
秋田大学大学院工学資源学研究科 大場 司
東京大学地震研究所 前野 深・中田節也
東京工業大学理工学研究科 横山哲也
京都大学総合人間学部 金子克哉
鹿児島大学理工学研究科 小林哲夫
他機関との共同研究の有無 : 有
山形大学理学部 伴 雅雄
茨城大学理学部 長谷川健
千葉大学大学院理学研究科 津久井雅志
神戸大学大学院理学研究科 鈴木桂子
福岡大学理学部 奥野 充
熊本大学 宮縁育夫 (教育学部)・長谷中利昭 (自然科学研究科)
産総研 古川竜太

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 北海道大学大学院理学研究院
電話 : 011-716-2111
e-mail : mnakagawa@mail.sci.hokudai.ac.jp
URL : <http://www.sci.hokudai.ac.jp/eps/>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 中川光弘
所属 : 北海道大学大学院理学研究院

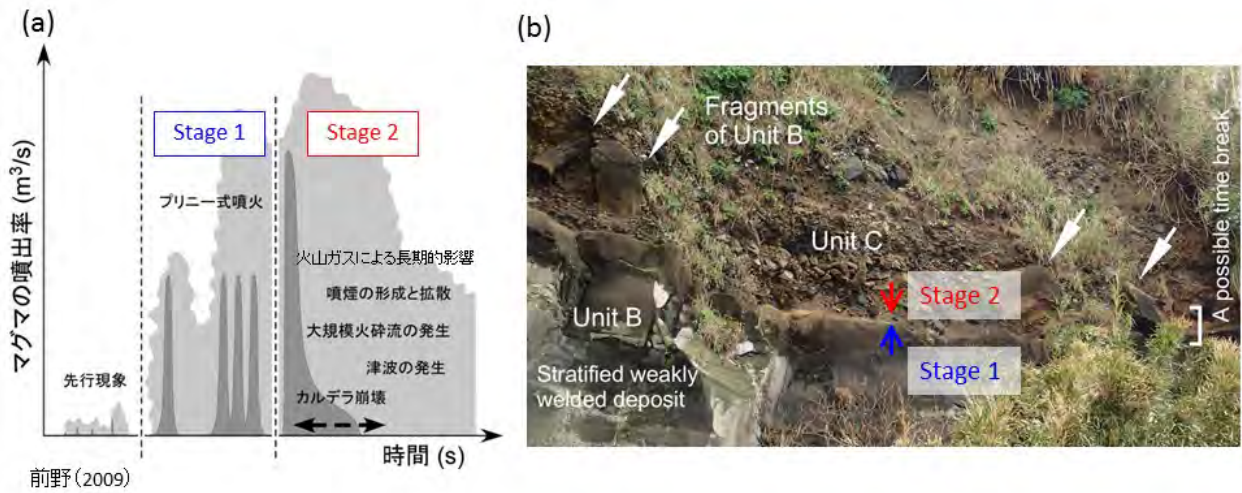


図1 . (a) カルデラ形成噴火における噴火推移の時間変化とマグマ噴出率の変化。(b) 鬼界カルデラ噴出物のステージ1・2間の産状。ステージ1の溶結ブロックをステージ2の火砕流が取り込んでいる。

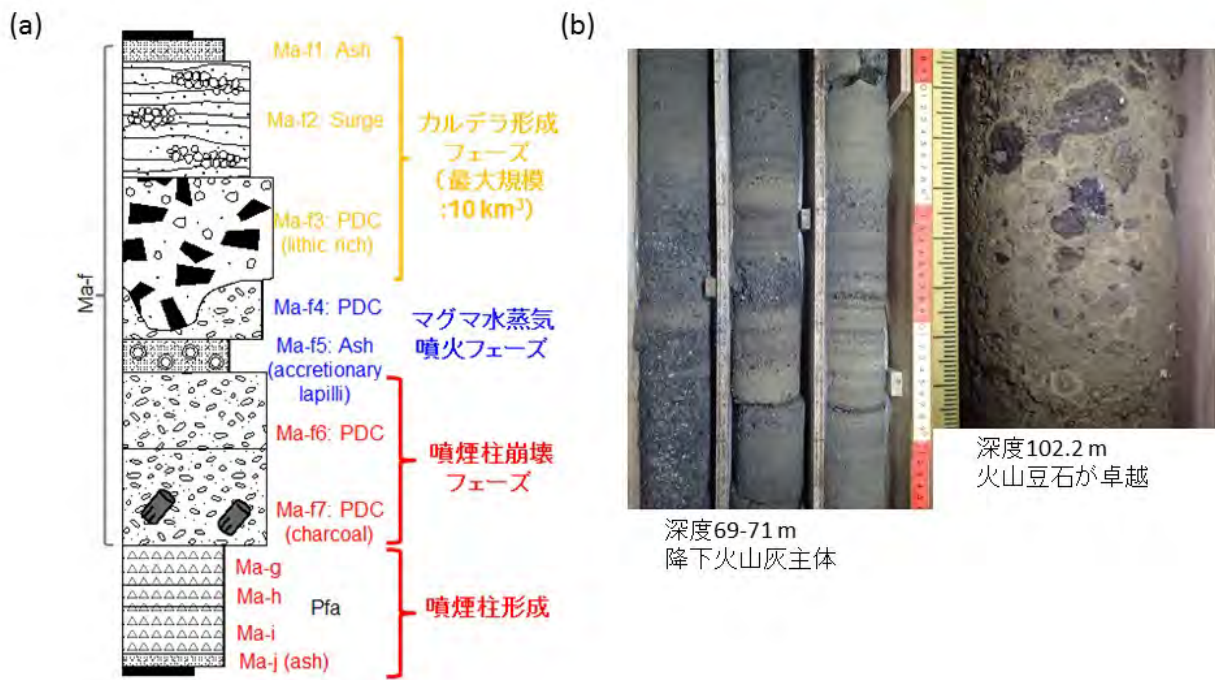
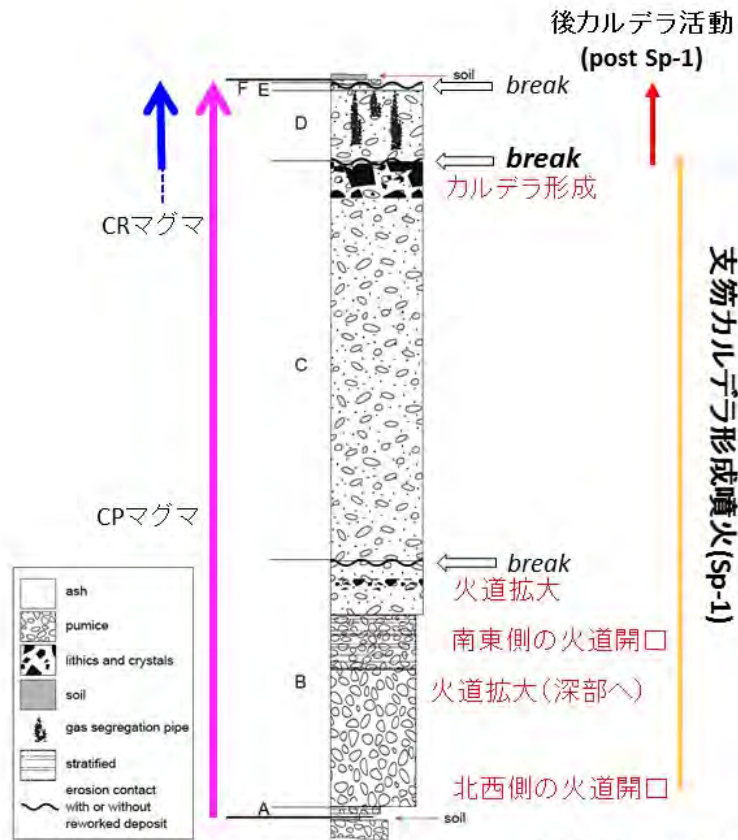


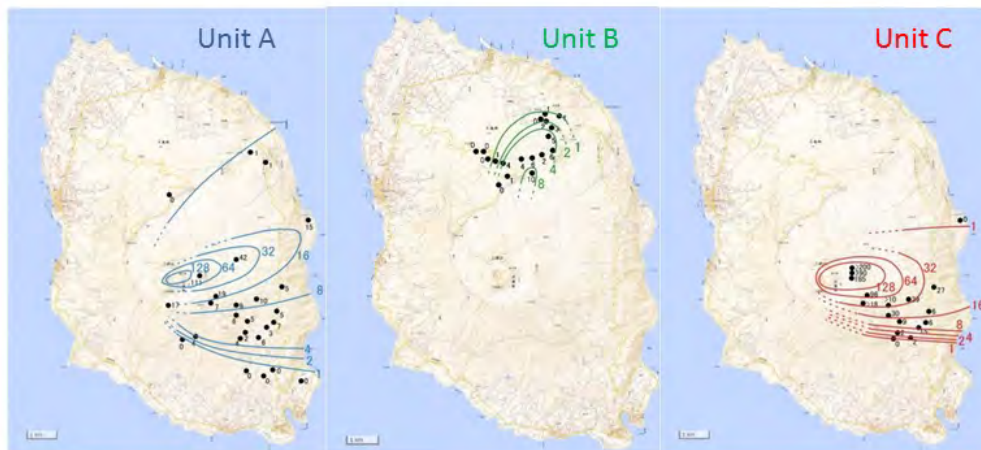
図2 . (a) 摩周火山 6.7ka カルデラ形成噴火噴出物の総合柱状図。(b) H29年度に掘削したボーリングコア試料写真。



(中川ほか,2018aを改訂)

図3 . 4.6 万年前の支笏カルデラ形成噴火の総合柱状図。
 複数の休止期があること、カルデラ陥没後に異なるタイプのマグマが活動したことが明らかになった。

(a)



(b)

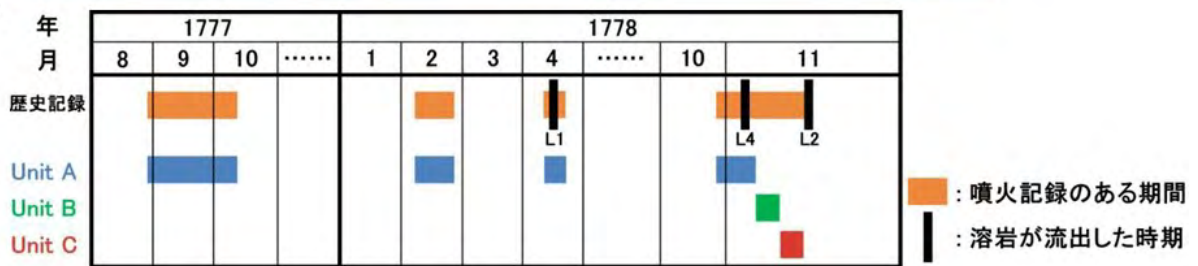
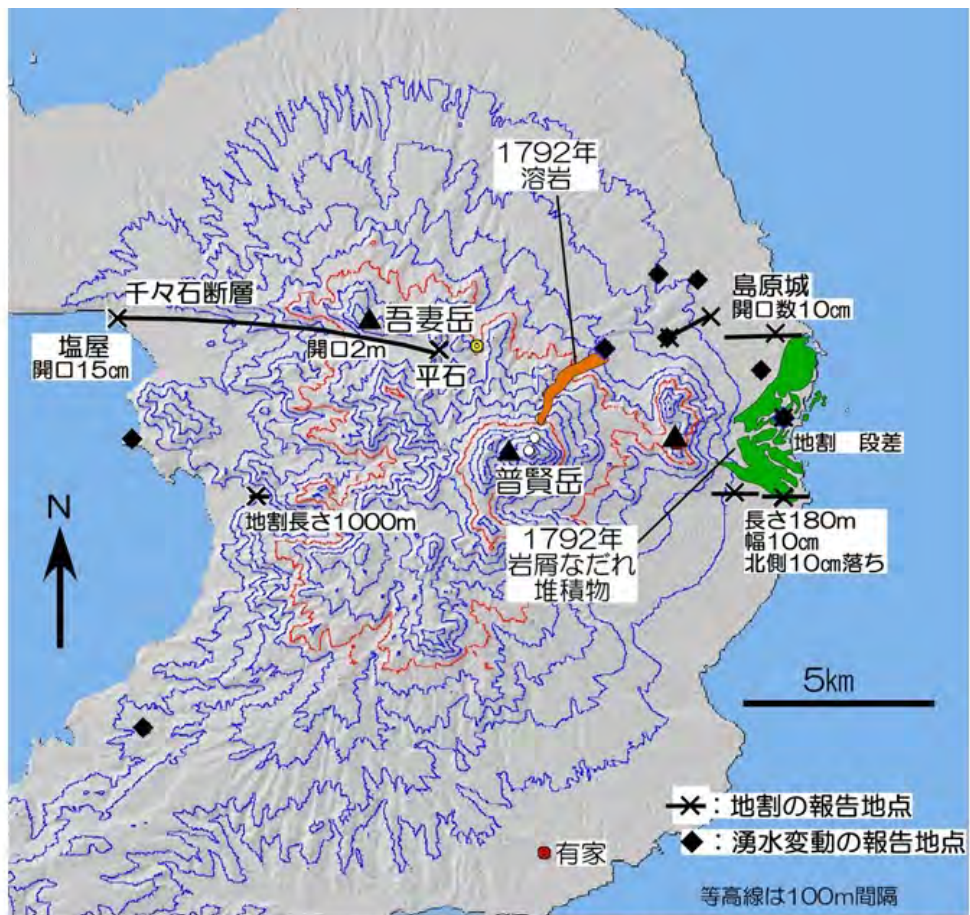


図4．伊豆大島 17 世紀安永噴火の (a) テフラ層序と (b) 古文書の記録との関係。

自然現象の推移（片山，1974，太田，1984に加筆・改変）

活動段階	和暦	グレゴリオ暦（年月日）と日本標準時	古記録
第一段階 前駆地震群	寛政三年十月八日 ころ	1791.11.320 ^h	小濱、佐賀、島原等で群発地震始まる。饑串で死者；以後毎日3～4回、地鳴りを伴う。
第二段階 普賢岳噴火	寛政四年 二月十九日	1792.2.11	普賢祠前の寝みから噴煙を確認。
	二月六日	2.27.10 ^h 30 ^m	穴迫(あなざこ)谷びわのぼちく噴煙。砂利・土砂も噴出。
	二月八日～九日	2.29～3.1	穴迫谷びわのぼちで新焼溶岩流下。
	二月六日	3.21.16 ^h 30 ^m	鐘の窪震動。噴煙、また溶岩流出、やがてびわのぼちからのものに合流。普賢祠前の地獄は沼状になる。
	閏二月二日～三日	3.24～3.25	古焼(ふるやけ)頭から噴煙。
	閏二月下旬	4中旬	おしが谷に炭酸ガス噴出、呼吸困難、鳥獣死ぬ。
第三段階 三月朔(さく)地震群	三月一日～ 三月上旬	4.21	“三月朔日の地震” 震度は島原で5～6、小濱で死者。島原半島を横切り千々石断層、島原城付近、中木場、安徳ほかで地割れ・開口、半島中央部で最大2m開口、湧水量変化。
	三月九日	4.29.0 ^h	桶平の山が約200mずり落ちた。ここは島原大変の際の大崩壊の中心部。
第四段階 眉山大崩壊	四月一日	1792.5.21.19 ^h	前山が大崩壊、地震後間もなく連波3波、うち第2波もっとも大波高約10m。島原大変”地震後間もなくつなみ3波、うち第2波もっとも大。波高約10m、前山大崩壊に伴って大量の出水、死者14,500人。大変直前地震の有震は近傍のみ。
	四月五日～六日	5.25～5.26	強い地震。
	四月十日	5.30	上の原の井戸自噴。水勢強し。
	四月十三日	6.2～	上の原などの湧水次第にたまり、白土(しろち)池を生じた。新山・万町一帯からも湧水湧出。
	四月十六日	6.5	北串山村から、三月はじめ一時湧水量が増したがやがて減水、の報告あり。
	四月二十五日	6.14	穴迫の噴火勢増す。
	四月二十八日	6.17～	前山の崩れ跡に6本のたて割れを認む。谷底では沸くようなはげしい音、割れ口から泥土を噴き出す。前山の割れ筋の一部から煙立つ。
	五月六日	1792.6.24	江里観音、杉山権現、宇土妙見湧水量減。
	五月七日	6.25	中木場村、安徳村で開口割れ目形成、拡大。
	五月十四日	7.2	島原村初原名で井戸四間四方程落ち込む。
	五月二十九日	7.17	中木場村庄屋近辺、地震にて、また地割りができた旨届出あり。
	六月一日～三日	7.19～7.21	普賢噴火、降灰。
	六月十三日	7.31	中木場村所々開口割れ目形成。一ヶ所は幅25cm、長さ1.5km、庄屋宅地内幅15cm～2m東西に裂けて長くのびた。
寛政十年 十一月一日・七日	1798.12.7. 12.6	普賢岳噴煙・崩壊D-A2D25	

表1. 古文書の記録から明らかになった、雲仙普賢岳 1792 年噴火の活動推移。



千々石断層に沿った地割れ（開口幅最大2m）の存在が『日新記』（諫早家文書）と『島原地変記』（神代（こうじろ）鍋島家文書）から明らかになった。
 ◆の地点で湧水量が変化した。山腹で減少、山麓で増加の傾向がみられた。

図5. 古文書の記録から明らかになった、雲仙普賢岳 1792 年噴火の活動の分布。

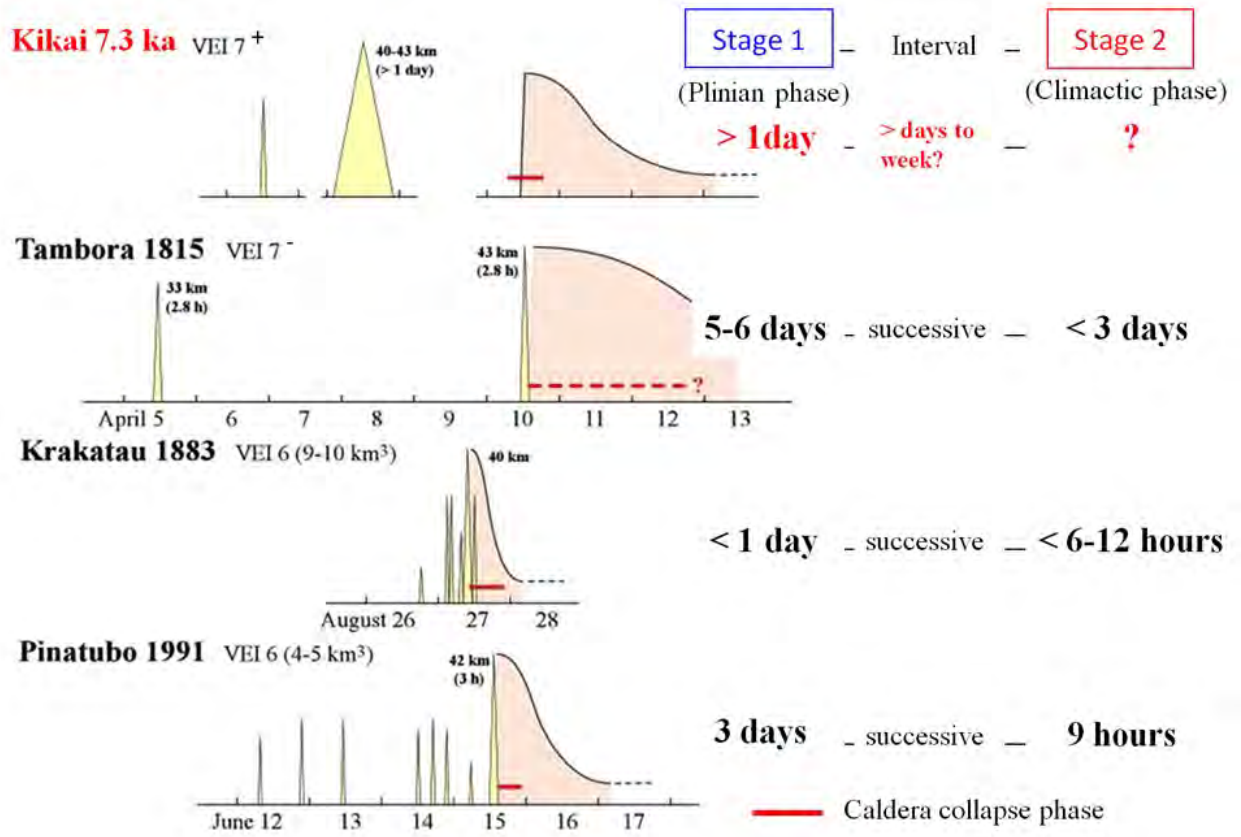


図 6 . カルデラ形成噴火の推移比較。

VEI=6 クラスのカルデラ形成噴火では噴火開始から最盛期・カルデラ陥没に至るまで短期間で移行しているのに対し、VEI=7 クラスのカルデラ形成噴火では、比較的長期間かけてカルデラが形成されている。

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

北海道沖低頻度大規模地震の総合的理解とそのモニタリングへの基礎的研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料, 考古データ, 地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

4. 研究を推進するための体制の整備

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

北海道太平洋沖では 2011 年東北地方太平洋沖巨大地震が発生する以前から太平洋沿岸で多くの津波堆積物調査が実施され、過去に災害を発生させてきた歴史津波より巨大な津波を発生させた低頻度大規模地震が 17 世紀前半に発生していたことが明らかになってきた。さらに、17 世紀前半に発生した低頻度大規模地震の際に、2011 年東北地方太平洋沖巨大地震と同じように海溝近傍のプレート境界で 20 m 以上の非常に大きな滑りが発生していた事も明らかになっている。

本研究課題では、北海道近傍で発生する低頻度大規模地震の発生様式を理解する調査研究を実施し、さらにそれら大規模地震を発生させるプレート境界の発生場を理解するための観測研究を実施し、最後にプレート境界状態のモニタリングのための手法開発のための基礎的研究を実施する。多くの研究項目を横断した研究計画となっており、地質学データに基づく低頻度大規模地震の発生様式の解明が

ら研究成果をモニタリング手法の開発につなげるまで低頻度大規模地震の予測を現実に近づけるための総合的研究を実施することを目的とする。

1) 低頻度大規模地震の履歴・発生様式の解明

17世紀前半以前の津波堆積物イベントに対し、多地点で面的津波堆積物調査を実施する。これまでの調査結果も総合的に利用し、津波遡上数値計算を実施することで断層モデルを推定し、低頻度大規模地震の発生様式の多様性を解明する。

2) 低頻度大規模地震の発生場の理解

海底構造探査により海溝近傍の構造及び海底地形を明らかにし、大滑りの発生場を理解する。研究成果は海溝近傍プレート境界の滑り予測のための情報を提供する。

北海道太平洋沖の低頻度大規模地震の震源域で海底地震調査観測を実施し、プレート境界で発生した微小地震の観測波形を解析し、微小地震の応力降下量の面的分布を得る。その応力降下量分布と大地震の大滑り域との関連を解明し、巨大地震の発生場を理解する。

低頻度大規模地震の履歴や発生様式が解明されても、広範囲で長期にわたる巨大地震の影響が評価できなければ、将来の低頻度大規模地震を予測することはできない。そこで、極東ロシアでのGPS地殻変動観測および地震観測により、2011年東北地方太平洋沖地震後の広域応力蓄積過程を解明し、マントル粘弾性の影響やプレート運動に与える影響を評価する。

3) プレート境界状態のモニタリング手法開発

低頻度大規模地震の履歴と発生様式の多様性が理解され、その発生場が理解できれば、それらの情報を地震発生予測に用いるため、プレート境界の固着をモニタリングする手法を開発する必要がある。現実には本研究課題は上記(1)、(2)の2つの課題の研究成果を受けて開発するものである。プレート境界で発生する微小地震活動や微小地震の応力降下量分布の時間変化を捕らえることでプレート境界の状態を把握し、モニタリングする手法を開発する。

(7) 本課題の5か年計画の概要:

平成26年度研究計画

(1) 低頻度大規模地震の履歴・発生様式の解明

北海道太平洋沿岸の面的津波堆積物分布を得るための現地調査を実施する。

(2) 低頻度大規模地震の発生場の理解

過去のプレート境界での微小地震の観測波形を用いて応力降下量の推定手法を確立する。ウラジオストックを中心とした極東ロシアにGPS観測網を維持、強化し、2011年東北地方太平洋沖地震による長期的な影響をモデル化への基礎研究を実施する。

(3) プレート境界状態のモニタリング手法開発

微小地震の応力降下量や微小地震活動を用いたモニタリング手法開発の検討

平成27年度研究計画

(1) 低頻度大規模地震の履歴・発生様式の解明

面的津波堆積物分布を得るための現地調査を継続する。過去の津波堆積物分析結果を津波遡上数値計算によって再現することで低頻度大規模地震の震源過程推定を試みる。

(2) 低頻度大規模地震の発生場の理解

北海道太平洋沖で自己浮上式海底地震計を用いた微小地震観測を実施し微小地震の応力降下量分布の推定を試みる。極東ロシアでのGPS観測網を維持、強化し、2011年東北地方太平洋沖地震による長期的な影響をモデル化への基礎研究を継続する。

(3) プレート境界状態のモニタリング手法開発

微小地震の応力降下量や微小地震活動を用いたモニタリング手法開発の検討。

平成28年度研究計画

(1) 低頻度大規模地震の履歴・発生様式の解明

面的津波堆積物分布を得るための現地調査を継続する。調査で得られた試料の粒度分析・珪藻分析・火山灰認定等の分析を実施する。津波堆積物分析結果を津波遡上数値計算によって再現することで過去の低頻度大規模地震の震源過程を推定する。

(2) 低頻度大規模地震の発生場の理解

プレート境界での微小地震による観測地震波形を用いた応力降下量分布の推定を継続する。極東ロシアでの GPS 観測網を維持、強化し、2011 年東北地方太平洋沖地震による長期的な影響のモデル化を実施する。

(3) プレート境界状態のモニタリング手法開発

微小地震の応力降下量や微小地震活動を用いたモニタリング手法開発を行う。

平成 29 年度研究計画

(1) 低頻度大規模地震の履歴・発生様式の解明

面的津波堆積物分布を得るための現地調査を継続。津波堆積物調査で得られた試料の分析を実施し、津波堆積物分析結果から過去の低頻度大規模地震の震源過程推定を高度化。

(2) 低頻度大規模地震の発生場の理解

北海道太平洋沖の千島海溝の海溝軸近傍で海溝軸に平行な側線で海底構造探査を実施し、低頻度大規模地震の大滑り域の付加体構造やプレート境界近傍の構造を明らかにする。プレート境界での微小地震による観測地震波形を用いた応力降下量分布の推定を継続する。極東ロシアでの GPS 観測網を維持、強化し、2011 年東北地方太平洋沖地震による長期的な影響のモデル化を実施する。

(3) プレート境界状態のモニタリング手法開発

微小地震の応力降下量や微小地震活動を用いたモニタリング手法開発を行う。

平成 30 年度研究計画

(1) 低頻度大規模地震の履歴・発生様式の解明

面的津波堆積物分布を得るための現地調査を継続する。調査で得られた試料の分析を実施し、津波堆積物分析結果を津波遡上数値計算によって再現することで過去の低頻度大規模地震の震源過程を推定し低頻度大規模地震の多様性を解明する。

(2) 低頻度大規模地震の発生場の理解

海底構造調査結果を分析し、2011 年東北地方太平洋沖地震の大滑り域の構造との比較を行い、構造と低頻度大規模地震の震源過程の多様性との関連を解明する。面的応力降下量分布を得、大地震の大滑り域との関連を解明し、モニタリングにつなげる。極東ロシアでの GPS 観測網を維持、強化し、2011 年東北地方太平洋沖地震による長期的な影響をモデル化し、北海道沖のプレート運動の挙動の把握に適應する。

(3) プレート境界状態のモニタリング手法開発

・微小地震の応力降下量や微小地震活動を用いたモニタリング手法開発を行う。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

平成 30 年度の成果概要

低頻度大規模地震の履歴・発生様式の解明

1) 十勝地方における 17 世紀および 12-13 世紀の巨大地震に伴う地殻変動の検出

北海道大樹町、当縁川下流域において 17 世紀および 12-13 世紀の巨大津波の堆積物とこのイベント前後の地殻変動を検討した。17 世紀のイベントについては、海岸から 1.8 km 内陸まで津波堆積物を識別した。また、珪藻分析から地震間沈降及び地震後の隆起が認められた。珪藻分析から求められた淡水汽水境界の標高と、現在の潮位 (十勝港における平均最大高潮位 1.2 m) から求められる地殻変動量は最大 2.3 m の隆起である (図 1)。地殻変動量は海岸から内陸にかけて大きくなり、1.9 km 内陸の地点で検出限界に達する。12-13 世紀地震の地殻変動量を正確に復元することは難しいが、淡水汽水境界の標高から、少なくとも数十 cm 程度、地震後に隆起し、その後沈降に転じ数十 cm 程度沈降した可能性が高い。この地殻変動パターンは 17 世紀のイベントとは異なるものである。

2) 北海道太平洋岸の津波堆積物の広域対比

北海道太平洋岸では、渡島から根室まで、17世紀の津波堆積物、もしくはその候補となる砂層が存在することがわかっている。同一手順、手法でサンプリングと泥炭層の炭素同位体年代を測定し、これらの津波堆積物の広域対比を試みた(図2)。調査地点は登別市から根室市までの11地点である。この結果、1640年の北海道駒ヶ岳津波の堆積物は、噴火湾(既往研究)から苫小牧市まで分布、1611年慶長三陸津波の堆積物は、苫小牧市からむかわ町にかけて分布、十勝地方から釧路地方に分布する津波堆積物は1611年よりは明らかに後年のイベントであることがわかった。

3) 国後島における歴史時代、先史時代の津波堆積物調査

国後島で2015年から2018年まで4年続けて津波堆積物調査を実施した。2018年度は(1)植古丹~ルヨベツ間の約16km区間において約18地点の津波堆積物調査を実施し2015-2017年調査の未調査地点を補完できた(2)薄い火山灰層を丹念に調査し、精密な地層対比が可能であることを明らかにした(3)古釜布~ルヨベツ間の約24km区間の19ヶ所において1994年北海道東方沖地震の津波堆積物候補が分布することを確認した(4)千島海溝の超巨大地震津波に対比される堆積物候補を古釜布湿原南部において発見した。さらに、4年間で採取した火山灰20試料について、火山ガラスの化学組成を調べて起源を明らかにした。国後島の東沸からルヨベツにかけて、北海道の火山起源のKo-c1, Ta-a, Ko-c2, Ta-b, Ma-b, Ta-cの各火山灰が分布している。

4) 巨大津波特有の津波遡上災害のメカニズム解明

これまでに、明らかになった北海道太平洋沖でM9規模の巨大地震が発生した場合の津波による被害の発生過程を解明するために、2011年東北地方太平洋沖地震による津波が北海道太平洋沿岸に被害を及ぼした大きな津波後続波について解析した。特に函館では9時間遅れで最大波が到達し大きな被害となった。その後続波の生成過程を解析したところ函館湾の基本モード(49.6分)が励起されたことが分かった(図3)。さらに、その基本モードは函館港沿岸で波高が特に大きくなることが分かった。周期の長い(49.6分)の基本モードを励起するには震源域の大きなM9クラスの巨大地震である必要があると考えられ、北海道太平洋沖の巨大地震による津波の場合にも励起されると考えられる。つまり函館港近傍では大きな後続波による被害に警戒する必要がある。

低頻度大規模地震の発生場の理解

1) ロシア極東でのGSNN観測による発生場の広域理解

海溝でのプレート間固着を考慮した北東アジアの長期地殻変動場の検討を実施した。海溝でのプレート間固着による大陸内部での変位は、粘性率によっては1cm/yrに及ぶ推定となり、地震時及び地震後の余効変動による変動量を上回る可能性が示された。変位はひずみ速度としては小さいものの、テクトニックブロック程度の空間的広がりをもっており、大陸内部のプレートやブロック運動と応力状態に長期的な影響を与えている可能性がある。

2) 海陸地震観測データ統合処理による速度構造推定

平成30年度には、平成28~29年度に海陸地震観測データの統合処理によって推定された速度構造に関する検討を継続し、以下のことがわかった。

(1) 陸域における日高衝突帯の構造

千島弧の下部地殻と解釈される高速度領域が東から日高山脈に向かって衝上していて、その西側には東北日本弧と思われる低速度領域が接している。

(2) デラミネーション構造

日高山脈直下から1982年浦河沖地震(Ms 6.8)の震源域直下に向かって南西向きに傾斜するデラミネートした千島弧の下部地殻がイメージングされ、その領域が幅約50km、長さ約50kmと推定された。

(3) 島弧-島弧衝突構造の海域への延長部

衝突している島弧地殻と思われる太平洋プレート上面付近まで続く低速度領域が、日高山脈の海側への延長部に当たる襟裳岬の南東側で急になくなることから、海域では島弧-島弧衝突の影響が急速に小さくなっていることが示唆された。

(4) 島弧-島弧衝突によって発生した大地震

1970年の日高山脈南部の地震(M 6.7)は低速度領域と高速度領域の境界で、1982年浦河沖地震はP波速度が8.0 km/sより高速度の領域の西端でそれぞれ発生している、Kita et al.(2012)と同様に物質境界で発生したと考えられる。

(5) 2003年十勝沖地震(M 8.0)

2003年十勝沖地震の本震時にすべりの大きかった領域(アスペリティ)の上盤側では、P波速度が高速度で高 V_p/V_s 比になっており、Machida et al.(2009)と調和的で斑れい岩中に水の存在を示唆する。

プレート境界状態のモニタリング手法開発

巨大地震発生前の静穏化による予測の有効性を確認するため、パラメータの最適値を探索するための学習期間と得られたパラメータに固定して予測を試みる検証期間に分割し、検証期間の予測成績を統計的に評価した。1985年～2010年の地震活動データを利用し、Trail?は学習期間を1985年～1995年に設定し最適パラメータ(静穏期間(T_q)・解析時間間隔(T_a)・解析距離(R))を推定し、予測期間1995年～2010年で予測を実施しその成績を示す(図4上)。Trail?は学習期間と予測期間を逆転、Trail?は全てを学習期間とした(図4)。いずれの場合も確率利得は2以上となり、予測手法の有効性を示した。

5年間の成果

低頻度大規模地震の履歴・発生様式の解明

国後島を含む北海道沿岸での詳細な津波堆積物調査を実施し、それらの広域対比により、これまで分離が難しいとされてきた、北海道沖17世紀巨大津波、1640年駒ヶ岳噴火津波、1611年慶長三陸津波が違うイベントとして認識可能であることを示した。また、17世紀巨大津波後の地殻変動や12世紀巨大津波後の地殻変動も捉えることに成功した。

歴史津波記録を再現することで1611年慶長三陸津波が東北沖で発生し、2011年東北地方太平洋沖地震の破壊域の北側を大きく破壊したことを明らかにした。これは上記津波堆積物調査結果とも整合的だ。さらに、これら大規模地震に特有な津波災害メカニズムを函館湾の津波励起として明らかにした。

低頻度大規模地震の発生場の理解

1) ロシア極東でのGSNN観測による発生場の広域理解

低頻度な海溝型巨大地震の広域テクトニクスの影響を検討した。ロシア極東や中国東北部のGNSS観測データにおいて、2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動を用いたマントルの粘性率が1018Pa s程度と推定されるとともに、観測データの説明にはより複雑な粘性構造の仮定が必要なことが明らかになった。観測点によっては余効変動量が地震時変動の2倍を超えており、海溝で発生する巨大地震の影響が長期広域にわたることが観測データから実証された。また、海溝でのプレート間固着による地殻変動が大陸内部まで及んでいる可能性が示唆され、アジア北東地域のプレート運動や応力場に海溝での地震サイクルが大きな影響を与えていることが示された。

2) 根室沖での海底地震観測から得られた地震活動

平成20年11月から平成24年5月まで根室沖で実施された海底地震観測から、1973年根室半島沖地震(M 7.4)のアスペリティでは地震活動が静穏であり、プレート間固着が続いていることがわかった。

3) 釧路沖における海底地下構造探査の実施

平成27年9月に釧路沖で地下構造探査を実施したが、台風17号接近のため計画通りにデータが取得できなかった。

4) 海陸地震観測データ統合処理による速度構造推定

平成11～13年に北海道・日高山脈周辺で行われた大学合同の陸上稠密地震観測と、平成11年と平成12年に北海道南方沖で気象庁と共同で行われた海底地震観測のデータを、地震波トモグラフィ法で再解析することによって、日高衝突帯からその海域延長部に到る領域のP波およびS波速度構造を推定した。

プレート境界状態のモニタリング手法開発

現計画前半では、1990年以降に全世界で発生したM 8以上の地震を詳しく調査し、発生前に10年間程度の地震活動の静穏化が全ての地震で見られることを示した。この事実に基づき、現計画後半では、地震活動の静穏化を用いて、カムチャツカから小笠原に至る海溝沿いで過去に発生したMw7.5以上の

地震の retrospective 長期予測を試行し，ランダムに予測した場合よりも有意に良い結果が得られることを示した．さらに，今年度は，パラメータの最適値を探索するための学習期間と得られたパラメータに固定して予測を試みる検証期間に分割し，検証期間の予測成績を統計的に評価した．

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので，平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Chiba, T., Nishimura, Y., and Otsuka T., 2018, Fossil diatom assemblages during the last millennium in the Toveri River mouth area, Hokkaido, Japan. *Diatom*, 34, 8029.

Tanioka, Y., M. Shibata, A. Gusman, Y. Yamanaka, and K. Ioki, Generation Mechanism of Large Later Phases of the 2011 Tohoku-oki Tsunami Causing Disaster at Hakodate, Hokkaido, Japan, *Prog. Earth. Plant. Sci.*, revised.

M. Shibata, Y. Tanioka, A. Gusman, and Y. Yamanaka, Tsunami Simulation of Large Later Phases Observed along the Coast of Hokkaido Generated by the 2011 Tohoku Earthquake, 2018 AOGS meeting, 03-08 June 2018.

Tanioka, Y., M. Shibata, A. Gusman, and Y. Yamanaka, Generation Mechanism of Large Later Tsunami Phases : A case study of the 2011 Tohoku-oki tsunami in Hokkaido, 10th ACES International Workshop, 25-28 September, 2018

Ito C., N. Vasilenko, A. Prytkov, H. Takahashi, M. Ohzono, Convergence velocity between Amurian plate and north American plate estimated by GNSS at southern Sakhalin, Russia and northern Hokkaido, Japan, 10th Biennial workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes (JKASP-2018). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, August 20-26, 90, 2018.

Ito C., N. Vasilenko, A. Prytkov, H. Takahashi and M. Ohzono, Convergence velocity between Amurian plate and north American plate estimated by GNSS at northern part of Hokkaido, Japan, International Conference for the Decade Memory of the Wenchuan earthquake, Chengdu, China, May 12-14, 2018.

Ohzono M., Takahashi H., Shestakov N.V., Meng G., Gerasimenko M.D., THE EFFECT OF POSTSEISMIC RELAXATION INDUCED BY LARGE EARTHQUAKES AROUND NORTHEASTERN ASIA, 10th Biennial workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes (JKASP-2018). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, August 20-26, 177, 2018.

Ohzono M., H. Takahashi, N. Shestakov, G. Meng and M. Gerasimenko, The effect of large postseismic relaxation around northeast Asia, International Conference for the Decade Memory of the Wenchuan earthquake, Chengdu, China, May 12-14, 2018.

Takahashi H., Ohzono M., Ito C., Shestakov N., Gerasimenko M., Vasilenko N., Prytkov A., Meng G., REGIONAL LONG TERM CRUSTAL DEFORMATION CHARACTERISTICS IN NORTHEAST ASIA CONTINENT DUE TO GREAT EARTHQUAKES AND INTERSEISMIC COUPLING ALONG NORTHWESTERN PACIFIC SUBDUCTION ZONES, 10th Biennial workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes (JKASP-2018). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, August 20-26, 26, 2018.

Takahashi H., M. Ohzono, C. Ito, N. Shestakov, M. Gerasimenko, N. Vasilenko, A. Prytkov, Impact on continental deformation field in NE Asia due to subduction great earthquakes, International Conference for the Decade Memory of the Wenchuan earthquake, Chengdu, China, May 12-14, 2018.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

千島海溝南部で津波堆積物調査を引き続き実施し、古地震・古津波に関するデータを取得する。関連課題と協力し、十勝根室沖に海底地殻変動観測を実施するための海底基準局を設置する。また、当該地域における地震活動の時空間特性の調査を継続する。千島海溝南部で発生する巨大地震による強震動予測を行うための調査を実施する。海陸観測データを用いた即時津波予測手法の高度化を継続する。研究成果を社会で活用するための活動を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

谷岡勇市郎・高橋浩晃・村井芳夫・勝俣啓・西村裕一・大園真子・椎名高裕・千葉崇
(北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センター)

他機関との共同研究の有無 : 有

篠原雅尚・望月公廣(東京大学地震研究所)・日野亮太・東龍介(東北大学)・山田卓司(茨城大学)・
海洋研究開発機構(3 名)・ロシアサハリン海洋地球物理研究所(3 名)・ウラジオストックロシア極
東大学(2 名)・ハバロフスク地球物理研究所(2 名)

参加機関 東京大学地震研究所、東北大学、茨城大学、海洋研究開発機構、ロシアサハリン海洋地
球物理研究所、ウラジオストックロシア極東大学、ハバロフスク地球物理研究所

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

電話 : 011-706-3591

e-mail : isv-web@mail.sci.hokudai.ac.jp

URL : <http://www.sci.hokudai.ac.jp/grp/isv/isv-web/>

(13) この研究課題(または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 谷岡勇市郎

所属 : 北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センター

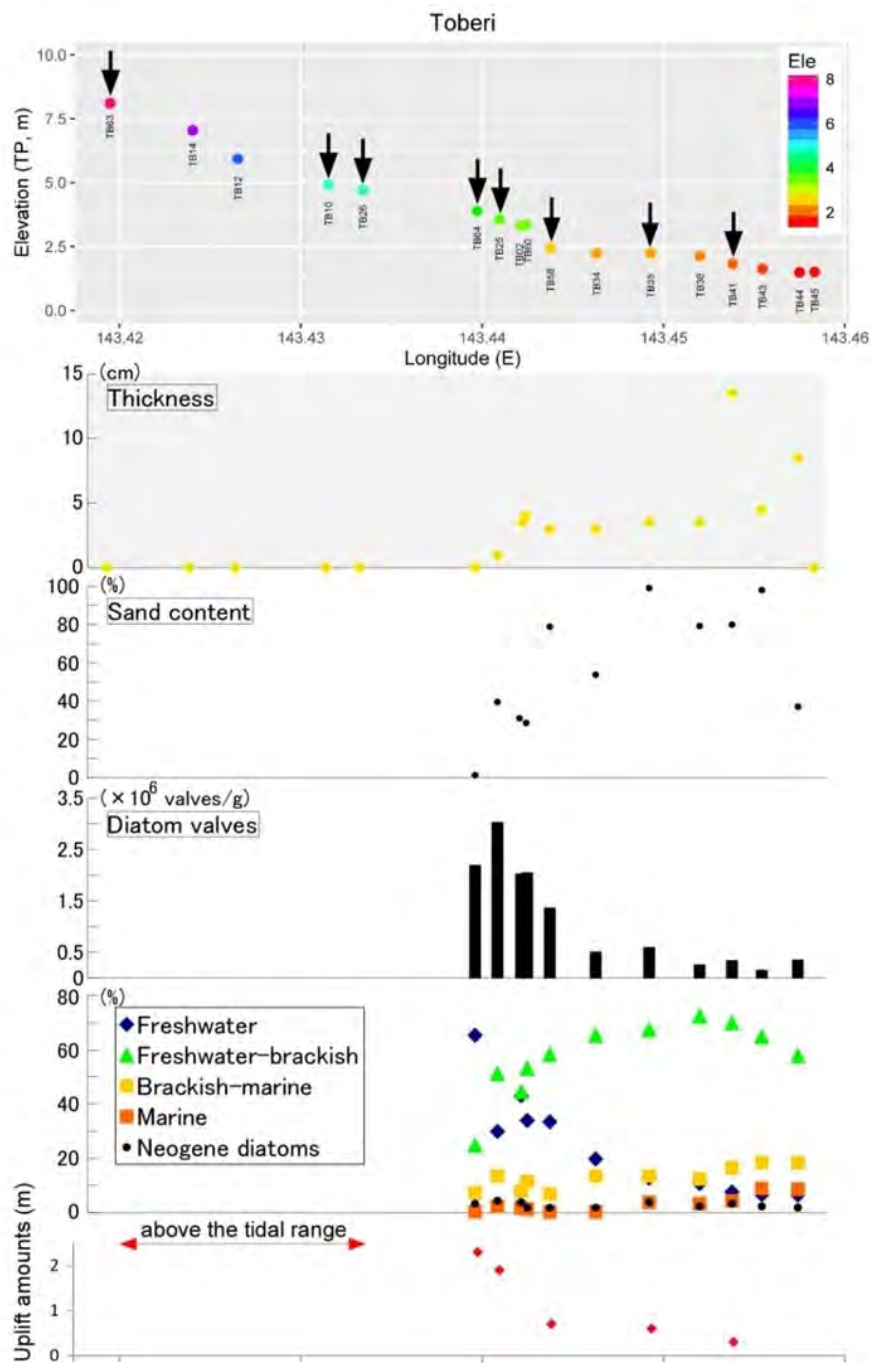


図 1

掘削地点ごとの 17 世紀津波堆積物の層厚，含砂率，珪藻含有率，珪藻種組成及び 17 世紀地震によると思われる地震後地殻変動量（最下段）．図の左が内陸．

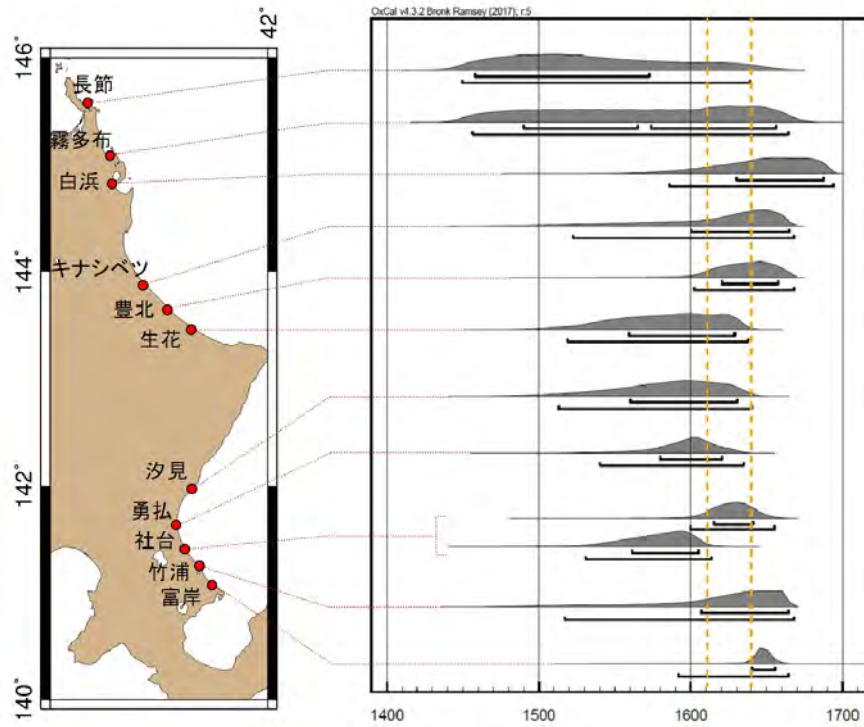


図 2
17 世紀津波堆積物の年代推定結果．右図の点線は西暦 1611 年，1640 年の位置を示す．

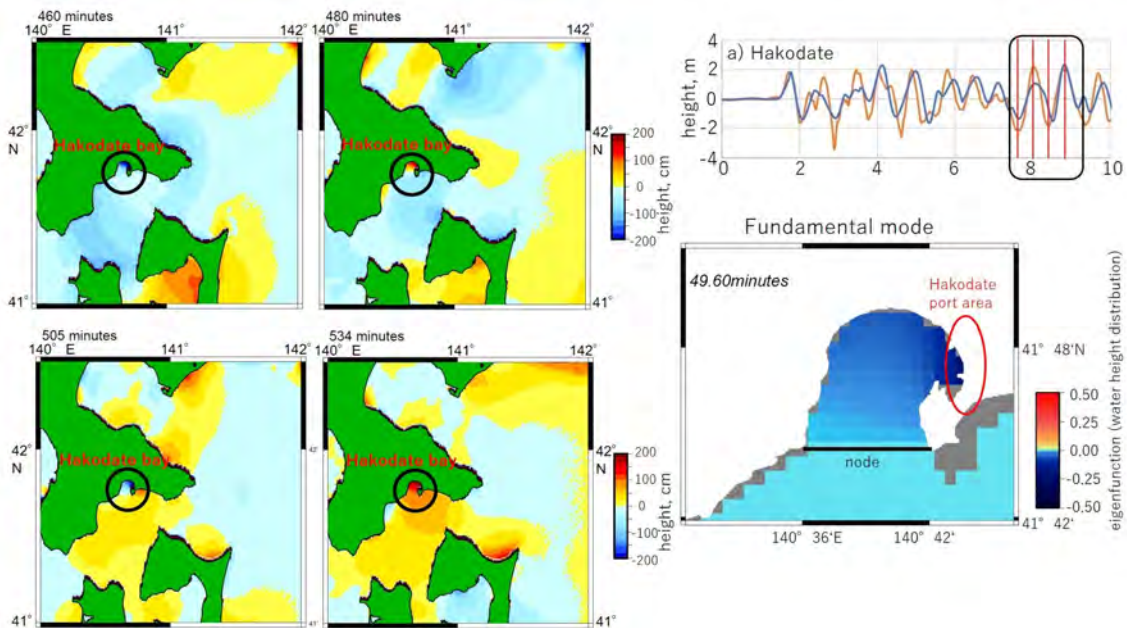


図 3
2011 年東北沖巨大地震で励起された函館での後続波の解析結果。左) 函館周辺での津波スナップショット (地震発生後 460 分、480 分、505 分、534 分)、右上) 函館での観測津波波形 (青) と計算津波波形 (橙)、右下) 函館湾の基本モード (周期 49.6 分)

Summary of trials

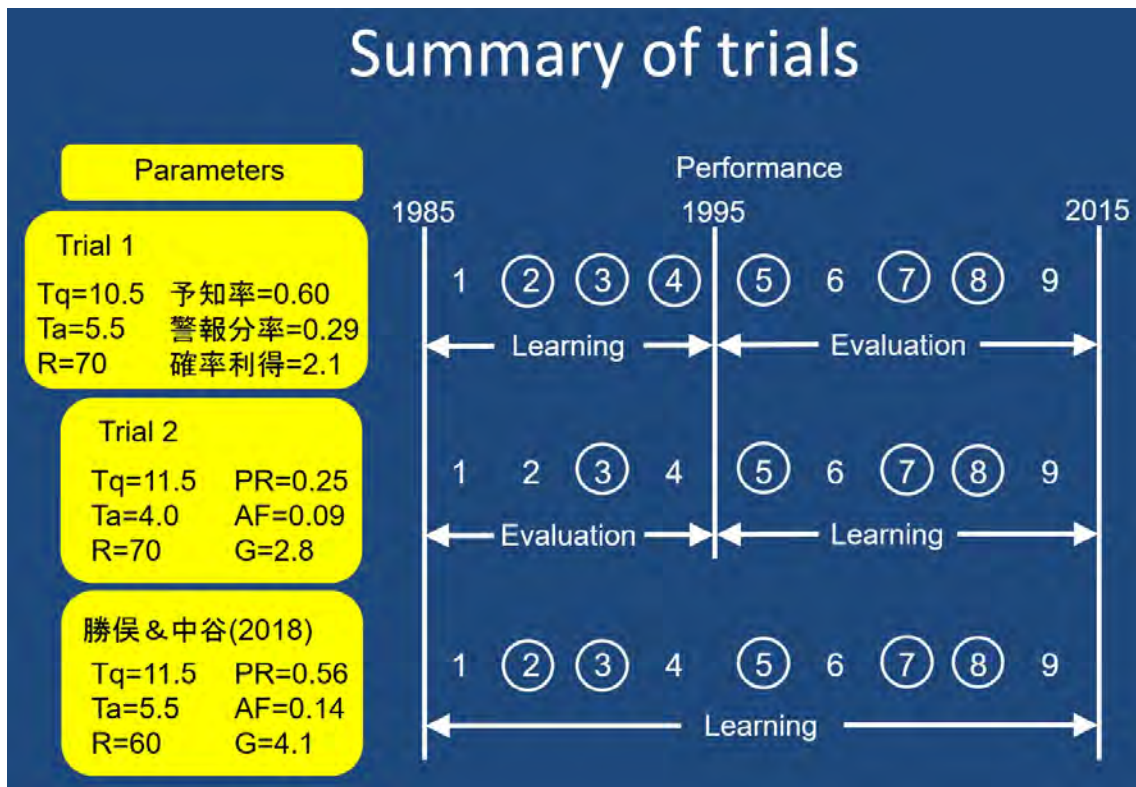


図 4

巨大地震発生前の静穏化の予測評価実験の結果。静穏化抽出パラメータ（静穏期間（ Tq ）・解析時間間隔（ Ta ）・解析距離（ R ））。

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

多項目観測に基づく火山熱水系の構造の時空間変化の把握と異常現象の検知

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

熱水系の卓越した火山では、本格的なマグマ噴火の前に、水蒸気噴火や小規模なマグマ水蒸気噴火が前駆することが多い。また、マグマ噴火に至らないまま一連の活動が終息してしまうことも少なくない。こうした水蒸気噴火や小規模マグマ水蒸気噴火は、マグマ噴火とは異なり、明瞭な先行現象に乏しく予知の難易度が高いとされている。その一方で、この種の噴火は発生頻度がマグマ噴火よりも高く、社会への影響は必ずしも小さくはない。現状では、水蒸気噴火や小規模なマグマ水蒸気噴火を実用レベルで予知することは現実的ではなく、この種の噴火の準備過程に関連する先行現象の事例をできるだけ多く集めて、現象の理解を深めるべき段階にある。この背景をふまえ、本研究課題では、熱水系の卓越する火山として十勝岳・吾妻山・草津白根山・阿蘇山・口永良部島を比較研究の対象として選定し、以下の 1～4 の目標を掲げて比較研究を実施する。

1. 水蒸気噴火に先行する異常現象の検知能力を高めて観測事例を増やす。

2. 比較研究を通じて現象の類似性や法則性を抽出することで、そのからくりの理解を深める。とりわけ、これまで個々の事例研究に基づいて提案されてきた、火道浅部の「熱水だまり」あるいは「蒸気だまり」等の概念モデルの実態を解明したい。

3. 理解が進んだ部分については、観測データを火山活動の現況評価に役立てるための道筋を着けることを目指す。

4. マグマ水蒸気噴火やマグマ噴火へと現象が発展する際、もしくは噴火が終息に向かう際に、観測量にどのような変化が表れるかを整理し、噴火シナリオ高度化に貢献する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

上記5火山では、マグマ活動を示唆する深部・広域の地盤変動に乏しく、噴気活動や地熱異常とその消長が見られ、火口近傍に顕著な磁場変化や地盤変動が観測されるのが共通した特徴である。また、微小地震の群発や低周波の火山性微動など、熱水系の関与を示唆する活動が見られる火山もある。こうした特徴的な現象を的確に定量化・モデル化するため、本研究課題では、活動火口域の周辺で、地盤変動、地震、磁場のモニタリング観測を共通手法として用いる(a~c)。これに加えて、可能な範囲で噴気・地熱放熱率、揮発性成分の時間推移を観測する(d,e)。また、過去の熱水系関与型噴火の地質・物質科学的調査・分析(f)により、噴火履歴および噴火推移に関する研究を行い、観測記録にもとづく先行現象との関連を議論する。必要に応じて、既存の資料・観測データの参照や再解析も行う。整備が必要な観測系はH26-27に設置作業を行う。

(a) 地盤変動観測： 熱水系の増減圧過程の時空間分布推定

- ・十勝岳・吾妻山・口永良部島に孔中傾斜計を新規に設置し、連続観測を実施
- ・草津白根山・阿蘇山では既存の観測設備を活用

(b) 地震観測： 熱水系が関与する地動特性の把握

- ・広帯域地震計観測に基づく泥噴出や水蒸気噴火などの噴出現象の定量モデル化
- ・地震波干渉法・RF解析による速度構造の推定と時間変化の検出(内陸課題との連携)

(c) 電磁気観測： 熱水系またはその近傍での蓄放熱およびその時間変化の推定

- ・5火山にテレメータ型プロトン磁力計を設置し、連続観測を実施
- ・磁場変化と放熱率変化の組み合わせによる火道浅部の熱輸送過程の推定

(d) 放熱率観測： 熱水系を通じた熱放出の定量的把握

- 主として東工大の別課題にて実施し本課題と連携
- ・空中熱赤外観測による地表放熱率とその経時変化の推定
- ・噴気画像解析による噴気放熱率の推定

(e) 揮発性成分観測： 熱水系へのマグマ揮発性成分の供給に関する知見

- ・非噴火時の火山ガスの特性把握とその起源の推定
- ・熱水系から湧出する液相の特性把握

(f) 地質調査と噴出物分析： 熱水系由来噴火の履歴解明と監視観測への示唆

- ・十勝岳(H26-28) 熱水系由来噴出物と熱水変質帯の地質調査と分析
- ・吾妻山(H26-30) カルデラ形成以後の噴火活動史の高分解能復元
- ・阿蘇山(H27-29) 完新世テフラ層序調査と年代測定
- ・草津白根山(H26-30) 公募研究枠で実施・本課題と連携予定

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要：

8?1. H30年度の成果

サブグループ1(地震・地盤変動)

十勝岳・吾妻山・草津白根山・阿蘇山・口永良部島で地震・地盤変動観測を継続した。5カ年の総括は後述。本研究計画などにより火口近傍観測網が強化された十勝岳・吾妻山・草津白根山では、微動・地震・傾斜・基線長変化等の地動イベントが続々と検出された。現象の詳細と解釈については随時各機関から噴火予知連資料等で報告した【北大・東北大・東工大・京大】。

国内の主要な火山について、気象庁配信の地震計データを用いた地震波干渉法を適用し、地震波速度の日々変化の半自動解析を継続した。これまでの解析では、熱水系卓越型の火山では火山活動との対応が明瞭ではなかったが、今年度の解析で、吾妻山では火山性の歪変化に対応する地震波速度変化を検出した。5年間の総括は後述【東北大】。

サブグループ 2 (電磁気・熱・化学)

十勝岳・吾妻山・草津白根山・阿蘇山・口永良部島で全磁力観測を継続した【北大・東北大・東工大・京大】。本計画の別課題と協力して、草津白根山で無人ヘリを用いた空中磁気測量を 2018 年 6 月と 10 月に実施した。今回は標高 2800m まで飛行可能な後継機体 FAZER G-2 を初めて使用することで、2000m を越える草津白根山でも測量飛行を実施できた。得られたデータを 2014 年に国土交通省が実施した実機による測量と比較することで経時変化を求めた。湯釜火口北東域では消磁パターンが認められた。2018 年 1 月の本白根噴火の火口域でも変化が見られたが噴火による地形変化である可能性が高い【東工大・東大】。

霧島硫黄山周辺で広帯域 MT 探査を実施し比抵抗構造を推定し、2018 年 4 月 19 日の小規模水蒸気噴火との関係を考察した (Tsukamoto et al., 2018)。硫黄山で継続している MT 連続観測からは、2017 年 10 月末ごろから 2018 年 1 月上旬にかけて浅部低比抵抗層の一部が高比抵抗化したことを示唆するインダクションベクトルの方向変化が得られた。水蒸気噴火発生直前 (5 分前) には電磁場変動が観測され、その変化は火口近傍の傾斜計の波形と極めて類似していることが分かった【九大】。

十勝岳望岳台に紫外分光カメラを設置して夏期限定の連続観測を試みた。また、トラバース法による二酸化硫黄フラックス観測を 3 回行った (うち 1 回はドローンによる観測)【東大・北大】。草津白根山で噴火ガスおよび湯釜湖水の採取分析を継続し、化学組成変化の観点から長期的な活動評価を行った。詳細は総括欄で後述【東工大】。

サブグループ 3 (地質・岩石・鉱物)

ニセコ火山群の最新活動であり現在も熱水活動が活発なイワオヌプリ山体およびニトヌプリ山体において野外調査および本質物の岩石学的検討を実施した。本研究で明らかになった山体形成史と噴火様式の詳細は次の通りである (1) 爆発的マグマ噴火による小イワオヌプリ火口の形成 (約 9500 年前) (2) 小イワオヌプリ溶岩ドームの形成 (3) 活動中心の東方移動 (大イワオヌプリ山体の形成 : 約 6500 年前) (4) マグマ噴火主体の活動 (約 3000 年前まで) (5) 水蒸気噴火主体の活動 (現在まで)。これらの活動履歴を考えると、イワオヌプリ火山体での活動監視および火山防災対応を検討する必要があると考えられる【北大】。

北海道中央部、旭岳の完新世の活動について、水蒸気噴火の履歴と噴火様式との関係に注目して野外調査を行った。旭岳では、約 5000 年前以降は水蒸気噴火が主体であったこと、約 2800 年前には水蒸気噴火に伴う山体崩壊が発生し爆裂火口が形成されたこと、約 700 年前に小規模な水蒸気噴火が北西山麓で発生したことを明らかにした。2800 年前の噴火については噴火推移も復元した。現在、山腹で噴気活動が認められるが、そこでの噴火発生頻度は極めて低いことも示した (石毛・他, 2018)【北大】。

熱水系の特徴を岩石学的に評価するため、十勝岳の 3.7ka, 4.7ka 火砕流堆積物および 1926 年噴出物について変質物の分析をさらに進め、マグマ貫入と強酸性変質が頻繁に繰り返されていることを解明した。結果は論文として公表した (井村・他, 印刷中)。また、吾妻山については、吾妻小富士形成以後の浄土平における一連の火山活動による水蒸気噴火の噴出物の調査を行い、その火山灰組成の変化を追跡した。過去 4000 年以内の活動では、大穴火口形成噴火 (AD1331 頃) を境に、熱水系の状態が大きく変化したことを明らかにした。成果は学会で公表した【秋田大】。

水蒸気噴火履歴の解明のため、栗駒山の 1744 年および 1944 年水蒸気噴火堆積物の粒度分析を行った。異なる地点での水蒸気噴火堆積物の同定において、粒度特性が有用な基礎情報となり得ることを示した【茨城大】。

8?2. H26-30 年度の総括

本課題では、多項目観測・調査・分析を通じて熱水系卓越型の火山活動の比較研究に取り組んだ。研究手法が多岐にわたるため、3 つのサブグループ (SG1: 地震・地盤変動, SG2: 電磁気・熱・ガス, SG3: 地質・岩石・物質科学) 体制で実施する一方、成果や関連資料を共有するために本課題専用の

wiki を作成し、分担者間の連携を図った。当初、主な研究対象として選定した十勝岳・吾妻山・草津白根山・阿蘇山・口永良部島の 5 火山は、いずれも計画期間中に噴火または活発化した。このため 5 力年の途中で一部の計画を修正し、類似性の高い他の火山も適宜調査対象に加えながら実施した。本課題の 5 年間を総括すると、熱水系卓越型の火山活動という切り口で、地球物理・地球化学・地質学岩石学分野が協力して研究するという貴重な場となった。まず、水蒸気噴火とそれに類する噴火様式の再整理を通じて、噴火発生場や発生機構に意識を向けることができた。また、鉱物学における熱水系の描像を観測系の研究者が共有できた。モニタリング観測に基づく異常現象検知力の底上げは着実に成し遂げられた。これまで不十分であった火山間の比較研究も一定の進展を見た。噴火に伴う入域規制やマンパワー不足等により十分達成できなかった項目もあるが、当初の目標とした 4 項目に対応する成果について以下順にまとめる。

成果 1：火口近傍多項目観測網の充実

本研究課題で主な対象とした 5 火山については、本研究課題や文科省補正予算等により、火口近傍の多項目観測の強化を進めることができた。御嶽山 2014 年 (H26) 噴火を受けて気象庁の観測網も強化されたため、水蒸気噴火に先行する異常現象の検知能力は 5 年前と比較して確実に向上した。特に、十勝岳・吾妻山・草津白根山では、本計画期間中に火山活動が活発化したこともあり、これまでの観測網では見えなかった微小な地動イベントが検知できるようになり、多点データに基づく変動源パラメータの推定が可能になるなどの効果も表れている。一方、当初から火口近傍の多項目観測の体制が敷かれていた阿蘇山及び口永良部島では、いずれも 2014 年の噴火に至るまでの過程を多項目観測に基づいて詳細に記録することができた。

成果 2：比較研究を通じた類似性の抽出

噴火時の地動

計画期間中にデータを取得した口永良部島 (2014.8.3)・御嶽山 (2014.9.27)・阿蘇山 (2015.9.14)・草津本白根 (2018.1.23) について、噴火時の地動データを比較した。これらはいずれも水蒸気噴火またはマグマ水蒸気噴火と考えられている。阿蘇山を除く 3 イベントで、噴火開始時に火山性微動に同期した傾斜の加速が認められた。ただし、このような加速期は噴火直前の数分から 10 数分である。地動の変化を大まかに見ると、噴火前に地盤が膨張し、噴火開始とともに収縮に転ずるというパターンであるが、観測点が火口にごく近い場合には、火口壁の落ち込みに伴い、噴火直前相が沈降センスになる場合があることがわかった。将来、こうした観測データの特徴が類型化でき、リアルタイムで異常を自動検出できるようになれば、登山者や観光客への注意喚起情報として役立てることが可能かもしれない。

非噴火期の地動イベント

十勝岳・蔵王山・吾妻山・草津白根山 (湯釜) では、非噴火期に傾斜変動を伴う火山性微動がしばしば確認された。ただし、その時定数や極性は火山ごとに異なる。吾妻山・蔵王山・草津白根山 (湯釜) では、数日から数週間にわたる山体膨張を示す傾斜変動が複数回観測された。このうち、吾妻山・蔵王山では傾斜変動に VLP (超長周期振動) を伴うことが多い。十勝岳・吾妻山では数分程度の時定数を持つ火口下がりの傾斜変動が繰り返し観測された。これらは火口浅部の圧力解放を反映していると推測される。今後、空振や噴気量変化等との対応を確認することで、火口からの熱放出量を地動記録から評価できる可能性が出てきた。吾妻山では火山性地震と長周期地震の活動度に相補的な関係が見られた。他の火山でも同様の関係があるかさらに整理する必要がある。

また、阿蘇山・口永良部島では、水準測量や GNSS により、マグマ性の噴火に先行してやや深部 (5 km 以深) での地盤膨張を示唆する変動が捉えられた。吾妻山でも 2014 年に GNSS でやや深部の膨張を示唆する変動が捉えられた。深部の膨張イベントが次の噴火におけるマグマの関与度を判断する根拠となるか否かという視点で、今後さらに事例を収集して検討する必要がある。

非噴火期の継続的・間欠的な消磁

主対象 5 火山で地磁気全磁力を継続的に観測し、一部は連続観測にしてテレメータデータの分担者へ配信した。テレメータされた全磁力データは、地殻変動データベース (crust-db) を流用して、サーバー上で移動平均・差分処理・グラフ化が行えるシステムを構築した。十勝岳・吾妻山・阿蘇山では、活動火口周辺で非噴火期に継続的な消磁が長期間続いたこと、特に十勝岳では局所的な地盤の膨張にほぼ同期して、間欠的に消磁が加速したことが確認できた。この特徴は、口永良部島で 2014 年噴火の 10 年以上前から観測されていた現象とよく似ており、浅部に熱水系をもつ火山の噴火準備過程に共通するものである可能性が示された。

計画期間中に噴火した口永良部島と草津白根山では、別課題と連携して空中磁気測量を実施した。無人ヘリ技術の進歩に伴い、高高度の火山や立入規制区域外からでも、空中調査の反復による時間変化検出が可能になったことの意義は大きい。噴火に伴う地形変化や、噴火堆積物の磁化による影響を正確に評価することにはまだ課題が残る。

比抵抗構造とその時間変化

本研究計画のみによる成果ではないが、近年の電磁気探査により、火山の内部構造の 3 次元イメージングがこの 5 年間で進展した (e.g., Hata et al., 2018a,b; Seki et al., 2019; Tsukamoto et al., 2018; Yoshimura et al., 2018)。本研究課題では、十勝岳・吾妻山・霧島硫黄山で既存の探査データの再解析や、新規観測を実施した。特に、霧島硫黄山では、火口周辺域の浅部比抵抗構造と、震源分布・地盤変動源との位置関係に着目し、温度・圧力状態の整合性も検討した。難透水粘土層に対応すると考えられる低比抵抗層の下部では、熱水だまりの増圧による地盤膨張と微小地震が起こっており、低比抵抗層の上面付近では、難透水層を突き抜けた熱水が相変化し、地表付近のごく局所的な地盤膨張を引き起こしていたとする解釈が示された (Tsukamoto et al., 2018)。こうした描像は、口永良部島で噴火前に報告されていた事例 (Kanda et al., 2010) とも調和的であり、火山の浅部熱水系で噴火前に起こる現象が、水理的な構造に強く規定されることを示唆している。さらに、霧島硫黄山では MT 法のモニタリング観測によって、噴火に先行する比抵抗変化も捉えられた。吾妻山では、入域規制の関係上、火口域周辺の浅部構造ではなく、やや深部広域の探査に取り組み、安達太良山も含めたマグマ供給系に関する構造を明らかにすることができた。

熱モニタリング

主対象とした 5 火山のうち、火口湖を有する草津湯釜火口と阿蘇山の湯だまりを対比させる形で、過去の観測データと熱・水収支の数値モデルに基づいて、火口湖が維持される条件や火山活動に伴って想定される火口湖の挙動を考察した (Terada and Hashimoto, 2017)。その他の火山に対する比較研究は十分できたとはいえないが、十勝岳においては、噴煙遠望画像による放熱率解析を行い、2015 年頃から噴気放熱率がやや増大していることを明らかにした。その過程で、将来の自動解析に役立つ可能性のある噴気画像処理ソフトを開発した (Hashimoto et al., 2018)。また、草津白根山および吾妻山において、軽飛行機による空中熱赤外観測を実施した。特に、草津白根山では別予算で導入したドローンも活用して空中熱赤外観測を繰り返し、湯釜火口の熱的モニタリングだけでなく、本白根新火口域での噴火前後の熱異常の確認にも貢献した。

変質鉱物組み合わせの解析による水蒸気噴火の比較

鉱床学分野で広く認知されている斑岩銅鉛床モデルを火山の熱水系に適用することで、噴出物中の変質鉱物の組み合わせから、噴火前の地下での環境を推定した。本研究課題では、御嶽山 2014 年噴火、十勝岳の北西火口群噴出物 (3.7ka, 4.7ka, 1926 年) および吾妻山の過去 4000 年間の水蒸気噴火堆積物を解析対象とした。その結果、御嶽山 2014 年では斑岩銅鉛床型の安定した熱水系が発達し、その熱水系が水蒸気噴火の源になっていたことを明らかにした (Minami et al., 2016)。一方で、十勝岳の北西火口群では、御嶽山とは異なり、熱水系ではマグマ貫入と強酸性変質が繰り返されている可能性を指摘した (井村・他, 印刷中)。さらに、十勝岳と類似した活動履歴を持つ吾妻山では、マグマ貫入を伴う大穴火口噴火を境に、熱水系の状態が御嶽山型から十勝岳型へと変化したことを明らかにした。このように、変質物の解析は、水蒸気噴火の源となる熱水系の過去および現在の環境を推定する上で重要な情報を与える。今後は、他の火山での事例研究を進めていくことと、地球物理学のおよび地球

化学的観測結果との関係を議論することが必要である。

水蒸気噴火履歴の調査

水蒸気噴火などの熱水系卓越型噴火の履歴が詳細に解明されている火山は現状では多くない。しかし、特に噴火の発生頻度を知ることは長期的な活動評価や噴火事象系統樹の作成において不可欠である。このため、本研究課題では堆積物が比較的豊富な火山を対象として、地質学・岩石学的手法により集中的な調査と分析に取り組んだ。5カ年で対象とした火山は、十勝岳、旭岳、ニセコ、吾妻山、栗駒山である。ニセコおよび旭岳では、マグマ噴火を主体とする活動から水蒸気噴火を主体とする活動への変化が認められ、最近の1000~2000年間ではマグマ貫入の痕跡はないことを示した。十勝岳では、マグマ噴火主体の火口群（北西山腹火口群）とは別に、これまで詳細に調査されていなかったヌッカクシ火口での水蒸気噴火の履歴を解明した。そして両者が少なくとも3000年間、連動して噴火活動を継続していることを明らかにした。吾妻山では、吾妻小富士形成期の活動を中心に、噴火様式と化学組成の時間的推移にも注目しながら噴火履歴を明らかにした。特に、十勝岳の噴火履歴の解明は、別課題での噴火事象系統樹の作成において、事象分岐の確率を付与することに貢献した。

化学モニタリング

本課題では、多項目による比較研究の手法として火山ガスや火口湖水の化学的測定も視野に入れていたが、対象火山の中であらかじめモニタリング体制が整備されていたのは草津白根山のみであり、火山間の十分な比較まではできなかった。草津白根山については高時間分解能で継続的な化学モニタリングを行ったので、成果4に詳述する。以下は、比較研究を目指して実施した本課題での取り組みである。

今期の5カ年で大きく改善されたモニタリング手法のひとつが、小型紫外分光装置による火山ガス中のマグマ性揮発成分である二酸化硫黄フラックスの測定である。本課題では、計画別課題で開発・改良された自動紫外分光装置（SO₂カメラ）を十勝岳に設置し、夏期限定での固定点連続モニタリングを試みた。結果的に、この手法は現在の十勝岳の噴煙に対しては有効でないことがわかったが、合わせて実施したトラバース測定（山麓では自動車、火口付近ではドローンを利用）により、少ない測定数ではあるが二酸化硫黄フラックスを求めることができた。気象庁の観測結果とも合わせることで、十勝岳では噴煙による二酸化硫黄放出率が2015年頃から顕著に増加したことを明らかにした。本課題では、火山ガス中の成分比を、湿式分析によらず簡易的に測定する方法の考案にも取り組んだ。比較的安価なロガー機能付きガス濃度計と温湿度計を、火口周辺に漂う噴気に晒すことにより、簡易的なMulti-GAS測定としてCO₂、H₂S、SO₂、H₂Oの比を求める方法を十勝岳で試みた（岡本修論, 2017）。この方法であれば、化学分析の専門的技術を持たない研究者や現業者でも測定が可能であるため、測定頻度を上げることに貢献できる。

成果3：観測データを火山活動の現況評価に役立てるための取り組み

本課題の5カ年の研究を通じて、一見静穏に見える非噴火時にも、各種の観測量に顕著な経年的変動が多くの火山で見られることが、これまで以上に明確になった。熱水系卓越型の火山活動のみに限定されることではないが、今後、こうした経年的な変動を火山活動の定量的評価にどのように活用していくかが次の課題として浮かび上がってきた。マグマ性の噴火イベントについて行われているように、多項目の観測を比較することは、長い非噴火期においても現象の理解を深めるために有効な方法である。ひとつの事例として、樽前山における多項目データを同一の時間軸で比較し、最近20年程度の活動推移について考察した（橋本・他, 2018）。また、複数の火山について非噴火期のunrestイベントを多数収集し変動源の特徴を整理することで、個々のunrestイベントの重篤性を評価する方法を仮説に基づいて提案した（橋本・他, 査読中）。本課題で得られた新たな観測・調査データや知見は、次期計画の重点目標である「火山活動推移モデルの構築」へと発展させていくことができると考える。

成果4：噴火シナリオ高度化に資するモニタリング手法の検討

ここでは、本課題で実施した各種モニタリングのうち、以下の2項目についてやや詳しく述べる。

長期の地震波速度変化

2012-18年の7年間の気象庁観測点の地震波記録を用いて、国内の火山に地震波干渉法を適用し、日々の地震波速度変化を調べた。多くの火山で年周期や数ヶ月周期の変動が見られ、地震波速度変化の標準偏差は0.2%程度であった。吾妻山では、火山性の歪変化に伴うと考えられる地震波速度の長期的変動が検出された。観測期間中に噴火が発生した御嶽山・口永良部島・阿蘇山・箱根山についても検討したが、少なくとも火口から数km以上離れた地震観測網では、噴火直前直後の有意な速度変化は検出できなかった。本研究により、日々の地震波速度変化を求める半自動処理プラットフォームが構築できたことで、非噴火時の常時観測データも火山活動の評価に役立てることが可能になった。今後は、火口に近い臨時観測点のデータも用いるとともに、季節変動などのノイズ源を除去するなどして、微小な地震波速度変化も検出できるよう解析方法を向上させることが課題である。

化学モニタリング

マグマの寄与が高まるにつれて、二酸化硫黄フラックスが顕著に増大することが、口永良部島や阿蘇山の噴火事例から改めて確認された。本研究でも取り組んだ紫外分光装置による遠隔モニタリングは、昼間しか測定できないことや気象条件に大きく影響されるという欠点があるものの、噴火で観測の連続性が失われるリスクは低く、水蒸気噴火からマグマ噴火への発展を判断するモニタリングツールとして有用性が高い。熱水系の関与が高い火山においても、非噴火時から定期的に二酸化硫黄フラックスを測定しておくことが重要といえる。

上述の遠隔測定は簡便であるが、詳細な組成分析は試料採取と室内分析に依らねばならない。本課題では、長期間にわたる化学分析の記録がある草津白根山について、湯釜火口北側噴気地帯の噴気ガスと湯釜火口湖水を繰り返し採取し、継続的に定量分析を行った。また、東工大草津白根火山観測所が保管している過去の湖水についても再分析を行った。地震活動を伴う火山活動の活発化期には、噴気ガス中の硫化水素濃度が低下することが、1982年～1983年および1989年～1991年の活動で知られているが、本研究は、2000年以降、噴気ガス中の硫化水素濃度が短い周期で低下し、これらは高温のマグマに由来する湯釜湖水中のフッ化物イオン、塩化物イオン濃度の上昇を伴っていたことを明らかにした。これは、マグマからの火山性流体が湯釜付近へ頻繁に供給されていたことを意味する。湯釜直下に想定される熱水貯留層で硫酸化物系イオンが生成し、その際に硫化水素が消費されるために噴気ガス中の硫化水素濃度が著しく低下するものと考えた。顕著な地震活動や地盤変動を伴わないレベルの活発化でも、北側噴気の硫化水素濃度変化は火山活動を捉えており、先行物質として火山活動をモニターする上で有効な指標である。一方、湖水中の硫酸イオン濃度の変化も認められたが、顕著ではない場合もあった。

- (9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
Hashimoto T., A. Terada and R. Tanaka, 2018, Volcanic smoke reduction in visible and thermal infrared imagery, *Earth Planets Space*, **70**:109, doi:10.1186/s40623-018-0886-5.
Hata, M., M. Uyeshima, Y. Tanaka, T. Hashimoto, N. Oshiman and R. Yoshimura, 2018, Three dimensional electrical resistivity distribution beneath the Beppu-Shimabara graben with a focus on Aso caldera, southwest Japan subduction zone, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **123**, 6397-6410, doi:10.1029/2018JB015506.
Hata, M., N. Matsushima, S. Takakura, M. Utsugi, T. Hashimoto and M. Uyeshima, 2018, Three Dimensional Electrical Resistivity Modeling to Elucidate the Crustal Magma Supply System Beneath Aso Caldera, Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **123**, 6334-6346, doi:10.1029/2018JB015951.
井村 匠・大場 司・中川光弘, 2019, 噴出物中の熱水変質鉱物の特徴：十勝岳火山噴出物の例, *地質学雑誌*, 印刷中.
石毛康介・中川光弘・石塚吉浩, 2018, 北海道中央部、旭岳の形成史：特に完新世、後期水蒸気噴火履歴および噴火様式について. *地質学雑誌*, **124**, 297-310, doi:10.5575/geosoc.2018.0001.
及川輝樹・大場 司・藤縄明彦・佐々木寿, 2018, 水蒸気噴火の地質学的研究, *地質学雑誌*, **124**, 231-250.
Seki, K., T. Ohba, S. Aoyama, Y. Ueno, H. Sumino, W. Kanda, M. Yaguchi and T. Tanbo, 2019, Variations

in thermal state revealed by the geochemistry of fumarolic gases and hot-spring waters of the Tateyama volcanic hydrothermal system, Japan, *Bull. Volcanol.*, **81**:8, doi:10.1007/s00445-018-1264-7.

Tanaka, R., T. Hashimoto, N. Matsushima and T. Ishido, 2018, Contention between supply of hydrothermal fluid and conduit obstruction: inferences from numerical simulations, *Earth Planets Space*, **70**:72, doi: 10.1186/s40623-018-0840-6.

Terada, A., Y. Morita, T. Hashimoto, T. Mori, T. Ohba, M. Yaguchi and W. Kanda, 2018, Water sampling using a drone at Yugama crater lake, Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *Earth Planets Space*, **70**:64, doi: 10.1186/s40623-018-0835-3.

Tsukamoto, K., K. Aizawa, K. Chiba, W. Kanda, M. Uyeshima, T. Koyama, M. Utsugi, K. Seki and T. Kishita, 2018, Three-dimensional resistivity structure of Iwo-yama Volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to shallow seismicity, surface uplift, and a small phreatic eruption, *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 12821-12828, doi:10.1029/2018GL080202.

Yoshimura, R., Y. Ogawa, Y. Yukutake, W. Kanda, S. Komori, H. Hase, T. Goto, R. Honda, M. Harada, T. Yamazaki, M. Kakmo, S. Kawasaki, T. Higa, T. Suzuki, Y. Yasuda, M. Tani and Y. Usui, 2018, Resistivity characterisation of Hakone volcano, Central Japan, by three-dimensional magnetotelluric inversion, *Earth Planets Space*, **70**:66, doi:10.1186/s40623-018-0848-y.

橋本武志・寺田暁彦・森 俊哉, 2018, ドローンによる火山観測, *地理*, **63**, 29-35.

橋本武志・青山 裕・小山 寛・森井敦司・三嶋 ？・荻野 激・高橋 良・岡崎紀俊, 2018, 非噴火時における多項目観測の重要性(樽前山の事例), *月刊地球*, **40**, 163-169.

神田 径・関 香織・木下貴裕, 2019, コンダクタンスを用いた熱水系構造の比較, *Conductivity Anomaly 研究会 2019 年論文集* (印刷中)。

小山崇夫・神田 径・宇津木充・金子隆之・大湊隆雄・渡邊篤志・辻 浩・西本太郎・本多嘉明, 2019, 無人ヘリによる草津白根山空中磁気測量, *Conductivity Anomaly 研究会 2019 年論文集* (印刷中)。

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要:

今期課題の成果をふまえて次期計画で取り組む課題のひとつである「HKD06:電磁気・熱・ガス観測に基づく火山活動推移モデルの構築」についてのみ述べる。新課題では、非噴火期も含めた長期間の多項目モニタリングが重要であるとの認識に立ち、十勝岳・吾妻山・蔵王山・伊豆大島・草津白根山・口永良部島・阿蘇山・焼岳・九重山などで、既存の観測網をベースに、地磁気・比抵抗・熱・ガス観測に取り組む。ドローンによる空中磁気測量を阿蘇山または九重山で実施する。京都大学代表の課題と協力して、年度毎に対象火山を設定して、観測データに基づく活動評価を行う(31年度は十勝岳)。そのための研究会合を他の課題と合同で開催する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

北海道大学大学院理学研究院	橋本武志・青山 裕・茂木 透・中川光弘
東北大学大学院理学研究科	西村太志・豊国源知・市來雅啓
東京工業大学火山流体研究センター	野上健治・神田 径・寺田暁彦・小川康雄
東京大学地震研究所	小山崇夫・青木陽介
東京大学大学院理学系研究科	森 俊哉
京都大学大学院理学研究科	大倉敬宏・宇津木充・横尾亮彦
京都大学防災研究所	中道治久・井口正人・味喜大介・山本圭吾・為栗 健
九州大学大学院理学研究院	相沢広記
他機関との共同研究の有無: 有	
秋田大学国際資源学部国際資源学科	大場 司
茨城大学理学部理学科	藤縄明彦
熊本大学教育学部	宮縁育夫

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

電話：011-706-2892

e-mail：

URL：<http://www.sci.hokudai.ac.jp/isv/>

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：橋本武志

所属：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

噴火履歴及び観測事例に基づく噴火事象系統樹の試作

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

イ. 熱水系の卓越する火山

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

これまでに噴火事象系統樹(噴火シナリオ)が作成されておらず、しかしながら火山活動が活発であり、噴火が発生した場合の社会的影響が大きいと考えられる火山を選択し、従来と同様に噴火履歴に基づき、それに地球物理学的観測事例も加味した噴火事象系統樹を作成する。そして、試作結果は社会に発信し、火山防災の基礎的情報として提供する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

対象火山は火山活動レベルが高く、噴火履歴・噴火様式が個性的な、浅間山、十勝岳および阿蘇山とする。それぞれの火山では噴火履歴および各噴火の推移に関する現在までの知見を収集・整理する。必要に応じて古記録の解読・解析を行う。近年の火山活動に関しては、地震学、測地学、電磁気学、火山ガスおよび物質科学などの解析結果を整理して、先行現象と噴火現象に関する経験則を求める。また社会的要請が大きい富士山についても噴火事象系統樹の作成を試みるが、近代火山観測は富士山の確実なマグマ活動および噴火活動を経験していない。そのため、上記 3 火山のように、噴火事象分岐において観測事例を加味するため必要なデータが、富士山ではない。そのため地質学および古記録解読による噴火履歴・推移データのみで噴火事象系統樹を作成することになり、これまで試作した火山とは状況が異なる。試作物は学会等で公表し、研究者あるいは防災担当者の意見を集める。場合によってはそれらの意見をもとに、噴火事象系統樹を改定する。

平成 26 年度はこれまで試作した噴火事象系統樹・噴火シナリオについて総括し、そこで浮かび上がった課題に基づき、本研究課題での噴火事象系統樹の作成方針を決定する。また浅間山について、噴火履歴、各噴火の推移、物質科学的データおよび噴火観測データなど現在までの知見を収集・整理する。必要に応じて追加の資料解析を行う。

平成 27 年度は浅間山について前年度の検討結果をもとに、噴火事象系統樹を試作する。新たに十勝岳について、噴火履歴、各噴火の推移、物質科学的データおよび観測データなど現在までの知見を収集・整理する。特に 1926 年噴火では古記録の再解析を行う。

平成 28 年度は十勝岳について前年度の検討結果をもとに、噴火事象系統樹を試作する。新たに阿蘇山について、噴火履歴、各噴火の推移、物質科学的データおよび観測データなど現在までの知見を収集・整理する。

平成 29 年度は阿蘇山について前年度の検討結果をもとに、噴火事象系統樹を試作する。新たに富士山について、噴火履歴および各噴火の推移に関する現在までの知見を収集・整理する。必要に応じて古記録の再解析を行う。また富士山と類似した活動を行う火山を国内外から選び出し、その観測データと噴火現象を参考にして、富士山の噴火現象を考察する。

平成 30 年度は富士山について前年度の検討結果をもとに噴火事象系統樹を試作する。試作物は学会等で公表し、研究者あるいは防災担当者の意見を集める。一方で 5 年間の活動を総括する。作成した噴火事象系統樹を評価し、今後の課題を明らかにし、文書にまとめる。

研究課題実施中には、他の研究課題とつねに連携を取り、それらの研究成果を取り入れる。また噴火が発生した場合には、その火山において緊急的に噴火事象系統樹を試作・公表することも念頭に入れる。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

1 . 平成 30 年度の成果

まず富士山の噴火事象系統樹を作成することを目的とした研究集会を H29 年度末に実施した。11 件の発表が行われ、噴火の観測事例がないが、噴火頻度が高く将来に噴火が起こった場合の社会的影響の大きい火山での事象系統樹の作成について活発に議論した。そして地質学的データの豊富な過去 3500 年間を用いると、噴火前兆現象の評価は不可能であるが、噴火開始後の事象系統樹については作成が可能であるとの考えが示された。また草津白根火山については 2018 年 1 月の本白根山の噴火を受けて、噴火事象系統樹の作成を検討することとし、H31 年 2 月に研究集会を開催する。並行して、阿蘇山について事象系統樹の作成を進めている。

それに加えて本年は浅間および十勝岳の系統樹の作成を通じて、噴火履歴と観測事例に基づく噴火事象系統樹の作成手法について検討した。まず浅間山での系統樹作成について、噴火開始と噴火未遂の評価手法および事象分岐確率の算出手法を検討し事象系統樹を改訂した (図 1)。さらに本白根の噴火を受けて噴火の可能性のある火口域が広範囲に及ぶ火山として十勝岳について噴火事象系統樹を作成した (図 2)。

2 . 計画期間中 (H26 ~ H30) の成果

すでに前回の計画期間、あるいは別の研究課題により、噴火記録が豊富で、観測実績のある火山を中心に噴火事象系統樹は作成されてきた (桜島、伊豆大島、三宅島、有珠山など)。その作成手法は個々の火山の特徴を強く反映したもので、その作成手法は必ずしも他の火山に当てはめることはできなかった。そこで、本計画期間では、まだ事象系統樹が作成されていない火山を対象として、地質学的研究成果に基づいた噴火事象系統樹を作成することで、一般的な作成手法を提案することを目指した。対象としたのは、爆発的噴火を繰り返し噴火規模および噴火推移が多様な火山 (浅間山)、類似した爆発的噴火を繰り返し観測事例の豊富な火山 (阿蘇山)、噴出率は低いが大噴火災害を起こしている火山 (十勝岳)、そして計画期間中に活動が上昇した火山 (蔵王山・草津白根山)、噴火頻度が高いが観測事例の無い火山 (富士山) である。これらの試作を通じて、以下のとおりの作成手順の指針を作成した。

噴火事象系統樹の作成は以下の (1) から (6) までの手順に従う。作成事例は図 1 ・ 2 を参照された

い。なおここで提案する噴火事象系統樹は、静穏時にその火山で想定される噴火活動を俯瞰することを目的とするもので、実際に活動が高まってきた場合には、その状況に応じて改定されるべきであろう。

(1) 検討期間の設定

過去の噴火履歴に基づいて噴火事象を議論していく場合に、対象火山の活動全部について考慮することは、噴火履歴研究の精度から考えて難しい。また系統樹が将来の噴火活動に備えるという目的がある以上、起こりうる可能性のある噴火活動に重点をおくことが重要である。したがって、系統樹の作成にあたって過去の噴火履歴をどこまで遡るかについて検討することが必要となる。個々の火山においては噴火頻度や噴火様式が多様で、長期的にも変化することが一般的である。そのため個々の火山の長期的な活動の変化を視覚的に表現できる、時間-累積噴出物量図(いわゆる階段図)を利用することを提案する。もちろんその階段図の精度は、ある一定以上のレベルに達していることが必要であることは言うまでもない。この階段図において一定の傾きで噴火活動が続いている期間は、火山深部のマグマ供給系が安定した、あるいは一定の時間変化をしている状態とみなすことが可能である。そこで、現在から遡って、階段図での傾き(長期噴出率)に大きな変化の無い期間について、その噴火履歴をもとに事象系統樹を作成することとする。なお階段図での傾きが一定の期間において、噴出物の岩石学的性質も検討してマグマ供給系に大きな変化がないことを確認することが望ましい。

(2) 想定火口域の設定

次に(1)の期間において、活動のあった火口域について把握し、それぞれの噴火履歴を明らかにしておく必要がある。例えば、有珠山では山頂火口と山麓、三宅島の場合には山腹割れ目火口を考慮する必要がある。これらの火山では噴火記録があるが、例えば十勝岳のように噴火記録が最近の100年程度に限られている場合には、地質調査によって複数の火口域の噴火履歴を明らかにしておく必要がある。

(3) 前兆現象の整理と噴火未遂の評価

ある程度以上の規模の噴火の場合、何らかの前兆活動を観測できる場合が多い。これらの活動は地震活動や地殻変動など深部の活動を反映したものや、噴気・熱水活動などの表面現象など多様である。活動の監視には多項目について行うことは必須であるが、噴火事象系統樹を作成する場合には、最も信頼ができ、かつ最も長期間にわたるデータが蓄積されている項目をとりあげてを提案する。浅間山ではGPSによる地殻変動、十勝岳では地震活動をその指標とした。それぞれの指標の高まりを前兆現象とし、噴火に至らなかった事例を噴火未遂とした。なお、噴火活動が地球物理学的に観測されていない火山では噴火未遂の評価はできないが、蔵王山のように最近の観測結果から前兆現象の整理することはできる。

(4) 噴火タイプの分類

噴火事象に関しては、個々の噴火の噴火推移の多様性にとらわれることなく、噴火の規模で噴火タイプを分類することを提案する。まず、地質調査では見逃す可能性の高い小規模噴火と、噴火堆積物として残る中規模以上の噴火に大別する。小規模噴火に関しては古記録から噴火を抽出する。しかし個々の火山では信頼できる記録の期間はそれほど長くはなく、噴火が記録されていない場合もあるであろう。このような場合には火口近傍でのトレンチ調査の実施などの基礎研究が必要となる。中規模以上の噴火分類については、噴火様式・推移を反映することも重要であるが、まずは規模に注目して分類し、その後に噴火様式・推移を反映した分類をするが、細分しすぎないことが重要である。

(5) 噴火回数の算出

噴火回数については上記で分類した各タイプの噴火について算出する。地質学的に堆積物として残る規模の噴火であれば、上記(1)の期間で地質学的に明らかにされた噴火エピソード数そのまま噴火回数となる。一方で、地質学的調査では見落とす可能性の高い小規模な噴火については、記録の残る期間あるいは火口近傍の調査で明らかになった、ある期間での噴火発生回数を、上記の(1)の期間で同様の頻度で小規模噴火が発生したと仮定して発生回数を、外挿して算出する。

(6) 分岐確率の算出

前述した各事象について、ある期間での(特定イベント回数)/(全イベント回数)により分岐確

率を算出する。この際に事象によって対象とする期間は異なってくる。まず(3)で議論した観測データが存在する期間について、活動活発化を意味すると考えられる現象が観測された後に噴火があった場合と、噴火には至らなかった場合の件数を数えて、噴火未遂と噴火発生との確率を算出する。噴火発生後は上記(1)の期間の各噴火タイプの発生数を足した「総噴火回数」で各噴火タイプの発生数を割ることで、確率を算出する。

- (9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
高橋正樹・安井真也・金丸龍夫・山下大輔, 2019, 浅間前掛火山テフラ・トレンチ調査により得られた降下軽石の全岩主化学組成—浅間前掛火山における最近1万年間のマグマ主化学組成の時間変化, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 印刷中。
安井真也・高橋正樹・金丸龍夫, 2019, 浅間火山火車岩屑なだれ堆積物の再発見- 浅間家畜育成牧場および周辺地域の火山地質 -, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 印刷中。
安井真也・高橋正樹・金丸龍夫, 2018, トレンチ掘削および14C年代にもとづく10ka以降の浅間前掛火山降下火砕堆積物の高分解能層序1- トレンチ掘削調査と層序 -, 日本地球惑星科学連合2018年大会, SVC43-12。
高橋正樹・安井真也・金丸龍夫, 2018, トレンチ掘削および14C年代にもとづく10ka以降の浅間前掛火山降下火砕堆積物の高分解能層序2 噴火史と降下軽石噴火のタイプ, 日本地球惑星科学連合2018年大会, SVC43-13。
中川光弘・松本亜希子・小林卓也, 2018, 十勝岳の噴火事象系統樹：特に想定火口域と分岐確率算定手法について, 日本火山学会2018年秋季大会, B3-15。

- (10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：
該当しない。

- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：
北海道大学 中川光弘, 橋本武志, 大島弘光
東京大学 中田節也, 森田裕一, 武尾 実, 前野 深
東京工業大学 野上健治
京都大学 鍵山恒臣, 大倉敬宏, 井口正人
他機関との共同研究の有無：有
日本大学 安井真也, 高橋正樹
静岡大学 小山真人, 石橋秀巳
熊本大学 宮縁育夫
産総研 高田 亮, 篠原宏志, 星住英夫, 石塚吉浩, 下司信夫
電中研 三浦大助, 上澤真平
気象庁 松森敏幸
道総研地質研究所 高橋 良

- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：北海道大学大学院理学研究院
電話：011-716-2111(代表)
e-mail：mnakagawa@mail.sci.hokudai.ac.jp
URL：http://www.sci.hokudai.ac.jp/eps/

- (13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者
氏名：中川光弘

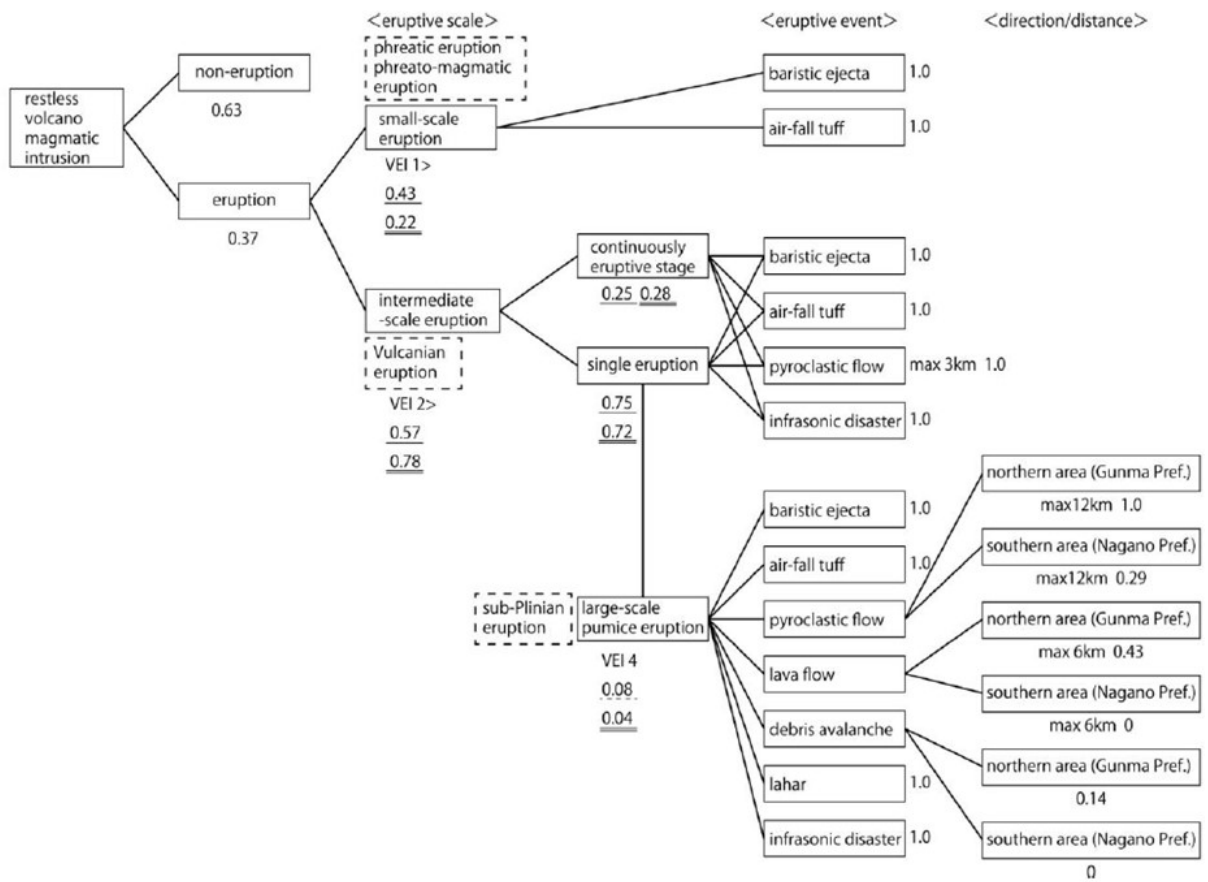


図 1 . 16 世紀以降の浅間前掛火山の噴火事象系統樹の試作。

数字は確率、下線付き数字は西暦 1868 年からの確率、二重下線付き数字は西暦 1783 年からの確率を示す。

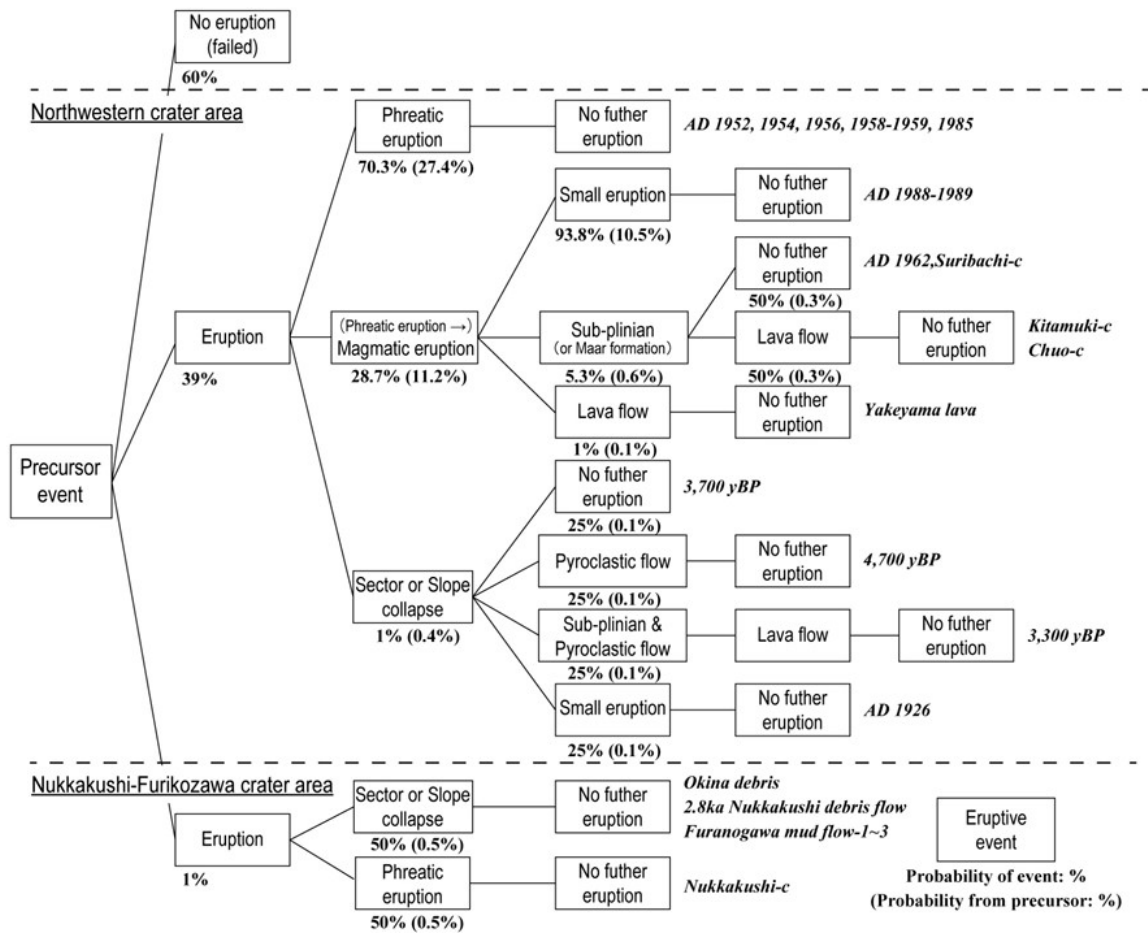


図 2 . 十勝岳過去 5,000 年間の噴火事象系統樹の試作。

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

津波浸水域の即時予測手法開発のための研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

現在の津波予測は沿岸での津波の高さを予測するもので、陸上の遡上した津波の浸水範囲や陸上での津波高を予測するシステムになっていない。気象庁では様々な断層モデルから計算される沿岸での津波波高をデータベース化し津波の高さ予測を実施している。さらに、沖合で観測された津波波形から沿岸での津波波高を予測する手法の開発も研究されてきた。上記のような手法の開発は、近い将来数多く設置される沖合のケーブル式津波計や GPS 波浪計による津波観測データを使用して津波予測を実施する上で非常に重要になる。

2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した大津波のように沿岸から 5 ～ 6km まで津波が浸水し被害を起こす場合には、津波の正確な高さを予測するよりも、津波の浸水範囲を予測する事が災害を軽減する上では重要となる。しかし、陸上を遡上する津波を津波数値計算で精度良く再現するためには、ある程度の計算時間が必要となり、地震発生時にリアルタイムに津波数値計算を実行しては、到達するまでに津波浸水範囲の予測を出す事は難しい。本研究課題は上記の問題を解決し、リアルタイムで津波の浸水範囲を予測する手法を開発する。さらには、ケーブル式津波計データ等も使用し、津波の浸水予測をリアルタイムで改善していく手法を開発する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年度

2011 年東北地方太平洋沖地震の津波浸水域をデータとしてそれを津波が到達する前に精度良く予測することを目標として津波の浸水範囲予測手法を開発する。この手法の基礎は平成 25 年度までに開発されているものを使用するが、実際に発生した津波に対して、適用することで、データベースの量や、海域の計算地点の分布等最適な津波浸水範囲をできる限り短い時間で予測するための基礎的研究を実施する。

平成 27 年度

平成 26 年度の基礎的研究を継続する。さらに、気象研究所・東北大学・東京大学地震研究所・防災科学技術研究所等で開発中の、海底津波計や GPS 連続観測記録等を用いたリアルタイムで震源過程や海面変動を推定する手法と連動して、各地域での津波の浸水範囲を予測する手法を開発する。それらの有効性を評価する。

平成 28 年度

平成 27 年度までの研究開発を継続しながら、それまでに防災科学技術研究所での設置が完了しているケーブル式海底圧力計のデータを利用した津波浸水範囲予測手法の開発を行う。

平成 29 年度

平成 28 年度までの研究開発を継続しながら、対象域を北海道太平洋沿岸にも拡大し、沿岸主要地域での津波浸水予測データベースを作成し、その有効性を確かめる。

平成 30 年度

研究開発を行った全てのリアルタイム津波浸水域予測手法を統合し、さらにそれらの浸水範囲予測情報を発信するための手法の開発も実施する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

平成 30 年度成果概要

ケーブル式津波観測網 (S-Net) を利用した即時津波予測手法の開発

日本海溝・千島海溝に沿って 150 の津波計 (圧力計) と地震計がケーブル式ネットワークシステム (S-Net) として設置された。昨年度は、地震発生後 500 秒の圧力観測波形の形状みを利用して海溝型巨大地震による津波発生域 (隆起域) を推定する手法を開発した。今年度は推定された津波発生域の大きさから巨大地震の規模を推定する手法を開発した。

まず過去に提案された様々な 4 つのスケーリング則 (宇津・関 (1955), Wells and Coppersmith(1994), Somerville et al.(1999), Blaser et al.(2010)) に従って、 $M_w 8.0, 8.2, 8.4, 8.6, 8.8$ のそれぞれに対する断層モデルを千島海溝沿いにまんべんなく配置し、S-Net 観測点で観測圧力波形を数値計算により作成した (例 : 図 1)。それらの想定観測波形から昨年度開発した手法により、津波発生域を推定した (例 : 図 2)。その津波発生域の面積を計算し、それらの対数を M_w に対してプロットする (図 3)。津波発生域の面積の対数と M_w の関係を線形で近似すると共に、その誤差 (標準偏差 $M_w 0.08$) を推定した。この結果を用いれば津波を発生させた地震の規模を推定することが出来る。

今回開発された手法を 1952 年十勝沖地震と 1968 年十勝沖地震の津波に適用し、その有効性を確かめる。1952 年十勝沖地震については Hirata et al. (2003)、1968 年十勝沖地震については Satake (1989) のすべり量分布から S-Net 観測点での海底圧力波形を計算した。それらの観測波形から津波発生域を本研究で開発された手法を用いて推定し、地震の規模を推定した。その結果、図 4 に示すように津波発生域は高精度で推定され、1952 年十勝沖地震の規模は $M_w 8.2 + - 0.08$ 、1968 年十勝沖地震の規模は $M_w 7.9 + - 0.08$ と精度良く推定された。

地震波形を用い、津波地震に対応できる津波即時予測手法の開発

上記のようなケーブル式津波観測網がない地域では、地震波形解析により適切な断層モデルを推定する手法を開発する必要がある。特に津波地震に対応できる断層モデルを適切に推定することが重要となる。昨年度は深さに依存する剛性率 (図 5) を仮定することにより、津波地震による津波浸水予測にも対応できる手法を開発した。今年度は上記手法をインドネシアのスマトラ島沿岸では発生した 2007

年 Bengkulu 巨大地震 (Mw8.4) と 2010 年 Mentawai 津波地震 (Mw7.8) に適応した (図 6)。典型的な巨大地震である Bengkulu 地震の津波も津波地震であった Mentawai 地震も津波を上手く予測できることが分かった (図 7)

さらに 1992 年ニカラグア地震については、Gusman et al. (2014) の手法 (NearTIF) を用いて津波浸水即時予測が高精度で可能であることを示した。

5 年間の成果概要

超巨大地震により発生する巨大津波の即時浸水予測手法の高度化

・リアルタイム浸水予測手法 (NearTIF) の高度化を実施し、W-phase インバージョンだけでなく、GPS データを利用した RAPID や津波波形データを利用した t FISH のデータから得られる津波波源モデルに対する有効性を示した (Gusman et al., 2014)

ケーブル式津波観測網を利用する新しい津波数値計算手法の開発

・震源直上の海底圧力波形を用いた新しいデータ同化手法を開発し、30 秒間隔で観測が実施された場合、地震の情報が無くても、数分でデータ同化により津波波動場を予測できることを示した (Tanioka, 2018)。本手法と上記リアルタイム浸水予測手法 (NearTIF) を組み合わせ、2011 年東北地方太平洋沖地震津波に適応し、浸水予測まで高精度で 10 分以内に予測できる手法の開発に成功した (Tanioka and Gusman, 2018)

・また、遠地津波の津波即時予測手法については Maeda et al.(2015) のデータ同化手法を 2012 年 Haida Gwaii 巨大地震により発生した津波の実際の観測波形に適応し、津波波動場が精度よく再現されることを示した (Gusman et al.,2016)

・さらに、津波数値計算など、複雑な計算を実施することなく、S-Net の観測圧力波形 (500 秒以内) の処理のみで津波波源域 (隆起域) とそれを発生させた地震の規模を推定する手法を開発した。その手法を 1952 年十勝沖地震と 1968 年十勝沖地震のすべり量分布から発生する津波に適応し有効に推定できることを確かめた。

地震波形を用い、津波地震に対応できる津波即時予測手法の開発

・ケーブル式津波観測網がない地域では、津波地震のような場合でも地震波形解析により過小評価しない断層モデルを推定し、適切に津波遡上域を再現する手法を開発する必要がある。そこで W-phase インバージョン結果に深さに依存する剛性率を加えることで適切な断層モデルを推定する手法を開発した。本手法をエルサルバドル・ニカラグア沖で発生した巨大地震に適応し 1992 年ニカラグア津波地震を含む全ての地震の津波波高及び津波浸水域を高精度で予測可能であることを示した (Tanioka et al., 2017)

・1992 年ニカラグア津波地震については本手法に加えて上記リアルタイム浸水予測手法 (NearTIF) の改良版を適用し、リアルタイムで津波浸水予測が高精度で予測できることを示した。

・本手法を改良し、インドネシアのスマトラ島沖で発生した 2008 年 Bangkuru 巨大地震と 2010 年 Mentawai 津波地震にも適応し、いずれも津波浸水域を精度良く再現できることを示した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Tanioka, Y., A.G. Cabrera, and Y. Yamanaka, Simulation of a Dispersive Tsunami due to the 2016 El Salvador?Nicaragua Outer-Rise Earthquake (Mw 6.9), Pure Appl. Geophys., doi:10.1007/s00024-018-1773-5, (2018)

Tanioka, Y., Tsunami simulation method assimilating ocean bottom pressure data near a tsunami source region, Pure Appl. Geophys., doi:10.1007/s00024-017-1697-5 (2018).

Tanioka, Y., and A.R. Gusman, Near-field tsunami inundation forecast method assimilating ocean bottom pressure data: A synthetic test for the 2011 Tohoku-oki tsunami, Phys. Earth Plan. Int., doi: 10.1016/j.pepi.2018.08.006, (2018)

Tanioka, Y., G.J. Arguello, and A.R. Gusman, Rapid Determination of Appropriate Source Models for Tsunami Early Warning using a Depth Dependent Rigidity Curve: Method and Numerical Tests, EGU

meeting 2018

Inoue, M., Y. Tanioka, Y. Yamanaka, Simple method for real-time tsunami source estimation using seafloor pressure sensor network in Japan, AOGS meeting 2018.

Tanioka, Y., A.G. Cabrera, and Y. Yamanaka, Determination of a Fault Size from a Dispersive Character of a Tsunami: a Case Study for the 2016 El Salvador-nicaragua Outer-ride Earthquake, AOGS meeting 2018.

Ratnasari, R.N., Y. Tanioka, and A.R. Gusman, Rapid Determination of Source Models for Tsunami Early Warning Using a Depth Dependent Rigidity Curve: Case Studies for the 2007 Bengkulu and 2010 Mentawai Tsunami Earthquakes, AOGS meeting 2018.

Tanioka, Y., G. Arguello, U. Grillo and A. Cabrera, Real time tsunami inundation forecast method developed for Central America Region, SCSTW 2018

Ratnasari, R.N., Y. Tanioka, and A.R. Gusman, Rapid determination of source models for Tsunami Early Warning using a depth dependent rigidity curve:case studies for Indonesia, SCSTW 2018 (3rd place of the best presentation award)

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

海溝沿いで発生が懸念される海底地すべりで発生した津波の計算手法の確立を目指し、1928 年 Great-Banks 津波の再現実験を実施する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

谷岡勇市郎・西村裕一・伊尾木圭衣

(北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センター)

他機関との共同研究の有無 : 有

佐竹健治・Aditya R. Gusman (東京大学地震研究所)・対馬弘晃 (気象庁気象研究所)

参加機関 東京大学地震研究所、気象庁気象研究所

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

電話 : 011-706-3591

e-mail : isv-web@mail.sci.hokudai.ac.jp

URL : <http://www.sci.hokudai.ac.jp/grp/isv/isv-web/>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 谷岡勇市郎

所属 : 北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センター

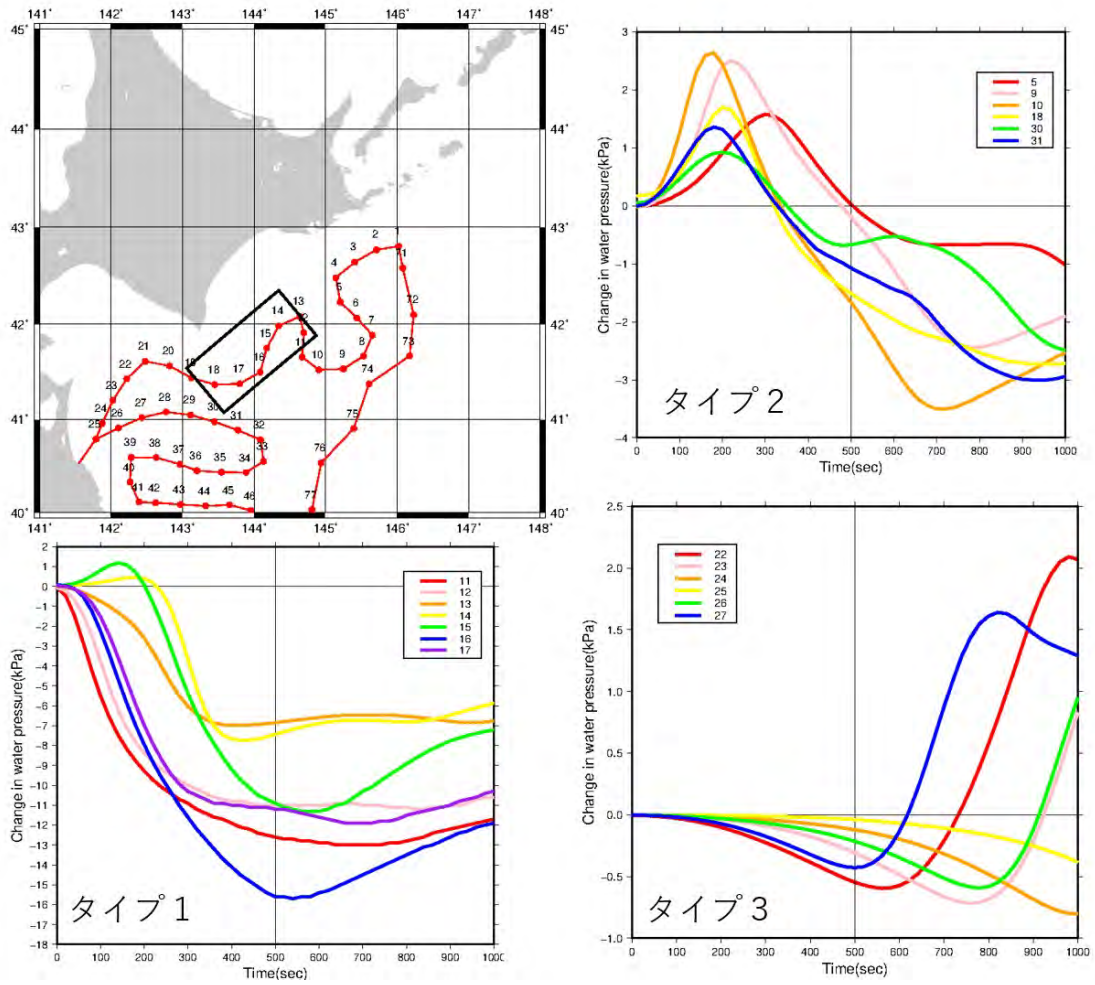


図 1

断層モデルから計算される海底圧力波形の一例。500 秒間の波形より 3 種類に分類 (タイプ 1 (戻らない)、タイプ 2 (1 波が入る)、タイプ 3 (その他))。

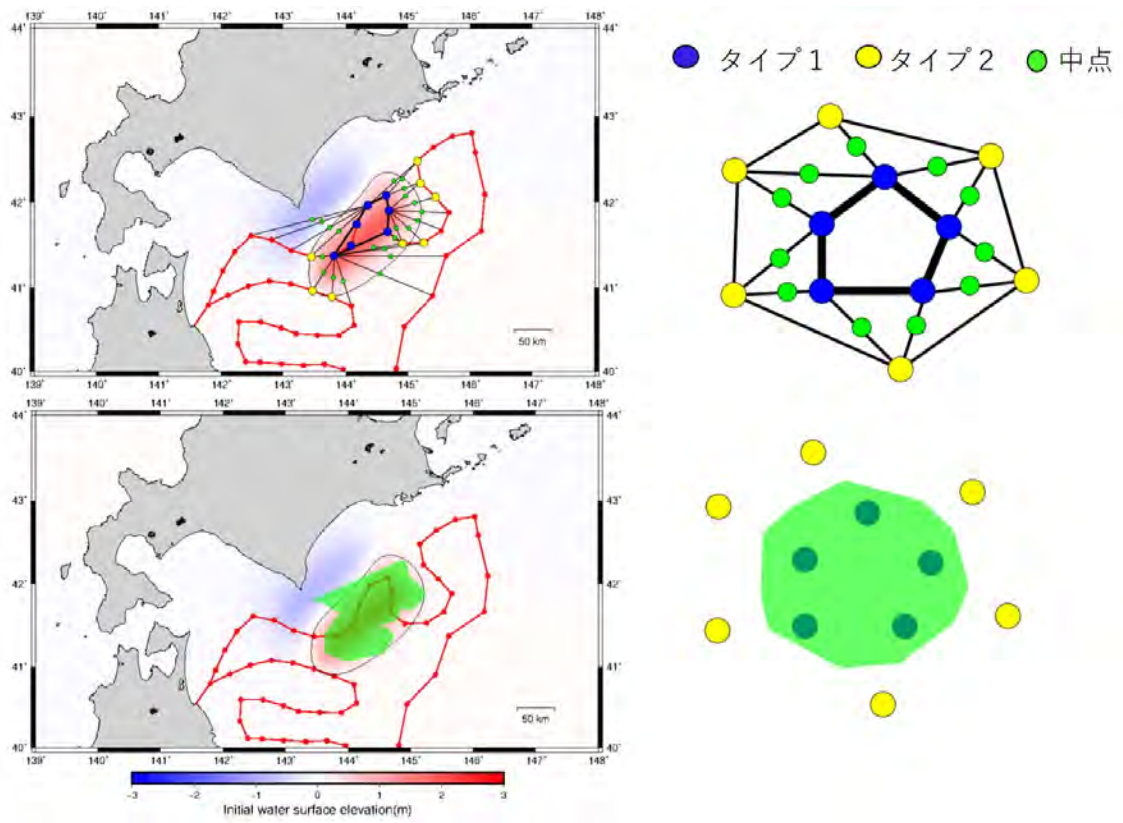


図 2

3種類の波形分類から津波波源域を推定する例。黄緑に部分が推定された津波波源域。断層モデルより計算された隆起量を赤、沈降量を青で示す。

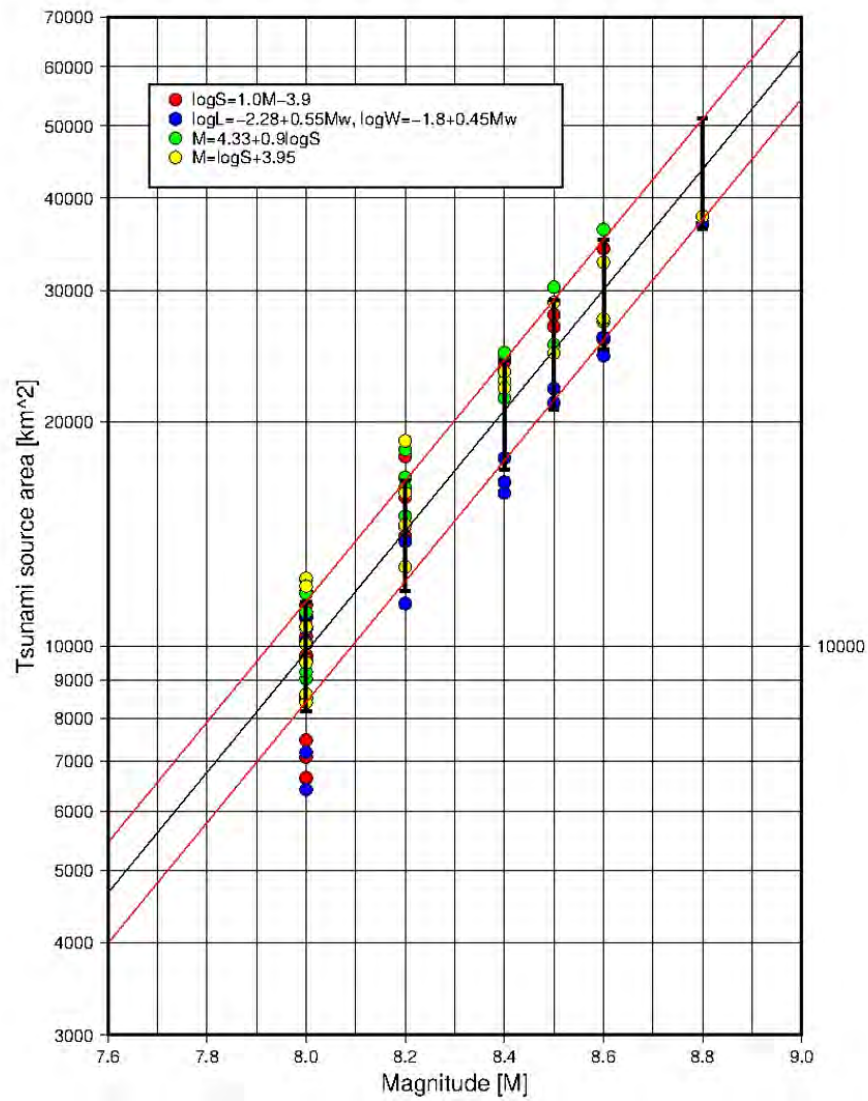


図 3

4つのスケールリング則による断層モデルから計算された海底圧力波形から本手法により推定された津波波源域の面積と地震の規模の関係図．黒線は近似直線を示す．赤線は誤差 ($M_w \pm 0.08$) である。

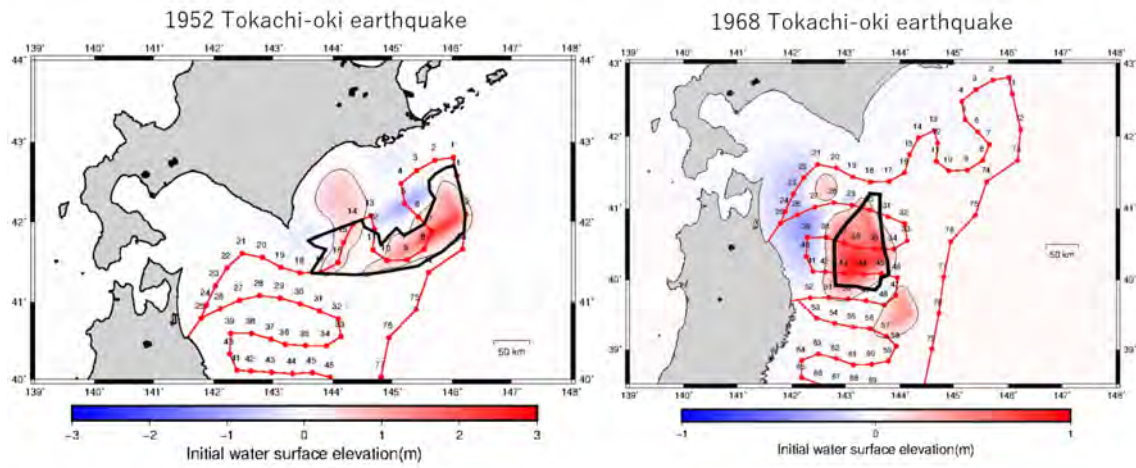


図4

本手法により推定された1952年十勝沖地震と1968年十勝沖地震の津波波源域(隆起域)太線領域。カラーはすべり量分布より計算された隆起域(赤)と沈降域(青)

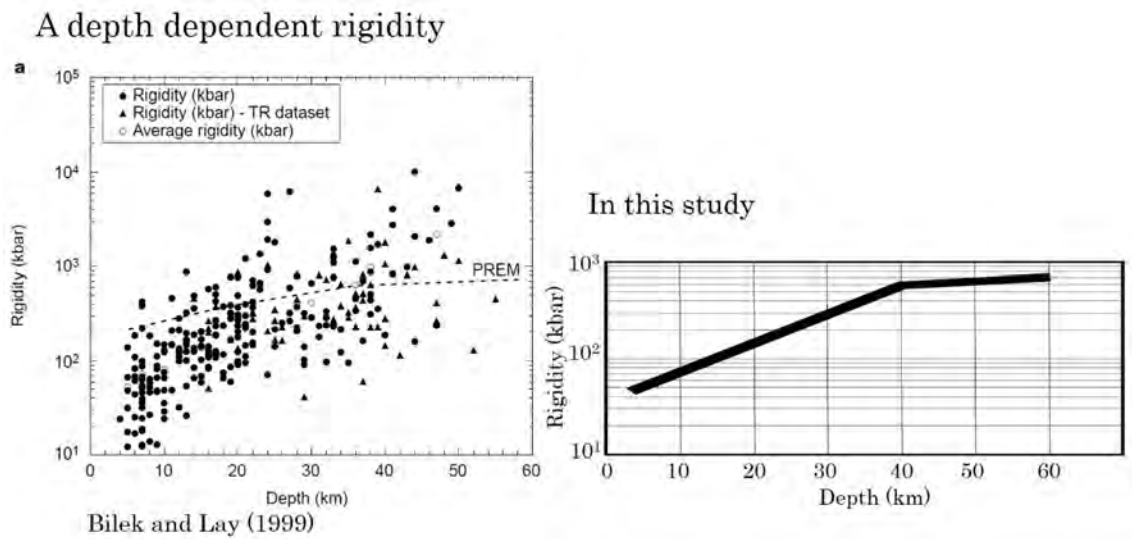


図5

深さ依存剛性率 . 左) Bilek and lay (1999) より . 右) Tanioka et al. (2017) より

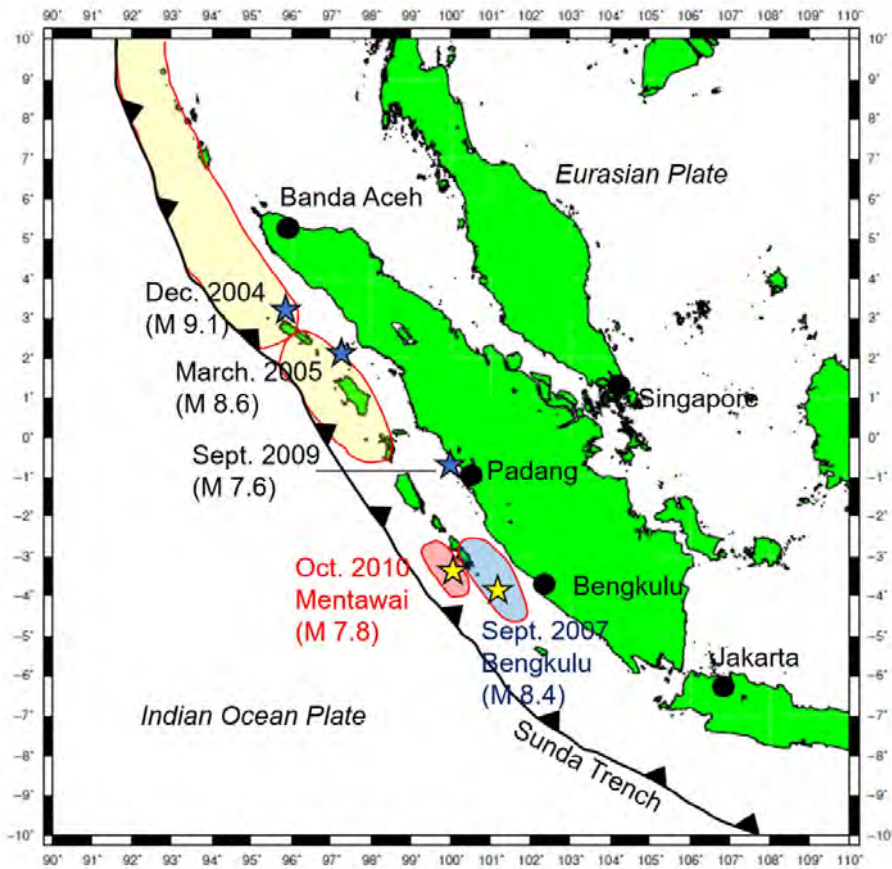


図 6

本研究で開発した津波予測手法を実施した 2007 年 Bengkulu 巨大地震 (Mw8.4) (青) と 2010 年 Mentawai 津波地震 (Mw7.8) (赤) の震源域

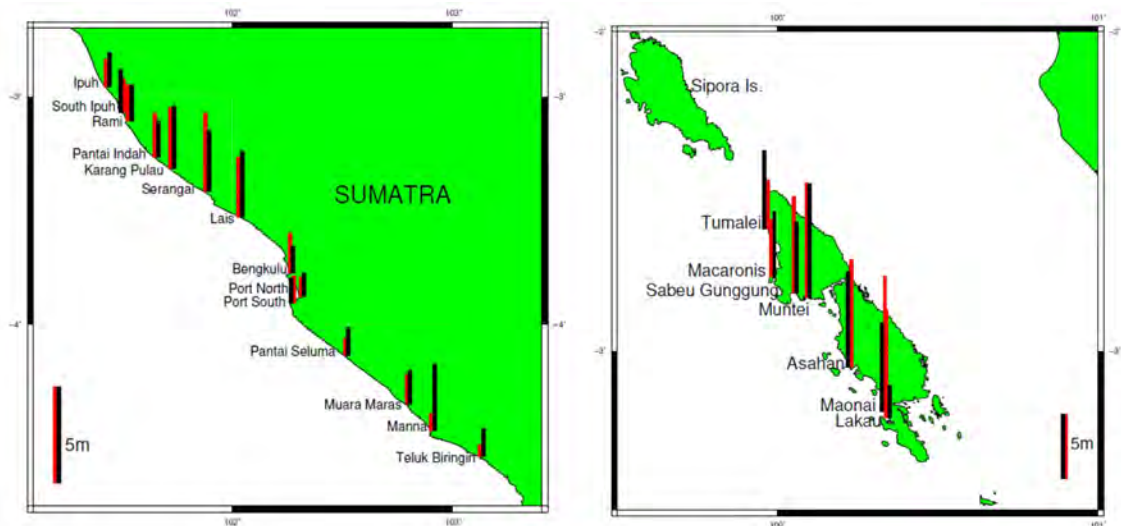


図 7

左) 2007 年 Bengkulu 地震による調査津波波高 (黒) と計算津波波高 (赤) の比較。右) 2010 年 Mentawai 地震による調査津波波高 (黒) と計算津波波高 (赤) の比較。

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地理空間情報の総合的活用による災害に対する社会的脆弱性克服のための基礎研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(5) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地理空間情報(G 空間情報) , GIS (地理情報システム) , 衛星測位 (GPS , 準天頂測位システムなど) に関して , 防災・減災への統合的な活用方法を開発する。本研究では , この高精度避難ナビゲーションシステムを含む防災・減災のための情報システム構築と , その活用方法開発を目指す。

上記で開発したシステムを援用し , 地域開発と自然災害リスクとの関係を分析し , その結果から災害に対する社会的脆弱性について , 人文社会科学と自然科学の両方の立場から議論を行う。特に , ここでは地方レベル , 市町村レベル , 町内会レベルというように空間スケールごとに分析を行ない , 各スケールにおける開発と災害リスクの関係やリスク軽減のための課題などを明らかにする。

上記の分析結果を受けて , 防災・減災の対策を情報流通の面から検討する。特に , 災害リスクを軽減させるために , 国 , 地方自治体 , 住民組織 , 住民個人の間で , どのような情報流通を行う必要があるか明らかにし , それによって「災害に対する社会的脆弱性 (Vulnerability)」克服のための可能性を探る。

また , 地域防災のための公開講座の開催 , 自治体防災担当者対象の講義の実施 , 自治体との相互協力協定にもとづく防災教育・地域貢献の実施等により , 最も効果的な研究成果の普及手法を探る。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年には , 災害の人文社会学的研究に関する地理空間情報 , GIS , 衛星測位の統合的活用方法の開発を行う。また , 人口 , 土地利用など下記の分析に用いるデータ (特に地理空間情報を含むもの) の収集を行う。

平成 27 年以降は、地域情報（土地利用および人口等）と被害想定に関する時系列的分析、避難施設と避難圏域に関するデータの収集と分析、住民の避難行動に関するデータの収集と分析などを行う。平成 27 年度には、北海道全域を対象に、現在、北海道危機対策課が整備を続けている津波浸水想定データを用いて、マクロな視点による津波被害分析を行う。その際には地域情報（土地利用および人口など）を GIS に取り込んで空間データベースを構築する。

平成 28 年度以降には、事例市町村を選定し、人口、土地利用、津波浸水想定だけではなく、避難施設と避難圏域に関するデータの収集と分析を行う。その際には避難施設や避難ルートなど、住民避難に関する地理空間情報も取り込み、空間データベースを構築する。この分析により、生活レベルのミクロな視点で、各自治体のもつ「災害に対する社会的脆弱性」に関する分析を行う。

これらの結果を受けて平成 29 年度以降は、町内会レベルもしくは個人レベルの避難に関する分析を行なう。なお、最後に各スケールにおける開発と災害リスクの関係やリスク軽減のための課題などを明らかにする。平成 29 年度以降は、上記の分析と並行して、自治体・住民組織を対象とした災害関係の情報流通に関する分析を行う。ここでは、防災・減災の対策を、各種避難警報やハザードマップなどを要素とした情報の流通に関して検討する。特に、災害リスクを軽減させるために、国、地方自治体、住民組織、住民個人の間で、どのような情報流通を行う必要があるか、自治体、住民などへの聞き取りから明らかにする。また、この情報流通を加速させる手段について、自治体と協力し実証実験を行う。以上の分析の成果を統合し、地域開発と災害に対する社会的脆弱性との関係を明らかにする。なお、災害の危険生が高い地域で積雪寒冷地の地域性を考慮した研究を行うために、積雪のある冬季と、積雪のない夏季の 2 時期で調査を行う。

全ての年度を通じて、地域防災のための公開講座の開催し、自治体防災担当者への講義を実施し、北海道大学理学研究院とえりも町との相互協定を利用したえりも町での防災教育活動・地域貢献を実施し、効果的な研究成果の普及手法を探る。

（ 8 ）平成 30 年度及び計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要：

【平成 30 年度の成果】

平成 30 年度には、まず準天頂衛星などによる衛星測位と地理空間情報および GIS の統合的活用法を開発し、積雪寒冷地の地域特性を考慮した災害発生時の避難に関する研究を行い、課題抽出と対策のための提言を行った。なお、ここでは高精度避難ナビゲーションシステムを含む防災・減災のための情報システムを構築し、その活用方法の開発を行った。

次に、地理空間情報と GIS の統合的活用法を開発し、地域防災力を強化し、防災・減災のための災害情報の高度活用について研究を行った。その中では、都市開発が地震・津波災害の災害リスクや災害に対する社会的脆弱性を増大させる可能性を論じ、地理空間情報活用による対策の有効性を検討した。なお、ここでは地方レベル、市町村レベル、町内会レベル等の異なる空間スケールごとに分析し、各スケールにおいて防災・減災のための課題などを明らかにした。

さらに、地域防災のための公開講座の開催、自治体防災担当者対象の講義の実施、自治体との相互協力協定にもとづく防災教育・地域貢献の実施等により、効果的な研究成果の普及手法を検討した。GIS や地理空間情報の防災への有効活用について、自治体や自主防災組織などで講演会や防災 GIS セミナーを開催した。また、北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センターでは地震火山地域防災情報支援室を設置し、公開講座の実施や地震防災教育活動を実施した。

平成 30 年度には、これまでの研究を継続すると共に、新規に以下の研究を行い、総括を行った。

研究 1：積雪寒冷都市における津波避難困難地域に関する空間分析法の改良

1-1 目的

本研究では、北海道釧路市を事例に、利用可能な最新のデータを用いて津波発生時の避難困難地域を画定し、その人口を推定することを目的とする。釧路市は北海道の市町村の中で津波浸水想定域内人口が最も多く、また、地震調査委員会は、釧路市について、今後 30 年以内に震度 6 弱以上の地震が発生する確率を 47 % から 69 % に上昇させており、緊急性の高い地域である。さらに、北海道は冬季

に積雪や路面凍結があり、これは避難可能性に影響を与えることから、季節ごとに分析を行う。

また、今回は、津波遡上データを用いて、津波浸水の時間発展を考慮した分析を行う。これにより、従来よりも現実的に即した分析が可能になる。

1-2 研究の方法

本研究では、津波発生時の避難困難地域について「津波の到達までに、津波浸水想定域の外側にたどり着くことが出来ず、かつ避難場所への避難が不可能な地域」とする。避難困難地域の画定にあたり、次の方法で分析を行う。

まず、GISを用いて2015年時点の釧路市の道路ネットワークおよび避難場所をデータベース化する。避難場所については、『釧路市津波避難計画』に記載されているもののうち、旧釧路市の津波浸水想定域内に立地する63か所を対象とし、それぞれの避難場所に到達する津波の最大浸水深を『釧路市津波防災マップ』を基に入力する。

次に、このデータベースに津波遡上データを入力し、津波浸水想定域を画定する。このデータは、2016年度に北海道総務部危機対策課から公表されたもので、50mメッシュ毎に、1cm、20cm、30cm、100cm、200cm、最大浸水深の到達時間が秒単位で記録されている。本研究では、30cm浸水深の津波が到達した時点で避難が不可能になるものとして分析する。

続けて、道路ネットワークデータより、浸水想定域内のすべての交差点にポイントを発生させ、これを津波発生時の出発点とする。また、『釧路市津波避難計画』を参考に、道路ネットワークデータと津波浸水想定域の交点にポイントを発生させ、津波発生時の脱出点とする。本研究では、30cm浸水深の津波が到達するまでに避難場所ないし脱出点にたどり着くことのできる出発点からの経路を、避難可能経路とする。

ここで、それぞれの出発点が、避難可能なものかどうかを判定する。はじめに、それぞれの出発点から最寄りの脱出点への避難経路を画定し、その距離を算出する。次に、避難に必要な準備時間と移動速度を考慮し、避難の所要時間を算出する。避難に必要な準備時間を昼間は5分、夜間は10分とする。また、移動速度を夏季は1m/秒、冬季は0.833m/秒とし、夜間の移動速度については昼間の0.8倍とする。最後に、それぞれの避難経路が通過するすべての津波遡上データのメッシュ毎に、避難時の通過時間と津波の到達時間を比較し、避難可能な経路であるか判定する。また、同様の手順で、それぞれの出発点から最寄りの避難場所への避難経路を画定し、避難可能なものであるか判定する。その際、避難場所での垂直移動に必要な時間を0.21m/秒とする。そして、上記の方法で避難可能と判定した避難経路を、津波発生時の避難可能経路とする。

この方法によって求めた「津波浸水想定域」および「避難可能経路」を基に、それぞれの域内の人口を算出する。釧路市は、郊外部に湿原が広がっていることから、国勢調査小地域データをそのまま面積按分した場合、人口を過大評価してしまう可能性がある。そこで、道路の中心線から100mのバッファを生成し、国勢調査小地域データの夜間人口および昼間人口をここに入力する(図1)。このようにすることで、市街地のほぼ全域を対象地域にしつつ、郊外部では湿原などの未開発地を取り除くことができ、実態に即した分析が可能になる。「避難可能経路」については、出発点に近い100mを削除し、残った経路の中心線から100mのバッファを生成することで、避難可能区域とする。この方法で得られる新たな人口データのうち、津波浸水想定域内の人口を津波浸水想定域内人口、避難可能区域内のものを避難可能人口とし、2つの数字の差分を避難困難人口としてそれぞれ算出する。

1-3 分析結果

津波浸水想定域を30cm浸水深の到達時間ごとに色分けして可視化すると(図2)、沿岸部では30分以内に津波が到達し、釧路駅を含む市街地のほぼ全域が30~40分で浸水することがわかった。一方で市街地東部の橋南地区や春採地区は高台があるため浸水域はそれほど広がらないが、浸水域の津波到達時間は早かった。

津波浸水想定域内人口は、夜間人口で124,794人、昼間人口で129,866人であった。これを30cm浸水深の津波の到達時間別にわけると(図3)、到達時間30~40分の人口が突出していた。特に、この到達時間帯の人口は、昼間人口が夜間人口よりも16,000人ほど大きな値を示した。

続けて、前述の方法により、避難困難地域を画定し、その人口を算出した。このとき、津波の時間発展を考慮したものに追加、避難可能距離の上限を 1,000m および 500m としたのも作成した。

まず、避難可能区域や避難困難区域の分布を地図上に表示すると（図 4）、避難場所が密に設置されている橋北地区や、高台のある橋南地区の周辺をはじめ、多くの区域が避難可能であった。しかし、避難可能距離の上限を設定すると、市街地西部の鳥取地区や大楽毛地区などで避難可能区域が狭まった。特に、避難可能距離を 500m としたものは、釧路市が要支援者の避難可能距離の上限として想定しているものでもあり、季節や時間帯によらず、大きなリスクが明らかになった。

最後に、条件別に避難困難人口を算出した（表 1）。昼間よりも夜間の避難困難人口が多いが、これは、津波浸水想定域内人口とは反対の傾向であった。釧路駅周辺の避難場所の整備が進んでいる区域に、昼間は人が集まっているためと考えられる。また、冬季は歩行速度が夏季よりも低下するため、避難困難人口が増加した。特に、避難可能距離の上限を設けない場合、夏季に比べて冬季の避難困難人口が大きく増加し、冬季の積雪や路面凍結といった積雪寒冷地特有の現象が、依然として避難を困難にすることが明らかになった。

本研究では、利用可能な最新のデータを用いて、北海道釧路市における津波発生時の避難困難人口の推定を行った。その結果、昼間よりも夜間に、夏季よりも冬季に避難困難人口が増加し、リスクが残されていることが明らかになった。

なお、津波発生時に利用可能な避難場所は、釧路市全体で、2010 年時点では 114 か所であったのが 2015 年時点で 145 か所と大きく増加しており、また、釧路市全体の人口も、5 年間で約 6,500 人減少している。これらは災害リスクを低下させるものではあるが、今回、多くの避難困難人口が算出された。ゆえに、本研究の結果は、東日本大震災を踏まえた新たな津波浸水想定に対して、行政が避難場所の整備を進めたこと結果の、現時点での防災の限界を示したと言える。

 研究 2：ICT 及び津波浸水想定データを利用した避難訓練支援システムの利活用

2-1 目的

この研究は、津波浸水想定時間発展と避難訓練参加者の行動軌跡と合わせて可視化する避難訓練支援システムを開発し、実証実験とフィードバック学習を行うことでシステム運用の効果と課題を明らかにすることを目的とする。本研究では、まず本研究で開発されたシステムの概要及び主機能の説明をする。次に実際にシステムを利用して行われた疑似津波集団避難実験の結果を元に、システムの効果と課題を検証する。最後に考察と今後の展望を述べる。

2-2 避難訓練支援システム概要及び機能

本研究で開発された避難訓練支援システム（以下、支援システムと略す）は、民間の VPS に構築された LAMP（CentOS, ApacheHTTPServer, MySQL, PHP）環境で可動する Web アプリケーションを基盤とするシステムである（図 5）。位置情報収集には Android 及び iOS 端末で可動する位置情報収集アプリケーションを合わせて実装した。ネットワーク機能を持った多機能端末を利用することで、支援システムは位置情報やセンサー情報といった地理空間情報をリアルタイムで収集し、WebGIS を利用することにより Web ブラウザを搭載するパソコンなどでも情報を共有することができる仕組みである。

避難訓練可視化機能はデータベースに格納された避難訓練参加者の行動軌跡を、津波浸水の時間発展と合わせて Web ブラウザ上の地図にアニメーションで表示する（図 6）。アニメーションに関しては秒単位で位置情報及び浸水想定を変化させ再生する。これにより細かな位置の変化や、危険エリアの変化を確認することができる。

地図及びアニメーションの表示には、オープンソースライブラリで提供されている Cesium を利用した。WebGIS ライブラリである Cesium は、他のライブラリに比べ時間属性をもったデータを可視化することに優れている。JSON 形式を拡張した CZML 形式のデータを読み込ませる事により、自動的にアニメーションが再生される。また Cesium のユーザーインターフェースのタイムバーを操作することにより、任意の時間や再生速度を設定することができる。

移動軌跡に関して本研究では、避難開始時間を分単位で遅らせることを可能とする。一斉集団避難訓練では、事前に訓練日時が周知されていることが多く、訓練開始と同時に避難行動を開始すること

がある。しかし、実際の発災時には情報収集、避難の検討、避難準備など様々な要因で避難開始が遅れることが予測される。こうした逃げ遅れの状況を再現するため、本システムでは任意の時間を避難開始時間に加算することができる。

以上の機能を用いることにより、実際に行われた集団避難実験の位置情報を可視化し、津波親水の時間発展と合わせて表示することにより、訓練参加者に対する訓練結果のフィードバックを行う。

避難訓練参加者の位置情報収集のために、本研究では位置情報収集アプリケーションが開発され利用される。このアプリケーションは、起動と同時に位置情報およびセンサー情報の収集を開始する。また実験用アプリケーションとは別に、機能を大幅に拡張した個人用避難訓練用アプリケーションを Android 用に開発した。こちらは個人で避難訓練を行う際に利用することを想定しており、軌跡情報収集、津波浸水想定と合わせた訓練結果の参照、訓練中に撮影した写真やメモ記録機能と共有機能を有する。

本システムの WebGIS で利用する背景地図は、国土交通省国土地理院が提供する地理院地図を利用する。地理院地図は背景基盤となるベースマップと、より詳細に場所を確認できる航空写真や、デジタル標高地形図のような地形情報なども利用することができ、必要に応じて背景を変えることによって、より幅広い表現が可能になる。

津波浸水データは北海道危機対策局危機対策課から提供された最大想定津波浸水シミュレーションデータである。北海道では新しい津波波源モデルを用いて津波シミュレーションを実施し、津波浸水予測図を作成した。本研究で用いるデータは 2016 年度に作成されたデータのうち「太平洋沿岸の津波被害想定に係る津波遡上データ」である。このデータはシェープファイル形式で保存されており、50 メートルメッシュもしくは 10 メートルメッシュ毎に属性が付与されている。属性データとしては、位置情報及び ID 情報に加え、1cm、20cm、30cm、100cm、200cm、最大浸水深に達する時間が秒単位で付与されている。

2-3 支援システムを用いた津波集団避難訓練

本章では 2018 年 6 月 29 日及び 6 月 30 日に、北海道釧路市および厚岸町で実施された津波集団避難実験結果と支援システムの運用結果をまとめる。津波集団避難訓練には北海道大学文学部で開講された地域科学演習を受講した学部生、院生の 36 名が参加した。訓練は 2018 年 6 月 29 日に釧路市で 2 箇所、2018 年 6 月 30 日厚岸町で 1 箇所、計 3 箇所にて実施された。

実験開始と同時に各端末の位置情報がリアルタイムで収集され、可視化機能により Web ブラウザを介して確認することが可能となった。これにより実験場所にいなくても集団の行動変化を把握できた。また、今回の実験では 3 回の実験とも集団が分断化するか隊列が伸びるといった、集団内の行動速度の変化が捉えられた。加えて津波浸水の時間発展を確認することで、行動速度の変化が被災リスクを高めていることが明らかとなった。この一次情報及び津波浸水想定データを元に、参加者に対するフィードバック学習を行った。

3 回目の実験後に、支援システムを利用したフィードバック学習の時間を設けた。フィードバック学習はノートパソコンの Web ブラウザを用いて訓練内容を可視化し、プロジェクター画面を介して参加者に見せる方法で行われた(図 7)。支援システムはこの際に参加者の行動軌跡と合わせて、津波浸水の時間発展を可視化した。可視化と同時に、訓練結果の説明を行った。このフィードバック学習の前後にアンケート調査を行い、回答内容の違いから支援システム及びフィードバック学習の効果を検証する。フィードバック学習はプロジェクターに映し出された内容を基に説明を行う講義形式で行った。まず支援システムにより可視化された訓練結果を参加者に示し、その後詳細な説明を行った。

フィードバック学習前後に行われたアンケート調査において、「今回の避難訓練では、迅速な避難ができたと思いますか?」という問いに対して「はい」または「いいえ」で回答してもらい、その理由を自由に記述してもらった。続いて「今回の避難訓練・振り返り学習を通して、避難行動を考える上で最も重要だと思ったことはなんですか?」という問いに対して 7 つの選択肢を用意し回答させ、その理由を自由に記述してもらった。

フィードバック学習前の調査では、訓練の成否を自己評価する問いに対して 50%の参加者が「はい」を

選択した。1回目の実験では、浸水が迫る前に避難できた参加者は3名だったが、支援システムを利用する前では評価基準が乏しくかったためと考えられる。選択理由欄では「問題なく普通で移動できたから。」や「ルートをしっかりと理解していたため、皆と同じ方向に進んでいたため安心することができた」と記載されており、迷いやその他の要因による行動の遅れが出なかったことが、迅速な避難と考えた要因であったと推測される。

「いいえ」を選択した参加者はその選択理由として「避難意識不足のため、移動速度が遅い」「ゆっくり歩いていたから」と挙げていたように、避難行動速度を問題視していた。また「道が狭い(歩道が狭い)ため、前の人を追い抜かすことができなかった場所が多かった。」「避難意識不足のため、移動速度が遅い」と、行動速度の遅さの要因まで言及する参加者もいた。1章で述べた参加者毎の意識によって評価が左右されるという課題が表れた。

フィードバック学習後に行ったアンケート調査では、「はい」を選択した参加者が29%、「いいえ」を選択した参加者が71%であった。評価を改めた参加者は一回目のアンケートでは「はい」を選択した参加者であった。選択理由の変化については「津波が予想以上に早く浸水した」「津波の浸水予測とのオーバーレイの映像を見たときに、避難が間に合っていないと感じた。」と回答にあるように、浸水エリアと避難者が重なるといった客観的データに基づいたといえる。また「間に合っていないので、厚岸でもそういえば少しガラガラ歩いてしまった。」という回答者のように、自身の行動速度を記憶と照らし合わせ評価する傾向も見られた。

次に避難行動時の重要項目に対するアンケート調査結果を見ると、フィードバック前では「避難所位置の確認」と「避難ルートの確認」を選択した回答者がそれぞれ40%であった(図8)。これは前項の評価基準になっていた、迷わず避難できるための要素として選択されたと考えられる。その他の選択肢では「事前の防災学習」が8%、「周囲の人とのコミュニケーション」「避難行動速度」がそれぞれ6%であり、「災害情報収集手段」と「その他」を選択した参加者はいなかった。

フィードバック学習後の調査結果では、「避難行動速度」を選択した39%であった(図9)。次いで「避難ルートの確認」が28%、「避難所位置の確認」が19%であった。またフィードバック前では選択した参加者がいなかった「災害情報収集の手段」が3%となった。津波浸水の時間発展と自身行動をあわせて確認することにより、よりすばやく避難を行うことが重要であるという認識を持ったことが、行動速度を重要視した一つの要因ではないかと考えられる。学習後の感想の中には「津波の避難について、少しの差が生死を分けるかもしれないこと、到達するスピードがとても早いことを知ることができてよかった。」と回答した参加者がいた。集団の中でも津波が来る前に避難できた者とそうでない者が別れていたため、行動速度の変化が被災有無に直接的に関わることを実感できたことも意識変化を促した要因と言える。

以上の様に、本研究では支援システムは端末とサーバーがリアルタイムで連携することにより、訓練終了後に担当者が訓練結果を確認することができ、問題点などを洗い出した上で参加者にフィードバック、もしくは議論するような活動を支援することを可能とした。

【研究期間全体の成果】

本課題では、地理空間情報(G空間情報)、GIS(地理情報システム)、衛星測位(GPS、準天頂測位システムなど)の統合的な活用として、高精度避難ナビゲーションシステムを含む防災・減災のための高度情報システム構築および活用方法開発を目指した。この情報システムを援用し、地域開発と自然災害リスクとの関係を分析し、その結果から災害に対する社会的脆弱性について、人文社会科学と自然科学の両方の立場から議論を行った。特に、ここでは地方レベル、市町村レベル、町内会レベルというように空間スケールごとに分析を行ない、各スケールにおける開発と災害リスクの関係やリスク軽減のための課題などを明らかにした。さらに、上記の分析結果を受けて、防災・減災の対策を情報流通の面から検討した(図10)。特に、災害リスクを軽減させるために、国、地方自治体、住民組織、住民個人の間で、どのような情報流通を行う必要があるか明らかにし、それによって「災害に対する社会的脆弱性(Vulnerability)」「克服のための可能性を検討した。また、地域防災のための公開講座の開催、自治体防災担当者対象の講義の実施、自治体との相互協力協定にもとづく防災教育・地

域貢献の実施等により、最も効果的な研究成果の普及手法についても検討を行った。

平成 26 年には、災害の人文社会学的研究に関する地理空間情報、GIS、衛星測位の統合的活用方法の開発を行った。また、人口、土地利用など下記の分析に用いるデータ（特に地理空間情報を含むもの）の収集を行った。また、平成 27 年以降は、地域情報（土地利用および人口等）と被害想定に関する時系列的分析、避難施設と避難圏域に関するデータの収集と分析、住民の避難行動に関するデータの収集と分析などを行った。平成 27 年度には、北海道全域を対象に、現在、北海道危機対策課が整備を続けている津波浸水想定データを用いて、マクロナ視点による津波被害分析を行った。その際、地域情報（土地利用および人口など）を GIS に取り込んで空間データベースを構築した。この 2 年間で、積雪寒冷地の事例である北海道の津波浸水想定域人口を推定し、津波深度別人口や年齢別人口を算出した（図 11）。これらの作業で求めた数値により、災害時避難の対象となる人口を定量的に扱うことができた。この作業は、当時 2010 年国勢調査ベースで行っていたが、平成 29 年度には 2015 年国勢調査の GIS データが公表されたため、それを用いて新たに計算を行った。また同年に、津波浸水想定域の日本海側データが公表されたため、それにより津波浸水域人口を推定し直し、主に市部で津波被害の危機が高まったことを明らかにした。

平成 28 年度以降には、事例市町村を選定し、人口、土地利用、津波浸水想定だけではなく、避難施設と避難圏域に関するデータの収集と分析を行った。その際には避難施設や避難ルートなど、住民避難に関する地理空間情報も取り込み、空間データベースを構築した。この分析により、生活レベルのミクロナ視点で、各自治体のもつ「災害に対する社会的脆弱性」に関する分析を行った。ここでは、町内会、保育園施設、高齢者施設などの津波災害時避難に関する聞き取り調査を行い、その対応と課題について分析を行った（図 12）。また、北海道総務部危機対策課、国土地理院、北海道沿岸市町村を結ぶ防災に関する地理空間情報の流通促進のため、マニュアル作りなど体制の整備を行った（図 13）。さらに、市町村の防災担当者の聞き取り調査から、この地理空間情報の流通促進に関する課題について明らかにした。

これまでの研究成果を受けて平成 29 年度以降は、町内会レベルもしくは個人レベルの避難に関する分析を行った。なお、最後に各スケールにおける開発と災害リスクの関係やリスク軽減のための課題などを明らかにした。この年には、津波避難困難地域から避難場所までの個人および集団避難実験を行い、そこで得られた移動ログや津波浸水想定 GIS データ等を分析して、避難の課題について検討した（図 14）。

平成 30 年度には、総括として、準天頂衛星などによる衛星測位と地理空間情報および GIS の統合的活用法を開発し、積雪寒冷地の地域特性を考慮した災害発生時の避難に関する研究を行い、課題抽出と対策のための提言を行った。なお、ここでは高精度避難ナビゲーションシステムを含む防災・減災のための情報システムを構築し、その活用方法の開発を行った。次に、地理空間情報と GIS の統合的活用法を開発し、地域防災力を強化し、防災・減災のための災害情報の高度活用について研究を行った。その中では、都市開発が地震・津波災害の災害リスクや災害に対する社会的脆弱性を増大させる可能性を論じ、地理空間情報活用による対策の有効性を検討した。なお、ここでは地方レベル、市町村レベル、町内会レベル等の異なる空間スケールごとに分析し、各スケールにおいて防災・減災のための課題などを明らかにし、「自助・共助を最適化する公助」についての提言を行った。

さらに、地域防災のための公開講座の開催、自治体防災担当者対象の講義の実施、自治体との相互協力協定にもとづく防災教育・地域貢献の実施等により、効果的な研究成果の普及手法を検討した。GIS や地理空間情報の防災への有効活用について、自治体や自主防災組織などで講演会や防災 GIS セミナーを開催した。

また、北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センターでは地震火山地域防災情報支援室を設置し、公開講座の実施や地震防災教育活動を実施した。なお、全ての年度を通じて、地域防災のための公開講座の開催し、自治体防災担当者への講義を実施し、北海道大学理学研究院とえりも町との相互協定を利用したえりも町での防災教育活動・地域貢献を実施し、効果的な研究成果の普及手法を探った。

本期間を通じて目的は、ほぼ達成できたと思われる。しかし、研究開始時点で最新技術であったものが、研究期間内における AR, VR, IoT, Ai などの著しい技術進歩により、古くなっている。そのため、最新の地理空間情報に関する技術を修得し、それを前提として地理空間情報, GIS, 衛星測位を統合した防災・減災のための高度情報システム構築を行う必要がある。それによって、災害誘因の予知研究の成果を自治体や個人など社会につなげる地理空間情報の流通促進を行い、「自助・共助を最適化する公助」についての議論を進めることができるものと考えられる。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

橋本雄一, 2018, 津波防災と自治体・住民の対応, 地理, 63(8), 60-68.

塩崎大輔・橋本雄一, 2018, WebVR を用いた疑似津波避難訓練システムの開発, 情報処理学会研究報告情報システムと社会環境(IS), 2018-IS-145, 1-6.

塩崎大輔・橋本雄一, 2018, 津波の時間発展を考慮した疑似避難訓練システムの利活用, 情報処理学会研究報告情報システムと社会環境(IS), 2018-IS-146, 1-6.

塩崎大輔・橋本雄一, 2018, ICT 及び WebVR 技術を援用した疑似津波避難訓練システムの利活用, 第 27 回学術研究発表大会講演論文集, 27, CD-ROM.

奥野祐介・塩崎大輔・橋本雄一, 2018, GNSS を用いた疑似的津波集団避難行動分析 北海道釧路市・厚岸町を事例として, 地理情報システム学会講演論文集, 27, CD-ROM.

内藤健裕・橋本雄一, 2018, 積雪寒冷都市における津波避難困難地域に関する空間分析 北海道釧路市を事例に, 地理情報システム学会講演論文集, 27, CD-ROM.

内藤健裕・橋本雄一, 2018, 積雪寒冷都市における津波避難困難地域に関する空間分析 北海道釧路市を事例に (要旨), GIS - 理論と応用, 27, 123.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

今期の計画において本研究は、地理空間情報, GIS, 衛星測位に現代的 ICT 技術, AI, IoT などを統合し、避難行動に関するマイクロジオデータ等を収集して、防災・減災に関して社会的有効性の高い統合的な情報活用システムを開発する。その際、旧計画開始時より進歩した AR, VR, IoT, Ai などの技術を前提とし、地理空間情報に関する情報通信技術を援用する。

本研究では開発したシステムを援用し、都市的な地域開発と災害誘因となる自然現象とで人的被害や経済的被害を分析することで災害リスクの解明を行い、その結果から「災害に対する社会的脆弱性 (Vulnerability)」について、人文社会科学と自然科学の両方の立場から議論を行う。特に、ここでは地方レベル, 市町村レベル, 町内会レベルというように空間スケールごとに分析を行ない、各スケールにおける開発と災害リスクの関係やリスク軽減のための課題などを明らかにする(図 15)。

上記の分析結果を受けて、防災・減災の対策を情報流通の面から検討する。特に、災害リスクを軽減させるために、国, 地方自治体, 住民組織, 住民個人の間で、どのような情報流通を行う必要があるか明らかにし、それによって「災害に対する社会的脆弱性 (Vulnerability)」克服のための可能性を探る。

特に本研究は、地震本部により発生が切迫している可能性が高いと評価された千島海溝南部の超巨大地震による津波を想定し、北海道東部太平洋沿岸(釧路市, 厚岸町など)の積雪寒冷地を主なフィールドとして研究を進める。これらのフィールドは、道路の凍結や、堆積した雪による歩道の幅員減少など、冬季(積雪期)に避難移動を困難にする要素が増加する。このような状況を想定し、本研究は積雪寒冷地の防災・減災に向けた情報システムの開発と活用についても研究を進める。

平成 31 年には、災害の人文社会学的研究に関する地理空間情報, GIS, 衛星測位の統合的活用方法の開発を行う。準天頂衛星システムは平成 29 年度に衛星 4 機体制となったため、衛星測位で取得できる位置データや標高データの精度が大幅に向上した。当年度には準天頂衛星システムを用いた活用方法の開発と実証実験を行い、さらに従来の空間分析手法の改良などを行う。なお、当年度では平成 27 年国勢調査小地域統計など最新の人口や土地利用を収集し、これまでに収集したデータと融合させて、

分析に用いる時空間データベースの作成を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

谷岡勇市郎・村上亮・茂木透・大島弘光・高橋浩晃・勝俣啓・村井芳夫・橋本武史
西村裕一・青山裕・森濟・山田卓司

(北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センター)

橋本雄一 (北海道大学大学院文学研究科)

他機関との共同研究の有無 : 有

参加機関 北海道大学大学院文学研究科

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

電話 : 011-706-3591

e-mail : isv-web@mail.sci.hokudai.ac.jp

URL : <http://www.sci.hokudai.ac.jp/grp/isv/isv-web/>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 谷岡勇市郎

所属 : 北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センター

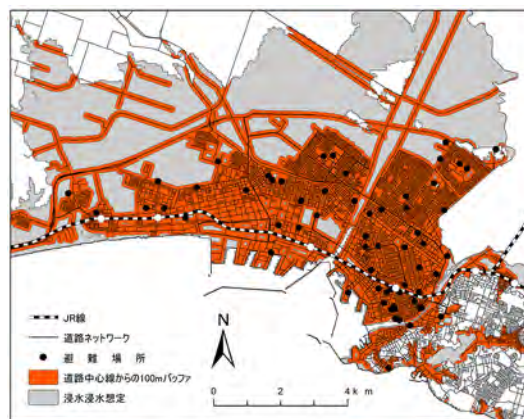


図 1 津波浸水想定域と道路中心線バッファ

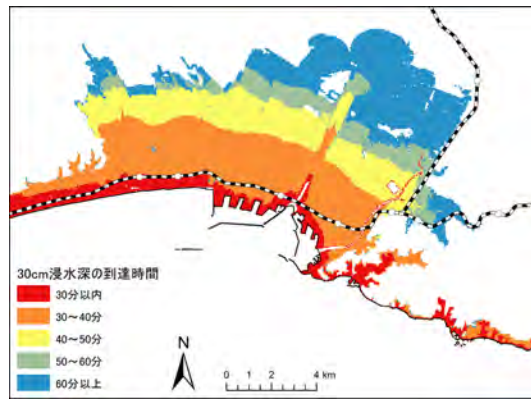


図2 北海道釧路市における津波浸水想定域

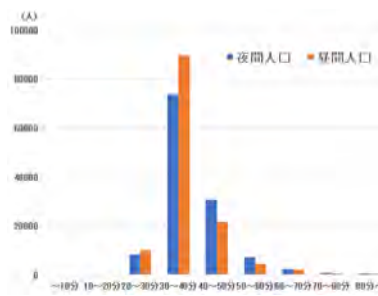
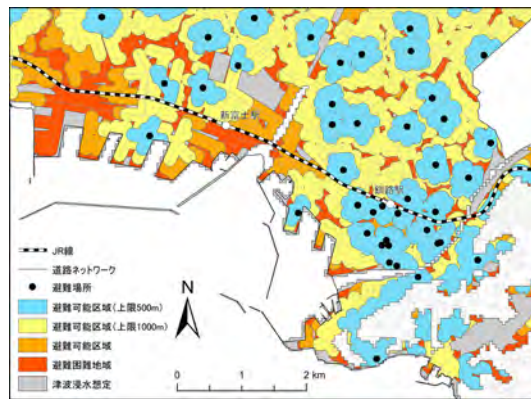


図3 津波の到達時間別人口分布



避難可能区域と避難困難地域（夏季・昼間の例）

	夏季		冬季	
	昼間	夜間	昼間	夜間
避難困難人口	9,921	11,058	11,010	14,594
釧路市（1,000m）	22,609	22,636	22,625	22,940
消防庁（500m）	72,995	81,721	72,995	81,721

表1 津波災害時の避難困難人口

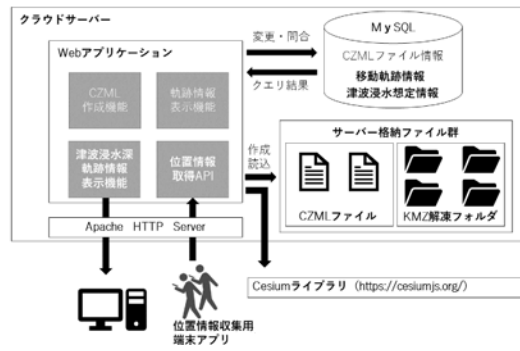


図5 システム概要図



図6 位置情報及び津波浸水想定データの可視化

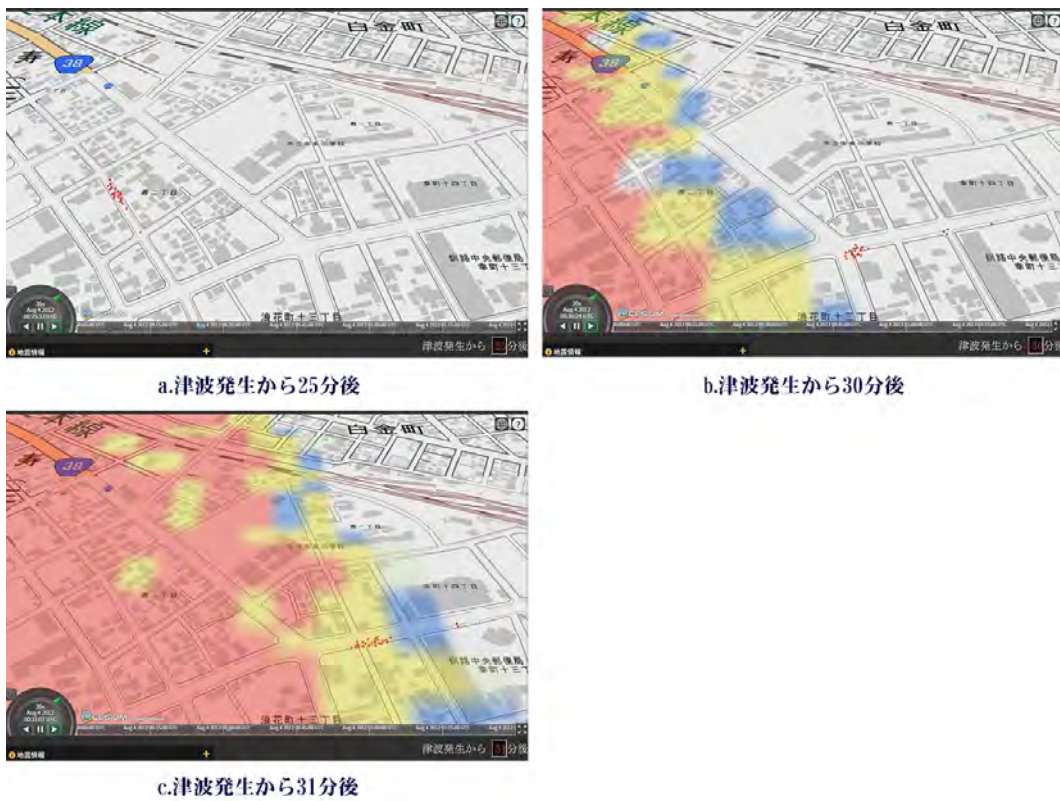


図7 実験後の位置情報及び津波浸水想定データの可視化

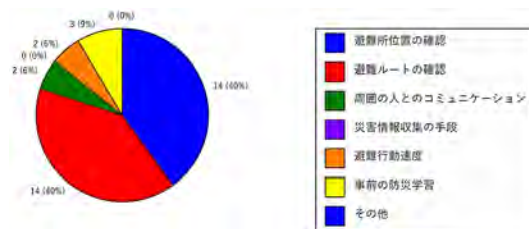


図8 アンケート調査集計結果(フィードバック学習前)

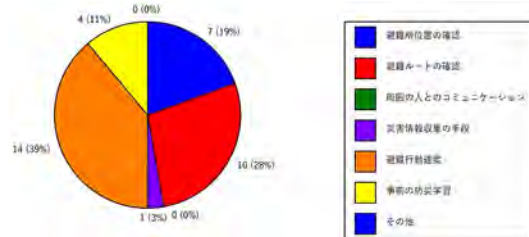


図9 アンケート調査集計結果(フィードバック学習後)

津波減災対策のための地域モニタリングシステム構築

- 津波想定域の可視化技術開発**

 北海道が発表している津波想定データをGISにより可視化。低コストでハザードマップを作成する技術を開発し自治体に提供。
- ネットワーク空間でのボロノイ領域分割とバッファ生成による避難困難地域の抽出法開発**

 GISで避難スペースが不足する地域や避難場所への到達困難な地域を抽出。
- スタンドアロン避難ナビ・システムの開発および避難行動ログ収集**

 ネットワークへの接続なしでも機能する避難ナビをタブレット端末で開発。これを冬季と夏季の疑似避難訓練で使用し、衛星測位による避難行動ログを収集。
- 避難行動の障害に関する空間分析技術開発**

 GISによるログ解析によりマイクロスケールでの避難行動における障害を特定。
 夏季(赤)+冬季(青)
 冬季と夏季の結果を比較することで、積雪の有無による避難行動の障害の相違を明確化。

目標：(1) 減災のための避難体制最適化に向けた地域モニタリングシステムを開発。
 (2) 積雪寒冷地での災害発生時に自助・共助を最適化するための公助のあり方を考察。

図10 プロジェクトの概要(平成26~30年度)

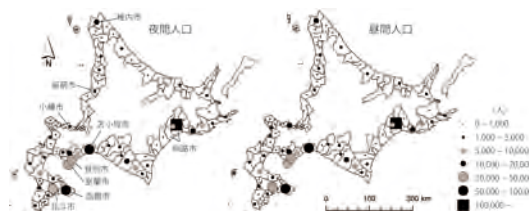


図11 市町村別津波浸水域人口の推定値(2010年国勢調査による)

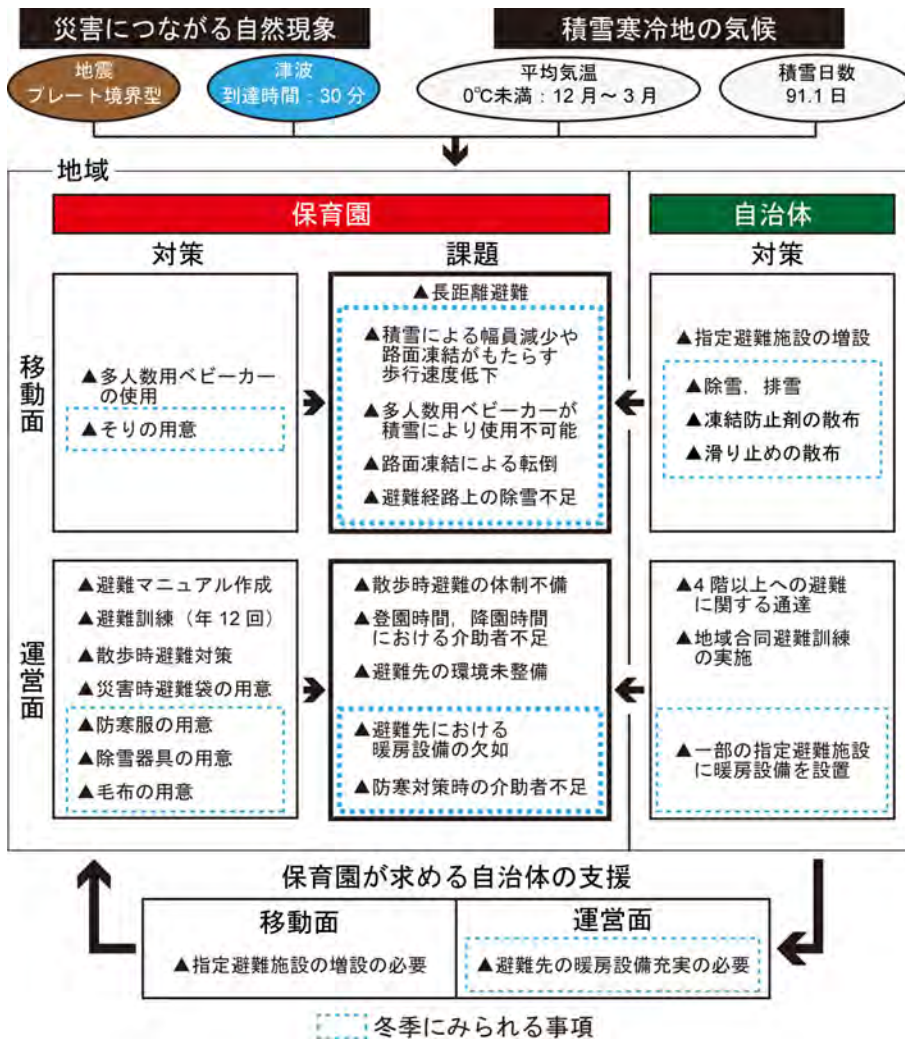


図 12 釧路市の保育園における津波避難の課題と対策（聞き取り調査による）

北海道沿岸自治体ハザードマップ作成に関する検討会議

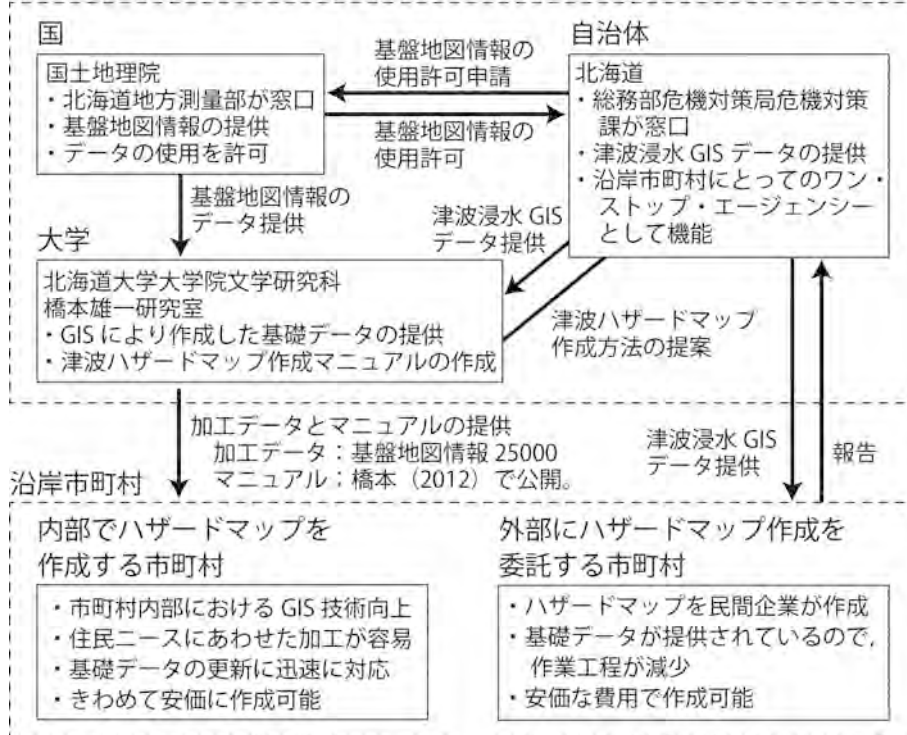


図 13 GIS を用いた北海道自治体の津波ハザードマップ作成支援体制

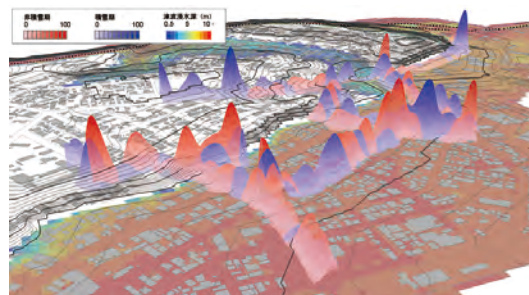


図 14 避難行動ログによる歩行速度変化の 3 次元表示 (釧路市入船地区)

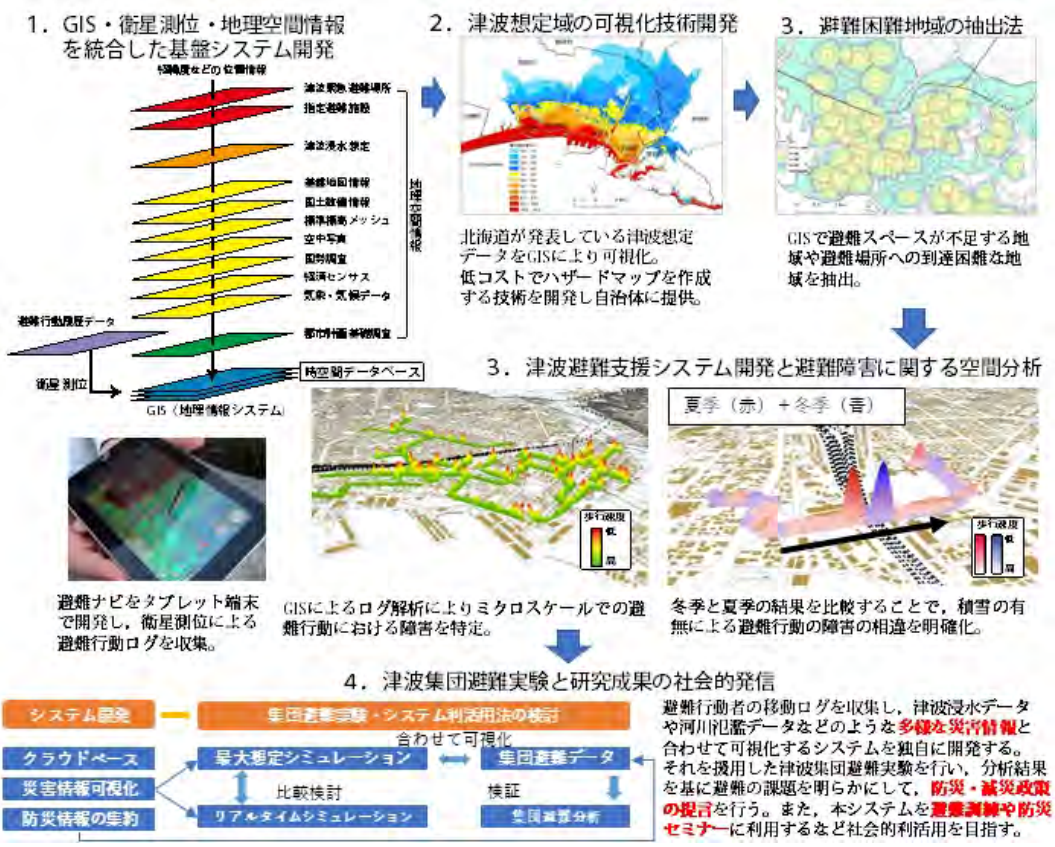


図 15 次期プロジェクトの概要

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地殻変動等多項目観測データ全国リアルタイム流通一元化解析システムの開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

ウ. 観測・解析技術の開発

(4) 研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

GNSS・地殻変動連続観測等の多項目観測データを全国にリアルタイム流通させるシステムを開発し、データの流通・収集・管理・解析を一元的に行うほか、関連する技術研修を実施し人材育成を図る。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

GNSS・地殻変動連続観測等の多項目観測データ全国リアルタイム流通一元化解析を実施するために、流通データ規格の策定や、流通システム開発、解析システム開発に関する基礎的な研究や実証試験を実施する。流通データを含めた各種データの一元的な管理にむけた環境整備を進める。人材育成のため観測・機器技術研修を実施する。

平成 26 年度においては、流通管理規格、解析技術、観測・機器技術研修等 WG によるデータ流通・解析等の技術的検討と研修計画策定を開始する。

平成 27 年度においては、流通規格案を策定するほか、データ流通の技術的検討と解析システムの設計概念をまとめる。観測・機器技術研修を実施する。

平成 28 年度においては、データ流通管理規格を決定し、データ流通の試験運用を開始するとともに、データの収集・保管を実施する。解析システムの開発を開始しプロトタイプを作成に着手する。

平成 29 年度においては、データ流通試験運用で明らかになった問題点の改良を行うほか、データの収集・保管を継続する。解析システムの開発を継続し試験運用開始を目指す。観測・機器技術研修を実施する。

平成 30 年度においては、データ流通の本格運用への移行を目指すとともに、解析システムの改良を実施する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

平成 30 年度の成果 :

GNSS データ流通公開保存管理システムでのデータの蓄積を開始した。GPS 大学連合で実施した 2003 ~ 2005 年東海稠密 GPS 観測網のデータの格納を完了した。リアルタイム GNSS データ解析について、オンサイト解析方式の実証試験を実施した。民間測量業者が提供する補正情報を用いた測位結果と、汎用的なソフトウェアを用いた後処理測位を比較したところ、10 分程度の期間で上下成分でも両振幅 10cm 程度の誤差であった。オンサイト方式は、スタンドアローンでの運用が可能であり、従来のデータセンター解析方式に比べ、災害時等に有効な手段となる可能性がある。地殻変動連続観測データ等の全国流通・公開を継続した。新たに産業技術総合研究所の超伝導重力観測点のデータの格納を開始した。長周期データの相互比較を行うため STS 地震計データの収録機能を付加した。

計画期間中の成果 :

GNSS データの公開流通を実施するためのサーバの製作を行った。観測データや観測点の管理、データのアップロード・ダウンロードなどが一元的に行える。また、WEB 上で簡易解析を行える機能や、リアルタイムデータを受信配信出来る付加機能も装備した。地震波形流通網等を用いた実データの流通実験は今後の課題である。このアーカイブを用いた GNSS の過去に行われたキャンペーン観測のデータのアーカイブ作業を行った。リアルタイム解析の評価を実施し、補正情報を用いるオンサイト式のリアルタイム測位手法でも後処理解析に匹敵する精度が見込める可能性を示した。地殻変動連続観測等データの全国流通一元化システムの運用と機能向上を実施した。Web ベースで潮汐予測を行える機能や、CMT 解から理論ひずみ波形を計算できる機能を付加したほか、電磁気観測データや超伝導重力計データ等の収集を新たに開始した。また、地殻変動連続観測技術の学習キットを作成し、大学院生や職員向けの技術研修を実施して計測技術の伝承を図った。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

山口照寛・高橋浩晃・笠原稔、地殻変動データベース開発状況 2018、日本測地学会講演予稿集、201、2018。

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

地殻変動連続観測等データベースの運用を継続し、データの流通一元化を継続する。他機関データの受け入れに向けた技術的課題を検討する。GNSS データベースの運用を継続し、過去データのアーカイブを進める。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター 高橋浩晃、山口照寛

他機関との共同研究の有無 : 有

北海道立総合研究機構地質・環境研究本部地質研究所 (岡崎紀俊)

自然科学研究機構国立天文台水沢 VLBI 観測所 (田村良明)

東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知観測研究センター (三浦哲、太田雄策)

気象庁気象研究所 (勝間田明男、小林昭夫、木村一洋)

東京大学地震研究所（加藤照之、新谷昌人）
 神奈川県温泉地学研究所（里村幹夫、本多亮、原田昌武、道家涼介）
 地震予知総合研究振興会東濃地震科学研究所（浅井康広）
 名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター（鷺谷威、伊藤武男）
 京都大学防災研究所附属地震予知研究センター（山崎健一、森井互、加納靖之、西村卓也）
 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設（柴田智郎）
 高知大学自然科学系理学部門（田部井隆雄、大久保慎人）
 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター（松島健）
 鹿児島大学理工学研究科地球環境科学専攻（中尾茂）

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター
 電話：011-706-3591
 e-mail：isv-web@mail.sci.hokudai.ac.jp
 URL：http://www.sci.hokudai.ac.jp/isv/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：高橋浩晃、大園真子、山口照寛
 所属：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

2019/2/14 GNSSデータ流通公開保存管理解析システム: GnsProduct GPS ログアウト

GNSSデータ流通公開保存管理解析システム

観測点データ一覧

表示する年・月
2006年 6月

データ種別
RINEX

観測点グループ
Tokai_data

観測点	観測点名	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
TJ04	Osadanishi	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
TJ05	Ashikubo	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
TJ06	Okawa	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
TJ07	Ozatohigashi	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
TJ08	Kuno	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
TJ09	Asahata	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
TJ10	Tamakawa	00	00	00	00	01	00	01	00	01	00	01	00	01	00	01	00	01	00	00	00	00	00	00	00
TJ13	Hanashi	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
TJ14	Setoya	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01
TJ15	Aojimakita	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01

http://gns.sci.hokudai.ac.jp/dashboard/GnsProduct/StationData 1/4

図 . GNSS データシステムに格納された東海稠密 GPS 観測のデータ

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

Lバンド 航空機 SAR による革新的火山観測手法の開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究では、近年の技術進展が目覚ましい航空機搭載型の L バンド SAR を火山観測に応用するため、宇宙航空研究開発機構と共同して、革新的な観測・解析手法の開発を目標とする

< 振幅・偏波解析による定量的火山モニタリング >：

宇宙航空研究開発機構の航空機 SAR システムである PiSAR-L2 の高解像度散乱振幅および偏波に関する時系列データの数値的較にもとづく火山活動関連情報の定量的抽出手法を開発する。

< リピートパス干渉法の実現へのチャレンジ >：

PiSAR-L2 に装備済みの高精度 GPS-INS 航路追跡装置を利用した、航空機リピートパス干渉による地殻変動解析手法の開発をめざす。

< 地殻変動モデル化手法の高度化 >：

マグマ移動、火山性地震、地滑りなどが重畳する複雑な変動場を効果的にモデル化する手法を開発する

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本研究では、実際に桜島および霧島火山群において、Pi-SAR-L2 による航空機 SAR 観測を実施し、取得したデータに基づきながら、高度な火山観測手法の確立を目指す。以下に、実施年度ごとの研究計画を示す。

なお、研究期間中に他の火山が顕著な活動を示した場合は、関係機関と調整の上、それまでの達成成果、予算執行状況等を勘案しながら、活動中の火山に観測対象を変更することも考慮する。

第 1 年次(平成 26 年度)

・Pi-SAR-L および Pi-SAR-L2 のアーカイブデータを利用した、定量的時系列解析手法開発のための予備的検討

第 2 年次(平成 27 年度)

・JAXA が単独で実施する観測(予定地域：桜島・霧島)、を利用したデータ解析

第3年次(平成28年度)

- ・JAXAによる前年次観測結果(予定地域:桜島・霧島)の高次解析
- ・モデル構築の試行

第4年次(平成29年度)

- ・第2回目観測実施(桜島・霧島)およびデータ解析
- ・第1回目および2回目観測結果を使用したDInSAR解析の実施と改善点の洗い出し

第5年次(平成30年度)

- ・DInSAR解析手法の完成と解析結果取りまとめ
- ・地殻変動モデル構築手法の完成と解析結果取りまとめ

(8)平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要:

I 平成30年度の実施内容

1.画像理サンプリング手法の高度化

平成29年度の研究の結果,これまで衛星データに対して標準的に用いられてきた低次多項式近似に立脚するSLC画像のリサンプリング手法に,改良の余地があることが明らかになった.これを受けて,平成30年度は,この手法の高度化を実施した.具体的には,SAR干渉解析ソフトウェアパッケージであるRINC(研究分担者の小澤拓防災科学技術研究所主任研究員が開発)のピクセル毎の画像シフト機能を利用することとした.その結果,干渉性確保の条件である主従画像の比較対象点の同一性の向上がもたらされ,極めて良好な干渉結果を得ることができた.

以下では,この処理が必要な背景を簡単に説明する.干渉SARでは,2時期の画像間で同一地点に対応するピクセルの位相を比較し,レーダーとの距離の変化を算出する.完全に近い真空中をほぼ重力のみによって飛行する衛星の場合は,主従画像の位置の不一致は,微小かつ規則的であり,座標の二次関数の当てはめで十分近似される.ところが,航空機SARでは,航路上の風などの影響を受けて航空機の飛行速度が不規則に変化し,その結果として,飛行方向の画像位置に特に大きなひずみが生ずるため,全体としての干渉性が劣化する.例えば,航空機SARの画像に,2次曲線でのフィッティング処理を施しても,+/-10ピクセルに達するような残差が残ることが昨年度までの研究で見いだされた.その結果,昨年度まで採用していた2次曲面の当てはめでは,地点の同一性が十分は確保されず,その結果,干渉性の劣化が生じていた.

平成30年度は,RINCの画素ごとのリサンプリング機能を利用することによって,主従画像の位置合わせを可能な限り厳密に行い,位相比較が地上の同一地点を対象にして実施される理想状態に近づけた.以下,具体的に成果を報告する.実験の対象としたのは,霧島上空を南東から北西方向に向かって左下を見下ろしながら観測したEW軌道の2014年と2016年の画像である(図1参照).

図2に,従来手法(2次曲面のフィッティングによる主従画像の位置合わせ)と新しく開発した手法(詳細位置合わせ)の干渉結果の比較を示す.上段に新旧手法の干渉結果(軌道縞と地形縞は除去済),下段にコヒーレンスを示す.なお,コヒーレンスが明るいピクセルほど,干渉性が高い.画像全体で干渉性が上がっているが,特に,画像の下半分で改善が顕著である.なお,コヒーレンス画像では,低干渉領域が飛行方向に直行した帯状に分布しているが,この筋に相当する観測時に,航空機の速度が大きく変化したことが示唆される.コヒーレンスの帯に対応した位置で,位相にも同様の帯状の変化が現れている.現時点では,航空機の精密な航路情報が入手不能であるので,確認はできないが,航路の乱れによって位相の乱れが発生している可能性が高い.高精度航路情報がないため,発生原因から補正することはできないものの,幸い,位相誤差分布の空間波長は比較的長く,変化の度合いも緩やかであるので,位相の長周期トレンド成分のフィッティングにより,取り除くことが可能であり.その結果,より局所的な地殻変動が抽出ができる.

図3にその結果を示す.飛行速度が急激に変化したと考えられる時間帯に相当する帯状の領域では,位相の乱れが若干残っているが,画像全体にわたってほぼ安定した位相分布が復元されている.このペアでは,ちょうど硫黄山に相当する観測時間帯に,速度変化が発生したと考えられ,旧手法では,干

渉性が十分ではなかったが、新手法ではより広く干渉を復元することができている。なお、夷守岳周辺では地形に相関する位相分布が残っており、大気中の水蒸気の影響を受けている可能性が高い。

図4および図5には、硫黄山周辺および新燃岳火口周辺の新旧比較結果を示す。もともと干渉性の良かった新燃岳周辺では、両者に大きな違いがない。その一方で、たまたま観測時に飛行速度が急変したと考えられる硫黄山周辺では、新手法による改善効果が大きく、より周辺の領域まで含めてシグナルが復元できたため、この結果を使用することによって地殻変動解析の精度を高められると期待される。

以上で見てきたように、主従画像の詳細位置合わせ手法を適用することにより、従来は干渉しなかった領域でも地殻変動シグナルの復元が可能になり、航空機 SAR 観測の有用性を大きく改善させることができた。

2. 地殻変動三次元成分分解手法の適用

霧島火山を対象に航空機データが取得された2014年、2016年、2017年にまたがる機関では、硫黄山周辺および新燃岳火口内で進行する地殻変動の存在知られている。加えて、霧島では、3方向からの航空機 SAR 観測が実施されており、地殻変動の三次元分布が取得できる可能性がある。したがって、平成30年度は、硫黄山を対象にして、航空機 SAR データから、3次元地殻変動分布を求める手法を開発した。

なお、この手法開発時には、前章で紹介した位置合わせ手法の高度化がまだ達成していなかったため、画像位置ズレ修正には従来手法を適用した干渉結果を用いている。このため、データには、航空機進行方向の不規則な縞が残存し、無変動域においても見かけの位相変化が生じるなど、SN比が悪い領域が残存している。したがって、今回は、航空機 SAR データに加え、同時期に取得された ALOS-2/PALSAR-2 の衛星データも解析に加えることで、3次元分解の精度を向上させた。その結果、恐らく、世界で初めて航空機 SAR データを用いた地殻変動の三次元成分抽出に成功した。ほぼ南北の軌道を飛行する衛星からのデータのみを用いる場合は、変動の南北成分の獲得は原理的に困難であり、今回成功した南北成分分布把握は、航空機 SAR データの寄与なしには達成できなかった成果である。

図6に、2016年-2017年間の、硫黄山周辺の三次元地殻変動分布を示す。ほぼ画像の中央部に硫黄山が位置している。上下成分は硫黄山を中心とした隆起が確認できる。また、東西、南北成分では、硫黄山を中心として、それぞれ東西方向および南北方向に拡大するセンスの変動分布が捉えられている。この解析により、10²程度と比較的小さな地殻変動であっても、航空機 SAR により三次元変動分布の復元が可能であることが確認できた。

3. 変動を説明するモデル作成手法の高度化

平成30年度は、前年度までに引き続き、衛星 SAR によって捉えられている御嶽山の水蒸気爆発後の収縮性の変動の解析とモデル化を実施した。この現象を浅部の貯水槽の水蒸気放出に伴う減圧現象とする仮説に基づき、水収支モデルを構築した。減圧源の深度が浅いことから地殻変動解析には有限要素法を使用した。放出水量と地殻変動量の比較したところ、火口からの放出水量は、衛星 SAR で確認された浅部の収縮源からの供給可能量を超過しており、より深部に存在する別の供給源の寄与を考える必要性が示された (Narita and Murakami, 2018)。

II 全期間の研究成果の総括

本課題では、観測の随時性、多方向観測可能性などの航空機 SAR の特徴を生かすことで、地殻変動を把握する測地学的な手法のメニューを拡充し、それにより得られた観測結果から地球物理学的情報を最大限に引き出すためのモデル化手法の高度化を試みた。予備的な考察により、航空機 SAR は、複雑な変動が急速に進展する性質を有する火山性変動の把握に適すると考えられたことから、研究対象は火山とした。

本課題独自の観測は、桜島火山、霧島火山、雲仙火山を対象として2017年度に多方向観測を実施した。干渉を試みる他時期のデータは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) から提供を受けた。

航空機 SAR の干渉解析に使用するソフトウェアには、基本的に RINC を用いることとし、衛星データを対象とした標準的な手法では不十分な部分について、適宜、修正したり拡張したりする方針で航空機 SAR 干渉手法への適用手法を構築した。このような改良を加えた結果、従来は、一部の例外を除いて、成功例の少なかった干渉解析を高い確率で達成させられる手法を確立した。干渉性を確保するうえで最も重要なポイントは、位相を比較する 2 枚の画像の位置合わせの品質であることを突き止め、それを高度に達成することで、画像の大部分で干渉を成立させることができた。

火山現象への適用に当たっては、観測期間中の地殻変動の進行が知られていた霧島火山硫黄山を対象として、多方向観測による三次元地殻変動分解を試み、衛星データ単独では得られない地殻変動南北成分の分布を求めることができた（平成 30 年度）。

一方、モデル化については、有限要素法等、数値解析手法の導入について準備を重ねたが、御嶽山を対象として 2014 年噴火後の収縮性地殻変動の衛星 SAR 干渉結果に有限要素法を適用し、そこから得られた収縮量と火口からの水放出量を比較することで、放出されている水の大部分は、地殻変動を引き起こしている浅部収縮源以外の別の供給源からもたらされている可能性が高いことを明らかにした。

なお、この課題開始とほぼ同時に稼働を開始した ALOS2 の高頻度観測結果が提供されるようになったため、従来の航空機 SAR 観測の随時性に関する優位性は減少したものの、他方向観測については、完全に代替する手段がいまだ存在しない。

他方、航空機 SAR 観測は、風による飛行速度の不規則変動に起因する誤差を完全には除去できないため、広域の変動把握には適していない。このため、空間的には局所に集中する変動量の大きな現象に注目することが有効であり、特に活動活発化時の火口周辺で進行する各種の火山現象の把握に有効であると考えられる。また、風による不意の速度変化の影響を低減させるため、同一のフライトで航路を周回し観測を繰り返すなどの観測の冗長化も精度向上に有効であると考えられる。さらに、火山現象のように、事象が、複雑かつ高速に進行する場合は、比較的短い期間の繰り返し観測が、(費用や航空規制の制約は別として、) 原理上は可能な航空機 SAR は、衛星の観測頻度が増加した現在でも、多くの長所を持った観測手法であると考えられる。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
成田 翔平・村上 亮(2018): 御嶽山 2014 年噴火後の噴気放水率推定, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 千葉市
村上 亮・古屋 正人・高田 陽一郎・青木 陽介・小澤 拓・島田 政信(2018): Pi-SAR-L2 データを利用した霧島火山の航空機 SAR 干渉解析, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 千葉市。
成田翔平・村上亮・古屋正人・高田陽一郎・青木洋介・小澤拓・島田政信(2018): Pi-SAR-L2 および ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた霧島硫黄山の 3 次元変位推定の試み, 2018 年度日本測地学会秋季大会, 高知。
Shohei Narita and Makoto Murakami (2018): Shallow hydrothermal reservoir inferred from post-eruptive deflation at Ontake Volcano as revealed by PALSAR-2 InSAR, , Earth, Planets and Space, 2018, 70:191, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0966-6>..

- (10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

北海道大学(村上亮, 古屋正人)
東京大学地震研究所(青木陽介)
京都大学防災研究所(高田陽一郎)
防災科学技術研究所(小澤拓)
他機関との共同研究の有無：有
宇宙航空研究開発機構 代表者：島田政信

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

電話：011-706-3591

e-mail：isv-web@mail.sci.hokudai.ac.jp

URL：http://www.sci.hokudai.ac.jp/isv/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：村上 亮

所属：北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

霧島上空 EW方向観測位置図

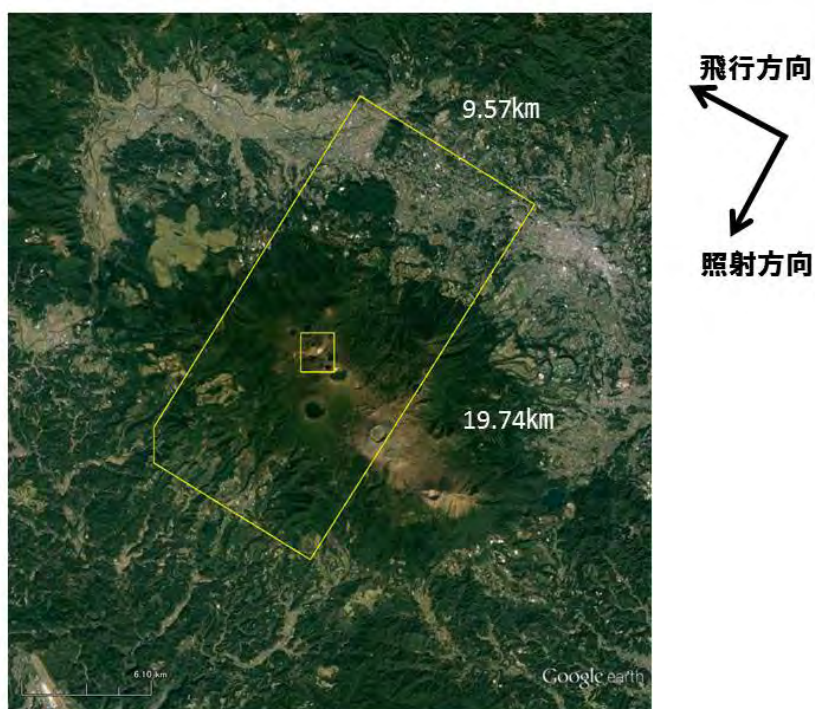


図1 解析地域位置図

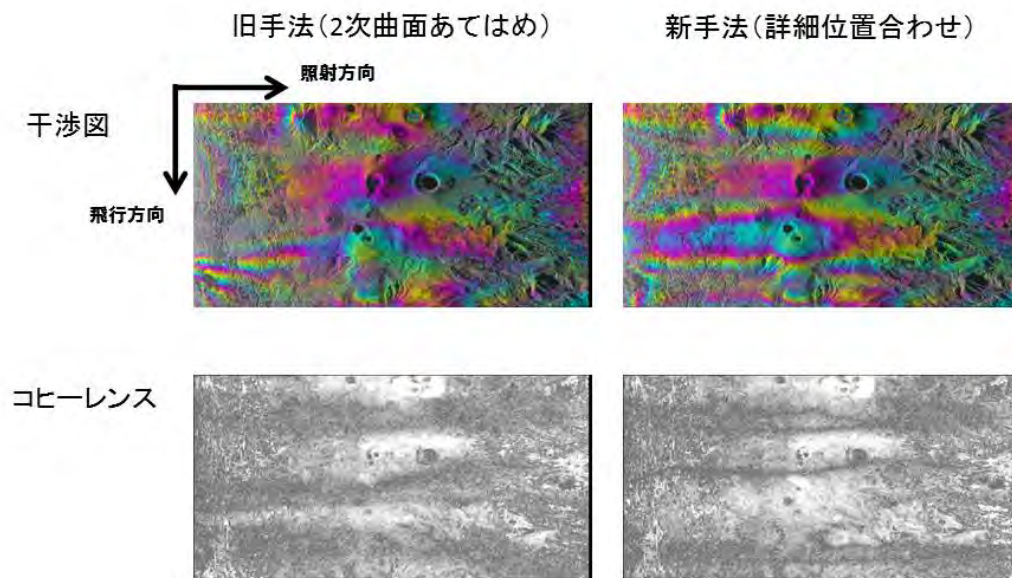


図2 EW軌道データ(2014-2016)に対するリサンプル新旧手法の比較.
 干渉図は, 軌道縞+地形縞は除去済. コヒーレンスは, 明るいピクセルほど
 干渉性が高い. 全体的に干渉性が上がっているが, 特に, 画像の下半分で
 改善が顕著である.

図2 EW 軌道データ (2014-2016) に対するリサンプル新旧手法の比較 .
 干渉図は , 軌道縞 + 地形縞は除去済 . コヒーレンスは , 明るいピクセルほど干渉性が高い . 全体的に干渉性が上がっ
 ているが , 特に , 画像の下半分で改善が顕著である .

長空間波長成分除去画像(位置合わせ新手法)

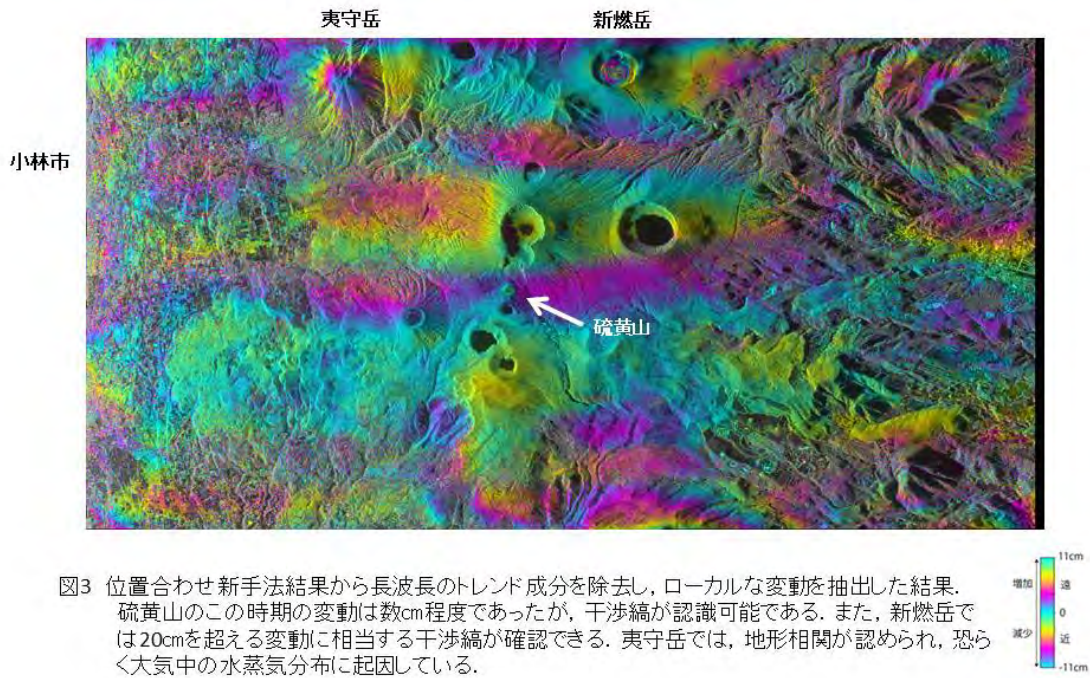
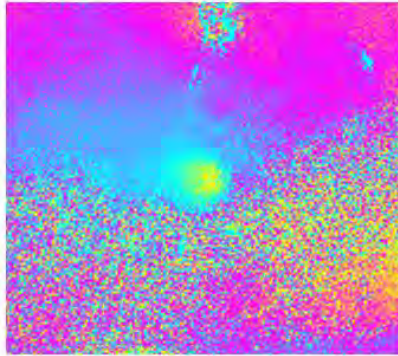


図3 位置合わせ新手法結果から長波長のトレンド成分を除去し、ローカルな変動を抽出した結果。硫黄山のこの時期の変動は数cm程度であったが、干渉縞が認識可能である。また、新燃岳では20cmを超える変動に相当する干渉縞が確認できる。夷守岳では、地形相関が認められ、恐らく大気中の水蒸気分布に起因している。

図3 位置合わせ新手法結果から長波長のトレンド成分を除去し、ローカルな変動を抽出した結果。硫黄山のこの時期の変動は数cm程度であったが、干渉縞が認識可能である。また、新燃岳では20cmを超える変動に相当する干渉縞が確認できる。夷守岳では、地形相関が認められ、恐らく大気中の水蒸気分布に起因している。

旧手法(2次曲面あてはめ)



新手法(詳細位置合わせ)

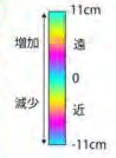
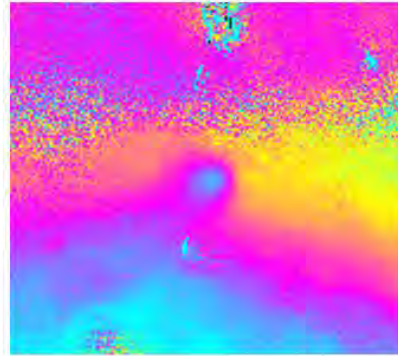


図4 硫黄山周辺の干渉状況の新旧比較.

両方で、画像中央部の硫黄山の膨張に伴う地殻変動(数cm)が確認できる。旧手法は画像の下半分の干渉性が劣悪であるのに対し、新手法のでは、より広い領域で干渉性が保たれている。前処理の関係で、両者の色調にオフセットがあるが、本質的ではない。干渉領域内の位相の相対値は同等であり、干渉領域を、より広い領域に拡張できたことが重要である。

図4 硫黄山周辺の干渉状況の新旧比較 .

両方で、画像中央部の硫黄山の膨張に伴う地殻変動(数?)が確認できる。旧手法は画像の下半分の干渉性が劣悪であるのに対し、新手法のでは、より広い領域で干渉性が保たれている。前処理の関係で、両者の色調にオフセットがあるが、本質的ではない。干渉領域内の位相の相対値は同等であり、干渉領域を、より広い領域に拡張できたことが重要である。

旧手法(2次曲面あてはめ)

新手法(詳細位置合わせ)

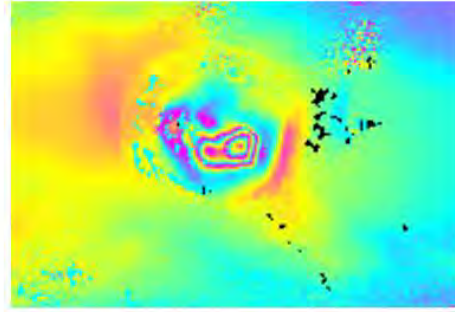
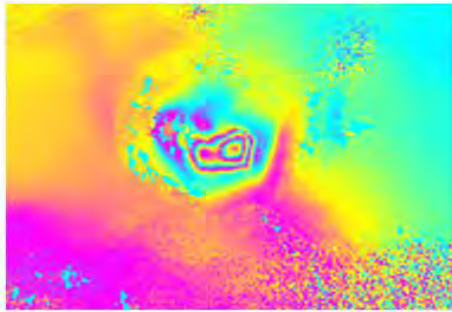


図5 新燃岳火口周辺の干渉性の比較. この領域の観測時には, 飛行の等速性が保持されていたと考えられ, 右下の領域を除いて, 両者に大きな違いはない. 火口内の溶岩域で, 20cmを超える膨張性の変動が確認できる.

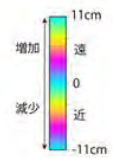


図5 新燃岳火口周辺の干渉性の比較.

この領域の観測時には, 飛行の等速性が保持されていたと考えられ, 右下の領域を除いて, 両者に大きな違いはない. 火口内の溶岩域で, 20?を超える膨張性の変動が確認できる.

3次元変位 (2016-2017年)

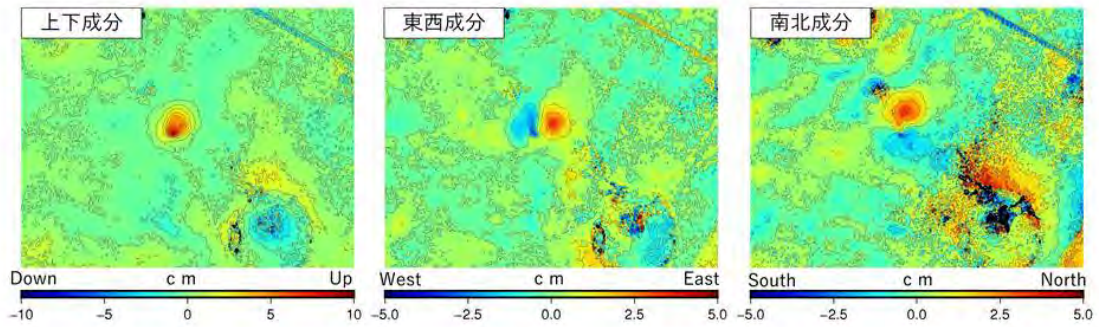


図6 航空機SARデータ(2016-2017)に同時期のALOS2/Palsar2データを加えて実施した三次元解析結果。ほぼ画像の中央部に硫黄山が位置している。上下成分は硫黄山を中心とした隆起が確認できる。また、東西、南北成分では、硫黄山を中心として、それぞれ東西方向および南北方向に拡大するセンスの変動分布が捉えられている。

図6 航空機 SAR データ (2016-2017) に同時期の ALOS2/Palsar2 データを加えて実施した三次元解析結果。画像のほぼ中央部に硫黄山が位置している。上下成分は硫黄山を中心とした隆起が確認できる。また、東西、南北成分では、硫黄山を中心として、それぞれ東西方向および南北方向に拡大するセンスの変動分布が捉えられている。

(1) 実施機関名：

北海道大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

準リアルタイム火山情報表示システムの開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(5) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(4) その他関連する建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

火山防災対策は噴火警報等を起点とした避難等の予防対策に始まり、噴火後は被災者救援や二次災害防止等の応急対策に移り、活動が沈静に向かうにつれて避難解除、更に将来の噴火も見据えて復旧・復興対策が進められる。これら一連の対策のなかで、噴火前兆期や噴火活動期に展開される対策は活動推移に左右され、対応を誤ると被害を拡大させるが、その起点となる噴火予測や活動の推移予測の技術は研究・開発途上にある。

一方、国の IT 化推進によって数々の観測情報が(準)リアルタイムに取得できるようになってきた。これらは地方自治体における噴火前兆期や噴火活動期の減災対応において、未確立な予知技術を補完する有用な情報になりえる。

本課題では、火山情報などの防災情報とリンクするインターネットを通して入手可能な関係機関の各種観測情報の準リアルタイムな収集と統合表示を通して、地方公共団体が現況を総合的に把握し、的確な防災対応を行うための支援システムを構築する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

開発研究にあたってはシステムをハコモノ化させないために、情報の受け手として、国内初のハザードマップを作成するなど火山防災において先導的な役割を果たしてきた道内火山周辺の自治体を協力機関に加え、共同して実用的なシステムを目指す。

平成 26 年から平成 28 年までの前半 3 年間は、開発システムを協力自治体に展開し、協力自治体の意見を反映しつつ、事務機の PC でも稼働するマルチプラットフォームで、関係機関のインターネット上のサーバーに負荷をかけない二次サーバー機能を有したシステムにまで機能拡張を進める。

後半の平成 29 年から平成 30 年までの 2 年間は、システムに潜む不具合等を修正しつつ、運用上の課題と解決策、更に実用化への方策について検討する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

今年度は6月に十勝岳で臨時解説資料が、11月には雌阿寒岳で火口周辺情報が発表され、システムの有効性が試される出来事があった。また9月6日には最大震度7を観測した胆振東部地震が発生し、大規模な土砂崩れにより大きな被害が生じた。また全道規模のブラックアウトも発生した。

昨年度から進めていた一つの情報を一つのウインドウに表示する個別表示方式(図1)の実装は今年度にずれ込んだ。プログラムコードの修正中に胆振東部地震が発生し、これを契機に2016年の熊本地震から検討していた地震・震度情報の取得・表示機能の組み込みを行った(図2)。また、ホームページが更新された情報については、新しいページへの対応を進めた。その際、高解像度降雨レーダー画像の取得・表示機能を追加した(図1右上)。

システムの利活用では、十勝岳を有する美瑛町と雌阿寒岳を有する釧路市が、観光客や登山者など来訪者に火山防災情報のリアルタイムな提供を目的として集客施設にシステムを設置した。これはシステムが自治体に評価され、受け入れられていることを示している。

この他、秋田市で開催された日本火山学会秋期大会ではシステムのブース展示を行った。

本課題では、ハコモノ化しない・させないことを目指し、利用と運用にあたる火山を有する道内の自治体に試験システムを設置し、自治体と連携してシステム開発が進められた。開発は当初の計画通りであったが、セキュリティの厳しい自治体ネットワークにシステムが接続されることは皆無に等しいことから二次サーバー機能の実装を見送った。その一方、パスワード保護されたページからの情報取得や未公開情報の流出に備えて情報の暗号化などのセキュリティ保護に関する機能を強化したほか、計画になかった地震・津波情報の追加を行った。最新バージョンで取得・教示可能な情報は25種類(表1)と、インターネットの上にある警報および警報に関連した観測情報をほぼ網羅した。

試験システムの設置機関における一般的な利用形態は「チラ見」による現況把握である。庁舎から火山を望むことのできない自治体を除き、平常時にはディスプレイの電源が落とされることも多い。その一方、警報発令時には情報収集基盤として利用され、本システムの画面をプロジェクターでスクリーンに表示し、防災対応にあたったという報告もある。また、強風波浪注意報の発表時に、異常潮位に気づき、状況確認に海岸に向いたという報告もあった。これは警報・注意報を裏付ける観測情報があればより効果的な警報・注意報になるという事例といえる。

発災時については、熊本地震で被災した阿蘇火山センターの緊急的な地震モニターとしての想定外使用がある。これは被災から免れた或いは早期に復旧した低速な携帯回線にシステムが対応していたことによる。胆振東部地震でブラックアウトした際も、本システムが災害情報収集の唯一のシステムになったという報告があった。これらは防災に関係するシステムは災害に強いインフラの上に実装しなければならないことを改めて認識させた事例である。

2016年8月の北海道に被害をもたらした台風に対する対応では、自動収集・統合表示機能を有効に活用し、市町村合併で拡大した行政区域にある観測点のデータを収集し現況把握にあたったという報告があった。その反面、避難所開設など避難住民の対応に追われた自治体では、想定通り、全く活用されなかった。これは人的資源に乏しい市町村では切迫した条件下、また発災直後は観測データにより現状把握を行う余裕がなることを示す事例である。

関係機関の情報共有システムとしての利用形態は、登別温泉大正地獄で2016年11月から断続的に続いている熱泥噴騰活動において実現した。現地観光業者と現地の見えない登別市、室蘭地方气象台、札幌管区火山センターがリアルタイムに観測データを共有し、立ち入り規制等の防災対応が適切に行われた。

この他、十勝岳や有珠山の防災訓練では防災情報収集基盤システムとして災害対策本部に持ち込まれた。また、観光客や登山者など来訪者へのリアルタイムな防災情報提供システムとして集客施設に設置された。更に、東北大により磐梯山噴火記念館に、京大阿蘇火山センターにより阿蘇火山博物館にもシステムが設置された。

自治体に設置した試験システムは、不具合の多い不完全なシステムであったが、システムの自動収集・統合表示が自治体防災担当者に受け入れられ、システム画面のプロジェクター投影や、防災情報

提供システムへの流用など使い方の工夫が自治体によりなされた。更に北海道外では博物館にも設置され、火山防災の普及・啓発ツールとしても使われ、システム開発の目的は達成されていると言える。ただ、開発目的の一つであった防災担当者が異常を異常と認知するために平常を把握するツールには必ずしもなり得ていない。加えて IT 技術の進歩は早く、このシステムは既に陳腐化し始めていると考えられるが、自動収集・統合表示という防災情報システムの一つのあり方を示した意義は大きいと評価したい。

この課題終了後に備え、試験システムを設置した自治体の多くで自前回線への切り替えが進んでいる。しかし、日々、更新されるホームページへの対応の遅れや不具合の修正などのシステムサポートに関する課題は積み残されている。表示する情報を取得するホームページは、日々、更新されており、その更新されたホームページへの対応の遅れは致命的で、システムへの信頼性を失わせる。また、このシステムが防災対応の有用なツールとしてより活用されるためには、積み残されたマニュアルの整備が必要である。更に、プログラムの配布は自治体等の裁量による自由配布の形態を取ったが、より広く普及させるためにはサポート体制の整備が必要不可欠である。課題終了後のサポート体制については目処が立っていないが、今後も寡黙なユーザの意見に耳を傾けながら、システムの維持・改良を続けていきたい。

(付記)

この課題と並行して、噴火および気象、地震災害フェーズを比較し、噴火災害では警戒体制の維持が必要な警報発令から解除までの時間が長いということを改めて示した。また、災害の軽減は予防・避難だけではなし得ず、復旧・復興がキーになるとの視点から十勝岳大正噴火災害の応急・復旧過程について調べた。時代・社会的な背景もあるが、発災から 2 週間で復興計画の原案が策定され、更に被災民自らの手による復興施策が取られるなど、速やかな復興が成し遂げられた要因を明らかにした。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
大島弘光、宮村淳一、棚田俊収、2017、準リアルタイム火山防災情報表示システムの開発、日本火山学会 2018 年度秋季大会講演予稿集、248。

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

大島弘光(地震火山研究観測センター有珠火山観測所)

他機関との共同研究の有無 : 有

気象庁地震火山部 宮村 淳一

(独) 防災科学技術研究所 地震防災研究ユニット 棚田 俊収

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 地震火山研究観測センター有珠火山観測所

電話 : 0142-66-4011

e-mail : oshima@uvo.sci.hokudai.ac.jp

URL : <http://uvo4.sci.hokudai.ac.jp>

(13) この研究課題(または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 大島弘光

所属 : 北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センター有珠火山観測所

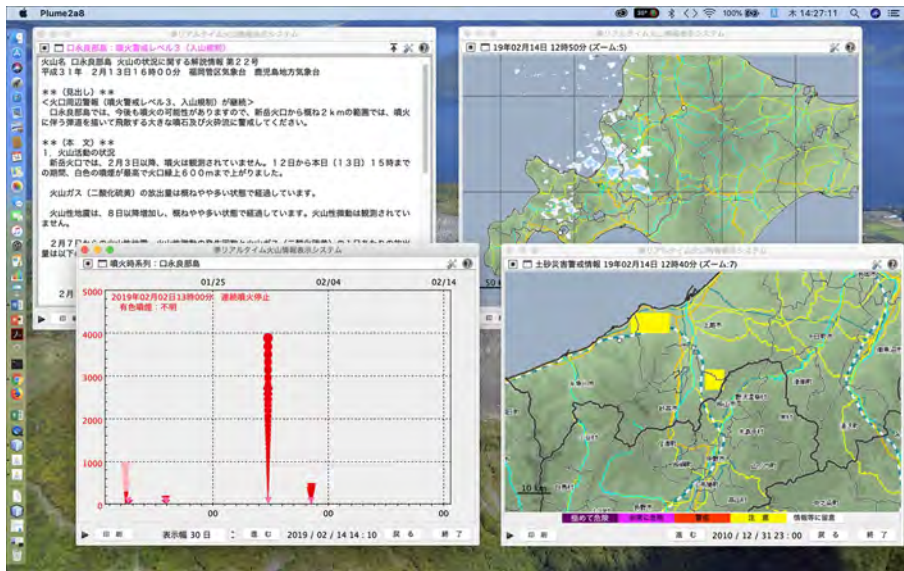


図1．4つの情報ウィンドウが表示されているデスクトップ。左上：噴火警報・解説情報、左下：噴火時系列、右上：高解像度降雨レーダー画像、右下：土砂災害警戒判定メッシュ情報。

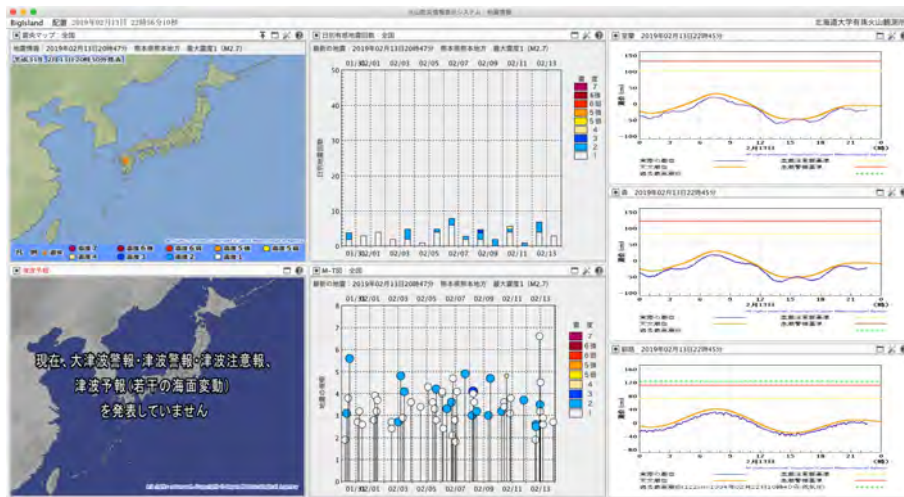


図2．統合型ウィンドウに表示された震央マップおよび津波情報（試験的）日別地震回数、マグニチュード-時間分布図、潮位観測情報。地震発生回数表示には、地震活動の時間的な推移が把握できるように、地震情報が更新されるたびに積み上がる、最大震度をカラーで表した積み上げ棒グラフ形式を用いた。マグニチュード-時間分布図についても、マグニチュードとともに最大震度がカラーと円の大きさで表されている。いずれの情報も、表示する地震の発生領域を全国、地方および震央地名から選択することができる。マグニチュード-時間分布図と地震発生回数では震度観測点（若しくは市町村名）で選択することも可能である。

気象情報関連	火山情報関連	地震情報関連	川の防災情報
気象警報・注意報・情報 台風情報 土砂災害警戒判定メッシュ情報 時系列予報 天気図 降水レーダー（標準・高解像度） 気象衛星（標準・高頻度） アメダス	噴火警報・解説資料 降灰予報 火山カメラ 噴火時系列 基盤的火山観測網波形画像 火山活動連続観測網各種画像 リアルタイム地震データ リアルタイム長周期データ	震央マップ 地震発生回数 M-T図 津波情報 潮位観測情報	河川水位 降水量

図3．最新バージョンで取得・表示可能な情報

(1) 実施機関名：

弘前大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地殻流体と地震活動の関係及び過去地震の災害誘因の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

内陸地震の発生機構の理解のためには、地震発生域の構造やそこでの地震活動の特徴把握が重要であるが、最近は特に地震発生と地殻流体の関係が注目されている。そこで本課題では、2011 年東北地方太平洋沖地震の誘発地震発生域での精密な震源と震源メカニズム解の分布を求め、地震活動の移動現象と地殻流体との関係を明らかにする。また、流体の存在が確実である火山周辺において、火山深部・浅部低周波地震及び高周波地震の観測と解析を通して、低周波地震発生機構、地殻応力場や地震活動との関わりを明らかにし、地震火山相互作用の解明に資する。さらに、2011 年東北地方太平洋沖地震及びその余効変動による応力場の擾乱が地震・火山活動に及ぼした影響についても調べる。

建議では、工学、人文・社会科学分野と連携し、歴史学的な観点も加えて、防災や減災につながる成果を挙げることが求められている。そこで、17・18 世紀に M7 級地震が頻発した青森県の日本海沿岸と内陸地域を対象に、分野横断型の研究を実施する。自然地震及び微動観測データ、及び歴史資料に基づき、強震動が地形・地盤及び建造物の脆弱性とどう結び付いて災害を出現させたかを検討し、地震・火山災害の特性を社会環境の時代的变化に留意して理解する。また、地殻流体に関する知見も加え、地震テクトニクスの背景が共通する他地域での検証と比較し、災害誘因の解明を目指す。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

(a) 地殻流体と地震火山相互作用に関する研究

東北地方北部の誘発地震発生域では、震源を精密に決定して震源移動を明らかにする。低周波地震発生域や、流体の存在が確実である火山周辺においては、波形相関を用いるなどして地震活動を詳細に把握する。また、これらの領域で、震源メカニズム解、地震波速度、地震波散乱強度、及び S 波偏向異方性の分布を求める。低周波地震に関しては、アレイ観測により低周波地震の後続波の起源を明らかにし、波形インバージョン等により発生機構の推定を行う。(平成 26~28 年度)

低周波地震発生域での場の特徴把握を基に、低周波地震の発生を地殻活動全体像の中で理解する。また、誘発地震、低周波地震、火山周辺の地震の震源分布や地震波散乱強度の時間変化を詳細に調べ、東北地方太平洋沖地震発生に伴う地殻の応答、流体の存在と移動、火山が存在することによる構造不均質のそれぞれが地震発生に及ぼす影響と、地震火山相互作用について検討する。(平成 29・30 年度)

(b) 過去の地震の災害事例の検証

青森県内の地震波速度構造・地震動距離減衰・地盤特性を自然地震観測及び微動探査により把握する。また、青森県の日本海沿岸と内陸で発生した歴史地震の研究を行い、社会環境の時代的变化に留意しつつ被害分布を再検討する。(平成 26~28 年度)

28 年度までに行った地震動距離減衰、地盤特性、及び被害分布の検討を基に、歴史地震の断層モデルの見直しが必要かどうかを検討する。また、歴史地震の分布や断層モデルを、(a)の地殻流体や(b)の地下構造に関する知見、及び同じ日本海東縁部で発生した 2004 年中越地震・2007 年中越沖地震の地震テクトニクスの背景を通して解釈し、災害誘因について検討する。(平成 29・30 年度)

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度~30 年度) の成果の概要 :

(a) 地殻流体と地震火山相互作用に関する研究

(a-1) 誘発地震の後続波を形成する散乱体位置の推定

森吉山周辺地域には地震波散乱体が存在することが推定されている。本年度は昨年度に引き続き、震源域北方において実施した小アレイ観測のデータのセンブランス解析から散乱体の位置推定を行った。その結果、散乱体は従来の推定よりも東側の、地震クラスターのやや南の深部(深さ 13 km 程度)に存在することが明らかになった。

(a-2) 散乱波の波形の時間変化

(a-1)の地震群では、実体波部分の波形が似ていても散乱波群の波形には地震ごとの違いがある。その要因としては、(1)震源位置やメカニズム解が異なる、(2)散乱波の伝播経路での特性が時間変化した、(3)散乱体の性質が時間変化した、等が考えられる。そこで、(1)の可能性を波動伝播シミュレーションから検討した。その結果、波形が似ている地震群の震源位置やメカニズム解はあまり変わらないことがわかり、(1)の可能性は否定される。そのため、消去法的に(2)または(3)が原因と考えられる。散乱波の波形の変化は、10 時間オーダーの短時間で起こる場合もある。この変化が流体分布の変化を反映しているとする、短時間での変化は流体が高速で移動したことを反映しているのかもしれない。

(a-3) 前震と余震の応力降下量

2016 年 11 月 2 日に、森吉山の北西 8 km 程度の領域で M4.2 の地震が発生した。この領域ではその 1 月ほど前から地震活動が見られた(図 1)ので、前震と余震の応力降下量を S 波のスペクトル比から求めた。その結果、前震は比較的狭い範囲で発生し、マグニチュード・応力降下量ともに大きいことがわかった(図 2)。それに対して、余震では活動域は広がったが、マグニチュード・応力降下量ともに小さいという違いがある。このことは、前震と本震において相対的に大きな応力降下があったために、余震発生時の応力レベルは低下していたことを示すものと考えられる。

(a-4) 特徴的な波動を示す深部低周波地震の抽出と波動の要因

地殻流体と地震火山相互作用を考える上で、深部低周波地震は重要な研究対象である。今年度は、低周波で継続時間が長い地震の抽出を FI 値を基に行なった。FI 値は、高周波帯域と低周波帯域の平均スペクトル振幅比の常用対数を取ったものである(図 3(a))。低周波で継続時間が長い地震は、山形県

の肘折などいくつかの領域において発生していることが判明した。その波形の位相は、異なる観測点で 20 秒以上に渡って揃っている場合があり、波動が震源起源であることを示す。このような波動が共鳴によって生じるかを波動伝播シミュレーションから検討した。極端な低速度域を仮定すると継続時間の長い波が生じる場合もあるが、震源位置やメカニズム解が極めて特別な場合に限られるので、複数地震からの観測波形を共鳴で説明するのは困難と考えられる。

(a-5) 地殻浅部低周波地震活動

深部低周波地震は一般に下部地殻以深で発生するが、地殻浅部でも低周波地震が発生していることが報告されるようになった。しかし、気象庁一元化地震カタログでは浅部の地震には低周波のフラグ付けがなされておらず、活動の実態は不明である。そこで、八甲田山と函館付近において、低周波地震の活動状況を FI 値を用いて調査した。八甲田大岳付近では 2013 年に深さ 6 km 程度までの円柱状の範囲で低周波地震が発生し、その震源は高周波地震とは棲み分けている。この低周波地震は火山性のものと考えられる。函館の東南東では、7 km 程度の深さで低周波地震が発生していることを、震央付近の 2 箇所で開催した臨時観測によって明らかにした。ここでは高周波地震が近接して発生しているので、脆性破壊域での低周波地震として注目される。

(b) 過去の地震の災害事例の検証

活火山である岩木山の北東山麓では地震活動が継続しており、その深部では低周波地震が発生している。また、津軽地方に大きな被害をもたらした 1766 年の地震 (M7 1/4) の震源断層は津軽平野南部域に存在すると考えられている。この地震による災害誘引の解明には津軽平野の構造推定が必要である。そこで、昨年度に引き続き、津軽平野周辺の観測点のデータを用いて地震波干渉法のプログラム開発を行った。その結果、長周期成分での波動伝播の様子や、短周期成分での年周変化が確認できるようになった。今後は分散曲線から地震波速度構造推定を行う。

5 力年の成果と計画との関係

(a) 地殻流体と地震火山相互作用に関する研究

誘発地震発生域での散乱体位置、散乱波の波形の時間変化、異方性の強さと地震活動の相関など、地殻流体の寄与が考えられる観測結果を得たが、直接的な証拠は得られなかった。深部低周波地震については波形の多様性を明らかにし、長いコーダ波を持つ地震の発生領域を特定し、その波動は震源起源と考えられることを示した。しかし、地震波速度の推定と、波形インバージョン等による深部低周波地震の発生機構の推定は目標を達成できていない。また、地震火山相互作用についても、その一部についての解析結果を得たに留まり、今後の課題となる。一方、散乱波と深部低周波地震については、現実的なモデルを考えて波動伝播シミュレーションから検討するアプローチができつつあり、この点は計画以上の成果である。

(b) 過去の地震の災害事例の検証

青森県内のいくつかの地点での微動探査に基づいた構造推定と、地震波干渉法の解析手法の開発は完了した。しかし、津軽平野の構造推定には至らなかったため、引き続き研究を進める。

今後の指針となるような事項として以下が挙げられる。一般に応力降下量は推定誤差が大きいが高応力降下量であることは高周波であることなので、FI 値のような簡便な指標で高周波の度合いを判定することで、前震の識別が可能になるかもしれない。また、地殻浅部の低周波地震がなぜ発生するかは、脆性破壊の要因が何かという問題と関わっているので、引き続きの研究が必要である。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) : 雨澤勇太, 森吉山の群発地震における散乱波群とその波形形状の時間変化, 弘前大学理工学研究科平成 30 年度修士論文・小菅正裕, 2019, 地殻浅部での低周波地震活動, 東北地域災害科学研究, 55.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画の課題は「島弧会合部とその周辺における地震発生場の解明」である。平成 31 年度に実施

予定の事項のうち、本研究課題と関連が深いものは以下のようなことである。

内陸地震活動が活発な領域で、震源のマイグレーションの解析、S波偏向異方性の時間変化の高精度推定、深部低周波地震の波形モデリングを行う。また、津軽平野南部などにおいて、地震波干渉法を用いた表層地盤構造推定を行い、堆積層構造を推定する。

これらは本研究課題をさらに発展させるものであり、本計画での成果を活かすことができる。特に、波動伝播シミュレーションを積極的に活用した研究を行う

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

小菅正裕・渡邊和俊・片岡俊一・津村浩三（以上弘前大学理工学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

・ 8 (a) については東北大学（松澤暢・岡田知己）、秋田大学（坂中伸也）との共同研究。

・ 8 (b) については東京大学地震研究所（西山昭仁・佐竹健治）との共同研究。

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：弘前大学理工学研究科

電話：172-39-3652

e-mail：mkos@hirosaki-u.ac.jp

URL：http://hrsryu.geo.hirosaki-u.ac.jp/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：小菅正裕

所属：弘前大学理工学研究科

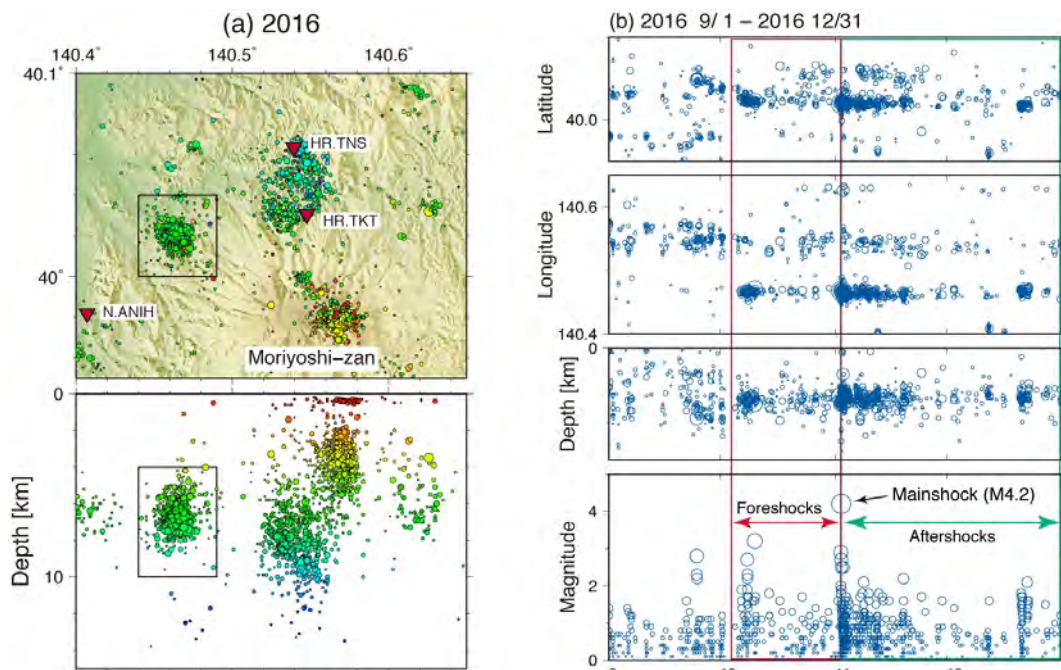


図1．森吉山周辺の地震活動

(a) 2016年に森吉山とその周辺で発生した地震の震源分布。赤い三角印は観測点の位置を示す。四角の中の領域を図2に示す。(b) (a)の領域の震源の時空間変化。上から順に、緯度、経度、深さ、マグニチュードの時間変化。(a)の四角の中において、最大規模のM4.2の地震の発生前の地震を前震、発生後の地震を余震とした。

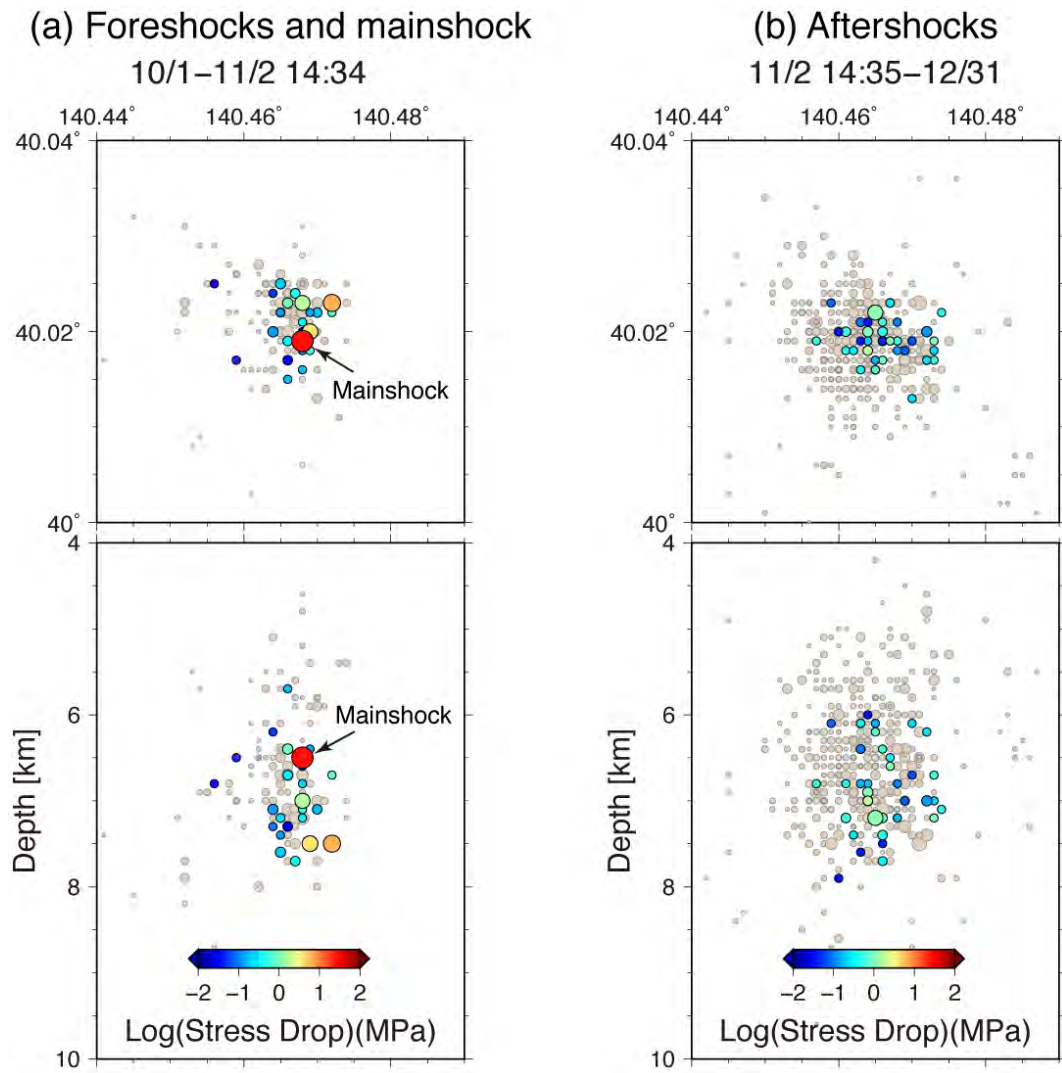


図2. 森吉山北西で発生した地震群の応力降下量の空間分布

(a) M4.2の本震とその前震の応力降下量の分布。(b) 余震の応力降下量の分布。(a) (b)とも、シンボルの丸の大きさはマグニチュードを、色が応力降下量を表す。灰色の丸はそれぞれの期間に発生した地震の震源を示す。

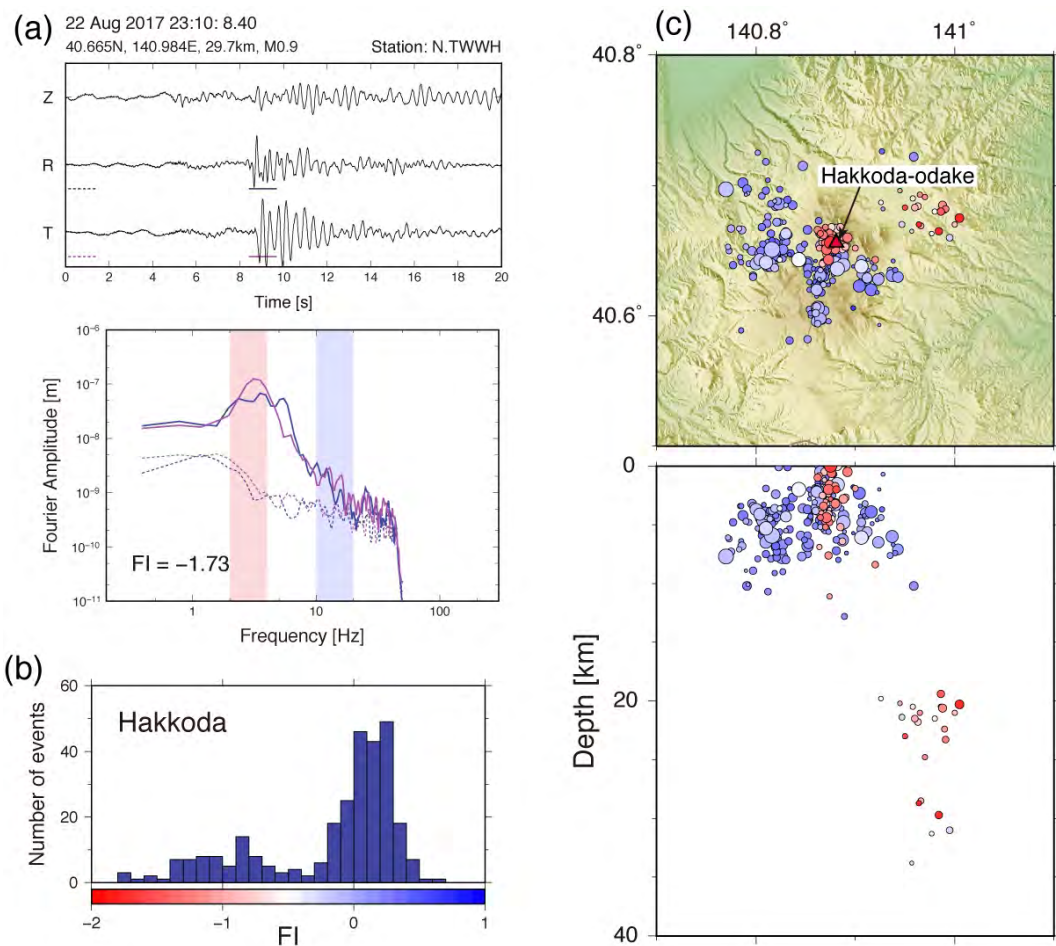


図 3 . 八甲田山における浅部低周波地震活動

(a) 低周波地震の波形と S 波のスペクトル。時間ウィンドウは波形の下の横棒で示す。破線は P 波到達前のノイズのスペクトル。色の帯で表される 10?20 Hz を高周波、2?4 Hz を低周波帯とし、両帯域での平均スペクトル振幅の比の常用対数を FI 値と定義する。(b) FI 値の頻度分布。(c) FI 値の空間分布。震源の丸の大きさはマグニチュードを、色は FI 値を表す。FI 値は (b) のカラースケールに従って色を付けている。

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

スラブ内地震の発生メカニズムの解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

イ. 海洋プレート内部の地震

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

首都直下地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題では、稍深発地震の地震波解析、含水試料による高温・高圧実験および数値シミュレーションによる沈み込み帯の温度モデリングを行う。得られた結果を包括的に比較・検討することで脱水脆性仮説の検証を行い、スラブ内地震の発生メカニズムを解明する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

スラブ内地震の地震波解析によって震源域付近の詳細な地震波不均質構造および震源パラメータの推定を行い、スラブ内地震の地震像を明らかにする。また、高温・高圧条件下での室内実験による含水鉱物の脱水に伴う脆性変形過程を調べることにより、脱水脆性仮説を包括的に検証する。さらに、数値シミュレーションによる沈み込み帯の温度構造モデリングを行い、計算された温度構造と高温・高圧実験結果に基づき含水鉱物の分布と脱水反応の進行場所を推定する。各サブテーマの具体的な計画は以下の通りである。

地震波観測

本課題では、太平洋スラブ内の深さ 200km までの地震を対象に地震波形解析を行い、相対震源決定による高精度震源決定および震源パラメータの推定を行う。得られた結果は、他の沈み込み帯で得られている観測結果と比較・検討し、スラブ内地震に共通してみられる特徴を抽出する。また、東北地方沖合に設置された OBS で観測される後続波(トラップ波・変換波など)の走時や周波数成分の解析により、スラブ地殻の詳細な P 波、S 波速度構造を推定する。得られた P 波、S 波速度モデルから、流体の存在に敏感なパラメータである V_p/V_s 比の空間分布を推定する。さらに、関東下のフィリピン海プレートの詳細な地震波速度・減衰構造の推定を行い、スラブマントル内の地震の分布と不均質構造との関係を検討するし、首都直下におけるスラブ内地震の発生ポテンシャルの評価に資する情報を提供する。

室内実験

稍深発地震を再現できる温度・圧力条件を発生することのできるマルチアンビル型プレスもしくはキューブ型プレスを用いて、蛇紋岩、角閃岩などの含水鉱物の安定領域内、相境界付近、安定領域外にて変形実験を行い、脱水反応と変形組織を比較する。多チャンネル AE 計測により、脱水に伴う AE 信号の震源決定を行い、脱水及びスラブ内条件下での震源過程を調べる。また 6ch 程度の多チャンネル AE 計測システムを構築し、石英ビーズなどを用いて、校正実験を行うことで、実験中の AE 信号が試料内部に決定されることを確認する。様々な変形条件下で変形および脱水反応を起こした場合の AE 信号を測定し、震源決定を行う。その際には、昇温および加圧レートを調整し、脱水反応の速度を調整することで AE 信号の間隔や強度の違いなどを比較する。回収した試料は電子顕微鏡を用いて、変形組織の観察を行う。特に、剪断変形組織(割れ目の幅や変位量)と脱水反応生成物の分布と量(広範囲に不連続的かつ均質に分布するか、連結し局所的な分布をするか?)に注目し、変形条件との比較を行う。AE 計測から推定される震源位置や震源パラメータと脱水鉱物分布及び剪断変形組織の比較から AE 信号の発生源を明らかにし、含水鉱物の脱水反応及び変形の測定により高温・高圧条件下における震源形成過程を明らかにする。

温度モデリング

本課題では、これまでほとんど行われてない 3 次元的な温度モデリングを行い、より現実的な温度構造を推定する。モデル化の際には、プレートの三次元形状や地殻熱流量、沈み込む海洋プレートの年代の地域変化や深海掘削で得られた鉱物組成や含水鉱物の分布などを制約条件とする。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度~30 年度)の成果の概要:

平成 30 年度の成果

地震波観測

東北地方中央部の太平洋スラブ上面で発生している地震の震源とメカニズム解を決定したところ、正断層地震と逆断層地震が 100 m 以内という非常に近接した場所で発生していることが明らかになった。この結果は、エクログャイト化に伴う体積減少によりプレート表面近くで正断層地震が発生するという従来の解釈を支持するものであるが、相転移による応力擾乱は極めて局所的であることを強く示唆している。

中部地方下の深発地震(深さ約 350 km)の波形解析により 2 つの相似地震グループ(相似地震数は 2 個と 3 個)を発見した。それぞれのグループの地震は数百 m から数 km 離れて発生しているが、いずれもメカニズム解から期待される一つの断層面上で発生しているという特徴がある。この結果は、深発地震が既存の弱面の再活動で発生していることを強く示唆している。

日本列島の周辺で発生しているスラブ内地震の地震波放射エネルギー効率を推定した。解析では観測点毎の結果のばらつきをできるだけ小さくするために観測点補正値をインバージョンにより推定し、その値を用いて観測された地震波放射エネルギー効率を補正した。得られた結果は、地震波放射エネルギー効率は地震の規模とともに小さくなること、深さ 360 km までの範囲では顕著な深さ依存を示さないことが明らかになった。

室内実験

スラブ内地震のうち特に上面地震帯の原因の一つとされるローソナイトの脱水脆性化について、高温高圧下におけるその場観察変形実験により検証を行った。放射光施設（高エネルギー加速器研究機構）にて、冷たいスラブ内の震源域に相当する温度圧力条件（圧力3～6 GPa、温度300～800℃）で変形を行いながら、試料にかかる応力、ひずみ、脱水の割合をその場観察した。その結果、ローソナイトは脱水を伴わなくても脆性的な挙動を示すことがわかり、脱水前でも地震につながるような不安定すべりを引き起こす可能性があることを明らかにした。またオリビーンスピネル相転移を模したフェイズフィールドモデルを構築し、相転移断層機構に関する温度の効果や余剰圧などの効果を議論した。

温度モデリング
海洋プレートが斜めに沈み込むマリアナ、ヒクランギ沈み込み帯において、シミュレーションによってマントル対流パターンの初期解析を行った。その結果、マリアナではスラブの斜め沈み込みの効果によってマントルウェッジに複雑な三次元対流パターンが生じ、その結果として島弧沿いに温度構造が変化する様子が推定された。一方で、スラブの斜め沈み込みの角度が島弧下において小さくなるヒクランギではマントルウェッジ対流は二次元的なパターンを示した。こうしたことから、マントルウェッジの対流パターンの形成には海溝におけるスラブの斜め沈み込み角ではなくマントルウェッジ下での沈み込み方向の影響が大きいと解釈できる。

計画期間中の成果概要

これまでは地震波不均質構造から地震の発生場の研究が主に進められてきたが、本計画では高精度震源決定や断層パラメータの推定により、相似地震の断層面は相補的であること、起震応力場は空間的に大きく変化することなど、地震発生の物理の理解に寄与する結果を得ることができた。また、海域地震探査による構造推定により沈み込み前の海洋地殻第3層が速度逆転層を有することを明らかにしたほか、海底圧力観測からはスラブ内地震津波に伴う海底圧力変動の解析によってスラブ内応力中立面の深さを把握できる可能性を示した。

東北大学設置の固体圧試験機およびガス圧試験機を用いて石膏の脱水摩擦変形試験を行い、脱水に伴う強度の変化を明らかにすることができた。また、2017年度より高エネルギー加速器研究機構でのビームタイムを取得し、D-DIA型変形試験装置、および放射光を用いたその場観察変形実験を軌道にのせることができた。それにより、冷たいスラブ内の代表的な含水鉱物であるローソナイトの変形特性について明らかにすることができた。

現実的なスラブの形状と斜め沈み込みを考慮した三次元温度構造モデルを用いたシミュレーションから、マントル対流パターンの様態にはスラブの斜め沈み込みの影響が大きいことを明らかにすることができた。三次元温度モデリングを通し、東北地方・関東地方の海溝～島弧域においてスラブ内地震およびプレート境界地震が起きる温度範囲を明らかにした。また、東北日本背弧におけるマントルウェッジの三次元対流パターンの分布とスラブ内温度分布との関係性を明らかにすることができ、東北日本における火山のクラスター化の成因解明にも繋がる有益な成果を得ることができた。

- (9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
Nakajima, J., and N. Uchida, 2018, Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip, *Nature Geoscience*, 11, 351-356, doi:10.1038/s41561-018.

白石令，角田明博，武藤潤，澤燦道，鈴木昭夫，2018，ローソナイトの脱水と変形特性：稍深発地震発生メカニズム解明を目指して，*Photon Factory Activity Report 2018 vol.36*.

Sawa, S., J. Muto, and H. Nagahama, 2018, Mechanisms of Olivine-Spinel transformation and microstructural development under differential stress by Phase Field Method, *EGU 2018*, April 4-13, Vienna, Austria, P. 11211.

- (10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

海域地震観測

首都直下で危惧されるようなスラブ内大地震は既往震源断層を再利用して起こるとも考えられるが、

アウターライズ大地震断層がどれくらいの深さに及ぶかはよくわかっていない。そこで、1933年昭和
三陸地震震源域の海底地震計観測網(地震探査、臨時観測、S-net)で観測された稍深発地震について、
震源要素を既知とした仮定のもと走時を計算し、観測走時との残差分布異常から断層形成にかかわる
地震波速度異常のおよぶ深さ範囲を明らかにする。

陸域地震観測

太平洋スラブの下面地震発生場の理解を深めることを目的として、東北地方の陸上地震観測網で稍
深発～深発地震を観測し、異方性を考慮した速度構造の予備解析を進める。また、相似深発地震につ
いて、その応力降下量を推定する。

室内実験

ローソナイトについて、脱水を伴わずとも破壊が起こることを実験的に示したが、脱水中に示す挙
動が未解決のままであるほか、岩石種による変形挙動の相違についてもよくわかっていない。そこで、
高エネルギー加速器研究機構およびSpring-8に設置されているD-DIA型変形試験装置を用いて、脱水
時に生じる間隙水圧を制御するシステムでの実験によってローソナイトの脱水時の挙動を明らかにす
る。また、固体圧変形試験装置も用いて緑泥石やゲルマニウムオリビンの脱水・相転移変形実験を行
い、スラブ内部での岩石の変形挙動を明らかにする。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東北大学(松澤 暢、日野 亮太、鈴木 昭夫、矢部 康男、武藤 潤、東 龍介)
他機関との共同研究の有無：有
ミネソタ大学(和田育子)
東京工業大学(中島淳一)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東北大学大学院理学研究科
電話：022-225-1950
e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp
URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：東龍介
所属：大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

蔵王山周辺の総合観測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

蔵王山周辺域において、稠密な地震及び電磁気観測、制御震源による地震波速度構造探査等を実施し、火山体直下の詳細な地震波速度構造や減衰構造、比抵抗構造等を推定することにより地殻深部から火山体浅部における流体分布を明らかにする。また、傾斜観測、GNSS 観測、InSAR 解析、重力観測などにより、火山体変形の時空間的特徴を明らかにするとともに、火山性微動の解析などを通じて火山性流体系の時間発展を検出する。休止期から活動期に入ったと考えられる同火山の活動の推移を精確にモニターすることを通じてマグマ溜まりや火道などの物理的特性、また、その周辺の応力・ひずみの時空間分布を明らかにする。

有史以来の蔵王山の活動は、御釜火口における水蒸気爆発を主たる活動としているが、火口域近傍まで観光客が容易に近づけることから、小規模な水蒸気爆発であっても被害が発生する可能性も高い。また冬季の積雪も多いことから、過去にも融雪雪崩などの災害も引き起こしている。火山流体系の状態を把握するとともに、その情報を行政・地元防災機関と共有し、有効な防災・減災対策に結びつけることを目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

制御震源による地下構造探査実験（平成27年度実施予定）や自然地震の観測により、山体及び周辺域のマグマ供給系の構造を推定し、震源決定精度の向上などに資する基礎データの拡充を図るとともに、火山体構造と山体及び周辺域で発生する地震や火山性微動（深部低周波微動・浅部低周波微動・長周期地震）との関連を明らかにする。また、マグマ供給系近傍のメカニズム解（応力場）分布、地震波干渉法（常時微動トモグラフィ法）、プレート境界地震や火山性地震の中に含まれる相似地震を利用した実体波による解析を実施し、微動等の火山活動に関わるマグマ等の流体の圧力変化や移動等に伴う構造や場の変化の有無に関する検討を行う。

蔵王山は水蒸気爆発を活動の主体としており、火山浅部の熱水系を明らかにするため、AMT探査による電気伝導度構造推定と全磁力観測を行う。一般に熱水系が卓越し水蒸気爆発を起こす火山では爆発前の深部・広域の地盤変動に乏しい傾向がある。電気伝導度構造と全磁力観測を組み合わせることで浅部での熱水だまりの形態や容量と熱変動の時間変化を把握することは災害予測と噴火準備過程把握の上で重要な判断材料となる。測地観測では、平成25年度に蔵王山馬の背に設置予定の傾斜観測を継続し、御釜火口において水蒸気爆発等の火山噴火が発生した際に、その活動に伴う山体変形の基礎的なデータを得る。また、簡単な圧力源モデルを用いて、噴火発生源の定量化を行う。また、GNSS観測、InSAR解析、重力観測などにより、より広域の火山体変形の時空間的特徴を明らかにする。

このようにして得られる結果から、火口流体系の構造および流体移動モデルを構築するとともに、それらの情報を気象庁や地元防災機関などとの共有を行う。また、諏訪瀬島や阿蘇山における先行研究のように噴火前兆現象として数分前からの地盤変動が観測される可能性があるため、このような観測結果を即時的かつ有効な防災・減災対策に結びつける方策を各機関と検討する。

(8) 平成30年度及び計画期間中（平成26年度～30年度）の成果の概要：

地震観測：本課題において展開した臨時地震観測網・既設観測網で得られた記録を用いて、蔵王山直下浅部で発生する低周波地震・長周期地震の解析を継続し、浅部の熱水系及びその時間変化に関する研究を実施した。流体を含む亀裂状構造における固液相互作用のモデリングから、想定火口域直下浅部に存在する破碎帯に気泡を含む熱水が介在し、長周期地震が発生していることが推定された。本課題の実施期間5年間においては、長周期地震の振動特性に明瞭な時間変化は見られず、浅部熱水系において温度あるいは物性について顕著な変化はないと解釈できる。これらの浅部活動の時間変化等の観測・解析結果は、火山噴火予知連絡会等に随時情報共有した。

また、深部マグマ活動の時間発展及び浅部活動との関係を明らかにするために、波形相関を用いたイベント検出法により深部低周波地震の検出を行い、その活動様式を明らかにした（図1）。これらの深部低周波地震は、発生深度によって波形の特徴に差異が見られ、今後の研究により流体存在形態等の解明に資する情報が得られることが期待される。

これまでの5年間の課題研究の中で、平成27年度には制御震源による地下構造探査実験を実施し、浅部速度構造の推定・地震波減衰域の特定等を行い、震源決定精度の向上・噴火ポテンシャル評価に資する基礎データを拡充することができた。また、長周期地震の波形解析等により、想定火口域直下の浅部熱水系の大局的構造を明らかにし、その時間変化をモニタリングすることにより水蒸気噴火を引き起こす浅部熱水系の状態推定を行い、その結果を関係機関と共有した。さらに、研修会等を通じて地元観光業者等に火山現象・火山災害に関する知見を共有するとともに、火山活動に関する情報を随時共有することで、減災対策に資する取り組みを試行した。

測地観測：2015年の1月から6月までの期間にGNSSにより蔵王山の周辺で観測された地殻変動の再解析を行った。2015年7月以降の静穏期を定常的変動と仮定したことで、上記期間直前に設置された山頂近傍の観測点を新たに解析対象とすることができた。観測された水平・上下変動と推定された点圧力源モデルによる計算結果を図2に示す。点圧力源は御釜の中心から東側に約800m、深さは約5.6kmの位置に、体積増加換算量は $3.8 \times 10^6 \text{m}^3$ と推定された（図2c）。また、2018年7月にハイブリッド重力測定を実施し図3に示したような1年間の重力変化が得られた。

5年間の課題研究により、2015年の火山性地震の活動活発化が火口湖直下の約6kmの深さにある圧力源の増圧に起因していたことが明らかになった。一方で、2018年の活動活発化の時にはGNSSによる山体膨張が観測されておらず、火山活動の多様性が示唆される。

火山ガス観測：2018年10月10日に蔵王山丸山沢で噴気a、bを採取・分析した。噴気aは丸山沢で最も放出の勢いが強い噴気で、温泉水を伴い放出していた。噴気bは噴気aの東方50m程度離れた場所にある勢いの弱い噴気である。両噴気の $\text{He}/(\text{He}+\text{CH}_4)$ 比を昨年分析値と合わせて図4に示す。同図には、参考のため蔵王山と同様に酸性の火口湖を有する草津白根山の噴気の $\text{He}/(\text{He}+\text{CH}_4)$ 比を示した。Heと CH_4 はそれぞれ、脱ガスマグマ、熱水系に起源する代表的な成分であり、 $\text{He}/(\text{He}+\text{CH}_4)$ 比の上昇は浅部熱水系に対するマグマ性ガスの流量が上昇したことを意味している。草津白根山では2017年から2018年にかけて大きな変動が観測されている。これに対し蔵王山では少なくとも2017年から2018年にかけて熱水系に対するマグマ性ガスの流量は安定していたと推測される。

噴気温度・御釜水温観測：5月30日、6月4日、7月26日、10月10日に丸山沢噴気地熱地帯と、濁川と振子沢の合流部付近(旧新関温泉)の現地調査を行った。丸山沢噴気地熱地帯には図5aに示したように、最下部(弱い噴気活動がある変質帯??)、中部(弱い噴気活動と温水湧出?)、最上部(強い噴気活動と温泉湧出??)の三つの活動域がある。噴気温度は2015年頃から全体に上昇傾向にある(図5c)。調査を開始した2012年に最も勢いがあつた上部の?は、?が活動を開始した頃から温度が下がり、2017年に活動を停止した。現在、?が最も高温で勢いも強く、2012年の調査開始以来最高となる104.2℃を7月に記録した。噴気孔には黄色い硫黄の付着を確認している(図6)。この温度上昇は、2018年1~2月の火山活動活発化により、二酸化硫黄等の高温の火山ガスが関与している可能性を示唆する。また、2015年と2018年の火口周辺警報のあと、ともに最高温度の上昇が見られる。

7月25日と9月7日に、火口湖御釜の湖底に連続記録型温度計を設置した(図7)。11月2日にデータを回収したところ、9月末から10月初めにかけての1週間ほどで、2~3℃の温度上昇が見られた(赤線と黒線)。前年に設置した温度計でも同時期に同程度の変化が見られたことから(黒線)、火山活動ではなく季節変化を捉えたと現時点では考えられる。なお黒線後半の上昇は、温度計の破損が原因と見られる。

これまでの5年間に現地調査を繰り返すことで、丸山沢噴気地熱地帯の詳細な活動変遷が記録され、火山性地震や微動など活動活発化が、噴気地帯の熱活動にも現れているらしいことがわかった。一方、新関温泉には活発化の影響が出る場合と出ない場合があつた。御釜では現在熱活動は確認されていないが、設置された連続記録型温度計により、熱活動が起こった場合はいち早く捉えられることが期待される。

- (9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
池谷拓馬・山本希，蔵王山直下の深部低周波地震活動，日本地震学会2018年度秋季大会，郡山市，ビッグパレットふくしま，2018年10月。池谷拓馬・山本希，蔵王山直下の深部低周波地震：Matched Filter法による解析，JpGU2018，千葉，幕張メッセ，2018年5月。三浦 哲，山本 希，市來雅啓，出町知嗣，立花憲司，西村太志，2018，サブミリ測地解析による火山活動モニタリング，東濃地震科学研究所報告，40，81-86。三浦 哲，山本 希，市來雅啓，出町知嗣，立花憲司，西村太志，2018，蔵王山で繰り返し発生する長周期地震に伴って観測される傾斜変化，JpGU2018，千葉，幕張メッセ，2018年5月。

- (10)次期計画における平成31年度実施計画の概要：

本課題で明らかになった蔵王山活動域直下の浅部熱水系の描像は、これまで阿蘇山や草津白根山で明らかになっているものと類似性も多い。今後、その類型化・比較を進めることで、水蒸気噴火発生場の特徴抽出や噴火ポテンシャル評価指標の導出を行い、災害軽減に資する情報を抽出することが今後の課題と考える。

広帯域地震計や傾斜計によって長周期地震に伴って観測される静的な地殻変動については、未だ尤もらしいモデルの構築ができておらず、今後の課題である。

御釜では 2018 年 9 月に、京都大学と山形大学のグループがソナーを用いた調査で、湖底の丘状地形から上方に伸びる反射を捉えている。上昇する気泡の可能性があり、その実体解明のため映像による湖底調査を実施したい。なお、温度計の一つ（スライド 2 枚目地図中の赤点）は反射源から 10m 以内の距離にあり、丘状地形で熱活動があれば、それを捉えられる可能性がある。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

三浦 哲・西村太志・山本 希・岡田知己・太田雄策・内田直希・市来雅啓・土屋範芳・後藤章夫・福島 洋

他機関との共同研究の有無：有

東京大学地震研究所：大久保修平・今西祐一・田中愛幸

東京工業大学：小川康雄・神田 径・中島淳一

気象庁気象研究所・仙台管区气象台：岡田 純

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp

URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：三浦 哲

所属：東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター

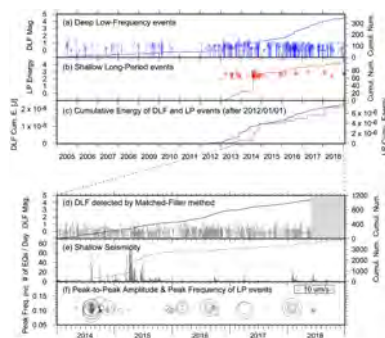


図 1 . 蔵王山の活動推移と本課題によって明らかにした活動時間推移の詳細 .

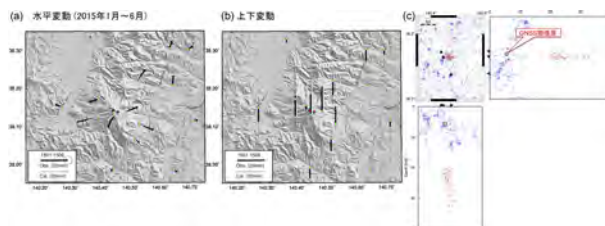


図 2 . 蔵王山周辺の GNSS 連続観測点における 2015 年 1 月～2015 年 6 月までの変位分布 .

(a) は水平成分，(b) は上下成分で黒矢印及び縦棒が観測値，白矢印及び白棒がモデルによる計算値を示す . (c) は推定された点圧力源の位置を蔵王山周辺の震源分布図に重ねたものを示す .

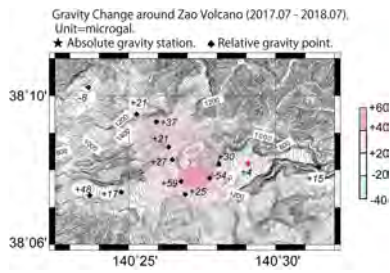


図3．蔵王火山の重力変化(2017年7月～2018年7月)

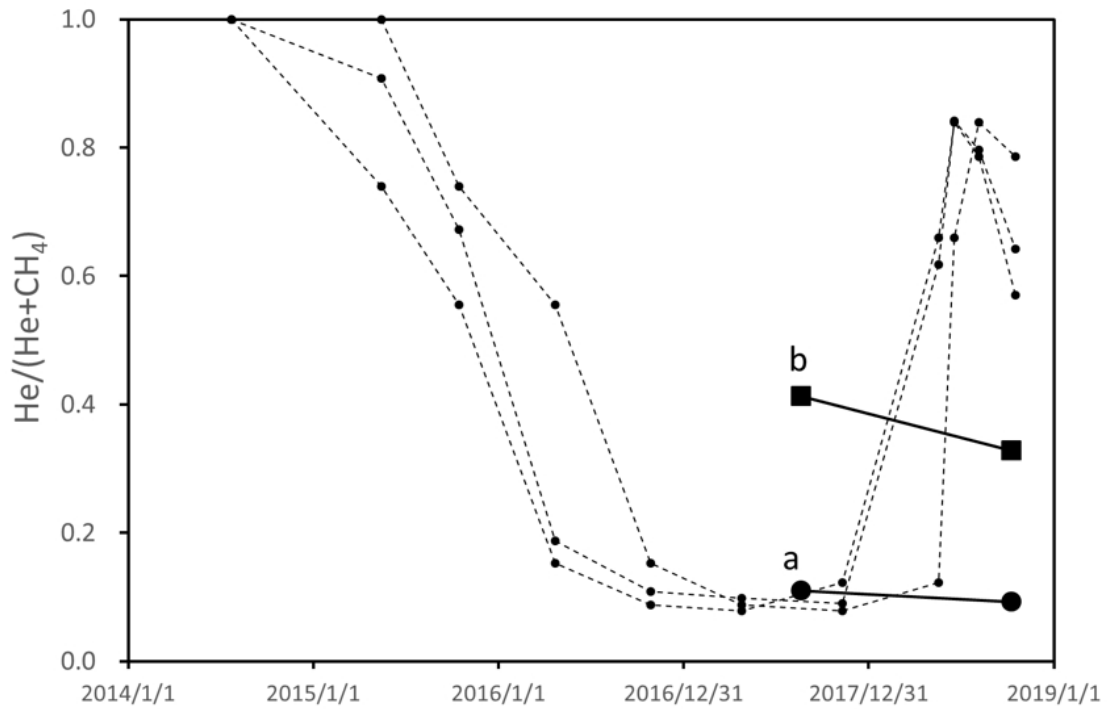


図4．噴気に観測された $\text{He}/(\text{He}+\text{CH}_4)$ 比の時間変動．
点線は草津白根山山頂北側山麓にある地熱地帯で採取された噴気の変動を示す．

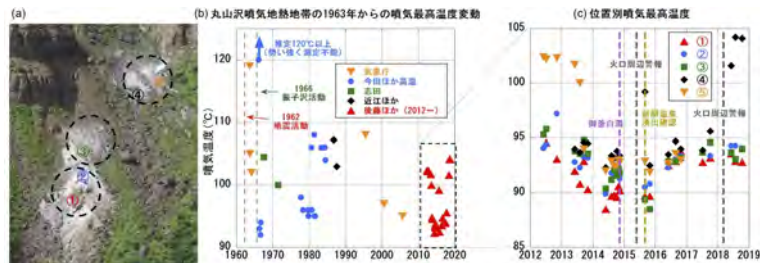


図5．丸山沢噴気地熱地帯における噴気温度変化．
(a) 活動域の写真．最下部(弱い噴気活動がある変質帯??)，中部(弱い噴気活動と温水湧出?)，最上部(強い噴気活動と温泉湧出??)の三つの活動域がある．(b)1963年以降の噴気最高温度変動．(c)図5 aに示した?～?の噴気最高温度．



図6．丸山沢最上部主噴気孔の状況．

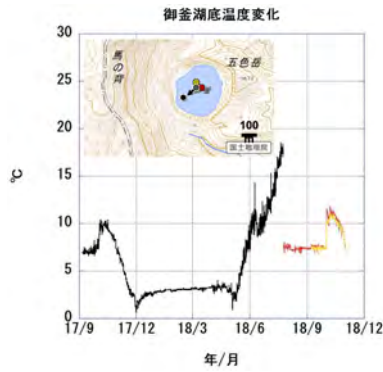


図7．火口湖御釜中心部湖底に設置した温度計で記録された水温変化．
 グラフの色は地図中の設置位置を示す丸の色に対応．2017年9月に設置したセンサー（黒線）は、つないだパイプが黒二重丸から黒丸の位置まで流され（おそらく解氷期）、破損していた．

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地殻応答による断層への応力載荷過程の解明と予測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究では、観測から求められている東北日本弧の弾性・非弾性構造を、実験的アプローチと連携してより物性的不均質にまで踏み込んで明らかにし、その中で進行する変形過程を観測・シミュレーションの両面から明らかにすることで、内陸地震断層域への応力載荷プロセスの理解を深める。

2011 年東北地方太平洋沖地震の後、大きな余効変動が捉えられており、これは余効滑りと粘性緩和の両方の影響が入っている。この粘性緩和の影響を分離して推定できれば、粘性係数の分布が推定でき、地震波トモグラフィの結果とあわせてレオロジー構造を構築することができる。このレオロジー構造を用いてシミュレーションすることにより、どこにどのように応力・歪が集中するのかを推定し、これと実際の地震活動・測地データと比較することにより、モデルの検証・改良を行うことができる。低粘性の領域が推定された場合、その原因としては、温度・流量・岩石組成等の違いが考えられる。

電磁気学的知見と地質学的知見も総合することによって得られた不均質構造の生成原因の推定も行うことができると期待される。

本課題では、上記のような観点から、2011年東北地方太平洋沖地震後の余効変動・余震活動を調べ、さらに詳細な地震波速度・比抵抗の3次元構造を推定し、これらを比較することにより、東北日本弧のレオロジー構造を構築し、数値シミュレーションによってモデルの検証・改良を行う。さらに地殻流体と地震活動の移動との関係を明らかにする。

得られた構造に基づきシミュレーションによって推定された応力・歪の時空間変化と、地震・火山活動の時空間変化との比較を通じて、今後の内陸地震や火山噴火の発生ポテンシャルの評価に資することを本研究の目的とする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

地震観測

- ・2011年東北地方太平洋沖地震の余震・誘発地震活動を把握するために設置された臨時・地震観測点およびそれ以外の臨時観測点を再編成して地震観測を継続(H26~30年度)
- ・いわき地域~猪苗代湖南部(H26~27年度)と猪苗代湖南部~新潟県三条市(H28~29年度)の測線において、それぞれ60点の臨時地震リニアアレイ観測を実施。
- ・これらの結果に基づき東北日本弧の上部地殻~最上部マントルにかけての地震波速度・減衰・異方性構造、詳細な震源分布を推定(H26~30年度)
- ・微小地震クラスター内の震源移動の検出、繰り返し地震のコーダ波解析、波形干渉法解析等を通して、地殻流体に関わる地震発生場の時間変化の検出を試行(H26~30年度)
- ・応力テンソルインバージョンにより、応力の時空間変化を推定(H26~30年度)

測地観測

- ・2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動を把握するために設置された臨時GNSS観測点およびそれ以外の臨時観測点を再編成してGNSS観測を継続(H26~30年度)
- ・東北地方と北海道太平洋岸において、ハイブリッド重力観測を実施(H26~30年度)
- ・以上の測地観測から、変形場や応力場の時空間発展を詳細に解明(H26~30年度)

電磁気観測

- ・いわき誘発地震域~中越地震震源域に至る領域で、広帯域MT法観測を実施するためのサイトサーベイを実施(H26年度)したのち、MT法観測を順次実施(H27~29年度)
- ・既存のデータと上記の観測結果により東北地方の広域の3次元比抵抗構造を推定(H26~30年度)

レオロジーモデリング

- ・粘性構造推定のため、岩石変形機構を明らかにする実験的研究を実施(H26~30年度)
- ・内陸の粘弾塑性応答のシミュレーションコードを開発(H26~27年度)
- ・地震学・測地学・電磁気学的知見と物質科学的知見や素過程の実験的研究を融合することにより、岩質・温度・流体量等の分布を推定し、地殻・マントルのレオロジーモデルを構築(H28~29年度)
- ・プレート境界面上の滑りの時空間変化を境界条件として与え、上記のレオロジーモデルを用いた、余効変動の数値シミュレーションを実施し、実際の歪分布や応力テンソルインバージョンの結果と比較することにより、モデルを改良(H29~30年度)
- ・北茨城いわき地方の地震活動の時空間発展が説明可能な震源域スケールでのレオロジー構造を推定し、いわき内陸地震の発生過程を説明するモデルを構築(H30年度)
- ・東北地方太平洋沖地震発生時及び発生後の活断層や活火山の周辺の歪・応力変化をシミュレーションによって再現し、さらに、その外挿として、今後の歪・応力分布を推定することにより、内陸地震や火山噴火の発生ポテンシャルを検討(H30年度)

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要：

平成30年度の成果の概要

地震観測

2011年東北地方太平洋沖地震(以下、「東北沖地震」と呼ぶ。)後に活発化した秋田県中部での応力場を求めた(図1)。2011-2013年の期間と2014-2017年の期間を比較すると領域全体の応力場(北東-南西方向の最大主応力軸を持つ横ずれ断層型)に顕著な時空間変化はないが、震源域が徐々に拡大した南端付近では逆断層型の応力場も見え、この地域の応力場の不均質性を反映している可能性がある。

いわきの地震活動域は、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震以降活発となった。図2に3つの期間の震央分布と反射面の俯瞰図を示す。一連の地震活動と反射面との関係を比べると、3月11日の活動は反射面の分布図の上部で始まり(図2a)、4月10日までに反射面を中心に広がっていった(図2b)。反射面の分布図の北部に地震活動の低いところがあり、そこを埋めるように、4月11日の福島県浜通りの地震が発生している(図2c)。この地殻内反射面は反射波の振幅が大きいことから、地殻内流体に関係するものと考えられる。そのため、これらの一連の地震活動が地殻内流体と関係している可能性が考えられ、今後も続けて詳細な解析を行っていく必要がある。

Iwamori (2007)によれば、沈み込み帯の脱水現象は沈み込む海洋プレートの深さ30?近傍でも生じており、また、Imanishi et al. (2012)では、3月11日の東北地方太平洋沖地震以降の活動の特徴として、沈み込む太平洋プレート境界から4月11日の福島県浜通り地震の震源域へと延びる活動を示し、Branching Faultの存在を示唆している。このように、プレート境界の水が大量にあるとされている領域から4月11日の福島県浜通り地震の震源域へと延びるBranching Faultが、水の移動に関係している可能性が考えられる。

測地観測

2018年5~7月に、東北全域及び北海道の太平洋岸において、絶対重力点10点を含む約60点で、ハイブリッド重力観測を実施した。表層30kmが弾性体で、それ以深に $5 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ の粘性率をもつ層を仮定して、粘弾性球対称地球モデルに基づく理論にもとづいて、重力変化の予測値を計算し、観測値と比較した(図3)。東北地方太平洋側では観測値と理論計算値とが良く一致し、4 microgal/yrの変動が認められた。一方、脊梁山脈を越えた日本海側では、太平洋側に比べて、観測量も理論計算値もともに小さいことが分かった。

重力変動を引き起こしている層を特定するため、地球内部の体積歪変化の理論計算を行った(図4)。その結果、東北地方太平洋側直下では、弾性層が圧縮に向かう傾向の方が、粘性層が膨張に向かう傾向よりも卓越していることがわかり、これによる密度場変動で重力変動を説明することができた。一方、日本海側のそれは、弾性層と粘弾性層の効果が拮抗しているため、太平洋側に比べて重力変動が小さくなることがわかり、実際の観測とも整合する結果を得た。

電磁気観測

北上山地で広帯域MT観測を新たに18点で行い、さらに既存の観測点データを併合することでグリッド状に北上山地の南半分を覆う100観測点のデータセットを作成し、3次元解析を行った(図5)。地震学的にはZhao et al. (2014)によって前弧側に流体の上昇域を示唆する低速度領域が解析されているが同様の位置には流体上昇を示す低比抵抗は推定されなかった。一方、火山フロントから西の下部地殻から最上部マントルの深度に顕著な低比抵抗が解析された。この低比抵抗はマントルウェッジの上昇流によって運ばれた流体であると考えられる。

新潟-福島横断測線では、平成29年度に観測を実施していた新潟県五泉市から福島県塙町に至る約150kmの測線上の16観測点のうちデータ不良の観測点での再測と、平成27、28年に共通して観測を実施していた福島県鮫川村の観測点の3観測点において、2018年11月から12月半ばにわたって、広帯域MT法補充観測を実施した。この結果当初に計画した通り、平成27年度に実施した新潟県阿賀野市から福島県鮫川村に至る測線、その北側で実施した平成28年度の新潟県阿賀野市から福島県石川町に至る測線をあわせた3測線での観測を終了できた。前年度までの報告で、平成27年度のデータについての2次元解析から、背弧側新潟平野の地下10~20km、前弧側郡山盆地と阿武隈高地との境にあたる領域の地下10~30kmに低比抵抗領域が決定され、脊梁部にあたる西会津地域に地下深部から立ち上るような低比抵抗領域が決定されたことを報告した。その断面について、地震波速度構造との対

照を行い、高低比抵抗域が、概ね地震波速度の高低速域に一致し、両者をあわせて、低速・低比抵抗域の上部にあたる高速・高比抵抗域に地震活動が集中している描像が得られた。低速・低比抵抗域を流体の存在域と考え、その流体が地震活動を励起した、あるいは、流体の存在によって脆性領域が薄くなることによる地震活動の励起の可能性が、本地域においても認められたことになる。

森吉山周辺で、地殻比抵抗構造解析と長周期データを用いた地殻・上部マントル3次元解析とを行った。森吉山での震源は地下10数kmまで分布し、震源領域はどちらかと言えば高比抵抗領域である。震源領域の西側に高比抵抗ブロックがあり、震源領域の直下深部に顕著な低比抵抗ブロックが認められる(図6)。長周期データによる牡鹿半島から八幡平にかけての測線では、火山フロント下の下部地殻から最上部マントルに1mを切る顕著な低比抵抗体を確認し、そこから浅部地殻に向けて背弧側の牡鹿半島に向け低比抵抗体が延伸している。この延伸途中の近傍に森吉山の低比抵抗体が存在する(図7)。

レオロジーモデリング

沈み込み帯の熱対流モデルによる温度構造(Horiuchi and Iwamori, 2016)を用いて、Unicycle(Barbot et al, 2017)による2次元解析を行った。解析においては、ベキ乗流動則とBurgersレオロジーを用い、応力依存の余効すべり(速度強化摩擦則)を組み込んでおり、2011~2016年までの海陸余効変動観測データ(Tomita et al, 2017)のデータとGNSS時系列データの再現を試みた。上記のモデルにより、観測(変位場と時系列)をほぼ再現すること成功した。水平変動はほぼ粘弾性緩和が支配しており、鉛直変動は、場所によっては余効滑りと粘弾性緩和の寄与が異なることが明らかになった。この傾向は時系列でも顕著で、牡鹿半島の上下変動(前弧)の隆起は余効滑りが支配するが、鳴子、豊浦(山形県鶴岡市)は粘弾性と余効滑りが影響している。また粘弾性緩和と余効滑りの相互作用は特に前弧の上下変動に影響し、地表変位の10%程が影響を受け、両者の誤差は時間とともに大きくなることがわかった。このことは、長期間の余効変動を詳細に予測するには、このような力学的相互作用を検討する必要があることを示している。

東北沖地震後の2012年に設置されたGNSS稠密観測網磐越測線の余効変動プロファイルを用いて、3次元不均質粘弾性構造モデルを推定した。余効滑りと粘弾性変形の同時計算にはLambert and Barbot(2016)による等価体積法を使用した。すなわち、Inuma et al.(2012)によって推定された東北沖地震時の滑り分布を初期値として、1日ごとにプレート境界断層及び粘弾性域に仮定したキューブ(図8a、b)において計算される応力変化から余効滑り及び全体の粘弾性変形を逐次計算した。余効滑りの計算には速度-状態依存摩擦構成則を、粘性計算にはベキ乗則Burgersモデルを用いた。磐越測線で観測されている余効変動プロファイル(図8c)について、単純なモデルから出発し、既往の地震波速度・減衰構造モデルを参考にして最適な不均質粘弾性構造モデルを得た(図8d)。最適モデルによって計算された変位プロファイル(図8c実線)は概ね観測結果を説明できている。推定された構造は、マントルウェッジの100km以深全体の低粘性と、70km以浅での火山フロント及びその西側下部の相対的低粘性で特徴付けられる。また、地温勾配分布等に基づいて島弧走向方向の不均質性も考慮したモデルにより、面積ひずみ分布を計算したところMiura et al.(2014)による結果を概ね再現することが分かった(図8e)。

2011年東北沖地震前及び地震後における東北日本前弧域の上盤内応力場を再現し、その形成メカニズムを明らかにするために、有限要素法を用いたプレート沈み込み及び重力に伴う島弧-海溝系の絶対応力場の二次元モデリングを行った。媒質は粘弾塑性体を仮定し、重力を物体力として考慮した。また温度構造・含水量・蛇紋岩化域のシミュレーション結果[Horiuchi and Iwamori, 2016]等に基づく不均質非線形レオロジーを考慮した。10万年間のプレート定常沈み込みを与えて長期応力場を形成した後、600年間のプレート間固着とその後の巨大地震時すべりを与え、2011年東北沖地震前後における絶対応力場をシミュレートした。海洋プレートの沈み込みはモデル端の入口と出口に速度境界条件を与えることで駆動し、プレート境界に沿って薄い塑性層を配置することでプレート境界に働く摩擦力を表現した。牡鹿半島を通る島弧直交断面について、巨大地震後のプレート境界の平均摩擦力が9MPaのケース(ベストモデル)の結果の前弧付近の拡大図を図9に示す。観測は、F-netのCMT解カタログ

グによる同断面 50km 以内の上盤内地震の P 軸・T 軸のうち断面との角度が 35 °以内のものをプロットしている。東北沖地震前と地震後はそれぞれ逆断層型地震と正断層型地震が卓越していたことがわかる。モデル計算の結果、前弧海域下の上盤内では、「地形・密度構造から重力が作る引張力」及び「定常沈み込みが作る曲げ応力」により、浅部が引張・深部が圧縮の応力場が形成されていたことがわかった。東北沖地震前はプレート間固着によって圧縮場の差応力が増加することで逆断層型地震が多発し、逆に東北沖地震後は地震時に引張場の差応力が増加したことによって正断層型地震が多発していると考えられる。複数のモデル結果と観測との比較を通じて、東北沖地震後のプレート境界（海溝から 40?150 km の範囲）の摩擦力は 5?11 MPa 程度と推定され、地震時の応力降下量が、10-20MPa 程度ということを見ると、プレート境界の強度が 30MPa 程度以下と非常に弱い事が示唆された。

地震断層すべり物理モデルの構築（計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果のまとめ）

東北地方太平洋沖地震後の余効変動や定常的な地殻変動について、観測や実験結果を参照しながらモデル化を行ってきた。その結果、余効変動には粘性緩和の影響が大きく含まれており、また、データとモデルの比較により粘性率の不均質性や非線形性が次第に明らかになってきた。また、余効滑りに起因する粘性緩和や、粘性緩和による応力変化に起因する余効滑りの進展など、余効滑りと粘性緩和の相互作用についても正しく評価することが、余効変動の長期予測には極めて重要であることもわかってきた。さらに、プレート境界浅部の固着が数百年にわたり継続することで、マントルウェッジ及びプレート境界深部の粘性せん断帯における粘弾性緩和の進行によりプレート境界深部のすべり欠損レートが時間とともに増加し、前弧域において巨大地震サイクル後半にかけて沈降速度が増加していくことが示された。このようにプレート境界型巨大地震の全体像と発生サイクルを理解するためには粘性緩和を正しく評価することが重要である、ということがわかってきたのが、この 5 年間の最大の成果である。

また、3次元比抵抗構造が次第に明らかになってきて、東北地方の下部地殻は、いわき付近を除いて、基本的に前弧は高比抵抗、背弧は低比抵抗となっていることが明らかになってきており、これらの分布は地震活動の不均質性とも大局的には良く対応している。内陸の地震発生域もプレート境界も、強度が 30 MPa 程度以下しかないことが明らかになってきており、また、様々な地震活動域の下には顕著な地震波反射面も見つかっている。これらのことから、流体による強度低下が地震発生に大きくかかわっていることを意味しており、流体の分布を今後、さらに絞り込むことができれば、地震が起こりやすい場所を次第に絞り込めることになり、それによって災害軽減に役立てられる可能性があることがわかった。

ただし、応力場の不均質性はそれほど簡単には解消しないこともわかってきたので、応力場の推定においては、背景の応力場も不均質である可能性を十分考慮して解析を行う必要があることがわかったのも、今回の大きな成果の一つである。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
深井雅斗・小川康雄・曾國軒・市來雅啓・高倉伸一，2019，北上山地の三次元比抵抗構造解析，CA 研究会論文集，印刷中。

Hata, M., M. Uyeshima, Y. Tanaka, T. Hashimoto, N. Oshiman, and R. Yoshimura, 2018, Three-dimensional electrical resistivity distribution beneath the Beppu-Shimabara graben with a focus on Aso caldera, Southwest Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 123, 6397-6410.

Hata, M., N. Matsushima, S. Takakura, M. Utsugi, T. Hashimoto, and M. Uyeshima, 2018, Three-dimensional electrical resistivity modeling to elucidate the crustal magma supply system beneath Aso caldera, Japan, *J. Geophys. Res.*, 123, 6334-6346.

Ichiki, M., T. Kaida., and Y. Ogawa, 2018, Investigation of flow reverse towards backarc side in the mantle wedge: Electrical conductivity distribution of subduction zone beneath the northern part of NE Japan, AGU Fall Meeting, T31H-0399.

伊藤嘉秋，2018，2011 年東北地方太平洋沖地震の余効変動に基づく不均質レオロジーに関する研究，東

北大学修士論文, 132pp.

Masyitha Retno Budiati Kiraman, G. Toyokuni, and T. Okada, 2018, Depth estimation of Moho discontinuity beneath Central Indonesia by the cross-correlation analysis of seismic ambient noise, AGU Fall Meeting, T23A-0345.

松野弥愛, 2018, 2016年ニュージーランド・カイコウラ地震における本震断層と余震メカニズム解の幾何形状の類似性の評価, 東北大学卒業研究.

大久保修平・高木悠・今西祐一・田中愛幸・渡邊篤志・安藤美和子・張新林・大島弘光・前川徳光・岡田和見・三浦哲・植木貞人, 2018, 2011年東北地方太平洋沖地震後の東日本広域重力変動 - 粘弾性変形の検出, 日本地震学会秋季大会, S22-06.

岡田知己・中山貴史・平原聡・堀修一郎・佐藤俊也・松澤暢・2011年東北地方太平洋沖地震合同余震観測グループ, 2018, 稠密地震観測で見た、東北沖地震後の内陸誘発地震, 地震学会秋季大会, S22-03.

Okada, T., T. Sato, Y. Iio, S. Matsumoto, S. Bannister, J. Ristau, S. Ohmi, S. Horiuchi, T. Miura, M. Savage, J. Pettinga, F. Ghisetti, and R. H. Sibson, 2018, Stress and strength control on the 2016 Kaikoura earthquake inferred from a seismic observation, Annual Meeting of Geoscience Society of New Zealand.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要:

次期計画においては、東北地方、特に東北地方太平洋沖地震が発生した後に地震活動の変化が見られた秋田県を中心とする東北地方中北部領域などの領域で、東北沖地震後のひずみ場、地震活動や応力場・地殻流体の挙動に伴う強度の時間変化のモニタリングを行い、東北地方の陸域地殻の東北沖地震後の約12年間の応答(余効変動)について知見を得る。また、活断層が複雑に分布する宮城県中部～山形県南部～福島県北部における地震活動の理解を深め、複雑な断層系における応力・ひずみ蓄積過程や断層間の相互作用の理解に貢献する。余効変動のような遷移的な変形挙動を予測する岩石力学的データは乏しく、余効変動の盛衰を占う余効すべりと粘弾性緩和の定量的な区分は未だ困難である。そこで本研究では、広範な上部マントル温度条件下でのカンラン石試料の応力緩和実験も行い、東北沖地震の余効変動を予測する遷移流動挙動のレオロジー解明を目指す。

平成31年度においては、主として測地観測網・地震観測網を長期にわたって継続するための整備を行う。これまで行ってきた臨時観測点の整理およびこれまでのオフライン観測をオンライン化する等長期観測に対応する。さらに、これまで観測・理解が手薄だった領域の強化として、宮城県中部～山形県南部～福島県北部において臨時地震観測網を整備する。それぞれの観測点間隔は、地震発生層の厚さ(約10-20km)を考慮し、約10km程度とし、また既存観測点の配置を考慮し、計40点の地震観測点を整備する。比抵抗構造探査については、前年度までに整理・統合したデータを利用し、新潟県村上市 福島県相馬市の二次元測線の解析を進める。実験については、既設の実験機材の整備を行う。領域内の断層浅部・深部構造探査等の結果について既往研究の成果・データ等の収集およびコンパイルを行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

東北大学: 岡田知己・太田雄策・三浦哲・市来雅啓・矢部康男・内田直希・松澤暢・高木涼太・吉田圭佑・武藤潤・趙大鵬・豊国源知・山本希・遠田晋次・他計約20名。

他機関との共同研究の有無: 有

東京大学地震研究所: 岩崎貴哉・平田直・小原一成・上嶋誠・飯高隆・酒井慎一・平賀岳彦・蔵下英司・五十嵐俊博・福田淳一・小河勉・大久保修平・今西祐一・田中愛幸・他計約20名。

・地震観測は北海道大学(勝俣啓・高橋浩晃)、弘前大学(小菅正裕・渡邊和俊)、名古屋大学(山中佳子・加藤愛太郎)、京都大学防災研究所(片尾浩・飯尾能久)、九州大学(松島健・松本聡)、鹿児島大学(宮町宏樹・後藤和彦)、防災科学技術研究所(武田哲也・浅野陽一)をはじめとした全国連携の共同研究。

・GPS観測も北海道大学(大園真子)をはじめとした全国連携の共同研究。

- ・重力観測は北海道大学（大島弘光）との共同研究。
- ・電磁気観測は秋田大学（坂中伸也）・東京工業大学（小川康雄）との共同研究。
- ・シミュレーションについては、建築研究所（芝崎文一郎）との共同研究。
- ・データ解析については東京工業大学（中島淳一）、JAMSTEC（飯沼卓史）との共同研究。

（12）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東北大学大学院理学研究科
 電話：022-225-1950
 e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp
 URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

（13）この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：松澤暢
 所属：東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

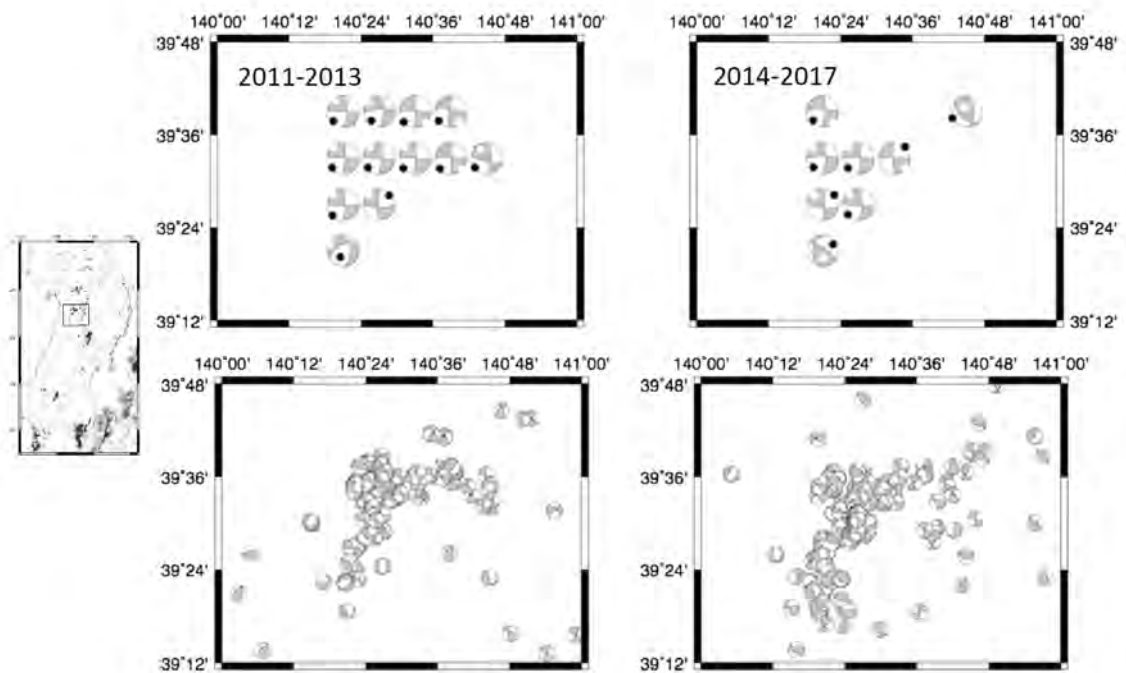


図 1. 秋田南部地域における応力インバージョン結果（上）とメカニズム解（下）。

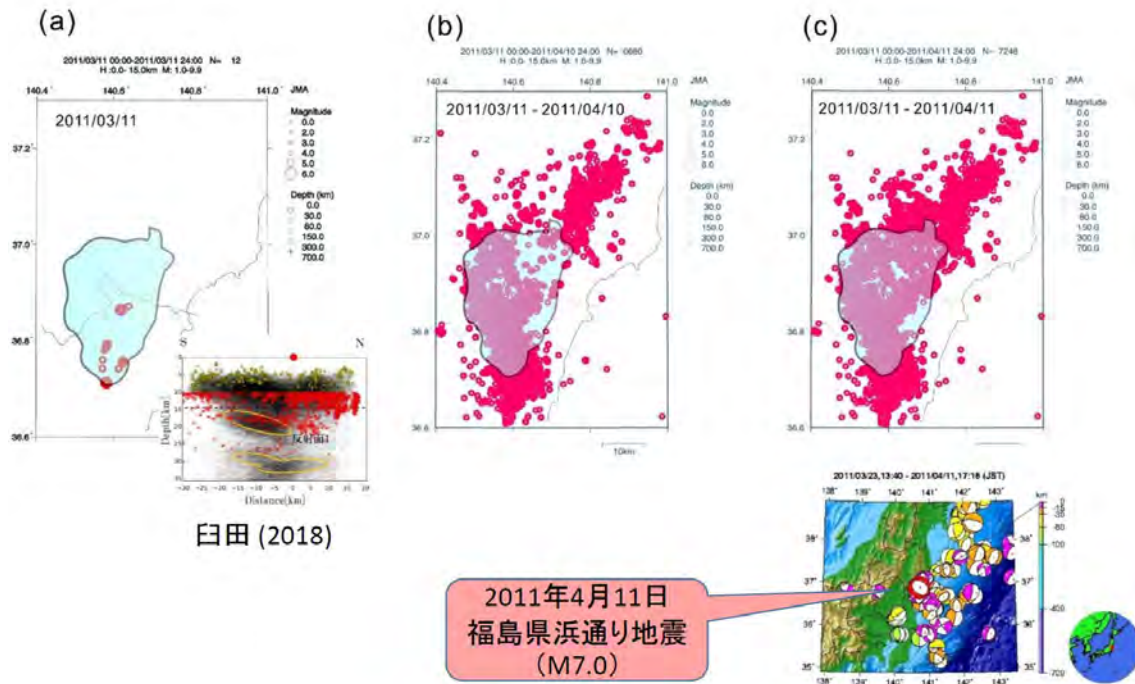


図 2. いわきにおける地震活動と地震波反射面の関係。

(a) いわきの地震活動域での 3 月 11 日に発生した 15°以浅の M 1 以上の地震の震源の位置と地殻内反射面の位置。反射面の位置は水色で示してある。挿入図は白田により求められた反射面の深さ分布 (白田修士論文、2018)。(b) いわきの地震活動域での 2011 年 3 月 11 日-4 月 10 日に発生した 15°以浅の M 1 以上の地震の震源の位置と地殻内反射面の位置。(c) いわきの地震活動域での 2011 年 3 月 11 日-4 月 11 日に発生した 15°以浅の M 1 以上の地震の震源の位置と地殻内反射面の位置。防災科研による 4 月 11 日の福島県浜通りの地震のメカニズム解を挿入図で示した。

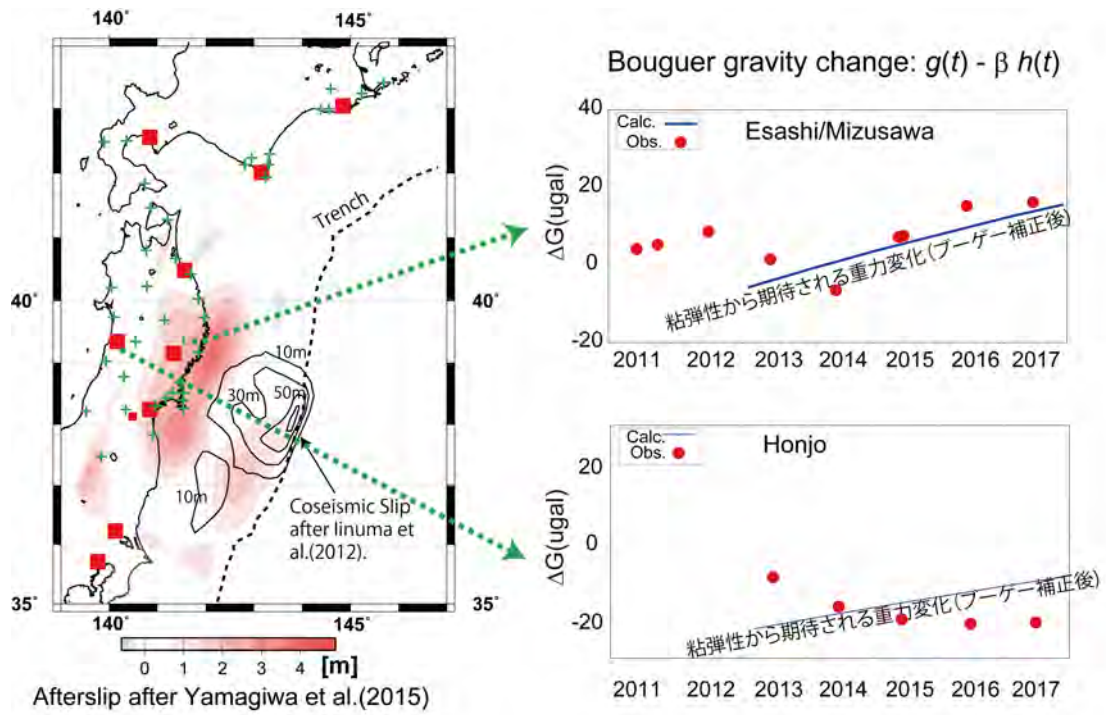
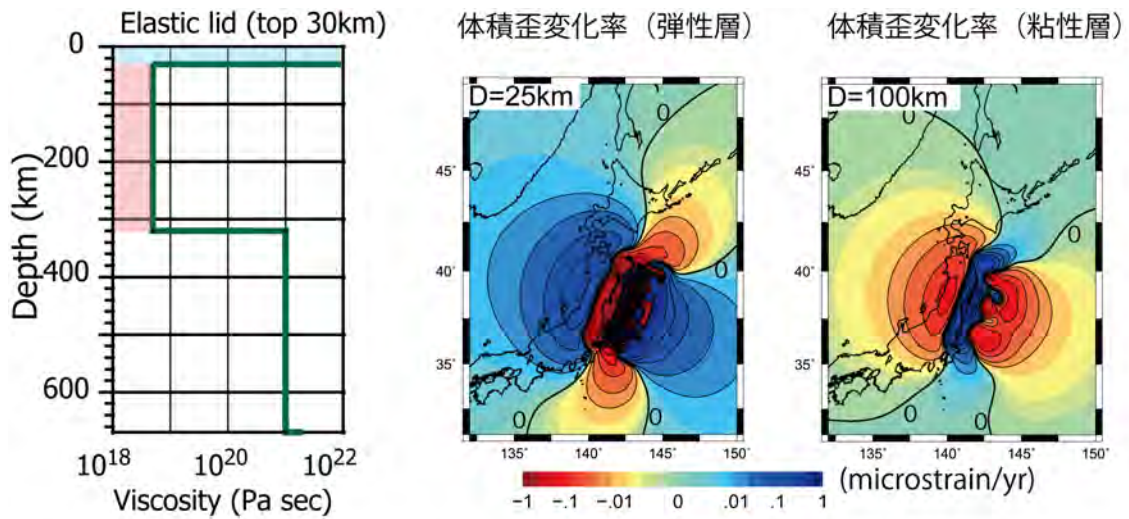


図 3. 太平洋側と日本海側の絶対重力値の変動率。

観測点の上下変動の効果は、ブーゲー勾配で補正した。(左)重力観測点(絶対点、相対点+)の分布と、東北地震の地震時すべり及びアフタースリップ。(右)観測値()と、球対称粘弾性モデルに基づく予測値。



	実効層厚 H (km)	体積歪変化率 $\dot{\epsilon}$ ($\mu\text{strain/yr}$)		重力への寄与 $-2\pi G\rho\dot{\epsilon} H$ ($\mu\text{gal/yr}$)	
		日本海側	太平洋側	日本海側	太平洋側
弾性層	30	+0.1	-1.5	-0.4	+5.5
粘性層	100	-0.1	+0.1	+1.2	-1.2
総和				+0.8	+4.3

図 4. 球対称粘弾性モデル (上左) に基づいて計算した、地球内部の体積歪変化率。
弾性層内の深さ 25km と粘性層の深さ 100km における分布を上中央と上右に示す。下部の表には、各層における体積歪変化率から期待される重力変化率の概算値を示す。

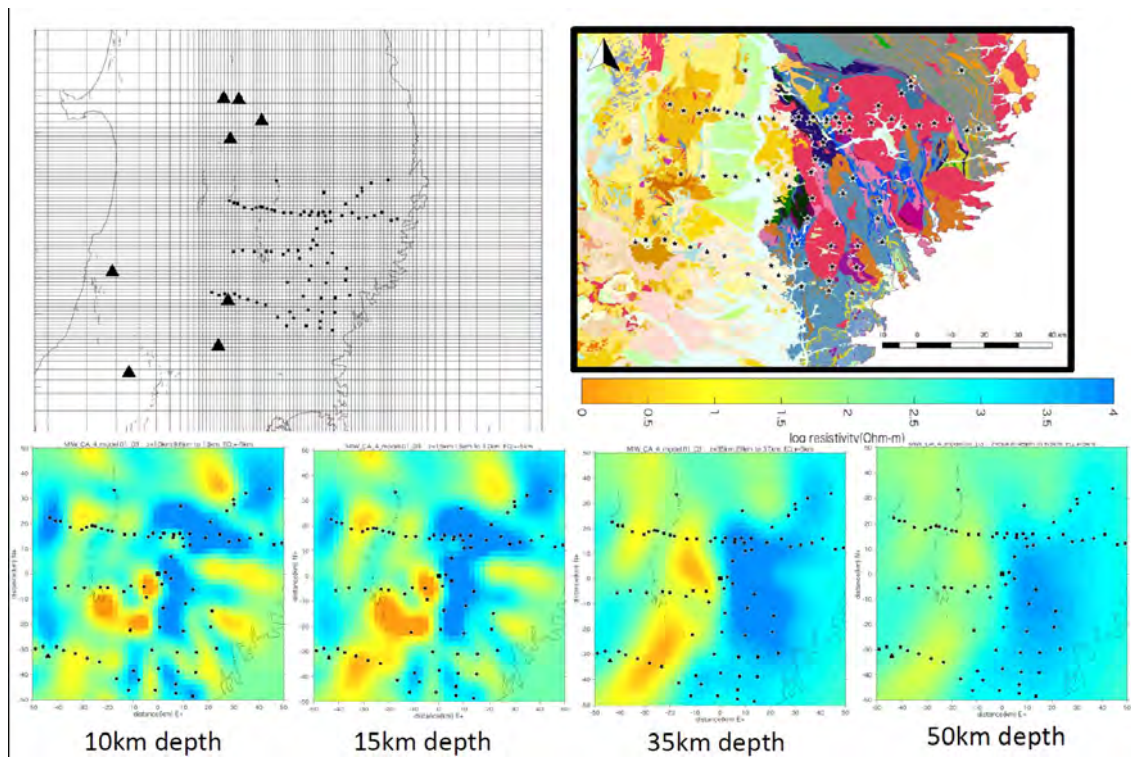


図 5. 北上山地における 3 次元比抵抗構造。

左上：観測点とグリッドの配置。右上：地質構造。下：各深さにおける比抵抗分布。

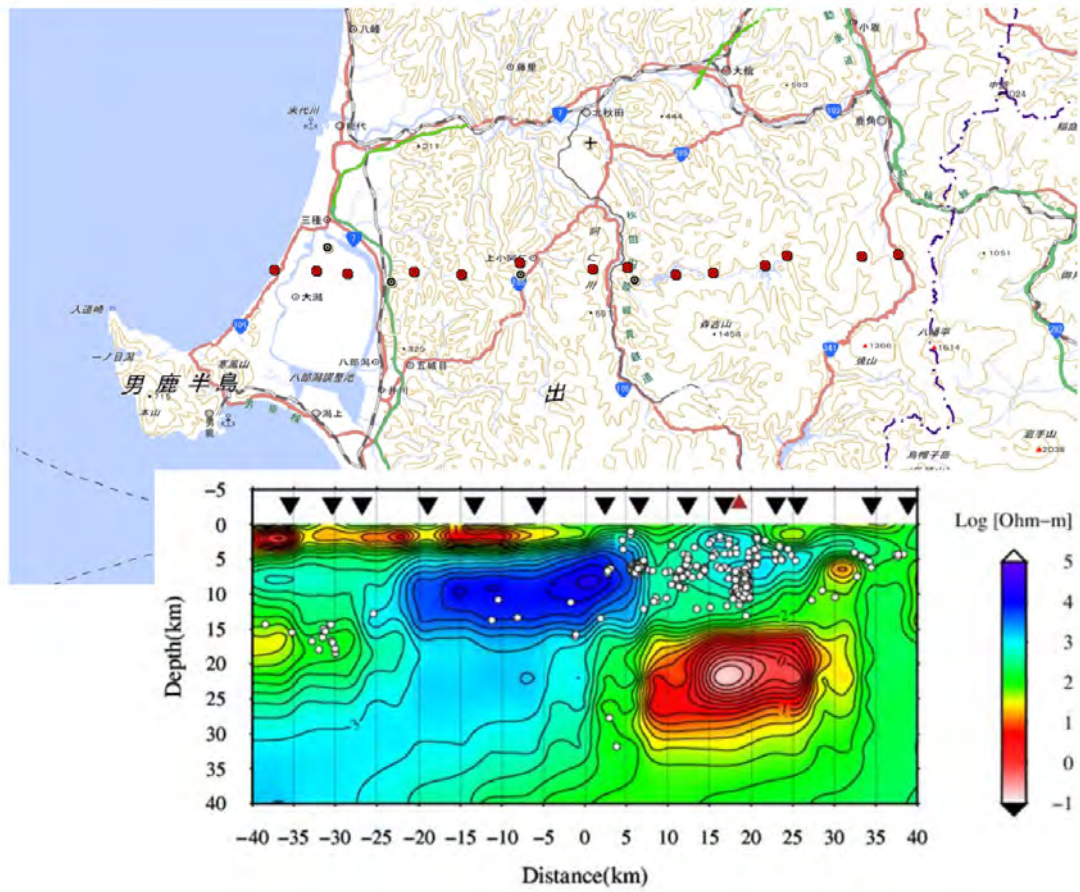


図 6. 森吉山周辺の比抵抗構造。
 上：観測点配置。下：推定された比抵抗構造。

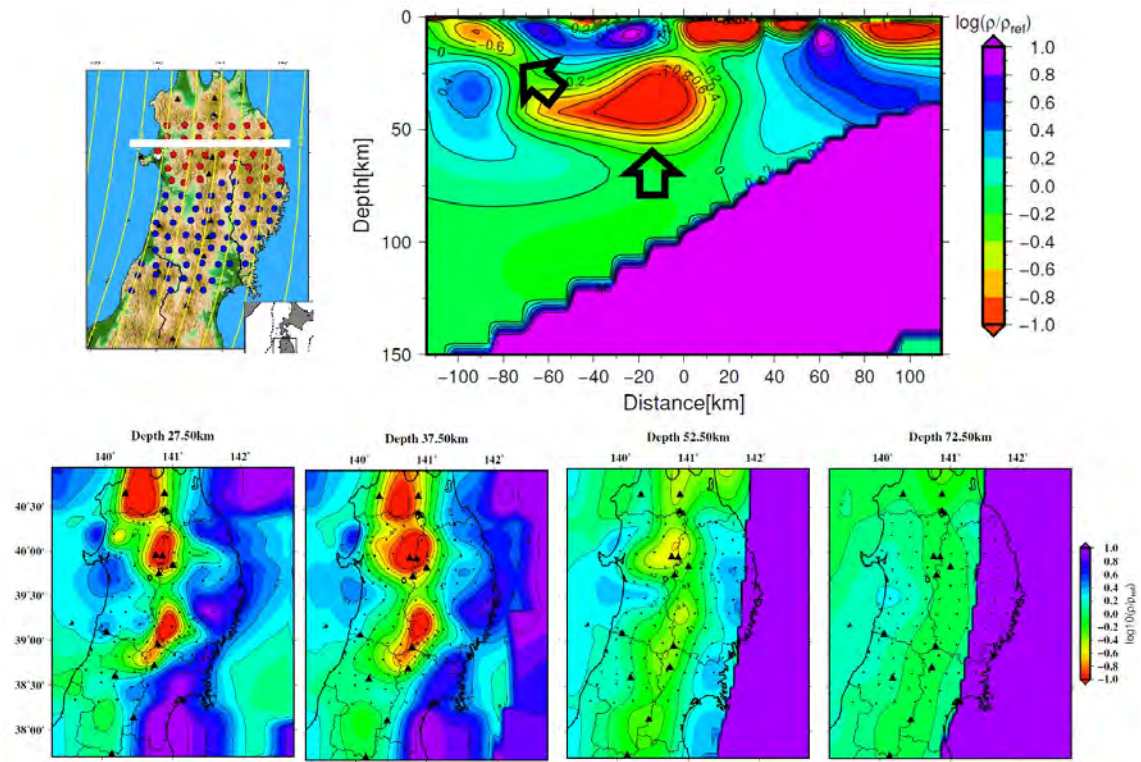


図 7. 長周期 MT 観測から推定された 3 次元比抵抗構造。

左上：観測点配置と断面図の位置。右上：森吉山・八幡平付近を通る東西断面。下：各深さにおける比抵抗分布。

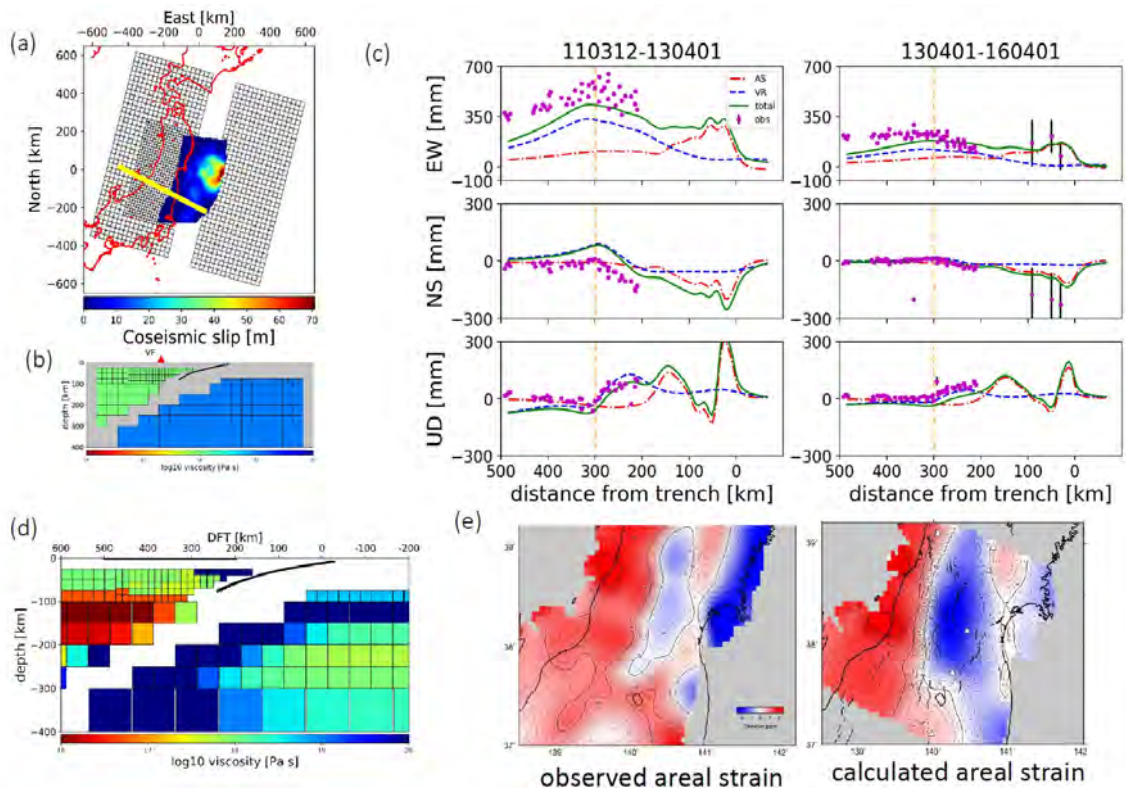


図 8. 3次元不均質粘弾性モデルによる余効すべり・島弧変形シミュレーション結果。

(a) シミュレーション計算に使用した構造モデル（深さ 80 km の水平断面図）。カラースケールは仮定したプレート境界断層モデル上に Inuma et al. (2012) によって推定された東北沖地震時の滑り分布を示す。矩形は粘性応答計算に使用したキューブを示す。黄色線は磐越測線の位置を示す。(b) (a) の磐越測線沿いの構造断面図。(c) 磐越測線沿いの変位プロファイル（紫点）と最適モデルにより計算された余効すべり（橙色の 1 点鎖線）及び粘性（青破線）による変位とそれらの和（緑実線）。左は東北沖地震後の 2 年間、右はその後の 3 年間について示す。(d) 最適モデルの粘性分布。(e) 東北沖地震後に観測された面積ひずみ分布（左）と最適モデルにより計算された面積ひずみ分布（右）。

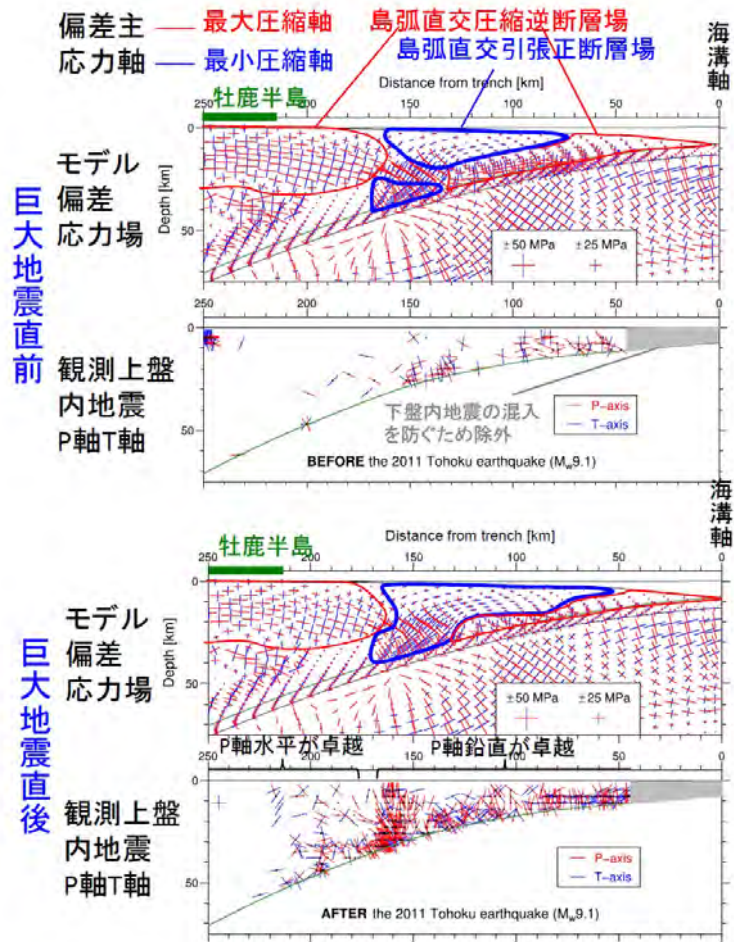


図9. 東北日本島弧の東北沖地震前後における絶対応力場のモデリング。

巨大地震後のプレート境界の平均摩擦力が9MPaのケース(ベストモデル)の結果、巨大地震発生前(上)と直後(下)の、モデルから計算される偏差応力場と観測された上盤内の地震の発震機構解のP軸とT軸の分布の前弧付近における拡大図を示す。

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震断層すべり物理モデルの構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震は、断層にかかっている応力が脆性破壊強度を上回った時に発生する。このような破壊現象である地震の発生を予測するためには、不均質性に起因する応力集中や流体等に起因する破壊強度の低下の状況を正確に理解しておかなければならない。本課題では、このような観点から、断層面や地殻微細構造の不均質性および流体の存在が地震の発生や規模、破壊過程の複雑性に及ぼす物理化学的影響について、野外観察、構造探査、自然地震観測、誘発地震観測、実験、シミュレーション等から明らかにすることを目的とする。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

地震観測

東北地方の臨時観測網の再編成を行い(H26年度)観測を継続する。ただし、観測点の移設・継続は、「地殻応答による断層への応力載荷過程の解明と予測」の課題にて実施することにより、経費の節減と観測データの有効利用を図る。地震活動域の拡大速度が流体の拡散で説明できるかどうかを検証し、また、メカニズム解データなどから得られる応力場の時空間変化から、背景となる絶対応力場と間隙流体圧の時空間変化を推定する(H26~30年度)。さらに、震源域の構造を詳細に推定するとともに、地震波干渉法や相似地震等を利用して、流体の移動に関わる構造の変化の検出を試みる(H26~30年度)。

電磁気観測

過去に行われた電磁気観測のデータを解析することにより、臨時地震観測網によって詳細な震源分布が得られている地域での三次元比抵抗構造を推定し、地震活動域における比抵抗構造の特徴を抽出する（H26～30年度）

岩石の変形特性に及ぼす高間隙水・フugaシティの効果

内圧式岩石 水反応実験装置を用いて、地震発生帯の環境下での断層面の透水性と反応性を明らかにし、すべり挙動実験とフィールド観察を通じて検証を進める。特に、高間隙水圧下での破壊のパターンと透水特性との関係を明らかにし、地震発生帯での透水特性を調べる（H26～29年度）。また、固体圧変形試験機を用いて、地殻 - 上部マントル条件での岩石の流動強度に及ぼす水の効果を明らかにする（H26～29年度）。封圧を変化させることで、水のフugaシティを変化させ塑性流動強度に及ぼす水の効果を定量化する（H27～30年度）。

CT 観察による地殻流体の実態の把握

深部地殻・最上部マントルからもたらされた捕獲岩中に間隙流体が存在していた空隙の形態を探るために、捕獲岩のX線CT撮影と画像解析を進める。減圧時に生じるクラックを正確かつ効率的に分離するための画像処理方法の改良を行い、流体の体積分率（空隙率）・連結度・形状を定量化する（H26～27年度）。さらに、得られた結果を用いて、地下での弾性波速度と電気比抵抗を計算する（H27年度）。X線CT撮影を行った試料の研磨断面を作成し、電子線後方散乱回折法（EBSD）によって結晶定向配列を定量的に測定し、岩石の変形と流体分布との関係を明らかにする（H28～29年度）。流体の連結度に敏感な電気比抵抗分布と応力場とを比較し、実験から得られた岩石の変形と流体分布との関係がマクロスケールに影響しているかどうかを検証する（H29～30年度）。

地震発生帯における地殻流体の熱力学情報の精密化と実フィールドでの検証

地震発生帯の温度圧力環境における岩石 - 水反応の熱力学データベースの改良と地熱流体の状態方程式の精密化、岩石 - 水反応に大きな影響を及ぼす誘電率に関する岩石実験とその定式化を行い、それらを組んだ水 - 岩石相互作用シミュレータを作成する（H26～29年度）。これを用いて水 - 岩石相互作用による間隙水圧の上昇をシミュレートし、その結果と実フィールドでの地質学的観測結果との整合性についての検討を進める（H27～30年度）。

地熱流体と内陸地熱誘発地震

地熱地帯の注水井を模した装置を用いて、地下の岩石中の流体の移動と破壊を同時に計測することにより、地熱地帯における誘発地震発生モデル化を行う（H26～30年度）。さらに、実際の地熱地帯において地震観測データを用いて、注水状況と地震活動の時空間変化について比較検討する（H26～30年度）。

断層面の不均質性と内陸地震の多様性の起源

断層長さの広いスケール領域でエネルギー解放率と各階層のジョグの破壊エネルギーは等しいと期待されるが、この様な破壊エネルギーの実測値はほとんどないことから、これらを充実化させるための実験を行う（H26～29年度）。また断層運動は散逸系なので断層帯の不均質性は進化することになるため、様々なスケールの観察を通じて、この断層の不均質性の進化の過程と内陸地震の多様性の起源についてモデルを構築する（H27～30年度）。

地震断層すべり物理モデルの構築

観測から得られた結果から、断層や地震活動域と流体の存在域との位置関係関係を把握し、実験結果に基づき、岩石の非弾性変形に起因する断層への応力集中機構をモデル化する。また、CT スキャンから得られた流体の流路の情報と水 - 岩石相互作用シミュレータにより高間隙水圧の生成をモデル化し、地熱地帯の誘発地震に関する実験・観測からそのモデルの妥当性を検証する。さらに、断層面の不均質性や強度について、進化の過程と流体の影響という観点からモデル化し、地震発生と流体との関係や地震の多様性の根本原因を解明することを目指す（H29～30年度）。

（ 8 ）平成 30 年度及び計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要：

地震観測

山形-福島県境付近では 2011 年東北地方太平洋沖地震の後、stress shadow になっているにもかかわらず、地震活動が活発化した。この地震群の波形には顕著な反射波が見えており、それを用いて反射面の推定を行った結果を図 1 に示す。反射面の分布は大峠カルデラにほぼ重なって同心円状に分布し、また中心部ほど反射面は低角となっている。このことから、これらの地震波反射面はカルデラの構造に起因した弱面に沿って流体が侵入してきたことを示唆する。

この山形-福島県境付近の地震活動では、様々なパラメータが活動当初の約 50 日間だけ異常な値となり、それ以後では通常の値になっていることが明らかになっている (Yoshida et al., 2017; Yoshida and Hasegawa, 2018a)。今回、Lin and Shearer (2007) の手法で地震クラスタ中の V_p/V_s を詳細に調べたところ、やはり最初の約 50 日だけが低い値を示し、そのあとは石英の多い花崗岩と同程度の値を示した (図 2)。また、経験的グリーン関数法から得られた震源時間関数のパルス幅の方位依存性から、破壊の進行方向を推定した結果、地震活動は時間とともに深部から浅部に移動していく (Yoshida and Hasegawa, 2018a) が、破壊伝播はむしろ浅部から深部に向かう場合が多いことが明らかになった (図 3)。

電磁気観測

東北地方太平洋沖地震発生後に地震活動が活発化した秋田県森吉山周辺で、二次元比抵抗構造解析を行った。解析には TM モードと TE モードの両方を用いた。震源領域はどちらかと言えば高比抵抗領域であり、震源領域の直下深部に顕著な低比抵抗ブロックが認められるという、他の地震活動域と同様の特徴が見られ、ここでも深部から流体が上昇してきて地震活動を生じている可能性が高いことがわかった (課題番号 1203 の図 6 を参照)

岩石の変形特性に及ぼす高間激水・フュガシティの効果

これまで、水が下部地殻の岩石の変形に及ぼす影響を調べるために、様々な実験を行ってきた。今回は、変形実験との比較のため静水圧実験 (封圧 1GPa、温度 900) を行い、高压下での変形時間と含水量の比較を行った。ここで、変形試料は高压下での保持時間を除いた正味の変形時間を用い、一方、静水圧試料には差応力をかけていないため保持時間を「変形時間」として扱った。含水率の測定は、回収試料について赤外分光法により行った。図 4a は含水率と強度の関係を示しており、含水率のエラーバーは $\pm 10\%$ (図 4b も同様) である。含水量が増えるほど強度低下を示すことがわかる。図 4b は含水率と時間の関係を示す。変形実験のデータ (黒) は含水率が変形時間に比例し、静水圧 (非変形) 実験のデータ (赤) は含水率が時間の $1/2$ 乗に比例することがわかった。時間にリニアに比例する拡散は異常拡散と呼ばれ、物質の変形 (構造変化) によって拡散が促進されている状態を示し、通常の時間 $1/2$ に比例する Fick の拡散より速い拡散を示す。このことは、変形によって通常よりも早い速度で水の拡散が進行し、それによって変形が促進されたことを示している。

CT 観察による地殻流体の実態の把握

前弧マントル上部で観測される低地震波速度、低 V_p/V_s 領域を説明する各種モデルの比較を行った。このような領域が存在することを説明するモデルとしては (1) 低温 石英の存在 (Eberhart-Phillips et al., 2006; Rossi et al., 2006; Zheng and Lay, 2006)、(2) 多量の斜方輝石 (Opx) の存在 (Qian et al., 2018)、(3) 橄欖岩の変形による非等方的な波線 (Hacker and Abers, 2012)、(4) 橄欖岩粒間の流体の存在 (Zhao et al., 2015)、(5) 斜方輝石の選択的含水反応による滑石の生成 (本研究) がある。図 5 に、500 、1.3 GPa における、ドライな斜方輝石橄欖岩 (harzburgite)、リザード石 (lizardite)、葉蛇紋石 (antigorite)、滑石 (talc)、低温石英 (alpha quartz)、斜方輝石 (opx) の V_p と V_s を示す。点線矢印は橄欖石 (olivine) の [100] 軸が波線に垂直と仮定した場合の (3) の速度変化を表す。濃い灰色と薄い灰色の領域はそれぞれ (4) と (5) の場合の速度変化を示す。

(1) と (2) はマントルの化学組成として広範に分布するとは考えにくく、(3) は V_s の値を観測より上昇させてしまい、また (4) では粒間の流体は前弧マントル条件ではごく短時間で橄欖岩と反応して含水鉱物を作ってしまうので、いずれも観測事実をうまく説明できない。したがって、本研究で提案した (5) の可能性が一番高いと考えられる。

地震発生帯における地殻流体の熱力学情報の精密化と実フィールドでの検証

昨年度までの高圧・高温における塩水中の石英の溶解度測定実験結果から、塩水の見かけの比誘電率を、50-200 MPa、25-550 の範囲で見積もり、その塩水の比誘電率 (ϵ_b) と水の誘電率 (ϵ_w) の比を次式で表した：

$$\epsilon_b / \epsilon_w = a / (2 - b)^{0.5} \exp(-(T - c)^2 / (2b)) + d,$$

ここで、 a は円周率、 T は温度 (K)、 a 、 b 、 c 、 d は定数で、それぞれ 300、13000、573、0.8 である。この水と塩水の比誘電率の違いは、塩の電離度の違いを引き起こし、延いては延いては帯電溶存種 (イオン) の自由エネルギーを補正する活量係数の違いを引き起こす。その一般的な傾向と、それによる水-岩石相互作用への影響を考察した。

石英の溶解反応は単純な中性溶存種のみからなるので、その中性溶存種の自由エネルギーは溶媒の比誘電率により直接補正できる。石英の溶解度は温度低下とともに単調に減少するので、水であれ塩水であれ、溶媒の温度が下がれば石英は沈殿する。一方、帯電溶存種は、溶媒の比誘電率による直接補正よりもはるかに大きな補正が活量係数によりなされる。この活量係数は溶媒のイオン強度に強く依存し、そのイオン強度は主要溶存種である塩の電離度に大きく支配されるが、その電離度自体が溶媒の比誘電率に依存する。一般的な珪酸塩鉱物の溶解反応式には、図 6b の上の式中の頑火輝石 (enstatite) の場合のようにイオンが含まれる。

また、多くの珪酸塩鉱物の溶解度は、石英とは逆に、温度低下とともに増加するので、温度低下に伴い溶解する。しかしながら、塩水の場合は、先述の活量係数の温度変化により、低温側で沈殿を引き起こすことが多い (図 6b)。この場合、低温側で孔隙率が減少する。また、珪酸塩鉱物が低温側で含水鉱物に交代される (変質を受ける) 場合には、一般に体積増加を引き起こすので、やはり孔隙率が減少して、シールされやすくなると期待される。たとえば、温度低下に伴い、頑火輝石 (enstatite、輝石 (pyroxene) の一種、 $MgSiO_2$) から含水鉱物である直閃石 (anthophyllite、角閃石 (amphibole) の一種、 $Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2$) への変質が生じた際の、それぞれの溶解 / 沈殿量を図 6c に、また、それによる総体積の変化量を図 6d に示す。

地熱流体と内陸地熱誘発地震

地震時に断層が急速に動くとき、断層のジョグでは流体圧が静水圧よりも低くなる「Flash vaporization」が起こる可能性が指摘されている (Wartherly and Hanley, 2013)。本年度は、同様の条件の Flash 実験を行いシリカ析出様式を検討した (図 7a)。その結果 100-5000 nm 程度の球形のアモルファスシリカ粒子が形成されることがわかった (図 7b)。このようなシリカ粒子は、移動性が高く、目詰まりさせるために、亀裂や断層の強度、水理学的特性に大きな影響を与えられられる。

水を含んだ花崗岩質地殻では、超臨界条件に入るとシリカが析出することが指摘されているが、玄武岩質地殻では明らかではない。また、熱力学データの欠落により、この条件での岩石-水相互作用が予測できない。本実験では、玄武岩を亜臨界条件で水に溶解させ、超臨界、及び気相領域での析出実験を行った。その結果、斜長石の選択的な溶解 (図 8a) と、析出が起こることを明らかにした (図 8b)。すなわち、同様の温度圧力で析出が起こるが、花崗岩地殻ではシリカ成分が動き、玄武岩地殻で長石成分が動きやすいことになる。

断層面の不均質性と内陸地震の多様性の起源

Schlische et al. (1996) は、長さオーダーから 1000 ほどまでの地質断層の長さ L と変位量 D に関するデータをコンパイルした (図 9)。個々の断層集団のいずれもほぼ $D \propto CL^n$ に従い、 n はほぼ 1.5 である (オレンジ色の線)。 L が 10 オーダー以下では、 L が大きい集団ほど C が小さいが、これは媒質 (多くは堆積岩) の物性に依る。 L が 10km オーダー以上では C は一定のようだが、これは媒質の主体が地殻本体になるためであろう。一方、地震断層の L と D の領域を青い破線で示した。近傍に活断層が見当たらなくとも、 $M6.6-7$ 以下の地震は起こり、それらの L は 30 程度以下である。このときは、 D は L に比例する。これらが成長してやがて地質断層になるなら、図の地質断層の領域と地震断層の領域の中間にプロットされるべきだが、なぜかそれが見当たらない。断層の成長過程を理解するためには、このギャップと n の違いを解明する必要がある。

計画期間中(平成26年度~30年度)の成果のまとめ

断層の成長の特徴を抽出し、大きな断層も小さな断層も3階層程度の入れ子構造を持つことを示した。また、地震発生域近傍の比抵抗構造を調べ、いずれも地震はやや高比抵抗の領域で発生するものの、その直下に低比抵抗の領域が存在していることが多いことを示した。

2011年東北地方太平洋沖地震後に発生した山形-福島県境付近の群発地震活動を丹念に調べ、カルデラの周りで地震波反射面が分布していることを明らかにした。これはカルデラ壁に沿って流体が存在している可能性を示す。また、この群発地震活動は深部から浅部に向かってマイグレーションしており、活動の様々なパラメータが活動開始から50日くらいまで異常な値を取り、それ以降は普通の値に落ち着くことを明らかにした。このことは、群発地震活動の初期の活動は間隙圧増加による強度低下によって生じていることを強く示唆する。

実験に基づき、塩水の比誘電率を定式化し、これにより、石英等が析出しやすい条件を明らかにすることができた。実際に実験により、石英の溶解や析出によるシールを再現することに成功した。また、下部地殻の条件下で、水があると強度が下がって変形が進み、さらに水が入って変形しやすくなることを明らかにした。さらに、沈み込んだスラブから島弧地殻へと水が供給される過程における、前弧側マントルウェッジ内での水の存在形態の候補も示した。

以上のように、流体と地震の関係が様々な観点から検証されたことにより、少なくとも群発地震は流体の急激な上昇によって発生した可能性が高いことが明らかになり、また、下部地殻の剪断帯に水が入り込むと、ますます変形が進みさらに水が入り込むという正のフィードバックが働くことから、水が存在すると強度が低下するのみならず、応力・歪が集中していくことも明らかになった。これにより、断層スケールでも、比抵抗分布等から水の存在範囲を調べることで、地震の発生しやすい場所をあらかじめ特定できる可能性があり、それによって災害軽減に貢献できる可能性があることがわかった。

- (9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
- Amaya, A., N. Hirano and N. Tsuchiya, 2018, Thermal prospection of geothermal reservoirs by using thermoluminescence of quartz, *Geothermal Resources Council Trans.*, 42.
- Kobayashi, F., H. Sumino, R. Burgess, S. Nakai, T. Iizuka, J. Nagao, H. Kagi, M. Nakamura, E. Takahashi, T. Kogiso, and C. J. Ballentine, 2019, Halogen heterogeneity in the lithosphere and evolution of mantle halogen abundances inferred from intraplate mantle xenoliths, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, doi: 10.1029/2018GC007903.
- Maeda S., T. Matsuzawa, T. Shinji, K. Yoshida, and H. Katao, 2018 Complex microseismic activity and depth-dependent stress field changes in Wakayama, southwestern Japan, *Earth Planets Space*, 70:21, doi: 10.1186/s40623-018-0788-6.
- 大槻憲四郎, 2018, A断層はB断層で切られたのか、B断層で停止したのか?, 地質学会第125年大会.
- Oyanagi, R., A. Okamoto and N. Tsuchiya, 2018, Multiple kinetic parameterization in a reactive transport model using the exchange Monte Carlo method, *Minerals*, 8, 579, doi: 10.3390/min8120579.
- 鈴木真奈美, 2018, 東北地方米沢-喜多方地域における地震波反射面の空間分布, 東北大学修士論文, 134pp.
- Suzuki, M., A. Hasemi, T. Okada, T. Matsuzawa, N. Umino, T. Yamashita, N. Tsumura, and Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, 2018, Spatial distribution of seismic wave reflectors beneath the Yonezawa-Aizu region, northeastern Japan, AGU Fall Meeting, T31H-0400.
- 立岩和也・岡田知己, 2018, P波の変位振幅の立ち上がりのマグニチュード依存性, 地球惑星科学連合大会, SSS15-P15.
- 立岩和也・岡田知己・内田直希, 2018, P波の変位振幅の立ち上がりのマグニチュード依存性(2), 日本地震学会秋季大会, S08-P19.
- Yoshida, K., and A. Hasegawa, 2018a, Hypocenter migration and seismicity pattern change in the Yamagata-

Fukushima border, NE Japan, caused by fluid movement and pore pressure variation, J. Geophys. Res. Solid Earth, 123 (6),5000-5017, doi: 10.1029/2018JB015468.

Yoshida, K., and A. Hasegawa, 2018b, Sendai-Okura earthquake swarm induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in the stress shadow of NE Japan: Detailed fault structure and hypocenter migration, Tectonophysics, 733, 132-147, doi: 10.1016/j.tecto.2017.12.031.

Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Yoshida, and T. Matsuzawa, 2018, Heterogeneities in stress and strength in Tohoku and its relationship with earthquake sequences triggered by the 2011 M9 Tohoku-Oki earthquake, Pure and Applied Geophysics, doi: 10.1007/s00024-018-2073-9.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

流体が深部に局所的に豊富に存在していると、そこで歪速度が上昇しやすくなり、その浅部に応力・歪が集中しやすくなると考えられる。また、断層中に流体があれば、間隙圧が上昇して強度が低下すると考えられる。これまでの定量的な検討から、地震発生域では差応力が小さく、断層の強度がこれまで考えられていたよりも 1/10 程度と低いことが次第に明らかになって来ており、その原因としてはやはり断層の中の流体の可能性が一番高いと考えられている。しかし、その流体が断層に及ぼす影響や流体の存在形態はまだ必ずしもよくわかっていない。このような問題意識のもと、いくつかのサブテーマを実施し、これらを統合することにより、特に流体の寄与に注目して地震断層すべり物理モデルの高度化を目指す。各サブテーマでは、平成 31 年度は以下を実施する。

1) 応力・強度推定手法の高度化と強度低下原因の解明

2011 年東北地方太平洋沖地震後の応力場の時空間変化を追跡し、歪速度場の時空間変化と比較することにより、応力の時空間変化の原因を探る。中規模地震の破壊過程を詳細に調べることにより、強度の不均質性と破壊の不均質性の関係を検討する。ニュージーランド等、海外の応力場と日本の応力場の違いと共通性を検討する。応力場を推定する新たな手法の開発に着手する。

2) 摩擦強度の環境依存性の解明

試料室を外気と隔離できるようにしたロータリー式低速せん断試験機(最大すべり速度は約 0.8 mm/s、法線応力は 15 MPa まで)で摩擦すべり実験を行い、水蒸気量が摩擦強度や摩擦のパラメータ、AE 活動に及ぼす影響を調べる。現状では、試料室の雰囲気制御は乾燥状態(湿度がほぼ 0%)、飽和状態(湿度がほぼ 100%)、室内状態の 3 通りに限られている。初年度は実験を行いつつ、雰囲気制御範囲を広げるよう試験機の改良を行う。

3) 実験・数値シミュレーション・野外観察に基づく岩石-水相互作用の解明

超臨界地殻流体の 300-500、50-1000 MPa での状態方程式と、その条件での岩石と流体の反応についての状態方程式や熱力学データが全く不足している。特に、地殻流体の平衡計算をする上で重要となる電荷のある溶存種について熱力学データについて、既存のデータには存在しない超臨界、気相領域まで経験的に外挿することを試み、実験によって検証する。

鉱物界面での純水の構造化を調べた実験装置と技術を用いて、 H_2O - $NaCl$ - CO_2 の混合流体と鉱物との相互作用および鉱物界面での流体分子を調べる。さらに、既に開発している超臨界条件における真三軸応力発生ならびに水圧破碎装置を用いて、300-500、50-150 MPa 条件での岩石内の 3 次元き裂の優先流路の形成の時間発展ならびに地殻流体透水性に関する流体流動実験に着手する。また、三波川変成帯、東北地方の花崗岩類と接触変成岩における流体通路(鉱物充填脈)の分布、特性を評価し、沈み込み帯と地殻における流体の物理化学的特性とその動的挙動を調べる。

4) 高温高压状態における地殻流体の存在形態の解明

鉱物の界面エネルギー異方性が比較的小さく、いわゆる組織平衡の状態を想定しやすい、最上部マントルを構成する主要鉱物である橄欖石の、 H_2O 、 CO_2 、 $NaCl$ 三成分系流体との二面角を、ピストンシリンダー装置を用いて 1-4 GPa, 900-1200 の条件で実験を行う(高压側では $MgCO_3$ が共存する条件となる)。

5) 下部地殻のレオロジーにおける流体(水・メルト)の効果の解明

下部地殻を構成する鉱物粉末を焼結し人工多結晶体を焼結する。さらに細粒変成岩試料を出発試料として、下部地殻の温度・圧力を発生することのできる変形試験機を用いてこれらの多結晶体の変形実験を行い、下部地殻の変形における流体の効果を調べる。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

岡田知己・松澤暢・市來雅啓・矢部康男・山本希・高木涼太・吉田圭佑・土屋範芳・武藤潤・大槻憲四郎・中村美千彦・奥村聡・佐々木理・他計 15 名程度。

他機関との共同研究の有無：有

地震観測は北海道大学（勝俣啓・高橋浩晃）弘前大学（小菅正裕・渡邊和俊）名古屋大学（山中佳子）京都大学防災研究所（片尾浩・飯尾能久）九州大学（松島健・松本聡）鹿児島大学（宮町宏樹・後藤和彦）をはじめとした全国連携の共同研究。

電磁気観測は秋田大学（坂中伸也）・東京工業大学（小川康雄）との共同研究。

流体の分布・挙動については広島大学（星野健一）との共同研究。

データ解析については東京工業大学（中島淳一）との共同研究。

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東北大学大学院理学研究科

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp

URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：松澤暢

所属：東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター

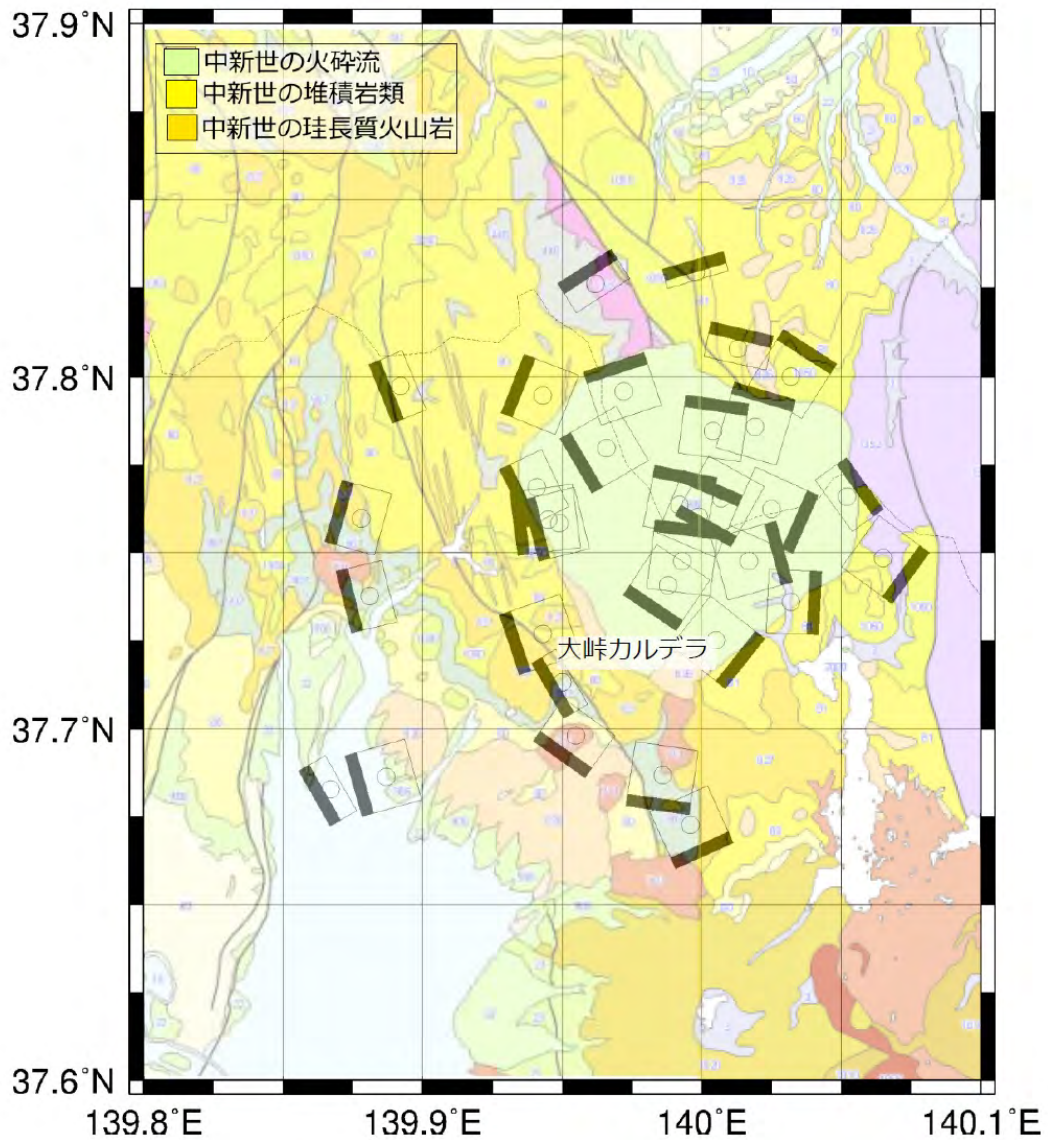


図 1. 福島-山形県境付近の群発地震震源域周辺の地震波反射面分布。

地震記録に見られる顕著な位相を S 波反射波と解釈して、鏡像観測点法 (Horiuchi et al., 1988) を用いて得られた反射面を正方形で表し、それを地表に投影してプロットしており、太線が浅い側の縁を表す。背景は産業技術総合研究所によるシームレス地質図であり、大峠カルデラを中心とした地質構造境界の走向と得られた反射面の走向が良く似ていることがわかる。

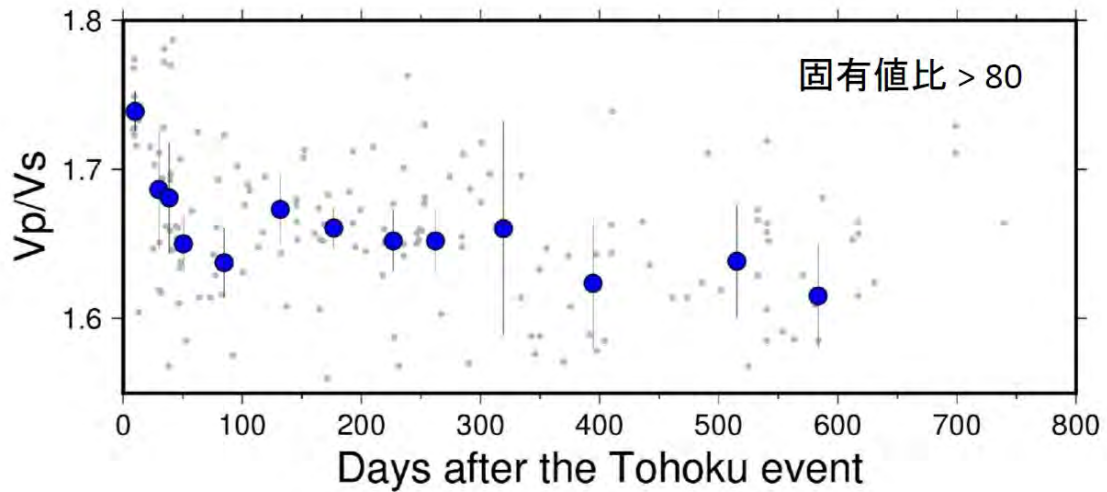


図 2. 福島-山形県境付近で発生した群発地震震源域内の V_p/V_s の時間変化。波形相関により得られた高精度の P 到着時刻の相対時間差と S 到着時刻の相対時間差に Lin and Shearer (2007) の手法を適用し、分布の固有値の比が 80 以上の信頼度の高い結果のみをプロットした。

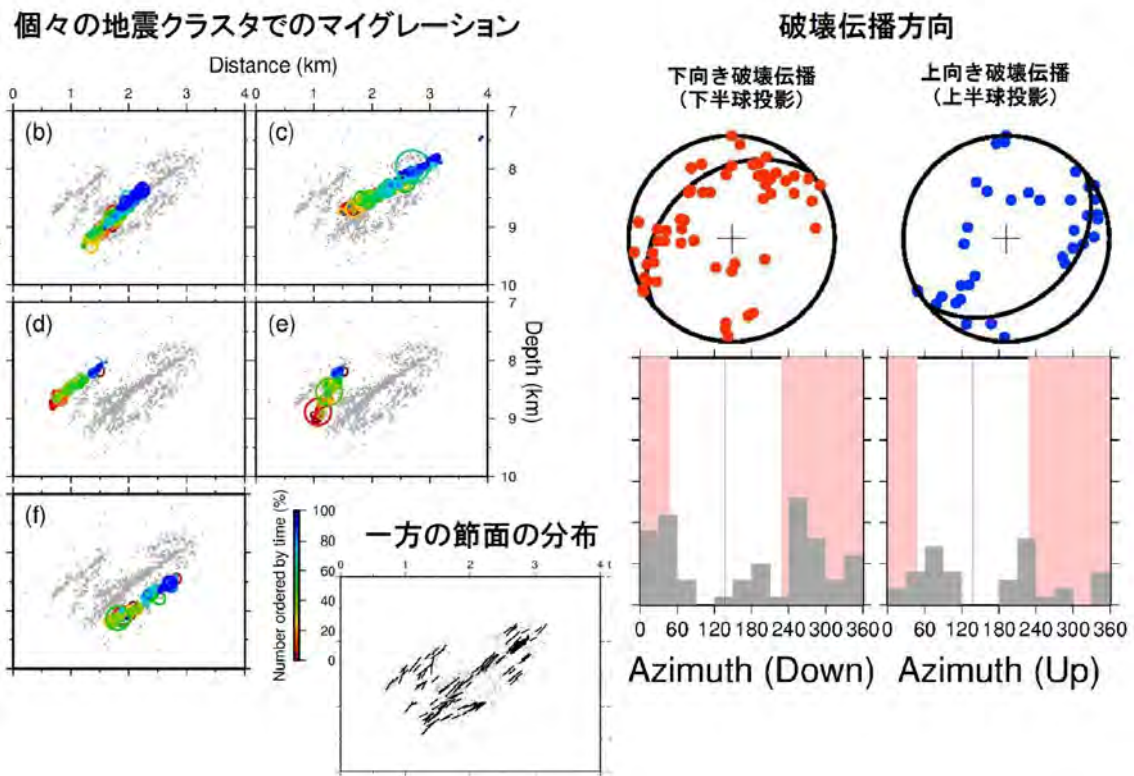


図 3. 経験的グリーン関数法から推定した破壊指向性。左：福島-山形県境付近で発生した群発地震のマイグレーション (Yoshida and Hasegawa, 2018a)。色は発生時期をしめしており、地震活動は時間とともに深部から浅部に移動していった。震源分布は発震機構解の一方の節面と同様の傾斜を示しており、この方向に断層が生じていたことを示唆する。右：経験的グリーン関数法から得られた震源時間関数のパルス幅の方位依存性から、破壊の進行方向を推定した結果。破壊伝播はやはり震源分布と整合する節面に沿って進む場合が多く、また、上向き (青丸) よりも下向き (赤丸) に破壊が伝播した例が多いことがわかる。

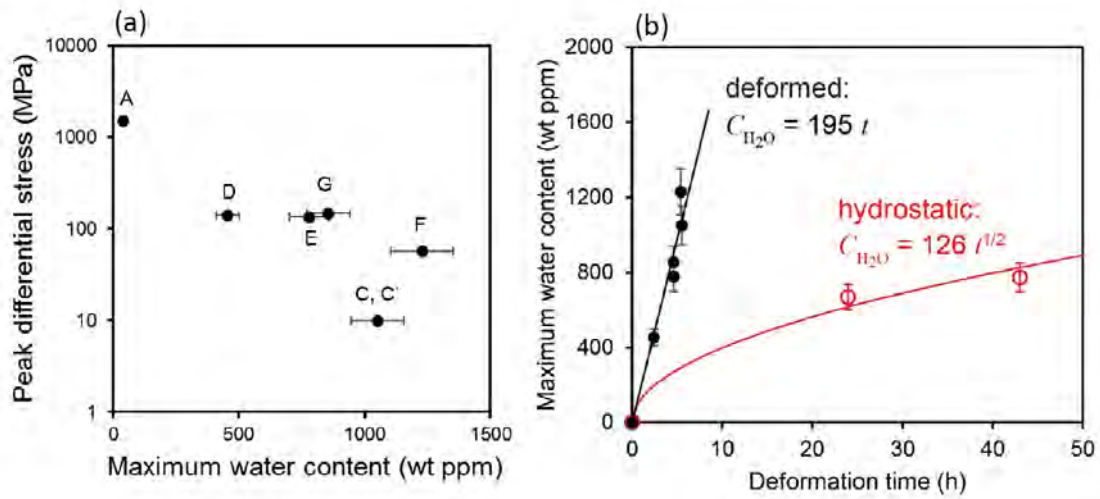


図 4. 固体圧試験機を用いた下部地殻構成鉱物（斜長石）の含水軸圧縮実験の結果。

左：変形実験における含水率と強度の関係。変形実験ではアノーサイト（灰長石）多結晶体を用いて、封圧：0.8-1.4 GPa、温度：900 °C、歪速度： $10^{-5} s^{-1}$ の条件下で、試料に対して 0.5 wt% の水を付加し、回収試料について赤外分光法により含水率の測定を行った。右：含水率と変形時間の関係。変形実験（黒）では、含水率が変形時間に比例するのに対して、静水圧（非変形）実験（赤）においては、含水率が時間の 1/2 乗に比例している。

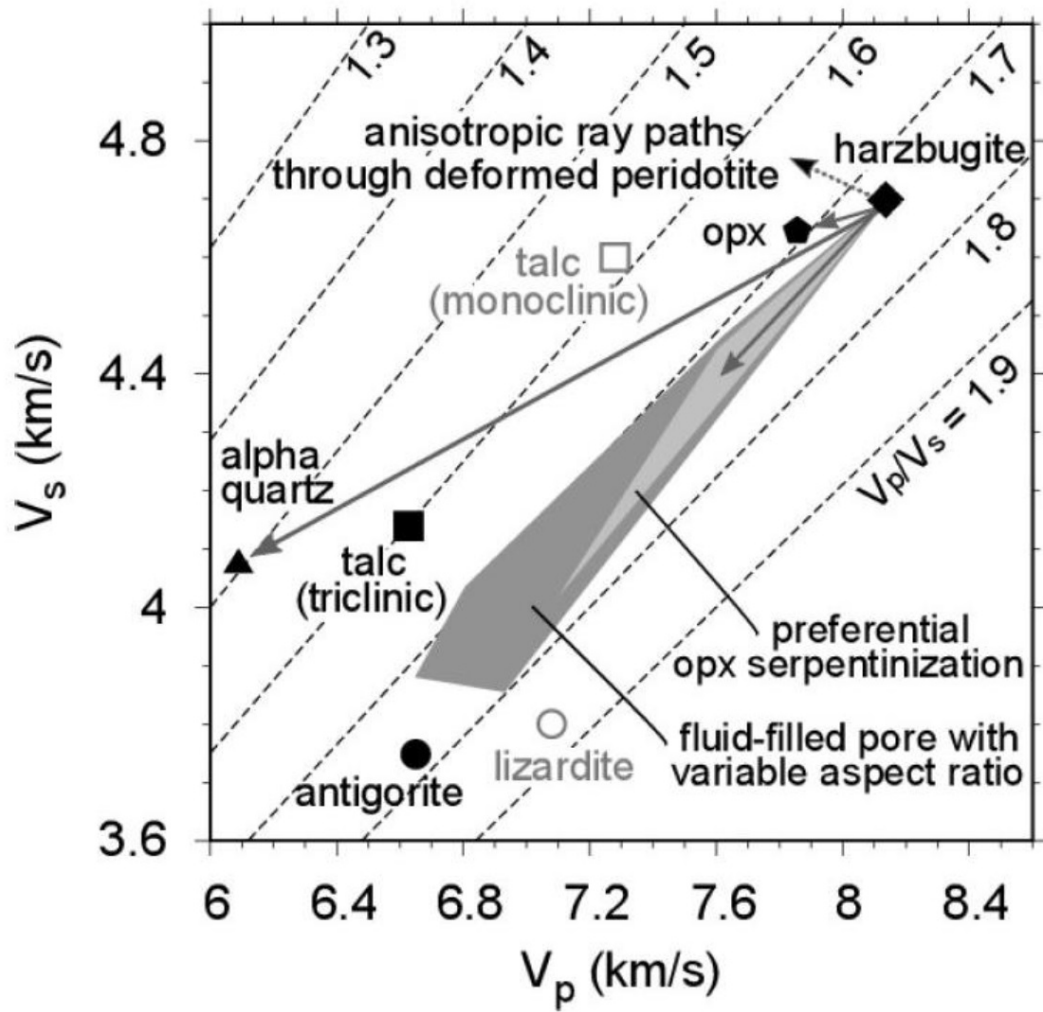


図 5. 前弧マントル上部で観測される低地震波速度、低 V_p/V_s 領域を説明する各種モデルの比較。

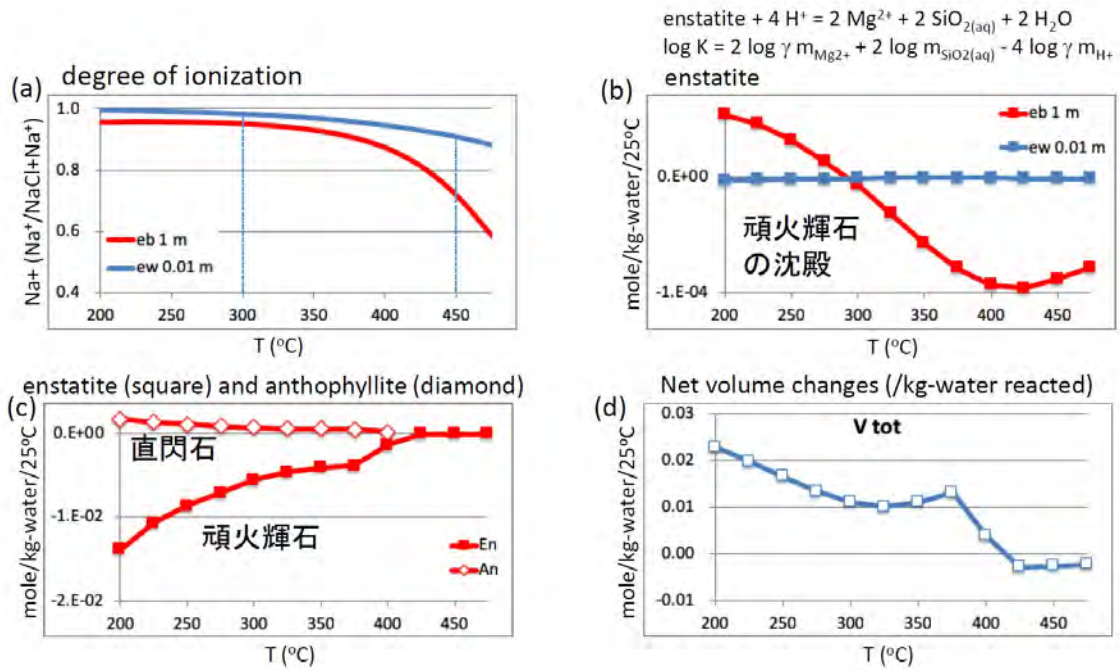


図 6. 珪酸塩鉱物存在下で期待される孔隙率変化。

地下に存在する流体が、深さ方向に圧力が静水圧勾配で、温度勾配が 25 /km となっていると仮定した場合の、様々なパラメータの変化を示す。(a) 塩水の電離度。赤線と青線はそれぞれ 1m と 0.01m の塩水 (NaCl 水溶液) を示す。ここで m は質量モル濃度 (mol/kg) を表す。(b) 深さが 1 km 浅くなった時 (25 温度低下した時) の頑火輝石の沈殿。負の値は溶解を示す。(c) 深さが 1 km 浅くなった時の頑火輝石 (四角) と直閃石 (菱形) の沈殿。負の値は溶解を示す。(d) 深さが 1k m 浅くなった時の総体積変化量。

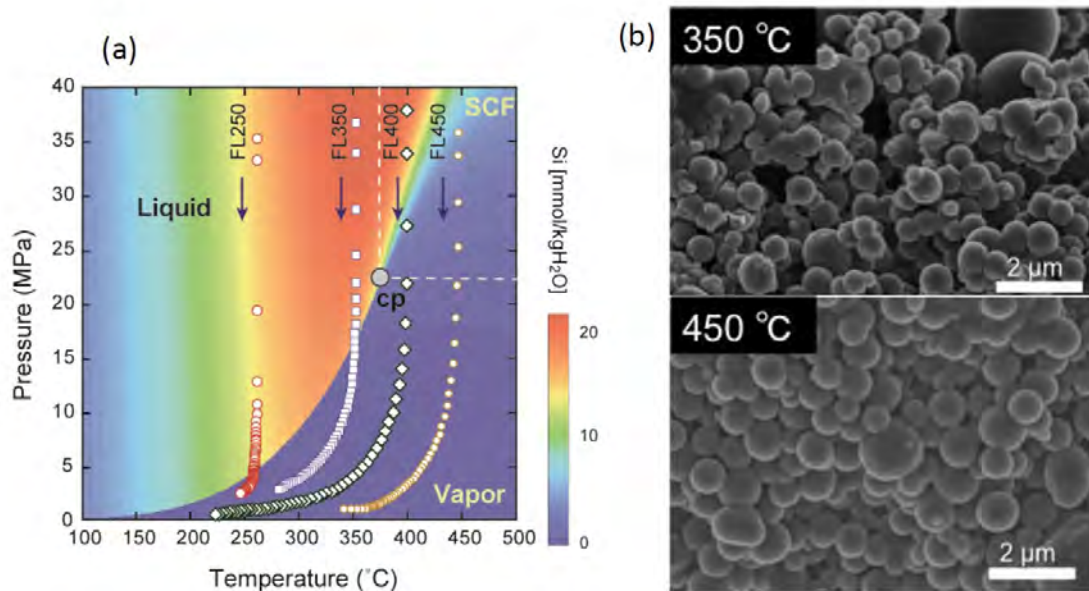


図 7. 超臨界・亜臨界条件からの流体の急減圧によるシリカの析出。

(a) Flash 実験条件。(b) Flash 実験の析出物。

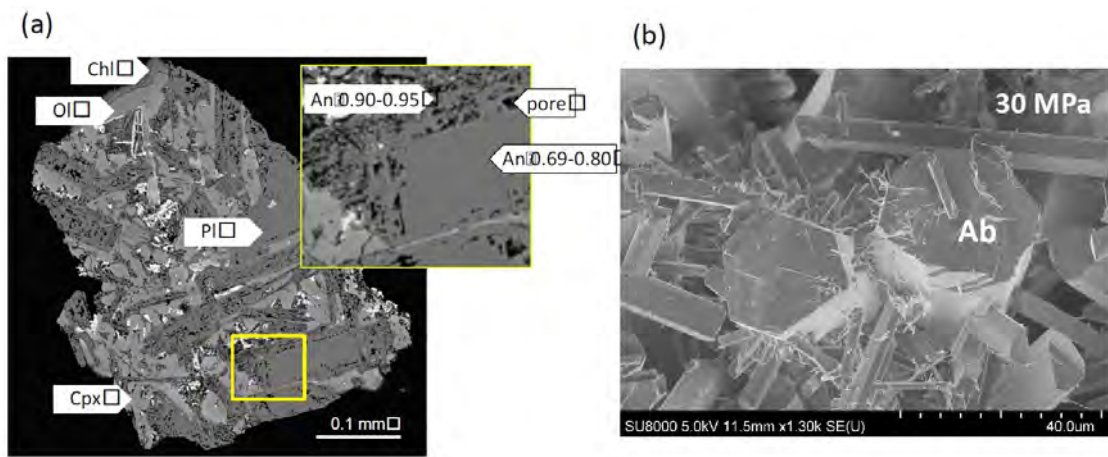


図 8. 超臨界条件における玄武岩の溶解-析出実験。

(a) 350 °C における玄武岩の溶解。斜長石が選択的に溶けて、ポアが形成していることがわかる。(b) 430 °C、30 MPa の超臨界条件における曹長石の析出。

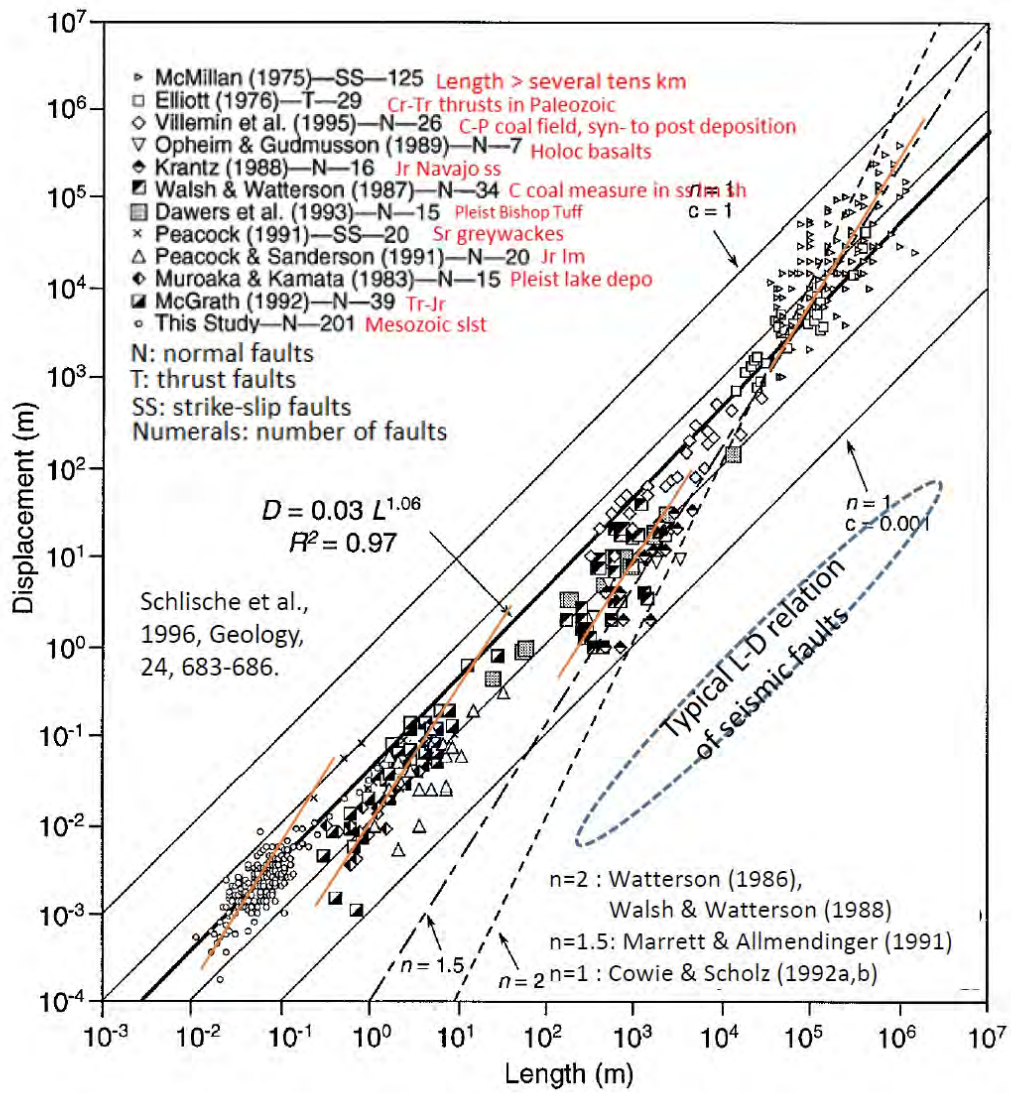


図9. 地質断層の長さLと変位量Dとの関係。
 Schlische et al. (1996) に加筆して示す。

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

岩石組織に基づく火道浅部プロセスの推定手法の開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

1. 浅部火道条件における珪長質メルトの結晶化カイネティクスを明らかにし、新燃岳 2011 年噴火を例に、マグマの浅部滞留時間と噴火様式の分岐点の関係を明らかにする。
2. 軽石・火山灰中の火山ガラスの結晶度の分析時間を短縮する技術開発を行い、活動中の火山の火道浅部におけるマグマの状態を物質科学的に推測する(岩石学的モニタリング)手法を考案する。
3. 浅部火道条件における、安山岩質メルトフォームの表面張力による組織緩和と圧密のメカニズムを実験的に明らかにし、ガス過剰圧の蓄積過程を明らかにする。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年度においては、項目 1 について、2011 年新燃岳噴火噴出物の記載的研究を実施する。噴火様式(サブプリニー式軽石、ブルカノ式軽石・本質石質岩片)ごと、石基結晶の鉱物種ごとに、結晶サイズ分布(CSD)を調べる。噴火様式の違いに着目したナノライトの CSD データはこれまでに報告例がない。

平成 27 年度においては、項目 1 について、噴火事例についての岩石記載的研究についての成果をまとめるとともに、過冷却メルトの結晶化実験を実施する。また項目 3 について、メルトフォームの組織緩和実験を行う。火道浅部を再現した低圧高温実験を行うことにより、CSD と結晶化時間などの関係を、定量的に把握することができる。再現実験については予備実験を行っており技術的な問題はない。

平成 28 年度においては、平成 27 年度の計画を継続し、それぞれの実験について、温度・結晶化時間・水蒸気圧・メルト組成などの条件を変えた対照実験を追加する。これにより、幅広い噴火事例に

応用が可能とする。メルトフォームの組織緩和実験については、組織緩和の程度と、ガス浸透率の関係を調べるとともに、緩和速度とブルカノ式噴火の発生頻度との関係について検討を行い、実際の爆発的噴火における火道浅部条件を推定できるようにする。

平成 29 年度においては、項目 2 の研究として、噴火活動時に、噴出物に含まれる結晶量を短時間で簡便に測定するため、マイクロライト・ナノライトを含む試料の可視分光あるいは X 線回折分析を行う。平成 28 年度までに得られた実験をもとに、項目 1、3 について、実験的研究によって得られた成果をまとめる。

平成 30 年度においては、最終年度は、5 年間で総括し、本課題から提案する、火道浅部での噴火様式の分岐条件を「2(4)事象系統樹の高度化による火山噴火予測」にフィードバックするとともに、今後の課題を総括し、文書にまとめる。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 30 年度は、研究項目 1 に関連し、桜島火山の過去 3 回の歴史時代プリニー式噴火(大正、安永、文明噴火)に共通したマグマの“pre-charge”現象を発見した。いずれの噴火でも、軽石・火山灰として爆発的に噴出したマグマは、噴火の直前には、従来想定されていた深部(約 10 km)のマグマ溜りから、それより大幅に浅い火道(桜島直下の深さ 1~3 km)に移動していたことが判明した。将来発生し得る大規模噴火が同じ前駆過程を経る場合、上昇開始からごく短時間で噴火が開始する可能性があることを明らかにした(Araya et al., 2019, Scientific Reports)。

研究項目 2 について、火山岩・火山砕屑物の初期帯磁率の基礎的性質を測定してまとめるとともに、応用として、霧島火山新燃岳の 2017 年 10 月と 2018 年 3 月に噴出した火山灰の初期帯磁率測定を行い、地球惑星科学連合大会において発表した。帯磁率の絶対値は測定機器による誤差を含むが、斑晶・石基の磁鉄鉱の総量が一般に高い中間組成(安山岩質)の溶岩・軽石で高く、 $10 \sim 14 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 程度である。ほぼ完全にガラス質の黒曜石では 0 で、その他の溶岩・スコリア・軽石はこの範囲の値をとる。空気中の高温加熱実験では、磁鉄鉱が赤鉄鉱に変化することで帯磁率の低下がみられる。新燃岳の本質噴出物の場合、2011 年噴火の本質軽石の値($10 \sim 12 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)が目安となり、火口付近での熱水変質や高温酸化を受けた類質・異質噴出物の割合が増えると、帯磁率は低下する。今回、2018 年 10 月のマグマ水蒸気爆発では、 $4 \sim 9 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ であったのに対し、2019 年 3 月の活動では、3 月 6 日 9 時の火山灰がマグマ噴火の値に迫る $9 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ の値を示し、その後 13 時過ぎには $12 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ を超えた。6 日 21 時すぎまでの火山灰が、 $10 \sim 13 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ の値を示した。この帯磁率の変化は、マグマ水蒸気爆発からマグマ噴火に至る噴火推移を正確に反映していることから、火山灰の初期帯磁率が迅速に測定可能な火山活動度指標となることがわかった。本計画期間(5 年間)に実施した成果：

研究項目 1 において、石基のサブミクロンサイズの結晶サイズ分布(Crystal Size Distribution: CSD)が、サブプリニー式噴火・ブルカノ式爆発・溶岩噴出という異なる噴火様式の分岐を記録していることを明らかにした。本研究において、石基鉱物(輝石・斜長石・磁鉄鉱)の結晶サイズ分布(CSD)に屈曲やギャップが見られるサイズを総合的に考慮し、あらたに幅が $1 \mu\text{m} \sim 30 \text{ nm}$ の石基結晶をナノライトと再定義し、30 nm より小さい結晶をウルトラナノライトと初めて定義した。これらよりも大きいマイクロライト領域では、これらの噴火様式は区別できない。本研究は、火道浅部～地表付近での噴火様式の分岐に対応した、結晶作用の相違を初めて発見したものである(Mujin et al., 2017, American Mineralogist)。

また本研究に関連し、桜島火山の歴史時代のプリニー式噴火に共通した前駆過程(“pre-charge 現象”)を発見した(H30 年度の成果に記載; Araya et al., 2019, Scientific Reports)。

研究項目 2 について、噴出物中に見られるこのようなナノライトの違いを、時間がかかる結晶サイズ分布(CSD)測定を行わずにより簡便に検出するため、火砕物の帯磁率の利用方法を開発した。その結果は平成 30 年度の成果として記す。これにより、火山噴火の物質科学的な準リアルタイム予測に帯磁率が利用できることが示された(Priyambodo et al., 2018, JpGU)。

研究項目3について、安山岩質発泡マグマの加熱実験を行い、表面張力によるガス浸透性の変化過程を明らかにした。形状緩和は数分という短時間で進行することが明らかとなった。本研究で得られた発泡組織の進化から、ブルカノ式噴火の火道内増圧過程は次のように進行すると考えられる。はじめ火道を上昇してきた発泡マグマは、流動を停止すると、数分のタイムスケールで表面張力によって微小領域で圧密しつつ、圧密ユニット間に脱ガス通路を形成する。その後、重力による圧密で脱ガス通路は数十分～数時間で塞がり、マグマが急激に低浸透性になること（蓋の形成）で火道内増圧が開始し、ブルカノ式爆発に至ると考えられる（Otsuki et al., 2015, Journal of Geophysical Research）。

今後の課題

ナノライトの結晶化条件を、岩石・鉱物学的に明らかにすることにより、火道浅部での各噴火様式の発生条件の違いを定量的に明らかにすることが望まれる。また、大規模噴火前に、マグマが通常のマグマ溜まりよりも浅部に充填された（“pre-charge”現象の起こった）理由や、その必然性は未解明である。他の火山噴火でも同様の前駆過程があったかどうかを調べるとともに、そのメカニズムを解明することが望まれる。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
ARAYA, N., M. Nakamura, A. Yasuda, S. Okumura, T. Sato, M. Iguchi, D. Miki, N. Geshi, 2019, Shallow magma pre-charge during repeated Plinian eruptions at Sakurajima volcano, Scientific Reports, doi: 10.1038/s41598-019-38494-x

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

1. マグマの結晶化速度測定：火山浅部に貫入したマグマの結晶度の変化を明らかにするため、低圧高温環境下でのマグマの結晶化実験を行う。実験は、独自に開発した石英ガラス管-ステンレスジャケット法を用い、温度800～1000℃、水蒸気圧力0.07～4 MPaで実施する。マイクロライトの成長とナノライト・ウルトラナノライトの核形成・成長について、鉱物相や不均質核形成の仕方などに注目して実験を行う。

2. 火砕物の帯磁率の利用方法の確立：多様な化学組成・噴出形態の火砕物の帯磁率の全体的な傾向と、霧島火山新燃岳の一連の噴火活動事例における帯磁率の経時変化の測定に加えて、帯磁率を測定した火山灰の記載岩石学的な研究を行い、論文を投稿する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

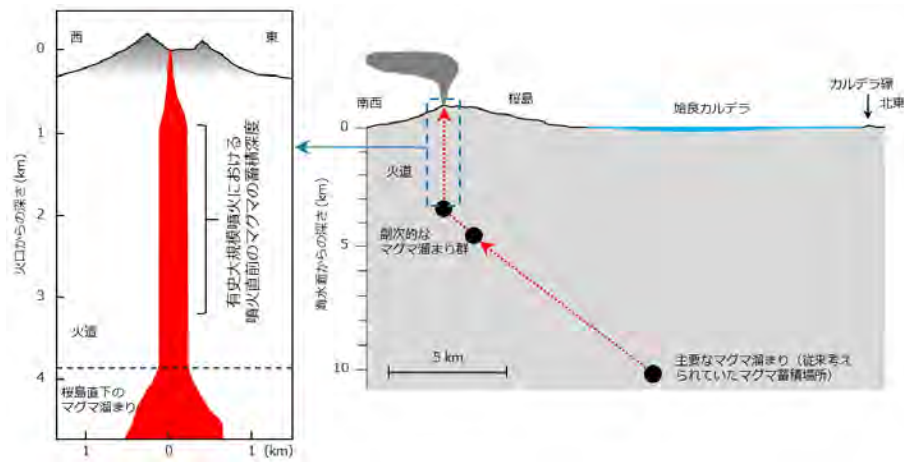
東北大学大学院理学研究科地学専攻 中村美千彦、奥村聡
他機関との共同研究の有無：有
北海道大学大学院理学院自然史科学専攻 吉村俊平

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東北大学大学院理学研究科地学専攻
電話：022-795-6673
e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp
URL：http://www.es.tohoku.ac.jp/JP/index.html

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：中村美千彦
所属：東北大学大学院理学研究科地学専攻



桜島山頂の火口から桜島直下のマグマ溜まりにかけての拡大図（左）と桜島火山のマグマ供給系（右）
 左図のうち、赤い領域がマグマで満たされている領域であり、火道とマグマ溜まりの境界は火口から深さ 4 km 程度と推定されている。本研究での詳細な噴出物の分析により、大規模噴火を引き起こしたマグマが火道に相当する深さ（1～3 km）に位置しており、始良カルデラ直下の主要マグマ溜まり（深さ約 10 km）や桜島直下の副次的なマグマ溜まり群（深さ 4～5 km）よりも浅かったことが明らかとなった。

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震活動の時空間パターンと断層および地震サイクルとの関係

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究課題では、気象庁一元化震源カタログなどの既存震源データの時空間解析を最新の統計学的手法によって解析・評価し、最近の大地震や既知の断層活動履歴データと結びつけることによって、断層の地震サイクル中の地震活動の時空間変化に共通する特徴を検出する。これによって、プレート境界および活断層周辺の現地震活動が地震サイクル中のどの時間的位置付けにあるのかを明らかにし、歴史地震・古地震・地質調査以外の手法によって大地震の長期的切迫度をはかる評価法を開発する。特に、時空間解析にあたっては、震源再決定や波形相互相関テンプレート法などの最新の知見・技術を導入し、一元化震源データ以上の高精度・均質データの整備を平行しておこなう。主断層面(on-fault)とオフフォルトの震源区分とその特性にまで言及できるような検討を目指す。さらに、断層周辺での余震活動や火山活動とそれにともなう群発地震活動、地震の誘発作用、地震活動の静穏化などの時空間統計解析を通じて、断層周辺の地殻応力状態を推定し、地震発生確率の中短期変動を求める。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

5か年の研究目標に到達するために、以下の4つの小課題にわけて研究を実施する。各内容の実施期間は複数年にわたるため【 】内に明示した。

1. 地震活動と活断層データの対比：歴史地震との対応や活動履歴データの信用度が高い活断層を中心に、最新活動からの経過年（経過率）を求め、活断層沿いの最近の地震活動の時空間的特徴を抽出する。そのために、地理情報システム（GIS）に地形・地質、活断層情報、地殻変動データ、震源データを統合し、活断層の3次元位置・形態と震源分布を詳細に可視化する。小課題2で実施する震源再決定データ等も活用し、全体の地震活動の活発度やサイズ分布（b値）等だけではなく、断層沿いの集中度といった空間クラスターの特性抽出とその定量化を行う。【平成26年度～平成30年度】また、最近約100年間に発生した地殻内地震に関しては、地表地震断層・推定震源断層と余震の空間的関連性ならびにその時間的減衰過程を明らかにし、広義の余震継続時間を含めた地震サイクル初期の特徴をとりまとめる。【平成28年度～平成30年度】

2. 地震カタログの整備：過去約5年間に検知された気象庁一元化処理震源と走時データを基準にして、気象庁イベントの地震波形から相対走時差データを作成し、震源の再決定を実施する。これにより、列島スケールにわたる高精度な震源分布を推定する。【平成26年度～平成30年度】また、気象庁一元化処理震源をプレート地震とし、その波形と連続波形データとの相互相関解析を施すことで、新たに地震カタログを構築し、本震前後の地震活動度の変化を明らかにする。【平成26年度～平成30年度】

3. 余震活動詳細解析：高密度な機動観測で取得された連続波形データに対して、近年開発された自動地震検出処理と震源決定処理を施し、できるだけ多数の余震の震源情報を抽出する。その後、震源決定精度の高いイベントの高精度な相対走時差データを作成することにより、相対震源決定をおこなう。これにより、相対精度数百m以内の精緻化された余震活動の震源カタログを作成する。同時に、P波初動極性の自動読み取り結果を用いて、微小地震の発震機構解を取得する。さらに、P波からS波のコーダ波を含む波形に対して波形相互相関処理を行うことで、相似地震の検出も実施する。これらの推定された詳細な震源分布と発震機構解・相似地震を比較検討することで、震源断層の微細構造や摩擦特性を明らかにする。【平成26年度～平成30年度】

4. 静穏化検出と地殻変動：研究課題「電磁気的地震先行現象の観測と統計評価による他種の先行現象との比較」によって作成される地震活動静穏化マップを活用し、静穏化範囲と断層の位置とを比較する。また、GPS等による地殻変動との関連性を調べ、断層深部滑りなどによる微小な応力変化との関連性を探る。地震活動静穏化と地殻変動との同期現象を全国一律に検証する。そのなかで、同期現象が大地震に結びついた事例の割合から、異常現象が地震前兆である確率利得を算出し、地震確率予報の高度化につなげる。【平成28年度～平成30年度】異なる震源メカニズムを持つ地震および誘発地震に関係した経験分布を統計学的に再構築し、常時地震活動、地震クラスタリングコンポーネントと全体地震の中で静穏化の有無を検出する。これらの研究から、地震サイクル後半での静穏化メカニズムの解明と破壊直前の標準モデルの構築を目指す。【平成26年度～平成30年度】

(8) 平成30年度及び計画期間中（平成26年度～30年度）の成果の概要：

1. 地震活動と活断層データの対比、地震活動による地震サイクルの解明

活断層周辺の応力状態を推定する手法として、P波初動（押し引き）をデータとした応力空間パターン推定手法（いわゆる「応力インバージョン」、Iwata, 2018）の開発を引き続き実施した。この手法は「断層面の向きは一様ランダム」という仮定のもとに、断層面の向き自体を求めることなしに、直接応力場の推定を行うものである。今年度は、昨年度開発した応力空間パターン推定手法を拡張し、推定した応力空間パターンにP波初動データを組み合わせることでメカニズム解推定も行えるようにした（図1）。人工データを用いた検証では、P波初動データのみ用いる場合に比べ、応力場の情報も取り入れた本手法の方が、より真のメカニズム解に近くかつ推定精度も高い（推定のバラツキが小さい）という結果が得られた（図2）。これは、応力場の情報が起こりえるメカニズム解に制約をかけるため、より尤もらしい解を選びやすくなるためである。

地震サイクルと地震活動の関係について、活断層の活動期間が長いほど余震継続時間が長い、すなわち、余震活動継続期間は本震マグニチュードに寄らず、地域の応力載荷速度に反比例することが指摘されている (Dieterich, 1994)。本課題では、この指摘を検証するために、東北地方太平洋沖地震による広域余震活動と東北地方での本震・余震活動 8 ケースを大森・宇津則 (一部 ETAS モデル) によって解析した。その結果、余震継続時間がマグニチュードに依存しないこと、余震継続時間と活断層 (一部プレート境界) の変位速度に負の相関があること、余震継続時間と常時地震活動に正の相関があることを見いだした (図 3)。プレート境界や活断層の活動間隔 (地震サイクル) が長くなれば、余震活動継続時間も引き延ばされることを示唆する。

2. 地震カタログの整備と余震活動詳細解析

余震活動など活発な地震活動中には、大量の地震が同時に発生する。そのため、複数の地震の波形が同時刻に重なって観測点に到達し、地震の欠測が顕著となる。この問題を解決するには、再決定されたプレート地震の波形を用いて連続波形記録から類似のイベントを検出する手法 (Matched filter technique) が有効である。今年度も、2013 年栃木県北部地震の前震活動、2018 年大阪府北部地震、2019 年熊本地方の地震の余震活動に関して、相対走時差データに基づく震源再決定・プレートマッチング解析等を実施した。例えば、大阪府北部地震の結果からは、北北西-南南東走向の東側傾斜 (約 45 度) の逆断層が最初にずれ、約 0.3 秒後に東北東-西南西走向の高角傾斜の横ずれ断層に破壊が伝播し、その後は同時に断層運動が起きていたことが示された (図 4、図 5)。これらの断層面と上町断層帯の深部延長との詳細な関係は不明ではあるが、大阪府北部地震が上町断層帯などの東側傾斜の逆断層に与える応力変化を計算したところ、断層運動を促進する方向に約 0.1MPa の応力変化が生じたことがわかった (図 5)。また、震源域の北部延長では、地震活動が遅れて活発化し、その領域の背景地震活動度は時間とともに徐々に増加する傾向を示した。このことは、本震によって震源域の北部延長 (地殻内) で非地震的な変形が引き起こされた結果と解釈される。本研究により、水平圧縮応力場が卓越する近畿圏においては、逆断層と横ずれ断層が同時に活動することで 1 つの地震になる場合があることが明示された。つまり、逆断層と横ずれ断層の活断層が共存する近畿圏では、地震ハザード評価において両断層の連鎖的破壊を考慮することが重要である。地震本部が実施している現状の長期評価においてこの点は含まれておらず、少なくとも近畿圏においては逆断層と横ずれ断層の活断層の連鎖的破壊を考慮することが今後必要である。同様の結論は、S 波振幅を用いた小余震のメカニズム解 (図 6、Li et al., 2019) によっても得られた。

余震活動と常時地震活動を区別することは、時間依存型 (time-dependent) の地震ハザード評価に不可欠である。そのために、ETAS モデルやその拡張手法が開発され、適用性の検討が進んでいる。今年度は、イタリアの地震活動を ETAS モデルで解析し、M2.9 以上の地震で約 61% がトリガー型地震であり、そのうち 1 / 4 が 5 つの大地震によって直接誘発された地震であることがわかった。また、2005 年～2016 年に発生した 6 つの大地震のなかでも、5 つは誘発性であり、イタリアでは前震現象が顕著である。統計的徐群法を用いてイタリア全土を 16 区域に分けて解析したところ、常時地震活動自体がこれらの主要地震に影響を受けており、それぞれ地震活動のフェーズが異なっていることがわかった。6 つの大地震の震源断層上では、直接的な余震はアスぺリティ周辺に発生し、余震域と本震破壊域が相補的である (図 7)。

3. 静穏化検出と地殻変動

気象庁一元化震源カタログを用い、2011 年東北地方太平洋沖地震後に日本海東縁部 (秋田県沖～新潟県沖) において、顕著な地震活動静穏化が発生していることを見いだした。地震発生率がある時刻 (地震) を境にして変化したとするモデルと、解析期間中に一定としたモデルの赤池情報基準 (AIC) を比較すると、その AIC 差は数十に及び、統計的に有意であることが示された。この静穏化は解析に用いる下限マグニチュードに依存せず、検出率の一時的な低下によるみかけ静穏化ではないと考えられる。静穏化領域では、東北地方太平洋沖地震前には東西圧縮場であり、逆断層型地震が卓越していたが、本震ならびにその余効変動 (余効すべり・粘弾性緩和による応力再分配) によって東西引張の応力変化を受けており、応力変化と地震活動度の変化とは調和的である。

大地震発生前の静穏化に関して、本年度はカムチャツカ半島から千島列島、北海道沖、東北沖、房総沖を通り伊豆小笠原諸島に至る領域で、静穏化を用いて過去に発生した大地震の長期予測（回顧的予測：retrospective forecast）を実施した。その結果、ランダムに予測した場合よりも有意に良い結果が得られることがわかった。手法として、最初に 1964～2014 年に発生した実体波マグニチュード mb 5.0 以上で震源の深さ 60km 以浅の地震のリストを International Seismological Center (ISC) のデータベースからダウンロード。次に、そのデータから Zhuang et al. (2002) で徐群した長さ 22 年間の短いリストを 30 組作成（例えば、1964～1985 年を 1 番目のリスト、1965～1986 年を 2 番目のリスト、1966～1987 年を 3 番目のリスト）。次に、1 番目のリストを用いて 1985 年時点における地震活動の静穏化を探索する。研究領域を 0.1×0.1 度の空間格子に分割し、ある一つの格子点近傍から 10 個の震央を取り、時間順に並べ、最後の地震発生時と 1 番目のリストの終わり（1985 年 12 月 31 日）との時間差 dT を計算する。ただし、格子点から半径 100km 以内に 10 個の地震が無い場合は、その格子点は解析及び成績評価から除外する。もし dT が 10.8 年以上ならば、警報を 4 年間（1986～1989 年）ON にする。警報 ON の領域は、この格子点を中心とした半径 100km の円内である。以上の処理を全ての格子点と 30 組全てのリストに対して行い、1990～2015 年の 1 年毎の予測マップを作成した。この期間に研究領域内では Mw7.5 以上、80km 以浅の地震が 10 個発生した（図 8）。そのうち 7 個が警報 ON 領域で発生し、残りの 3 個が警報 OFF 領域で発生した。予知率は $7/10=70\%$ である。警報 ON 領域が占める割合、警報分率は 24%なので、確率利得は $70\%/24%=2.9$ となる。警報分率 24%の場合、10 個中 7 個の地震が偶然警報 ON 領域で発生する確率 P は、 $0.24^{**7} \times (1-0.24)^{**3} \times 10C7=0.24\%$ で、1%より十分小さいので、地震活動の静穏化による長期予測は統計的に有意である。

計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要

1. 地震活動と活断層データの対比、地震活動による地震サイクルの解明

活断層沿いの地震活動については、計画期間中に発生した 2014 年長野県北部地震（神城断層地震）、2016 年熊本地震において、古地震データの再解析や現地調査から、2 つの地震ともに地震サイクル後期であったことを確認した。また、震源再決定や項目 2 のテンプレート法によって、前震活動やその移動・拡大、 b 値の低下などが断層活動直前の特徴であることを明らかにした。余震活動については、東北地方太平洋沖地震やその他の大地震の解析から、余震継続期間と断層変位速度に負の相関があることを見いだした。スケールダウンして活断層沿いの地震活動を俯瞰する視点で、南アフリカ大深度金鉱山での微小地震観測を行い、地質断層上での繰り返し地震の詳細を可視化した。その結果、非地震性すべりによるアスペリティへの载荷、アスペリティの磨耗現象など、断層発達や最終破壊への準備過程の理解が進んだ。将来的な活断層周辺の詳細地殻変動モニタリングへのヒントになることが期待される。さらに、ベイズ推定の枠組みで P 波初動を用いて活断層周辺の応力分布を推定する手法を開発し、2000 年鳥取県西部地震などで地震前後の応力場の変化を捉えた。活断層の地震サイクル中の時間的位置づけ推定に有効である。

2. 地震カタログの整備と余震活動詳細解析

地震カタログの整備に関しては列島スケールでの高精度震源分布の作成には至らなかったが、計画期間中に発生した大地震発生域周辺（2014 年長野県北部地震、2016 年熊本地震、2016 年鳥取県中部地震、2018 年大阪府北部地震など）でテンプレート法を用いた震源再決定を実施し、前震活動と震源断層面、余震分布などの高精細 3 次元分布とその時間変化を明らかにした。特に、熊本地震では近傍の地殻変動観測も分析し、前震による応力変化に加えて、非地震性クリープによる応力载荷も活断層型地震の鍵になることを示した。また、余震活動の詳細解析には、有限断層 ETAS モデルなど新しい解析手法の開発を試み、震源断層変位と余震活動が空間的に相補的であることを可視化した。さらに、活断層の断層強度や応力状態推定の手掛かりとなることが期待される動的地震誘発作用についても、東北地方太平洋沖地震や熊本地震で事例研究を実施した。その結果、大振幅のラブ波によって 1500km 以上離れた遠地でも地震活動が励起されていることを突き止めた。加えて、表面波通過による遅れ破壊、火山・熱水地域での大森 宇津公式の高い p 値と応力緩和効果、静的誘発作用に比べて顕著に短い活動継続時間など、動的地震誘発作用の特徴が明らかとなった。

3. 静穏化検出と地殻変動

大地震発生前の静穏化現象の有無を統計的に明らかにするため、1964年以降のISCのカatalogを使って千島海溝、日本海溝、琉球海溝沿いに発生した大地震前の地震活動を解析し、9年以上継続する長期静穏化が10回観測されていたことを突き止めた。また、時空間パラメータを用いた大地震予測手法を開発し、予知率、警報分率、確率利得を回顧的に予測・検証し、静穏化による長期予測の統計的有意性を明らかにした。ただし、断層深部すべりなど、物理過程との関連への考察までには至らなかった。一方で、大地震後の地震活動静穏化の観点から、コサイスマックなクーロン応力低下と地震活動の静穏化について調べ、東北地方太平洋沖地震による2008年岩手・宮城内陸地震余震域や日本海東縁部(秋田県沖～新潟県沖)で統計的有意性を確認した。地震活動の静穏化に少なくともステップ状の応力低下が関係している。

- (9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
- Chen, S., J. Zhuang, X. Li, H. Lu, and W. Xu, 2018, Bayesian approach for network adjustment for gravity survey campaign: methodology and model test, *J. Geodesy*, doi:10.1007/s00190-018-1190-7.
- Gulia, L., A. P. Rinaldi, T. Tormann, G. Vannucci, B. Enescu, and S. Wiemer, 2018, The effect of a mainshock on the size distribution of the aftershocks, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2018GL080619.
- Guo, Y., J. Zhuang, and N. Hirata, 2018, Modeling and forecasting 3D-hypocenter seismicity in the Kanto region, *Geophys. J. Int.*, 214, 520-530, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy154>.
- Fukushima, Y., S. Toda, S. Miura, D. Ishimura, J. Fukuda, T. Demachi, and K. Tachibana, 2018, Extremely early recurrence of intraplate fault rupture following the Tohoku-Oki earthquake, *Nature Geoscience*, doi:10.1038/s41561-018-0201-x.
- Heidarzadeh, M., T. Ishibe, and T. Harada, 2018, Constraining the source of the Mw 8.1 Chiapas, Mexico earthquake of 8 September 2017 using teleseismic and tsunami observations, *Pure and Applied Geophysics*, doi:10.1007/s00024-018-1837-6.
- 石辺岳男・橋間昭徳・松浦律子・津村建四朗, 2019, 東北地方太平洋沖地震の背弧側における地震活動度の変化について, CSEP-Japan (日本における地震活動に基づく地震発生予測検証実験) 研究集会, 2019年1月28-29日, 東京大学地震研究所, 東京都文京区.
- Ishimura, D., S. Toda, S. Mukoyama, S. Homma, K. Yamaguchi, and N. Takahashi, 2019, Three-dimensional surface displacement and surface ruptures associated with the 2014 Mw6.2 Nagano earthquake using differential LiDAR, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, in press.
- Iwata, T., 2018, A Bayesian approach to estimating a spatial stress pattern from P wave first-motions, *J. Geophys. Res.*, 123, 4841-4858, doi:10.1002/2017JB015359.
- Jia, K., S. Zhou, J. Zhuang, C. Jiang, Y. Guo, Z. Gao, and S. Gao, 2018, Did the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake trigger the occurrence of the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou earthquake in Sichuan, China?, *J. Geophys. Res.*, 123, 2965-2983, <https://doi.org/10.1002/2017JB015165>.
- 加藤愛太郎, 2018, 間欠的な固着のはがれと大地震の発生, *パリテイ*, 33, 06, 48-51.
- Kato, A. and T. Ueda, 2019, Source fault model of the 2018 Mw 5.6 northern Osaka earthquake, Japan, inferred from the aftershock sequence, *Earth Planets Space*, 77, 11, <https://doi.org/10.1186/s40623-019-0>.
- Kato, A., 2019, The evolution of fault slip rate prior to earthquake: The role of slow and fast slip modes, *Proceedings of the International School of Physics " Enrico Fermi "*, in press.
- Mngadi, S. B., R. J. Durrheim, M. S. D. Manzi, H. Ogasawara, Y. Yabe, H. Yilmaz, N. Wechsler, G. Van aswegen, D. Roberts, A. A. K. Ward, M. Naoi, H. Moriya, M. Nakatani, A. Ishida, SATREPS Team, and ICDP Dseis Team, 2019, Integration of underground mapping, petrology, and high-resolution microseismicity analysis to characterise weak geotechnical zones in deep South African gold mines, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 114, 79-91, doi: 10.1016/j.ijrmm.2018.10.003.

- 中谷正生, 2019, あんた, 地震の何なのさ? 短期前兆のメタ理論, パリティ, 34, 02,84 - 88 .
- 直井 誠, 2018, 南アフリカ大深度金鉱山での微小破壊観測による震源の物理的研究, 地震, 第2輯, 71, 43-62, doi: 10.4294/zisin.2017-13.
- Omi, T., Y. Ogata, K. Shiomi, B. Enescu, K. Sawazaki, and K. Aihara, 2018, Implementation of a real time system for automatic aftershock forecasting in Japan, *Seismol. Res. Lett.* 90, 242-250.
- Schorlemmer, D., M. Werner, W. Marzocchi, T. Jordan, Y. Ogata, D. Jackson, S. Mak, D. Rhoades, M. Gerstenberger, N. Hirata, M. Liukis, P. Maechling, A. Strader, M. Taroni, S. Wiemer, J. Zechar, and J. Zhuang, 2018, The Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability: Achievements and Priorities, *Seismol. Res. Lett.*, doi:10.1785/0220180053.
- Sugan M., A. Vuan, A. Kato, M. Massa, and G. Amati, 2019, Seismic evidence of an early afterslip during the 2012 sequence in Emilia (Italy), *Geophys. Res. Lett.*, 46, doi: 10.1029/2018GL079617.
- Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018, Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog, *Earth, Planets and Space*, 70, 90.
- 遠田晋次, 2018, 2018年大阪府北部地震の周辺活断層と地震活動への影響, 地震ジャーナル, 66, 9-21 .
- Toda, S., and R. S. Stein, 2018, Why aftershock duration matters for probabilistic seismic hazard assessment, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 108, 1414-1426.
- 遠田晋次・石村大輔, 2019, 熊本地震など内陸大地震で見いだされた誘発性地表地震断層と短い活断層の評価, 第四紀研究, 印刷中 .
- 堤 浩之・遠田晋次・後藤秀昭・熊原康博・石村大輔・高橋直也・谷口 薫・小俣雅志・郡谷順英・五味雅宏・浅野公之・岩田知孝, 2018, 熊本県益城町寺中における2016年熊本地震断層のトレンチ調査, 活断層研究, 49, 31-39 .
- Wang, T., Zhuang, J., Buckby, J., Obara, K. and Tsuruoka, H., 2018, Identifying the recurrence patterns of non-volcanic tremors using a 2D hidden Markov model with extra zeros, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.123, Issue8, pp.6802-6825, doi:10.1029/2017JB015360.
- Wang, Y., T. Wang, and J. Zhuang, 2018, Modelling continuous time series with many zeros and an application to earthquakes, *Environmetrics*, 29, 4, <https://doi.org/10.1002/env.2500>.
- Yamaguchi, J., M. Naoi, M. Nakatani, H. Moriya, T. Igarashi, O. Murakami, Y. Yabe, R. Durrheim, and H. Ogasawara, 2018, Emergence and disappearance of very small repeating earthquakes on a geological fault in a gold mine in South Africa, *Tectonophysics*, 747-748, 318-326. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.014>.
- Zhuang, J., T. Wang, and K. Kiyosugi, 2019, Detection and replenishment of missing data in marked point processes. *Statistica Sinica*. In press. doi:10.5705/ss.202017.0403.
- Zhuang, J., M. Murru, G. Falcone, and Y. Guo, 2018, An extensive study of clustering features of seismicity in Italy from 2005 to 2016, *Geophysical Journal International*, 216, 302-318, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy428>.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要:

当研究課題自体は次期計画には引き継がれないが、主として前震活動や静穏化による地震発生予測手法の開発については、次期計画研究課題「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」(代表: 中谷正生)と関連し、引き続き実施される。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

担当者: 遠田晋次(東北大学災害科学国際研究所)

他機関との共同研究の有無: 有

参加人数 11人(担当者を含む) 北海道大学(勝俣 啓) つくば大学(Enescu Bogdan) 東京大学地震研究所(中谷正生、加藤愛太郎、酒井慎一、五十嵐俊博、鶴岡 弘) 統計数理研究所(Zhuang Jiancang) 常磐大学(岩田貴樹) 京都大学防災研究所(片尾 浩)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
 部署等名：東北大学大学院理学研究科
 電話：022-225-1950
 e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp
 URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者
 氏名：遠田晋次
 所属：東北大学災害科学国際研究所

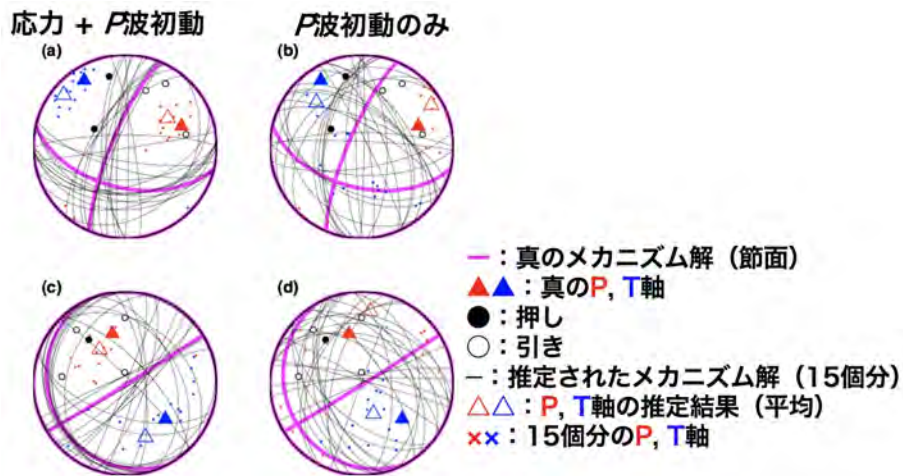


図1 . 人工データを用いた2つのメカニズム解推定法の検証例

左列 (a,c) は Iwata (JGR, 2018) による応力空間パターンと P 波初動の組み合わせ、右列 (b,d) は P 波初動のみによる推定結果を示す。100 個のメカニズム解をサンプリングし、P 軸・T 軸の平均方向を計算。ここでは可視化の都合上、そのうち 15 個分についてのみのメカニズム解および P 軸・T 軸を図示している。推定結果平均の P・T 軸の向き (白抜き赤・青三角) は真のそれ (塗りつぶした赤・青三角) に (a)(b) とそれぞれなりに合致するが、サンプリング各々の P・T 軸 (赤・青の×印) は、(b) の場合にかなりバラついている。c), d) は P 波初動を「誤って記録」したデータ (「引き」(白丸) に囲まれた「押し」(黒丸) は、本当は「引き」である) を含む例。

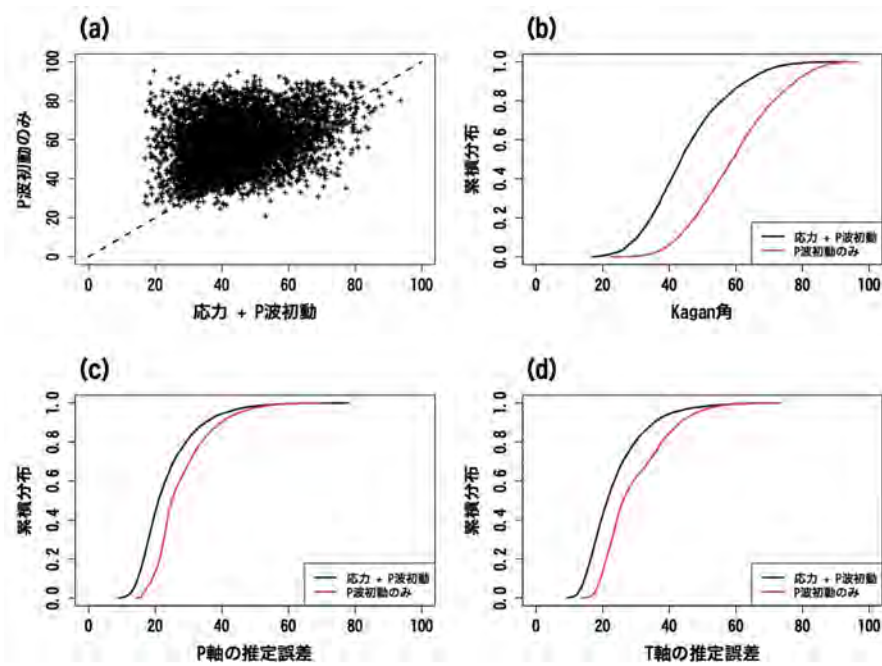


図 2 . 人工データを用いた 2 つのメカニズム解推定法の比較

a) 両手法による結果を比較した散布図。各々の地震に対する「応力情報あり」(応力 + P 波初動) と「応力情報なし」(P 波初動のみ) の推定結果と真のメカニズム解からのズレを Kagan 角で表したもの。値が大きいほどズレが大きい。「なし」の推定結果のズレが「あり」のそれより大きい。b) Kagan 角の累積分布。この図でも全体として「なし」の Kagan 角の方が「あり」のそれより大きい。c) d) P 軸、T 軸の推定誤差。「なし」の方が「あり」の場合より推定精度が低い。

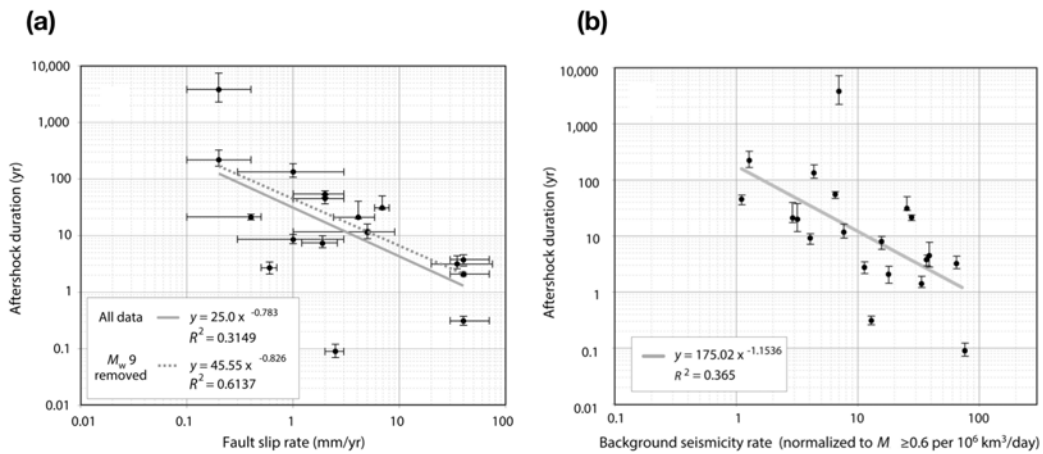


図 3 . 東北地方太平洋沖地震の 12 箇所の広域余震活動域および東北地方で発生した最近の 8 個の大地震の余震活動継続時間と領域内の活断層・プレート境界の変位速度 (a) および常時地震活動 (b) との関係 (Toda and Stein, 2018)

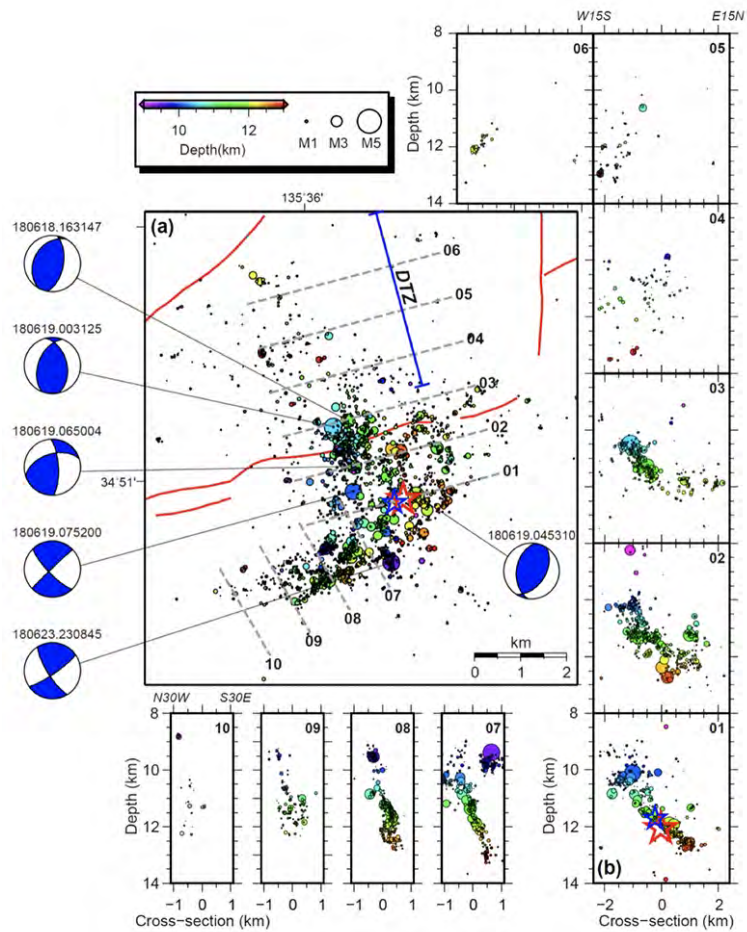


図4 . 震源再決定に基づく2018年大阪府北部の地震 (Mw5.6) の余震の詳細分布 (Kato and Ueda, 2019)

- a) 再決定された震央分布。円の大きさはマグニチュード、色は発生深度を示す。メカニズム解は防災科学技術研究所による。青星は前震、赤星は本震の震央。赤線は活断層を示す。DTZは遅れて誘発された余震活動域を示す。
- b) 震源分布の断面図。それぞれの位置は図4aに示す。

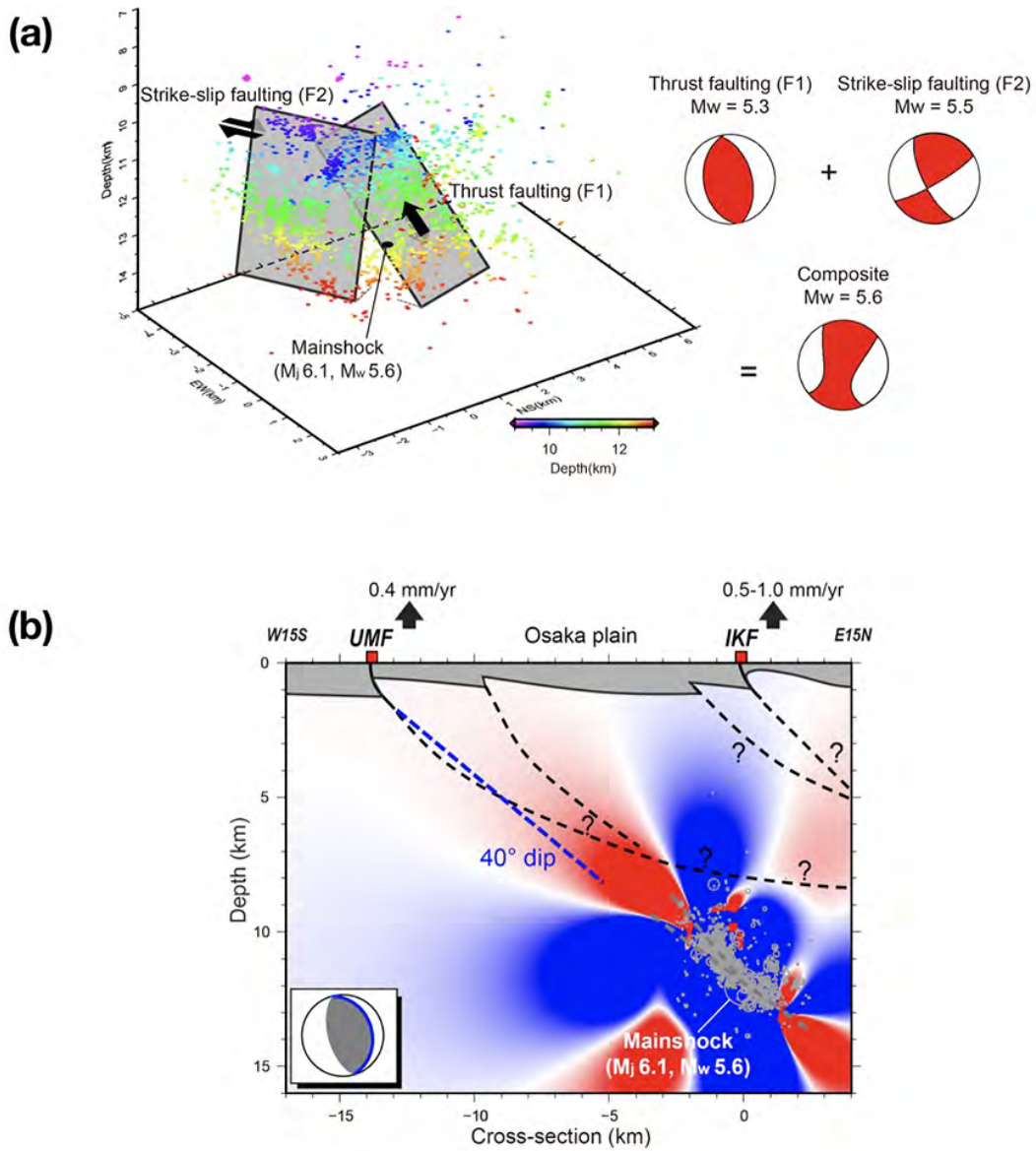


図5 . 2018年大阪府北部の地震の震源断層モデル (Kato and Ueda, 2019)

a) 再決定された余震と2枚の震源断層の透視図。震源断層は北北西走向・東傾斜の逆断層 (F1) と急傾斜の東北東走向の右横ずれ断層からなる。F1、F2断層による2つのダブルカップルモーメントテンソルを足し合わせることで観測された本震のCMT解が説明可能。b) 東傾斜の逆断層 (走向345°、傾斜30°、すべり角90°、図中のメカニズム解) に対して解いたクーロン応力変化と余震分布 (灰色丸) の東北東-西南西の断面図。破線はSato et al. (2009)による活断層の推定位置。UMF、IKFはそれぞれ上町断層帯、生駒断層帯を示す。0.4mm/yr、0.5-1.0mm/yはそれぞれの上変位速度。

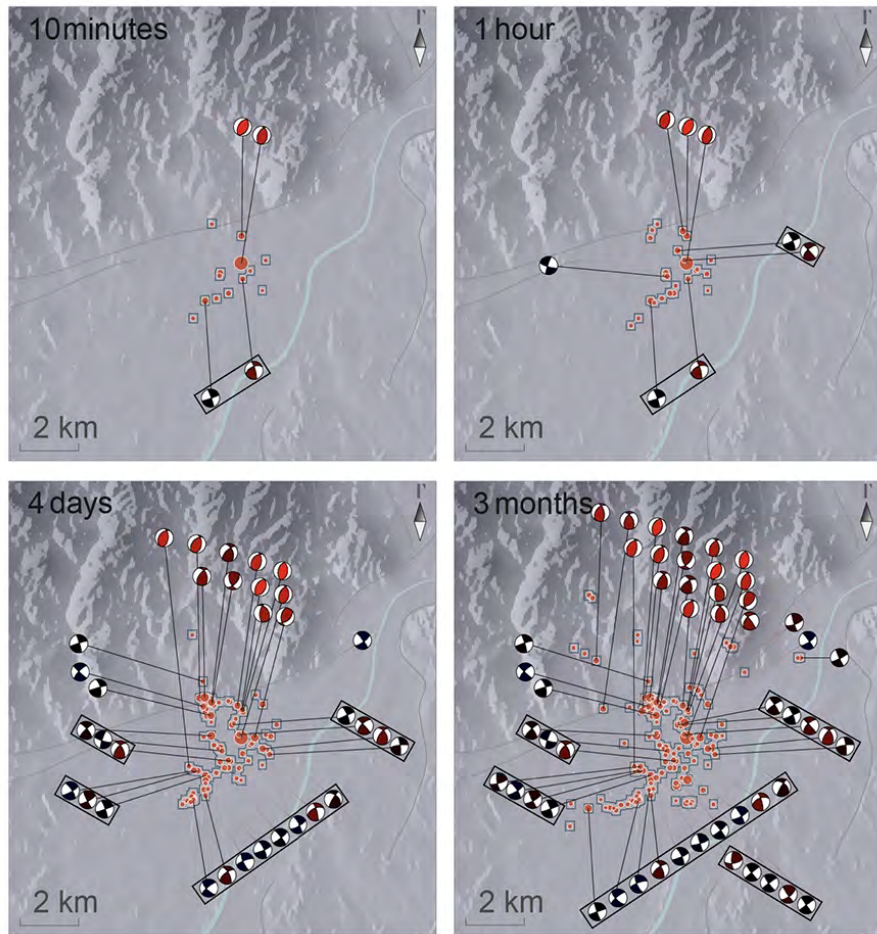


図6 . 2018年大阪府北部の地震の余震震央分布 ($M \geq 2.0$) とメカニズム解 ($M \geq 2.5$, Li et al., 2019) それぞれ本震後10分、1時間、4日、3ヵ月間の分布を示す。

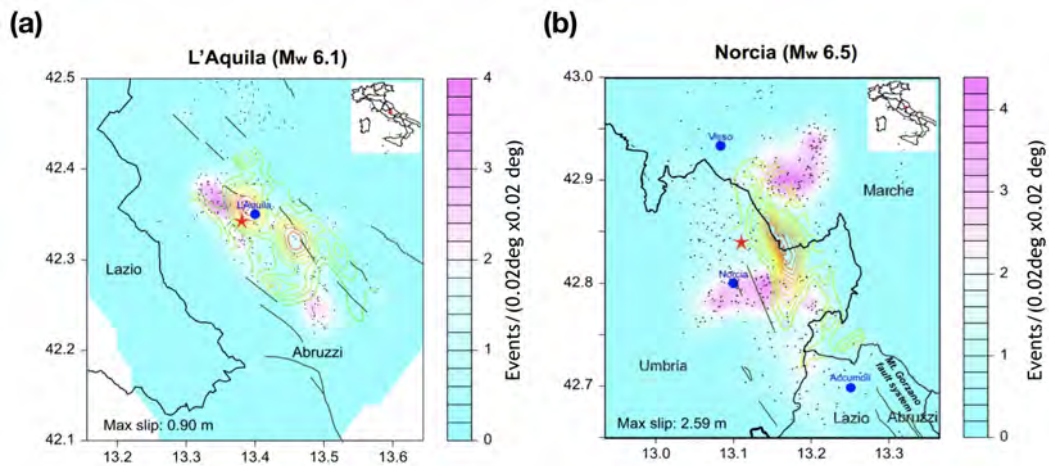


図7 . イタリアの2009年ラクイラ地震、2016年ノルチャ地震におけるETAS解析によって求めた本震断層面沿いの余震発生量の比較
 点は本震後数日間の余震で、背景色は密度に応じてカラーコード化したもの。色付きのコンターは本震時の断層変位量を示す。

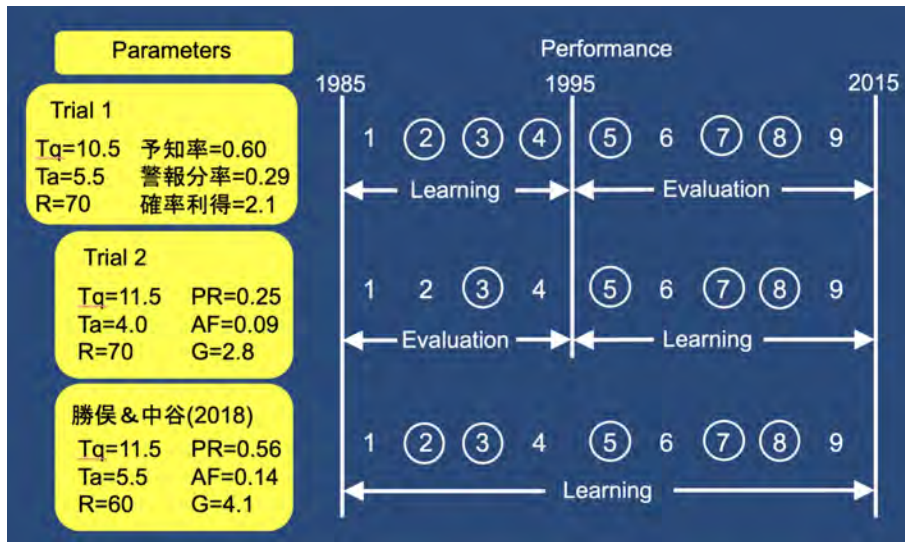


図 8 . カムチャツカ半島から千島列島、北海道沖、東北沖、房総沖、伊豆小笠原諸島で発生した Mw7.5 以上の地震の静穏化モデルによるレトロスペクティブテスト
 番号は Mw7.5 以上の 10 個の地震を示し、 囲みがか的中した地震である。Learning は学習期間、Evaluation は評価期間を意味する。Trial 1、 2、 勝俣・中谷 (2018) の 3 つのパラメータセットを用いて予測を実施。Td は静穏化設定期間、Ta は警報期間、R は警報範囲半径を示す。

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震に先行する大気中ラドン濃度変動に関する観測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

イ. 海洋プレート内部の地震

ウ. 内陸地震と火山噴火

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

大学及び研究機関の放射線管理施設のモニタリングネットワークによって、広域な大気中ラドン濃度変動をモニタリングすることができる。そこで、本研究では放射線管理施設が有する排気モニターを用いて、全国で大気中ラドン濃度の測定を行い、巨大地震前の地殻変動を大気中ラドン濃度変動からモニタリングすることを目的とする。広域での地殻変動モニタリングを行うために、全国規模の放射線管理施設のモニタリングネットワークの構築や観測データの解析に基づいた研究を行う。収集したデータの解析により大地震に先行するラドンガス放出と地殻変動の関連を明らかにし、地震・火山噴火の発生ポテンシャルの評価に資することを本研究の目的とする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

現在19施設の全国医薬系放射線管理施設が参画しており、これらの機関との共同研究においてデータ解析を進める。また更に地殻変動モニタリングに使用出来る放射線施設に協力を求めることで、全国

をくまなくカバーすることの出来る全国放射線管理施設ネットワークの拡大を目指す。得られたデータを用いて、大気中ラドン濃度のデータを広範囲・長期間に収集・分析し、地震・火山噴火・ゆっくりすべり・地殻ひずみなどの活動と比較する。平成26年度は、これまでに得られている放射管理施設の大気中ラドン濃度変動データの解析を進める。また新たに全国の放射線管理施設で長期間の大気中ラドン濃度計測データを持つ協力機関を探し、ネットワーク拡大を行う。平成27年度以降は、引き続きデータ解析および協力施設からの収集を進めるとともに、地殻変動との比較を行い、大地震に先行するラドンガス放出と地殻変動の関連を明らかにしていく。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度～30年度)の成果の概要:

1) 全国規模での放射線管理施設のモニタリングネットワークの構築や測定データの解析

平成30年度までに25施設の全国医薬系放射線管理施設が参画しており、今年度は、これまでに得られている放射管理施設の大気中ラドン濃度変動データの解析を進めるほか、信州大学医学部、鳥取大学医学部、札幌医科大学(東北地方太平洋沖地震以降のデータ)、福島県立医科大学(東北地方太平洋沖地震以降のデータ)、大阪薬科大学の事業所の計測データの解析を進めた。学会や論文等で、解析データの公表が可能になった際に、協力事業所名を公表する。また新たに全国の放射線管理施設で長期間の大気中ラドン濃度計測データを持つ協力機関を探し、ネットワーク拡大を行っている。

2) 潮汐分潮解析

神戸薬科大学での観測された大気中ラドン濃度変動データ(1984年～1994年)を用いて、潮汐分潮解析を行った結果、主要分潮のS1、K1、S2に相当する周期が認められた。S1、S2に相当する周期については、気象による影響が高い。K1については、1984-1988年では認められなかったが、兵庫県南部地震前の1990年-1994年の期間では認められた。

3) 各大学で観測された大気中ラドン濃度変動

図1は、札幌医科大学で観測される大気中ラドン濃度の(a)経年変動と平均変動、(b)平均変動からの残差を示す。東北地方太平洋沖地震以後に大気中ラドン濃度変動の振幅が東北地方太平洋沖地震以前と異なっている。

図2は、信州大学医学部で観測される大気中ラドン濃度の残差を示す。2014年11月22日に発生長野県神城断層地震(図中×印)前に大気中ラドン濃度の上昇が認められる。

図3は、鳥取大学医学部で観測される大気中ラドン濃度の残差を示す。2016年10月21日に発生鳥取県中部地震(図中×印)前に大気中ラドン濃度の上昇が認められる。

図4は、大阪薬科大学で観測される大気中ラドン濃度の経年変化と平均変動からの残差を示す。2018年(平成30年)6月18日に発生した大阪府北部地震(図中×印)前後に大気中ラドン濃度の低下が認められる。

4) RAD7、PicoRad、管理モニタによるラドン濃度測定法の確立

4-1) RAD7装置による水中ラドン濃度測定

RAD7装置を用いた水中のラドン濃度測定は、液体シンチレーションカウンター(LSC)のように有機溶媒を使用しないことから、水文学のような屋外での水中ラドン濃度測定をする場合にも、使用され始めている。RAD7装置の空気の漏れ防止を行わなければ、値が低値を示す。漏れ防止付きのRAD7脱気方法を使用することにより、 $10\sim 90\text{ Bq L}^{-1}$ において、測定が可能であることを公表した(Higuchi et al., 2019)。

4-2) ピコラドのための校正係数の導出と評価

活性炭を用いたラドン収集器(PicoRad)は、室内ラドンのスクリーニングや土壌からのラドン散逸簡易測定に用いられ、同時多地点測定ができるのを特徴としてきた。しかし、PicoRadを含む市販のラドン収集器について適切な測定結果を得られないことが指摘されていた。そこでPicoRadを標準ラドンチャンバで曝露し、標準場の基準器と比較することで、計数率からラドン濃度への変換式を決定した。鉱石からのラドン(基準器と同じ機種でラドン濃度基準値を決定)をPicoRadに曝露し、この変換係数を用いてラドン濃度を求めたところ、変換された値はラドン濃度基準値とよく一致した。以

上から、PicoRad は、有効期限の異なるロットごとに換算式を得ることで、正確な濃度が決定できることを明らかにした (Wakabayashi et al., 2019)

4-3) 管理モニタのラドン濃度測定における問題

放射線モニタリングに使用されるガスフロー電離箱には2つのタイプがある。1つは温度補正システムを装備しているタイプで、地震前後の大気中ラドン濃度変動の研究に用いられてきた。もう1つはこの補正システムを装備しないタイプである。後者に関して、測定値 (fA) をラドン濃度 (Bq m^{-3}) に変換するのに必要なバックグラウンド値 (fA) と変換係数 ($\text{fA Bq}^{-1}\text{m}^3$) について、温度に基づく補正が必要であることを明らかにした (Ishihara et al., 2018)

計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

現在 25 施設の全国医薬系放射線管理施設が参画しており、これらの機関との共同研究においてデータ解析を進めた。更に地殻変動モニタリングに使用出来る放射線施設に協力を求めることで、全国をくまなくカバーすることの出来る全国放射線管理施設ネットワークの拡大をおこなった。得られたデータを用いて、大気中ラドン濃度のデータを広範囲・長期間に収集・分析し、地震・火山噴火・ゆっくりすべり・地殻ひずみなどの活動と比較した。平成 26 年度は、これまでに得られている放射管理施設の大気中ラドン濃度変動データの解析を進め、大気中ラドン濃度の露点依存性を明らかにした。平成 27 年度以降は、引き続きデータ解析および協力施設からの収集を進めるとともに、地殻変動 (東北地方太平洋沖地震、和歌山県北部地震、大阪府北部地震、鳥取中部地震、長野県神城断層地震、北海道胆振東部地震など) との比較を行なった。また解析では、大気中ラドン濃度の日変動や年変動の特性を明らかにし、気候変動、地下水変動、GPS 変動解析などとの相関や特異値分解 (部分空間法) による異常値の検出や潮汐分潮解析、対数周期変動との関連を検討し、大地震に先行あるいは地震に呼応するラドンガス放出について明らかにした。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Yasuoka, Y., Nagahama, H., Muto, J., Mukai, T. (2018) The Anomaly in Atmospheric Radon Concentrations Prior to the 2011 Tohoku-Oki Earthquake in Japan. *Radiation Environment and Medicine*, 7(2), 86-94, Aug., 2018.

Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y. (2018) Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes. *Scientific Reports*, 8(1), 13028, Aug., 2018.

Ishihara, M., Yoshii, M., Minami, N., Yasuoka Y., Tokonami, S., Nagahama, H., Mukai, T. (2018) Airborne radon concentration measurements using gas-flow Ionization chambers and the effects of temperature changes. *Proceeding of the 19th Workshop on Environmental Radioactivity*, Bessho, K., Matsumura, H., Miura, T, Tagami, K., Takamiya, K., (Eds). (2018, May). Tsukuba, p. 288-293.

Wakabayashi, A., Yasuoka, Y., Janik, M., Nagahama, H., Fukuhori, N., Mori, Y., Arai, Y., Fujii, S., Mukai, T. (2019) Derivation and validity evaluation of calibration factors for activated-charcoal radon collectors. *Radioisotopes*. in press.

Higuchi, S., Kamishiro, Y., Ishihara, M., Yasuoka, Y., Mori, Y., Hosoda, M., Iwaoka, K., Tokonami, S., Takahashi, R., Janik, M., Muto, J., Nagahama, H., Mukai, T. (2019) Evaluation of a radon air monitor in the measurement of radon concentration in water in comparison with a liquid scintillation counter. *Radiation Protection Dosimetry*, in press.

Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y. (2018) Statistical analysis of the correlation between earthquakes and atmospheric radon concentration. *International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop on Earthquake Preparation Process - Observation, Validation, Modelings, Forecasting - (ISEF-IWEP5)* Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.

Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y. (2018) Quantitative Analysis of Anomalies of Atmospheric Radon Concentration and Earthquakes. *Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), The 15th Annual Meeting*, Hawaii, 3 Jun, 2018.

Higuchi, S., Kamishiro, Y., Ishihara, M., Yasuoka, Y., Mori, Y., Hosoda, M., Iwaoka, K., Tokonami, S., Janik, M., Muto, J., Nagahama, H., Mukai, T. (2018) Evaluation of a radon air monitor as a measurement of radon concentration in water in comparison with a liquid scintillation counter. 9th International Conference on High Level Environmental Radiation Areas - For Understanding Chronic Low-Dose-Rate Radiation Exposure Health Effects and Social Impacts (ICHLERA 2018), 27 Sep., 2018.

Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y. (2018) Estimation of anomalous variation in atmospheric radon concentration related to earthquakes by Kalman Filter, American Geophysical Union fall meeting 2018, Washington, USA, December 2018.

岩田大地、長濱裕幸、武藤 潤、安岡由美 (2018) 地震に先行する大気中ラドン濃度変動：特異スペクトル変換法による異常検知法（招待講演）、日本地震予知学会第5回学術講演会、東海大学高輪キャンパス、2018年12月25日。

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

本課題では、地殻変動や地震・火山活動のデータに限らず、地球潮汐データ、電磁気学的データ、地下水データなどと大気中ラドン濃度との関連を求め先行現象の発現メカニズムを解明し、中短期の地震・火山噴火先行現象の統計的評価に着手することを目的とする。各年度大学及び研究機関の各放射線管理施設の排気データの読み取りから、広域な大気中ラドン濃度変動解析を進める。大気中ラドン濃度の異常変動発現メカニズムを解明すると共に、機械学習等のデータ駆動手法を取り入れた中短期の地震・火山噴火先行現象の統計的評価を試みる。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

長濱裕幸・武藤 潤

他機関との共同研究の有無：有

神戸薬科大学 安岡由美

福島県立医科大学：本間好・鈴木俊幸

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東北大学大学院理学研究科

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp

URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：長濱裕幸

所属：東北大学大学院理学研究科地学専攻

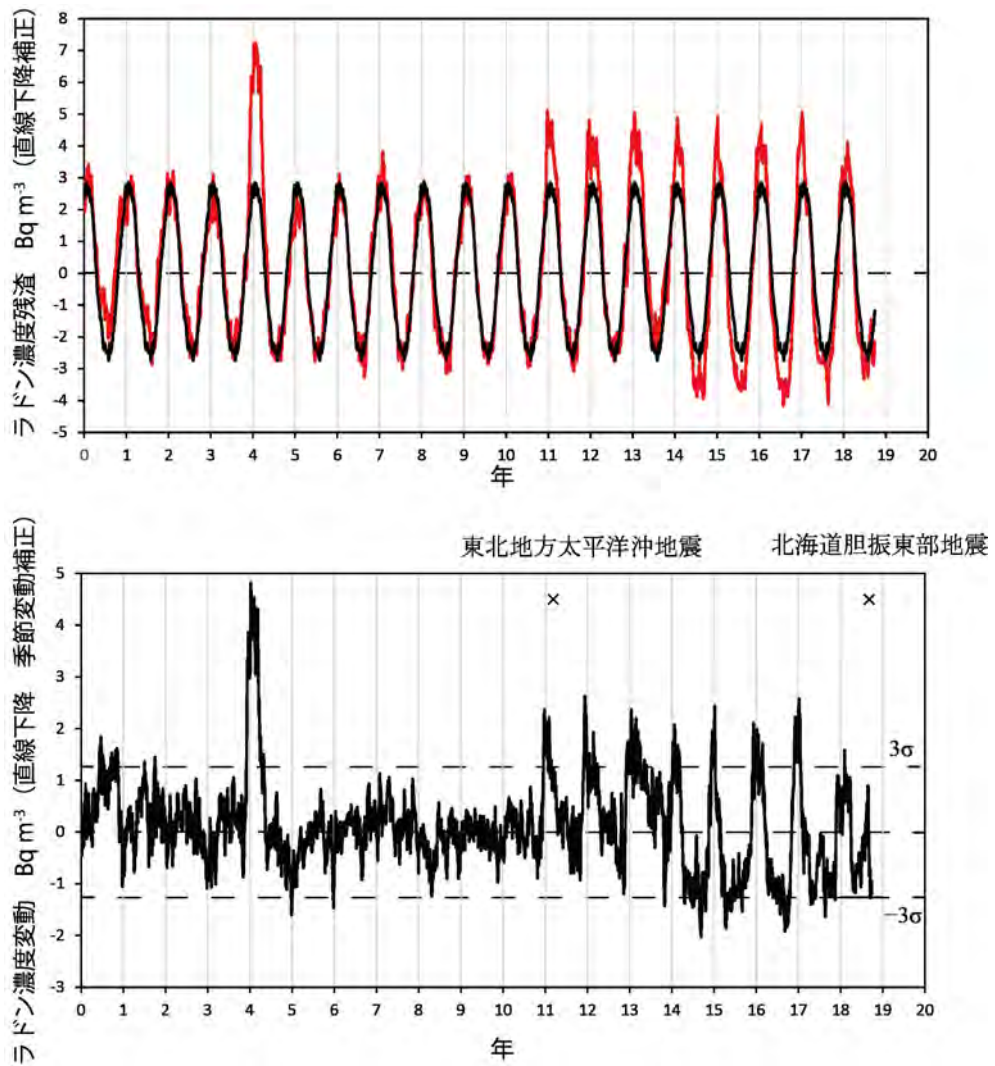


図1 札幌医科大学における大気中ラドン濃度
経年変動と平均変動(上図)と平均変動からの残差(下図)。

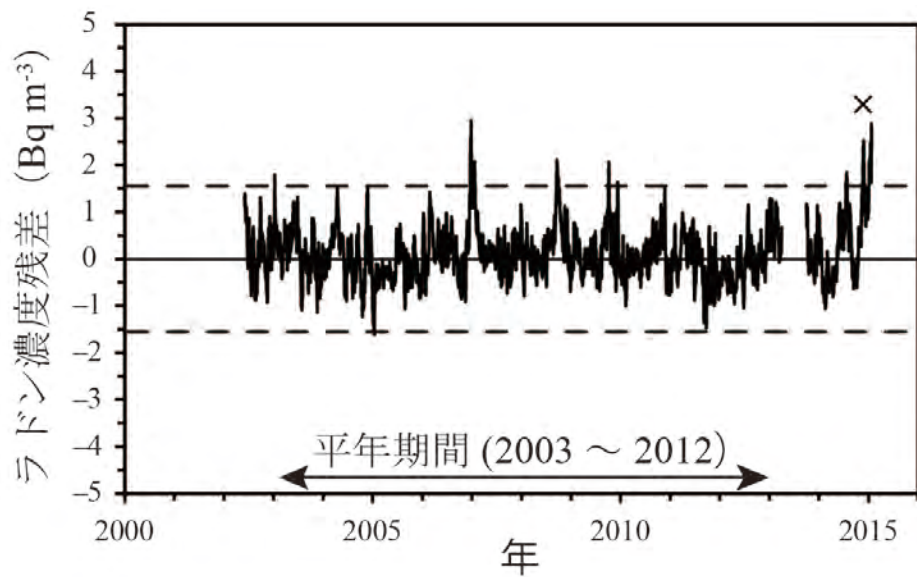


図2 信州大学医学部における大気中ラドン濃度の残差値変動

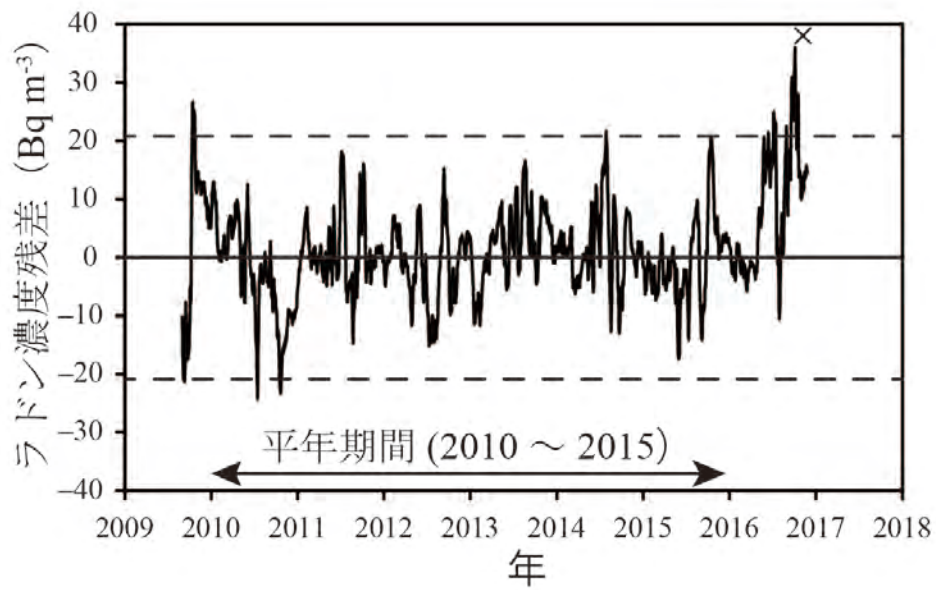


図3 鳥取大学医学部における大気中ラドン濃度の残差値変動

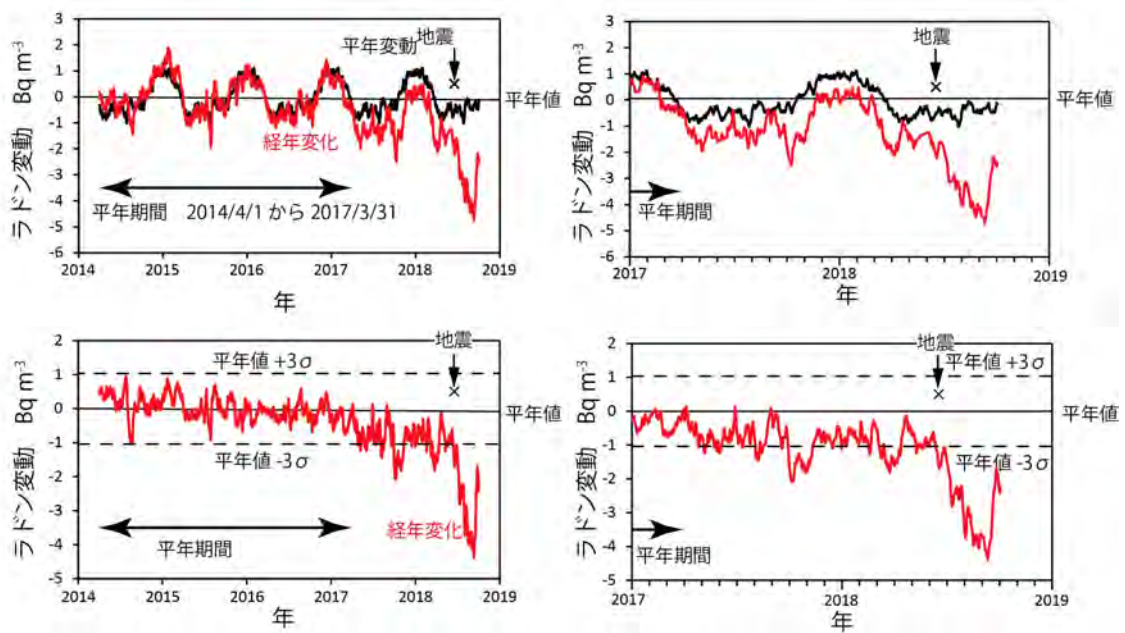


図4 大阪薬科大学における大気中ラドン濃度変動
経年変動と平均変動(上図)と平均変動からの残差(下図).

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

観測事例及び理論予測に基づく噴火事象系統樹の分岐条件の検討

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

イ. 熱水系の卓越する火山

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

逐次変化する火山活動に対応した予測は、火山噴火予知連絡会などによる専門家会合を開き、地球物理学の観測や物質科学的分析による結果を総合的・多面的に理解することによってなされてきた。今後、より迅速な対応をとれるように、このような専門家による判断をより客観化・一般化することにより、科学的知見として将来に蓄積する必要がある。本研究では、リアルタイムで得られる各種の観測データと火山活動や噴火現象の分岐との関係を具体的に記述し、噴火事象系統樹をより高度なものに発展させることを目的に、現在の火山学的知見および本研究計画により明らかとなる法則をまとめ、噴火事象の分岐判断の基準の作成を進める。具体的には、以下の目標掲げる。

1. 現在の火山学的知見をもとに、火山噴火現象を類型化し、災害や火山・噴火活動にとって重要な事象の分岐点を網羅的に調べる。

2. 事象の分岐点について、過去の観測データによる経験、理論・実験的な予測等にもとづき、事象分岐の判断方法をまとめる。

3. まとめられた分岐判断の方法をもとに、類型化された火山や火山噴火現象ごとに適切な観測項目・体制を明らかにする。

このような判断基準の作成はこれまで試みられていない。5年間でプロトタイプを作成することを目指す。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要 :

上記目標にある 3 項目をほぼ番号順に進める。活発な火山活動を示す火山(桜島等)や防災上重要な火山(富士山等)については、それぞれの火山における噴火シナリオの分岐判断条件を検討する。

平成 26 年度においては、主に項目 1 について実施するとともに、項目 2 に着手する。マグマの特性やテクトニクス的な背景、これまで提案されている噴火事象系統樹を参考にしながら、火山活動および噴火活動の事象分岐点を網羅的に調べる。さらに、災害軽減の観点から、とくに重要な事象分岐点を抽出する。重要な事象分岐点について、地震学、測地学、電磁気学、火山ガス・噴出物分析学などの、現在までの火山学的知見をもとに、先行現象と噴火現象に関する経験則や理論的な予見の調査を開始する。

平成 27 年度においては、項目 2 を継続し、事象分岐の判断基準の表を試作する。経験則には、観測事例数、適用範囲、再現性などを、理論的な予測法については、観測による検証、条件などをもとにして、いくつかのランクを設定し、分岐条件の判断基準の確からしさを加えることを検討する。

平成 28 年度においては、外部資金等を利用し、国内外の火山研究者とセミナーを開催し、国内外の火山の事例の比較研究を行う。これをもとに平成 27 年度に作成した事象分岐の判断基準の問題点を明らかにし、分岐条件の判断基準の再作成を行う。

平成 29 年度には、まとめられた事象分岐の判断基準をもとに、現在の火山観測体制での利用可能性を検討する。また、必要な観測体制や研究の方向性をまとめる。

平成 30 年度には、5 年間で総括し、本課題から提案する事象分岐の判断基準と今後の課題を総括し、文書にまとめる。

研究課題実施中には、他の研究課題とつねに連携を取り、それらの研究成果を取り入れるだけでなく、特に重要な研究内容を提言する。また、事象分岐の判断基準のもととなる論文、観測報告等を電子媒体等によりまとめ、常に検証・再構築できるようにする。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度~30 年度)の成果の概要 :

平成 30 年度は、平成 26 年度から進めてきた研究をまとめることを中心に実施した。その成果の一部は、現在、火山学会誌「火山」特集号へ投稿され、審査を受けている。以下に、成果をまとめる。1 - 4 は複数の火山の比較から求められた分岐指標、5 - 7 は個別火山に関して得られた結果である。

1. 1996 年以降に GEONET で火山性地殻変動が観測された国内の火山について、地殻変動の継続期間や変動量を整理し、それらと噴火の有無等との関係を調べた。ひずみ量のスタッキング手法を用いて 38 の地殻変動イベントを検出し、このうち 16 の地殻変動イベントでは噴火を伴ったことがわかった。一方、地殻変動を検出できずに噴火した事例が 7 回あった。スレットスコアの指標を用い、地殻変動による噴火の予測について検証したところ、全体で 0.36 であった。地殻変動イベントの継続期間と地殻変動開始日から噴火に至る期間の関係を調べたところ、噴火を伴った地殻変動イベント 16 事例すべてで、噴火活動の開始は地殻変動継続期間中であった。そのうち 14 の事例で、噴火は地殻変動終了後約 3 か月までに停止し、10 の事例で、噴火は地殻変動の継続期間中に停止した。

2. 世界の火山を対象に、公開データベースをもとに、噴火発生の特徴および地震発生との関連を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。(a) VEI が 2 あるいは 1 の噴火は、全体の 10-30 % は 1 日で終了する。10 日以下は 25-45% であり、1 年を超える噴火は 8-15 % である。一方、VEI が 3 以上になると、1 日で噴火が終了するのは 3-4 % に減少し、1 年を超える噴火は 25 - 30 % に増加する。(b) 数百 km 以内にある火山をグループ化し、その領域内での活動をみると、数十年程度の間、1 / 3 以下あるいは 3 倍以上に噴火活動が変化する地域は、全体の 10 % 程度である。地域内の一火山に対する 100 年間に発生する噴火回数は平均 1.25 / (100 年・火山) である。(c) マグニチュード 7.5 以上の大地震が発生した際に、距離 200km 程度内にある火山の噴火発生数は、大地震発生前に比べて発生後約 5 年間は 50 % 程度まで増加する。(d) 噴火が発生した場合、火山から 50 km 程度以内の距離範囲で M5 - 6 クラスの中規模地震が発生する確率が数ヶ月間高まる。(e) ある火山で噴火が発生すると、隣接する火山で数ヶ月以内に噴火が発生する確率は、そのほかの期間に比べて 30% ほど大きくなる。

3. 国内火山を中心に、非噴火期における unrest event のうち、特に熱水系の関与が疑われる事例を収集し、点源モデルで推定されたソースの深度と強度の関係を散布図に整理した。地磁気変化・地盤変動のいずれにおいても、深度と強度（又は時間変化率）の間に明瞭な正の相関が認められた。この正相関は、観測網スケールによる見かけのものである可能性も否定できないが、火山体の構造に共通する何らかの特性を反映している可能性もある。より浅く強い方向に偏差する程度によって、将来観測される個々の unrest event の危険度を統計的に評価できるのではないかという考え方を提案した。
4. 火山ガスに現れる変化は、噴火する本体であるマグマや熱水系における変化が地表に現れたものであることから、長年、噴火前兆や推移に伴う火山ガス組成などの変化が報告されてきた。そこで、定量的な測定に基づく最近の火山ガス放出率や組成の連続観測研究を網羅的に調べ、噴火発生や活動推移との関係をまとめた。その結果、例えば、火山ガス放出率とマグマ上昇率の比例関係の可能性や、火山ガス中の CO₂/SO₂ 比の増加がマグマ中の気泡の増大、ひいては規模な大きな噴火の発生に至るといふ仮説が示された。
5. 桜島火山についてマグマの貫入速度を分岐条件とする経験的な噴火事象分岐論理を構築した。1914 年大正噴火や 1946 年昭和噴火は住民の記録や鹿児島測候所の報告書をもとに、1955-2005 年南岳火口および最近の昭和火口噴火では、地盤変動データをもとにマグマの貫入速度を推定し、噴火事象と比較した。南岳下を中心とする既存火道系へマグマが貫入する、南岳での噴火活動の場合では、ブルカノ式噴火 (1-8?10⁵m³/day) > 連続火山灰放出 (?1?10⁵m³/day) > ストロンボリ式 (0.2-2?10⁵m³/day) 噴火の順にマグマの貫入速度が大きい。昭和火口の噴火の場合、ブルカノ式噴火は (104m³/day) と小さく、溶岩噴泉のような噴火に至る前は 105m³/day のオーダーである。1946 年昭和噴火 (2 億 m³ 級溶岩流出) では、106m³/day のオーダーと推定された。一方、新規火道を形成し、プリニー式噴火から始まる山腹噴火を起こした大正噴火では、マグマの貫入速度は 2 × 10⁸m³/day と推定された。ただし、106m³/day 程度のマグマ貫入速度では、噴火は発生していない (2015 年 8 月 15 日マグマ貫入イベント)。地盤変動がほとんど検出できない場合 (2006 年、2007 年昭和火口噴火)、水蒸気噴火、もしくはマグマ水蒸気噴火が発生した。この場合、温度上昇、噴気量の増加などが分岐判断の指標として考えられる。
6. 阿蘇火山について、近代的な地球物理学的観測が展開されて初めてとなる、2014 年 11 月のマグマ噴火から 2016 年 10 月の爆発的噴火までの一連の火山活動をもとに各種観測量と噴火現象を調べた。その結果、以下の分岐指標が得られた。マグマ噴火、水蒸気噴火ともに、噴火時期が近づくにつれて、地下の体積変化量を示す基線長の伸び、熱的活動の活発化、火山性地震の微動振幅増加など、多くの観測項目に火山活動の活発化を示すシグナルが共通に現われる。一方、地下マグマによる熱消磁を反映する地磁気変化は、マグマ噴火の発生前のみを観測され、水蒸気爆発前には顕著な発現はない。
7. 草津白根山について、火山ガス組成の測定を行い、火山活動との関係を調べた。北側噴気地帯では、噴気ガスの繰り返し採取と組成測定を行った。湯釜火口では、湖水の繰り返し採取に基づく、フッ化物イオン、塩化物イオン、硫酸イオンと全硫酸化物イオンについて定量分析を行った。噴気ガス中の H₂S 濃度が減少した 1982 年～1983 年および、1989 年～1991 年の活動では、地震活動が顕著になり火山活動が活発化した。噴気ガス中の H₂S 濃度が短い周期で低下した 2000 年以降は、高温のマグマに由来すると考えられる湯釜湖水中のフッ化物イオン、塩化物イオン濃度の上昇を伴い、マグマからの火山性流体が湯釜付近へ頻繁に供給されていると推定された。
8. インドネシアの 5 つの活火山 (グンツール、ガルングング、メラピ、ケルト、スメル) について噴火履歴を検討し新たに噴火推移を示すイベントツリーを作成した。噴火確率を付すことまではできていないが、最近の噴火の推移パターンと、その発生頻度のある程度記述することができる。ここでは、噴出率の大小を意識してイベントツリーを作成したほか、各火山の過去の災害を参考に、噴火場所の違いや火口湖の有無を考慮した。欧米では、ひとつの単発事象について確率を付したイベントツリーを作成して、基本的には単一の災害の評価を行う。その際、噴火が数ヶ月以上続く場合には、別の噴火として改めて再評価をする。一方、メラピ火山の最近の噴火のように、比較的短期間に噴出率が変化して噴火現象が変化する場合がある。日本で展開してきた噴火推移を示したイベントツリーの

利点は、噴火全体を俯瞰したストーリーを理解し説明が可能なことである。しかしながら、このイベントツリーでは、噴火が推移する間に異なる複数の火山災害が連続あるいは同時に発生しうることを記述できていない。そのため、噴火事象ごとに災害のイベントツリーを別のドメインで展開する必要があることを提案した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Nishimura, T. (2018) Interaction between moderate earthquakes and volcanic eruptions: analyses of global data catalog. *Geophys. Res. Lett.*, 45 , 8199-8204, doi:10.1029/2018GL079060. Nakada, S., Maeno, F., Yoshimoto, M., Hokanishi, N., Shimano, T., Zaennudin, A., and Iguchi, M., Eruption scenarios of active volcanoes in Indonesia. *J. Disaster Res.*, Vol. 14, pp. 40-50 doi: 10.20965/jdr.2019.p0040, 2019. 井口正人・為栗 健・平林順一・中道治久(2019) マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理. 火山, (印刷中) 篠原宏志(2019) 火山ガス観測から推定される火山活動推移過程. 火山, (印刷中)

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

全国の主要な火山について、これまでに得られている地球物理学的、物質科学的データをもとに、火山活動や噴火活動について分岐指標を整理し、分岐判定に対する論理的評価方法を開発する。また、山体構造や周辺テクトニクスを考慮に入れた火山活動をモデル化する。火山活動の活発化や噴火発生時の現象理解や事象分岐の予測に役立てるために、時系列上に、起こりうる火山現象と期待される地球物理学的観測量や噴出物特性をまとめる。加えて、観測量や噴出物特性を説明する物理化学的解釈やモデルを提示する。噴火を繰り返している国内の火山については、個別に火山活動および噴火活動のモデルを提示し、噴火事例の少ない火山については、他火山の事象との比較検討などを通して、特徴的な分岐現象や定常時の活動に着目したモデルを提示することを目指す。「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」として実施する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東北大学	西村太志、中村美千彦
他機関との共同研究の有無 :	有
北海道大学	中川光弘、橋本武志
東京大学	中田節也、森田裕一
東京工業大学	野上健治
京都大学	鍵山恒臣、井口正人
九州大学	清水 洋
気象庁	松森敏幸
気象研究所	高木朗充
産業総合研究所	篠原 宏志
防災科学技術研究所	藤田英輔

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻
電話 : 022-796-6531
e-mail : zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp
URL : <http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名 : 西村太志

所属：東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

トランジェント現象リアルタイムモニタリングのための複合測地データ利用の高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究課題では、(1) 海陸の複数測地データを用いてプレート境界及びその周辺で発生する巨大地震の規模及びその広がりを即時(イベント発生後 3 分以内)に把握し、それに基づく津波の高精度予測のための技術開発、(2) 数日以下の時定数を持つゆっくりとしたプレート境界上の滑り現象を GNSS データから自動検知するための解析技術の高度化及び地殻変動自動検知のためのアルゴリズム開発、(3) 火山活動の活発化に伴う地殻変動を検出し変動源の推定をリアルタイムで自動的に行う解析システムの開発、の 3 点を実施する。これらは準実時間でプレート境界や火山周辺における様々な時間帯の現象を迅速に把握する上での基盤技術であり、巨大地震発生後の津波即時予測や、プレート境界での滑りシミュレーションに取り入れるためのデータ逐次同化システムへの応用、火山活動の推移予測等を行う上で極めて重要である。これらの技術開発により、プレート境界で発生する津波や火山噴火による被害等の軽減及びプレート境界型地震の短期予測に資するデータの提供を目指し、防災・減災ならびに地震・火山噴火予測に貢献する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本計画は、(1) 複数の測地データ (GPS、地殻変動連続観測、海底水圧計等) を使用して、プレート境界及びその周辺で発生する巨大地震の地震規模を即時に推定し、高精度津波予測に活用するための技術開発、(2) GPS、GLONASS、Galileo 等を含めた複数 GNSS 衛星を用いて、数日以下の時間帯域におけるゆっくりとした地殻変動を準実時間で捉えるための解析手法の高度化、(3) 火山活動の変化に伴って観測される山体変形を準実時間で確実に把握しその変動源の時空間変化を推定できる解析技術の高度化、の3つの技術開発項目で構成される。

(1) に関しては、これまでに開発を進めてきたリアルタイム GPS データに基づいて巨大地震に伴う地殻変動を自動検知・推定するアルゴリズム (RAPiD) を GPS 以外の GNSS 衛星及び地殻変動連続観測データでも利用できるように拡張し、得られる観測量から断層面での不均質滑りを即時推定するアルゴリズムを開発して、それらに基づく高精度な津波予測システムの開発を進める。年次進行としては、平成 26、27、28 年度にかけて GNSS データと地殻変動連続観測データのノイズ特性に配慮した地殻変動検知アルゴリズムを開発し、平成 29、30 年においてリアルタイム観測データを用いたアルゴリズムの精度検証を行う。

(2) に関しては、GPS、GLONASS、Galileo 等を含めた複数 GNSS 衛星を用いて、数日以下の時間帯域におけるゆっくりとした地殻変動を準実時間で捉えるための解析手法の高度化を行う。数日以下の時間帯域では対流圏遅延の補正、マルチパスによる擾乱等の軽減等がノイズレベル軽減に重要である。それらに対流圏の数値予報モデル、Sidereal filter 等を用いて準実時間で軽減しつつ、高品位の座標時系列を得るための技術開発を5カ年通じて進める。また平成 28 年度以降、それら時系列から地殻変動を自動検出するアルゴリズムをこれまでに開発した RAPiD アルゴリズムを拡張する形で開発する。

(3) については、山体変形の検出技術は(2)と共通部分も多いが、山体変形の原因となる増減圧源については先験的情報も乏しいため、格子点状にモーメントソースを配置し、GNSS 観測データ等から地殻変動源モデルの時空間変化を精度良く推定する手法を開発する。なお、火山体変形を抽出する際には、現在もなお継続している東北地方太平洋沖地震に伴う余効地殻変動の影響を取り除く必要があるため、海陸測地観測による余効変動に関する研究課題と連携して計画を実行する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度～30 年度) の成果の概要：

平成 30 年度の成果の概要

平成 30 年度は主として2つの研究項目を実施した。1 点目が平成 28 年度、29 年度と開発を続けてきた GNSS 搬送波位相データから断層すべりを直接推定する手法の高度化であり、具体的には海溝型地震に対して同手法を適用し、その性能評価を行った。2 点目が平成 29 年度より開発を開始したリアルタイム GNSS データによって推定される震源断層即時推定における不確定性の定量的評価の高度化であり、具体的には同手法のすべり分布推定への拡張を行った。以下にその詳細を示す。

(1)GNSS 搬送波位相データから断層すべりを直接推定する手法による海溝型巨大地震の地震時すべり分布推定

平成 28、29 年度に実施した GNSS 搬送波位相データから断層すべりを直接推定する手法 (Phase To Slip、以下 PTS と表記) の成果を受けて、同手法を用いて海溝型巨大地震の地震時すべり分布推定を試みた。

2011 年 3 月 11 日の 14 時 46 分に発生した東北地方太平洋沖地震では非常に活発な余震活動が見られ、本震発生から 1 時間のあいだに M7 級の大きな余震が 3 つ相次いで発生した。本年度はこのうち、本震から約 30 分後の 15 時 15 分に茨城県沖で発生した Mw7.8 の地震 (以降、茨城沖地震) に対して PTS を適用した。解析では震央から半径 100km にある、40 点の GEONET 点で記録された搬送波データを使用した。解析においては、GNSS 衛星の軌道暦として International GNSS Service が提供する精密暦 (最終暦) と、GNSS 衛星から直接送信される放送暦の両者を比較のために用いた。茨城沖地震は、プレート境界で発生した地震である。そのため、プレート境界面を仮定し、そこに矩形断層を配置することで、断層面とした。具体的にはプレート境界等深線に沿って、震央を中心に 288 枚の矩形断層を仮定した。

図1にPTSによって推定された茨城沖地震のすべり分布の結果を示す。地震時すべり量は地震発生時刻15分前から5分前の10分間の平均をその値とした。図1を見ると、精密暦・放送暦の場合ではほぼ同様の結果となった。また、全体的に放送暦の場合の方がわずかに大きいすべりが推定された。両者によるすべり量の差異は、断層面全体の平均で5cmとなった。最大のすべりは、震央からおよそ40km海溝軸寄りの位置で推定され、1.9~2.0mとなった。平均すべりは0.6~0.7mで、Mw7.8相当である。すべりの方向は大部分の断層面ではほぼ純粋な逆断層性すべりを示している。これら得られた結果は、例えば強震データから推定されたすべり分布(Honda et al., 2013)ともおおむね調和的な結果を示しており、PTSが海溝型巨大地震に対しても有効であることが明らかになった。また、IGS精密暦と放送暦の両者がよく一致する結果を示したことは、外部情報に依拠しない地震時すべり分布推定が可能であることをあらためて示唆する結果と考えることができる。一方で、PTSで推定されたすべり時系列は、地震に伴うステップ状の断層すべりは明瞭にとらえているものの、それ以外の時間帯域における安定性は低い。また計算に要する時間もまだ短縮の必要があり、今後も継続した技術開発が必要と考えられる。

(2) リアルタイムGNSSによって推定される地震時すべり分布の不確実性定量評価

平成29年度に引き続き、リアルタイムGNSSデータによって推定される震源断層即時推定における不確実性を定量的に評価することを目標として、マルコフ連鎖モンテカルロ法(Markov Chain Monte Carlo methods: 以下、MCMC)を用いた震源断層推定の不確実性定量評価の高度化を進めた。具体的にはより複雑な断層破壊を表現するために、プレート境界面におけるすべり分布推定の誤差定量評価を試みた。すべり分布を推定するためには、プレート境界面上を小断層に分割する必要があるが、多数の小断層上でのすべりをそのままMCMCによって推定しようとする、解の収束に膨大な時間を要し、リアルタイム用途には適さないことが明らかになった。そのため、解析を複数ステージに分割し、ステージが進行するに従ってすべり量が多い領域のみ徐々に小断層のサイズを小さくすることで、すべり量が少ない部分への計算コストを下げた四分木アルゴリズムを開発した。適用事例は2011年東北地方太平洋沖地震であり、地震後600秒後時点のキネマティックPPP解析の結果をデータとして用いた。ステージは全部で4ステージに分割し、1、2ステージでは断層面は8枚と31枚に設定し、その後のステージ3および4では、直前のステージ2もしくは4で、モーメント解放量が全体の上位80%を占める小断層のみを細分化した。これによって、MCMCによるすべり量推定を大幅に効率化することに成功し、観測点267点、サンプル数が 3.1×10^6 の場合で900秒程度で計算を終えることができるようになった。各ステージ毎の、各小断層ごとに得られる事後確率分布(PDF)の中央値をによるすべり分布を図2に示す。ステージが進むに従い、すべり量が細分化されていく様子が明瞭に分かる。今後はこのように得られた断層すべりの不確実性をどのように活用していくかの検討が必要である。

平成26~30年度の成果の概要

本研究課題では、(1)プレート境界およびその周辺で発生する巨大地震の規模およびその広がりを即時に把握し、それに基づく津波の高精度予測のための技術開発、(2)数日以下の時定数を持つゆっくりとしたプレート境界上の滑り現象をGNSSデータから自動検知するための解析技術の高度化及び地殻変動自動検知のためのアルゴリズム開発、(3)火山活動の活発化に伴う地殻変動を検出し変動源の推定をリアルタイムで自動的に行う解析システムの開発の3点を目指して、研究を推進してきた。以下に各項目における5年間の成果の概要を示す。

(1) 地震規模即時推定のための技術開発

地震規模を即時的に推定するための技術開発として、GNSS搬送波位相データから断層すべりを直接推定する手法を用いた地震時すべり推定の高度化を行い、2016年熊本地震(Tanaka et al., *GRL*, 2019)や2011年東北沖地震の最大余震である茨城沖地震等で地震時すべり分布を推定できることを示した。また、リアルタイムに推定される断層すべりの不確実性を定量評価するための手法開発を行い、一枚矩形断層におけるMCMCを用いたアルゴリズムの開発を行った(大野・太田, *測地学会誌*, 2018)。また同手法のすべり分布への拡張を、リアルタイム用途を念頭に行った。さらに国土地理院と共同で開発しているリアルタイム地殻変動監視システム(REGARD)の高度化に貢献した(例えば、Kawamoto

et al., *EPS*, 2016; *JGR*, 2017)。上で述べた MCMC を用いた一枚矩形断層推定のアルゴリズムは、改良を加えた形で国土地理院に 2019 年 2 月段階で技術移転され、今後活用が期待される段階にある。さらに REGARD 等の結果を津波浸水の推定に活用するための技術開発を進め、それらの成果は東北大学災害科学国際研究所を中心として開発が進められた津波浸水被害推計システムとして、内閣府の総合防災情報システムの機能の 1 つに実装された (例えば、Ohta et al., *JDR*, 2018; Musa et al. *J Supercomput.*, 2018)。

(2) 数日以下の時定数を持つゆっくりとしたプレート境界上の滑り現象を GNSS データから自動検知するための技術開発

数日以下の時定数を持つゆっくりとしたプレート境界面上でのすべり現象を把握することを目指したキネマティック GNSS 解析の高度化を行った (例えば、Hirata and Ohta, *EPS*, 2016)。さらにそれらを実地検証するための GNSS アンテナ精密可動台を開発し、キネマティック GNSS 解析の精度を定量評価するためのテストベッドを獲得した (太田, *測地学会誌*, 2016)。

(3) 火山活動の活発化に伴う地殻変動を検出および変動源の推定のための技術開発

目標とする火山活動の変化に伴って観測される山体変形の準実時間での把握のために、GNSS 解析時における各 GPS 衛星および GPS 観測点におけるノイズレベルを調査した (Ohta and Iguchi, *EPS*, 2015)。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) : 大野圭太郎, 太田雄策, 2018, MCMC を用いたリアルタイム GNSS データによる単一矩形断層推定の不確実性定量評価の試み - 2011 年東北地方太平洋沖地震への適用例 -, *測地学会誌*, **64**, 39-50, doi: 10.11366/sokuchi.64.39.

Kawamoto S., N. Takamatsu, S. Abe, K. Miyagawa, Y. Ohta, M. Todoroki, and T. Nishimura, Real-time GNSS analysis system REGARD: an overview and recent results, 2018, *J. Disaster Res.*, **13**, No. 3, 440-452, doi:10.20965/jdr.2018.p0440.

Musa, A., O. Watanabe, H. Matsuoka, H. Hokari, T. Inoue, Y. Murashima, Y. Ohta, R. Hino, S. Koshimura, and H. Kobayashi, 2018, Real-time tsunami inundation forecast system for tsunami disaster prevention and mitigation, *J. Supercomput.*, **74**, 3093-3113, doi:10.1007/s11227-018-2363-0.

Ohta Y., T. Inoue, S. Koshimura, S. Kawamoto, and R. Hino, 2018, Role of real-time GNSS in near-field tsunami forecasting, *J. Disaster Res.*, **13**, No. 3, 453-459, doi:10.20965/jdr.2018.p0453.

Tanaka Y., Y. Ohta, and S. Miyazaki, Real-time Coseismic Slip Estimation via the GNSS Carrier-Phase to Fault Slip Approach: A Case Study of the 2016 Kumamoto Earthquake, 2019, *Geophysical Research Letters*, **46**, doi:10.1029/2018GL080741.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

研究課題名 : 「海陸測地データを活用したプレート境界面すべり即時把握能力の向上とそれにもとづく津波即時推定手法の高度化」

様々な時間帯域 (年、月、日、分) での複合観測データにもとづくリアルタイムプレート間カップリングモニタシステムの開発を目指した技術開発を継続する。具体的には求めたい断層すべり現象と GNSS に付随する他の道パラメータ間の分離精度の向上のための技術開発を行う。さらに不確実性を考慮したリアルタイム GNSS による津波即時予測技術の高度化を目指した技術開発を継続し、その技術の現業機関への技術移転を継続する。さらに得られた不確実性をどのように災害情報に結びつけるかについて検討を開始する。海底地殻上下変動を正確に把握するためのドリフト特性を海底のその場で推定する観測機材の開発に必要な特性の整理を開始する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

太田雄策、三浦 哲、日野亮太

他機関との共同研究の有無 : 有

北海道大学：高橋浩晃
気象研究所：対馬弘晃

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東北大学大学院理学研究科
電話：022-225-1950
e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp
URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：太田 雄策
所属：東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター

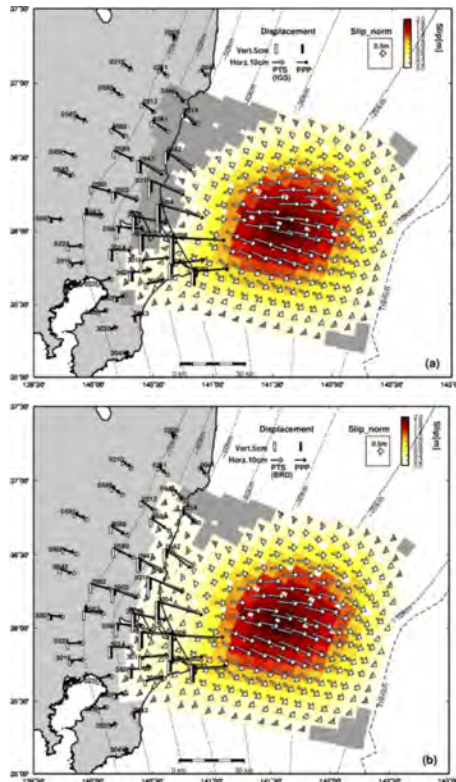


図 1

PTS で推定されたすべり時系列をもとに描画した、茨城沖地震のすべり分布。(a)が精密暦、(b)が放送暦を用いた場合の結果で、各サブフォルトのすべり量とすべりの方向を、カラスケールおよびベクトルで表示している。黒色の長方形で囲ったサブフォルトは、最大のすべりが推定されたサブフォルトである。また、観測点の矢印と棒は地表変位の水平成分と上下成分で、白色が PTS で推定されたすべりから計算される変位量。黒色は、比較用に PPP 時系列から求めた変位量。赤い星は震央を示す。また、すべりの S/N 比が 2 成分の両方で 1 を下回ったサブフォルトは、灰色でマスクしている。

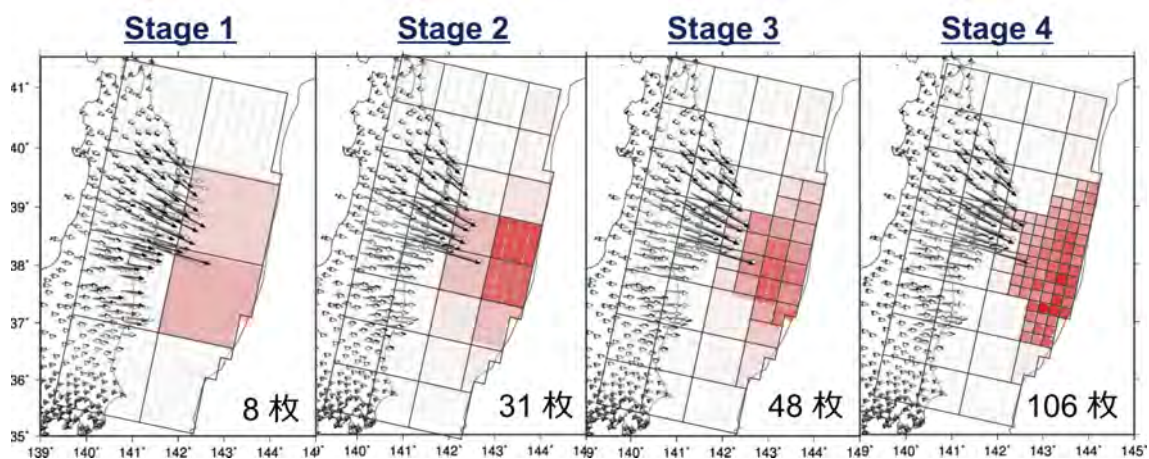


図 2

四分木アルゴリズムで推定された 2011 年東北地方太平洋沖地震の地震時すべり分布．各ステージ毎のに徐々に断層区分が細分化されていることが分かる．

(1) 実施機関名：

東北大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

海溝軸近傍で観測可能な海底地殻変動観測技術の開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

大きな津波を伴う海溝型の低頻度超巨大地震の発生過程において、海溝軸近傍の固着状態が非常に重要な役割を果たしていることが明らかにされつつある。東北地方太平洋沖地震後に整備された大学と海上保安庁の海底 GPS による地殻変動観測点網は、この事実を重視し、従来の観測点よりも海溝に近い大深度海域に重点的に展開されている。しかし、特に日本海溝における海溝軸直上付近での観測は、水深の倍程度の長い距離の測距の技術的困難さや、観測点を構成する海底局間の距離が、もはや剛体とは見なせない大きさになる原理的な限界から、未着手のまま残されている。これに対し海底間音響測距観測は、海底間同士の音響測距であるため距離的にも音響ノイズ的にも有利であり、また、海底の歪そのものを計るため、剛体的振る舞いが保障されない場所での観測に適することから、実現の可能性が高いと判断できる。一方、海底圧力観測では、海溝軸直近での観測を開始したものの、超深海対応の圧力センサーの大きなドリフトの低減、あるいは解析による除去などの課題が残る。本研究課題では、超深海用に開発された海底間音響測距装置と海底圧力計での実海域での観測を繰り返して、機器と解析方法の改良に関する知見を蓄積し、実用技術として確立することにより、低頻度超巨大地震の発生メカニズムの解明や想定される津波の規模の推定に役立つ、海溝軸近傍の固着状態のモニタリング観測実現に資することを目的とする。

(7) 本課題の5か年計画の概要 :

上記の超深海型の圧力計および海底間音響測距装置には、試験観測の結果をフィードバックさせながら機器と解析方法の改良を重ねていく必要がある。これらをおよそ1年サイクルで繰り返していくことにより、超深海での海底地殻変動観測技術を確認する。別予算で措置した超深海型の海底圧力計、海底間音響測距装置をプロトタイプとして使用し、各年度の機器の改良も別予算で実施する。その試験観測時に必要な消耗品としての電池の一部を本研究課題の予算でまかない、全体として年1回の観測機会を確保し、技術確立までの過程を強化する。平成26 - 27年度は、観測機器の基本性能の確認および改良部分の洗い出しを行う。具体的には、超深海型の圧力計センサーのドリフトの性質の把握を行い、海底間音響測距装置に関しては測距限界距離および温度計測による長距離の音速補正の知見を得る。平成28 - 29年度は、過年度で得た知見をもとに必要な装置の同志の設置配置を変え、圧力計では海洋の影響を取り除いた相対上下変位検出の精度評価、海底間音響測距では精度を確保できる距離で、かつ海溝をまたぐ位置へ、潜航艇の利用も想定しつつ設置し、データを得る。平成30年度には、それまでのデータをもとに最終的な改良、設置方法を提案し、実測により技術の確立を実証する。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要 :

H30年度は、回収済みの日本海溝宮城沖での海底間音響測距のデータの再解析を進めた他、新たに福島沖に設置した機器の回収を行い、通常の direct path ranging (DPR) 基線の解析に加え、音響パスを確実に通すために新たに開発した中継機(インターロゲーター)を用いた indirect path ranging (IPR) のデータについても、データ取得の状況など有用性を精査した。

図1に福島沖の日本海溝をまたぐ海域で DPR および IPR による海底間音響測距観測の機器設置箇所、および周辺の余効すべり分布の推定例を示す。該当海域は、東北沖地震後の余効すべりが海溝軸付近にまで及んでいるとされており、海溝軸を挟んでプレートの収束が見られる可能性がある。海底間測距機器は、2017年3月に DPR 方式で4局を、2017年10月に、DPR 方式で1局、および、それら5局を中継するための IPR 方式用の中層係留機器1局を追加設置した。2018年8月に6局すべてを回収し、データを精査した。その結果、DPR 方式では、5局の組み合わせ中で音響パスが確保できたのは、サイト1704-1705の基線のみであった。しかし、この基線は海溝軸をまたいでおり、海溝軸の収束状況を計測するという当初の最低限の目的は実現した。その結果、昨年度までの成果である宮城沖の日本海溝と同様に有意な収束は見られず、福島沖の余効すべりが完全に海溝軸まで達していないか、あるいは2017年以降すべりが止まったことを示す結果を得た。図に関しては結果公表前につき割愛する。一方、IPR 方式は、音響パスを確保する目的通り、中層係留で設置した中継機の周囲の5局に対するすべてのパスが通り、正常に測距が行われていたことを確認した。IPR 方式の解析手法はまだ確立されていないが、係留した中継機の動きがどの程度の精度でモニターできるかを解析中である。その後、中継機を介した各基線長変化を推定する予定である。図2aに、推定された中継機の水平方向の動き(測距時のみ)を示す。索長1500mの係留で、中継機は概ね50m四方の位置に留まっていたが、時折300mほどエクスカージョンすることがあった。これは、底層流の流れが一時的に変化したためと思われる。図2bに、推定された中継機の深度変化を、圧力データと共に示す。係留索振り回りに伴い中継機の深度も最大100mほど上下したことがわかる。各局への音線がほぼ水平なため、深度の推定誤差はかなり大きくなると見込まれていたが、それでも圧力計との比較において、メートルオーダーでは推定できていることがわかった(図2c)。今後、基線長変化と中継機の位置を同時推定するアルゴリズムを完成させ、大深度における海底間音響測距のモデルケースとすると共に、福島沖海溝軸の最終的な変形について言及する予定である。

本課題の5年間の成果は以下に示す通り、当初の5か年計画の概要をほぼ実現できたと言える。圧力計に関しては、大深度用の機器開発を行い、毎年の実海域観測を通して、長期水密などの耐圧性能が確認された他、海洋モデルによる擾乱の除去、圧力校正によるドリフトの推定などの周辺技術も向上した。海底間音響測距に関しては、大深度用の機器を開発し、海底間測距独特の設置方法について、いくつかの改良を試みた。当初自在継手を介した、底層流に対して揺れ動く一脚式を採用したが、測距

中にも無視できない揺れが見られ、姿勢補正だけでは解析が完結しないことが判明したため、揺れ動かない三脚型に切り替えた。その結果、海溝軸をまたぐ 10km を超える測線でも、1 年の観測で 1-2cm/yr の精度で計測できることを実証した。さらに、海底間音響測距の弱点である音響パス確保の困難さを解決するために、各基線の中程に中層係留の中継機を用いる IPR 方式を導入し、目的通り機能することを確認できた。科学的な成果としては、少なくとも宮城沖の日本海溝海溝軸では 2013 年以降、福島沖では 2017 年以降有意なプレート収束は見られず、上盤プレートの先端部分は、海洋プレートと一体となって動いていることが実測により明らかになったことで、プレート境界浅部の固着に関する情報を得られたことが挙げられる。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
Seafloor geodesy revealed partial creep of the North Anatolian Fault submerged in the Sea of Marmara, Yamamoto, R., M. Kido, Y. Ohta, N. Takahashi, Y. Yamamoto, A. Pinar, D. Kalafat, H. Ozener, and Y. Kaneda, Geophys. Res. Lett., in press, 2019.
Direct measurement of postseismic motion of incoming Pacific plate after the 2011 Tohoku Earthquake using acoustic ranging system, Yamamoto, R., R. Hino, M. Kido, Y. Ohta, and C. Honsho, EGU General Assembly 2018, Vienna, Austria Center Vienna, April, 2018.
係留式音響測距装置の開発と実装, 山本 龍典・日野 亮太・木戸 元之, 日本測地学会第 130 回講演会, 高知, 高知県立県民文化ホール, 2018 年 10 月.
海底間音響測距による東北地方太平洋沖地震の余効すべり検出の試み, 山本龍典・日野亮太・木戸元之・長田幸仁・本莊千枝・鈴木秀市, JpGU2018, 千葉, 幕張メッセ, 2018 年 5 月.
深海調査による日本海溝プレート境界浅部の特徴, 日野亮太・小平秀一・金松敏也・篠原雅直・伊藤喜宏, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 郡山市, ビッグパレットふくしま, 2018 年 10 月.

- (10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

現計画では、海溝軸付近の大深度での海底測地観測技術の開発、および実海域への適用について研究を行ってきた。その結果、7000m の大深度での圧力計測、海底間音響測距が可能な技術を手に入れた。次期計画では、その技術を活かし、大深度海域を含む、根室沖から東北沖にかけての海溝軸付近で、従来水平方向の変位の検出に特化していた、定点観測方式による GPS-Acoustic 観測について、新たな海底局アレイの形状を導入することにより、上下変位の検出の可能性を実証する技術開発および、その応用として実観測を通した同海域での固着域の推定を行う。課題名は、「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」を予定しており、関連の深い次期研究計画の項目として、「1(5)ア:プレート境界地震と海洋プレート内部の地震」「5(3)イ:観測・解析技術の開発」、関連する総合研究の項目として「5(2)ウ:千島海溝沿いの巨大地震」が挙げられる。H31 年度は、新たに提案する海底局アレイのレイアウトに沿った配置で、次期計画の予算でバッテリーなどを整備した海底局を根室沖に設置し、初回の観測を実施するとともに、数値実験により、上下変位検出の誤差伝搬などを調べる。

- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

木戸元之・日野亮太・太田雄策・東龍介・本莊千枝・川田佳史(東北大学)
他機関との共同研究の有無:有
伊藤喜宏(京都大学)
JAMSTEC(飯沼卓史)
ミネソタ大学(和田育子)

- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名:東北大学大学院理学研究科

電話：022-225-1950

e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp

URL：http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：木戸元之

所属：東北大学 災害科学国際研究所

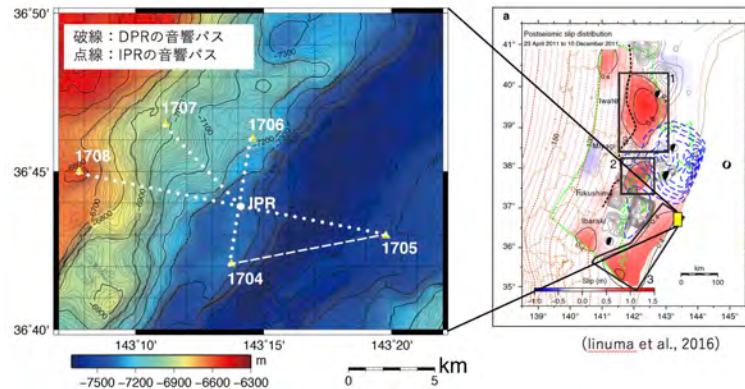


図 1

福島沖日本海溝軸での海底間音響測距観測の機器配置。中央の中継機 (IPR) の周囲に、5 台の機器を配置した。点線は中継機を介した IPR 測距が成立した測線、波線は海底同士の DPR が成立した測線を示す。右図は、Iinuma et al. (2016) による余効すべり分布の推定値。福島沖観測点は、余効すべりが見られると予想される。

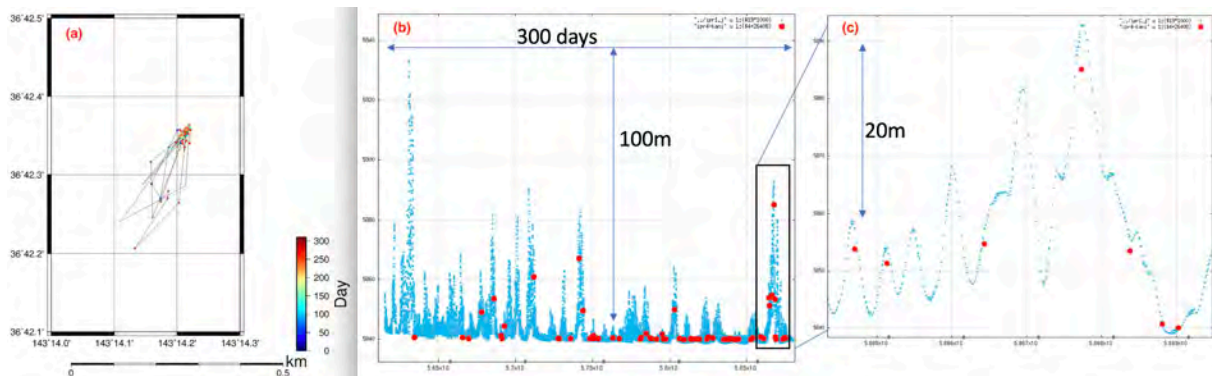


図 2

(a) IPR の中継機の 1 年弱の水平方向の動き (測距時)、点の色は、観測開始からの経過日数を表す。ほとんどの期間で 50m の範囲に留まっているが、稀に最大 300m 程度の漂流が見られる。(b) IPR の中継機の 1 年弱の上下方向の動き (赤点：測距時)、青点は、圧力計による推定深度。中継機の上下運動の音響走時による推定は圧力計による推定と少なくともメートルオーダーでは一致した。(c) は一部期間の拡大。

(1) 実施機関名：

東京大学理学系研究科

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地殻流体の連続化学観測にもとづいた地殻の状態評価システムの開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

首都直下地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究では、地下水に含まれる溶存イオンや溶存ガスの濃度・存在比・同位体比を連続的に分析するシステムの高度化と実装を行う。物理的・化学的な地殻の内部状態に関して情報を得るために、その変動パターンを説明する試みを行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年度：

関東・東海地域にある温泉や鉱泉のひとつに、試作中の同位体比測定装置を試験導入する。温泉分析表に基づく候補地の絞り込みを行ったのち、いくつかの温泉で実際に採水分析を実施し、実施地の選定を行う。測定装置の実装においては、測定そのものだけでなく付帯する制御技術・生成技術の高度化を目指し、実験室環境での動作テストを実施する。

平成 27 年度：

選定した観測地での採水分析を定期的に行う。また、測定装置の小型化や耐久性を向上させる。イオン分析装置やラドン測定装置などを含めた装置群の集積化を行い、選定した候補地へ導入してテスト分析を開始する。

平成 28、29 年度：

選定した観測地での採水分析を定期的に行う。集積化した装置の耐久性を確認し、野外における連続運転に関連して発生する問題点を解決する。観測データの変動成分について情報を蓄積すると共に、測地学的データや地震学的データとの関連について検討する。

平成 30 年度：

これまでの内容を継続・総合し、システムのさらなる改良を検討する。最終的には他の研究者や行政機関が導入運用できるようなシステムを提案する。得られた観測データや時間変動パターンはホームページ上で公開する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

地下水溶存ガスの観測を跡津川観測点で実施した。観測点は跡津川断層の直上に設置され、観測井は断層の下盤側の帯水層から地下水をくみ上げられるようになっている。観測井の井戸口からテフロンパイプを差し込み、下端をケーシングの外と直結し、チューブポンプで直接地下水をくみ上げている。毎分 1L で揚水すると、途中のパイプ内で溶存ガスが遊離するので、これを地上部の気液分離装置と電子除湿機によって乾燥させ、四重極質量分析計で精密なガス組成を決めた。

Giggenbach が 1993 年の実験によれば、地熱地帯から放出されるガスの He、N₂、Ar の比の解析から、測定したガスが安山岩質マグマを起源としているか玄武岩質マグマを起源としているかを分けることが可能である。そこで、跡津川観測点で測定されたガスについて、Giggenbach ダイアグラムを作ってみると、大気起源のガスと玄武岩質マグマまたは地殻起源のガスとの混合比が時間とともに変化していることが見いだされた。地下深部からのガスフラックスに大きな変動がないと考えれば、この変化は断層のようなガスのチャンネルの開閉に伴っておきると考えることが可能である。一方、もしチャンネルの開閉の度合いが変化しないとしたら、フラックスの変化を表すことになる。いずれにしても、地下深部または地殻の状態が変化することをガスという物質によって観測が可能になることを示唆している。

このような測定装置と分析方法を、地上部に地下深部ガスが上昇しており、地下深部では低周波地震などの現象が頻発している地域で行うことによって、Giggenbach ダイアグラム上の点の移動が、地下深部の状態変化によるものか地殻内のチャンネル変化によるものかを分離できる可能性がある。そこで、平成 30 年度より本宮観測点に装置を設置し観測を開始した。使用する観測井は 1000m まで掘削されているが、地下水は 500m の位置から、大気と混ざらない空圧揚水ポンプであるベネットポンプを使って、毎分 1L でくみ上げている。気液分離機構は跡津川観測点と同じものを使用し測定を継続している。このように、電子冷却器を使った溶存ガス乾燥機構によって、安定して溶存ガス組成を測定できるようになった。その結果、跡津川観測点では、He・N₂・Ar をつけた Giggenbach ダイアグラム上の点が、時間とともに変化し、大気と地下深部ガスの混合比が変動することを見いだした。この変動要因が、フラックスの変化によるものかチャンネル開閉によるものかを判別するために、本宮観測点での観測を開始した。この観測結果は、今後順次ホームページ上で公開していく。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画の課題「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」では、本宮観測点で開始した計測を継続し、低周波地震微動の発生と Giggenbach ダイアグラム上の変化、さらに、地上部の GNSS 観測に基づいた地殻変動のデータ、などと照らし合わせる。これにより Giggenbach ダイアグラム上の変動の原因を特定することを通して、断層破碎帯を通過した深部流体を含む温泉水などの溶存成分をモニタリングし、地震や火山噴火が発生する場や地震・火山噴火現象の物理・化学過程を解明することに貢献したい。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

担当者 : 東京大学大学院理学系研究科 角森史昭・田中秀実、参加人数 : 2 人
他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学大学院理学系研究科

電話：03-5841-4624

e-mail：fumi@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp

URL：

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名：角森史昭

所属：東京大学大学院理学系研究科

(1) 実施機関名：

東京大学理学系研究科

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震発生場の階層性を考慮した地震活動予測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

イ. 海洋プレート内部の地震

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

4. 研究を推進するための体制の整備

(4) 研究者, 技術者, 防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震発生場には様々な長さスケールの不均質構造が含まれている。その理解は地震の予測可能性を判断するうえで重要だが、現実的なプレート境界において、階層性をどのように定量化するか自明ではない。地震の階層性と関係ある現象として、プレート境界で発生する繰り返し地震や「ゆっくり地震」(深部微動、スロースリップ)を観測することが可能である。世界の様々な地域で、普通の地震やゆっくり地震活動の特徴を抽出し、その他の地球科学的情報を総合することで、階層性の地域性を抽出し、それらをもとに階層性を定量化する。さらに定量化された階層性を確率予測に導入するためのモデルを検討する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

巨大地震破壊プロセス、定常地震活動、繰り返し地震活動、ゆっくり地震活動の解析結果をもとに、地震発生地域ごとの地震の階層性の統計的性質を明らかにする。個々の地震の性質（地震エネルギー、継続時間など）のスケール法則と、対象領域で見られる地震活動パラメータ（Gutenberg-Richter 則の b 値、ETAS パラメータ）ゆっくり地震の時間空間的統計性質、さらには海底地形や重力データの分析によって、まずは階層性を定性的に把握する。既存の地震破壊プロセスの解析結果、地震活動カタログや過去に推定したゆっくり地震のカタログを最大限活用する。H27 年度より 3 年間、博士研究員を採用し、これらの作業を主に担当させる。

上記分析によって得られた定性的な性質を地震発生場の階層性として定量化する方法を開発する。まずは日本周辺の沈み込み帯を対象とする。すでに東北沖ではすべり分布、過去の地震活動や b 値の解析結果に基づいて不均質パッチモデルが提案されている（Ide and Aochi, 2013）。同様の手法で北海道沖、南海沈み込み帯などで不均質パッチモデルを構築し、これらのモデルの不均質性を既存の確率論的地震活動予測モデル（ETAS 等）に取り入れる方法を開発する。その際、ゆっくり地震の発生による応力変化という要素を予測モデルに取り入れることを目指す。この開発は H27 年度からはじめ研究期間内にプロトタイプ完成を目指す。プロトタイプが完成した場合、世界のいくつかの地域を対象に確率論的地震活動予測の試験を実施する。

本研究計画では、将来の地震、火山の研究者養成を重視している。階層性抽出のために用いる基礎情報、地震破壊プロセスの解析や震源決定は地震学における基本的問題であり、研究者を目指す学生の演習として良いテーマである。研究代表者は新規採用する特任研究員とともに、大学院生、学部生への演習的指導を行う。

年度ごとの作業内容：

H26 階層性の定性的把握、既存カタログ等の情報収集

H27 階層性の定性的把握、確率的地震活動予測モデル開発

H28 階層性の定性的把握、確率的地震活動予測モデル開発

H29 階層性の定量的把握、確率的地震活動予測モデル開発もしくは試験

H30 階層性の定量的把握、確率的地震活動予測モデル開発もしくは試験、研究総括

(8) 平成 30 年度及び計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要：

平成 30 年度は東北沖の繰り返し地震グループの解析結果をまとめて論文を出版した。昨年度に予備的な解析を終えた釧路沖、那珂沖の M5 程度の繰り返し地震グループについて詳細な震源すべり分布をまとめ、EPS 誌に公表した。これらの地域では M5, M4, M3 程度の階層的な構造の存在が示唆された。この研究に異なる規模の地震でも地震の始まりが異なる例を発見した。これは階層性を強く示唆する事象なので、この話題を別の論文として Nature Communications 誌で公表した。茨城沖の群発地震活動の統計的モデルを用いた分析を進め、論文として JGR 誌にて公表した。茨城沖では群発地震活動が M7 級の地震になる場合（前震的活動）とならない場合がある。前震的な活動は、それ以外の群発地震活動より活動度が高い傾向にあり、将来予測能力を持つことが示唆される。これらのデータ解析的研究と並行して、不均質摩擦すべりモデルによる前震発生プロセスのモデル化を行った。この研究も PEPS 誌に論文として公表し、米国地球物理学会では招待講演を行った。また階層性パッチの連鎖プロセスを定量化するための理論計算研究も進め、階層性と Gutenberg-Richter 則の b 値の関係を明らかにした。これらは次期研究計画で引き続きまとめる予定である。

本計画期間 5 カ年には、概ね当初の予定通りに研究が進んだ。データ解析研究のうち、巨大地震を含む地震活動の全世界的な傾向についての研究として、Gutenberg-Richter 則の b 値に関わる論文を 3 本公表した。一つは b 値のテクトニクス依存性の研究で、 b 値とプレート年代、海溝深度の関係から、プレート境界における偏差応力は沈み込むプレートにかかる浮力と関係していることを明らかにした研究である。これは 2014 年に Nature Geoscience 誌に公表され、すでに 40 回近く引用されている。またその b 値はプレートが大きく屈曲していると大きくなることを明らかにし、沈み込み前後のプレート内部への水の輸送過程との関係を指摘した。この研究は、2015 年に GRL 誌に掲載され、やはり 10 回

程度引用されている。b 値が階層的破壊の潮汐応力による擾乱によって変化するという説をデータ解析結果とともに示した研究も行った。論文は 2016 年に Nature Geoscience 誌に掲載されたが、これは地震の予測可能性とも関係するだけに国内外で多くの注目を集めた。実際にプレート境界に存在する階層性の分析研究は上記平成 30 年の 2 論文によって大きく進んだ。数値モデル研究は Ide and Aochi (2005) モデルに沿って行っているが、一連の研究をまとめたレビューを 2014 年に JDR 誌に執筆し、研究の位置づけの再確認を行っている。このモデルの精密化は平成 30 年にもさらに進めており、次期計画でも重要な研究対象となる。並行して階層性をあえて入れず、より単純なバイナリ不均質性から様々な地震活動を明らかにしようという研究も進めた。必ずしも階層性のない場で発生する低速の地震現象と高速の地震破壊との関連を明らかにするためである。このバイナリモデルは基本的なモデル設定と高速低速地震の切り替わりについて 2017 年に JGR 誌に公表したのに続いて、前震活動の説明として上記平成 30 年の PEPS 論文へとつながっている。予測可能性に関しては上記群発地震の研究や b 値の変化の研究が、予測可能性を向上させる可能性までは指摘できたが、定量化はまだできていない。これは次期計画の重要な課題である。本計画では教育活動も重視した。紹介した研究には大学院生が中心となったものも多く、この期間に、博士論文に関連したものが 2 篇、修士論文に関連したものが 2 篇、それ以外に多くの学生が関わった。また東京大学理学部地球惑星物理学科の観測実習では震源決定手法の教育、特別演習では震源すべりインバージョンの練習など、直接研究成果に直結しない教育活動も行った。指導した学生たちは様々な分野でその経験を生かしている。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Nishikawa, T., & Ide, S. (2018). Recurring slow slip events and earthquake nucleation in the source region of the M 7 Ibaraki Oki earthquakes revealed by earthquake swarm and foreshock activity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(9), 7950-7968.

Okuda, T., & Ide, S. (2018). Streak and hierarchical structures of the Tohoku-Hokkaido subduction zone plate boundary. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 132.

Okuda, T., & Ide, S. (2018). Hierarchical rupture growth evidenced by the initial seismic waveforms. *Nature communications*, 9(1), 3714.

Yabe, S., & Ide, S. (2018). Variations in precursory slip behavior resulting from frictional heterogeneity. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(1), 43.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画では「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」という課題を実施する予定である。最も関連の深い次期研究計画の項目は、1. 地震・火山現象の解明のための研究、(3) 地震発生課程の解明とモデル化、ア. 地震発生機構の解明となる。本課題では小規模から超巨大地震まで、個々の破壊プロセスが含む階層性と、複雑系の相互作用として出現する地震活動の階層性をデータ分析によって定量化し、数値モデリングで予測可能性を検討する。平成 31 年度は日本周辺における高精度階層性イメージング、階層性モデリング手法開発、階層性抽出のための新技術開発、地域研究のための予備解析などを行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

井出哲 (東京大学大学院理学系研究科)

他機関との共同研究の有無 : 有

フランス BRGM 青地秀雄

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

電話 : 03-5841-4281

e-mail :

URL : <http://www.eps.s.u-tokyo.ac.jp/index.html>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 井出哲

所属 : 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

(1) 実施機関名：

東京大学理学系研究科

(2) 研究課題(または観測項目)名：

噴火推移モニタリングのための火山ガス観測装置の開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

イ. 熱水系の卓越する火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

火山噴火予測においては、噴火が開始したのち、噴火活動がどのように推移していくかを予測することも非常に重要な課題であり、活動の活発化や静穏化を見極めることは、防災・減災計画を検討して行くうえで不可欠である。火山ガス放出率、特に二酸化硫黄放出率は、地下にあるマグマの量や挙動を反映して変動するパラメータであり、その増減の推移を監視し、他の観測データと合わせて評価することは噴火活動の推移の理解に多大な貢献が可能である。一方、噴火に対応して、二酸化硫黄放出率を観測できる観測者の数は限られており、噴火開始後に、高い頻度で噴火推移をモニタリングし続けることができないのが現状である。このような状態を打開するため、噴火発生に対応して、迅速に観測態勢を立ち上げられるようなモニタリングシステムの開発や火山ガス測定の経験がなくてもガス放出率測定を容易にできるような観測装置の開発をすることで、噴火後の火山活動推移の火山ガスモニタリングを可能にすることが目標である。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本研究計画では、低価格 CCD カメラを使用した二酸化硫黄可視化モニタリング装置、ポータブルなガス放出率自動測定装置および簡易型トラバース測定装置の開発、そして、これらの装置のフィール

ドテストおよび噴火可能性のある火山周辺での事前調査が主な内容となる。各年度の概要は以下のとおりである。

平成26年度：二酸化硫黄可視化モニタリング装置と簡易型トラバース測定装置の設計・開発をおこない試作機のテストを実施する。

平成27年度：上記2装置の開発を継続する。浅間山火山、桜島火山、阿蘇火山などでテスト観測を実施する。後半からは、ポータブルガス放出率自動測定装置の設計・開発に入る。

平成28年度、平成29年度：ポータブルガス放出率自動測定装置の開発を継続するとともに、これまで開発した装置のフィールドテストを実施しつつ、装置の問題点などを修正して行く。1-2ヶ月単位で、複数の火山で試験測定を行うとともに、噴火が生じた際の装置設置場所などの事前調査をいくつかの火山で実施する。

平成30年度：平成28、29年度の内容を継続するとともに、一般ユーザーでも設置から稼働まで行えるように最終的な改良やマニュアルを作成する。

なお、5か年中に噴火が発生した場合、その時点でできるだけの対応をする。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要：

平成30年度の成果の概要

本研究課題で設計・開発した簡易型トラバース測定装置は、2014年11月末以降、屋久島 口永良部島間のフェリーに搭載され、口永良部島火山の二酸化硫黄放出率モニタリングで使用されてきた。平成30年度は、これまでの観測体制の維持とさらなる改良を行った。昨年度、測定装置からクラウドサーバーにアップロードされた観測スペクトルを自動解析し、その結果を福岡管区气象台に自動的に送信する形にプログラムを変更したが、今年度は、自動解析とデータ転送の際の問題点の改修を行った。現在は、フェリーが屋久島に帰港してから30分以内に、解析結果が福岡管区气象台に送られるようになっている。装置に関しては、制御に使用してきた制御用小型PC等の故障があったため、交換を含め行った。この際、電源部分に新たにタイマースイッチを実装した。これまで装置のON/OFFは出港後と帰港後に船員の方に行ってもらっていたが、今回のタイマーの実装により、観測が完全に自動化された。

口永良部島は2018年10月21日に、3年数か月ぶりに小規模な噴火を起こした。二酸化硫黄放出率は、今年度初めごろは100-400 ton/dayで推移していたが、2018年8月以降上昇を始め時折1000 ton/dayを超える値が見られるようになった(図1)。地震回数も増加する中、10月21日に噴火したが、簡易トラバース測定装置を用いた繰返し観測により、噴火に先駆するガス放出の変化をとらえたことは大きな成果である。噴火に先立つ2か月以上前のマグマの上昇または火道の変化をとらえたものと推察される。その後の口永良部島の活動は、噴火後にガス放出が比較的早く減少し、低い値が続いた後に再噴火するというサイクルをくりかえしており、こうした状況も簡易トラバース装置でとらえられている。

二酸化硫黄可視化モニタリング装置に関しては、昨年度装置構成を一新したバージョンの装置を、防雨対策をしたハウジングに入れて、十勝岳でフィールドテストを実施した。2018年7月末に、北海道大学の十勝岳望岳台の局舎の上に、62-2火口付近を撮像する形で設置した。稼働期間は11月始めまでの約3か月間であるが、途中1か月強、可視化装置の制御に使用していたPCのOS自動更新によるトラブルのため、ストップしていた。トラブルがあったものの、観測装置としては、フィールドでの連続測定が可能であることを示すことができた。一方、十勝岳の二酸化硫黄の可視化としては、定量的な可視化には至らなかった。これは、十勝岳噴煙が、紫外光で不透明な状況が続き、特に噴煙中心付近では背後からの紫外光がほとんど透過しないため、二酸化硫黄の紫外光の吸収を捉えることができなかったためである。一般的に、二酸化硫黄可視化装置の定量的なための較正は、二酸化硫黄を封入した石英ガラスセルの使用や紫外分光計による並行測定することで実施する。より簡単に装置の較正を行うために、ガラスフィルターを用いた手法の検討を行い評価した。

5か年の成果の概要

本研究課題は、噴火発生に対応して、迅速に火山ガス放出の観測態勢を立ち上げられるようなモニタ

リングシステムの開発や火山ガス測定の経験がなくてもガス放出率測定を容易にできるような観測装置の開発をすることで、噴火後の火山活動推移の火山ガスモニタリングを可能にすることが目標である。この中で、低価格 CCD カメラを使用した二酸化硫黄可視化モニタリング装置、ポータブルなガス放出率自動測定装置および簡易型トラバース測定装置の開発を行ってきたが、5 か年間の成果としては、一番成果の上が簡易型トラバース装置について報告する。

この簡易型トラバース装置は、火山ガスが専門の研究者でなくても、二酸化硫黄放出率の測定が簡単にできるようにすることを目的として開発してきた装置である。2014 年 8 月に口永良部島が噴火し、その後に二酸化硫黄放出率が増加したことを受けて、フェリーによる繰返し測定を考案し、試作中だった簡易型トラバース装置をより自動化する形で開発・改良を進めてきた。京都大学防災研究所、屋久島町、そしてフェリー太陽の協力を受けて、口永良部島の二酸化硫黄放出率の繰返し測定を確立することができた。開発した簡易型トラバース装置によるフェリー太陽での繰返し測定を開始してからすでに 4 年以上経過しており、この間、口永良部島の 2015 年 5 月 29 日の噴火前、そして噴火後の二酸化硫黄放出率推移、2018 年 10 月 21 日の噴火前の放出率の上昇等、火山活動を理解するうえで貴重なデータを供給してきた。また、フェリー太陽で繰返し測定している二酸化硫黄放出率は、気象庁の火山活動解説資料に採用されており、口永良部島の火山活動の監視に役立っている点が、本研究課題の最大の成果である。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
森 俊哉, 2018, 紫外線 CCD カメラを用いた火山ガス噴煙中の二酸化硫黄の可視化, 可視化情報, 38, 2-6.

- (10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

本研究課題で開発した簡易型トラバース測定装置は、口永良部島という、離島火山で、導入したことにより、飛躍的に火山ガス放出率の情報が得られるようになった。一方、その他の離島火山や遠隔地の火山では、火山ガス放出の観測が十分に行われておらず、火山活動の評価に十分なレベルの火山ガス情報が得られていないのが現状である。次期計画では「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」という研究課題で、薩摩硫黄島、諏訪瀬島、十勝岳等の火山に着目し、本研究課題で開発した簡易型トラバース測定装置をベースにさらなる高度化を行い、火山ガスモニタリングの観測基盤を確立していく。また、口永良部島での測定に関しても高度化しつつ継続する。

- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東京大学大学院理学系研究科 森 俊哉、 角森史昭
他機関との共同研究の有無 : 無

- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設
電話 : 03-5841-4649
e-mail : mori@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp
URL : <http://www.eqchem.s.u-tokyo.ac.jp>

- (13) この研究課題(または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 森 俊哉
所属 : 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設

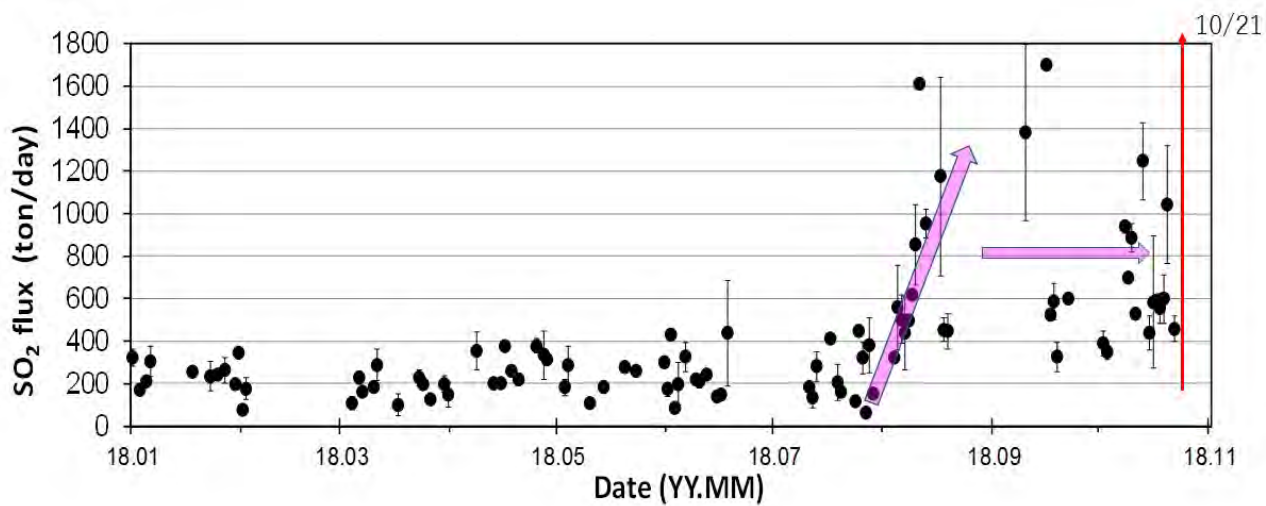


図1. 簡易型トラバース測定装置で測定した2018年1月10月の二酸化硫黄放出率の推移

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震・火山災害の関連史資料に基づく低頻度大規模災害の調査

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ア. 史料の収集とデータベース化

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

イ. 考古データの収集・集成と分析

ウ. 地質データ等の収集と整理

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料，考古データ，地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究の目的は、文献史料データ・考古データ・地質データなどを用いて、過去に発生した大規模地震・津波や火山噴火とそれによる災害の実態を分析し、近代的な調査・観測データとの比較・検討から低頻度大規模災害の実態を解明することである。

本研究では、北海道大学大学院理学研究院が中心となり、津波堆積物の報告書などを調査し、津波堆積物に関する内容について時系列順・地域別に収集・整理してデータベースを構築する。津波堆積物に関する地質データのうち、近代的な調査・観測データとの比較・検討が可能な事例については、評価方法を検討して調査・観測データとの統合を目指す。

文献史料データ及び考古データを全国的・通時代的に収集・整理する研究、並びに地域を限定して様々なデータを精査する研究は、それぞれ別件の研究課題において計画されている。そこで本研究では、それらの研究課題によって得られた地震・津波・火山噴火などに関する位置情報について緯度・経度へ変換し、地質（津波堆積物）データと文献史料データ・考古データとの統合的分析が可能なデータベース及び地理情報システムを構築する。

また、本研究では、文献史料データ及び考古データ・地質データを総合的に分析して、近代以前に発生した1703年の元禄地震や1707年の宝永富士山噴火などの大規模地震や火山噴火について多角的に分析する手法を確立する。その準備作業として、既刊地震史料集の史料本文について、確実な史料や良質な刊本に基づいて校訂（原史料・原本による本文の訂正）を行う。校訂作業を経た信頼性の高い史料を用いて、大規模な地震・津波・火山噴火で被害の生じた場所を特定し、個々の被害程度などを推定する。この史料本文の校訂作業に際しては東京大学史料編纂所の協力を得る。

更に、上記のような近代以前の地震・津波などに関する文献史料・考古・地質データを用いて、先史時代・歴史時代における地震の被害分布図・震度分布図、津波高分布図、津波浸水（到達）図、火山災害地図などを作成する。これに加えて、強震動予測や津波シミュレーションなどの手法を用いて、過去に発生した大規模地震・津波の実態を分析し、低頻度大規模地震に関する強震動・津波の発生予測などの検討に資することを目指す。

（7）本課題の5か年計画の概要：

[平成26年度]

既刊の津波堆積物の報告書などを調査し、津波堆積物に関する内容を収集・整理してデータベースを構築する。また、近代以前の大規模な地震・火山噴火災害関連史料について、信頼性の高い史料の原本調査と校訂作業を実施する。特に、関東地方での事例を対象とする。

[平成27年度]

津波堆積物の報告書などを調査してデータベースを構築し、近代以前の大規模な地震・火山噴火災害関連史料について、継続して校訂作業を実施する。また、本研究における地質データや校訂済み地震史料データ、別件の研究課題における考古データや文献史料データなどを用いて、先史時代・歴史時代に発生した大規模地震・津波・火山災害を統合的に分析可能なデータベース及び地理情報システムの試作版を構築する。これに基づいて、歴史時代に関東地方で発生した大規模地震・津波・火山噴火について実態の解明を試みる。

[平成28・29年度]

津波堆積物の報告書などを調査してデータベースを構築し、近代以前の大規模な地震・火山噴火災害関連史料について、継続して校訂作業を実施する。また、文献史料・考古・地質データの統合的な分析を可能とするデータベース及び地理情報システムの構築を行う。

[平成30年度]

津波堆積物の報告書などを調査してデータベースを構築し、近代以前の大規模な地震・火山噴火災害関連史料について、継続して校訂作業を実施する。また、文献史料・考古・地質データの統合的な分析を可能とするデータベース及び地理情報システムを構築して、先史時代・歴史時代に関東地方以外で発生した大規模地震・津波・火山災害の実態を解明する。

（8）平成30年度及び計画期間中（平成26年度～30年度）の成果の概要：

平成30年度の成果の概要

津波堆積物による古津波の調査および液状化痕跡による古地震の調査

地震の長期評価の説得力を高めるには、地震や津波が痕跡を残さない事例、さらに痕跡が形成された後に一部もしくは全部が消失してしまう事例についても調べ、その過程を理解する必要がある。

青森県の三沢海岸には2011年に形成された津波堆積物が残されている。遡上限界付近の薄く不連続な堆積物は消失してしまった所が多いが、粒径の変化を詳細に調べることで、遡上限界付近の特徴で

ある「粗粒で軽量の粒子が集積した堆積物」が識別可能な場合があることがわかった。これは、津波堆積物の粒径と比重を系統的に調べることで古津波についても遡上限界まで追跡しているかどうか評価可能であることを示す。

また、沿海州と北方領土で歴史時代と先史時代の津波堆積物の調査を進めている。平成30年度は国後島で約10日間の調査を行った。国後島の太平洋岸、古釜布～クラオイ川(約30kmの範囲)で、1994年北海道東方沖地震津波によると思われる津波堆積物が明瞭に残されていることを確認した。

さらに、1611年慶長三陸地震による津波の北海道南西部における被害と痕跡について考察した。この地震については、『松前家記』に「十六年辛亥十月東部海嘯民夷多ク死ス」とある。北海道太平洋岸における17世紀の津波堆積物の年代を統一手法で求めると、苫小牧～むかわの津波堆積物は1611年起源で説明でき、噴火湾や襟裳岬より東のものは明らかに後年と言えそうである。史料にある「東部」が松前より東部という解釈で良ければ、史料の記述と痕跡は矛盾しないことになる。

2018年9月に発生した胆振東部地震を受け、液状化の痕跡である噴砂の地質学的特徴を調査した。苫小牧市、厚真町、むかわ町の例では、噴砂丘、砂脈の構成物や構造には、割れ目の形状や液状化層の構成物(ここでは砂、泥、礫、様々なサイズの軽石)が影響していることがわかった。また、液状化の痕跡は古地震の情報源として使われるため、遺跡調査報告書の液状化痕跡の産状記載を確認した。札幌市で公表している234ヶ所の遺跡調査報告を調べた結果、そのうち54ヶ所で液状化の痕跡が記載されていることがわかった。今後、写真や図版をもとに噴砂、あるいは液状化の痕跡とみなした根拠も整理する予定である。

前近代の奈良盆地における被害地震と災害痕跡との対応

史料に記された被害地震の発生日月は明確であるが、被害の範囲やそれに基づく震度分布などは推定に頼らざるを得ない。一方で、考古遺跡にみられる災害痕跡の場所と被害程度は明らかであるが、それが生じた時期については資料の性質上一定の幅を有しており確定は難しい。そのため、史料に基づく前近代の被害地震と考古遺跡にある災害痕跡とを対応させるには、災害の発生時期についてある程度の範囲のなかで考える必要がある。そこで試みに、奈良盆地の考古遺跡で確認された地震に起因する災害痕跡と、史料から判明している被害地震との対応について幾つかの事例を検討した。

高市郡明日香村岡の酒船石遺跡では地滑りの痕跡が確認されており、その年代は7世紀後半と推定されている。その時期に奈良に大きな揺れをもたらした被害地震としては、史料から684年の南海トラフ沿いの巨大地震が考えられる。

葛城郡広陵町萱野の箸尾遺跡では噴砂の痕跡が確認されており、その年代は11世紀初めと推定されている。史料からはその時期に奈良に大きな被害をもたらした内陸地震は確認できないため、1096年の南海トラフ沿いの巨大地震が候補として挙げられる。

高市郡明日香村大字真弓小字カヅマヤマのカヅマヤマ古墳では地割れの痕跡が確認されており、史料から考えられる被害地震として、大きく長い揺れを伴う1361年の南海トラフ沿いの巨大地震が挙げられる。

このように奈良盆地で災害痕跡を生じさせた被害地震は、南海トラフ沿いで発生する巨大地震に起因する場合が多い。そのため、仮にその前後数十年の間に発生した内陸地震によって災害痕跡が生じていたとしても、時期を絞り込むことが困難なために、巨大地震に起因する災害痕跡とされてしまう可能性がある。

史料に基づく前近代の地震活動の解明

昨年度に引き続き、既存の日記史料に新たに調査・撮影した日記史料を加えて、「日記史料有感地震データベース」を構築しており、本年度は試作版を公開した。また、このデータベースを基にした地理情報システムを作成し、そこから前近代の有感地震に関する時空間分布図を作成した。さらに、この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の有感範囲を比較・検討して、前近代に日本各地で発生した中・小規模の地震について震源決定を試みた。今後の展開として、日記史料のデータベース化を進めて有感地震の記録地点数と記録期間を増やしていき、19世紀中頃の日本列島における有感地震の有無や有感範囲などのデータ量を増加させていく予定である。それに対応して、デー

データベースや時空間分布図の改良も計画している。

計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要

津波堆積物の調査およびデータベース化に向けての準備作業

津波堆積物に関するデータベースの構築については、東北大学のプロジェクト研究に参加し、主に北海道の既存資料について整理を進めた。また、ロシアの沿海州と北方領土における歴史津波や先史時代の津波痕跡について、ロシアの研究者と共同で調査を実施した。さらに、古地震に伴う地殻変動の痕跡となり得る海岸の隆起地形と生物痕跡について、2015 年 4 月に北海道の羅臼町幌萌海岸で発生した地すべりに伴う海岸隆起を調査した。

一方で、地震や津波の痕跡がどのような場所、条件で保存されるかを確認するため、2011 年東北地方太平洋沖地震津波で形成された津波堆積物を追跡調査した。青森県の三沢海岸に残された津波堆積物について、6 年後に土壌が表面を覆ってから再調査したところ、部分的に残された堆積物からも内陸薄層化、内陸細粒化といった津波堆積物に良く見られる傾向が確認できた。また、慶長三陸地震（1611 年）による津波について、北海道南西部における被害や痕跡について考察した。

史料に基づく歴史地震の事例研究

安政江戸地震（1855 年）の被害発生場所について、様々な史料を用いて調査・検討し、地震発生 12 年前の 1843 年に作成された「江戸大絵図」を用いて被害分布図を作成し、地震やその後の火災による被害の要因や傾向について検討した。また、この被害地震について、記述内容の信頼性が高い日記史料に記された遠地での有感記録に基づき、有感場所ごとに緯度・経度を特定して震度を推定し、有感範囲の地理情報システムの試作版を作成した。さらに、近世の京都盆地における被害地震の中で、文禄伏見地震（1596 年）と寛文近江・若狭地震（1662 年）と文政京都地震（1830 年）について、信頼性の高い史料記述を使用し、歴史学における既存の研究成果を援用して、被害地震ごとに推定震度分布図の試作版を作成した。

一方で、既存の日記史料および新たに調査・撮影した日記史料から、有感地震に関する記録を抽出して、一定期間にわたる有感地震データベースを構築した。このデータベースを基にして地理情報システムを作成し、そこから 19 世紀中頃の日本列島における有感地震に関する時空間分布図を作成した。また、奈良盆地の考古遺跡で確認された地震に起因する災害痕跡と、史料から判明している被害地震との対応について、複数の事例を用いて検討した。

（9）平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

Chague-Goff, C., Goto, K., Sugawara, D., Nishimura, Y., Komai, T., 2018, Restoration measures after the 2011 Tohoku-oki Tsunami and their impact on tsunami research, In: Santiago-Fandino, V., Norio, M., Iuchi, K., Sato, S. (eds), Reconstruction and Restoration after the Japan 2011 Earthquake and Tsunami, Insights and Assessment after 5 years, Springer, Vol. 47, pp. 229-247.

片桐昭彦, 西山昭仁, 水野嶺, 2018, 日記史料にみる時間表現の情報化, 人間文化研究情報資源共有化研究会報告集, 8, 33-44.

Nishiyama, A., M. Ebara, A. Katagiri, Y. Oishi and K. Satake, 2018, Long-term seismic activity database based on historical diaries widely distributed in Japan, EGU General Assembly 2018, EGU2018-12914 (Poster), Vienna, Republic of Austria, Austria Center Vienna (ACV), 8-13 April, 2018.

西村裕一, 千葉 崇, 2019, 北海道胆振東部地震（2018 年 9 月 6 日）で出現した噴砂の特徴, 北海道地区自然災害科学資料センター報告, 印刷中.

（10）次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

別の研究課題において作成された史料データや考古データなどを用いて、近代以前に発生した地震・津波や火山噴火現象とその災害について、統合的に分析可能なデータベース及び地理情報システムを構築する。

次期計画研究課題

地震火山関連史資料に基づく低頻度大規模地震火山災害の調査

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東京大学地震研究所 佐竹健治・西山昭仁

他機関との共同研究の有無 : 有

東京大学史料編纂所 佐藤孝之・他 5 名

北海道大学大学院理学研究院 西村裕一

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京大学地震研究所

電話 : 03-5841-5712

e-mail : yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL :

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 佐竹健治

所属 : 東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

揮発性成分定量による活火山爆発力ポテンシャル評価とマグマ溜まり深度の再決定

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料，考古データ，地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究では，噴火確率の高い火山や，大規模災害を引き起こす可能性のある火山の火山噴出物について，顕微赤外反射法を用いて，効率良く多数の試料の揮発性成分定量分析を実施し，火山噴火研究の基礎資料を作成する。

マグマ中の揮発性成分量(特に水の量)は，個々の火山の「爆発力ポテンシャル」として重要であるばかりでなく，熱力学平衡をとおしてマグマおかれた温度圧力条件の評価にも大きな影響を与える。このため，過去の噴火のマグマプロセスを物質科学的に評価するためには，マグマの含水量の決定が不可欠である。しかし，これまでは測定自体の難易度が高かったため，研究対象になった火山噴火が限られており，非常に少ない含水量データしか蓄積されていない。また，分析可能な大きさ試料に限られていたため，分析試料のバイアスによる含水量評価の偏向の恐れもあった。本研究では，多数の試料の分析によって，これまで欠けていたデータの提供を行う。加えて，マグマ溜まり深度の再決定を行う。従来の物質科学研究によるマグマ溜まり深度の見積もりは含水量データの不足によって 1kb (4km) 程度の不確定性があったが，多数の揮発性成分量のデータを加えることによって，これを従来の半分以下(1~2km)で再決定することを目指す。

本研究によって，目的とする火山の爆発ポテンシャルや深度等のマグマ溜まりの状態の時間変化についての知見を積み上げることができれば，その火山の噴火シナリオの作成等の研究にも貢献することができよう。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

研究の根幹となる顕微赤外反射法については、すでに基礎的部分の開発が終了している。この方法を実際の火山噴出物に応用して、火山噴火についての基礎試料として噴火前のマグマ中の揮発性成分量を決定する計画である。この方法ならば、20~30ミクロンサイズの斑晶ガラス包有物試料について、比較的容易に実用的な精度で水の定量分析することができる。毎年200個以上の斑晶メルト包有物を分析し(5年間で1000個)、地質基礎データの整備に貢献する計画である。

より具体的には、以下の2項目についての研究を実施する。

(1) マグマ噴火の頻度の高い火山を対象として、多数の揮発性成分データを収集し、データベース化する。また、他の岩石鉱物学的情報とあわせて、マグマ溜まり深度の再決定を行う。一つの噴火あたり40~50試料のデータを得られれば、その噴火のマグマの特徴をかなり正確に把握可能であろう。一つの火山あたり連続する数回の噴火試料を分析すれば、マグマ溜まり環境の時間変化を捉えられる可能性がある。そこで、現在から過去にさかのぼって4~5回の連続する噴火の噴出物を分析対象とする。対象とする火山としては、富士山、伊豆大島、三宅島、浅間山を予定している。

(2) 大規模災害を引き起こす可能性のある火山を対象にして、過去に発生した大規模噴火とそれに先行する複数の小規模噴火時の試料解析から、大規模噴火に到るまでのマグマ溜まりにおける揮発性成分量変化と不均質の程度を読み出す。対象とする大規模噴火としては始良カルデラ噴火を予定している。

研究は、各年度に2~3火山を対象としてとりあげ、1火山について2~3年かけて、化学分析とデータ解析をおこなう。平成26年度においては、富士山と始良カルデラ噴火についての研究に着手する。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要：

当初の計画では今年度は三宅島の試料分析と研究のとりまとめを行う予定であった。しかし、H27やH28年度に実施した富士山や伊豆大島などの玄武岩噴火を主体とする火山において、マグマ溜まり環境と噴火規模の関係が十分に明らかにできていなかったため、予定を変更して富士山の噴出物について集中的に分析を行った。

H26年に実施した始良火砕噴火の噴出物の解析から、大規模珪長質マグマの活動においては、マグマ溜まり環境が大規模噴火を前にして十分に爆発力を高めていることが明らかになった。しかしながら、玄武岩質の活動をする火山についておこなったH27とH28年度の解析においては、噴火の規模とマグマ溜まりの環境(温度、圧力、含水量)との明確な対応関係は見いだせなかった。これらの研究では、マグマ中の含水量の直接的な測定を重視して、斑晶ガラス包有物が結晶化していない爆発的噴火のテフラ噴出物についての分析を実施していた。そこで今年度は分析対象を溶岩流噴火にも広げて、全岩組成、斑晶組成を用いて熱力学的解析を中心に、噴火様式と溜まりの環境(温度、含水量)との関係を明らかにすることにした。

爆発的噴火の噴出物としては、富士火山山腹の太郎坊に堆積したS-10以降の17枚のテフラ層と側火山である大室山テフラを分析した。溶岩流噴火の噴出物としては焼野丸尾溶岩と火山体北東部のボーリングコア試料5枚の計6試料を分析した。いずれも富士黒土層形成以後の新富士期の火山活動の噴出物と考えられている。これらについて、全岩化学組成を蛍光X線分析装置で測定するとともに、斑晶(かんらん石と斜長石)組成を電子線マイクロプローブで測定した。加えて、溶岩流噴火を爆発的噴火のマグマ組成の違いを調べるため、これまで東京大学地震研究所で全岩化学組成分析を実施した多数の噴出物組成データ(山頂付近もしくは山体割れ目噴火の溶岩流、側火山からの溶岩流、テフラ試料)をとりまとめた。

溶岩流試料とテフラ試料では、 SiO_2 量という観点からは両者の組成範囲はほぼ等しい(図1(a)(b))。しかしながら、同じが SiO_2 量で見ると TiO_2 や K_2O が溶岩流試料の方がやや高めの傾向にある。組成範囲が明確に分離しているわけではなく、両者が重なっている部分も多い。溶岩流噴火の中では、山頂(山体)と側火山との差は見られない。 TiO_2 - K_2O の組成図(図1(c))では、溶岩流試料とテフラ試料はほぼ直線的に分布する。玄武岩質マグマにおいて液相濃集元素である K_2O と磁鉄鉱に入りやすい

TiO₂ が直線的な関係であるということは、これらの噴出物では磁鉄鉱の晶出が抑制されていることを示唆している。実際、富士山の場合には、磁鉄鉱の晶出なしで SiO₂ をあまり変化させずに K₂O を増加させる要因として、マグマ溜まり存在する場が高圧のため輝石のほうがかんらん石よりも晶出しやすくなることが考えられている。富士山で噴出するマグマは、高圧下で分化したマグマと低圧下で分化したマグマの混合物であることが知られているが、今回の分析結果は溶岩流のほうが、テフラよりも高圧下で分化したマグマの寄与が大きいことを示唆しているのかもしれない。

次に深部マグマの噴出前の温度と含水量を評価した。Putirka (2008) のかんらん石-液の平衡を用いた温度計と斜長石-液の平衡を用いた含水量計を連立させることにより、系の温度と含水量を求めた。また、得られた液組成と温度を Lange(1997) の密度計算式に代入し、圧力補正係数を Spera (2000) を適用して、マグマ溜まりでのマグマの密度を計算した。ただし、系の圧力は、物理観測から予想されている富士山深部のマグマ溜まりに相当する圧力、400 MPa、を仮定した。図 2 と図 3 に結果を示す。注目すべきは、溶岩流試料とテフラ試料では、顕著にマグマの温度と含水量の分布が分かれたことである(図 2)。溶岩流試料のほうが、マグマの温度が高く含水量は低い。これは、石橋・天野 (2017) が富士山貞観噴火と宝永噴火の試料解析と熱力学的検討から示した低温マグマほど爆発的になりやすい、という傾向と一致する。

マグマの密度についても興味深い結果が得られた(図 3)。一般に、マグマの温度が高いほど、そして含水量が高いほど、マグマの密度は低くなる。したがって、温度が高くて含水量が低い溶岩流試料と温度が低くて含水量が高いテフラ試料とでは両者の特徴が逆に作用するため、マグマの密度に系統的な違いが生じることは予想されていなかった。しかしながら、今回の解析では、溶岩流を生じたマグマのほうが系統的に高密度であることが示された。このことから、深部マグマ溜まりからのマグマ上昇のトリガーが両者で異なっていることが示唆される。すなわち、より深部からの高温マグマの注入によって、深部マグマ溜まりからのマグマ上昇が開始する場合には溶岩流噴火となり、深部マグマ溜まりが結晶分化によって自ら浮力を獲得してマグマの上昇が開始した場合には爆発的なテフラ噴火となる、という考えである。溶岩流を生じるマグマの方が同じ SiO₂ 量に対して TiO₂ と K₂O が高いことやマグマの温度が高いことも、上記の考えと矛盾しない。もしこの考えが正しければ、噴火の予測において重要な意味を持つことになる。つまり、地震観測などで、深部マグマ溜まりへのマグマの注入が確認された後に深部マグマ溜まりからのマグマの上昇が観測された場合には溶岩流噴火となることが期待され、マグマの注入が観測されないままマグマの上昇が観測された場合には爆発的噴火となることが期待される。

今回の解析はまだ試料数も少ないうえ、全岩組成から液組成を決定する過程における斑晶量による補正精度が高くないという問題点があり、確定的なものではない。また、浅部マグマの寄与を過小評価している可能性もある。次期計画においては、分析試料数を増やして噴火時期を細分するとともに、個々の分析精度を高めてより正確に温度と含水量を決定し、噴火の準備過程についての描像をより明確にする必要がある。

常葉大学に参加を得て、当初計画に追加した諏訪之瀬島火山のマグマ供給系の変遷に関する研究成果は以下の通りである。

諏訪之瀬島火山では、プリニー式噴火を中心とした活動期から、約 1 万年前以降、徐々に規模を縮小しつつ、次第に噴火が高頻度化してきた。このような活動におけるマグマ供給系の変遷要因について理解するため、本研究では、ガラス包有物の顕微赤外分光法による含水量の分析と EPMA によるガラス及び斑晶鉱物化学組成分析を行った。対象は、(1) 玄武岩質マグマとデイサイト質マグマの混合による安山岩質マグマが噴出し、プリニー式噴火を行った約 1 万年前の噴火(10ka 噴火)、(2) ほぼ同質の玄武岩質安山岩どうしの混合後、準プリニー式噴火を行い歴史上最大規模となった 1813 年噴火、(3) ストロンボリ式~ブルカノ式噴火を連続的に続ける近年の噴火、とした。

測定は斜長石及び斜方輝石中のガラス包有物について行った。EPMA 分析の結果、ガラス包有物組成は 10ka 噴火ではデイサイト~流紋岩質であり、1813 年噴火及び最近の噴火では安山岩質であった。含水量については 10ka 噴火では 0.6-2.4 重量%となり、2.0 重量%強が目立ったのに対し、1813 年噴

火では 0.5-2.2 重量%で 1.0 重量%程度のもも目立った(図4)。また、近年の噴火では H₂O の反射に対応するピークが不明瞭であり、0.5 重量%未満と考えられる。

なお、今回用いた Putirka (2008) の輝石温度推定がこれまでの Lindsley (1983) の温度計より系統的に 100 程度低温となったため、Lange et al. (2009) の斜長石 石基ガラス組成による含水量計を用いた推定と比較すると実測値が 10ka 噴火で 2 重量%程度、1813 年噴火で 0.1-0.5 重量%程度低くなる傾向が認められた。

10ka 噴火では縞状軽石が認められ、玄武岩質マグマとデイサイト質マグマが混合した形跡があるが、斑晶組成のバリエーションも大きい。噴火直前のマグマの状態を示すと考えられる斑晶リムおよび石基斜長石組成は分化したマグマを反映した低 An 組成を示す(図5(a))。一方、1813 年噴火では、逆累帯構造を持つ斑晶が多く、全岩化学組成の均一性から温度や含水量の異なる同質のマグマ混合が示唆されるが、噴火直前の組成は未分化側(高 An 側)のマグマをより反映したものとなっている(図5(b))。さらに最近の噴出物は大部分が 1813 年噴出物の低 An 側と同程度の斜長石からなり、バイモーダル性は消滅しつつある。

以上のことから、諏訪之瀬島火山では 10ka 以降、噴火史を通してマグマ混合が起こりつつ、次第に噴火直前の未分化マグマ注入が低頻度・多量から高頻度・少量に移行したと推察される。本火山では、今回対象試料だけでなく、より連続～断続的に噴出物が得られるため、今後、ガラス包有物の組成や含水量測定を進め、より高時間分解能でマグマ供給系の理解を進めることが重要である。また、最近の岩石学的温度計・含水量計による推定値と実測値との不整合については、鉱物-メルト間平衡やガラス包有物の結晶化などの考察をふまえた上で、検証が必要と思われる。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
安田 敦・田島靖久・嶋野岳人・金子隆之・吉本充宏・西澤文勝・藤井敏嗣(2018)新富士火山のテフラ対比用データベースの構築について、火山学会 2018 秋季大会予稿集。

- (10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

次期研究課題名「マグマ溜まりの時間発展と噴火様式との関連性」1-(1)-ウ

富士山のマグマ溜まりの温度、圧力、含水量、組成に関して火山噴出物の結晶やガラス組成の分析を通じて得られるデータを収集する。加えて、それらの噴出物をもたらし噴火の様式や規模についての情報を文献から収集する。これらの情報を統合することにより、マグマ溜まりの状態と噴火の様式・規模の関係を定式化するとともに、時間発展の情報から将来の噴火の様式・規模を考察する。

本研究では、2000 年前より新しい爆発的噴火と溶岩流噴火の両方について網羅的に試料収集と分析を行う。富士山の約 2000 年前以降の噴火については、貞観噴火と宝永噴火の 2 つの大規模噴火以外についての研究はほとんど行われておらず、発生頻度が高い小・中規模の噴火についてのデータがあまりない。そこで主として S-24 シリーズと呼ばれる約 10 回の爆発的噴火と、この期間に発生している十数枚の溶岩流の試料の分析を行い、これらの噴火の直前のマグマ溜まりの状態を調べる。この結果を時系列に整理してマグマ溜まりの時間発展を明らかにするとともに、マグマの状態と噴火様式との関連について調べる。特に、爆発的噴火と溶岩流噴火を分ける要因について検討を行う。さらに、貞観噴火や宝永噴火のような大規模噴火とは、マグマ溜まりの状態がどう異なっていたのかを明らかにする。

- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京大学地震研究所 安田 敦
他機関との共同研究の有無：無

- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所
電話：03-5841-5712

e-mail : yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL :

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 安田 敦

所属 : 東京大学地震研究所

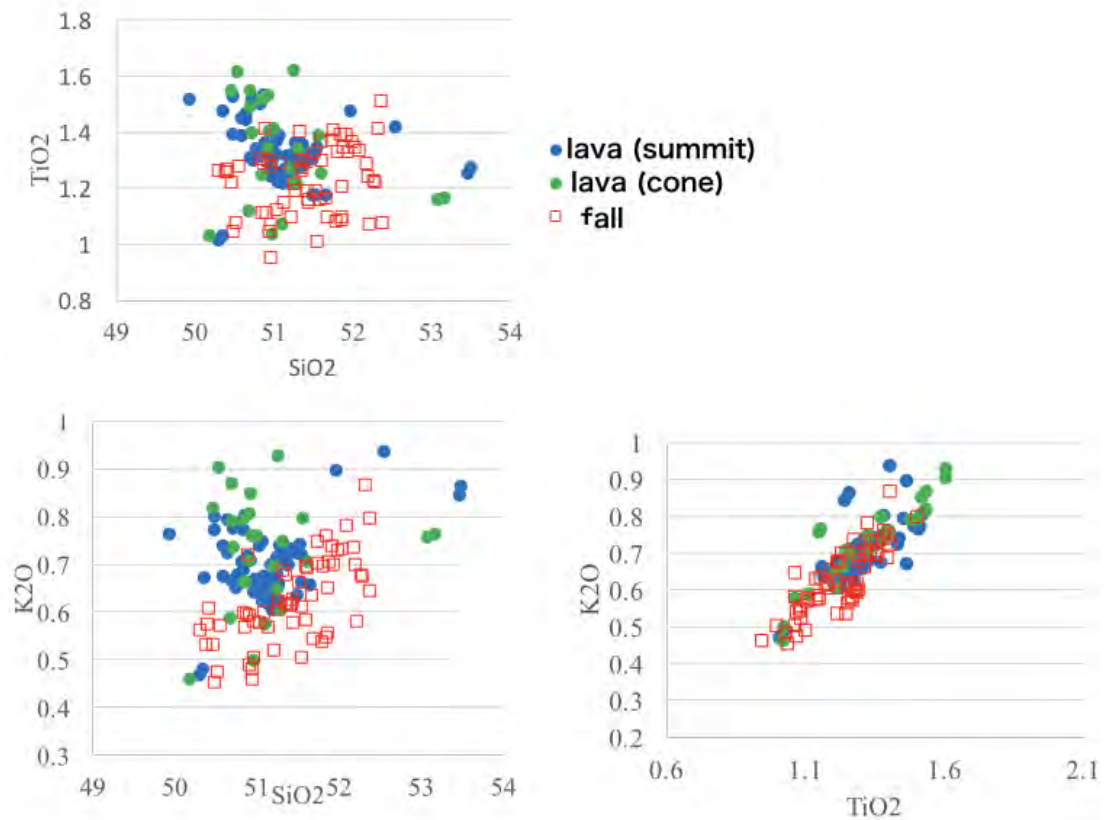


図 1 . 富士火山の全岩化学組成での溶岩流試料とテフラ試料の比較 .

(a) SiO₂-TiO₂ , (b) SiO₂-K₂O , (c) TiO₂-K₂O .

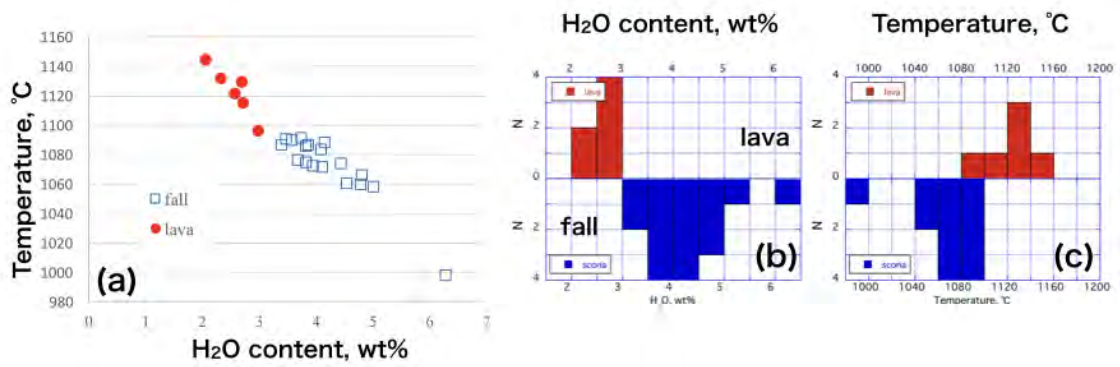


図2．富士火山の溶岩流試料とテフラ試料のマグマの温度と含水量の比較．
 (a) 温度と含水量の散布図，(b) 含水量のヒストグラム，(c) 温度のヒストグラム．

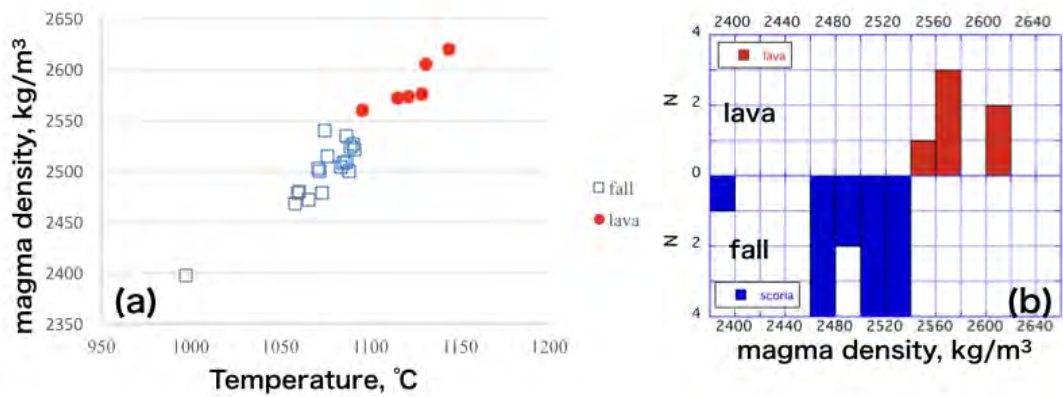


図3．富士火山の溶岩流試料とテフラ試料のマグマの密度比較
 (a) 温度と密度の散布図，(b) 密度のヒストグラム．

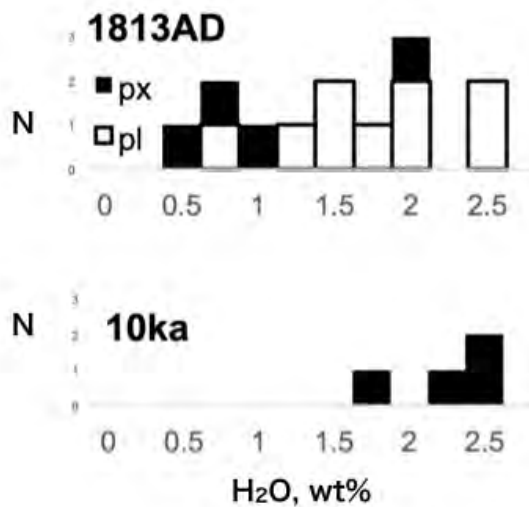


図4．諏訪之瀬島火山ガラス包有物中の含水量（重量％）

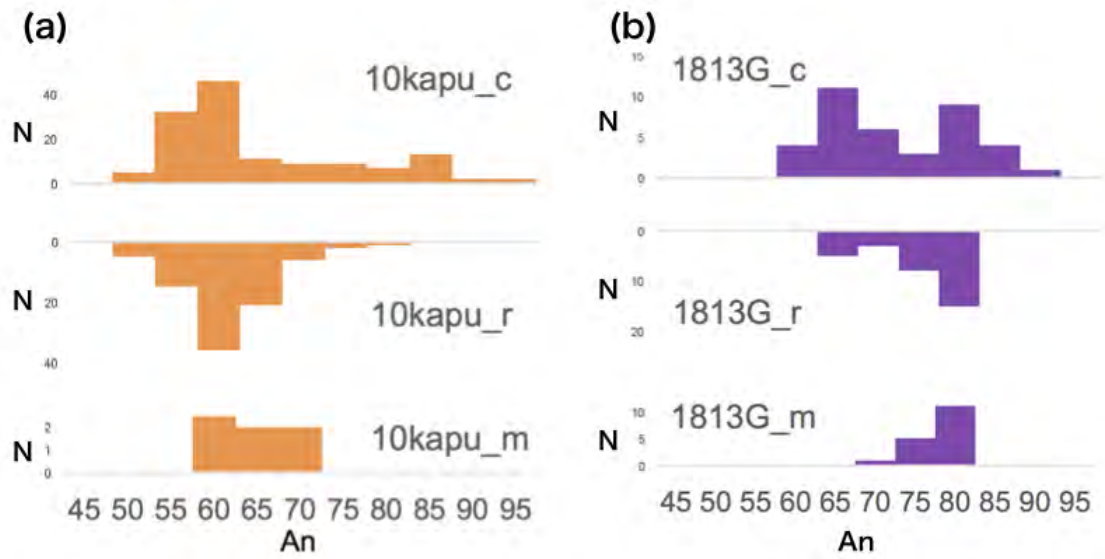


図5 . 諏訪之瀬島の斜長石 An 組成
 (a) 10ka 噴火, (b) 1813 年. c: core, r: rim, m: microlite

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

日本海溝・相模トラフプレート境界で起こる多様なすべり現象の包括的モデル構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

イ. 海洋プレート内部の地震

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

東北地方太平洋沖地震発生の前後を中心とした地震・地殻変動観測データの見直しからは、日本海溝沈み込み帯においても、非地震性すべりのすべりプレートに時空間的なゆらぎがあることが明らかとなってきた。また、東北沖地震で大きな地震時すべりを示した範囲内に、地震発生以前では M7.5 程度の地震を繰り返す領域やその後の余効すべりのすべり域が混在していて、プレート境界断層面上の同じ場所が東北沖地震の発生前と発生時とで異なるすべり特性を示した可能性がある。こうした、プレート間すべりをもつ多様性をモデル化することは、沈み込みプレート境界における地震発生機構に

関する理解の刷新に必要不可欠であるばかりでなく、この領域における地震サイクルをモデル化することによって大地震発生の長期予測の信頼性を高めることに資する。

本研究では、プレート境界においては余効すべりと固着の回復とが競合して進行していると考えられる東北沖地震の震源域とその周辺において、海域を中心とした測地・地震高密度観測を実施し、地震活動・余効変動との中で発生する多様なすべり現象の詳細を明らかにするとともに、プレート境界付近の構造を明らかにする。また、観測から得られた構造モデルを制約条件としてプレート境界の状態を再現した摩擦実験から、多様なすべり現象がおこる条件・要因を明らかにし、摩擦構成則の定式化を行う。さらに実験により得られた摩擦構成則に基づいて数値モデリングを行い、日本海溝の沈み込みプレート境界で起こるすべり現象の多様性を統一的に説明し得るモデルの構築を試みる。こうした観測・実験・モデル研究の成果を統合して、この領域のプレート境界でおこるすべりの時空間発展に関して、より現実的な予測の実現をめざす。

東北沖地震の破壊領域の南側に隣接する房総半島沖においては、スロースリップ現象が数年程度の短い間隔で繰り返し発生している。そこで、上記の日本海溝における海底観測や陸上観測（別課題にて提案）と連携して、この領域で発生するスロースリップの観測を行い、海陸の観測で繰り返し発生するスロースリップの発生を規定する物理モデルの構築を試みる。構築されたモデルに基づいて、さらに次のサイクルで発生するスロースリップの発生時期や規模を予測する実験に発展させる。通常の地震に比べて繰り返し間隔が短いスロースリップは、このような予測実験に格好な対象である。

（7）本課題の5か年計画の概要：

本研究計画は、海域観測研究と実験・モデリング研究から構成される。以下に各々の計画を示す。

海域観測研究

東北沖地震震源域の周辺および房総半島沖において、自己浮上式の海底精密水圧計および海底地震計（広帯域地震計を含む）による観測を実施する。これら観測測器による観測期間は2年間とし、その設置と回収を平成26～30年の間、隔年繰り返し行うことにより、約5年間の連続した観測体制を維持する。これに加え、GPS音響結合方式海底地殻変動観測を実施するほか、整備が進められている海底ケーブル方式の日本海溝地震・津波観測網による観測とも連携して、なるべく広域かつ高密度な観測が行えるように配慮する。東北地方太平洋沖地震震源域周辺の観測からは、余効変動と固着回復過程との中で発生するプレート境界ならびに太平洋プレート内で発生する多様なすべり現象の規模および頻度の時空間的な分布を明らかし、房総半島沖スロースリップ現象などの大規模なイベントについてはすべり量の時空間発展の推定を行う。これとともに、地震観測データを用いて、各イベントの発生領域を特徴付ける地下構造を明らかにする。海底観測測器の観測期間の長期化により、繰り返し観測による准モニタリング的な観測が海域においても実施できるようになった。本研究計画では、積極的に機動観測測器によるモニタリング観測を行うことにより、これまで陸上観測網では捕捉することが困難であった、海域下のプレート境界で発生するすべりイベントの空間分布とともに、その時間変化の解明をめざすことが特徴である。対象域が、巨大地震発生直後の東北沖、あるいは繰り返し間隔が短いスロースリップ現象がみられる房総半島沖であり、5年間という短い期間でも、プレート間すべりの多様性やその時空間変動を観測によって捉えることが可能であると期待できる。

実験・モデリング研究

平成26年度は、深海掘削で得られた遠洋性泥質・珪質堆積物およびそれらを模した物質を試料として、日本海溝沈み込みプレート境界浅部（0～10 km）の深度に相当する温度・有効圧力下で透水・破壊・摩擦実験を行う。透水実験結果から、熱加圧（thermal pressurization）の発生可能性を評価する。破壊実験はプレートの沈み込み速度相当の短縮速度で行い、破壊速度の実験条件に対する依存性からスロースリップの発生条件を絞り込む。摩擦実験は、プレート沈み込み速度から地震時のすべり速度までの変位速度下で行う。さらに、これらの実験結果に基づいたモデリングにより、プレート境界断層の地震発生域上限付近の挙動を明らかにする。

次の3年間は、平成26年度と同じ堆積物・模擬物質に加え、沈み込みプレート境界原位置の温度・

圧力相当で変成作用を受けたと考えられる変成岩、およびプレート境界断層上盤側のウェッジマントル中に存在すると想定される蛇紋岩を試料として、日本海溝沈み込みプレート境界中深部(10~60 km)の深度に相当する温度と、試験機で達成可能な範囲の圧力および間隙水圧条件下で、透水・破壊・摩擦実験を行う。実験条件は観測により得られた構造モデルに基づいて絞り込みを行う。また、実験により得られた摩擦特性や水理学的特性を用いたモデル化を進め、東北地方太平洋沖地震が発生したメカニズムや地震発生域におけるプレート境界断層の多様なすべりを明らかにする。さらに、観測結果を反映させてモデルの改善を図る。

平成30年度は、変成岩および蛇紋岩試料を使用して、日本海溝沈み込みプレート境界深部(60~80 km)の深度に相当する温度と試験機で達成可能な範囲の圧力および間隙水圧条件下で、透水・破壊・摩擦実験を行う。また、これらの実験結果に基づいたモデリングによりプレート境界の地震発生域下限付近の断層の挙動を明らかにするとともに、東北地方太平洋沖地震の余効すべりや固着過程を再現し、観測結果と比較することでモデルの改善を図る。さらに、隣接地域のすべりや地震発生の再現を試みる。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要:

海域観測研究

海域観測研究では、2013年に長期観測型海底地震計(LT-OBS)を用いて、岩手県・宮城県沖において、約1年間のモニタリング観測を実施したことや2014年度から2018年度まで、科学研究費補助金(特別推進研究)「深海調査で迫るプレート境界浅部すべりの謎~その過去・現在」が採択されたことなどから、これらの観測と密接に連携して、モニタリング観測を実施することとした。また、海域観測には、利用可能な研究航海をできるだけ利用して、海底地震計・水圧計の設置回収作業を行うこととした。これらの方針に基づいて、本研究計画では、LT-OBSを中心に使用して、海底観測を実施した。また、東北沖地震震源域のモニタリング観測については、科研費の観測とも連携した。

2014年度から開始したLT-OBSによる宮城県沖におけるモニタリング観測では、2018年4月と11月に回収および再設置を再度行い、観測を継続した。なお、当該領域に日本海溝海底地震津波観測網(S-net)が設置されたことを考慮して、観測網を海溝付近に移動させている(図1)。科学研究費補助金(特別推進研究)と連携して行っている海底地震計アレイ(Array of Array: AoA)観測では、福島沖に設置されていたアレイ3式を2018年8月から11月にかけて順次回収した。福島沖に設置されていた3式の海底地震計アレイは、アレイの中心となる観測点に、次世代広帯域海底地震計(BBOBS-NX)または海底設置型広帯域海底地震計(BBOBS)が設置されており、1式が中心にBBOBS-NX、2式はBBOBSが中心である。また、同時期に福島沖の広域地震観測網を構成している自己浮上式海底地震計の回収も行った。この海底地震計は、新規に開発した小型広帯域海底地震計(固有周期20秒)を用いた(図1)。房総半島沖においては、スロースリップ観測のために、4台の海底水圧計(OBP)が設置されており、2018年9月に回収・再設置を行った(図1)。設置したOBPは約2年間の連続収録が可能である。房総半島沖には、同目的のために、次世代広帯域地震傾斜計1台が設置されており、2017年9月に回収を試みたが、来年度以降に再試行することとした。

2013年からほぼ1年間実施した東北地方太平洋沖地震の震源域北部における長期観測型海底地震計データの解析を行った。この観測は、東北沖地震発生約3年後の日本海溝より震源域北部の地震活動を把握することを目的としている。求められた震源分布(図2)から、地震活動が本震直後に比べて時空間的に変化していることが明らかとなった。2013年から2014年の観測では、本震直後には活動が低調であったプレート境界付近での活動が観測され、これらの地震の発震メカニズムも逆断層型が卓越していると推定された。

2011年東北地方太平洋沖地震の震源域およびその周辺において海底地殻変動観測を継続し、前弧域での余効変動が示す顕著な空間変化を明らかにした。2011年の本震時に大きなすべりがあった中部域(宮城県沖)においては、粘弾性緩和が卓越することにより西向き速い変位速度が観測される一方で、南部(福島県沖)においては余効すべりによる東向きの変位が観測された。粘弾性緩和による

地殻変動から地震時すべり量を制約することができるため、地震時地殻変動と余効変動のデータを併合して用いて、地震時すべりと地震後すべり（余効すべり・すべり欠損）を同時に逆解析で推定し、顕著な地震時すべりが北緯 39.2 度より北側には及んでいなかったこと、地震時すべり域の深部延長側とともに北緯 37 度以南の海溝軸に近いプレート境界浅部でも余効すべりが進行していること、の 2 点を明らかにした。一方で、中部においてはすべり欠損が推定され、海溝軸を挟んだ基線長変化が検知されなかったこととあわせると、本震時に大きなすべりがあった領域のプレート境界は固着を回復したことを示唆する。本震の破壊が及ばなかった北部においては、東北沖地震以前から繰り返し発生している周期的スロースリップが日本海溝沿いにまで及んでいるために、そこで観測される変位速度が非常に小さくなっている可能性がある。

本震直前に破壊の開始点周辺で発生したゆっくりすべりの時空間発展を、宮城県沖に設置されていた海底地震計の波形記録の詳細な解析を通して解析した。低周波微動活動や微小地震の震源分布、海底地震計のノイズ自己相関関数にみられる時間変化から明らかにした。

2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域南側となる福島県沖に設置した海底地震計アレイの観測により、低周波微動活動が検知された（図 3）。微動は約 1 年間の観測期間中に 5 回の顕著な活動期に集中して発生している（図 4）。それぞれの活動期の長さは 6～18 日間であり、それぞれに活動期の中で震央の経時的な移動（migration）がみられる。Migration の速さはおよそ 5 km/day であり、南海トラフで観測される微動が示すものより有意に遅い一方で、東北沖地震前に小繰り返し地震が示した migration の速さに近い。微動が励起した S 波の振動方向の解析からは、これらが低角逆断層型の発震機構解を示すことが明らかとなった。以上のことから、こうした低周波微動の活動の背景には、繰り返し発生するスロースリップイベント（SSE）があると推測される。微動の発生域は、地殻変動観測から東北沖地震後の余効すべりが継続していると推定されている範囲内であって、比較的狭い時空間の範囲内で余効すべりと SSE とが共存して進行している可能性を示唆する。

2011 年に三陸沖北部で発生した VLFE の近傍に設置されていた短周期海底地震計の記録を用い、陸上の地震観測網によって検知されている VLFE と同様な特徴を有するイベントの探索を行ったところ、既知の VLFE による S 波信号に類似した信号の到達を数多く見出すことができた（図 5）。こうしたイベントの発生数の時間変化は、周辺における小繰り返し地震の発生数の時間変化と相似な様相を示しており、VLFE がプレート境界上のすべりによって励起されていることを示す。

また、宮城県沖においてこれまで実施してきた海底地震観測のデータを用い、3 次元地震波速度構造を仮定した震源再決定を行った。求められた震源位置をもとに発震機構解の空間分布の詳細を検討したところ、東北沖地震震源域直上の上盤プレート内は東北沖地震後の約 6 年間、顕著な伸張応力場であって顕著な時間変化は認められない。深部延長側の余効すべり域では、プレート境界の上盤と下盤それぞれのプレート内部の応力主軸の向きが顕著に異なっていることが明らかとなった。

東北沖地震震源域北限付近である北緯 39 度付近の日本海溝陸側斜面下では、東北沖地震発生前には、微小地震活動度の境界があることが知られており、1996 年と 2001 年に海底地震計とエアガンを用いた構造探査実験が行われている。その結果、微小地震活動が活発な領域では、プレート境界からの地震波反射強度が弱く、非活発な領域では反射強度が強いという結果が得られている（Fujie et al. 2002, Mochizuki et al. 2005）。東北沖地震の発生を受けて、プレート境界の特性変化を抽出する目的で、2013 年に以前の構造探査実験と同一地点に海底地震計を設置し、同一測線においてエアガン発震を行った。さらに、2014 年にはさらに海側の領域において同じく海底地震計とエアガンを用いる構造探査実験を行った。データ解析の結果、東北沖地震前後において、ほぼ同じ記録断面が得られて、速度構造に大きな変化がないことが推定される。一方、プレート境界からの反射強度については、東北沖地震発生前に強度が強かった場所では発生後に強度が低下し、発生前に弱かった場所では発生後に強度が上がるといった傾向があるように見える結果となった（図 6）。

2011 年東北地方太平洋沖地震（東北沖地震）発生前後に日本海溝域で実施された海底地震観測および陸上定常観測データから、同領域で発生した地震の震源とマグニチュードの詳細なカタログを作成し、東北沖地震前後の地震活動の特徴を明らかにした。東北沖地震発生前（2007 年 10 月～2008 年 6

月)が日本海溝・千島海溝海底観測、東北沖地震発生後(2011年3月~2011年6月)が大規模余震観測(Shinohara et al., 2011, 2012)による海底観測データを用いた。地震波形の振幅と相関を用いて、プレート境界面付近の地震を自動検出・震源決定する手法(Nakatani et al., 2015)を適用し、震源の時空間分布や規模別頻度分布を得た。その結果、東北沖地震発生前においては、北緯39度付近で活動が変わり、北側の低活動域が少なくとも東北沖地震発生前の数年間継続したことを示した。一方、東北沖地震発生後においては、本震時大すべり域に顕著な低活動域、その周辺で高活動域が見られた。Gutenberg-Richter則(G-R則)を仮定し、地震の規模別頻度分布からb値と completeness magnitude(M_c)を求め、東北沖地震後は低b値が広く分布することが明らかになった(図7)。さらに、本震時に高周波破壊を起こした領域では、東北沖地震発生後にb値が低下し、地震後の頻度分布はG-R則から逸脱することが推定され、破壊に伴う応力変化とプレート境界面の摩擦状態変化が原因と考えられた。

房総沖スロースリップ領域において、水圧計の観測を継続した。平成30年6月にスロースリップが発生し、9月に水圧計の設置、回収を行った。データの解析は現在進行中である。

房総沖スロースリップ領域の観測では、2013年12月から2014年1月と2018年6月にスロースリップが発生した。データ解析から、水圧計による海底の上下変動は、深さに換算して約1cmの精度で観測できることがわかった。2013年12月から2014年1月のイベントでは、房総沖スロースリップに近い観測点(KAP3)で2cmを超える有意な隆起が認められ、スロースリップから遠い観測点(BOSO2)では有意な隆起は観測されなかった。この結果と陸上GNSSデータを用いてスロースリップのすべり分布を求めた結果、すべりの南東端が推定できたとともにすべり分布の推定誤差が減少した(図8)。

房総沖で行われた人工地震探査データの解析を引き続き行い、スロースリップ領域での反射波強度について面的な評価を行った。データは、2009年に白鳳丸を用いて行われ、海底地震計とエアガンを使用した4つの測線(図9)である。この4測線から3次元地震波速度構造を求めた(図10)。Travel time mapping法を世界で初めて3次元構造に適用し、フィリピン海プレート上面からの反射波の面的分布を求めることに成功した。Travel time mapping法の結果から、反射波が見える部分が2か所あることがわかり、そのうちの西側の部分はスロースリップ領域と一致することがわかった。この部分は、速度構造に特に異常がみられないため、反射波はプレート境界に挟まれた薄い低速度物質によるものと推定した。

実験・モデリング研究

石英と滑石の混合ガウジを用いて、温度25℃、有効垂直応力10MPa、変位速度0.7~2 μ m/sの摩擦実験を行い、定常摩擦係数の変位速度依存性(a-b値)を求めた。その結果、a-b値は滑石含有量の減少に伴ってほぼ線形に低下し(図11)、かつa-b<0の速度弱化領域において、ゆっくりとした固着すべりから固着すべりへと変化することが明らかになった。この結果は、沈み込み帯の断層運動が粘土鉱物の含有量に依存して変化する可能性を示唆する。

東北沖日本海溝で沈み込む太平洋プレート被覆層チャートの主成分であるオパールについて、封圧150MPa、間隙水圧50MPa、温度23~200℃、軸方向変位速度0.1~10 μ m/sの三軸摩擦実験を行い、摩擦特性の温度・変位速度依存性を検討した。その結果、温度上昇または変位速度低下に伴ってオパールの定常摩擦強度が増大し(図12a)、a-b値が正から負へと変化することが明らかとなった(図12b)。高温の実験後試料は基質が密で粒子間の癒着が認められ、圧力溶解の作用を示唆している。従って、温度上昇または変位速度低下に伴って圧力溶解の活動度が増大すると、粒子間の癒着が促進されて定常摩擦強度が増大し、その結果a-bが正から負へと変化し、非地震性断層運動から地震性断層運動への遷移を促すと考えられる。

海底下掘削時に取得される掘削パラメータから岩石強度を推定する手法を用いて、室戸沖南海トラフにおいて実施されたIODP第370次研究航海(T-Limit)で取得された掘削データを用い、プレート境界断層を含む付加体の強度の深度変化を明らかにすることを試みた。解析の結果、岩石の強度は深度増加に伴い徐々に増大すること、プレート境界断層直下約250mの範囲(海底下800~1250m)で著しく低下すること、それより以深では海洋地殻玄武岩に向かって再び増大することが明らかとなった(図13)。地震波速度とコア試料の物性解析などから、プレート境界断層下盤には高間隙水圧帯が想定

されている。この高間隙水圧帯によって有効応力が低下して、プレート境界断層下盤の強度が著しく低下していると考えられる。

日本列島と同じく沈み込み帯に位置する島弧であるニュージーランドで、2016年にM7.9のカイコウラ地震が発生した。カイコウラ地震は、合成開口レーダーなどの技術により地震破壊過程や断層形状の詳細がこれまでで最も良く観測された地震の一つである。本課題で構築した動的破壊シミュレーション手法を適用してカイコウラ地震の再現を行い、地殻変動や強震動の観測・解析結果との比較を行った。本研究のモデルは、応力の初期条件と摩擦構成則を境界条件とした順方向のモデルであるので、そのシミュレーション結果が地震時の観測データをよく再現するほど物理モデルの妥当性の高さを示すことになる。比較の結果、断層形状の非平面性の効果によって破壊過程がよく再現されることがわかった(図14)。大きなすべりの発生場所や破壊の停止が精密なパラメータチューニングを施すことなく再現されたことは、特筆すべきことである。

準動的な地震発生サイクルにより東北地方東北沖地震発生2年後の温度異常のモデル化を行い、浅部の有効圧を6 MPa程度に設定することでIODP第343次研究航海(JFAST)で測定された温度上昇を再現することができた(図15)。

また、計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要としては、モンモリロナイト(Na型・K型)ガウジを用いて、温度25~150℃、間隙流体圧10 MPa、有効垂直応力10~70 MPa、軸方向変位速度0.03~3 μ m/sの条件下で三軸摩擦実験を行って定常摩擦係数の変位速度依存性(a-b値)を求め、各温度におけるa-b値と有効垂直応力の線形相関に基づいて、南海・コスタリカ・ヒクラングの各沈み込み帯のa-b値の深度プロファイルを作成した。その結果、南海・コスタリカ・ヒクラングの各沈み込み帯は速度強化あるいは速度ニュートラル挙動を示すことがわかった(図16)。

沈み込む海洋プレートの基盤岩・表層堆積物(玄武岩・チャート・遠洋性粘土・半遠洋性粘土)試料について、日本海溝沈み込み帯浅部の温度(50~150℃)・有効圧(50~150 MPa; 間隙水圧は50 MPaに固定)条件下で軸方向変位速度を0.1~10 μ m/sの間でステップ状に変化させながら三軸摩擦実験を行い、日本海溝沈み込み帯浅部における断層運動について検討した。実験の結果、定常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、同一試料では温度上昇に伴い増加する傾向が認められた(図17a)。一方、a-b値は100℃以上の温度では粘土鉱物含有量の増加に伴い増加する傾向が認められ、同一試料では温度上昇に伴い減少する傾向が認められた(図17b)。日本海溝沈み込み帯でa-b値が正から負へ変化し、非地震性断層運動から地震性断層運動への遷移が起こる温度は、チャートで50℃と100℃の間、玄武岩で約100℃、半遠洋性粘土で100℃と150℃の間、遠洋性粘土では150℃以上というように、粘土鉱物含有量によって系統的に変化する。これは同一深度でも断層帯を構成する堆積物・岩石によって、地震性~非地震性の多様な断層運動が起こることを意味する。

日本海溝沈み込み帯浅~中部を構成する代表的な物質としてJFASTによって採取されたスメクタイトに富む泥質岩を、深部を構成する代表的な物質として藍閃石片岩をそれぞれ使用して、様々な温度・圧力条件下で回転摩擦実験を行った。特に、実験条件によってa-b値がどのように変化するかを調べ、すべりの安定性という視点から日本海溝沈み込み帯浅~深部にわたる摩擦特性を描くことを試みた。その結果、沈み込み帯浅部の低温条件下(~20℃)ではa-b値は正の値を示すこと、そして沈み込み帯中部(100~200℃)に向かって正から負に変化し、200℃で最低値を取り、地震を引き起こすポテンシャルを持つことが明らかになった(図18)。東北地方東北沖地震の震源域温度が約160℃程度と推定されていることから、この摩擦特性モデルと矛盾しない。また、有効垂直応力が小さく(間隙水圧が大きく)なると、a-b値がより負の方向にシフトしていくことも明らかとなった。この結果は、震源域上限付近のa-b~0の領域で間隙水圧が上昇すると、スロー地震が発生する条件が現れることを示唆している。

2011年東北地方太平洋沖地震の震源域で前震の余効すべりと本震の高速すべりがオーバーラップしている領域が発見されたことに基づき、天然のプレート境界における摩擦強度のすべり速度依存性の実証的な評価を行った。インバージョン解析により求めたすべりプロファイルから応力変化を計算するとともに、その結果を速度と応力変化の関係としてコンパイルした。その結果、顕著な動的弱化

現象が観察された。この結果は地震すべり速度域で極端な弱化を見せる、室内実験の結果とも調和的と言える(図19)。

JFASTによって採取された日本海溝浅部断層試料の摩擦実験から得られた摩擦の性質、及び実測された水理的性質と摩擦発熱による間隙水圧上昇を考慮した動的地震サイクルシミュレーションを行った。平時の有効垂直応力分布に関してパラメータスタディをする事により、スーパーサイクル挙動、海溝まで達する巨大地震の頻度、深部のみの大震災の頻度、巨大地震時のすべり量と発熱量、長期的摩擦発熱量の全てにおいて観測結果とよく一致するケースを実現する事に成功した(図20)。

(9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

Ando, R. and Kaneko, Y., Dynamic rupture simulation reproduces spontaneous multifault rupture and arrest during the 2016 Mw 7.9 Kaikoura earthquake. *Geophysical Research Letters*, 45, 12,875 - 12,883, 2018.

Azuma, R., R. Hino, Y. Ohta, Y. Ito, K. Mochizuki, K. Uehira, Y. Murai, T. Sato, T. Takanami, M. Shinohara, T. Kanazawa, Along-arc heterogeneity of the seismic structure around a large coseismic shallow slip area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake: 2-D Vp structure estimation through an airgun-ocean bottom seismometer experiment in the Japan Trench subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 123, 5249 - 5264, doi: 10.1029/2017JB015361, 2017

Hamada Y., Hirose, T., Ijiri, A., Yamada, Y., Sanada, Y., Saito, S., Sakurai, N., Sugihara, T., Yokoyama, T., Saruhashi, T., Hoshino, T., Kamiya, N., Bowden, S., Cramm, M., Henkel, S., Homola, K., Imachi, H., Kaneko, M., Lagostina, L., Manners, H., McClelland, H.-L., Metcalfe, K., Okutsu, N., Pan, D., Raudsepp, M. J., Sauvage, J., Schubotz, F., Spivack, A., Tonai, S., Treude, T., Tsang, M.-Y., Viehweger, B., Wan, D. T., Whitaker, E., Yamamoto, Y., Yang, K., Kinoshita, M., Maeda, L., Kubo, Y., Morono, Y., Inagaki, F. and Heuer, V. B., In-situ mechanical weakness of subducting sediments beneath a plate boundary décollement in the Nankai Trough. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5, #70, doi: 10.1186/s40645-018-0228-z, 2018.

Hamahashi, M., Kimura, G., Tanikawa, W., Hamada, Y., Hashimoto, Y. and Saito, S., Physical property anisotropy of foliated fault rocks: Study from the Nobeoka Thrust, Shimanto Belt, southwest Japan. *Island Arc*, 27, e12257, doi: 10.1111/iar.12257, 2018

Han, R., Kim, J.-S., Kim, C.-M., Hirose, T., Jeong, J. O. and Jeong, G. Y., Dynamic weakening of ring faults and catastrophic caldera collapses. *Geology*, 47, 107 - 110, 2019.

Kameda, J. and Hirauchi, K., Rheological properties of composite serpentine-brucite suspensions: Implications for mudflow behavior on forearc seamounts. *Marine Geology*, 403, 191 - 196, 2018.

Katakami, S., Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, S. Suzuki, M. Shinohara, Spatiotemporal variation of tectonic tremor activity before the Tohoku-Oki earthquake, *J. Geophys. Res.*, 123, 9676 - 9688, doi: 10.1029/2018JB016651, 2018.

Kono, A. T. Sato, M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Yamada, K. Uehira, T. Shinbo, Y. Machida, R. Hino, and R. Azuma, Spatial distribution of reflection intensity on the upper surface of the Philippine Sea plate, off the Boso Peninsula, Japan, 2018 JpGU Meeting, Chiba, SCG59-P02, May 22, 2018.

村田耕一、佐藤利典、長谷川晟也、河野昭博、塩原肇、八木健夫、山田知朗、篠原雅尚、マルチチャンネル特異スペクトル解析法を用いた房総沖スロースリップ域の海底圧力計データの解析、日本地震学会講演予稿集 2018 年度秋季大会、郡山、S03-P03、10月11日、2018。

中西智哉・金川久一・澤井みち代、オパールガウジの低温熱水条件における摩擦特性に対する溶解・析出クリープの影響。日本地球惑星科学連合 2018 年大会、SSS15-15, 2018.

中西智哉・金川久一・澤井みち代、200 °C 以下の熱水条件におけるオパールガウジの摩擦特性。日本地質学会第 125 年学術大会(つくば特別大会)、R13-O-11, 2018.

Shibazaki, B., Noda, H. and Ikari, M. J., Quasi-dynamic 3D modeling of the generation and afterslip of a Tohoku-oki earthquake considering thermal pressurization and frictional properties of the shallow plate

boundary. Pure and Applied Geophysics, 176, doi:10.1007/s00024-018-02089-w, 2019.

篠原雅尚・山田知朗・望月公廣・中東和夫・町田祐弥・真保敬・悪原岳・仲谷幸浩・塩原肇・村井芳夫・日野亮太・伊藤喜宏・佐藤利典・植平賢司・八木原寛・尾鼻浩一郎・小平秀一、自己浮上式海底地震計を用いた 2011 年東北沖地震震源域におけるモニタリング観測、日本地震学会 2018 年度秋季大会、10 月 10 日、郡山(日本)、2018

高橋美紀・廣瀬丈洋・飯尾能久、断層の強度に関する論争と学際的アプローチの必要性、地質学雑誌、124, 725 - 739, 2018.

Uemura, M. Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, M. Shinohara, Spatio-temporal changes in the seismic velocity induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and slow slip event revealed from seismic interferometry, using ocean bottom seismometer's records, Prog. Earth Planet. Sci., 5:87, doi: 10.1186/s40645-018-0240-3, 2018.

Wang, K., T. Sun, L. Brown, R. Hino, F. Tomita, M. Kido, T. Iinuma, S. Kodaira, T. Fujiwara, Learning from crustal deformation associated with the M9 2011 Tohoku-oki earthquake, Geosphere, 14, 552 - 571, doi: 10.1130/GES01531.1, 2018.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

海域観測研究

・GNSS-音響地殻変動観測、海底間音響測距観測、海底水圧観測からなる海底地殻変動観測、地震計アレイ観測および広帯域地震観測を千島海溝・日本海溝付近で、継続して実施する。

・宮城県沖において自己浮上式海底地震および海底水圧観測を継続し、2011 年東北地方太平洋沖地震震源域における地震活動の時空間変化の把握を行う。とくに、発震機構解の解析から応力状態の時空間変化の解明を目指す。

・日本海溝北部において GNSS-音響地殻変動観測をおこない、周期的 SSE に伴う変位速度のゆらぎの検出を目指す。

・海底精密水圧計の観測を行う。解析は、水圧計については、2018 年 6 月のイベントについてのデータに対して解析を進めるとともに、過去のデータも含めて新たな解析方法の開発についても試みる。

実験・モデリング研究

・沈み込み帯浅部で起こる多様なすべり挙動解明のため、沈み込み帯浅部に多く含まれる粘土鉱物の量を系統的に変化させて摩擦実験を行い、摩擦特性の粘土鉱物含有量依存性を検討する。

・沈み込む海洋プレートの基盤岩・表層堆積物試料について沈み込み帯震源域上限付近の温度・圧力条件下で三軸摩擦実験を行い、摩擦特性に対する間隙水圧の影響を検討する。

・海山物質試料について沈み込み帯浅部の温度・圧力条件下で三軸摩擦実験を行い、海山の沈み込みによる摩擦特性の変化を検討する。

・沈み込み帯震源域に存在すると想定される変成岩試料について沈み込み帯震源域の温度・圧力条件下で摩擦実験を行い、その摩擦特性について検討する。

・地震破壊過程の物理モデルを高度化するために、過去に発生した大地震の破壊過程の定量的なモデル化と観測データとの比較を系統的に行う。また、摩擦実験の成果を組み込んだ断層のモデル化を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

海域観測班：篠原雅尚・塩原肇・望月公廣・山田知朗・一瀬建日(東京大学地震研究所)・日野亮太・木戸元之・太田雄策・飯沼卓史(東北大学)・村井芳夫(北海道大学)・佐藤利典(千葉大学)・伊藤喜宏(京都大学)・八木原寛(鹿児島大学)

実験・モデリング班：金川久一(千葉大学)・矢部康男・武藤潤(東北大学)・平内健一(静岡大学)・廣瀬丈洋・谷川 亘(海洋研究開発機構)・芝崎文一郎(建築研究所)・安藤亮輔(産業技術総合研究所)

他機関との共同研究の有無：有

北海道大学・東北大学・千葉大学・静岡大学・京都大学・鹿児島大学・海洋研究開発機構・建築研究所・産業技術総合研究所（上記参加者による共同研究）

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5712

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：篠原雅尚

所属：東京大学地震研究所 観測開発基盤センター

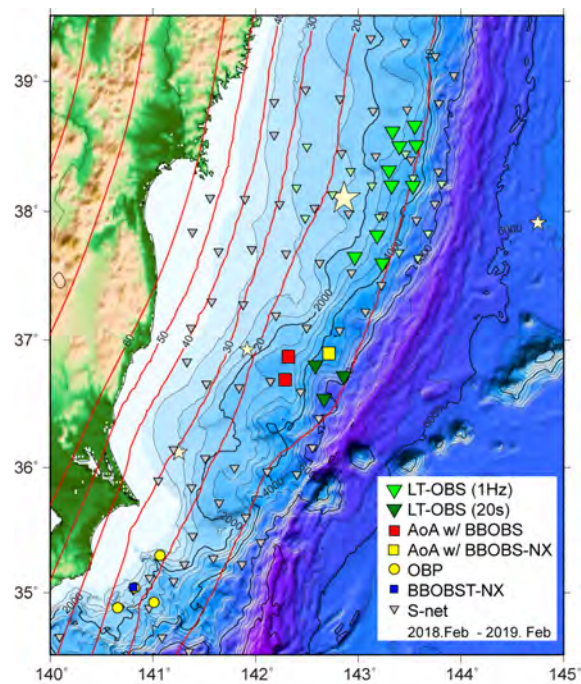


図 1

平成 30 年度に観測を行った海域観測点の分布。薄い緑の逆三角は、平成 28 年度以前の自己浮上式長期観測型海底地震計による宮城県沖観測網の観測点位置を示す。星はマグニチュード 7.5 より大きい地震の震央。赤線は海域観測から推定されたプレート境界深度の等深度線を表す。BBOBS-NX は地震計海底下埋設型の海底地震計を指す。BBOBST-NX はさらに傾斜も観測できる。

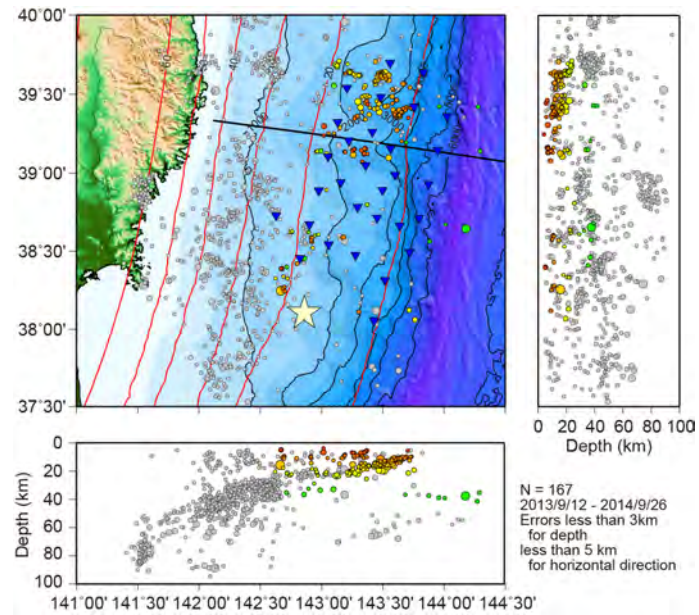


図 2

海底地震計観測網による 2013 年 9 月から 2014 年 9 月までの岩手県沖日本海溝陸側斜面における震源分布。逆三角は海底地震計の設置位置を示す。色は震源の深さを表す。また、灰色は 2011 年東北地方太平洋沖地震以前の海底地震観測による震央。

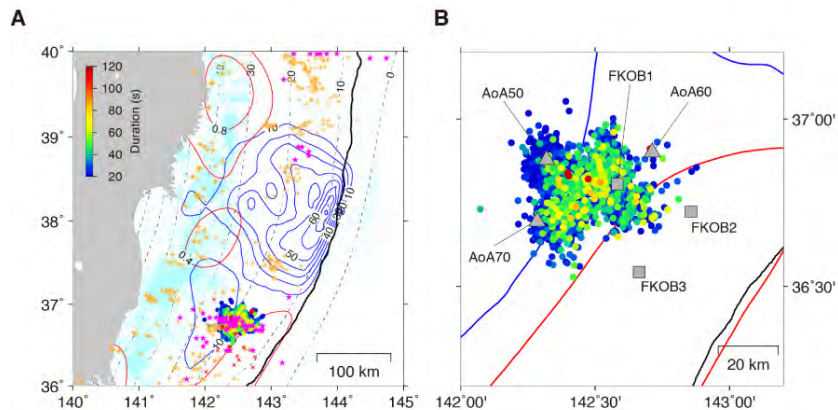


図 3

日本海溝南部で検知された低周波微動の分布。A) 微動の継続時間に応じた色をつけた丸印で震央を示す。VLFE (紫星)、小繰り返し地震 (橙十字)、気象庁一元化処理による震央 (水色点) をあわせて示す。青色コンター (10 m 間隔) と赤色コンター (0.4 m 間隔) は、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う地震時および余効すべりの分布。B) 微動発生域周辺の拡大図。海底地震観測点をあわせて示す。

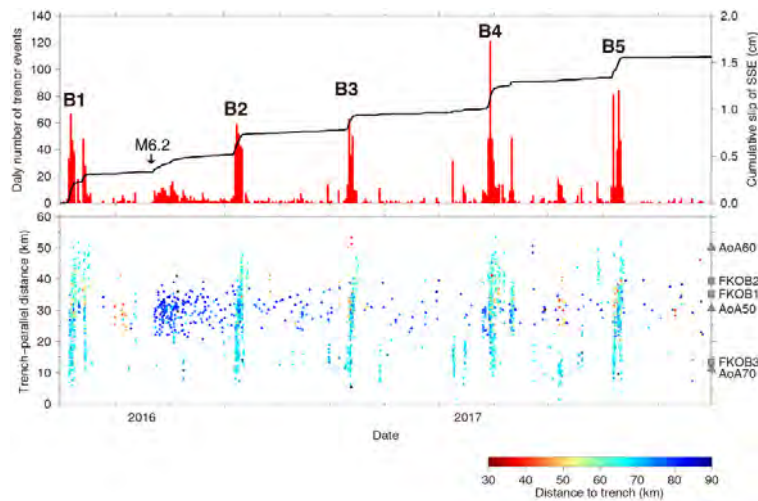


図 4

微動活動の時空間変化。(上) 日別の個数分布と微動活動から換算された対応する SSE による累積すべり、(下) 海溝軸に沿う方向に投影した微動活動の時空間プロット。検知された微動イベントをその震央の海溝軸からの距離に応じた色シンボルで示す。

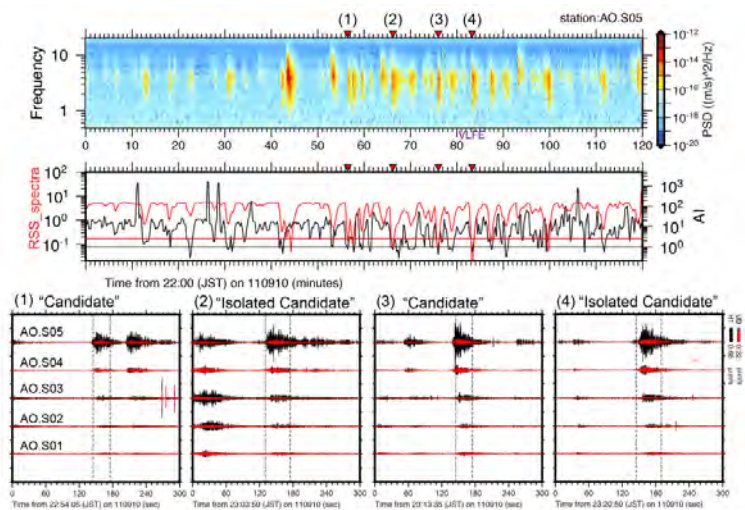


図 5

青森県沖に設置された短周期 OBS で検知された VLFE ならびにその類似イベント。(上) Matsuzawa et al. (2015) により報告された VLFE の一つの発生時を含む 2 時間でのランニングスペクトル。(中) 既知の VLFE とのパワースペクトルの類似性(赤)と振幅空間分布の類似性(黒)の時間変化。いずれも小さい値ほど類似性が高い。(下) 2つの類似性基準をみたしたときの地震波形記録。黒と赤は水平動および鉛直動成分にそれぞれ対応する。(1) ~ (4) に対応する時間を上図に示した。(4) が既知の VLFE に対応する。

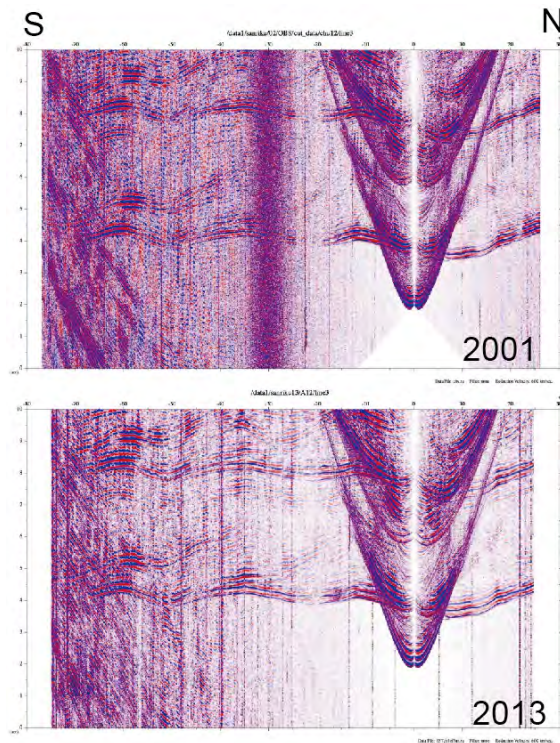


図 6

2001年と2013年に行った構造探査実験。同位置に設置された海底地震計について、2001年と2013年の記録を比較している。

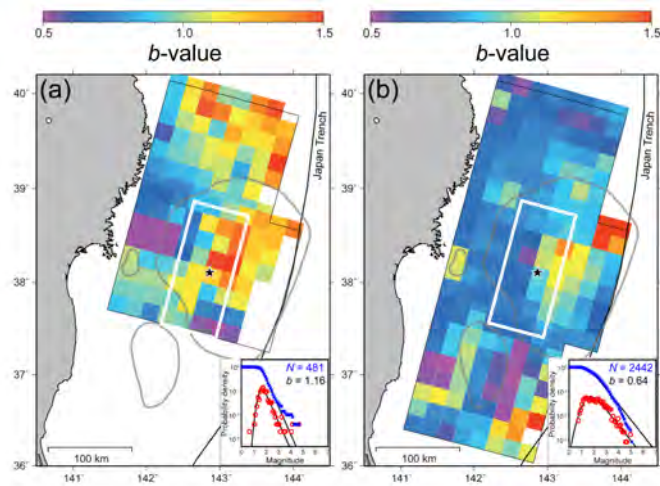


図 7

(a) 東北沖地震前および (b) 地震後の b 値の空間分布。 b 値推定手法は Maximum Curvature 法 (Wiemer and Wyss, 2000)。星印は東北沖地震の震源、灰色コンターは Iinuma et al. (2012) による本震時すべり分布 (10 m) を示す。挿入図は地図上の白色矩形域内で発生した地震 (N : 全地震数) の規模別頻度分布 (赤: 非累積頻度、青: 累積頻度) を示す。ただし、ここでの b 値は Ogata and Katsura (1993) の最尤推定モデル (黒線) から得た。

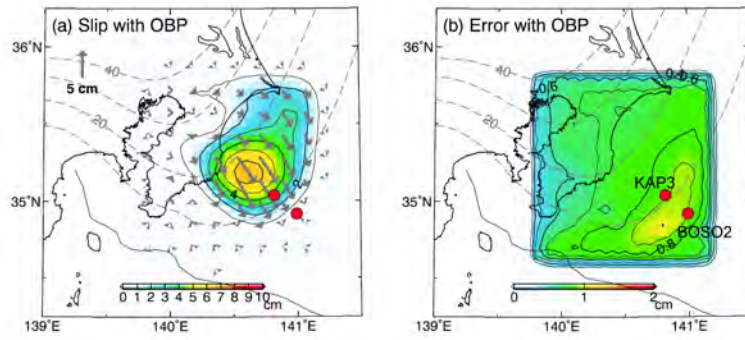


図 8

2013 年 12 月から 2014 年 1 月の房総沖スロースリップのすべり分布 (a) と推定誤差 (b)。赤丸は水圧計の位置を示す。

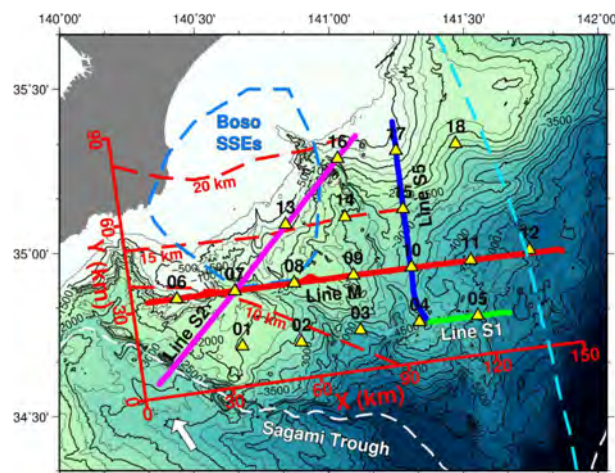


図 9

構造解析に用いた 4 つの測線 (測線 M, S1, S2, S5) と解析範囲 (赤い XY 座標)。は解析に用いた海底地震計。赤破線はフィリピン海プレート上面の等深度線。青破線はスロースリップ領域。水色破線はフィリピン海プレート東端。

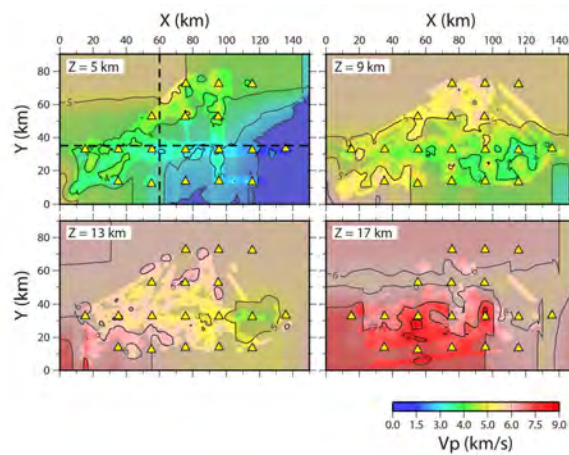


図 10

房総沖の地震波速度構造。グレーのない部分は波線が通っている部分を示す。

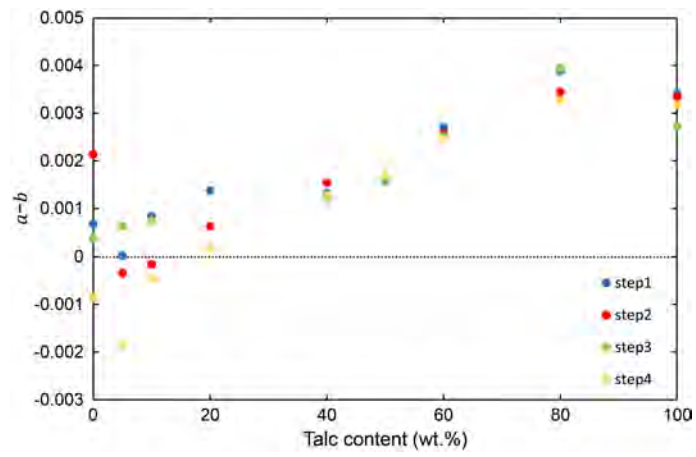


図 11

石英 + 滑石ガウジの $a - b$ 値と滑石の含有量 (wt %) の関係。step 1 ~ 4 は実験中に行った変位速度ステップを表す。

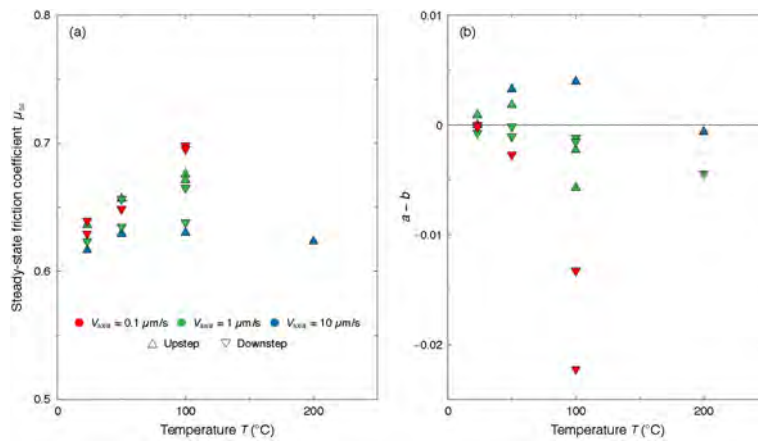


図 12

オパールガウジの定常摩擦係数 μ_{ss} (a) および $a - b$ 値 (b) の温度変化。

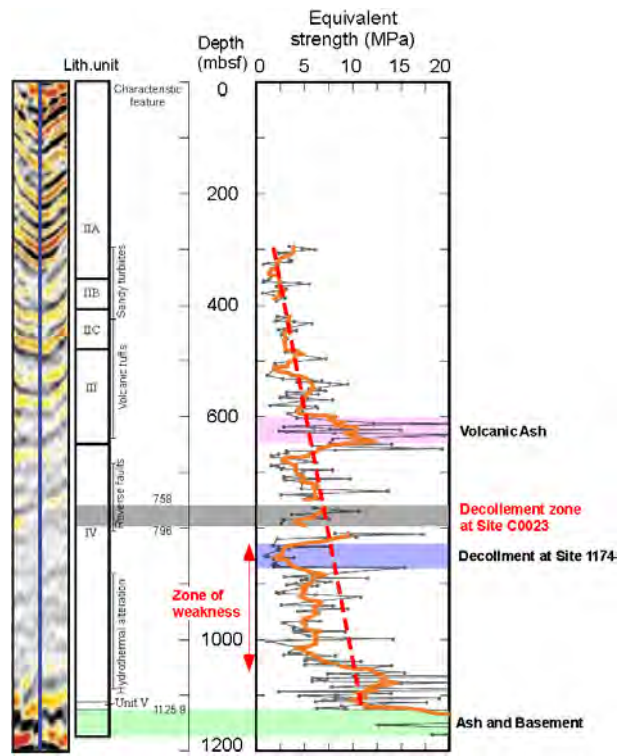


図 13

室戸沖南海トラフ掘削 (IODP 第 370 次研究航海) で取得された掘削パラメータから解析された、付加体内部の等価強度。

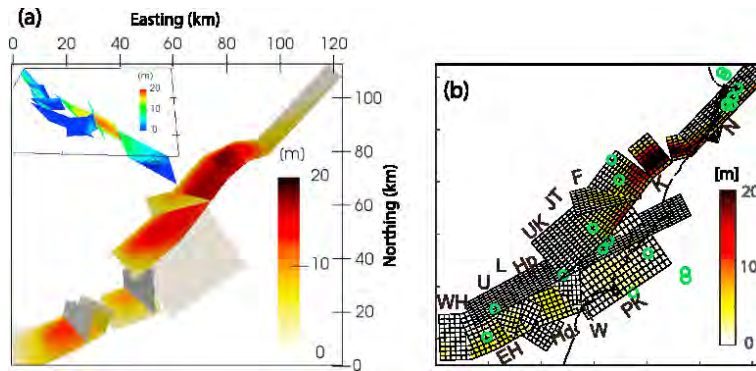


図 14

2016 年 M7.9 ニューゼーランドカイコウラ地震の動的破壊シミュレーション。(a) シミュレーションによって求めた地震時すべり分布。(b) 合成開口レーダー観測データに基づいて逆問題的に求めた地震時すべり分布。

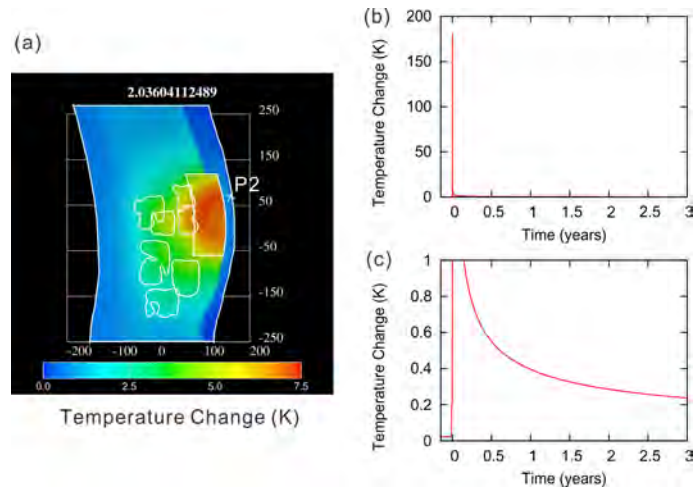


図 15

東北沖地震発生の2年後におけるプレート境界面の温度上昇 (a) および (a) の地点 P2 における温度の時間変化 (b, c)。t = 0 は東北沖地震発生時を示す。

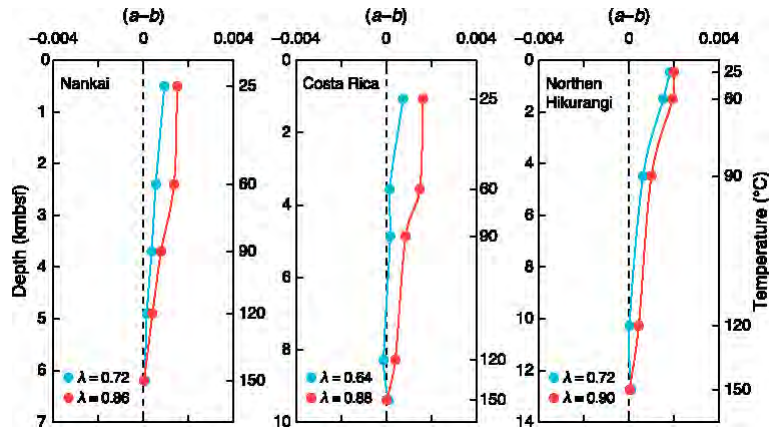


図 16

南海トラフ (a)、コスタリカ (b)、ヒクラング (c) の各沈み込み帯における a - b 値の深度プロファイル。 : 間隙水圧比。

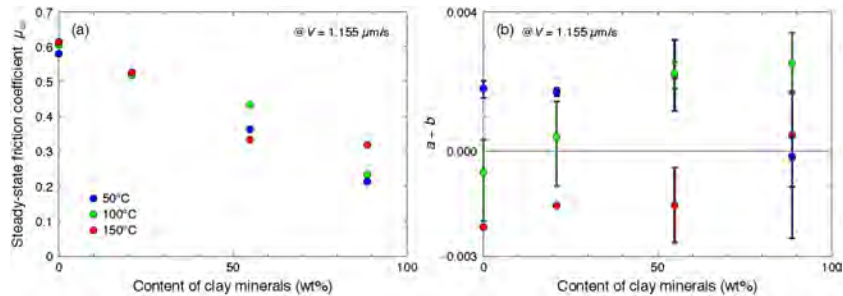


図 17

紀伊半島沖フィリピン海プレート海洋地殻玄武岩試料 (粘土鉱物約 21 wt%)、宮城県沖日本海溝プレート境界断層下盤側チャート試料 (粘土鉱物 0 wt%)、三陸沖太平洋プレート表層半遠洋性粘土試料 (粘土鉱物約 55 wt%) および遠洋性粘土試料 (粘土鉱物約 89 wt%) の、軸方向変位速度 $1 \mu\text{m/s}$ における定常摩擦係数 (a) と a - b 値 (b) の温度と粘土鉱物含有量による変化。

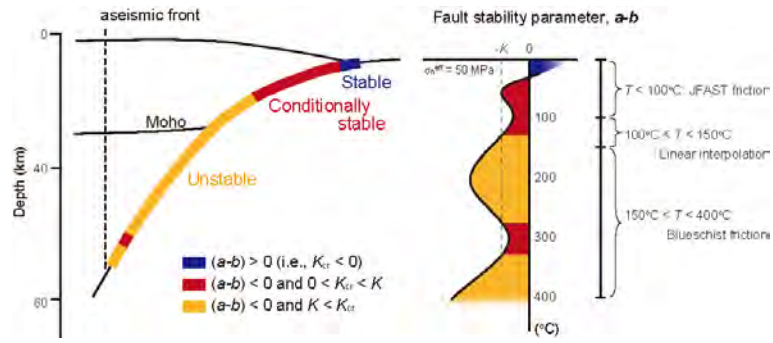


図 18

東北沖日本海溝沈み込み帯のすべり安定性モデル (間隙水圧比が 0.5 の場合)

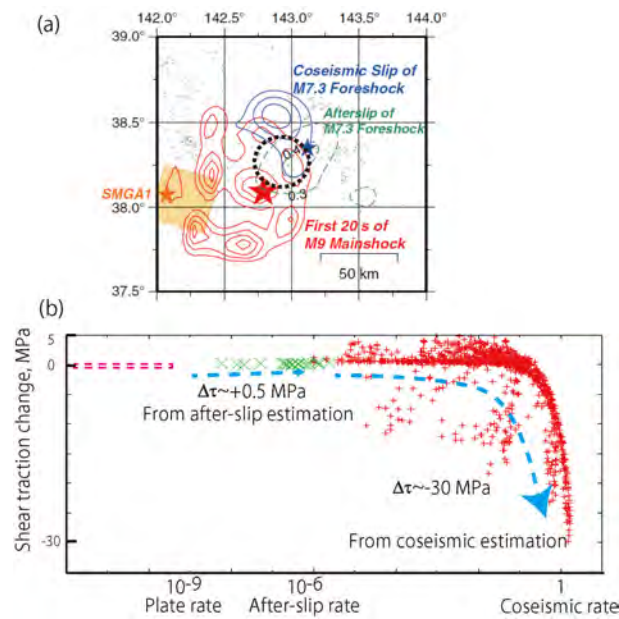


図 19

東北地方太平洋沖地震の震源域で推定した摩擦強度の変位速度依存性。(a) 解析領域、前震余効滑りと本震時滑りが共存する破線で囲った領域を対象とし、運動学的インバージョンで求められたすべりプロファイルを使用。(b) 解析により求めた変位速度と応力変化の関係。動的弱화가顕著に観察される。

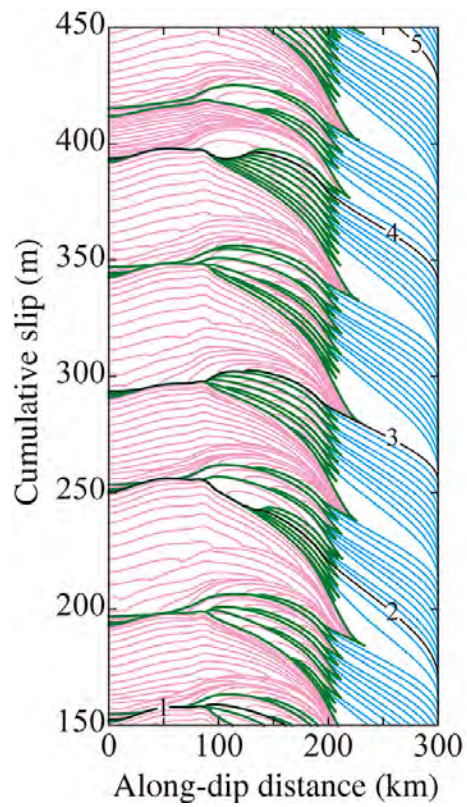


図 20

地震サイクルシミュレーションの結果。累積変位量を一定の時間間隔でプロットしている。浅部（横軸 100 km 程度まで）には JFAST 試料、深部（横軸 100 km から 200 km 程度まで）には藍閃石片岩試料、それぞれの摩擦特性を用い浅部は摩擦発熱による間隙圧上昇の影響を組み込んでいる。黒：1000 年毎、青：50 年毎、ピンク：地震時 10 秒毎、緑：地震の初めと終わりのスナップショット。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

内陸地震発生の理解と予測に向けて

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

4. 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

これまでに内陸地震の研究は，各機関によって，それぞれの地域の特徴を活かした観測フィールドにおいて研究課題が提出され，実施されてきた。しかしながら，内陸地震の発生は，現象を支配する共通の物理メカニズムが存在すると考えられる。そのため，本研究では，それぞれのフィールドで得られた研究成果をもとに知見を合わせる中で内陸地震発生の現象の根幹を支配している物理を明らかにし，内陸地震の発生予測の進展を目指す。また，これまでの研究では，多くの研究課題の最終結果が現象の理解にとどまってしまうことが見られた。その反省をうけて，本課題では“日本列島広域統合コミュニティモデルの構築”を一つの柱として設定するとともに，各柱の中で予測に向けた研究観測を実施し，得られた結果を積極的に長期予測にどう生かせるかを明確にする。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

内陸地震研究を 4 本の柱(地殻応答による断層への応力载荷過程の解明と予測，内陸地震発生の物理モデルの構築，日本列島広域統合コミュニティモデルの構築，地震・火山噴火発生場の解明

と地震火山相互作用の解明)で構成し、本計画の組織の中に上記関連課題の実施グループの責任者を中心に構成される研究推進委員会を組織する。本計画では、研究推進委員会を中心として、それぞれの研究課題間の連携を図り、成果の取り纏めと関連する分野に対する成果の活用を図るとともに、予測に向けた研究のかじ取りを行う。

(a) 研究成果の取り纏めと予測に向けた研究の推進

上記の4本の柱の研究の推進を図るとともに、それらの連携による内陸地震の発生メカニズムに対する定量的モデルの構築を目指す。広域統合モデル構築の成果と観測研究の成果に基づき、島弧内の広域変形、地殻・断層スケールの弾性/非弾性不均質構造、内陸地震域への応力蓄積・集中プロセスの定量的理解を深め、得られた研究成果の取り纏めと、予測に向けた研究推進のための検討を行う。

(b) 研究推進委員会や研究連絡会の開催

各課題の責任者によって構成される研究推進委員会を定期的開催し、各研究課題や関連する研究課題の連携およびこれらの研究の効果的な推進を図る。

平成 26 年

- ・関連する課題責任者による研究推進委員会を年2回程度開催し、各研究課題によって得られた研究成果をもとに内陸地震の現象を理解するとともに、予測に向けた今後の研究方針を検討する。

- ・東北地方太平洋沖地震の地震時や余効変動に伴う地殻活動の把握を行うとともに、互いの観測計画の確認と研究の方向性に関しての議論と検討を行う。

平成 27 年

- ・関連する課題責任者による研究推進委員会を年2回程度開催し、各研究課題によって得られた研究成果をもとに内陸地震の現象を理解するとともに、予測に向けた今後の研究方針を検討する。

- ・地殻流体と内陸地震との関係についての理解を深める。

- ・実験によるデータと地殻活動の観測データの比較検討から、地殻およびマンツルの粘性・弾性・塑性についての理解を深める。

平成 28 年

- ・関連する課題責任者による研究推進委員会を年2回程度開催し、各研究課題によって得られた研究成果をもとに内陸地震の現象を理解するとともに、予測に向けた今後の研究方針を検討する。

- ・さまざまな研究課題の成果をもとに、日本列島広域統合コミュニティモデルの構築に向けての議論をおこない、モデルを構築する。

- ・互いの観測・研究計画の確認と研究の方向性に関しての議論と検討を行う。

平成 29 年

- ・関連する課題責任者による研究推進委員会を年2回程度開催し、各研究課題によって得られた研究成果をもとに内陸地震の現象を理解するとともに、予測に向けた今後の研究方針を検討する。

- ・日本列島広域統合コミュニティモデルによるシミュレーション結果と東北地方太平洋沖地震の地震時や余効変動に伴う地殻活動との比較検討を行い、コミュニティモデルの高度化を行う。

平成 30 年

- ・関連する課題責任者による研究推進委員会を年2回程度開催し、各研究課題によって得られた研究成果をもとに内陸地震の現象を理解し総括を行うとともに、予測に向けた今後の研究方針を検討する。

- ・これまでのデータと解析結果をもとに、内陸地震の物理モデルの構築をおこなう。

- ・観測データとの比較検討より日本列島広域統合コミュニティモデルの改良を行う。

- ・関連する課題研究関係者による研究成果の総括と、長期地震活動予測についての総括を行いハザード予測貢献に関しての可能性の議論を行う。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度~30 年度)の成果の概要:

内陸地震発生の理解と予測を目指し、内陸地震断層の理解とモデル化、東北地方太平洋沖地震の効果による地殻応答、コミュニティモデルの構築やモデルを用いたシミュレーション等の研究が関連する

各課題において行なわれた。それらの関係する課題責任者を含めた研究推進委員会をおこない、現状での理解と今後の方向性についての議論をおこなった。

現計画の内陸地震の研究においては、地殻応答が一つの主要なテーマとなっており、地殻応答の研究においては断層面上にどう力がかかるか応力の状態を知る必要がある。その際には地殻・マントルの不均質構造を理解することが大切であることが再認識された。方針としては、観測による地殻マントルのモデルの構築とそれに基づいたシミュレーションを行い、シミュレーション結果と地殻活動との比較検討にもとづき、モデルの精緻化をおこない、発生ポテンシャルの予測につなげていくことである。2011年東北地方太平洋沖地震の発生から5年以上が経過しても、東北地方内陸での誘発地震活動は依然として継続しているが、活動には時空間変化がある。この変化は誘発地震活動の原因を探る上での重要な情報となる可能性があるため、今後も誘発地震活動の時空間変化が調べられていく必要がある。地殻応答に関する研究では、計算機の進歩も激しく粘弾性モデルでも検討できた。粘性の影響が見えてきたことが大きな進歩であると考えられる。一連の活動を通じて粘性緩和の理解が進んだことも重要な成果であろう。

断層のモデル化においては、2次元の簡単なモデルでの理解であったものが、詳細な観測により、断層端の詳細なメカニズム解など細かい点にまで理解が進んだ。今後普遍性について研究を進めていくことが重要である。地殻内流体は重要な要素である。特に群発地震に関しては、地殻内流体の影響が大きいと考えられる。地震波速度構造や比抵抗構造など、解析結果を表示する際にカラーマップ等で議論を行う際に、カラースケールを変えると見解が変わることもあるので、絶対値で議論できるようになることが重要である。アスペリティ、地震波速度分布、比抵抗分布に関しては領域の特徴として調和する結果が得られてきているので、今後はどのように普遍化できるかが重要である。

基本構造モデルについては、プロトタイプのモデルを作ったが、プレートの厚さに関する知見が充分でないことが明らかになった。また、基本構造モデルの全体のアップデートを今後どのように行っていくかが重要な課題である。そのなかでプレート形状を改定していくことは重要である。現在は、震源分布からプレートの形状を求めているが、今後どのように改定を進めていけるかが重要であろう。また、海底ケーブルのデータの使用による解析結果の取り込みが今後の方向性の一つであろう。地殻構造については、モホ面はモデリングできているが、コンラッド面は難しいので、今後の課題である。モデルのアップデートに関しては、データソース側の研究者の協力が重要である、

また、広域での理解が必要であるため、海外とのデータ交換を含め考えていく必要がある。GPS等のデータは中国、ロシア等のデータが重要となるため、研究者個人同士のつながりだけでなく、コミュニティとして繋がりを持っていくことが重要である。

地震と火山の相互作用については力学作用を研究したが、明確な物理的プロセスがわからなかった。今後も研究を続けていく必要があるとともに、長い期間で見えていく必要がある。

この5年間の重要なテーマの一つとして地殻応答に関する研究を行ってきたが、計算機の進歩も激しく粘弾性モデルでも検討できた。粘性の影響が見えてきたことが大きな進歩である。また、粘性緩和の理解が進んだことも重要な成果であろう。断層のモデル化においては、詳細な観測により、断層端の詳細なメカニズム解など細かい点にまで理解が進んだ。今後普遍性について研究を進めていくことが重要である。この計画から始められたコミュニティモデルの作成においても、プロトタイプのモデルが作成された。今後は、そのアップデートが課題となるが、引き続き続けていく必要がある。地震と火山の相互作用については力学作用を研究したが、明確な物理的プロセスがわからなかった。今後も続けていくとともに、長い期間で見えていく必要がある。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要 :

本課題が実施してきたことと、目指すべき方針下記となる。次期計画では、現象解明部会全体において理解し議論を進め総括を行うとともに、予測に向けた今後の研究方針を検討する。

- ・関連する課題責任者による研究推進委員会を年2回程度開催し，各研究課題によって得られた研究成果をもとに内陸地震の現象を理解し総括を行うとともに，予測に向けた今後の研究方針を検討する。
- ・これまでのデータと解析結果をもとに、内陸地震の物理モデルの構築をおこなう。
- ・観測データとの比較検討より日本列島広域統合コミュニティモデルの改良を行う。
- ・関連する課題研究関係者による研究成果の総括と，長期地震活動予測についての総括を行いハザード予測貢献に関しての可能性の議論を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京大学地震研究所（岩崎貴哉，平田直，佐藤比呂志，小原一成，上嶋誠，飯高隆，酒井慎一，蔵下英司，石山達也，五十嵐俊博，福田 淳一，小河勉）

他機関との共同研究の有無：有

北海道大学・弘前大学・東北大学・茨城大学・千葉大学・東海大学・名古屋大学・京都大学防災研究所・金沢大学・九州大学・鹿児島大学・防災科学研究所

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5712

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：飯高 隆

所属：東京大学地震研究所・地震火山噴火予知研究推進センター

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

日本列島基本構造モデルの構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

東北地方太平洋沖地震は、日本列島の沈み込みシステムに大規模な影響を与えており、この巨大地震によって引き起こされるプレート境界及び島弧内陸域の地殻活動を定量的に明らかにしていくことは、喫緊の重要な課題となっている。近年、詳細な地震観測網の整備や解析方法の進展、大規模な制御震源による地殻構造探査によって、日本列島の沈み込みシステムの基本構造についての知見は著しく増加した。しかしながら、これらの情報が組織的・統一的に集約され統合的な共通モデルが構築されているわけではない。日本列島の基本構造についてのコミュニティ・モデルの構築とそれらの更新は、日本列島の地殻活動予測にとって本質的に重要であり、現状の活動を把握し、今後の観測を合理的に進めていくためも欠かせないものである。東北太平洋沖地震に関して言えば、プレート境界をこれまでの研究成果から可能な限り正確に定義し、その面上での運動(地震時滑り及び余効滑り)による島弧域の弾性的/粘性的変位・歪・応力を計算し、現在進行中の地殻活動との比較によってプレート境界及び島弧域のモデルの妥当性を検証し、地殻活動の背景となる物理的メカニズムの理解につながるであろう。また、島弧域の広域応力の蓄積過程がある程度定量化できれば、島弧内の構造モデルをより精緻化し、更に列島内に分布する断層をモデル化することによって内陸地震活動の理解にも大きく貢献することができる。

本課題は、こうしたコミュニティ・モデルを構築し、これらを共有し、更新していくことにより、地殻活動予測、巨大地震発生にいたるプロセスの定量的な理解など、火山噴火予測を含む多様な地殻活

動についての定量的な理解を深めようとするものである。日本列島は、千島弧・東北本弧・西南日本弧・琉球弧・伊豆小笠原弧から成り、各々の島弧下で進行しているプレート沈み込みが複雑な相互作用を及ぼしあっている。従って、これらの領域を広範に覆う領域でのモデル化が必要である。特に東北地方太平洋沖地震後の地殻変動・地震活動現象等を支配する歪み・応力状態の定量的評価に必要な項目を含むものとし、ジオダイナミクス・被害地震の発生評価などを考慮し、統合モデルは以下の6要素を表現するものとなる。

(1) 地形、(2) 沈み込みプレート境界、(3) モホ面、地殻内脆性/延性境界 (eg. D90)、(4) 震源断層の形状、(5) リソスフェア・アセノスフェア境界、(6) 日本列島下のマントルおよび地殻のレオロジー

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本提案は、既往の成果を可能な限り収集・整理し、(6)で挙げた6つの要素についてのデジタルモデル (grid データ) を構築していくものである。従って、研究というより地道な実作業という色彩が濃い。本研究で対象とする要素の中の地形及びプレート境界についてモデル化がかなりの程度進んでおり、5ヶ年計画の初期の段階で整備する。また、モホ面・脆性/延性境界、震源断層については、現在も調査・研究が進行しており、その成果を随時取り込みながら、5ヶ年かけて実施する。また、リソスフェア・アセノスフェア境界、日本列島下のマントルおよび地殻のレオロジーについては、境界の位置や物性値そのものについても不明な点も多く残されている。これらについては、その直接的(実験的)/間接的な推定方法の開発も含め、研究的要素が強い。5ヶ年計画の前半では関係研究者による集会を通じて最新の知見を集約し、後半で実験/実作業を行うこととしたい。表1に5ヶ年計画の概要を示し、モデル化の手順の要約する。

(1) 地形・海溝軸モデルの構築 (H26年度)：対象域における地形データを統合する。更にモデルとしての海溝軸を定義する。(H26年度)。

(2) プレート境界モデルの構築 (H26-27年度)：これまでの制御震源探査・tomography 解析・高精度震源分布に基づき、Pacific Plate 及び Philippine Sea Plate 境界を定義する。

(3) 日本列島及びその周辺の震源断層モデルの構築 (H26-30)：これまでの制御震源構造探査・変動地形的調査等に基づき、震源断層の位置・形状のモデル化を図る

(4) 日本列島下のモホ面及び脆性・延性域境界モデルの構築 (H27-30)：これまでの制御震源探査・tomography 解析・高精度震源分布に基づき、日本列島下のモホ面及び脆性・延性域境界モデルの構築のモデル化を図る。

(5) リソスフェア・アセノスフェア境界の構築 (H26-30)：広域・深部 tomography・これまでの地殻変動シミュレーションの結果を踏まえ、日本列島周辺のリソスフェア・アセノスフェア境界及びその粘性的構造を推定する。

(6) 日本列島下の岩石モデル・レオロジーモデルの構築 (H26-H30)：これまでの制御震源探査・tomography 解析から得られた地震波速度構造・比抵抗構造を組み合わせ、まず島弧スケールにおける岩石モデルを構築する。構成岩石の推定は、室内での高温・高圧下での弾性波速度の測定結果との比較によって行う。高温変形試験を行い、岩石の粘性についての基礎資料を直接的に得る。日本列島下の温度構造についての知見を加え、レオロジー構造を推定する。

尚、ここで想定しているモデルでは、観測されている細かい形状変化などが、報告されている場合は、それらを反映したものとし、数値計算に必要なスムージングなどについては、初期モデルでは実施しない、いわば観測寄りの統合モデルを想定する。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要：

近年、詳細な地震観測網の整備による高精度震源分布や大規模な制御震源による地殻構造探査や tomography、RF 解析等によって、日本列島の沈み込みシステムの基本構造についての知見が著しく増加した。しかしながら、これらの情報が組織的・統一的に集約され統合的な共通モデルが構築されているわけではない。日本列島の基本構造に対するコミュニティ・モデルの構築とそれらの更新は、日

本列島の活動予測にとって本質的に重要であり、現状を把握し、今後の観測を合理的に進めていくためにも欠かせないものである。本研究は、既往の成果を可能な限り収集・整理し、下記の6つの要素についての基本構造デジタルモデルを構築していくものである。

- (1) 地形・海溝軸モデルの構築
- (2) プレート境界モデルの構築
- (3) 日本列島及びその周辺の震源断層モデルの構築
- (4) 日本列島下のモホ面及び脆性・延性域境界モデルの構築
- (5) リソスフェア・アセノスフェア境界の構築
- (6) 日本列島下の岩石モデル・レオロジーモデルの構築

1. プレート境界モデルの構築

5年間の成果:日本列島周辺域プレート境界モデル (Regional Model) の修正: 日本列島周辺においては、様々な地球物理的観測・解析が行われており、上記の広域モデルより高精度のプレート境界位置が求められている。前年度までの作業を元に、今年度はプレート境界位置の修正及びフィリピン海プレートの、太平洋プレートとの接合部の形状モデルの検討を行った。また、関東域における構造探査を元に、同地域の複雑なフィリピン海プレート形状の再定義を試みた。このモデルでは、伊豆半島北部から北西方向に顕著な屈曲が見られ、今後の詳細な検討が必要である。また、太平洋プレート及びフィリピン海プレートモデルについて、下記のサイトからの公開を開始した。 <http://evrress.eri.u-tokyo.ac.jp/database/PLATEmodel/>

2. 日本列島及びその周辺の震源断層モデルの構築

H30年度は、6月に発生した大阪府北部の地震 (M6.1) の震源域周辺の反射法地震探査データを収集するとともに、Sato et al. (2009) の大大特データについて MDRS 法などによる再解析を行うとともに、構造解釈を行い、上町・仏念寺山断層の下方延長部が震源域近傍まで延びることを示した (図1)。

5年間の成果:九州・関東・東北・中国・四国・近畿地域において、これまで実施された主な反射法地震探査データを収集するとともに、活断層に関する変動地形・第四紀地質学的データを説明する活断層の幾何学的形状を推定した。このような地質学的データ・解析に基づき断層面の傾斜を推定すると共に、Hi-netの地震活動データに基づくD90から求められた地震発生層の厚さや、断層深部の地震活動を用いて、九州・関東・東北・中国・四国・近畿地域の内陸活断層について、震源断層モデルを推定した。

3. リソスフェア・アセノスフェア境界の構築

H30年度は、大和海盆および日本海盆に設置された海底地震計を用いて、日本海直下のリソスフェア・アセノスフェア境界 (LAB) の検出を目指した。LABに由来するPs変換波を検出するために、レシーバ関数解析がよく用いられる。しかし、海底地震計のデータでは海面・海底面・堆積層底部に由来する反射・変換波が卓越するために、従来のレシーバ関数の手法がうまく機能しない。この問題に対処するため、ベイズ統計に基づく新手法を開発した。また、鉛直方向空間分解能は劣るものの、より堆積層や海水層の影響を受けにくい手法として、Sp変換波の抽出を行った。大和海盆の地殻が日本海盆の地殻よりも厚いという結果が現時点までに得られており、先行研究と調和的である。Ps変換波とSp変換波を併用して、LABの深さを推定するジョイントインバージョン法を開発中である。

5年間の成果:日本海直下のリソスフェア・アセノスフェア境界 (LAB) の検出を目指して、大和海盆および日本海盆において、海底地震計による自然地震観測を行った。これまでに、大和海盆では3年間、日本海盆では1年間の観測データが得られている。これらのデータに対して、実体波トモグラフィ解析・表面波トモグラフィ解析・レシーバ関数解析を適用した。いずれの解析からも、LABを示唆する地震波低速領域が、深さ約60km以深に見られている。

4. 日本列島下のモホ面及び脆性・延性域境界モデルの構築

H30年度は、Matsubara et al. (2017) によるMoho面データをプレートの形状を考慮して切り取るとともに、Matsubara et al. (2017) に含まれない領域についてはglobalなMoho面モデル (crust1.0, Laske et al., 2013) を用い、これらを滑らかに接続して、モデル領域全体にわたるモホ面モデルを提出した (図2)

5. 日本列島下の岩石モデル・レオロジーモデルの構築

H30年度は、内陸地震の形状推定に必要な地震発生層の厚さを推定するため、東北本州弧の地殻構成岩石モデル (Nishimoto et al, 2008; 石川, 2017) と同様に岩石の弾性波速度と地震波速度構造を比較することで上部地殻・下部地殻境界の推定と上部地殻の構成岩石の推定 (石英質な上部地殻と苦鉄質上部地殻を区分) を試みた (図 3, 4)。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Akuhara, T., Bostock, M. G., Plourde, A. P., & Shinohara, M. (2019). Beyond Receiver Functions: Green's Function Estimation by Trans Dimensional Inversion and Its Application to OBS Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JB016499> Becker, W.T., A. Hashima, A. M. Freed, H. Sato, Stress change before and after the 2011 M9 Tohoku-oki earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, 504, 174-184, 2018. 石川正弘, 2018, 本州弧の地殻深部及び最上部マントルの構成岩石の推定, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会石山達也・佐藤比呂志・阿部 進, 2018, 大阪堆積盆地の震源断層モデル, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, S24-04. 櫻木 颯, 石川 正弘, 2018, Elastic wave velocity change caused lawsonite decomposition in blueschist at 1.0 GPa and up to 550 °C, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会坪川 祐美子、石川 正弘, 2018, Ultrasonic velocity measurements of plycrystalline clinopyroxene under high P-T conditions, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画では、観測と日本列島基本構造モデルの構築・更新と地殻活動予測を統合的に実行し、地殻活動予測、巨大地震発生予測、火山噴火予測を含む多様な地殻活動についての定量的な理解を深めることを目的としており、海陸地震観測、長期間地殻変動、日本列島基本構造モデル、数値計算の 4 つの研究を順次開始する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

佐藤 比呂志・岩崎 貴哉・石山 達也・篠原 雅尚

他機関との共同研究の有無 : 有

参加人数 : 20 名 .

参加機関 : 防災科学技術研究所・国土地理院・海上保安庁・海洋研究開発機構・岩手大学・東北大学・新潟大学・愛知教育大学・中部大学・京都大学 .

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京大学地震研究所

電話 : 03-5841-5712

e-mail : yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL :

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 岩崎 貴哉・佐藤 比呂志

所属 : 東京大学地震研究所

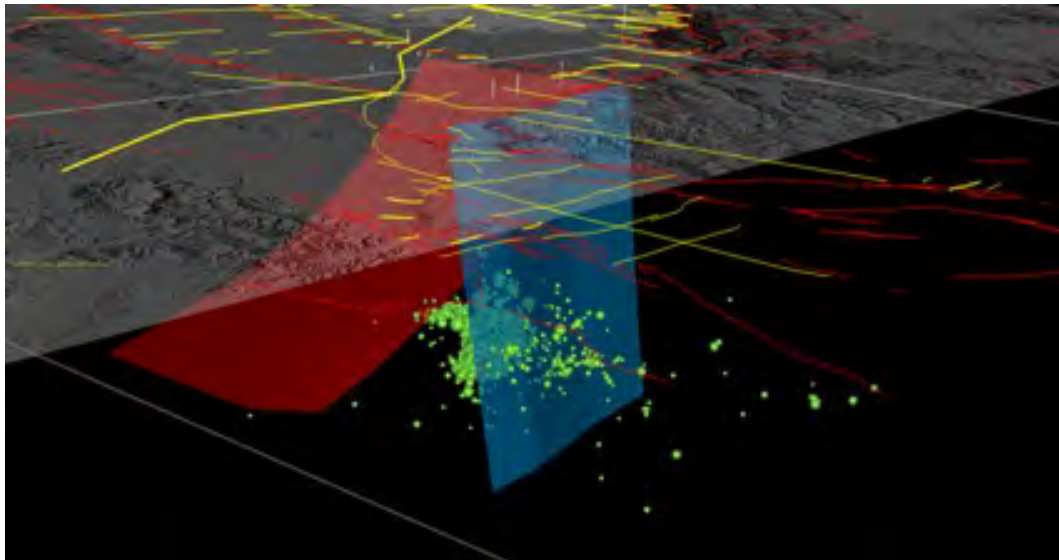


図1 大阪府北部の地震の震源分布と反射法地震探査データの構造解析に基づく上町・仏念寺山断層の震源断層モデル(赤色の面)。青色の面は有馬高槻断層帯の震源断層モデルを示す。震源分布(黄緑色の点群)は気象庁一元化震源を使用した。

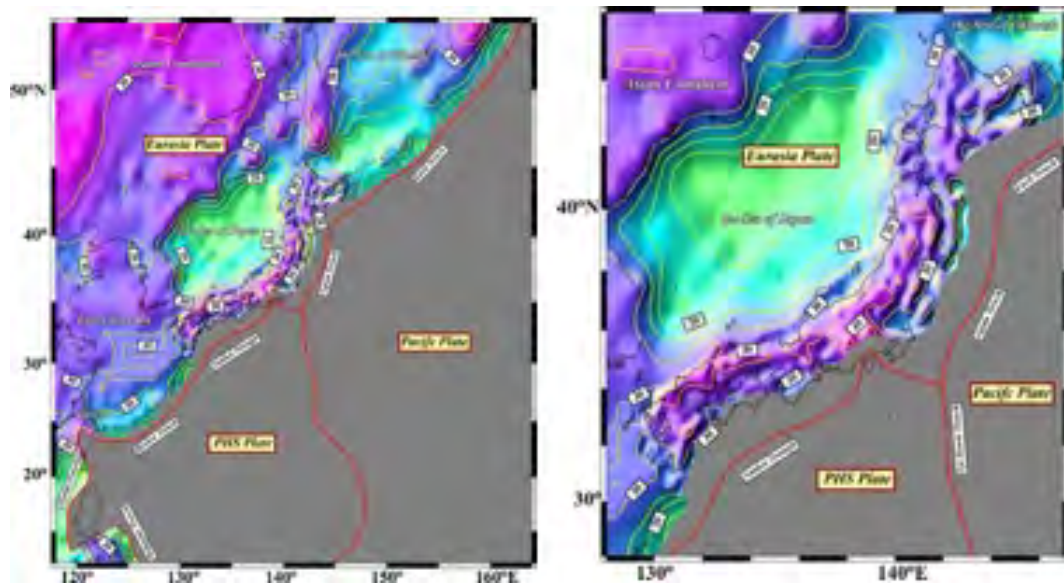


図2 ユーラシアプレートのもほ面。
左図はモデル領域全体、右図は日本列島周辺域を示す。日本周辺は Matsubara et al. (2017)、周辺域は crust1.0(Laske et al., 2013) による結果を用いた。更に本研究で求めた太平洋プレート境界面で切り取った。

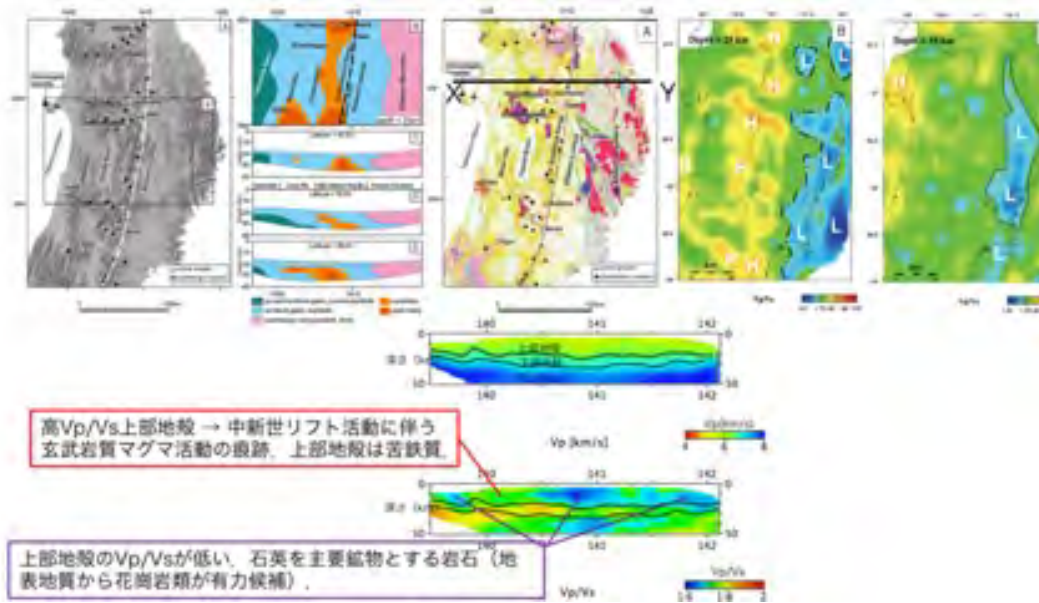


図3 東北本州弧の地殻構成岩石モデル (Nishimoto et al, 2008; 石川, 2017)。

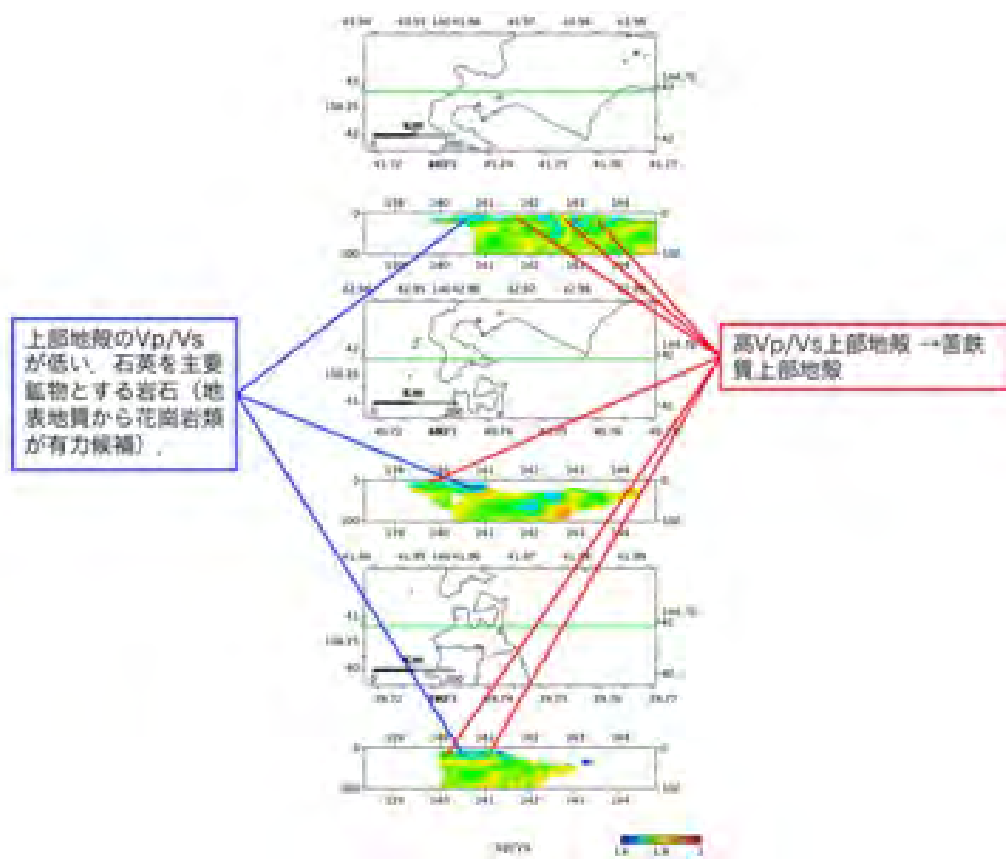


図4 東北本州弧の地殻構成岩石モデル (Nishimoto et al, 2008; 石川, 2017) と同様の手法で推定した同北部・北海道南部の地殻構成岩石モデル。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

小型絶対重力計を用いた火山監視技術の開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

マグマ噴火を主体とする火山において、その活動を予測するためにはマグマの動きを監視する技術が不可欠である。重力観測はマグマ移動に伴う密度変化に感度をもち、GPS など地表変位の観測と相補的に地下深部の情報を引き出すことができる。これまで絶対重力計と相対重力計を組み合わせたハイブリッド重力観測により、火山活動に伴う重力変化が観測されているが、本課題では小型絶対重力計を用いて火口の近傍で精度の高い重力観測を行い、マグマ活動を監視する技術を開発する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」で開発された小型プロトタイプ絶対重力計を用いた試験観測による実用性の向上と並行して、装置のさらなる小型化と火口近傍での観測技術開発をすすめる。重力以外の観測とも組み合わせ、5 年程度の期間で絶対重力による火山監視技術を開発する。平成 26 年度においては、小型プロトタイプによる試験観測、および光源の小型化を行う。平成 27 年度においては、小型光源の組み込み、および小型落下機構の導入を行う。平成 28 年度においては、新型プロトタイプ(小型光源・落下機構)による試験観測、および山体設置法の研究を行う。平成 29 年度においては、新型プロトタイプの火山体における試験観測、およびデータ通信試験を行う。

平成30年度においては、火口近傍での観測実証試験(1年程度)を行う。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要:

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」において、マグマなど火山流体の移動を重力変化によって検知するための小型絶対重力計を開発した。計測の誤差となる地面振動を補正するための組み込み加速度計や計測に使用する落体の回転を抑えるサイレントドロップ法により、開発した絶対重力計プロトタイプ TAG-1 は市販品の70%程度のサイズとなった。火山地帯を含む複数の観測点で性能評価を行った結果、既存の絶対重力計と同等の $1\ \mu\text{Gal}$ 以内の精度を確認した。一方、絶対値については過去の測定結果と比べて $20\ \mu\text{Gal}$ 程度の低下が認められた。その間、GPSデータによると地殻変動は顕著でなかったため、測定結果は装置の系統誤差による可能性があった。

本年度は TAG-1 の系統誤差の評価を継続し、石岡測地観測局(国土地理院、茨城県石岡市)における絶対重力計 FG5 との比較観測を実施した。その結果、FG5 の結果とくらべ $30\sim 40\ \mu\text{Gal}$ 小さい値が計測された。昨年よりも約 $10\ \mu\text{Gal}$ 小さい。観測期間中の変動は $\pm 10\ \mu\text{Gal}$ 程度であった。重力値へ影響する要因として考えられていた室内の温度変化や加速度計出力のドリフトについては大きな系統誤差の要因にはならず、ローカルな微小地震については外れ値を統計的に除く処理で誤差を低減させた。落体の解放時の反作用の影響に対しては干渉計部分に除振材を挿入し低減させた。一方、光検出器に既知の擬似干渉波形を受光させ、通常観測と同様に計測・信号処理した結果、求められた重力値が既知の値より数十 μGal 低減することがわかった。これを光検出器によって生じる系統誤差と考え、これまでの TAG-1 による観測値をこの系統誤差で補正した結果が、他の機器による観測値と整合するか解析を進める。

火山帯における観測については、蔵王観測所(東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター、宮城県蔵王町)において2018年11月8~19日に実施した(図1)。同じ観測基台上で超伝導重力計が稼働中であり、今回 TAG-1 との並行観測を実施した。観測初期の調整のための欠測期間(9~12日)をのぞき、11月12~19日のほぼ一週間継続した記録が得られた。地面振動の影響が組み込み加速度計信号により補正され、重力値のばらつきが低減していることが確認された。

当初計画では、本年度は観測実証試験として1年程度の期間を予定していたが、誤差評価など他の研究課題との兼ね合いやリソースの制限により火山帯での観測は短期となった。5ヶ年の計画で性能に関する主要な課題であった系統誤差に関しては概ね評価ができ、「小型絶対重力計を用いた火山監視技術の開発」という到達目標はある程度クリアできた。但し、上述のように総括的な観測実証試験の期間は短期となった。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):

新谷昌人、ファイバーネットワークを用いた地震・津波・地殻変動の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, 24, 129-131, 2018.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要:

次期計画では、本研究で得られた成果を高度化し「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」の課題として実施する。光計測技術を用いた地震計・重力計などのセンサを面的に配置し光ファイバで接続し、従来観測が困難であった地下深部や火山近傍での次世代の光ベースの地震・地殻変動観測網を構築するための手法を確立させることをめざす。H31年度は地震計・小型絶対重力計の各センサに関して、長距離の光ファイバ伝送試験を実施する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

新谷昌人、高森昭光

他機関との共同研究の有無: 有

国立天文台 田村良明、東北大学 中沢正隆ほか2名、京都大学 福田洋一ほか3名、極地研 土

井浩一郎、産総研 名和一成

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5712

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：新谷昌人

所属：東京大学地震研究所

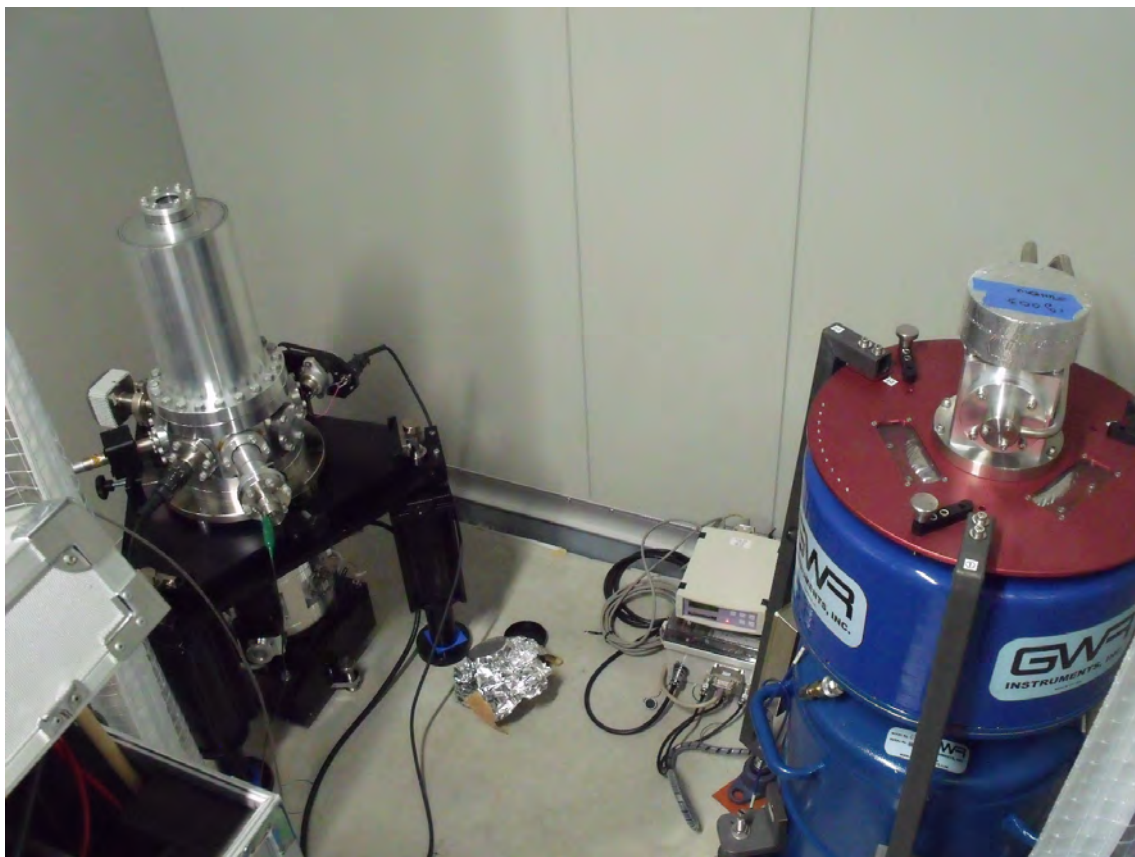


図1 蔵王観測所（東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター）における観測。左が小型絶対重力計 TAG-1、右は並行観測を行った超伝導重力計。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

次世代プレート境界地震発生モデル構築のための実験的・理論的研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

イ. 海洋プレート内部の地震

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

2011 年の東北地方太平洋沖 M9 地震は、アスペリティと認定されていなかった領域で大きな地震性滑りが生じたものであり、地震発生予測シミュレーションにおいて有望とされてきた、摩擦特性の固定的な空間分布によってプレート境界断層が固着域(アスペリティ)と準定常的クリープ域に棲み分けられているという単純なアスペリティモデルが巨大地震には適用できないことが明白となった。実際、2011 年 M9 の破壊域内部でのスロースリップが観測されている。また、スロースリップは、南海トラフ巨大地震の破壊域と予想されている部分の深部と浅部でもみつかっている。このような事実は、プレート境界の摩擦において時間・空間スケールによって異なった物理プロセスが働くことを示唆している。プレート境界での物理的条件や、物性に関してさまざまな仮定を置いてこのような観察を説明する仮説は既に提出されているが、仮定の妥当性を観測データだけから判断することは困難である。本課題では、室内実験・物理理論・数値シミュレーションの 3 つのアプローチを組み合わせて、複雑

で多様なプレート境界の滑り現象に関する観測と矛盾しないと同時に、プレート境界の条件での物理化学素過程として妥当なプレート境界の断層モデルを構築することを目標とする。その成果は次世代の予測シミュレーションにおいて設定されるべき物理モデルの指針となるであろう。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

室内実験、理論研究、数値シミュレーションは、連携を保ちつつ独立に進める。

A. 室内実験。

A1：プレート境界では、陸側プレートと海側プレートの岩盤が、未固結堆積物の層を介して接触していると考えられる。室内実験において、粉体層内に形成される剪断集中帯より十分厚い粉体層がある場合に、高速滑りによる動的な弱化によらなくても非常に長い距離にわたる滑り弱化がおこるケースが報告されている。これは、巨大地震の発生に必要な、大きなエネルギーの長期にわたる蓄積を可能にするメカニズムであり、非常に長い滑り距離のとれる回転式剪断試験機を用いて、このような現象がおこる条件を探る。

A2：プレート境界の熱水条件下では、未固結堆積物は徐々に固結し、それとともに、力学・水理特性も変化してゆくと考えられる。この様子を解明するために熱水条件下で粉体の固結実験を行う。

A3：スロースリップは、プレート境界の剪断のメカニズムが、温度・圧力・変形速度によって、脆性的なものから延性的なものに遷移することと関係している可能性がある。本課題ではアナログ物質を用いた脆性-延性の遷移の実験等を参考に物理的に妥当な形の構成則を開発する。また、より高温高压の実験を達成することで、実際の岩石における脆性-延性遷移のデータを取得する。

A4：間隙圧の強度に対する影響は、脆性域では、「有効圧 = 拘束圧 - 間隙圧」なる有効圧力の法則としてよく確立されている。しかし、プレート境界深部に存在すると考えられる蛇紋岩等では、延性変形の効果によって大きなずれが生じることが考えられるため、高温高压実験による拘束をめざす。

B. 理論的研究においては、微視的素過程から摩擦構成則を構築し、実験室データを断層に適用するために必要となるスケール則を調べる。そのために、断層スケールでの地質学的不均一性及び断層面の不規則形状をモデル化し、モデルの最小スケールにおいて摩擦則を与えて、より大きなスケールでの平均的な挙動を調べる。また、温度計を設置した自然断層において地震の発生を待ち、滑り域が10-100m程度のサイズの地震時の摩擦発熱量から地震時動摩擦の絶対値を推定する観測を継続する。計画の後半では、最小スケールで与える構成則に時間依存性をもたせて、理論の拡張をおこなう。

C. 断層滑りシミュレーションでは、複数の変形メカニズムを滑りモデルにとりこむために摩擦構成則の拡張を行ない、階層性を含めた構成則パラメータの不均質分布が地震発生パターンに与える影響や、滑り速度や温度等で卓越する変形メカニズムが交替することの影響を明らかにする。素過程としては、高速滑りによる動的弱化等、本課題での実験以外から知られているものも含めて、様々な素過程の競合・共存を検討する。滑りによる発熱や断層周辺岩石の破碎と間隙流体の非線形相互作用に関しては、ゆっくりとした流体移動から高速な断層滑りまでの一見多様に見える動的な地震破壊を体系的に理解することをめざす。また、不均質媒質中の地震破壊伝播計算手法の開発を行い、断層周辺の不均質構造と地震断層破壊との力学的相互作用を取り入れた定量的モデルを構築する。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度～30年度)の成果の概要：

平成30年度

法線応力・剪断応力変化による断層面状態の変化を考慮した地震トリガの評価

余震や誘発地震といった現象は、遅れ破壊性をもつ摩擦則に従う断層の応力擾乱に対する応答として理解することができる。応力擾乱から誘発地震までの遅れ時間が最も基本的な情報であり、今まで考慮されていなかった剪断応力依存性(Nagata et al., 2012)をとり入れた摩擦則を使った場合に、静的(近隣の地震による断層の変位によりステップ的に応力が変化する)、動的(地震波の通過による一過性の応力擾乱、遠方まで影響が及ぶ)な応力擾乱から誘発される地震までの遅れ時間を計算した(Yoshida, 2018)。さらに、Linker&Dieterich(1992)が導入した、摩擦強度に対する法線応力変化を組み込んで計

算し直した(図1)。動的・静的擾乱のそれぞれについて、トリガリング効果は、従来のクーロン摩擦で定義されていたデルタ CFF に、これら二つの効果を組み込んだ修正デルタ CFF でほぼ決まっている。一方、静的擾乱と動的擾乱では同じ修正デルタ CFF でもトリガリングの強さが大きく異なる。そこで動的応力変動に対してそれと同等のトリガー効果を及ぼす静的デルタ CFF(図1のデルタ CFF_{eq})を求める方法を提案した。この等価 CFF は変動の時間積分を含む関数なので、トリガー効果は動的擾乱の周波数への依存性はほとんどないと推定されるが、そのことは数値シミュレーションによっても確認された。

複雑な幾何構造をもつ断層のダイナミクス

フラクタル的な凸凹をもつ粗い断層面における地震発生過程を調べるため、境界要素積分法によるシミュレーションを行った。粗い断層は微小な直線セグメントからなっており、各セグメントには速度状態依存摩擦法則を仮定し、状態の発展法則には slip law を用いた。この系で震源核形成ダイナミクスを詳細に追った結果、地震性高速すべりの発生前に非地震性の遅いすべりが発生し一方向に移動し(図2)、断層の粗さが増すと(粗さの振幅が大きい/最短波長が短い)その移動距離がより長くなることが見い出された。このことは、より大きなモーメントが準備段階の間に解放されることを意味する。さらに、断層の粗さがある程度以上になると、断層は地震性の速い滑りを起こせなくなり、スロー地震のようなイベントが期待されることも見い出された。これらの現象は、断層の粗さによる抵抗応力の概念で定量的に記述される(Ozawa et al., 2019)。

津波数値計算法の理論的基礎づけ

地震に伴う海底地殻変動は、海面変動を引き起こし、そこを源として津波が発生する。非圧縮非粘性流体を仮定し、一様水深のモデルを考える。海底面において上下変動が発生した時、瞬時に応答する海面における上下変動は海底面デルタ関数入力に対する海面変動を表すグリーン関数 G (無次元量)の畳込みで表される。 G は梶浦フィルター(Kajiura, 1963)として広く津波研究において利用されている。梶浦フィルターの積分表現は0次の第1種 Bessel 関数を含むので、実際の津波研究においては数値計算に便利な級数表現がもっぱら利用されている。ここでは積分表現から出発し、 $1/\cosh(x)$ を指数関数で級数展開し項別積分を行い、級数表現式に至る導出の計算過程を全て示した(日下部・亀, 2018)。大きな SSE を含む地震サイクル

昨年度までに、熱水摩擦実験(e.g., Nakatani & Scholz, 2004)などで知られる、低速滑りのみに関連する微視的強度回復過程を脆性-延性遷移域に仮定した連続体シミュレーションでは大きな SSE が起き、固有地震はその SSE による載荷によって短い時間で誘発される場合が多いことを示していた。本年度は、これらのシミュレーションで、脆性領域での破壊エネルギーが標準的な脆性モデルと同じであるにもかかわらず、遷移域での摩擦特性を変えることによって震源核の臨界サイズが大きくなった理由を考察し、プレスリップの滑り分布が、標準的な脆性摩擦によるものと比べて中央部(遷移域に相当)でべったりした形(図3)となり、この部分は、プレスリップのモーメントには大きく貢献する一方、破壊進展力(震源核先端への応力集中)への寄与効率は低いからであることを見出した(Ohtani et al., 2019)。

媒質粘弾性を考慮した地震サイクル

断層挙動の地震から SSE への遷移は、摩擦法則の深さ依存性で解釈されることが多いが、高温で周囲の媒質が粘弾性応力緩和することで急激な破壊が起きにくくなる可能性も考えられる。2次元面外問題の動的地震サイクルシミュレーション[Lapusta et al., 2000]に、地震間の粘弾性緩和を実装して従来の手法に比べて高速かつ省メモリなシミュレーションを実現することで、この点を検討した(三宅, 2019)。速度弱化パッチに関し、摩擦則の特性滑り距離 L と媒質の緩和時間 t_c に関するパラメータスタディを行ったところ、 t_c が減ると地震性パッチが非地震性になった。しかしこの遷移ではスロー地震は発生せず、地震の再来周期が有限 t_c で発散し、速度弱化パッチが永久に固着する挙動が見られた(図4)。 t_c を減らすと、スロー地震の発生できる条件の範囲は狭くなる。初期値依存性などの問題もあり、予察的な結果ではあるが、スロー地震を伴うタイプの地震性-非地震性遷移では、媒質ではなく摩擦の性質の変化が重要であると結論付けられる。

巨視的な滑りイベントの伝播モードに関する新しい統一理論

これまで滑り速度に放物型に依存する摩擦則の下での滑り端の伝播において、問題を線形化して支配方程式が波動方程式と拡散方程式の組み合わせとみなされることを見出し、拡散により加速される伝播端と減速される伝播端が存在することを示してきた。摩擦力がゼロになる滑り速度での摩擦応力 滑り速度曲線の勾配のみが伝播速度を決定すると示されたことがポイントであるが、今年度は、「摩擦力がある滑り速度でゼロになる」という条件を満たさない、より一般的な非線形摩擦則への拡張の可能性を検討した。完全な定常解はなくても、摩擦がゼロに漸近するのであれば、有限の時間内では定常状態に近い状態が実現すると期待される。

計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要

地震発生域から深部 SSE の発生域にいたる脆性 延性遷移域のレオロジーに関して、岩塩を用いて遷移域を完全に横切る実験を行い、有効応力則に対して主に理論的な観点から提案されていた、真実接触面積の増加による補正項が必要ないことを示し、その物理的理由を提案した。このことは、断層強度が遷移深さで急峻なピークを持たないことを示唆する。また、玄武岩質の海洋地殻の変成によりプレート境界に広く存在する板状鉱物である緑泥石(いわゆる弱粘土鉱物ではない)が広い条件で低い摩擦強度と速度強化を示す実験データを得た。一方、塑性をおこしにくいはんれい岩質海山と塑性をおこしやすい石英質堆積物の影響を考慮した、東北地方のプレート境界の強度分布モデルを提唱し、さらに、石英質堆積物の塑性強度については、水の化学的効果を考慮した新たな理論を作り、これまで矛盾点の多かった再結晶粒径による地質応力計のデータを体拡散律速型の回復クリープとして合理的に解釈することができた。これは、地震や SSE のおきる地学条件よりずっと高い温度でおこなわれる塑性変形の実験データを正しく外挿して用いるために重要な知見である。500 程度で変成を受けた海洋地殻の石英質堆積物に改良された地質応力計を適用すると差応力が 30-60MPa と推定された。

一方で地殻浅部の断層強度を推定するため、地下 3km で百メートル程度の断層が滑った深部鉱山での地震断層について、地震前後のドリリング等から得られた様々な情報を併せて、実験室から得られる高い摩擦係数が支持されることが確認された。また、地震時の高速滑りで重要であると考えられている真実接触部の瞬間的発熱について、その温度を正しく実測することに成功し、これまでの通説よりずっと高い、常温での石英の融点を超えるほどの高温が発現することが示された。また、摩擦発熱が間隙水を膨張させておきる動的弱化による断層挙動のバリエーションを、少数の無次元パラメタによって整理する理論をまとめた。

摩擦の微視的物理解理メカニズムに関して、真実接触面積の光学的モニタリングと巨視的摩擦強度の滑り弱化学動の比較から、真実接触面積の低下だけでは滑り弱化学動が説明できないことを見出した。また、摩擦強度と接触面の音波透過率の関係を調べた室内実験の結果をスケールアップし、巨大地震のサイクルシミュレーションで予想されるプレスリップでは、滑りがごく小さい段階でも、摩擦面の固着度が大きく低下するため音響探査で顕著なシグナルが期待できることを提案した。これまで、このような摩擦挙動の微視的理解は、接触面積等、微視プロセスの平均値を用いて、巨視的な応力・変形を記述するというアプローチで行われてきたが、本課題では、微視的な接触サイズの分布から摩擦の物理モデルを組み上げ、巨視的摩擦法則の特徴滑り距離と状態変数の微視的表現を導出した。一方で、非常に低圧での実験ではあるが、厚い粉体層の摩擦において、非常に長いメートル級の特性滑り距離をもつ可逆的な強度変化が見つかった。剪断集中ゾーンの外側での粒子配置の変化による可能性があり、滑り変位の限られた従来の実験に基く摩擦則には取り入れられていないものである。また、画像処理による粒径解析の技術を高度化させ、ショ糖を用いた実験で、破碎によって粒子分布がフラクタル分布に発展してゆく経過を追うことができた。

一方で、逆に巨視的摩擦パラメタが不均質分布する系の長期的・平均的な挙動を粗視化して表現する試みも行い、パラメタの平均から予想されるふるまいと実際の粗視化挙動は関連しているが、量的にかなり違うことを示した。

断層の不規則な表面形状と物性の不均質を具体的にモデリングして破壊伝播を予測するための計算

法の開発が、基礎理論の再検討から、実装用の関数表現の導出まで進んだ。また、均質な弾性体中にあるフラクタルな形状をもつ面での摩擦すべりを直接計算することによって、断層の粗さが増すと巨視的な挙動が安定化することを見出した。

応用的な研究としては、遷移域での摩擦の速度弱化が低速に限られている場合に、遷移域で非常に大きな SSE が起きることが可能で、それは大地震を誘発する強い効果があることをサイクルシミュレーションで示した。また、東北地震後におきたリピーターの発生パターンの顕著な変化が、実測した余効滑りによる載荷で駆動される摩擦滑りモデルでよく説明されることを示し、そのようなモデルによる逐次予測の実験を行った。また、実験で改良された摩擦則を用いて、動的・静的な地震トリガ効果を再評価し、これらを統一的に表現する方法を提案した。

このように五年間の研究の進展は、(7) とおおむね一致した成果をもたらした。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
日下部哲也・亀伸樹, 2018, 津波のグリーン関数 Kajiura Filter の級数表現の導出, 地震 2, 71, 117-119, doi: 10.4294/zisin.2017-16.
桑野修, 2018a, 高速せん断される摩擦接触面の発熱の可視化 断層高速摩擦の素過程解明を目指して, 可視化情報学会誌, 38 巻, 149 号, p.65 -68.
桑野修, 2018b, 高速せん断される摩擦接触点の発熱の可視化, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.5.20, SCG63-15.
三宅雄紀, 2019, 粘弾性媒質中での地震サイクルシミュレーション手法の開発, 平成 30 年度地球惑星科学専攻(地球物理学分野) 修士論文, 京都大学.
Miyake, Y. and H. Noda, 2018a, Dynamic Earthquake Sequence Simulations of a Fault in a Viscoelastic Material with a SBIEM, 10th ACES International Workshop - Towards Comprehensive Understanding of Earthquake Physics -, Sep. 25-28, Awaji island, Japan.
三宅雄紀・野田博之, 2018b, 粘弾性媒質中の断層における動的地震サイクルシミュレーション～摩擦特性 vs 粘弾性～, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, S08-26, 2018 年 10 月 9 日-11 日, ビッグパレット福島, 郡山市, 日本.
Miyake, Y. and H. Noda, 2018c, Dynamic Earthquake Sequence Simulations of a Fault in a Viscoelastic Material with a SBIEM, 2018 AGU Fall meeting, T42C-06, Dec. 10-14, 2018.
大谷真紀子・亀伸樹・中谷正生, 2018, バネブロックモデルで観察される地震と周期的 SSE の同期, S08-25, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 福島, 10 月 11 日.
Ohtani, M., N. Kame, and M. Nakatani, 2019, Nucleation of characteristic earthquakes in simulated cycles involving deep huge slow slip events, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2018JB016156.
Ozawa, S. W., Hatano, T., and Kame, N., 2019, Longer migration and spontaneous decay of aseismic slip pulse caused by fault roughness. Geophys. Res. Lett. 46, 10.1029/2018GL081465.
Suzuki, T., 2018a, Sensitivity of the Final Slip Amount to the Initial Fluid Pressure, International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2018, O2-09, Fukuoka, Japan, 21-23 September.
Suzuki, T., 2018b, Sensitivity of the Final Slip Amount to the Initial Slip Velocity Derived from the Universal Law, JpGU 2018, SCG53-31, Chiba, Japan, 20-24 May.
Suzuki, T., 2018c, Unpredictability of the Final Slip Amount based on Uncertainty of the Initial Fluid Pressure and the Porosity Evolution Law, 2018 AGU Fall Meeting, S43C-0610, Washington DC, USA, 10-14 December.
Suzuki, T., 2018d, Generation of the Universal Law Observed in the Governing Equation System with Common Nullclines, New Zealand-Japan Joint Workshop on Slow Slip, Wellington, New Zealand, 26-27 February.
鈴木岳人, 2018e, 亀裂の最終滑り量の初期流体圧分布に対する鋭敏性とその地震学的意義, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, S08-27, 郡山, 2018 年 10 月.

- 鈴木岳人, 2018f, 熱・流体・空隙生成系が示す地震の最終滑り量の予測不可能性, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 10aM202-3, 京都, 2018 年 9 月.
- 鈴木岳人, 2018g, 共通ヌルクラインに基づく地震の最終滑り量の予測不能性, 日本応用数理学会 2018 年度年会, 名古屋, 2018 年 9 月.
- 鈴木岳人, 2018h, 動的地震滑り過程に現れる普遍性・臨界性と臨界指数の導出, 日本物理学会第 73 回 年次大会, 23pK703-4, 野田, 2018 年 3 月
- Suzuki, T. and H. Matsukawa, 2018, Two Types of Fronts of Macroscopic Slip between a Block and a Substrate and Their Propagation Velocities, 15th Annual Meeting of AOGS, SE18-34-37-D1-PM1-321A-019, Honolulu, USA, 3-8 June.
- Yoshida, S., 2018, Numerical simulations of earthquake triggering by dynamic and static stress changes based on a revised friction law, J. Geophys. Res., doi.org/10.1029/2017JB014781.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

「より現実的な断層面ダイナミクス」

SSE のメカニズムの有力な候補である、特性時間の長い強度回復過程・低速でのみ発現する速度弱化過程、剪断による透水性変化の研究を進めるため、熱水下での長時間強度回復試験、非常に低速域までの摩擦・剪断試験、および模擬堆積物の固結/剪断試験の準備を進める。また、地震時高速滑りの動的弱化メカニズムの物理を定量的に理解するために、その場観察による閃光発熱温度の絶対値測定を系統的に行う準備をする。SSE、地震サイクルの数値シミュレーションに、小アスペリティからのカスケード破壊、周辺岩盤の粘弾性、外部要因による擾乱などの影響を取り入れる方法を検討する。摩擦面上での破壊進展モード理論の対象をより一般的な摩擦則に拡張する方法を検討する。不均質媒質中での動的破壊進展計算法の高度化を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東京大学地震研究所 中谷正生・亀伸樹・波多野恭弘・吉田真吾
他機関との共同研究の有無 : 有
京都大学大学院理学系研究科 清水以知子
青山学院大学 鈴木岳人
海洋研究開発機構 桑野修
東邦大学 上原真一
京都大学防災研究所 野田博之
産業技術総合研究所 大谷真紀子

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京大学地震研究所
電話 : 03-5841-5712
e-mail : yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp
URL :

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 中谷正生
所属 : 東京大学地震研究所

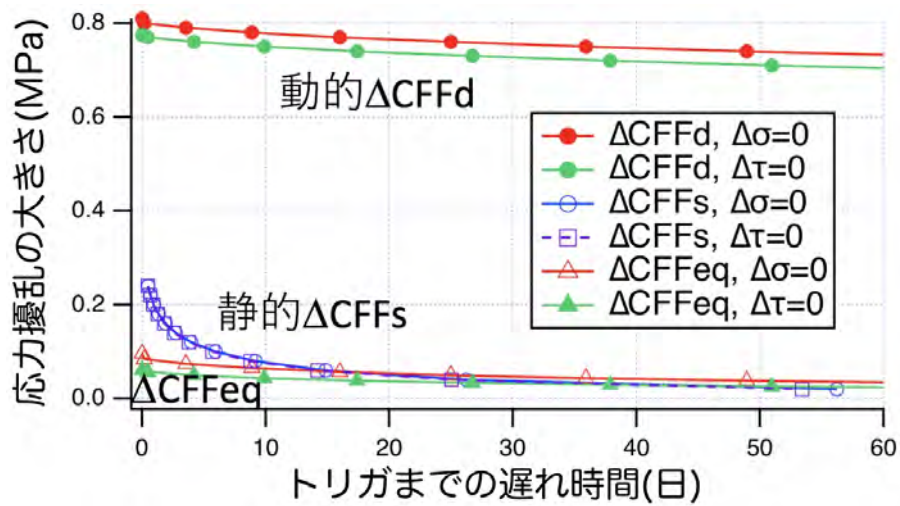


図 1. 応力擾乱の大きさと誘発地震発生までの遅れ時間の関係

様々な剪断・法線応力の擾乱振幅デルタタウ・デルタシグマを仮定して、静的および動的応力擾乱についてシミュレーションを行った結果。

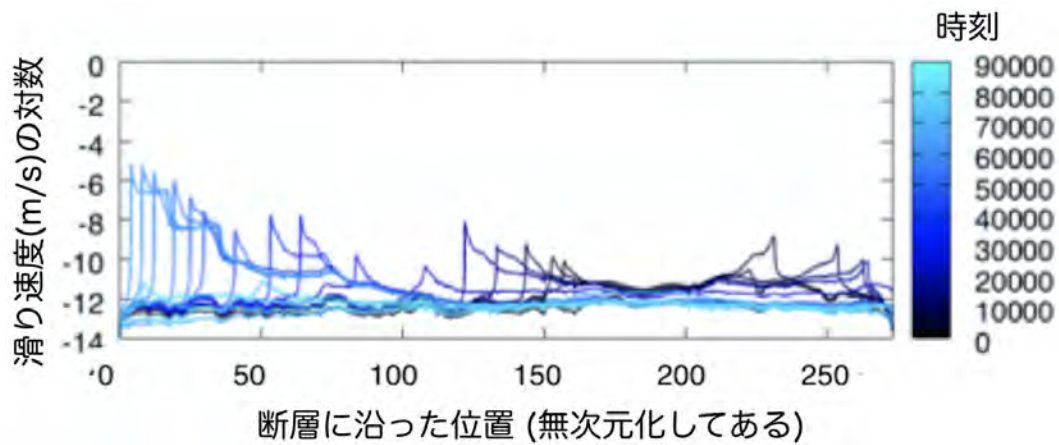


図 2 . 粗い断層におけるすべり速度の時間発展の例

断層の右側で始まった核形成がなかなか加速せず左側へ移動して行く (Ozawa et al., 2019)。

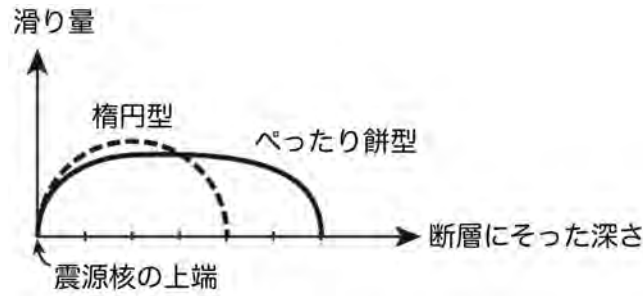


図3. 臨界状態でのプレスリップの変位分布 (概念図)

摩擦の速度依存を深さとともに負から正に変化させる標準的なモデルにおける震源核の滑り分布 (破線) は楕円型であるのに対して、遷移域で、摩擦の速度弱화에上限速度を設けた (Ohtani et al., 2019) のモデルでは、遷移域での滑りの加速が促成されるため、遷移域にフラットな変位分布をもつ部分が挿入された滑り分布をもつ震源核 (実線) が形成される。後者においては、震源核の中央部分はモーメントには大きく貢献するが、クラック先端での応力集中に対しては非常に非効率な寄与しかできないので、脆性領域の破壊成長抵抗が同じでも、標準的なモデルに比べて相当大きい震源核が形成される。

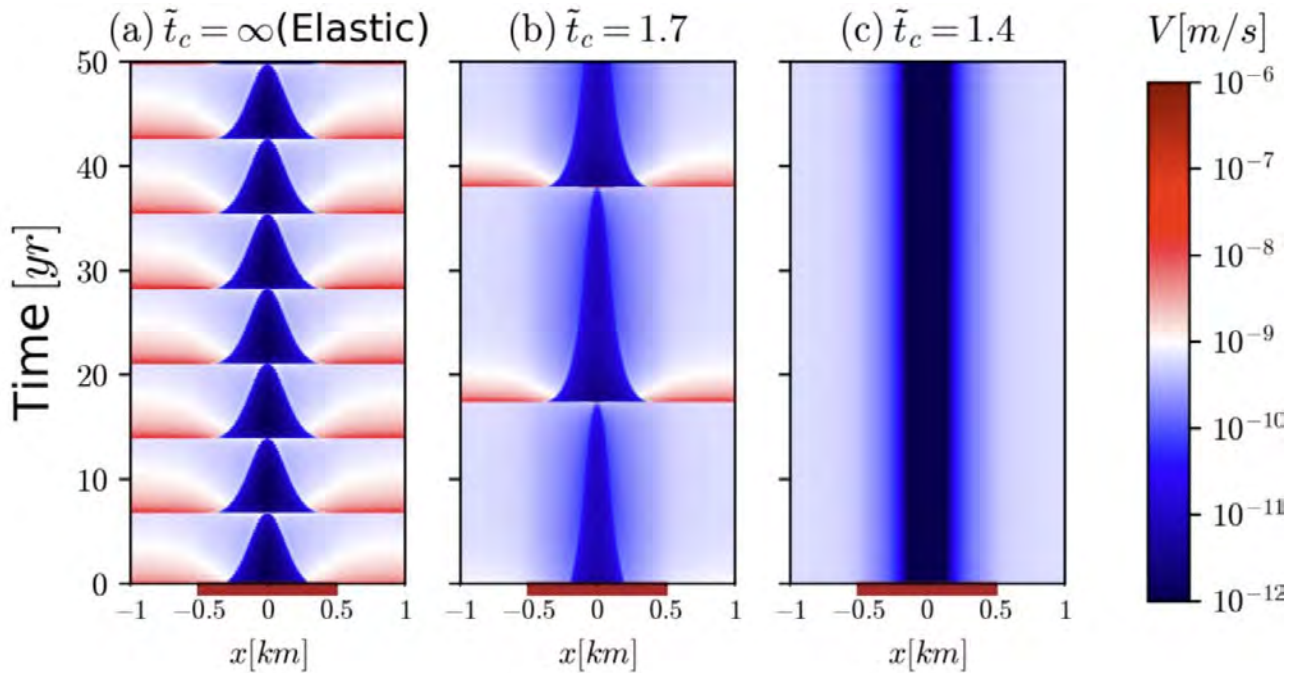


図4. 粘弾性岩盤中にある断層の地震サイクルシミュレーション結果 (三宅, 2019)

横軸は空間座標。茶色のバーは速度弱化学域 (地震性)。縦軸は時間の経過。カラーマップで滑り速度 V の時空間発展を示した。(a) 断層の周囲が弾性体 (粘弾性緩和時間 t_c が無限大) の結果。地震を繰り返す。(b) 断層の周囲が粘弾性体の場合、地震が起きるが再来周期が長くなる。(c) 断層の周囲が粘弾性体ある程度より小さい t_c をもつ場合、速度弱化学域中心の速度が著しく小さくなり Stuck (永久固着) したままになる。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地球物理・地球化学統合多項目観測および比較研究によるマグマ噴火を主体とする火山の定量化とモデル化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究では、国内外の火山の比較研究を行う。1) 浅間山の研究に基づきマグマ供給系の深部から浅部に渡る詳細なモデルを提案し、他のマグマ噴火を主体とする国内外の火山で提案されているマグマ供給系モデルとの比較を行う。2) 伊豆大島のデータから応力変化と地震発生の関係を表すモデルを提案し、地震学の分野での先行研究と比較し、火山に適用できるモデルの確立を目指す。3) 諏訪之瀬島では火口近傍観測で観測された噴火直前の加速度的な傾斜変化が、火道内マグマ上昇モデルにより説明されている。諏訪之瀬島において傾斜計を含む火口近傍多項目観測網を強化してモデルの精密化を図るとともに、国内外の火山における観測データおよびモデルと比較する。

これらの比較研究を通じて、マグマ噴火を主体とする火山に共通する要素を抽出し、モデルの高度化を進める。これまでの噴火事象の分岐判断は経験的要素が強かったが、モデルの高度化により、分岐判断に物理的な根拠を与えることができる。それにより、噴火事象系統樹は経験則の段階から科学的理解を基礎に置いた予測手法へ進化し、経験則に近い現状に比べて予測精度が大きく向上する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本課題は実施機関及び共同研究機関の運営費交付金に支えられる計画である。

平成 26 年度：浅間山、諏訪瀬島において観測網の高度化を開始する。また、伊豆大島においてはガス観測準備のため、1000m 孔からのケーブル引上げを行う。桜島において空中時期観測および火口近傍への観測装置設置を行う。

平成 27 年度：浅間山、諏訪瀬島においては高度化された観測を継続する。伊豆大島においてはガス観測機器の開発を進めるとともに、地震・地殻変動観測網の高度化を進める。樽前山で空中時期観測を行う。比較研究のための海外火山調査を行う。

平成 28 年度：浅間山、諏訪瀬島、伊豆大島においては高度化された観測を継続する。伊豆大島においてはガス観測機器の開発も継続する。桜島において空中時期観測および火口近傍への観測装置設置を行う。観測対象火山においてモデルを構築し、国内外火山との比較を進める。

平成 29 年度：浅間山、諏訪瀬島、伊豆大島においては高度化された観測を継続する。伊豆大島においてはガス観測機器の運用テストも行う。樽前山において空中時期観測を行う。比較研究のため、海外調査を行う。観測対象火山においてモデルを構築し、国内外火山との比較を進める。

平成 30 年度：浅間山、諏訪瀬島、伊豆大島での観測を継続するとともに、比較研究に基づくモデルの高度化を進める。桜島において空中時期観測および火口近傍への観測装置設置を行う。海外調査を行い、観測対象火山と国内外火山とでモデルの比較をさらに進め、噴火事象系統樹の分岐判断へ応用する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

平成 30 年度の成果の概要

浅間山、伊豆大島、霧島新燃岳などのマグマ噴火を主体とする火山において地震、地殻変動、ガス、電磁気等の多項目観測を継続した。また、火山周辺で得られた地震データの地震波干渉法による解析を進めた。これらにより、噴火直前の変化や火山体内部の構造変化、脱ガスやマグマ冷却など、火山現象のモデル化に資する知見が得られた。

霧島新燃岳では火山活動が再活発化し、2018 年 3 月から 2018 年 6 月まで爆発的噴火が断続的に続いた。その内 2018 年 3 月中に発生した爆発的噴火について火口周辺の広帯域地震波形から傾斜変化を抽出したところ、77 回のイベントの平均として、約 30 分前から膨張が始まり、10 分前から若干収縮した後に噴火に至ることがわかった。噴火直前の火道内プロセスの定量的理解につながる成果と言える。

伊豆大島三原山山頂部で二酸化炭素土壌拡散放出率の分布調査を 12 月に実施した。100 強の地点で測定をおこない、三原山山頂部から一日当たりの二酸化炭素土壌拡散を算出した結果、 6.0 ± 0.4 ton/day であった。この値は、H27 年、H28 年の調査と同じレベルである。9 月の始めに、三原山山頂の南西部に位置する噴気地帯のはずれに、二酸化炭素土壌拡散放出率の自動測定装置を設置し、1 時間ごとの連続測定を開始した。拡散放出は風向・風速や気圧や降水などの気象要素の影響を強く受け、大きくばらつくことが明らかになった。また、気象要素の影響が比較的少ない時期の放出率はおおよそ $3\text{--}4$ mol/m²/day で推移しており、この値に関しては顕著な変化は今のところ見られていない。今後、三原山の地震活動や地殻変動等と比較しながら観測を継続していく予定である。

2018 年 3 月に新燃岳で再噴火が起きた後、10 月に再度繰り返し空中磁気測量を実施し、全磁力変化の変化を検証した。従来どおり、対地高度 100m、測線間隔 100m をおおよそ保ちながら速度 10m/s で測定を行った。測線長はおおよそ 38 km である。2011 年 5 月観測時からの変化を見積もると、おおよそ ± 400 nT であった。これは、火口内溶岩の帯磁として換算すると、81MAm² の磁気ダイポールモーメントに相当する。

地震波干渉法を桜島の気象庁観測点の連続地震波記録に適用した結果、桜島では 2015 年 8 月のダイク貫入イベントに 1ヶ月ほど先行し、相関係数の低下が始まったことが明らかとなった。ダイク貫入や火口を含む火山体浅部の不均質構造が変化すると推定された。また、地震波干渉法と震源探索アルゴリズムを利用した方法により、桜島で発生した噴火微動の震源決定を行ったところ、噴火微動が精度 1km 程度で火口付近に求まり、開発した震源決定方法が有効であることが示された。

5 か年の成果の概要

本研究では、浅間山や伊豆大島をはじめとするマグマ噴火を主体とする火山について、マグマ供給系に関する比較研究を行う。観測の多項目化や新たな観測手法の開発など、観測の高度化を進めつつ、マグマ供給系に関するモデルを提案するとともに、国内外の火山について、観測データや解析結果、モデルの比較を行い、マグマ供給系モデルの高度化を進めることを目標とする。

浅間山における観測の高度化と得られた知見

観測高度化の一環として浅間山火口の北方およそ 300m の位置にプロトン全磁力計を設置し 2015 年 6 月より連続観測を開始した。年周変化の小さい非常に安定したデータが取得できている。

2015 年 6 月の小規模噴火に関して得られた火口近傍の傾斜・地震・空振・画像等の各種データの比較したところ、噴火の開始とともに火口下のゆっくりした膨張が始まり数日間継続したこと、と長周期地震発生に伴うガス放出によるパルス状の収縮が繰り返し発生したことがわかった。

浅間山山頂部前掛山火口内で二酸化炭素土壌拡散放出率分布を 4 回調査した。前掛山山頂部では、前掛山火口の東火口縁と釜山火口の東火口縁から構成されるリング状の放出分布を持つことが明らかとなった。一方、前掛山火口の西半分は二酸化炭素の放出がほとんどなく、ごく一部、前掛山火口の西側の火口縁のみに弱い放出が見られた。土壌ガスの二酸化炭素の起源に関して、東西で違いが見られ、東側はマグマ・熱水系の二酸化炭素の影響が強く、西側は生物起源の二酸化炭素の影響が大きいことが明らかとなった。この火口の東西で大きく異なる放出に関しては、MT 観測より得られた低抵抗域の深度分布と組み合わせることで、浅間山山頂部のガス放出システムのモデル化を行った。

伊豆大島における観測の高度化と得られた知見

伊豆大島においてはガス観測準備のため 1000m 孔からのケーブル引き上げを試みたが、途中でケーブルが切断し引き上げはできなかった。地震活動と地殻変動データからマグマ起源の揮発成分量を推定するための理論構築を行った。

伊豆大島三原山山頂部では、二酸化炭素土壌拡散放出率分布調査を 2009 年から繰返し行っており、今期は H27, H28, H30 年に実施した。いずれも山体の収縮期や安定期にあたり、山頂からの二酸化炭素拡散放出率は 3.9-6.4 ton/day と低い値であった。これまでの調査から、山体の膨張期と地震活動の活発な時期に拡散放出率は高く、例外はあるが、収縮期や静穏期には放出率は低い傾向が見られている。

桜島における観測の高度化と得られた知見

火口近傍へ無人ヘリによる観測装置の設置を行った。

桜島の爆発地震にスペクトル比法を適用した。その結果、爆発規模が大きい場合、1-3Hz 程度がより卓越する震源過程を持つことが明らかとなった。また、爆発発生から数十秒後の震源過程は、爆発の規模の大小による差がより小さくなり、火山灰の連続的な放出過程時の震源過程が初期の爆発時と異なることを示した。

霧島新燃岳における観測の高度化と得られた知見

空中磁気観測を行い、火口内にたまった溶岩の冷却過程を調べた。2011 年噴火後の 5 月に初めての観測を行って以来、計 7 回の空中磁気測量を行っているが、その内、2014 年 10 月、2015 年 11 月、2017 年 10 月、2018 年 10 月の 4 回が本計画期間内の実施である。それらの測定から各時点での磁気ダイポールモーメントを推定すると、単調に増加し、かつ、2017 年までは経過時間の 1/2 乗によく比例することがわかった。これは、2011 年噴火の際に火口内に滞留した約 15Mm³ の溶岩が熱拡散で冷却することで磁化を獲得していることを示唆する。しかし、2018 年 3 月に再噴火がありおよそ 14Mm³ の溶岩が滞留し、その後 2018 年 10 月におこなった測定では、それまでの推定時間変化曲線を逸脱し 10MAm² ほど大きくなっていった。新たに滞留した溶岩の表面が急速に冷却帯磁したものと考えられる。なお、帯磁速度は 2011 年噴火時と比べると、見掛け上およそ半減している。岩石磁化強度を未測定なため、以下は推測であるが、岩石磁化強度は 2011 年と 2018 年噴火ではそれほど変わっておらず、2018 年にあらたに溶岩が噴出した際に、今まで帯磁していた火口内溶岩の一部が熱消磁したため、磁場測定値から推測される全体の帯磁量が目減りしたものと考えられる。

2011 年の霧島データの解析を行い、微動や空振振幅とマグマ噴出率の関係式を見出した。

2017年10月に発生した6年ぶりの噴火に関しては、新燃岳周辺に設置した広帯域地震計により、噴火に先行する微動に伴う傾斜変動が捉えられた。この傾斜変動は新燃岳火口直下深さ1km付近における 10^4m^3 の膨張源によって良く説明されることから、火山性微動は噴火に先行して流体が新燃岳の浅部に移動したことに伴い発生したと解釈された。また、2018年3月中に発生した爆発的噴火について火口周辺の広帯域地震波形から傾斜変化を抽出したところ、77回のイベントの平均として、噴火の約30分前から膨張が始まり、噴火10分前から若干収縮して噴火に至ることがわかった。噴火直前の火道内プロセスの定量的理解につながる成果と言える。

その他の火山における観測の高度化と得られた知見

口永良部島で2015年5月にマグマ水蒸気噴火が発生したため、無人ヘリコプターを用いて地震観測・空中磁気観測・画像撮影等を実施した。4月と9月の2回の観測の結果、火山活動の変化が明瞭に捉えられた。口永良部島における2回の空中磁気測量データから見積もられた磁化強度は平均 1.8A/m であり、標準的な安山岩の値を示した。4月と9月との全磁力変化に着目すると、新岳火口直下では磁化が弱まり、その周辺では磁化が強まっていることがわかった。このことは新岳火口直下の物質が5月の噴火で噴出し、その一部が火口周辺に堆積して磁化を獲得したものと考えられる。

三宅島の火口周辺2kmを対象として空中磁気観測を行い、2014年度の観測結果と比較したところ、北側で負、南側で正の変化がみられた。これは、水位の回復による冷却帯磁と解釈できるが、地殻変動観測から山体の膨張が観測されている点を考慮すると、圧力増加によるピエゾ磁気効果という解釈も可能である。

火山の比較研究

噴火推移の比較研究の一環として、2011年の霧島新燃岳噴火と比較するために、米国セントヘレンズ火山での噴出物調査を実施した。本調査は1980年噴火の推移を支配する要因を明らかにすることを目的としており、山体崩壊直後に発生したブラストと、その後数時間かけて成長しさらに数時間継続的に噴出したプリニー式噴火の噴出物調査を行った。また、調査で採取した試料の見かけ密度や内部組織の分析を行った。その結果、脆性破壊の痕跡の有無や石基中の微結晶や微小気泡の量について、系統的であるが不連続な変化が見かけ密度の違いによって見られることが分かった。組織観察の結果と、マグマ破碎の模擬実験の結果を比較し、ブラスト噴出は、山体崩壊に伴う急減圧によって発生した脆性破碎および遅延破碎の結果であり、その終了は、マグマの脆性度による破碎限界で決まっている可能性があると考えられた。

地震波干渉法解析を国内14火山に適用し、伊豆大島・桜島等において、速度変化がGNSSによる面積歪と相関することがわかった。火山性圧力源などによる山体変形に伴う地震波速度の変化を捉え、地震波速度の応力依存性は深さ(封圧)依存することを示した。山体変形等により生じる地震波速度を定量的に評価するモデルを提示した。これは、降雨量等の影響も除去することにより、火山性ガスなどの浸透による地震波速度変化の検出を行うための第一歩となり得る。

桜島や十勝岳、諏訪之瀬島、スメル山、ロコン山(インドネシア)、ストロンボリ火山(イタリア)の噴火に伴う地震の規模別頻度分布を系統的に調べた。その結果、諏訪之瀬島を除き、指数分布で説明できることが明らかとなり、噴火地震の発生には特徴的なスケールが関与していると推察された。

ストロンボリ式噴火のメカニズムとして考えられている火道中の大気泡上昇をモデル化し、それにより生じる山体変形を計算した結果、噴火直前には火口近傍を除いて、火口方向が沈降する傾斜変動が観測されることが予見された。観測とは一致しないことから、火道中の大気泡上昇だけでなく、マグマ溜まりなどの影響を考慮する必要があることがわかった。

火山ガスに関する比較研究の一環として、樽前山と薩摩硫黄島において、噴気孔から離れたところに流れてきた火山ガス噴煙のサンプリングを行い、二酸化炭素の炭素と酸素の同位体比を分析し、おおもとの火山ガスの CO_2 の炭素同位体比と酸素同位体比を推定した。樽前山では、島弧火山の火山ガスとして一般的な ^{13}C の値が得られた。また、薩摩硫黄島小岳の95の低温噴気では一般的な火山ガスの値が得られたが、荒山では、通常より非常に重い ^{13}C 値が推定された。この原因については今後精査が必要である。 CO_2 の ^{18}O の分析結果から、大気と火山ガスの混合したものである噴煙

の測定により、火山ガスの 18O の推定ができることが示された。

計画の変更

主たる対象火山として、浅間山、伊豆大島、諏訪之瀬島を挙げていたが、火山の活動状況等を踏まえ、諏訪之瀬島・樽前山に代わり霧島新燃岳・三宅島・桜島を対象として加えた。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
Kazahaya, R., H. Shinohara, T. Ohminato, and T. Kaneko, 2019, Airborne measurements of volcanic gas composition during eruption stage at Kuchinoerabujima volcano, Japan, Bull. Volcanol., 81, doi: 10.1007/s00445-018-1262-9.

小山崇夫・神田径・宇津木充・金子隆之・大湊隆雄・渡邊篤志・辻浩・西本太郎・本多嘉明, 2019, 無人ヘリによる草津白根山中磁気測量、Conductivity Anomaly 研究会論文集 2019, 8 (印刷中)

大湊隆雄, 2018, 最近の火山観測技術と噴火の予測, 建築防災, 2018.12, 19-29.

武尾 実・大湊隆雄・前野 深・篠原雅尚・馬場聖至・渡邊篤志・市原美恵・西田 究・金子隆之・安田 敦・杉岡裕子・浜野洋三・多田訓子・中野 俊・吉本充宏・高木朗充・長岡 優, 2018, 西之島の地球物理観測と上陸調査, 海洋理工学会誌, 24, 45-56.

- (10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

次期計画の関連課題

「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」

実施内容

- ・浅間山・霧島・阿蘇・伊豆大島・諏訪之瀬島等での火口近傍多項目観測の実施
- ・浅間山についてデータの再解析を進め、他火山との比較研究の実施
- ・SAR データの自動解析システムを開発
- ・衛星赤外画像火山観測システムの機能拡張(新衛星への対応)
- ・高飛行高度・高ペイロード型無人ヘリに向けた観測モジュール開発と設置実験
- ・難地域観測用観測機器のプロトタイプ作成
- ・マグマのアナログ物質によるモデル実験

- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

武尾実、森田裕一、大湊隆雄、上嶋誠、市原美恵、及川純、金子隆之、青木陽介、小山崇夫(以上地震研究所)、橋本武志(北大)、本多嘉明(千葉大)、井口正人、中道治久、為栗健(以上京大防災研)、西村太志、三浦哲(以上東北大)、野上健治(東工大)、松本聡、寅丸敦志(以上九大)、森俊哉(東大院理)、八木原寛(鹿児島大)

他機関との共同研究の有無：有

浅間山：森俊哉(東大院理)

伊豆大島：松本聡(九大)、野上健治(東工大)、三浦哲(東北大)

諏訪之瀬島：井口正人、中道治久、為栗健(以上京大防災研)、西村太志(東北大)、八木原寛(鹿児島大)

樽前山：橋本武志(北大)、本多嘉明(千葉大)

桜島：井口正人、中道治久、為栗健(京大防災研)、本多嘉明(千葉大)

モデル化：寅丸敦志(九大)

- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5712

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL :

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 大湊隆雄

所属 : 東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

プレート境界すべり現象モニタリングに基づくプレート間カップリングの解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(3) 関連研究分野との連携の強化

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標 :

プレート間カップリングの多様性と相互作用を詳細に把握し, そのメカニズムを明らかにすることは, 巨大地震と他のプレート境界現象との相互作用の解明に資するとともに, プレート境界に対する理解を深めることで巨大地震の発生予測の高度化に貢献する. そのため, スロースリップイベントや深部低周波微動を含むスロー地震等の多様な滑り現象を高精度に把握し, それらの現象の時空間発展等の活動様式, とくに現象間の相互作用を明らかにするとともに, これらの多様なプレート間カップリングを規定する構造的要因を明らかにする. また, 相互作用によって発生する現象の誘発メカニズムを理解し, シミュレーションによって現象の再現を試み, 巨大地震との関わり合いに関する知見を得る. 特に, 2016 年に発生が予想される豊後水道の長期的スロースリップイベント (SSE) とそれに誘発される様々な滑り現象などについて, 多項目のモニタリングを集中することにより, 相互作用を含めた一連の現象のメカニズムを解明する.

(7) 本課題の 5 か年計画の概要 :

本研究計画は, 以下のモニタリング, 構造探査・シミュレーションから構成される.

1. モニタリング精度向上とプレート境界すべり現象解明

1(1) 豊後水道における隣接すべり現象間の相互作用の解明

豊後水道で 2016 年 (平成 28 年度) に発生が予想される長期的 SSE とそれによって誘発される多様なスロー地震群を正確に把握し, その時空間発展に基づいて相互作用を解明するため, 豊後水道の周辺陸域に広帯域地震観測点, 島嶼部に GPS 観測点, 海域に海底地震計・圧力計を設置し, 長期的 SSE の滑りパラメータや浅部超低周波地震の検出精度を向上させる. また地震波干渉法による地下構造の時間変化の抽出を試みるとともに, 重力・電磁気観測の結果と比較し, すべりの時間発展と流体との相互作用を明らかにする.

[GPS 観測]

(平成 26 年度)

豊後水道周辺島嶼部の数か所に機動的 GPS 観測点を設置し, 国土地理院 GEONET のデータを加えて長期的 SSE のすべり分布の時空間発展を推定するためのモニタリング体制を構築する.

(平成 27~30 年度)

機動的 GPS 観測点によるモニタリングを継続し, 長期的 SSE が発生した場合には, 国土地理院 GEONET のデータを加えてすべり分布の時空間発展を推定する.

[陸域地震観測]

(平成 26 年度)

浅部・深部超低周波地震等を把握するための機動的広帯域地震観測点や, 地震波干渉法による長期的 SSE 震源域周辺の速度変化把握のための機動的短周期地震観測点の選定を行なう.

(平成 27~30 年度)

機動的広帯域地震観測点を設置し, 既存のデータ流通網を活用して防災科研にもデータ転送し, 超低周波地震・深部低周波微動について従来の処理システムを活用したモニタリング体制を構築する. それに基づいて, 長期的 SSE の発生に伴う浅部超低周波地震や深部低周波微動・超低周波地震の検出を進める. また, 地震波干渉法によるモニタリングを行なうとともに, 過去データ解析を進める.

[海域観測]

(平成 26~30 年度)

海域に海底地震計や圧力計を数台設置して観測を実施し, 海域観測機器を交換してモニタリングを継続するとともに, 長期的 SSE 発生前の定常的活動及び長期的 SSE に伴う地殻変動や超低周波地震を検出するためのデータ処理を行なう.

機動的 GPS・広帯域・短周期地震観測点については, 長期的 SSE 終了後もその影響を見極めるためのモニタリングを継続する. 長期的 SSE が発生した場合には, 海陸のデータを融合して各スロー地震の発生源の時空間発展を正確に推定し, 現象間の相互作用を明らかにする. また, 1(5) によって得ら

れた重力変化や比抵抗変化，及び地震波干渉法による地下速度構造変化との比較から，すべりの時間発展と流体との相互作用を明らかにするとともに，シミュレーションモデルの構築に資するデータを提供する．

1(2) 東海地域における長期的・短期的 SSE の時空間変化の 推定手法の高度化とプレート間すべりの 解明

東海地域は数年に及び長期的 SSE と一週間程度の短期的 SSE が発生する場であり，これらの発生領域の特性を解明することが重要である．このため，東海地域に展開している大学連合による GPS 観測を維持・強化し，周期的に発生する短期的 SSE を把握して滑りパラメタを高精度に推定し，当該地域における滑り収支を把握するとともに，長期的 SSE の発生も期待されるため，発生した場合にはその滑りパラメタの高精度推定を行う．

(平成 26 年度)

伊勢湾付近を中心として機動的 GPS 観測点を数か所設置し，既存の大学連合による GPS 観測点及び国土地理院 GEONET のデータを加えて，東海長期的 SSE や微動に伴って生じる短期的 SSE のモニタリング体制を構築するとともに，短期的 SSE を自動的に検出する手法の開発を進める．

(平成 27～30 年度)

モニタリングを継続するとともに，周期的に発生する短期的 SSE について自動検出結果との比較に基づき，システムの改良を継続的に行う．長期的 SSE が発生した場合にはその滑りパラメタの高精度推定を行う．前期の研究に基づき，短期的 SSE と長期的 SSE の特性を比較し，場の物理特性の違い等を解明する．

1(3) 房総 SSE と群発地震活動との相互作用の解明

房総半島に展開している機動的 GPS・地震観測網や定常観測網を維持し，房総沖でこれまでも繰り返し発生している SSE とそれによってトリガーされる小繰り返し地震を含む群発地震活動をモニタリングし，発生した場合にはその時空間発展に基づきこれらの相互作用を解明する．

[GPS 観測]

(平成 26～30 年度)

房総半島沿岸の機動的 GPS 観測点の維持を行なうとともに定常状態を把握し，房総 SSE が発生した場合には，そのすべりの時間発展を正確に推定する．

[地震観測]

(平成 26～28 年度)

委託研究で維持されている房総半島内の MeSO-net(大大特) の地震観測データを活用し，既存の地震観測データを含めて定常的な地震活動の把握を行なう．

(平成 29～30 年度)

MeSO-net 観測点を維持するとともに，房総沖 SSE が発生した場合にはそれに伴う群発地震活動の高精度震源決定を行ない，SSE すべり域との時空間的關係を明らかにする．

小繰り返し地震解析から準静的すべりのすべり量を推定し，測地学的推定結果との比較を行う．

1(4) 西南日本スロー地震活動様式の解明

(平成 26～30 年度)

深部低周波微動等のスロー地震カタログを用いて、セグメント構造・周期性・移動性・トリガリングなどのスロー地震活動様式の特徴を抽出し，巨大地震活動様式との類似性・相違性を明らかにし，活動予測モデルを構築する．

1(5) 重力・電磁気観測に基づくすべりの時間発展と流体との相互作用の解明

南海トラフ等の長期的 SSE の生じている地域において重力観測及び電磁気観測を実施し，摩擦構成則に関連する間隙流体圧の変動パターンを質量変化及び比抵抗変化を通じて捉えることにより，すべりの時間発展と流体との相互作用を明らかにする．

[重力観測]

(平成 26～30 年度)

東海・四国・宮崎・房総等の SSE 発生域において年 1 回程度の絶対重力観測を行う。平成 29 年度に豊後水道で絶対重力観測を連続観測に切り替え、SSE による重力変化の常時監視を行う。平成 30 年度に SSE による重力変化データを GPS、地震、電磁気データと統合し、流体とすべりとの相互作用をモデリングする。

[電磁気観測]

(平成 26 年度)

1994-1995 年、2000-2001 年にわたって観測を実施した四国西部におけるネットワーク MT 法観測データをコンパイルし、四国西部広域深部 3 次元比抵抗構造を推定する。得られた構造に対して比抵抗構造の変化が予想される領域に対する地上電磁場観測点の感度を調べ、平成 27 年度からのモニターの観測の最適な観測点配置を検討するとともに、ネットワーク MT・磁場観測点の選定、土地交渉等を行う。

(平成 27 年度)

前年度に選定したネットワーク MT・磁場観測点において、それぞれ長基線地電位差観測・磁場 3 成分観測を開始する。さらに、観測データの 1 次的解析(電磁場、磁場磁場間応答関数推定)を実施し、得られた応答関数が平成 26 年度で検討した感度を勘案して著しくデータの質が劣る観測点に関しては、観測の中止、ないしは移転を行う。

(平成 28~30 年度)

電磁場モニター観測を継続し、豊後水道長期的 SSE を含む応答関数変化の検出を試みるとともに、平成 26 年度における感度検定のために用いた従来のネットワーク MT 法データに、本研究で得られるネットワーク MT 法データをあわせて 3 次元構造解析を行う。

得られた応答関数の変化について、3 次元構造解析に基づいた感度行列から、応答関数変化を担う比抵抗変化領域と比抵抗変化値の決定を試みる。地震波速度構造の変化や、重力値変化から推定された密度構造変化をあわせ、SSE に流体移動の関与があったかどうかを定量的に検証し、SSE の時空間発展メカニズムを考察する。

1(6) 海域観測に基づくスロースリップと誘発現象との相互作用の解明

既に沈み込み帯浅部において SSE または低周波微動・超低周波地震が検出されている領域直上で、海底圧力計による上下変動観測をトラフ軸付近で実施し、浅部の SSE 活動を詳細に調べて、それにより誘発される多様な地震活動を既設のケーブル式地震計記録などから検出する。さらに、観測された SSE の時空間発展と誘発される地震活動の時空間的特徴を比較し、SSE による誘発現象の物理プロセスを調べる。得られた知見に基づき、SSE により誘発される地震活動の予測、特に発生時期に関する予測に向けた研究を行う。

(平成 26~28 年度)

熊野灘や室戸沖の海底ケーブル式観測網の周辺に海底圧力計を設置し既存の観測データと併せて、特に沈み込み帯浅部で発生する SSE とそれに誘発される地震やスロー地震の活動を把握する。

(平成 29~30 年度)

前年度からの観測を継続する。熊野灘や室戸沖周辺で観測された SSE と誘発される地震・スロー地震活動の時空間的特徴から、SSE による周囲への応力の載荷速度の変化と誘発される地震・スロー地震活動との関係を明らかにする。また、東北日本や他地域で観測された SSE とそれに誘発される現象も含めて、SSE とそれにより誘発される地震・スロー地震活動の予測モデルを構築する。

1(7) 余効すべりの物理モデルの構築と摩擦特性の推定

速度・状態依存摩擦構成則に従う余効すべりと地震時・地震後のすべりによるマンツルの粘弾性緩和の双方を考慮したプレート境界地震の余効変動の物理モデルを構築する。このモデルを 2011 年東北沖地震等のプレート境界地震後の GNSS データに適用し、余効すべり発生領域の摩擦特性とマンツルのレオロジーを推定する。また、観測された余効変動に対する余効すべり及び粘弾性緩和の寄与を分離することを試みる。

(平成 26~30 年度)

弾性媒質を仮定して速度・状態依存摩擦構成則に従う余効すべりの物理モデルを構築する。このモデルを用いて、地震時のすべり分布や摩擦パラメータの分布が余効すべりに与える影響を調べる。このモデルを基に、地震時・地震後のすべりによるマンツルの粘弾性緩和を取り入れたモデルを構築する。弾性・粘弾性モデルを用いて、東北沖地震等のプレート境界地震後の GPS データを再現できるような余効すべり域の摩擦特性とマンツルのレオロジーを推定する。

2. プレート境界すべり現象メカニズム解明のための地下構造異常の抽出とスロー地震・巨大地震の相互作用シミュレーション

想定東南海地震・南海地震震源域の境界域の深部延長上を含む紀伊半島中央部や深部低周波微動活動が明瞭な北東部において、プレートの沈み込む方向に線状稠密アレイを展開し、地震波トモグラフィ解析・地震波干渉法解析・反射法解析等を実施することで巨大地震破壊域の広がりや様々な滑り現象を規定するプレートやマンツルウエッジにおける構造不均質を抽出する。また、過去に実施された自然地震の稠密観測データの再解析に基づき、スロー地震の滑り特性の違いに対応する構造変化、深部スロー地震域セグメント境界・上端・活動様式の深さ依存性を規定する構造の抽出を行う。また、ここで得られた地下構造異常に関する情報に基づいて摩擦パラメータを設定してシミュレーションを行ない、1で得られた様々なプレート間すべり現象の発生様式や相互作用を説明するように、スロー地震活動様式を再現することを試みる。また、スロー地震と巨大地震の同時シミュレーションに基づき、巨大地震発生前後におけるスロー地震活動の長期的・短期的変化を抽出し、巨大地震の切迫度評価や発生予測に資する知見を得る。

2(1) プレート境界すべり現象メカニズム解明のための地下構造異常の抽出

(平成 26 年度)

紀伊半島で取得されている既存地震観測データの再解析を実施し、深部低周波微動の活動度が異なる紀伊半島北東部と中央部における地下構造の特徴を明らかにするのに最適な地震観測測線位置の検討を行う。既存地震観測データの再解析は、平成 29 年度に渡って実施し、微動発生域を含むプレートやマンツルウエッジの詳細な構造を明らかにする。

(平成 27 年度)

紀伊半島北東部の深部低周波微動が明瞭な領域を通る滋賀県甲賀市から三重県南伊勢町至る「甲賀南伊勢測線」(測線長 約 90 km)で稠密自然地震観測を実施する。測線上の 60 か所に観測点を設置し、6 か月間の連続観測を行う。

(平成 28 年度)

「甲賀南伊勢測線」沿いで既に取得されている制御震源探査データと平成 27 年度に取得した自然地震観測データとの統合解析を実施し、深部低周波微動発生域を含むフィリピン海プレートやマンツルウエッジの詳細な構造を明らかにする。

(平成 29 年度)

紀伊半島中央部の低周波微動の活動が不明瞭な領域を通る測線(串本-橋本測線、測線長 約 90km)に 60 か所の観測点を設置し、6 か月間の自然地震観測を行う。また、測線下の詳細な P 波速度構造を得る為に、測線上の 3 か所で発破を実施する。発破を実施する際には、既存研究で明らかになっている地殻深部の明瞭な反射面の、プレートの沈み込む方向における深度変化を明らかにする為に、450 台のオフラインレコーダを設置する。

(平成 30 年度)

平成 29 年度に取得した「串本-橋本測線」の制御震源・自然地震データの統合解析を実施すると共に「甲賀南伊勢測線」・「串本-橋本測線」と紀伊半島で既に取得されている観測データとの統合解析を実施することで、巨大地震破壊域の広がりを規定するプレートやマンツルウエッジの地下構造異常を抽出し、地下構造異常が微動活動度に及ぼす影響を明らかにする。

2(2) スロー地震・巨大地震の相互作用シミュレーション

(平成 26~30 年度)

深部低周波微動の分布や地下構造研究結果を考慮して長期的及び短期的 SSE 発生域における摩擦パラメータ (a-b) や有効法線応力を設定し、カットオフ速度を考慮したすべり速度・状態依存摩擦則を用いたシミュレーションを実施し、観測される SSE を再現するようにパラメータを調節しつつ SSE 発生モデル化を進めるとともに、巨大地震発生前後におけるスロー地震活動の発生間隔等の発生様式における長期的・短期的変化を抽出する。また、豊後水道長期的 SSE に伴って発生する誘発現象についても、パラメータ調節によって観測された現象を再現可能なモデル化を進め、2016 年に発生すると予想される長期的 SSE の観測結果に基づいて、モデルの検証・改訂を行なう。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

年次計画に基づいた機動的調査観測を実施したとともに、房総半島や東海・豊後水道におけるスロー地震をモニタリングし、発生状況の把握を行なった。また、スロー地震活動様式の特徴やスロー地震発生域の構造・流体挙動の把握、スロースリップにより誘発される現象の検出、余効変動の物理モデル構築、スロー地震・巨大地震の相互作用シミュレーションを実施した。

1. モニタリング精度向上とプレート境界すべり現象解明

1(1) 豊後水道における隣接すべり現象間の相互作用の解明

[GPS 観測]

豊後水道周辺および島嶼部の 22 か所に機動的 GPS 観測点を設置し (表 1)、国土地理院 GEONET のデータを加えて長期的 SSE のすべり分布の時空間発展を推定するためのモニタリング体制を構築した。設置した観測点には科学研究費新学術領域研究「スロー地震学」で設置した観測点も含まれている。

平成 30 年度は、愛媛県内子町、愛媛県松山市中島、愛媛県伊予郡砥部町、愛媛県久万高原町の 4 地点に機動的 GPS 観測点を新設し観測を開始した (表 2)。これら観測点も携帯電話端末を取り付けたモバイルルータを設置することで、外部から毎日定期的にデータを収録できるようになっている。

本計画期間中では、平成 29 年度までに新設した 18 か所の観測点は、平成 30 年度もほぼ欠測なしでデータが取得されており、長期間に渡る地殻変動データが蓄積されつつある。回収されたデータを周囲の GEONET 観測点や海上保安庁のデータと一緒に精密単独測位法 GIPSY-OASIS 6.4 を用いて解析した。新設された機動的 GPS 観測点で求められた日々の座標のうちの代表的なグラフを図 1 に示す。フィリピン海プレートの沈み込みにもなう西方向の通常の地殻変動変位が見られる。図 2 に 2017 年 11 月から 2018 年 11 月にかけて、豊後水道およびその周辺の GPS 観測点で記録された地殻変動を示す。赤色のベクトルが、本研究で新設された機動的 GPS 観測点での結果を示す。ベクトル矢印の先端の楕円が推定誤差を示しており、機動的 GPS 観測点のデータの精度は、GEONET と遜色ない安定性をもっていることがわかる。

2015 年 12 月ごろから 2016 年 3 月ごろまで四国南部を中心に長期的 SSE の可能性のある小さな地殻変動が観測された (図 3)。しかしながらその変動量や推定されたモーメントマグニチュードは、豊後水道で想定されている長期的 SSE の数分の 1 しかないことがわかった。2018 年 8 月ごろから豊後水道南西部を中心に長期的 SSE の可能性のある小さな地殻変動が観測されており、また 2018 年 12 月から豊後水道全域で 2010 年以來の大規模な長期的 SSE が発生したと考えられる。今後の観測・解析結果に大きな期待がもてる。

[陸域地震観測]

これまでに九州東部から四国西部に設置した合計 6 箇所における広帯域地震計臨時観測を継続し、不具合の見られる地震計の交換などを行った。南海トラフ近傍で発生する浅部超低周波地震と内陸下で発生する深部超低周波地震の解析を行った結果、これらの超低周波地震の累積振幅分布は指数関数的であり特徴的なサイズが存在することを明らかにした。また、その特徴的なサイズには地域性があり、浅部超低周波地震は深部超低周波地震の約 10 倍の振幅を持つことを明らかにした。

本計画期間中に広帯域地震計臨時観測点を 6 箇所まで増やし、超低周波地震の検知能力向上を図った。これらの観測点は、今後、科学研究費新学術領域研究「スロー地震学」で行なわれる稠密広帯域地震観測とともに、超低周波地震の検出・解析に貢献する。豊後水道で発生する長期的 SSE と深部低

周波微動や深部超低周波地震との関係については、2014年のSSEでは微動や超低周波地震の活動増加が捉えられたものの、2010年のSSE発生時における活動増加ほどではなかった。このことは、2014年のSSEの規模が2010年のSSEより小さいものであったことを示している。また、2016年のSSE発生時には、微動や超低周波地震は特に活発化しなかったことから、このSSEの規模が小さいことと、すべり域が豊後水道南部と、微動域から離れているために相互作用が働かなかったことを示している。

[海域観測]

平成30年度は、平成29年度末に豊後水道南方のプレート境界浅部領域に構築した海底地震計アレイによる観測を継続し、2018年1月にすべて回収が完了した。また、2017年3月より科研費新学術領域研究「スロー地震学」にて同じ領域で海底地震観測を実施しており、これらの機材も一部回収を実施した。今年度は平成25年度に開始した文部科学省委託研究「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」による種子島沖における観測のデータ解析を進めた。種子島沖の領域は、これまでの解析により日向灘で発生していることが分かっている浅部低周波微動活動域の南側延長領域にあたり、初めて海底での観測データが取得され、観測期間中の2017年12月～2018年1月にかけて比較的活発な活動が確認された。通常地震が多く含まれており、イベント除去とより詳細な検討が必要であるが、震央分布はおおよそ日向灘の活動領域を南側に延長した領域に位置しており、日向灘からの活動域がそのまま延長していることを示唆する。また、日向灘との違いとして、浅部低周波微動活動中に通常地震活動が活発化したことが挙げられる。通常地震活動が活発化した時期と微動活動が活発化した時期は、浅部低周波微動が通常地震の地震波形にマスクされている可能性も否定できないが、細かく見ると時間的には棲み分けているように見える。一方で、領域としてはほぼ同じである。通常地震がプレート境界で発生しているかどうかはより詳細な検討が必要であるが、浅部低周波微動震源域ではプレート境界での通常地震がほとんど発生しない日向灘とは異なる特徴で興味深い。

本計画期間中では、豊後水道南方で実施した海底地震観測の結果から、日向灘プレート境界浅部では浅部低周波微動活動が年に1回は発生しており、2年に1回程度はマイグレーションを伴うような比較的規模が大きな活動が発生していることが明らかとなった。また、浅部低周波微動活動は、超低周波地震を伴っていることが海底観測による直上観測で確認され、活動領域は日向灘から東は足摺岬沖まで、南は種子島沖まで広がっている事が明らかになった(図4)。

1(2) 東海地域における長期的・短期的SSEの時空間変化の推定手法の高度化とプレート間すべりの解明

平成29年度までは60点での稠密GNSS観測を実施していたが、本項目の主担当者の交代に伴い観測点の大半を撤収し、平成30年度は静岡県内3点、愛知県内1点において観測を継続した。継続した観測点では、観測データの毎日のダウンロードと精密暦及び速報暦による日座標値の算出を行って周辺のGEONET観測点とともにWeb上でベクトル図(図5)と時系列を公開し、準リアルタイムの地殻変動観測システムを構築した。次に、平成28-29年度に引き続き、2013年頃から開始した長期的SSEに関して、時間発展インバージョンを用いた解析を実施し、結果の詳しい検討を行った。長期的SSEに加えて2013年から2016年1月に、少なくとも2回の短期的SSEが発生し、その位置は長期的SSEのプレート境界深部に位置する北西側(図6)であった。推定された短期的SSEのすべり速度は20～30cm/年であり、長期的SSEのすべり速度(約2.3cm/年)よりも1桁早い。長期的SSE領域では深部低周波微動が発生していないが、本研究の結果は微動の発生が周囲のスロースリップのすべり速度に依存しているという仮説(Wech and Bartlow, 2014)を支持する結果となった。

本計画期間中の成果としては、(1)稠密GNSS観測により東海地方の地殻変動の高空間分解能で把握できるようになったこと。(2)改良型の時間発展インバージョン(Fukuda et al., 2008)を用いることで、従来の手法では難しかった東海地方で発生する短期的SSEと長期的SSEを一度に解析することが可能になったことが挙げられる。

1(3) 房総SSEと群発地震活動との相互作用の解明

[GPS観測]

千葉・茨城県内の太平洋沿岸で行っているGNSS連続観測を継続した。これらの観測点のうち6点

については2月下旬に撤去を行う。

これらの観測点と周辺の国土地理院 GEONET の観測点のデータを GIPSY-OASIS II ソフトウェアを用いて解析し、観測点座標値を1日毎に推定した。その結果、房総半島中部から北部の観測点で2018年6月~7月にSSEによると考えられる地殻変動が起きたことが分かった。このSSE以前に房総半島で観測された最大のSSEである2011年10月~11月のSSEと比較して、2018年のSSEによる地表変位は房総半島中部ではほぼ同程度であるが、北部ではやや大きい。従って、2018年のSSEは、1994年にGEONETが構築されてGNSS連続観測が開始されて以来、房総半島で観測されたSSEとしては最大規模であると考えられる。

本計画期間中では、千葉・茨城県内の太平洋沿岸で2011年11月以来行っているGNSS連続観測を継続した。房総半島沖で繰り返し発生してきたSSEの詳細を明らかにするために、1996、2002、2007、2011、2013-2014年に発生したSSEの時空間発展をGNSS時系列データと改良型のNetwork Inversion Filterを用いて推定した。その結果、すべりの加速様式、すべりの伝播方向、伝播速度など、すべりの時空間発展のイベント毎の共通性と違いが明らかになった。房総SSEは群発地震活動を伴うが、すべりの伝播と地震活動の間には時空間的に強い相関が見られた。

[地震観測]

房総沖で繰り返し発生しているスロースリップ域で発生する地震活動をモニタリングした。その結果、2018年6月に発生したスロースリップに伴い、地震活動や相似地震活動が増加したことを確認することができた。相似地震活動から推定される滑り量は、過去に発生したものと同程度である。今回のスロースリップ発生までの4年5か月の間には2度地震活動の増加が見られた。ただし、これらの地震活動は非常に狭い領域に集中しており、相似地震の発生頻度はさほど高まらなかった。局所的なすべりの変化を示しているのかもしれない。

計画期間全体を通して、房総沖で繰り返し発生しているスロースリップ域で発生する地震活動をモニタリングした。その結果、測地データから推定された、2011年11月、2013年12月~2014年1月、2018年6月の活動に伴う地震活動、相似地震活動の活発化を確認することができた。また、地震活動の活発化を基に、東北地方太平洋沖地震発生直後の2011年3月にも非地震性滑りが発生したことを明らかにした。房総沖のフィリピン海プレート上面では、東北沖地震発生直後に滑り速度がやや増加したが、それ以降は徐々に遅くなっていると考えられる。また、スロースリップイベントが発生していないときにも地震活動度の変化や相似地震の発生が見られている。これはすべりの揺らぎを示唆しているのかもしれない。

1(4) 西南日本スロー地震活動様式の解明

西南日本で発生するスロー地震のうち、紀伊半島と四国の深部低周波微動活動について、その時空間的特徴を統計的に自動解析するための2次元隠れマルコフモデルを開発した。その結果、四国では6つ、紀伊では4つのサブシステムに分類され、それぞれのサブシステムには複数の微動セグメントが存在するという階層構造を形成していることがわかった。また、セグメントの活動パターンはエピソード、弱い集中、及び背景的活動の3つに分けられ、いくつかのセグメント間では相互作用が見られた。また、2003年から2010年に起きた豊後水道の長期スロースリップイベント以前に、四国南西部のセグメントで微動の発生割合が大幅に増加していたことが分かった。

霧島山直下の低周波地震を対象としてマッチドフィルター法による検出を行い、2011年新燃岳噴火の前後に深部低周波地震が活発化していたことが分かった。この結果は、地表面での火山活動が深部と密接な関係を示しているものである。

一方、東北地方太平洋沖における浅部超低周波地震のマッチドフィルター法による網羅的検出を実施し、2011年東北地方太平洋沖地震の大すべり域ではその後超低周波地震活動が極めて低調になったのに対して、その周辺領域では余効すべりに対応し超低周波地震活動が非常に活発化したことが分かった。この結果は、超低周波地震がプレート間応力変化を反映していることを示している。

本計画期間中では、西南日本で発生するスロー地震の活動様式などに基づいて、スロー地震が巨大地震に対して果す役割を、類似性、応力状態を反映する指標、そして周囲への応力载荷という3つの

可能性として取りまとめた (Obara and Kato, 2016)。また、微動エネルギーの定量的評価を目的とした新たな微動検出手法を開発し、これまで取り逃がしていた微動活動を的確に把握することに成功したとともに、プレート収束速度と微動エネルギーレートとの相関関係を明らかにするなど、深部低周波微動活動に関する新たな描像を得ることができた (Annoura et al., 2016)。また、遠地地震による誘発微動について、より高速で移動する活動が存在することを明らかにした (Kurihara et al., 2018)。

1(5) 重力・電磁気観測に基づくすべりの時間発展と流体との相互作用の解明

[重力観測]

前年度に引き続き、スロースリップに伴う流体移動の検出を目的とした重力観測を実施した。今年度の絶対・相対重力観測は、2月に宮崎1点、東海2点(菊川・豊橋)及び豊後水道1点(足摺岬)で実施した。御前崎では共同研究を行っている国土地理院が観測点を移転し、新旧両点での重力測量を実施した。今年度の観測結果は現在解析中である。一方、重力変化を補正する手法の高度化として、3次元的な地球構造モデルに基づく荷重変形に伴う重力変化の理論開発を行った (Tanaka et al., 2019)。

本計画期間中における最も大きな成果は、東海地方の約20年間の観測により、長期的スロースリップ中のtransientな重力変化を捉えることに世界で初めて成功したことである (Tanaka et al., 2018)。図7に観測結果を示す。スロースリップ域の浅部に位置する御前崎・菊川で特にスロースリップ中に重力の相対的減少が大きく、スロースリップの発生していない時期には重力が増加している。スロースリップ中は重力変化が相対的に減少することは、流体移動モデルに基づいて定量的に解釈できる (Tanaka et al., 2018)。今年度の解析により追加した最新のデータも、同論文から予想される傾向と一致した。3点に共通する定常的な重力増加の原因は分からず、それを探るという新たな課題も見つかった。宮崎、足摺岬、石垣島においてもデータをさらに蓄積し、今後、地磁気データも加えた上で同様の解析を行う予定である。

[電磁気観測]

2015年6月より、愛媛県内の2観測点(窪野観測点と菊川観測点)でオフラインの磁場3成分観測を開始した一方、愛媛県と高知県にわたる17エリア内に、総計58点の電極を埋設し、2016年3月末よりNTTメタリック通信回線網を用いたネットワークMT長基線地電位差連続観測を開始した。

今年度においては、昨年度に引き続き、上記の磁場と長基線地電位差の毎秒サンプリングによる観測を継続した。また、昨年度に報告した、2016年4月1日から5月31日までの2か月間のデータを用いた3次元インバージョン解析によって得られた3次元比抵抗構造について、沈み込むフィリピン海プレートに沿う面での比抵抗分布を検討した。この際、そのプレート上面の深さ分布を表すモデルとして、同じく災害軽減プロジェクトにおいてコンパイルされたIwasaki et al., 2015の結果を参照した。ここで、プレート沈み込みに沿う面での比抵抗分布を検討したのは、地震波減衰構造についての報告であるKita and Matsubara, 2016において、プレート面に沿う形でその分布が示され、長期的スロースリップイベント(SSE)域との相関が議論されていたためであった。また、2016年の初頭、ちょうど本観測を開始して構造を推定した時期の直前に、豊後水道域において小規模な長期的スロースリップが発生したとの報告があり(図3やOzawa, 2017)そのすべり分布と本研究で得られた構造との間に何らかの相関が認められないかについて検討したかったためでもあった。

Qp構造との比較から、概ね、比抵抗の低いところは低Qpの減衰の大きな領域に対応していた。その低比抵抗、低Qp域は、過去におきた(1997年、2003年、2010年)大規模な長期的SSEにおいて滑り量の大きかった領域の外側に分布していた。一方、過去の大規模長期的SSEにおいて滑りの大きかった領域は、高Qp領域に対応すると報告されている。その高Qp領域と高比抵抗領域の形状や位置は必ずしも一致しているわけではないが、図3で示された2016年初頭の小規模長期的SSEのすべり領域は、高比抵抗域となっていた。これらの比抵抗構造、地震学的構造、滑り分布の空間的対応関係や構造の時間変化の可能性については、今後の検討が待たれる。

本計画期間中には、上述のように、愛媛県と高知県にわたる17エリア内で、ネットワークMT長基線地電位差連続観測を2016年3月末より開始し、その観測を継続した。各電位差と磁場との周波数応答関数であるネットワークMT応答関数を直接的に逆解析できるように改良した3次元インヴァー

ジョンコード (Siripunvaraporn et al., 2004) を用い、豊後水道に面した四国西部の深部広域比抵抗構造が推定できるようになった。その構造の特徴として、中部地殻に顕著な低比抵抗層が認められて水の存在が示唆される一方で、沈み込むプレートに沿う方向の断面では概ね低比抵抗域と高減衰域とが SSE すべり域の外側に認められ、すべり域内は高比抵抗で低減衰域であるという相関が認められた。

なお、本観測の実施にあたっては、西日本電信電話株式会社やその関連各会社からの多大なるご支援を頂いております。

1(6) 海域観測に基づくスロースリップと誘発現象との相互作用の解明

スロースリップに伴う上下地殻変動を観測する目的で、昨年度までに設置した 2 台の海底圧力計の回収作業を熊野灘で実施した。海底圧力記録からスロースリップによる地殻変動を抽出する手法の開発を昨年度に引き続き実施し、海底圧力計に含まれる非海洋潮汐成分を除去する新たな手法を開発した。昨年度までに、海洋物理学的手法により非潮汐成分を計算し観測される圧力値から差し引くことで地殻変動由来の圧力変動を抽出する手法を開発した。これまでの研究では非潮汐成分の観測値とモデル値の位相はよく一致し高い相関値を示すものの、振幅はモデル値の方がやや小さいことを確認していた。今年度はモデル値の振幅を観測値に合うよう補正することにより非潮汐成分を効率良く除去する手法を開発した。開発した手法をニュージーランドヒ克蘭ギ沈み込み帯に 2015 年 6 月から 2017 年 6 月の期間に設置された海底圧力計記録に適用した結果、補正後の圧力計の分散がすべての観測点で減少できることを確認した。

本計画 5 年では、海域観測に基づくスロースリップの検出と、スロースリップにより誘発される現象の解明を目的とし、1) スロースリップに伴う上下地殻変動の観測、2) 海底圧力計記録から地殻変動を抽出する手法の開発、3) スロースリップに伴う微動や微小な地震活動の検出に向けた手法開発を行った。

1) については、スロースリップに伴う上下地殻変動を観測する目的で、2 台の海底圧力計の設置回収作業を熊野灘で実施した。設置点は、海底ケーブル式観測網 (DONET) の海底圧力計よりも沖側で、一台は陸側斜面、もう一台は沈み込むフィリピン海プレート上とした。観測期間の 5 年の一部に欠測期間が含まれるものの長期の圧力記録をケーブル式の海底圧力計が設置されていない地点において取得することに成功した。

2) については、海底圧力記録からスロースリップによる地殻変動を抽出する手法の開発した。海底圧力計に含まれる非海洋潮汐成分を海洋物理学的モデルを用いて除去することで、スロースリップによる ~ 1 cm 程度の圧力変動の検出に成功した。さらに、非潮汐成分のモデル値の振幅を観測値に合うよう補正することで非潮汐成分をさらに効率良く除去できることを確認した。

3) については、海底地震計記録から微動を抽出する手法の開発を行い、東北地方太平洋沖地震前にスロースリップに伴い誘発された微動活動の検出に成功した。また、スロースリップに伴う構造の変化を地震波干渉法により抽出することにも取り組み、スロースリップ域内にてスロースリップの発生に伴い海底地震計記録から求めた自己相関関数が急激に変化することを見出し、最大前進の発生域内で最大前震発生の三ヶ月ほど前から徐々に自己相関関数が変化していた可能性を示した。

1(7) 余効すべりの物理モデルの構築と摩擦特性の推定

昨年度に引き続き、摩擦構成則に従う余効すべりとマンツルの粘弾性応力緩和を組み合わせた余効変動の物理モデルを用いて、2011 年東北沖地震の余効変動のモデル化を行った。今年度は、プレート境界面の摩擦パラメータ、マンツルの粘性率に加えて地震時のすべり分布も未知パラメータとして扱い、地震時及び地震後の測地データからこれらのパラメータを同時に推定する手法の開発を行った。この手法を用いて、地震時の地表変位及び地震後 7 年間の地表変位の時系列データを説明できるパラメータの推定を行った。

本計画期間中では、余効すべりとマンツルの粘弾性応力緩和を組み合わせた余効変動の物理モデルを構築した。モデルでは、余効すべりと粘弾性緩和は地震時の応力変化によって駆動され、余効すべりの時間発展は摩擦構成則に従うと仮定した。このモデルを用いて、2011 年東北沖地震の余効変動をモデル化した。初めに地震時のすべり分布、プレート境界面の摩擦パラメータ、粘弾性構造、マンツ

ルの粘性率などのパラメータを変化させてモデル計算を行い、計算された余効変動と GNSS 及び海底地殻変動データを比較することで各パラメータの余効変動に対する影響を調査した。その結果、余効すべりの時空間変化は地震時のすべり分布に極めて敏感であることが分かった。そこで、地震時の地表変位と地震後の地表変位の時系列を観測データとして用い、地震時のすべり分布と余効変動の物理モデルのパラメータを同時に推定する手法の開発を行った。この手法を用いて、地震時の地表変位及び地震後 7 年間の地表変位の時系列データを説明できる物理モデルのパラメータを推定した。

2. プレート境界すべり現象メカニズム解明のための地下構造異常の抽出とスロー地震・巨大地震の相互作用シミュレーション

2(1) プレート境界すべり現象メカニズム解明のための地下構造異常の抽出

プレート間の滑り現象を規定する構造不均質を明らかにする目的で、2017 年度に和歌山県の深部低周波微動活動が不明瞭な領域における測線 (図 8) で取得した稠密自然地震観測データ、制御震源地殻構造探査データに対して、トモグラフィー解析、反射法解析をそれぞれ実施した。得られた測線下の地震波速度構造を図 9、反射法断面図を図 10 に示す。また、深部低周波微動活動域の詳細な地震波減衰構造を推定するために、2015 年度に紀伊半島北東部の深部低周波微動活動が明瞭な領域を通る測線 (図 8) で取得した稠密自然地震観測データと、2009 - 2010 年に紀伊半島南部で実施した稠密自然地震観測 (Kurashimo et al., 2014)、2010 - 2011 年に紀伊半島西部で実施した稠密自然地震観測 (Kato et al., 2014) のそれぞれで取得した波形データと研究対象地域の定常観測点で得られている波形データを使用し、プレート境界での波線の屈折の影響を考慮して、Q 値インバージョン解析を行った。また、紀伊半島東部地域においては、波形のスペクトル比を用いて Q_p/Q_s 値を求め、S 波減衰構造も推定した (図 11)。

深部低周波微動活動が不明瞭な領域を通る測線下の反射法断面図 (図 10) からは、測線北側から中央部の深さ 25 km 付近に明瞭な北傾斜の反射面が確認でき、トモグラフィー解析で得られた速度構造 (図 9) と比較すると、島弧側のモホ面に対応すると考えられる。測線南端の深さ 22 km 付近から確認できる北傾斜の反射層は、この地域に於いて過去に実施された地殻構造探査の結果と比較するとフィリピン海プレート上面に対応すると考えられる。この反射層の層厚は、紀伊半島北東部下の微動活動が活発な領域におけるフィリピン海プレートに対応する反射層 (Iwasaki et al., 2008) の層厚よりも薄くなっている。このことから、深部低周波微動活動度と沈み込むフィリピン海プレート内の構造不均質との関連が示唆される。

P 波減衰構造の解析結果は、深部低周波微動発生が発生しているいずれの地域でも中・低 Q_p (400 ~ 800) を示した。また、紀伊半島東～中部では深部低周波微動発生域上部で高 Q_p (800 以上)、マントルウェッジで低 Q_p (400 以下) の領域が存在するのに対し、西部では深部低周波微動発生域上部で中 Q_p 、マントルウェッジで高 Q_p となる違いがあることが明らかになった。一方で、紀伊半島北東部における S 波減衰構造の解析結果 (図 11) は、深部低周波微動発生域で中・低 Q_p/Q_s 、中・高 Q_s 、深部低周波微動発生域上部で低 Q_p/Q_s 、高 Q_s 、マントルウェッジで明瞭な高 Q_p/Q_s 、低 Q_s をそれぞれ示した。さらに、マントルウェッジから中央構造線へと高 Q_p/Q_s 、低 Q_s 領域が伸長していることが分かった。

深部低周波微動発生域は紀伊半島東～中部では海洋プレート内、西部では海洋プレート上面付近に存在し、既存研究から高 V_p/V_s 域に位置すると推定されている。地下流体の存在領域は低 Q ・高 V_p/V_s で特徴づけられることを踏まえると、本研究の結果は紀伊半島の中部・西部では地下流体の存在する環境で深部低周波微動の活動が活発になっている可能性を示している。また、紀伊半島東部では下部地殻の不透水層によって、マントルウェッジ端部でスラブ起源流体が滞留している可能性がある。さらに、既存研究では中央構造線沿いの領域で高 V_p/V_s が得られていることから、紀伊半島東部の深部低周波微動発生域で生じた高圧流体は、一部がマントルウェッジへ移動したのち、中央構造線に沿って上昇しているかもしれない。

本計画期間中では、深部低周波微動活動度が異なる地域下で稠密自然地震観測、制御震源地殻構造探査を実施した。取得したデータや既存地震観測データに対して地震波速度構造解析・地震波減衰構

造解析・反射法解析を実施することで、プレート間の滑り現象を規定する地下構造の異常が、深部低周波微動の発生域やその近傍に存在することを明らかにした。また、それらの地震学的特徴から、微動発生域やその近傍に流体の存在が示唆されることを示した。

2(2) スロー地震・巨大地震の相互作用シミュレーション

四国および日向灘地域における、浅部および深部のスロースリップイベント (SSE) の発生を统一的に再現することを目指した数値シミュレーションを実施した。この数値シミュレーションにおいては、従来の研究で再現されていた四国深部の長期的・短期的 SSE に加えて、日向灘での深部の長期的 SSE、足摺沖の浅部 SSE も统一的に再現することができた。また、浅部の SSE については、日向灘から足摺沖に向かう方向へのすべりの伝播も、固着域の幅を狭くすることによって、説明できる可能性が示された。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
磯田謙心, 2019, 豊後水道で繰り返し発生するスロースリップイベントの研究, 2018 年度九州大学大学院理学府修士論文.
藤田萌実・西村卓也・宮崎真一, 2018, 西南日本における応力解放に伴う地殻変動の検出 -小規模なスロースリップの検出に向けて-, 地殻変動研究集会.
Hirose, H., T. Matsushima, T. Tabei, and T. Nishimura, 2018, A small slow slip event in Bungo Channel from December 2015 to March 2016 detected by a GNSS observation network, T33E-0457, AGU Fall Meeting 2018, Washington, D.C., 10-14 December.
廣瀬仁・松澤孝紀, 2018, スロースリップイベントによる応力時間変化の計算: 房総半島スロースリップイベントへの適用と地震活動との対比, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 22, 20-25.
廣瀬仁・松島健・田部井隆雄・西村卓也, 2018, 豊後水道 GNSS 観測網で捉えた 2015 年 12 月 ~ 2016 年 3 月頃の小規模なスロースリップイベント, S23-P07, 2018 年日本地震学会秋季大会, 郡山市, 10 月 9 日-11 日.
Hirose, H., T. Matsushima, T. Tabei, and T. Nishimura, 2018, A small slow slip event in Bungo Channel from December 2015 to March 2016 detected by a GNSS observation network, International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2018, P21.
Hirose, H., K. Nakano, and T. Matsuzawa, 2018, A comparison of the stress evolutions due to Boso slow slip events and the accompanying earthquake swarms, SCG53-P14, JpGU 2018, Chiba, 20-24 May.
Kano, M., N. Aso, T. Matsuzawa, S. Ide, S. Annoura, R. Arai, S. Baba, M. Bostock, K. Chao, K. Heki, S. Itaba, Y. Ito, N. Kamaya, T. Maeda, J. Maury, M. Nakamura, T. Nishimura, K. Obana, K. Ohta, N. Poiata, B. Rousset, H. Sugioka, R. Takagi, T. Takahashi, A. Takeo, Y. Tu, N. Uchida, Y. Yamashita, and K. Obara, 2018, Development of a Slow Earthquake Database, Seismological Research Letters, doi: 10.1785/0220180021.
Katakami, S., Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, S. Suzuki, and M. Shinohara (2018), Spatiotemporal Variation of Tectonic Tremor Activity Before the Tohoku-Oki Earthquake, J. Geophys. Res., 123, 9676-9688, doi: 10.1029/2018JB016651.
Kurashimo, E, T. Iidaka, N. Tsumura, H. Nakasako, T. Iwasaki, N. Hirata, 2018, Subduction structure beneath the western part of Kii Peninsula, southwestern Japan, revealed by active and passive seismic experiments, T21F-0280, AGU Fall Meeting 2018, Washington, D.C., 10-14 December.
Kurashimo, E, T. Iidaka, N. Tsumura, H. Nakasako, T. Iwasaki, N. Hirata, 2018, Active and passive seismic experiments in the western part of Kii Peninsula, southwestern Japan, SSS11-P11, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 幕張メッセ, 千葉市, 5 月 20 日 - 24 日.
Muramoto, T., Y. Ito, D. Inazu, L. M. Wallace, R. Hino, S. Suzuki, S. C. Webb, and S. Henrys, 2018, Seafloor crustal deformation on ocean bottom pressure records with non-tidal variability corrections: application to Hikurangi margin, New Zealand, Geophys. Res. Lett., in press.

- Nagano, A., Y. Yamashita, T. Hasegawa, K. Ariyoshi, H. Matsumoto, M. Shinohara, 2018, Characteristics of an atypical large-meander path of the Kuroshio current south of Japan formed in September 2017, *Marine Geophysical Research*, doi: 10.1007/s11001-018-9372-5.
- Nishimura, T., Y. Yokota, K. Tadokoro, and T. Ochi, 2018, Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, *Geosphere*, 14, 535-551, doi:10.1130/GES01529.1.
- Poiata, N., J.P.Vilotte, P.Berbnard, C.Satriano, K.Obara, 2018, Imaging different components of a tectonic tremor sequence in southwestern Japan using an automatic statistical detection and location method, *Geophys. J. Int.*, 205, doi:10.1093/gji/ggy070, 1548-1573.
- 坂上 啓・西村卓也・福田淳一・加藤照之, 2018, 1997-2010 年における東海地方スロースリップイベントの時空間発展の推定, 1, 日本測地学会第 130 回講演会, 高知市, 10 月 16 日-18 日.
- Sakaue, H., T. Nishimura, J. Fukuda, T. Kato, 2018, Spatio-Temporal Evolution of Long-Term and Short-Term Slow Slip Events in the Tokai Region, Central Japan Estimated from a Very Dense GNSS Network, During 1996-2016, SE27-A016, AOGS 15th Annual Meeting, Honolulu, USA, 3-8 June.
- 坂上 啓・西村卓也・福田淳一・加藤照之, 2018, 東海地方スロースリップイベント, SCG53-P12, 日本地球惑星科学連合 2018 年連合大会, 千葉市, 5 月 20 日-24 日.
- 田中愛幸・黒石裕樹・香取秀俊, 2018, 光格子時計の地震・火山研究応用の可能性を探る, *地震ジャーナル*, 65, 36-44.
- Tanaka Y., V. Klemann, and Z. Martinec, 2019, Surface loading of a self-gravitating, laterally heterogeneous elastic sphere -preliminary result for the 2D case, IAG Symposia series, in revision .
- Uemura, M., Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, and M. Shinohara, 2018, Spatio-temporal changes in the seismic velocity induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and slow slip event revealed from seismic interferometry, using Ocean Bottom Seismometer's records, *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(87), doi: 10.1186/s40645-018-0240-3.
- Uyeshima, M., Hata, M., Ichihara, H., Yoshimura, R. and Aizawa, K. A progress report on the subsurface electrical resistivity structure obtained from the Network-MT survey in the vicinity of area with a forthcoming slow slip event in the SW part of the Shikoku Island, SW Japan, 24th EM Induction Workshop, Helsingoer, Denmark, 2018.
- Wang, T., J. Zhuang, J. Buckby, K. Obara, H. Tsuruoka, 2018, Identifying the recurrence patterns of non volcanic tremors using a 2D hidden Markov model with extra zeros, *J. Geophys. Res.*, 123, 10.1029/2017jb015360.
- Watanabe, S., Y. Yamashita, T. Yamada, and M. Shinohara, 2018, Spatio-temporal Variation of Seismic Energy Released by Shallow Low-frequency Tremors in the Hyuga-nada, SW Japan, revealed by Ocean Bottom Seismological Observation , T33E-0448 , AGU Fall Meeting 2018 , Washington, D.C. , 10-14 December.
- 渡邊早姫・山下裕亮・山田知朗・篠原雅尚, 2018, 日向灘浅部低周波微動活動に伴うエネルギー解放量の特徴, S23-28, 2018 年日本地震学会秋季大会, 郡山市, 10 月 9 日-11 日.
- Watanabe, S., Y. Yamashita, T. Yamada, and M. Shinohara, 2018, Activity of Shallow Tremor in the Hyuga-Nada Region After the 2016 Kumamoto Earthquake by Ocean Bottom Seismological Observation, SE27-A009, AOGS 2018, Honolulu, USA, 3-8 June.
- Watanabe, S., Y. Yamashita, T. Yamada, and M. Shinohara, 2018, Activity of shallow low-frequency tremor in the Hyuga-nada, revealed by ocean bottom seismological observation, SCG53-P07, JpGU 2018, Chiba, 20-24 May.
- Yamashita, Y., Y. Kase, and K. Ioki, Does a focal region of shallow slow earthquake become a source area of tsunami? -Approach of geophysical and geological survey for a large historical earthquake-, T33E-0472 , AGU Fall Meeting 2018 , Washington, D.C., 10-14 December.

Yamashita, Y., M. Shinohara, T. Yamada, S. Watanabe, K. Nakahigashi, H. Shiobara, K. Mochizuki, T. Maeda, and K. Obara, 2018, Spatiotemporal Variation of Shallow Low-Frequency Tremor and Very-Low-Frequency Earthquake Activity in the Western Part of Nankai Trough Revealed by Long-Term Ocean Bottom Seismological Observation, SE27-A020, AOGS 2018, Honolulu, USA, 3-8 June.

Yamashita, Y., M. Shinohara, T. Yamada, S. Watanabe, K. Nakahigashi, H. Shiobara, K. Mochizuki, T. Maeda, and K. Obara, 2018, Shallow very-low-frequency earthquake activity in the Hyuga-nada region revealed by long-term ocean bottom seismological observation, SCG53-P05, JpGU 2018, Chiba, 20-24 May.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

次期計画では、以下に挙げるサブテーマの内容が継続して実施される。

1. モニタリング精度向上とプレート境界すべり現象解明

1(1) 豊後水道における隣接すべり現象間の相互作用の解明

[GPS 観測]

「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」のサブテーマ「4. GNSS 観測による豊後水道周辺域での SSE のモニタリング」で、本計画および科研費等で構築してきた機動的 GNSS 連続観測点における地殻変動観測を継続して実施し、国土地理院等の他機関の観測データもあわせてモニタリングを行う。このための GNSS 基線解析環境を構築するとともに、過去の長期間のデータも活用し SSE の把握を進める。

[陸域地震観測]

「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」のサブテーマ「2. 陸域広帯域地震観測等を用いた超低周波地震活動様式の解明」で継続して実施する。四国西部・九州東部に設置した合計6点における広帯域地震計臨時観測を継続し、南海トラフ域に発生する浅部及び深部超低周波地震活動を継続的にモニタリングし、その活動様式を解明すると共に、他のスロー地震との相互作用などに関する研究を行なう。得られた超低周波地震カタログはスロー地震データベースに登録し、国際的スロー地震研究の推進に貢献する。なお、以上の実施計画については、平成31年度から2カ年は新学術領域研究「スロー地震学」で実施するため、その間は本計画では行わない。

1(2) 東海地域における長期的・短期的 SSE の時空間変化の推定手法の高度化とプレート間すべりの解明

「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」において、東海地方の GNSS 観測を継続し、SSE の時空間発展と固着状態の推定を行う。

1(3) 房総 SSE と群発地震活動との相互作用の解明

[地震観測]

相似地震活動の調査は、「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」で引き続き実施する。プレート境界やプレート内で発生する相似地震活動を抽出し、周辺で発生した大地震やスロースリップイベントとの関連を詳細に調べる。

1(4) 西南日本スロー地震活動様式の解明

「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」のサブテーマ「1. スロー地震データベースの拡充とスロー地震活動特性の解明」で継続して実施する。様々な時定数を有するスロー地震の時空間変化や相互作用を正確に把握することは、これらのスロー地震活動を再現するための数値シミュレーションモデルパラメタを得る上で大変重要である。その結果として、数値シミュレーションの信頼性が向上し、スロー地震とそれに隣接する大地震の相互作用に関するシミュレーション結果に基づいて、長期的及び中短期的な大地震発生可能性の評価に貢献することが期待される。この目的を達成するため、科研費で構築したスロー地震カタログのデータベースを維持し WEB 公開を継続するとともに、各カタログの更新、および国内外から新規カタログの追加を行い、各種スロー地震の時空間変化や相互作用などの活動様式を明らかにする。なお、ここで拡充さ

れるスロー地震データベースは、本地震火山観測研究計画内での利用にとどまらず、国内外のスロー地震研究における基盤的環境を提供するものであり、スロー地震カタログの国際標準化や、国際的スロー地震カタログリポジトリとしての存在価値化を通じて、地震研究分野における国際的リーダーシップの強化に貢献する。なお、本計画は平成31年度からの2カ年は新学術領域研究「スロー地震学」で実施するため、平成31年度は、今後科研費から本計画にデータベースを移行するに必要な準備を進める。

1(5) 重力・電磁気観測に基づくすべりの時間発展と流体との相互作用の解明

[重力観測]

「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」のサブテーマ「7. 重力・電磁気観測に基づくすべりの時間発展と流体との相互作用の解明」で継続して実施する。南海トラフ等のスロースリップ域において重力・地磁気観測を実施し、間隙流体の時間変動を捉えることを目指す。スロースリップ時のデータを蓄積するとともに、地下水等の補正手法改善による観測データの誤差低減手法に取り組むとともに、スロースリップに及ぼす流体の効果をモデリングする。プレート境界の応力状態を変化させる間隙流体の移動を明らかにすることは、他のスロー地震及び巨大地震発生域とスロースリップ発生域とがどのように相互作用しているのか解明することに貢献し、中短期予測につながる。重力観測はそれぞれの地域で2-3年間に1回を標準とするが、スロースリップの発生時期に応じて観測頻度を地域間で調整する。

2. プレート境界すべり現象メカニズム解明のための地下構造異常の抽出とスロー地震・巨大地震の相互作用シミュレーション

2(1) プレート境界すべり現象メカニズム解明のための地下構造異常の抽出

「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」のサブテーマ「8. スロー地震の滑り特性を規定する地下構造異常の抽出」において、スロー地震発生域やその近傍における構造を明らかにするために、紀伊半島等で取得された稠密地震観測データの解析を引き続き実施する。また、豊後水道下のプレート形状を明らかにする目的で水ノ子島に構築した観測点の保守・データ回収作業を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

小原一成・岩崎貴哉・酒井慎一・前田拓人・篠原雅尚・望月公廣・山田知朗・田中愛幸・今西祐一・大久保修平・上嶋誠・加藤照之・福田淳一・五十嵐俊博・酒井慎一・飯高隆・蔵下英司・加藤尚之・竹尾明子・加藤愛太郎・木下正高（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

松島健（九州大学大学院理学研究院） 田部井隆雄・村上英記（高知大学理学部）
西村卓也・伊藤喜宏（京都大学防災研究所） 廣瀬仁（神戸大学大学院理学研究科）
日野亮太・三浦哲・高木涼太（東北大学大学院理学研究科） 津村紀子（千葉大学大学院理学研究科）
伊藤武男（名古屋大学大学院環境学研究科） 生田領野（静岡大学理学部）
原田靖・長尾年恭（東海大学海洋研究所） 浅野陽一・松澤孝紀・木村尚紀・武田哲也・汐見勝彦（防災科学技術研究所） 芝崎文一郎（建築研究所）
荒木英一郎（海洋研究開発機構） 塩崎一郎（鳥取大学大学院工学研究科）

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5712

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 小原一成

所属: 東京大学地震研究所

観測点コード	地名	北緯	東経	備考
FKU2	愛媛県愛南町福浦	32.9200	132.4970	H27 年度
HBR2	愛媛県宇和島市日振島	33.1720	132.2950	H27 年度
MZNK	大分県佐伯市水ノ子島	33.0440	132.1770	H27 年度
SKME	大分県佐伯市蒲江	32.8030	131.9430	H27 年度
TOCH	大分県津久見市越智	33.0840	131.9890	H27 年度
MSKC	愛媛県伊方町三崎	33.3890	132.1240	H28 年度
YHNI	愛媛県八幡浜市保内町	33.4805	132.3972	H29 年度
SNOM	愛媛県西予市野村町	33.3732	132.6436	H29 年度
YURA	愛媛県宇和島市津島町	33.0566	132.4299	H29 年度
AOSM	愛媛県大洲市長浜町青島	33.7357	132.4870	H29 年度
TKOB	大分県豊後大野市緒方町	32.8209	131.3812	H29 年度
SYND	大分県佐伯市米水津	32.8869	131.9884	H29 年度
SNKW	大分県佐伯市直川	32.8976	131.7763	H29 年度
OSGS	大分県大分市佐賀関	33.2492	131.8637	H29 年度
TNHM	愛媛県西予市田之浜	33.3199	132.3904	H29 年度
NOKW	宮崎県延岡市黒岩	32.6298	131.6255	H29 年度
NOMT	宮崎県延岡市港	32.6012	131.7090	H29 年度
NOMS	宮崎県延岡市名水	32.5053	131.6948	H29 年度
UUCK	愛媛県喜多郡内子町	33.5537	132.6502	H30 年度
NKJM	愛媛県松山市中島	33.9743	132.6270	H30 年度
TOBE	愛媛県伊予郡砥部町	33.7362	132.7906	H30 年度
KUMA	愛媛県久万高原町	33.6527	132.9043	H30 年度

表 1: これまでに設置された GNSS 観測点。

観測点コード	地名	北緯	東経	備考
UUCK	愛媛県喜多郡内子町	33.5537	132.6502	2018/12/27～
NKJM	愛媛県松山市中島	33.9743	132.6270	2018/6/20～
TOBE	愛媛県伊予郡砥部町	33.7362	132.7906	2018/5/31～
KUMA	愛媛県久万高原町	33.6527	132.9043	2019/2/4～

表 2: 平成 30 年度に設置した GNSS 観測点。

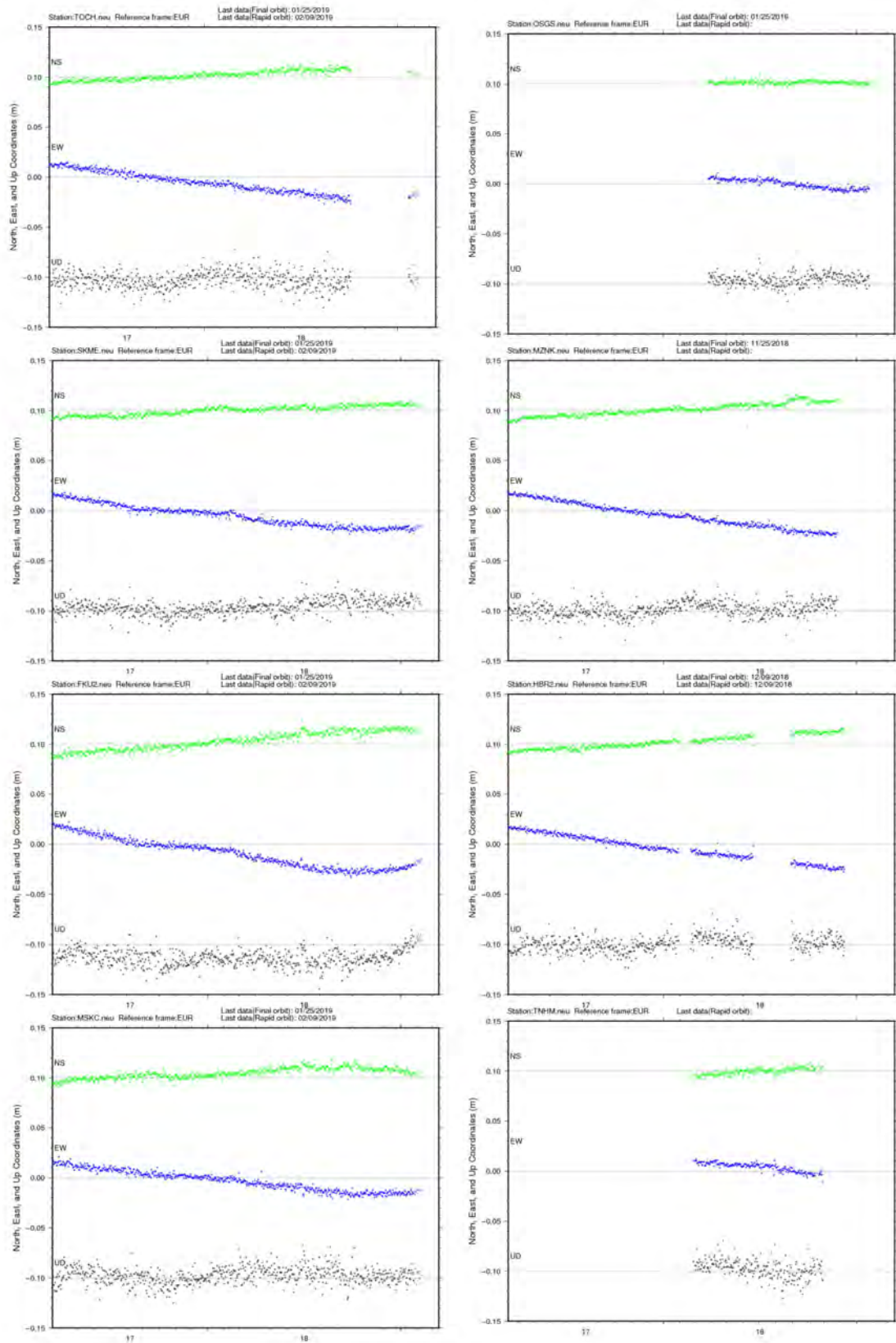


図 1:本研究で設置された代表的な機動的 GPS 観測点で求められた日々の座標値のグラフ。

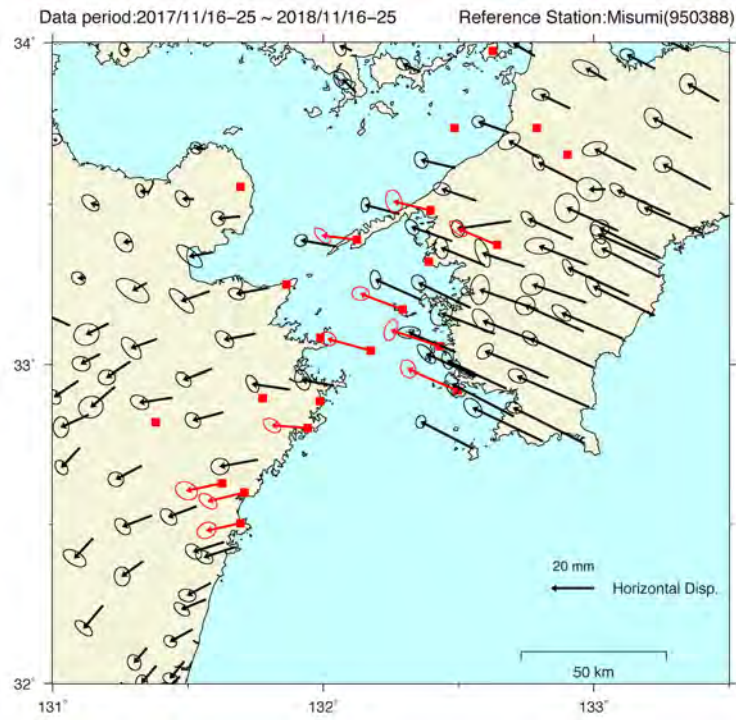


図 2: 豊後水道およびその周辺の GPS 観測点で記録された地殻変動 (2017 年 11 月 ~ 2018 年 11 月)

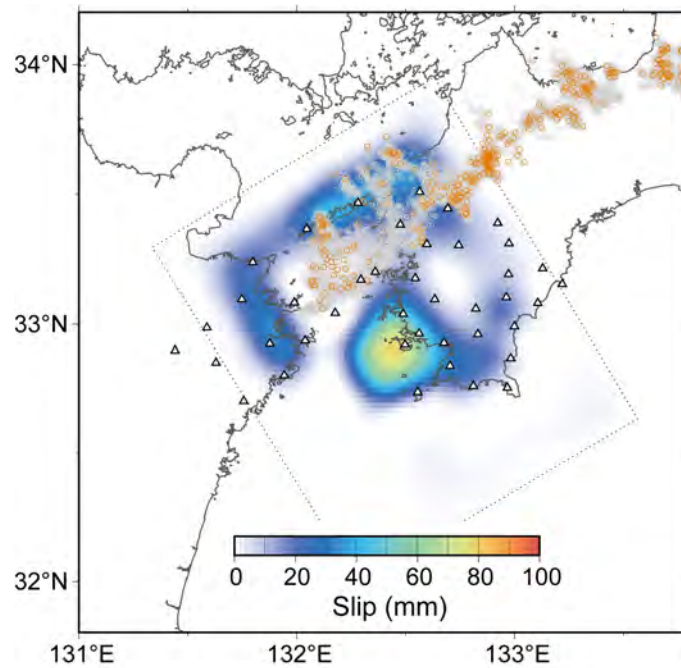


図 3: 2015 年 12 月 ~ 2016 年 3 月に発生した四国南部を中心とした長期的 SSE の滑り量分布 (Hirose et al., 2018)。

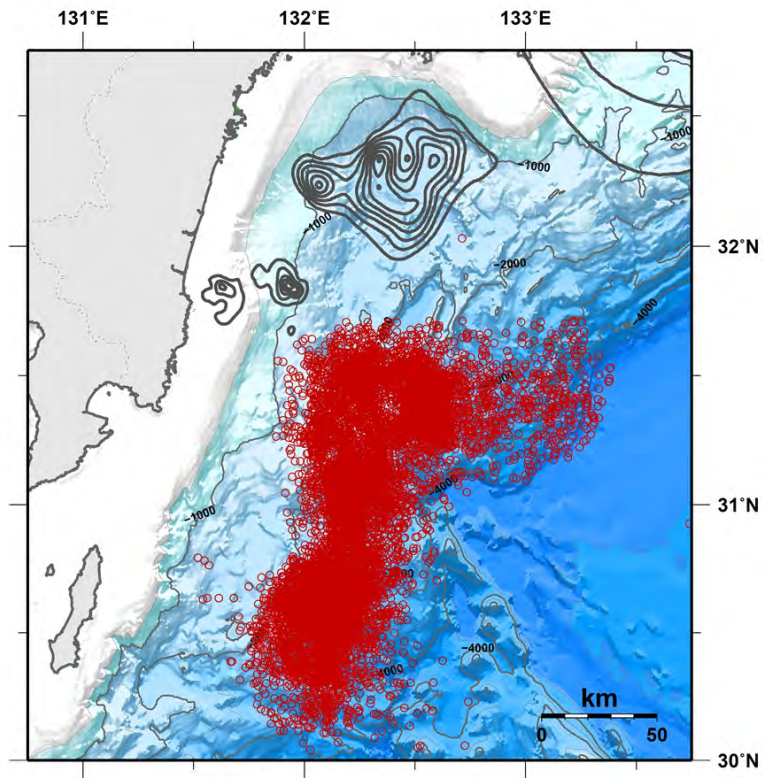


図 4 : 2013 年 ~ 2018 年の間に実施した海底地震観測中に決定された浅部低周波微動の震源位置 (赤丸) 。

ただし、2017 年 ~ 2018 年の活動 (主に種子島沖) は通常地震活動も含んでいる。灰色のコンターは 1968 年日向灘地震と 1996 年 10 月・12 月の日向灘の地震の 50cm 毎のすべり分布 (八木・他、1998; Yagi et al. , 1999) および 1946 年南海地震の 2m 毎のすべり分布 (Sagiya and Thatcher , 1999) を示す。

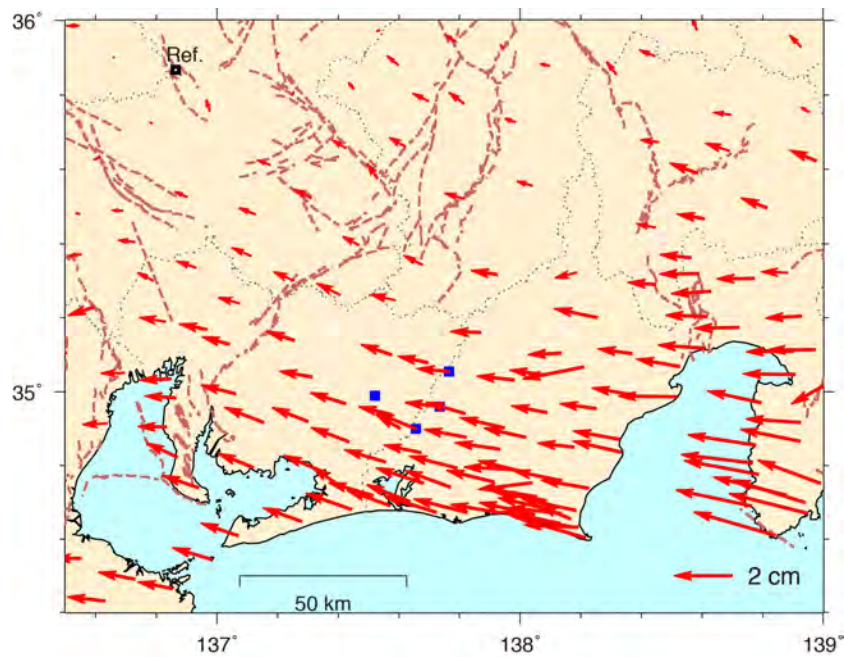


図 5 : 最近 1 年間の東海地方の水平地殻変動。

矢印は、2018 年 1 月 9-18 日から 2019 年 1 月 9-18 日までの GNSS 観測点における水平変位を表す。青四角が本研究による観測点。

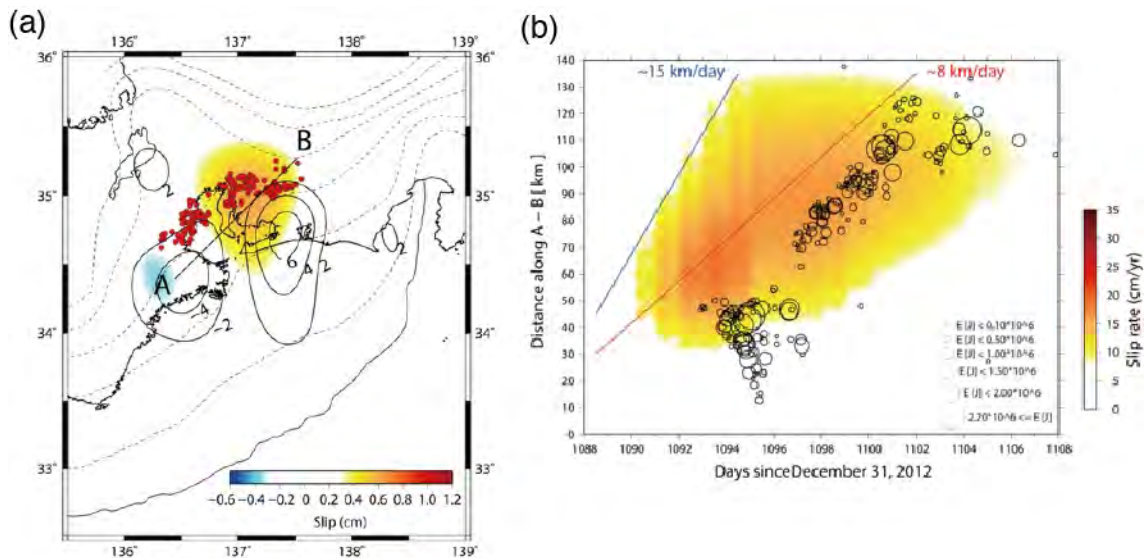


図 6: (a) 2015 年 12 月 26 日から 2016 年 1 月 12 日までの短期的 SSE に伴うプレート境界面でのすべり分布 (カラースケール)。等値線は 2013 年 1 月から 2016 年 1 月 31 日までの累積すべり量 (cm) を示す。赤丸は深部低周波微動。(b) 断面 A-B における短期的 SSE のすべりの時間発展。

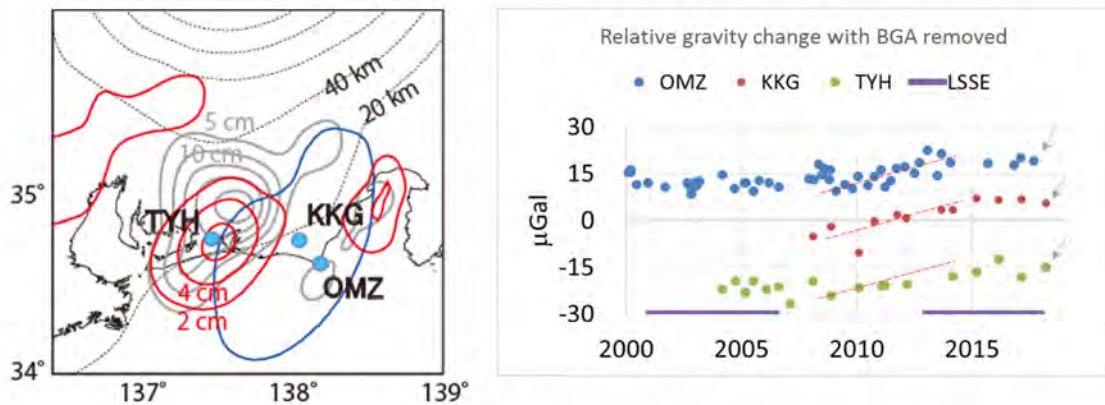


図 7: 東海地方で観測された異常な重力変化。

(左) 観測点の位置 (OMZ: 御前崎、KKG: 菊川、TYH: 豊橋) を国土地理院のすべり量のコンターに重ねている。(右): 観測結果。縦軸の単位はマイクロガル (1 マイクロガル = 10 億分の 1 G)。地殻上下変動の影響は除去しているため、地下の質量変化を表す。点線は比較のために同じ傾きを示したものの。

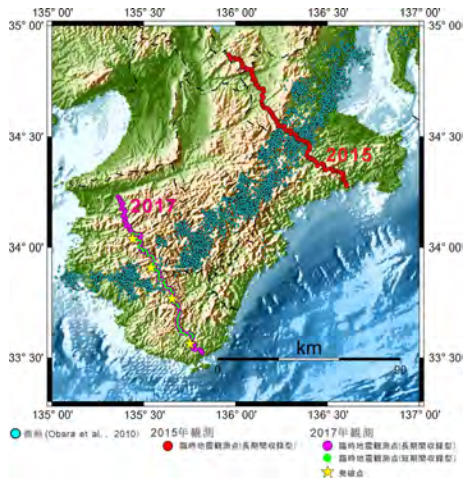


図 8 : 臨時地震観測点配置図。

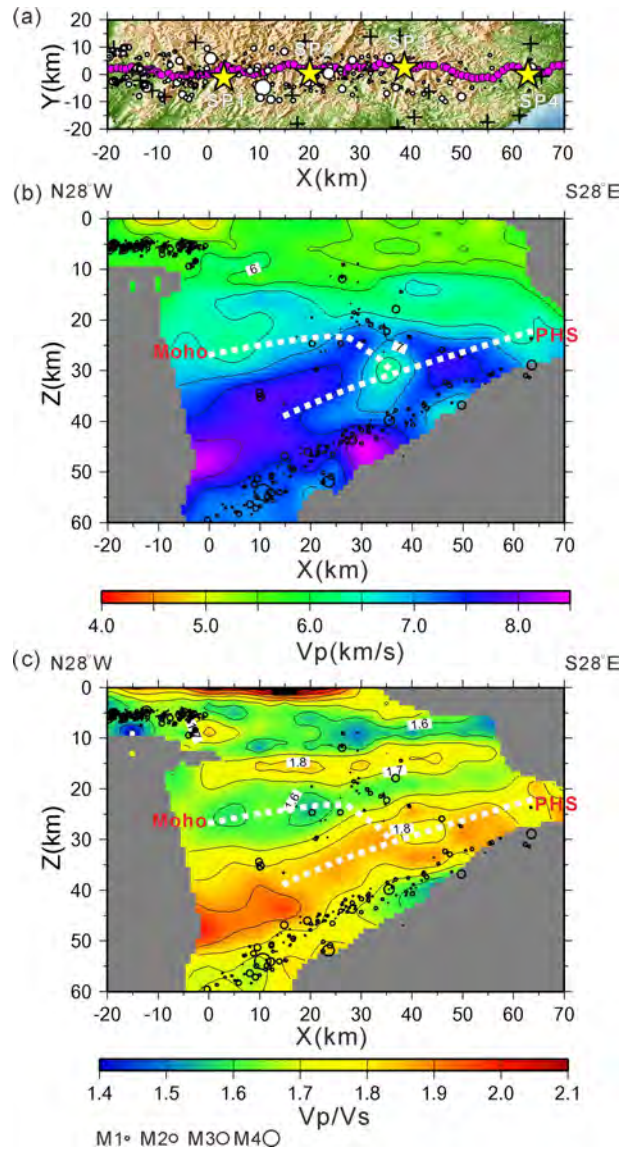


図 9: トモグラフィック解析により得られた 2017 年測線下の地震波速度構造と震源分布。

(a) 紫色丸印が臨時観測点、+ が定常観測点、星印は発破点位置を示す。白色丸印は再決定した震央分布を示し、その大きさがマグニチュードを表す。(b) P 波速度構造。(c) V_p/V_s 構造。

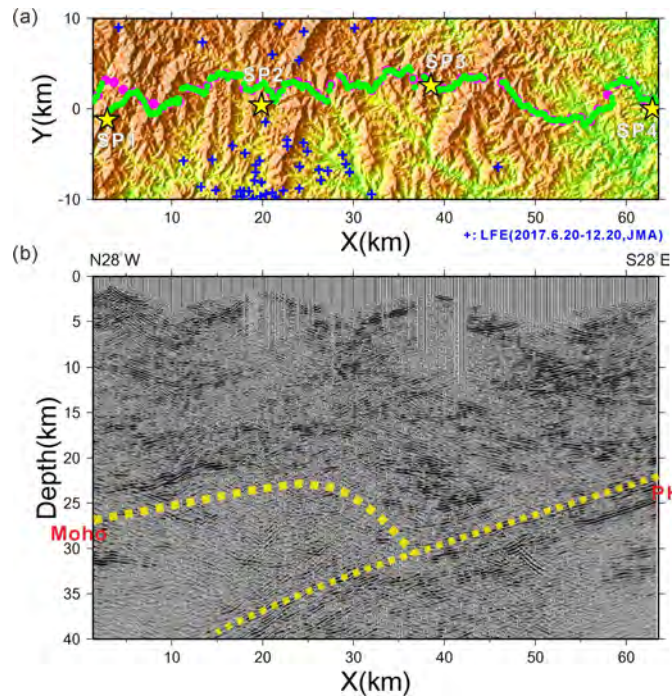


図 10：反射法断面図。

(a) 探査測線と気象庁一元化震源カタログによる低周波地震(2017.6.20-2017.12.20)の震央分布図。(b) 深度断面図。

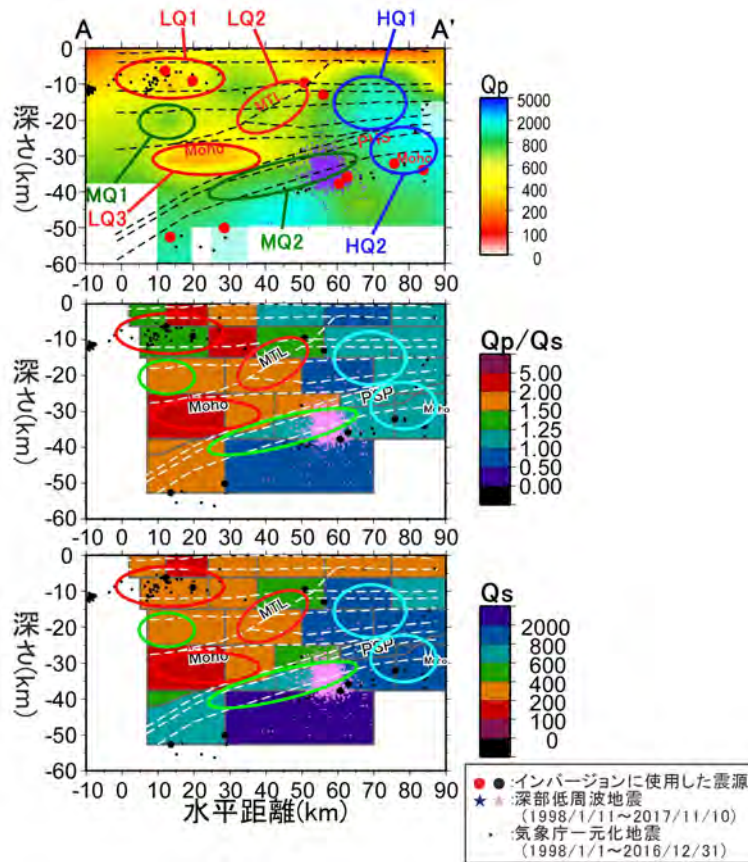


図 11: 地震波減衰構造解析により得られた 2015 年測線下の減衰構造。

波線は、Iwasaki et al. (2008) によって示された 2015 年測線下の速度境界面を示す。上段： Q_p 構造、中段： Q_p/Q_s 構造、下段： Q_s 構造。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

相似地震再来特性の理解に基づく地殻活動モニタリング手法の構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

イ. 海洋プレート内部の地震

ウ. 内陸地震と火山噴火

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究計画では、ほぼ同一場所で発生する相似地震を用いて、沈み込みプレート境界における固着状態の時間・空間的变化をモニタする手法を改良・高精度化するとともに、プレート間相似地震以外の地

震や微動によるすべりモニタリングの可能性を検討し、地殻活動および地震発生過程の理解を進める。また、地震の再来を、地震の震源位置、発震機構解、波形の類似性等から総合的に検証するシステムを開発し、日本列島および世界で発生した小・中規模相似地震カタログの構築を行う。さらに、相似地震に見られる再来間隔および規模の揺らぎの原因を、観測データの解析および数値シミュレーションによって明らかにする。異なる規模の地震を比較検討することにより、発生状況の類似性や相違を明確にし、大地震の発生・予測モデルの構築に役立てる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

(a) 相似地震カタログの構築

平成26年度から5ヶ年を通して、日本全国の定常地震観測網で観測された地震波形データを蓄積し、前計画までに各機関で構築された小規模相似地震抽出システムを継続運用する。また、伊豆・小笠原海溝等島嶼部において地震観測を実施し、観測体制を強化する。地震観測網内およびその周辺で発生した地震については、地震の震源再決定、発震機構解の推定および地震のコーナー周波数の推定等を行い、同一場所での地震の再来を確認する基礎資料を作成する。

さらに、日本周辺および世界のプレート境界域で発生した、微小地震から中規模地震までの相似地震カタログを自動構築するシステムを新たに開発する。平成26年度は、データや解析結果等、入出力ファイルの共通化に向けた仕様を策定する。平成27年度は、相似地震抽出法の改良方針を決定し、プログラムの基本部分を開発してテスト運用を行う。平成28年度は、結果の共有化およびモニタリングシステムへの容易な移行を進めるため、地震の震源位置、発震機構解、波形の類似性等のデータベースを構築し、各種データを相互にリンクするシステムを追加開発する。平成29年度は、開発したシステムの実運用を開始し、相似地震カタログの準リアルタイム構築を実施する。また、GPUを用いた高速解析システムの開発を行う。平成30年度は、ホームページを作成し、新たに作成されたカタログに関する情報を発信する。

(b) 断層面固着状態の推定

平成26年度から5ヶ年を通して、日本列島下に沈み込むプレート境界における固着状態のモニタリングを行う。特に、東北地方太平洋沖地震発生前の固着状況変化および地震後の余効変動に着目した解析や、この地震でその重要性が認識されたプレート境界浅部での固着状態の把握を、相似地震による解析の特徴を生かして進める。南西諸島地域の固着状態の推定は、東北日本地域との類似性や違いを意識しながら進める。

また、断層面固着状態の時間・空間変化をモニタする手法を高精度化する。平成26年度は、前計画までに各機関で構築したモニタリング手法を適用する。また、各手法を比較検討し、改善点を調査する。平成27年度は、測地データから推定されるすべりの情報と比較し、さらには統合して解析する手法の開発を行う。平成28年度は、プレート境界周辺で発生する低周波地震・微動等、他の地震活動と比較を行い、相似地震すべりモニタリングの適用範囲を把握し、他の地震活動によるすべりモニタリングへの応用可能性を検討する。また、プレート境界地震を含む周辺の地震の応力降下量の推定や、変換波振幅の時空間変動のモニタリングを通して、プレート境界の固着状態の時間・空間的变化を推定する手法を開発する。平成29年度は、地殻内やスラブ内で発生する地震のすべりが推定可能か検証を行う。平成30年度は、モニタ結果を自動的にアップデートするシステムを構築する。

(c) 地震再来特性の解明

以下に掲げる相似地震活動予測、観測データ解析および数値シミュレーション解析を5ヶ年にわたり実施することにより、相似地震に見られる再来間隔・規模の揺らぎの原因を明らかにする。特に、相似地震の階層性が生じる原因の解明を目指す。また、東北地方太平洋沖地震発生後に多数見られた新たな相似地震群の発生および消滅、既存相似地震群の波形相似性が低下した原因について検討する。観測データからは、釜石沖や東北地方太平洋沖地震震源域等において詳細な震源メカニズムを多数推定し、地震の再来間隔との関係を調べ、近隣でのすべりや応力変化による影響を検討する。また、小地震の地震サイクルが大地震サイクルと共通の特徴を持つかどうか、規模の異なる繰り返し地震の性

質を比較検討する。さらに、統計モデルより相似地震活動の予測を行う。予測性能を統計的に評価し、予測手法の改良を図っていく。観測された地震の再来特性を速度 - 状態依存摩擦法則に基づく数値シミュレーションにより再現し、相似地震発生域で想定される摩擦特性を検討する。特に、巨大地震発生後の応力不均質性による影響、地震発生深さへの依存性、プレート形状の影響等に注目した解析を行う。また、様々な摩擦特性における地震間のすべりの時空間変化を調査し、断層面固着状態の時間変化の推定精度向上を図る。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

「平成 30 年度の成果」

(a) 相似地震カタログの構築

日本全国の定常観測網で観測された地震波形データを蓄積し、日本列島周辺で発生した相似地震活動の検出を行った。

伊豆・小笠原島弧における地震観測の空白地域となっている伊豆鳥島での地震観測を継続した。伊豆鳥島は北の青ヶ島から 230 km、南の小笠原父島から 420 km 離れた無人島であり、アクセスや電源、通信手段の入手が非常に難しい。平成 26 年度に開発した新しい衛星電話で送るシステム (図 1) を 2015 年 9 月に伊豆鳥島に設置し、地震および傾斜変動の連続観測を開始し、今年度も観測を継続した。今年度は日程の都合で伊豆鳥島への上陸点検作業は実施できなかったが、機器は正常に動作しており、いくつかの顕著な地震が記録されている (図 2)。地震波形データは帯域が狭い衛星電話回線のため、顕著な地震波形しかリモートで回収できないが、連続記録は 2 月にアホウドリ調査のために島に渡った研究者に委託して回収することができた。

(b) 断層面固着状態の推定

作成した相似地震カタログを用いて、日本列島周辺におけるすべりの空間分布・時間変化の特徴を調べた。沈み込むプレートの境界では、大地震後の余効すべりなど、各地域のプレート間固着状態を反映した特徴を示していた。さらに、地殻内で発生する大地震の余震活動や群発地震活動の中に見られる相似地震活動を基にすべり速度の時間変化の推定を試みた。その結果、2011 年東北地方太平洋沖地震発生後に M6 クラスの地震が誘発された茨城県北部地域や千葉県銚子市付近では、余効すべりが生じていることが示された。発生後 1 年間のすべり量は少なめに見積もっても 3 cm 程度になった (図 3)。このことは上盤側プレート内の変動もこれらの地殻活動を把握する際には無視できないことを示唆している。

関東地方下において 2004 年から 2015 年に発生した地震を用いた解析により、繰り返し地震の活動が約 1 年周期で活発化すること、その活動と同期してプレート境界直上の地震波の減衰特性が大きくなること、さらにそれから数か月遅れて浅い地震活動が活発化することが明らかになった (図 4)。これら一連の活動は、以下のように考えると、その時空間変化を説明できる。1) 繰り返し地震の活発化は、約 1 年周期で発生するプレート境界でのスロースリップが原因である。2) スロースリップに伴ってプレート境界の水が上盤に排出され、地震波の減衰を大きくする。3) 排出された水は数か月かけて浅部に上昇し、上盤プレート内で地震を誘発する。この研究成果はスロースリップによって「水の移動」が起こることを示している。解析領域である茨城県南西部では、プレート境界から放出された水により上盤プレート内で地震活動が誘発された。しかし、上盤プレートの透水性が低く水が抜けにくい場合には、水はプレート境界を伝わり浅部に移動すると考えられる。移動した水がプレート境界の破壊強度を低下させ、そこで地震を誘発する可能性がある。これまで指摘されていなかったスロースリップの新しい役割である。

前年度に開発したデロネー四面体補間に基づくすべり速度の推定手法を米国カリフォルニア州サンアンドレアス断層の相似地震カタログに適用し、すべり速度の特徴的な変化の抽出と周辺域における大地震との関連性の分析を行った。その結果、1989 年 Loma Prieta 地震 (Mw6.9) 後の余効すべりの一部が南へと伝播する様子などを確認することができた。

(c) 地震再来特性の解明

速度状態依存摩擦構成則を用いた地震サイクル数値シミュレーション研究では、余効滑り伝播過程に生成核という概念を導入して平成 29 年度に導出した、摩擦パラメーターと余効すべり伝播速度との関係式について、実際の観測場に適用できるように改良した (Ariyoshi et al. submitted to Tectonophysics)。

岩手県釜石沖の繰り返し地震では、地震サイクル後半に小地震活動が活発化する傾向がある。しかし、東北沖地震後の地震発生間隔が極端に短くなった期間においては、同じような活動があるのかどうかは明らかになっていない。そこで、2011 年 3 月 11 日から 4 月 13 日までの 34 日間の連続波形データに対し Matched Filter 法 (MF 法) を適用し、25 個の地震を検出した。このうち 18 個は気象庁一元化カタログに未記載の地震であった。MF 法の性質から、これらの地震は M4.8 前後の地震の繰り返しで知られていた釜石沖の繰り返し地震の極近傍で発生した地震であると考えられる。得られた地震活動は、これまでの約 6 年に比べ、繰り返し間隔が 9 ~ 23 日と極端に短くなっている時期においても、地震サイクル後半の活動が活発な傾向が保存されていたことを示す。地震サイクルにおける小地震の活動の静穏化・活発化が釜石沖の本震の繰り返し間隔に依存しないという結果は、このような活動が、繰り返し間隔の長短によらず固着域内部での応力状態や固着域の階層性といったような同一の性質に支配されている可能性を示唆する (図 5)。

「計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果」

(a) 相似地震カタログの構築

日本全国の定常観測網で観測された地震波形データを蓄積し、日本列島周辺および世界で発生した相似地震活動の検出を行った。その結果、プレート境界型地震が発生する多くの地域で相似地震が検出された。また、メカニズムタイプの分類、応力降下量、S-P 時間差の調査や地震の震源再決定等を行うことにより、同一場所における地震の再来を確認する基礎資料を作成した。さらに震源決定や東北沖地震による応力変化の計算も行い、東北沖地震の発生によるメカニズムタイプの空間変化について議論した。

伊豆・小笠原島弧における地震観測の空白地域となっている伊豆鳥島での地震観測を強化し、計画期間を通して観測を行った。平成 26 年度に地震の連続観測データを衛星電話で送るシステムを新たに開発し、2015 年 9 月にそのシステムを島内に設置した。現在も機器は正常に動作しており、いくつかの顕著な地震が記録されている。

(b) 断層面固着状態の推定

作成した相似地震カタログを用いて、日本列島および世界の各プレート境界における、すべりの空間分布・時間変化の特徴を調べた。スマトラ、日本、千島列島で発生したプレート境界型巨大地震発生後、その余震発生域では相似地震の再来間隔が短くなっており、余効すべりの発生が示唆された。2011 年東北地方太平洋沖地震発生後、震源域のまわりで急激に増加したすべりは、現在まで、徐々に減少していく傾向が続いている。

北海道 関東地方の沖合のプレート境界断層の広い範囲で、準周期的な非地震性すべり (スロースリップ) が発生していることを地震および GPS データから発見した。これまで北海道・東北地方の太平洋側では広域にわたる周期的スロースリップの発生は知られていなかった。今回発見されたスロースリップは地域によって異なり、1 ~ 6 年の発生間隔を持つ。その発生に同期してその地域での M 5 以上の規模の大きな地震の活動が活発化しており、東北地方太平洋沖地震が発生した時期にも、三陸沖ではスロースリップが発生していた (図 6)。このように周期的なスロースリップを地震・地殻変動観測でモニタリングし、データ同化することで、シミュレーションを通じた地震発生予測の高度化への貢献が期待できる。

これまで概ね 5 ~ 7 年間隔でスロースリップが発生していた房総半島沖において、相似地震によるすべりの調査および、既知の房総スロースリップ時に発生した群発地震と類似したイベントの検出を行った。その結果、東北地方太平洋沖地震直後にその応力変化によってスロースリップイベントが誘発されたことが推定された。2011 年 3 月に続き、2011 年 11 月、2014 年 1 月、2018 年 6 月にスロースリップは発生していることから、発生間隔は、東北地方太平洋沖地震によって短くなったものの、その後、発生間隔が少しずつ延びていると考える方が妥当と思われる。

チリ北部の沈み込み帯域における繰り返し地震の解析を実施し、2014年4月に発生した Iquique 地震 (M8.1) 発生に至るまでの地震活動解析を行った。その結果、本震発生の約 270 日前から、地震活動度、繰り返し地震から推定される非地震性すべり量、ETAS モデルの background rate が間欠的に増加し始め、その増分も時間とともに大きくなり、本震発生に至ったことが明らかとなった。また、震源移動現象の発生頻度も本震発生に向かって増加した傾向が見られた。地震性すべりに加えて非地震性すべりもプレート境界面上で同時に進行し、本震破壊領域の端で固着が間欠的に緩み破壊域への応力集中が生じたことで本震の発生が促進されたと考えられる。

沈み込みプレート境界における固着状態の時間・空間的变化をモニタする手法の改良・高精度化のため、繰り返し地震のすべり方向の相対変化を精密に推定できる方法を開発し、東北沖地震前後のフィリピン海プレートの上面と下面の繰り返し地震に適用した。

Brownian Passage Time (BPT) 分布更新過程から拡張した時空間更新過程モデルを用いて、相似地震活動からすべり速度の時空間変動を推定する統計的手法を開発した (Nomura et al., 2017)。すべり速度の変化を 3 次元 B-スプライン関数で表現し、さらに局所的な不連続性と集中性を節点配置に取り入れることにより、解析期間中の大地震による余効すべり等の様子がより詳細に捉えられるようにした。また、B-スプライン関数に代わり、不均一な点配置に基づくデロネー分割による四面体補間を用いた手法も開発し、相似地震の各震源の時空間座標をデロネー分割の点配置として利用することで、相似地震の密集域における微細なすべり速度の変化を捉えることも可能とした。

開発した時空間更新過程モデルに基づくすべり速度の推定手法を用いて、米国カリフォルニア州サンアンドレアス断層 Parkfield segment にて観測された微小相似地震カタログから同領域の準静的すべりの時空間的变化をスプライン関数により推定した (Nomura et al., 2014)。推定結果より、1993 年から 1997 年にかけてのスロースリップが深部から始まり、その後北西へと伝播していく様子を捉えることができた。また、2004 年 Parkfield 地震後の余効すべりの地域差やその変化を明らかにした。さらに、2011 年東北地方太平洋沖地震までに観測された相似地震カタログからプレート境界上の準静的すべりの時空間的变化をスプライン関数により推定した (Nomura et al., 2017)。推定結果より、福島沖における 2008 年からの長期的スロースリップのすべり分布とその時間推移が確認できる。また、2011 年東北地方太平洋沖地震の半年程前から震源より北側で発生したすべり加速と、それが南へと伝播していく様子が捉えられている。

地殻内で発生する相似地震活動を用いたすべりモニタリングの可能性について検討を行った。大地震の余震活動や群発地震活動中に存在する相似地震活動を基にすべり量およびすべり速度の推定を行ったところ、Nadeau and Johnson (1998) により提案された、現在沈み込み帯で用いている関係式では値が大きすぎる可能性が示唆された。

(c) 地震再来特性の解明

岩手県沖について、2011 年東北沖地震前後の繰り返し地震の活動を震源再決定により調べた (Hatakeyama et al., 2017)。その結果、複数の場所で、東北沖地震後、繰り返し地震の規模が大きくなるだけでなく、これまでプレート境界で地震が発生していなかった場所で新たに地震が発生していたことを明らかにした (図 7)。これらの場所では、東北沖地震後大きな余効すべりが発生していたと考えられており、このような時間変化には、東北沖地震の余効すべりによる載荷レートの増加が関係していると考えられる。すなわち、載荷レートの増加により、それまで非地震的にすべっていた場所が、地震的にすべることがあることを示す。

東北沖でテンプレートを用いたメカニズム解の決定を行い、同地域でのメカニズムタイプの時間変化と、2011 年東北沖地震前後の震源域周辺における b 値の時間変化との関係を調べた (Nakamura et al. 2016)。東北沖地震後、震源域周辺では正断層型地震が卓越するようになっており、逆断層型地震が卓越していた東北地方太平洋沖地震前と大きく異なることが明らかになった。一方、b 値の時間変化については、地震の発生場所が時間的に変化していることもあり、応力変化と結びつけるのは、現段階では慎重になる必要があると考えられた。

日本列島周辺域で相似地震活動を含む地震クラスターを抽出し、相似地震活動と規模別頻度分布の

b 値との関係を調査した。相似地震の発生割合が高い地震クラスターの b 値は、プレート境界近傍で発生するものは小さく、内陸で発生するものは大きい傾向が見られた。

釜石沖の繰り返し地震活動が、東北地方太平洋沖地震後から頻発し、発生間隔のみならず規模や震源域の空間分布も揺らぐ現象について、速度状態依存摩擦構成則に基づく数値シミュレーションによって再現することに成功した (Ariyoshi et al., 2015)。その結果、通常発生している繰り返し地震は、摩擦不安定域の中心付近を部分破壊しており、東北地方太平洋沖地震直後に発生した通常よりも規模の大きな地震は、その震源域が摩擦不安定域に相当する、というモデルであれば、整合的に説明できることを示した。また、破壊域の空間的な揺らぎは、余効すべりの伝播方向に沿うことから、釜石沖における余効すべりは、東南東から西北西へ移動したことが示唆された。以上のことから、繰り返し地震の揺らぎを解析することによって、測地観測・岩石実験とは独立に、余効すべりの伝播方向・摩擦構成則を推定することが示された。さらに、速度状態依存摩擦構成則を用いた地震サイクル数値シミュレーションを実施し、余効すべり伝播速度と摩擦パラメータとの関係式について解析解を導出した (Ariyoshi et al. submitted to Tectonophysics)。

孤立したアスペリティに一定速度のせん断をかけた場合でも、アスペリティで発生するすべりは周期的にならず、カオス的な振る舞いをする場合があることを数値シミュレーションで示した。また、アスペリティの相互作用による複雑な地震サイクルを調べるために、3 自由度のバネブロックモデルを用いた数値シミュレーションを行った。条件によっては、周期的な地震発生とカオス的な地震発生とが不規則に繰り返す間欠カオス的な振る舞いが見られた。

繰り返し回数が少ないときの相似地震の発生確率予測の精度を、日本海溝沿いで行った 2006 年から 2010 年の 4 回の確率予測実験データで検証した。相似地震の予測検証実験では、実際の発生状況に比べ、予測確率の平均が 10 % 前後過小であった。対数正規乱数の疑似データを用いて、小標本論対数正規分布モデルの予測実験を行ったところ、同様な過小確率が再現され、その半分強が標本誤差と予測モデルに由来することが判明した。天気予報の降水確率予報と予測成績を比較したところ、平均対数尤度などでは、7 日先の降水確率より予測成績がいくぶん劣るが、ROC (Relative Receiver Operating Characteristic) での比較では、5 日先の降水予報の成績と同程度であった。また、BPT 分布モデル (BPT, plug-in 方式)、ベイズ統計対数正規分布モデル (LN-Bayes)、小標本論対数正規分布モデル (LN-SST) および指数分布モデル (Exp-pin) について、繰り返し回数が同じときの予測結果を ROC 曲線で比較した。その結果、繰り返し回数が少ないときは、LN-Bayes や LN-SST は BPT よりも優れており、Exp-pin は他の 3 統計モデルよりも劣っていた。さらに、乱数を用いたシミュレーションを実施したところ、データが非常に少ない時は、事前分布に含まれる経験的な情報が予測精度の向上に役立つことが分かった。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
- Igarashi, T., Aseismic slip histories inferred from sequences of small repeating earthquakes beneath the Boso Peninsula, central Japan, American Geophysical Union Fall Meeting, T33F-0481, Washington, D.C., 2018.
 - Igarashi, T., Estimation of slip history in the episodic slow slip area from small repeating sequences and their surrounding seismic activities, Asia Oceania Geoscience Society 15th Annual Meeting, SE28-A027, Honolulu, 2018.
 - Kano, M., Aso, N., Matsuzawa, T., Ide, S., Annoura, S., Arai, R., ... & Itaba, S. Development of a Slow Earthquake Database., Seismological Research Letters, 89 (4): 1566-1575, 2018.
 - Nakajima, J., and N. Uchida, Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip, Nature Geoscience, 11, 351-356, doi:10.1038/s41561-018-0090-z, 2018.
 - 奥田貴・内田直希・浅野陽一, 2018, Matched Filter 法を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震直後の小地震の検出 - 釜石沖繰り返し地震クラスターへの適用 -, 地震 2, 71, 87-101, doi:10.4294/zisin.2017-8.
 - Uchida N, Brgmann R.. Repeating earthquakes. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 47:

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

本課題は次期計画中「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」課題で引き続き実施する。この課題では、繰り返し地震を用いて、1)断層面の固着状態の時間・空間的变化をモニタリングする手法を高精度化し、地殻活動の理解を進め、地震発生予測の高度化に資する。そのため、2)プレート境界および内陸地域で発生する繰り返し地震のカタログを整備し、また、3)重点地域において地震観測を実施する。さらに、4)繰り返し地震の再来特性を理解し、大地震の発生モデルの構築に寄与することで、将来発生する大地震の地震像およびその変動範囲の推定に役立てることを目指す。

1)断層面固着状態の推定

沈み込むプレート境界および内陸活断層における固着状態の時間・空間的变化をモニタリングする手法を高精度化する。今期計画にて開発したスプライン補間およびデロネー四面体補間に基づくすべり速度の推定手法を東北太平洋沖における相似地震カタログへと適用して、特に東日本大震災後のすべり速度の特徴的な変化の抽出と2003年十勝沖地震から最近までのすべり速度の推移、その他領域内の大地震との関連性の分析を行う。さらに、すべりレートの推定に用いるスケーリング則の検討や、繰り返し地震と通常の地震やスロー地震の関係を調査する。また、南アフリカ大深度金鉱山において見つかっている、破壊サイズ数十mmという超微小繰り返し地震について解析を行う。

2)繰り返し地震カタログの更新

前計画で完成させる予定の日本の小～中規模の繰り返し地震カタログをアップデートし繰り返し地震活動のモニタリングを行う。繰り返し地震カタログの更新においては、S-netを用いた繰り返し地震の抽出に着手する。世界の繰り返し地震活動については、グローバルの地震計ネットワークを用いた繰り返し地震候補の抽出を行う。

3)重点地域における地震観測

島嶼部地震観測空白域での地震カタログの構築および沿岸・内陸地域において小規模繰り返し地震群発生の特徴を詳細に調べるため、小笠原諸島伊豆鳥島や釜石地域などで臨時観測を継続する。伊豆鳥島の観測では、平成27年度に設置した新しい衛星携帯電話を用いたテレメータ観測装置を用いて、地震観測を継続する。また現在現地収録している地震データを回収して、相似地震カタログの構築に資する。

4)地震再来特性の解明

繰り返し地震に見られる再来間隔・規模の揺らぎの特徴や原因を、地震の震源過程解析、統計解析および数値シミュレーションにより明らかにする。今期計画で得られた余効すべり伝播速度と摩擦パラメータとの関係式を用いて、相似地震を用いて実際に観測された準静的すべり過程の特徴から摩擦特性を推定する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京大学地震研究所(五十嵐俊博、加藤愛太郎、加藤尚之)

他機関との共同研究の有無：有

東北大学大学院理学研究科(内田直希、松澤暢)、九州大学大学院理学研究院(松島健)、鹿児島大学大学院理工学研究科(八木原寛)、弘前大学大学院理工学研究科(小菅正裕)、京都大学防災研究所(山下裕亮)、防災科学技術研究所(木村尚紀、松原誠)、海洋研究開発機構(有吉慶介)

統計数理研究所(尾形良彦、野村俊一)、首都大学東京(大久保寛)、UC Berkeley(Roland Burgmann)、気象研究所(研究連携：田中昌之、勝間田明男)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5712

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：五十嵐俊博

所属：東京大学地震研究所

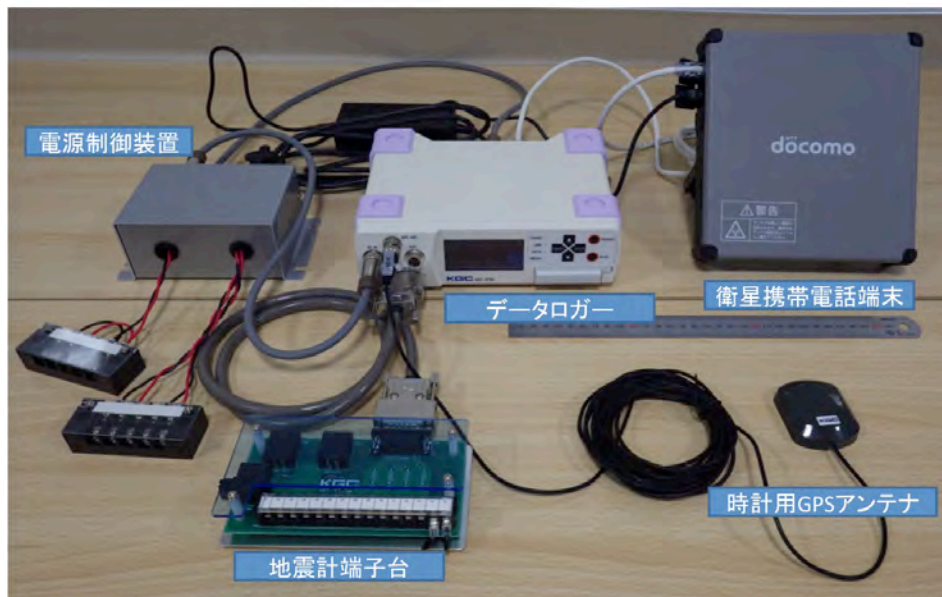


図1 伊豆鳥島に設置した、衛星携帯電話利用のデマンド型テレメータ地震観測装置

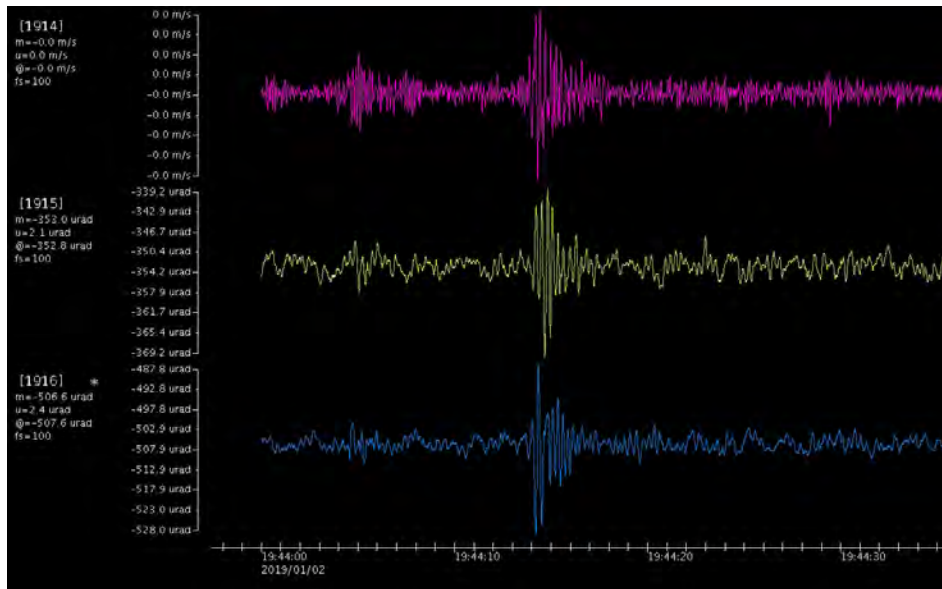


図2 新装置で記録され、衛星電話経由で回収した、伊豆鳥島近傍の地震(2019年1月2日)

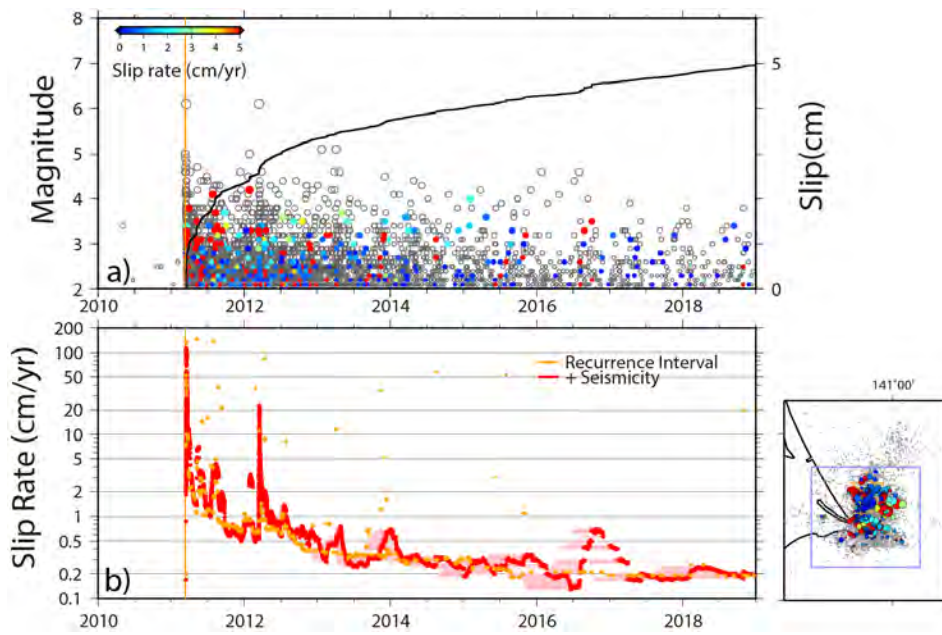


図3 千葉県銚子市付近の地殻内相似地震活動

(a) 地図中枠内で発生した相似地震活動(色つきの丸印)と推定された積算すべり(黒線)、(b) すべり速度の時間変化。

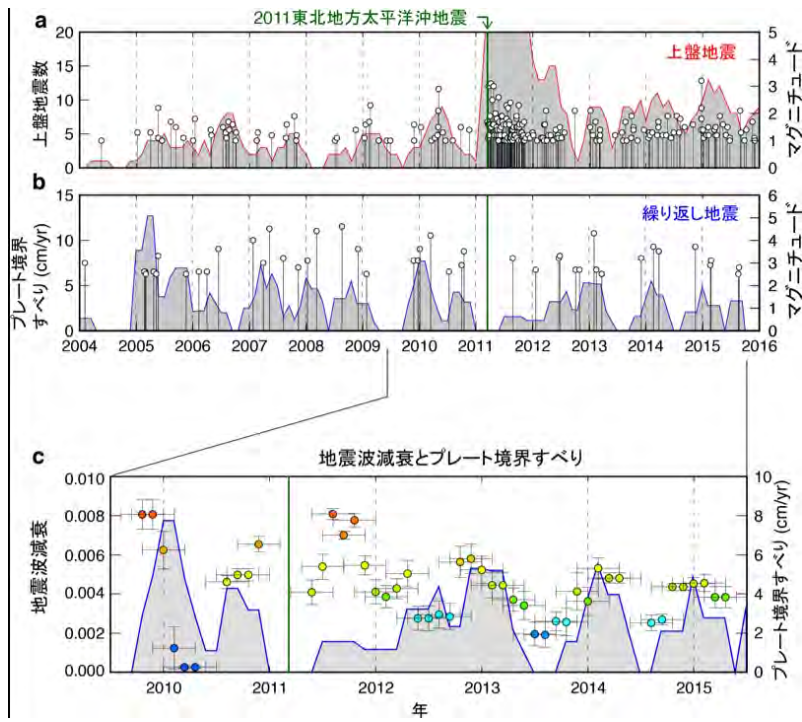


図 4

(a) 上盤地震の地震数、(b) 繰り返し地震から推定したプレート境界のすべりレート、(c) 地震波減衰の時間変化とプレート境界のすべりレート。(Nakajima and Uchida, 2018)

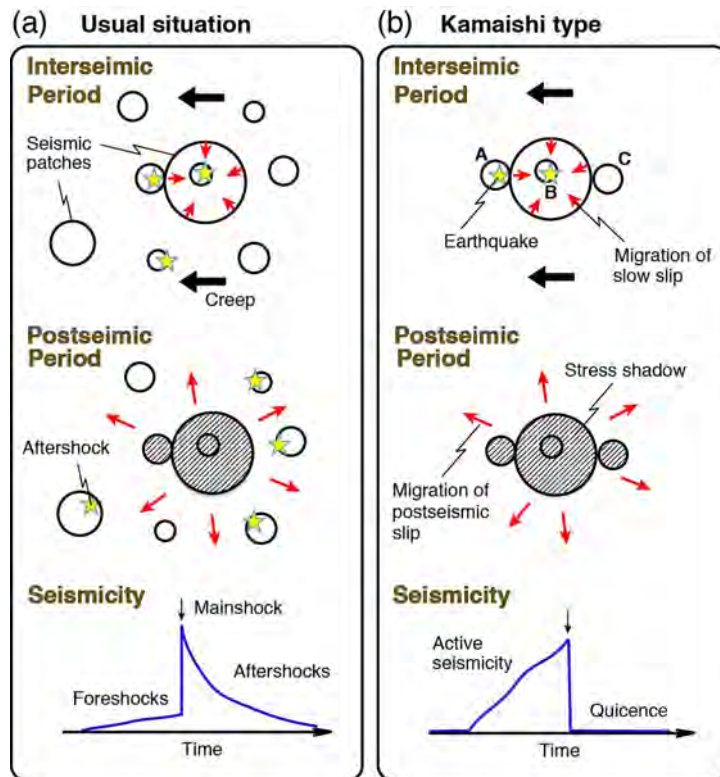


図 5 地震間および地震後の地震活動(印)を説明するモデル

左は通常の状態、右は釜石沖地震の場合。通常の状態では、大きな固着域の周りに小さな固着域が存在するが、釜石沖地震の場合はそれが存在しない。地震間は通常の状態では、大きな固着域内外で地震が発生する。一方地震後は、大きな固着域の周りに小さな固着域がない釜石沖では余震が発生しない。(奥田・他, 2018)

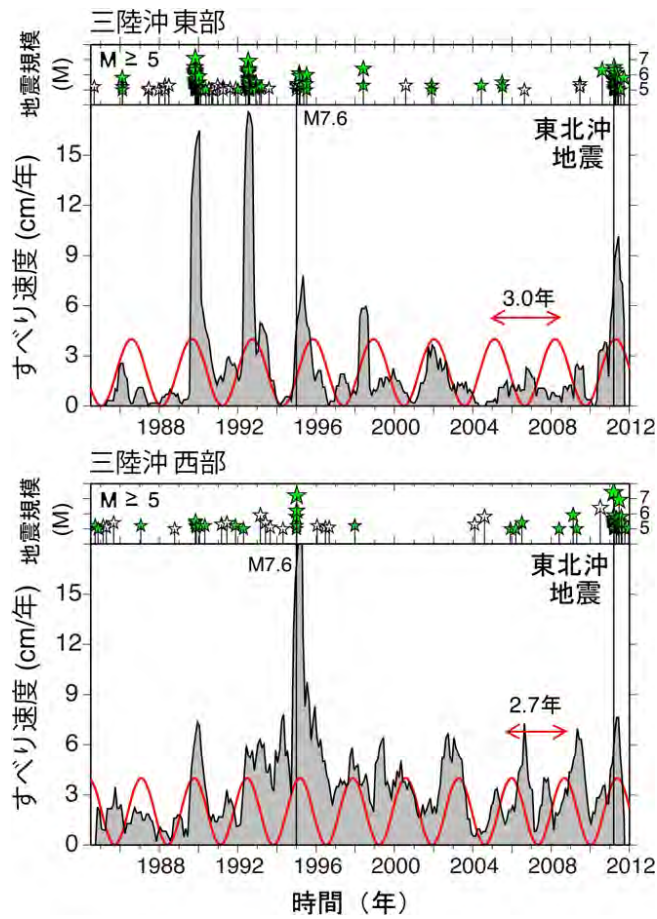


図6 繰り返し地震データから推定した三陸沖東部（上）および西部（下）でのプレート境界でのすべり速度（スロースリップの速度）

赤線はすべり速度に当てはめた周期関数。それぞれの図上部の星は、マグニチュード5以上の地震の活動を示し、緑はそのうち、周期関数の位相が正（すべり速度が速い時期）に発生したものを示す (Uchida et al., 2016 を改変)。

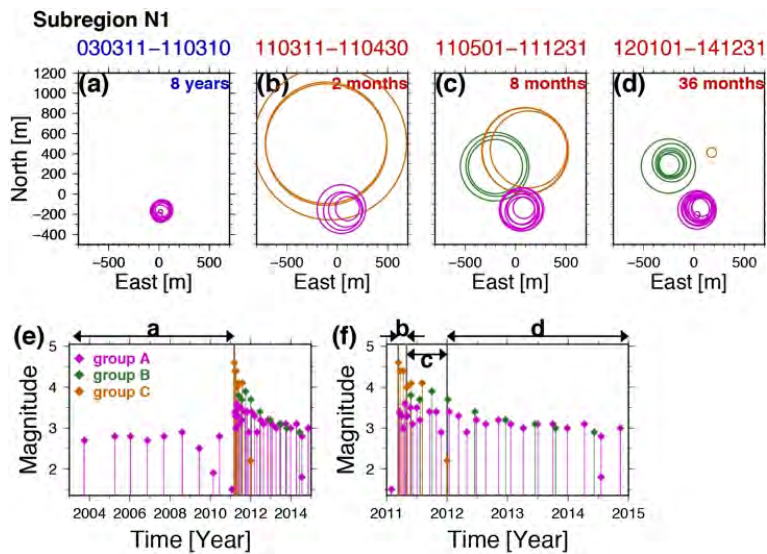


図7 三陸沖の小領域における東北沖地震前後の期間ごとの地震活動変化 (Hatakeyama et al., 2017)

(a-d) の丸はそれぞれの地震によるおおよそのすべり範囲を示す。色は地震のセントロイドに近いものをグループ化したもの。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震活動に基づく地震発生予測検証実験

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

日本における地震発生予測検証実験を通して、標準あるいは基準となる地震活動予測モデルを開発する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

国際プロジェクトである Collaboratory for the Study for Earthquake Predictability (CSEP) と国際連携をはかり、日本においての地震発生予測検証実験を運用し、日本標準あるいは基準となるような地震活動に基づく地震発生予測モデルの開発を行う。検証実験のための地震カタログ等についてコンプリートネスマグニチュードなどの性能評価を行う。また、地震カタログ生成などのシミュレーション手法等のプロトタイプを開発する。この研究に関する研究集会等を企画する。

評価に必要な基盤ソフトウェアを、CSEP のテストセンターから入手し、アップデートを実施する。地震発生予測検証実験の結果を、論文あるいはパスワードプロテクトされた Web ページにて、関連の研究者に公開する。

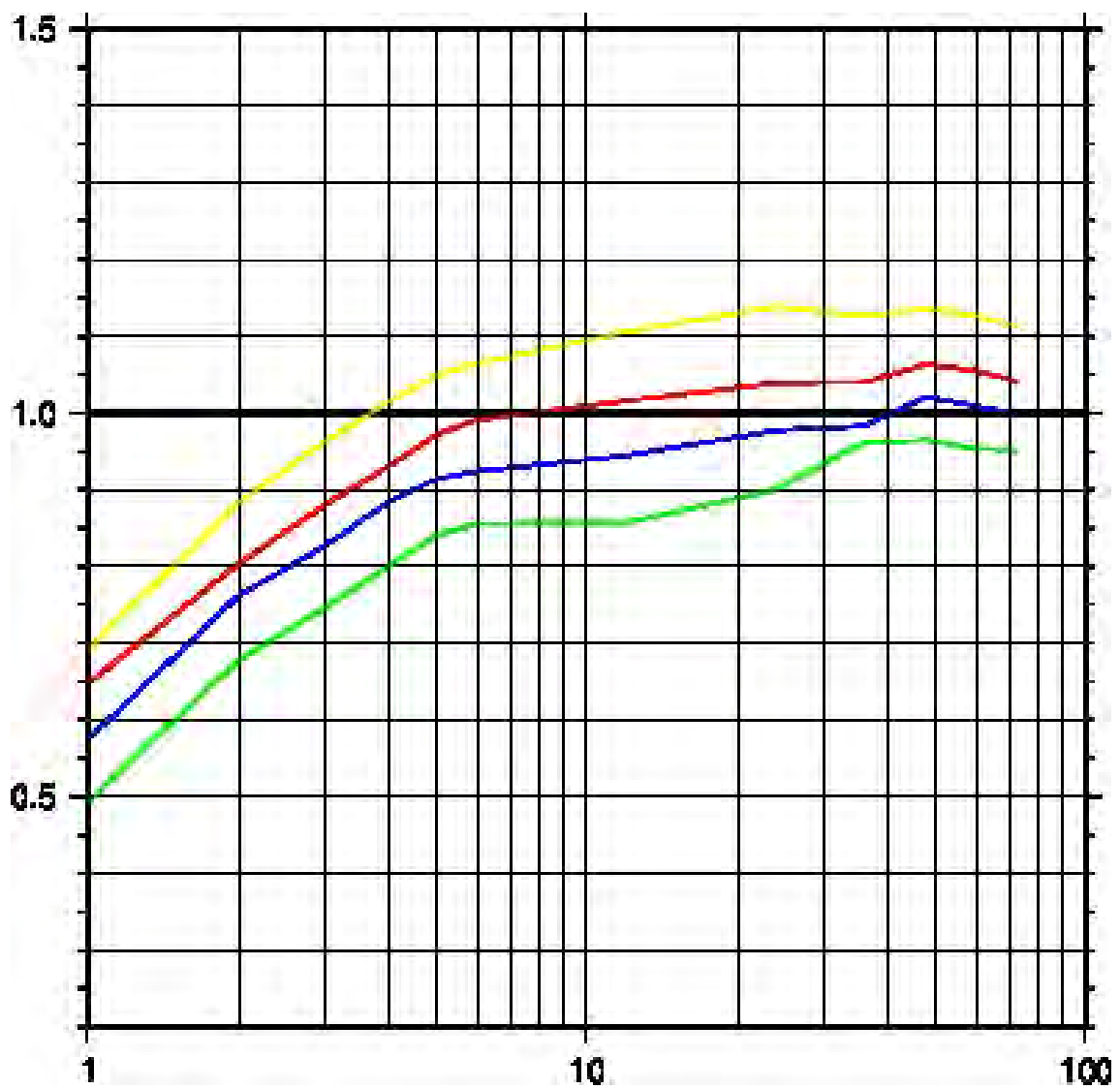
(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

CSEP に基づく 3 領域および 4 テストクラスの合計 12 のカテゴリーの地震発生予測検証実験を継続して進めた。2019 年 1 月 28 日から 29 日にかけて、地震研究所において、CSEP-Japan に関する研究集会を開催し、トータル 16 の研究発表を通して活発な議論を行った。地震活動予測モデルの一つである Relative Intensity モデルにおける学習期間をパラメータとして地震活動予測パフォーマンスがどう影響するかの事後テストを実施し、12ヶ月程度でパフォーマンスが頭打ちになることが明らかとなった。また予測のターゲット期間が長くなるほどそのパフォーマンスが落ちることもわかった。

平成 26 年度から 30 年度の成果は、国際プロジェクトである Collaboratory for the Study for Earthquake Predictability (CSEP) と国際連携をはかり、日本においての地震発生予測検証実験を運用し、日本標準あるいは基準となるような地震活動に基づく地震発生予測モデル (HISTETAS) の開発を行った。検証

実験のための地震カタログ(気象庁一元化震源)についてコンプリートネスマグニチュードの時空間分布の調査などの性能評価を行った。ゲーテンベルグリヒター則を仮定した地震カタログ生成のためのシステムを開発した。毎年度においてCSEP-Japanの研究集会を実施した。また、CSEPのテストセンターから基盤ソフトウェアを入手して地震研究所内に設置されたテストセンターにインストールを実施して、検証実験に利用した。

- (9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
Schorlemmer, D., N. Hirata, Y. Ishigaki, K. Doi, K. Z. Nanjo, H. Tsuruoka, T. Beutin, F. Euchner, Earthquake Detection Probabilities in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 108, 2, 702 doi: <https://doi.org/10.1785/0120170-217>, 2018.
Guo, Y., J Zhuang, N Hirata, , Modelling and forecasting 3D-hypocentre seismicity in the Kanto region, Geophys. J. Int., ggy154, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy154>, 2018.
Schorlemmer, D., M. J. Werner, W. Marzocchi, T. H. Jordan, Y. Ogata, D. D. Jackson, S. Mak, D., A. Rhoades, M. C. Gerstenberger, N. Hirata, M. Liukis,, P. J. M., A. Strader, M. Taroni, S. Wiemer, J. D. Zechar, and J. Zhuang,, The Collaboratory for the Study of Earthquake, Predictability: Achievements and Priorities, Seism. Res. Letters , 89, 4, 1305-1313, 2018.
Ogata, Y., K Katsura, H Tsuruoka and N Hirata, Exploring Magnitude Forecasting of the Next Earthquake, 地震 2, 89, 4, 1298-1304, 2018.
- (10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：
地球規模の広域な地震活動や、世界の様々な地域の地震活動の予測・検証実験を行うために、国際的な地震活動予測可能性共同実験(CSEP)に継続して参加する。世界標準の地震発生予測モデルや検証方法の改善、実験方法の改良にも貢献する。
- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：
担当者：鶴岡 弘・平田 直(東京大学地震研究所)
他機関との共同研究の有無：有
常磐大学(岩田貴樹)
- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：東京大学地震研究所
電話：03-5841-5712
e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp
URL：
- (13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者
氏名：鶴岡 弘
所属：東京大学 地震研究所 地震火山情報センター



Relative Intensity モデルにおける学習期間と情報利得図

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震活動パラメータと地震発生場の応力の中に成り立つ定量的関係式

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

(2) モニタリングによる地震活動予測

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震活動パラメータ群の時空変化を地震発生場の物理量の変化と結びつける定量的な関係式を、室内実験・数値シミュレーションによって確立する。とくに、応力の絶対値およびその時空ダイナミクスと、地震活動の特性を数理的に結びつける。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

地震発生場の物理量の直接測定はごく浅部を除き不可能であるため、実際の地震活動を地震発生場の物理過程から理解すること容易ではない。したがって本課題においては、地震活動と極めて類似した振る舞いを示すいくつかの物理モデルを用いて、地震活動を動力学の観点から理解することを目指す。室内実験で確立・解明された関係式は、実際の地震活動データを用いてその妥当性を検証する。扱う物理モデルは主に以下の 3 つである：I. 粉体の準静的変形実験、II. 粘弾性体シートやアクリル樹脂を使った摩擦実験、III. バネブロックモデルの数値実験。これらの実験に加えて、理論物理的研究も並行して進める。

H26 年度

実験システムの準備と構築を行う。粉体中の音波放出 (AE) 検出システムおよびデータ処理システム構築、およびアクリル樹脂を使った摩擦面可視化システムを準備する。

バネブロックモデル数値実験においては、離散化の度合いが破壊核形成過程のダイナミクスに及ぼす影響を調べる。

H27 - 28 年度

粉体変形実験における AE データ収録。

アクリル樹脂摩擦実験において垂直応力の不均一性を導入し、すべりの停止ダイナミクスを観察する。バネブロックモデル数値実験において離散化の度合いが系の固有地震に及ぼす影響を調べる。

H29 年度

粉体実験における AE の統計性について整理し、応力絶対値と AE 統計パラメーターの関係性を解明する。

アクリル樹脂摩擦実験において垂直応力の不均一性が地震サイクルに及ぼす影響を調べる。

バネブロックモデル数値実験において、摩擦法則を低速でより正しいと思われるものに変更し、統計パラメーターや破壊核形成過程への影響を調べる。

H30 年度

前年度までに得られた定量的成果を、実際の地震活動データなどと比較し、室内実験の妥当性やスケールアップを解明する。

なお、本課題は主として科学研究補助金の事業に基づいた計画である。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

I. 粉体変形実験においては、粉体層に埋められた棒状の固体を引き抜く際の摩擦抵抗を計測した (図 1)。引き抜き時のせん断変形に伴って粉体層が固化することで急激に摩擦抵抗が増大することを明らかにし、この挙動を実験と数値計算の双方で確認した。次に、凝着力を持つ湿った粉体層の傾斜地に固体弾を衝突させ、流動化による雪崩の発生条件、および粉体層内圧力の異方的に伝播・減衰過程を解明した。同様に、固液混合サスペンションに固体弾を衝突させた際の過渡レオロジー特性の計測手法を開発し、固体の衝突とともにサスペンションが瞬時に固化する様子を測定・解析した。その他、凝着粉体層内の空隙構造の強度や、粉体流と障害物形状の関係についても実験的研究の成果を発表した。

II. 粘弾性体シートやアクリル樹脂を使った摩擦実験においては、画像相関法を用いて、ゆっくりすべりから高速破壊に至るプロセスを詳細に調べた結果、図 2 のように、ゆっくりすべりと微動が同期して発生することで、すべりが共振して加速する様子が捉えられた。また、ゆっくりすべりの継続時間を系の駆動速度に対してプロットしたところ、べき的な関係が得られることが分かった。

III. バネブロックモデルに関しては、本年度はモデルを少し変更し、岩石破壊の離散モデル (ファイバーバンドルモデル) の解析と数値実験を行った。このモデルはレオロジー的仮定を一切含まないが、構成要素の微小破壊に伴う応力再配分によりクリープ破壊的挙動が再現されることを示し、そのメカニズムがサドルノード分岐であることを示した。応力をステップ関数的に載荷した際の緩和挙動は大森則に従い、系が完全に破壊される直前には逆大森則に従って破壊が加速することを発見した。さらに、大森則における c 値の決まり方に注目して解析を行い、 c 値が応力について弱い正の依存性をもつこと、および、系の不均質性が増すと c 値は減少することを示した。特に後者は「複雑な断層形状ほど小さい c 値をもつ」ことを示唆する。

5 年間の総括 : 粉体レオロジーについては四つの異なる状況につきその性質を研究した。(i) 粉体層への固体塊押し込み時に発生する AE イベントの統計則、(ii) 粉体層からの棒状固体引き抜きによる粉体層の固化と摩擦抵抗増大、(iii) 凝着性を持つ湿った粉体層中の空隙構造の強度や衝突起因流動崩壊、(iv) 粉体サイロ流の流れ場制御。これらの研究は「ドライな粉体層のせん断による固化と破壊」および「凝着性粉体層の衝突による流動化」など、粉体系特有のレオロジー特性を明らかにするものであり、固化と流動化が荷重条件 (応力スケール、時間スケール、空間スケール) に依存して複雑に発生することを明らかにできた。複雑な地球科学現象の解明のためには、このような素過程の着実な理解が強力な道具として今後役立つであろう。ゲルを用いたアナログ実験系では、摩擦面の凹凸や法線応力の不均一性がすべりダイナミクスに大きな影響を与えることを発見した。例えば、ゆっくりすべりと高速破壊の共存、スーパーシアー破壊、イベントサイズ vs 持続時間のスケールアップ、ゆっくりすべりと微動の同期など、断層でみられる多彩な地震現象を再現することができた。加えて、従来ゲルを用いたアナログ実験系では二媒質モデル的状况であり、断層を挟んで弾性率が大きく異なる状況が重大な

問題であったが、この技術的問題を克服し、同種材料を用いたゲル摩擦実験系を実現することができた。このことは、今後より現実的な挙動を模擬する実験を可能にする。速度・状態依存摩擦則を仮定したバネブロックモデルでは、破壊核形成過程～高速破壊（本震）～余効すべりという一連のすべり挙動を再現したのみならず、短期的・長期的なスロースリップイベント等の多様なすべり様式を再現した。極めてシンプルなモデルであるにも関わらず、少数個のパラメータを動かすだけで上記多様な地震現象を統一的に記述できることが判った。さらに、大森則における c 値を決める一つのメカニズムとして、サドルノード分岐に基づいた解析を行い、 c 値が応力に対して正の依存性をもつこと、系の不均質系が増すと c 値は減少することを一般的に示した。これは「複雑な断層形状ほど小さい c 値をもつ」ことを示唆する。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

- T. Furuta, S. Kumar, K. Anki Reddy, H. Niiya, and H. Katsuragi, Packing-dependent granular friction exerted on a rod withdrawn from a granular layer: the role of shear jamming, *New J. Phys.* accepted (2019).
- S. Takizawa, H. Niiya, T. Tanabe, H. Nishimori, and H. Katsuragi, Impact-induced collapse of an inclined wet granular layer, *Physica D* 386-387, 8-13 (2019).
- A. Shinoda, S. Fujiwara, H. Niiya, and H. Katsuragi, Void structure stability in wet granular matter and its application to crab burrows and cometary pits, *Sci. Rep.* 8, 15784 (2018).
- H. Katsuragi, K. Anki Reddy, and K. Endo, Shape dependence of resistance force exerted on an obstacle placed in a gravity-driven granular silo flow, *AIChE J.* 64, 3849-3856 (2018).
- T. Yamaguchi, R. Sato, Y. Sawae, Propagation of Fatigue Cracks in Friction of Brittle Hydrogels, *Gels* 4, 53 (2018).
- T. Yamaguchi, C. Creton, M. Doi, Simple model on debonding of soft adhesives, *Soft Matter* 14, 6206-6213(2018).
- H. Kawamura, Maho Yamamoto and Yushi Ueda, Slow-slip phenomena represented by the one-dimensional Burridge-Knopoff model of earthquakes. *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 053001-(1-4) (2018).
- H. Kawamura, K. Yoshimura, and S. Kakui, Nature of the high-speed rupture of the two-dimensional Burridge-Knopoff model of earthquakes. *Phil. Trans. R. Soc. A* 377 20170391 (2018).
- R. Itoh and T. Hatano, Geological implication of grain-size segregation in dense granular matter. *Philosophical Transactions A* 377, 20170390 (2018)
- Y. Yamaguchi, S. Takada, and T. Hatano, Rheology of Cohesive Granular Particles under Constant Pressure, *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 094802 (2018)
- T. Matcharashvili, T. Hatano, T. Chelidze, and N. Zhukova, Simple statistics for complex Earthquake time distributions. *Nonlin. Processes Geophys.* 25, 497-510 (2018)
- S. Roy and T. Hatano, Creeplike behavior in athermal threshold dynamics: Effects of disorder and stress. *Phys. Rev. E* 97, 062149 (2018)
- Y. Ootani, J. Xu, T. Hatano, and M. Kubo, Contrasting Roles of Water at Sliding Interfaces between Silicon-Based Materials: First-Principles Molecular Dynamics Sliding Simulations. *J. Phys. Chem. C* 122, 10459 (2018)

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

波多野恭弘、光藤哲也

他機関との共同研究の有無 : 有

桂木洋光(名古屋大環境学研究科) 川村光(大阪大理学研究科) 山口哲生(九州大学工学研究院)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
 部署等名：東京大学地震研究所
 電話：03-5841-5712
 e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp
 URL：

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者
 氏名：波多野恭弘
 所属：東京大学地震研究所

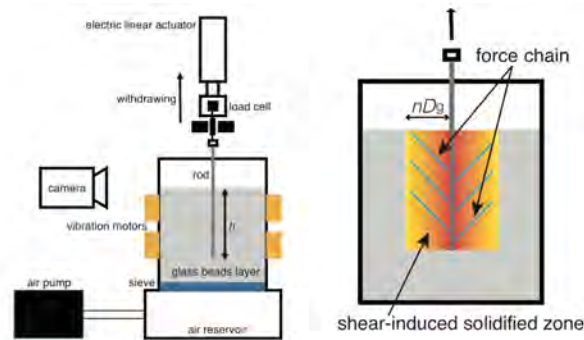


図 1

(左) 粉体層からの棒引き抜き実験の概念図 (左) 粉体層からの棒引き抜きにより形成された実効的固化領域の概念図 .

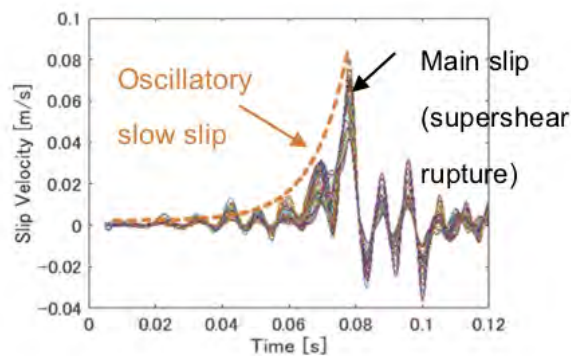


図 2

ゲル摩擦実験において、本震的な大きい滑り（時刻 0.08 秒付近）へ向けて、ゆっくりした滑りが振動しながら加速していく様子。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

歴史時代に発生した地震・火山などの災害に関する多角的な研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ア. 史料の収集とデータベース化

イ. 考古データの収集・集成と分析

ウ. 地質データ等の収集と整理

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料，考古データ，地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

歴史資料などに基づき、歴史時代に発生した地震・津波・火山災害などに関して、当時の人々の対応や教訓などを検討する。現代とは異なる社会状況の下で発生した災害時における対応や教訓、復興過程などから、今後の防災・減災施策、復興施策などの検討に資する材料の提示を目的とする。また、地震・津波・火山噴火に起因する災害だけではなく、気象災害や火災など半ば人為的な災害についても検討の対象とし、日本列島における自然災害史の全体像の提示を目指す。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

[平成 26・27 年度]

歴史資料などに基づいて、歴史時代に発生した地震・津波・火山災害などについて、当時の人々の対応や教訓、復興過程などについて検討する。特に、首都直下地震の発生が懸念される関東地方の歴史災害を対象として研究を実施する。

[平成 28・29 年度]

歴史資料などに基づいて、歴史時代に発生した地震・津波・火山災害などについて、当時の人々の対応や教訓、復興過程などについて検討する。特に、南海トラフ沿いでの海溝型巨大地震の発生が懸念される東海・南海地方の歴史災害を対象として研究を実施する。

[平成 30 年度]

これまでの研究成果に、新たにデータベース化された史料・考古・地質データを加えて、関東地方や南海トラフで発生した地震・津波・火山噴火などの歴史災害について再検討する。これらの再検討から、自然災害における地震・津波・火山災害の特徴を解明し、今後の防災・減災施策、復興施策などの検討に資する材料の提示を目指す。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

平成 30 年度の成果の概要

安政江戸地震に関する絵巻史料からみた江戸市中の被災状況の研究

安政江戸地震は、安政二年十月二日 (1855 年 11 月 11 日) 夜に発生し、関東地方南部に甚大な被害をもたらした地震である。薩摩の島津家に伝来した「江戸大地震之図」(東京大学史料編纂所所蔵島津家文書) には地震に襲われた江戸市中の状況が描かれており、地震後に発生した火事で被害がさらに拡大した様子を見とることができる。関連する文献史料をあわせて検討した結果、絵巻にある火災の場面は、薩摩藩芝屋敷の北に位置し一町が全焼した町を描いたものと判断される。被災した屋敷や町など特定の場所を描いていると判明したことで、絵巻における被災状況の描写の史料的価値が認められ、地震に起因しない火災がたびたび起きていた江戸で、火災後に復興していく市中の様相を知るうえでもこの絵巻を史料として活用できる可能性が示された。

天延四年 (976 年) の京都・近江の地震における京都での被害要因の研究

天延四年の京都・近江の地震は、天延四年六月十八日 (ユリウス暦では 976 年 7 月 17 日) に発生して当時の京都とその周辺および近江国南西部に被害を与えた被害地震である。『日本紀略』の記述からは清水寺の堂宇の倒壊によって、僧侶と俗人が 50 人圧死した様子がわかる。平安時代中期以降に観音信仰が高まるなかで、十一面観音像を安置する清水寺は、盆地の東縁という京都近郊に位置していたために、この当時、日頃から参詣・参籠者で賑わっており、特に毎月十八日は観音の縁日であった。この地震が発生した六月十八日も観音の縁日であり、清水寺の本堂は参詣の庶民で賑わい混雑していた。このような状況下で地震が発生して本堂が倒壊したために、その下敷きとなった僧侶や庶民に 50 名におよぶ圧死者が生じたものと考えられる。この場合、50 名という圧死者数の多さから、清水寺における建物の多数倒壊を想定する必要はなく、本堂の倒壊のみで 50 名の圧死者が生じる事態は十分に想定可能である。

計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要

史料に基づく歴史地震の事例研究

元禄地震 (1703 年) と 152 年後の安政江戸地震 (1855 年) における日光東照宮での被害状況や対応を比較すると、双方とも被害程度は軽微であり、被害に対する直接的な対応はあまり見受けられない。元禄地震の際には、地震見舞いの使者が江戸から日光東照宮へ派遣されていたが、安政江戸地震の際には使者の派遣はなかった。双方に共通する地震対応として、江戸の幕府からの命令によって実施された天下安穩の祈禱が挙げられる。

明応七年 (1498 年) の六月と八月に畿内で記録された有感地震について検討した。六月十一日の「大地震」の場合には、その後の有感地震は一ヶ月程度で減少しており、京都盆地や奈良盆地の周辺で目立った被害が確認できないことから、双方の盆地周辺よりも遠地で発生した中規模の地震であった可能性が考えられる。また、八月二十五日の「大地震」の場合には、その後の有感地震は一ヶ月以上も継続しており、京都では六月十一日の大きな地震よりも倍ほどの揺れの大きさと、奈良では小規模な被害が確認できる。そのため、京都と奈良で記録された六月十一日と八月二十五日の「大地震」は、同じような発生過程の地震でなかった可能性が高い。一方で、これらの地震における朝廷での地震対応は、古代以来の陰陽道に基づいて地震の発生要因を検討し、地震発生を次なる災いの予兆と捉えて、過去の先例について中国の古典を調査する、という形式的な内容であった。そのため、朝廷での具体的な対応は、打ち続く有感地震を鎮めるために社寺に対して祈禱を命じる程度であった。

安政江戸地震 (1855 年) における江戸市中での被害と復興の様子を描いた絵巻として、薩摩の島津家に伝来した「江戸大地震之図」(島津家文書、東京大学史料編纂所所蔵) がある。この絵巻に描かれ

た内容について、関連する文献史料に記された内容を踏まえて詳細に分析した結果、この絵巻の主題や成立時期が明らかとなり、江戸市中での具体的な地震被害や火災被害を検討する際の基本史料として用いることが可能となった。また、文献史料や絵画史料の検討から、地震直後の余震が打ち続く中での町人などの避難方法や避難場所、被災した町人などに対する幕府側の施策、余震の発生状況や気象条件に起因する避難状況の変化などが明らかになった。

伊賀上野地震(1854年)における京都市中では、石燈籠の顛倒、土蔵や土塀の破損といった小規模な被害が生じた。この地震は、24年前に発生した文政京都地震(1830年)と比較して京都市中での被害は格段に軽微であったために、京都町奉行所にとってこの地震は緊急に対応すべき災害とはならなかった。

天延四年(976年)の京都・近江の地震における京都での被害要因について検討し、清水寺本堂で生じた多数の圧死者は、地震発生当日が観音の縁日であり、参詣の庶民で賑わい混雑していたことが要因であったと考える。

(9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

(10)次期計画における平成31年度実施計画の概要：

現存する膨大な史料の中から、近代以前の地震・火山災害に関連する新たな史料を調査・収集・翻刻する。既存の史料に新たな史料を加えて、近代以前に発生した地震・火山災害などについて、当時の人々の行動や対応、復旧・復興過程などについて検討し、災害事例を集積する。

次期計画研究課題

近代以前の地震・火山災害に関する多角的研究

(11)実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京大学地震研究所 佐竹健治・西山昭仁

他機関との共同研究の有無：有

東京大学史料編纂所 佐藤孝之・他5名

(12)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5712

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(13)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：佐竹健治

所属：東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

首都圏に被害を及ぼす地震の解明およびその被害の実像

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

イ. 海洋プレート内部の地震

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

首都直下地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

首都圏地震観測網 (MeSO-net) による観測を継続し、これらの観測点で得られた地震データを用いて、首都圏直下の速度構造や減衰構造に関する解析を進める。プレートの詳細な構造と地震活動との関係を解明し、将来発生が予想される首都直下地震の地震像を明らかにする。歴史地震の震度分布を理解するために、MeSO-net で得られた観測値とモデル構造で計算した値とで比較することで、首都圏の地盤の揺れの特性を解明する。MeSO-net で得られた観測値を利用して、災害の素因となる地域ごとの揺れの特徴を明らかにする。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本課題は、文部科学省委託研究「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト (平成 24 年～28 年、代表：平田直)」のデータや成果を利用して、研究を進める。

平成 26～27 年度は、MeSO-net で得られた観測データを用いて、首都圏直下の速度構造および減衰構造を詳細に求め、その構造で地震波の伝播をシミュレートする。MeSO-net 観測点の直上で測ったデータをまとめて、地下の地震計と地表の地震計を比較し、伝達関数を求める手法を調査する。

平成 28～29 年度は、地下の地震計と地表の地震計の観測波形を比較して、伝達関数を求める。地震計の観測波形とモデル構造によるシミュレート波形を比較し、モデル構造を高度化する。

平成 30 年度は、伝達関数を利用して、首都圏直下で発生する地震に対して想定される揺れの分布を明らかにする。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度～30 年度) の成果の概要：

昨年度、MeSO-net 観測点のひとつにおいて臨時観測を行い、約 100 mしか離れていない観測点同士で観測された地震波形の振幅が約 2 倍になることを示した。今年度は、その観測領域を広げ、14 か所で臨時観測を行った。得られた地震波形を近傍のボーリングデータと比較をしたところ、揺れの大きさは地質との関係が深いことが明らかになった。

この 5 カ年で MeSO-net で得られた観測データは、既存観測点のデータと併せて解析・処理を進めてきた。それらのデータは、震源決定法・地震波トモグラフィ法等の手法を用いて、震源分布や地震波速度と非弾性定数の三次元的分布等の解析が進んだ。稠密な臨時観測のデータによれば、揺れの推定には、細かな地盤構造の違いを丁寧に考慮する必要があることを確認した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画課題名 : 首都圏の地震被害分布と地震像の解明

実施計画の概要 : 首都圏における地震被害を軽減するために、まず、どのような被害になるのか、想定される多様な震源について、発生メカニズムや発生の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、高密度な観測データや、地震史料の情報を同化する新たな地震動予測手法の開発を目指す。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

酒井慎一、中川茂樹、平田直(東京大学地震研究所)

他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京大学地震研究所

電話 : 03-5841-5712

e-mail : yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL :

(13) この研究課題(または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 酒井慎一

所属 : 東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

堆積平野・堆積盆地における地震災害発生機構の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震災害に関する災害発生機構を重点的に解明する。特に、強震動が増幅され、人口密度が高い場合が多い堆積平野・堆積盆地などを対象にして、地震災害の素因と誘因の関係や災害発生機構を多面的に分析し、災害を制御する要件を明らかにする。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26～28 年度においては、地震災害誘因の分析と、地震災害発生機構の解明に向けた地下構造モデルの構築を行う。具体的には、地震動などの地震災害誘因の分析のため、国内外の堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースを増強し、堆積平野・堆積盆地における地震動の増幅などの自然素因への作用を定量化する。また、地震災害誘因の事前評価と即時推定に資する地下構造モデルを構築する。

平成 29～30 年度においては、地震災害誘因の自然素因への作用の解明と、地下構造モデル化手法の国際展開を行う。堆積平野・堆積盆地における地震災害発生機構の解明には、強震記録を用いた地

下構造モデルの検証とチューニングの反復改良が不可欠であるため、災害誘因の自然素因への作用の分析に使用する強震記録を逐次更新追加し、参画機関で共有すると共に、本研究計画におけるデータベースの相互研究推進に資する。また、堆積平野・堆積盆地における地下構造モデル化手法の国際展開を試み、国外の堆積平野・堆積盆地における適用妥当性を実地検証する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

平成 30 年度は、地震災害誘因の自然素因への作用の解明に向けた研究と、地下構造モデル化手法の展開を継続した。また、当初計画通り国外の堆積平野・堆積盆地における適用妥当性の実地検証をとりまとめた。具体的には、台湾・インド~ブータン等のヒマラヤ前縁・アルジェリア等の国外の堆積平野・堆積盆地において、強震動予測に活用できる地下構造モデルが得られていない場合、観測記録の水平動と上下動の比率 H/V スペクトル比を用いた補正、震源近傍強震動パルス再現に必要な震源放射特性係数の補正、経験的グリーン関数法の活用などの手法開発を行うと共に、過去の被害地震の強震動評価を行った。その結果、国内で推進されている強震動評価よりも精度は劣るが、平均値としては、各々の国で工学的に用いられている地震動予測式と調和的な時刻歴波形を再現できることを確認した。これらの手法は、良質な地下構造モデルが構築されるまでの過渡期に有効な計算手法として代替利用が可能である。また、平成 26 年度より継続的に整備を行ってきた強震観測データベースの対外発表を行うと共に、トリガーデータのみならず連続データも公開できるシステム構築に着手した。

計画期間中の成果の概要として、平成 26 ~ 28 年度は、地震災害誘因の分析と、地震災害発生機構の解明に向けた地下構造モデルの構築を行った。具体的には、地震動などの地震災害誘因の分析のため、足柄平野・諏訪盆地・甲府盆地をはじめとする、地震被害と関連が深い周期 1 ~ 2 秒の地震波が卓越する高震度盆地を含めた堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースを増強した (三宅・他, 2018)。地震動増幅の自然素因への作用を定量化するため、首都圏の MeSO-net を用いた地震波干渉法によって高精度のグリーン関数を抽出し、周期 1 秒までの強震動シミュレーションに成功した (Viens et al., 2016)。また、南海トラフ海域の付加体に対する構造モデリングを実施し、計算結果が過大となる従来の S 波速度や層厚を修正し、地震災害誘因の事前評価と即時推定に資する地下構造モデルを構築した (Guo et al, 2016)。

平成 29 ~ 30 年度は、地震災害誘因の自然素因への作用の解明と、地下構造モデル化手法の国際展開を行った。堆積平野・堆積盆地における地震災害発生機構の解明には、強震記録を用いた地下構造モデルの検証とチューニングの反復改良が不可欠であるため、災害誘因の自然素因への作用の分析に使用する強震記録を逐次更新追加し、参画機関で共有すると共に、本研究計画におけるデータベースの相互研究を推進した。国内では、2016 年熊本地震の震源域を対象とした検証を行った。2016 年熊本地震の臨時余震強震観測によって、従来の地下構造モデルでは地震動増幅率が過小となる箇所が多く、より深く、より速度が遅い構造に修正する必要があることが分かった。そのため、震源インバージョンに資する観測点直下の地下構造モデルを、複数の中小地震の全波形 (full-wave) チューニングにより構築した。これにより、震源インバージョンの浅い部分の解像度が向上し、震源破壊過程と、活断層や地震活動から示唆される断層幾何形状の議論が可能となった (Kobayashi et al., 2017)。また、堆積平野・堆積盆地における地下構造モデル化手法の国際展開に向けて、国外の堆積平野・堆積盆地における適用妥当性を実地検証した。強震動予測に活用できる地下構造モデルが得られていない場合であっても、観測記録の水平動と上下動の比率 H/V スペクトル比を用いた補正、震源近傍強震動パルス再現に必要な震源放射特性係数の補正、経験的グリーン関数法の活用などの手法によって、過去の被害地震の強震動評価を一定の精度で行える対処法を開発した (e.g., Diao et al., 2018)。開発された手法は、良質な地下構造モデルが構築されるまでの過渡期に有効な計算手法として利活用可能である。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Diao, H., H. Miyake, and K. Koketsu, 2018, Near-fault broadband ground-motion simulations of the 2016 Meinong, Taiwan, earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., 108, 3336-3357.

- Gherboudj, F., H. Miyake, T. Yokoi, and N. Laouami, 2018, Ground motion simulation of the 2003 Boumerdes earthquake using empirical Green's function method, Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering, ID 11467.
- Koketsu, K., H. Kobayashi, and H. Miyake, 2018, Irregular modes of rupture directivity found in recent and past damaging earthquakes, Proceedings of the 11th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, ID 645.
- 三宅弘恵・瀧澤一起・古村孝志・宮川幸治・田中伸一, 2018, 東京大学地震研究所の強震観測網と強震観測データベース, 第15回日本地震工学シンポジウム論文集, 3306-3311.
- Sharma, B., H. Miyake, T. Yokoi, T. Hayashida, and O. P. Mishra, Simulation of strong ground motion for north eastern region of India using empirical Green's function method, Seismol. Res. Lett., 89, 833.
- Miyake, H., K. Irikura, K. Miyakoshi, and K. Kamae, 2018, Validation of a 3-stage source scaling for crustal earthquakes, Seismol. Res. Lett., 89, 911.
- 神定健二・高橋功・篠原芳紀・香川敬生・三宅弘恵, 2018, 東京都市部における地震防災のための震度分布図のリアルタイム推定, 日本地球惑星科学連合2018年大会, SCG65-05.
- Deleplanque, T., J.-P., Vilotte, P. Bernard, C. Satriano, and H. Miyake, 2018, Development of a high-frequency earthquake rupture imaging method at the regional scale; application to the 2016 Kumamoto earthquakes, JpGU Meeting 2018, SSS06-P02.
- Viens, L., M. Denolle, and H. Miyake, 2018, Ground motion simulation from a large subduction earthquake using the offshore-onshore ambient seismic field, JpGU Meeting 2018, SSS14-19.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要:

平成31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)の推進について(建議)における

大学は、人口密度が高く災害リスク評価において脆弱と捉えられている堆積平野・堆積盆地などを対象に、地震災害の素因と誘因の関係や災害発生機構を多面的に分析し、災害を軽減するための要件を明らかにする。

に資する研究を推進する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

三宅弘恵・瀧澤一起・古村孝志・ほか

他機関との共同研究の有無: 有

東京大学大学院情報学環・北海道大学・信州大学・福井大学・広島大学・高知大学・独立行政法人建築研究所・ほか

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名: 東京大学地震研究所

電話: 03-5841-5712

e-mail: yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL:

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 三宅弘恵

所属: 東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

広帯域・高解像度強震動シミュレーションに基づく大地震の強震動評価の高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

大地震の複雑な断層破壊過程と、不均質な地下構造を適切に組み込んだ地震波伝播シミュレーションを実施し、過去の被害地震の強震動と津波被害発生要因を検証して、将来の想定地震の強震動・長周期地震動と津波の事前予測を行う。K-NET、KiK-net 等の高密度地震観測網データを解析し、強震動と長周期地震動の生成過程の理解を深める。高速スパコンを用いた高精度シミュレーションを実施して、観測データの再現とモデルの検証を行う。短周期～長周期地震動の高精度評価に向けて、シミュレーションモデルの高度化・精緻化をはかり、地震ハザード評価手法の改良を進める。本研究では、工学研究者と社会科学研究者との協働により、現代社会が有する多様な構造物の被害と社会影響に踏み込んだリスク評価へとつなげる。以上の目的解決に向けて、a) 強震動および長周期地震動による地震災害発生要因の研究、b) 強震動および長周期地震動予測の高度化に向けた研究、c) 将来の大地震の被害事前予測の研究、の 3 つを進める。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

(a) 強震動および長周期地震動による地震災害発生要因の研究

東北地方太平洋沖地震の国内外の強震計記録を再解析し、1 G を超える強い加速度を作り出した短周期地震動、超高層ビル等に影響を与える周期数秒程度のやや長周期地震動、および超大型石油備蓄タンクや将来の長大構造物に影響を与える可能性のある長周期地震動(周期 10~20 秒以上)につい

て、それぞれの周期帯毎の震源放射特性、伝播特性、各地の地盤増幅特性を明らかにする【H26・27年度】。特に、関東平野での高密度観測データ（K-NET・KiK-net、首都圏強震総合ネット SK-net、首都直下地震観測網 MeSO-net 等）を統合的に処理し、平野の3次元地下構造と短周期地震動～長周期地震動の伝播特性を詳細に把握する【H28・29年度】。

M9クラスの長巨大地震による長周期地震動の特性を明らかにするために、超巨大地震特有の断層運動として期待される、浅部プレート境界の大滑りと、深部プレート境界のゆっくり滑りが、長周期地震動の生成に与える影響を、シミュレーションに基づき評価する。ここでは、震源の静的特性（深さ・メカニズム等）と動的特性（滑り速度、応力降下量など）の二つの震源パラメータの効果についても検討する【26-30年度】。東北地方太平洋沖地震において、関東平野や大阪平野などで、やや長周期の生成が地震規模に比べ小さかった原因を明確化するとともに、日本海溝～千島海溝および相模トラフ～南海トラフ沿いでのM9地震シナリオに対する長周期地震動の生成特性について検討する【26・27年度】。

震源モデルのパラメータ設定の不確かさや、地震時の断層運動の再現性（不確実性）に伴う、強震動予測の不確かさを、各種震源パラメータを用いたシミュレーションを多数行ない、強震動予測の不確かさとそのバラツキの幅を調査する。具体的には、1）断層破壊方向に生まれる放射指向性（ディレクティビティ）効果が地震波放射指向性と周波数特性に与える影響、2）断層破壊過程の不均質性・揺らぎによるディレクティビティの抑制効果、3）断層破壊の時間差発生による強震動レベルと揺れの継続時間の増長の問題等に着眼した検討を行う【H26-28年度】。地震動評価のバラツキに対する、建物被害・人的影響のバラツキを評価し、予測誤差の拡大（または縮小）の可能性を検討する。バラツキのある強震動予測に対して、被害と社会影響の側から見た巨大地震の「最悪地震シナリオ」とは何か明確化する【H27-29年度】。

b) 強震動および長周期地震動予測の高度化に向けた研究

短周期～長周期の広帯域強震動予測の高度化に向け、地表・海底地形と、堆積層・地殻・マントル内の短波長不均質構造（多層構造で表現できない物性値の揺らぎ）を適切にモデル化し、数Hz以上の高周波数地震動の散乱を適切に評価することのできる高分解能シミュレーション法を整備する【H26・27年度】。短波長不均質構造により地震波散乱が強い減衰を起こす過程、散乱による地震動の継続時間の増長の問題、地震動の空間変動と局所的な増幅（フォーカシング現象）の発生可能性について検討する。こうした、地下構造探査による直接推定が困難な短波長不均質構造の存在が、強震動の予測の不確かさに与える影響を定量的に評価する【H27-29年度】。

震度に強く寄与する短周期地震動の高精度評価の実現に向け、表層地盤（数メートル以浅）における地震動の増幅特性を、全国のK-NET・KiK-net強震観測データ、および自治体震度計データを用いて評価する【H26年度】。地盤応答の非線形性応答を考慮し、強震時（震度5弱～）のサイト増幅特性の変化も調べる。得られたサイト増幅特性を用いて、緊急地震速報の震度予測への適用可能性・有効性を、過去地震の強震記録を用いて検討する【H26-29年度】。

広帯域強震動シミュレーションの実現に向け、高精度かつ安定な吸収境界条件を整備する。複雑な地表地形（空気/固体境界）と海底地形（海水/固体）を差分法（FDM）の直交格子に実装するために、適切な境界条件を整備する。地表付近の強い不均質性構造を組み込むことができる、マルチグリッドFDM（または、境界適合格子FDM）を開発する【H26-29年度】。

c) 将来の大地震の被害事前予測の研究

巨大地震による強震動、地殻変動、津波の複合災害の予測に向けて、地震動シミュレーションから得られた海底隆起・沈降の時空間的変動を適切に活用した、津波高・浸水シミュレーションを実施する【H26-29年度】。また、大地震の断層運動に伴う内陸の地殻応力の動的・静的変化（ただし、地殻は弾性変形を仮定）を評価して、大地震に伴う火山噴火や内陸地震の活発化、誘発地震の発生に与える影響を、関連項目の研究グループとの協働により検討する【H27-30年度】。

複数の地震シナリオに対する各地の強震動を迅速に評価するための仕組みとして、日本海溝、相模・南海トラフ沿いの小断層（10km*10km）毎に、各地の揺れ（グリーン関数）を計算して、地震動デー

データベースを構築する。そして、任意の地震シナリオに対する強震動をグリーン関数の重ねあわせにより合成する強震動合成システムを開発する【H26-28年度】。グリーン関数データベースは、震源インバージョンや地震波形解析のための基礎データとして公開する。これを用いて、大地震発生後すみやかに震源モデルを推定し、観測データのない地点を含む全国各地の強震動を面的に推定する手法を、関連項目の研究グループと共同で開発する【H28-30年度】。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度～30年度)の成果の概要:

H30年度の成果

強震観測データ同化に基づく長周期地震動の即時予測実験

大地震の際に平野で発生する長周期地震動の即時予測の実現に向けた、高速計算環境による観測データと高速シミュレーション同化の実現可能性を数値実験により評価した。

2007年新潟県中越沖地震(Mw6.6)のK-NET, KiK-net強震観測データと、3次元差分法計算による地震波伝播シミュレーション結果を同化して、高速計算による関東平野の長周期地震動の予測を行った。データ同化手法には、震度の即時予測(Hoshiba and Aoki, 2015)や津波の即時予測(例えば、Maeda et al., 2015)で広く活用されている最適内挿法を用いた。

2007年新潟県中越沖地震(Mw6.6)の強震観測データ同化と予測の結果を図1に示す。評価領域を480 km x 480 km x 55 kmとし、J-SHIS地下構造モデルを0.24 kmの格子間隔で離散化して3次元差分法計算により長周期(> 2.7秒)地震動を計算した。データ同化は、領域内の482点のK-NET、KiK-net強震観測データを用いて行い、地震発生から30、50、70、および90秒までデータ同化(図1a)を行った後に、高速計算により未来(地震発生から160秒後)の長周期地震動を予測した(図1b)。予測精度と猶予時間にはトレードオフがあるが、データ同化が進むにつれ、長周期地震動の振幅と継続時間が良く予測できることが確認された。評価領域外で発生した、2011年東北地方太平洋沖地震のデータ同化・予測においても本即時予測手法が適用できることを確認した。

データ同化完了後に100秒後の波動場の予測に要する時間は、東大と筑波大が共同運用するOakforest-PACS計算機の並列計算(2048 CPU)で12.4秒であった。これは、長周期地震動の伝播にかかる実時間よりずっと短く、観測データの取得に合わせて即時予測を繰り返し進め、予測の精度を高めることが可能である。差分法計算の解像度(格子サイズ)を2倍に広げ、長周期地震動の評価対象を5.4秒以上に限定すれば、より小規模の計算機システム(128 CPU程度)でも同程度の時間で実施可能である(図2)。

近年の海域強震観測網(DONET, S-NET)の整備により、震源域近傍でのデータ同化により、より猶予時間のある即時予測が可能になると期待できる。実用化に向け、地下構造モデルの精緻化、とくに観測点近傍での表面波のサイト増幅の影響評価が必要である。

2019年1月3日熊本地方の地震(M5.1)による震度6弱の強震動

2019年1月3日に発生した熊本県熊本地方の地震(M5.1)は、震源が浅い(気象庁暫定値10 km)、横ずれ型のメカニズムを持つものであった。この地震により、住宅の瓦のずれやガラスの被害、神社の石灯籠などに被害が出た。

この地震により、熊本県和水町で震度6弱、熊本市北区と熊本県玉東町で震度5弱を観測した。和水町の震度計の波形記録を調べると、S波に後続して、表面波とみられる周期0.5秒程度の長い波群が確認された。速度応答スペクトルを求めると、周期0.5秒の狭い周期帯に110 cm/sの強い速度応答が確認された(図3)。この周期帯は計測震度を大きくするが、木造家屋の倒壊を起こす周期帯(1-2秒)より短いことから、被害が限定的であった可能性がある。

和水町では、2016年4月14日の熊本地震の前震(M6.5)と4月16日の本震(M7.3)でも震度6弱と5弱が観測されている。いずれの地震波形も同様の周期特性を示しており、この地点の地盤の影響が考えられる。

なお、熊本地震の本震では、周期0.5秒の強い応答に加え、周期1-2秒にもやや大きい(>40 cm/s)応答が見られた。これに対して、1月3日の地震はMが小さく、震源スペクトルが長周期帯で弱かつ

たためと考えられる。

5 力年（平成 26 – 30 年）の成果

(a) 強震動および長周期地震動による地震災害発生要因の研究

1. 2011 年東北地方太平洋沖地震による長周期地震動

2011 年東北地方太平洋沖地震（M9.0）による、都心（新宿）の周期 6 秒 – 10 秒の長周期地震動のレベルは、震源距離がほぼ等しい 1944 年南海地震（M7.9）による、東京（本郷、大手町）地点の記録とほぼ同レベルであった。この地震の余震を含む太平洋岸の M7 級の地震を調べたところ、震源が比較的深い、東北沖のプレート境界地震やスラブ内地震に加え、震源の浅い（<10 km）アウターライズ地震においても、他の内陸地震や南海トラフ地震と比べて長周期地震動の生成が弱いことが確認された（古村、2014）。

関東平野にかけての表面波の伝播特性を確認した。その結果、宮城沖や福島県沖の地震では、高周波数地震動に富む実体波の震幅が強いが、表面波の生成は弱く、関東平野に向かう経路でも長周期地震動が発達しないことが分かった（古村、2014；Furumura、2014）。

次に、2004 年新潟県中越地震の断層走行を変えた地震波伝播シミュレーションから、この地震メカニズムにおいて関東平野へ Rayleigh 波放射が強いこと、そして断層走行が変化しても都心での長周期地震動のレベルは一定の値を持つことを確認した。一方、2011 年福島県浜通り地震のように、東北地方で発生する地震のメカニズムでは関東平野への Rayleigh 波の放射が弱いことが確認された。

さらに、2 つの地震のシミュレーション結果に対して、Particle motion 解析と Wave Gradiometry 解析に基づいて、Rayleigh 波の伝播方向と位相速度の時空間変動を調べたところ、新潟県中越地震では、関東平野の北東の熊谷 – 高崎周辺の深い溝状構造に表面波が焦点ぶように集まり、強い増幅を起こすこと、福島県浜通りの地震では、筑波山付近の尾根構造上の基盤で表面波が Defocus して弱まる傾向が確認できた（向井、2019）。

以上より、都心部における長周期地震動の増幅特性とその震源方位依存性は、震源から平野に向けた表面波の放射特性、伝播経路、そして、堆積層構造における表面波の増幅特性の相乗効果によるものであること、その予測には、構造探査と強震観測記録に基づく 3 次元堆積層構造の把握が重要であることが再確認された。

2. PL 波により運ばれる長周期地震動

長周期地震動は、S 波の後から遅れて到達する「後揺れ」現象として知られている。ところが、2004 年新潟県中越地震の強震波形を見ると、P 波の到達直後から周期 5 -10 秒程度の大振幅の長周期の波群が認められ、観測点によっては、後続の表面波と同程度の振幅を持つことが分かった。この波群は Radial と上下動成分に見られ、弱い正分散性と Prograde の震動軌跡を持つことから、PL 波と判断できる。PL 波は、地殻を広角反射しながら伝播する波であり、表面波の方程式の虚数解に相当する“Leaking mode”として解釈される。

新潟県中越地震による PL 波の生成・伝播を、JIVSM モデル（Koketsu et al.、2012）による 3 次元地震波動伝播シミュレーションにより評価したところ、浅い震源から放射された P 波が地殻内で広角反射（PmP）を起こす際に、堆積層の存在により地表での PP 反射係数を大きく、PS 反射係数が小さくなる、大振幅の PL 波が生成することが確認できた。さらに、堆積層で SmS 波が強い SP 変換波を起こして地殻に入射することで、長い PL 波群が形成されることも確認できた（Furumura and Kennett、2018）。

PL 波は、Rayleigh 波と同様に震源の深さに敏感である。この性質を用いて、P 波直後に観測される PL 波の震幅から後続の長周期地震動（Rayleigh 波）を予測するなど、長周期地震動の即時予測への活用が期待できる。

3. 2016 年熊本地震による断層ごく近傍長周期地震動

2016 年 4 月 16 日に布田川断層帯で発生した熊本地震（M7.3）では、熊本と阿蘇地方で気象庁長周期地震動震度階級 4（最大ランク）を記録した。そして、益城町や西原村の疑似速度応答スペクトルに

は、固有周期 3 秒 – 10 秒で 200 – 300 cm/s の強い応答が確認された。これは、2003 年十勝沖地震 (M8.0) で石油タンクがスロッシングにより破損・出火した苫小牧地点のレベル (固有周期 7 秒前後で 120 cm/s) の 2 倍を上回る。

断層ごく近傍の強震記録を調べると、西原村と K-NET 大津 (KMM005) 観測点では、立ち上がり時間 2.6 秒で、食い違いが 1 – 2 m のランプ関数に近い変位を持ち、これが周期 3 – 10 秒以上の長周期応答を作ることがわかった。これは、断層運動の近地項に対応する。

こうした長周期地震動成分は、最大 10 m の地表断層のズレを伴う 1999 年台湾集集地震 (M7.6) の石岡ダム (TCU068) 地点でも観測されている。ただし、台湾集集地震は規模が大きく、かつ断層すべり速度が遅かったために、長周期地震動はより長周期 (> 9.5 s) が卓越した。

これまで長周期地震動は、震源がやや離れた場所で起きる大地震の際の平野で強く増幅する表面波によるものが一般に想定されてきたが、浅い大地震による、断層ごく近傍で見られる、断層運動に世もなう近地項が生み出す長周期地震動についても、別途考慮が必要である。

(b) 強震動および長周期地震動予測の高度化に向けた研究

1. 太平洋スラブ深部の不均質構造による地震波の導波効果の強化

スラブ深部 (410-660 km) には、相転移遅れによる低速度異常が、スラブ内部にくさび状に存在する (MOW: Metastable Olivine Wedge) ことが知られている。北海道西方沖 – ウラジオストックを震央とする深発地震 ($h=200 - 570$ km) の強震波形を調べたところ、深さ 400 km 以深において、P 波と S 波に低周波数の先駆波が認められ、高周波数の後続相との時間差が震源深さとともに増大することから、これが MOW の下面の低速度 / 高速度境界を屈折波として伝播したことが考えられた。

2010 年 2 月 12 日のウラジオストック深発地震 ($h=578$ km, $M_w6.8$) の地震波伝播シミュレーションから、MOW は 100 km (深さ 410km) – 10km (深さ 660km) の幅を持ち、P 波と S 波速度がそれぞれ -5% と -7% の低速度異常を示すことを確認した。MOW 内部で起きた地震のうち、周波数 2 – 4 Hz の地震波を閉じ込めて、スラブ上部に強く放射する凹レンズ効果も確認できた。

深発地震による異常震域の生成には、これまでスラブ内部の短波長不均質構造による高周波数地震動の強い前方散乱と導波効果 (Furumura and Kennett, 2005; 2008) が議論されてきたが、さらに深さ 410 km 以上の深発地震では、スラブ深部の低速度の MOW による導波効果も大きいことが確認された。

2. 海洋リソスフェアの短波長不均質構造とその成因

スラブ内を伝わる高周波数 (>1-2 Hz) 地震動の前方散乱と導波に寄与する、地殻・マントル内の短波長 (相関距離: 数百 m – 数 km 以下) の不均質構造の成因を調べるために、太平洋プレートが広がる北太平洋上の海嶺 – 海溝にかけて海底地震計と島嶼観測点で記録された、海洋 Pn、Sn 波 (Po、So 波) の伝播特性を調べた。

Po、So 波は、海洋リソスフェアにおける強い前方散乱に加え、海水による P 波の綴じ込めと PS 変換による長いコーダ波も特徴的である。Po、So 波の震幅と距離減衰を調べると、プレート年代が古く、海洋リソスフェアが厚いほど Po、So 波が強く、海嶺に近いプレート年代が若い地域では振幅が小さいことが確認できた (Kennett and Furumura, 2014; 2015)。

このことから、太平洋スラブの短波長不均質構造は、海嶺でプレートが生成される過程で作られ、その移動に伴って下面にアセノスフェアが付加 (underplating) することで、年代とともに不均質層の厚さが増すことが考えられる。そして、不均質性の強度分布はリソスフェア下面付近で強く、浅部では弱いことも地震波伝播シミュレーションと観測との比較から確認した (Kennett and Furumura, 2016)。

以上明らかになった、太平洋プレート (スラブ) 内部の短波長不均質構造の分布特性は、プレート境界地震やスラブ内地震による高周波数地震動による被害予測に向けた強震動シミュレーションのモデルの精緻化に必要な観点と言える。

3. 超長周期の W-phase の発生・伝播メカニズムの解釈

W-phase (Kanamori, 1993) は、浅い巨大地震 ($M_w>8-9$) において、遠地 (5、000-10、000 km) 広帯域記録の P – S 波の間に見られる超長周期 (100-500 s) の波群である。W-phase は P 波直後の早い

時間に到着し、そして S 波や表面波より振幅が小さく巨大地震でも振り切れないことから、巨大地震の CMT インバージョンと津波の早期警報に広く活用されている。

W-phase の生成過程を 2011 年東北地方太平洋沖地震の遠地地震波動伝播シミュレーションより確認した。そして、球殻地球の地表面の曲率と深部マントルにおける大きな速度勾配が PP、PPP、PPPP 反射波を強め、PS 変換を起こしながら上部マントルの低速度層を伝わる過程に長周期帯で干渉を起こし、これが W-phase を生成することが確認できた。また、PP、PPP 波が地表に焦点 (caustics) を結び、震源距離 3000、5000 km 付近で W-phase の震幅が特に大きくなることも確認できた。

以上の W-phase の特性は、低速度の上部マントル (厚さ 660 km) を広角反射により伝わる超長周期 (100-1,000 s) の P 波群として解釈できる。これは、低速度の地殻 (厚さ 35 km) を同様のメカニズムで伝わる長周期 (5-30 s) の PL 波と類似しており、遠地波形を用いた W-phase インバージョンと同様に、近年研究が進められている、近地強震波形を用いた同様の震源解析の有効性を保障するものである。

(c) 将来の大地震の被害事前予測の研究

1. 関東平野の 3 次元地下構造を考慮したリアルタイムモーメントテンソルインバージョン

関東平野の堆積層構造とプレート構造をモデル化した 3 次元不均質地下構造モデルを用いて、関東周辺で発生する地震のグリーン関数を、震源の位置と深さ毎に 10 km 間隔で計算してデータベース化した。従来の 1 次元地下構造によるグリーン関数と比較して、堆積層における表面波の強い励起や、高速度のプレートによる地震波伝播速度の違いが、グリーン関数に与える影響とその周波数依存性を調べた。そして、関東周辺の地震においては、周期 30 - 50 秒の周期帯でもグリーン関数に有意な差が生じることを確認した。

3 次元グリーン関数データベースをリアルタイムモーメント・テンソルインバージョン (Grid MT; Tsuruoka et al., 2009) に導入し、関東周辺の地震活動モニタリングを行った。2016 年 11 月 - 12 月の 1 ヶ月間に 11 個の震源を求めたところ、半数以上において従来の 1 次元グリーン関数を用いた結果よりも CMT 推定の Variance Reduction が大きく改善され、3 次元地下構造モデルを用いた震源メカニズムの即時推定の有効性を確認した。

2. 南海トラフ M9 超巨大地震の長周期地震動評価

2011 年東北地方太平洋沖地震において都心で観測された長周期地震動は、固有周期 6 秒の速度応答で最大 80 cm/s 程度であり、過去の M8 級地震 (2003 年十勝沖地震、1944 年東南海地震など) と同程度であり、地震規模から考えて相対的に小さかった (Furumura, 2015)。

これに対し、南海トラフ地震では、沈み込むフィリピン海プレートの上を覆う付加体による表面波の強い増幅と陸地に向けた導波効果、そして関東平野の 3 次元基盤構造による表面波の増幅効果により、より大きな長周期地震動の生成が心配される。

南海トラフ沿いの地震で生まれる長周期地震動の特性と、東北地方太平洋沖地震との比較から明らかにするために、東北地方太平洋沖地震の震源モデル (Lee et al., 2012) を南海トラフ沿いに置いた、「仮想 M9 巨大地震」による長周期地震動を評価した。

JIVSM モデルを用いた地震波伝播シミュレーションの結果、K-NET 新宿地点において周期 6 - 10 秒の速度応答が、東北地方太平洋沖地震時の 2 倍程度になることが確認できた。また、南海トラフに近い、大阪 (KiK-net 此花観測点) 地点では、東北地方太平洋沖地震の 5 倍程度以上の速度応答が生じる可能性が示された。

このように、南海トラフ地震は長周期地震動を生成しやすい地理的要因があり、東北地方太平洋沖地震の観測データを南海トラフ地震に適用する際には注意が必要である。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) : Furumura, T., Maeda, T., and Oba, A. (2019), Early forecast of long period ground motions via data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations, Geophysical Research Letters, <https://doi.org/10.1029/2018GL081163>.

Furumura, T. and BLN Kennett (2018)、Regional distance PL phase in the crustal waveguide - An analog to the teleseismic W phase in the upper-mantle waveguide、J. Geophys. Res.、123、<https://doi.org/10.1029/2018JB015>
向井優理恵・古村孝志・前田 拓人 (2019)、関東平野における長周期地震動強度の特徴的方位依存性とその要因、東京大学地震研究所彙報、印刷中。
古村孝志 (2018)、2015 年 5 月 30 日小笠原諸島西方沖深発地震と異常震域の謎、地震ジャーナル、66、40-51.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

- (1) 平成 30 年度に継続し、関東平野等での主要平野における長周期地震動増幅強度の方位性とその成因を、震源の深さや伝播経路の地下構造の観点から詳しく評価するとともに、それぞれの原因を定量化することで、南海トラフ地震等の巨大地震による長周期地震動の予測の高度化に繋げる。
- (2) 長周期地震動による被害軽減に向け、高性能計算機を用いた波動伝播シミュレーションと強震観測データ同化に基づく即時予測の、南海トラフ巨大地震への適用可能性を検討する。震源域近傍の海域観測の有効性や、予め計算したグリーン関数を用いたリアルタイム予測の可能性を検討する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

古村孝志・他 (参加人数 6 名程度)
他機関との共同研究の有無 : 有
東大情報学環、東大生産技術研究所、岡山大学理学部ほか

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京大学地震研究所
電話 : 03-5841-5712
e-mail : yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp
URL :

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 古村孝志
所属 : 東京大学地震研究所

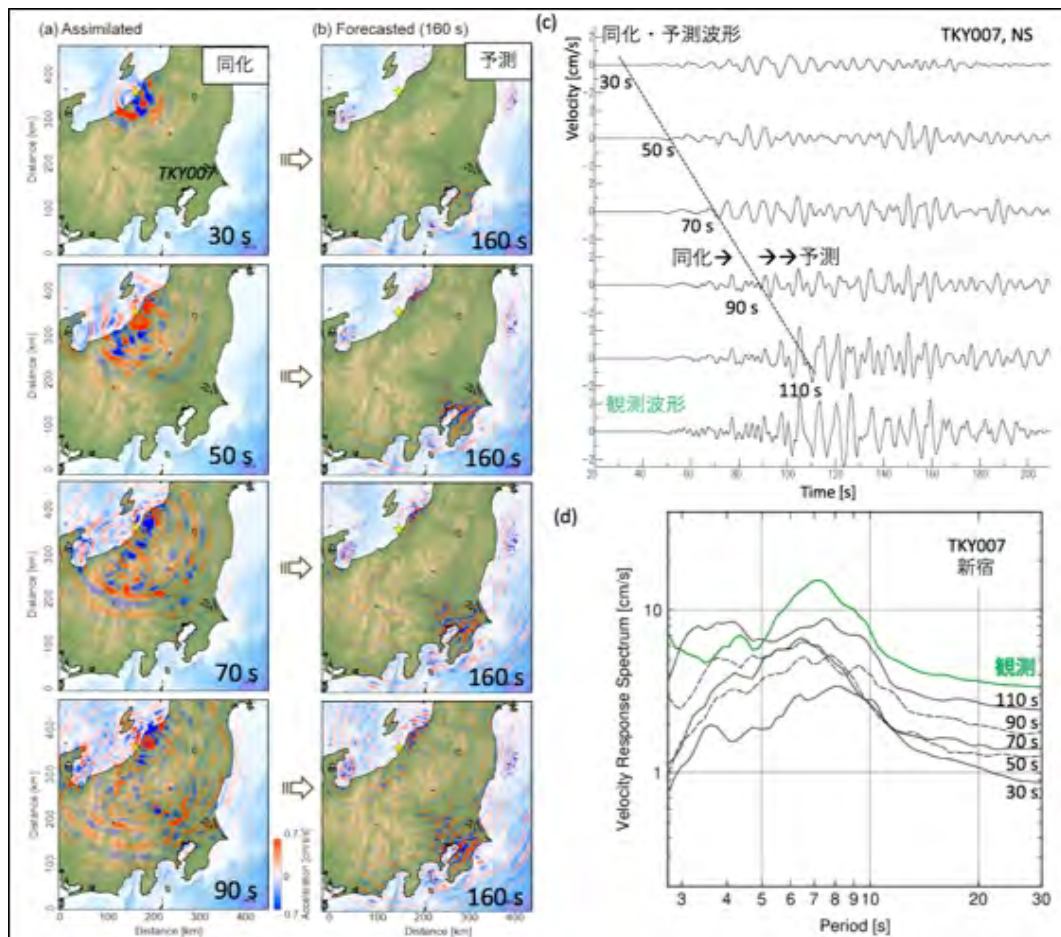


図1 . 2004年新潟県中越沖地震 (Mw6.6, h=8 km) の強震観測データ同化に基づく長周期地震動の予測実験。
 (a) 観測データと同化された地震伝播シミュレーションのスナップショット (30, 50, 70, 90 秒後)、(b) これを初期値とする 160 秒後のシミュレーション結果。(c) 新宿地点における長周期地震動の予測波形と K-NET 観測記録との比較、(d) 速度応答スペクトルの比較。

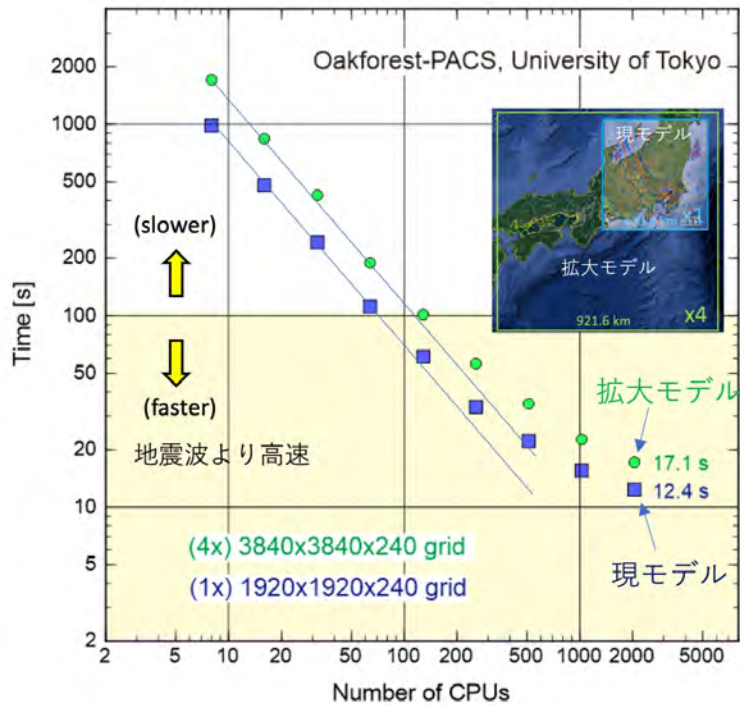


図 2 . 100 秒間の地震波動伝播シミュレーションに要する計算時間。
 並列計算に用いた CPU 数と計算時間の変化。青印は現行モデル (460.8km*460.8 km) の計算時間、緑印は面積を
 4 倍に拡大したモデルの計算時間。黄色ハッチは、計算速度が波動伝播速度より高速となる範囲を表す。

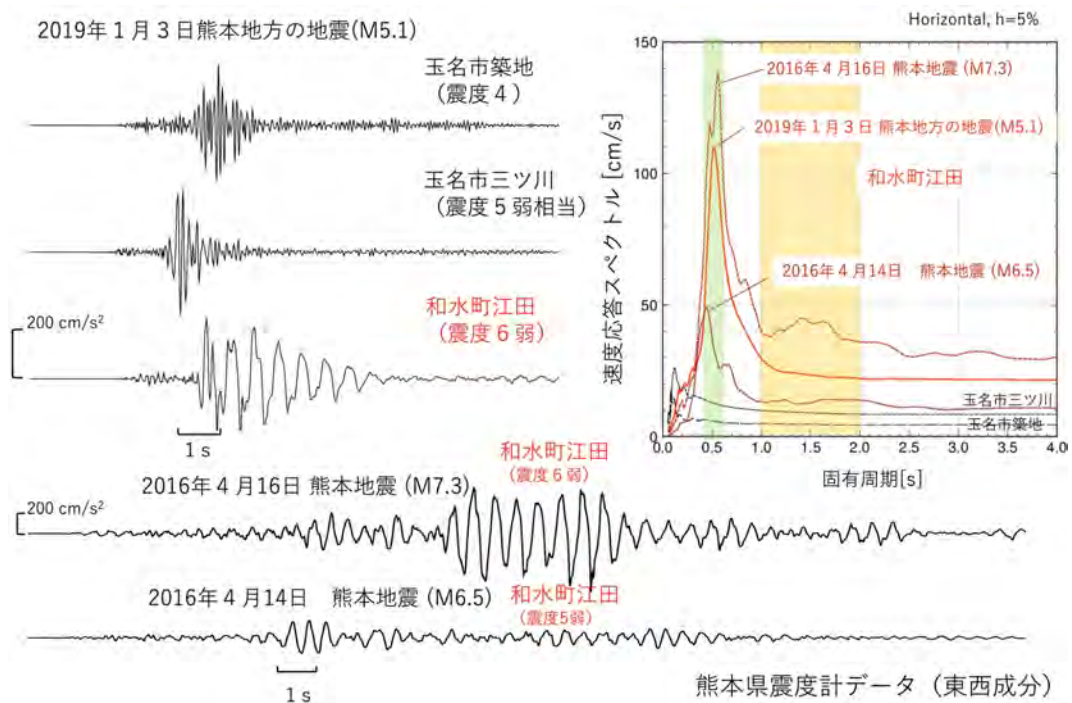


図 3 . 2019 年 1 月 3 日熊本地方の地震 (M5.1) と強震動
 熊本県和 water町で観測された震度 6 弱の揺れには周期 0.5 秒前後の成分が強く含まれており、同様の地震動は 2016
 年熊本地震の本震 (M7.3) と前震 (M6.5) でも記録されており、地盤による増幅の影響が示唆される。

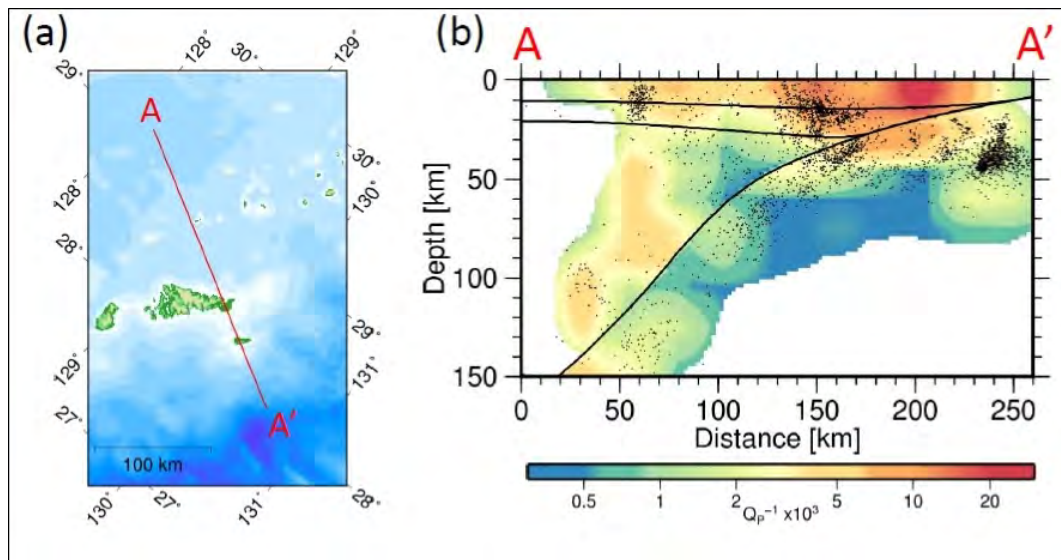


図4 . 奄美大島と喜界島を横切る $1/Q_p$ の鉛直断面

断面図中の実線は、トモグラフィで用いたコンラッド面、モホ面、フィリピン海 (PHS) プレート上面の位置。喜界島周辺の浅部に見られる強い高減衰領域は、主に石灰岩層によるものと考えられる。また、沖縄トラフ内では PHS プレート上面付近から高減衰領域が広がっている。ここは、第四紀火山が広がる地域でもある。この高減衰領域は上昇する高温物質や流体が原因と考えられる。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震動・津波誘因の長期予測情報コミュニケーション

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

4. 研究を推進するための体制の整備

(3) 関連研究分野との連携の強化

(5) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震動誘因や津波誘因の不確実な長期予測情報が、災害軽減に有効に役立つためのコミュニケーション手法を確立することにより、長期予測情報の高度化に貢献する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26～28 年度には、サーベイ調査や海外調査などを行って、我が国におけるコミュニケーション手法の問題点を明らかにする。その上で平成 29 30 年度に人文・社会科学分野の方法論などを援用しながら問題点の解決策を検討し、新たなコミュニケーション手法を確立する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 30 年度は研究成果のとりまとめと、そのために必要な情報収集を海外研究者と行った。地震予測を行う専門家が評価の不確実性を述べることによって住民の地震リスク認知や専門家に対する信頼がどのように変化するかという問題に関する社会調査を平成 26 年度に行い、その分析を 27～28 年度に行った。その結果に基づいてコミュニケーション手法を 29～30 年度にまとめたが、追加調査が必要となったので 29 年度に実施した。

- (9)平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
鈴木舞・瀧澤一起, 過去に基づく未来予測の課題：確率論的地震動予測地図, 「予測がつくる社会」, 東
大出版会, 2019.
- (10)次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：
該当しない。
- (11)実施機関の参加者氏名または部署等名：
東京大学地震研究所・災害科学系研究部門
他機関との共同研究の有無：有
慶應義塾大学，同志社大学，東京都市大学，東北大学，土木研究所など。
- (12)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：東京大学地震研究所
電話：03-5841-5712
e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp
URL：
- (13)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者
氏名：瀧澤一起
所属：東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

データ流通網の高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

全国の陸域および海域に展開された地震・地殻変動・火山等の各種観測網から得られる大容量・多項目のデータを、リアルタイムで効率的に流通させるためのシステムを構築・運用・高度化し、全国の観測研究をデータ流通基盤として支える。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本課題で取り扱うデータ流通網は、基本的に実施機関および共同研究機関の運営費交付金によって運用・維持されるものである。5 ヶ年を通して、高速広域ネットワークを利用した観測データ流通網 JDXnet の安定的な運用と機能の高度化を行う。その中で特に以下を進める。

- (1) 災害時に強いデータ収集・中継システムの構築。
- (2) 超大容量・多項目データ流通のための効率的な通信方式の開発。
- (3) 観測メタデータの効率的なハンドリングシステムの開発。
- (4) データ蓄積機能を包含するデータ流通システムの開発。
- (5) 接続機関の拡大。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

観測データ流通網 JDXnet の安定的な運用を引き続き進めたが、昨年度 JGN-X から JGN への変更により JGN の接続ポイントが減ったことが安定的な運用において不安定要素を増加させる原因となっている状況が続いた。東大接続ポイントについては SINET 経由により JGN 接続が可能であることが判明したので、東京大学情報基盤センターとその準備を進めた。また、データ配信に用いる 2 ホストのプロセス図において役割が同等でないため地震研究所内に設置されたホストにより SINET へのデータ配信を実施すると TDX でのデータ量が 3 割程度増加している状況がしばらく続いていることがわかった。

計画期間における成果については

- (1) 災害時に強いデータ収集・中継システムの構築については、長野と松江にデータセンター (DC) を設置して、観測点から直接 SINET に配信させることにより実現した。
 - (2) 超大容量・多項目データ流通のための効率的な通信方式の開発については、WIN システムの改良等を実施した。
 - (3) 観測メタデータの効率的なハンドリングシステムの開発については、WIN のチャンネルテーブルを管理する CIMS を開発して運用した。
 - (4) データ蓄積機能を包含するデータ流通システムの開発については、JGN 側の広域 L2 網内にキャッシュサーバを設置して実現した。
 - (5) 接続機関の拡大について東京工業大学が接続できるように準備を進めた。
- が概要である。なお、毎年 3 月にデータ流通ワークショップを開催して、関連情報をこのコミュニティ内で共有した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

全国の陸域、海域及び火山周辺に設置された地震・地殻変動などの各種観測網から得られるデータを即時的に流通させるシステムを運用するとともに、大容量かつ多項目の観測データを確実に、かつ効率的に流通させるための通信方式等の開発を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

鷹野 澄・鶴岡 弘・大湊 隆雄・平田 直(東京大学地震研究所)

中川 茂樹(気象庁地震火山部)

他機関との共同研究の有無：有

地震、地殻変動等、火山の各観測データの流通協定に参加する各機関(*)とそのデータ流通システム担当者が共同研究に参加する。

(*) 北大・弘前大・東北大・東大・東工大・名大・京大・高知大・九大・鹿児島大・防災科研・気象庁・JAMSTEC・産総研・国土地理院・地震予知総合研究振興会・国立天文台・北海道・青森県・東京都・神奈川県・静岡県。

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5712

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：鶴岡 弘

所属：東京大学 地震研究所 地震火山情報センター

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

研究成果共有システムの構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(4) その他関連する建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本計画で得られる速度構造モデルやソフトウェアを含む研究成果をデータベース化し、それらを容易に共有できる仕組みを構築する。また、基礎データを自動解析し、解析結果を自動的にアップデートできるシステムを構築する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

1. 研究成果を容易に共有できる仕組みの構築

クラウドサービス等を利用し、Web サーバ等に情報共有・成果共有の仕組みを構築する。震源過程解析結果の可視化ツールを開発する。

2. 速度構造モデル共有に向けてのフォーマット等の作成

コミュニティのなかで標準あるいは基準となるような速度構造モデルを目標に作成する。

3. 応用解析のための基礎データを作成するプログラムの開発

東京大学地震研究所の並列計算機システム (EIC) 上で動作可能な並列化されたプログラム群を開発する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

研究成果共有サーバ (evrrss) において、DropBox と同等のオープンソフトウェア ownCloud を導入して、このコミュニティにおける利用を進めた。地震活動解析ソフトウェアの開発を進めた(図 1)。大規模連続地震波形データ解析システムへの地震データ格納を進めた。

平成 26 年度から平成 30 年度における成果の概要は以下である。

- (1) 研究成果共有サーバ (evrrss) を構築し , pukiwiki や ownCloud を導入して , コミュニティーで活用を図った .
 - (2) プレート構造モデルの公開を含むホームページコンテンツの整理を進めた .
 - (3) 地震活動解析ツールである xetas や tseisx の開発を行った .
 - (4) 大規模連続地震波形データ解析システムを構築し , 長期間の地震波形データを格納した .
- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので , 平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
- (10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :
- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :
- 鶴岡 弘 (東京大学地震研究所)
 - 中川 茂樹 (気象庁地震火山部)
 - 他機関との共同研究の有無 : 有
 - 山中佳子 (名古屋大)・大見士朗 (京都大学防災研)
- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
- 部署等名 : 東京大学地震研究所
 - 電話 : 03-5841-5712
 - e-mail : yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp
 - URL :
- (13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者
- 氏名 : 鶴岡 弘
 - 所属 : 東京大学 地震研究所 地震火山情報センター

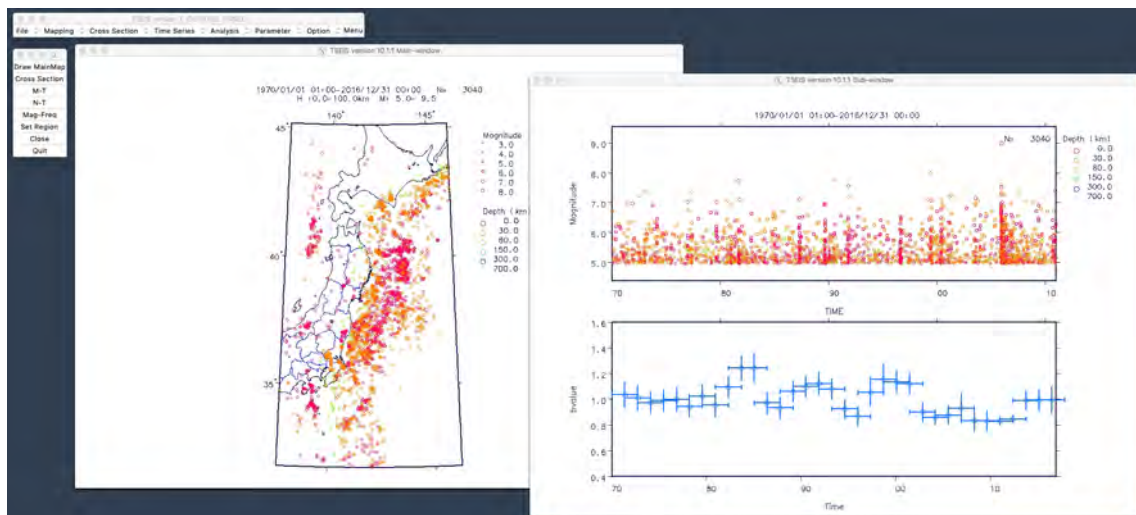


図 1 . 地震活動解析ツール (TSEISX) の起動画面例

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

衛星赤外画像による噴火推移の観測と類型化に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

4. 研究を推進するための体制の整備

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

噴火推移の体系的分析は，噴火事象系統樹の全体像 多様性・タイプ等 の把握に密接に関係すると共に，推移の違いを生む原因を探る上でも重要な鍵となるが，これまで基盤となる適当なデータセットがなく困難であった．衛星を用いた広域観測により噴火推移データの効率的収集ができ，これらを基にすることにより噴火推移の系統的な整理・検討が可能となる．本計画は，この衛星赤外画像データに基づく噴火推移解析を，次世代衛星データの導入と複合的解析方法の開発の両面から高度化し，その多様性の把握と類型化に関する研究を進めることを目的とする．このような研究が進めば，リアルタイム観測の変化から類型を推定し，イベント発生に先行して現れる特徴的な変化パターン - 例えば単純には，爆発的噴火に先行して現れる熱異常の低下等 - を捉えることにより，噴火推移の予測に繋がられる可能性もある．

噴火は，極論すればマグマや高温ガスが地表に噴出する現象と見做すことができ，この熱が地上にもたらす温度変化やその空間的拡がりに関係する情報を高頻度型衛星赤外画像で観測することにより，間接的にマグマやガスの放出状況とその時間変化パターンを捉えることができる．他方，静止衛星による超高頻度観測により爆発的噴火の発生に関する噴煙の発生状況等に関する詳しい情報を得るこ

とができる。両者を組合せることにより、マグマやガス放出状況の時間変化に対して、どのようなタイプ・規模の爆発的噴火がどのようなタイミングで発生しているのか あるいはしていないのか 等を比較分析し、噴火推移の特徴を抽出することが可能となる。これをベースに、独自の複数指標によるパラレルタイムラインチャートによる複合的解析手法の開発と高度化を進め、噴火推移のデータベース化と類型化を行う。観測の結果はリアルタイムで公開し、観測網が乏しい東アジアの基盤的観測の一翼を担えるようにする。

計画期間内の平成 27-28 年度に我が国の 2 つの新衛星 GCOM-C1 と次世代「ひまわり」の運用が開始される予定であり、これらを現在の衛星観測システムに導入することにより、観測能力の各段の向上を図る。GCOM-C1 は JAXA の気候変動観測衛星で、新センサー SGLI が搭載されており、分解能が現在主力の MODIS の 1km から 250m に向上する。SGLI データを観測システムに組込むことで、リアルタイムで火口位置や噴出物分布域等を知ることが可能となる。同時に、Web ベースのシミュレーションツール（溶岩流、火砕流等）を開発し、SGLI の観測結果と同サイトに置くことで、現地 - 東アジア各地を含む - で、噴火状況に応じて災害域の予測を、直接かつ即時できるようにする。次世代「ひまわり」も赤外バンドが分解能 2km、観測頻度 10 分毎となり、噴煙や爆発的噴火の発生状況等に関する観測精度が格段に向上する。さらに、ALOS-2 等に小型赤外カメラ（CIRC 等）が搭載され、これらの火山観測への応用について JAXA/EORC と共同で検討を進める。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

衛星赤外画像による東アジア活火山リアルタイム観測・情報発信システムを引き続き運用し、噴火データの収集と解析を進めると共に、観測システムの高度化を図る。

研究は以下のように進める。平成 26-27 年度：新衛星 GCOM-C1/SGLI、次世代「ひまわり」画像解析ルーチンを開発し、システムへの組み込みを実施する。これにより、リアルタイムで細かな噴火情報の収集が可能となる。得られたデータはアーカイブシステムに蓄積する。また、衛星搭載赤外カメラの利用検討を行う。平成 28 年度：性質の異なる複数のインデックス - 熱異常の強さや規模、噴煙の状況 - をパラレルタイムラインチャートとしてプロットし、時間変化パターンや相互関係から噴火推移を多角的に推定する方法の開発を進める。平成 29-30 年度：Web ベースの火砕流・溶岩流のシミュレーションツールを作成しシステムに組込む。また、アーカイブを含め噴火データをパラレルタイムラインチャート等により解析すると共に、噴火推移の類型化研究を進める。結果は関連データと併せデータベース化し、Web 上で公開する。国内噴火等観測データが豊富な事例を使って、マグマシステムとの関係など推移の違いを生む原因の検討を行う。なお、噴火が発生した場合はデータ収集のため、必要に応じて現地調査を実施する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要：

・「GCOM-C SGLI 画像による観測システム開発と運用、解析」

GCOM-C(Global Change Observation Mission ? Climate) は JAXA の気候変動観測衛星「しきさい」で、SGLI(Second Generation Global Imager) と呼ばれるセンサーが搭載されている。SGLI は短波長赤外の 1.6 μ m、熱赤外の 11 μ m、12 μ m に分解能 250 m のチャンネルをもち、夜間画像の観測頻度が 2-3 日毎で、リアルタイム性も比較的高い。GCOM-C は幾度かの打上げ延期の後、本年度 2017 年 12 月 23 日に種子島から打上げられ、2018 年 12 月より、正式運用が始まった。火山の観測には高い空間分解能と高い時間分解能（= 高い観測頻度）が必要となるが、適度に高い空間・時間分解能をもつ SGLI は、両者の長所と短所を併せ持ち、利用方法を工夫することでこれまでにない重要な情報を得ることができる。

我々が開発した SGLI 画像処理システムでは、JAXA のデータ配布サーバに数時間ごとにアクセスし、対象地域の新しい夜間データ（L1B Shortwave IR Thermal IR のデータセット）を地震研究所の SGLI 処理サーバにダウンロードする。その後、輝度補正・幾何補正を行い、火山毎にそれらを含む小領域を切り出す。これらの小領域画像は熱異常の解析に用いられると共に、アーカイブとして保存される。

解析結果は、観測結果公開システム(REALVOLC)により Web 上に自動で公開される。本年度は、正式運用前に内部公開されたデータを使って、昨年度までに開発したシステムのテスト運用と不具合の修正を行った。

このような開発と併せて、SGLI 画像によって実際のどの程度まで溶岩流等の噴出物の観測ができるのかを、本年度に起きたハワイ・キラウエア火山 2018 年噴火を用いて検証した。本研究は 5 月 5 日～6 月 12 日までに得られた 25 夜間画像の内、雲の被覆の少ない 15 画像を選び、Level 1b 画像を基に輝度補正・幾何補正を行い、緯度経度座標系に変換した後、Puna 地区周辺約 16.5 × 16.5 km の領域を切り出した。解析に使用した画像は MODTRAM の熱帯モデルを用いて大気補正を行った。

噴火推移の判読は主に SGLI の 10.8 μm チャンネルの pixel-integrated 温度画像を用いて行った。5 月 5 日(UTC)の画像では、Puna 地区標高 400-500 m 付近に、East Rift Zone の伸長と同方向に並ぶ微弱な熱異常が認められる。これらが初期の割れ目噴火発生地点とその噴出物に当たると思われる。16 日(UTC)の画像では、熱異常域が拡大すると共に、東北東へ伸長していることから、活動が活発化していることが推定される。5 月下旬の画像では、南東に向かって斜面を流下した溶岩流が、MacKenzie State Recreation Area の海岸付近まで達している。ここで海への溶岩の流入(ocean entry : 19 日 HST に始まる)が起きている。一方この時期、SGLI 可視画像により、溶岩の噴泉活動に伴う黒色噴煙や、ocean entry によって発生した水蒸気由来の白色噴煙、溶岩が海水に流入することで発生した変色域等も捉えられている。この後、6 月 4 日(UTC)には、溶岩は東に向かって流れ Kapoho Crater 周辺を埋没させ、7 日(UTC)には Kapao Bay に流れ込んでいることが認められる。8 日の画像では、初期の噴火地点付近(fissure 8)から溶岩が噴出し、東端部の海岸まで流下していることが判読される。

・「ひまわり 8 号のシステムによる試行観測および関連した開発」

ひまわり 8 号の観測システムについては、平成 28～29 年度に関連した解析システムの開発として解析結果の公開のため Web システム開発、オフラインで利用する詳細解析ソフトの開発および試行観測を行った。本年度は、このシステムを用いて、アジア太平洋域の 168 火山について観測を行い、この中で発生した不具合の修正を行った。とくに、ひまわり 8 号による観測を開始して以降、1.6 μm、2.3 μm の夜間画像において火山活動とは無関係に春分及び秋分期を中心とする約 6 ヶ月間、特異な熱異常が表れ、火山の熱解析を行う上で大きな障害となる問題が発覚した。アジア太平洋域に分布するいくつかの火山について、この熱異常の年変化および日変化を調べ、この熱異常が太陽迷光の影響による見かけの熱異常であることを明らかにした。また、火山近隣の非熱異常域の値をバックグラウンドして、R1.6Mx(1.6 μm 画像において火山近傍で最高の輝度値を示す画素の値)、R2.3Mx(2.3 μm 画像において火山近傍で最高の輝度値を示す画素の値) から、それぞれ差し引くことにより、この見かけの熱異常の影響をほぼ完全に補正できることを見出した。この補正方法により、年間を通じて 1.6 μm、2.3 μm バンドを火山の熱異常観測に利用することが可能となった。

- (9)平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
Kaneko, T., K. Takasaki, F. Maeno, M.J. Wooster, and A. Yasuda, Himawari-8 infrared observations of the June-August 2015 Mt Raung eruption, Indonesia, Earth Planets Space, 70, 89, 1-9, 2018. Kaneko, T., A. Yasuda, Y. Yoshizaki, K. Takasaki, and Y. Honda, Pseudo thermal anomalies in the shortwave infrared bands of the Himawari-8 AHI and their correction for volcano thermal observation, Earth Planets Space, 70, 175, 1-9, 2018 .

- (10)次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画は「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」の一项目的として、これまで開発と運用を行って来た衛星赤外画像による東アジア活火山リアルタイム観測・情報発信システムを基に、その観測機能の拡張、観測域の拡大、観測結果を用いた噴火推移研究の推進、およびその防災への応用等に取り組む。

観測機能の拡張については、2017 年 12 月に打上げられた GCOM-C(しきさい)の SGLI 画像の処

理とその情報公開システムを完成させ、試験的運用を始める。

観測域の拡大については、これまで東アジア地域を対象としてきたが、これにニューヘブリデス、フィジー、サモア諸島等の南西太平洋域を加え、合計 168 活火山の観測を行うこととする。

観測結果を用いた噴火推移研究の推進については、2016 年度に立ち上げたひまわり 8/9 号の超高頻度観測、商用画像衛星の超高分解能画像および中分解能中観測頻度の SGLI 画像を組み合わせ、噴火推移の解析を進める。得られた噴火推移の解析結果を基に比較分析を進める。本計画では、ストロンボリ噴泉を伴う噴出的活動、連発的プリニー噴火を主体とする活動、溶岩ドームの成長を主体とする活動、ブルカノ噴火を主体とする活動等、よく見られる活動タイプに着目し、各タイプについて噴火推移の共通性とそのヴァリエーションについて分析と整理を進める。この際、噴火や活動変化に先行してしばしば表れる微弱な熱異常を精査し、その発生原因や噴火推移との関係について分析を進める。さらに、この結果に基づき、リアルタイム観測で推移を確認しつつ、前兆現象となる熱異常を捉え、噴火推移の予測を行うといったアプローチについて、観測システムの運用を通じて検討を重ねその確立に取り組む。

防災への応用については、リアルタイム観測情報を防災情報としてより有効に活用するため、火砕流と溶岩流について Web ベースのシミュレーションシステムを開発する。これにより、アジア太平洋域の火山防災担当者が、リアルタイム観測で得られる情報 - 前兆となる熱異常の検出や噴火地点の位置等 - を基に、必要に応じ即時リアルタイムシミュレーションにより危険域の予測ができる仕組みを構築する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

担当者：東京大学地震研究所 金子隆之

分担者： " 安田 敦

他機関との共同研究の有無：有

JAXA/EORC (GCOM-C/SGLI , ALOS-2/CIRC データの利用について)

ロンドン大学キングスカレッジ (データ解析について)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5712

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名：金子隆之

所属：東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

海底での地震・地殻変動観測に向けた観測技術の高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震予知の基礎的観測研究を行う上で、海洋プレートの沈み込み帯でのプレート境界地震及びスロースリップイベントが繰り返し発生している場の直上である海底での、地震・地殻変動観測は重要である。陸域と同等な観測をこの海底で実現させるという基本的観点から、これまでも長期高密度な機動的な地震観測、機動的な強震観測、機動的で長期の広帯域地震観測、新方式のケーブルシステムによる定常的地震観測、などをこの 10 数年で実現させてきた。海域での地震・地殻変動観測をより高度化させるため、陸上と同等な広帯域地震観測を海域で機動的に行う技術開発、超深海域での機動的な地震観測の実用化、海底面での機動的な水圧(上下変動)観測と傾斜観測の面的展開技術の実用化、および定常的な海域観測網の高度化、などを今後の技術開発の課題として取り組む。

これらの観測技術開発を進展させることで、研究基盤の整備を目指す。その結果として、海域での地震・測地観測の高度化を図り、プレート境界の地震発生帯その場でのモニタリングを可能とさせて、今後の地震発生の予測へ貢献する。

(7) 本課題の5か年計画の概要 :

本研究課題では、明確な年度計画は設定せず、後述の開発項目のうち予算的裏付けと試験観測が可能となったものを順次進めて行く。その理由として、これらの機器開発の予算はその大部分を科学研究費や運営費交付金(地震研内のセンター経費・所長裁量経費など)で賄っていること、及び試験観測には研究船利用(潜水艇も含む)が必要であり、その実行には不確定要素が多いためである。

機動的観測での主たる開発項目は、

- ・次世代型広帯域海底地震計の自律展開設置・自己浮上回収方式への機能高度化、
- ・超深海域で長期(広帯域)地震観測の実用化、
- ・面的展開が可能な海底面での傾斜観測の実用化、
- ・長期安定した精密水圧観測への観測手法と次世代圧力センサーの開発、

とする。一方、定常的観測としては、

- ・高信頼性を保ちつつ、対費用効果をあげるケーブルシステムと海底孔内観測システムの統合的開発、
- ・研究の進展に伴い観測を高度化できる、また、大規模展開に適したケーブルシステムの開発、
- ・機動的観測を視野に入れたケーブルシステムの開発、
- ・GPS/A等の地殻変動観測への拡張、

を開発項目とする。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要 :

機動的観測での開発の一つとして、2015年度に科研費基盤研究(A)の採択により本格的に開始した、次世代型広帯域海底地震計(BBOBS-NX)の自律展開設置・自己浮上回収方式への機能高度化を更に進めた。2016年度の実海域試験結果とその実用的試験機としての改修成果を基に、自律展開設置・自己浮上方式の新型機(NX-2G、図1)の長期試験観測(福島県沖日本海溝陸側斜面に設置)を2017年4月の研究船航海時に開始し、自由落下設置後の自律動作による観測開始までを船上からの音響通信により確認した。この際の動作は、着底の様子も含め、NX-2Gに取り付けた小型深海用ビデオカメラにより自撮りさせていた。2018年10月の研究船航海で、無人潜水艇(かいこう Mk-IV)を用いて観測状態および回収状態への遷移の様子を観察し(図2)、錘を含めた機器全体の回収を実施した。海底面が柔らかいこともあり、錘を切り離してセンサー部を堆積層から引き抜き始めると直ちにセンサー部全体が海水中に引き上げられた。ビデオカメラも含めて機器とデータは無事に回収された。同地点では通常型のBBOBSも設置され記録が取られており、NX-2Gとのノイズレベル比較を実施した結果、これまでのBBOBS-NXとBBOBSでの差程は水平動ノイズレベルの改善が見られなかった。これは、センサー部と記録部を唯一つなく水中ケーブルの引き回しが悪く、ケーブルが十分に海底に落ちていなかったため、海中に浮遊状態にある記録部の振動がセンサー部へ伝わってしまったことによると考えられる。これは容易に解決可能であり、2002年に発案し開発を進めてきた、自己埋設方式センサーによる自己浮上型BBOBSが基本的には実現できたものと考えている。

房総沖で長期海底傾斜観測(2年間)を2015年7月に開始したままであったBBOBS-NXの回収を実現するため、研究船公募による無人潜水艇利用を今年度申請し、2019年6月に実施する予定となった。また、海底面に自由落下で設置される通常型のBBOBSにおいても、底層流が弱い環境下では1?radオーダーでの傾斜観測の可能性が充分にあることも分かってきた。これを踏まえ、2019年1月に開始したチリ沖でのBBOBS観測(2年間)では6台で地震・傾斜同時観測を20km程度の観測点間隔で実行中である。水晶発振方式加速度センサーの評価試験は、鋸山観測坑でのサーボ型加速度計との比較試験を進行中で、東北大で開発されたGPSアンテナ試験用可動台を用いて実施するための準備を進めている。

海底において空間的に高密度なやや広帯域地震観測の実施をめざして、小型広帯域地震計を搭載した長期観測型海底地震計の開発を行った。現在多数運用されている1年以上観測可能な長期観測型海底地震計は短周期地震計(固有周期1秒)搭載しており、小型広帯域地震計に換装することにより広帯域化できる。2017年までは、小型広帯域地震計には、固有周期20秒のNanometrics社Trillium Compact

Broadband Seismometer を用いて開発を行った。この小型広帯域地震計は、直径 90 mm、高さ 100 mm の円筒形容器に収納されており、収納容器のまま搭載できるレベリング装置を新規に開発した(図 3)。開発した長期観測型小型広帯域海底地震計は、主にプレート境界浅部で発生するスロー地震の観測をめざしているが、深部構造研究のための深発地震や遠地地震の観測や、海底火山の観測への利用も可能である。新規開発した海底地震計を、2017 年 2 月に日向灘に設置し、同年 7 月に回収した。回収した記録には、超低周波地震が S/N 比よく記録されていた。2018 年には、同じく Nanometrics 社の Trillium Compact Broadband Seismometer 固有周期 120 秒を用いた小型広帯域地震計を製作した。これは、サイズ、重量ともに固有周期 20 秒のものと同じであるが、観測時に許される傾斜角が小さい。そのため、20 秒計用に開発したレベリング装置を、制御ソフトウェアの改良により、より精度の高いレベリングを可能とした。そのため、120 秒計に適用可能である(図 4)。120 秒計を搭載した小型広帯域海底地震計は、日本海溝陸側斜面における観測に使用した。

定常的な海域観測網の高度化については、2014 年に復旧した既設の三陸沖海底光ケーブル式地震津波観測システムおよび 2015 年に設置した新規開発した海底光ケーブル式地震津波観測システム(OBCST システム)の両方を用いた併行観測を継続している。また、システムの保守および改良も実施している。同システムでは、2016 年 1 月に、汀線部で観測ケーブルの露出が発見されたため、2016 年 5 月 13 日、14 日に、当該ケーブルの汀線部から沖合 100 m までの区間のケーブル敷設状況調査を実施し、汀線部から沖側約 30 m までの区間のケーブルの保護強化対策が必要であることがわかった。2017 年には、波浪の影響を受けやすい汀部から沖側約 30 m までの区間のケーブルの保護対策と、アース電極の沖合への設置作業を実施した。沖合数十 m にアース電極を設置し、これまで利用していた汀線部アースと並列に接続した。その結果、給電電圧の変動はほぼ無くなり、安定した運用ができるようになった(図 5)。2018 年は、9 月に汀線部から沖合 100 m 程度までの状況の監視調査を行ったが、大きな問題は発見されず、前年に実施した保護対策が有効であることが確認された。また、同月に 1996 年に設置したケーブル観測システム(既設システム)について、システムの監視と観測データの冗長性向上を図るために、陸上局舎内に既設システム監視用サーバを新規に追加した(図 6)。既設システム監視サーバシステムは、監視サーバと光受信装置監視装置から構成される。監視サーバは新システムネットワークと既設システムネットワークの両方に接続され、既設システムから転送された WIN データの転送及び保存を行う。また、既設システムの電源装置から電源出力状況を取得し保存を行う。光受信装置監視装置は既設システムネットワークに接続され、光信号受信装置とシリアル通信が可能である。既設システム監視用サーバの新規設置により、既設システムについても、より詳細なシステムの状況をモニタリングすることが可能になるとともに、データの冗長化により、データが欠落する確率が著しく減少したと考えられる。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
- A. Takeo, H. Kawakatsu, T. Isse, K. Nishida, H. Shiobara, H. Sugioka, A. Ito, and H. Utada, In situ characterization of the lithosphere–asthenosphere system beneath NW Pacific ocean via broadband dispersion survey with two OBS arrays, *G-cubed*, 19, 3529–3539, doi:10.1029/2018GC007588, 2018.
 - Fukao, Y., O. Sandanbata, H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, S. Watada, and K. Satake, Mechanism of the 2015 volcanic tsunami earthquake near Torishima, Japan, *Science Advances*, doi: 10.1126/sciadv.aao0219, 2018.
 - D. Suetsugu, H. Shiobara, H. Sugioka, N. Tada, A. Ito, T. Isse, K. Baba, H. Ichihara, T. Ota, Y. Ishihara, S. Tanaka, M. Obayashi, T. Tonegawa, J. Yoshimitsu, T. Kobayashi, and H. Utada, The OJP array: seismological and electromagnetic observation on seafloor and islands in the Ontong Java Plateau, *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, 26, 54–64, doi: 10.5918/jamstecr.26.54, 2018.
 - H. Shiobara, A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara, Geodesy and broadband seismology from a mobile ocean bottom observation, *JpGU Meeting 2018*, 幕張メッセ, 千葉県, 2018 年 5 月 24 日, S-CG67-P07.
 - H. Shiobara, A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara, The First Data of the Autonomous BBOBS-NX (NX-2G)

for New Era of Ocean Bottom Broadband Seismology, 2018 AGU Fall Meeting, Washington DC, USA, Dec. 13, 2018, S43E-0654.

Shinohara, M., T. Yamada, H. Shiobara, Y. Yamashita, Development and Evaluation of Compact Long-term Broadband Ocean Bottom Seismometer, 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO), 1-4, doi:10.1109/OCEANSKOBE.2018.8559338, 2018

Shinohara, M., T. Yamada, H. Shiobara and Y. Yamashita, Compact long-term ocean bottom seismometer equipped with small broadband seismic sensor, European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2018, Vienna, Austria, Apr. 10, 2018, EGU2018-5807

篠原雅尚・山田知朗・塩原肇・山下裕亮、スロー地震観測のための小型広帯域海底地震計、日本地球惑星科学連合 2018 年大会、千葉、2018 年 5 月 24 日、SCG67-08

Shinohara, M., T. Yamada, S. Sakai, H. Shiobara, and T. Kanazawa, ICT Seafloor Cabled Seismic and Tsunami Observation System Off Sanriku, Japan, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 15th Annual Meeting, Honolulu, USA, Jun. 5, 2018, SE11-13-A020

篠原雅尚、新しいケーブル式海底地震・津波観測システム - 日向灘への設置に向けて -、海底ケーブルの科学利用と関連技術に関する将来展望現行システムと今後の展望、東京、2018 年 9 月 19 日 (招待)

篠原雅尚、海域における地震・津波観測とその意義、Riesgo de TSUNAMI Seminario Internacional " Gestiones Preventivas y de Respuesta ante el riesgo de Tsunami ", Puerto Vallarta, Mexico, Oct. 15, 2018 (招待)

Shinohara, M., Recent seafloor seismic and tsunami observation systems for scientific research and disaster mitigation, International Colloquium of Mexican and Japanese Studies, Mexico City, Mexico, Oct. 17, 2018

篠原雅尚、海底における地震・津波・地殻変動のモニタリング - 海底ケーブルネットワーク -、海洋調査技術学会 創立 30 周年記念研究発表会、東京、2018 年 11 月 28 日、(招待)

Shinohara, M., T. Yamada¹, S. Sakai¹, H. Shiobara¹ and T. Kanazawa, Installation and operation of ICT seafloor cabled seismic and tsunami observation system in source region of Tohoku-oki earthquake, 2018 AGU Fall Meeting, Washington DC, USA, Dec. 11, 2018 OS21E-1611

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

機動的観測での開発に関しては、2019 年 6 月に予定されている観測航海において、未回収となっている房総沖の BBOBST-NX の回収を研究船 (新青丸) で実施する。NX-2G の開発は科研費 (基盤 A、代表 : 塩原) で 2019 年度まで研究期間があるが、2019 年度中には 2018 年度の長期試験観測結果を元に、実用観測へ適用可能な形態への改修作業を進める予定である。また、水晶発振方式加速度センサーの評価試験を鋸山観測坑および東北大で実施し、長周期帯域でのノイズレベルやレスポンスを確認する。

定常的な海域観測網の高度化については、従来からの三陸沖海底光ケーブル式地震津波観測システムおよび 2015 年設置の ICT 観測システムの両方を用いた併行観測を継続するとともに、システムの保守および観測システムの改良を実施する。また、新規開発システムについては、さらに信頼性を高めた ICT システムについての検討を引き続き実施する。さらに、これまでにない新しい方式での海底ケーブル式地震・津波観測システムの開発をめざして、調査・検討を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

塩原肇・篠原雅尚・望月公廣・山田知朗・一瀬建日
他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京大学地震研究所
電話 : 03-5841-5712

e-mail : yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL :

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 塩原 肇

所属 : 東京大学 地震研究所 海半球観測研究センター

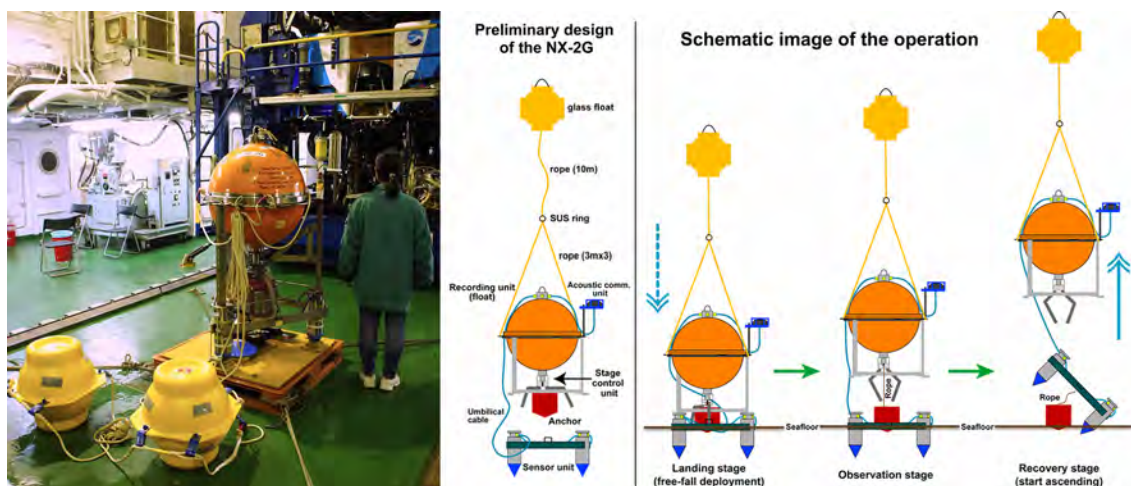


図1 2017年4月に長期試験観測を開始した自律動作方式のBBOBS-NX (NX-2G)

2016年の実地試験で機能を確認し、問題点などを修正したNX-2G試験機を、福島県沖の日本海溝陸側斜面(地点名: AoA60、水深: 4236 m)に設置、長期試験観測を2017年4月に開始した。左: 手前に見える黄色の物体2個がガラス球フロートで、13 m長のロープを介してNX-2Gの記録部(オレンジ色のチタン球耐圧容器)の赤道部に繋がっており、センサー部を引き抜く浮力および降下中での記録部の回転の抑制、の役割を持つ。右: NX-2Gのシステム全体とその動作(投入・観測・回収の3状態)を模式的に示した図。

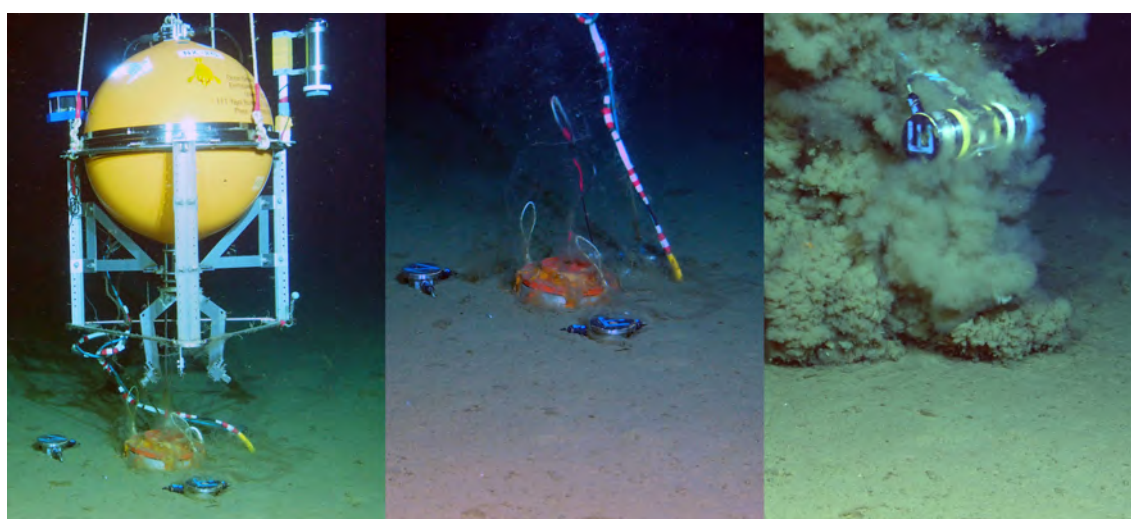


図2 NX-2Gの観測状態から回収状態(浮上開始)への移行の様子

2018年10月の回収航海で、無人潜水艇かいこう Mk-IVにより観察したスナップショット画像である。図1右での観測状態(左)から、錘と記録部の接続ロープが離れた直後(中央)、浮力体によりセンサー部の引き抜きが開始された直後(右)、へと自己浮上方式の回収状態への動作が速やかに進んでいったことをその場で確認した。

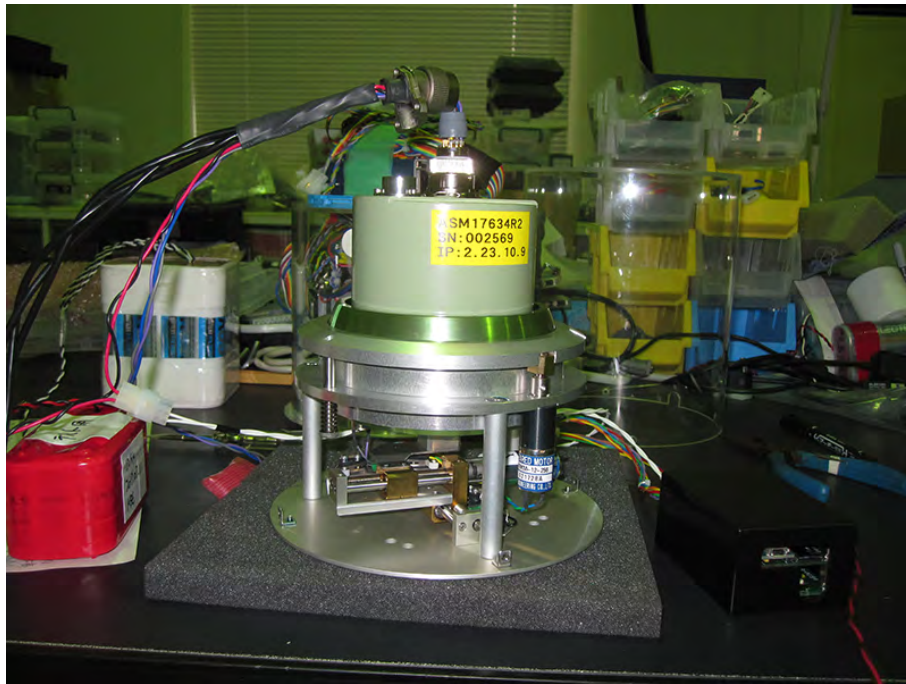


図3 小型広帯域海底地震計のために開発した小型広帯域地震計レベリングシステム
従来の長期観測型海底地震計に使用されている1 Hz地震計ユニットとほぼ同じサイズ、同重量である。電気的な接続やレコーダの設定も、従来の1 Hz地震計と同じにしたので、組み立て作業やその後のオペレーションも従来と同じである。

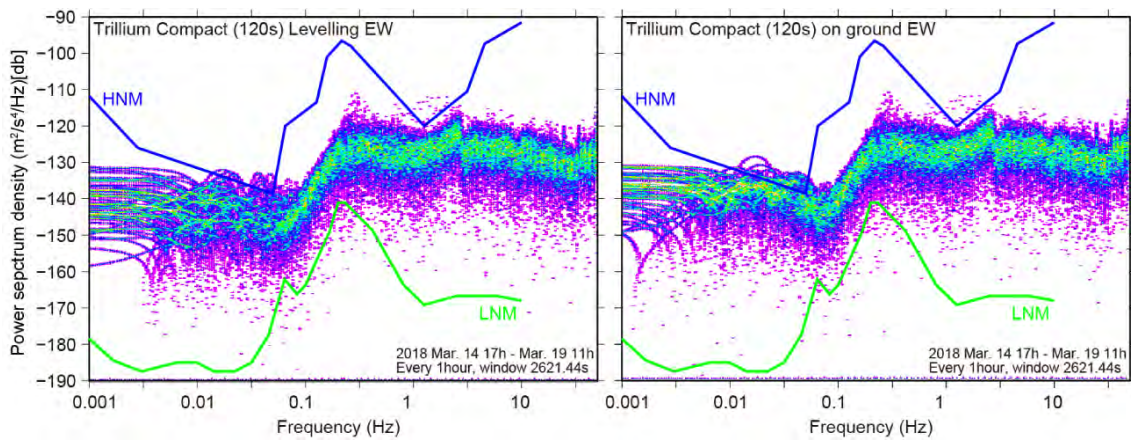


図4 小型広帯域地震計レベリングシステムに搭載した Nanometrics 社 Trillium Compact Broadband Seismometer 固有周期 120 秒計 (左) と地面に直接設置した 120 秒計 (右) のスペクトル
地震研究所建物内において比較観測を行った。2つのセンサーのスペクトルはほぼ同じであり、レベリング装置に起因すると思われるノイズは確認できない。

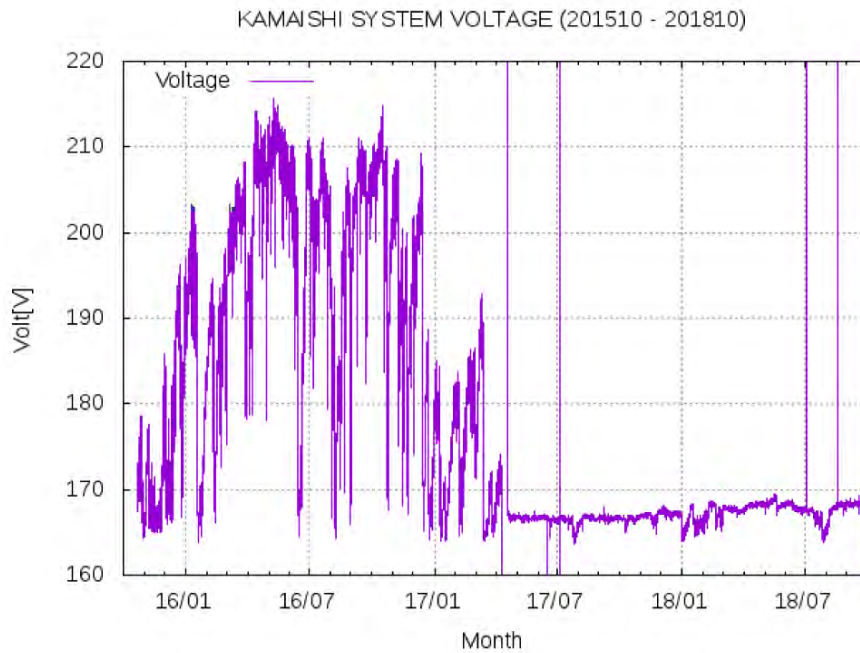


図5 OBCSTシステムの供給電圧の時間変化

海底ケーブル観測システムは、定電流給電を行っており、OBCSTシステムでは、約0.7Aの定電流給電を行っている。そのために、接地抵抗が変化すると供給電圧の変化として現れる。設置した2015年から、海中アースを設置するまでの2017年4月までは、降雨などの影響により、電圧が大きく変化している。海中アース増設後は、電圧は170V弱でほぼ一定となり、抵抗が一定となったことを示している。なお、パルス的な電圧変動は、メインテナンスなどの理由でのシステム電源の断続が原因である。

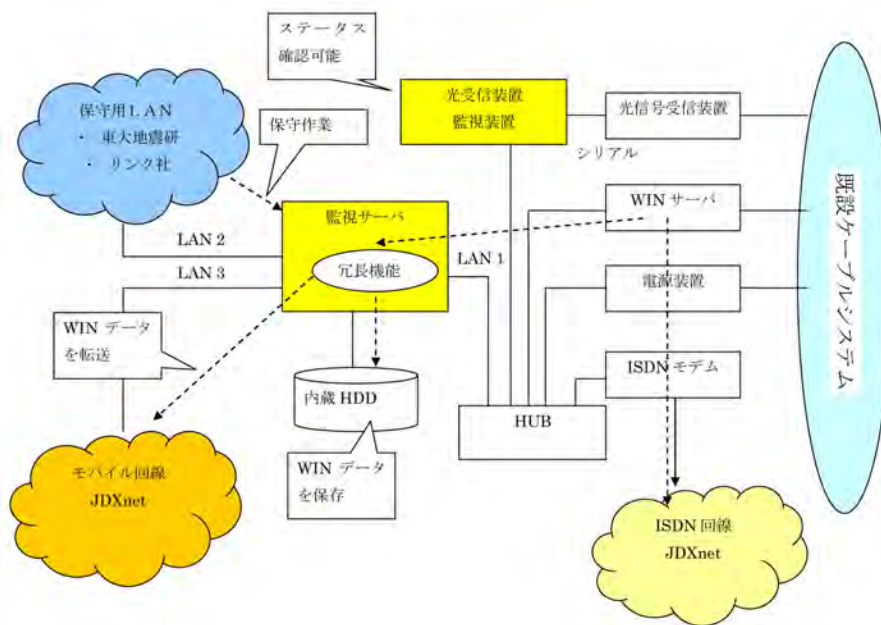


図6 既設システム監視用サーバシステム構成

既設ケーブルシステムの監視を行うとともに、データの冗長化を行い、データ欠落を防止する。

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

光技術を利用した大深度ボアホール用地震地殻変動観測装置の開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

断層すべりや応力場など地殻内で起こっている現象を観測結果に基づき定量的に理解するためには、地下深部や断層近傍における観測手法の確立が不可欠である。地下深部の高温環境においても動作し、地殻活動にともなう地動変位を正確にとらえることのできる方法として、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」では光技術を利用した広帯域地震計・傾斜計の開発を行った。この技術を高度化し、ボアホール内での試験観測を通じて、大深度における地殻活動の観測技術を確立し、地震の予測を行うための基礎観測データを提供する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」で開発された地震計・傾斜計に歪計・温度計を加え、5 年程度の期間で光ベースの大深度ボアホール用地震地殻変動観測装置の開発を行う。

平成 26 年度においては、現状の高温対応地震計・傾斜計をボアホール型に改良する。

平成 27 年度においては、ボアホール型地震計・傾斜計の高温試験および試験観測を実施する。

平成 28 年度においては、さらに光ファイバー式温度計・歪計を組み込む。

平成 29 年度においては、上記を統合し、光ベースの大深度ボアホール用観測装置を試作する。

平成 30 年度においては、既存の大深度ボアホールを利用し、観測を実施する(1 年程度)。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」において、レーザー技術を利用した広帯域地震計および傾斜計が開発された。変位センサーとしてレーザー干渉計を用いたものを製作し、所期の高い検出性能を確認した。また、これまでに地震計およびレーザー干渉計部分の高温試験を実施し、後者については光学素子の保持部材として高温用バネ材であるインコネルが有効であり 340 においても

レーザー干渉計が機能することが確認されている。光ベースの大深度ポアホール用地震地殻変動観測装置で必要となる光ファイバー長距離伝送に関しては、東北大学電気通信研究所で開発された通信波長帯の 1550nm 光源を 26km の伝送路で小型絶対重力計に導入し、測定値の誤差などを評価した結果、重力の計測値は少なくとも 7 桁のレベルでは特段の誤差は認められず、通常の地震観測には影響がない誤差のレベルであることがわかった。光アンプを用いた増幅後も劣化はなく、～30km の距離の光ファイバー伝送については大きな問題が伴わないと見込まれた。

本年度はこれらの成果に基づき、地震計の試作を進めた。高温用のレーザー干渉計部分については、動作保証などの関係でコンタクトを取ったメーカーでの製作は困難であることがわかり、地震研で内製することとした。地震計振り子部は 200 の環境下で動作試験の実績のあるメーカーに製作を依頼した。当初は干渉計ではなくコリメーター式の簡易な変位センサーで地震計としての動作確認を行い、その後上記の干渉計を組み込み高感度化することとした。光ファイバーを用いた長距離伝送・ネットワーク化の基礎実験については継続し、多重化や単線による信号取得の方法について検討を進めた（東北大・電気通信研究所との共同研究）。

当初計画では、本年度は大深度ポアホールを利用した観測を実施する計画であった。前年度までの基礎実験の遅れにより、光ベースの高温対応の地震計製作までは到達できたが、大深度観測までには至らなかった。5 ヶ年の計画では地震計およびひずみ計については一定の進捗があったが、温度計と傾斜計については進めることができなかった。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
新谷昌人、ファイバーネットワークを用いた地震・津波・地殻変動の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, 24, 129-131, 2018.

- (10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画では、本研究で得られた成果を高度化し「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」の課題として実施する。光計測技術を用いた地震計・重力計などのセンサを面的に配置し光ファイバで接続し、従来観測が困難であった地下深部や火山近傍での次世代の光ベースの地震・地殻変動観測網を構築するための手法を確立させることをめざす。H31 年度は地震計・小型絶対重力計の各センサに関して、長距離の光ファイバ伝送試験を実施する。

- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

新谷昌人、高森昭光

他機関との共同研究の有無 : 有

海洋研究開発機構 荒木英一郎ほか 1 名、宇宙科学研究所 白石浩章ほか 1 名、東北大学 中沢正隆ほか 2 名

- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京大学地震研究所

電話 : 03-5841-5712

e-mail : yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL :

- (13) この研究課題(または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 新谷昌人

所属 : 東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

素粒子ミュオンを用いた火山透視技術の可用化プロジェクト

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

低雑音型ミュオン検出器として、すでに実績が上がっているカロリメータ方式の装置の可用性を以下の項目を開発することで、大幅に向上させる。(1) 装置のモジュール化、マニュアル化、(2) 自動解析ハードウェアの開発、(3) 取得したデータの自動解析ソフトウェアおよびイメージャーの開発。“ユーザー”から“プロバイダ”へのフィードバックを促し、火山学者が必要とするミュオン検出器を実用化する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1年目においてはミュオグラフィ自動解析アルゴリズム、自動画像生成アルゴリズムを完成させる。2年目においてはミュオグラフィ自動解析、自動画像生成ソフトウェアを完成させる。3年目においては活動的火山におけるミュオグラフィ長期観測点へのカロリメータ方式の導入・観測開始を行う。4年目においては火山学者によるミュオグラフィ測定装置の運用開始及び、開発者へのフィードバック。ソフトウェアの改良を行う。5年目においては4年目までの運用実績をもとに、最適化を行い火山学者

による観測を実現し、ミュオグラフィ装置の実用化を実現するとともに、ミュオグラフィデータベースを構築する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

カロリメータ方式の装置の可用性を以下の項目を開発することで、大幅に向上させた。(1) 装置のモジュール化、マニュアル化することにより、効率よく大口径化を行う手法を確立した。大口径化は透視画像の高解像度化に必要な要件である。理由を以下に示す。総ミュオン数が一定であれば、画素数を上げれば 1 画素あたりに記録されるミュオン数は減る。すなわち、記録される総ミュオン数を増やす必要がある。ミュオンの絶対強度は変わらないので、口径 (受光面積) を拡大する必要がある。(2) Virtual Private Service 上に観測データを解析するためのシステム基盤を構築することにより、データベース上に自動解析ソフトウェアおよびイメージャーの実装が可能となり、迅速な画像出力を可能とした。(3) 従来のプラスチックシンチレーター及び光読出の方式に替えて、ガスの電離をワイヤでピックアップする比例計数管の技術をベースとしたミュオグラフィ観測システムの開発を行い、透視画像の高解像度化を実現した。これにより従来観測が困難だった構造を見やすくした。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Laszlo Olah , , Hiroyuki K. M. Tanaka , Gergo Hamar and Dezso Varga, Investigation of the limits of high-definition muography for observation of Mt Sakurajima, Philosophical Transactions of the Royal Society A, 377, 2137, <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0135>.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

医用画像コンピュータ自動検出/診断技術を高解像度火山透視画像に適用することで、他の桜島観測データとミュオグラフィデータとの相関を評価できるシステム構築を目指して、医用画像用コンピュータ自動検出/診断の適用可能性の検討を実施する。ミュオグラフィ透視画像の改良。次世代火山プロジェクトとの連携を推進する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東京大学 (地震研究所)
他機関との共同研究の有無 : 有
高エネルギー加速器研究機構 (素粒子原子核研究所)
北海道大学 (院理・地震火山研究観測センター)
名古屋大学 (院理・物理学専攻)
産業技術総合研究所 (活断層・火山研究部門)
京都大学 (防災研究所)
Hungarian Academy of Sciences (Wigner Research Centre for Physics)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

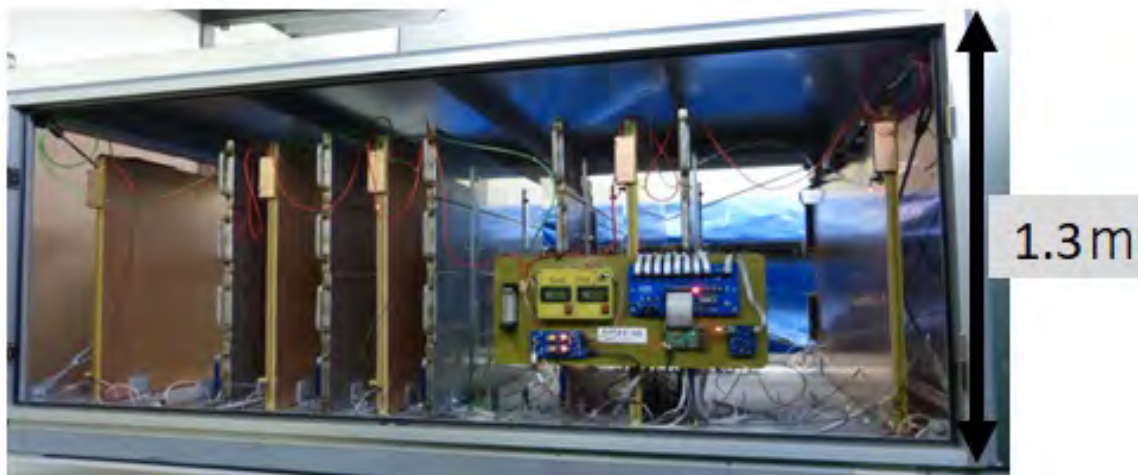
部署等名 : 東京大学地震研究所
電話 : 03-5841-5712
e-mail : yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp
URL :

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 田中宏幸
所属 : 東京大学地震研究所



ガスの電離をワイヤでピックアップする方式



比例計数管の技術をベースとしてミュオグラフィ観測装置

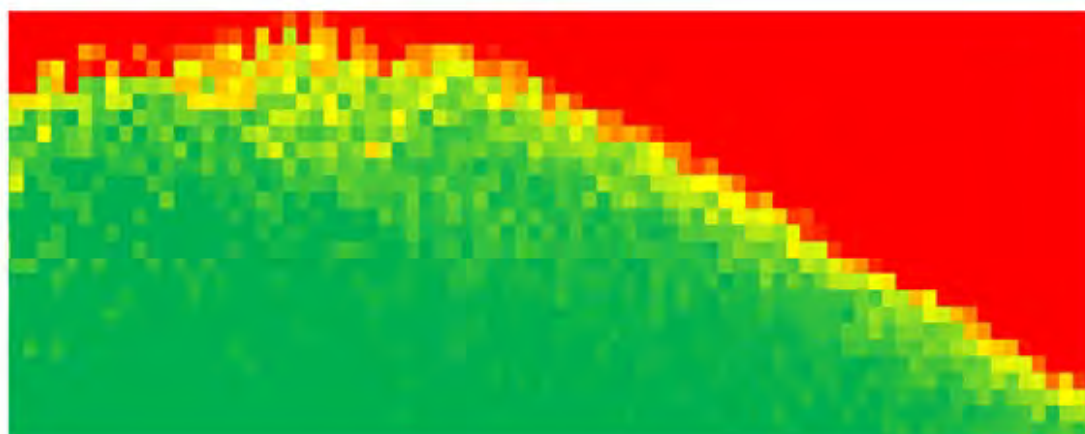


モジュールが並列運用されている様子

Before



After



20 倍以上に向上構造した透視画像画素数 (桜島南岳)

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

日・米・NZ 国際協力によるスロースリップでのプレート境界面断層滑りメカニズムの解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(6) 国際共同研究・国際協力

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震活動やスロースリップなど、プレート境界における多様な滑り運動を詳細に把握し、プレート境界の形状や物性などの構造的要因との関係を明らかにすることは、地震発生メカニズムや断層破壊過程の理解に重要な貢献をなす。ニュージーランド北島では陸上地震観測網に加えて、近年 GPS 観測網が整備され、東海岸沖合いのヒクラング沈み込み帯における通常地震活動に加え、プレート間固着強度分布や、スロースリップの発生が明らかとなってきた。特に本研究の対象地域であるヒクラン

ギ沈み込み帯北部では、~2年周期でスロースリップが発生しており、過去にはM7級津波地震による被害も受けている。太平洋プレートの沈み込みが浅いため、地震波構造調査によって海山の沈み込みなど詳細なプレート境界周辺の形状や反射強度が得られており、断層すべり運動とプレート境界の構造的要因との関係について議論を行う上で、世界的に最適な場所である。

海底下深度掘削によって実際にプレート境界面周辺物質までを取得し、沈み込みに伴う脱水反応過程や水の流路、およびその低周波イベントとの関係を明らかにすることを目的とした国際共同研究を計画している。国際共同研究の枠組みの中で、日本の得意とする地震・海底地殻変動観測を、日・ニュージーランド・米の共同で多点展開することによって行い、ヒクラング沈み込み帯で発生するスロースリップ、およびそれに伴う多様な地震活動の推移を詳細に把握する。ここで得られた結果と地震波構造断面と比較することによって、多様な断層滑り現象とプレート境界面周辺の構造的要因との関係を解明する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

ヒクラング沈み込み帯では、~2年周期でスロースリップが発生しているが、このうち~6年に一度程度の周期で大規模なイベントが起こっている。海底地震計や海底圧力計を用いて、海域においてこのスロースリップおよびそれに付随する地震活動をとらえ、プレート境界の性質と運動の関係について解明を目指す。そのために我々は、日・米合わせて10台の海底地震・圧力計、5台の海底地震計および17台の海底圧力計を用いて、大規模なスロースリップの滑り過程の全体像をとらえることを目的とした観測を、2014年5月から1年間に渡り行うことを計画している。この観測で得られたデータについて、日・NZ・米の共同で多面的な解析をし、議論・検証を行う。この3カ国共同観測後にも、複数回のスロースリップを観測することを目的として、本研究計画による海域観測を続け、プレート境界運動の詳細を把握する。

(平成26年度)

- ・日・ニュージーランド・米共同による海底地震観測および海底圧力計を用いた海底上下変動観測を開始する。
- ・東京大学地震研究所では、2012年4月から2013年3月までの期間、同海域で4台の海底地震計を用いたパイロット観測を行った。観測期間中に観測網の南方で発生した比較的大きなスロースリップについて、その滑り過程を国際共同研究者が解析中である。スロースリップと地震活動との関係を把握するために、海底地震観測記録の解析を進める。
- ・2013年3月に設置した東北大学の海底圧力計4台の回収を行う。観測期間中の2013年7月に、少~中規模のスロースリップが発生した。このイベントにおけるプレート境界滑り分布について、解析を始める。

(平成27年度)

- ・日・ニュージーランド・米による海底多点観測網の回収を行い、解析を開始する。
- ・東北大学の海底圧力計については、回収後再設置を行い、引き続き観測を行う。
- ・これまでに得られた海底地震計、および海底圧力計の記録の解析を進める。

(平成28~29年度)

- ・東北大学の海底圧力計の回収・再設置を行い、引き続き観測を行う。
- ・海底地震計のデータと陸上観測網のデータを合わせて解析し、地震活動やスロースリップに付随する低周波イベントの同定、および震源の決定を行う。
- ・震源決定の精度を上げるため、海域下の地震波速度構造モデルの改善を行う。
- ・震源メカニズムの決定を行う。

(平成30年度)

- ・東北大学の海底圧力計の回収を行う。
- ・精度よく決定された地震や低周波イベントの震源および震源メカニズムと地震波反射断面との比較を行い、構造的要因との関係について検討を行う。

・日・ニュージーランド・米共同研究者によるワークショップを行い、結果のとりまとめに向けた検討を行う。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

平成 30 年度は、2014 ~ 15 年にかけて日・NZ・米国際共同で行った HOBITSS 大規模海域観測で取得したデータについて、解析を進めた。これまで、スロースリップにおける断層すべりとプレート境界面での水の分布には関係があることが議論されてきたが、その直接的な物理観測はなされていなかった。そこで、海域観測網で観測された海洋性地殻内の地震の震源メカニズムと観測期間中に発生した小さいものも含む複数のスロースリップについての関係を調べたところ、海洋性地殻内の応力と間隙水圧がスロースリップの発生前後に変化していることを明らかにした。過剰間隙水圧のかかっているプレート境界において、その圧力の増減によって、スロースリップの発生がコントロールされている可能性について議論した。

また、2017 年 11 月から 2018 年 2 月にかけて実施した、日・NZ・米・英国際共同大規模地震波構造調査 (図 1) の解析も進めた。本海域に沈み込むヒクラング海台の構造について、その詳細を明らかにし、また、プレート境界面の構造、および物性に関する解析を進めているところである。

2018 年 10 月には 2019 年 11 月までの観測予定で、海底圧力計の観測を継続するための観測機器の交換、および、改めて 5 台の海底地震計の設置した。これにあわせ、アメリカでは電磁気構造調査が行われ、また海底下からの流量計の設置も行った。これらの観測結果を総合的に解釈し、スロースリップ発生に伴うプレート境界面周辺の物理的变化を明らかにすることを目的としている。

5 か年の研究について :

ヒクラング沈み込み帯北方の Gisborne 沖合にて 2012 年 4 月から 2013 年 3 月まで海底地震計 4 台を用いて行ったパイロット海底地震観測で得られたデータの解析を行った。まず、観測全期間にわたり、STA/LTA アルゴリズムを適用して地震活動を抽出した。海域地震観測によって、これまでニュージーランドの陸上地震観測網 GeoNet でとらえられていた地震活動よりもはるかに活発な活動があることを明らかにした。観測期間中の 2013 年 2 月から 3 月にかけて発生したスロースリップに伴う地震活動を明らかにすることを目的として、その期間に発生した地震すべてに関して、海域観測点 4 点に陸上 GeoNet 観測点 9 点を加えて、P 波および S 波の到達時刻について手動検測を行った。これに加え、観測全期間中の $M > 2$ 程度の地震について、同様に手動による到達時刻検測を行った。これらの手動検測された地震のうち、P 波検測 4 点以上、S 波検測 2 点以上の地震について HYPOMH 震源決定プログラムを用いて震源と観測点補正値を求めた。ここで得られた震源について、さらに TOMOD3 次元トモグラフィー・プログラムを用い、精度の高い海陸観測網下 3 次元地震波速度構造および震源の決定を行った (図 2)。その結果、北島北方海岸線が、地震活動および沈み込む海洋性地殻の構造の境界となっており、海岸線より海側には地震活動の見られない非地震活発帯が存在し、そこでは海洋性地殻内の V_p/V_s が周囲よりも低いことが明らかとなった。また、沈み込むプレート境界周辺の地震活動について調べると、反射法地震探査で確認されている流体が多く分布していると考えられる地震波強反射プレート境界の周辺域で活動が見られることが分かった。これは、強反射境界では定常的なすべりが起こっており、その周辺に応力集中が起こるために地震活動が見られると解釈される。2014 年 5 月から 2015 年 6 月にかけて、日・NZ・米 3 か国共同の Hikurangi Ocean Bottom Investigation of Tremor and Slow Slip (HOBITSS) 大規模海域観測を行った。ニュージーランドの共同研究機関である NIWA (National Institute of Water and Atmospheric Research) の研究船 R/V Tangaroa を用いてニュージーランド北島 Gisborne 沖合のヒクラング沈み込み帯に、海底地球物理観測機器を設置した (図 3)。その内訳は、東京大学地震研究所の海底地震計 (1 Hz 計) 5 台、海底圧力計 3 台、東北大学の海底圧力計 4 台、海洋研究開発機構の海底電位差計 3 台、ラumont・ドハティー研究所の広帯域海底地震計 10 台、海底圧力計 5 台、およびテキサス大学の海底圧力計 5 台の総計 35 台 (海底地震計 15 台、海底圧力計 27 台、海底電位差計 3 台) である。1 年強の観測の後、スクリップス海洋研究所 (アメリカ) の研究船 R/V Roger Revelle を用いた RR1509 航海において、これらの海底観測機器の回収を行った。海

底電位差計 1 台を除き、それ以外の 34 台の回収に成功した。本航海中には、来年度までの継続観測として海底圧力計 4 台を再設置するとともに、新たに GPS / 音響測距結合方式による海底地殻変動観測を開始した（図 3）。回収した観測機器の記録について直ちに一次評価を行った結果、海底圧力計 4 台についてはセンサーの稼働状況に問題があり、記録の取得に失敗した。またラumont・ドハティー研究所の海底地震・圧力計では、地震計に装備されている時計のデータに問題があることが判明し、その修正について現在も検討中である。

HOBITSS 観測期間中の 2014 年 9 月から 10 月にかけて、これまでに観測されている中で 2 番目に大きい規模のスロースリップが観測網直下で発生し（図 4）、これの直近での観測に成功した。データに不備のあった海底圧力計、および水深が 100 m に満たない浅海に設置した海底圧力計を除いた 13 台の海底圧力計のデータを調べたところ、このスロースリップに伴う 1.5~5.4 cm の海底上昇を記録していることがわかった。この海底上昇は陸上の GPS 観測網によってスロースリップが捕らえられる数日前から開始しているように認められ、したがってスロースリップのすべりはプレート境界の浅部から深部へと進行したことが示唆される。もっとも大きなすべりは、海岸線よりも 30 km 離れた海底下で発生し、その海底は 5.4 cm の上昇を記録した。すべり量は海溝軸に向かって小さくなり、海溝軸から 5~10 km の海底では 1.5~2 cm の海底上昇が認められた。海溝軸近傍の海底圧力計で記録された海底上昇は、スロースリップによる断層すべりはほぼ海溝軸まで達したことを示唆している。断層すべりの量としては、もっとも大きくすべった 4~7 km の深さのプレート境界のところで 10 cm 程度と考えられる。ここで得られたスロースリップに伴う断層すべりについて、反射法地震波構造調査によって得られているプレート境界の形状と比較すると、沈み込んだ海山を避けるように分布していることがわかった。この海底圧力計の記録については、潮汐による影響と大気により駆動される海洋モデルによる圧力擾乱を取り除くことによって、さらにその詳細を調べており、小規模なスロースリップの発生の検出に成功している。2012~13 年に行った海域地震観測で得られた地震活動分布と比較すると、本海域下での地震活動はまさしくプレート境界面の凹凸形状に従った分布を示していることが明らかとなっている。これらの結果と地震波反射断面から推測されるプレート境界面の形状や物性との比較検討を進めることによって、境界面上の滑り運動の物理モデル構築に貢献できると期待される。

HOBITSS 観測における海底地震計の記録では、観測期間を通して発生した地震について陸上の地震観測網では捉えられない微小地震を含めて検出を行い、その震源および震源メカニズムの決定に取り組んでいる。HOBITSS 観測に先駆けて東京大学地震研究所と GNS Science (NZ) が共同で 2012 年から 2013 年に同海域で行った地震観測（パイロット観測）の結果では、本海域下での地震活動はまさしく反射法地震探査断面で認められるプレート境界面の凹凸形状や、水の分布に良い対応関係を示していることが明らかとなっている。今回の HOBITSS 観測では、期間中にニュージーランド北島周辺域で発生した 3000 個を越す地震について震源を決定し、現在はその精度について検討を行っている。その結果、得られた震源分布は 2012~13 年パイロット観測で観測された地震活動と良い一致を示しており、地震の活発・非活発な領域が定常的であることが確認できた。さらに、観測期間中に発生したスロースリップに伴う地震活動との比較について、検討を進めているところである。

ヒクラング沈み込み帯の海域では、これまでに繰り返しスロースリップの発生は認められてきたが、微動の活動については必ずしも明らかとなっていなかった。HOBITSS 観測で得られた海底地震計の記録を用いて、目視による微動の検出、さらにはエンベロープ相関法による微動の震源決定を進めた結果、スロースリップに伴った微動と考えられる活動が 1 日あたり 0~12 個程度、特にスロースリップ活動の後半から 2 週間程度の期間に認められ、その震源はスロースリップの断層すべりが及ばない沈み込んだ海山の基底部周辺に集中しているように見える（図 5）。ヒクラング沈み込み帯では、特にプレート境界が浅く、また地震波減衰も大きいことが知られている。したがって、小さな地震活動は多点での観測が不可能な場合もあり、そのため微小地震の検出や震源決定が困難である。観測点 1 点でも微動活動の検出が可能であり、さらに地震波の到来方向、あるいは 2 点以上の観測記録から震央を推定することを目的として、S 波スプリッティング解析および地震波偏向方向解析を、海底地震計連続波形に適用した。まずは、完全な波形記録が得られた地震研究所海底地震計 5 台の解析を行い、工

ンベローブ相関法で得られた震源と整合的に、沈み込む海山の沈み込み前縁部に集中して発生していることが示された。一方、エンベローブ相関法では1日0~12個程度しか検出できなかったが、その微動活動がほとんど中断無く2週間程度連続して発生していることが示された。現在、アメリカの海底地震計を設置した他観測点のデータを用いての解析を進めている。

2015年6月にはHOBITSS観測における海底観測機器の回収とともに、新たに5台の海底圧力計を設置し、1点でGPS/A海底地殻変動観測装置の設置を行って観測を開始した。2016年6月にはGPS/Aの観測を行うと共に、海底圧力計の設置・回収作業を行って、観測を継続している。

2016年9月から1月にかけて、NZの研究機関であるGNS Science及びビクトリア大学ウェリントン校から東京大学地震研究所に研究者が滞在し、HOBITSS観測で得られた地震波形データの解析を進めた。特に、レシーバー関数解析やS波スプリッティング解析で必要となる地震計方位の決定について、複数の手法を用いて詳しく調べた。2016年11月には、NZ南島北東部でM7.8の規模のKaikoura地震が発生し、それによって北島沖合のヒクラング沈み込み帯全域に渡ってスロースリップが発生した。これを受け、今後の研究方針などについても議論を行った。

2017年6月には、2015年6月に設置したGPS/A海底地殻変動観測点での観測を行うとともに、前年度に設置した海底圧力計を回収し、新たに5台の海底圧力計を設置し、海底地殻変動の観測を継続した。

2016年9月には、ヒクラング沈み込み帯北部にてM7.1のTe Araroa地震が、2016年11月にはNZ南島北東部でM7.8のKaikoura地震が発生した。特に、Kaikoura地震では、その発生直後にヒクラング沈み込み帯全域においてスロースリップの発生が観測された。本地震発生時に観測中であった海底圧力計の記録から、その観測点における、これらの地震による海底面の振動を求めた。その結果、海域における堆積層下では、地震波伝播の数値計算から予想される振動よりもはるかに長い継続時間が観測されており、長時間にわたるダイナミックな応力変動による影響の可能性があることが示された(図6)。

2017年11月から2月にかけて、ヒクラング沈み込み帯全域をカバーする北島東方沖において、日本から持ち込んだ海底地震計100台と、アメリカの物理探査船R/V Marcus G. Langsethを用いた日・NZ・米・英国国際共同大規模地震波構造調査を行った。本調査では反射法地震波構造調査に加え、海底地震計および陸上にも地震観測網を展開して屈折法構造調査も行い、良好な記録を取得した。現在、そのデータについて解析を行っている。

(9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Todd, E.K., S.Y. Schwartz, K. Mochizuki, L.M. Wallace, A.F. Sheehan, S.C. Webb, C.A. Williams, J. Nakai, J. Yancey, B. Fry, S. Henrys, Y. Ito, 2018, Earthquakes and Tremor Linked to Seamount Subduction During Shallow Slow Slip at the Hikurangi Margin, New Zealand, *J. Geophys. Res.*, 123, 6769-6783. <https://doi.org/10.1029/2018JB016136>

新井隆太, 小平秀一, 藤江剛, 尾鼻浩一郎, 山本揚二郎, 三浦誠一, 望月公廣, 仲谷幸浩, S. Henrys, D. Barker, R. Kellett, D. Bassett, N. Bangs, H. van Avendonk, 2018, S06-P16, 日本地震学会講演予稿集 2018年度秋季大会, 福島, 10月9 - 11日

Kodaira, S., G. Fujie, R. Arai, K. Obana, Y. Yamamoto, S. Miura, K. Mochizuki, Y. Nakatani, S.A. Henrys, D.H.N. Barker, D. Bassett, J.I.T. Hillman, H.J. Van Avendonk, N.L. Bangs, 2018, Along-strike variation of incoming plate to the Hikurangi seismogenic zone: results from Seismogenesis at Hikurangi Integrated Research Experiment (SHIRE), T51I-0283, 2018 Fall meeting, AGU, Washington, 10-14 Dec.

Arai, R., S. Kodaira, R.L. Kellett, V.K. Stucker, D. Bassett, S.A. Henrys, K. Obana, N.L. Bangs, D.H.N. Barker, R.E. Bell, K. Mochizuki, S. Miura, B. Fry, and NZ3D team, 2018, NZ3D OBS experiment: Toward elucidating high-resolution plate boundary structure, offshore Gisborne, Hikurangi margin, New Zealand, T51I-0295, 2018 Fall meeting, AGU, Washington, 10-14 Dec.

- Stern, T.A., S.H. Lamb, K. Mochizuki, K. Gohl, K. Hochmuth, J.D.P. Moore, P. Herath, and D.A. Okaya, 2018, HIGH P-WAVE SPEEDS IN THE UPPER MANTLE AND THEIR POSSIBLE ASSOCIATION WITH SUPER PLUMES, T51I-0278, 2018 Fall meeting , AGU , Washington , 10-14 Dec.
- Wallace, L.M, P. Barnes, D.M. Saffer, S.A. Henrys, D.H.N. Barker, D. Bassett, F.C. Tontini, Y. Kaneko, Y. Ito, K. Mochizuki, S.C. Webb, K. Clark, U.A. Cochran, N.J. Litchfield, C.A. Williams Jr, S.M. Ellis, B. Fry, E. Todd, R.E. Bell, K.E. Petronotis, I.A. Pecher, L. LeVay, and IODP Expedition 372 and 375 Scientists, 2018, The dynamics of shallow plate interface slip at the offshore Hikurangi subduction margin, New Zealand, T52C-03, 2018 Fall meeting , AGU , Washington , 10-14 Dec.
- Mochizuki, K., S.A. Henrys, R. Sutherland, D.A. Okaya, T. Yamada, M. Shinohara, T. Iwasaki, H. Sato, R. Arai, G. Fujie, Y. Yamamoto, Y. Nakatani, S. Kodaira, D.H.N. Barker, D. Bassett, H.J. Van Avendonk, and N.L. Bangs, 2018, Subduction structure of the Hikurangi Plateau, from travel-time inversion of OBS data, offshore of the Wellington region, the southern North Island, New Zealand, T51I-0289, 2018 Fall meeting , AGU , Washington , 10-14 Dec.
- Savage, M.K., H.J. Zal, K. Jacobs, S. Mroczek, J. Yancey, E. Todd, H.R. Shaddock, J.S. Nakai, K.M. Graham, Y. Iwasaki, A.F. Sheehan, K. Mochizuki, S.Y. Schwartz, and S.C. Webb, 2018, Seismic Anisotropy and Vp/Vs Changes Measured on Ocean Bottom Seismometers Suggest Fluid Pressure Changes Occur With Slow Slip off the Hikurangi Margin, New Zealand, T51I-0292, 2018 Fall meeting , AGU , Washington , 10-14 Dec.
- Kaneko, Y, Y. Ito, B. Chow, L. Wallace, C. Tape, E. D'Anastasio, R. Grapenthin, R. Hino, 2018, Extremely long duration of ground motion arising from sedimentary structures above slow slip areas of the Hikurangi subduction zone, T53C-05, 2018 Fall meeting , AGU , Washington , 10-14 Dec.
- Savage, M.K., H. Zal, K. Jacobs, S. Mroczek, K. Graham, J. Yancey, W. Wang, B. Fry, E. Todd, H. Shaddock, J. Nakai, Y. Iwasaki, A. Sheehan, K. Mochizuki, S. Schwartz, and L.M. Wallace, 2018, Seismic velocity and anisotropy in a slow slip region of the Hikurangi Margin, New Zealand from ocean bottom seismometers, SCG53-26 招待講演, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 幕張, 5月20日 - 24日

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

2017 年 11 月から 2018 年 2 月にかけて実施した、日・NZ・米・英国際共同大規模地震波構造調査について、引き続き解析を進める。特に、プレート境界からの反射強度の分布と、これまでに明らかにしてきた多様な地震活動の分布との比較を通し、地震発生メカニズムと構造との関係について検討を加える。

2018 年 10 月に設置した長期観測型海底地震計および海底圧力計について、1 年間の観測終了後にこれらの機器の回収を行う。また、観測を継続するため、あらたに海底地震計および海底圧力計の設置を行う。回収した機器によって取得された記録について、解析を始める。

これらの観測およびデータ解析は、プレート境界地震と海洋プレート内部の地震に関する地震発生場の解明とモデル化を目的とするものである。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

望月公廣・篠原雅尚・山田知朗・塩原肇・小原一成

他機関との共同研究の有無 : 有

伊藤喜宏 (京都大学防災研究所) 日野亮太・木戸元之 (東北大学災害科学国際研究所)

Stuart Henrys・Stephen Bannister・Bill Fry・Charles Williams (GNS Science, NZ) Phil Barnes (NIWA, NZ)

Laura Wallace (UTIG, USA)

Susan Schwartz (UCSC, USA)

Spahr Webb (LDEO, USA)

Anne Sheehan (University of Colorado at Boulder, USA)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5712

e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp

URL：

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：望月 公廣

所属：東京大学地震研究所 地震予知研究センター

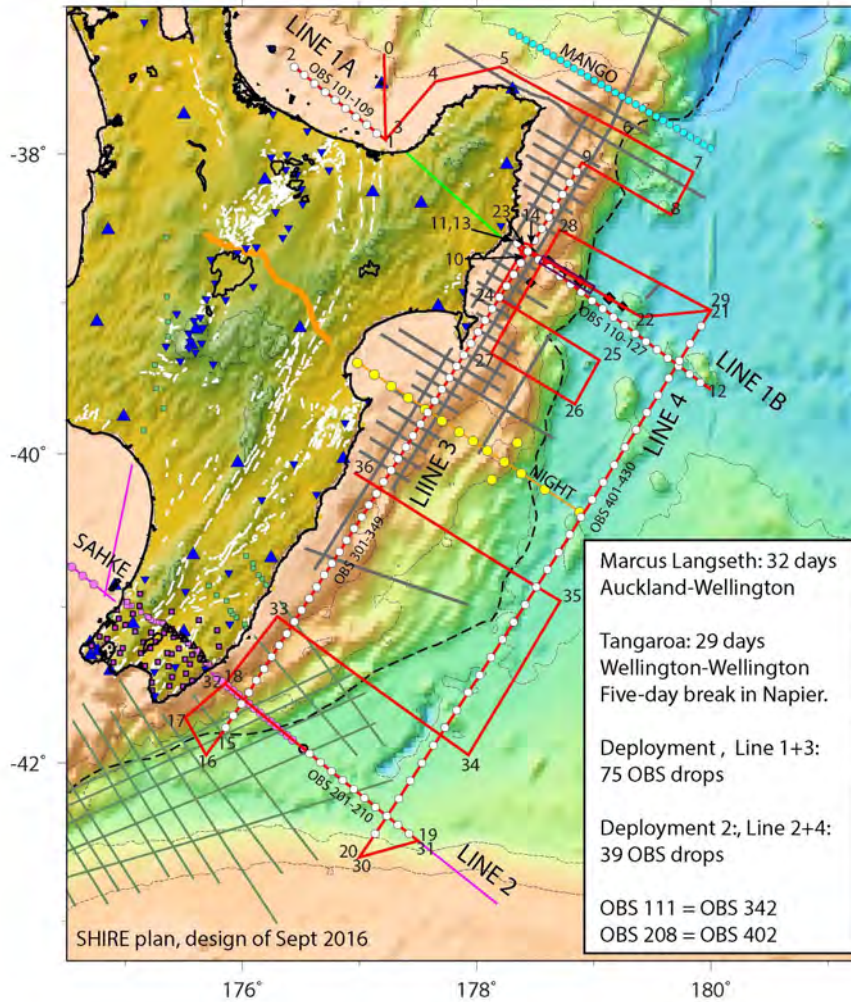


図1 日・NZ・米・英国際共同大規模地震波構造調査の測線
 北島沖合のヒクランギ沈み込み帯に沿った2測線、および北南端近くに位置する直交2測線について調査を行った。また、陸域にも観測網を設置している。

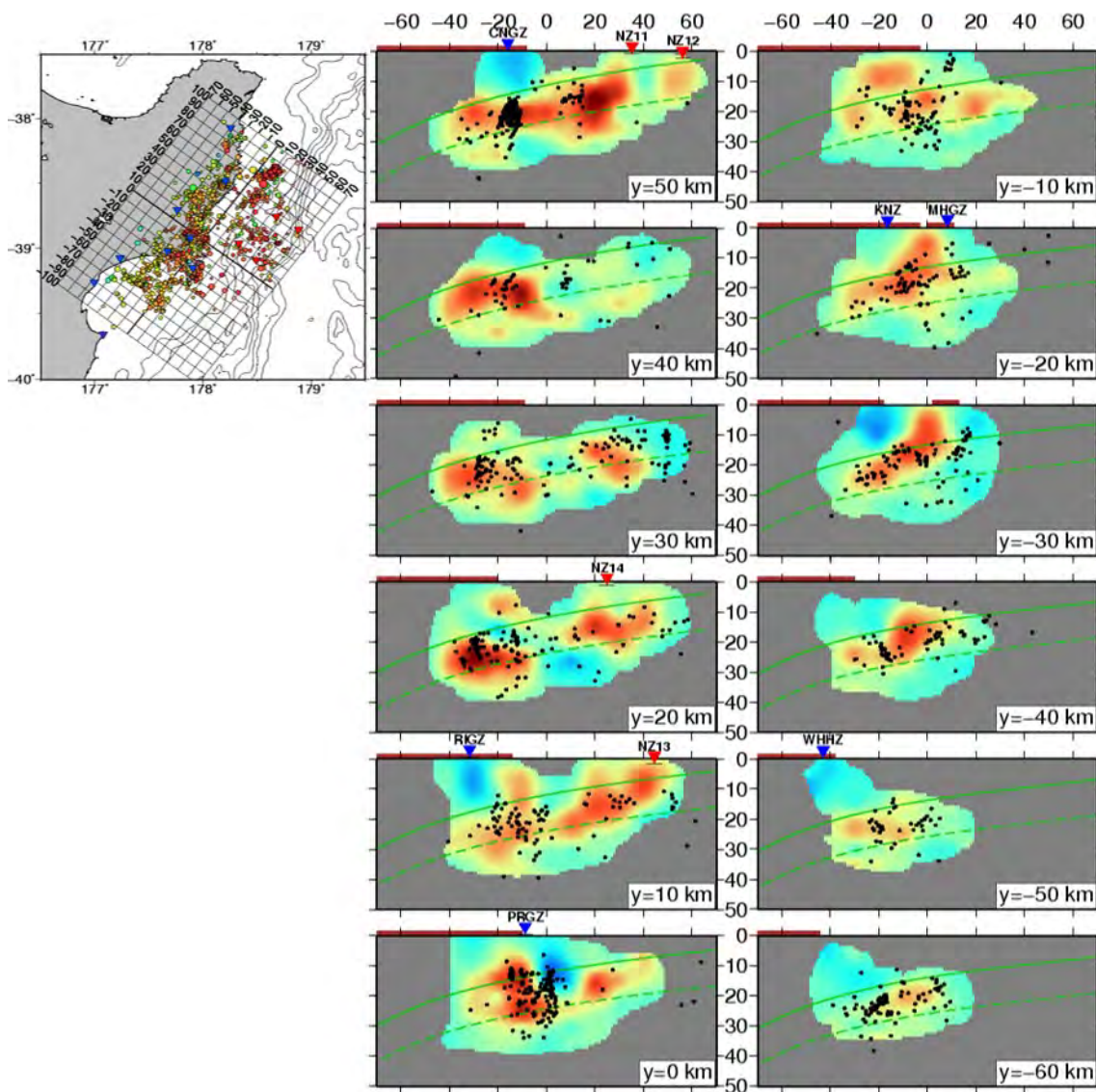


図2 北島北東沖合海陸境界周辺の3次元地震波速度構造

左図は地震活動の分布と右に示したトラフ軸に直交する構造の断面測線。右図にて、黒点が地震震源、赤い部分は V_p/V_s が高い場所。また、各セクションの上部に示され赤実線は、陸域の範囲を示す。海岸線に位置する V_p/V_s の高い領域の境界にて地震活動がなくなることがあきらかとなった。

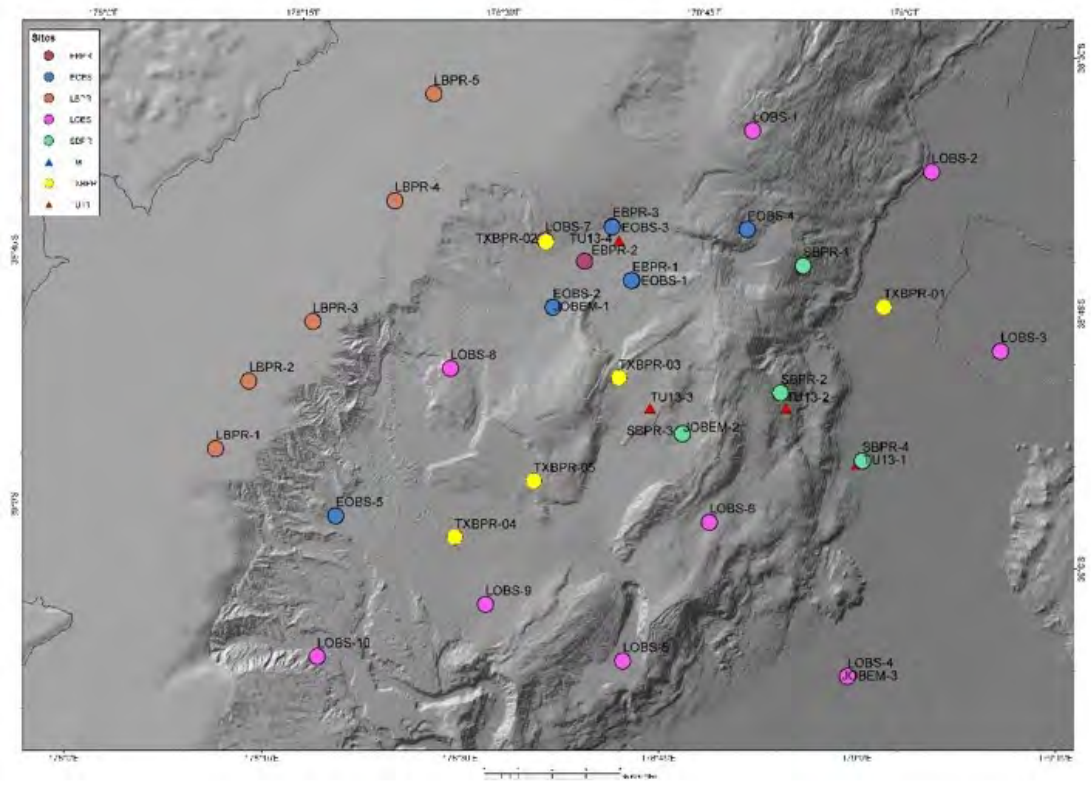


図3 日・NZ・米3か国共同によるHOBITSS観測網

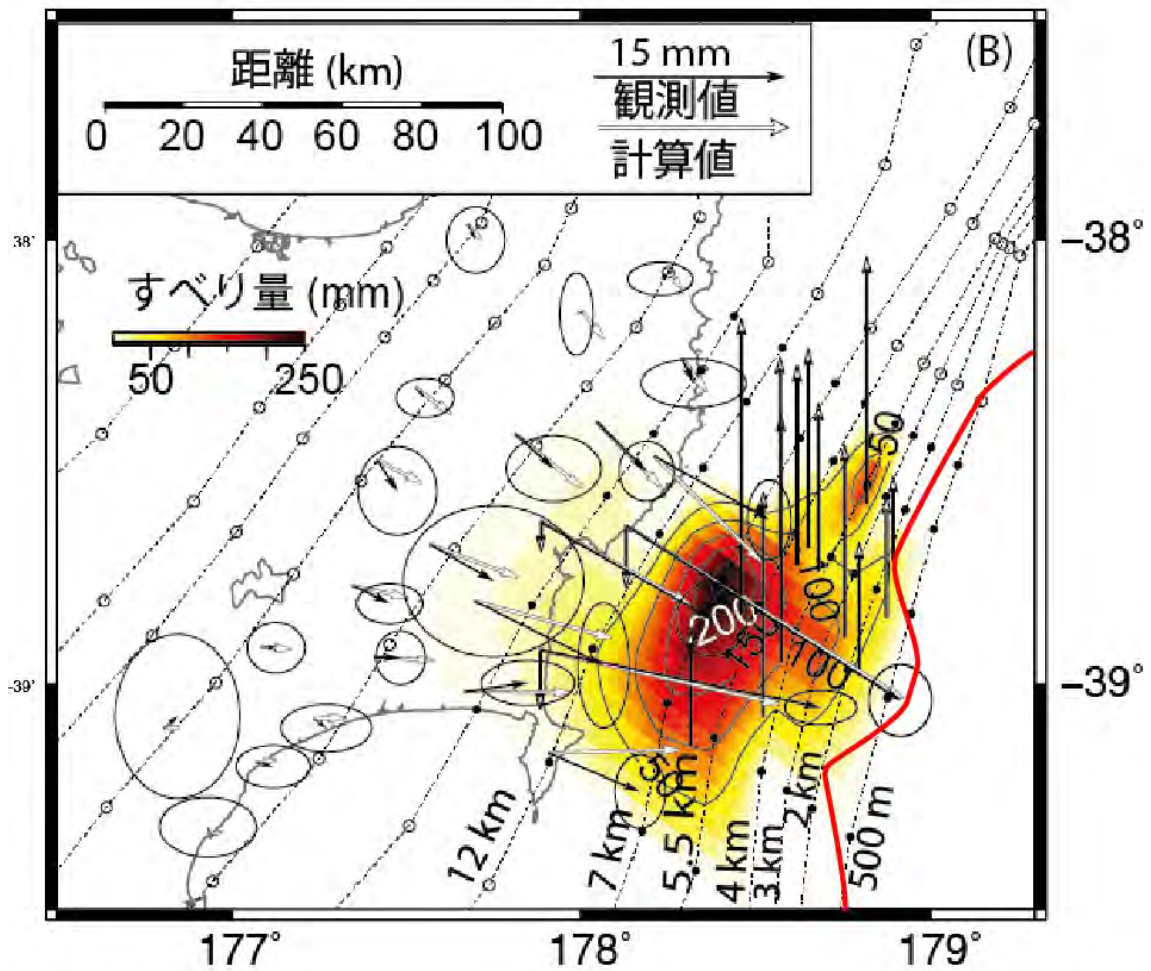


図 4

HOBITSS 観測網中、海底圧力計（海域縦矢印：上下変動）と陸域 GPS 観測網を用いて求めた、2014 年 9 月に観測網直下で発生したスロースリップの断層すべり量分布。赤線で示したヒクラングトラフ軸直近まで滑っていることが確認された。

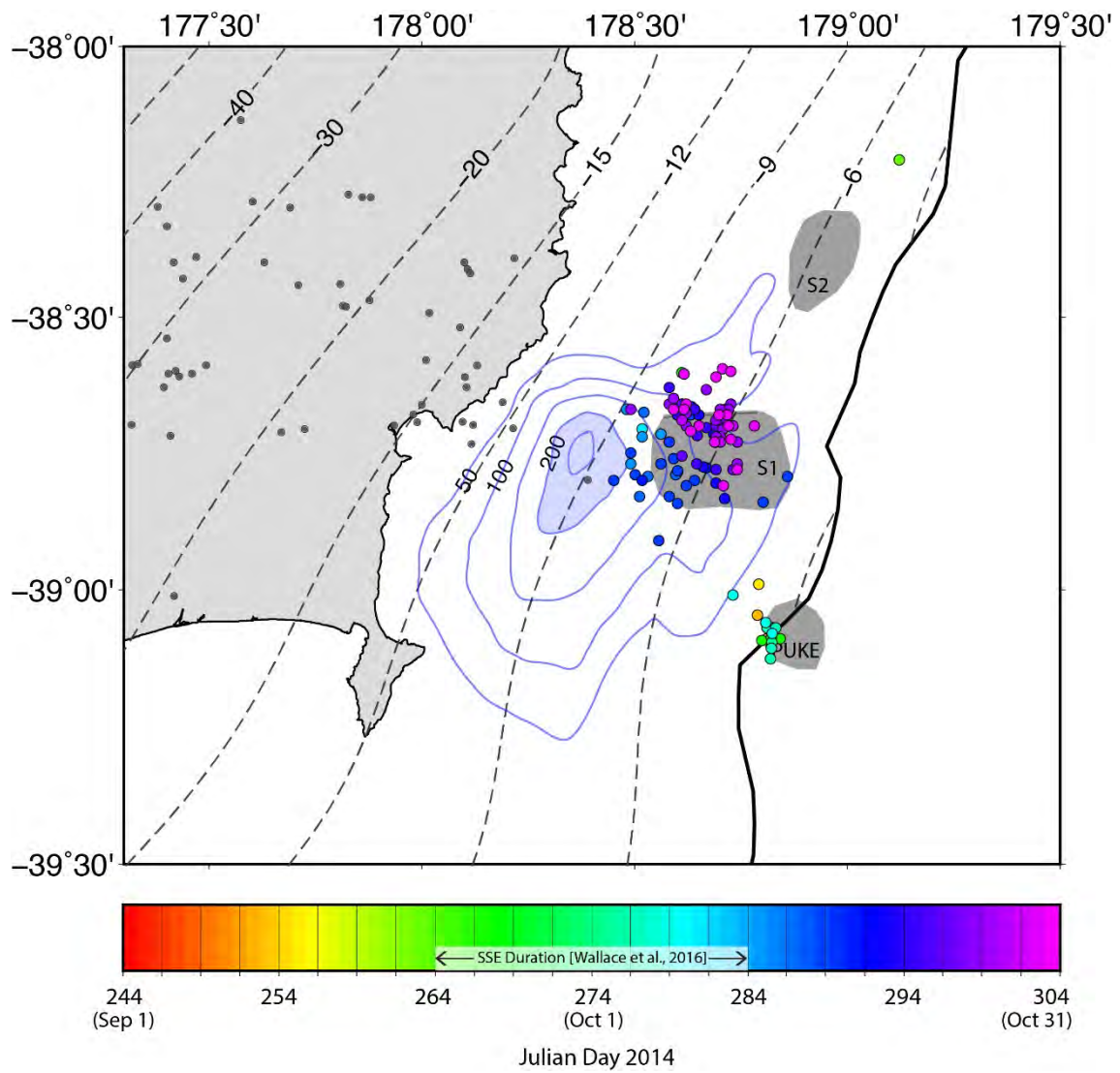


図5 スロースリップ発生直後から活発化した微動の分布
 海域の灰色領域は沈み込んだ海山を示す。沈み込んだ海山周辺域にのみに集中して、かつスロースリップ発生後～3週間にわたって微動活動が見られることが明らかとなった。

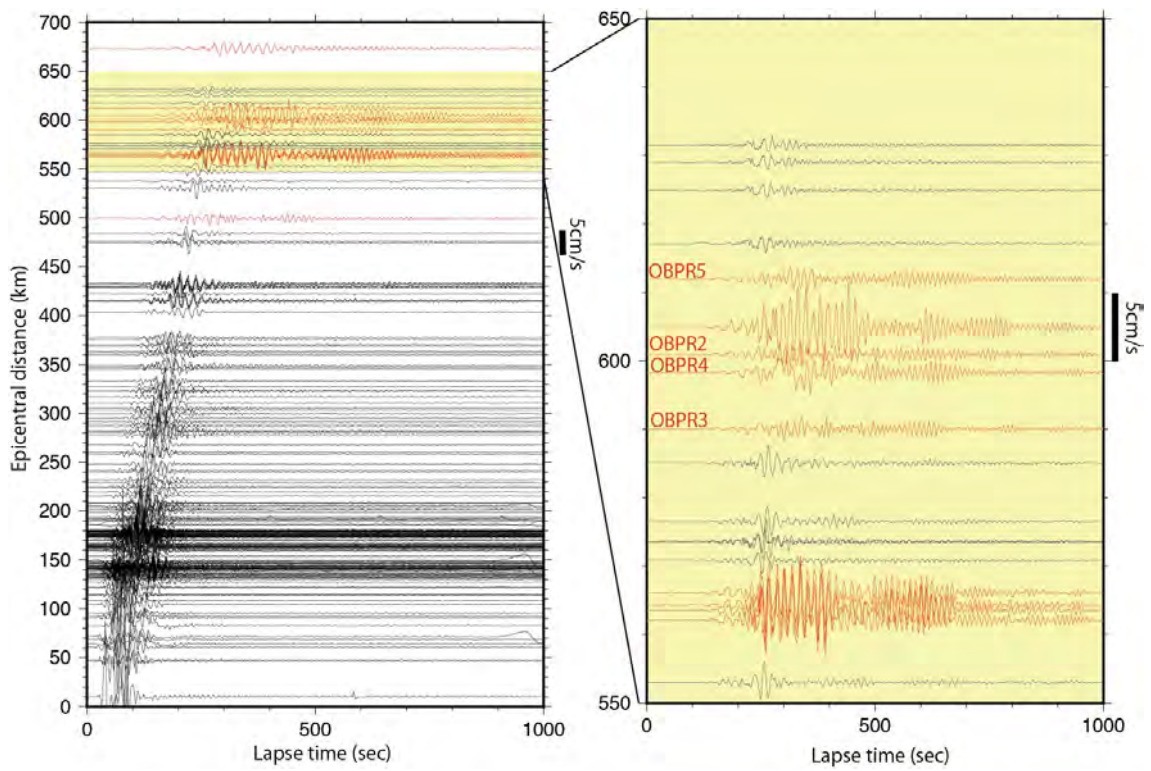


図6 陸域地震観測網（黒実線）と海底圧力計（赤実線）で記録された、地震観測波形の一例
 海底圧力計の記録は、海底下の堆積層を反映して、はるかに長い継続時間を持っていることが明らかとなった。

(1) 実施機関名：

東京工業大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

水蒸気爆発場の物理・化学状態の把握と火山流体の挙動

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

水蒸気爆発は、地下浅所に形成された火山ガス溜まりがガス圧に抗しきれなくなった時に発生するものであり、マグマの直接的な関与は必ずしも必要ではない。水蒸気爆発の準備領域では、熱水変質した難透水性の蓋と、その直下に蒸気の卓越した気液二相が共存する熱水流体溜りが存在することが明らかになりつつある。この熱水流体溜りの気相は噴気ガスとして、液相は温泉水や火口湖水として火山体から常時放出されている。熱水流体溜りを構成する変質岩石は、火山体を構成する岩石が噴気ガスや酸性熱水との反応によって生成し、その変質プロセスは物理的・化学的条件に大きく依存する。また、その形状は電磁気観測によってモニターできることから、水蒸気爆発の予測の高度化のためには、爆発場を形成する活動火口下浅部の物理・化学状態の変動を火山性流体の挙動とリンクさせて捉えることが不可欠である。本研究では、火山ガスや湖水・温泉水の地球化学的観測と地震・地殻変動観測による力学的状態や地磁気観測に火口湖の水温や水位の精密観測を加えて、熱的状态を総合的に解釈し、草津白根山での活動火口下浅部の物理・化学状態の変動を捉えることを目指す。本課題は、課題番号 1003「多項目観測に基づく火山熱水系の構造の時空間変化の把握と異常現象の検知(代表機関：北海道大学)」と関連しており、1003 で対象となる火山(十勝岳, 吾妻山, 阿蘇および口永良部島)についても、本課題 1602 と同様に地球化学的観測、地磁気観測及び熱観測等を実施する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本研究では、研究期間の 5 年間にわたり、草津白根山湯釜火口周辺に整備された活動火口観測システムによる微小地震、GPS 及び傾斜変動の連続観測および火山ガス、湖水・温泉水などの化学組成などの繰り返し観測を実施する

平成 26 年度においては、草津・湯釜火口湖の水温データを取得し、既存のボーリングコアの変質部分の二次生成鉱物組成について記載する。

平成 27 年度においては、草津・湯釜火口湖の水位データの分解能を向上させ、変質部分の化学組成分析を実施する。

平成 28 年度においては、三次元地下比抵抗構造解析を行い、活動火口周辺の詳細な三次元地下構造モデルを構築する。

平成 29 年度においては、空中赤外観測を実施して地表面放熱量を測定し、平成 24 年度からの増減を明らかにする。得られた地球化学・地球電磁気データから熱水系全体の物質・熱収支の推定を行う。

平成 30 年度には火山性流体の挙動と火山体浅部で発生する諸現象との関係性を解明する。十勝岳などでも空中赤外観測や噴煙画像解析・等を行い、各火山からの地表面放熱量を計測する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

1 . 平成 30 年度の成果報告

1 - 1 . 草津白根山 (湯釜付近) の観測

草津白根山 (湯釜付近) では、2018 年 4 月 21 日から再び地震活動活発化および膨張を示す地盤変動が始まり、山体深部の高温化による消磁も観測された。その後、地震活動は消長しつつ衰退傾向であったが、同年 9 月 28 日から再び地震活動及び地盤変動が観測された。これらの活動で観測された地殻変動が非等方的であることが、2014 年以降の活動とは異なる特徴である。特に 9 月 28 日からの活動活発化と時を同じくして、草津白根山の西方で地鳴りを伴う地震活動が始まった。同地域の地下深部にはマグマだまりが存在する可能性が GNSS 観測から示唆されているため、臨時地震観測点を設置した。既存観測網と併せて震源決定を行ったところ、4ヵ所の震源域を見出した。それぞれ狭い領域で集中発生しており、いずれも湯釜火口からは数 km ~ 10 km 程度離れていることが明らかとなった。地球化学的観測としては、湯釜北側噴気のガス組成と湯釜湖水の陰イオン濃度の繰り返し測定を行い、2017 年冬から 2018 年春にかけて、マグマからの火山性流体の供給が増加していることを明らかにした。

熱水系の貯留構造を精緻化するため、湯釜周辺の AMT/MT データをコンパイルし、地形を考慮した非構造化メッシュによって 3 次元比抵抗構造を再解析した。また、湯釜東 (KSE) および湯釜南 (KSS) のボーリングコアの変質鉱物の分析を行った。KSS のコア試料に含有される粘土鉱物はクリストバライトが主で、カオリン鉱物やスメクタイトを含む部分もある。地表下 40m 以浅で著しい酸性変質作用を受けており、最深部 (標高 1893m) はほぼ完全にタンパク石化しており、全体的に過去に著しい熱水変質をうけていることがわかった。一方、KSE のコア試料は全体的には変質の程度は低く、また原岩と考えられる溶岩が単に酸性条件下で変質しただけではなく、中性およびアルカリ性条件下での変質作用を受けていることがわかった。このことから、湯釜付近での熱水活動は湯釜の南方向に顕著に発達していることが推察される。この湯釜南斜面においては、土壌水銀フラックスの多点観測を行った。その結果、破碎帯に相当すると考えられる水銀高放出帯が初めて見出された。その先端は湯釜中心から 500m 程度離れており、国道 292 号線付近にまで達していることが分かった。

湯釜とその周辺から放出される物質・熱量を観測するため、夜間空中赤外線観測を実施した。その結果、2018 年 4 月においても、前年度までと同様に高い値を維持していることを明らかにした。湯釜湖面放熱率は、4 月および 10 月の地震活動活発化期に通常の 1.5 倍程度に高まったもの、約 2 か月程度で通常の値に戻り、2014 年のような持続的な湖底熱活動の高まりは進行していないことが分かった。

1 - 2 . 草津白根山 (本白根山) の観測

2018 年 1 月 23 日 10 時 02 分に本白根山鏡池北火口で 1500 年ぶりの水蒸気噴火が発生し、噴石により人的な被害が発生した。この噴火は顕著な前駆的活動を伴わない水蒸気噴火であった。本白根山を囲むように観測点を配置するため、本白根山の東 ~ 南方面の 3 箇所に地震観測点を設置した。これらの観測点はリアルタイムで地震波形データの伝送が可能であり、本白根火砕丘周辺における地震検知能力が従来よりも向上した。2018 年 1 月 23 日噴火前の地震発生頻度は月に数個程度で、地震のタイプは主として A 型地震であった。噴火後は、多数の B 型地震とハイブリッド型の地震が発生し、そ

の震央は本白根山北部の火口周辺浅部であった。

本白根噴火前の地震活動を再検討するため、Matched Filter 法による微小地震の検出を行った。その結果、通常のルーチン処理に比べ数倍～10 倍程度の地震 (B 型地震) を検出できた。ただし、噴火に先行するような明らかな変化は認められなかった。地震波干渉法による構造変化も検討したが、噴火発生前後で有意な変化は認められなかった。

本白根山噴火前後の地盤変動を解析した。白根山湯釜周辺に設置していた 3 点のボアホール型および 2 点の地上設置型傾斜計により、変動の詳細が捉えられた。噴火前の 9 時 59 分 58 秒から噴火発生に対応する 10 時 02 分 10 秒まで湯釜南方が隆起を示し、その後、反転した。主火口に対応する本白根山鏡池北火砕丘の直下に開口クラックを仮定すると、噴火直前の膨張体積 49 万[?](開口量は 0.38 m)、噴火後の収縮体積は 33 万[?]と推定された。噴煙質量収支から、クラック開口を担ったのは主として気相と考えられる。

2018 年 3 月 19 日に本白根火砕丘外側の東～北側斜面について、斜め赤外線画像を取得し顕著な地表面温度異常は認められなかったが、2018 年 5 月 5 日、5 月 11・12 日の現地における温度測定 (接触式温度計および赤外線カメラ) でも、本白根火山 3 つの新火口周辺に地熱異常は認められていない。

6 月 18 日に無人ヘリコプターを用いた空中地磁気測定を行なった。本白根山、逢ノ峰、草津白根山上空を対地高度 100m 測線間隔 100m でカバーし、総飛行距離は約 100km に及んだ。2013 年に国土交通省の実施した空中地磁気測定データとの差を取るることによって本白根山 2018 年噴火前後の変動を求めた。その結果、本白根山火口周辺に顕著な変動は認められなかったが、逢ノ峰の深部が消磁する広域的な傾向が見出され、2013 年以降、逢ノ峰の深部が高温化していると推定された。

火口近傍における噴出物に関する調査を 4 月から 5 月に行った。この調査では定面積法により計 100 点以上の堆積量データが得られ、噴出量は約 3.6 万トンと推定された。また、鏡池北火砕丘北面の 2 露頭において降灰産状調査を行ない、火山灰については XRD による鉱物種同定を行なった。放出岩塊の全岩化学組成分析によれば、岩塊の岩石学的特徴は鏡池北火砕丘のそれと一致した。火山灰に付着した水溶性成分の F, Cl, SO₄ の分析し、噴火口から近い万代鉱の熱水系と比較した結果、今回の噴火にはより高温のマグマ起源のガスが関与していることが示唆された。

マグマの関与を評価するため、火口から 2km 離れた殺生河原に位置するロープウェイ山麓駅舎に UV 分光計を設置し、新火口周辺上空における SO₂ の有無をリモートセンシングにより連続観測した。殺生河原での噴気ガス、および万代鉱源泉の化学組成を繰り返し観測した結果、1 月 23 日の噴火前後で顕著な変動が認められないことが分かった。

2. 計画期間中 (平成 26 年度～30 年度) の成果の概要

この 5 年間の間に、草津白根火山では、3 つの活動イベントがあった。本課題では、これらのイベントに対応した地球物理・地球化学観測を実施し、観測データとその解析結果を気象庁や関連する自治体に提供することによって、災害の軽減に貢献した。

初めの火山活動は、2014 年 3 月から 2015 年 10 月までの湯釜付近を中心とする地殻変動を伴う地震活動の活発化である。既存の 3 次元比抵抗モデルでは、湯釜の直下に、低比抵抗かつ不透水性を示す粘土鉱物による釣鐘状のキャップ構造が存在することが推定されていた。山体膨張の中心は、この釣鐘状のキャップ構造の内側頂部にあり、その内側で地震活動が活発化したと考えられる。高温の熱水がキャップ内部に侵入して、地表への温度異常として湯釜の水温の上昇が確認されたのは、膨張開始から 2 ヶ月後である。また地磁気観測による消磁が観測されたのも同じく 2 ヶ月後である。この活動に対応して湯釜湖水のフッ化物イオンおよび塩化物イオンの顕著な上昇が観測されている。これに対して、湯釜北側噴気帯の火山ガス成分の H₂S 濃度は 2013 年 11 月から 2014 年 5 月の間に急激に減少していた。同様の現象は 1982 年～1983 年の噴火に先立って観測されている。様々な現象が表面化した膨張開始から 2 ヶ月後には H₂S 濃度は上昇を始めており、湯釜直下への高温の火山性流体の流入による地震活動の活発化とほぼ同時にガス組成の変化が起きたものと考えられる。

第 2 の活動は、2018 年 1 月に本白根山鏡池北火砕丘で発生した約 1500 年ぶりの水蒸気噴火である。噴火開始の 2 分前から火山性微動が始まったことが観測されているが、それ以外に前駆現象は今ま

でのところ明確に捉えられていない。湯釜周辺の傾斜観測から、開口割れ目モデルで噴火をモデル化できた。この噴火で噴出した火山灰に付着した水溶性成分の F, Cl, SO₄ とそれらの量比は、この噴火が高温のマグマ起源のガスによるものであることを示している。噴火口周辺は地震計や傾斜計の稠密なネットの外側にあり、噴火の推移を監視するために、本白根山周辺に地震および地殻変動観測点を整備した。本白根山では、岩石学的な噴火履歴調査 2012 年から始まっており、同山が国内有数の活動的火山であることや、活動中心が今回噴出した鏡池北火山へと時間的に遷移していることが既にわかっていた。同山では広帯域 MT 観測も既に行なわれており、噴火地点の地下深部には流体たまりによると思われる低比抵抗層の存在が推定されている。さらに、多点地温測定により、同火山に帯状の地中温度異常が存在することも見出されていた。しかし、噴火発生が切迫しているとはならず、噴火の発生前に社会に対して有効な情報提供を行うまでには至らなかった。

第3の活動は、2019年4月および9月の地殻変動を伴う湯釜周辺の地震活動の高まりである。地球化学データについても、北側噴気のガス成分や、湯釜湖水の陰イオンのモニタリングによって、2017年冬からマグマの寄与が高まっていることが示された。特に9月の活動では、草津白根山の数 km 西側の地鳴りを伴う地震活動と時間的に同期していた。このように、草津白根山は全山的に活動が高まっている可能性があり、草津白根山のマグマ供給系について、より広域的なエリアから見直す必要が認識された。そのため、従来よりも広い領域に地震観測点を展開した。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
- Tsukamoto, K., K. Aizawa, K. Chiba, W. Kanda, M. Uyeshima, T. Koyama, M. Utsugi, K. Seki, T. Kishita, 2018, Three-dimensional resistivity structure of Iwo-yama Volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to shallow seismicity, surface uplift, and a small phreatic eruption, *Geophy. Res. Lett.*, 45, 12821-12828, doi:10.1029/2018GL080202.
- Noguchi, R., A. Hamada, A. I. Suzuki, K. Kurita, 2018, Experimental approach to rootless eruptions using kitchen materials, *Earth Planets Space*, 70:208, doi:10.1186/s40623-018-0974-6.
- Hashimoto, T., A. Terada, R. Tanaka, 2018, Volcanic smoke reduction in visible and thermal infrared imagery, *Earth Planets Space*, 70:109, doi:10.1186/s40623-018-0886-5.
- Shoji, D., R. Noguchi, S. Otsuki, H. Hino, 2018, Classification of volcanic ash particles using a convolutional neural network and probability, *Sci. Rep.*, 8, 8111, doi:10.1038/s41598-018-26200-2.
- Yoshimura, R., Y. Ogawa, Y. Yukutake, W. Kanda, S. Komori, H. Hase, T. Goto, R. Honda, M. Harada, T. Yamazaki, M. Kakmo, S. Kawasaki, T. Higa, T. Suzuki, Y. Yasuda, M. Tani, Y. Usui, 2018, Resistivity characterisation of Hakone volcano, Central Japan, by three-dimensional magnetotelluric inversion, *Earth Planets Space*, 70:66, doi:10.1186/s40623-018-0848-y.
- Terada, A., Y. Morita, T. Hashimoto, T. Mori, T. Ohba, M. Yahuchi, W. Kanda, 2018, Water sampling using a drone at Yugama crater lake, Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *Earth Planets Space*, 70:64, doi:10.1186/s40623-018-0835-3.
- Shinohara, H., N. Geshi, A. Yokoo, T. Ohkura, A. Terada, 2018, Salt shell fallout during the ash eruption at the Nakadake crater, Aso volcano, Japan: evidence of an underground hydrothermal system surrounding the erupting vent, *Earth Planets Space*, 70:46, doi:10.1186/s40623-018-0798-4.
- 寺田暁彦, 2018, 水蒸気噴火発生場としての草津白根火山, *地質学雑誌*, 124(4), 251-270

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

これまで実施してきた火口ごく近傍における多項目稠密観測により、微小地震や火山性微動、地殻変動、熱消磁などのソース位置と比抵抗構造との位置関係が明らかとなった。すなわち、火口の地下数 100 ~ 1000 m 付近に不透水性の粘土層によってシーリングされた浅部熱水貯留層が確かに存在することがわかった。2014 年に始まった湯釜付近の群発地震活動においては、この熱水貯留層における質量収支が崩れた結果、気液 2 層で構成される熱水の体積膨張、微小地震の群発、熱消磁、および火口湖

水や火山ガス組成の変化が進行したことが考えられる。検出された火山ガス成分変化は、熱水系へ供給されている深部流体の質的变化を示唆するものであった。その後、2018年1月23日に本白根山で水蒸気爆発が発生した。同火山でも比抵抗調査や地中温度観測を行っていたが、2014年以降の湯釜付近の活動活発化と本白根山との関係や、本白根山における噴火準備過程と地下構造との関係などの研究は、将来の検討課題とされていた。

これまでの研究と活動経緯から見て、従来までのように火口近傍観測に基づく浅部(地下数100m)だけを研究対象としていては、次期建議が目指す火山活動のモデル化には不十分と考えられる。今後は、浅部熱水系への流体供給源であるマグマだまりや、Brittle-Plastic境界(地表下2-3km付近)以深に貯留されている高温・高圧の熱水の挙動を観測から伺い知ることが、草津白根山の火山活動や噴火機構のモデル化を行うために必要である。

そこで次期計画では、マグマだまりから浅部熱水系へと至る熱水供給モデルの精緻化を目指す。すなわち、山体スケールで電磁気学的構造探査を含む地球物理学的、地球化学的、および地球熱学的観測を推進する。併せて、長野県側も含めたやや広域を対象とした温泉や火山ガスのサンプリングを行い、さらに既存データを収集する。以上により、地下数km程度の領域までの構造と流体輸送との関係を研究する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京工業大学 野上健治

東京工業大学 小川康雄

東京工業大学 神田 径

東京工業大学 寺田暁彦

他機関との共同研究の有無：無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京工業大学火山流体研究センター

電話：03-5734-2639

e-mail：oga@ksvo.titech.ac.jp

URL：http://www.ksvo.titech.ac.jp/

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：小川康雄

所属：東京工業大学火山流体研究センター

(1) 実施機関名：

東京工業大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

海底火山活動の評価手法開発に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

海底火山は、その周囲が大量の海水に囲まれていることから、大規模な熱水活動を伴うことが特徴であり、陸上の火山活動とは全く異なった様相を呈する。これらの火山で噴火が起これば、海上・航空交通に多大な影響を与えるだけでなく、場合によっては領土・領海、ひいては EEZ にまで影響が及ぶため、その監視観測や火山活動の評価は我が国の国益に関わる、きわめて重要なミッションであるが、それに資するべき試料の採取装置や分析方法には課題が多く残されている。

本研究課題は、海底火山活動の即時評価に資することを目的とし、危険を伴う海底火山の観測装置の開発に関する研究を行う。同時に、熱水と海水との反応による組成変化の実験を行い、薩摩硫黄島など、天然の熱水系で作成した観測装置を使用して観測を行う。更に、2011 年から大規模な海底火山活動が始まっているカナリア諸島エルイエロ島で繰り返し観測を行う。これ以外に予知計画期間中に海底火山噴火が発生した場合には、その観測も実施し、研究成果の一部とする。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年度においては、海底火山活動のときに熱水と海水との反応によって発生する変色海水の再現実験を行う。

平成 27 年度においては、海域火山での反応生成物の調査観測及び分析を行う。

平成 28 年度においては、海域火山での調査観測・分析を繰り返し、必要に応じて実験を行う。

平成 29 年度においては、海域火山での調査観測・分析を繰り返し、必要に応じて実験を行う。

平成 30 年度においては、成果のとりまとめを行う。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

本年度は、西之島および口永良部島において採取した変色海水の分析と、それらから推察される火山活動について検討した。

西之島

2015 年から 2017 年の間に 3 回、西之島周辺で採取した海水を分析し、その成分変動から火山活動の状況を推定した。西之島から離れた海域で火山活動の影響をうけていない海水(基準海水)も採取した。2015 年に採取した時点では中央火口丘で噴火が続き、溶岩を大量に流していたが、2016 年は噴

火活動が全くなく、極めて静穏な状況であった。2017年に採取した時点(1月29日)も火山活動に変化はなかったが、この3ヶ月後に再び噴火があり、海岸に達した大量の溶岩流によって島の地形が変化した。2015年には新島の全周すべての地点で基準海水よりもpHが格段に低く、この3年間では最も低い値となっている。2016年には基準海水のpHにほぼ等しくなっていたが、2017年になると再び海水のpHが低下していた。各成分の濃度変化も年ごとに変化があるが、F/Cl、Cl/SO₄モル比とpHの関係から、西之島から放出される熱水は、2015年、2016年は基準海水と比較して相対的にFとSO₄に富んでいた事を示しており、2015年には酸性熱水が大量に放出され、西之島周辺海域の広い範囲でpHの低下を招いたが、2016年になるとその量が減ったものと考えられる。2017年に採取した試料では基準海水と比較してClとFの割合が高く、高温の火山ガスの寄与があったが、その量は2015年のレベルには達していないと考えられる(図1)

口永良部島

口永良部島は近年活動が活発化している火山島で、2014年に34年ぶりに新岳で噴火が発生し、その後2015年、2018年、2019年と噴火を繰り返している。口永良部港内や古岳南西海岸で変色海水が常時発生している。海上保安庁の協力を得て、周辺海域で変色海水を2018年と2019年に採取した。また、火山活動の影響を受けていない海水(基準海水)も採取した。2018年の試料は基準海水のpHにほぼ等しくなっていたが、2019年になると明らかにpHが低下していた。F/Cl、Cl/SO₄モル比とpHの関係は、口永良部島沿岸から放出される熱水は、2019年は基準海水と比較して相対的にFとSO₄に富んでいた事を示している(図2)

本課題で実施した海底火山活動の評価手法に関する観測および実験的研究成果を以下の通り報告する。

1) 海水中のF濃度の精密分析法の開発

海底火山活動は大量の海水に囲まれていることから、大規模な酸性熱水活動を伴う事か?特徴て?ある。熱水中に含まれると考えられるFイオン濃度を精密に定量する方法が存在していなかったことから、高塩濃度の海水中に含まれる低濃度Fを精密に分析する方法を開発した。西之島および口永良部島において採取した変色海水中のF濃度を定量し、火山活動の評価を行った。

2) 変色海水中のFの挙動に関する実験的研究

この熱水と海水との反応によって生成する、酸性熱水中のFe、Al、Siの3成分か?水酸化物として共沈した非晶質物質の生成で、熱水中のAlはフッ化物イオンとフルオロ錯体を作るため、海水との反応過程において沈澱に取り込まれる可能性がある。沈澱生成実験を行い、溶液中のフッ化物イオン濃度変化について検討した。その結果、Al濃度が一定の場合、F濃度が高い場合でも沈澱率は10%程度にとどまることが明らかになった。また、Al濃度が高くなれば、Fの沈澱率は30%程度まで上昇するが、熱水中のF濃度も標準的の海水中の濃度よりも遥かに高いと考えられる。

3) 岩石?酸性化海水反応実験

海底火山活動にともなって放出される熱水は、大量に存在する海水にマグマから放出される火山ガスが溶解して酸性化した海水と岩石が反応して生成したと考えられる。岩石からのFe、Al、Siの溶脱の挙動を明らかにするために、岩石?酸性化海水反応実験を行った。その結果、岩石が塩酸や硫酸などの単純な酸性溶液と反応した場合は全く異なる、FeがAlやSiよりも遥かに溶脱しやすく、Feの割合が非常に高い熱水が生成することが明らかになった。この結果は、海底火山活動が極めて活発なときに発生する、赤褐色や黄褐色の変色海水をもたらす熱水の生成を裏付けるものである。

以上のことをまとめると、海底火山の活動評価の手法を検討した結果、変色海水のpH測定は迅速に行えること、マグマから放出された高温の火山ガス起源のF、Cl、SO₄の影響を直接的に反映していることから、有効であることがわかった。Fイオン濃度変化だけでは評価が困難であるが、大量に含まれるClやSO₄の濃度も変化することから、これらの陰イオンとのモル濃度比をとることで、高温の火山ガスの影響の変化を捉える事が出来るようになった。酸性化海水と岩石との反応過程についてはこれまでの常識を覆す発見であり、この反応過程を明らかにする事は海底火山の活動予測に非常に重要であり、時期計画で取り組む予定である。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

海域火山活動に伴う熱水活動の実験的研究と観測研究のなかで、本課題で新たに発見された酸性海水—
岩石反応過程の再現実験と海域火山の観測研究

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東京工業大学火山流体研究センター 野上健治
他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京工業大学火山流体研究センター

電話 : 0279-88-7715

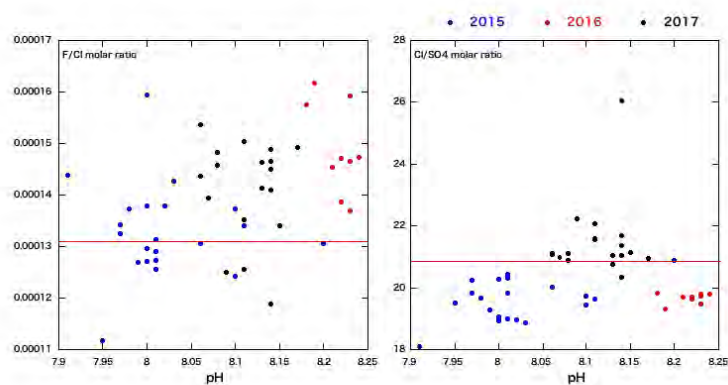
e-mail : knogami@ksvo.titech.ac.jp

URL :

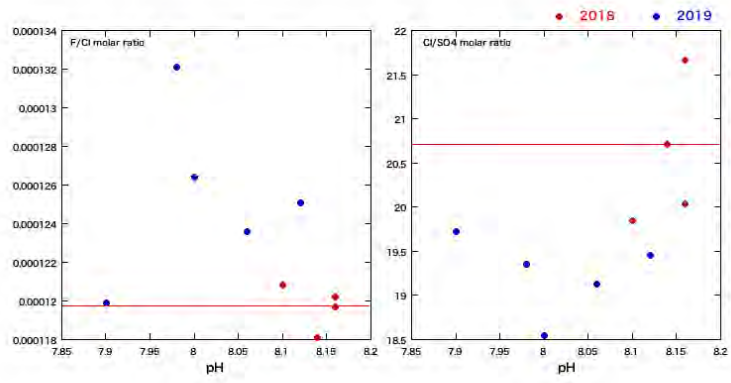
(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名 : 野上健治

所属 : 東京工業大学火山流体研究センター



西之島周辺海域における海水中の陰イオン成分比と pH



口永良部島沿岸における変色海水および海水中の陰イオン成分比と pH

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

古文書解読による南海トラフ巨大歴史地震像の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料，考古データ，地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ア. 史料の収集とデータベース化

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究では古文書を読み解き，南海トラフ巨大歴史地震の地震活動，地殻変動，津波，人的・建物的被害状況などを地震毎に面的に整理し，情報量が多く地球物理的データも存在する昭和の南海，東南海地震と比較することによって，南海トラフでの巨大地震を明らかにすることを目的とする．古文書の解釈は人によってかなり異なることから，すでに解読がなされているものも含めて再検討し，南海トラフで発生する巨大地震の特徴を明らかにする．まだ翻刻されていない史料もたくさんあることから南海トラフ巨大地震に関する古文書調査，翻刻も並行して行う．近年，防災・減災のために自治体等でも古文書史料の重要性が言われていることから，収集した情報について地域防災に役立てやすいようなフレンドリーなデータベース化を目指す．

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本研究では地震史料から得られる情報と昭和東南海、南海地震の被害状況などを直接比較し、過去の地震がどのような地震であったか、次に起きた場合各地でどのような災害を想定する必要があるかについて理学、工学、文学の研究者で協力しながら検討を行う。地震史料については過去に集められた史料に新たに史料を追加し、これらの史料から地震活動、地盤沈下、津波、人的被害、建物被害の情報を抽出し、地震毎に面的分布を求める。昭和の地震についてはこれまでに出版されている資料を整理、再調査を行い、これまで以上に詳細な被害分布、震度分布を求める。これと過去の地震の特徴を比較することにより、それぞれの地震の相違点を明確化し、それぞれの地震像を検討する。

[年度毎の実施事項]:

平成 26 年度: 史料収集および翻刻を行う。またすでに翻刻された史料の整理、郷土史(神社等の被害、碑など) の調査、神社明細帳の調査、古地図の収集を行う。

平成 27 年度: 引き続き調査、整理を行う。また古文書情報地点場所の推定を行う。

平成 28 年度: 引き続き調査、整理を行う。整理された史料から南海トラフ巨大地震の特徴を抽出する。翻刻史料データベースの検討を行う。

平成 29 年度: 引き続き調査、整理を行う。南海トラフ巨大地震および誘発地震の特徴を面的に検討する。翻刻史料データベースの構築を行う。

平成 30 年度: 引き続き調査、整理を行う。これまでに得られた史料から南海トラフ歴史巨大地震の地震像の推定を行う。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度) の成果の概要:

今年度は三重県、愛知県自治体史、郷土史などを中心とした史料調査を行い、南海トラフ地震を中心に地震情報の抽出を行い、抽出された情報について項目毎にまとめつつある。今後ここで収集した史料については e コミマップを用いて地図と結びつけた DB を構築する予定である。そのため、今年度は高知県、三重県、愛知県、静岡県の明治期の旧版地形図をデジタル化し、e コミマップから見るようにした。また e コミマップに歴史地震で活用できそうな国土数値情報を追加し、e コミマップの活用方法を検討した。新しい史料については公益社団法人全国市有物件災害共済会防災専門図書館所蔵のかわら版(東海道大阪辺大地震津波図、諸国大地震 嘉永七甲寅十一月新板、関東大地震図など) の翻刻を行った。名古屋大学所蔵の高木家文書の修復、翻刻についてはこれまでに引き続き行った。

データベースについては新たに大学共同利用機関法人人間文化研究機構が作製した明治期地名データを地図や地名から検索できるシステムの構築を行った。今後史料情報を地図と結びつけるときに大いに利用できる。またこれまで構築してきた歴史史料検索システムに改良を加え、「大日本地震史料」については国会図書館で公開になっている IIIF 化された各コマの画像に直接検索結果にリンクすることで「大日本地震史料」に載っている史料を見ることができるようにした。

本計画の 5 年間はこれまでに出版されている史料の検索システムの構築、文献リスト検索システムの構築、明治期地名検索システムの構築などの歴史地震研究の環境整備を主に行ってきた。これらのシステムは WEB 上ですべて公開されている。また地方史や郷土史の歴史地震に関する項目の収集、神社明細帳を使った宝永、安政地震の比較、徳川林政史研究所、蓬左文庫、岐阜歴史博物館や各地の図書館が所蔵する新しい史料の調査、翻刻、名古屋大学所蔵の高木家文書の修復、翻刻などを行ってきた。計画のうち、調査やデータベースの構築についてはほぼ計画通りに進んだが、整理に時間がかかり、これまでに得られた史料から南海トラフ歴史巨大地震の地震像の推定については漠然としたものになってしまった。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):

平井敬, 名古屋大学減災連携研究センター古文書勉強会の活動報告 防災専門図書館所蔵災害関係かわら版の活用, 第 2 回関西歴史災害研究懇談会, 2018.

平井敬, 殖産興業の民間先駆者 田中長嶺が見た濃尾地震, 日本地震学会 2018 年度秋季大会講演予

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

本計画で作製した様々なデータベースおよび検索システムをさらにバージョンアップし，より使いやすいシステムを構築するとともに新しい史料の収集，翻刻を続けていく．また次期計画では南海トラフ歴史巨大地震の地震像の推定に向けて，これまでの収集した南海トラフ巨大地震および誘発地震についての史料を整理するとともに e-コミマップを用いて地図と結びつけ，史料の可視化を試みる．地点の特定のため現地調査や資料調査なども行う．H31 年度はとりあえず高知県，三重県を例に可視化の方法について検討する．

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

山中佳子，平井敬（名古屋大学大学院環境学研究科）

石川寛（名古屋大学文学部）

武村雅之，都築充雄，浦谷裕明（名古屋大学減災連携研究センター）

他機関との共同研究の有無：無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター

電話：052-789-3046

e-mail：sanchu@seis.nagoya-u.ac.jp

URL：http://www.seis.nagoya-u.ac.jp

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：山中佳子

所属：名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地表地震断層および活断層の地表形状・変位量データにもとづく直下型大地震の規模・頻度予測手法の高度化 - LiDAR 等の高解像度 DEM を用いた検討

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料，考古データ，地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本課題は、活断層の平均変位速度分布と地震時のすべり量分布を比較し、地震発生繰り返しのばらつきを評価して、固有地震のみではなく、実態に即した複雑性を有する断層発生モデルを検討する。中越地震などのようなひとまわり小さな地震活動や、断層トレースが並走する場合の断層挙動、あるいは複数の断層の連動・非連動など、従来の固有地震説で説明できない複雑性を考慮した活動モデルの構築が必要である。そのためには航空レーザー測量 (LiDAR) 等の最新の地形計測技術を用いた詳細な変位地形分布調査と、課題検証のための戦略的なトレンチ調査が必要である。なお、LiDAR のデータ整備が全国的に進み、活断層研究に利用できる環境が整っている。

活断層による地震発生予測の高度化を実現することで、内陸地震の地震発生機構の物理モデル確立に必要な活動間隔および規模のゆらぎに関する基礎データを提供する。また、防災・減災にとって内陸地震が引き起こす災害誘因の高精度予測は想定外災害をなくすことに貢献するほか、歴史地震が人々の暮らしに与えた影響についても視野にいれることで災害研究として歴史地震の全体像解明に貢献しうる。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年度～28 年度は航空写真判読との比較などから LiDAR データを用いた実体視判読手法の評価をおこないながら、地表地震断層が現れたことがある根尾谷断層を中心に重点的に調査する。具体的には地震断層の詳細地震断層地図の作成、高密度変位量分布図の作成、および活断層の累積変位量分布の解明をまずおこなう。特に平成 27～28 年度は二回前の地震時の活動トレースと変位量分布の解

明を目的とし、トレース毎の活動履歴が解明できるような戦略的なトレンチ掘削調査、ボーリング調査を実施する。

平成 29 年度以降は、根尾谷断層で補完的調査をする一方で、歴史地震を発生させた活断層や前回の地震時の変位量が見積もりやすい活断層を中心に、活断層の累積変位量分布および地震時の変位量分布の解明を目的とする戦略的なトレンチ掘削調査、ボーリング調査を実施する。その間に地表地震断層が出現した場合はその断層調査も実施し、活断層から発生する地震のゆらぎと変位地形の特徴にせまり、活断層地形のタイプわけを目指す。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

地震災害軽減のためには、将来発生する地震の場所と規模、頻度など (以下、「地震像」) と自然現象がもたらす被害の「災害像」を予測する必要がある、そのためには「活断層」「地表地震断層」「地震像」「災害像」4 者の相互関係を解明することが求められる。活断層が一般に千年程度以上の長い活動間隔を有することを考えれば、1: 変動地形学的手法によって数千年 ~ 数万年の時間スケールでの調査によって活断層の位置形状を明らかにする、2: 過去の「地震像」を復元して活動繰り返しパターンを明らかにする、3: 活断層が実際に動いて出現した地表地震断層を精査してその位置形状と「地震像」の関係を検証する、4: 地震像と災害像の相互関係を明らかにすることが不可欠であるのは明らかで、その際には、5: 近年充実しつつある高解像度 DEM の活用とそのデータ取得手法の改良も重要である。本課題はこれらを解明するために過去に地表地震断層が出現した断層帯で調査を行うことを目的としていた。この間、熊本地震や神城断層地震が発生したことで、4 者 (「活断層」「地表地震断層」「地震像」「災害像」) の相互関係を検証する貴重な機会を得ることが出来た。調査の結果、これらの断層における多様な地震像の存在が明確になってきたので、平成 30 年度はこれらの地震や断層の調査を継続しながら、断層運動における断層末端部の挙動の解明や高解像度 DEM データの活用手法確立とデータ取得の高度化の試みを行った。

1) 今期は、LiDAR や SAR 等の高解像度 DEM を用いた変動地形および地震断層の解析を目指した。開始前にはデータ取得が困難だとも言われたが、この 5 年間の情報整備はめざましく、それを先取りした研究が実現した。その結果、これまで未確認の長波長変形や、断層末端の微地形が新たに見出され、そのテクトニクスにおける意義が考察された。

2) この間に 2014 年神城断層地震や 2016 年熊本地震があり、直後にオールジャパン体制で地震断層調査を行い、その全貌を速報した。また、従来の活断層評価の問題点 (セグメンテーションおよび一回り小さな地震) をいち早く指摘して改良提案も行った。

3) LiDAR の差分解析手法を検討し、地震断層認定を高精度化させるとともに、地表変形の「波長問題」(短波長変位と長波長変位とが食い違うこと) に気づき、変動地形学的な長期評価手法の改良という視点で検討を開始した。

4) 神城断層地震と熊本地震において、地震断層と被害集中の関係を明らかにし、本グループが問題提起した強震動評価における地下浅部の断層破壊の影響は、強震動研究者にもある程度受け入れられ、強震動計算手法の高度化の機運を生んだ。

1. DEM データ活用手法確立に関する一連の調査

平成 30 年度の成果

(1) ドローン空撮画像から作成した超細密 DSM にもとづく断層変位地形の検討 特に最新活動に伴う変位量の解明 (愛媛大・広島大ほか)

人口集中域でも使用可能な軽量 UAV による空撮画像から SfM-MVS 解析によって地形モデルを作成し、その精度検証を昨年に引き続き行った。対象地域は畑野断層と伊予断層で河成段丘の段丘崖が右横ずれしている地点である。本研究では EMLID 社製 REACH6 台 (うち 1 台は基準点) を用いることで精度の良い GCP 取得を行った。その結果、解像度 2.3? の DSM を作成することに成功し、精度の高い地形計測を面的に行えることができた。

(2) 高解像度 DEM に基づいて認定された長野県大町市街地の推定活断層 (法政大・広島大)

人工構造物が密集する地域は長波長や低崖の変動地形は空中写真による認定がされにくかったが DEM を用いた地形解析によって、新たに認定できるようになってきた。糸魚川 - 静岡構造線断層帯北部、大町市街地付近の活断層分布について、国土地理院によって公開されている 5 m メッシュ DEM (LiDAR 計測による) を用いて検討を行った。その結果、市街地の中央通り沿いに、長さ約 1 km の長波長の推定活断層 (東側隆起の地形異常) が認定された。

5 か年の成果

(1) 地表地震断層出現時などに有効な迅速な地形測量手法の確立 (愛媛大・広島大ほか)

神城断層地震で出現した地表地震断層調査で、日本で初めてドローンを用いた地形計測が行われた。この手法は熊本地震でも引き継がれ、地上踏査と合わせた地表地震断層出現時の調査の片翼を担っている。この際、精度の良いデータ取得に向けて、GCP の取得の問題や系統的な空撮手法の課題といったことが顕在化し、その後のデータ取得手法の改善へ向けた研究によって、数センチ精度のデータ取得が可能になり、地表地震断層にとどまらず過去に出現した地表地震断層の計測や再検討にも有効であることが示された。

(2) 詳細 DEM を用いた地表変位量の計測 (首都大・東北大・名古屋大ほか)

神城断層地震や熊本地震の前後の DEM データの差分から地震時の変位量を面的に取得することに成功した。神城地震ではその変位量が小さいため単純な差分でよかったが、熊本地震のように変位量が大きくな場合は地震前後の同一地点を認識する必要があり、画像マッチングの技術を駆使して確立されつつある。この手法は SAR などと比較してデータ取得から分析までに時間が必要で速報性はないものの、3 次元的な詳細な変位量を空間的に取得できるだけでなく、断層の極近傍ではなく長波長の変形も捉えることが出来るため、断層面上の地震時の変位量分布と変動地形の関係を検討できる点がユニークであり有効であることが示された。

(3) 詳細 DEM を用いた地形判読と平均変位速度の算定 (千葉大・広島大など)

DEM を加工して実体視視可能なデータセットを作成し地形判読を行うことで、今まで気が付けなかった長波長な変形や森林下の断層地形のほか、小さな変位基準が検出可能となり、断層の分布のみならず、長期的な変位速度の算定が可能となった。しかし、DEM を実体視画像に加工する際に生じる見かけ上の凹凸が判読の精度を落としている。この問題を解決するための検討を実施した。

2. 地表地震断層を活用した過去の地震像の解明に関する調査

平成 30 年度の成果

(1) 神城断層地震

2014 年神城断層地震は白馬村北城 ~ 神城の約 9km に渡って断続的に地表地震断層が出現し、その上下変位量は最大で約 1m に達したが、推定されていた固有地震より一回り小さな地震であった。

1) 糸魚川 - 静岡構造線活断層帯神城断層中北部における断層活動 (信州大・岡山大・地震研・法政大・鶴岡高専・名古屋大など)

2014 年地震のような規模の地震と固有地震との関係を明らかにするため、過去の地震像と比較検討を試みてきた。その結果、神城断層には複数の地震像が存在することが明らかとなり、本年度は 2014 年の神城断層地震で活動しなかった神城断層南部においてトレンチ掘削調査を行った。その結果、青木湖南部で地震後の再検討で発見された横ずれ断層のトレースで、約 4700 年前以降少なくとも三回の地震イベントが確認され、また木崎湖海ノ口地区でも、あらたに発見された横ずれ断層のトレースにおいて古地震イベントが解読された。より詳細な活動履歴を明らかにするための年代測定が実施されている。

2) 神城断層地震における地震時変位量 (首都大、名古屋大ほか)

神城断層地震前後の DEM データの差分から地震時の変位量を面的に取得した結果、地震断層が明瞭でない北方延長においても断層活動があったこと、および、地表地震断層では一部を除いて明瞭ではない横ずれ変位も広域的に生じていたことが明らかになった。また、地表踏査では変位量が小さいとされた震源域中央部の値が長波長成分の変位を加味すると大きくなることが明らかになった。とくに

測線長を 1km とした場合、中央部の変位量は、地震断層が明瞭な南部や北部と大きくは異なることが判明した。

(2) 熊本地震

平成 28 年 4 月 14 日に M6.5 の地震が、またその約 28 時間後の 4 月 16 日には M7.3 の地震が発生し、明瞭な地表地震断層が、主に既知の活断層である布田川 - 日奈久断層の北東部に沿って長さ約 31km にわたって出現した。

1) 布田川断層・出ノ口断層における活動履歴(広島大・首都大・名古屋大など)

昨年度までの調査で、堂園から河陽までの区間で同様な活動履歴を有する可能性が指摘されていた。本年度はそれをより明らかにするために、履歴調査の間隔があく堂園から河陽までの区間で地形調査を実施し、高遊原溶岩台地を切る谷が横ずれしていることから小森地区でトレンチ調査を行った。その結果、熊本地震を含めて 1 万年前以降 4 回以上の地震イベントが確認され、7300 年前以降 3 回のイベントを見出した。出ノ口断層のトレンチ調査も首都大を中心に小森牧野で実施され、布田川断層と同時に活動する可能性が指摘された。

2) 布田川断層・日奈久断層・出ノ口断層の変位量分布(首都大など)

DEM を用いた変位量の検討によって、布田川で地震時の変位量が最大 2.5 m、河川の屈曲から累積した右横ずれ変位が 70 - 170 m (布田川)、200 - 280m (大峰東部の河川) であることを計測した。高遊原溶岩・大峰火砕丘といった変位基準からこれらの横ずれ変位速度は 0.8 - 5.7mm/yr となる。また上下変位量も高遊原溶岩の落差から類推すると 0.8 - 1.1mm/yr となり、従来の右横ずれ成分 0.2mm/yr、上下変位速度 0.1-0.3 mm/yr と比較すると過小評価していたことが指摘された。

5 か年の成果

(1) 熊本地震地表地震断層

熊本地震の地表地震断層の変位量分布と強震動データ等を用いた震源破壊過程モデルに基づくすべり量分布は地域的に概ね対応することが明らかになった。しかし、活断層と地表地震断層の対応関係は複雑で、新たに確認された益城に伸びる活断層の存在や、正断層である出ノ口断層と横ずれ断層である布田川断層が同時に活動するといった活断層間の関連性、一部区間は前震と本震の両方で地震することなど、従来の長期評価とは異なる現象が確認された。また、布田川断層と日奈久断層の区分に問題があることも判明した。断層の走向き分岐により機械的に分けるのではなく、変位地形の連続性に注目することで改善されることを提案した。

(2) 神城断層地震地表地震断層

神城断層地震の地表地震断層の地上踏査を用いた変位量分布調査と強震動データを用いた震源破壊過程モデルに基づくすべり量分布は震源中部においてやや齟齬が生じた。ところが、DEM を用いた地震前後の差分を用いると 1km 程度の測線ととらえることのできる長波長の変位量は震源破壊過程モデルに基づくすべり量分布と近い値を示し、地表地震断層の断層近傍の短波長の変位量分布のみでは深度 1km 以深の断層運動の解明には不十分である場合があることが明らかとなった。また、断層トレースの活動履歴調査によって、神城断層には複数の地震像が併存していることが明らかとなり、それらは地震像ごとに変位が生ずる断層が異なる可能性が指摘された。

(3) その他(濃尾断層帯・富士川断層帯・庄内平野断層帯・阿寺断層など)

濃尾断層帯では、詳細な DEM データを用いて森林下の詳細な地形が判読され、濃尾断層帯末端部で山体重力変形に伴う地形が大量に発見され断層末端部の特徴的な地形の存在が明らかとなった。また、黒津断層の調査から濃尾断層帯の活断層間に生ずる複数の連動シナリオの存在が指摘された。富士川断層帯では、海陸の DEM を用いることでフィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界に値する活断層の存在が指摘された。庄内平野東縁断層帯や石狩平野東縁断層の西側の支笏火砕流面などでは今まで検知できなかった長波長の変位地形の検出が報告され、今後はそれらの検証が課題となった。

3 . 地表地震断層と被害の特性を検証した調査

熊本地震では益城町の被害集中域内に、地表地震断層が出現し、改めて変動地形調査を行った結果、これまで確認されていなかった活断層の再活動であることがわかった。これ神城断層地震でも、断層

末端部の堀之内において、著しい被害集中が生じた。当初はいずれも表層地質の効果であるとする見解が出されたが、我々の研究グループは被害集中の地理的分布から地下浅部の断層変位が影響している可能性を指摘した。

平成 30 年度の成果

昨年度の益城町で地震断層から 120m 以内に全壊家屋の 95%が集中し、大破以上の家屋被害率は地震断層に近づくほど増加し、50m で 30%、20m では 35%に達すること、また地震断層直上においては、ほぼ半数の家が全壊または大破し、大破以上の家屋に注目すると建物の新旧にはよらないことなどを明らかにした。こうした特徴は表層地盤の影響では説明できない。しかし、地表地震断層近傍でも被害が軽微な場所も見られ、その違いは断層浅部での雁行や屈曲といった断層の形状に起因する可能性を指摘した。こうした地表における強震動の再現に向け、強震動グループとの新たな共同研究もスタートした。

5 か年の成果

従来の強震動レシビにおいて、強震動は地下約 3km 以深の断層運動のみが影響するとされてきたが、神城断層地震と熊本地震における事例から、より浅部の断層運動が影響することが経験的に明らかになった。地表地震と被害（および強震動）分布の関係は複雑であることが判明し、その関係を再現できる新たな強震動モデルを作成するという課題が整理された。

注：石村大輔の所属が東北大から首都大に変更になっています。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Fukushima, Y., Toda, S., Miura, S., Ishimura, D., Fukuda, J., Demachi, T., Tachibana, K., 2018, Extremely early recurrence of intraplate fault rupture following the Tohoku-Oki earthquake. *Nature Geoscience*, 11, 777-781, DOI: 10.1038/s41561-018-0201-x

Kaneda, H. and T. Chiba, 2019, Stereopaired morphometric protection index red relief image maps (Stereo MPI-RRIMs): effective visualization of high-resolution digital elevation models for interpreting and mapping small tectonic geomorphic features, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 109, 2370-2391.

金田平太郎・柏原真太郎・小村慶太郎, 2018, 山上湿地掘削のための可搬型パーカッションコアリングシステム, 月刊地球, 号外 69, 112-120.

岡田篤正・金田平太郎・杉戸信彦・中田 高, 2018, 1:25,000 活断層図 濃尾断層帯とその周辺「大野」「冠山」「能郷白山」「谷汲」「美濃」「岐阜」解説書. 国土地理院技術資, D1-No.912, 29 p.

丹羽雄一, 遠田晋次, 石村大輔・森 良樹, 小俣雅志, 2018, 神城断層の極浅部における断層形状と平均上下変位速度: 長野県北安曇郡白馬村神城地区におけるボーリング調査. 活断層研究, 49, 1-16.

杉戸信彦・後藤秀昭, 2018, 長野県大町市街地の活断層分布に関する一検討, 活断層研究, 49, 17-22.

Sugito, N., H. Sawa, K. Taniguchi, Y. Sato, M. Watanabe, and Y. Suzuki, 2019, Evolution of Riedel-shear pop-up structures during cumulative strike-slip faulting: A case study in the Misayama-Godo area, Fujimi Town, central Japan, *Geomorphology*, 327, 446-455.

Ishimura, D., Toda, S., Mukoyama, S., Homma, S., Yamaguchi, K., Takahashi, T. (in press) Three-dimensional surface displacement and surface ruptures associated with the 2014 Mw6.2 Nagano earthquake using differential LiDAR. *Bulletin of the Seismological Society of America*.

鈴木康弘, 2018, 日本活断層学会設立から 10 年: 200~2017, 活断層研究, 49, 57-62

鈴木康弘・渡辺満久・中田 高, 2018, 2016 年熊本地震における益城町中心市街地内の地震断層 - 変動地形学的意義と建物被害への影響. 活断層研究, 48, 13-34

堤 浩之・遠田晋次・後藤秀昭・熊原康博・石村大輔・高橋直也・谷口 薫・小俣雅志・郡谷順英・五味雅宏・浅野公之・岩田知考, 2018, 熊本県益城町寺中における 2016 年熊本地震断層のトレンチ調査. 活断層研究, 49, 31-39.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

従来の活断層評価などで想定されてきた内陸地震の震源断層モデルを、地表地震断層の調査や地震波解析等から推定される震源過程の特徴に基づき検証するため、熊本地震や神城断層地震の調査を継続する。

また、兵庫県南部地震時に確認された破壊伝播による大振幅地震波や、熊本地震時に観測された地震断層近傍における特異な長周期パルス波など、建物被害に直結する震源域での強震動特性を理解することで、将来発生する強震動の評価手法の高度化に向けた研究を防災科技研と共同で、熊本地震の被害の検討を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

鈴木康弘 (名古屋大学)

他機関との共同研究の有無 : 有

広島大学 (後藤秀昭・熊原康博・中田 高)・岡山大学 (松多信尚)・信州大学 (廣内大助)・千葉大学 (金田平太郎)・東大地震研 (石山達也)・東北大学 (石村大輔・岡田真介)・山口大学 (楮原京子)・東洋大学 (渡辺満久)・法政大学 (杉戸信彦)・国立鶴岡工業高等専門学校 (澤 祥) 等

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 名古屋大学減災連携研究センター

電話 : 052-789-3468

e-mail :

URL : <http://www.gensai.nagoya-u.ac.jp/>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 鈴木康弘

所属 : 名古屋大学減災連携研究センター

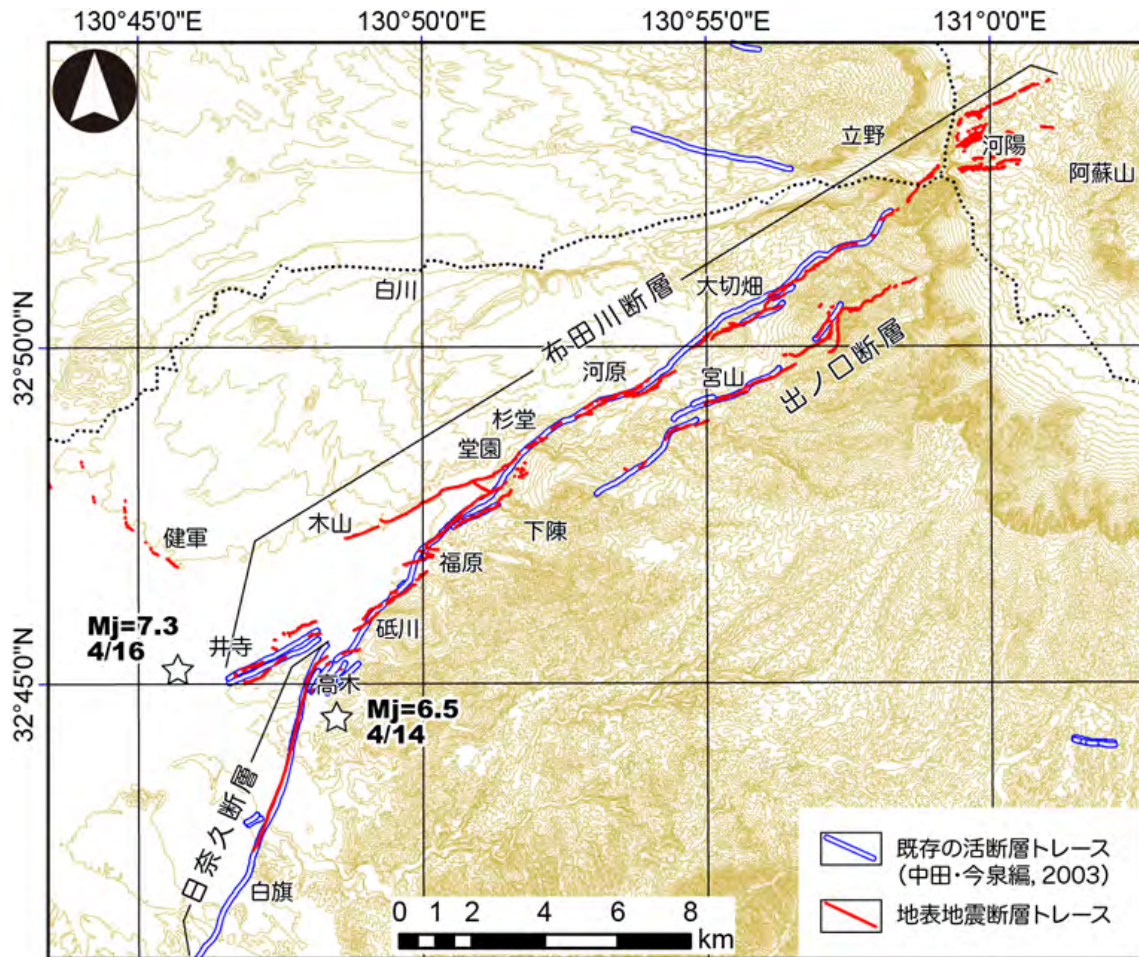


図1 熊本地震の地表地震断層トレースと既存の活断層トレース

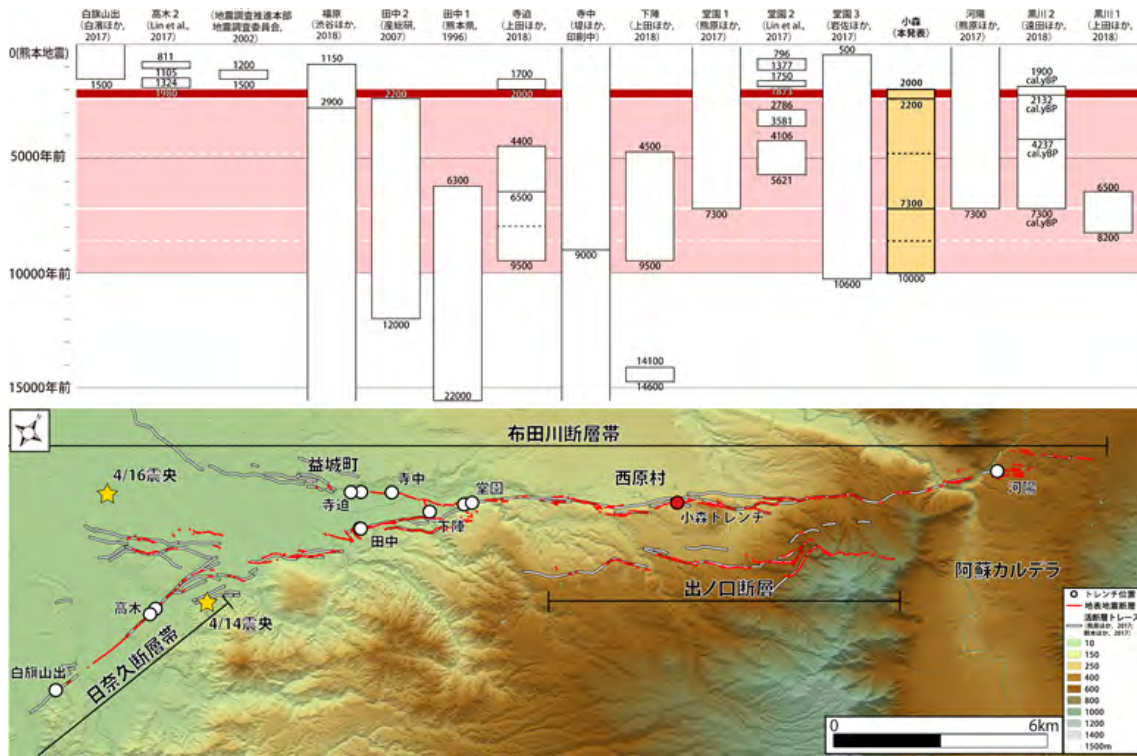


図2 布田川断層帯の活動履歴

- (1) 実施機関名：
名古屋大学
- (2) 研究課題(または観測項目)名：
南海トラフ域における巨大地震断層域の力学・変形特性の把握
- (3) 最も関連の深い建議の項目：
2. 地震・火山噴火の予測のための研究
(2) モニタリングによる地震活動予測
ア. プレート境界滑りの時空間発展
- (4) その他関連する建議の項目：
1. 地震・火山現象の解明のための研究
(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明
イ. プレート境界巨大地震
(3) 地震・火山噴火の発生場の解明
ア. プレート境界地震
(4) 地震現象のモデル化
イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築
2. 地震・火山噴火の予測のための研究
(1) 地震発生長期評価手法の高度化
(2) モニタリングによる地震活動予測
イ. 地殻ひずみ・応力の変動
3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究
(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
4. 研究を推進するための体制の整備
(2) 研究基盤の開発・整備
ア. 観測基盤の整備
ウ. 観測・解析技術の開発
(3) 関連研究分野との連携の強化
- (5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：
南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標 :

南海トラフ域を対象として、地震発生予測の基本となる海溝型巨大地震の理解のために本質的に不可欠な (A) プレート境界面の力学的特性の時空間変化の把握と (B) 海底地形やプレート形状も含めた巨大地震断層形状の把握をめざす。そのため、測地学的データなどからプレート間固着の時空間分布を把握し、そのプレート間固着の多様な振る舞いからプレート境界面上の力学特性を明らかにする。陸上のデータのみでなく、GPS/音響方式による海底地殻変動モニタリングを熊野灘沖の南海トラフ軸近傍の 2 ヶ所で実施し、プレート境界浅部におけるプレート間固着の現状把握をめざす。またこれまでに設置した ACROSS 震源の運転を継続するとともに、プレート境界面で変換された地震波や、トラップされた波の解析によるアプローチを試み、合わせてプレート境界の力学特性の時間変化検出をめざす。

格段に詳細な海底地形データ等を新たに取得し、従来の地形データとあわせて、海底活断層の位置形状や活動履歴等を詳しく調べる。歴史地震の発生源や将来の巨大地震の断層モデルに関し、地震学的・測地学的視点とは異なる変動地形学的観点からの方法論を提示するとともに、巨大地震断層面と海底地形との関連を検討する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要 :

本研究課題では (A) プレート境界面の力学的特性の時空間変化の把握と、(B) 巨大地震の断層形状の把握のために以下の 6 項目の研究を実施する :

1) 過去の測地データの活用

平成 26 年度 ~ 平成 28 年度において過去の測地学的データの整理・解析を行い、長期 ~ 中期のプレート固着の時空間分布を推定する。その後モデルの高度化とプレート境界の力学特性を推定する。

2) 陸上での GPS 観測

平成 26 年度 ~ 平成 29 年度で GPS 観測点の整備及びデータ蓄積を行い、GEONET と統合解析を行い、プレート間カップリングや地殻の歪みを推定する。

3) 海底地殻変動観測

期間中継続して、南海トラフ沿いに既に設置している観測点での測定を 1 回 / 年以上の頻度で行い、地殻変動データを蓄積するとともに解析を逐次行う。以前の測定期間も通した観測を総合することにより、高精度の変位速度ベクトルを獲得する。

4) ACROSS による解析

期間を通して ACROSS 震源の連続運転を継続する。並行して過去のデータも統合しながら、震源と周辺の観測点間での各種到達波の走時や反射波振幅の時間変化を監視する。課題の期間中に項目 2) 等などからスロースリップが検出された場合には、それに伴う力学特性の変化の推定を試みる。

5) プレート境界面トラップ波・変換波解析

平成 26 年度にデータ整理を行い、その後の年度で解析を行う。特にプレート境界面の形状や境界面周囲の力学的特性を明らかにすることを目指す。

6) プレート境界周辺海底活断層の変動地形学的・古地震学的調査

平成 26 年度 ~ 平成 27 年度は調査地を選定し、海底地形詳細調査を実施する。

平成 28 年度以降は、それまでの成果に基づき、海底地形詳細調査と堆積物調査等を実施するとともに、変動地形学的・古地震学的データの解析を行う。

期間終盤では、上記の項目の成果を統合しプレート境界の力学特性を把握するとともに、南海トラフ沿いにおける統一モデルの構築を目指す。また海底活断層が引き起こす津波のシミュレーションなどもおこなう。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

H30 年度は、主に 1), 3), 4), 6) について研究を実施した。

1) 南海トラフ沿いのフィリピン海プレートの沈み込みに関わる有限要素モデルを作成し、定常的沈み込みプロセスについて検討した。海洋プレートの沈み込みプロセスを理解するために、西南日本を中心に東西 1460km × 南北 1400km × 深さ 700km の領域の有限要素モデルの構築を行った。この有限要素モデルは、地形、フィリピン海プレートの上面の形状、モホ面の形状を考慮して作成され、最小要素はプレート境界付近で 2km、最大要素はモデルの外周付近で 120km である(図 1)。有限要素モデルの境界条件は、有限要素モデルの外周部および、下面はローラー条件を課し、フィリピン海プレートの上面と下面に相対変位速度を与え、運動学的に PHS プレートの定常的な沈み込みを再現した。なお、フィリピン海プレートの沈み込み速度は MORVEL[DeMets et al. (2010)] のオイラーベクトルを採用し、フィリピン海プレートの上面と下面のすべての小断層に適用した。

フィリピン海プレートの定常的な沈み込みに伴って生じる、プレート境界面上の最大せん断応力について、弾性体と粘弾性体にて比較した(図 2)。上部マントルの粘弾性体の緩和によって、せん断応力が緩和されているのがわかる。また、プレート形状が震源域に与える影響は限定的であると予想され、さらに、長期スロースリップが発生している領域にも直接的な影響は小さいことが示された。またプレート境界面上の法線応力についても弾性体と粘弾性体で比較した(図 3)。この比較から、ニュートン流体を仮定する Maxwell 粘弾性体を仮定する、マントル物質では、せん断応力のみでの緩和が発生し、プレート境界面に生じる法線応力は緩和されないことが理解できる。プレートの形状によって生じる法線応力は海溝型地震では解消されないため、蓄積される。地殻と海洋プレートが接する境界面に生じるせん断応力とプレート境界全体に生じる法線応力により定常的な上下変動が生じ、大まかな地形を形成する。この結果は、Fukahata and Matsu 'ura (2016) と調和的であった。

海洋プレート内の最大せん断応力とプレート内地震について調べた(図 4)。伊予灘の周辺地域はプレート内地震が周辺地域に比べ多く発生しており、本研究で得られた結果と整合的であり、海洋プレート内の応力場も再現できていると考えられる。

これらの結果から、プレートの形状により生成された法線応力はプレートの沈み込み帯の基本的な応力場を形成し、自らの法線応力によりプレートは曲がりだすと止まらない状況を作り出している。しかし、一旦曲がり始めると、プレートの浮力によるフィードバックがかかり、プレートは平らに戻ろうとする力が働くと考えられる。これらのバランスにより現在のフィリピン海プレートの形状の一部が生成されている可能性がある。これらのプロセスは、沈み込み帯における絶対応力場を理解するには必要であると考えられる。

(3) 熊野灘に設置している海底地殻変動観測点のうち 2 ヶ所で計 3 日間の観測を行った。また、黒潮流域における解析手法の改善のため、水平一定勾配層が存在する場合の音響測距信号の走時を定式化して、これをもとに解析時の最適なパラメータを設定する手法を構築した。以上の成果に基づき、熊野灘での変位速度場を明らかにした。

また、駿河?南海トラフ沿いの海上保安庁(Yokota et al., 2016)および名古屋大学(Yasuda et al., 2017)による海底地殻変動観測結果、および国土地理院 GEONET の観測結果をもとに、プレート間のすべり欠損分布の推定を行った。名古屋大学による海溝軸沿いの観測結果が加わったことによって、海溝軸沿いでもすべり欠損の大きい領域があることがより直接的に明らかになった。また、伊豆マイクロプレートをモデル化するか否かによって、南海トラフ東部のすべり欠損速度が著しく異なることが明らかになった。このことは、南海トラフ巨大地震の震源域におけるひずみ蓄積過程の把握には伊豆マイクロプレートの運動を正しくモデル化することが不可欠であることを意味しており、この領域での地殻変動観測の実施、ならびに伊豆マイクロプレートの境界の位置を明らかにすることが重要である。

(4) 静岡県森町に設置されているアクロス震源からの信号を捉えた周辺にある 13 か所の Hi-net 観測点の過去 10 年間のデータを解析し、2011 年東北地方太平洋沖地震時の地震波速度減少以外は定常的に地震波速度が増加していることを確認し(図 7) 論文として発表した。定常的な地震波速度の増加は、我々の知る限り世界で初めて測定されたものである。定常的な地震波速度の増加は、岩盤中のクラックが徐々に閉じることによる合成の増加を表しており、地下水の化学成分の沈殿による割れ目の閉塞を表していると推測できる。増加量は、東北地方太平洋沖地震による減少を凌駕しており、何ら

かのイベントにより減少することが予想される。

また、プレートからの反射波等の振幅の時間変化を捉えるための解析手法を開発した。従来から用いられてきた envelope を用いる方法では、S/N比の小さい信号については、ノイズ振幅により信号の振幅が過大評価されるという欠点があった。この欠点を克服し、誤差推定とともに振幅を調べる方法を開発した。この方法では位相変化（走時変化）も同時推定が可能となる。この手法を岐阜県土岐市の震源と 22km 離れた Hi-net 串原との間の伝達関数に適応したものを図 8 に示す。

(6) 安乗口海底谷付近の海底活断層に関し（図 9）、平成 28・29 年度に取得した計 8 本のコアのうち CORE 03 について、高知大学海洋コア総合研究センター（担当：岩井雅夫教授）にて有孔虫分析を実施し、その後放射性炭素年代測定（株式会社加速器分析研究所に依頼）を行った。その結果、CORE 03 の深度 0.81 m に認められる不整合面の形成時期が約 1 万年前と推定された。海底谷中に発達する比高約 10 m の断層変位地形は、この不整合面が形成されて以降に形成された可能性があり、その場合、対象とした海底活断層は約 1 万年前以降、1 回あるいは複数回の活動によって上下方向に約 10 m 変位したと見積られる。海溝軸と比べて陸域に近く、発生した津波はわずかな時間で沿岸に到達したと推定される。

平成 26～30 年の 5 年間では、詳細な海底地形データを得た範囲においては海底活断層の位置形状が詳しく把握され、かつ安乗口海底谷付近の海底活断層に関しては試料の取得と分析によって活動履歴が具体的に推定されている。このように、変動地形的・古地震学的手法を用いた調査が、歴史地震の発生源の解明、さらには将来の巨大地震の断層モデルの構築において有効であることが示された。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

岩瀬裕斗・伊藤武男、Investigation of tectonic stress implication in southwest Japan using three-dimensional finite element model、JpGU Meeting、SSS09-P12、2018 岩瀬裕斗・伊藤武男、海洋プレートの定常的な沈み込みに起因する西南日本の長期的な上下変動、日本測地学会第 130 回講演会、P23、2018 Kimura, H., T. Ito, and K. Tadokoro, Internal Strain Rate in Southwest Japan estimated by Block Motion Model based on Onshore and Seafloor Geodetic Observations, AGU Fall Meeting, Washington, D.C., 2018. 木村 洋・伊藤武男・田所敬一・篠島僚平、ブロック運動モデルに基づく伊豆半島周辺のテクトニクスの考察、日本測地学会第 130 回講演会、高知、2018 年 10 月。木村 洋・田所敬一・伊藤武男、陸上および海底地殻変動観測データに基づくブロック運動モデルから推定される南海トラフ沿いのプレート間カップリング分布、地球惑星科学連合大会、幕張、2018 年 5 月。Tsuji S, Yamaoka K, Ikuta R, Kunitomo T, Watanabe T, Yoshida Y, Katsumata A (2018) Secular and coseismic changes in S-wave velocity detecting using ACROSS in the Tokai region, EPS, doi.org/10.1186/s40623-018-0917-2 杉戸信彦・岩井雅夫・若木仁美・松井浩紀・鈴木康弘、2018、安乗口海底谷における南海トラフ周辺海底活断層の変動地形的・古地震学的調査、日本地質学会第 125 年学術大会（つくば特別大会）講演要旨、R8-P-7、茨城、12 月 2 日。

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

山岡耕春・鷺谷威・渡辺俊樹・鈴木康弘・田所敬一・橋本千尋・伊藤武男（7 名）

他機関との共同研究の有無：有

静岡大学（生田領野）、気象研究所（勝間田明男、他 1）、岡山大学（松多信尚、他 1）広島大学（後藤秀昭、他 1）、高知大学（徳山英一）、東洋大学（渡辺満久）、法政大学（杉戸信彦）、東海大学（坂本泉）、海上保安庁（泉 紀明）、国立環境研究所（石黒聡士）

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター

電話：052-789-3046

e-mail：

URL：<http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：山岡 耕春

所属：名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター

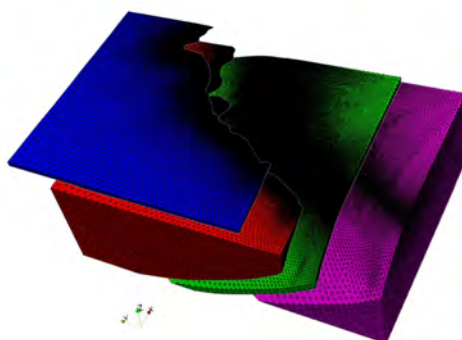
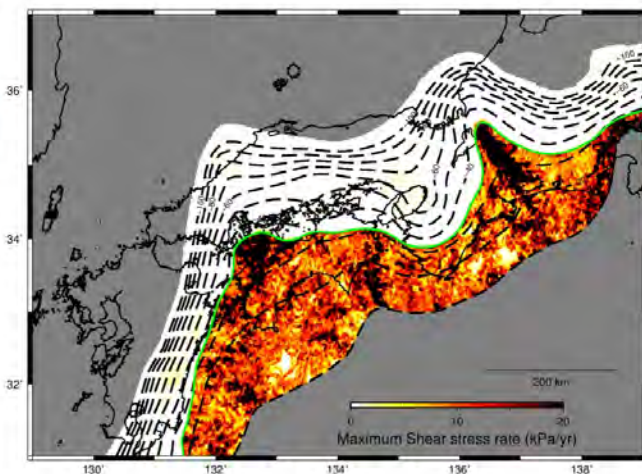
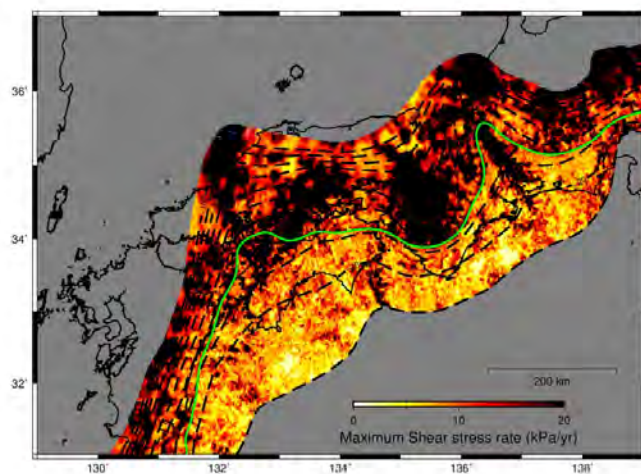


図1 有限要素モデル



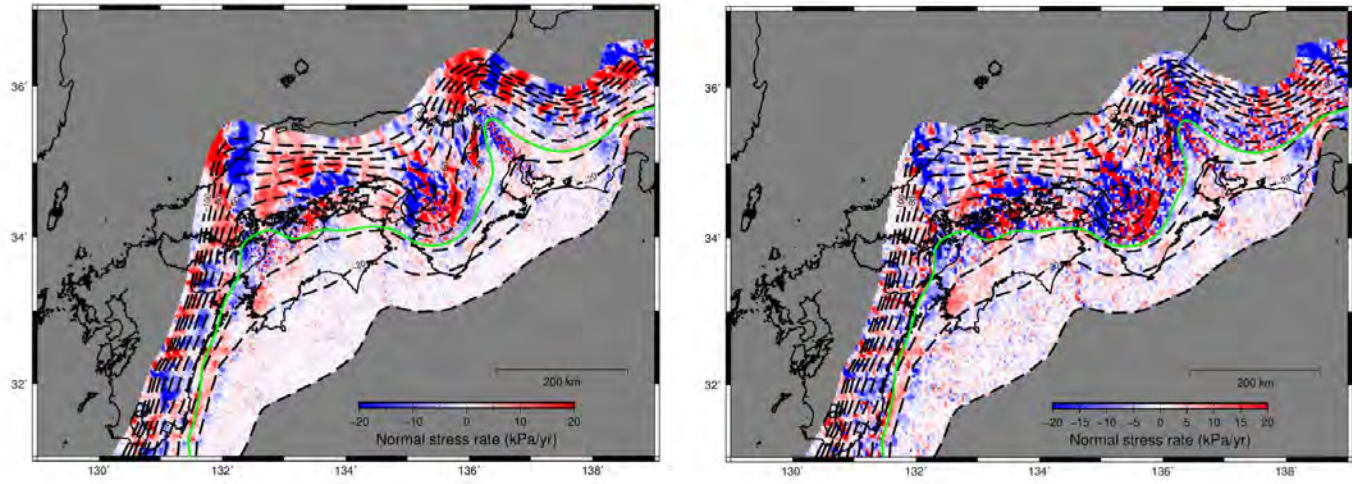


図3：プレート境界面上の法線応力

赤：海洋プレートが上盤側を押し力。青：上盤側が海洋プレートを押し力。左図：上部マントルを弾性体と仮定。
 右図：上部マントルを粘弾性体と仮定。

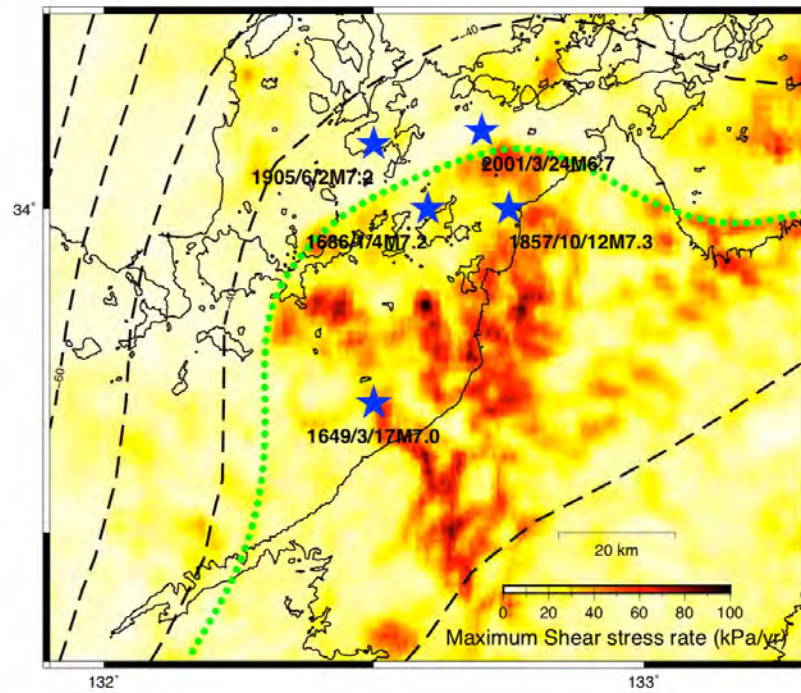


図4：海洋プレート境界面直下のプレート内部における最大せん断応力
過去のプレート内地震。緑の破線：モホ面と海洋プレートとの接点

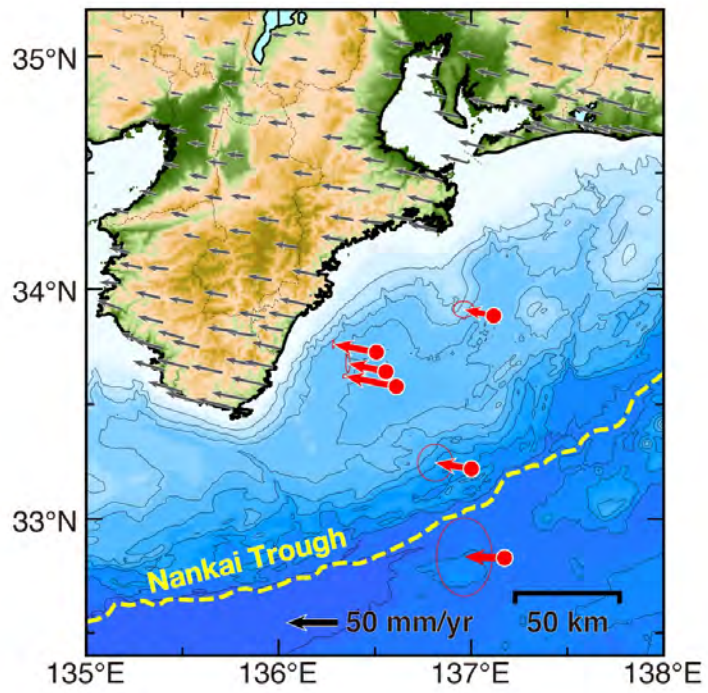


図 5 : 2018 年までの観測にもとづく熊野灘沖における海底地殻変動観測結果

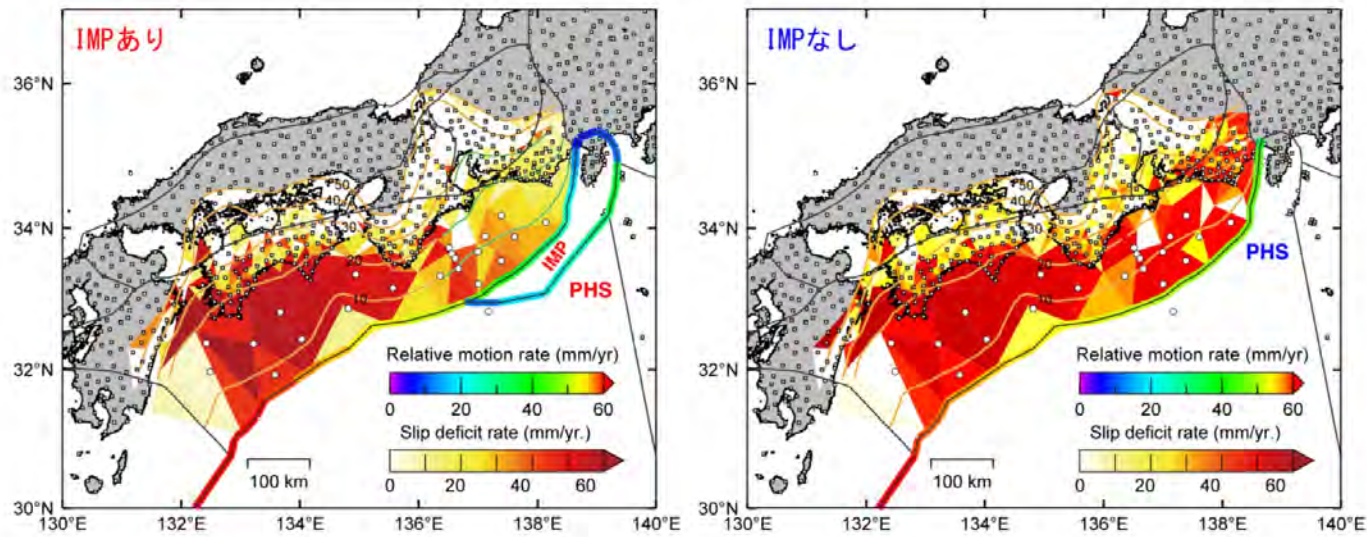


図6：滑り欠損の分布

伊豆マイクロプレート（IMP）が（左）有る場合と（右）無い場合のすべり欠損速度の違い（Kimura et al., ）。南海トラフ東部のすべり欠損分布が著しく異なる。

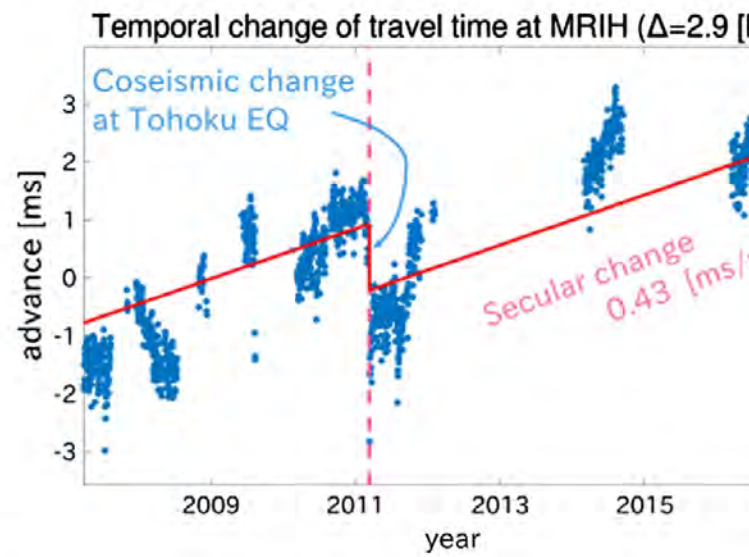
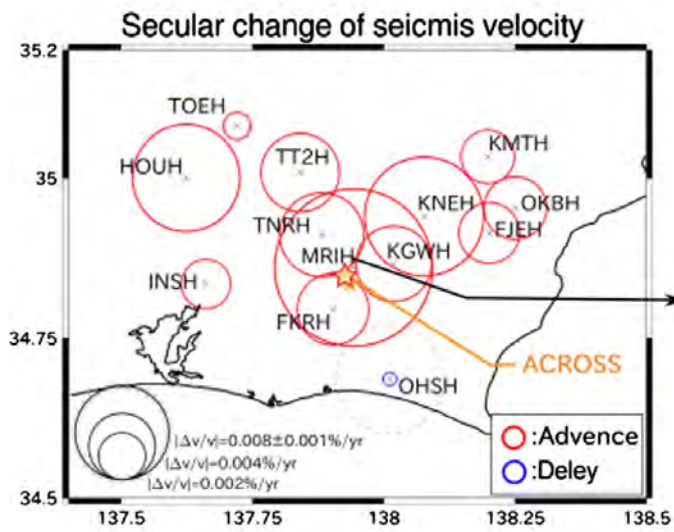


図 7：地震波速度の経時的増加

(左) アクロスの震源(星印)と、周辺の Hi-net 観測点における地震波速度経時的増加量の分布。(右) Hi-net 森で得られた S 波相変化。

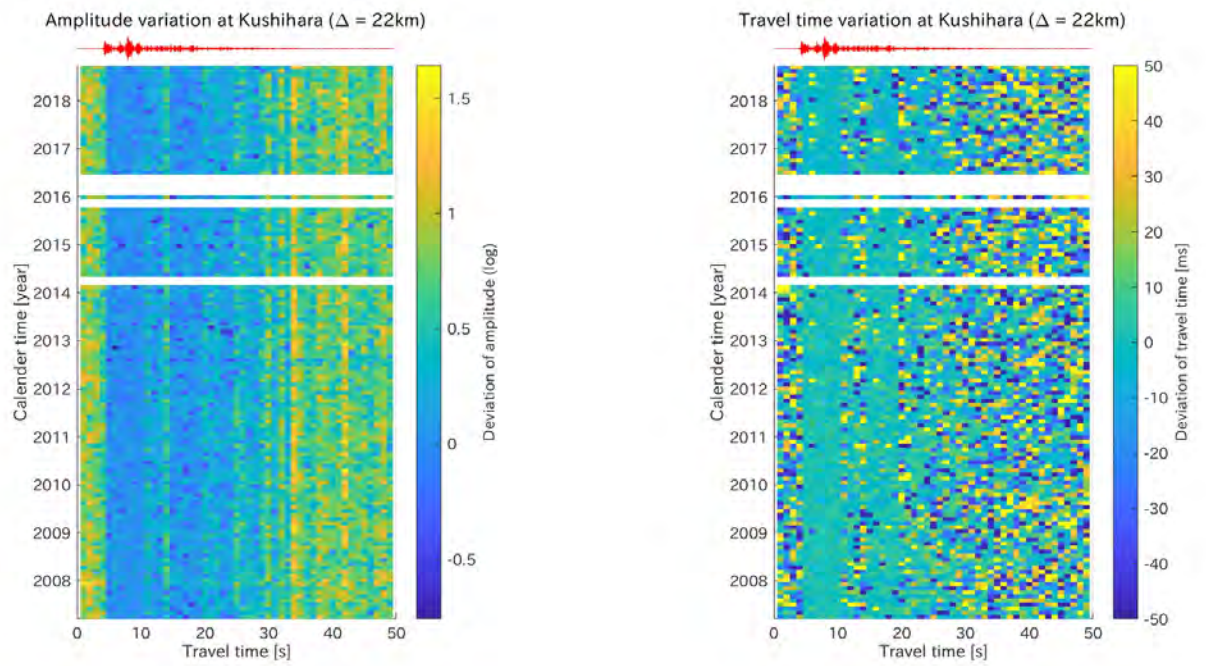


図 8 振幅と走時変化の同時推定
岐阜県土岐市の震源と Hi-net 串原間で得られた震源関数の時間変化。

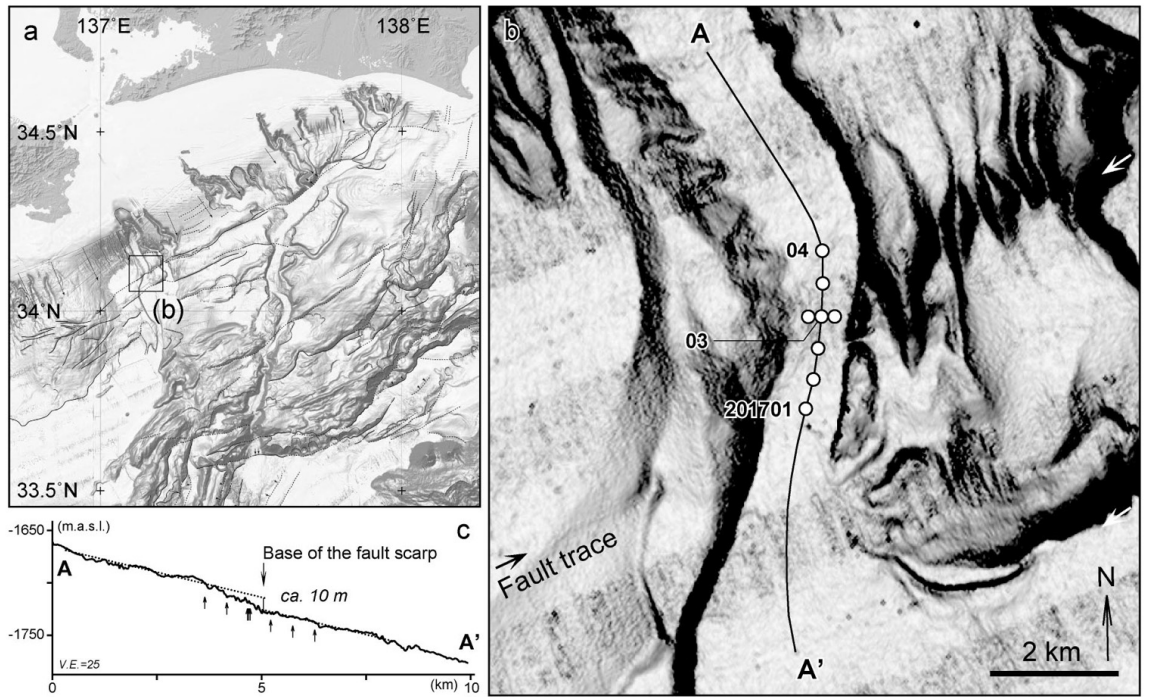


図9：安乗口海底谷の地形と調査概要

(a) 活断層分布 (b) コア取得地点(丸印)と地形断面測線(A-A') (c) A-A'に沿う地形断面(杉戸ほか, 2018, 日本地質学会)

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震・津波被害に対する地域社会の脆弱性測定に基づくボトムアップ型コミュニティ防災・減災に関する文理融合的研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

「脆弱性」という概念は、ボトムアップ型コミュニティ防災・減災を考えるための基本的フレームにとって中心的な位置を占める。しかし、「脆弱性」をどう捉えるかに関しては、様々な立場がある。本課題の到達目標は、「脆弱性」概念に関して、概念的整理を行うとともに、東日本大震災の被災地の状況を参照しながら内容を明確化し、最終的に尺度として洗練させることである。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

初年度(2014年度)においては、地震・津波被災地、具体的には東日本大震災の被災地に関して、避難行動等においてコミュニティがどのような防災・減災力を発揮したか/しなかったかを検証し、脆弱性とコミュニティ防災・減災力に関する作業仮説を構築する。

2015年度～2017年度においては、南海トラフ巨大地震で被害が想定される中小都市、沿岸漁村、大都市の3つの空間的・社会的特性の異なる地点を選定し、作業仮説の検証を行う。

最終年度(2018年度)においては、脆弱性尺度をより洗練させ、ボトムアップのコミュニティ防災・減災を考えるための基礎的なフレームの構築に貢献する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

前年度まで、東日本大震災の被災経験に基づいて、コミュニティの災害脆弱性評価のための指標を量的および質的分析によって検討した上で、南海トラフ地震の被災想定地域を対象に質的分析によってコミュニティ防災力に関する検討を深めた。具体的には、(1)空間(土地利用、土地条件、都市計画、都市機能など)、(2)防災意識・災害文化(災害の集合的記憶とその喚起装置、災害への備えなど)、(3)

社会的凝集性（地域住民組織、防災組織・NPO やその組織間関係、行政との協働など）(4) 災害対策（防災施設等のハード対策と防災計画等のソフト対策）という脆弱性の構成要素に関する作業仮説に基づいて調査研究を進めてきた。今年度も引き続き、そうした調査を継続するとともに、東日本大震災後の津波被災地の復興状況について質問紙調査を実施し、とりわけ、それら構成要素間の関連について理論化を図ろうと試みた。得られた知見は以下の通りである。

(1) 南海トラフ地震被災想定地域のコミュニティ防災

前年度までに名古屋市南区で実施した質問紙調査から、個人レベルのリスク認知・防災意識がコミュニティレベルの防災活動と必ずしも連動していないことが明らかになった。その社会的・歴史的背景を考究すべく、引き続き同地で伊勢湾台風以降の防災対策の変遷やコミュニティの社会変動に関するヒアリング調査を実施した。その結果、第1に、伊勢湾台風は国や自治体の防災制度・組織の発展に大きく寄与した一方で、そうした災害が契機となって都市開発が進展し、ハザードに対する暴露性（exposure）がむしろ拡大したこと、第2に、そのことと関連して、防災に影響を与える社会変動として、都市化や地域開発といった長期的変動と、被災経験がもたらす短期的変動とを区別して捉えると、地域社会の災害対応力はむしろ減退する傾向にあること、第3に、今日ではそうした防災と開発のミスマッチが地域的に多様な形で顕在化しており、それゆえ地域社会の脆弱性は一元的な尺度ではなく、多面的な尺度から捉える必要があること、そのためには、量的変数と質的変数との適切な組み合わせとともに、地域の社会構造に配慮した地域類型に基づくアプローチが不可欠であること、といった知見が得られた。なお、現地調査の結果については地元住民を対象とした防災シンポジウムで報告し、研究成果の地域社会への還元と防災対策への活用を図った。

(2) 東日本大震災津波被災地域の復興・防災に関する調査

脆弱性概念を精緻化するために、上記調査で得られた知見を東日本大震災の被災地研究にフィードバックし、宮城県の津波被災地5市5町（石巻市、気仙沼市、名取市、東松島市、岩沼市、亶理町、山元町、七ヶ浜町、女川町、南三陸町）のコミュニティを対象に質問紙調査を実施した。特に、震災後の移転（空間の変化）がコミュニティの社会的凝集性、生活環境条件、防災活動に及ぼした影響に着目し、以下の知見を得た。

・コミュニティの分解と再編

東日本大震災後の住宅再建は、防災重視の観点から内陸移転が強力に推進された点に特徴がある。住宅再建状況に関してコミュニティ単位で見ると（図1）第1に、前段階の避難生活に関して仮設住宅に入居したケースは5割強にすぎず、世帯で個別に対処したケース（見なし仮設等）が2割にのぼったこと、仮設に入居した場合もそのうちの8割近くは複数の仮設に分かれて入居したこと、第2に、住宅再建に関して一定規模の被害が出た地域では現地再建よりも移転が支配的であったこと、しかし第3に、移転が現地再建かが二者択一的に選択されるよりも、コミュニティの内部で複数の方法が同時に採用される場合が多かったこと、第4に、移転に関しては防災集団移転よりも世帯ごとの個別移転が主流であったこと、第5に、以上のことと関連して、住宅再建過程に対するコミュニティの関与は限定的であり、行政の再建方針に追従するケースが支配的であったことが明らかになった。

・生活環境条件の変化

移転はコミュニティの生活環境条件にも以下のような変化をもたらしたことが明らかになった。第1に、震災前と比較してコミュニティの生活条件は全体として悪化しており、特に、買物の便、公共交通の便、雇用・生業条件に関してそうした傾向が顕著であること（図2）第2に、移転の有無によって生活環境の変化に有意差が生じており、移転した地区でポジティブな変化とネガティブな変化がともに大きいこと、その意味で、移転地区間で生活環境条件が分極化する傾向が生じている（図3）。

・高所移転とコミュニティ防災

震災後のコミュニティ防災は概ね活発化している傾向がみられたが、他方で、以下のような問題点も見出された。まず、将来危惧する災害に関して、津波のスコアが地震や水害のそれと比較しても低い一方で、土砂災害が比較的高くなっており、このことはスマトラ地震の被災地アチェでの調査結果と比較するといっそう顕著である（図4）。また、防災訓練の頻度に関して、女川町や気仙沼市といっ

た三陸地域の自治体でスコアが有意に低かった。これらの知見は、震災後の津波防災対策が一定の成果を挙げた一方で、高所移転によって新たな災害リスクが生じたり、防災意識・災害文化や社会的凝集性の点から見て、脆弱性が逆に増大したりする可能性を示唆するものである。

以上の知見はいずれも、防災事業（移転）と都市計画・生活再建の不調和を示唆するものである。その実態に対する理解を現地調査によって深め、脆弱性を把握するための地域類型論的な分析枠組を構築し、南海トラフ地震被災想定地域の現状分析や防災対策に役立てることが今後の研究課題である。

なお、上記質問紙調査の結果は速報版として報告書にまとめ、関係する自治体および希望する回答者に郵送し、研究成果の現地社会への還元を図った。

これまでの5か年において、理論的には、(1)社会的脆弱性が土地利用、社会的凝集性、災害文化、災害対策の4側面とそれらの相互作用によって構成されることを導き出した。実証研究では、東日本大震災被災地を対象に、(2)被災地の過去100年間にわたる土地利用調査から、1970年代以降のその変化において「堤防効果」あるいは「安全開発のパラドクス」と呼ばれる傾向を指摘するとともに、(3)津波生存者への質問紙調査から、避難行動の基盤にあった自己判断力が教育水準や科学的知識の有無、防災訓練への参加などと関連しないことを見出した。南海トラフ地震想定地域におけるコミュニティ防災力に関連しては、(4)名古屋市南区住民への質問紙調査に基づいて、住民の持つ科学的知識が防災・減災行動を導く知識につながらない、いわゆる「リスク認知のギャップ」を明らかにした。また、他プロジェクトと連携して、(5)全国の基礎的自治体と自主防災組織への質問紙調査を行い、地域社会の活力と自主防災組織の活動とに相関を見いだすとともに、地域の状況に応じた防災対策や、コミュニティレベルでの組織間連携の必要性を指摘した。最後に、(6)地域防災力の向上に取り組む先進地の経験を総括するために、名古屋大学において定期的に新しい防災の考え方に関する公開研究会を開催し、報告書を刊行した。

- (9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
田中重好・黒田由彦・横田尚俊・大矢根淳編『防災と支援 - 成熟した市民社会に向けて』有斐閣、2019年3月刊行予定、総382ページ（予定）
名古屋大学大学院環境学研究科コミュニティ防災研究会『東日本大震災後の復興と防災に関する調査報告書（速報版）』名古屋大学大学院環境学研究科、2018年12月、総37頁

- (10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

次期の研究課題は「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」であり、次期研究計画の中でも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」の、特に(1)「地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明」に関係する。「地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究」に関係する。

平成31年度は、東日本大震災被災地のコミュニティ組織を対象に、他のプロジェクトと連携して過年度に実施した質問紙調査の分析結果と、その回答者に対する、復興後の災害対応の変化などに関する追跡調査（インタビュー調査）をもとに、これまで行ってきた東日本大震災研究の総括を行うとともに、ハザード外力と脆弱性との相互既定関係について理論化を図る。なお、各年次数回程度、コミュニティ防災の取り組み担当者を招聘し、全国的な先進事例に関する定例研究会を開催する。

- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

室井研二（名古屋大学環境学研究科）

高橋誠（名古屋大学環境学研究科）

堀和明（名古屋大学環境学研究科）

山岡耕春（名古屋大学環境学研究科・地震火山研究センター）

鈴木康弘（名古屋大学減災連携研究センター）

他機関との共同研究の有無：有

黒田由彦（梶山女学園大学文化情報学部）
 黒田達朗（梶山女学園大学現代マネジメント学部）
 田中重好（尚絅学院大学総合人間科学部）

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター
 電話：052-789-3034
 e-mail：
 URL：http://www.seis.nagoya-u.ac.jp

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：室井研二
 所属：名古屋大学大学院環境学研究科

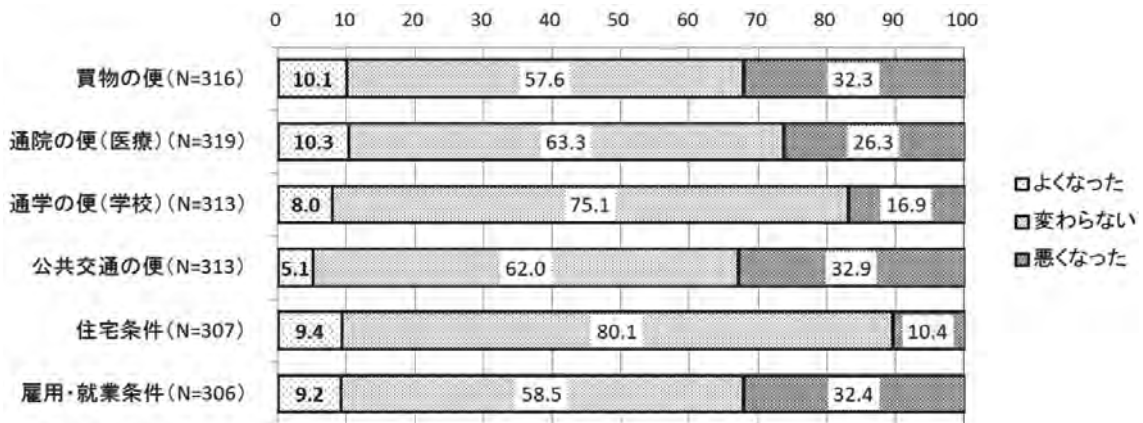


図2 復興後の生活環境条件の変化

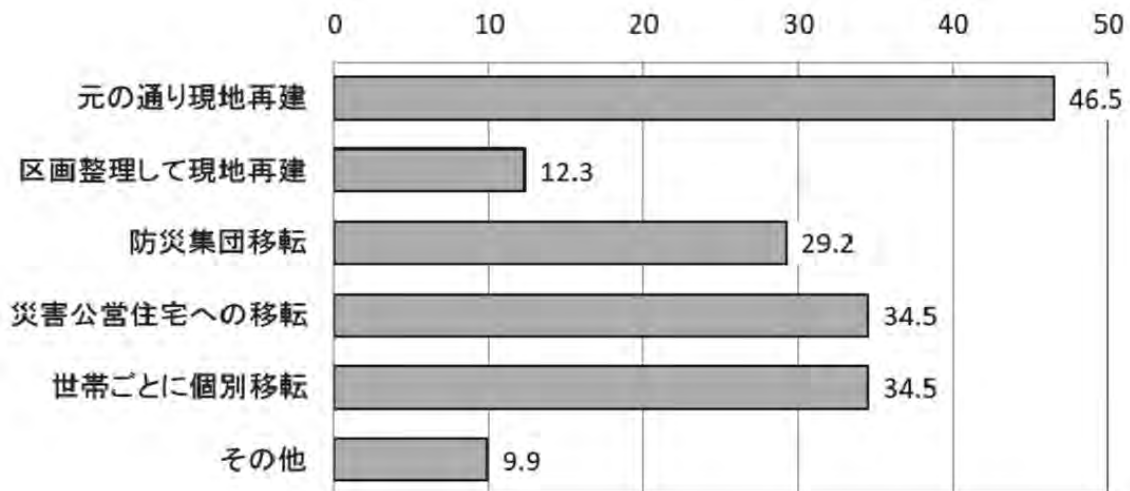


図1 住宅再建の方式(複数回答)(N=284)

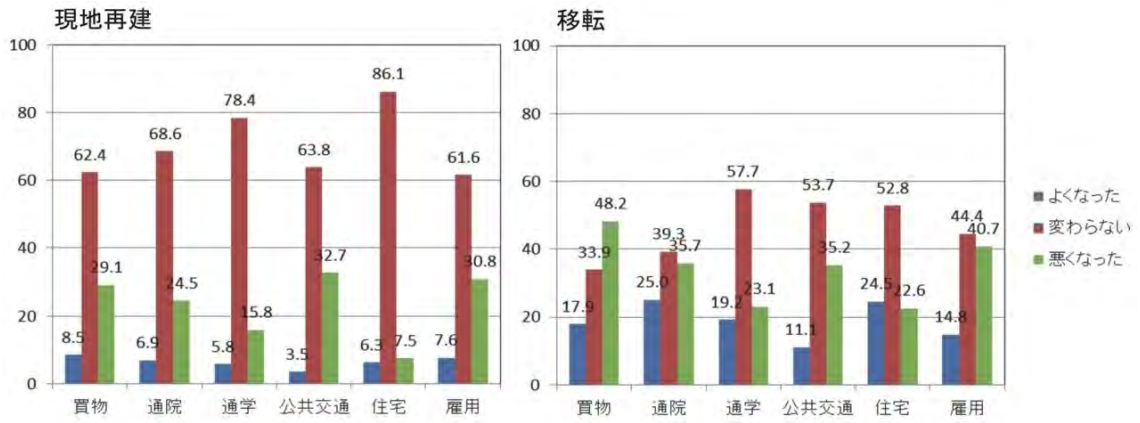


図3 住宅再建方式別の生活環境条件の変化

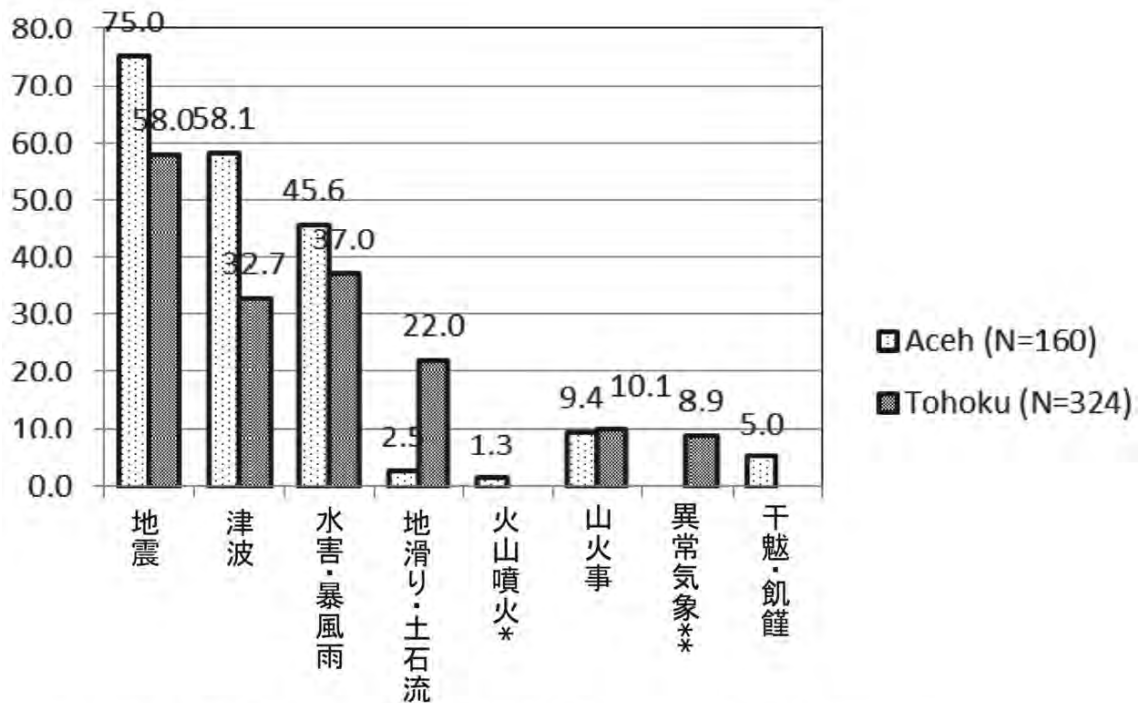


図4 将来危惧する災害:スマトラ地震被災地との比較(2つまで回答)

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

精密制御震源システムの標準化と、ポアホール・海域への設置に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

ウ. 内陸地震と火山噴火

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

上記の研究成果の概要において利用したアクロス震源装置の仕様を基本的に見直した第二世代のアクロス震源装置をすでに製作した。本研究では、[1] 第二世代アクロス震源の性能検証に加え、[2] 海底掘削孔内震源の開発を行う。

第二世代アクロス震源装置は、様々な発生力の要求に対応できる柔軟性、故障への対応等メンテナンス性、地盤への設置の迅速性の 3 点を向上させることをめざしている。本課題ではこの 3 点についての性能向上の検証を行い、最終的には比較的低い運用コスト(科研費の基盤 B 程度)で誰にでも利用できることをめざす。また海底掘削孔内に設置するための震源については、5 か年中に陸上のポアホール内で運用できる震源装置の開発をめざす。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

○平成 26 年度:[1] 第二世代震源装置については、前年度(平成 25 年度)中に試験運転実施場所を確定し、平成 26 年度に設置工事を行う。また本体および周囲に加速度計を設置し、本体の振動お

よび地盤との相互作用を解析する。[2]海底掘削孔内震源の開発については、前年度までに作成していたプロトタイプの動作試験を引き続き行う。

○平成 27 年度:[1]第二世代震源装置については、長期連続運転試験を行い、耐久性について検証する。[2]海底掘削孔内震源については、平成 26 年度は、プロトタイプを改良し、ボアホールに設置する 1 つ手前の装置を製作する。直径の大型化および長さを 1 m 程度に長くすることにより、おもり落下による発生力を大きくする。

○平成 28 年度:[1]第二世代震源装置については、長期連続運転試験を継続するとともに、耐久性の課題であるベアリングを確認し、場合によってはベアリングの設計変更を行う。[2]海底掘削孔内震源については、前年度の大型化装置の動作実験を行い問題点を洗い出すとともに改良を行う。

○平成 29 年度:[1]第二世代震源装置については、長期連続運転試験を継続する。この年度以降は、実際の観測に用いることも想定する。[2]海底掘削孔内震源については、孔内に設置するための設計・製作を行う。

○平成 30 年度:[1]第二世代震源装置については、長期連続運転試験を継続する。[2]海底掘削孔内震源の開発については、前年度までの試験結果を基に、孔内に設置して動作試験を実施する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要:

図 1 に、1994 年以降に名古屋大学がかかわって開発あるいは使用してきた震源を示す。本か題では、Type-2014 を第 2 世代震源と呼び、落下型を孔内震源と呼んでいる。

H30 年度は、岐阜県豊橋市にある名古屋大学三河観測所に設置してある第 2 世代震源の長期連続運転試験を実施し、さらに継続中である。そのうち、2017 年 12 月から 2018 年 12 月までのデータを解析した。第 2 世代震源は従来型よりも S 波だけでなく P 波も効率的に発信することが可能である。図 2 には 1 年間の運転実績を示す。長期にわたって安定に稼働できていることが示されている。前年度に改修した基礎も震源の長期稼働に対して問題がないことがわかった。稼働率は約 90 %という成績である。図 3 と 4 には、P 波と S 波の掃除の時間変化を示す。掃除変化は S 波よりも P 波の方が大きいことがわかる。これは降水により岩盤や地盤の空洞を水が埋めたためと考えられる。

落下型震源については、ウェブカメラ動画を 24 時間連続記録できるトラブル監視装置をくみ上げ、画像監視の下稼働実験を行った。一時的におもりを持ち上げることができないトラブルが発生したが、ジョイント部分へのグリス塗布によって解決した。またこの際のトラブルにおいても、装置には致命的な損傷を与えていないことが確認できた。これは装置稼働のロジックを PLC により適切にプログラミングしたことによる。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要:

該当なし

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

名古屋大学環境学研究科 山岡耕春、渡辺俊樹、前田裕太

名古屋大学全学技術センター

他機関との共同研究の有無: 有

海洋研究開発機構(荒木英一郎)・静岡大学理学部(生田領野)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名: 名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター

電話: 052-789-3046

e-mail:

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名 : 山岡 耕春

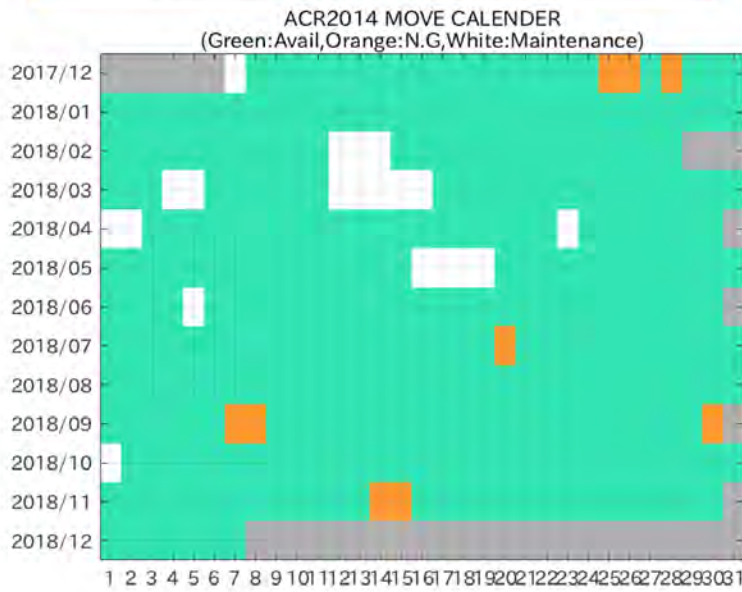
所属 : 名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター



図1: アクロス震源の系譜

名古屋大学が関わって過去に製作した、または、使用した震源一覧。

連続稼働試験 2017.12-



緑：データが正常な日
白：メンテナンス等
橙：アクロスが正常に稼働していない日
灰：期間外

	日数
震源不調	19
メンテナンス	9
データなし	13
使用不可	41
使用可能	324



図2：アクロス震源の稼働率

走時変化 (三河)

降水量の多い期間：
2018年4月～9月
降水量の少ない期間：
2017年12月～2018年3月、
10月～12月

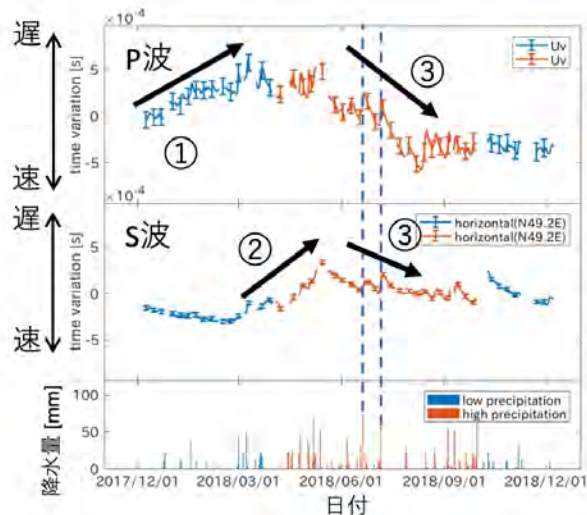
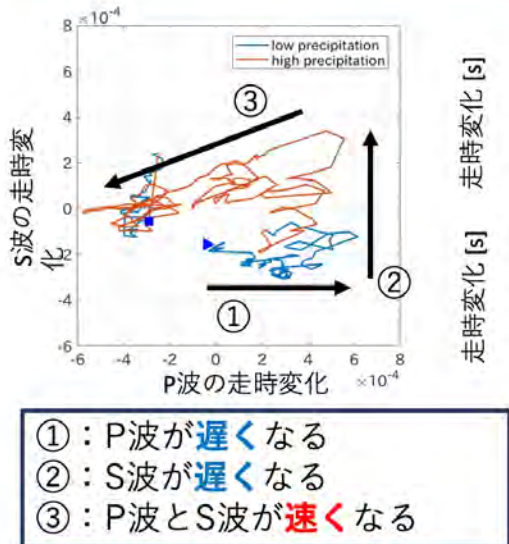
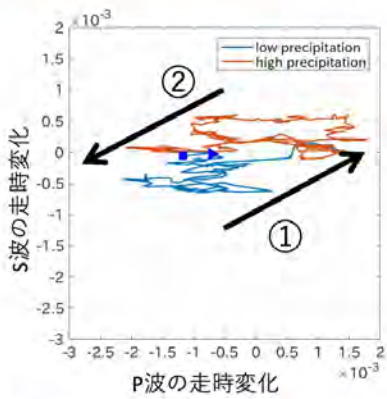


図3：名古屋大学三河観測所の地震観測点におけるP波とS波の走時変化
左図) P波とS波の変化の様子をひかくしたもの (右図) P波とS波の走時変化。赤色の線は降水量の多い時期(4月から9月)、青色は降水量の少ない時期(10月から3月)を示す。

走時変化（豊橋北）



- ① : P波、S波が遅くなる
- ② : P波、S波が速くなる

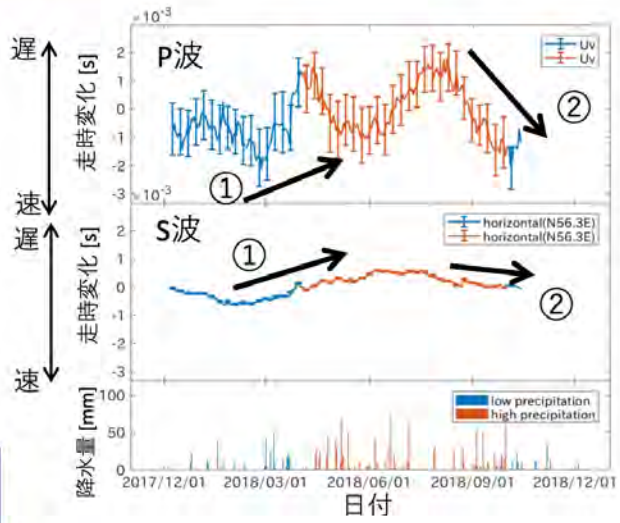


図 3 : Hi-net 豊橋北の地震観測点における P 波と S 波の走時変化
 左図) P 波と S 波の変化の様子をひかくしたもの (右図) P 波と S 波の走時変化。赤色の線は降水量の多い時期 (4 月から 9 月)、青色は降水量の少ない時期 (10 月から 3 月) を示す。

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

火山災害情報およびその伝達方法のあり方

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(5) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(4) その他関連する建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

4. 研究を推進するための体制の整備

(4) 研究者，技術者，防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

御嶽山は、1979 年の中規模な噴火をはじめ、1991 年、2007 年にもごく小規模ながら噴火活動があり、“噴火活動を続けている”火山である。また、2014 年の 9 月 11 日からは地震活動がやや活発化していた。ところが、これらの情報が一般向けに十分に浸透しておらず、2014 年 9 月 27 日の噴火に多くの観光客等が巻き込まれた。情報が浸透していなかった一因は、情報の受け手側(今回の噴火では観光客等)にとって有用な形で伝わっていなかったことにある。特に、半月前の地震活動の活発化の情報を手にしていた我々は、この情報が一般に行き渡っておらず、災害を拡大させたという事実から目を背けてはならない。そこで、本研究課題では、地域住民、観光客といった情報の受け手や、自治体職員等の情報伝達の担い手にとって有用な災害情報の内容や伝達方法のあり方について検討・提案を試みる。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本研究課題では、災害情報の受け手の視点に立って以下の項目を実施する：

1) 火山災害情報のあり方についてのアンケート

御嶽山の岐阜県側(高山市)・長野県側(大滝村等)において、住民を対象にアンケートを実施する。質問内容は、低頻度の自然災害である火山災害の発生リスクに対する意識(他の自然災害との比較を含む)、各情報源から出される情報への信頼度、有用な情報源等とする。また、近年噴火した新燃岳周辺住民に対しても同様のアンケートを実施する。3 地域における一連のアンケートを 3 年間で実施し、

情報の受け手にとって有用と感じる災害情報について、同一火山における火山との物理的距離や距離感の違い、異なる火山間での回答の違いを整理し、最終年度に火山災害情報およびその伝達方法のあり方を提案する。

2) 地域向けワークショップ

アンケートを実施した各地域において、アンケートの集計・分析が終わった時点でその結果をふまえたワークショップを実施し、火山災害そのものや、災害情報の活用方法等を主として一般住民に伝える。火山においては山岳ガイドが観光客等への災害情報伝達の重要な担い手になりうると考え、これらの方々にも参加を促す。

3) 受け手に有用な情報発信の試行

上記1)および2)の結果をふまえて、最終年度に受け手に有用な火山災害情報およびその伝達方法のあり方を提案するとともに、火山災害情報の発信を試行する。特に、観光客等の情報の受け手側が情報源にアクセスせずとも必要な情報が得られるよう、アナログ情報発信手段である情報ボードの試作を検討する。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度～30年度)の成果の概要:

1) 火山災害情報のあり方についてのアンケート

御嶽山の噴火と対策に関する意識調査を2015年に岐阜県側(下呂市)、2018年に長野県側(木曾町・王滝村)の住民に対して実施した。また、2018年は、噴火時に登山していた人に対しても意識調査を実施した。分析の結果、事前の噴火リスクに認識においては地域差はあまり見られないことがわかった。噴火から3年が経過したものの噴火を経験した人には未だに大きな心理ストレスがあることが示された。平成30年度は、岐阜県、長野県で実施した調査結果の取りまとめと比較分析を実施した。さらに、噴火後に新たに創設された御嶽山火山マイスターの運用状況について、長野県に対してヒアリング調査を実施した。御嶽山火山マイスターは現在8名おり、長野県側では活発な活動が展開されている一方、岐阜県側の参加をどのように得るのが課題となっている。

2) 地域向けワークショップ

住民意識調査の結果については、平成29年11月に岐阜県下呂市小坂町でワークショップを開催し共有した。また、火山に関する情報伝達のあり方についての意見交換を実施した。

3) 受け手に有用な情報発信のあり方の比較検討

火山災害情報およびその伝達方法について比較検討するために、2015年に噴火が発生し、日本で初めて噴火警戒レベル5が適応された口永良部島における情報伝達・避難に関する調査を2015年から継続実施している。口永良部島では噴火後に観光客を対象に、フェリーにおけるビデオ上映、観光ボードの設置、避難経路を示した地図アプリの開発など多様な試みが行われている。2018年8月には噴火警戒レベルが4に上がったことから、住民対応について聞き取り調査を行った。この時は台風も接近しており、他の災害が発生している場合の避難も離島の場合は大きな問題である。また、避難行動と災害情報のあり方を検討するため、噴火警戒レベルが下げられたものの噴火活動がみられた11月にも調査を実施した。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):

久利美和、山中佳子、2018年口永良部火山噴火警戒レベル4での対応と課題、平成30年度自然災害科学東北地区部会

石水英梨花、阪本真由美、火山地域における住民主体の防災計画策定に関する考察 口永良部島の事例より、地区防災計画学会誌 C+Bousai, Vol.14, 2019.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要:

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター 山中 佳子
兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科 阪本 真由美
東北大学災害科学国際研究所 久利 美和
他機関との共同研究の有無：有
(兵庫県立大学 東北大学)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター
電話：052-789-3046
e-mail：
URL：

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：山中 佳子
所属：名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター

(1) 実施機関名：

京都大学理学研究科

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震サイクルシミュレーションの高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

速度状態依存の摩擦 (RSF) 則に基づく地震サイクルシミュレーションにより、過去の地震発生履歴の再現がなされ、地震発生予測に繋げようとする研究が進んできた。しかしながら、現行の地震サイクルシミュレーションの多くは、主として計算上の制約から、

1) 媒質の単純化：均質半無限弾性媒質を仮定

2) 動的破壊過程の単純化：準動的地震サイクルシミュレーション

といった現実とは異なる単純化が行われている。本研究では、こういった単純化に 対する地震サイクルシミュレーションの高度化に関して以下の研究課題を扱う。

本研究課題は 2 次元モデルを用いる基礎的研究であり、1) と 2) を扱う。これにはスペクトル有限要素法 (SEM) を用いる。公開されている動的破壊コード SEM2DPACK(Ampuero,2002) を元に、地震間における準動的過程を実現するようにコードを改良し、速度状態依存摩擦則に従う動的・準動的地震サイクルシミュレーションコードの開発を行なう。これにより、1) と 2) の問題を克服し、沈み込み帯に特有の不均質弾性媒質が動的破壊過程を含む地震サイクルに及ぼす影響の評価を行う。

また、地震サイクルシミュレーションの高度化として、他の課題 (1803) で開発予定のデータ同化手法を用いた摩擦パラメータの推定における準動的地震サイクルシミュレーションの高速化、および周期的外力の地震サイクルに及ぼす影響の評価を行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

H26年度においては、ABAQUS 粘弾性地震サイクル1次モデル(簡単な不均質構造で接触解析に重点を置いて開発)を構築する。

- ・重力の与え方の検討
- ・沈み込むプレートの屈曲を扱うプレート相対運動の与え方の検討

H27年度においては、ABAQUS 粘弾性地震サイクル2次モデル(実際の海底地形や弾性・粘弾性構造)を構築し、動的破壊過程組み込みの検討を行う。

H28年度においては、傾斜断層における、動的破壊過程を含む、SEM 2次元地震サイクルコードを開発する。また、準動的な地震サイクルシミュレーションにおけるルンゲークッタ法に時間発展解法の改良を試みる。更に、1自由度固着・すべり振動子の周期的外力への応答評価を行う。

H29年度においては、上記項目を継続し、において論文化に着手する。

H30年度においては、上記項目についてのまとめを行う。

(8)平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要:

平成30年度研究成果概要:

- ・巨大地震震源域における固着が長期的スロースリップイベント(KSSE)活動に及ぼす影響評価

アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)を用いた長期的スロースリップイベント(LSSE)域における摩擦特性とすべり発展推定において、隣接する巨大地震震源域でのすべり欠損レートの推定を同時に行う定式化を、豊後水道LSSEを対象に進めている。図1に豊後水道LSSE断層モデル(傾斜角 15°)と南海地震震源域に対応する固着域(茶色:傾斜角 5°)およびGEONET観測点(黒丸)分布を示す。簡単のため、LSSE断層は平面断層を仮定し、 $100\text{km} \times 120\text{km}$ の速度強化矩形域(青色)の中に半径 25km の速度弱体化円形パッチを置き、速度状態依存則の摩擦パラメータA、Lは一定、Bのみパッチ内外で変えて、繰り返し間隔7年のLSSE活動をシミュレーションにより再現している。

LSSE活動のモデル化において、LSSE断層域浅部に位置する南海トラフ巨大地震震源域に対応する固着域(仮定: $V-V_{pl}=-6.5\text{cm}/\text{年}$ 、フィリピン海プレートの沈み込み速度 $V_{pl}=6.5\text{cm}/\text{年}$)が無い場合とある場合のLSSEすべり速度分布の違いを、それぞれ図2右上図および右下図に示す。固着域の影響がない場合では、円形パッチの中心に対称的にすべりが広がるのに対し、固着域がある場合では、すべり速度の大きな領域が浅部に移り、深さ方向に非対称な分布になっている。図2左図は、Nakata他(2017)によるスパースモデリングにより得られたすべり分布で、すべりの極大が浅部に現れ、深さ方向に非対称になっている。単純な摩擦モデルではあるが固着域を考慮したLSSEシミュレーション(右図下)に良く対応している。このように、LSSE域での摩擦特性およびすべり発展推定には固着域でのすべり欠損レートの推定も同時に行う必要があることが分かった。

計画期間中における計画変更及び研究成果の概要:

速度状態依存の摩擦(RSF)則に基づく地震サイクルシミュレーションにより、過去の地震発生履歴の再現がなされ、地震発生予測に繋げようとする研究が進んできた。しかしながら、現行の地震サイクルシミュレーションの多くは、主として計算上の制約から、

- 1) 媒質の単純化: 均質半無限弾性媒質を仮定
- 2) 動的破壊過程の単純化: 準動的な地震サイクルシミュレーション

といった現実とは異なる単純化が行われている。本研究では、こういった単純化に対する地震サイクルシミュレーションの高度化に関して、以下の1)と2)の研究課題を扱った。

1) ABAQUS 地震サイクルシミュレーションコードの開発(H26-27)

商用ソフトウェアABAQUSを用いて2次元粘弾性地震サイクルシミュレーションコードの作成を目指して、東北地方太平洋沖地震震源域を模した2次元粘弾性モデルを構築して以下の検討を行った。

- ・重力の与え方に伴うモデルの検討、
- ・沈み込むプレートの屈曲を扱うプレート相対運動の与え方の検討
- ・境界要素法で用いられる臨界核形成サイズを考慮した詳細メッシュ(図3)を作成しての検討

しかしながら、これまでのところ安定した地震サイクルが得られない(図4)。そこで、法線応力を詳しく調べたところ、ABAQUSで用いているマスタ・スレーブ法ではプレート境界上の節点がすべりに応じてプレートの法線方向にも変位するため、初期条件の段階で初期法線応力もプレート形状の変形により大きく変動し、すべりが不安定になることが分かった。ABAQUSは接触解析機能を有する有限要素解析ソフトとして有名で優れた機能を有しているが、現状では、自重をかけた時の状態を平衡状態として、応力をクリアしその状態からの差分を扱う機能が実装されていなくて、開発は難しいということが分かった。ソフト開発会社を通じて必要な機能の改善要求をしているので、他にも同様な需要があれば、将来的に機能が追加される可能性があるが、5ヵ年計画の中では、安定な計算を行えず、開発を断念した。

詳細は平成27年度報告書参照。

2) スペクトル要素法 (SEM) による2次元動的・準動的地震サイクルシミュレーションコードの開発 (H27-29)

スペクトル要素法 (SEM) を用いた動的破壊シミュレーションコード SEM2DPACK (Ampuero, 2002) を元に、地震間における準動的過程を実現するようにコードを改良し、不均質弾性媒質における、速度状態依存摩擦則に従う動的・準動的地震サイクル (EQC) シミュレーションコードの開発を行なった。

順次、傾斜断層での動的破壊、全無限媒質および半無限垂直断層での動的破壊過程を含む EQC シミュレーションコードを開発してきた。更に、沈み込み帯への適用を考え、高角の傾斜断層での検証に留まっているという問題は残されているが、以下に述べる計算アルゴリズムの改良により、傾斜断層における動的破壊を含む EQC シミュレーションのコードの開発に成功した。

Kaneko et al. (2008, 2011) では、2次元 in-plane 問題での地震サイクルを考えたが、この場合断層面における split-node で垂直な変位成分がなく考慮していないが、2次元 anti-plane 問題では、まず摩擦モデル地震間の準動的計算において垂直成分の計算を組み込む開発を行った。最初、断層面両側の split-node での変位 u_f^+ , u_f^- を x y の3成分で計算していたが、傾斜層では数値発散が生じる問題があった。そこで、変位を相対変位 $(u_f^+ - u_f^-)/2$ 、および重心の変位 $(u_f^+ + u_f^-)/2$ に分離し、速度状態依存摩擦側に従う摩擦力とせん断応力のつり合いから断面に沿う傾斜方向の相対変位を計算し、split-node での重心変位は断層以外の媒質のノードの変位に組み込み、断層における相対すべりから媒質ノードにおける変位を求める方式に変更した。これは、実質 Melosh and Raefsky (1981) により提唱された有限要素法における split-node 法と同じ定式化になっている。この改良により、傾斜断層での動的・準動的地震サイクル計算が可能になった。

現状では、並列化できていないため現実的な領域が扱えないこと、およびメッシュ生成フリーソフトウェア emc2 を使っているため、低角傾斜断層で安定に計算できるメッシュ生成が出来ていないので、コードの確認は高角の場合に限られているが、不均質弾性媒質における傾斜断層での動的・準動的地震サイクル計算が可能になった。

一例として、bimaterial 媒質 (断層を挟んで左右で媒質が異なる) での傾斜断層 (傾斜角 77°) における、地震サイクル計算例を示す。図5に傾斜断層メッシュモデルを示す。地表を自由表面とし、その他の境界には消波境界条件 (abc) を課している。縦軸 (深さ軸) の $0 \sim -45\text{m}$ にローディング速度 V_{pl} を課し、 $+32.5 \sim +12.5\text{m}$ に速度弱化域、その他の領域を速度強化域としている。図6に bimaterial 媒質 (断層を挟んで媒質が異なる) での5サイクル目の累積変位の深さ分布を示す。左図は左側 (上盤)、右図は右側 (下盤) の V_p, V_s をそれぞれ20%減じた bimaterial 媒質に対応している。図6から分かるように、これまでの bimaterial における動的破壊計算で示されているように、震源核の形成場所が低速度の媒質の変位の向き (positive direction) に偏っている。地震サイクル計算はこれまで行われていないので比較はできないが、この両者のモデルでは、最大滑り・再来間隔がほぼ変化しない。震源核

形成過程では両者は異なるが、地表まで滑らないため、地震時すべりではその違いを打ち消し、上方と下方でほぼ同じ地震時すべり量になるためと考えられるが、検討を要する課題である。

詳細は、平成 29 年度報告書参照。

3) その他の地震サイクルシミュレーションの高度化研究

3 . 1) 準動的地震サイクル計算における数値積分法の検討

大規模地震や多くのパッチを含む地震サイクル (EQC) 計算、およびプレート境界における摩擦パラメータとすべり発展を推定・予測するデータ同化において、準動的 EQC 計算の高速化が必須である。我々は、これまで階層化行列法を適用して、すべり応答関数とすべり (速度) の行列ベクトル積の高速化・省メモリ化を図ってきた。ここでは、微分方程式の解法の問題について報告する。

準動的 EQC シミュレーションでは、準動的運動方程式と速度状態依存の摩擦則を連立させて、プレート境界におけるすべりの時空間発展を追っているが、その微分方程式系の積分には時間刻み可変の 4/5 次埋め込み型ルンゲ・クッタ法 (rkqs) (Press et al.2 版,1992: 2 版) が、これまで多くのシミュレーション研究で用いられてきた。ところが、3 版 (2007) では、Dorman-Prince (1980,1981) による 5 次埋め込み型 RK である DOPRI5、および 8 次の DOP853 (Hairer et al., 1993) といった高次の埋め込み型 RK が紹介されている。一方、例えば、Noda and Lapusta(2010) では、動的で TP(thermal Pressurization) 過程も含んだ EQC を扱っているが、2 次精度の exponential integrator(EI) 法で時間発展させ、すべり速度は Lambert の W (オメガ) 関数を用いている (Noda et al., 2013 ;NL 法と略)。

そこで、速度状態依存摩擦則に従うバネ-スライダ-固着すべり振動子の準動的数値計算に rkqs, DOPRI5, DPO853, NL 法を用いて、繰り返し間隔が約 112 年で 3 万年間の計算を行い、そのパフォーマンスを見た。詳細は、平成 28 年度報告書に譲るが、高精度になるにつれ、DOP853 の優位性が見て取れ、我々の EQC 計算をこのアルゴリズムに変更した。NL 法はこの問題では劣っているように思えるが、動的や TP を含む stiffness の高い問題に対して開発された手法であり、ここでの比較は適当でない恐れがある。数値計算分野では計算精度をもう少し上げた 4 次精度 RK を用いた EI 法も提案されているので検討する必要がある。

3 . 2) 固着すべり振動子の周期外力への応答 (H27)

非線形科学分野で発展してきた同期理論 (蔵本・河村、2017) を地震分野に適用する場合、2 つの面が考えられる。ひとつは、地震サイクルシミュレーションではプレート境界をセルに分割しそれぞれのセルにおけるすべり発展を計算するが、地震発生自体をプレート境界面での各セルにおけるすべりの同期現象と捉える見方で、異なるリズム (すなわち異なる摩擦パラメータ) を持つ多数の振動子相互作用系における蔵本モデルにより地震サイクルシミュレーション計算の高速化を図るという考えが挙げられる。一方で、振動子の外力への応答が考えられる。ここでは後者を扱う。

ゆっくり地震 (SSE) や繰り返し地震、および地震活動には卓越した活動周期が存在すると報告されている。地震サイクルシミュレーションの高度化の一つとして、こういった地球・海洋潮汐などの周期的外力および単独の繰り返し間隔を持つアスペリティの相互作用より生じる同期現象として、地震サイクル計算に組み込むことを考える必要がある。非線形科学分野で発展してきた同期理論の用語を借りて、地震発生を模した 1 自由度のバネ・スライダ-からなる固着すべり振動子への周期的外力の応答を調べた。底面に速度状態依存摩擦則に従う摩擦力が働くブロックにバネを付けローディング速度 V_{pl} で引っ張る系に周期的外力が加わる状態を考えた。まず、摩擦条件とバネ定数を調整して、固着すべり振動子 (固着とすべりを繰り返し、すべりの繰り返し間隔が T_0 (自然周期) となる系を設定する。そこに振幅 E で周期 T_e となる外力を加える。

一例として、 $T_0=112$ 年サイクル中の応力降下 (6MPa) の生じる固着すべり振動子に、サイクル中の応力降下量の 1/10 の振幅 (E) で、 T_e を 1 年刻みで $T_0 - 110$ 年から T_0+125 年に変化させて周期的外力を加えて、系の応答すなわち繰り返し間隔 T_c を調べたところ、 $T_c:T_e$ が $m:n$ (m,n は互いに素の

整数)となるように系の周期がシフトして外力に同期する現象、 $m:n$ 同期現象が生じた。この同期はサイクル中の応力降下量の $1/100$ の大きさの振幅(E)を持つ外力でも生じる。このことから、地球・海洋潮汐が引き起こす応力レベルは数 k Pa程度なので、数 $10 \sim 100$ k Pa程度の応力変化を伴うSSEでは同期現象が生じる可能性がある。また、複雑で解析できていないが、非同期の場合は非常に複雑な繰り返し間隔の乱れを示し、これは実際の地震活動がある間隔を持つがばらついているのを説明できる可能性がある。

- (9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
Hirahara, K. and K. Nishikiori, EnKF estimation of frictional properties and slip evolution on a LSSE fault -numerical experiments, 日本地球惑星科学連合2018年大会, SCG53-17, 幕張2018.
Hirahara, K. and K. Nishikiori, EnKF Estimation of Frictional Properties and Slip Evolution on a LSSE Fault with a locked megathrust fault zone -Numerical Experiments-, AGU 2018 Fall Meeting, T33F-0470, Washington, DC, USA, 2018.
平原和朗・錦織健人、EnKFによるLSSE発生域の摩擦特性およびすべり発展推定に関する数値実験 - 固着域の影響、日本地震学会2018年度秋季大会、S23-20、郡山、2018。

- (10)次期計画における平成31年度実施計画の概要:

- (11)実施機関の参加者氏名または部署等名:

京都大学大学院理学研究科:宮崎真一

他機関との共同研究の有無:有

理化学研究所革新知能統合研究センター非常勤研究員:平原和朗

京都大学防災研究所:西村卓也

東京大学地震研究所:亀 伸樹

東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センター:太田雄策

- (12)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名:京都大学大学院理学研究科

電話:075-753-3911

e-mail:miyazaki.shinichi.2m@kyoto-u.ac.jp

URL:

- (13)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:宮崎真一

所属:京都大学大学院理学研究科

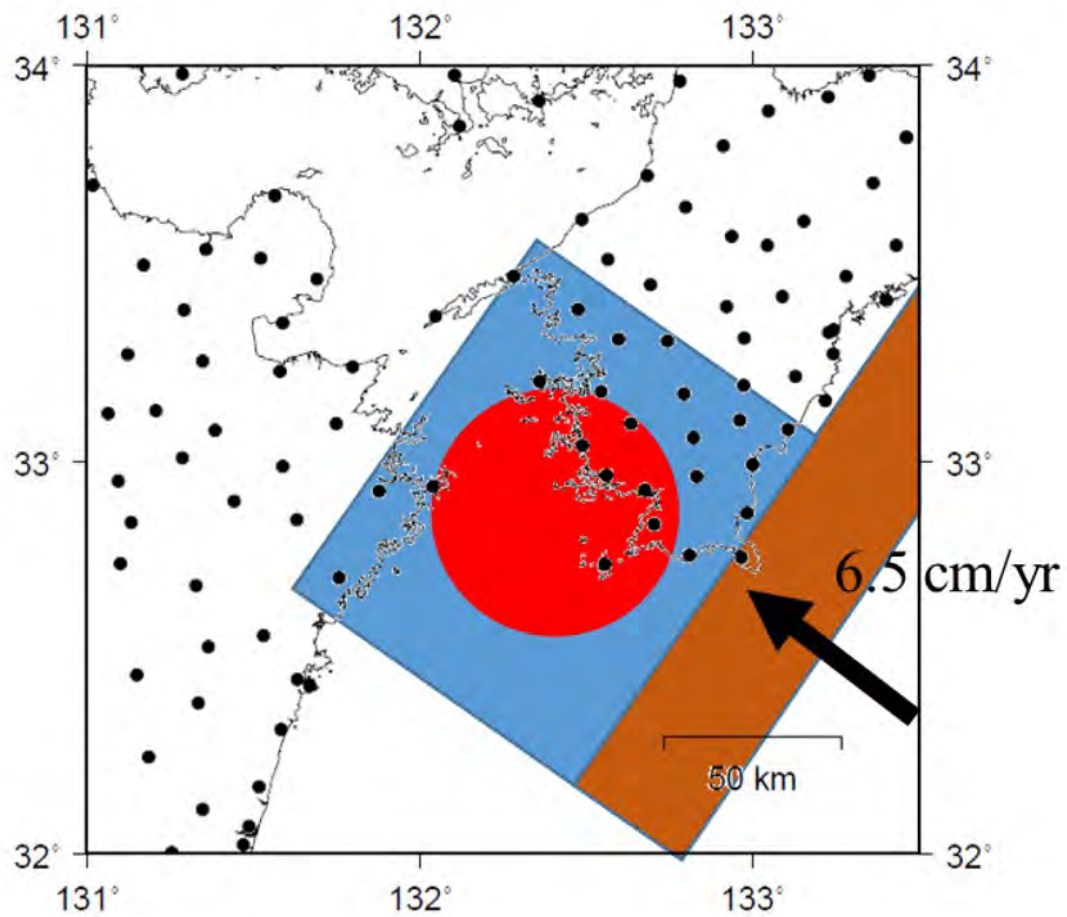


図1 豊後水道 LSSE モデルと GEONET 観測点分布

矢印は、6.5cm/年で沈み込むフィリピン海プレートの沈み込み方向。矩形領域がプレート境界断面(青色：速度強化域)で、赤い円形パッチは LSSE 発生域(速度弱化域)、茶色の矩形域は、南海地震固着域をモデル化したものである。また、黒丸は GEONET 観測点。

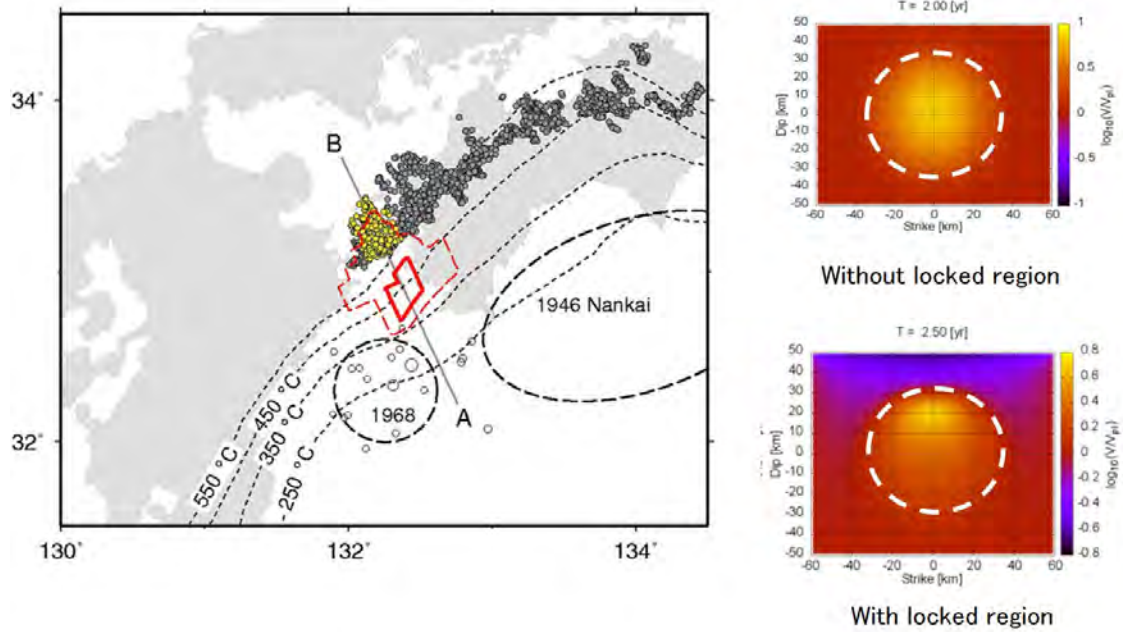


図2 豊後水道 LSSE 域におけるすべり分布：観測とシミュレーション

左図：Nakata 他 (2017) のスパースモデリングにより得られた。2010 年豊後水道 LSSE のすべり分布。赤実線および赤点線で囲まれた部分は、それぞれ、すべり量が 0.2m、0.1 m 以上に領域を示す。

右上図：固着域が無い場合の、シミュレーションによる LSSE 発生時のすべり速度分布。

右下図：固着域が有る場合の、シミュレーションによる LSSE 発生時のすべり速度分布・点線円は LSSE パッチを示す。

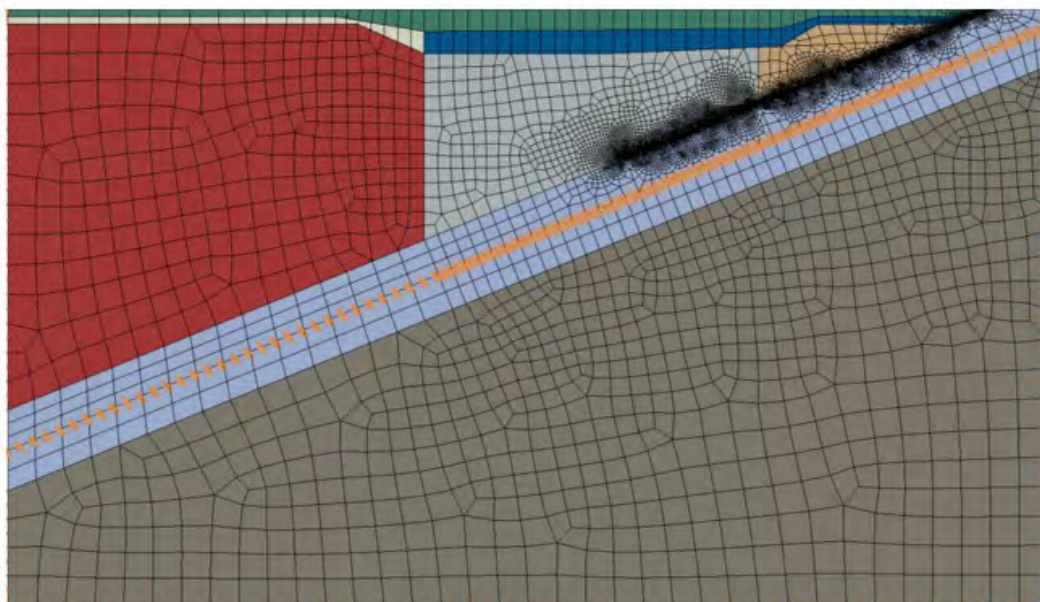
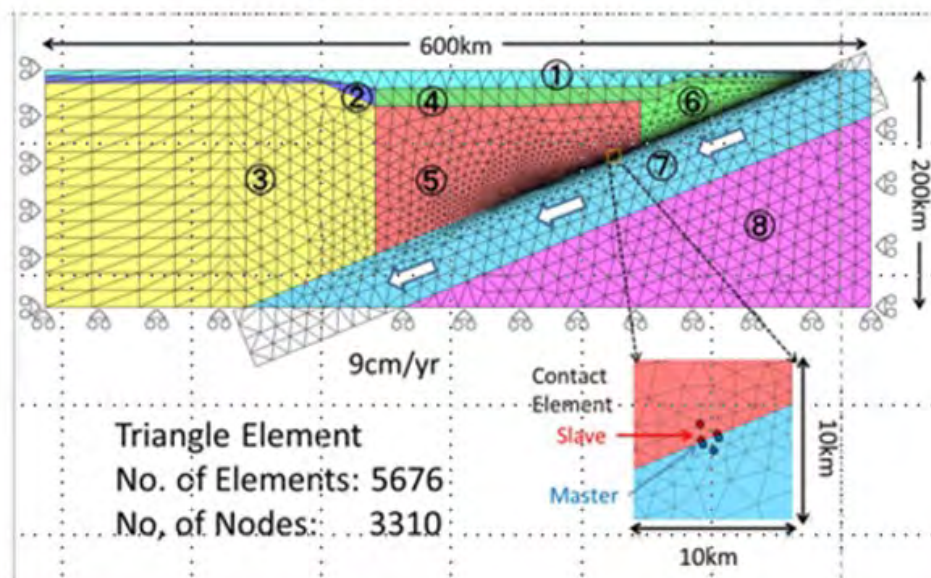


図3 ABAQUS2次元東北日本メッシュ図

上図：粗いメッシュ図 1と7は弾性、他は粘弾性体で、深さ 10-60?に速度弱化摩擦特性を与え、矢印方法にプレートをしみ込ませ地震を発生させる。

下図：詳細メッシュ図。速度弱化域をプレート境界では、臨界メッシュサイズより小さく 500m としている。

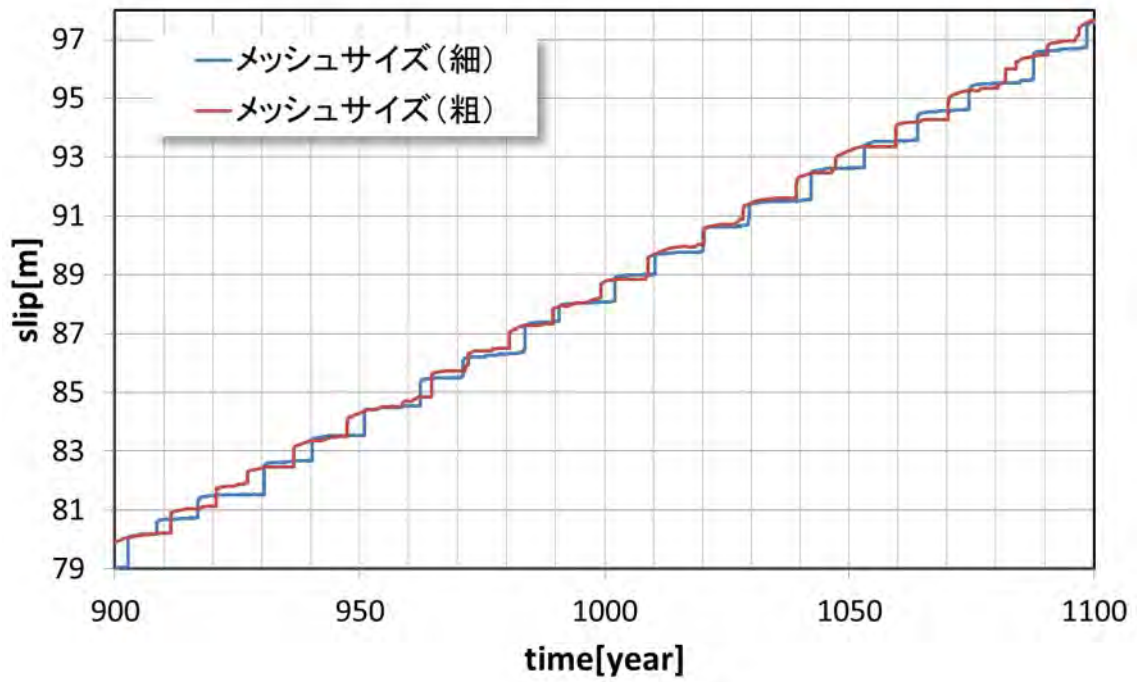


図4 図3に対応する ABAQUS メッシュ図に対応する地震サイクルシミュレーション結果
 10年程度の繰り返し間隔を持つ場合の、深さ 40?付近の節点での積算すべり量を示す。粗いメッシュ(赤線)に比べ細かいメッシュ(青線)では、ややすべりが滑らかになっており、改善が見られるが依然不安定なすべりを示している。

自由表面

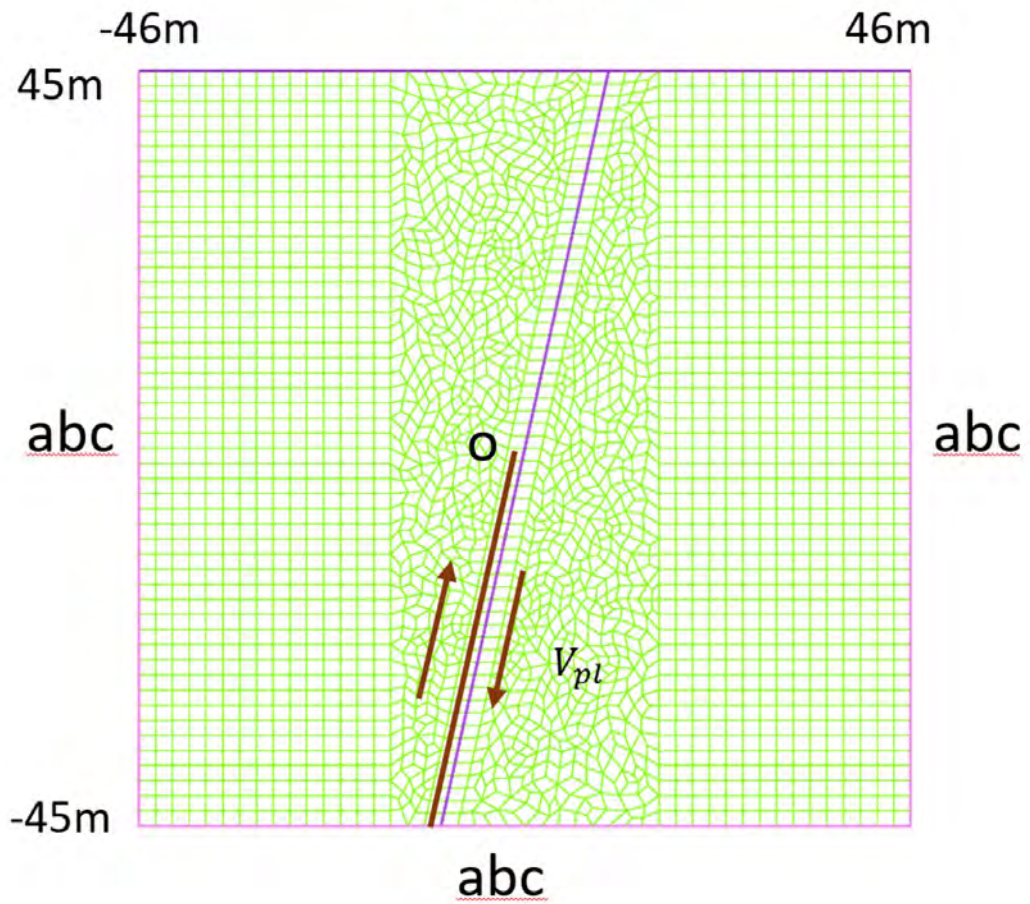


図5 傾斜断層メッシュ図

abc は消波境界条件を表す。青線が断層境界を示す。O 以下の実赤線部分にローディング速度 V_{pl} を与えた。

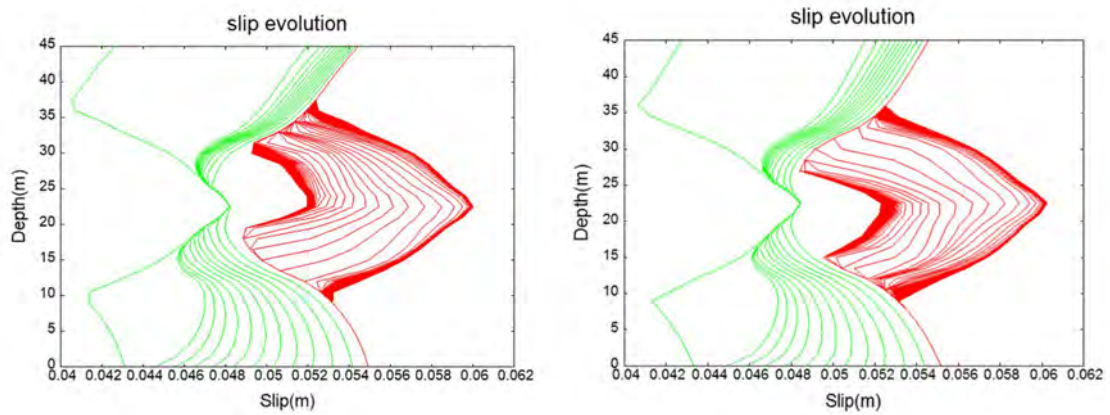


図6 図5の bimaterial 媒質における傾斜断層に対する5回目の地震サイクルにおける累積変位
 左図および右図： それぞれ、図5における左側(上盤)側および右側(下盤)側の V_p, V_s を20%減じた媒質に対応する。+ 22.5 ~ + 12.5mの領域を速度弱化域としている。緑および赤いコンターは、それぞれ地震間0.5年および地震時0.001秒間隔での変位の累積を表す。これまで無限媒質モデルで言われてきたように、震源核の形成場所が低速度の媒質の変位の向き(positive direction)に偏る。すなわち、左図では左側(上盤)が低速度媒質で上方にすべるので震源核形成場所が上方に見られる(地震時すべりに至るゆっくりすべりの段階で赤色線の間隔が上方ほど粗い)。右図では低速度媒質が右側(下盤)なので、逆になっている。しかし、地表に破壊が達していないため、両者の最終的な地震時すべり分布に差異は小さく、両者の再来間隔もほぼ同じで、この場合、bimaterialの効果はサイクルには大きく寄与しないようである。

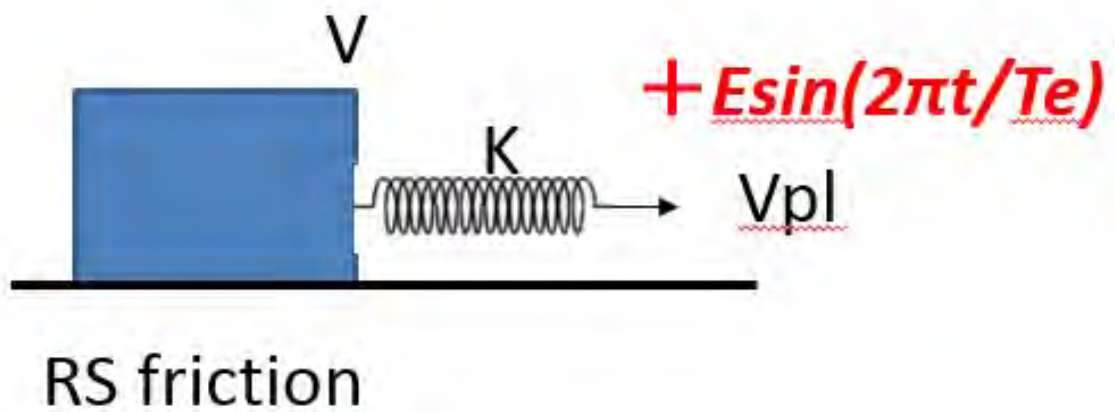


図7 バネ・ブロックからなる固着・すべり振動子に加わる外力モデル
 底面に速度状態依存摩擦則(RSF)が働くバネ・ブロックを速度 V_{pl} で引っ張る系に振幅 E 、周期 T_e の外力を加える。

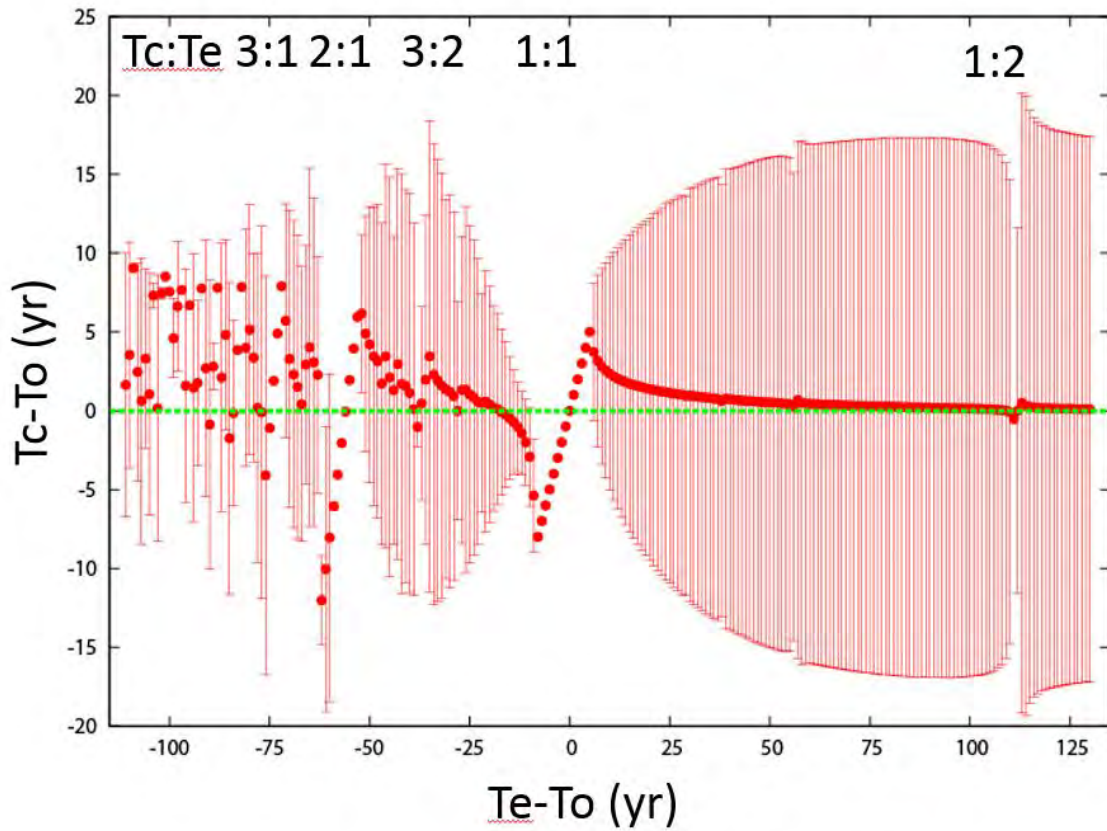


図8 外力の周期 (T_e) を変えた時の固着すべり振動子の繰り返し間隔 (T_c) との関係
 自然周期 $T_0 (=112$ 年) となる固着すべり振動子に、周期 (T_e) を持つ外力を加えた時の計算された繰り返し間隔 (T_c) の平均と標準偏差。標準偏差ゼロの T_c は、 $T_c:T_e=m:n$ (m,n は互いに素) となる $m:n$ 同期を示す。

(1) 実施機関名：

京都大学理学研究科

(2) 研究課題(または観測項目)名：

水蒸気噴火後の火山活動推移予測のための総合的研究 - 御嶽・口永良部・阿蘇 -

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

各火山において地震観測、測地観測、地磁気観測、火山ガス測定を実施し、水蒸気噴火後の過程で発生するさまざまな現象を捉える。そして、これらの観測結果を比較することにより、水蒸気噴火後の活動推移予測の精度を高める。また、水蒸気噴火に至る過程で発生した事象から共通するものを抽出し、水蒸気噴火準備過程のモデルを構築するための基礎材料とする。

阿蘇火山では噴火中でも比較的安全に火口に接近可能であるという地の利を生かし、火口極近傍での電磁気観測や地震観測を実施し、他の火山における遠方での観測手法の有効性を検証するためのテストフィールドとしても活用する。また、同火山は他の二火山に比して水蒸気噴火の頻度が高いことから、火口周辺での地質調査により歴史時代を中心とした噴火発生履歴を明らかにすることで、水蒸気噴火発生場の時間変化を考察し、他二火山の活動度評価に資する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

御嶽火山

2014 年御嶽山の噴火では約 1ヶ月前から地震活動の活発化が見られ、南西山麓の約 20km の水準路線では、噴火時期を含む 2007 年 4 月 - 2014 年 10 月の期間に最大 14? の山頂方向の沈降する地殻変動が観測された。これらの変動を精査するとともに、南西山麓における水準測量や GPS 観測により上下変

動および水平変動を長期にわたり観測する。また、定常観測点における地震観測、傾斜観測を実施する。一方、有人機ヘリによる御嶽山の空中磁気測量を実施し、火山体浅部の熱状態の変化による磁気構造変化を抽出する。また無人機を用いた多成分ガス濃度観測により火山性流体中へのマグマの関与の度合いの時間変化を調べる。

口永良部島火山

2014年の噴火に至る前兆過程で発生した地震、地盤変動、磁力変化、地熱変化などの変化を精査し、前兆過程を細分化し、特に、噴気活動が強くなった2008年以降の地震活動と地盤変動の特性変化の抽出を行なう。また、今後のマグマ性噴火への移行に先行する地盤変動、二酸化硫黄放出量の変化、全磁力変化などをとらえるための観測を実施し、深部から浅部へのマグマ移動の検出を試みる。

阿蘇火山

中岳火口での全磁力観測点をテレメータ化し、地磁気変化検出能力の向上をはかり、マグマ移動の検出を試みる。また、TDM法に基づくACTIVEシステムを用い、高時間分解能の比抵抗モニタリングを行う。一方、ACTIVEの観測に合わせ、火口の西部および北部における短周期地震アレイあるいは火口近傍域における稠密広帯域地震観測を行いアレイ解析による微動の発生源推定をおこなうほか、散乱波解析などによりクラックなどの火道システムにおける浅部地震波速度構造の時間的・空間的变化を抽出する。また、DOASなどを用いた火山ガス観測も随時おこなう。また、中岳周辺域においてテフラ層序に関する調査を行ない、歴史時代を中心とした完新世の水蒸気噴火発生履歴を解明する。

年次進行を以下に示す。

H26年度

- ・リアルタイム空振観測網の構築、ACTIVEソース、レシーバー点の設置（阿蘇）

H27年度

- ・水準測量（全路線）、GPS観測（全基線）、地震波形データ整備および波形解析、比抵抗調査データの再解析、空中磁気測量、ガス調査（御嶽）
- ・空振アレイ整備、磁力計整備、ACTIVE観測、稠密広帯域地震観測、ガス観測、テフラサンプリングと年代測定（阿蘇）
- ・水準測量（全路線）、GPS観測（全基線）、地震波形データ整備および波形解析、二酸化硫黄放出量測定（口永良部島）

H28年度

- ・水準観測（主要路線）、GPS観測（全基線）、地震波形解析、空中磁気測量（御嶽）
- ・ACTIVE観測、地震アレイ観測、テフラサンプリングと年代測定（阿蘇）
- ・水準測量（全路線）、GPS観測（全基線）、地震波形データ整備および波形解析、傾斜計設置、二酸化硫黄放出量測定（口永良部島）

H29年度

- ・水準観測（全路線）、GPS観測（全基線）、地震波形データ整備および波形解析（御嶽）
- ・ACTIVE観測、稠密広帯域地震観測、ガス観測、テフラサンプリングと年代測定（阿蘇）
- ・水準測量（全路線）、GPS観測（全基線）、地震波形データ整備および波形解析、傾斜計観測、二酸化硫黄放出量測定（口永良部島）

H30年度

- ・水準観測（主要路線）、GPS観測（全基線）、地震波形解析（御嶽）
- ・ACTIVE観測、稠密広帯域地震観測、ガス観測（阿蘇）
- ・水準測量（全路線）、GPS観測（全基線）、地震波形データ整備および波形解析、傾斜計観測、二酸化硫黄放出量測定（口永良部島）

（8）平成30年度及び計画期間中（平成26年度～30年度）の成果の概要：

H30年度の成果の概要

御嶽山

水準測量

2014年御嶽山噴火の収束の過程、および次の活動への準備過程の解明を目的として、2014年の噴火後に御嶽山東山麓において全長36?の水準路線において、精密水準測量を繰り返し実施してきた。

2018年4月22日～27日に全路線の測量を実施した。2017年4月24日～27日の全路線での測量および2017年9月10日～11日に実施した一部路線での測量結果と本年度の結果を比較することで上下変動を検出した。

前回全路線を測定した2017年4月の測量結果との比較から、2017年4月から2018年4月の1年間の上下変動を検出した。2017年6月25日に水準路線直下でM5.6の地震が発生し、地震の影響と考えられる30?を越える隆起が木曾温泉路線および屋敷野路線で、上松(BM34)の不動点に対して観測された。隆起は主に地震発生域で観測されている(図1)。一方、山頂に近いロープウェイ・中の湯路線では約9?の沈降が観測された。

屋敷野路線および木曾温泉路線においてM5.6の地震後の9月10日～11日に実施した測量結果の比較から、2017年9月から2018年4月の約半年間に屋敷野路線・木曾温泉路線の分岐付近を中心に約5?の隆起が検出された(図2)。この領域は、御嶽山の東山麓での群発地震が比較的活発であった2002年～2004年に実施された水準測量結果においても隆起が検出され、球状圧力源が推定されている(Kimata et al.,2004)。来年度以降の御嶽山の火山活動に伴う地殻変動の議論の際に、この群発地震活動域の変動を慎重に考慮する必要があると考える。

GNSS観測

名古屋大学では、2014年の御嶽山の水蒸気噴火以降、既存のキャンペーンGNSS観測基点を再整備しボルトを用いた6箇所のキャンペーンGNSS観測点を定期的に年1回の測量を実施してきた。また、キャンペーンGNSS観測だけでなく、御嶽山周辺に6箇所の連続GNSS観測点を新たに構築し整備してきた(図3)。図4は御嶽山山麓地域のGNSS観測によって得られた地殻変動時系列である。この時間変化により、地震前後で地殻変動速度が変化していることがわかるが、2011年東北地震後の余効変動の減衰の影響の可能性はあるが、明確ではない。図5は2017年長野県南部地震(2017年6月25日7時2分発生)に伴う地殻変動分布を示している。しかし、この地殻変動分布は地震波から得られたメカニズム解だけでは説明が難しい。よって、流体の関与があると仮定して、ポアソン比を同時推定して地殻変動場を説明することを試みた、その結果、比較的大きなポアソン比(0.32)となり、流体の存在を示唆する結果となった。

地震観測

名古屋大学では、御嶽山山頂域に多点の観測点を展開するために、小型軽量で低消費電力、作業効率のよい火山観測キットを開発中である。現時点での試作セットを使って2017年10月より、御嶽山山頂でのリアルタイム多点地震観測を試験的に行っている。過酷な環境である山頂で連続運用ができるか、ソーラーでの充電状況、雪の影響などをチェックするため御嶽山山頂に10点設置している。現時点で不安定な2点を除き8地点のデータがリアルタイムで送られてきている。

そこでこれらのデータを御嶽山から概ね10km以内にある名大の定常観測点定常観測点、気象庁、Hi-net(防災科技研)のデータに加えて震源決定を行った。図6は求められた震源分布である。地震は剣ヶ峰の南西から西の領域(地獄谷西側)で2014年噴火の火口列周辺に集中しており、深さはおおよそ-2~-1kmで南方向から噴気孔まできれいに直線上に分布することがわかった。ここで得られた観測点補正值を使って、御嶽山から概ね10km以内にある名大の定常観測点定常観測点、気象庁、Hi-netのデータだけで震源決定を行ってみると、かなり再現できることがわかった。

また御嶽山山頂域の地震観測データから低周波地震や微動が発生していることを見出した。これらのイベントについて機械学習による検知手法を考案し、テスト解析を実施した。

口永良部島

口永良部島では、2018年8月初めからSO₂の増加が顕著となると同時に新岳火口直下浅部での地震活動が活発化した。そしてGNSS観測により、8月10日から新岳をはさむ基線が約2cm伸びたことがとらえられた(図7)。その後、8月15日に地震活動が活発化し、噴火警戒レベルが4に引き上げられた。

8月27日-28日に実施された水準測量では、路線南部に向かって明瞭な地盤隆起がとらえられている(図8。KC103で2.4mm)。この変化は2015年噴火前(図中の緑太線:2014年8月~2015年3月の期間)に変動量・パターンともに類似していた。その後、地震活動は急速に低下、地盤の収縮も観測された。これは、地震活動により、マグマ貫入による応力が緩和されたためと考えられる。

その後、2018年10月21日から12月13日までほぼ連続的に噴火発生し、12月18日や2019年1月17日には爆発的噴火が発生した。これらの噴火の前にはGNSS観測で補足できる量の地盤変動は生じていなかったが、火山性地震回数の増加がとらえられた(図7)。

阿蘇火山

比抵抗構造

阿蘇火山周辺では、中岳火口周辺において2011年からACTIVE観測システム(人口電流源を用いた電磁探査システム)を用いた繰り返し観測を行い、火口浅部比抵抗の時間変化のモニタリングを行ってきた。今年度は、地下比抵抗のモニタリング精度を向上させ、より微細な地下熱水系の状態変化を捉える事を目的として、火口周辺にACTIVE連続観測システムを構築した。

連続観測システムの設置作業は2018年10月に行われた。使用したデバイスは、テラテクニカ社製高精度電磁探査装置SRM-112R(レシーバ)及び人口電流送信装置TRM-112R(トランスミッタ)で、トランスミッタを火口南側の砂千里内(図9のS01)に、レシーバを火口周辺の3点に設置した(図9のA02、A03及びB02)。また同時に、火口西側の2点(図9のA01、A04)で繰り返しACTIVE観測を行った。

各レシーバ連続観測点にはソーラーパネルを1枚設置し、12Vバッテリーを充電しつつ観測を継続させている。トランスミッタ点(S1)では120Whのソーラーパネルを計4枚設置し、本体・通信機器の電力供給を行うと共に、人口電流源のバッテリー(12V x 4)の充電を行いながら電流送信を行っている。但し電力を安定させるため、電流送信は2日に1回、夜間1時間に限って行っている。また各観測点に携帯回線を用いたモバイルルータを設置しており、観測された電流送信データ及び誘導磁場データをインターネット回線を通じ火山研究センターにテレメートさせている。

地質

中岳第1火口西方約1km地点において、噴出物層序を観察するとともに、炭化物を採取して放射性炭素(^{14}C)年代測定を実施した。

観察した断面は高さ約2mで、色調・粒径・産状などの違いによって、約150枚の火山灰層および土壌層に区分することができた。堆積物の大部分は、暗灰色から黒色を呈する砂状の火山灰であり、それらは中岳を代表する噴火様式である灰噴火による産物と考えられる。そうした火山灰層中に、白色や黄色などを呈して、おそらく水蒸気噴火に伴うと推定される堆積物が少なくとも12層確認することができた(図10の矢印)。地表には2016年10月8日の水蒸気噴火堆積物(厚さ4cm)も観察された。断面最下部付近の褐色土層層中には多数の炭化物が存在しており、それを採取して放射性炭素(^{14}C)年代測定を実施した。その結果、 70 ± 30 年という年代値(Beta-517390)が得られ、暦年代較正すると西暦1690~1730年という17世紀末~18世紀初頭という年代となった。つまり、約300年間に12層の水蒸気噴火堆積物が存在することになり、同噴火の発生頻度は25年に1回程度と見積もることができる。中岳における最近の水蒸気噴火あるいはマグマ水蒸気噴火は1958年、1979年、1990年、2015年および2016年に発生しており、その噴火間隔ともおおむね一致している。しかしながら、今回の観察地点には残存していない堆積物も存在する可能性があるため、実際にはより高い頻度で水蒸気噴火が発生していると考えられる。

地震・空振観測

火山性微動は、火山活動が活発化し噴火発生が近づく際に観察されることがある。阿蘇山で発生した2014年1月の新火孔の開口および小規模火山灰放出にともなった火山性微動を解析対象とし、火口周辺における微動振幅比の空間分布を用いてASL法による震源決定を行った。微動源は、地表面から400mの深さまでの円筒領域(直径100~150m)に分布し、地表火山活動の変化と関連してその位置が変化した。火山性熱流体のフラックス増加によって、火道確立とサイズ拡大とが順次生じたものと

理解される。マグマだまりから火口へとつながる通路のうちの最終領域についてイメージングできたものと考えられる。

阿蘇山 2014-2015 年噴火は、断続的なストロンボリ式噴火の発生で特徴付けられる。ストロンボリ式噴火は世界でもっともよく研究されている噴火様式ではあるが、火道内における気相移動過程についての理解は必ずしも十分でない。阿蘇での地震・空振シグナルの到着時間差を用いて推定した移動速度は 100 m/s を超えるものであり、室内実験から予測される値やストロンボリ火山での推定値よりはるかに速い。このような速度を説明するには、従来考えられてきたような単一スラグの上昇ではなく、環状流のような、より複雑なメカニズムが効いていることを意味する。すなわち、ガスフラックスの一時的な増加により、地表にまで通じる経路が火道内に形成され、その中を気相が高速で上昇するというようなことを考えるべきである。

阿蘇山の 2014-2015 年の噴火活動期間中、ほぼ毎日のように、0.4-0.7 Hz にピークを持つモノクロマティック空振が観測された。火道上部での火山ガスや火山灰噴煙の流動、もしくは、ストロンボリ式噴火の発生などによって駆動された圧力擾乱がトリガーとなり、火道内共鳴によってモノクロマティック空振が発生していたと考えられる。そこで、実際の三次元火口地形データにシリンダー型火道を配置した計算領域を設定し、空振伝播の FDTD モデル計算を実施した。計算によって、観測された波形形状やピーク周波数はよく再現され、とくに、火道長さがピーク周波数を規定していることが明らかになった。たとえば、2015 年 4 月下旬時点でのマグマヘッドまでの深さは 120 m と計算された。地震・空振記録を参照することで、より詳細にマグマヘッドの深さの時間変化を見積もることが可能になると考えられる。

熱観測

2000 年から 2017 年にかけての阿蘇中岳の熱活動について、MODIS-MIROVA などの観測衛星データと地上現地観測データとによって評価した。熱活動位置は山頂火口内の二箇所（火口中心と南壁噴気地帯）に存在しており、おおむね、合計 3MW 程度のしきい値で活動期と非活動期とを区分することができた。とくに、2014-2015 年の噴火活動期間中は、火口中心部で高い放射強度を示す一方（最大で 16MW）、噴気地帯では 2MW 程度の値で安定していたことも明らかとなった。ここで使用した熱活動モニタリングのデータおよび解析手法が、準リアルタイムの火山活動監視ツールのひとつになる得ることを意味する。

計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要

2014 年に噴火した口永良部島と阿蘇山および御嶽山において、水蒸気噴火後の活動推移予測のための観測的研究を実施した。口永良部島と御嶽山では、気象庁による噴火警戒レベル 1 の状態で噴火が発生したが、口永良部島ではその後の 2015 年 5 月や 2018 年 10 月の噴火に至る過程で、山体膨張、火山ガスの放出量の増加、地震活動の活発化がとらえることができた。御嶽山では、噴火から 1 年以内に火山ガスの放出率は検出限界レベル以下になり、地殻変動や山頂直下の地震のメカニズム解も 2016 年 9 月以降は山体収縮を示すものとなっている。阿蘇火山では、2016 年の熊本地震によりリアルタイムの火山観測が一時的に機能不全に陥ったが、その後順次復旧され、2016 年 10 月 8 日の爆発的噴火に至る過程で、山体膨張、火山ガスの放出率増加、火山性長周期地震の活発化がとらえられ、得られたデータは同火山における噴火警戒レベル設定基準の見直しに役立てられた。

3 火山での比較研究から、火山活動の推移予測には、GNSS や水準測量による地殻変動観測、火山ガス（二酸化硫黄）放出率の観測、地震観測が重要であることが、再確認された。得られた知見は、吾妻山など他の火山の活動予測に役立てることができるであろう。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
Minami, T., Utsugi, M., Utada, H., Kagiya, T., and Inoue, H., Temporal variation in the resistivity structure of the first Nakadake crater, Aso volcano, Japan, during the magmatic eruptions from November 2014 to May 2015, as inferred by the ACTIVE electromagnetic monitoring system, Earth, Planets and Space, 10.1186/s40623-018-0909-2, 2018

Shinohara, H., Yokoo, A., and Kazahaya, R., Variation of volcanic gas composition during the eruptive period in 2014-2015 at Nakadake crater, Aso volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, 70, 151, doi: 10.1186/s40623-018-0919-0, 2018.

Ichimura, M., Yokoo, A., Kagiya, T., Yoshikawa, S., and Inoue, H., Temporal variation in source location of continuous tremor before the ash-gas emissions in January 2014 at Aso volcano, Japan, *Earth, Planets, and Space*, 70, 125, doi:10.1186/s40623-018-0895-4, 2018. Cigolini, C., Coppola, D., Yokoo, A., and Laiolo, M., The thermal signature of Aso Volcano during unrest episodes detected from space and ground-based measurements, *Earth, Planets and Space*, 70, 67, doi:10.1186/s40623-018-0831-7, 2018

Huang, Y.C., Ohkura, T., Kagiya, T., Yoshikawa, S., and Inoue, H., Shallow volcanic reservoirs and pathways beneath Aso caldera revealed using ambient seismic noise tomography. *Earth, Planets and Space*, 70,169, 10.1186/s40623-018-0941-2,2018

Ishii, K., Yokoo, A., Kagiya, T., Ohkura, T., Yoshikawa, S., and Inoue, H., Gas flow dynamics in the conduit of Strombolian explosion inferred from seismo-acoustic observation at Aso volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, 10.1186/s40623-019-0992-z, 2019

Yokoo, A., Ishii, K., Ohkura, T., Kim, K., Monochromatic infrasound waves observed during the 2014-2015 eruption of Aso volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, 71, 12, doi:10.1186/s40623-019-0993-y, 2019.

Morita, M., Mori, T., Yokoo, A., Ohkura, T., and Morita, Y., Continuous monitoring of soil CO₂ flux at Aso volcano, Japan: The influence of environmental parameters on diffuse degassing, *Earth, Planets and Space*, 71, 13, doi:10.1186/s40623-018-0980-8, 2019.

日本大学, 名古屋大学, 京都大学, 九州大学, 東濃地震科学研究所, 気象庁 (2018) 精密水準測量による御嶽山における上下変動 (2014年10月~2018年4月), 火山噴火予知連絡会会報, 130, 受理済み

村瀬雅之、森濟、李楊、大淵一樹、山中佳子、前田裕太、堀川信一郎、奥田隆、松廣健二郎、田ノ上和志、松島健、手操佳子、宮町凜太郎、森田花織、吉川慎、井上寛之、木股文昭、柳澤宏彰、松村智之、谷口隆文、精密水準測量によって検出された御嶽山2014年噴火後の上下変動(2014-2017), 日本地球惑星科学連合2018年大会 SVC41-P23, 2018.

学会発表

山中佳子・前田裕太・寺川寿子・堀川信一郎, 御嶽山山頂観測試験と御嶽山山頂付近での地震活動, 日本地球惑星科学連合2018年大会, SVC41-19, 2018.

前田裕太・山中佳子・寺川寿子・堀川信一郎, 山頂観測試験により得られた御嶽山2017年秋の地震活動の特徴, 日本地球惑星科学連合2018年大会, SVC41-P21, 2018.

伊藤武男・松廣健二郎、2017年6月長野県南部地震に伴う地殻変動、日本測地学会第130回講演会、P23、2018

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要:

御嶽山では、山頂域での地震観測の結果を踏まえて観測点の強化や再配置等を行う。そのデータを用いて低周波地震や微動を含む山頂域浅部の地震活動の検知と解析を進める。GNSSキャンペーン観測を行い、山麓の落合唐谷-田の原路線で現在見えている収縮の空間分布を明らかにする。現行計画で行われているSAR解析を継続実施し、御嶽山浅部における水収支モデルを完成させる。周辺域・山麓域での地震・GNSS定常観測を継続する。

口永良部島火山では、数ヶ月から数年の時間スケールにおける、マグマ蓄積過程とマグマ蓄積量・率を明らかにするために、定常地震観測、定常GNSS観測と繰返し水準測量を実施する。

阿蘇火山では、マグマ噴火活動後の地下熱水系回復過程をモニタリングするための多項目観測を実施し、水蒸気噴火発生場の普遍的モデル構築の足がかりとする。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

附属地球熱学研究施設火山研究センター : 大倉敬宏・宇津木充・横尾亮彦・鍵山恒臣

他機関との共同研究の有無 : 有

名古屋大学大学院環境学研究科 : 山中佳子・伊藤武男・寺川寿子・前田裕太

京都大学防災研究所 : 中道治久・井口正人・味喜大介・山本圭吾・為栗健

北海道大学大学院理学研究院 : 橋本武志・茂木透・中川光弘・森済

東京大学地震研究所 : 小山崇夫・加藤愛太郎

東京工業大学火山流体研究センター : 野上健治・神田径・寺田暁彦

東北大学大学院理学研究科 : 山本希

東京大学大学院理学系研究科 : 森俊哉

九州大学大学院理学研究院 : 松島健

日本大学文理学部 : 村瀬雅之

熊本大学教育学部 : 宮縁育夫

東濃地震科学研究所 : 木股文昭

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター

電話 : 0967-22-5000

e-mail :

URL : <http://www.aso.vgs.kyoto-u.ac.jp>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 大倉敬宏

所属 : 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター

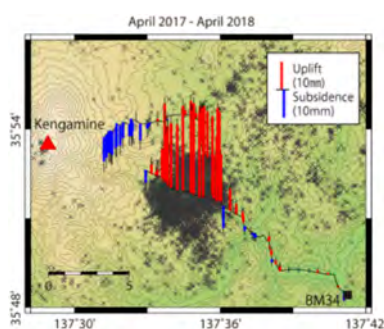


図 1

御嶽山における 2017 年 4 月から 2018 年 4 月の上下変動。同期間に発生した地震の震央を × で示す。(気象庁一元化震源データを使用)

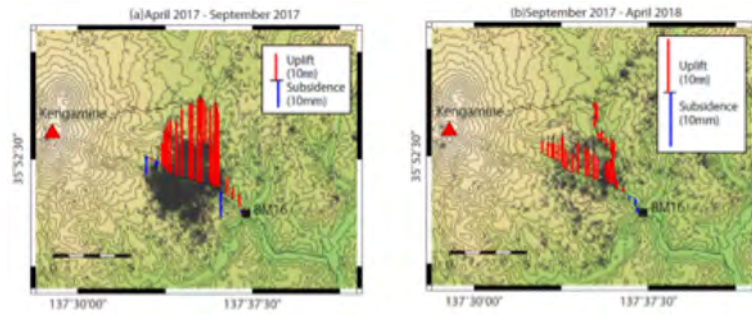


図 2

(a) 御嶽山における 2017 年 4 月から 2017 年 9 月までの上下変動および、(b)2017 年 9 月から 2018 年 4 月の上下変動。同期間に発生した地震の震央を × で示す。(気象庁一元化震源データを使用)

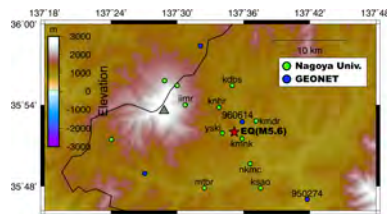


図 3

御嶽山山麓の GNSS 観測点と長野県南部地震 (M5.6) の震源位置

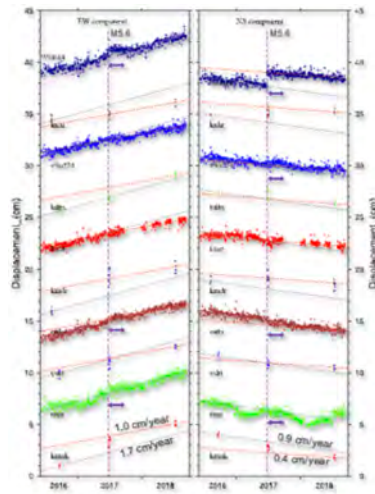


図 4

御嶽山山麓地域の GNSS 観測により得られた地殻変動時系列。左図：東西成分、右図：南北成分 破線：近似線 地震前 (灰色) 地震後 (赤色)

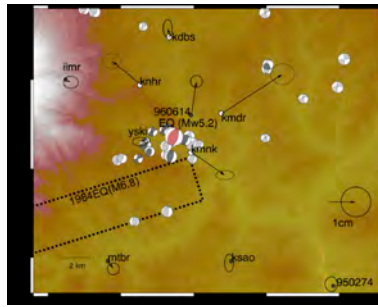


図 5

2017年長野県南部地震に伴う地殻変動分布。また、この周辺で発生した地震のメカニズム解（F-NET解）を示している。赤：長野県南部地震、薄い灰色：長野県南部地震以前の地震、濃い灰色：長野県南部地震以降の地震、破線の長方形は1984年の長野県西部地震の震源域を示している。

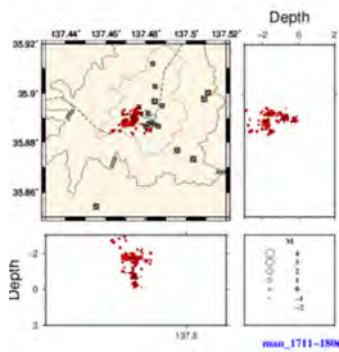


図 6

御嶽山山頂域地震観測点で得られたデータと名大定常観測点，気象庁，Hi-net観測点データを用いて求めた震源分布

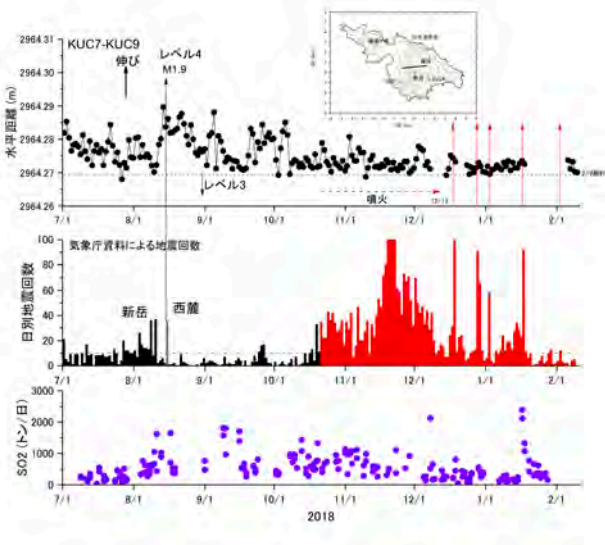


図 7

2018年の口永良部島の噴火活動の推移と地盤変動

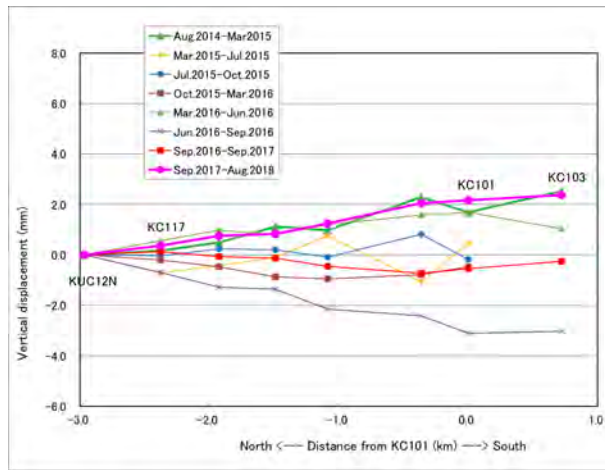


図 8
口永良部島における水準測量によりとらえられた地盤変動



図 9
2018 年 ACTIVE 観測・観測点分布

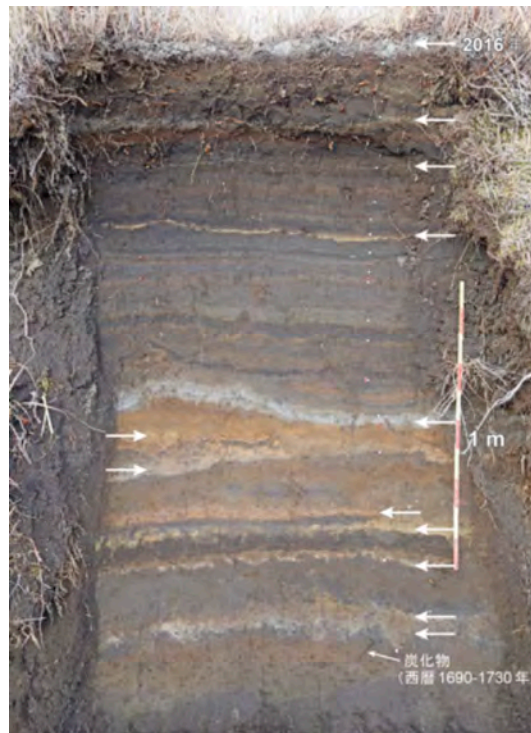


図 10

阿蘇火山中岳第 1 火口西方約 1 km 地点における噴出物層序。矢印は水蒸気噴火に伴うと推定される堆積物を示す。

(1) 実施機関名：

京都大学理学研究科

(2) 研究課題(または観測項目)名：

実観測データに基づく断層面の摩擦パラメータと地殻活動の状態推定のためのデータ同化手法の構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

大地震の発生予測へとつながる地震サイクルシミュレーションを行うにあたっては、摩擦構成則に現れる摩擦パラメータをどのように設定するかが重要である。観測データから摩擦パラメータを推定する手法としてはいくつか候補が考えられるが、データ同化の理論やアルゴリズムの実際の問題への適用可能性は、データとモデルの特性に強く依存する。そこで、複数のデータ同化アルゴリズムを用い、設定された物理モデルに対する各アルゴリズムの特性や適用上の問題点を調査するとともに、その結果に基づいてアルゴリズムの改良を行う。

第 1 の課題として、豊後水道や八重山地域のように繰り返し発生してきたスロースリップを対象に、速度・状態依存摩擦構成則に基づいて断層面上の摩擦パラメータおよびすべりの履歴を推定する手法を確立する。基礎となる手法としてアジョイント法とアンサンブルカルマンフィルタ・粒子フィルタ(特殊な例として SIS を含む)という 2 つのやや性質の異なるアプローチをとり、それぞれの手法の長所・短所を調査する。それに基づき、摩擦パラメータやすべりの履歴を推定する上で最適と考えられる手法を構築する。また、数値シミュレーションの分野で利用されている階層型行列(H-matrix)をデータ同化にも適用し、計算の高速化を図る。

第 2 の課題は、余効すべり域の摩擦パラメータ推定の問題である。余効すべりを扱う上では、観測データに含まれる複数のプロセスから余効すべりの成分のみを抽出し、摩擦パラメータの推定に用いることが肝要である。そこで本課題では、速度・状態依存摩擦構成則に従う余効すべりと、地震時のすべり及び余効すべりによる上部マントルの粘弾性応力緩和の双方を取り入れたプレート境界地震の余効変動の物理モデルを構築し、GPS データを用いてプレート境界の余効すべり域における摩擦パラメータや初期条件、上部マントルの粘性率を推定するためのデータ同化手法を開発する。複数のアルゴリズムを用いた結果に基づいてアルゴリズムの改良を行い、GPS データを同化し、余効すべり領域の摩擦パラメータと上部マントルの粘性率を推定する。

摩擦パラメータの妥当な値を決めるためには、推定の信頼性や空間分解能を一層高めることが不可欠である。そこで本課題の第3の課題として、地震活動をデータとした摩擦パラメータ推定を行う。解析の枠組みとしては、Dieterich(1994)による摩擦構成則に基づく地震活動度モデルを用い、実際の地震活動度に合うよう摩擦パラメータの推定を行う。計算アルゴリズムとしては、マルコフ連鎖モンテカルロ法が、まず考えられるが、主に計算時間の面でコストが高い。プレート境界のように、地震サイクルシミュレーションの精度向上に寄与出来るような広い領域を扱うには限界があるため、特にこの点を考慮した解析手法の確立を目指す。例えば、「ラプラス近似」など、統計科学で用いられる近似手法の適用を検討し、効率的なアルゴリズムの開発を行う。そして、比較的小さな解析領域を対象とした、人工的に生成したデータに基づく数値実験(いわゆる「双子実験」)から始め、地震サイクルシミュレーション等から得られる結果との整合性を踏まえつつ、実データへの適用を行う。その状況に応じ、パラメトリックモデルの導入なども検討し、最終的には、例えば、2011年東北地方太平洋沖地震の余震データを解析することで、三陸沖全体のような広い領域での解析を行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要:

(平成26~28年度)

スロースリップおよび余効すべりの課題では、粒子フィルタ、アンサンブルカルマンフィルタ、マルコフ連鎖モンテカルロ法等の複数のデータ同化アルゴリズムの計算コードを作成する。初めに、これらのアルゴリズムを摩擦パラメータの空間分布が低解像度の比較的小規模なモデルに適用して数値実験を行い、アルゴリズムの特性や適用上の問題点を明らかにする。また、初期条件と摩擦パラメータを同時に推定する方法を数値実験により検討する。この結果を基にパラメータ推定が効率的に行えるようにアルゴリズムの改良を行い、改良されたアルゴリズムを実データに適用する。

地震活動データ同化の課題では、計算コストの軽減化、特に計算速度の短縮に重点を置いたアルゴリズム開発、比較的小さな領域を対象とした数値実験、例えば、2005年宮城県沖地震の余震データを用いるなどした、小領域における実データ解析を行う。

(平成29~30年度)

スロースリップおよび余効すべりの問題では、摩擦パラメータ空間分布が複雑になり、モデルが比較的大規模になった場合の同化アルゴリズムの性能を数値実験により検討する。これらの結果を基に、比較的大規模なモデルにも適用できるように同化アルゴリズムを改良する。改良されたアルゴリズムを実データに対して適用する。

地震活動データ同化の課題では、広い領域を扱うためのアルゴリズム拡張と、それに関連する数値実験、そして、2011年東北地方太平洋沖地震の余震データなど、広い領域に対する実データ解析を行う。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要:

1. アンサンブルカルマンフィルタに基づくデータ同化手法の研究

昨年度までに、スロースリップを模したすべり分布を仮定し、断層面上の滑り分布をデータとして、アンサンブルカルマンフィルタに基づくデータ同化手法の構築を行った。しかし、非常にテクニカルな問題がいくつか残されていた。今年度は、構築したシステムの振る舞いについて詳細に調査を行った。複数回のデータ同化を行う際に、同化計算が途中で発散してしまうという問題がある。細かく調査したところ、スロースリップが始まり、予測値と観測データが乖離し始めた際に、予測誤差を超えて状態の更新ができず、発散するという傾向が見られた。観測データや予測値にノイズを加えるなどいくつかの試行を行い、状況は改善しつつあるが、まだ完全な解決には至っていない。また、実データの利用についての検討も開始した。データをそのまま同化に用いると上述の問題が発生するので、平滑化などの手続きが必要であると考えられ、検討を開始した。

計画期間全体では、初めに、断層面上の滑り分布をデータとして、アンサンブルカルマンフィルタ、アジョイント法、マルコフ連鎖モンテカルロ法等のデータ同化手法に基づく摩擦パラメータ推定のための計算コードを作成した。これらのアルゴリズムを摩擦パラメータの空間分布が低解像度の比較的

小規模なモデルに適用して数値実験を行い、アルゴリズムの特性や適用上の問題点を明らかにした。次に、2003年十勝沖地震の余効すべりデータに適用し、余効すべり発生域の摩擦パラメータの空間分布を明らかにした。その結果、同地震の余効すべりは速度強化域で発生していることが分かった。

2. スロースリップイベント発生域の摩擦パラメータの推定

琉球海溝南西部八重山諸島近傍において、およそ6ヶ月周期で繰り返し発生するスロースリップイベント（SSE）に伴う断層すべり速度の時間発展の振る舞いがSSE毎に異なることを示した（図1、Kano et al. 2018）。このすべり速度の振る舞いを、1自由度のばねスライダーモデルでモデル化し、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いてSSE発生域の摩擦パラメータの推定を試みた（図2）。その結果、SSEごと、また一つのSSEの時系列の中でも、推定に使用するデータ期間により摩擦パラメータの分布が異なることが分かった。単純なモデルを用いたため、大自由度系のモデルを用いた場合の検討は必要ではあるが、この結果はプレート境界周辺の流体分布や摩擦の分布が時間変化している可能性を示唆している。

計画期間全体では、まず琉球海溝南西部のSSEを対象に断層すべり過程の解明を行い、すべり速度の振る舞いがSSE毎に異なることを示した。ここで得られたすべり速度を基に、マルコフ連鎖モンテカルロ法で摩擦パラメータの推定を行ったところ、流体分布を含む摩擦パラメータが時間変化している可能性が示唆された。

3. データ同化のための断層すべり速度推定に関する研究

本項目では、上記のようなデータ同化研究で使用するために、豊後水道で発生しているスロースリップイベントのすべりの時空間分布を、データの時間方向の滑らかさに応じて平滑化を課す手法（Fukuda et al. 2008）に基づいて推定した。

1996年から2011年の東北沖地震前までの15年間のGEONETのデータに対してインバージョンを行った。1997年から約6-7年おきに発生している長期的スロースリップは、いままで推定されていたよりも規模の小さい長期的スロースリップと複数の短期的スロースリップからなることが明らかになった。また、15年間にわたり、3-4ヶ月ごとに短期的スロースリップが発生しており、微動と同期して発生していることも確認された。

計画期間全体では、琉球海溝南西部と豊後水道のスロースリップイベントに対して、GNSS時系列データからすべりの時空間分布を推定した。

4. 余効変動の物理モデルのパラメータ推定

昨年度までに構築した摩擦構成則に従う余効すべりとマンツルの粘弾性応力緩和を組み合わせた余効変動の物理モデルを用いて、2011年東北沖地震の余効変動のモデル化を行った。このモデルでは地震時の応力変化によって粘弾性緩和と余効すべりが駆動され、余効すべりの時間発展は摩擦構成則に従うと仮定している。従って、モデルによる余効変動の計算値は、プレート境界の摩擦パラメータ、マンツルの粘性率、地震時のすべり分布等の関数である。余効変動のモデリング研究では地震時のすべり分布は固定されることが多いが、昨年度までの研究から、余効すべりの時空間発展は地震時の応力変化に強く依存することが分かっている。そこで今年度は、東北沖地震時の地表変位及び地震後7年間の地表変位の時系列データを用いて、プレート境界の摩擦パラメータ、海洋マンツル及びマンツルウェッジのMaxwell及びKelvin粘性率、地震時のすべり分布とそれに対する平滑化パラメータを同時に推定する手法の開発を行った。図3に推定された地震時のすべり分布及び推定されたパラメータを用いてモデルから計算された積算余効すべり分布の時間変化を示す。地震時の応力変化によって駆動される粘弾性緩和と余効すべりにより、地震後7年間の地表変位の時空間パターンを水平・上下変動共に概ね説明することができた。

計画期間全体としては、(1)余効変動の物理モデルを構築し、(2)物理モデルのパラメータであるプレート境界の摩擦パラメータ、マンツルの粘性率、及び地震時のすべり分布とそれに対する平滑化パラメータを2011年東北沖地震時及び地震後7年間のGNSS及び海底地殻変動データを用いて推定したことが成果として挙げられる。

5. 統計モデルと物理モデルの混合による地震活動モデルの改善

前年度までに摩擦構成則に基づく Dieterich [JGR, 1994] の地震活動度モデルから物理パラメータを推定する試みを行って来た。但し、Dieterich のモデルと現実の地震活動との適合性は高いとは言えず、Iwata [Pageoph, 2016] (以下、rate-and-state モデル) のような改良を行ってもまだ改善の余地が多くあると言える。即ち、そもそもこのモデルがどこまで実際の地震活動に適用可能であり、またどのようにモデルを改善すべきかを調べるのが、こういった試みには不可欠と考えられる。

現時点で標準的とされ、おしなべて現実の地震活動への適合性がよい地震活動モデルは ETAS モデル [Ogata, JASA, 1988] である。ただし、rate-and-state モデルが応力変動のような物理的要因を直接取り入れたモデルであるのに対し、ETAS モデルは純粋な統計モデルである。1つの方向性として、こういった統計モデルと組み合わせることで、物理モデルの問題点を補うことが考えられる。

こういったことを踏まえ、地震活動モデル改善の試みの1つとして、地震活動の時間発展を表す点過程モデルとして、ETAS モデルと rate-and-state モデルを混合したものを考える。即ち、ある時刻 t における単位時間当たりの地震発生率 (レート) を $l(t) = m + k(\text{ETAS モデル}) + (1 - k)(\text{rate-and-state モデル})$ という形で与える。 k が ETAS モデルと rate-and-state モデルの混合比に対応する。また m は定常的な地震活動 (background seismicity) に相当する。

一例として、2000年の伊豆諸島群発地震へ適用した例を以下に示す。地震活動データには気象庁一元化震源カタログを用いた。解析期間は2000年6月1日から9月30日までの3ヶ月間、マグニチュードは3.0以上とした。地震数は4897個である。

まず、上記モデル (以下、混合モデル) だけでなく、ETAS モデルおよび rate-and-state モデルそれぞれを単独で適用した場合についても解析し、AICによるモデル比較を行った。その結果、ETAS モデル、rate-and-state モデル、混合モデルに対する AIC はそれぞれ 1099.5、1114.0、1093.7 となり、混合モデルが有意によい (AIC の値が小さい方がよく、また差が 1~2 程度あれば有意とされる) ことが示された。

また、ETAS モデル及び混合モデルに対する残差解析の結果を図4に示す。ETAS モデルで大きく正または負に振れている部分が、混合モデルにおいてはある程度押さえられ、ETAS モデルの実際の地震活動のズレを修正している様子が見て取れる。

この他、ベイズ的手法による地表付近の速度構造を求める手法開発についても研究を行った。

計画期間全体としては、地震活動から大地震時の滑り分布や摩擦パラメータ推定を行うための手法開発に取り組んだ。推定時には滑り分布に対し、空間平滑化の重みを掛けるが、この重みをどう選択するかが問題となった。そこで、本震のマグニチュードを確率分布 (事前分布) として与えることで、重みのベイズ推定を行い得るよう手法を改善した。また、摩擦パラメータの深さ依存性が取り入れられるよう、手法の拡張も行った。他方、地震活動のみからこういった推定を行うことには推定精度などの面から限界があるため、地殻変動データと組み合わせた推定手法の予備の開発についても行った。

- (9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
- Cho, I., and Iwata, T., 2019, A Bayesian approach to microtremor array methods for estimating shallow S wave velocity structures: Identifying structural singularities. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 124, doi: 10.1029/2018JB015831.
 - Fukuda, J., and K. M. Johnson, 2018, Coupled frictional afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Tohoku-oki earthquake, 2018 AGU Fall Meeting.
 - Kano, M., Fukuda, J., Miyazaki, S., & Nakamura, M., 2018, Spatio-temporal Evolution of Recurrent Slow Slip Events Along the Southern Ryukyu Subduction Zone, Japan, From 2010 to 2013. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123. <https://doi.org/10.1029/2018JB016072>.
 - Kano, M., Fukuda, J., Miyazaki, S., & Nakamura, M., 2018, Temporal variation of SSEs in the southern Ryukyu subduction zone: Implications for frictional parameters on the fault, Joint Workshop on Slow Earthquakes 2018.
- 加納将行・宮崎真一・平原和朗、アジョイント法による SSE 発生域の摩擦特性の推定、日本地震学会

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

次期計画では、以下のような研究を「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」で実施する。

1. GNSS データの EnKF 解析による LSSE 断層における摩擦特性とすべり発展および巨大地震震源域でのすべり欠損レートのリアルタイム推定・予測

逐次データ同化手法であるアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) を用いて、GNSS データから長期的スロースリップイベント (LSSE) 断層域における摩擦特性とすべり発展、および巨大地震震源域におけるすべり欠損レートのリアルタイム推定および予測を行う手法を構築する。まずは、その手法を豊後水道周辺での GEONET データに適用し、実データ解析により豊後水道 LSSE 域における摩擦特性とすべり発展および南海地震震源域におけるすべり欠損レートの推定・予測を行う。次に、順次他の LSSE 域へ対象を広げ、実データ解析を行う。また、EnKF とアジョイント法を融合したハイブリッドデータ同化法を開発する。

また、これに関連し、八重山での GNSS 観測や、八重山および豊後水道でのすべり速度の推定についても継続して実施する。

2. 断層面上の断層パラメータ分布の推定手法の開発

これまで断層面上の摩擦パラメータを事前に与えていたが、来年度は機械学習的な手法を用いて、データに基づいて分布を推定する手法の開発に着手する。すでに手法の構築は終わっているが、来年度は簡単なジオメトリで人工数値データを用いて数値実験を実施する。

3. 地震活動データと地殻変動データの統合解析手法の開発

地殻変動データと地震活動データを統合的に扱い、地中滑りの時空間分布推定手法の開発を行う。両データの統計的特性は大きく異なるので、この差異を考慮した上で、適切に両データ間の重みを客観的に決める点が重要となる。平成 31 年度については、人工データによる双子実験を中心として、この重み付けの部分に関する手法開発・検証を中心に行う。また、地震波形データ (P 波初動) から得た情報を元に推定した応力場情報を補助的に用いることを考えている。この応力場推定に関する手法はある程度完成している (Iwata, 2018, JGR) が、その推定精度向上に向けた手法改善も行う。

4. 地殻変動および地震活動データを用いた、南海トラフ地震サイクル中でのプレート間固着・すべり蓄積推定

地殻変動データに加え、Saito 他 (2018) により開発されたプレート間固着レートによる静的歪みエネルギーの時空間変動と地震活動の関係から、プレート間固着・すべりレートの時空間変動を逆解析する手法の開発を行い、昭和東南海・南海地震前後から現在に至るプレート間固着・すべり蓄積の時空間発展を追い、摩擦構成則に基づき、次期南海トラフ巨大地震発生に向けて応力蓄積状態を探る。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

京都大学大学院理学研究科：宮崎真一

他機関との共同研究の有無：有

理化学研究所革新知能統合研究センター非常勤研究員：平原和朗

京都大学防災研究所：西村卓也

東京大学地震研究所：福田淳一・長尾大道

海洋研究開発機構：堀高峰・日吉善久

常磐大学コミュニティ振興学部：岩田貴樹

東北大学大学院理学研究科：加納将行

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：京都大学大学院理学研究科

電話：075-753-3911

e-mail：miyazaki.shinichi.2m@kyoto-u.ac.jp

URL：

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：宮崎真一

所属：京都大学大学院理学研究科

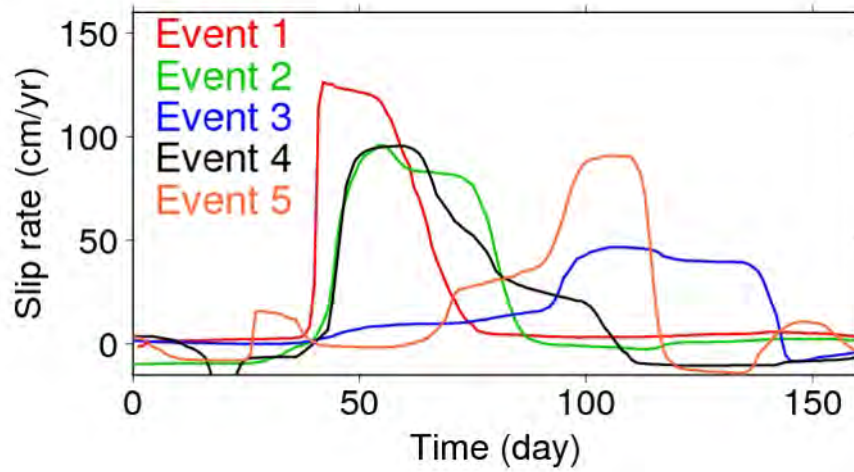


図 1

琉球海溝南西部で 2010-2013 年にかけて発生した 5 回の SSE のすべりの中心付近における断層すべり速度の時間発展。

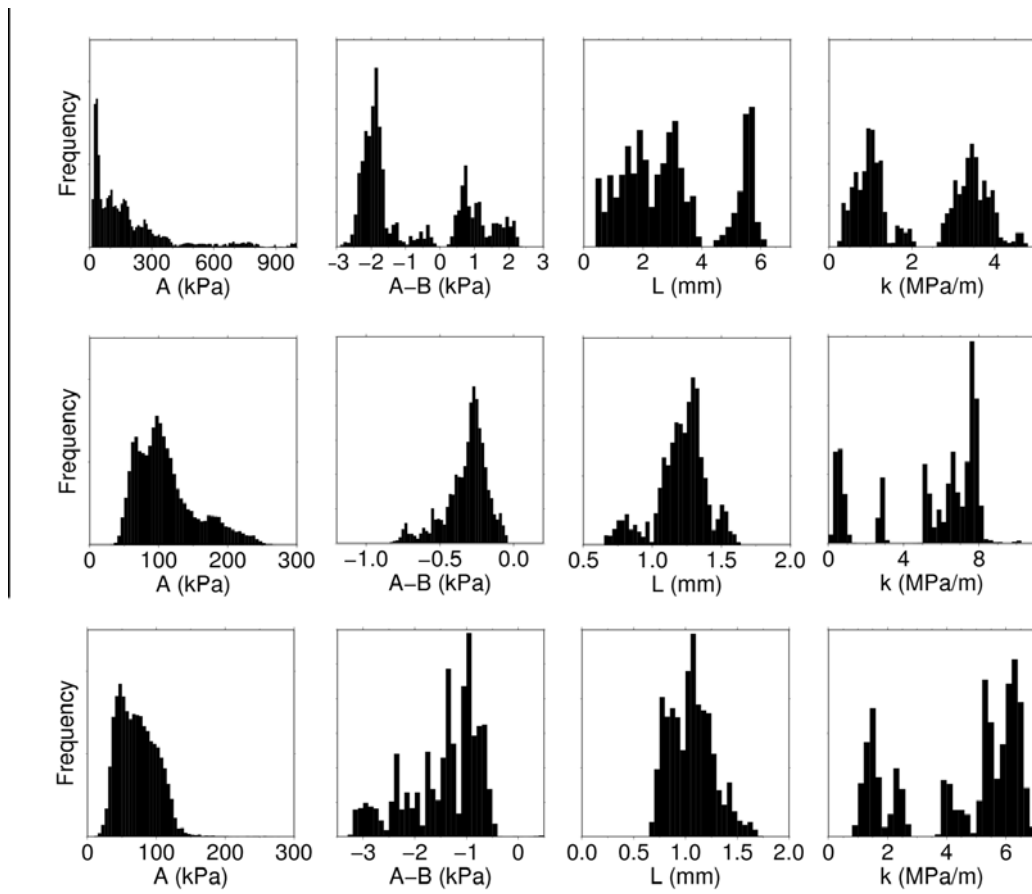


図 2

(上段) 2010 年 8 月の SSE の減速時、(中段) 2011 年 3 月の SSE の加速時、(下段) 2011 年 3 月の SSE のすべり速度データから推定したパラメータの分布。

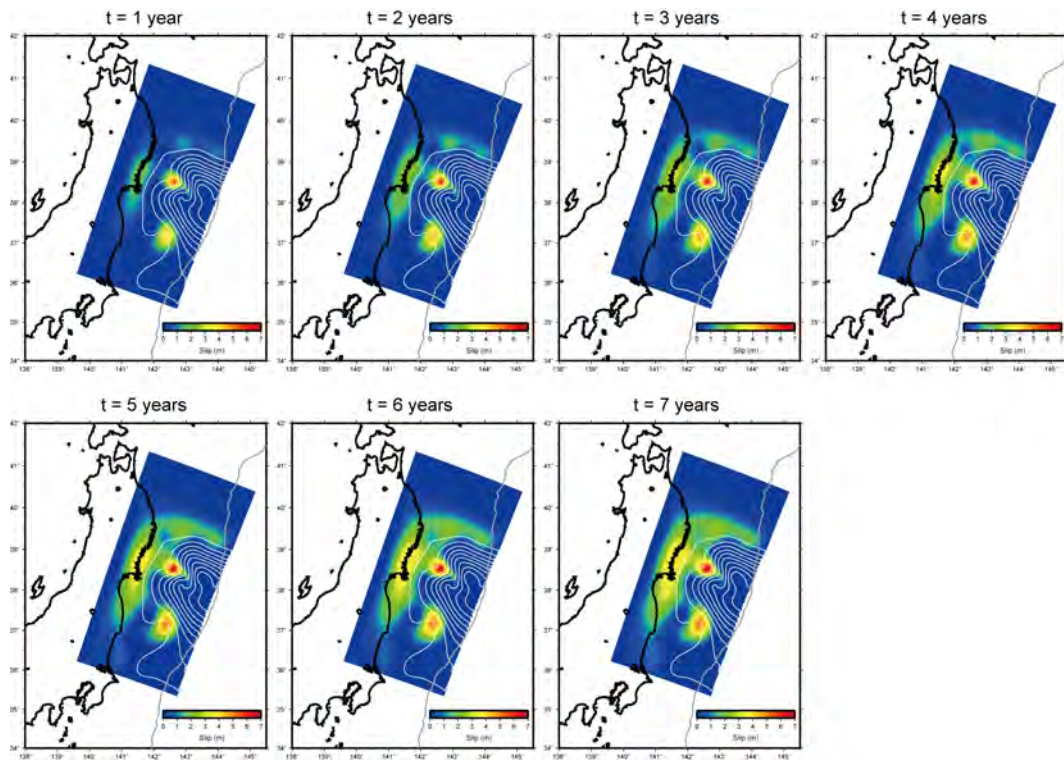


図 3

推定された地震時のすべり分布（白コンター）及び推定されたパラメータを用いてモデルから計算された積算余効すべり分布（カラー）の時間変化。コンターの間隔は 5m。

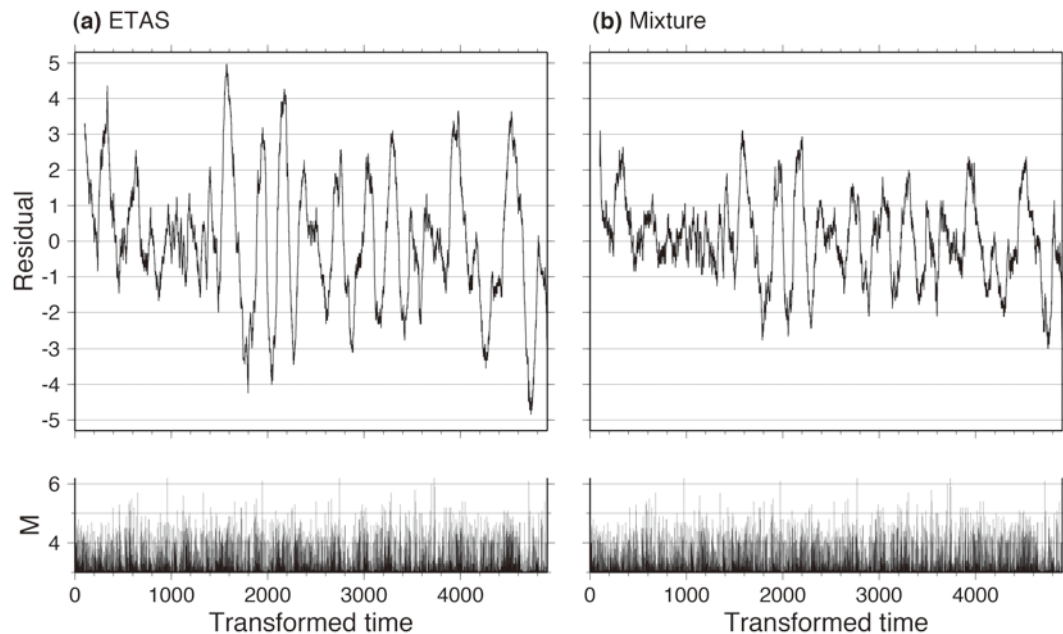


図 4

残差解析の結果。実際の地震活動がモデルに適合していれば定常ポアソン過程（発生率一定）になるよう時間軸を伸び縮みさせて変換し（Transformed time）、定常ポアソン過程と実際のデータとの残差（Residual）を示してある。残差が正であれば実際の地震活動の方がモデルよりも高く、負であれば低いことになる。(a)ETAS モデルに対する結果および (b) 混合モデルに対する結果。

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

史料の収集・翻刻・解析による過去の大地震および自然災害の調査

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ア. 史料の収集とデータベース化

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料，考古データ，地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

4. 研究を推進するための体制の整備

(3) 関連研究分野との連携の強化

(4) 研究者，技術者，防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震史料の収集、翻刻、解析により、過去の地震および関連する現象についての情報を得る。特に南海トラフの巨大地震にともなう上下地殻変動の解明、および、地震の本震・余震の分離や震源域の確定、地震にともなう災害(強震動、地盤沈下、地すべり、洪水など)の理解を目指す。地震が一定の期間を置いて繰り返す性質があることから、過去の履歴をより詳細にとらえることで防災・減災に貢献する。また、史料には地震そのものだけでなく、これによる被害状況やそれへの対応などの情報も含まれており、研究計画のことばを借りれば「災害誘因」「災害素因」を合わせた情報を得ることにより、地域の防災・減災に貢献できると考えている。

(7) 本課題の5か年計画の概要 :

史料の収集および現地調査、史料の解読をおこない、得られたデータをもとに過去の地震の解析を実施する。斜面崩壊や洪水などの災害、地変など付随する諸現象にも着目する。対象は、史料の収集状況にも依存するが、たとえば南海トラフの巨大地震、内陸の大地震(特に斜面崩壊をともなったもの。たとえば、慶長伏見地震、寛文近江若狭、弘化善光寺地震、安政伊賀上野地震、寛政雲仙噴火、天明浅間噴火)などである。

あわせて、歴史学の専門家の協力を得て、合宿形式等の研究会(翻刻を主とした史料解析の実践)を開催するなどして、地震学のバックグラウンドをもちながら史料の解読もできる人材を育成する。

以上の研究については、5年間継続して実施するが、平成26年度~27年度は内陸地震、平成28年度~30年度は南海トラフの巨大地震について調査・解析をおこなうこととする。合宿形式の研究会については毎年実施する。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要 :

平成30年度は寛文年間および寛永以後の京都周辺の地震活動について史料の翻刻を実施した。市民参加型のオンライン翻刻プロジェクト「みんなで翻刻」に順次史料を追加し、運営に協力した。1854年伊賀上野地震の際に伏見で発生した液状化被害について検討した[加納(2018)]。1707年宝永地震と富士山噴火に関する史料の履歴および記述について複数の史料を用いて精密に検証した。1856年天正地震の液状化被害や2018年に発生した大阪府北部の地震での文化財被害の分析を通じて、歴史地震における震度変換手法の高度化に向けた研究を開始した。また、古地震に関する合宿形式の研究会(翻刻を主とした史料解析の実践)を実施した(平成30年9月、平成31年3月)。

これまでに解読した史料について、名前、対象とする地震等を末尾にする。

弘瀬・中西(2015, 2016)は、「蕨岡家文書」にある「嘉永七甲寅年大地震記録」の原本コピーにより、安政南海地震時の愛媛県愛南町での地震動の推移、地震に伴って発生したその他の自然現象と被害を詳しく検討した。坂崎ほか(2015)は、安政三年江戸台風について、「安政風聞集」などに基づく進路の推定をおこなった。1847年2月15日(弘化四年一月一日)に越後高田で発生したとされてきた地震被害は、実際には存在せず、1847年5月8日(弘化四年三月二四日)の地震(いわゆる善光寺地震)によるものだったことをしめた。1831年11月14日(天保二年一〇月一一日)に佐賀で発生したとされてきた地震被害は、実際には存在せず、1831年11月13日(天保二年一〇月一〇日)の会津の地震の被害記事を誤って認定したものであることを示した[加納(2017)]。これらの研究は、これまでに蓄積されてきた地震史料の再評価により、より正確な歴史地震カタログを作成することができることをしめしている。1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関して、複数の写本を検討し、より原本に近い史料を特定して未読箇所を翻刻した[服部・中西(2017, 2018)]。また、この地震と噴火について、現在知られているなかで最も完全で、かつ古い時代に書かれた史料を特定し翻刻した[小林ほか(2018)]。これらの史料から、1707年宝永地震の本震と翌日発生した余震の震源域の推定に重要な情報が得られた。

5年間を通じて、歴史学の専門家の協力を得て、古地震に関する合宿形式の研究会(翻刻を主とした史料解析の実践)を実施した(平成29年9月、平成30年3月)。この研究会の内容は、翻刻を主とした史料解析の実践および歴史学に関する話題の講演である。翻刻にあたっては歴史学の専門家の指導および史料の背景の説明を受ける。また講演では、古文書解読の背景となる知識を得る。この研究会は、地震学のバックグラウンドをもちながら史料の解読もできる人材の育成だけでなく、歴史学、人文情報学、地理学、地質学、気象学、地震学といった幅広い分野の研究者および学生、大学職員、一般市民の交流の場となることを目指すものである。研究会で翻刻や史料の扱いを学んだ研究者・学生が、上記のような研究成果を発表するようになり、人材育成の効果があらわれはじめているといえる。幅広い異分野交流をとおして、新たな視点での歴史地震研究の姿を検討した。「みんなで翻刻」の開発や、上記の歴史地震研究は、この研究会での学習、技術向上、情報交換によって生みだされたものである。

おおむね計画どおりの進捗である。ただし、「みんなで翻刻」は、計画提出後に具体化した。

【本課題によりこれまでに翻刻した史料】

- ・「信越震漲録」、1847年善光寺地震
- ・「弘化四丁未大地震御届書写」、1847年善光寺地震
- ・「信州大地震前後天災之記事」、1847年善光寺地震
- ・「見聞書写」、1783年浅間山噴火
- ・「浅間の記」、1783年浅間山噴火
- ・「浅間山焼候二付松平讃岐守見分候者届出二書付」、1783年浅間山噴火
- ・「浅間山焼大変記」、1783年浅間山噴火
- ・「浅間山焼一件」、1783年浅間山噴火
- ・「信州浅間山土砂降り所々書上并はなし」、1783年浅間山噴火
- ・「浅間山焼之図」、1783年浅間山噴火
- ・「信州大地震聞書」、1847年善光寺地震
- ・「弘化四未年三月信濃国大地震二付同国在陣御代官届書写」、1847年善光寺地震
- ・「丁未震災録」、1847年善光寺地震
- ・「安政見聞録」、1855年江戸地震
- ・「安政風聞集」、1856年江戸台風
- ・「安政見聞誌」、1855年江戸地震
- ・「安政東南海地震に関する書状」、1854年東南海地震
- ・「元録地震記」、1703年関東地震
- ・「肥前國島原領普賢山大変記」、1792年雲仙噴火
- ・「嘉永七甲寅四月京都大火諸国大地震控」、1854年伊賀上野地震
- ・「嘉永七寅年六月十四日上方筋大地震二付、定飛脚問屋島屋佐右工門、京屋弥兵衛より申出候書付写」、1854年伊賀上野地震
- ・「嘉永七甲寅年上方諸国大地震出火荒増扣」、1854年伊賀上野地震
- ・「五街道江戸大地震出火場所絵巻」(個人蔵)、1855年江戸地震
- ・「日記安政二年より」(稲生家文書 14 埼玉県立文書館)、1855年江戸地震
- ・「元禄十六年御普請」(埼玉県立文書館 岩国市岩国藩関係文書 28)、1703年関東地震
- ・「申渡」(埼玉県立文書館 船川家 1325(CH89))、1855年江戸地震
- ・「乍恐以書付御注進奉申上候」(埼玉県立文書館 船川家 1534(CH93))、1855年江戸地震
- ・「[地震二付御触書写]」(埼玉県立文書館 西角井家 7747(CH279))、1855年江戸地震
- ・「[善光寺地震に関する書状]」(東京大学地震研究所図書室 文書番号 1074)、1847年善光寺地震
- ・「地震考」(早稲田大学図書館古典籍総合データベース)、1830年京都地震
- ・「善光寺地震被害書上」(東京大学地震研究所図書室 文書番号 石本文庫 41)、1847年善光寺地震
- ・「弘化四大地震由来全」(東京大学地震研究所図書室 文書番号 石本文庫 224)、1847年善光寺地震
- ・「諸国海辺地震津波書」(東京大学地震研究所図書室 文書番号 石本文庫 229)、1854年東海地震・南海地震

- (9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
加納靖之，2018，1854年伊賀上野地震の際に伏見で発生した局所的な液状化被害地点の検討，自然災害科学，37，205-217．
加納靖之・水島和哉，2018，『伏見酒造組合資料』にみえる明治期の地震，歴史地震，33，213-219．
加納靖之・竹之内健介・矢守克也，2018，ハザードマップへの歴史災害地点の重ね合わせ - 災害史と地域防災の新たな連携 - ，京都大学防災研究所 2017年九州北部豪雨災害調査報告書，109-114．
山村紀香，2018，1586年天正地震の震源断層推定：液状化履歴地点における検討から，京都大学修士論文．

- 服部健太郎・中西一郎，2019，1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する史料 富士山宝永噴火に先行した地震活動に関する記述の検証 ，地震2，71，219-229，doi: 10.4294/zisin.2018-5 .
- 服部健太郎・中西一郎，2018，訂正：1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する一史料(3) 元禄地震・宝永地震・宝永富士山噴火を記した「当山本宮記」 ，地震2，71，151-152，doi: 10.4294/zisin.2018-4 .
- 服部健太郎・中西一郎，2018，1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する一史料(3) 元禄地震・宝永地震・宝永富士山噴火を記した「当山本宮記」 ，地震2，71，131-137，doi: 10.4294/zisin.2017-17 .

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

研究課題「歴史地震史料を活用した地震学的解析」において次の2項目を実施する。(a) 震動の強さや継続時間、液状化の発生などであれば断層や地盤構造を仮定した全波形の再現、地殻変動や地下水の異常であれば、地殻変動の計算などをより簡単におこない、その結果と史料の記述を対照できるような解析(計算)ツールの整備を開始する。地震学と歴史学等の双方の専門家が対話しながらツールの整備をすすめるために「古地震研究検討会(仮)」を年1回程度(10月頃)開催し、議論と実装をおこなう。(b) 史料を解読できる研究者の育成のため、年2回(9月と3月、各2泊3日)の合宿形式の勉強会を継続する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

京都大学防災研究所 西上欽也
京都大学大学院理学研究科 中西一郎
他機関との共同研究の有無：有
京都大学総合博物館 五島敏芳
東京大学地震研究所 加納靖之

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：京都大学防災研究所附属地震予知研究センター
電話：
e-mail：
URL：<http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：西上欽也
所属：京都大学防災研究所附属地震予知研究センター

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

近代観測以降の大噴火時の観測データの整理と低頻度大規模噴火予知に寄与する情報の抽出

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料, 考古データ, 地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

イ. 熱水系の卓越する火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

近代観測データが得られるようになった噴火事象の中で顕著な国内の噴火について観測データを網羅して整理する。そして、噴火発生前後の地震活動、地盤変動などをから、現在の観測データから低頻度大規模噴火予知に役立つ情報を抽出する。

明治・大正の日本の科学黎明期に発生した大規模噴火として、磐梯山明治噴火と桜島大正噴火を取り上げ、文献事例調査と当時の観測データの再検討をする。

磐梯山明治噴火については、既存の研究結果を検証するために、水蒸気爆発時の地震動の聞き取り調査結果から震度分布から震源位置とメカニズムを評価する。爆発発生源の位置と火山構造探査結果との比較検討を行う。あわせて明治期の限られた火山の知識に基づいて推定された噴火メカニズムを現代の火山学知見にて検証する。

桜島大正噴火については、地震と地盤変動の定常観測データを用いて、桜島におけるひずみ速度と応力変化の構成関係を明らかにする。そして、大正噴火時の地震回数や規模からひずみ速度を推定する。大正噴火に至った時点での積算ひずみ速度を推定して、今後の噴火警戒レベル設定のおおよそ目安(閾値)とする。また、大正噴火の時に発生した桜島地震の再評価を行う。気象庁と連携して、各地の測候所の地震記録を入手して、震源とメカニズムを推定する。

本研究において大噴火の前兆現象の理解を進めることで項目2(4)事象系統樹の高度化による火山噴火予測の研究に寄与できる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題は、地震・噴火予知協議会共同事業に基づいた計画である。

平成26及び27年度においては、磐梯山明治噴火については、水蒸気爆発時の地震動の聞き取り調査結果から加速度分布(震度分布)を精査して、震源位置とメカニズムを評価する。

平成27~29年度においては、桜島大正噴火の地震活動の再評価を行う。現在の観測から得られている地盤変動と地震活動からひずみ速度と応力変化の関係を明らかにして、大正噴火当時の群発地震から地盤変動を推定して評価する。桜島地震については、現存する波形記録を用いて震源決定とメカニズム解推定を行う。また、磐梯山明治噴火については前兆現象についてその物理的背景を検討し、低頻度大規模噴火のメカニズムの知見の向上を目指す。

平成27~30年度においては、前述の調査対象火山について観測データ・資料・論文などを収集して整理する。そして、現在の観測データから低頻度大規模噴火予知に役立つ情報の抽出を行う。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要：

平成30年度は、1914年桜島地震の鹿児島測候所(当時)の地震記象のデジタル波形を理論波形と比較することで震源位置と発震機構の検討を行った。緒方・他(2017)がS-P時刻と振動軌跡から推定した震源位置を参考に、正断層および逆断層のメカニズムを仮定して理論波形を計算してデジタル波形と比較したところ、桜島の南西沖5kmの深さ10kmが震源の正断層のメカニズムがデジタル波形をもっとも説明することがわかった。また、モーメントマグニチュードはMw6.5と推定され、気象庁マグニチュード換算でMj6.9となり、既報のマグニチュードとほぼ整合的である。

また、計画期間中に以下の成果を得た。桜島大正噴火の前駆地震の震度(Omori, 1920)から、マグニチュードおよびエネルギーに換算した。そして、前駆地震全体のエネルギーを $1.3 \times 10^{14} \text{J}$ と推定した。11地点のS-P時刻データと鹿児島測候所の震動軌跡から推定した初動到来方向を制約条件としてS-P時刻の残差分布から桜島地震の震源を推定した。その結果、鹿児島測候所から南南東方向約6kmの鹿児島市街地沖の極浅部に桜島地震の震源が推定された。

史料等をもとに1888年磐梯山水蒸気爆発の噴火シナリオの誤謬に関して考察を行った。調査に従事した関谷と菊池の間には、報告書をまとめる過程で事実認定や解釈上で種々の食い違いがあったことを明らかにした。史料等もとに磐梯山噴火直後に当時お雇い外国人として異分野で活躍した教師が、本来の任務のかたわらで助言者としてわが国の火山学への貢献度を検討した。他分野で活躍したPalmerとBurtonの両氏はそれぞれ、磐梯山の崩壊地形測量と噴火写真撮影について多大な貢献し、その成果がSekiya and Kikuchi (1890)に反映され、我国の火山学の発展に寄与した実態を明らかにした。このことは、目視による噴火現象の定性的記載に終始していたそれまでの状況から、山体崩壊地形を定量的に記載する能力を日本人研究者に教授するなどお雇い外国人が我国の火山学に画期的進歩をもたらしたことを意味している。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

中道治久, 2019, 桜島大正噴火の前駆地震と桜島地震について, 京都大学防災研究所研究発表講演会, A34.

井口正人・為栗健・平林順一・中道治久, 2019, マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理, 火山, 受理.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

該当する事項はない。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

中道治久・井口正人 (京都大学防災研究所附属火山活動研究センター)

他機関との共同研究の有無 : 有

浜口博之 (東北大学大学院理学研究科) , 後藤和彦 (鹿児島大学大学院理工学研究科)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 京都大学防災研究所附属火山活動研究センター

電話 : 099-293-2058

e-mail : nakamiti@svo.dpri.kyoto-u.ac.jp

URL :

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 中道治久

所属 : 京都大学防災研究所附属火山活動研究センター

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

プレート境界巨大地震の広帯域震源過程に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

イ. 海洋プレート内部の地震

(4) その他関連する建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

プレート境界で起きる大 - 巨大地震の詳細な破壊過程を分析・比較することにより、巨大地震の発生様式を解明し、南海トラフ巨大地震の破壊様式の詳細を拘束することを目的とする。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

2011 年東北地方太平洋沖地震をはじめとして、プレート境界で起きた大地震～巨大地震の震源過程を広帯域地震動生成の観点で分析する。三次元速度構造モデルの利用や強震観測点のサイト評価を行うことによって、近地のグリーン関数の信頼度を上げることにより、波形インバージョンの帯域を短周期帯に拡張し、広帯域でより信頼度の高いすべりの時・空間分布を求め、巨大地震の破壊様式の詳細を解明する。また、過去に発生し既往研究があるイベントに関しては、遠地記録を用いたすべり分布モデル、近地強震記録等を用いた強震動生成モデルをそれぞれ収集し、解析周期帯域と時空間の解像度を確認した上でコンパイルを行う。このようにして得られた複数の震源像を多角的に比較して大地震～巨大地震の発生・破壊進展過程の差異の有無を検討するとともに、将来発生する巨大地震の広帯域震源モデルの構築と、発生様式の詳細を拘束する震源特性やパラメータを探る。

各年度の実施計画は以下を予定する。

平成 26 年度 既往震源モデル(長周期モデル、強震モデル)の収集、震源モデリング

強震記録等の収集、強震観測点サイト特性評価

平成 27 年度 既往震源モデルの収集継続、周期帯別特性抽出、震源モデリング

強震記録等の収集、強震観測点サイト特性評価

平成 28 年度 広帯域震源モデルプロトタイプ提案、既往地震による検証

強震記録等の収集、強震観測点サイト特性評価

平成 29 年度 広帯域震源モデルプロトタイプの改良

発生様式特性分析，強震記録等の収集、強震観測点サイト特性評価

平成 30 年度 広帯域震源モデルの提案

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

プレート境界で起きた大地震 ~ 巨大地震の震源過程を広帯域地震動生成の観点で分析し，地殻内地震やスラブ内地震のそれらの特徴と比較しながら，将来発生する巨大地震の広帯域震源モデルの構築と，強震動生成を拘束する震源特性やパラメータを探る．平成 30 年度は，平成 28 年 10 月の鳥取県中部の地震の強震動シミュレーションによる強震動震源モデルの推定と，平成 30 年 6 月の大阪府北部の地震の強震波形を用いた震源断層破壊過程の推定を行った．

2016 年 10 月 21 日に発生した鳥取県中部の地震 ($M_{JMA} 6.6$) の強震動震源モデルを，経験的グリーン関数法により推定した．いくつかの観測点では 2 つの波群が確認されているため，2 つの SMGA からなる強震動震源モデルを推定した．2 つ目の SMGA の破壊開始点は，2 つ目の波群の立ち上がりを読み，1 つ目のそれとの相対時間差から，F-net モーメントテンソル解と余震分布から推定される震源断層面上で相対位置を推定した．SMGA2 の破壊開始点は SMGA1 の破壊開始点より北北西に 7.5km，また傾斜方向には 5km 浅い位置で，4.4 秒後に破壊したと推定された．SMGA1,2 の設定位置に近い余震記録を経験的グリーン関数として波形フィッティングを行った．結果，SMGA1 サイズは $6 \times 6\text{km}^2$ ，SMGA2 サイズは $4.8 \times 4.8\text{km}^2$ と求められ，破壊はどちらも深い方から浅い方へ進展した．応力降下量は両 SMGA とも約 7MPa となった．応力降下量は同様の地殻内地震のそれに比してやや小さい値に求まっている．波形インバージョン結果によるすべり分布と比較すると，SMGA1 はすべりの大きい領域に対応する一方，SMGA2 の位置は波形インバージョンによるすべりの大きい位置とはやや異なる位置に求まっていることがわかった．

2018 年 6 月 18 日に大阪府北部で発生した地震 ($M_{JMA} 6.1$) の震源過程を強震記録の波形インバージョン解析 (対象周波数帯域 0.1 ~ 2 Hz) により推定した．ほぼ南北走向の逆断層 (断層 1) と北東 - 南西走向の右横ずれ断層 (断層 2) の 2 つの震源断層が関わっていることが明らかとなった．なお，余震のメカニズム解析から推定した応力場は， σ_2 と σ_3 がほぼ等しいことが分かっており，この地域では逆断層型，右横ずれ型の両方の地震が起こりえる環境にあり，本震の破壊過程とも矛盾しない．この地震の破壊は，最初に断層 1 で始まり，約 0.3 秒後に断層 2 の破壊が始まり，その破壊は南東の浅い側に向かって進展した．断層 1，2 いずれも 4 ~ 5 km 四方の震源断層であり，主たるすべりは深さ 10 ~ 13 km の範囲に集中しており，震源断層の破壊は地表には到達していない．断層 1 の震源断層形状は上町断層帯の深部と類似しているが，余震活動が上町断層帯に広がっている様子は現時点では見られないため，上町断層本体との関係は不明であるが，類似の形状の断層であることはいえる．断層 2 は，有馬 - 高槻構造線断層帯の 2 ~ 3 km 南に位置する伏在断層の一部 (伊丹断層の東部延長) と考えられ，今回の地震の破壊域の西端は 1987 年 8 月 21 日の右横ずれ型の地震 ($M_{JMA} 4.2$) の余震域の東端に対応しており，一連の地震活動と考えられる．

また，計画期間においては以下の研究を進めてきた．

平成 26 年度：強震記録の周期帯別波形インバージョンによる，2011 年東北地方太平洋沖地震の周波数別地震波生成の空間的な棲み分けに関する研究．強震記録を用いた 2010 年ニュージーランド・ダーフィールド地震の複雑な震源破壊過程の推定と複雑な震源断層破壊伝播に関する研究．2016 年アメリカ・ナパ地震の強震動震源モデルの構築．

平成 27 年度：強震記録を用いた 2017 年 11 月長野県北部の地震の震源過程の推定．2015 年ネパール・ゴルカ地震の遠地記録を用いた震源時間関数の特徴と同規模の地震との比較検討．

平成 28 年度：強震記録に基づく 2016 年熊本地震の最大前震と本震の震源過程の推定．

平成 29 年度：2016 年 4 月にフィリピン海プレートと大陸プレートの境界で起きた熊野灘の地震の強震動震源モデルの構築．2016 年熊本地震本震をはじめとする地表地震断層近くで観測された国内外の震源近傍強震動記録の対比研究．

平成 30 年度：2016 年 10 月鳥取県西部の地震の強震動震源モデル構築．強震記録を用いた 2018 年 6 月大阪府北部の地震の震源モデル構築．

期間内に発生した国内の被害地震については，強震記録を用いた詳細な震源過程の解析を進めることができ，また震源近傍強震動特性についても知見を得ることができた．これらの研究成果，及び担当者等がこれまでに実施してきた強震記録を用いた震源断層破壊過程モデルの蓄積は，将来発生する地震の強震動予測に用いる震源断層モデルパラメータ設定（例えば 1911 の後継研究）に反映することができる．

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので，平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
永井夏織，浅野公之，加藤護，岩田知孝，2018，経験的グリーン関数法を用いた 2016 年鳥取県中部の地震の広帯域震源モデル，第 15 回日本地震工学シンポジウム論文集，110-118.

岩田知孝，2018，震源断層近傍の強震動特性，2018，第 15 回日本地震工学シンポジウム論文集，698-703.
（招待発表）

Asano, K., 2018, Source Modeling of an MW 5.9 Earthquake in the Nankai Trough, Southwest Japan, using Offshore and Onshore Strong Motion Waveform Records, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **108**, 1231-1239.

岩田知孝・飯尾能久・松島信一，2018，2018 年 6 月 18 日大阪府北部の地震，地震ジャーナル，**66**，1-8.

岩田知孝・浅野公之，2018，2018 年 6 月大阪府北部の地震時の強震動，第 55 回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集，65-66.

永井夏織・浅野公之・加藤護・岩田知孝，2018，経験的グリーン関数法を用いた 2016 年鳥取県中部の地震の震源モデルの推定，日本地球惑星科学連合 2018 年大会，SSS14-P30，2018 年 5 月.

浅野公之・岩田知孝・Miroslav HALLO，2018，強震記録による 2018 年 6 月 18 日大阪府北部の地震の震源過程，日本地震学会 2018 年秋季大会，S24-09，2018 年 10 月.

永井夏織・浅野公之・加藤護・岩田知孝，2018，経験的グリーン関数法を用いた 2016 年鳥取県中部の地震の SMGA モデル，日本地震学会 2018 年秋季大会，S14-05，2018 年 10 月.

Asano, K., T. Iwata, and M. Hallo, 2018, Rupture Process of the 2018 Northern Osaka Earthquake (Mw 5.6), an Earthquake Involving Both Thrust and Strike-slip Faults Near a Junction of Major Active Fault Systems Surrounding the Osaka Basin, Japan, AGU 2018 Fall Meeting, S43C-0602, 2018 年 12 月.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

前計画および他プロジェクト等を通じて求めている，強震記録に基づく震源インバージョンモデルと震源近傍強震動記録を収集し，震源特性及び観測点のサイト地震波増幅特性を定量的に見積もった上で，震源近傍の地震動特性を支配する断層運動を明らかにし，その特徴を表記し，予測問題に適用できる情報を得る．期間内に発生した国内外の大～巨大地震の震源過程を，強震記録等を用いて解析し，既往の震源モデルの特徴と比較を行い，強震動生成の観点に立った分析を継続する．平成 31 年度は，既往震源近傍強震記録と震源断層モデルの収集．観測点のサイト増幅特性に関する資料収集，強震記録等を用いた地震の震源過程解析，を行う．

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

岩田知孝

浅野公之

関口春子

他機関との共同研究の有無：無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：京都大学防災研究所地震災害研究部門（強震動）

電話：0774-38-4057

e-mail : iwata@egmdpri01.dpri.kyoto-u.ac.jp

URL : <http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 岩田知孝

所属 : 京都大学防災研究所

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

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の構造研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

四国と南九州の下に沈み込むフィリピン海プレートとその周辺の構造をレシーバ関数解析や地震波走時トモグラフィなどの地震学的手法により高精度に推定する。得られた構造をもとに、南海トラフ巨大地震やマグマの発生場であるプレート境界面やマントルウェッジの物性や状態を明らかにする。加えて、地震発生や強震動のシミュレーションに資する地震波速度構造モデルの開発を目指す。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年度においては、四国東部において、フィリピン海スラブの傾斜方向とその直交方向に設定された測線上に観測点を約 5km 間隔で配置する地震観測を計画し、観測点候補地の選定と調査を行う。適切と認められた観測点に地震計やデータロガー等を設置し、観測を開始する。四国西部で行われたアレイ観測の既存データを用いて、レシーバ関数解析を行い、地震波速度不連続面の暫定的なイメージを得る。南九州において、前計画から行っている宮崎 阿久根測線と宮崎 桜島測線での同様の観測を継続し、データの蓄積を行うとともに、レシーバ関数解析によりフィリピン海スラブを含む地震波速度不連続面のイメージングを行う。

平成 27 年度においては、四国東部において、地震観測を継続し、地震波形データの蓄積を行う。必要であれば、追加の観測を開始する。前年度に得たデータに対して、レシーバ関数解析を行い、地震波速度不連続面の暫定的なイメージを得る。その際、2002 年～2004 年に行われた臨時観測のデータも再解析し、四国東部から山陰中部までのイメージを作成する。南九州において、観測を継続し、データの蓄積を行うとともに、レシーバ関数解析により地震波速度不連続面のイメージを更新する。地震波の読み取り（外注）を行う。

平成 28 年度においては、四国東部において、地震観測を継続し、地震波形データの蓄積を行う。レシーバ関数解析を行い、地震波速度不連続面のイメージを更新する。四国西部において、観測点候補地の選定と調査を行う。適切と認められた観測点に地震計やデータロガー等に移設し、観測を開始する。南九州において、トモグラフィ解析を行い、3 次元速度構造の暫定版を得る。

平成 29 年度においては、四国西部において、地震観測を継続し、地震波形データの蓄積を行う。必要ならば、追加の観測を開始する。前年度に得たデータに対して、レシーバ関数解析を行い、地震波速度不連続面の暫定的なイメージを得る。地震波の読み取り（外注）を行う。南九州において、トモグラフィ解析を行い、3 次元速度構造を更新する。

平成 30 年度においては、四国東部と西部において、レシーバ関数解析を行い、地震波速度不連続面のイメージを更新する。四国東部と西部のレシーバ関数解析の結果を併せて解釈し、四国下に沈み込むフィリピン海スラブの形状を推定する。地震波の読み取り（外注）を行う。四国において、トモグラフィ解析を行い、3 次元速度構造を更新する。これらと紀伊半島および南九州での結果を併せて、紀伊半島～四国～南九州の広い地域において、南海トラフ巨大地震の震源断層であるフィリピン海プレート境界面近傍の物性や状態を解明する。地震サイクルシミュレーションや強震動予測に資する地震波速度構造モデルを開発する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度～30 年度) の成果の概要 :

本研究では、リニアアレイ観測、レシーバ関数解析および地震波走時トモグラフィ解析により、四国、南九州および紀伊半島の地下構造を高精度に推定することを目的とする。得られた構造をもとに、南海トラフ巨大地震の発生場であるプレート境界面とフィリピン海スラブ周辺の物性・状態の推定、および地震サイクルシミュレーションや強震動予測に資する地震波速度構造モデルの開発に必要な情報の抽出を目指す。平成 30 年度の成果の概要は以下のとおりである。

四国では、図 1 に示すように、米子 - 海陽測線 (AA') の四国側 (綾川 - 海陽区間) と徳島 - 西予測線 (BB') でリニアアレイ観測を行った。いずれも測線近傍の定常観測点も含めて、観測点間隔が 5 km ほどになるように臨時観測点を配置した。綾川 - 海陽区間では、2014 年 12 月から 2017 年 2 月まで 7 点の臨時観測点を設置した。徳島 - 西予測線 (BB') の東側 (神山 - 大豊区間) では、2015 年 12 月から 2018 年 12 月まで 7 点の臨時観測点を設置した。徳島 - 西予測線 (BB') の西側 (いの - 西予区間) では、2017 年 3 月から 2019 年 1 月まで 7 点の臨時観測点を設置した。

米子 - 海陽測線 (AA') の観測点で記録された遠地地震波形を用いてレシーバ関数解析を行った。レシーバ関数とは、観測点下の S 波速度不連続面で生成される PS 変換波を抽出した波形である (澁谷・他, 2009)。図 2 に観測点 SL06 において得られたレシーバ関数の radial 成分の波形を到来方向 (北から時計回り) 順に示す。正のピーク (赤) は高速度上面での変換波、負のピーク (青) は低速度上面での変換波と考えられる。

さらに、気象庁の地震波速度構造 JMA2001 (上野・他, 2002) を用いて、レシーバ関数の時間軸を深さ変換し、多数の観測点で多数の地震に対して得られたレシーバ関数の振幅を共通の変換点上で重合することにより、S 波速度不連続面のイメージを求めた。得られたレシーバ関数イメージを図 3 に示す。OM とラベルした赤線の背景にある赤いイメージの連なりは高速度層の上面と考えられるので、フィリピン海スラブ内の海洋モホ面と解釈できる。その上方にある ST とラベルした青線は、低速度である海洋地殻の上面、すなわちフィリピン海スラブの上面と考えられる。そのまた上方にある CM とラベルした赤破線は、高速度である大陸マントルの上面 (大陸モホ面) と考えられる。大陸モホ面は

鮮明ではないものの、中国地方北部で深さ約 35 km にあり、中国地方南部から四国地方では沈み込むフィリピン海スラブの上方にせり上がっていくように見える。フィリピン海スラブが深さ約 40 km に達するあたりに白丸で示す深部低周波地震の発生域があり、その上方のマントルウェッジに低速度領域が見られる。

紀伊半島では、2004 年 3 月から 2013 年 3 月まで延べ 6 測線においてリニアアレイ観測が行われた。これまで、レシーバ関数解析では、大陸モホ面、フィリピン海スラブ上面、海洋モホ面の 3 次元的形状が推定された。トモグラフィ解析では、近畿地方北部から紀伊半島までのスラブ周辺域の 3 次元地震波速度構造が推定された。フィリピン海スラブの海洋地殻は深部低周波地震の発生域を中心として低速度異常かつ高 V_p/V_s 比を示し、流体の存在が裏付けられた。また、地震活動が活発な和歌山県北部の下部地殻に非常に大きな低速度異常域が存在することが分かった。これも流体が関係する低速度異常と考えられる。下部地殻から供給される流体が、上部地殻においてクラック中の間隙水圧を上昇させ、有効法線応力が減少するので、地震が発生しやすくなるというモデルが考えられる。今年度は、これらの成果をまとめて、地震学会で発表した（澁谷・平原, 2018）。

南九州では、昨年度まで行ってきた宮崎 - 阿久根測線と宮崎 - 桜島測線での稠密リニアアレイ観測の波形データのマージ処理等を行い、レシーバ関数解析やトモグラフィ解析用の波形データの蓄積を行った。また、桜島火山周辺に設置されている京都大学防災研究所火山活動研究センターの定常観測点のデータを用いたレシーバ関数解析を行い、宮崎 - 桜島測線を補強した。

計画期間中の成果であるが、紀伊半島と四国については、平成 30 年度の成果において述べた。南九州については、地震波走時トモグラフィによる P 波速度の 3 次元不均質構造を推定した。深さ 10 km では新燃岳、桜島、開聞岳の近傍に低速度異常が見られる。深さ 20 km では上記の 3 火山の付近に強い低速度異常域が広範囲に広がっている。日向灘の沿岸部付近にも強い低速度異常が見られる。海洋地殻は、深さ 30 km と 40 km では低速度異常を示すが、深さ 50 km と 60 km では高速度異常を示す。新燃岳と桜島の近傍を通る東西断面での P 波速度の不均質分布においては火山下の地殻内に強い低速度異常が広範囲にみられる。マントルウェッジの先端部の海側にも強い低速度異常域が見られる。海洋地殻は深さ 50 km ~ 60 km でいったん高速度異常を示すが、それより深いところではまた低速度異常に戻るようである。島弧側のマントルは広範囲に低速度異常を示す。これらの低速度異常域は、スラブ起源流体やマグマ等の流体に起因すると考えられる。海洋地殻からの脱水は、マントルウェッジ先端部の海側付近と深さ 80 km 以深の低速度異常域で発生していると思われる。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
澁谷拓郎・寺石眞弘・小松信太郎・山?健一・山下裕亮・大倉敬宏・吉川 慎・井口正人・為栗 健・園田忠臣, 地震学的手法による南九州下のフィリピン海スラブとその周辺域の構造の推定, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会(幕張メッセ, 千葉市), SSS11-P16, 2018 年 5 月 24 日
澁谷拓郎・平原和朗, レシーバ関数解析と地震波走時トモグラフィによる紀伊半島下の 3 次元地震波速度構造, 日本地震学会 2018 年秋季大会(ビッグパレットふくしま, 郡山市), S21-07, 2018 年 10 月 10 日

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画では、「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」という課題で、澁谷・西村(京大防災研) 加納(東大地震研) で担当する。研究目的は、(1) フィリピン海スラブ周辺の陸域において、地震や GNSS の臨時観測を、定常観測網を補間する形で行う、(2) 過去の地殻変動観測記録のデジタル化を行う、(3) 南海トラフ沿いで発生する SSE の検出手法の高度化を行う、(4) 南海トラフ巨大地震の震源域周辺の詳細な不均質構造の推定を行う、(5) 南海トラフ域でのプレート境界面でのすべりの収支と時間変化を明らかにする、(6) 速度構造から推定されるプレート境界面付近の物性や状態とスロー地震発生域と南海トラフ巨大地震の震源域との関係について明らかにする、等である。

平成 31 年度は、地震波速度構造の研究では、四国でのリニアアレイ観測において八幡浜 - 土佐清水測線の観測点調査と、南九州と四国での未解析データを加えた再解析を行う。SSE モニタリングでは、紀伊水道や東海地方の GNSS 観測を継続するとともに、紀伊水道で観測を増強する。また、SSE の検出とモニタリングの手法の開発と高度化を行う。地殻変動記録のデジタル化では、紀伊半島の地殻変動観測点で観測されたプロマイド記録のデジタル化を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

澁谷拓郎、寺石眞弘、山崎健一 (地震予知研究センター)、井口正人、為栗 健 (火山活動研究センター)

他機関との共同研究の有無 : 有

京都大学理学研究科 : 大倉敬宏

東京大学地震研究所 : 小原一茂、加藤愛太郎

高知大学理学部 : 大久保 慎人

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 京都大学防災研究所 地震予知研究センター

電話 :

e-mail :

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

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 澁谷拓郎

所属 : 京都大学防災研究所

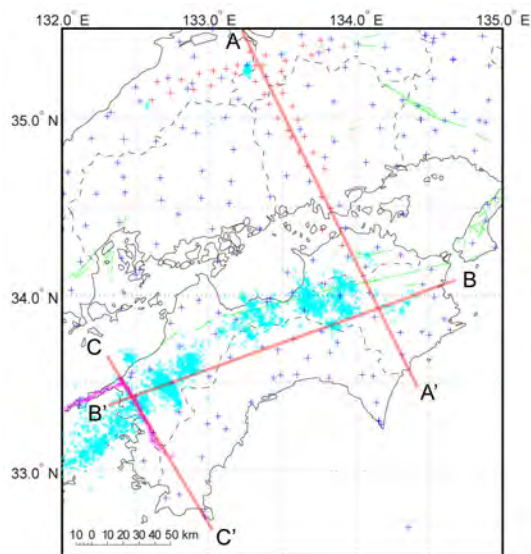


図 1 四国および中国地方でのリニアアレイと観測点分布

AA : 米子 - 海陽測線。BB : 徳島 - 西予測線。CC : 八幡浜 - 土佐清水測線。+ は地震観測点、水色の + は深部低周波地震、緑色の線は活断層。

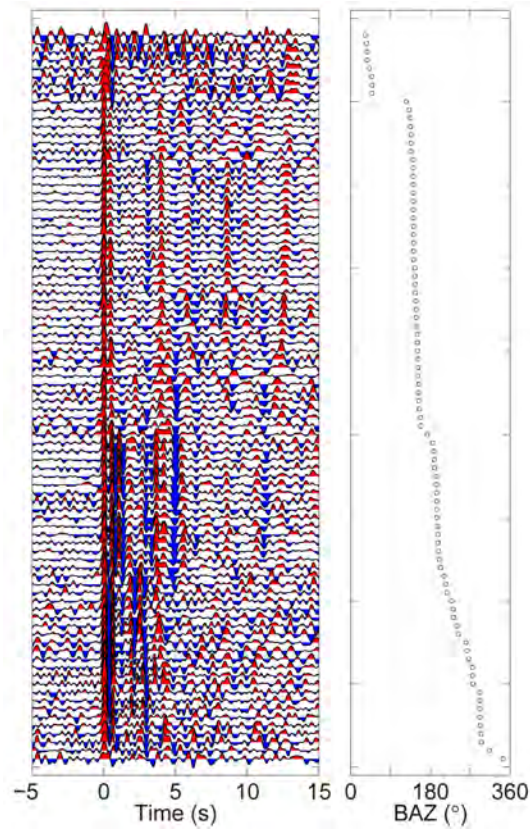


図2 観測点 SL06 で得られたレシーバ関数の radial 成分波形
 到来方向 (BAZ: 北から時計回り) 順に上から下へ並べて示す。それぞれの波形の到来方向は右の図に示されている。正のピークを赤で、負のピークを青で示す。

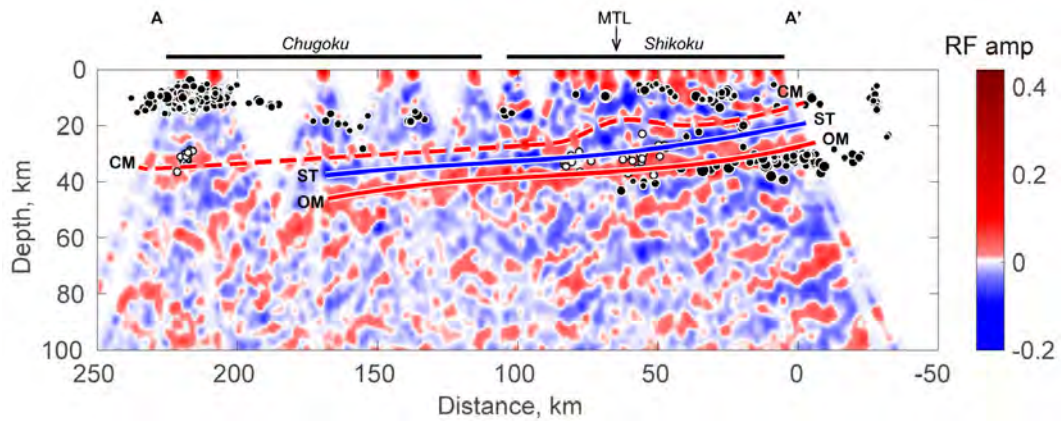


図3 米子 - 海陽測線 (AA') でのレシーバ関数イメージ
 白丸は深部低周波地震、黒丸は通常の地震。大陸モホ面 (CM)、フィリピン海スラブ上面 (ST)、海洋モホ面 (OM) の解釈線も示す。

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

日本列島変動の基本場解明：地殻とマントルにおける物性、温度、応力、流動 - 変形

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

イ. 海洋プレート内部の地震

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地殻とマントルにおける変動現象の基本場(物質場、温度場、応力場、流動 - 変形場と、その複合場としての地震発生場および流体 - マグマ生成・上昇場)の理解を深化させ、同時に、それらを比較・統合することで、地震発生場と流体 マグマ発生・噴火場を統一的に理解することを目的とする。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

日本列島の物質場(特に、地殻流体の分布と量) 温度場(地下温度分布、マントルポテンシャル温度) 応力場(絶対応力とその分布) 流動 変形場(島弧地殻の粘弾性変形を含む)の定量的理解を、地震波・電気伝導度に関する実験的および観測データの統合数値解析、火山岩・熱水・鉍脈の地球化学組成解析、稠密地震観測結果の地震学的解析、および地殻変形データのインバージョン解析により進める。それらの結果を統合して、地震発生場と流体 マグマ発生・噴火場を統一的に理解することを目的とする。H26~H27年度においては、特に有馬型塩水の採取、火山微量元素組成の定量的解析手法の開発、含水岩石の地震波速度および電気伝導度の実験的測定に用いる試料作製、微小地震データの整備、日本列島規模での流動変形場の数値フォワードモデルの構築を目指す。H28~H30年度に

おいては、採取試料の化学・同位体分析とその定量的解析、含水岩石の地震波速度および電気伝導度の実験的測定、微小地震データ解析による広域応力場の推定、数値フォワードモデルのパラメータスタディを行い、物質構造、温度場、応力場、変形場の関係と、統合モデルの構築を目指す。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

流体・火山・物質循環 : H30 年度 : 日本列島全域下の (i) 流体付加前のマントル組成、(ii) 付加流体量を、主に第四紀火山岩の Sr-Nd-Pb 同位体比空間における統計解析 (k-means analysis and independent component analysis) を併用して解析したところ、いずれも島弧セグメントごとに違いがあり、かつ (i) は東日本と西日本で系統的に異なること (図 1 におけるオレンジ・緑 vs. 青) およびブルーム由来成分 (黄色) が明瞭に分かれることが分かった。これらの違いは、(i) については、地球規模の東西半球構造に関連すること、および (ii) については、沈み込むスラブの温度、角度および組成 (特に堆積物成分) の違いを反映していることが明らかとなった (Nakamura et al., 2019)。5 力年間 : (1) 日本列島には、「スラブから直接由来した可能性が高い深部流体」としての有馬型塩水が、有馬-高槻構造線および中央構造線沿いに分布し、その組成、特に希土類元素の分析と統計解析から、深部流体の上昇過程が明らかになった。(2) 島弧セグメントの接合部、特に中部日本から東北日本弧への遷移の様子が火山岩組成から詳細に議論され、従来、関東北部付近と考えられていたフィリピン海プレートの北東端が、さらに北の東北日本弧南部にまで広がっていること、またそのためにスラブ由来流体が南に向かって吸い寄せられていることなどが明らかとなった。(3) H30 年度の成果 (上記) のように、日本列島全域にわたるスラブ由来流体量やマントル組成の大域的性質が明らかとなった。

応力場 : H 3 0 年度 : 先行研究 Yukutake and Iio (2017) により 2000 年鳥取県西部地震域得られた約 4000 イベントの余震の発震機構解 (メカニズム解) から、本震断層周辺域の応力場の不均質性の評価及び本震時の静的応力変化に基づいた絶対応力場の推定を行った。応力の不均質性を評価するにあたり、ある単一のリファレンス応力場 (主応力軸方向及び応力比) を仮定したときの断層面上での理論的な最大せん断応力方向とメカニズム解の滑り方向 (rake angle) とのなす角で定義される Misfit 角を用いた。Yukutake et al. (2007, JGR) により推定された余震域の応力場をリファレンスとし、各余震メカニズム解節面上の Misfit 角を求めた (図 2)。次に本震断層に沿った応力場の不均質性の特性を知るため、断層走向に沿った方向 (図 2A-B 方向) に余震をソートしその Misfit 角の積算曲線を求めた (図 3 オレンジ線)。この Misfit 角積算曲線を説明するため、最初にメカニズム解誤差の影響を推定した。ここでは観測されたメカニズム解節面とリファレンス応力場から求まるすべり方向から Synthetic メカニズム解を求めそこに実際のメカニズム解に含まれる誤差をガウジアンノイズとして与えた。その結果、メカニズム解の誤差のみを考慮した場合の積算曲線のトレンド (図 3 青線) は観測されたトレンドよりも緩やかであり、余震域には何らかの応力場の不均質性が存在することが明らかになった。この応力場の不均質性を再現するため、ここでは、本震前の応力場を均質と仮定し、そこに本震断層滑りにより生じた応力変化を応力場の擾乱源として重ね合わせることを行った。その結果、本震前の差応力レベルが 3.2MPa/km 程度の場合に、観測されたのと同程度の応力不均質を再現できることが分かった (図 3 赤線)。また本計画期間 (5 力年) において、以下の成果があげられた。(1) 基盤地震観測データに基づき日本列島規模で内陸部の地殻応力場の空間分布を求め、その空間的な特徴や活断層と応力場との関係性について議論した。内陸活断層については基本的には応力場に対して最適な方向であることが分かった、一方で、応力場に対してやや Miss-oriented な方向に形成された活断層も存在し、そうした活断層は流体圧の増加に伴う強度の低下が地震発生に重要な役割を果たしていることが示唆される。(2) 余震の発生原因を明らかにするために、2000 年鳥取県西部域において稠密余震観測データから余震の震源及びメカニズム解を高精度に推定し、本震時に破壊された断層面 (本震断層) との関係性について調べた。その結果、余震は本震断層に対して幅 1km ほどで分布し、またメカニズム解も多様であることが明らかになった。多くの余震は本震断層滑りにより求めた CFF が正の値を持つことが明らかになった。余震は断層滑りにより生じた応力変化により本震断層周辺の微小な断層面上での滑りが促進されることによりトリガーされた可能性が示唆される。(3) 地殻応力場の空間不均質性につ

いて定量的に評価するため、上記の鳥取県西部地震域の余震データの Misfit 角をもとに応力不均質を推定した。その結果、余震域は応力場の空間不均質性が存在すること、及び本震前の背景応力場を均質だと仮定した場合、その差応力レベルが 3.2MPa/km の条件で本震静的応力変化を足し合わせることで空間不均質の度合いが説明できることが分かった。

含水岩石物性：H 30 年度：高圧で連結を維持する空隙を理解するために、封圧下での含水岩石の弾性波速度・電気伝導度の同時測定を行った。実験で用いた岩石試料は、花崗岩（大島，愛媛県），花崗閃緑岩（塩山，山梨県），トータル岩（勝原，福井県）である。また、これらの岩石試料から観察用小片を作製し、富山県産業技術研究センター，機械電子研究所において表面をイオンミリング加工して、SEM 観察を行った。クラックがほぼ閉じるような高封圧下での電気伝導度は、どの試料も以前に実験を行った花崗岩（庵治，香川県）に比べて一桁ほど低かった（図 4）。これは今年度実験を行った 3 つの試料に含まれるクラックにおいて、庵治花崗岩に見られるような開口の大きい部分が少ないためと考えられる。また、庵治花崗岩に見られる「開口の大きなセグメント」の実体を理解するために、海洋研究開発機構において、収束イオンビームで試料を加工しながら SEM 観察を行い、ひとつのクラックの開口幅の空間分布を明らかにした（図 5）。5 カ年間：日本の内陸で行われた電磁気学的観測から、上部・中部地殻の電気伝導度は乾燥岩石の電気伝導度よりも有意に高いことが分かっており、広く流体が分布していると考えられる。この流体の量を推定するため、高圧で流体の連結を維持する空隙構造を理解することを目指した。封圧下での含水岩石の弾性波速度・電気伝導度の同時測定、SEM による空隙の微細構造観察により、クラックの開口の大きな部分が「高圧で流体の連結を維持」することが分かった。地殻内にはさまざまなサイズのクラックが存在している。これらのクラックも静岩圧によりほとんど閉鎖するが、開口の大きな部分がチューブ状に連結しているのではないかと考えている。チューブ状の流体を考えると、地震波速度，電気伝導度は、流体の体積分率の関数として図 6 のように変化する。なお、地震波速度，電気伝導度とも固体，流体の値で規格化したものを示している。また、流体としては水を考えている（体積弾性率を 2GPa とした）。電気伝導度は流体の体積分率に比例して増加する。地震波速度は、流体の体積分率が 0.1% 以下のときは有意な変化を示さないが、1% を超えると急激な低下を示すようになる。速度低下はチューブ断面の形状に依存し、比表面積の大きい形状の方が大きな速度低下を生じる。チューブ断面が円形の場合には、流体の体積分率が 10% 程度であっても速度低下は 10% 程度である。高伝導度領域は、変形に伴って形成されたクラックが多い領域なのかもしれない。クラックはほぼ閉じているが、閉じずに連結経路を維持している部分が多くなるため、電気伝導度は高いはずである。このような変形の不均質が、電気伝導度の分布に表れているのかもしれない。

変形・流動場：H 30 年度：日本の本州の大部分は強い東西圧縮の場にある。しかし、日本のテクトニクスの基本場として非常に重要なパラメタであるにも拘わらず、その短縮速度は良く分かっていない。具体的には、測地学的手法で得られる歪み速度は $10^{-7}/\text{yr}$ を越える一方、地質学的手法で推定されたそれは一桁近くも小さいという歪み速度パラドックス問題がある。本研究では、この問題に対する全く新しいアプローチとして、日本列島下で顕著な変形をしているフィリピン海スラブに着目した（Fukahata, 2019）。フィリピン海スラブは、沈み込む前はほとんど変形していないため、現在観察される変形は全て沈み込み開始後に生じたものと見なせるので、その変形速度を比較的精度良く推定できるのがポイントである。また、フィリピン海スラブの変形は、中部・近畿地方下で大きい一方、四国・中国地方下で小さい、太平洋沖合から沿岸部で小さい一方、内陸部で大きいという特徴を持ち、地表の変形パターンと非常に整合的である（図 7）。そこで、フィリピン海スラブの変形速度を地表の変形速度の代替指標（プロキシ）として用いることができるのではないかと考えた。フィリピン海スラブの形状は日本列島に固定した座標系で定常と仮定した上で、南海トラフに平行な測線を等間隔に取って（図 8a）、その地形断面を描き（図 8b）、短縮量を求めた（図 8c）。さらに、隣り合う測線間の短縮量の差を取ることで短縮速度を推定した。得られた歪み速度は、太平洋沖合および北端部を除く四国地方下では小さい（ $0.2 \times 10^{-8}/\text{yr}$ 以下）一方、中部・近畿地方下の内陸部では $4.7 \times 10^{-7}/\text{yr}$ に達した。但し、この見積もりは、紀伊水道下でフィリピン海スラブが断裂していた場合には 20% ほど小さ

くなる。フィリピン海スラブの変形から推定された中部・近畿地方の内陸部の歪み速度は、測地学的歪み速度より小さい一方、地質学的歪み速度よりも大きい値となった。より広域的な沈み込み帯全体のダイナミクスについては、数値シミュレーションにより、沈み込むプレートの含水量に応じて、スラブの速度、角度、形状がどのように変化するかを系統的に明らかにした(図9)。その結果、太平洋プレートの含水量は比較的低い必要があることが分かった(Nakao et al., 2018)

この5カ年間の画期的な成果は、島弧の地形・重力異常の枠組みを形作る、島弧・海溝・外縁隆起帯という凹凸がなぜ形成されるのか、その根本的な物理メカニズムを明らかにしたことである(Fukahata & Matsu'ura, 2016)。例えば、海洋プレートが右から左に沈み込む状況を考えると、プレート境界が一般に上に凸の形状を持つため、プレート境界面における変位の食い違いにより、海洋プレートは時計と反対回りに陸側プレートは時計回りに回転する一方、遠方では重力平衡を回復するため、島弧と外縁隆起帯に地形的高まりが形成されるのである。例えばこれまで、海溝で海洋プレートに曲げモーメントを与えることにより海溝～外縁隆起帯の地形がうまく説明できることが知られていたが、なぜ曲げモーメントを与えると良いのかはよく分かっていなかった。この研究は、そういった疑問にも合理的な解答を与える。さらには、数値シミュレーションに基づき、弾性・粘弾性層構造媒質に於いては、粘弾性層の名目的な緩和時間よりも実際の緩和に遥かに長い時間を要すること、粘性緩和による変動のセンスが途中で入れ替わり得ることを明確に示すと共に、その原因を理論的に明らかにした(Fukahata & Matsu'ura, 2018)。また、熊本地震の滑り分布推定など、インバージョン解析の理論的な研究と実際の観測データへの適用も進めた(Fukahata & Hashimoto, 2016)。より広域的な沈み込み帯全体のダイナミクスについては、(i) 沈み込むプレートからの脱水、(ii) 流体とマントルの反応と溶融、(iii) 粘性流動・温度構造の3つの非線形相互作用を数値シミュレーションで初めて解き、東北日本の標準モデルを提案し(Horiuchi and Iwamori, 2016)。また全マントルスケールでの水の効果とスラブ形状・運動の対応関係を解明した(Nakao et al., 2016)。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

Yoshida, K., T. Kuwatani, T. A. Yasumoto, S. Haraguchi, K. Ueki, H. Iwamori (2018) GEOFCM: a new method for statistical classification of geochemical data using spatial contextual information. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, <https://doi.org/10.2465/jmps.171127>.

Nakao, A., H. Iwamori, T. Nakakuki, Y. Suzuki, H. Nakamura (2018) Roles of Hydrous Lithospheric Mantle in Deep Water Transportation and Subduction Dynamics. *Geophys. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1029/2017GL076955>.

Nakagawa, T., H. Iwamori, R. Yanagi, A. Nakao (2018) On the evolution of the water ocean in the plate-mantle system. *Prog. Earth Planet. Sci.*, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0209-2>.

Haraguchi, S., K. Ueki, K. Yoshida, T. Kuwatani, M. Mohamed, S. Horiuchi, H. Iwamori (2018) Geochemical database of Japanese islands for basement rocks: compilation of domestic article. *J. Geol. Soc. Japan*, 124, 1049-1054.

Iwamori, H., H. Nakamura, M. Yoshida, Nakagawa, T., Ueki, K., Nakao, A., Nishizawa, T., Haraguchi, S. (2018) Trace-element characteristics of east-west mantle geochemical hemispheres. *Comptes Rendus Geosci.*, <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.09.007>.

Hanyu, T., K. Shimizu, T. Ushikubo, J.-I. Kimura, Q. Chang, M. Hamada, M. Ito, H. Iwamori, T. Ishikawa (2019) Tiny droplets of ocean island basalts unveil Earth's deep chlorine cycle. *Nature Comm.*, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07955-8>.

Nakagawa, T., H. Iwamori (2019) On the implications of the coupled evolution of the deep planetary interior and the presence of surface ocean water in hydrous mantle convection. *Comptes Rendus Geosci.*, in press.

Nakamura, H., H. Iwamori, M. Nakagawa, T. Shibata, J.-I. Kimura, T. Miyazaki, Q. Chang, B.S. Vaglarovb, T. Takahashi, Y. Hiraharai (2019) Geochemical mapping of slab-derived fluid and source mantle along Japan arcs. *Gondwana Res.*, in press.

渡邊 了, 2018, 地震波速度・電気伝導度から推定される地殻内の流体分布, 地震予知連絡会会報, 100,

427-430.

Fukahata, Y., 2019. Estimate of the contraction rate of central Japan through the deformation of the Philippine Sea slab, *Progress in Earth and Planetary Science*, 6:4, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0251-0>.
査読あり

Okuwaki, R., Kasahara, A., Yagi, Y., Hirano, S. & Fukahata, Y., 2019. Backprojection to image slip, *Geophys. J. Int.*, 216, 1529-1537, doi: 10.1093/gji/ggy505. 査読あり

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要:

流体・火山・物質循環: 沈み込んだ海山が日本列島の火山活動に及ぼす影響を、火山岩およびそこに含まれる結晶・包有物の化学・同位体分析に基づき、評価する。このための予察的なデータコンパイル、フィールドワークを行う予定である。

応力場: 2000年鳥取県西部地震の余震データについて2001年以降実施された稠密地震観測のデータを整備しメカニズム解データを追加させる。また大きな地震が近年発生していない領域で発生する地震活動のメカニズム解を求め、背景応力場がどの程度応力不均質があるのかについて検証する。

含水岩石物性: 平成30年度までは、粒界クラックが主な空隙である岩石試料を使用してきた。平成31年度は、マクロなクラックをもつ岩石試料を用いて、封圧下での含水岩石の弾性波速度、電気伝導度の同時測定、SEMによる空隙微視構造観察を行う。前年度までの粒界クラックから得た地殻内部の空隙のイメージを検証する。

変形・流動場: 島弧の長期的な変形速度を求めるためには、結局のところ非弾性歪み速度を求める必要がある。非弾性歪みは、粘性歪みと塑性歪みに分解できる。前者は絶対応力の大きさ(の冪乗)に概ね比例する一方、後者は応力の履歴に強く依存すると考えられる。東北沖地震前後の測地データの解析を通して島弧の長期的変形速度を求める上で不可欠な塑性歪み速度の推定を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

京都大学防災研究所(飯尾能久、深畑幸俊)

他機関との共同研究の有無: 有

富山大学(渡辺了)

神奈川県温泉研究所(行竹洋平)

東京工業大学・海洋研究開発機構(中村仁美、岩森光)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名: 京都大学防災研究所

電話: 0774-38-3348

e-mail:

URL:

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 飯尾能久

所属: 京都大学防災研究所地震予知研究センター

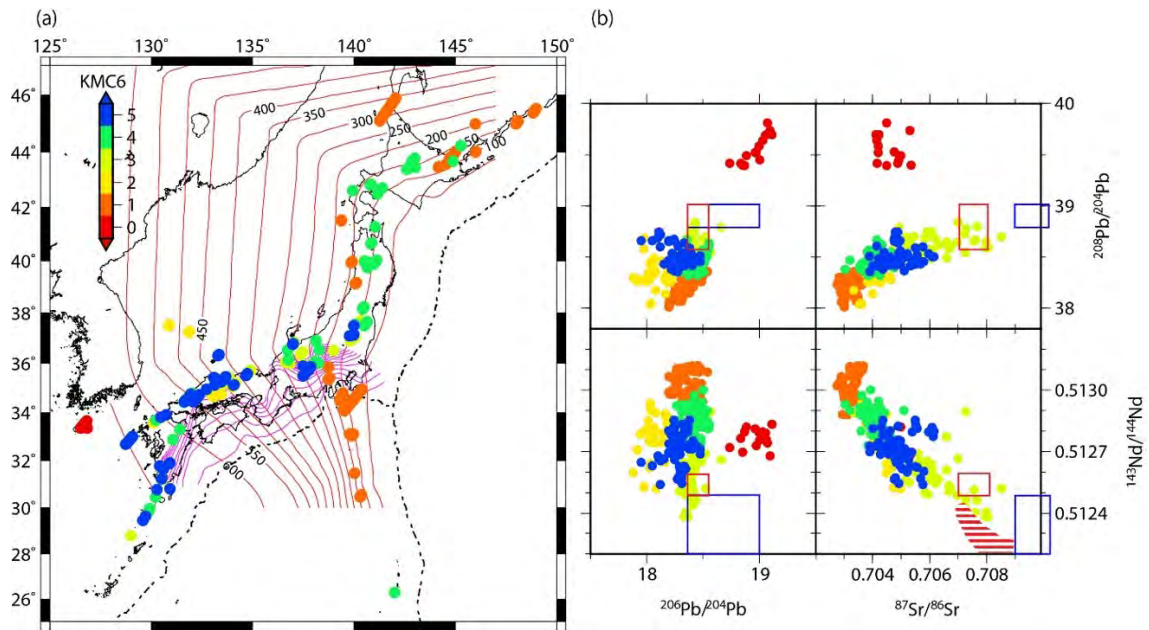


図 1

日本列島の、主に第四紀火山岩の Sr-Nd-Pb 同位体比空間における統計解析 (k-means cluster analysis) の結果。6 つのクラスタにより特徴が良く表される (左)。日本列島全域下の (i) 流体付加前のマントル組成、(ii) 付加流体量を、independent component analysis を併用して解析したところ、いずれも島弧セグメントごとに違いがあり、かつ (i) は東日本と西日本で系統的に異なること (図におけるオレンジ・緑 vs. 青)、およびブルーム由来成分 (黄色) が明瞭に分かれることが分かった。これらの違いは、(i) については、地球規模の東西半球構造に関連すること、および (ii) については、沈み込むスラブの温度、角度および組成 (特に堆積物成分) の違いを反映していることが明らかとなった (Nakamura et al., 2019)。

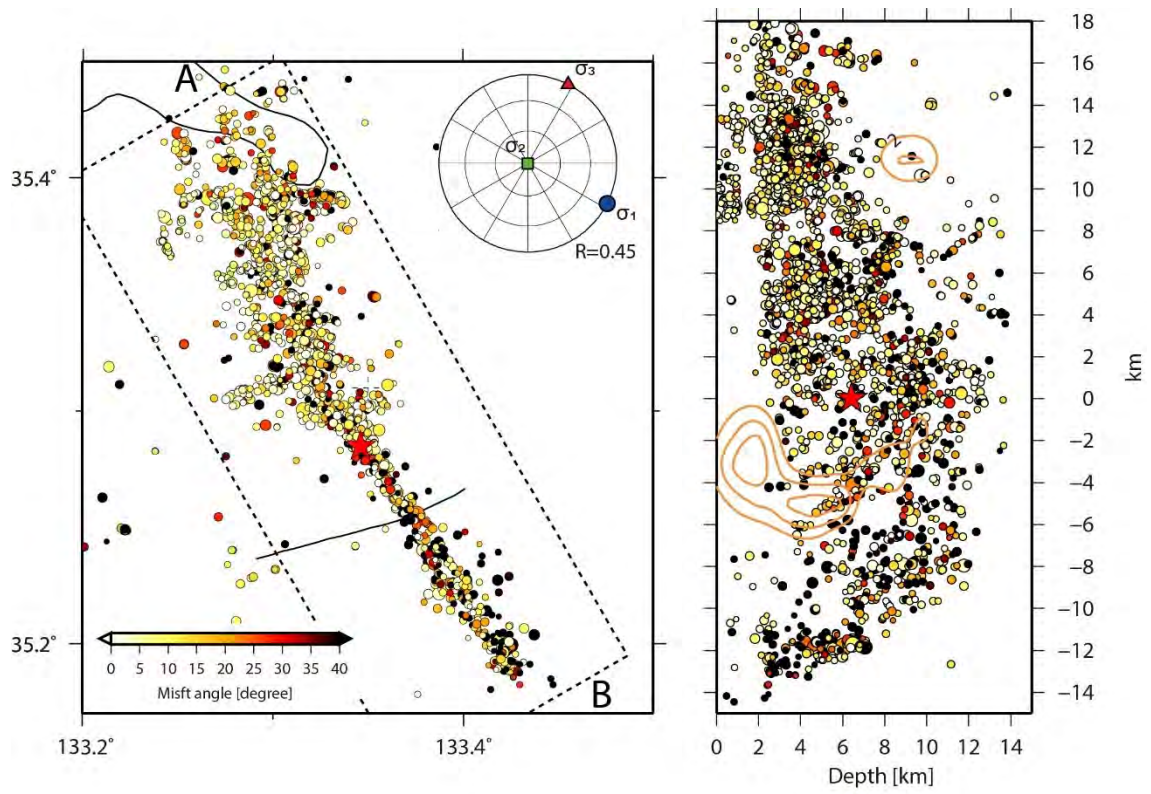


図 2

図上部のダイアグラムに示したリファレンス応力場に対する余震メカニズム解の Misfit 角空間分布。(左)点線矩形領域内に対応する震央分布図、(右)南北断面に投影した深さ分布。星印は本震破壊開始点を示す。

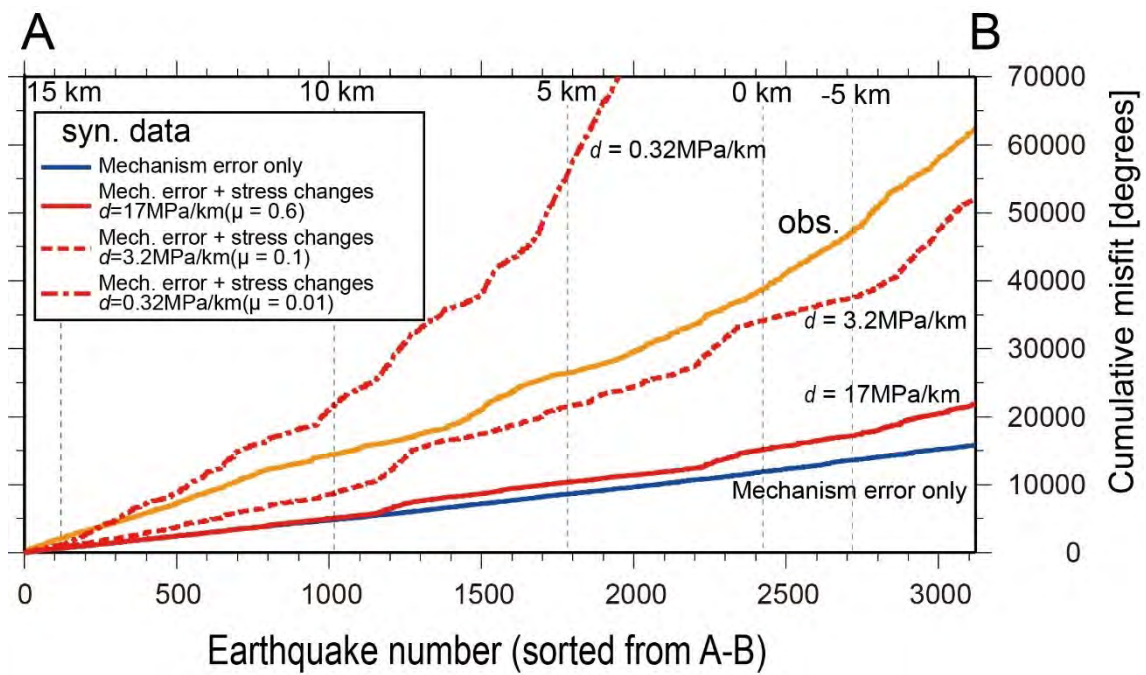


図 3

本震断層にそった余震 Misift 角の積算曲線 (オレンジ) 及びメカニズム解の誤差のみを考慮した Misfit 角の積算曲線 (青色)、メカニズム解の誤差に加え本震による静的応力変化を応力擾乱として与えた場合の Misfit 角の分布 (赤色線)、静的応力変化を与える場合背景応力場の差応力レベルをいくつか設定し、本震後の応力不均質を求めた。

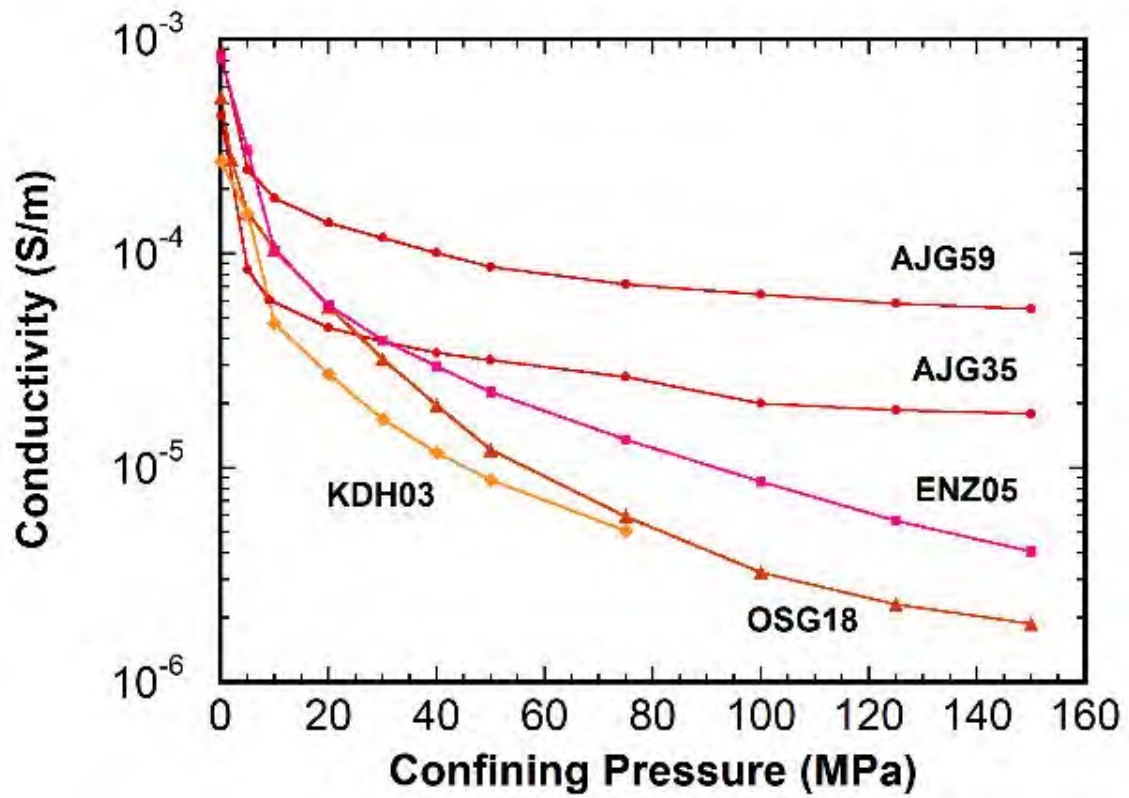


図 4

庵治花崗岩 (AJG), 大島花崗岩 (OSG), 塩山花崗閃緑岩 (ENZ), 勝原トータル岩 (KDH) の電気伝導度の封圧依存性。岩石試料はすべて 0.1 mol/L KCl 水溶液を含ませている。

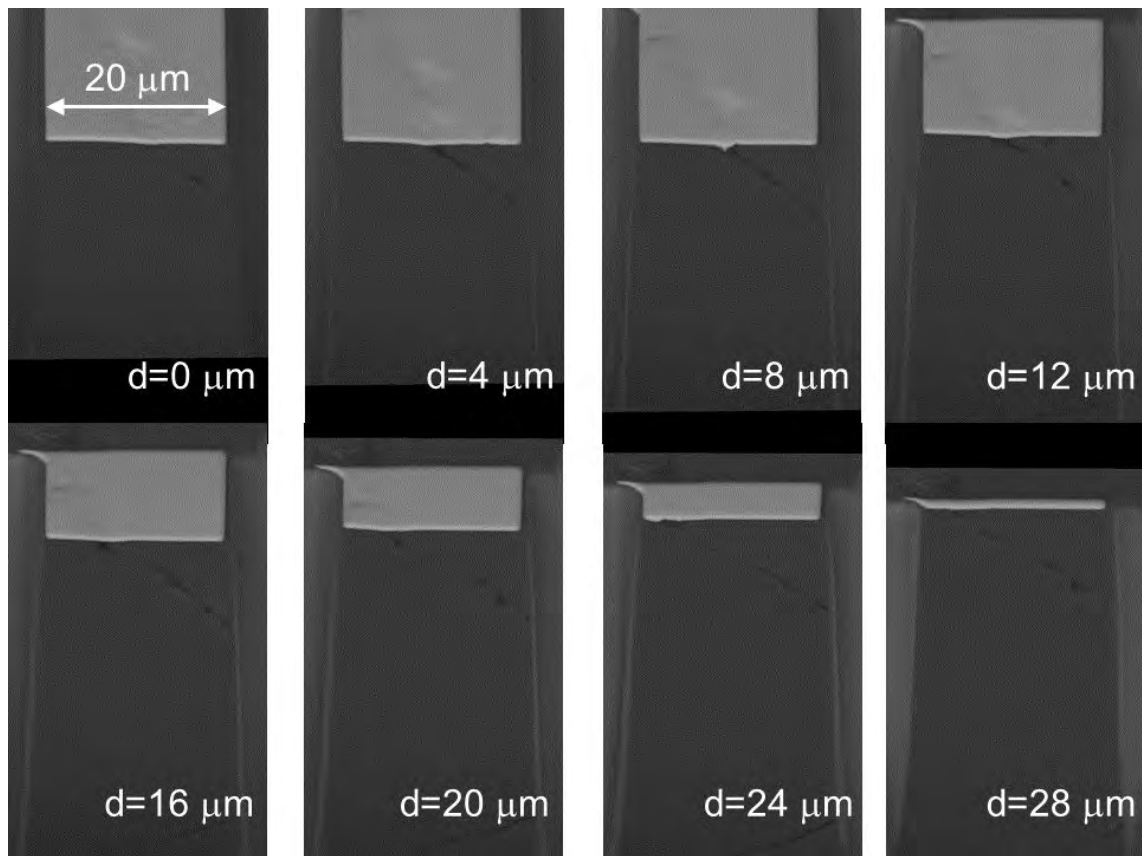


図5
庵治花崗岩 (AJG02) のクラックの FIB-SEM 画像。

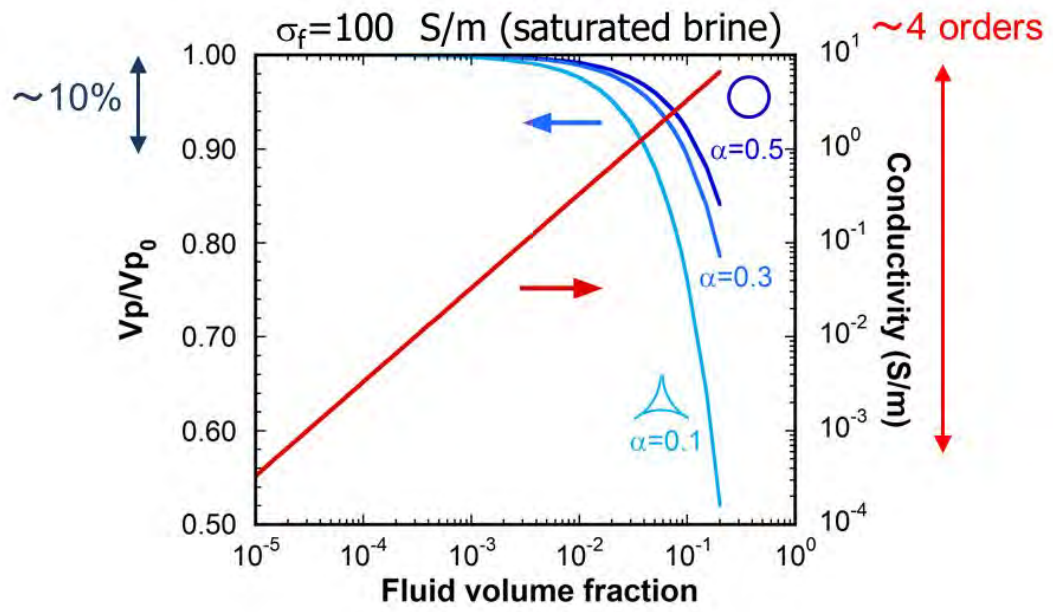


図 6

岩石内に流体がチューブ状に存在する場合の地震波速度（P波）および電気伝導度。流体の電気伝導度は 100 S/m としている（飽和食塩水に相当）。また、P波速度は固相（花崗岩）の速度で規格化している。

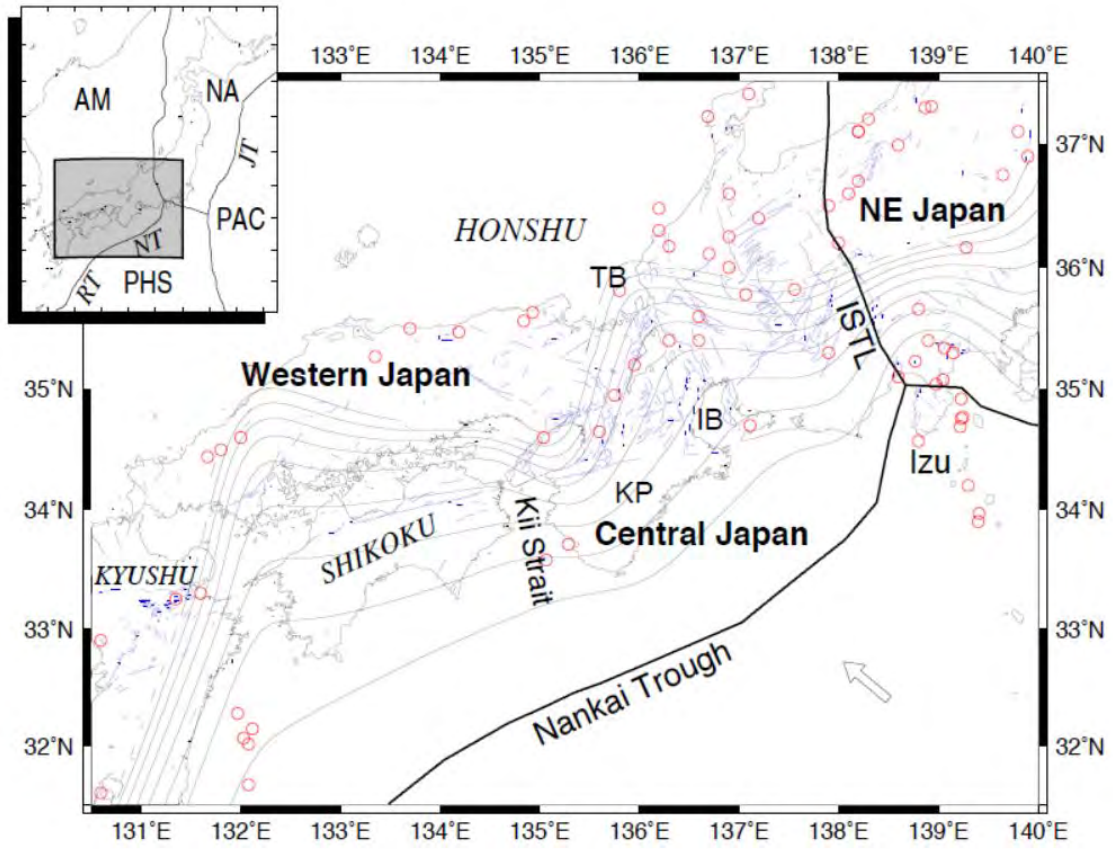


図7
 中部～西日本下のフィリピン海スラブの形状。形状データは CAMP モデル (Hashimoto et al., 2004) による。青線は活断層 (活断層研究グループ、1991)、赤丸は歴史地震 (宇津, 2004; Matsu 'ura, 2017) を表す。フィリピン海プレートの変形と地表の変形が整合的。

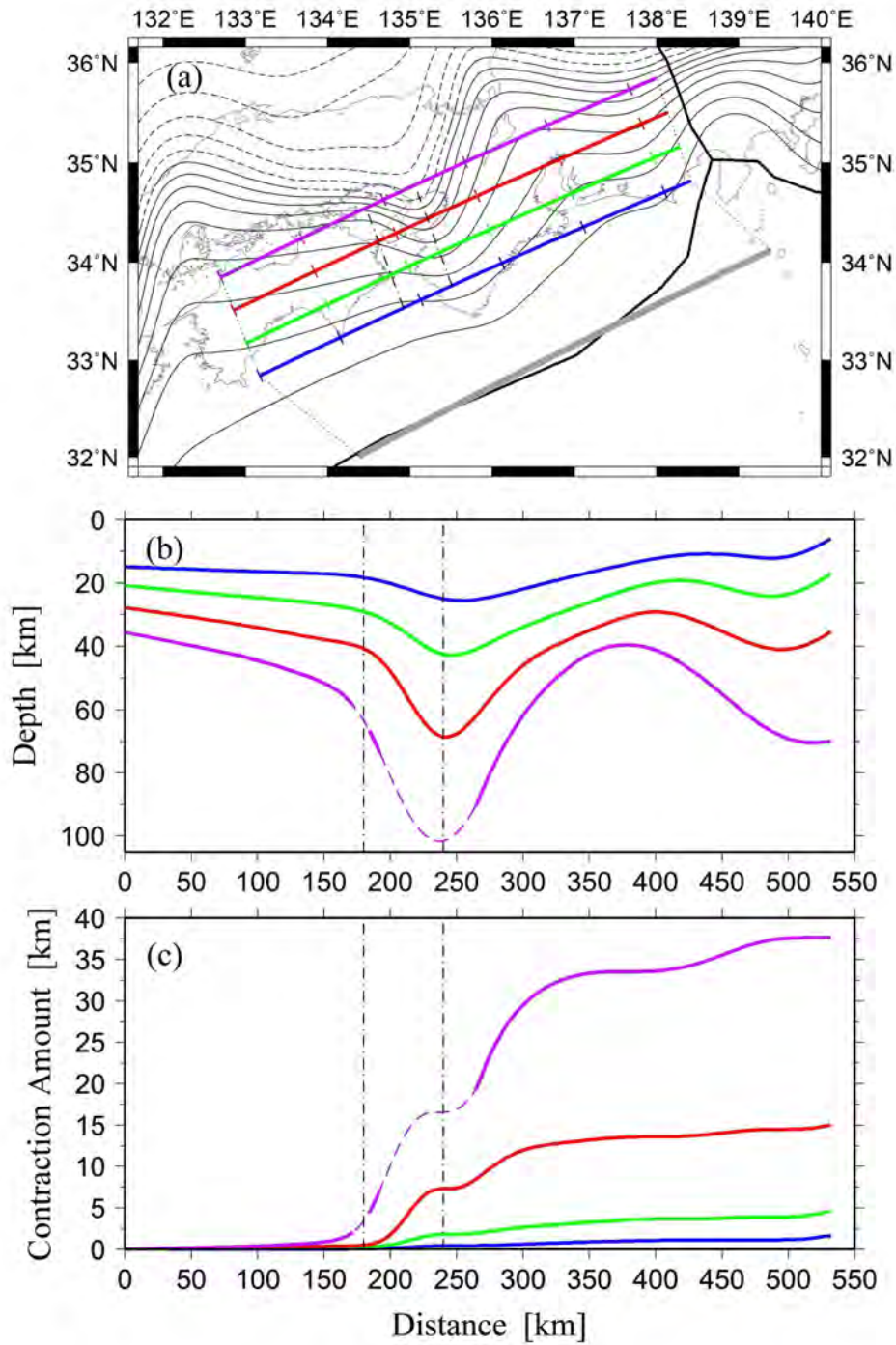


図 8

(a) フィリピン海スラブの地形(黒のコンター)。青・緑・赤・紫の各測線は、それぞれ3・4・5・6百万年前に南海トラフ(灰色の測線)に位置していた。(b)各測線におけるフィリピン海スラブの地形断面。(c)各測線におけるフィリピン海スラブの短縮量。隣り合う測線間の短縮量の差を取ることで、最近百万年間の短縮速度が得られる。

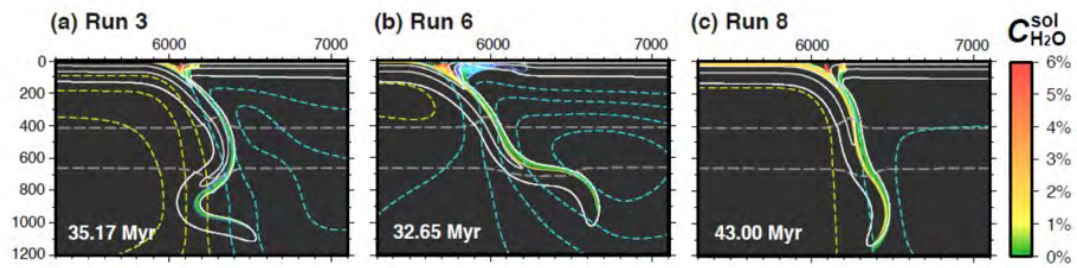


図9

沈み込むプレートの含水量の変化に対応するスラブ形状の変化。右に向かって (Run3 から Run8 に向かって) 含水量が多くなる。スラブのマントル部分含水量が 0 の場合 (Run3) 流体放出による上盤プレートの弱化が起こらず、背弧拡大も海溝後退も起こらない。Run6 のように、若干の水が入っている場合には、背弧拡大と海溝後退が起こり、スタグナントスラブが形成される。水が多すぎる場合 (Run8) 沈み込むパワーが弱くなり、背弧拡大も海溝後退も起こらなくなる (Nakao et al., 2018)

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

注水実験による内陸地震の震源断層の詳細な構造と回復過程の研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

野島断層において第 2 回目の 1800m 深度注水実験を実施する。第 1 回注水実験(2013 年実施)と合わせて、震源断層の透水性構造、および震源断層から分岐断層にいたる詳細な破碎帯(透水性)構造を推定する。震源断層における透水性の経年変化を検出し、野島断層(震源断層)の強度回復過程について検討する。1800m 深度注水に伴う誘発地震を検出し、誘発地震の発生過程および詳細な断層構造と地震発生特性について解明する。野島断層および他の活断層(震源断層)について、断層深部構造(特に走向方向の構造不均質性)と本震時の破壊過程および回復過程に関する特性を抽出する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

野島断層での第 1 回目の 1800m 深度注水実験(2013 年 9 月)について、観測データの解析・モデリングを深化させる。まず、震源断層を深さ約 400m において貫通する 500m 孔での地下水位データについて、注水に伴う微小な変動を抽出し、拡散過程モデリングにより震源断層の透水係数を推定する。800m 孔底における歪み変動、地下水位変動、地表で測定された自然電位データについてもさらにモデル化を進め、野島断層の震源断層から分岐断層にいたる断層帯全体の透水性構造、および注入水の挙動を推定する。これにより、従来の 540m 深度注水に対して行った 800m 孔歪変動および地下水位変動のモデリング解析(拡散過程モデル)の改善・高度化へのフィードバックを行う。

第 2 回目の 1800m 深度注水実験を 5 年度目(平成 30 年度)に実施する。野島断層の震源断層(最上部)の透水性構造の時間変化を検出し、強度回復過程について検討する。

野島断層上盤側の地表岩盤に設置されたアクロス震源の連続運転を実施する(各年度約2ヶ月間)。これにより、従来検出されていたアクロス震源～800m孔底地震計間の地震波の走時・振幅の経年変化についてさらに検証する。S波偏向異方性の測定も合わせて行い、地震波の走時や振幅変動の要因となる野島断層近傍の構造特性について検討する。

1800m深度注水に伴う誘発地震(極微小地震)の発生を検出する。1800m孔地震計の高速(10kHz)サンプリング波形の解析により、誘発地震の震源過程(震源パラメータおよびそのスケージング、初期破壊過程、等)を推定する。地表に設置する地震観測点も含めて高精度の震源決定を行い、断層トラップ波の解析とも合わせて、断層破砕帯と誘発地震の位置関係を明らかにする。誘発地震および定常地震活動について、800m孔地震波形の相互相関係数等にもとづいて震源精度以上に高い精度の震源分布特性(震源クラスター構造)を明らかにする。これらの結果に基づき、注水誘発地震および定常地震活動について、震源過程および発生特性の違い、およびそれらと断層微細構造との関係を明らかにする。

注水実験によらない地震学的な手法(地震波散乱係数やS波偏向異方性の経年変化)からも地震発生後の震源断層の回復過程を検出できる可能性がある。野島断層および最近発生した内陸地震の震源断層を対象として、断層深部構造(特に走向方向の構造不均質性)、本震時の破壊過程と回復過程の関係を系統的に調べる。

年度毎の計画概要は以下のとおり。

26・27年度：1800m深度注水実験(第1回)データの解析・モデル化、ボアホール連続観測・データ解析(地震、地殻変動、地下水)、アクロス連続運転、野島断層等の深部不均質構造および回復過程の地震学的解析

28・29年度：ボアホール連続観測・データ解析(地震、地殻変動、地下水)、アクロス連続運転、野島断層等の深部不均質構造および回復過程の地震学的解析

30年度：1800m深度注水実験(第2回)の実施および解析・モデル化、地震臨時観測・自然電位観測、アクロス連続運転、ボアホール連続観測・データ解析(地震、地殻変動、地下水)、野島断層等の深部不均質構造・回復過程の取りまとめ

(8)平成30年度及び計画期間中(平成26年度～30年度)の成果の概要：

【平成30年度の成果概要】

通算で8回目となる注水実験を実施した。当初計画では第2回1800m深度注水実験を予定していたが、予算面と漏水防止用パッカーの劣化により、第7回540m深度注水実験として実施した。注水は2018年12月17日～23日の6日間、孔口圧力が一定(当初予定では4.5MPaであったが孔口装置での漏水により3.8MPaに変更した)となるように注水流量を制御して実施した。800m孔底でのひずみ及び地下水圧の変動、地表における自然電位変動、極微小地震の活動変化等について解析を行っており、以下、自然電位の変動について報告する。

注水に伴う自然電位変動を計測するために観測(12月11日～1月29日)を実施した。注水孔から約50m南側の地点を電位計測の基準点とし、4か所(A1：注水孔からの距離5.2m、A2：同11.3m、A3：同20.7m、A4：同40.3m)硫酸銅電極を設置し、1800m孔と800m孔のケーシング・パイプを電極として1秒間隔で電位を計測した。日変化及び人為的なノイズを除去するために中央値フィルタ(幅24時間)を施した結果を図1に示す。A1～A4における電位変動は、1997年以降の注水実験において観測されている4つの特徴を備えている。すなわち、1)注水に同期した変動、2)注水孔周辺が負に変動、3)注水孔に近いほど変動が大きい、4)注水に伴い1800m孔が正に変動。これらの自然電位変動を説明するメカニズムについて、これまでの注水実験も含めて検討を行っている。観測された変動が過去の注水実験と同じ特徴を備えているので、Murakami et al. (2001, 2007)と同様の解析を行った結果、注水終了時点での電流値として-0.26 Aが得られた(図2)。注水終了の23日の注水量(漏水量を考慮した平均の有効流量)を $12.4 \pm 1.4 \text{ L/min}$ とすると、流量と電流の比(-J/I)は $0.79 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{A sec})$ となる。ここで、 $-J/I = (k / (t-2)) / (\quad)$ 、k：透水係数、 \quad ：空隙率、t：屈曲度、 \quad ：誘電率、 \quad ：

ゼータ電位を表す。電気的パラメータ(ρ 、 σ)に経年的な変化がなければ、水理的パラメータ(k 、 t)の変化を表す。

【平成 26～30 年度の成果概要】

5 力年計画期間を通して、これまでに実施した 540m 深度注水実験(1997 年～2009 年の 6 回)及び 1800m 深度注水実験(2013 年)データの系統的な再解析、モデルの高度化を行い、野島断層近傍岩盤の透水性構造とその経年変化の検出を行ってきた。注水に伴う自然電位変動については、従来の 1800m 注水孔を線電流源とするモデルに対して、正の電荷が注水孔から一定の距離に環状に分布する環状電流源を重ね合わせるモデル(平成 26 年度)、正の電位変動が生じる電極付近に双極子型の電流源を重ね合わせるモデル(平成 27、28 年度)などの検討を行った。また、注水に伴う自然電位変動を説明するためのアナログ実験も試みた(平成 29 年度)。800m 孔地下水データについては、水圧計の感度再検定、気圧応答の再検討、解析モデルの高度化などの再解析を行い、野島断層近傍岩盤の透水係数の経年変化をより精度良く推定した(平成 28 年度)。

野島断層近傍の地表岩盤に設置されたアクロス震源については、1999 年 6 月に最初の連続運転を実施したが、今期 5 力年期間を通して毎年度、約 2ヶ月間の連続運転を行い、アクロス震源と 800 m 孔底地震計の間の伝達関数から P 波および S 波の走時と振幅の経年変化を推定した。S 波走時については、各期間で ± 1 ms 程度のばらつきを持つものの、全体の傾向として 1999 年～2018 年の 19 年間において約 2 ms(約 6%)程度、速まっているように見える。S 波の振動方向による変化の傾向の違いは特に見られない。また、P 波走時は、ばらつきが大きいものの、全期間で約 4 ms(約 3-4%)程度、速くなっている。両者を速度変化に直して経年変化を散布図に描くと図 3 のようになる。P 波と S 波の走時の速まりの相関係数は 0.63 と高い。振幅については各期間で ± 10 %程度のばらつきがある。後続波部分についても、上記と同じ伝達関数を用いて走時の経年変化を推定した。走時のばらつきが大きいものの数%程度、速まる傾向がある。これは P 波部分の変動よりは小さい。以上の結果は、長期的には、断層近傍でのクラック密度の減少による地震波速度の増大(強度回復)を示唆している。しかし必ずしも単調に増大しているわけではなく、1999 年から 2000 年にかけては、特に P 波で走時が増大(速度が減少)している。2011 年以降の実験で、S 波走時の変化が小さい一方で P 波走時が速くなっていることは、例えば、これらの期間ではクラック密度は変化しないままクラックの水飽和率が増加した等、水の動きが関与している可能性が示唆される。なお、平成 30 年度も連続運転を実施したが、アクロス震源を制御する PC 装置にトラブルが発生したため実験を中止することとなった。

- (9)平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
村上英記・野本和希，注水実験時に観測された自然電位変動解明のためのアナログ実験(序報)，第 144 回地球電磁気・地球惑星圏学会，R003-P14，2018 年 11 月 25 日(名古屋市)。
村上英記・野本和希，地下水流動モニターにボーリング孔ケーシングパイプを利用する際の留意点，Conductivity Anomaly 研究会，P01，2019 年 1 月 10 日(宇治市)。
村上英記・野本和希，地下水流動モニターにボーリング孔ケーシングパイプを利用する際の留意点，Conductivity Anomaly 研究会論文集 2019 (印刷中)。

- (10)次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：
本研究課題について次期計画は提出していない。

- (11)実施機関の参加者氏名または部署等名：
西上欽也・大志万直人・吉村令慧・加納靖之(京都大学防災研究所)
他機関との共同研究の有無：有
東京大学地震研究所(山野 誠)
名古屋大学環境学研究科(山岡耕春・田所敬一)
静岡大学理学部(生田領野)

金沢大学理工研究域自然システム学系（平松良浩）
高知大学理工学部（村上英記）
大阪市立大学理学部（山口 覚）
福山市立大学都市経営学部（向井厚志）
産業技術総合研究所（北川有一）
滋賀県立大学環境科学部（小泉尚嗣）

（12）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：京都大学防災研究所地震予知研究センター
電話：0774-38-4195
e-mail：nishigami.kinya.3r@kyoto-u.ac.jp
URL：<http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/idoi/kaibo/>

（13）この研究課題（または観測項目）の連絡担当者
氏名：西上欽也
所属：京都大学防災研究所地震予知研究センター

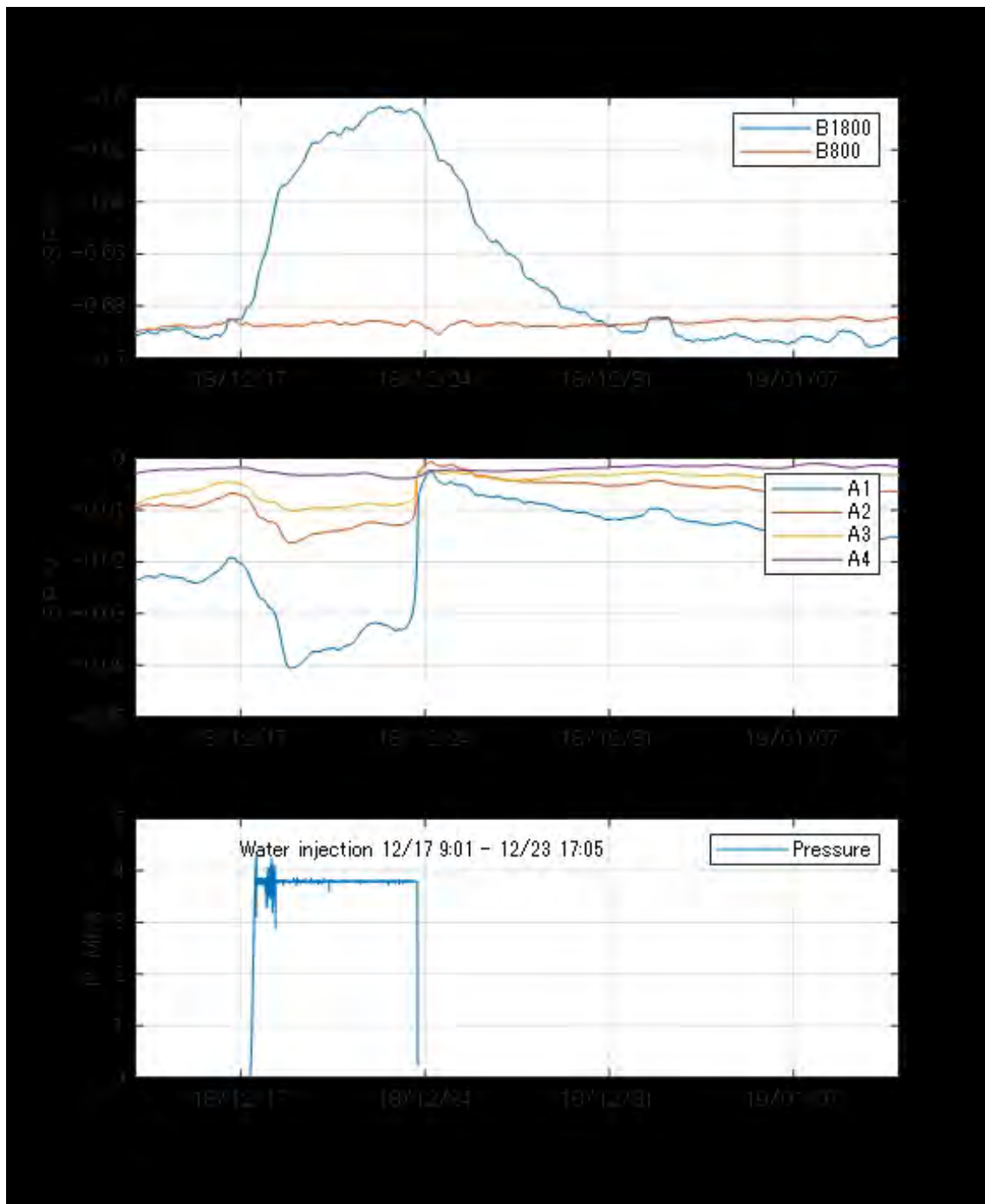


図1 注水に伴う自然電位変動。上段：1800m 孔と 800m 孔の電位変化、中段：電極 A1 から A4 までの電位変化、下段：注水孔口での圧力。

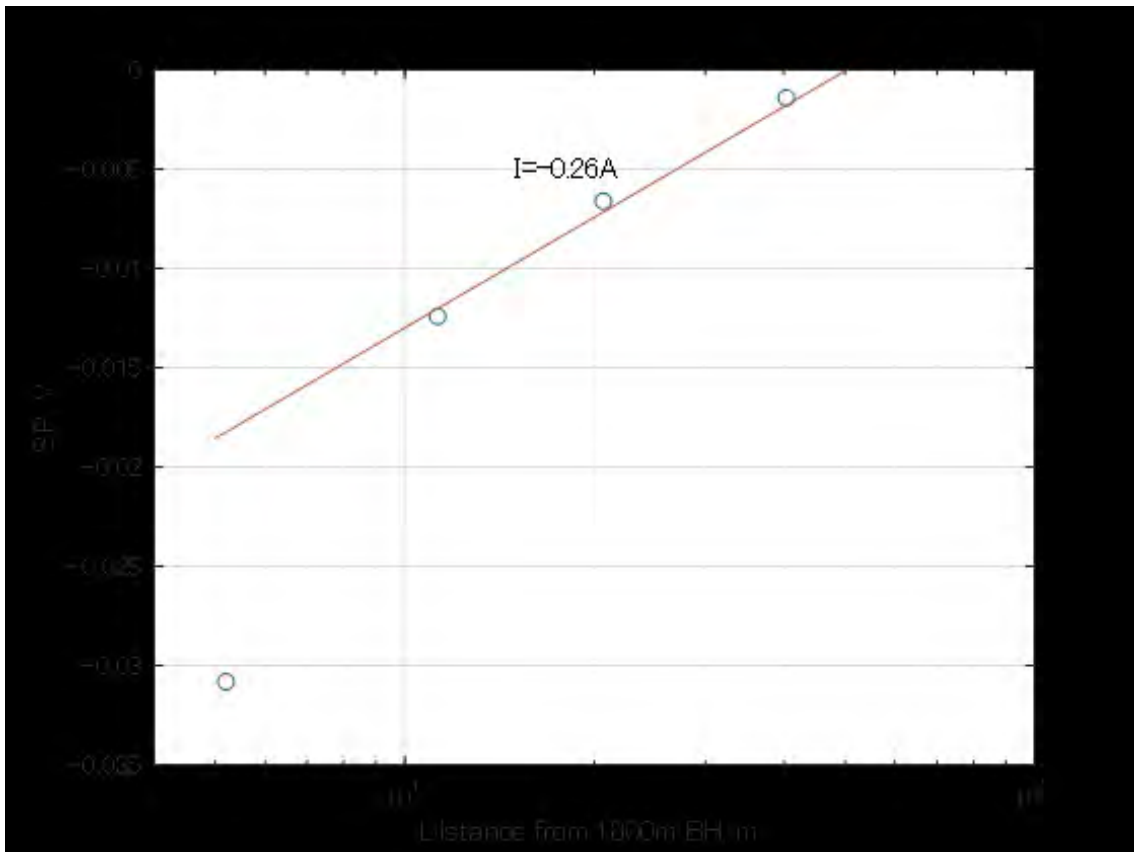


図2 注水孔からの距離に対する電位変化の大きさ。直線は、線電流モデル ($I = -0.26 \text{ A}$) による予測値を示す。

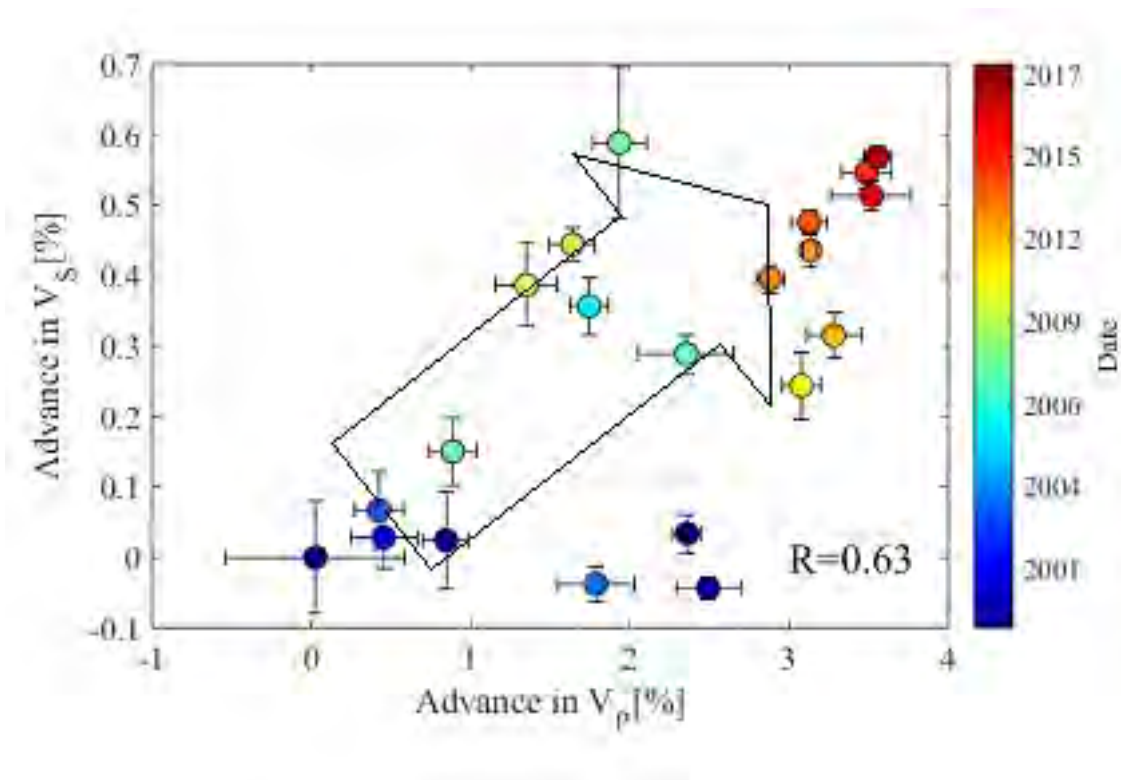


図3 1999年～2018年の19年間に於けるP波、S波速度の変動。P波速度の増大が顕著で3-4%程度、S波は6%程度の増大が見られた。

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

横ずれ型の内陸地震発生の物理モデルの構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

(2) モニタリングによる地震活動予測

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

4. 研究を推進するための体制の整備

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の5か年の到達目標：

横ずれ型の内陸地震を主な対象として、断層への応力集中機構のモデル化、断層の強度低下のメカニズム解明、地震活動変化のメカニズム解明等を行い、長期的な発生予測手法の改善につなげることが本研究全体としての到達目標である。以下に手法毎の到達目標の概要を述べる。

跡津川断層周辺の変形パターンが断層走向方向にどのように変化するかを明らかにして、横ずれ型の活断層のモデル化に反映させる。複数の微小地震活動域において、高精度の地下構造および応力分布を求め、他のデータと合わせて総合的に解析し、内陸地震の発生場の特徴を解明する。比抵抗構造研究により、内陸地震の断層の端の状態を解明し、断層の端に、地震の規模を規定する不均質構造があるのかどうかを検証する。四国地方を中心に基盤的な地殻・マントル上部の比抵抗構造研究を行い、主にフィリピン海スラブ周辺の物性状態の解明、さらには、定量的内陸地震発生モデルの構築等に貢献する。御嶽山周辺域で観測された高密度な地震データから、地震メカニズムトモグラフィ法により三次元間隙流体圧場を推定し、内陸地震の発生における間隙流体の役割を理解する。過去の歴史記

録等から明らかになっている南海トラフ巨大地震前後の西南日本における内陸地震活動の活発化について、現実的なモデルを用いた数値シミュレーションを通して活発化のメカニズムを考察することにより、今後数十年間に内陸地震の発生可能性の高い場所についての検討を行う。近年発生した内陸地震の前後の地震活動と地殻変動データの時間変化を詳細に解析し、地震活動変化のメカニズムを解明するとともに、確率予測が可能になるような統計モデルの提案を目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題においては、地震、地殻変動、電磁気観測・解析、数値シミュレーション、地震活動解析など、色々な手法を活用するとともに、個別に得られた結果を総合することにより、目標の達成を計る。以下に、手法別に5か年計画の概要を述べる。

・地殻変動とモデリング：

跡津川断層周辺を対象としてGPS観測とInSAR解析を実施する。GPS観測から得られた変位場を用いてInSAR干渉画像中の長波長ノイズを軽減することにより、高精度かつ高空間分解能の面的な地殻変動分布を明らかにする。

・比抵抗観測とモデル化：

長野県西部地震震源域の南西端周辺において可聴域MT観測を行い、北東域の既存稠密観測データと統合して、震源断層全体を包括する領域について三次元比抵抗構造を推定する。基盤的比抵抗構造研究として、主に四国地方の比抵抗調査空白域において広帯域MT観測を行い大域的な比抵抗構造の地域特性を解明する。

・地震観測とモデル化：

近畿地方北部、山陰地域、長野県西部地震震源域等において実施中のオフライン臨時観測装置を用いた稠密地震観測を継続し、定常観測網の地震波形データと統合処理して、3次元地震波トモグラフィ、レシーバ関数解析、反射波解析による地殻構造解析を行う。また、極微小地震をも含んだ大量のメカニズム解を決定し、それを基に詳細な応力場を求める。電気比抵抗構造や表層地質等の情報も合わせて、活断層の分布やそれによる内陸大地震、また常時発生す定常的な地震活動の地域差が、どのような物理的要因によって支配されているかを解析・考察する。

・間隙流体圧場の推定：

名古屋大学定常観測等の地震波形データから、詳細な地震の震源分布とメカニズム解を推定しデータを蓄積する。これらのデータから御嶽山周辺域のテクトニック応力場と間隙流体圧場を三次元的に推定し、内陸地震の発生や地震火山相互作用について考察する。

・西南日本活動期のシミュレーション：

計算機上で南海トラフにおける固着と滑りや東北日本と西南日本間の東西圧縮、内陸活断層におけるすべり相互作用を考慮して、大規模計算手法を用いた現実的な数値モデルを構築する。数値モデルを用いて、西南日本内陸における応力場の変化や内陸活断層におけるクーロン応力を計算することによって、南海トラフ巨大地震と西南日本内陸地震の活発化・静穏化の因果関係を解明するとともに、現在の地殻活動の再現と今後の予測を試行する。

・地震活動変化：

内陸大地震の発生前の地震活動変化はゆっくりすべりによる応力変化(CFS)に起因するという説を、GNSS観測データの解析や地下構造や応力場のデータも含めて検証する。北摂・丹波地域における地震活動と大地震との関係や活動変化の原因について、地震メカニズム解や地下構造等の解析により、解明を試みる。さらに、地震活動の異常性を業務的に捉えられるようなモデルとそのソフトウェアを開発し、確率予測が可能になるような統計モデルの提案を目指す。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度～30年度)の成果の概要：

平成30年度の成果

・地殻変動とモデリング：

平成 30 年度は、跡津川断層周辺にて GNSS 観測および観測点の保守を行った。また、そのデータを用いて局所的な歪速度場を求め、東北地方太平洋沖地震前後での局所的な歪速度の変化を求めるとともに、これをより東北沖地震の震源に近い東北地方における結果と比較した。跡津川断層周辺では地震前・地震後の短波長歪速度のパターンは地震時の歪パターンと全く異なるため、非弾性歪(断層深部すべりを含む)による可能性がある。一方、東北地方においては局在化した歪速度も地震前後で変化しており、地震後 2 年間ごとに区切って歪速度場を求めると、時間とともに急速に減衰している。その原因は次のように考えられる。東北地方で局在化した歪速度が見られる脊梁山地の火山地帯においては大きな内陸地震がカルデラ内部で発生しない傾向(海野ら, 1998)が知られていることから、熱流量が高い地域は低粘性となっているため、東北沖地震に伴う応力変化が相対的に大きくなるため、歪速度が変化した。地震後に歪速度が減少する原因としては、歪速度が局在化した地域は脊梁山地に沿って連続しておらず、地殻強度の高い地域によって分断されているためであると考えられる。この場合、東北沖地震に伴う応力変化は当初は粘性率の低い火山地域に粘性流動を引き起こすものの、応力が緩和した後は周囲の弾性定数の高い領域のみで応力を支えることになる。この流動が卓越する期間のみ局在化した歪速度が見られ、それは時間とともに急激に減衰する。この様子を有限要素法モデルで検証してみた(図 1)。なお、計算では重力を物体力として全領域に加え、境界条件には絶対応力を与えている。この結果から逆に、新潟神戸歪集中帯に属する跡津川地域において歪速度が変化しない原因は、それが弾性領域によって分断されておらず、2 次元的な構造をとることによると考えることができる(飯尾, 私信)。

陸域観測衛星だいち(ALOS)により 2006 年 8 月から 2011 年 2 月に取得された L バンド合成開口レーダ(SAR)のデータを用いて、山陰ひずみ集中帯(SSZ)の地殻変動分布の検出を試みた。北行軌道から撮像された鳥取県東部の 27 画像(パス 416、フレーム 680-700)を解析し、Gamma ソフトウェアを用いて干渉処理を行った。地形補正は、ASTER-GDEM(Ver.2)を用いて行った。最大基線距離 1070m、最大経過日数 2500 日、最小コヒーレンス 0.5 の基準を満たした 44 画像(図 2a)からアンラッピング処理により、衛星視線方向の変位分布を求めた。そのうち 17 画像には大きな電離層擾乱の影響が見られ、補正を試みたが上手くいかなかったため、最終的にはこれらの画像は解析に用いなかった。平均的な地殻変動速度を求めるために、残りの画像をスタッキング処理した結果が図 2b である。得られた地殻変動速度は、干渉 SAR の誤差(2cm/年)以下であるが、山崎断層系の周辺のように一部の地域で地質学的な特徴と相関のある変化が見られた。GNSS データから歪み速度分布の集中が見られている SSZ では、幅 30km 程度の負の速度を持つ領域が見られるが、変動速度が GNSS データと整合しないことから、今後さらに解析を進める必要がある。

山陰ひずみ集中帯(SSZ)の地殻変動を詳細に調べるために、2011 年東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動分布の短波長・長波長成分の特徴とひずみ集中の原因として深部剪断帯の幅の推定を行った。まず、SSZ における東北地方太平洋沖地震前後の N80 °E 成分のせん断ひずみ速度に注目して、ひずみ速度分布の解析を行った。地震前、地震後の 3 つの期間において、いずれも歪み速度は顕著な右横ずれ運動を示す(図 3 左列)。歪み速度の長波長成分(図 3 中列)は、2011 年以降に増加する傾向が見られており、東北沖地震の余効変動を示すと考えられるが、歪み速度の短波長成分(図 3 右列)は、いずれの期間も SSZ に変形が集中していることを示すが、その速度は大きく変化していなかった。この地域の定常地震活動変化を見るために、ETAS モデルを用いた解析を行ったが、東北地方太平洋沖地震前後で地震活動度の顕著な変化は見られなかった。これらの結果から、東北地方太平洋沖地震前後の応力変化は、この地域の定常的な応力変化速度に対して小さいことが示唆される。

次に SSZ におけるひずみ集中の原因として、地下深部の延性剪断帯の運動を仮定し、その幅の推定を試みた。延性剪断帯の上端は、微小地震活動の下端である深さ 13km (Omuralieva et al., 2012)とし、平行な横ずれ断層を剪断帯内に多数配置することにより、剪断帯の変形を近似した。鳥取県西部と中・東部のひずみ集中帯を横切る 2 つの断面における水平変位速度分布は、後者の方がより変形が集中していることを示し、深部剪断帯の幅はそれぞれ 60km と 21.5km と推定された。ただし、地殻変動観測データは、有限の幅を持った深部剪断帯でより良く説明できるが、横ずれ断層 1 枚(幅が 0)のモデ

ルでもデータがある程度説明できるため、GNSSデータだけでは、下部地殻の剪断帯の幅を推定することは難しい。

・比抵抗観測とモデル化：

本研究計画では、主に、四国地方の比抵抗調査空白域において経度・緯度方向 10 分毎の格子点を設定、大局的・基盤的比抵抗構造の地域特性の解明を目的とした広帯域 MT 観測を実施した。一方で、2016 年度秋、鳥取県中部の地震 (M6.6) が発生したことを受け、同年度には断層直下の下部地殻の不均質構造の実態の解明を目的として、鳥取県中部の震源域を中心とするエリアにおいて広帯域 MT 観測を項目として追加・実施した。中国・四国地方の広帯域 MT 法観測地点分布図を図 4 に示す。四国地方中央部の観測点が上述の格子点間隔で覆われるとともに、鳥取県中部の地震域を取り囲むように測点密度が上がった。以下、本年度のデータ処理・解析結果について報告する。

四国地方では比抵抗構造の地域特性の解明を目指し、研究計画ならびに既存の観測データを整理、一部を再解析することにより 3 次元比抵抗構造モデル構築のための入力データを作成した。

現時点では、中国・四国地方いずれの地域でも 3 次元モデルの完成には至っていない。全域にわたる空間的な比抵抗構造の特徴を確認するとともに、3 次元初期モデルを作成する目的で、2017 年度と同様、新規ならびに再解析・既存データを活用・統合して各地点で得られた determinant impedance データに対して 1 次元 Occam inversion を実施し、中国・四国地方における深度別比抵抗分布図を作成した (図 5)。ここでは、一例として深度 10km についての比抵抗分布を図示する。四国地方では、やはり、中央構造線周辺域を境とする相対的な高/低の比抵抗構造の存在が顕著である。瀬戸内海側の観測の空白域はあるものの、その高比抵抗地殻の北部延長に関しては、山陰地方の低比抵抗領域の南限までの連続性が示唆される。次期計画では瀬戸内側の観測を通じてこの高比抵抗地殻の連続性の検証を行う必要がある。また、この深度の比抵抗分布図と深さ 15km 以浅の地殻地震の震央分布との対応関係をみれば、中央構造線周辺北側・内帯では、高比抵抗域もしくはその境界領域と明瞭な対応がみられる。この関連性は山陰地方におけるそれと共通する知見である。また、山陰地方の地殻深部の低比抵抗領域はある程度の規模を持って連続的に存在することが示された。

一方、外帯では、2017 年度本報告で既に指摘されたことであるが、その両者の関連は明瞭ではなく、むしろ、四国中央部を北北東から南南東に抜ける高比抵抗の帯を境として東側で地殻地震の活動は顕著であるようにみえる。

さて、2016 年鳥取県中部の地震震源域に関しては、この地震の発生域の東方約 10km の地域で、2015 年 10 月以降たびたび地震が発生しているうえ、さらにその東側は 1943 年鳥取地震の地震断層である鹿野・吉岡断層の西方延長域にあたる。このような地域の特徴をふまえ、2016 年度の観測では取得されていない南側延長部の比抵抗構造の推定精度をあげるために、鳥取・岡山県境脊梁部周辺域において追加観測を実施した。2018 年 11 月初旬から 12 月初旬にかけて、鳥取・岡山県境脊梁部周辺域において計 4 地点で、自然界に存在する微弱な電磁場変動を信号とする広帯域 MT 法観測を実施した。広帯域 MT 法観測にはフェニックス社製の測定器 MTU-5 および MTU-5 A を使用し、原則として地磁気 3 成分と電場 2 成分を測定した。観測により得られた見かけ比抵抗探査曲線ならびに位相差曲を図 6 に示す。

今回は、測定期間中に顕著な地磁気擾乱現象に恵まれない上、電気鉄道からの漏洩電流や電柵の影響を受ける地点もあり、全般的に良質の広帯域データが取得できていない。ただし、見かけ比抵抗曲線等、探査曲線から鳥取・岡山県境脊梁部周辺域は大局的にみれば、地殻上部は高比抵抗 (少なくとも $k \text{ m}$ オーダー) 岩石の存在が示唆される。地震・火山噴火予知研究計画事業ならびに鳥取県環境学術研究振興事業等により、鳥取県中東部の地震発生域周辺において同じく広帯域 MT 観測データが取得されている (図 4)。ここでは、それらのデータも統合活用し、震央を横切る南北測線において東西走向の 2 次元構造をもつものと仮定して Ogawa and Uchida(1996) のコードを用いて構造解析を行った。その結果、震源域は高/低比抵抗境界領域と明瞭な対応がみられるとともに、震源域の南側地殻深部にみられていた低比抵抗領域の南限位置を確認することができた (図 7)。

・地震観測とモデル化：

前計画および科研費新学術領域「地殻ダイナミクス」で設置された満点システムを用いた臨時観測、鳥取県西部地震の合同余震観測および定常観測のデータを用いて、応力逆解析により、鳥取県西部地震の断層近傍の応力場を推定した。図 8 に、推定された最大・最小圧縮応力の方位分布を断層に沿う断面に投影したものを示した。稠密地震データの活用により 2km 程度の高分解能のデータが得られている。断層の南端付近(図の左側)では最大圧縮応力の向きが上下に近くに推定されている領域が多数存在し、断層の南端付近で正断層的な応力場となっていたと考えられる。2016 年鳥取県中部の地震の余震域でも同様の結果が得られており、地震前に断層端付近において応力緩和が起こっていたものと推定される。

・ 間隙流体圧場の推定 :

御嶽山周辺域の地震活動を理解するために、名古屋大学を含む諸機関の定常地震観測で得られた連続地震波形データ(2018 年 1 月~2018 年 12 月)に対し、WIN システムのイベント自動検出機能を利用した手動波形読み取り処理を行い、5529 個の地震の震源を決定した(図 9)。この中には、2014 年の御嶽山噴火以降に継続して発生している火山性地震の震源 218 個が含まれている(図 10)。このうち 70 個の火山性地震については、P 波初動の押し引き分布と S/P 振幅比のデータからメカニズム解を推定した。火山性地震は、2014 年 9 月の噴火以降減少傾向にあるが、未だに噴火前の平常時には戻っていない。規模の大きい火山性地震は、広域応力場と調和的なタイプとなる傾向がみられた。また、2014 年噴火の火口付近に、広域応力場では説明できないタイプのイベントが多く発生していることも分かった。

次に、Matched Filter 法を用いて、噴火の日時が明確になっていない 2007 年御嶽山噴火(VEI=0)の発生日を調べた。本研究では、2014 年の噴火を境に火山性地震のメカニズム解が東西伸長の正断層・横ずれ断層型から東西圧縮の逆断層型に変化したことに着目し(Terakawa et al., 2016)、2007 年噴火に伴う火山性地震のメカニズム解の時間変化を調べることを通じて噴火日を推定することを試みた。2007 年当時は、2014 年噴火時に比べて観測網が不十分であり、直接火山性地震のメカニズム解を推定することは難しい。このため、メカニズム解が推定されている 2014 年の火山性地震(Terakawa et al., 2016)の中から、噴火前に特徴的であった東西伸長の正断層・横ずれ断層型の地震 10 個と、噴火直後に特徴的であった東西圧縮の逆断層型地震 8 個をプレート地震とし、2006 年 12 月 22 日~2007 年 3 月 31 日までの連続波形に Matched Filter 法を適用し、メカニズム解の時間変化の傾向を調べた(西嶋ほか, 2019)。

現段階では予備的な結果であるが、噴火前及び噴火後タイプの地震は、それぞれ 2375 個と 1659 個検出された(図 11a)。1 日ごとのタイプ別の発生割合に着目すると、解析期間は 5 つの期間(期間 1: 2006 年 12 月 22 日~2007 年 1 月 24 日, 期間 2: 2007 年 1 月 25 日~2007 年 2 月 5 日, 期間 3: 2007 年 2 月 6 日~2007 年 2 月 19 日, 期間 4: 2007 年 2 月 20 日~2007 年 3 月 24 日, 期間 5: 2007 年 3 月 25 日~2007 年 3 月 31 日)に明瞭に分かれる。期間 1 と 3 においては東西伸長型地震(噴火前タイプ)、期間 2 と 4 においては東西圧縮型地震(噴火後タイプ)がそれぞれ卓越し、期間 5 には特徴的なタイプが見られなくなることがわかった(図 11b)。

期間 1~3 は、山体を東西に横切る GNSS(国土地理院)の基線長が伸びを示していることから、マグマが貫入した時期であると考えられている。この時期に、東西伸長型の噴火前タイプの地震が卓越することは(期間 1 及び 3)、これらの地震がマグマの活動の活発化を反映して発生していることを示唆する。また、期間 2 は超長周期地震の発生に続く 12 日間に当たり、このイベントは東西走向の開口クラックでよく説明できることがわかっている(Nakamichi et al., 2009)。このことから、この期間に卓越する東西圧縮型の噴火後タイプの地震は、超長周期地震による水蒸気等の放出による山体の収縮活動に対応する可能性がある。期間 4 は前述の基線長の伸びが鈍化し始める時期に当たり、噴火後タイプの地震が卓越することから、この時期に噴火した可能性が高いと思われる。まず、卓越するメカニズム解のタイプが噴火前タイプから噴火後タイプに切り替わる期間 4 の開始日の 2007 年 2 月 20 日が噴火日の候補となる。しかし、この日の噴火後タイプの地震の検出数は 9 個と少なく、微動も発生していない、一方、3 月 11 日頃から噴火後タイプの地震の検出数が多くなった。気象庁によれば、3 月

12日以降に微動が継続して発生しており、2007年3月16日には噴煙が確認されている。噴煙の確認は、それまでに火道の通気性が高まったことを示唆しており、これらのことから、本研究では3月11～12日をもう1つの噴火の候補日と考えている。ちなみに、気象庁では、5月29日の現地調査により火山灰を確認し、その上に黄砂（岐阜・長野気象台及び松本測候所で、2007年は4月1～2日に始めて黄砂を観測）が重なっていたことから、噴煙が確認された2007年3月16日から3月31日までに噴火が発生したと推定している。今後、解析の時間窓の取り方などを工夫し、地震検出の精度を向上させ、2007年の噴火日推定を行うとともに、御嶽山噴火のメカニズムを解明することを目指す。

最後に、間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場のモデル化法を開発し、1992年ランダース地震震源域の絶対応力場を推定した（Terakawa and Hauksson, 2018）。応力は2階の対称テンソルとして表現され、6つの独立な成分を持つ。これらの6つの自由度は、応力場のパターン（最大剪断応力で正規化された偏差応力テンソル）を表す4つの自由度と、最大剪断応力（偏差応力の大きさ）と等方成分に対応する各々1つの自由度である。このうち応力場のパターンは、地震データによる応力インバージョン法で推定できる。また、等方成分は概ね静岩圧と仮定してよい。したがって、絶対応力6成分を推定するためには、何らかの情報から最大剪断応力を決めることが本質的な問題である。本手法では、地震時に断層面上の剪断応力と強度が一致することと、クーロンの破壊規準で記述される強度が間隙流体圧に依存することに着目し、応力場の最適面での間隙流体圧を静岩圧と静水圧の差で規格化した値（参照間隙流体圧係数 C ）をパラメータとして、実際の地震のメカニズム解から絶対応力場をモデル化する。 C の値が大きくなるほど間隙流体圧レベルが高くなり、断層強度が小さくなるため、推定される最大剪断応力が小さくなる。この手法を南カリフォルニアの大量のメカニズム解に適用し、参照間隙流体圧係数 C を変化させながら、ランダース地震震源域の地震発生直前の絶対応力場を推定誤差と共に求めた（図12）。一方、本震のすべりモデル（Wald & Heaton, 1994）とすべり応答関数（Fukahata & Matsu'ura, 2005）を用いてランダース地震による応力変化を計算し、これを地震発生直前の絶対応力場に重ね合わせて地震直後の絶対応力場を求めた。こうして、大地震発生前後の絶対応力テンソル6成分を得ることができ、大地震に伴う応力場のパターンの時間変化や、断層面上の剪断応力や弾性歪エネルギーの変化と参照間隙流体圧係数との関係を明らかにした（図13）図13cに示すように、剪断応力レベルが低すぎると（ $C=0.8$ ）、本震後に震源域に働く剪断応力が増加して、向きも逆転する。これは、地震が応力を解放する物理過程であることと矛盾する結果であり、非現実的なケースであると考えられる。従来の研究では、本震前後の応力場のパターンの変化量から絶対応力レベルを推定してきたが、本研究では、この情報に加えて、弾性歪エネルギーの変化は少なくとも放射エネルギーの値よりも大きくなることに基づき、ランダース地震震源域での最適参照間隙流体圧係数を見積もり、その結果、深さ5kmでの最大剪断応力は 44 ± 15 MPaと見積もった（図14）。

・西南日本活動期のシミュレーション：

西南日本の内陸地震の活動期をモデル化するために、粘弾性緩和を考慮して南海トラフを模した単純な斜め沈み込み帯における内陸断層のクーロン応力変化（CFS）の計算と考察を行った（水戸川・西村, 2018）。厚さ30kmの弾性層の下に粘性率1019Pasの半無限粘弾性層の2層構造中に配置した傾斜角 10° の断層面に、海溝型地震時にはすべり角 117° で6mのすべり、地震間（100年間）には6cm/年のバックスリップを与えて、内陸域での様々な走向、傾斜角を持つ断層に対してCFSの時間変化を計算した。海溝型地震時にCFSが負となる内陸断層の時間変化の例を図15に示すが、このような断層ではCFSが地震前の値に回復するまでに数十年を要し、内陸地震が海溝型地震後しばらくは発生せず、海溝型地震の前に発生することになる。一方、海溝型地震時にCFSが正となる内陸断層では、特に海溝型地震の断層域に近い場所で地震後も10～20年程度CFSが増加し続ける傾向があり、地震後に内陸地震が発生しやすくなる。このような単純なモデル計算により、西南日本で南海トラフ地震前50年間、地震後10年間に内陸地震が多く発生しているという観測事実（例えば、Hori and Oike, 1999）を概ね説明することができた。

粘弾性変形の影響を考慮したブロック断層モデルについては、プレート間固着と地震時すべりの粘弾性緩和が地殻変動場に与える影響について南海トラフを例に粘性率や地震の繰り返し間隔を変えて計

算を行い、その結果について考察した。プレート間固着と地震時すべりによる粘弾性緩和変形は、前者は時間変化せず、後者は最後の地震からの経過時間と粘性率に依存し、両者は反対向きの変動となる。そのため、地震サイクルの前半では後者の影響が卓越し、後半では前者の影響が大きいことになる。両者の影響がほぼ打ち消しあって粘弾性の影響が小さくなる経過時間は、粘性率を 1019Pas とすると地震後 30-50 年であり、この期間では弾性応答だけでも沈み込み帯での変形を良く近似できるが、地震サイクルの後半になるにつれて、粘弾性応答を考慮することが重要になることがわかった。

・地震活動変化：

地震活動変化の解析においては、長期間にわたる均質なデータセットが必要不可欠である。そのため、阿武山微小地震観測網と気象庁の両方で処理された、同一の地震のマグニチュードの差の時間変化を調べてみた。その結果、1976 年や 1995 年頃の前後で両者には差がみられることが分かった。

5 力年の成果

・地殻変動とモデリング：

跡津川断層周辺にて GNSS 観測を行い、そのデータを用いて InSAR 解析の結果を補正することで、高い空間解像度での地震間地殻変動を検出した。具体的には、まず InSAR 画像から標高依存トレンドを DEM を用いて除去し、次に GNSS 速度場を用いて長波長トレンドを除去する。最後に、補正した干渉画像を用いて SBAS 法に基づく時系列解析を行い、平均速度場を求めた。その結果、跡津川断層帯の内部においても変位勾配は不均質であり、特に牛首断層近傍で最も変位勾配が大きくなっていることが明らかとなった（図 16）。ただし、水蒸気や電離層に起因するノイズの影響は未だに大きく、一層の精度向上が必要である。

次に、跡津川断層周辺の GNSS データを用いて東北地方太平洋沖地震前・地震後の歪速度場、および地震時の歪変化を推定し、これらから長波長トレンドを除去して局所的な歪速度の変化を調べた。その結果、地震前および地震後の歪速度場は互いに似ており、また地震時歪は全く異なるパターンを示した（図 17）。地震時歪は弾性歪を表すことから、地震前・地震後の局在した歪は非弾性歪である可能性があり、この速度が変わらないことから東北沖地震に伴う応力変化は絶対応力場に対して小さいことが推定された。同様なことを東北地方について行った結果、地震前後の歪速度は異なり、特に高熱の火山地域においては地殻の絶対強度が極めて低く、そこでの東北沖地震に伴う応力変化が歪速度を変化させた可能性を指摘した。さらに、東北沖地震後に歪集中域において歪速度の急速な減衰が見られる。火山地域を強度の低い粘弾性体、その周囲を強度の高い弾性体でモデル化し、絶対応力を考慮した数値計算を行い、この歪速度の減少を説明した。

科研費新学術領域「地殻ダイナミクス」で設置された山陰地方にける稠密 GNSS 観測データを用いて、山陰ひずみ集中帯の地殻変動の特徴と変形メカニズムについて検討した。また、2016 年鳥取県中部地震の地震時・地震後地殻変動を解析するとともに、InSAR データを用いた地震間、地震時地殻変動の解析も行った。

山陰ひずみ集中帯については、この 5 年間で存在が明らかになったもので、GEONET データだけでなく稠密観測データも加えて、鳥根県西部から鳥取県にかけてひずみ集中が顕著に見られること、およびひずみ集中帯の幅は鳥取県西部の方が鳥取県中部東部に比べて広いことが明らかになった。この特徴は、深部の延性剪断帯の幅が鳥取県西部の方が広いことを示唆している。鳥取県西部地域における地震活動は、ひずみ集中帯の走向とは異なる北北西-南南東走向に発達しているが、これらは剪断帯内部に発達した共役リーデル剪断面と考えることができ、鳥取県西部において周辺より大きな M7 クラスの地震（鳥取県西部地震）が発生していることは、ひずみ集中帯の幅が広いことによって説明できる可能性がある。鳥取県中部地震については、稠密 GNSS 観測網の中で発生した地震であり、この規模の地震としては前例がないほどの震源域近傍でのデータが得られ、余効すべりは深さ 6km よりも浅い領域で発生したと考えられ、本震の応力変化によって駆動されたと考えられる。本計画では InSAR データから有意な地震間地殻変動を得ることはできなかったが、良好な干渉が得られることは確かめられた。今後 GNSS データと組み合わせるとより高度な解析を行うことにより、微小な地殻変動を検出できる可能性がある。

・比抵抗観測とモデル化

地震・火山噴火災害の軽減に寄与することを到達目標として中国・四国地方において基盤的な地殻・マントル上部の比抵抗構造研究を行い、定量的内陸地震発生モデルの構築に貢献するために、主に、四国地方の比抵抗調査空白域において基盤的比抵抗構造研究(経度・緯度 10 分毎の測定点を設定)を進めた。5ヶ年計画の成果として、当初予定通り四国中央部において30点を超える地点の広帯域 MT 測定を実施、大局的ではあるが面的比抵抗構造を推定するための基盤的比抵抗構造探査データを得たことをあげる。このデータならびに既存データを活用・統合して新たに得られた知見を中心に以降に示す。

四国中西部や中東部の2次元構造モデルでは、上部地殻深度では中央構造線北側で見られる北傾斜の震源分布と調和する北傾斜の比抵抗構造が、深部低周波地震深度では相対的に低比抵抗構造が、南部地域ではフィリピン海プレートに関連づけられる高比抵抗構造等が、興味深い特徴として示された。また、3次元構造モデルの初期モデルとして試みに作成された中国・四国地方の深度別1次元比抵抗構造モデルを統合した擬似3次元比抵抗モデル(例えば、図5)から、いくつかの興味深い特徴が新たに浮かび上がった。中央構造線周辺域を境とする相対的な高/低の比抵抗構造の存在が顕著である。瀬戸内海側の観測の空白域はあるものの、その高比抵抗地殻の北部延長に関しては、山陰地方の低比抵抗領域の南限までの連続性が新たに示唆された。また、中央構造線周辺北側・内帯では、地殻地震活動は、高比抵抗域もしくはその境界領域と明瞭な対応がみられるが、この関連性は山陰地方におけるそれと共通する知見である。さらには、四国の地殻地震の東西地域での活動度の差異と中央部を北北東から南南東に抜ける高比抵抗の帯と関連がみられたことは、新たに提示された視点といえ、既存の2次元構造モデルを根拠に東部と中部・西部の構造の相違点を指摘した村上・塩崎(2016)には再考の可能性がでてきた。

一方で、2016年度秋に鳥取県中部の地震(M6.6)が発生したことを受け、断層周辺域の下部地殻の不均質構造の実態の解明を目的として、鳥取県中部の震源域を中心とするエリアにおいて広帯域 MT 補観測を項目として追加・実施、構造研究を進めた。鳥取県環境学術研究振興事業等による既存の研究データ等と統合して示された震源域を横断する2次元比抵抗構造解析結果は、比抵抗と地震活動の密接な関連を示す既存の研究成果と調和することが示された。また、既述の深度別擬似3次元比抵抗モデルから山陰地方の地殻深部の低比抵抗領域はある程度の規模を持って連続的に存在することが新たな知見として示された。

このように面的な研究基盤を持たない比抵抗研究においては、本研究が取り扱うような一定の観測点密度で日本全国をカバーするという視点を持つ基盤的な調査研究は重要であり、これにより実データを持つものとして背景地域を考慮することにより、研究対象としての活構造地域の特徴がより明瞭に提示できるものとする。今後は、研究対象地域での観測点密度の再興を含めることで、この基盤的比抵抗構造研究を通して本研究プログラムに貢献する。

・地震観測とモデル化：

稠密地震観測データを用いた地殻構造および応力場の解析等により、内陸地震が起こる領域とそうでない領域の違いが明らかになってきた。図18左に、定常観測網および満点システムを用いた臨時観測データから得られた山陰地方の地震帯における下部地殻および上部地殻の地震波速度偏差の概要を示した。下部地殻深部の深さ25kmにおいては地震帯に沿うような低速度異常が見いだされた。下部地殻の浅部において低速度域の幅が狭くなっていることは今後の検討課題であるが、Shiozaki et al.(2003)による下部地殻内の低比抵抗域とは調和的に見える。上部地殻では、近年発生した大地震の余震域の両端に低速度異常域が見いだされた。図18右には、応力逆解析から推定された最大圧縮応力の方位分布を示した。稠密地震データの活用により5km程度の高分解能のデータが得られている。地震帯の中央部付近で最大圧縮応力の方位が周辺に比べて数十度回転していることがよくわかる。下部地殻の延性せん断帯の変形(ゆっくりすべり)により地震発生域に応力集中が発生していると考えられる。これは、GNSSで推定されたひずみ速度の集中と調和的である。さらに、図8に示したように、鳥取県西部地震の余震域の南端付近では地震前に応力緩和が起こっていた可能性が指摘された。2016

年鳥取県中部の地震の余震域でも同様の結果が得られており、また、図 18 の速度構造において、大地震の余震域両端に系統的に低速度異常が推定されているため、断層端で地震前に応力緩和が起こっていることは、山陰地方の地震帯に起こる大地震に共通した性質である可能性がある。このように、内陸地震の震源断層に対して、下側の下部地殻内のゆっくりすべりおよび両端の応力緩和により、応力集中が起こっている可能性が示された。この知見が普遍的なものであれば、今後発生する大地震の場所やそこで発生する地震の大きさについて、深部および両端の低速度異常、および応力緩和と集中によって推定することが可能となることが期待される。下部地殻の不均質構造と震源断層のより具体的な関係や、この知見が他の地域でも成り立っているかどうかの検証等が今後の課題となる。

・ 間隙流体圧場の推定：

内陸地震の発生における間隙流体の役割を理解することを目指し、御嶽山周辺域を主な研究対象領域とし、定常地震観測で得られた地震波形データから震源の把握とメカニズム解の推定を行い、データを蓄積した。これらのデータを地震メカニズムトモグラフィー法 (Terakawa et al., 2010) に適用し、御嶽山周辺域の 3 次元間隙流体圧場の推定を行った (Terakawa et al., 2013; Terakawa, 2017)。この結果、群発地震発生域に静水圧を 15 ± 5 MPa 程度上回る間隙流体圧が 5 年以上に亘って維持されていることがわかり、活発な地震活動が高い間隙流体圧に駆動されて発生している可能性を示した。また、従来の地震メカニズムトモグラフィー法を発展させ、地震のメカニズム解から地殻内間隙流体圧場の時間発展を推定する逆解析法 (Terakawa, 2014) を開発した。本手法をスイス・パーゼルの地熱貯留層での注水による誘発地震に適用し、間隙流体圧の上昇による断層強度の低下が誘発地震の主なメカニズムであることや、最大地震の発生は強度の低下には直接支配されず、応力状態が臨界状態に近づく過程があることなどがわかった。更に、これらの研究が種になり、間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場のモデル化とその推定法 (Terakawa and Hauksson, 2018) を開発した。この手法により、南カリフォルニアの内陸活断層は岩石の標準状態にあることを示し、絶対応力レベルは深さ 5km で 30-55 MPa 程度であることを示した。また、研究期間中の 2014 年 9 月 27 日には、御嶽山で水蒸気噴火が発生した。この噴火に伴う火山性地震のメカニズム解を詳細に調べ、メカニズム解が噴火を境に東西伸張の正断層・横ずれ断層型から東西圧縮の逆断層型に正反対に時間変化することをつきとめた (Terakawa et al., 2016)。これらのデータを分析し、応力場の時間変化に基づく御嶽火山のモニタリング法の提案を行った。2007 年の御嶽山噴火の際にも、2014 年の噴火時と同様なメカニズム解の時間変化があることがわかり、御嶽山直下には東西伸張と圧縮で特徴付けられるマグマ活動のシステムがあるかもしれない。

・ 西南日本活動期のシミュレーション：

5 か年では、西南日本をモデル化した地震活動のシミュレーションを行うにあたって、まず現状のテクトニクスや断層運動を明らかにする必要があることから、ブロック断層モデルを用いた西南日本の地殻変動のモデル化を行った (Nishimura et al., 2018)。陸上の GNSS データだけでなく海域の地殻変動データも用いることにより、内陸のブロック的な変形と南海トラフなどの沈み込み帯における固着分布を精度良く推定することが可能となり、西日本における海洋プレート (フィリピン海プレート) と大陸プレート (アムールプレート) の相対運動速度の約 3 割は、内陸の断層帯 (主に、中央構造線断層帯と山陰ひずみ集中帯) で解消されていることがわかった。西日本の陸域は、10 以上の比較的剛体的に振る舞う地塊 (ブロック) に分割することができ、これらのブロックの境界は測地データからひずみ集中帯とされる場所になっており、活断層として認識されていることが多い。また、2016 年熊本地震や 2016 年鳥取県中部地震などの内陸地震の多発帯にもなっている。しかし、山陰のように発達した活断層帯としては認識されていない場所もあり、変動速度が時間変化していることを示唆するが、そのメカニズムは今後さらに研究を進める必要がある。地震活動のシミュレーションについては、単純化した粘弾性モデルにおける検討を行ったが、単純なモデルでも海溝型地震前後に内陸地震が多発する傾向を説明することができることが示された。

・ 地震活動変化

内陸大地震の発生前の地震活動変化に関して、兵庫県南部地震の前の気象庁一元化震源データを用いた

非定常 ETAS モデルによる解析により、常時地震活動度 (background rate) μ 値と余震生産率 (aftershock productivity) K 値の時間変化を求め、兵庫県南部地震の約半年前の群発地震活動に対応する期間で常時地震活動度 μ 値が大きくなったことが明らかになった。内陸大地震の発生前の地震活動変化の原因の解明のために、先行研究により地震に先行する変化が指摘されている、2004 年新潟県中越地震と 2007 年新潟県中越沖地震の震源域近傍の GNSS データ (Ogata, 2007, 2011) の詳細な調査を行った。基線長データ解析より、先行研究で指摘されたように、いくつかの基線で長期トレンドからずれが地震の 2 年前から始まっていることが確かめられたが、トレンドからのずれは先行研究よりも大きいものが多く、その空間パターンも明瞭ではなかった。地震活動変化との関係を明らかにするには至らなかった。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Katoh, S., Iio, Y., Katao, H., Sawada, M., Tomisaka, K., Miura, T., & Yoneda, I. (2018). The relationship between S-wave reflectors and deep low-frequency earthquakes in the northern Kinki district, south-western Japan. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 149. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0921-6>

Meneses Gutierrez, A., Nishimura, T., & Hashimoto, M. (2019). Coseismic and Postseismic Deformation of the 2016 Central Tottori Earthquake and its Slip Model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JB016105>

Takada, Y., Sagiya, T., Nishimura, T., 2018, Interseismic crustal deformation in and around the Atotsugawa fault system, Central Japan, detected by InSAR and GNSS, *Earth Planets and Space*, vol. 70:32 doi: 10.1186/s40623-018-0801-0

Terakawa, T. and E. Hauksson, Absolute Stress Fields in the Source Region of the 1992 Landers Earthquake, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 23 (B10), 8874-8890, doi: 10.1029/2018JB015765, 2018.

跡津川断層近傍における変形運動と応力蓄積過程, 高田陽一郎, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会 (招待講演)

Toshiko Terakawa, Roles of tectonic stress and pore fluid pressure in earthquake generation, 2nd Asia-Pacific Workshop on Lithosphere and Mantle Dynamics, Yokohama, 2018.8.7.(invited).

Terakawa, T., and E. Hauksson, 3D Absolute Stress Fields in the Source Region of the 1992 Landers Earthquake, AGU 2018 Fall Meeting, S21E-0484, 2018, Washington D.C., USA.

寺川寿子・Egill Hauksson, 1992 年ランダース地震震源域の絶対応力場, 日本地球惑星連合大会, 千葉, 2018.5.22.

寺川寿子, 間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場のモデル化と推定, 東濃地震科学研究所・平成 30 年度第 1 回地殻活動研究委員会, 瑞浪, 2018.9.5.(invited)

寺川寿子・Egill Hauksson, 1992 年ランダース地震震源域の絶対応力場, 日本地震学会 2018 年秋季大会, 郡山, 2018.10.11.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

主に跡津川断層域において GNSS 観測を継続する。また、ALOS-2 による InSAR 解析を継続し、このデータを GNSS データで補正することにより、跡津川断層系のさらに高い空間分解能での地殻変動の詳細を明らかにする。加えて、跡津川断層域の非弾性歪の実体を探るべく、断層域を粘弾性体としてモデル化し、有限要素法による数値計算を行う。これにより、東北沖地震前・地震時・地震後の変形運動の概略を説明する。山陰地方の GNSS 観測の一部を継続するとともに、有馬高槻断層帯を横断する GNSS 稠密観測網を新たに構築して詳細地殻変動分布を明らかにする。そのための選点・交渉・観測点設置を平成 31 年度に行う。

2018 年大阪北部の地震が周辺の活断層に及ぼす影響を定量的に評価するためには、それらの活断層との深部での相対的な位置関係、活断層の応力状態や強度の低下の度合いを知る必要がある。満点方式の高密度地震観測に加えて、0.1 満点地震システムを用いた超高密度地震観測網等からのデータを活用して、大阪北部の地震の発生過程と今後の推移の予測を試みる。

中国・四国地方の基盤的抵抗構造研究では緯度・経度方向に測点密度観測網（活構造域：5分×7.5分、その背景域：10分×10分）を展開する。地殻・マントル上部の空間的構造不均質性を明らかにし、地震・火山現象を支配する場の解明とモデル化に寄与する。H31年度は中国地方中北部・東部域ならびに四国東部・中部域のMT予備調査を行い、選点が済んだ地域で本観測を実施する。

プレート運動による応力蓄積率の遅い内陸地域を対象に、地震のメカニズム解から地殻内の絶対応力場、及び地震の発生における応力と流体の役割を定量的に評価することを目指す。このため、内陸域にありながら活発な地震活動が観測される御嶽山周辺域を主な研究対象地域とする。研究の軸となる地震メカニズムトモグラフィー法(Terakawa et al., 2010; Terakawa, 2014)と間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場モデリング手法(Terakawa and Hauksson, 2018)では、地震のメカニズム解をデータとして用いる。このため、研究期間全体を通じて、名古屋大学をはじめとする諸機関の定常地震観測によって得られた良質な地震データから、気象庁カタログには掲載されない微小地震も含めて震源とメカニズム解を推定し、データベースを構築する。H31年度は、従来の地震メカニズムトモグラフィー法について、応力場の推定誤差を理論的に取り入れた定式化を行い、手法を改良することを目指す。ブロック断層モデルの結果を用いた現実的な断層ジオメトリーに基づくシミュレーションを実施する予定であるが、H31年度においては、海溝型地震の震源断層だけでなく、単純化した内陸の断層間の相互作用も考慮した地震時、地震後の応力変化(CFS)の計算を行い、海溝型地震に対する内陸地震の発生時期や内陸地震の連動性の統計的性質を検討する。また、内陸活断層の数値モデルに応力擾乱を加える数値実験を行い、海溝型巨大地震サイクルに伴う準周期的な応力変動と内陸地震の関係(活動期)について理解する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

飯尾能久、高田陽一郎、吉村令慧、片尾 浩、宮澤理稔、西村卓也、平原和朗

他機関との共同研究の有無：有

名古屋大学 寺川寿子、山中佳子

鳥取大学 塩崎一郎

九州大学 松本 聡

東京大学 上嶋 誠

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：京都大学防災研究所

電話：0774-38-3348

e-mail：

URL：

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：飯尾能久

所属：京都大学防災研究所地震予知研究センター

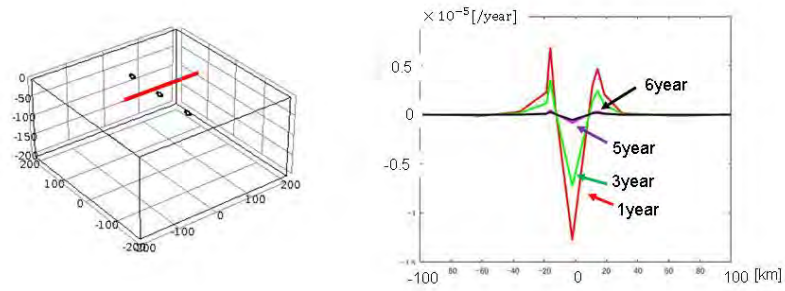


図1 東北地方脊梁山地の火山地帯の有限要素モデルによる数値計算
 (左)弾性体中に楕円体状の低粘性の Maxwell 粘弾性領域を設けた(右)赤線に沿った面積歪速度プロファイル。時間とともに面積歪速度(の絶対値)が減少する。なお、GNSS データによる解析と同様に長波長トレンドは除去してある。

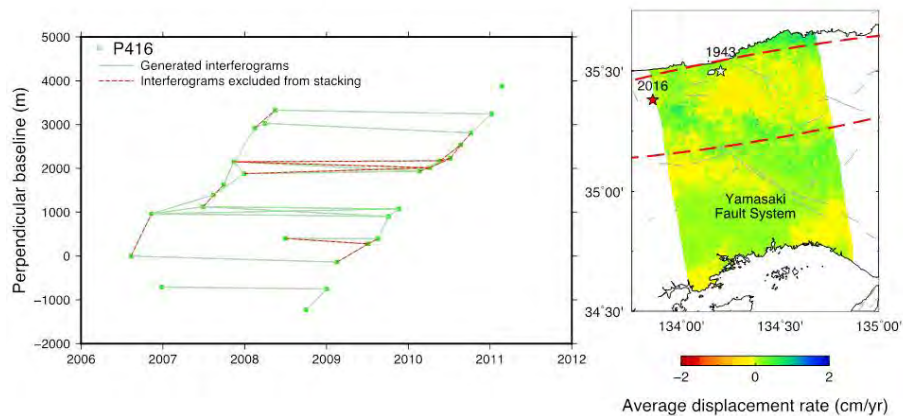


図2 山陰ひずみ集中帯における InSAR 解析
 a) 用いた ALOS データの基線長。実線はスタッキングに用いたペアの鉛直基線長を表し、赤破線はスタッキングに用いなかったペアを表す。b) スタッキングによる平均変位速度分布。正の値は、衛星から遠ざかる向きの変動を表す。灰色の線は第四紀の活断層、白と赤の星は、それぞれ 1943 年鳥取地震 (M7.2) と 2016 年鳥取県中部地震 (M6.6) の震央を表す。赤破線の領域は、山陰ひずみ集中帯を表す。

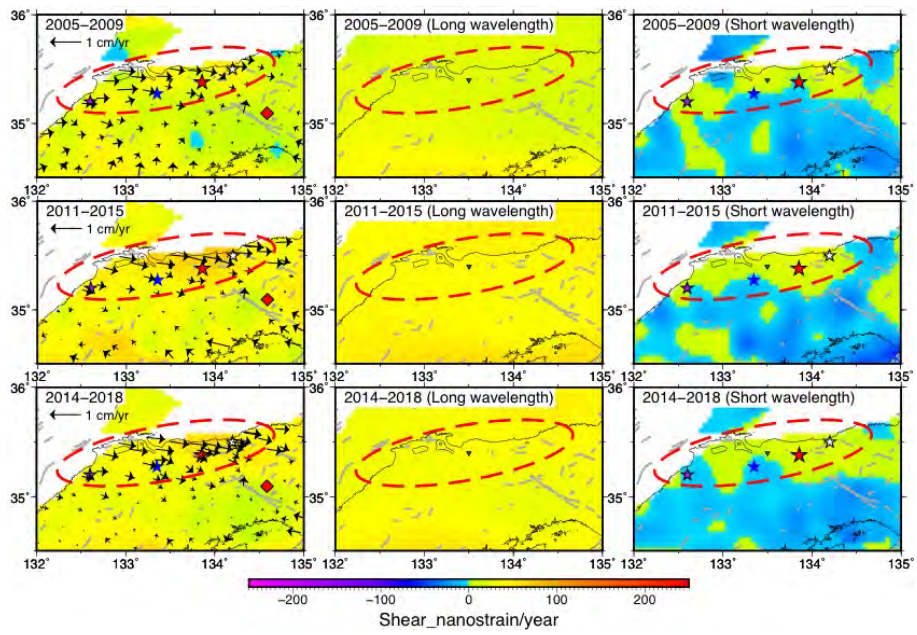


図3 山陰ひずみ集中帯(赤破線の領域)における東北地方太平洋沖地震前後の歪み速度(N80°E成分)分布とその短波長・長波長成分
 正の値は右横ずれ、負の値は左横ずれを示す。水平変位速度の固定点は、0344観測点(赤菱形)。星印は大地震の震央を表す。

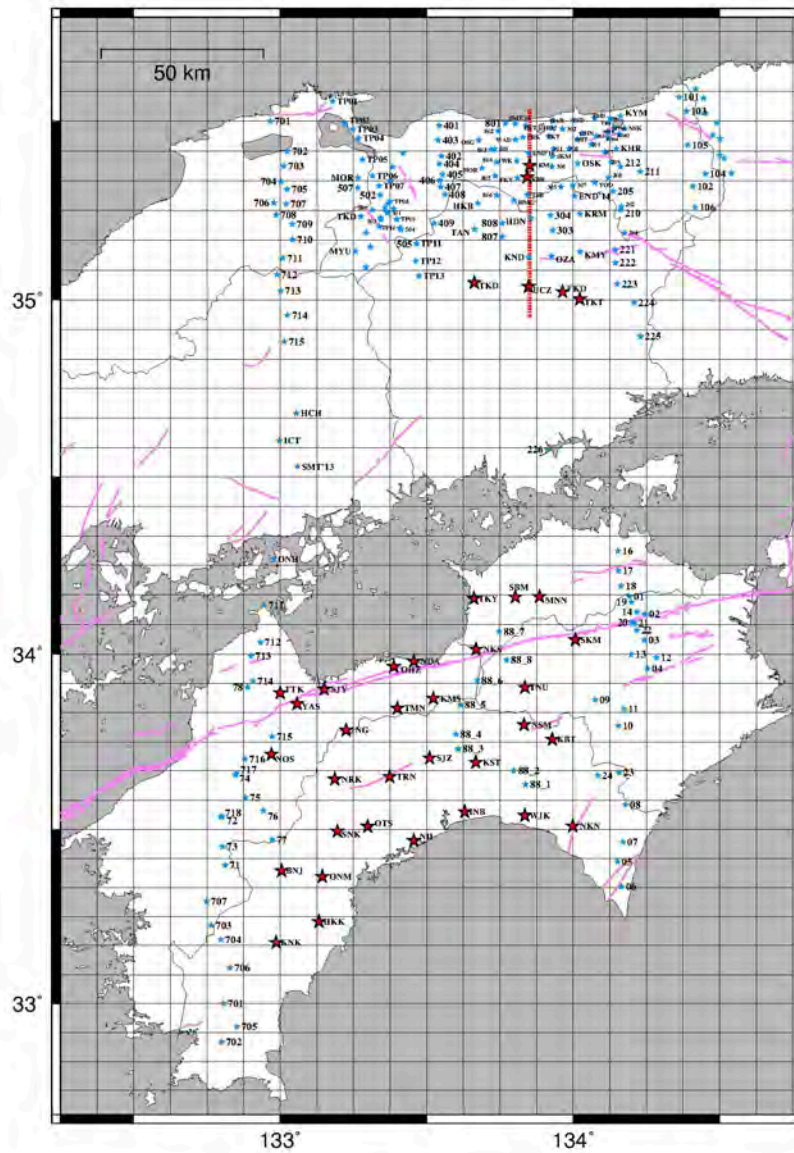


図4 中国・四国地方の広帯域 MT 法観測地点分布図

本事業で取得された広帯域 MT 観測地点を赤色の印、既存測点ならびに鳥取県環境学術研究振興事業で取得された観測地点を水色の印で併記する。活構造は活断層データベースによる。赤破線は図5で示される2次元構造断面図の位置を示す。

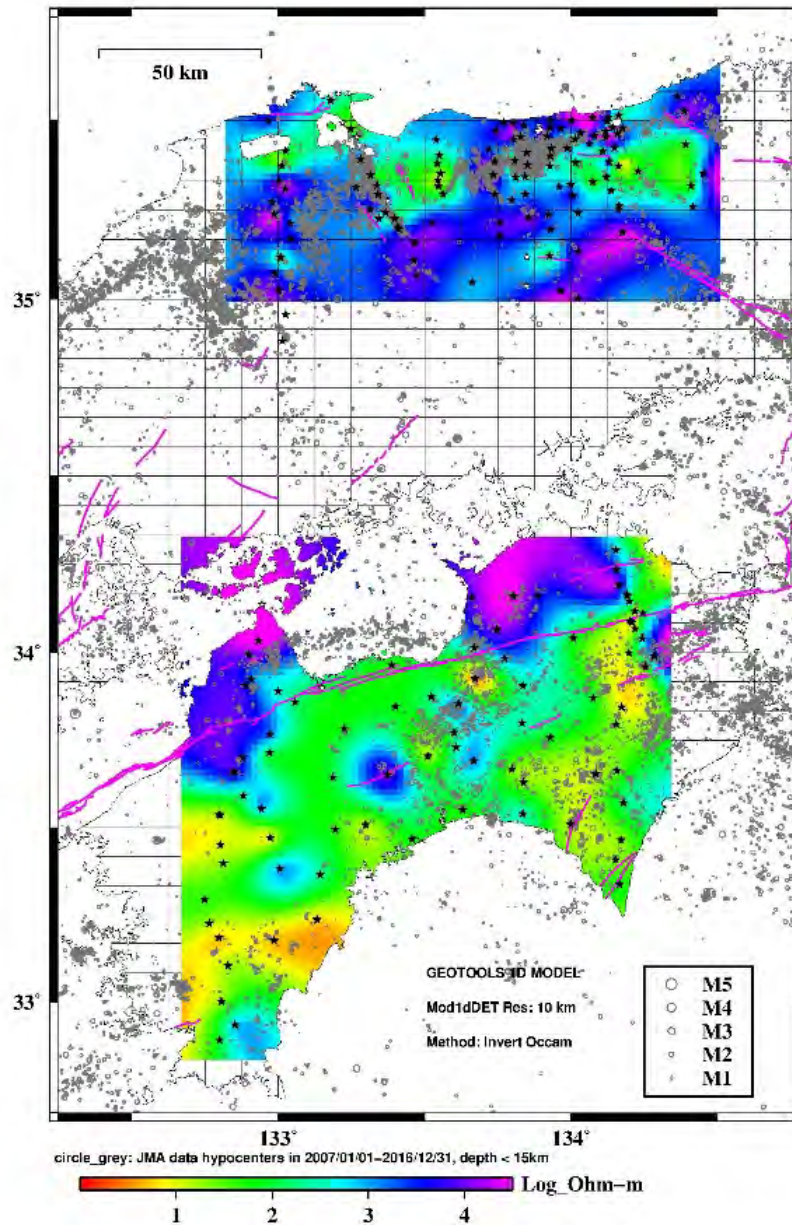


図 5. 中国・四国地方の 10km 深度比抵抗分布図と震央分布

各地点で得られた determinant impedance に対して実施した 1 次元 Occam インバージョン解析の結果得られた 1 次元構造モデルをもとにしたもの。気象庁ホームページ「地震月報」より 2007 年 1 月～2016 年 12 月の深度 15km より浅の震源データをダウンロードして描画した。図版作成には GMT (Generic Mapping Tool) を使用した。山陽地域は殆どデータが取得されていないため白地図で示される。

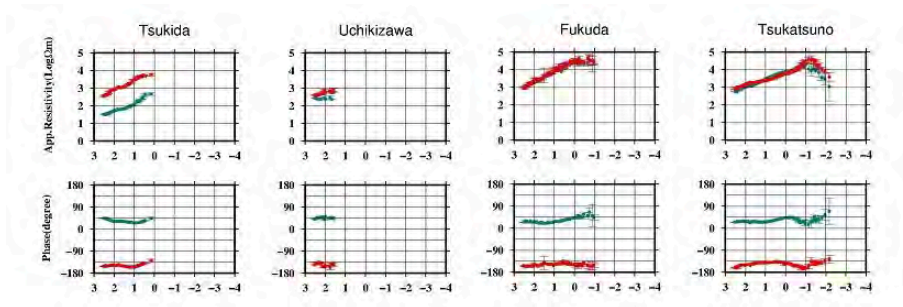


図 6. 鳥取・岡山県境脊梁部周辺域の追加観測点で得られた見かけ比抵抗ならびに位相差探索曲線
 南北方向の電場と東西方向の磁場変動から推定された見かけ比抵抗を緑丸、東西
 方向の電場と南北方向の磁場変動の組み合わせで推定されたそれを赤丸で示す。
 縦軸は見かけ比抵抗 ($\Omega \cdot m$)、横軸は周波数 (Hz) を対数目盛りで表現する。
 位相差曲線について縦軸は位相差 (度) を表す。

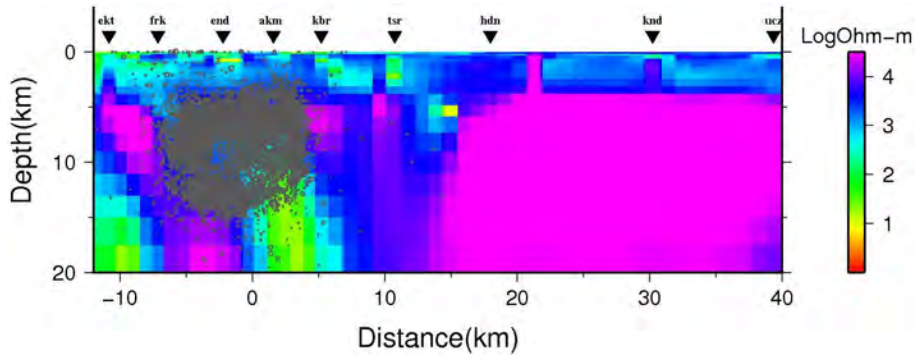


図 7. 2016 年 10 月 21 日鳥取県中部の地震 (M6.6) 震源域周辺の 2 次元比抵抗構造南北断面図
 図中の震源データは気象庁ホームページ「地震月報」より 2007 年 1 月～2016 年 12 月をダウンロードして描画
 した。

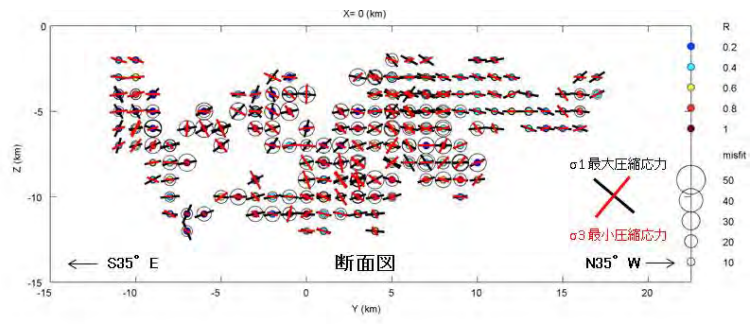


図 8 鳥取県西部地震の断層近傍の応力場

断層に沿う断面に推定された最大・最小圧縮応力の方位分布を投影したものの。黒・赤の線分がそれぞれ最大・最小圧縮応力に対応する。 の大きさは misfit、 の塗りつぶしの色は応力比 R を示している。

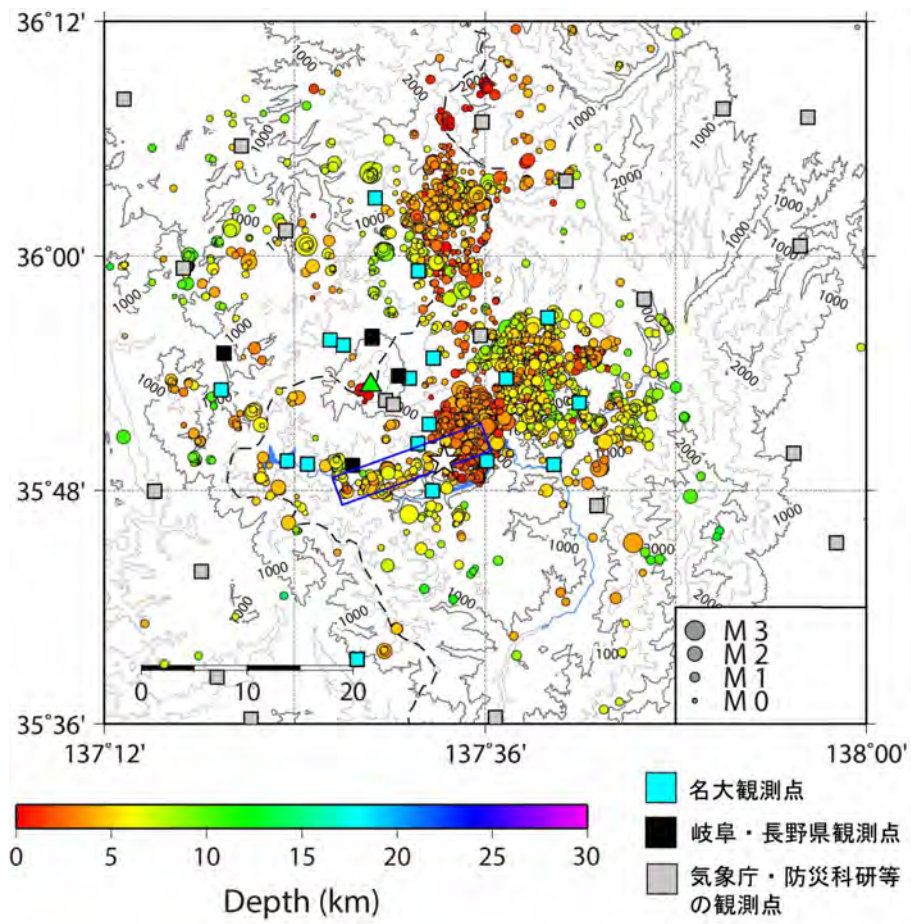


図9：御嶽山周辺域の地震活動（2018.1-2018.12）と観測点分布
 は御嶽山， と青線の矩形は1984年長野県西部地震の震源と震源断層．

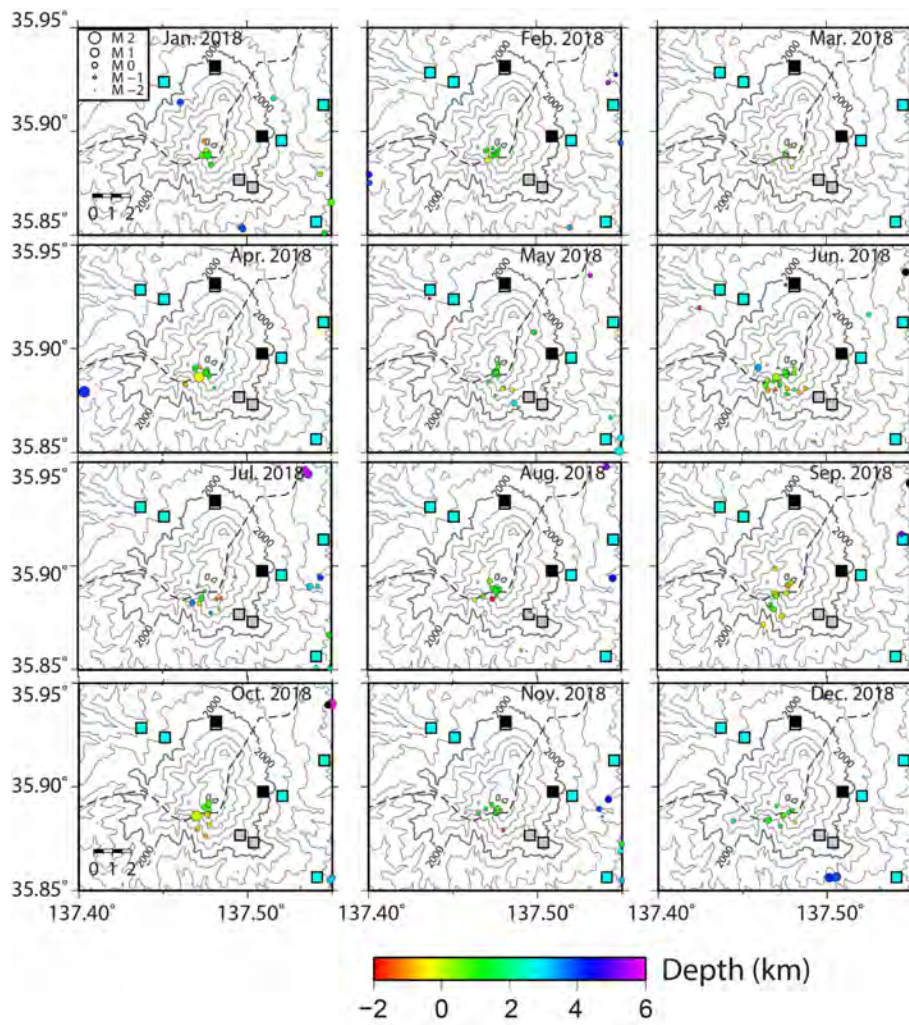


図 10：御嶽山直下で発生した火山性地震の震源分布（2018年1月～12月）
観測点の記号は図9と同様。

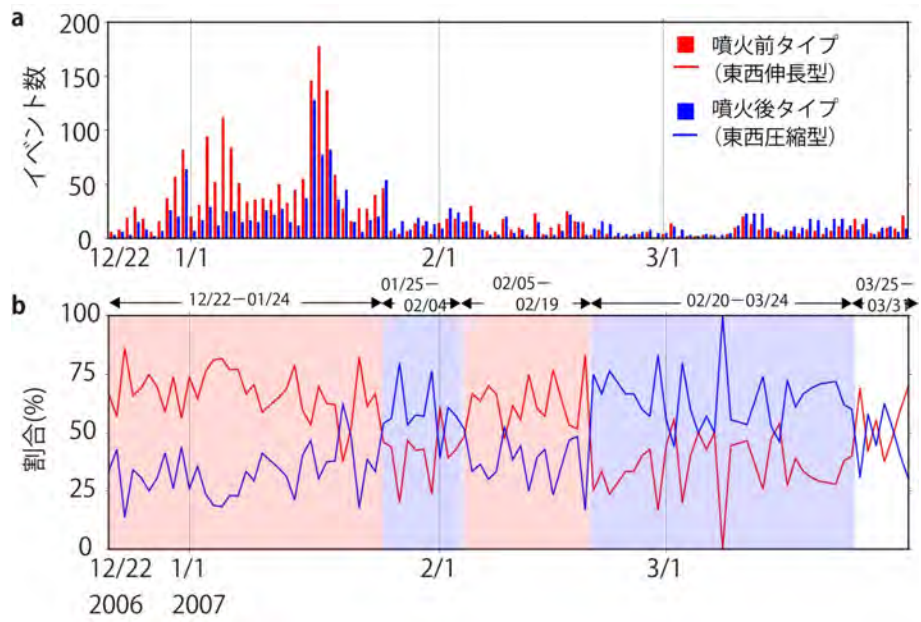


図 11： Matched Filter 法による 2007 年御嶽山噴火に関連する火山性地震のメカニズム解の変化

a. 検出されたイベント数 . b. 各タイプの 1 日ごとの検出割合 . 2007 年噴火は , 御嶽山を挟む東西方向の基線長の変化が鈍化し始め , かつ東西圧縮型のイベントが卓越する期間 4 (2/20-3/24) に発生したと考えられる .

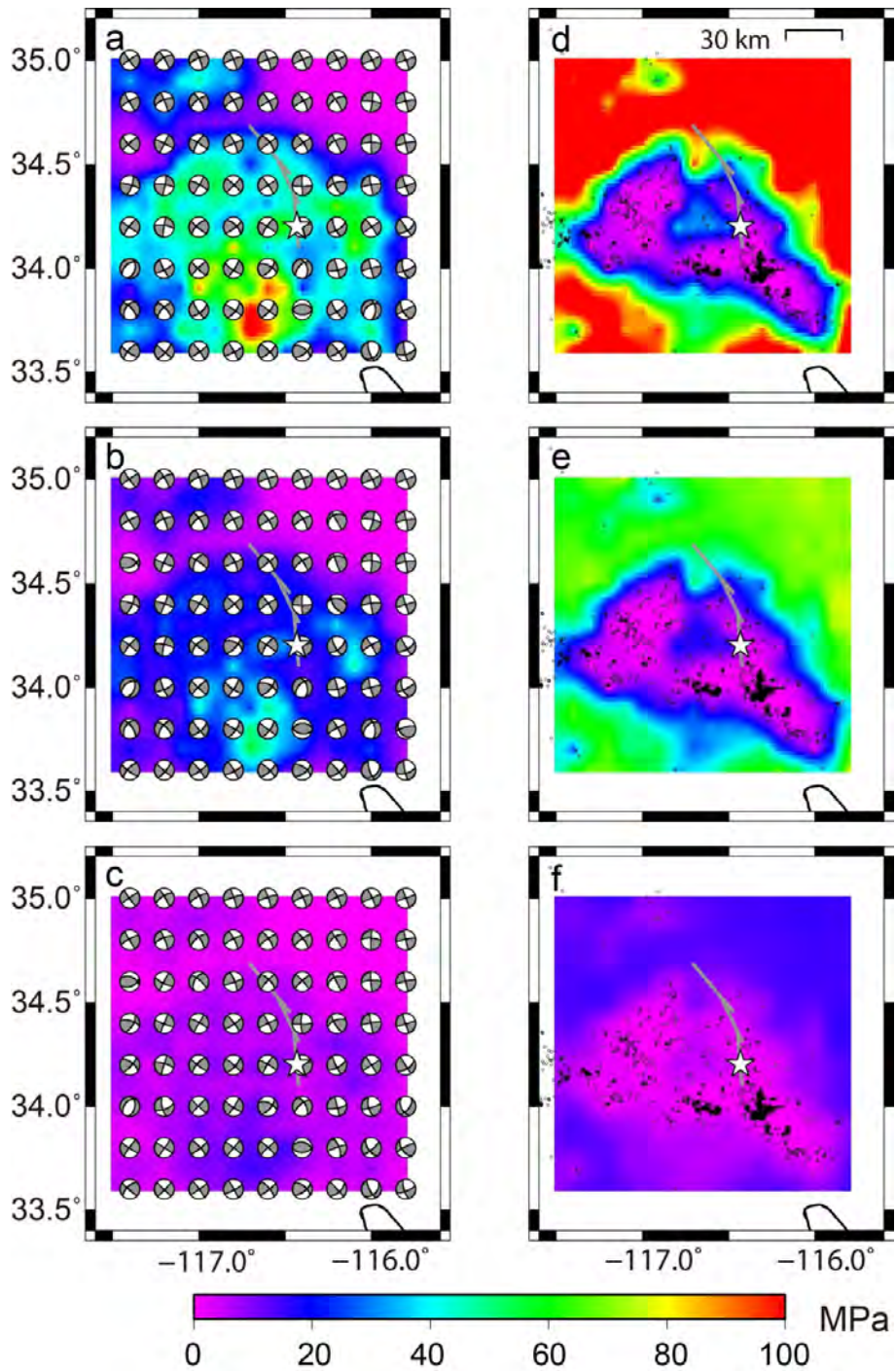


図 12 : 1992 年ランダース地震震源域の絶対応力場のモデル化 (Terakawa and Hauksson, 2018)
 a-c は , それぞれ $C = 0.0$, $C = 0.5$, $C = 0.8$ とした場合の深さ 5km での絶対応力場 . 背景のカラースケールは最大
 剪断応力の大きさを表す . d-f は , $C = 0.0$, $C = 0.5$, $C = 0.8$ とした場合の最大剪断応力の値の 68 % 信頼区間 . 黒
 い点は使用した地震データの震源 (depth: 0-10 km) を表す .

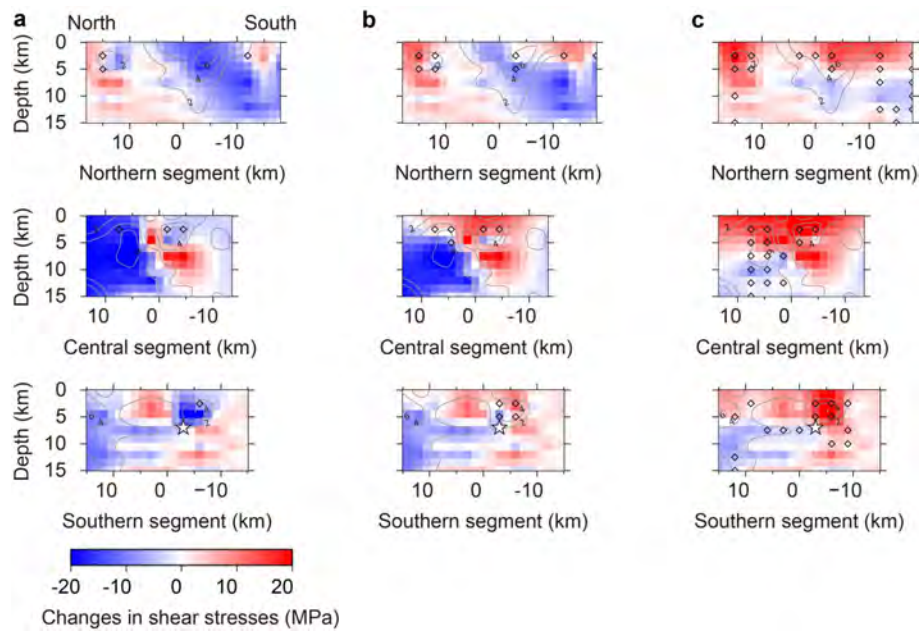


図 13 : 1992 年ランダース地震前後における本震断層での剪断応力の変化

a. $C = 0.0$, b. $C = 0.5$, and c. $C = 0.8$. 赤い領域は本震後に剪断応力が増加したことを，青い領域は剪断応力が減少したことを示す． \star は本震震源，グレーのコンター（2m 毎）は本震のすべり（Wald and Heaton, 1994）を示す． \times は，本震後に剪断応力の方向が逆転した領域を示す．a の結果では，本震で大きくすべった領域で剪断応力が解放されている様子を表す．

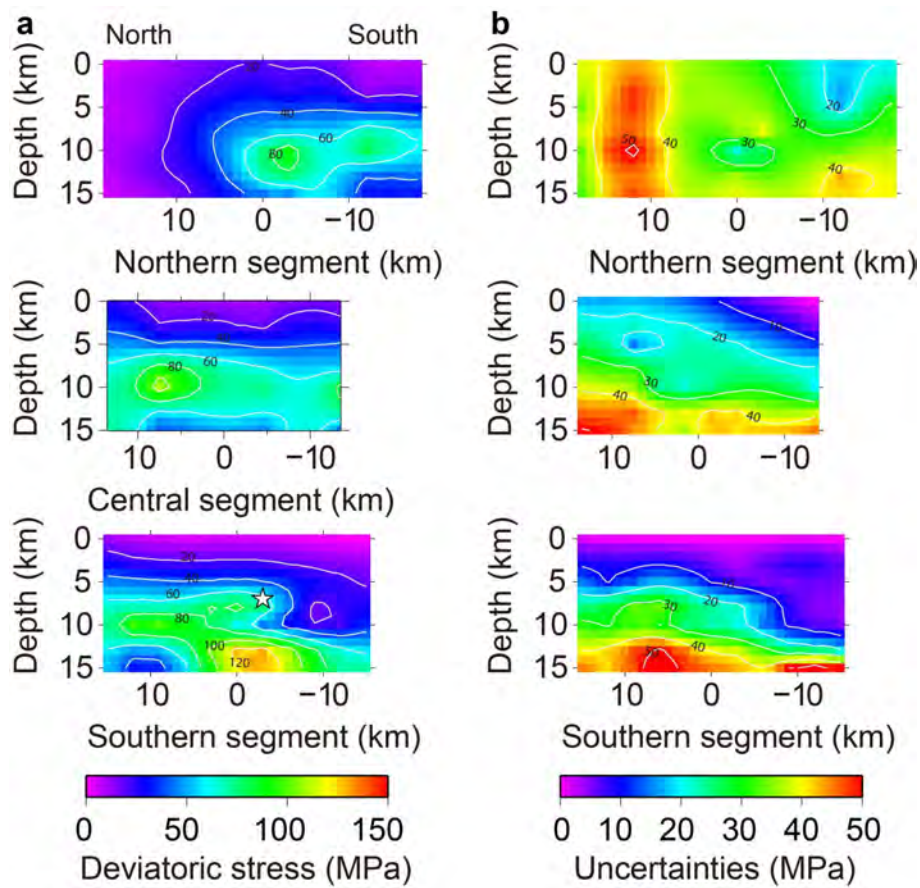


図 14 : 1992 年ランダース地震直前の本震断層に働く剪断応力分布
 a. 最大剪断応力 ($C = 0.0$), b. 68 % 信頼区間 .

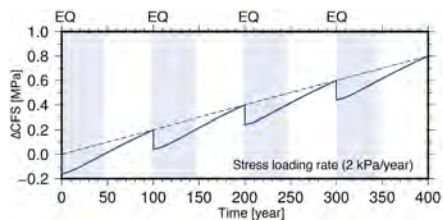


図 15 内陸断層におけるクーロン応力変化 (CFS) の時間発展 (青線)
 海溝型地震 (EQ) が 100 年ごとに発生し、その走向は 270° とした。内陸断層は右横ずれで走向 150° 、傾斜 90° とし、経年的な応力載荷速度を $2\text{kPa}/\text{年}$ とした。海溝型地震後に地震直前の応力に回復するまでの期間を網掛けした。

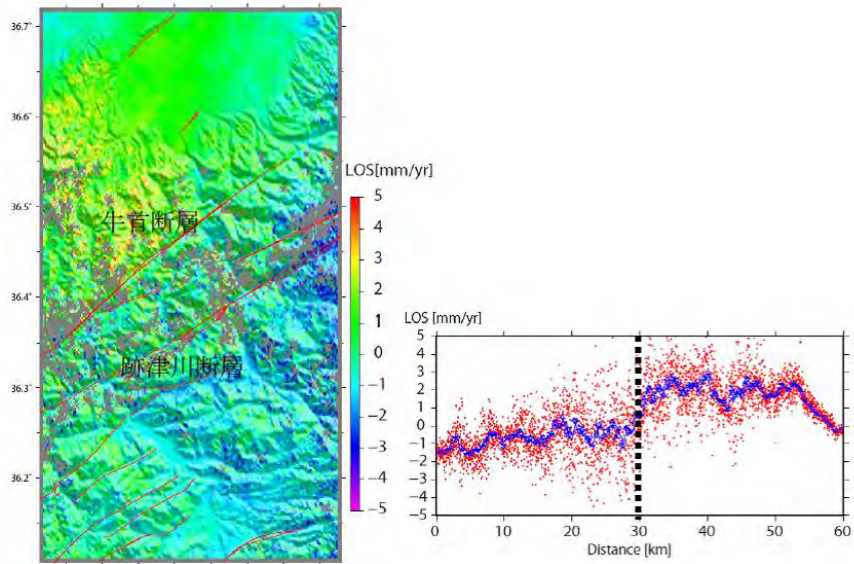


図 16 : InSAR と GNSS から求めた跡津川断層近傍の衛星視線方向の速度場 (左) と , その断面 (右)
 点線は牛首断層 , 青線は移動平均を示す

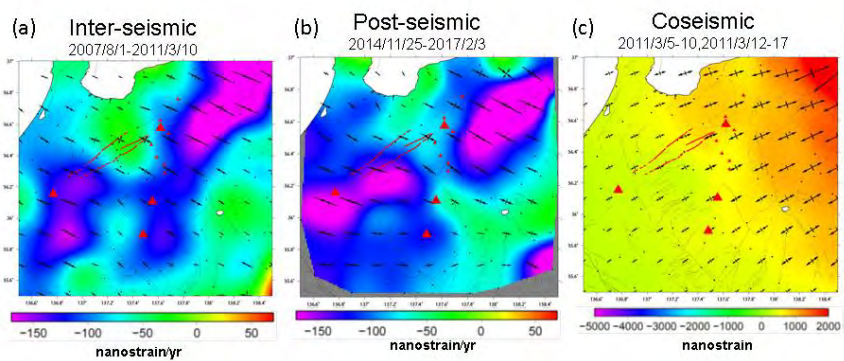


図 17 . (a) 東北沖地震前および (b) 地震後の面積歪速度 (短波長成分) . (c) 東北沖地震時の面積歪
 赤線が跡津川断層系 . 三角は火山 . 黒点が GNSS 観測点.

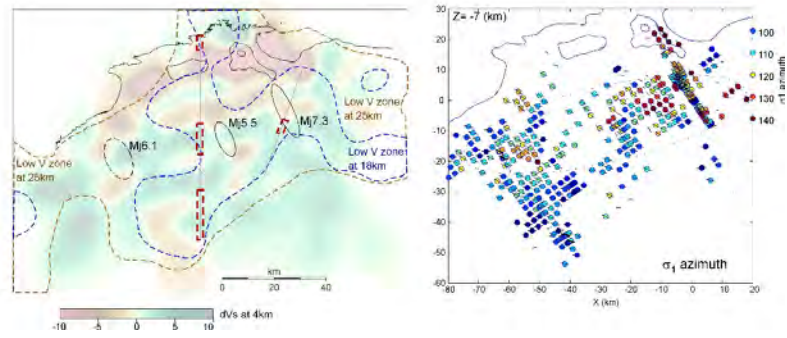


図 18 山陰地方の地震帯における下部地殻および上部地殻の地震波速度構造

左：下部地殻の深さ 25km、18km における P 波速度の低速度異常域の概形および深さ 4km における S 波速度偏差の分布。塩崎・他 (20??) による下部地殻内の低比抵抗異常域が赤点線で測線とともに示されている。右：応力逆解析から推定された最大圧縮応力の方位分布。方位を黒線分の向きで示すととも、丸の色によっても北からの角度を示している。

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

桜島火山におけるマグマ活動発展過程の研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

昭和火口における噴火活動過程において、多項目の5年にわたる長期観測に基づいてカルデラ下におけるマグマの蓄積に伴うその量の推移および桜島中央火口丘下へのマグマの移動の過程を把握した上で、火山体構造とその時間変化をあわせ考慮して、桜島のマグマ蓄積・移動・上昇の変化を定量的・定性的に把握することにより、地下のマグマの動態がどのように変化し、今後の活動の活発化に繋がっていくのかをモデル化する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本課題は、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」事業に基づいた計画である。本研究計画では、爆発が多発し、将来、噴火活動が更に活発化する桜島を対象として、個々の爆発および一連の活動期とそれらに前駆する諸現象を物質科学も取り込んだ最大限の多項目・長期観測により定量化し、両者の間の経験則を確立するとともに、その理論的背景について考察する。さらに、上記(4)その他関連する建議の項目記述した上位項目において直接的に成果を活用する。具体的には、次の5つのテーマに基づいて研究をすすめる。

[1] 爆発現象に前駆する短期的マグマの蓄積過程及びマグマ放出過程の解明

[2] 長期的マグマ蓄積過程・放出過程の解明

[3] 火山体構造の時間変化に基づくマグマ供給系の発展過程の解明

[4] 先行マグマ物質の分析によるマグマ供給系の発展過程の解明

[5] マグマ挙動のモデリング

[1] では、個々の爆発について火山性地震、地盤変動、絶対重力、二酸化硫黄放出量観測、空気振動、火山灰放出量に基づいて、前駆現象と噴火規模を定量化し、噴火に前駆する発生様式や変動パターンと後続する噴火の規模・様式を関連付けて噴火予測の基礎データを構築するとともに、蓄積および放出過程を明らかにする。

[2] では、火山活動の1~2年周期の活発化と縮退のサイクルに注目し、長期的なサイクルを定量化したうえで、浅部および深部の地震活動や地盤変動との関係を明らかにし、長期的な予測の基礎データとする。

[3] では、長期的なサイクルと深部および浅部の地下構造の変化の関係を明らかにする。地下構造の時間変化把握にはMT、人工地震探査、地震波干渉法、地震波トモグラフィー、重力など多様な手法を駆使し、マグマ供給系の発展過程を明らかにする。26年度および28年度に人工地震探査を実施し、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」実施時からの時間変化を抽出する。

[4] では、火山灰水溶性成分、火山灰・レキ等の噴出物の岩石学的分析、温泉ガス濃度などのマグマ発散物の分析に基づいて、質的变化と長期サイクルとの関係を明らかにし、火道の拡大や開口率などのマグマ供給系の発展過程を明らかにする。

[5] では、上記[1]~[4]で得られる観測量の変化に対してマグマ溜まりや火道内のマグマ挙動を、混相流の基礎方程式や実験などから得られる構成方程式をもとにして、数値計算を行い、マグマ挙動の数値モデルを構築する。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要:

1908 H30 報告書

平成30年度成果概要

2006年に58年ぶりに再開した桜島の昭和火口における噴火活動は2009年後半から2015年前半まで、ブルカノ式噴火が頻発した。2015年8月15日に急速なマグマ貫入があったものの、2015年以降の噴火活動は低下した状態にある。2017年10月末から噴火活動の中心は昭和火口から南岳山頂火口に回帰した。本研究計画では、平成30年度も地震、地盤変動観測、重力測定、火山ガス放出量、噴出物の分析を継続した。2018年以降のマグマの蓄積・放出過程は以下のようにまとめられる。

(1) 長期的マグマ蓄積過程・放出過程の解明

2017年10月31日から噴火活動の中心は南岳山頂火口に戻り、それ以降、昭和火口において噴火は数回しか発生していない。南岳における爆発的噴火の発生回数は2017年が3回であったが、2018年は254回と増加した。2018年の爆発回数は1980年代の平均的な爆発回数252回/年に匹敵するが、火山灰放出量は、わずか192万トンと少なく、昭和火口の活動期に比べても少ない。ひずみ変化も概ね収縮傾向にあり、変動量は0.5マイクロスレイン以下と少ない。収縮傾向にあることは水準測定の結果とも整合的である。マグマの放出及び蓄積も昭和火口の噴火活動期と比べ少ない状態であった。

(2) 爆発現象に前駆する短期的マグマの蓄積過程及びマグマ放出過程の解明

2018年において最大規模の噴火は6月16日に発生した爆発的噴火で、噴煙高度は4700mに達し、火砕流も約1.3km流下した。この噴火の18時間前の15日13時ごろから火山体の膨張が始まり、圧力源の体積増加量は約18万 m^3 と見積もられた。噴火発生後には同様に、約18万 m^3 の体積収縮が起こり、15日13時のレベルに戻った。噴火発生前の1時間前からBH型地震が発生し始め、膨張の停止を経て、噴火が発生した。このような特性は、火砕流を伴う噴火に前駆する地震活動や地盤変動によく見られ、一連噴火活動期の縮退期においては火砕流が発生しやすいことと合わせて、火砕流を伴う噴火への分岐条件として挙げるができる。

平成26年度~平成30年度成果概要

[1] 爆発現象に前駆する短期的マグマの蓄積過程及びマグマ放出過程の解明

昭和火口において発生する個々の爆発についてはブルカノ式噴火および噴煙高度 1000m 以上に達する非爆発的噴火の約 90%について前駆する山体の膨張が捕捉され、噴火に伴って収縮が観測された。噴火発生に先行する伸長時間、伸長量、伸長量と収縮量の比について統計解析を行い、先行伸長継続時間の頻度、伸長量および伸長速度の頻度、伸長量と収縮量の比の頻度は対数正規分布を示す。これらのことは、爆発に先行する伸長継続時間から発生時刻を、また、膨張量から爆発の規模を確率的に予測することが可能であることを意味する。

噴火発生に先行するひずみの時間変化は時間の経過とともに減速し、停滞した後、直前に収縮に至る場合が多く、発生時刻の予測は直前の収縮に至るまでわからない場合が多い。膨張ひずみの停止に伴い、BH 型と呼ばれる 5Hz 程度の周波数が卓越する地震が多発する場合がある。この場合、時間経過とともに、BH 型地震の頻度と振幅は増加し、噴火発生直前には連続微動の様相を呈する。地震波エネルギーは時間とともに加速度的に増加するので、地盤変動が停滞していても噴火発生時刻の予測が可能となる。

噴火の発生とともに、地盤の収縮が始まり、その変動速度は指数関数的に時間の経過とともに減速し、停止する。圧縮性流体に満たされたマグマ溜まりにつながる火道の最上端が開口した場合の、圧力変化の時間関数は指数関数なので、噴火は圧縮性流体の放出過程と考えることができる。より複雑な場合、複数の圧縮性流体の圧力源モデルで説明可能である。

[2] 長期的マグマ蓄積過程・放出過程の解明

2006 年の水蒸気噴火に始まり、2009 年に活発化し、2017 年まで続いた一連の昭和火口噴火に先行して、地震活動活発化及び始良カルデラ及び桜島の地盤の膨張が検出された。昭和火口の噴火活動期に入ってから、顕著な地盤の膨張が、2009 年 10 月～2010 年 5 月、2011 年 11 月～2012 年 2 月、2015 年 1 月～6 月まで 3 回検出された。GNSS 観測により検知された水平変動、傾斜及びひずみ変化から始良カルデラ下約 10km の増圧源および北岳下 4km の増圧源により説明可能であることが分かった。また、これらの時期には噴火活動が活発化し、火山灰放出量も増加しており、マグマ貫入と同時にマグマ放出が起こる開口型火道系の特徴的な地盤変動と噴火活動を示した。水準測量を含めた地盤変動解析により、南岳下約 1km の深さには減圧源が検出されており、深部においては、マグマの貫入による増圧、浅部では、同時に発生する噴火活動に伴うマグマ物質の放出による減圧が起きていると解釈される。

始良カルデラ周辺も含めた地盤変動観測により、始良カルデラ下 10km にある圧力源は依然として隆起を続けていることがわかった。南岳において噴火活動が激化した 1980 年代には、地盤の沈降が検知されていたが、1983 年から 1992 年までの平均火山灰放出量は 1370 万トン/年であり、始良カルデラ下の溜まりのマグマの放出超過による地盤沈降と解釈される。一方、2009 年～2017 年の昭和火口の噴火活動による平均火山灰放出量は 600 万トン/年と南岳活動期の半分程度であり、この放出量では、マグマの貫入による増加分を解消できず、マグマの蓄積が進行する。

[3] 火山体構造の時間変化に基づくマグマ供給系の発展過程の解明

2009 年以降、反射法探査を毎年繰り返すことにより、始良カルデラから桜島へのマグマの供給路があるとされる桜島北東部の地下構造の時間変化を検出した。2009 年から 2013 年までの反射法探査で得られた反射断面を重合することにより、参照地震反射断面を作成し、これからの各年に得られた反射断面の差分を反射強度偏差断面とした。反射強度偏差断面において顕著な変化が現れたのは、北岳の北東部の深さ約 5km であり、2009 年の探査後、2010 年の探査では反射強度が増加し、その後、低下した。さらに、深さ 5km の反射面に対応する地震波の位相の振幅に注目すると、2009 年に比較して 2011 年では約 30 % 増加し、その後、現象に転じたことが分かった。そこでこの反射強度の増加を北岳下 5km にあるシル状のマグマ溜りにおけるマグマの速度変化と仮定して解釈を行った。その結果、シルの厚さを 50m と仮定すると 5% の速度低下により反射強度の増加が説明可能であることが分かった。2009 年 10 月以降は、先に述べた最初のマグマ貫入期に相当し、それ以降噴火活動が激化しているので、2009 年 10 月以降の高温で新鮮なマグマ貫入によりマグマ溜まりの速度が低下したものと考えられる。

人工地震探査に加え、地震波干渉法による地下構造の変化の抽出を試みた。山頂に近い観測点同士の干渉ペアにおいて、2012年に波形の相関が低下した。地盤変動観測により2011年12月ごろからマグマ貫入速度が増加したことが知られているので、マグマの貫入を反映したものである可能性がある。また、始良カルデラ内の海域における海底観測を繰り返すことにより、特に海域における震源決定精度と3次元地震波速度構造が高精度化され、震源と速度構造の精度のよい比較が可能となった。

[4] 先行マグマ物質の分析によるマグマ供給系の発展過程の解明

先に述べた2009年10月～2010年5月、2011年11月～2012年2月、2015年1月～6月の3回の顕著なマグマ貫入期に前後して様々な物質化学的な変化が検出された。2009年のマグマ貫入期に先行して同年4月～5月には昭和火口の東4kmにある黒神観測井の温泉ガス中の二酸化炭素および水素の濃度が急激に増加した。これは、2009年のマグマ貫入期に先行する唯一の現象である。また、2009年10月～2010年5月、2015年1月～6月のマグマ貫入期には、噴出物のガラス中の二酸化ケイ素の組成は低下し、玄武岩マグマの関与が指摘されている。2011年11月～2012年2月のマグマ貫入期には温泉ガス濃度や二酸化ケイ素の組成には大きな変化はなかった。一方、2011年のマグマ貫入期以降、二酸化硫黄放出率が増加し、噴火規模が拡大した。噴火規模の拡大は噴火に伴う地盤変動量の平均値および分散の増加、噴煙高度の増加によって裏付けられており、2013年9月には噴出物中に火道角礫岩が見出され、火道の拡大が示唆された。

火山灰に付着する火山ガスに関連する水溶性成分の時間変化を2006年以降の昭和火口における噴火活動に対比して再検討を行った。2006年と2007年の噴火活動は2-3週間程度と短期間であり、塩素イオンと硫酸イオンの比は一時的に高い値を示すが、その後、低下した。短期的なマグマ貫入により熱水系が消滅しつつある時期と解釈される。劇的に変わったのは2009年の後半であり、先に述べた2009年10月以降のマグマ貫入期に対応する。この時期は対照的に時間の経過とともに塩素イオンと硫酸イオンの比は増加し続け、2010年以降は、活発な噴火活動を反映して、塩素イオンと硫酸イオンの比は頻繁に高い値を示し、熱水系に関わらないマグマ活動であることが示された。

火山ガスの単一成分の濃度測定を除き、噴出物の分析には、ある程度の時間を要するので、準リアルタイム的に火山灰の性質を評価する手法として、測色法が提案され、実用化に向けて検討を行った。

[5] 2015年8月15日マグマ貫入イベント

2015年8月15日の7時ごろから始まった群発地震活動は急速な地盤変動を伴い、数時間で地震活動は低下した。この地震活動はほとんどが火山構造性地震の発生であり、まれに低周波地震が発生した。15日の地震回数は約1000回であり、桜島としては異常に多い。また、M2級の有感地震も発生した。GNSS、傾斜、ひずみ等の地盤変動の空間特性から、この地震活動は、北東-南西方向に走向をもつ、ほぼ鉛直の割れ目の北西-南東方向への開口と解釈された。また、この割れ目は深さ1～2kmの範囲にあり、極めて浅いことが特徴としてあげられる。割れ目の体積増加量は270万m³であり、体積増加率は極めて大きい。火山性地震は、初期段階においては割れ目よりも上部、また、開口量の最も多い最盛期には、割れ目よりも下部においても発生し始め、その後は、上部および下部の両方で地震活動がゆるやかに終息に向かった。地震のメカニズムはT軸が北西-南東方向を示す開口割れ目の開口方向と整合的なものが多い。

この地震活動と直結した噴火は発生していない。南岳山頂火口につながる火道に極めて近いが、異なる場所にダイク状にマグマが貫入し、急速な開口とともに、その周辺の火山体を破壊させ、マグマ貫入に伴う圧力を緩和させたと解釈される。同様の地震活動は47年前の1968年5月29日に発生している。このときも噴火活動は低下傾向に向かい、1971年にはわずか10回のブルカノ式噴火しか発生していない。

[6] マグマ貫入速度による経験的事象分岐論理の構築

桜島火山についてマグマの貫入速度を分岐条件とする経験的事象分岐論理を構築した(図1)。対象としたのは、105年間の桜島の活動であり、1914年大正噴火、1946年昭和噴火、1955年～2005年の南岳山頂噴火、2009年～2017年の昭和火口噴火である。大正噴火の時には、鹿児島測候所に設置された地震計しかないが、当時の住民の記録に基づいてマグマの貫入速度を推定した。1946年昭和噴

火では、主に鹿児島測候所の報告書をもとに推定した。南岳火口および最近の昭和火口噴火では、地盤変動からみつめられる圧力源の体積変化速度をマグマの貫入速度とした。

まず、南岳下を中心とする既存火道系へマグマが貫入する場合を考える。南岳の噴火活動では、ブルカノ式噴火 ($1-8 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$) > 連続火山灰放出 ($\sim 1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$) > ストロンボリ式 ($0.2-2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$) 噴火の順にマグマの貫入速度が大きい。昭和火口のブルカノ式噴火はこれらよりもさらに小さく $10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ のオーダーに過ぎない。ただし、溶岩噴泉のような噴火に至る前は、 $10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ のオーダーに達し、さらに昭和噴火のような 2 億 m^3 級溶岩流出では、 $10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ のオーダーと推定される。

一方、新規火道を形成する場合、 $10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ 級のマグマ貫入では、噴火は発生していない (2015 年 8 月 15 日マグマ貫入イベント) が、プリニー式噴火から始まる山腹噴火である大正噴火のマグマの貫入速度は $2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{day}$ と推定された。

地盤変動がほとんど検出できていない場合 (2006 年、2007 年昭和火口噴火) 温度上昇、噴気量の増加などが指標として考えられる。この場合の噴火形態は、水蒸気噴火、もしくはマグマ水蒸気噴火である。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
- 堀田耕平・井口正人, 2018, 2017 年の南岳爆発に前後する傾斜ひずみ変化, 京都大学防災研究所年報, 61B, 324-329.
 - 井口正人・中道治久・為栗 健・堀田耕平・園田忠臣, 2018, 2017 年 8 月桜島溶岩噴泉活動に伴う地震活動及び地盤変動, 京都大学防災研究所年報, 61B, 318-323.
 - 井口正人・為栗健・平林順一・中道治久, 2019, マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理, 火山 (受理済).
 - 風間卓仁・山本圭吾・平良真純・大島弘光・前川徳光・岡田和見・園田忠臣・井口正人, 2018, 桜島火山における繰り返し相対重力測定 (2017 年 5 月 ~ 2018 年 2 月), 京都大学防災研究所年報, 61B, 330-336.
 - 為栗 健・井口正人, 2018, 桜島火山昭和火口で発生する火砕流の特徴, 京都大学防災研究所年報, 61B, 312-317.
 - Tameguri, T., M. Iguchi, 2019, Characteristics of micro-earthquake swarms preceding eruptions at Showa crater of Sakurajima volcano, Japan, J. Volcanol. Geotherm. Res., 372, 24-33.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

これまでと同様に地震, 地盤変動の連続とキャンペーン観測, 地下構造の時間変化, 火山灰や火山ガスなどの物質科学的な観測を実施する.

それに加え, 平成 31 年度は, 人工地震探査を 1 2 月第一週に実施する. 北側における反射法探査 (爆破 6 箇所) と南側における 2013 年実施探査との変化検出のための探査 (爆破 4 箇所) を実施する.

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

井口正人、中道治久、山本圭吾、為栗健、大見士朗

他機関との共同研究の有無 : 有

北海道大学大学院理学研究科 (大島弘光、中川光弘)

秋田大学工学資源学部 (筒井智樹)

東北大学大学院理学研究科 (西村太志、太田雄策、小園誠史)

東京大学地震研究所 (大久保修平、及川純)

東京大学大学院理学系研究科 (森俊哉)

東京工業大学火山流体研究センター (野上健治、神田径)

常葉大学環境防災学部 (嶋野岳人)

名古屋大学大学院環境学研究科 (山中佳子)
 京都大学大学院理学研究科 (大倉敬宏、横尾亮彦、宇津木充)
 九州大学大学院理学研究院 (清水洋、松島健、相澤広記)
 鹿児島大学理工学研究科 (中尾茂)
 鹿児島大学地震火山地域防災センター (八木原寛)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
 部署等名：京都大学防災研究所火山活動研究センター
 電話：099-293-2058
 e-mail：iguchi.masato.8m@kyoto-u.ac.jp
 URL：http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/default.html

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者
 氏名：井口正人
 所属：京都大学防災研究所

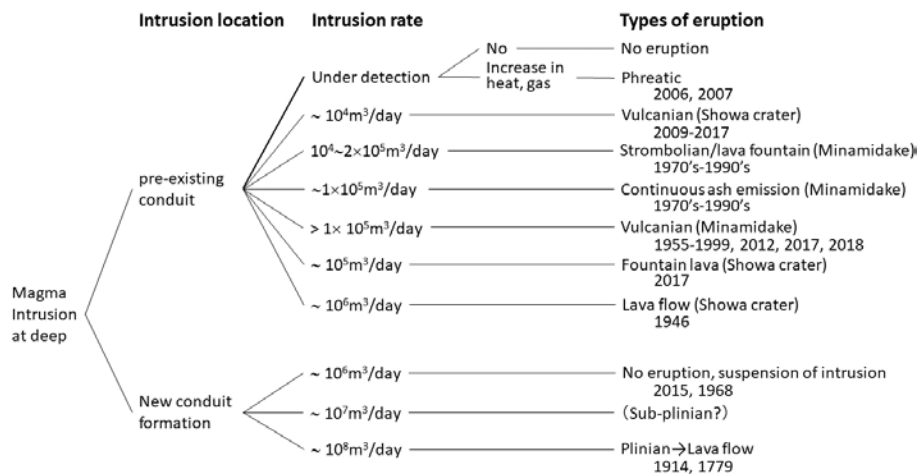


図1 マグマ貫入速度と噴火様式，規模との関係

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

焼岳火山の噴火準備過程の研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

飛騨山脈の焼岳火山は、東北地方太平洋沖地震の直後に地震活動が非常に活発化するなど、今後の動向を注視する必要がある火山のひとつであると考えられることから、同火山において複数項目の観測を行い、その火山噴火準備過程の理解に資する。本計画では、現状では手薄な地盤変動の観測研究を中心に、すでに実施中の微小地震観測や、他機関によって実施されている赤外熱映像観測等のデータの集約と解析を行い、将来の火山防災に資するための基礎データとすることを目的とする。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

焼岳火山においては、大学、気象庁、国交省砂防部局、長野県等が各種観測機器を設置してデータを取得しているが、各データが有機的に集約されているとはいえないのが現状である。本計画では、既存データの有機的な集約・統合を試みつつ、既存の観測で取得されていない地盤変動データを集中的に取得することで同火山の噴火準備過程の理解に資する。地盤変動データは、噴火の直前過程において微小地震観測データに先行して変化が現れる可能性があり、基礎データとして平常時のデータを取得しておくことは特に重要である。以下、年度別の計画を記述する。

平成 26 年度：現計画で実施中の焼岳近傍での微小地震観測および解析を継続すると共に山体近傍へ地震計の再設置を含めた観測点配置の再検討を行う。また、山体に傾斜計を設置するための地点選定と、そのための各種許認可手続きを開始する。傾斜計観測点は、山体を囲むように、長野県側に 2 点、岐阜県側に 1 点の計 3 点を計画している。1 点はボアホール型、他の 2 点は気泡型の予定である。平成 26 年度は気泡型傾斜計 1 点の設置まで行う。さらに、現在オフライン方式で継続している長野県側の地震観測点の一部を、携帯電話サービスを使用した簡易的なテレメータ観測点に改造することを試みる。なお、傾斜計本体は別経費で調達する。

平成 27 年度：微小地震観測を継続するとともに、引き続き傾斜計設置のための許認可手続きを行う。また、ボアホール型傾斜計 1 点の設置作業を行う。

平成 28 年度：微小地震観測を継続するとともに、引き続き傾斜計設置のための許認可手続きを行う。また、気泡型傾斜計 1 点の設置作業を行う。

平成 29 年度：微小地震観測およびその解析の継続、さらには傾斜観測データの解析を行う。また、国交省砂防部局が取得している赤外熱映像データの解析手法を開発し、同データを有効利用する手立てを検討する。

平成 30 年度：傾斜観測データの解析から、データの精度チェックおよび 2 年間の地殻変動の評価を行う。微小地震観測および熱映像解析もあわせて行い、本計画の総括を行う。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

平成 26 年度から 27 年度にかけて文部科学省の「火山地域での効率的な機動的集中観測研究システムの構築事業」(以下、機動的集中観測システムという)により構築した観測設備の安定稼働を目標とした調整作業を引き続き実施した。「機動的集中観測システム」では、図 1 に示す上高地下堀沢 (DP.SMHZ)、焼岳中尾峠 (DP.NKOT)、焼岳山頂 (DP.YKEP) の 3 点の観測点を構築した。構築以来 3 シーズンを経過しているが、機器の問題点を改良しつつ、地震活動のみならず、火口近傍での地殻変動、地磁気、温度等の観測を順調に続けており、これが本計画の最大の成果となる。

平成 30 年度は、冬季の電力不足に備えるために、DP.NKOT 観測点のバッテリーを交換するとともに、DP.NKOT および DP.YKEP の両観測点の通信用ルータの省電力化をはかった。これにより、DP.NKOT 観測点における冬季の日照不足による欠測の状況は前年に比較して改善された。

これらの観測点により、2018 年 11 月 22 日から発生した焼岳西麓における群発地震とそれに伴う諸現象を観測することができた。図 2 に Matched Filter 法により自動決定した震源分布とその時系列を、図 3 にはこの活動を含む期間 (2018 年 2 月から 2019 年 1 月末までの 1 年間) の、焼岳周辺の諸観測データの時系列を示す。これによれば、地殻変動、磁力計、温度データ等には、季節変動を超える変化は認められず、現状では変動があったとしても検出限界以下であった。

今回の諸解析には、栃尾観測点のアメダスデータ、国交省北陸地方整備局の微小地震観測データを参照させていただいた。記して謝意を表する。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

地震および地殻変動観測とそのデータ解析を継続するとともに、平成 32 年度に予定しているプロトン磁力計増設にむけた諸手続きを開始するとともに、次期計画での中心課題となる、無人機を使用した熱観測のためのシステムの設計・製作を開始する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

京都大学防災研究所：大見士朗、加納靖之

他機関との共同研究の有無：有

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設：横尾亮彦

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：京都大学防災研究所地震防災研究部門

電話：

e-mail：

URL：

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 大見土朗

所属: 京都大学防災研究所地震防災研究部門

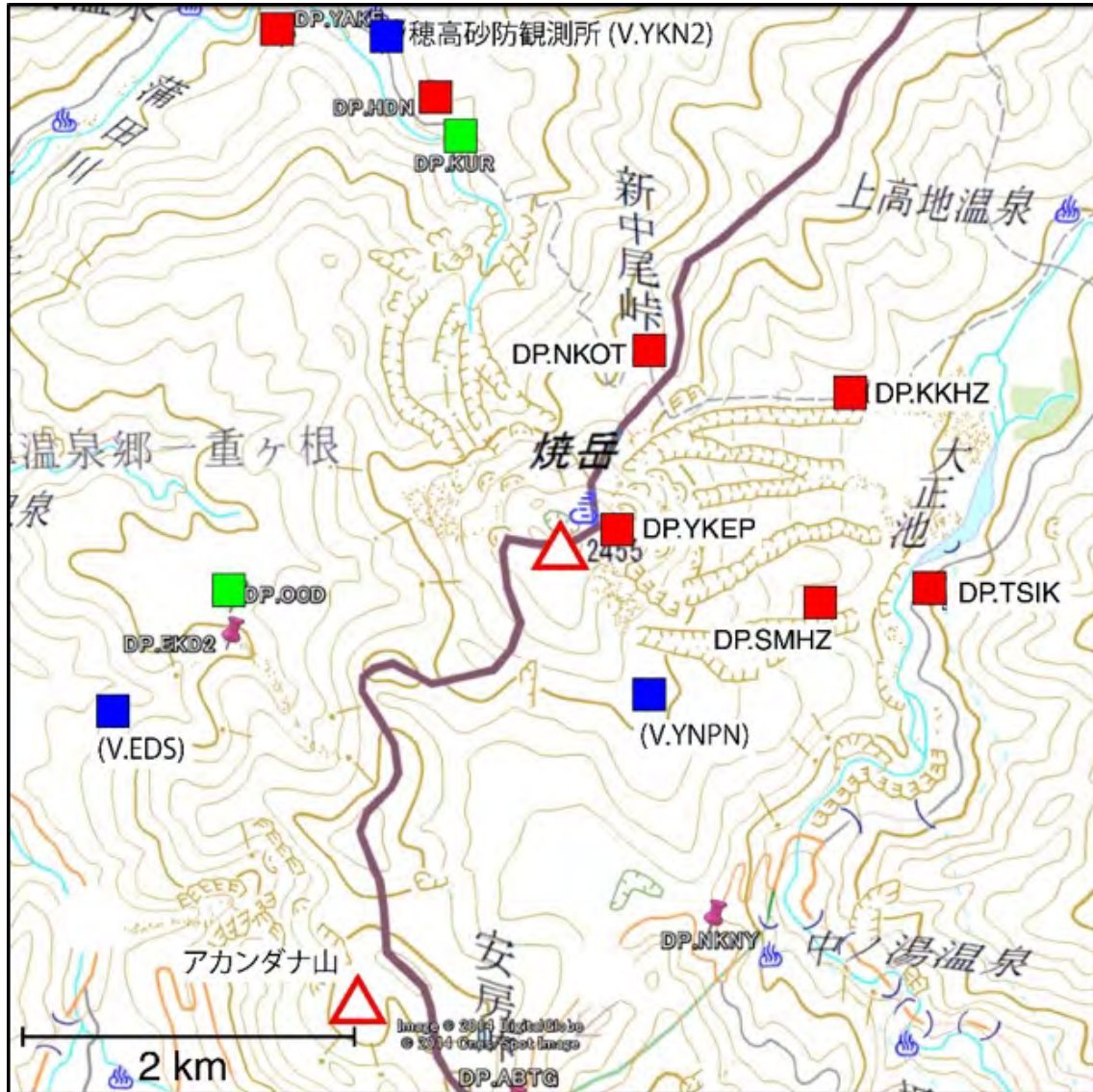


図1: 2018年10月現在の焼岳周辺の観測点分布

それぞれ、北陸地整・神通砂防(緑)、気象庁(青)、京大(赤)の観測点を示す。

焼岳山頂(DP.YKEP)、焼岳中尾峠(DP.NKOT)、上高地下堀沢(DP.SMHZ)は平成26年度文科省予算で構築された点、上高地峠沢(DP.KKHZ)、上高地防災情報センター(DP.TSIK)は平成25年度から27年度にかけて国交省予算で整備した観測点。

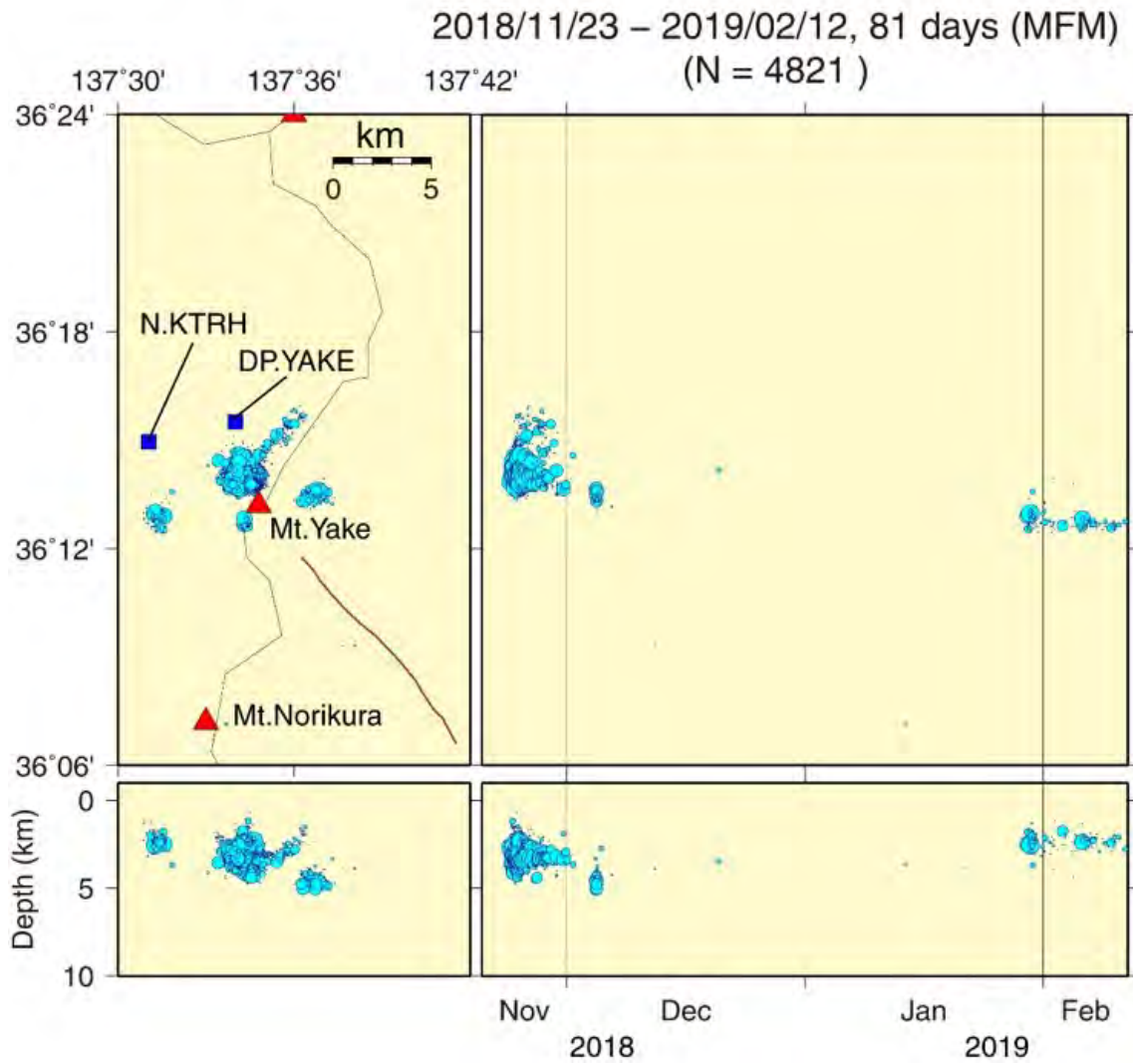


図 2 : Matched Filter 法により決定した、2018 年 11 月 23 日から 2019 年 2 月 11 日までの焼岳周辺の地震活動の状況。

2018 年 11 月の群発地震は 11 月末を以って終息したが、その後、12 月初旬に上高地で小規模な活動、2019 年 1 月末に 2018 年 11 月の震源域の西方で、2019 年 2 月には焼岳南方の稜線直下でそれぞれ小規模な地震活動が見られた。

2018/02/01 – 2019/01/31



図3：2018年2月1日から2019年1月末までの1年間の主な観測結果の時系列。

上から、DP.NKOT(京大・焼岳中尾峠) - TOCHIO(栃尾)のGNSS基線長、DP.SMZH(京大・上高地下堀沢)の傾斜計、DP.NKOT(京大・焼岳中尾峠)およびDP.YKEP(京大・焼岳山頂)の全磁力(絶対値)、DP.YKEP(京大・焼岳山頂)の精密温度計の各記録。最下段に参考のため気象庁の栃尾観測点のアメダスによる日別降水量の記録を示す。2018年11月の地震活動に際しては、地殻変動、磁力計、温度データ等には、季節変動を超える変化は認められず、現状では変動があったとしても検出限界以下であった。なお、DP.SMZHの傾斜計データに2018年11月の地震活動に同期して見られるデータのとびは、頻発した有感地震によって機器が激しく振動したことによるものと考えられる。

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

短スパン伸縮計等を活用した西南日本における短期的 SSE の観測解析手法の高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

南海トラフから沈み込むプレート境界深部で発生する短期スロースリップイベント (SSE) を新たな観測と解析手法の高度化によって詳細にモニタリングする手法を構築する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

GNSS (GEONET) データと既存および新設する観測網による地殻変動連続観測データを併合処理して、西南日本に発生する短期的スロースリップイベント (SSE) を時空間的に精度良く検出する手法を開発し、南海トラフ沿いのプレート境界深部における滑りのモニタリングを高度化する。そして、検出された短期的 SSE の発生頻度や規模からプレート境界深部における滑り特性を把握する。さらに、併合処理によって明らかにされる短期的 SSE 発生時の地殻変動の大きさや時定数をふまえて、長期間のデータの蓄積がある地殻変動連続観測データの再解析を行い、過去の短期的 SSE の発生状況を明らかにして南海トラフの巨大地震の発生サイクルの中で SSE の発生が時間変化しているのかどうかを調査する。

短期的 SSE の稠密観測を実現するために、短スパン伸縮計 (基準尺が 50 cm ~ 1.5 m) を開発し、地殻変動観測の新たなツールとする。開発にあたっては、アレイ観測や臨時観測に用いることを念頭とし、ひずみ地震動や火山などでの地盤変形計測にも対応することを目指す。また、従来の横坑式伸縮計の補正や置き替えの可能性についても検討する。

短期的 SSE は、巨大地震発生域に隣接した深部延長領域で数ヶ月に一度発生しており、巨大地震震源域への応力蓄積過程を理解する上で重要な現象である。また、大地震発生サイクルの数値シミュレーションから、地震サイクル中に短期的 SSE の発生頻度が変化することや、短期的 SSE の準静的滑りが巨大地震の動的滑りにまで成長することがあることが予想されており、短期的 SSE と巨大地震の発生は密接に関連していると考えられる。よって本課題は、南海トラフの巨大地震を対象としたプレート境界滑りのモニタリング手法の高度化に資することを目的とする。具体的な実施項目の年次計画は、以下の通り。

平成 26 年度：基準尺 1.5 m の短スパン 3 成分伸縮計の仕様の確定と計器の完成。紀伊半島での稠密アレイ観測を開始。GNSS データを用いた短期的 SSE 推定手法の改良。地殻変動連続観測データにおける短期的 SSE に関連するシグナルの抽出。

平成 27 年度：基準尺 50cm の超短スパン伸縮計開発の開始と紀伊半島における短スパン伸縮計での観測の継続。GNSS データと地殻変動連続観測データの併合処理による短期的 SSE 推定手法の開発。地殻変動観測データの整理 (潮汐・気象擾乱の補正、デジタイズ) 。

平成 28 年度：基準尺 50cm の超短スパン伸縮計開発の完成と紀伊半島における短スパン伸縮計での観測の継続。GNSS データと地殻変動連続観測データの併合処理による短期的 SSE 推定手法の開発。地殻変動観測データの整理 (潮汐・気象擾乱の補正) 。

平成 29 年度：紀伊半島における短・超短スパン伸縮計での観測の継続。過去の地殻変動データを用いた SSE 発生履歴の推定。地殻変動観測データの整理 (潮汐・気象擾乱の補正) 。

平成 30 年度：紀伊半島における短・超短スパン伸縮計での観測の継続。短期的 SSE 発生の発生状況の総括と地震サイクルにおける考察。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要：

短期的 SSE に伴う地殻変動を検出するための新たな手法として、深部低周波地震を基に GNSS データをスタッキングする手法 (Frank, 2016) を西南日本のデータに適用し、その有効性を検証した。微動データとして Annoura et al.(2016)、GNSS データとして国土地理院の GEONET データから京大防災研で算出した日座標値を用いて、微動と短期的 SSE が完全に同期していると仮定し、その日に発生した微動の総エネルギーがある閾値を超えた日座標値差を足し合わせることによって、2004 年 4 月-2009 年 12 月の SSE に伴う総変位量を計算した。閾値を 5×10^5 J とした時の総変位量を図 1 に示す。この図からわかるように GNSS の総変位量は傾斜計データから推定された SSE の断層モデルから期待される総変位量よりもはるかに大きく、四国中部や四国東部でその影響が顕著であった。この手法では、個々の短期的 SSE は検出できないが、SSE の特性を解明するための重要な知見を与えてくれることが期待される。

短スパン伸縮計の開発及び観測網の構築に関しては、水呑観測点での短スパン伸縮計の観測を終了し、撤収した。短スパン伸縮計およびプロマイド記録の撮影により得られた記録を分析した。

5か年の主な成果としては、以下の3点にまとめられる。(1) 基準尺が1.5m程度の短スパンの伸縮計で短期的SSEを含む地殻活動に伴う歪み変化が検出可能であることが確かめられたこと。(2)GNSS単独、あるいはGNSSと傾斜計のデータを組み合わせて南海トラフ沿いに発生する短期的SSEの検出及び断層モデルの推定が行われたこと。(3)GNSSデータから関東地方や千島海溝沿いの過去20年間に発生した短期的SSEの検出を行い、関東地方ではフィリピン海プレートと太平洋プレートの双方のプレート境界面での多くのSSEが検出されたのに対し、後者では確実なものは検出されなかったこと。短スパン伸縮計に関しては、紀伊半島西部の2か所において基準尺1.5mの伸縮計(3成分)による観測を実施した。中辺路観測点では2012年9月から観測を継続しており、水呑観測点では2014年11月から観測を開始した。これらの観測点は使わなくなったトンネルを利用している。トンネル内の温度変化が記録に影響を与えることから、伸縮計全体を断熱材でおおう、間仕切りを増強するなどの対策をおこなった。従来の伸縮計と同じく、降雨による地盤の変形も記録する。水呑観測点では、商用電源が確保できないことから、ソーラーパネルおよびバッテリーからの電力供給によって、変位検出器およびデータロガーが動作するように改良を行った。この方式をとると、一定の日照を確保できる地点であればよく、設置場所の制約を受けにくくなる。また、電気ノイズが小さいので、基準尺を短くすることにより犠牲にしたひずみについての分解能がいくぶん向上することも長所である。いっぽう、電力不足による欠測が起こりうるという短所もある。その後、燃料電池とソーラーパネルを併用した電源供給システムを構築し、電源は安定した。燃料電池は、他の観測種目での電源としても活用する余地がある。これまでの観測により、紀伊半島での低周波地震活動に合わせて生じる 5×10^{-9} 程度の伸縮変化を観測している。

平成28年度から古い地殻変動観測データの解析を開始した。京都大学防災研究所紀州観測点(三重県熊野市)では、1940年代から観測がはじまり、1947年から土地傾斜の観測をはじめている。現在、1948年以降の横坑傾斜計の記録の存在を確認している。プロマイド記録であり、各用紙に1週間程度記録されている。記録紙をデジタル画像化し、簡単なアルゴリズムで数値化した。その上で、現在の観測データも参照しながら、記録されている傾斜変化について検討を行った。地殻変動観測の長期間のデータから、地震発生サイクル中のSSEの発生頻度や規模の変化を見るという点については、本計画で結論を得るところまでは至らなかったが、次期計画でも引き続き検討を行っていく予定である。

SSEの観測解析手法の高度化に関しては、GNSSデータ単独で客観的基準に基づき短期的SSEを検出し、断層モデルを推定する手法の改良を行った。GNSSデータのスタッキング法(宮岡・横田, 2012)を用いることでSSEの継続期間も推定することが可能となり、断層モデルの推定も複数の初期値から非線形インバージョンを行うことで、初期値依存性を小さくすることが可能となり、より冗長性のある検出・推定が可能となった。この手法を関東地方や千島海溝沿いの過去20年間以上に渡るGNSSデータに適用した。関東地方では、フィリピン海プレートの上面で従来から繰り返し発生していることが指摘されている房総SSEに加えて、沖合の三重会合点付近でもSSEが発生していることがわかった。さらに、太平洋プレートの上面でも多数のSSEが発生しており、継続期間が数日程度のものから数ヶ月程度ものまで多様であることがわかった。SSEの発生位置は海山が沈み込んでいる場所と概ね一致しており、プレート境界面の形状がSSEの発生と密接に関わっていることが示唆される。

断層モデルの推定手法について、GNSSデータと傾斜計データの両方を使えるような改良を行い、紀伊半島で発生したSSEについて実際のデータに適用した。両者の最適な重み付けなど課題は残されているが、傾斜計データを用いることにより断層位置がより良く拘束されるなどの有効性が示された。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等): 加納靖之・細善信・尾上謙介, 2018, 1960年代の紀伊半島の傾斜計記録の復元, 東濃地震科学研究所地殻活動研究委員会報告書, 40, 173-175.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要:

次期計画では、「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」において、SSE の観測解析手法の高度化及び過去の地殻変動連続観測の解析を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

京都大学防災研究所 西村卓也、加納靖之、山崎健一、伊藤喜宏
他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 京都大学防災研究所 地震予知研究センター
電話 :
e-mail :
URL : <http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 西村卓也
所属 : 京都大学防災研究所地震予知研究センター

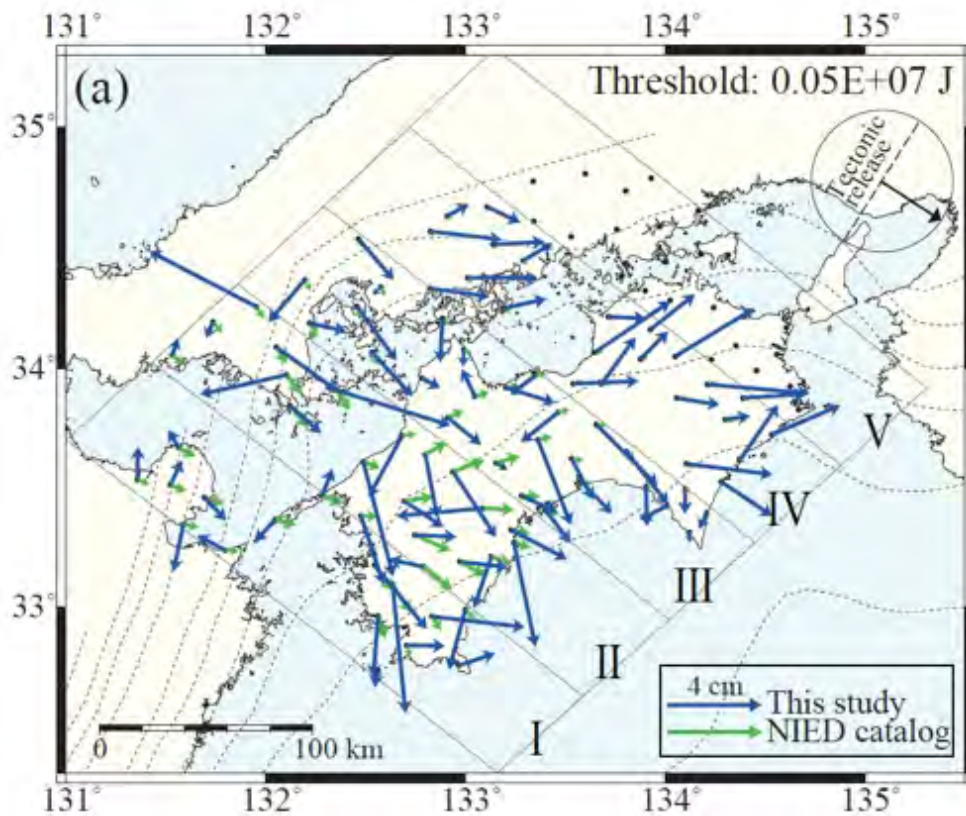


図1 微動活発日の GNSS データを積算した水平変位 (青矢印) と傾斜計データから推定された SSE の断層モデルから計算した水平変位 (緑矢印)
どちらの変位も 2004 年 4 月から 2009 年 12 月までの総変位量を表す。微動の日毎エネルギーが閾値 (5×10^5 J) を超えた日を微動活発日とする。

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

プレート境界巨大地震等の広帯域強震動予測に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

ウ. 内陸地震と火山噴火

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

プレート境界巨大地震や内陸地殻内地震等を対象として、広帯域強震動生成のための震源モデル、地殻構造モデルおよび大阪盆地等の堆積盆地構造モデルの高度化を行い、長周期地震動を含む広帯域強震動予測手法の構築を目指す。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

地震災害誘因の事前評価としての広帯域強震動予測を行うために、震源モデル、震源から観測サイトまでの地殻・地盤速度構造モデルの高度化を進める。震源モデルに関しては、担当者らを含むグループがこれまで行ってきた広帯域の震源不均質モデルをベースに、研究課題「プレート境界巨大地震の広帯域震源過程に関する研究」の研究成果も導入する。地殻・地盤速度構造モデルの高度化は、全国一次地下構造モデルのような全国レベルのモデルを含む既往モデルに対して、そのモデルの妥当性の検証を進めることによって問題点を発見し、モデルの修正・高度化を行う。速度構造モデルの妥当性の検証には、各観測網によって得られている中規模地震の波形記録を活用した波形モデリングを行う。また、適切な観測記録が少ない地域においては、微動連続記録の地震波干渉法解析により観測点間グリーン関数を求め、地下構造モデルに基づく理論的グリーン関数と比較する。大阪盆地等の大規模堆積盆地において、地震動特性把握のための臨時的強震観測や微動観測を行い、速度構造のモデリングに利用する。南海トラフ等を震源域とするプレート境界巨大地震の震源域および大阪平野等での地震動評価を行う。

各年度の研究計画を以下に示す。

平成 26 年度 既往広帯域震源モデルの整理と問題点抽出

	強震記録・連続地震記録等の収集、観測点グリーン関数構築、強震観測
平成 27 年度	広帯域震源モデル問題点の改良 地下構造モデル妥当性検証、強震観測
平成 28 年度	広帯域強震動予測手法プロトタイプ提案。既往地震による検証。 地下構造モデル妥当性検証継続・モデル改良、強震観測
平成 29 年度	広帯域強震動予測手法プロトタイプの問題点の改良 地下構造モデル妥当性検証・モデル改良継続、強震観測
平成 30 年度	広帯域強震動予測手法の提案 南海トラフ地震等の広帯域シミュレーション、強震観測

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

本課題では、広帯域強震動予測のための震源モデル、震源から観測サイトまでの地殻・地盤速度構造モデルの高度化を進めている。平成 30 年度は、1) 2018 年大阪府北部の地震の地震動モデリングによる大阪堆積盆地 3 次元速度構造モデルの検証、及び、2) 地盤震動特性把握のための関東平野、京都盆地における地震 (強震) 観測の継続的な実施を行った。

2018 年 6 月の大阪府北部の地震を対象に地震動シミュレーションを行い、大阪堆積盆地東部にあたる大阪平野部分の速度構造モデルを検証した。地震動シミュレーションに用いた堆積盆地の 3 次元速度構造モデルは、大阪盆地モデル (Sekiguchi et al., 2016) と奈良盆地モデル (関口・他, 2019) である。後者は、平成 29 年度に本課題で作成したものである。震源モデルには、2 つの断層面を設定し周波数 2Hz までの速度強震波形インバージョンを行った有限断層モデル (課題番号 1903, Asano et al., 2018) を用いた。地震動シミュレーションは、まず、この震源モデルと前述の大阪堆積盆地の 3 次元速度構造モデルを与えて 3 次元差分法により周波数 2Hz までの計算を行い、さらに、沖積層等からなる浅部の地震動応答を、浅層地盤構造モデルを用いて等価線形化法により計算した。計算された地震動の最大速度分布では、震央からみて南西 ~ 西方向に相対的に大きい値が広がった。これは、2 つの断層面のうち北東南西走向の横ずれ断層のメカニズムに対応する S 波のラディエーションパターンと破壊伝播の影響が強く現れ、そこに大阪堆積盆地による地震動の増幅効果が加わって形成されたと解釈できる。また、大阪盆地北縁部や上町断層帯北部の佛念寺山断層に沿って、その西側に帯状に最大速度が大きい地域が見られる。これは、基盤深さの急変により地震波の波面が大きく曲げられ、波のエネルギーに集中が起きたことによると考えられる。このような最大速度の分布形状は、大局的には、観測値の分布と整合している。計算された波動場には、直達波の後に、盆地内のあちこちで後続波が発生し、様々な方向へ伝播して複雑な波動場が形成されているのが見える。後続波には、堆積盆地基盤面と地表との間の多重反射波 (例えば、岩田・他, 2018) や、盆地端部および平野下に伏在する活断層による基盤の段差構造から発生した表面波などがあり、場所によってはそれらが直達 S 波より大きな振幅を生じている。大阪平野内の地震観測点の観測波形と比較すると、後続波の到来は観測とよく対応しており、速度構造モデルは表面波の形成・伝播などの盆地の応答はおおよそ再現できていると考えている。一方、計算地震動の振幅は観測に比べ全体的に小さく、震源モデルと 3 次元速度構造モデルの特に浅部部分に原因があるのではないかと考えられる。また、盆地端部近くの観測点は、波形の再現がよくない点があり、堆積構造の急変地域でのモデル更新が課題としてあげられる。堆積盆地構造の地震応答を実測し地盤構造モデルの改良に用いる目的のため、京都盆地および関東平野の中川低地で既設強震観測点での観測を継続した。

また、計画期間においては以下の研究を進めてきた。

平成 26 年度：既往の運動学的広帯域震源モデル作成手法におけるパラメータ設定方法の検証。大阪堆積盆地において強震記録に現れる繰り返し後続波群の特性分析。

平成 27 年度：広帯域予測震源モデルのパラメータ拘束のための、大 ~ 巨大地震の強震動震源モデルパラメータの分析。大阪堆積盆地における強震記録に現れる繰り返し後続波群の、大阪堆積盆地速度構造モデルに基づく再現。

平成 28 年度：予測震源モデルの広帯域化を目指した，すべり量や応力降下量の不均質分布導入方法の検討と分析．2013 年淡路島の地震の地震動シミュレーションに基づく，適切な堆積層内 Q 値の導入に関する検討．レシーバ関数解析による京都盆地堆積層と基盤境界面の深度推定による地下構造モデルの高度化．

平成 29 年度：奈良堆積盆地の速度構造モデルの構築と観測記録のシミュレーションによるモデル検証．広帯域予測震源モデルプロトタイプの構築．

平成 30 年度：2018 年大阪府北部の地震の地震動モデリングによる大阪堆積盆地 3 次元速度構造モデルの検証．また研究期間内において，京都盆地及び関東平野中川低地において強震観測を維持管理し，堆積盆地構造の地震応答の実測と地盤構造モデルの改良への活用を継続した．

研究期間内には，1903 で構築された震源モデル等を活かして，広帯域強震動予測のための震源モデル構築を進めるとともに，関西圏（大阪，京都，奈良）の堆積盆地の速度構造モデルを改良してきたものに対して，2013 年淡路島の地震や 2018 年大阪府北部の地震の強震動シミュレーションを通して，そのモデルパフォーマンスを検証することができ，多くの観測点においては周期 1 秒程度でもよい再現ができるモデルになっていることがわかった一方，再現度が低い地域が判明したことで，今後の研究対象地域を絞ることもできた．

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので，平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
岩田知孝・浅野公之・田中宏樹，2018，大阪堆積盆地北西部の尼崎観測点で観測される繰り返し地震波後続波群の特徴と 3 次元地震動シミュレーション，第 15 回日本地震工学シンポジウム論文集，GO10-01-11.
関口春子・岩田知孝・浅野公之，2018，2018 年 6 月 18 日大阪府北部の地震時の強震動シミュレーション，日本地震学会 2018 年度秋季大会，S24-15，2018 年 10 月．
関口春子・岩田知孝・浅野公之，2019，2018 年 6 月 18 日大阪府北部の地震による大阪平野の強震動シミュレーション，平成 30 年度 京都大学防災研究所研究発表講演会，A18.
関口春子・浅野公之・岩田知孝，2019，奈良盆地の 3 次元速度構造モデルの構築と検証，地質学雑誌，受理済．

- (10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

前計画および他プロジェクトを通じて担当者らが構築したプレート境界地震の広帯域震源モデルについて，実地震記録を用いた評価を行い，モデルの改良や問題点の整理を行う．大阪盆地，奈良盆地等の堆積地盤における地震動応答特性評価を行い，堆積層速度構造モデル改良の情報を得る．同様の目的で，京都盆地および関東平野において，地震観測を継続する．

- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

関口春子

岩田知孝

浅野公之

他機関との共同研究の有無：無

- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：京都大学防災研究所社会防災研究部門（都市防災計画）

電話：0774-38-4286

e-mail：sekiguchi.haruko.6u@kyoto-u.ac.jp

URL：

- (13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：関口春子

所属：京都大学防災研究所

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

強震動によって発生する地すべり現象の発生ポテンシャル評価と事前予測手法の高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

斜面の地すべり現象(地すべり・崩壊・土石流を総称)は、地震による最も大きな災害要因の一つであり、山間地とともに都市域の造成地でも発生している。2011 年東北地方太平洋沖地震時には、事前降雨が極めて少なかったため、発生数、発生域ともに限られていたが、近い将来大規模な地震が予測される南海トラフの地震や首都直下地震、およびその他の内陸地震では、それとは比較にならないほど広域かつ甚大であると考えられる。これらの地震による地すべり現象の発生には、地質、地質構造、地下水、地震波の斜面内部での挙動など、様々な要因が関与するが、地震による地すべり発生のメカニズムと発生場についての研究は極めて立ち遅れているのが現状である。本研究では、これらの要因と地震時地すべり現象発生との関連を事例研究および観測研究によって明らかにし、地震動に伴って発生する地すべり現象の発生ポテンシャル評価と事前予測手法の高度化を行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本研究では、地域的多様性を考慮したハザード評価手法の構築と観測・実験・シミュレーションによる災害発生メカニズムの検討(二次災害のハザード評価を含む)の二つのサブテーマをセットとして推進する。

1) 地域的多様性を考慮したハザード評価手法の構築 - 過去の事例の地質・地形的要因の調査・分析とハザードマップ作成手法の構築 -

地すべりと地震との関係を、有史前までさかのぼって野外調査と室内分析によって分析し、地すべり発生事前予測のための指標を明らかにする。特に航空レーザー計測による詳細地形の活用を図る。さらに、地すべりと震源断層との関係、地すべりに先行すると考えられる斜面重力変形地形の特徴、および、地震に弱い岩石の風化帯構造や谷埋め堆積物の構造を解明し、地質・地形的にみた地震時ハザードマップ作成手法を、科学的にも実用的にもレベルの高いものとして構築する。

2) 観測・実験・シミュレーションによる災害発生メカニズムの検討 - 斜面内での地震動の観測、及びそれが引き起こす地下水と斜面変位への影響の解明 -

現在、地震計・強震計の多くは、比較的平坦で堅固な地盤に設置されているため、斜面での地震動の観測は不十分なままである。本研究では、サブテーマ1で抽出した不安定候補斜面と過去に発生した地すべり斜面と堆積物(天然ダムを含む)において、以下の三点を実施する。

1. 斜面内に地震計の多点アレイを設置し、地震波の斜面内の挙動を明らかにする。
2. 斜面内に観測孔を掘削し、地震計、間隙水圧計、傾斜計を設置し、地震動が引き起こす間隙水圧の変化と斜面の変動への影響を明らかにする。
3. 上記の成果を基に、室内実験とシミュレーションを組み合わせ、今後予測される地震の斜面の安定性への影響を評価する方法を構築する。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要:

2008年中国ブン川地震、2015年ネパールゴルカ地震による斜面崩壊の分析を進めた結果、谷の侵食加速による谷中谷に数多くの崩壊が集中していることが明らかになった。我が国にも特に西南日本外帯には谷中谷が広く分布していることも明らかになってきており、特に南海トラフ地震時に要注意であることが明らかになった。2018年北海道胆振東部地震によって発生した壊滅的な地すべりでは、強風化軽石およびその直下の火山灰土にすべり面が生じた(図1)。その他の過去の事例も踏まえると、降下火砕物斜面の地震時地すべりのすべり面形成層準として、風化した軽石とその近傍の地層が地震時地すべりに対して最も危険であることがわかった。これらの分布は、火山灰層序学的に調べることが可能である。

谷埋め盛土において、事例収集できたPGAが200galまでのイベントでは、PGA、PGV、AI(Arias Intensity)と間隙水圧の上昇量は高い正の相関を示すとともに、震動の周波数特性が異なり長周期(>1秒)成分を多く含んだイベントはPGVの大きさに比して間隙水圧の上昇量は小さかった(図3)。四国の大規模地すべり斜面においては、稠密な常時微動観測をおこない、H/Vスペクトルのピーク周波数が空間的に連続性を持つことがわかり、その連続性が地表変位によって判別した地すべりブロック分割とは異なることが明らかになった。平成30年大阪府北部の地震においては、谷埋め盛土における擁壁の変形メカニズムを明らかにするとともに、高い地下水位を持つ公園での地すべり現象を調べた。また、平成30年北海道胆振東部地震においては、札幌市および厚真町の谷埋め盛土において調査をおこない、旧谷筋周辺を2-3m程度埋めた盛土が地すべり状の変状を呈したことを明らかにした。厚真町の大規模岩盤地すべりにおいては余震観測をおこない、特有の周波数(2Hz)で長く震動することが分かった。

今期5ヶ年期間中に発生した地震時地すべりと過去の地すべりとの調査によって、地震時に発生する地すべりの地質・地形的特徴が明らかになり、火山地域・非火山地域ともに、ハザードマップ作製方法の大枠を構築することができた。また、様々なタイプの地すべりにおいて観測を行い、地形や地すべりブロックの形状、地すべり土塊の厚さや地下水位に起因する斜面の揺れ方を明らかにし、強震時の過剰間隙水圧の生成や斜面の変形に関するデータを収集することに成功した。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):

Chigira, M., Sato, T., Matsushi, Y. & Suzuki, T. 2018. Landslides induced by the 2016 Kumamoto earthquake and its application to future earthquake-induced landslides (Invited). The 5th International symposium on Mega earthquake induced geo-disasters and long term effects, Chengdu, 7-8.

Doi, I., T. Kamai, R. Azuma, and G. Wang (2019): A landslide induced by the 2016 Kumamoto Earthquake adjacent to tectonic displacement - Generation mechanism and long-term monitoring, *Engineering Geology*, 248, 80-88.

土井一生・釜井俊孝・王功輝・千木良雅弘 (2018): 地震時地すべり減災に向けた観測研究 - 斜面地震学の展開 - 、日本地球惑星科学連合 2018 年大会、招待講演、HDS11-01.

Ma N., G. Wang, T. Kamai, I. Doi, and M. Chigira (2019): Amplification of seismic response of a large deep-seated landslide in Tokushima, Japan, *Engineering Geology*, 249, 218-234.

Tsou, C.Y., Chigira, M., Higaki, D., Sato, G., Yagi, H., Sato, H.P., Wakai, A., Dangol, V., Amatya, S.C. & Yatagai, A. 2018. Topographic and geologic controls on landslides induced by the 2015 Gorkha earthquake and its aftershocks: an example from the Trishuli Valley, central Nepal. *Landslides*, 15, 953-965, doi: 10.1007/s10346-017-0913-9.

Zhao, S., Chigira, M. & Wu, X. 2018. Buckling deformations at the 2017 Xinmo landslide site and nearby slopes, Maoxian, Sichuan, China. *Engineering Geology*, 246, 187-197, doi: 10.1016/j.enggeo.2018.09.033.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

前 5ヶ年より進めてきた、重力変形斜面や海岸地すべり、盛土斜面などいくつかのタイプの斜面における地震観測網を拡充し、多点稠密な地震観測を展開する。また、地下水圧や傾斜・ひずみ等の斜面の変形に関する観測も新たに実施する。

京都大学火山研究センター周辺におけるボーリング試料に対し土質試験を行う。また、火山研究センター斜面(高野尾羽溶岩ドーム)のボアホールにおいて傾斜観測を実施する。さらに、GPS 観測を継続する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

千木良雅弘(京都大学・防災研究所・教授): 総括、サブテーマ 1 (主査) サブテーマ 2

釜井俊孝(京都大学・防災研究所・教授): サブテーマ 1、サブテーマ 2 (主査)

松浦純生(京都大学・防災研究所・教授): サブテーマ 2

松四雄騎(京都大学・防災研究所・准教授): サブテーマ 1

王 功輝(京都大学・防災研究所・准教授): サブテーマ 1、サブテーマ 2

土井一生(京都大学・防災研究所・助教): サブテーマ 2

山崎新太郎(京都大学・防災研究所・准教授): サブテーマ 1

他機関との共同研究の有無: 有

西山賢一(徳島大学・環境防災研究センター): サブテーマ 1

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名: 京都大学防災研究所地盤災害研究部門

電話: 0774-38-4097

e-mail:

URL:

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 千木良雅弘

所属: 京都大学防災研究所地盤災害研究部門

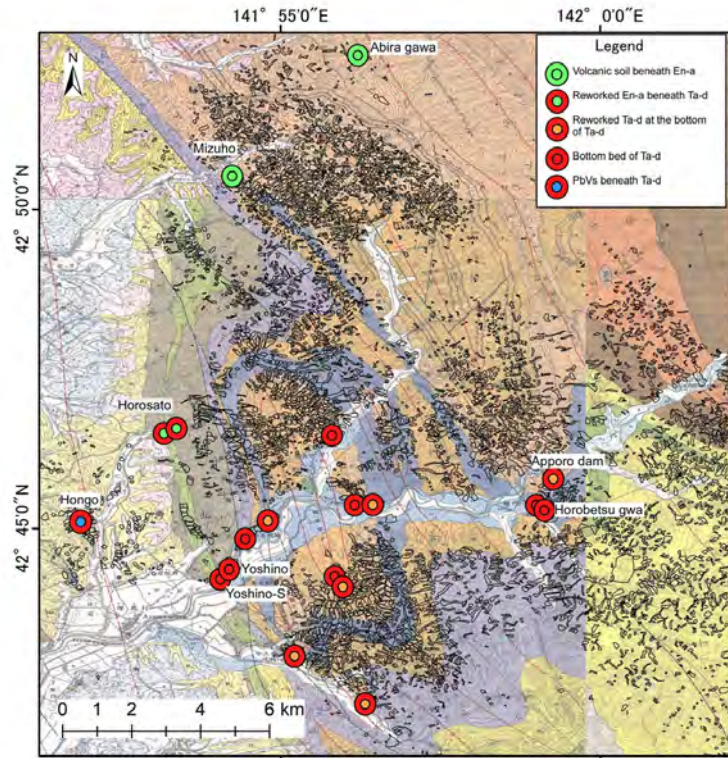


図1 2018年北海道胆振地震によって発生した地すべりのすべり面を示す図

斜面崩壊分布は地理院地図による。すべり面は、樽前火山から9000年前に噴出したTa-d軽石の最下部で強く風化した層に形成された場合が多かった。その他に、Ta-dの下位の軽石混じり火山灰土や、En-a軽石の下位の火山灰土に形成された場合もあった。いずれも、すべり面は風化によってハロイサイトの形成された層にできた。

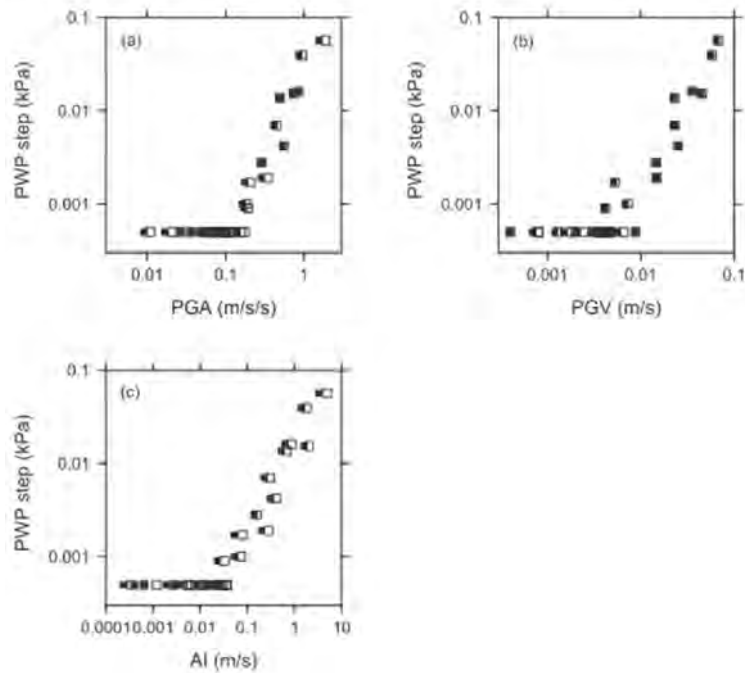


図2 谷埋め盛り土内における過剰間隙水圧の大きさと(a)PGA、(b)PGV、(c)AIとの関係。

3成分ベクトルを用いた計算値(白四角)と水平2成分のベクトルを用いた計算値(黒四角)の両方を示す。

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

桜島火山におけるマグマ活動発展過程の研究 - 火山灰拡散即時予測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

火山噴火により多量の火山灰が噴煙として大気中を上昇し、浮遊拡散するとともに、火山周辺に多量に降下する。浮遊火山灰は航空機の運航に障害を与え、最悪の場合はジェットエンジンを停止させる。また、降下火山灰は、農林水産業被害、健康被害、地上交通網の停止と噴火活動静穏化後も繰り返される泥流等の土砂災害を引き起こす。本研究では、レーダー、ライダー観測や GNSS を用いて火山灰浮遊推定量をする技術を開発するとともに、シミュレーションを用いて大気中を浮遊拡散する火山灰粒子密度分布と降下する火山灰の堆積分布を予測する。レーダー観測で得られる大気中の噴煙イメージは、噴火して噴煙柱が成長した結果であるので、さらに即時性を高めるために、地盤変動量、噴火微動振幅を用いた火山灰噴出率をリアルタイムで把握する手法とそれに基づくシミュレーション技術を開発する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本課題は、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」事業に基づいた計画であり、以下の 5 つのテーマに沿って研究を行う。

[1] 降下火山灰のリアルタイム観測および大気中火山灰粒子密度のその場観測による把握

[2] レーダーおよびライダー観測による噴煙高度等の外形情報の把握、噴煙柱形成、移流・拡散過程の把握および GNSS による搬送位相遅延量を用いた大気中火山灰粒子密度のリアルタイム推定手法開発

[3] 火山灰量の地上および大気中実測との照合によるリモートセンシング観測に基づく火山灰量の推定

[4] シミュレーションによる火山灰拡散範囲と粒子密度および降下火山灰堆積量の予測と観測データと予測値の照合による拡散シミュレーションの高度化

[5] 地盤変動、地震観測データに基づく、火山灰噴出率と噴煙高度のリアルタイム評価手法の開発と拡散シミュレーションのさらなる即時化

平成 26 年度はレーダー観測により噴煙柱の形成、移流・拡散過程の把握する。また、GNSS による搬送位相遅延量を用いて大気中火山灰分布をリアルタイムで把握できる手法を開発する。降下火山灰のリアルタイム観測および大気中火山灰粒子密度のその場観測による火山灰粒径分布を明らかにする。

平成 27 年度はライダー観測も含めて、降下および浮遊火山灰量の実測値との照合によってリモートセンシング観測に基づく火山灰量の推定方法を確立する。

平成 28 年度はシミュレーションに基づいて火山灰拡散範囲と粒子密度および降下火山灰堆積量の予測し、観測データと予測値の照合によって拡散シミュレーションのパラメータのチューニングおよびシミュレーション論理の改良を行う。

平成 29 年度は地盤変動、地震観測データに基づいて、火山灰噴出率と噴煙高度のリアルタイム評価手法を開発し、拡散シミュレーションのさらなる即時化を図る。

平成 30 年度は上記の [1]～[5] の結果を検討して最良の即時予測システムを構築する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度～30 年度) の成果の概要 :

2009 年以降、ブルカノ式噴火の発生頻度がきわめて高い桜島を対象に、噴火に伴う噴煙の早期検知と粒子密度の推定を目的とした地上観測を実施した。地上からのリモートセンシング観測で用いた手法は GNSS、X バンド MP レーダー、ライダーであり、この順に波長が短くなる。2015 年後半以降、桜島の噴火活動は低いレベルにある。2017 年および 2018 年の爆発回数は、76 回及び 254 回であり、1000 回近い爆発が発生した 2010 年～2015 年の 1/5 程度である。2017 年 10 月までは昭和火口において噴火が発生したが、2017 年 11 月以降は南岳の B 火口において噴火が発生し、昭和火口の噴火活動はおおむね停止した状態にある。

1) X バンド MP レーダー

X バンド MP レーダーによる噴煙観測を霧島、桜島、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島において継続した。このうち、2018 年において噴火が発生したのは、霧島新燃岳、桜島、口永良部島、諏訪之瀬島であり、いずれの火山においても、レーダーにより噴煙を検出できた。2018 年 6 月 16 日に桜島において発生した噴煙のレーダー画像を図 1 に示す。画像はセクタ RHI スキャンによるものであり、方位角 95 ° 方向についての断面を示す。噴煙は海拔 5km 程度まで上昇している。また、南西方向に流下した火砕流にたいおうすると考えられる強い散乱体が、1km 程度の低い高度に確認できる。

図 2 は 2018 年 12 月 18 日に口永良部島で発生した噴火のレーダー画像である。噴煙に対応する強い散乱体が、火口上の 4500m 程度上空まで確認できる。噴火発生時は、口永良部島新岳の火口上低い高度に雲があり、目視観測では噴煙の最高到達高度は確認できないが、X バンド MP レーダーを使用することにより、冠雲時でも噴煙を可視化できることを示すことができた。

2) 火山灰拡散シミュレーション

多くの火山灰拡散のシミュレーションコードがあるが、大気中浮遊または降下火山灰を量的に自動的に予測するものはない。火山灰粒子の移流を決める風の場合は、気象庁により予測され、公開されているが、噴出した火山灰量を即時的に評価するシステムがないからである。また、噴煙高度についても上記 1 に記述したように常に目視観測が可能な訳ではない。Iguchi (2016) は火山噴火に伴う地震動の振幅と地盤変動から評価される圧力源の体積変化量の線形結合から火山灰放出量を評価する手法を開発した。この手法により火山灰放出率をリアルタイムで評価し、経験的に導出された噴出率と噴煙高度の経験式を用いて即時的に火山灰の拡散および降下量を予測することが可能となる。京都大学及び筑波大学のサーバーに火山灰予測を実装した。火山灰拡散予測の結果を図 3 に示す。火山灰の拡散方向はおおむね一致している。降下火山灰量も 2kg/m³ に達する桜島南西部の降灰量を予測できた。

H26-H30 成果の概要

本研究課題で設定した研究項目は次の5つであり、それに対応する成果の概要は以下の通りである。

[1] 降下火山灰のリアルタイム観測および大気中火山灰粒子密度のその場観測による把握

桜島において火口を取り巻くように設置された13台のディストロメータによって降下火山灰のリアルタイム観測網を構築した。

[2] レーダーおよびライダー観測による噴煙高度等の外形情報の把握、噴煙柱形成、移流・拡散過程の把握およびGNSSによる搬送位相遅延量を用いた大気中火山灰粒子密度のリアルタイム推定手法開発
XバンドMPレーダーによって、霧島新燃岳、桜島、口永良部島、諏訪之瀬島の噴火に伴う噴煙の高度等の外形情報、噴煙柱形成、移流・拡散過程が把握できた(図1, 図2)。特に、冠雲によって噴煙が目視できない時でも、レーダーにより噴煙を可視化できるので、気象条件がよくない時にその有効性が示された。ライダー観測により、噴火発生時に加え、静穏時でも微小な火山灰粒子を含む白煙が放出されていることが確認できた。また、偏光解消度により、粒子の形状が推測可能であることが示された。火山噴火の噴煙により、GNSSによる搬送位相遅延量とSNRに顕著な変化があることが桜島、阿蘇山の噴火で示され、衛星-受信機を結ぶ異常伝搬経路の交線から噴煙高度を推定できた。

[3] 火山灰量の地上および大気中実測との照合によるリモートセンシング観測に基づく火山灰量の推定
XバンドMPレーダーによって観測された反射強度の空間分布と地上降灰量を対比し、反射強度と火山灰量の間を経験式が桜島の噴火を対象に構築した。

[4] シミュレーションによる火山灰拡散範囲と粒子密度および降下火山灰堆積量の予測と観測データと予測値の照合による拡散シミュレーションの高度化

シミュレーションによって得られる降下火山灰予測量と観測データを対比して、良好な結果が得られた(図3)シミュレーションの更なる高度化のためには、風速場を高分解能化する必要がある。

[5] 地盤変動、地震観測データに基づく、火山灰噴出率と噴煙高度のリアルタイム評価手法の開発と拡散シミュレーションのさらなる即時化

噴火に伴う地震動振幅と地盤変動の線形結合から火山灰放出率と噴煙高度を決定し、それを入力条件とする火山灰拡散予測シミュレーションを実装した。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
中道治久・井口正人・下村 誠・竹中悠亮, 2018, 南九州の火山における小型Xバンド偏波レーダーの展開と噴火観測事例, 京都大学防災研究所年報, 61B, 337-343。

Tanaka, H., M. Iguchi, 2019, Simulations of volcanic ash plume dispersal for Sakura-jima using real-time emission rate estimation, Jour. Disast. Res, 14, 160-172.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

本研究課題の内容については、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトのサブテーマD2が引き継ぐので、次期計画の中の研究課題はない。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

井口正人、吉谷純一、中道治久、味喜大介

他機関との共同研究の有無：有

鹿児島大学地域防災教育研究センター 眞木雅之

防災科学技術研究所 藤田英輔

東北大学理学研究科 太田雄策、小園誠史

気象研究所 高木朗充

気象協会 桃谷辰也

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：京都大学防災研究所火山活動研究センター

電話：099-293-2058

e-mail：

URL：<http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/default.html>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：井口正人

所属：京都大学防災研究所

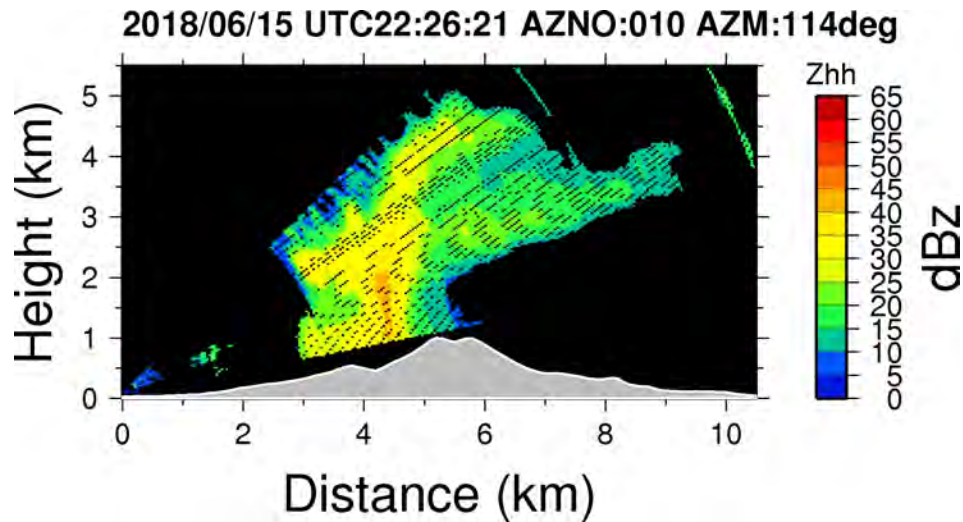


図1 桜島において2018年6月16日07:19に発生した爆発により放出された噴煙のレーダー画像
スキャン：セクタRHIモード，南岳方向(N 95 °E)の鉛直断面．2018年6月16日07:26．縦軸と横軸は高度および距離(km単位)．左：雨量換算値(降水強度)(mm/h)，右：水平偏波レーダー反射因子(dBZ)

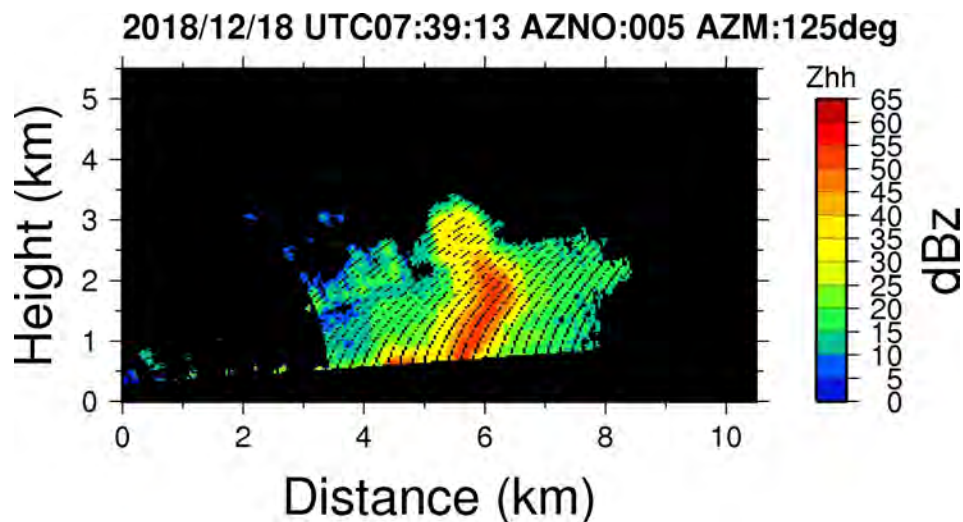


図2 口永良部島において2018年12月18日16:37に発生した爆発により放出された噴煙のレーダー画像
スキャン：セクタRHIモード，南岳方向(N 125 °E)の鉛直断面．2018年12月18日16:39．縦軸と横軸は高度および距離(km単位)．左：雨量換算値(降水強度)(mm/h)，右：水平偏波レーダー反射因子(dBZ)

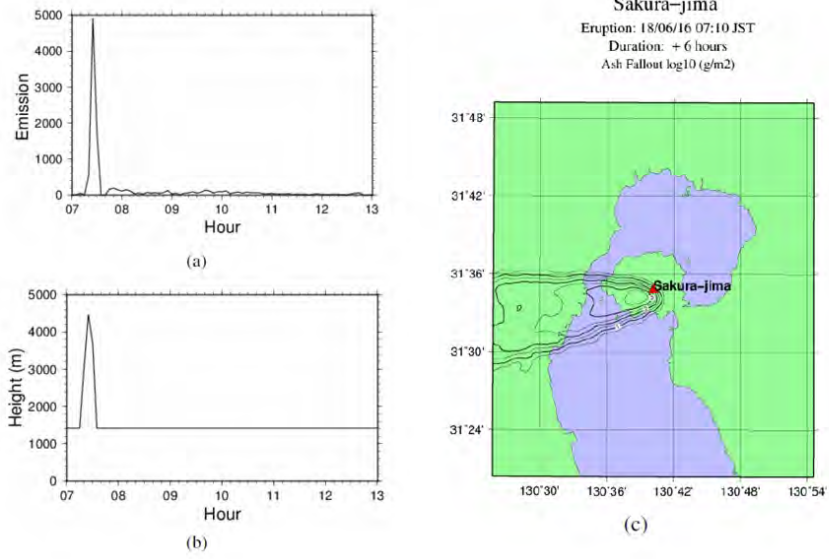


図3 桜島南岳において発生した爆発により放出された火山灰の拡散シミュレーション

a: 地震動と空気振動から算出された噴出率, b: 経験式を用いて噴出率から算出された噴煙高度, c: 降下火山灰量 (等高線は, 単位面積当たりの降灰量 g/m^2 の対数)

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

桜島火山におけるマグマ活動発展過程の研究 - 地域との連携

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究では、桜島火山をモデルケースとして、地方自治体の防災担当者、一般住民、報道機関など様々な層を対象に、これまでの火山噴火予知研究の成果を知ってもらうためのセミナーを定期的開催する。そのうえで、これまでの予知研究の成果を、自治体の地域防災計画や住民の防災意識へ反映することの可能性を検討するとともに、よりよい地域防災計画策定や危機的状況における住民行動の改善のためにはどのような研究成果や火山活動に関する情報が必要であるか、予知研究の要求調査を行う。さらに、火山現象理解のための研究や噴火規模の即時評価の研究の成果を年次ごとに公表し、防災対策の視点から研究の仕分けを行う、また、必要とされる研究項目を推進するため、フィードバックをかける。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本課題は、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」事業に基づいた計画である。年 2 回のセミナーと検討会を実施し、火山噴火予知研究の成果を地域における防災対策等に反映することを検討する。検討項目は以下の通りである。

[1] 避難計画における火山噴火予知研究成果の活用

[2] 様々な噴火シナリオに基づく避難計画の多様化の研究

[3] 現状の避難計画の問題点と予知研究による解決の可否の検討

[4] 火山噴火による経済への影響評価と BCP や個人の生活支援策への予知研究成果(噴火活動推移)の活用

平成 26 年度はこれまでの火山噴火予知研究成果をレビューするセミナーを開催するとともに、その成果の現状の避難計画を含めた防災対策にどのように活用できるかを検討する。

平成 27 年度は噴火事象系統図にリストアップされる個々の噴火の規模と様式について、前駆活動及び火山噴火推移の事象の発現に沿った避難計画策定の可能性について検討する。

平成 28 年度は火山噴火予知研究から想定される今後の噴火活動に対する現状の防災対策の問題点と予知研究によってその問題が解決可能であるかどうかを検討する。さらに、どのような予知情報が必要であるかを明らかにしていき、予知研究の課題としての解決策を探る。

平成 29 年度は噴火活動の推移予測と事業継続、生活継続の問題について検討する。

平成 30 年度は以上の検討を踏まえ、火山噴火予知研究からみた地域防災計画や支援策などへの提言を取りまとめる。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 30 年度の成果の概要：

桜島火山の大規模噴火を想定した降灰リスク分析を、(1) 噴火シナリオと気象シナリオに応じた降灰分布の推定、(2) その降灰量に応じた影響度分析に分けて行った。

降灰により災害が予測される分野の整理を行い、火山灰の湿潤時における導電性やその重量、付着した火山ガス成分により、様々な社会システムに影響を与えることを確認した。続いて、その中から、本研究における降灰リスク分析を行う対象分野を、道路、航空、建物という3分野に設定し、それぞれの災害影響度を決定づける閾値について検討した。

1914 年の大正噴火規模の噴煙を仮定し、3890 日分の気象シナリオに基づいて、降灰分布を計算し、降灰ハザードデータベースを構築した。降灰分布の予測計算には PUFF モデルによる火山灰輸送シミュレーションを用いた。また、そのデータベース内の降灰分布集合に対し、桜島上空の偏西風による影響の変化や、台風を含む強い風速下等を条件に用いた降灰分布確率の算定により、桜島における大規模噴火時の降灰分布について有意な傾向を見出した。

算出した降灰分布とその確率分布を用いて、分析対象項目とした道路、航空、建物の3分野における降灰リスクを分析した。航空分野においては、国内の20空港について定めた閾値ごとの降灰確率分布を算出し、そこから羽田空港や新潟空港について、降灰を懸念すべき噴火時期を明らかにした。また、建物倒壊などの降灰リスクを回避するために、要避難人口を求めた。日々変わる気象条件を考慮し、2017年と2013年の2年間し730日間における各日の要避難人口を求めた。2017年においては8月23日の気象条件下であり、625,186人、2013年においては9月16日の635,171人となった。また、いずれの年でも5月から10月までの平均要避難人口は10万人を超え(図1)避難実施の困難が予想される。

平成 26 年度～平成 30 年度の成果の概要

年 2 回のセミナーと検討会を実施し、火山噴火予知研究の成果を地域における防災対策等に反映することを検討する。検討項目は以下の通りである。

[1] 避難計画における火山噴火予知研究成果の活用

[2] 様々な噴火シナリオに基づく避難計画の多様化の研究

[3] 現状の避難計画の問題点と予知研究による解決の可否の検討

[4] 火山噴火による経済への影響評価と BCP や個人の生活支援策への予知研究成果(噴火活動推移)の活用

噴火活動が激化している桜島において、火山噴火予知研究成果をレビューするセミナーを開催するとともに、その成果の現状の避難計画を含めた防災対策にどのように活用できるかを検討した。セミナー

は鹿児島市内において一般向けに開催した。聴講者の関心事は噴火発生時期に関するものが多く、依然として火山噴火予知の5要素「いつ(時期)」、「どこで(場所)」、「どれくらい(規模)」、「どのような(様式)」、推移・終息のうち、時期の問題が十分に解明されていない現状がわかった。一方、規模に関する認識はあまりなく、「大きい・小さい」噴火といった表現が使われ、地震のマグニチュードのような指標が定着していないことが浮き彫りとなった。

噴火事象系統図にリストアップされる桜島の噴火の規模と様式について、前駆活動及び火山噴火推移の事象の発現に沿った避難計画策定の可能性について検討した。これまで考えられてきた前兆事象と噴火規模・様式との対応は、地盤変動から推定されるマグマの貫入速度に応じて、 $10^4\text{m}^3/\text{日}$ のオーダーであれば、昭和火口のブルカノ式噴火、 $10^5\text{m}^3/\text{日}$ 程度であれば、南岳の昭和火口のブルカノ式噴火、また、 $10^6\text{m}^3/\text{日}$ のオーダーであれば、昭和21年噴火のような溶岩流出、 $10^8\text{m}^3/\text{日}$ を超えれば、大正3年のプリニー式噴火とそれに続く溶岩流出を予測するものである。火山性地震の活動については 10^{14}J に地震エネルギー積算量が達する大正3年の噴火に前駆する地震を除けば、地震活動度は低いので、地震エネルギー積算量が前兆事象と噴火規模・様式との対応において判断条件となる。

これまでの観測研究から、始良カルデラにおけるマグマの蓄積量は、最近10年間で1914年の大正噴火のマグマ量に匹敵する量に達していることが明らかとなっている。したがって、防災対策を要する噴火規模としては、まず、大正噴火級を想定し、大正噴火にまつわる証言から噴火に至る前駆過程を考察し、それに基づいたシナリオに沿って鹿児島県、鹿児島市など自治体の机上防災訓練が行われた。本研究課題においては、現在の避難計画でも1914年大正噴火級で避難が必須とされる桜島島内よりもさらに広域における大量降灰からの避難について5年間かけて検討した。まず、対象区域において広域避難を実施する場合の対象人口及び避難に要する時間を算出した。その後、住民の避難意向アンケートを実施し、避難する住民の人口を限定したうえで、シミュレーションを行い、長距離避難の意向を持つ20%の住民が避難するのに要する時間は約5時間という結果を得た。一方、大量降灰を想定した避難の場合、影響を受ける区域とその人口は気象条件に大きく依存する。最近の長期間の気象条件を考慮したシミュレーションを行い、下記において対象人口が大きく増加する結果を得た。

インドネシアの最近の大規模噴火(2010年メラピ火山噴火及び2014年ケルト火山噴火)について避難計画や対策について調査した。両火山噴火とも平時の教育と体制の整備が進められ、噴火警戒レベルが1つ上がるごとに、それに対応して、避難場所、避難方法の確認や、家畜の移動などの対応が順次なされた。警報発表は、防災対応の極めて重要なトリガーになるが、すでにレベル3であり、避難を要するレベルの4、5しか残されていない桜島においては、きめ細かい対策のためには、政府機関が発表する警報だけでは不十分であることが指摘できた。

さらに、噴火災害時における事業と生活を継続させるための早期の復旧計画についても検討した。2011年霧島新燃岳噴火は、多量の火山灰・軽石が噴出し、火山体の東麓から都城市にかけて火山灰が堆積した。火山灰の堆積により、いくつかの道路が閉鎖され、交通網に長期間の影響が出た。降灰量と道路における通行規制の有無の関係を機能的フラジリティ曲線で近似し、降灰量に対する通行規制の確率分布を求めた。これを用いて、噴火による交通量の初期低下率を把握することが可能となる。これをもとに、最適な交通ネットワークの復旧分析を行った。分析する目的関数は道路の清掃時間、交通量、交通量の低下率の積をすべての道路について足し合わせたものであり、その最適解を求めることができた。ここで得られた機能的フラジリティ曲線は他の火山にも応用可能であり、噴火発生前のハザード評価に活用できる。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

火山研究成果のセミナーにて成果の現状を踏まえて避難計画などへの活用の検討を始める。また、自治体の防災担当者等に火山観測データの見方の講習を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

井口正人, 中道治久, 多々納裕一

他機関との共同研究の有無 : 有

北海道大学大学院理学研究科 (大島弘光, 中川光弘)

秋田大学工学資源学部 (筒井智樹)

東北大学理学研究科 (西村太志)

東京大学地震研究所 (大久保修平)

東京大学大学院理学系研究科 (森俊哉)

東京工業大学火山流体研究センター (野上健治)

常葉大学環境防災学部 (嶋野岳人)

京都大学大学院理学研究科 (鍵山恒臣)

九州大学大学院理学研究院 (清水洋)

鹿児島大学理学部 (宮町宏樹, 中尾茂, 八木原寛)

鹿児島大学地域防災教育研究センター (眞木雅之)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 京都大学防災研究所火山活動研究センター

電話 : 099-293-2058

e-mail :

URL : <http://www.svo.dpri.kyoto-u.ac.jp/default.html>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 井口正人

所属 : 京都大学防災研究所

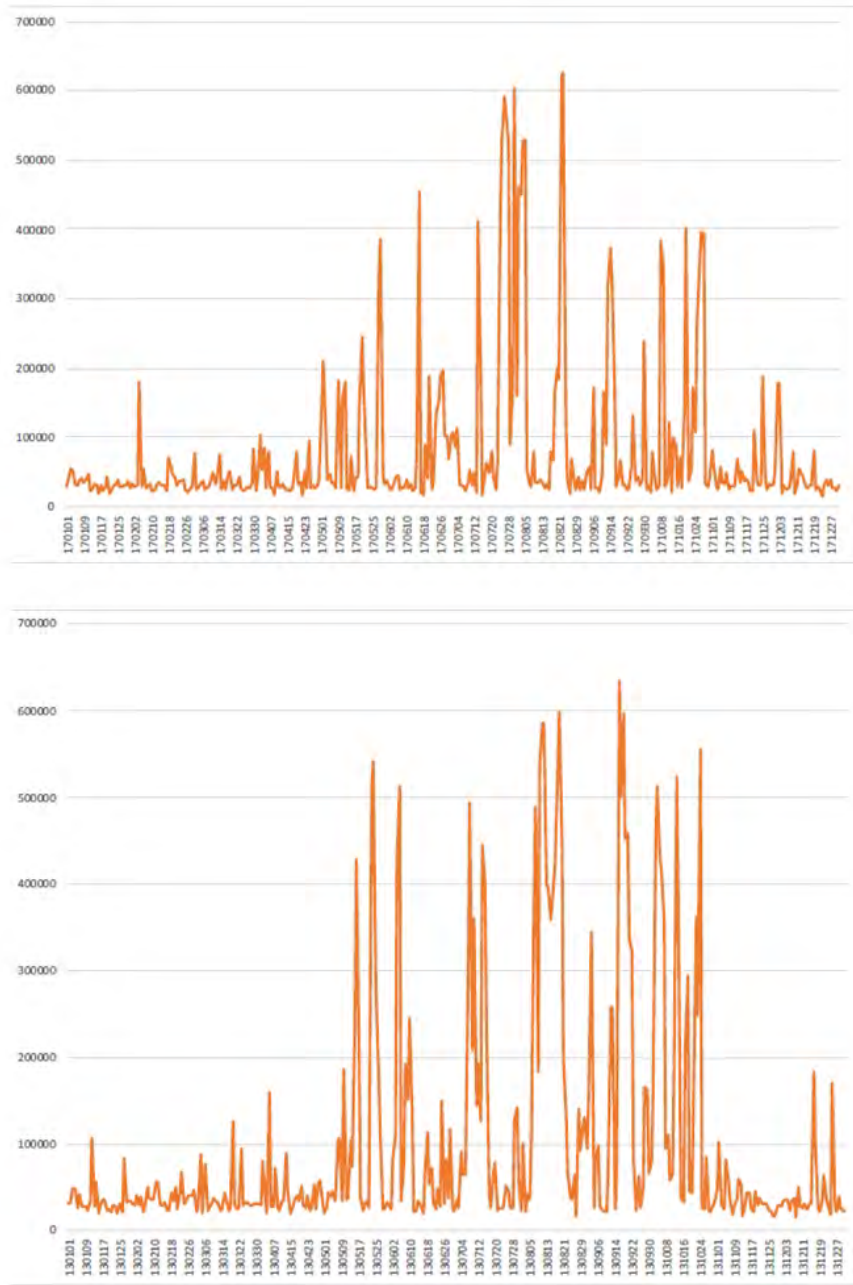


図1 一年を通じた要避難人口の推移
上:2017年,下:2013年

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

歴史記録の電子化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ア. 史料の収集とデータベース化

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

東南海・南海道震前の地震活動や応力状態を知るために、過去の地震データは最も重要な情報の一つである。劣化しつつある歴史地震記録を電子化し、データベースを構築することが本研究の主な目的である。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

京都大学では、阿武山・別府・阿蘇・上賀茂等で記録された一世紀以上におよぶ地震の観測データおよび約半世紀にわたる地殻変動連続観測データを保有している。これらのうち、阿武山観測所のウィヘルト地震計および大震計の大部分と上賀茂観測所の大森式地震計の一部は電子化されているが、それ以外のデータは依然として紙媒体のままであるため、管理および活用に困難を極めているし、データは年々劣化している。これらの貴重な観測記録を電子化し、データベース化をはかり、全世界の地震・火山研究者の利用に供する。加えて、阿武山観測所においては、これらのデータを記録した歴史的な地震計を動態保存し、電子化した記録とともに、サイエンスミュージアムとしてのアウトリーチ活動に活用する。

平成 26～27 年度においては、阿蘇のウィヘルト地震計のデータを電子化する。平成 28 30 年度においては、上賀茂観測所の大森式地震計の未処理分および、別府のウィヘルト地震計のデータを電子化する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

上賀茂観測所の大森式地震計の 1945 年以降の電子化を行った。阿武山観測所において、一般見学会、団体見学会およびペットボトル地震計製作講習を行うとともに、高槻市等の施設において出前講座を行った。

上賀茂観測所において記録された煤書き記録の多くは当観測所に保管されていたが、劣化が激しいため、運搬可能なものを阿武山観測所へ移動した。耐震改修に伴いこれまでの倍程度の床面積となった阿武山観測所の新しい記録保存室に、上賀茂・桜島の地震データを格納した。上賀茂観測所の大森式地震計の 1925 ~ 1935 年分を長期保管用の保存箱に収納するとともに、電子化した。阿蘇のウィヘルト地震計の 1931 年 ~ 1940 年分を電子化し、2016 年熊本地震による損失を免れた。阿武山観測所に保管されている、全ての歴史記録や資料等のデータベースの構築を行った。平成 23 年度以降、阿武山観測所において、サイエンスミュージアムに関連するイベントを 200 回以上開催し、これまでの合計参加者が 8836 人になった。阿武山観測所において、「あぶやま・まんてん tera 小屋」と称するサイエンスカフェ的な参加型の一般向け講演会を平成 27 年度より 15 回開催した。各回 2 ~ 3 時間とゆったりしており、実習や体験も含んだ一方通行でないイベントとなっている。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

DPRI15 において、阿武山観測所におけるオープンサイエンス型のサイエンスミュージアムの企画、運営等により、防災リテラシーの向上に市民科学および参加型観測研究がもたらす効果と可能性について検証する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

京都大学防災研究所・理学研究科
他機関との共同研究の有無 : 有
地震予知総合研究振興会、松浦律子

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 京都大学防災研究所
電話 : 0774-38-3348
e-mail :
URL :

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 飯尾能久
所属 : 京都大学防災研究所地震予知研究センター

(1) 実施機関名：

鳥取大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

自治体震度計を用いた地震速報の高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

自治体震度計の波形データは、近年の更新によりリアルタイムにデータを取得できるようになっている。鳥取県を例とすると、現状では事後の震度情報が地震動分布の把握に活用されているのみだが、リアルタイム観測かつ高密度な観測網の利点を活かし、より速く精度良く地震発生を検知し、観測記録を用いて現地地震動を推定する精度を向上する手法を開発する。

気象庁が緊急地震速報に用いている地震計よりも高密度に展開されている利点を活かし、緊急地震速報が間に合わない領域の狭小化、速報の高精度化を図るためのパイロット・システムを開発する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年度においては、検討対象地域である鳥取県域の全計測震度観測点を調査し、主に常時微動を用いて震動特性を把握する。県の防災業務に支障を及ぼさず、情報ハイウェイを介して計測震度計から地震発生に関するデータを取得する手法を開発する。

平成 27 年度においては、県内に比較的高密度に展開された観測網を用いて、震源を推定せずに地震発生と各地域の揺れの規模を推定する新たな方法論に基づくシステムを構築する。

平成 28 年度においては、実際の観測記録を用いて揺れの予測を補正して予測パラメータを自動更新し、精度を上げる仕組みを新たに開発する。得られた結果を関係機関に伝達、表示する仕組みについて、気象業務法に配慮しつつ検討する。

平成 29 年度においては、試作したパイロット・システムの運用を通じて課題を抽出し、それらを解決することを通じて信頼性の向上を図る。他地域の自治体における実施可能性を調査し、ネットワークの広域化を検討する。

平成 30 年度においては、パイロット・システムの運用を通じてシステムの信頼性を向上させ、成果と課題をとりまとめる。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

【平成 30 年度成果概要】 今年度の実施内容と成果は以下の 3 項目である。

(1) 鳥取県管理の計測震度計 34 点からの 1 秒パケットのリアルタイム震度と最大加速度値を、鳥取県情報ハイウェイを介して継続受信している。この情報を基に気象庁緊急地震速報で導入される PLUM 法を用いたリアルタイム震度の表示システムを試作したが、これに PLUM 法では考慮されていない距離減衰を導入し、また 1 km メッシュとした予測点全てを 2 次震源とする波動伝播を考慮した。さらに、P 波を用いた震度予測の概念の導入も試みた。これらを 2016 年 10 月 21 日に発生した鳥取県中部の地震のリアルタイム震度を模擬したデータに適用したところ、より早く、かつ精度良く震度分布の予測が可能となった (下図参照) 。

(2) 震度計観測点における震度情報から周辺の非観測点での震度を予測することを想定し、常時微動を用いた地盤震動特性の稠密把握および地下構造モデルの構築を実施した。平成 30 年度は、既往観測点分布が粗な地域のうち、北栄町、倉吉市関金地区、および智頭町を対象とし、既往データを補間した卓越周期分布および浅層地下構造モデルを得ることができた。

(3) 平成 28 年 10 月 21 日に発生した鳥取県中部の地震 (M6.6) の被災域および 2000 年鳥取県西部地震の境港市では、上記 (2) で実施したような、常時微動を用いた地盤卓越周期や地下構造モデルでは説明できない強震動が観測された。これらは非線形地盤応答による卓越周期の長周期化や短周期地震動の減衰による影響考えられ、これらの観測点における非線形地盤応答の実態について検討をおこなった。

【5 年間の成果概要】 これまでの 5 年間における成果を以下の 4 項目にまとめる。

(1) 鳥取県管理の計測震度計 34 点に、現業に支障が無いように配慮した上で、1 秒パケットのリアルタイム震度と最大加速度値を配信する改良をおこない、そのデータを鳥取大学で受信するシステムを構築した。2016 年 10 月 21 日に発生した鳥取県中部の地震には間に合わなかったが、それ以降は安定的に動作を継続している

(2) 上記の情報を基に、PLUM 法を基礎としたリアルタイム震度の表示システムを試作し、2016 年鳥取県中部の地震模擬したデータを用いて有用性を確認している。ただし、現状ではネットアプリとはなっておらず、今後の課題である。

(3) リアルタイム震度を予測する際の地盤増幅特性を広域に把握するために、常時微動を用いた地盤震動特性の稠密把握および地下構造モデルの構築を鳥取県内各地の堆積地盤で実施した。

(4) 2016 年鳥取県中部の地震に際して、共同利用機器を用いた余震観測および被災地域での常時微動探査を実施し、同地震による強震動の実態と被災に及ぼした地盤応答の要因について多角的な検討を実施した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

吉田昌平・香川敬生・野口竜也, 2018, 2016 年鳥取県中部の地震における臨時余震観測に基づいた広域の強震動評価, 土木学会論文集 A1, Vol.74, No.4(地震工学論文集第 37 巻), I.417-I.428.

野口竜也・西川隼人・香川敬生・吉田昌平, 2018, 2016 年鳥取県中部の地震における非線形地盤応答の基礎的検討, 土木学会論文集 A1, Vol.74, No.4(地震工学論文集第 37 巻), I.1010-I.1016.

香川敬生・野口竜也, 2018, 自治体震度計ネットワークを用いたリアルタイム震度評価の試み - 鳥取県の事例 -, 日本地球惑星科学連合大会 2018 年大会, SCG65-06.

神定 健二・高橋 功・篠原芳紀・香川 敬生・三宅弘恵, 2018, 東京都市部における地震防災のための震度分布図のリアルタイム推定, 日本地球惑星科学連合大会 2018 年大会, SCG65-05.

野口竜也・中井翔・吉見和・上野太士・日高大我・西川隼人・吉田昌平・香川敬生, 2018, 2016 年鳥取県中部の地震による被害要因と地盤震動特性の把握, 日本地球惑星科学連合大会 2018 年大会, SSS14-P16.

- 香川敬生，2018，自治体震度計ネットワークを用いたリアルタイム震度評価の試み - 鳥取県の事例 - ，土木学会第 38 回地震工学研究発表会，C12-1294.
- 西村武・西川隼人・野口竜也，2018，2016 年鳥取県中部の地震を対象とした木造建物の最大応答変形角評価式の検討，土木学会第 38 回地震工学研究発表会，A22-1363.
- 香川敬生，2018，高密度の震度計ネットワークを用いた震度分布の即時推定 - 鳥取県の事例 - ，日本地震学会 2018 年度秋季大会，S13-12.
- 香川敬生・野口竜也・向坊恭介，2018，1943 年鳥取地震による鹿野断層近傍における強震動の推定と被害との対応，第 15 回日本地震工学シンポジウム，OS2-03-07.
- 野口竜也・中井翔・日高大我・吉見和・西川隼人・吉田昌平・香川敬生，2018，微動および地震観測に基づく鳥取県中部域の地盤構造推定と地盤震動特性の把握，第 15 回日本地震工学シンポジウム，OS2-03-08.
- 香川敬生，2018，鳥取県震度計ネットワークを利用した震度分布の即時推定 - 課題と対応 - ，平成 30 年度東京大学地震研究所協同利用研究集会「地震動のリアルタイム解析：防災・減災に向けた即時的な活用を目指して」，講演番号 6.
- 神定健二・高橋功・篠原芳紀・香川敬生・三宅弘恵，2019，自治体震度計観測網の次期更新計画への提案 観測網の拡充とデータのリアルタイム化 ，平成 30 年度東京大学地震研究所協同利用研究集会「地震動のリアルタイム解析：防災・減災に向けた即時的な活用を目指して」，講演番号 7.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

現計画で試作し有用性を確認したリアルタイム震度分布予測システムについて，地震防災業務の現場である自治体（鳥取県）での活用を模索する。加えて，研究期間に蓄積した鳥取県内の地盤震動特性および地下構造モデルを現業に活用するための共同作業を開始する。今後実施する地震被害想定の高高度化および，地域住民への周知への活用を模索し，地域における災害の軽減への貢献を目指す。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

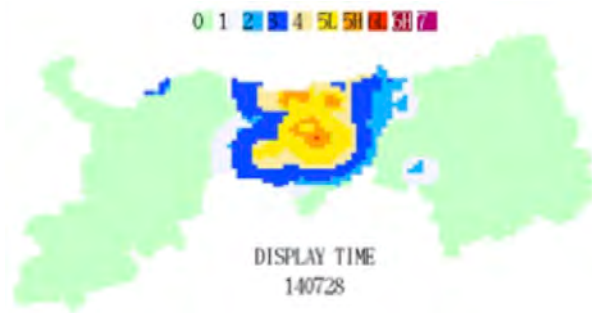
鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授 香川敬生
鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 助教 野口竜也
他機関との共同研究の有無：無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：鳥取大学大学院工学研究科
電話：0857-31-5183
e-mail：en-syomu@adm.tottori-u.ac.jp（庶務係）
URL：http://www.tottori-u.ac.jp/

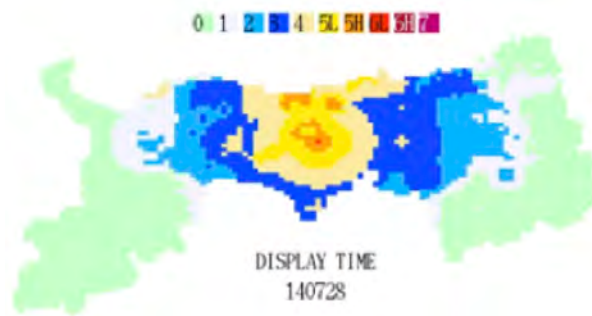
(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：香川敬生
所属：鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻



鳥取県震度ネットワークを用いたリアルタイム震度表示例 (1)

PLUM 法に距離減衰を考慮し全予測点を 2 次震源とした場合，2016 年鳥取県中部の地震の事後評価，緊急地震速報（予報）発令時



鳥取県震度ネットワークを用いたリアルタイム震度表示例 (2)

上記に P 波震度を併用，2016 年鳥取県中部の地震の事後評価，緊急地震速報（予報）発令時

(1) 実施機関名：

高知大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

四国前弧域から中央構造線北方にかけての観測高度化による地震発生場の研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

燧灘の伊吹島、魚島における地震観測を高度化し、地震観測データの充実を図ることで、四国前弧域から中央構造線北方の領域における地震発生場の状態解明を目指す。対象地域における地震波走時データ、発震機構解データを蓄積することで、地震発生場の状態を解明するための資料となる地殻応力状態の分布や地殻構造モデルを構築する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

燧灘の伊吹島、魚島における地震観測は発震機構解解析に対して、地理的に非常に重要である。そのため両島の観測点に対して平成 27 年度は、携帯電話回線等を利用したテレメータ機能を付加することにより両観測点データの利便性を向上させる。テレメータについてはリアルタイム・全波形転送のテレメータが望ましいが、回線品質、通信速度を勘案し、最低限観測状況のモニタが可能なシステムの構築を行う。地方自治体や小中学校等、地域コミュニティーへの情報提供もシステム構築の際には考慮する。あわせて、京都大学が実施する四国を縦断する臨時地震観測と連携を図るため、双方の観測点状況について情報の交換を実施する。

平成 28 年度は、燧灘での地震観測を維持・継続し、観測データを蓄積し、四国前弧域から中央構造線北方を対象とした地震の発震機構解の推定を行う。プレート形状に関する課題(京都大学)と研究連携も実施する。

平成 29 年度は引き続き、観測および対象地域における地震の発震機構解の推定を継続し、対象地域における地震波の走時解析により、 V_p/V_s 分布の推定を行う。地震波速度構造推定に関する課題(京都大学)と研究連携も実施する。

平成 30 年度は地震観測を維持・継続しつつ、さらに観測データを蓄積する。対象地域における地震の発震機構解の推定を継続し、応力解析、 V_p/V_s 分布の推定、トモグラフィ解析を行う。京都大学実施する課題（レシーバ関数解析、トモグラフィ解析）との対照・比較を行い、対象地域における応力 - 間隙流体相互作用について考察し、地震発生場の状態を解明する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要：

平成 30 年度は地震観測を夏まで維持・継続し、観測データを蓄積を行った。その後、観測点は撤収した。対象地域における地震の発震機構解の推定を継続したが、解析に利用可能な地震数が十分ではなかったため、応力解析、 V_p/V_s 分布の推定、トモグラフィ解析は行うことができなかった。平成 29 年度の成果として、熊本地震時に震源決定時に得られる観測点補正値が震源域近傍の観測点において変化したことが認められた。この現象を検証すべく、地表付近で観測点補正値を変化させうる現象・変動について精査を行った。

本課題において、四国前弧域から中央構造線北方にかけての燧灘を対象とした、地震観測点の IoT による観測高度を進めルことができた。無線データ通信網の発達に伴う通信環境の改善によって、地震波形データ伝送、観測点運用状況の把握が可能となった。しかしながら、観測対象地域の地震活動はあまり活発ではなく、目標とした応力場解析、トモグラフィ解析に進むことができなかった。余震活動が活発な 2016 年熊本地震の震源域近傍を対象とした解析では、震源付近の状態変化を示唆する観測結果が得られた。この変動が観測点近傍のみに由来する現象ではないことを検証するため、ごく浅層地盤構造の時間変化の原因となりうる現象を調査した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
特になし

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：
特になし

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：
大久保慎人、田部井隆雄、山品匡史（高知大学）
他機関との共同研究の有無：有
京都大学防災研究所：澁谷拓郎

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：高知大学理工学部附属 高知地震観測所
電話：
e-mail：
URL：<http://www.kochi-u.ac.jp/>

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者
氏名：大久保 慎人
所属：高知大学理工学部附属 高知地震観測所

(1) 実施機関名：

九州大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震・火山相互作用下の内陸地震・火山噴火発生場解明およびモデル化の研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料, 考古データ, 地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本課題においては、大きく二つのカテゴリで研究を進める。ただし、相互はデータから解析まで密接な連携を持って進める。

A) 地震発生場と火山の作用

i) 応力・ひずみ速度場のモデル化

・ 応力・ひずみ急変域での 15km 程度の分解能の空間的特性把握(九州地域)

・ 背景構造(速度、減衰、D90 等)の推定(九州地域)

・ 対象領域外からの場の擾乱の検出

・ カルデラを含む活動的火山地帯である北海道東部において GNSS 観測・地殻弾性層厚調査等による地殻不均質場とひずみ集中のモデル化を実施する。

・ 5 年間で九州地域において 15km 程度の分解能を持つ、弾性体としての地殻応答モデル構築と、下部地殻の作用検出を進める。それとともに北海道東部でのモデルとの比較から、伸張場・圧縮場における火山の力学的作用についてモデル化を行う。

ii) 地震活動・間隙流体

・ 九州中部地域において 10km 分解能での比抵抗構造を推定

・ 発震機構解の高精度推定による応力場、間隙水圧の推定

3) 1)、2) で得られる成果と合わせた地震発生様式のモデル化(有限要素法等の数値シミュレーションによる観測データのモデル化)

B) 噴火発生場

前項で得られる背景構造より詳細な、阿蘇、九重、始良、洞爺、屈斜路地域での構造推定。

- ・地殻深部から火山体浅部におけるマグマ供給系モデル化
- ・深部供給系の時間変化抽出可能性の検討（阿蘇）
- ・流体の熱力学的状態と、振動を特徴づける振幅・周波数の関数としての無次元数を用いて、系の不安定性を評価できる「トリガリング・ダイアグラム」の作成

(7) 本課題の5か年計画の概要：

A) 地震発生場と火山の作用

ひずみ集中領域の形状を把握することが、力学的モデル化をするうえで必須である。このため、別府島原地溝帯においてGNSSのオンライン観測を行う。これによって、定常変形（5年のタイムスパンでの）を明らかにできる。また、現在9年周期で起こっている豊後水道スロースリップを適切な配置で観測し、数か月程度の時定数での変動に対する応答特性を検出する。

地殻不均質構造とひずみの集中が見られる北海道東部でGNSS観測を実施し詳細なひずみ場を求めるとともに、地殻熱データ等から弾性層厚を推定し、ひずみが集中するメカニズムのモデル化を試みる。

応力場については、応力・ひずみ急変域での15km程度の分解能の空間的特性把握（九州地域）を行うために、別府島原地溝帯に現在の定常観測網を補完する臨時地震観測点を設置する。さらに、発震機構解を精度良く求めることが重要となるため、規模の大きな地震に対しては機動観測を実施する。これらの観測によって、現在20km程度の分解能の応力場・地震発生層厚分布は別府島原地溝帯で15km程度が実現できる。

比抵抗構造については、鹿児島県、福岡県を除いた九州中心部で広帯域MT観測を行い、空間解像度10kmの比抵抗構造を30kmの深度まで求める。阿蘇-九重周辺域においては、阿蘇周辺の既存のデータを利用しつつ、さらに高密度なMT探査を行い、空間解像度を3kmの比抵抗構造を得る。構造解析においては電場と磁場の測定場所が離れていることを考慮した3次元インバージョンを行う。

以上のひずみ速度場、応力場、地震発生層厚、背景構造を用いて広域のモデル化を進める。これらは次のステップを進める。

1. 地震発生層厚・背景構造を取り入れた弾性体モデルによるひずみ速度場・応力場の再現
2. プレート境界のカップリングを取り入れたモデル化
3. 火山下の異常構造を取り入れた地殻応答のモデル化

基本的には中国・四国・九州全体でのGNSS解析をもとに初期モデルを作り、期待される応力場と比較する。1では定常変形や東北地方太平洋沖地震時の応答再解析データを中心とする。2ではプレート間カップリングが一様でなく、九州へのローディングが一様でないことから、これらを導入して外的な境界条件に拘束をあたえる。3では、豊後水道スロースリップ（過去のデータも併せて）を用いてモデル化する。北海道地域では屈斜路カルデラを中心としたモデル化を行うが、領域は広くないために、1+3を進める。両地域で得られたモデルを比較することで、地震発生場に対する火山の作用の一般的なモデル化につなげる。

B) 噴火発生場：

噴火発生場は有珠火山（洞爺カルデラ）、阿蘇火山（阿蘇カルデラ）、桜島火山（始良カルデラ）を対象とする。レシーバー関数解析あるいは走時トモグラフィにより上部マントルまでの地震波速度構造を明らかにする。求められた地震波速度構造と比抵抗構造から上部地殻および下部地殻における流体の存在範囲およびその存在様式を明らかにする。

噴火発生場については、GNSS観測や水準測量などの地殻変動観測により、マグマ蓄積の位置とマグマ蓄積率の時間変化を把握するとともに、大規模噴火のポテンシャル評価を行なう。さらに、すべてのカルデラの研究結果を比較検討することにより、カルデラにおけるマグマ供給系の理解を深める。

一方、地震による噴火への作用も重要な要因のひとつである。強制力が働いたときの流体の挙動は、その温度圧力条件によって大きく左右されるだけでなく、その振動の振幅と周波数によっても影響さ

れる。そのために、アナログ物質を用いた実験による気泡挙動の基本的理解を行う。すなわち1)気泡の離脱条件に対する振動の振幅と周波数の影響の定量的理解。2)発泡を伴うクラック上昇に対する振動の影響の解明。マグマの地表付近の移動と遠地地震の関係についてモデル実験を通して明らかにする。

年次計画としては以下のとおりである

- 平成 26 年度 九州：GNSS 観測点設置
臨時地震観測点設置
広帯域 MT 観測（熊本 大分、九重）
GNSS 観測（阿蘇）・地震観測（阿蘇、加久藤（霧島））
RF 解析@阿蘇、加久藤、始良、北海道：GNSS 等の観測・調査や地殻熱関係データ等収集を開始
RF のためのデータ収集（屈斜路）
室内実験：アナログ実験装置作成
- 平成 27 年度 GNSS 観測・広域地震観測およびデータ解析（九州）
広帯域 MT 観測（大分 - 熊本 - 宮崎）
GNSS 等の観測・調査や地殻熱関係データ収集を継続（北海道）
RF 解析@阿蘇、屈斜路
RF のためのデータ収集 洞爺（有珠）
各種既存構造資料の収集・整理
室内実験
- 平成 28 年度 広域地震観測およびデータ解析（九州）
GNSS 観測（阿蘇）地震観測（阿蘇、霧島）
広帯域 MT 観測（宮崎 鹿児島）
GNSS 等の観測・調査を継続するほか地殻弾性厚推定等を実施（北海道）
RF 解析@洞爺（有珠）
減衰構造推定
地下構造・力学構造モデル化
室内実験
- 平成 29 年度 広域地震観測およびデータ解析（九州）
GNSS 観測（阿蘇）地震観測（阿蘇、霧島）
RF 解析@阿蘇、始良、加久藤
GNSS・地震等観測・調査およびデータ解析
地下構造・力学構造モデル化
ひずみ・応力・地殻変動場のモデル化
噴火に伴う地震に関するひずみ・応力場の検討
広帯域 MT 観測（長崎 佐賀 福岡、阿蘇）
室内実験：地下流体の熱力学状態についての観測結果の吟味
- 平成 30 年度 GNSS・地震等観測・調査およびデータ解析
広帯域 MT 補完観測およびモデリング
阿蘇水準測量
ひずみ・応力・地殻変動場のモデル化
トリガリング・ダイアグラムの作成

(8) 平成 30 年度及び計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要：

本課題では地震火山相互作用下の内陸地震発生場・噴火発生場の研究として到達点を設定し、研究を進めてきた。その中で 2016 年熊本地震が発生し、被災するなど状況の変化で計画の一部変更を余儀な

くされたが、観測体制を立て直し、現共同研究体制や多くの大学の支援の下、充実させて目的のよりいっそうの推進を図った。

X) 熊本地震

2016年4月14日から始り、16日にはM 7.3の最大地震が発生し多くの被害をもたらした、熊本地震の一連の活動について、現在に至るまで全国の大学と協力して観測および解析を進めた。

背景場：

地震波速度トモグラフィ法を用いて、詳細な速度構造(Shito et al., 2017)を得ることができた(H29)。地震時のすべり分布との対比から、大きなすべりは比較的高速度領域で起こった。また、D95から見られる地震発生層内ですべりが大きいことが明らかになった(H29)。また、臨時地震観測網を含めた解析により(図1)、地震波散乱強度が布田川断層・日奈久断層の接合部付近を中心として高いことが見出され、高周波数帯での非弾性減衰が断層帯の北西側で強いことが明らかになった(H30)。これは従来の研究で得られている様々な構造特性と同様な結果であり、短波長不均質構造が断層の分岐等によって発達しているものと考えられる。

応力場は、熊本地震発生前後の地震の発震機構解から推定し、地震前後で変化することが明らかになった。布田川断層延長部や日奈久断層延長部ではせん断応力が増加していることが検出された。また、差応力推定を試みた結果、布田川-日奈久断層では地震前から数Mから数十MPaの大きさを持っている結果が得られた。すなわち相対的に差応力が高い領域で大地震が発生したことになる。また、熊本地震発生後も必ずしも領域全体で応力が低下したわけではなく、依然として差応力が高いことも明らかになった(H30)。

非弾性変形場は熊本地震前のデータから推定され、この地震は非弾性変形が大きい領域の縁で発生していることが示された(H28)。つまり、この変形の結果、応力の再配分がなされて地震発生に至った可能性を示唆している。

以上の結果は今後の地震発生ポテンシャルを考える上で重要である。

地殻変動：

2016年熊本地震の余効変動の観測を継続した。余効変動が継続していた日奈久断層東側の観測点で、2018年7月ころから東西成分では余効変動が止まったように見える。南北成分については、変動は小さくなったものの現在も余効変動が継続している。

断層形状、地震時すべりと応力場：

3次元速度構造から再決定された震源分布を用いて、詳細な熊本地震断層面形状を特定した(H29)。これらを基にして、前述の応力時間変化を検出し、モデル化を行った。また、熊本地震発生前の震源分布からはこれらの地震断層を明確にイメージすることは困難であった。これは今後の地震発生ポテンシャルを評価するための断層面想定を行う際に考慮すべき重要な点である。

M6.5以前のデータから応力場は地震発生前に不均質な状態であったことが明らかになり、地震前応力場から期待される断層面上のすべり方向は一致する部分が多いことがしめされた(H28)。さらに、本震のすべり面は応力場から期待される最適面と一致しない部分を見出し、強度が弱い部分の存在を示唆している。これは流体の寄与によると考えられ、相澤・他(2017)の指摘する低比抵抗層が関与していると考えられる。このような部分が地震時すべりをより大きくする作用がある可能性を示した(H30)。

比抵抗構造：

熊本地震震源域周辺の80点のデータを用いて行った3次元解析では、M5クラスより規模の大きい地震の破壊開始点は、低比抵抗領域のへりから外側5km以内に位置すること。熊本地震の大すべり領域は、低比抵抗領域にはさまれた数100から数1000 mの高比抵抗領域に対応していることなどがあきらかになった(後述)。

これらは本震発生や日奈久、布田川断層にわたる地震の連動は深部低比抵抗層が強く関与していることを示唆している。また、低比抵抗値を定量的な基準を持って評価する試みが始められた。これらは地震発生ポテンシャル推定にとって重要なアプローチである。

以上のように、背景場と地震断層の関係が明らかになってきた(図3に模式図を示す)。今後はこれらのさらに定量的なモデル化が必要とされる。

A) 地震発生場

ひずみ集中領域の形状を把握することが、力学的モデル化をするうえで必須である。このため、ひずみ速度場、応力場、地震発生層厚、背景構造を用いて広域のモデル化を進めた。

i) 応力・ひずみ速度場のモデル化

九州地域においては臨時地震・地殻変動観測を継続的に実施し、これらを把握してきた。

・背景構造(速度、減衰、D90等)の推定(九州地域)

九州全域において、地震波エンベロープの形状等から非弾性・散乱減衰の2次元構造を推定した。ひずみ集中域である阿蘇・九重周辺で減衰が大きいことが見いだされた(H27)。また、地震の発震機構から求めた非弾性ひずみの空間分布では熊本、別府周辺で大きくなり、最大で10⁻⁷/yr程度であることが分かった。これは中小地震によって解放される弾性ひずみがこのオーダーとなり、活断層の活動繰り返しによるものと同程度に達することが明らかになった(H28)。3次元速度構造を用いて詳細に震源を再決定することで地震発生層の上限下限(D5, D95)を推定した(H28)。今期計画の一つの目標は大地震発生が地震発生層の厚さに支配されているか?という問題に答えることであった。これは発生層下限で規定される脆性層が周辺から載荷される応力を支えているとすると、層厚が薄いところで応力が高く、地震発生ポテンシャルが高いと考えるモデルである。しかしながら、2016年には最も層厚が大きい熊本地域において熊本地震が発生した。また、先に述べたようにこの地域では周辺より応力が高かったことが示された。この結果は、幾何学的な層形状だけでは少なくとも内陸地震サイクル内での応力集中は評価できないことが示された。一方では脆性層が厚いことで断層面積が広くなりうるという点では違う角度で地震発生層厚をポテンシャル評価には用いるべきであることが示唆されている。

・九州の広域地殻変動:

現在の地殻変動状態の長期間にわたる詳細な把握は、応答特性を知る上で重要である。そこで、5年間GNSSによる観測を継続し、これからも継続予定である。H30では2011年東北地方太平洋沖地震の九州内の地震時変動について、変位をグリッドに内挿する方法ではなく、観測点で作る三角形の内部でのひずみを求める方法で求めた。平滑化を考慮するとほぼ同じひずみ分布であるといえる。また、フィリピン海プレートの固着の影響を取り除いた変位速度を用いてひずみ分布を求めたところ、阿蘇山から別府湾にかけてのひずみの変動幅が小さくなった。今期計画5年間で九州の地殻変動を把握するため、13点のGNSS連続観測点を設置し、GEONET観測点のデータと統合解析を行い日々の座標変化を計算した。このデータから変位速度を求め、九州内のひずみ分布を佐藤他(2002)の方法で計算した。また、2011年東北地方太平洋沖地震の地震時変動によるひずみ分布を求め、一様でないことがわかった。しかし、有限要素法を用いた一様でないことの原因を探るところまではいかなかった。

・北海道:

平成30年度は、屈斜路カルデラ周辺においてGNSS観測を実施し、地殻変動速度およびひずみ場の推定を行った。また、この結果を説明するための力源等について検討を行った。GNSS観測の結果から、カルデラ中心部で1ppm/yrを超える収縮は一定の線形的な変動として継続していることを確認した。この値は、プレート収束に伴う広域の北東-南西短縮、カルデラ内のマグマだまりおよびカルデラ構造を考慮した有限要素解析による予測値よりも数倍大きい。そのため、カルデラ中心部の火山性の力源を仮定し、観測されたひずみ場の説明を試みたところ、深さ10km前後での10⁻⁶m³/yrの収縮が推定された。この場合、水平地殻変動場は概ねよく再現されるものの、上下変動については過剰の沈降が予測され観測値と一致しないため、マグマ活動の推定においてもカルデラ内の構造の影響などを考慮する必要があることを確認した。また、2016年から2017年にかけては、カルデラ南西部で比較的大きな伸長ひずみが発生しており、南西部にある雌阿寒岳周辺の一時的なマグマ活動が原因である可能性が高いことを明らかにした。この一時的な火山活動による屈斜路カルデラ内への影響はほとんどないが、カルデラ周辺のひずみ場とそれに伴う地殻活動を把握するためには、周辺の影響についても考慮が必要であることがわかった。

今期5カ年の成果としては、地殻不均質構造とひずみの集中が見られる北海道東部屈斜路カルデラにおいて、GNSS観測を実施し詳細なひずみ場を求めた。また、地殻熱データ等から弾性層厚を推定し、ひずみが集中するメカニズムのモデル化を試みた。

GNSS観測では、屈斜路カルデラ周辺の約15点の機動観測および周辺の連続観測から地殻変動場およびひずみ速度場を明らかにした。太平洋プレートの沈み込みによる広域的な北東-南西方向の短縮に加え、カルデラ内で約1桁大きい、1 ppm/yrを超える収縮ひずみが一定速度で発生していることが捉えられた(図4 a,1b)。ひずみ速度が最大となる地域は、浅部低比抵抗域や1993-1995年の隆起イベント域と対応する。2016年から2017年にかけて観測されたカルデラの南西部で観測された伸長場は、雌阿寒岳周辺の火山活動による可能性が示唆される。

過去100年間にM6クラスの地震が4回発生しているものの、地表には地震性活断層は認められていないため、1983年(M6.0)の震源域と見られる屈斜路湖南部において、音響反射法による湖底の変動地形調査を実施した。断層を示す変動地形は確認されなかったものの、この地震時に発生した可能性がある湖底地すべり堆積物が確認され、地震時津波の発生要因の可能性が示唆された(図5)。

温泉井温度データによる温度構造に基づく弾性層厚の推定では、カルデラ内で地温勾配が8-10 /100 mと高い値を示した。地殻の脆性延性境界と考えられる350 等温プロファイルの作成から、カルデラの南東の前弧側および北東の背弧側では等温線の深さが10 km程度であるのに対し、カルデラ内では3 km程度と浅くなることが明らかになった(図4 c)。この分布は、1次元速度構造を推定した震源の再決定による震源分布とも概ねよく一致する。

観測された地表ひずみ場、脆性延性境界構造を考慮し、カルデラ構造およびマグマだまりといった地殻の不均質構造をとり入れた有限要素解析を実施し、地表ひずみ場と地殻内応力場を推定した。地表ひずみ場はカルデラ構造が大きく影響し、また、地殻内応力場はカルデラ構造およびマグマだまりの存在がこの地域における応力蓄積場を形成することが明らかとなった(図6)。このことは、カルデラ構造をもつ火山特有の物性分布が内陸での地震発生の応力場形成の可能性を示唆する結果であり、屈斜路カルデラ以外の火山性の構造を持つ地域においても同様の地震発生ポテンシャルを持つ可能性を示唆する。

ii) 地震活動・間隙流体

比抵抗構造：

内陸地震と比抵抗構造の関係を探るため九州中部において約7 kmグリッド間隔でおよそ500点の広帯域MT観測、電位差観測を行った。200点規模の既存データあわせの解析により得られた知見は以下のとおりである(図7, 8)。

(1) 低比抵抗領域では地震活動は低いが、大崩山花崗岩体に代表される高比抵抗領域も地震活動が低い。地震活動が極めて低調な天草諸島も周辺に比べ高比抵抗である。

(2) 九州中央部の地震活動が低い領域や大分県東部などにおいて、上部地殻の深度に低比抵抗領域が存在する。

続いて内陸地震と比抵抗構造の関係をより詳細に見るために、熊本地震震源域、九重山、鶴見由布、霧島山の4つの地域において80点規模の広帯域MTデータを用いて3次元比抵抗構造を推定し以下の知見を得た。(図9, 10)

(3) 中下部地殻の10 m以下の領域の地震活動は低く、その周辺の数100から数1000 mの領域で地震活動が活発である。

(4) M5クラスより規模の大きい地震の破壊開始点は、前述の低比抵抗領域のへりから外側5 km以内に位置する。

(5) 熊本地震の大すべり領域は、前述の低比抵抗領域には含まれた数100から数1000 mの高比抵抗領域に対応している。

中下部地殻の10 m以下の低比抵抗領域を温度400 Cを超える超臨界水に代表される流体が豊富に存在する領域と解釈すると、高温で流体が豊富な領域では地震活動が低く規模の大きな地震が起こらないこと、微小破壊の開始から地震規模が大きくなるために流体が役割を果たしていることが示唆

される。さらに流体は破壊の収束にも寄与していることも示唆された。M5 より規模の大きい地震は数 100 ~ 数 1000 m の高比抵抗領域で起こり、10 m 以下の低比抵抗領域、10000 m を超える超高比抵抗領域では規模の小さい地震に限定されるという結果が得られた。

・発震機構解の高精度推定による応力場、間隙水圧の推定

熊本地域では発震機構解のばらつきが大きく、間隙流体圧が高い可能性が示唆された。しかしながら広域応力の構造不均質が大きく、間隙流体圧の定量的推定を行うことが困難となり、今後の課題である。

iii) 地震発生様式のモデル化 (有限要素法等の数値シミュレーションによる観測データのモデル化)

北海道においてはカルデラ構造、地殻熱流量のデータから試行的に応力不均質を有限要素法によってモデル化した。その結果、カルデラ構造といった火山地域特有の不均質構造がひずみ・応力分布の不均質を生み出すことが明らかになり、同時に、火山下のマグマだまりの活動による影響もイメージできた。

iV) 地震発生ポテンシャル推定にむけて

北海道屈斜路カルデラを対象として有限要素法解析によって、カルデラ内のひずみ集中、カルデラ縁辺部での応力集中などが再現できた。これによって、ポテンシャル評価の足掛かりになる。

また、熊本地域においては熊本地震発生後の応力場が推定された。この応力場に対して断層面を仮定すればすべり方向を予測することができる。現在想定できるこの地域の断層面想定 (受託研究: 熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査) に対してすべり方向を推定した。従来は単純な滑りを仮定していたがこのように応力場に対して整合的な滑りは面上で不均質となる。このような試みが今後のポテンシャル評価、強震動評価に重要であると考えられる。また、ポテンシャル評価にとって最も重要なパラメータの一つである応力場すいていについて、従来は地震が起こっている領域のみしか求めることができなかった。しかし、GNSS によるひずみ速度場からの非弾性変形検出と地震活動から得られる非弾性変形の特性を統合して、低地震活動域の応力テンソル推定の方法を開発し、推定を行った。九州においては天草周辺の非地震域に適応した結果、周辺と同様の傾向を持つ非弾性変形が進行し、応力場も同様な傾向があることが見いだされた (H30)。これは地震発生域、非地震域にかかわらず応力場を把握し、断層におけるポテンシャル評価の道筋を開く一つの取り組みである。

B) 噴火発生場:

噴火発生場は上部地殻および下部地殻における流体の存在範囲およびその存在様式を明らかにするため、レシーバー関数解析あるいは走時トモグラフィにより上部マントルまでの地震波速度構造を明らかにし、比抵抗構造から浅部の噴火に直結した構造を調査した。

また、GNSS 観測や水準測量などの地殻変動観測により、マグマ蓄積の位置とマグマ蓄積率の時間変化を把握するとともに、大規模噴火のポテンシャル評価を行なった。さらに、すべてのカルデラの研究結果を比較検討することにより、カルデラにおけるマグマ供給系の理解を深めた。5 年当初の計画模式図に成果を記入したものを図 11 に示す。

九重火山における広帯域 MT 観測・3 次元地下比抵抗構造解析

2014 年および 2015 年 9 月 ~ 10 月に、九重火山を中心とした東西約 30km、南北約 30km の領域において 63 観測点で高密度な広帯域 MT 観測を実施した (図 12)。本観測には Phenix 社製電磁探査装置 MTU-5A (京大火山研究センター所有 2 台、京大防災研所有 1 台)、Metoronix 社製電磁探査装置 ADU (東大地震研所有 7 台)、NT システム社製 ELOG (九州大学所有 10 台) を用い、各観測点に 10 日 ~ 2 週間程度設置し MT 連続観測を実施した。今年度はこの観測から得られたデータを用い、地下比抵抗 3 次元構造解析を行った。解析にあたっては硫黄山を中心とした 80km x 80km x 50 km の領域を、30 x 30 x 50 のグリッドに分割した (図 13。図中には観測点 (赤点) を含む 20km x 20km の領域のグリッドを図示)。このグリッドに基づいて 3 次元 MT インバージョンコード ModEM (Kelbert, et al., 2014) を用いて九重火山及びその周辺の地下 3 次元比抵抗構造を求めた。その結果を図 14 示す。この図には地表から (a) 500m、(b) 1000m、(c) 4150m 及び (d) 9500m の深さの水平断面を示している。図 14(b) から、地下 1km では、九重火山西側で抵抗が非常に低い (1 ~ 数 m) 領域が存在することが見られる。また図 14(d) から地下 10km では山体全体の地下に比較的抵抗が低い (数 ~ 10 m) 領域が存在することが分

かる。但し、地下 1km の低抵抗域は、4~5km で数十~100 m まで抵抗が一旦高くなり、地下 10km の低比抵抗域と連続して存在するのではないように見える（図 14(c)）。これらは地下の熱水・マグマだまりに対応するものであることが考えられるが、現在のグリッドは非常に荒いので解像度、信頼性が十分とは言えない。現在、粗いグリッドを用い、モデルの安定性を確認しつつインバージョンパラメータの最適化を行っており、この作業はおおむね完了した。今後より細かいグリッドでの計算を行い九重火山地下の詳細な比抵抗構造の推定を行う。

阿蘇火山周辺では 2016 年熊本地震による道路の寸断状況が 2019 年 1 月現在も継続している。しかし 2018 年 4 月には主要な道路の復旧作業が完了したため、我々は 2018 年 9 月 30 日から 10 月 6 日の期間において 2012 年以来となる水準測量を実施した。

水準測量は赤水、坊中、地獄・吉田、湯の谷の各路線（総延長は約 42km）で実施された。すべての水準点間の往復測量が一等水準測量の許容誤差以内で行われている。その結果、27km の閉合路線における環閉合差が 0.43mm となり、高精度の測量を実施することができた。

これまでの水準測量では、阿蘇山麓北側を不動点（基準）とした場合に草千里を中心とするゆるやかな沈降（0.5cm/year 以下）が検出されていた。しかし、今回の測量結果は、2016 年熊本地震による地殻変動を反映するもの（2012 年 9 月と比較すると草千里周辺で約 50cm の沈降）となった。えられた比高値を今後の火山活動による地殻変動を検出する際のあらたな基準値とし、今後も繰返し水準測量を実施して行く予定である。

参加機関（京大理、京大防災研、九大理、名大環境、日大文理、東濃、東大地震研）

地震火山相互作用実験：

地震による噴火への作用も重要な要因のひとつである。強制力が働いたときの流体の挙動は、その温度圧力条件によって大きく左右されるだけでなく、その振動の振幅と周波数によっても影響される。そのために、アナログ物質を用いた実験による気泡挙動の基本的理解を行う。すなわち 1) 気泡の離脱条件に対する振動の振幅と周波数の影響の定量的理解。2) 発泡を伴うクラック上昇に対する振動の影響の解明。マグマの地表付近の移動と遠地地震の関係についてモデル実験を通して検討した。

静止場において気液界面張力を変化させた実験を行い、気泡の離脱条件を決定し、気泡の変形による necking が、気泡の離脱の基本過程であることを明らかにした。静止場での気泡の離脱条件を振動場に応用し、2つの無次元パラメータ（気泡径と振動場の振幅の比、および振動の加速度と重力加速度の比）によって離脱条件が決定されていることがわかった。次のポテンシャル評価の手法と合わせると、気泡の離脱によるマグマだまりの不安定化によるトリガリングダイアグラムが描ける。

流体系のモデルに基づき、間欠泉の室内実験において気泡を含む流体の体積弾性率を決定する手法を開発した。その手法を、間欠泉実験の圧力変動（微動）の解析に応用し、体積弾性率の時間変化を推定した。その結果、系統的周波数変化の要因が、熱水だまり中のガス相の存在度の変化であることを明らかにした。これによって噴火発生のポテンシャル評価の手法につながる道筋が示された。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

Muramatsu D., Aizawa K., Yokoo A., Iguchi M., and Tameguri T. (2018), Estimation of Vent Radii from Video Recordings and Infrasonic Data Analysis: Implications for Vulcanian Eruptions from Sakurajima Volcano, Japan, *Geophysical Research Letters*, 45, 12,829?12,836. <https://doi.org/10.1029/2018GL079898>.

Tsukamoto K., Aizawa K., Chiba K., Kanda W., Uyeshima M., Koyama T., Utsugi M., Seki K., and Kishita T. (2018), Three-dimensional resistivity structure of Iwo-yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to shallow seismicity, surface uplift, and a small phreatic eruption, *Geophysical Research Letters*, 45, 12,821?12,828. <https://doi.org/10.1029/2018GL080202>.

相澤 広記、上嶋 誠、小山 崇夫、長谷 英彰、山谷 祐介、宇津木 充、神田 径、橋本 武志、塚本 果織、村松 弾、桜島・霧島・富士山・九重山での広帯域 MT 連続観測により推定される比抵抗構造時間変化、日本地球惑星科学連合 2018 年大会、2018 年 5 月、千葉幕張。

相澤広記・塚本果織・A. Triahadini・村松弾・林田祐人・湯浅雄平・A. Luthfian・手操佳子・松本 聡、

- 光岡 郁穂, 飯尾 能久, 酒井 慎一, 2016 年熊本地震 合同地震観測グループ, 2016 年熊本地震震源域における応力場のモデル化(3), SSS15-12, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.5.20-24, 幕張
- 林田 祐人, 松本 聡, 飯尾 能久, 酒井 慎一, 加藤 愛太郎, 0.1 満点地震観測グループ, Characteristics of focal mechanism solution of the earthquakes in the source region of the 2000 Western Tottori Earthquake based on "0.1 Manten" hyper dense seismic observation, SCG57-P20, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.5.20-24, 幕張
- 林田祐人・松本聡・飯尾能久・酒井慎一・加藤愛太郎・0.1 満点地震観測グループ, 0.1 満点観測によって得られた鳥取県西部地震震源領域における微小地震のメカニズム解の特徴について, S08-P13, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 2018.10.9-11, 郡山市
- 神園 めぐみ, 松本 聡, 志藤 あずさ, 山下 裕亮, 中元 真美, 宮崎 真大, 酒井 慎一, 飯尾 能久, 2016 年熊本地震 合同地震観測グループ, 2016 年熊本地震震源域における地震波減衰構造, SSS10-11, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.5.20-24, 幕張
- 松本聡・飯尾能久・酒井慎一・加藤愛太郎・0.1 満点地震観測グループ・鳥取県西部満点地震観測グループ, 0.1 満点地震観測でみた鳥取県西部地震震源域の余震活動による非弾性ひずみ, S23-05, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 2018.10.9-11, 郡山市
- 光岡 郁穂, 松本 聡, 山下 裕亮, 中元 真美, 宮崎 真大, 酒井 慎一, 飯尾 能久, 2016 年熊本地震 合同地震観測グループ, Change in state of stress around Hinagu fault zone through the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, SCG57-26, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.5.20-24, 幕張
- 光岡郁穂・松本聡・志藤あずさ・山下裕亮・中元真美・宮崎真大・飯尾能久・酒井慎一・2016 年熊本地震合同観測グループ, 2016 年熊本地震震源断層および日奈久断層周辺の応力場の時空間変化について, S08-P15, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 2018.10.9-11, 郡山市
- 村松 弾, 相澤 広記, 横尾 亮彦, 井口 正人, 為栗 健, 桜島昭和火口におけるブルカノ式噴火の初期段階について 可視映像および空振観測から得られる知見, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉幕張.
- Dan MURAMATSU, Koki AIZAWA, Akihiko YOKOO, Masato IGUCHI, Takeshi TAMEGURI, Initial Phase of Vulcanian Eruption at Showa Crater, Sakurajima Volcano, Japan: Insight from the Visual Movie and Infrasonic Data, AOGS 15th annual meeting, 2018 年 6 月, Hawaii USA
- 中尾 茂, 松島 健, 田部井 隆雄, 大久保 慎人, 山品 匡史, 大倉 敬宏, 西村 卓也, 澁谷 拓郎, 寺石 眞弘, 伊藤 武男, 鷺谷 威, 松廣 健二郎, 加藤 照之, 福田 淳一, 渡邊 篤志, 三浦 哲, 太田 雄策, 出町 知嗣, 高橋 浩晃, 大園 真子, 山口 照寛, 岡田 和見, 2016 年熊本地震後の GNSS による地殻変動観測(3), 日本測地学会第 130 回講演会予稿集, 173-174, 2018 . 高知市, 10 月
- 中尾 茂, 松島 健, 田部井 隆雄, 大久保 慎人, 山品 匡史, 大倉 敬宏, 西村 卓也, 澁谷 拓郎, 寺石 眞弘, 伊藤 武男, 鷺谷 威, 松廣 健二郎, 加藤 照之, 福田 淳一, 渡邊 篤志, 三浦 哲, 太田 雄策, 出町 知嗣, 高橋 浩晃, 大園 真子, 山口 照寛, 岡田 和見, Post-seismic deformation of 2016 Kumamoto Earthquake by continuous GNSS network (2), 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, SSS09-P04, 2018 . 千葉県幕張, 5 月
- 志藤あずさ・松本聡・大倉敬宏, 九州地方における地殻の内部減衰と散乱減衰の三次元構造, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, S06-P14, 2018 年 10 月, 郡山市
- Shito A., Matsumoto S., and Ohkura T., Towards more appropriate mapping of scattering and intrinsic attenuation in Kyushu, 2018 JpGU, SSS11-P15, 2018 年 5 月, Makuhari, Japan.
- 武石貢佑・神田径・木下貴裕・関香織・宇津木充・小山崇夫・上嶋誠, 霧島火山での広帯域 MT 観測, 日本火山学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月, 秋田.
- Triahadini, A., K. Aizawa, Dan Muramatsu, Kaori Tsukamoto, Keita Chiba, Saki Watanabe, Yui Odasaki, Makoto Uyeshima, Yoshiko Teguri, MAGNETOTELLURIC TRANSECT OF THE UNZEN GRABEN,

日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉幕張.

Triahadini, A., K. Aizawa, Yoshiko Teguri, Kaori Tsukamoto, Takao Koyama, Dan Muramatsu, Keita Chiba, Saki Watanabe, Makoto Uyeshima, Magnetotelluric transect of the Unzen graben and its correlation with seismic profile, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2018 年秋学会, 2018 年 11 月, 名古屋.

塚本 果織、相澤 広記、千葉 慶太、神田 径、上嶋 誠、小山 崇夫、宇津木 充、関 香織、木下貴裕、手操 佳子、村松 弾、Agnis Triahadini、湯浅 雄平、岩佐 優一、林田 祐人、Alutsyah Luthfian, 霧島硫黄山の三次元比抵抗構造と 2013 年ごろからの火山活動について, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉幕張

湯浅 雄平、松本 聡、中尾 茂、松島 健、大倉 敬宏, Characteristics of the seismic gap in west part of the central Kyushu, Japan, SCG57-P18, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.5.20-24, 幕張

湯浅雄平・松本聡・松島健・中尾茂・大倉敬宏, 天草地震空白域における非弾性ひずみの検出, S23-P16, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 2018.10.9-11、郡山市

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

「地震火山相互作用下の内陸地震空間ポテンシャル評価」として、今期計画を引き継ぎ、熊本地震震源域での地震発生ポテンシャル評価、地震火山相互作用について研究をする。次期は新たに断層・火山の流体環境としての関連を探るため、東京大学大学院理学研究科とも共同で行う。

京都大学大学院理学研究科とは同一課題内の共同研究ではなく、課題間連携として行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

九州大学大学院理学研究院附属・地震火山観測研究センター

他機関との共同研究の有無 : 有

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻 中尾茂

九州大学大学院理学研究院地球惑星科学専攻 寅丸敦志

北海道立総合研究機構地質研究所 (岡崎紀俊ほか 4 名)

(電磁気観測および噴火発生場観測は全国連携研究)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

電話 : 0957-62-6621

e-mail : hshimizu@kyudai.jp

URL : www.sevo.kyushu-u.ac.jp

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 松本 聡

所属 : 九州大学大学院理学研究院附属・地震火山観測研究センター

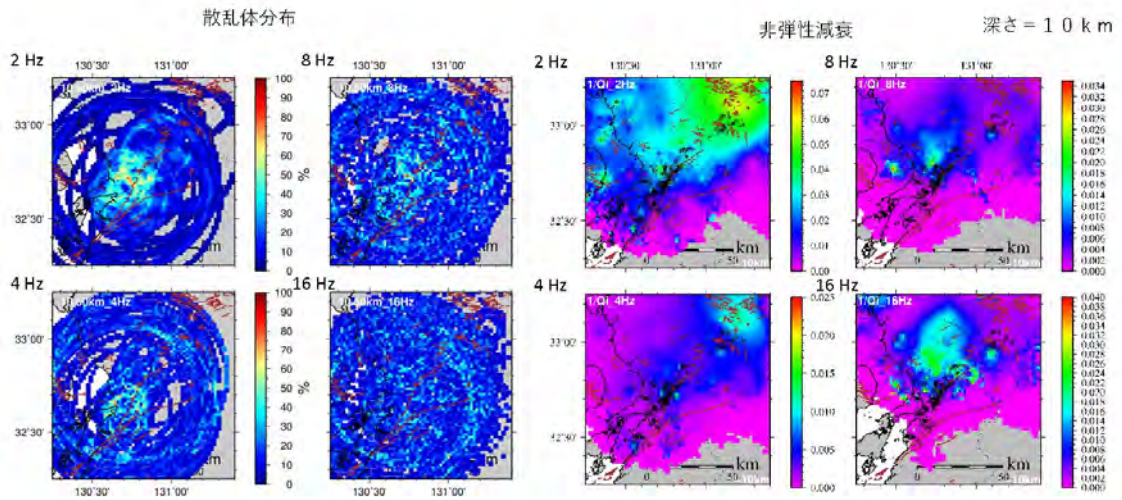


図 1

図 1 深さ 10 km における散乱体分布と非弾性減衰。暖色が散乱、非弾性減衰が強いところを示している。図中の黒丸は熊本地震の余震。

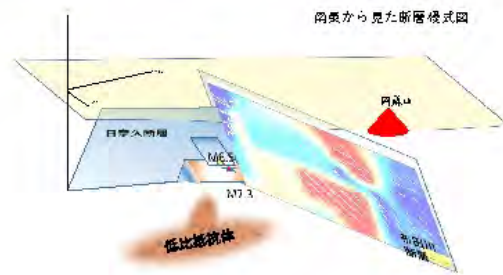
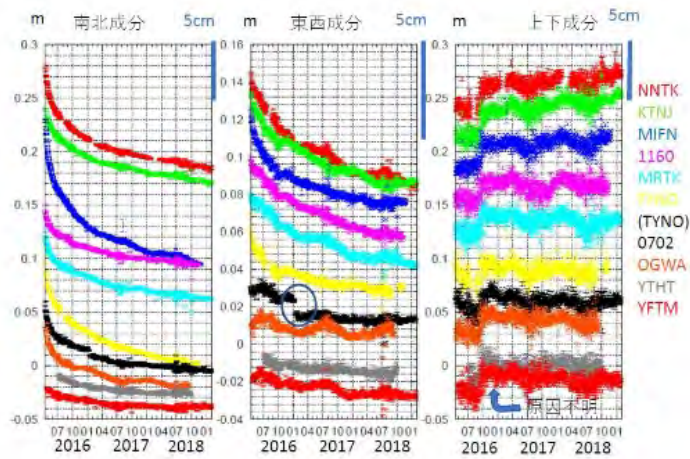


図 2、3

上：図 2 . 日奈久断層帯東側の観測点の変位。2016 年 4 月 16 日～2019 年 1 月 26 日まで。○で囲った変動は原因がわからない。

下：図 3 . 2016 年熊本地震の断層構造の模式図。布田川断層上では背景の応力場不均質によって地震時すべりが一様でないことが示された。また、破壊開始点直下には顕著な低比抵抗体が存在する。

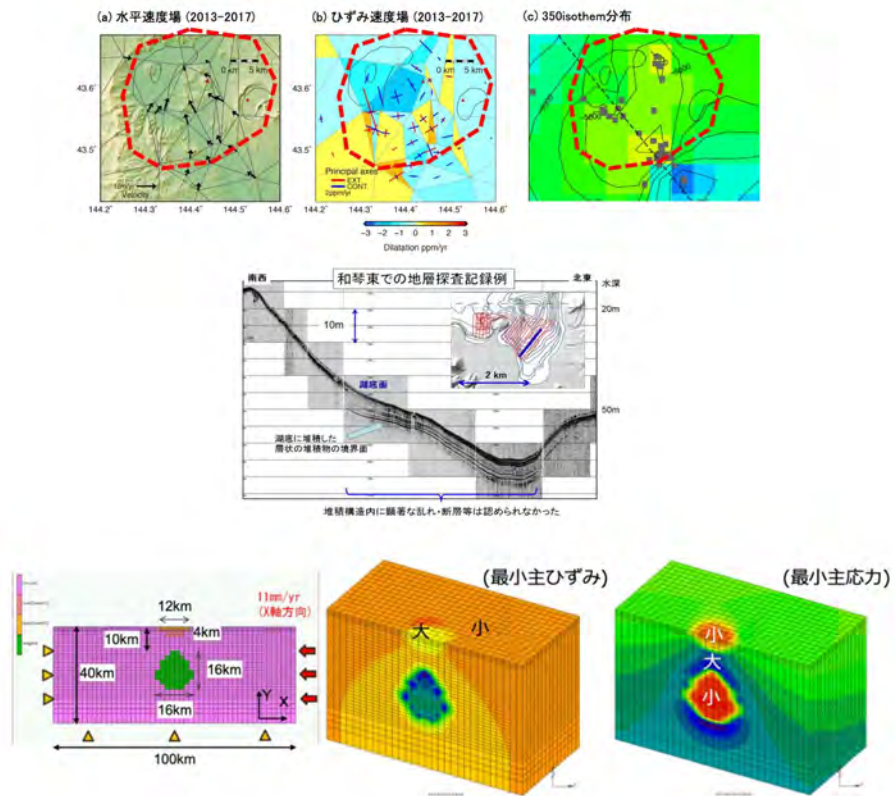


図 4 , 5 , 6

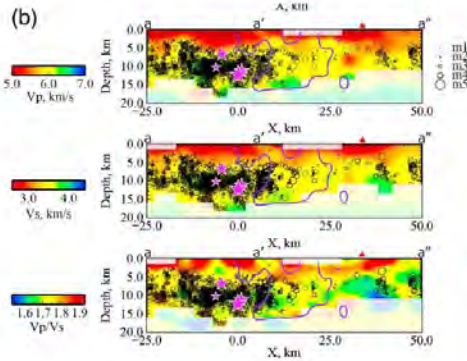
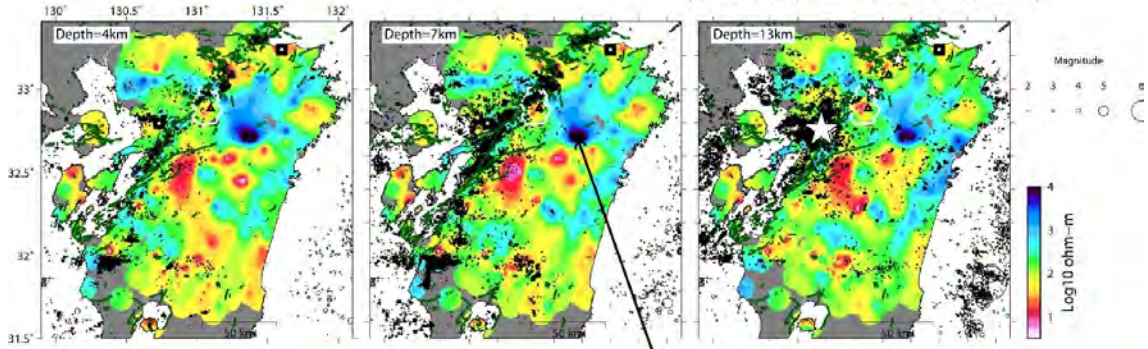
上：図 4 . 2013 年から 2017 年までの GNSS 観測による地殻変動速度場 (a) およびひずみ速度場 (b) と地殻熱プロファイルによる弾性層厚の分布 (c) . 赤の破線域がおおよその屈斜路カルデラの位置を示す .

中：図 5. 屈斜路湖底音響探査の結果 .

下：図 6. 有限要素解析の結果 . 左から設定した物性構造 , 最小主ひずみ , 最大主応力の分布 .

1-D解析による比抵抗構造

震源は九大地震火山センターによる
(1993年1月1日～2018年1月23日)

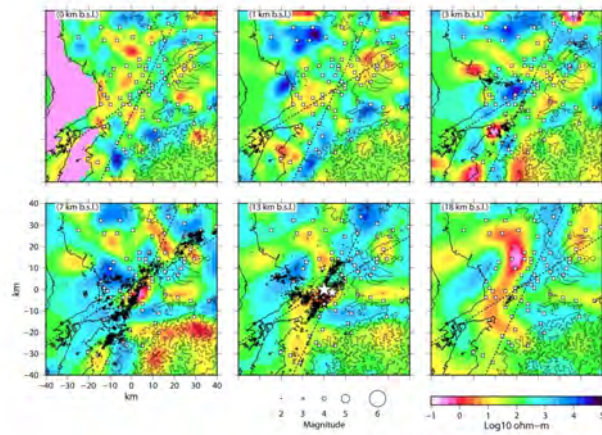


固すぎるところは地震がおこらない。

熊本地震の速度構造の結果
(Shito et al., 2018, GRL) と調和的

図 7

図 7 . 1次元解析で得られた比抵抗断面。赤 は広帯域 MT 観測点、青 は電位差観測点をそれぞれ示す。各観測点の下を1次元と仮定し Ssq インピーダンスに 10%の誤差を与え RMS が 1.0 まで収束したとき最もスムーズなモデルを採用した。断面の深さ ± 1.5km で起こった地震の震源 (1993 年 1 月 1 日 ~ 2018 年 1 月 23 日) をプロットしてある。 は熊本地震の本震の震源を示す。



相澤他., 2017, *Sgeps* 秋学会

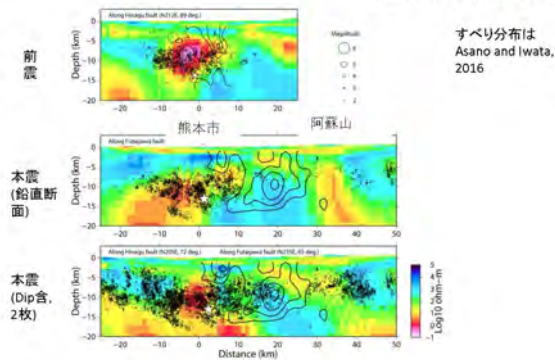
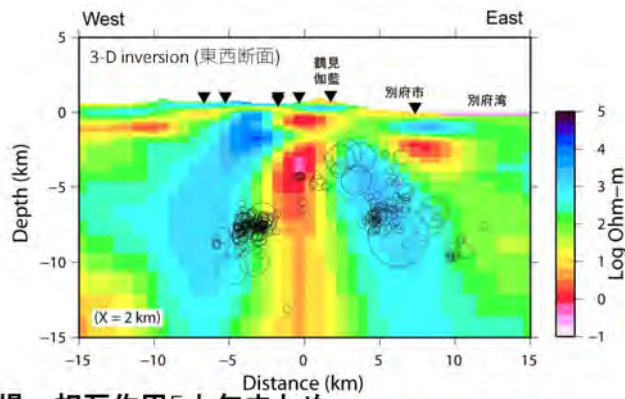


図 8 , 9

上：図 8 . は解析に使用した広帯域 MT 観測点を示す。海拔下 13km(13km b.s.l.) の断面に示した 3 つの星印は、大きいものから、本震、前震、2000 年 6 月に発生した M5.3 の地震の震源をそれぞれ示している。茶実線は活断層(活断層研究会編, 1991)を、白実線は阿蘇カルデラを示す。2 つの破線は、布田川断層帯と日奈久断層帯方向を示している。M4.7 以上の大きさの地震(期間: 2016 年 4 月 14 日~2017 年 12 月 31 日)を で示す。

下：図 9 . 3 次元解析により推定した比抵抗構造(鉛直断面)。断面の走行は前図の日奈久断層帯(上図)、布田川断層帯(中図、下図)に沿った方向の破線に相当する。布田川断層帯方向の鉛直断面(中図)と、布田川断層、日奈久断層の走行傾斜を考慮にいれて斜めに切った断面(下図)をそれぞれ示している。星印は前震と本震の震源、印は地震の震源(期間: 2016 年 4 月 14 日~2017 年 12 月 31 日)を示している。実線は熊本地震本震の推定すべり分布(Asano and Iwata, 2016)を 2, 3, 4, 5 m のコンターで表している。



噴火発生場、相互作用5カ年まとめ

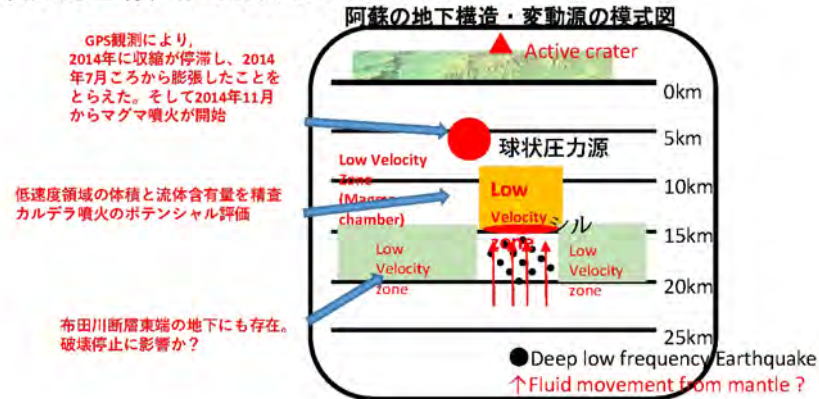


図 10, 11

上：図 10．別府鶴見火山地域の比抵抗構造。広帯域 MT 観測から推定した 3 次元比抵抗構造を東西方向に切る断面図。断面は鶴見岳と伽藍岳の間を通り別府市に抜ける。 は断面近傍の広帯域 MT 観測点、 は 1993 年～2016 年 4 月までの震源を示す。鶴見伽藍岳直下に鉛直な低比抵抗領域が存在し、その西側、東側で地震活動が活発である。この低比抵抗体は水平面内では北東 南西方向に伸びており地表断層の東西走行とは一致しない。

下：図 11．噴火発生場 5 カ年のまとめ（阿蘇火山）

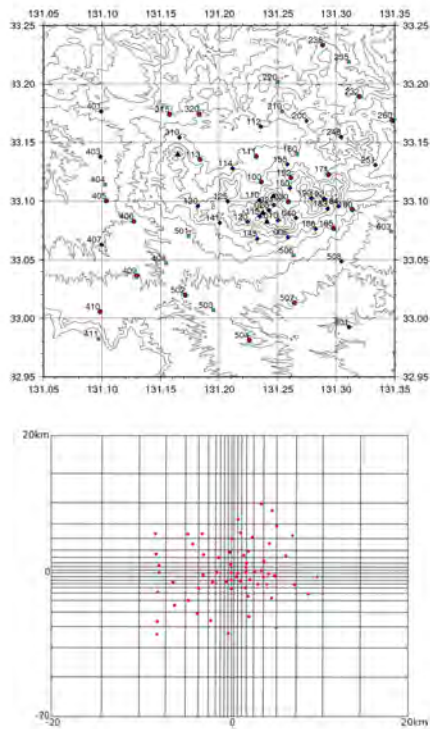


図 12, 13

上：図 12. 九重火山広帯域 MT 観測・観測点分布

下：図 13. 3次元比抵抗構造解析に用いたグリッドモデル

硫黄山 (x=0, y=0km) を中心とした 80km x 80km x 50 km の領域を 30 x 30 x 50 のグリッドに分割 (このうち図には観測点 (赤点) を含む 20km x 20km の領域のグリッドを图示)

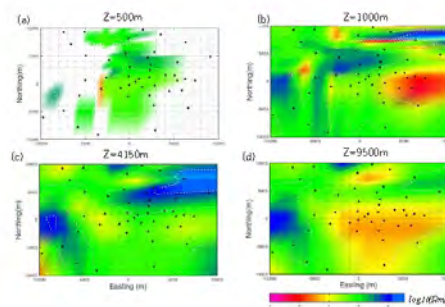


図 14

図 14. 3次元構造解析結果

地表から (a) 500m、(b) 1000m、(c)4150m 及び (d)9500m の深さの水平断面

(1) 実施機関名：

鹿児島大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

海域と島嶼域における地震・地殻変動観測による南西諸島北部のプレート境界域テクトニクスの観測研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

当該領域においては、陸域が海溝軸から 100～200 km 離れた島弧軸に沿って直線状に配列する島嶼に限定されるため、プレート境界付近の微小地震活動等の時間空間的变化の詳細な把握に限界がある他、プレート境界の 3 次元形状も十分には把握できていない。一方で、当該領域のテクトニクスの解明においては、東北日本弧や南海トラフとは異なり、背弧活動(沖縄トラフの拡大)の影響を無視できない。本課題は、精度を向上させて推定するプレート境界の 3 次元形状と沖縄トラフ拡大の寄与を考慮した地殻変動のモデリング、及び繰り返し地震の解析から当該領域のプレート間の固着域、固着率、固着状態の推移を明らかにする。また当該領域では、短期的スロースリップイベントや超長周期地震の発生が最近明らかになったことから、本課題では非火山性微動等も含めたプレート境界周辺域で発生する現象の理解を進める。これらの結果を基に、当該領域のテクトニクスについて考察し、日向灘や南海トラフとの連続性や相違点について比較する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本課題は、平成 26～30 年度において、海底地震計を同一位置に繰り返し投入し、無人島を含む島嶼域での地震観測点と併せて、島弧軸に直交する方向にも拡がりをもつ継続的な地震観測網を構築する。また、限定された陸域を最大限に活用するために、無人島や未設置の有人島における GNSS 観測を積極的にいき、平成 26 年度から 5 年を通じて地殻変動データを蓄積する。これらの海域及び島嶼域の臨時観測点データ、常設観測点データのデータを併合処理することにより、以下の項目についての観測研究を実施する。

(a) プレート境界の 3 次元形状：平成 26 年度から 5 年において、海域及び島嶼域で得られた地震観測データにトモグラフィ解析を適用し、速度モデルを推定する。平成 26 年度の 1 次元速度モデルの推定から開始し、観測データの蓄積状況に応じて、3 次元速度モデルの推定に拡張する。これらの速度モデルを適用した震源決定に基づき、海溝軸付近における反射法探査による浅部構造の先行研究と比較考察しながら、プレート境界の 3 次元形状について、精度を向上させて推定する。データの蓄積に応じて、速度モデルと 3 次元形状モデルを逐次修正する。

(b) GNSS 観測データの解析：平成 26 年度は、当該領域における剛体としてのプレート運動を求める。平成 27 年度は、観測データからプレート運動を除去することにより、当該領域の弾性変形を解明する。一方、過去に実施された構造探査の結果を用いて、地殻 - マントル境界の形状モデルを生成する。平成 28 年度は、(a) のプレート境界の推定形状をモデルに取り込み、3 次元有限要素モデルを構築する。平成 29～30 年度は、3 次元有限要素法を用いたフォワードモデリングを行い、沖縄トラフ拡大率、フィリピン海プレートの境界面の固着域、固着率を推定する。GNSS 観測データの蓄積による精度向上を図り、かつ (a) の形状モデルの修正に応じてフォワードモデリングを繰り返すことにより、モデルの改善を行う。

(c) 繰り返し地震解析、非火山性微動等の現象の理解：島嶼域及び海域で継続的に得られる地震観測データを用い、平成 26 年度から 5 年を通じて、繰り返し地震の解析から固着域、及び固着率の推定を継続して実施する。この結果を、(b) で得られる固着域、固着率と比較考察する。また、平成 26 年度から 5 年を通じて、非火山性微動等のプレート境界周辺域の現象について、発生位置の推定、活動様式を明らかにし、固着域、固着率との関係、短期的スロースリップイベント、超長周期地震との時間的空間的關係を比較考察する。

平成 30 年度は、以上の (a)～(c) の結果を基にし、当該領域のテクトニクスについて考察する。また、推定された固着の状態、非火山性微動等のプレート境界周辺域における現象の活動様式の視点から、隣接する日向灘や南海トラフとの連続性や相違点について比較考察する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度～30 年度) の成果の概要：

海域及び島嶼域における観測：

平成 30 年度は、2 航海 (4 月、及び 8 月) にわたり、当該海域に平成 29 年度に投入した 6 台の長期収録型海底地震計 (LOBS) 6 台 (図 1 (a) の L1～L6) を回収した。これらの回収作業は、平成 29 年度までの回収・再投入作業と同様に、長崎大学水産学部附属練習船・長崎丸の教育関係共同利用に基づき実施された。いずれの LOBS も、データ収録や投入直前・回収直後の時刻較正が正常に完了した。この結果、本課題の期間中に実施してきた LOBS の同一位置への繰り返し投入による海域準定常地震観測では障害は発生せず、全観測期間・全観測点において中長期の連続データを (回収から再投入までのタイムラグを除き) 取得できた。これら 6 観測点のうち 3 観測点 (L2, L3, 及び L6) は、繰り返し観測を平成 26 年度に開始しており、約 4 年間の連続データを取得した。残りの 3 点は平成 27 年度に追加投入した観測点で、約 2 年 9 ヶ月の連続データを取得した。

また平成 30 年度は、島嶼域における短周期地震、及び GNSS 観測についても継続した。ただし、無人島 (女島、宇治島、臥蛇島、及び横当島) のデータ回収及び保守作業予定は気象・海象が適しないこと等による制約で、それぞれ 1 回ずつの実施にとどまった。これらの無人島での地震及び GNSS 観測データの収録は概ね順調である。ただし臥蛇島の GNSS 観測点のみ平成 30 年度中に台風により損害を受け、システムが損壊して観測が中断した。

3次元速度モデルの解析とプレート境界面の形状推定：

平成30年度は、平成29年度の3次元速度モデル解析後、1年間のデータの蓄積が進んだため、3次元速度モデルの再解析を行った。再解析で用いた地震は、LOBSを投入した6観測点のデータが揃った2015年7月～2018年4月の期間、かつ、震央が海域、及び島嶼域観測点に囲まれるM3.0以上の438個(平成29年度解析は308個)である。なお、LOBS観測点数が3のみであった2014年4月～2015年7月の期間の地震を除外している。1次元速度モデルの解析結果に基づく3次元速度初期モデルの構築と観測点補正値の取り扱い、緯度・経度方向のグリッドノード間隔(0.5°)は、平成29年度解析と同じである。緯度、経度方向に0.1°毎に平行移動させた合計25モデルの解析結果を用いて速度モデルの平滑化を図り、得られた速度モデルとした(図1(c))。解析の結果、25モデルのいずれも、ダンピングファクター0.06～0.11で安定した収束解が得られ(平成28年度の暫定解析では1.0～1.3、平成29年度の解析では0.5)、1年間のデータ蓄積が進んだ結果、解像度が向上した。解析ではグリッドノードを緯度・経度方向に配列させたが、得られた速度モデル(図1(c))では海溝軸に平行な速度不均質の構造や、深さ50kmにおいては、沈み込むプレートに対応した高速度領域が南東部に認められる。2014年4月～2018年4月に収録された4年間のデータについて、観測点網周辺の地震も含めて3次元速度モデルを適用した震源計算を行った結果、609の収束解が得られた(図2)。震央分布では、深さ40km以深で10km程度の深さごとに震央の帯状の分布が認められる。震源分布から推定した深さ40～100kmにおける地震面の等深線を震央分布(図2)に重ねて示した。領域A-BとC-Dの間で、等深線の屈曲(地震面の形状変化)が認められる。また震源決定された浅発地震のうちの多くは深さ20km以浅の地震で、これらが示す地震面の傾斜角は水平に近い。また深さ40km以浅については、震源分布のみからプレート境界面を推定するのは困難である。そこで、M4.0以上、かつ深さ40km以浅の地震を対象に震源メカニズム解析を行い、2枚のnodal planeのうち1枚の走向が海溝軸とほぼ平行な低角逆断層型の地震を抽出した(図2)。これらの地震の震源位置と深さ40kmの地震面の深さ分布から、境界面の深さ20kmの等深線を推定した。深さ40km以深の地震面と異なり、領域A-BとC-D間で水平方向の有意なオフセットは無いように見える。また、低角逆断層型のメカニズム解をもつ地震の震源深さは、Arai et al. (2017)の反射法探査断面で示されたプレート境界面の深さとほぼ一致する。

GNSS解析：

平成30年度は、島嶼域におけるGNSS連続観測を継続した。またHayes et al. (2012)による沈み込みプレートモデルSlab 1.0の琉球領域のモデルを使用し、3次元有限要素モデルを作成した。ここではプレートの厚さを50kmとした。作成にはロスアラモス研究所が作成したメッシュ作成プログラムLaGriTを用いた。今後、こうして作成された3次元有限要素モデルを適用した解析を進めていく必要がある。

本計画の5年間では、島嶼域におけるGNSS連続を継続して行った。GNSSによる変動を用い、琉球弧をマイクロプレートとして考え、オイラー極を推定した。琉球弧は北部、中部、南部とさらに分けた方がGNSSによる変動をよく説明することを見出した。さらに、北端境界は鹿児島県と熊本・宮崎県境であることが分かった。

また島嶼域におけるGNSS観測点のデータは、国土地理院が運営するGEONET観測点のデータを加え、BERNESE GNSS Software V.5.2を使って解析した。GPS軌道暦と地球回転パラメータはCODEが解析し公表しているものを使用した。ITRF2008座標系に準拠し、1日ごとの観測点の座標を決定した。得られた座標データを使い、観測点の変位速度を最小二乗法により求めた。この際、顕著な地震時変動の大きさと余効変動の時定数と振幅、年周変化および半年周変化の振幅と位相を同時に推定した。UJIS(宇治島)を固定点としたときのフィリピン海プレートが沈み込む方向(N303°E)に連なる観測点の変位速度ベクトルを求めると、沖縄トラフより西側に位置するMESM(女島)観測点と他の観測点(全て沖縄トラフより東側に位置)で変位速度の方向が異なっていることが分かった。MESMは相対的に毎年約5mmでUJISから離れている結果が得られ、沖縄トラフは毎年約5mmの速度で拡大していると考えられる。

海域データによる低周波イベントの検出と発生位置の推定：

これまでの島嶼域地震観測点網のデータから、低周波微動が南西諸島北部域でも活発であることが分かってきた。平成 30 年度は、前年度に引き続き、2014 年 4 月～2018 年 4 月の 4 年間に LOBS で取得されたデータを解析し、低周波微動の検出を試みた。検出の方法は、各 LOBS 観測点において、低周波微動が卓越する周波数（概ね 2Hz 前後）、高周波側の帯域（概ね 10Hz 前後）のエンベロープ波形を求め、それぞれの振幅比、またノイズレベルとの比を 1 秒毎に求め、一定の基準を 10 秒以上連続して超えた場合に 1 イベントとカウントすることとした。図 3 に 2014 年 4 月から 2018 年 4 月までの解析結果を示す。2017 年 4 月～2018 年 4 月にかけてもこれまでと同様に L3 でバースト的な活動が何度か見られ、特に 2018 年 3 月～4 月の活動は比較的活発であった（海底地震計が回収された時点でも活動は継続していた）。同じタイミングで L5 でも活動が見られ、L5 の活動がやや遅れていることから L3 から L5 への migration があった可能性が考えられる。

2016 年～2017 年に観測されたデータについて、東京大学地震研究所と地震予知総合研究振興会が共同で実施している海底地震観測のデータを加え、喜界島沖の浅部低周波微動の震源決定を実施した（図 4）。この領域は、後藤（2013）により 1911 年喜界島沖 M8.0 の地震の震源域があると考えられている場所で、通常の地震活動が極端に低い領域（空白域）が広がっている。2017 年 2 月～3 月の浅部低周波微動活動について、震源決定を行った結果、この空白域を埋めるように分布しているように見えるが、観測網の形状の影響もあり誤差が大きく詳細な議論の為にはさらなる観測が必要である。

海底における長期連続観測により、トカラ東方海域における浅部低周波微動活動の時空間変化を捉えることに成功した。図 3 に、2014 年 4 月～2018 年 4 月の 4 年間に観測された低周波微動の日回数を示す。L5 は 2015 年 7 月から観測を開始したため、2014 年 4 月から 2015 年 7 月までの L5 周辺の活動は不明であるが、観測期間中の 4 年間に少なくとも 8 回のエピソードがある事が分かった（2014 年 5～6 月、2014 年 11 月、2015 年 10 月、2016 年 2 月、2017 年 2 月、2017 年 3 月、2017 年 7～8 月、2018 年 1 月、2018 年 3 月）。1 年に 1～2 回程度は活動が見られ、活動が L3 と L5 および L5 と L6 で同時に検出されるパターンがある。同時に検出される場合でもタイミングが若干ずれており、震源の移動（migration）を伴っている可能性が高い。また、L5 周辺の領域がセグメント境界に対応しているようにも見える。いくつかのエピソードは短期的 SSE の解析ともタイミングが調和的であることが分かっており（西村、私信）、南西諸島北部域のプレート境界浅部において深部スロー地震と同様に短期的 SSE と低周波微動が同期発生していることが示唆される。

2017 年 3 月のエピソードは、小繰り返し地震解析において小繰り返し地震の発生数が南西諸島北部域で増えた時期と対応しており、GNSS で検出が難しい南西諸島北部域でも小繰り返し地震の解析からスロー地震活動をモニタリングできる可能性がある。2017 年 3 月の活動は、L3 および L5 周辺で発生していると考えられるが、同時期には日向灘でも浅部スロー地震活動が観測された。同様の現象は、2014 年 6 月にも見られており、日向灘から南西諸島北部域の広域にわたって同時にスロー地震活動を活発化させるメカニズムの存在が示唆される。

喜界島沖における浅部低周波微動の震源決定結果から、浅部低周波微動と 1911 年喜界島沖 M8.0 の地震の震源域と考えられる地震空白域が重なる結果が得られた。浅部低周波微動の震源決定には大きな誤差があり、南西諸島海溝沿いで発生した M8.0 の地震と浅部スロー地震との関係についてより詳細な議論のためにはさらなる観測研究が必要である。

相似地震解析（準静的すべり速度の時空間変化）:

バースト的な活動を除いたプレート境界域での相似地震（小繰り返し地震）を用い、日向灘から奄美大島にかけての小領域ごとに小繰り返し地震が発生する度に、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（図 5）。喜界島北部（領域 K）を除く 9 領域で、2015 年頃から準静的すべり速度がほぼ同期して変化している。平成 29 年度のデータ解析結果では、領域 F（種子島南方）と領域 G（トカラ海域北部）は減速していたが、本年度までのデータ蓄積と解析の結果、増加に転じていることが分かった。なお、減速した領域である奄美大島北方（領域 J）は、2009 年の M6.8 の影響で、相似地震活動は静穏化しているために、準静的すべり速度減速の定量的な信頼度は高くない。2000～2014 年頃の約 15 年間の期間については、すべての領域で準静的すべり速度の変化は小さい（図

5)ことから、2015年前後の変化を見るために、2015~2018年と2001~2014年のそれぞれの期間で求められた準静的すべり速度(図6の左・中)、及びその比(図6の右)を緯度0.3°×経度0.3°の領域について0.1°ずつ、ずらしながら求めた。都井岬の東~東南東沖の領域で、準静的すべり速度が最も増加した。その他、日向灘中部、種子島の東方と南東沖、トカラ列島東方域で増加が認められる。平成29年度までのデータ解析結果では、トカラ列島東方の領域はやや減速していたが、本年度の解析結果では減速の大きさがさらに小さくなった。

5か年を通じた解析の結果、準静的すべり速度が、日向灘から奄美大島近海に至る広域でほぼ同時に変化していることが分かった。この傾向が生じたことについて平成28年度に検知し報告したが、その後2年間のデータが加わった結果、より明瞭になるとともに、平成29年度の報告時には減速していた領域が増加に転じたことも明らかになった。1993年以降にプレート境界で発生したM6.4以上の地震発生時の前後で準静的すべり速度が速くなっており(図5)、2015年以降に準静的すべり速度が速くなったことは「固着が剥がれ始めた」可能性を示唆する。ただし、準静的すべり速度の変化が広域でほぼ同時に起こっていることが、固着の剥がれ始めが広域で起こっていることを示す、についての解釈には議論を要する。

(9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Saki Watanabe, Yusuke Yamashita, Tomoaki Yamada, and Masanao Shinohara, 2018, Spatio-temporal Variation of Seismic Energy Released by Shallow Low-frequency Tremors in the Hyuga-nada, SW Japan, revealed by Ocean Bottom Seismological Observation, AGU Fall Meeting 2018

Yusuke Yamashita, Yoshihiro Kase, and Kei Ioki, Does a focal region of shallow slow earthquake become a source area of tsunami? -Approach of geophysical and geological survey for a large historical earthquake-, AGU Fall Meeting 2018.

渡邊早姫・山下裕亮・山田知朗・篠原雅尚, 2018, 日向灘浅部低周波微動活動に伴うエネルギー解放量の特徴, 2018年日本地震学会秋季大会

八木原寛・仲谷幸浩・平野舟一郎・小林励司・宮町宏樹・中尾茂・馬越孝道・内田和也・松島健・清水洋・中東和夫・山下裕亮・阿部英二・池澤賢志・諏訪祥士・山田知朗・篠原雅尚, 2018, 南西諸島北部の海域及び島嶼域における地震観測によるプレート境界面形状の推定(5), 2018年日本地震学会秋季大会

Yusuke Yamashita, Masanao Shinohara, Tomoaki Yamada, Saki Watanabe, Kazuo Nakahigashi, Hajime Shiobara, Kimihiro Mochizuki, Takuto Maeda, and Kazushige Obara, 2018, Spatiotemporal Variation of Shallow Low-Frequency Tremor and Very-Low-Frequency Earthquake Activity in the Western Part of Nankai Trough Revealed by Long-Term Ocean Bottom Seismological Observation, AOGS 2018

Saki Watanabe, Yusuke Yamashita, Tomoaki Yamada, and Masanao Shinohara, 2018, Activity of Shallow Tremor in the Hyuga-Nada Region After the 2016 Kumamoto Earthquake by Ocean Bottom Seismological Observation, AOGS 2018

Yusuke Yamashita, Masanao Shinohara, Tomoaki Yamada, Saki Watanabe, Kazuo Nakahigashi, Hajime Shiobara, Kimihiro Mochizuki, Takuto Maeda, and Kazushige Obara, 2018, Shallow very-low-frequency earthquake activity in the Hyuga-nada region revealed by long-term ocean bottom seismological observation, JpGU 2018

Saki Watanabe, Yusuke Yamashita, Tomoaki Yamada, and Masanao Shinohara, 2018, Activity of shallow low-frequency tremor in the Hyuga-nada, revealed by ocean bottom seismological observation, JpGU 2018

(10)次期計画における平成31年度実施計画の概要 :

現行計画のトカラ東方海域における準定常海底地震観測網の空間的な観測点密度は、低周波微動を検出してその震央を精度良く決定するには十分でないことが本課題の解析の結果、明らかになった。こ

のため平成 31 年度は、長期観測型海底地震計 (LOBS) 6 台を投入し、観測点間隔を 20 ~ 30 km とし、空間密度を現行計画の観測よりも大幅に向上させた小スパンの海底地震観測網を構築して観測を開始する。なお、次期計画では海域地震の観測対象を 1911 年喜界島地震の震源域周辺に絞って実施する。平成 32 年度以降、この観測網を少しずつオーバーラップするように年次的に移動させ、5 か年を通じて、より広域をカバーする観測を実施する計画である。

次期計画での海域観測は平成 31 年度に新たに開始されるため、1 回目のデータ回収と解析の着手は平成 32 年度に実施される計画である。従って平成 31 年度は、平成 30 年度までのトカラ東方海域の準定常観測網で取得された中長期連続データを用い、予備解析等を実施する。ここでは、海底地震観測網でのみ検出可能な規模の新たな相似地震の検出と、既知の相似地震の震源精度の向上をめざした解析を行うための予備試験を実施する。次期計画では、通常の地震と低周波微動との発生位置の関係の把握が重要になるため、通常の地震を含めた、より精度の良い震源決定を行えるよう準備を進める。

この一方で、南西諸島北部域のプレート間固着を正確に評価するためには、背弧側に位置する沖縄トラフの拡大の効果やプレートの剛体運動の考慮が不可欠で、地殻変動を長期にわたって継続的に捉える必要がある。このことから、島嶼域 GNSS 観測と 3 次元有限要素モデルを適用した解析を現行計画から引き継いで実施する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

鹿児島大学地震火山地域防災センター (八木原寛・仲谷幸浩)

鹿児島大学大学院理工学研究科 (中尾茂)

他機関との共同研究の有無 : 有

東京大学地震研究所 (篠原雅尚・望月公廣・塩原肇・山田知朗)

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科 (馬越孝道)

京都大学防災研究所地震予知研究センター (山下裕亮)

東京海洋大学 (中東和夫)

九州大学大学院理学研究院 (清水洋)

東北大学大学院理学研究科 (日野亮太)

北海道大学大学院理学研究院 (村井芳夫)

千葉大学大学院理学研究科 (佐藤利典)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 鹿児島大学地震火山地域防災センター附属南西島弧地震火山観測所

電話 : 099-244-7411

e-mail : yakiwara@km.kagoshima-u.ac.jp

URL : <http://bousai.kagoshima-u.ac.jp>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 八木原 寛

所属 : 鹿児島大学地震火山地域防災センター附属南西島弧地震火山観測所

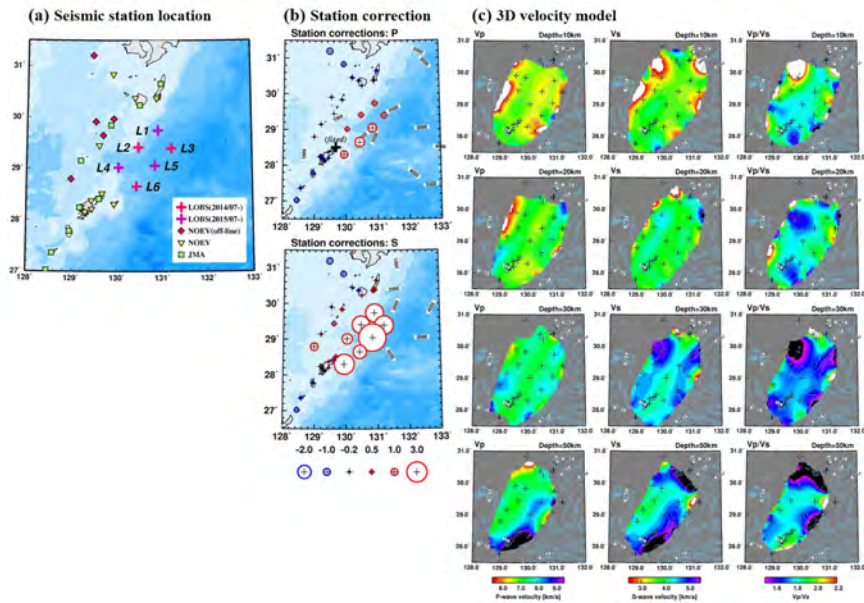


図1 海域及び島嶼域地震観測と推定された3次元速度モデル。

(a) 海域及び島嶼域地震観測点の配置。+印が LOBS の位置を示す。その他のシンボルは島嶼域地震観測点を示す。
 (b) 1次元解析で得られた観測点補正值。(c) 得られた3次元速度モデル。緯度・経度方向のグリッドノード間隔を0.5°とし、グリッド空間を緯度方向・経度方向にそれぞれ0.1°毎に移動させて計算した合計25モデルから計算された速度の平均値をプロットした。ただし、Resolution Matrixの対角要素値が0.60以上の位置のみ速度分布を図示した。

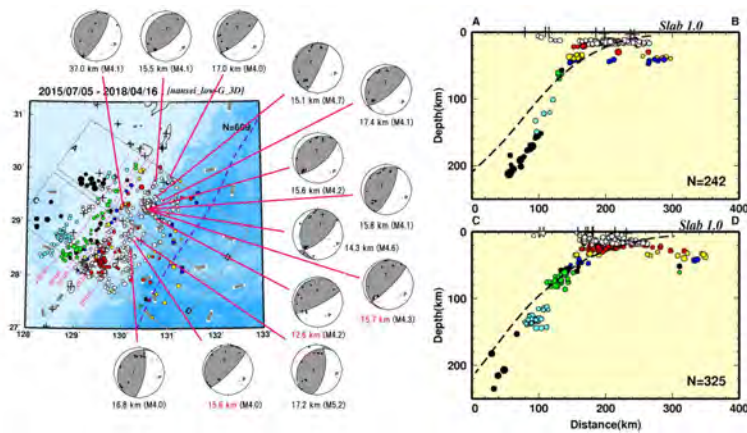


図2 震源分布、及び低角逆断層型のメカニズム解。

震源計算の結果、解が発散や振動せず、収束解が得られた地震のみをプロットした。シンボルの色は震源の深さに対応する。+は地震観測点を示す。矩形領域A-BとC-Dに挟まれた領域が概ねトカラ海峡と一致する。断面図上のA-BとC-Dは、海底地形図から読み取った海溝軸の位置を示す。垂直断面の点線は、グローバルなプレート形状モデル：Slab 1.0 (Hayes et al., 2012) の輪郭を示す。

また震央分布図には、震源分布から推測される地震面の深さ分布(深さ40 km ~ 100 km)を重ね合わせた。さらに、海域及び島嶼域観測網のデータから得られた低角逆断層型の震源メカニズム解(下半球投影)を合わせて示した。震源メカニズム解析の対象のうち、1枚のnodal planeの走向が海溝軸とほぼ平行で傾斜角が低角である地震のみを示した。メカニズム解のうち深さが赤色の解は、平成30年度の解析で新たに追加された解であることを示す。深さ20 kmの点曲線は、低角逆断層型の解をもつ地震の震央と深さ、及び深さ40 kmの点曲線とを内挿することで推定した。なお、青点曲線は、海底地形から推定した海溝軸を示す。

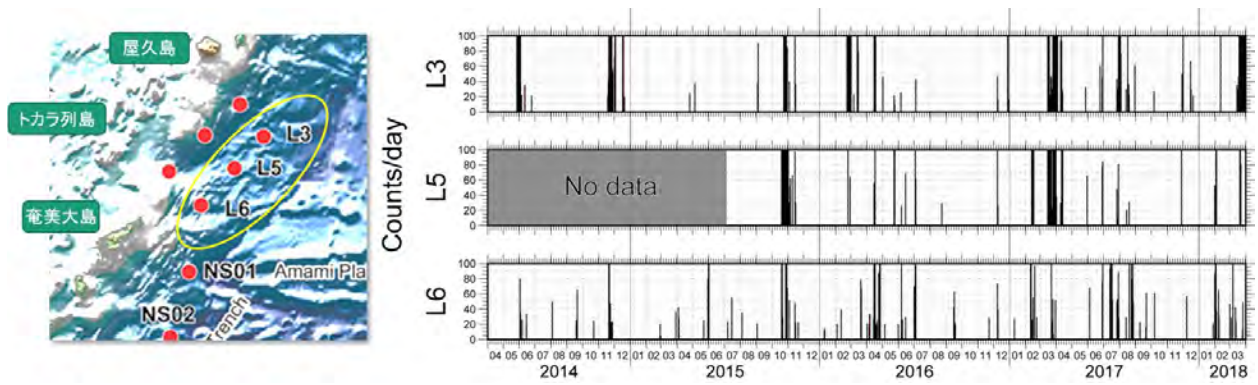


図3 2014年4月～2018年4月の4年間に於ける海溝軸側観測点(L3, L5, L6)で検出された低周波微動の日回数。

グレーの時期はデータが存在しない期間を示す。なお、2015年11月の沖縄トラフにおける地震(M7.1)と2016年熊本地震のタイミングで検出されているイベントは余震活動を誤って検出したものである。4年間で、少なくとも8回のエピソードが確認できる。

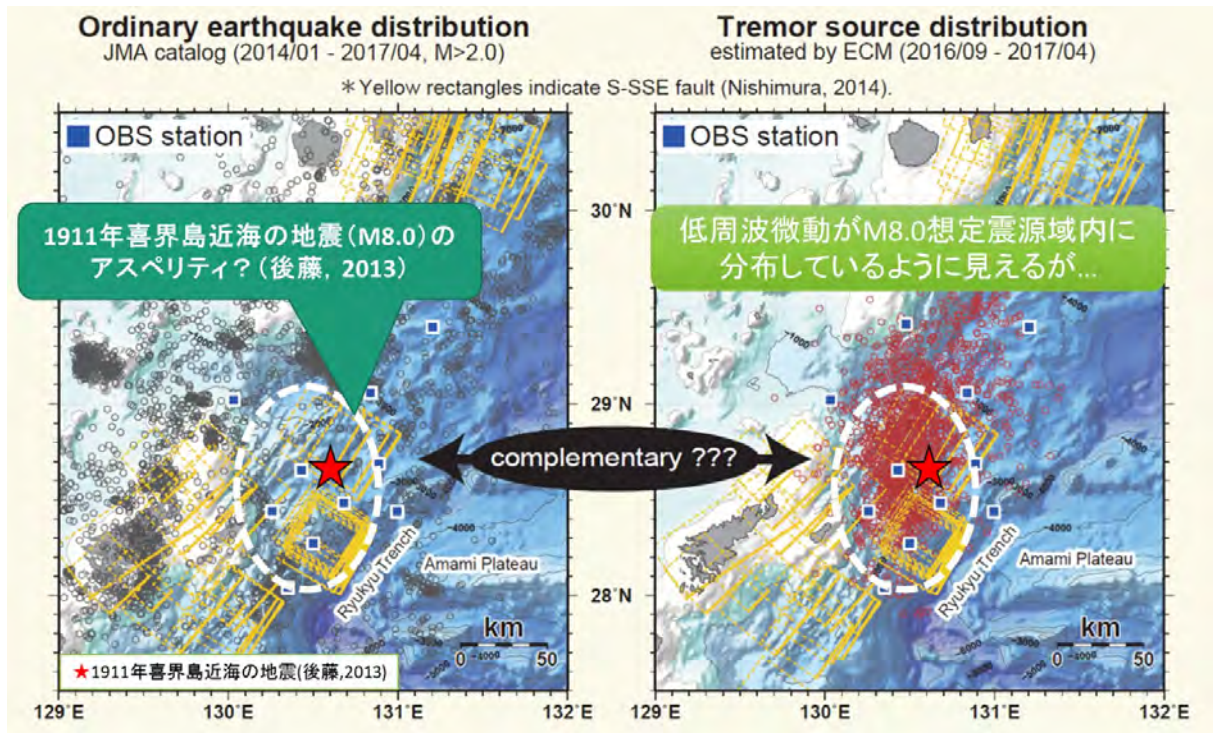


図4 2016年9月～2017年4月にかけて喜界島沖で観測された浅部低周波微動の震央分布。本研究課題に、東京大学地震研究所と地震予知総合研究振興会が共同で実施している海底地震観測のデータを加え、エンベロップ相関法による震源決定を実施した。左図は通常地震(気象庁一元化カタログ)、右が浅部低周波微動で、青四角が海底観測点、赤星は2011年喜界島近海の地震の震源(後藤、2013)、黄色の矩形断層はNishimura(2014)によって推定された短期的SSEの断層位置を示す。

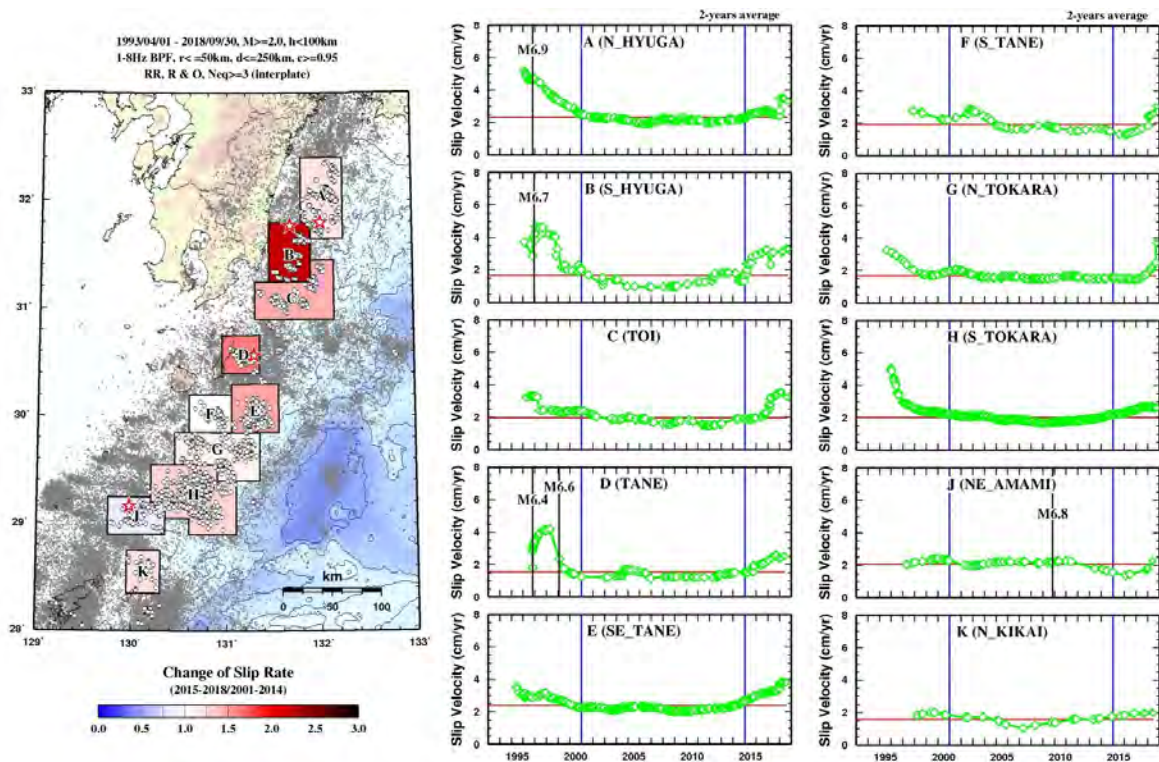


図5 日向灘から奄美大島近海に至る10個の領域での準静的すべり速度の時間変化。各図中の赤線は、準静的すべり速度の平均値を示す。1993年以降に発生したM6.4以上のプレート境界地震の発生時が、該当する図中に縦太線で示されている。なお、図中の青線は図6の解析で使用した期間の境を示す。

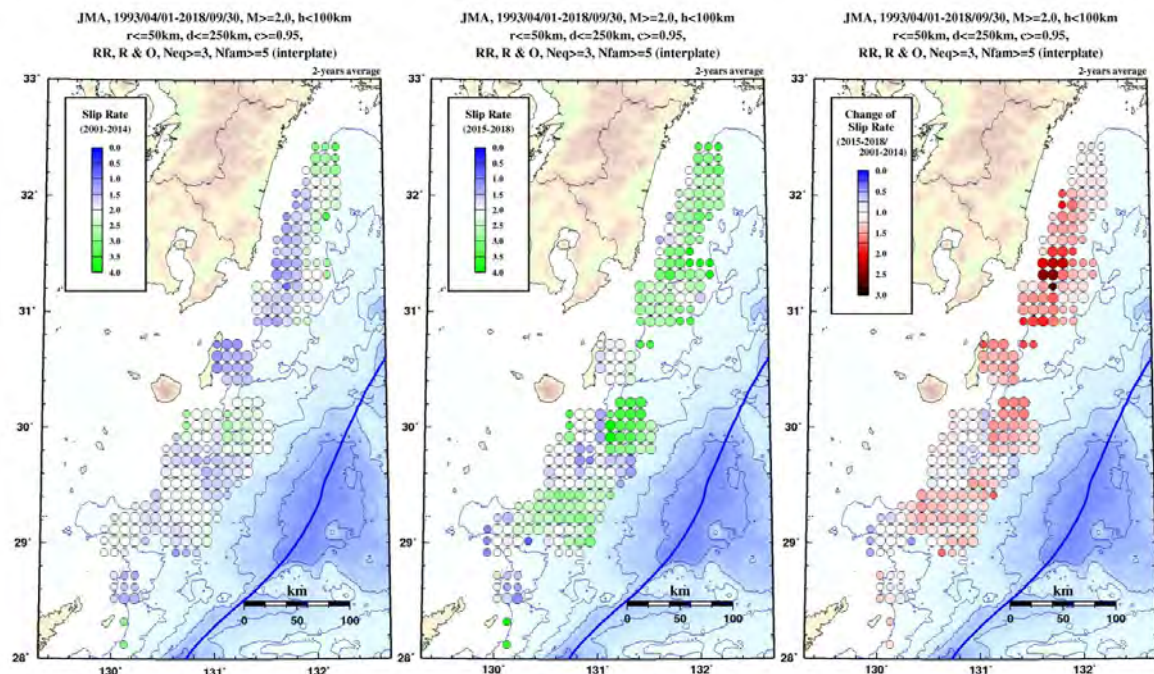


図6 日向灘から奄美大島近海に至る領域における2015年前後の平均的な準静的すべり速度、及び準静的すべり速度の比の分布。左図と中図がそれぞれ、2001～2014年及び2015～2018年の平均的な準静的すべり速度の分布を示す。右図が2015～2018年と2001～2014年の準静的すべり速度の比を示す。解析は、緯度 $0.3^\circ \times$ 経度 0.3° の領域を 0.1° ずつ、ずらして行った。

(1) 実施機関名：

立命館大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

南アフリカ金鉱山の地震発生場における応力・強度・ひずみ変化の現位置計測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

イ. 海洋プレート内部の地震

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(3) 関連研究分野との連携の強化

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

5 か年の間に、これまでの取り組みを更に進め、地質構造の情報も多い南アフリカ大深度金鉱山の地震発生場において、震源と周囲の応力や強度、歪変化の原位置実測データを増やす。現位置測定結果に基づく較正によって、計算機応力モデリングを高度化し、地震ハザード評価の高度化も目指す。そ

の上で、自然地震の研究で用いられている地震の切迫性の間接推定手法（例えば、空白域、 b 値、潮汐応答敏感性）、あるいは、応力の間接推定手法（地震みかけ応力、モーメントテンソル逆解析など）を、よりよく拘束された応力や強度と比較することによって評価する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成26年度：これまでに、ドリリングは大型科研費に頼っていたが、2013年度で終わる。次の大型科研費に申請ができるのは、地球規模課題対応科学技術協力のJSTの支援の最終年度（2014年度）である。このため、2014年度は、次のステップに進むために非常に重要な年度となる。

これまでの取り組みによって技術移転され、構築された体制によって、年に2～3点の応力測定が、複数の鉱山において鉱山自身によって行えるようになってきている。これらは坑道から十数m以内の測定である。また、すでに埋設されている石井式歪計の付近の地震活動がピークを迎える。これらに基づき応力モデリングを較正し始める。

後述する他の大型予算の獲得の成否に関わらず、上記については5年間続ける。5年間の研究期間の後半は、較正された応力モデリングの結果と、応力の間接推定手法や地震の切迫性の間接推定手法と比較し評価する。

平成27年度以降、大型予算を獲得することを目指し、もし獲得できた場合は、震源を貫通する、もしくは、きわめて近くを通る、坑道から数十mのドリリングを行って応力分布を実測する。本課題ではこのような測定が可能な候補地を平成26年度～平成27年度に見つけ、準備を進める。

(8) 平成30年度及び計画期間中（平成26年度～30年度）の成果の概要：

平成29年度に、ICDP南アフリカ金鉱山地震発生場掘削計画（DSeis計画）によって、採掘レベルの誘発地震発生場の掘削と、鉱山下のM5.5余震発生帯に向けた地下2.9kmからの1本目の掘削（図；NQ817m孔；傾斜角39-49度；孔口での方位はM5.5余震帯走向に斜交）のフルコア掘削が完了していた。昨年度末から本年度当初にかけて、2本目（Hole B；NQ700m；方位は約15度反時計回り）の3m長ダブル・チューブによるフルコア掘削が、M5.5余震発生域の上端を貫通し、断層物質の回収に成功した。続いて、Hole Bの544m地点から約2度異なる方向に分岐孔（Hole C；NQ390m長）をフルコア掘削した。断層交差部では、1.5m長のトリプル・チューブをHole Cでは使い、Hole Bよりも多くの断層物質を回収できた。ICDP予算でできる範囲の物理検層を加え、ICDP予算による地下掘削サイトの活動は2018年9月に終わった。本計画の本課題2401や公募研究2948を含む、日本・南アフリカ・アメリカ・ドイツ・スイス・インドの連携課題によって、以下に述べる重要な成果を得ることができた（小笠原・他、2018b）。

Hole Bの幅約3mの断層交差部から、滑り強化性を持つTalcやBiotiteが確認され、活動が新しいことを示唆する非晶質も確認された（金木・他、2018）。Hole Cの断層物質は2019年1月に日本に持ち帰られた。年度内に高知コアセンターで非破壊検査が行われる予定である。

米国やドイツが地球微生物学グループが、孔内で、天水とは起源が異なる、塩分がほとんど飽和した10MPaの水や、非生物起源の岩石と水の反応を起源とするガスを検出した（Rusley et al. 2018; Wiersberg et al. 2019）。

総延長約1.6kmの全コアの360度展開画像スキャンが2019年2月に完了し、これらや物理検層結果との比較・議論が始まった。

鉱山が1996年に実施した3次元地震反射法探査データが最新の解析法で再処理され、掘削で確認された貫入岩帯の広がりや、それを断ち切る構造とM5.5断層との関係もより明かになった（Manzi et al. および Linzer et al. 2018）。M5.5の破壊過程の解析を進めることができた（Mori et al. 2018; 安富2019）。

公募研究2948では、上述の、あるいは、直井(2018)が概観した地震発生場での実測に基づく応力場の理解が進んだ（小笠原・他、2018a; Ogasawara et al. 2019）。直井(2018)が概観した、微小破壊観測によって詳細が描き出した採掘レベルの地震発生場では、繰り返し地震的微小破壊活動の消長が見

つかった (Yamaguchi et al. 2018)。Mngadi et al. (2019) は、この地震発生場で昨年度行われた DSeis 掘削の現場において、微小破壊データ・採掘の亀裂マッピング・岩石力学的室内実験・岩石鉱物学的観察を統合した地震発生場の理解を行った。

5 年間の成果

平成 26 年 8 月に鉱山の下で発生した上述の横ずれ型の M5.5 の地震や、採掘レベルで誘発される正断層型の M2~3 の地震発生場の掘削調査する計画を平成 27 年度の ICDP DSeis Workshop で固め、掘削予算が平成 28 年 8 月に ICDP によって認められた。このため、地震発生場の掘削調査は当初計画通りに進めることができ、上述の成果を今年度に上げることができた。ICDP は掘削に直接関わる費用しか負担しないため、本計画は、日本人研究者の南アや日本での関連する研究活動を支えた。規模が異なる地震発生場の掘削による比較調査によって、鉱山下で 2014 年に発生した M5.5 の地震は、採掘レベルの M2~3 の誘発地震と性質が大きく異なることが明らかになり始めた。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
金木俊也・横山友輝・廣野哲朗・矢部康男・小笠原宏, 2018, M5.5 Orkney 地震の余震発生帯から回収された断層岩の鉱物学的特徴 (ICDP DSeis project), 日本地震学会, S08-06, 郡山, 2018 年 10 月 10 日.
- Linzer, L., M. Manzi, and ICDP DSeis team, 2018, Interpretation of the merged 3D seismic volume covering the seismogenic zone of M5.5 Orkney earthquake, South Africa, 日本地震学会, S08-05, 郡山, 2018 年 10 月 10 日.
- Manzi, M., A. Malehmir, R. Durrheim, H.Y. Ogasawara, H. Ogasawara, and ICDP DSeis team, 2018, Reflection seismic imaging of the causative geological structure of the M5.5 earthquake (2014) in South Africa, 日本地震学会, S08-04, 郡山, 2018 年 10 月 10 日.
- Mngadi, S.B. R.J. Durrheim, R.J., M.S.D. Manzi, H. Ogasawara, Y. Yabe, H. Yilmaz, N. Wechsler, G. Van aswegen, D. Roberts, A.K. Ward, M. Naoi, H. Moriya, M. Nakatani, A. Ishida, SATREPS team, ICDP Dseis team, 2019, Integration of underground mapping, petrology, and high-resolution microseismicity analysis to characterise weak geotechnical zones in deep South African gold mines, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 114, 79-91. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.10.003>.
- Mori, J.J., Y. Yasutomi, and H. Ogasawara, 2018, Close observations of the rupture for the M5.5 Orkney, South Africa earthquake. Tuesday, 11 December 2018. Abstracts AGU Fall Meeting. S21C-0438.
- 直井誠, 2018, 南アフリカ大深度金鉱山での微小破壊観測による震源の物理の研究, 地震 2, 71, 43-62, doi:10.4294/zisin.2017-13 (2016 年地震学会若手学術奨励賞受賞記念論文)
- 小笠原宏・石田亮壮・小笠原宏幸・杉村幸祐・野田拓・阿部周二・矢部康男・加藤春實・伊藤高敏・船戸明雄, 2018a, 大深度南アフリカ金鉱山の地震発生場での岩盤応力測定, 第 53 回地盤工学研究発表会, 2018 年 7 月 26 日(木), サポートホール高松, 高松, DS-2-7, pp.2.
- 小笠原宏・矢部康男・伊藤高敏・DSeis チーム, 2018b, ICDP 南アフリカ金鉱山 地震発生場掘削の完了, 日本地震学会, S08-03, 郡山, 2018 年 10 月 10 日.
- Ogasawara, H., A. Ishida, K. Sugimura, Y. Yabe, S. Abe, T. Ito, A. Funato, H. Kato, B. Liebenberg, G. Hofmann, L. Scheepers, R. J. Durrheim, and the SATREPS and DSeis teams, 2019, Spatial variation in stress in seismogenic zones in South African gold mines, *Proceedings of the 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa*, 7-11 May 2019, Okinawa, accepted.
- Rusley, C., T.C. Onstott, R.X. Liang, J.A. Higgins, N.W. Slater, H. Ogasawara, E.D. Cason, B.S. Lollar, T. Wiersberg, M. Zimmer, E. van Heerden, T.L. Kieft, B. Freese, B. Leibenberg, and V.H. Esterhuizen, 2018, Exploring the Limits of Life in a South African Deep Subsurface Brine, 11 December 2018. AGU Fall Meeting. B23E-2552.
- Wiersberg, T., M. Zimmer, C. Kujawa, B. Liebenberg, H. Ogasawara, T.C. Onstott, E. Cason, Jan-G Vermeulen, E. van Heerden 2019, Investigations on fault zone gases in South African gold mines, Ab-

stract EGU2019-5670, SSP1.2/CL1.32/EMRP3.11/GD2.9/GMPV1.7/NH5.12/TS1.4, 7-12 April 2019, Vienna.

Yamaguchi, J., M. Naoi, M. Nakatani, H. Moriya, T. Igarashi, O. Murakami, Y. Yabe, R. Durrheim, H. Ogasawara, 2018, Emergence and Disappearance of Very Small Repeating Earthquakes on a Geological Fault in a Gold Mine in South Africa, *Tectonophys.*, 747-748, 318-326, doi: 10.1016/j.tecto.2018.10.014
安富達成, 2019, Rupture process of the M5.5 Orkney earthquake using the dense network of a South African gold mine, 京都大学修士論文.
Ziegler, M., M. Rickenbacher, N. Berset, B. Liebenberg, A. Ishida, K. Sugimura, T. Noda, H. Ogasawara, S. Mngadi, R. Durrheim, T. Ito, A. Funato, and the ICDP DSeis team, 2018, Core and borehole logging and stress measurements of a 817 m long borehole drilled from 2.9 km depth toward the Moab Khotsong 2014 M5.5 aftershock zone (ICDP DSeis project in South Africa), EGU2018-10377, Vienna, 12 April 2018.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

ICDP DSeis 計画 (2016-2019) で得られたデータ、特に M5.5 の地震発生場については、掘削試料と孔検層と、水とガス、現存する 3 D 反射法探査データと地震と歪との比較解析を進める。コアによる応力測定を進め、回収されたコアや断層物質の XRD による地球化学的解析や摩擦実験を行う。採択されている別予算 (H29 ~ 31 年度) で、国際シンポジウムを開催し、到達点と課題を共有し、翌年度以降の進め方を議論する。追加の掘削や検層を行うための他予算を獲得する努力を続ける。採択された場合は、掘削や検層を加え、孔内稠密地震観測網の構築を始める。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

立命館大学・理工学部 小笠原宏
他機関との共同研究の有無 : 有
東北大学大学院理学研究科 矢部康男
東北大学大学院工学研究科 森谷祐一
東北大学大学院環境科学研究科 坂口清敏
東北大学流体科学研究所 伊藤高敏
(公益社団法人) 地震予知総合研究振興会 石井紘
鹿児島大学大学院理工学研究科 中尾茂
京都大学大学院工学研究科 石田毅・直井誠
北海道大学大学院理学研究院 山口照寛
茨城大学理学部 山田卓司
高知大学理学部 大久保慎人
防災科学技術研究所 小村健太郎
産業技術総合研究所 今西和俊
東京大学大学院情報学環 三宅弘恵
東京大学地震研究所 加藤愛太郎
京都大学防災研究所 Jim Mori

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 立命館大学 研究部 B K C リサーチオフィス
電話 : 077-561-2802
e-mail : ml-b-kanri@ml.ritsumei.ac.jp
URL : http://www.ritsumei.ac.jp/research/center/sci_eng/

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 小笠原宏

所属: 立命館大学・理工学部

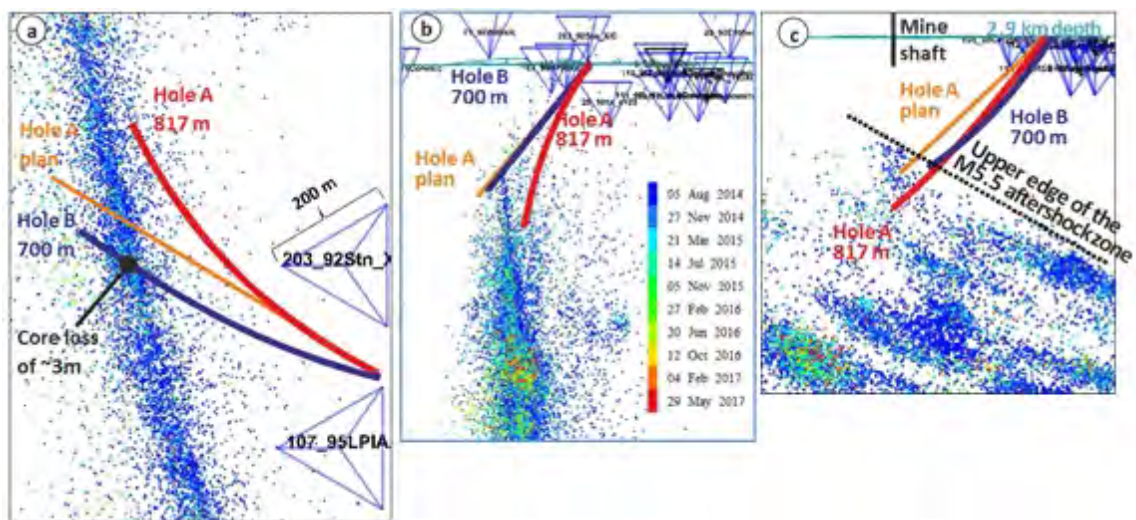


図 M5.5 余震発生帯、および、その上縁部と周囲を調査するための地下 2.9km からの掘削の位置関係。

Hole A は、当初計画(橙色)から右にそれたが、Hole B は余震発生帯の上縁部を貫通した。Hole B の 544m の地点から約 2 度異なる方向に分岐孔(Hole C)が掘削され、より多くの断層物質を回収することができた。関連する成果については本文参照。

(1) 実施機関名：

立命館大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

大規模地震・破壊に先行する極微小な前震活動の発生様式の特徴の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

近年、海外のグループや我々(上述)によって、大規模地震に先行する極微小な前震活動が日本を含む世界各地で発見されている。自然地震における前震活動の存在は、地震計によるリモート・センシングが可能な現象であり、地震発生予測の確度を上げるための鍵となりうる。高感度連続地震観測のおかげで、日本においてその検出は可能であるが、カタログに記載されないほどの極微小な地震であるため、現段階ではその特徴が把握できるほどには検出事例は多くなく、その発生機構や発生条件も明らかにされていない。

一方で、岩石試験時に観測される極めて小規模(マグニチュード - 8 ~ - 7)の破壊(地震)は、本震に相当する主破壊に先行して数多く観測されている。実験においては、我々の新たな計測技術により、微小破壊の震源特性を調べられるようになったことに加え、実験後に回収された試料の内部観察も可能である。

そこで本課題では、定常地震波観測記録を用いた内陸地震における極微小な前震活動の有無を調べ、検出事例の増加を目指す。また、室内実験から得られる主破壊に先行する微小破壊の特徴を踏まえ、前震の発生様式の解明を目指す。そして、室内実験から推定された前震の発生様式を適宜参照しつつ、これまでに確認されている前震活動を用いて、本震発生前に前震が前震であることを予測できるか否かを検討し、検出モニタリングのアルゴリズムの確立を目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要 :

前項で挙げた、「定常地震波観測記録を用いた内陸地震における極微小な前震活動の検出事例の増加」、「室内実験から先行する微小破壊の特徴の把握」、「前震の発生様式の解明」、「本震発生前に前震が前震であることを予測する手法、検出するためのモニタリング・アルゴリズムの検討」を以下の手順で実施する。

平成 26 年度においては、高感度地震観測網整備後に日本の内陸で発生した中大規模地震のうち、数 km 以内の震央距離に定常観測点が存在するものを対象に、Doi and Kawakata (2013) の手法を用い、カタログには掲載されていないような極微小な前震の検出を試みる。並行して、内陸地震発生層に相当する封圧下において岩石破壊試験を実施し、その際に Kawakata et al. (2011) による技術を応用し、微小破壊の高感度・連続・広帯域・多点観測をおこなう。微小破壊について、前震・本震・余震系列として、その発生形態を見直し、発生パターン、従来の計測波形では正しく解析できていなかった規模別頻度分布、応力パラメタなどを推定する。

平成 27 年度においては、平成 26 年度の成果を参考にしつつ、引き続き前震の検出と室内実験の実施、微小破壊の解析を実施する。必要に応じて、破壊試験だけではなく二軸せん断試験も実施する。

平成 28 年度においては、内陸地震について、前震が検出されるか否か、検出された場合にはその個数について、震央距離や本震のマグニチュードに関する依存性を明らかにする。また、室内実験後に回収された岩石試料の高分解能 X 線 CT スキャン画像を取得し、室内実験の観測波形データを用いた解析結果と併せて検討することによって、前震活動の特徴を明らかにする。封圧や載荷速度などの条件を変更しつつ、岩石破壊試験・せん断試験を継続して実施する。

平成 29 年度においては、自然地震における前震活動の特徴を考慮に入れ、室内実験から推定された前震の発生様式を適宜参照しつつ、前震を自動的に検出できるようにするアルゴリズムを Doi and Kawakata (2013) の方法を応用することにより検討する。また、中大規模な地震発生の前後の期間以外にも解析期間を広げ、本震が発生したという情報を与えずとも、これまでに検出された前震を検出できるように検討を進める。

平成 30 年度においては、データ解析を進めるとともに、研究成果のとりまとめをおこなう。

ただし、平成 27 年度以降の計画については、成果と進捗状況を照らし合わせながら適宜見直しをおこなう。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

[平成 30 年度の成果] 平成 30 年度は、本計画でこれまで対象としてきた 2011 年長野県中部の地殻内地震 (Mj5.4) の前震活動を例にとり、客観的な指標に基づくイベント検出方法の検討をおこなった。まず、気象庁一元化カタログに記載されている前震の波形記録をテンプレートとし、長期に渡る連続波形とテンプレートとの相互相関 (CC) の計算により、CC の分布の裾が、正規分布よりも極値分布で良く説明できることを明らかにした。またこの分布を利用し、大きい CC を示す外れ値の上位いくつまでをイベントとみなすのが合理的か、赤池情報量規準 (AIC) を基に議論した。AIC を利用することにより、定数や標準偏差の定数倍等の任意性の残る閾値ではなく、合理的かつ客観的な閾値の設定方法を提案することができた。

気象庁カタログに記載済みの前震は本震 13 時間前からに限定されていたが、以上の新手法を基に、本震から遡ること 2 年間の地震活動を評価したところ、新たに見つかった地震は、本震の 2ヶ月前に 1 つと、3~4 日前にまとめて 3 つのみであった。このことは、前震活動が定常的な微小地震の巨大化・頻発化と呼べるものではなく、過去 2 年間に殆ど例のなかったイベント群の発露であったことを示している。

この成果は国際学術誌に投稿中である。

[5 か年の成果] 本計画では、「定常地震波観測記録を用いた内陸地震における極微小な前震活動の検出事例の増加」、「室内実験から先行する微小破壊の特徴の把握」、「前震の発生様式の解明」、「本震発生前に前震が前震であることを予測する手法、検出するためのモニタリング・アルゴリズムの開発」

を目指して研究を実施した。特に、自然地震記録を用いた前震検出アルゴリズムの開発と大型二軸せん断試験時に発生する前震の発生様式の検討において、成果をあげることができた。

2011年に発生した長野県中部の地殻内地震(Mj5.4)をターゲットとして、防災科研 Hi-net の震源近傍(10 km 以内)の4観測点の3成分連続波形記録を利用し、前震検出の適切な基準について詳細な検討をおこなった。まず、本震発生前1週間の連続波形記録に対し、1)連続波形記録を用いる観測点で得られた地震による記録を含まない常時微動記録、2)連続波形記録を用いる観測点とは異なる観測点で得られた常時微動記録、3)全く異なる地域で得られた微小地震波形記録をテンプレートとして用い、対象とする観測点の連続波形記録との間で得られる相互相関係数の頻度分布を求めた。その結果、S波が卓越する無関係の地震記録をテンプレートとして用いた場合には、最大で0.7程度の高い相関が得られる、すなわち誤検出が生じやすいことが明らかになった。さらに、相互相関係数の頻度分布が正規分布では近似できないものとなることも示され、平均値+標準偏差のX倍といった閾値の設定は適切ではなく、前震などの通常とは異なる活動であるか否かを判断するための閾値の設定方法が必要となった。これに対する解決策は平成30年度の成果に示したとおりである。また、準リアルタイムのモニタリングとして、2016年熊本地震に続発した愛媛県北東部の地震(Mj3.1)に関し、これが大地震の前震である可能性を想定し、この地震の波形記録をテンプレートとして解析したが、気象庁一元化震源カタログに記載された2つのM0クラスの地震以外にはイベントは検出されなかった。防災科学技術研究所と共同で実施した二軸せん断試験の際に取得された連続波形記録の解析を継続した。本試験は、法線応力は1.33 MPaと高くないものの、断層面積はすべり方向に1.5 m、すべり直交方向に0.5 mと大きいという特徴を有するものであり、防災科学技術研究所所有の大型振動台を利用して実施された。また、試料内に弾性波センサを埋設する、広帯域弾性波センサを利用するといった工夫を加え、稠密多点の弾性波センサのネットワークを形成するとともに高速度(10 Msps)連続集録を実施した。本計画において、断層ガウジが残置された条件下では、試料全面がすべる大規模な動的すべりイベント(「本震」)に先行して前震が発生することが確認され、その中に、互いに波形が酷似したリピーター的な前震の発生が確認された。これらは、断層全面がすべる大規模な動的すべりイベントをはさんで発生しており、断層全面がすべることによっても前震を発生させるパッチが保持される可能性が示された。リピーター的な前震は、「本震」の破壊準備過程に関する情報を与える重要なものであると考え、リピーター的な前震に関して精査した。最大のリピーター的な前震のクラスターでは、ランタイム全体を通じて22個の前震が確認された。それらは「本震」の直前を中心に発生しており、20個の「本震」に対して1, 2個ずつの発生であった。また、50回程程度の繰り返し「本震」を経験する過程を通じて、これらリピーター的な前震の規模の系統的な変化については認められなかった。ただし、リピーター的な前震が想定される震源サイズの範囲内で発生しているか否かは確定できず、リピーター的な前震が真のリピーターといえるか否かについては今後の課題となった。また前震の発生環境に関する理解の一助として、ランは異なるが、ひずみ記録を精査することにより「本震」に先行するひずみの時空間変化を調べ、二次元的な破壊の進展に関する新たな知見が得られた。

- (9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
- Hirano, S., Y. Toyomoto, H. Kawakata, and I. Doi, 2018, Application of Extreme Value Theory to a Matched-Filter Analysis, 10th ACES International Workshop -Toward Comprehensive Understanding of Earthquake Physics-
 - Hirano, S., 2018, Aftershocks and the GR law due to a heterogeneous slip model, American Geophysical Union 2018 Fall Meeting, Washington D.C., U.S.
 - Hirano, S., Y. Toyomoto, H. Kawakata, and I. Doi, 2018, Objective matched-filter analysis for detecting small events, International Symposium on Earthquake Forecast / 5th International Workshop on Earthquake Preparation Process, Observation, Validation, Modeling, Forecasting , Chiba, Japan.

- (10)次期計画における平成31年度実施計画の概要：

研究課題「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」において、「本震」の発生という情報を持たない状態で「本震」の発生をどの程度の確率で予測できるか、を明らかにすることを主目的とし、室内実験結果を活用しながらリピーター的前震の発生様式、発生機構を明らかにすることも目指して研究を実施する。

近年に大規模地震が発生した地域、定常地震活動度の高い地域、定常地震活動度の低い地域、大地震の切迫度が高いと評価されている地域等から、研究対象領域を抽出し、気象庁一元化震源カタログよりテンプレートとして使用する微小地震を設定する。現行計画で開発したアルゴリズムに従い、繰り返し活動の抽出をおこなう。データ量が多いため、高速化のためのアルゴリズムの改良を進める。同時にテンプレートを与えないで実施できるリピーター的前震イベントを検出できるアルゴリズムについても開発を開始させる。

室内試験においては、二軸せん断試験で得られた波形の解析を高度化するために、実験時に貼り付けられていた弾性波トランスデューサの計器特性を精査するための検定試験を実施する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

立命館大学 理工学部 川方 裕則・平野 史朗
他機関との共同研究の有無：有
京都大学防災研究所 土井 一生
東京大学地震研究所 加納 靖之
防災科学技術研究所 福山 英一・山下 太・徐 世慶・滝沢 茂
電力中央研究所 溝口 一生

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：立命館大学 研究部 B K C リサーチオフィス
電話：077-561-2802
e-mail：ml-b-kanri@ml.ritsumei.ac.jp
URL：http://www.ritsumei.ac.jp/research/center/sci_eng/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：川方 裕則
所属：立命館大学 理工学部

(1) 実施機関名：

東海大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

電磁気的地震先行現象の観測と統計評価による他種の先行現象との比較

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

観測研究では、時間的・空間的相関が極めて高い結果が得られていたが、当時のデジタル計測技術の限界で中断していた VLF 帯パルス電磁波の新たな観測システムを構築し、VLF 帯における先行現象の有無について一定の結論を得る。VHF 帯の観測研究では、既存の観測網を良好に維持し、ケーススタディを積み重ねる。それ以外の DC-ULF 帯等の観測についてもシステムを良好に維持し、先行現象の抽出を試みる。必要に応じて観測点周辺の比抵抗構造を測定し、現象発現の発現・伝搬メカニズムの理解を進める。

先行現象の統計評価に関する研究では、従来の研究で地震発生との時間・空間的相関が示唆されている力学的現象(GPS 地殻変動、地震活動度変化)、電磁気学的現象(電離層全電子数(GPS-TEC)、地磁気・地電位差変化)などについて、統計的評価を強化し、それぞれの先行現象の地震との相関を定量的に評価する。さらに、各々の現象を利用した地震発生予測法の予測能力を定量的に表現・比較できるような指標を開発する。また、異常の抽出や地震発生の予測の手法において客観性を確保し、第三者が評価可能なデータベースのプロトタイプを作成する。このため、先行現象研究が行われているロシア、キルギス、フランス、中国、台湾、ギリシャ等の研究者と連携し、既存のデータの発掘・再解析を実施する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年度は、VLF 帯パルス電磁波の新たな観測装置の試作を行ない、予備観測を開始し最初のデータの取得を行なう。さらに既存の DC-ULF 帯および VHF 帯の観測網を良好な状態で維持する。またこれまで電磁気観測の空白域となっている南海トラフ沿いの地域に、新規複合的電磁気観測点構築を開始する。統計評価に関する研究では、予測マップの形式を定義することから開始し、それを地震カタログと比較して算出される種々の統計量を算出するシステムの構築を開始する。一方で、いくつかの先行現象と目されるものを選定し、試行評価のための予測マップ作成に必要な基礎データとプログラム群を用意する。

平成 27 年度は VLF 帯パルス電磁波の本観測を開始するとともに、それ以外の観測網を良好な状態で維持する。VLF 帯パルス電磁波観測については、先行現象候補と雷放電を判別するためのソフトウェアの開発を開始する。統計評価に関する研究では、試行評価のための予測マップを作成し、さまざまな評価指標を算出する。また東北地方太平洋沖地震の前に観測された GPS-TEC の変動について、観測データの存在する世界中の巨大地震についての解析を終了し、本現象に関する知見をまとめる。

平成 28 年度はすべての観測網を引き続き良好な状態で維持する。VLF 帯パルス電磁波観測については、先行現象候補と雷放電との判別ソフトウェアを完成させる。統計評価に関する研究では、試行評価を複数の現象に対して行い、さまざまな指標の長所・短所を検討する。

平成 29 年度も引き続き観測網を良好な状態で維持するとともに、各々の先行現象から予測マップに変換する作業におけるチューニングによって、さまざまな指標による成績がどのような影響を受けるかを検討する。また、指標値の計算において、地震カタログのデクラスタ等の影響を検討する。

平成 30 年度も引き続き観測網を良好な状態で維持するとともに、本研究で観測・収集・コンパイルされた先行現象のデータベースを作成する。統計評価に関する研究では、統計モデルによる予測との性能比較を行い、成果をとりまとめる。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

まず過去 4 年間の成果を簡単に述べる。平成 26 年度には高知県に新たな地震電磁気観測点を 2 ヶ所設置し観測を開始した。また全く新たな観測として故・浅田敏東大名誉教授が開始し、時間的・空間的相関が極めて高いと考えられた VLF 帯パルス電磁波観測装置を再興し、平成 30 年度では 5 ヶ所で定常観測を実施している。また過去データのサーベイランスとして VHF 帯電波伝播異常観測について北海道・襟裳観測点をモデルとして統計的な評価手法を提案した。

平成 27 年度には各種電磁気観測点を良好な状態に保つ事は当然の事として、特に宏観異常と地震前の電離層全電子数 (GNSS-TEC) 変化に関する評価を実施した。さらに統計評価に関する " 予測マップ " を用いた評価方法を提案し、実際に北海道・襟裳観測点の 10 年以上の観測データについて予測マップを作成し評価を行ったところ、先行時間を 4 日とした場合に最も高い確率利得が得られる事が判明した。また東北地方太平洋沖地震の直前 1 時間以内に観測された GNSS-TEC 変化に関するケーススタディを実施し、GNSS データが存在する 8 例のマグニチュード 8 以上の地震すべてで同様の現象が発生している事を確認した。

平成 28 年度には熊本地震が発生した。この地震に対して複数の手法による地震学的な解析を実施し、地震発生密度解析や静穏化解析で明瞭な準備過程が存在した事を示す事に成功した。VHF 帯の電波伝播異常観測では、従来は見通し外伝搬を主な観測対象としてきたが、見通し内伝搬も有望である可能性のある事が判明した。また巨大地震直前の GNSS-TEC 研究においては、特に 2015 年にチリで発生した Illapel 地震で電離層の 3 次元トモグラフィを実施し、磁場に沿って低高度に正の異常が、高高度に負の異常が並んで生じる構造を見出した。

平成 29 年度においては、気象庁柿岡地磁気観測所の地磁気 3 成分データの統計解析が進み、Molchan Error Diagram (MED) 解析の結果として、確率利得が最大となったのは先行時間が 8 日で警告期間を 1 日とした場合に $PG=2.3$ となる事が判明した。統計評価の研究では、 $M>6$ もしくは 7 に対して統計的に有意であることが示されている様々な予想手法の成績 (予知率、適中率、警報分率、ゲイン) を文献情報から逆算してまとめた。さらにレビューを通じ、ETAS によるトリガリング作用を考慮するだけ

で、数百倍のゲインをもつ短期的な予測ができるケースのある事も確認された。さらに ETAS では説明できない特徴に目をつけた方法では、ゲインが 1 万倍を超えるような予測手法も存在する事も判明した。また日本周辺での M 8 クラスの地震に対して、地震活動静穏化の長期的な定量的評価を実施したところ、対象となる 10 個の地震の内 7 個が警報 ON 領域で発生しており、予知率は $7/10=70\%$ となった。警報 ON 領域が占める割合、警報分率は 24% であったので、確率利得は $70\%/24\%=2.9$ となった。

平成 30 年度は特に本研究課題と関わりが深い、統計的に有意と判断される先行現象に特化したシンポジウムを初めて予知協議会主催という形で 5 月に実施する事が出来た。さらに一般向けの啓発本で、短期的先行現象と地震発生プロセスの物理的結びつきに関する考察を発表した(中谷, 2019)。以下平成 30 年度の個別の成果である。

VHF 帯電波伝播異常の統計的検出

これまでは異常を検出する基準については、全観測期間にわたるデータに対して異常の検出基準を一意的に決定していた。しかしその場合、長い期間にわたるデータでは強度や変動が大きい期間や小さい期間があり、異常を判定したい時点での傾向を上手く反映できず、その結果、全体と比較して強度が小さい期間のデータの場合に、本来異常であるべきデータを検出できなかったり、またその逆に変動が大きいときは余分に異常を検出していたりという問題が発生して、そのことが結果に影響を与えていたことが考えられる。そこで、短周期のトレンドを上手に反映できるよう、またリアルタイムでの即時検出に適用できるようにその時点での異常検出基準を、その時点から過去 30 日のデータを使って算出し、異常判定を実施した。また、その地点から過去 x 時間を振り返り、データ中 $y\%$ 以上異常が検出されている場合に L 日間継続して警報を出すことにした。

研究対象期間全体に対して、警報を出している割合を r で表し、対象とした全地震のうち警報を出している最中に発生した地震の割合を s とおくと、その予測マップのゲイン G は次式で求まる。

$$G = s / r$$

ここでは p 値を用いることにより、この予測マップのゲインが偶然求まったものかどうかを調べた。今回は異常の検出基準を、 y を 50% に固定し、「ある時点から過去 x 時間中の 50% 以上のデータが異常の場合」に異常検出させ、検出した後 L 日間警報を継続させた場合の、 G 、 p 値を図 1 であらわす。

この結果、過去 x 時間中 50% 以上の異常で警報を ON にした場合には、その時点から過去 24 時間のデータを参照し、警報継続期間 L を 3 日にしたときにもっとも良い結果 ($G=9.64$ 、 $p=0.018$) が求まった。そのときの観測値、閾値、警報マップ、対象地震を図 2 に示す。

また、図 1 では異常時間の割合が 50% の場合の G 、 p 値を示したが、過去 24 時間の異常時間割合を変えた場合の結果を図 3 に示す。 $y\%$ を動かすことで G 、 p 値を算出し、この図を作成した。

VLF 帯パルス電磁波観測

VLF 帯パルス電磁波観測は、現在中部地方の 5 地点で連続観測を行っている。今年度は観測期間中かつ観測ネットワーク内で発生した最大の内陸地震であった 2017 年 6 月 25 日の長野県西部の地震 (M5.6) の 2 日前に観測された電磁パルスについて詳細な解析を実施した。今年度は AR と ICA を用いた電磁波の到達時間決定手法をルーチンで適用できる所まで開発を行った。今回はこのシステムを用いて波形を詳しくチェックしてみると、7 個のうちの 2 個は極めて波源が良く求まり (図 4) さらに観測された波形も極めてよく似たものである事が判明した (図 5)。図 5 は 6 月 23 日の 3 時 33 分 42.022 秒に観測された波形である。この時は、4 つの観測点 (学芸大、信州大、東海大、群馬大) が稼働していた。

これまでは、観測の立ち上げ時期という事からメンテナンスの容易性を考慮し、研究協力者のいる大学の屋上での観測を行ってきたが、今後はもう少しノイズの少ない郊外での観測というものを計画していきたい。このためには太陽電池パネルと携帯 SIM を用いた観測システムの構築が必要であり、現在その方向で検討を進めている。

巨大地震直前の GNSS-TEC 異常について

東北地方太平洋沖地震の前に観測された GNSS-TEC の異常は、今期の本研究課題の最大のトピックの一つであったと言えよう。またこの現象がどの程度小さな地震まで検出できるかについては、昨年

度に M 7 クラスでも条件によっては検出できるとの報告がある (He and Heki, 2017, JGR)。これまで日置のグループは精力的にケーススタディーを実施してきたが、今年度はこの現象がはたしてより小さな地震を用いて統計的にも確認できるか一つの検証作業を実施した。この研究のモチベーションはフランスが 2004 年に打ち上げた DEMETER 衛星のデータ解析で唯一強い統計的有意性が得られたのが、地震発生直前の VLF 帯電磁波の吸収であり、この現象は下部電離層の電子密度が増加していたという事で説明する事ができる。今回は、GEONET のデータについて、Nemec らが DEMETER 衛星の解析のために用いた手法と類似した手法を用いる事とした。Nemec らは衛星軌道を地上に投影した地点からの距離を採用し、距離ごとに 4 時間の Bin (計算セル、ユニットと同義) を設定し、計算を行った。今回の解析では、1) 1997 年以降、東北地方太平洋沖地震までに陸域近傍で発生した M 5 以上の地震 (279 個) を対象として (図 6)、2) 1 つの地震に対して地震発生時刻に震央に近い 6 個の SIP (Sub-Ionospheric Point) を追跡する。3) ある時刻 (ターゲット時刻) の TEC の異常を求めるためには、その時刻の前後 1 時間ずつ (合計 2 時間) の TEC のデータが存在している事、さらに 4) TEC の異常はターゲット時刻の前 1 時間から 30 分前と、ターゲット時刻の 30 分後から 1 時間後までのデータを 2 次曲線でフィッティングした残差と定義する、という演算を実施した。換言すればターゲット時刻の前後 30 分 (合計 1 時間) はフィッティングに用いないという事である。

図 7 は地震発生 4 時間前のヒストグラムである。わずかではあるが、正の TEC 異常が卓越している事がわかる。同様な解析を地震発生前 40 時間から発生後 12 時間まで行ってみると、正のピークは地震直前の 4 時間前になっている事が確認された。ここで赤線は全てのデータを用いたもの。緑線はヒストグラムの上下 5 % の値を削除して求めたものである。現時点で日置が発見した現象がマグニチュード 5 ないし 6 クラスでも見えるという事を証明した事にはならないが、予察的な解析としては、M 5 から M7 クラスの地震でも、地震直前に TEC の正の異常が存在していた可能性を示唆する結果であろう。今後より詳細な解析 (磁気嵐の後の地震を解析対象から除去する等) を行っていく所存である。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
出版物

Nakatani, M., Statistical Evaluation of Precursory Phenomena ? A Review (invited), Proceedings of the 17th Japan-Taiwan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, 19-23, 2018.

中谷正生, 経験則から期待される大地震発生の確率: 相場のレビュー, 地震予知連会会報, 99, 465-469, 2018.

中谷正生, 地震のメカニズム解明ー本当に地震予知はナンセンス? あんた, 地震の何なのさ? 短期前兆のメタ理論, パリティ, Vol.34, No.2, 84-88, 2019.

Ouzounov, D., S. Pulinet, K. Hattori, P. Taylor (eds.), Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies, pp. 414, Wiley, July 2018.

Uyeda, S. and T. Nagao, International Cooperation in Pre Earthquake Studies: History and New Directions, Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies, edited by Ouzounov et al., AGU Geophysical Monograph 234, 3-6, Wiley, 2018.

Hattori, K. and P. Han, Statistical Analysis and Assessment of Ultralow Frequency Magnetic Signals in Japan As Potential Earthquake Precursors, Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies, edited by Ouzounov et al., 229-240, DOI: 10.1002/9781119156949.ch13, Wiley, 2018.

Liu, J. E., K. Hattori, and Y. I. Chen, Application of Total Electron Content Derived from the Global Navigation Satellite System for Detecting Earthquake Precursors, Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies, edited by Ouzounov et al., 305-317, DOI: 10.1002/9781119156949.ch17, Wiley, 2018.

Ouzounov, D., S. Pulinet, J. Y. Liu, K. Hattori, and P. Han, Multiparameter Assessment of Pre Earthquake

- Atmospheric Signals, Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies, edited by Ouzounov et al., 339-359, DOI: 10.1002/9781119156949.ch20, Wiley, 2018.
- Schorlemmer, D. N. Hirata, Y. Ishigaki, K. Doi, K. Z. Nanjo, H. Tsuruoka, T. Beutin, F. Euchner, Earthquake Detection Probabilities in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108 (2): 702-717, 2018. <https://doi.org/10.1785/0120170110>
- 楠城一嘉, b 値に基づく全地球規模の大地震発生予測のモデル, *地震予知連会会報*, 99, 459-462, 2018.
- Heki, K., Chapter 5-3: Ionospheric disturbances related to earthquakes in *Advances in ionospheric research: Current understanding and challenges*, Wiley/AGU Book, edited by C. Huang, 2019 (in press)
- 学会発表
- Nagao, T., J. Izutsu, M. Kamogawa, Y. Orihara, S. Sugiura, H. Kondo, Electromagnetic observation addressed to the short-term earthquake prediction research in VLF band, *Electro-Magnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes 2018 (EMSEV2018)*, Potenza, Italy, September 2018.
- 長尾年恭, 齋藤愛理, 井筒潤, 鴨川仁, 織原義明, 杉浦繁貴, 近藤 斎, VLF 帯パルス電磁波観測による短期・直前予測の研究 -震央から観測されたと考えられる電磁波の予察的解析-, *日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第5回学術講演会アブストラクト集*, 62, 2018年12月.
- Hattori, K., P. Han, and J. Zhuang, Assessment of ULF geomagnetic precursor for short-term earthquake forecast, *European Geosciences Union General Assembly 2018, EGU2018-17007*, Vienna, Austria, April 2018.
- Hattori, K., S. Hirooka, M. Yagmur, S. Saito, C. Yoshino, and J. Y. Liu, Spatial and Temporal Characteristics of the Pre-Seismic Ionospheric Anomaly over Japan: Case study for the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) and statistical study, *International Conference for the Decade Memory of the Wenchuan Earthquake with The 4th International Conference on Continental Earthquakes and The 12th General Assembly of the Asian Seismological commission*, Chengdu, Sichuan, China, May 2018.
- 韓鵬, 服部克巳, 周媛媛, 常, Principle component analysis of geomagnetic data associated with the 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0), *日本地球惑星科学連合 2018 年大会, MIS03-05, 幕張メッセ, 千葉県千葉市, 2018 年 5 月 (招待講演)*
- Han, P., K. Hattori, and J. Zhuang, On the precursory information in ULF seismo-electromagnetic phenomena, *International Symposium on Earthquake Forecast / 5th International Workshop on Earthquake Preparation Process - Observation, Validation, Modeling, Forecasting - (ISEF-IWEP5)*, Chiba University, Chiba, Japan, May 2018. (Invited)
- HATTORI, K., S. HIROOKA, M. YAGUMUR, S. SAITO, C. YOSHINO, and J. Y. LIU, Spatial and Temporal Characteristics of the Pre-Seismic Ionospheric Anomaly over Japan: Case Study for the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) and Statistical Study, *15th Annual Meeting for Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2018)*, Hawaii Convention Centre, Honolulu, Hawaii, US, oral, IG22-D2-AM2-322B-001 (IG22-A009), June 2018.
- Hattori, K. and P. Han, Statistical Analysis and Assessment of ULF Magnetic Signals in Japan as Potential Earthquake Precursors, *Electro-Magnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes 2018 (EMSEV2018)*, Potenza, Italy, September 2018.
- Hattori, K., C. Yoshino, W. Xie, S. Saito, P. Han, T. Mogi, T. Goto, I. Takumi, T. Takano, M. Mouri, M. Kamogawa, C. Yamanaka, Y. Ando, J. Izutsu, D. Ouzounov, V. Tramutoli, J. Y. Liu, Multi-sensor network for monitoring earthquake precursors and preparation processes near subduction zone at Boso, Japan, *2018 AGU Fall Meeting*, Walter E. Washington Convention Center, Washington, D.C., USA, NH11A-06, December 2018.
- Nakatani, M., Short-Term Precursors, Why do I care? (invited), *International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process*, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.

- Nakatani, M., A revised seismogenesis scenario implied by the discovery of a too consistent, immediate precursor - I think I 've figured it out! (invited), International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.
- Nakatani, M., Statistical Evaluation of Precursory Phenomena ? A Review (invited), the 17th Japan-Taiwan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, Tsukuba, 4 September, 2018.
- 勝俣 啓・中谷 正生 (2018), 静穏化による地震の長期予測の試行 千島・東北・伊豆小笠原沈み込み帯の場合, 地球惑星連合大会, SSS13-04, 幕張, May 24, 2018.
- 森田 笙・中谷 正生・日置 幸介・茂木 透, 2018, 島原における FM 電波伝播異常の観測と 2016 年熊本地震前の異常について, 地球惑星連合大会, MIS09-03, 幕張, May 22, 2018.
- 勝俣啓・中谷正生, 2018, 静穏化による長期予測の試行 予測と検証, 日本地震学会秋季大会, 2018 年 10 月 10 日, 郡山, S23-01, 2018.
- Morita, S., K. Heki, M. Nakatani, K. Matsushima and T. Mogi, 2018, Statistical evaluation of anomalous propagation of VHF-band radio wave and reliability of the anomaly that immediately preceded the 2016 Kumamoto Earthquake, International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27.
- Katsumata K. and Masao Nakatani, Long-term earthquake forecast based on the seismic quiescence: trials in the Kurile, the Tohoku, and the Izu-Bonin subduction zones, International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.
- Motojima, K., Y. Shiono and Y. Ogura, Detection of anomalous VHF radio wave propagation associated with earthquake by artificial intelligence, International Symposium on Earthquake Forecast / 5th International Workshop on Earthquake Preparation Process ? Observation, Validation, Modeling, Forecasting - (ISEF-IWEP5), pp.94, Chiba, May 25-27, 2018.
- Shiono, Y. and K. Motojima, Detection of anomalous VHF radio wave propagation associated with earthquake by Artificial Intelligence, Japan Geoscience Union Meeting 2018, MIS09-06, Chiba, May, 22, 2018.
- 小林孝央、本島邦行, GPS 波観測データを用いた地震発生時における電離層電子密度観測 ”、日本地震予知学会第 5 回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第 5 回学術講演会アブストラクト集, 35-38, 2018 年 12 月.
- 小倉佑哉、本島邦行、気象現象による影響を考慮した見通し内 VHF 帯放送波の伝搬異常と地震の関連性解析, 日本地震予知学会第 5 回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第 5 回学術講演会アブストラクト集, 39-42, 2018 年 12 月.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画では、電磁気学的な先行現象に関する計画部分は全面的に千葉大学が提案する新研究課題「電磁気学的な地震先行現象の総合的研究」に引き継がれる事となった。本研究課題(2501)を実施し、統計的有意性が明らかになった複数の現象について、さらに探求を実施していく。換言すれば千葉大学の課題は、電磁気学的な地震先行現象を用いた短期地震予測に資する研究であり、最終的な output として地震災害軽減に対応する確率的な短期地震予測情報というものを目指すものである。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

長尾 年恭、織原 義明、馬場 久紀、佐柳 敬造、原田 靖(東海大学)
 他機関との共同研究の有無 : 有
 北海道大学(茂木 透、橋本 武志、日置 幸介、勝俣 啓)

東京大学地震研究所 (中谷 正生 , 鶴岡 弘)
 京都大学防災研究所 (西村 卓也)
 九州大学 (松島健、相澤 広記)
 東京学芸大学 (鴨川 仁)
 千葉大学 (服部 克巳)
 中部大学 (井筒 潤)
 群馬大学 (本島 邦行)
 静岡県立大学 (楠城 一嘉)
 海洋研究開発機構 (末廣 潔)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東海大学海洋研究所 地震予知・火山津波研究部門
 電話 : 054-334-0411
 e-mail : nagao@scc.u-tokai.ac.jp
 URL : <http://www.sems-tokaiuniv.jp/EPRCJ>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 長尾年恭
 所属 : 東海大学海洋研究所 地震予知・火山津波研究部門

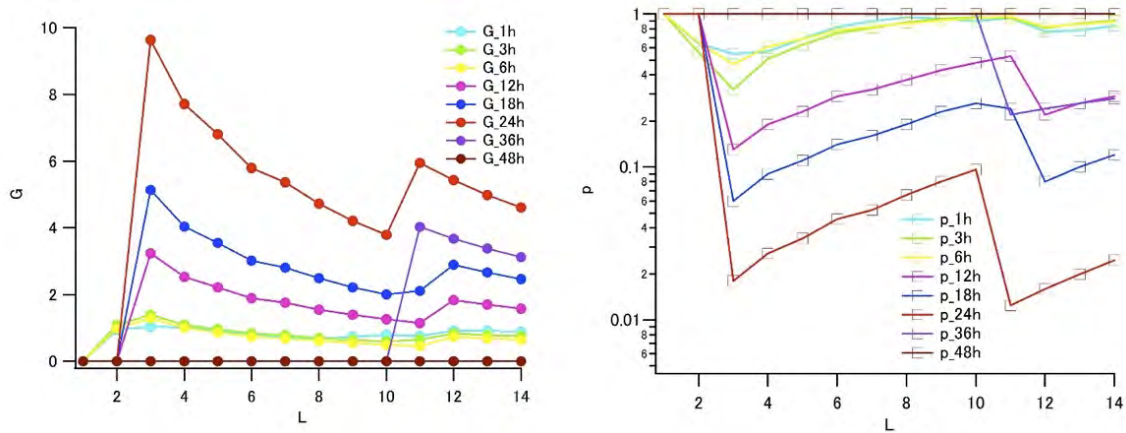


図 1

過去 x 時間 (x=1 ~ 48 時間) のうち 50 % 以上のデータが異常とした場合の G と p の値

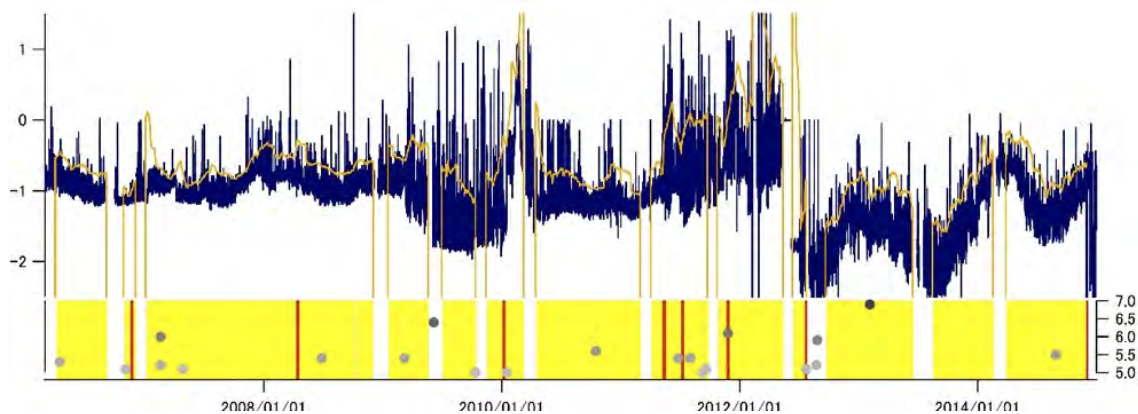


図 2

縦軸が電波強度 V 、横軸が 2006/03/01 ~ 2014/12/31 までの日付を表している。オレンジのグラフはその地点での異常検出の閾値を表す。下の帯グラフが、黄色が警報 OFF、赤色が警報 ON 期間をあらわす。帯グラフ上の丸が地震の発生した期間とそのときのマグニチュードを示す。この期間中では、全 21 個のうち 4 つが欠測期間中に発生した地震、2 つが警報 ON 中に発生した地震、残り 15 個が警報 OFF 中に発生した地震となった。

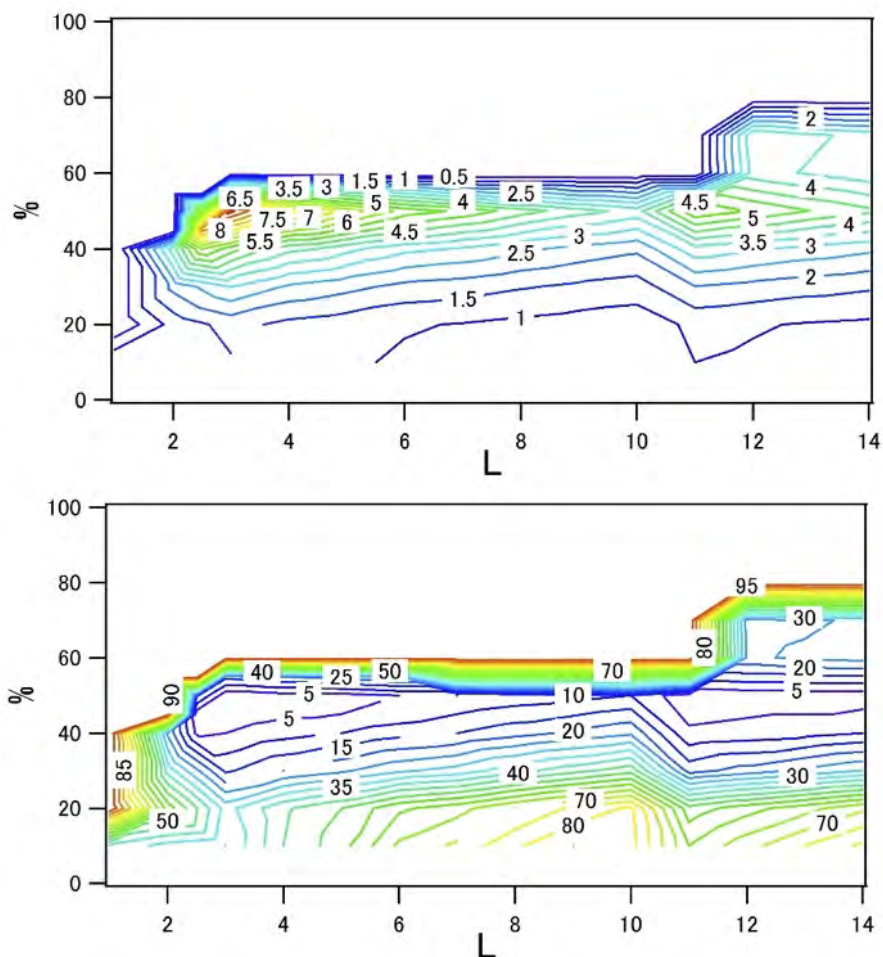


図 3

縦軸：異常時間検出割合 ($y\%$)、横軸が L を表す。上図は G についての分布、下図は p 値の分布を表す。この図からも過去 24 時間で $L=3 \sim 5$ 日で 40 ~ 55 % の異常データが検出された場合、 G が 6 以上、 p が 5 % 以下になった。

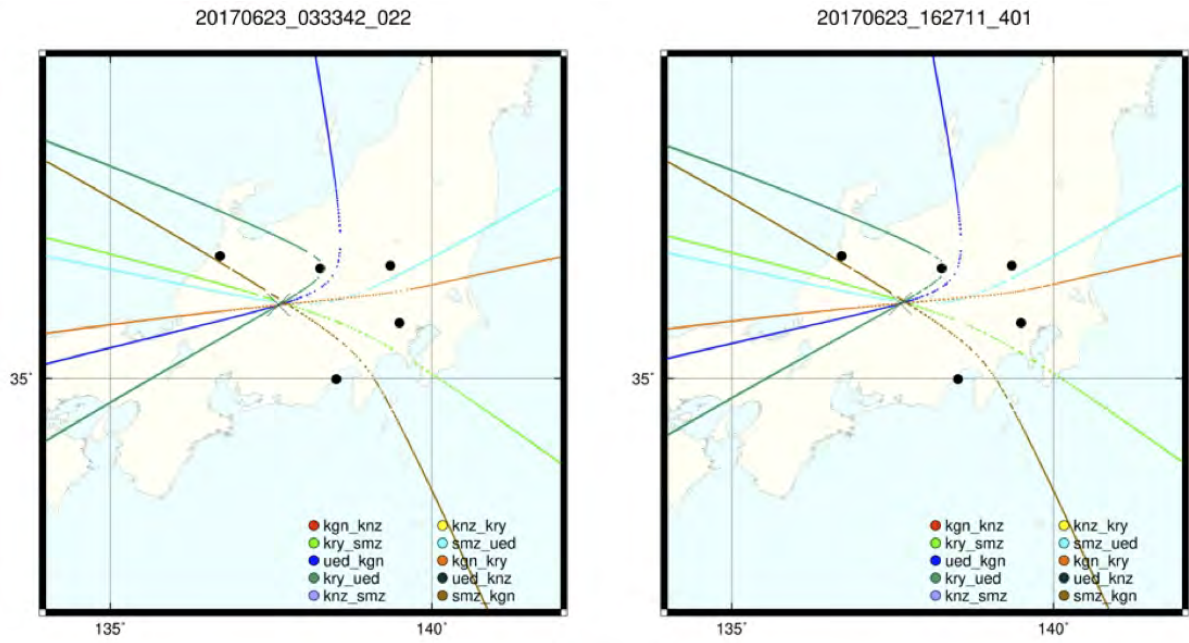


図4
震央近傍から到来した電磁波の TDOA の結果の例

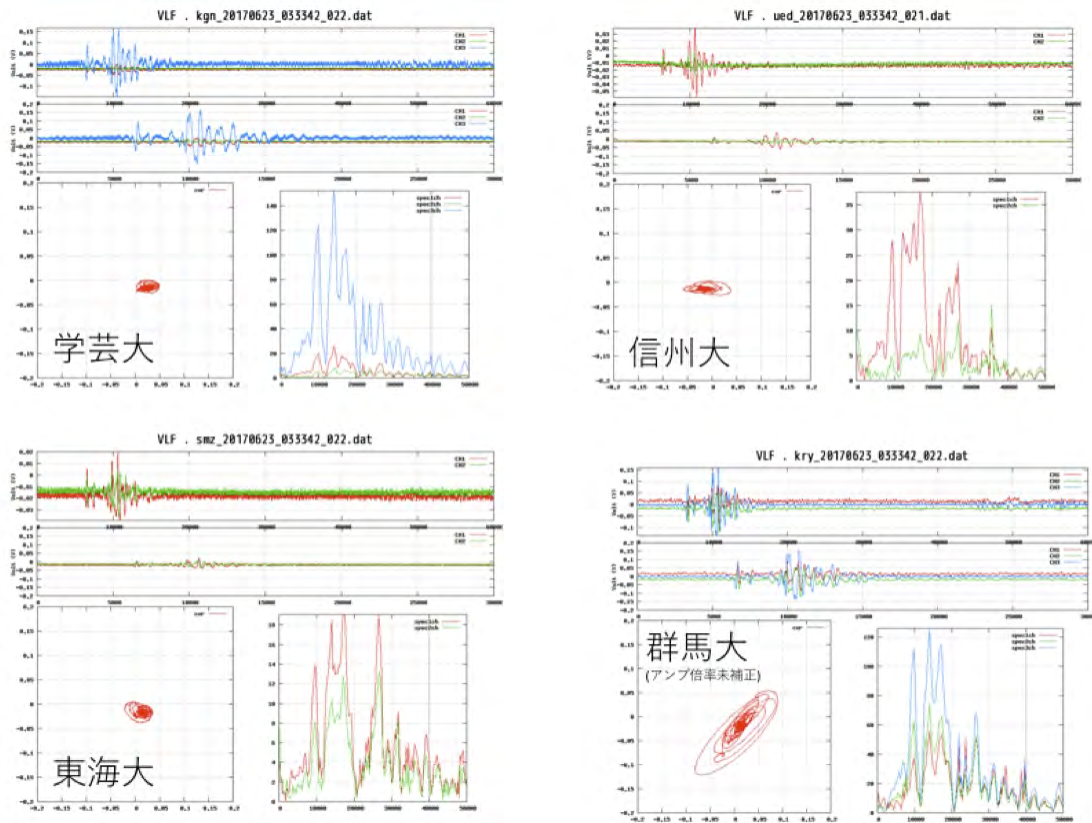


図5
6月23日の3時33分42.022秒に観測された波形である。いずれの観測点でも観測された波形は時系列からもほぼ同一の特徴を持ち、ほぼ同様なスペクトル特性をもつ事から、同じ事象を観測している事が確認できる。また午前3時台には中部地方では落雷は発生していない事がフランクリンジャパンのウェブ上の落雷データからも確認できた。

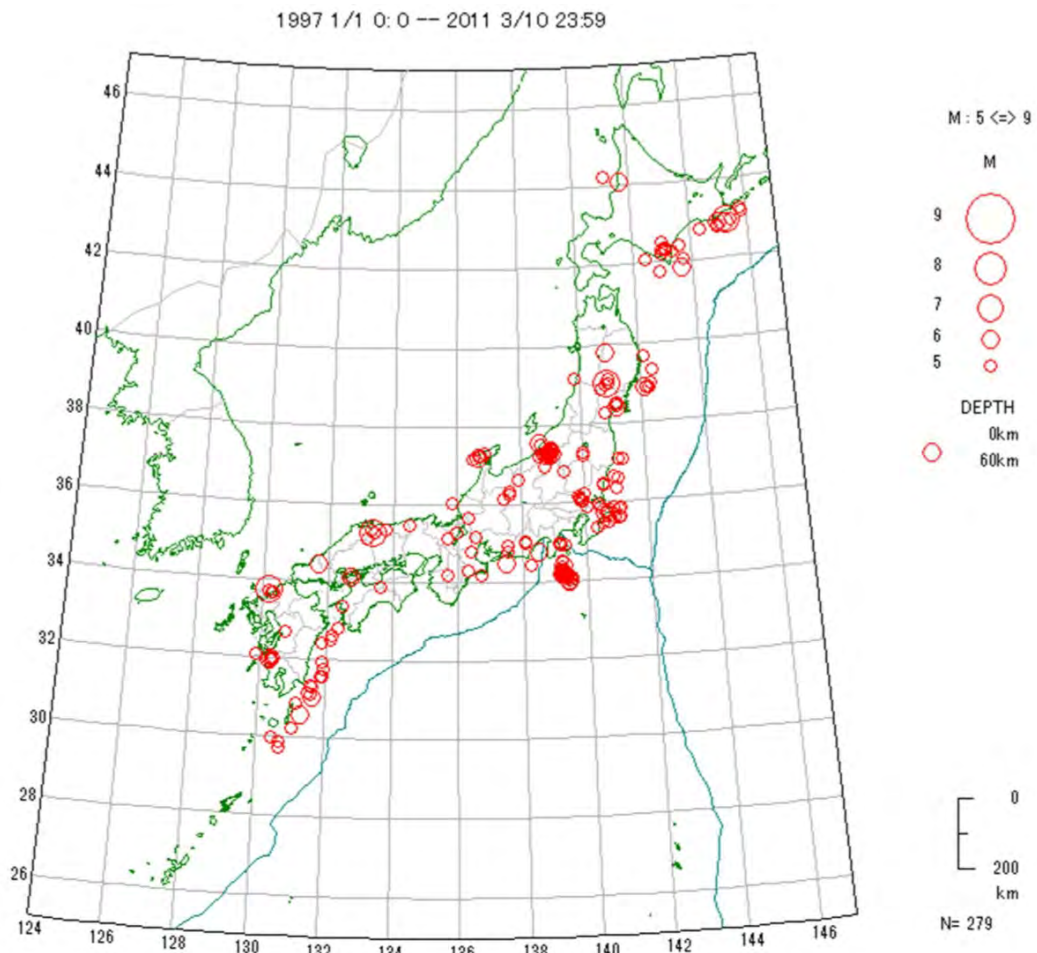


図6
解析に用いた279個の地震の震央

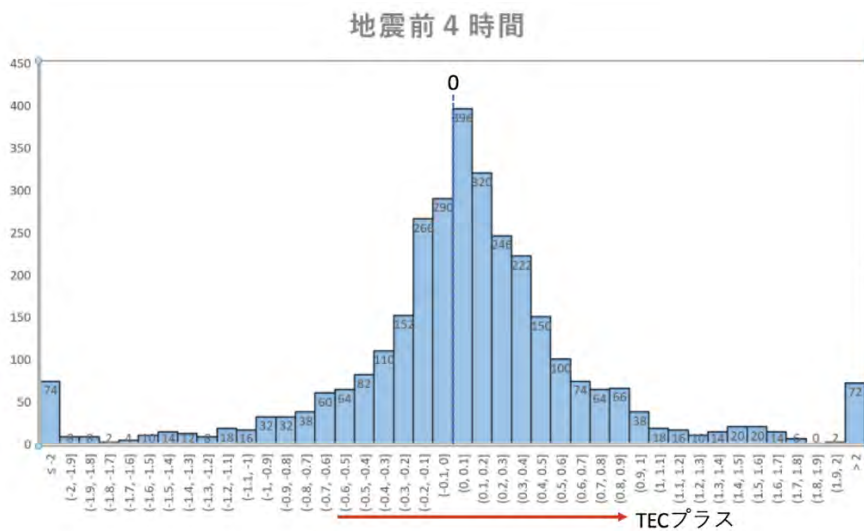


図7
地震発生4時間前のTECのモデルからのずれ。若干正の値がピークとなっている事がわかる。

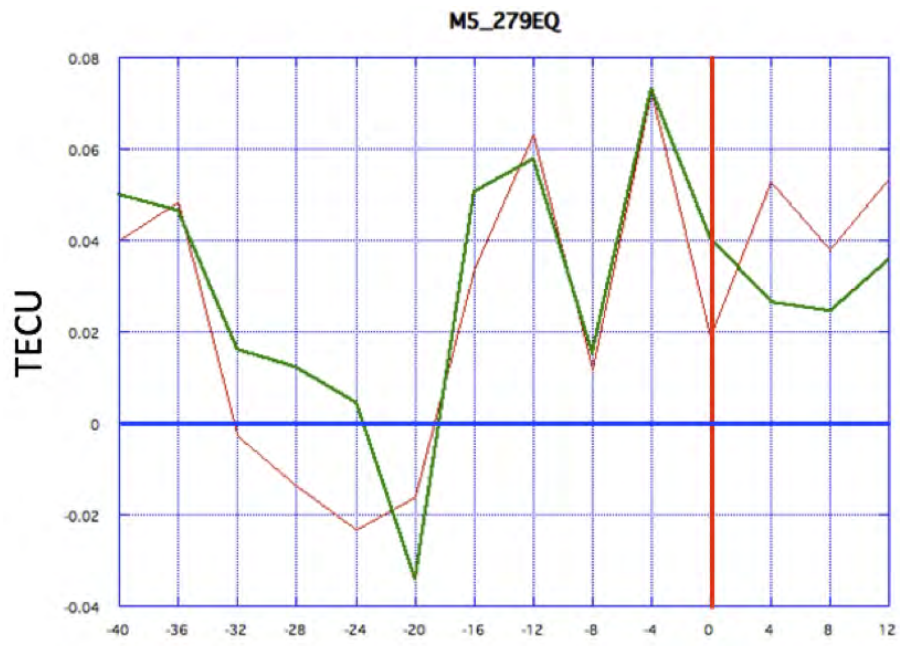


図 8

4 時間ごとに計算した TEC のモデルからのずれ。地震発生の 4 時間前に最も大きな正の値となっている事がわかる。

(1) 実施機関名：

東京大学史料編纂所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

文献史料による歴史地震に関する情報の収集とデータベースの構築・公開

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ア. 史料の収集とデータベース化

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

イ. 考古データの収集・集成と分析

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

低頻度大規模地震の実態把握のためには、近代以前の被害地震についての調査・研究が必要である。本研究計画では、近代以前の文献史料を対象にして、過去の被害地震に関する記録を収集し、そのデータベース構築と公開を実施する。

近代以前に日本列島周辺で起きた地震(以下、歴史地震と呼ぶ)に関しては、東京大学地震研究所の編集などによって、既に計 33 冊(約 27,000 頁)に及ぶ地震史料集が刊行されている。しかし、これらの地震史料集は幾度ももの増補を重ねているため、現状では地震研究者・歴史研究者の双方にとって利用しにくい状態にある。本研究計画では、この既刊地震史料集に収録された文献史料を分析して、地震の発生した年月日や場所の情報によって検索可能なデータベースを構築する。また、既刊地震史料集には収録されていない地震関連の新史料の調査・収集を実施し、その成果を情報化して公開する。公開にあたっては東京大学地震研究所と連携する。

上記の取組によって、近代以前に起きた被害地震の規模や震源の推定、低頻度大規模地震による災害の実態を解明し、その将来的な予測に寄与するための基盤的なデータベースの構築が期待できる。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

[平成26年度]

既存の17世紀以前の地震・火山噴火史料データベースを活用して、近代以前の地震史料について総合的に検索できるデータベースの設計を行う。また、『増訂大日本地震史料』(3冊)、『日本地震史料』(1冊)、『新収日本地震史料』(21冊)、『日本の歴史地震史料拾遺』(8冊)に収録された地震史料の編年的整理(網文・出典史料のデータベース化)を実施する。更に、既刊地震史料集に未収録の地震関連史料の調査・収集を行う。

[平成27年度]

『新収日本地震史料』(10冊分)の収録史料の解読と地震に関する時間・空間情報及び被害情報を抽出する。また、既刊地震史料集に未収録の地震関連史料を調査・収集し、成果の情報化を実施する。更に、文献史料から抽出した情報を順次データベースに搭載する。

[平成28年度]

『増訂大日本地震史料』(3冊)、『新収日本地震史料』(11冊分)の収録史料の解読と地震に関する時間・空間情報及び被害情報の抽出を行う。また、既刊地震史料集に未収録の地震関連史料を調査・収集し、成果の情報化を実施する。更に、文献史料から抽出した情報を順次データベースに搭載する。

[平成29年度]

『日本の歴史地震史料拾遺』(8冊)の収録史料の解読と地震に関する時間・空間情報及び被害情報の抽出を行う。また、既刊地震史料集に未収録の地震関連史料を調査・収集し、成果の情報化を実施する。更に、文献史料から抽出した情報を順次データベースに搭載する。

[平成30年度]

平成26～29年度の成果を踏まえ、必要な補充調査を実施するとともに、研究成果をまとめて、近代以前の地震史料に関して総合的に検索できるデータベースを構築する。構築されたデータベースを学界や社会に向けて公開し、データベース活用の研究集会を開催する。

(8)平成30年度及び計画期間中(平成26年度～30年度)の成果の概要:

平成30年度の成果の概要

今年度は昨年度に引き続き、既刊地震史料集に記載されている史料について、歴史的に信頼できる原典史料に遡って、史料記述の間違いの修正や省略部分の補足を行う校訂作業を実施した。史料本文の校訂作業には膨大な手間と時間を必要とするため、当初の計画どおりには進捗していない。そこで、今年度からは計画を部分的に変更して、既刊地震史料集全33冊(合計約27,000頁)を一端全てテキストデータ化して簡易データベースを作成し、それを基にして校訂作業を実施していく手法を開始した。これによって、平成29年度までにデータベース化の作業に着手している約30.9%に加えて、今年度中に新たに約24.5%のテキストデータ化が達成された。これらについては順次、試作版地震関連史料データベースに組み込んでいく予定である。

試作版地震関連史料データベースに収められた史料を用いて、文禄五年(1596年)閏七月に発生し、現在の大部分の別府湾岸に津波被害をもたらした文禄豊後地震に関する史料について再検討した。この検討によって、地震・津波の発生日を閏七月九日(1596年9月1日)とする複数の史料については、情報源が個々に独立したものであるが、同じく発生日を閏七月十二日(同年9月4日)とする複数の史料については、後世に日付を改めたものであるため、信頼性のないことが判明した。これによって従来、閏七月九日説と同十二日説の学説が存在していた文禄豊後地震について、別府湾に津波被害をもたらした文禄豊後地震は閏七月九日であったことが確定的となった。

また、昨年度に引き続き、東海地方にあって長期間にわたる日記史料が現存する三河国田原藩(愛知県田原市)の「田原藩日記」(田原市博物館所蔵)の調査・撮影を実施しており、今年度で全ての撮影が完了した。これに関連して、嘉永七年十一月四日・五日(1854年12月23日・24日)の東海・南海地震関連の日記史料について集中的に調査を実施し、本震前後の期間における有感地震の記録について分析した。現段階での成果として、東海・南海地震の発生前に、太平洋沿岸地域では目立った有感記録の増加はみられないが、山陰地方や近畿地方北部では本震発生の5年前に有感地震の記録が増

加している状況が判明した。

さらに、平成 30 年 11 月 30 日に、地震史料データベースの更なる活用に向けて、地震史料シンポジウム「地域史料から地震学へのアプローチ」を開催した。

計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要

既刊地震史料集に所収されている史料について、XML データ化のためのタグ付けおよび XML データ化作業を実施した。史料を XML データ化する際に、信頼できる原典に遡って史料本文の間違いの修正や省略部分の補足を行う校訂作業を実施し、「日本歴史地震関連史料データベース」（試作版）を構築した。既刊地震史料集全 33 冊（合計約 27,000 頁）のうち、データベース化の作業に着手しているのは 30.9 % である。また、既刊地震史料集を一端全てテキストデータ化して簡易データベースを作成し、それを基にして校訂作業を行う新たな手法も開始した。さらに、本研究で XML データ化した地震関連史料について、当時の地名を示す箇所に位置情報（緯度・経度）を付与し、「日本地震関連史料データベース」（試作版）の検索結果を国土地理院の地図上に表示するシステムを試作した。

既刊地震史料集に未収録の地震関連史料の調査・収集および翻刻を実施し、安政東海地震（1854 年）における駿河（現静岡県東部）地域での地震とその被害について記された嘉永七年「恒例関東献上使日記」を翻刻した。また、東海地方において長期間にわたる日記史料が伝存している三河国田原藩（現愛知県田原市）の「田原藩日記」をはじめとして、各地の史資料保管機関において地震関連史料の調査・撮影を実施した。これらの調査・収集・翻刻した史料を用いて、文禄豊後地震（1596 年）については史料学的な評価に基づいてその実態を検討し、安政東海・南海地震（1854 年）については日記史料の記録に基づいて、その前後の期間における有感地震の発生傾向を分析した。

平成 28 年度に開催された「東京大学史料編纂所第 37 回史料展覧会」において地震史料のコーナーを設け、安政東海地震などに関する新史料を展示して、展示図録『史料を後世に伝える営み』に解説を掲載した。

（9）平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

（10）次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

史料の校訂作業における新たな手法を開発・実用化し、既刊地震史料集に所収の史料について校訂作業を実施していく。また、地震火山関連史料データベースの構築作業について、新たに全文デジタルデータ化を基盤とした構築方法を導入し、従来の紙媒体上での編集から史料データを用いた編集作業へと手法を転換する。これらによって、歴史学的に信頼できる史料に基づいた史料データベースを構築していく。さらに、現存する膨大な史料の中から、近代以前の地震・津波や火山噴火に関連する新たな史料を調査・収集する。

次期計画研究課題

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

（11）実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京大学史料編纂所 佐藤孝之・他 5 名

他機関との共同研究の有無：有

東京大学地震研究所 佐竹健治・西山昭仁

京都大学地域研究統合情報センター 原正一郎

（12）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学史料編纂所

電話：03-5841-5997

e-mail：

URL：

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 佐藤孝之

所属 : 東京大学史料編纂所

(1) 実施機関名：

新潟大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

日本海沿岸地域を中心とした地震・火山噴火災害関連史料の収集と分析

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ア. 史料の収集とデータベース化

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

イ. 考古データの収集・集成と分析

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料，考古データ，地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

各地の文書館・図書館等の史料保存機関に所蔵されている歴史資料を調査し，日本海沿岸を中心とした地震・火山噴火に関連する前近代の史料を収集して翻刻を行う。重要な史料については，理系の研究者等にも理解しやすいように丁寧な校訂者注を付ける。収集・翻刻した新たな地震・火山噴火災害関連史料については，地震別に整理し，それをさらに藩領等地域別に分類し，活用しやすいように編集し，データベースを構築する。このデータベースを活用し，歴史時代における日本海沿岸地域の地震活動について，地形等の地域の特徴を分析した上で，近代的な観測データとの統合を目指す。日本海沿岸の地震関連の考古データも収集し，分析・検討の材料とする。災害絵図については，絵図に記された文字を読み込みトレーズ図に文字情報も組み込み，データベースに収める。また，既刊地震・火山噴火災害関連史料集所収史料のうち，総家数・倒壊家屋数・即死者数が記載され，家屋倒壊率・即死者率が導き出すことができ，近代的な観測データとの比較・検討が可能な良質の史料については，原本調査と校訂作業を行い信頼できる史料を作成し，地震別・地域別に分類してデータベースを構築する。さらに，このデータベースに収められた史料に記載された村の総家数，倒壊家屋数・即死者数を詳細に分

析・検討して、地域別の被害表等を作成する。家屋倒壊率・即死者率は地形によって異なるので、被害率表を作成する際には地形の検討も行う。この検討により、前近代の史料により震源域を特定する方法を確立する。また、データベースに収められた史料から従来明確にされてこなかった「半潰」とはいかなる被害状況を示しているのかを明らかにする等の検討を行うことを通じて、現在の前近代の震度を出す方法を再検討し、あらたな震度を算出する方法を確立する。津波については到達点を史料から導き出し、また、土砂災害については、即死者率から被害地点を特定する方法を構築し、防災・減災に貢献したい。データベースにおさめられた史料、被害絵図の中からさらに防災教育に役立てられるものを選び出し、現代語訳やわかりやすい図に直す工夫も行う。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成26年度においては、各地の文書館・図書館等の史料保存機関に所蔵されている歴史資料の調査を行い、地震・火山噴火に関連する前近代の史料を収集・翻刻し、地震別・地域別に整理しデータベースを構築する。また、既刊地震・火山噴火史料集所収の史料について原本調査と校訂作業を実施し、地震別・地域別に整理してデータベースを構築する。

平成27・28・29年度においては、地震・火山噴火などに関する新たな歴史資料の調査・収集・翻刻及び、既刊地震・火山噴火史料集所収の史料の校訂作業を継続して実施し、成果のデータベース化を推進する。平成27・28・29年度は、歴史学・考古学共同の研究集会を開催し、データの共有化を計り、活用の方策を検討する。

平成30年度においては、地震・火山噴火などに関する新たな歴史資料の調査・収集・翻刻及び既刊地震・火山噴火史料集所収の史料の校訂作業を継続して実施し、成果のデータベース化を推進する。さらに、データベースに収められた史料の村の総家数、倒壊家屋数・即死者数を詳細に分析・検討して、地域別の被害率表等を作成する。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度～30年度)の成果の概要：

平成30年の主な成果は以下のとおりである。

1. 各地の文書館・図書館等の史料保存機関に所蔵されている歴史資料の調査と、既刊地震・火山噴火史料集所収の史料の原本調査と校訂作業

(1) 1718年伊那・三河地震：享保三年七月二十六日(1718年8月22日)に起きた伊那・三河地震の全体像を明らかにするための基礎的研究として、『月堂見聞集』等の地震史料の検討を行った。明らかになったことは次の4点である。1 大阪府池田市地域では通常の地震とは違い日記に「大地震」と表記するような揺れがあった。2 吉田藩領(愛知県豊橋市等)・淀城(京都市伏見区)では地震による被害があった。3 「朝林後編 巻六三」により松本市・諏訪市・伊那市高遠町・飯田市の4箇所の被害を比べると飯田市の被害がいちばん大きい。4 『月堂見聞集』は京都の町人が記した記録で京都の町触を書き写す等良質な史料であるが京都から離れた地域の記事については慎重な扱いが必要である。九月十二日の風雨の記事のあとに記された「信州飯山のあたりは大地震で城・民家まで大破損」という記事の「飯山」は飯田の書き誤りでこの地震記事は七月二十六日の飯田の被害を書いたものと考えられる。

(2) 1848年弘化善光寺地震(三月二十四日夜)・同年三月二十九日朝の地震、同日昼の弘化高田地震：弘化四年(1847)三月二十四日夜十時頃善光寺地震とその五日後の三月二十九日昼頃に起った高田地震は知られているが、三月二十九日朝に起った地震はまだ検討されていない。埴科郡森村(長野県千曲市)の名主中条唯七郎が書いた日記「徒然日記 附 地震大變録」三月二十九日条には、「今朝明け方前より明けるまでの地震、誠に大より(揺)なり、我ら方これまでは何の子細もこれなくそうろうが、今朝の大より(揺)にて土蔵の屋根瓦一寸程ずつ下り候」(読み下し)と記される。中条唯七郎は、今朝の明け方前後の地震は大地震であった。私たちの家はこれまでなんの被害もなかったが、今朝の大地震で土蔵の屋根瓦が一寸(3センチメートル)ほどずつ下り下った、と記している。森村の自らの家は、三月二十四日の地震ではまったく被害がなかったが、5日後の二十九日朝の地震で土蔵の屋根瓦がずれる被害があったことがわかる。森村では、三月二十四日の地震よりも三月二十九日

朝の地震被害の方が大きかった。

2 前近代における家屋倒壊率研究の再検討

前近代の家屋の地震被害の史料を検討することによって、家屋倒壊率を導き出す方法の再検討を行った。明らかにした点は、次の4点である。1、1707年宝永地震被害報告書の記事のうちで町家・民家の被害の事例143例を検討すると潰・半潰・大破という順で記される例は全体の22パーセントであり、半潰という用語を使用しないで潰・大破という記載は16パーセント、潰・破損という表現は12パーセントであった。2、1854年嘉永東海地震の被害について、東海道三島宿(静岡県三島市)は同じ被害とその被害数を道中奉行には半潰47軒、代官には大破47軒と報告している。3、1855年安政江戸地震の被害について、武蔵国葛飾郡東葛西領笹ヶ崎村(東京都江戸川区)は代官が示した被害報告書の雛形に従って被害報告書を作成し提出していた。4、代官の被害報告の雛形作成の目的は夫食米・夫食金貸与のための基礎資料作成のためのものであった。以上のことから半潰数は家屋倒壊率を導き出すための被害数としては使用することが出来ないことは明白である。広域の地震被害を検討するときには、家屋倒壊率を導き出すためのものとして半潰軒数は使用しない方がよい。家屋半壊率を含めず、家屋全壊率を家屋倒壊率とすることが妥当である。

3 災害絵図の調査とトレース図作成

1854年南海地震にともなって作成された瓦版絵図の検討：東大地震研石本コレクションの「嘉永七年寅霜月大坂大地震(仮)」、大阪城天守閣蔵の「大坂大津浪図」、大阪府中之島図書館蔵の「大坂大洪水図」という1854年南海地震により作成された瓦版絵図について、翻刻および簡単な検討を行った。津波到達点について論じた土屋・河田(1986)や長尾(2008)などでは、大阪城天守閣蔵「大坂大津浪図」を使用しているが、これは管見の限り、他では見ないものである。多数の残存を確認できる「嘉永七年寅霜月大坂大地震(仮)」は体裁や記載内容が類似するため、「大坂大津浪図」と明確に区別されていないが、津波遡上による被害情報の量や浸水範囲において相違が見られる。この違いは大きな違いではないかもしれないが、面的な広がり把握するために絵図が有効であることを念頭に置かなければ、留意しておくべき、資料上の性格の差異と考える。また、「大坂大洪水図」は「嘉永七年寅霜月大坂大地震(仮)」をベースに朱筆の手書きによる書き込みがあるものであり、朱筆の内容はa死者に関する記載、b遡上した船に関する記載、c辰巳屋に関する記載、dその他の4つに大別できる。「大阪市中大洪水図」は、災害被害を描いた瓦版絵図をベースマップとして、さらに被害状況に関する記載を追加して、情報を空間的に把握した結果として残されたものと推定される。このような入手者の手によって情報が付加されていることは、瓦版絵図の利用方法の一端を伺わせており興味深い。

4 地形・地質調査

九十九里浜平野における津波痕跡に関する調査：千葉県東部の九十九里浜平野では、西暦1703年の元禄関東地震の際に津波が襲来したとされる。同平野内に位置する片貝村(現在の九十九里町片貝付近に相当)には元禄関東地震前・後に作成された絵図が存在し、現地比定の結果から現在の九十九里町役場付近まで津波が遡上した可能性が高いことが指摘されている。この津波に伴って堆積した「津波堆積物」を検出するため、役場付近の堤間湿地において浅層部の地下地質調査を実施した。役場北東側(第1図;標高約0.7m)の計15地点において、ハンドオーガーと打ち込み式ポータブル・ジオスライサーを用いた掘削調査を実施した。掘削深度は0.6~1.0mである。1地点の堆積物について、光学顕微鏡を用いて珪藻化石群集を概査した、また、有機物試料計3点について、放射性炭素(^{14}C)年代測定を行った。浅層地下地質は、計4ユニット(下位から順にユニットA~D)に区分できる。ユニットAは青灰色シルト混じり極細粒砂から構成され、概ね深度0.5m以深に分布する。本ユニットでは汽水泥質干潟指標種の*Pseudopodosira kosugii*が優占的に産出し、潮汐の影響下で堆積したことが示唆される。これらの特徴から、ユニットAは干潟堆積物であると推定される。ユニット最上部からは、1456-1631 cal AD(2)の年代測定値が得られた。ユニットBは暗褐色の極細粒砂混じりシルトから成り、深度0.4~0.5m付近に分布する。層厚は5cm程度である。対象地域南部では本ユニットは認められない。本ユニット下部では*P. kosugii*の産出頻度が減少し、淡水~汽水生種の*Rhopalodia*属や淡水生種の*Gomphonema*属などが産出する。これらの特徴から、ユニットBは堤間湿地堆積物で

あると考えられる。本ユニットからは 1684-1928 cal AD , 1664-1950 cal AD の年代測定値が得られた。ユニット C は淘汰の良い極細粒砂から成り、下位のユニット B とは侵食面を介して接する。ユニット最上部では上方に細粒化する。陸側に向けて基底深度が浅くなる傾向があり、粒度もやや細くなる。層厚は少なくとも 10~15 cm 以上である。淡水~汽水生種の *Staurosira construens* や *Fragilaria* 属などが卓越する。掘削地点周辺には砂質堆積物を運搬する河川がないことから、本ユニットは津波や高潮などの海側からの流れ込みに伴うイベント堆積物である可能性が高い。さらに、ユニット B の年代測定値を考慮すると、本ユニットが元禄関東地震の津波堆積物に対比される可能性がある。ユニット D はシルト質極細粒砂~極細粒砂混じりシルトから成り、全体に植物片や植物根跡が認められる。土地利用状況を参照すると、本ユニットは水田土壌と考えられる。

5 考古データの収集

警固断層地震の考古学的研究:警固断層の最新活動は、福岡市中央区浜の町におけるトレンチ調査から、約 8000 calBP と推測されている。考古年代でいうと、塞ノ神?式中段階以前であることは確かだが、どれほど遡るかが課題とされていた。本研究で、福岡平野における縄文遺跡の消長を細別型式ごとに整理した結果をふまえ、地震の発生時期を、人類活動の痕跡がにわかに皆無になる塞ノ神?式中段階と結論づけた。

計画期間中(26年度~30年度)の主な成果は、以下のとおりである。

A. 各地の文書館・図書館等の史料保存機関に所蔵されている歴史資料の調査と、既刊地震・火山噴火災史料集所収の史料の原本調査と校訂作業

(1) 日本海沿岸地域

a.1804 年象潟地震：象潟地震の全被害数研究については半田 1994 があるが、半田 1994 が取り上げていなかった『庄内大変記』記載の庄内藩預所 7 か村分の被害数を入れると、象潟地震全体の被害数は民家の潰家(全壊)5225 軒、町家の潰家(全壊)死亡者 387 人となる。

b. 寛文以来万年代記：既刊地震史料集所収の寛文以来万年代記の史料について原本調査と校訂を行った。寛文以来万年代記(福島県只見町大字熊倉の目黒武男家に所蔵される年代記)はこれまで『只見町郷土史資料第 4 集 寛文以来万賞書』が利用されていたが、福島県歴史資料館寄託史料によって地震で五十里湖ができた天和三年(1683)・宝永七年(1710)会津南山地震等の地震記事の翻刻をおこなった。

c.1828 年三条地震における広域情報の集積：文政 11 年(1828)越後三条地震に関する諸記録の形成のされ方の検討を行なうことにより、各史料の総合的研究により幕府への報告の全体像はほぼ把握が可能になった。その過程で既刊地震史料の翻刻の修正もおこなうことができた。

d.1961 年の長岡地震について、長岡市立中央図書館文書資料室で保管されている『災害記録綴(長岡地震)』に即して、災害発生時の行政の対応等について検討を行なった。

e.1964 年新潟地震に関する歴史資料の調査・検討・活用：1964 年の新潟地震について、新潟市内の小学校に保存されていた 1964 年新潟地震資料の調査を行い、8 ミリフィルム・写真のデジタル化を行った。その後、8 ミリフィルムを基礎に DVD『新潟地震とその復興の記録—新潟市立白山小学校に残された 8 ミリフィルム映像』を制作した。本 DVD は新潟市の小学校において防災教育に活用された。

f. 未紹介であった江戸青山善光寺文書より 1848 年弘化善光寺地震(三月二十四日夜)・同年三月二十九日昼の弘化高田地震記事を翻刻した。

g.1858 年飛越地震の被害一覧表の作成：1858 年飛越地震の被災地である飛騨地域(岐阜県)には一つの文書に広域の村ごとの家数・皆潰数・半潰数・死亡者数が記された史料「飛騨国村々大地震先御届出」がある。本史料はすでに『岐阜県史 資料編 近世八』に全文翻刻されているが、原本で確かめると、本文の翻刻に誤読や脱落の箇所があり、また翻刻の体裁が原本に忠実でなく、抹消部分の記載・未記載などの翻刻基準の不統一があることがわかった。そこで、あらためて原本によって翻刻をし直し、1858 年飛越地震飛騨国被害一覧(51 か村)を作成した。この表によって、正確な家屋被害数、一軒当たり死亡者数が導き出すことができる。

h.1707 年宝永七年閏八月十一日伯耆(鳥取県)を中心とした地震と 1708 年宝永八年二月一日美作

(岡山県)に被害を与えた地震に関する既刊地震史料の再検討と新たな史料の収集：この地震に関し、今年度は既刊地震史料の再検討と新たな史料の収集を行い確実な史料からわかる被害地域と家屋倒壊数と死亡者数を明らかにした。

(2)各地の地震史料の調査・研究

i. 1855年安政江戸地震：安政江戸地震における幸手領52か村(埼玉県幸手市・北葛飾郡杉戸町・久喜市・春日部市)の家屋倒壊率(家屋全壊率)は0.3パーセントであり、川崎領15か村(神奈川県川崎市川崎区・横浜市鶴見区)の家屋倒壊率(家屋全壊率)は1.1パーセントである。よってこの地域は安政江戸地震の被害の中心地ではない。なお、家屋倒壊率を家屋全壊率とすることについては、2.前近代における家屋倒壊率研究の再検討、で説明している。

j. 『月堂見聞集』等の検討により、享保三年(1789)九月十二日の風雨の記事のあとに記された「信州飯山のあたりは大地震で城・民家まで大破損」(『月堂見聞集』)という記事の「飯山」は飯田の書き誤りで、この地震記事は七月二十六日の飯田の被害(1789年伊奈・三河地震)のことを書いた可能性が高いことを明らかにした。

k. 1889年の熊本地域に被害を与えた歴史資料の収集・研究・調査・史料翻刻を行った。

B. 家屋倒壊率研究の再検討

前近代における被害用語「半潰」等の検討をおこなうことにより、広域の地震被害を検討するときには家屋倒壊率を導き出すためのものとして半潰軒数は使用しない方がよいこと、家屋半壊率を含めず家屋全壊率を家屋倒壊率とすることが妥当であることを明確にした。

C. 災害絵図の調査とトレース図作成

a. 1833年庄内沖地震：新潟市立新津図書館所蔵の「信濃川御番所舟着場絵図」を検討し、庄内沖地震津波の被害を描いたものであることを明らかにした。

b. 1833年庄内沖地震被災地である能登輪島地域(石川県)の災害絵図を調査し、絵図に記された文字を読み込んだトレース図を作成した。

c. 1858年飛越地震による山崩れと天然ダムに関する研究：「飛越郡代高山陣屋文書」所収絵図の読み取りと自然科学的調査によって、飛越地震によって生じた保木付近の大規模な山崩れと天然ダムの形成場所を明らかにした。また、山崩れの際に生じた滑落崖と、その下部に形成された崩落土砂の堆積地形を復原することができた。

D. 地形・地質調査

(1) 米代川流域で発見された十和田火山AD915噴火後のラハール堆積物と埋没建物に関する研究：2015年に秋田県埋蔵文化財センターによって実施された片貝家ノ下遺跡の発掘調査に参加し、良好な状態で保存された埋没建物群およびラハール堆積物を確認した。

(2) 徳島県撫養地区における塩田開発と1596年の地震との関連性に関する研究：鳴門南断層は、高島を含む撫養塩方十二ヶ村の南部付近にまで伸びており、当地は断層の隆起側に立地している。また、本研究における地形・地質調査の結果および既存の活断層研究の結果などから、同断層の最新の活動時期は16世紀末の連動型地震時に相当し、断層部における上下変位量は0.5~1.0m以上と考えられた。この変位は、干潟堆積層にも及んでおり、撫養地区では干潟が隆起したことが示唆される。以上の結果は、1596年に地震性の隆起が生じ、塩田開発の契機となったとする「鳴門市山田喜昭所蔵文書」の内容を支持しており、文書の信ぴょう性は高いと判断できる。

E. 考古データの収集

(1) 新潟県遺跡における地震痕跡の集成とデータの偏りに関する研究：新潟県内で行われた発掘調査で検出された地震痕跡を集成し、その偏在性を指摘した。その上で偏りの意味するところを考察した。高田平野は西・東縁に活断層が存在し、1751年高田地震では、高田城下町屋地域の全壊率が71%に達しているが(矢田・ト部2011)、地震関連の考古データは1例にすぎない。液状化痕跡が残らない理由として、a. 段丘の発達、b. 粘土層の厚さが推測される。噴砂等の液状化痕跡が発生しやすい低地とそうでない低地があること、また大規模地震が発生していても痕跡が残りにくいケースがあることを議論した。

- (2) 晩期縄文越後地震の考古学的研究：新潟県下越地方では、液状化をともなう大規模地震が縄文時代晩期最終末の短期間に頻発した。土器型式の細別研究により、a. 阿賀野川以北の低地帯では、当該地震直後での活動痕跡が一切みられなくなり、b. 阿賀野川以南で新しく集落が出現する。そして、c. 1 世代未満の時間的間隔を挟んで、元々の場所での活動が再開する、という回帰プロセスが確認された。
- (3) 正徳4年(1714)信濃小谷地震の考古学的研究：千国坪ノ沢に形成された天然ダムについては、鈴木比奈子ほか(2009)・井上公夫ほか(2013)・鈴木比奈子ほか(2013)が天然ダムの規模・水量の復原を行っている。この天然ダムは地震発生の日後に決壊したと言われているが、文書では決壊によって発生した洪水が下流へ及ぼした影響が明確でない。この問題について、小谷村北小谷下寺でトレンチ調査を実施し、同地震に起因する最大厚80cmの洪水砂層を検出した。したがって、この洪水は、千国坪ノ沢から12km下流の来馬下寺地区でも姫川溪谷全体を覆い尽くしたことが初めて明らかになった。
- (4) 三陸地震津波研究：岩手県域の発掘調査データを悉皆調査し、地震・津波によって引き起こされた現象を抽出した。特に、縄文時代中期大木9式前後の集落一斉移転は、縄文三陸地震の規模や実態を考えていくうえでの参照枠を提供したといえる。
- (5) 寛永熊本地震の考古学的研究：明らかにしたのは以下の3点である。1. 古町遺跡では、17世紀前葉と中葉の間で遺構の連続性が必ず途切れる、2. 17世紀前葉を下限とする遺構に、被熱し廃棄されたと思われる遺物が含まれる。そして、3. 熊本城飯田丸では17世紀中葉以降利用された形跡がない。低地の古町遺跡と高台上の熊本城で同時に変化が起きていること、および時期の一致から、これらの変化は寛永期の大規模地震に起因する一連の現象ととらえられる。

- (9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
矢田俊文, 2018, 1855年安政江戸地震と1856年安政台風の被害数 武蔵葛西領・武蔵多摩地域・武蔵川崎領, 資料学研究, 15, 1 - 20.
矢田俊文, 2018, 史料から見た一七一年伯耆・美作地震と一七一年伯耆・美作地震, 災害・復興と資料, 10, 13 - 18.
矢田俊文, 2018, 近世の巨大地震, 吉川弘文館, 248pp.
堀健彦・小野映介, 2018, 1833年庄内沖地震による輪島の津波被害の地域的差異と微地形, 災害・復興と資料, 10, 15-23.
齋藤瑞穂, 2018, 警固断層の考古学的研究事始, 2018年前近代歴史地震史料研究会講演要旨集, 37-39
齋藤瑞穂, 2018, 弥生土器型式細別論, 同成社, 304pp.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

1. (1) ア. 史料の収集とデータベース化。平成31年度は各地の文書館・図書館等の史料保存機関に所蔵されている日本海沿岸を中心とした地震・火山現象に関連する近代観測開始以前の史料を調査・収集し、新たな史料については翻刻を行う。災害絵図も収集し、絵図記載の文字の翻刻・トレース図の作成を行う。また、歴史学・考古学・地理学研究者が参加する研究会を開催する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

新潟大学災害・復興科学研究所 矢田俊文
新潟大学人文学部 堀健彦・原直史・中村元
新潟大学教育学部 小野映介
他機関との共同研究の有無：有
九州大学埋蔵文化財調査室 齋藤瑞穂

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：新潟大学災害・復興科学研究所
電話：025-262-7051

e-mail :

URL : <http://www.nhdr.niigata-u.ac.jp>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 矢田俊文

所属 : 新潟大学災害・復興科学研究所

(1) 実施機関名：

新潟大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

過去の災害事例に基づく減災科学に係る研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

(4) その他関連する建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

新潟県において、過去に経験した焼山火山災害、新潟地震、中越地震、中越沖地震等を契機とし進めてきた「災害メカニズムの調査研究」に基づき、地域安全の確保を目的とした火山・地震災害の事例研究を実施する。研究成果を事例とし、地震・火山噴火に係る知見の発信技術について開発を実施する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

焼山火山災害、新潟地震、中越地震、中越沖地震等評価・検証し、今後想定される同様の地域における地震災害における多くの国民の財産、豊かな暮らしを守る機能の保全・維持を目指すために、災害事例の研究を実施する。研究成果を事例とし、地震・火山噴火に係る知見の発信技術について開発を実施する

平成 26 年度：新潟地震 50 周年、焼山火山災害 40 周年、新潟中越地震 10 周年を迎える年を契機として、火山・地震災害の被害やその後の復旧状況を評価・検証する。地震・火山噴火に係る知見の発信技術についての調査を実施する。

平成 27 年度：引き続き過去の災害の状況を評価・検証する。地震・火山噴火に係る知見の発信技術についての検討を実施する。

平成 28 年度～平成 29 年度：過去の災害事例に基づく災害発生機構を精査する。災害事例の研究を実施する。研究成果を事例とし、地震・火山噴火に係る知見の発信技術プロトタイプを検証を実施する。

平成 30 年度：さらなる研究の検証、研究のとりまとめと発信を実施する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 30 年度の成果概要

1. 研究概略

本年度においては、地震災害における知見の発信技術プロトタイプ作成の検証を実施した。地震研究が社会要請に応えるためのチャレンジは「ゆれの情報をいかに被害軽減並びその後の復旧・復興の実現に還元するか」である。本研究では特に後者の「復旧・復興の実現への還元」をその目的とし、被災者生活再建支援業務の業務量と業務日数の見積もりについて、過去災害の実績値の分析と将来の対応への見積もりシミュレーションを実施した。これらの研究成果を現在対応中の被災自治体体制に対し発信することで、自治体は「今後の推移の読み解きから、生活再建支援のための戦略的な行動変容に期待した研究である。

2. 研究対象

被災者生活再建支援業務の中で「罹災証明書の発行業務」を対象とした。罹災証明書は、被災者生活再建支援金・災害義援金の支給、住宅の応急修理、仮設住宅への入居など、被災者への生活支援サービスの適用の判断材料として活用されている。

3. 収集したデータ

2007年に発生した新潟県中越沖地震の被災地である柏崎市、2016年に発生した熊本地震の被災地である益城町、2018年大阪北部の地震の被災地である茨木市、における罹災証明書の発行の日別件数データについて、各自治体から提供を受けた（表1）。データによれば発行開始からの発行総件数は、柏崎市においては826日間で60,901件、益城町においては370日間で18,919件、茨木市においては、129日間3,357件となっている。本年度発生した大阪北部の地震は、昨年11月29日以降、発行実績はない。それぞれのデータは、被害を引き起こした地震災害の甚大さ、自治体の規模等、罹災証明書を受け取った被災者数等、条件が異なっており、それらの実数比較では業務量のシミュレーションモデルを導き出すことは難しい

4. 方法

まずは、収集したデータにおける罹災証明書の発行総件数を100として、日々の発行件数の割合を求めた。次に罹災証明書発行業務の全体傾向を比較するために、前日との発行件数の割合の差分を求めた。この罹災証明書の発行総件数に占める日々の発行件数の割合差分を、縦軸を差分%、横軸を日付（発行初日から何日目）のグラフに散布図として可視化した。なお、横軸の日付については、茨木市の発行実績が終わった129日を採用した。最後に、罹災証明書の発行パターンをモデル化するためにそれぞれの近似曲線を求めた。その際にデータの変動パターンから次数2の多項式近似曲線を採用した（図1）。

5. 結果

全体傾向

- 1) 罹災証明書を発行し始めて3週間弱で発行件数は減少傾向に転じる
- 2) 2ヶ月強で再び増加傾向に転じ、4ヶ月を超えて収束に向かう
- 3) 被害量に関わらず、上述の傾向には同様のパターンが見られる

個別傾向

- 4) より被害程度が小さい茨木市においては、罹災証明書の発行数は、より被害程度の大きい益城町、柏崎市より立ち上がり大きい
- 5) 3週間弱で減少傾向に転じた際には、益城町と茨木市は、柏崎市と比較して、より傾向が似ている。2ヶ月強で増加傾向に転じる際により発行件数が多くなっている。
- 6) 柏崎市については、益城町、茨木市より緩やかに発行件数が立ち上がり、その後も増減の幅が比較的小さいまま推移する

6. 考察

罹災証明書の発行業務について、茨木市、益城町、柏崎市を比較すると、被害量が小さい茨木市の方が最も発行が早く進んでいる。次に被害程度が大きかった益城町が続いているが、これは東日本大震災以降「罹災証明書の交付時期が被災者の生活再建のスピードを左右する」という考えに基づき、被災自治体に発行を急がせる傾向があり、その社会的要請に益城町が応えた結果であると推察できる。

一方で、全体的に緩やかに発行件数を伸ばした柏崎市の方が、発行件数の増減の幅が小さく、発行業務に焦点をあてると安定した業務の推移となっている。

参考として、胆振東部地震の被災地である安平町についても、近似曲線を示している。データは発行が始まってから10日までとなっており、今後も発行業務の推移を見守る必要があるが、他の3つの被災地の傾向から導き出される推計によれば、被災程度はさほど大きくないが被害棟数が多い安平町においては、いったん減じた発行件数が、3ヶ月後のフェーズでは増加することが予測される。

7. 今後に向けて

安平町に対しては、復旧・復興の過程にあり、この研究成果を示し、今後の業務見直しに対する戦略構築に役立てており、シミュレーション結果が被災者支援業務に与える影響に今後も着目する必要がある。

平成26年度～30年度の成果概要

新潟県において、過去に経験した焼山火山災害、新潟地震、中越地震、中越沖地震等を契機とし進めてきた「災害メカニズムの調査研究」に基づき、地域安全の確保を目的とした火山・地震災害の事例研究を実施した。研究成果を事例とし、地震・火山噴火に係る知見の発信技術について開発を実施した。研究成果を事例とし、地震・火山噴火に係る知見の発信技術プロトタイプの検証を実施した。地震・火山の観測研究の成果が、特に災害対応従事者である行政職員が実施する災害対応・防災対策にいかに関与できるかを中心に検討した。観測研究の成果を直接的に発信するよりは、業務のシミュレーション等を通じて、成果を業務に役立ててもらおうことを目指した。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Keiko Tamura, Munenari Inoguchi, Kei Horie, Ryota Hamamoto and Haruo Hayashi, Realization of Effective Team Management Collaborating between Cloud-based System and On-site Human Activities -A Case Study of Building Damage Inspection at 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake- IEEE International Conference on Big Data2018 2018.12.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要 :

次期計画においては、本研究の成果を含め、観測研究の成果を、特に災害対応従事者や地域のキーパーソンに防災リテラシーの構築・向上を目指した研修プログラムとして、利活用できる形に再構築する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

新潟大学 危機管理本部危機管理室/災害・復興科学研究所(協力) 教授 田村圭子
他機関との共同研究の有無 : 有
東京大学地震研究所 教授 加藤 尚之
東京大学地震研究所 教授 森田 裕一
兵庫県立大学 環境人間学部 / 大学院環境人間学研究科 准教授 木村玲欧
静岡大学 情報学部 講師 井ノ口宗成

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 新潟大学危機管理室(総務部総務課)
電話 : 025-262-6022
e-mail : rmo@adm.niigata-u.ac.jp
URL :

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名 : 田村 圭子

災害名	2018 北海道胆振東部地震	2018 大阪北部の地震	2016 熊本地震	2007 新潟県中越沖地震
被災自治体	安平町	茨木市	益城町	柏崎市
発災日（本震発生日）	9月6日	6月18日	4月16日	7月16日
罹災証明書発行開始日	9月30日	7月23日	5月20日	8月17日
発災日から発行までにかかった日数	25日目	36日目	35日目	33日目

表 1 . 4つの地震災害における罹災証明発行の実態

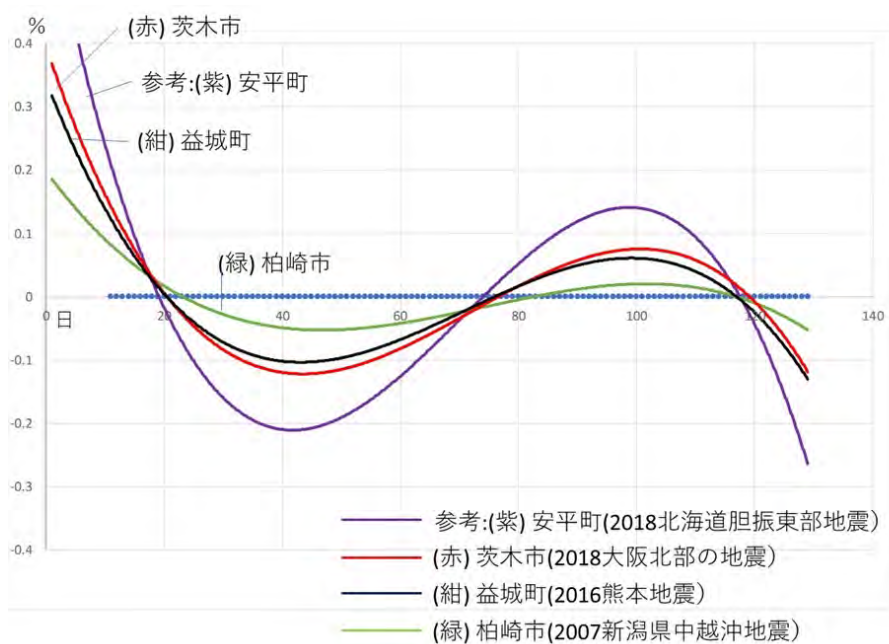


図 1 . 罹災証明書発行業務のモデル化

(1) 実施機関名：

東京大学大気海洋研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

津波地震を励起する浅部プレート境界断層の実態解明と物性変動モニタリング

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

既存・新規の MCS 探査データおよび ODP/IODP 掘削データを用い、南海トラフで津波地震を励起する巨大分岐断層とデコルマの構造、摩擦特性、間隙水圧などの分布を、空間的に途切れることなく高精度で明らかにする。また、沈み込みインプット (subduction input: 沈み込む堆積物と海洋性地殻) は巨大分岐断層とデコルマの発達過程や間隙水圧変動に最も大きく影響するため、南海トラフに沈み込む直前の四国海盆堆積物と海洋性地殻の 3 次元広域変化を明らかにする。

巨大分岐断層やデコルマに沿った地震性滑りの将来挙動を予測する上で、断層の物性変動の長期モニタリングは極めて重要である。断層の間隙水圧異常が巨大分岐断層やデコルマに沿った地震発生・破壊エネルギーの伝播に重要な役割を果たすと考えられるため、断層面付近の音響インピーダンスのコントラストを示す反射係数に着目し、反射係数から間隙水圧を推定する手法を新たに開発する。さらに、time-lapse MCS 調査 (繰り返し観測により時間変化を捉える調査) により、反射係数 (間隙水圧)

変動のモニタリング手法を開発する。巨大分岐断層の海底付近堆積物と海水からヘリウム同位体比 ($3\text{He}/4\text{He}$) を定期的に測定し、巨大分岐断層に沿った間隙水圧変動をモニタリングする。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

巨大分岐断層とデコルマを対象とする新規の2次元高分解能 MCS データを取得するため、東京大学大気海洋研究所の「可搬式反射法地震探査システム」を搭載した学術研究船「新青丸」を利用する。4か年間、巨大分岐断層の海底堆積物と直上海水からヘリウムを観測する。

【平成27年度】においては、(1)断層面付近の音響インピーダンスのコントラストを示す反射係数に着目し、反射係数から間隙水圧を推定する手法の開発に着手する。(2)既存の四国海盆 MCS データを用いた堆積層の岩相層序解析を行い、デコルマ相当層準をマッピングする。また、四国海盆の海洋性地殻最上部の3次元形状変化を求め、デコルマの発達過程において沈み込む海洋性地殻の影響を解明する。(3)既存の四国海盆 MCS データと深海掘削データとの統合解析 (Seismic Inversion) を行い、堆積層の間隙率と間隙水圧を求め、デコルマ相当層準の剪断強度を明らかにする。

【平成28年度】においては、(1)反射係数から間隙水圧を推定する手法を開発する。(2)巨大分岐断層とデコルマの発達が顕著な熊野沖南海トラフに直交する測線上で稠密 MCS データを取得し、巨大分岐断層とデコルマの反射係数を求める。(3)既存・新規の MCS データと深海掘削データを用いた構造解釈と物性解析を行い、巨大分岐断層とデコルマの実態 (構造と物性) を明らかにする。(4)海底地形データと MCS 断面図を用い、南海トラフ付加体の傾斜角度とデコルマの傾斜角度を求めることで、Coulomb Wedge Theory に基づくデコルマの摩擦係数を推定する。

【平成29年度】においては、(1)既存 MCS データが十分でない四国沖南海トラフに直交する測線上で、MCS データを取得する。また、南海トラフ隣接の四国海盆で沈み込みインプットを対象に、トラフに平行する測線上で MCS データを取得する。(2)MCS データと深海掘削データを用いた構造解釈と物性解析を行い、巨大分岐断層とデコルマの実態 (構造と物性) を明らかにする。(3)海底地形データと MCS 断面図を用い、南海トラフ付加体の傾斜角度とデコルマの傾斜角度を求めることで、Coulomb Wedge Theory に基づくデコルマの摩擦係数を推定する。(4)四国海盆 MCS データと深海掘削データとの統合解析 (Seismic Inversion) を行い、堆積層の間隙率と間隙水圧を求め、デコルマ相当層準の剪断強度を明らかにする。

【平成30年度】においては、(1)熊野沖南海トラフの稠密 MCS 調査範囲で、平成28年度に続く2回目の MCS 調査 (time lapse) を行い、巨大分岐断層とデコルマの反射係数を求めることで、間隙水圧の時空間変動を求める。

(8) 平成30年度及び計画期間中 (平成26年度～30年度) の成果の概要：

【平成30年度成果の概要】

プレート境界断層の破壊による巨大地震発生を予測する上で、プレート間固着は重要である。プレート沈み込み帯に沈み込む堆積物はプレート間固着に影響するとされている。最近、南海トラフのプレート沈み込み帯で行われた海底地殻変動の観測では、プレート間固着度 (カップリング) 分布が明らかになった (Yokota et al., 2016)。プレート間固着度は南海トラフに沿って強・弱の変化を示し、沈み込んだ海山または海嶺がその変化の原因として示唆されているが、沈み込む堆積物の影響は不明のままである。本研究では、プレート間固着度に対する堆積物の影響を解明するため、JAMSTEC が過去に南海トラフで取得したマルチチャンネル反射法地震探査 (MCS) データの再解析を行った。MCS データ解析の結果、四国海盆から南海トラフまで3種類のタービダイトが広く分布することが明らかになった (図1)。(1)西部タービダイト、(2)中部タービダイト、(3)東部タービダイト。これらのタービダイトは海溝軸の陸側まで分布し、プレート境界断層の挙動やプレート間固着度への影響が考えられる。沈み込んだ西部タービダイトは、主に四国の足摺岬沖に分布し、海底地殻変動の高い滑り欠損域 (滑り欠損 $> 5 \text{ cm/yr}$) とほぼ一致している。沈み込んだ中部タービダイトは、主に四国の室戸岬沖に分布し、海底地殻変動の中位滑り欠損域 (滑り欠損 $> 4 \text{ cm/yr}$) とほぼ一致している。沈み込んだ

だ東部タービダイトは、主に紀伊半島の潮岬沖に分布し、海底地殻変動の高い滑り欠損域パッチを含む中位滑り欠損域とほぼ一致している。泥質タービダイトの中部タービダイトに比べて、高い浸透率の砂質タービダイト（例：西部タービダイト）は、沈み込んだ後に優れた排水特性や高い有効応力が持てるので、高い滑り欠損域（強いカップリング域）を形成する。一方、相対的に低い浸透率の泥質タービダイト（例：中部タービダイト）は、沈み込んだ後に劣る排水特性や低い有効応力が持てることで、低い滑り欠損域を形成し、周辺の高い滑り欠損域のセグメント化をもたらした可能性が考えられる。即ち、南海トラフのプレート沈み込み帯の浅部セグメント化（プレートカップリングの東西変化）は、海山や海嶺に加え、沈み込んだタービダイトの東西変化に起因すると推測される。

【平成 27～29 年度成果の概要】

浅部プレート境界断層（デコルマ）の発達過程において沈み込む堆積物の影響を解明するため、四国海盆 MCS データと深海掘削データとの統合解析を行い、沈み込む堆積層の 3 次元間隙率を求めた。四国海盆 MCS データとして、2006 年に JAMSTEC（国立研究開発法人海洋研究開発機構）が熊野沖四国海盆で取得した 3 次元 MCS データ（3.5 × 52 km）を使用した。また、IODP 南海トラフ地震発生帯掘削計画のサイト C0006、C0007、C0011、C0012 のコア試料と検層データ（P 波速度、密度、間隙率）を深海掘削データとして用いた。3 次元 MCS データの処理結果である 3 次元 PSTM データの高分解能を図るため、音響インピーダンス（Acoustic Impedance）インバージョンを行った結果、四国海盆の合計 7 つの層準において、間隙率の変化が認められる。間隙率は概ね海底面から深度を増すに従い低下する傾向を示すが、一部において間隙率の逆転を伴う間隙率異常域が見られ、この異常域は陸側に向かって発達する傾向を示す。また、サイト C0011 上の間隙率異常域中に見られる低間隙率層と、比抵抗並びに自然ガンマ線の検層値とを対比した結果、榎野埼海丘周辺に限定的に分布するチャネル堆積物が存在する可能性が示唆された。同一層準において、南海トラフに沿った間隙率変化はほぼ認められず、これは 3 次元 MCS データ領域の狭い幅（約 3.5 km）との関連性が考えられる。一方、間隙率は四国海盆から南海トラフに向かって（トラフに直交方向）低下する傾向を示す。特に、南海トラフで間隙率は著しく低下する。間隙率が陸側に向かって、特に南海トラフで顕著に低下する要因には loading 効果が考えられる。

熊野沖南海トラフにおいて浅部プレート境界断層（デコルマ）の発達過程に影響する沈み込む堆積物の役割を解明するため、平成 27 年度に四国海盆 MCS データと深海掘削データとの統合解析を行い、沈み込む堆積層の 3 次元間隙率を求めた。平成 28 年度には、この 3 次元間隙率データを用い、沈み込む堆積層の間隙水圧を推定した。間隙水圧の推定には、Reference サイトと Target サイト間の間隙率を比較する手法（例：Screaton et al., 2002）を用いた。本研究では、四国海盆の IODP 掘削サイト C0011 を Reference サイトとして設定し、静水圧状態である仮定した。サイト C0011 での堆積層は大きく 3 つの地層（上部四国海盆堆積層、中部四国海盆堆積層、下部四国海盆堆積層）に区分できる。サイト C0011 で認められる間隙率データの特徴から、今回は中部・下部四国海盆堆積層を対象に間隙水圧を推定した。Reference サイト C0011 での間隙率と南海トラフ軸サイト Xline 1600 での間隙率を比較した結果、サイト Xline 1600 の中部・下部四国海盆堆積層は高間隙水圧状態であることが判明した。特に、中部四国海盆堆積層での高間隙水圧が明瞭であるため、本研究では、南海トラフ軸サイト Xline 1400 と 1600 において中部四国海盆堆積層を対象に過剰間隙水圧比（ $\alpha = [\text{pore pressure} - \text{hydrostatic pressure}] / [\text{lithostatic pressure} - \text{hydrostatic pressure}]$ ）を求めた。サイト Xline 1400 で、 α は上部の 0.23 から下部の 0.45 へ増加する。これは、中部四国海盆堆積層中の脱水がトラフ充填堆積作用による急激な loading に歩調が合わせられないほど中部四国海盆堆積層の透水率が低いためと考えられる。サイト Xline 1600 で、 α は上部の 0.53 から下部の 0.82 へ増加する。特に、10.3 MPa の高間隙水圧（ $\alpha = 0.82$ ）は、中部四国海盆堆積層中の脱水がトラフ充填堆積作用による急激な loading や blind thrust 発達による堆積層の厚化に歩調が合わせられないほど中部四国海盆堆積層の透水率が低いためと考えられる。サイト Xline 1600 で最も注目すべきところは、中部四国海盆堆積層で過剰間隙水圧が最大となり（即ち、有効応力が最少）、この層準で断層挙動に必要な剪断応力が最少となることである。従って、将来の浅部プレート境界断層（デコルマ）は中部四国海盆堆積層で発達すると推定される。

東北地方太平洋沖地震の約1か月後に宮城沖震源域近くの海底で採取した海水中にマンテル起源のヘリウム同位体異常が発見され、巨大地震に伴ってマンテルからの高圧流体がプレート境界断層を通じて海溝域近傍に到達し、プレート境界断層から上方へ到達する大規模断層に沿って海底まで移動したことが示唆された(Sano et al., 2014)。しかしながら、流体移動の通路となる、前弧海盆の大規模断層の実態は未だ解明されていない。この大規模断層の実態と流体挙動を解明するため、(1)既存のマルチチャンネル反射法探査(MCS)データの再解析、(2)学術研究船「新青丸」を用いた高分解能地層探査(サブボトムプロファイラー:SBP)データ解析、(3)マルチプルコアラー採泥によるヘリウム同位体分析、を行った。MCSデータとSBPデータの解析結果、ヘリウム同位体異常サイト(N3, N2, N1, R)付近の浅部堆積層と白亜紀地層(音響基盤)で正断層と逆断層を発見した。これらの断層は浅部堆積層は勿論のこと、白亜紀地層の最上部を明瞭に切っており、深部への延長は明瞭ではないものの、ヘリウム同位体異常観測から、おそらくマンテルやプレート境界断層までつながっている可能性が高い。これらの大規模断層は2011年の東北地方太平洋沖地震後に活動したことはないので、マンテル由来のヘリウムは地殻の中に浸透してゆっくりと上昇し、普段は堆積層でシールされ、堆積層付近に溜まる。堆積層付近のマンテル由来ヘリウムは、2011年の東北地方太平洋沖地震で再活動した大規模断層を伝わって海底面に露出した可能性が考えられる。2011年のヘリウム同位体異常サイトと同じサイトで2016年にヘリウム同位体を分析した結果、ヘリウム同位体異常は観測されず、これらの大規模断層は既にシールされている可能性が高い。即ち、マンテル由来のヘリウムは巨大地震時に再活動する大規模断層に沿って上昇し、海底面まで到達するが、地震後には断層が再びシールされるため、海底面でのヘリウム同位体異常は観測されなくなる。これらの大規模断層は、断層帯に大量の流体が浸透した場合、将来の巨大地震時の再活動で大規模の津波を引き起こす可能性が考えられる。

これらの研究成果は、本課題の5か年計画と概ね一致している。

(9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):

Tetsuro Tsuru, Jin-Oh Park, Tetsuo No, Yukari Kido, and Kazuo Nakahigashi, Visualization of attenuation structure and faults in incoming oceanic crust of the Nankai Trough using seismic attenuation profiling, *Earth, Planets and Space*, 70:31, 2018.

Tetsuro Tsuru, Kazuo Amakasu, Jin-Oh Park, Junichi Sakakibara, and Mamoru Takanashi, A new seismic survey technology using underwater speaker detected a low velocity zone near the seafloor: An implication of methane gas accumulation in Tokyo Bay, *Earth Planets and Space* (in press).

Okutsu, N., Ashi, J., Yamaguchi, A., Irino, T., Ikehara, K., Kanamatsu, T., Suganuma, Y., Murayama, M., Evidence for surface sediment remobilization by earthquakes in the Nankai forearc region from sedimentary records, *Geological Society, London, Special Publications*, 477, SP477. 22. doi: 10.1144/SP477.22, 2018.

Ikehara, K., Usami, K., Kanamatsu, T., Arai, K., Yamaguchi, A., Fukuchi, R., Spatial variability in sediment lithology and sedimentary processes along the Japan Trench: Use of deep-sea turbidite records to reconstruct past large earthquakes, *Geological Society Special Publication* 456, 75 - 89, 2018.

Jin-Oh Park and Tetsuro Tsuru, Regional distribution of the incoming sediments along the Nankai Trough and its implications for the megathrust fault behavior, Abstract SCG58-P05 presented at 2018 JpGU Meeting, 2018.

Chen Guo and Jin-Oh Park, 2D pre-stack depth migration imaging across the 2011 Tohoku (Mw 9.0) coseismic rupture zone off NE Japan, Abstract T21F-0275 presented at 2018 AGU Fall Meeting, 2018.

(10)次期計画における平成31年度実施計画の概要:

プレート境界断層面付近の音響インピーダンスのコントラストを示す反射係数に着目し、反射係数から間隙水圧を推定する手法の開発に着手する。これは新しいチャレンジである。過去に日本海溝や南海トラフで実施されたMCS調査の仕様を検討し、Time-lapse MCS調査に最適な仕様を決定するた

め、事前調査モデリング (Pre-survey Modeling) を行う。宮城沖日本海溝のアウトサイズで高分解能 MCS データを取得する。MCS データの反射極性 (正・負) 分布をマッピングし、正断層に沿った流体分布を推定するとともに、正断層の反射係数 (Warner, Tectonophysics, 1990) を求める。正断層の活動性や断層強度を評価するため、正断層付近の減衰特性 (Tsuru et al., EPS, 2018) を推定する。また、大規模アウトサイズ地震断層の付近でマルチプルコアラーによる表層採泥および CTD 採水を行い、海底堆積物試料と海水試料を採取する。希ガス専用質量分析計を用いて海底堆積物・海水試料に含まれる He (ヘリウム) を抽出し、He 濃度および同位体比 ($3\text{He}/4\text{He}$) を測定する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

朴進午、芦寿一郎、山口飛鳥、佐野有司、高畑直人
他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京大学大気海洋研究所国際・研究推進チーム
電話 : 04-7136-6009
e-mail : iarp@ori.u-tokyo.ac.jp
URL : <http://www.ori.u-tokyo.ac.jp/>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 朴進午
所属 : 東京大学大気海洋研究所

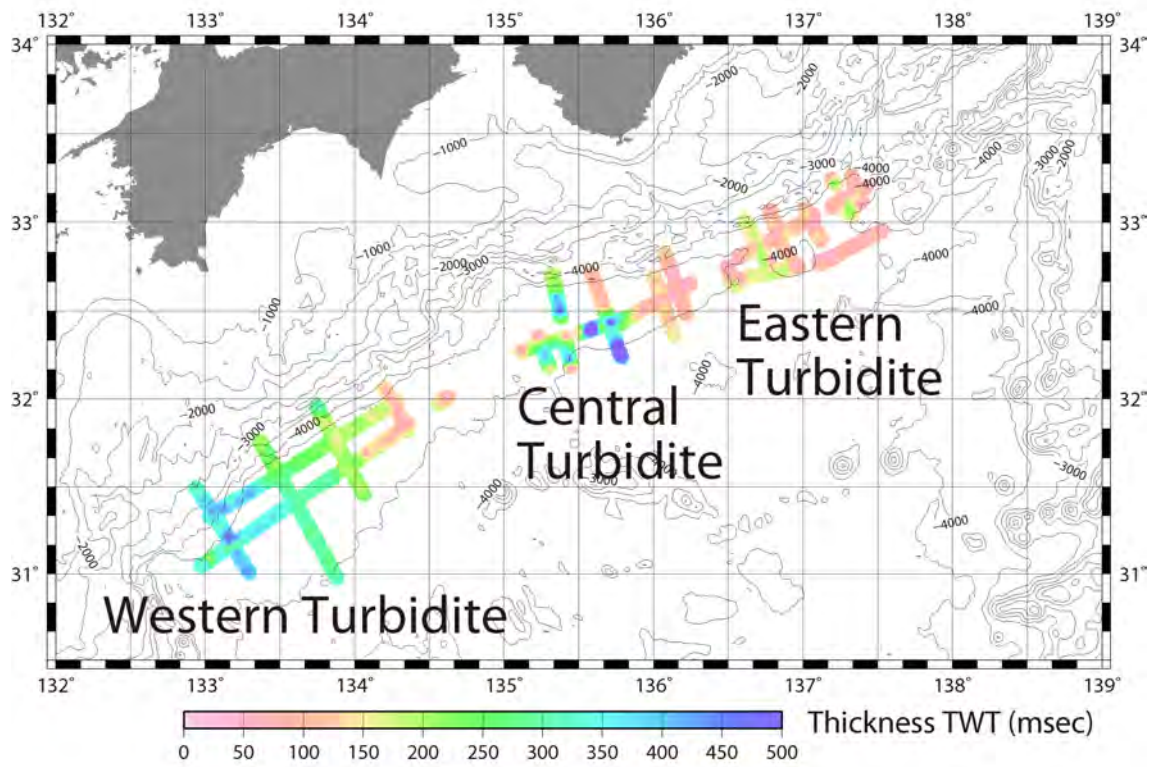


図1 . 南海トラフで沈み込む3つのタービダイト（西部タービダイト、中部タービダイト、東部タービダイト）の分布図。

(1) 実施機関名：

東京大学大気海洋研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地球物理・化学的探査による海底火山および海底熱水活動の調査

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

イ. 熱水系の卓越する火山

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(4) 研究者，技術者，防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

4. 研究を推進するための体制の整備

(3) 関連研究分野との連携の強化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

日本近海の鹿児島湾から南西諸島海域の島弧系及び背弧海盆において、継続的に海底火山や海底熱水活動を調査し、火山活動度の変化や新たな熱水活動域を明らかにする。また、海底地形の高まりが火山かどうかを物理的・化学的探査により判別する。具体的には、ヘリウム - 3、二酸化炭素、メタンの濃度及び同位体組成の詳細分布図を作成し、火山活動が活発な海域の把握や活動度の経時変化把握に役立てるための一次情報を得る。活動を休止した火山においては、海底地形や岩石分析、磁気異常の物理探査が有効であり、熱水系の広がりやテクトニックセッティングを調査する。これらの調査を効率的に行なう方法を開発し、若手研究者を育成して、将来持続的に観測できる体制を整える。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要 :

海底火山の活動や噴火の可能性を把握する事は船舶航行における防災に必要不可欠である。とりわけ鹿児島湾から南西諸島海域においては海底活火山と関連づけられる熱水活動が水深の浅い海域に多く見られ、それらが噴火した際に直上に船舶がいた場合には重大な被害の可能性も懸念される。海底地形のデータからある程度海底火山の場所を推定する事は可能かもしれないが、それが本当に火山であり、どの程度活動的なのかを判断する事は難しい。

そこで我々は火山性ガスの強力な指標となるヘリウム - 3 を中心とした、マグマ・熱水由来の成分 (pH、濁度、溶存炭素同位体、メタン、マンガンなど) の海水中の三次元分布とその時系列変化を明らかにし、その分布を詳細な海底地形と比較する事で、海底活火山の場所や活動度を把握する事を目的として調査を進める。マグマ由来成分の放出は活動的である証拠であり、その成分組成や放出量から火山の特性を把握する事が可能である。海水中での保存性が異なる元素を比較する事で活動的な放出源を特定し、成分増減の経時変化から活動度の変化を検出する事で噴火兆候の早期把握に役立てる。本課題では、特に鹿児島湾北部の若尊カルデラや薩摩硫黄島など南西諸島海域において、継続的に海底熱水活動を調査するとともに、未知の熱水活動の発見には音響測深器を用いて効率的な観測を目指す。また現場化学分析計 GAMOS (鉄やマンガンの分析) の係留による熱水の長期継続モニタリングも視野に入れ、その手法や装置の改良を検討する。さらに地球最大の火山が中央海嶺系であることから、日本の火山とはテクトニックセッティングが異なる中央海嶺系火山の物理的・化学的性質を理解することが、日本の火山の性質をより理解することにつながるであろう。そこで観測対象は日本近海だけでなく、中央海嶺系など他の海域の海底火山も対象とし、その性質の違いを調べることにより、日本の海底火山のより深い理解を目指す。

平成 27 年度については、奄美大島西方海域における熱水組成の把握を行う。また継続的に調査している海域である鹿児島湾、薩摩硫黄島周辺海域、小宝島周辺海域、奄美大島北方海域において、火山性成分の経時変化が見られるかを検証する。特に口之永良部島に近い薩摩硫黄島周辺海域で重点的に調査を行う。これら調査のために海洋研究開発機構新青丸のシフトタイムを既に確保済みである。平成 28 年度以降については、新青丸の航海計画を申請し、観測空白域を埋めるとともに経時変化を把握する。航海以外の期間は、無人島を含む陸上火山の噴気や熱水の分析を行う。最終的に平成 31 年度までに、鹿児島湾から南西諸島にかけての ^3He 、二酸化炭素、メタンの濃度及び同位体組成の詳細分布図を作成し、火山活動が活発な海域の把握や活動度の経時変化把握に役立てるための一次情報を得る。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

今年度は長崎県の島原半島周辺およびインド洋東部において学術研究船による調査を行った。島原半島には火山の他いくつかの温泉が存在し、地下にマグマだまりが存在すると考えられている。周辺の海底においても火山活動の影響がないかどうかを調べるために、周辺海域で海水を採取し、火山活動に敏感なヘリウムを分析することで、火山活動を評価することを試みた。またインド洋東部の調査は海底に火山は存在しないが、これらの試料採取や分析手法は海底火山の調査と共通で、その手法を評価することで今後の海底火山の調査にいかせる。並行してこれまでに鹿児島湾で採取した試料の分析を行った。鹿児島湾の北部に位置する若尊カルデラでは水深 200m という浅い場所に海底熱水活動が存在し、桜島と共通のマグマだまりが存在すると言われている。これまでに何度か若尊カルデラで観測を行っており、継続して観測することで活動度の変化を調査することができる。特にヘリウムはマグマ活動に敏感で、ヘリウムの分析を中心に調査を進めている。また陸上の火山においてもヘリウムを用いた調査が応用できるため、木曾御嶽山や箱根山で定期的に観測を行なった。

計画期間中 (平成 27 年度 ~ 30 年度) の成果としては学術研究船の研究航海により鹿児島湾から南西諸島において海底熱水活動の調査を行った。申請した研究航海が採択されなかった年は別の研究航海に参加し、中央海嶺や非火山地帯などで比較のために海水や海底堆積物を採取した。同時に試料採取法や分析法を確認しそれを改良するために役立てた。また若手研究者の乗船経験および試料分析の習得にも貢献した。特に大きな成果としては、海底の火山活動は直接見る事ができないため、効率

的に観測する手法を試した。それは浅海のカスハイドレイト探査で定評のあるマルチビーム音響測深機によるウォータカラム画像を、海底火山の熱水活動探査に応用した。南西諸島における熱水探査において、これまで国内ではほとんど研究例の無い洋上からの熱水噴出口の特定を試みた。具体的には、マルチビーム音響測深機を用いて、海底熱水活動のプロキシーであるガスプルームを探査し、微地形解析と合わせて噴出点を推定した(図)。そしてCTD観測を併用することで、海底火山の熱水活動を洋上から把握することに成功した。本研究で用いた観測方法は、海底火山における活動状況の探査効率を飛躍的に向上させることが期待される。他にもマリアナ海域やファンデフカ海嶺付近を調査し、テクトニックセッティングの異なる地域の海底熱水活動を比較する上で有用なデータを得た。陸上の火山においても定期的に調査を行なった。

- (9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
Yamamoto, J., T. Kawano, N. Takahata and Y. Sano, 2018, Noble gas and carbon isotopic compositions of petit-spot lavas from southeast of Marcus Island. Earth Planet. Sci. Lett., 497, 139-148.
Takahata, N., K. Shirai, K. Ohmori, H. Obata, T. Gamo and Y. Sano, 2018, Distribution of helium-3 plumes and deep-sea circulation in the central Indian Ocean. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 29, 331-340.
Kagoshima, T., Y. Sano, A. Tanaka, 2018, Helium isotopes in Lake Mashu, 2017. Goldschmidt Abstracts, 2018 1217.

- (10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

桜島や口永良部島など活動が活発な火山近傍に位置しており、我々が継続的に観測を行ってきた南西諸島および鹿児島湾といった海域でこれまでに採取した海水試料の分析を進める。また、箱根山など継続的調査を実施している陸上火山・温泉地帯についても観測や試料分析によるデータ収集を行う。これによりヘリウム-3を中心とした、マグマ・熱水由来成分の増減の経時変化や分布を把握し、火山熱水活動度の評価および噴火兆候の長期の変動把握に役立てる。これは次期計画の研究課題「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」の内容に該当し、火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明につながる。

- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

東京大学大気海洋研究所

他機関との共同研究の有無：無

- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学大気海洋研究所国際・研究推進チーム

電話：04-7136-6009

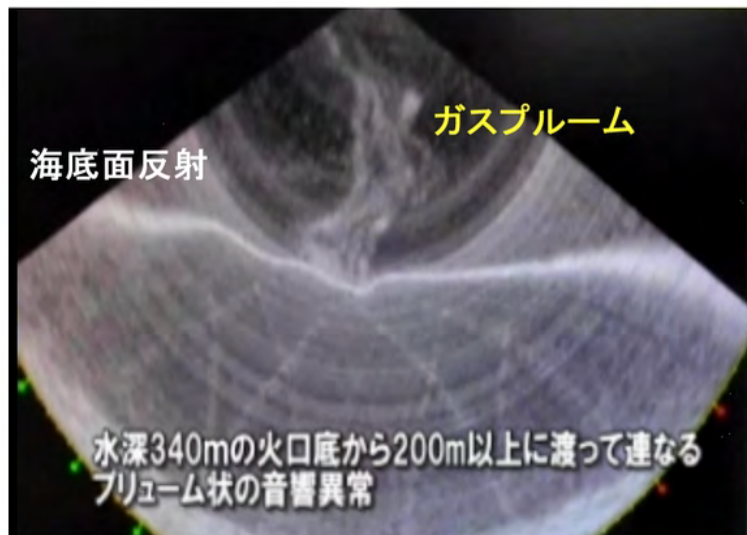
e-mail：iarp@aori.u-tokyo.ac.jp

URL：http://www.aori.u-tokyo.ac.jp/

- (13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：佐野 有司

所属：東京大学大気海洋研究所



図．マルチビーム音響測深機を用いたガスプルーム探査の様子

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

宏観異常現象の検証 - 漁獲量と地震との関係を中心に -

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

大地震前の漁獲異常、鯨類のストランディング(座礁) 深海魚の打ち上げなどは、それぞれ宏観異常現象のひとつと考えられている。明治三陸地震の前にはマグロ、イワシ、カツオが豊漁であったこと、昭和三陸地震の前にはイワシの豊漁が継続していたことなどが報告されている(吉村, 2004)。また、2011 年東北地方太平洋沖地震(M9.0)の1週間前に、茨城県の鹿島灘に面する海岸にカズハゴンドウ 54 頭のマス・ストランディング(集団座礁)があり、これを前兆現象とする書き込みがネット上で広まった。こうした前兆現象の報告に対して、漁獲異常については東北地方太平洋沖地震前、東日本の太平洋岸にある主要 12 漁港のうち 6 漁港で 2011 年 2 月にマイワシの漁獲異常がみられた。しかし、同様の異常は地震のない他の期間でもみられたことから、東北地方太平洋沖地震前に限った現象と呼べるものではなかった(織原他, 2014)。また、茨城県の海岸で発生したマス・ストランディングについては、東北地方太平洋沖地震と関連性はないとされた(織原・野田, 2015)。しかし、これらの現象と地震とが関係あるのかないのかを結論づけるにはまだ検証が不十分である。

宮城県では各漁港の月別漁獲量をデジタル化されていない紙ベースの資料として、県政情報公開室にて一般公開している。前年度までにこの紙ベース資料のデジタル化作業を実施してきた。しかし、11 漁港 34 魚種と数が多いため紙ベースの資料すべてのデジタル化が終わっていない。本年度はこの作業を継続して終了させる。そして、1973 年以降に発生した宮城県沖を中心とする顕著な地震との対応について統計的な検証を行う。深海魚の打ち上げや捕獲に関するデータは、前年度の研究で深海魚の打ち上げ等に関する文献調査ならびに、新聞記事に掲載されていた水族館等への過去データに関する問い合わせを行った。これにより、より充実した深海魚情報のカタログになった。本年度はこのカタログを用いて深海魚打ち上げ等の情報と日本周辺の地震との関連を論文にする。鯨類のストランディングについては、全国的なデータで織原・野田(2015)同様の検証を行う。

上記以外の宏観異常現象については、前年度の研究で紙ベースの民間(なまずの会)による地下水位観測データをデジタル化した。本年度はこのデータを用いて水位異常変化と地震との関連を調べて論文化する。また、他の紙ベースのデータ(例えば、八戸市の化学的な地下水データ)についてもデジタル化の作業を実施する。さらに、元となる観測資料が消失してしまったため、事実関係に未解明な部分が残る“椋平虹”については、和歌山県の田辺市図書館が椋平氏本人による資料(自費出版)を

所蔵していることがわかっている。本年度はこのような資料や現地での聞き取り調査をして、椋平虹現象と地震との関係について新たな事実の発見を試みる。

(7) 平成 30 年度の成果の概要 :

宮城県内の漁港別・魚種別・月別漁獲量のデジタル化作業は、昨年度に引き続き『水産物水揚統計』に掲載された 11 漁港 34 魚種について実施し、本年度末時点で終了予定である。これで、1973 年 1 月から 35 年分のデジタル化作業が終了する。

深海魚と地震との研究については、前年度作成した深海魚出現カタログから新聞等で地震との関連性が指摘されているリュウグウノツカイやサケガシラなど 8 種を抜き出して地震との関連を調べた。期間は 1928 年 11 月 26 日から 2011 年 3 月 11 日までで、深海魚出現数は計 336 となった (Fig. 1)。また、対象とする地震は深海魚出現日から 30 日後までに出現地点から半径 100km 以内で発生したマグニチュード (M)6.0 以上、深さ 100km 以浅の地震 221 個である (Fig. 2)。両者を比較した結果、深海魚出現から 30 日後までに対象エリアで地震が発生したケースは、2007 年 6 月 19 日新潟県柏崎市のサケガシラと 7 月 16 日新潟中越沖地震 (M6.8) のみであった。地震に先行する何らかの現象によって深海魚が出現する可能性が全くないとは言えないが、本研究結果からは少なくとも深海魚出現の近傍で大地震がしばしば発生していた事実は見出せなかった。換言すれば、「深海魚が出現すると大地震が発生する」といった言い伝えを裏付ける結果にはならなかった。ただし、使用した深海魚出現データがすべての深海魚出現事例ではないため、新たな記録が見いだされれば、結果が変わってくる可能性はある。なお、この結果はイタリアで開かれた EMSEV meeting で発表し、論文は現在英文査読誌に投稿中である。

鯨類ストランディングと地震との関係については全国規模で検証を行い、その結果を 2018 年日本地震学会秋季大会にて発表した。なお、本研究で用いた鯨類ストランディングデータは、日本鯨類研究所が公開するストランディングレコードを引用している。日本の海岸で発生するストランディングの数は、全国から報告が集まるようになった近年では年間 200 ~ 250 件になる (Fig. 3)。一方、マス・ストランディング (集団座礁 : 同時に 2 頭以上が座礁) は年間数回程度で 1923 年まで遡ることができる。そこで、本研究では東北地方太平洋沖地震前にもみられたマス・ストランディングに絞って検証した。対象となるマス・ストランディングは 1923 年から東北地方太平洋沖地震前まで 48 事例あった。なお、海岸漂着ではなく目撃情報などであっても、ストランディングレコードでマス・ストランディングと分類されているものはこれに含まれている。対象とする地震は、マス・ストランディングが発生した場所から半径 200km 以内で 30 日後までに発生した M6.0 以上 (深さ 100km 以浅) の地震 429 個である (Fig. 4)。両者を比較した結果、マス・ストランディングから 30 日後までに対象エリアで地震が発生したケースは、2002 年 5 月 21 日沖縄県石垣港ユメゴンドウ 2 頭と 5 月 29 日石垣島西方沖の地震 (M6.1)、2005 年 7 月 23 日静岡県沼津市コブハクジラ 2 頭と千葉県北西部の地震 (M6.0) の 2 事例であった。なお、2011 年東北地方太平洋沖地震前にみられた茨城県でのカズハゴンドウ 54 頭のマス・ストランディングは、本震と前震いずれの震央からも 300km 以上離れていたため対象外となる。Table1 は 10 頭以上のマス・ストランディング 17 事例を示している。茨城県と千葉県では、2011 年 3 月 4 日以前にもカズハゴンドウのマス・ストランディングが 6 回発生している (赤色で表示)。しかも、2011 年 3 月 4 日よりも群頭数が多い事例が 4 回ある。しかし、その後に東北地方太平洋沖地震よりも大きな地震は発生していない。また、他の 10 頭以上のマス・ストランディングについても、その後に M6.0 以上の地震を伴っていない。このことから、マス・ストランディングの群頭数と地震のマグニチュードの関連性はないと考えられる。だからといって、2011 年 3 月 4 日の事例が東北地方太平洋沖地震に関係ないとは言いきれないが、「マス・ストランディングがあると大地震が発生する」とも言いきれない。

なお、予算削減により椋平虹の調査は実施できなかった。また、地下水関連の研究は日本地震予知学会第 5 回学術講演会における発表にとどまった。

- (8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
Orihara, Y., M. Kamogawa, Y. Noda, and T.Nagao, 2018, Are deep-fish appearances an earthquake precursor?, EMSEV (Electro-Magnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes) 2018 International Workshop Abstracts, 203.
織原義明・鴨川仁・野田洋一・長尾年恭, 2018, 日本周辺における鯨類のマス・ストランディングと地震との関係に関する考察, 日本地震学会講演予稿集 2018 年度秋季大会, S13-05.
織原義明, 2018, 地震予知学が未科学として認められるには, 日本地震予知学会第 5 回学術講演会アブストラクト集, 13-16.
織原義明, 2018, 2011 年東北地方太平洋沖地震前の地下水異常調査, 日本地震予知学会第 5 回学術講演会アブストラクト集, 67-69.

- (9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：
織原 義明 東海大学・海洋研究所 特任准教授
他機関との共同研究の有無：無

- (10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：東海大学・海洋研究所
電話：054 - 334 - 0411
e-mail：orihara@tsc.u-tokai.ac.jp
URL：

- (11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者
氏名：織原 義明
所属：東海大学・海洋研究所 特任准教授

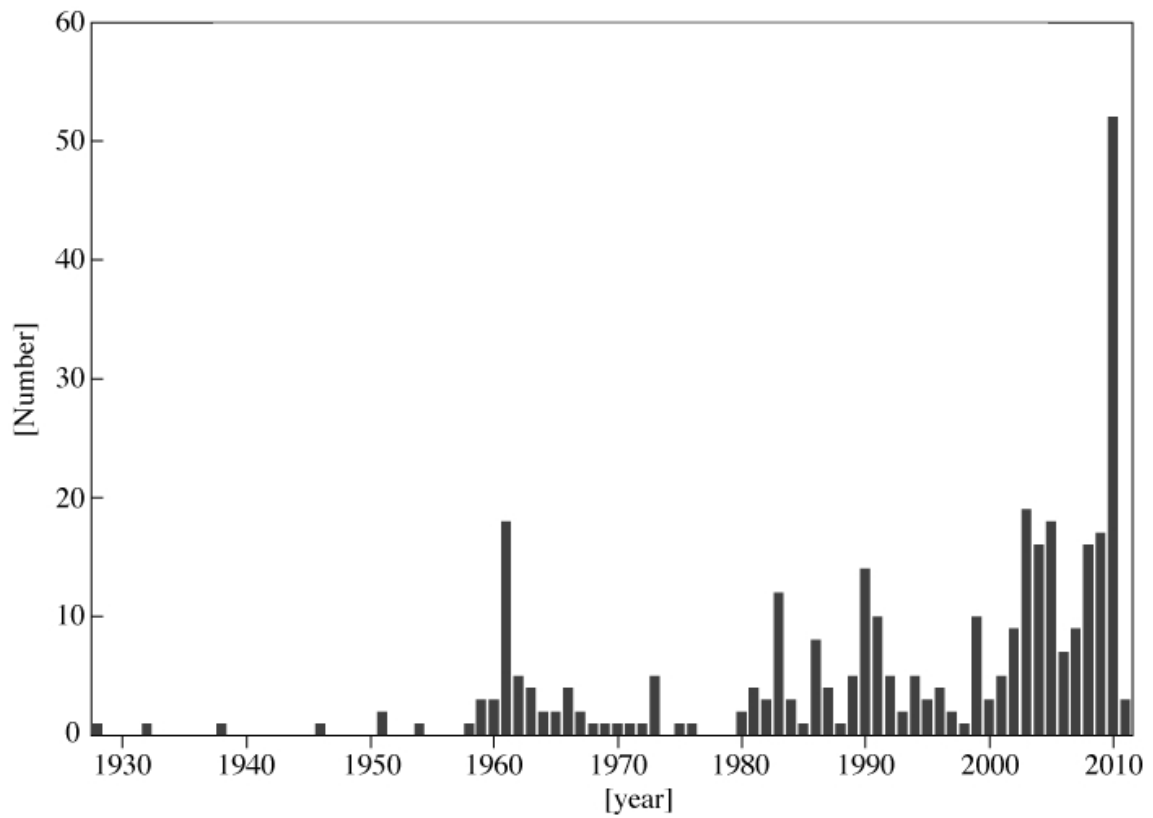


Fig.1 The annual number of deep-sea fish appearance reports from 1928 to 2011.

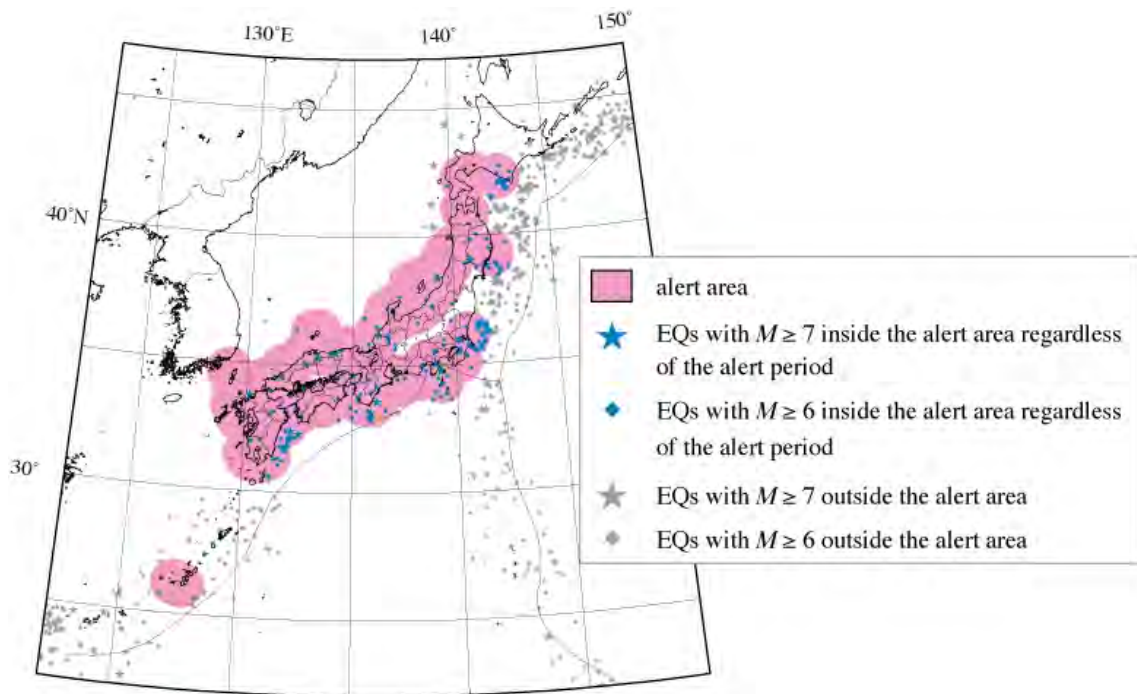


Fig.2 The alert areas for the periods of 1928 - 2011.

The number of the deep-sea appearances was 336. The number of EQs in $M \geq 6$ and $M \geq 7$ were 221 and 22.

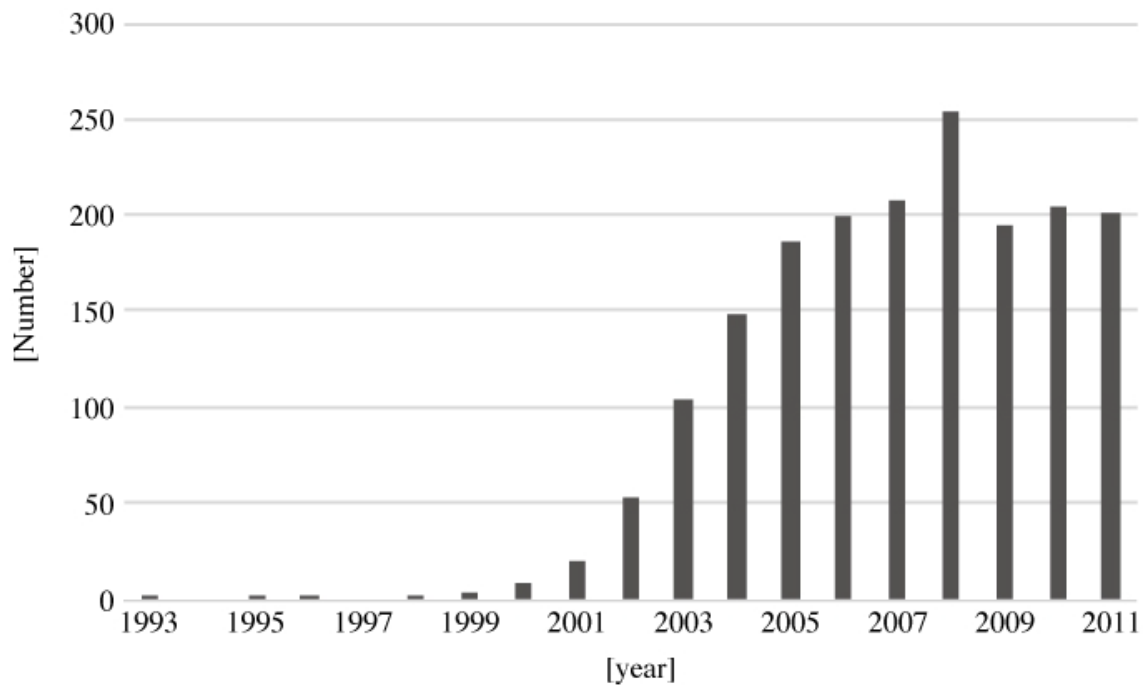


Fig.3 The annual number of mass-stranding from 1993 to 2011.

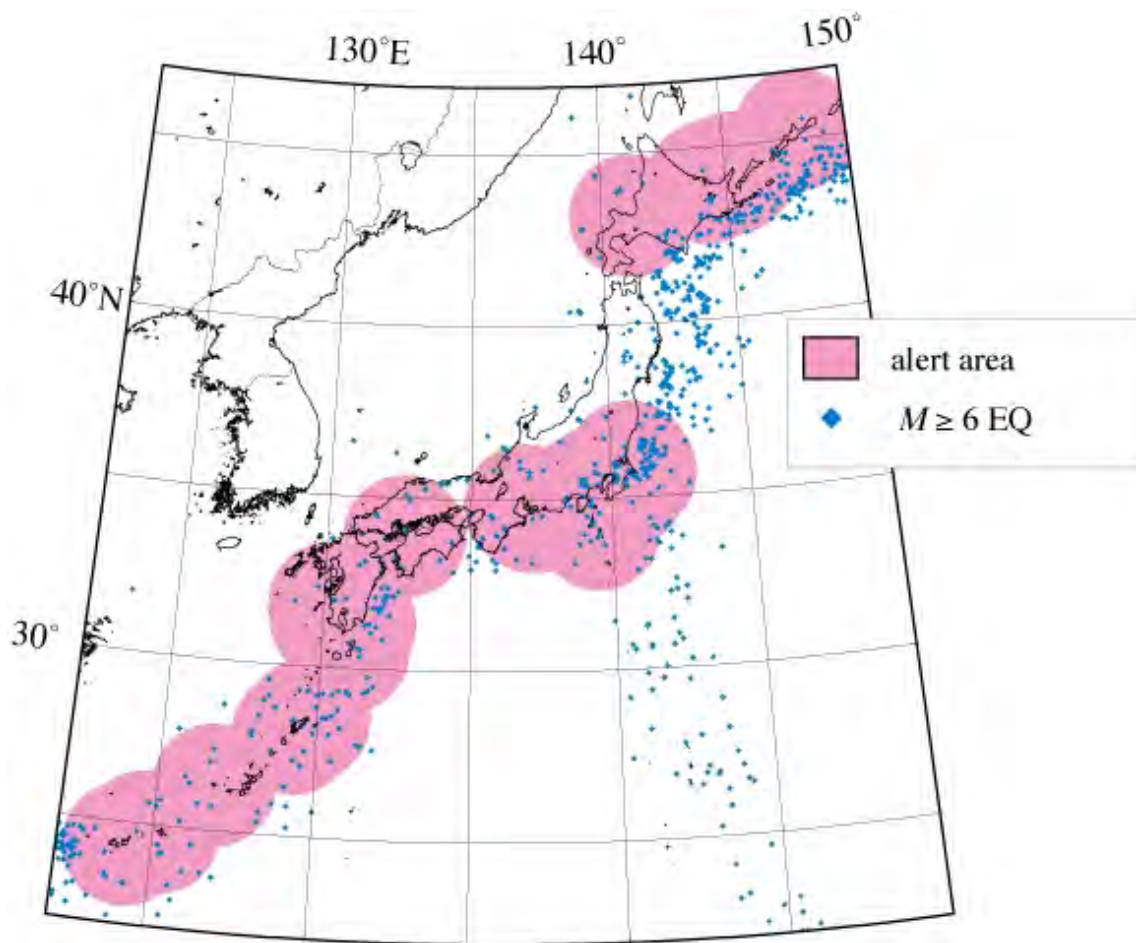


Fig.4 The alert areas for the periods of 1923 - 2011.

The number of mass-stranding was 48. The number of EQs with $M \geq 6$ was 429.

年月日	都道府県	場所	種類	群頭数
1923/1/24	千葉	上総太東岬	ゴンドウ類	240
1927/12/1	茨城	波崎海岸出洲	カズハゴンドウ	113
1928/12/24	千葉	銚子町新生地先利根川河口	カズハゴンドウ	120
1929/2/15	静岡	磐田郡幸浦村大野海岸	ゴンドウ類	45
1929/2/17	神奈川	鎌倉市七里ヶ浜(相模湾)	ゴンドウ類	20
1929/6/11	東京	大島新島本村前浜1マイル沖(伊豆諸島)	バンドウイルカ	3000
1947/2/24	鹿児島	大島郡笠利村赤木名(奄美大島)	種不明イルカ	52
1947/4/14	鹿児島	大島郡請島池地浜(奄美諸島)	種不明イルカ	300
2001/2/11	茨城県	波崎町(現神栖市)	カズハゴンドウ	50
2001/3/10	鹿児島県	熊毛郡中種子町屋久津の長浜海岸	カズハゴンドウ	171
2002/2/25	茨城県	波崎町(現神栖市)	カズハゴンドウ	85
2004/8/24	沖縄	宮古郡伊良部町渡口の浜(宮古列島)	マダライルカ	13
2005/2/7	北海道	目梨郡羅臼町相泊(アイドマリ)(根室海峡)	シャチ	12
2006/1/23	千葉	旭市行内飯岡海岸	カズハゴンドウ	26
2006/2/28	千葉	長生郡一宮町東浪見(トラミ)	カズハゴンドウ	67
2008/8/11	沖縄	宮古郡多良間村水納(ミンナ)島	コビレゴンドウ	40
2011/3/4	茨城	鹿嶋市下津(オリツ)海岸	カズハゴンドウ	54

Table 1 List of mass-stranding (N 10)

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

多種の地震活動度解析による大地震先行的地震活動変動の検知

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

古くより、様々な手法における地震活動度解析によって先行現象を精査する試みがなされている。近年ではとりわけ、物理学における臨界現象の概念に基づく新しい手法による地震活動解析が複数提案されており、申請代表者らは、これまでナチュラルタイム (Natural time) という新しい時間概念で臨界現象の時系列解析を行うと、システムが臨界点に達しているか否かを推定できることを報告してきた。

今年度は特に前震活動密度解析に焦点を絞って研究を実施する。前震活動密度解析は、Lippiello らによって報告されたものである (Lippiello et al., Scientific Reports, 2013)。彼らによれば陸域における前震活動空間密度は、余震活動空間密度と一致し、その密度分布には本震マグニチュード依存性があることが判明した。このことは、地震の準備過程では、本震マグニチュードに応じて準備領域が発生していることを示している。また、前述のように前震活動密度分布の時間依存性を調べると、2016 年熊本地震においては、地震発生前 3 年程度から、本震の準備過程がなされていることが予想された (Nanjo et al., EPS, 2016)。本研究では、前震活動密度分布解析を、日本の陸域および海域の大地震について実施し、本手法が海域の地震でも適応できるか、さらに前震活動解析によって本震マグニチュードが推定できるかの議論を行う。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

地震がどのような形で準備されているかは長い間議論がなされているが、主たる仮説は 2 つである。一つは、小さな地震の連鎖発生で大きな地震へ成長するといったドミノ的カスケードモデルであり、破壊のドミノがいつとまるかが分からないことから最終的な発生領域、つまりマグニチュードは実質的に予測できないというモデルである。もう一つは、地震は大きな地震ほど破壊領域が大きく準備され、主破壊直前にはその領域全体がわずかにスリップし、その後高速破壊、つまり主破壊が全体を破壊していくような震源核モデルである。前者は地震は小さな地震の寄せ集めとして成り立っており、わずかな力で発生する最初の小さな地震から、ドミノ倒しのようにして大きな地震に成長すると考えるものである。後者は地震の規模が主破壊直前の準静的スリップ領域に関係するというもので、換言すれば地震は発生する前に最終的な破壊領域、つまりマグニチュードは事前におおよそ判明しているというモデルである。これらのモデルの判定には、地震波の立ち上がり波形を見ることでできるとされているが最新の研究では、前者のほうが有力とされている。

本研究では、カリフォルニア内陸地震、日本の内陸・海域、台湾の地震カタログで前震活動空間密度を調べ、Lippielloら(2012)によって指摘されている余震活動空間分布と一致するか、さらには前震活動空間分布が本震マグニチュードに依存するか統計的に調査した。その結果、発生地震数の密度は前震と余震でほぼ同一の分布になり、地震カタログに依存しないことがわかった。したがって、本震マグニチュード依存性がある前震活動空間分布のピークを示す領域(これは地震準備過程の領域および余震活動領域を示す)は、等しい。また、その領域は本震のマグニチュードが大きくなるにつれて大きくなる。この関係と本震の推定されるアスペリティー長との関係と、ほぼ同じでもあった。以上、統計的解析の範囲では、準備過程で本震のサイズが与えられていると解釈でき、本解析の範囲では地震は震源核モデルのほうで解釈できた。

- (8)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
Kamogawa, M., K. Z. Nanjo, Y. Orihara, J. Izutsu, T. Nagao, S. Uyeda, Nucleation and cascade features statistically identified from foreshock seismicity, Entropy (under review)
楠城一嘉, 地震のナウキャストニングの研究, 日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第5回学術講演会アブストラクト集, 5, 2018年12月.
井筒潤, 楠城一嘉, 鴨川仁, 地震災害予測のための地球観測データのデジタルアースへの適用, 日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第5回学術講演会アブストラクト集, 11-12, 2018年12月.

- (9)実施機関の参加者氏名または部署等名:

(代表者名)

上田誠也 東京大学地震研究所 名誉教授

長尾年恭 東海大学 教授

他機関との共同研究の有無: 有

鴨川仁 東京学芸大学 准教授

井筒潤 中部大学 准教授

楠城一嘉 静岡県立大学 特任准教授

- (10)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名: 東京大学地震研究所

電話: 090-5798-8440

e-mail: suyeda@st.rim.or.jp

URL:

- (11)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 上田 誠也

所属: 東京大学地震研究所

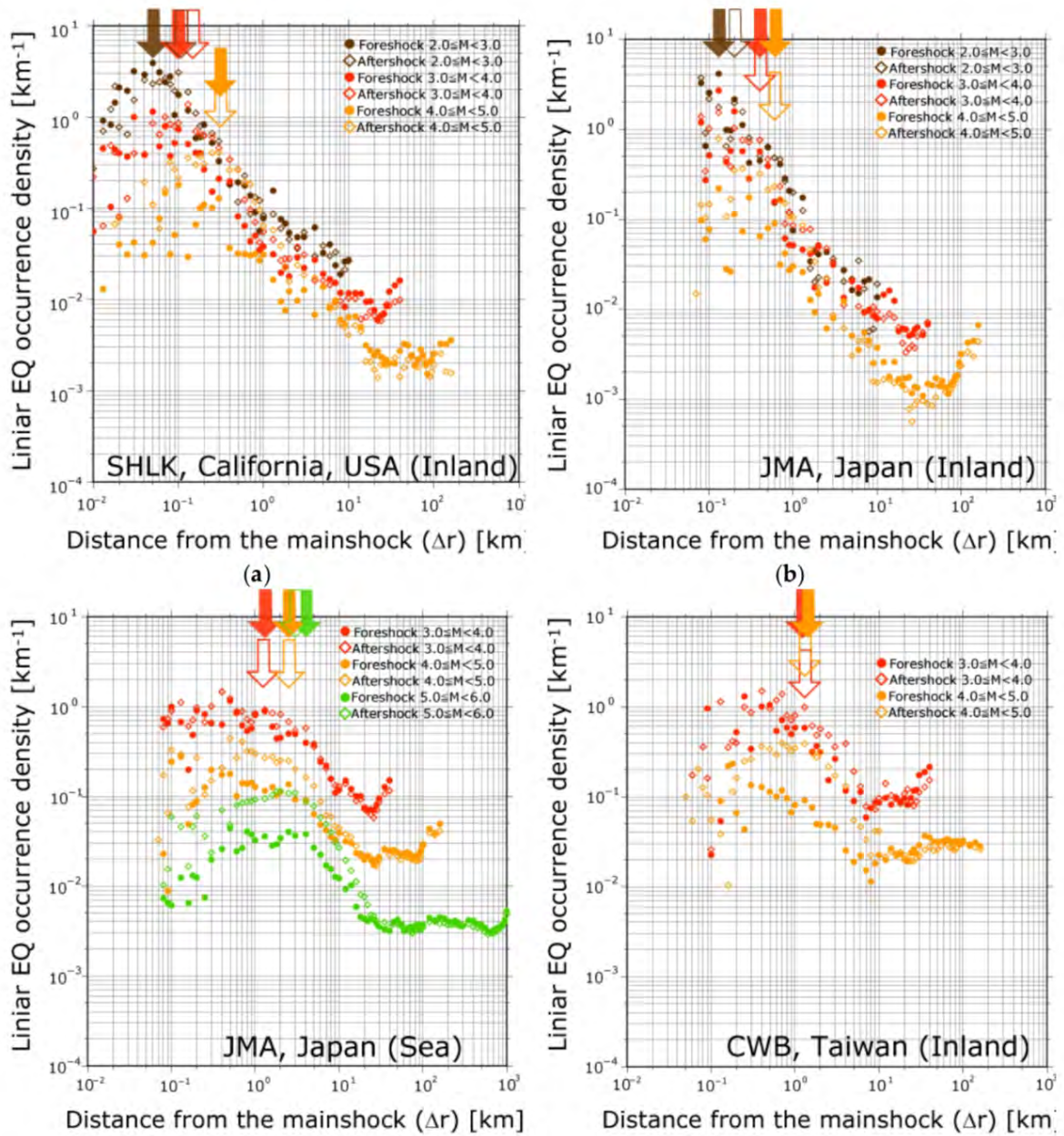


図 1

前震 (Solid circle) と余震 (open diamond) の線密度分布の例。(a) カリフォルニア、(b) 日本の内陸地震、(c) 日本の海域地震、(d) 台湾。線密度分布の計算で、採用した本震のマグニチュードは解析対象地域によって異なる。(c) では M4、(d) では M3 である。Solid arrow と Open arrow は、それぞれ、前震と余震のグラフの折れ曲がりの距離 (特性距離) を表す。

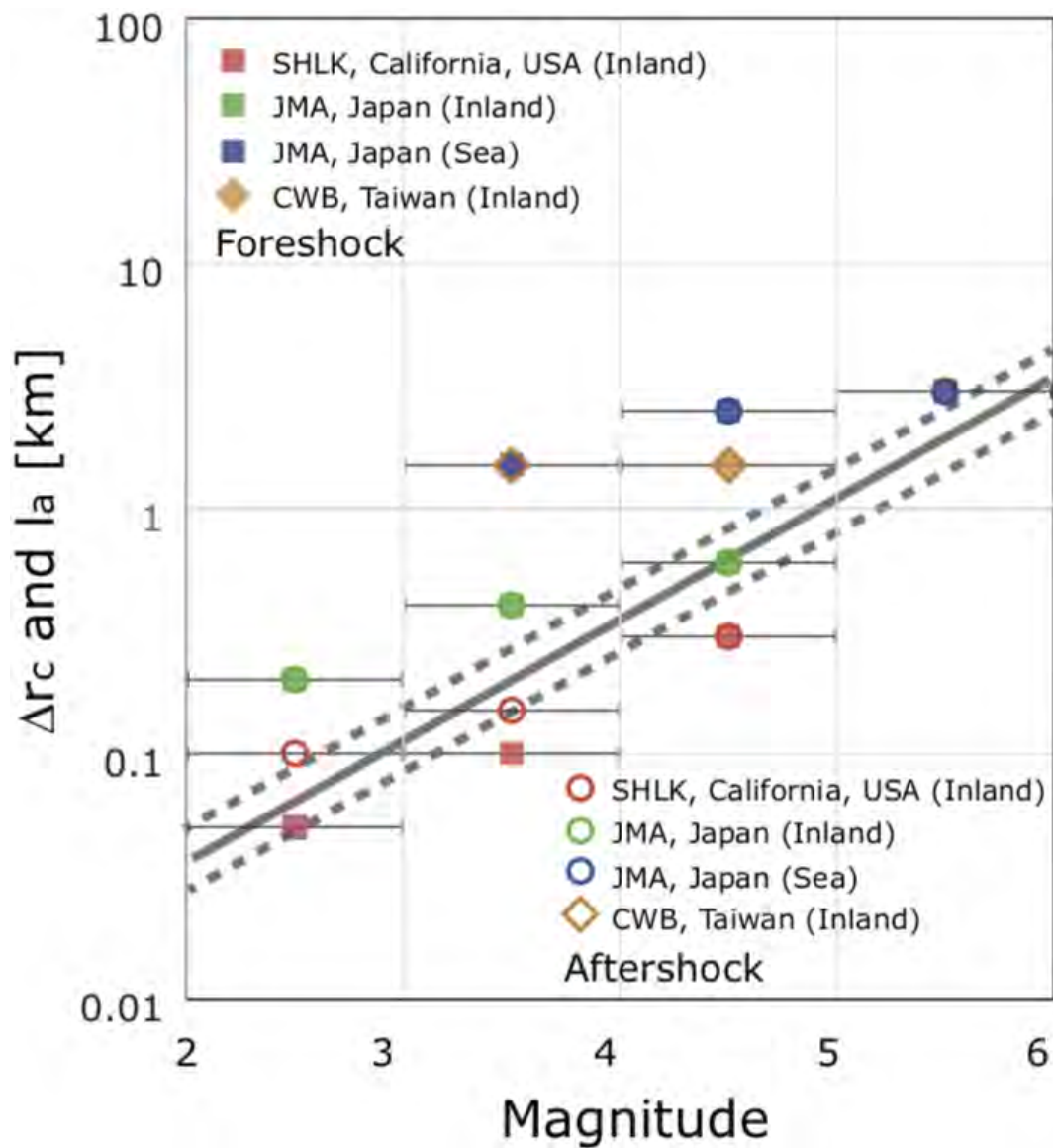


図 2

解析対象地域ごとの本震のマグニチュードごとの前震と余震の特性距離。赤はカリフォルニア、日本の内陸地震は緑、海域の地震は青、台湾はオレンジとなっている。グレーの実線は Skarlatoudis ら, Bull. Seismol. Soc. Am. 106, 1652-1662, 2016 によるアスペリティーサイズ(半径)を示す。点線は 1 シグマの標準偏差を示す。

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

「地震学及地理学研究材料報告」に基づく歴史津波の痕跡調査

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ア. 史料の収集とデータベース化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

東京大学地震研究所所蔵「地震学及地理学研究材料 測候所郡役所組合事務所報告」(以下「研究材料報告書」とする。)は、1893年(明治26年)段階に帝国大学理科大学総長加藤弘之名義で各地の郡役所・測候所に対し、「(甲)海嘯二関シ口碑又ハ記録等二伝フル各般ノ事項」、「(乙)五十年内外依頼海底ノ浅深ニ変遷アリシヤ」と?過去の津波に関する口碑・記録と?明治26年から50年以内の海底変動に関する情報について調査を依頼したものであり、北海道・岩手県・福島県・千葉県・富山県・三重県・香川県・愛媛県・宮崎県・鹿児島県・沖縄県の1道10県の過去の津波や海底変動について回答が寄せられている。

本研究は、「研究材料報告」に記載された新たな津波痕跡点について現地調査を実施し、津波到達点の特定を目指すとともに、周辺地域の歴史資料調査を実施し、「研究材料報告」における記載内容の歴史学的な検証をおこなう。特に、当時の歴史的景観を示す古絵図・古地図類の情報は重点的に収集する。ただし、現時点で「研究材料報告」に掲載されている地域は1道10県、回答があった役所・役場・事業所は津波の有無に拘わらず約130件の情報が記されている。よって当該年度は、従来の地震研究のデータを更新する可能性が高い福島県・千葉県・富山県の記録の検証に重点を置くこととする。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

「研究材料報告」に収録される福島県楢葉町の報告書で注目されるのは、かつて楢葉郡木戸村付近の沿岸に存在した脇浜村が、慶長年間(1603-1615)の海嘯によって壊滅し、生き残った住民は伝承があり、これが地元の旧記に記されているという点である。『福島県史』、『楢葉町史』によると、近世初頭に存在した「わきの村」または「脇之浜村」が、近世後期には史料上に現れなくなることが確認されている。楢葉町木戸地区は2011年の東日本大震災および原発災害にともなう中間所蔵施設の建造により、旧家の解体・移転が進行しているが、元福島県立歴史資料館・山内幹夫氏が昭和49年に実施したフィールドワークによると、楢葉町北田の北田天満宮の縁起を記した旧記が存在し、その中に脇浜村は慶長年間の洪水・大波によって壊滅したと記されていることが確認できる。

「研究材料報告」に収録される千葉県からの報告では、現・館山市域の「今境橋」に関わる明応地震による隆起の伝承や、上総興津の禅奥寺の元禄津波の伝承などが記されている。また、旧銚子町からの報告には「田中玄蕃所蔵ノ記録」として『新収日本地震史料』などに収録される『先代集』の文章が記載されるが、刊行物では「洗足の砌波上げ盤浮き」とされている部分について、「盤」の文字が「盥」の誤読であることが確認された。

富山県四方町地区からの報告では、安政5年(1858)2月24日の四方海岸において、30間(約54メートル)の潮の満ち引きがあり、溺死者3名の被害が報告されている。この日に発生したのは内陸を震源とする飛越地震であるが、この津波に関して記した史料として、他に「地水見聞録」に記された高波による4人の死者、あるいは「魚津在住見聞録」に記された魚網の流失、漁舟の大破などを記した史料があり、津波発生の存在を裏付けている。

ほか、「研究材料報告」に収録される北海道の海嘯記事については、武者金吉『日本地震史料』に収録されているものと一部共通しているが、『日本地震史料』に収録されているのは『時風録』なる書物からの引用であり、「研究材料報告」にはより多くの箇所の海嘯記事が収録されていることが判明した。

- (8) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
蝦名裕一・佐竹健治, 2018, 帝国大学理科大学「地震学及地理学研究材料報告」に記載される津波痕跡の検証, 平成30年度歴史地震研究会大分大会口頭報告.

- (9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

(代表者名) 蝦名 裕一 東北大学災害科学国際研究所 准教授
佐竹 健治 東京大学地震研究所 教授
他機関との共同研究の有無：無

- (10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東北大学災害科学国際研究所 人間社会対応研究部門 災害文化研究分野
電話：022-752-2146
e-mail：ebin@irides.tohoku.ac.jp
URL：

- (11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：蝦名 裕一
所属：東北大学災害科学国際研究所 人間社会対応研究部門 災害文化研究分野

福島県の伝承



『材料報告』

「…檜葉郡元北田村ノ東浜昔脛浜村ト云ヒシ処ヨリ移住シタル者ナリト是ハ慶長年間海嘯ノ為メ脛浜村全地滅没セシ旨、旧記等ニ伝載アルヲ見ル、」

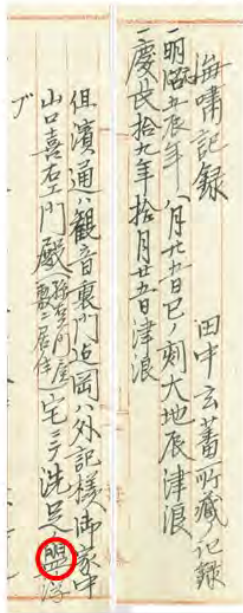
慶長年間の海嘯により協浜村が壊滅、住民は山田浜へ移住

『天満宮縁起』 (山内氏ノートより)

「…其後大洪水ニテ金剛川辺り満水致シ、協浜真中江押切シ流レケル、尚又海崖渚高波相成、廿五日之間大浪ニ而式百三軒之家数不残郭公洞ト散リニ而、」

協浜村が洪水・高波で滅亡したという伝承

『材料報告』における「田中玄蕃所蔵ノ記録」



田中玄蕃所蔵ノ記録

一、慶長拾九年拾月廿五日津浪
但濱通ハ観音裏門迄、岡ハ外記様御家中山口喜右エ門殿(孫右エ門屋敷ニ居住)宅ニテ洗足ノ盥浮ブ

『先代集』

(『千葉県史料近世編』、新収2巻収録)

一、慶長十九年甲寅年十月廿五日津波入ル、浜通ハ観音裏門迄上ル、岡ハ松平外記様御家中山口喜左衛門と申衆入孫右衛門屋敷に其代居住被成、洗足の砌波上げ盤浮き申程波参候申咄伝也

『先代集』は現在閲覧が困難。ただし、『千葉県史料近世編』の翻刻における「盤」は「盥」の誤読であることが判明。

富山県富山市四方町からの報告



安政五年二月廿四日夜地ノ
劇震スルヤ、一時ハ海水三十
間モ退キ、少時アリテ海水満
チ来リテ平常ヨリ陸ニ氾浸シ
タルコト又三十間程ナリシト、
此際漁船ヲ繋カシカ為メ海
浜ニ出テタルモノ、漲波ノ為メ
漂流セル所トナリテ溺死スル
モノ三人アリ、是レヲ以テ町
民一同海嘯ノ浸来スベシトテ
老ヲ扶ケ幼ヲ携ヘ、十町或ハ
半里許ヲモ距ル村落ニ避逃セ
シモノ少ナカラズ

日付は1858年飛越地震。内陸が震源なのに津波は発生？

「地水見聞録」...高波にさらわれ4人死亡

「魚津在住見聞録」...塩蔵全潰、蔵46大破、漁網12流失、漁舟6大破

(1858飛越地震報告書)

*『富山市史上巻』「打ち返された高波にのまれて4人が死亡した」

...メカニズムについては依然謎

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

白山火山の最近 5000 年間の噴火履歴解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

本研究は、白山火山の最近 5000 年間の噴火履歴が判明を目的として、(a) 白山山頂部の高精度地質図作成、(b) 噴出物の噴火年代と定置温度の推定、(c) ドローンによる火山岩塊の分布調査、(d) 岩石学的解析によるマグマ供給系の解明を試みた。

(a) 白山山頂部の高精度地質図作成

本研究による現地調査結果と既存の年代値から、本火山の活度史が以下のように明らかになった。

Stage 1 (約 6~3 万年前): 大汝峰と御前ヶ峰付近を噴出中心として、西方から南方へ溶岩流(大汝峰溶岩類、御前ヶ峰西部溶岩、御前ヶ峰南部溶岩、南竜ヶ馬場溶岩類及び六万山溶岩)が流出した。東麓にはブロックアンドアッシュフロー堆積物(間名古谷火砕流堆積物)が堆積した。

Stage 2 (約 3~1 万年前): 山頂北部の翠ヶ池や現山頂の御前ヶ峰付近を噴出中心とし、翠ヶ池溶岩類、御前ヶ峰火砕岩層、剣ヶ峰火砕岩層が形成された。その後、約 4,400 年前に山頂域で小規模な山体崩壊が発生し、東麓に大白川岩屑なだれ堆積物を堆積させた。

Stage 3 (山体崩壊後~現在): 山体崩壊で形成された馬蹄形凹地内から溶岩が流出し、東麓に白水滝溶岩を堆積させた、山頂部では爆発的噴火も繰り返し発生し、多数の爆裂火口とテフラ層が形成された。

(b) 噴出物の噴火年代と定置温度の推定

白山火山の山頂部に分布する 7 個の火山弾を対象に試料採取を実施し、古地磁気解析を行った。その結果、粘性残留磁化成分を除き安定な一成分が認められた。山頂直下で採取した火山弾試料は伏角が負を示したが(図 2a)、その他の試料については、伏角は正を示し、概ね地磁気方向となった(図 2b)。従って、山頂直下の試料は、マグマが十分に冷却し固結後に、水蒸気噴火により現在の位置に落下したと考えられる。一方、その他の試料については、比較的高温(>500)で落下し、現在の位置で冷却したと考えられるため、マグマ噴火起源が示唆される。テリ工法の結果では、およそ 36 μ T の古地磁気強度を示す火山弾が多く認められた。この古地磁気強度を既報の地磁気強度の変化曲線(Sakai and Hirooka 1986; Yoshihara et al. 2003)と対比した結果、4000-3000 BC の年代が推定できた。水蒸気

噴火を示した試料とマグマ噴火を示した試料が同じ年代のため、同時代に水蒸気噴火とマグマ噴火が発生した可能性が示唆される。また、試料により統計学的に異なる古地磁気強度も得られているため、今後試料を増やして、さらなる検討が望まれる。

(c) ドローンによる火山岩塊の分布調査

白山火山の山頂部には、複数の火口地形が見られ、その周辺には火山岩塊（多くがジョイントッドブロック）が広く分布する。これらの火山岩塊の給源火口を特定するために、ドローンを用いて山頂域の航空写真を撮影し、火山岩塊の粒径分布図を作成した。写真解析から、翠ヶ池火口（古文書では1042年に噴火したとされる）の西側に火山岩塊が多く分布することが分かった。当初は翠ヶ池火口の近傍に最大径の火山岩塊が分布すると予想していたが、そのような結果は得られなかった（第3図）。これは、山頂部に複数の火口が存在し、各火口から放出された火山岩塊が混在した状態で山頂域に分布するためと考えられる。

(d) 岩石学的解析によるマグマ供給系の解明

白水滝溶岩（噴出年代約2200年前；北原ほか，2000）について物質科学的解析を行った。本溶岩は、ホスト溶岩（デイサイト～安山岩）とその中に散在する玄武岩質安山岩の包有岩からなる。全岩・鉱物組成分析及び斑晶鉱物の平衡関係の解析より、本溶岩の形成に以下の3種類の端成分マグマが関与したことが明らかになった。

- 1) デイサイト質マグマ：Pl (An₃₆₋₅₆) , Opx , Amp , Qtz を晶出
- 2) 玄武岩質マグマ I：Pl (An₆₀₋₇₈) , Ol (Fo₆₆₋₇₈) , Cpx (Al₂O₃ < 3 wt.%) を晶出
- 3) 玄武岩質マグマ II：極微量の Pl (An₈₅) , Ol (Fo₈₀₋₈₈) , Cpx (Al₂O₃ > 3 wt.%) を晶出

鉱物圧力計で求められた深度は、デイサイト質マグマが約5 km、玄武岩質マグマが約15 km、同IIが約35 kmであり、高橋ほか（2004）や平松（2006）の震源分布解析と地震波トモグラフィーから推測されている本火山の地下のマグマ溜まりの深度（4～5 km、10～14 km 及び 30～40 km）とほぼ一致する。現在は、これら3種類のマグマの混合過程を検討中である。

(8) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

（代表者名）

川さき 一雄 富山大学大学院理工学研究部（理学） 助教

（分担者名）

石? 泰男 富山大学大学院理工学研究部（理学） 准教授

藤原 寛 富山大学大学院理工学教育部修士課程 修士課程1年

他機関との共同研究の有無：無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：

電話：

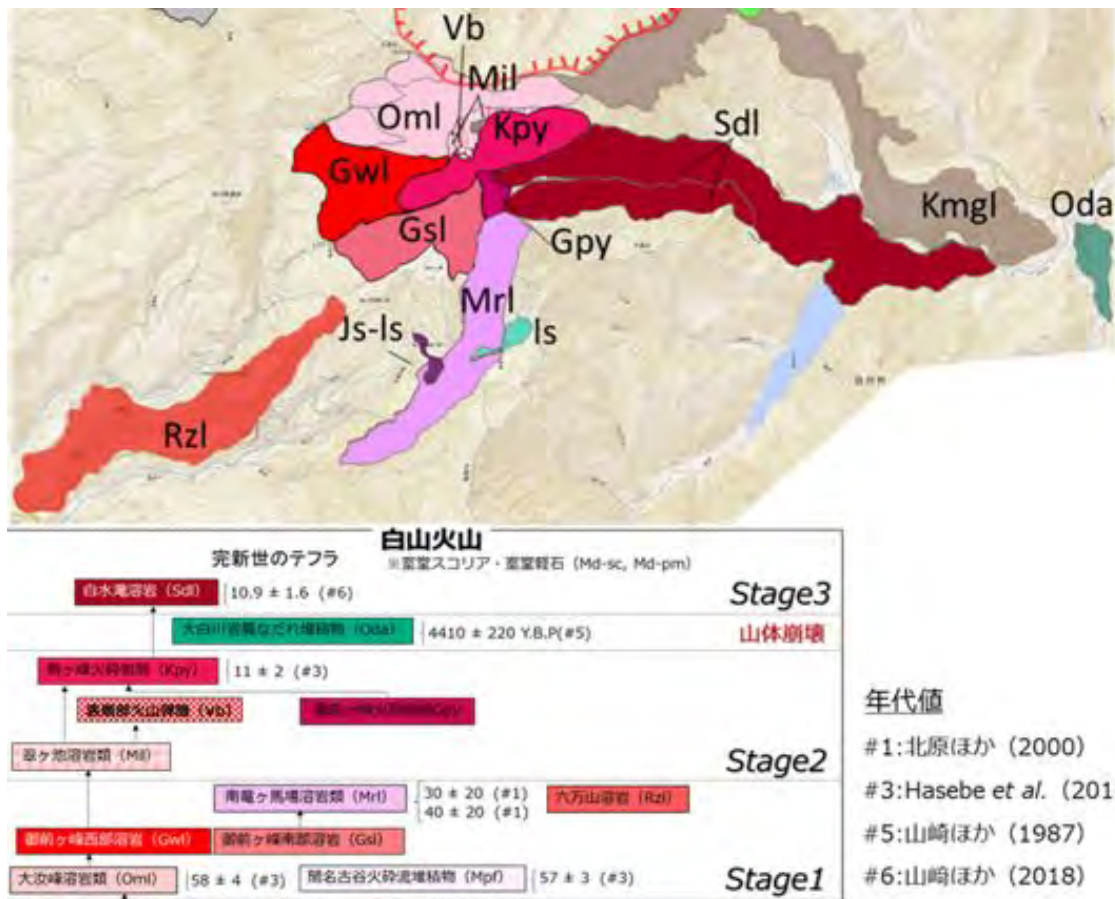
e-mail：

URL：

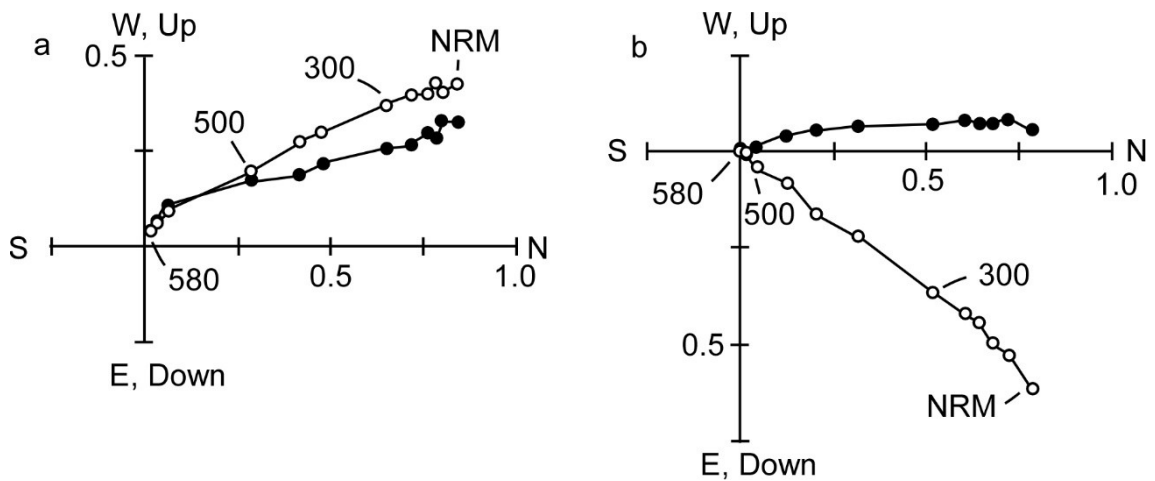
(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：川さき 一雄

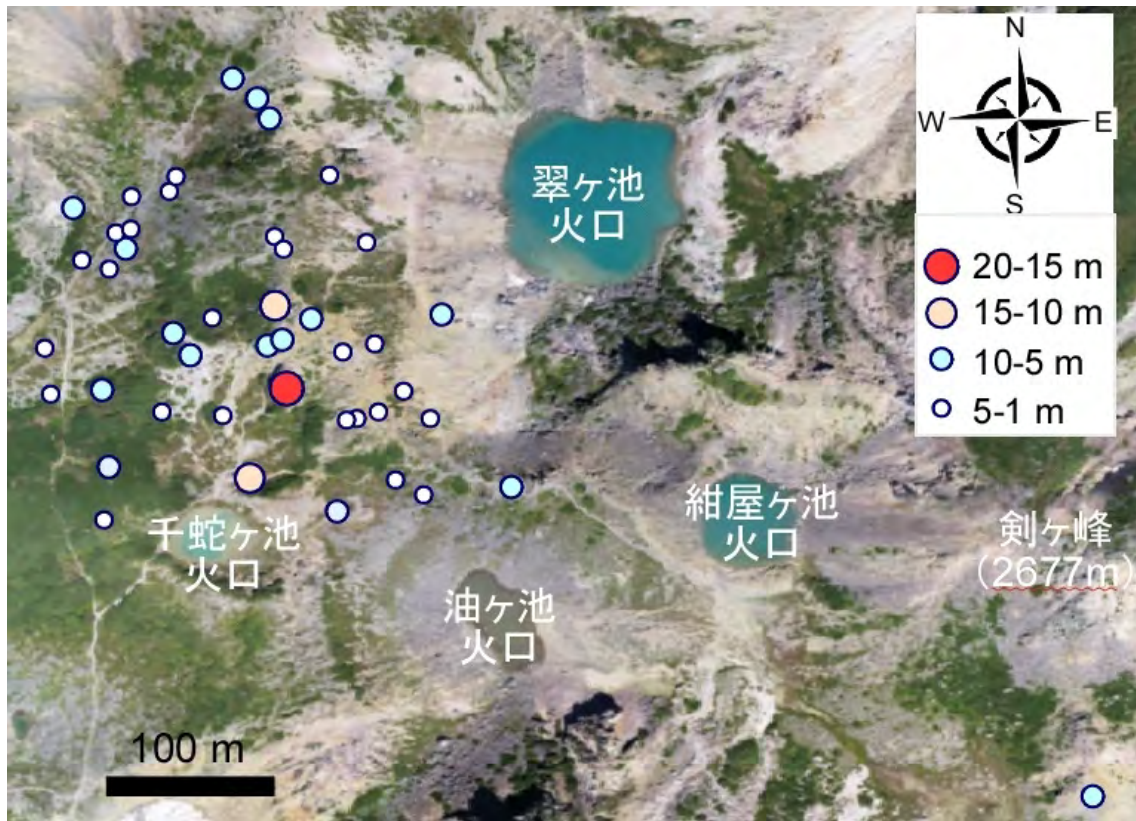
所属：富山大学大学院理工学研究部（理学）



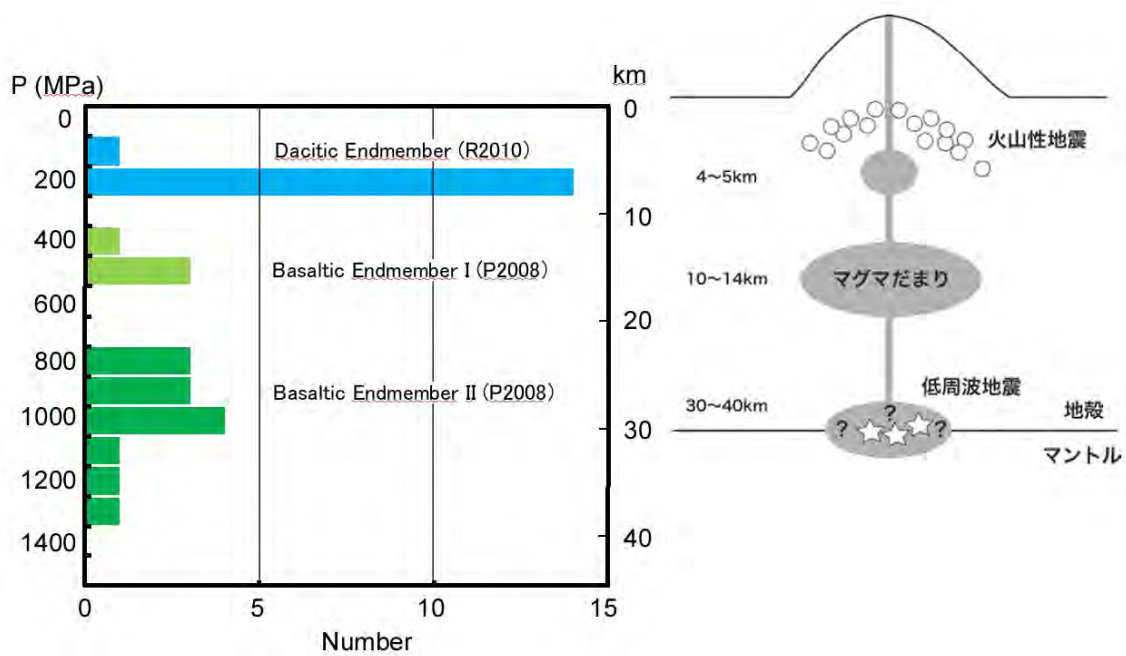
第1図 白山火山山頂部の火山地質図(上)と噴出物層序を示すブロックダイアグラム(下)



第2図 代表的な段階熱消磁の結果：a) 白山山頂直下で採取した試料，b) 御前峰より南西に～480 m 地点で採取した岩石．黒丸は水平面，白丸は鉛直面への投影を示す．数字は消磁温度()を示す．



第3図 白山火山山頂部の火山岩塊の分布（長径1 m以上のものを点示）



第4図 観測から推測されている白山火山のマグマ溜まりモデル（平松 2006）と鉱物圧力計から見積もられた各端成分マグマの深度．デイサイト質及び玄武岩質端成分マグマの圧力は，それぞれ，Ridolfi et al. (2010) の角閃石圧力計と Putrika (2008) の輝石圧力計で求めた．

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

北海道中央部，大雪火山，御鉢平カルデラ噴火を対象とした噴火推移とマグマ供給系の変遷の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

本研究は、北海道中央部の活火山である大雪火山で約 3 万年前に生じた御鉢平カルデラ形成噴火を対象として、噴出物の層序・堆積様式に対応した噴火推移を編むこと、さらに噴火推移に対応したマグマ供給系の変遷を明らかにすることを目的としている。以下に研究計画の概要を示す。

1. 噴火推移の解明について

御鉢平カルデラ形成期の噴火活動については、これまで主に山麓の地質調査によって推定され、流出時期の異なる 2 種類の火砕流堆積物の存在が明らかになっている(佐藤・和田、2012; 安田・他、2015)。これらは流出時期の古い方から、Hb-type 火砕流堆積物、Px-type 火砕流堆積物と呼ばれている(佐藤・和田、2012)。最近、Yasuda and Suzuki-Kamata (2018) がカルデラ近傍の詳細な地質調査を行い、特に Px-type 火砕流を流出した噴火の推移を明らかにし、Px-type 火砕流の噴火直前に、先行する噴火活動が生じていることを明らかにした。

また、Hb-type 火砕流についても火砕流に先行する噴火活動があったことが確認できている。以上のように御鉢平カルデラでは火砕流が流出する噴火に先行して数回の噴火が生じていたと考えられる。したがって、特に Hb-type 火砕流を流出した活動について、カルデラ近傍での地質調査を行い、カルデラ形成期全体の噴火活動を解明することを目指す。

2. マグマ供給系の変遷について

これまで申請者らは主に山麓の火砕流堆積物について岩石学的な検討を行い、マグマ溜まりの進化過程を検討してきた(佐藤・和田、2012)。しかし、御鉢平カルデラでは、上述のように火砕流流出に先行して数回の噴火が生じている。したがって、火砕流に先行する噴火を含めて噴火活動全体に対応したマグマ供給系の変遷を明らかにすることを目指す。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

北海道中央部、大雪山の中央に位置し、約 3 万年前に活動した御鉢平カルデラの噴火推移・マグマ供給系の変遷を明らかにする目的で、カルデラ周辺および山麓において地質調査を行った。また、採取した噴出物について残留磁化方位の測定、岩石学的な検討を行った。

カルデラ近傍での地質調査の結果、カルデラ周辺に分布する火砕堆積物は、層序・岩相・構成物の観点から3つの噴火堆積物に分けられることが明らかとなった。古いものから順に、スコリアと岩片に富む小鉢平火砕流堆積物、スコリア降下物と火砕サージ堆積物の互層からなる間宮岳部層、軽石とスコリアに富む降下堆積物と火砕流堆積物からなる層雲峡部層である。これらの噴火堆積物には時間間隙を示す火山灰土壌が含まれない。しかし、岩石磁気分析の結果、3つの噴火堆積物はそれぞれ特有の残留磁化方位を示し、層雲峡部層の方位は大雪山山麓に分布する火砕流堆積物(Px-type 火砕流堆積物：佐藤・和田、2012)の方位とよく一致することが分かった。このことから、カルデラ周辺に堆積する層雲峡部層は約3万年前のカルデラ噴火の際に噴出したPx-type 火砕流堆積物の給源近傍相であることが明らかになった。間宮岳部層は、9地点から求めた残留磁化方位が2つの方向に集中することから、休止期間を挟む2回の噴火イベントによって形成された可能性が示唆された。

現在、これらの噴出物の岩石学的な検討を行っており、地質現象と統合的なマグマ溜まりの進化モデルを推定している段階である。

(8) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

【論文】

Yasuda, Y. and K. Suzuki-Kamata, 2018, The origin of a coarse lithic breccia in the 34 ka caldera-forming Sounkyo eruption, Taisetsu volcano group, central Hokkaido, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 357, 287-305.

【国際学会(ポスター発表)】

Yasuda, Y. and K. Suzuki-Kamata, 2018, The origin of a coarse lithic breccia sheet and its implication for the formation of small calderas, *The 7th International Workshop on Collapse Caldera*, 講演予稿集, p54.

【学会・研究集会(口頭発表)】

安田裕紀・鈴木桂子, 2018, The origin of a coarse lithic breccia and its implication for the formation of small calderas, 日本地球惑星科学連合2018年大会, 講演予稿, SVC43-03.

佐藤鋭一・安田裕紀・和田恵治, 2018, 大雪火山, 過去3万年間の噴火活動. 国際火山噴火史情報研究集会2018-2, 講演要旨集, 3-01, 33-35.

安田裕紀・佐藤鋭一・鈴木桂子, 2018, 古地磁気方位からみた大雪山御鉢平カルデラの噴火史, 国際火山噴火史情報研究集会2018-2, 講演要旨集, 3-02, 36-37.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

(代表者名) 佐藤鋭一 神戸大学・大学教育推進機構 助教

(分担研究者) 安田裕紀 神戸大学・理学研究科 大学院生(博士課程後期課程)

他機関との共同研究の有無：無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：神戸大学・大学教育推進機構

電話：078-803-7635

e-mail：esato@people.kobe-u.ac.jp

URL：

(11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：佐藤 鋭一

所属：神戸大学・大学教育推進機構

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

後屈斜路カルデラ期の摩周火山及び中島火山の噴火履歴とマグマ供給系

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

1. 摩周火山の過去 4 万年の噴火履歴とマグマ供給系の変遷の解明

摩周火山は屈斜路カルデラ(長径 26km)の東壁上に噴出した後カルデラ火山である。約 7500 年前に生成した直径 6x7 km のカルデラをもち、鬼界カルデラの形成(約 7300 年前)と並んで最新のものである。摩周火山は約 4 万年前に活動を開始後、プリニー式噴火を主とした大噴火を周期的に行ってきた(岸本ほか, 2009; 長谷川ほか, 2009)。摩周火山は規模の大きな爆発的噴火を高頻度で行ってきた特徴を有する。しかし摩周火山は気象庁の常時観測火山に指定されていない。火山ハザードマップもできていない。過去の噴火履歴からは千年~二千年間の休止期の間にはマグマが蓄積されて次なる爆発的噴火の準備がなされていると予想される。

平成 30 年度では、カムイヌプリ山体の調査を実施し、摩周カルデラ以降のテフラ及び 1000 年前のカムイヌプリ噴火噴出物について重点的に精密調査・試料採取を行う。摩周火山の最新噴火である約 1000 年前に起こったプリニー式噴火後、噴気活動もなく静穏な状態が続いている現在の摩周火山の中長期的な噴火予測に役立つ。

2. 中島火山は活火山である

後屈斜路カルデラ期にカルデラ湖(屈斜路湖)内に中島火山が成長した。中島火山の地質やテフラに関する報告は少なく、その噴火史については未解明な点が多い。平成 29 年度の予察的調査で中島火山の最新の噴火が摩周カルデラ形成期よりも新しいことが予想された(後藤・和田, 2017)。中島火山の詳細な噴火史を中島に上陸して調べて中島が活火山であることを明らかにする。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

1. 屈斜路火山後カルデラ期、中島火山の噴火履歴と活火山の提唱

北海道東部屈斜路カルデラの屈斜路湖内に位置する中島は、後カルデラ期に形成された。中島の地質に関する報告は非常に少なく(勝井, 1962; 守屋・隅田, 2003)、その詳細は明らかにされていない。我々は環境省の許可を得て中島に上陸し、中島全域の地質調査を行った。

中島火山(標高 355m)は緩やかな山体をなし、湖水面下の部分を含めた山体の大きさは径 4km、高さ 210m である。山体の中央部には大きな火口(径 1.5km、深さ 60m)があり、山体の大部分は火砕堆

積物からなり、典型的なタフコーンの形態をなす(図1)。中央火口内には3つの溶岩ドームがあり、溶岩ドームの一部は2つの爆裂火口により破壊されている(図1)。

中島火山は主に3回の噴火イベントから形成されたと考えられる。

約23-20 kaにマグマ水蒸気爆発が起こってタフコーンの主体が形成された。この火砕堆積物(屈斜路中島火砕堆積物c; KsNj-cと称する)は、岩相から勝井(1962)のアトサヌプリ軽石に対応される可能性が高い。約13 cal kaには水蒸気プリニー式噴火によって発泡の良い軽石を含む屈斜路中島火砕堆積物b(KsNj-b)が堆積した(後藤・和田, 2018)。続いて3個の溶岩ドームが噴出したと推測した。

中央火口内の2個の爆裂火口は東側の火口(径330m, 深さ50m)と西側の火口(径400m, 深さ30m)からなり、連結する(図1)。東側の火口は溶岩ドーム(南西側)の一部を破壊している。東側の火口のリムでは、厚さ約50cmの小規模な爆発堆積物が観察された(図2)。これを屈斜路中島火砕堆積物a(KsNj-a)と呼ぶ。溶岩片と少量の軽石を含み、マグマ水蒸気爆発によるものと解釈した。KsNj-aはMa-fの上位にある。KsNj-aの直下土壌からは1770 ± 30 BP(1.7 cal ka)の年代を得た(図2)。2つの爆裂火口は地形が極めて新鮮で火口壁はほとんど侵食されていない。爆裂火口の周辺には溶岩ドームを破壊したこの爆発噴出物(KsNj-a)が堆積しており、約1700年前に起こった最新の噴火堆積物である。

中島火山の噴火履歴が明らかになったことで、その最新噴火が約1700年前と推定されたことは中島火山が活火山の定義に当てはまり、火山防災上、非常に重要な知見が得られたと思われる。

2. 摩周火山の過去4万年の噴火履歴とマグマ供給系の変遷の解明

今年度、Ma-c3層直下土壌及びMa-d2層直下土壌の炭素放射年代測定を行い、昨年度の年代値データと合わせて、摩周火山のカルデラ形成期以降の噴火年代と噴火履歴がより詳細にわかった。カルデラ形成期以降の噴火履歴の総合柱状図を図3に示す。以下に今年度の新知見を含めた研究成果を報告する。

図4はマグマ噴出量の積算変化を示す。摩周火山過去14000年間では約7000年の間隔で噴出量が多い3つの噴火イベントがあった(Ma-l: 14000年前, Ma-f~j: カルデラ形成7500年前, Ma-b: 1000年前)。カルデラ形成後は溶岩の噴出や爆発的な噴火を小刻みに繰り返した(図4)。約4000年前にカムイヌプリの中央火口丘が形成されてからは後カルデラ期で最も長い休止期間(約1500年)を経てMa-cの断続的な噴火が起こった(図4)。1000年前の最新噴火(Ma-b)から1000年の休止期間を経た現在は、後カルデラ期の噴火履歴傾向から考えると、マグマ蓄積の準備が整って新たな噴火イベントが始まる時期にあると言える。

約7500年前にカルデラを形成した時期の一連の爆発的な噴火を引き起こしたマグマは、後カルデラ期と約14000年前のMa-l期のマグマとは、TiO₂-K₂O図で見ると異なる組成領域にあって、マグマシステムが約7500年前の時期だけ異なっていたことが推定される(図5)。

今年度の地質調査において、Ma-gの直上に水蒸気プリニー式噴火と予想される噴出物を見出した(図6)。この噴出物中には火山灰にコーティングされた、発泡が良くやや角張った軽石が多数含まれる。この堆積物をMa-f'と仮称する。Ma-ilからMa-gにわたる一連のプリニー式噴火の後で、火口が変わってMa-f'、そしてMa-fの大規模な火砕流噴火に至った可能性がある。平成28年度に提起したカルデラ噴火においては火道を変えて噴火が行われたモデルと合致する。

- (8)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
- 後藤芳彦・和田恵治(2018)北海道屈斜路カルデラ中島火山の噴火年代?中島軽石のテフロクロノロジー. 地学雑誌 127, 157-173.
 - 和田恵治・岡田侑也・佐藤鋭一(2018)摩周火山, 後カルデラ期の噴火履歴とマグマ供給系. 日本地球惑星科学連合2018年大会予稿集, SVC43-P06
 - 和田恵治・佐藤鋭一・石塚吉浩(2018)雌阿寒岳, 最近1000年間の噴火履歴とマグマ供給系. 日本地球惑星科学連合2018年大会予稿集, SVC41-P02
 - 和田恵治・遠藤 優磨・佐藤鋭一(2018)雌阿寒火山, 螺湾火砕流堆積物の縞状軽石から推定されるマ

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

(代表者名) 和田恵治 北海道教育大学旭川校 教授

(分担研究者) 後藤芳彦 室蘭工業大学 准教授

他機関との共同研究の有無 : 無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 :

電話 :

e-mail :

URL :

(11) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 和田 恵治

所属 : 北海道教育大学旭川校・地学研究室

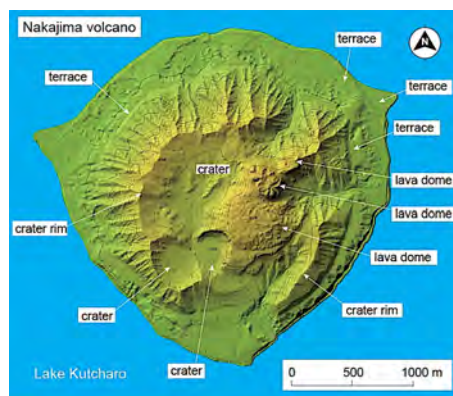


図 1 屈斜路火山後カルデラ期, 中島火山の地形



屈斜路中島 a テフラ (KsNj-a)；中島の最上位テフラは溶岩片を多量に含む爆発堆積物である。軽石を含み、マグマ水蒸気噴火で形成された。KsNj-a 直下土壌の 14C 年代は 1770 年前。At-b テフラに覆われる。

図 2 中島 a テフラ (KsNj-a) の露頭

溶岩	テフラ層序	堆積物	年代	休止期間(年)
	Ta-a	広域Ash	AD1739	現在
	soil			
	Ko-c2	広域Ash	AD1694	1699
	Ma-b1	pumice fall		Ma-b
	Ma-b2	ash		
	Ma-b3	pumice fall		
	Ma-b4	ash+PDC?		
	Ma-b5	pumice fall		
	Ma-b6	PDC, ash	0.9-1.0 cal ka	
	B-Tm	広域Ash	1.0 cal ka	199-206
	soil			
カムイヌプリ 山頂溶岩 (山頂-北麓)	Ma-c1	ash		Ma-c1
	soil			195-201
	Ma-c2	ash	1.3 cal ka (1440BP)	Ma-c2
	soil			701
	Ma-c3	ash	2.0-2.1 cal ka (2100BP)	Ma-c3
	soil			151
	Ma-c4	ash	2.2 cal ka (2160BP)	Ma-c4
	soil			199-198
	Ma-c5	ash+pumice		Ma-c5
	soil			199-198
	Ma-c6	ash		Ma-c6
	soil			
	Ta-c	広域Ash	2.5 cal ka	1590-1760
	soil			
	Ma-d1	pumice fall+PDC		
カムイヌプリ 本体溶岩	Ma-d2	ash	4.0 cal ka 3.8-3.9 cal ka (3960BP)	Ma-d
	soil			391
カムイヌプリ 西側溶岩	Ma-e1 (Ma-e')	ash	4.4 cal ka (3940BP)	Ma-e1
	soil			1199
	Ma-e2 (Ma-e)	ash	5.5 cal ka	Ma-e2
	Riddell ash	広域Ash		800
カムイヌプリ 溶岩	Ma-e3	ash	6.3 cal ka (6430BP)	Ma-e3
	soil			
	Ko-g	広域Ash	6.3 cal ka (6500BP)	1290
	soil			
	secondary Ma-f	PDC, fall	7.4-7.6 cal ka	
	Ma-g	pumice fall		Ma-j-Ma-f (カルデラ 形成)
	Ma-h	pumice fall		
	Ma-i1	pumice fall		
	Ma-i2	ash+pumice		
	Ma-j	ash	7.7 cal ka	
	soil			2399
	Ma-k	ash	12 cal ka	Ma-k
	soil			2999
	Ma-l	pumice fall+PDC	14 cal ka	Ma-l

図 3 摩周火山最近 14000 年間の噴火履歴 (Ma-1 以降)
年代データの赤字は本研究結果による

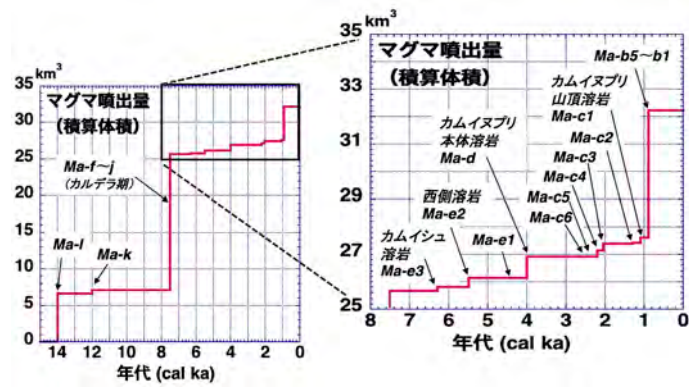


図4 摩周火山過去 14000 年間及び後カルデラ期のマグマ噴出量の積算変化 (岸本他:2009 のテフラ積算体積を基にデータを追加)

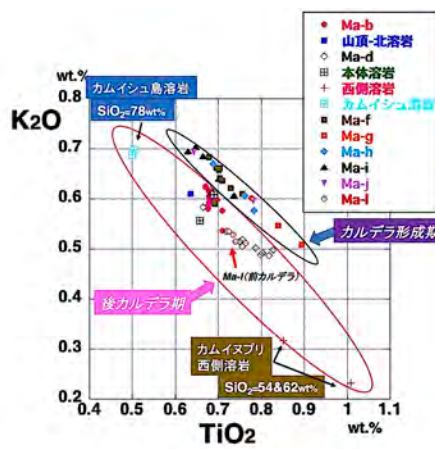


図5 カルデラ形成期及び後カルデラ期の 噴出物の全岩化学組成

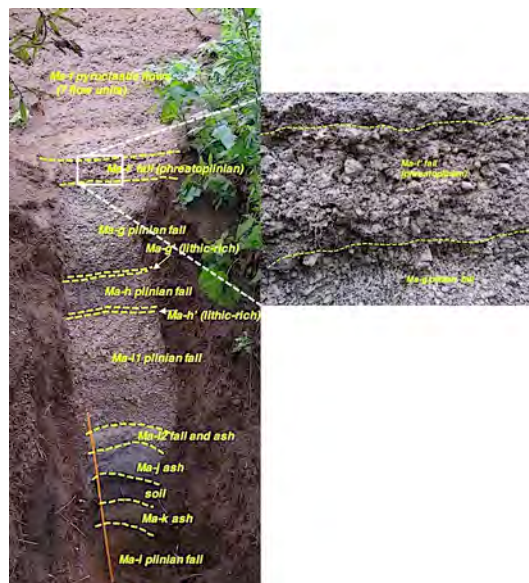


図6 摩周火山南東麓における Ma-l から Ma-f テフラの露頭

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

北海道摩周における火山活動の化学的調査

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

北海道は東西にかけて火山フロントが走っており、ここ数十年で多くの火山噴火が確認されている。北海道東部に位置する摩周については、約 7000 年前の噴火により摩周湖を形成したことが知られている。摩周湖は周辺からの河川の流入が無く、人為的影響からほぼ独立した清澄な環境が形成されており、環境モニタリングなどを目的とした観測が実施されてきた一方で、そこで見られる火山・熱水系の化学的調査については殆ど前例が無い。本研究では摩周湖や、摩周付近に位置する温泉の遊離ガス、温泉水、またはアトサヌプリ(硫黄山)などの噴気を調査し、そのヘリウム同位体組成などを分析してデータを収集することで、現在の火山熱水活動に関する情報を得る。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

今年度の計画に沿って北海道の摩周周辺などにおける調査を実施し、データを収集することで火山熱水系の活動に関する情報を得た。2018 年 12 月にアトサヌプリや和琴温泉、また大規模な地震が 9 月に発生した胆振周辺の温泉における調査を実施した。各サイトで噴気・遊離ガス・温泉水試料を採取して大気海洋研究所に持ち帰り、ヘリウム同位体比($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比)を測定した。アトサヌプリ、和琴温泉については 2017 年からの顕著な変動は見られず、大気補正值で 7.0-7.5 Ra (Ra: 大気のヘリウム同位体比)を示した。この値は 2017 年に摩周湖の底層で観測された火山性成分を含むと考えられる流体(Kagoshima et al., 2018)や、Rouilleau et al. (2015)が報告した十勝岳や雌阿寒岳における噴気に近い。得られたデータからは、2017 年から 2018 年にかけての火山熱水活動の活発化や北海道胆振東部地震に伴う、摩周周辺における同位体組成の変動は検出されなかった。本研究で得られたデータは今後の観測で得られる化学データと比較可能であり、同地域の火山活動度を評価していく上で有用と考えられる。

(8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

Kagoshima, T., Y. Sano, A. Tanaka, 2018, Helium isotopes in Lake Mashu, 2017. Goldschmidt Abstracts, 2018 1217.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

(研究代表者名)

鹿兒島 渉悟 東京大学・大気海洋研究所 特任助教

(研究者名)

佐野 有司 東京大学・大気海洋研究所 教授

Lee Hyunwoo 東京大学・大気海洋研究所 博士研究員

他機関との共同研究の有無：無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：

電話：

e-mail：

URL：

(11) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名：鹿兒島 渉悟

所属：東京大学・大気海洋研究所

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

火山性湖沼における地下熱水流動系の解明：噴火予測への新たな指標

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

本研究では、倶多楽火山東部にある倶多楽湖において湖底における地殻熱流量に対する長期観測を実施する。観測方法は、水温・電導度ロガーおよび電磁流速計を係留設置し、2018年6月～11月の水温成層期に1時間間隔で湖水の電導度・水温および流速の連続測定を行う。これらの機材を設置する地点は、Goto and Johmori (2015) の地下の低比抗体分布を参考に、湖の最深点とその周辺の湖底付近である。これと同時に、定期的に湖内複数点で全層にわたる水温・電導度プロファイルを求め、湖の全湖底における地熱流量分布を求め、湖底地下熱水系の分布領域を特定する。

他方、倶多楽火山西部にある温泉池「奥の湯」において、連続的な水温測定を実施し、その熱収支から地下熱水流入による熱流量を評価する。この時間変動を先の湖底での地下熱流量と比較し、両者の関係から倶多楽火山熱水系の活動度を評価する。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

倶多楽湖において、湖面から下層への熱拡散が無視できる水温成層期(6～11月)に、平均月一回のプロファイラー観測(水温、25 電導度 EC25、DO の 0.1 m ピッチ垂直観測)を実施した。その結果、最深点(水深 148 m)の湖底から 48 m 高までの深水層で水温の上昇が認められ、同時に EC25 も湖底付近で上昇することがわかった。つまり、本来の湖水とは水質の異なる暖水塊が湖底下より漏出していることが判明した。この水温上昇に対する熱流量は 0.66～3.33 W/m² で、短期間で比較的大きく変動することが分かった。このため、同時に設置した水温ロガーの記録から、この熱流量の変動をより詳細に検討した。その結果、湖底からの熱流量は 0～3.65 W/m² で、8月24日～9月22日の約1か月間で 1.87～3.65 W/m² と比較的大きな値をとることがわかった。なお、熱流量はわずかに負値で計算される場合があるが、これは誤差の範囲と考えられる。現在、温泉池「奥の湯」の水温データを解析し、

同池の熱収支を計算中である。この熱収支から奥の湯における地下熱水流入による熱流量を評価し、多楽湖で計算された熱流量とどのように関係があるかを検討する予定である。

(8)平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
原著論文 Chikita et al. (2019): Geothermal linkage between a hydrothermal pond and a deep Lake: Kuttara Volcano, Japan. Hydrology, 6(1), doi:10.3390/hydrology6010004

(9)実施機関の参加者氏名または部署等名：

知北和久 北海道大学大学院理学研究院 非常勤講師

藤井智康 奈良教育大学 教授

橋本武志 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター 教授

青山 裕 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター准教授

他機関との共同研究の有無：無

(10)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：

電話：

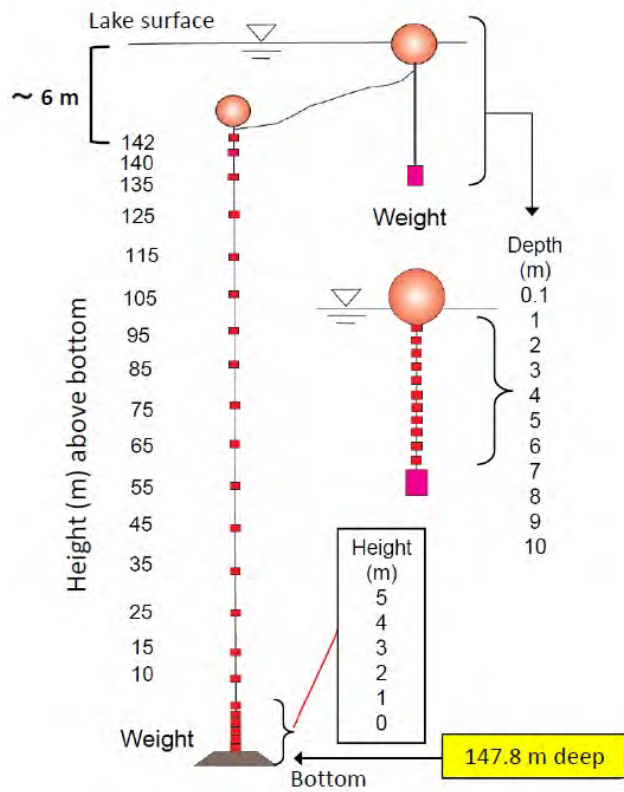
e-mail：

URL：

(11)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

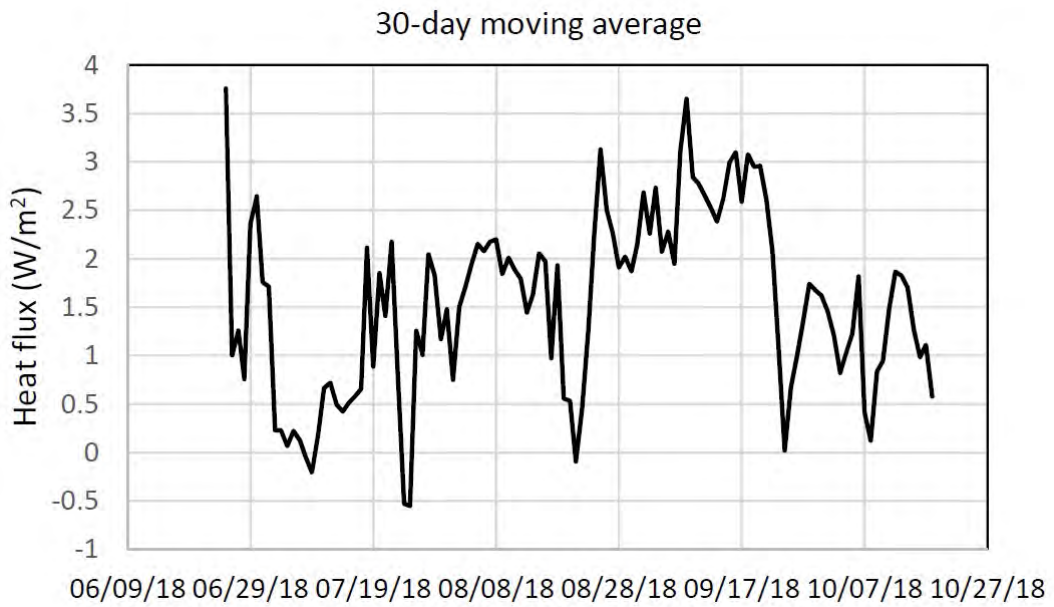
氏名：知北 和久

所属：北海道大学 大学院理学研究院



温度ロガーの係留系

?多楽湖最深点における温度ロガーの係留法



湖底熱流量の時間変化

?多楽湖最深点における熱流量の時間変化(30日移動平均)

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

蔵王山、御釜を火口とする活動の噴火推移の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

蔵王山の最新の火口である御釜は約 800 年前から活動を開始している。この御釜噴火のうち、水蒸気噴火からマグマ噴火へと推移したフェーズの代表として Za-Ok1 を、また、後続するマグマ噴火が明確に認められていないフェーズとして Za-Ok7 を例にして、噴火の推移とマグマ供給系の変遷を解明する。本研究で得られる結果を用いることによって、蔵王山の噴火発生時における可能性の高い噴火推移の 2 つのパターンをマグマ供給系の変化も含めて提示し、噴火事象系統樹に反映し、その高度化を図ることが可能となる。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

水蒸気噴火からマグマ噴火へと推移したフェーズの代表の Za-Ok1 と後続するマグマ噴火が明確に認められていないフェーズの代表の Za-Ok7 について、山頂近傍のテフラの調査を詳細に行い噴火推移を解明した。その結果、Za-Ok1 では水蒸気噴火からマグマ噴火へ至る推移が休止期を挟んで 2 回認められた。2 回目の水蒸気噴火の後のマグマ噴火はブルカノ式 準プリニー式 ブルカノ式と推移したと考えられる。Za-Ok7 については、山頂カルデラの外側に分布する噴出物は一連の噴火によるものと推定された。それらは主に 1895 年 9 月 27 日の噴火によるものと思われる。一連の噴火噴出物の上部に本質物質がある程度明瞭に認められ、噴火が進むに連れマグマの関与が増大したと考えられる。得られた成果をこれまでに作成してきた噴火事象系統樹に反映させた。噴出物の物質科学的研究は、Za-Ok1 についてはスコリアについて分析を進めたが酸化変質を被っており有意な結果が得られなかった。これについては試料の選択や分析方法を検討する必要がある。Za-Ok7 については主に火山弾について分析を進めた。先行する 18~19 世紀噴火のマグマ噴出物にはその特徴の時間変化が認められるが、その傾向の延長上に乗るような特徴が認められた。マグマ組成変化傾向はフェーズを超えて継続した可能性がある。

(8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

Nishi, Y., Ban, M., Takebe, M., Alvarez-Valero, A.M., Oikawa, T., Yamasaki, S. (2019) Structure of the shallow magma chamber of the active volcano Mt. Zao, NE Japan: Implications for its eruptive time scales. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 371, 137-161.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

伴 雅雄 山形大学理学部 教授

他機関との共同研究の有無 : 無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 山形大学理学部

電話 :

e-mail : ban@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

URL :

(11) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 伴 雅雄

所属 : 山形大学理学部

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

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ブレッドボードモデルの開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

平成 30 年度以前においては単一成分電場観測プローブを搭載した 3U Cubesat : Prelude (Precursory electric field observation CubeSat demonstrator) の設計を開始したが、システム成立性に欠けるため、6U サイズの Cubesat での設計に変更した。フランスの小型衛星 DEMETER (130kg) が観測した地震電離圏先行現象を、わずか 6U (10 kg 程度) の CubeSat で実証することは極めて挑戦的であり、宇宙実証がされれば次の段階として本格的な小型衛星群をより安価な超小型衛星群で構築できる可能性を秘めており、従来の小型衛星群より遥かな低コストでより稠密衛星観測の実現が可能となる (2018 年に初号機が打上げられた中国地震電磁観測衛星群は 700kg 以上の衛星で構築される)。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

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ブレッドモードモデル (BBM) の製作を行ない、目的を達成するには 6U サイズ (10 × 20 × 30cm) の CubeSat で実現可能とわかった (図 1)。DEMETER (130 kg) で得られた成果を超えるミッションを、6U (10 kg 程度) の CubeSat で実現できることが確認できた。本稿執筆時点では、衛星の BBM (新規技術要素を有する開発において、設計の実現性を確認するために高価な宇宙用の部品ではなく、地上の一般用部品や材料を使用して製作・試験されるモデル) の設計・製作は完成まで 70% の段階にある。

(8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等)：

児玉哲哉, 新世紀地震フロンティア研究：地上-衛星連携による地震先行現象の確立, パリティ Vol. 33 No 5 (2018)

菊池秀乙, 山崎政彦, 鴨川仁, 宮崎康行, 地震先行現象検証衛星 PRELUDE の自動運用システムの研究開発, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3M14, pp. 1-6 (2018)

鴨川仁, 山崎政彦, 日置幸介, 長尾年恭, 八木橋 宏之, 児玉哲哉, 超小型衛星群とグローバル地上局ネットワークによる地震発生予測, 宇宙ビジネスアイデアコンテスト (S-Booster) ファイナリスト (2018)

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

児玉 哲哉 J A X A 主任開発員

山崎 政彦 日本大学 助教

鴨川 仁 東京学芸大学 准教授
他機関との共同研究の有無：無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：

電話：

e-mail：

URL：

(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：児玉 哲哉

所属：宇宙航空研究開発機構

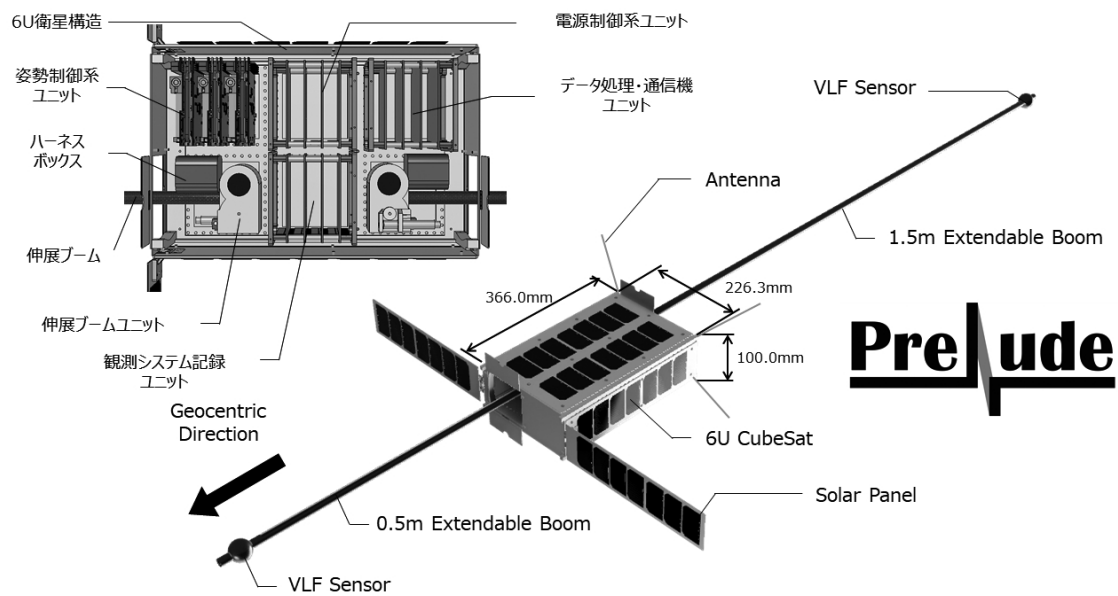


図1 PRELUDE 衛星外見と衛星内のコンポーネント

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

歴史災害研究のオープンサイエンス化に向けた検討

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ア. 史料の収集とデータベース化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

本研究では、オープンサイエンスの標準手法を導入し、災害史料にオープンかつ機械可読な形式でアクセスするための情報基盤を構築する。また、市民参加型のプラットフォームを開発し、少数の研究者の手では不可能な災害史料の大規模データ化を遂行する。これにより、歴史災害研究の情報基盤を最適化し、史料データの高度な利活用を促進する。具体的な研究課題として次の3項目を設定する。

1. 災害史料の構造化記述モデルの構築 地震学・歴史学・地理学・情報学の各専門家の検討の下、災害史料に含まれる時空間情報や被害状況を、機械処理可能な構造化データとして記述するためのモデルを構築する。構造化データの Linked Open Data 化や、史料への DOI (Digital Object Identifier) 付与、データ可視化、原史料画像の IIIF 公開、歴史 GIS 技術との連携など、データの永続的管理や活用手法についても併せて検討する。検討のため Web 上の情報のほか、関連する資料・書籍を購入し参照する。
2. 市民参加による大規模データ構築 膨大な量が残されている災害史料から、?の構造化モデルに基づくデータを生成するために、多数の市民の参画を実現するクラウドソーシング・プラットフォームを開発する。その土台として、研究代表者らがすでに開発公開している『みんなで翻刻』を拡張する。このプラットフォーム上で、デジタル化した災害史料を公開し、市民の協力のもと災害研究に有用な各種データを構造化して抽出する。特に、史料からの時空間情報と被害情報の抽出に重点を置く。
3. 地震研究所蔵史料への適用 「みんなで翻刻」で公開した史料群に、実験的に課題??で開発した構造化記述と市民参画の手法を適用する。

今年度特に重点的に実施するのは、課題 1 の災害史料の構造化記述モデルの検討である。災害史料を妥当な形式で構造化するためには、地震学・歴史学・地理学・情報学の横断的連携が必要になるため、共同研究者全体で情報共有と検討を進める。この作業には具体的史料に基づく検討が必要だが、すでに全文翻刻されている「石本文庫」の 114 点と、『新収日本地震史料』等の既刊史料集を使用する。また、防災科学技術研究所の「災害事例データベース」など既存のデータベースとの連携についても調整を進める。他機関の取り組み、特に東京大学で進められている既刊史料集のデータベース化事業と大きな齟齬が生じないようにする。

課題 2 について、災害史料構造化モデルを反映した市民参加プラットフォームの開発のために必要な機能はどのようなものかを検討する。人間文化研究機構が構築を進める旧地名データベースや、防災科学技術研究所の運営する災害事例データベースとの連携を検討している。

課題3について、試験的に石本文庫の収蔵史料114点をプラットフォーム上に搭載する。また、このプラットフォームで生成されたデータを加工し、災害史料構造化データの作成を試みる。

(7) 平成30年度の成果の概要:

課題1 災害史料に含まれる情報の構造化記述を可能にするために、日本語歴史資料の記述に特化した軽量マークアップ言語 Koji (<http://www.koji-lang.org/>)を開発した。Kojiは形式文法的一种である解析表現文法(Parser Expression Grammar)で定義されており、史料中の日時や地名等の情報を明示的にタグ付けすることができる。加えて言語の処理系を整備するために、縦書きでの記述や構文強調、エラー検知などに対応した Koji のための Web エディタを開発した。このエディタは script タグを含めることで任意の Web ページに設置することができる。

課題2 本研究の活動の一環として運営している歴史災害資料の市民参加型翻刻プラットフォーム「みんなで翻刻」(<https://honkoku.org/>)では、地震研究所図書室が所蔵する和古書資料499点(画像数7940枚)を公開している。2019年2月現時点までに、このうちの94%にあたる481点(画像数7467枚, 558万文字)が4,600名の参加者によって翻刻された。

課題3 課題1で開発した Koji を搭載し、画像情報共有の国際的標準規格である IIIF(International Image Interoperability Framework)に対応した「みんなで翻刻」の試験バージョン(<https://honkoku.org/next/>)を開発・公開した。2019年3月中に稼働を開始し、史料の翻刻に加えてその時空間情報のタグ付けを実施する予定である。

(8) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):

橋本雄太・宮川真弥, 日本語歴史資料の構造化記述のための軽量マークアップ言語の開発, 人文科学とコンピュータシンポジウム2018 論文集, 2018年12月, 東京大学.

Yuta Hashimoto, et al, Minna de Honkoku: Learning-driven Crowdsourced Transcription of Pre-modern Japanese Earthquake Records, Digital Humanities 2018, June 2019, Mexico.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

橋本 雄太 国立歴史民俗博物館 助教
加納 靖之 京都大学防災研究所 助教
中西 一郎 京都大学大学院理学研究科 教授
大邑 潤三 佛教大学 非常勤講師
西山 昭仁 東京大学地震研究所 助教
他機関との共同研究の有無: 無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名:

電話:

e-mail:

URL:

(11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 橋本 雄太

所属: 国立歴史民俗博物館

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

史料中の有感地震記録を用いた歴史地震研究の新展開

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料, 考古データ, 地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

有感地震記録からどの程度地震活動をイメージできるのか、歴史地震研究への適用可能性を検証する為、気象庁による有感地震データベースを用いた検討を実施する。また史料中の有感地震数から、余震の発生数と距離減衰式に基づき歴史地震の震源域を推定する経験的手法を試験的に確立し、2004 年新潟県中越地震、2008 年岩手・宮城内陸地震など近年の大地震に適用する。史料記述に基づく有感記録の記録密度は、近年の稠密観測網に比べて疎である為、歴史地震研究への適用性を鑑み、観測点や有感地震記録を間引く事による精度の変化について調査する。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

日記や公文書等の史料に残された有感地震記録から余震や群発地震を抽出し、歴史地震の地震活動解析や震源域推定等に活用できないだろうか。史料には、被害記述の他に有感地震を記述したものがある。これらは大半が発生日時とともに「地震」とだけ記述されたものだが、中には日毎の有感地震数やその震度等を詳細に纏めたものも存在する。しかしながら、僅かな先行研究を除き、史料中の有感地震記述は歴史地震の震源域推定や地震活動解析に十分に活用されてきたとは言い難い。有感地震数は本震からの経過時間ならびに震源域からの距離に強く依存する為、有感地震数の時空間的な推移に基づき、大地震の震源域を制約できる可能性がある。また、有感地震数の増減は大地震後の地震活動度変化や誘発地震・群発的地震活動の発生を示唆する。

史料中に記述された有感地震記録から、歴史時代に発生した大地震の震源域推定や、地震活動の時間的・空間的な変化をイメージする手法を構築できれば、従来の被害記述に基づいた大地震にのみ着目した歴史地震研究から、中小地震を含めた新たな歴史地震研究の展開が見込まれる。そこで本課題では、史料中の有感地震記録を用いた新たな歴史地震研究の可能性を探るべく、その手始めとして、気象庁震度データベースならびに最近構築された震度の多次元距離減衰式を用いて有感地震回数分布の再現性の検証を行った。また有感地震記録に基づき大地震の震源域を推定する予察的手法を構築し、2004 年新潟県中越地震、2008 年岩手・宮城内陸地震ならびに 2011 年福島県浜通りの地震に対して適用した。

まず、2000年～2010年までに最大震度3以上、深さ20km以浅で発生した約2300の浅発地震を対象にして、田中・他(2017)の多次元距離減衰式から予測震度を計算し、計測(観測)震度との比較を行った。その結果、震源距離10～400km程度の有感域のほぼ全域にわたって残差が±1程度の範囲内に収まり、残差のヒストグラムは平均がほぼ0の正規分布を示す事が分かった。また既往の距離減衰式に比べ、幅広いマグニチュード、震源距離の範囲内において小さな残差になる事が示された。さらには田中・他(2017)の多次元距離減衰式によって、日本全国で観測された有感地震回数(震度2以上)の分布を概ね再現する事ができた。これらの結果は、田中・他(2017)による地殻内地震に対する多次元距離減衰式が、既往の距離減衰式に比べ中小地震、遠方の観測点まで日本全国の地表における計測震度の推定式として活用できる事を示している。

これらの背景を元に、有感地震記録に基づき大地震の震源域を推定する予察的手法を構築し、2004年新潟県中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震ならびに2011年福島県浜通りの地震に対して適用した。具体的にはグリッドを緯度・経度方向に0.05°刻みで一様に配置し、それぞれのグリッドにおいて地震の規模別頻度分布がグーテンベルグ・リヒター則(Gutenberg and Richter, 1944)に従うものと仮定してランダムに地震を発生させ、それぞれの観測点において算出された有感地震回数と観測された回数との規格化残差を計算した。その結果、2004年新潟県中越地震ならびに、2008年岩手・宮城内陸地震に対しては、残差分布から震源域が明瞭にイメージングされ、残差が最小となる地点も本震の震源にほぼ一致した(図)。これは本震発生後1カ月間の周辺における地震活動が比較的低調であった為と考えられる。一方で、2011年福島県浜通りの地震の場合には、1か月前に発生した東北地方太平洋沖地震による余震活動が活発な期間にあたり、沖合で発生した地震によって有感となった観測点も多かった。その為、沖合においても残差が小さくなり、イメージングされた震源域は上記の2地震に比べ不明瞭であった。

現在の震度観測点が稠密に展開されている状況に対しては、有感地震回数の分布から地震活動度を推定することができる可能性が示された。しかしながら、史料中の有感地震記述への適用可能性を考えた場合、史料から有感地震数を抽出できる点(震度観測点)は現在に比べ極端に少ない事が想定される。そこで、観測点を1/2、1/4、1/8、1/16に間引いた場合に、残差分布ならびに残差が最小となるグリッドがどのように変化するか、調査した。その結果、観測点密度が低くなるにつれてイメージングされた震源域は不明瞭になるものの、観測点のカバレッジが保証され有感地震回数が突出する観測点がある場合には、観測点分布が疎になった場合でもある程度、震源域がイメージングされる事が分かった。

本課題で得られた結果からは、今後、史料から有感地震に対する記述を抽出・蓄積するとともに、予察的に構築した手法を高度化することで歴史地震の震源域を従来の被害記述とは異なった観点から議論できる可能性が示唆される。なお、それぞれの観測点における有感地震回数の時間的変化をプロットすると、余震域に近い観測点では実際に発生した多くの地震に対して有感となる為、余震回数の時間減衰を表す大森-宇津公式に従う。一方で余震域から離れるにしたがって、有感地震回数の累積頻度曲線は、本震と直後の比較的規模の大きい地震に対してのみ有感となる為、ステップ状の変化を示す。このような有感地震回数の時間的変化を、史料からどの程度適切に抽出できるかについては今後検討が必要であるが、このような情報を取り入れる事で震源域推定の精度を向上させることができる可能性がある。

- (8)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
石辺岳男・松浦律子・津村建四朗・岩佐幸治・古村美津子、2018、地震活動から探る房総スローリップイベントの発生履歴、日本地震学会2018年度秋季大会、2018年10月9-11日、ビッグパレットふくしま、福島県郡山市。

- (9)実施機関の参加者氏名または部署等名：
(代表者名)

石辺 岳男 公益財団法人地震予知総合研究振興会 副主任研究員
松浦 律子 公益財団法人地震予知総合研究振興会 解析部長
古村 美津子 公益財団法人地震予知総合研究振興会 解析部部長代理
岩佐 幸治 公益財団法人地震予知総合研究振興会 主任研究員
佐竹 健治 東京大学地震研究所 教授
西山 昭仁 東京大学地震研究所 助教
他機関との共同研究の有無：無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：

電話：

e-mail：

URL：

(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：石辺 岳男

所属：公益財団法人地震予知総合研究振興会 地震調査研究センター

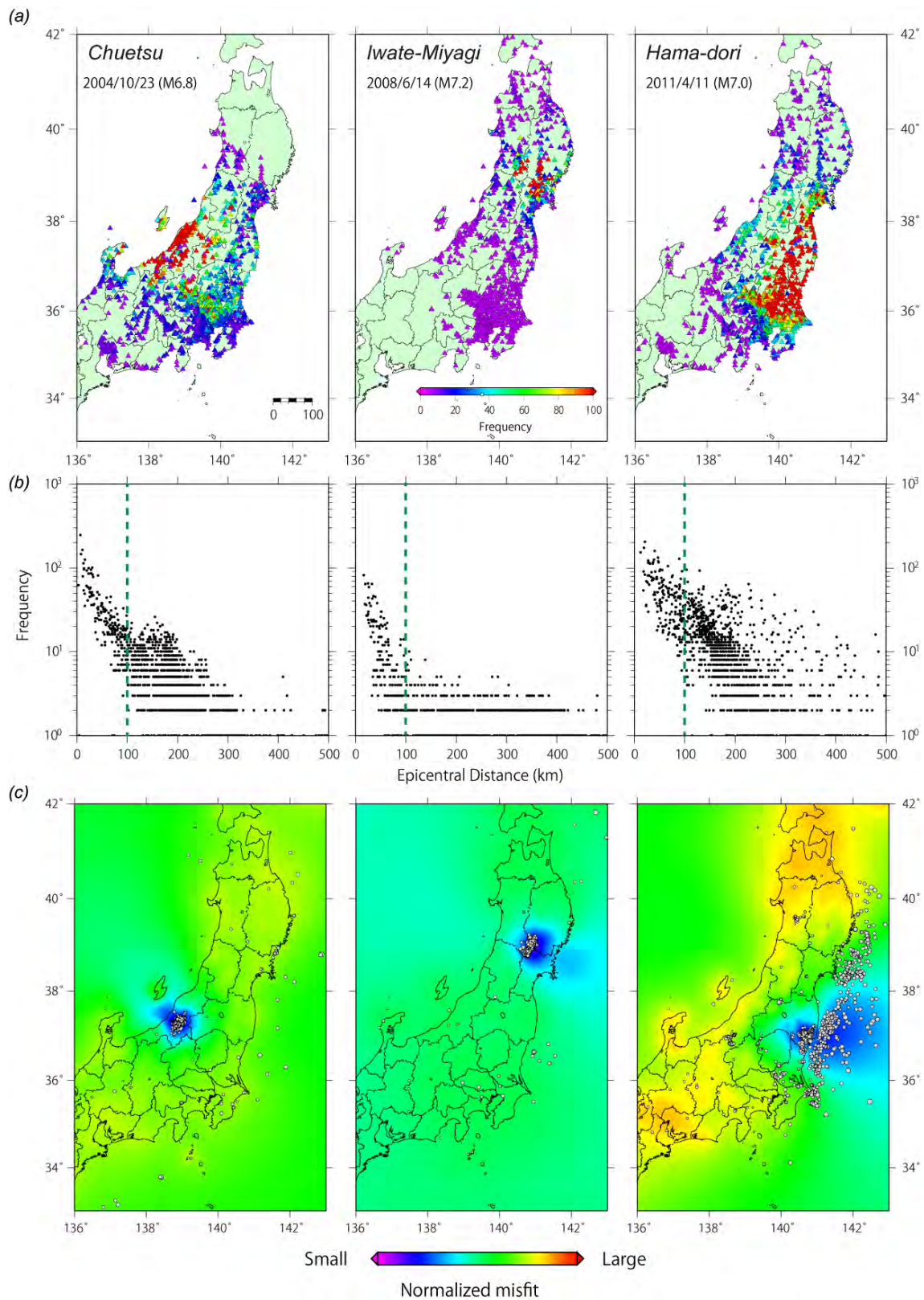


図 (a) (左) 2004 年新潟県中越地震、(中央) 2008 年岩手宮城内陸地震、(右) 2011 年福島県浜通りの地震に対する地震後 1 か月間の有感地震回数、(b) 震源 - 観測点間距離との関係。(c) 規格化された残差分布。灰色の丸はそれぞれの本震後 1 か月以内に発生した地震の震源分布を表す。

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

富山県弥陀ヶ原火山・地獄谷内での重力探査と地形および地温計測による地熱・火山活動のモニタリング

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

平成 30 年度は、平成 28 年度から実施してきた(1)水準測量、レーザー・スキャナ測量、UAV 空撮と SfM を用いた地形測量による弥陀ヶ原火山・地獄谷内の地殻変動、(2) 地中温度計測、(3) 噴気孔火山ガス・噴泉温度の測定、(4) 定点赤外線サーモグラフィ観測による地表面温度の長期間測定、(5) 定点タイムラプスカメラによる噴気孔・噴泉の状況変化の可視画像観測、を継続・発展させると共に、(6) 重力測定を実施する。重力測定は水準測量路線上で実施し、まずは 2 次元的な構造の推定を試みる。これらの観測により、水蒸気爆発の先行現象を捉える基礎となるデータのさらなる蓄積を図る。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

水準測量による地殻変動観測は、図 1 に示される白線上の黄点上で、これまで通り、9 月に実施された。平成 30 年度に観測された地獄谷内の変動は、平成 29 年度までに観測された変動と大きく異なっていた。これまで顕著な隆起は観測されていたが、沈降は観測されてこなかった。しかしながら、今年度は全水準点が沈降した(図 2)。本観測地では水準路線を一本しかとることができないため、ディスロケーション解や茂木モデルの使用が難しい。そのため、新しい解析手法を開発した。現在解析を進めており、これまでの地殻変動は地表面から 50m 程度の深さにその力源を求められることが明らかになっている。平成 30 年度の全水準点の沈降は、深さ 100~160 m 程度にその力源を求められる。水準測量以外の測量は、悪天候のため実施できなかった。

地中温度測定は、図 1 に示される赤色の四角点で継続している。今年度は、NTT 西日本の協力を得て、地獄谷内 10 か所に温度センサーと送信機から構成される LPWA (Low Power, Wide Area) デバイスを設置し、地中温度リアルタイム・モニタリング・システムを構築した。積雪の多くなった 12 月末以降はデータが受信できなくなったが、積雪のない時期には、インターネット上で地中温度のモニタリングが可能になった。

噴気孔火山ガス・噴泉温度の測定は、昨年度に設置した機器が破損したため、今年 10 月に再度投入した。投入場所は紺屋地獄であり、現在計測を継続中である。定点赤外線サーモグラフィ観測による地表面温度の長期間測定、および、定点タイムラプスカメラによる噴気孔・噴泉の状況変化の可視画像観測も現在継続中である(図 3)。

重力測定は、水準点上で実施した。図4はブーゲー密度を 2.2 g/cm^3 としたときの単純ブーゲー異常である(図中の灰色の丸記号)。水準点 BM1 から BM20 に向かって重力異常値が小さくなっている。測定範囲でのトレンドを直線で近似し、トレンドの残差重力異常を図4の赤丸で示す。残差重力異常は、地下浅部での密度異常を反映しており、本地域では、水準点 BM20 から 300 m 付近と 520 m 付近の地下浅部に低密度物体が存在していることを示唆する低重力異常が観測された。これらの低重力異常の位置は、水準測量で局所的な変動がみられているところに一致する。この低重力異常とその原因である低密度体の深度は、地盤変動の原因を考える上で重要なデータとなることが予想される。

今後は、これまでに UAV やレーザースキャナで取得された地形データを用いて細密なデジタル標高データを作成し、地形補正を行う予定である。また、地下密度構造の推定を行い、既に推定されている地盤変動の力源との比較を行う予定である。これらのデータは、噴気孔・噴泉の状況変化や地温分布の解釈にある種の制約条件を与え、解の絞り込みに貢献できるのではないと思われる。

(8) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
楠本成寿, 2019, モデル形状の仮定を伴わない鉛直変位の力源推定手法, 物理探査, 72, 1-7.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

(代表者名)

楠本成寿 富山大学大学院理工学研究部(都市デザイン学)教授

(分担者名)

渡邊 了 富山大学大学院理工学研究部(都市デザイン学)教授

石崎泰男 富山大学大学院理工学研究部(都市デザイン学)教授

他機関との共同研究の有無: 有

早川裕弐 北海道大学 地球環境科学研究所 統合環境科学部門 准教授

丹保俊哉 富山県 立山カルデラ砂防博物館 学芸員

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名: 富山大学大学院理工学研究部(都市デザイン学)

電話: 076-445-6653

e-mail: kusu@sus.u-toyama.ac.jp

URL:

(11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 楠本 成寿

所属: 富山大学大学院理工学研究部(都市デザイン学)

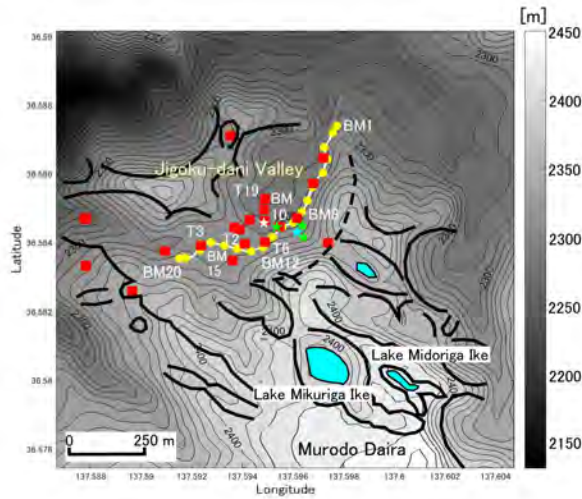


図1 地獄谷内の各種観測点分布図

黄色の点が水準点であり、白線は水準路線。赤色の点(四角)は、地中温度計測点。緑色星印は定点タイムラプスカメラによる噴気孔・噴泉の状況変化の可視画像観測点。水色星印は噴気温度計測点。白色星印は噴泉温度計測点。

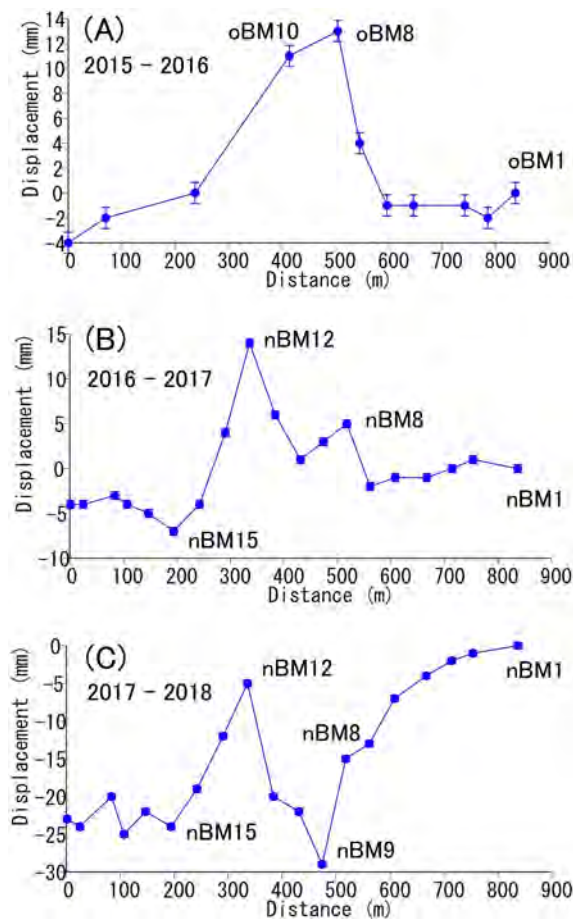


図2 水準路線上で地盤の変動

(A)2015年～2016年の地盤の上下変動。oBMはOld Bench Markを意味する。2015年に設置した水準点は2016年9月の観測時までに約半分が損失した。同年10月に再度新設した。新設した水準点をnBM(New Bench Mark)とした。(B)2016年～2017年の地盤の上下変動。(C)2017年～2018年の地盤の上下変動。

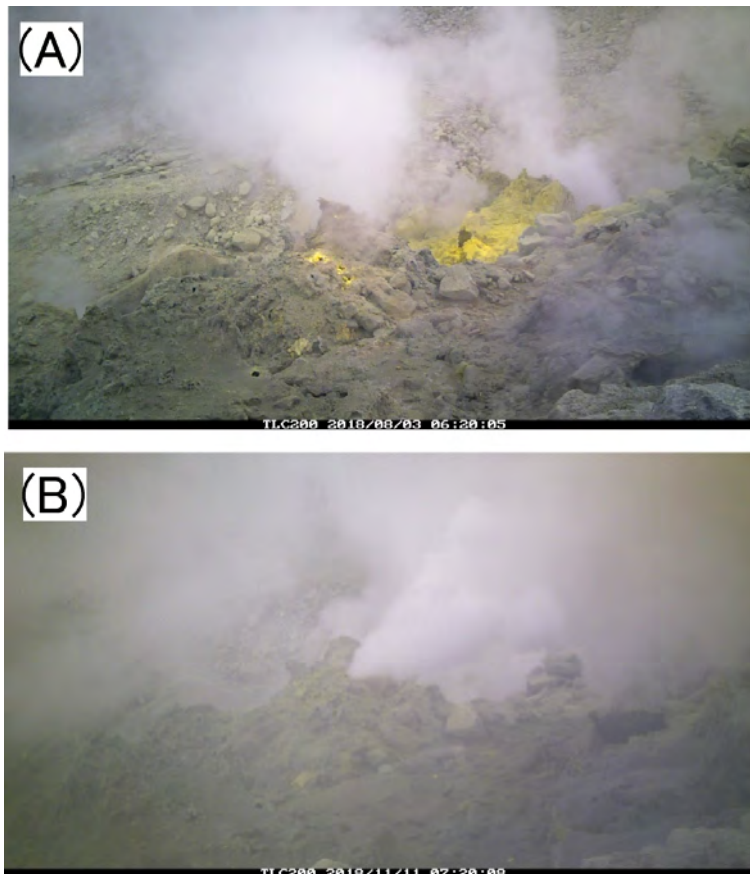


図3 タイムラプスカメラによる紺屋橋上流噴気孔群上部の状況。
 (A) 観測開始時の状況。(B) 観測終了時の状況。

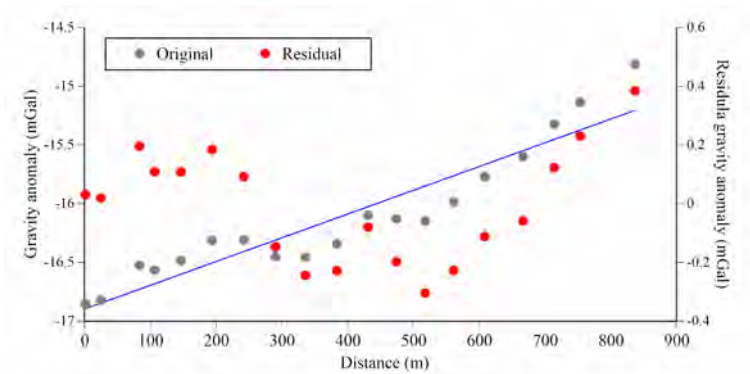


図4 水準路線上での単純ブーゲー異常。
 ブーゲー密度は 2.2 g/cm^3 が仮定されている。灰色丸はオリジナルデータであり、赤丸は1次傾向残差重力異常(残差重力異常)である。図中の青線は最小二乗法から求められた測定範囲内でのトレンド(1次傾向)である。

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

草津白根火山の完新世噴火履歴解明(総括)

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

(1) テフラ層序調査の成果

白根火砕丘群湯釜火口の東南東約 1.2 km 地点(国道 292 号線脇の標高 1880 m 地点)においてテフラ層序調査を行った。この地域の指標テフラである 7L 火山砂層、8L 火山砂層、9L 火山砂層、10P 軽石層、熊倉軽石層および 12L 火山砂層の他に、17 層のテフラ層が確認された(第 1 図)。各テフラ層の間に層厚 20 cm 以上の土壌層が観察されないことから、本露頭で見られるテフラ層は比較的短い間隔で発生した噴火により形成されたと考えられる。

火山砂層の岩相の特徴は以下の通りである。7L 火山砂層は層厚が約 7 cm で、殺生河原(湯釜火口の東南東約 4 km 地点)での本層の層厚(約 40 cm)よりも薄いことから、本白根火砕丘群から噴出したテフラ層である可能性が高い。8L 火山砂層と 9L 火山砂層の層厚はそれぞれ 50 cm と 42 cm で、殺生河原における各層の層厚(それぞれ 15 cm と 20 cm)よりも厚いことから、白根火砕丘群から噴出したテフラ層である可能性が高い。

本露頭の 5 層のテフラ層の直下もしくは直上から土壌を採取し、放射性炭素年代を測定した(測定はパレオ・ラボ社に依頼)。得られた暦較正年代は、7L 火山砂層直下の土壌が 10,566-10,372 cal BP、8L 火山砂層直下の土壌が 8,651-8,544 cal BP、9L 火山砂層直下の土壌が 8,010-7,930 cal BP、12L 火山砂層直上の土壌が 4,415-4,247 cal BP、最上位の火山灰層直下の土壌が 1,490-1,603 cal BP である。8L 及び 9L 火山砂層の火山灰粒子と火山弾には、斑晶として黒雲母が見られる。黒雲母斑晶を含む噴出物は本火山では珍しく、現在までの調査で黒雲母斑晶が確認できた噴出物は香草溶岩のみである。したがって、8L 及び 9L 火山砂層は、香草溶岩とその給源火砕丘形成時のテフラである可能性が高い。また、12L 火山砂層の上位には厚い火山砂層が見られなくなることから、本火山での火山砂層を形成するような爆発的噴火は、4,000 年前にはほぼ完了していたようである。火山砂層はブルカノ式噴火に伴う火口遠方相であるため、本火山山頂部に見られる火砕丘の多くは 10,500~4,000 年前頃に形成されたと推測される。

(2) 南火口断面での調査結果

2018年1月23日噴火では、鏡池火砕丘の火口内に新しい火口(南火口)が形成された。この断面には、鏡池火砕丘形成以降の噴出物が露出しており、その層序調査を行った。火口断面には、鏡池火砕丘本体を基底として、下位より白色火山灰層からラピリ・火山弾層に漸移するテフラセットの互層と、その上位にあたる地表付近の黒色土壌中に白色火山灰層が見られる(第2図)。テフラセット互層の最上部では、ラピリと火山弾は赤色酸化している。この火山弾は径20cm以下で、パン皮状の割れ目をもち内部が発泡したパン皮状火山弾が多く含まれる。その斑晶組合せは $Pl + Opx + Cpx + Ol \pm Qtz + Opq$ であり、記載岩石学的特徴と全岩化学組成が濁川・他(2016)の鏡池北火砕丘の組成と一致する(第3図)。そのため、これら一連の堆積物は鏡池北火砕丘形成時の噴火による堆積物であると判断される。

テフラセット互層には、サグ構造を伴って着弾した径40cm以上の火山弾(平滑面で囲まれた緻密な火山弾あるいはパン皮状火山弾)も見られる(第4図)。当初はテフラセット互層形成時に着弾した火山弾と考えていたが、赤色酸化しておらず、テフラセット互層最上部の火山弾に比べてサイズが有意に大きいこと、火山弾の直下に黒土が見られることから、テフラセット互層形成後(テフラセット互層の上に黒土が堆積した後)の噴火で放出された火山弾であると判断した。黒土から得られた暦較正年代値は400-536 cal ADであり、火山弾の定置年代は1450年前頃と推測される。また、この火山弾の直下の白色火山灰層は、火山弾との接触部が赤色に変色している。未変色の白色火山灰を採取し、電気炉で加熱実験を行ったところ、250以上の温度で白色火山灰が赤化することが確認できた(第5図)。そのため、この火山弾の定置温度は250以上であったことは間違いなく、マグマ噴火による火山弾と結論される。この火山弾も斑晶組合せと全岩化学組成が鏡池北火砕丘噴出物と一致するため、鏡池北火砕丘でのマグマ噴火でもたらされたものである可能性が高い。

以上を整理すると、鏡池北火砕丘は2回のマグマ噴火により形成された可能性が極めて高く、2回目のマグマ噴火の発生時期が1450年前頃と結論される。

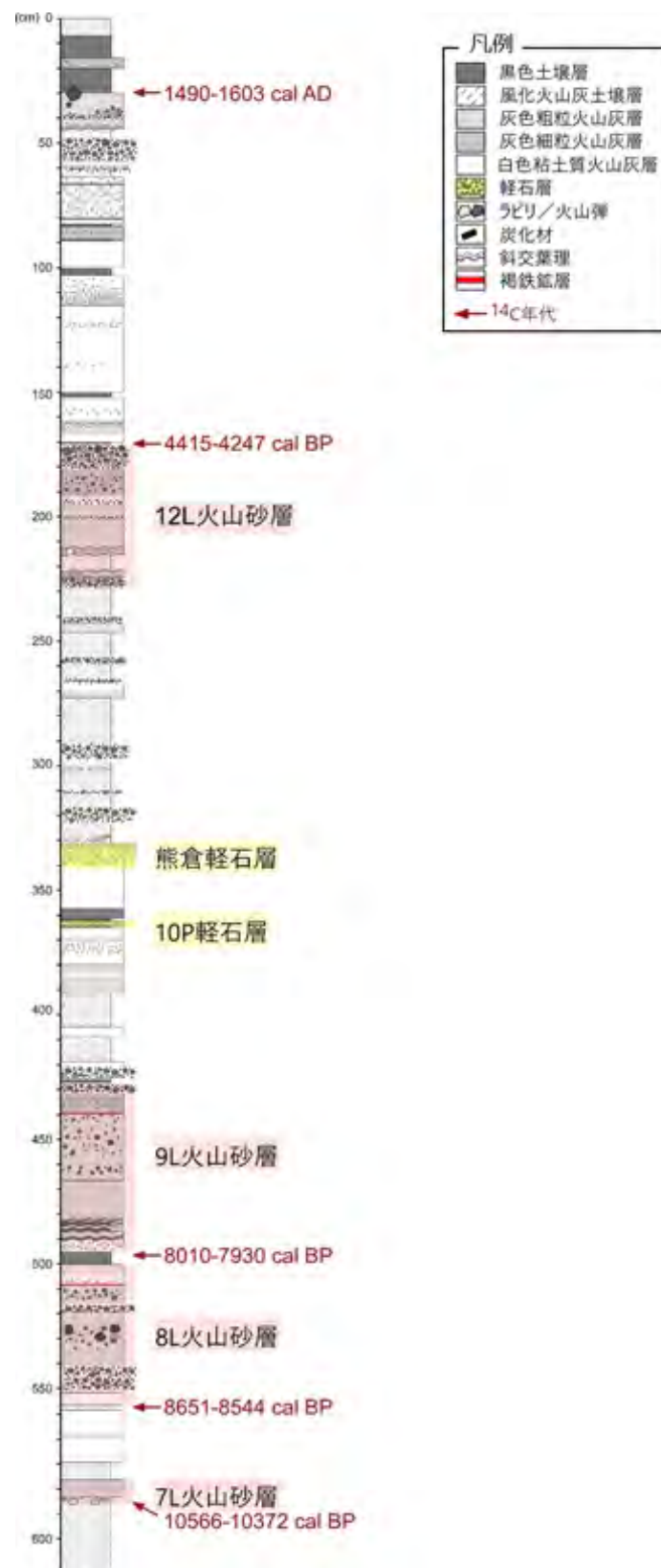
- (8) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
亀谷伸子・石崎泰男・吉本充宏・寺田暁彦(2018)トレンチ調査と放射性炭素年代測定による草津白根火山・白根火砕丘南斜面の噴火史：火口列と弓池マールの活動年代の推定、日本地球惑星科学連合2018年大会、SVC41-P1

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

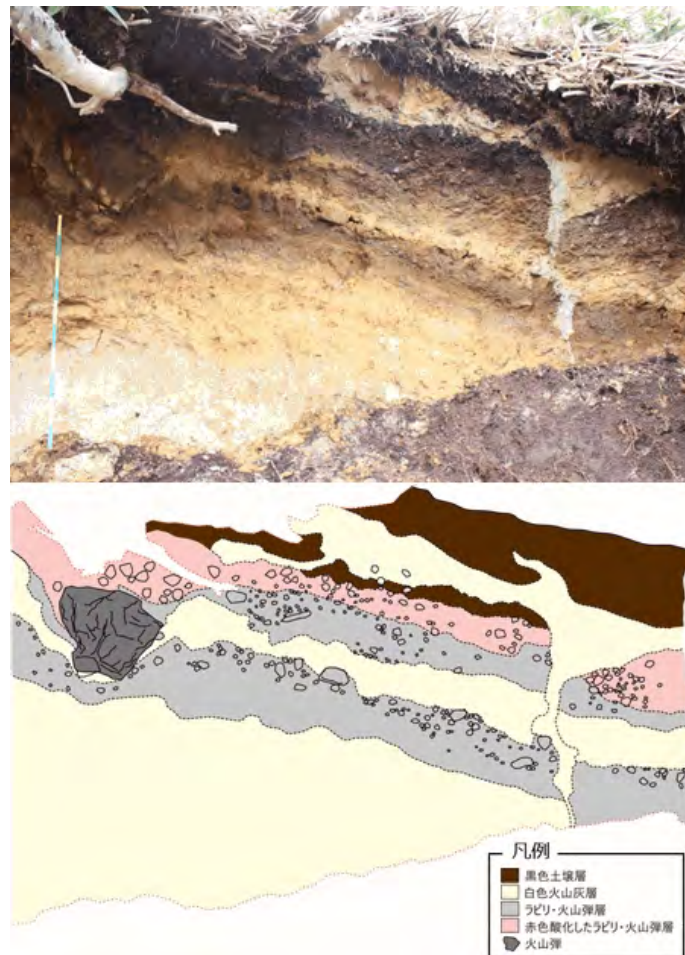
(代表者名) 石崎 泰男 富山大学大学院理工学研究部(理学) 准教授
(分担者名) 吉本 充宏 山梨県富士山科学研究所 主任研究員
寺田 暁彦 東京工業大学火山流体研究センター 講師
亀谷 伸子 富山大学大学院理工学教育部博士課程 博士課程1年
他機関との共同研究の有無：無

- (10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：富山大学大学院理工学研究部(理学)
電話：076-445-6656
e-mail：ishizaki@sci.u-toyama.ac.jp
URL：

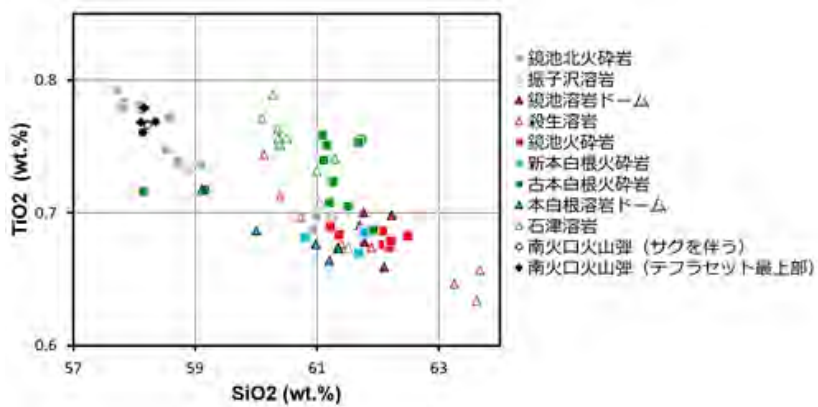
- (11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者
氏名：石崎 泰男
所属：富山大学大学院理工学研究部(理学)



第1図 テフラ柱状図と暦較正年代値



第 2 図 南火口断面の露頭写真とスケッチ



第 3 図 本白根火砕丘群の全岩化学組成 (濁川・他、2016) に本研究の分析結果 (南火口火山弾) をプロットした。



第4図 サグ構造を伴う火山弾



第5図 火山灰の加熱実験による色調の変化

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震先行 VLF 帯電磁波強度減少の統計的評価と発生メカニズムの解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

平成 30 年度においては、従前から報告 (Nemec et al (GRL, 2008) 等) されている地震発生前の超長波 (VLF) 帯電磁波の強度減少について評価を行う。これまでに報告されている研究では 4 時間等の時間分解能で統計的に解析をしていたが、本年度の研究では、電磁波強度を観測している人工衛星 (DEMETER) の軌道ごとの時系列データ (2 秒間隔のサンプリング) を用いて分析を行う。

本研究における新たな取り組みとしては、電磁波の強度減少を定量的に評価するための高度な統計学的手法を用いる。具体的には、ノイズデータを除去するために非線形データに対する分位点回帰、離散データを連続データに変換するため B スプライン関数を用いた円滑化処理、強度減少を定量的に評価するための関数主成分分析といった手法を適用する。以上より DEMETER の軌道別のデータを定量的評価することが可能となる。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

本研究においては、大規模データの処理及び高度な統計手法の適用が必要となるため、英国 University College London の統計学部と共同して分析を行った。解析では、近隣雷によるノイズを除去し、VLF 帯電磁波の強度減少を定量的に評価することが可能となった。具体的には、DEMETER のデータに対して関数主成分分析を適用した場合、第 3 主成分のスコアが VLF 帯電磁波の強度を定量的に評価する指標となり得ることを見出した。

これまでは DEMETER の軌道・地震について合算されたデータを用いて VLF 帯電磁波強度の減少を評価していたため、平均して地震発生前に当該電磁波強度が減少するとの報告がなされていたが、本分析により、当該電磁波強度が減少を示す場合と示さない場合が存在することが明らかになった。また、本解析手法において当該電磁波強度が減少を示す事例は、先行現象の条件を満たす全軌道に対してほぼ 1 割であった。

- (8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
- M. Kamogawa, T. Nagao, Y. Orihara, J.J. Berthelier, Origin of Pre-seismic whistler wave intensity attenuation observed by DEMETER satellite, EMSEV-2018 International Workshop on Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes, 17-21 September, Potenza, Italy, 2018
 - M. Kamogawa, T. Nagao, Y. Orihara, J.J. Berthelier, D-region ionospheric precursors and its earthquake predictability, EMSEV-2018 International Workshop on Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes, 17-21 September, Potenza, Italy, 2018
 - Kamogawa et al., Evaluation of the pre-seismic DEMETER 's VLF intensity decrease identified by the functional principal component analysis, The 3rd International Workshop of CSES Mission, 16-18 Nov. 2018, Beijing, China

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

(代表者名)

鴨川仁 東京学芸大学教育学部 准教授

他機関との共同研究の有無 : 有

児玉哲哉 宇宙航空研究開発機構研究開発部門第一研究ユニット 主任研究員

城和貴 奈良女子大学理学部 教授

石通彩加 奈良女子大学大学院 人間文化研究科博士前期課程 1 年(予定)

金井龍一 ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドン数理科学・物理科学部 修士 2 年

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東京学芸大学・教育学部

電話 : 042-329-7484

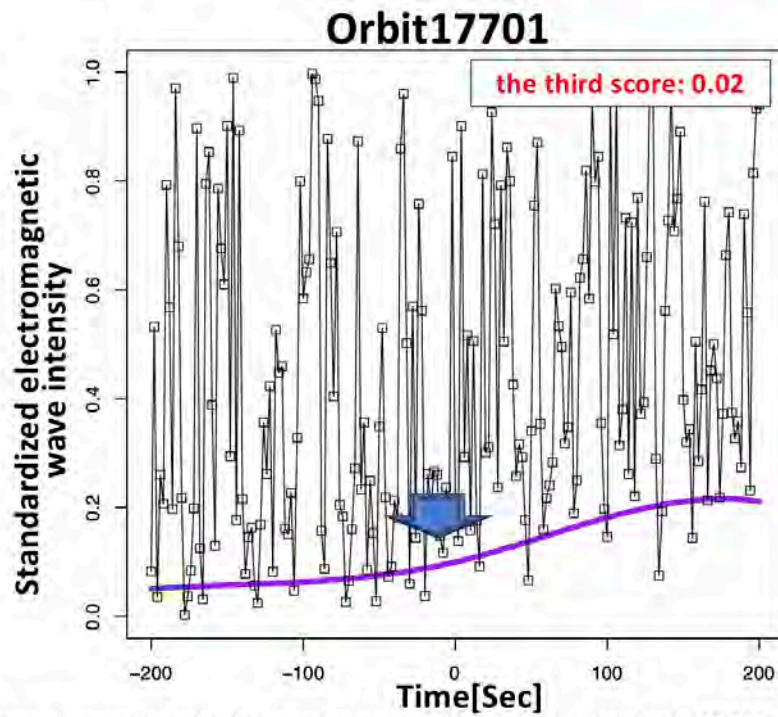
e-mail : kamogawa@u-gakugei.ac.jp

URL :

(11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

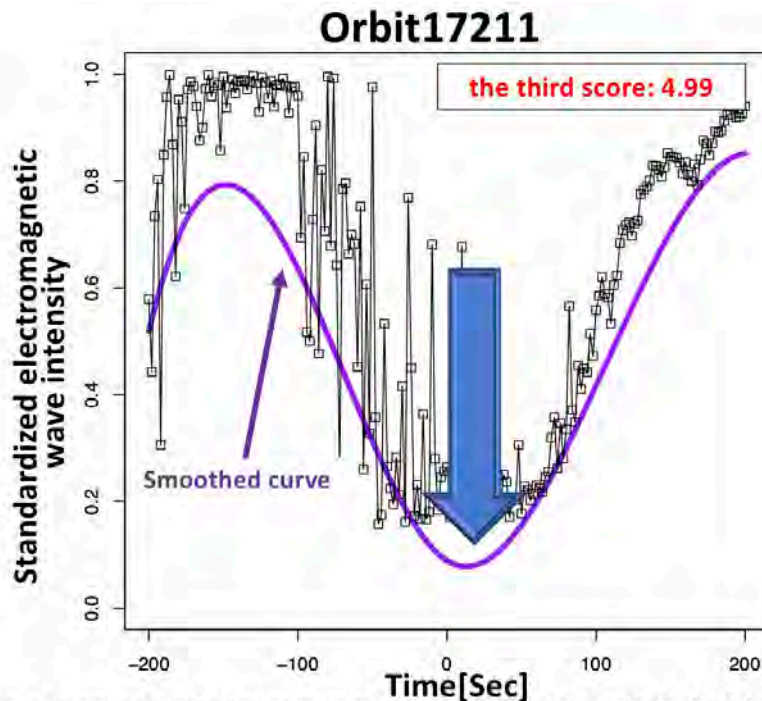
氏名 : 鴨川 仁

所属 : 東京学芸大学・教育学部



This electromagnetic wave intensity data near an earthquake occurred at Longitude: 97.108 and Latitude: 2.085 on 28th March 2005. The depth is 30km and magnitude is 8.6. In this case, the large dip is not observed around time 0 when the DEMETER satellite approached the nearest point of the earthquake epicenter.

図 1 先行現象軌道の事例その 1



This electromagnetic wave intensity data near an earthquake occurred at Longitude: 27.574 and Latitude: 43.065 on 7th October 2010. The depth is 10km and magnitude is 4.8. In this case, the large dip is observed around time 0 when the DEMETER satellite approached the nearest point of the earthquake epicenter.

図 2 先行現象軌道の事例その 2

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

南アフリカ大深度金鉱山における M5.5 地震震源域の応力場直接測定

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

断層のセグメンテーションや断層破壊の連動性に重要な役割を果たすと考えられる動的断層破壊の停止機構を理解することを目標として、2018 年 8 月に南アフリカのオークニー地区で発生したオークニー地震 (M5.5) の余震域上端をターゲットとした ICDP-DSeis 計画による掘削でえられたコア試料に、コア変形法 (Diametrical Core Deformation Analysis、DCDA) や変形率変化法 (Deformation Rate Analysis、DRA) を適用し、震源断層周辺の応力場を明らかにする。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

ICDP-DSeis 計画では 2 本の孔井 (Hole A、Hole B) を掘削した。最初に掘削した Hole A は孔曲りのために余震域に到達しなかった。この経験をもとに方位を修正して掘削した Hole B は、余震域に到達したと思われる深さ 610 620 m から破碎された掘削コアが回収された。本研究では、先に掘削が完了し、岩相の記載等が終了している Hole A の掘削コアを用いて DCDA および DRA による応力測定を行った (図 1) 。

DCDA では、平均 6.3 m ごとに 122 カ所で、掘削孔に直交する面内の差応力を測定した。差応力は、200 m 以浅では 10 40MPa、200 400 m で 5-25 MPa、400 m 以深では 15 35 MPa であった。さらに、深さ 400 m 付近と 700 m 付近で局所的に 55 MPa まで大きくなっていた。差応力が急減する深さ 200 m では孔内検層で測定された自然ガンマ線強度が高くなっていた。また、差応力とガンマ線強度が局所的に高まる深さ 400 m 付近では、高濃度塩水の湧水もみられた。Hole A は余震域を横切っていないものの、深度としては約 700 m が余震域の上端に相当する。

南アフリカのウィットワータスランド大学の試験機を使用し、約 100 500 m の区間で約 50 m ごとに DRA による応力測定を行った。試験機の性能による制約のため、測定できたのは、孔軸方向の法線応力のみである。差応力が急減し、ガンマ線強度も高くなる深さ 200 m 付近で法線応力は極大となる。また、ガンマ線強度と差応力が局所的に高まる深さ約 400 m では、法線応力も局所的に大きくなっているようにも見える。

以上のように、ICDP-DSeis 計画の Hole A に沿って、余震域上端にいたる応力場の空間変化の特徴をいくつか見出すことに成功した本研究の成果は、「(6) 平成 30 年度の計画の概要」で掲げた目的に

合致する。今後、掘削コアの一部を日本に輸入し、東北大学において、孔軸方向以外の法線応力も測定し、DCDAの結果も取り入れて、応力テンソルの復元を試みる予定である。

(8)平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

(9)実施機関の参加者氏名または部署等名 :

(代表者名)

伊藤高敏 東北大学 教授

小笠原 宏 立命館大学 教授

矢部康男 東北大学 准教授

他機関との共同研究の有無 : 有

船戸明雄 深田地質研究所 主席研究員

(10)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東北大学・流体科学研究所

電話 : 022-217-5234

e-mail : takatoshi.ito.c5@tohoku.ac.jp

URL :

(11)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名 : 伊藤 高敏

所属 : 東北大学・流体科学研究所

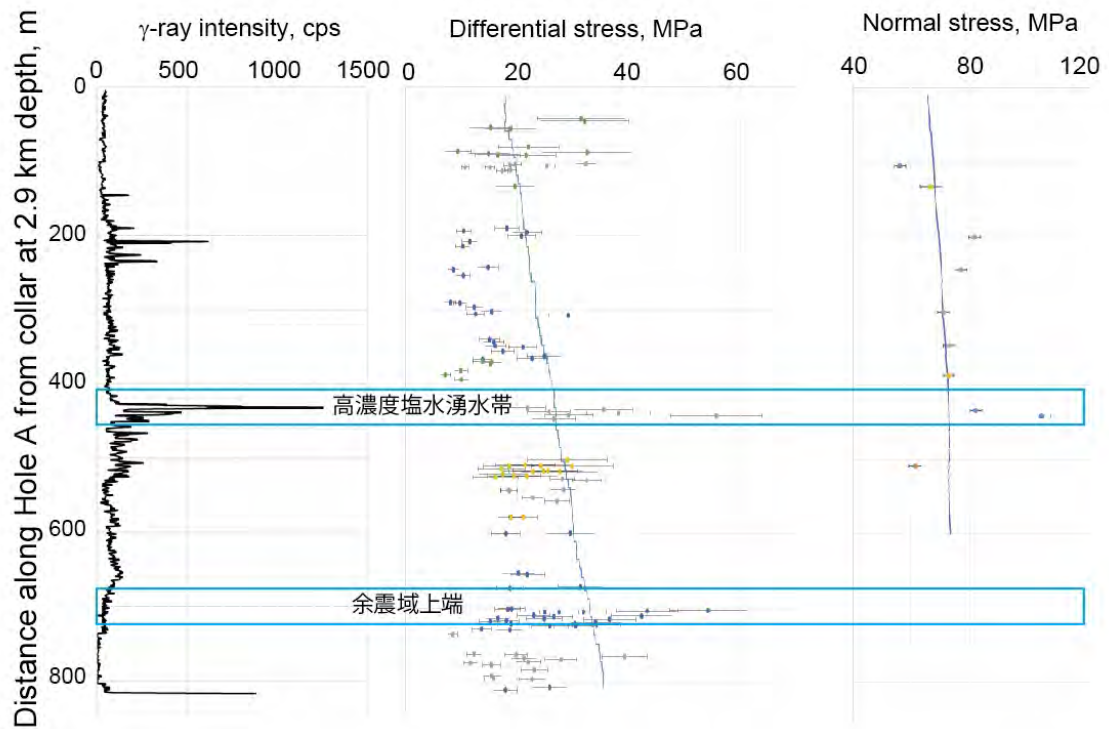


図 1

左から順に、孔内検層による自然ガンマ線強度、DCDA により測定された孔井直交面内の差応力、DRA により測定された孔軸方向の法線応力の深さ分布。応力分布に記された青実線は、弾性数値モデルから期待される応力値。深さ約 400 m では、高濃度塩水の湧出がみられた。Hole A は余震域に交差していないが、深さ約 700 m で余震発生深度に達している。

(1) 実施機関名：

公募研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地球化学的観測手法を用いた箱根山等における熱水系の構造解明, 地震活動評価, および火山ガスの化学的連続観測技術の高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

2014 年御嶽山噴火, 2015 年箱根山噴火は共に水蒸気噴火であった。水蒸気噴火は, 熱水系が卓越する火山で頻発する噴火様式で, 水蒸気噴火が予測される領域の近傍が観光地になっている場合があり, 水蒸気噴火の発生予測は火山災害を軽減させるために重要である。水蒸気噴火は, マグマが移動せず発生すると考えられており, 前兆となる地震活動や地殻変動の規模が小さく, 物理的な観測による発生予測を困難にしている。水蒸気噴火の予測には浅部熱水系の構造解明が不可欠である。

火山ガス, 火山灰, 温泉水等のマグマや熱水系から放出される物質を分析対象とする地球化学的な観測手法は, 水蒸気噴火の予測や熱水系の構造解明に対し有効な手段の一つである。箱根山では, 2015 年 4 月下旬に群発地震が始まり, 6 月末に水蒸気爆発に至った過程で, 群発地震の発生に先行し, 火山ガス中の水の安定同位体比が低下し, 地震数の増減に同期する CO₂/H₂O 比の変動が観測された。さらに, 2015 年 6 月末の噴火で放出された火山灰を分析し, その構成鉱物種や付着した熱水成分の Cl/S 比等を指標として, 当該火山灰の起源深度が地下約 350-500m よりも浅部であると推定された。箱根火山は数年毎に群発地震やそれに伴う噴気異常を繰り返しており, 継続的な火山ガスの地球化学的観測により群発地震の発生機構の解明や推移の予測手段が確立できると期待される。

上述のように, 地球化学的な観測手法は熱水系の構造解明や火山活動評価に有益な情報を提供する。

一方, 地球化学的な火山観測は自動化が普及していない。さらに, 火山活動の盛衰に応じて変動する化学的な指標は火山毎に個性的であり, 地球化学的な観測手法を火山活動評価に実用化するためには, 建議書で指摘されている様に, “ 火山性流体に関わる異常現象の検知事例を増やし ”, かつ, 連続した長期間のデータを蓄積することが不可欠である。現在, 気象庁では全国 4 カ所の火山(吾妻山, 草津白根山, 御嶽山, 九重山) に多成分火山ガス連続観測装置を設置し, 噴気地帯周辺の大気中に含まれる SO₂, H₂S, CO₂, H₂, H₂O の濃度を遠隔観測する環境整備に取り組んでいる。しかし, 当該装置は観測値の品質管理や積雪・氷結時における装置の安定性等において多くの課題が残されており, 火山ガスの化学的連続観測の実現には, 火山ガスを人手により採取し分析する従来型の手法で観測値を補完し, 品質を担保する必要がある。

これらの背景を踏まえ、本研究では箱根山を主な対象とし、火山ガスおよび熱水の採取・分析、多成分火山ガス連続観測装置による火山ガスの組成観測を実施し、当該火山の群発地震の発生機構の解明と推移予測の高度化、熱水系浅部構造の解明、および火山ガス組成連続観測技術の高度化を目指す。

(7) 平成 30 年度の成果の概要 :

箱根山の中央火口丘に発達する地熱地帯である大涌谷と上湯場で、自然に放出している噴気(それぞれを T, S とする)を毎月採取・分析し、以下の結果を得た。

1 . CO₂/H₂S 比および He/CH₄ 比 (Fig.1 a , b を参照)

2017 年 10 月頃に T の CO₂/H₂S 比は最大値に達し、その後 2019 年 1 月にかけてなだらかに減少する傾向を示した。T では He/CH₄ 比についても同様な傾向が見られた。S の CO₂/H₂S 比は、2018 年 2 月から 2019 年 2 月までほぼ一定の値を維持したが、2018 年 11 月に一度低下が見られた。S の He/CH₄ 比は、T と同様に 2018 年に低下傾向が見られたが、低下の速度は T よりも緩やかであった。これらの比の分子である CO₂ や He は脱ガスするマグマに由来し、分母の H₂S や CH₄ は熱水系に由来する。よって 2018 年に観測された CO₂/H₂S 比および He/CH₄ 比の低下傾向は、マグマ起源ガスの浅部熱水系に対する流量が低下傾向であったことを示している。この原因としては、マグマを取り囲むシーリングゾーンの発達と考えられる。2018 年の CO₂/H₂S 比および He/CH₄ 比の低下傾向は 2019 年に入り、解消される兆しが見える。T と S の CO₂/H₂S 比は 2019 年 1 月から 2 月にかけて、わずかに上昇した。これに対応するように 2019 年 1 月 24 日に箱根山で軽微な群発地震が観測された(神奈川県温泉地学研究所 HP より)。

2 . N₂/He 比 (Fig.1 c を参照)

T と S の N₂/He 比は 2018 年から 2019 年にかけて低い値を維持したが、T の 2019 年 1 月は例外的に高い値を示した。N₂ は大気に由来する成分であり、噴気に N₂ が増加することは、浅部熱水系の流体圧が低下し、大気の混入が一部発生したことを示している。2015 年の 4 月末から始まった群発地震の直前にも N₂/He 比の上昇が観測されており、マグマ起源ガスの浅部熱水系に対する流量の低下が原因として考えられているので、2018 年も同様な現象が発生したと推定される。

3 . 見かけ平衡温度 (AET) (Fig.1 d を参照)

T と S に含まれる H₂O と H₂ の水素同位体比を組み合わせて見かけ平衡温度 (AET) を計算することができる。この値の群発地震に先行する低下現象が 2014 年と 2017 年に観測されている。2018 年の初頭から 10 月にかけて、特に S について AET が低下しつつある。これは群発地震の前兆である可能性がある。

4 . マルチガスシステムの実験

2019 年 2 月 6 日に、大涌谷において携帯式のマルチガスシステムを持ち込み、地熱地帯で大気に拡散した火山ガスの組成を観測した。得られたデータは、同時に採取した T の分析値と比較し、多成分火山ガス連続観測装置の開発に役立つ。

(8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Takeshi OHBA, Muga YAGUCHI, Kana NISHINO, Nozomi NUMANAMI, Yasushi DAITA, Chiho SUKIGARA, Masanori ITO, Urumu TSUNOGAI “ Time variations in the chemical and isotopic composition of fumarolic gases at Hakone volcano over the earthquake swarm and eruption in 2015, interpreted by magma sealing model ” submitted to Earth Planets Space (EPS), Special issue entitled ”Towards forecasting phreatic eruptions: Examples from Hakone volcano and some global equivalents”.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

(*代表者名)

大場 武* 東海大学 教授

谷口 無我 気象研究所 研究官

高木 朗充 気象研究所 室長
福井 敬一 気象研究所 研究官
他機関との共同研究の有無：有
萬年 一剛 神奈川県温泉地学研究所 主任研究員
板寺 一洋 神奈川県温泉地学研究所 主任研究員
代田 寧 神奈川県温泉地学研究所 主任研究員
原田 昌武 神奈川県温泉地学研究所 主任研究員

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東海大学・理学部

電話：0463-48-1211

e-mail：takeshi_ohba@tokai-u.jp

URL：

(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：大場 武

所属：東海大学・理学部

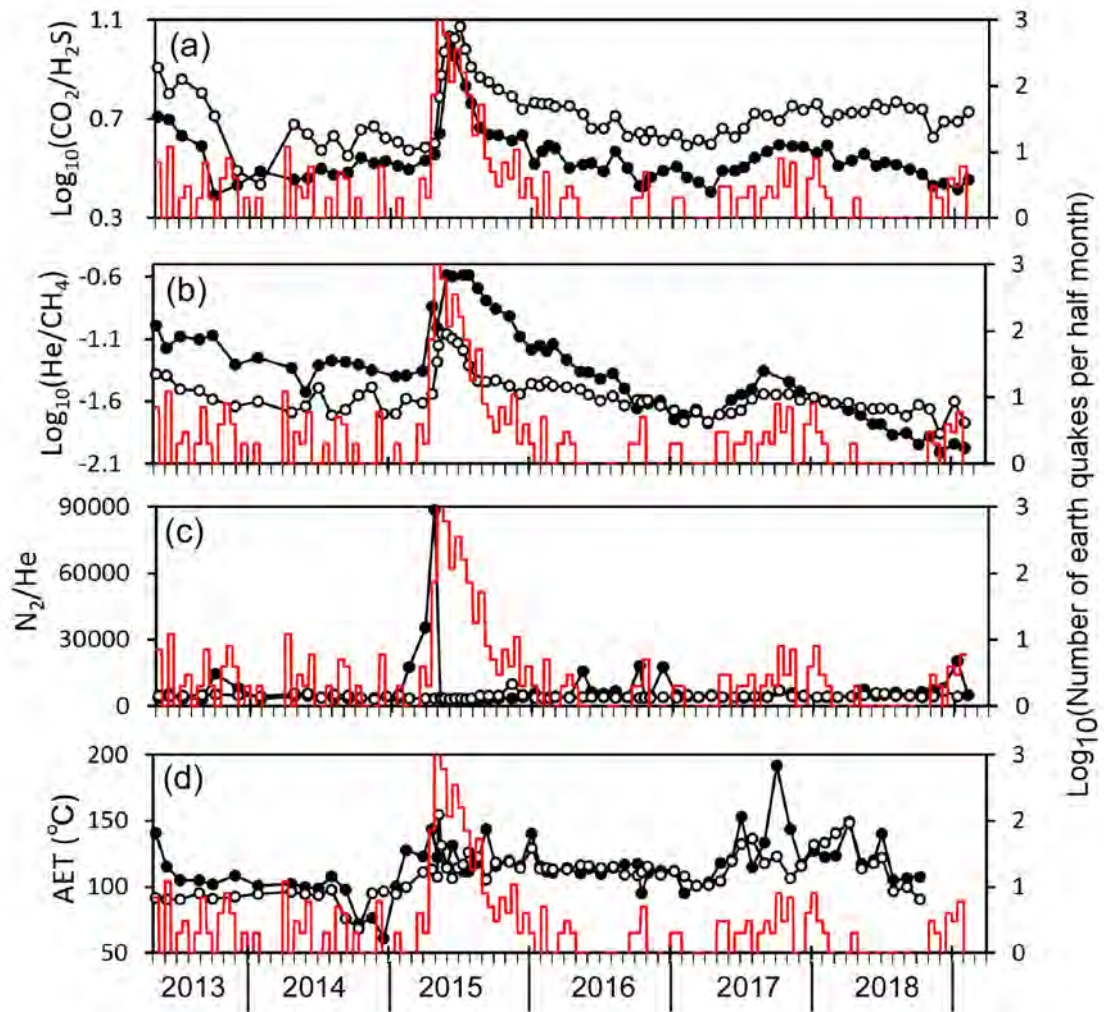


Fig. 1. Time variation of $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ ratio, He/CH_4 ratio, N_2/He ratio and apparent equilibrium temperature (AET) of fumarolic gases sampled at Owakudani (closed circles) and Kamiyuba (open circles) in Mt Hakone, Japan. AET was determined between δD of H_2O and H_2 in fumarolic gas.

Fig.1

(1) 実施機関名：

拠点間連携研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

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

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害事例の研究
- (2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明
- (3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
- (4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
- (5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

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、また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になる。本研究では、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構築と、災害リスク評価のばらつきをふまえた防災計画のあり方についての検討を行う。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

災害リスク評価のばらつきを理解するため、様々な震源モデル(6パターン)、強振動予測モデル(5パターン)、表層地盤増幅率(3パターン)、倒壊率を組み合わせ、評価結果のばらつきを容易に理解することが可能な表示システム(図)の構築を行った。またばらつきのある災害リスク評価結果を防災計画の策定に活用するという観点から、命を守る、財産を守る、業務・生活・地域を守るという3つのレベルの達成目標に応じたハザードシナリオ選択の考え方についての整理を行った。

(8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

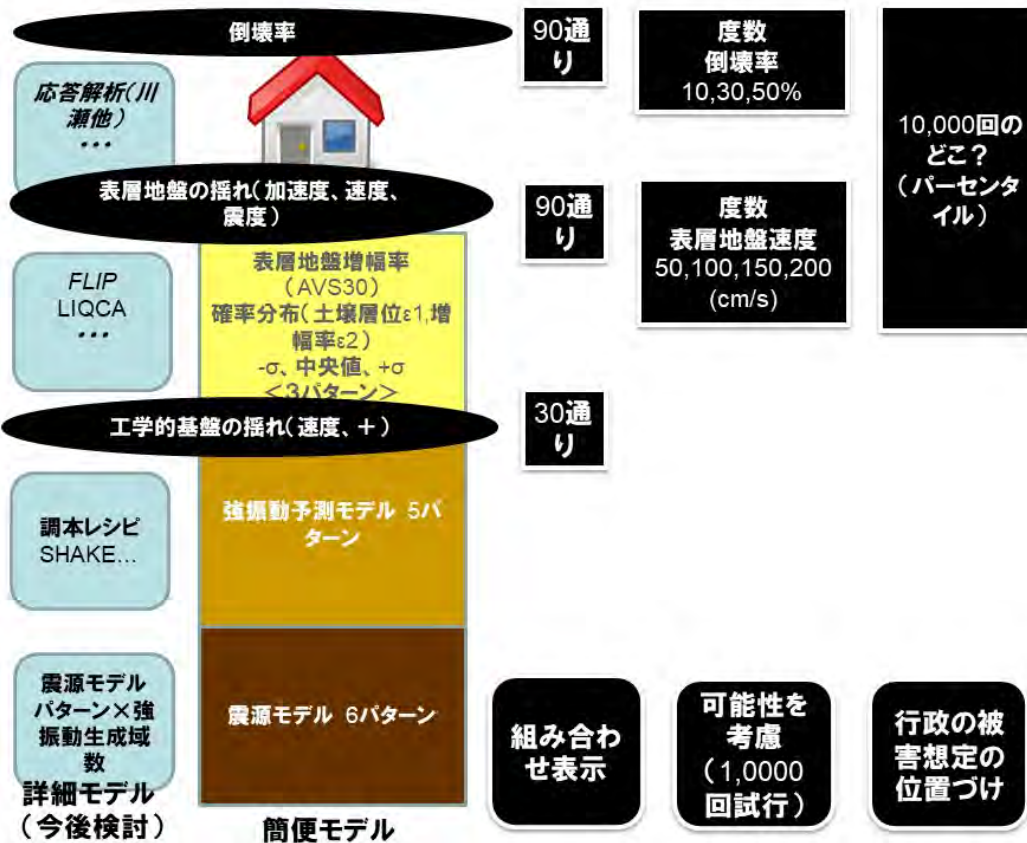
牧紀男, 馬場俊孝, 高橋智之, 柄谷友香, 川崎浩司, キム・ミンスク, 2018, シナリオによって変化する津波・水害シミュレーション情報の適切な提示手法に関する研究、地域安全学会梗概集、43、23-26

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

牧 紀男 京都大学・防災研究所 教授
 森田 裕一 東京大学地震研究所 教授
 川瀬 博 京都大学防災研究所 教授
 他機関との共同研究の有無：無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
 部署等名：
 電話：
 e-mail：
 URL：

(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者
 氏名：牧 紀男
 所属：京都大学防災研究所



(1) 実施機関名：

拠点間連携研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

将来時点でのエクスポージャ予測のためのデータ解析とモデル化手法の構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害事例の研究
- (2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明
- (3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
- (4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
- (5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

地震リスク評価に際しては、「地震ハザード」「耐震性能評価」「影響」の評価に加えて、「エクスポージャ」評価が必要である。そして、このエクスポージャ評価は災害が発生する将来時点に対応している必要がある。したがって、地方自治体などの広さ有した広域に対する地震リスク評価を行う際には、当該地域のエクスポージャの将来予測が必要不可欠である。

本研究では、人口および建物ストックの将来予測モデルの構築を目的として、特定の地方自治体での人口及び建物ストックの時系列分析を行う。また、その地方自治体での時系列変化に影響を及ぼす要因についても分析し、人口と建物ストックの相関および建物ストックの時系列変化に関する簡易なモデルを構築する。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

高知県南国市を対象に以下の分析を行った。

- (1) 固定資産課税台帳から抽出されたデータを用いて、築年数ごとの建物残存率を疑似的に推定した。
- (2) 上記データに加えて、住民基本台帳から抽出されたデータを用いて、建物用途種別、居住率、1 棟あたりの平均居住世帯数の時系列変化を分析した。
- (3) 固定資産課税台帳から抽出されたデータを用いて、木造戸建住宅の棟数および築年数分布の将来予測を行った。

具体的には、

- (1) 平成 17, 22 年, 29 年度の固定資産台帳から抽出したデータを用いて、疑似的に残存率を計算する方法を提案した。提案した方法は、築年数が同じであるが建築年が異なるであろう残存率の違いを考慮できないものではあるが、異なる 2 期間のデータがあれば疑似的に残存率を計算でき

るものである。提案した方法で疑似残存率を計算した結果を図1に示す。図には平成17年度と22年度のデータを用いた場合、平成22年度と29年度のデータを用いた場合の2ケースの結果を示した。図より、全般的に平成22年度と29年度のデータを用いた場合のほうが残存率が高いという結果になっており、近年になるほど住宅の寿命が長くなる傾向を示している。

(2) 固定資産課税台帳から抽出されたデータと住宅基本台帳から抽出されたデータをアドレスマッチングすることで、住宅種別や築年数などの情報と世帯数や家族人数などの居住者に関する匿名情報とを統合した。統合したデータを用いて、住宅の種別ごとの居住率および1棟あたりの平均世帯数の時系列変化を分析した。その結果、専用住宅および共同住宅等での居住率が増加傾向にあること、専用住宅では1棟あたりの平均世帯数が減少傾向にある一方で、共同住宅等では増加傾向にあることなどが明らかになった(図2および図3)。

(3) 平成17, 22, 29年度の課税台帳を整理し、各年度における木造戸建住宅棟数と滅失、新設住宅棟数をまとめた。この結果を用いて、築年数ごとに住宅の滅失確率を計算した。また、過去のデータから住宅の1年あたりの変化率を推定した。住宅ストックの変化に対する数学モデルを構築し、上記で得られた過去の変化が将来に外挿できると仮定し、将来時点での木造戸建住宅の棟数および築年数分布を予測した(図4)。住宅戸数の変化率が一定とした今回の仮定の下では、平成29年においては築35年あたりにあったピークは、時間とともにピークが平準化されつつ築年数の平均値が大きくなっていくという結果が得られた。

(8) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
河野祐哉，西嶋一欽(2018)高知県南国市を例とした建物ストックの時系列変化の分析，日本建築学会大会学術講演梗概集。

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

西嶋一欽 京都大学防災研究所 准教授
森田裕一 東京大学地震研究所 教授
川瀬博 京都大学防災研究所 教授
松島信一 京都大学防災研究所
牧紀男 京都大学防災研究所
倉田真宏 京都大学防災研究所
佐伯琢磨 京都大学防災研究所
河野祐哉 京都大学防災研究所
中嶋唯貴(北海道大学)
指田朝久(東京海上日動リスクコンサルティング)
他機関との共同研究の有無：無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：京都大学防災研究所
電話：0774-38-4165
e-mail：nishijima.kazuyoshi.5x@kyoto-u.ac.jp
URL：https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/yR5eT

(11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：西嶋一欽
所属：京都大学防災研究所

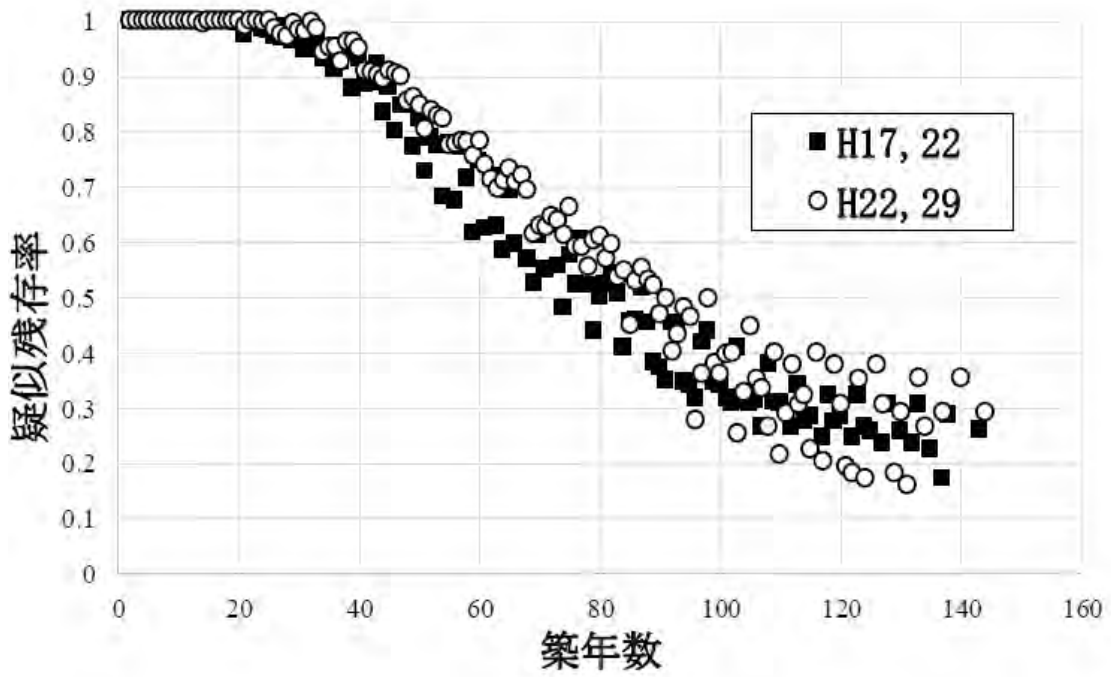


図1 南国市における建物（住宅）残存率

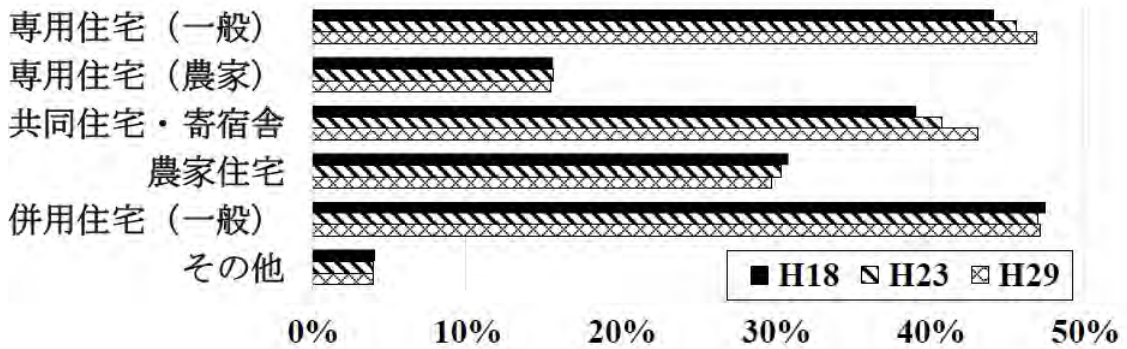


図2 居住率

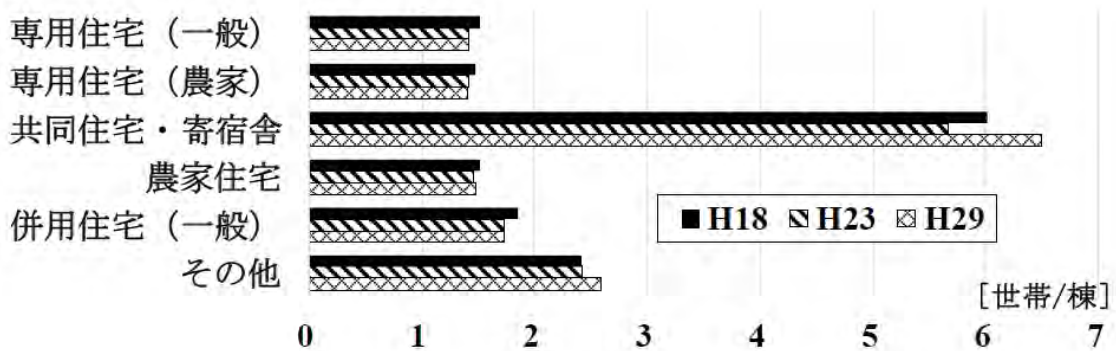


図3 1棟あたりの平均世帯数

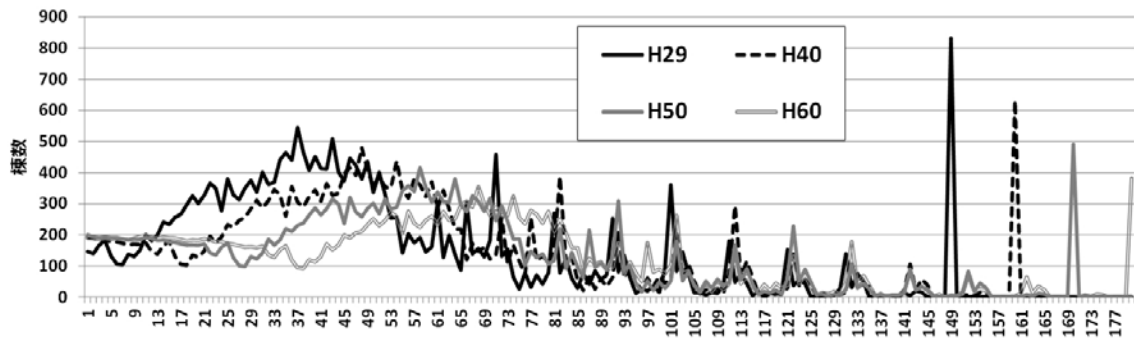


図4 将来時点での築年数ごとの木造戸建住宅の棟数予測

(1) 実施機関名：

拠点間連携研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

歴史被害地震の活動セグメントの推定とそれを考慮した強震動・建物被害シミュレーションに基づく震源破壊過程の推定に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

震源破壊過程を推定する際には、特に被害集中地域での地盤増幅特性が重要となるため、これまでに被害集中地域で調査した地盤情報を用いる。ただし、情報が不足している横手盆地北部の地域における地盤情報について調査を行う。地盤情報の調査については、現地にてアレイ・単点微動観測を行う。一方、これまでに収集した活断層情報を元に活動セグメントの新たな解釈により推定した断層モデルと地盤増幅特性を考慮して、強震動シミュレーションを行う。さらに、微動観測結果と古地図を照らし合わせ、地盤異変が行われた地形かどうかの判断などを行う。建物被害シミュレーションをする際には、歴史地震の発生時の建物の耐力が必要となるが、既往の文献に基づくほか、耐力を推定して複数のケースについて検討を行い、得られた推定結果の推定誤差について検討を行う。平成 29 年度までの課題募集型研究において検討を行ってきた、1847 年善光寺地震と 1896 年陸羽地震について、同じ手法を用いて震源破壊過程を推定することにより、提案しようとしている予測手法の確からしさについての検証を行う。具体的には、推定した活動セグメントに基づく震源断層モデルを初期モデルとし、推定した詳細地下構造モデルを元に強震動シミュレーションと建物被害シミュレーションを行い、被害予測結果が被害分布と整合するように震源断層モデルを合わせこむことにより、震源破壊過程を推定する。このとき、建物被害シミュレーションに用いる建物モデルを当時の強度に合わせる必要があるため、必要に応じ現地において建物の調査を実施する。さらに、横手盆地東縁断層帯では、1896 年陸羽地震の震源域よりも南側のセグメントは活動していないため、その部分が活動した場合の横手市域における強震動予測を行う。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

常時微動観測結果

常時微動観測によって得られたデータから、40.96 秒の小区間を 50 % オーバーラップさせて観測時間分の区間を切り出し、区間毎に微動の水平上下スペクトル比 (MHVR) を計算してその平均をとった。このとき、NS/UD、EW/UD はそれぞれ別々に計算している。また、交通振動等のノイズによる影響を避けるため、振幅の二乗和平均が大きい区間は除外した。MHVR から読み取った 1Hz 以下でのピーク振動数を図 1 に示す。

横手市周辺や盆地北部の地点におけるピーク振動数が低くなっており、それらの地点では深い構造となっていることが推測できる。

地盤構造モデルの作成

まず、K-NET 横手と J-SHIS 深部地盤地下構造モデルを参考に層構造モデルを作成した(表 1)。ただし、層 2 の V_S は層 1 と層 3 の中間となるような値を設定し、層 1~3 の V_P は V_S から Ludwig et al.(1970) の関係式より算出した。次にアレイ 3、4 において、理論位相速度分散曲線および理論 MHVR が観測したものに近づくような 1 次元地盤構造モデルを構築した。そして、この地盤構造モデルを基に、単点観測点においても観測 MHVR のピーク振動数に理論 MHVR のピーク振動数が近づくように地盤構造の推定を行った。その際、1 次ピークはアレイの構造の層 3~層 9 について、各層の層厚比を固定した上で層厚を変化させることで、2 次ピークは層 1、層 2 の層厚を定義することによってピークを再現した。

推定した 1 次元地盤構造と方位依存係数、および重力図を参考に盆地境界(地震基盤深さ 0 m)を定め、これを考慮して推定した 1 次元地盤構造を GMT の surface 関数で補間することにより 3 次元地盤構造を作成した。地震基盤深さ分布を図 2 に示す。

増幅特性評価

スペクトルエレメント法の 1 つである EFISPEC3D を用いて、推定した 3 次元地盤構造の増幅特性を評価した。ただし、層 1 の物性値を層 2 と同値としている。入力用モデルの作成には CUBIT を用いた。領域は経度緯度で 140.17/140.83/38.97/39.83 の範囲とし、メッシュサイズは、深さ 20000 m 以深は 5000 m、以浅は 1667 m、盆地内は 185 m の有効振動数 1.89Hz とした。このモデルにスペクトル振幅 $1\text{m}\cdot\text{s}$ のデルタ関数を変位として、深さ 20km から EW 方向に平面波入射をした。有効振動数以上の影響を除くため、出力結果に 1Hz のローパスとして 4 次の Butterworth フィルタ - をかけている。PGV[m/s] と基盤深さコンターを図 3 に示す。

1896 年陸羽地震の強震動シミュレーション

1896 年陸羽地震は横手盆地東縁断層帯の北部が活動したものと考え、横手盆地東縁断層帯北部の想定地震のケース 1 のシミュレーションを、推定した地盤構造モデルを用いて行った。比較のために、J-SHIS モデルでの計算も併せて行った。推定地盤構造モデルは EFISPEC により、J-SHIS モデルについて GMS によって行った。その結果、図 4 に示すように、推定地盤構造モデルによる計算では、震源近傍のみならず横手市の西側まで最大速度の大きい領域が現れた。これは、基盤が深くなっていることによることが原因であると考えられ、1896 年陸羽地震の際に被害域が南に延びた主な原因であることが示唆される。

- (8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
佐藤啓太・松島信一・松下隼人・増田峻介・吾妻崇・野澤貴，2018，微動観測記録に基づく横手盆地の地下構造の推定，第 15 回日本地震工学シンポジウム，OS2-01-03。
佐藤啓太・松島信一・松下隼人・増田峻介・吾妻崇・野澤貴，2019，微動観測記録に基づく横手盆地の推定地下構造の増幅特性評価，京都大学防災研究所研究発表講演会，B06。

- (9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

松島信一 京都大学防災研究所 教授
市村 強 東京大学地震研究所 准教授
吾妻 崇 産業技術総合研究所 主任研究員
野澤 貴 鹿島建設原子力部 担当部長
他機関との共同研究の有無：無

- (10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：

電話：
 e-mail：
 URL：

(11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：松島 信一
 所属：京都大学・防災研究所

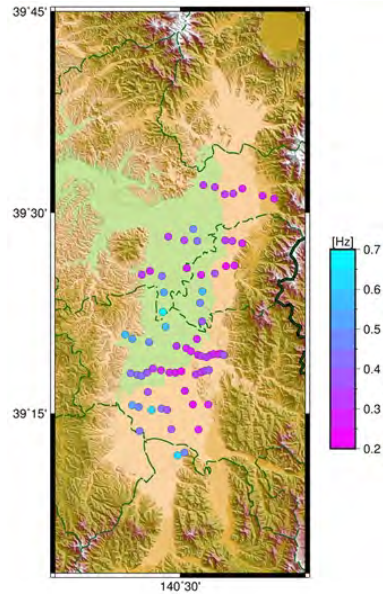


図1 横手盆地における微動観測記録から得られた1次ピーク振動数

	V_s [m/s]	V_p [m/s]	ρ [g/cm ³]
層1	130	700	1.42
層2	350	1585	1.69
層3	560	1901	1.86
層4	1100	2500	2.15
層5	1400	3000	2.25
層6	1700	3500	2.30
層7	2100	4000	2.40
層8	2700	5000	2.50
層9	3100	5500	2.60
地震基盤	3300	5700	2.70

表1 推定した横手盆地における速度構造モデル

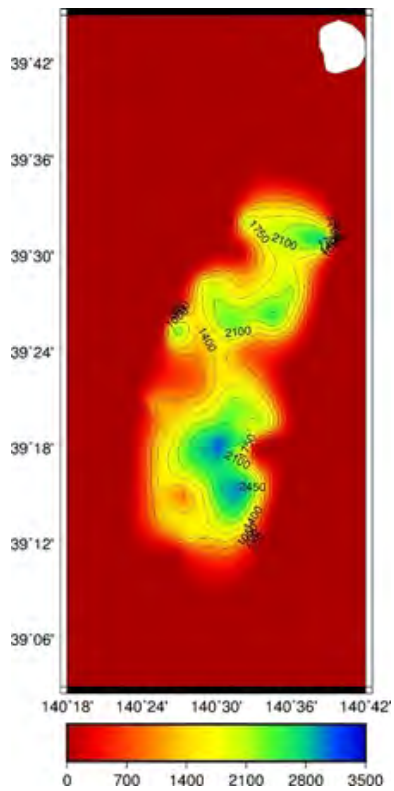


図2 横手盆地の地震基盤深さ

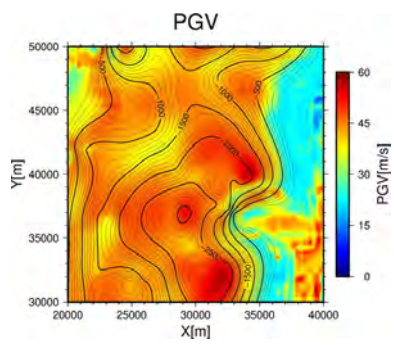


図3 横手市周辺における地盤増幅特性 (EW 成分)

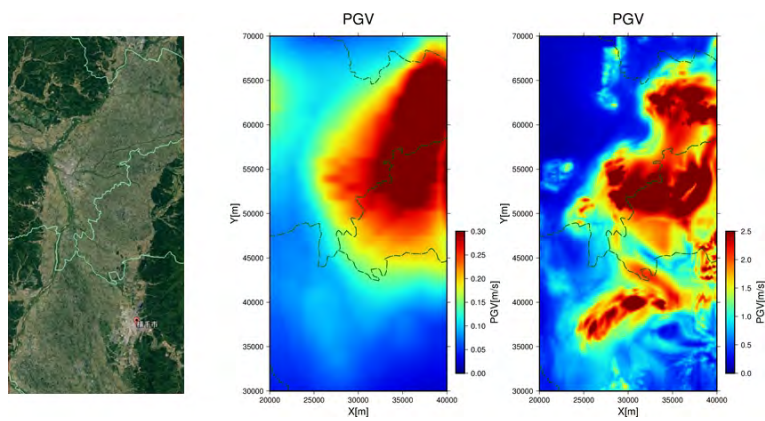


図4a 1896年陸羽地震の強震動シミュレーションによる最大速度分布 (EW 成分)

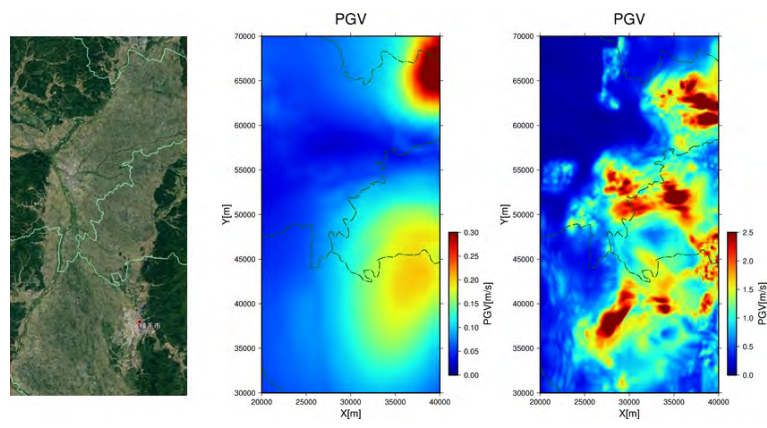


図 4b 1896 年陸羽地震の強震動シミュレーションによる最大速度分布 (NS 成分)

(1) 実施機関名：

拠点間連携研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

歴史地震評価のための振動計測と引き倒し実験による伝統木造建造物の耐震性能評価

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

本研究では、歴史地震の強震動生成プロセスの解明を最終目的として、1925 年代以降の建物に適用可能な現行の建物被害予測モデルを 100 年以上過去の住家に対しても適用可能とすることを目的とする。そのため、古民家の平均振動特性とばらつきを把握するとともに、解体を予定している家屋の引き倒し実験を行い、その終局耐力を把握する。両者から建物被害予測モデルを構築し、詳細モデルの応答と比較しその妥当性を検証する。具体的には以下の検討を実施する。

(1) 築 100 年以上の古民家の平均的振動特性とそのばらつき把握

古民家の振動性状についてはこれまで十分な調査がされているとは言い難く、一般的な知見として整理されていない。本研究では古民家の共振振動数の分布を 20 棟以上の調査結果に基づいて把握する。

(2) 解体予定古民家の引き倒し実験

大破・倒壊に至る大被害レベルの挙動予測においては、その終局耐力の把握が重要である。しかし一般に古民家の終局耐力はそのフレーム構造の特性によって決まりそれが類似していることから、耐力も類似していることが期待される。そこで解体予定の古民家を探し出しその軒下にワイヤーを固定してクレーンで水平方向に載荷し、徐々に力を増やし変形角を増大させて引き倒す、静的引き倒し実験を行ってその終局耐力を把握する。得られた実験結果は構造解析用ソフト SNAP で解析を行い、伝統木造建造物の地震時挙動に関する定量的知見を得る。

(3) 入力地震動による建造物被害予測モデルの構築

微動計測で得られた古民家の平均的な振動特性と、引き倒し実験で得られた終局特性、および現行の一般木造建造物の年代別被害予測モデルを統合して、歴史的木造建造物用の被害予測モデルを構築する。そのモデルと SNAP の引き倒し実験結果を再現できる三次元立体フレームモデルに過去の内陸地震の観測地震動を入力して動的応答解析を行い、両者がよく対応することを確認する。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

(1) 古民家の平均的振動特性とそのばらつき把握

今回実施した我々独自の古民家の微動計測値および過去の計測済み微動計測値、さらに文献に記載されている古民家の微動計測値を収集整理し、その年代別の共振振動数の平均値と分布を把握した。その結果江戸時代後期から明治時代中期までの古民家の振動特性に大きな変化がないことがわかった。

(2) 古民家の引き倒し実験とその再現解析

築100年以上の古民家の静的挙動を把握するため、1888年頃に建てられた岡山県井原市の伝統構法木造民家IBR01に対して引き倒し実験を実施した。引き倒し実験は、IBR01のY5構面の高さ2271mmの梁に鉄骨を当てその鉄骨の4か所にワイヤーを接続し、梁間方向に均等に加力した。両端構面の層間変位が300mmになるまで加力した結果、最大水平力は102.2kNであり、ベースシア係数は0.32であった。最大変形時の水平力は約78kNであり、ベースシア係数は0.25であった。対象古民家は層間変形角0.13radまで変形させても自重を保持し続けたことから高い変形性能を有していることが確認できた。

構造解析用ソフトSNAPを用いてこの引き倒し実験の再現解析を行った。解析結果ではX2Y1のNo.2-2の加力時の層間変形角がわずかに過大評価となった。また、建物全体が非線形した後の除荷ループを再現することはできていない。しかしながら、概ね実験結果のスケルトンカーブを再現することができており、既往の解析用モデルを用いることで、古民家の建物全体が非線形化するまでの挙動を再現できた。

(3) 入力地震動による構造物被害予測モデルの構築

現行の一般木造構造物の年代別被害予測モデルの構築手法に従い、設計基準等から作成した標準建物モデルに対する古民家の耐力比および、耐力分布を決定することで、1900年以前に建てられた古民家の被害予測モデルを構築した。構築手順を以下に示す。

- 1) 建物の固有振動数の二乗と耐力が比例すると仮定する。
- 2) 木造建物262棟の常時微動計測結果に基づく固有振動数とその建築年の関係から、各建築年に対する木造建物の平均固有振動数推定式を決定した。
- 3) 各建築年に対する平均固有振動数推定式から求めた各年代区分別の固有振動数の二乗と一般木造構造物の年代別被害予測モデルの耐力比の関係から、古民家の耐力比を0.99と推定した。
- 4) 古民家の固有振動数の二乗が対数正規分布に従うとし、未補強の古民家17棟の常時微動計測結果に基づく固有振動数から古民家の耐力分布を算定した。

ここで3)において、耐力比と固有振動数の二乗が平均的には比例することが確認できた。従って、1)の仮定は成り立つと考えられる。また、IBR01の引き倒し実験の再現解析結果を用いてIBR01の建築当初と推定される建物モデルを作成したところ、その耐力は本研究で作成した古民家の地震被害予測モデルの耐力分布の幅に収まっており、本地震被害予測モデルの妥当性を支持しているということがわかった。

(8) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

川瀬博 京都大学防災研究所・特定教授
八木尊慈 京都大学工学研究科・修士課程
市村強 東京大学地震研究所・教授
他機関との共同研究の有無：無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：
電話：
e-mail：
URL：

(11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：川瀬 博
所属：京都大学防災研究所 社会防災研究部門

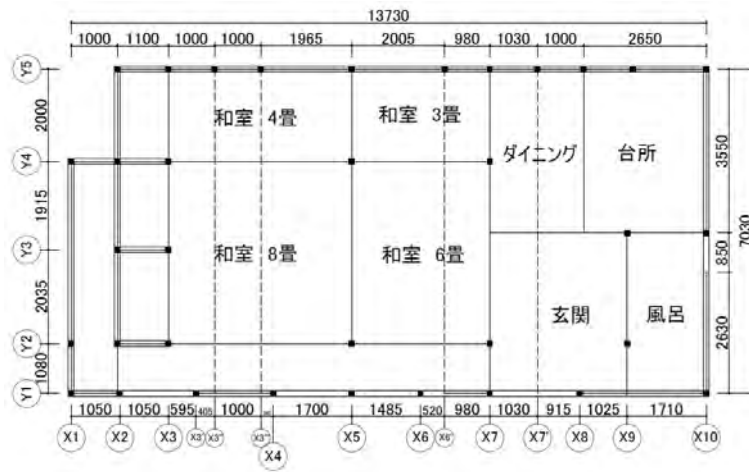


図 1 IBR01 平面図

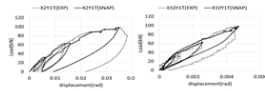


図 2 再現解析結果

(1) 実施機関名：

拠点間連携研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

強震動評価のための浅部地盤と深部地盤の統合モデル化に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

首都直下地震

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

この研究では、浅部および深部の地盤を統合してシームレスな地盤モデルを構築する手法をいくつかの地域に対して応用し、その適用性を明らかにすることを目的とする。さらに、異なる地盤環境を有する地域での適用の結果と研究分担者との議論を通じて、浅部深部統合地盤モデルの作成手法の高度化に資する知見を得ることも目的のひとつである。さらに、この研究では、分担者がいくつかの地域の中心部で地震動評価に十分信頼性のある浅部深部統合地盤モデルを提案する予定である。1次元地盤構造モデルではあるが、地域の中心部で信頼性の高い地盤構造モデルが得られることになり、各地域の免震建物や超高層建物などの重要構造物の耐震安全性の評価にも有益な情報となると期待される。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震の際に周期1~3秒付近で大きな地震動が観測された東京湾西岸地域と小田原地域を対象として、1次元浅部深部統合地盤モデルを構築することを試みた。既存の地下構造情報と地震観測記録を用いて、図1に示す手順によって周波数0.5-20Hzの観測増幅特性から、1次元浅部深部統合地盤モデルのS波速度構造と減構造を同定する。まず、Miyakoshi et al.(2019)による関東地域の強震観測点の中小地震の地震動記録のS波部分のスペクトル分離解析による東京湾西岸部の強震観測点(図2)での周波数0.5~20Hzの帯域の増幅特性を得た。この解析による増幅特性は、S波速度2.5km/sの地震基盤よりも浅い地層による増幅であると解釈されている。次に、J-SHISなどから既往の深部S波速度構造モデルを収集した。さらに、微動アレイ探査(地元ほか、2018)や検層による強震観測点直下の浅部S波速度構造モデルも得た。これらの既存の地盤情報を用いて、1次元浅部深部統合地盤の初期モデルを作成した。この初期モデルを参考にして、1次元重複反射を仮定して、ハイブリッドヒューリスティック法(山中、2007)による上記の増幅特性の逆解析によって、1次元浅部深部統合地盤モデルのS波速度およびQ値を同定した。なお、減衰構造のモデル化には、佐藤・山中(2010)によるバイリニア型のQ値モデルを仮定した。

図2には、東京湾西岸部のUK1222で得られた1次元浅部深部統合地盤モデルを示す。比較のために、J-SHISの深部地盤モデル、J-SHISと微動アレイ探査による初期地盤モデルも示されている。UK1222

の浅部深部統合地盤モデルは、J-SHIS モデルよりも-200m 程度の深度の S 波速度が遅く、地震基盤深度は 1km 程度浅くなっている。図 3 に示した増幅特性では、得られた浅部深部統合地盤モデルが周波数 0.8Hz と 3Hz の観測ピークを最も良く説明していることが分かる。このように、1 次元浅部深部統合地盤モデルは、既存モデルよりもより広帯域で地震動を説明可能なモデルとなっていることが分かる。

図 3 に、足柄平野中央部 (NRD) で得られた 1 次元浅部深部統合地盤モデルが示されている。図には、J-SHIS による深部地盤モデル、J-SHIS と微動アレイ探査による初期モデル、既存モデル (Tsunno et al., 2018) も比較されている。NRD の浅部深部統合地盤モデルは、J-SHIS モデルよりも深さ-100m 程度で S 波速度が遅く、地震基盤深度は 400m 程度浅くなっている。図 3 右に示した観測増幅特性では、得られた浅部深部統合地盤モデルが周波数 2Hz と 3Hz の観測ピークを最も良く説明している。一方で、1Hz 付近の観測サイト特性を説明できておらず、初期モデルなどの設定など、モデル化に再検討が必要であることを示唆している。

以上のように、東京湾西部地域と小田原地域での 1 次元浅部深部統合地盤モデルを構築することを試み、本研究による 1 次元浅部深部統合地盤モデルは、既存の 1 次元地下構造モデルよりもより広い周波数帯域で地震動特性を説明可能なモデルとなることを示した。

本研究では、2018 年 9 月に胆振東部地震が発生したことを踏まえて、同地震の被災地域において共同微動観測を実施し、同地域の浅部深部統合地盤モデルを作成するための資料を得た。この地域では、気象庁や防災科研による強震観測点で震度 7 の強震記録が本震時に得られている。さらに、高井ほか (2018) によって余震観測が実施され、中小地震による強震動記録も得られ、堆積層による増幅効果が強震動特性に及ぼす影響が大きいことも指摘されている。図 4 に鶴川町地域での強震観測点と微動・表面波探査地点を示す。これらの強震観測点では、微動アレイ探査と表面波探査が行われ、図 5 に示すように広い周波数帯域のレイリー波を位相速度を得ることができた。図には、既存の地盤情報に基づく理論位相速度も示されており、観測値との矛盾は少ない。今後、これらの結果と強震観測による地震観測記録を合わせて、上記のような分析を行うことによって、浅部深部統合地盤モデルを推定することを考えている。

(8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
津野靖士、山中浩明、地元孝輔、宮腰寛之、三宅弘恵、高井伸雄、重藤迪子、神野達夫、佐藤浩章、
纈纈一起、松島信一、川瀬 博、足柄平野と東京湾西岸部における地震観測点の 1 次元浅部深部統
合地盤モデル、平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演会、2019 .

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

山中 浩明 東京工業大学 教授
三宅 弘恵 東京大学 准教授
高井 伸雄 北海道大学 准教授
神野 達夫 九州大学 教授
山田 伸之 高知大学 准教授
地元 孝輔 東京工業大学 助教
佐藤 浩章 電力中央研究所 上席研究員
是永 将宏 鉄道総合技術研究所 副主任研究員
川瀬 博 京都大学防災研究所 教授
松島 信一 京都大学防災研究所 教授
纈纈 一起 東京大学地震研究所 教授
他機関との共同研究の有無 : 無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名 :

電話：
 e-mail：
 URL：

(11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：山中 浩明

所属：東京工業大学 環境・社会理工学院

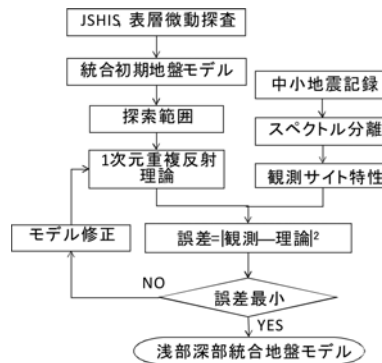


図1：1次元浅部深部統合地盤モデルの構築手順

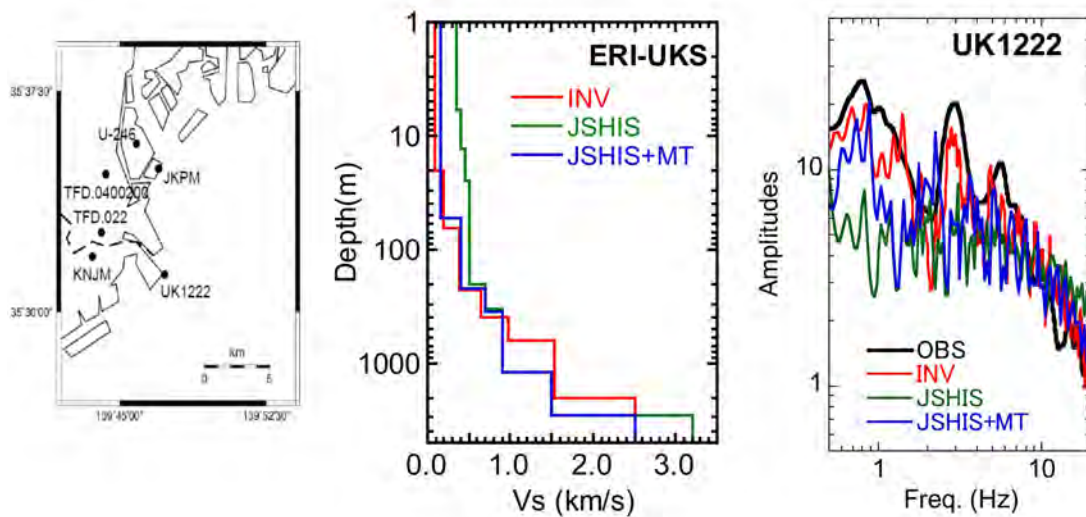


図2：東京湾西岸部(UK1222)の1次元浅部深部統合地盤モデルとサイト特性の比較

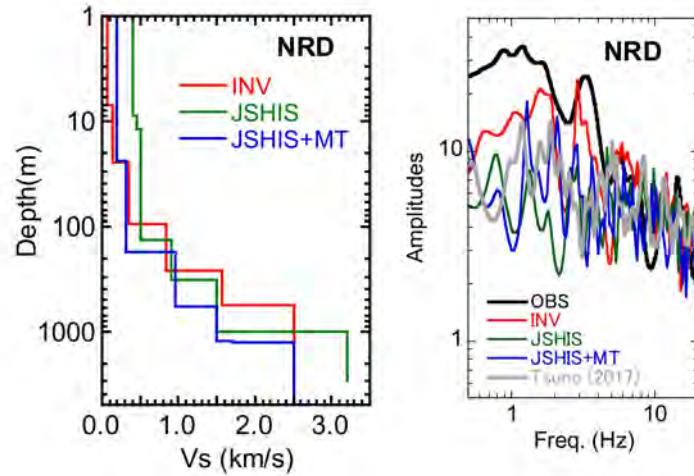


図 3: 足柄平野 (NRD) の 1 次元浅部深部統合地盤モデルとサイト特性の比較

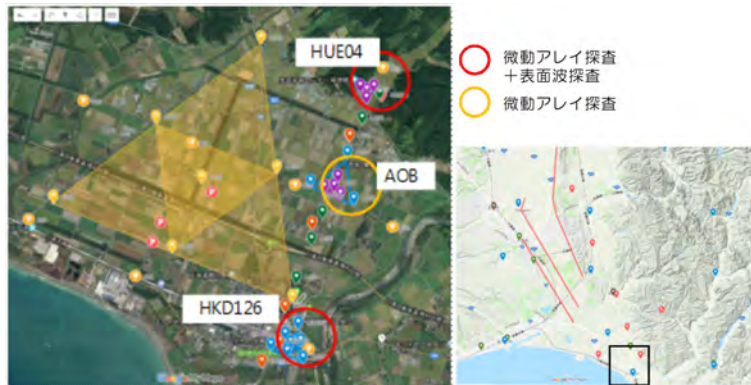


図 4: 胆振東部地震の被災地域での微動観測点

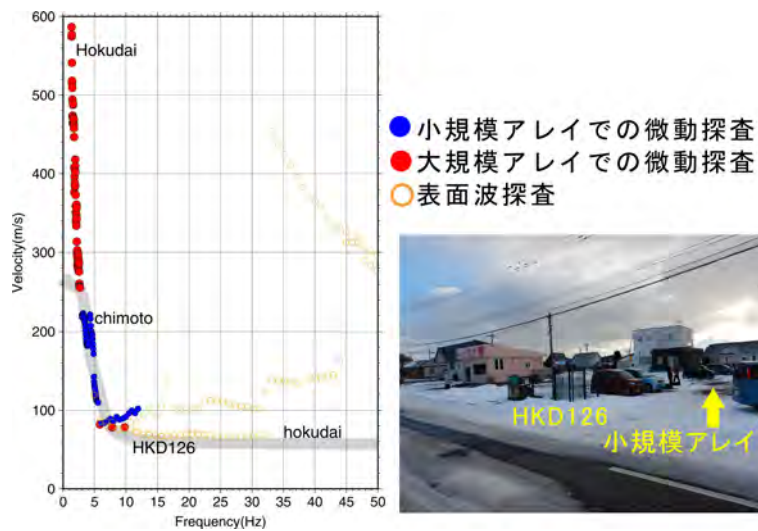


図 5: HKD126 (K-NET 鶴川) での微動および表面波探査の結果

(1) 実施機関名：

拠点間連携研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震による被災から回復までの個人世帯生活被災度時間関数の構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

本研究は、地震による個人世帯の生活破壊の予防そして減災を目的とし、予防から復旧までの時系列的自助能力向上のための防災計画を「家族生活継続計画(Family-life Continuity Plan : FCP)」という概念で提案し、その計画作成のための基本関数(生活被災度時間関数)の構築を目指すものであり、以下の研究計画を立案した。

(1) 住家損傷度の評価モデルの構築：住家被害は個人世帯の基本的被害量であり、後続被害に直接的に影響する。個人世帯の住家耐震性能(木造建築物耐震評点)をパラメータとし、地域の地震動入力を与えることで、被害を評価する。

(2) 身体的被害 - 回復モデルの構築：住家被害及び室内散乱に伴う死傷程度を世帯家族全員について、想定地震動での確立評価モデルとして提案する。

(3) 資産的被害 - 回復モデルの構築：個人世帯の家計をバランスシートをベースにした生涯資産評価モデルとして構築する。

(4) 精神的被害 - 回復モデルの構築：当該研究グループは 2017 年度拠点間連携研究(課題募集型)の助成を受け、地震時における心の復興の重要性を訴えている。上記の身体的被害及び資産的被害が精神に与える影響も因果的に関連づけた種々のインシデントの影響を考慮できる精神的被害 - 回復モデルの構築を目指す。

(5) FCP シミュレーション：具体的世帯を設定し、シミュレーションを行う。無体策の場合と各種対策を行った場合の比較により、対策の効果評価を行う。

(6) 検証並びに今後への新展開の検討：モデル検証を地震工学・建築都市計画及び地震学の視点から行い、その防災的応用性を多角的に検証する。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

以下の成果を得た。

(1) 住家損傷度の評価モデルの構築：日本の標準世帯として木造戸建て住宅を想定した。住家被害を損傷度(Damage Index)、並びに 7 階級の損傷区分(Damage Level)で評価する関数(損傷度関数)を提案し、世帯住家の耐震補強の有無や補強程度を木造住家耐震評点をパラメータとすることで様々な世

帯構成及び対策の条件設定が可能となった。また想定される地震動入力を確定的(想定 PGV、あるいは想定震度) のみならず発生確率を考慮した扱いも可能とするものであり、住家耐震対策の将来的効果評価やリスク評価のばらつきも検討可能なモデルとなっている。

(2) 身体的被害 - 回復モデルの構築 : 住家被害及び室内散乱に伴う死傷程度を災害医療で用いられている多発外傷重症度指標 (ISS) で評価するモデルを構築し、この指標導入により負傷の場合は、治療による全快時間が評価できるため、身体被害 - 回復モデルへと展開が可能となった。また、死亡発生確率が高い結果となった場合は、それを防ぐための住家耐震補強対策や室内安全化対策の条件を変えらることで、対策の人的被害に与える影響が検討可能となった。

(3) 資産的被害 - 回復モデルの構築 : 個人世帯の家計のバランスシートをベースにした生涯資産評価モデルの標準世帯版を構築した。個人資産は世帯ごとに大きく異なるが、今回の提案は生命保険のライフプランを参考に標準的サラリーマン世帯をモデル構築した。個人世帯により収入支出項目は大きく異なるはずであり、項目数を今後増やすことにより汎用的利用が可能となろう。このライフプラン上で災害発生を想定することで、(1) 住家損傷度評価モデルにより住家損傷を含む物的被害の算定と復旧 (住家再建費用等) 及び (2) 身体的被害 - 回復モデルにより家族の身体的被害治療費等) 等々との経済的因果関係がシミュレーション可能となった。また、災害時の公的助成金や地震保険の加入の有無等を考慮することで、資産回復の予測もシミュレーションでき、資産対策の重要性を伝えるツールとしても活用可能である。

(4) 精神的被害 - 回復モデルの構築 : 精神的な障害度を Kessler の指標 (K6) で定量化し、その時系列変化を追跡する精神被害 - 回復モデルを提案した。種々のインシデントをモデルに組み込むことが可能となり、本人の物理的被害よりも家族が傷つくことによる精神的被害の大きさが計量された。

(5) FCPシミュレーション : 高知県南国市を例に、夫婦 30 代・子 6 歳で築 40 年の戸建て木造住宅 (持ち家) に住むサラリーマン世帯を想定する。地震動は内閣府が公表しているレベル 2 クラスの南海トラフ巨大地震のうち陸側に震源を想定した最大地震動の震度分布を与えると、全壊の確率は 50 % を超え、死亡発生確率 14% を得る。この状態に避難生活と収入減少のインシデントが加わった場合の資産及び心の回復シミュレーションを行った。さらに事前対策として耐震改修と地震保険の加入及び事後の生活再建支援法による助成の減災効果をシミュレーションし、FCP の有用性を確認した。

(6) 検証並びに今後への新展開の検討 : 本年度は 3 軸 (人的被害、経済被害、精神被害) による個別評価に留まった。しかしこのモデルにより、地震が原因の家屋倒壊 室内破壊 人的被害 資産損傷 + 精神被害 回復の定量化と時間シミュレーションが可能となった。そしてそのシミュレーションの中に様々な対策を入れることで効果評価も可能となった。しかし今回は結果を十分に可視化するまでには至っていない。一般住民に活用してもらうには可視化も重要なことと考えている。今後は総合評価軸として原点から 3 次元面までの汎距離を求めることで総合評価が可能となろう。それを時間軸で動かすことで、ライフスパンに拡張された対策 - 被災 - 回復が一望され、世帯個別の自助対策の診断ツールとなろう。

(8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) : 岡田成幸・中嶋唯貴・牧紀男・纈纈一起 : 地震による被災から回復までの個人世帯生活被災度時間関数の構築, 平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演会 (2019.2.20)

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

(代表者名)

岡田成幸 北海道大学・大学院工学研究院 特任教授

中嶋唯貴 北海道大学・大学院工学研究院 助教

牧紀男 京都大学・防災研究所 教授

纈纈一起 東京大学・地震研究所 教授

他機関との共同研究の有無 : 無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名 :
電話 :
e-mail :
URL :

(11) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者
氏名 : 岡田 成幸
所属 : 北海道大学 大学院工学研究院

(1) 実施機関名：

拠点間連携研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震随伴火災の経時的な発生予測モデルの開発と出火防止対策の有効性評価

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

本研究では、地震動の影響により発生する火災(以降では、地震火災と呼ぶ)の件数を発火要因の違いを考慮して予測可能な統計モデルを開発する。また、開発したモデルを用いて南海トラフで地震が発生した条件下での日本全域を対象にした確率論的な出火シミュレーションを行い、将来の南海トラフ地震に伴う火災の発生件数のばらつきを数値的に明らかにする。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

【A】地震火災の発生件数を予測するための統計モデルの開発

地震火災の発生件数を予測するため、人口1人あたりの出火確率に着目し、これを計測震度や電力の供給率から説明するモデルを定式化するとともに、2011年東北地方太平洋沖地震の出火記録を再現できるように、モデルの未知パラメータを同定することによって、プレート境界地震に伴う火災の発生件数の予測に利用可能な統計モデルを整備した。特に、感震ブレーカーといった出火防止対策の普及率向上による効果を評価できるように、発火要因を(1)電気器具・電気配線(2)ガス器具(3)石油暖房器具(4)その他の4つに分類し、それぞれについてモデルを構築した。

【B】南海トラフ地震に伴う火災の発生件数のばらつきの評価

サブ課題(A)で開発した出火モデルと地震動指標の距離減衰式を組み合わせることによって、南海トラフ地震の不確実性を考慮した日本全域での確率論的な出火シミュレーションを行った。ここでは、地震火災の発生件数に大きく影響する地震の不確実要因として(1)震源域とそれが破壊された際の地震の規模(2)地震の発生季節(3)地震の発生時間帯、の3種類の要因を仮定し、各要因のバリエーションの組み合わせからなる合計72の地震シナリオに重み係数を設定することによって、地震火災の発生件数と条件付き超過確率の関係を表す出火リスクカーブを消防本部の管轄範囲ごとに推定した。その結果、南海トラフ地震が発生した際、全国のほとんどの消防本部では、保有するポンプ車の台数を上回る数の火災が発生する確率は非常に小さく、水道管や防火水槽の耐震化によって地震時においても消防水利を確保することができれば、放任火災の発生を高い確率で防ぐことができることを

明らかにした。また、出火防止対策として、感震ブレーカーの普及率が25%に向上した場合の評価を行い、出火リスクカーブがどのように変化するかを確認した。

- (8) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
Nishino, T. and Hokugo, A., A Stochastic Model for Time Series Prediction of the Number of Post-Earthquake Fire Ignitions in Buildings Based on the Ignition Record for the 2011 Tohoku Earthquake, Earthquake Spectra (submitted).

- (9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

(代表者名)

西野智研 京都大学防災研究所 准教授

川瀬博 京都大学防災研究所 教授

北後明彦 神戸大学都市安全研究センター 教授

関口春子 京都大学防災研究所 准教授

市村強 東京大学地震研究所 准教授

他機関との共同研究の有無：無

- (10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：

電話：

e-mail：

URL：

- (11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：西野 智研

所属：京都大学防災研究所 社会防災研究部門

(1) 実施機関名：

拠点間連携研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

建物個別の応答予測と揺れ継続時間のリアルタイム情報配信

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

本研究では、利用者が多い大規模な建物や災害拠点となる施設を対象として、震源特性と伝播経路特性、立地地盤の特性、建物の諸元、さらには建物内の上層階と下層階での被害差などを考慮した高精度地震情報配信手法の開発を目指すとともに、その実装に向けた課題を、京都大学防災研究所と東京大学地震研究所が保有する建物地震応答観測システムを用いて検討する。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

本課題では、利用者が多い大規模な建物や災害拠点となる施設を対象として、固有周期や立地条件が異なる個別の建物の (A) 建物入力地震動のリアルタイム分類 (B) 揺れ継続時間の予測、に取り組んだ。

(A) 建物入力地震動のリアルタイム分類：東京大学地震研究所が公開している即時に地震の位置・規模・メカニズムを決定するシステム (GRiD MT, 主開発者：鶴岡弘) を利用し、地震発生直後に災害拠点などで震源情報を有効利用する方法について議論した。図 1 は 2018 年に発生したモニタリング領域内で発生した地震に対して、GRiD MT により決定された震源メカニズム解を示している。GRiD MT は、20～50 秒の長周期波動場をリアルタイムにモニタリングすることにより、震源情報を必要とせず地震発生後ほぼ 3 分で震源位置・モーメントマグニチュード・震源メカニズムを同時に決定するシステムである。震源位置やそのメカニズムは直接には建物の被害把握などに用いることはできないが、地域全体の災害拠点となる建物においては、中長期的に避難準備や避難継続の判断、あるいは地域レベルでの復興支援体制の構築を考えるうえで、震源に関する情報を随時提供することは有意義と考えられる。震源情報については気象庁より地震後に発表があるが本震や大きな余震にとどまるため、より詳細な情報が提供された場合の利用法について、検討を続ける。また GRiD MT が持つ即時計算処理能力を用いた新たな防災情報の提供についても議論した。

(B) 揺れ継続時間の予測：建物利用者の心理的不安軽減を図るおよび地震収束後の復旧・退避行動の迅速化には、揺れの大小のみならず、揺れ継続時間の情報が必要である。まず、国立研究法人建築研究所に依頼して、地震計を設置している建物の建物応答観測記録および観測地点の詳細な地盤情報の提供を受けた。次に、震源特性・震源距離・地盤特性、をパラメータとした、敷地地盤の影響等を含む建物の振動特性を考慮した揺れ継続時間を分析した。能島 (2015) の既往研究を参考に、累積パワーが 95% となる区間を揺れ継続時間と定義し (図 2 参照)、建物内で得られた観測記録の揺れ継続時間

を求めた．図 3 は 398 地震の観測記録に対して，建物の基礎および上部階で得られた揺れ継続時間を示している．縦軸は揺れ継続時間（秒）の対数表記，横軸は地震のマグニチュードを示している．ばらつきはかなり大きいですが，マグニチュードが大きくなるにつれて揺れ継続時間の中央値は大きくなる．また，建物の上部階の方が，基礎よりも継続時間が長くなる傾向が見られる．建物の高さや地盤条件に対しても揺れ継続時間との相関性が一部確認されているが，理論的解釈が成立するかも含めて，今後詳細について慎重に検討を進める予定である．

(8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので，平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

（代表者名）

倉田 真宏 京都大学防災研究所 准教授

鶴岡 弘 東京大学地震研究所 准教授

楠 浩一 東京大学地震研究所 准教授

山田 真澄 京都大学防災研究所 助教

柏 尚稔 国土技術政策総合研究所 主任研究官

溜淵 功史 気象研究所 研究官

他機関との共同研究の有無：無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：

電話：

e-mail：

URL：

(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：倉田 真宏

所属：京都大学・防災研究所

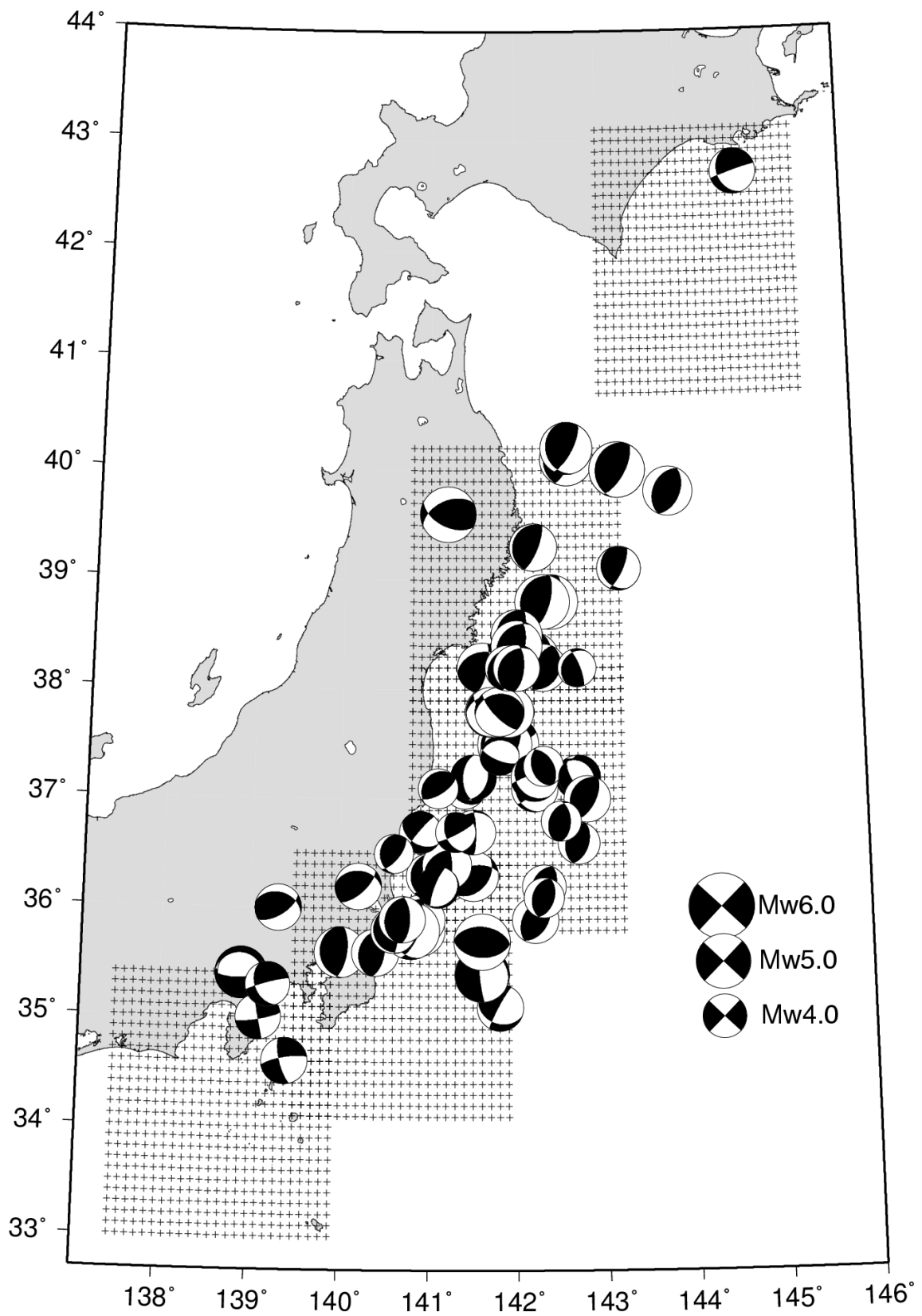


図 1 GRiD MT により決定された震源メカニズム解 .

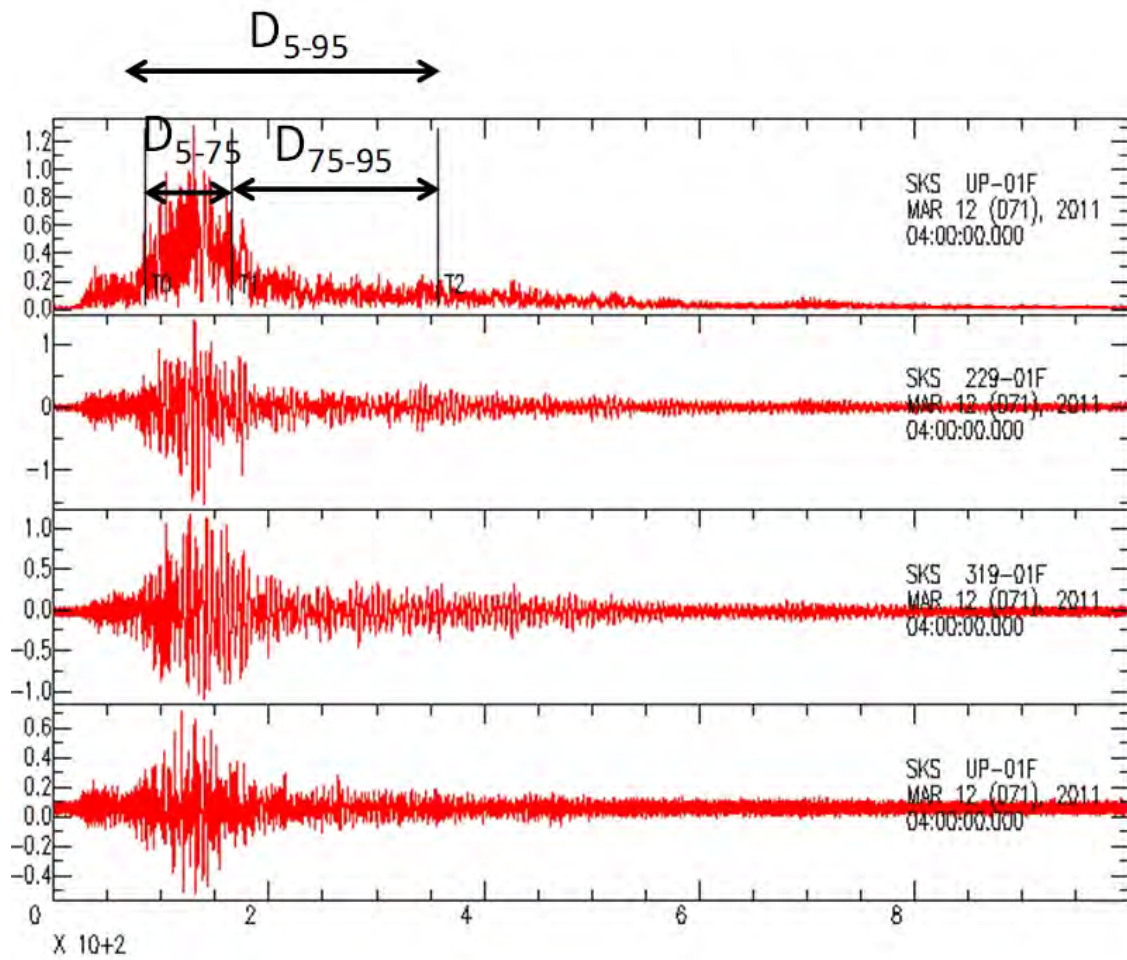


図2 揺れ継続時間の定義

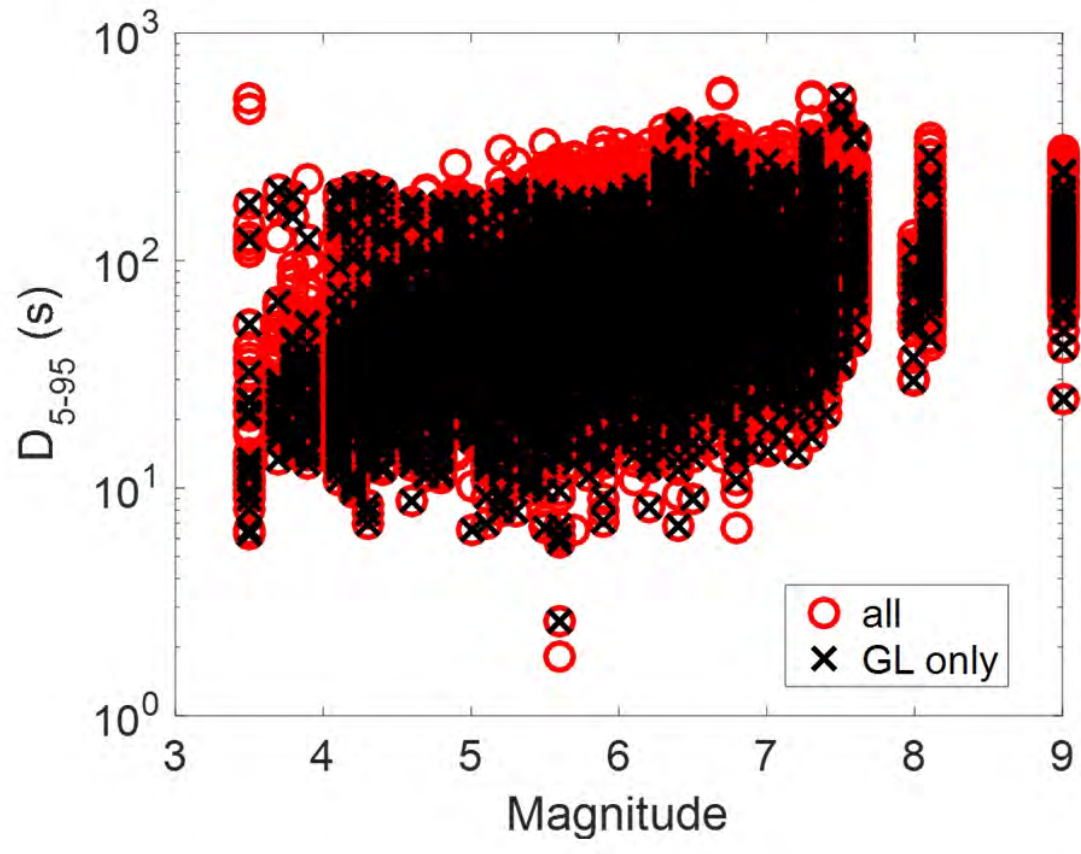


図3 揺れ継続時間とマグニチュードの関係

(1) 実施機関名：

拠点間連携研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

巨大地震のリスク評価の精度向上に関する新パラダイムの構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

【提案の背景】標準的な地震リスク評価手法では、震源・波動伝搬・地盤増幅・建物応答・直接的被害・社会的影響に関する研究分野からの知見を統合して、リスクが評価される。リスク計算の視点から見れば、各研究分野に対応するそれぞれのモジュールから、知見の数学的表現であるところのモデルを選び、それらのモデルを組み合わせることで1本のリスクカーブが得られる。一方、現実には各研究分野で様々な知見があることに対応して同じモジュールの中に複数のモデルが併存するので、原理的には、複数の組み合わせによるリスクカーブ群が得られることになる。すなわち、地震リスク評価には、モデルの相違によるばらつきが伴っている。

【現状の問題点】地震リスク評価のモデル選択に伴うばらつきを評価し、その妥当性やばらつきを低減させる可能性について、分野を横断して公に議論することはほとんど行われていない。また、リスク評価結果の利用者であるステークホルダの意見を取り込むこともほとんどされていない。

【本研究での課題】これまでに、上記の問題点解消するために系統的な地震リスク評価を可能にするプラットフォームを構築し、昨年度までに新しいモデルの組み入れに加え、面的な地震リスク評価の可視化について検討し、さらに、時系列的なリスク評価手法の適用方法やリスク評価に基づく社会的影響に着いての検討を行った。本研究では、面的な地震リスク評価のばらつきの評価方法について検討を行う一方で、防災対策立案者・意思決定者の判断に資する情報の創出および提供方法について検討する。

【期待される成果】各研究分野に存在する多くのモデルをプラットフォームに組み込み、系統的に地震リスクを評価することで、地震リスク評価の不確実性に寄与している研究分野を明らかにすることができる。また、本総括研究の目標である、現時点でのリスク評価に関する不確実性を評価して公に共有することを実現できる。

(7) 平成 30 年度の成果の概要 :

【震源過程・強震動予測】南海トラフ巨大地震の震源像構築について、一様な断層の滑りモデルから震源モデルの高度化を図るにあたり、強震動生成域を考慮した場合の強震動予測に関する問題点を整理した。

【深部地盤・伝播経路】過去に南海トラフに沿った海域で行われてきた人工震源構造調査、および自然地震観測の結果について、陸域の地震観測データと合わせて南海トラフ全域にわたる海陸統合した地震波速度構造の再解析が進められている。紀伊半島沖では新たに人工震源構造調査も進められ、また、自然地震観測が計画されている。これらの結果について検討を行い、さらなる構造解明のための観測計画について策定を行なった。

【浅部地盤構造】公開地盤情報および過去の地震記録を用いて、地盤の強非線形性を厳密に考慮した逐次非線形地盤応答解析(非液状化解析および液状化解析)を多数実施した。その結果に基づき表層地盤の加速度増幅率を算出したところ、入力地震動のレベルに応じた増幅率の変化に加え、液状化解析の場合には液状化指数(PL 値)や液状化危険度指数(LRI)といった液状化指標に増幅率が大きく影響されることがわかった。

【構造物被害予測】1900 年以前に建てられた古民家の引き倒し実験およびその解析を行い、その静的非線形挙動を把握した。古民家の地震被害予測モデルを構築し、その妥当性について検討を加えた。

【リスク評価】特定の市区町村を対象に南海トラフ地震による影響を受けるエクスポージャ(戸建住宅)の情報を整備した。また、過去のエクスポージャの経時変化をもとに将来のエクスポージャを予測したうえで築年数に応じた地震脆弱性関数を適用し、将来の地震リスクの経時変化を評価した。また、西日本広域の震源データをアップデートし、確率的地震ハザード解析の計算環境を整備した。

【プラットフォーム構築】地震リスク評価のばらつきの要因について分析を行うとともに、評価に用いるモデルの違いによるばらつきの違いの公正な比較のための検討を行った。また、地震時の総合的な影響評価にむけて、病院建物の被害の程度による、医療行為に対する影響評価について地理空間情報を用いて評価した。

【災害リスク情報】災害リスク評価のばらつきを理解するため、様々な震源モデル(6パターン)、強振動予測モデル(5パターン)、表層地盤増幅率(3パターン)、倒壊率を組み合わせ、評価結果のばらつきを容易に理解することが可能な表示システム(図)の構築を行った。またばらつきのある災害リスク評価結果を防災計画の策定に活用するという観点から、命を守る、財産を守る、業務・生活・地域を守るという3つのレベルの達成目標に応じたハザードシナリオ選択の考え方についての整理を行った。

(8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

一井康二・植村一瑛・生頼直樹・兵頭順一, 2019, 地震応答解析における技術者の違いによるパラメータのばらつきの影響, 平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D29.

木内亮太・宮澤理稔・瀧藤一起, 2019, 沈み込み帯巨大地震の強震動生成域からの地震動と既存予測式の比較, 平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D31.

河野祐哉・西嶋一欽, 2019, 過去の統計データに基づく高知県南国市における木造戸建住宅の棟数および築年数分布の将来予測, 平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, B29.

河野祐哉・西嶋一欽, 2018, 高知県南国市を例とした建物ストックの時系列変化の分析, 日本建築学会 2018 年大会学術講演梗概集, F, pp.93-94.

増田俊介・佐伯琢磨・松島信一・西嶋一欽・河野祐哉, 2019, 南海トラフ地震による高知県南国市における主要な病院の建物被害予測に基づく影響評価, 平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, P03.

増田俊介・佐伯琢磨・松島信一・西嶋一欽・河野祐哉, 2018, 南海トラフ地震による高知県南国市における地震危険度解析に基づく病院被害による影響人数推定, 第 37 回日本自然災害学会学術講演会, ?-4-6.

増田竣介・松島信一，2018，南海トラフ地震による高知県南国市における病院被害による影響人数予測に関する研究，平成30年度(2018年度)日本建築学会近畿支部研究発表会，2040。
佐伯琢磨・西嶋一欽・松島信一，2019，地震リスク評価における不確実性の分布について，平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会，D28。
佐伯琢磨・西嶋一欽・松島信一，2018，不確実性を考慮した地震リスク評価に関する研究 その1 南海トラフ地震を想定した感度分析，日本建築学会2018年大会学術講演梗概集，B2，pp.559-560。
田中宣多・Adapa GAUTHAM・澤田凱人・上田恭平，2019，液状化現象を含む地盤の非線形性を考慮した表層地盤増幅率の評価，平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会，D30。

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

森田裕一(代表者) 東京大学地震研究所 教授
川瀬 博(代表者) 京都大学防災研究所 教授
宮澤理稔 京都大学防災研究所 准教授
飯高 隆 東京大学地震研究所 准教授
望月公廣 東京大学地震研究所 准教授
松島信一 京都大学防災研究所 教授
上田恭平 京都大学防災研究所 助教
西嶋一欽 京都大学防災研究所 准教授
牧 紀男 京都大学防災研究所 教授
加藤尚之(東京大学地震研究所)
関口春子(京都大学防災研究所)
西村卓也(京都大学防災研究所)
畑山満則(京都大学防災研究所)
倉田真宏(京都大学防災研究所)
佐伯琢磨(京都大学防災研究所)
市村 強(東京大学地震研究所)
糸井達哉(東京大学工学研究科)
森信人(京都大学防災研究所)
西野智研(京都大学防災研究所)
西上 欽也(京都大学防災研究所)
澁谷 拓郎(京都大学防災研究所)
浅野 公之(京都大学防災研究所)
古村 孝志(東京大学地震研究所)
前田 拓人(東京大学地震研究所)
悪原 岳(東京大学地震研究所：レシーバー関数解析)
他機関との共同研究の有無：有
北野利一(名古屋工業大学社会工学専攻)
指田朝久(東京海上日動リスクコンサルティング)
中嶋唯貴(北海道大学大学院工学研究科)
秋山充良(早稲田大学創造理工学部社会環境工学科) 教授
境 有紀(筑波大学大学院システム情報工学研究科) 教授
岡田成幸(北海道大学大学院工学研究院建築都市空間デザイン部門) 教授
中嶋唯貴(北海道大学大学院工学研究院建築都市空間デザイン部門) 助教
中村友紀子(千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻) 准教授
山崎文雄(千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻) 教授
宮腰淳一(清水建設技術研究所原子力技術センター) 主任研究員

神野 達夫 (九州大学)

仲西 理子 (海洋研究開発機構：人工震源構造調査)

山本 揚二郎 (海洋研究開発機構：自然地震観測によるトモグラフィー)

高橋 努 (海洋研究開発機構：減衰構造)

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：京都大学・防災研究所

電話：0774-38-4080

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

URL：

(11) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名：森田裕一

所属：東京大学地震研究所

(1) 実施機関名：

拠点間連携研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

巨大地震時における地盤増幅率の予測手法の高精度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害事例の研究
- (2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明
- (3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
- (4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
- (5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

特定分科研究(その5)では、巨大地震時における土木・建築構造物等の社会インフラ施設の被害リスク評価に供するため、地盤物性の強非線形性やばらつきを考慮することにより、巨大地震に対しても適用可能な浅部地盤増幅率の高精度な評価手法の開発を目指す。

2年計画のうち最終年度は、地盤物性のばらつきを考慮に入れた上で、近年発展の著しい地盤の非線形構成モデルを用いて地盤の強非線形領域までを含めた地震応答解析を実施することにより、巨大地震に対しても適用可能な浅部地盤増幅率の評価手法について検討を行う。本年度の具体的な計画は以下のとおりである。

(1) 技術者の特性に依存した解析パラメータのばらつきが地震応答特性の評価精度に及ぼす影響の検討
構造物の地震時応答を求めるために高度な構成則を用いた地震応答解析が用いられている。しかし、このような解析結果の妥当性は、解析モデルの観点だけではなく、解析パラメータの設定方法の観点からも議論されなければならない。とくに、耐震設計実務への適用を考えた場合、実務者の経験等の違いによる解析パラメータの違いにも着目する必要がある。例えば三上ら(2009)による研究報告があるが、検討事例は多くはない。

本研究では、国際共同研究 LEAP(Liquefaction Experiment and Analysis Project)の機会を利用して、共通する解析対象に対して複数の技術者により解析パラメータを設定し、解析パラメータの設定のばらつきや、そのばらつきが解析結果に及ぼす影響について検討した。

(2) 表層地盤構造のモデル化手法の統合解析による地盤増幅特性評価の高度化

微動アレイ探査や表面波探査におけるレイリー波位相速度の逆解析では、P波速度(V_p)は、レイリー波位相速度に対する感度が相対的に大きくないため、S波速度(V_s)との関係式により仮定することが多い。しかし、ごく表層の V_p は含水率によって大きく変化するため、レイリー波位相速度への影響が無視できない場合がある。そこで、電気探査を用いて見かけ比抵抗値を測定し、レイリー波位相速度との同時逆解析によって、 V_s および比抵抗モデルの推定を試みる。

(3) 地盤の非線形性を考慮した表層地盤増幅率の評価法に関する検討

これまでに提案されている地盤増幅率の評価法は、観測記録に基づくものと数値解析的手法に基づくものに大別でき、いずれにおいても表層地盤の非線形の影響を考慮に入れる試みがなされている。しかし、そこで考慮されているひずみレベルはそれほど大きくなく、地盤内の過剰間隙水圧の上昇を伴うような強非線形性の領域まで含めた地盤増幅率の検討はほとんどみられない。

本研究では、地盤の強非線形性を厳密に考慮できる構成モデルを用いた逐次非線形解析を多数実施することで、巨大地震に対しても運用可能な浅部地盤増幅率の評価法を提案することを目標とする。本年度は、公開されている地盤情報および過去の観測地震動を用いて、過剰間隙水圧の上昇を考慮しない逐次非線形解析および液状化解析（過剰間隙水圧の上昇を考慮した逐次非線形解析）を実施することで、地盤増幅率に及ぼす解析手法の影響についての検討および液状化層を有する地盤の増幅率の評価手法についての検討を行う。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

(1) 技術者の特性に依存した解析パラメータのばらつきが地震応答特性の評価精度に及ぼす影響の検討

LEAP での遠心実験で用いられている Ottawa (F65) 砂を解析対象とした。LEAP の土質条件の詳細は、<https://doi.org/10.17603/DS2210X> を参照されたい。解析プログラムには、FLIP ROSE を用いて、カクテルグラスモデル (Iai et al., 2011) により解析することにした。なお、三上らによる先駆的な検討でも FLIP を用いているが、マルチスプリングモデル (Iai et al., 1992) を用いて非排水条件での解析を行っており、本研究の方が最新の高度な解析コードを用いていることになる。

図 1 (a) に内部摩擦角と変相角の算定例を示す。これは、土質試験における有効応力経路から算定でき、技術者による違いがあっても、それほど大きな違いにはならないと思われる。一方で、解析モデル固有のパラメータは、土質試験結果から直接的に算定することが難しい。例えば、カクテルグラスモデルでは正負のダイレイタンスのそれぞれに応じて複数のパラメータがあるが、一般の試験結果は正負のダイレイタンスの影響が同時に生じた状態として得られるため、個々のパラメータをユニークに算定することは難しい。このため、液状化試験などの試験結果を再現するように、試行錯誤的にパラメータが設定される。図 1 (b) に複数の技術者によるパラメータの設定結果を示す。ただし、設定されたパラメータを用いて液状化試験を再現計算した液状化強度曲線である。4 グループで計 9 通りの解析パラメータセットを得たが、どのパラメータセットにおいても液状化強度曲線をよく再現できていることがわかる。

LEAP での遠心実験は傾斜地盤を対象としている。対象断面と変形解析結果の例を図 2 (a) に示す。解析結果の比較例として、断面中央部の沈下量の比較を図 2 (b) に示す。パラメトリックスタディでは、密度が緩いほど沈下量が大きくなっており、感覚的に納得しやすい結果である。一方で、Medium の条件に対して設定した 7 ケースでは解析結果が大きくばらついており、解析が不安定となったケースもあった。FLIP では、地盤条件パラメータの設定後に、そのパラメータを用いて解析を安定させるためのレーレー減衰パラメータが設定される。しかし、本検討では機械的に地盤条件パラメータのみを入れ替えた。このことが解析の不安定性を引き起こした可能性がある。

本研究では、解析パラメータの設定のばらつきや、そのばらつきが解析結果に及ぼす影響について検討した。その結果、地盤だけでなく、解析全体のパラメータの設定方法を含めた議論が必要であり、機械的に地盤物性のパラメータを変更した場合は、同じ土質試験結果を対象に設定したパラメータであっても、技術者の違いにより大きな解析結果の違いが生じる場合があることが確認された。

(2) 表層地盤構造のモデル化手法の統合解析による地盤増幅特性評価の高度化

KiK-net 益城観測点が設置されている益城町辻の城公園において、レイリー波位相速度を推定するために、微動アレイ探査と表面波探査を実施した。また、見かけ比抵抗値を測定する電気探査を実施した。微動アレイ探査では最大 12m と 4m のアレイを組み、10 20 分間の微動を測定した。表面波探査は 2m 間隔で 24 個のセンサーを配置し、両端と中央でハンマーによる上下加振を行った。電気探査では電極間隔が 1m から 25m までの間で抵抗と電圧を測定した。16m 以降では電位電極間隔を 1m と

し、それまでは0.4mで測定した。また112mまでは2mAの電流を流し、16m以降では10mAの電流を流した。図3(a)に、微動アレイ探査によるレイリー波位相速度と、表面波探査による位相速度の推定値を示している。微動アレイ探査では20Hzまでの位相速度を推定できるが、20Hz以上の位相速度は、表面波探査によるものが適切と考えてレイリー波位相速度を抽出した。

推定されたレイリー波位相速度と、測定された見かけ比抵抗値との同時逆解析により、 V_s および比抵抗モデルの推定を行う。同時逆解析では、平行成層での見かけ比抵抗の理論値と観測値との対数の差を観測値で除したものの二乗和と、レイリー波位相速度の理論値と観測値と差を観測値で除したものの残差二乗和の和を最小化することを目的として、ハイブリッドヒューリスティック探索法(山中, 2007)を用いた。見かけ比抵抗の理論値は、水平成層でのシュランベルジャー配列を仮定し、Keoford, 1997のリニアフィルタ法を用いて計算した。レイリー波位相速度の理論値の計算においては、地表付近には不飽和帯が存在している可能性があることから、飽和帯と不飽和帯で異なる V_p - V_s 関係式(Shofy, 2017)を用いた。逆解析において、比抵抗と V_s の境界面は一致するとした。未知数は各層の比抵抗、S波速度、および層厚とした。KiK-net 益城観測点のボーリングによれば、表層9mは火山灰質粘性土、その下層に6mの砂の層が存在する。さらに下層では軽石凝灰岩が18mの層を成している。砂の層から軽石凝灰岩の層の境界で実体波速度が大きく変化しており、 V_s は500m/sとなっていることから、この層を工学的基盤と考えるのが妥当であるとして、逆解析における探索範囲を設定した。

同時逆解析により推定された V_s 、比抵抗構造モデルを図4に示し、それによる理論値を図3(b)(c)に示している。理論値と観測値との整合性は、位相速度、見かけ比抵抗値ともに良い。1,2層目の V_s は、KiK-net 益城観測点(KMMH16)のPS検層結果よりも小さくなっており、微動アレイ探査(Chimoto et al. 2016)による結果と同じである。2層目の深さがPS検層よりも少し浅くなっている。これは、図3(b)のレイリー波位相速度にみられるとおり、低周波数帯域の位相速度の一致度が低くなっていることから改善の余地がある。1層目から2層目にかけて V_s に大きな変化は見られないものの、2層目の比抵抗が1層目の1/3程度になっていることから、この境界が地下水面であると考えられる。なお、 V_s との関係式によって求められる V_p についても図4(a)に示しているが、PS検層結果と異なる。これは、観測時期による変化も想定されることから、異なる時期に観測した結果も検討する必要があると考えている。また、他の V_p - V_s 関係式による検討も必要であると考えている。重原ほか(2018)では、微動アレイ探査と電気探査の同時逆解析について報告している。本研究では、微動アレイ探査結果に加えて表面波探査による高周波数帯域の位相速度も逆解析に用いた。その結果、第1層目の V_s が重原ほか(2018)に比べて小さく推定される結果となった。

(3) 地盤の非線形性を考慮した表層地盤増幅率の評価法に関する検討

液状化を伴うほどの強非線形性が地盤増幅率に及ぼす影響を把握するため、2次元の有効応力解析プログラムFLIPを用いて時間領域での逐次非線形解析を実施した。水平成層地盤を仮定して1次元の土柱モデルで地盤をモデル化し、地盤の構成モデルには液状化といった強非線形現象を厳密に考慮できるひずみ空間多重せん断モデル(マルチスプリングモデル)を用いた。対象地盤は、高知市2地盤(高知、大津)、南国市7地盤(国分、前浜、浜改田、物部、岡豊町中島、大そね、大そね乙)の計9地盤とした。非液状化解析は9地盤、液状化解析は物部・大そね乙を除く7地盤を対象に解析を行った。地盤情報は、こうち地盤情報公開サイトおよびK-netから取得した。地盤のモデルパラメータは、N値、有効上載圧、および細粒分含有率(試験値はないため土質区分から推定)に基づき簡易的に設定した。なお、簡易設定法によりダイレイタンスに関するパラメータも設定されるが、過剰間隙水圧の上昇を考慮しない逐次非線形解析(非液状化解析)ではこれらのパラメータは無視され、液状化解析においてのみ使用される。土柱モデルの底面に与えた入力地震動は、1993年釧路沖地震、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟中越地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震など全13種類である。それぞれの地震動の最大加速度振幅(PBA)を100、200、400、800 galと変化させることで、地盤増幅率に与える振幅レベルの影響を調べることにした。液状化解析を行った地盤では、4段階に変化させた入力地震動の最大加速度振幅(PBA)のデータをもとに、液状化の程度によって、地盤増幅率の評価を検討した。液状化判定指標には、液状化の程度を表す指標として用いられる液状化指

数 (PL) および有効応力減少比の深さ方向に重みをつけて求める液状化危険度指数 (LRI) を用いた。

増幅率の縦軸は地表面の応答加速度の最大振幅 (PGA) を入力地震動の最大加速度振幅 (PBA) で除した値とし、横軸には地盤条件として地盤の固有周期 (T_g) を入力地震動の周期特性として入力地震動の卓越周期 (T_b) で除した周期比 (T_g/T_b) を用いる。ここに、 T_b はフーリエ変換により得られた周波数特性から読み取った。非液状化解析により得られた地盤増幅率と周期比の関係では、周期比が 0.5 付近で、増幅率は最大値をとる (図 5 (a))。地盤増幅率の変動幅は、入力波が増加すると、小さくなる。液状化解析により得られた地盤増幅率と周期比の関係では、入力波が増加すると、地盤増幅率の変動幅は小さくなる傾向にあった (図 5 (b))。特に、入力地震動が 800 gal のとき、増幅率はおよそ 0.5 となった。

液状化解析時の地盤増幅率を評価するために、液状化判定指標を用いた。液状化指数を用いた場合、地盤増幅率と液状化指数の大小関係には明瞭な対応は見られなかった (図 6 (a))。道路橋示方書に基づき液状化抵抗率の算出には、動的せん断強度比および地震時せん断応力比を用いており、液状化に伴う過剰間隙水圧の上昇を十分に考慮できていないことが影響したと考えられる。有効応力減少比を用いて過剰間隙水圧を直接考慮できる液状化危険度指数を用いた場合、地盤増幅率の変動幅は液状化程度で分類できた (図 6 (b))。液状化解析時の地盤増幅率は、入力地震動に関わらず 0 から 2.5 の幅で変動する。液状化危険度指数が大きくなるとき、地盤増幅率の変動幅は 0 から 1.5 と小さくなる。

- (8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
一井康二, 植村一瑛, 生頼直樹, 兵頭順一: 地震応答解析における技術者の違いによるパラメータのばらつきの影響, 平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演, D29, 2019.
地元孝輔, 山中浩明, 是永将宏, 津野靖士: KiK-net 益城観測点におけるレイリー波位相速度と見かけ比抵抗の同時逆解析, 平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演, P04, 2019.
田中宣多, Gautham Adapa, 澤田凱人, 上田恭平: 液状化現象を含む地盤の非線形性を考慮した表層地盤増幅率の評価, 平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演, D30, 2019.

- (9) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

上田恭平 京都大学防災研究所 助教
森田 裕一 東京大学地震研究所 教授
川瀬 博 京都大学防災研究所 教授
他機関との共同研究の有無: 有
一井 康二 関西大学社会安全学部 教授
地元 孝輔 東京工業大学 環境・社会理工学院 助教
是永将宏 鉄道総合技術研究所 副主任研究員
山中浩明 東京工業大学 教授

- (10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名: 京都大学 防災研究所
電話: 0774-38-4092
e-mail: ueda.kyohei.2v@kyoto-u.ac.jp
URL:

- (11) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名: 上田恭平
所属: 京都大学 防災研究所

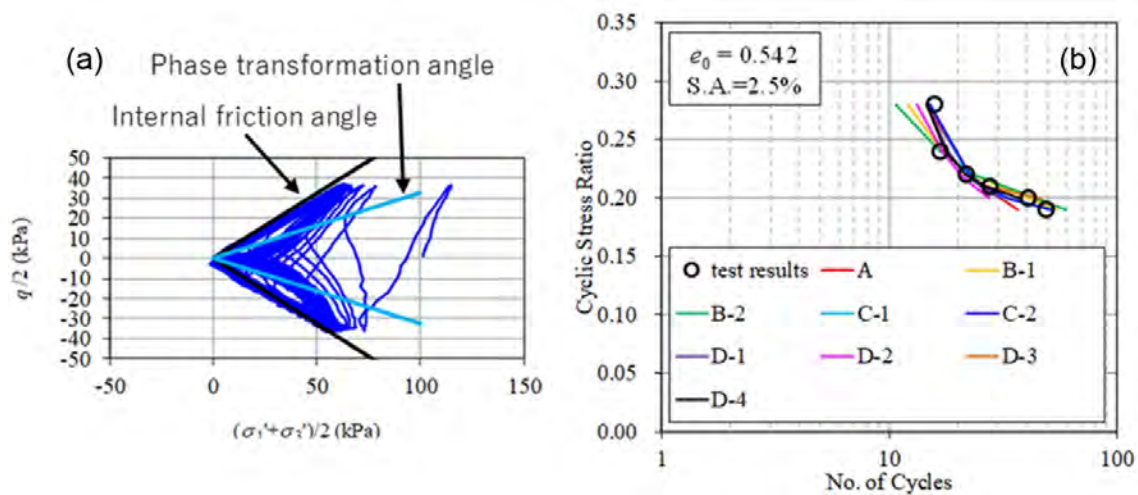


図1 (a) 内部摩擦角と変相角の設定例, (b) 複数の技術者によるパラメータの設定結果 (設定したパラメータによる液状化強度曲線)

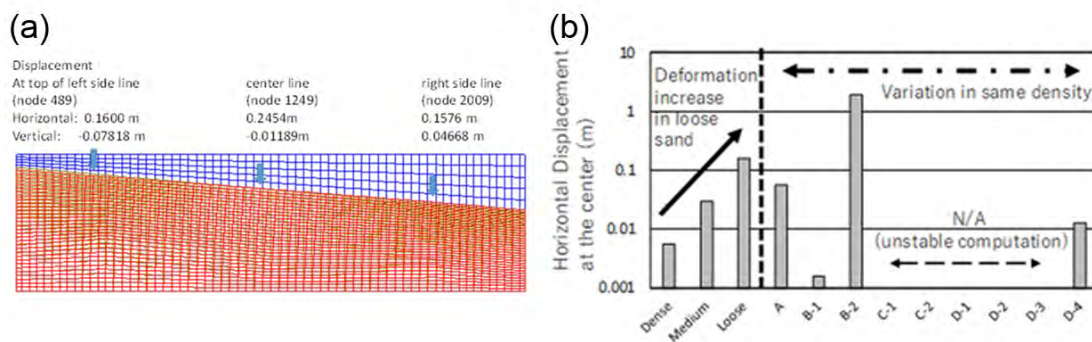


図2 (a) 遠心実験結果の再現計算例, (b) 解析結果の比較例 (中央部の沈下)

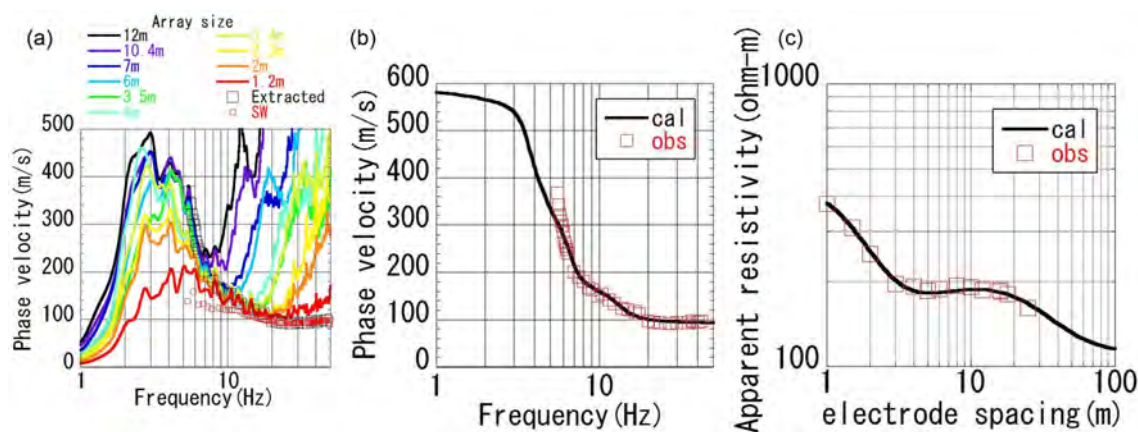


図3 (a) 微動アレイ探査 (アレイサイズ 12-1.2m) と表面波探査 (SW, 赤色) により推定した位相速度 (抽出したレイリー波位相速度を黒色で示す), (b) レイリー波位相速度, (c) 見かけ比抵抗値

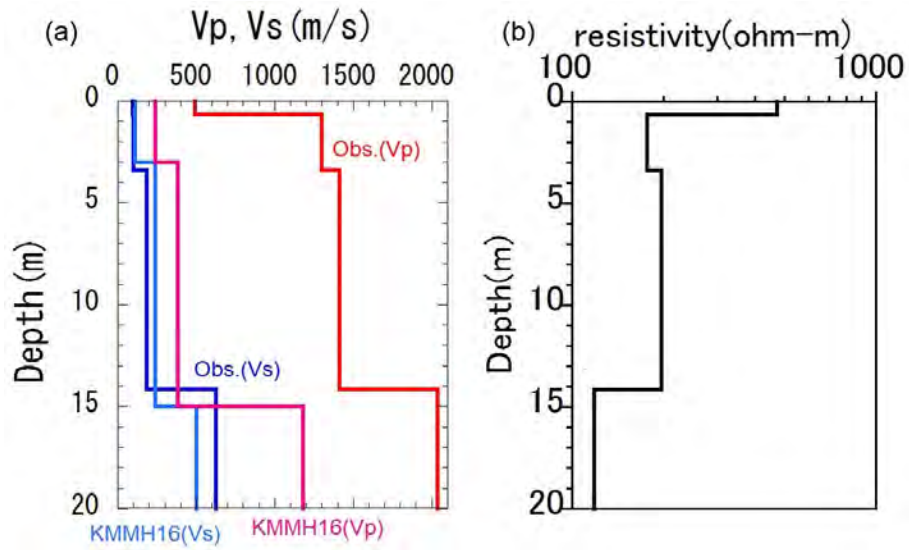


図4 同時逆解析により推定された (a) S波速度, (b) 比抵抗構造モデル

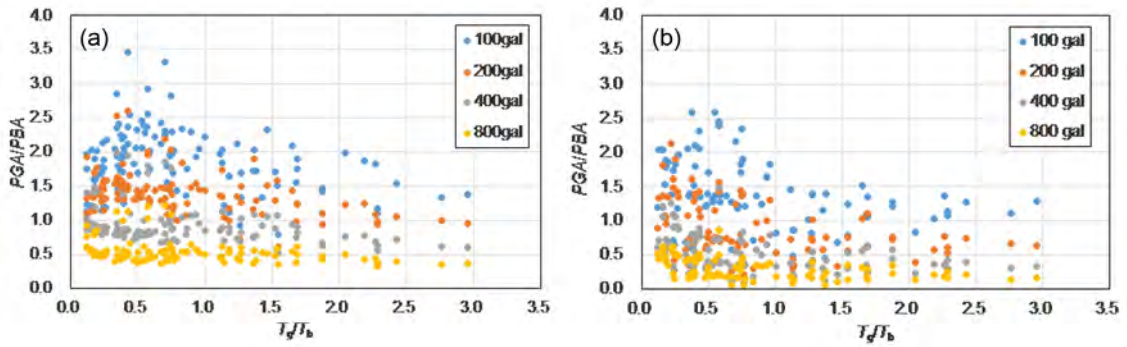


図5 地盤増幅率と周期比の関係：(a) 非液状化解析, (b) 液状化解析

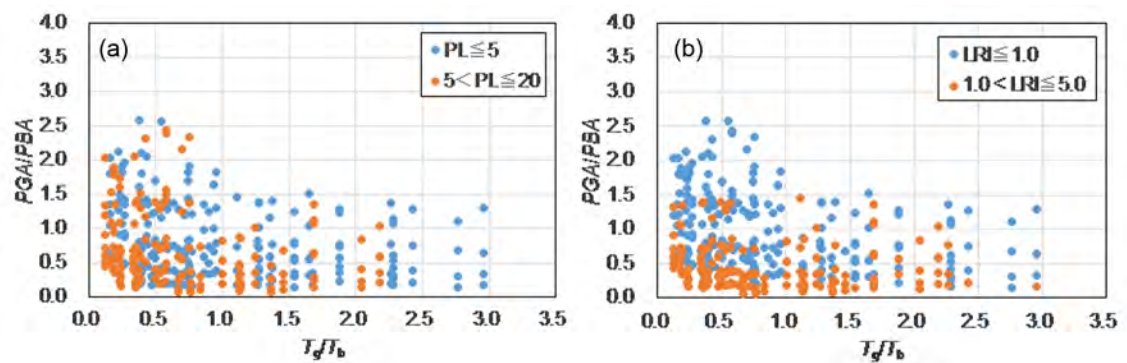


図6 増幅率と周期比の関係：(a) PLで分類した結果, (b) LRIで分類した結果

(1) 実施機関名：

拠点間連携研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

震源モデルに着目した巨大地震に伴う強震動予測の高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

- (1) 地震・火山噴火の災害事例の研究
- (2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明
- (3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
- (4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
- (5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

強震動生成域に着目した巨大地震の強震動評価の高度化を行うために、プレート間で発生する巨大地震の強震動生成域に対して、既存の距離減衰式の適用可能性とその不確実性を、2003 年十勝沖地震と 2011 年東北沖地震等の記録やその解析結果を用いて調査する。今年度は特に強震動生成域の距離とマグニチュードを用いて強震動を予測した場合に、多くのモデルでは観測を過小評価してしまう問題について取り組む。

将来発生する南海トラフ巨大地震後の地震ハザードを評価するために、様々な観測網が充実する日本で発生した超巨大地震である 2011 年東北沖地震(によって各地で誘発された地震活動の特徴を整理し、大地震と中小地震の関係を解明する。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

観測された強震動生成域(SMGA)からのPGA,PGVと距離との関係を、前弧・背弧を考慮した距離減衰式(GMPE)と比較した。ただし観測データがSMGAからの距離を用いているのに対して、比較するGMPEは断層最短距離が距離の関数として定義されている。2003年十勝沖地震では、観測されたPGAおよびPGVがKamae & Kawabe(2004)によって推定されたMw7.5相当のasperity(SMGA)からの地震波に起因するとして比較を行った。観測された地震動はPGA,PGVともにGMPEから予測される地震動よりも大きな値で、とりわけ近距離側でその差が大きかった。また本震のマグニチュードM8.3を用いて比較した場合、観測された地震動との誤差は小さくなったが同様の特徴が見られた。一方2011年東北地方太平洋沖地震については、Kurahashi & Irikura(2013)によって5つのSMGAが推定されているが、そのうち対応するPGAとPGVが観測波形から明瞭に判別できる2つのSMGA(SMGA1:M7.55,SMGA3:M7.81)を比較するデータとして使用した。PGAは2003年十勝沖地震のケー

スと同様に、本震のマグニチュード M9.1 を用いても GMPE から予測された値が特に近距離側で過小評価となった (Fig.1)。また距離減衰に関しては、観測された地震動が前孤側と背孤側で異なる傾きを持っているが、背孤側では特に GMPE で予測されるよりも強く減衰することが分かった (Fig.1)。PGV については、それぞれの SMGA のマグニチュード (M7.55, 7.81) を用いた場合に過小評価となることが分かった。(木内他, 2019)

2011 年東北地方太平洋沖地震によって各地で誘発された地震活動については、東北沖地震の発生前に震源域あるいはその周辺域において様々な地震活動変化があったことが明らかにされてきた。また地震発生から 8 年近くが経過し、地震発生直後には追い付かなかった膨大な数の地震に対する震源決定が進み、各地の地震活動変化に関する詳細な調査研究からその要因に関する考察がなされている。そこで東北沖地震の発生後に生じた地震活動変化について既往研究を交えながら概観し、それらの地震活動変化を引き起こした要因について整理した。(Ishibe et al., 2018)

(8) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Ishibe, T., M. Miyazawa, Y. Ogata, H. Tsuruoka, and K. Satake, 2018, Seismicity Rate Change in Japan Following the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *AOGS 15th Annual Meeting*, Hawaii Convention Centre, 3-8 June 2018, Honolulu, USA.

木内亮太, 宮澤理稔, 瀧藤一起, 2019, 沈み込み帯巨大地震の強震動生成域からの地震動と既存予測式の比較, D31, 平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演会.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

宮澤 理稔 京都大学 防災研究所 准教授

森田 裕一 東京大学地震研究所 教授

川瀬 博 京都大学防災研究所 教授

瀧藤 一起 東京大学地震研究所

James Mori 京都大学防災研究所

木内 亮太 京都大学大学院理学研究科

西村 卓也 京都大学防災研究所

坂上 啓 京都大学大学院理学研究科

伊東 優治 京都大学大学院理学研究科

他機関との共同研究の有無 : 有

石辺岳男 公益財団法人地震予知総合研究振興会

松浦律子 公益財団法人地震予知総合研究振興会

古村美津子 公益財団法人地震予知総合研究振興会

岩佐幸治 公益財団法人地震予知総合研究振興会

関根真弓 公益財団法人地震予知総合研究振興会

田力正好 公益財団法人地震予知総合研究振興会

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 :

電話 :

e-mail :

URL :

(11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名 : 宮澤 理稔

所属 : 京都大学・防災研究所

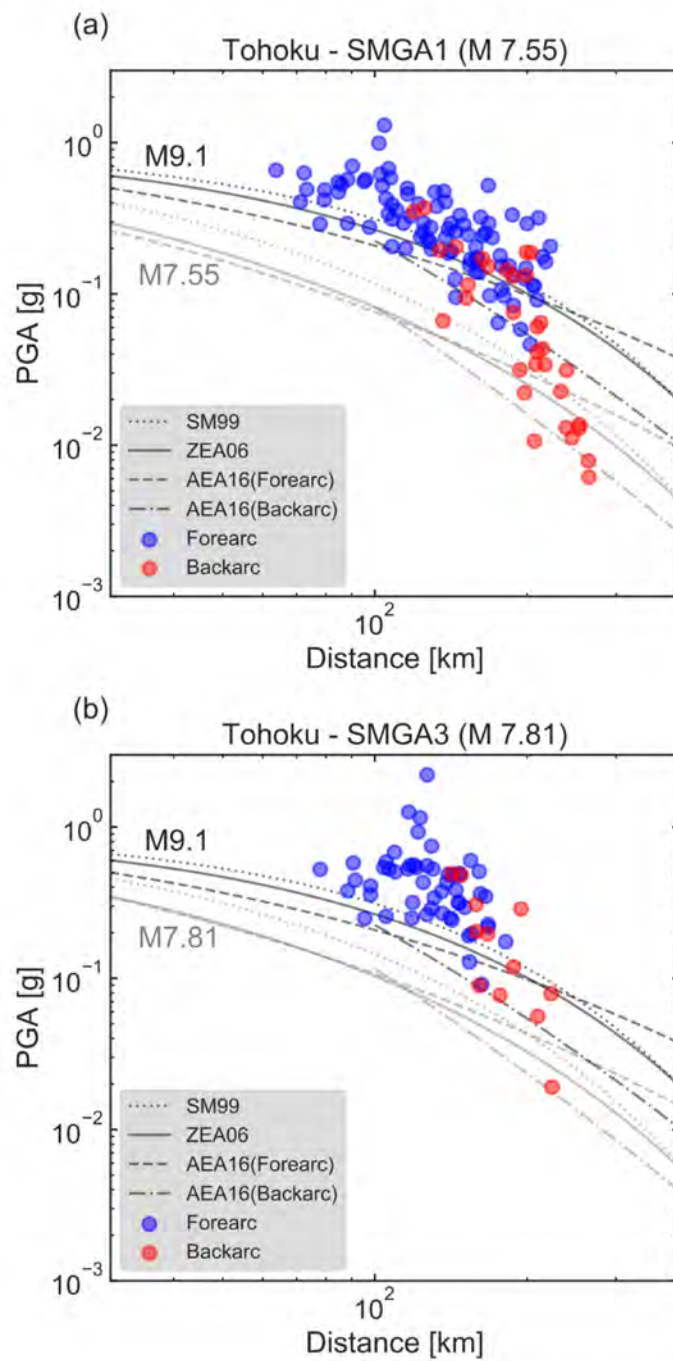


Fig.1 距離減衰

2011年東北沖地震の (a)SMGA1 および (b)SMGA3 からの PGA の距離減衰を GMPEs と比較している。

(1) 実施機関名：

拠点間連携研究

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震時の斜面災害軽減を目的とした地震波動伝播シミュレーションの利活用

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 平成 30 年度の計画の概要：

実際の詳細な微地形のデータ、地質情報に基づいた地形の短波長揺らぎを考慮したシミュレーションコードの改良をおこない、斜面崩壊による地震動の特徴の再現を試みる。また、申請者がこれまでの研究で明らかにした地形に対応した地震動の特徴を明らかにする。特に今年度は自然地震における地震波解析の専門家をメンバーに迎え入れることにより、斜面崩壊による地震動記録解析手法の確立を目指す。

またこれまでの斜面崩壊による地震動の再現の検討において、シミュレーションでは 1 Hz 前後の表面波が極めてよく卓越するが、観測記録には全くそのような信号が現れないという興味深い差異が確認された。様々な要因を検討した結果、この違いは、計算モデルにおいて地形の短波長揺らぎに由来する可能性がある。そこで、現実の高解像度地形ならびに同じような統計的特徴を持つ仮想地形の数値シミュレーションの比較検討から、その原因を詳細に明らかにする。

(7) 平成 30 年度の成果の概要：

上記の計画に照らし合わせ、以下の 3 点について主に得た。

1. 2017 年長野県飯山市における斜面崩壊による地震動についてのさらなる検討：

2017 年 5 月 19 日に発生した長野県飯山市における斜面崩壊に伴って周囲 50 km 程度の Hi-net 観測点において地震波が観測された。地震波は、継続時間 100-200 秒で約 3 km/s の伝播速度を持つ波群に加え、約 6 km/s の伝播速度で上下動成分のみに卓越し立ち上がり明瞭な波群から構成された。伝播速度約 3 km/s の波群に対し、振幅を用いた震源決定法 (Kumagai et al., 2010) によって波源を推定したところ、崩壊源から地震波が放射されたとして矛盾のない結果が得られた。一方、約 6 km/s で伝播する波の初動到達時刻を読み取り、JMA2001 (上野ほか、2002) の P 波速度構造を仮定して震源決定をおこなったところ、崩壊源周辺に震源が決まった。このことから、崩壊源周辺においては、継続時間が長く徐々に震動が大きくなる力源と比較的短い時間の間に大きな震動を作り出す力源の 2 種類が存在することが分かった。斜面崩壊による地震動において、短周期地震波の初動の読み取りが可能な地震波形記録は稀であり、移動土塊の対岸への衝突など何らかの斜面現象を反映している可能性がある点でも特筆すべき点である。

2. これまでの斜面崩壊による地震動についての整理：

表に地震動が検知された斜面崩壊の特徴と地震動の特徴を示す(2015/2016年厚岸町の事例を除く)。高周波地震波の卓越周波数はおおむね1-10 Hz程度に分布し崩壊のタイプには大きく依存しないことがわかった。継続時間もおおむね30-200秒程度であり、イベントの長さを反映しているものと考えられる。周期10秒以上の長周期信号は、崩壊域が数百m四方にわたり厚さが20mを超えるような大規模な地すべり性崩壊で確認されることが推察された。

3. 地表震源の場合の地形が地震動シミュレーションに及ぼす影響についての検討：

斜面崩壊による地震動の再現の検討において、シミュレーションでは1 Hz前後の表面波が極めてよく卓越する理由について検討するため、地形にさまざまなローパスフィルターを施すことで、1 Hz前後の表面波がどの程度卓越するかを調べた。その結果、ある波長よりも短い成分をカットした地形においては1 Hz前後の表面波が生成されないことが結果となった。このことから、地形の短波長不均質による散乱がこのような表面波を作り出し、この効果は地表震源の場合に特に強調されることが分かった。

- (8) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
土井一生・前田拓人・釜井俊孝・王功輝(2018): 斜面崩壊によって励起された地震動波形の特徴 - 2017年の事例 - 、日本地球惑星科学連合2018年大会、HDS07-05.
Doi, I. (2018): Development of a New academic field "Slope seismology", International Seminar on Geoscience and Disaster Mitigation in Japan and South Korea.

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

土井 一生 京都大学防災研究所 助教
前田 拓人 東京大学地震研究所 助教
他機関との共同研究の有無：無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：京都大学防災研究所
電話：0774-38-4113
e-mail：doi.issei.5e@kyoto-u.ac.jp
URL：

(11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：土井 一生
所属：京都大学防災研究所

年・場所	2011年 紀伊半島	2013年 京都市	2013年 伊豆大島	2014年 南木曾町	2015・2016年 厚岸町	2017年 飯山市	2017年 日田市
崩壊のタイプ	深層崩壊	表層崩壊・土石流	表層崩壊・土砂流	土石流	再活動型地すべり	地すべり性崩壊・土石流	地すべり性崩壊
地質	付加体堆積岩	粘性土・盛土	テフラ	花崗岩	粘性土	凝灰岩	安山岩溶岩・凝灰角礫岩
長さ・流走距離	1 km	30 m (崩壊) 100 m (土石流)	50-500 m (崩壊) 2 km (土石流)	2 km	70 m	300 m 800 m (土石流)	200 m
幅	400 m	20 m	50-300 m	50-100 m	30 m	150-200 m	150-200 m
厚さ	60-100 m	1 m	1 m	N/A	5 m	20-50 m	10-20 m
卓越周波数 (震央距離)	1-4 Hz (10-70 km)	3-10 Hz (50 m)	2-6 Hz (500 m - 5 km)	3-30 Hz (500 m- 30 km)	震動なし (5 m)	0.5-2 Hz (8-60 km)	1-4 Hz (8-20 km)
継続時間	50-100 s	50-100 s	30-200 s	20 min	移動時間は 20 h	200 s	30-50 s
長周期(> 10 s) 信号の有無	○	×	×	?	×	○	×
引用文献	Yamada et al. (2012)	土井ほか(2017)	Ogino, Yonogida (2015) Doi et al. (2016)	本研究	土井ほか(2017)	本研究 Yamada et al. (2017)	本研究

表： 崩壊とそれに伴う地震動の特徴

(1) 実施機関名：

防災科学技術研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

巨大地震による潜在的ハザードの把握に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

本課題は、防災科学技術研究所の中期目標達成のために支出されている運営費交付金によって行われている。そのため、ここでは第 4 期中長期計画期間が終了する平成 34 年度末までの到達目標を記述する。

今後発生が懸念される首都直下地震をはじめとする内陸部を震源とする地震、南海トラフや日本海溝等における海溝型巨大地震およびそれにともなう津波による被害の軽減に向けた研究開発に取り組む。具体的には、室内実験および大規模シミュレーション等の成果に基づき、地震発生長期評価の高度化に資する地震発生モデルを構築する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本課題は、防災科学技術研究所の中期目標達成のために支出されている運営費交付金によって行われている。そのため、ここでは第 4 期中長期計画期間前半の平成 31 年度末までの計画概要を記述する。

室内実験によって明らかにした破壊法則や観測から得られた地震発生場等の知見を大規模シミュレーションに組み込み、南海トラフにおける海溝型巨大地震、及び内陸大地震の発生多様性を検討し、大地震発生シナリオ作成の高度化を実現する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

(平成 30 年度成果)

南海トラフ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、GNSS データからプレート間すべり遅れ速度分布を推定した。この際、現実的なリソスフェア アセノスフェア構造を考慮することで、すべり遅れ速度のピークが従来の研究よりも海溝の近くに存在することを示した。更に、すべり遅れ速度の推定結果から算出したプレート境界への応力蓄積速度を入力値として南海トラフ海溝型地震の断層破壊シミュレーションを実施し、今後発生しうる地震のシナリオを複数作成した。また、推定したプレート境界のすべり遅れ分布と小地震解析による西南日本の背景応力場推定とを統合解析し、プレートの沈み込みが内陸地震発生層に引き起こす剪断歪みエネルギー量を推定した。その結果、剪断歪みエネルギーの増減分布と地震活動分布との間には有意な相関があることを確認した。また、2016 年熊本地震による応力変化と余震活動に相関が見られることを示した。更に、GNSS データを用いて 2016 年熊本地震発生前の応力蓄積速度を推定し、断層の一部で応力蓄積、断層の端で応力解放が生じていたことを示した。

防災科学技術研究所 (以下、防災科研) が所有する大型振動台を利用して岩石摩擦実験をおこなった。インド産変はんれい岩を用いたスティックスリップ実験では、通常の高速度破壊イベントに加え、媒質の弾性波速度を越えて高速伝播するゆっくりすべりが発生していることを明らかにした。また、過去の実験データを解析し、高速な破壊伝播を模擬断層から離れて設置した歪みゲージによって観測する際に大きな誤差が発生しうることを指摘するとともに、数値計算から得られた波形と観測波形とをフィッティングさせて模擬断層の真の破壊パラメタを推定する手法を開発した。スティックスリップが繰り返し発生する模擬断層の断層帯が発達する過程を推定するため、断層面に沿って伝播するレイリー波の群速度変化を推定する手法を開発した。1 mm/s の載荷速度で実施した実験結果に適用したところ、約 1000 回のイベント発生を経ておよそ 1 % の速度低下が検出された。ユトレヒト大学 (オランダ) と共同で大型振動台を利用したガウジ摩擦実験をおこない、速度-状態依存摩擦構成則のパラメタが断層長に依存するかどうかを調査した。インド産砂岩ブロックの模擬断層面上にフローニンゲン砂岩の粉碎ガウジを敷き詰め速度ステップを与えた。推定されたパラメタ (a , b , D_c) は断層長サイズには依存しない傾向が見られた一方で、これらのパラメタがすべり距離にもなって変化する様子が確認された。防災科研が所有する長大岩石摩擦試験機を用い、4 m 長の変はんれい岩試料を用いたスティックスリップ実験をおこなった。高速破壊イベントが発生するはるか前から断層両端がゆっくりとすべり続けており、それらが断層中央部に到達した後、断層中央部で震源核が形成されて高速破壊に至っている様子が観測できた。これは有限要素法による準静的な解析と調和的である。各高速破壊の前には断層上で前震が発生しており、その発生条件が震源位置での累積すべり量ではなく瞬間的なすべり速度であることを明らかにした。

海溝型巨大地震の発生メカニズムやそれともなう被害についての知見を得るため、1906 年エクアドル・コロンビア大地震 (M_w 8.4) の震源モデルを推定した。当時の津波波形データから推定された長波長すべりモデルを基に建物被害から推定された震度分布データを説明可能な短波長すべり分布を推定し、広帯域波長すべりモデルを構築した。

(平成 26-30 年度成果)

2016 年熊本地震に関し、4 月 16 日に発生した $M7.3$ の地震の破壊過程及び短周期地震動生成域を、KNET/KiKnet 強震記録を用いたバックプロジェクション法によって推定した。布田川 - 日奈久断層帯周辺で発生した地震のメカニズム解を用いて、その地域における主応力方向の空間分布およびその時間発展を推定した。また、前震による応力変化を考慮した本震の動的破壊伝播の数値シミュレーションをおこない、本震断層面の摩擦パラメタと広域応力場を明らかにするとともに、前震の本震への影響と地表面の影響とを明らかにした。さらに、断層近傍の地震波形記録から D_c を推定し、その値が過去の地震の解析結果と整合的であることを明らかにした。2012 年 12 月 7 日に東北沖で連続して発生した 2 つの地震イベントの位置関係を、津波記録の詳細解析によって陸上地震波記録解析よりも高精度に推定したうえで、2 つのイベント発生の因果関係を考察した。南海トラフをターゲットとし、拡

充された海域測地データと粘性緩和効果とを取り入れてプレート境界面上の固着分布を推定した。さらに、推定した固着分布を用いて、その固着が内陸部に作り出す剪断歪みエネルギーの分布を計算し、エネルギーの増減と地震の活動度とが空間的に相関していることを確認した。また、推定したプレート間固着分布を応力分布の初期条件として三次元動的破壊伝播シミュレーションをおこない、発震位置と最終的な地震の規模との関係を調査した。四国西部において実施している MT 法連続観測のデータに対し Honkura *et al.* (2013, Nat. commun.) の手法を適用して解析をおこない、地殻比抵抗の時空間変化に起因すると考えられるパラメタの変化を検出した。防災科学技術研究所（以下、防災科研）が過去に掘削・回収したボーリングコアのコア形状を計測し、コア変形法を適用して原位置の水平面最大・最小主応力を推定した。

海山の様な膨らみのあるプレート境界モデルを設定し、Hok and Fukuyama (2011, GJI) の境界積分方程式法を用いた数値シミュレーションを実施した結果、2011 年東北沖地震と同様に海溝付近における大きなすべりが再現されることを確認した。backthrust 断層が破壊される条件についてシミュレーションによる系統的な検討をおこない、分岐点付近の強度不均質によって生成が促進される事を明らかにした。また、backthrust 断層が破壊するとより大きな海底変動を生じることとなり、津波被害を増幅する要因となりうる事を示した。自由表面を考慮した力学的断層破壊理論に基づき、沈み込み帯で発生した主破壊が浅部に向け拡大するにつれて励起される分岐断層が逆断層型から正断層型に遷移することを明らかにした。線形破壊力学に基づく動的シミュレーションを実施し、断層帯周辺に生じる亀裂の生成条件を調査・整理した。この結果を基に実際の野外調査で観察された亀裂分布を解釈することで、過去の地震時の破壊過程を推定できる可能性がある。防災科研が実施した大型岩石摩擦実験の観測データを数値シミュレーションで再現することにより速度-状態依存摩擦構成則のパラメタを推定し、摩擦パラメタが累積変位と載荷速度に依存することを明らかにした。Saito (2013, EPS) の基礎理論を使用した海洋音響波・地震波・津波の連成シミュレーション手法を開発した。また、多様な巨大地震の発生様式とそれによる地震動および津波を予測するため、断層破壊と地震動・津波の連成シミュレーション手法を開発した。さらに巨大地震発生時の海域観測記録を理論的に合成する手法を開発し、2011 年東北地震における仮想 S-net 観測点の海底水圧記録を理論合成した。

防災科研が所有する大型振動台を利用して岩石摩擦実験を実施した。その実験で得られた摩擦特性と高速せん断摩擦試験機で得られた摩擦特性とを比較し、それらがスケールによって異なることを発見した。さらに数値シミュレーションをおこない、そのスケール依存性が空間的応力不均質によって引き起こされていることを確認した。また、スティックスリップイベント発生時の歪みデータを解析し、伝播する破壊先端の非弾性領域の長さ（Cohesive zone length）を推定し、それが破壊伝播速度に依存していることを明らかにした。スティックスリップイベントにともなう断層破壊過程を調査し、載荷速度が大きくなるにつれて震源核の時空間サイズが減少するとともにより不安定で高速な破壊が励起されることを明らかにした。また、断層が粗くなるにつれ前駆のスロースリップが始まる時間及び場所の再現性が低下していき、断層面の粗さが初期及び主破壊過程に大きく影響することを確認した。さらに、比較的幅の広い（0.5 m）断層面下に埋め込んだ歪みゲージデータを解析し、2 次元的な核形成を観察することに成功した。この観察により、破壊が始まる位置がその後の成長過程に大きく影響を及ぼすこと、従来の様な断層端での 1 次元的な測定アレイではその様な 2 次元的な破壊過程が完全には把握できないことが示された。高速な破壊伝播を模擬断層から離れて設置した歪みゲージによって観測する際に大きな誤差が発生しうることを指摘するとともに、数値計算から得られた波形と観測波形とをフィッティングさせて模擬断層の真の破壊パラメタを推定する手法を開発した。ユトレヒト大学（オランダ）と共同で大型振動台を利用したガウジ摩擦実験をおこない、速度-状態依存摩擦構成則のパラメタは断層長サイズには依存しない傾向が見られた一方で、これらのパラメタがすべり距離にともなって変化する様子を確認した。新規に 4 m 長の岩石試料を使用可能な摩擦試験機を構築し、スティックスリップ実験をおこなった。高速破壊イベントが発生するはるか前から断層両端がゆっくりとすべり続けており、それらが断層中央部に到達した後、断層中央部で震源核が形成されて高速破壊に至っている様子が観測できた。各高速破壊の前には断層上で前震が発生しており、その発生条件

が震源位置での累積すべり量ではなく瞬間的なすべり速度であることを明らかにした。

SWIFTによる地震パラメタの解析対象地域に関して、インドネシア・フィリピン・チリ北部地域に加えチリ全域および中南米地域を加えた。さらにSWIFT-TSUNAMIシステムの導入により津波の予測結果を加えるとともに、観測データの自動選択手法を改良して自動CMT解の精度を向上させた。解析結果はWebで公開している。2014年4月1日に発生したチリ北部地震において、短周期加速度波形砲絡線のバックプロジェクション法による短周期地震動の放射特性を調べた(5-10 Hz)。その結果、短周期地震動は、地震発生後の20~40秒に陸側に移動しながら放射された後、30~40秒に陸に近い領域で最も強く放射されていた事が分かった。一方、30~40秒には、沖合において最大すべりが解放されたことが長周期波形インバージョンから推定されている。このような地震動放射特性は2011年東北沖、2010年チリ地震、2007年ペルーの巨大地震の際においても見られている。フィリピン地域で発生した地震のSWIFT-CMT解およびgCMT解を用いて応力テンソルインバージョンをおこなったところ、同地域の主応力軸方向は大局的にはプレート相対運動により説明可能であるものの、フィリピン断層中央部西側(ボホール地域)にプレート相対運動では説明できない領域が存在することと、その応力場の空間不均質がフィリピン断層の左横ずれすべりにより説明可能であることが明らかとなった。ボゴタ盆地(コロンビア)の速度構造モデルを構築するため、微動アレイ観測(183箇所)及び単点微動観測(380箇所)を行い、盆地の3次元速度構造の初期モデルを作成した。その結果、盆地の最も深い地震基盤は深さ3~4kmと推定された。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Noda, A., T. Miyauchi, T. Sato, and M. Matsu'ura, 2018, Modelling and simulation of Holocene marine terrace development in Boso Peninsula, central Japan, *Tectonophysics*, **731-732**, 139-154, doi:10.1016/j.tecto.2018.03.008.

Noda, A., T. Saito, and E. Fukuyama, 2018, Slip-deficit rate distribution along the Nankai trough, southwest Japan, with elastic lithosphere and viscoelastic asthenosphere, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **123**(9), 8125-8142, doi:10.1029/2018JB015515.

Saito, T., A. Noda, K. Yoshida, S. Tanaka, 2018, Shear strain energy change caused by the interplate coupling along the Nankai trough: An integration analysis using stress tensor inversion and slip-deficit inversion, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **123**(7), 5975-5986, doi:10.1029/2018JB015839.

Xu, S., E. Fukuyama, and F. Yamashita, 2019. Robust estimation of rupture properties at propagating front of laboratory earthquakes, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **124**, doi:10.1029/2018JB016797.

Kubota, T., T. Saito, Y. Ito, Y. Kaneko, LM Wallace, S. Suzuki, R. Hino, and S. Henrys, 2018, Using tsunami waves reflected at the coast to improve offshore earthquake source parameters: Application to the 2016 Mw 7.1 Te Araroa earthquake, New Zealand, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **123**(10), 8767-8779, doi:10.1029/2018JB015832.

Sawazaki, K., T. Saito and K. Shiomi, 2018, Shallow temporal changes in S wave velocity and polarization anisotropy associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **123**(11), 9899-9913, doi:10.1029/2018JB016261.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要 :

GNSS-地震データの統合解析による地震発生応力場推定手法の開発をおこなう。コア変形法による原位置地殻応力測定手法を開発する。長大岩石試料摩擦試験機を用いて断層破壊の基本法則構築に向けた実験をおこなう。大型振動台を用いた摩擦実験を実施するとともに、その結果に基づいてスケール依存性を考慮した摩擦構成則を検討する。四国西部で推定された比抵抗構造変化を生み出す定量モデルについて検討する。大地震が連動して発生するシナリオを特殊ケースのシナリオとして作成する。南海トラフ巨大地震の発生シナリオを使って地震発生時の模擬記録を作成する。模擬記録を用いて地震発生時の巨大地震・津波のモニタリング性能を評価する。SWIFT-TSUNAMIシステム等で推定され

た M7 以上の地震の震源メカニズムパラメタや震源関数の情報を用いて断層の摩擦特性を抽出するための研究をおこなう。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

国立研究開発法人防災科学技術研究所地震津波防災研究部門

他機関との共同研究の有無 : 有

立命館大学

名古屋大学

電力中央研究所

インドネシア気象気候地球物理庁

フィリピン地震火山研究所

コロンビア地質調査所

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 防災科学技術研究所 企画部広報課

電話 : 029-851-7611

e-mail : toiawase@bosai.go.jp

URL : <http://www.bosai.go.jp/index.html>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 山下太

所属 : 防災科学技術研究所 地震津波防災研究部門

(1) 実施機関名：

防災科学技術研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

基盤地震観測等データのモニタリングによる地殻活動の理解と予測技術の開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

イ. 海洋プレート内部の地震

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

(2) モニタリングによる地震活動予測

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

4. 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

(6) 本課題の5か年の到達目標 :

基盤的地震・津波観測網により得られる海陸統合のデータに加えて、海外を含む様々な機関のデータや必要に応じてそれらを補完する機動的な調査観測のデータを最大限活用した研究開発を実施することにより、地震及び津波に係る防災・減災に貢献することを目指す。とくに、基盤的地震・津波観測網等より得られるデータのモニタリング研究より、多様な情報からなる地震カタログの作成を進めるとともに、地震発生の長期評価の発展につながる地震発生モデル構築を目指す。

(7) 本課題の5か年計画の概要 :

基盤的地震・津波観測網および必要に応じて行われる機動的な調査観測、国内外の機関より得られるデータから、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、断層モデルの推定等を行い、その活動状況をモニタリングすることで多様な情報からなる地震カタログを随時作成する。とくに、地震や、低周波地震、スロースリップイベント等のカタログから得られる、プレートの固着や応力の状況、地震発生域周辺における構造等の情報は、地震発生の長期評価に資する可能性が考えられる。そのため、これらのモニタリングおよび解析手法の開発を進めるとともに、防災科学技術研究所による別課題(「巨大地震による潜在的ハザードの把握に関する研究」)とも協力し、モニタリング成果を活かした地震発生モデル構築および数値シミュレーション研究を行う。本課題による成果については、国民に対して分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される。なお、本課題は防災科学技術研究所の中期計画に基づく運営費交付金によるプロジェクト研究の一部として実施される。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要 :

平成30年度の成果としてとくに、房総半島沖で発生するスロースリップイベント、紀伊半島南東沖で発生する浅部超低周波地震、十勝沖から岩手沖での低周波微動活動、および日向灘から四国沖におけるスロースリップイベントの数値シミュレーションに関する研究成果について以下報告する。

房総半島沖では、2018年6月3日頃から地震が群発的に発生するとともに、ほぼ同期して房総半島のHi-netに併設された高感度加速度計により傾斜変動が観測された。傾斜方向の変化について特徴的な期間ごとに傾斜データを解析したところ、房総半島沖のフィリピン海プレート上面付近に断層モデルが推定された(合計の規模Mw6.5)。すべり域および地震発生域は、房総半島沖において2~7年間隔で繰り返し発生してきたスロー地震とほぼ重なった。すべり域と群発地震の移動により対応が見られた。これらの特徴は過去のスロー地震と共通しており、基本的にこれまでと同様のスロー地震が再来したと考えられる。

プレート境界浅部(海域)で発生するすべり現象把握のため、海域の現実的な3次元地下構造の影響を考慮した解析手法を開発した。この手法を紀伊半島南東沖で発生する浅部超低周波地震に適用したところ、陸域の広帯域地震観測網F-netの記録のみで、海底地震計による解析結果とほぼ同様な解が得られ、高い精度の解析が可能であることを確認した。海域での観測がなされていない期間の解析結果からも、紀伊半島南東沖で発生する浅部超低周波地震が総じてプレート境界のすべりを反映する低角逆断層となることが示され、陸域観測網のデータの存在する長期の活動把握が可能となった。

日本海溝地震津波観測網(S-net)の地震計記録の解析により、十勝沖から岩手沖の領域において低周波微動の発生を確認した。また得られた時空間分布から、超低周波地震が発生した時間帯において、同地域で微動活動が活発化していることが明らかとなった。

日向灘から四国沖を対象地域とし、スロースリップイベントの数値シミュレーションを実施した。この数値シミュレーションでは、カットオフ速度を考慮したすべり速度・状態依存を採用し、3次元沈み込み形状・スロー地震分布を考慮したモデルを用いている。これにより、深部および浅部のスロースリップイベントの発生を再現することができた。また、浅部のスロースリップイベントの伝播方向が、日向灘南部において固着域の幅が狭くなっていることにより説明できる可能性を示した。

上記以外にも、地殻活動のモニタリングを定常的に行っており、その結果を地震調査委員会や地震予

知連絡会等に随時提供している。

平成 26~30 年度の成果の概要は以下のとおりとなる。

スロー地震に関連するデータ解析による成果として、十勝沖から岩手沖の領域について、上述のとおり低周波微動の活動状況を明らかにした。房総半島沖では、2014 年および 2018 年にスロースリップイベントが発生しており、その発生状況の解析を実施した。2014 年については、すべり域はこれまでと重なるものの、地震活動が少ない傾向がみられた。また、傾斜変動が小さく、地震モーメントが小さなイベントであったことが示唆された。2018 年については上述のとおりである。紀伊半島南東沖では、上述のとおり超低周波地震の解析を実施した。四国地域について、P 波の地震波減衰構造の推定を行った結果、長期的スロースリップイベントの上盤側の地殻内では減衰が大きいこと、深部低周波微動活動のセグメント境界付近は地震波減衰が大きく変化する領域と対応していることが明らかとなった。これにより、地殻の減衰構造とプレート境界における微動のセグメント形成が関連している可能性が示唆された。また四国地域を対象として、傾斜データを用いたスロースリップイベントの自動検出に関する研究も実施した。南西諸島においては広帯域臨時観測を実施し、F-net の観測記録と併せることで南海トラフから南西諸島にかけての超低周波地震の活動状況を明らかにした。超低周波地震活動の活動度は、繰り返し地震から推定されるすべりレートの空間的差異と調和的である。また、すべりの移動方向についても、特徴的な方向がみられる地域がある。

スロースリップイベントの数値シミュレーションについては、上述の成果に加え、四国地域を対象として潮汐の影響の評価を実施した。孤立性の高いスロー地震域においては、潮汐の影響が強く現れること、外部の擾乱による影響から早く間欠的なすべりの繰り返しへと回復することを示唆する結果を得た。

2016 年 4 月 1 日の三重県南東沖の地震 (Mw5.8) の解析を実施した。沈み込むフィリピン海プレートの 3 次元速度構造を考慮した差分法による地震波シミュレーション計算を行った結果、プレート境界付近における低角逆断層の地震が最適解として推定された。海域の地震では、3 次元不均質構造を考慮することが重要であることが示された。

地震波干渉法を用い、東北地方太平洋沖地震前後の東北地方や 2014 年長野県神代断層地震前後の周辺地域について、速度変化の解析を実施した。いずれも地表から数 100m までの地震波速度の変化で説明可能であることを示した。

2016 年熊本地震においては、地震活動の高周波エネルギー輻射量の推移を解析することにより、同地震の前震に伴う余震のエネルギー輻射効率が顕著に大きいことを明らかにした。

この他主要なものとして、2014 年チリ地震の震源過程の解析、2015 年 6 月 24 日に発生した小笠原の連発する深発地震の解析、Hi-net 地震カタログを用いた活断層と地震活動の関係評価の研究を実施した。2016 年熊本地震および 2018 年胆振地震の際には、オンラインの臨時観測を実施し、EarthLAN を通じて大学等にデータを提供した。また、モニタリング成果は政府関連の各種委員会に随時報告された。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
- Takemura, S., T. Matsuzawa, T., Kimura, T., Tonegawa, and K. Shiomi, 2018, Centroid moment tensor inversion of shallow very low frequency earthquakes off the Kii Peninsula, Japan, using a three-dimensional velocity structure model, *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 6450-6458, doi:10.1029/2018GL078455.
 - 防災科学技術研究所, 2019, 日本周辺における浅部超低周波地震活動 (2017 年 11 月 ~ 2018 年 5 月), 地震予知連絡会会報, **100**, 印刷中.
 - 防災科学技術研究所, 2019, 西南日本における深部低周波微動活動 (2017 年 11 月 ~ 2018 年 4 月), 地震予知連絡会会報, **100**, 印刷中.
 - 防災科学技術研究所, 2019, 西南日本における短期的スロースリップイベント (2017 年 11 月 ~ 2018 年 4 月), 地震予知連絡会会報, **100**, 印刷中.
 - 防災科学技術研究所, 2019, 日本周辺における浅部超低周波地震活動 (2018 年 5 月 ~ 10 月), 地震予知連絡会会報, **101**, 印刷中.

防災科学技術研究所，2019，西南日本における深部低周波微動活動(2018年5月～2018年10月)，地震予知連絡会会報，101，印刷中。

防災科学技術研究所，2019，西南日本における短期的スロースリップイベント(2018年5月～2018年10月)，地震予知連絡会会報，101，印刷中。

防災科学技術研究所，2019，房総半島沖スロースリップイベント(2018年6月)，地震予知連絡会報，101，印刷中。

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

防災科学技術研究所は引き続き、陸海統合地震津波火山観測網(MOWLAS)および必要に応じて行われる機動的な調査観測、国内外の機関より得られるデータから、地震やスロー地震についてその活動状況をモニタリングし、適宜解析を実施することで多様な情報からなる地震カタログを随時作成する。これらの様々な滑り現象のモニタリングおよび解析とともに、地下構造に関する解析を進め、地震発生モデル構築および数値シミュレーション研究を実施する。本課題による成果については、国民に対して分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する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

国立研究開発法人防災科学技術研究所地震津波防災研究部門
他機関との共同研究の有無：無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：防災科学技術研究所 企画部広報課
電話：029-851-1611
e-mail：toiawase@bosai.go.jp
URL：http://www.bosai.go.jp/index.html

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：松澤孝紀
所属：防災科学技術研究所 地震津波防災研究部門

(1) 実施機関名：

防災科学技術研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

噴火予測システムの開発に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(4) その他関連する建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

基盤的火山観測網・リモートセンシング技術等による多項目の火山観測データの活用、火山活動及び火山災害の推移を予測する技術開発、火山災害による被害の軽減につなげるためのリスクコミュニケーションの在り方に関する研究を実施し、火山災害軽減のための技術開発を行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本課題は、防災科学技術研究所の中期計画に基づいたものである。

基盤的火山観測網、火山ガス・地殻変動・温度の把握を目的としたリモートセンシング技術等による多項目の火山観測データを活用し、多様な火山現象のメカニズムの解明や火山災害過程を把握するための研究開発を進める。

また、事象系統樹は、地域住民、地方公共団体や政府が、噴火災害の恐れのある噴火活動に対して、その火山活動や噴火現象の推移の全体像を把握し、適切な判断をする基本となるもので、社会的に重要である。この事象系統樹による推移予測技術の開発、実験的・数値的手法による多様な火山現象を再現する物理モデルの構築などにより、火山活動及び火山災害の推移を予測する技術開発を実施する。さらに、水蒸気噴火の先行現象の研究等に資するため、火口付近を含む火山体周辺において火山観測網を補完する機動的な調査観測を行うほか、噴火様式の変化を早期に捉えるため、遠隔で火山ガスや火山灰等の分析を行うモニタリング技術を開発する。

災害リスク情報に関する研究と連携し、火山活動と火山災害に関する空間的・時間的情報を一元化し、火山防災に関わる住民・国・地方公共団体・研究機関が迅速に共有・利活用できるシステムを開発する。また、火山専門家の知見を社会に効果的に伝える手法の開発等、火山災害による被害の軽減につなげるためのリスクコミュニケーションの在り方に関する研究を実施する。国内の火山研究の活

性化と成果の社会実装を推進するため、大学・研究機関・火山防災協議会等との連携を強化し、研究実施体制の強化・充実を図る。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

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として、阿蘇山・桜島・霧島・口永良部島などの V-net 空振データの波形解析により、噴煙体積の変化率と積算体積の時間変化を推定する手法を開発した。また、2011 年・2018 年霧島山新燃岳噴火の相違について検討し、そのメカニズムについて解明した。また、2018 年霧島山新燃岳噴火において降灰リアルタイム観測・粒子輸送軌跡の推定を行った。

火山リモートセンシング技術の開発研究では、地上設置型レーダー干渉計による地殻変動モニタリングに関する研究、ARTS-SE データ処理 ~ STIC の 3 次元地形情報取得手法開発、および ARTS-SE カメラ型センサ (STIC) を応用したポータブル地上設置型装置 (G-STIC) 開発を実施した。

噴火・災害ポテンシャル評価のためのモデリング研究では、火山噴出物モニタリングシステムの開発、火山性流体のレオロジーモデル開発、溶岩流・土石流・火砕流シミュレーションの高度化、および、水蒸気噴火データベース構築を行った。

火山災害軽減のためのリスクコミュニケーションに関する研究では、地方自治体主催の防災訓練におけるアウトリーチ活動、専門家・非専門家を対象としたアンケート調査とギャップに関する考察、都市部のインフラに対する降灰リスク評価に向けた閾値や情報の整理、および、火山災害・火山防災に関する資料の改訂に向けた検討を進めた。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

NIED02 多角的火山活動評価に関する研究

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

国立研究開発法人防災科学技術研究所火山防災研究部門
他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 防災科学技術研究所 企画部広報課
電話 : 029-851-1611
e-mail : toiawase@bosai.go.jp
URL : <http://www.bosai.go.jp/index.html>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 藤田英輔
所属 : 防災科学技術研究所 火山防災研究部門

(1) 実施機関名：

防災科学技術研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

基盤的地震・火山観測網の整備・維持及び超大容量の地震・火山観測データの効率的流通システムの構築

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

首都直下地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

日本列島周辺で発生する地震現象の予測精度を向上させるためには、現在発生している現象を適確に把握し、モデル構築等に有効な観測データを提供することが不可欠である。より詳細な微小地震活動は、全てのモデルの基礎データとなり得るものである。したがって、地震調査研究推進本部の地震調査研究に関する総合基本施策及び調査観測計画を踏まえて、陸域の地震観測網(高感度地震観測網、広帯域地震観測網、強震観測網等)と海域の地震観測網(日本海溝海底地震津波観測網(S-net)、地震・津波観測監視システム(DONET))を一元化した海陸の基盤的地震観測網の安定的運用を行うとともに、関連施設の更新を図る。また、「今後の大学等における火山観測研究の当面の進め方について」(平成 20 年 12 月、科学技術・学術審議会測地学分科会火山部会)及び「御嶽山の噴火を踏まえた火山観測研究の課題と対応について」(平成 26 年 11 月、科学技術・学術審議会測地学分科会地震火山部会)に基づき、重点的に強化すべき火山について観測施設の整備・運用を推進する。観測データの

関係機関との共有や利用促進を図り、国内外の関係機関における研究、業務遂行や我が国の地震・津波及び火山に関する調査研究の進展に貢献する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

防災科学技術研究所は、世界最大規模の稠密かつ高精度な陸域及び海域の基盤的地震・津波観測網を安定的に運用するとともに、さらに日本海溝海底地震津波観測網の整備を行う。

既存の火山観測施設や基盤的火山観測網を含め、重点的に観測を強化すべき火山について観測施設の整備・運用を行う。これにより得られる観測データについては、全国の大学が運用する観測網のデータとの共有化を進め、大学等の火山防災の基礎研究の振興や気象庁の監視業務の推進、さらには地方防災行政の関係機関の情報共有化に貢献する。

地震・津波防災研究の中核的機関として国内外の機関とも連携し、日本における地震観測データを集約・公開・解析し、得られた地震津波防災情報等を国民に対して分かりやすく情報発信を行うとともに、政府関係委員会等への資料を提供することにより、国民の安全・安心と社会の安定的発展に貢献する。地震・火山観測網により得られたデータは定期的に蓄積し、波形データベースを構築する。また、モニタリングの結果などをもとに地震波速度構造をはじめとする「日本列島標準モデル」を構築する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要：

防災科学技術研究所 (防災科研) は、高感度地震観測網 (Hi-net) ・ 広帯域観測網 (F-net) ・ 強震観測網 (KiK-net, K-NET) の陸域の基盤的地震観測網を安定的に運用している。これらの良質な地震等の観測データの流通を図り、関係機関における研究、その他の業務の遂行や我が国の地震調査研究の発展に貢献した。海域に設置した観測網については、昨年度から本格運用された日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) と平成 28 年度に海洋研究開発機構から移管された地震・津波観測監視システム (DONET) の維持管理を継続的に実施している。S-net の観測データについては、海底地震津波観測網データダウンロードページより公開を開始した。また JDXnet での流通も 3 月 1 日から開始する予定である。DONET の観測データについては、強震計及び広帯域地震計に加え、水晶水圧計のデータについても海底地震津波観測網データダウンロードページより公開を開始した。また、DONET の観測網機能を向上させるため、海溝軸付近に位置する観測点の埋設を行った。これらを併せて、陸海統合地震火山津波観測網 (MOWALS) 統合処理体制の基盤を構築するとともに、今後の利活用を発展させる準備を整えた。平成 29 年 4 月 1 日に移管された首都圏地震観測網 (MeSO-net) の運用を継続するとともに、ホームページによる観測データの公開を開始している。

重点的に観測を強化すべき火山に整備した基盤的火山観測網 (V-net) について、故障、老朽化した観測機器の更新を行い安定運用に努め、観測データの大学や気象庁への流通を図り、関係機関の研究や火山監視業務等に貢献した。

これらの防災科研の地震・火山観測網及び大学・気象庁等の関係機関により得られた波形データを定期的に蓄積し、防災科研のホームページから公開している。

房総半島沖で、2 - 7 年間隔で繰り返し発生するスロー地震が、2018 年 6 月に再来した。2018 年 6 月 3 日頃より、房総半島沖で通常時より多くの地震が群発的に発生するとともに、Hi-net に併設された高感度加速度計により、スロー地震によるとみられる地殻変動が観測された。防災科研では、関係機関と連携して、WEB サイトから情報発信した。これにより、最大震度 4 の地震をはじめとして、多数の有感地震に先行して情報提供を行うことができた。

DONET の解析により明らかとなっている海域の地下構造の情報を基に現実的な 3 次元地下構造モデルを構築し、地震動シミュレーションを行い、付加体 (厚く低速度な海洋堆積物) が長周期地震動伝播に及ぼす影響を評価した。海域の構造を高度化した結果、これまでの地下構造モデル比べ観測地震動の再現性が向上した (Takemura et al., in press)

F-net 広帯域地震計の約 20 年におよぶ連続地震波形記録について、記録の品質に関する情報をユーザーに提供することを目的とした web コンテンツを高度化した。昨年度公開した、パワースペクトル

密度の確率密度分布に加えて、Kimura et al. [2015] によるセンサーの周波数特性の正常性に関する情報を公開した (http://www.fnet.bosai.go.jp/auth/noise_spectral/?LANG=ja)

海底地震津波観測網である DONET 及び S-net の特性を最大限活かして、海域で発生した地震と地震に伴って発生した津波に関して調査研究を行った。日本海溝周辺で発生している地震活動について M1.5 程度以上の地震については漏れなく検知する能力があることが分かり、他の海域においても多くの震源を自動で決定できていることを確認した。

比較的規模の大きなイベントの記録について、5月6日15時3分(日本時間)に鳥島近海で発生した M5.7 の地震について、S-net と DONET の水圧観測点で津波を捉えた。津波は地震発生からおよそ 30-60 分後に到達し、S-net で最大 6 mm、DONET で最大 3 mm 程度の津波高であった。この海域では、ほぼ同じメカニズムを持つ M6 前後の地震とそれに伴う津波が繰り返し発生しており、前回(2015年5月3日)と今回の津波による DONET での波形は、振幅の違いを除いて、ほぼ同じ波形形状であることを確認した。加えて、分散性を考慮した津波伝播の計算により、観測波形と良く一致する計算結果を得た。

2016年に三重県南東沖で発生した Mw5.9 の地震において DONET の海底圧力計により津波および地殻変動による圧力変動が記録されたが、同時に地震動によりセンサーが傾いたことによると思われる見かけの圧力オフセット変化(非津波成分)も観測された。Kubota et al. (2018) では圧力時系列の時間微分波形を用いて津波波源分布を推定する方法を提案し、実際に DONET 記録に適用して非津波成分の影響を大きく軽減できることを確認した。この研究は、非津波成分の有無を判断する時間的猶予の少ない津波即時予測において予測精度が向上することを示している。

上記の研究に加え、データを活用した社会実装への取り組みも行った。鉄道の地震防災対策へ活用することを目的とした相互協力協定を関係機関と締結し、房総沖の海域の S-net データを実配信していたが、2019年1月より房総沖から北海道沖までのデータの実配信を開始した。現在、DONET データの実配信に向けた取り組みも進めている。津波即時予測システムについては、DONET を用いたシステムの構築を海洋研究開発機構と連携して進め、すでに和歌山県、三重県、中部電力、尾鷲市に実装・運用しているが、複雑な地形を持つ瀬戸内海沿岸での即時津波予測システムの有効性を確認し(Takahashi et al., 2018)、坂出市と高松市を対象としたシステムを香川大学に構築した。11月には、S-net データを用いた津波即時予測システムを千葉県に導入し、運用を開始している。

2018年3月に霧島山新燃岳において2011年以来7年ぶりに溶岩流出を伴う噴火が発生した。噴火時に霧島山の基盤的火山観測網(V-net)において、2011年噴火時とよく似た地殻変動を観測した。このデータは、2011年噴火と同じマグマ溜まりからマグマが上昇したことを示す証拠となり、火山活動評価に役立った。また、防災科研のホームページにクライシスレスポンスサイトを立ち上げ、災害情報の集約報、現地調査や観測データ報告等を掲載した。

地震調査委員会・地震防災対策強化地域判定会・地震予知連絡会、火山噴火予知連絡会へ、「広帯域地震計を用いたモーメントテンソル解析結果」や「関東・東海地域の地震活動」等の資料を提供した。定例の地震活動などの資料に加えて2018年4月9日島根県西部の地震、2018年5月25日長野県北部の地震、2018年6月18日大阪府北部の地震、2018年6月房総半島沖スロースリップイベント、2018年7月7日千葉県東方沖の地震、2018年9月6日北海道胆振東部地震、2019年1月3日熊本県の地震等については別途資料を提出した。

防災科学技術研究所は、日本海溝海底地震津波観測網(S-net)の整備を行い、かつ既存の世界最大規模の稠密かつ高精度な陸域及び海域の基盤的地震津波火山観測網(Hi-net, F-net, K-NET, KiK-net, V-net)を含めた陸海統合地震津波火山観測網(MOWLAS)を安定的に運用した。

既存の火山観測施設や基盤的火山観測網を含め、重点的に観測を強化すべき火山について観測施設の整備・運用を行った。これにより得られる観測データについては、全国の大学が運用する観測網のデータとの共有化を進め、大学等の火山防災の基礎研究の振興や気象庁の監視業務の推進、さらには地方防災行政の関係機関の情報共有化に貢献した。

地震・津波防災研究の中核的機関として国内外の機関とも連携し、日本における地震観測データを

集約・公開・解析し、得られた地震津波防災情報等を国民に対して分かりやすく情報発信を行うとともに、政府関係委員会等への資料を提供することにより、国民の安全・安心と社会の安定的発展に貢献した。地震・火山観測網により得られたデータは定常的に蓄積し、波形データベースを構築した。また、モニタリングの結果などをもとに地震波速度構造をはじめとする「日本列島標準モデル」を構築し、地震波速度構造や高精度時震源カタログなどを公開した。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
- Kubota, T., Suzuki, W., Nakamura, T., Chikasada, N. Y., Aoi, S., Takahashi, N., & Hino, R. (2018) Tsunami source inversion using time-derivative waveform of offshore pressure records to reduce the effects of non-tsunami components *Geophysical Journal International*, 215, 1200-1214 <https://doi.org/10.1093/gji/ggy345>.
- Takemura, S., Kubo, H., Tonegawa, T., Saito, T., & Shiomi, K., Modeling of Long-Period Ground Motions in the Nankai Subduction Zone: Model Simulation Using the Accretionary Prism Derived from Oceanfloor Local S-Wave Velocity Structures, <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2013-8>
- Takahashi, N., Imai, K., Sueki, K., Obayashi, R., Ishibashi, M., Tanabe, T., and Kaneda, Y. (2018). Real-Time Tsunami Prediction System Based on Seafloor Observatory Data Applied to the Inland Sea, Japan. *Marine Technology Society Journal*, 52(3), 120-127.
- 防災科学技術研究所 (2019), 房総半島沖スロースリップイベント (2018 年 6 月), 地震予知連絡会報, 101, 印刷中.
- 防災科学技術研究所 (2019), 2018 年 5 月 25 日長野県北部の地震, 地震予知連絡会報, 101, 印刷中.
- 防災科学技術研究所 (2019), 2018 年 5 月 6 日鳥島近海で発生した地震(MJMA 5.7)による津波 S-net・DONET による水圧変動観測 , 地震予知連絡会報, 101, 印刷中.
- 防災科学技術研究所 (2019), Double-Difference 法による 2018 年 6 月 18 日大阪府北部の地震の震源分布, 地震予知連絡会報, 101, 印刷中.
- 防災科学技術研究所 (2019), Double-Difference 法による 2018 年 9 月 6 日胆振東部地震の震源分布, 地震予知連絡会報, 101, 印刷中.
- 防災科学技術研究所 (2019), 三次元地震波速度構造により再決定した平成 30 年胆振東部地震周辺の震源分布, 地震予知連絡会報, 101, 印刷中.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

防災科学技術研究所は、引き続き、陸海統合地震津波火山観測網(MOWLAS)である、陸域の基盤的地震観測網(高感度地震観測網(Hi-net)、強震観測網(K-NET)・基盤強震観測網(KiK-net)・広帯域地震観測網(F-net))・海域の基盤的観測網(日本海溝海底地震津波観測網(S-net)・地震・津波観測監視システム(DONET))および首都圏地震観測網(MeSO-net)について安定的な運用を継続するとともに、海陸統合データベースを構築し、良質な地震等の観測データの取得・流通を図り、関係機関における研究、その他の業務の遂行や我が国の地震調査研究の発展に貢献する。

既存の火山観測施設や基盤的火山観測網を含め、重点的に観測を強化すべき火山について観測施設の運用を行いつつ、これにより得られる観測データについては、全国の大学が運用する観測網のデータとの共有化を引き続き進め、大学等の火山防災の基礎研究の振興や気象庁の監視業務の推進、さらには地方防災行政の関係機関の情報共有化に貢献する。

地震・火山観測網により得られたデータは定常的に蓄積し、波形データベースを構築する。また、「日本列島標準モデル」に組み込む各種構造の推定・多機能地震カタログの整備を進める。

地震・火山観測データを用いた解析結果等については、発災時を含め地震調査委員会等の関係機関へ速やかに提供する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

国立研究開発法人防災科学技術研究所地震津波防災研究部門

他機関との共同研究の有無：無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：防災科学技術研究所 企画部広報課
電話：029-851-1611
e-mail：toiawase@bosai.go.jp
URL：http://www.bosai.go.jp/index.html

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者
氏名：松原 誠
所属：防災科学技術研究所 地震津波防災研究部門

(1) 実施機関名：

防災科学技術研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

火山活動把握のためのリモートセンシング観測・解析技術に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

衛星搭載型 SAR と地上設置型レーダー干渉計による火山活動把握に関する研究

SAR データから火山性地殻変動を mm/yr レベルの精度で求めるため、永続散乱体 SAR 干渉法等に関する高度解析技術を開発する。また、平成 26 年度に打ち上げ予定の「だいち 2 号」(ALOS-2)等の SAR データを用いて、高精度地殻変動情報(3次元地殻変動など)を得るための技術を開発する。また、火山活動の活発化が発生した場合には、これまでに開発した技術を用いて、それに伴う地殻変動を検出する。さらに、火口周辺の地表変動を遠隔地から面的かつ高頻度にモニタリングすることを目的とし、地上設置型レーダー干渉計を用いた観測技術を開発する。

航空機搭載型光学センサーに関する研究

火山ガス・温度等の把握を目的とした航空機搭載型光学センサーの観測・解析技術の開発として、小型単発機に搭載可能なセンサーに関する技術開発を進め、同センサーの実現と同センサーによる火山観測を実現する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 28 年度においては、浅間山に設置した地上設置型レーダー干渉計観測システムの初期性能評価を行うと共に、準リアルタイムで解析を行うシステムを構築する。また、平成 27 年度に単発航空機への搭載許可を取得した改良型 ARTS(ARTS-SE)のカメラセンサデータの処理手法を開発する。

平成 29 年度においては、地上設置型レーダー干渉計のデータ解析における大気遅延誤差軽減手法を開発する。また、ARTS-SE のスキャナセンサデータの処理手法を開発する。

平成 30 年度においては、地上設置型レーダー干渉計観測データの時系列解析手法を開発する。また、ARTS-SE のカメラセンサデータとスキャナセンサデータの融合解析処理手法を開発する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

衛星搭載型 SAR と地上設置型レーダー干渉計による火山活動把握に関する研究

本計画期間中における合成開口レーダー (SAR) による火山活動把握に関する研究においては , SAR 干渉解析ツール (RINC) の開発および霧島山 , 桜島 , 口之永良部島 , 御嶽山等における地表変動研究を行った . 以下に , その概要を述べる .

RINC は高度 SAR 解析技術の研究のための基本ソフトウェアとすることを目的として開発を行っているもので , ALOS , ALOS-2 , Sentinel-1 の SAR データのほか , 商用ソフトウェアの GAMMA SAR プロセッサが出力する SAR 画像にも対応している . 火山活動や地震に関する事例解析においては , GAMMA SAR プロセッサによる解析結果とほぼ同等の結果が得られることを確認した . RINC は , 主に SAR 研究グループ (PIXEL) において公開しており , 多くの機関における地震や火山 , 地すべりの研究等に活用されている .

SAR を用いた事例研究においては , 霧島山 , 桜島 , 口永良部島 , 御嶽山 , 十勝岳に関する SAR 解析を行ったほか , 2016 年熊本地震に関する阿蘇山のマグマシステムへの影響評価を行った . 霧島山新燃岳の 2011 年噴火に関する事例研究においては , 噴火活動が静穏化した 2011 年 9 月以降においても火口内で継続的に進行する隆起が生じていることを発見した . この隆起は時間とともに減衰しつつも , 2016 年末頃まで生じていた . その膨張体積量の減衰曲線は , 67 日と 556 日の時定数を持つ 2 つの指数関数の和で良く説明されることが分かった . また , 2017 年 10 月に噴火が発生する約 3 か月前から , 急激に火口内で局所的な沈降が見られた . 同時期に , 火口外においては , 膨張変動が見られた . 2018 年 3 月の噴火においては , SAR 画像に Ozawa and Kozono (2013) の方法を適用して溶岩の体積を求めたところ , 3 月 8 日まで , おおよそ一定の速度 (72m³/sec) で増加し , 3 月 10 日における体積は約 1400 万³に達したことが分かった .

桜島の事例研究においては , COSMO-SkyMed や ALOS-2 を用いた解析を行った . 特に , 2015 年 8 月に局所的な地殻変動が検出され , 昭和火口地下約 1? にダイクの貫入があったことを明らかにした .

口永良部島の事例研究においては , 2007 年 ~ 2011 年の地殻変動を調査するため , 陸域観測衛星「だいち」の PALSAR データの解析を実施した . 特に , SBAS 法と複数軌道データを用いた SAR 時系列解析手法 (Ozawa and Ueda, 2011) を併用し , 地殻変動の準上下成分 (垂直から南に 10 度傾く成分) と東西成分の時系列を求めた . その結果 , 新岳・古岳付近において , 2009 年後半頃から山頂の隆起および東山麓の東進 , 西山麓の西進が見られた . また , 2014 年 8 月 3 日に発生した噴火に関する調査のため , ALOS-2 (PALSAR-2) データを用いた SAR 干渉解析を実施した . 噴火が発生した新岳付近に注目すると , 局所的なスラントレンジ伸長変化が求めた . 一般的に , SAR 干渉解析におけるノイズの影響は空間波長が短い変化に対しては小さいと考えられることや噴火孔の周辺であることなどから , この変化は地殻変動シグナルを示している可能性が考えられる .

2014 年 9 月 27 日に噴火が発生した御嶽山の火山活動を調査するため , ALOS-2 (PALSAR-2) データを用いた SAR 干渉解析を実施した . 得られた解析結果においては , 除去しきれなかった大気遅延等に起因する非地殻変動成分が大きく , 火口付近を除いてノイズレベルを超えるような有意な変化は検出されなかった . 火口周辺では , 噴火発生日を挟む 2014/8/18 と 2014/10/13 の干渉ペア (北行軌道・右方向視) の解析結果において , 地獄谷の噴火口の南西付近に , 衛星 - 地表間距離 (スラントレンジ) が 10cm 以上短縮 (隆起もしくは西進成分が卓越) したことを示す変化が見られた . また , 噴火後の 2014/9/29 と 2014/10/13 の干渉ペア (北行軌道・右方向視) の解析結果においては , 地獄谷の噴火口の南西において , スラントレンジが伸長したことを示唆する変化が見られた . ただし , この変化の大きさは , 周辺のノイズの大きさと同程度であることやこの領域の干渉度が低いこと等を考慮すると , 得られた変化がノイズに起因する位相変化である可能性は否定できない .

北海道の十勝岳に対して複数の波長を用いた SAR 干渉解析を行った . これまで , 十勝岳の山頂近傍においては , 2006 年以降 , GNSS 連続観測により局所的な地殻変動が継続的に生じていることが知られていた . 今年度に観測された X-band SAR 衛星・TanDEM-X と L-band SAR 衛星・ALOS-2/PALSAR-2 のデータを解析したところ , 2015 年 5 月から 7 月にかけて , これまで検出されていたよりも大きなレー

トで地殻変動が生じていたことが明らかとなった。この結果は同時期に行われた GNSS 観測の結果とも一致する。地形を考慮した地殻変動モデリングの結果、山頂近傍の地下約 300m に地殻変動源が位置すると推定された。

2016 年熊本地震に関する解析においては、陸域観測技術衛星「だいち 2 号」(ALOS-2) のデータを用いて、熊本地震に伴う地殻変動を検出した。得られた地殻変動は、布田川断層と日奈久断層の北端部、布田川断層の東端から北東に伸びる断層の右横ずれと、西原村付近の低角の断層の正断層成分を伴う右横ずれによっておおそ説明することができることが分かった。この結果に基づき、熊本地震に伴う地殻変動が阿蘇山のマグマだまりに与える影響を見積もった。その結果から、以下の 2 つが推測された (1) 仮定した球形のマグマシステムは楕円形に変形し、体積はわずかに増加した (2) マグマシステム上部付近の差応力の変化はおおよそ 3.5MPa であった。

防災科研においては、新たな地表変動モニタリング技術として、地上設置型レーダー干渉計 (GBRI: Ground-based radar interferometer) の研究を開始した。GBRI は地上に設置したアンテナからレーダー波を照射し、観測対象からの後方散乱波を受信するセンサーである。さらに、得られたレーダー画像の各画素に格納される位相の時間変化から、アンテナと散乱点との距離の変化を面的に検出することが可能である。本研究においては、合成開口レーダー型 (LiSA Lab 社製 LiSA mobile k09) と実開口レーダー型 (Gamma Remote Sensing 社製 GPRI2) の 2 台の GBRI から構成される GBRI 観測システムを浅間山の山麓に設置した。植生がほとんどない火口周辺においては、30 日間のデータペアにおいても、地殻変動検出が可能なほどの干渉性が得られることを確認した。まばらに草が生える中腹においては時間の経過とともに干渉性が劣化し、30 日間の干渉ペアにおいては、地殻変動検出が困難なほどの干渉性劣化がみられた。樹林帯においては、1 時間以内に干渉性が著しく劣化し、地殻変動検出は困難であった。また、悪天候時においては、著しく干渉性が劣化する現象がみられた。これは降雨により、レーダー波が減衰するためと考えられる。現時点における解析においては、大気遅延等によるノイズの軽減手法を適用しておらず、このような解析によっては、3cm を超えるような非地殻変動成分が重畳する可能性があることが確かめられた。

航空機搭載型光学センサーに関する研究

平成 30 年度の成果の概要

航空機搭載型光学センサーに関する研究においては、防災科学技術研究所の第 4 期中期計画に基づき、平成 27 年度に航空機搭載許可を取得した小型単発機に搭載可能なセンサー：ARTS-SE の試験観測データ (2015/12/5 (箱根山)) を用い、ARTS-SE のカメラ型センサデータの処理手法の開発 (スキャナ、カメラセンサ融合解析技術の開発) を実施した。2015 年の噴火で生じた大涌谷 15-1 火口を観測した連続する 20 の熱赤外画像 (計測間隔 0.5s) を用い、15-1 火口の最高輝度温度および放熱率の推定を行った。これらの連続する画像は、約 $0 \sim \pm 9.5$ °の観測角で 15-1 火口を観測している。この結果、9.5s 間の観測中に 15-1 の両推定値とも約 $\pm 50\%$ 程ゆらいでいることがわかった。これらの結果より、噴気の影響を受け観測値がゆらぎを持つ地熱域の表面現象は、カメラセンサの連続画像を融合的に利用することで、従来のスキャナセンサのワンショットの観測に、不確定性を示す動的な計測値を追加できることが分かった。

計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要

平成 26 年度は、現行 ARTS を改良し、小型の単発航空機 (C208) に搭載可能な改良型 ARTS を実現するための航空機搭載インターフェースの製作を完了し、同装置の搭載免許取得作業に着手した。平成 27 年度は、現行 ARTS を改良した小型の単発航空機 (C208) に搭載可能な改良型 ARTS を、ARTS-SE として完成させた。また、ARTS-SE の修理改造検査を受検し、2015 年 6 月に航空機搭載許可を取得した。また、同装置の試験観測を 2015/11/19 (名古屋)、2015/11/27 (安城市)、2015/11/29 (浅間山)、2015/12/5 (箱根山) に実施し、今後の火山観測の準備を整えた。平成 28 年度は、防災科学技術研究所の第 4 期中期計画に基づき、平成 27 年度に航空機搭載許可を取得した小型単発機に搭載可能なセンサー：ARTS-SE の試験観測データ (2015/11/19 (名古屋)、2015/11/27 (安城市)、2015/11/29 (浅間山)、2015/12/5 (箱根山)) を用い、ARTS-SE のカメラ型センサデータの処理手法の開発 (可視データ

の SfM/MVS 技術の開発)を実施し、各観測データより DSM を作成した。平成 29 年度は、ARTS-SE の試験観測データ(2015/12/5(箱根山))を用い、ARTS-SE のカメラ型センサデータの処理手法の開発(赤外データの SfM/MVS 技術の開発)を実施し、観測データより箱根山大涌谷付近の DSM を作成した。数値標高モデル 10m メッシュ(標高)(国土地理院)と SfM/MVS で求めた DSM を比較した結果、オルモザイク画像の端(縦横距離それぞれ 10~15%程度の周縁)以外は、両標高値の差は 10m 以内であることが分かった。平成 30 年度は、ARTS-SE のカメラ型センサデータの処理手法の開発(スキャナ、カメラセンサ融合解析技術の開発)として、カメラ型センサの連続するデータを用い、特定のターゲット(箱根大涌谷 15-1 火口)を約 0~±9.5°の観測角で観測することで、地熱域特有の観測値のゆらぎが捉えられ、これらをスキャナデータの情報に重畳することで、よりの確に地熱地帯の情報把握ができることが分かった。以上の平成 26~30 年度の成果より、本課題の 5 か年の到達目標を達成できた。

(9)平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
なし

(10)次期計画における平成 31 年度実施計画の概要:

防災科学技術研究所の第 4 期中期計画に基づき、火山観測用のリモートセンシング手法に関する研究として、画像分光装置の開発およびその観測データ解析技術の開発、および、衛星 SAR と地上設置型レーダー干渉計を用いた地殻変動観測技術に関する開発を行う。

(11)実施機関の参加者氏名または部署等名:

国立研究開発法人防災科学技術研究所火山防災研究部門
他機関との共同研究の有無:無

(12)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名:防災科学技術研究所 企画部広報課
電話:029-851-7611
e-mail:toiawase@bosai.go.jp
URL:http://www.bosai.go.jp/index.html

(13)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:小澤拓
所属:防災科学技術研究所 火山防災研究部門

(1) 実施機関名：

海洋研究開発機構

(2) 研究課題(または観測項目)名：

先端的掘削技術を活用した総合海洋掘削科学の推進

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料，考古データ，地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

イ. 海洋プレート内部の地震

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

(第三期中期目標より抜粋)

地球深部探査船「ちきゅう」等による海洋掘削により、これまで人類が到達できなかった海底下深部において得られた知見を最大限に活用し、新たな科学的命題を解決するための研究開発を行い、国際深海科学掘削計画(International Ocean Discovery Program : IODP)の科学プランの達成に重要な役割を果たす。

(7) 本課題の5か年計画の概要:

本研究課題は当機構の運営費交付金及び受託研究「東北地方太平洋沖で発生する地震・津波の調査観測」等により得られたデータや成果を利用して実施。

(第三期中期計画より関連部分を抜粋)

1) 先端的掘削技術を活用した総合海洋掘削科学の推進

海洋掘削の技術開発は、海底下という未踏のフロンティアへのアプローチを可能なものとし、その結果、多数の研究課題が生まれている。それらを解決するため、国際深海科学掘削計画 (IODP) を推進し、「ちきゅう」等による海洋掘削を行うとともに、地球を構成する物質の直接採取、分析及び現場観測を実施し、数値解析手法やモデリング手法等を用いることで、海洋・地球・生命を関連させた地球内部ダイナミクスモデルの構築とその理解の推進を図り、多様な探査と地球深部への掘削により掘削科学の新たな可能性を切り拓く。さらに、海洋掘削に関する総合的な知見に基づき、今後需要が増すと見込まれる超深度掘削技術の発展に寄与する。

(イ) 掘削試料・掘削孔を利用した地殻活動及び物質循環の動態解明

スケールの異なる各種試料やデータを高精度・高分解能で分析できる手法を構築するとともに、掘削科学の推進に不可欠な掘削技術・計測技術、大深度掘削を可能とする基盤技術を開発する。また、海底観測や広域地球物理探査等によって得られるデータに、掘削孔内において取得される多様なデータや現場実験結果を加えることにより、海底下の構造や性質を立体的に把握し、それらの変動機構の理解につながる仮説を構築する。さらに、仮説の有効性を確認するために、得られたデータ等を用いた数値シミュレーションを実施する。

(ロ) 海洋・大陸のプレート及びマグマの生成並びにそれらの変遷過程の解明

活動的なプレート境界である日本列島周辺海域等において、プレートが生成されてから地球内部に向けて沈み込むまでの構造及びプレート自体の変遷や挙動、沈み込み帯を中心としたプレートと断層の運動に伴い発生する諸現象及びプレート・地球内部のマグマ生成、マンテル対流とプレートとの関連等の解明に貢献する研究開発を IODP 等とも連携しつつ推進する。

(ホ) 掘削科学による新たな地球内部の動態解明

海底掘削試料等の精密化学分析により提唱され始めた新たな地球内部の構造の存在について、マンテル・コアの精密な物理・化学・地質探査を実施し、平成 28 年度を目途にその構造の概要を把握する。また、マンテル運動及びプレート運動等に与える影響を分析し、観測及び数値シミュレーションを組み合わせることで、地球表層及びマンテルの大規模運動を評価する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要:

平成 30 年度は以下の観測研究を実施した:

地殻・マンテル・モホの実態解明: オマーンオフィオライト掘削試料分析 (2 回目) を「ちきゅう」船上で実施した ..

南海トラフ地震発生帯掘削: IODP 第 358 航海が 10 月から 5 か月間実施され、固着域での掘削を試みた .

チリ三重会合点観測航海: 「みらい」による MR18-06 レグ 2 が 2019 年 1 月に実施された . 知り三重会合点において、6 点の熱流量およびピストンコア取得、2 点でドレッジ試料取得、4 測線で浅部構造データ取得、海底地震計 13 台を設置した .

本計画期間 5 年間の成果概要

○地震断層の摩擦特性に関する知見・手法の獲得

3.11 東北沖地震断層物質がプレート運動 (10cm/年) という超低速で不安定滑り発生

軽元素 (ホウ素、リチウム) の同位体比分析により、日本海溝断層帯掘削における流体岩石相互作用の低温の温度効果推定

南海トラフ三次元探査データ再処理、分岐断層の詳細形態と物性値取得

掘削試料の摩擦強度計測と数値計算から、南海トラフ先端部で 30m 以上の大きな滑りが生じうることを示した

掘削トルクから原位置・連続地層強度推定に成功した

間隙水存在下での高速摩擦実験により、断層岩化学分析から断層発熱評価に成功した

大深度掘削を可能とするタービン駆動型高機能コアバーレルの開発、ドリルパイプ疲労強度評価、CFRP ライザー強度試験の開発を実施した

IODP 第 365 掘削 (2016) で、熊野沖南海トラフ付加体斜面の分岐断層出口付近 (C0010 孔) に孔内観測所を設置した。既存の C0002 孔観測所のデータと併せて、固着域の浅部側から付加体斜面下部にかけて、1 年に 1 回程度、スロースリップが発生していることを検出した。スロー地震と併せて、固着域の挙動解明に大きな貢献をした。

IODP 第 380 航海 (2017) で、熊野沖南海トラフ付加体先端部のデコルマ (C0006 孔) に孔内観測所を設置した。既存の孔内観測所 2 か所と併せて、固着域浅部から海溝軸までのプレート境界断層の挙動が明らかになると期待される。

IODP 第 370 航海 (2016) で、室戸沖南海トラフ付加体先端部デコルマに掘削し、断層サンプル取得、地層物性データ取得、孔内温度計を設置した。温度計は 2017 年度に回収し、海底下 800m のデコルマ温度が 90 程度と判明した。

○ジオダイナミクス (深部スラブ・マントル)

トモグラフィーにより、2015 年小笠原超深発地震の機構が解明：太平洋スラブが上下マントル境界で滞留から沈み込みに遷移する場所での変形。

岩石・流体分析により、スラブからの脱水・大構造線が日本列島の深部流体の湧出に重要な貢献をしていることが分かった。

マントル対流三次元モデルから、2.5 億年以内に北半球にユーラシア、アフリカ、オーストラリア、北アメリカ大陸統合超大陸の形成を予測した。

○地殻・マントル・モホの実態解明

人類未踏のマントル物質の獲得のため、IODP 掘削の準備を行っている。具体的には、ハワイ沖での地殻構造探査を行いモホ面の検出に成功した。一方、過去の海洋地殻・マントルがその後の地殻変動で陸上に隆起したオフィオライトが、アラビア半島東端のオマーンに露出しており、2016 2017 年に陸上掘削で得られたサンプルを「ちきゅう」設備を用いて、2017 2018 年度に処理・分析・計測を行った。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Hashimoto, Y., M. Stipp, J. C. Lewis and F. Wuttke, (2019), Paleo-stress orientations and magnitudes from triaxial testing and stress inversion analysis in Nankai accretionary prism sediments, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2019, 6:3, doi: 10.1186/s40645-018-0249-7

Uemura, M., Y. Ito, K. Ohta, R. Hino and M. Shinohara, (2018), Spatio-temporal changes in the seismic velocity induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and slow slip event revealed from seismic interferometry, using ocean bottom seismometer's record, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, 5:87, doi: 10.1186/s40645-018-0240-3

Wiersberg, T., S. B. Hammerschmidt, S. Fuchida, A. Kopf and J. Erzinger, (2018) Mantle-derived fluids in the Nankai Trough Kumano forearc basin, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, 5:79, doi: 10.1186/s40645-018-0235-0

Kimura, G., H. Koge and T. Tsuji, (2018), Punctuated growth of an accretionary prism and the onset of a seismogenic megathrust in the Nankai Trough, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, 5:78, doi: 10.1186/s40645-018-0234-1

Koge, H., Y. Yamada, A. Ohde, A. Bauville, A. Yamaguchi and J. Ashi, (2018), Dynamic formation process of thick deformation zone on the shallow plate boundary fault of the Japan Trench: insight from analog experiments of half-graben subduction, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, 5:69, doi:

10.1186/s40645-018-0230-5

- Hamada, Y., T. Hirose, A. Ijiri, Y. Yamada, Y. Sanada, S. Saito, N. Sakurai, T. Sugihara, T. Yokoyama, T. Saruhashi, T. Hoshino, N. Kamiya, S. Bowden, M. Cramm, S. Henkel, K. Homola, H. Imachi, M. Kaneko, L. Lagostina, H. Manners, H.-L. McClelland, K. Metcalfe, N. Okutsu, D. Pan, M. J. Raudsepp, J. Sauvage, F. Schubotz, A. Spivack, S. Tonai, T. Treude, M.-Y. Tsang, B. Viehweger, D. T. Wang, E. Whitaker, Y. Yamamoto, K. Yang, M. Kinoshita, L. Maeda, Y. Kubo, Y. Morono, F. Inagaki and V. B. Heuer, (2018), In-situ mechanical weakness of subducting sediments beneath a plate boundary décollement in the Nankai Trough, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, 5:70, doi: 10.1186/s40645-018-0228-z
- Lackey, J., G. Moore and M. Strasser, (2018), Three-dimensional mapping and kinematic characterization of mass transport deposits along the outer Kumano Basin and Nankai accretionary wedge, southwest Japan, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, 5:65, doi: 10.1186/s40645-018-0223-4
- Ikeda, T. and T. Tsuji, (2018), Temporal change in seismic velocity associated with an offshore MW 5.9 Off-Mie earthquake in the Nankai subduction zone from ambient noise cross-correlation, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, 5:62, doi: 10.1186/s40645-018-0211-8
- Yabe, S. and S. Ide, (2018), Variations in precursory slip behavior resulting from frictional heterogeneity, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, 5:43, doi: 10.1186/s40645-018-0201-x
- Nakano, M., M. Hyodo, A. Nakanishi, M. Yamashita, T. Hori, S. Kamiya, K. Suzuki, T. Tonegawa, S. Kodaira, N. Takahashi and Y. Kaneda, (2018), The 2016 Mw 5.9 earthquake off the southeastern coast of Mie Prefecture as an indicator of preparatory processes of the next Nankai Trough megathrust earthquake, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, 5:30, doi: 10.1186/s40645-018-0188-3
- Kinoshita, M., K. Shiraishi, E. Demetriou, Y. Hashimoto, and W. Lin, (2019), Geometrical dependence on the stress and slip tendency acting on the subduction megathrust of the Nankai seismogenic zone off Kumano, *Progress in Earth and Planetary Science*, 6:7, Special Issue "Subduction-zone megathrust earthquakes: New perspectives from insitu data & laboratory analyses", doi:https://doi.org/10.1186/s40645-018-0253-y
- Miyakawa, A., M. Kinoshita, Y. Hamada and M. Otsubo, (2019), Thermal maturity structures in an accretionary wedge by a numerical simulation, *Progress in Earth and Planetary Science*, 6:8. doi:10.1186/s40645-018-0252-z
- Otsubo, M., H. Naruse and A. Miyakawa, (2018), Temporal changes in the internal stresses and pore pressures in a large-scale submarine mass transport deposit, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2018, 5:59, doi: 10.1186/s40645-018-0219-0
- Hasegawa, R., A. Yamaguchi, R. Fukuchi, Y. Hamada, N. Ogawa, Y. Kitamura, G. Kimura, J. Ashi and T. Ishikawa, (2019), Postseismic fluid discharge chemically recorded in altered pseudotachylite discovered from an ancient megasplay fault: an example from the Nobeoka Thrust in the Shimanto accretionary complex, SW Japan, *Progress in Earth and Planetary Science*, accepted on Jan. 28, 2019.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

- 地震発生帯掘削データ解析, および孔内観測所によるモニタリングを継続し, 特に固着域浅部の地震・測地学的挙動を明らかにする .
- 全地殻レオロジー断面の構築に向けた観測研究を継続する . ハワイ沖でのマントル掘削地点の絞り込みのための浅部掘削等を実施する .

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東北大学 (大谷 栄治、松澤 暢、日野 亮太、鈴木 昭夫、矢部 康男、武藤 潤、東 龍介) 海洋掘削科学研究開発センター 地震津波海域観測研究開発センター 地球深部ダイナミクス研究分野 地球内部

物質循環研究分野 数理科学・先端技術研究分野 高知コア研究所 地球深部探査センター

他機関との共同研究の有無：有

(以下、本課題の中心を担う海洋掘削科学研究開発センターの共同研究の相手方機関、代表者等について記載)

- ・金沢大学 理工研究域自然システム学系 森下 知晃 教授ほか
- ・神戸大学 大学院理学研究科 巽 好幸 教授
- ・東京大学地震研究所 波多野 恭弘 准教授

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：研究推進部研究推進第1課

電話：045-778-5691

e-mail：rsd1-kikan@jamstec.go.jp

URL：http://www.jamstec.go.jp/ods/j/

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：山田 泰広

所属：海洋掘削科学研究開発センター

(1) 実施機関名：

海洋研究開発機構

(2) 研究課題(または観測項目)名：

海域地震発生帯研究開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(4) 地震現象のモデル化

ア. 構造共通モデルの構築

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

(第三期中期目標より抜粋)

海溝型巨大地震や津波は、人類に甚大な被害をもたらす脅威であることから、海溝型地震発生帯における動的挙動を総合的に調査・分析し、海溝型地震の発生メカニズムや社会・環境に与える影響を理解することにより防災・減災対策を強化することは、我が国にとって喫緊の課題である。このため、機

構は、海域におけるリアルタイム地震・津波観測網を整備するとともに、研究船や海底地震計等を用いた高度な観測技術等を最大限に活用し、南海トラフや日本海溝等を中心とした地震発生帯の精緻な調査観測研究を実施する。また、「地球シミュレータ」等を用いた計算技術等により、海溝型地震の物理モデルを構築し、プレートの沈み込み帯活動の実態を定量化するとともに、より高精度な地震発生モデルやプレート境界モデルを確立する。これらの成果をもとに、地震・津波に起因する災害ポテンシャル等の評価や、我が国の防災・減災対策の強化に資する情報を提供する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

本研究課題は当機構の運営費交付金および補助金により実施している。

(第三期中期計画より関連部分を抜粋)

近年、我が国及び世界各国では、阪神淡路大震災(1995年)、スマトラ沖大津波地震(2004年)、東日本大震災(2011年)のような地震・津波による災害が多発している。機構は地震調査研究推進本部が策定した「新たな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 - 」(平成24年9月6日改訂)及び文部科学省 科学技術・学術審議会の建議「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(平成25年11月8日)」において示されている役割を果たすため、独立行政法人防災科学技術研究所等の関係する研究機関と協力し、再来が危惧されている南海トラフ巨大地震の震源域を始めとする日本列島・西太平洋海域を中心に、地震・火山活動の原因についての科学的知見を蓄積するとともに、精緻な調査観測研究、先進的なシミュレーション研究、モニタリング研究及び解析研究等を統合した海域地震発生帯研究開発を推進する。

これにより、海溝周辺における地震性滑りの時空間分布等の新たなデータに基づき、従来の地震・津波発生モデルを再考し、海溝型巨大地震や津波発生メカニズムの理解を進める。また、主に海域地殻活動や海底変動に起因する災害ポテンシャルの評価とそれに基づく地域への影響評価を行う。

(1) プレート境界域の地震発生帯実態解明研究

地震発生帯の地震・津波像の解明に資するため、地殻構造、地殻活動及び地震発生履歴等について精緻な調査観測研究を実施する。また、地震・津波観測監視システム(Dense Ocean floor Network system for Earthquakes and Tsunamis :DONET)等の海域地震・津波観測システムから得られるデータや関係する研究機関とのデータ相互交換の枠組みを活用し、地震発生、地震動及び津波の予測精度の向上に資する解析研究を行う。さらに、地震発生帯における諸現象のシミュレーション研究等を実施し、海洋科学掘削で得られた研究成果との統合を図ることにより、巨大地震発生帯の実態解明に資する新たな科学的知見を蓄積する。

(2) 地震・津波の総合災害ポテンシャル評価研究

東日本大震災の教訓を踏まえ、現実的な地震・津波像に基づく地震・津波シミュレーション研究を行い、南海トラフ、南西諸島域及び日本海溝等の日本列島周辺海域における地震・津波被害像の評価を進めるとともに、防災・減災対策へ実装するため、平成28年度を目途に各種予測計算等の準備を実施し、日本海や南海トラフ周辺海域等の地震・津波による被害の軽減に向けた情報基盤プラットフォームを構築する。これらを活用し、海域地殻変動や海底変動に起因する災害ポテンシャルの評価とそれに基づく地域への影響評価を行う。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度~30年度)の成果の概要：

平成30年度の成果の概要

次世代海底設置システム試験・評価として、BMS(海底設置型掘削装置)に搭載する観測装置設置装置の開発と海域試験を実施し、水深1,879mにおいて海底下約2.5mにダミーセンサーの設置に成功した。水圧計校正技術の検証として、DONET2観測点近傍において移動式水圧校正装のリピータビリティーの検証を行い、0.09hPa(水深0.9mm相当)の再現性を確認した。これにより水圧計データを用いた地殻変動観測の実現性を示した。

すべりの多様性と相互作用に大きく影響する摩擦則と非線形粘弾性応答の両方を考慮した地震発生サイクルシミュレーションにより東北地方太平洋沖地震後の余効変動をよく説明するモデルを構築した。また、掘削孔内計測による地震波・地殻変動（海底上下動、歪変化）の観測データによって、M8地震の震源域内のM6地震とその後の変動の起こり方を明らかにするとともに、その振る舞いを定性的にシミュレーションで再現することにより、南海トラフ巨大地震の準備状況についての知見を得た。さらに、アンサンブルカルマンフィルタを用いた逐次データ同化手法をプレート境界の固着とゆっくりすべりの推移予測に取り入れ、南海トラフ全域を対象とした数値実験を実施した。

南海トラフや南西諸島、日本海溝や日本海などの地震発生帯において調査観測研究を実施し下記のような成果を得た

- (1) 構造的知見の乏しい南西諸島地域の地震発生帯構造モデル構築のため、海溝から背弧海盆までの構造解析を行った。その結果、北部南西諸島弧および北部沖縄トラフでは、地殻浅部と堆積層内に多数の正断層・横ずれ断層が存在することを確認した。これらはいずれも背弧リフト活動に起因する構造と考えられる。また、火山フロント周辺に多数のマグマ貫入構造を検出した。
- (2) 南西諸島北部地域において自然地震の震源分布、震源断層メカニズムおよびトモグラフィー解析から既存の南海トラフのプレート境界モデルを南西方向の延長した領域の詳細境界モデルを構築した。
- (3) 日本海において、地下構造探査データの取得、データ解析を進め、断層分布と形状および地殻構造を明らかにした。また、既存の結果との比較を進め、日本海東縁北部（青森沖）と南部（新潟粟島沖）において、地殻構造のタイプ、被害地震余震域および活構造分布と地殻構造タイプの分布との対応関係の違いを明らかにした。
- (4) 海溝近傍で発生するアウターライズ地震の実態把握を目指し、千島海溝域および日本海溝域において地下構造探査観測研究を実施し、アウターライズ地震断層の発達に伴い海底面付近からマントルに至るまで地下構造が変質していること、その変質度合は両海溝域間で顕著に異なることを明らかにした。また、福島沖での海溝域の陸側斜面やアウターライズの活構造に対応した地震活動が確認され、該当域での地震発生のポテンシャルに関する知見を得た。
- (5) 明治三陸沖地震の明瞭な地学的痕跡を確認するため、三陸沖において表層の海底地質調査をおこない、その可能性のある試料を採取した。また、これまでに詳細にした堆積年代を元に三陸沖の地震発生の周期についてあらたな知見を得た。さらに熊本地震発生域から連続する佐田岬沖“中央構造線断層帯”における調査航海で取得したデータの解析を進め、地形・浅部構造、海底重力異常による構造を明らかにした。
- (6) 海底地震観測データを用いて地震波トモグラフィーとレシーバー関数解析をおこない、房総沖の地震活動、震源メカニズム、地震波速度構造、フィリピン海プレートの上面深度を推定した。陸側の領域ではプレート上面は先行研究に比べ深度は3-6km浅いことが分かり、これまで存否が不明だった沖合側のプレートの存在も確認できた。

計画期間中の成果の概要

DONET2を完成し防災科学技術研究所に運用移管をおこなうとともに、2点の新たな多項目孔内観測システムを設置しDONETへの接続を実施した。このシステムを活用することにより2016年三重県南東沖地震の震源を高精度に決定して約70年ぶりに発生したプレート境界地震であることを明らかにした。また孔内間隙水圧データから、これまでに観測されることがなかった地震発生帯浅部でのゆっくりすべりが非地震時でも繰り返し発生していることを発見した。

DONET津波計データを用いて、津波の伝搬特性を生かして即時的に津波浸水予測するシステムの構築と自治体へのシステムの提供をおこなった。さらにDONET2データも取り込んで広域化を進めた。

すべりの多様性と相互作用に大きく影響する摩擦則と非線形粘弾性応答の両方を考慮した地震発生サイクルシミュレーションにより東北地方太平洋沖地震後の余効変動をよく説明するモデルを構築した。また、掘削孔内計測による地震波・地殻変動(海底上下動、歪変化)の観測データによって、M8地震の震源域内のM6地震とその後の変動の起こり方を明らかにするとともに、その振る舞いを定性的にシミュレーションで再現することにより、南海トラフ巨大地震の準備状況についての知見を得た。さらに、地表の変位速度場の空間勾配から、逆解析を経ずにプレート境界での固着・すべり分布の時空間変化をモニタリングする手法を開発・適用し、東北地震前の固着の剥がれが周期的な変動を伴いながら生じていたことを示した。

南海トラフや南西諸島、日本海溝や日本海などの地震発生帯において調査観測研究を実施し、下記のような成果を得た。

(1) 南西諸島南部海溝付近において低周波微動観測および地下構造探査によって南西諸島南部での津波地震、低周波微動、スロースリップ発生域と地下構造の関係を明らかにし、南海トラフとは異なってプレート間の固着の弱い領域が支配的に存在することが明らかになった。

(2) これまでに得られてきた南海トラフ域における地下構造をコンパイルして地震発生帯の3次元海洋プレート形状モデルを構築し公開した。また、詳細なプレート形状モデルが未構築な南西諸島では海域での大規模な地震観測から地震活動やトモグラフィーの解析から北部と南部でそれぞれプレート形状モデルを構築した。

(3) 日本海東縁から南東縁では海洋地殻、厚い海洋地殻、大陸地殻という異なる地殻構造の領域が分布していることがわかり、それらの形成過程を明らかにするとともに、過去の地震破壊域や地震活動との関係を明らかにした。

(4) 日本海溝海溝軸近傍における調査観測研究によって、東北地震において海溝陸側斜面の変動が大きかった部分とそうでない部分の分布が明らかになり、断層や褶曲構造および堆積構造の分布に差異があることがわかった。

(5) 海溝海側アウターライズ域において、沈み込む海洋地殻およびマントルの変質を確認するとともに、アウターライズ地震断層について日本海溝側の方が千島海溝側よりも深部まで発達していることがわかった。また詳細な地震活動の解析から活構造に対応した震源の分布が認められることや断層メカニズム解から海洋プレート内部の応力状態について明らかにした。

(6) 日本海溝における調査観測研究により、2011年地震時の海底地形変動を東北沖全体で明らかにし、宮城沖以外は大きな変動がないことを示した。また2011年地震時の浅部断層のすべり量分布を定量的におこない、すべりモデルを提唱した。2011年と同等の過去の地震の分布と年代を日本海溝の地層から読み取り、その発生域や繰り返しなど、東北沖で発生する地震の実態解明を進めた。

(7) 海底地震計や水圧計の観測データの処理手法を開発し海洋地殻内の堆積層の層厚や異方性を得るとともに、S速度構造の推定をおこないプレート境界近傍の低速度層の検出と低周波微動の活動との関連について知見を得た。

(8) 海域コア試料の調査により、南西諸島および南海トラフの海域津波地震履歴記録の年代分布を把握した。

(9) 海底下浅部構造把握のための電磁気学的手法を開発し、地震発生海域(日本海溝アウターライズ)で観測実施した。

(10) 期間中に発生した2016年の熊本地震や、福島県沖で発生した地震の周辺海域で、迅速な調査による海底断層の現状把握を行なった。

(11) 房総沖OBS観測データを用いた震源決定やトモグラフィー解析からフィリピン海プレート上面形状を推定し、上面の深さが従来より数%浅いことがわかった。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
Agata, R., S. D. Barbot, K. Fujita, M. Hyodo, T. Iinuma, R. Nakata, T. Ichimura, and T. Hori (2019).
Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake. Nat.

- Commun., in press. Iinuma, T. (2018). Monitoring of the spatio-temporal change in the interplate coupling at northeastern Japan subduction zone based on the spatial gradients of surface velocity field. *Geophys. J. Int.*, 213, 30-47, doi:10.1093/gji/ggx527.
- Nakano, M., M. Hyodo, A. Nakanishi, M. Yamashita, T. Hori, S. Kamiya, K. Suzuki, T. Tonegawa, S. Kodaira, N. Takahashi and Y. Kaneda (2018). The 2016 Mw 5.9 earthquake off the southeastern coast of Mie Prefecture as an indicator of preparatory processes of the next Nankai Trough megathrust earthquake. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5:30, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0188-3>.
- Ryuta Arai, Shuichi Kodaira, Tsutomu Takahashi, Seiichi Miura and Yoshiyuki Kaneda. Seismic evidence for arc segmentation, active magmatic intrusions and syn-rift fault system in the northern Ryukyu volcanic arc. *EARTH PLANETS AND SPACE*, 2018, 70, 61, doi: <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0830-8>.
- Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Yuka Kaiho, Yojiro Yamamoto, Tsutomu Takahashi, Seiichi Miura and Tomoaki Yamada, Controlling factor of incoming plate hydration at the north-western Pacific margin, *Nature Communications*, 2018, 9, 1, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06320-z>.
- 富士原敏也, 金松敏也, 笠谷貴史. 佐田岬半島沖瀬戸内海における海底地形, 浅層構造, 重力調査. *JAMSTEC Report of Research and Development*, 2018, 27, p. 13-25, doi: 10.5918/jamstecr.27.13
- Kazuko Usami, Ken Ikehara, Toshiya Kanamatsu and Cecilia M. McHugh, 2018, Super cycle in great earthquake recurrence along the Japan Trench over the last 4000 years, *GeoScience Letters*, DOI: 10.1186/s40562-018-0110
- Koichiro Obana, Yasuyuki Nakamura, Gou Fujie, Shuichi Kodaira, Yuka Kaiho, Yojiro Yamamoto, Seiichi Miura, Seismicity in the source areas of the 1896 and 1933 Sanriku earthquakes and implications for large near-trench earthquake faults, *GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL*, 2018, 212, 3, 2061-2072, doi: 10.1093/gji/ggx532

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

海洋研究開発機構第四期中期計画に基づき実施の予定

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

地震津波海域観測研究開発センター

地球深部ダイナミクス研究分野

数理科学・先端技術研究分野

高知コア研究所

海洋掘削科学研究開発センター

地球情報基盤センター

地球深部探査センター

他機関との共同研究の有無 : 有

(以下、本課題の中心を担う地震津波海域観測研究開発センターの共同研究の相手方機関、代表者等について記載)

- ・株式会社地球科学総合研究所 新技術推進室 浅川 栄一室長ほか
- ・独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター地質情報研究部門海洋地質研究グループ 荒井 晃作グループ長ほか
- ・気象庁地震火山部地震津波監視課松代地震観測所 山崎伸之 技術専門官ほか
- ・和歌山県危機管理局総合防災課 松尾 孝志課長ほか

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 地震津波海域観測研究開発センター企画調整グループ

電話：045-778-5963

e-mail：kg-kikan@jamstec.go.jp

URL：http://www.jamstec.go.jp/ceat/j/

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：小平 秀一

所属：地震津波海域観測研究開発センター

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

津波浸水履歴情報の整備

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料，考古データ，地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

津波堆積物をはじめとした過去の津波に関する痕跡データについて、産総研によって論文公表した調査データを整理し、ウェブのマップ上で各種情報を示せるように整備する。特に 869 年貞観地震に関するデータについて、まず仙台平野について整備し、ウェブ公開する。その後は石巻平野、福島県北部について順次整備の上、公開する。南海トラフ沿いなど、そのほかの地域のデータは内容を検証しながら整備する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年度は仙台平野の津波浸水履歴に関する情報を整備し、ウェブ公開する。平成 27 年度は石巻平野、福島県北部について整備の上、順次公開する。平成 28 年度以降は、津波浸水履歴情報の内容を検証しつつ、青森県沿岸や九十九里浜沿岸、南海トラフ沿岸などの地域を候補として情報の整備を行っていく。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

【平成 30 年度成果】

・千島・日本海溝

千島の 17 世紀巨大地震について、北海道東部霧多布湿原で 13 世紀の巨大津波に関する検討のため、過去の海岸線位置復元のための調査を行った。

- ・相模トラフ

房総半島南部の海岸段丘について、おもに平砂浦地域で地中レーダ探査および掘削調査を実施し、また詳細 DEM の解析を行った。

- ・南海トラフ

駿河湾奥部において、富士川河口断層帯を挟んだ隆起側と沈降側でボーリングコア試料の解析を進めた。また三重県南伊勢町、和歌山県串本町、高知県高知市および須崎市で津波堆積物調査を行った。奄美群島喜界島ではサンゴマイクロアトールの調査から、過去約 600 年間の地殻上下変動を復元した。

【本計画期間中の成果のまとめ】

- ・千島-日本海溝

- ・相模トラフ

相模トラフ沿いではおおよそ当初計画通りに進めることができ、まず房総半島九十九里浜において津波堆積物調査を実施した結果、過去約 1000 年間に 2-3 回の津波痕跡を検出し、歴史津波およびこれまで歴史上に知られていない津波の痕跡を検出した。房総半島南部千倉低地の海岸段丘については、詳細 DEM の解析とボーリングコア試料の解析から段丘の分布パターンと離水年代の再検討を行った結果、房総半島南部の海岸段丘について、ボーリングコア試料の解析から離水年代の再検討を行った。その結果、段丘の区分と年代が更新され、再来間隔が非常にばらつくことが明らかになった。

- ・南海トラフ

南海トラフ沿いでは東端の駿河湾沿岸から西は南西諸島北部の喜界島まで、各地で津波堆積物調査および隆起痕跡調査を実施し、地震・津波履歴に関する情報を収集することができた。駿河湾沿岸では過去 3000 年間の沈降履歴および駿河トラフの陸域延長部の断層活動性を解明した。また静岡県、三重県、和歌山県、徳島県、高知県の各沿岸での津波堆積物調査で得た地震履歴は、津波浸水規模を反映し、歴史地震の再来間隔より長い 400-1000 年間隔であることが明らかになった。宮崎県沿岸では顕著な津波痕跡が乏しいこと、喜界島では過去約 600 年間の地殻上下変動を明らかにした。このように各地で最大クラスの評価に資するデータを得ることができ、おおよそ計画通りに進めることができた。しかし地域間のイベントの対比ができておらず、破壊域の評価には至っておらず、今後の課題となっている。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Fujino, S., Kimura, H., Komatsubara, J., Matsumoto, D., Namegaya, Y., Sawai, Y., Shishikura, M., 2018, Stratigraphic evidence of historical and prehistoric tsunamis on the Pacific coast of central Japan: Implications for the variable recurrence of tsunamis in the Nankai Trough, Quaternary Science Reviews, 201, 147-161. Tanigawa, K., Shishikura, M., Fujiwara, O., Namegaya, Y., Matsumoto, D., 2018, Mid to late Holocene marine inundations inferred from coastal deposits facing the Nankai Trough in Nankoku, Kochi Prefecture, southern Japan, The Holocene, 28, 867-878.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画においても「海溝型巨大地震の履歴とメカニズム解明」という課題で進めていく。平成 31 年の予定は、これまでの海溝沿いに日本海沿岸を加え、以下のように進める予定である。

- ・千島-日本海溝

千島の 17 世紀巨大地震の断層モデルの再検討。日本海溝南部の津波履歴の検討。

- ・相模トラフ

房総半島南部の海岸段丘について、掘削調査による試料採取と年代測定データの充実。

- ・南海トラフ

駿河湾奥沿岸地域の古地震履歴解明のための調査、分析。紀伊半島および四国沿岸での津波堆積物調査。南西諸島北部での隆起サンゴ礁調査。

・日本海沿岸

秋田県沿岸および島根県沿岸での古地震・古津波調査。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ

他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ

電話 : 029-861-3691

e-mail :

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

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 穴倉正展

所属 : 活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

活断層データベースの整備

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

(4) その他関連する建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

首都直下地震

(6) 本課題の5か年の到達目標：

すでに公開中の活断層データベースについて、新規データの入力、既存データの追加、検索・表示機能の強化を行う。また他機関のデータベースも含め、データの共有やリンク表示機能等の連携を強化し、より機能的で使いやすいデータベースに発展させる。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成 26 年度については、最近数年間に実施された活断層調査の成果について、データを体系化し、データベースに収集する。また産総研で刊行している活断層ストリップマップ等を重ねて表示できる機能を追加する。

平成 27 年度以降については、新たに実施された活断層調査の結果を逐次収集・入力するとともに、他機関との連携を図り、データの共有やリンク表示機能を強化する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

産業技術総合研究所では、全国に分布する活断層のうち、大地震の震源となる可能性が高い長さ 10 km 以上の活断層について、これまでの調査情報・研究成果のデータ化とそれぞれの活断層のパラメータに関する情報を整備している。平成 30 年度には、活断層データベースの検索画面の表示速度を高速化するため、背景地図、断層線、調査地点といったデータを画像タイル化する作業と、位置情報から各データにアクセスするためのシステム構築を行った。また、これまでに収集した調査地点情報約 21,000 件について整理を行い、表示方法の改善を検討した。

本計画期間には、30 文献について活断層パラメータのデータ化を行うとともに、約 1000 件の地点情報を公開した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

平成 30 年度に産総研で実施した陸域活断層調査(3 断層帯 : 日奈久断層帯、標津断層帯、松本盆地東縁断層帯) と海域活断層調査(1 断層帯 : 十勝平野断層帯(南部 : 光地園断層)) の調査結果をデータ化し、活断層データベースに収録する。さらに、未収録の論文・報告書の中から活断層の活動性評価に関する重要な情報を含む資料を選定し、陸域と海域をあわせて 10 断層帯程度についてデータ化と入力作業を実施する。また、これまで外注していた活断層情報入力作業を内部で作業できるように入力インターフェイスを改善する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

活断層・火山研究部門 活断層評価研究グループ
他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 活断層・火山研究部門 活断層評価研究グループ

電話 :

e-mail : af-db-ml@aist.go.jp

URL : <https://unit.aist.go.jp/ievgroup/faulteval/index.html> https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html

(13) この研究課題(または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 吾妻崇

所属 : 活断層・火山研究部門 活断層評価研究グループ

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

地質調査に基づく火山活動履歴調査とデータベース整備

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料，考古データ，地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

火山活動の評価と予測の基礎となるデータとして、九重、蔵王、伊豆諸島、富士山、恵山などの活動的火山の噴火履歴調査を実施し、形成史や噴火履歴を明示した地質図の整備を推進する。また、火山に関する基礎データの収集と整理を行い、日本の火山データベースとして維持更新する。大規模噴火を発生させた火山対象に大規模噴火に至る準備過程の特徴を抽出し、大規模噴火の再来の可能性を検討する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

将来噴火の可能性の高い活動的火山の形成史・噴火履歴を明示した地質図整備を、火山防災のために監視・観測体制の充実が必要な活火山（47 火山）で重点的に行う。このうち九重、蔵王、伊豆諸島、富士山、恵山などでは、噴火履歴調査に基づいて形成史を解明し、あわせて定量的な噴出物量、化学分析、年代測定等の基礎データを取得し、地質図として整備する。

日本列島の火山の基礎情報を最新の知見に基づいて収集・整理し、これらを日本の火山データベースとして引き続き整備し公開する。新たに 20 万分の 1 スケールでの全国火山図を作成し、この火山区分に基づいた噴火年代、噴出量、岩石学的分析等を基礎データとしてデータベースに取り込む。これらの整備により、国土の基礎情報として関係諸機関の利用に供すると共に、火山活動の噴火推移予測に貢献する。

十和田やインドネシアを含め、後期更新世から完新世に大規模噴火を発生させた火山において、過去の大規模噴火とそれ以前の噴出物を対象に、ボーリング・トレンチを含めた地質学岩石学的調査を行い、大規模噴火に至る噴火推移の復元とマグマ供給系の変遷を明らかにする。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

監視・観測体制の充実が必要な活火山の地質図整備では、八丈島火山の火山地質図を、陸域と海域を統合する形で出版した。火山地質図作成のため、雌阿寒岳火山と秋田焼山火山で新たにトレンチ掘削を含めた調査を行い、恵山火山、御嶽火山及び日光白根火山では引き続き噴火履歴調査を実施した。

日本の火山データベースでは、八丈島火山に関するデータを公開し、第四紀火山のページに文献一覧の掲載を開始した。また 20 万分の 1 スケールの全国火山図公開に向けたビューア開発を行い、北海道及び東北地域で試験公開を進めた。

阿蘇火山・始良火山等の大規模噴火に至る噴火履歴の詳細化のため、大規模噴火とその直前の噴出物の分布・層序調査および岩石学的分析を実施した。大規模火砕流噴火である阿蘇 3 及び 4 噴火の間の層序とマグマ組成の変化を明らかにした。また始良カルデラの大規模噴火である入戸火砕流噴火に先立つ約 3 万年間のマグマ組成の変化を明らかにした。

わが国における過去約 30 万年間に発生した VEI=7 クラスの噴火について噴火推移や噴出物の分布・体積等のデータを取りまとめた大規模噴火データベースの整備を進めた。また世界各国の有史における大規模噴火推移の記録を取りまとめ大規模噴火推移データベースの整備を進めた。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

石塚 治・下司信夫、2018、八丈島火山地質図. 火山地質図 20, 産総研地質調査総合センター, 8p.
及川輝樹・萬年一剛・下司信夫・中野 俊, 2018, Recent eruptions in Japanese Islands. 地質学雑誌, vol.124, I-II.

及川輝樹・大場司・藤縄明彦・佐々木寿, 2018, 水蒸気噴火の地質学的研究. 地質学雑誌, vol.124, 231-250.
伊藤順一, 2018, 御嶽山噴火の教訓と噴火予測の現状 - 過去の火山活動から学ぶ危険予知 -. 日本旅行医学会学会誌, vol.13, 45-51.

Geshi, N. and Itoh, J., 2018, Pyroclastic density currents associated with the 2015 phreatomagmatic eruption of the Kuchinoerabujima volcano. Earth Planet Space, 70:119, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0881-x>

下司信夫, 2018, 陥没カルデラの構造とその形成メカニズム. 地学雑誌, 127, 175-189.

日本の火山データベース <<https://gbank.gsj.jp/volcano/>>

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

活火山の形成史・噴火履歴を明示した地質図整備では、恵山火山の地質図をとりまとめ、雌阿寒岳、秋田焼山、御嶽山、日光白根山の各火山で引き続き調査研究を実施する。日本の火山データベースでは、第四紀火山の文献一覧掲載を進め、20 万分の 1 スケールでの全国火山図の公開を行う。

大規模噴火を対象に過去の噴火推移を地質学的手法により明らかにするとともに、記載岩石学的手法・実験岩石学的手法による噴出物の解析とマグマ溜り条件の復元を行う。我が国における後期更新世の大規模火砕流噴火の噴火推移や噴出物分布、その噴出量評価を取りまとめた大規模噴火データベースの作成・公開を進める。歴史記録に基づく詳細な噴火推移を取りまとめた噴火推移データベースの作成と公開を進める。噴出物組織や化学組成、微小領域化学分析手法による大規模噴火のマグマ溜り

条件やマグマ上昇・噴出条件の解析を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

活断層・火山研究部門 火山活動研究グループ

他機関との共同研究の有無 : 有

北海道大学、山形大学、電力中央研究所など

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 活断層・火山研究部門 火山活動研究グループ

電話 :

e-mail :

URL : <https://unit.aist.go.jp/ievg/actvolcano-rg1/>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 石塚吉浩

所属 : 活断層・火山研究部門 火山活動研究グループ

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

海溝型巨大地震の履歴とメカニズム解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料，考古データ，地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

・千島-日本海溝

2011 年東北地方太平洋沖地震の破壊領域よりも北のプレート境界で発生する巨大地震および津波に関して、過去の履歴と規模を津波堆積物調査等に基づいて復元し、断層モデルの構築を試みる。

・相模トラフ

おもに房総半島沿岸の地形、地質調査のデータから、過去の関東地震の履歴と隆起パターンなどを復元し、関東地震の多様性を評価する。特に房総半島南東～東沖の領域の破壊の可能性について検証する。

・南海トラフ

沿岸域において地形、地質の調査を行い、史料の情報などと併せ、過去に海域で発生した地震の時期とそれに伴う地殻変動や津波浸水域を解明する。特に最大クラスの地震について、地形、地質に記録された実証データから検証し、規模の上限について評価を試みる。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

・千島-日本海溝

平成 26 年度は青森県および岩手県南部の太平洋沿岸で津波堆積物調査を実施する。平成 27 年度は同地域の補完調査に加え、北海道南部太平洋沿岸に調査範囲を拡大する。平成 28 年度以降は北海道太平洋岸などの津波堆積物調査を行い、それらのデータに基づいて断層モデルについて検討を行う。

・相模トラフ

平成 26～27 年度は、おもに産総研がこれまでに房総半島で取得した詳細地形 (DEM) データについて、地形判読や高度分布の解析を行い、海岸段丘の分布を再評価する。また房総半島沿岸各地で実施した掘削調査による既存のコア試料の分析を行い、海岸段丘の年代を解明する。平成 28 年度以降も上記解析を継続すると共に、九十九里浜平野などで津波堆積物調査を実施する。

・南海トラフ

おもに文部科学省(委託先：海洋研究開発機構)の南海トラフ広域地震防災研究プロジェクトに参画して津波履歴調査を担い、平成 26 年度はおもに高知県沿岸、平成 27～29 年度は四国・九州から南西

諸島にかけて、平成 30 年度以降は東海～紀伊半島沿岸で、それぞれ津波堆積物調査および隆起痕跡調査を実施する。また期間を通じて地震サイクルシミュレーションなどから規模予測の手法を検討する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度～30 年度) の成果の概要 :

【平成 30 年度成果】

・千島・日本海溝

千島の 17 世紀巨大地震について、北海道東部霧多布湿原で 13 世紀の巨大津波に関する検討のため、過去の海岸線位置復元のための調査を行った。

・相模トラフ

房総半島南部の海岸段丘について、おもに平砂浦地域で地中レーダ探査および掘削調査を実施し、また詳細 DEM の解析を行った。

・南海トラフ

駿河湾奥部において、富士川河口断層帯を挟んだ隆起側と沈降側でボーリングコア試料の解析を進めた。また三重県南伊勢町、和歌山県串本町、高知県高知市および須崎市で津波堆積物調査を行った。奄美群島喜界島ではサンゴマイクロアトールの調査から、過去約 600 年間の地殻上下変動を復元した。

【本計画期間中の成果のまとめ】

・千島・日本海溝

本地域では 2011 年東北地方太平洋沖地震によって形成された津波堆積物の観察を通じ、古津波の津波浸水域の正確な復元のための地球化学的手法の開発を行った。またその手法を千島海溝の 17 世紀超巨大地震への適用を試みた。また仙台平野などでの津波堆積物の証拠から 869 貞観地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震の間にも同様の巨大津波を伴う地震が発生しており、それが歴史記録にある 1454 年享徳地震の可能性が高いことを示した。当初計画にあった 2011 年東北の地震の破壊域より北の地域での古地震の評価のため、岩手県や青森県沿岸の調査を実施したが、断層モデルの構築にはまだデータが不足しており、今後も調査が必要である。

・相模トラフ

相模トラフ沿いでは当初計画通りに進めることができ、おおよそ目標に到達した。まず房総半島九十九里浜において津波堆積物調査を実施した結果、過去約 1000 年間に 2-3 回の津波痕跡を検出し、歴史津波およびこれまで歴史上に知られていない津波の痕跡を検出した。房総半島南部千倉低地の海岸段丘については、詳細 DEM の解析とボーリングコア試料の解析から段丘の分布パターンと離水年代の再検討を行った結果、房総半島南部の海岸段丘について、ボーリングコア試料の解析から離水年代の再検討を行った。その結果、段丘の区分と年代が更新され、再来間隔が非常にばらつくことが明らかになった。

・南海トラフ

南海トラフ沿いでは東端の駿河湾沿岸から西は南西諸島北部の喜界島まで、各地で津波堆積物調査および隆起痕跡調査を実施し、地震・津波履歴に関する情報を収集することができた。駿河湾沿岸では過去 3000 年間の沈降履歴および駿河トラフの陸域延長部の断層活動性を解明した。また静岡県、三重県、和歌山県、徳島県、高知県の各沿岸での津波堆積物調査で得た地震履歴は、津波浸水規模を反映し、歴史地震の再来間隔より長い 400-1000 年間隔であることが明らかになった。宮崎県沿岸では顕著な津波痕跡が乏しいこと、喜界島では過去約 600 年間の地殻上下変動を明らかにした。このように各地で最大クラスの評価に資するデータを得ることができ、おおよそ計画通りに進めることができた。しかし地域間のイベントの対比ができておらず、破壊域の評価には至っておらず、今後の課題となっている。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Fujino, S., Kimura, H., Komatsubara, J., Matsumoto, D., Namegaya, Y., Sawai, Y., Shishikura, M., 2018, Stratigraphic evidence of historical and prehistoric tsunamis on the Pacific coast of central Japan: Im-

plications for the variable recurrence of tsunamis in the Nankai Trough, Quaternary Science Reviews, 201, 147-161. Tanigawa, K., Shishikura, M., Fujiwara, O., Namegaya, Y., Matsumoto, D., 2018, Mid to late Holocene marine inundations inferred from coastal deposits facing the Nankai Trough in Nankoku, Kochi Prefecture, southern Japan, The Holocene, 28, 867-878.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画においても「海溝型巨大地震の履歴とメカニズム解明」という課題を進めていく。平成 31 年の予定は、これまでの海溝沿いに日本海沿岸を加え、以下のように進める予定である。

・千島-日本海溝

千島の 17 世紀巨大地震の断層モデルの再検討。日本海溝南部の津波履歴の検討。

・相模トラフ

房総半島南部の海岸段丘について、掘削調査による試料採取と年代測定データの充実。

・南海トラフ

駿河湾奥沿岸地域の古地震履歴解明のための調査、分析。紀伊半島および四国沿岸での津波堆積物調査。南西諸島北部での隆起サンゴ礁調査。

・日本海沿岸

秋田県沿岸および島根県沿岸での古地震・古津波調査。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ

他機関との共同研究の有無 : 有

筑波大学、新潟大学、島根大学、法政大学、建築研究所、地域地盤環境研究所

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ

電話 : 029-861-3691

e-mail :

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

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 宍倉正展

所属 : 活断層・火山研究部門 海溝型地震履歴研究グループ

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震時変位量に基づく連動型古地震像復元手法の研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料, 考古データ, 地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料, 考古データ, 地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

4. 研究を推進するための体制の整備

(4) 研究者, 技術者, 防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

糸魚川-静岡構造線活断層系等の内陸活断層帯において地質学的・古地震学的な調査を実施し、過去の地震に伴う複数セグメントの連動履歴を解明する。連動履歴解明のため、セグメント境界周辺において複数回の地震時変位量を復元するための野外調査を 5 か年で実施する。地震時変位量等を基準としてセグメント境界の連動/非連動を判別することによって連動性を評価し、最近数回の地震サイクルにおける古地震シナリオを構築する。さらに、その古地震シナリオを反映した地震規模予測および長期予測の高度化について検討する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年度：セグメント境界周辺において、地震時変位量を復元するための調査を実施する。

平成 27 年度：セグメント境界周辺において、地震時変位量を復元するための調査を実施する。地震時変位量等から連動履歴を明らかにして連動/非連動を判別し、セグメント境界の連動性評価をおこなう。

平成 28 年度：セグメント境界周辺において、地震時変位量を復元するための調査を実施する。

平成 29 年度：セグメント境界周辺において、地震時変位量を復元するための調査を実施する。地震時変位量等から連動履歴を明らかにして連動 / 非連動を判別し、セグメント境界の連動性評価をおこなう。

平成 30 年度：セグメント境界周辺において地震時変位量を復元するための調査を実施する。セグメント境界毎の連動性評価を総合し、断層帯の連動履歴をもとに古地震シナリオを作成する。古地震シナリオを反映した規模予測および長期予測の高度化について検討する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要：

主に糸魚川 - 静岡構造線活断層系を対象として、地震時変位量等を指標として過去の連動 / 非連動の履歴を明らかにする調査研究を実施してきた。特に、2014 年長野県北部の地震に伴う緊急調査では、2014 年に先行する古地震イベントが西暦 1714 年正徳小谷地震である可能性が高く、さらに先行するイベントは西暦 762 年 / 841 年の少なくとも神城断層全体が活動した連動型地震であった可能性等を明らかにした。これらの結果、地震時変位量と断層長のスケールリング則を指標として、古地震イベントの連動範囲と地震規模を推定可能であること、固有地震と非固有地震が繰り返す不規則な地震発生が時間予測モデルで説明可能であることを示した。

また、過去の神城断層の南端付近に位置する大町平地区・木崎湖南方地点で実施されたジオスライサー調査の結果を再検討し、最近 4 ~ 6 回の地震時変位量を復元した。詳細な地形地質断面に基づく再検討の結果、約 1 万年前以降の河川性堆積層および湖沼性堆積層に東側隆起の累積的な上下変位と撓曲変形が生じ、地表から深さ約 10m に東傾斜約 20-30 °の低角逆断層が認められた。地層の対比や年代測定結果を再検討した結果、1.1 万年前の砂礫層以降に約 10m の累積的な上下変位が生じており、確実な古地震イベント 4 回と不確かなイベント 2 回を識別可能であることが判明した。さらに下位の砂礫層と腐植質シルト層は 1.2 万年の年代測定試料を包含し、約 12m の累積上下変位を伴う。以上より、1.2 万年前以降に 4 回もしくは 6 回の古地震イベントが生じたと考えられる。

古地震イベントに伴う地震時上下変位量について、イベント回数が 4 回のケースと 6 回のケースのそれぞれを再検討した。その結果、前者のケースでは新しいイベントからそれぞれ 3m 以上のイベントが 2 回と 2m 以下のイベント 2 回の地震時上下変位が生じた可能性が指摘できる。一方、後者のケースでは、3m 以上のイベントが 2 回と 2m 以下のイベントが 4 回の地震時変位が生じた可能性がある。いずれのケースでも木崎湖南方地点における最新活動の上下変位は 3 m 程度であり、南隣の松本盆地東縁断層北部・大町借馬地区においても最新活動に伴う上下変位は 2 m 程度であることが確認されている。いずれの地点も神城断層と松本盆地東縁断層北部のセグメント境界付近に位置し、互いに 1.5km 程度しか離れていないため、最新活動に伴い神城断層と松本盆地東縁断層北部が連動したと判断できる。これは、最新活動に対比される西暦 762 年/841 年の地震に伴い、白馬村堀之内周辺から山梨県小淵沢に至る区間 (例えば、奥村、1998) あるいは諏訪湖の西岸に至る区間 (近藤ほか、2014) が連動したとする従来の推定と調和的である。さらに、上述の木崎湖南方地点における変位履歴から判断して、神城断層と松本盆地東縁断層北部における連動イベントの発生間隔は 5400 年程度と試算され、ポアソン過程による試算では、連動確率は 0.6% と試算される。最新活動よりも古い連動イベントについては、さらに多くのセグメント境界付近の調査地点で変位履歴を復元し、連動範囲を特定して古地震シナリオを精緻化していく必要がある。

なお、本研究の一部は、文部科学省科学技術基礎調査等委託事業「活断層の評価に関する調査研究：活断層帯から生じる連動型地震の発生予測に向けた活断層調査研究」により実施した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等)：

堤 浩之・近藤久雄・石山達也、我が国における活断層研究の最近 25 年の成果と今後の展望、地質学雑誌、124-9、741-757.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

引き続き、連動型地震を含む地震発生履歴を精緻化するため、主要活断層帯のセグメント境界周辺において複数回の地震時変位量を復元する地形地質調査を実施する。地震時変位量等を基準としてセグメント境界の連動/非連動を判別し、過去の連動型地震の発生頻度と地震規模を明らかにする。その結果を基に、最近数回の地震サイクルにおける古地震シナリオを構築し、その古地震シナリオを反映した地震規模予測および長期予測の高度化について検討する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

活断層・火山研究部門 活断層評価研究グループ

他機関との共同研究の有無：無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：活断層・火山研究部門 活断層評価研究グループ

電話：

e-mail：

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

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：近藤久雄

所属：活断層・火山研究部門 活断層評価研究グループ

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

火山性流体と噴出物の解析に基づく噴火推移過程のモデル化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

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

熱水系の卓越する火山において、熱水系の構造及び火山ガス供給系を明らかにし、水蒸気爆発発生に関与する熱水系の実体をモデル化する。

火山噴出物の岩石学的・地球化学的解析に基づき、マグマ溜まりにおける噴火準備過程および直前過程の定量化を行うとともに、火山灰の解析に基づく噴火特徴把握手法の確立を行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

桜島、浅間山などマグマ噴火を主体とし活発な噴煙活動を継続している火山において、Multi-GAS による火山ガス組成の連続観測および繰り返し観測を実施し、噴火発生や火山活動推移に伴う火山ガス組成の特徴と変化を把握し、火山ガス供給過程のモデル化を行う。特に桜島においては、航空機等を用いた観測も併用することにより、噴火により放出される火山ガス組成の特徴把握を目指す。また、噴煙活動を継続している火山において高時間分解能の SO₂ 放出量変動観測を実施し、噴火発生前後に於ける火山ガス放出量変動を定量化し、噴火発生過程のモデル化を行う。伊豆大島において自然電位

の連続観測を実施し、火山活動静穏時における降雨などに対する地下水系の応答をモデル化し、火山活動に伴う変動を抽出する。さらに、想定されるマグマの貫入および火山ガスの供給に対する熱水系の応答を、シミュレーションを用いてモデル化し、発現する地表変動の多様性を評価する。

雌阿寒岳、口永良部島などにおいて、火山ガスの繰り返し観測および放熱分布の把握、自然電位分布測定などを実施し、熱水系の分布および火山ガスの起源を明らかにすると共に、熱水系シミュレーションによるモデル化を実施し、水蒸気爆発の発生に関与している熱水系の実体を明らかにする。

有珠、伊豆大島等マグマ噴火を繰り返す火山において、斑晶の累帯構造、マグマ溜まりの岩石学的特徴、揮発性成分濃度や圧力条件を把握し、噴火直前過程や噴火に至るまでのマグマ供給系の発展を明らかにするとともに、噴火を繰り返すメカニズムを解明する。桜島火山など活発に噴火している火山について、火山灰構成粒子の観察・分析等に基づき噴出物の特徴を把握するとともに、他の観測量や岩石学的解析と比較に基づきマグマ上昇・脱ガス過程をモデル化する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

浅間山、阿蘇において Multi-GAS による火山ガス組成繰り返し観測を実施し、火山活動推移に伴う火山ガス組成の変化を把握し、噴火推移の評価を行った。口永良部島の 2015 年噴火前後に実施した、無人ヘリやセスナ機を用いた火山ガス組成観測結果の再解析を行い、噴火前後における火山ガス組成の変動を定量化した。火山ガスの CO_2/S 比は 2014 年、2015 年噴火前後で大きな変動は見られないが、 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ は 2014 年噴火以前の 3 程度から、2014 年噴火後には 10 に上昇し、その後再び 3 程度に減少している。この変動は脱ガス圧力の変動に起因すると推定された。熱水系が卓越すると考えられる雌阿寒岳、十勝岳、霧島硫黄山において火山ガスの繰り返し観測を実施し、噴気活動の変化を把握した。霧島硫黄山において、2018 年 4 月 19 日の噴火に先立つ、急激な火山ガス組成の変化を検知した。

本計画期間中に、マグマ噴火を主体とし活発な噴煙活動を継続している火山において、Multi-GAS による火山ガス組成の連続観測および繰り返し観測を実施し、浅間山、阿蘇、三宅島、口永良部島における噴火・火山ガス供給過程の解析を進めた。有人・無人航空機を用いた火山噴煙観測を手法の改良を進め、桜島や口永良部島などの観測に応用した。また、桜島における SO_2 放出率の短時間変動の測定に基づき、火山ガス放出と地殻変動の関連を定量化した。熱水系が卓越すると考えられる火山においては、阿蘇の湯だまりのモデル化や霧島硫黄山における噴火直前の火山ガス組成の変化検知を実現した。

伊豆大島の自然電位の連続観測において年周変動とは異なるような経年変化が観測されたため、全体的な傾向を把握するためにカルデラ内で移動観測を行い自然電位のマッピングを行った。過去の分布と比較を行い、火山活動にともなうような顕著な変化は認められないことを確認した。火山活動の活発化に伴い予想される地殻内の火山ガス上昇を捉える目的で、従来の自然電位観測網の拡充と地中温度の連続観測に着手した。

本計画期間中に、伊豆大島における自然電位の連続観測結果は顕著な年周変動を示し、この現象は、数値計算による定量的な解析から、厚く堆積している不飽和な地層への雨水の浸透に起因することがわかった。また、数値シミュレーションを行うことによって火山活動に伴う変動を予測し、このような特性を持つ自然電位は地下からの火山性流体の上昇に対して敏感な物理量であることが示された。雌阿寒岳、口永良部島、伊豆大島の各火山における自然電位分布と電磁探査法によって得られた比抵抗分布の比較を行い、各火山に特徴的な自然電位の高度勾配は、熱水系に伴う変質帯の分布形態に影響されることが分かった。

2018 年 3 月に発生した霧島新燃岳の噴出物の時間推移を解析し、連続的な噴煙活動と溶岩流出が起こった 3 月上旬の噴出物とそれ以降の間欠的な爆発が続いた時期の噴出物に含まれる本質物質の結晶度の違いから、火道内浅部のマグマ上昇と火口内での滞留による結晶化の進行を推測した。口永良部島新岳で 10 月以降活発化した噴火の噴出物の統計的解析を行い、連続噴煙活動が卓越した 10 月から 11 月の噴出物には結晶度のやや低い本質物が多く含まれていたが、間欠的なマグマ水蒸気爆発が卓越した 12 月以降の噴出物には熱水変質を被った変質岩片が多量に含まれることを明らかにした。

本計画期間中に、桜島や阿蘇中岳、霧島新燃岳などマグマ噴火を主体とした噴火活動が継続する火山

において、噴出物の岩石学的特徴と表面噴火活動の推移との対応を解析し、噴火活動の活発化と本質物質の結晶度などに相関があることを見出した。また、光学顕微鏡像解析と電子顕微鏡による化学組成解析を組み合わせることで本質物質と熱水変質物質の系統的な区分を可能とした。

- (9)平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
Kazahaya R, Shinohara H, Ohminato T, Kaneko T (2019) Airborne measurements of volcanic gas composition during unrest at Kuchinoerabujima volcano, Japan. Bull. Volcanol., 81:7 <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1262-9>
Shinohara H, Yokoo A, Kazahaya R (2018) Variation of volcanic gas composition during the eruptive period in 2014 Nakadake crater, Aso volcano, Japan. Earth, Planets and Space 70:15 <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0919-0>.

- (10)次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

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

- (11)実施機関の参加者氏名または部署等名：

活断層・火山研究部門 マグマ活動研究グループ
他機関との共同研究の有無：有
東京大学地震研究所(武尾実、他数名)
京都大学防災研究所(井口正人、他数名)
京都大学理学部(鍵山恒臣、他数名)

- (12)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：活断層・火山研究部門 マグマ活動研究グループ
電話：
e-mail：
URL：<https://unit.aist.go.jp/ievgroup/magma/index.html>

- (13)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：篠原宏志
所属：活断層・火山研究部門 マグマ活動研究グループ

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地下水・地殻変動観測による地震予測精度の向上

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

紀伊半島～四国周辺に、4 点の新規地下水・地殻変動観測施設を整備する。南海トラフ巨大地震想定震源域の深部周辺で発生する短期的ゆっくり滑りの詳細なマッピングを行う。主に測地・測量データを解析して、想定東海地震震源域周辺における 1980 年代以降のプレート間固着の時空間分布を明らかにする。深部低周波微動発生領域における水理特性を推定する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

地下水・地殻変動観測施設(4点)の新規整備。平成25年度までの整備済みの16観測点と併せ合計20観測点とする。短期的ゆっくり滑りを地下水位・水圧で検出可能な所があれば、臨時観測点を設置して観測網を補完する。この観測網での観測精度向上のため、観測技術の開発を行う。

産総研・防災科研・気象庁との共同研究により構築した観測システムにより、南海トラフの深部低周波微動・短期的ゆっくり滑りの高精度モニタリングを行う。短期的ゆっくり滑りの客観的な検出システムの高度化・地震計アレイによる深部低周波微動の高精度な検出を行う。その他、解析技術の開発を行う。

1946年南海地震前後の上下変動・地下水変化・潮位変動解明のための文献調査及び潮位測定等を行う。想定東海地震震源域周辺のプレート間固着の時間変化推定のため、東海地域の水準測量データ等を解析する。

深部滑り・微動のメカニズム理解のための研究を実施する。深部滑り・微動発生における流体の影響の解析を行い、同発生領域の水理特性の推定を行う。

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

(8)平成30年度及び計画期間中(平成26年度～30年度)の成果の概要:

(平成30年度の成果の概要)

産総研と防災科研および気象庁との共同研究により、3機関の歪・地下水・傾斜データを用いて南海トラフ周辺地域で2017年11月～2018年10月の間に35の短期的SSEの断層モデルを決定した。

ボアホール歪計を用いて巨大地震のモーメントマグニチュード(Mw)の即時推定を試みた。水平歪4成分以上があれば、M9クラスの東北地方太平洋沖地震本震のほか、同地震の最大余震、近年発生した内陸地震でもMwを推定可能であることを示した。

四国地方でプレート間の固着速度と深部低周波微動の発生レートとの間に時間的相関のある場所が見つかった。相関のよい場所では、微動発生レートがゼロになるときは固着速度がプレート収束速度に近くなることが期待されることがわかった。

南海トラフ地震発生帯掘削計画の一環として熊野灘沖合に設置された長期孔内観測システム(LTBMS)の水圧計が周辺の掘削作業時に伴って大きく変化していることを受け、クロスホール透水試験に見立て、原位置透水係数の推定を行った。さらに、先行研究の室内実験や数値シミュレーションの結果と比較することで、透水係数のスケール依存性が見えてきた。この結果はスケールが大きくなるほど断層やクラックの数が増え、それらが連結することでより水が流れやすくなることを示唆する。

紀伊半島において、国土地理院と水路局のデータを組み合わせて1944年東南海地震・1946年南海地震による変動を分離した上下変動時系列を求めた。

台湾・国立成功大学との共同研究の一環として、水文学的・地球化学的手法による地震予知研究についての日台国際ワークショップを共催し、プロシーディングスを公開した。

(計画期間中の成果の概要)

北勢観測点の観測井戸を密閉し、短期的SSEを観測できるように整備した。4地点の新規観測点の整備は実施されなかった。

産総研・防災科研・気象庁との共同研究によりデータを共有し、南海トラフの短期的SSEの高精度モニタリングを実施し、2013年11月以降の5年間で162個のSSEイベントの断層モデルを決定した。短期的SSEの解析手法の高度化等の解析技術の開発を行った。

1946年南海地震前後の地下水変化・潮位変動の解析および1944年東南海地震・1946年南海地震前後の紀伊半島の上下変動時系列を求めた。

四国地方のプレート間の固着速度および深部低周波微動との相関について解析を行なった。南海トラフや内陸地震発生域等の水理特性の推定を行った。

地下水・地殻変動観測等による地震の予知・予測研究に関する国立成功大学との共同研究を実施し、共同でワークショップを毎年開催した。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
Itaba, S., 2018, Rapid estimation of the moment magnitude of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0) from static strain changes, Earth, Planets and Space, 70, doi:10.1186/s40623-018-0894-5.
木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努・武田直人, 2018, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2017年11月~2018年4月)(57), 地震予知連絡会会報, 100, 183-189.
木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努, 2019, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2018年5月~2018年10月)(58), 地震予知連絡会会報, 101, 印刷中
Kinoshita, C., and D. M. Saffer, 2018, In Situ Permeability and Scale Dependence of an Active Accretionary Prism Determined From Cross-Borehole Experiments, Geophysical Research Letters, 45, 6935-6943, doi:10.1029/2018gl078304.
北川有一・板場智史・武田直人・松本則夫・落唯史・木口努, 2018, 紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2017年11月~2018年4月), 地震予知連絡会会報, 100, 264-275.
北川有一・板場智史・武田直人・松本則夫・落唯史・木口努, 2019, 紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2018年5月~2018年10月), 地震予知連絡会会報, 101, 印刷中.
落唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・武田直人・木口努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦, 2018, 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(2017年11月~2018年4月), 地震予知連絡会会報, 100, 165-182.
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, 2019, 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(2018年5月~2018年10月), 地震予知連絡会会報, 101, 印刷中.
Ochi, T., and N. Takeda, 2018, Relation between the coupling and tremor rates in the transition zone around the Shikoku region, Earth, Planets and Space, 70, doi:10.1186/s40623-018-0883-8.
梅田康弘・板場智史, 2018, 1944年東南海地震及び1946年南海地震時の海水位変化を利用した紀伊半島沿岸部における上下変動時系列の推定, 地質調査研究報告, 69, 81-89.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

産総研と防災科研および気象庁との共同研究により、3 機関の歪・地下水・傾斜データをリアルタイムで共有し南海トラフ周辺地域の短期的 SSE を解析するシステムの運用を継続する。
既存未使用井戸を活用した安価かつ高精度な歪観測技術を開発し、香川県の既設井戸に適用する。地下水・地殻変動観測による地震の予知・予測研究の日本における成果を台湾での震災軽減に生かすため、国立成功大学との共同研究を継続する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

活断層・火山研究部門 地震地下水研究グループ

他機関との共同研究の有無：有

気象庁、防災科学技術研究所、名古屋大学、京都大学、鳥取大学、神奈川県温泉地学研究所、台湾国立成功大学等

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：活断層・火山研究部門 地震地下水研究グループ

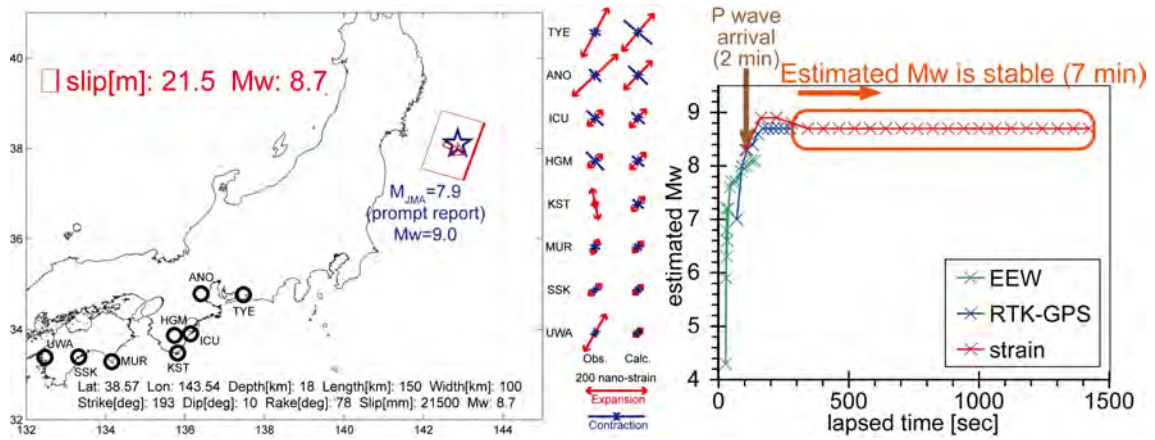
電話：029-861-3656

e-mail：tectono-h-ml@aist.go.jp

URL：https://unit.aist.go.jp/ievgroup/tectonohydr/index.html

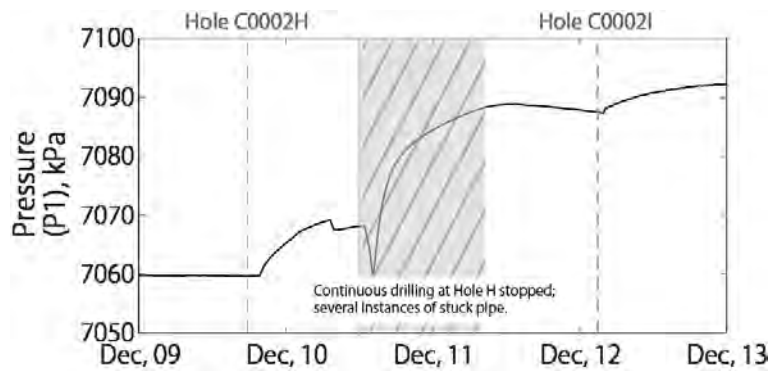
(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：松本則夫



第 1 図

- (左) ボアホール歪計を用いて推定した東北地方太平洋沖地震本震の断層モデル。
- (中) 各観測点における主歪の観測値および計算値
- (右) 推定された Mw の時間変化



第 2 図

熊野灘沖合に建設されたホール C0002G において近傍の掘削作業時に記録された水圧変化。掘削作業はおよそ 100 m 離れた C0002H および C0002I で行われた。灰色点線は掘削中のドリルビットが C0002H に設置されている水圧計と同じ深度に達した時の時間を示す。灰色斜線部はオペレーションに不具合が生じたため、解析では使用していない。

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

高分解能地殻応力場の解明と造構造場の研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

首都直下地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

可能な限り小さな地震まで解析に含めることで、高い空間分解能を有する地殻応力図を整備する。さらにこの応力図をもとに、地形・地質情報や地震学的情報も含めて地震発生場の地域性とそのテクトニックな意味を解釈し、将来発生する地震の最大規模や発生様式を評価するための地図(地震テクトニックマップ)を作成する。関東地域の 25km 以浅をケーススタディとして試作を行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年度と平成 27 年度では、Hi-net の整備以後蓄積されている定常観測網のデータ解析を進め、関東地域の 25km 以浅における応力場を明らかにする。地震データが不足している地域では臨時観測を実施し、地震データの蓄積と解析を行う。可能な限り小さな地震まで解析に使えるようにするため、ノイズに強い地震検出法、隣接地震の複合処理による発震機構解推定法などの手法開発に取り組む。また、活断層の 3 次元地下構造を推定するため、関東平野における既存の地下構造探査データに対して最新の処理法を用いた再解析を実施する。地震テクトニックマップの有効性と限界を確認するため、過去に発生した地震の震源域の応力状態と本震の規模や発生様式との関係を調査する。

平成 28 年度は引き続き前年度までの解析を行い、地殻応力図を取りまとめる。地震活動が不活発な領域は地殻変動データ、地形地質情報、数値シミュレーション結果などを吟味して補間を行い、応力情報の空白域を無くすことを目指す。応力場のメッシュサイズはデータ量に依存するが、マグニチュード 6 後半の中規模地震であっても最大規模や発生様式の評価に繋がられるよう、最低限 10km を目指す。深さ方向にもデータの状況に応じてメッシュを配置する。結果は地殻応力場データベース (<https://gbank.gsj.jp/crstress/>) において公開する。

平成 29 年度は前年度までの解析で推定した地殻応力図や 3 次元地下構造の結果に加え、活断層分布や重力異常図などの地形・地質情報、 b 値や地震波速度構造などの地震学的情報等も考慮して地震発生場の地域性とそのテクトニックな意味を解釈し、将来発生する地震の最大規模や発生様式を評価するための地図(地震テクトニックマップ)を完成させる。

平成 30 年度では、地震テクトニックマップを基に、数値シミュレーションを併用した最大規模評価や活動性評価手法を提案する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 30 年度は、昨年度完成した関東地域の 25km 以浅の応力マップを論文に纏めた(今西ほか, 2019)。また、現実的な粘弾性構造を仮定し、2018 年北海道胆振東部地震(M6.7)、2008 年四川大地震(M7.9)による周辺活断層への今後数十年間にわたる影響を定量的に評価した(大谷・今西, 2018; Matsushita et al., 2019)。さらに、機械学習の導入による地震データ処理の自動化手法(内出, 2018)、波形の振幅値からメカニズム解と応力場を同時に推定する手法開発にも取り組んだ(Imanishi, 2018)。本計画期間における成果は以下の通りである。

1) 可能な限り小さな地震まで解析に含めることで、高い空間分解能を有する関東地域の応力マップを完成した(今西ほか, 2019)。空間分解能は 10 km メッシュである。得られた応力マップは非常に複雑であり、最大水平圧縮応力方位(S_{Hmax})が急変する場所があること、数十 km スケールの複数の応力区が確認できること、伊豆半島から北部に向けて S_{Hmax} が時計回りに回転すること、太平洋沿岸域は正断層場が卓越するなどの特徴が明らかになった。これらの特徴は、今後、この地域のテクトニクスを理解や将来の地震リスクを評価する上で重要な情報となる。一連の地震データ処理には時間を要するため、機械学習の導入の検討も進めた。

2) 活断層の 3 次元地下構造に関しては、関東地域で取得された既存の深部反射法データから求めた基盤深度を拘束条件とし、重力データに基づき基盤構造を推定した。その結果、従来の地震動計算用の地盤構造モデルには反映されていない基盤深度の浅い領域が東京都東部に存在することが明らかになった。

3) 震源域の応力状態とそこで発生する地震の発生様式を明らかにするため、2014 年長野県北部の地震(Imanishi and Uchide, 2017)、茨城県北部・福島県浜通り地域における地震活動(Uchide and Imanishi, 2016, 2018)、2016 年熊本地震(Uchide et al., 2016)、2016 年大韓民国慶州(キョンジュ)地震(Uchide and Song, 2018)について調査を進めた。茨城県北部・福島県浜通り地域の地震活動に関しては、小地震の震源スペクトルを精密に推定することに成功し、 2 モデルで説明できない地震が多く発生していることを明らかにした。このような地震が発生する要因を明らかにすることは、今後、地震発生場の特性を突き止める上で有用な情報になり得ると考えている。

4) 数値シミュレーションを併用した活動性評価手法の開発に向け、現実的な 3 次元粘弾性構造に基づく CFF の時間変化の計算に取り組んだ。事例研究として 2018 年北海道胆振東部地震(M6.7)と 2008 年四川大地震(M7.9)に適用し、周辺活断層への今後数十年間にわたる影響を定量的に評価した。評価の際には周辺活断層が現在の応力場で動きやすいか否かも判断材料にしており、空間分解能の高い応力マップの全国版をいち早く整備する必要がある。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

Imanishi, K. (2018), Direct determination of tectonic stress field and individual focal mechanisms from waveform amplitudes, Proceedings of the 13th SEGJ International Symposium, 1-4.

今西和俊・内出崇彦・大谷真紀子・松下レイケン・中井未里(2019), 関東地域の地殻応力マップの作成, 地質調査研究報告(受理)

Matsushita, R., K. Imanishi, M. Ohtani, Y. Kuwahara, J. Chen, and S. Ma (2019), Seismic potential around the northeastern edge of the Longmenshan fault zone as inferred from seismological observations, PA-GEOPH, <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02098-3>.

大谷真紀子・今西和俊(2018), 2018年北海道胆振東部地震による石狩低地東縁断層帯のCFFの時間変化, 日本地震学会2018年度秋季大会, S25-P24.

内出崇彦(2018), Inception Moduleを用いた地震波形自動検測, 日本地震学会2018年度秋季大会, S21-09.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要:

将来発生する地震の最大規模や発生様式の評価を行うため、現計画に引き続き、可能な限り小さな地震まで解析し、高い空間分解能を有する地殻応力マップを整備する。様々なデータから地殻応力の不均一の成因を明らかにするとともに、応力場の地域性を考慮し、数値シミュレーションも併用した最大規模評価や活動性評価手法を提案する。絶対応力や断層強度の指標になり得るb値や応力降下量については、最新の手法を用いて高精度に推定し、地震データから絶対応力レベルや断層強度に関する情報を引き出すことができるかについて検討する。

次期計画における研究課題名は、「高分解能地殻応力場の解明と造構造場の研究」である。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

活断層・火山研究部門 地震テクトニクス研究グループ
他機関との共同研究の有無: 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名: 活断層・火山研究部門 地震テクトニクス研究グループ
電話: 029-861-3691
e-mail:
URL: <https://unit.aist.go.jp/ievg/group/seismotec/index.html>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 今西和俊
所属: 活断層・火山研究部門 地震テクトニクス研究グループ

(1) 実施機関名：

産業技術総合研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

アジア太平洋地域地震・火山ハザード情報整備

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ア. 史料の収集とデータベース化

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

4. 研究を推進するための体制の整備

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

アジア地域の地震及び火山関連情報を CCOP 関連国等と協力の上収集整備する。また、未整備な地域のデータを統一的基準で取りまとめ、「アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システム」として公開する。

ユネスコ、世界地質図委員会 (CGMW) の最新版災害図として「東アジア地域地震火山災害図」を出版する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

CCOP 関連諸国の研究機関等と連携し、一定の基準・精度をもった地震・活断層・津波・火山関連データを東～東南アジア地域において作成し（あるいは作成をサポートし）、各国で共有できるようにする。具体的には、(1) 過去の地震の観測データをデジタル化した上で、震源パラメータを再決定し、統一した広域地震データを整備する、(2) 各国の活断層分布データを収集し、統一的な活断層分布データを整備する、(3) 東南アジア地域の火山について、世界的な統一基準で火山データベースの再検討を行う。以上の情報を元に、「アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システム」の構築と公開を行う。

東アジア地域地震火山災害図(1:7,500,000)を作成し、ユネスコ、世界地質図委員会(CGMW)から、最新の地震火山の災害関連情報図として出版する。

GEM(Global Earthquake Model)やGVM(Global Volcano Model)と連携し、アジア地域の地震火山関連データの国際標準化を図る。

CCOP 関連諸国と定期的にワークショップ、会合、技術講習会等を開催し、アジア各国の研究機関との連携、人材教育を推進する。

(8) 平成30年度及び計画期間中(平成26年度～30年度)の成果の概要:

1. 平成30年度の成果の概要

平成30年度には、アジア太平洋地域のハザード関連情報の整備として、震源域、震源、活断層、津波、地震犠牲者数、大規模火砕流、大規模降下テフラ、カルデラ、火山イベント犠牲者数の詳細データを国際標準形式でとりまとめ、アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システム(図1)への公開作業を進めた。震源域については、M7以上の全世界の258のデータを整備した(図2)。活断層については、タイとフィリピンの活断層データを追加した。津波については、1707年宝永津波、1896年明治三陸津波、1993年北海道南西沖津波の分布を追加した(図3)。地震犠牲者数については、東・東南アジア地域の236の地震イベントについて、犠牲者数を要因(火災、建物、地すべり、津波、関連死)別に取りまとめた。大規模火砕流については、東・東南アジア地域のVEI6以上の18の火砕流堆積物の分布を取りまとめた。大規模降下テフラについては、東・東南アジア地域の24の降下テフラについて分布と等層厚線を取りまとめた(図4)。カルデラについては、東・東南アジア地域のVEI6以上の主要な22のカルデラの形状を取りまとめた。火山イベントの犠牲者数については、東・東南アジア地域の67火山、152イベントについて、犠牲者数を要因(火砕流、岩屑なだれ、降下火砕物及び噴石、火山泥流、津波、火山ガス、その他関連現象)別に取りまとめた。これらのデータは、平成30年度中にアジア太平洋地域地震火山ハザード情報システム(<http://ccop-geoinfo.org/G-EVER/>)上で閲覧検索できる予定である。また、ほとんどのデータはGISデータをダウンロード可能となる予定である。さらに、ハザード情報システムのモバイル版(図5; <https://ccop-geoinfo.org/gever-mo/>)を作成し、iPhone、アンドロイドなどのモバイルデバイス上でハザード情報を閲覧検索できるようになった。

東・東南アジア地域の地質調査機関によるCCOP(東南アジア地球科学計画調整委員会)の主要プロジェクトの1つとして、CCOP地質情報総合共有プロジェクトにより、フィリピン、インドネシア、パプアニューギニア等の諸国と共に、活断層、地震災害関連情報、火山関連情報の整備・WebGISによる公開を進めている。本年度は9月にCCOP地質情報総合共有システム(図6; <https://ccop-gsi.org/main/>)を正式に公開した。本年度は、地震火山関係では、フィリピンの活断層分布図、液状化ハザードマップ、津波ハザードマップ、ピナツボ火山ラハールハザードマップ、地すべりハザードマップ、インドネシアの火山ハザードマップ、韓国の地震分布図、ミャンマーの地震ハザードマップ、タイの活断層図、地すべりハザードマップなどが公開された。現在、本システムでは、570以上のデータ、15以上のポータルサイトの閲覧ができる。また、CCOP地質情報総合共有プロジェクトの第3回国際ワークショップをマレーシアランカウイ島で開催し、参加者40名に対して技術講習会を行い、人材育成に努めた。

2. 平成26年度～平成30年度の成果の概要

産総研地質調査総合センターのG-EVER推進チームでは、平成26年度に、仙台市で開催された第3回国連防災世界会議のフォーラムの1つとして、「2015アジア太平洋地域地震火山ハザード・リスク情報国際ワークショップ」を開催し、ユネスコ、CCOP、GEM、インドネシア、中国、ニュージーランド、ベトナム、台湾、シンガポール、イタリア、日本からの参加者と共に、アジア太平洋地域における地震火山のハザード・リスクに関する議論を行った(<http://g-ever.org/en/workshop/>)。平成26年～平成28年に、アジア太平洋地域地震火山災害情報図プロジェクトにおいて、アジア各国の地質調査機関(PHIVOLCS、CVGHM、CEA、VAST、Academia Sinica)のメンバーと共に東アジア地域地震火山災害情報図を作成し、平成28年に出版を行った(図7)。ユネスコ傘下の世界地質図委員会の災害情報図の1つとして、世界の地質調査機関に広く配布された。この東アジア地域地震火山災

害情報図は、M6以上の地震の震源分布、大規模地震の震源域、主要活断層の分布、大規模津波の分布、津波の最大到達高度、地震の犠牲者数とその要因、完新世火山の分布、大規模火山噴火(VEI6以上)の噴火による降下テフラ分布域、主要カルデラの位置、大規模火砕流の分布、大規模火山噴火による犠牲者数とその要因を地質図上に示している。地震及び火山の犠牲者数とその要因についてはアイコンを用いて分かりやすく表示している。平成29年度はこれらのデータの数值化(GIS化)を進め、アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システム上で閲覧検索ができるように整備を行った。データの大部分はGISデータとしてダウンロードが可能であり、QGISやArcGIS等の各種GISソフトウェア上で、他の関連データと組み合わせる利用が可能である。活断層情報の閲覧システムとしては、フィリピン火山地震研究所(PHIVOLCS)と共同で、フィリピン国内の活断層データをモバイルデバイス上で閲覧可能な"PHIVOLCS FaultFinder"を開発し平成29年度に一般公開をおこなった(<http://faultfinder.phivolcs.dost.gov.ph/>)。FaultFinderには、現在の地点から活断層までの距離を表示する機能や、地名検索を行い任意の地点から活断層までの距離を表示する機能などがある。世界中で約80万件のアクセスがあり、広く利用されている。また、G-EVERでは、火山災害予測支援システムの構築を進めており、火山活動史、火山データベース、シミュレーションにより、火山のハザード予測支援のための仕組みを構築している。本システムでは、オンラインで全世界の火山について、エナジーコーン、Titan2D、Tephra2を用いた、火山重力流や降下火山灰のハザード予測支援ができる(<http://volcano.g-ever1.org/>)。

- (9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
下記の成果物を、平成30年度中に登録公開予定。

石川有三, 2019a, 世界の震源域の分布 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 1/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集 .

石川有三, 2019b, 世界の震源分布 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 2/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集 .

松本 弾, 2019, 津波分布域 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 3/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集 .

宝田晋治, 2019a, 東・東南アジア地域の大規模火砕流堆積物の分布 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 4/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集 .

宝田晋治, 2019b, 東・東南アジア地域の大規模降下テフラの分布 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 5/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集 .

宝田晋治, 2019c, 東・東南アジア地域のカルデラの形状 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 6/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集 .

宝田晋治, 2019d, 東・東南アジア地域の火山イベントの犠牲者数 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 7/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集 .

- (10)次期計画における平成31年度実施計画の概要:

アジア太平洋地域の地震火山ハザード情報整備、国際標準化、データ共有・相互利用、国際的な連携の推進を目的として、アジア太平洋地域の研究機関と連携し、地震火山活動に関連する地質ハザード情報を取りまとめる。平成31年度は、インドネシア、フィリピン、中国、韓国等のCCOP(東・東南アジア地球科学計画調整委員会)を始めとするアジア太平洋地域の研究機関と連携し、地震火山総合データベースとして、地震・活断層・津波・火山関連データの整備・更新を行う。また、CCOPで進めている地質情報総合共有プロジェクトとの連携を図り、各国の地震火山の地質情報の国際的な共有を進める。

- (11)実施機関の参加者氏名または部署等名:

活断層・火山研究部門

他機関との共同研究の有無：有

CCOP , GEM , GVM, PHIVOLCS (Philippine Institute of Volcanology and Seismology), CVGHM(Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation), INGV(Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), CGMW(Commission for the Geological Map of the World)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：活断層・火山研究部門

電話：029-861-3656

e-mail：g-ever-ml@aist.go.jp

URL：http://g-ever.org/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宝田晋治

所属：活断層・火山研究部門

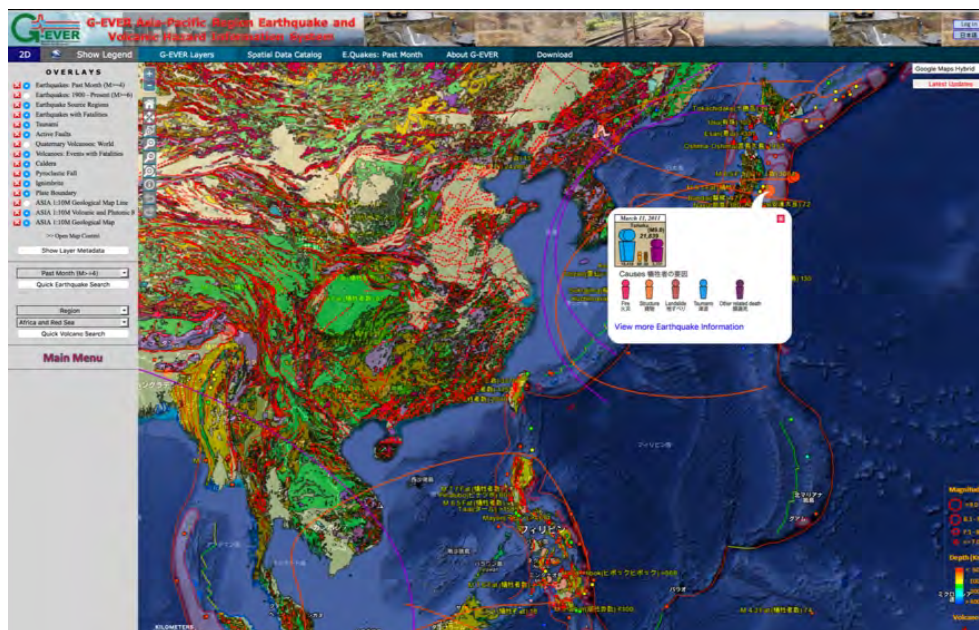


図 1. アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システム

<http://ccop-geoinfo.org/G-EVER>。主なデータは GIS データをダウンロードできる。



図 2. 世界の地震の震源域
 約 1ヶ月間の余震域に基づき、M7 以上の 258 の震源域データを作成。



図 3. 1707 年宝永、1896 年明治三陸、1993 年北海道南西沖地震による津波の分布域



図 4. フィリピン、インドネシア、パプアニューギニア周辺の大規模降下テフラの分布図
 青色は >0 cm の降灰の分布限界、オレンジ色は等層厚線を示す。

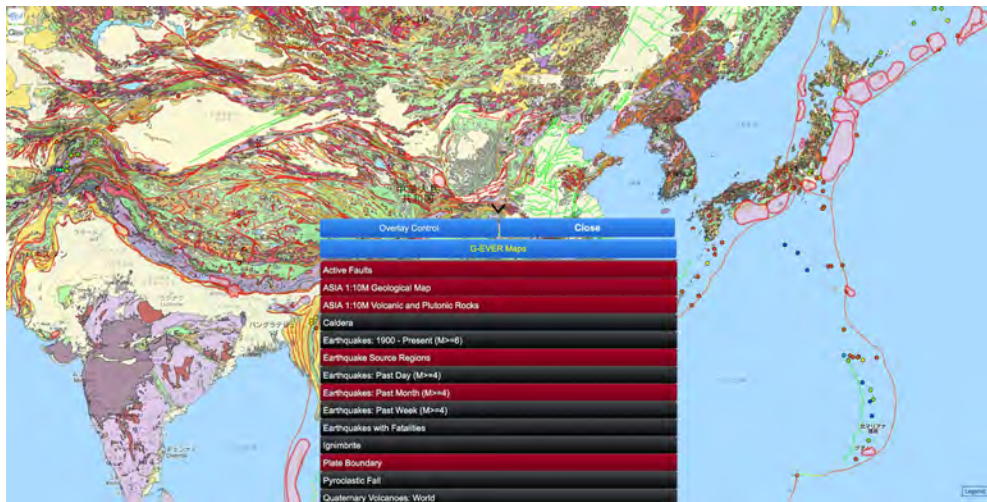


図 5. アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムのモバイル版
<https://ccop-geoinfo.org/gever-mo/> PC 版で公開中のデータをモバイルデバイス上で閲覧できる。

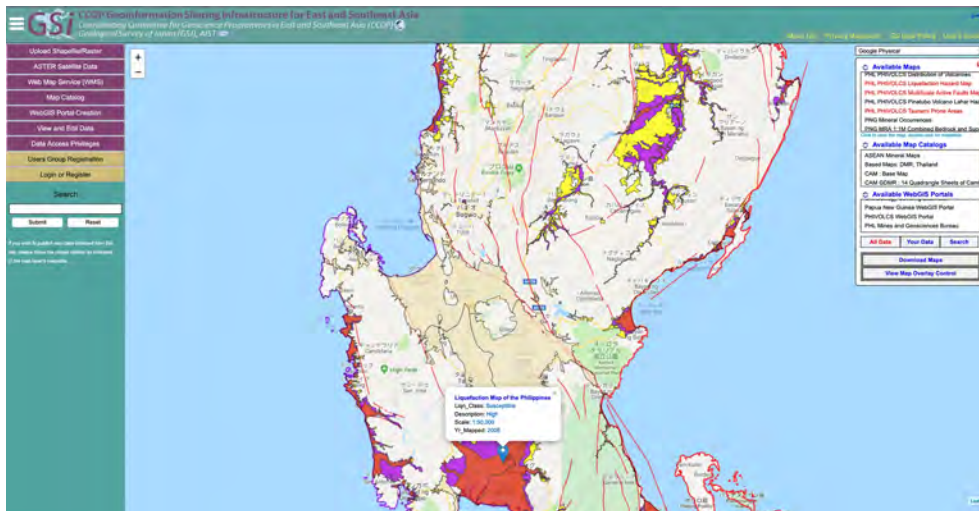


図 6. CCOP 地質情報総合共有システム

<https://ccop-gsi.org/main/> PHIVOLCS による活断層分布図、液状化ハザードマップ、津波ハザードマップを表示。

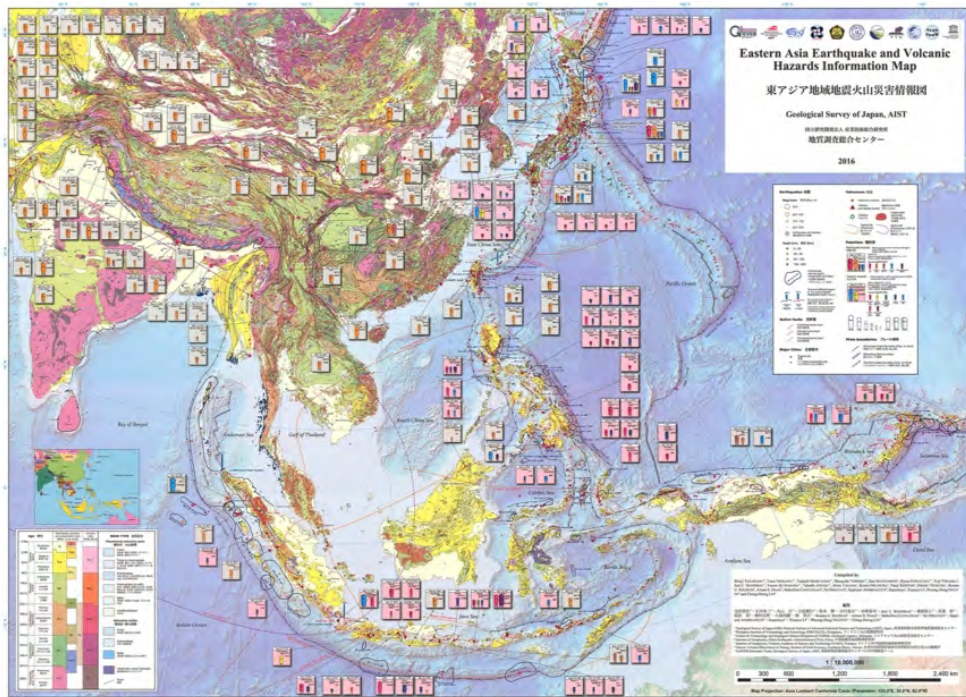


図 7. 東アジア地域地震火山災害情報図

地質調査総合センターの HP からダウンロード可能 (<https://www.gsj.jp/Map/JP/asia-area-geoscience.html>)

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

内陸の地殻活動の発生・準備過程の解明

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

イ. 海洋プレート内部の地震

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

中長期的な地震発生予測の精度向上に資するため、測地学的手法による内陸地震発生域における詳細な地殻変動分布の解明、震源断層モデル推定手法の高度化及び余効変動の時間変化とその発生メカニズムの解明を通して、内陸地震発生域の地殻活動を詳細に理解する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年度は、新潟県佐渡市から阿賀町に設置された GNSS 観測点においてキャンペーン観測を実施する。また、これまでの観測結果に基づき、地殻の不均質構造を考慮した地殻変動の再現シミュレーションを実施する。

平成 26 年度～28 年度は、過去に発生したマグニチュード 6～7 クラスの地震について、不均質構造を考慮して震源断層モデルの再解析を実施する。また、長期間継続する余効変動の抽出とその発生メカニズムのモデル化を実施する。

平成 28 年度～30 年度は、時間分解能の高い GNSS 時系列データを用いて過去の内陸地震発生後の初期の余効変動の抽出とその発生メカニズムのモデル化を実施する。そして、地震発生直後の短期間と長期間の余効変動及びその発生メカニズムの比較を行う。

以上は、国土地理院経費のうち技術研究開発推進費に基づいた計画である。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

[H30 年度の成果の概要]

GNSS 観測および SAR 観測により、平成 30 年北海道胆振東部地震（2018 年 9 月 6 日、Mj6.7）に伴う地殻変動を検出した（図 1、2）。震央の南を中心として最大 7cm の隆起が捉えられた。検出された地殻変動を基に震源断層モデルを推定した結果、ほぼ南北走向の高角な断層面上における逆断層運動が推定された。滑り量は約 1.3m、推定された地震モーメントは 8.68×10^{18} Nm（モーメントマグニチュード 6.56）であった（図 1）。断層の上端は、深さ約 16km（下端は約 31km）に推定され、一般的な内陸の地殻内地震より深い位置に断層面が求めたのが特徴である。

大阪府北部の地震（2018 年 6 月 18 日、Mj6.1）では、震央を東西に挟む基線（箕面 - 宇治）、南北に挟む基線（交野 - 亀岡）でそれぞれ数 mm の短縮と伸張を検出した。

平成 30 年 9 月～11 月に新潟県佐渡市から阿賀町における GNSS 繰り返し観測を実施した。新潟県周辺では東北地方太平洋沖地震の余効変動により東西方向の伸張が卓越していたが、時間と共に伸張は小さくなり、2017 年 10 月から 2018 年 10 月の 1 年間では、佐渡島で東西方向の伸張が卓越しているが、越後平野周辺では北西 - 南東方向の短縮が卓越しつつある。

[H26～30 年度の成果の概要]

・ひずみ集中帯

新潟県周辺では、東北地方太平洋沖地震の余効変動により東西方向の伸張が卓越していたが、時間と共に伸張は小さくなってきている。地震後 5 年程度は伸張が卓越していたが、2016 年以降は北西 - 南東方向の短縮が卓越しつつあることが分かった。ひずみ集中帯の成因の一つとして過去の大地震の粘弾性変形の寄与を検討した。越後平野周辺で過去に発生した 4 つの地震（1828 年越後三条地震、1964 年新潟地震、2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震）の粘性緩和による変形のひずみ速度は、概ね 0.1ppm/yr より小さく、観測されているひずみ速度（0.1～0.2ppm/yr）に比べて小さく、過去の大地震の粘弾性変形がひずみ集中の主成因と考えることは難しいことが分かった。

・平成 28 年（2016 年）熊本地震

平成 28 年（2016 年）熊本地震に関連して、一連の地震に伴う地殻変動および余効変動を GNSS 連続観測および SAR 干渉解析により捉えた。4 月 14 日 M6.5 および 4 月 15 日 M6.4 の地震の震源断層は、北東 - 南西方向のやや西に傾き下がる高角の断層が右横ずれ的に動いたと推定された。4 月 16 日 M7.3 の本震は、布田川断層帯および日奈久断層帯に沿った位置に震源断層が推定された。布田川断層帯では北西傾斜の断層面とその東側延長に南東傾斜の断層面、日奈久断層帯では北西傾斜の断層面で、それぞれ右横ずれ的な断層が生じたと推定された。GNSS データの時系列解析から、余効変動は地震直後 60 日間程度急激な変動が続いたが、その後はゆっくりとした変動が続いている。また、2 方向の SAR 干渉データを用いることで、地表の準東西、準上下成分を抽出した。布田川断層周辺で西向き及び隆起が、それより西側の宇土区間周辺では東向き及び沈降が検出され、GNSS データで検出された余効変動と概ね一致する結果が得られた。注目すべき点は、地震時に大きく滑った布田川断層を境にして変位の食い違いが見られないことで、断層の南北側とも隆起および西に変位していることが分かった。水平二層構造のモデリングから最適な弾性層の厚さは 25km、粘性率は 2.0×10^{18} Pa・s と推定された。これらのパラメータで計算された粘性緩和による変動を観測データから取り除いた後に、余効滑りをフォワードモデリングで求めた。余効滑りは布田川断層と日奈久断層帯の境界付近で大きな滑りが求めた。余効滑りと粘性緩和のそれぞれのメカニズムの寄与は、震源域近傍（～50km）では余効滑りが、遠方（50km～）では粘性緩和の影響が大きいと考えられる。粘性緩和による変動は徐々に減衰するものの 10 年後でも年間数 mm の変動が予測されることが分かった。

・国内外で発生した内陸地震

GEONET による地殻変動および ALOS-2/PALSAR-2 のデータを用いた SAR 干渉解析により国内で発生した内陸地震の地殻変動を検出し、震源断層モデルを推定した。2014 年長野県北部の地震（2014 年 11 月 22 日、Mj6.7）では、東に傾き下がる断層面上で、左横ずれを含む逆断層運動が推定された。地震後数か月はわずかな余効変動が観測され、空間パターンは地震時の変動とほぼ類似した分布であった。2016 年鳥取県中部の地震（2016 年 10 月 21 日、Mj6.6）では、北北西 - 南南東走向の垂直な断層面上における左横ずれ運動が推定された。2016 年茨城県北部の地震（2016 年 12 月 28 日、Mj6.3）で

は、最大の地殻変動観測される領域で長さ約 2km の変位の不連続を検出した。

ALOS-2/PALSAR-2 のデータを用いた SAR 干渉解析により国外で発生した内陸地震の地殻変動を検出し、震源断層モデルを推定した。2015 年 4 月 25 日に発生したネパールの地震 (Mw7.8) では、カトマンズの北東 20-30km の領域の直下に最大 6m 超の滑りが推定され、最大余震の西隣に極端に滑りが欠損している領域が見られることが分かった。2016 年 11 月 13 日発生したニュージーランド南島の地震 (Mw7.8) では、複雑な地表地震断層に伴うと考えられる変位の不連続を捉え、右横ずれ、左横ずれ、逆断層成分が卓越する非常に複雑な断層運動であったことが分かった。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
- Kobayashi , T., H. Yarai, S. Kawamoto, Y. Morishita, S. Fujiwara and Y. Hiyarama, 2018, Crustal Deformation and Fault Models of the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence: Foreshocks and Main Shock, International Association of Geodesy Symposia, doi:10.1007/1345_2018_37.
- 小林知勝・矢来博司, 2018, SAR データによる地殻変動解析および地殻変動データに基づく力学的モデリングに関する研究 (第 9 年次), 国土地理院調査研究年報 (平成 30 年度), 印刷中 .
- Morishita, Y., T. Kobayashi, S. Fujiwara and H. Yarai, 2018, Complex crustal deformation of the 2016 Kaikoura, New Zealand, earthquake revealed by ALOS-2, Bull. Seismol. Soc. Am., 108(3B), 1746-1756, doi:10.1785/0120180070.
- 水藤 尚・小林知勝・山田晋也, 2018, ひずみ集中帯の地殻変動特性に関する研究 (第 4 年次), 国土地理院調査研究年報 (平成 30 年度), 印刷中 .
- 水藤 尚, 2018, 日本列島下の粘性構造の推定に関する研究 (第 2 年次), 国土地理院調査研究年報 (平成 30 年度), 印刷中 .

- (10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :
- 該当なし。

- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :
- 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室
他機関との共同研究の有無 : 有
名古屋大学、東北大学、東京大学地震研究所

- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
- 部署等名 : 地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話 : 029-864-5954
e-mail : gsi-eiss@ml.mlit.go.jp
URL : <http://www.gsi.go.jp>

- (13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者
- 氏名 : 矢来博司
所属 : 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

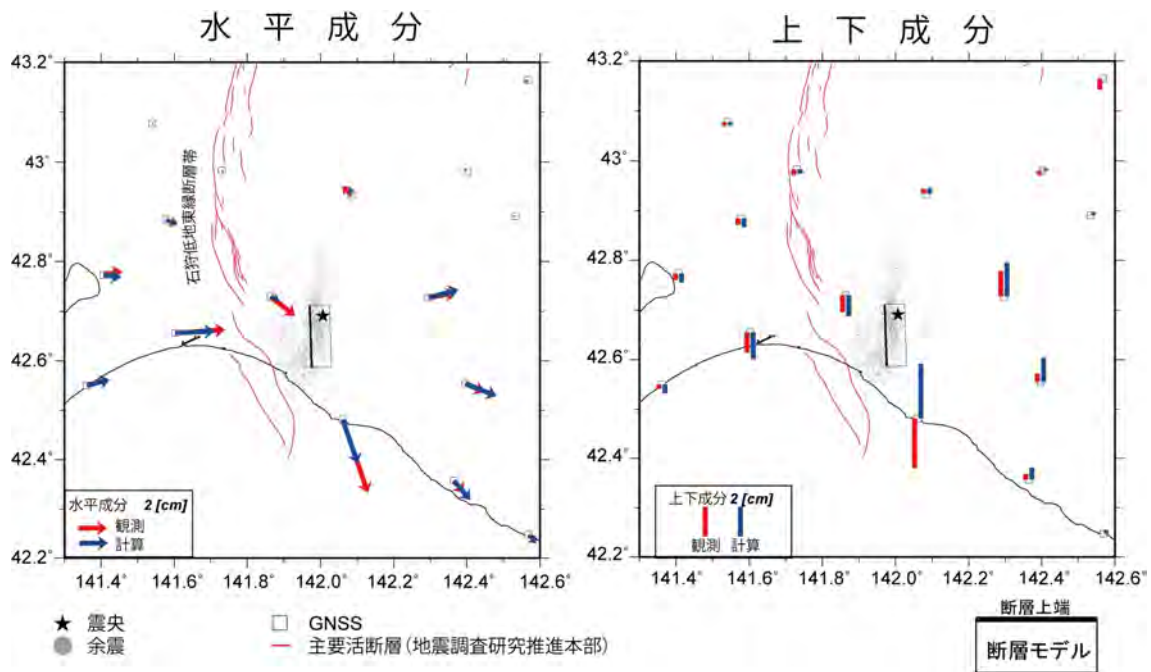


図 1 . 平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う地殻変動と震源断層モデル。
 (左) 水平成分。(右) 上下成分。赤矢印は観測値、青矢印は計算値を示す。

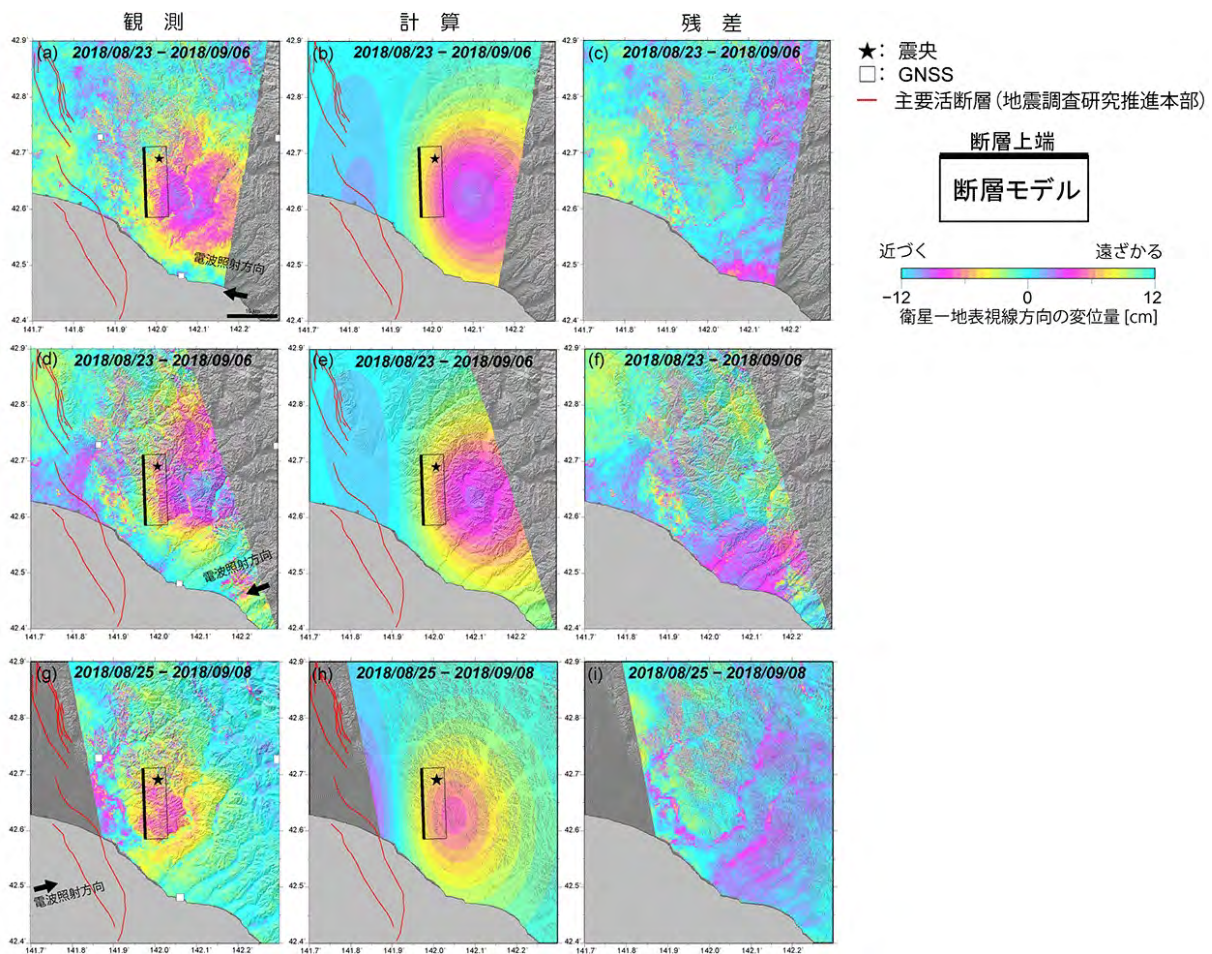


図 2 . 平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う地殻変動を示した干渉 SAR 画像。
 (左) 観測。(中央) モデル計算。(右) 残差。矩形は震源断層の地表への投影位置を示し、太線は上端を示す。

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

火山地域のマグマ供給系のモデリング

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の5か年の到達目標：

火山地域のモデルにシル、ダイク、テクトニックな変形を取り入れ、マグマ溜りの膨張・収縮及びマグマの移動まで含めた解析を行えるようにし、開発された手法を用いて特定の火山地域を半自動で解析・監視できるシステムを構築する。構築されたシステムを適用して、マグマ供給系の時間変化に関する知見を得る。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

平成 26 年度においては、伊豆大島、桜島のモデルにシル、ダイク、テクトニックな変形を取り入れられるように解析手法を改良し、過去のイベントも考慮して、地殻変動の観測結果を適切に説明できるモデルを構築する。

平成 27 年度においては、平成 26 年度に開発された解析手法の非線形化を行い、マグマ溜りの膨張・収縮に加えてマグマの移動まで含めた時間変化を推定できるようにし、この開発された解析手法の妥当性の評価を行う。

平成 28～29 年度においては、前年度までに開発された非線形の解析手法を実際のデータに適用して伊豆大島、桜島のマグマ溜り、シル、ダイク、テクトニックな変形のモデリングを行う。また開発された手法を元にモデリング及び結果の可視化を半自動で行えるシステムの構築を行う。

平成 30 年度においては、伊豆大島、桜島以外の火山に対象を広げる。

以上は、国土地理院経費のうち技術研究開発推進費に基づいた計画である。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

粒子フィルターを用いて、伊豆大島の解析を行い、非線形の時間依存インバージョンの結果とほぼ同じ結果が得られる事を確かめた。また従来の線形の解析を伊豆大島、桜島に行い茂木ソースの体積変化を調べ、膨張収縮を繰り返しながら体積増加が継続していることを確かめた。

SAR 観測により、2018 年 5 月のハワイ島キラウエア火山活動に伴う地殻変動を捉えた。East Rift Zone 東部における溶岩噴出領域の周辺において、南北に開くような最大約 2.5m の地表変位が観測された。鉛直の開口割れ目を仮定して開口量を推定したところ、約 3.9m の開口が推定された。

茂木モデル、シル、ダイクを取り入れられる解析手法を開発した。シミュレーションデータで、茂木モデルの深さ変化を検出できることを確かめた。また伊豆大島、桜島以外に霧島山の解析も行った。計画では、実際のデータに適用してシル、ダイク、テクトニックな変形のモデリングを行うことになっていたがそこまでは達成できなかった。SAR 観測により、各種の火山地域の地殻変動を検出し、地下のモデリングを行うことができた。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :
- ・小沢 慎三郎, 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 9 年次), 国土地理院調査研究年報 (H30 年度)
 - ・小林 知勝, 矢来 博司, SAR データによる地殻変動解析および地殻変動データに基づく力学的モデリングに関する研究 (第 9 年次), 国土地理院調査研究年報 (H30 年度)

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室
他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話 : 029-864-5954
e-mail : gsi-eiss@ml.mlit.go.jp
URL : <http://www.gsi.go.jp>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 矢来博司
所属 : 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

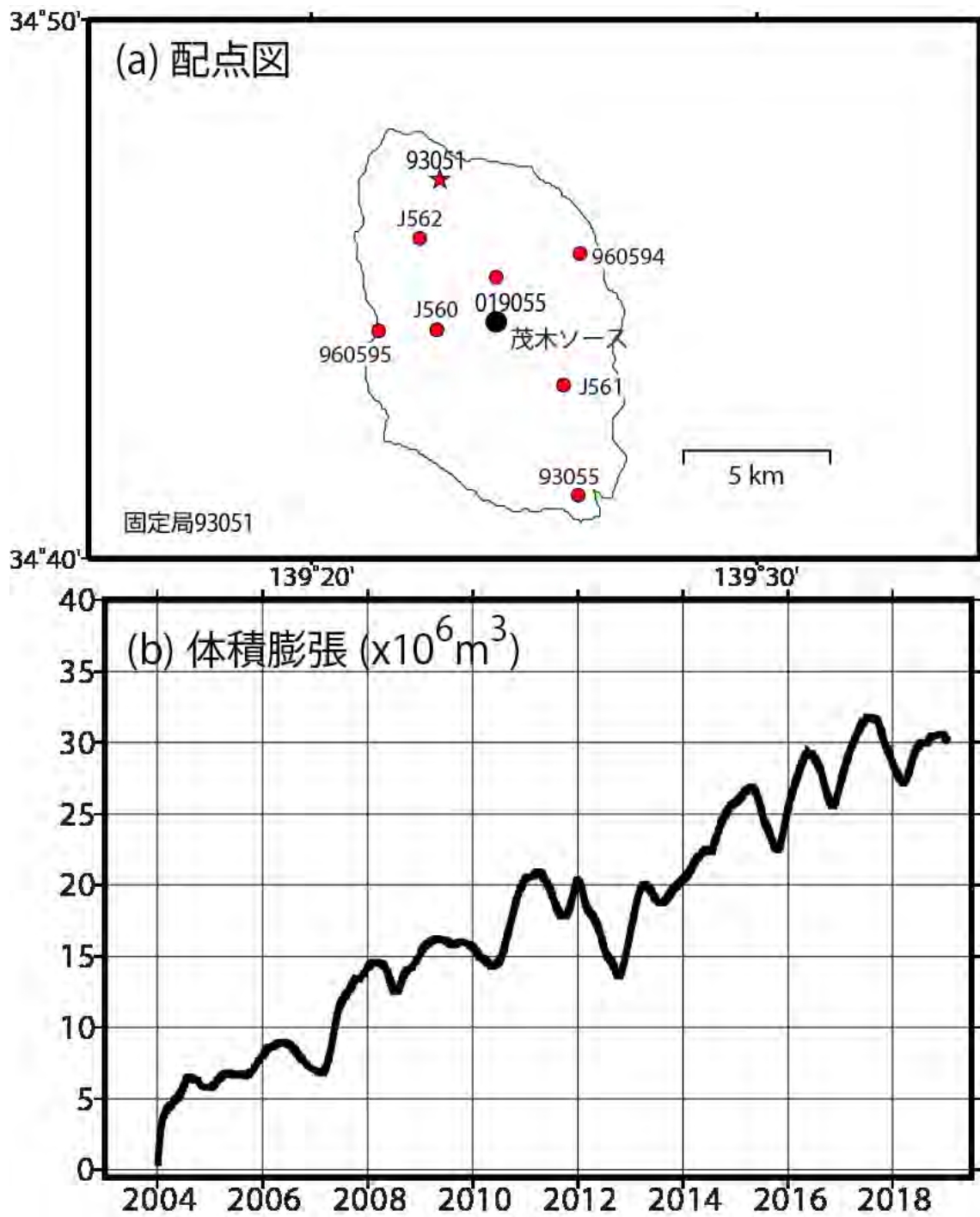


図1
 (a) 伊豆大島の配点図. (b) 伊豆大島の体積膨張.

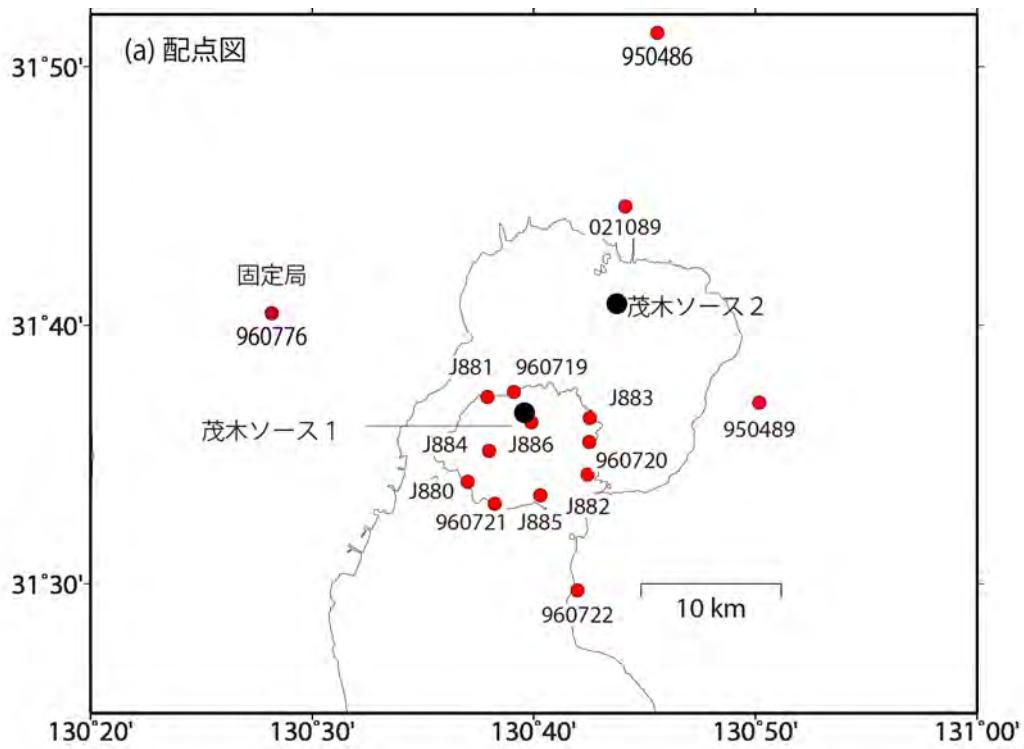


図 2

(a) 桜島の配点図. (b) 桜島の茂木ソース 1 の体積変化. (c) 桜島茂木ソース 2 の体積変化.

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

プレート境界面上の滑りと固着の時空間変化の広域的な把握

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

日本を構成するマイクロプレートの動き、海底地殻変動データを解析に取り入れ、広域的な地殻変動データから、日本の主要な領域のプレート間の固着・滑りの推定を行う解析手法を開発し、プレート間の固着・滑りの推定結果の精度を高める。開発された手法を用いて、日本のプレート境界の広域的な固着・滑りの時空間変化を明らかにする。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26 年度においては、ブロック断層モデルの形状のモデル化を行い、並行してブロック断層モデルの解析プログラムの開発を行う。また海底地殻変動データの取り入れ手法の開発を行う。

平成 27～28 年度においては、開発されたプログラムを広域の地殻変動データに適用し、日本の主要な領域のプレート境界の滑りの時空間変化について、広域的なモデルを推定を行ない、従来の手法と比較した精度の向上を確認する。さらに、その解析及び監視を半自動で行えるシステムの構築を行う。

平成 29～30 年度においては、開発されたシステムを用いて、日本のプレート境界の固着・滑りの現在の時空間変化を推定し、その地震発生への準備過程における意味を考察する。

以上は、国土地理院経費のうち技術研究開発推進費に基づいた計画である。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

Loveless & Mead (2010) の提唱した日本列島のブロックモデルに基づいて、東北地方太平洋沖地震前及び 2014 年以降の日本列島の解析を行った。その結果、東北地方太平洋沖地震前の解析では、先行研

究と調和的な結果が得られた。2014年以降の解析では、東海のスロースリップ、九州東岸のスロースリップに加え、2016-2017年に紀伊半島東岸で固着が2014-2015年に比べて若干小さくなる結果が得られ、2018年に回復した。2016-2017年の紀伊半島東岸の固着の弱化は、紀伊半島東岸で2016年4月1日の三重県沖の地震(M5.8)に加え、一連の短期的スロースリップの発生による地殻変動の変化を受けたためであると考えられる。

時間依存のブロック断層モデリングのプログラムを開発し、Loveless & Mead (2010)のブロック断層形状を用いて日本全国の解析を行い、プレート境界における滑り欠損・滑り、ブロック運動の推定を行った。日本全国の解析及び監視を半自動で行えるシステムの構築を行った。開発されたシステムを用いて日本のプレート境界の固着・滑りの現在までの時空間変化を推定した。計画とほぼ一致した成果が得られた。

- (9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
・小沢 慎三郎, 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推定, 国土地理院調査研究年報(H30年度)
- (10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：
- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：
地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室
他機関との共同研究の有無：無
- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話：029-864-5954
e-mail：gsi-eiss@ml.mlit.go.jp
URL：http://www.gsi.go.jp
- (13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者
氏名：矢来博司
所属：地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

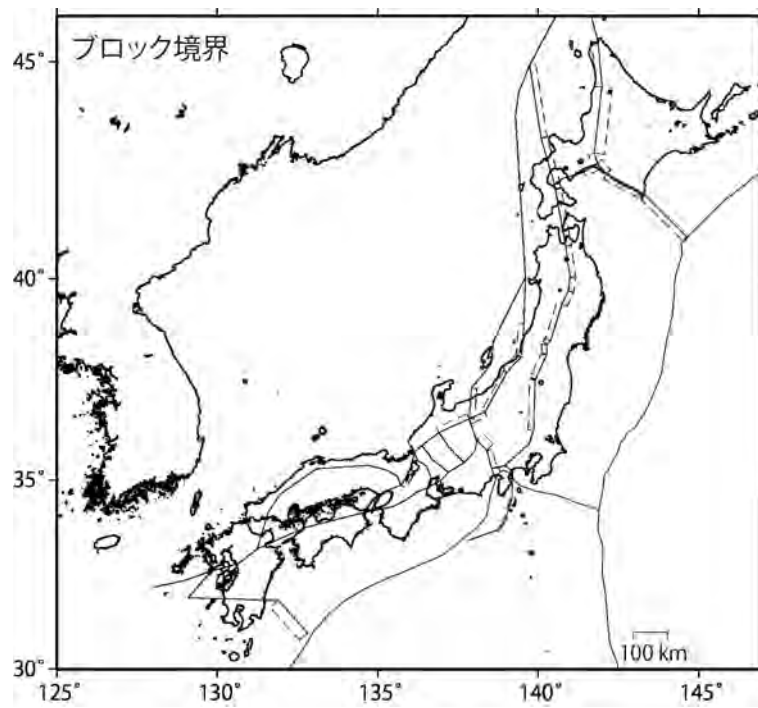


図 1

Loveless & Mead(2010) の提唱したブロックモデルの形状

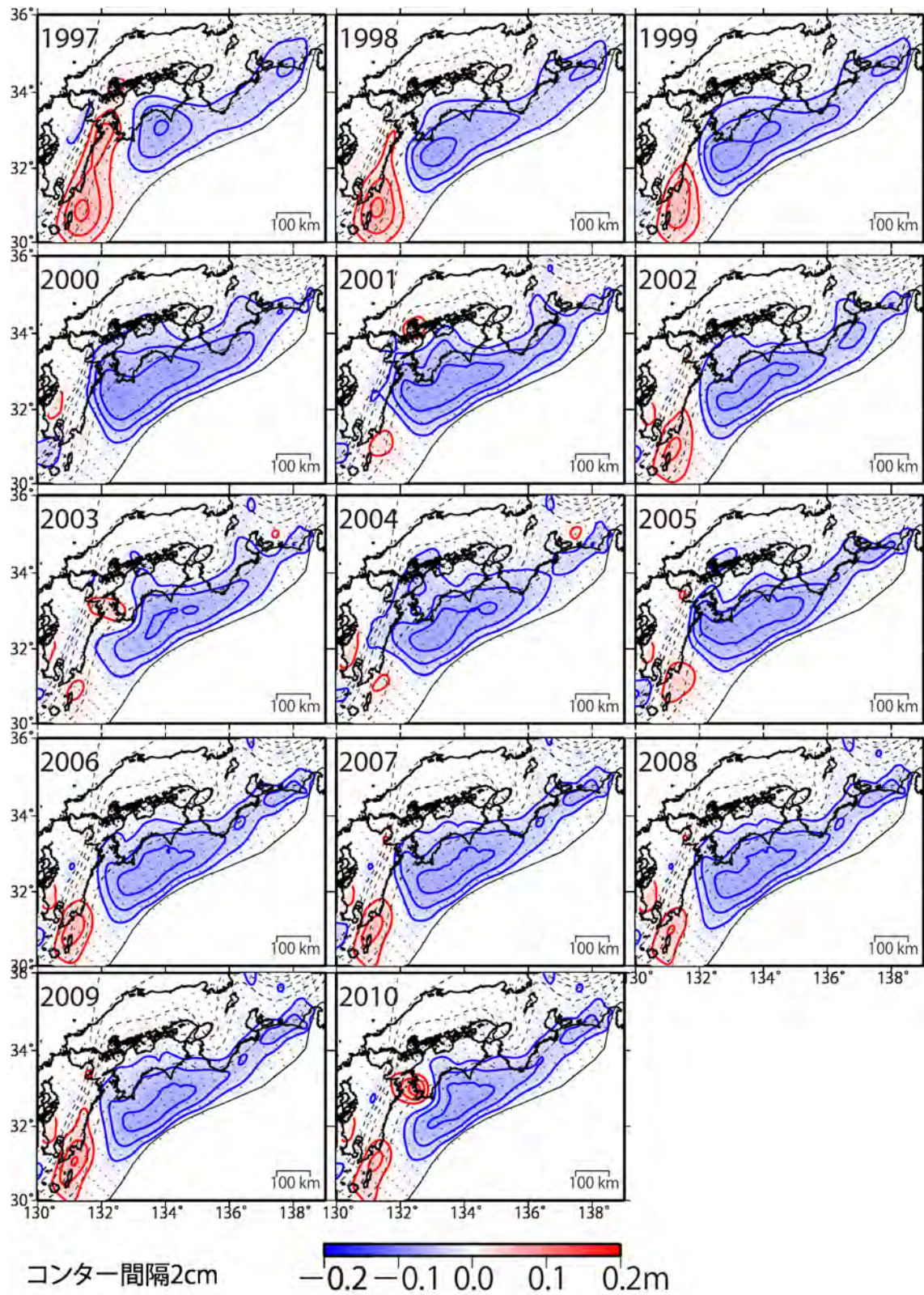


図2
東北地震前の西南日本の固着（青）と滑り（赤）

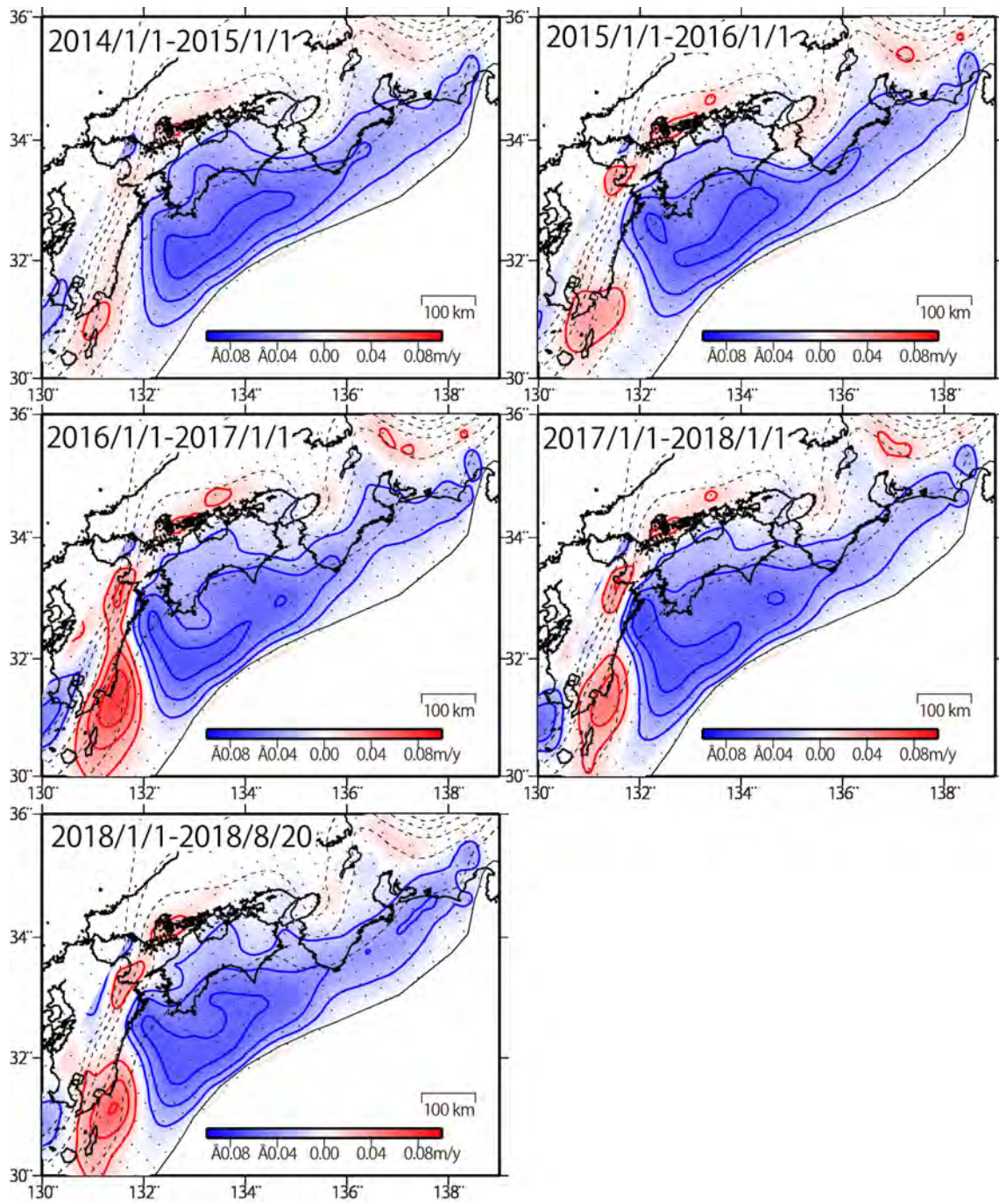


図 3
2014 年以降の西南日本の固着（青）と滑り（赤）

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

GNSS を用いた震源メカニズム即時推定技術の開発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

大地震の際に被害集中域の早期把握及び津波予測の高度化に資することを旨とした、GNSS 解析から得られるリアルタイム地殻変動データを用いて震源メカニズムを即時に推定する技術を開発する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

大地震の際に GNSS 解析から得られるリアルタイム地殻変動データを用いて地殻変動の原因である断層の震源メカニズムを即時推定する技術の開発を行う。開発した技術については過去の地震についてシミュレーションデータ等を用いて検証を行い、GEONET リアルタイム解析システムへ組み込むための基礎技術とする。

以上は、国土地理院経費のうち技術研究開発推進費に基づいた計画である。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

5 年間の研究を通じて、相対測位による GEONET リアルタイム解析から得られる日本全国のリアルタイム地殻変動データを用いて地震発生時に矩形断層モデル及びプレート境界面上のすべり分布を即時推定する技術の開発を行い、電子基準点リアルタイム解析システムに実装した。加えて、電子基準点リアルタイム解析システムにおいて、相対測位法に加え、固定点が不要なため震源断層モデルが安定的に推定できると見込まれる精密単独測位法を試験的に導入した。さらに、観測点周辺の地物からのマルチパス誤差を定量的に評価する手法を開発し、これを補正值としてキネマティック GNSS 解析に用いることで、精度の向上が見込めることを確認した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
Kawamoto, S., N. Takamatsu, S. Abe, K. Miyagawa, Y. Ohta, M. Todoriki, and T. Nishimura, 2018, Real-time GNSS analysis system REGARD: an overview and recent results, Journal of Disaster Research

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

次期計画の研究課題「GNSS 観測・解析技術の高度化」に該当
地殻変動を即時的・高時間分解能で把握可能な、電子基準点リアルタイム解析システムの高度化を行うとともに、地殻変動を高時間分解能で把握するための電子基準点キネマティック解析システムについて、解析結果の信頼性及び精度を向上させるための技術開発を行う。また、汎用低価格受信機を用いた地殻変動観測システムの開発を行う。さらに、得られた解析結果の精度向上や異常値を判定する仕組みを構築することで、より信頼性の高い災害関連情報の発信を図る。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

地理地殻活動研究センター 宇宙測地研究室
他機関との共同研究の有無：有
東北大学、気象庁気象研究所

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話：029-864-5954
e-mail：gsi-eiss@ml.mlit.go.jp
URL：http://www.gsi.go.jp

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：矢来博司
所属：地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

GNSS 連続観測(GEONET)

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

GEONET による地殻変動連続観測を着実に継続し、日本列島全域の地殻変動・火山活動のモニタリングシステムの高度化をさらに推進することを目指す。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

全国において、GNSS 連続観測点を平均 20 キロメートル間隔の配置として維持するとともに、観測を継続する。必要に応じて、重点的な観測地域において観測点密度を考慮した観測体制の充実を目指す。

電子基準点の GNSS 化・最新の ITRF 座標系の実現等に伴い GEONET の解析手法の高度化を図る。

国際 GNSS 事業(IGS)に参加して国内の IGS 点のデータ提供を継続することにより、GEONET で衛星の位置情報として用いる IGS 精密暦の精度を確保し、地殻変動やプレート運動監視の基準となる ITRF 座標系の構築に貢献する。

(電子基準点課、地殻監視課)

以上は、国土地理院経費のうち地理空間情報整備・活用等推進費に基づいた計画である。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 30 年度においては、GNSS 連続観測(GEONET)による日本列島全域の地殻変動・火山活動のモニタリングを着実に実施し、東北地方太平洋沖地震後の継続的な余効変動、4 月 9 日に鳥取県西部で発生した地震、6 月 18 日に大阪府北部で発生した地震、9 月 6 日に北海道胆振東部で発生した地震、1 月 8 日に種子島近海で発生した地震に伴う非定常的な地殻変動を検出した。さらに、6 月に房総半島

沖、2018年春頃から九州北部、2018年秋頃から四国西部で発生したプレート間ゆっくりすべり（スロースリップ）現象に伴う非定常的な地殻変動、硫黄島や桜島周辺の火山活動に伴う地殻変動等も検出するなど、防災や地震発生・火山活動のメカニズムに関する研究等に寄与した。また、これらのモニタリング結果は、速やかにホームページなどで公表するとともに、地震調査委員会、火山噴火予知連絡会等に報告した。

（地殻監視課）

平成30年度においては、GNSS連続観測点で故障等により観測に障害が発生した際には、速やかに復旧作業を実施することで観測の継続に努めた。さらに、定常的に実施する解析手法の一部について、より精度の高い解析結果が得られるよう改良を行った。また、国際GNSS事業（IGS）に参加については、石岡局を新たに登録し、IGS観測局の運用とIGSデータセンターに観測データを提供した。

（電子基準点課）

計画期間中、全国のGNSS連続観測点を維持し、観測を継続した。それらにより、日本列島周辺の定常的な地殻変動、地震による地殻変動、余効すべり、スロースリップ、日本周辺のプレートの動きや火山活動におけるマグマの膨張や収縮などの火山変動監視を実施した。また、電子基準点のGNSS化・最新のITRF座標系の実現等に伴いGEONETの解析手法の高度化を図った。国際GNSS事業（IGS）に参加して国内のIGS点のデータ提供を継続した。

- （9）平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
阿部聡・高松直史・石川典彦・木村勲・畑中雄樹・川元智司（2018）：次世代GEONETの構築（第4年次）、平成29年度調査研究年報
阿部聡他（2018）：Development of New GEONET Analysis Strategy（GEONET新解析戦略の開発）、地球惑星科学連合2018年大会
川元智司他（2018）：GEONET新解析戦略（F4）の開発、日本地震学会秋季大会
川元智司他（2018）：GEONET新解析戦略（F4）の開発、日本測地学会第130回講演会
福?順洋他（2018）：昭和IGS観測局の連続運用20年、日本測地学会第130回講演会
日本列島の地殻変動：<http://www.gsi.go.jp/kanshi/index.html>

（10）次期計画における平成31年度実施計画の概要：

GNSS連続観測（GEONET）による日本列島全域の地殻変動・火山活動のモニタリングを定常的にを行い、得られた結果は防災情報への活用のため速やかにホームページなどで公表するとともに、地震調査委員会、火山噴火予知連絡会等に報告する。

GNSSの発展・最新のITRF座標系の実現等に伴いGEONETの解析手法の高度化を図るとともに、観測の継続のため観測機器の更新を行う。

引き続き国際GNSS事業（IGS）に参加し、IGS観測局の運用とIGSデータセンターに観測データを提供する。

（11）実施機関の参加者氏名または部署等名：

測地観測センター 電子基準点課、地殻監視課
他機関との共同研究の有無：無

（12）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話：029-864-5954
e-mail：gsi-eiss@ml.mlit.go.jp
URL：<http://www.gsi.go.jp>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 矢来博司

所属 : 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地形地殻変動観測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

日本列島全域の地殻活動のモニタリングシステムの高度化に寄与するため、潮位連続観測を継続すると共に、観測システムの更新やデータの共有化を進める。

地殻変動連続観測を着実に継続して実施することを通じて、東海地域の地殻活動のモニタリングシステムの高度化を更に推進することを目指す。(地殻監視課)

基本測量に関する長期計画の施策を基本に、大規模地震対策特別措置法に基づく「地震防災対策強化地域」など、南海トラフ地震、首都直下地震等が想定される地域を対象として、定期的に水準測量を実施し信頼性のある高精度の地殻上下変動量データを取得する。

火山性の地殻変動を詳細に捉えるため、GNSS 火山変動リモート観測装置(REGMOS)及び自動測距測角装置による連続観測を実施し、火山活動が活発化した地域においては、水準測量等による機動観測を実施し、火山観測体制の強化を図る。

(測地基準課、電子基準点課、地殻監視課)

航空機 SAR を利用して、活動的な火山における火口等の地形測量を実施し、形状の情報を蓄積する。(地図情報技術開発室)

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

全国 25 験潮場での潮位連続観測を引き続き実施するとともに、GNSS 連続観測点のデータを用いて験潮場の地盤上下変動等を補正し、絶対潮位データを作成することで日本周辺の海面変動トレンドの定量的な評価を行い、これらの験潮場の観測データをホームページ等で公開していく。また、潮位データの共有化を進め、津波等の発生時における予測や終息等の防災情報の発信への活用を図る。

御前崎及び切山においてひずみ計、水管傾斜計、地震計等の地殻変動連続観測を引き続き実施し、地殻変動の監視を行う。得られたデータは、地震予知連絡会、地震防災対策強化地域判定会等の会議に適宜報告する。

以上は、国土地理院経費のうち地理空間情報整備・活用等推進費および災害情報整備推進費に基づいた計画である。(地殻監視課)

「地震防災対策強化地域」など、南海トラフ地震、首都直下地震等が想定される地域の水準路線 2,089 キロメートルを対象に、平成 26 年度においては 1,496 キロメートルの水準測量を実施し、平成 27 年度以降においては対象となる水準路線の中から特定の路線を中心に定常的な観測を実施する。

火山周辺域では、引き続き REGMOS 及び自動測距測角装置による連続観測、水準測量等による観測を実施し、平成 26 年度においては十勝岳（水準）、樽前山（水準、GNSS）において測量を実施する。

以上は、国土地理院経費のうち災害情報整備等推進費に基づいた計画である。

（測地基準課、電子基準点課、地殻監視課）

全国の活動的な火山を航空機 SAR によって観測を実施し、火口付近の地形を明らかにして、地形情報をアーカイブする。また、活発な噴火活動によって災害が発生した際には、地形変化を明らかにする。

平成 26 年度においては、桜島の航空機 SAR による観測を実施し、地形解析を行う。

（地図情報技術開発室）

（8）平成 30 年度及び計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要：

全国 25 験潮場の潮位連続観測を安定的に実施するため、定期的な保守および監視を実施するとともに、これらの観測データを引き続きホームページで公開した。また、防災情報の発信への活用のため、関係機関と潮位データの共有化を行った。機動観測は、自動測距測角装置による連続観測を 1 火山（伊豆大島）で実施し、得られたデータは火山噴火予知連絡会に報告した。

本計画期間中には、25 験潮場で潮位連続観測、1 火山で自動測距測角装置による連続観測を実施した。また、平成 29 年度まで、御前崎地殻活動観測施設において歪・傾斜の連続観測を実施した。これらの成果は計画と一致している。

（地殻監視課）

機動観測は、火山周辺地域において GNSS 火山変動リモート観測装置（REGMOS）等による連続観測を 10 火山で実施した。また、GNSS による機動連続観測を 6 か所で実施した。

計画期間中には、火山活動に応じて GNSS 火山変動リモート観測装置（REGMOS）を設置し、連続観測を行った。

（電子基準点課）

平成 30 年度は、南海トラフ地震防災対策推進地域・南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域等において、一等水準測量 1314km（相模、駿河、島田、御前崎、遠州、渥美、紀伊北、紀伊南、室戸、足摺地区）を実施した。

本計画期間中には、大規模地震対策特別措置法地震防災対策強化地域および南海トラフ地震防災対策推進地域等において、一等水準測量 6413km を実施し、高精度の地殻上下変動データを取得した。

（測地基準課）

平成 30 年度は、霧島山（硫黄山）、草津白根山、浅間山、吾妻山、口永良部島、諏訪瀬島について、航空機 SAR による観測を実施した。

本計画期間中に全国の活動的な火山（噴火警戒レベル 2 以上）の航空機 SAR 観測を実施し、地形の情報を取得した。また、活発な噴火の際には噴火後迅速に観測を実施し、地形の変化を調査した。

（地図情報技術開発室）

（9）平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

国土地理院,2018, 東海地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報,99,184-225

（10）次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

全国 25 験潮場での潮位連続観測を安定的に実施するため、定期的な保守および監視を実施するとともに、これらの観測データを引き続きホームページで公開する。また、防災情報の発信への活用のため、関係機関と潮位データの共有化を行う。

機動観測では、自動測距測角装置による連続観測を1火山(伊豆大島)で実施し得られたデータは、火山噴火予知連絡会等の会議に報告する。

本研究課題と関連が深いもの：研究課題名「GNSS連続観測(GEONET)」験潮場に設置されているGNSS連続観測点データと験潮データを用いて、地殻変動に伴う地盤の上下変動を連続的に検知するとともに、絶対潮位データを作成することで日本周辺の海面変動トレンドの評価を行う。

(地殻監視課)

機動観測は、火山周辺地域においてGNSS火山変動リモート観測装置(REGMOS)等による連続観測を10火山(雌阿寒岳、樽前山、有珠山、北海道駒ヶ岳、浅間山、富士山、伊豆東部火山群、伊豆大島、硫黄島、霧島山)で実施する。また、GNSSによる機動連続観測を、宮城県牡鹿半島及び静岡県中西部において継続実施する。

(電子基準点課)

南海トラフ地震防災対策推進地域・南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域等において、一等水準測量1309km(相模、駿河、島田、御前崎、遠州、渥美、紀伊北、紀伊南、室戸、足摺地区)を実施する。

(測地基準課)

活動的な火山の航空機SAR観測を実施し、地形解析を行う。また、活発な噴火の際には、噴火後迅速に観測を行い、地形の変化を明らかにする。

(地図情報技術開発室)

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

測地観測センター 電子基準点課、地殻監視課

測地部 測地基準課

基本図情報部 地図情報技術開発室

他機関との共同研究の有無：無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：地理地殻活動研究センター 研究管理課

電話：029-864-5954

e-mail：gsi-eiss@ml.mlit.go.jp

URL：http://www.gsi.go.jp

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：矢来博司

所属：地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

物理測地観測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

日本重力基準網 2013 (JGSN2013) の構築及び公表。

磁気図 2015.0 年値及び 2015.0 年値磁気偏角一覧図の刊行並及び毎年度の磁気データの提供。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

地震・火山現象の理解とその予測研究に必要な基礎的資料を整備するため、日本列島域を対象とした絶対重力観測及び地磁気の連続観測を実施するとともに、地殻変動に伴う局所的な重力の変化を詳しく捉えるため重力測量を実施する。また、南海トラフ巨大地震の想定震源域において、繰り返し絶対重力観測を実施しその重力変化を把握する。

さらに富士山中腹において、全磁力の連続観測を行う。

以上は、国土地理院経費のうち地理空間情報整備・活用等推進費に基づいた計画である。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

重力測量については、南海・東南海地域を含む全国で基準重力 3 点の絶対重力観測を実施し、日本重力基準網に準じた重力値を得るとともに、重力値の時間的な変化を把握した。また、過去に整備した二等重力データ(約 14,000 点)の日本重力基準網 2016 への整合を図るため、必要な計算を実施した。さらに、航空重力測量の実施に向けて、航空重力計地上検定線を設置して 101 点で相対重力観測を実施するなど、必要な準備を進めた。

地磁気測量については、鹿野山測地観測所、水沢測地観測所、江刺観測場及び全国 11 点の地磁気連続観測点で地磁気連続観測を実施した。また、基準磁気点 10 点及び一等磁気点 1 点で地磁気絶対観測等を実施し、日本全国の地磁気の時間変化及び地理的分布を把握した。さらに、富士山中腹において、全磁力の連続観測を実施した。

本計画期間の 5 年間には、東海・東南海地域を含む全国で基準重力延べ 12 点の絶対重力観測、一等重力点等延べ 583 点で相対重力観測を実施し、日本重力基準網 2016(JGSN2016)を構築及び公表した。

また、御前崎において絶対重力観測を繰り返し実施し、時間変化を把握した。さらに、航空重力測量の実施に向けて準備を進めた。

地磁気の連続観測については、5年間を通じ、鹿野山測地観測所をはじめ全国14箇所で実施した。また、地磁気絶対観測等は、基準磁気点10点及び一、二等磁気点12点において実施した。把握した日本全国の地磁気の時間変化及び地理的分布は、磁気図2015.0年値にまとめ公表した。さらに、富士山中腹において、全磁力の連続観測を実施した。

- (9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
山本宏章，宮原伐折羅，吉田賢司，菅原安宏，松尾功二，宮崎隆幸，2018，国土地理院の重力測量の歴史 - 観測技術と重力基準の変遷 - ，国土地理院時報，131。
山本宏章，宮原伐折羅，吉田賢司，菅原安宏，宮崎隆幸，2018，国土地理院の重力測量，国土地理院時報，131。
吉田賢司，矢萩智裕，平岡喜文，宮原伐折羅，山本宏章，宮崎隆幸，2018，日本重力基準網2016(JGSN2016)の構築，国土地理院時報，131。
宮原伐折羅，吉田賢司，山本宏章，松尾功二，宮崎隆幸，宗包浩志，2018，国土地理院の重力測量の展望 - 測定技術と重力基準の将来像 - ，国土地理院時報，131。
菅原安宏，宮原伐折羅，吉田賢司，山本宏章，福田洋一，2018，南極地域における国土地理院の重力測量 - 地球規模の重力場測定への貢献 - ，国土地理院時報，131。
小坂橋勝，小島秀基，根本悟，宮原伐折羅，平岡喜文，矢萩智裕，2018，ジオイド・モデル「日本のジオイド2011」(Ver.2)の構築，国土地理院時報，130。
Toshihiro Yahagi, Kenji Yoshida, Takayuki Miyazaki, Yoshifumi Hiraoka, Basara Miyazawa, 2018, Construction of the Japan Gravity Standardization Net 2016, Bulletin of the GSI (Vol.66).
宮崎隆幸，2018，過去の稠密重力データの日本重力基準網2016への整合手法の高度化，日本地球惑星科学連合2018年大会予稿集(発表番号：SGD01-05)。
大森秀一，平岡喜文，矢萩智裕，加藤知瑛，吉田賢司，2018，石岡測地観測局における重力値の水平勾配の評価，日本地球惑星科学連合2018年大会予稿集(発表番号：SGD01-10)。
平岡喜文，矢萩智裕，松尾功，大森秀一，2018，日本での航空重力測量実現に向けた国土地理院の取り組み，日本地球惑星科学連合2018年大会予稿集(発表番号：SGD01-12)。
矢萩智裕，平岡喜文，大森秀一，宮原伐折羅，黒石裕樹，2018，国土地理院のジオイド・モデルの変遷，日本地球惑星科学連合2018年大会予稿集(発表番号：SGD01-P07)。
兒玉篤郎，富山顕，吉樂絵里香，矢萩智裕，平岡喜文，河和宏，大森秀一，2018，航空重力測量実施に向けた地上重力検定線の設置，日本測地学会第130回講演会要旨集，147-148。
大森秀一，矢萩智裕，平岡喜文，吉樂絵里香，2018，航空重力測量実施に向けた飛行計画の設計，日本測地学会第130回講演会要旨集，149-150。
Toshihiro Yahagi, Yoshifumi Hiraoka, Shuichi Oomori, Tokuro Kodama, Akira Tomiyama, Erika Kichiraku, Hiroshi Kawawa, Koji Matsuo, 2018, Launch of an airborne survey project towards the new geoid-based vertical datum in Japan, the AGU 2018 Fall Meeting .

(10)次期計画における平成31年度実施計画の概要：

III. 5 (3) ア. 観測基盤の整備

航空重力測量により全国を網羅する標高基準の精度を上げ、GNSS測位によって容易に信頼性の高い標高が得られる環境を整備する。また、地上における重力の繰り返し観測及び地磁気の連続観測を行い、地震や火山活動の監視、現象の理解に資する基礎資料を整備する。

(11)実施機関の参加者氏名または部署等名：

測地部 物理測地課

他機関との共同研究の有無：有
東京大学地震研究所

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話：029-864-5954
e-mail：gsi-eiss@ml.mlit.go.jp
URL：http://www.gsi.go.jp

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者
氏名：矢来博司
所属：地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

宇宙測地技術による地殻変動監視

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

4. 研究を推進するための体制の整備

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

合成開口レーダーを利用した SAR 干渉解析により、日本全国の地殻変動を面的かつ高精度に監視し、火山活動や地震によって生じた地殻変動を把握する。また、地震発生の可能性の高い地域において、地殻変動分布を明らかにする。

GNSS 連続観測により、日本周辺のプレートの広域的な運動及びアジア太平洋地域の地殻変動を把握する。また、国際 VLBI 事業に参加して国際共同観測を定常的に実施することで、地殻変動やプレート運動監視の基準となる ITRF 座標系の構築等に貢献する。

国連地球規模の地理空間情報管理に関するアジア太平洋地域委員会 (UN-GGIM-AP) の下で実施される GNSS キャンペーン観測に参加し、地殻変動監視の基準となるアジア太平洋地域の基準座標系

(APREF) の構築に貢献する。また、APREF 構築のために、アジア・オセアニア VLBI グループによる測地観測に関する事業に参画する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要 :

陸域観測技術衛星 2 号 (ALOS-2) 等を利用し、干渉 SAR 時系列解析など最新の SAR 干渉解析手法により全国の地殻変動を高精度に捉える。活動的な火山地域、地震発生の高いプレート境界沿いやひずみ集中帯の地域において、地殻変動の面的分布を高精度に把握する。地震に伴う災害発生時は、緊急的な SAR 干渉解析を実施し、その結果を迅速に提供することにより、災害復旧・復興に資する。

アジア太平洋地域において、次世代の VLBI 仕様に準拠した、アジア・オセアニア VLBI グループによる測地観測への石岡測地局の参画並びに、同地域における GNSS 連続観測を安定的に実施することにより、プレートの広域的な運動及びアジア太平洋地域の地殻変動を高精度に把握するために必要な基準座標系の構築に貢献する。

以上は、国土地理院経費のうち地理空間情報整備・活用等推進費および災害情報整備推進費に基づいた計画である。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

ALOS-2 の SAR データを用いて北方四島を含む国土全域を対象に SAR 干渉解析を行い、国内や海外で発生した地震や火山活動に伴う変動を検出した。霧島山 (えびの高原 (硫黄山) 周辺) では、2018 年 3 月 ~ 4 月の観測データから硫黄山の南側及びその西側に隆起のピークを検出した (図 1)。この解析結果は火山噴火予知連絡会において火山活動の評価に活用された。2018 年 9 月 6 日に発生した平成 30 年北海道胆振東部地震では、SAR 干渉解析により、震央周辺で最大 7cm 程度の隆起及び隆起域の東側で最大 4cm 程度の東向きの変動を検出した。また、SAR 干渉解析及び GNSS で捉えられた地殻変動を用いて、震源断層モデルを推定した。これらの結果は地震予知連絡会や地震調査委員会において地震活動の評価や検討に活用された。2018 年 9 月 28 日に発生したスラウェシ島の地震では、震央から南側へ役 160km の広範囲で変動し、最大 5m 程度の変位が生じたことを明らかにした。

また、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 93 回実施した。そのうち、9 回はアジア・オセアニア VLBI グループによる測地観測として実施した。これらのデータを 1980 年以降世界中で観測された VLBI データとともに全球的に解析し、観測局位置とその変化を求めた。約 3 年の観測データから、水平約 2.1mm、鉛直約 2.6mm の位置決定精度 (標準偏差) で局位置が求められた。また、石岡局の速度は約 24.2mm/年 (方位角 130 ° 方向) であった (図 2)。これは、通常のプレート運動の成分に東北地方太平洋沖地震の余効変動を含んでいるものと考えられる。

計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果としては、SAR 干渉解析により、面的かつ高精度に日本全国の変動の監視を行った。地震や火山活動に伴う災害発生時には緊急的な SAR 干渉解析を実施し、地震活動の評価や災害からの復旧・復興に資する情報を迅速に提供した。また VLBI では、平成 26 年度から石岡測地観測施設において定常的な国際 VLBI 観測を開始し、これまで 18 年に亘り国際 VLBI 観測を実施してきたつづき VLBI 観測局の役割を引き継ぎ、前述のようなプレート運動などを検出した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

本田昌樹・山下達也・上芝晴香・攪上泰亮・林京之介・桑原将旗・松本紗歩・仲井博之・酒井和紀・宮原伐折羅・宗包浩志・飛田幹男・矢来博司・小林知勝・森下遊・藤原智 (2018) , だいち 2 号 SAR データの解析による霧島山噴火に伴う地表変動の検出 , 国土地理院時報 , 130.

Kobayashi, T., H. Yurai, S. Kawamoto, Y. Morishita, S. Fujiwara, Y. Hiyama (2018), Crustal Deformation and Fault Models of the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence: Foreshocks and Main Shock, International Association of Geodesy Symposia, doi:10.1007/1345_2018_37 (to be published)

- Kobayashi, T.(2018), InSAR-detected local ground deformation in potential areas of phreatic eruption: Way forward to proactive monitoring for disaster risk mitigation, proceeding of 13th SEGJ Information Symposium, 2018 (to be published)
- Kobayashi, T. (2018), Locally distributed ground deformation in an area of potential phreatic eruption, Midagahara volcano, Jpana, detected by single-look-based InSAR time series analysis, J. Volcanology and Geothermal Res., 357, 213-223, 2018, doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.04.023.
- Kobayashi, T., Y. Morishita, and H. Munekane (2018), First detection of precursory ground inflation of a small phreatic eruption by InSAR, Earth Planet. Sci. Lett, 491, 244-254, 2018, doi:10.1016/j.epsl.2018.03.041.
- 森下遊・小林知勝(2018), ALOS-2 干渉 SAR 時系列解析で検出された霧島山の地表変位と大気遅延誤差低減処理の効果, 測地学会誌, 64, 28-38.
- Morishita, Y., T. Kobayashi, S. Fujiwara, and H. Yarai (2018), Complex crustal deformation of the 2016 Kaikoura, New Zealand, earthquake revealed by ALOS 2, Bull. Seismol. Soc. Am., 108(3B), 1746-1756, doi:10.1785/0120180070.
- Wakasugi T., S. Kurihara, H. Ueshiba, M. Umei, M. Ishigaki, H. Munekane (2018), Current Status of VGOS Observation with Ishioka VLBI Station, proceeding of 10th General Meeting of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (to be published)

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要:

衛星 SAR データを使用して日本全国の SAR 干渉解析を定常的に実施し、日本国内における火山、地盤沈下、斜面変動等による地殻・地盤変動を検出する。地震発生や火山活動活発化の際には臨時解析を実施する。VLBI は、引き続き IVS の観測計画に基づき、石岡局で国際共同観測を実施する。また、観測データを解析し、観測局位置とその速度を算出する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

測地部 宇宙測地課
地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室
他機関との共同研究の有無: 無

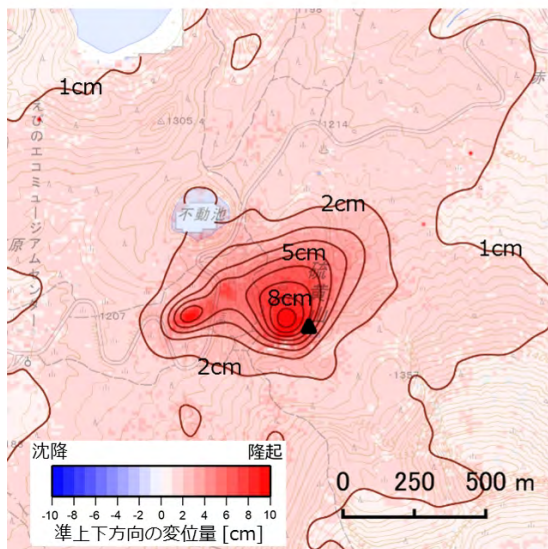
(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名: 地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話: 029-864-5954
e-mail: gsi-eiss@ml.mlit.go.jp
URL: <http://www.gsi.go.jp>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 矢来博司
所属: 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

準上下方向



準東西方向

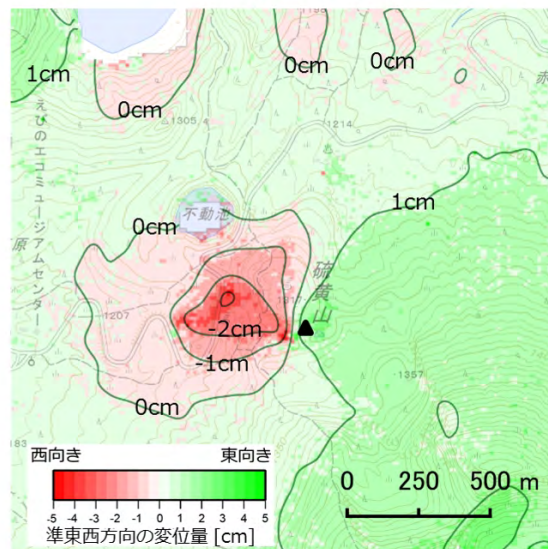


図1 2018/03/11-2018/04/22 と 2018/03/12-2018/04/23 の SAR 観測データの解析により得られた霧島山(硫黄山)における準上下・準東西成分の変動量

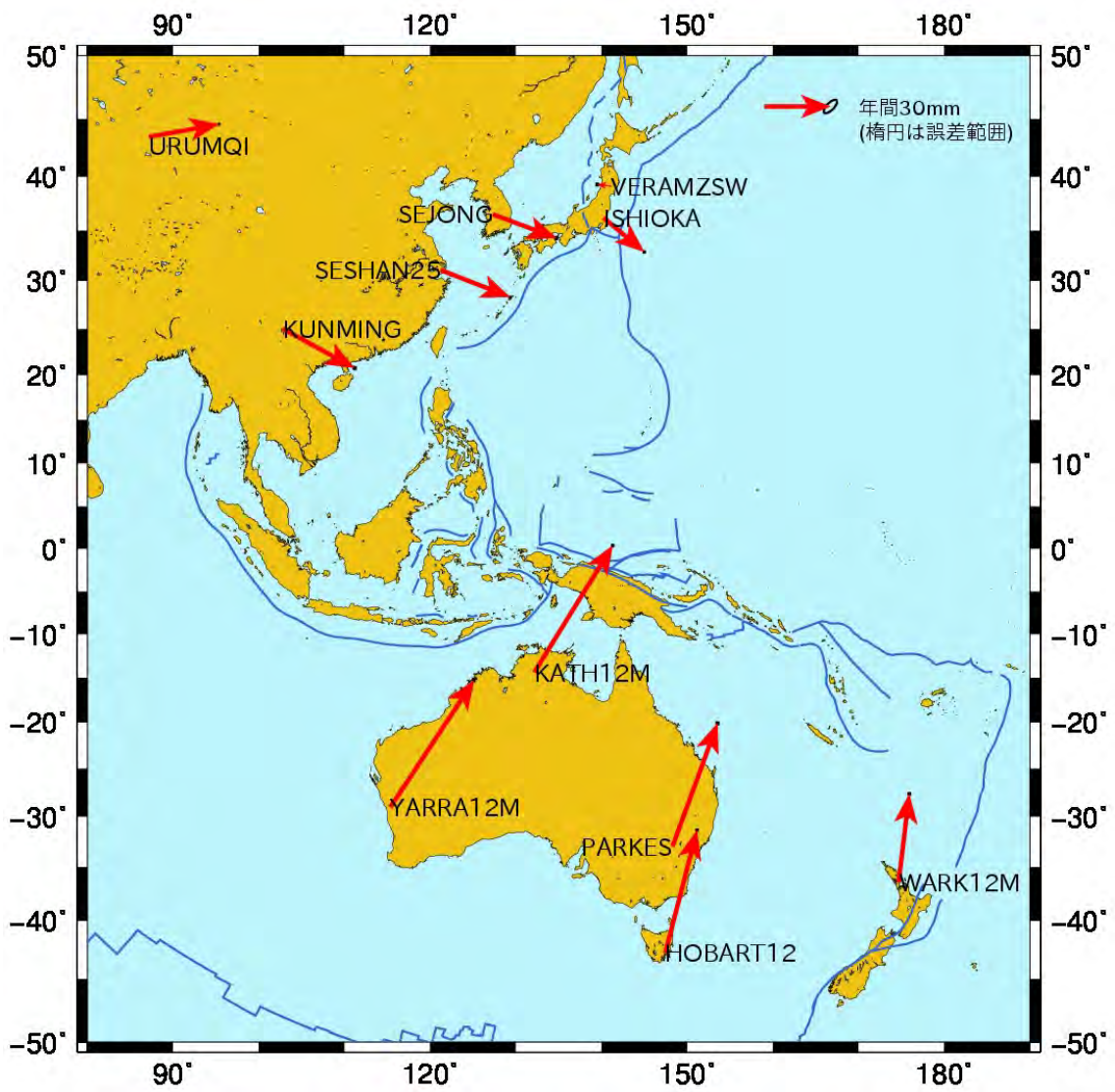


図2 VLBI観測データの解析により得られたアジア・オセアニア地域のVLBI観測局の速度

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

火山基本図・火山土地条件図整備

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

火山防災のために監視・観測体制の充実等の必要がある 47 火山について火山基本図及び火山土地条件図を作成するとともに、それらの数値データ化を進める。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本課題は、国土地理院経費のうち災害情報整備推進費により火山防災地形データとして整備・提供するものである。

平成 26 年度においては、「秋田駒ヶ岳」の火山土地条件調査を実施する。

平成 27～30 年においては、毎年度、1 火山を対象に火山土地条件調査を実施し、火山土地条件図数値データを整備・提供予定。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 29 年度に調査を実施した火山土地条件図「鳥海山(南部)」の数値データ整備及び「八丈島」の火山土地条件調査を実施した。

火山基本図「草津白根山」「乗鞍岳」「阿蘇山」「雲仙岳」の数値データを整備した。

平成 26 年度～30 年度の成果の概要

【平成 26 年度】

「新潟焼山」の火山土地条件図及び数値データを整備した。

「秋田駒ヶ岳」の火山土地条件調査を実施した。

【平成 27 年度】

「秋田駒ヶ岳」の火山土地条件図及び数値データを整備した。

「秋田焼山」の火山土地条件調査を実施した。

【平成 28 年度】

「秋田焼山」の火山土地条件図及び数値データを整備した。

「鳥海山(北部)」の火山土地条件調査を実施した。

「新潟焼山」「焼岳」「桜島」「八丈島」「新島」の火山基本図及び数値データを整備した。

【平成 29 年度】

「鳥海山(北部)」の火山土地条件図及び数値データを整備した。

「鳥海山(南部)」の火山土地条件調査を実施した。

「西之島」「弥陀ヶ原」「霧島山」「口永良部島」「鳥海山」「吾妻山」の火山基本図及び数値データを整備した。

【平成 30 年度】

「鳥海山(南部)」の火山土地条件図及び数値データを整備した。

「八丈島」の火山土地条件調査を実施した。

「草津白根山」「乗鞍岳」「阿蘇山」「雲仙岳」の火山基本図及び数値データを整備した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
国土地理院時報(第 130 集)「火山基本図の整備、公開」を公表。

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

火山土地条件図「八丈島」の数値データ整備及び「箱根山」の火山土地条件調査を実施予定。

「岩手山」ほか 2 火山を対象に火山基本図を整備予定。

次期計画の研究課題名：火山基本図・火山土地条件図整備

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

応用地理部 防災地理課

他機関との共同研究の有無：無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：地理地殻活動研究センター 研究管理課

電話：029-864-5954

e-mail：gsi-eiss@ml.mlit.go.jp

URL：http://www.gsi.go.jp

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：矢来博司

所属：地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

都市圏活断層図整備

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

都市周辺の主要な活断層について、位置・地形等のデータベースの充実を図る。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本課題は、国土地理院経費のうち災害情報整備推進費により主要な活断層について、断層の詳細な位置、関連する地形の分布等の情報を整備・提供するものである。

平成 26 年度においては、砺波平野断層帯、三峠・京都西山断層帯、山崎断層帯、雲仙断層群、人吉盆地南縁断層帯、5 断層帯を 1:25,000 都市圏活断層図として整備。

平成 27～30 年においては、毎年度、3 断層帯を調査する予定。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 29 年度に調査を実施した、糸魚川 - 静岡構造線断層帯とその周辺「白馬岳 改訂版」「大町 改訂版」、濃尾断層帯とその周辺「大野」「冠山」「能郷白山」「谷汲」「美濃」「岐阜」、山田断層帯とその周辺「宮津」「大江山」、布田川テ 犁彙視惣咄箸修亮 奸嵌 改訂版」「日奈久」12 面の 1:25,000 活断層図を整備・公開及び、牛首・跡津川断層帯、養老 桑名 四日市断層帯の調査を実施した。

・平成 26 年度の成果の概要

平成 25 年度に調査を実施した、三峠・京都西山断層帯とその周辺「園部」、六甲・淡路島断層帯とその周辺「洲本」「由良」「鳴門海峡」、警固断層帯とその周辺「福岡 改訂版」「甘木」「脊振山」7 面の 1:25,000 都市圏活断層図を整備・公開及び、砺波平野断層帯、三峠・京都西山断層帯、山崎断層帯、雲仙断層群、人吉盆地南縁断層帯の調査を実施した。

・平成 27 年度の成果の概要

平成 26 年度に調査を実施した、砺波平野断層帯とその周辺「高岡」、三峠・京都西山断層帯とその周辺「舞鶴」「綾部」、山崎断層帯とその周辺「北条」「高砂」、雲仙断層群とその周辺「雲仙」、人吉盆地南縁断層帯とその周辺「人吉盆地」7面の 1:25,000 都市圏活断層図を整備・公開及び、森本・富樫断層帯、綾瀬川断層、山崎断層帯、菊川断層帯の調査を実施した。

・平成 28 年度の成果の概要

平成 27 年度に調査を実施した、森本・富樫断層帯とその周辺「鶴来」、綾瀬川断層とその周辺「鴻巣」、那岐山断層帯(山崎断層帯)とその周辺「津山東部」、菊川断層帯とその周辺「下関北部」「宇部」5面の 1:25,000 都市圏活断層図を整備・公開及び、屏風山・恵那山断層帯及び、猿投山断層帯、鈴鹿西縁断層帯、別府 - 万年山断層帯、布田川・日奈久断層帯の調査を実施した。

・平成 29 年度の成果の概要

平成 28 年度に調査を実施した、屏風山・恵那山断層帯及び猿投山断層帯とその周辺「中津川」「恵那」、鈴鹿西縁断層帯とその周辺「彦根東部」「御在所山」、別府 - 万年山断層帯とその周辺「豊岡」、布田川・日奈久断層帯とその周辺「阿蘇」「熊本 改訂版」7面の 1:25,000 都市圏活断層図を整備・公開及び、糸魚川 - 静岡構造線断層帯北部、濃尾断層帯、山田断層帯北部、布田川テ 犁彙視怒鳴棉堯 杵沈テ 犁彙視怒啼酪瑤獵敢困終損櫻靴拭

・平成 30 年度の成果の概要

平成 29 年度に調査を実施した、糸魚川 - 静岡構造線断層帯とその周辺「白馬岳 改訂版」「大町 改訂版」、濃尾断層帯とその周辺「大野」「冠山」「能郷白山」「谷汲」「美濃」「岐阜」、山田断層帯とその周辺「宮津」「大江山」、布田川テ 犁彙視怒哮箸修亮 奸嵌 改訂版」「日奈久」12面の 1:25,000 活断層図を整備・公開及び、牛首・跡津川断層帯、養老 桑名 四日市断層帯の調査を実施した。

平成 26 年度から平成 30 年度の間に 19 断層帯について調査を実施した。当初計画では 17 断層帯であったが、熊本地震に関連する 2 断層帯の調査を追加したため、当初計画を上回る結果となった。

(9)平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

- ・後藤秀昭・千田昇(2018): 1:25,000 活断層図 布田川・日奈久断層帯とその周辺「八代 改訂版」「日奈久」解説書。国土地理院技術資料 D1-No.914, 12p. ・岡田篤正・金田平太郎・杉戸信彦・中田 高(2018): 1:25,000 活断層図 濃尾断層帯とその周辺「大野」「冠山」「能郷白山」「谷汲」「美濃」「岐阜」解説書。国土地理院技術資料 D1-No.912, 29p. ・植田摩耶・中澤尚・安喰靖・齋藤俊信・飯田誠・山中崇希(2018): 1:25,000 活断層図「熊本 改訂版」及び「阿蘇」の公開。国土地理院時報, 130.

(10)次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

平成 31 年度においては、庄川断層帯、長良川上流断層帯、長岡平野西縁断層帯、石狩低地東縁断層帯、糸魚川 - 静岡構造線断層帯(改訂)、上町断層帯(改訂)の 6 断層帯を 1:25,000 活断層図として整備。

次期計画の研究課題名 : 全国活断層帯情報整備。

(11)実施機関の参加者氏名または部署等名 :

応用地理部 防災地理課

他機関との共同研究の有無 : 無

(12)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 地理地殻活動研究センター

電話 : 029-864-5954

e-mail : gsi-eiss@ml.mlit.go.jp

URL : <http://www.gsi.go.jp>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 矢来博司

所属 : 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地殻活動データベース整備・更新

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(4) その他関連する建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

GNSS データクリアリングハウスに登録されている GNSS 連続観測局の所在変更が生じた場合、あるいは、GNSS 連続観測局が追加された場合には、データベースを随時更新する。さらに、現在公開している国土地理院と海上保安庁以外の機関が管理する GNSS 連続観測データの所在情報についても整備を進める。

地殻活動総合解析システムの維持及びデータベースの更新を行う。水準測量、GNSS(GEONET)、潮位観測データにおいては、年度毎に観測結果を追加するとともに、これらの原データの管理部署で進められているエラーデータの排除や観測の再解析結果を反映し、データベースを最新の状態に保つ。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 26～30 年度において、メタデータの更新を適宜実施するとともに、対象を他機関の GPS 連続観測点にも広げることにより、より一層の環境整備を進める。

以上は、国土地理院経費のうち地理空間情報整備・活用等推進費に基づいた計画である。

(電子基準点課)

平成 26～30 年度において、上記の到達目標を実現するため、各年度ごとにシステムの維持及びデータベースの更新を行う。また、システムのユーザーインターフェース改良等を平行して実施する。外部公開用の CD-R 媒体を作成し、希望者に配布する。

以上は、国土地理院経費のうち災害情報整備推進費に基づいた計画である。

(地殻変動研究室)

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 30 年度を含む計画期間中において、国土地理院が公開する GNSS 連続観測データに関する所在情報を、引き続き国土地理院のホームページから公開した (<http://datahouse1.gsi.go.jp/>)
(電子基準点課)

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

国土地理院が公開する GNSS 連続観測データに関する所在情報を整備し、国土地理院のホームページから引き続き公開する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

測地観測センター 電子基準点課
地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室
他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 地理地殻活動研究センター 研究管理課
電話 : 029-864-5954
e-mail : gsi-eiss@ml.mlit.go.jp
URL : <http://www.gsi.go.jp>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 矢来博司
所属 : 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

GNSS 観測・解析技術の高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

- ・電子基準点観測データの誤差特性を総合的に分析する手法を開発する。
- ・GNSS 解析技術を高度化した上で、過去の地震や火山活動に関して高時間分解能の地殻変動情報を抽出する技術を開発する。
- ・リアルタイム GNSS 解析の安定化、高精度化を図る技術を開発する。

(宇宙測地研究室)

- ・GEONET リアルタイム解析システムについて、全国の電子基準点を対象として安定した運用ができるようシステムの構築を行う。

(電子基準点課)

(7) 本課題の 5 か年計画の概要 :

- ・平成 26 年度において、電子基準点観測データの誤差特性を分析する技術の開発を行う。
- ・平成 26 年度～28 年度において、GNSS 解析技術を高度化した上で過去の地震や火山活動に関して高時間分解能の地殻変動情報を抽出する技術を開発する。
- ・平成 26 年度～29 年度においてリアルタイム GNSS 解析の技術を安定化、高精度化を図る技術を開発する。

(宇宙測地研究室)

以上は、国土地理院経費のうち技術研究開発推進費に基づいた計画である。

- ・電子基準点の GNSS 化に伴う解析システムの改良を行うことで、より安定した測位結果の取得を図る。さらに、大規模地震発生時等に解析結果を迅速かつ確実に提供できるよう、システムの冗長化及び必要な改良を実施する。

(電子基準点課)

以上は、国土地理院地経費のうち理空間情報整備・活用等推進費に基づいた計画である。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度～30 年度) の成果の概要 :

平成 30 年度においては、電子基準点リアルタイム解析システムにおいて、精密単独測位法を導入し試験運用を実施した。

計画期間中においては、電子基準点リアルタイム解析システムにおいて、全国の電子基準点を対象として安定した運用ができるようシステムの調整を行った。さらに、システムの堅牢性向上のため精密単独測位法の導入について検討を行なった。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Kawamoto, S., N. Takamatsu, S. Abe, K. Miyagawa, Y. Ohta, M. Todoriki, and T. Nishimura, 2018, Real-time GNSS analysis system REGARD: an overview and recent results, Journal of Disaster Research

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画の研究課題「GNSS 観測・解析技術の高度化」に該当

地殻変動を即時的・高時間分解能で把握可能な、電子基準点リアルタイム解析システムの高度化を行うとともに、地殻変動を高時間分解能で把握するための電子基準点キネマティック解析システムについて、解析結果の信頼性及び精度を向上させるための技術開発を行う。また、汎用低価格受信機を用いた地殻変動観測システムの開発を行う。さらに、得られた解析結果の精度向上や異常値を判定する仕組みを構築することで、より信頼性の高い災害関連情報の発信を図る。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

地理地殻活動研究センター 宇宙測地研究室

測地観測センター 電子基準点課

他機関との共同研究の有無 : 有

東北大学、気象庁気象研究所

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 地理地殻活動研究センター 研究管理課

電話 : 029-864-5954

e-mail : gsi-eiss@ml.mlit.go.jp

URL : <http://www.gsi.go.jp>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名：矢来博司

所属：地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室

(1) 実施機関名：

国土地理院

(2) 研究課題(または観測項目)名：

SAR 観測・解析技術の高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

・「だいち 2 号」等による衛星 SAR データを用いた地殻変動観測・解析技術の高度化を目指し、干渉 SAR 時系列解析に関する技術の開発・改良を進める。

・GNSS データを利用して SAR 干渉画像内に含まれる、電離圏の影響による誤差を低減する手法の開発を行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

・平成 26 年度～30 年度において、干渉 SAR 時系列解析における主要な誤差要因である植生、大気、電離層の影響を、地表の散乱特性の時空間的共通性、数値気象モデル、電離層モデル等を用いて低減する技術の開発・改良を行い、微小な規模で進行する地殻変動の計測精度向上を図る。

(地殻変動研究室)

・平成 26 年度～27 年度において、電子基準点の観測データを利用して SAR 干渉画像内に含まれる、電離圏の影響による誤差を低減する手法を開発する。

(宇宙測地研究室)

以上は、国土地理院経費のうち技術研究開発推進費に基づいた計画である。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要:

干渉 SAR 時系列解析を GUI 操作で行うソフトウェアの改造を実施した。また、周波数分割法による電離圏起因の誤差の低減処理や SBAS 法等の機能を干渉 SAR 時系列解析に実装した。実データへ適用してその効果を確認した。(地殻変動研究室)

5 年間の研究を通じて、干渉 SAR 時系列解析に関する技術開発及び電離圏擾乱起因の誤差低減手法を開発した。前者の研究では、干渉 SAR 時系列解析における主要な誤差要因である植生、大気、電離圏の影響を低減する技術を開発し、計測点数や計測精度の向上を実現した。これにより年間数 mm から数 cm 程度の微小な規模で進行する地盤変動の時間的推移を面的に検出可能になった。また、GUI 操作による時系列解析専用処理システムを開発し、解析作業・分析作業の効率化を実現した。電離圏起因の誤差に関する研究では、GPS-TEC を利用した誤差低減技術を開発した。これに加えて、SAR データの周波数分割処理を利用した誤差低減技術も開発した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):

Kobayashi T., Y. Morishita, and H. Munekane, 2018, First detection of precursory ground inflation of a small phreatic eruption by InSAR, Earth Planet. Sci. Lett., doi:10.1016/j.epsl.2018.03.041, 491, 244-254.

Kobayashi T., 2018, Locally distributed ground deformation in an area of potential phreatic eruption, Midagahara volcano, Japan, detected by single-look-based InSAR time series analysis, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 357, 213-223, doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.04.023

森下遊, 小林知勝, 2018, ALOS-2 干渉 SAR 時系列解析で検出された霧島山の地表変位と大気遅延誤差低減処理の効果, 測地学会誌, 64, 28-38.

小林知勝, 森下遊, 山田晋也, 2018, 干渉 SAR 時系列解析プロトタイプシステムの開発, 国土地理院時報, 130.

小林知勝, 山田晋也, 2019, 干渉 SAR 時系列解析による国土の地盤変動の時間的推移の面的検出に関する研究(第 5 年次) 国土地理院調査研究年報(平成 30 年度).

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要:

干渉 SAR 時系列解析に関する技術の開発・改良を進める。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室、宇宙測地研究室

他機関との共同研究の有無: 有

宇宙航空研究開発機構(JAXA)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名: 地理地殻活動研究センター 研究管理課

電話: 029-864-5954

e-mail: gsi-eiss@ml.mlit.go.jp

URL: <http://www.gsi.go.jp>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 矢来博司

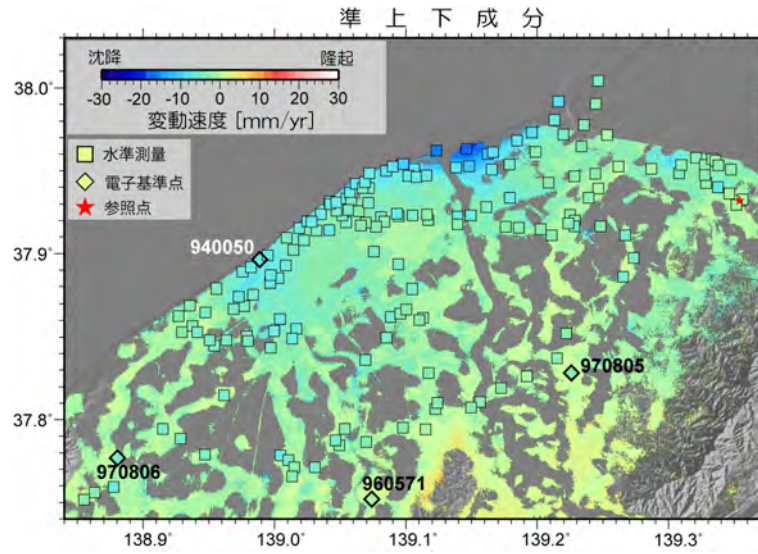


図 1： 干渉 SAR 時系列解析により求めた変動速度（準上下成分）と水準測量データ及び電子基準点データとの比較

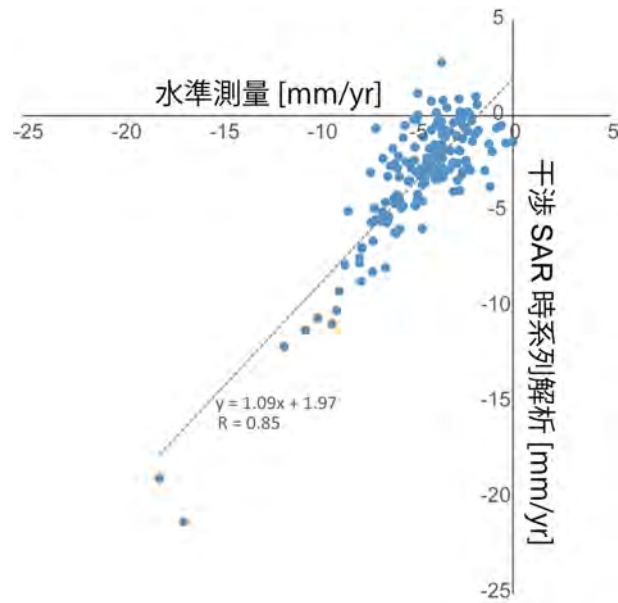


図 2： 図 1 に示す干渉 SAR 時系列解析により求めた変動速度（準上下成分）と水準測量との比較

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

火山現象に関する基礎データの蓄積と活用

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ア. 史料の収集とデータベース化

(4) その他関連する建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(4) 研究者，技術者，防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

全国の活火山について，大学や防災科学技術研究所等関係機関の協力の下，火山噴火予知連絡会で中長期的な火山監視体制の強化が必要とされた 47 火山については常時観測データの収集を行い，それ以外の火山については現地調査等必要に応じて観測データを収集して，火山現象のデータベースとしてその蓄積を図る．

これらの成果は，噴火警報等の防災情報の発表や火山活動解説資料の作成に利用するとともに，地震火山月報(カタログ編)や火山年報で取りまとめて公表する．これにより，火山噴火，前兆現象の国際的データファイルの更新にも寄与する．

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

火山噴火予知連絡会で中長期的に観測体制の充実が必要とされた 47 火山について，全国 4 か所の火山監視・情報センターにおいて，地震計，空振計，GNSS 等の観測データを常時収集し，解析を行い，蓄積する．

全国の火山について，地震観測，GNSS 繰り返し観測，熱観測等の調査的な機動観測により得られた観測データを解析し，蓄積する．

火山活動に異常が観測された場合には，緊急観測により収集した火山活動の詳細なデータを解析し，蓄積する．

これらのデータの蓄積にあたって，今後の活火山総覧の改訂に活用できるようにデータベース化する．

各種監視・観測で得られた成果は、噴火警報等の防災情報、火山活動解説資料等の防災目的の資料等に利用する他、地震火山月報（カタログ編）や火山年報等により HP により公表する。また、火山活動の概況を英文でとりまとめて HP により公表する。

（ 8 ）平成 30 年度及び計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要：

全国の 50 活火山について、全国 4 か所の火山監視・警報センターにおいて、地震計、空振計、GNSS 等の観測データを常時収集し、解析を行い、蓄積した。

全国の火山について、地震観測、GNSS 繰り返し観測、熱観測等の調査的な機動観測により得られた観測データを解析し、蓄積した。

平成 30 年度に噴火が発生した霧島山（新燃岳）、桜島、及び口永良部島のほか、火山活動の高まりがみられた吾妻山、草津白根山（白根山（湯釜付近））、霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺）等において、緊急観測により収集した火山活動の詳細なデータを解析し、蓄積した。

これらのデータの蓄積にあたって、今後の活火山総覧の改訂に活用できるようにデータベース化した。

各種監視・観測で得られた成果は、HP で速報的に公開するとともに、噴火警報等の防災情報、火山活動解説資料等の防災目的の資料等に利用する他、地震火山月報（カタログ編）や火山年報等により HP により公表した。また、火山活動の概況を英文でとりまとめて HP により公表した。

（ 9 ）平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

地震火山月報（防災編）2018 年 3 月号～2019 年 2 月号（予定含む）

地震火山月報（カタログ編）2016 年 3 月号～2016 年 5 月号（予定含む）

年間の日本の主な火山活動（2018 年）

Monthly Volcanic Activity Report（2017 年 1 月号～2018 年 3 月号）（予定含む）

（ 10 ）次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

全国の 50 活火山について、全国 4 か所の火山監視・警報センターにおいて、地震計、空振計、GNSS 等の観測データを常時収集し、解析を行い、蓄積する。

全国の火山について、地震観測、GNSS 繰り返し観測、熱観測等の調査的な機動観測により得られた観測データを解析し、蓄積する。

火山活動に異常が観測された場合には、緊急観測により収集した火山活動の詳細なデータを解析し、蓄積する。

これらのデータの蓄積にあたって、今後の活火山総覧の改訂に活用できるようにデータベース化する。

各種監視・観測で得られた成果は、HP で速報的に公開するとともに、噴火警報等の防災情報、火山活動解説資料等の防災目的の資料等に利用する他、火山月報（カタログ編）や火山年報等により HP により公表する。また、火山活動の概況を英文でとりまとめて HP により公表する。地元自治体による災害対策の意志決定を支援するため、火山防災協議会に対する観測成果の共有を進める。

（ 11 ）実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁地震火山部・札幌管区气象台・仙台管区气象台・福岡管区气象台火山監視・警報センター
他機関との共同研究の有無：有

（監視に関するデータ提供機関）

大学、防災科学研究所等の研究機関、自治体、地方整備局等の火山観測実施機関

（ 12 ）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：地震火山部管理課 地震調査連絡係長

電話：03-3212-8341(内線：4514)

e-mail：johokan@eqvol2.kishou.go.jp

URL : <http://www.jma.go.jp>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 井上 和久

所属 : 気象庁地震火山部火山課火山監視・警報センター

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

自己浮上式海底地震計観測による宮城県沖の地震活動

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

想定宮城県沖地震の震源域及びその周辺において自己浮上式海底地震計による地震観測を行い、その海域で発生している地震活動を詳細に把握するとともに、精度の高い震源分布を求める。また、震源決定手法の改良・高度化も行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

宮城県沖において 4 か月(2 か月 2 回) 程度の自己浮上式海底地震計による地震観測を実施し、地震データを蓄積するとともに、検測・解析処理を行う。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 30 年度は、4 月と 11 月の海洋気象観測船の航海で、13 台の海底地震計、4 台の海底水圧計を設置し、15 台の海底地震計、7 台の海底水圧計を回収した。

平成 26 年度～30 年度にかけ、宮城県沖において自己浮上式海底地震計による繰り返し地震観測を実施し、地震データを蓄積するとともに、検測・解析処理を行った。得られた検測値をもちいて Yamamoto et al. (2014) による 3 次元速度構造を用いて決定された震源分布を図に示す。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：特になし。

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

現計画と同様の実施体制により、引き続き宮城県沖において 4 か月(2 か月 2 回) 程度の自己浮上式海底地震計による地震観測を実施し、地震データを蓄積するとともに、検測・解析処理を行う(実施機関は気象庁から東北大学へ変更)

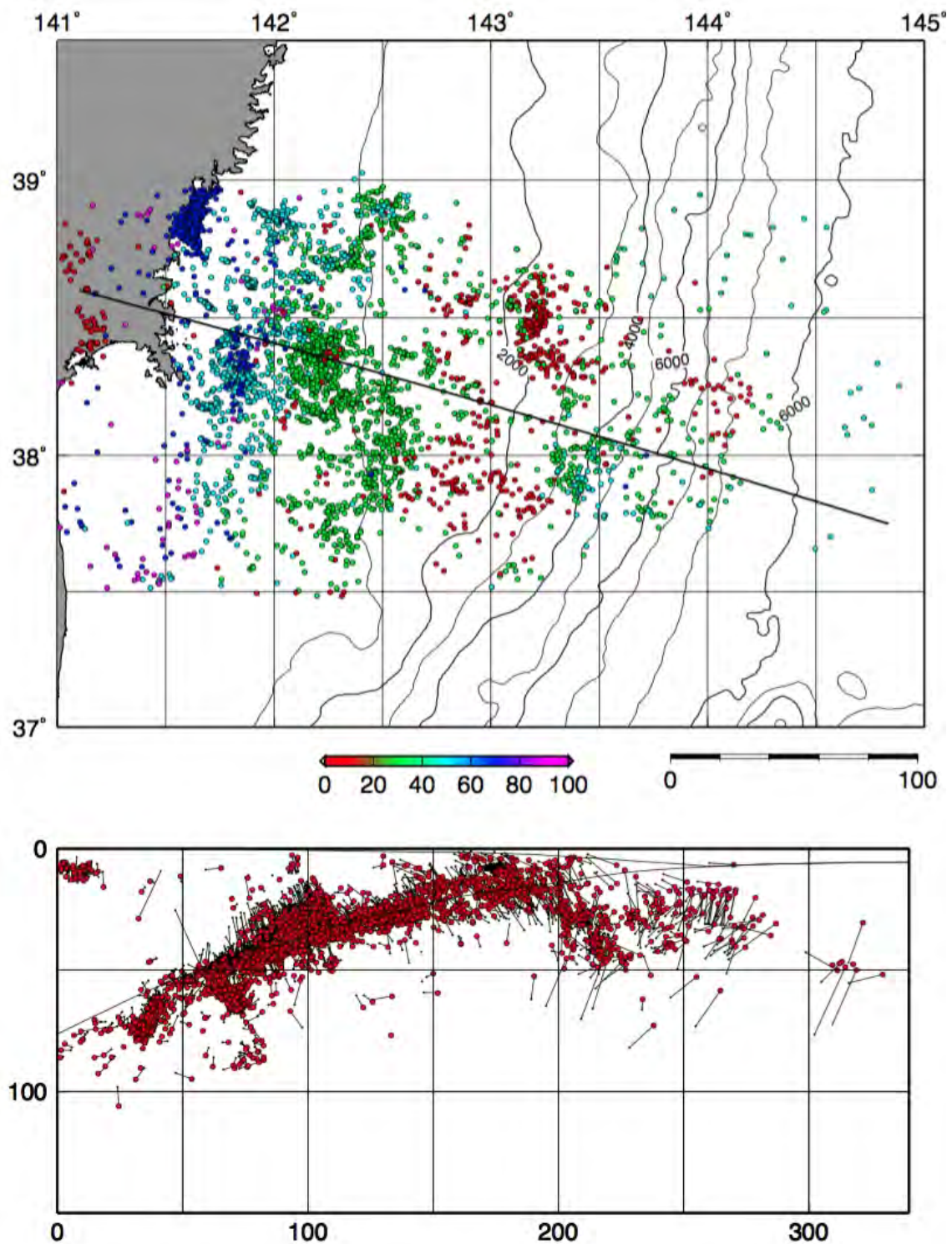
(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁

他機関との共同研究の有無：有

東北大学

- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：地震火山部管理課 地震調査連絡係長
電話：03-3212-8341 (内線：4514)
e-mail：johokan@eqvol2.kishou.go.jp
URL：http://www.jma.go.jp
- (13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者
氏名：尾崎 友亮
所属：気象庁地震火山部管理課



図

自己浮上式 OBS 観測の読み取りと Yamamoto et al. (2014) による 3 次元地震波速度構造を用いて再決定された宮城県沖における震源分布．2003～2016 年の気象庁一元化カタログに掲載された地震のうち，OBS を含む 10 点以上で P 波初動押し引きが読み取られたものを示す．黒細線の先は 1 次元構造で決定された震源．

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地殻変動観測による火山活動評価・予測の高度化に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

4. 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地殻変動データが得られる活動的な火山において、火山活動の異常検出のために地殻変動観測データ等のモニタリング手法を高度化するとともに、地殻変動源のモデル化とシミュレーションによりマグマ蓄積・挙動の推定手法を高度化する。

噴火に至る多様な地震活動や地殻変動などについて過去事例の整理・解析を通して、事例の少ない火山も含め火山活動の推移の想定を行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

伊豆大島等の活動的な火山における GPS、光波測距、傾斜、ひずみ、重力等の各種地殻変動データや地震活動データ、および合成開口レーダー (SAR) データの取得・収集を行い、火山における長期的および短期的な地殻変動の捕捉、解析を行う。また、観測データの S N 比の向上などによる異常検出手法の高度化や、高品位なひずみや傾斜、光波測距、GPS などの観測データを活用した火山活動のリアルタイム・モニタリング手法の高度化を行う。

マグマがどこに存在するか、マグマは周辺にどのような力学的影響を及ぼすかをより正確に把握できるように、力学的な地殻変動源モデルの設定・改良やマグマによる地殻変動・応力場のシミュレーションを通して、地殻変動によるマグマ蓄積状態の時間空間的な推定手法や地震活動、地殻変動によるマグマの挙動の推定手法の高度化を図る。

マグマの移動・上昇など噴火に伴う活動様式は多様であることから、複数の代表的な活動ケースについて、マグマの移動・上昇に伴う地震活動と地殻変動の多様性・共通性を過去事例等で整理・解析する。また、その結果に基づいて、マグマの状況や火道の形態等から噴火に至る地震活動や地殻変動の推移を想定し、確率的な噴火シナリオの作成に貢献する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

[平成 30 年度の成果の概要]

伊豆大島の GNSS 観測、光波測距観測、ひずみ観測、重力観測を継続し、データ収集及び解析を行った。GNSS による 2001 年以降の長期的な上下変動を解析し、火山との関連は未解明ながら、2013 年以降は以前より全島で隆起速度がやや増加 (年あたり平均約 0.7cm) していることが判明した。今後の活動予測のために引き続き検討が必要である。重力繰り返し観測では、相対重力計の種々の誤差要因を推定してそれによる補正を適用し、三原山では継続的に重力の増加傾向がみられ、重力鉛直勾配の実測と GNSS 上下変動データによる定量解析により、その傾向は概ね三原山の局所的沈降で説明できることを示した。

火山の傾斜観測において、降水と共に融雪の影響とみられる変化を補正することが課題であったところ、この間に開発したタンクモデルによる降水補正に加えて、気象観測データから融雪量を推定して補正する手法を開発して、中・長期的な SN 比を向上させた。

霧島山周辺の地震計データを用いて、地下のマグマだまりの検出を試みた (東大地震研・京都大学との共同研究)。地下約 7-12km にある種の地震波の低速度異常が存在し、2011 年噴火時の地殻変動との対応から、この領域がマグマだまりと推定された。

[5 か年の成果の概要]

(御嶽山の 2014 年噴火に関連した解析)

2014 年 9 月 27 日の御嶽山の水蒸気噴火に関連して、地震及び地殻変動の解析を行った。噴火直前の火山性微動の解析から震源が深い方へ移動したことがわかった。また傾斜変動のデータ解析から噴火直前の火口浅部の膨張量を推定した。9 月以降の GNSS 観測データの解析による深部の膨張は、2007 年のごく小規模噴火の前にみられたものより小さいことがわかった。噴火前後の地震活動を比較すると、高周波成分が比較的少ない地震は噴火後に少なく噴火前の期間に多くみられ、流体の動きとの関連が示唆される。

(モニタリング手法の高度化)

吾妻山周辺の GNSS 連続観測データの、気象庁及び国土地理院 GEONET を同時に解析する統合解析システムを構築し、2014-15 年の大穴火口付近を中心とする明瞭な隆起・膨張が検出された。火口直下の浅部の熱水活動との関連が示唆される。

GNSS の基線長データの S/N 比を向上させるスタッキング解析により、御嶽山の 2014 年の深部膨張の解析を行った他、2015 年の箱根山の火山活動では、地震活動の活発化に 3 週間あまり先行して地殻変動を検出した (温泉地学研究所と共同)。

光波測距観測については、数値気象モデル GPV を用いた気象補正なども含めた処理の自動化を図り、監視業務にも利用可能なシステムに高度化した。

(衛星 SAR による火山性地殻変動の検出と火山監視手法の高度化)

2014 年 8 月から運用開始された ALOS-2/PALSAR-2 データで、雌阿寒岳、十勝岳、吾妻山、御嶽山、箱根山、西之島、硫黄島、霧島山、桜島、口永良部島などの 25 火山において火山活動に伴う地殻変動を面的な分布として検出し、空間スケールが数 10 m 程度の変動を検出できることを明らかにした。これらについて MaGCAP-V の SAR データによるモデル解析機能を用いた圧力源推定を行った。

(地殻変動・応力場のシミュレーションによるマグマの挙動の推定に関する研究)

伊豆大島の約 1 年の周期的な地殻変動の原因について、渡辺 (2012) の概念モデルに基づいて、浅部マグマだまり中で生じる気泡の上昇と、それによる体積膨張と圧力変化に伴う間欠的な気泡の流出過程をモデル化し、その数値計算により地殻変動の周期や体積変化量を説明できる可能性を示した。

十勝岳では、62-?火口周辺の 2005 年頃から継続している局所的な山体変動について、地形を考慮した有限要素法による計算で圧力源を検討し、茂木モデルでは説明困難な変動が、2015 年 6 月の前十勝の加速的変動までは説明できることを示し、浅部圧力源を境界要素法で求めることができた。

(活動的火山におけるその他の研究)

霧島山 (硫黄山) における 2014 年からの火山活動の活発化の推移を検討し、2017 年 4 月からの硫黄山浅部の地殻変動及び 9 月の地殻変動を伴った地震活動について傾斜変動源の推定を行い、霧島硫黄山浅部の活動モデルの推定を行った。

西之島火山で自己浮上式海底地震計による観測を 2015 年 6 月 ~ 10 月に実施した。噴火活動に伴うと考えられる震動が記録され、6 月から 10 月にかけて震動回数は減少しているものの、地震規模はやや大きくなっていることがわかった (海上保安庁、地震研究所と連携して観測)。PS 変換波を用いた堆積層補正を施し、エンベロープ相関法により震源を推定した。

草津白根山において光波測距の繰返し観測を実施し (東京工業大学と共同で観測)、GNSS 繰返し観測のデータを合わせて解析し、2013 ~ 14 年に湯釜の火口直下 200m で 3.0 万 m³ の体積膨張があったことがわかった。

箱根山の 2015 年の活動で、大涌谷周辺で全磁力繰返し観測を実施し、ごく小規模な噴火が発生した後の 7 月から 9 月にかけて火口群の地下の帯磁を示唆するわずかな地磁気変化を検出した (神奈川県温泉地学研究所と共同で観測)

(火山活動の推移想定に関する研究)

近年の国内のおもに水蒸気噴火で、気象庁の地震観測データの時系列上の特徴を調査し、全体の約 3 分の 2 の事象で、噴火直前の地震活動の増大は認められず、残りの 3 分の 1 についても、数日前から地震発生率の増加、数十個以下の地震の群発、というものがほとんどで、地震数が加速的に増大するという顕著な活動は認められなかった (東北大学との共同作業)。

噴火事象の分岐判断に資するため、活動的な 8 火山 (浅間山、箱根山、雌阿寒岳、霧島山新燃岳、新潟焼山、御嶽山、阿蘇山、口之永良部島) の深部の圧力源の、先行研究の体積変化量を参照し、噴火の有無や噴火発生時期等と前駆的地殻変動との関連性を調べた。地殻変動が生じた 28 イベントのうち 12 イベントで噴火を伴い、そのうち 11 イベントは変動継続期間中に噴火した。体積変化量と変動継続期間の間には明瞭な相関はなく、体積変化量と変化速度には弱い正の相関が見られたが、噴火と噴火未遂による差別化はできなかった。

[計画の変更]

御嶽山、口永良部島、西之島、草津白根山、箱根山など、噴火あるいは活動の高まりが見られた火山について、研究対象に加えた。

マグマの蓄積や移動に着目した研究計画であったところ、御嶽山を水蒸気噴火を受けて、水蒸気や熱水の挙動などにも着目点を広げた。

火山活動の推移の想定に関する研究については、2014 年の御嶽山噴火を契機として、気象庁が噴火警報の発表基準 (噴火警戒レベルの判定基準) を精査、公表することとなり、予定した研究内容がこの精査に必要な調査と重複する部分が多いことから、各火山監視・警報センターの調査への協力として実施し、成果は気象庁から火山ごとにまとめられ公表されている。

- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :
Doke, R., Harada, M., and Miyaoka, K., 2018, GNSS Observation and Monitoring of the Hakone Volcano and the 2015 Unrest. Journal of Disaster Research, 13, 526-534.

Honda, R., Yukutake, Y., Morita, Y., Sakai, S., Itadera, K., and Kokubo, K., 2018, Precursory tilt changes associated with a phreatic eruption of the Hakone volcano and the corresponding source model. Earth, Planets and Space, 70, 117.

高橋浩晃, 大園真子, 一柳昌義, 山口照寛, 岡田和見, 齊藤一真, 不破智志, 伊藤ちひろ, 岡崎紀俊, 高木朗充, 本多亮, 2018, 十勝岳火口周辺域での重力鉛直勾配測定. 北海道大学地球物理学研究報告, 81, 57-60.

岡田和見, 高橋浩晃, 一柳昌義, 岡崎紀俊, 高木朗充, 2018, 十勝岳重力観測網での2機種相対重力計による測定値の比較. 北海道大学地球物理学研究報告, 81, 27-32.

高木朗充, 宮城洋介, 小澤拓, 本多亮, 高橋浩晃, 2018, CG-5重力計の登山を伴う野外調査時における重力値安定性の基礎調査. 北海道大学地球物理学研究報告, 81, 1-10.

武尾実, 大湊隆雄, 前野深, 篠原雅尚, 馬場聖至, 渡邊篤志, 市原美恵, 西田究, 金子隆之, 安田敦, 杉岡裕子, 浜野洋三, 多田訓子, 中野俊, 吉本充宏, 高木朗充, 長岡優, 2018, 西之島の地球物理観測と上陸調査. 海洋理工学会誌, 24, 45-56.

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要:

[テーマ1]: 観測研究による火山活動の活発化や噴火に至るプロセスの解明

(1) 伊豆大島等におけるマグマ蓄積・上昇過程の解明

・伊豆大島においてGPS、光波測距、多成分ひずみなどの地殻変動観測を継続する。

・伊豆大島の地殻変動データの解析において迅速化・自動化を進める。また、圧力源推定の精度・時間分解能の向上を図るとともに、地下のマグマの状態・挙動の推定を行う。他の火山でも活動に応じて地殻変動の解析を行う。

・重力観測データ補正技術の高度化を進めるとともに、伊豆大島において重力の繰り返し精密観測を行う。

(2) 伊豆大島山頂部における地表放熱量評価

・伊豆大島山頂域において地表面熱収支を把握のための試験観測を開始するとともに、熱・水収支モデルの構築を進める。

[テーマ2]: 火山活動の解析・評価のための手法開発

(1) SARの対流圏遅延補正高精度化

・気象モデルを用いた対流圏遅延補正プログラムの開発を進めるために、利用可能な気象モデルの調査や既存の気象補正手法の調査を行う。

(2) GNSS解析手法の高度化

・気象データを活用した大気遅延補正の先行研究の調査を行う。

・GNSS解析戦略および対象とする火山を検討する。

(3) マグマの状態・活動を地殻変動などから推定するための手法開発

・火山活動に伴う地殻変動データの抽出・解析手法の検討

・地下のマグマ挙動に伴う地殻変動シミュレーションの先行研究の調査

[テーマ3]: 監視観測データの活用的高度化

(1) 地震波形の観測点間の相互相関解析による地震波速度変化のモニタリング

・震動観測データを取得する環境の整備、構築

・解析手法の検討

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

気象研究所火山研究部

他機関との共同研究の有無: 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：気象研究所企画室

電話：029-853-8536

e-mail：ngmn11ts@mri-jma.go.jp

URL：http://www.mri-jma.go.jp/

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名：小久保 一哉

所属：気象研究所火山研究部第 1 研究室

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

火山活動に伴う地殻変動の把握及び評価

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

(4) その他関連する建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(4) 研究者，技術者，防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

火山活動監視・評価の高度化に資するため，全国の火山の地殻変動観測およびデータについて，監視項目の評価と適正化の検討、地殻変動検出のためのノイズ低減に向けた検討を進めるとともに，地殻変動検出時の変動源推定等の解析と結果の噴火予知連絡会等への報告を行う。これらを進めるにあたり，データ解析技術や活動評価等について職員の能力向上に配慮する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

気象庁では常時監視火山をはじめとする活火山において傾斜計や GNSS 等の地殻変動観測装置を整備しデータを取得するとともに，関係協力機関から提供を受けたデータを用いて全国の火山活動の監視を行っている。これら監視データにより地殻変動の検出を試みるとともに，活動の活発化に伴い地殻変動が検出された際には，これらのデータを使用し，適宜，変動源推定等の解析を行い，火山噴火予知連絡会等に報告する。また，観測データをより有効に活用し，監視・評価手法を改善していくために以下の検討，技術の高度化を進める。

- ・ GNSS 等の異常検知力調査およびこれに則った監視項目の評価、適正化の検討
- ・ 傾斜データ等のノイズ低減によるデータ高品位化のための検討
- ・ ALOS-2 に対応した SAR データ解析環境の構築と地殻変動検出の試み

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

【GNSS】

- ・ 国土地理院からの助言や気象研究所の協力を得ながら、平成 29 年度に GNSS の解析戦略を見直した。

【傾斜計】

・傾斜データによる自動異常検出の可能性を探るために、御嶽山傾斜観測データを事例として、変動率によるアラーム報知基準を設け、アラーム報知空振り率とその原因を調査した。2014年の1年間のデータを調査した結果、アラーム報知の原因として、実際の火山活動に伴う変動以外に、地震動により生じたステップ、地震の震動波形、機器固有に生じるステップ等が挙げられた。9月27日噴火前に観測された急激な傾斜変動に相当する高い閾値を用いても、80%以上の空振り率であった。

・平成29年度に運用を開始した火山監視情報システムにおいて、傾斜データの降水補正機能を導入した。

【衛星 SAR】

・平成28年度に ALOS-2 データの解析環境の再構築を行い、職員誰もが SAR 差分干渉解析が可能な環境が整った。火山活動活発時に ALOS-2 で行われた緊急観測の解析を行い、状況に応じて関係機関に共有した。また、国内全ての活火山を対象に火山活動監視を目的として気象研究所とともに解析を行った。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
火山噴火予知連絡会衛星解析グループ「火山活動の評価及び噴火活動の把握に関する共同研究」平成30年度成果報告書 (平成31年3月発行予定)

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

平成31年度にも引き続き以下を実施する。

1) 地殻変動観測による監視・評価

常時監視火山をはじめとする全国の活火山において傾斜計、GNSS、SAR等の地殻変動観測データにより火山活動の監視、変動の検出を行う。顕著な変動を検出した際には、変動源推定等も含めた解析を行うと共に、他観測データと併せて活動評価に資する。

2) 技術的検討

地殻変動観測データの質的検討を行うと共に、ノイズ低減によるデータ高品位化のための検討を進める。また、SARデータでの地殻変動検出の試みを進める。

3) 成果の公表

得られた成果は、火山噴火予知連絡会における火山活動評価、火山活動解説資料等の防災目的の資料等に利用する他、適宜、学会等において発表を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁地震火山部・札幌管区气象台・仙台管区气象台・福岡管区气象台火山監視・警報センター
他機関との共同研究の有無：有
国土地理院，宇宙航空研究開発機構，大学，研究機関，自治体等の火山観測実施機関

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：地震火山部管理課 地震調査連絡係長

電話：03-3212-8341(内線：4514)

e-mail：johokan@eqvol2.kishou.go.jp

URL：http://www.jma.go.jp

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：木村 一洋

所属：気象庁地震火山部火山課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地球電磁気学的手法による火山活動監視の高度化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

雌阿寒岳、草津白根山など熱水活動の活発な火山において全磁力連続観測および繰り返し観測を継続的に実施し、火山活動との対応を調査する。全磁力連続データから火山活動に伴う変動を準リアルタイムに抽出することを目指し、補正手法の高度化、異常検知手法の確立を進める。観測点による外部擾乱の影響量の違いを把握するため補足的観測を実施し、火山活動に伴う変動の検知能力の向上を図る。その他、MT 法による比抵抗構造探査を実施し、熱水貯留層の構造などを把握する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

より高度な火山活動監視の実現を目指すため、特に水蒸気爆発型の噴火を起こす火山について重点的に調査を行う。平成 26 年度は雌阿寒岳を重点的に調査するため、全磁力連続観測点を 1 点増設し 3 観測点態勢とし、熱源の推定能力の向上を図る。さらに、雌阿寒岳において MT 法による比抵抗構造探査を実施し、全磁力から推定される熱消磁域と比抵抗構造との関連性について理解を深める。平成 27 年度以降も引き続き雌阿寒岳、草津白根山などにおいて全磁力の連続観測、繰り返し観測を継続し、火山活動との対応関係を調査する。その他、全磁力データの処理技術開発として外部磁場擾乱の補正手法の改良を進め、全磁力による火山監視技術の高度化を図る。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 30 年度は雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島、三宅島、阿蘇山において全磁力連続観測および繰り返し観測を実施し、火山地下の熱的活動を推定すると共に、火山活動との対応関係を調査した。また、2018 年 1 月に噴火した本白根山の熱活動の状況を把握することを目的とし、本白根山山頂部周辺において自然電位観測、および地磁気全磁力の繰り返し観測を実施した。

5 年間の研究計画を通して、雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島、三宅島、阿蘇山において全磁力連続観測および繰り返し観測を継続的に実施し、火山活動との対応関係を調査した。これらの火山での観測結果については年 3 回の火山噴火予知連絡会および同会報で報告した。雌阿寒岳においては A M T 法を用いた比抵抗構造探査を実施し、全磁力観測から推定される熱消磁、帯磁モデルと併せて論文に

とりまとめた。気象庁地震火山部が水蒸気噴火の予知を目的として平成 27～30 年度に行った樽前山、吾妻山、御嶽山、霧島山、九重山、安達太良山における全磁力観測装置の整備事業に協力し、観測地点の地点選定のための磁気測量やデータ解析等を行った。また、これら整備火山における DI 効果について調べ、参照点における地磁気三成分データを用いた DI 補正法を適用し、火山活動評価の高度化を図った。

- (9)平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
飯野英樹・山崎明・田中達朗，本白根山における 2018 年噴火後の自然電位および地磁気全磁力観測，2019 年 CA 研究会論文集(印刷中)
秋元良太郎・山崎明・山崎貴之・浅利晴紀・高橋幸祐，活火山での全磁力観測における DI 補正法の適用，2019 年 CA 研究会論文集(印刷中)
火山噴火予知連絡会会報第 129 号(雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島、阿蘇山)
火山噴火予知連絡会会報第 130 号(雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島、三宅島、阿蘇山)
火山噴火予知連絡会会報第 131 号(雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島、阿蘇山)
秋元良太郎・山崎明・山崎貴之・高橋幸祐，活火山での全磁力観測における DI 補正法の適用，日本火山学会 2018 年度秋季大会，秋田大学，2018 年 9 月
山崎明・飯野英樹・田中達朗，本白根山における 2018 年噴火後の全磁力および自然電位観測，Conductivity Anomaly 研究会シンポジウム「地球電磁気学研究の災害軽減への応用」，京都大学宇治キャンパス，2019 年 1 月
秋元良太郎・山崎明・山崎貴之・高橋幸祐，活火山での全磁力観測における DI 補正法の適用，Conductivity Anomaly 研究会シンポジウム「地球電磁気学研究の災害軽減への応用」，京都大学宇治キャンパス，2019 年 1 月

- (10)次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

より高度な火山活動監視の実現を目指すため、特に水蒸気噴火を起こす火山について重点的に調査を行う。この目的のもとに引き続き雌阿寒岳、草津白根山などにおいて全磁力の連続観測、繰返し観測を継続し、火山活動との対応関係を調査する。噴火した本白根山では平成 30 年度に続き、平成 31 年度にも自然電位および全磁力の繰返し観測を実施し、時間的变化の有無を調査する。

- (11)実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁地磁気観測所

他機関との共同研究の有無：無

- (12)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：気象庁地磁気観測所総務課

電話：0299-43-1151

e-mail：kakioka@met.kishou.go.jp

URL：http://www.kakioka-jma.go.jp

- (13)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：山崎明

所属：気象庁地磁気観測所技術課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震活動・地殻変動監視の高度化に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震活動や地殻変動について、新たな評価手法や監視技術等を導入することにより、より微小な変化を逐次的にとらえる技術を開発する。また、地震発生シミュレーションを通じて、地震・地殻活動の変化と大地震発生との関係に関する評価手法の改善を図る。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

これまで地震発生前の変化が報告されている地震活動に関する指標を逐次的に解析する手法を構築する。長期的な地殻変動の把握を行うとともに、これまでよりも微小な地殻変動を検出できる技術を開発する。地殻変動解析で得られた知見などを地震サイクルシミュレーションモデルに取り込むとともに、前駆すべりの多様性を表現できる大地震発生モデルの構築を目指す。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

(平成 30 年度の成果)

- ・2017 年から 2018 年にかけて発生した志摩半島付近の小規模な長期的スロースリップを検出し、すべり分布(Mw6.5 相当)を推定した。
- ・エンベロープ相関法により DONET2 の解析を行い、2018 年 3 月から 8 月にかけて、断続的に四国地方南東沖から紀伊半島南方沖で浅部低周波微動活動が活発なことを示した。
- ・SAR 衛星 ALOS - 1 のデータを用いた時系列解析により、御前崎、潮岬、室戸岬、足摺岬周辺の定常的な地殻変動の検出を行い、面的に詳細でスムーズな地殻変動分布が得られた。

・飯作家文書の中の「大地震富士山焼之事覚書」の原本を確認し、全文を翻刻した。この史料の観測地は『新収日本地震史料』に記された静岡市ではなく、富士本宮浅間社のあった富士宮市と考えられる。

・自動震源決定手法（PF法）によって得られた結果を活用し、b値のリアルタイム推定手法を開発した。これを平成28年（2016年）熊本地震や2016年10月21日の鳥取県中部の地震に適用し、b値の時空間分布を推定した。その結果、熊本地震においては、4月14日M6.5の地震発生後にb値が低下したことを明らかにした。

・自動処理の改良によって地震数が増加した2016年4月以降の一元化カタログ、及び1997年10月以降の一元化震源カタログに対して最近傍法による客観的かつ自動的なクラスタリング処理を行い、前震、本震、余震の分類を行った。その結果、前震のb値がわずかに小さいこと、前震の発生率が広いM範囲で概ね30~40%程度であること、最大前震と本震の関係はM、時間、空間においてべき乗則に従うこと、といった前震の特徴を明らかにした。

・GNSS日値を用いた全国基線長変化について、日本海側の観測点を領域固定して、太平洋側の観測点のプレート沈み込み方向の位置変化を見るように改良した。

・繰り返し中地震について、相関係数とコヒーレンスを用いて2018年2月から2019年1月までに10個の繰り返し地震の発生を確認した。2018年2月1日にベイズ統計対数正規分布モデルを用いた今後1年以内の発生確率を予測し、予測期間終了後に平均対数尤度とブライアスコアの評価指標で、指数分布モデルを用いる予測よりも良い成績であることを確認した。

（計画期間中の成果）

地震活動に関し、潮汐応答変化や前震検知などの時系列解析手法についての調査が進んだ。GNSSやひずみ、傾斜データを用いたスロースリップ、地震波形を用いた低周波微動検出の研究などが進展した。また、地震発生シミュレーションにより、巨大地震の発生パターンを再現するモデルの構築が進んだ。

<地震活動>

・トンガ・ケルマディック海溝沿いプレート境界型地震活動について、地震と潮汐との相関について調査した。その結果、潮汐せん断応力よりも潮汐法線応力と地震発生の相関が高いことが明らかとなった。

・豊後水道長期的スロースリップ（LSSE）前後における深部低周波地震（LFE）の潮汐応力との相関を表すp値の時空間変化を調査した。その結果、LFEの領域浅部側（LSSEの北西縁）に顕著な低p値帯が分布し、LFEの活動度が特に高い領域において、LSSEに関連したp値の時間的变化が見られた。

・東海地方の深部低周波地震活動についてp値の時空間変化を調査した。その結果、p値は空間的に不均質を持ち、体積収縮時にLFEが発生する傾向にあることがわかった。また、東海LSSEとの時間的な対応関係は見られなかった。

・紀伊半島東部の深部低周波地震活動についてp値の時空間変化を調査した。その結果、p値は空間的に不均質を持ち、伊勢湾直下で小さいことがわかった。

・群発活動が特徴的な伊豆地域について、M5以上の地震に対し地震発生予測に有効な前震活動を選択する最適パラメータを求めた。そのパラメータを用いた場合、予知率は約68%、適中率は約23%と良好な予測結果が得られた。

・2014年11月22日に発生した長野県北部の地震（M6.7）の約4日前から見られた前震活動に関連し、この地域の過去の地震活動の統計的解析を行い、前震識別の最適パラメータを推定した。その結果、今回のような前震から本震（M5.0）に至る割合は12%程度であり、本震のうち前震活動を伴う割合は約45%であることを明らかにした。

・モーメント保存則とG-R則に基づき、特定地域で発生しうる地震の最大規模の推定を行った。その結果、仮定するパラメータによる不確定性はあるが、東北沖の領域では東北地方太平洋沖地震がほぼ最大クラスと考えてよいことがわかった。

・東日本の太平洋沖で1990年以降に発生したM7.0以上の本震前の規模別頻度分布はG-R則から逸脱し、本震後にG-R則に従う傾向にあることがわかった。この特徴に基づくシンプルな予測モデルを構

築した。M7 後半～M8 前半 (M7.6-8.5) の地震を予測対象とした場合、北海道東方沖及び関東東方沖～南東沖に顕著な異常が検出された。

- ・国内の M7 クラス以上の大地震を対象に地震活動の静穏化・活発化解析手法 (eMAP 法) を適用し、破壊領域 (余震域) と静穏化領域を詳細に比較した結果、地震発生前までに静穏化領域が破壊領域を囲むドーナツパターンが約 8 割の静穏化事例で見られることが分かった。

- ・自動震源決定手法 (PF 法) によって得られた結果を活用し、b 値のリアルタイム推定手法を開発した。これを平成 28 年 (2016 年) 熊本地震や 2016 年 10 月 21 日の鳥取県中部の地震に適用し、b 値の時空間分布を推定した。その結果、熊本地震においては、4 月 14 日 M6.5 の地震発生後に b 値の低下したことを明らかにした。

- ・自動処理の改良によって地震数が増加した 2016 年 4 月以降の一元化カタログ、及び 1997 年 10 月以降の一元化震源カタログに対して最近傍法による客観的かつ自動的なクラスタリング処理を行い、前震、本震、余震の分類を行った。その結果、前震の b 値がわずかに小さいこと、前震の発生率が広い M 範囲で概ね 30～40 % 程度であること、最大前震と本震の関係は M、時間、空間においてべき乗則に従うこと、といった前震の特徴を明らかにした。

- ・自動震源を用いて ETAS モデルによる余震の発生回数予測を行う手法を、2018 年 3 月 1 日西表島付近の地震、6 月 18 日大阪府北部の地震に対して適用し、同手法が有効であることを確認した。

- ・繰り返し中地震について、相関係数とコヒーレンスを用いて 2015 年度中に 10 個の繰り返し地震の発生を確認した。事前に 2014 年 8 月 1 日と 2015 年 4 月 1 日を基準日としてベイズ統計対数正規分布モデルを用いて長期的発生確率予測をおこなっており、10 個のうち 7 個は基準日から今後 3 年以内の予測確率が 60 % 以上で、予測通りの時期に発生したことが確認できた。

- ・中規模以上の繰り返し地震は、発生間隔が長く、観測回数が非常に少ないケースが多いことから、繰り返し回数が非常に少ないときの長期的発生確率予測の信頼度について、繰り返し小地震を使って調査し、小標本論対数正規分布モデルとベイズ統計対数正規分布では予測手法による成績差はほとんど見られず、繰り返し回数が 4 回以下では、回数が少なくなるにつれて、成績が着実に悪くなることを定量的に示した。

- ・予測モデルの違いによる予測精度の変動を調べるため、対数正規乱数で発生させた発生間隔からなる疑似地震系列を用いて、繰り返し回数や直前地震から予測日までの経過日数を変化させた実験を行った。小標本論対数正規分布モデルとベイズ統計対数正規分布モデルについておこない、繰り返し回数の増加に伴う成績向上は、平均対数尤度とブライアスコアとも繰り返し回数が少ないときほど顕著で、ベイズ統計対数正規分布モデルは小標本論対数正規分布モデルよりも概して優れているものの、ベイズ統計対数正規分布モデルは、繰り返し回数が少なく、直前地震から予測日までの経過日数が高いときに予測確率に明瞭な頭打ちが見られることがわかった。

<地殻変動>

- ・中国地方を領域固定した GNSS 日値を用い、フィリピン海プレートの沈み込みと逆方向の成分について、南海トラフのプレート等深線 25km および 30km 沿いに並べた地点を中心とする一定範囲内の平均を求め、1 年および 1 週間の傾斜期間を持つランプ関数との相関を取ることで、南海トラフ沿いの長期的 (1 年から数年程度の継続期間) および短期的 (数日から 1 週間程度の継続時間) スロースリップの客観的な時空間分布を得る手法を開発した。これにより、2000～2002 年の紀伊水道長期的スロースリップの存在を新たに指摘し、すべり分布を推定した。また、2017～2018 年の志摩半島付近の小規模な長期的スロースリップを検出した。

- ・GNSS 日値の解析から、2014 年半ばから始まった紀伊水道における長期的スロースリップが 2017 年まで継続し、その規模が Mw6.7 相当であることを明らかにした。

- ・ひずみ計データのスタッキング解析を行い、2013 年から始まった東海地域長期的スロースリップのモーメント解放の時間変化を求めた。このとき、ひずみ計設置後の緩和的なトレンド変化を補正した解析を行い、良好な結果が得られた。

- ・やや長期間のひずみデータを用いたスタッキングにより、東海地域の短期的スロースリップの時空

間分布を明らかにした。

- ・ひずみデータを用い、グリッドサーチと SCE-UA 法を組み合わせ、南海トラフ沿いの短期的スローリップの矩形断層を推定する手法を開発した。

- ・防災科研の傾斜データの各種補正、傾斜データを追加した場合のスタッキングによる短期的スローリップ検知能力の調査を行い、検知能力の改善が図られることがわかった。

- ・海底観測システムである DONET の 2015 年 9 月から 2016 年 4 月までの連続地震記録をエンベロープ相関法により解析し、南海トラフの島弧側において浅部低周波微動が発生していることがわかった。微動は 2015 年 10 月と 2016 年 4 月に発生しており、深部の微動活動と同様に地震動によるトリガ現象が見られた。

- ・エンベロープ相関法により DONET2 の解析を行い、2018 年 3 月から 8 月にかけて、断続的に四国地方南東沖から紀伊半島南方沖で浅部低周波微動活動が活発なことを示した。

- ・2014 年 7 月～2014 年 12 月までの連続地震波形を用いて、西南日本の南海トラフ沿いの深部低周波地震活動に Matched Filter (MF) 法を適用してイベントの検出を行った。その結果、5188 個のイベントを検出し、3744 個の震源を決定した。イベント検出の際の誤検出率は約 4.0%と低い値であるにも関わらず、MF 法で決定した震源数は一元化震源カタログに掲載されている同期間、同領域の深部低周波地震数の約 2 倍となった。

- ・SAR 衛星 ALOS - 1 のデータを用いた時系列解析により、御前崎、潮岬、室戸岬、足摺岬周辺の定常的な地殻変動の検出を行い、面的に詳細でスムーズな地殻変動分布が得られた。

- ・体積ひずみ計の降水補正について、2006 年から 2014 年まで 3 年ごとに区切って、観測点設置雨量計、近隣のアメダス、解析雨量の比較を行った。アメダスが 5km 以内であれば、観測点設置雨量計とほぼ同程度の補正が可能であること、アメダスが 10km 以遠の場合は解析雨量の方が良い補正が可能であることがわかった。

- ・降水補正をした体積ひずみ計の一部の観測点のデータで、銚子沖や房総半島沖の短期的ゆっくりすべりに対応する変化が検出できることを示した。また、伊豆半島東方沖の地震活動に伴い、これまでひずみ変化なしとされてきた多くの事例で活動に相関を持つ変化を検出できることを示した。

- ・大島津倍付の体積ひずみ計の降水補正について、伊豆大島周辺の解析雨量の複数格子を用いた場合を比較し、ひずみ計の位置する格子ではなく大島アメダスの位置する格子を用いた場合に最も良い降水補正になること、東京都の御神火茶屋の雨量計が位置する格子を用いた場合は周辺の格子に比べて降水補正が著しく悪くなることがわかった。

- ・松代の 100m 石英管伸縮計について降水補正手法を適用し、長期的なデータ品質向上を検討した。2011 年から 2014 年の 4 年間の伸縮計データと露場の降水量データを用いた。伸縮計の南北成分については 1 段目のタンクの補正係数が 2 段目や 3 段目に比べて 1 桁小さく、2 段目と 3 段目のタンクの補正係数の符号が反転して推定された。これは、西前・涌井 (1996) によって試行錯誤で決められたパラメータと整合するものである。

- ・東北地方太平洋沖地震の余効変動について GNSS 日値を再調査し、新たなパラメータで余効変動を除去したデータを作成した。南海トラフ沿いの GNSS 日値を用いた面的監視処理について、このデータを用い、監視範囲を変更し、東海の長期的ゆっくりすべりを検出しやすくした。また、処理の変更に伴い監視の閾値を再設定した。

- ・2015 年 5 月から公開された国土地理院の GNSS 日座標値 R3 解について、基線解析や GNSS 面的監視 (1ヶ月 / 3ヶ月) については F3 解と同程度の精度で監視ができることを確認し、F3 解と同様に気象庁本庁において R3 解を web 上で閲覧できるしくみを構築した。

- ・2000 年と 2005 年の銚子付近、千葉市付近の M6 クラスの地震に伴い、地震が発生した太平洋プレート上面付近において、地震時の数倍の規模の非地震性すべりが発生していたことを明らかにした。

- ・複数のアクロス送信点からの観測結果を説明できる浅部からフィリピン海プレート境界にいたる P 波及び S 波の地下構造モデルを構築した。

- ・アクロス送信点からの信号の走時変化を詳細に解析し、走時に持続的に小さくなっていく変化及び

年周変化があることを明らかにした。また、2011年東北地方太平洋沖地震発生時は大きな地震波速度低下があったことを示した。

・GNSSデータから推定された定常上下変動速度を差し引いて、1966～2001年の水準測量データを用い、房総半島中南部の地殻上下変動を調査した。市原市北部の工業用水揚水による地盤沈下、茂原地区の天然ガスかん水採取による地盤沈下の他は目立った非定常変動がないことを示した。

<地震発生シミュレーション>

・南海トラフ沿いの巨大地震シミュレーションにおいて、紀伊半島沖のプレスリップ域に小アスペリティを設定したところ、プレスリップの大きさは（大小アスペリティの大きさの比）に反比例して小さくなり、小アスペリティの破壊が大地震の核形成を代用するカスケードアップ型の地震が発生することがわかった。

・カスケードアップ型の地震について、紀伊半島における仮想的な観測点での地殻変動を計算したところ、陸上観測点でプレスリップを検知できないまま、巨大地震が発生する可能性もあることがわかった。

・紀伊半島沖に $\mu=8$ の小アスペリティを設定するだけで、東海地域が割れ残るケースが出現した。このパターンは東海地域の固着の剥がれが不十分な状態で周囲から破壊が進展してきた場合に現れる。東海地域の割れ残りを再現するために、東海地域に沈み込んだ海山を模したパラメータ（大きな特徴的すべり量）を必ずしも与える必要はないことを示している。

・紀伊半島沖に小アスペリティを置き、東海長期的ゆっくりすべり (LSSE) が繰り返し発生するモデルの構築を試みた。Hirose & Maeda [2013, JGR] と同様に有効法線応力を局所的に小さくすると、振幅が 1 cm/yr. 程度と低いものの LSSE が繰り返し発生するモデルとなった。

・日本海溝沿いの数値シミュレーションにおいて、従来のアスペリティモデルと階層アスペリティモデルの 2 モデルを軸に、M7-9 の主な地震の再現計算を行い、M7-8 クラスの地震がそれぞれ単独で発生する様子はどちらのモデルでも概ね再現できた。また、M9 クラスの地震の破壊域及び余効すべりは階層アスペリティモデルでは概ね再現できた。

・日本海溝沿いの数値シミュレーションにおいて、津波インバージョンによる断層モデルや過去の大地震周辺の地震活動等からアスペリティの位置をより詳細に設定することで、過去の大地震で見られるような継続的な地震発生パターンを再現できた。

・南海トラフ沿いの巨大地震の発生履歴、比較的良好にわかっている昭和東南海・南海地震のすべり分布、最新のすべり欠損レート分布、そして繰り返す長期的スロースリップを再現するモデルを構築した。各地震のすべり分布は概ね再現しているが、宝永 安政 昭和の発生順は再現できていない。

・2016年4月に紀伊半島南東沖で発生したような M6 クラスの地震が南海トラフ巨大地震に与える影響について数値モデルを用いて調査した。低角・M6.5 の地震を仮定した場合、サイクル終盤に擾乱を投入すると擾乱の半年～1年以内に巨大地震を誘発し、規模は若干小さくなった。その他の場合は、巨大地震にはほとんど影響を与えない。

・過去の南海地震について古文書による調査を行い、「蕨岡家文書」にある「嘉永七甲寅年大地震記録」の原本コピーにより、安政南海地震時の愛媛県愛南町での地震動の推移、地震に伴って発生したその他の自然現象と被害を詳しく検討した。この記録を掲載した『新収日本地震史料』には自然現象及び被害描写の欠落や死者数の誤りが認められた。深浦の死者数は 101 人ではなく 1 人であった。さらに、「蕨岡家文書」に記された井戸の水位低下を体積ひずみ変化で定性的に説明できた。

・飯作家文書の中の「大地震富士山焼之事覚書」の原本を確認し、全文を翻刻した。この史料の観測地は『新収日本地震史料』に記された静岡市ではなく、富士本宮浅間社のあった富士宮市と考えられる。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018, Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog, *Earth, Planets and Space*, 70, 90.

気象研究所, 2018, 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*, 99, 302-305.

気象研究所, 2018, 海溝と直交する方向の全国の基線長変化, *地震予知連絡会会報*, 99, 24-27.

気象研究所, 2018, 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, 100, 印刷中.
気象研究所, 2018, 海溝と直交する方向の全国の基線長変化, 地震予知連絡会会報, 100, 印刷中.
気象研究所, 2018, 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率 (2019), 地震予知連絡会会報, 100, 印刷中.
木村一洋, 2018, 体積ひずみ計データの降水補正に用いる降水量データについて, 気象研究所研究報告, 67, 35-44.
小林昭夫, 弘瀬冬樹, 堀川晴央, 平田賢治, 中西一郎, 2018, 1707 年宝永地震と富士山宝永噴火に関する一史料 飯作家「大地震富士山焼之事覚書」の調査と翻刻, 地震, 70, 221-231.
田中昌之, 岡田正実, 内田直希, 2018, 繰り返し回数の少ない繰り返し地震系列に対する長期的地震発生確率予測の成績と検証, 地震, 70, 195-213.
廣田伸之, 溜淵功史, 2018, 即時的な解説資料における自動震源の活用, 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震調査報告, 135, 67-72.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要:

- ・南海トラフ沿いの岬付近の差分干渉 SAR 解析結果について、数値気象モデルを用いた大気遅延量を推定し補正を行う。
- ・短期的スロースリップのすべり分布推定手法の改良を行い、すべりの時空間分布を推定する。
- ・東海大学と共同で、海底地震計観測を行う。
- ・地震発生シミュレーションにおいて、効率的な計算手法の検討を行う。また、千島海溝域についての地震発生シミュレーションモデルの基本構造の構築を行う。
- ・地震活動の特徴を表す b 値や p 値などの様々な指標の地域毎の時間変動特性および地域差の特徴について調査を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

気象研究所地震津波研究部

他機関との共同研究の有無: 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名: 気象研究所企画室

電話: 029-853-8552

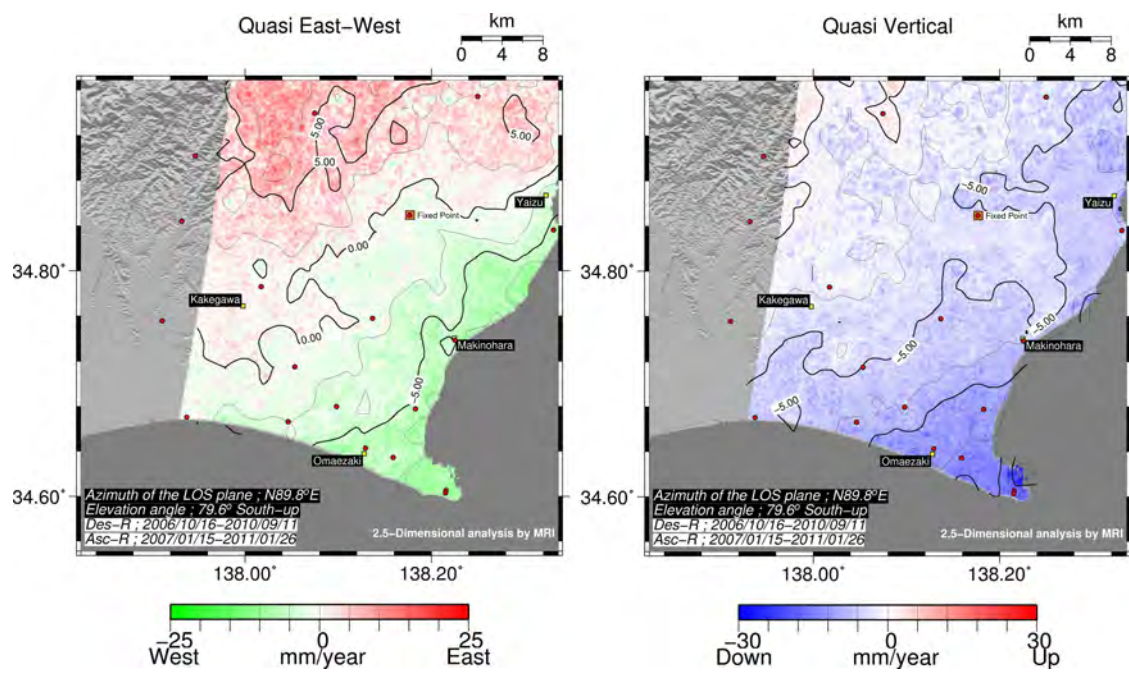
e-mail: ngmn11ts@mri-jma.go.jp

URL: <http://www.mri-jma.go.jp/>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名: 小林昭夫

所属: 気象研究所地震津波研究部



図

SAR 衛星 ALOS - 1 のデータを用いた時系列解析結果を 2.5 次元解析した、御前崎付近の準東西（左）と準上下（右）方向の変位速度。

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

陸上電磁場観測における津波生成磁場の検知

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

近年、津波が電磁場を誘導すること(津波ダイナモ効果)が海洋底や離島での観測から明らかとなった。海洋底や離島では津波ダイナモ効果を検出しやすいが、理論的には陸上の磁場観測においても検知可能と考えられる。観測が比較的簡単にできる陸上で津波ダイナモ効果による磁場を津波到達前に検知できれば、巨大地震発生時の大津波警報に資する可能性がある。本課題では、さまざまな原因による地球磁場変化から津波生成磁場を効果的に検出することを目指し、理論と観測の両面から検討を行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本課題では海岸付近に磁場観測点を一点設置し、もう一点を海岸から数 10km 離れた内陸に設置する。この 2 点で磁場のベクトル観測を行い、2 点間の差ベクトル磁場を求める。外部磁場変化は数 10km の距離ではほぼ同じと考えることができるので、差ベクトル磁場を求めることにより、外部磁場変化を取り除き、海岸付近に生じる津波生成磁場を検出することが期待できる。具体的には海岸付近の観測点として既設の国土地理院の室戸地磁気観測点を利用する。また、内陸の観測点として人工的なノイズレベルの低い高知県馬路村に地磁気 4 成分観測点を設置し、馬路観測点を基準点として、室戸観測点に含まれる津波生成磁場の検知可能性を検討する。

その他、津波ダイナモ効果について過去の事例解析等を行い、津波ダイナモ効果の性質の解明を目指す。

なお、本課題で実施する高知県での観測は科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究「陸上地磁気三成分データを用いた津波ダイナモ効果の検出」(H25-26)に基づいた計画である。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 30 年度は 5 か年の研究成果を各項目について再度分析、整理すると共に、全体の総括をおこなった。

津波生成磁場を陸上の磁場観測で検知することを目的として、高知県馬路村土川地区において 2014 年 1 月に三成分フラックスゲート磁力計、同年 6 月には全磁力観測装置を設置し、地磁気観測を開始

した。馬路での地磁気観測は、測器の故障等により全磁力観測は2015年11月、地磁気三成分観測は2016年9月までの観測となった。津波生成磁場は室戸観測点(国土地理院)と馬路観測点の磁場のベクトル差をとることにより検出可能と考えられるが、馬路での観測期間中、津波の発生はなく、津波生成磁場の検出の例はなかった。室戸観測点と馬路観測点の磁場のベクトル差を求めると、地磁気擾乱時にZ成分で差の変化が大きかった。これは室戸観測点が半島の先端部に位置しており、外部磁場変化に伴い海水中に誘導された電流が半島を避けて流れることによるいわゆる半島効果で説明できることがわかった。

2011年東北地方太平洋沖地震では小笠原父島において津波到達の約20分前に地磁気のZ成分に津波起源と考えられる磁場変動が観測され、津波が海水中に誘導した電流系により発生したものと考えられた。津波が生成する磁場変化を数値シミュレーションで確かめたところ、観測値をほぼ説明できる結果が得られた。また、本州など陸域においても津波到達前の磁場変化が検出可能かどうかについて、シミュレーションにより検討した。これらの研究により、津波の早期検知に磁場観測が有効であることが示された。

津波生成磁場の解析解の研究もおこなった。具体的にはTyler(2005)による2次元線形長波津波モデルによる津波生成磁場の解析解の改良を試みた。Tyler(2005)の解は津波ダイナモ効果を引き起こす背景主磁場をZ成分のみとして求めたが、本研究ではZ成分に加えて水平成分の効果も考慮した。新しく導出した解析解については三次元シミュレーションと比較し、ほぼ妥当であることを確認した。新しい解は、鉛直分力が非常に小さくなる磁気赤道付近でも津波生成磁場を検出する可能性を示唆するものと考えられる。

(9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):

(10)次期計画における平成31年度実施計画の概要:

本研究計画は平成30年度で終了し、対応する次期計画はない。

(11)実施機関の参加者氏名または部署等名:

気象庁地磁気観測所

他機関との共同研究の有無:有

国土地理院(高橋 伸也)

(12)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名:気象庁地磁気観測所総務課

電話:0299-43-1151

e-mail:kakioka@met.kishou.go.jp

URL:http://www.kakioka-jma.go.jp

(13)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:山崎 明

所属:気象庁地磁気観測所技術課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

緊急地震速報の予測手法の高度化に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震動の即時予測において、より迅速性・堅牢性を向上させるとともに、広い震源域をもつ巨大地震の場合や、広域に複数の地震が連発する場合であっても、震度の適切な即時予測が可能となる手法を構築する。

また、震度(比較的短周期)の即時予測に加え、長周期まで(おおよそ 10 秒程度まで)の様々な揺れの即時予測に対応できるように拡張・強化する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

従来の地震動即時予測は、震源とマグニチュードの早期決定のみに焦点を当てるアプローチが多かったが、本課題では、観測網からリアルタイムで得られる揺れの実況値を用いる点が特徴である。これにより、(震度だけではなく)長周期地震動を含めた波形での予測が可能となる。

多点観測網のデータを有効に活用する手法を検討する。観測網からリアルタイムで得られる震度分布の実況値にデータ同化を適用し、時間発展的な波動伝播の計算により未来予測を行い、逐次予測精度を上げていくモデルを導入する。また、震源やマグニチュードが未推定の状態でも、実況値から予測可能な手法をめざす。このことにより迅速性・堅牢性の向上を図る。

さらに、本計画では、上記の震度の即時予測に加えて、長周期地震動まで含む様々な周期での地震動即時予測が行えるように手法を拡張する。それらをリアルタイムで適用できるように計算手法の工夫を図る。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

“揺れから揺れを予測する”という考え方で研究を進め、平成 30 年度は地震波の散乱や減衰構造の精緻化、PLUM 法の高度化、地盤増幅特性の適正化に取り組んだ。

現在の緊急地震速報で用いられている“震源とマグニチュードの早期決定”という考え方に加えて“揺れから揺れを予測する”という考え方で研究を進めた。これは、データ同化手法を用いて揺れの分布の現状を正確に把握し、波動伝播の物理を用いて未来の波動場を予測するものである。これにより、これまで以上の精度や堅牢性、迅速性が得られ、そして、速度構造、散乱・減衰構造をとり入れることで、さらに早い段階で精度よく予測できることが分かった。また、強震入力時の海底地震計の

挙動とその対策や、地震動の伝播方向をリアルタイムで推定することの考察を進めた。“揺れから揺れを予測する”という考え方は長周期地震動に対しても十分に適用できる。

(7)の5か年計画と一致している。

(9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

Ogiso, M., M. Hoshiya, A. Shito, and S. Matsumoto, 2018: Numerical Shake Prediction for Earthquake Early Warning Incorporating Heterogeneous Attenuation Structure: The Case of the 2016 Kumamoto Earthquake. Bulletin of Seismological Society of America. 108 (6): 3457-3468.

Kodera, Y., Y. Yamada, K. Hirano, K. Tamaribuchi, S. Adachi, N. Hayashimoto, M. Morimoto, M. Nakamura, and M. Hoshiya, 2018: The Propagation of Local Undamped Motion (PLUM) method: a simple and robust seismic wavefield estimation approach for earthquake early warning. Bulletin of Seismological Society of America, 108(2), 983-1003.

Kodera, Y., 2018: Real-time Detection of Rupture Development: Earthquake Early Warning Using P Waves from Growing Ruptures. Geophysical Research Letters, 45, 156-165.

(10)次期計画における平成31年度実施計画の概要 :

緊急地震速報のさらなる精度向上・迅速化・堅牢化を目指して、データ同化手法を用いて波動場を正確に推定し、そこから未来の波動場を予測する手法を発展させる。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。地盤増幅特性の中の位相特性を検討し、長周期地震動を含めた即時予測での継続時間の予測の精度向上を目指す。

(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

(11)実施機関の参加者氏名または部署等名 :

気象庁気象研究所地震津波第3研究室

他機関との共同研究の有無 : 無

(12)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 気象庁気象研究所企画室

電話 : 029-853-8536

e-mail : ngmn11ts@mri-jma.go.jp

URL : <http://www.mri-jma.go.jp/>

(13)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名 : 干場 充之

所属 : 気象庁気象研究所地震津波研究部第3研究室

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

海溝沿い巨大地震の地震像の即時的把握に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

・巨大地震の断層のおよその広がりを地震発生直後 2 ~ 3 分以内に把握する手法を開発する．断層の滑りの大きさや方向の解析について，信頼性向上を図る．余震の震源分布を地震発生後 10 ~ 20 分以内に把握するための震源決定手法を開発する．断層の大まかな滑り分布を震発生後 10 ~ 20 分で求める手法を開発する．

・観測地震データと断層上の滑り分布推定結果に基づいて，さまざまな周波数帯の地震動分布を地震発生後 10 ~ 20 分後に推定する手法を開発する．

・津波地震や海底地すべりの発生を検知し、津波予測に用いるための規模等を推定するための手法を開発する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

・地震動の振幅分布を用いて巨大地震の断層のおよその広がりを地震発生直後 2 ~ 3 分以内に把握する手法を開発する．

・巨大地震の震源分布を地震発生後 10 ~ 20 分以内に自動処理により把握するため，振幅など多面的な情報に基づき地震識別を行える手法を開発する．

・地震波形や GNSS データを用いて，断層の大まかな滑り分布を震発生後 10 ~ 20 分で求める手法を開発する．

- ・巨大地震発生直後の 10～20 分後を目途に、さまざまな周期帯の地震動分布を推定する手法を開発する。
- ・地震波の短周期成分と長周期成分の信号の特徴から津波地震の判定を行い、津波予測に用いるための長周期成分のみを用いた震源決定と規模推定を行う手法を開発する。また、海底地すべりについては、津波発生ポテンシャルについて評価する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度～30 年度) の成果の概要 :

平成 30 年度の成果

- ・スロー地震タイプの津波地震を含む地震の規模を即時かつ適正に推定するため考案した変位を積分した波形の振幅を用いた手法について、日本周辺以外で発生した地震への適用可能を確認した。
- ・2016 年 4 月から 2017 年 12 月までの気象庁に導入された PF 法自動震源の処理結果を評価し、その導入前後で一元化震源カタログのイベント数が 2 倍となり、東北地方では検出下限が最大 M1 程度低下したことを示した。また、導入によって震源カタログに系統的な差が生じていないことを確認した。
- ・遠地実体波震源過程解析結果の検証のため、USGS によるすべり分布と相関係数を用いた比較を行い、多くの地震で高い相関のある結果が得られていることを確認した。
- ・遠地実体波のスペクトル解析から得たスロー地震タイプの津波地震のスペクトルレベルをもつ近地の地震波形を理論波形として合成し、それらの津波地震に対する気象庁マグニチュード等の値を推定した。その結果、気象庁マグニチュードでは津波地震に対して 1 以上の過小評価の可能性があることを明らかにした (図 1)。
- ・山体崩壊による津波の評価手法を過去に山体崩壊を起こしたことがある富士山に適用して、事前評価法としての問題点の検討を行った。更に、2018 年インドネシア、クラカタウ島における山体崩壊津波源を明らかにするため、干渉 SAR の手法を用いてイベント前後の地形の変化を求め、それを元に津波シミュレーションを行いモデルの妥当性について検討した。

計画期間中の成果の概要

- ・スロー地震タイプの津波地震を含む地震の規模を即時かつ適正に推定するため、より長周期成分に基づいて規模を推定するよう、変位を積分した波形の振幅を用いた手法を考案し、日本付近の M6.5 以上の地震について地震の規模推定が可能であることを示した。
- ・自動震源決定手法 (PF 法) を開発し、同手法は気象庁において 2016 年 4 月に運用が開始された。更に、震源出力条件の見直し、複数の地震が発生した場合には振幅の大きいイベントから処理を行うこと、及び走時残差が大きな相を削除する等の改良を行い、島嶼部及び地震多発時における震源決定性能を向上させた。
- ・地震直後に地震の規模や断層の広がりや断層の深さを推定するため、国土地理院との共同研究として GNSS データに地震波形解析法を適用した手法開発を行い、当手法において適正な解が得られる条件を明確化した。
- ・解析結果の公表までに時間を要していた遠地実体波震源過程解析の迅速化のため、サンプリング間隔・基底関数の数等を最適化し、比較的短い処理時間で安定して解が得られるよう処理の自動化を図った (図 2)。
- ・2016 年熊本地震の震源過程解析、干渉 SAR 解析を行い、震源過程解析で推定されたすべり分布をもとにした地殻変動が干渉 SAR 解析結果と整合することを確認した。
- ・応答スペクトル比と地盤情報の関連性について調査し、周期 3 秒までは深さ 30 m までの平均 S 波速度との相関が高く、更に長周期については 1 次固有周期との相関が高いことを明らかにした。
- ・遠地実体波のスペクトル解析から、スロー地震タイプの津波地震の特徴抽出を行った。それに基づき、世界各地で発生したスロー地震タイプの津波地震が日本近海で発生した場合を想定し、通常の海溝型地震とのスペクトルレベルの比較とそれに基づく震度の考察、さらに理論波形を計算してそれに基づき気象庁マグニチュード等を評価した。その結果、モーメントマグニチュードが同程度の通常の地震に比べて震度が 2 段階ほど低くなる可能性がある他、津波地震の M_w が 8 に近い場合であっても

気象庁マグニチュードの推定値は7程度あるいはそれ以下にとどまるという結果を得た(図1)。気象庁マグニチュードは最初期の津波予測時に参照されており津波地震に対して過小評価が懸念される。

・1998年バプアニューギニアの地震発生10分後の海底地すべりにより津波が発生した事例について、地すべりによる地震波の励起の理論計算を行い、地震発生後間もない地震計記録からでは地すべり現象が検知困難であることを確認した。

・山体崩壊による津波について、崩壊後の地形を与えた上で崩落させた土砂の移動を計算し、その結果に基づいて津波を計算する手法について検討を行った。この手法を歴史津波観測高の得られている1741年渡島大島及び1792年雲仙眉山の事例に適用し、妥当な予測結果を得た。

(9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018: Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog. Earth, Planets and Space, 70, 90.

Tamaribuchi K., Evaluation of automatic hypocenter determination in the JMA unified catalog, Earth Planets, and Space, 70, 141.

安藤忍, 2018, 陸域観測技術衛星「だいち2号」(ALOS-2/PALSAR-2)を用いた合成開口レーダ(SAR)干渉解析, 平成28年(2016年)熊本地震調査報告, 気象庁技術報告, 135, 35-45.

(10)次期計画における平成31年度実施計画の概要:

3-(2)「地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化」の関連として以下の研究を計画している。

- ・スロー津波地震が日本近海で発生した場合の、現状の規模推定法の問題点の検討を行う。
- ・スロー津波地震の規模推定法の検証を進める。
- ・山体崩壊による津波の評価法の検討を行う。
- ・自動震源決定手法を海底地震計データに適用可能な形に改良し、海溝型地震における破壊域等の断層パラメータ把握についての検討を行う。
- ・遠地実体波震源過程解析の自動解析手法のとりまとめを行うとともに、近地強震波形震源過程解析の手法改良を行う。

(11)実施機関の参加者氏名または部署等名:

気象庁気象研究所地震津波研究部

他機関との共同研究の有無:有

国土地理院

(12)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名:気象研究所企画室

電話:029-853-8536

e-mail:ngmn11ts@mri-jma.go.jp

URL:http://www.mri-jma.go.jp/

(13)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:勝間田明男

所属:気象庁気象研究所地震津波研究部

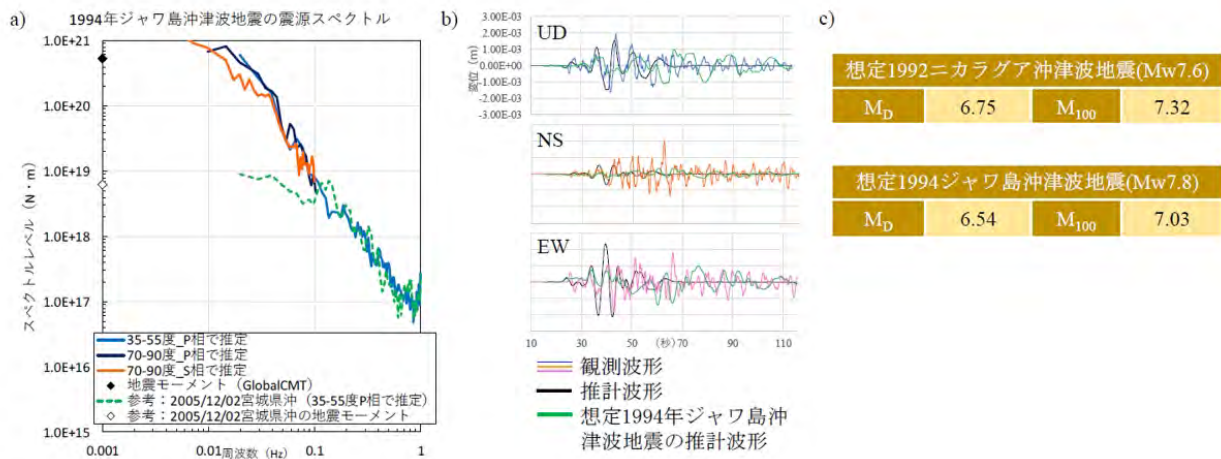


図1 津波地震が日本近海で発生したと想定した場合の近地波形の振幅に基づくマグニチュードの評価

- a) 遠地波形による1994年ジャワ島沖津波地震 (Mw7.8) 及び2005/12/02宮城県沖 (Mw6.5) の震源スペクトル。
 b) 2005/12/02宮城県沖と同じ場所で1994年ジャワ島沖津波地震の発生を想定した場合の仙台大倉 (気象庁地震観測点) での波形推計の例。
 c) 1992年ニカラグア沖津波地震 (Mw7.6) 及び1994年ジャワ島沖津波地震を想定した近地の推計波形に基づく気象庁変位マグニチュード (M_D) 及びKatsumata et al.(2013) のマグニチュード (遮断周期100秒, M_{100}) の推定値。

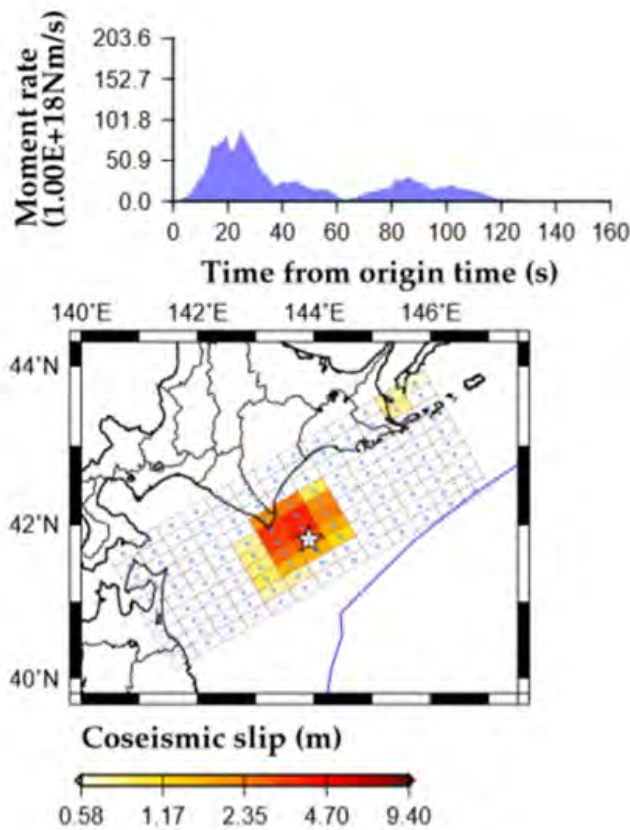


図2 2003年十勝沖地震の自動震源過程解析結果

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

大規模噴火時の火山現象の即時把握及び予測技術の高度化に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

4. 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

気象レーダー等リモートセンシング手法や震動観測等を活用した噴火現象の即時的な把握技術を開発するとともに、噴煙柱及び移流拡散モデルを活用した火山灰等の高精度な予測技術を開発する。さらに、観測値と予測値に基づく火山噴出物データ同化・予測システムを構築し、即時的に把握した噴火現象から高精度な火山灰等の拡散予測を行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

活動的な火山である桜島等を対象として、気象レーダーにより噴煙のエコー強度やマルチパラメータ等を観測し、噴煙状態等を速やかに把握する手法を検討するとともに、火山灰検出技術の開発や噴出する火山灰・礫の量や挙動を定量的に推定するための研究を行う。また、次期気象衛星で観測される火山灰雲のマルチチャンネルデータ等を、噴火検知や噴煙の高さ、広がり等の噴火規模の即時的な推定に活用するための研究を行う。また、噴火発生直後の地震、空振、地殻変動及び監視カメラによる爆発映像等からも即時的に噴火規模等を把握する手法を検討するとともに、火山岩塊等、防災上重要な火山現象に対する予測技術の高度化を行う。

気象レーダー・衛星等のリモートセンシング観測データの解析結果に基づき、気象庁非静力学モデル等により噴煙 - 降灰過程の動力学的側面を明らかにし、噴煙柱モデルの改良に資する知見を得る。改良した噴煙柱モデルを初期値に用いて、移流拡散モデルによる火山灰や礫の落下範囲や落下量を即

時的かつ高精度に予測するための技術研究を行う。これらモデルを組み合わせ、火山噴出物に対する観測データの解析から予測までを一貫して実行できるデータ同化・予測システムの構築を目指す。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

現行計画では 3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究 (4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化と関連の深い項目として「大規模噴火時の火山現象の即時把握及び予測技術の高度化に関する研究」を実施した。

(平成 30 年度の成果)

気象研究所で開発した、気象レーダー観測網を用いた噴煙高度の確率的推定手法を用いて、霧島山 (新燃岳)(2017-2018 年)、草津白根山 (本白根山)(2018 年)、口永良部島 (2019 年) の噴火事例を解析した。解析結果は火山噴火予知連絡会に提出し、火山活動評価に活用された。

航空路火山灰情報 (VAA) 業務で作成している現業者による火山灰雲の解析結果 (現業者解析) を火山灰データ同化システム (プロトタイプ) に取り込めるよう機能を拡張した。これにより多くの事例で火山灰雲領域の過大予測が抑制され予測精度が改善した。

大規模噴火を想定した下記、JMA-RATM による降灰シミュレーションから降灰確率を求めた結果、富士山で宝永規模の噴火が起きた場合に都心で 10 cm 以上の降灰になる確率は 3.3 %、桜島で大正規模の噴火が起きた場合に鹿児島市街で 1 cm 以上の降灰になる確率は 7.8 % と試算された。

(平成 26 ~ 30 年度の概要)

気象レーダー網を用いた噴煙高度の確率的推定手法を開発し、噴火事例に適用を行った。開発した手法により、噴煙高度の過大評価を抑制し、かつ推定誤差を定量的に評価することが可能となった。解析結果は火山噴火予知連絡会に提出し、火山活動評価に活用された。

X バンド MP レーダー、Ku バンド高速スキャンレーダーなどによる噴煙観測データの解析を行った (2016 年 3 月 26 日、2016 年 4 月 29 日桜島 (昭和火口) 噴火など)。Ku バンド高速スキャンレーダーでは世界で初めて約 1 分毎に火山噴煙の詳細な 3 次元構造を捉えた。X バンド MP レーダーにおいても、噴煙内部の二重偏波パラメータの定性的な変化傾向を掴むことができた。

火山灰データ同化システム開発では、2014 年 2 月のケルト火山噴火を用いて動作確認を行い、レーダー観測の限界高度による観測感度が得られる可能性が示された。また気象衛星 (ひまわり 8 号) 火山灰プロダクトの同化については、2015 年 5 月の口永良部島噴火から放出された火山灰について大気中の火山灰濃度の定量的な予測ができる可能性が示された。

気象庁領域移流拡散モデル (JMA-RATM) による降灰予測では、2014 年御嶽山、2015 年口永良部島、2016 年桜島、阿蘇山、2017 ~ 18 年新燃岳噴火などの実事例で比較検証を行い、総噴出量推定、予想降灰域など改善できることを示した。

大規模噴火時に成層圏に達した火山灰の輸送を予測する際、高層で空気が希薄になることによる落下速度の変化 (抵抗係数のスリップ補正) について、JMA-RATM を用いた検討を行った。この補正はミクロンオーダーの火山灰の落下過程に影響すること、短期的な降灰予測への効果はわずかだが、広域に長期間浮遊する火山灰の輸送予測に影響することを確認した。

大規模噴火の過去事例として 1707 年富士山噴火 (宝永噴火) 及び 1914 年桜島噴火 (大正噴火) を想定して、2015 ~ 17 年の 3 ヶ年分の気象庁メソ解析値を用いて、JMA-RATM による降灰シミュレーションを各 1096 事例、実行した。降灰シミュレーション結果の一部は、防災科学技術研究所の火山リスクマネジメントシステム (VRMS) へ入力できるようにした。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Sato, E, K. Fukui, and T. Shimbori, 2018: Aso volcano eruption on October 8, 2016, observed by weather radars. *Earth, Planets and Space*, 70:105, 1-8.

佐藤英一, 福井敬一, 新堀敏基, 石井憲介, 徳本哲男, 2018: 気象レーダーで観測した 2018 年 3 月から 5 月にかけての霧島山 (新燃岳) 噴火に伴う噴煙エコー, 火山噴火予知連絡会会報, 130, 292-298.

佐藤英一, 福井敬一, 新堀敏基, 石井憲介, 徳本哲男, 2018: 気象レーダーで観測された 2017 年 10 月霧島山(新燃岳)噴火に伴う噴煙エコー, 火山噴火予知連絡会会報, 128, 316-319.

石井憲介, 新堀敏基, 佐藤英一, 徳本哲男, 2018: 2017 年 10 月 10 日から 17 日にかけての新燃岳の気象衛星ひまわり 8 号による観測結果, 火山噴火予知連絡会会報, 128, 324-326.

新堀敏基, 石井憲介, 佐藤英一, 徳本哲男, 森健彦, 林洋介, 吉田知央, 松田康平, 2018: 2017 年 10 月霧島山(新燃岳)噴火に伴う降灰予測, 火山噴火予知連絡会会報, 128, 320-323.

石井憲介, 新堀敏基, 佐藤英一, 徳本哲男, 林勇太, 2018: 2016 年 10 月 8 日阿蘇山噴火で放出された二酸化硫黄の静止気象衛星ひまわり 8 号による観測結果, 火山噴火予知連絡会会報, 126, 181-182.

佐藤英一, 新堀敏基, 福井敬一, 石井憲介, 徳本哲男, 2018: 気象レーダーで観測された 2016 年 10 月 8 日阿蘇山噴火に伴う噴煙エコー, 火山噴火予知連絡会会報, 126, 175-180.

佐藤英一, 新堀敏基, 福井敬一, 石井憲介, 徳本哲男, 2018: 気象レーダーで観測された 2018 年 1 月 23 日草津白根山噴火に伴う噴煙エコー. 火山噴火予知連絡会会報, 129, 78-82.

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要:

現在設置している気象レーダーや衛星の観測を高度利用し、噴煙の構造、降灰・降礫など噴煙現象の実事例と比較検証することで、供給源モデルの改善や火山灰輸送予測の精度向上を目指す。

噴煙の構造や火山灰などの物理的パラメータから、火山灰データ同化システムと新しい移流拡散モデルに基づく火山灰解析・予報サイクルのシステムを導入する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

気象研究所火山研究部

他機関との共同研究の有無: 有

鹿児島大学、京都大学防災研究所、防災科学技術研究所

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名: 気象研究所企画室

電話: 029-853-8536

e-mail: ngmn11ts@mri-jma.go.jp

URL: <http://www.mri-jma.go.jp/>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 徳本 哲男

所属: 気象研究所火山研究部第二研究室

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

津波の予測手法の高度化に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

稠密な観測データを高度に活用し、津波成分を抽出する手法や現況を面的に把握する手法を開発する。波源推定に基づく予測手法の高度化および波源推定に基づかない新たな予測手法の開発を行う。

遠地津波の後続波および減衰特性のモデル化を行い、遠地津波の継続時間の予測を行うことにより津波警報解除の時期の予測手法を開発する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

沖合における多点の水圧観測データから、津波伝播の状況をリアルタイムで高い空間分解能を持って面的に把握する技術を開発するため、高精度水圧計による実海域観測データや既存の沖合観測データの解析等に基づき津波以外の現象に伴う水圧変化の特性を明らかにし、リアルタイムに津波成分のみを抽出するための技術開発を行うとともに、観測点配置やデータの量および質などを考慮してデータ同化の手法等を用いて即時的に津波の伝播状況を面的に把握する手法を開発する。

これまでの研究成果である沖合で観測された津波波形の逆解析に基づく津波の即時予測手法システムについて、大量の津波観測データに対しても安定して効率よく動作するようシステムを改良するなどの高度化を行う。また、津波の波高分布の時間発展をデータ同化の手法により逐次予測することにより、津波波源を推定しないで津波予測を行う新しい手法を開発し、精度の高い津波予測が行えるようにすることを目指す。

津波の減衰過程の予測のため、反射波や散乱波などの遠地津波を中心に後続波を精度よく再現できる計算手法を用い、様々な津波発生シナリオについて数値実験を行うことにより、後続波が第一波と同程度あるいは大きい振幅となる条件を経験的に見出すことを目指す。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

沖合で観測された津波波形の逆解析に基づく津波の即時予測手法システムについて、地震発生時に海底水圧データに記録される非地殻変動オフセット及びトレンド変化のノイズへの対処策として、波形逆解析において津波成分とノイズ成分を同時推定して分離できるように改良した。また、時々刻々

得られる津波予測結果の妥当性を提示できるよう、予測精度をリアルタイムに評価する指標について検討し、波形逆解析で用いた観測波形と計算波形の一致度、及び前解析時刻に推定した初期水位の空間分布との一致度を評価する方法の組み合わせにより概ね適切に評価できることを確認した。津波の減衰過程の予測のため、昨年度の南米沖に加え、ニューギニア島からサモア諸島にかけての南太平洋で発生した地震に伴う遠地津波の減衰過程の特徴について調査を行い、移動自乗平均振幅の成長・減衰過程に南米沖と同様の傾向が見られ、減衰過程における振幅が地震のマグニチュードと関係していることを明らかにした。

沖合で観測された津波波形の逆解析に基づく津波の即時予測手法システムについて、リアルタイムGNSS測地データ解析によって推定される震源断層解との統合、波源の広がり小さな津波に対応するための段階的処理手法の導入等、手法の改良を行ったことに加え、観測データに含まれる非津波成分への対処や予測結果の妥当性評価の指標の開発等を行って実用性を高めた。波源推定に基づかない予測手法について、データ同化による津波面的把握とそれを用いた津波予測について検討し、マグニチュード8クラスの波源の広がりが大きい津波に対しては概ね適切な予測ができることを確認したが、広がりが小さい津波に対しては十分ではないことを示した。遠地津波の継続時間の予測手法について、沿岸津波観測データの移動自乗平均振幅の成長・減衰過程を数理モデルで表現し、地震のマグニチュードとの関係を明らかにすることで、継続時間の予測可能性を示した。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要 :

津波の観測事例について、長時間津波伝播計算による後続波と減衰過程の再現を試み、その精度向上のために必要な伝播計算条件設定の検討を行う [JMA06]

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

気象研究所地震津波研究部

他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 気象研究所企画室

電話 : 029-853-8536

e-mail : ngmn11ts@mri-jma.go.jp

URL : <http://www.mri-jma.go.jp/>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名 : 山本剛靖

所属 : 気象研究所地震津波研究部

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震・津波・火山防災情報の改善に係る知見・成果の共有

(3) 最も関連の深い建議の項目：

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

4. 研究を推進するための体制の整備

(4) 研究者，技術者，防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

緊急地震速報の高度化

長周期地震動情報の高度化

噴火警報の改善

降灰予報の改善

国際共同研究・国際協力

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

気象庁では、地震学、火山学の最新の研究成果や地方自治体、関係防災機関のニーズを踏まえ、地震や火山噴火の災害軽減に資するため、津波警報、緊急地震速報、長周期地震動情報、噴火警報や降灰予報について過去の経験を踏まえて高度化を進めてきた。

これらの情報内容の改善や高度化にかかる知見・成果については、広く大学等関係機関、防災関係機関に、気象防災情報として、また、各種情報の検討部会等を通じ、広く共有し、また、防災対応へ、各分野の研究の推進に活用されている。

また、火山噴火予知連絡会では、火山活動の評価結果を公表しており、一般の方にも理解しやすい表現を心がけている。

平成 26 年度においても、これまでの取り組みの成果、各種検討部会での議論の結果を踏まえ、継続的に取り組んでいく。平成 27 年度以降についても、引き続き成果の共有を続けていく。

また、国際共同研究・国際協力については国際地震センター、米国地質調査所、包括的核実験禁止条約機構、米国大学間地震学研究連合（IRIS）及び近隣国との地震観測データの交換などの組織的な連携・協力を通じて、また、航空路火山灰情報センター及び北西太平洋津波情報センターの国際協力業務や開発途上国における地震・火山の観測や津波警報の発表などの体制整備に必要な技術的な支援を通じて、国際的な研究活動の進展に寄与する。

（ 8 ）平成 30 年度及び計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要：

気象庁から発表する地震・津波に関する防災情報の高度化を図るため以下の検討会等を開催し、報道発表等により広く情報共有を図った。

- ・緊急地震速報評価・改善検討会の開催（3 月予定）
- ・長周期地震動に関する情報検討会の開催（3 月予定）
- ・津波予測技術に関する勉強会の開催

また、「南海トラフ地震に関連する情報」（平成 29 年 11 月 1 日から運用開始）を発表するため、南海トラフ全域を対象として地震発生の可能性を評価するにあたり有識者から助言いただくために「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」（以下「評価検討会」という。）を開催し、評価結果を関係資料とともに公表している。

火山については、火山噴火予知連絡会の提言を踏まえ、どのような場合に噴火警報が発表されるか登山者等が認識できるよう、噴火警戒レベルの引き上げや引き下げの基準を精査し、精査の終わった火山より順次公表を始めた。また、日々の火山観測データについて平成 28 年 12 月 21 日より気象庁ホームページへの掲載を行っている。

計画期間（平成 26 年度～30 年度）を通じ、上記取り組みを実施した。

（ 9 ）平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

（ 10 ）次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

平成 31 年度も、引き続き、各種情報の利活用・高度化等のための検討を進める。

（ 11 ）実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁及び全国気象官署職員
火山噴火予知連絡会事務局（気象庁地震火山部火山課）
他機関との共同研究の有無：有
様々な関係機関、専門家等と連携

（ 12 ）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：地震火山部管理課 地震調査連絡係長
電話：03-3212-8341（内線：4514）

e-mail : johokan@eqvol2.kishou.go.jp

URL : <http://www.jma.go.jp>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 長谷川安秀

所属 : 気象庁地震火山部管理課地震津波防災対策室

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

火山活動の総合判断

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

(4) その他関連する建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(4) 研究者，技術者，防災業務・防災対応に携わる人材の育成

(5) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

防災関係機関の防災活動に資するため，引き続き全国の火山活動の状況について総合的な判断を実施する．特に噴火が近づいた火山や噴火中の火山について，最新の研究成果に基づき現在の状態から火山噴火や噴火終息に至るまでの過程についての噴火推移の予測を試みる．

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

年 3 回開催予定の火山噴火予知連絡会(定例会)において，全国の火山活動の総合的な評価を実施する．また，火山噴火発生等の異常時に開催する臨時の幹事会や連絡会(定例会，臨時会)において，火山噴火の可能性や火山活動の推移の予測等について評価し，火山噴火予知連絡会統一見解等の判断結果については報道発表や気象庁の火山情報で公表する．

防災科学技術研究所等が新規に整備する観測施設など，監視に必要なデータについては，観測データの交換対象に追加する．

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 30 年度は，第 141 回(平成 30 年 6 月 20 日) 第 142 回(平成 30 年 10 月 31 日)の 2 回の火山噴火予知連絡会定例会を開催し，全国の火山活動の状況についての検討を行った．検討結果は定例会終了後に報道発表し，気象庁の「火山の状況に関する解説情報」で発表するとともに，気象庁ホームページでも公表した(平成 30 年度第 3 回目となる第 143 回火山噴火予知連絡会定例会は平成 31 年 2 月 27 日に開催する予定)．

平成 30 年 1 月 23 日の草津白根山(本白根山)での噴火発生を受けて，1 月 26 日に拡大幹事会を開催して草津白根山の火山活動について検討を行った．その後，第 140 回定例会(2 月 14 日開催)で草津

白根山部会の設置を決定し、3月までに2回の会合を開催して火山活動その他について検討を行った。また、火山活動評価検討会では、第21回(3月7日)及び第22回(6月12日)の会合で、長期間噴火活動を休止している火口/山体における今後の調査研究及び監視のあり方について検討を行い、検討結果を取りまとめて平成30年7月3日に公表した。

近年、新燃岳及びえびの高原(硫黄山)周辺で噴火を繰り返している霧島山については、第141回定例会で霧島山全体の火山活動を検討するため霧島山部会の設置を決定し、12月までに2回の会合を開催して火山活動その他について検討を行った。

五カ年の計画期間中に火山活動の総合評価のために開催した会合は、定例会が15回(予定を含む)、拡大幹事会が7回(御嶽山2回、口永良部島2回、口之永良部島及び桜島1回、霧島山1回、草津白根山1回)、草津白根山部会2回、霧島山部会2回であった。

(9)平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
火山噴火予知連絡会会報126号、127号、129号、130号

(10)次期計画における平成31年度実施計画の概要:

火山噴火予知連絡会(定例会)及び特定の火山を対象に設置した部会において全国の火山活動の総合評価を実施するほか、噴火発生等の火山異常時に開催する臨時の連絡会あるいは幹事会において、噴火発生の可能性や火山活動の推移の予測等について評価し、火山噴火予知連絡会統一見解等に取りまとめて報道発表や気象庁の火山情報で公表する等、社会に分かりやすく発信し、各地の火山防災協議会にも提供して防災・減災に資する。

研究成果・観測結果の情報交換、火山観測データの流通・共有の促進、活発化した火山における臨時観測に係る総合的な調整、研究成果の社会への発信などを通じて、火山噴火予知研究の推進に寄与する。

(11)実施機関の参加者氏名または部署等名:

火山噴火予知連絡会事務局(気象庁地震火山部火山課)

他機関との共同研究の有無:有

火山噴火予知連絡会委員

(監視に関するデータ提供機関)

大学、研究機関、自治体、地方整備局等の火山観測実施機関

(12)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名:地震火山部管理課 地震調査連絡係長

電話:03-3212-8341(内線:4514)

e-mail:johokan@eqvol2.kishou.go.jp

URL:http://www.jma.go.jp

(13)この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名:宮村 淳一

所属:気象庁地震火山部火山課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地震観測、地殻変動観測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震観測、地殻変動観測の継続

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

津波警報や地震情報等を適切に発表するため全国に展開している地震計及び震度計，東海地域を中心に展開しているひずみ計などの観測を継続するとともに，文部科学省と協力して，大学，防災科学技術研究所など関係機関の地震観測データを合わせて一元的に処理し，その結果を大学，関係機関に提供する．

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

津波警報や地震情報等を適切に発表するため全国に展開している地震計及び震度計，東海地域を中心に展開しているひずみ計などの観測を継続するとともに，文部科学省と協力して，大学，防災科学技術研究所など関係機関の地震観測データを合わせて一元的に処理し，その結果を大学，関係機関に提供した．

(5 年間の成果) 津波警報や地震情報等を適切に発表するため全国に展開している地震計及び震度計，東海地域を中心に展開しているひずみ計などの観測を継続するとともに，文部科学省と協力して，大学，防災科学技術研究所など関係機関の地震観測データを合わせて一元的に処理し，その結果を大学，関係機関に提供した．

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので，平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

一元化処理結果(震源、検測値、発震機構解)，地震・火山月報(カタログ編)，地震・火山月報(防災編)，地震予知連絡会会報

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

平成 31 年度も、引き続き観測を継続するとともに、処理結果を大学、関係機関等に提供する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

気象庁

他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 地震火山部管理課 地震調査連絡係長

電話 : 03-3212-8341 (内線 : 4514)

e-mail : johokan@eqvol2.kishou.go.jp

URL : <http://www.jma.go.jp>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 尾崎 友亮

所属 : 気象庁地震火山部管理課

- (1) 実施機関名：
気象庁
- (2) 研究課題（または観測項目）名：
潮位観測
- (3) 最も関連の深い建議の項目：
4. 研究を推進するための体制の整備
(2) 研究基盤の開発・整備
ア. 観測基盤の整備
- (4) その他関連する建議の項目：
- (5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：
南海トラフの巨大地震
首都直下地震
- (6) 本課題の 5 か年の到達目標：
潮位の連続観測を継続して実施する。
- (7) 本課題の 5 か年計画の概要：
潮位データの伝送を高度化し，障害による欠測を減少させる。
- (8) 平成 30 年度及び計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要：
観測された潮位データを気象庁に集約し，気象庁 HP 及び国土交通省防災情報提供センター HP で公開（5 分間隔で更新）している。また，気象庁の管理地点は，毎時潮位，月平均潮位（平年偏差），津波，副振動等のデータも気象庁 HP で公開している。
平成 28 年度までに，気象庁の管理地点について，ランドライン障害時においても潮位データの伝送が行えるよう伝送の二重化（衛星回線によるバックアップ回線），予備電源による稼働時間の長時間化（72 時間以上），観測機器の雷災対策，ランドラインのデジタル回線化，離島地点の電源強化を行った。
気象庁の管理地点のほとんどがランドラインにメタル回線を利用しており，ランドライン経由の雷サージによる障害及び欠測を減少させるため，平成 31 年度光回線への変更計画を策定した。
- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので，平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
- (10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：
気象庁の管理地点のランドラインを光回線化する。
- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：
気象庁地球環境・海洋部海洋気象課，地震火山部
他機関との共同研究の有無：有

国土交通省（水管理・国土保全局，港湾局）、国土地理院、海上保安庁と連携した潮位データの一元化

（12）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：地震火山部管理課 地震調査連絡係長
電話：03-3212-8341（内線：4514）
e-mail：johokan@eqvol2.kishou.go.jp
URL：http://www.jma.go.jp

（13）この研究課題（または観測項目）の連絡担当者
氏名：市川 真人
所属：気象庁地球環境・海洋部海洋気象課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地磁気精密観測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

日本中央部、北日本、南西日本、日本南方の地磁気基準点である柿岡、女満別、鹿屋、父島の 4 観測点において、観測データの精度向上及び編集・解析作業の効率化を図りながら数十年～100 年スケールにわたる安定した地磁気観測を実施し、大学等による地殻活動・火山活動を評価する電磁氣的観測研究のために、精密な磁場データを毎日リアルタイムで提供する。また、日本域の全磁力分布を解析するために、全国にわたる全磁力精密観測網を構築する観測点として、いわき、北浦、阿蘇山麓において、データ取得の安定性を図りながら精密連続観測を継続実施する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

日本における地磁気基準点である柿岡、女満別、鹿屋、父島の 4 観測点において、観測データの精度向上及び編集・解析作業の効率化を図りながら、地殻活動・火山活動を評価するために安定した地磁気観測を実施し、精密な磁場データを毎日リアルタイムで提供する。また、日本域の全磁力分布を解析するために、全国にわたる全磁力精密観測網を構築する観測点として、いわき、北浦、阿蘇山麓において、データ取得の安定性を図りながら精密連続観測を継続実施する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

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、陸域、海域での磁気測量をはじめ、大学等による電磁氣的観測研究あるいは幾つか提案されている日本域における標準的な全磁力磁場モデルの算出方法の検証・改良を進めるために、高精度の地磁気基準値を提供した。火山活動起源のシグナルを抽出するためには、「参照データとの差を求めて局所的な磁場変動だけを取り出す」という手法が用いられるが、地域によって変化の大きさ、傾向が異

なるため、地域毎の基準値観測が必要となる。それら地磁気観測点への車両や建築物等による人工的な磁気擾乱の観測を維持し、異常値の検出・補正処理を施し、基準値の精度維持を図った。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

日本中央部、北日本、南西日本、日本南方の地磁気基準点である柿岡、女満別、鹿屋、父島の 4 観測点において、数十年～100 年スケールにわたる安定した地磁気観測を実施し、精密な磁場データを毎日リアルタイムで提供する。

あわせて観測データの精度向上及び編集・解析作業の効率化を図る。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

気象庁地磁気観測所

他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 気象庁地磁気観測所総務課

電話 : 0299-43-1151

e-mail : kakioka@met.kishou.go.jp

URL : <http://www.kakioka-jma.go.jp>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名 : 山際 龍太郎

所属 : 気象庁地磁気観測所観測課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

全国における火山観測の強化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

大学や防災科学技術研究所等関係機関の協力の下、火山噴火予知連絡会で中長期的な火山監視体制の強化が必要とされた 47 火山の連続的な監視観測を継続する。また、火山活動が活発化した場合には、必要に応じ観測体制を強化する。

これらの成果は、噴火警報等の防災情報の発表や火山解説資料の作成に利用するとともに、地震火山月報(カタログ編)や火山年報で取りまとめて公表する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

1) 連続的な監視観測

火山噴火予知連絡会で中長期的に観測体制の充実が必要とされた 47 火山について、全国 4 か所の火山監視・情報センターにおいて、地震計、空振計、GPS 等により、連続的な監視観測を行う。

火山観測施設の更新計画(5 か年)に基づき、平成 23 年度から実施している観測施設の更新を継続する。

2) 現地調査・機動観測による繰り返し観測等

全国の火山について、地震観測・GPS 繰り返し観測、熱観測等の調査的な機動観測を計画的に実施する。また、三宅島、浅間山、桜島等、火口からの二酸化硫黄ガスの放出が継続している火山については、DOAS 等による火山ガス放出量の観測を実施する。

火山活動に異常が観測された場合には、緊急観測を実施し、火山活動の詳細を把握する。

3) 観測成果の公表

各種監視・観測で得られた成果は、噴火警報等の防災情報、火山解説資料等の防災目的の資料等に利用する他、地震火山月報(カタログ編)や火山年報等により公表する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

1) 連続的な火山観測

全国の50活火山について、全国4か所の火山監視・警報センターにおいて、地震計、空振計、GNSS、監視カメラ等による連続的な監視観測を継続した。平成30年度は、全国47箇所の遠望観測施設(監視カメラ)の機器更新及び機能強化を実施した。

2) 現地調査・機動観測による繰り返し観測等

全国の活火山について、GNSS繰り返し観測、熱観測等の調査的な機動観測を計画的に実施した。また、口永良部島、阿蘇山、桜島等の二酸化硫黄ガス放出が継続している火山については、COMPASSによる火山ガス放出量の観測を実施したほか、噴火発生や火山活動に変化があった火山では、関係機関の協力を得て上空からの観測を繰り返し実施した。

3) 観測成果の公表

各種監視観測で得られた成果は、噴火警報、火山の状況に関する解説情報、火山活動解説資料等の防災目的の情報や資料として公表した他、地震火山月報(カタログ編)等に取りまとめて公表した。また、気象庁のホームページで常時観測火山(50火山)の観測データを掲載しているほか、防災科学技術研究所のホームページでは引き続き気象庁の地震計等のデータを公開している。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):
地震火山月報(防災編)2018年3月号~2019年2月号(予定)地震火山月報(カタログ編)2016年3月号~5月号(予定)

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要:

1) 監視観測の継続

火山噴火予知連絡会で監視・観測体制の充実等が必要とされた50活火山について、全国4か所の火山監視・警報センターにおいて、地震計、空振計、GNSS等により、常時観測を継続する。

2) 機動観測の実施

全国の火山について、GNSS繰り返し観測、熱観測、火山ガス観測等の調査観測を計画的に実施するとともに、火山活動に異常が認められた場合には、緊急観測を実施して火山活動の詳細を把握する。

3) 観測データの共有

関係機関による新規観測点のデータのうち火山監視に必要と考えられる観測点についてはデータ交換の対象に追加する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

気象庁地震火山部・札幌管区气象台・仙台管区气象台・福岡管区气象台火山監視・警報センター
他機関との共同研究の有無: 有
(監視に関するデータ提供機関)
大学, 研究機関, 自治体, 地方整備局等の火山観測実施機関

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名: 地震火山部管理課 地震調査連絡係長
電話: 03-3212-8341(内線: 4514)
e-mail: johokan@eqvol2.kishou.go.jp
URL: <http://www.jma.go.jp/>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 宮村 淳一
所属: 気象庁地震火山部火山課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地殻活動・火山活動のための地磁気基準観測、全磁力精密観測のデータベース化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地殻活動・火山活動を的確に検出するため、地磁気基準観測、全磁力精密観測の成果のデータベース化を継続する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

柿岡(茨城県)、女満別(北海道)、鹿屋(鹿児島県)、父島(東京都小笠原村)の 4 地点に、祓川(鹿児島県)を加えた 5 観測点における地磁気基準観測データを、継続して地磁気観測所データベースに登録し、迅速に公開するとともに、国際的なデータセンターに提供する。さらに、活動的な火山を対象とした全磁力精密観測データについて、継続してデータベースに登録する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

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。また、過去の紙媒体による地磁気アナログ記録をスキャナでデジタル画像に変換し(画像データ化)、それを計算機で利用可能な高時間分解能のデジタルデータに変換し(デジタルデータ化)、データベースに登録、公開した。

5 観測点の地磁気 4 成分連続観測データの地磁気観測所データベースへの登録・公開および国際的なデータセンターへの提供は、計画期間の 5 年にわたり継続的に実施した。また、柿岡については 1924 年以降、女満別・鹿屋については 1970 年以降の地磁気アナログ記録の画像データ化を進めるとともに、さらにその一部をデジタルデータ化し、それらをデータベースに公開した。その結果、デジタルデータについては、柿岡については 1956 年～1983 年まで、女満別・鹿屋については 1975 年～1984 年までの期間がデータベースに登録・公開となる予定。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

これまで進めてきた計画を継続し、柿岡、女満別、鹿屋、父島、菟川の5観測点における地磁気4成分連続観測データを統一的な形式に整理し、地磁気観測所データベースに登録、公開するとともに、前者4地点のデータを国際的なデータセンターに提供する。また、活動的な火山を対象とする全磁力精密観測データについても、データベースへの登録を継続する。

紙媒体による地磁気アナログ記録の画像データ化、デジタルデータ化も継続して実施する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁地磁気観測所

他機関との共同研究の有無：有

名古屋大学、京都大学

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：気象庁地磁気観測所総務課

電話：0299-43-1151

e-mail：kakioka@met.kishou.go.jp

URL：http://www.kakioka-jma.go.jp/

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：飯野 英樹

所属：気象庁地磁気観測所観測課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

全国地震カタログの作成

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

全国地震カタログを作成する。また、定常的な発震機構解析(初動発震機構解、CMT 解)及び大地震時の震源過程解析を実施し、それら成果の関係機関等への提供及び一般への公開を実施する。

「高感度地震観測データの処理方法の改善に関する報告書」(平成 26 年 2 月地震調査委員会)を踏まえて、文部科学省と協力して行う地震波形の分析(地震波到達時刻の読取り等)やそれを使った震源の決定等の処理震源決定にかかる処理の改善を行う等、地震カタログを充実する。

過去にさかのぼった震源決定を行うとともに、1976 年以降の大学等の検測値を取り込んで総合的な地震カタログを作成する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本課題は気象庁の通常予算で行うものである。

各年度において、地震カタログ等を作成し、関係機関等への提供及び一般への公開を実施する。

高感度地震観測処理の改善に関しては、平成 26 年度に「高感度地震観測データの処理方法の改善に関する報告書」に係る業務上必要な事項についての検討を行い、平成 27 年度から運用を開始する。また、海域の地震観測網の拡大に対応するため、平成 26 年度に海底地震計のデータを用いた震源決定手法の改善について調査を行い、後年度に運用を開始する。

震源過程解析に関しては、平成 26 年度に過去の解析結果の再解析を含めた見直しを行う。平成 27 年度にカタログ化に必要なフォーマットの検討を行い、後年度に提供を開始する。

過去震源の改定に関しては、平成 26 年度に 1955・1958・1975 年の震源の再計算を行い公開する。後年度に、1976～1997 年の期間について大学の検測値を取り込んだ総合的な地震カタログを作成する。

その他、適宜、地震カタログに係る解析・処理の改善を図る。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

平成 30 年度の成果

地震カタログ(震源、発震機構)を平成 29 年 12 月まで作成し、地震月報(カタログ編)として公開した(平成 30 年度内の予定含む)。自動震源採用に伴う発破イベント混入に対応するため、波形相関による発破抽出手法を開発し、カタログの質的改善を図った。

海域の地震観測網への対応として、一元化処理への S-net や DONET2 等、海底地震計データ活用に向けた調査を実施し、調査結果を平成 30 年 11 月の地震調査委員会「高感度地震観測データの処理方法の改善に関する小委員会」及び 12 月の地震調査委員会に報告し、一元化処理に取り込むことについて合意を得た。調査結果の概要は以下の通りである。

- ・海底地震計の有無が海域で発生する地震の震源位置に大きく影響し、走時補正（標高補正、堆積層補正）及び海域 1 次元速度構造の導入により、なかでも S 相の検測値による震源決定精度向上が見込まれる。特にアウターライズ付近の地震では深さ精度が向上する。

- ・S-net の速度 M については、埋設の有無に応じた補正值が必要である。

- ・初動発震機構については、海底地震計及び海域速度構造導入により MT 解と調和的な解となり、海域で発生する地震の発震機構決定精度が向上する。

震源過程解析については、平成 30 年北海道胆振東部地震など、近地強震波形または遠地実体波を用いて日本及び海外の大地震を解析し、気象庁ホームページ等で公開した。また、2009 年 9 月以降に海外で発生した地震の解析結果の数値データについて、統一したフォーマットでの気象庁ホームページへの掲載を平成 30 年度末より開始予定である。

過去震源の改訂については、1976 年 7～12 月、1977 年の震源決定を行うとともに、1922 年分について各地の気象官署の検測値の原簿などを元に震源決定を行った（1922 年分は平成 30 年度内公開予定）、計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果

地震カタログ（震源、発震機構）を平成 29 年 12 月まで作成し、地震月報（カタログ編）として気象庁ホームページで公開した（平成 30 年度内の予定含む）、平成 26 年 11 月には英語版の web 公開を開始した。

「高感度地震観測データの処理方法の改善に関する報告書」（地震調査委員会、2014）を踏まえた震源決定等の処理の改善については、これまでのトリガ方式の地震検知に加えて新たな地震検知手法である PF 法（溜淵ほか、2016）を取り入れ、自動処理による地震検出結果を検測処理の基本とした新たな作業手順を確立し、平成 28 年 4 月 1 日より運用を開始した。これにより、地震カタログに登録される地震数は改善前の約 2～3 倍となった。こうした処理イベントの増加に対応するため、処理の効率化を進め、平成 28 年（2016 年）熊本地震の非常に活発な一連の地震活動の処理にあたり、小規模地震について波形相関を用いて効率的に処理した。また、西南日本の南海トラフ沿いの深部低周波地震について、Matched Filter 法による自動決定手法を平成 30 年 3 月 22 日に導入し、暫定的に（1 サイトシステム、初期テンプレートにより）運用開始した。これにより、処理の効率化を進め検知能力を向上させた。さらに、自動震源採用に伴う発破イベント混入へ対応するため、波形相関により発破を抽出する手法を開発した。

海域の地震観測網への対応として、一元化処理への S-net や DONET2 等の海底地震計データ活用に向けた調査を実施し（詳細は平成 30 年度の成果に記載の通り）、一元化処理に取り込むことについて地震調査委員会の合意を得た。

震源過程解析については、近地強震波形または遠地実体波を用いて日本及び海外の大地震を解析し、結果を公開した。また、震源過程解析結果の数値データについて、統一したフォーマットでの気象庁ホームページへの掲載を、日本で発生した地震（2010 年 12 月以降）については平成 29 年 5 月より開始した。海外で発生した地震（2009 年 9 月以降）については平成 30 年度末より開始予定である。

過去震源の改定については、大学等の検測値、気象官署の地震観測原簿などを取り込んだ再解析を行い、1922・1955・1958・1975・1976 年 1～6 月について震源カタログに反映した（1922 年分は平成 30 年度内公開予定）

（9）平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

地震月報（カタログ編）：<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html>

上野寛・上田満治・森脇健・溜淵功史，2018，最近の気象庁一元化震源の動向，日本地震学会予稿集 2018 年秋季大会，S23-P05．

宮岡一樹・武田清史・尾崎友亮・青木元，2018，大阪府北部の地震活動の概要，日本地震学会予稿集
2018 年秋季大会，S24-P01．

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

地震カタログの作成、発震機構解析及び大地震時の震源過程解析を行い、関係機関等への提供及び一般への公開を実施する。海域観測網の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、ルーチン業務を開始する。1977 年以降及び 1921 年以前の過去震源について順次、大学等の検測値を取り込んだ震源再計算を行い公開する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

地震火山部地震予知情報課

他機関との共同研究の有無：無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：気象庁地震火山部管理課地震調査連絡係長

電話：03-3212-8341 (内線：4514)

e-mail：johokan@eqvol2.kishou.go.jp

URL：http://www.jma.go.jp

(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：上野 寛

所属：地震火山部地震予知情報課

(1) 実施機関名：

気象庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

防災・減災に関する知識の普及啓発

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(5) 社会との共通理解の醸成と災害教育

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

緊急地震速報の利活用促進

長周期地震動情報の普及・啓発

津波防災に関する普及・啓発

噴火警報、噴火警戒レベルの利活用促進

量的降灰予報の普及・啓発

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

気象庁では、国や地方自治体等の防災関係機関、教育機関、大学等研究機関と連携しながら、地震・津波及び火山に関する現象や警報をはじめとする防災気象情報に関する、知識、防災・減災等に対する住民の意識の向上に、全庁を挙げて戦略的に取り組んでいる。

このうち、地震津波関係で、特に、緊急地震速報の利活用促進、長周期地震動情報、津波防災に関する普及・啓発について、さらに進めていくこととしている。また、火山関係では噴火警報、噴火警戒レベルの利活用推進をさらに進めると共に、量的降灰予報の普及・啓発を進めることとしている。平成 26 年度においても、これまでの取り組みの成果や各地の取り組み、各種検討部会での議論の結果を踏まえ、継続的或いは発展的な普及啓発の取り組みを進めるよう、対応を進めていく。

なお、普及啓発の対応は息の長い取り組みが必要であることから、平成 27 年度以降についても継続的に取り組んでいく予定。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

関係機関と連携し、地域の状況にあった様々な手段を用いて地震・津波及び火山に関する知識や防災行動についての普及啓発に継続的に取り組んだ。主な実施内容は以下のとおり。

- ・ 地方自治体等と連携した防災訓練への助言・協力、HP 等での相互協力
 - ・ 教育機関と連携した学校防災教育へ助言・協力
 - ・ 防災関係機関、民間団体等と連携した出前講座・防災講演会等の実施
 - ・ 関係機関と連携した合同登山・学習登山の実施
 - ・ 報道機関と連携した防災番組への協力
- 計画期間(平成26年度～30年度)を通じ、上記取り組みを実施した。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

これまでの取り組みの成果や経験を活かし、全国の気象官署において引き続き継続的或いは発展的に取り組む。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

気象庁及び全国気象官署職員

他機関との共同研究の有無：有

様々な関係機関、専門家等と連携

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：地震火山部管理課 地震調査連絡係長

電話：03-3212-8341(内線：4514)

e-mail：johokan@eqvol2.kishou.go.jp

URL：http://www.jma.go.jp

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：長谷川 安秀

所属：気象庁地震火山部管理課地震津波防災対策室

(1) 実施機関名：

海上保安庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

海底地殻変動観測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

イ. プレート境界巨大地震

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地震活動、地震の余効変動、固着回復過程などの詳細を調べ、構造との関係を明らかにするため、GPS - 音響測距結合方式による海底地殻変動観測を継続する。

併せて、観測体制の強化を進め、南海トラフなどのプレート境界の固着状態の把握に努める。また、観測手法の一層の高度化を進め、効率的で長期に安定した計測技術の開発を行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

引き続き、日本海溝沿い、南海トラフ沿いなど、日本近海の家溝型巨大地震が発生した海域ならびに発生が想定される海域において、海底地殻変動観測を継続するとともに、観測技術の開発・効率化を図り観測の高度化を行う。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

日本海溝沿いにおける観測を継続し、マンツルの粘弾性効果の影響を含んだ余効変動を観測している(図1)。南海トラフ沿いにおける観測も継続し、プレート境界固着の影響による地殻変動を観測している(図2)。一方で、紀伊水道沖の観測点における2017年末頃からのデータから、浅部のスロースリップに起因すると考えられる非正常地殻変動を観測した(図3)。

海中音速の空間的傾斜の影響を解析的に除去し測位精度を向上させる手法を開発した(Yokota et al., 2018a)。また、測位結果のデータの再利用の利便性を図るために、データ論文を発表した(Yokota et al., 2018a)。

計画期間中は、東北地方太平洋沖地震後の海底の余効変動(Watanabe et al., 2014)、南海トラフ沿いにおけるプレート境界のすべり欠損分布の推定(Yokota et al., 2016; Nishimura et al., 2018)などの成果を挙げた。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

Yokota, Y., T. Ishikawa and S. Watanabe (2018a): Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS-A oceanography. *Marine Geophysical Research*, 1-12.

Yokota, Y., T. Ishikawa and S. Watanabe (2018b): Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations, *Scientific Data*, 5:180182.

Ishikawa, T. and Y. Yokota (2018): Detection of Seafloor Movement in Subduction Zones Around Japan Using a GNSS-A Seafloor Geodetic Observation System from 2013 to 2016, *J. Disaster Res.*, 13, 3, 511-517.

海上保安庁, 2018, 日本海溝沿いの海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 100(印刷中)

海上保安庁, 2018, 南海トラフ沿いの海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 100(印刷中)

海上保安庁, 2018, 日本海溝沿いの海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 101(印刷中)

海上保安庁, 2018, 南海トラフ沿いの海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 101(印刷中)

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

日本海溝沿い、南海トラフ沿いなど、日本近海の海溝型巨大地震が発生した海域ならびに発生が想定される海域において、海底地殻変動観測を継続するとともに、観測技術の開発・効率化を図り観測の高度化を行う。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

海上保安庁海洋情報部海洋調査課海洋防災調査室

他機関との共同研究の有無：有

東北大学災害科学国際研究所

名古屋大学大学院環境学研究科地震火山研究センター

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：海上保安庁海洋情報部海洋調査課海洋防災調査室

電話：03-3595-3632

e-mail：下記URLの問い合わせフォームから問い合わせください。

URL：<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：石川 直史

所属：海上保安庁海洋情報部技術・国際課

2014年8月~2018年8月の平均速度

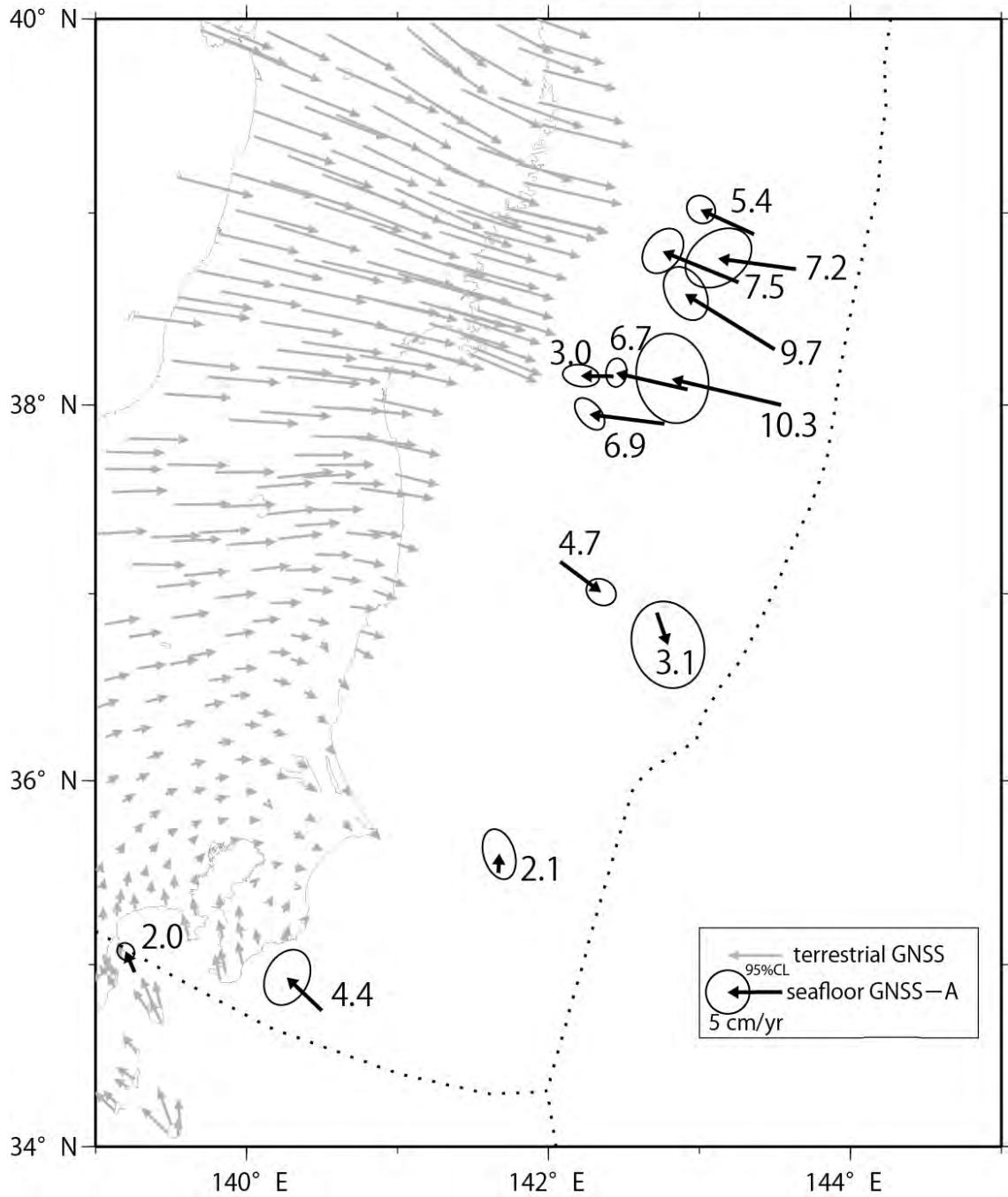


図1 日本海溝沿いの海底の水平地殻変動

2014年8月から2018年8月までのGNSS-A観測データを直線回帰して求めた海底の変動速度(単位はcm/y)。陸上の変動ベクトルはGEONETのF3解による。

2014年12月～2018年11月の平均速度

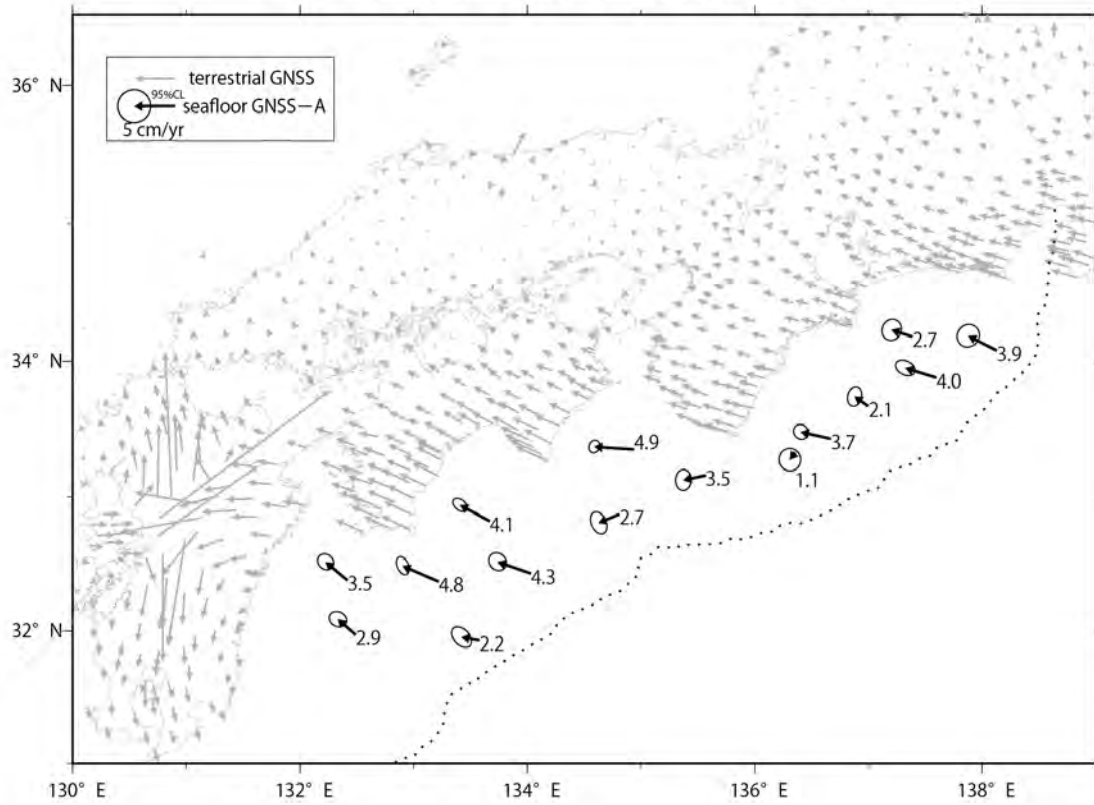


図2 南海トラフ沿いの海底の水平地殻変動

2014年12月から2018年11月までのGNSS-A観測データを直線回帰して求めた海底の変動速度(単位はcm/y)。陸上の変動ベクトルはGEONETのF3解による。

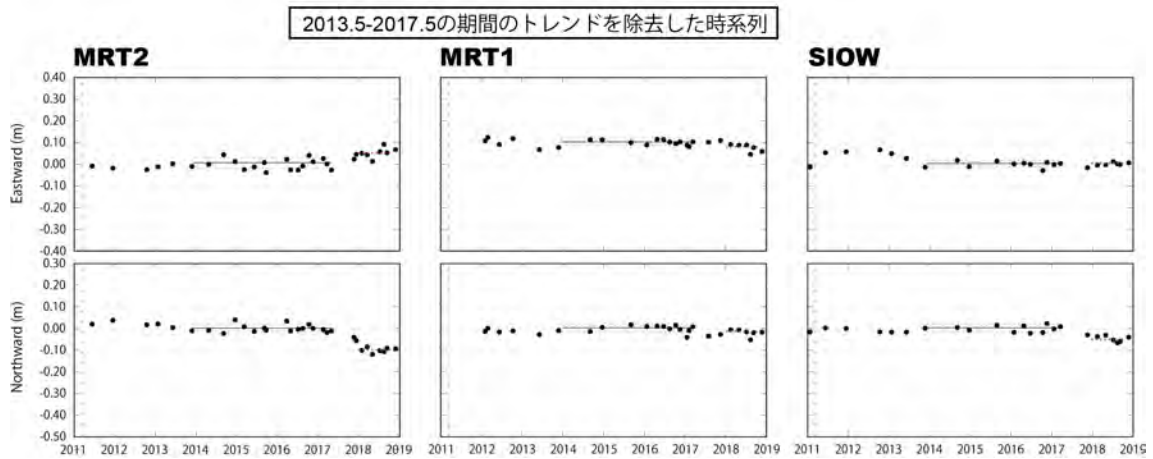
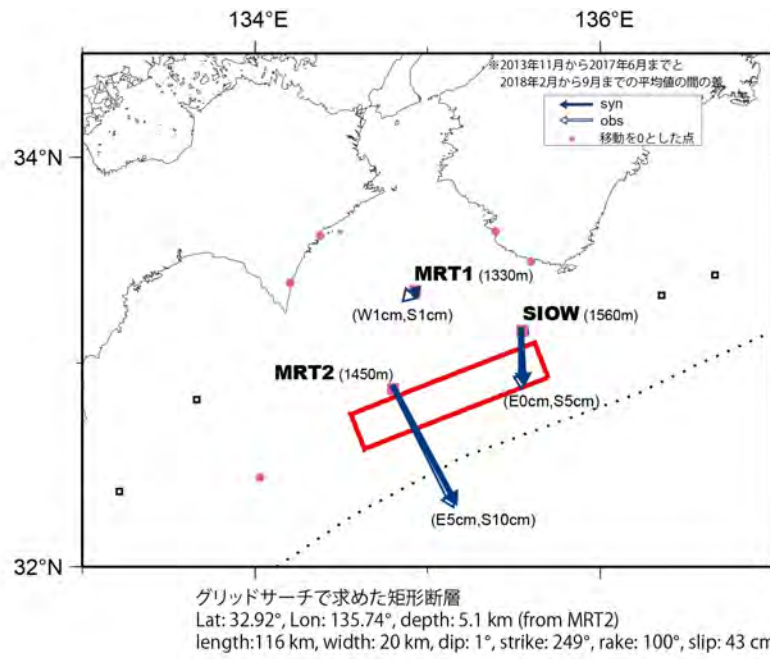


図3 紀伊水道沖の海底における非正常地殻変動

白抜き矢印は、2013年11月から2017年6月の間の平均値と2018年2月から2018年9月の間の平均値の差から求めた非正常地殻変動。赤四角はグリッドサーチで求めた矩形断層の最適解。赤丸は変動量を0とした観測点。青矢印は断層モデルから計算された変動。

(1) 実施機関名：

海上保安庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

海洋測地の推進

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

(4) その他関連する建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(6) 国際共同研究・国際協力

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

SLR の国際共同観測を継続し、日本周辺を含めた広域のプレート相対運動を把握するためのデータを提供し精度向上に貢献する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

下里水路観測所において SLR の国際共同観測を継続し、日本周辺を含めた広域のプレート相対運動決定に資するデータを取得する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

海上保安庁では 1982 年から下里水路観測所において、SLR 観測を継続的に実施しており、ITRF の原点決定への貢献ならびに日本周辺のプレート収束速度の高精度検出に寄与している。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

海上保安庁, 2018, 下里水路観測所における SLR 観測, 地震予知連絡会会報, 100(印刷中)

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

SLR の国際共同観測を継続し、ITRF の原点決定ならびに日本周辺のプレート収束速度決定の精度向上に貢献する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

海上保安庁海洋情報部海洋調査課海洋防災調査室

他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 海上保安庁海洋情報部海洋調査課海洋防災調査室

電話 : 03-3595-3632

e-mail : 下記 URL の問い合わせフォームから問い合わせてください。

URL : <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 山田 裕一

所属 : 海上保安庁海洋情報部海洋調査課海洋防災調査室

(1) 実施機関名：

海上保安庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

海域火山観測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

海域火山の定期巡回監視及び海域火山基礎情報図整備を継続して実施する。

海域火山データベースの整備及び公表を継続して行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

海域火山の定期巡回監視及び海域火山基礎情報図整備を継続して実施する。

海域火山データベースの整備及び公表を継続して行う。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

南方諸島及び南西諸島方面において、航空機による海域火山の定期巡回監視観測を行った。また、測量船を用いて海域火山基礎情報を整備するための調査を「西之島」、「海徳海山」、「伊豆大島」、「利島至三宅島」(第 1 図)、「若尊」において実施した。これらの成果は、火山噴火予知連絡会に報告するとともに海域火山データベースに反映した。

平成 25 年 11 月 20 日に確認した「西之島」至近での新島形成を伴う噴火活動については(第 2 図)平成 25 年 11 月 22 日にはマグマ水蒸気爆発からストロンボリ式噴火に移行するとともに(第 3 図)本計画期間開始後も噴火活動が継続し、「西之島」と合体して成長を続けたが、平成 27 年 11 月 17 日のブルカノ式噴火の確認を最後に噴火が一旦休止したものの(第 4 図)平成 29 年 4 月 20 日に噴火活動が再開(第 5 図)同年 8 月 2 日の噴火確認を最後に休止、さらに、平成 30 年 7 月 12 日に噴火活動が再開し(第 6 図)溶岩流が海に流入して「西之島」がさらに成長したが、7 月 18 日の噴火確認を最後に噴火活動が休止している。現在も噴気活動や海面の変色が継続しており、航空機による定期的な目視観測、熱計測(第 7 図)垂直写真撮影による地形の把握を継続して実施している。

平成 29 年 3 月 14 日に確認した「明神礁」の変色水については、その後に確認した気泡や海面の低温部の出没を繰り返しており、航空機による定期的な目視観測、熱計測を継続して実施している（第 8～9 図）。

平成 30 年 8 月 15 日に火山活動が活発化し、噴火警戒レベルがレベル 2 からレベル 4 に引き上げられた口永良部島については、8 月 29 日に噴火警戒レベルが 3 に引き下げられたものの、現在も噴火を繰り返しており、航空機による目視観測等を継続して実施している（第 10 図）。

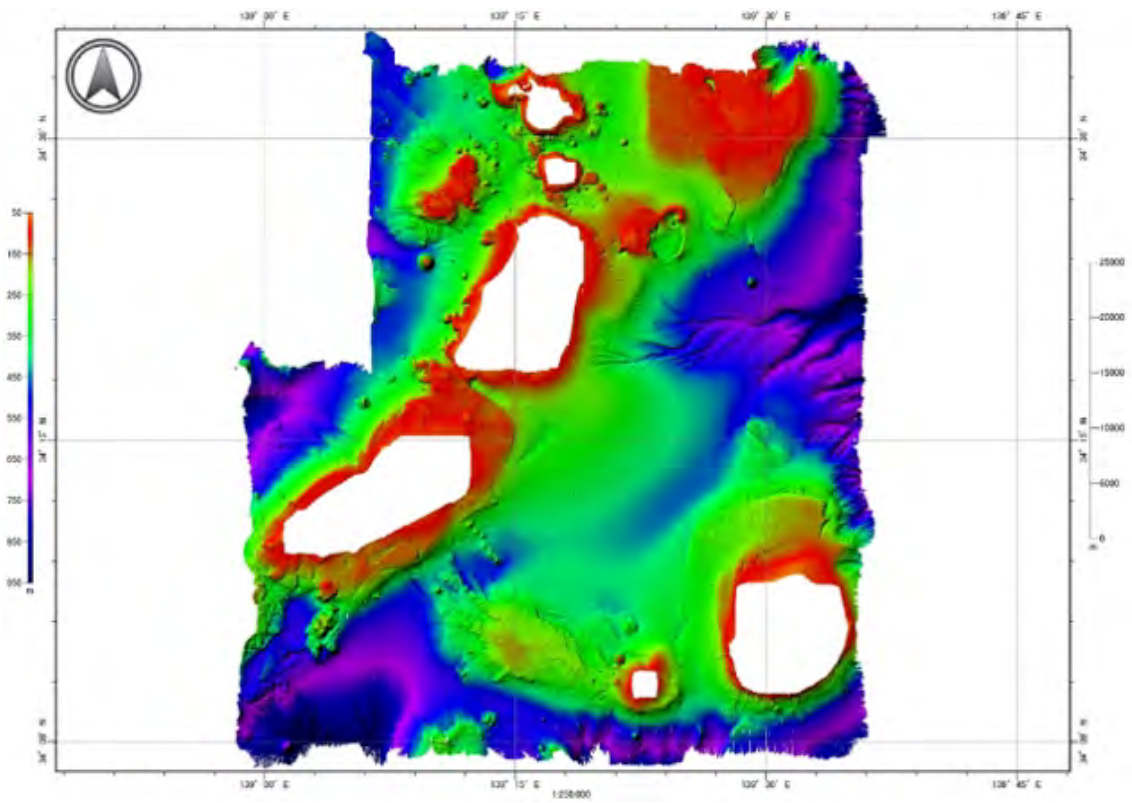
（ 9 ）平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
海上保安庁，2018，海域火山の最近の活動，火山噴火予知連絡会会報，129
海上保安庁，2018，海域火山の最近の活動，火山噴火予知連絡会会報，130

（ 10 ）次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：
海域火山の定期巡回監視及び海域火山基礎情報整備を継続して実施する。海域火山データベースの整備及び公表を継続して行う。

（ 11 ）実施機関の参加者氏名または部署等名：
海上保安庁海洋情報部海洋調査課海洋防災調査室
他機関との共同研究の有無：無

（ 12 ）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：海上保安庁海洋情報部海洋調査課海洋防災調査室
電話：03-3595-3607
e-mail：下記 URL の問い合わせフォームから問い合わせてください。
URL：http://www1.kaiho.mlit.go.jp/

（ 13 ）この研究課題（または観測項目）の連絡担当者
氏名：新村 拓郎
所属：海上保安庁海洋情報部海洋調査課海洋防災調査室



第1図 利島至三宅島海底地形図(暫定版)



第2図「西之島」(平成25年11月20日)
 マグマ水蒸気爆発の特徴であるコックステールジェットを伴う噴火を確認した。



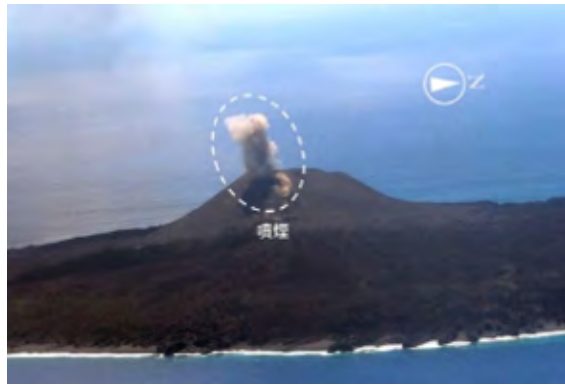
第3図「西之島」(平成25年11月22日)
ストロンボリ式噴火への移行を確認した。



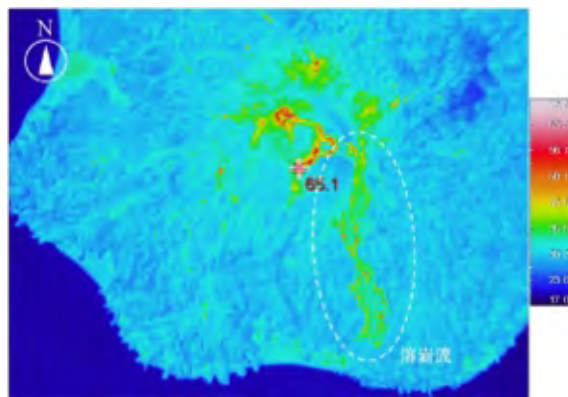
第4図「西之島」(平成27年11月17日)
ブルカノ式噴火を確認した。



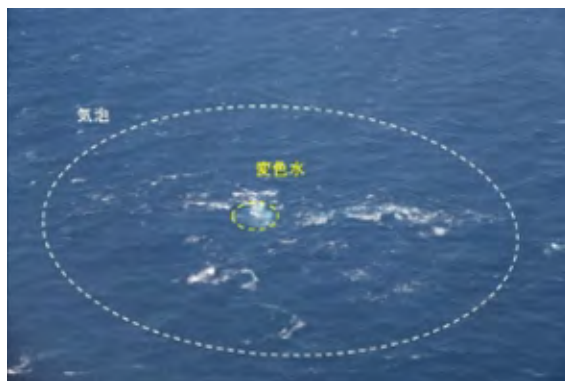
第5図「西之島」(平成29年4月20日)
赤外線画像(噴火と溶岩流)



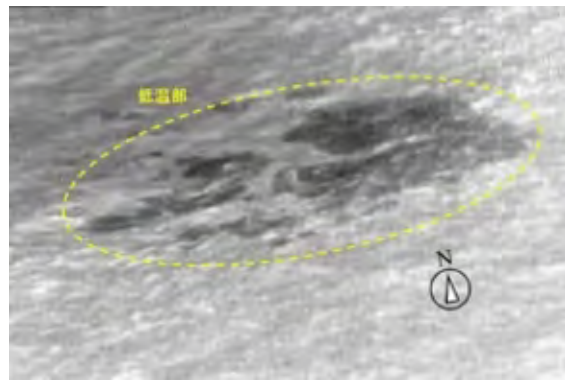
第6図「西之島」(平成30年7月12日)
火砕丘の南東側山腹からの噴煙。



第7図「西之島」(平成30年7月30日)
熱画像(溶岩流の流下状況)



第8図 明神礁(平成29年5月2日)
明神礁の気泡と変色水。



第9図 明神礁(平成29年4月20日)
赤外線画像(海面の低温部)



第10図 口永良部島(平成30年8月16日)
口永良部漁港の変色水域。

(1) 実施機関名：

海上保安庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地殻変動監視観測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

継続的に GNSS 観測による地殻変動の監視観測を実施するとともに、観測データを利用して地震・火山現象に伴う地殻変動を検出する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

伊豆諸島海域において GNSS 連続観測を実施するとともに、DGPS 局のデータを利用して地殻変動を検出する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

伊豆諸島海域において GNSS 連続観測を実施するとともに、DGPS 局のデータを利用して地殻変動を検出する。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

なし

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

なし

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

海上保安庁海洋情報部海洋調査課海洋防災調査室

他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 海上保安庁海洋情報部海洋調査課海洋防災調査室

電話 : 03-3595-3632

e-mail : 下記 URL の問い合わせフォームから問い合わせてください。

URL : <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 山田 裕一

所属 : 海上保安庁海洋情報部海洋調査課海洋防災調査室

(1) 実施機関名：

海上保安庁

(2) 研究課題(または観測項目)名：

験潮

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

潮汐観測の継続実施

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

引き続き、潮汐観測を実施し、全国 20ヶ所の地殻変動監視及び他機関との連携による験潮データのリアルタイム公開を実施する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中(平成 26 年度～30 年度)の成果の概要：

海上保安庁は潮汐観測により平均水面を求め、海岸昇降検知センターへ提出し、日本の地殻変動監視に供している。また、国土交通省水管理・国土保全局及び港湾局、国土地理院、気象庁と連携し、験潮データをリアルタイムでインターネットにより公開した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

なし

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：

全国 20カ所の験潮所において潮汐観測を実施し、国土交通省水管理・国土保全局および港湾局、国土地理院、気象庁と連携し、験潮データをリアルタイムでインターネットにより公開する。

海上保安庁所管験潮所：竜飛、釜石、横浜、横須賀、千葉、三宅島、神津島、八丈島、徳山、広島、呉、大分、博多、佐世保、巖原、粟島、大泊、西之表、中之島、名瀬

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

海上保安庁海洋情報部環境調査課

他機関との共同研究の有無：無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：海上保安庁海洋情報部環境調査課

電話：03-3595-3609

e-mail：下記 URL の問い合わせフォームから問い合わせてください。

URL：http://www1.kaiho.mlit.go.jp/

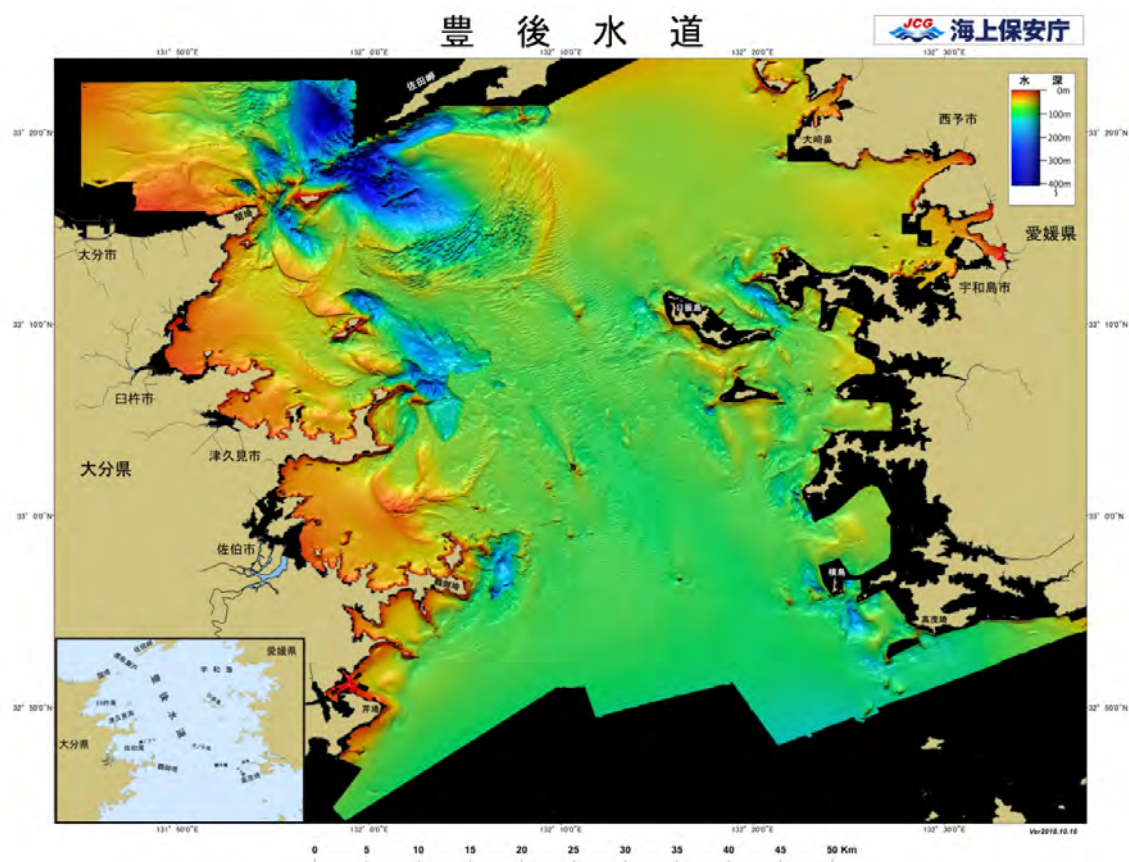
(13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：林王 弘道

所属：海上保安庁海洋情報部環境調査課

- (1) 実施機関名：
海上保安庁
- (2) 研究課題（または観測項目）名：
海域における地形・活断層調査
- (3) 最も関連の深い建議の項目：
4. 研究を推進するための体制の整備
(2) 研究基盤の開発・整備
ア. 観測基盤の整備
- (4) その他関連する建議の項目：
- (5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：
- (6) 本課題の 5 か年の到達目標：
- (7) 本課題の 5 か年計画の概要：
巨大地震の発生が懸念されるプレート境界域等において、海底地形等の調査を実施する
- (8) 平成 30 年度及び計画期間中（平成 26 年度～30 年度）の成果の概要：
我が国の沿岸海域において、海底地形の調査を実施した。
- (9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：
海上保安庁海洋情報部研究成果発表会ポスターセッション「P3 豊後水道におけるマルチビーム測深機
で得られた海底地形」
- (10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要：
なし
- (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：
海上保安庁海洋情報部海洋調査課
他機関との共同研究の有無：無
- (12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：海上保安庁海洋情報部海洋調査課
電話：03-3595-3606
e-mail：下記 URL の問い合わせフォームから問い合わせてください。
URL：http://www1.kaiho.mlit.go.jp/
- (13) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者
氏名：福山 一郎

所属：海上保安庁海洋情報部海洋調査課



マルチビーム測深機で得られた豊後水道の海底地形

(1) 実施機関名：

奈良文化財研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

考古資料および文献資料から見た過去の地震・火山災害に関する情報の収集とデータベースの構築・公開

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

イ. 考古データの収集・集成と分析

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

過去の災害を研究する場合、近代的な記録が整備されている時代のみを対象とするのでは不十分である。歴史的な記録類を参照するとともに、文字資料を補完する役割を果たす考古資料についても、発掘調査の場で災害の痕跡を正しく認識することによって、情報を収集・分析する必要がある。また、これらの情報をデータベース化して公開することで、従来よりも長期にわたる、より正確な地震・火山災害に関する情報を提供することが可能となり、災害痕跡の認識に関するレベルの向上を図るとともに、将来的な防災・減災に寄与することが期待される。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

新規研究

考古学の領域では、特に阪神・淡路大震災を契機として、過去の地震や火山噴火などの災害痕跡に関する問題意識が高まり、各地の発掘調査で多くの考古データが蓄積されつつある。しかし、それらを収集・公開する体制は未整備であり、情報が十分に共有されているとはいえない。そこで、そうした災害に関する考古データを全国的に収集・分析し、文字史料とのすり合わせを含めて、どの時代のいかなる災害によるのかを検討する。そして、情報を時代と地域、災害の原因ごとに整理し、データベースとして公開することによって、過去の災害情報の共有化を図るとともに、将来にわたる防災・減災を講じる指針とする。

平成 26 年度：データベースの項目設計、発掘現場での情報収集、データの収集と分析、文献史料の調査

平成 27 年度：データベースの構築開始、発掘現場での情報収集、データの収集と分析、研究集会の開催

平成 28 年度：歴史時代を中心としたデータベースの公開、発掘現場での情報収集、データの収集と分析

平成 29 年度：データベースの先史時代への拡張、発掘現場での情報収集、データの収集と分析、研究集会の開催

平成 30 年度：拡張版データベースの公開

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

平成 30 年度成果

平成 29 年度に続いて発掘調査報告書から災害痕跡データの抽出を行い、結果、47 都道府県について検討した発掘調査地点数が計 48,352 カ所、確認した災害痕跡件数が 21,803 件に達した。これら災害痕跡のデータについては、検出地点および検出層位の再検討を進め、被災エリアの見える化や災害発生時期の特定を可能な限り試みることににより、特に奈良県において 4 度の巨大地震の被災履歴を捉えることができるようになってきた。地層中からの痕跡データの抽出というデータの特性から史料のような明確な時期決定を伴うことは極めて困難であるが、近現代のかく乱の多い地層についても地理学的なアプローチを丁寧に加えることにより、過去から南海白鳳地震 (684)、五畿・七道地震 (887)、京都・紀伊地震 (938)、宝永地震 (1707)、伊賀・美濃・近江地震 (1819)、伊賀・上野地震 (1854)、安政東海・南海地震 (1854) の地震痕跡の存在か指摘できるようになりつつある。

これらのデータについては入力作業を進めているが、データ量の増加と共に入力項目の整理が前年度に引き続き必要となり、各項目の再定義 (文字情報、画像情報、ID 化情報等) をおこなった。これまでのデータをこの定義づけに従い更新し、上記のデータについてもデータベース化を進めている。

災害痕跡 GIS データベースシステムでは、東大史料編纂の歴史災害史料データベース等と連携して、災害痕跡データベースと相互に検索できるシステム開発を進め、検索システムや情報入力インターフェースの拡充を進めている。

このほか、奈良県や京都府、静岡県、長崎県を始めとした、各地の発掘調査現場において、主に中近世以前に発生したと考えられる災害痕跡について地質考古学的調査と試料採取を行い、それらの整理・分析を実施して結果を報告するとともに、災害痕跡の調査・記録方法に関する研究集会を開催した。本計画期間の成果

日本国土において表層地質情報を最も蓄積していた考古学において、しかしその発掘調査目的は文化財の保護・記録であったために地域災害履歴の蓄積や防災・減災への貢献がほとんどな砂わなかつた背景において、本計画に改めて参画したことが最も大きな成果といえる。本計画以前にも「地震考古学」という名称で特に阪神淡路大震災以降、一時的に情報の蓄積が行われたが、行政執行目的外の背景からその流れは継続はしなかった。今回、地域ごとの有志による小規模データベースではなく、行政区画を超えた形で一括したデータベース作成を進めた意義は大きい。実務的な内容としては、当初計画通り、平成 26 年度にはデータベースの項目設計、発掘現場での情報収集、データの収集と分析、文献史料の調査、平成 27 年度にはデータベースの構築開始、発掘現場での情報収集、データの収集と分析、研究集会の開催と順調に進んだが、災害痕跡の記録、検証についてのノウハウが発掘調査担当者の中に浸透しておらず、調査現場からの情報抽出の困難さが浮きぼりとなった。加えて本計画開始当初で遺跡の総数は全国で 44 万件を超えており、その情報の集成とデータベース化のシステムを検討する必要が出てきた。そこで担当省庁である文化庁を通じた全国地方公共団体との協業について現在も模索中ではあるものの、そのシステム構築に向けた取り組みを進めている。そこで平成 28 年度には歴史時代を中心としたデータベースのプロトタイプ構築を進めるとともに発掘現場での情報収集、データの収集と分析を進めた。さらに平成 29 年度にはデータベースの先史時代への拡張、発掘現場での情報収集、データの収集と分析、研究集会を開催し、本年度となる平成 30 年度には拡張版データベースの公開に向けて取り組んでいる。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

村田泰輔・小池伸彦、2018、考古資料および文献資料から見た過去の地震・火山災害に関する情報の収集とデータベースの構築・公開にかかわる平成 29 年度活動報告。地震・火山噴火予知研究協議会シンポジウム。村田泰輔、2018、「発掘された歴史的地震・火山災害痕跡データベース - 考古学の新たな挑戦」『デジタル技術で魅せる文化財 奈文研と ICT』、159 - 192、クバプロ。村田泰輔、2018、「第 6 章第 6 節 自然科学分析からみた高住牛輪谷遺跡 (2 区) の古環境」『高住牛輪谷遺跡 II』鳥取県教育委員会編、393 - 404。村田泰輔、2018、「第 4 章第 14 節 自然科学分

析からみた大楠遺跡(1 - 2区)の古環境』『大楠遺跡 III』鳥取県教育委員会編、(3)、570 - 602。村田泰輔、2018、「第5章第10節 自然科学分析からみた大楠遺跡の古環境』『大楠遺跡 IV』鳥取県教育委員会編、453 - 456。村田泰輔、2018、「自然科学分析」『平城宮東院地区の調査 第584次・第587次・第593次』独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所編『紀要2018』、178 - 181。村田泰輔、2018、「地質学的検討」『平城京左京一条二坊十坪の調査 第582次・第583次』独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所編『紀要2018』、216 - 217。小池伸彦、2018、「平城第552次調査検出の地震痕跡について』独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所編『紀要2018』、60 - 61。

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要：

本研究課題は、次期計画において主に以下の6点の課題を中心に取り組み、データベースの拡充を進める。1) 考古発掘調査から地震、火山噴火現象を示す痕跡を明確に識別する方法の開発と、それらの発生時期特定に関わる調査・記録法の普及・啓発、2) 過去の低頻度巨大地震の発生時期の検証と被災分布や具体的な被災像の追跡、3) 海溝型地震と内陸型地震発生の関係、4) 史料による近世地震・火山噴火記録と発掘調査から検証される災害・被災実像の対比から、先史・古代・中世の地震・火山噴火像についてより具体的な現象像の解明、5) 日本全国の百年から千年単位のスケールでの地震・火山噴火発生像の追跡、さらにこれまで地方公共団体が進めてきた6) 埋蔵文化財情報についての地域発信(発掘調査現地説明会、学校教育授業への情報提供、出前講演など)を通し災害履歴情報の共有化を進め、災害知識の定着化を目指す。

この課題について平成31年度には、課題1)および2)を中心に情報の集成およびデータベース化を進め、約1万件程度の災害痕跡情報の蓄積を進める計画である。また課題3)についても積極的に進め、検索方法や検索結果表示の改善に取り組んでいく。

加えて、課題6)については継続的に進める必要があり、年度単位ではなく次期5カ年の間に関係省庁や地方公共団体、大学等との協業ネットワークの構築を進めたい。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

津田保行・森本晋・小池伸彦・渡辺晃宏・金田明大・山崎健・脇谷草一郎・星野安治・高田祐一・村田泰輔(奈良文化財研究所)

他機関との共同研究の有無：無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：研究支援推進部総務課

電話：0742-30-6733

e-mail：webstaff@nabunken.go.jp

URL：http://www.nabunken.go.jp/

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：村田泰輔

所属：奈良文化財研究所 埋蔵文化財センター 遺跡・調査技術研究室

(1) 実施機関名：

北海道立総合研究機構地質研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

日本海沿岸域における過去最大級津波の復元

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料，考古データ，地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

1 . 津波堆積物や古文書記録から 1741 年渡島大島の山体崩壊による津波の浸水域を明らかにするとともに、数値シミュレーションにより浸水域を復元できる山体崩壊の崩壊速度や崩壊体積などを明らかにする。

2 . 津波堆積物調査の結果明らかになった 13 世紀頃の津波について、波源域の推定を進め地震の規模や浸水域の推定を行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

本課題は、日本海沿岸域における地震及び火山噴火に伴う低頻度大規模な津波イベントについて地質データを収集するとともに、津波シミュレーションと相互補完的に検証作業を行って確度の高い波源モデル・数値モデル構築や、浸水域の確定を行う。

平成 27 年度は、1741 年渡島大島山体崩壊による津波シミュレーションの高度化、津波堆積物による検証と数値モデルの最適化を行う。

平成 28 年度は、13 世紀頃の津波の波源域の推定、津波シミュレーションと津波堆積物による波源モデルの構築を行う。

平成 29 年度は、檜山沿岸の広域にわたる津波浸水実績のとりまとめ、GIS 化を行う。

平成 30 年度は、講演会等により成果の普及をはかる。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

(8)

本年度は研究成果の普及をはかるため、以下の講演等を実施した。

「地質研究所による津波堆積物調査と 3.11 後の日本海における津波想定」

日本応用地質学会北海道支部特別報告 (4/25 北海道大学学術交流会館)

「北海道日本海沿岸における 3.11 後の津波想定」

北海道立総合研究機構地質研究所成果発表会 (5/18 かでる 2・7)

「日本海沿岸における津波堆積物研究」(招待講演)

地球惑星科学連合同大会 2018 (5/22 幕張メッセ国際会議場)

「過去の北海道南西沖津波と新たな浸水想定 復元された 1741 年と 13 世紀頃の大津波をふまえて」

北海道立総合研究機構 道総研地域セミナー in 渡島・檜山 (1/16-17 渡島総合振興局・檜山振興局)

本研究課題は平成 27 年度から平成 29 年度の 3 年間にわたり実施したもので、複数地点で津波堆積物を確認した 1741 年渡島大島の津波、および 13 世紀頃の北海道南西沖地震による津波の浸水域を、津波浸水シミュレーションおよび検証的な津波堆積物調査により解明した。

1741 年の津波では、崩壊前の渡島大島の山体復元および崩壊土量の見積もりを踏まえ、土塊と水塊を考慮した二層流モデルを用いて津波の再現計算を行った (Ioki et al., in press)。また 13 世紀頃の津波については、国の F17 断層モデルをベースとしてパラメータスタディを行い、浸水規模が津波堆積物の分布と最も合うモデルを決定した (Ioki et al., in prep.)

浸水域の復元に際しては、旧版地形図を用いて陸域の地形をできる限り津波発生時の地形に近づけるよう DEM を修正した。

1741 年の津波の浸水計算結果は、多く残る歴史記録により検証を行い、十分な精度で復元されていることを確認した。

計算された浸水深は、浸水実績図として地質研究所のウェブサイトから公開中である。

以上の通り、本研究課題は当初の目的を十分に達した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Ioki, K., Tanioka, Y., Yanagisawa, H., and Kawakami, G. (in press) Numerical simulation of the landslide and tsunami due to the 1741 Oshima-Oshima eruption in Hokkaido, Japan. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

平成 29 年度から、北海道立総合研究機構では重点研究「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」を実施している。この課題では、北海道における津波による死傷リスクを低減するため、積雪寒冷や暗夜条件下での最大リスクの評価手法、ならびに地域社会構造の経年変化を考慮した津波防災対策効果の評価手法を開発することにある。また津波防災対策の実施を支援するために対策案の効果を定量的に評価する手法を開発し、モデルとなる市町村で津波避難計画や津波防災地域づくり計画に参画して実証的な展開をはかる。現在、厚岸町・八雲町・神恵内村の 3 町村と共同で研究を進めている。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

地質研究所 地域地質部 地質防災グループ、資源環境部 沿岸地質グループ

他機関との共同研究の有無 : 有

北海道大学大学院理学研究院 谷岡勇市郎

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：北海道立総合研究機構 地質研究所

電話：011-747-2420（代表）

e-mail：

URL：<http://www.hro.or.jp/list/environmental/research/gsh//index.html>

（13）この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：川上源太郎

所属：地域地質部 地質防災グループ

(1) 実施機関名：

北海道立総合研究機構地質研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

地球科学的総合調査による火山のモニタリングと熱水系のモデル化

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 火山現象のモデル化

イ. 熱水系の卓越する火山

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

5 火山における地球物理学的・地球化学的モニタリングにより、地殻変動や温泉水・火山ガスの成分変化などの噴火の先行現象やそれに続く火山現象を捉える。

現在、火口域の膨張や、火山性地震の増加、温泉成分の変化といった現象が観測されている十勝岳では、それらの現象のメカニズムを明らかにするため、地球物理的・地球化学的・地質学的調査による多項目観測に基づき、火山体内部構造と熱水流動系のモデル化を行う。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

5 火山においては、噴火の先行現象などの火山活動の変化を捉えるため、継続的に地殻変動や、地温、温泉水・火山ガスの成分・同位体比等の各種モニタリングを行う。

十勝岳では山体の膨張や、火山性地震の増加、温泉成分の変化などが観測されているが、これらのメカニズムが明らかになっていないため、火山活動の現状を評価することが難しかった。そこで、十勝岳における火山災害の防災・減災に向けて火山活動の現状を評価するために、以下の調査を行う。

平成 27～28 年度は、火口域において MT 探査を行い、火口域地下浅部の比抵抗構造を明らかにする。また、重力観測や火山ガス観測、過去の堆積物に対する熱水変質調査を行い、火口域での熱水系について検討する。これらを合わせて火口域における火山体内部構造のモデル化を行う。また、山腹の温泉湧出域では、温泉水の成分や同位体比の観測や、山腹域での MT 探査を行い、十勝岳周辺の熱水流動系についてモデル化を行う。

平成 29 年度は、継続的に行うモニタリングを基に、火山体内部構造と熱水流動系のモデルの検証を行う。

平成 30 年度は、モニタリングに基づいてモデルの検証を行うとともに、そのモデルに基づいて火口域地下浅部を膨張源とする地殻変動のメカニズムや、温泉成分の変化のメカニズムを明らかにする。

これらの観測データや結果については、気象台や大学と共有するとともに、地元自治体等にも情報提供をおこなう。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

当初の計画の通り、北海道内の 5 火山 (雌阿寒岳、十勝岳、樽前山、有珠山、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て行い、火山活動の変化を捉えるためのデータの蓄積を行った。また、十勝岳に関しては、平成 26 ~ 28 年度に集中的に行った各種調査の結果の解析を続けるとともに、山体を横断する測線での MT 探査の探査点を 4 点追加し、よりの確な火山体内部構造の検討を行った。継続的にモニタリングデータを蓄積し、平成 28 年度に構築した内部構造や熱水流動系のモデルに基づいて、温泉水の化学成分の変化のメカニズムについて検討した。これらの調査・観測の一部は北海道大学や札幌管区気象台と協力して行っており、情報の共有も随時行っている。

5 火山での地球物理学的・地球化学的モニタリング

(1) 雌阿寒岳

GPS 連続観測と火口域での地温連続観測、噴気および温泉水の地球化学的観測、地下水位連続観測を行った。雌阿寒岳西麓の湯の滝などでは温泉水の Cl や SO₄ 濃度がここ数年、増加しており、2018 年もその傾向が続いている。一方、温泉水の酸素・水素同位体比には大きな変化はなかった。また、中マチネシリ火口の噴気の化学成分や凝縮水の酸素・水素同位体比には大きな変化はなかった。GPS 観測では、2016 年 11 月頃から始まった雌阿寒岳北東麓の膨張現象による変化が観測されたが、2017 年 中旬以降は変動が停滞しており、2018 年もその傾向が続いた。

(2) 十勝岳

GPS 連続観測と火口域での地温連続観測、噴気および温泉水の地球化学的観測、地下水位連続観測を行った。GPS 観測では、2006 年以降、火口域の膨張を示す変動を継続的に捉えていたが、2018 年の春頃からは収縮を示す変動へと変化した。吹上温泉地区の温泉では、1988-89 年噴火前と同様の Cl/SO₄ 比の上昇が 2012 年に入り認められるようになったが、2013 年 4 月以降は横ばい~やや低下に変わった。2018 年は Cl/SO₄ 比がやや低下する傾向で推移した。大正火口の噴気の温度や化学成分、凝縮水の酸素・水素同位体比には大きな変化はなかった。2015 年以降、活動の活発化が認められる振子沢噴気孔群で噴気観測を行ったところ、噴気域の拡大が確認され、高温状態も続いている。また、その噴気凝縮水の酸素・水素同位体比は 2017 年と同様に島弧のマグマ水と類似した値を示した。

(3) 樽前山

火口域での地温連続観測と、噴気および温泉水の地球化学的観測を行った。A 火口と B 噴気孔群の噴気温度はそれぞれ約 510 および約 370 で、高い状態が続いている。A 火口と B 噴気孔群の噴気は 2008 年以降、硫黄化合物の濃度が低下し、2012 年頃からは横ばい傾向となった。2018 年もその傾向に変化はなかった。A 火口の噴気凝縮水の酸素・水素同位体比は、観測を開始した 2012 年以降、徐々に重くなる傾向がある。山麓の温泉水の化学成分は 1998 年の観測開始以降、濃度の低下傾向が続いていたが、2011 年頃からは横ばいとなり、2018 年もその傾向が続いた。

(4) 有珠山

山頂・山麓での重力観測、噴気観測、および地下水位連続観測を行った。山頂の溶岩ドームでは、山体の収縮に伴う重力値の増加が観測されているが、徐々に横ばい傾向になってきている。一方、外輪

山では、2014年以降、重力値はほぼ横ばいで推移しており、2018年もその傾向が続いた。山麓の重力値には変化はなかった。山頂I火口の噴気温度は約400℃でこれまでと大きな変化はなく、噴気凝縮水の酸素・水素同位体比にも明らかな変化はなかった。

(5) 北海道駒ヶ岳

火口域での地温連続観測、山麓域での温泉水の地球化学的観測と地下水位連続観測を行った。山麓の温泉水の温度や化学成分に大きな変化はなかった。また、山麓での地下水位連続観測の結果には大きな変化が認められなかった。

十勝岳での火山体内部構造と熱水流動系のモデルに基づく温泉成分変化のメカニズム

平成28年度に構築した火山体内部構造と熱水流動系のモデルに基づいて、十勝岳周辺の温泉水の化学成分の変化のメカニズムについて検討した。吹上温泉地域には火山活動の活発化に伴って高温・高NaCl濃度の熱水(高NaCl熱水)が供給され、温泉水の温度や成分を変化させていることが明らかとなった。2010年頃からのこの地域の温泉水のCl濃度の変動は地震活動とやや相関が認められ、地震が多い時期にはCl濃度が上昇する。このことから、高NaCl熱水の浅部への上昇が一部の地震活動を引き起こしている可能性がある。

一方、高NaCl熱水の供給が認められない十勝岳温泉地域では、温泉水のCl濃度と62-2火口の噴気高度に良い相関があることが分かった。化学組成の特徴から、十勝岳温泉地域の温泉水は火山ガスが溶け込んで形成されたと考えられることから、マグマからの火山ガスの供給量が増えると温泉水のCl濃度が増加すると考えられる。そのため、相対的にマグマからの火山ガスの供給量の変化を示す噴気高度と相関がでると考えられる。したがって、十勝岳温泉地域での温泉観測によって、定性的ではあるがマグマからの火山ガス供給量の変化を把握できると考えられる。

以上のように、十勝岳周辺の温泉水には火山活動の変化に関連した変化が良く表れることが分かった。したがって、今後も継続的な観測が重要である。

計画期間中(平成26~30年度)の成果の概要

雌阿寒岳、十勝岳、樽前山、有珠山および北海道駒ヶ岳において、計画期間中に地殻変動や、地温、温泉水・噴気の化学成分・同位体比等の各種モニタリングを継続的に行った。いずれの火山においても、この期間中に明らかな火山活動の活発化を示すような変化は認められなかった。モニタリングデータについては、気象台や大学と共有し、各火山の監視に活用された。

近年、山体膨張や地震の増加、温泉成分の変化などが観測されている十勝岳については、北海道大学や札幌管区気象台と共同で平成26~28年度に多項目の調査・観測を集中的に行った。その調査・観測の結果に基づいて、火山帯内部構造や熱水流動系のモデルを構築した。その研究成果は、北海道地質研究所調査研究報告第44号としてまとめ、地質研究所のウェブサイトで公開している(http://www.hro.or.jp/list/environmental/research/gsh/publication/report/gsh_special_report_44.pdf)。

(9) 平成30年度の成果に関連の深いもので、平成30年度に公表された主な成果物(論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成31年度実施計画の概要 :

雌阿寒岳、十勝岳、樽前山、倶多楽、有珠山及び北海道駒ヶ岳において、地殻変動や、地温、温泉水・噴気の化学成分・同位体比等の各種モニタリングを行う。十勝岳や倶多楽など熱水系の発達している火山については、これまで蓄積したモニタリングデータの再検討を行うとともに、熱水変質調査や電磁探査など多項目の調査・観測を加えて、熱水系の構造などを検討する。それらを基に、観測されている地殻変動や地震活動のメカニズムを総合的に検討する。得られたモニタリングデータなどは気象庁や大学と共有するとともに、地元自治体等へ情報を提供する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

地質研究所 地域地質部 地質防災グループ

他機関との共同研究の有無 : 有

北海道大学大学院理学研究院 : 橋本武志ほか 4 名

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 北海道立総合研究機構 地質研究所

電話 : 011-747-2420

e-mail :

URL : <http://www.hro.or.jp/list/environmental/research/gsh/index.html>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 高橋 良

所属 : 地域地質部 地質防災グループ

(1) 実施機関名：

山梨県富士山科学研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

富士山における地下水観測

(3) 最も関連の深い建議の項目：

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

平成 14 年度～18 年度にかけて行った「富士山の火山活動に関する研究」や平成 26 年度から始まった山梨県重点化研究課題「富士山火山防災のための火山学的研究」で、火山噴火予知の研究等に寄与する基礎データを得ることを目的にし、地下水位・水温等の観測点を設け充実化を図っており、観測を行っている。いくつかの火山地帯の地下水位・地下水温および水質の観測の変化が火山活動に関連していることが明らかにされつつあり、噴火の前兆現象および噴火後の推移を予測する上で重要な観測項目とされている。しかし、現在のところ富士山北麓において火山活動との関連で地下水の観測点は限られており、北西麓はカバーできていない。したがって、新規の観測点の増設や既存の温泉井などの活用ができるように、地下水観測体制の強化整備等を図っていく。また、星山期堆積物中の地下水挙動の把握のための研究を同時並行に進め、星山期堆積物や深部地下水の地下水循環系を明らかにする。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

山梨県富士山科学研究所 研究・企画費

噴火タイプや推移に影響を与える可能性のある富士山の地下水体の実情を把握するために星山期堆積物や深部地下水中の地下水挙動、水循環系の把握を行う。また、地下深部へ降水等がどのような浸透過程(浸透ライン)を明らかにする。

平成 27 年度においては、浸透ライン研究として、富士山頂および複数標高の降水試料を収集し、それらについて水素・酸素・塩素の安定同位体比を分析する。また、地下水体の研究として、水理地質踏査と既存ボーリングなどの地下地質資料収集を実施する。

平成 28 年度においては、浸透ライン研究として、富士山北東麓エリアを中心とした複数標高の地下水試料を収集し、それらについて被圧地下水研究の湧水試料と同項目の同位体比分析と水質分析を実施する。地下水体研究として富士山北麓に分布する温泉水の分析を行い、深部地下水の実情を把握する。

平成 29 年度においては、前年度までの研究での不足分について、地下水体の分布等の実態把握や浸透ラインを明らかにするための地下水観測体制の強化を図る。引き続き、浸透ラインおよび地下水体の把握の研究を実施する。

平成 30 年度においては、上記の研究における不足データの補充を実施し、地下水浸透ラインの推測を行う。その結果を用いて被圧地下水の浸透標高を推定し、水理地質構造を加味して、深部地下水も含めて地下水循環系を検討する。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

平成 30 年度ではこれまでの研究における不足データの補充を実施し、地下水涵養・浸透ラインの推測を行った。

降水と地下水・湧水の水同位体比測定を行い、不圧・被圧地下水の浸透標高を推定した。また、地質データや新たな放射性炭素同位体年代から水理地質構造の再検討を行った結果、この中で北麓の忍野観測点・富士吉田観測点については、火山噴出物の年代を知るために、新たに放射性炭素年代測定を行った。その結果、最下層の溶岩流下位の火山噴出物の 14 C 年代値は約 1.8 万年から 2 万年前を示すことから、被圧地下水流動系は星山期堆積物中に存在することが判明した

平成 27 年度から平成 30 年度までの研究成果の概要は次の通りである。

・地下水涵養・浸透ライン研究においては、富士山頂および複数標高の降水試料を収集し、それらについて水素・酸素の安定同位体比の分析を複数年行った。また、主要イオン・微量元素等の水質分析を行い、あわせた結果から地下水涵養・浸透ラインの推測が可能となった。

・星山期堆積物や深部地下水の地下水流動系を明らかにするために、水理地質踏査と既存ボーリングなどの地下地質資料の再検討、解析を行った。

観測井で観測している地下水位は星山期火山噴出物・堆積物中にあることが判明した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

これまで整備を進めてきた地下水観測に加えて、新たに重力観測を実施する。火山の状態を知るための地下水観測データは、特にその水位データを重力観測の重要な補正用参照データとして活用できるので、それらを合わせて今後も整備を進めていく。具体的には研究所内に重力基準点を整備したので、重力連続観測を開始する。また、敷地内の井戸について水位観測データが得られるように整備をするとともに、雨量観測を実施する。当面はそうした陸水観測データと重力データを蓄積しつつ、富士山北麓の水理地質構造の理解を進める。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

山梨県富士山科学研究所 火山防災研究部
内山高、吉本充宏、山本真也、本多亮、馬場章
他機関との共同研究の有無 : 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 山梨県富士山科学研究所 火山防災研究部
電話 : 0555-72-6211 (代表)
e-mail : vulcano@mfri.pref.yamanashi.jp
URL : <http://www.mfri.pref.yamanashi.jp/>

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名 : 内山 高
所属 : 山梨県富士山科学研究所 火山防災研究部

(1) 実施機関名：

山梨県富士山科学研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

富士山の噴火事象系統樹の高精度化のための基礎研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料，考古データ，地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

富士山における噴火事象系統樹を作成させるために既存データの集約と新たな地質情報をもとに噴火履歴の高精度化をおこない、その結果をもとに噴火事象系統樹を試作する。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

山梨県富士山科学研究所 研究・企画費

重点化研究 「富士山火山防災のための火山学的研究～噴火履歴とそのシミュレーション～」

富士山研究 「富士山の火山噴出物に関するデータベースの構築」

基盤研究 「富士山の古地磁気を用いた溶岩噴出年代の決定」

噴火事象系統樹を高精度に作成するためには、詳細な噴火履歴と噴火推移が明らかになっている必要がある。富士山では近年、産業技術総合研究所による火山地質図の改訂が行われたが、未解明な点も多い。最近 3200 年間に 100 あまりの噴出物が確認されているが、噴火年代が確定しているものは約 3 割で、噴火推移が明らかになっている噴火は 1 割程度である。本研究では、まず既存研究のデータを集約し、データベースを構築する。その中で年代未詳の噴出物については放射性炭素年代測定を行い、噴火履歴の高精度化を図る。一方、放射性炭素年代測定用の試料の得られない噴出物(溶岩)については、古地磁気学的手法を用いて年代決定を行う。さらに地質調査をもとに個々の噴火の噴火推移を検証する。これらのデータを元に噴火事象系統樹を作成する。

平成 27 年度においては、富士山における既存のデータを集約し、データベースを構築する。その中で年代未詳の噴出物について地質調査を行い、放射性炭素年代測定を行う。一方古地磁気学的手法を

用いた年代測定には、年代既知の溶岩の古地磁気方位のデータベースが重要となる。古地磁気方位のデータベースのための測定を行う。

平成 28 年度においては、平成 27 年度に引き続きデータの集約および年代測定を行い、溶岩の古地磁気測定を行う。また、噴火推移の明らかに成っていない噴火の噴火推移を明らかにするための地質調査を実施する。

平成 29 年度においては、年代未知の溶岩の古地磁気測定を行い、年代を決定する。噴火推移を明らかにするための地質調査を継続する。

平成 30 年度においては、上記で収集したデータを元に噴火事象系統樹の試作を行う。

(8) 平成 30 年度及び計画期間中 (平成 26 年度 ~ 30 年度) の成果の概要 :

富士山の噴火災害予測対策を考えるうえで噴火の頻度や噴火推移の想定することが重要となる。その噴火推移を検討するためには、詳細に解明された噴火履歴を元にした噴火事象系統樹が不可欠である。また、富士山ではハザードマップの改訂作業を実施しており、火口の分布や堆積物の到達範囲などの情報が重要となっている。本課題では、噴火履歴の精緻化を目的に野外調査やトレンチ調査を実施した。

平成 30 年度は、北麓における降下火砕物及び火砕流の分布を明らかにするため、富士北麓の自衛隊演習場内の地質調査及び山中湖西岸 (H29 地点 3) 富士吉田市街南 (H30 地点 2) でのトレンチ調査を実施した (図 1) 。特に火砕流については、富士吉田市街地東北地域に位置する上中丸遺跡 (図 1 地点 N) で報告されている火砕流または火砕サージに類似する岩相を示す堆積物 (8a 層 : 公益財団法人山梨文化財研究所, 2012 『上中丸遺跡 (第 2 次)』富士吉田市文化財調査報告書) が火砕流堆積物が二次的に流動して当地に堆積した堆積物かということが、ハザードマップの改訂に大きく影響を与えるため、北東麓の火砕流堆積物を念頭に調査を実施した。

山中湖西岸 (H29 地点 3) では、鷹丸尾溶岩流 (Sd-Tam : 高田ほか, 2016) の下位に 11 層のテフラ層を確認し、そのうち最下位は忍野スコリア (Osi) その下位から 3 層準目に大室スコリア (Os) を確認した。同地点で合計 5 層準の放射性炭素年代測定を実施し、いずれの値も層序と整合的であった。富士吉田市街南 (H30 地点 2) では鷹丸尾溶岩流 (Sd-Tam) の下位に 2 層のテフラ層と火山岩の角礫からなる砂礫層、および未区分の溶岩流 1 層を確認した。一方で、本トレンチでは火砕流堆積物は確認できなかった。また、砂礫層は、火砕流等の火砕物が上流部に堆積し土石流化したものか、雪代による堆積物であると考えられる。また、他の富士北麓の地質調査の結果、H30 地点 2 の富士山側の調査においても火砕流堆積物は確認できなかった。これらを総合的に判断すると上中丸遺跡で指摘された火砕流に類似した岩相を示す堆積物は、富士山麓に堆積した火砕流堆積物や降下火砕物などが二次的に流動した堆積物と考えられる。

全期間を通して本課題では富士山における既存のデータを集約し、噴出物データベースを構築した。また、地質調査およびトレンチ調査を実施し、雁ノ穴溶岩の火口範囲の解明や忍野スコリアの給源の解明、火砕流堆積物の分布解明を行った。年代未詳の溶岩については、古地磁気学的手法を用いた年代測定にむけ、古地磁気方位データの収集をおこない、既存の古地磁気方位データベースとの照合を実施した。収集したデータを元に噴火事象系統樹を試作した。

(9) 平成 30 年度の成果に関連の深いもので、平成 30 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

(10) 次期計画における平成 31 年度実施計画の概要 :

次期計画では、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、の中で、富士山を対象としてトレンチ調査を含む地質調査等を実施し、噴火年代、噴火推移、噴出量等の詳細な噴火データを収集する。それらの結果を基に噴火履歴の解明を進めることで、噴火事象系統樹の精緻化に取り組む。

平成 31 年度は、噴火履歴を精緻化するために主に富士山東麓の地質調査を実施し、さらに東麓に分布する指標テフラの定量的な識別手法の検討をおこなう。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：
山梨県富士山科学研究所 火山防災研究部
吉本充宏、馬場章、西澤文勝、山本真也、内山高
他機関との共同研究の有無：有
東京大学地震研究所 中田節也 教授
東京大学地震研究所 安田敦 准教授

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先
部署等名：山梨県富士山科学研究所 火山防災研究部
電話：0555-72-6211 (代表)
e-mail：vulcano@mfri.pref.yamanashi.jp
URL：http://www.mfri.pref.yamanashi.jp/

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者
氏名：吉本 充宏
所属：山梨県富士山科学研究所 火山防災研究部

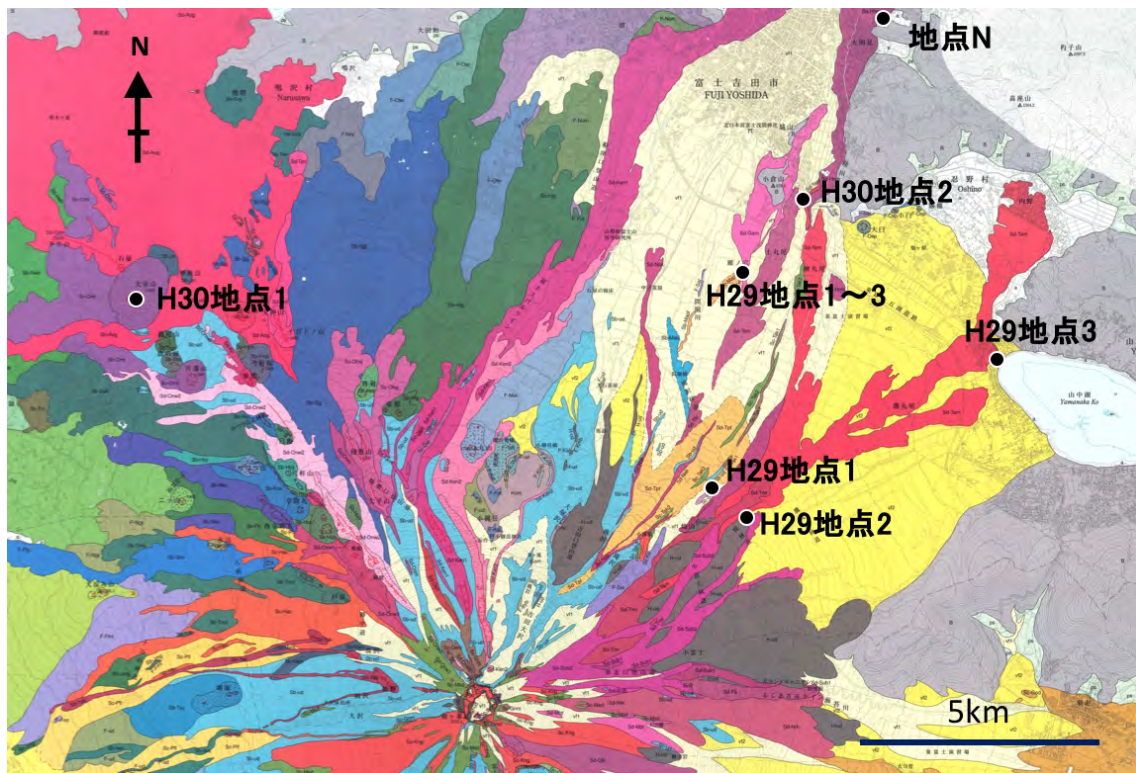


図1 トレンチ調査の位置図