

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」

令和元年度年次報告

【成果の概要】

令和元年9月

科学技術・学術審議会測地学分科会

地震火山観測研究計画部会

目 次

【令和元年度の成果の概要】

1. はじめに.....	1
2. 山形県沖の地震に関する研究成果.....	6
3. 令和元年度の成果の概要.....	9
3-1. 地震・火山現象の解明のための研究.....	9
3-2. 地震・火山噴火の予測のための研究.....	19
3-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究.....	27
3-4. 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究.....	33
3-5. 研究を推進するための体制の整備.....	37
4. まとめ.....	43
用語解説.....	45
災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次） 実施機関.....	67
災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次） 令和元年度研究課題一覧.....	68

【参考資料】

計画推進部会および総合研究グループ等別の成果.....	75
1（1）地震（現象解明）.....	77
1（2）地震（長期予測）.....	118
1（3）地震（中短期予測）.....	128
1（4）火山.....	174
1（5）災害誘因評価・即時予測.....	189
1（6）防災リテラシー.....	218
1（7）史料・考古.....	230
1（8）観測研究基盤.....	239
2（1）南海トラフ沿いの巨大地震.....	247
2（2）首都直下地震.....	249
2（3）千島海溝沿いの巨大地震.....	251
2（4）桜島大規模火山噴火.....	256
2（5）高リスク小規模火山噴火.....	266
3 拠点間連携共同研究.....	269

[令和元年度の成果の概要]

1. はじめに

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」（以下、「本研究計画」という。）は、科学技術・学術審議会において平成31年に建議され、平成31年度（令和元年度）から5か年計画として実施されている。本研究計画は、平成26年度から5年間実施された第1次計画の方針を踏襲して、地震発生・火山噴火現象の根本的理解、発生予測、災害誘因*予測、災害情報の活用に関する研究を実施する。加えて、防災対策の推進について、国民や社会の共通理解の醸成を効果的に図るための手法開発に関する研究を新たに開始する。本研究計画では、災害の軽減に貢献することを意識した研究を推進するという視点をより明確にし、関連研究分野との一層の連携強化や観測研究の成果を活用して災害軽減に役立てる方策の研究等を進めている。

本研究計画は以下の5つの大項目で構成される。

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

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

- (1) 地震・火山現象に関する史料、考古データ、地質データ等の収集と解析
- (2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明
- (3) 地震発生過程の解明とモデル化
- (4) 火山現象の解明とモデル化
- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

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

- (1) 地震発生の新たな長期予測
- (2) 地殻活動*モニタリングに基づく地震発生予測
- (3) 先行現象*に基づく地震発生の確率予測
- (4) 中長期的な火山活動の評価
- (5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

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

- (1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
- (2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
- (3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

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

- (1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明
- (2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

5は、計画全体を組織的に推進する体制の整備や、基礎的な観測体制の強化を図るものであり、本研究計画全体の研究基盤の開発・整備が含まれ、次の中項目に分けられている。

- (1) 推進体制の整備
- (2) 分野横断で取り組む総合研究を推進する体制
- (3) 研究基盤の開発・整備
- (4) 関連研究分野との連携の強化
- (5) 国際共同研究・国際協力
- (6) 社会との共通理解の醸成と災害教育
- (7) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

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

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

令和元年度の本研究計画は、国立大学法人等、国立研究開発法人、独立行政法人、政府機関、公設試験研究機関¹が策定した170の実施計画（個別課題）及び公募による12の実施計画（個別課題）、拠点間連携共同研究²としての22の実施計画（個別課題）からなっている。また、この個別課題の成果は、年次報告【機関別】（文部科学省及び地震・火山噴火予知研究協議会³のホームページに掲載）に取りまとめられている。これらの個別課題による研究成果をもとに、本研究計画の項目別に令和元年度の成果を取りまとめたものが本報告書である。

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

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

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

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

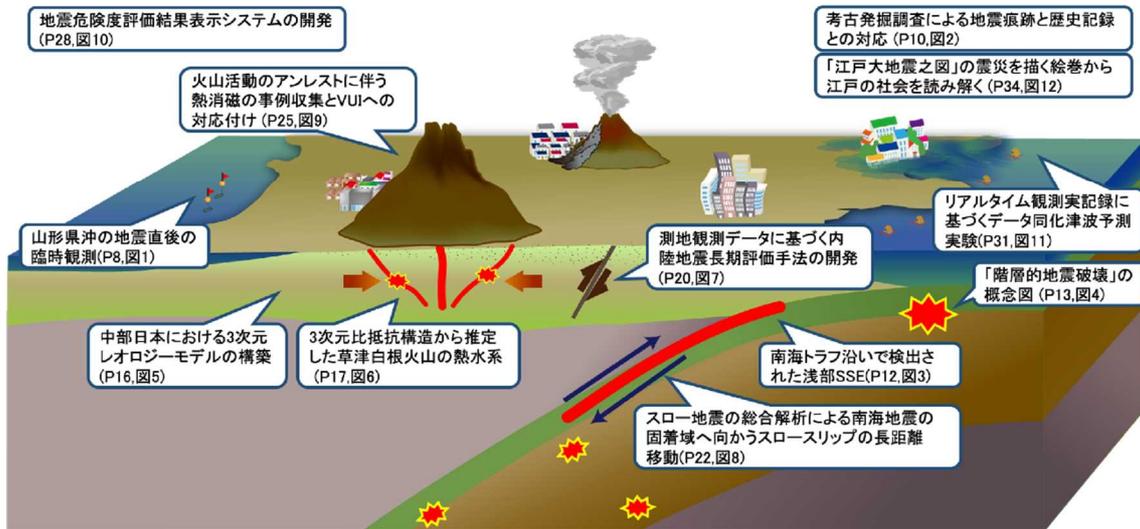
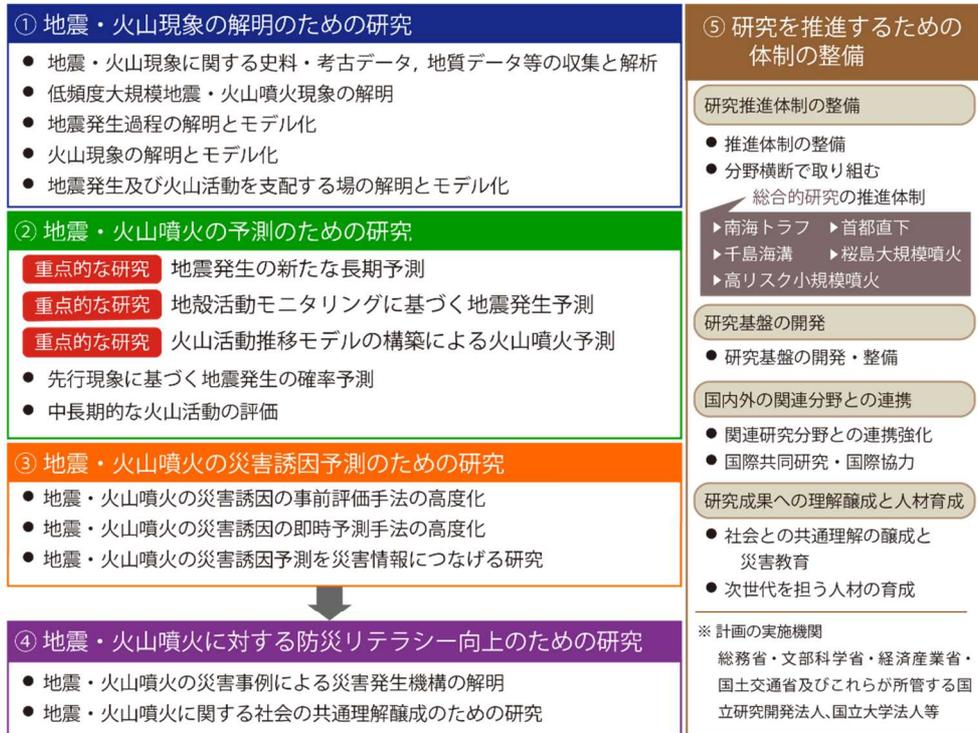
³ 東京大学地震研究所には、本研究計画で立案された研究を推進する目的で地震・火山噴火予知研究協議会^{*}が設置されている。

⁴ 用語解説に掲載している用語に、下線（破線）と*を付記している。

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

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

災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究



成果の概要概念図

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

2. 山形県沖の地震に関する研究成果

2019年6月18日22時22分頃、山形県酒田市沖の深さ約14kmを震源とするMjma6.7の地震が発生した。この地震により、新潟県村上市で震度6強を観測し、山形県、新潟県、石川県に津波注意報が出され、被害が発生した。発震機構*は西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層*型で、いわゆる内陸地震*と考えられる。日本海東縁部にはひずみ*集中帯と呼ばれる活構造が存在しており、今回の地震はこの構造の一部が関係していると推定される。本地震について、定常地震観測網を用いて推定した地震発生直後の余震*分布からは、余震域が時間とともに広がることが確認された。このような余震域の拡大は、本地震の発生過程における流体の影響を示唆する（現象解明部会今年度報告参照）。

今回の地震の震源域は、陸域既設地震観測網の近傍の海域にある。海域の震源に対し、精密な余震分布を求めるためには、震源域直上における海底地震計による観測が必要不可欠である。そこで、今回の地震活動とその地震発生場の特徴を正確に把握するために、震源域直上において、海底地震計を用いた臨時観測及び震源域近傍の海岸線付近において臨時テレメータ観測を実施することとした（図1左）。観測の実施にあたっては、地元漁業団体にご協力頂いた。

通常海底観測に用いられる自由落下自己浮上式海底地震計は、直径50cm程度の球型耐圧容器に観測機材を封入しており、観測船から自由落下により海底に設置される。今回の地震の震源域直上の海底は水深が100mより浅いため底引き漁などの水産活動等が活発であり、自己浮上式海底地震計の設置は水産活動と干渉する。さらに、浅海では波浪等により海底付近での水流が大きく、海底から高さがありかつ回収時の自己浮上のため浮力を持つ自己浮上式海底地震計では雑微動が大きくなる。このようなことから、今回のような浅海域では従来の自己浮上式海底地震計による海底観測は難しい。そこで、今回浅海用に簡便な係留ブイ方式を用いた海底地震計を開発した。観測装置は地下構造探査用に開発されたものを流用した。電池駆動であり、約1ヶ月間観測可能である。この装置は置かれている姿勢に関係なく計測可能であり、データ処理に用いるため地震計の姿勢も記録される。また、観測装置は浮力を持たずかつ高さが10cm程度の板状の形状であるため、海底における水流の影響を受けにくく雑微動を少なくできる。ブイが海上にあることにより、海底に設置物があることを周知することが主な目的である。全体の構成は、実績・経験ある漁業用システムを積極的に用いた。観測装置と固定用錘（合計20kg程度）からなる海底部と、海面に浮かぶブイをつなぐロープの長さは設置する水深の約3倍である。ブイ方式の場合、ブイが波浪や風の影響を受けるため、位置が移動することが多いが、固定用錘の一部に船止め用アンカーを用いる

ことにより位置移動を防止する。この浅海用係留ブイ方式海底地震計3台を、5km及び8.5km程度の間隔で震源域直上に設置した(図1)。水深は70mから80mである。7月5日に設置を実施し、回収は7月13日に行った。回収前日の12日に係留ブイ方式海底地震計1台のブイが流失していることが確認され、12日及び13日に回収作業及び搜索活動を行ったが、残念ながら現時点では回収されていない。海底臨時観測と観測期間が重なるように、震源域の海岸付近において陸上テレメータ臨時観測を実施した。

海底地震計と近傍の陸上観測点のデータから、P波及びS波の到着時刻を読み取り、一次元地震波速度構造を用いた震源決定を行った。一次元地震波速度構造は、近傍で行われた海域構造探査の結果(Sato et al., 2014)を参照した。また、海底地震計の観測点補正については、変換波を読み取り、補正值の決定に用いた。解析期間は、係留ブイ方式海底地震計が設置されていた期間である。その結果、現在までに168個の地震について精度のよい震源が求まった(図1右)。求まった地震は深さおおよそ3kmから12kmに分布する。気象庁震源と比較すると、海底地震計を含む臨時観測網で決定した震源は5kmほど浅く決定され、やや西に移動する。臨時観測網により決定された余震の震源は、全体として、傾斜角度40度程度の南東に傾斜する面状分布を示し、本震の発震機構解と調和的である。海底地震計を用いた直上での観測データが得られたことにより、本震の断層面がより正確に推定できた。日本海沿岸の断層は、日本海形成時の影響を受けて、構造探査などにより、西に傾き下がる断層が多く確認されているが、今回のように東に傾き下がる断層による地震も発生する。日本海沿岸で発生する地震を考察する上で、今回のような地震の正確な断層面の推定は重要である。

山形県沖の地震直後の臨時観測

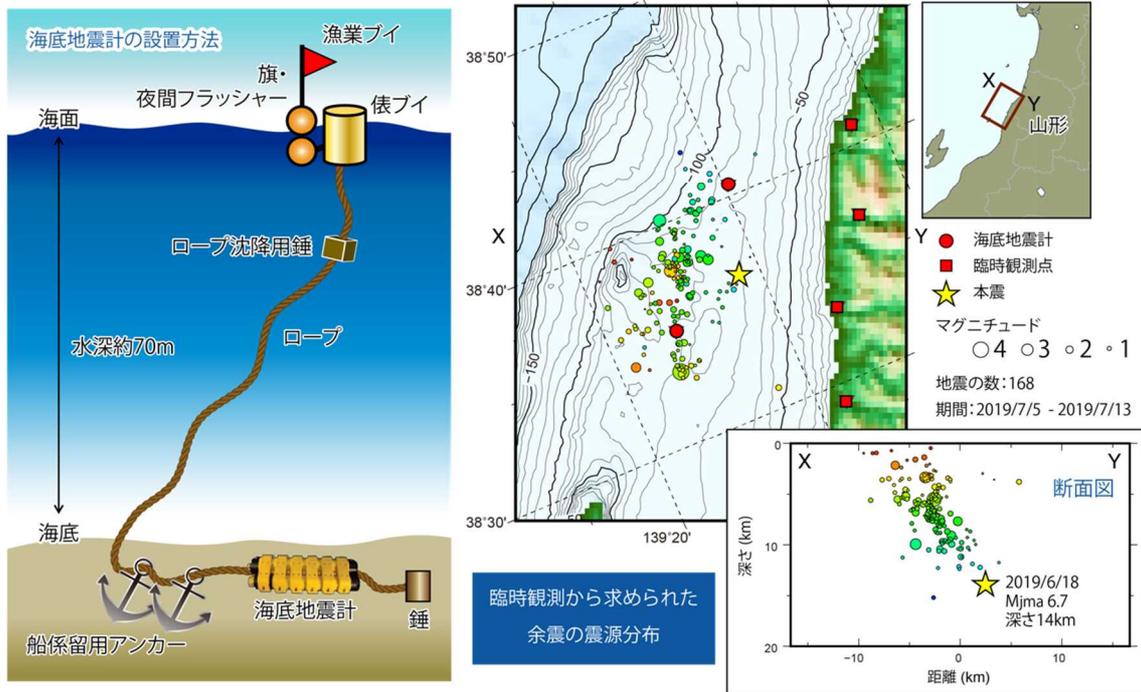


図1. 山形県沖の地震直後の臨時観測

左に山形県沖の地震発生直後に設置した海底地震計の設置方法を示す。水深が比較的浅く、水産活動等が活発な海域のため、係留ブイ方式を用いた海底地震計を設置した。右は7月5日から7月13日までの臨時観測から求められた震源分布である。丸の大きさでマグニチュード^{*}、色で深さを表現している。地震は深さ3kmから12kmに分布して、傾斜角40度程度の南東に傾斜する面状分布を示し、発震機構解と調和的である。

3. 令和元年度の成果の概要

3-1 地震・火山現象の解明のための研究

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

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

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

ア. 史料の収集とデータベース化

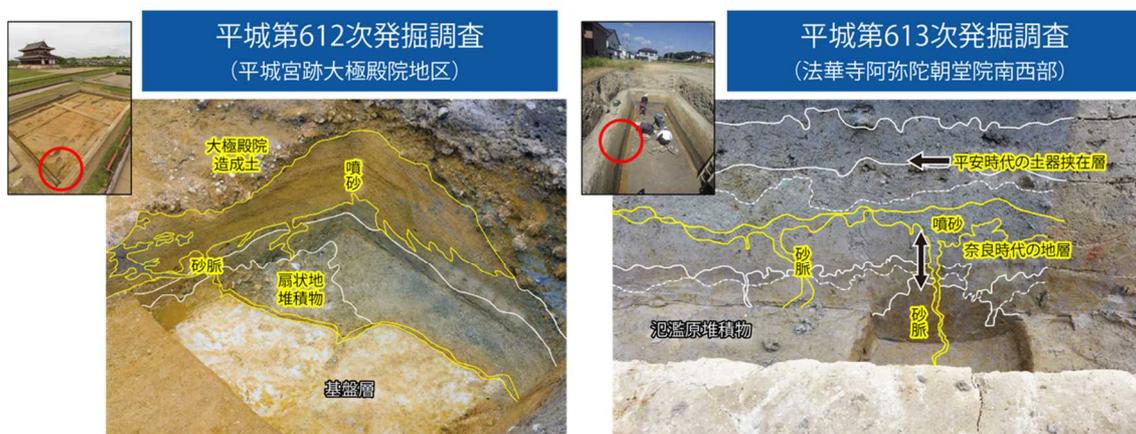
既刊地震史料の全文デジタル化作業は順調に進捗し、全史料中の60%弱が完了した。史料の校訂過程も紙媒体利用からXML形式のデジタルファイルを用いることで、作業の一層の効率化が可能となった^[UTH_01]。15世紀中頃の越中国の地震や1804年象潟地震などの日本海側沿岸地域や、1933年昭和三陸地震関連の史料収集や校訂作業を進めた^[NGT_01, IRID01]。画像公開の国際基準であるIIIFに準拠した市民参加型翻刻システムの新しいバージョンを公開した^[KOB001]。恵山火山の地質図原稿の取りまとめを行った。また、20万分の1スケールの日本火山図公開のためビューアー開発とデータ作成を行い、約440の火山データの公開を進めた^[AIST03]。

イ. 考古データの収集・集成と分析

古代より近世まで史料が継続的に残る奈良盆地において、古墳時代以降の遺跡の被災類別や被災分布の収集を進め、液状化*や地すべり*等の地震痕跡が5世紀後半、7世紀後半～末、8世紀後半～9世紀半ばに集中している可能性が明らかにされた(図2)^[NAB_01]。1804年象潟地震の肝煎文書の絵図史料と現地調査との比較から、関地区の被害は津波ではなく、地震動による家屋倒壊であったことが明らかになった^[IRID01]。

松代藩の史料から1847年善光寺地震の被害を集計し、地震動による被害は地震火災や河道閉塞決壊による被害に比べると限定的であった可能性が示された^[NGT_01]。

考古発掘調査による地震痕跡と歴史記録との対応



平城京・京跡や藤原宮・京跡の
発掘調査から砂脈や噴砂の痕跡を発見



近畿地方の歴史記録から
どの地震が候補を特定

候補1：827年京都地震(天長4年)

候補2：855年奈良地震(斉衡2年)

図2. 考古発掘調査による地震痕跡と歴史記録との対応

平城京・京跡や藤原宮・京跡における発掘調査から砂脈や噴砂の痕跡が発見された。歴史資料にある近畿地方の大地震と対応させると、これらの痕跡は827年(天長4年)京都地震、または855年(斉衡2年)奈良地震によって発生した可能性があることがわかった。

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

北海道太平洋沿岸部の胆振西部から十勝沿岸の津波堆積物*について高精度な年代推定を実施し、1640年駒ヶ岳噴火津波起源と1611年慶長三陸地震津波起源堆積物の分離可能性が示された^[HKD_01]。17世紀千島海溝の超巨大地震の津波浸水計算に必要な古地形の復元を行った^[AIST08]。数値標高モデルから客観的に段丘地形を抽出する手法を開発し、房総半島南部の段丘間比高の空間分布が1703年元禄関東地震による隆起沈降分布に類似していることを明らかにした^[UTS_02, AIST08]。布田川一日奈久断層帯のトレンチ調査*等から過去のイベント時期や水平平均変位速度*が見積もられた結果、2000-3000年間隔での活動が推定された^[NGY_03]。

富士火山の過去の噴出物試料を分析したところ、高温かつ低含水率のマグマ*は溶岩流噴火を起こしやすく、低温かつ高含水率のマグマは爆発的噴火をする傾向があることがわかった。また、爆発的噴火前に石基*組織が系統的に変化することがわかった^[ERI_02]。草津白根山の噴出物層序*調査、放射性炭素年代測定、水蒸気噴火*によるテフラ*の粘土鉱物解析を実施し、噴火履歴の解明を進めた^[TYM_01]。阿蘇火山の溶岩*及びアグルチネート*の古地磁気・岩石磁気測定を行い、活動履歴を明らかにした^[KOB003]。雌阿寒岳火山、日光白根火山、秋田焼

山火山でのトレンチ調査を実施した。御嶽火山では地表踏査を行い、九重火山と蔵王火山では K-Ar と Ar/Ar 年代の比較を行った^[AIST03]。

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

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

17 世紀前半から 19 世紀中頃の複数の江戸大名家日記史料を組み合わせ、長期にわたる年間有感地震回数を検討し、1649 年慶安川越地震や同年の慶安川崎地震、1703 年元禄関東地震、1855 年安政江戸地震の余震を統一的に検出することに成功した。平城京遷都以降に奈良で発生した最低 8 回の強い地震動の特徴を、史料データベースと現存する建造物の比較から検討することを試みた。具体例として、11 世紀後半から 12 世紀後半に東大寺鐘楼の鐘が 3 回の地震で落下した記録の検討を実施した^[HMEV01]。

北海道太平洋岸の津波堆積物の年代測定から、胆振西部の堆積物は 1640 年北海道駒ヶ岳噴火津波起源、胆振東部以東の堆積物は 1611 年慶長地震津波起源である可能性が示された^[HKD_01]。和歌山県串本町橋杭岩漂礫の津波挙動シミュレーションから、1707 年宝永地震以前により規模の大きな津波の存在が示唆された^[AIST08]。琉球列島南部の津波堆積物中の年代測定を実施し、1771 年明和大津波より 1 つ前の発生年代を推定できる可能性が示された^[UTS_01]。東北地方太平洋沖地震前のおよそ 100 年間に太平洋沿岸部でみられた沈降と地震後の隆起現象は、深さ 200km 程度までの温度構造と流体分布に起因する粘性構造が原因であることがシミュレーションにより示された^[DPRI04]。超巨大地震の発生が切迫している千島海溝根室沖から日本海溝会合部にかけて海底地殻変動観測用基準局や群列海底地震計を設置した。また、海底基準局で 1 回目の測定を実施した。来年度以降に測定を行うことで、千島海溝南部の海域で初めて地殻変動場が明らかになることが期待される^[ERI_05]。

伊豆大島では玄武岩質溶岩の大規模噴火である安永噴火（1777 年）と 15 世紀の噴火について、噴出物層序の再構築と層序毎の噴出物の組織・化学分析を行い、噴火推移の詳細を明らかにするとともに従来の考えよりも噴出時期が半年早いスコリア層があることを示した。浅間山や霧島山においても大規模噴火堆積物の調査、解析を開始した^[ERI_03]。カルデラ噴火の準備過程*、推移、履歴の推定精度を上げる手法の開発の一環として支笏のカルデラ形成噴火*による噴出物に U-Th 放射非平衡*測定を適用し、マグマの発生場所や履歴を明らかにした^[HKD_02]。屈斜路カルデラの中島火山及びアトサヌプリ溶岩ドームの地質調査、化学分析、年代測定を行い火山活動の詳細を明らかにした^[KOB004]。鬼界カルデラにおいて調査・探査航海を実施し、アカホヤ噴火の総噴出物量の精密推定を進めている^[KOB01]。

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

断層滑りの多様性や動的破壊の特徴、断層間の相互作用、地震現象の階層性など、地震発生過程に関する理解を進め、地震性滑り*の物理・化学モデルの構築につなげるため、観測・実験・数値シミュレーションを用いた以下の研究を実施した。

ア. 地震発生機構の解明

南海トラフで実施されている海底地殻変動の観測データを統計的に解析することで、スロースリップ*由来と考えられる非定常地殻変動*を複数の観測点で検出した(図3) [JCG_03]。また、房総半島周辺の海底地震観測データ等による速度構造解析等から、この領域におけるスロースリップは陸側プレート*とフィリピン海プレートの地殻*同士が接している部分でのみ発生していることを明らかにした [JAMS02]。

南海トラフ沿いで検出された浅部SSE

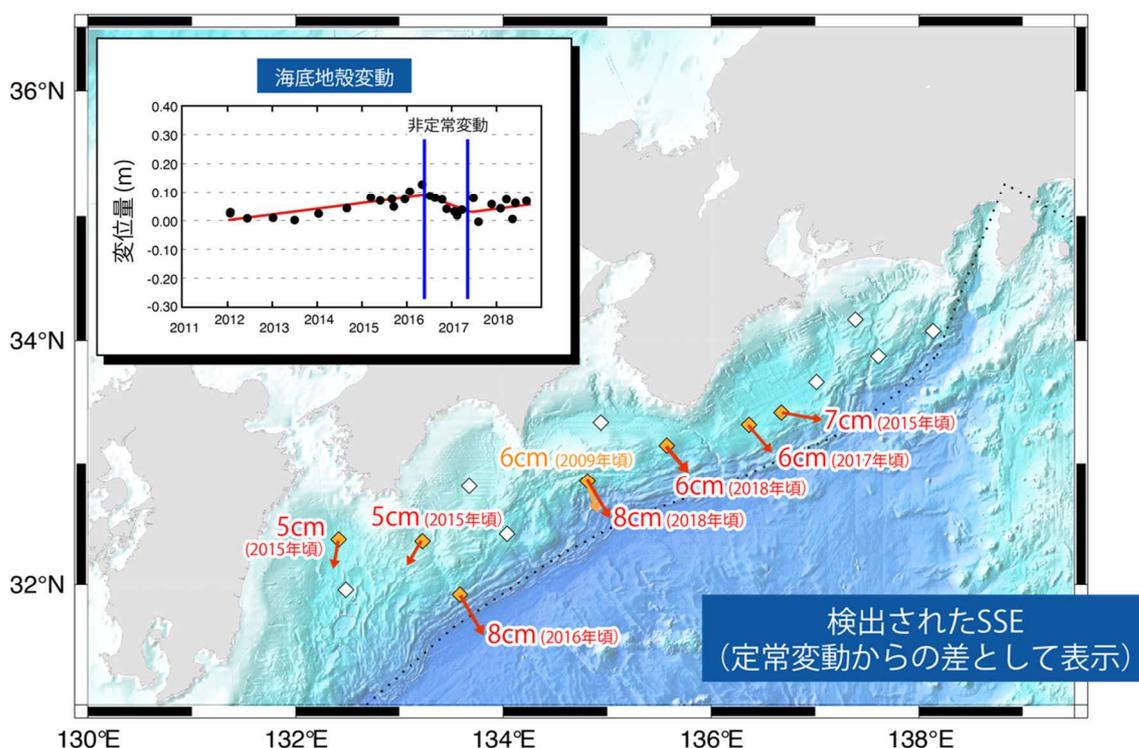


図3. 南海トラフ沿いで検出された浅部SSE*

南海トラフの過去の観測データを統計的に解析することで複数の観測点で検出された SSE 由来と考えられる非定常な変動。定常変動からの差として表示。左上の挿入図は、変位量のデータ(黒丸)を定常変動と非定常変動を表す折れ線で回帰したものである (Yokota and Ishikawa, 2020, Sci. Adv. をもとに作成)。

イ. 地震断層滑りのモデル化

スロースリップによる荷重が地震をトリガする効果を評価するため、定常的なプレート運動にスロースリップを模したステップ的荷重が重畳している状態をシミュレートし、地震の発生サイクルがスロースリップに完全に同期する現象が発生することを確認した [ERI_06]。日本海溝から千島海溝南部の M4.5 以上の大地震に近接する M4 以下の小地震の地震波形を網羅的に調査し、多くの大地震の波形の始まりの部分が小地震と同じであることを発見した (図 4) [UTS_03]。岩石破壊実験から、差応力*に対して 0.1% 程度の微弱な流体圧変動が微小破壊*発生率と有意に相関することを明らかにした [ERI_04]。

「階層的地震破壊」の概念図

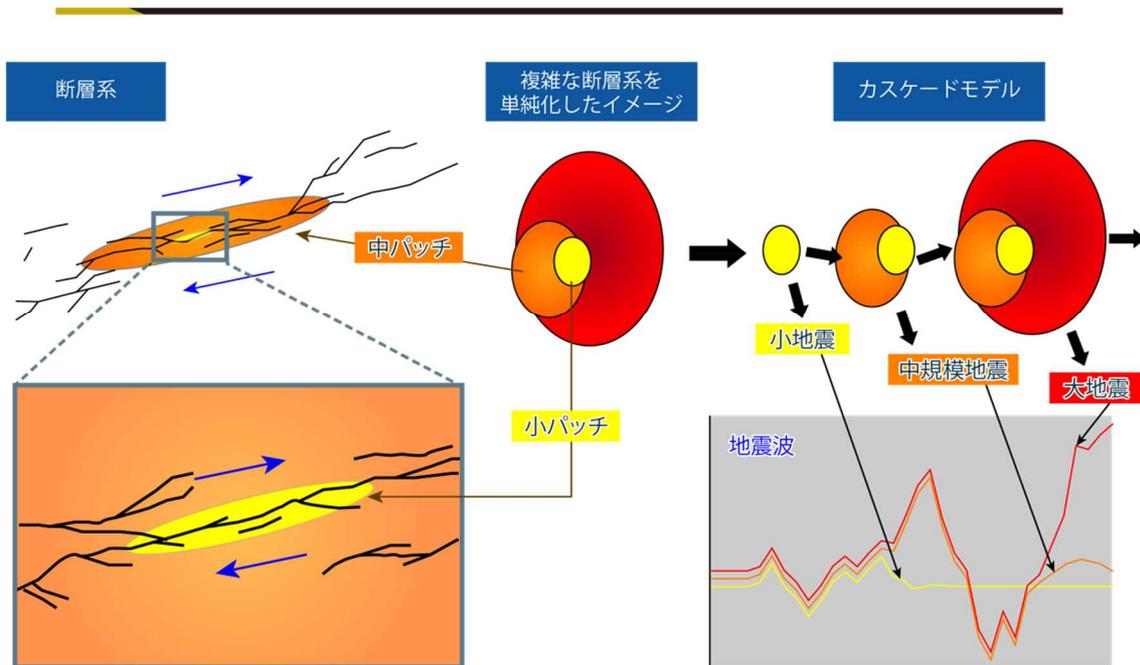


図 4. 「階層的地震破壊」の概念図

地震時の断層破壊は大きさの異なるパッチの連鎖破壊と考えられることが、大小様々な規模の地震の観測波形を用いた解析から示された。大地震の波形の立ち上がり部分が中小地震と同じである事例が多く発見された。複雑な入れ子構造をもつ断層系 (左上) を単純化したイメージ (中央上) に置き換えて考えると、階層的なパッチが連鎖破壊する (右上) ことで上記の観測事例を説明できる (カスケードモデル)。小パッチの破壊で終われば小地震、中パッチの破壊まで連鎖すれば中規模地震、より大きなパッチにまで破壊が至れば大地震となる。それぞれの地震の規模は異なるが、地震波形の立ち上がり部分は地震間で共通する (右下) (Ide, 2019, Nature をもとに作成)。

(4) 火山現象の解明とモデル化

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

ア. 火山現象の定量化と解明

火山の比較研究への活用を目指し、地震波干渉法に基づく火山性地震・微動の震源決定法を開発した。また、干渉 SARデータの解析により有珠山の貫入溶岩の熱収縮による沈降のメカニズムを解明した。また、浅間山の熱水活動と山体不安定に起因すると推定される変動を検出した^[ERI_07]。航空機搭載型赤外カメラシステムを応用したポータブルな画像分光装置を開発することにより、航空機による分光観測が可能となり、火山の熱異常の定量的評価への応用が期待される^[NIED01]。

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

火山噴火様式は火道内を上昇するマグマの脱ガス過程が支配する。噴出物の塩素濃度の不均質性には脱ガスの記録が残されている可能性を示した^[HKD_03]。桜島大正噴火(1914年)の軽石を用いた結晶化実験を行い、ナノスケール結晶の分析からマグマが経験した圧力、温度、定置時間が制約できる可能性を示した^[THK_04]。

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

地震や火山噴火が発生する場のモデル化を進めるため、プレート境界域、海洋プレート内部、内陸域及び火山地域において、地震波速度構造や比抵抗構造、応力や変形場等を明らかにするための研究を実施した。また、地震活動と火山活動の相互作用についての研究を進めた。

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

三陸沖のアウターライズ地震発生領域での構造探査から、多数の海底活断層を高解像度でイメージングすることに成功した^[AORI01]。2012年に三陸沖で発生したアウターライズ地震の震源モデルから、せん断強度が大幅に小さいプレート内断層が存在し、東北地方太平洋沖地震に伴う応力変化で2012年の三陸沖地震が誘発された可能性が示された。これまでに実施してきた海底地震計データを用いて1978年宮城県沖地震震源域付近の上盤プレート内応力状態を検討し、東北地方太平洋沖地震前の水平面内差応力の大きさは15MPa程度と推定された^[ERI_05, THK_06]。2015年から2018年までに実施した四国を東西に横断する27観測点からなる測線下のレシーバー関数解析から、沈み込んだフィリピン海プレートの上面と海洋プレートモホ面をイメージングした^[DPRI02]。

イ. 内陸地震

中部日本において温度構造・水の分布・地質構造に基づいて地殻を数値モデル化し、東西圧縮変形を加えることで、新潟から飛騨山脈に至るひずみ集中帯が再現された。深さ 14 kmでの応力場*と震源分布の比較では、地震は高応力の脆性領域で発生し、低応力の延性領域では発生しない傾向がみられる(図5) [THK_07]。応力の絶対値の大きさなどについては不確定な要素も残されているが、内陸地震の発生場に関する重要な成果である。今後、多様な観測結果との比較検討を通じたモデルの評価により一層の高度化が図られると期待される。鳥取県から山口県にかけての下部地殻*で低速度異常が推定され、対象地域の東部では地震発生層*の下限が浅い領域との一致が見られた [DPRI03]。今年度実施した広帯域MT探査*から、長崎県南島原から熊本県天草にかけてみられる地震空白域の上部地殻*は、低温で水をあまり含まず破壊強度が高いと考えられる高速度・高比抵抗の岩石からなることが明らかになった [KYU_01]。H₂O-NaCl 系流体とカンラン石間の高圧高温実験により、NaCl が二面角*を引き下げる効果大きいことが明らかにされた [THK_02]。この結果と東北地方の広域的な比抵抗構造から、東北日本弧の地殻流体*供給モデルが提案された [THK_07]。

中部日本における3次元レオロジーモデルの構築

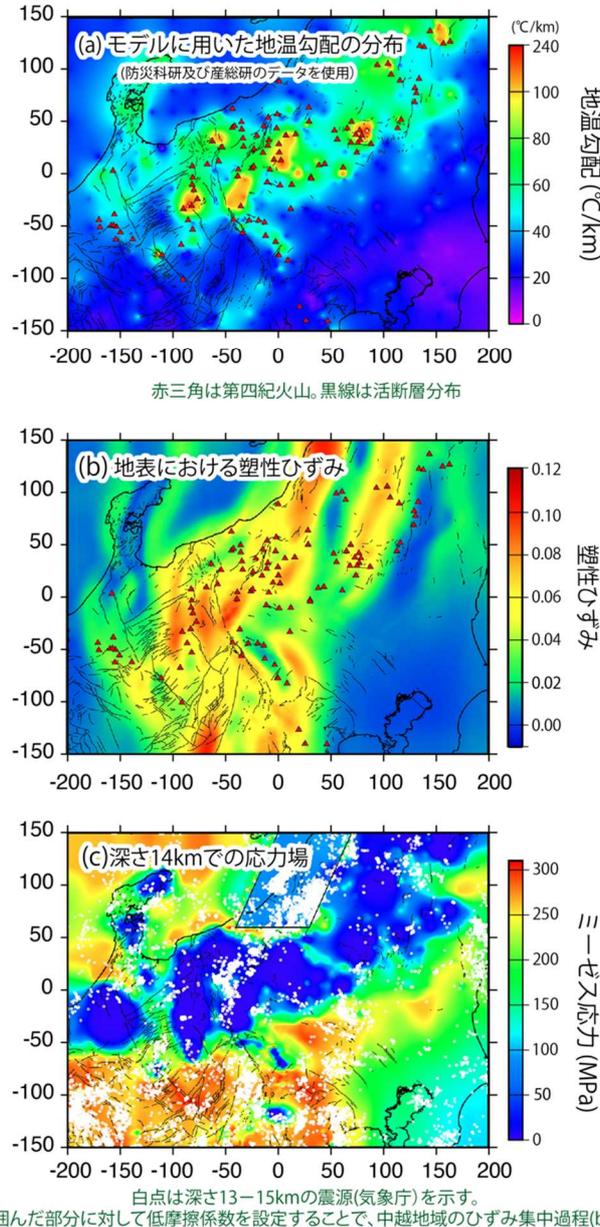


図5. 中部日本の3次元レオロジーモデルの構築

地温勾配の分布 (a) から推定した温度構造、水の分布、既存の地質構造を考慮し、東西方向に短縮させて、中部日本におけるひずみ・応力集中過程を再現した。新潟地域のリフト構造（強度の弱い領域）等を考慮することで、(b) に示す新潟から飛騨山脈周辺までのひずみ集中帯を再現した。(c) は深さ 14 km でのミーゼス応力場と震源分布。低応力の延性領域で地震活動は低く、高応力の脆性領域で地震が発生する傾向にある。

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系*の構造の解明

箱根火山大涌谷の噴気観測により、噴火前後のヘリウム同位体比の変化を検出し、噴火発生と同位体比変化の関係が噴火に伴う流体移動で説明できることを示した[AORI02, KOB013]。草津白根山では3次元比抵抗構造を推定するための広帯域MT観測を実施し、湯釜直下から本白根案にかけて広がる低比抵抗域を見出し、火口湖や周囲の温泉に熱水を供給する熱水系と解釈した(図6) [TIT_03]。

3次元比抵抗構造から推定した草津白根火山の熱水系

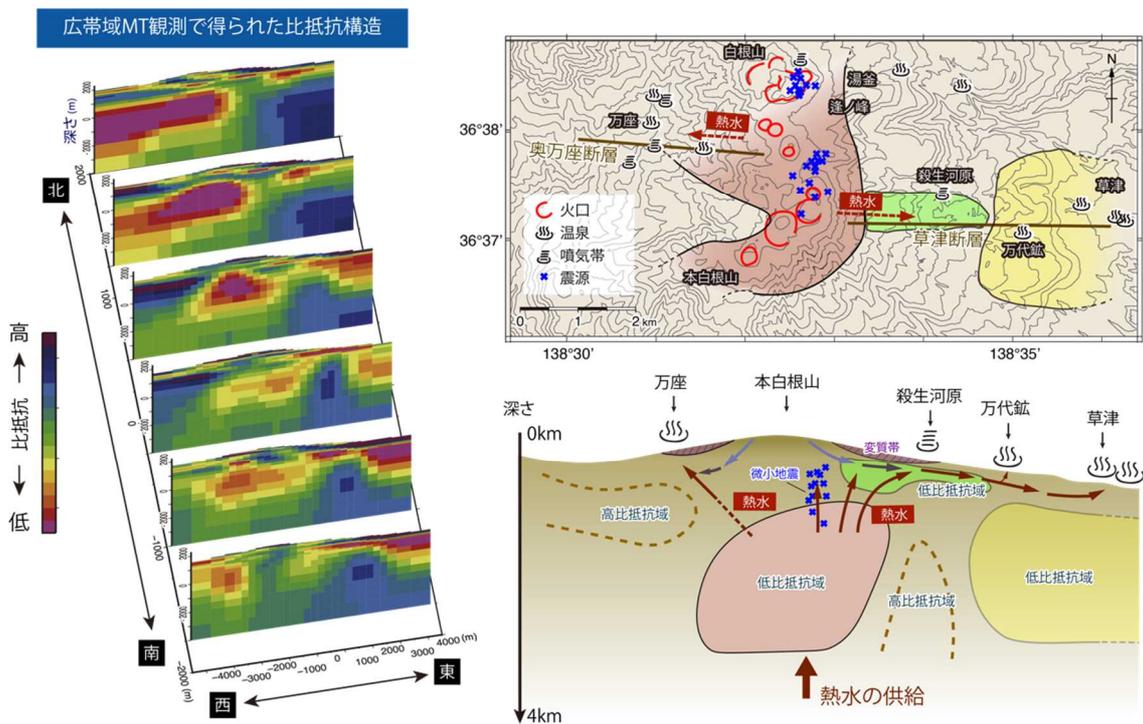


図6. 3次元比抵抗構造から推定した草津白根火山の熱水系

草津白根火山で広帯域MT観測を行い、3次元比抵抗構造を推定した。左図は3次元の比抵抗分布、右図は低比抵抗領域の平面図と東西断面を示す。山頂地域の深さ1~3kmに電気が通りやすい低比抵抗層が広がっており、深部から供給される熱水により形成された熱水系と考えられる。ここから、北側に位置する湯釜火口湖や東西に位置する万座温泉及び草津温泉へ熱水が供給されていると推定される (Matsunaga et al., 2020, JVGRをもとに作成)。

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

箱根カルデラの2019年群発地震*に対し高精度な震源決定を行った結果、前駆的なゆっくりとした震源移動から拡散的な高速度の震源移動に遷移する様子が捉えられた[THK_02]。また、箱根火山の深部低周波地震*活動が浅部の高周波地震活動や圧力源の増圧などの現象と時間的に連動していることが明らかになった[DPRI04]。

オ. 構造共通モデルの構築

過去14年間のメカニズム解*をコンパイルして作成した関東地域の地殻応力マップがデータベース化され公開された。また、中国地域での応力マップ作製に向けて3000個以上のメカニズム解を決定した^[AIST07]。球体地球における広域粘弾性*余効変動*モデルの構築に向けて、2次元回転対称の地球モデルに対して密度と弾性定数の水平不均質が表層荷重に対する影響を見積もる手法を開発した^[UTS_02]。

3-2 地震・火山噴火の予測のための研究

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

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

S-net^{*}の観測記録に基づき、十勝沖・三陸沖の日本海溝近傍で発生する低周波微動^{*}を捉え、その発生場所を明らかにした。低周波微動は、当該地域で発生した巨大地震の震源域浅部側に隣接して分布すること、プレートの走向に沿う帯状の領域内で2つのクラスタ^{*}を形成すること、このクラスタ間に巨大地震の破壊開始域や余震活動が分布することが示された。南海トラフ海域では、3次元地震波構造を用いて浅部超低周波地震^{*}のCMT解^{*}を求め、長期間の活動履歴を明らかにした。浅部超低周波地震の多くは、プレート境界面での滑りを意味する低角逆断層型の発震機構解で説明できること、測地データから推定されている滑り欠損^{*}速度が大きい領域の周囲、かつ地震波速度が遅い領域で活発に発生していることがわかった^[NIED02]。このような滑り様式の特徴に関する知見は、物理モデルを用いた数値シミュレーションに基づくプレート境界型地震の長期予測手法の高度化につながる成果である。

イ. 内陸地震の長期予測

地震の活動履歴に依らない新たな長期予測手法の構築を目指して、測地データから推定されるひずみ速度^{*}分布に基づいて西日本の内陸地震の発生確率を試算した。ひずみ速度は、地震によって解放される弾性^{*}ひずみと解放されない非弾性^{*}ひずみの両方を含むため、両者の割合を測地モーメント速度と歴史地震で解放されたモーメント速度の比から推定した。内陸域に蓄積される測地モーメント速度の14%が地震として解放されるとし、地震の発生時刻はポアソン過程に従うと仮定すると、約20km四方の格子内において、30年間にM6.0以上の内陸地震が発生する確率は、ひずみ集中帯で高い値を示し、中部地方では最大4.3%という結果が得られた(図7)^[DPRI05]。

2016年熊本地震による地殻内のせん断ひずみエネルギーの変化を3次元的に推定した。この結果と熊本地震発生後1週間の震源分布を比較すると、せん断ひずみエネルギーが増

加した場所で、顕著な地震活動が起きていることが明らかになった^[NIED03]。また、せん断ひずみエネルギーに加えて体積ひずみエネルギー変化を考慮することで、1992年米国西部で発生したランダース地震後の地震活動域の分布を概ね説明できることも示された^[DPRI03]。これらの成果は、従来から用いられているクローン応力変化*よりも、ひずみエネルギー変化を用いる方が大地震後に活発化する地震活動域の分布を精度良く予測できることを意味する。

測地観測データに基づく内陸地震長期評価手法の開発

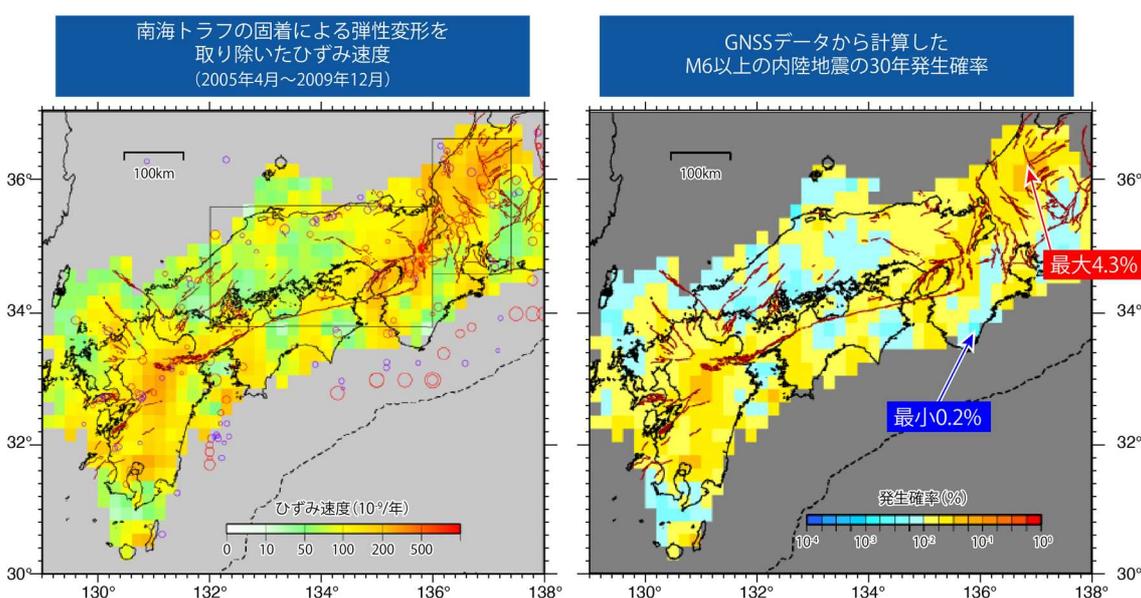


図7. 測地観測データに基づく内陸地震長期評価手法の開発

左は南海トラフの固着による弾性変形を取り除いたひずみ速度場*を示す。右は測地ひずみの14%が弾性的に蓄積すると仮定して計算した、M6以上の内陸地震の30年発生確率である。

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

西南日本において、様々な種類のスロー地震*が空間的に相補的に分布していることを明らかにした。また、九州沖から四国にかけてのフィリピン海プレート境界域の深部及び浅部において、スロー地震の長距離にわたる移動現象を検出するとともに、異なる種類のスロー地震の間に相互作用が見られることを示した(図8)^[ERI-12]。さらに、四国西部域のGNSS*データを、深部低周波地震活動を基準にして解析することで、深部で短期的スロースリップが発生している最中に、浅部の固着域においてもわずかな滑りが起きていたことを見出した。

微少なながらも固着域の中でも滑りが起きていた点が特徴的であり，応力が固着域へ間欠的に載荷されていると考えられ，短期的スロースリップと固着域の関係性を理解する上で重要な成果である^[ERI_12]。

スロー地震の総合解析による南海地震の固着域へ向かうスロースリップの長距離移動

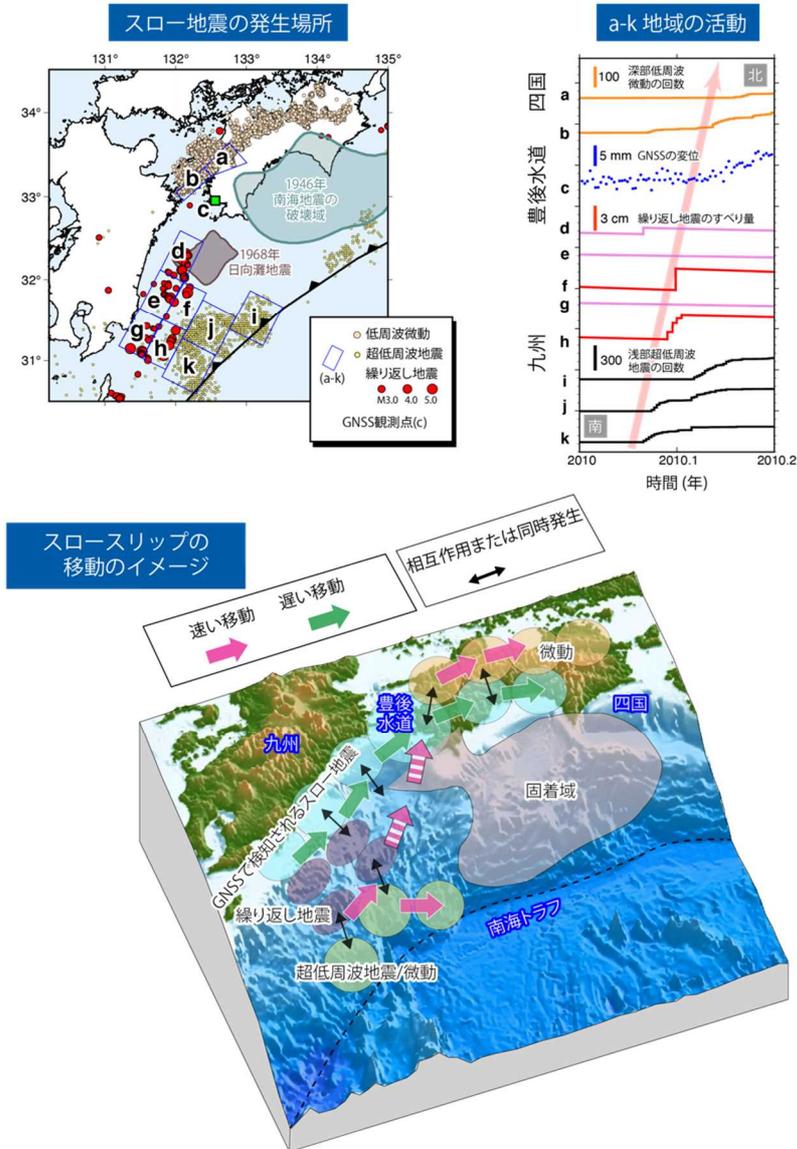


図8. スロー地震の総合解析による南海地震の固着域へ向かうスロースリップの長距離移動

左上で示すように鹿児島沖から四国沖にかけての南海トラフのプレート境界で複数の種類のスロー地震を捉え、それらが深部と浅部、別々の時間スケールで長距離移動する様子がわかった。左上の図で示すa~kの領域について、深部低周波微動、GNSS観測から得られた変位、繰り返し地震*の滑り量、浅部超低周波地震*の回数を時間変化として右上に並べると、1ヶ月程度で南から北に向かって移動している様子がみえる。これらの南海トラフ沿いのスロースリップの移動についてまとめたイメージを下に示す (Uchida et al., 2020, EPSL をもとに作成)。

レーザー式変位計とひずみ計のデータを用いて、通常の短期的スロースリップが発生している期間において、継続時間約1時間のスロースリップ現象が起きていることを発見した。このスロースリップの規模は Mw5.0 程度であり、既存のスロー地震のスケーリング則*と調和的であった^[JMA_01]。

繰り返し地震カタログを用いて、日本列島周辺における滑りの空間分布・時間変化の特徴を調べた結果、沈み込むプレートの境界における滑り速度は、ここ数年は、ほとんどの地域でプレート間の相対運動速度よりも遅く、大地震の余効滑り*の影響が見られた地域はわずかであった^[THK_09]。

プレート境界面上の摩擦と粘弾性緩和*の両者の構成則*を考慮した物理モデルに対するベイズ的データ同化*手法の開発を進め、2011年東北沖地震の地震時及び地震後7年間の地殻変動データに適用した。推定されたパラメータによるモデル計算値は観測データを良く再現するとともに、余効変動の初期段階から粘弾性緩和の寄与が余効滑りに比べて大きかったことが示された^[KUS_01]。

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

階層ベイズ型時空間 ETAS モデル*を用いて、余震などのトリガ効果を除いた地震活動度の高低の地域性を表す常時地震活動度の分布を明らかにした。2011年東北地方太平洋沖地震などに続く地震活動が非常に活発な時期のデータを含めて解析しても、常時地震活動度の大きさや分布は、時間的にほとんど変わらないことが確かめられた。常時地震活動度の高い領域は、大地震の起きた領域や繰り返し地震の位置とも良く対応しているように見える。また、国際的な枠組みのもと、地震活動データに基づく地震活動予測可能性共同実験 (CSEP)*を継続的に実施した。さらに、ある地震が起きた直後に、より規模の大きな地震が発生する確率評価手法について検討を行った。

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

地震活動の短期的な活発化に着目した研究を行った。伊豆地域で見られた複数の前震*活動は、地震間の誘発作用を考慮する ETAS モデルだけでは説明できないほどの活発な現象であることが示された。前震活動の特徴を巧妙に抽出できれば、ETAS モデルよりも効率的な地震予測が可能になることが期待される^[ERI_13]。

山陰地方の1980-2017年のM3以上の地震活動に対して余震を取り除いた独立地震の発生時期を分析したところ、春と秋に地震発生確率が平均値よりも高いという傾向が示された^[ERI_13]。さらに、1923-2017年のM6.2以上の地震だけに関しても、春と秋に発生頻度が高い傾向が見られる。

2016年熊本地震震源域周辺の最近(2017年1月から2019年3月まで)の地震活動の特徴を調べた結果、本震破壊域の南端10km程度の領域(日奈久断層帯)でのみ、b値*が地震前に比べて低下し、低いb値の状態が継続していることが見出された。このことは、熊本地

震以降に本震破壊域南端において応力载荷*がおきていることを示唆する^[ERI_13]。

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

山梨県富士山科学研究所は、古地磁気測定により、火山弾の古地磁気方位から富士山の宝永山が西暦 1707 年に形成されたと推定できることを示した。また、鷹丸尾溶岩及び剣丸尾第 1 溶岩の年代推定を行った結果、西暦 600-700 年、西暦 1000 年と求められた。さらに、陸上植物起源の脂肪酸と炭化木片の ^{14}C 年代測定値は誤差の範囲内で一致し、炭化木片が産出しない土壌試料でも、脂肪酸を利用した年代推定ができることを示した^[MFRI_01]。東京大学地震研究所は、霧島山について、代表的噴火の堆積物の露頭調査、歴史時代の個々の噴火の推移や中長期履歴の文献調査をもとに、噴出物分布や層区分について検討するとともに、18 世紀享保噴火の降下軽石における茶・灰色及び白色の 2 タイプの軽石の全岩化学組成*が 2011 年噴火と同様のトレンドを有すること、温度・組成差のある 2 端成分マグマが関与したことなどを明らかにした^[ERI_03]。富山大学は草津白根火山において、また産業技術研究所は、雌阿寒岳火山、日光白根火山、秋田焼山火山、御嶽山において活動履歴解明のための噴出物調査を進めた^[TYM_01, AIST03]。

イ. モニタリングによる火山活動の評価

北海道大学と京都大学大学院理学研究科は、各種観測データに基づく、数年～数十年スケールの中期的な火山活動評価を日本各地の活火山で行う手始めとして、十勝岳を対象とした VUI* (火山活発化指数) の評価項目と基準を作成した。評価項目の一つとして、火口直下での昇温の指標となる地磁気変化を取り上げ、過去のアンレスト*事例の収集・整理を通じて、VUI に対応付ける方法を考案した (図 9) ^[HKD_04, KUS_02]。また、北海道立総合研究機構は、十勝岳において GNSS 観測、火口域地温観測、噴気及び温泉水の化学分析、地下水位観測等を行った。2006 年から 2019 年までの火口域の膨張収縮は、地震活動や温泉水の Cl 濃度との相関があることがわかった一方で、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^[HR0_01]。

御嶽山 2014 年噴火後から続く山頂付近の局所的な沈降は、InSAR*及び GNSS データの解析と噴煙映像から推定される水蒸気放出量の分析から、噴火発生から指数関数的に急速に変化する深部減圧源と、緩やかに変化する浅部の減圧源で説明できることが明らかとなった^[KUS_02]。

箱根火山では、噴気中の $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比、 He/CH_4 比及び N_2/He 比が 2015 年 5 月～8 月の群発地震活動に先行して増加、群発地震活動の低下とともに減少し、マグマ起源ガスの浅部熱水系に対する流量の増加が群発地震を起こしたと解釈された^[KOB011]。また、簡易型トラバース測定装置による二酸化硫黄放出率と噴火活動との対比 (口永良部島) や、噴火時の火山ガス*の

化学組成の測定や火山灰*から抽出した水溶性物質の化学分析（浅間山，阿蘇山）に基づく噴火様式の同定が行われた。

火山活動のアンレストに伴う熱消磁の事例収集と VUI（火山活発化指数）への対応付け

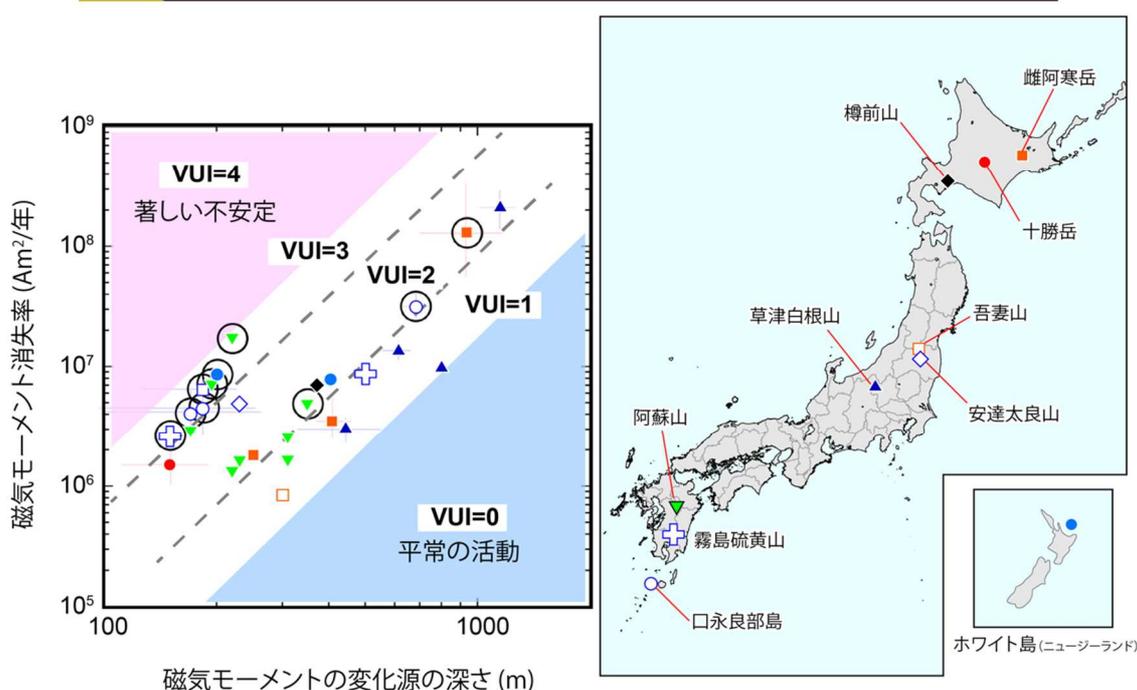


図9. 火山活動のアンレストに伴う熱消磁の事例収集と VUI への対応付け

各種観測データに基づいて、数年～数十年スケールの火山活動評価、特に非噴火時における火山活動の高まり（アンレスト）の定量的評価を目指している。今年度はニュージーランドで開発されたVUI（火山活発化指数）を我が国の火山に適用するための具体的検討を始めた。右図の火山で過去に観測されたアンレスト事象について、地下の昇温の指標となる磁気モーメント消失率とその深さを調べると、グラフの左上側に行くほど、アンレスト後に実際に噴火した事例（円で囲ったイベント）が多かった。そのため、右下から左上に向かってVUI値が大きくなるよう基準を設定した。

（5）火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

火山活動推移のモデル化や分岐判断指標の作成をするために観測データ等を検討した。大地震と噴火の発生に相関があること、火山噴火を伴う地殻変動は約半年以上先行して継続することが多いことなどがカタログデータ解析から明らかとなった^[THK11]。また、インドネシア国シナブン火山を対象に、水蒸気噴火からマグマ噴火*への移行期の地盤変動*と地震活動の連動性を明らかにした^[DPRI07]。既存の火道系へのマグマ貫入*と、そうでない場所へのマグマ貫入の場合に分けた、マグマの貫入速度と噴火事象の経験的分岐論理を構築した

[DPRI07]。

蔵王火山について、最新の火山活動・噴火活動の履歴から、前兆現象のみで終息する場合、その後、水蒸気噴火に至る場合、水蒸気噴火からマグマ噴火へ移行する場合、大規模噴火に至る場合に分ける噴火推移予測図を作成した^[KOB015]。

3-3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動*の事前評価手法

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

2018年北海道胆振東部地震 (Mjma 6.7) の断層破壊を強震記録*の波形インバージョン*

(周波数 0.04-0.5Hz) 及び強震動生成域のモデリング (周波数 0.3-10Hz) により解析し、主破壊域の広がりや主破壊域中の2つの強震動生成域を特定した。震度7を記録した地点での地震動再現計算結果は卓越周波数や最大加速度値が観測記録に合わず、地盤の非線形応答があった可能性が示された。静岡県下の強震データを用い、スペクトルインバージョン法により各震源特性*、地震波伝播、サイト特性*を分析したところ、応力降下量*に深さ依存性が確認された^[DPRI09]。

2016年熊本地震について、インバージョンより得られた地下の震源断層モデル*と、地表で観察された地表地震断層*の情報に基づき、複数の震源断層面形状のモデルを提案した。また、布田川断層から離れた清正公道沿いの地表変状においてトレンチ調査を実施し、右横ずれ断層*であることを明らかにした^[NGY_05]。

大阪、京都、奈良堆積盆地を中心とした地域ではQ値*周波数依存性のモデル化などの改良を行い、静岡県地域についても強震波形データを用いた地震基盤以浅の構造モデルの検証を進めるなど、既往の地盤構造モデルの検証を行った^[DPRI08]。

標準地球モデルによる理論分散曲線*と3次元差分法による地震波伝播シミュレーション結果の比較により、大振幅のラブ波*パルス (G波) の生成原因を推定した。2011年東北地方太平洋沖地震では、振幅の大きなG波の到来地域で、地震活動活発化や太平洋沿岸の沈み込み帯の低周波地震や微動活動が報告されるなど、大地震による表面波*の影響が全地球へ広がったことが確認された^[ERI_14]。

南西諸島域の地震の応力降下量の分布を調べたところ、1~100MPaの範囲に分布し、琉球海溝から沖縄トラフにかけて低下する傾向にあること、奄美大島北東沖など特に値の高い領域が存在することが確認できた^[ERI_14]。

3次元差分法に基づく地震波伝播シミュレーションのオープンコード (OpenSWPC) について、利用者コミュニティからのフィードバックを受けて改良と機能拡張を進めた^[ERI_14]。

予測手法の妥当性を検討するため、2016年熊本地震について、地表地震断層の長さに基づく断層モデルと地震モーメント*に基づく断層モデルを作り、地震本部の強震動予測手法レシピによる強震動計算結果を比較した。前者では地震モーメントや地震動が過小評価と

なり、後者ではおおむね実際の地震動分布を説明できたが、地表地震断層ごく近傍の観測点では過小評価が残った。後者をさらに改善するためには、地震発生層よりも浅い地表付近まで断層滑りを設定する必要がある^[NGY_05]。

災害リスク評価には想定シナリオ・手法の不確定性に起因するばらつきがあるが、このばらつきを防災計画に反映するためのハザードデータの構築手法の開発に着手し、今年度は表示システムを開発した（図10）^[CTOC01]。

地震危険度評価結果表示システムの開発

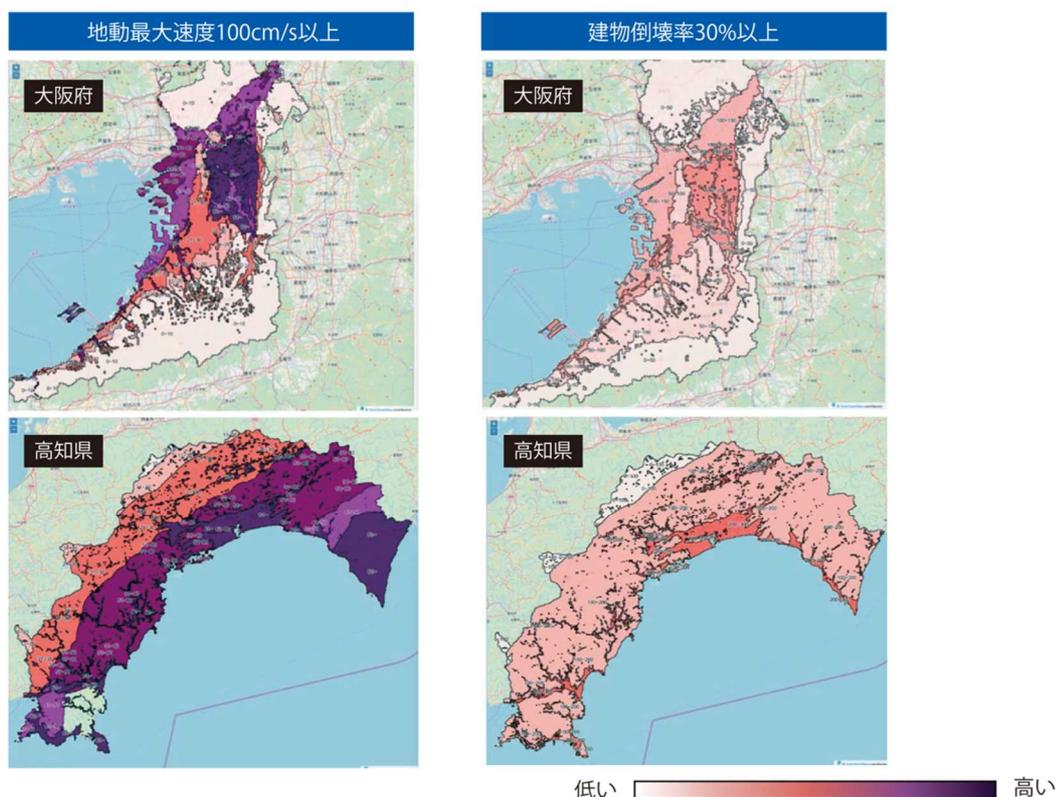


図10 地震危険度評価結果表示システムの開発

災害リスクの評価結果には想定シナリオや地盤効果の計算手法の違いによるばらつきがある。ばらつきを含む結果を防災計画に反映させるための表示システム開発を進めた。異なる地震シナリオ毎に、異なる震源要素*を持つ地震を仮定し、その地震による工学的基盤での揺れ、表層地盤（地表）での揺れ、建物倒壊率を計算する。大阪府と高知県を例として、10,000回の数値試行実験で得られた「表層地盤（地表）での揺れ（最大速度）が100cm/s以上となる度数（左図）」及び「建物倒壊率が30%以上となる度数（右図）」の表示例を示す。

イ. 津波の事前評価手法

巨大地震に伴う海底斜面崩壊による津波の数値計算手法を開発した。1929年 Grand Banks で発生した海底地すべりに伴う津波イベントに適用し、海底地すべりの量は約 100km³ 程度であると見積もることができた^[HKD_05]。

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

強震動による地震災害誘因の分析のため、堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースの増強に着手した。また、2018年北海道胆振東部地震や2004年米国パークフィールド地震、トルコ西部の被害地震等国内外の強震記録の分析を行い、堆積平野・堆積盆地の地震動増幅特性*を定量化するとともに、震源解析や強震動シミュレーションを行った^[ERI_16]。

2016年熊本地震の益城町市街地において、詳細な地表地震断層の分布と建物被害との関係を調べたところ、地震断層から120m以内の範囲に全壊家屋の総数の94%が集中することがわかった^[NGY_05]。

地震被害想定における不確実性の低減を目的として、鳥取県内で微動観測を展開して面的な地盤震動特性を調べ、これまでに実施した各種地盤調査を総合的に再解析し地下構造をモデル化した。小地震と大地震の地震観測記録から、線形応答時の地盤構造とともに大地震時の非線形応答特性*を逆推定する方法を開発した^[TTR_01]。

北海道八雲町、神恵内村等において、実測した歩行速度に基づく津波避難シミュレーションを行い、避難困難地区を特定した。対策を自治体・地域住民と協議し、新たに避難路の整備、役場庁舎の津波避難ビル機能付加の計画につなげた^[HRO_02]。

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

過去の火山噴火による軽石の分布域と過去の地震地すべり箇所を比較したところ、地震時地すべりの滑り面となる可能性が特に高い降下火砕物*は、9000年よりも古い軽石及びそれに伴う火山灰土であることがわかった^[DPRI10]。

谷埋め盛土斜面の地すべりメカニズム解明のため、地震動と間隙水圧*変動を同時観測したところ、間隙水圧が上昇するタイミングや上昇量は地震動の強さと強い相関があることが示された^[DPRI10]。

2018年北海道胆振東部地震により厚真町のテフラ斜面において発生した地すべりを調査したところ、滑り面に広く見られる粘土鉱物の薄板状ハロイサイトを検出した。さらに、ハロイサイトの含有量が増えるに従い、せん断抵抗が下がり保水力が上昇すること、すなわち、せん断された際には流動性が増すことが明らかになった^[DPRI10]。

宮城県荒砥沢地区における地上設置型合成開口レーダー (GB-SAR) 観測で、2019年10月の豪雨に伴う斜面の侵食が確認された。この時、斜面各点で計測した地表面変位から、土砂の流出量に対応すると考えられる体積変化が得られた。また、降雨後4日程度で地表面変位が現れることを見いだした。このような知見は、土砂侵食の予測へつながると考えられる^[IRID03]。

オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

桜島火山の黒神地区において小型船舶レーダーを用いた観測を開始し、2019年11月8日の火砕流*噴煙の流下パターンや堆積量を明瞭に捉えることに成功した。また、桜島の過去の噴火の前駆地震・地殻変動データから、火砕流を伴う噴火では直前の膨張停滞時間は30分以上継続し、47例中27例で前駆地震が発生することが明らかになった。この結果から、火砕流を伴う噴火では火道内の状態が通常の噴火前とは異なっている可能性が示唆された[DPR11]。

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測*手法

大地震による大規模平野での長周期地震動*の即時予測の実現に向け、観測・計算データ同化に関する研究を進めた。高速化を目指し、予め計算した同化観測点～予測地点の伝達関数(グリーン関数)を用いて、評価地点の揺れを予測する方法を検討した。南海トラフ巨大地震の即時予測の可能性を検討した結果、震源域直上の海底地震観測網、DONET*やN-net(計画中)を地震発生直後からデータ同化できれば、数十秒以上の猶予時間をもって関東平野等の遠地での長周期地震動の即時予測が可能ながわかった[ERL14]。

“揺れから揺れを予測する” PLUM 法*の高度化を進めた。S波群中のP波の検知、上下動成分を用いた震度の予測、距離減衰の導入により、近い未来にしか適用できないという弱点を軽減する可能性を見出した[JMA_06]。

イ. 津波の即時予測*手法

海底圧力観測*記録と津波伝播のグリーン関数を用いたデータ同化に基づく津波即時予測手法を、海底地震津波観測網 DONET が捉えた2016年鳥島沖地震津波に対して適用した。同地震は海底火山カルデラ内に発生する津波地震*であり、地震動の解析によって津波を即時的に予測することが困難な事例であるが、本手法により津波予測を迅速に行い得ることを示した(図11) [HRS_02]。

GNSS 搬送波位相*変化から断層滑りを直接推定する手法(PTS)の性能評価のため、2011年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)とその後1日以内に起こった2つの余震に同手法を適用した。先行研究とほぼ同等の震源像が得られ、PTSによって1日以内で連続する地震現象のモニタリングが可能であることが確認できた[THK_12]。

後続波で高い津波が観測された近地津波事例を精査し、その成因を推定した。スロー津波地震の規模推定のために開発した積分変位を用いた規模推定法を国内外の地震に対して適用し、従来の変位振幅に基づく手法に比べ規模を適正に推定できる可能性が高いことを示した[JMA_06]。

リアルタイム観測実記録に基づくデータ同化津波予測実験

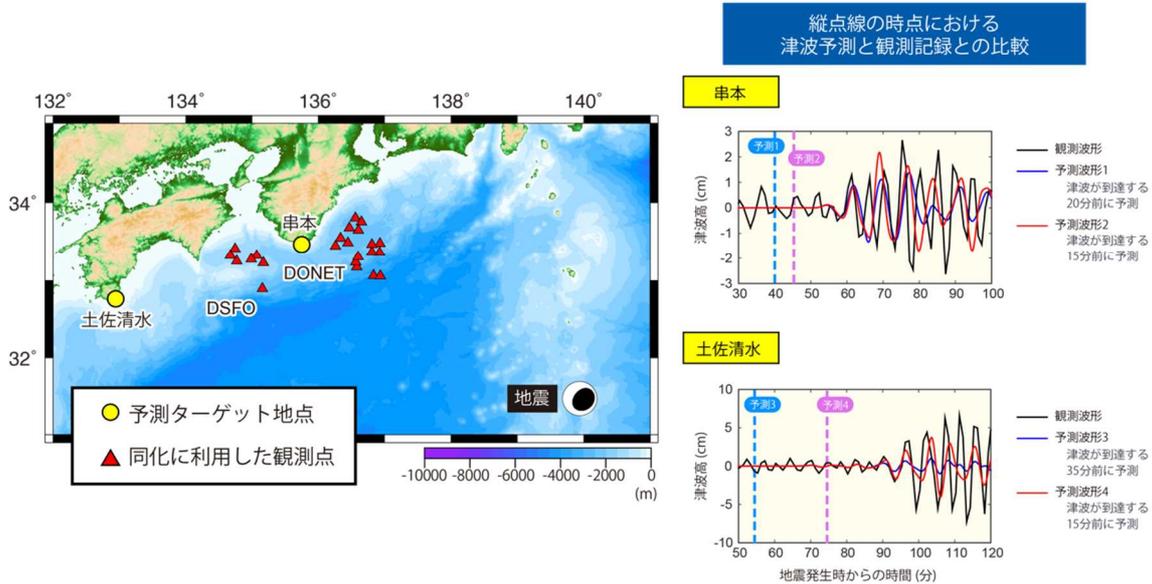


図 11. リアルタイム観測実記録に基づくデータ同化津波予測実験

鳥島で発生した火山性の津波地震に対し、震源情報に依存しない津波データ同化に基づく現況把握からの予測実験。左：震源（右下の丸）、同化に利用した観測点（赤）、予測ターゲット地点（黄）。右：縦点線の時点における津波予測と観測記録との比較（Wang et al., 2019, JGR をもとに作成）。

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

焼岳火山における昭和 37 年の噴火以降の土石流の発生に関する既往研究と、昨年発生した土石流の際の 10 分間雨量とその雨域のデータから、火山の噴火後の土石流発生ポテンシャルの変化と発生条件に関するモデルのフレームワークを構築した^[DPRI12]。

レーダーによる噴煙の即時把握に向けて、噴煙中の粒子の粒径分布の調査や、噴煙と降水エコーを区別する方法の検討、噴煙拡散モデルの高度化を進めた^[JMA_07]。

霧島新燃岳 2018 年噴火において、噴火様式の変化と噴出物の岩石組成変化の対応を明らかにするとともに霧島火山の噴火事象系統樹の作成を開始した。また 2019 年 8 月の浅間山噴火について関係機関で連携して降灰調査を行うとともに、噴出物モニタリング手法の高度化及び噴火時対応の迅速化・効率化に関する議論を進めた^[ERI_07]。

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震・火山災害情報の活用のための基礎調査として、日本放送協会による「体感・首都直下地震ウィーク」を刺激とする社会的実験調査（パネル調査）を実施し、認知、知識、行動、態度、確率評価への効果を検討した^[III_01]。

ハザード事象系統樹の設計について検討し、系統樹は選択枝の整理と視覚化には優れるが、時間変化の表現には課題があり、時間変化については系統樹より表形式が適していることがわかった^[IRID04]。

2018年1月の草津白根火山の噴火事例において、噴火に関する情報の内容、伝達、理解に関する課題を分析するため、噴火から約2年後、草津白根山近傍の草津温泉スキー場の利用者を対象としたアンケート調査を実施した。2018年1月の噴火を「はっきりおぼえている」グループとそうではないグループでは、前者のほうが理解度や知識量が顕著に高いことが明らかになり、利用者の理解度や知識量の違いを意識した情報伝達を検討すべきであると考えられた^[KOB016]。

地震波形・GNSS・傾斜計*等のデータを即時解析して震源や地盤変動源を表示するシステムを開発しているが、テレメータされている地震波形のデータを用いて震源を逐次推定するツールを追加し試運転を開始した^[HKD_06]。

3-4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

社会とのかかわりにおいて地震・火山噴火災害の発生機構を理解するためには、自然現象が生じる場所や地域の歴史的・地理的特性が重要な研究項目である。国宝・島津家文書のうちに伝来する「江戸大地震之図」（東京大学史料編纂所蔵）に描かれた、安政江戸地震（1855年）における被害の状況と人々の対応や復興過程の実態を検討した。他の文献史料と丹念に照合すると、絵巻に描かれた内容と良く符合し、そのことから、この絵巻史料が事実に基づいて特定の場所や出来事を描いている可能性が高く、歴史資料としての信頼度が高いことが明らかになった。地震動や火事による被害状況や、仮設住宅や瓦礫の処理、米の配給などの災害対応や復興課題が現代とも共通し、歴史的な経験が今後の防災施策や復興施策の検討に資すると考えられる（図12）^[UTH_02]。災害誘因として場所限定性の強い津波について、その常習地である岩手県山田町船越地区を事例に、「陸中国閉伊群第拾七区船越村絵図面」、「山田警察分署所轄海嘯*被害明細図」など、1896年明治三陸津波災害の発生前後の史料を収集・解析し、当時の地形や被害状況との対応関係を復元・可視化した。リアス式海岸に特徴的な急傾斜地形と集落立地との関係に着目すると、標高と被害程度との間に明瞭な対応関係があり、そのことが被災後の高台移転につながったことを明らかにした^[IRID05]。

2011年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）を事例に、宮城県の津波被災地における災害対応過程や生活条件の地域間比較分析を行い、災害経験が地域社会のまとまりを強くする反面、地域の社会特性に応じた災害対応がとられないときに、逆に社会の脆弱性が増大することが示唆された^[NGY_06]。土地所有・利用にかかわる私権制約の問題により、被害軽減を図るための土地利用規制・建築規制が進まないことが多い。一方、2004年新潟県中越地震の被災地である中越地方では、割地制度と土地総有制が、土地から生産される利益の分配と災害による被害の分散のために運用されており、地域全体で利益を共有し、暮らしの再建を目指せるような環境づくりが現代の土地利用施策においても有効であると考えられる^[HGY_02]。

災害対応・復興に際して地震・火山観測情報がどのように活用されてきたのかという問題について検討した。口永良部島新岳と箱根大涌谷の火山噴火では、気象庁による噴火警戒レベルの判断基準となる観測情報に対して住民が敏感に反応していた。兵庫県加古川市養田南地区での地区防災計画策定における住民と専門家とのリスクコミュニケーションの事例では、統合地震シミュレーター*による建物の揺れと被害の予測結果を可視化した情報が、住民自身が対策を具体的に検討する際に役立ったことが確かめられた^[HYG_01]。

「江戸大地震之図」の震災を描く絵巻から江戸の社会を読み解く

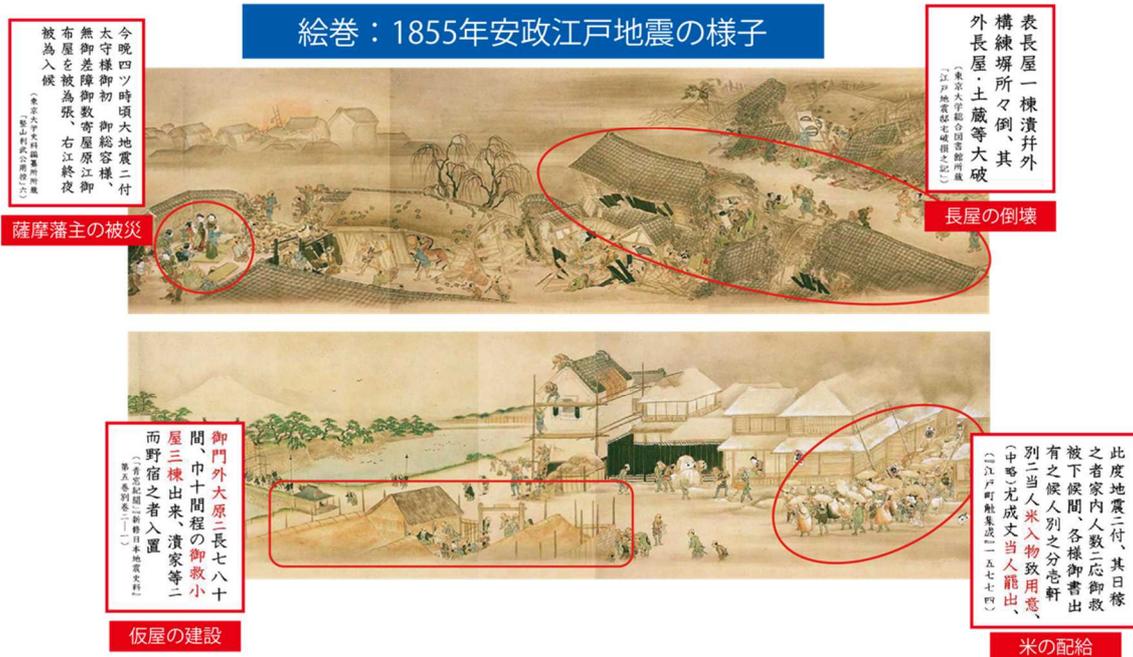


図 12. 「江戸大地震之図」の震災を描く絵巻から江戸の社会を読み解く

国宝である島津家文書の絵巻「江戸大地震之図」（東京大学史料編纂所蔵）から安政江戸地震（1855年、安政2年）の様子を読み解き、文献資料と照合すると、事実と良く符合しており、当時の状況を忠実に描いているものとして、資料としての信頼度が高いことが明らかになった。当時の地震や火事による被害や人々の対応、復興過程の実態を見る手がかりとなり、今後の防災施策や復興施策の検討にも活用可能な事例である。

（2）地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

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

地域社会は災害に対処する仕組みを備える一方で、近年の社会変動によって潜在的な脆弱性を増大させており、そのことは災害の発生によって被害を拡大する要因となる。今年度においては、災害が生活に与える影響の把握方法について、地域に潜むリスクを脆弱性の観点から評価する技術の可能性を検討した。富山県を対象に、国勢調査データに基づいて人口密度ならびに乳幼児・高齢者人口の密度を算出し、脆弱性尺度として災害時弱者支援力「見

守られ率」(成年一人当たりの乳幼児・高齢者数)を地図上で可視化した^[TYM_03]。

一方、地震・火山等の自然現象に関する知識、また災害予測情報等の活用可能性には個人差も大きく、より効果的な防災対策を可能にするためには、こうした個人差を良く理解する必要がある。認知科学のアプローチから、災害情報を活用する個人の態度・能力・考え方と関係する「災害を生きる力」因子を整理する調査設計のために、今年度は基礎的検討と試行調査を行った。南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域在住の成人を対象としたウェブ調査を実施し、「通常の大地震発生とそれに伴う大津波からの避難」と「南海トラフ地震臨時情報(巨大地震警戒)に基づいた避難」の両シナリオ間での避難見通しの差異を検討し、その程度には大きな差はなかったものの、前者のシナリオの際に「絶対避難しない」「必ず避難する」の回答が多いなどの結果を見いだした^[IRID06]。

個人レベルにおけるリスク認知と避難行動とのギャップについては、地理空間情報*、GIS*、衛星測位に ICT 技術を統合した災害情報共有システムを構築し、活用方法の開発に着手した。具体的には、WebVR 技術を用いた疑似避難訓練システムを開発して避難実験を行ったところ、たとえば地形の複雑な地域において「海から離れなければ」という意識で逆に津波が来る方向に逃げようとするなど、津波災害時に注意すべき行動が明らかになった^[HKD_07]。

緊急性の高い火山噴火災害への備えにおいては、市民の科学的知識レベルの向上は喫緊の課題である。桜島は現在活動中の火山のうち人口 50 万以上の大都市に最も近接する火山であり、科学者と市民との共同によって観測から防災に至る一連の対応システムの構築が試みられている。そのための基礎資料として市民を対象に噴火情報に関する意識調査を行った。鹿児島市などの隣接地域において噴火警戒レベルの認知度が有意に高く、噴火に至るかどうかも不明であっても観測データに異常が見られる場合の情報が必要とされていること、情報の信頼性の高い公的機関や専門機関からの情報発信のニーズが高いこと、火山災害を減らすためには災害情報にかかわる取組が重要だと考えられていることなどを明らかにした^[DPRI13]。

一方、日本有数の観光地であり、近年大きな地震や火山噴火が発生した熊本県阿蘇地域では、研究者と国や県、地元行政機関などが連携して、地震・火山観測の準リアルタイムデータ表示システムの設置を行うとともに、観光客に触れる機会の多いジオパークガイドの養成を通して防災リテラシーの向上を図る方策を展開してきた。今年度は、その養成講座の講習内容を検討するために、現役ガイドと新人ガイドに対して熊本地震に関するアンケート調査を実施するとともに、現役ガイドの活動に関するアクションリサーチを行った。その結果、新人ガイドと現役ガイドの間には活断層認知率など科学的知識レベルに差異があり、地球科学リテラシーの向上につながる講習内容に課題があることを見いだした^[KUS_03]。

また、2014 年に深刻な御嶽山噴火被害を経験した長野県木曾地域は、観光地でありながらも深刻な過疎の問題を抱えており、地元の火山防災力の向上を図る担い手の確保に腐心している。そのため、専門家と県や地元自治体が連携して、火山マイスターとして認定された地域内外の市民のネットワークを専門家が支援し、火山マイスターの活動記録をもとに、

必要とされる知識や防災効果を評価・検証・フィードバックする制度を構築した。今年度は、基礎資料を作成するために、木曾地域の関連行事における参与観察、関係者へのインタビュー調査などを行い、マイスターの属性を整理するとともに、過去2年間の活動記録を蓄積した^[NGY_06]。

地震・火山研究の成果を防災対策や災害対応に活かすための、より一般的・体系的な取組として、実務者（行政担当）を対象にした防災リテラシーの向上のための研修プログラムの開発し、開発した研修プログラムをモデルケースとして実装し、その効果を検証することでプログラムの高度化を図る研究に着手した。今年度は、その基礎となる「育成したい人材の特性」「育成フレームの同定」「育成プログラムのプロトタイプ」を検討した。特に育成プログラムにおいては、一方の研修だけではなく、研修によって一定の基礎知識が共有された段階で、育成対象者から研究者コミュニティへのフィードバックを実施し、双方向のリスクコミュニケーションを実現することを目指したプログラムの試作を行った^[NGT_02]。

最後に、「オープンサイエンス」（市民参画型科学，市民参画型データ収集・管理）の手法を地震防災学の分野にも導入し、地震・火山・津波災害データベースの構築・共有を進めながら、それを通じた防災リテラシーの育成を目指す取組を開始した。取組内容は多岐にわたる研究項目から構成されるが、今年度は、（1）サイエンスミュージアム「阿武山地震観測所」の運営による地震リテラシーの向上、（2）地震・津波避難訓練支援ツール「逃げトレ」の導入による市民参画型の地震・津波訓練の推進、（3）自然災害に関する歴史資料の解説を行う「みんなで翻刻」プロジェクトの推進、（4）内陸地震観測「満点計画・0.1満点計画」によるオープンサイエンス型地震学の試行を実施し、それらの基本フレームとアウトカムを整理・図式化した^[DPR114]。

3-5 研究を推進するための体制の整備

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

(1) 推進体制の整備

測地学分科会*は、計画の進捗状況を把握し行政や社会のニーズを踏まえた計画の推進につとめた。行政機関や地震調査研究推進本部*等の関係機関との連携を進め、本計画による研究成果・技術が災害軽減に貢献できるよう、災害・防災対策に係る社会ニーズを的確に把握することに努めた。例えば、津波や地震動の即時予測及び事前想定の高高度化、海溝型地震の発生予測手法の高高度化、などの課題に対し、本計画は基礎・学術研究の面から取り組んでおり、地震調査研究推進本部の施策に資するものと考えられる。地震・火山噴火予知研究協議会においては、前研究計画から行政機関、国立研究開発法人等が正式に参加し、また、企画部*内に戦略室を設置するなど実施体制の強化が図られてきた。戦略室に行政機関、国立研究開発法人等の委員も加わり、本研究計画に参加している全機関の連携がより強化された。地震学・火山学の成果を災害軽減に活用するために、地震リスク評価について、不確実性の可視化手法及び精度向上のための災害誘因予測の高高度化、に関する拠点間連携共同研究をさらに発展させた。

気象庁は火山噴火予知連絡会*を2度開催するとともに、霧島山部会と草津白根山部会でそれぞれの火山の活動を検討した^[JMA_08]。

(2) 拠点間連携共同研究

災害や防災に関連する研究者と協働して計画を推進するためには、東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所とが連携して、計画を進めることが有効であるとの結論に至った。これを受けて、前研究計画から、両研究所がそれぞれの分野の共同利用・共同研究拠点として、連携して共同研究を進めている。重点推進研究では、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を目指し、(1)震源過程、(2)伝播・深部地盤構造、(3)強震動予測、(4)浅部地盤構造、(5)構造物被害予測、(6)リスク評価の研究グループに分かれ、それぞれの分野におけるリスク評価の不確かさの要因についての検討を進めるとともに、これらの

知見を統合するための（７）プラットフォーム構築グループ、（８）ステークホルダの参画に関する研究グループ及び（９）大規模計算のためのコンピュータサイエンスグループの９グループにおいて、リスク評価及びその不確かさに関する検討を行っている。総括研究では研究グループ間で理工分野の連携を進めながら主に大学により共同研究を実施した。また、分科研究においてはそれぞれの研究グループの研究の深化を図った。さらに、一般課題型研究では、災害誘因予測の高度化のための研究を公募することで、新規５件、継続６件の防災に関する多岐に亘る研究分野についての研究を実施した。

（３）分野横断で取り組む総合的研究を推進する体制

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

・ 南海トラフ沿いの巨大地震

地震・測地観測網で得られたプレート間固着*やスロー地震の知見に基づき、南海トラフ沿いの巨大地震の広帯域震源モデルを構築する。その上で地震波及び津波の伝播モデルに基づき、西南日本地域の強震動及び津波浸水モデルを提示することを目的とする。今年度は、地震・測地観測記録及びこれまでの研究事例を検討し、科学的に最も起こりうる震源モデルと強震動予測モデルの構築を進めた。また、予測される地震シナリオに基づく津波の浸水モデルの構築を進めるとともに、本震発生時に想定される各課題間の輻合作用を考慮したモデル作成時の問題点等を整理した。

・ 首都直下地震

首都直下地震は、一旦発生すれば首都機能や我が国の経済活動全体に深刻なダメージを与える可能性が高い。想定される多様な震源について、発生メカニズムや発生可能性を評価できるようになることを目標とする。産総研は、房総半島南部沿岸の海岸段丘について掘削調査を行い、離水年代の検討を行った^[AIST08]。東京大学地震研究所は、1855年安政江戸地震を対象として研究を進めるため、過去の地震被害の記述が多く残されている成田周辺において、それらの記述から特定した被害地点のうち27か所で臨時地震観測を行った^[ERI_15]。東京大学情報学環は、地震・火山災害情報の活用のための住民の知識体系に関する基礎的調査を実施した^[III_01]。

・ 千島海溝沿いの巨大地震

千島海溝沿いでは、東北地方太平洋沖地震と類似した巨大地震が、繰り返し発生していることが津波堆積物の調査から明らかにされている。政府の地震調査研究推進本部では、M8.8程度以上の超巨大地震の発生が切迫している可能性が高いと評価しており、津波や地

震動による大きな被害が予想される。本総合研究グループでは、千島海溝沿いで発生する巨大地震による災害の軽減を目指した総合的な研究を横断的に実施する。

今年度は、津波堆積物の調査から、白老町社台・苫小牧市勇払・むかわ町汐見の津波堆積物は1611年慶長地震津波起源の可能性が高いことがわかった^[HKD_01]。地震活動の静穏化^{*}現象を用いて、カムチャツカ半島東岸から千島列島、北海道沖、東北日本沖、伊豆小笠原諸島にかけての沈み込み帯での長期予測を試行した^[HKD_09]。震源域近傍の海底圧力観測データ同化による津波数値計算手法を用いて、実際のS-net観測点分布で津波即時予測がどの程度可能かを1968年十勝沖地震の断層モデルにより検討した^[HKD_09]。また、避難訓練結果を可視化する避難訓練可視化システムを開発し、集団避難実験における運用を通して、システムの効果及び課題を検証した^[HKD_09]。

・ 桜島大規模火山噴火

活発な噴火活動を60年以上続け、今後、大規模噴火の発生が予想される桜島を対象に、各研究項目間で緊密な連携と成果の共有を図り、住民避難を視野に入れた総合的研究を推進することを目的とする。観測研究を通じて火山活動推移モデルの高度化を図り噴火予測研究を進展させることと、災害予測研究を進め、災害予測に基づく災害情報を住民へ伝達する手段や避難・復興に資する研究を進めることを5カ年の目標とする。今年度は、京都大学防災研究所が、大正噴火時の住民の記憶をまとめた「桜島爆発の日（野添，1980）」などにもとづき、大規模噴火に至るまでの過程を整理した。噴火発生に伴う諸現象を即時的に解析して火山灰の拡散範囲をシミュレーションにより予測するだけでなく、噴火前の地盤の膨張量から噴出マグマ量を予測し、火山近傍の風速データをもとに噴火発生前の拡散予測も行った。

・ 高リスク小規模火山噴火

噴気地帯や山頂火口近傍に、多くの観光客や登山客が訪れるため、小規模な噴火でも人的・物的被害が生ずる場合がある。また、小規模な噴火は発生頻度が相対的に高いことから、観光客や登山客等の災害リスクの低減という観点から重要な研究対象であるが、研究の具体的な方向性は必ずしも明らかではない。本総合研究では、高リスク小規模噴火による災害の軽減に資する研究の課題や方向性を明らかにすることを目的とする。既存課題の成果を活用し噴火履歴の把握や噴火ポテンシャルを評価すること、災害情報の発信手法を整理すること、社会科学、災害科学分野の成果を調査し本課題への活用法を探ること、本課題に関する研究集会を開くことを5カ年の目標とする。今年度は、草津白根山について、噴火履歴の解明及び噴火ポテンシャル評価に関する研究が進められた^[TYM_01]。箱根大涌谷では噴気観測データから噴火前後のヘリウム同位体比の変化を検出し、噴火に関する流体移動の役割を明らかにした^[AORI02]。

(4) 研究基盤の開発・整備

・ 観測基盤の整備

防災科学研究所は、陸海統合地震津波火山観測網 (MOWLAS)*及び首都圏地震観測網 (MeSO-net)*を安定して運用した^[NIED05]。

国土地理院は、全国における GNSS 連続観測点を平均 20km 間隔の配置として維持するとともに観測を継続し、電子基準点リアルタイム解析システムを運用するとともに変動点検知機能を強化した。さらに、SAR 干渉解析により西之島の地形変形を検出するとともに、八丈島、箱根山、岩手山秋田駒ヶ岳、日光白根山について、火山土地条件図、火山基本図、数値データの準備や整備を進めた^[GSI_04, GSI_07, GSI_10]。

気象庁は地震観測網や地殻変動観測網などの観測基盤の維持、関係機関の地震観測データの一元的处理結果の関係機関への提供を実施し、南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会や地震調査委員会において報告を行った^[JMA_09]。また、全国の 50 活火山について、全国 4 カ所の火山監視・警報センターにおいて連続的な監視観測を継続するとともに、いくつかの火山で新たな観測装置の配備や臨時観測を実施した^[JMA_12]。

海上保安庁は海域火山の定期巡回監視を実施するとともに海域基礎情報調査の成果を公表した^[JCG_04]。

大学は、観測データ流通網 JDxnet*の安定的な運用を継続し、東大地震研接続ポイントにおいては、SINET*経由により JGN*接続を実現し、ネットワークの冗長化を復旧させた。また、柏での接続も開設し東京大学情報基盤センターの大規模並列計算機を活用できる基盤を構築した^[ERI_19]。

山梨県富士山科学研究所は、gPhone 重力計の導入を行い、連続観測を開始した^[MFRI02]。北海道立総合研究機構地質研究所は、北海道の活火山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た^[HRO_01]。

・ 観測・解析技術の開発

大学は、新たな無線通信帯域・技術を活用したデータ伝送システムの開発及びこれを利用した地震・火山活動状況を高精度かつ迅速に把握可能なシステムの開発を進めた。東京大学地震研究所は、桜島火山においてミュオグラフィ観測を行い火口下の密度変化を検出した^[ERI_21]。また、光ファイバセンシング技術の一つであり、振動を計測する分散型音響センシング (DAS)*を利用した地震観測を実施した^[ERI_22]。情報通信研究機構においては、地震や火山等の自然災害発生時における被災地の状況把握を詳細かつ迅速に行うための次世代航空機搭載 SAR*を開発した^[NICT01]。

・ 地震・火山現象のデータ流通

北海道大学は、地殻変動連続観測、及び GNSS データサーバの運用を継続し、地殻変動等

多項目データの一元的な流通とデータの蓄積などを行った^[HKD_08]。東京大学地震研究所は、現 WIN システム*における課題と次世代システムへの要望の集約を行った^[ERI_24]。

・ 地震・火山現象のデータベースの構築と活用・公開

気象庁は、総合的な地震カタログの作成と発震機構解析及び大地震時の震源過程解析を実施し、それらを公開した。また、1919～1921 年の過去震源について各地の地震観測原簿等を用いて震源計算を行い、2020 年 1 月に公開した。これにより、日本周辺の地震活動について一定品質の地震のデータが 100 年以上の期間で利用可能となった^[JMA_14]。産業技術総合研究所は、アジア太平洋地域の地震火山ハザード情報整備、国際標準化、データ共有・相互利用、国際的な連携の推進を目的として、アジア太平洋地域の研究機関と連携し、地震火山活動に関連する地質ハザード情報の取りまとめを進めた^[AIST11]。国土地理院は、監視・観測体制の充実などが必要とされた火山を優先して、火山防災に資する基礎的な地理空間情報の整備を進めるとともに、地震災害の軽減に資するため、地形分類情報の整備を進めるほか、全国活断層帯情報（活断層図）を整備した^[GSL_10, GSL_09]。地震・火山噴火予知協議会では、戦略室を主導として、研究成果共有システムの構築に向けた検討を進めた。具体的には格納を行う情報・データの検討を実施するとともに、コンテンツの整理を先行的に進めた、成果報告時に登録される成果物のリスト、火山構造探査データ、機動 GNSS データのほか、これまでの建議研究で作成されているデータベースやソフトウェアへのリンク、建議研究で実施されている観測や調査に関するメタ情報について、本システムで一元的に収集することとした^[ERI_25]。

（５）関連研究分野との連携強化

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

（６）国際共同研究・国際協力

日本と同様に沈み込み帯に位置するニュージーランドにおいて地震観測を実施し、地震発生機構の解明のための国際共同研究を進めている。今年度は、カイコウラ地震発生以前から南島に展開されている臨時地震観測点のデータと定常観測網である GEONET、及び Victoria University of Wellington, University of Wisconsin-Madison による地震観測点データを統合し、カイコウラ地震の余震分布を詳細に決定した^[THK_01]。また、2018 年 3 月

下旬から4月前半にかけて、比較的大規模なSSEが発生したヒクランギ沈み込み帯北部において日・NZ・米・英の国際共同による海底地震計及び海底圧力計による観測を継続している^[ERI_08]。

素粒子 μ オンによる桜島火山の内部構造画像化の研究をハンガリー科学アカデミーウィグナー物理学研究センターとの共同で進めている。高精細 μ オグラフィの開発に成功し、桜島中央火口近傍の密度変化を示唆する時系列的な画像が得られ始めた^[ERI_21]。

国土地理院は国際VLBI事業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86回実施した^[GSI_07]。

(7) 研究成果への理解醸成と人材育成

地震・火山噴火予知研究協議会は、東京大学地震研究所の広報アウトリーチ室との共同で「地震・火山噴火予知研究のサイエンスカフェ」を2回開催した。このイベントは、地震・火山噴火の予知研究の現状について専門家と参加者が意見交換を行い、双方の理解を深めることを目的としており、第1回は「近年の浅間山噴火等を例にした火山噴火予知研究の現状」、第2回は「大地震発生後の地震活動の推移予測の難しさ」をテーマとした基調講演に対して活発な質疑応答が行われた。

4. まとめ

「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）」は平成30年度までの5年間に進められてきた第1次計画の基本方針を踏襲しつつ、関連研究分野間のさらなる連携強化を図ることで、観測研究の成果を活用して災害軽減に役立てる方策の研究を推進するものとなっている。地震発生と火山噴火の予測に関する3つの重点課題は、幅広く展開されている観測研究の成果を予測情報の高度化という具体的な目標に集約することを意識して新たに設定された。一方、観測研究の成果を災害軽減に効果的に活用することを目指し、知識や情報の受け手となる人々の地震・噴火災害に関する理解（防災リテラシー）の向上のための研究を本格的に始動した。そして、本研究を構成する様々な研究分野の連携を促進するしくみとして、大地震や火山噴火を意識した5つの総合研究グループが設けられた。

地震発生の長期予測は、これまで地震発生履歴に強く依存してきた。とりわけ、発生頻度が低く活動履歴に関する情報に乏しい内陸の活断層の活動予測の定量化は重要な課題であった。内陸地震発生の新たな長期予測の手段として、測地観測から得られるひずみ速度場をもとに、特定の地域において大地震が発生する確率を計算する試みが始められた。地殻活動のモニタリングにより、南海トラフにおけるスロースリップの長距離移動が発見されたことで、プレート境界での滑りの時空間変化を検知した新たな事例が蓄積された。これを海溝型地震の予測性能向上にどのようにつなげるかが、今後の重要な課題であろう。地震発生場の地下構造や応力状態と多様な断層滑り現象とその分布を記述するモデルの構築・提案が本計画の課題の中でも進められており、それらを活用することで、地殻活動の現況に基づく地震発生予測の性能向上が図られると期待される。

近年、噴火事象系統樹が多くの火山で作成されるにつれ、過去に起こった噴火事象の種類や発生頻度を把握するだけでなく、予測にも役立てようとする機運が高まってきた。こうした背景を受けて新たな重点課題に設定した「火山活動推移モデルの構築」は、最終的には、これまで蓄積されてきた多様な観測データを様々なアプローチで援用しつつ、事象間の連関や各種観測量の関係にも目を向けることで、一連の火山活動の予測に有用な準拠モデルの提案を目指している。各地での継続的な多項目観測はその基盤をなす。今年度はとりわけ、噴出物の含水率・温度・微結晶量等の変遷と噴火様式の対応、火山ガスの継続的サンプリング・化学分析や、二酸化硫黄放出率の自動観測など、物質科学分野での成果が多数上がっている。測定技術の開発が進んだことで、これらの一部は地震観測等と同様、もはや火山のモニタリング項目として不可欠な存在となりつつある。

防災リテラシー向上を目指した研究では、社会における防災リテラシーの実態や、地震火山に関連して発信される情報に対するニーズの把握は重要である。地震火山災害に関する理解や情報活用可能性には個人差が大きいと考えられるが、認知科学などによりこれを理解する研究が始まっており、リテラシー向上に向けた重要な基礎情報が得られると期待

される。防災減災でのキーパーソンとなる実務者や有志市民を対象とした研修プログラムの開発や市民ボランティア参加型の研究も進められている。こうした取組は、社会全体の防災リテラシー向上に有効と期待される。

総合研究グループのうち、「千島海溝沿いの巨大地震」と「高リスク小規模噴火」は、本計画から活動を開始したものである。前者では、地震発生の長期予測から地震発生後の津波ハザード即時予測といった複数の時間スケールでの予測手法の研究に加え、長期予測と即時予測がどのように住民の避難行動を変容させるか、という観点での社会科学的な研究が展開されている。今年度、千島海溝近くでのプレート間固着状態を推定するための海底地殻変動観測が開始され、データの蓄積によって、ここで発生する巨大地震に関する長期評価の精度向上が期待される。一方、後者は、観光客や登山者の火山災害リスクを念頭に置いたもので、今年度はまず、5年間の目標設定、課題の洗い出し、とるべきアプローチの検討が行われた。現象解明に軸足を置いた研究方法のみではなく、社会科学的アプローチの必要性が認識されている。また今後、このグループに関連する既存課題を中心に部会横断型の研究集会を開き、各課題の成果を集約・活用する方法も探る。

用語解説

アウターライズ地震

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

アグルチネート

粘性の低いマグマのしぶきが火口付近に堆積・溶結してできた岩石。

アンレスト(unrest)

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

インバージョン解析（逆解析）

ある事象に関して物理モデルが設定されているとき、その事象で観測された測定値を合理的に説明するモデル中の変数を推定するための数学的解析手法。単に、インバージョンと呼ばれることもある。

液状化

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

応力

岩盤等の物体内部に考えた仮想的な面を通して及ぼされる単位面積当たりの力。応力の単位は Pa（パスカル）。面に対して垂直な方向の力を垂直応力または法線応力、面に平行な力をせん断応力とよぶ。応力の向きや大きさの空間的な分布の状態を応力場という。地球科学が取り扱うほとんどの範囲では、応力は 6 つの独立な成分を持つ 2 階の対称テンソルとして記述できる。一般に、応力テンソルは対角化が可能であり、3 つの固有値と固有ベクトルを、それぞれ主応力と主応力軸とよぶ。特に 3 つの主応力を、圧縮が大きい方から順に最大主応力、中間主応力、最小主応力とよぶ。最大主応力と最小

主応力の差を差応力とよぶ。震源域のせん断応力が岩盤のせん断破壊強度に達したときに地震が発生すると考えられている。

応力降下量

地震発生時の断層滑りによって、蓄積されたひずみエネルギーが解放され、断層面にかかる応力が低くなる時のその量。

応力載荷

プレート運動や近傍での地震発生によって、着目する領域の応力が増加すること。

応力場

物体内部の応力の向きや大きさの空間的な分布の状態を応力場という。

海嘯(かいしょう)

現在では、河口に入る波の前面が高い垂直な壁となり、砕けながら川上に進む現象を指すが、かつては津波も海嘯と呼ばれていた。

海底圧力観測

海底地殻変動観測の項を参照。

海底地殻変動観測

海底の地殻変動を観測すること。海底地殻変動観測には以下のような手法がある。

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

化学組成

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

火砕流

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

火山ガス

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

火山性地震

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

火山性微動

火山で発生する連続した地震動。マグマの動きや熱水の活動等に関連して発生すると考えられている。火山性地震とは異なり震動が数十秒から数分、ときには何日間も継続する。

火山灰

火山噴火により噴出した固体のうち、直径 2 mm 未満の細かい破片。

火山噴火予知連絡会

火山噴火予知計画（文部省測地学審議会（現文部科学省科学技術・学術審議会）の建議）により、関係機関の研究及び業務に関する成果及び情報の交換、火山現象についての総合的判断を行うこと等を目的として、昭和 49 年に設置された機関（事務局は気象庁）。年に 3 回開催する定例会では全国の火山活動について総合的に検討を行う。火山噴火などの異常時には、臨時に開催し、火山活動について検討を行う。

活断層

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

させると考えられる。

火道

地下のマグマ溜まりから地表へ至るまでのマグマの上昇経路のこと。

下部地殻

上部地殻・下部地殻の項を参照。

カルデラ（形成）噴火

輪郭が円形またはそれに近い大きな陥没地を形成する噴火様式。

間隙水圧

土や岩石中の粒子間のすきま（間隙）に入り込んだ水にかかる圧力。

干渉 SAR

SAR の項を参照。

観測点補正

震源決定等において、観測網に共通して仮定した速度構造では考慮しきれない観測点直下の地盤の影響を除去するための補正。

企画部

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

逆断層

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

強震記録

強震動の項を参照。

強震動

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

拠点間連携共同研究

「地震・火山科学の拠点」である東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の拠点」である京都大学防災研究所が連携して研究を進める仕組み。今期の研究計画から導入された。

クラスタ

一般には集団や群れのことであるが、ここでは地震がある特定の場所に数多く集まっている状態、またはそのような地震の集合体のことを意味する。

繰り返し地震

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

クーロン応力変化

地震などで生じた力によって、ある断層面あるいは仮想的な面で、どれだけ破壊が生じやすくなったかを示す量。（仮想的な）断層面に平行にかかる応力（せん断応力）の変化と、垂直にかかる応力（法線応力）に摩擦係数を乗じた摩擦力の変化の差として定義されるため、応力と同じ単位であらわされる。

群発地震

本震や余震という区別がなく、ある期間に比較的狭い地域で集中的に発生する地震。

傾斜計

地表面の勾配（傾き）の変化を測定する計器。

玄武岩

マグマが地表及び地下の浅いところで冷却・固結して生じた、二酸化ケイ素の含有率が45～52重量%である火山岩。

降下火砕物

噴火による固形噴出物のうち、噴煙としていったん上空に吹き上がり、風に乗ってある程度水平方向に漂ったのち、重力で地上に落下してくるもの、もしくは火山弾などのように爆発時に火口から弾道を描いて飛散し地表に落下する噴出物。地表付近で水平方向の速度を持って流れる火砕流や火砕サー

ジとは区別される。

航空機搭載 SAR

SAR の項を参照。

構成則

応力とひずみ，滑り速度・滑り履歴と摩擦係数といった異なる物理量を関係づける法則。

災害素因

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

災害誘因

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

サイト特性

増幅特性の項を参照。

差応力

応力の項を参照。

事象系統樹

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

地震・火山噴火予知研究協議会

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

ている組織。予知協と略称されることもある。

地震性滑り

地震波の放射を伴う断層滑り。

地震調査研究推進本部

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

地震・津波観測監視システム（DONET）

南海トラフの地震・津波を常時観測監視するため、南海地震震源域及び東南海震源域に設置された地震・津波をリアルタイムで常時監視するシステム。DONET は英語名 Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis の略称。海底に設置された地震計や水圧計などの観測機器ネットワークによって、地殻変動、地震動、津波などを計測する。

地震動の即時予測

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

地震波干渉法

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

地震発生層

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

地震発生の長期評価

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

地震モーメント

地震の規模を表す最も基本的な量。地震断層の面積と滑り量及び剛性率（岩盤の変形のしにくさを表す物性値）の積で計算される。

地すべり

斜面の一部あるいは全部が地下水等の影響と重力によって移動する現象。

シミュレーション

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

社会素因

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

首都圏地震観測網

首都圏地震観測網(Metropolitan Seismic Observation network), 通称MeSO-net(メソネット)。首都圏地域で発生する地震の研究と、その被害軽減を目的に、首都圏の約 300 カ所(東京都, 茨城県, 神奈川県, 千葉県, 山梨県, 埼玉県)で、人間活動による首都圏の大きなノイズや温度変化を避けるため約 20m の縦孔の底に設置された地震計による観測網。

(噴火の) 準備過程

火山噴火は、火口から溶岩や火山ガスが急激に地表に放出される現象である。噴火の前には、地下深部で発生したマグマが、マントルや地殻内を上昇し、地殻浅部にマグマ溜まりとして蓄積される。さらに、内部の圧力が高まる等の理由で、マグマが地表へ移動し溶岩や火山ガスとして噴出する。このように噴火に至るまでの一連の過程を噴火の準備過程という。

上部地殻・下部地殻

地球の固体部分を構成する大きな成層構造のうち、一番外側の層が地殻である。地殻の浅い部分を上部地殻、深い部分を下部地殻と呼ぶ。

震源過程

地震は震源域において断層面が滑ることによって生じる。このとき断層面上で滑りが伝播する過程のことを震源過程という。断層面上の滑りの速さや向きの時空間変化をあらかじめ指定する運動学的なものを指す。破壊や摩擦の物理法則と連続体力学を用いて断層の滑り伝播過程を動力的に記述する「動的破壊過程」とは区別されることが多い。

震源断層モデル

断層面上における滑り量の分布や滑り方向、破壊の伝播様式を表すモデルのこと。

震源特性

応力降下量や断層サイズ、破壊伝播速度など、震源で放射された地震波の特徴を再現するために必要なパラメータ。

震源要素

震源の座標（緯度、経度、深さ）や発震時刻、マグニチュード、発震機構解（断層の走向と傾斜、滑り角）、断層の長さや幅、滑り量といった、地震の震源を記載するために必要な基本的なパラメータ。

水蒸気噴火

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

スケーリング則

ふたつの物理量の間での比例関係を与える法則。

滑り欠損

プレート境界の変位を考えた時、プレートの収束運動から期待される量から、実際に生じているずれの大きさを減じた量。欠損が大きいとはプレート間が固着していることを意味する。

スロー地震

通常の地震のように断層が急激にすべることなく、ゆっくりと滑ることによって蓄積されたひずみエネルギーを解消させる現象。ゆっくり地震ともいう。

スロースリップ

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

静穏化

地震活動や火山活動が以前の活動よりも相対的に低下している現象。

石基

火山岩を構成する組織の一つ。火山岩中の非常に細かい鉱物粒子からなる緻密な組織を石基と呼び、比較的大きな粒である鉱物結晶を斑晶と呼ぶ。

先行現象

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

前震

本震の近傍で本震発生前に起きる地震のこと。

増幅特性

表層地盤の影響で地震の揺れが増幅される特性のこと。サイト特性ともいう。

測地学分科会

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

脱ガス

マグマの項を参照。

弾性・非弾性

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

地殻

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

地殻活動

地殻内で発生する現象全般の総称。

地殻変動

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

地殻流体

地殻の内部に含まれる水やマグマ等の流体。地殻内で水は、岩盤の亀裂や岩石鉱物の粒界などに存在していると考えられている。

地盤変動

地殻変動の項を参照。

地表地震断層

地震時に連続的に現れる地表のずれのこと。

長周期地震動

規模の大きな地震が発生した場合に生じる、ゆっくりとした揺れのこと。高層ビルは固有周期が長く長周期地震動により影響を受けやすい。

超低周波地震

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

地理空間情報

空間上の特定の地点又は区域の位置を示す情報、及びそれに関連付けられた情報。

津波地震

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

津波堆積物

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

津波の即時予測

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

低周波地震

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

低周波微動

数分から数日の間、断続的に低周波振動を発生する現象。低周波地震の重ね合わせと考えられている。

データ同化

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

テフラ

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

統合地震シミュレーター

コンピューター内に，地盤や構造物だけでなく，人の動きも再現した都市を作り，想定地震動を入力した際の被害や住民の避難行動等を予測するシステム。

トレンチ調査

地質調査法の一つで，地表から溝状に掘り込み，地表では観測できない地層を新たに露出させ，断面を観察する手法。地震分野では過去の断層運動の年代や周囲の環境の調査，火山分野では過去の噴火史を調査するために有力な方法である。

内陸地震

陸側プレートの地殻内で発生する地震。

日本海溝海底地震津波観測網（S-net）

地震計と津波計が一体となった観測装置を光海底ケーブルで接続した観測網で，防災科学技術研究所が日本海溝沿いの海底に設置したもの。24時間連続で観測データをリアルタイムに取得できる。観測装置は150カ所，ケーブル総延長は約5,700kmである。

二面角

水平な固体表面に液体を滴下したときに，液滴の端で，固体と液体表面のなす角。固体が液体をはじきやすいと二面角は大きくなり，固体が液体で濡れやすいと二面角は小さくなる。

熱水系

地熱地帯や火山の地下で形成される，熱水が貯留・循環している領域のこと。

粘弾性

加えられた力に応じて変形し力を除くと原形に戻る弾性的性質と，加えられている力に応じた速度で時間とともに変形が進行する粘性的性質を併せ持つ性質。

粘弾性緩和

マントルや下部地殻などは、地震等によって外部から応力・ひずみの変化が与えられると、短い時間の尺度では弾性体として振る舞い、一方、長い時間の尺度では粘性流体として振る舞い応力が緩和される。このような弾性と粘性の中間的な性質のことを粘弾性と呼び、それを特徴づける時定数を緩和時間という。粘弾性緩和とは、粘弾性体の緩和時間と同じくらいの時間尺度で生じる変形のこと。

発震機構（解）

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

微小破壊

岩石や金属などに応力や熱が加えられることで内部に生じた局所的な応力集中によって引き起こされる部分的な破壊。このときに励起される高周波数の弾性波のことをアコースティックエミッションという。

ひずみ

岩盤（プレート）などが変形する際の、変形の大きさをひずみといい、単位長さ当たりの変位量で定義される。ひずみの空間的な分布の状態をひずみ場という。

ひずみ速度

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

ひずみ速度場

ひずみ速度の項を参照。

非線形応答特性

地盤の増幅特性が、地震基盤から入射する地震動の周波数だけに依存する場合を線形応答といい、振幅にも依存する場合を非線形特性という。

非弾性

弾性・非弾性の項を参照。

比抵抗

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

非定常地殻変動

プレート境界面での固着によって陸側プレートが引きずりこまれることによる定常的な地殻変動とは異なる地殻変動のこと。

微動

低周波成分の小さい振幅の地震波を長い時間にわたって放出する震源のこと。

表面波

地表面に沿って伝わる地震動。波の進行方向に対して地表が直角方向に水平に振動して伝播するラブ波と、上下方向に楕円を描くように振動するレイリー波がある。

プレート

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

プレート境界

プレートの項を参照。

プレート境界地震

プレートの項を参照。

プレート間固着

プレート境界においてずれ運動がない状態のこと。

噴火事象系統樹

事象系統樹の項を参照。

噴火様式

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

分散型音響センシング (DAS)

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

分散曲線

表面波の伝播速度の周波数依存性を表すグラフ（関数）のこと。

噴出物層序

層序とは、地層の重なっている順序のこと。この場合は火山噴火による噴出物が地表に堆積し重なっている順序のことを指す。それを解析することにより、噴火の様式や規模の変化を明らかにすることができる。

平均変位速度

活断層の累積変位の履歴から推定される長期的な変位速度。

変換波

地震波速度の境界面でP波からS波又はS波からP波に変換された波。変換波を解析することにより境界面の位置を推定することができる。

放射非平衡

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

本震, 余震

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

マグニチュード (M)

地震の規模を表す指標。推定に使うデータやデータ処理の方法により、同一の地震でもマグニチュードが異なることがある。気象庁によって推定されたマグニチュードを M_{jma} と表記することがある。

マグマ (マグマの結晶化, 上昇, 発達, 流動, 破碎, 脱ガス)

岩石物質が高温で熔融したもの。日本列島下では、主として沈み込むプレートが持ち込む水によりマントルが部分熔融することで生成する。上昇途中では周囲の岩石と密度が釣り合う場所に滞留してマグマ溜まりを作る。マグマ溜まりに滞留する間に結晶化が進むことで組成が変化したり (結晶分化)、地殻内を上昇する途中で地殻物質を取り込むことで多様な組成のマグマができる (マグマの発達)。マグマ溜まりの圧力が高まるとマグマは上昇を始める。上昇中はメルト中に溶け込んでいた揮発性成分が気泡となり (脱ガス) 密度を下げるため、マグマの上昇が加速される。マグマ中のケイ素の量により粘性が大きく異なり、ケイ素が少ない玄武岩質マグマは粘性が低いために流動性が高く、穏やかな噴火をしやすい。ケイ素が多い流紋岩質マグマは粘性が高く、爆発的噴火になりやすい。火道内のマグマ中にあるガス成分が周辺岩体や噴気として系外へ排出されることを系外脱ガスという。系外脱ガスの量は噴火の爆発性を左右する。マグマ中の気泡の割合が増えると液体部分が細かくちぎれ、大小さまざまな破片になる。これをマグマの破碎という。最も細かく砕けたマグマが火山灰になる。

マグマ貫入

地下のマグマが岩盤に割れ目をつくりながら移動する現象。

マグマ溜まり

マグマの項を参照。

マグマ噴火

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

ミーゼス応力(ミゼス応力)

多方向から圧縮や引張が働いて、本来、6つの成分(テンソル)で表される複雑な応力場にある物体に非弾性変形が起こるかどうかをひとつの値(スカラー)で評価するための指標。ある点の応力場が、非弾性変形を生じえない静水圧状態からがどのくらいずれているかを表している。名称は、リヒャルト・フォン・ミーゼス(Richard von Mises)によって提唱されたことに由来する。

ミュオン(ミューオン)

宇宙線が大気中の原子核と反応して生成される二次宇宙線の一つで、地上に絶え間なく降り注いでいる素粒子。透過する物質の密度によって宇宙線ミュオンの減衰が異なることを利用して、X線の透視撮影のように地殻内部の密度分布を調べる試みがなされている。

ミュオグラフィ

宇宙線ミュオンを用いた地下の透過イメージング手法のこと。

メカニズム解

発震機構解の項を参照。

モホ面

モホロビッチ不連続面の略称。地球の地殻とマンツルの境界であり、そこでは地震波速度が不連続となっている。

溶岩

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

余効滑り

地震が発生したのと同じの断層面上で、地震の後に起こるゆっくりとした滑り。

余効変動

地震の後に震源域あるいはその周囲で発生する地殻変動。

横ずれ断層

断層面に沿って主として水平方向にずれた断層。断層を挟んで他方の岩盤を見たときに、その岩盤が右向きにずれていれば右横ずれ断層、左向きにずれていれば左横ずれ断層という。

余震

本震，余震の項を参照。

ラブ波

表面波の項を参照。

陸海統合地震津波火山観測網 (MOWLAS)

防災科学技術研究所が運用する、全国の陸域から海域までを網羅する地震・津波・火山の観測網の総称。略称はMOWLAS (モウラス: Monitoring of Waves on Land and Seafloor の略)。陸域においては高感度地震観測網 (Hi-net)、全国強震観測網 (K-NET)、基盤強震観測網 (KiK-net)、広帯域地震観測網 (F-net)、基盤的火山観測網 (Vnet)、海域においては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 (DONET1, DONET2) が運用されている。

レオロジーモデル

物質の変形や流動について、単位面積あたりに働く力 (応力) と変形の大きさや変形速度の関係の様子を表したモデル。

レシーバー関数解析

一つの観測点において異なる成分で記録された地震波形を処理した関数。

「レシーバー関数解析」とは、直達 P 波と Ps 変換波 (境界面で P 波から S 波に変わる波) 等の到達時刻差を用いて、波の変換が起こるような面 (例えばプレート境界面) の深さを推定する手法。

b 値

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

CMT 解

発震機構解の項を参照。

CSEP（地震活動予測可能性共同実験）

Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability の略。客観的かつ透明性のある地震予測検証実験を実行できる研究基盤環境を作り、その過程において地震の予測可能性を探るための国際研究計画。

DONET

Dense Ocean floor Network system for Earthquakes and Tsunamis（地震・津波観測監視システム）。南海トラフの地震及び津波を常時観測監視するため、熊野灘沖に設置された地震・津波観測監視システム（DONET 1）。平成 22 年度から、新たに潮岬沖から室戸岬沖にも整備された（DONET 2）。

ETAS モデル

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

GIS

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

GNSS

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

GNSS 搬送波位相

受信機で復調した GNSS 測位信号の搬送波位相角を連続的に測定したもの。

精度の高い測定が可能のため、精密測位に使用される。

InSAR

干渉 SAR のこと。詳しくは SAR の項を参照。

JDXnet

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

JGN

ICT 開発の基盤となる超高速通信ネットワークの実証実験のためのプラットフォーム。

MT 法 (MT 探査)

物理探査の手法の一つで、電気伝導度など地下の電氣的性質を調査する手法。地表で電場と磁場を測定し、地表に入射する電磁場とそれによって地中で誘導される電磁場との関係を用いて、地中の比抵抗構造を算出する。地磁気地電流法 (Magnetotelluric method) とも呼ばれる。

P 波

Primary wave (第一波) または Pressure wave (圧力波) の略。進行方向に平行に振動する弾性波。固体・液体・気体を伝わることができる。

PLUM 法

Propagation of Local Undamped Motion 法。震源や規模の推定は行わず、地震計で観測された揺れの強さから直接震度を予想する新しい手法。巨大地震が発生した際でも精度良く震度が求められる。

Q 値

地震波の減衰の強さを表すパラメータ。Quality factor の略。Q 値が小さいほど地震波は減衰しやすい。

SAR

SAR は Synthetic Aperture Radar (合成開口レーダー) の略。レーダーを搭載する人工衛星や航空機が移動中に得たデータを合成することで移動方向

の開口面を大きく拡大し、大型アンテナと同等の高い分解能を実現したレーダーシステム。干渉 SAR (Interferometric SAR, InSAR) は、同じ場所を撮影した時期の異なる 2 回の画像の差をとる (干渉させる) ことにより地表面の変動を詳細に捉える手法である。

SINET

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

SSE

スロースリップの項を参照。

S 波

Secondary wave (第二波) または Shear wave (ねじれ波, たわみ波もしくはせん断波) の略。進行方向と直交に振動する弾性波。固体のみを伝わることができる。

VLBI (超長基線電波干渉法)

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

VUI

アンレストの項を参照。

WIN システム

日本で開発された、多チャンネルの地震波形データを取り扱うための処理システム。UNIX 上で動作する多くのプログラムからなる。

災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画 実施機関

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

災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次） 令和元年度研究課題一覧

実施機関名	課題番号	研究課題名	研究代表者
北海道大学	HKD_01	津波堆積物情報の高度化と実践的活用に関する研究	西村裕一
	HKD_02	大規模噴火に関わるマグマプロセスの時間スケールの解明	栗谷豪
	HKD_03	マグマ脱ガス実験と火山噴出物の揮発性成分解析に基づく噴火分岐メカニズムの解明	吉村俊平
	HKD_04	電磁気・熱・ガス観測に基づく火山活動推移モデルの構築	橋本武志
	HKD_05	巨大地震に伴う海底斜面崩壊による津波の事前評価・即時予測に関する研究	谷岡勇市郎
	HKD_06	火山活動即時解析表示システムの開発	橋本武志
	HKD_07	地理空間情報の総合的活用による災害への社会的脆弱性克服に関する人間科学的研究	橋本雄一
	HKD_08	地殻変動等多項目データの全国流通一元化公開解析システムの高度化	高橋浩晃
	HKD_09	千島海溝沿いの巨大地震津波災害軽減に向けた総合研究	高橋浩晃
弘前大学	HRS_01	東北日本弧・千島弧会合部とその周辺における地震発生場の解明	小菅正裕
	HRS_02	データ同化に基づく津波現況把握と即時予測の高度化	前田拓人
東北大学	THK_01	国際共同研究によるニュージーランドにおける地震発生機構の解明	岡田知己
	THK_02	流体の寄与に注目した地震断層すべり物理モデルの高度化	松澤暢
	THK_03	噴火発生時刻の即時把握と噴火ダイナミクスの研究	西村太志
	THK_04	浅部貫入マグマの結晶化速度と噴火挙動の推定手法の開発	中村美千彦
	THK_05	世界各地の大地震発生域との比較研究に基づく地震・火山現象の理解	趙大鵬
	THK_06	スラブ内地震の発生メカニズムに関する研究	東龍介
	THK_07	地殻応答による断層への応力載荷過程と断層間相互作用の解明と予測	岡田知己
	THK_08	集中地震観測による火山体構造・火山現象発生場の解明	山本希
	THK_09	繰り返し地震再来特性の理解に基づく地殻活動モニタリング	内田直希
	THK_10	地殻変動に伴う大気中ラドン濃度変動	長濱裕幸
	THK_11	多項目観測データに基づく火山活動のモデル化と活動分岐判断指標の作成	西村太志
	THK_12	海陸測地データを活用したプレート境界面すべり即時把握能力の向上とそれにもとづく津波即時推定手法の高度化	太田雄策
	THK_13	地震・火山データの無線伝送技術の開発	内田直希
東北大学災害科学国際研究所	IRID01	東北地方における地震・津波・火山情報に関する歴史資料の所在調査とデータ収集	蝦名裕一
	IRID02	GPS-A 観測による効率的な上下変動検出技術の開発と根室沖観測への適用	木戸元之
	IRID03	地表設置型合成開口レーダ(GB-SAR)による地表面変位計測の高精度化	佐藤源之
	IRID04	地震の事前情報を起点とするハザード事象系統樹の開発	福島洋
	IRID05	歴史地形の復元・可視化手法の確立と災害発生要因の分析	蝦名裕一
	IRID06	災害に関わる個人の心理・行動特性とその評価・活用・調整に関わる研究	杉浦元亮
新潟大学	NGT_01	日本海沿岸地域を中心とした地震・火山現象の解明のための史料収集と解析	中村元
	NGT_02	地震・火山噴火災害における被害軽減のために利活用可能な要素・知識体系の整理・検証	田村圭子
東京大学地震研究所	ERI_01	歴史地震史料を活用した地震学的解析	加納靖之
	ERI_02	マグマ溜まりの時間発展と噴火様式との関連性	安田敦

	ERI_03	大規模噴火に伴う諸現象とそれを駆動するマグマ溜り—火道システムの解明	前野深
	ERI_04	非線形動力学・計算材料科学との学際連携に基づく地震現象の多様性の統一的理解	亀伸樹
	ERI_05	千島海溝・日本海溝における複合海底地震測地観測によるプレート境界の挙動解明とそのモデル化	篠原雅尚
	ERI_06	より現実的な断層面ダイナミクス	中谷正生
	ERI_07	多項目観測データの比較研究に基づく噴火過程の理解とモデル構築	大湊隆雄
	ERI_08	日本・NZ 国際協力によるヒクランギ沈み込み帯における多様な地震活動と、その発生環境との関係の解明	望月公廣
	ERI_09	内陸地震発生ポテンシャルの予測を目指した島弧の地殻応答と断層における地殻内流体の影響の解明	飯高隆
	ERI_10	東日本における長期的重力変化の観測とモデリング	今西祐一
	ERI_11	地震発生予測のための島弧-海溝システムの観測-モデリング統合研究	篠原雅尚
	ERI_12	スロー地震モニタリングに基づく南海トラフ域の地震発生可能性評価手法に関する研究	蔵下英司
	ERI_13	経験的アプローチによる大地震の確率予測のパフォーマンス調査	中谷正生
	ERI_14	大規模数値シミュレーションに基づく広帯域強震動災害の事前・即時予測	古村孝志
	ERI_15	首都圏の地震被害分布と地震像の解明	酒井慎一
	ERI_16	堆積平野・堆積盆地における地震災害発生機構の解明	三宅弘恵
	ERI_17	堆積物に基づく噴火物理化学パラメータ推定手法の高度化と事象分岐判断への活用	前野深
	ERI_18	観測研究データへの永続的識別子付与	加納靖之
	ERI_19	データ流通網の高度化	鶴岡弘
	ERI_20	光技術を用いた地下深部・火山近傍における地震・地殻変動計測技術の確立	新谷昌人
	ERI_21	高精細ミュオグラフィ画像自動診断による火山活動状況の推移との相関評価	田中宏幸
	ERI_22	海底ケーブルを用いる地震・地殻変動・津波リアムタイム観測技術開発	篠原雅尚
	ERI_23	海底での地震・地殻変動観測に向けた機動的観測技術の高度化	塩原肇
	ERI_24	マルチプラットフォーム次世代 WIN システムの開発	中川茂樹
	ERI_25	研究成果共有データベースの構築	鶴岡弘
東京大学理学系研究科	UTS_01	沿岸巨礫を用いた古津波評価法の検討: 南海トラフ～琉球海溝の連動可能性評価に向けて	後藤和久
	UTS_02	巨大地震に伴う粘弾性余効変動の解明	田中愛幸
	UTS_03	地震発生場のテクトニクスとマルチスケール地震現象の予測可能性	井出哲
	UTS_04	地殻流体の化学的観測による地震火山活動評価システムの高度化と応用	角森史昭
	UTS_05	物理モデルと地形・地質学およびテクトニックな観測データを統合した地震発生の長期予測手法の開発と検証	安藤亮輔
	UTS_06	遠隔地火山、特に離島火山における火山ガスモニタリングの高度化	森俊哉
東京大学情報学環	III_01	ニーズ・アセスメントに基づく地震・火山災害に関する発生確率、被害想定、災害情報のコミュニケーション戦略の開発	関谷直也
東京大学史料編纂所	UTH_01	地震火山関連史料の収集・分析とデータベースの構築・公開	榎原雅治
	UTH_02	近代以前の地震・火山災害に関する多角的研究	杉森玲子
東京大学大気海洋研究所	AORI01	巨大津波を引き起こす震源断層の実態解明と流体変動モニタリング	朴進午
	AORI02	地球物理・化学的探査による海底火山および海底熱水活動の調査	佐野有司
東京大学地震火山史料連携研究機構	HMEV01	地震火山関連史資料に基づく低頻度大規模地震火山災害の調査	佐竹健治
	HMEV02	地震関連史料に基づく近代以前の地震活動の調査	西山昭仁

東京工業大学	TIT_01	海域火山活動に伴う熱水活動の実験的研究と観測研究	野上健治
	TIT_02	小型拡散放出二酸化炭素率測定装置の開発	野上健治
	TIT_03	水蒸気噴火の準備過程を捉えるための火山熱水系構造モデルの精緻化	寺田暁彦
千葉大学	CBA_01	電磁気学的な地震先行現象の総合的研究	服部克巳
富山大学	TYM_01	極小規模噴火を含めた草津白根火山の噴火履歴の解明と噴火ポテンシャル評価	石崎泰男
	TYM_02	富山県弥陀ヶ原火山における地球物理学的観測による火山活動モニタリング	堀田耕平
	TYM_03	地震学・火山学の知見に基づくコンパクトシティをデザインする情報科学からの被災生活シミュレーション	井ノ口宗成
名古屋大学	NGY_01	古文書解読による南海トラフ巨大歴史地震像の解明 ～歴史地震情報の可視化システムの構築とその活用～	山中佳子
	NGY_02	南西諸島海溝におけるプレート間固着状態の解明	田所敬一
	NGY_03	変動地形学的手法による内陸地震発生モデルと活断層長期評価手法の再検討	鈴木康弘
	NGY_04	南海トラフ域におけるプレート間固着・滑りの時空間変化の把握	田所敬一
	NGY_05	地表地震断層の特性を重視した断層近傍の強震動ハザード評価	鈴木康弘
	NGY_06	被害の地域的な発現過程とコミュニティの社会・空間構造に着目した地震・津波災害発生機構に関する文理融合的研究	室井研二
	NGY_07	御嶽山地域の防災力向上の総合的推進に関する研究	山岡耕春
	NGY_08	小電力・小型・携帯テレメータ地震観測装置の改良開発	山中佳子
京都大学防災研究所	DPRI01	津波生成過程の理解に向けた浅部スロー地震の活動様式・発生場の解明とモデル化	伊藤喜宏
	DPRI02	南海トラフ巨大地震の予測高度化を目指したフィリピン海スラブ周辺域での総合的観測研究	澁谷拓郎
	DPRI03	内陸地震の発生機構と発生場の解明とモデル化	飯尾能久
	DPRI04	日本列島の地震-火山噴火の基本場解明:地殻とマントルにおける応力、流体-マグマ、温度・流動-変形場	深畑幸俊
	DPRI05	測地観測データに基づく内陸地震長期評価手法の開発	西村卓也
	DPRI06	インドネシアの活動的火山における火山活動推移モデルの構築	井口正人
	DPRI07	桜島火山における火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測のための総合的観測研究	中道治久
	DPRI08	広帯域強震動予測の高度化に関する研究	関口春子
	DPRI09	断層破壊過程と極大強震動生成に関する研究	岩田知孝
	DPRI10	火山地域を含む地震地すべり発生場の評価と斜面における強震動及び不安定化の事前予測手法の展開	釜井俊孝
	DPRI11	火砕流の発生と流下予測	為栗健
	DPRI12	噴火後の土石流および泥流の発生に関する観測と予測手法の開発	藤田正治
	DPRI13	桜島火山における地域との連携による火山災害に関する社会の共通理解醸成のための研究	中道治久
	DPRI14	災害リテラシーの育成のためのオープンサイエンス手法の検討	矢守克也
京都大学理学研究科	KUS_01	地殻活動データの同化による沈み込みプレート境界面すべり予測に関する研究	宮崎真一
	KUS_02	地震・地殻変動モニタリングによる中期的な火山活動の評価	大倉敬宏
	KUS_03	阿蘇で学ぶ地震・火山災害への備え	大倉敬宏
奈良文化財研究所	NAB_01	考古・文献資料からみた歴史災害情報の収集とデータベース構築・公開ならびにその地質考古学的解析	村田泰輔
神戸大学	KOBE01	鬼界海底カルデラにおけるマグマ供給系の構造・進化の解明	島伸和
鳥取大学	TTR_01	地方自治体の地震被害想定、災害リスク評価を高度化するための基盤整備	香川敬生

高知大学	KOC_01	地震動観測点観測環境の時間変化把握に向けた、解析手法の検討・開発	大久保慎人
	KOC_02	地震波形データ流通のための、新WIN伝送プロトコルの検討・開発	大久保慎人
九州大学	KYU_01	地震火山相互作用下の内陸地震空間ポテンシャル評価	相澤広記
鹿児島大学	KGSM01	南西諸島北部域におけるプレート間すべりの特性に関する地震・地殻変動観測研究	八木原寛
兵庫県立大学	HYG_01	地震・火山観測データを活用した減災・復興モデルの構築とリスクコミュニケーションに資する事例収集	阪本真由美
	HYG_02	地震観測研究の成果を活用した土地利用に係る事例収集に基づく枠組みの提案	澤田雅浩
立命館大学	RTM_01	南アフリカ大深度金鉱山からの地震発生場における応力と物質の直接調査	小笠原宏
	RTM_02	地震に先行する極微小な前震活動の異常度評価と発生環境の評価	川方裕則
情報通信研究機構	NICT01	先端リモートセンシングによる地震及び火山の被害状況把握技術の高度化	中川勝広
防災科学技術研究所	NIED01	多角的火山活動評価に関する研究	藤田英輔
	NIED02	地震・津波予測技術の戦略的高度化研究	汐見勝彦
	NIED03	巨大地震による潜在的ハザードの把握に関する研究	齊藤竜彦
	NIED04	自然災害ハザード・リスク評価と情報の利活用に関する研究	藤原広行
	NIED05	基盤的観測網の運用	青井真
海洋研究開発機構	JAMS01	地震発生帯モデリング研究	堀高峰
	JAMS02	海底広域変動観測研究	石原靖
	JAMS03	海底火山観測研究	石原靖
産業技術総合研究所	AIST01	活断層データベースの整備	吾妻崇
	AIST02	主要活断層帯から生じる連動型地震の古地震学的研究	近藤久雄
	AIST03	地質調査に基づく火山活動履歴の解明と年代測定手法の高度化	石塚吉浩
	AIST04	津波浸水履歴情報の整備	宍倉正展
	AIST05	地質調査と実験に基づく、断層の力学挙動についての三次元モデルの構築	重松紀生
	AIST06	火山性流体観測に基づく噴火発生過程および火山活動推移の解明	篠原宏志
	AIST07	高分解能地殻応力場の解明と造構造場の研究	今西和俊
	AIST08	海溝型巨大地震の履歴とメカニズム解明	宍倉正展
	AIST09	地下水・地殻変動観測による地震予測精度の向上	松本則夫
	AIST10	噴出物の物質科学的解析に基づくマグマ供給系-火道システム発達と噴火推移過程のモデル化	下司信夫
	AIST11	アジア太平洋地域地震・火山ハザード情報整備	宝田晋治
国土地理院	GSI_01	内陸の地殻活動の発生・準備過程の解明	矢来博司
	GSI_02	プレート境界面上の滑りと固着の時空間変化の広域的な把握	矢来博司
	GSI_03	火山地域のマグマ供給系のモデリング	矢来博司
	GSI_04	GNSS 連続観測(GEONET)	矢来博司
	GSI_05	地形地殻変動観測	矢来博司
	GSI_06	物理測地観測	矢来博司
	GSI_07	宇宙測地技術による地殻変動監視	矢来博司
	GSI_08	GNSS 観測・解析技術の高度化	矢来博司
	GSI_09	全国活断層帯情報整備	矢来博司
	GSI_10	火山基本図・火山土地条件図整備	矢来博司
	GSI_11	地殻活動データベース整備・更新	矢来博司
気象庁	JMA_01	地震活動・地殻変動監視の高度化に関する研究	小林昭夫
	JMA_02	地殻変動観測等に基づく火山活動評価の高度化に関する研究	小久保一哉

	JMA_03	火山活動に伴う地殻変動の把握及び評価	湯山弘明
	JMA_04	地球電磁気学的手法による火山活動評価の高度化	山崎明
	JMA_05	化学的手法に基づく火山活動監視・予測に関する研究	菅野智之
	JMA_06	地震動・津波即時予測の高度化に関する研究	山本剛靖
	JMA_07	火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測に関する研究	新堀敏基
	JMA_08	火山活動の総合判断	高木朗充
	JMA_09	地震観測、地殻変動観測	原田智史
	JMA_10	潮位観測	市川真人
	JMA_11	地磁気精密観測	山際龍太郎
	JMA_12	全国における火山観測の強化	宮下誠
	JMA_13	地磁気観測成果のデータベース化	飯野英樹
	JMA_14	全国地震カタログの作成	岩切一宏
	JMA_15	火山現象に関する基礎データの蓄積と活用	山本哲也
	JMA_16	地震・津波・火山防災情報の改善に係る知見・成果の共有	長谷川安秀
	JMA_17	防災・減災に関する知識の普及啓発	長谷川安秀
海上保安庁	JCG_01	海洋測地の推進	山田裕一
	JCG_02	験潮	林王弘道
	JCG_03	海底地殻変動観測	石川直史
	JCG_04	海域火山観測	藤原琢磨
北海道立総合研究機構	HRO_01	北海道内の活火山の地球物理学的・地球化学的モニタリング	高橋良
	HRO_02	津波による最大リスク評価手法の開発と防災対策の実証的展開	川上源太郎
山梨県富士山科学研究所	MFRI01	富士山の事象系統樹を精緻化するための噴火履歴の研究	吉本充宏
	MFRI02	火山モニタリングと地下水流動把握のための多点連続重力観測	本多亮
公募研究	KOBO01	歴史災害研究のオープンサイエンス化に向けた検討	橋本雄太
	KOBO02	有感地震記述ならびに震度の距離減衰式に基づく地震活動解析	石辺岳男
	KOBO03	古地磁気方位を利用した火山層序の高精度化	望月伸竜
	KOBO04	カルデラ・リサージェンスモデルに基づく北海道屈斜路カルデラの大規模噴火予測	後藤芳彦
	KOBO05	南アフリカ大深度金鉱山直下で発生した M5.5 地震震源域の力学的・物質科学的解明	伊藤高敏
	KOBO06	玄武岩質およびデイサイト質マグマの噴火準備過程の高精度解明	佐藤鋭一
	KOBO07	地震先行 VLF 帯電磁波強度減少研究のための超小型衛星のブレットボードモデル及びエンジニアリングモデルの製作	児玉哲哉
	KOBO08	行政等が所有する宏観異常現象に関わるデータを用いた地震発生の確率予測	織原義明
	KOBO09	地震先行 VLF 帯電磁波強度減少の発生メカニズムの解明	鴨川仁
	KOBO10	北海道摩周火山の噴火履歴とマグマ供給系の変遷	和田恵治
	KOBO11	マグマ起源物質の地球化学的モニタリングによる火山性流体挙動解明および火山活動評価	大場武
	KOBO12	火山ガス観測による焼岳火山の活動評価とガス輸送システムの解明	齋藤武士
	KOBO13	北海道摩周周辺における火山熱水活動の地球化学的調査	鹿児島涉悟
	KOBO14	八幡平火山～秋田・駒ヶ岳の熱水流動系が周辺水域に与える影響評価: 広域的火山活動と田沢湖関連水域との関係	知北和久
	KOBO15	蔵王山、過去約 800 年間の活動の噴火推移の類型化	伴雅雄
	KOBO16	2018 年 1 月の草津白根火山の噴火における緊急時の災害情報伝達に関する研究	地引泰人
拠点間連携共同研究	CTOC01	巨大地震のリスク評価の不確実性に関するパラダイム構築の推進	市村強・松島信一
	CTOC02	ばらつきのある被害リスク評価をふまえた防災計画の検討	牧紀男

CTOC03	定常的地震活動の震源および地震波速度構造の精度向上による地震波動場推定の高度化	望月公廣
CTOC04	不均質な断層すべり分布を考慮した津波の確率論的予測と不確実性の評価	佐竹健治
CTOC05	強震観測点におけるサイト特性評価手法の開発に関する多国間共同研究 Multi-national joint-research on the development of the evaluation scheme for site characteristics at strong motion observation sites	川瀬博
CTOC06	テフラの成層構造の発達と風化に伴う物性変化を考慮した斜面崩壊発生場の予測	松四雄騎
CTOC07	強震動のブラインド予測のための共用地盤モデルの構築に関する研究	山中浩明
CTOC08	火山砕屑物からなる斜面の崩壊に対する地震とその前後の降雨の影響評価	渦岡良介
CTOC09	活断層における地殻変動に伴う盆地形成過程から推定される盆地端部での基盤構造を考慮した地震動増幅特性に関する研究	松島信一
CTOC10	建物の応答を考慮した高精度地震情報配信手法の開発	倉田真宏
CTOC11	地震発生の切迫性を伝える災害情報モデル構築～北海道胆振東部地震の主要被災3町(厚真・むかわ・安平)における人的被害に関する全世帯調査を通して～	岡田成幸
CTOC12	訪日外国人旅行者に対する地震・火山に関する情報提供と風評被害対策に関する事例分析 —2018年胆振東部地震、2018年大阪府北部地震、2018年草津白根噴火、2015年箱根山噴火を対象として—	秦康範
CTOC13	災害に備えた文化財等データベースの作成と防災マップの構築	蝦名裕一

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」

令和元年度年次報告

【成果の概要】

参考資料

令和元年9月

科学技術・学術審議会測地学分科会

地震火山観測研究計画部会

[参 考 资 料]

計画推進部会および総合研究グループ等別の成果

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

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

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

○東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会

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

○東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究委員会

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

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

1 (1) 地震 (現象解明)

「地震 (現象解明)」計画推進部会長 飯高 隆

(東京大学・大学院情報学環)

副部会長 望月公廣

(東京大学・地震研究所)

副部会長 岡田知己

(東北大学・大学院理学研究科)

地震や火山噴火が多発する我が国において、地震、火山噴火及びこれらによる災害を科学的に解明することにより、災害軽減に貢献することを目指して、地震・火山の観測研究を推進することは重要である。地震がどこでいつ、どのようなメカニズムで、どのような頻度で発生したかに関して知ることは災害の軽減を目指すうえで基本的な情報となる。地震現象の根本的な理解を深めるためには低頻度大規模現象を含む地震現象の多様性について特性を理解し、それらの現象が発生する仕組みや発生する場について観測研究・理論研究・実験研究による多面的なアプローチが不可欠である。

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

低頻度で大規模な地震現象の研究では、長期間における地震活動を把握するために、史料や考古学的データや地質データ等の長期間にわたるデータの解析に加えて近代的な観測データを用いた解析を行い、研究を進めていく必要がある。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(以下、東北沖地震)は、国内の観測史上最大の地震であり、近代測器が整備された状況において発生した巨大地震であった。地震発生に伴う断層面での大きな変位に加えて、発生以降も長期にわたり大規模な余効変動が続き、これら一連のプレート境界での動きが島弧に大きな影響をもたらすことが考えられる。そのため、東北沖地震発生以降、この地震に関する研究が継続的に進められてきた。

宮城県沖で実施してきたOBS繰り返し観測で得られたデータを用いて、東北沖地震の前後におけるプレート内の応力場を推定した。地震後の上盤内では最大主応力軸がプレート境界面にほぼ直交する一方、中間主応力および最小主応力の方位がプレート境界面からの距離に応じて変化することがわかった。この変化を東北沖地震に伴う地震時応力変化によって引き起こされたと仮定すると、地震前の水平面内での差応力の大きさは15MPa程度と推察される(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_05])。

海溝の海側には、アウターライズ(海溝外縁隆起帯)と呼ばれる、海洋プレートの屈曲によって生じる地形的高まりが一般的に認められる。アウターライズではプレートの沈み込みに伴う屈曲により海洋プレート浅部に伸張応力場が生じ、海洋地殻を断ち切る正断層群が発達することによりホルスト・グラベン(地塁・地溝)構造が形成され、正断層型の地震(アウターライズ地震)が海洋プレート内部で発生する。巨大津波を引き起こす大規模なアウターライズ地震は海溝型巨大地震の発生後に連動して発生することが知られている。日本海溝では、1896年明治三陸地震(海溝型巨大地震, M8.5)の37年後に1933年昭和三陸地震(大規模アウターライズ地震, M8.1)が発生し、津波災害による約3000名の死者が報告されている。

一方、東北沖地震後には大規模アウターライズ地震が未だに起こっておらず、その切迫度が増している状況にあると考えられる。2019年4月、宮城沖や三陸沖日本海溝海側のアウターライズでマルチチャンネル (Multi-channel Seismic: MCS) 反射法地震探査 (「新青丸」KS-19-5 次航海) が実施され、合計2測線 (全長150kmの測線1と全長100kmの測線5) でMCSデータを取得した。これを用いた重合前深度マイグレーション (Pre-stack Depth Migration) 処理の結果、ホルスト・グラベン構造を形成する多数の海底活断層 (アウターライズ断層) の高解像度構造のイメージングに成功した (図1) (東京大学大気海洋研究所 [課題番号: AORI01])。海溝での沈み込み直前における彎曲変形に伴うプレート上面での構造の変化が明らかになった。

水平方向に移動してきた太平洋プレートは、日本海溝から日本列島の下に沈み込むにつれて大きな変形を被るため、沈み込むスラブの上部とスラブ深部では、応力やひずみが異なる可能性が考えられる。それらの違いは、プレート内地震の発生パターンに影響を及ぼすため、スラブ内部の構造や応力・ひずみを知ることが重要である。2012年12月7日にアウターライズ域で発生したスラブ内ダブルット地震の震源モデルを、震源近傍の海底圧力計、遠地地震波形、余震分布から推定した (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_06])。その結果、浅部正断層型地震の断層下端と深部逆断層型地震の断層上端はそれぞれ約35km、約45kmの深さにあり、正断層型地震発生層の下限は2007年の宮城県沖アウターライズ正断層地震活動の下限 (約25km) に比べ有意に深く、東北沖地震によって正断層型地震の活動域が深くなったと考えられる。こうした正断層型地震発生層の下限の深さ変化を東北沖地震による応力変化で説明するには、正断層型地震が発生する範囲での摩擦係数は大きくとも0.2でなければならない。これは、プレート内の断層に沿って間隙流体が深さ30-35kmまで浸透しているために岩石のせん断強度が大幅に低下している可能性を示唆する。曲げ変形によるひずみ速度が遅いプレート内深部では定常的な地震活動度が低いが、摩擦強度が低下しているために東北沖地震による応力変化で正断層型地震の活動が顕在化したと解釈された (図2) (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_06])。

東北沖地震 (M9) のあと、東日本を中心とした広い範囲で大きな地殻変動が起きているが、それと同時に大きな重力変化も起きており、その変動をとらえる研究もおこなわれている (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_10])。さらに、海陸の地殻変動データに加え、今後のデータ取得が進む衛星重力データの利用まで視野に入れた広域粘弾性変形モデルを開発することで、地震サイクルの各段階における列島規模の地殻変動の理解を深めることを目的とする研究もおこなわれている (東京大学理学系研究科 [課題番号: UTS_02])。密度と弾性定数の水平不均質が余効変動に与える影響を見積もる前段のステップとして、それらの水平不均質が表層荷重に対する変形に与える影響を2次元回転対称の地球モデルに対して推定する手法が開発された。

プレート境界周辺で観測される現象を、数値計算やコンピュータによるシミュレーション等で検証していくことも重要なことである。東北沖地震前のおよそ100年間に、東北地方沿岸部にみられた沈降 (特に加速する沈降) の原因、および地震後、現在もなお続く大きな隆起の原因が、いずれもマントルにまでおよぶ (深さにして200 km程度) 温度-流体分布とその結果としての粘性構造に由来するものであることが数値シミュレーションの結果から明らかにされた (図3) (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI04])。

今後巨大地震の発生が懸念される千島海溝沿いや南海トラフ沿いの研究も重要である。千

島海溝根室沖において、GNSS/A (GPS/A) 観測を開始した。具体的には海溝軸より海側に1点 (G23)、海溝よりも陸側の斜面に2点 (陸側よりG21, G22) のGNSS/A観測点を新設した (図4) (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_05])。各観測点は3局ないし4局のミラートランスポンダーから構成されている。さらに、海溝軸を跨ぐ形で3点の海底間音響測距機器を設置し、観測を開始した (図4)。また、ドリフト自己校正機能付海底圧力観測装置のプロトタイプ機を用いて試験観測を実施した。本年度は開発した機構の動作確認を根室沖で実施した。その結果、2700mの水深下でドリフト自己校正のための機構が想定通り動作することが確認された。さらに、根室沖におけるプレート間固着率の評価のためのレオロジー構造の検討を開始した。

また、日本海溝と千島海溝の会合部におけるプレート境界の挙動を把握することは重要であり、そのためには超低周波地震に代表されるスロー地震の観測も必要であるが、通常海底地震観測では検知困難である。そこで、会合部に海底地震計群列 (Array of Array, 以下AoA) を設置して、地震・微動観測も併せて開始した (図4)。AoA は5台の長期観測型海底地震計から構成され、中心には、Nanometrics社Trillium Compact (固有周期120秒) 地震計をセンサーとする小型広帯域海底地震計を設置し、周辺に固有周期1秒の長期観測型海底地震計を配置した。設置は2019年7月に行われ、消費電力の関係から、観測可能期間は中心の小型広帯域海底地震計で1年、周辺の長期観測型海底地震計で2年と見積もられている (東京大学地震研究所 [課題番号ERI_05])。

南海トラフ沿いで取得された過去の海底地殻変動観測データを統計的に解析することで、スロースリップに由来する非定常の地殻変動を複数の観測点で検出した (図5) (Yokota and Ishikawa, 2020, 海上保安庁 [課題番号: JCG_03])。また、海中音速の空間的傾斜を推定する手法を開発し、GNSS/A 観測が海洋学的なシグナルを捉える可能性を有することを示した (Yokota and Ishikawa, 2019)。

沈み込むフィリピン海プレートの形状や深さについての研究は、今後発生が懸念される南海トラフ巨大地震の被害想定において重要な情報をもたらす。四国の徳島-西予測線の27観測点 (臨時15+定常12) の2015年12月から2018年5月までのデータを解析し、レーザ関数イメージを作成した (図6) (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI02])。0Mとラベルした赤線の背景にある正 (赤) の振幅強度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。ここでは海洋地殻の厚さはほぼ一定 (7~8km程度) と考え、明瞭な海洋モホ面 (0M) の上方の青いイメージの連なりに解釈線 (ST) を置いた。 $-80 < x < 50\text{km}$ ではスラブ上面 (ST) の上方に濃い青のイメージが見られ、低速度層の存在が示唆された。その低速度層は、スラブ起源の流体に起因すると考えられる (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI02])。

海域の観測においては、観測機器の開発やその高度化も非常に重要な課題である。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が進められた (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_23])。また、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なっている (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_23])。この小型広帯域地震計には、固有周期20秒のNanometrics社Trillium Compact Broadband Seismometerが用いられた。開発され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

一地震を観測対象としているが、深部構造研究のための深発地震や遠地地震の観測、海底火山の観測への利用も可能である。また、海底地殻変動を測る目的での計測機材の開発と観測も開始されている（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID02〕）。

沈み込み帯全体の広域構造について普遍的な理解を深めるために海外の沈み込み帯での研究も実施された。ユーラシアプレート、オーストラリアプレートとフィリピン海プレートが複雑に相互作用を及ぼしているフィリピン地域の地震発生メカニズム、島弧マグマの成因及び沈み込みダイナミクスに関する研究によって、沈み込み帯ダイナミクスへの重要な情報が得られた。また、フィリピン沈み込み帯において実体波異方性トモグラフィ法を用いて、3次元P波異方性構造も推定された（東北大学理学研究科〔課題番号：THK_05〕）。

（3）地震発生過程の解明とモデル化

地震発生過程の解明とそのモデル化においては、断層滑りの多様性、地震時の動的破壊過程、複雑な断層系における断層間の力学的相互作用、地震活動の階層性等に関する研究を通して地震発生過程の解明を進めることが重要である。また、地球物理・地球化学的観測、野外観察、海域・陸域の科学掘削、室内実験や数値シミュレーションなどを通して、断層面の摩擦特性や地殻流体の挙動等に関する理解を深め、地震断層滑りの物理・化学モデルの構築を行う必要がある。このような研究対象領域としては、日本周辺にとどまらず、世界的な沈み込み帯において、スロー地震から通常地震まで、それぞれの地域で特徴的な活動を包括的に理解することが重要である。そのため、世界各国の沈み込み帯においてスロー地震を含む地震活動の特徴の把握、さらにその発生メカニズムの類似性・関連性の解明のための研究が実施された。

4月中旬に喜界島東方海域において8台の長期収録型自己浮上式海底地震計（LOBS：固有周期1Hz）を投入し、小スパン海底地震観測網による機動観測（第1期）を新たに開始した（図7）（鹿児島大学〔課題番号：KGSM01〕）。また、従来の観測によって取得されたデータの解析も行われた。前計画での約5年間にLOBSで取得された海溝軸側の3点のデータを解析し、低周波微動の検出を行った。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低周波帯域（概ね2Hz前後）、および概ね10Hz前後の高周波帯域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した。平成26年（2014年）4月から令和元年（2019年）10月までの解析結果を示す（図8）（鹿児島大学〔課題番号：KGSM01〕）。今年度新たに加わった平成30年（2018年）4月以降の結果について、バースト的な活動が平成30年（2018年）11月に見られたが、それ以外に特に際立った活動は見られなかった。同海域にお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データを加え、検出されている浅部低周波微動の震源決定を実施した（図9）（鹿児島大学〔課題番号：KGSM01〕）。

また、科研費等により2017年から2018年にかけて実施された日向灘の観測記録の解析を進めた。その結果、2013年の活動域の一部と領域がほぼ重なる微動活動が2017年12月から2018年1月にかけて観測された。観測された微動の移動は、2013年に観測された微動分布の折れ曲がりの部分で停止した。2013年の活動で見られた2回の移動のうち1回目は今回観測された微動の移動と同じ場所で停止した。停止した領域は、九州パラオ海嶺が沈み込む領域に対応し、沈み込む海嶺が微動活動域の広がりやを規定する構造的要因であることが示唆される

(京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI01])。

海底の地震活動の現状把握と実態解明のためには、広域かつ精緻な観測データをリアルタイムで取得する海底地殻変動・地震活動観測技術システムを開発し、海域に展開する必要がある。特に、巨大地震・津波の発生源として緊急性や重要性が高い海域を中心に3次元地殻構造や地殻活動、断層物性、地震活動履歴等に係る調査が実施された(海洋研究開発機構 [課題番号: JAMS02])。房総半島沖での地震観測データを用いて速度構造解析とレシーバー関数解析が行われた。その結果、フィリピン海プレート上面の深さは、陸上での地震観測データに基づく先行研究の結果よりも3-6km浅いことがわかった。また、房総半島沖で繰り返し発生しているスロースリップは、北米プレートとフィリピン海プレートの地殻同士が接している部分でのみ発生していることが明らかとなった。

さらに、海外の沈み込み帯でも観測研究が実施され、メキシコ・ゲレロ州沖合で2017年11月から実施している海底地震・測地観測網のデータの回収作業、機器の回収・再設置作業を継続して実施した(京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI01])。加えて、GNSS音響結合方式による海底地殻変動観測(GNSS/A観測)による測地観測点3点の観測も継続して実施した。特に2019年度は、長期型海底圧力計1台の機器回収、長期型海底圧力計3台のデータ回収作業、海底地震計8台の設置・回収作業およびウェーブライダーを用いたGNSS/A観測を実施した。2017年以降に調査海域で取得されたマルチビームソナーの記録の再解析も実施し、2019年までに回収した海底地震・測地観測記録のデータサーバーを構築した。2018年度に回収された9台の地震計記録を解析し、微小地震活動および非火山性微動の分布を求めた。約800個の微小地震について目視でP波およびS波の検測を行いそれらの震源を決定したところ、微小地震の震源は主として、ゲレロ空白域北西端に設置された観測網の周囲に分布し、特にゲレロ空白域の主要部では周囲に比べて微小地震活動が低調であった。微小地震の一部に小繰り返し地震が含まれることを陸上の観測網記録との比較から確認した。この研究では、継続時間が10-100秒の非火山性微動を検出し、エンベロープ相関法によりそれらの震源を求めた。解析の結果得られた130個の震源は、海溝軸付近に複数のクラスターを形成して分布した。各クラスターの活動周期は、おおよそ2-3ヶ月間隔であった(京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI01])。

ニュージーランドのヒ克蘭ギ沈み込み帯でも研究が行われた。今年度は、予定していた海底圧力計5台の設置を行った。また、2015年6月に設置したGNSS/A観測のための海底局3台、2018年10月に設置した海底圧力計5台に加え、海底地震計5台については全台回収することに成功した(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_08])。本海域では、2019年3月から4月にかけて大規模なスロースリップが発生し、これに伴い地震活動が活発となっていることが陸上観測網から認められている。これらの事から今後の解析結果に期待ができる。

観測データに基づいた解析が進められている一方で、このようなスロースリップイベント(SSE)を数値シミュレーションによって解明する研究も進められた(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_06])。SSEによる载荷が地震をトリガする効果の基礎的な見通しを得るために、1自由度バネブロックモデルを用いたシミュレーションを行った。SSEを模した小さなステップ的な载荷が、定常的なプレート運動からの载荷に周期的に重畳している系のふるまいをサイクルシミュレーションによって調べたところ、総体的にみれば定常载荷に近く、頻繁に繰り返す小さなSSEの場合ですら、地震の発生サイクルがSSEのサイクルに完全に同期してしまう「引き込み現象」が生じることが見いだされた(Ohtani et al., 2019)。同程度の大

きさの摩擦ブロック間での引き込み現象は既に知られている(Sugiura et al. 2014) が、この研究での結果は大きな規模の地震のリズムが、それよりずっと小さな規模のSSEのリズムに引き込まれてしまうことを意味する(図10)。この引き込み同期現象は、非常に広い条件範囲で普遍的に生じるが、その発生パターンは、SSE周期の整数倍の一定周期で地震が起こる単純なものから、地震数回をひとつの単位としてSSE周期の整数倍になり、そのあいだ地震発生間隔がきまったパターンで平均から増減する複雑なものまで様々である(図10)。基本的には、1回のSSEが大きなインパクトをもち頻度が少ないほど単純な同期パターンになりやすい傾向があり、SSEはそのインパクトの大きさに応じて、地震発生間隔をSSEの影響がない場合の自然な周期からずらす力をもつように見える(図10)。ただし、どのような同期パターンでも、地震の発生がとりわけSSEの発生後短期間に集中する傾向は見られない。なお、SSEが瞬間的なステップではなく、現実のSSEのように有限の期間をもって滑る場合であっても、引き込み同期現象は同じように起こることも確認された(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_06])。

2019年山形沖で発生したM6.7の地震に伴う余震活動に関して、定常地震観測網の波形データを用いて震源再決定を行った(図11)(吉田・他, 2019)。その結果、余震活動が数枚の面構造に集中し、その震源が深部から浅部へ移動することが分かった(図12)。同様の震源移動は、2017年秋田県大仙市で発生したM5.1の地震や2017年の鹿児島湾のM5.1・M5.3地震の前後にも見られた。これらの震源移動は、地震活動の発生要因として流体移動や非地震性滑りなどが関係していることを示唆する(東北大学理学研究科[課題番号: THK_07])。

北海道から東北沖の沈み込み帯における階層的地震発生構造を解明するために、階層的地震破壊の実例を多数調査した。M4.5以上の大地震と、M4以下の中小地震の波形の立ち上がりを網羅的に比較した結果、多くの大地震の波形の立ち上がりは、小地震と同じであることを発見した(図13)。これは階層的な地震破壊が起きていることを示唆する。具体的には低角逆断層の沈み込みタイプの地震899イベントのうち170イベントが該当する。但しこの割合は低角逆断層でない地震の場合には極めて低くなる。その低い割合は、地震の震源核形成過程にとって重要な示唆を与える結果である(Ide, 2019, 東京大学理学系研究科[課題番号: UTS_03])。

非線形動力学・計算材料科学的アプローチに基づいた地震研究も行われている。この課題では、摩擦の速度依存性の微視的モデル、断層相互作用系フルモデルの効率的シミュレータ開発、摩擦不安定性におけるノイズや応力摂動の効果に関する力学系理論的研究の視点からの研究が行われた。その一例として、地震発生における応力摂動の効果をより物理的に解明すべく、高精度の制御と計測が可能な岩石破壊実験において、応力変動効果と微小破壊の関係を定量的に確立することが試みられた。流体圧を変動させることによって有効封圧を変動させ、差応力の変化と微小破壊発生率の関係を調べた。その結果、差応力に対して0.1%程度の微弱な流体圧変動が微小破壊発生率と有意に相関することが確かめられた。

地震発生場の詳細を、南アフリカの大深度金鉱山における至近距離地震観測によって描き出そうという試みもなされている(立命館大学[課題番号: RTM_01])。1996年に行われた3次元地震反射法探査データの再解析を進めたところ、未解釈だった採掘レベル以深で、本震時に周囲より大きく滑った領域(Mori et al., 2019)および余震のギャップと、反射体が分布する領域との位置関係が相補的であることがわかった(Noda et al., 2019)。地球化学的見地から断層運動を明らかにする研究もなされており、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も行われた。四重極質量分析計での観測を本宮観測点などにおいて実施し、周囲の地震火山活動とHe, N₂, Arの組成の時間変化との対応関係について検討した（東京大学理学系研究科[課題番号：UTS_04]）。

（5）地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化においては、プレート境界域や海洋プレート内部、内陸を含む地殻・マントル内の地震発生域及び火山地域において、地震波速度・減衰構造、地震活動、応力場、変形場、比抵抗構造、レオロジー構造等を明らかにすることで、地震や火山活動が発生する場のモデル化を進める必要がある。また、大地震によって火山噴火が誘発される可能性や火山活動が地震活動へ及ぼす影響など、地震火山の相互作用に関する研究を進めることも大切である。

日本列島の日本海側の新潟から神戸にかけてひずみ速度の大きい、新潟-神戸ひずみ集中帯が存在する。この新潟-神戸ひずみ集中帯では、歴史的に見ても大きな内陸地震が発生している。1995年の兵庫県南部地震、2004年の新潟県中越地震や2007年の新潟県中越沖地震と近年でも大きな内陸地震が発生している。このようなひずみ集中帯形成の原因を明らかにすることは重要である。地温勾配の分布から推定した温度構造、水の分布、既存の地質構造を考慮し、東西方向に短縮させることで、中部日本における歪・応力集中過程を再現した。新潟地域のリフト構造（強度の弱い領域）及び飛騨山脈周辺の高温度域を考慮することで、新潟から飛騨山脈周辺までの歪集中帯が再現された。深さ14kmでの応力場と震源分布（深さ13-15km）と比較すると、低応力の延性領域では地震活動度は低く、高応力の脆性領域で地震が多く発生していることが分かる（図14）（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_07]）。

内陸地震の発生過程を考える上で、下部地殻の強度弱化域の変形による直上の断層への応力集中機構が注目されてきた。その一方で、2016年鳥取県中部の地震の断層の両端で地震前に応力緩和していた可能性が示された。山陰地方の地震帯では、鳥取県西部地震などの震源域両端に低速度異常域が推定されている。また、鳥取県から山口県にかけて下部地殻に低速度異常が存在することが推定されている。東部においては低速度異常は地震発生層の下限（D90）の浅い領域とよい対応関係を示す（図15）（Tsuda et al., 2019, 京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI03]）。断層両端付近の特性は、大地震の起こる場所とその大きさや隣接領域での大地震の続発性という観点で重要であり、今後の成果が期待される。

都市部での断層構造や浅部地下構造推定のために、大都市大震災軽減化特別プロジェクト（大大特プロジェクト）などの既存の地殻構造探査結果の再解釈が行われ、2018年大阪府北部の地震の震源域周辺において、以前から特定されている活断層の延長部に、伏在する活断層が発見された（図16）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI03]）。有馬-高槻断層帯を構成する真上断層の東の延長は男山丘陵の南側の地質境界へ延びること、枚方とう曲の北方延長は淀川低地帯の南東縁を横切って、真上断層の東方延長部まで延びることが分かった（堤・飯尾, 2019）。また、精度の高い発震機構解により断層面近傍の詳細な応力分布についても研究が進んだ。解析には、京都大学防災研究所・九州大学・東京大学地震研究所・関西大学合同観測班、満点計画および周辺の高感度定常観測点(NIED, KyotoUniv., JMA, AIST)のデータを用いた（図17）。一例として、深さ11kmにおけるP軸の方位とT軸の傾斜角の分布を示す（図17）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI03]）。T軸が鉛直に近い逆断層型の余震は北側に多く、T軸が水平に近い横ずれ型の余震は南側に多く分布する。図中には、本震の

断層モデルから計算された ΔCFF の空間分布も示す。 ΔCFF の0.1 MPaのコンターは、それぞれの型の余震分布とよく対応しているため、多くの余震は本震滑りにより引き起こされたと考えられる。ただし、余震は、北方の定常的に微小地震活動のある領域など、推定断層面からかなり離れたところまで分布しており、そこでは、断層の強度とせん断応力が近い状態にあることが示唆される。P軸の方位と傾斜およびT軸の傾斜角とも色々な値をとっており、近年の内陸大地震について報告されているように、個々の余震の断層の大部分は、本震の推定断層面と平行ではなく、様々な向きを向いていることが分かる(図17)。このことから、余震域における応力場は、北側では逆断層型、南側では横ずれ型であると予想されるが、応力逆解析により、Y=2~4km付近においては逆断層的な応力場が、それ以外では横ずれ型の応力場が推定された。これは地震後の応力場であるが、浅野による断層モデルの滑り方向と調和的であり、余震域とその周辺においては、本震前から応力場の空間的な不均質があったことが示唆される。

近年、内陸地震発生においては地殻内流体の役割が重要であることが指摘されている。地殻内流体の検出には、地震学的構造に加えて電磁気学的(比抵抗)構造も欠かせない。2016年熊本地震震源域を含む九州中央部では、20~30kmの帯状の活発な地震活動域とそれに囲まれた地震空白域(南島原一天草)が存在する。地震・測地データを使用した解析により、この領域の非弾性変形と応力集中プロセスや地震空白域との関係を検討した(九州大学[課題番号: KYU_01])。応力の連続性から、上部地殻から下部地殻まで応力テンソルの形状は大きく変化しないと仮定し、発震機構解から推定される上部地殻の偏差応力を拘束条件として下部地殻の非弾性変形の方角と大きさを推定する手法を開発した(Yuasa et al., 2020)。その結果、地震活動が活発な領域下に高い非弾性歪み速度($10^{-7}/\text{yr}$)を有する領域があることが分かった。さらに、その直上の上部地殻では非弾性変形によって効果的に応力集中が進行していることが示唆された。一方、南島原一天草の地震空白域の下部地殻も歪み速度はそれほど顕著ではないものの、周囲と同程度に非弾性変形しており、10年の単位では上部地殻に応力を蓄積しつつあることが示唆された。地震空白域は、地震波速度構造から高速度異常(Saiga et al., 2010)及び広帯域MT探査から明瞭な高比抵抗体に対応することが明らかになった。以上から、南島原一天草の地震空白域の特に上部地殻に相当する深度に深成岩体のような、温度が低く、水をあまり含まない破壊強度が高い物質が存在し、そのことが地震空白域の要因であると示唆される。大局的な観点から深成岩体などの破壊強度が強い領域が地震空白域の原因と推定されたが、比抵抗構造と内陸地震の震源分布の対応を見ると、地震活動が活発な領域は巨大な高比抵抗体の端部であり、その近傍には流体と解釈される低比抵抗体が存在する(九州大学[課題番号: KYU_01])。熊本地震震源域を対象に新規データを加えた3次元比抵抗構造を推定し、震源と比抵抗の空間的な対応を精査したところ、M5以上の規模の大きい地震は低比抵抗体の近傍で破壊が開始する一方で、M5より規模が小さい地震は高比抵抗領域でも破壊が開始することが示唆された(相澤・他, 2019a)。同様の関係は九重山周辺で行った広帯域MT観測からも推定され(相澤・他, 2019b)、流体が破壊の成長に影響していることを示す結果と考えられる。流体が破壊の成長、特にその初期段階に役割を果たしていることは稠密地震観測からも示唆される(図18)(九州大学[課題番号: KYU_01])。

東北沖地震発生後、M7の福島県浜通りの内陸地震が発生し飛躍的に地震活動が増加した、いわき地域の活動も地殻内流体の関与が示唆されている。その仮説を明らかにすべく、地震活動の増加が見られなかった北関東から2004年新潟県中越地震の震源域を通る島弧を横断す

る測線を調査対象とする地震観測とMT観測の研究も進められている（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_09]）。

内陸地震の発生メカニズムの解明に向けて、海外の沈み込み帯での研究もおこなわれている（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_01]）。日本と同様に沈み込み帯に位置するニュージーランドにおいて地震観測を実施し、地震発生過程の理解を普遍化する研究が行われている。ニュージーランドでは、南島北部において、2010年・2011年クライストチャーチ地震や2016年カイクウラ地震が発生し、甚大な被害を生じた。カイクウラ地震・クライストチャーチ地震は、地震時あるいは地震後に複数の断層が連動して破壊した地震であると考えられており、2016年熊本地震において指摘されたような複雑な断層系の相互作用や断層端の特性の理解の上で最適な研究対象である。この地域においても、地震活動や3次元トモグラフィの結果から、地震活動と流体との関連が示唆された（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_01]）。

地殻のレオロジーや地震発生に対して重要な役割を果たす地殻内流体が、沈み込み帯でどのように供給されるのかを調べるため、 H_2O 、 CO_2 、 $NaCl$ 三成分系の沈み込み流体と楔形マン托ルの主要構成鉱物であるカンラン石間の二面角を決定する高温高压実験を行った（Huang et al, 2019）（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_02]）。 $H_2O-NaCl$ 系流体について調べたところ、二面角を引き下げる $NaCl$ の効果が極めて大きいことが明らかになった。わずか数wt %の塩濃度でも、楔形マン托ルの広い領域をカバーする温度圧力条件において、二面角が連結閾値である 60° を有意に下回ることが示された（図19）（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_02]）。

沈み込み帯で流体が、蛇紋岩として固定される前弧域と、マン托ルを融解させる領域の間にはマン托ル岩の粒間に流体が共存する領域があり、その上部には、近年、前弧下部地殻付近で発見されている高電気伝導度帯が位置している（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_02]）。沈み込んだ流体がマン托ルを浸透して前弧域に直接抜けていると考ええると、この高電気伝導度帯が形成される原因と、沈み込み帯への流体の流入フラックスと放出フラックスが合わない「Missing fluid」問題に対する一つの解答も得られることがわかった。

岩手県南部から宮城県北部の3次元地殻比抵抗構造において、中部地殻に火山フロントから深さ30kmに渡って東側に低比抵抗帯が存在することが分かり、マン托ルから供給されている流体が一部は火山フロントを超えて東側へ供給されることが分かった。長周期MTデータに基づく東北地方全域の比抵抗構造を見直すと、マン托ルウェッジ内の深さ70-80kmより浅い側が高抵抗、深い側が高伝導になっていることが分かり、この結果は室内実験による橄欖岩の二面角の実験結果と合致し、火山フロントがプレート境界の深さ80kmとほぼ一致することを上手く説明する（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_07]）。

内陸断層の深部、脆性-塑性遷移付近における、応力・歪といった変形の不均質を削剥断層（三重県中央構造線）の地質調査により、断層内部構造形成・発展・力学挙動の物理過程を岩石変形実験により明らかにする研究もなされた（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST05]）。その結果、調査範囲内の岩石は変形温度 $450^\circ C$ 付近から $250^\circ C$ 付近までと脆性-塑性遷移領域をまたぐ条件での断層運動を被ったことが明らかになった。岩石が被った差応力は脆性-塑性遷移付近で200MPa程度であるが、この値は脆性-塑性遷移より深い $450^\circ C$ 付近においても大きく変化していないことが示唆された。

将来発生する地震の最大規模や発生様式の評価を行うため、可能な限り小さな地震まで解

析し、高い空間分解能を有する日本列島の地殻応力マップを整備することは重要である。関東地域の10kmメッシュの応力マップに関する成果が、地質調査研究報告に掲載され（今西ほか、2019）、産総研の地殻応力場データベース（<https://gbank.gsj.jp/crstress/>）でも公開された（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST07]）。

大地震によって火山噴火が誘発される可能性や火山活動が地震活動へ及ぼす影響など地震火山の相互作用に関する研究を進めることも重要である。火山現象と地殻内流体との関係を明らかにするため、箱根火山における深部低周波地震活動（DLFE）の詳細な時系列をマッチドフィルター法により推定した。その結果、浅部の活発な地震活動や火山性地殻変動に先行し、低周波地震の活発化が起きていることが明らかになった（図20）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI04]）。

また、箱根カルデラ内において2019年5月に発生した群発地震活動について高精度震源決定並びに地震検出を行った結果、震源はほぼ鉛直な面上に集中し、前駆的な比較的ゆっくりとした震源移動から、拡散的により高速度で移動する地震活動に変遷する過程が明らかになった（図21）（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_02]）。こうした震源移動様式は、断層帯内での流体圧の拡散様式の変化、もしくは高圧流体に励起された非地震性滑りの寄与を示唆している。

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

（1）地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

地震・火山噴火という自然現象が引き起こす地震動、津波などの災害誘因が自然や社会に潜在的に存在する脆弱性などの災害素因に働きかけ、これらの誘因と素因の組み合わせと相互作用の状態に応じて様々な規模の災害が発生する。そのため災害誘因予測の高度化は、災害の軽減に結びつく有効な手段の一つである。

海底地震津波観測網DONETで捉えられた2016年鳥島沖地震津波についてデータ同化が適用され、Green関数を用いたデータ同化に基づく津波即時手法（GFTDA; Wang et al., 2017）の適用に基づいた津波即時予測実験が実施された（Wang et al., 2019）。これはリアルタイムに実施されたものではないが、リアルタイムに取得された記録を用いたデータ同化に基づく津波予測が初めて実現されたものである（弘前大学 [課題番号：HRS_01]）。

建物被害の軽減を考える際には、揺れの不均質に応じた的確な対策が必要である。そこで、稠密な観測により揺れの違いを詳細に観測し、地形や地下構造との関連性を明らかにする必要がある。歴史地震の被害分布と対比させることで、首都直下地震の地震像を解明する研究もなされている（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_15]）。1855年安政江戸地震を対象として研究を進め、成田山新勝寺や佐倉城址等の江戸時代から続く建物や施設が千葉県成田市周辺にあり、過去の地震被害の記述が多く残されている。そこで、それらの記述から被害地点を特定して地震計を設置し、古文書に記録されている揺れの大きさについて比較検討を開始した。この観測を行うことで、古文書等に記述のあった地点での揺れを参考とし、古文書に記載のなかった地点での揺れも推定できることを確認した。

（2）地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

即時警報を画期的に早めうる方法として、光速で伝播するP波到着前の即時重力信号の検出が挙げられる。このP波前信号を、東北沖地震のF-netで取得された広帯域地震波形を重合

することで検出することに成功した。先行研究に比べて高い統計的有意性を実現した。また、即時重力変化が引き起こす弾性変形は、総内力ゼロとなる不思議な変形であることを理論的に示した。これは、今後の信号検出および検出装置開発の指針となる（図22）（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI06〕）。

これまでの課題と今後の展望

低頻度大規模地震の解明においては、千島海溝沿いや三陸沖において新たな海域観測が開始され、地震・地殻変動データが徐々に得られつつある。これらのデータを用いた今後の成果が期待される。また、滑りの多様性の理解を深めるために、様々な沈み込み帯において低周波微動やスロースリップを対象とした観測研究が進められており、今後得られる成果を比較検討し、それぞれの地域の特徴の類似点・相違点を明らかにしたうえで、現象を普遍的に理解していく必要がある。また、断層滑りの多様性の理解のために室内実験も進められており、実際に観測されるプレート境界の滑り現象と関連付けながら研究を進めていく必要がある。観測結果と数値シミュレーションの比較研究もなされており、摩擦特性や流体挙動など、地震発生につながる本質的に重要な要素を明らかにしていく必要がある。内陸地震については、それぞれの地域で起きている現象が明らかにされ、内陸地震と地殻内流体との関連性が多くの地域で議論される中で、沈み込み帯における水の流れに着目しつつ断層強度の時間変化に関する研究を進めていくことが大切である。この部会は、観測に基づく研究が多く、今年度は実施初年度ということもあり、観測点の展開等、観測開始に関する報告が多くみられた。今後は得られてくる成果を包括的にまとめ、地震発生過程の解明とモデル化に向けた研究を進めていく必要がある。また、得られた成果を他部会と共有することで、地震の発生予測手法の高度化につなげていくことが重要である。

成果リスト

- Amagai, T., A. Okamoto, T. Niibe, N. Hirano, K. Motomiya, N. Tsuchiya (2019), Silica nanoparticles produced by explosive flash vaporization during earthquakes, *Sci. Rep.*, 9:9738, doi:10.1038/s41598-019-46320-7
- Amanda, F.F., R. Yamada, M. Uno, S. Okumura, N. Tsuchiya (2019), Evaluation of caldera hosted geothermal potential during volcanism and magmatism in subduction system, NE Japan, *Geofluids*, 2019:3031586, doi:10.1155/2019/3031586
- Chanard, K., A. Nicolas, T. Hatano, F. Petrelis, S. Latour, S. Vinciguerra, A. Schubnel (2019), Sensitivity of acoustic emission triggering to small pore pressure cycling perturbations during brittle creep, *Geophys. Res. Lett.*, 46, doi.org/10.1029/2019GL082093
- Chang, T. W., S., Ide (2019), Empirical relocation of large subduction-zone earthquakes via the teleseismic network correlation coefficient method, *Earth Planet. Space*, 71(1), 79, doi:10.1186/s40623-019-1057-z
- Chang, J.-H., J.-O. Park, T.-T. Chen, A. Yamaguchi, T. Tsuru, Y. Sano, H.-H. Hsu, K. Shirai, T. Kagoshima, K. Tanaka, C. Tamura (2020), Structural-morphological and sedimentary features of forearc slope off Miyagi, NE Japan: implications

- for development of forearc basins and plumbing systems, *Geo-Marine Letters*, 40(3), 309-324, doi:10.1007/s00367-020-00636-w
- Chiba, K. (2020), Stress state along the western Nankai Trough subduction zone inferred from b-values, long-term slow-slip events, and low-frequency earthquakes, *Earth Planet. Space*, 72, 3, doi:10.1186/s40623-020-1130-7
- Escobar, M. T., N. Takahata, T. Kagoshima, K. Shirai, K. Tanaka, J.-O. Park, H. Obata, Y. Sano (2019), Assessment of Helium Isotopes near the Japan Trench 5 Years after the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *ACS Earth and Space Chemistry*, 3(4), 581-587, doi:10.1021/acsearthspacechem.8b00190
- Fan, J., D. Zhao (2019), P-wave anisotropic tomography of the central and southern Philippines, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 286, 154-164, doi:10.1002/2015JB012098
- Fujita, M., T. Nishimura, S. Miyazaki (2019), Detection of small crustal deformation caused by slow slip events in southwest Japan using GNSS and tremor data, *Earth Planet. Space*, 71:96, doi:10.1186/s40623-019-1075-x
- Fukahata, Y., A. Meneses-Gutierrez, T. Sagiya (in press), Detection of plastic strain using GNSS data of pre- and post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-oki Earthquake, *Earth Planet. Space*
- Fukahata, Y., K. Oohashi, Y. Takada, A. Tanaka (2019), Overview of the special issue "Crustal dynamics (Part I): From a macroscopic view", *J. Geography (Chigaku Zasshi)*, 128, 681-683
- 深畑幸俊, 大橋聖和, 高田陽一郎, 田中明子 (2019), 特集号「地殻ダイナミクス (Part I) -主としてマクロな視点から-」巻頭言, *地学雑誌*, 128, 685-687, doi:10.5026/jgeography.128.685
- Fukao, Y., T. Miyama, Y. Tono, H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, M. Yamashita, S. Varlamov, R. Furue, Y. Miyazawa (2019), Detection of ocean internal tide source oscillations on the slope of Aogashima Island, Japan, *J. Geophys. Res. Oceans*, 124, 4918-4933, doi:10.1029/2019JC014997
- Fukuda, J., H. Raimbourg, I. Shimizu, K. Neufeld, H. Stunitz (2019), Experimental grain growth of quartz aggregates under wet conditions and its application to deformation in nature, *Solid Earth*, 10:621-636, doi:10.5194/se-10-621-2019
- Hara, S., Y. Fukahata, Y. Iio (2019), P wave first motion polarity determination of waveform data in western Japan using deep learning, *Earth Planet. Space*, 71:127, doi:10.1186/s40623-019-1111-x
- Hayashida Y. S., Matsumoto S., Y., Iio S., Sakai, A., Kato (in press), Non-double-couple micro-earthquakes in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake (M 7.3) via hyperdense seismic observations, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2019GL084841
- Heidarzadeh, M., Y. Wang, K., Satake, I.E., Mulia (2019), Potential deployment of offshore bottom pressure gauges and adoption of data assimilation for tsunami warning system in the western Mediterranean Sea, *Geosci. Lett.*, 6(1),

doi:10.1186/s40562-019-0149-8

- Hirauchi, K., Y. Yamamoto, S. A. M. den Hartog, A. R. Niemeijer (2020), The role of metasomatic alteration on frictional properties of subduction thrusts: An example from a serpentinite body in the Franciscan Complex, California, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 531, 115967, doi:10.1016/j.epsl.2019.115967
- Honsho, C., M. Kido, F. Tomita, N. Uchida (2019), Offshore postseismic deformation of the 2011 Tohoku Earthquake revisited: Application of an improved GPS-Acoustic positioning method considering horizontal gradient of sound speed structure, *J. Geophys. Res.*, 124, 5990-6009, doi:10.1029/2018JB017135
- Huang, Y., T. Nakatani, M. Nakamura, C. McCammon (2019), Saline aqueous fluid circulation in man-tle wedge inferred from olivine wetting properties, *Nature Comm.*, 10:5557, doi:10.1038/s41467-019-13513-7
- Hutchinson, J., H., Kao, G., Spence, K., Obana, K., Wang, S. Kodaira (2019), Seismic characteristics of the Nootka Fault Zone: Results from the Seafloor Earthquake Array Japan-Canada Cascadia Experiment (SeaJade) *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 109, 2252-2276, doi:10.1785/0120190008
- Ide, S. (2019), Frequent observations of identical onsets of large and small earthquakes, *Nature*, 573(7772), 112-116, doi:10.1038/s41586-019-1508-5
- Ikeda, A., T. Kawasaki, L. Berthier, K. Saitoh, T. Hatano (2020), Universal relaxation dynamics of sphere packings below jamming, *Phys. Rev. Lett.*, 124, 058001, doi:10.1103/PhysRevLett.124.058001
- Ikeda, H., R. Takagi (2019), Coseismic changes in subsurface structure associated with the 2018 Hokkaido Eastern Iwate Earthquake detected using autocorrelation analysis of ambient seismic noise, *Earth Planet. Space*, 71:72, doi:10.1186/s40623-019-1051-5
- Imano, M., M. Kido, C. Honsho, Y. Ohta, N. Takahashi, T. Fukuda, H. Ochi, R. Hino (2019), Assessment of directional accuracy of GNSS-Acoustic measurement using a slackly moored buoy, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 6 No56, doi:10.1186/s40645-019-0302-1
- Ito, A., T. Tonegawa, N., Uchida, Y., Yamamoto, D., Suetsugu, R., Hino, H., Sugioka, K., Obana, K., Nakahigashi, M., Shinohara (2019), Configuration and structure of the Philippine Sea Plate off Boso, Japan: constraints on the shallow subduction kinematics, seismicity, and slow slip events, *Earth Planet. Space*, 71, 111, doi:10.1186/s40623-019-1090-y
- 岩森光, 行竹洋平, 飯尾能久, 中村仁美 (2019), 地殻流体の起源・分布と変動現象, *地学雑誌*, 128, 761-783, doi:10.5026/jgeography.128.761
- Iwamori, H., H., Nakamura, Q., Chang, N., Morikawa, S., Haraguchi (in press), Multivariate statistical analyses of rare earth element compositions of spring waters from the Arima and Kii areas, Southwest Japan. *Geochem. J.*
- Iwamori, H., H., Nakamura, M., Yoshida, T., Nakagawa, K., Ueki, A., Nakao, T., Nishizawa, S., Haraguchi (2019), Trace-element characteristics of eastwest

- mantle geochemical hemispheres, *Comp. Ren. Geosci.*, 351, 209-220,
doi:10.1016/j.crte.2018.09.007
- 岩田貴樹, 吉田圭佑, 深畑幸俊 (2019), 地震学的データを用いた応力インバージョン, 地学雑誌, 128, 797-811, doi:10.5026/jgeography.128.797
- Kame, N., M. Kimura (2019), The fundamental nature of a transient elastic response to prompt gravity perturbations, *Geophys. J. Int.*, 218,
doi.org/10.1093/gji/ggz196
- Kaneko, T., T., Nakakuki, H., Iwamori (2019), Mechanical coupling of the motion of the surface plate and the lower mantle slab: Effects of viscosity hill, yield strength, and depth-dependent thermal expansivity, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 294, doi:10.1016/j.pepi.2019.106274
- Kano, M., Y. Kano (2019), Possible slow slip event beneath the Kii Peninsula, southwest Japan, inferred from historical tilt records in 1973, *Earth Planet. Space*, 71, 95, doi:10.1186/s40623-019-1076-9
- Kashiwagi, H., J. Nakajima (2019), Three-dimensional seismic attenuation structure of central Japan and deep sources of arc magmatism, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 13,746-13,755, doi:10.1029/2019GL084793
- Kharitonova, N., G., Chelnokov, I., Bragin, H., Nakamura, H., Iwamori, N., Morikawa, A., Korzun (2019), The geochemistry of water and gas phases from high pCO₂ sparkling springs within the northern Sikhote-Alin ridge region (Russian Far East), *E3S Web of Conferences* 98, 01025,
doi:10.1051/e3sconf/20199801025
- Kimura, M., N. Kame, S. Watada, M. Ohtani, A. Araya, Y. Imanishi, M. Ando, T. Kunugi (2019a), Earthquake-induced prompt gravity signals identified in dense array data in Japan, *Earth Planet. Space*, 71, doi:10.1186/s40623-019-1006-x
- Kimura, M., N. Kame, S. Watada, M. Ohtani, A. Araya, Y. Imanishi, M. Ando, T. Kunugi (2019b), Reply to comment by Valee et al. on " Earthquake-induced prompt gravity signals identified in dense array data in Japan" , *Earth Planet. Space*, 71, doi:10.1186/s40623-019-1099-2
- 木村将也, 亀伸樹 (2019), 表現定理とグリーン関数(3) ——全無限グリーン関数の2階微分を用いた点震源が引き起こす歪み・応力・密度摂動場の表現——, *地震*, 71, 153-160, doi:10.4294/zisin.2017-20
- Kitamura, M., H. Kitajima, H. Sone, Y. Hamada, T. Hirose (2019), Strength profile of the inner Nankai accretionary prism at IODP Site C0002, *Geophys. Res. Lett.*, 46 , 10791-10799, doi:10.1029/2019GL083732
- Kodaira S., T., Fujiwara, G., Fujie, Y., Nakamura, T., Kanamatsu (in press), Large Coseismic Slip to the Trench During the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*
- Kono, A., T. Sato, M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Yamada, K. Uehira, T. Shinbo, Y. Machid, R. Hino, R. Azuma (2019), 2D spatial distribution of reflection intensity on the upper surface of the Philippine Sea plate off the Boso

- Peninsula, Japan, *Tectonophysics*, 774, doi:10.1016/j.tecto.2019.228206
- Kumazawa, T., Y., Ogata, H., Tsuruoka (2019), Characteristics of seismic activity before and after the 2018 M6.7 Hokkaido Eastern Iburi earthquake, *Earth Planet. Space*, 71, 130, doi:10.1186/s40623-019-1102-y
- Lanza, F., C. J. Chamberlain, K. Jacobs, E. Warren-Smith, H. J. Godfrey, M. Kortink, C.H. Thurber, M. K. Savage, J. Townend, S. Roecker, D. Eberhart-Phillips (2019), Crustal fault connectivity of the Mw 7.8 2016 Kaikoura earthquake constrained by aftershock relocations, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 6487-6496, doi:10.1029/2019GL082780
- Lee, H., H., Kim, T., Kagoshima, J.-O., Park, N., Takahata, Y., Sano (2019), Mantle degassing along strike-slip faults in the Southeastern Korean Peninsula, *Sci. Rep.*, 9, 15334, doi:10.1038/s41598-019-51719-3
- Matsui, R., M. Kido, Y. Niwa, C. Honsho (2019), Effects of disturbance of seawater excited by internal wave on GNSS-acoustic positioning, *Mar. Geophys. Res.*, 40, doi:10.1007/s11001-019-09394-6
- Matsumoto S., T. Okada, T. Terakawa, M. Uyeshima, Y. Iio (2020), The advancement of research on inland earthquake generation 2014-2018, *J. Disaster Res.*, 15(2), 96-105, doi:10.20965/jdr.2020.p0096
- Meneses-Gutierrez, A., T. Nishimura (2020), Inelastic deformation zone in the lower crust for the San-in Shear Zone, Southwest Japan, as observed by a dense GNSS network, *Earth Planet. Space*, 72:10, doi:10.1186/s40623-020-1138-z
- Miyake, Y., H. Noda (2019), Fully dynamic earthquake sequence simulation of a fault in a viscoelastic medium using a spectral boundary integral equation method: does interseismic stress relaxation promote aseismic transients?, *Earth Planet. Space*, 71:137, doi:10.1186/s40623-019-1113-8
- Mori, J., T. Yasutomi, H. Ogasawara, S.N. Somala, S. Sangaraju (2019), Near-Field Observations of the Rupture for the M5.5 Orkney, South Africa Earthquake, SSA Annual Meeting 2019, *Seismol. Res. Lett.*, 90, 936-936
- Muto, J, J. D. P. Moore, S. Barbot, T. Iinuma, Y. Ohta, H. Iwamori (2019), Coupled afterslip and transient mantle flow after the 2011 Tohoku earthquake, *Sci. Adv.*, doi:10.1126/sciadv.aaw1164
- 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, *Comp. Ren. Geosci.*, 351, 197-208, doi:10.1016/j.crte.2019.02.001
- Nakajima, J., (2019), Revisiting intraslab earthquakes beneath Kyushu, Japan: Effect of ridge subduction on seismogenesis, *J. Geophys. Res.*, 124, 8660-8678, doi:10.1029/2019JB017869
- Nakamura, H., H. Iwamori, M. Nakagawa, T. Shibata, J.-I. Kimura, T. Miyazaki, Q. Chang, B. S. Vaglarov, T. Takahashi, Y., Hirahara (2019), Geochemical mapping of slab-derived fluid and source mantle along Japan arcs, *Gondwana Res.*, 70,

36-49, doi:10.1016/j.gr.2019.01.007

- 七條彰啓, 中尾茂, 松島健, 大倉敬宏 (2019), ブロック断層モデルを用いた鹿児島一宮崎・熊本県境付近のブロック境界の検討, 鹿児島大学理学部紀要, 52, 15-22
- Noda, N., M. Manzi, H.Y. Ogasawara, L. Linzer, S. Enslin, R. Durrheim, H. Ogasawara (2019), ICDPDSeis 8: the M5.5 fault structure and reflective intrusives in legacy 3DSeismic reflection data, JpGU 2019 Meeting, MIS02-P11
- Nohara, T., M. Uno, N. Tsuchiya (2019), Enhancement of permeability activated by supercritical fluid flow through granite, *Geofluids*, 2019:6053815, doi:10.1155/2019/6053815
- Ogasawara, H., B. Liebenberg, M. Rickenbacher, M. Ziegler, v. H. Esterhuizen, T. C. Onstott, R. J. Durrheim, M. S. D. Manzi, S. Mngadi, Y. Yabe, H. Y. Ogasawara, S. Kaneki, E. Cason, J. G. Vermeulen, E. an Heerden, T. Wiersberg, M. Zimmer, C. Kujawa, R. Conze, G. van Aswegen, N. Wechsler, A. K. Ward, S. Enslin, S. Tau, M. S. Bucibo, the DSeis Team (2019a), 2019 status report: Drilling into seismogenic zones of M2.0-5.5 earthquakes in South African gold mines (DSeis project), *Proc. 9th Int. Congr. Deep and High Stress Mining, Symposium Series S98, Southern African Inst. Min. Metal.*, 375-384, doi:10.36487/ACG_rep/1952_28_Ogasawara
- Ogata, Y., K., Katsura, H., Tsuruoka, N. Hirata (2019), High-resolution 3D earthquake forecasting beneath the greater Tokyo area, *Earth Planet. Space*, 71, 113, doi:10.1186/s40623-019-1086-7
- Ohta, K., Y. Ito, R. Hino, S. Ohyanagi, T. Matsuzawa, H. Shiobara, M. Shinohara (2019), Tremor and inferred slow slip associated with afterslip of the 2011 Tohoku Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 4591-4598, doi:10.1029/2019GL082468
- Ohtani, M., N. Kame, M. Nakatani (2019), Synchronization of megathrust earthquakes to periodic slow slip events in a single-degree-of-freedom spring-slider model, *Sci. Rep.*, 9, 8285, doi:10.1038/s41598-019-44684-4
- Oikawa, G., N. Aso, J. Nakajima (2019), Focal mechanisms of deep low-frequency earthquakes beneath Zao volcano, northeast Japan, and its relationship to the 2011 Tohoku earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 7361-7370, doi:10.1029/2019GL082577
- Okada, T., Y. Iio, S. Matsumoto, S. Bannister, S. Ohmi, S. Horiuchi, T. Sato, T. Miura, J. Pettinga, F. Ghisetti, R.H. Sibson (2019), Comparative tomography of reverse-slip and strike-slip seismotectonic provinces in the northern South Island, New Zealand, *Tectonophysics* 765, 172-186, doi: 10.1016/j.tecto.2019.03.016
- Okamoto, A. S., B. A. Verberne, A. R. Niemeijer, M. Takahashi, I. Shimizu, T. Ueda, C. J. Spiers (2019), Frictional properties of simulated chlorite gouge at hydrothermal conditions: Implications for subduction megathrusts, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 124, 4545-4565, doi:10.1029/2018JB017205

- Plata-Martinez, R., Y. Ito, S. Ide, N. Mizuno, M. Shinohara, T. Yamada, A. Husker, J. Real, V. M. Cruz-Atienza, Y. Yamashita, A. Toh (2019), OBS detection of shallow tremors at the Guerrero Gap, Mexico, Reunion Anual Geofisica Mexicana 2019, SE12-3 0487
- Sakaue, H., T. Nishimura, J. Fukuda, T. Kato (2019), Spatiotemporal evolution of long- and short-term slow slip events in the Tokai region, central Japan estimated from a very dense GNSS network during 2013-2016, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 124, doi:10.1029/2019JB018650
- Sasajima, R., B., Shibazaki, H., Iwamori, T., Nishimura, Y., Nakai (2019), Mechanism of subsidence of the Northeast Japan forearc during the late period of a gigantic earthquake cycle, *Sci. Rep.*, 9:5726
- Sawa, S., J. Muto, H. Nagahama, N. Miyajima (2020), Grain size dependency of the olivine-spinel phase transformational faulting mechanism responsible for deep-focus earthquakes, Annual Report, Bayerisches Geoinstitut
- Shibazaki, B., L. M., Wallace, Y., Kaneko, I., Hamling, Y., Ito, T., Matsuzawa (2019), Three-dimensional modeling of spontaneous and triggered slow-slip events at the Hikurangi subduction zone, New Zealand, *J. Geophys. Res.*, 124, 13,250-13,268, doi:10.1029/2019JB018190
- 澁谷拓郎, 寺石眞弘, 小松信太郎, 山崎健一, 山下裕亮, 大倉敬宏, 吉川慎, 井口正人, 為栗健, 園田忠臣 (2019), 地震学的手法による南九州下のフィリピン海スラブの構造の推定, 京都大学防災研究所年報, 62B, 279-287
- Shimizu, K., Y., Yagi, R., Okuwaki, Y., Fukahata (in press), Development of an inversion method to extract information on fault geometry from teleseismic data, *Geophys. J. Int.*
- Shiobara, A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara (2019), New Era of Ocean Bottom Broadband Seismology with Penetrator System of the Autonomous BBOBS-NX (NX-2G), 27th IUGG General Assembly, S05a, IUGG19-0453
- 篠原雅尚 (2019), 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*, 31(1), 11-16
- Shiraishi, K., G. F., Moore, Y., Yamada, M., Kinoshita, Y., Sanada, G., Kimura (2019), Seismogenic Zone Structures Revealed by Improved 3-D Seismic Images in the Nankai Trough off Kumano, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, John Wiley & Sons, Ltd., 20, 2252-2271, doi:10.1029/2018gc008173
- Shiraishi, K., Y. Yamada, T. Nibe (2019), Thermogenic petroleum potential of the Nankai subduction zone, offshore SW Japan, *J. Pet. Geol.*, 42, 417-434, doi:10.1111/jpg.12744
- Suemoto, Y., T. Ikeda, T. Tsuji, Y. Iio (2020), Identification of a nascent tectonic boundary in the San-in area, south-west Japan, using a 3D S-wave velocity structure obtained by ambient noise surface wave tomography, *Earth Planet. Space*, 72, 15, doi:10.1186/s40623-020-1139-y
- Suzuki, T. H. Matsukawa (2019), Transition between Macroscopic Steady Slippage and

- Creep Motion in a System with Velocity-Dependent Friction Stress, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 88, 114402, doi:10.7566/JPSJ.88.114402
- Takahashi, A., M., Hashimoto, J.-C., Hu, K., Takeuchi, M.-C., Tsai, Y., Fukahata (2019), Hierarchical cluster analysis of GPS data and examination of the nature of the clusters associated with regional tectonics in Taiwan, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 124, doi:10.1029/2018JB016995
- Terakawa, T., M. Matsu'ura, A. Noda (2020), Elastic strain energy and pore-fluid pressure control of after-shocks, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 535, doi:10.1016/j.epsl.2020.116103
- Tomita, F., M. Kido, C. Honsho, R. Matsui (2019), Development of a kinematic GNSS-Acoustic positioning method based on a state-space model, *Earth Planet. Space*, 71(1), 102, doi:10.1186/s40623-019-1082-y
- Tsuda, H., Y. Iio, T. Shibutani (2019), Origin of the seismic belt in the San-in district, southwest Japan, inferred from the seismic velocity structure of the lower crust, *Earth Planet. Space*, 71, 109, doi:10.1186/s40623-019-1091-x
- Tsuru, T., K. Amakasu, J.-O. Park, J. Sakakibara, M. Takanashi (2019), 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 Planet. Space*, 71:31, doi:10.1186/s40623-019-1011-0
- 堤浩之, 飯尾能久 (2019), 地形・地質・物理探査データに基づく2018年大阪府北部の地震の震源域周辺の活構造の再検討, *地震2*, 72, 57-67, doi:10.4294/zisin.2018-16
- Uchida, N., D. Kalafat, A. Pinar, Y. Yamamoto (2019), Repeating earthquakes and interplate coupling along the western part of the North Anatolian Fault, *Tectonophysics*, 769, 228185, doi:10.1016/j.tecto.2019.228185
- Ueki, K., T., Kuwatani, A., Okamoto, S., Akaho, H., Iwamori (in press), Thermodynamic modeling of hydrous melt? olivine equilibrium using exhaustive variable selection, *Phys. Earth Planet. Inter.*
- Wang, K., L. Brown, Y. Hu, K. Yoshida, J. He, T. Sun (2019), Stable forearc stressed by a weak megathrust: Mechanical and geodynamic implications of stress changes caused by the M=9 Tohoku-oki earthquake, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 124(3) 6179-6194, doi:10.1029/2018JB017043
- Wang, Y., K. Satake, O. Sandanbata, T. Maeda, H.-Y. Su (2019), Tsunami data assimilation of cabled ocean bottom pressure records for the 2015 Torishima volcanic tsunami earthquake, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 124(10), 10413-10422, doi:10.1029/2019JB018056
- Warren-Smith, E., B. Fry, L. Wallace, E. Chon, S. Henrys, A. Sheehan, K. Mochizuki, S. Schwartz, S. Webb, S. Lebedev (2019), Episodic stress and fluid pressure cycling in subducting oceanic crust during slow slip, *Nature Geo.*, 12, 475-481, doi:10.1038/s41561-019-0367-x
- Watanabe, T., M., Makimura, Y., Kaiwa, G., Desbois, K., Yoshida, K., Michibayashi (2019), Elastic wavevelocity and electrical conductivity in a brine-saturated

- rock and microstructure of pores, *Earth Planet. Space*, 71:129,
doi:10.1186/s40623-019-1112-9
- Watanabe, N., K. Sakaguchi, R. Goto, K. Yamane, T. Ishibashi, Y. Chen, T. Komai, N. Tsuchiya (2019), Cloud-fracture networks as a means of accessing superhot geothermal energy, *Sci. Rep.*, 9:939, doi:10.1038/s41598-018-37634-z
- Yarce, J., A.F. Sheehan, J.S. Nakai, S.Y. Schwartz, K. Mochizuki, M.K. Savage, L.M. Wallace, S.A. Henrys, S.C. Webb, Y. Ito, R.E. Abercrombie, B. Fry, H. Shaddox, E.K. Todd (2019), Seismicity at the northern Hikurangi Margin, New Zealand, and investigation of the potential spatial and temporal relationships with a shallow slow slip event, *J. Geophys. Res.:Solid Earth*, 124, 5, 4751-4766, doi:10.1029/2018JB017211
- Yokota, Y., T. Ishikawa (2020), Shallow slow slip events along the Nankai Trough detected by GNSS-A, *Sci. Adv.*, 6(3), eaay5786, doi:10.1126/sciadv.aay5786
- 吉田圭佑, 平原聡, 中山貴史, 内田直希, 岡田知己, 松澤暢 (2019), 2019年山形沖M6.7地震の余震の詳細な震源分布とその時空間発展, 日本地震学会2019年度秋季大会, S24-02
- Yoshida, K. (2019), Prevalence of asymmetrical rupture in small earthquakes and its effect on the estimation of stress drop: A systematic investigation in inland Japan, *Geosci. Lett.*, 6:16, doi:10.1186/s40562-019-0145-z
- Yoshida, K., T. Saito, K. Emoto, Y. Urata, D. Sato (2019), Rupture directivity, stress drop and hypocenter migration of small- and moderate-sized earthquakes in the Yamagata-Fukushima border swarm triggered by the upward pore pressure migration after the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, 769:228184, doi:10.1016/j.tecto.2019.228184
- Yuasa Y., S., Matsumoto S., Nakao T., Matsushima T., Ohkura (2020), Inelastic strain rate and stress fields in and around an aseismic zone of Kyushu Island, Japan, inferred from seismic and GNSS data, *Geophys. J. Int.*, ggaa008, doi:10.1093/gji/ggaa008
- Yukutake, Y., Y., Abe, R., Doke, R. (2019), Deep low-frequency earthquakes beneath the Hakone volcano, central Japan, and their relation to volcanic activity, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 20, 11035-11043, doi:10.1029/2019GL084357
- Zal, H., K. Jacobs, M. Savage, J. Yarce, S. Mroczek, K. Graham, E.K. Todd, J. Naka, Y. Iwasaki, A. Sheehan, K. Mochizuki, L. Wallace, S. Schwartz, S. Webb, S. Henrys (2019), Temporal and spatial variations in seismic anisotropy and Vp/Vs ratios in a region of slow slip, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 532, 115970, doi:10.1016/j.epsl.2019.115970

Kirchhoff Prestack Depth Migration (Line 1)

17

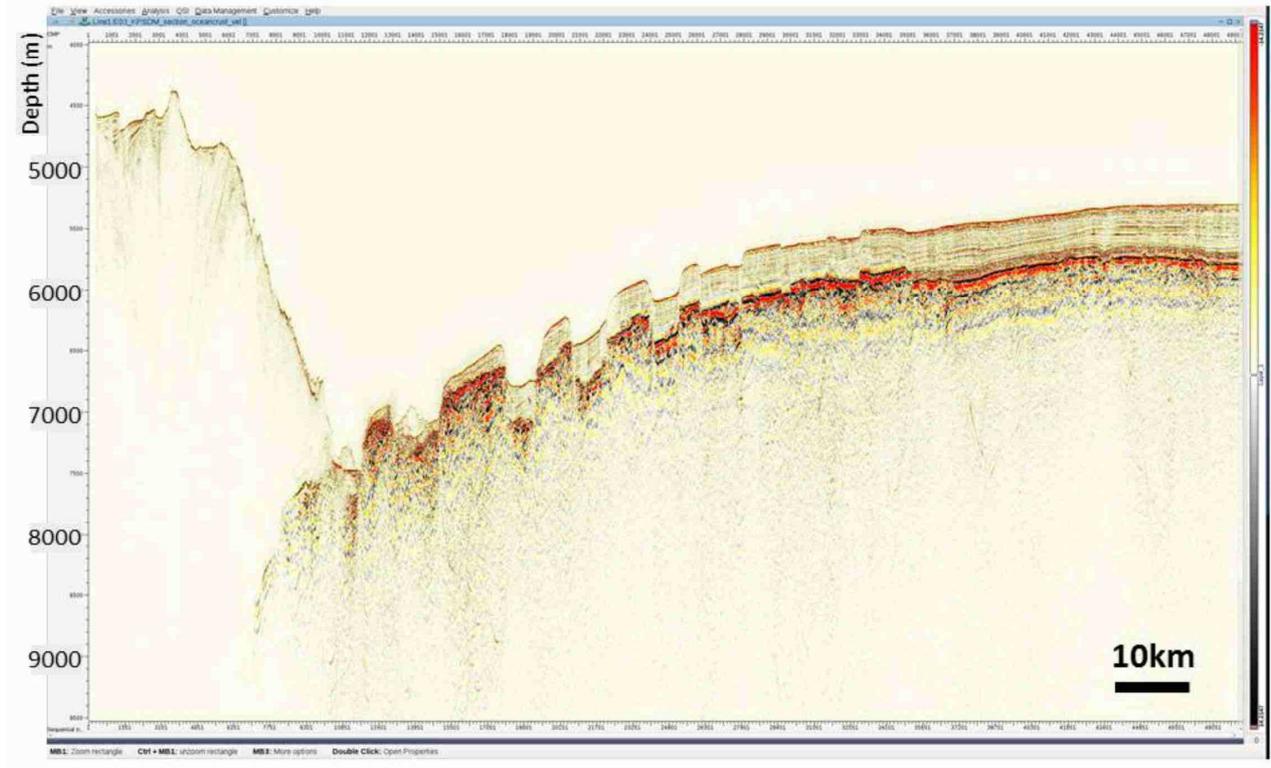


図1. 三陸沖日本海溝海側のアウターライズ断層構造を示す重合前深度マイグレーション (Pre-stack Depth Migration) 処理結果 (東京大学大気海洋研究所 [課題番号:AORI01])。

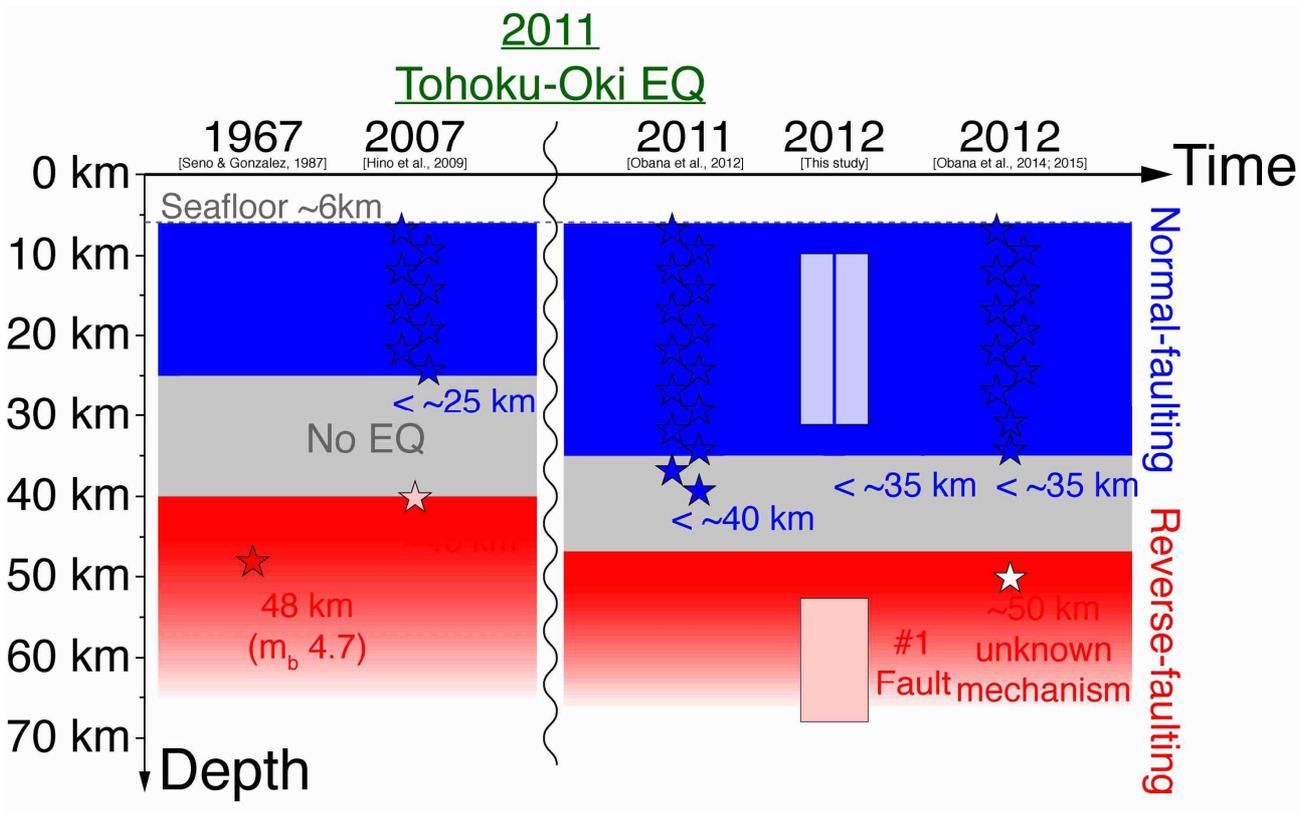


図 2. 宮城県沖の沈み込むプレート内における応力深さプロファイルの時間変化の模式図 (Kubota et al., 2019)。赤色は深部における水平圧縮応力（逆断層型地震活動）、青色は浅部における水平引張応力（正断層型地震活動）。正断層型地震の発生下限深さは 2011 年東北沖地震後に有意に深くなっている（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_06]）。

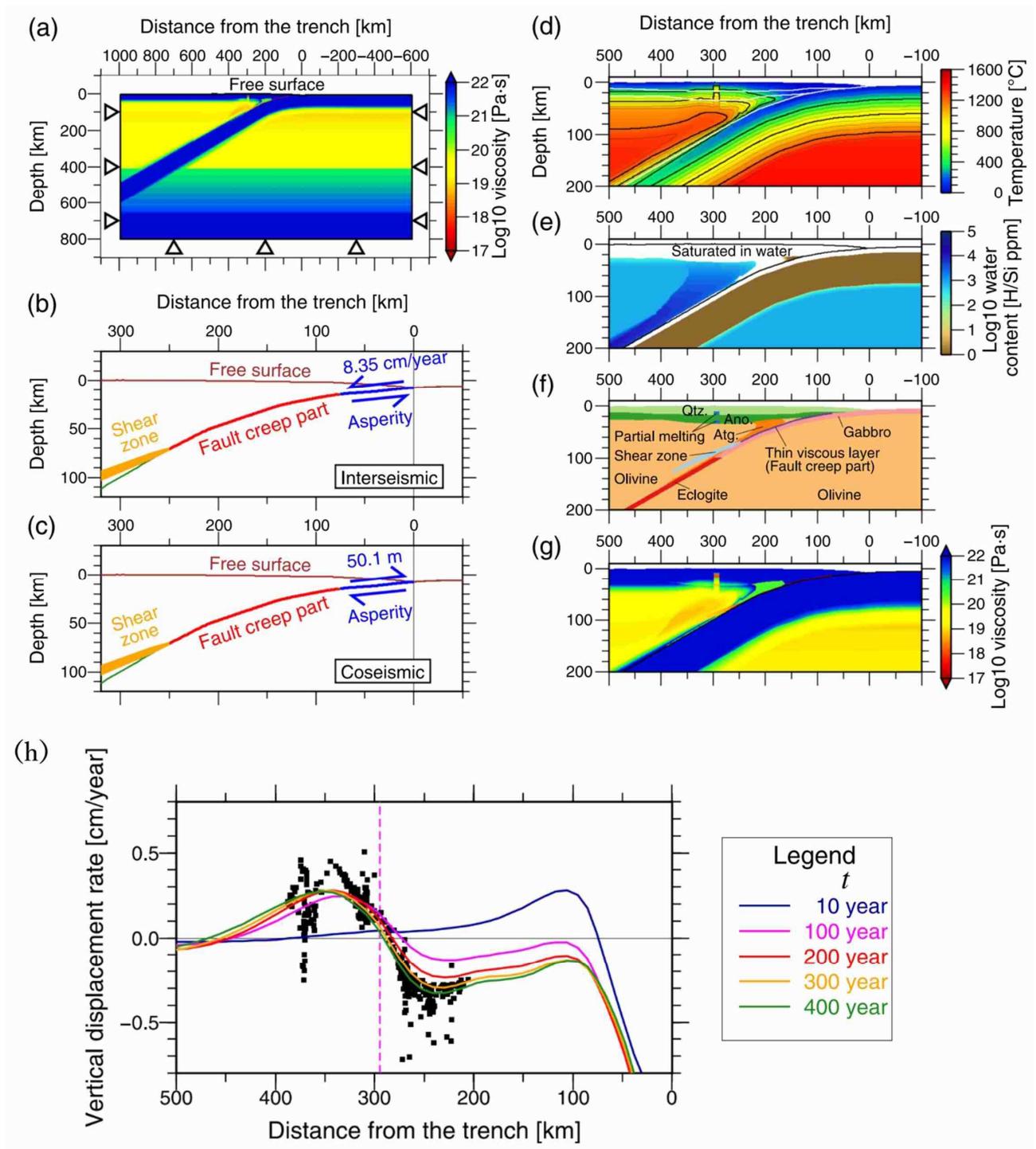


図 3. 東北沖地震前の沈降（および地震後の隆起）を再現する数値モデル (Sasajima et al., 2019)。(a) モデル領域, (b) 巨大地震前後のすべりに関する境界条件, (c) 巨大地震時のすべりに関する境界条件, (d) 温度場, (e) 水分分布, (f) 主要・重要鉱物の分布, (g) 粘性率, (h) これらの条件をもとに計算された垂直変位とその時間変化（色付きの実線），および観測値（黒四角の点）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI04]）。

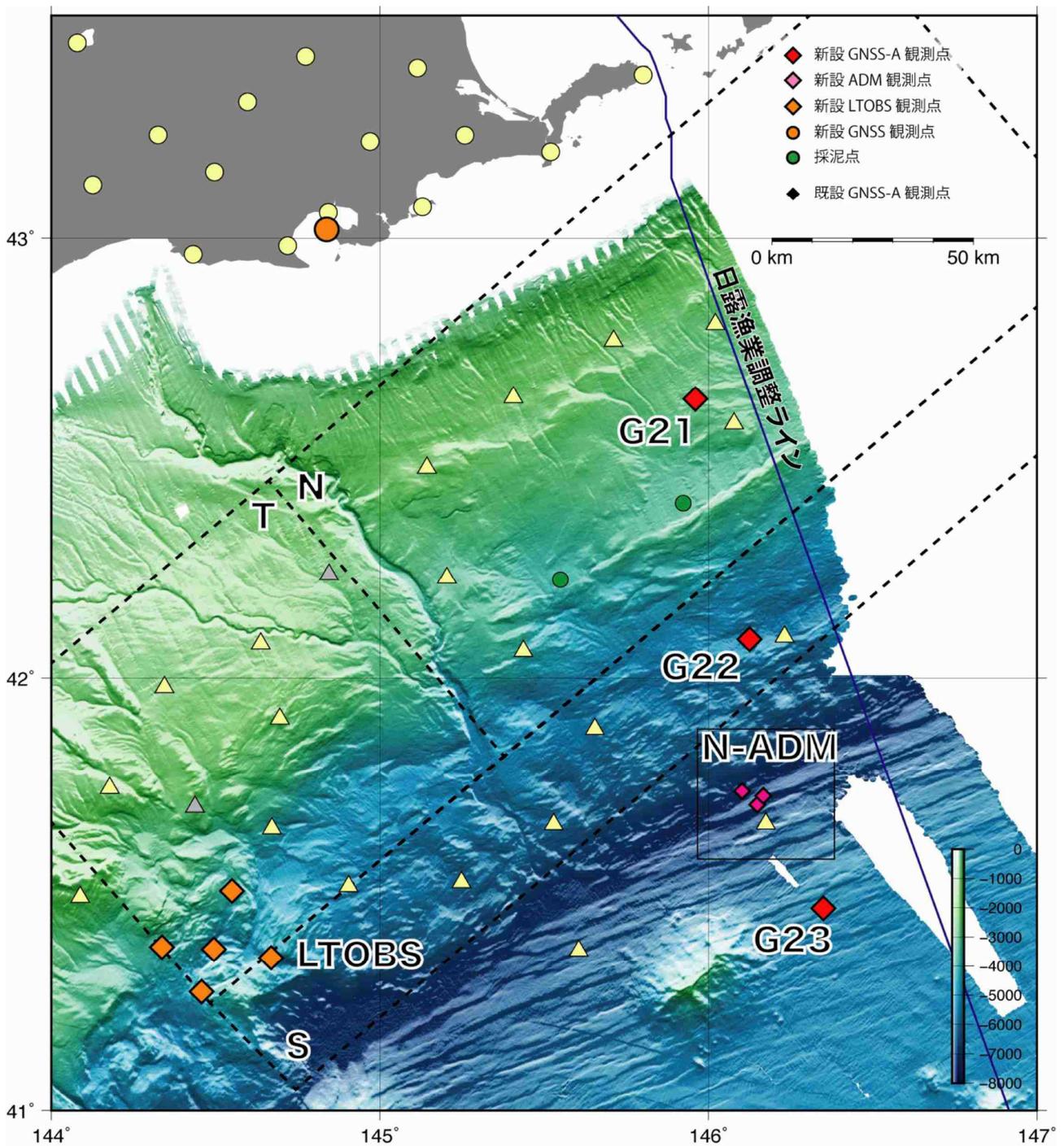


図4. 千島海溝根室沖に新設した海底測地観測網の配置図。G21, G22, G23 が GNSS/A 観測点, N-ADM が海底間音響測距の観測点をそれぞれ示す。陸上の黄色丸印は GEONET 観測点, オレンジ色の丸印が GNSS/A 観測のために新設した陸上 GNSS 観測点をそれぞれ示す。オレンジ色の四角は, 地震・微動を観測する AoA を構成する海底地震計の位置を示す (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_05])。

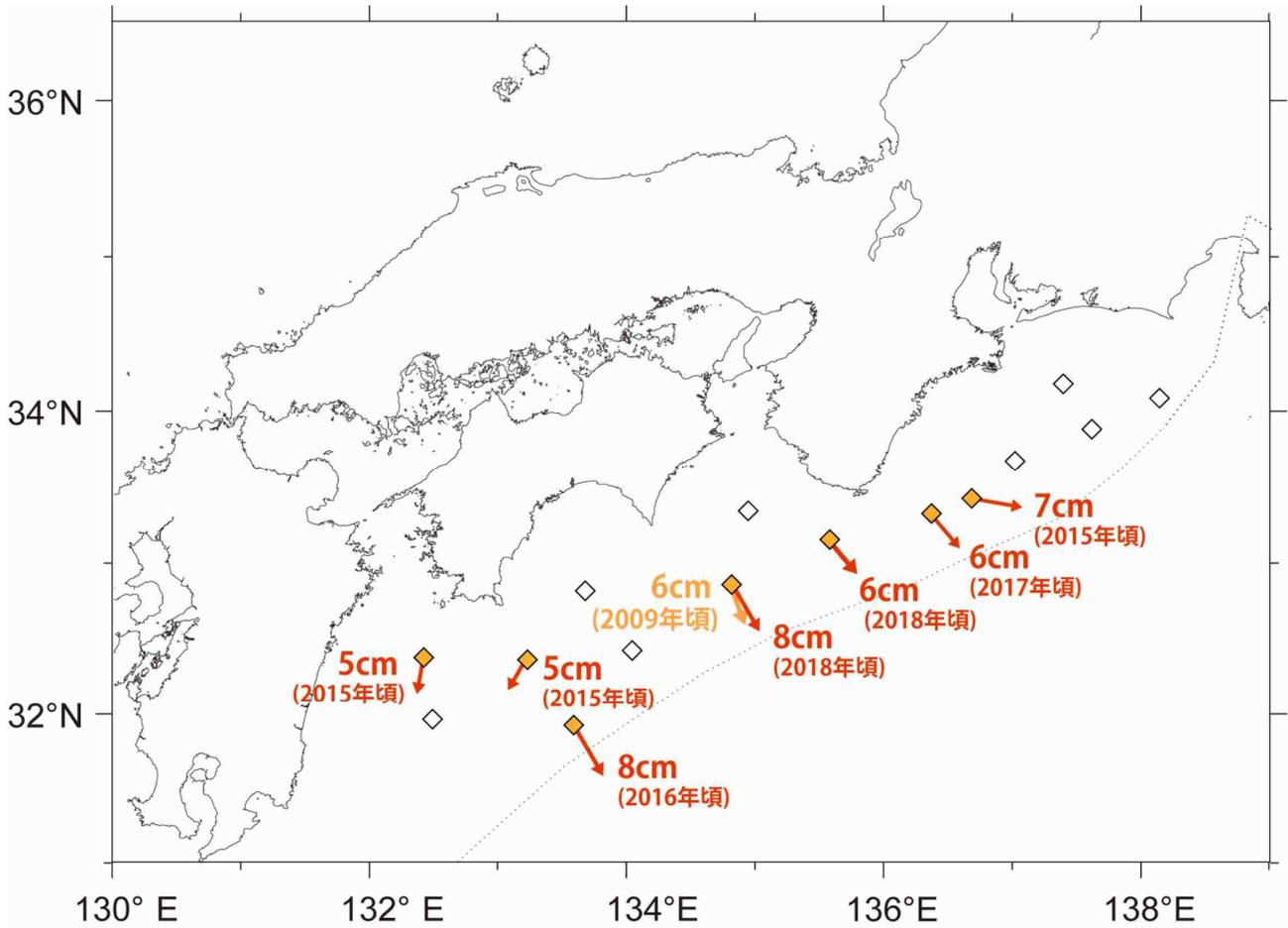


図5. 南海トラフ沿いの海底地殻変動観測により検出された SSE 由来と考えられる非定常変動の水平ベクトル（定常変動からの差）を示す（海上保安庁 [課題番号：JCG_03]）。

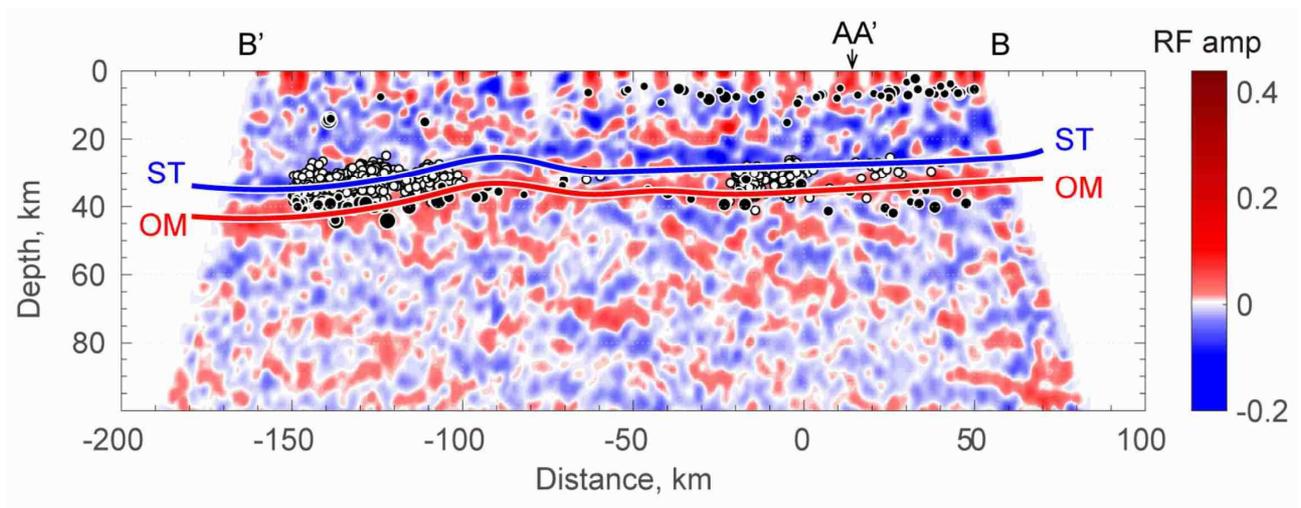


図6．四国を東西に横断する測線（B'：西予，B：徳島）におけるレーザー関数イメージ。解釈線STとOMは、それぞれフィリピン海スラブ上面とスラブ内の海洋モホ面を示す。白丸は深部低周波地震を、黒丸は通常の地震を示す。AA'は四国を南北に縦断する海陽ー綾川測線の位置を示す（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI02]）。

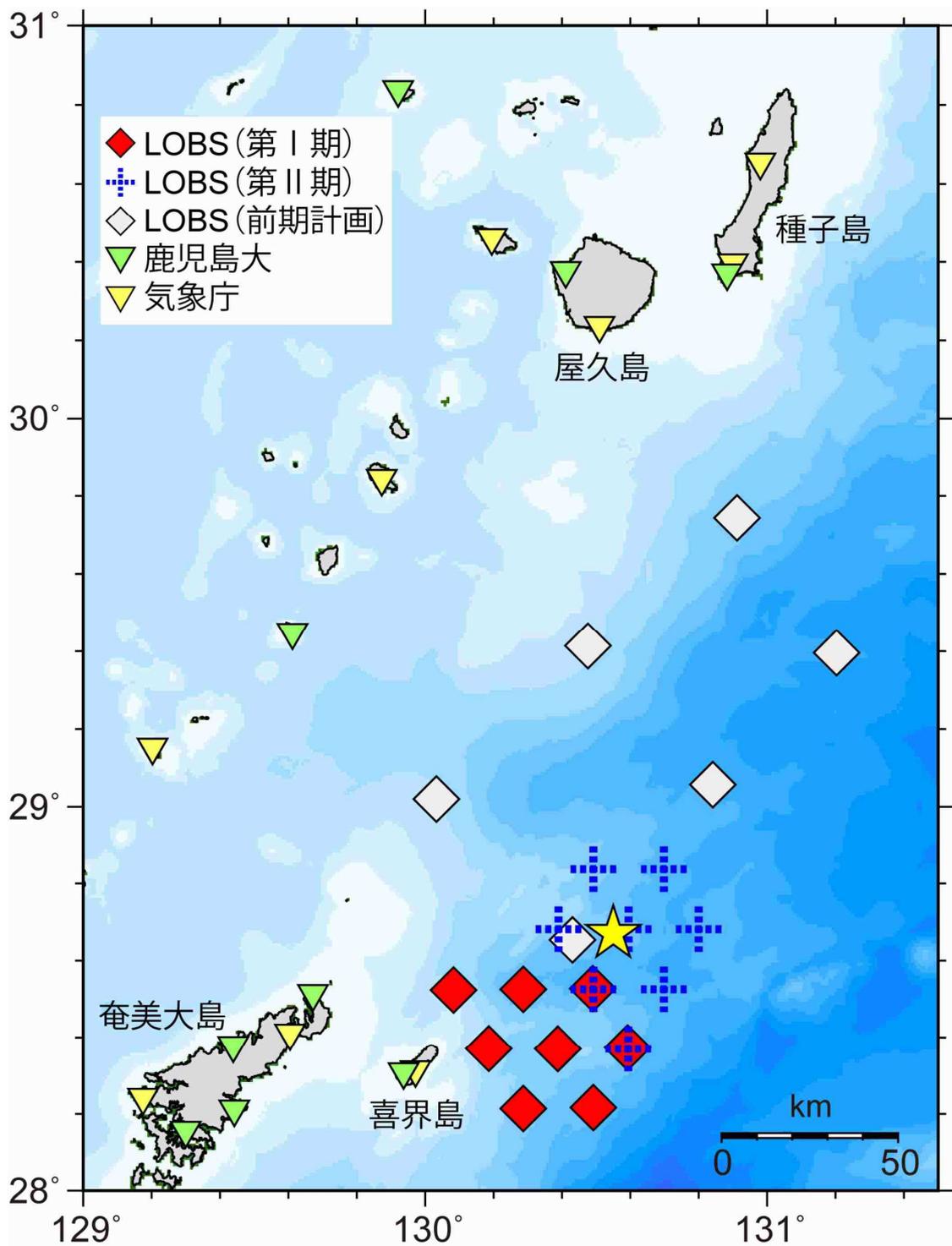


図7. 海底および島嶼部の地震観測点配置。赤四角が2019年度に新規投入された第I期LOBSの位置を示す。青十字は、2020年度に入れ替えらえる第II期LOBS、灰四角は前計画でのLOBSの設置位置である。星印は、1911年に発生したM8.0喜界島近海地震の想定震源(後藤, 2013)を示す。逆三角形のシンボルは、島嶼部の定常地震観測点である(鹿児島大学[課題番号: KGSM01])。

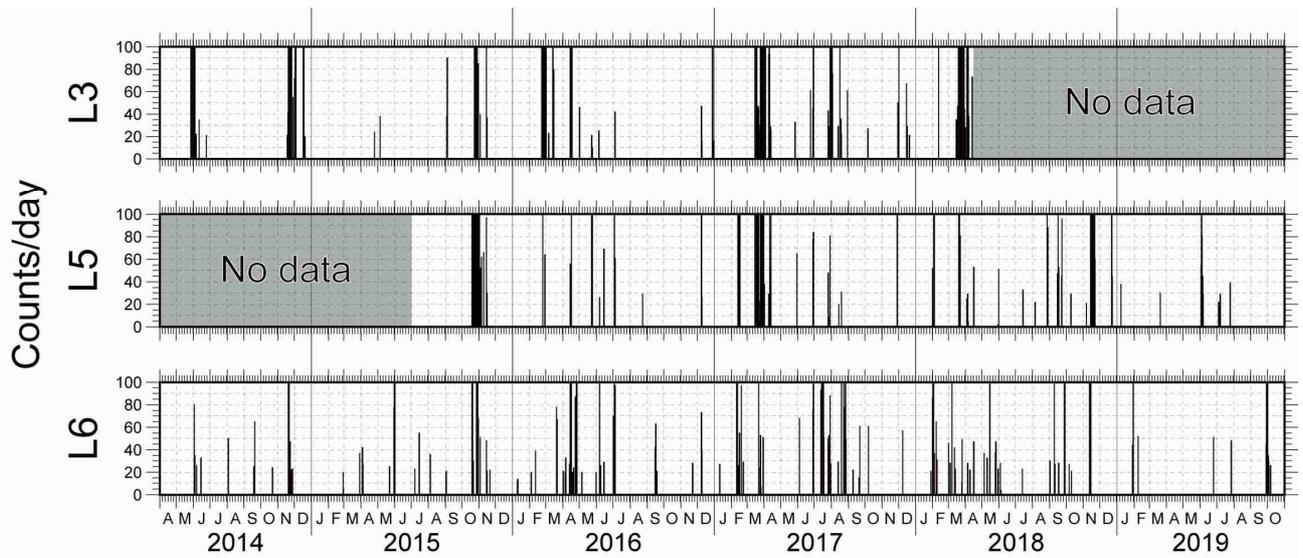


図 8 . 2014 年 4 月～2019 年 10 月の約 5 年間における海溝軸側観測点 (L3, L5, L6 ; 図 9 参照) で検出された低周波微動の日回数の時系列を示す。グレーの時期はデータが存在しない期間に相当する (鹿児島大学 [課題番号 : KGSM01])。

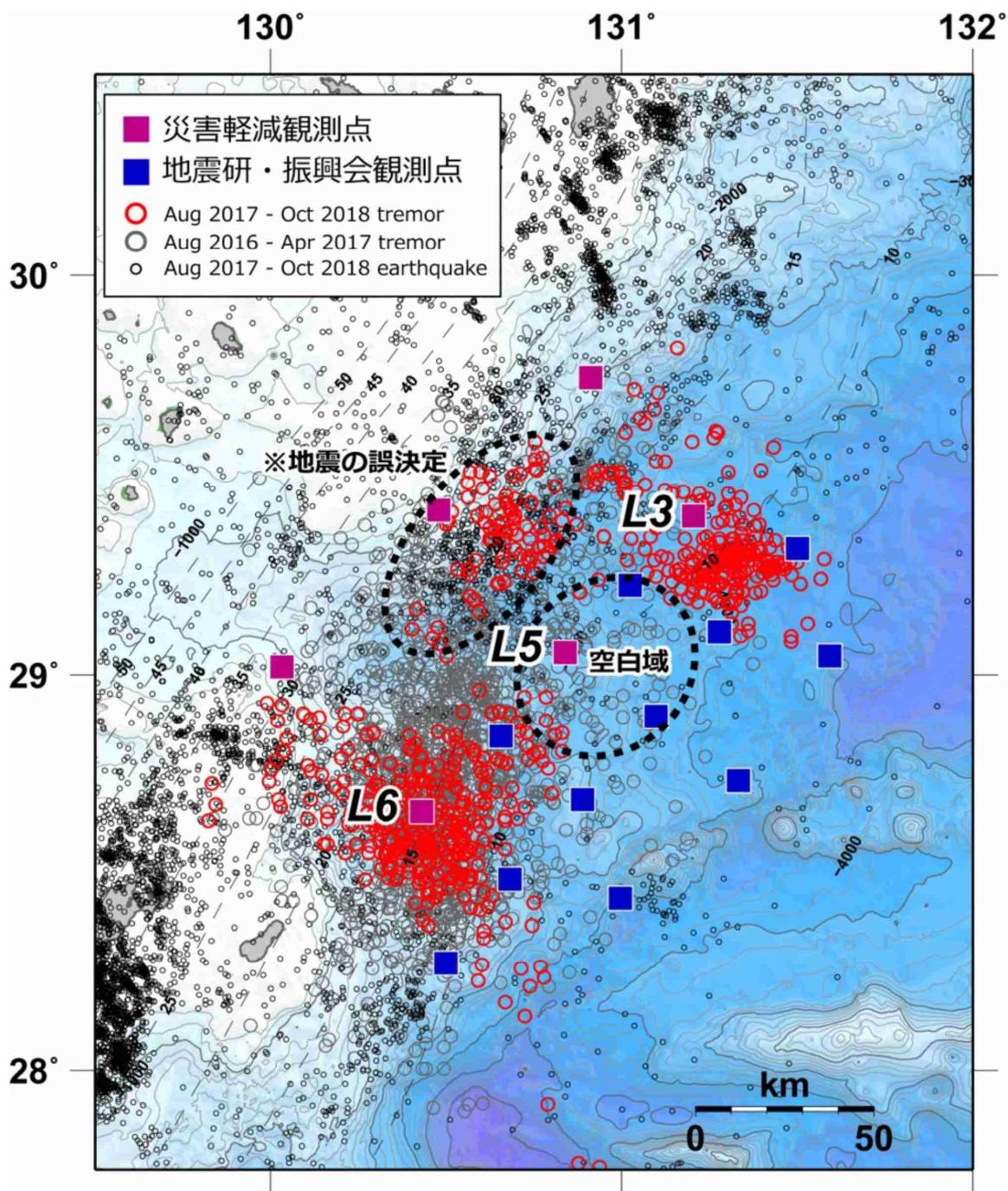


図9. スロー地震（浅部低周波微動）の震央分布。赤丸が決定されたスロー地震の震央，黒丸は通常の地震の震央（気象庁の一元化震源）を示す。四角はLOBS観測点で，このうち紫と青はそれぞれ，前計画の課題で実施した準定常（繰り返し）観測点，東京大学地震研究所と地震予知総合研究振興会が共同で設置した観測点である（鹿児島大学 [課題番号:KGSM01]）。

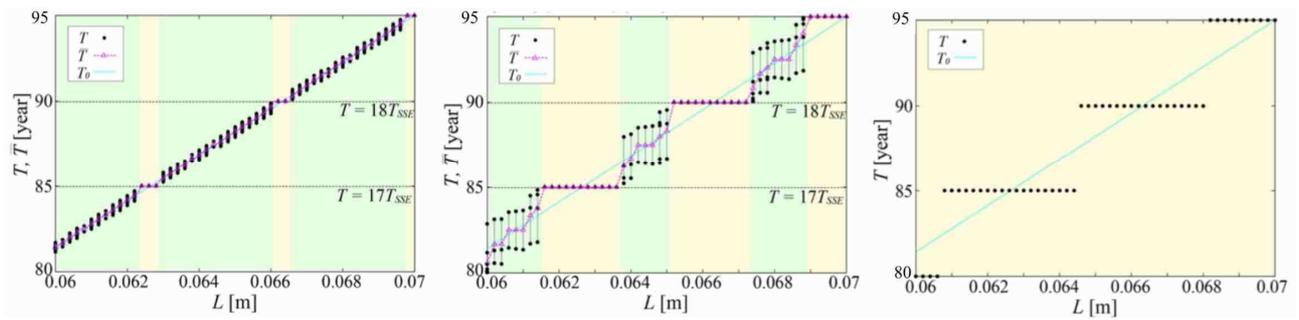


図 10. 5 年周期で起きる SSE の影響を受ける場合の地震の発生間隔 (Ohtani et al., 2019 より改変)。横軸：摩擦則の特徴的滑り距離 L 。縦軸：(黒丸) 地震の発生間隔 T 。青色の三角印は、複数の T が現れる場合の $T(L)$ の平均値、青色実線は、定常的な载荷の場合 (SSE が ない場合) の地震の発生間隔。(a), (b), (c) の順に仮定した SSE の規模が大きくなる。薄黄の塗色部では、SSE 周期の整数倍の T が 1 種類だけ現れる。薄緑の塗色部では、複数の地震をひとつのまとまりとする周期的ふるまいとなり、その間に複数の T が現れ、それらの合計が SSE 周期の整数倍になる (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_06])。

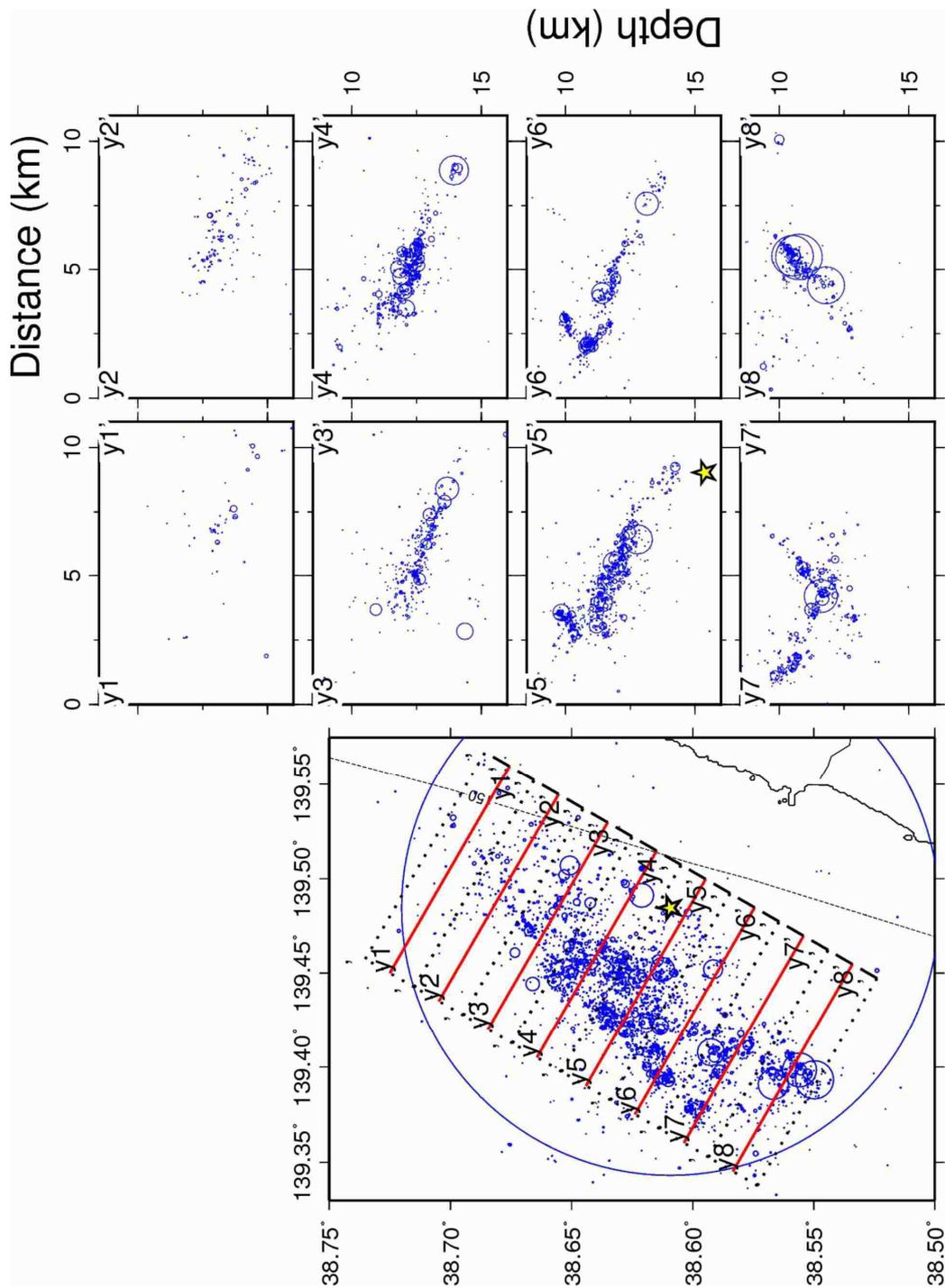


図 11. 震源再決定により推定された 2019 年山形県沖の地震の余震の震源分布（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_07]）。黄色の星印は、山形県沖の地震の震源を表す。

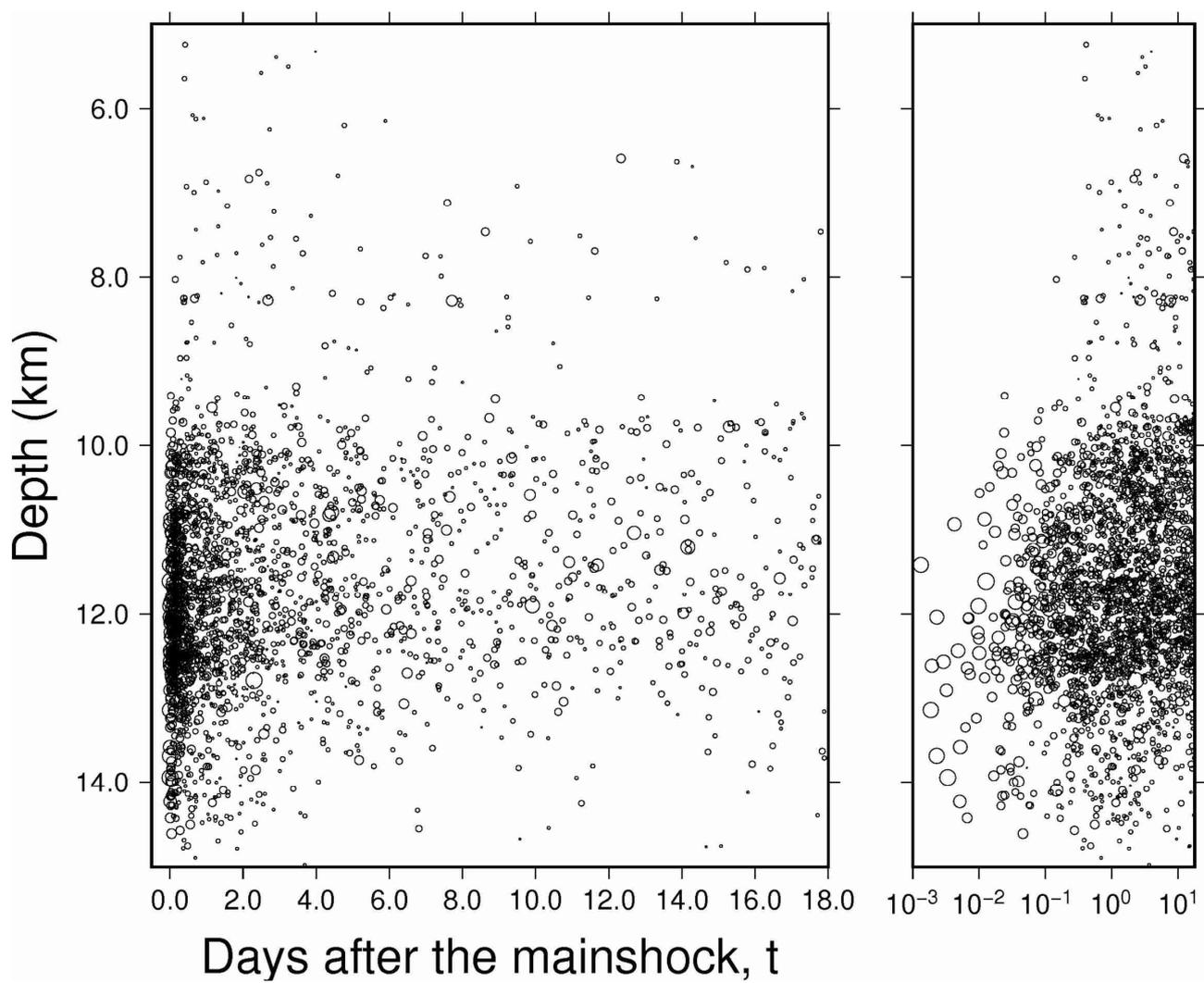


図 12. 2019 年山形県沖の地震の余震の震源深さと経過時間の関係（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_07]）。

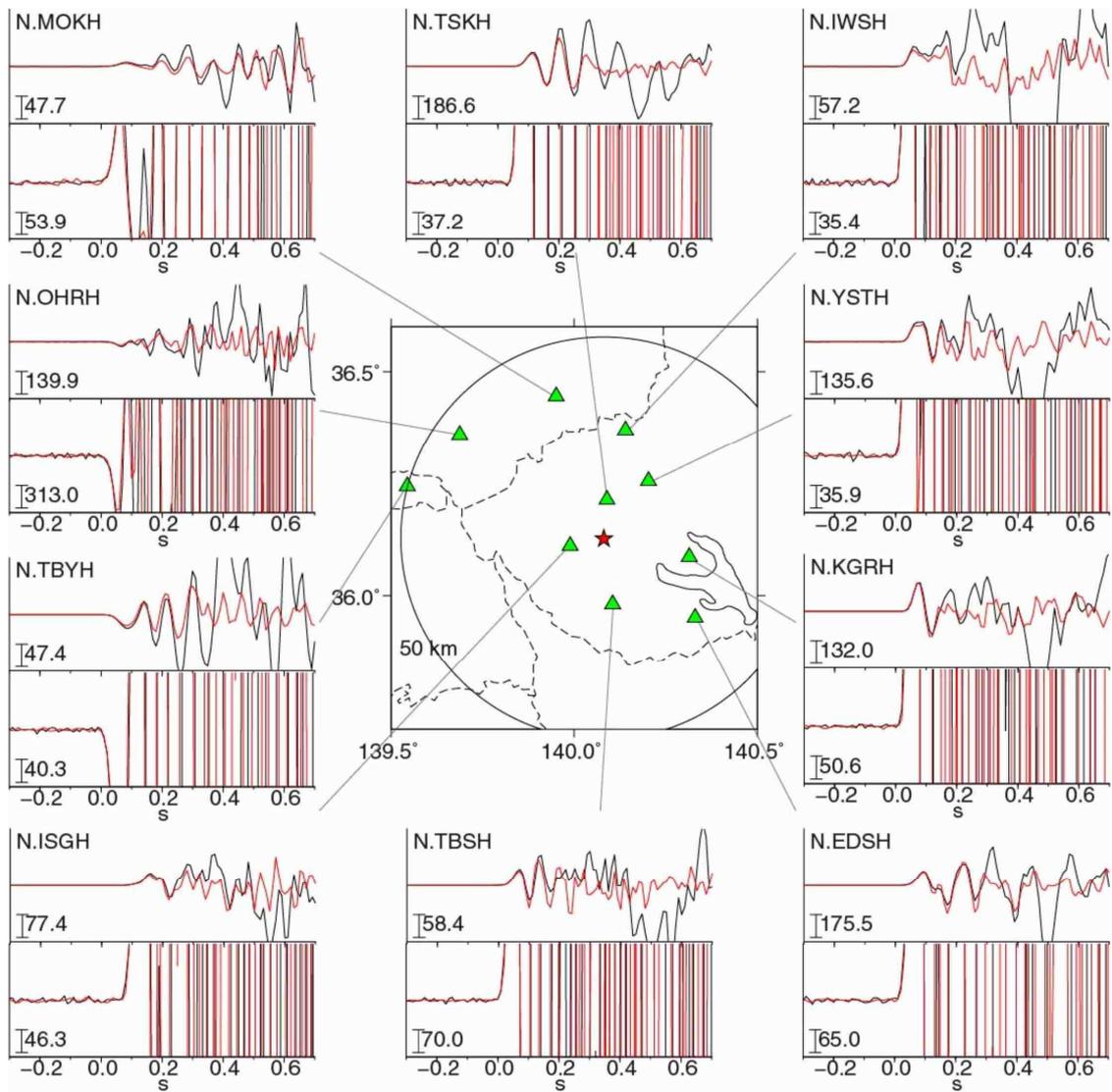


図 13. 北海道から東北沖の沈み込み帯における階層的地震発生構造を解明するために、M4.5 以上の大地震と、M4 以下の中小地震の波形の立ち上がりを網羅的に比較した結果（東京大学理学系研究科 [課題番号：UTS_03]）。

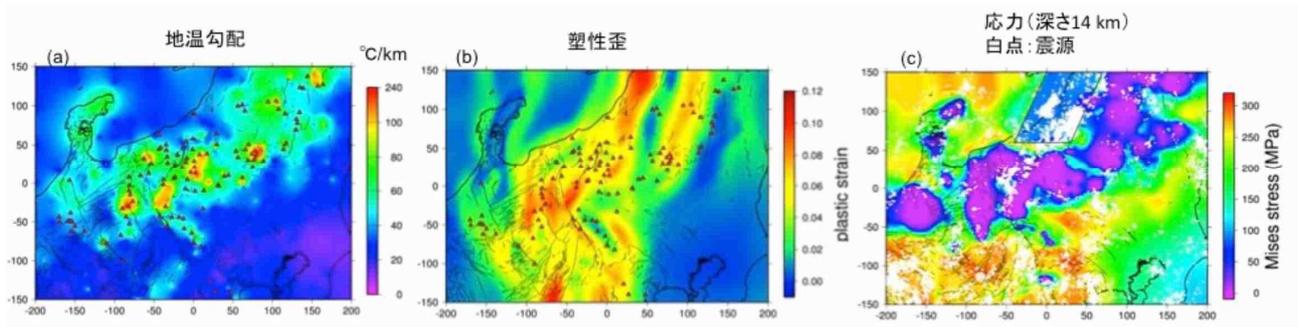


図 14. 中部日本歪集中帯・応力場のモデル化。地温勾配の分布 (a) から推定した温度構造、水の分布、既存の地質構造を考慮し、東西方向に短縮させることで、中部日本における歪・応力集中過程を再現した。新潟地域のリフト構造（強度の弱い領域）及び飛騨山脈周辺の高温度域を考慮することで、新潟から飛騨山脈周辺までの歪集中帯を再現した (b)。 (c) に深さ 14 km での応力場と震源分布（深さ 13-15 km）を示す。低応力の延性領域では地震活動度は低く、高応力の脆性領域で地震が多く発生する（東北大学理学研究科 [課題番号:THK_07]）。

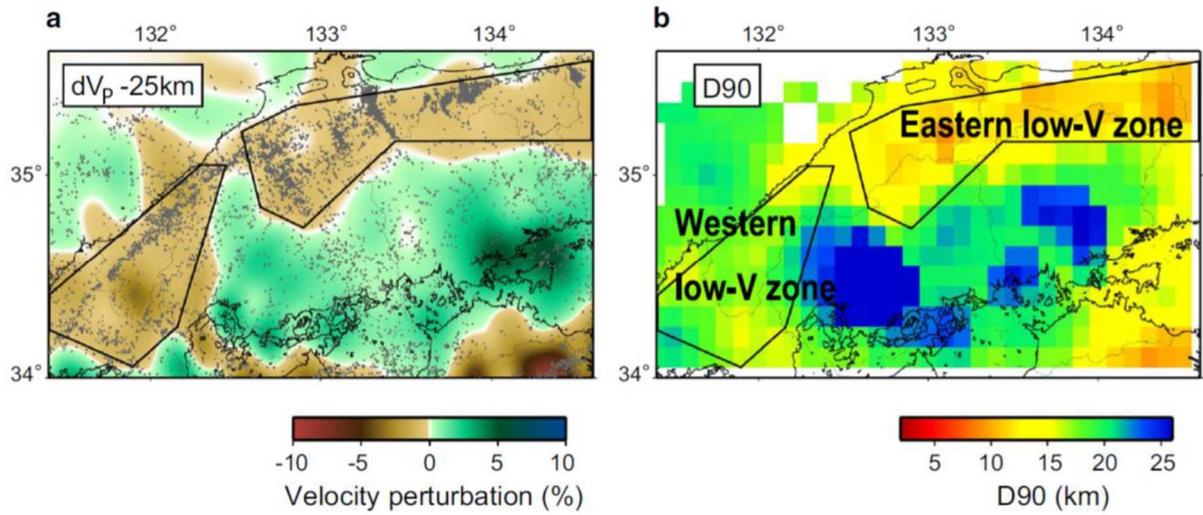


図15. 山陰地方の地震帯直下の下部地殻の速度構造とD90の分布 (Tsuda et al., 2019)。
 (左) 地震波トモグラフィーにより気象庁一元化処理震源データから推定された深さ25kmにおけるP波速度偏差, (右) 気象庁一元化処理震源で推定されたD90の空間分布 (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI03])。

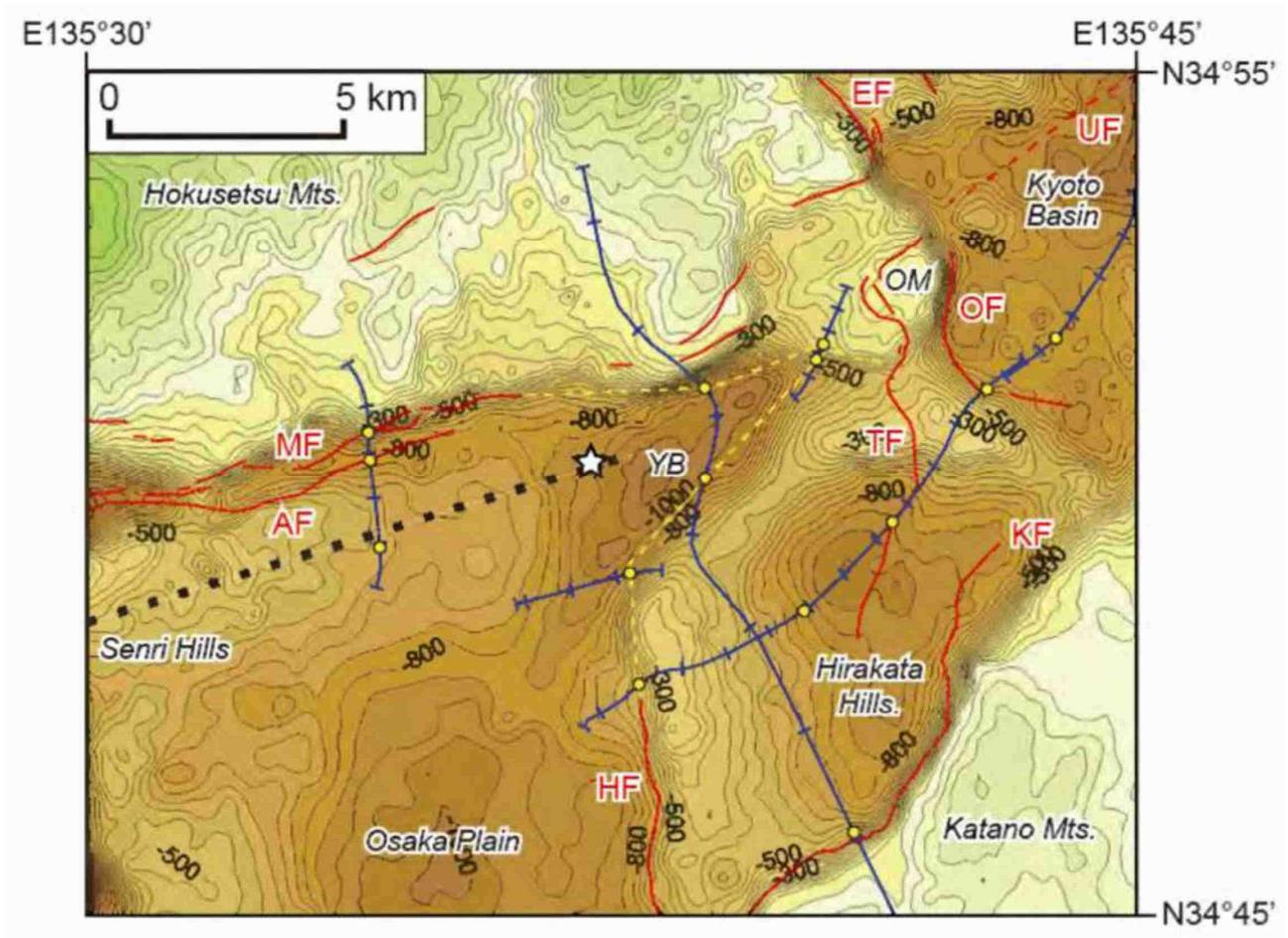


図 16. 地下構造探査結果の再解釈から新たに発見された伏在活断層（黄色の破線）（堤・飯尾，2019）。赤線は以前から特定されている活断層，MF:真上断層，AF:安威断層，EF:円明寺断層，UF:宇治川断層，OF:男山断層，TF:田口断層，KF:交野断層，HF:枚方とう曲。背景は重力基盤地図（赤松・他，2007）。青線:反射法探査測線，測線上の黄色の円は，反射法で特定された断層の位置。青点線は微小地震活動の線上配列（リニアメント）。星印は，大阪府北部の地震の震央。OM:男山丘陵，YB:淀川地溝（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI03〕）。

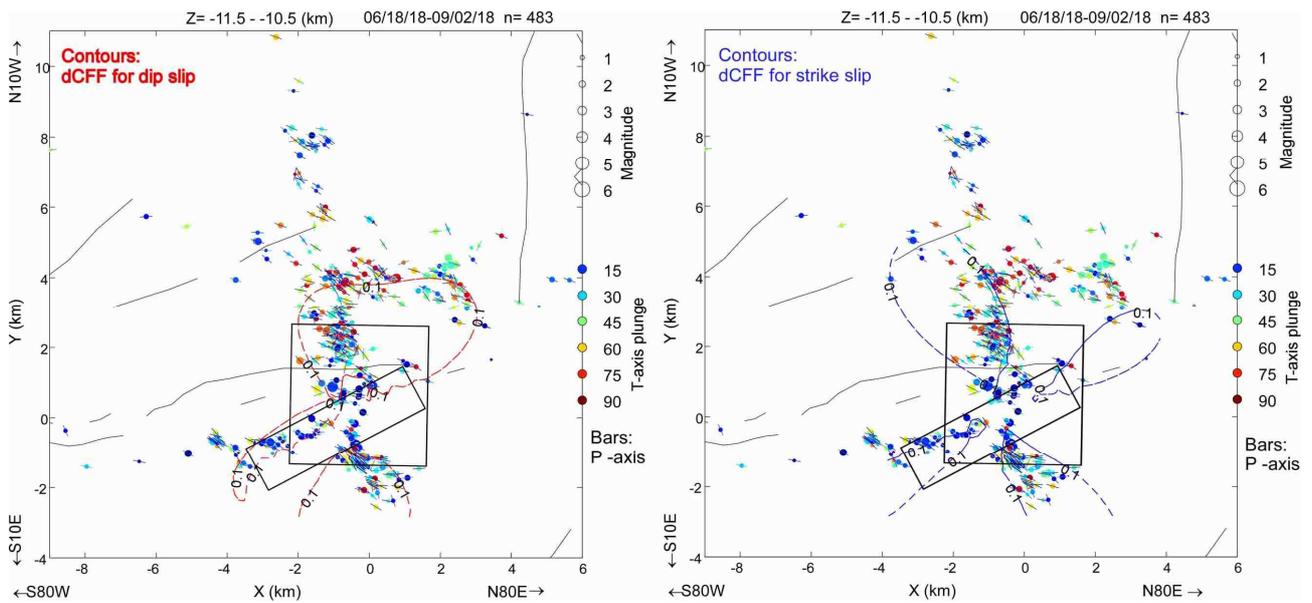


図 17. 大阪府北部の地震の余震の P 軸の方位と T 軸の傾斜角の分布。深さ 11km (± 0.5 km) の水平面へ投影した P 軸の方位と T 軸の傾斜角の分布。丸の塗りつぶしの色が赤系統の余震は T 軸が鉛直に近い逆断層型。京都大学防災研究所地震災害研究分野（浅野公之）による南側の高角の断層面 ($N52^\circ E$, 77° 南傾斜) と北側の東傾斜の断層面 ($N351^\circ E$, 50° 東傾斜) も水平面に投影。浅野により波形インバージョン解析によって推定された本震の断層モデルを近似したすべり分布による DCFE の 0.1MPa のコンターを表示。左：上記の東傾斜の断層面と同じ向きの逆断層に対する DCFE，右：上記の高角の断層面と同じ向きの横ずれ断層に対する DCFE（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI03]）。

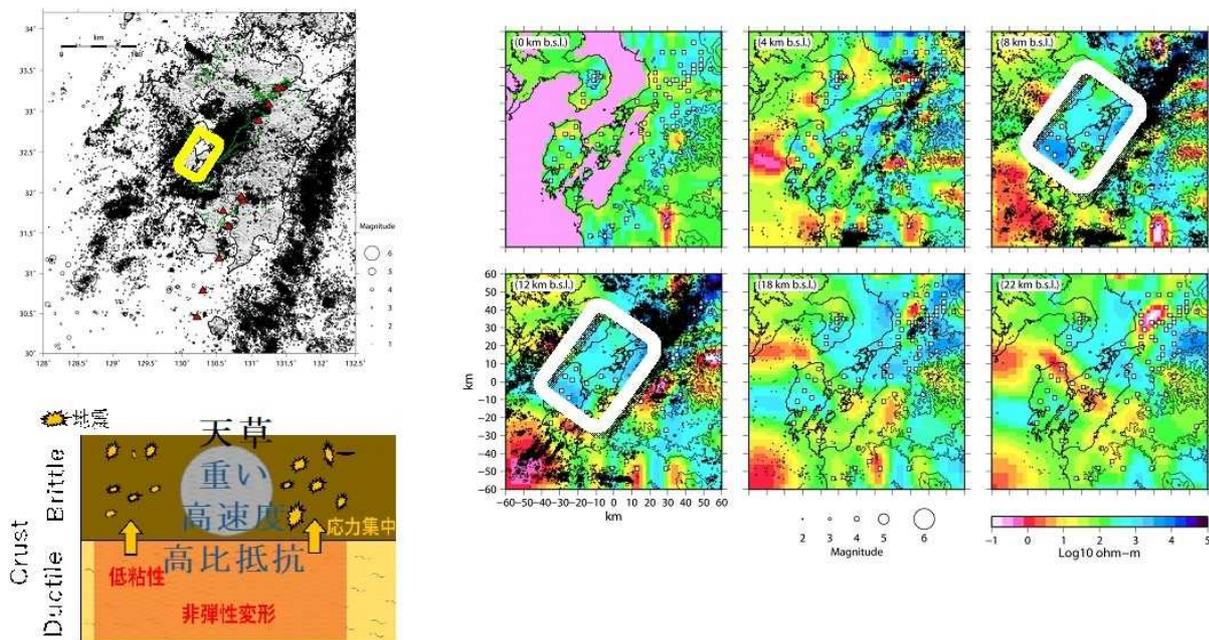


図 18. 南島原の地震空白域周辺で実施された MT 観測の解析結果 (九州大学 [課題番号 : KYU_01])。

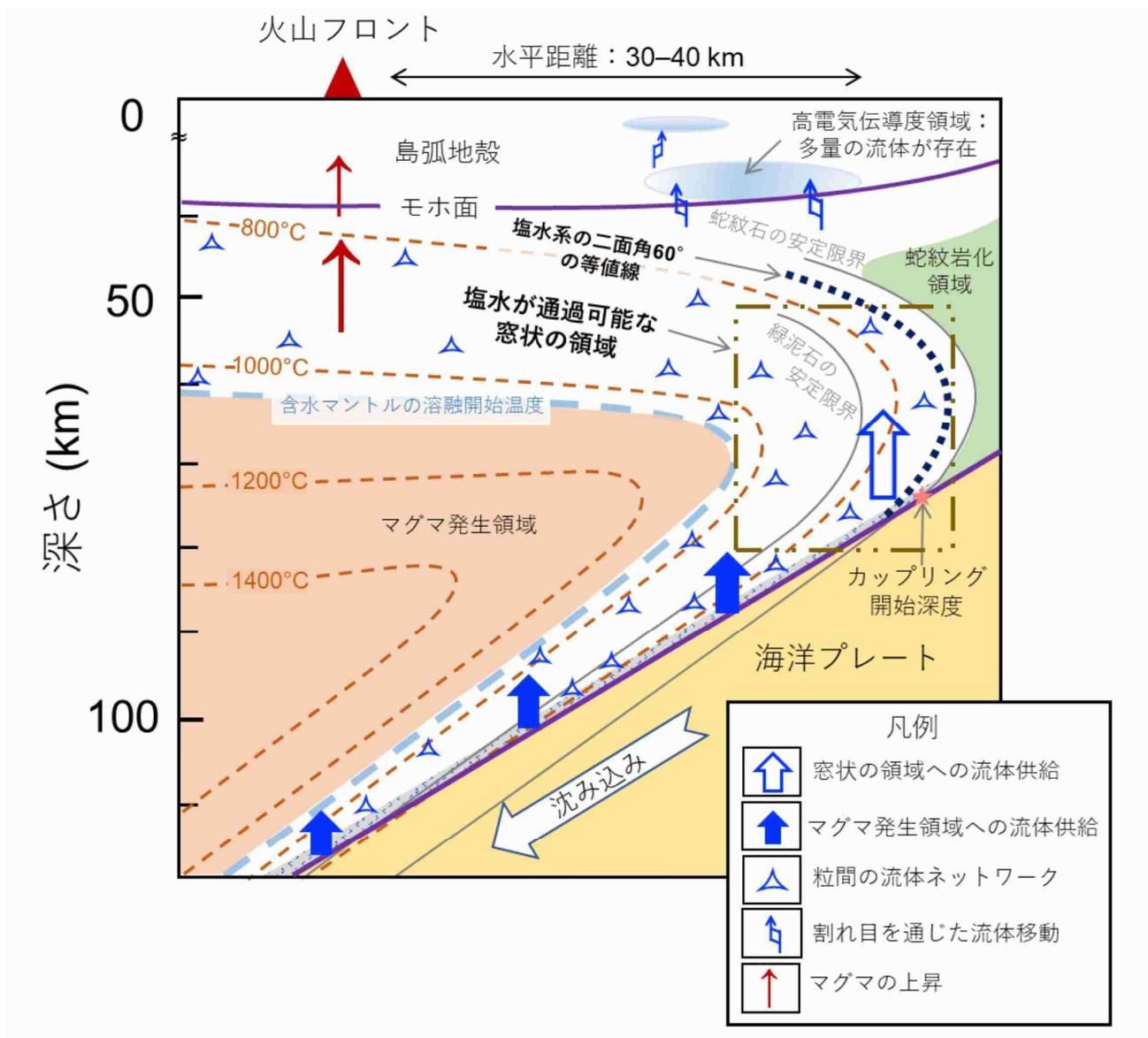


図 19. カンラン石間の二面角を決定する高温高圧実験の結果に基づき提案された沈み込み帯の水循環モデル (Huang et al., 2019)。沈み込んだプレート (スラブ) から放出される塩分を少量含んだ水を主成分とする超臨界流体は、地殻との間の“楔形マントル”のほぼ全域で岩石の粒間に浸透できる。前弧 (島弧の海溝側) 域の地下には、流体成分が、含水鉱物を形成して固定される海溝付近と、マントルを熔融させてマグマに溶け込む領域の間で、スラブから放出された流体が粒間を浸透して移動できる領域が、窓のように存在すると考えられる。このような流体の移動経路は、前弧のモホ面近傍に電気伝導度の高い領域が形成されることを説明できるとともに、スラブから供給された流体が何処に運ばれるのか、という問題の解決につながる (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_02])。

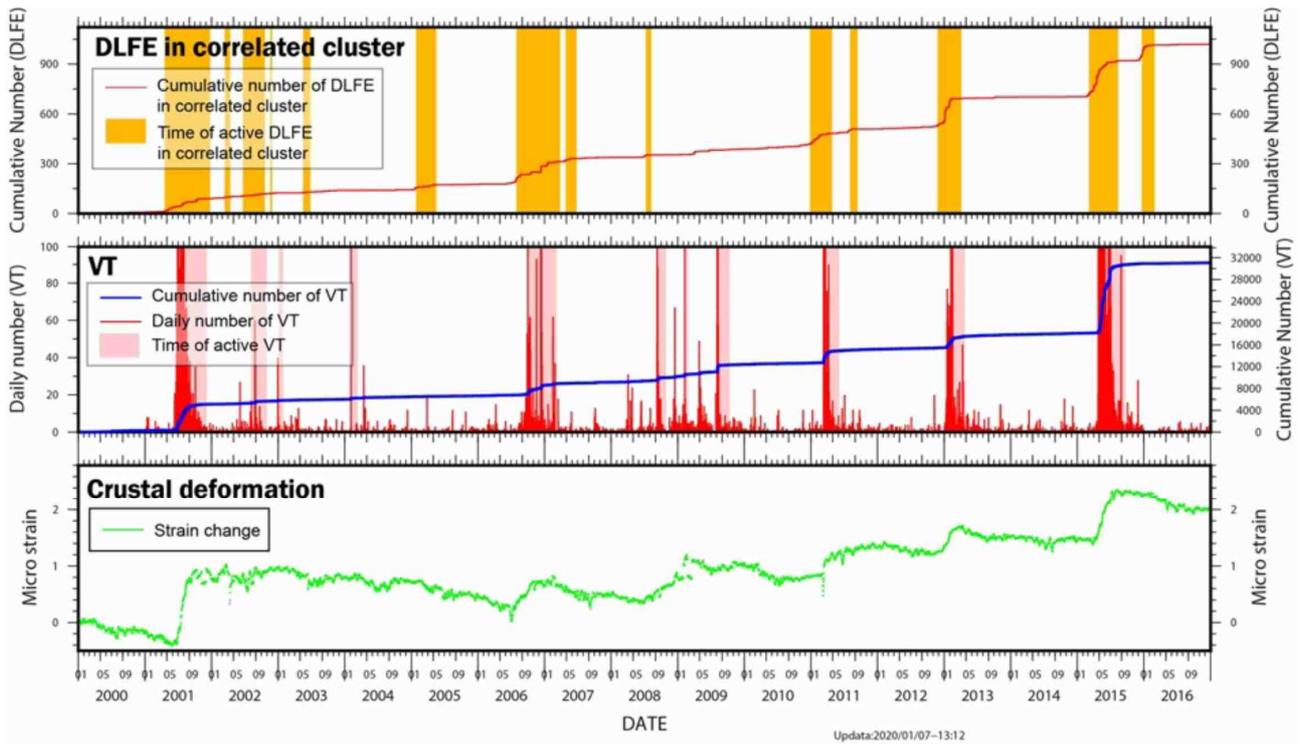


図 20. 箱根深部低周波地震活動（DLFE）と浅部群発地震（VT）及び火山性歪み変化時系列との関係（Yukutake et al., 2019 を一部改変）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI04]）。

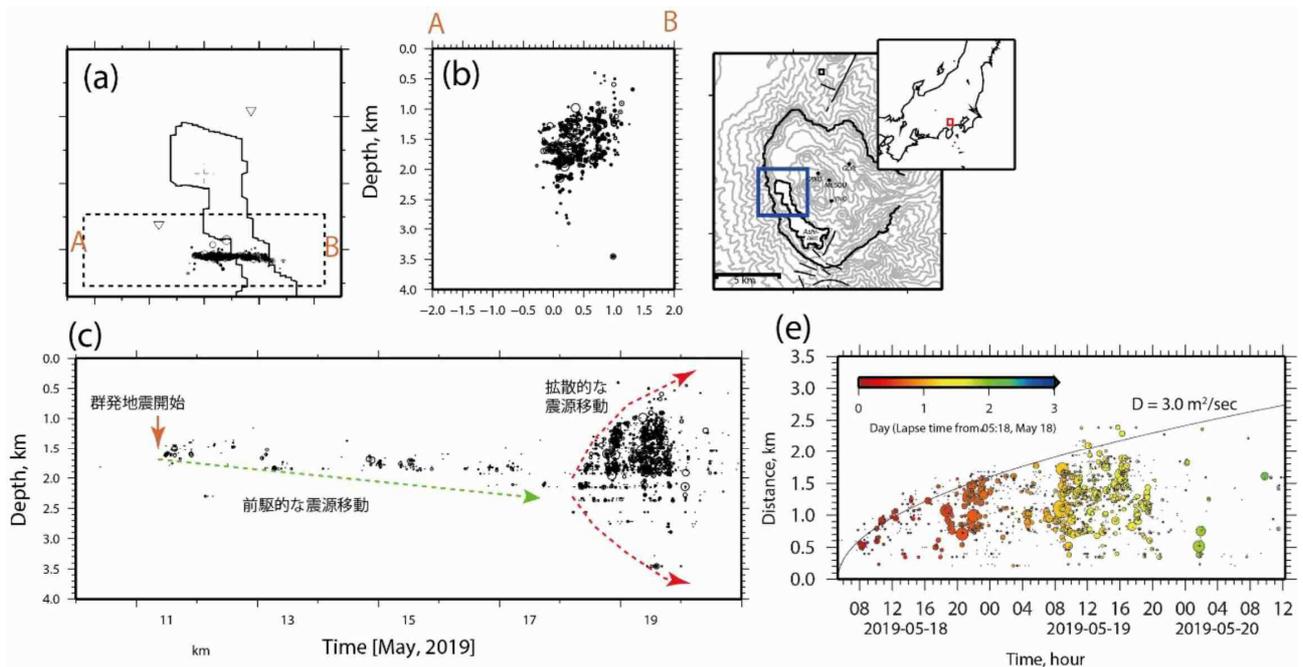


図 21. 2019 年 5 月箱根カルデラ内での群発地震の時間空間分布。(a) 震央分布，(b) 矩形 A-B に沿った深さ断面，(c) 矩形 A-B における時間—震源深さとの関係，(d) 5 月 18 日未明から始まった拡散的な震源移動現象における，時間—初期イベントからの距離との関係（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_02]）。

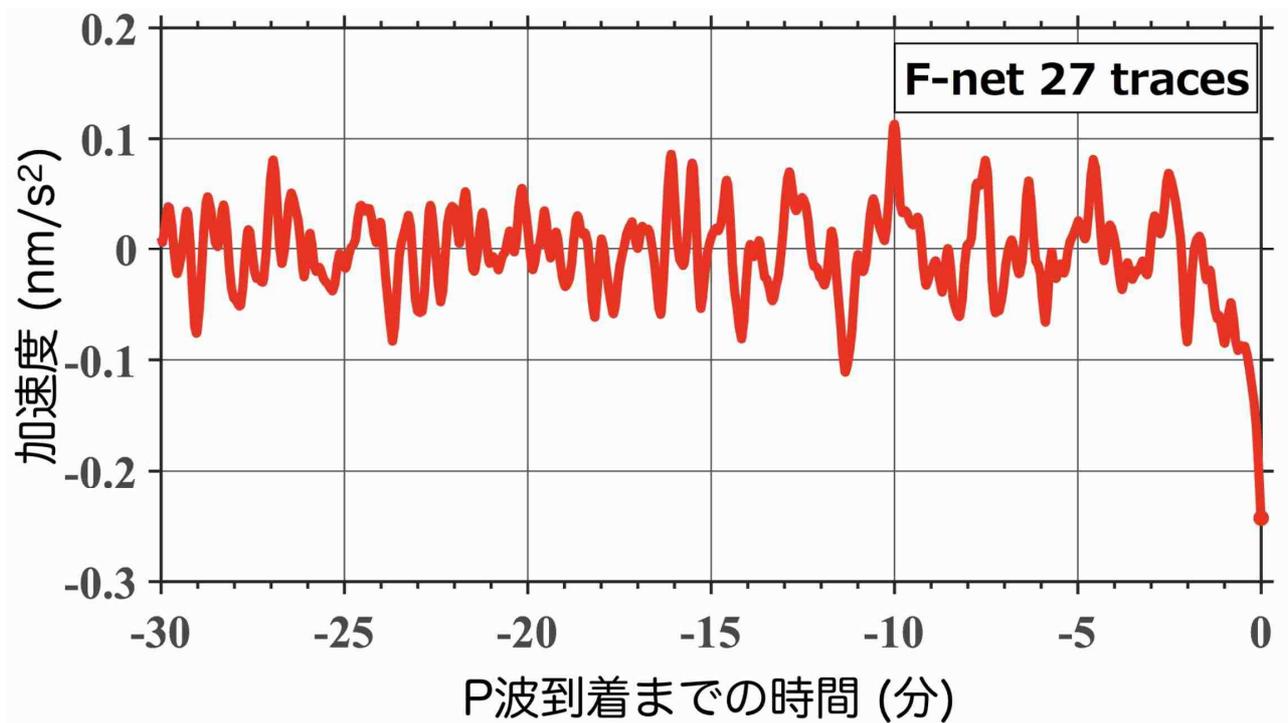


図 22. 2011 年東北地震による即時重力波 (Kimura et al., 2019 より改変)。日本の広帯域地震計網 (F-net) の 27 観測点の P 波到着前の下向き加速度を P 波到着時刻 (=0 分) をそろえて平均した。P 波到着前 30 秒間で重力値が変化している。27 観測点の震源距離は 505-1421km の範囲にあり, 平均距離 987km において P 波到着直前の重力加速度は平均 0.25 nm/s² の減少を示す (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_06])。

1 (2) 地震 (長期予測)

「地震 (長期予測)」計画推進部会長 西村卓也

(京都大学防災研究所)

副部会長 宍倉正展

(産業技術総合研究所)

大地震の長期予測は、日本国内では地震調査研究推進本部による長期評価という形で実施され、その評価結果は全国地震動予測地図などの形で社会に公表されている。大地震の長期予測は、災害軽減や防災対策の立案に役立てられることが期待されるが、大地震の発生は極めて低頻度な現象であるため、おもに過去の地震の発生履歴に基づいて行われてきた長期予測には大きな不確定性が伴っている。本部会では、地質データや史料・考古データを活用して地震の発生履歴をより詳細に解明する手法開発を行うとともに、実際に得られた発生履歴データを蓄積して予測精度の改善につなげる観測研究を行う。さらに、これまでは十分に活用されていなかった地殻変動や地震活動などの観測データや地震発生の物理モデルの利用により、長期予測手法の高度化を目指した観測研究を行う。以下では、本部会に属する各課題について令和元(2019)年度の成果の概略と今後の展望について述べる。

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

イ. 考古データの収集・集成と分析

近代以前の日本列島において大地震の前後に発生した中・小規模の地震や地震活動の実態などを解明するために、江戸時代前期の京都で記された2つの日記史料にある有感記録について調査した。下鴨神社での日記史料である『豊光日次』には、寛文二年五月一日(グレゴリオ暦:1662年6月16日)に発生した寛文近江・若狭地震の直後から有感記録が多くなっている。有感記録が減少し始めるのは十一月になってからであり、日数の経過と共に有感記録は減少していくものの、寛文三年十二月と寛文五年五月には有感記録が多くなっている。吉田神社で記された日記史料である『御広間雑記』についても寛文近江・若狭地震の直後から有感記録が多くなっているが、両者の有感地震の記録数について比較したところ、有感記録は前者の方が多ことがわかった。有感記録数の違いには記主の主観や経験がある程度影響していると考えられるが、両者の日記が書かれた場所における地震時の揺れ方に違いがあり、それによって記主が感じた地震数に差異が生じた可能性が示唆される(東京大学地震火山史料連携研究機構 [課題番号:HMEV02])。

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

海溝型地震の発生履歴に関する調査としては、沿岸での津波堆積物や巨礫群を用いた古津波、海岸段丘地形の評価が行われた。北海道の太平洋岸において再調査、再検討された津波堆積物から、17世紀前半の年代を示すイベントは場所によって波源が異なり、胆振地方西部においては1640年北海道駒ヶ岳噴火津波起源であること、胆振地方東部においては1611年慶長地震津波起源の可能性が高いことがわかった。また十勝地方の複数の地点における津波堆積物は、1611年より新しい時代のものと推測された。これらの結果は、いわゆる17世

紀の巨大地震の地震像を再検討する必要があることを示唆する（北海道大学 [課題番号：HKD_01]）。南海トラフ沿いでは、紀伊半島東部（南伊勢）、紀伊半島南部（那智勝浦・串本）、宮崎平野で津波堆積物調査、喜界島で隆起サンゴ調査をそれぞれ実施し、串本の橋杭岩の漂礫の調査及び津波シミュレーションでは、宝永地震クラスの津波で計算上動かない重さの漂礫が、実際には動いていることから、過去に宝永地震時よりも大きな津波があったことが示唆された（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST08]）。琉球列島南部において津波堆積物中に含まれるサンゴ・貝類の放射性炭素年代測定を多数行い、測定結果がある年代値に収束する傾向が見られた。これにより、1771年明和大津波より一つ前の津波の発生年代を高確度で決定できる可能性が高いことが明らかになった（東京大学理学系研究科 [課題番号：UTS_01]）。古地震履歴の推定手法の高度化のために、海岸段丘地形の高解像度な数値標高モデル（DEM）を対象としたクラスタリング手法に基づいた定量的かつ客観的な数値解析手法の開発を行った。海岸段丘地形は、過去の地震性隆起の痕跡として認識されており過去の地震発生回数や発生年代の推定に広く用いられているが、房総半島南部にある海岸段丘地形のDEMデータに上記の手法を適用したところ、これまで空中写真判読で認識されていた四段の段丘面を客観的に抽出し、段丘面間の比高の空間分布を定量的に求めることに初めて成功した（図1）。得られた比高は、どの段丘面間の場合でも南部に行くほど大きくなり、これまで知られていた1703年元禄関東地震（M8.2）での隆起沈降分布に類似していることがわかった（東京大学理学系研究科 [課題番号：UTS_02]、産業技術総合研究所 [課題番号：AIST08]）。

内陸地震の発生履歴に関する調査としては、糸魚川-静岡構造線断層帯（糸静線）の中北部区間において、三次元的なトレンチ掘削調査、群列ボーリング調査、S波反射法地震探査が実施され、西暦762年もしくは841年の歴史地震に対比できる最新イベントが確認された。従来からの知見と合わせて解釈すると、このイベントでは糸静線の北部区間と中北部区間に至る区間が連動したと推定される（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST02]）。2016年熊本地震の震源断層である布田川-日奈久断層帯については、益城町平田でのトレンチ調査及び断層変位地形の屈曲量から水平変位速度はそれぞれ0.29-0.86mm/yr及び約1mm/yrと見積もられた。西原村小森でのトレンチ調査では2016年熊本地震を含めて4回の断層運動があり、その平均活動間隔は2400-3500年、2016年熊本地震の1つ前の活動が2086-2287calBPにあったことが明らかになった。これらの結果から布田川-日奈久断層帯が2000-3000年程度の間隔で活動してきた可能性が高い（図2）。また、阿蘇カルデラ東部と出ノ口断層沿いに出現した地表地震断層は、過去においても布田川断層の活動と同期していた可能性があることがわかった（名古屋大学 [課題番号：NGY_03]）。

これらの地質データを簡単に検索、表示できるデータベースについても、前計画から引き続いて充実が図られている。産業技術総合研究所では、活断層及び津波浸水履歴情報を「活断層データベース」「津波堆積物データベース」として整備しており、産総研の調査情報の追加、調査地の位置精度の向上、データ入力インターフェイスの作成およびシステム改修が行われた（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST01, AIST04]）。

（5）地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

銭洲海嶺西端およびその延長部における海底地形詳細調査と浅層地質構造探査が行われた。その予備的な解析によると、銭洲海嶺と西方の檜野埼海丘の間に地殻変動に起因すると考え

られる海底面の起伏が確認され、サブボトムプロファイラを用いた浅層地質構造探査からも変位・変形構造がイメージングされた。それらの中には海底面まで変位させるものも含まれる（名古屋大学 [課題番号：NGY_04]）。

時間遅れを伴う地震活動が大地震の余効すべりによって誘発される場合を考察するため、余効すべり伝播速度と摩擦特性との定量的な関係式の導出を行った。速度状態依存摩擦則に基づき余効すべり域で均質な摩擦特性を持つ多数の試行モデルの数値シミュレーション結果から、余効すべりの発生過程について近似条件を導き出し、摩擦特性パラメータ値 a 、有効法線応力 σ 、せん断応力変化量 $\Delta \tau$ を用いた $\exp(\Delta \tau / a \sigma)$ が余効すべり伝播速度に比例することを導出した。この関係式は、 $a \sigma$ が小さいほど指数関数的に伝播速度が増大することを意味する。一方、余効すべり伝播速度は摩擦特性が時空間的に均質であっても、経過時間に比例することが確かめられた（Ariyoshi et al., 2019）（海洋研究開発機構 [課題番号：JAMS01]）。

オ. 構造共通モデルの構築

防災科研Hi-netやF-netのデータにS-netのデータも活用することにより、海域を含む日本列島域の3次元地震波速度構造の高精度な推定を行い、結果を防災科研Hi-netのweb サイトから公開した（Matsubara et al., 2019）（防災科学技術研究所 [課題番号：NIED02]）。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

（1）地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

スロー地震活動について、S-netの観測記録に基づき、十勝沖・三陸沖の日本海溝近傍で発生する低周波微動を捉えた（Tanaka et al., 2019）。低周波微動は、当該地域で発生した巨大地震の震源域浅部側に隣接して分布すること、プレートの走向に沿う帯状の領域内で2つのクラスタを形成すること、このクラスタ間は巨大地震の破壊開始域や余震活動が分布することを明らかにした。3次元構造を用いて、南海トラフ海域における浅部超低周波地震のCMT解を求め、その多くは低角逆断層型であること、フィリピン海プレート上面のすべり欠損速度が大きい領域の周囲、かつ地震波速度が遅い領域で活発に発生していることが明らかとなった（Takemura et al., 2019）（防災科学技術研究所 [課題番号：NIED02]）。

イ. 内陸地震の長期予測

内陸における地震発生層の下限（D90）を求めるため、3次元地震波速度構造を用いて再決定した震源カタログを構築するとともに、このデータ等に基づいて日本海沿岸や中央構造線沿い等のD90の分布を調査した。また、地震波走時トモグラフィによる速度構造から推定された温度構造・岩種とD90の分布の関連性を議論した（防災科学技術研究所 [課題番号：NIED02]）。

内陸域などに存在する地殻内震源断層の応力蓄積過程を明らかにし、長期予測を行うため、日本列島域の三次元有限要素モデルを構築した。このモデルとGNSSデータを用いて千島海溝の固着を推定し、固着の進行にともなう北海道地域の震源断層の応力蓄積速度を求めた（図3）（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_11]）。

測地データから内陸地震の発生ポテンシャルを評価するために、ひずみ速度を用いて西日

本の内陸地震の発生確率を試算した。この試算の中で、測地データによって観測されるひずみ速度は弾性ひずみと非弾性ひずみの両方を含むため、両者の割合を測地モーメント速度と歴史地震で解放されたモーメント速度の比から推定した。最近433年間の歴史地震及び気象庁一元化カタログを用いると、測地モーメント速度に対する歴史地震のモーメント速度の比は西日本全域では14%、中部・近畿・中国地方を中心とする領域では、24%であった。これらの結果は、測地学的ひずみ速度が地震学的ひずみ速度よりも1桁大きいという先行研究の結果を支持するものであるが、両者の割合は地域性があることも示唆された。GNSSデータとして南海トラフ沿いのカップリングによる弾性変形を除去したひずみ速度から測地モーメント速度を計算し、その14%が地震として解放されるとし地震の発生時刻はポアソン過程を仮定すると、0.2°グリッド毎の30年間にM6.0以上の内陸地震が発生する確率は、最大4.3%という結果を得た（図4）（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI05]）。

地殻内のせん断歪みエネルギーの蓄積が地震発生に深く関与するという考えのもと、2016年熊本地震による地殻内のせん断歪みエネルギーの変化を3次元的に推定した。この結果と熊本地震発生後1週間の余震分布を比較し、せん断歪みエネルギーが増加した場所で余震が顕著に活発化したことを明らかにした。更に、せん断歪みエネルギーの変化量は、背景応力の大きさに強く依存することが分かった。この事実を利用して、エネルギー保存という新たな観点から地殻応力の下限值（深さ10kmで14MPa以上）を推定することに成功した（Noda et al., 2020）（防災科学技術研究所 [課題番号：NIED03]）。

（2）地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

GNSS連続観測データから、南海トラフ域のスロースリップイベント（SSE）を調べ、2019年初め頃の豊後水道、四国南西部、日向灘北部におけるSSEの時空間変化を推定した。その結果、日向灘北部のSSEが2018年6月と2019年初めの合わせて2回発生したことがわかった（図5）（国土地理院 [課題番号：GSI_02]）。

これまでの課題と今後の展望

今年度から開始された観測研究計画において「地震（長期予測）」計画推進部会では、最終的なアウトプットが地震調査研究推進本部で行う長期評価の高度化に貢献することを目標として、個々の課題が実施された。計画の初年度ということで、特に新規に開始された課題においては研究開始から間もない時期ではあるが、多くの重要な成果が挙げられている。過去の地震の発生履歴を知ることが、長期予測において最も基礎的で重要であるが、今年度の成果の中でも過去の津波堆積物の年代測定の高精度化や多点での比較から、過去の津波の発生時期の絞り込みや複数の堆積物が異なる起源であることが示され、過去に発生した大地震の地震像が絞り込まれつつある。また、活断層で発生する内陸地震においては、2014年長野県北部の地震や2016年熊本地震を契機として、断層セグメントの一部を破壊する地震や断層セグメント間の連動及び活断層として事前に認識されていない場所での破壊などをどのように長期予測に取り入れて行くかの研究が始まっている。また従来、研究者の経験や地道な作業に依存しがちであった地質・地形データの解釈において、DEMとクラスタリング手法を用いた海岸段丘の客観的抽出手法が開発され、房総半島南部の海岸段丘面とその比高が高精度で検出できることが示された。高精度かつ高空間分解能のDEMデータは全国で整備されつつあり、こ

のような客観的抽出手法は、膨大なデータを効率的に処理していくという観点からも重要であると考えられる。

本計画の重点的な観測研究と位置づけられている新たな長期予測手法についても、着実な研究の進展があった。GNSS等によって観測された地殻変動データから内陸地震の発生確率が試算され、実際の地震活動を概ね説明することが示されたことは重要で、今後更に手法やデータの高度化が進められることが期待される。また、物理モデルを用いて近年実際発生した地震の震源過程を説明する研究や物理モデルへの入力パラメータとなる応力場を観測データから推定する試み、従来データがほとんどなかった地域における新たな観測の開始など今後結実することが期待できる多くの研究が開始されており、現在の研究を継続することによって、次年度以降はさらなる成果が期待できる。

成果リスト

- Ariyoshi, K., J. Ampuero, R. Burgmann, T. Matsuzawa, A. Hasegawa, R. Hino, T. Hori (2019), Quantitative relationship between aseismic slip propagation speed and frictional properties, *Tectonophysics*, 767, 128-151, doi:10.1016/j.tecto.2019.06.021
- Carvajal-Soto, L. A., T. Ito, M. Protti, H. Kimura (2020), Earthquake potential in Costa Rica using three scenarios for the Central Costa Rica Deformed Belt as western boundary of the Panama Microplate, *J. South Am. Earth Sci.*, 97, doi:10.1016/j.jsames.2019.102375
- Ioki, K., Y. Tanioka, G. Kawakami, Y. Kase, K. Nishina, W. Hirose, K. Hayashi, R. Takahashi (2019), Fault model of the 12th century southwestern Hokkaido earthquake estimated from tsunami deposit, distributions. *Earth Planets Space*, 71:54, doi:10.1186/s40623-019-1034-6
- 石村大輔 (2019), 熊本県西原村布田における布田川断層の2016年熊本地震(Mw7.0)時上下変位と活動性, *活断層研究*, 50, 33-44, doi:10.11462/afr.2019.50_33
- 岩佐佳哉, 熊原康博, 後藤秀昭, 中田高 (2020), 熊本県益城町堂園地区における2016年熊本地震の地表地震断層の詳細な分布と共役断層の活動履歴, *活断層研究*, 52 (印刷中)
- Iwasaki, T., N. Tsumura, T. Ito, K. Arita, M. Makoto, H. Sato, E. Kurashimo, N. Hirata, S. Abe, K. Noda, A. Fujiwara, S. Kikuchi, K. Suzuki (2019), Structural heterogeneity in and around the fold-and-thrust belt of the Hidaka Collision zone, Hokkaido, Japan and its relationship to the aftershock activity of the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, *Earth Planets Space*, 71:103, doi:10.1186/s40623-019-1081-z
- Kubota, T., R. Hino, D. Inazu, S. Suzuki (2019), Fault model of the 2012 doublet earthquake, near the up-dip end of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, based on a near-field tsunami: implications for intraplate stress state, *Prog. Earth Planet Sci.*, 6:67, doi: 10.1186/s40645-019-0313-y
- Kubota, T., T. Saito, W. Suzuki (2020), Millimeter-scale tsunami detected by a wide and dense observation array in the deep ocean: fault modeling of an Mw 6.0 interplate earthquake off Sanriku, NE Japan, *Geophys. Res. Lett.*,

e2019GL085842, doi:10.1029/2019GL085842

- Matsubara, M., H. Sato, K. Uehira, M. Mochizuki, T. Kanazawa, N. Takahashi, K. Suzuki, S. Kamiya (2019), Seismic velocity structure in and around the Japanese Island arc derived from seismic tomography including NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, *Seismic Waves - Probing Earth System*, M. Kanao and G. Toyokuni eds., 1-19, doi:10.5772/intechopen.86936
- Nakano, M, S. Yabe, H. Sugioka, M. Shinohara, S. Ide (2019), Event size distribution of shallow tectonic tremor in the Nankai trough, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 5828-5836. doi:10.1029/2019GL083029
- Noda, A., T. Saito, E. Fukuyama, T. Terakawa, S. Tanaka, M. Matsu'ura (2020), 3-D Spatial distribution of shear strain energy changes associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, e2019GL086369. doi:10.1029/2019GL086369
- Ogata, Y., K. Katsura, H. Tsuruoka, N. Hirata (2019), High-resolution 3D earthquake forecasting beneath the greater Tokyo area, *Earth Planets Space*, 71:113, doi:10.1186/s40623-019-1086-7
- Ozawa, S., H. Yarai, T. Kobayashi (2019), Recovery of the recurrence interval of Boso slow slip events in Japan, *Earth Planets Space*, 71:78, doi:10.1186/s40623-019-1058-y
- Saito, T., T. Baba, D. Inazu, S. Takemura, E. Fukuyama (2019), Synthesizing sea surface height change including seismic waves and tsunami using a dynamic rupture scenario of anticipated Nankai trough earthquakes, *Tectonophysics*, 769, 228166, doi:10.1016/j.tecto.2019.228166
- Saito, T., A. Noda (2020), Strain energy released by earthquake faulting with random slip components, *Geophys. J. Int.*, 220(3), 2009-2020, doi:10.1093/gji/ggz561
- Saito, T., T. Kubota (2020), Tsunami modeling for the deep sea and inside focal areas, *Annual Rev. Earth Planet. Sci.*, 48, doi:10.1146/annurev-earth-071719-054845
- Shimada, Y., S. Fujino, Y. Sawai, K. Tanigawa, D. Matsumoto, A. Momohara, M. Saito-Kato, M. Yamada, E. Hirayama, T. Suzuki, C. Chagu (2019), Geological record of prehistoric tsunamis in Mugi Town, facing the Nankai Trough, western Japan, *Prog. Earth Planet Sci.*, 6, 33, doi:10.1186/s40645-019-0279-9
- 宍倉正展 (2019), 房総半島南西岸の関東地震における隆起生物遺骸群集の露頭データ, *歴史地震*, 34, 91-102
- Takemura, S., T. Matsuzawa, A. Noda, T. Tonegawa, Y. Asano, T. Kimura, K. Shiomi (2019), Structural characteristics of the Nankai Trough shallow plate boundary inferred from shallow very low frequency earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 4192-4201, doi: 10.1029/2019GL082448
- Tanaka, S., T. Matsuzawa, Y. Asano, (2019), Shallow low-frequency tremor in the northern Japan Trench subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 5217-5224,

doi: 10.1029/2019GL082817

Tomita, F., M. Kido, C. Honsho, R. Matsui (2019), Development of a kinematic GNSS-Acoustic positioning method based on a state-space model, *Earth Planets Space*, 71:102, doi:10.1186/s40623-019-1082-y

Xu, S., E. Fukuyama, F. Yamashita, S. Takizawa (2019), Evolution of Fault-Interface Rayleigh Wave speed over simulated earthquake cycles in the lab: Observations, interpretations, and implications, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 524, doi:10.1016/j.epsl.2019.115720

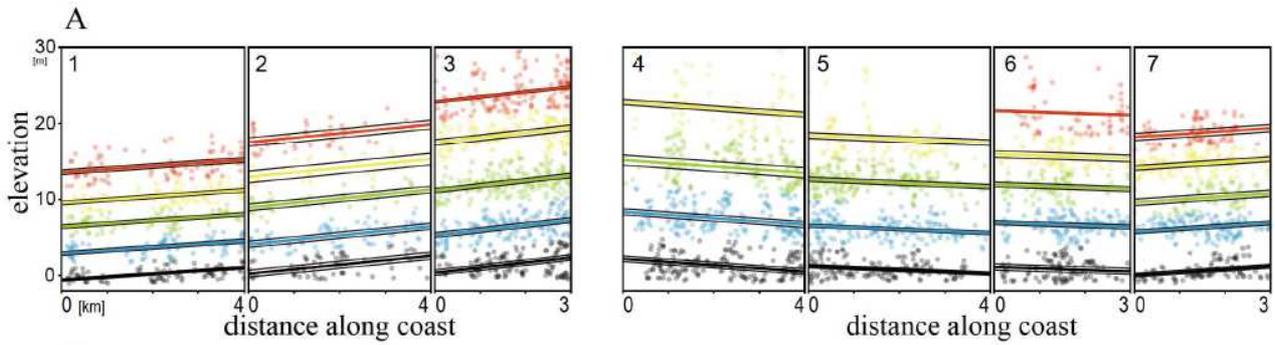


図1. 房総半島南部の沼段丘面の標高分布。デジタル標高モデル(DEM)に曲率に基づく特徴量抽出と k-means クラスタリングによる分類を行った結果。4段もしくは5段の段丘面が客観的に抽出できている(東京大学理学系研究科 [課題番号: UTS_05])。

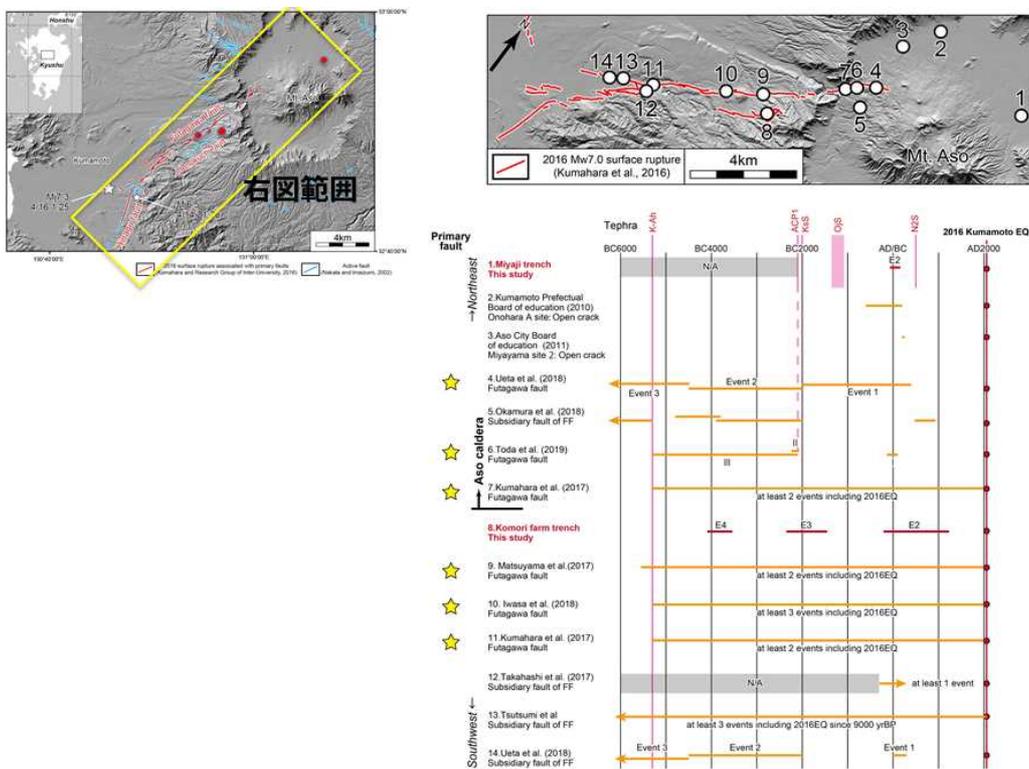


図2. 2016年熊本地震の地表地震断層の活動履歴。布田川一日奈久断層帯が2000-3000年程度の間隔で活動してきた可能性が高いことが示された(名古屋大学 [課題番号: NGY_03])。

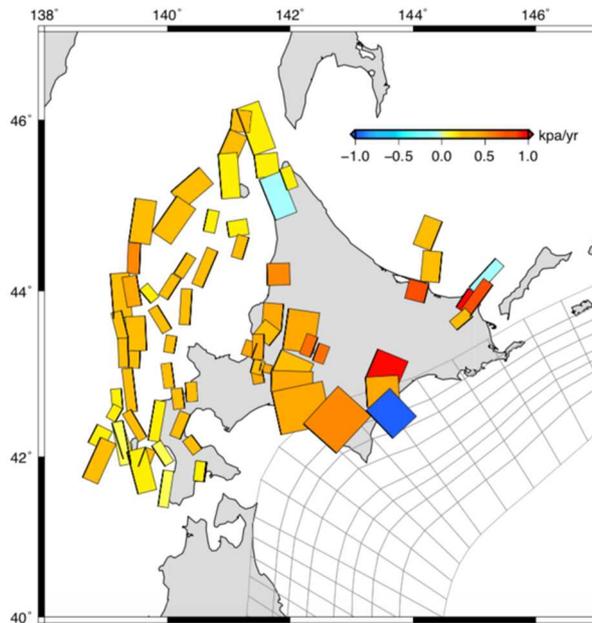


図 3. 北海道周辺の震源断層モデルにおけるクーロン応力の蓄積速度。日本列島の基本構造 FEM モデルに対して、1998-2003 年までの GNSS の変位速度場から推定されたプレート境界の固着分布から震源断層面でのクーロン応力を計算した（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_11]）。

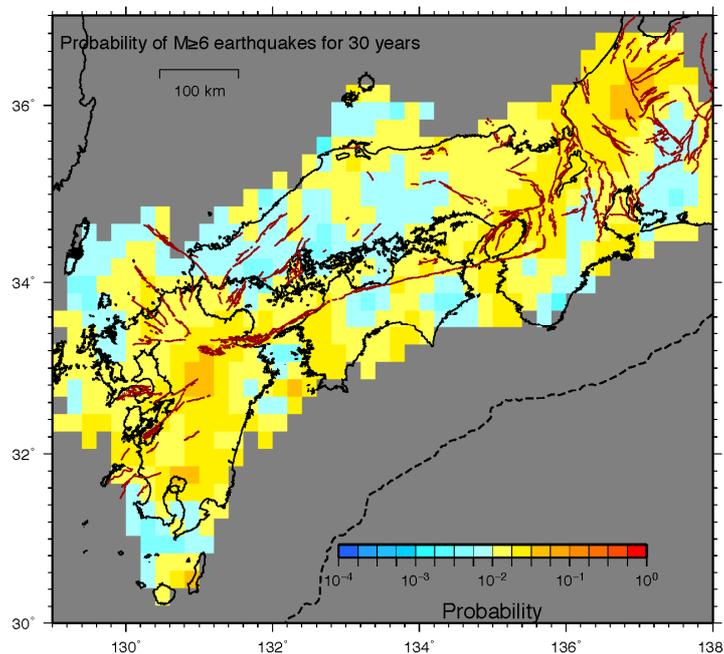


図 4. 2005年4月-2009年12月のGNSSデータに基づく30年間にM6以上の内陸地震が発生する確率の試算例。地震の発生時刻はポアソン過程に基づくと仮定した。地震発生層の厚さ，剛性率，GR則のb値，ひずみ速度を求める際の距離減衰定数，測地観測によるひずみ速度に対する弾性ひずみ速度の割合は，それぞれ12km，30GPa，0.9，25km，0.14とした（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI05]）。

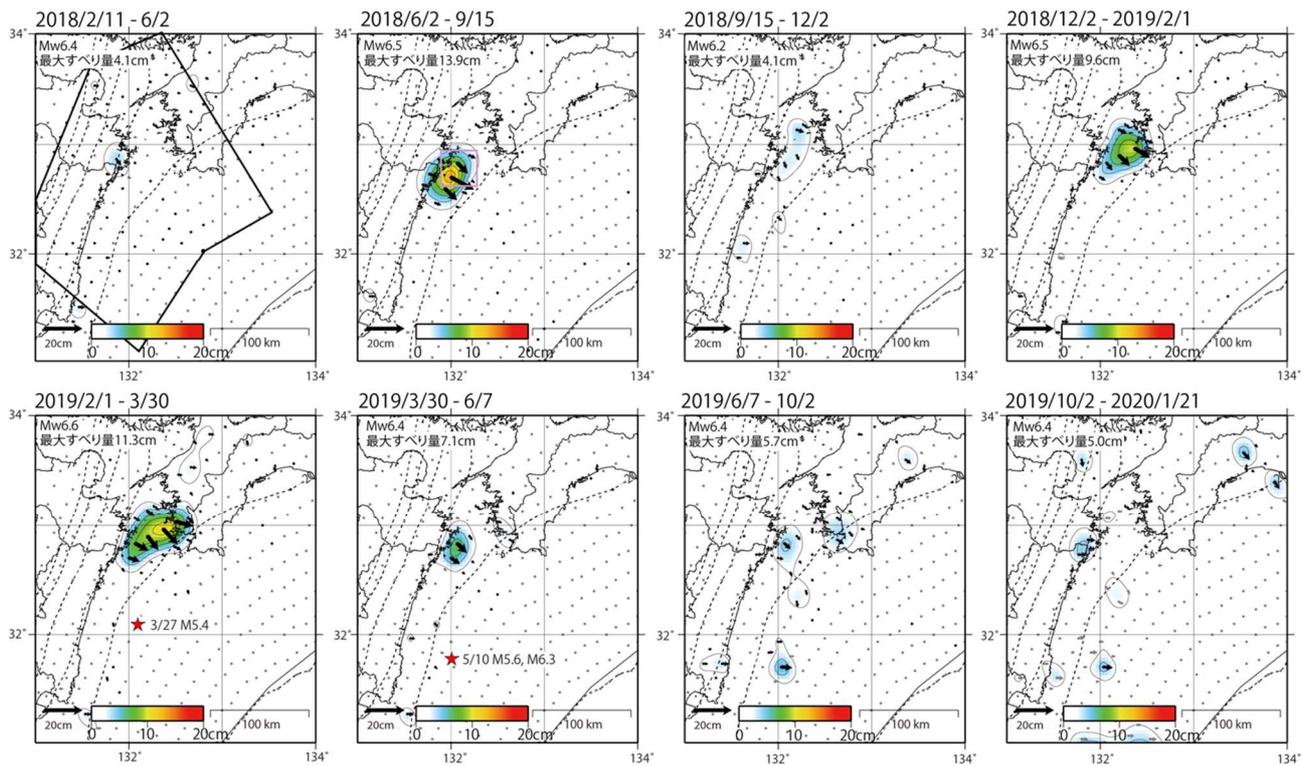


図5. 西南日本のプレート境界滑りの時空間変化。矢印とカラースケールは、2018年2月から2020年1月までのGNSSデータに基づく非定常地殻変動から推定された滑りを表す（国土地理院 [課題番号：GSI_02]）。

1 (3) 地震 (中短期予測)

「地震 (中短期予測)」計画推進部会長 中谷正生

(東京大学地震研究所)

副部会長 内田直希

(東北大学大学院理学研究科)

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

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

プレート境界の固着・滑りの時空間履歴は、地震発生の切迫度への効果が物理的に明らかであり、予測への物理ベースの演繹的なアプローチが考えやすいという、ユニークな重要性があるため、観測・解析手法の高度化がはかられている。

プレート境界での地震モーメント保存則に基づき、日本海溝から千島・カムチャッカ海溝沿いで発生しうる地震の最大規模を推定した。解放されるべき合計地震モーメントを、(プレート収束速度×地震性カップリング率)から見積もっているところに特色がある。推定された最大規模は、規模別頻度分布として切断G-R則を仮定した場合でM10程度、宇津の式を仮定した場合でM11程度となった (Hirose et al., 2019b, 気象庁 [課題番号: JMA_01])。

プレート境界滑りの指標となるスロー地震は、現象のスケールと検出手段が非常に多岐にわたり、いまだに新たな観測・解析手法によって新しい現象が見い出され続けている段階なので、様々なカタログをコミュニティで共有することが重要である。そこで、科研費・新学術領域研究「スロー地震学」で構築したスロー地震データベースを安定的に維持・管理するとともに、データベースへのカタログ登録を継続的に呼びかけ、現在まで47のカタログが登録された (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])。2019年度の地震学会では特別セッション「オープンデータと地震学」を開き、スロー地震データベースの現状と課題について報告と検討を進めた。また、新たなカタログとして、内陸の火山等直下に発生する深部低周波地震の網羅的な検出を行い (Kurihara et al., 2019), 多くの場合、鉛直方向に複数の離散的グループに分かれること、同一火山下に存在する複数の近接したグループ間でも活動様式は大きく異なること、いくつかの火山では地表火山活動と深部低周波地震活動が関連することなどが明らかになった (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])。

地震観測に関しては、基盤的地震観測網の維持が引き続き地殻活動モニタリングの重要な基盤となっている。これに加え、科研費・新学術領域研究「スロー地震学」において、スロー地震のモニタリングに関して、機動的広帯域地震観測を実施し、四国西部、紀伊半島、東海にそれぞれ6点、4点、4点を設置した。さらに深部低周波地震の高速移動現象の新たなモード検出を目指し、4つの稠密な地震計アレイを四国西部の低周波地震発生域の直上に設置して2019年12月下旬から連続波形記録の取得を開始した。各地震計アレイの口径は約1-2kmで、60-100点の3成分短周期地震計から構成される (東京大学地震研究所 [課題番号:

ERI_12])。また、地震研究所一般共同利用で豊後水道の中心部に位置する水ノ子島に構築した臨時地震観測点でのデータ取得も継続した(図1)。水ノ子島では、2019年6月にデータ回収作業を実施した。得られた波形データのパワースペクトル密度(図2)を世界中の陸上観測点の平均的なノイズレベル(Peterson, 1993)と比較すると、上下動成分ではほぼ全帯域でhigh noise modelより低いことが明らかとなり、水ノ子島のような岩礁でも良好な地震波形データを得ることが分かった。しかし11月に2回目のデータ回収を行うために水ノ子島へ上陸したところ観測点が消滅していた。これは台風8号による高波により観測点が流出したためだと考えられ、観測点の再構築に向け新たな観測点設置方法の検討を行っている(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_12])。

繰り返し地震のモニタリングのための観測に関しては、2002年から継続している伊豆鳥島における地震観測(2Hz上下動1成分)を継続した(図3)。2015年からは新衛星携帯電話による3成分(1Hz上下動+2成分傾斜計)の地震観測システムを増設し、必要日時のデータをリモートで回収可能となっている。今年度は、新システムの連続地震波形データを現地回収するとともに、旧システムの2Hz地震計が故障したため交換作業を行った。また、繰り返し地震を含む釜石沖の地震クラスターでの地震活動の詳細を調べるための13ヶ所での陸域臨時観測を継続した(図4)(東北大学理学研究科[課題番号:THK_09])。

地殻変動観測に関しては、気象庁が展開する東海地方の歪み計ネットワークによる短期的スロースリップイベント(SSE)の検知確率の評価を行った(Nanjo, 2019)。M5.5程度のSSEなら、現状でもネットワークからネットワークの幅程度離れたところまで90%を超える検知率があるが、さらに浜名湖付近に観測点を追加すると、検知可能域がかなり沖側へ広げられるとがわかった(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13])。また、前計画から開発を続けている、SAR衛星ALOSのデータを用いた定常的な地殻変動を2.5次元解析する手法について、今年度は特に上下方向の精度を検討し、御前崎、潮岬、室戸岬、足摺岬周辺でSARによって面的に詳細に求められたスムーズな定常地殻変動は、GNSS観測点の動きと上下方向で0.5cm/年の範囲内で調和的であることが確認できた(気象庁[課題番号:JMA_01])。また、安価で短い工期でのボアホールひずみ観測の実現を目的として、小口径の多成分ひずみ計および既存井戸への設置手法を開発し、同ひずみ計を香川県三豊市の既存井戸に設置した(産業技術総合研究所[課題番号:AIST09])。さらに、前計画・科研費等で構築してきた、豊後水道周辺地域におけるGNSS連続観測および座標値解析を継続して実施した。図5に示すように、四国西部、豊後水道周辺、日向灘周辺等の地域に独自観測点を展開している。各観測点の維持作業を随時行い、安定してデータが取得できるように努めた。

スロースリップに伴う流体移動(例えば, Tanaka et al., 2018)の検出を目的とした重力及び電磁気観測を以下のように実施した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_12])。2019年6月には共同研究を行っている国土地理院が御前崎において絶対重力観測を実施し、重力増加の速度が小さくなっていることが分かった。2020年2-3月に絶対・相対重力観測を宮崎1点、東海2点(菊川・豊橋)及び豊後水道1点(足摺岬)で実施する予定である。石垣島地方気象台においては、気象研究所との共同研究として、相対重力計による連続重力観測を2020年1月より開始した。並行して土壌水分計も設置しデータを取得している。電磁気観測では、東海地方、石垣島、西表島において地磁気観測を行いデータを蓄積した。地磁気変化の異常場をデータから同定するために、地磁気変化の全国規模の標準場モデルの構築

を進めた。また、四国西部域においてネットワークMT観測を継続し、そのデータから得られた3次元比抵抗構造に基づいて滑り発生時の構造変化の検知可能性を検討した。

以上のように基盤的地震・測地観測に臨時観測を加えることにより、プレート境界滑りの時空間変化の把握能力が増強されており、向上したデータの質と量を活かして網羅的・客観的な解析が進んでいる。産業技術総合研究所と防災科学技術研究所および気象庁との共同研究では、3機関のひずみ・地下水・傾斜データをリアルタイムで共有して南海トラフ周辺地域の短期SSEを解析するシステムの運用を継続し、2018年11月-2019年10月の間に33の短期的SSEの断層モデルを決定した(図6)(落・他, 2019, 矢部・他, 印刷中, 産業技術総合研究所[課題番号:AIST09])。一方、長期的SSEによる滑り量を把握するために、気象庁は、中国地方を領域固定したGNSS日値の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1年間の変化量を求め、これをあらかじめ南海トラフのプレート等深線25km上を中心とする矩形断層で一定の滑りを与えて計算した理論変位と比較することで、1年あたりの規模の時空間分布を得る手法を開発した(気象研究所, 2019b, 気象庁[課題番号:JMA_01])。

また、関東地方に沈み込むフィリピン海プレート上面で発生するSSEに関しては、GNSSデータからの系統的検出を行い(高木・他, 2019, 東京大学地震研究所[課題番号:ERI_12])1996年から2018年の期間において、Mw6.6-6.8程度の既知の房総沖SSEに加え、Mw5.9-6.5程度の小規模SSEの可能性のあるイベントを25個検出した(図7, 8, 9)。小規模SSEの多くは、既知の房総沖SSEの東に位置する。既知の房総沖SSEに比べて発生間隔は短く、滑り量は小さいことから、安定滑りから間欠的な滑りへのプレート走向方向の滑り特性変化であると考えられる。また、2011年以降にSSEの発生数が増加しており、2011年東北沖地震以降のフィリピン海プレートの沈み込み速度上昇を反映している可能性がある。一方気象庁は、GNSS座標データを用い、2017年春から2018年秋にかけて発生した志摩半島付近の長期的SSEを詳細に解析した(Kobayashi and Tsuyuki, 2019)。長期的SSE発生期間には隣接する領域で短期的SSEが活性化され、短期的SSEによる変位を除くと、この長期的SSEの滑りの規模はMw6.4相当であった(気象庁[課題番号:JMA_01])。

スロー地震の一種である超低周波地震については、防災科学技術研究所F-netの連続波形データに対して、東北地方太平洋沖のプレート境界やプレート運動を仮定して計算された理論波形をテンプレートとしてその検出を試みたところ、超低周波地震活動が2011年東北地方太平洋沖地震によって大きく影響を受け、その影響の内容が場所によって大きく異なることを見出した(図10)。東北沖地震震源域では、その発生前まで小規模な超低周波地震がエピソードに起き、東北沖地震後は完全に静穏化したのに対して、震源域外側の余効滑り域では東北沖地震後に急激に活発化した。これらの結果は、東北沖地震後のプレート間滑りの空間分布を反映していると考えられる(Baba et al., 2019, 東京大学地震研究所[課題番号:ERI_12])。一方気象庁は、2004年紀伊半島南東沖の地震後に行ったOBS観測から、浅部低周波地震が紀伊半島南東沖の地震の余震域と近接した場所で多数発生していたことを示し、さらに、浅部低周波地震が2004年新潟県中越地震や潮汐に敏感に反応していることも見出した(Tamaribuchi et al., 2019, 気象庁[課題番号:JMA_01])。

繰り返し地震を用いた網羅的な滑りモニタリングのために、日本全国の定常観測網で観測された地震波形データを蓄積し、日本列島周辺で発生した繰り返し地震活動の検出を行った。また、作成した繰り返し地震カタログを用いて、日本列島周辺における滑りの空間分布・時間変化の特徴を調べた。沈み込むプレートの境界における滑り速度は、ここ数年は、ほとん

どの地域でプレート間の相対運動速度よりも遅く、大地震の余効滑りの影響はわずかな地域で見られるのみであった（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]）。

繰り返し地震から断層の固着状態の時空間変化を推定する新しい方法である、Brownian Passage Time (BPT) 分布更新過程から拡張した繰り返し地震群に対する時空間点過程モデル (Nomura et al., 2017) を用いて、1993年7月から2016年8月までの東日本太平洋プレート沈み込み帯におけるプレート境界上の準静的滑りの時空間的变化をスプライン関数により推定した (図11)。特に、2011年東北地方太平洋沖地震後の滑り速度の時空間変化 (図12) から、2016年までに東北沖の滑り速度がほぼ2010年以前の水準に戻っていく様子や、2012年と2015年の二度にわたり三陸沖の同じ領域においてM6台の地震を伴う滑り加速が発生した様子が捉えられた (野村, 2020, Nomura et al., 2020, 東北大学理学研究科 [課題番号:THK_09])。

深部低周波微動から長期的SSEまで、いわゆるスロー地震は、Ide et al. (2007) のスケーリング則に従うことが知られているが、いまだにスロー地震が発見されていない周波数帯もあり、それが現象の真の欠如なのか、観測S/Nの問題なのかはわかっていない。レーザー式変位計とひずみ計のデータを用いて短期的SSEよりも短時間のスロースリップ現象がないか調査したところ、継続時間約1時間のスロースリップ現象を発見した。そのスロースリップは通常の短期的SSEが発生している期間の間に発生したもので、Mw5.0ほどの規模を持ち、Ide et al. (2007) のスロー地震のスケーリング則と調和的であった (気象庁 [課題番号:JMA_01])。

モニタリングにより得られるスロー地震と中・大規模地震の関係を解明する試みとして、西南日本において繰り返し地震と他のスロースリップイベントの間の時空間的特徴の詳細を調べ、スロー地震が空間的に相補的な分布をしていること、異なる種類のスロー地震の活動に相互作用があることを明らかにした。また、九州沖から四国にかけてのプレート境界の深部および浅部で、時間スケールが異なる2つのスロー地震の長距離移動を見出した (図13) (Uchida et al., 2020, 東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12])。さらに、四国西部域のGNSSデータを深部低周波地震活動を基準にして重合することで、深部で短期的スロースリップが発生している最中に固着域の深い側においても、わずかな滑りが起きていたことを見出した (Kano et al., 2019)。固着域の中で確認されたスロースリップという点が特徴的である。短期的スロースリップが起きる度に固着域深部側でわずかに滑りが進行することで、固着域に対して応力が間欠的に载荷されていると考えられ、短期的スロースリップと固着域の関係性を理解する上で重要な成果である (東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12])。

以上のように、観測データに基づき、プレート境界滑りの時空間変化の把握が行われた。一方、このような解析の手法を高度化する取り組みも進めた。繰り返し地震の抽出では、局所性鋭敏型ハッシュ検索技術を応用した類似波形探索アルゴリズム (FAST; Yoon et al., 2015) をテスト的に実装した。同手法では、連続収録データ中に存在する類似波形をテンプレートなしに効率よく抽出することができる。同手法を山陰地方で展開されている稠密地震観測 (満点観測) で得られた、2011年6月4日に発生したM5.2の地震直後の連続収録データに適用し、類似波形イベントを検出できることを確認した (図14) (東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09])。また、繰り返し地震の抽出方法について解析周波数帯 (図15) の影響を詳細に検討したレビュー論文 (Uchida, 2019) と、世界の繰り返し地震の研究履歴や動向のレビュー論文 (Uchida and Burgmann, 2019) を発表した (東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09])。また、スロー地震やプレート間固着の解析技術の高度化に向けて、GNSS座標時系列データに含まれる同相誤差を推定して取り除くためのツールを開発した (廣瀬, 2019)。

図16に示した適用例のように、オリジナルの座標時系列(ここでは国土地理院GEONET F3解)に含まれる日々のばらつきのかなりの部分は同相成分にも表れており、これをオリジナル座標時系列から差し引くことで、日々のばらつきを低減できている。スロースリップイベントによる地殻変動をGNSSデータから検出する際にこの手法を適用することで、より小さい変位まで検出できると期待される(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_12])。

プレート境界の滑りモニタリングから、境界面の摩擦特性に関する情報を得ることもできる。相似地震の揺らぎの要因の一つである余効滑りの伝播現象について、伝播速度と摩擦特性との関係式を導出することに成功した(Ariyoshi et al., 2019)。これにより、大規模な地震が起きてから非相似地震が発生するまでの時間差から摩擦特性を絞り込めると期待される(東北大学理学研究科[課題番号:THK_09])。

観測データから、プレート境界の滑りと、滑りを支配する物理モデルを同時に推定するデータ同化は、原理的には、そのまま今後の滑りの発展の予測にも使えるはずのものである。本年度は、2010年の豊後水道の長期的SSE(L-SSE)のデータ同化をアンサンブル・カルマンフィルタに基づいて行い、地殻変動データと速度・状態摩擦構成則(Dieterich, 1979)の両方に合うような滑りの時空間発展を推定した。均質な半無限弾性体中にフィリピン海プレートの三次元形状を導入した解析領域を設定し、断層面を5,400個の小断層セルに分割して、弾性体の準動的な運動方程式とSlowness型(Ruina, 1983)の速度・状態依存摩擦則を連立させ、各セルにおける滑り速度と状態変数の時間発展を計算した。ただし、L-SSE発生領域として、断層面に半径35kmの円形速度弱化パッチを設定している。観測データとしては、GNSSデータをインバージョン解析して得られたL-SSE領域における滑り速度(横井, 2019, 京都大学修士論文)を使用した。初期アンサンブルの摩擦パラメータの選出については、Hirahara and Nishikiori (2019)の手法にさらにグリッドサーチを組み合わせることで、初期値依存性の軽減と解析の不安定性の改善を同時に実現した。データを同化するとともにL-SSE領域における摩擦パラメータが収束し、円形パッチ内では観測値を用いて適切に修正された滑り速度の解析値が得られた。また、L-SSE発生期間中において、そのイベントの終了する時期の予測といった数か月程度の短期的な予測が可能であることが示唆された(京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01])。

一方、アジョイント法に基づくデータ同化手法の開発では、地表面で観測されたGNSSによる地殻変動データから、アジョイント法により直接プレート境界面の摩擦特性を推定する手法を整備・改良し、2003年十勝沖地震の余効滑りを模した数値実験により、開発手法の妥当性を検証した。これまでの数値計算では、アジョイント行列を直接演算していたが、このアジョイント行列は疎な行列であるため、微分方程式として解くことで計算時間を従来の数分の一程度に削減することができた(京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01])。

さらに、粘弾性緩和も考慮したモデルに対するベイズ的データ同化手法の開発も進めた。これは、特に余効変動や地震間の地殻変動をモデル化する場合に重要である。また、ベイズ的推定を行うことで、摩擦や粘弾性パラメータの最適値だけでなく、その不確実性も推定できることになる。今年度は、前計画の課題1803で開発した余効変動の物理モデルを測地学的に観測された余効変動に適用してみた(Fukuda and Johnson, 2019a, 2019b)。このモデルでは、地震時の応力変化により余効滑りと粘弾性緩和が駆動され、余効滑りは定常状態を仮定した速度・状態依存摩擦構成則、粘弾性緩和はBurgers rheologyに従うと仮定している。また、余効滑りと粘弾性緩和の相互作用をモデルに取り入れている。本研究では、地震時の

滑り分布，これに対する平滑化パラメータ，断層の摩擦パラメータ(a-b) σ ，海洋・大陸マン
トルのMaxwell及びKelvin粘性率を未知パラメータとし，これらを同時推定した。このモデル
は計算コストが高いため，多数回のフォワード計算を必要とする標準的なベイズ推定手法を
適用することは困難である。そこで，1) 既存のフォワード計算の結果からボロノイ分割を
用いて近似的な事後確率分布を構築し，2) これをギブスサンプラーでサンプリングし，3)
このサンプルに対してフォワード計算を実施する，というプロセスを反復して事後確率分布
の推定を逐次的に改良するアルゴリズムを構築した。この手法は標準的なベイズ推定手法(マ
ルコフ連鎖モンテカルロ法の一つであるMetropolis-Hastings法など)より必要なフォワード
計算の回数が少なく，アルゴリズムの並列性が高いため，現実的な計算時間で事後確率分布
を推定することができる。この手法を2011年東北沖地震の地震時及び地震後7年間の地殻変
動データに適用しパラメータの事後確率分布を推定した(図17)。推定されたパラメータに
よるモデル計算値は地震時及び地震後の観測を良く再現することができた。また，推定され
たパラメータによるモデル計算の結果では，余効変動の初期段階から，粘弾性緩和の寄与が
余効滑りの寄与に比べて大きかった(京都大学理学研究科 [課題番号: KUS_01])。

スロースリップは，地震サイクルに比べれば支配方程式系がステップでないため，デー
タ同化やそれによる予測が成功しやすいと期待される。そこで，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SSEの解析を行い，滑りの時空間分布を
推定した(京都大学理学研究科 [課題番号: KUS_01])。Kano et al. (2018) は2010-2013年
に発生したSSEに伴う断層滑り速度の時間発展の振る舞いがSSE毎に異なることを示してい
るが，今年度は，解析期間を2018年まで拡張するとともに，2013年以降に整備された新規のGNSS
観測点のデータを加えることで，より多くのSSEの解析に着手した。

プレート間固着の時間変化を推定・モデリングするためには，プレート境界周辺の物性や
応力を知ることも重要である。南海トラフでは，海洋科学掘削で得られたロギングデータを
解析し，付加体の空隙率と温度構造を従来より正確に推定する手法を開発した(図18)。空
隙率は様々な物性値と相関することが知られている。船上の実験室で得られたデータをも
とに空隙率と電気伝導度・熱伝導率の変換式を構築し，それらを同時に満たす空隙率・温度構
造を推定した(Yabe et al., 2019, 産業技術総合研究所 [課題番号: AIST09])。また，硬
岩中に高い透水性を示す亀裂が存在する条件を明らかにするために，愛知県西尾市の観測井
で物理検層とVSPにより検出した透水性亀裂の向きと水圧破碎法から得た応力場の関係につ
いて解析した(図19)。透水性亀裂は，北北東-南南西を示す応力方位と40度程度以上の角度
をなす走向が多いが，せん断型と引張り型の2つの亀裂モデルによる詳細な検討の結果，こ
の向きを現在の応力場と直接関係付けて説明するのは難しいことがわかった(木口・桑原，
2019, 産業技術総合研究所 [課題番号: AIST09])。一方，構造探査からのアプローチとして，
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データの再解釈を
行い，深海掘削(ODP/IODP)データとの統合を試みた。四国海盆から南海トラフまで分布す
る三種類のタービダイト(西部タービダイト，中部タービダイト，東部タービダイト)が浅
部プレート境界断層(デコルマ)の下部へ沈み込んでいることが示唆される(図20)(東京
大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])。南海トラフの陸側へ既に沈み込んでいると推察さ
れる3種類のタービダイトの空間分布と，海底地殻変動から推定されたプレート間固着度(カ
ップリング)分布(Yokota et al., 2016)を比較すると，タービダイトの岩相と形状の違い
が以下のようにプレート間固着度に影響していると解釈できる。1) シート状の形状を示し

ながら優れた排水能力を持つと考えられる西部タービダイトは、デコルマ付近で低間隙水圧や高有効応力の状態をもたらし、高い滑り欠損域（滑り欠損 $> 5\text{cm/yr}$ ）での高カップリングに影響したと推測される。2）浸食チャンネル，または海洋性地殻の起伏が作る小規模海盆に堆積した中部タービダイトはデコルマ付近で高間隙水圧の状態をもたらし，中位滑り欠損域（滑り欠損 $> 4\text{cm/yr}$ ）での低カップリングに影響したと推測される。3）シート状の形状を示しながら低浸透率の泥質タービダイトを挟んでいる東部タービダイトは，デコルマ付近で高間隙水圧や低有効応力の状態をもたらし，中位滑り欠損域（滑り欠損 $> 4\text{cm/yr}$ ）での低カップリングに影響したと推測される。

スロー地震の発生域が特徴的な地下構造に規定されている可能性を検討するために，2015年度に紀伊半島北東部の深部低周波地震の活動が活発な領域を通る「甲賀 - 南伊勢測線」の稠密地震観測で取得した低周波地震のP波・S波の検測値を用いて，低周波地震の震源決定を行った。また，観測した通常の自然地震の水平動成分記録では明瞭な後続波を確認することができたので，自然地震反射法解析を実施した。得られた反射法断面図からは，深さ25-30km付近に，フィリピン海プレート上面に対応すると考えられる北傾斜の反射層が確認できる。本研究で決定した低周波地震の震源は，プレート境界近傍に位置するものもあるが，その大部分が，プレート境界から5-10kmの深さに位置している。本地域下での沈み込むフィリピン海プレートの地殻の厚さが7-8kmである（例えば，Nakanishi et al., 2002; Iwasaki et al., 2008）ことを考慮すると，低周波地震の大部分は，沈み込む海洋性地殻内や海洋性マントル内で発生していると考えられ，トモグラフィ解析で得られた測線下の地震波速度構造（Kurashimo et al., 2019）と比較すると，低周波地震発生域の地震波速度は，P波速度が低下し， V_p/V_s 値は大きくなる特徴を示している。よって，流体の存在が，これら低周波地震の発生に寄与していると考えられる（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12]）。

内陸の地震活動についても，応力場と断層滑りによるその再分配で理解できそうな現象は少ない。前計画で報告したように（例えば，Kato and Ueda, 2019），2018年大阪府北部地震(Mj6.1)は，本震において逆断層と横ずれ断層がともに大きく滑った複雑な地震であった。今年度さらに3ヶ月間の余震活動の精密な震源位置と，多数の余震の滑りの向きを調べ，本震の横ずれ断層に斜交した別の2つの横ずれ断層（長さ1kmと4km）に沿って発展したことがわかった（Li et al., 2019）。こういった複雑な断層の間の相互作用は，静的な応力の変化・地域の応力場と整合的であった（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]）。また，みかけの前震活動を通じて，地震の強い可予測性をもたらす（Nakatani, 2020）ETASモデルも，第一義的には余震活動のモデルであり，応力再分配の観点から物理ベースでETASに匹敵する性能をもつモデルを作る努力が行われている（例えば，Iwata, 2016）。本年度は，地震が周囲に及ぼす応力的影響に異方性を許し，また，空間的減衰の鋭さもパラメータ化して最適化することを許した試みを行ったところ，期待通り，余震の空間分布に関して大きな改善がみられた。厳密な物理解釈は難しいが，トリガリングソースである個々の地震が点ではなく，二次元的な滑り域であるという効果を近似的に取り入れたことになるのかもしれない（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]）。純粹に経験的なモデルとしてのETASに関しても，大きな地震からのトリガに関してその破壊域形状を考慮した取扱をする（Guo et al., 2015, 2017; 有限断層ETAS），震源の深さの情報も用いる（Guo et al., 2015; 三次元ETAS）など，一層の改善の努力が進んでいる。本年度は，三次元有限断層ETASモデル（Guo et al., 2019）を開発し，2016年熊本地震周辺域の2010-2018年の地震活動に適用したところ，三次元化・有

限断層化とともにフィッティング性能に大きく貢献するとの結果が得られた。また、本震後30日間にわたって活動の予測を試みたところ、三次元化によって予測性能が改善していた。有限断層化（2つの大きな前震と本震を有限断層として扱った）も本震後1-2日に限っては予測を改善する効果があった（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]）。

地殻内で発生する大地震の余震活動や群発地震活動についてもあらたに系統的な繰り返し地震解析を行い、繰り返し地震を多数見つけた（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]）。その多くはバースト的な活動を示し、地震活動の推移に従って活動度が減少する傾向にあった。一方で、1995年兵庫県南部地震の余震域等、長期間活動が継続する場所もいくつか見られた。地殻内の相似地震に対して、プレート境界で適用している滑り推定式を用いた場合、その推定値は、過大評価される傾向にある。ただし、東北沖地震発生後に地震が誘発された福島県南部～千葉県銚子沖の活動については、大規模な余効変動を示唆している可能性があり、さらなる検討が必要である。また、トルコアナトリア断層での繰り返し地震分布を推定し、過去の大地震の破壊域の端に分布していること、繰り返し地震の積算滑りから一部では、プレートの相対運動速度に近い速度で非地震的に変位していることを明らかにした（図21）（Uchida et al., 2019, 東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]）。また、函館周辺で発生している地震・低周波地震の震源位置・波形について詳細に調べた。その結果、通常地震と低周波地震が近傍で発生していること、気象庁カタログでは浅い低周波地震が通常地震と分類されていること、通常地震が同一場所を繰り返し破壊させた可能性があることを示した（図22, 図23）（吉田・他, 2019, 東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]）。

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

地震活動の様々な変動が地震の先行現象ではないかと提案されており、少なくとも、短期的な地震活動のクラスタリングは、明らかに存在するという強い傾向をもつ。また、地震活動は20世紀前半からの網羅的な観測データがあり、予測手法の検証・実践に関して格段のポテンシャルを有しているため活発な研究が続けられている。

中規模繰り返し地震について、発生状況のモニタリングから発生確率をプロスペクティブに予測する実験を継続的に行っている。今年度は、2016年2月、2017年2月、及び2018年2月に岡田・他（2007）のベイズ統計対数正規分布モデル（LN-Bayes, $\phi=2.5$, $\zeta=0.23$ ）を用いて予測した1年発生確率について、平均対数尤度（MLL）とブライアスコア（BS）の評価指標を使って予測成績を確認し、他の更新過程の小標本論対数正規分布モデル（LN-SST）、BPT分布モデル（BPT, $\alpha=0.24$ ）及び指数分布モデル（Exp）の予測成績と比較した。結果は、2016年2月の予測はLN-SSTが他のモデルよりも成績が良く、2017年2月と2018年2月の予測はLN-Bayesが最も良かった。3回の実験はそれぞれ独立であり、3回の結果を一つにして得られる成績はLN-Bayesが最も良かった。要因は不明であるが、LN-Bayes, LN-SST及びExpの成績は徐々に悪化している、という結果を定量的に確認した（気象研究所, 2019d, 気象庁 [課題番号：JMA_01]）。

国際的なプロトコルのもと、地震活動データにもとづくプロスペクティブな地震発生予測検証実験を継続的に行っているCSEP-Japanセンターでは、本年度3領域および4テストクラスの合計12のカテゴリーで実験を実施した（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]）。またCSEP-Japanに関する研究集会を開催し、10を超える研究発表を通して活発な議論を行った。今年度はさらに、CSEPに提出されている予測モデルのなかでも、過去の一定の期間（以後学

習期間)の地震活動の地域性のみに着目して予測を行う,単純で意味のつかみやすいRIモデルに関して,学習期間,学習対象のマグニチュード下限をさまざまに変えて,CSEPのプロスペクティブ予測実験開始以前も含む2005-2017年のレトロスペクティブな予測・評価を行った(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13])。図24aは,学習に使う地震の下限をM3.5と固定し学習期間の長さを変えたモデルにおいて,3ヶ月先までの関東地域内においてM4以上の地震が発生しやすい場所を予測できているかという観点での成績である。基本的には,長期間のデータを学習した方が予測成績がよい。2011年の東北地震の前と後において成績をみると,東北地震後の方が好成績で,場所による活動度の差が東北地震後の方がくっきりしているのだと解釈できる。図24bからは,小さい地震まで学習対象とした方が短期間で学習を完了することがわかる。つまり,RIモデルによる予測においては,学習でみる活動の期間の長さよりも,学習した地震の数が大事であることが示唆される(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13])。

一方,数十年スケールの長期的な地震危険度の空間分布を求めるために,中国北部における1980-2016年のM3以上の地震の空間分布に対して,実装が簡単な新規提案のものを含めて四種類の手法で空間平滑化を行った(Xiong et al., 2019)。いずれの手法も同様の結果を示し,またクロスバリデーションでも安定した結果を示したので,空間分布のロバストなモデルが推定されたと考えられる(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13])。

階層ベイズ型時空間ETASモデルは,日本周辺の地震活動の標準モデルをめざして,CSEPの評価を受けている。このモデルの常時地震活動度 $\mu(x,y)$ は,余震などのトリガ効果を除いた地震活動度の高低の地域性を表わすもので,様々な地震確率予測の妥当な出発点の一つだと考えられている。日本の内陸地震に関しては,2011年東北沖地震などにつづく活動の激変期のデータを含めてフィットしても, $\mu(x,y)$ はほぼ時間不変であることが確かめられている(Ogata, 2017)。本年度は,東北地方太平洋沖地域の $\mu(x,y)$ を求め,フィットに使うデータを(1926-1995: $M \geq 5$)としても,M9後の激しい活動を含む(1926-2012: $M \geq 5$)としてもほとんど同じ結果が得られることを確認した。さらに,2011年M9地震以前のデータから決めた $\mu(x,y)$ は,学習期間外になる2011年M9以後の大地震の位置ともよく対応することが確認された(図25左)。また,繰り返し地震の位置とも良く対応しているようである(図25右)。一方,日本内陸部の $\mu(x,y)$ は,内陸部地殻(上盤側プレート)内の繰り返し地震(五十嵐, 2019)のうち,大きめの地震直後のもの(バースト型)を除いた非バースト型の震央分布とよく似ている(図26)(東北大学理学研究科[課題番号:THK_09])。

前震識別による本震発生確率の予測手法として提案されたOUK法(Ogata et al., 1996)は,現時点での最大地震よりMが0.5以上大きい地震が30日以内におきる確率を予測する手法であり,クロス集計表により有効な予測であることが確認されている(Ogata and Katsura, 2012)。この手法を発展させ,確率の活動への依存性をより一般的なスプライン関数とした手法(野村・尾形, 2018; 以後N0法)はOUK法に似ているが,予測対象が少し異なり「現時点での最大地震よりMが少しでも大きい地震が30日以内におきる確率」である。本年度は,予測対象の違いをこえて性能を比較するために,簡便な方法でN0法の予測対象を変更することを試みた(野村・尾形, 印刷中)。予測対象のマグニチュードに関しては,最大前震と本震とのマグニチュード差の分布(図27a)に基いてN0法の予測対象をOUK法の対象と同様にした(予測確率値を0.48倍にする)場合の予測性能を調べ,その場合でも有効な予測となることを確認した。同じ原理で,予測対象のマグニチュード下限を絶対値で指定した予測への変換もで

き、M6以上を対象とした場合についても有効な予測になっていることを確認した。また、前震確率評価時点から本震発生までの日数の分布（図27b）に基づいて同様の補正をすることで予測期間を縮めた場合の発生確率に変換した結果も、有効な予測となっていた（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕）。

地震活動の評価による地震発生予測を業務的に行う場合の問題点を洗い出すために、データの取り込みと予測のアップデートを自動的に行なう試行的な準リアルタイムシステムを作り始めた（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕）。今年度はまず、予測アルゴリズムのベースとなる階層的時空間ETASモデルを過去の様々な期間のデータにフィットした。求めたパラメータ値はデータベースとして蓄積され、過去の任意の時期、もしくはリアルタイムで加わる新しいデータに基いて予測を速やかに作製するために使われる。さらに、パラメータの最尤推定値ではなく、直近の活動からベイズ推定したETASパラメータ値の事後分布に基づいて、今後短い期間内に特に大きな地震がおきる確率をロバストに推定する新しい手法も開発した（Shcherbakov et al., 2019）。また、予測値の可視化のために、断層や地震活動など様々な情報と組みあわせて二次元の地図に表示し、対話的に拡大・縮小や個別情報の詳細へのアクセスができるマッピングツールを試作した。さらに、3次元でのマッピングツールも試作し（井筒・他, 2019）、毎日更新取得する地震カタログを用いて計算される静穏化指標、b値、GEONETによる観測点変位や面積歪み、地震活動の短期的な空間集中化指標（Lippiello, 2012）などを表示できるようにした（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕）。

大地震への先行傾向があるのではないかとされているb値の変化を、赤池情報量基準（AIC）を用いて客観的に評価するパラメータとして、大地震の直前・直後でない時期の地震をブートストラップ法でリサンプルし、参照b値を1000個求め、そのうち判定対象期間のb値とのAIC差が2以上になる割合（ $P(\Delta AIC \geq 2)$ ）を用いることを提案した。b値の低下が先行した過去のいくつかの大地震（2003年十勝沖地震M8.0、2011年東北沖地震M9.0、2008年中国四川地震M8.0、2016年熊本地震M7.3）に対して事例解析を行なったところ、地震の数ヶ月前に非常に顕著な変化がみられた（図28）（千葉大学〔課題番号：CBA_01〕）。

（3）先行現象に基づく地震発生の確率予測

地震先行現象の候補として提案されている様々な自然現象について、地震発生との相関の有無と程度を評価しておけば、その知見を経験的に地震発生確率の予測に取り入れることができ、また、物理ベースの演繹的予測法のヒントになることも期待できる。

どんなものであろうと、何らかの自然現象がおきるとそのあと地震の確率が高いという先行傾向（Nakatani, 2020）の有無や程度を検証するには、地震の前だけでなく、普段からどの程度異常が起きているかを知ることが必要である。宏観異常現象に関して、そのようなデータを集める努力がなされている（公募研究、東海大学〔課題番号：KOB008〕）。前計画で、1928年11月26日から2011年3月11日まで日本近海での深海魚出現事例336件（ほとんどが大地震発生より前に報告されたものである）のデータベースを作製した。この期間に日本でM6以上100km以浅の地震は221個あったが、30日以内距離100km以内に深海魚出現が先行したものは一つだけであった（Orihara et al., 2019; 織原, 2019a）。また、2011年東北沖地震（M9）の7日前に鹿島灘で51頭のマス・ストランディングがあったことから注目された鯨類ストランディングの地震先行傾向については、日本鯨類研究所が公開するストランディングレコードに記録されている過去51件の鹿島灘でのストランディングと周辺のM6以上の地震発

生(21個)の間に統計的に有意な相関はないことを既に報告している(織原・野田, 2015)が、さらに多くのデータで検証するため、国立科学博物館がホームページ上で公開している情報からマス・ストランディング(2頭以上の同時座礁)377件のデータ(1886-2016年)をデータベース化した(東海大学[課題番号:KOB008])。

宏観異常現象は、日常生活の中で気付ける事象であるため、報道やネットで注目されることがある。2019年6月18日22時22分に発生した山形県沖の地震(M6.7, 最大震度6強)に関連して、6月21日の朝に秋田魁新報社と共同通信社が「地震雲?18日夕方に目撃情報太い棒状の雲、由利本荘市で」といったタイトルのウェブニュース記事を配信したことから、この地震に関する「地震雲」の調査を行った(東海大学[課題番号:KOB008])。具体的には、地震発生前にTwitter上で地震雲は騒がれていたのか?を探るため、Yahoo!リアルタイム検索を用いて、「地震雲」のキーワードでこのサービスの過去ログを検索した。その結果、ツイート数は地震当日が最も多かった(図29)。また、これを見ると地震2日前からツイート数が急増しているが、ツイートされていた雲の大半は秋田県由利本荘市の雲ではなく福岡県の雲であった(織原, 2019b, 2019c)。

先行現象としての大きな確率利得が強い有意性で確立している前震識別法の一つ(Maeda, 1996; 以後M法)について、その予測能力が余震トリガ効果から派生しているものにすぎないのか(Nakatani, 2020, for review),あるいは、本震の物理的準備過程の存在を示唆する(例えば, Kamogawa et al., 2019)ものなのかを調べるために、ETASモデルによって作製した人工的なカタログ(つまり、定常ランダムな地震の発生と余震的トリガ効果だけで起きる地震活動)に対してM法を適用してみた(弘瀬・他, 2019; 前田・他, 印刷中, 東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13])。図30は、伊豆地域(1977-2018年, ただし三宅島の活動があった2000年6-9月は除外)における予察的な結果であり、人工カタログ(1000通り作成)、実際のカタログに対してそれぞれ最適化した上で、それぞれのカタログ上での予測成績を示している。いずれの成績指標も実際の地震カタログに対する予測の方が明らかにすぐれている。図31は、それぞれのカタログで各々の本震時刻を基準に、M法で前震候補とみなす群発地震の累積回数を示す(余震は除いてある)。どちらのカタログでも本震に向って前震活動は加速するが、実際のカタログでは本震5日前程度の前震数がETAS人工カタログよりかなり多い。実カタログに対する最適化では3日以内にM3以上の地震が3個あれば前震活動とみなすのに対し、ETASカタログへの最適化では、5日以内に2個となっており、実際の前震は、ETASで予測されるより数が多いという特徴を活用してM法の識別条件が厳しく設定できたことが、偽陽性を減らし、パフォーマンスに貢献したと解釈される。一方で、M法をETASカタログへ適用した場合でも、確率ゲインで100程度の予測はできており、M法は、余震的トリガ効果だけによって生まれる活動であっても前震活動だと識別することも見てとれる(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13])。

地震の動的破壊が開始した後、それが大きく成長しやすい物理的条件というものがあるか?というのは、地震の可予測性の程度の原理的限界に関わる重要な問題である。標準的な考え方は、そんなものはないということであり、大地震の発生確率は、小地震の発生確率にいつでも定まった小さな割合をかけたものである(地震の規模別頻度分布は時間不変)ということになる(Nakatani, 2020 for review)。この問いに対するヒューリスティックなアプローチとして、先述の前震識別による地震発生確率の経験的予測法(OUK法およびNO法)で、規模別頻度分布が時間変化することを許すことによって、予測が改善されるかどうかを調べ

てみた（野村・尾形，印刷中）。群発活動が生じた場合には次の地震のマグニチュード分布がより大地震の割合が大きいものになる（Ogata et al., 2018）という仮説をN0法に取り入れると，時間不変のGR則を仮定した場合より予測性能がよくなることがわかった（図32）。この仮説をOUK法に取り入れた場合には，少数の地震からなる群発活動に絞った時以外では，かえって性能を下げる結果となっていた（Ogata et al., 2018）が，N0法に取り入れた場合では，クラスタサイズに制約をかけなくても，この規模別頻度分布の変化を取り入れることで性能が改善された。この傾向は，日本の地震に対しても全世界の地震に対しても同じであった（東京大学地震研究所 [課題番号:ERI_13]）。また，日本の内陸の地殻内で発生したM6.5以上の地震を対象に，地震規模との経験的關係から計算される余震域の広がり程度の範囲の地震活動を見ると，地震発生から半年程度以降はb値が地震発生前に比べて高く，相対的に規模の大きな地震の割合が少ない傾向があることが分かった（気象庁 [課題番号:JMA_01]）。

この他，前震活動の例として，2015年の小笠原の深発地震(Mw7.9，深さ700km)に対して，3ヶ月前から逆大森則に従う前震が30個弱おきていたことを見いだした（Gardonio et al., 2019，東京大学地震研究所 [課題番号:ERI_13]）。深発地震に対して明瞭な前震活動が見つかったのは世界初である。また，大森則にしたがう20個ほどの余震も見いだされた。これらのほとんどは，マッチトフィルター法によって見いだされたM1.9-4.8の小さな地震で，気象庁のカタログ（検出保証下限マグニチュード3.7）では，余震が4つ登録されていただけであった。

このように，地震カタログを充実させることは重要であり，また，精密な震源決定は，前震活動が（余震的）トリガリングによる確率論的なカスケードアップ現象なのか，プレスリップなどの前兆的物理状態を示したものなのかの議論に重要な役割を果たす（例えば，Ellsworth and Bulut, 2018）。気象庁では，東海大学と共同で駿河湾における海底地震計観測を行った（気象庁 [課題番号:JMA_01]）。この臨時OBS観測は，前計画で駿河湾地域の地震検知限界を大きく改善することが確かめられている（Baba et al., 2015）。一方，南アフリカ金鉱山（例えば，Manthei et al., 2019），内陸地震の稠密観測などの，高い検知率と高精度な震源決定が期待できる超高密度ネットワーク観測のハイサンプリングデータに対して，高速で自動処理してカタログを充実させるために，深層学習等を取り入れた計算機負荷の少ない検出アルゴリズムの試行的適用をはじめた（東京大学地震研究所 [課題番号:ERI_13]）。また，気象庁では，2011年3月の地震波形に震源自動決定システム（PF法）を適用し，現在の一元化震源カタログの2倍以上のイベントを検出した。その結果，東北地方では取り漏らしなく捕捉できるマグニチュードの下限を約1.0ほど下げられることを示した（気象庁 [課題番号:JMA_01]）。

前震の中には本震の破壊開始点近傍で本震直前に多数の微小な相似地震としておこるものがあり（例えば，Bouchon et al., 2011; Doi and Kawakata, 2012, 2013），このようなものは特異な活動として事前識別がつきやすいと期待される。このような活動を網羅的に走査するために，昨年度，相似地震と判断するための波形の類似度（相互相関係数）の閾値をAICを用いて客観的に決定する方法を開発し，長野県中部の地殻内地震（2011年，Mj5.4）の前2年間のデータを走査して，そのような活動はほぼ本震直前の時期だけにおきていたとの結果を得た（Hirano et al., 2019，立命館大学 [課題番号:RTM_02]）。しかしこの手法は，計算された膨大な相互相関係数の分布を適切に表現するためのパラメータを最尤推定すること，および上位いくつまでを外れ値とするかを逐次検証するため膨大な計算コストを要する。そ

ここで今年度は、1) 相互相関係数の分布を表現するパラメータを厳密な最尤推定を行わずに近似すること、2) 外れ値の上位をひとつずつ検討するのではなく1) で近似的に求めたパラメータから直接的に閾値を求める、という改造を行い、計算の高速・効率化を達成した。さらに、テンプレートとして既知の地震波形を与えることなく、相似微小地震を効率よく見つけだすことを目指して、連続波形データから得られる短時間波形全ての組み合わせについて、その類似度を判定するための試みを開始した(立命館大学 [課題番号: RTM_02])。この問題は類似音声探知の研究で発展した手法が地震研究にも応用され始めているが、判定正確性と計算効率はまだまだである。そこで短時間波形の特徴抽出のための新たな関数を2通り提案し、予察的な実験で、既存手法と同等以上の判定精度と劇的な計算効率の改善がみられた。

様々な外部条件の変化に、地震発生の確率が影響される可能性が提案されている。トンガ・ケルマディック海溝沿いで発生したプレート境界型の地震活動について、潮汐との相関を調査した。解析の結果、潮汐指標値の絶対値が大きいほど地震の選択性が顕著であること、せん断応力よりも法線応力の方が地震のトリガーに寄与していることがわかった(Hirose et al., 2019a, 気象庁 [課題番号: JMA_01])。地震活動に季節性があることは以前より様々な地域で提案されており、これは、地震確率の時間変動の予測に使用できるはずの情報である。なるべく恣意性を除いた手法で余震を取り除いて独立地震に対して季節性があるかどうか客観的に評価するために、山陰地方の1980-2017年のM3以上の地震活動に対して時空間ETASを用いた確率的手法での余震除去カタログを10,000通り生成することによって、独立地震の発生数にみられる6ヶ月周期の変動が8シグマで有意であることを示した(Ueda and Kato, 2019a, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])。春と秋には平均より25%程度地震発生確率が高いという傾向であり、これは、解析期間を2つに分割しても安定してみられる傾向であった。余震除去を階層的時空間ETASで行ってみても結果はほぼ同じであった(図33a-c)。また、数が少ないのでそれ自体の有意性は評価しがたいが、1850-2017年および、1923-2017年のM6.2以上の地震だけについても、春と秋に多いという傾向はある。さらに、新潟地方の1980年からのM3以上の地震活動に対して同様の解析(図33d-f, Ueda and Kato, 2019b)を行うと、1年周期の変動が有意であった(夏に少なく、冬に多い)。これらの季節性の原因として、降水の地下浸透による間隙圧の増加、あるいは、降雪/雪解けによる鉛直応力の変化が考えられる。また、中国の天然ガス地層貯留フィールドでの地震活動データからETASモデリングから余震を除去することで、貯留によって人工的に誘発されたい地震活動の存在が示唆された(Zhou et al., 2019, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])。誘発された活動は、貯留層との流体移動が難しそうな場所にあり、間隙圧の効果ではなく、ガスの注入・回収によって生じる岩盤の変位に起因する弾性応力の変化ではないかと考えられる。

b 値の低いところで地震がおきる例がたびたび指摘されているが、2016年熊本地震震源域周辺の最近(2017年1月から2019年3月まで)の地震活動のb 値の空間分布を調べたところ、本震破壊域の南端10km程度の領域でだけ、地震前に比べて顕著にb 値が低下していることを見いだした。さらに、これより北の本震破壊域では大森-宇津則のp 値が >1 と余震の減衰が速いものに対して、日奈久断層のこれより南の部分ではp 値 <1 で余震の減衰が遅い。このことは、地震後の地殻変動観測から指摘(Pollitz et al., 2017)されている本震の破壊域での余効滑りと岩盤の粘弾性緩和から期待される断層上での不均質な応力変化と整合的(図34, Nanjo

et al., 2019) であり、熊本地震以降に本震破壊域南端での応力増加が進行している可能性を示唆する(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])。

地殻流体に見られる変動も、しばしば地震に先行することがある。神奈川県温泉地学研究所が中心となって1976年に設立されたアマチュア研究グループ「なまずの会」が記録した国内の132個の井戸の水位データ(1977年2月1日-1987年3月31日)と地震(M6.0以上、井戸との距離はマグニチュードに応じて100-250km以内)を比較したところ、地震直前に水位が異常を示していた井戸は6個であった(織原, 2019d; 織原・長尾, 2019; 織原・他, 2019, 東海大学 [課題番号: KOB008])。また、産業技術総合研究所が中心となって行っている台湾・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主催しプロシーディングス(Matsumoto and Shieh, 2019)を公開した(産業技術総合研究所 [課題番号: AIST09])。

全国25施設の医薬系放射線管理施設が参画する大気中ラドン濃度のモニタリングネットワークでは、計画的に各施設からの過去データを回収し順次解析を行っている(Nakatani, 2020, for review)。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においては、1995年兵庫県南部地震(Mw6.9)の1ヶ月前から大きな変動があったことが知られている(Yasuoka et al., 2006)。このデータに対し昨年度から進めていた分潮解析の結果を精査し、1984-1988年にはなかったK1分潮成分(周期23.934時間)が、兵庫県南部地震前の1990年-1994年の期間では認めらるという傾向が、誤差を考慮しても有意と思われることを見いだした(図35, 東北大学 [課題番号: THK_10])。また、大阪薬科大学で観測された大気中ラドン濃度の経年変化と正弦回帰した平均変動解析を進め、2018年大阪府北部地震(Mj6.1)の約1年前から大気中ラドン濃度が低下していたことを発表した(三浦・他, 2019, 東北大学 [課題番号: THK_10])。また、より多くの放射線管理施設のデータが利用できるよう、室温制御なしの環境で測定されたデータでも、温度補正によって空气中ラドン濃度の測定が可能になることを示した(東北大学 [課題番号: THK_10])。また、液体シンチレーションカウンターのようにより有機溶媒を使用しないことから使い易いRAD7装置によっても、水中のラドン濃度が10-90Bq/Lの範囲なら測定が可能であることを報告した(Higuchi et al., 2019, 東北大学 [課題番号: THK_10])。

各観測点で測定される大気中ラドン濃度変動が、どのくらい広い範囲に影響しているのか、またどのくらいの規模の地震が寄与するのかを明らかにするために、福島県立医科大学と札幌医科大学における大気中ラドン濃度変動度(連続データ)と地震系列(非連続データ)の強度関数が近くなるように地震を選択することで、大気中ラドン濃度変動度に寄与する地震の条件の予察的な推定をおこなった。これにより、大気中ラドン濃度異常においても、地震に伴う地下水位の異常の場合(Matsumoto et al., 2003)と同様な閾値マグニチュード-震源距離の関係が認められた(図36, 東北大学 [課題番号: THK_10])。

ラドンは地殻岩石中において常に生成されているため、そのフラックスは地殻の透水性を反映すると期待され、大気中ラドン濃度は、気象による変動を補正することによって、地殻からのガスフラックスを反映していると期待される。一つの可能性として、土壌中でラドン測定を行えば、地殻フラックスをより正確に反映する可能性がある。活性炭を用いたラドン収集器(PicoRad)を用いてこれを行うための校正係数を導出し出版した(Wakabayashi et al., 2019, 東北大学 [課題番号: THK_10])。さらに、ラドンフラックスが大気電場に影響を与えうることも提唱されているため、千葉県旭市で地中及び地表付近のラドン濃度と大気

電場，ULF電磁場のパイロット観測（大村，2019）を行い，また，50km離れた茨城県美浦に同様の観測点を追加した（図37，千葉大学 [課題番号：CBA_01]）。旭のパイロット観測から得られた時系列データ（2018年2月13日-2018年12月31日）について，地中ラドン濃度・気温・気圧のマルチチャンネル特異スペクトル解析から気象要素の影響を除去し地中ラドンフラックスを求め，観測点周囲50kmでの地震活動と比べてみると，旭観測点直下で地震が発生した数日前に地中ラドンフラックスの 3σ を超える異常を示す傾向が感じられる（図38）。また，国土地理院のF3解を用いて面積ひずみを求めて比較したところ，地中ラドンフラックスは，弾性圧縮に対して増加し，弾性膨張に対して減少する傾向がみられた（千葉大学 [課題番号：CBA_01]）。

近年，地震に先行する電離圏電子数異常の報告が多くされている。例えば，Kon et al., (2011) は，日本上空における電離圏総電子数（TEC）は浅い $M>6$ の地震1-5日前に正の有意相関があることを示した。しかし，GNSSデータは1990年代以降しか存在しない。そこで，1958年以降の長期にわたるデータが存在する地上の電離圏観測機器であるイオノゾンデに注目し，電離圏の最大電子密度（NmF2）とその高度（hmF2）について地震との相関解析を行った（千葉大学 [課題番号：CBA_01]）。NmF2とhmF2について前15日間の中央値と四分位範囲（IQR）を用いて，観測値が中央値+1.5IQR，または中央値-1.5IQRを超える場合，異常と定義した。また，電離圏擾乱は地磁気擾乱によっても発生する。したがって，地磁気擾乱に起因する電離圏異常の特徴を調査し，そのデータを取り除いた。イオノゾンデから半径1000kmおよび半径350km以内で発生した $M\geq 6$ ，深さ ≤ 40 kmの地震の発生と電離圏異常の発生の時間的相関をSuperposed Epoch Analysis（SEA）で探った。SEAの結果（図39b-d）から，NmF2は半径1000km以内では地震前6-10日間，半径350km以内では地震前1-10日間の正の有意な異常を示した。hmF2については有意な異常はなかった。さらに，ROC解析によってNmF2の先行傾向の評価を行った（図39e）。ROC解析を最も有意な異常を示した5日カウントで6-10日前，1日カウントでの7日前に適用すると，確率ゲインは1をわずかに超え，非常に弱いながらも先行傾向がある可能性がある。

フランスの地震先行現象検知衛星DEMETER（2004-2010運用）での観測データから，地震に数時間先行してVLF電磁波強度が減少する傾向が主張されている（Nemec et al., 2008）。しかしその統計解析においては時空間解析領域における地震数のばらつきを整えるために多数の仮定を設けていた。本年度は，このばらつきを無くすために別手法の解析を行い，それでも類似した先行性が認められた（静岡県立大学 [課題番号：KOB009]）。また，DEMETER衛星の上位互換的なスペックである中国のCSES衛星（2018年2月打ち上げ，現在運用中）のデータで同様の相関解析を行うための前処理を行った（静岡県立大学 [課題番号：KOB009]）。また，VLF電磁波強度に絞ってDEMETER（約130kg）の廉価版の超小型衛星（約10kg）多数による観測を目指すPrelude計画は，ブレッドボードモデルからエンジニアリングモデルの段階に進んだ（児玉，2019；児玉・他，2019，宇宙航空研究開発機構 [課題番号：KOB007]）。

これまでの課題と今後の展望

プレート境界の滑りのモニタリングは，スロー地震と繰り返し地震の解析を中心に高度化し，その時空間変化に対して定量的・網羅的な結果が得られるようになってきている。このことによって，大地震発生のサイクルにおけるスロースリップの役割をデータから実証的に提案するような成果も得られはじめている。また，滑り特性の空間不均質の原因も構造など

との比較から検討されはじめている。物理モデルの拘束を含むデータ同化も、実際の観測データへの適用が成功しはじめており、既に進行中のスロースリップの終期が予測できる可能性が示されている。今後、物理モデルに基づく滑り予測は、着実に進展することが期待される。経験的な地震活動のモデリングによる地震予測は、特に短期的な前震に関して、前震を含む全ての地震についての余震的トリガ作用を考慮するETASモデルだけでは説明できない現象であることが示唆されたのは重要な進歩である。さらに、前震の解析方法に関しても、網羅的・客観的な新たな方法が提案され始めており、今後もいっそうの前進が期待される。一方、地震の規模と数の関係を表すb値等の、中期的な地震活動の変化に関しては、新たなケーススタディはでていないが、先行傾向が統計的に有意であるかの評価が重要な課題である。これは、地殻流体にみられる先行現象候補の研究にもあてはまる。電磁気的な現象に関しては、短期的なもので、低いゲインながらも有意な先行傾向が示されたものはいくつかあり、人工衛星による観測を含めたデータの拡充、解析技術の向上によって研究の量を増やしていくことが、メカニズムの解明への道を拓くかもしれない。

成果リスト

- Ariyoshi, K., J-P Ampuero, R. Burgmann, T. Matsuzawa, A. Hasegawa, R. Hino, T. Hori (2019), Quantitative relationship between aseismic slip propagation speed and frictional properties, *Tectonophysics*, 767, 128151, doi:10.1016/j.tecto.2019.06.021
- Baba, S., A. Takeo, K. Obara, T. Matsuzawa, T. Maeda (2019), Comprehensive detection of very low frequency earthquakes off the Hokkaido and Tohoku Pacific coasts, northeastern Japan, *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 125, doi:10.1029/2019JB017988
- Escobar, M. T., N. Takahata, T. Kagoshima, K. Shirai, K. Tanaka, J.-O Park, H. Obata, Y. Sano (2019), Assessment of Helium Isotopes near the Japan Trench 5 Years after the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *ACS Earth and Space Chemistry*, 3 (4), 581-587, doi:10.1021/acsearthspacechem.8b00190
- Fukuda, J. (2019), Variability of the space-time evolution of slow slip events off the Boso Peninsula, central Japan, from 1996 to 2018 (Invited), 日本地球惑星科学連合2019年大会, SCG48-01
- Fukuda, J., K. M. Johnson (2019a), Bayesian parameter estimation of a physics-based model of postseismic crustal deformation (Invited), 日本地球惑星科学連合2019年大会, MGI30-12
- Fukuda, J., K. M. Johnson (2019b), Bayesian inverse modeling of postseismic deformation following the 2011 Tohoku-oki earthquake using mechanically coupled models of coseismic slip, stress-driven afterslip, and viscoelastic relaxation, AGU Fall Meeting 2019, T11A-04
- Fukushima, Y., M. Hashimoto, M. Miyazawa, N. Uchida, T. Taira (2019), Surface creep rate distribution along the Philippine fault, Leyte Island, and possible repeating of Mw 6.5 earthquakes on an isolated locked patch, *Earth Planet. Space*, 71(1), doi:10.1186/s40623-019-1096-5

- Gardonio, B., A. Schubnel, S. Das, H. Lyon-Caen, D. Marsan, M. Bouchon, A. Kato (2020), The preseismic and postseismic phases of the ~700-km deep Mw7.9 Bonin Islands earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2019GL085589, doi:10.1029/2019GL085589
- Goto, S., R. Uchida, K. Igarashi, C. - H. Chen, M.-H. Kao, K. Umeno (2019), Pre-seismic ionospheric anomalies detected before the 2016 Taiwan earthquake, *J. Geophys. Res.:Space Physics*, 124(11), 9239-9252, doi:10.1029/2019JA026640
- Guo, Y., J. Zhuang, Y. Ogata (2019), Modelling and forecasting aftershocks can be improved by incorporating rupture geometry in the ETAS model, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 12881-12889. doi:10.1029/2019GL084775
- 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* 184, 426-429
- Hirahara, K., K. Nishikiori (2019), Estimation of frictional properties and slip evolution on a long-term slow slip event fault with the ensemble Kalman filter: numerical experiments, *Geophys. J. Int.*, 219, 2074-2096, doi:10.1093/gji/ggz415
- Hirano, S., H. Kawakata, I. Doi (2019), Foreshock activity detection by a threshold-free matched-filter technique, *JpGU Meeting 2019*, SSS04-05
- 弘瀬冬樹, 溜渕功史, 前田憲二 (2019), 自然地震カタログとETASカタログに内在する前震活動の特徴の違い:前震予測モデルを用いた検証, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SSS09-P02
- Hirose, F., K. Maeda, O. Kamigaichi (2019a), Tidal Forcing of Interplate Earthquakes Along the Tonga - Kermadec Trench, *J. Geophys. Res.*, 124, 10498-10521, doi:10.1029/2019JB018088
- Hirose, F., K. Maeda, Y. Yoshida (2019b), Maximum magnitude of subduction earthquakes along the Japan-Kuril-Kamchatka trench estimated from seismic moment conservation, *Geophys. J. Int.*, 219, 1590-1612, doi:10.1093/gji/ggz381
- 廣瀬仁 (2019), GNSS座標時系列データに含まれる common-mode error 除去手法の開発, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 23, 18-25
- Hirose, H., W. Tamura, T. Kimura (2019c), Cumulative slip distribution of short-term slow slip events in the western Shikoku area, southwest Japan based on tilt change measurements, *JpGU Meeting 2019*, SCG48-02
- Hirose, H. T. Kimura (2019), Slip distributions of short-term slow slip events in the Shikoku area, southwest Japan from 2001 to 2019 based on tilt change measurements, *International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019*, P2-05
- Honsho, C., M. Kido, F. Tomita, N. Uchida (2019), Offshore Postseismic Deformation of the 2011 Tohoku Earthquake Revisited: Application of Improved GPS-Acoustic

- Positioning Method Considering Sloping Sound Speed Structure, *J. Geophys. Res.*, 124(6): 5990-6009, doi:10.1029/2018JB017135
- Ito, A., T. Tonegawa, N. Uchida, Y. Yamamoto, D. Suetsugu, R. Hino, H. Sugioka, K. Obana, K. Nakahigashi, M. Shinohara (2019), Configuration and structure of the Philippine Sea Plate off Boso, Japan: constraints on the shallow subduction kinematics, seismicity, and slow slip events, *Earth Planet. Space*, 71(1), doi:10.1186/s40623-019-1090-y
- Iwasaki, T., N. Tsumura, T. Ito, K. Arita, M. Makoto, H. Sato, E. Kurashimo, N. Hirata, S. Abe, K. Noda, A. Fujiwara, S. Kikuchi, K. Suzuki (2019), Structural heterogeneity in and around the fold-and-thrust belt of the Hidaka Collision zone, Hokkaido, Japan and its relationship to the aftershock activity of the 2018 Hokkaido Eastern Ibari Earthquake, *Earth Planet. Space*, 71, 103, doi:10.1186/s40623-019-1081-z
- 岩田貴樹, 吉田圭佑, 深畑幸俊 (2019), 地震学的データを用いた応力インバージョン, *地学雑誌*, 128, 797-811, doi:10.5026/jgeography.128.797
- 井筒潤, 楠城一嘉, 鴨川仁, 織原義明, 長尾年恭 (2019), 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による可視化, *東海大学海洋研究所研究報告*, 41, 1-15
- Kakinaka, S., K. Umeno (2020), Characterizing Cryptocurrency Market with Levy's Stable Distributions, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 89, 024802, doi:10.7566/jpsj.89.024802
- Kamogawa, M., K. Z. Nanjo, J. Izutsu, Y. Orihara, T. Nagao, S. Uyeda (2019), Nucleation and cascade features of earthquake mainshock statistically explored from foreshock seismicity, *Entropy*, 21(4), 421, doi:10.3390/e21040421
- 鴨川仁, 児玉哲哉, 長尾年恭 (2019), DEMETER衛星によって検知された地震先行的VLF強度現象時のELF帯電波強度について, *日本地球惑星科学連合2019年大会*, MIS22-P04
- Kano, M., A. Kato, K. Obara (2019), Episodic tremor and slip silently invades strongly locked megathrust zone at the Nankai Trough subduction, *Scientific Reports*, 9, doi:10.1038/s41598-019-45781-0
- Kano, M., Y. Kano (2019), Possible slow slip event beneath the Kii Peninsula, southwest Japan, inferred from historical tilt records in 1973, *Earth, Planet. Space*, 71:95, doi:10.1186/s40623-019-1076-9
- 木口努, 今西和俊, 松本則夫 (2019), 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果 (2018年11月~2019年4月), *地震予知連絡会報*, 102, 212-213
- 木口努, 今西和俊, 松本則夫 (印刷中), 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果 (2019年5月~2019年10月), *地震予知連絡会報*, 103
- 木口努, 桑原保人 (2019), 孔井内測定で検出した透水性亀裂の方向と応力場の関係: 産総研西尾善明観測点の結果, *活断層・古地震研究報告*, 19, 33-59
- 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11月~2019年4月) (59), *地震予知連絡会会報*, 102, 201-208

- 木口努, 松本則夫, 北川有一, 板場智史, 落唯史, 矢部優, 佐藤努 (印刷中), 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2019年5月~2019年10月)(60), 地震予知連絡会会報, 103
- 気象研究所 (2019a), 全国GNSS観測点のプレート沈み込み方向の位置変化, 地震予知連絡会会報, 102, 17-20
- 気象研究所 (2019b), 南海トラフ沿いの長期的スロースリップの客観検知, 地震予知連絡会会報, 102, 277-279
- 気象研究所 (2019c), 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, 102, 280-283
- 気象研究所 (2019d), 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, 102, 380-384
- 北川有一, 板場智史, 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11月~2019年4月), 地震予知連絡会会報, 102, 284-294
- 北川有一, 板場智史, 武田直人, 松本則夫, 落唯史, 木口努, 矢部優 (印刷中), 紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果 (2019年5月~2019年10月), 地震予知連絡会会報, 103
- 北川有一, 松本則夫, 佐藤努, 板場智史, 落唯史, 木口努 (2019), 近畿地域の地下水位・歪観測結果 (2018年11月~2019年4月), 地震予知連絡会会報, 102, 295-298
- 北川有一, 松本則夫, 佐藤努, 板場智史, 落唯史, 木口努, 矢部優 (印刷中), 近畿地域の地下水位・歪観測結果 (2018年11月~2019年4月) 地震予知連絡会会報, 103
- Kobayashi, A., T. Tsuyuki (2019), Long-term slow slip event detected beneath the Shima Peninsula, central Japan, from GNSS data, *Earth Planet. Space*, 71, 60, doi:10.1186/s40623-019-1037-3
- 児玉哲哉 (2019), S-Booster2018参加報告, 日本地球惑星科学連合2019年大会, MIS22-05
- 児玉 哲哉, 山崎政彦, 鴨川仁 (2019), 地震先行現象検証超小型衛星:Preludeの現状, 第16回宇宙環境シンポジウム
- Kono, A., T. Sato, M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Yamada, K. Uehira, T. Shinbo, Y. Machida, R. Hino, R. Azuma (2020), 2D spatial distribution of reflection intensity on the upper surface of the Philippine Sea plate off the Boso Peninsula, Japan, *Tectonophysics*, 774(5), 228206, doi:10.1016/j.tecto.2019.228206
- Kurashimo, E, T. Iidaka, N. Tsumura, T. Iwasaki (2019), Earthquake reflection imaging of subduction structure beneath the eastern part of the Kii Peninsula, southwestern Japan, AGU Fall Meeting 2019, T51G-0367
- Kurihara, R., K. Obara, A. Takeo, Y. Tanaka, 2019, Deep low-frequency Earthquakes associated with the eruptions of Shinmoe-dake in Kirishima Volcanoes, *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 124, doi:10.1029/2019JB01803
- Lee., H, H. Kim, T. Kagoshima, J.O. Park, N. Takahata, Y. Sano (2019), Mantle degassing along strike-slip faults in the Southeastern Korean Peninsula, *Scientific Reports*, 9, 15334, doi:10.1038/s41598-019-51719-3

- Li, Y., D. Wang, S. Xu, L. Fang, Y. Cheng, G. Luo, B. Yan, B. Enescu, J. Mori (2019), Thrust and Conjugate Strike - Slip Faults in the 17 June 2018 MJMA 6.1 (Mw 5.5) Osaka, Japan, Earthquake Sequence, *Seismol. Res. Lett.*, 90 (6), 2132-2141, doi:10.1785/0220190122
- Liu, J.-Y., C.-Y. Lin, Y.-L. Tsai, T.-C. Liu, K. Hattori, Y.-Y. Sun, T.-R. Wu (2019), Ionospheric GNSS total electron content for tsunami warning, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 13, 05n06, 1941007, doi:10.1142/S1793431119410070
- 前田憲二, 弘瀬冬樹, 溜渕功史 (印刷中), 群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測手法(5):最近の活動事例による検証とETASモデルとの比較, *地震予知連絡学会報*, 103
- Manthei, G., K. Plenkers, J. Philipp, M. Naoi, H. Moriya, M. Nakatani (2019), In-Situ Acoustic Emission Monitoring in Mines, ARMA19-1711
- Matsumoto, N., C.-L. Shieh eds. (2019), Proceedings of the 18th Taiwan-Japan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, <https://unit.aist.go.jp/ievg/tectonohydro/topics/workshop/2019/18thProceeding.pdf>
- 三浦直, 吉井未来, 安岡由美, 床次眞司, 長濱裕幸, 向高弘 (2019), 監視モニタによる空气中ラドン濃度測定の見直し, 第69回日本薬学会関西支部総会・大会, P-AM-43
- Nakatani, M. (2020), Evaluation of phenomena preceding earthquakes and earthquake predictability, *J. Disaster Res.* 15(2), 112-143, doi:10.20965/jdr.2020.p0112
- Nanjo, K. Z. (2019), Capability of Tokai strainmeter network to detect and locate a slow slip: First results, *Pure and Applied Geophysics*, doi:10.1007/s00024-019-02367-1
- Nanjo, K. Z., J. Izutsu, Y. Orihara, M. Kamogawa, T. Nagao (2019), Changes in Seismicity Pattern Due to the 2016 Kumamoto Earthquakes Identify a Highly Stressed Area on the Hinagu Fault Zone, *Geophys. Res. Lett.*, 46(16), 9489-9496, doi:10.1029/2019GL083463
- Nishikawa, T., T. Matsuzawa, K. Ohta, N. Uchida, T. Nishimura, S. Ide (2019), The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories, *Science*, 365, 808-813, doi:10.1126/science.aax5618
- Noda, Y., H. Hirose (2019), The b-value of the earthquake swarm activities accompanied by the Boso slow slip events, JpGU Meeting 2019, SCG48-P45
- 野村俊一, 尾形良彦 (印刷中), 多様な予測方式に対する前震識別モデルとその予測性能評価, *地震予知連絡学会報*, 103
- 野村俊一 (2020), Inversion of spatio-temporal variation in - 147 - interpolate slip rate from repeating earthquakes (招待講演), 第10回データ同化ワークショップ
- Nomura, S., Y. Ogata, N. Uchida, M. Matsu'ura (2020), Spatio-temporal renewal model for repeating earthquakes to estimate interplate slip rate (招待講演), ISM Symposium on Environmental Statistics 2020

- 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 (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11月~2019年4月), 地震予知連絡会会報, 102, 184-200
- Ogata, Y., K. Katsura, H. Tsuruoka, N. Hirata (2019), High-resolution 3D earthquake forecasting beneath the greater Tokyo area, *Earth Planet. Space*, 71, 113, doi: 10.1186/s40623-019-1086-7
- 尾形良彦 (2019), Delaunay三角形網による高分解能地震活動モデル, 日本地震学会2019年度秋季大会, S14-05
- Ogata, Y. (2019), High resolution seismicity models using interpolation with Delaunay triangulation, 11th International Workshop on Statistical Seismology (第11回統計地震学国際ワークショップ)
- 大村潤平, 大山佳織, 韓鵬, 吉野千恵, 小島春奈, 服部克巳, 下道國, 小西敏春, 古屋隆一, 山口弘輝 (2019), 房総半島における大気電気パラメータの観測, *Journal of Atmospheric Electricity*, 38, 37-52, doi:10.1541/jae.38.37
- 織原義明 (2019a), 深海魚と地震, *地震ジャーナル*, 68, 40-43
- 織原義明 (2019b), 2019年6月18日山形県沖の地震前後の地震雲発生のうわさから考える Twitter ユーザーの科学リテラシー, 東海大学海洋研究所研究報告, 41, 16-31
- 織原義明 (2019c), 2019年6月18日山形県沖の地震前後の地震雲に関する「つぶやき」から考えるツイッターユーザーの科学リテラシー, 日本地震学会2019年秋季大会, S24-11
- 織原義明 (2019d), 地震予知を目指したアマチュア研究グループによる地下水データの再検証, 日本地震予知学会第6回学術講演会アブストラクト集, No.19-02
- Orihara, Y., M. Kamogawa, Y. Noda, T. Nagao (2019), Is Japanese folklore concerning deep-sea fish appearance a real precursor of earthquakes?, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 109(4), 1556-1562, doi:10.1785/0120190014
- 織原義明, 長尾年恭 (2019), アマチュア研究グループ“なまずの会”による地下水異常と地震との関係についての再調査, 日本地震学会2019年度秋季大会, S14-04
- 織原義明, 鴨川仁, 長尾年恭 (2019), なまずの会による地下水異常と地震との関係についての再調査, 日本地球惑星科学連合2019年大会, MIS22-04
- Osawa, Y., Y. Ogura, K. Motojima (2019), Statistical relation between earthquakes and radiation dose increments at the radiation monitoring post, *Journal of Atmospheric Electricity*, 38(1), 11-21, doi:10.1541/jae.38.11
- Sakamoto, R., Y. Tanaka (2019), Theoretical consideration on a relationship between tidal periods and permeability on the plate interface with high-pressure fluids, AGU Fall Meeting 2019, T43H-0423
- Shcherbakov, R., J. Zhuang, G. Zoeller, Y. Ogata (2019), Forecasting the magnitude of the largest expected earthquake, *Nature Communications*, 10:4051, doi:10.1038/s41467-019-11958-4
- 高木涼太, 内田直希, 小原一成 (2019), 関東地方におけるスロースリップイベントの系統的検出の試み, 日本地震学会2019年度秋季大会, S03P-034,

- Takagi, R., N. Uchida, T. Nakayama, R. Azuma, A. Ishigami, T. Okada, T. Nakamura, K. Shiomi, 2019a, Estimation of the Orientations of the S-net Cabled Ocean-Bottom Sensors, *Seismol. Res. Lett.*, 90, 2175-2187, doi:10.1785/0220190093
- Takagi, R., N. Uchida, K. Obara (2019b), Along-strike variation and migration of long-term slow slip events in the western Nankai subduction zone, Japan, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2018JB016738
- Tamaribuchi, K., A. Kobayashi, T. Nishimiya, F. Hirose, S. Annoura (2019), Characteristics of Shallow Low-Frequency Earthquakes off the Kii Peninsula, Japan, in 2004 Revealed by Ocean Bottom Seismometers, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 23, doi:10.1029/2019GL085158
- Teshiba, S., H. Hirose (2019), Interplate slip around the Hyuganada-Bungo Channel from 1996 to 1998 based on GNSS data, *International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019*, P2-11
- Tramutoli, T., F. Marchese, A. Falconieri, C. Filizzola, N. Genzano, K. Hattori, M. Lisi, J.-Y. Liu, D. Ouzounov, M. Parrot, S. Pulinetz (2019), Tropospheric and ionospheric anomalies induced by volcanic and Saharan dust events as part of geosphere interaction phenomena, *Geosciences*, 9(4), 177, doi:10.3390/geosciences9040177
- Tsuru, T., K. Amakasu, J.-O Park, J. Sakakibara, M. Takanashi (2019), 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 Planet. Space*, 71:31, doi:10.1186/s40623-019-1011-0
- Uchida, N. (2019), Detection of repeating earthquakes and their application in characterizing slow fault slip, *Prog. Earth. Planet. Sci.*, 6(1): 40, doi:10.1186/s40645-019-0284-z
- Uchida, N., R. Burgmann (2019), Repeating earthquakes, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 47, doi: 10.1146/annurev-earth-053018-0601191
- Uchida, N., D. Kalafat, A. Pinar, Y. Yamamoto (2019), Repeating earthquakes and interplate coupling along the western part of the North Anatolian Fault, *Tectonophysics*, 769, 228185, doi:10.1016/j.tecto.2019.228185.
- Uchida N., R. Takagi, Y. Asano, K. Obara (2020), Migration of shallow and deep slow earthquakes toward the locked segment of the Nankai megathrust, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 531, 115986, doi:10.1016/j.epsl.2019.115986
- Ueda, T., A. Kato (2019a), Seasonal variations in crustal seismicity in San-in district, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 3172-3179, doi:10.1029/2018GL081789
- Ueda, T., A. Kato (2019b), Seasonal variations in crustal seismicity in several tectonic regions in Japan, *AGU Fall Meeting 2019*, S13D-0471
- Umemiya Y., Y. Tanaka (2019), Possibility of crustal deformation caused by deep fluid flow during long-term slow slip events in the Tokai area, *AGU Fall Meeting 2019*, T43H-0433

- Wakabayashi, A., Y. Yasuoka, M. Janik, H. Nagahama, N. Fukuhori, Y. Mori, Y. Arai, S. Fujii, T. Mukai (2019), Derivation and validity evaluation of calibration factors for activated-charcoal radon collectors, *Radioisotopes* 68, 317-329, doi:10.3769/radioisotopes.68.317
- Wang, K., L. Brown, Y. Hu, K. Yoshida, J. He, T. Sun (2019), Stable forearc stressed by a weak megathrust: Mechanical and geodynamic implications of stress changes caused by the M=9 Tohoku-oki earthquake, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 124(3), 6179-6194, doi:10.1029/2018JB017043
- Xiong, Z., J. Zhuang, S. Zhou (2019), Long-term earthquake hazard in North China estimated from a modern catalog, *Bull. Seismol. Soc. Ame.*, 109, 2340-2355, doi:10.1785/0120190006
- 矢部優, 落唯史, 板場智史, 松本則夫, 北川有一, 木口努, 木村尚紀, 木村武志, 松澤孝紀, 汐見勝彦 (印刷中), 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント (2019年5月~2019年10月), 地震予知連絡会会報, 103
- Yabe, S., R. Fukuchi, R. Hamada, G. Kimura (2019), Simultaneous estimation of in situ porosity and thermal structure from core sample measurements and resistivity log data at Nankai accretionary prism, *Earth Planet. Space*, 71, doi:10.1186/s40623-019-1097-4
- Yoshida, K. (2019), Prevalence of asymmetrical rupture in small earthquakes and its effect on the estimation of stress drop: A systematic investigation in inland Japan, *Geosci. Lett.*, 6, 16, doi:10.1186/s40562-019-0145-z
- Yoshida, K., T. Saito, T. Taira, K. Emoto, T. Matsuzawa (2019), Stress release process ongoing along a crustal fault examined through the foreshock-mainshock-aftershock sequence of the 2017 M5.2 Akita-Daisen, NE Japan, earthquake, 日本地震学会秋季大会2019年大会, S08-23
- Yoshida, K., T. Saito, K. Emoto, Y. Urata, D. Sato (2019), Rupture directivity, stress drop and hypocenter migration of small- and moderate-sized earthquakes in the Yamagata-Fukushima border swarm triggered by the upward pore pressure migration after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Tectonophysics*, 769, doi:10.1016/j.tecto.2019.228184
- 吉田圭佑, 長谷川昭, 野口科子 (2019), 北海道函館周辺の深部低周波地震と内陸の繰り返し地震, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SCG61-18
- Zhou, P., H. Yang, B. Wang, J. Zhuang (2019), Seismological investigations of induced earthquakes near the Hutubi underground gas storage facility, *J. Geophys. Res.-Solid Earth*, 124, 8753-8770, doi:10.1029/2019JB017360

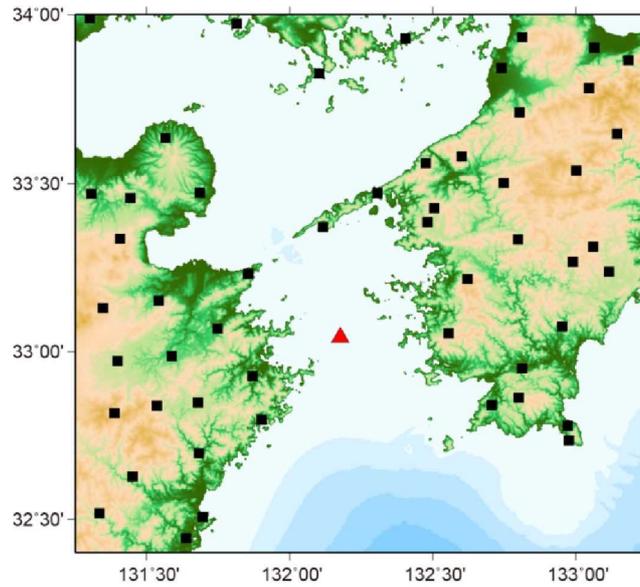


図 1. 水ノ子島観測点および周辺の観測点配置図。赤色三角：水ノ子島観測点， 黒色四角：定常地震観測点（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12]）。

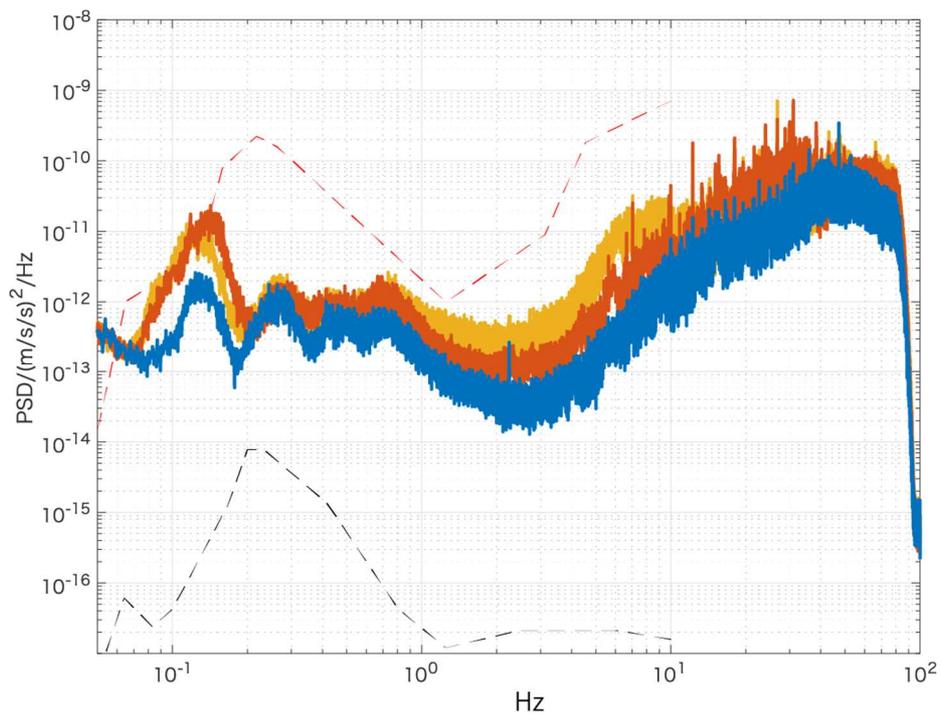
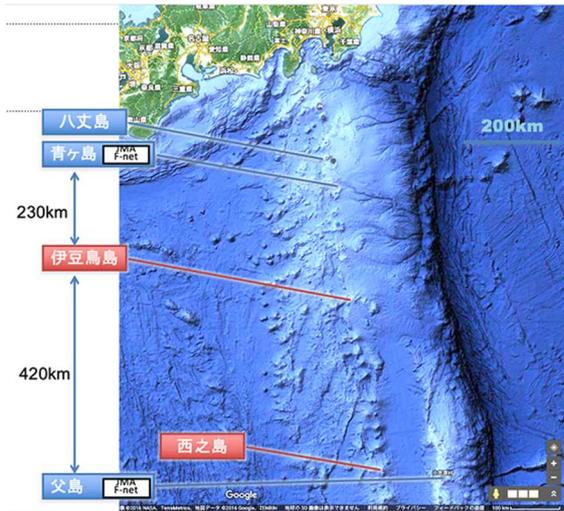


図 2. 水ノ子島観測点で得られた波形のパワースペクトル密度。青：上下動成分，赤：南北成分，オレンジ：東西成分，赤破線：high noise model，黒破線：low noise model（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12]）。



最近の波形例

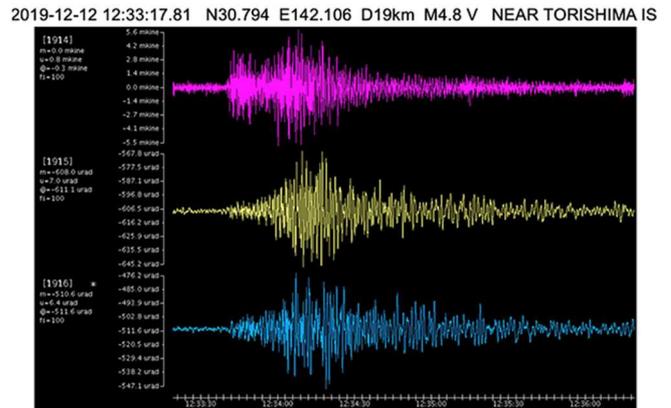


図 3. 伊豆鳥島における地震観測（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]）。

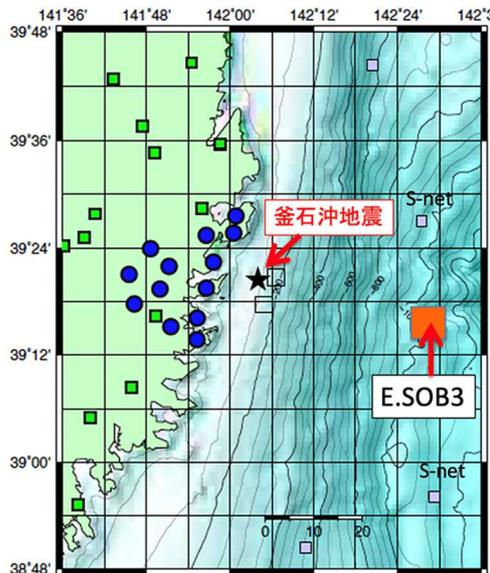


図 4. 釜石市周辺の臨時地震観測網（青丸）（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]）。

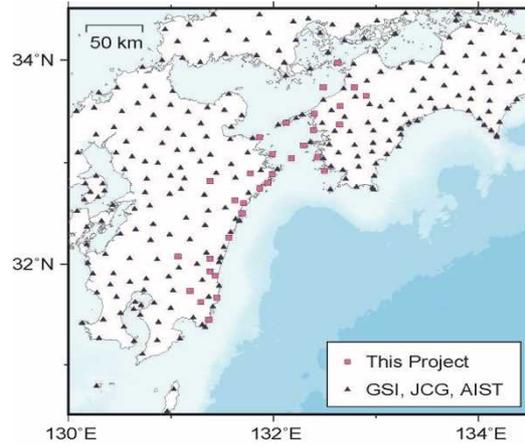


図5．本計画の研究グループで維持しているGNSS連続観測点の（ピンク四角）分布図。他機関のGNSS観測点でデータの利用できる地点を青三角で示した（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12]）。

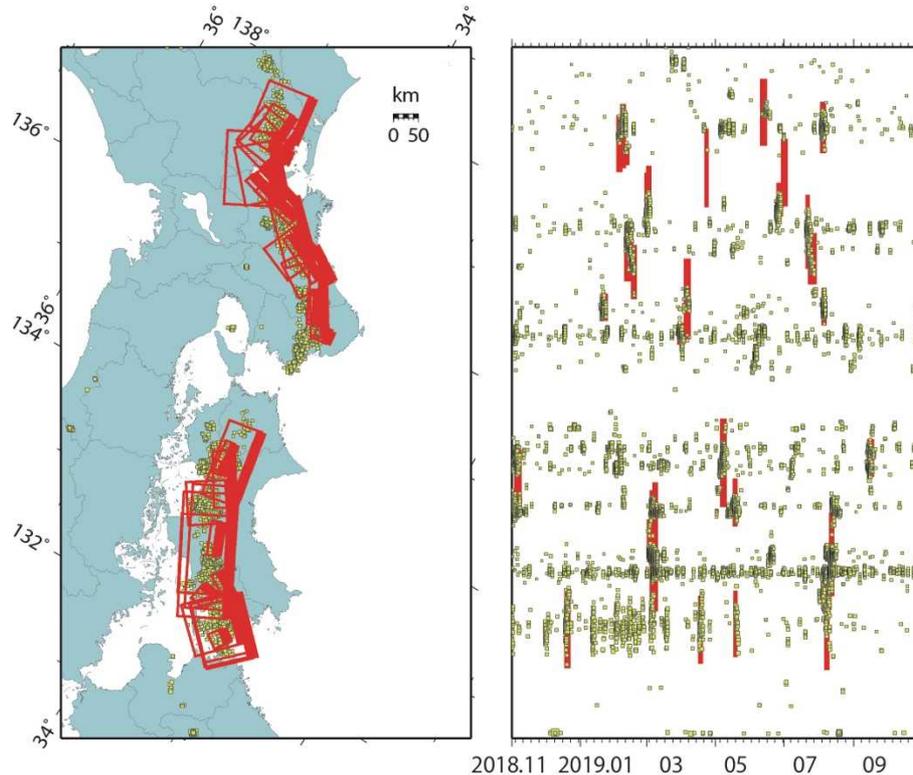


図6. 産業技術総合研究所・防災科学技術研究所・気象庁の歪・地下水・傾斜データにより決定した短期的 SSE の断層モデルおよび時空間分布。2018年11月-2019年10月に決定された33個の短期的 SSE (左図の赤四角, 右図の赤線)。黄色の四角は同期間の気象庁カタログによる深部低周波地震(微動)の震源位置と時空間分布 (産業技術総合研究所 [課題番号: AIST09])。

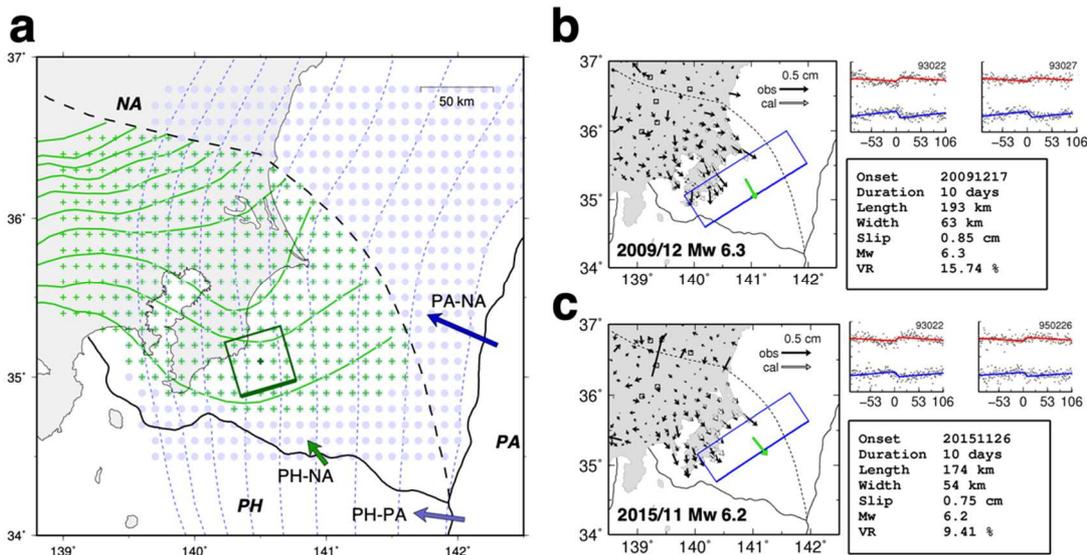


図7. 関東地方に沈み込むフィリピン海プレート上面で発生する SSE の検出。(a) SSE の検出に使用したグリッド配置。緑のフィリピン海プレート上面のグリッドのみで検出を行った。(b) 検出された小規模 SSE の例。このイベントは防災科学技術研究所 (2010) も Hi-net 傾斜計 1 点での非定常変動を報告している。(c) 検出された小規模 SSE の別の例 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])。

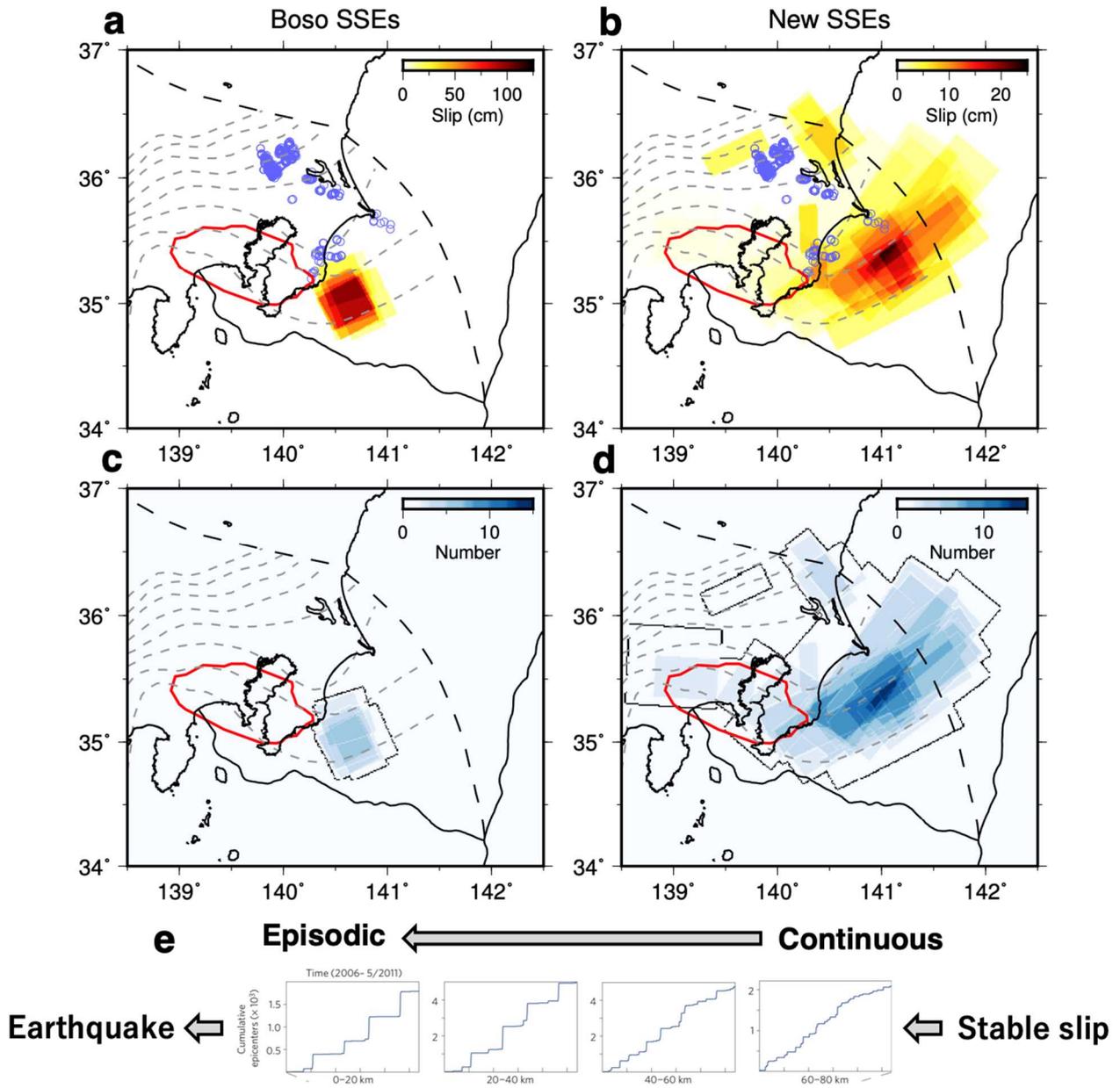


図 8. 既知の房総沖 SSE と新たにみつかった小規模 SSE。(a) 既知の房総沖 SSE の積算滑り量。赤線は関東地震の滑り域、青丸は小繰り返り地震 (Uchida et al., 2016), 灰色破線はフィリピン海プレート上面深さ 10km 間隔の等深線 (Nakajima et al., 2019), 黒色破線はフィリピン海プレート北東端 (Uchida et al., 2010)。(b) 新たに検出された小規模 SSE の積算滑り量。(c) 既知の房総沖 SSE の発生個数。(d) 新たに検出された小規模 SSE の発生個数。(e) Cascadia における低周波微動発生様式のプレート沈み込み方向の変化。Wech and Creager (2011) の図に加筆 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])。

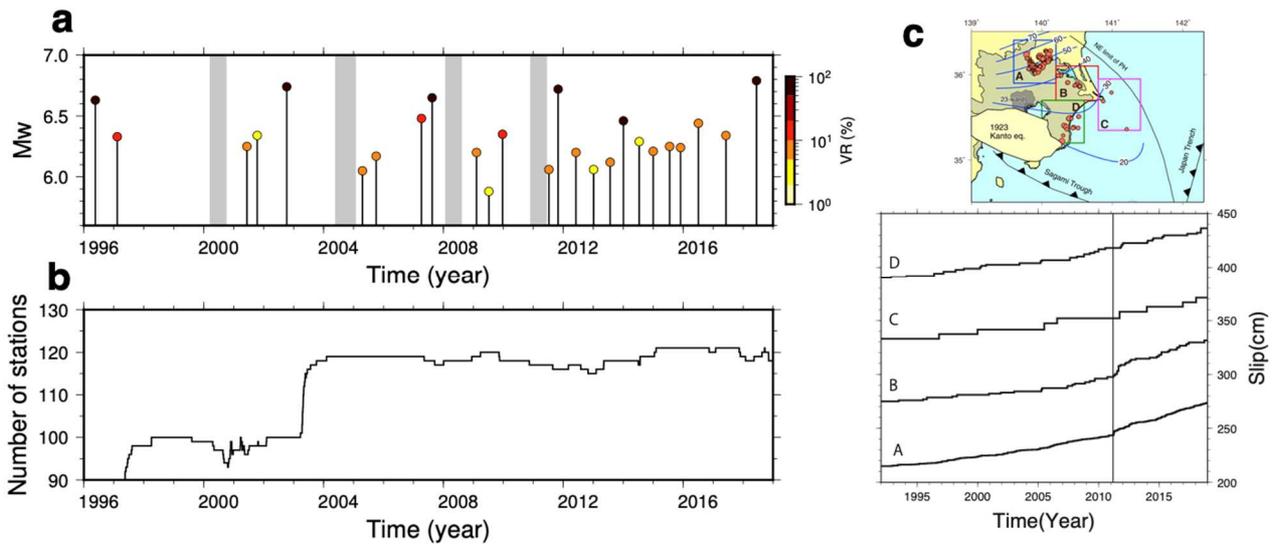


図 9. 関東地方に沈み込むフィリピン海プレート上面で発生する SSE 活動の時間変化。(a) 検出された SSE の MT 図。色は観測 GNSS 時系列とモデル時系列の Variance Reduction を表す。灰色の領域は、大地震による地殻変動により SSE 検出ができなかった期間を示す。(b) 使用した GNSS 観測点数。(c) 小繰り返し地震活動から推定される非地震性滑り。Uchida et al. (2016) をアップデート (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])。

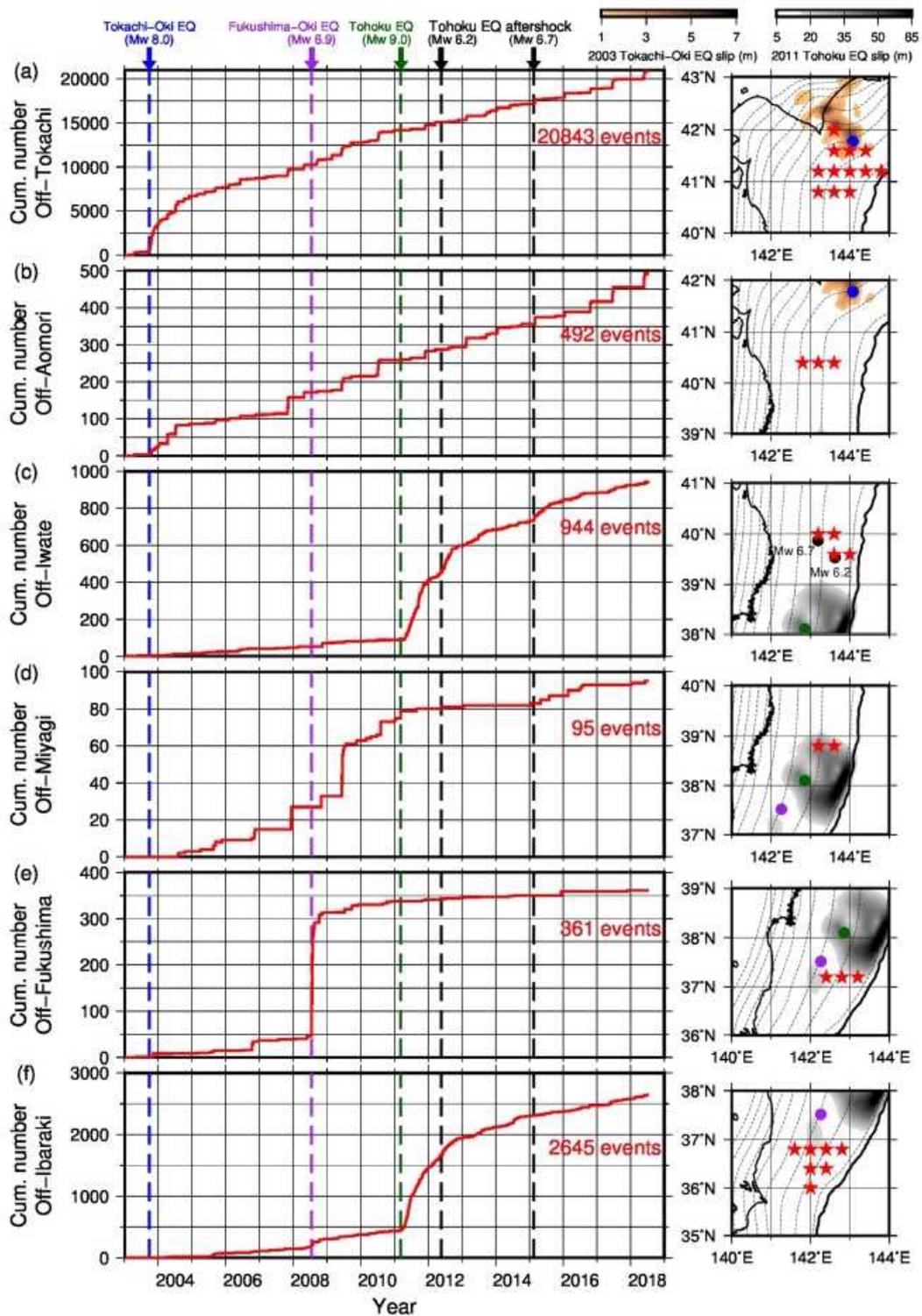


図 10. 東北地方太平洋沖における 2003 年 1 月-2018 年 7 月の浅部超低周波地震活動の時間変化。(a) - (f) はそれぞれ十勝沖, 青森沖, 岩手沖, 宮城沖, 福島沖, 茨城沖。右図に示す各地域の赤星のグリッドに配置したテンプレートにマッチした超低周波地震の積算個数を左図に示す。破線は周辺に発生した顕著な地震活動を示す(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])。

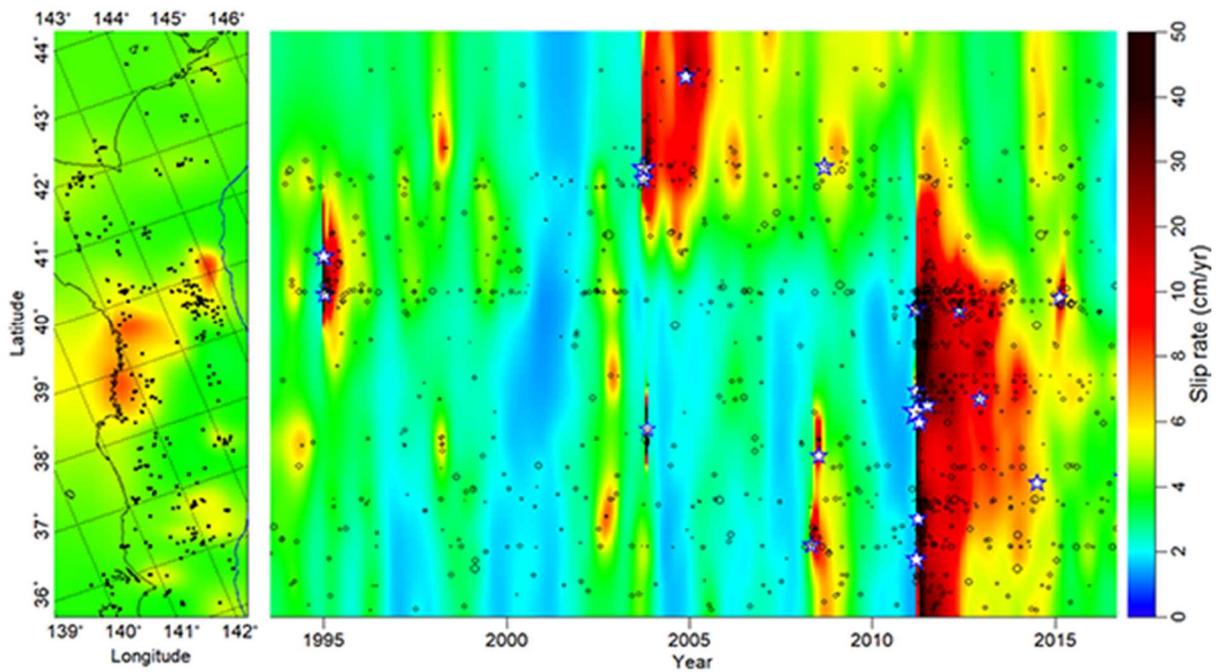


図 11. 繰り返し地震から推定された 1993 年から 2016 年までの滑り速度分布の全期間平均値 (左) と時空間推移 (右)。黒丸は繰り返し地震の震央位置および発生時点, 青星は繰り返し地震の余震を多数伴った M6 以上の地震の震央位置および発生時点を示している (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09])。

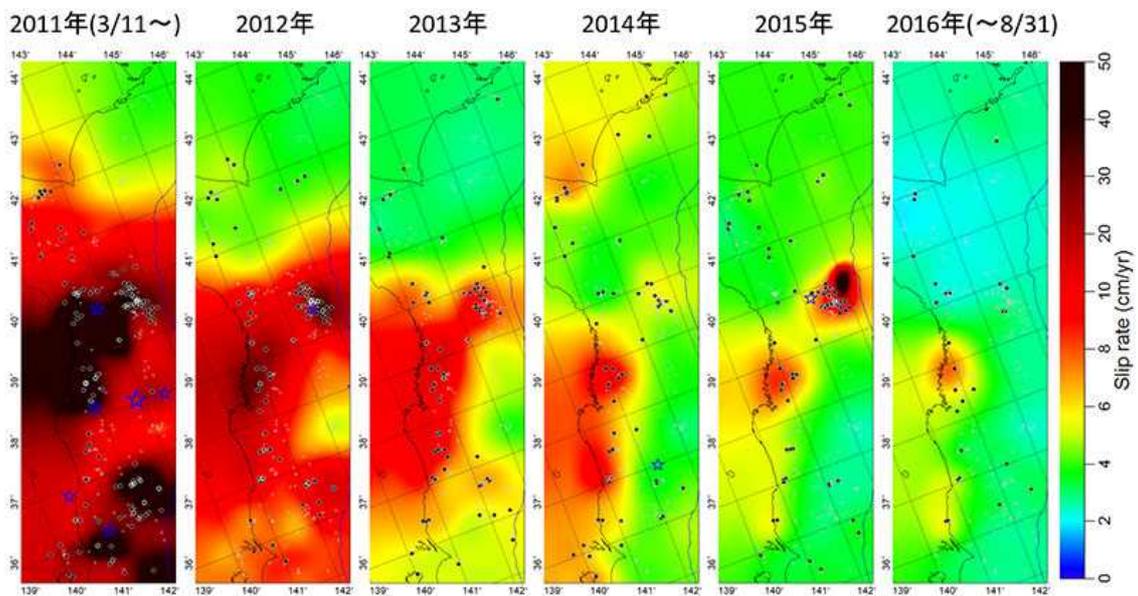


図 12. 繰り返し地震から推定された 2011 年東北地方太平洋沖地震から 2016 年までの滑り速度分布の年平均値の推移。黒点および青星は, 各年に発生した繰り返し地震および繰り返し地震の余震を多数伴った M6 以上の地震の震央位置を表す (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09])。

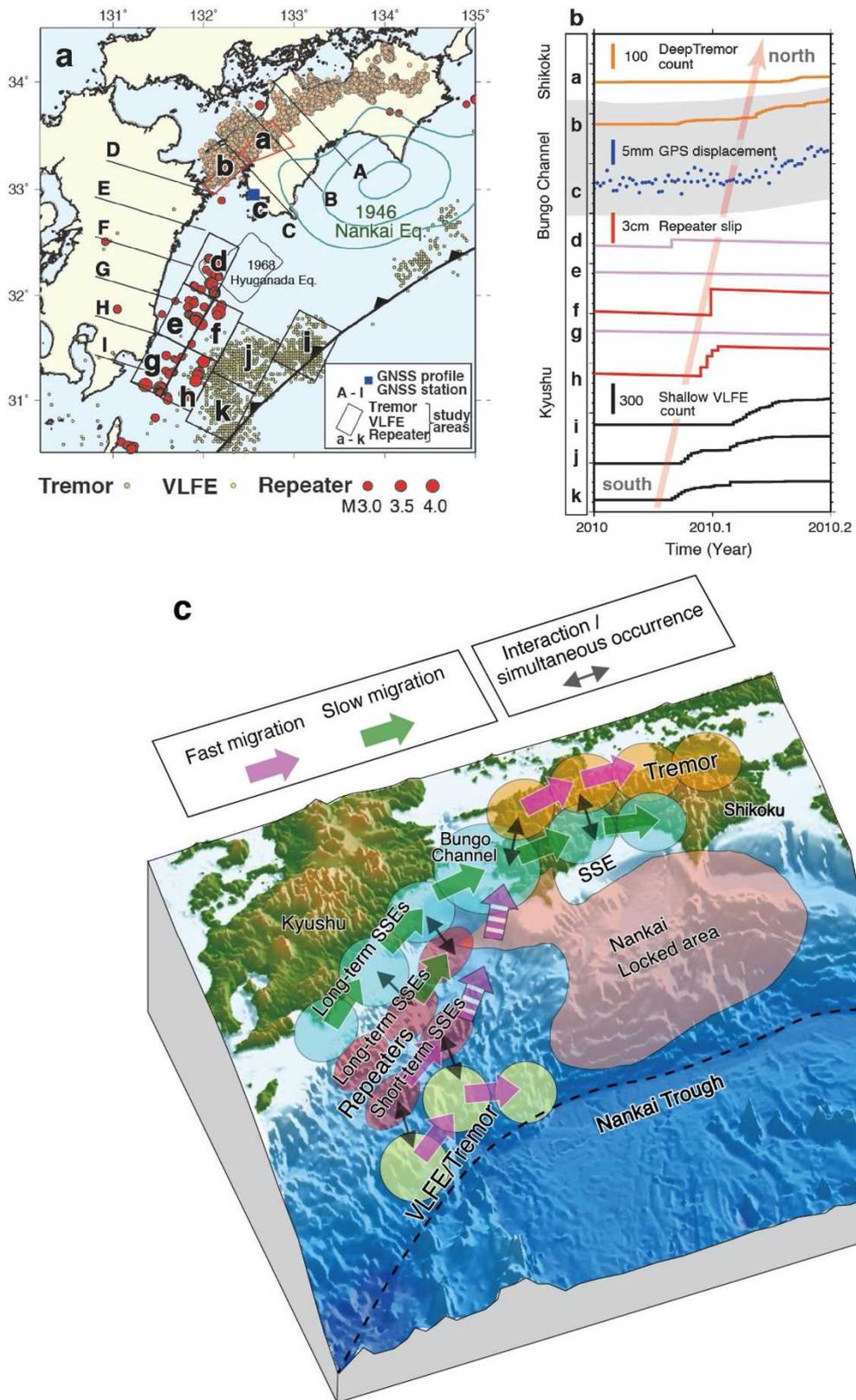


図 13. 繰り返し地震と様々なスロー地震の併合解析で見つかったゆっくり滑りの大規模な移動。(a) 南海トラフでの繰り返し地震 (赤丸) および他のスロー地震 (黄色丸・橙色丸) の分布。(b) 繰り返し地震およびスロー地震から推定される長距離のスロースリップの移動の例。(c) スロースリップ移動のモデル (緑は数年かけた移動, ピンクは1ヶ月程度での移動) (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09])。

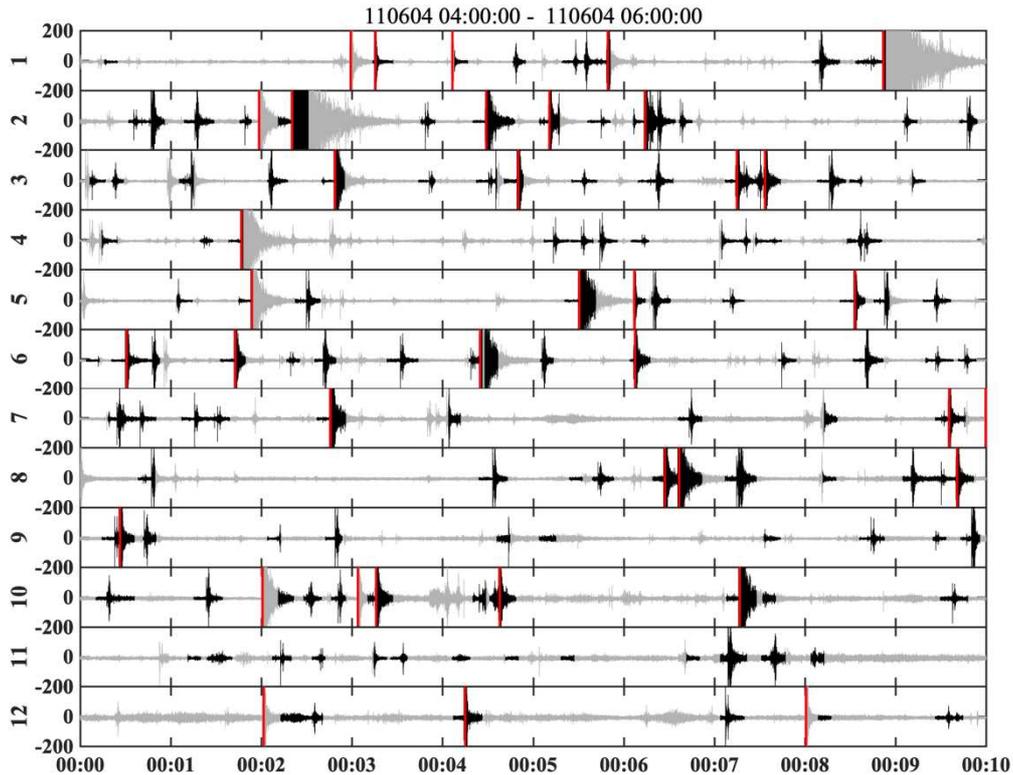


図 14. 満点観測網のある観測点で得られた上下動成分の連続波形記録（2 時間分；250 Hz サンプルング）からのイベント検出。黒線で示した部分は FAST によって類似波形として認定された波形を含む窓を表す。赤線は付近のある定常観測点において、気象庁一元化カタログ中に検出記録が存在するタイミングを表す（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]）。

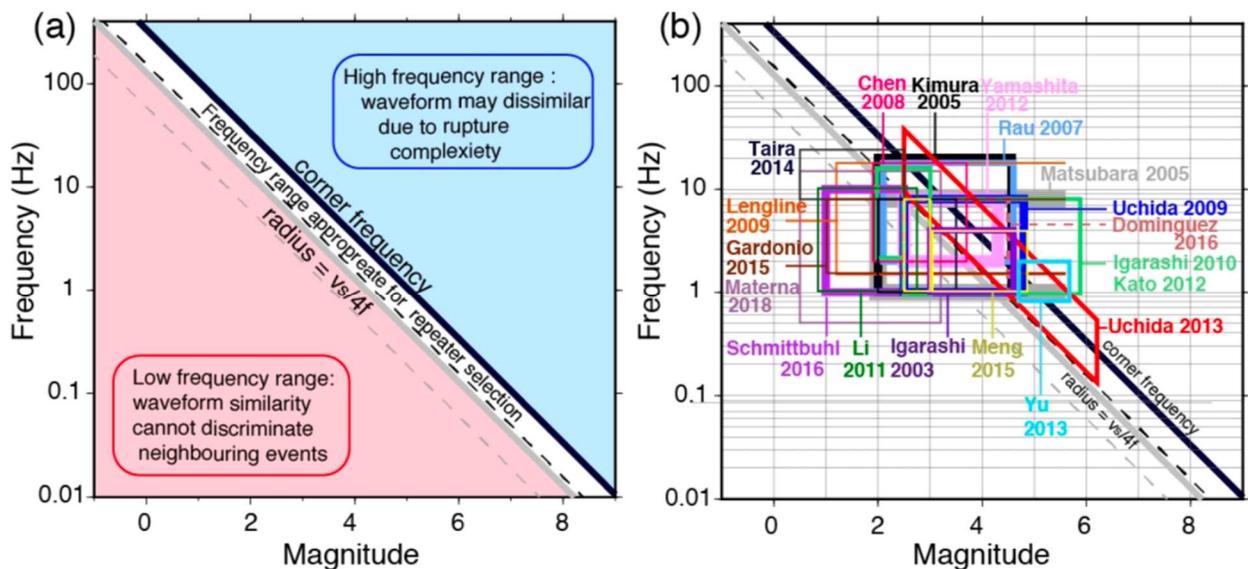


図 15. 繰り返し地震の抽出に用いる周波数帯域の検討。(a) マグニチュードとコーナー周波数および断層サイズを考慮した解析周波数帯。(b) 過去の研究で用いられた解析周波数帯（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]）。

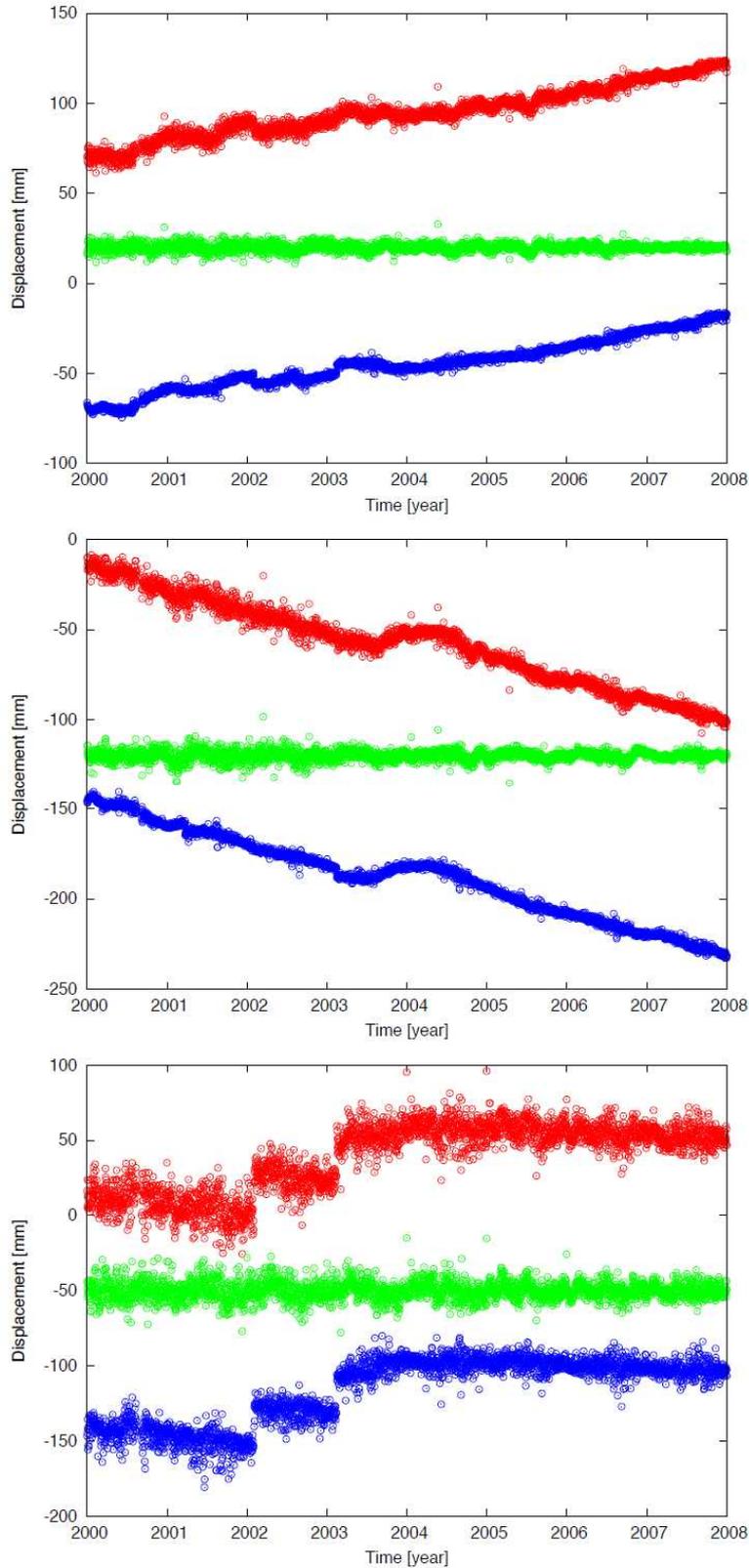


図 16. 観測点 940085 (大分佐伯) の GNSS 座標時系列データ。(上) NS 成分, (中) EW 成分, (下) UD 成分。赤点は元データである F3 解, 緑点は推定された common mode のうち並進成分, 青点はこの観測点に対して求められた common mode 計算値を元データから差し引いたもの。それぞれのトレースは縦軸方向に適当にオフセットさせている (廣瀬, 2019, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])。

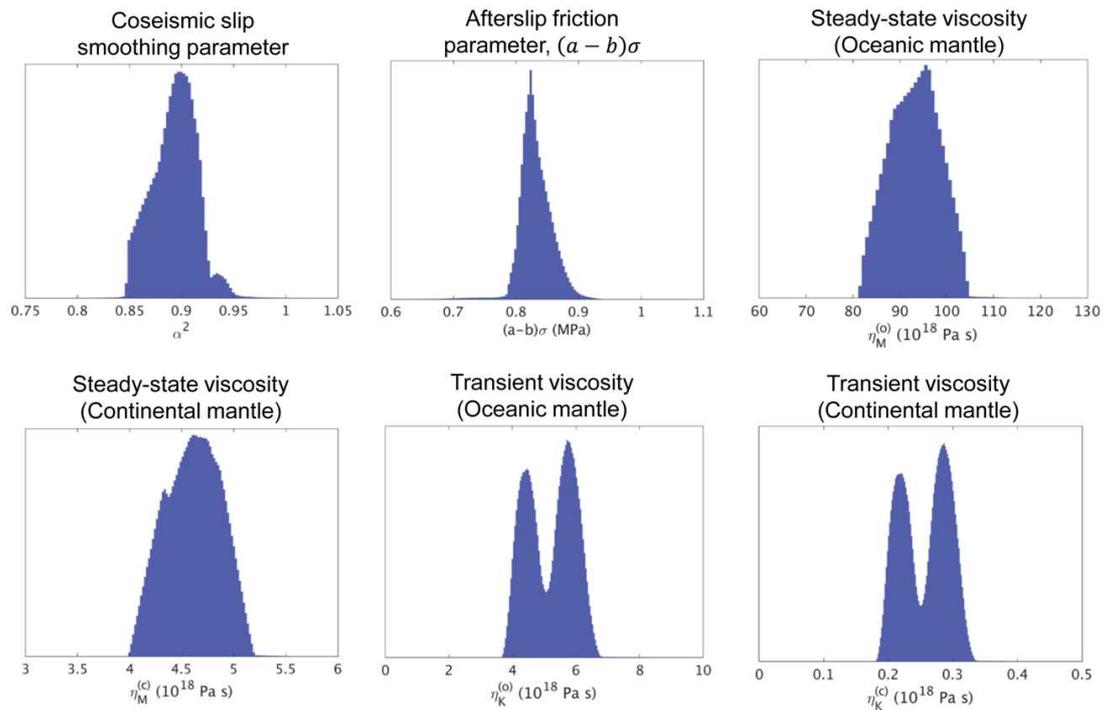


図 17. 粘弾性緩和も考慮したモデルに対するベイズ的データ同化。2011 年東北沖地震の地震時及び地震後 7 年間の地殻変動データを用いて推定された地震時滑り分布に対する平滑化パラメータ、プレート境界の摩擦パラメータ $(a-b)\sigma$ 、海洋・大陸マンタルの steady-state viscosity 及び transient viscosity の事後確率分布（京都大学理学研究科 [課題番号：KUS_01]）。

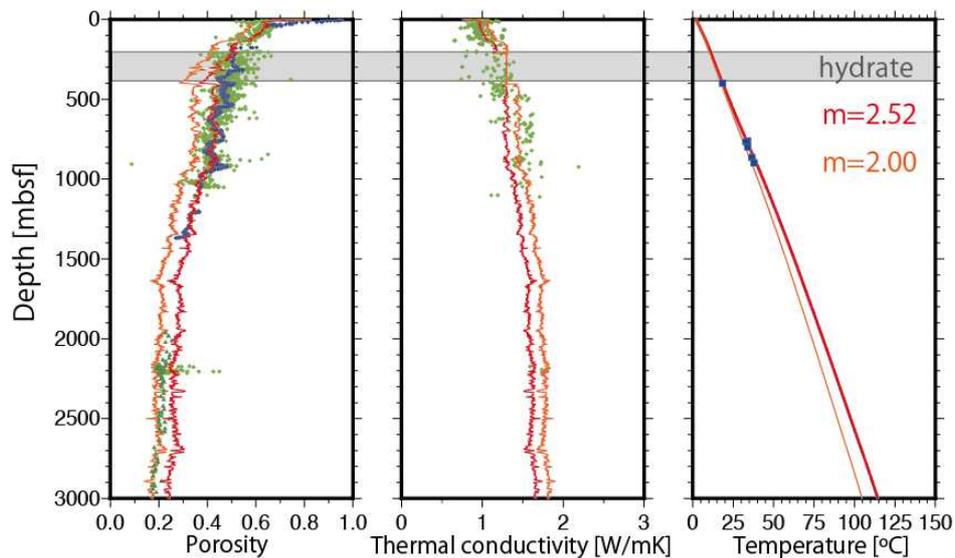


図 18. 掘削ロギングデータから推定された空隙率・温度構造と測定値の比較。赤線と橙線は推定値。ただし、空隙率と電気伝導との変換式に現れるパラメーター m の値が異なる。緑の点は船上の実験室での測定値。青線は密度検層による測定値。青点は孔内に設置された温度計による測定値と BSR による推定値。灰色の領域はハイドレートの存在が確認されており、本手法による推定が不適切な領域（Yabe et al., 2019, 産業技術総合研究所 [課題番号：AIST09]）。

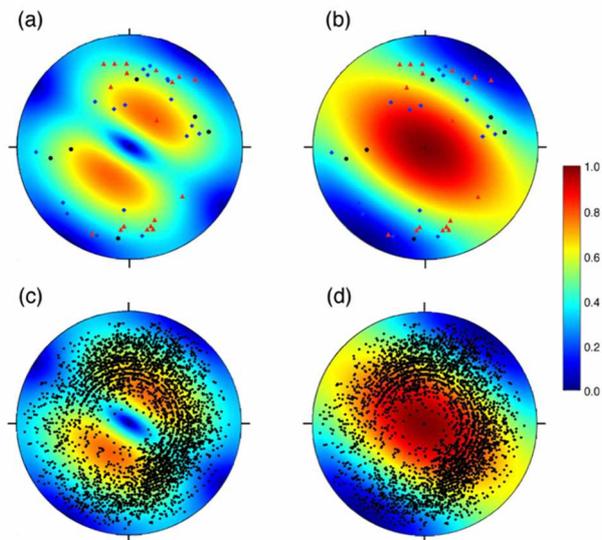


図 19. 愛知県西尾市の観測井の応力場から計算した slip tendency 及び dilation tendency と亀裂の向きを重ね合わせた下半球等積投影図。(a) slip tendency と透水性亀裂。(b) dilation tendency と透水性亀裂。(c) slip tendency と全ての亀裂。(d) dilation tendency と全ての亀裂。2つの tendency において tendency が高い領域と対応する向きの亀裂もあるが、それらの亀裂は必ずしも透水性亀裂ではなく、むしろそれらよりも低い値となる向きの亀裂が高い透水性を示す傾向である（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST09]）。

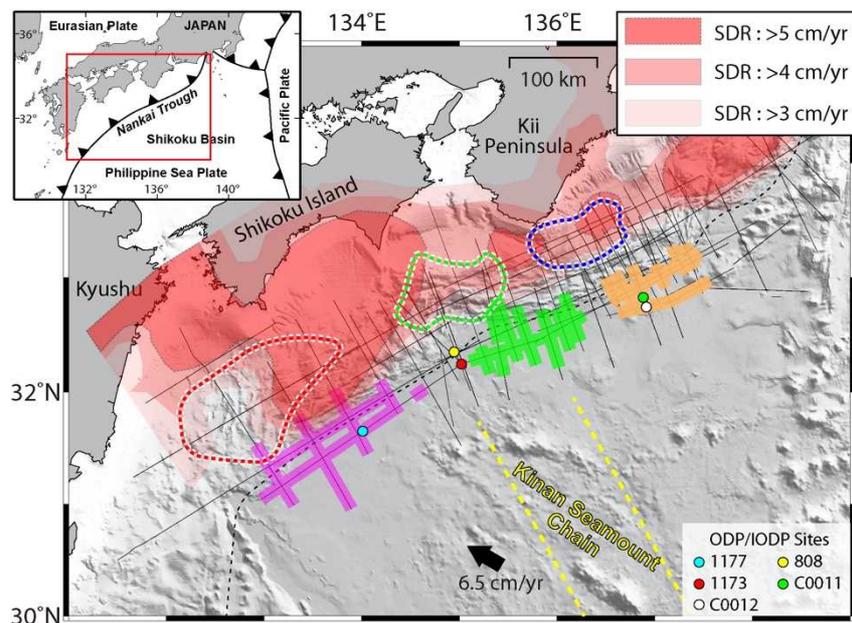


図 20. 南海トラフのタービダイトと固着度の比較。灰色の細線は JAMSTEC が取得したマルチチャンネル反射法地震探査データの測線を示す。MCS 測線上の太いピンク線、緑線、オレンジ線は、四国海盆で同定された西部タービダイト、中部タービダイト、東部タービダイトを示す。太いピンク点線、緑点線、オレンジ点線のポリゴンは、既に陸側へ沈み込んだ西部タービダイト、中部タービダイト、東部タービダイトを示す。海底地殻変動から推定された滑り欠損 (Slip-deficit Rate; SDR) 分布 (Yokota et al., 2016) は透明な赤色エリアで示されている（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12]）。

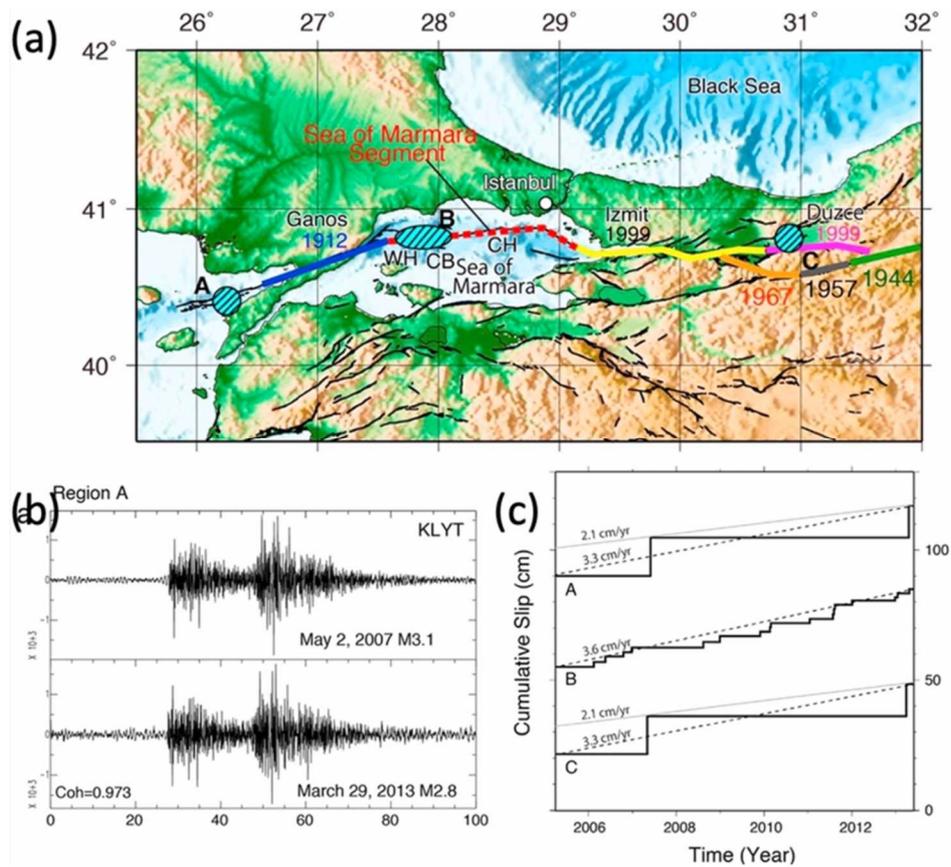


図 21. トルコ、マルマラ海周辺で発見された繰り返し地震発生領域。(a) 繰り返し地震発生領域 A-C。(b) そこでの繰り返し地震の波形例。(c) 3 領域で繰り返し地震から推定したプレート境界のすべりレート (Uchida et al., 2019, 東北大学理学研究科 [課題番号:THK_09])。

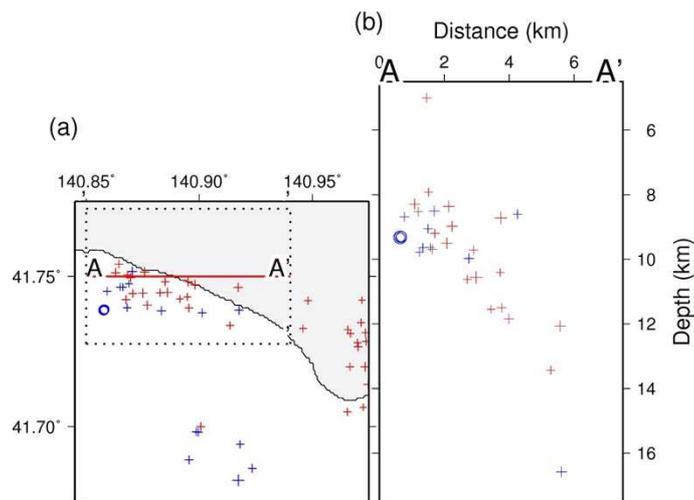


図 22. 震源再決定により求めた函館周辺で発生する通常地震活動と低周波地震の震源分布。青丸で通常地震を示し、十字で低周波地震を表す。低周波地震を表す十字が青色と赤色のものは、それぞれ気象庁一元化震源で低周波地震と通常地震と分類されているもの (東北大学理学研究科 [課題番号:THK_09])。

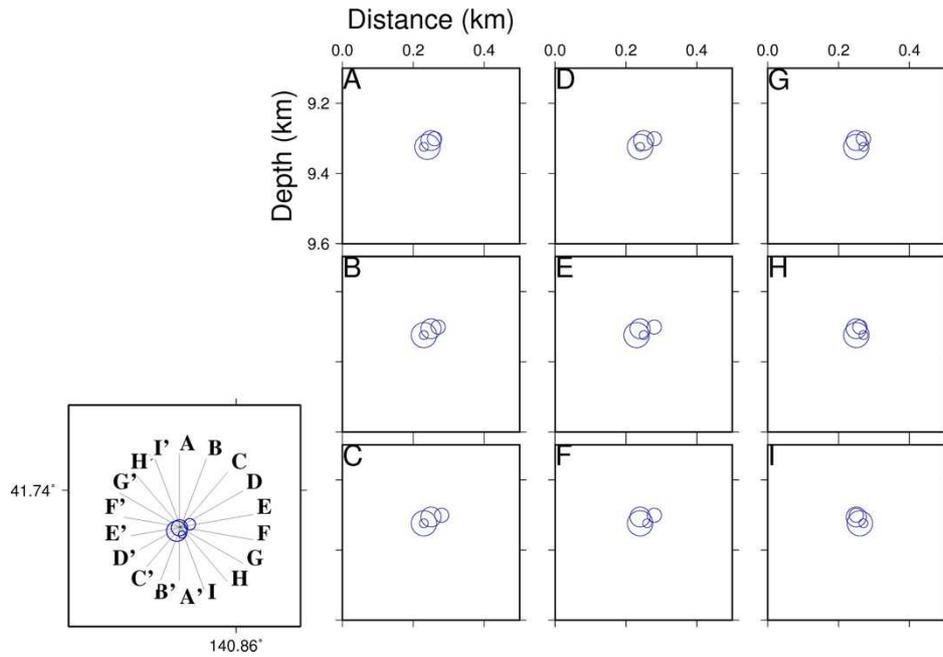


図 23. 函館周辺の低周波地震 (図 22) の近傍で発生している、繰り返し地震の可能性のある通常地震クラスター。丸の大きさを、応力降下量 3MPa を仮定した断層サイズに合わせてプロットした (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09])。

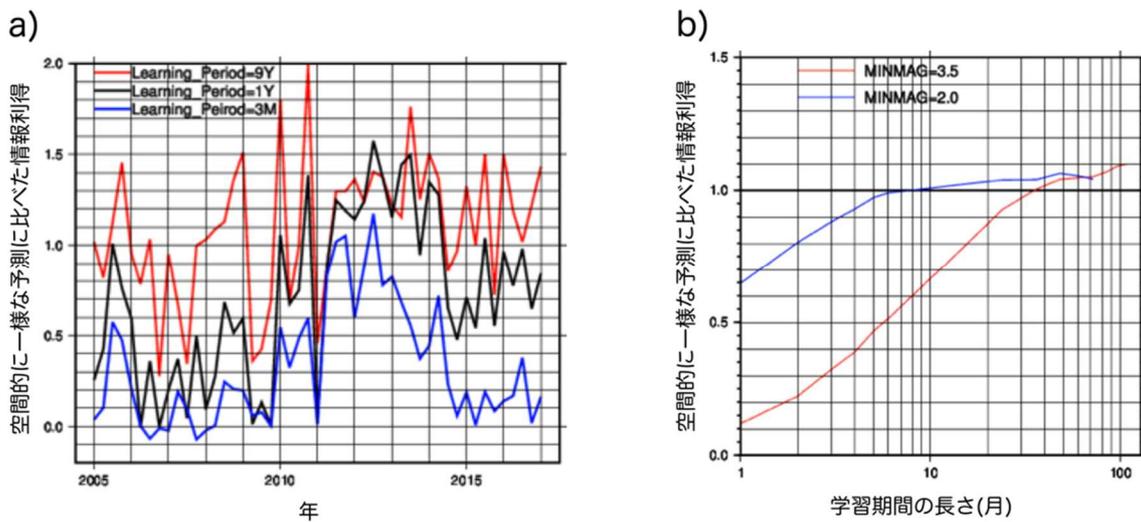


図 24. RIモデルによる関東地域の 3 ヶ月先までの地震予測の成績。a) 成績の推移。学習期間を 3 ヶ月 (青線), 1 年 (黒線), 9 年 (赤線) とした場合それぞれについて示した。b) 学習期間の長さに対する成績の変化。学習に用いる地震の下限を M3.5 (赤線) にした場合と M2.0 (青線) にした場合を示した (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])。

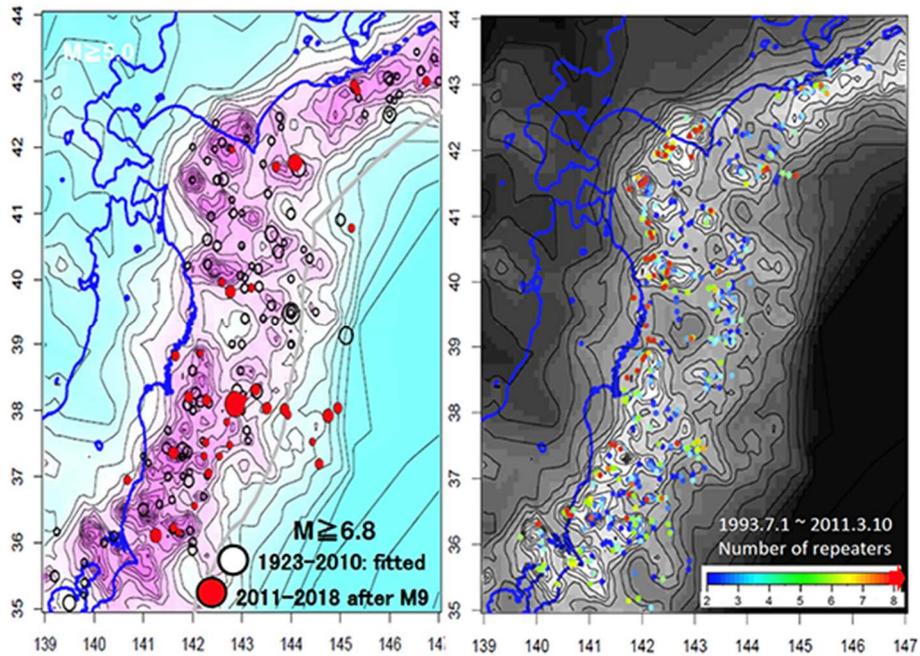


図 25. 階層的時空間 ETAS モデルによる $M \geq 5$ 地震の常時地震活動度（1 日 \times 1 度²あたりの発生率）。常時地震活動度は、約 3 倍ごとの対数等間隔スケールの等高線で示されている。（左図）東北沖地震より前（白丸）と後（赤丸）の大きな地震の震央と比較。（右図）繰り返し地震の震央と比較（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]）。

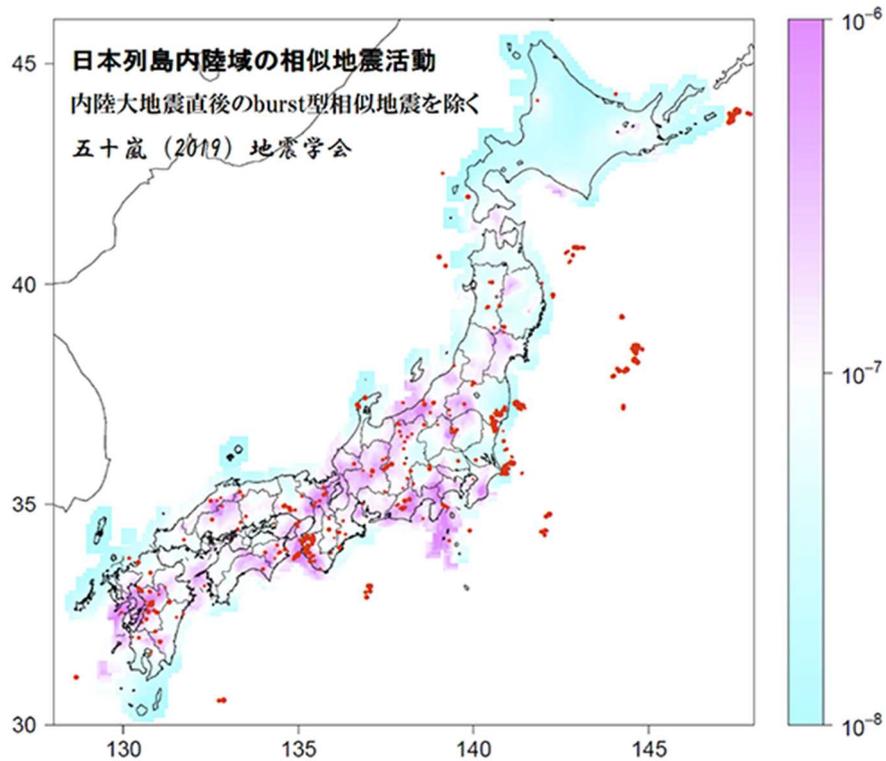


図 26. 階層的時空間 ETAS モデルの $M \geq 4$ 地震の常時地震活動度（カラスケール）と非 burst 型相似地震活動（赤点）の比較。常時地震活動度の単位は、1 日 \times 1 km²あたりの発生率（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_09]）。

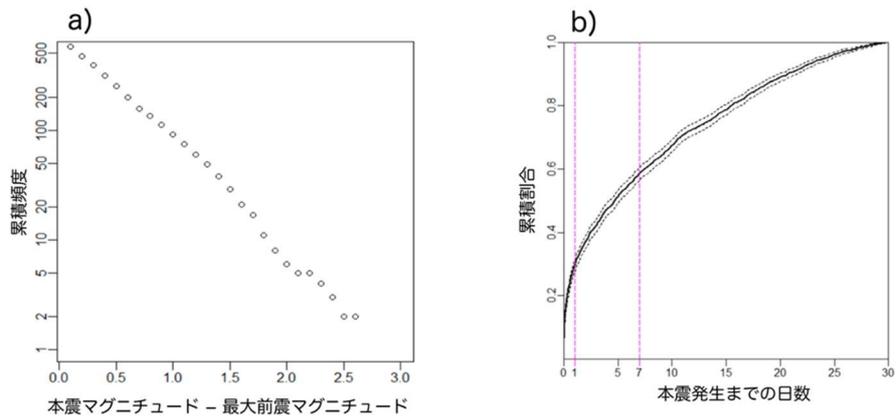


図 27. 前震確率 NO 予測法 (野村・尾形, 2018) の予測対象を簡便に変更するための基礎となる統計分布。a) 本震と最大前震のマグニチュード差の累積分布。b) 前震確率 (30 日確率) 評価時点から本震発生までの期間の累積分布 (黒実線) とその 95%信頼区間 (黒破線)。1 日と 7 日のところに引いた縦の点線は、1 日予測に変換するには 30 日確率に約 0.3 を、7 日予測に変換するには 30 日確率に約 0.6 を、乗じればよいことを示す (野村・尾形, 印刷中より改変, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])。

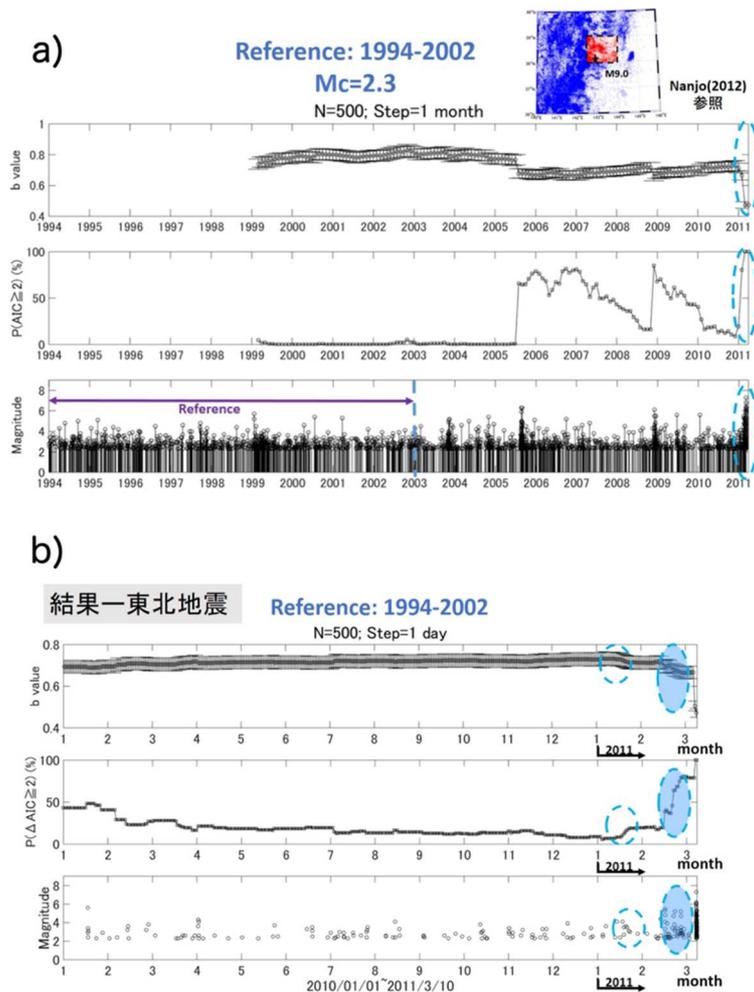


図 28. 2011 年東北地震に先行する期間における、b 値変化の新たな評価パラメタ ($P(\Delta AIC \geq 2)$) の解析例。a) 1994 から 2011 年 M9 地震直前まで。b) 2010 年 1 月 1 日から 2011 年 3 月 10 日まで (千葉大学 [課題番号: CBA_01])。

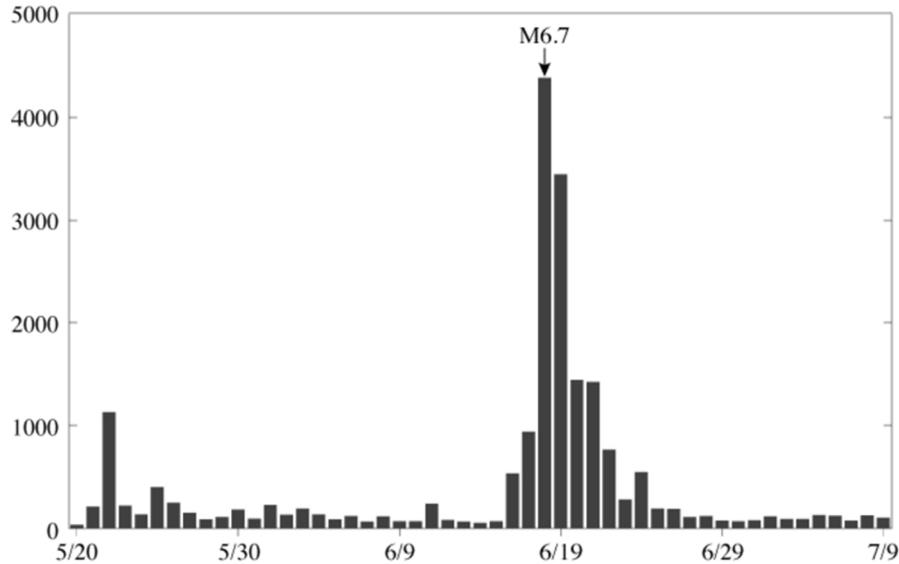


図 29. 2019 年 6 月 18 日 22 時 22 分に発生した山形県沖の地震（M6.7，最大震度 6 強）の前後の「地震雲」に関するツイート数（東海大学 [課題番号：KOB008]）。

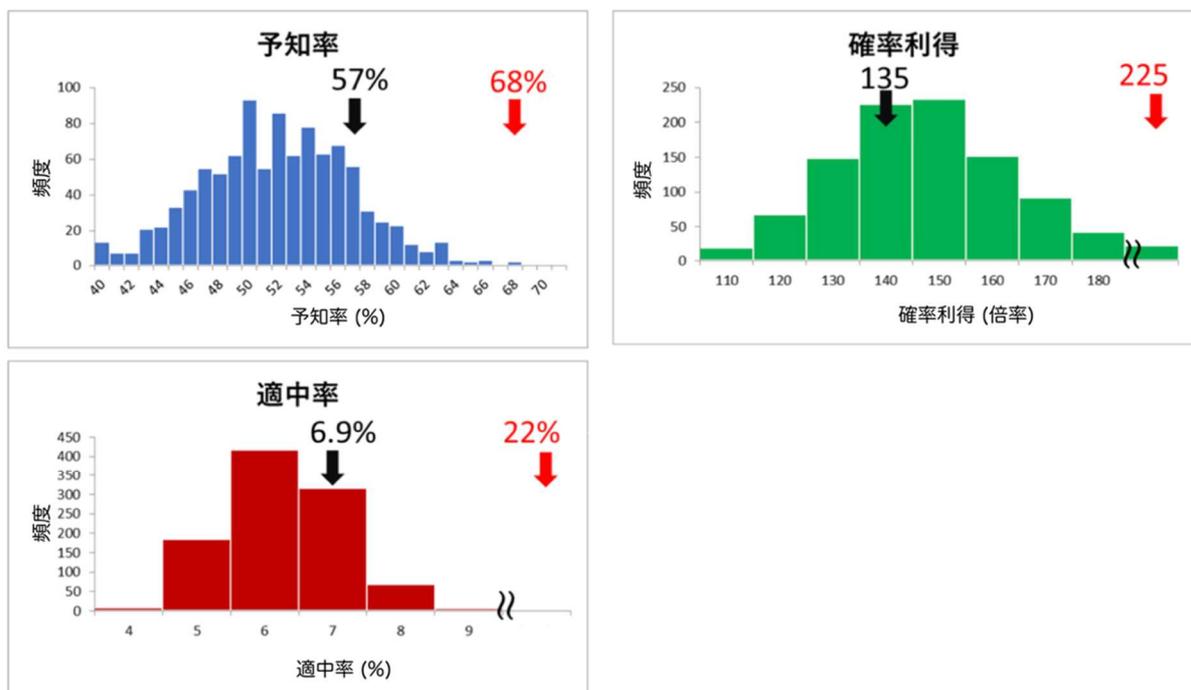


図 30. 伊豆地域の地震活動に対する Maeda (1996) の前震識別法の成績。三宅島の活動があった 2000 年 6-9 月を除いた，1977-2018 年の活動を用いた検討。赤矢印は実データに最適化された前震識別パラメータによる，実データに対する成績。ヒストグラムは，実データから求めた時空間 ETAS モデルによって合成した 1000 通りのカタログについて，合成カタログに最適化した前震識別パラメータを用いた場合の成績分布。黒矢印は，合成カタログに最適化されたパラメータによる，最適化に用いた合成カタログに対する予測の成績（前田ら，印刷中より改変，東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]）。

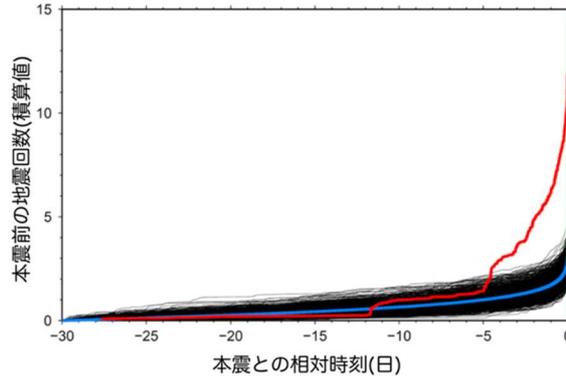


図 31. 伊豆地域の地震活動に対する本震前の地震活動の加速。赤太線は前震候補とみなす(余震ではないと判断された)群発地震活動内の累積数を, 本震発生時刻をそろえて(ゼロとして)示した。多数の黒細線は, 図 30 で用いた 1000 個の ETAS 合成カタログを用いた場合で, 青太線は黒細線を平均したもの。いずれも, 前震の回数は, 本震 1 個あたりの数に正規化してある(前田・他, 印刷中より改変, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])。

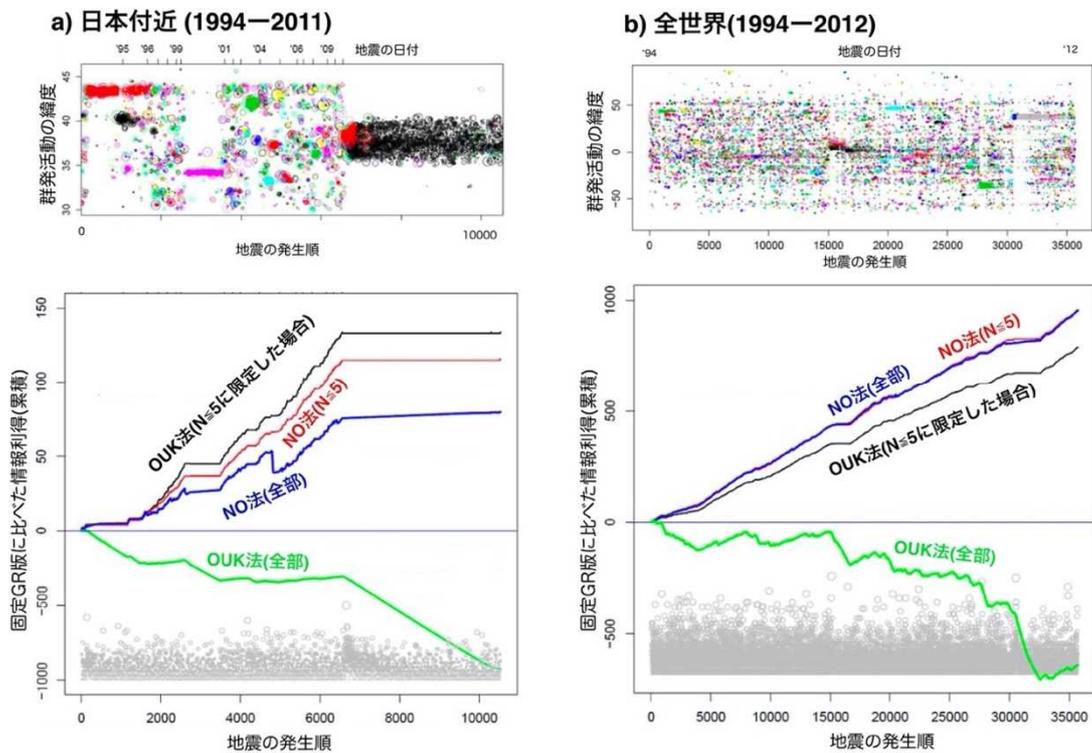


図 32. 履歴依存の地震サイズ分布 (Ogata et al., 2018) を取り入れることによる前震確率予測の成績改善。上段: 「前震らしさ」の評価対象となった群発活動の場所と時期を示し, 同じ群発活動に属するものは同じ色で示してある。下段: 成績。このグラフが右上りであるほど, 地震サイズ分布が時間的に不変 (GR 則) と仮定した場合より優れた予測ができています。右下りの場合は, かって予測性能が悪くなったことを示す。a) 1994-2011 の気象庁カタログを用いて日本付近の M4 以上の地震活動を用いた結果。b) 1994-2012 の全世界の M4.7 以上の地震活動を用いた結果 (野村・尾形, 印刷中より改変, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])。

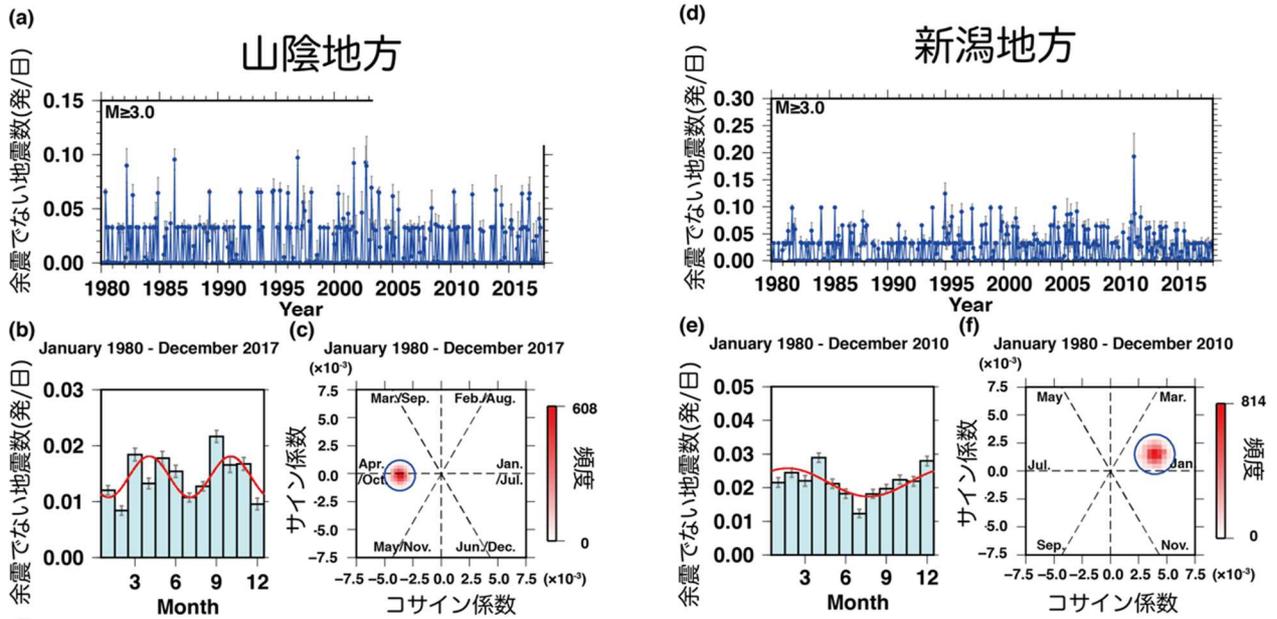


図 33. 階層的時空間 ETAS を用いて余震活動を除いた地震活動度に見られる季節性 (Ueda and Kato, 2019b より改変, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])。

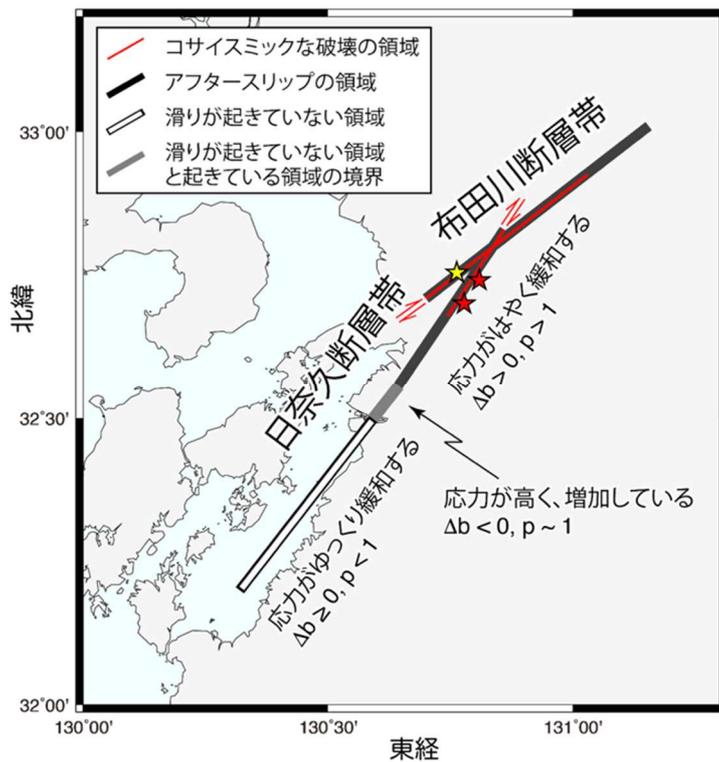


図 34. 2016 年熊本地震震源断層周辺での最近 (2017 年 1 月から 2019 年 3 月まで) の地震活動 (b 値の変化と p 値の空間分布) に対する解釈 (Nanjo et al., 2019 より改変, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])。

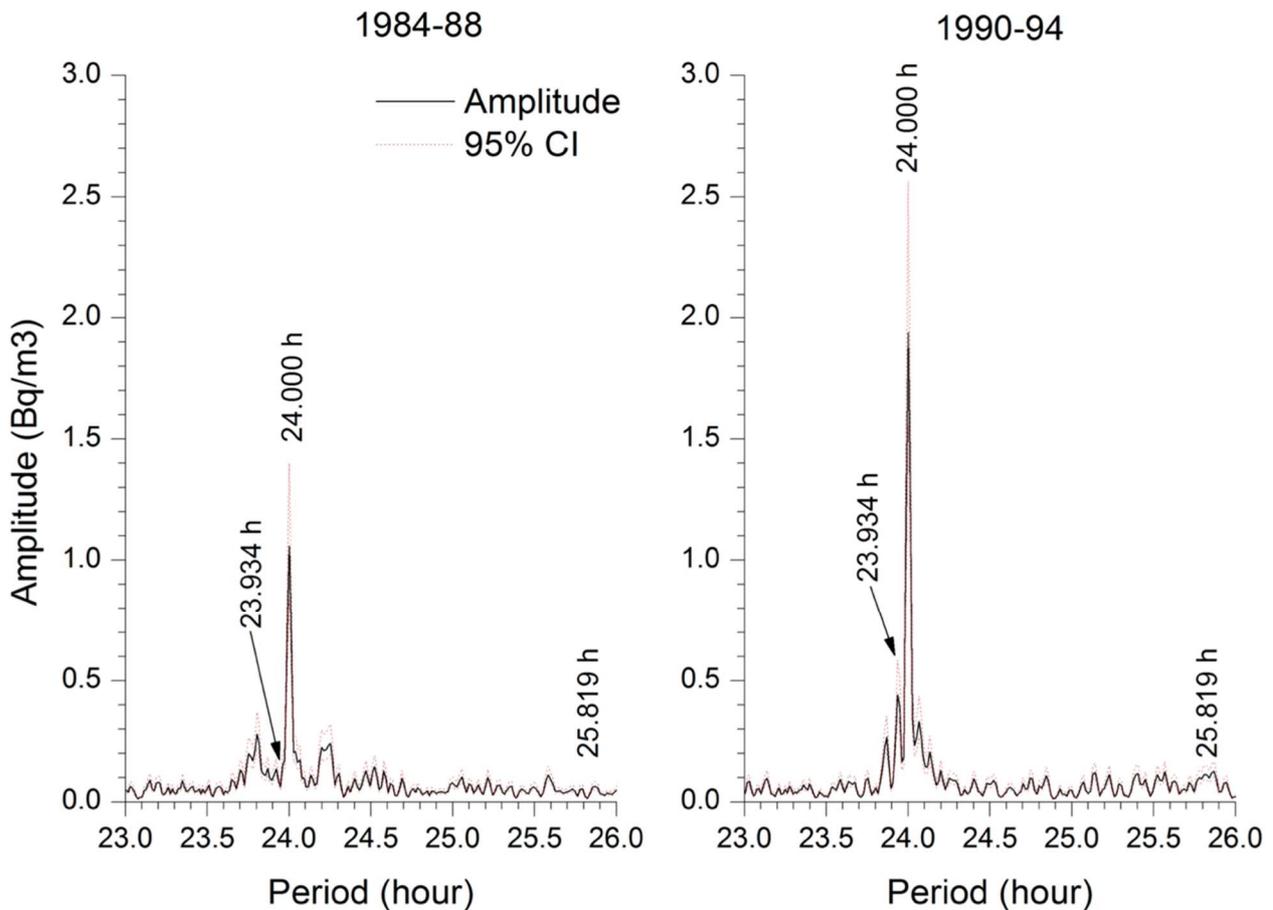


図 35. 神戸薬科大学で観測された大気中ラドン濃度変動データのスペクトル。実線は振幅スペクトル，点線はその 95%信頼区間。左図：1984-1988 年。右図：1990-1994 年（東北大学 [課題番号：THK_10]）。

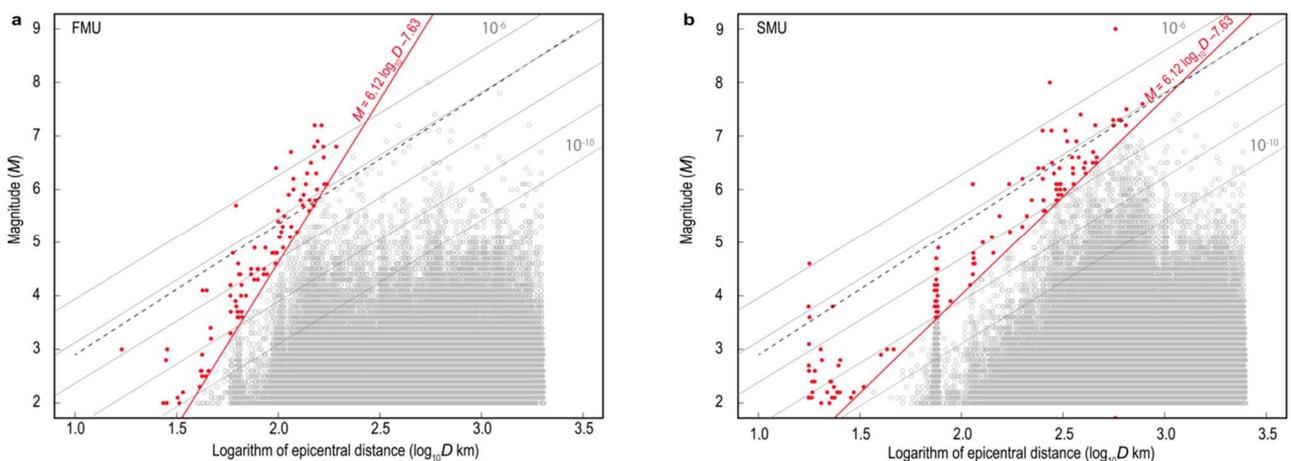


図 36. 大気中ラドン濃度変動に寄与する地震の規模と震源距離。福島県立医科大学（左），札幌医科大学（右）。赤丸が大気中ラドン濃度変動に寄与した地震，中ぬき灰丸が大気中ラドン濃度変動に寄与しない地震。赤線が閾値，黒破線が地下水位変動に寄与した地震の閾値，灰実線は地殻歪を表す（東北大学 [課題番号：THK_10]）。

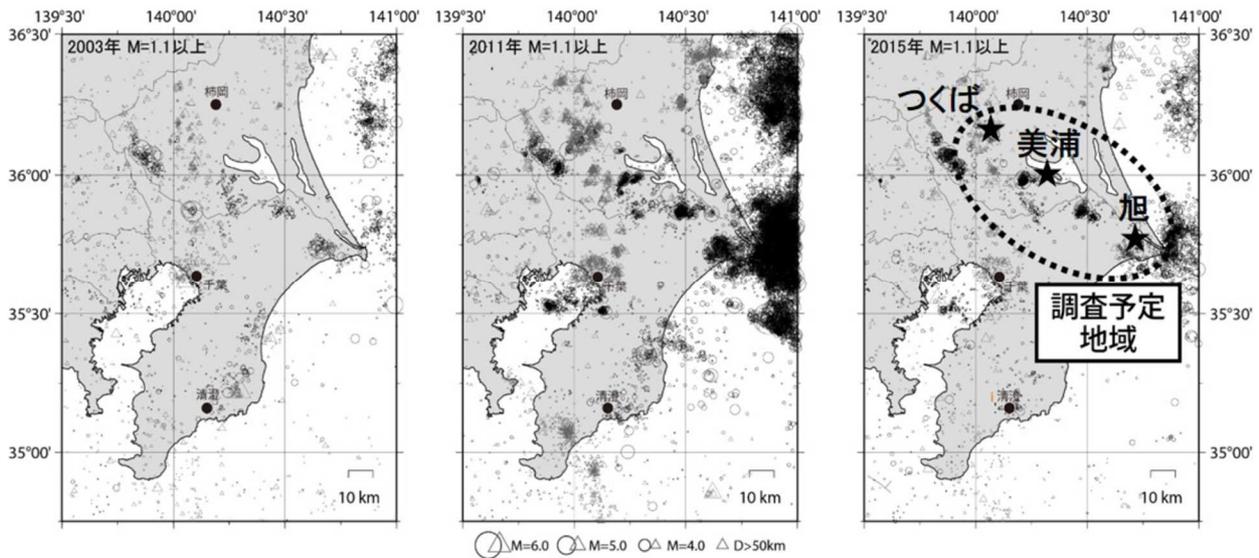


図 37. 地中ラドン濃度ネットワーク観測と地震活動度の変化。(左：2003 年 (2011 年東北地震前)，中：2011 年，右：2015 年 (2011 年東北地震後))。旭 (既存観測点)，美浦 (R1 年度に設置した観測点)，つくば (R2 年度設置候補地) (千葉大学 [課題番号：CBA_01])。

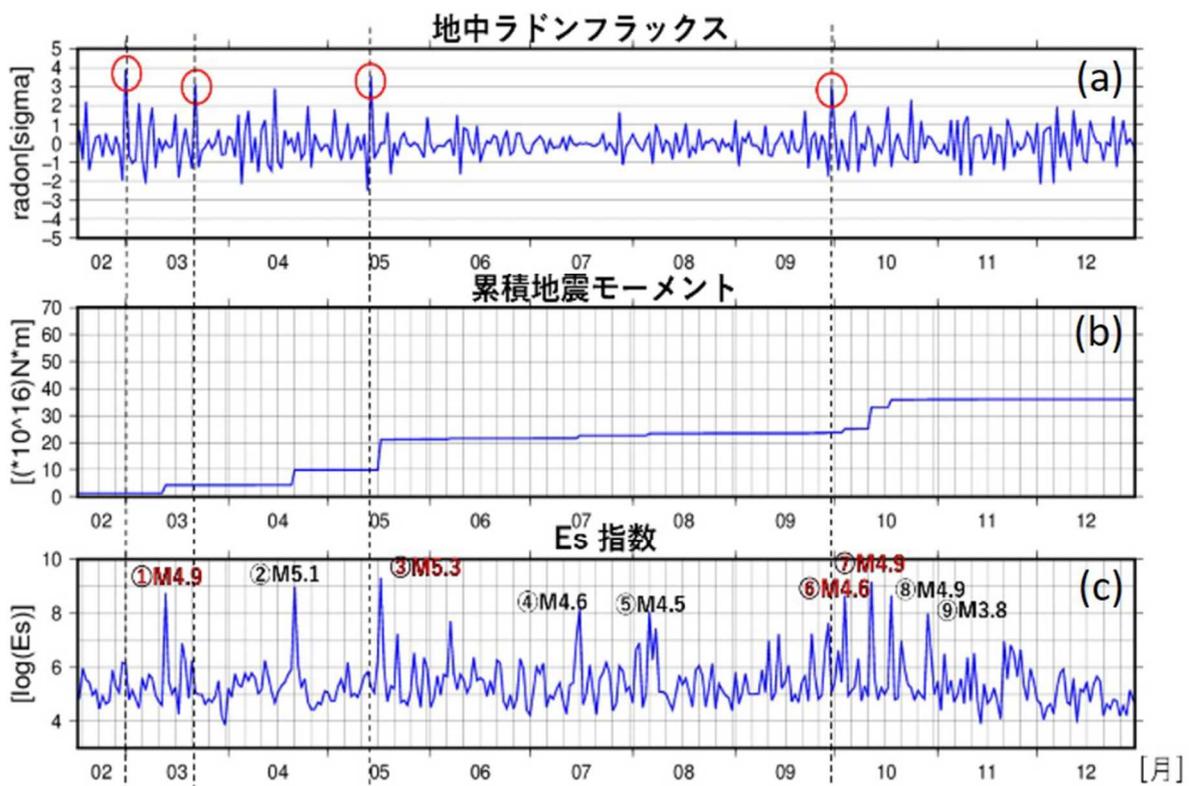


図 38. 旭観測点における地中ラドンフラックスの変動と旭観測点から半径 50km で発生した地震活動の関係 (2018 年 2 月 13 日-2018 年 12 月 31 日)。(a) 規格化された 1 日積算値の Rn フラックス，(b) 累積地震モーメント，(c) Es 指数；1 日間に周辺でおきた地震のエネルギーを観測点への近さで重みづけしたものの総和 (例えば，Han et al., 2017) (千葉大学 [課題番号：CBA_01])。

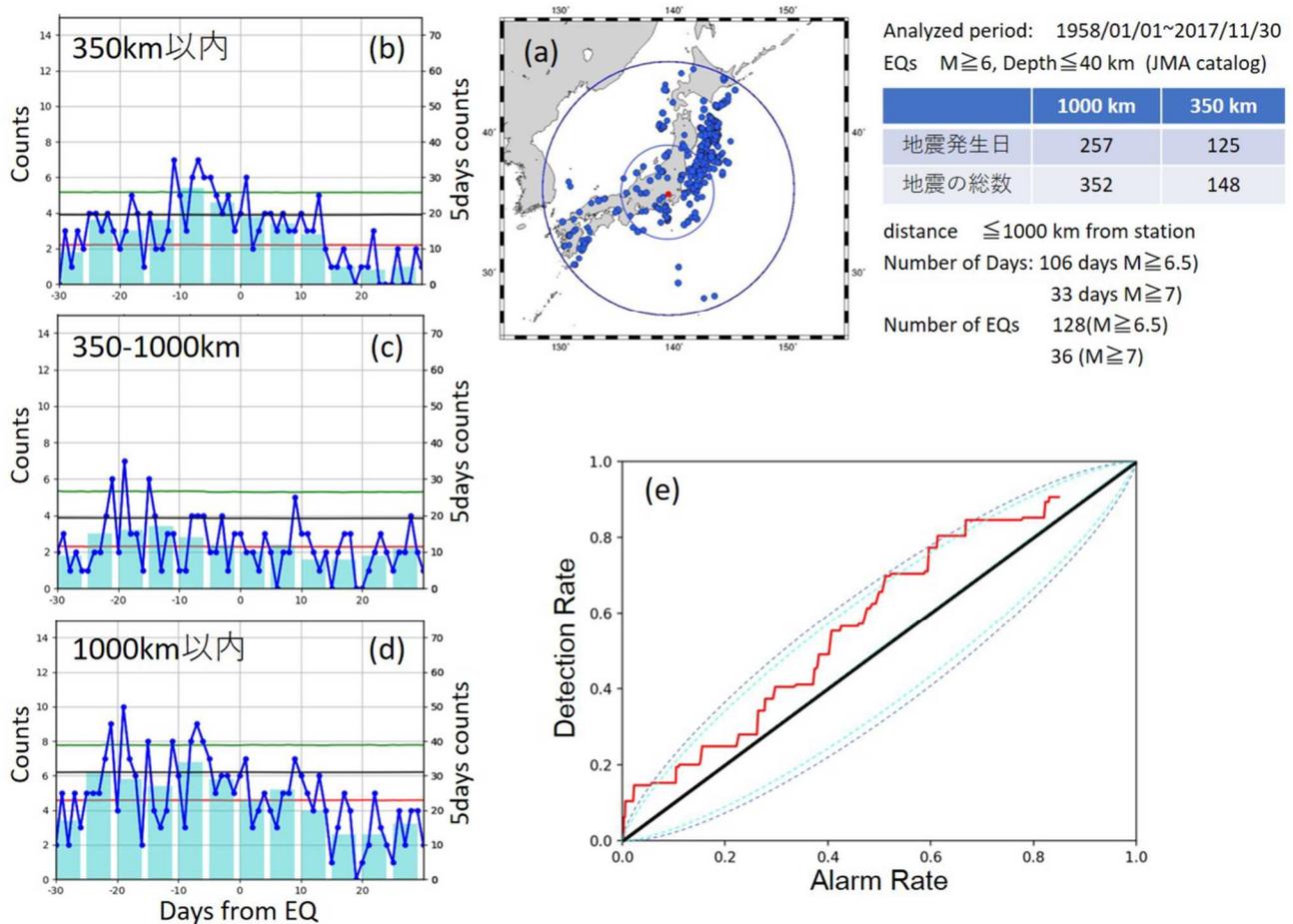


図 39. 国分寺イオノゾンデ (1958/01/01-2017/11/30) 観測値の異常と周辺の地震発生の比較。(a) 比較対象地震。イオノゾンデから 350km 以内, 1000km 以内。(b) SEA 解析による統計的有意性の調査結果 (350km 以内)。緑線: 5 日間カウントの有意レベル, 黒線: 1 日カウントの有意レベル, 赤線: 5 日カウントのランダム平均。5 日間カウントでは半径 350km 以内の地震 1-10 日前に異常が多いという傾向が有意である。(c) SEA 解析による統計的有意性の調査結果 (350-1000km 以内)。有意性なし。(d) SEA 解析による統計的有意性の調査結果 (1000km 以内)。5 日間カウントにおいて半径 1000km 以内では地震前 6-10 日間において正の有意な異常を示す。(e) イオノゾンデの異常から 5-10 日後を警報 ON とする試行予測を, 異常判定の閾値をさまざまに変えて行った ROC 解析の結果。横軸は対象期間に対する警報 ON の期間が占める割合 (アラームレートは「警告率, またの名を予知率」の意味に使われることが多いので, 本当はアラームフラクションとラベルすべき), 縦軸は対象地震のうち警報 ON の期間におきた地震の割合, すなわち予知率。水色と青色の点線は 90%および 95%信頼区間 (千葉大学 [課題番号: CBA_01])。

1 (4) 火山

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

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

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

長期間における火山現象とそれに伴う災害を正確に把握するためには、地質データ等を収集して調査・分析を行い、データベースを整備・拡充することが重要である。マグマの状態と噴火様式との関連性について詳しく調べるために、爆発的噴火と非爆発的噴火（溶岩流噴火）を数多く起こしている富士火山の噴出物の解析を進めている。本年度は、7試料についてマグマの含水量と温度との関係を決定した結果、高温かつ低含水量のマグマが溶岩流噴火を、低温かつ高含水量マグマが爆発的な噴火をするという傾向を見出した（図1左）。また、マグマ上昇速度の評価のために石基組織の解析を進め、S-8以降の爆発的噴火に、斜長石微結晶の数密度や石基ガラス量のシステムティックな変化があることがわかった（図1右）（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_02]）。

草津白根山の噴火履歴の解明および噴火ポテンシャル評価に関する研究を進めている。本年度は、白根火砕丘群の噴出物層序調査と放射性炭素年代測定を行い、約6000年前頃には白根火砕丘群の主要部が形成されていたこと、約2000年前頃までマグマ噴火が発生していたことを明らかにした（亀谷・他、2020）。白根火砕丘群東斜面でのテフラ層序調査と、水蒸気噴火テフラのXRDによる粘土鉱物解析により、過去1万年間における熱水変質帯の物理化学環境の変遷が明らかになった。また、テフラ5層準で古地磁気年代を得ることができ、そのうち3層準で放射性炭素年代と調和的な年代値となった（図2）（富山大学 [課題番号：TYM_01]）。

阿蘇火山新期中岳溶岩およびアグルチネートの古地磁気および岩石磁気測定を行い、古地磁気永年変化曲線との比較から、5ka, 4.5ka, 3.5ka前後の3つの異なる活動があったことを明らかにした（公募研究、熊本大学 [課題番号：KOB003]）。

恵山火山の地質図原稿のとりまとめと、火山地質図作成のための雌阿寒岳火山、日光白根火山及び秋田焼山火山でのトレンチ掘削を実施した。御嶽火山では地表踏査に基づく噴火履歴調査を実施した。九重火山と蔵王火山では10万年前より若い噴出物のK-ArとAr/Ar年代データの比較研究を行った。また、20万分の1スケールの日本火山図公開のためのビューア開

発とデータ作成を行い、約440の第四紀以降に活動した火山に関するデータ公開を進めた（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST03]）。

（２）低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

低頻度で大規模な火山噴火現象の発生履歴、規模等を解明するためには、史料・考古データ、地質データ等の分析を着実に進める必要がある。伊豆大島では、玄武岩質の大規模噴火である安永噴火（Y1）および15世紀噴火（Y4）について、噴出物の層序を広範囲で再構築し、層序毎の噴出物の組織・化学分析を行った。その結果、Y1については、爆発的噴火のテフラが3つのユニットに区分でき、それぞれ噴出率・噴煙高度が異なること、岩石組織もそれに対応して変化することなど、噴火推移の詳細がわかってきた。上位の主要な降下スコリアについては、古文書から流出時期が制約されている溶岩流との層序関係から、従来の考えよりも半年ほど遅い1778年11月中旬に噴出したことが明らかとなった。このような噴火推移の特徴は、噴火発生後の噴出物モニタリングが噴火推移・規模の予測において重要であることを示唆する。浅間山や霧島山においても大規模噴火堆積物の地質調査と噴出物の解析を開始し、層序・層相の解析、層序毎の粒子物性データを取得し、岩石組織の定量化、全岩・鉱物化学組成分析を進めた（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_03]）。

カルデラ噴火については、噴火準備段階からの活動の推移・履歴を把握するとともに、その推定精度を上げる手法の開発・改良を進める必要がある。大量のマグマの蓄積と噴火の準備過程の時間スケールを明らかにするために、ウラン系列放射非平衡を用いた物質科学的研究を進めている。本年度は、対象試料のU-Th放射非平衡の測定に必要なTh同位体比（ $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ）の分析確度を向上させるための様々な試みを行い、測定方法における問題を解決した。また、先行研究によってマグマプロセスがよく理解されている支笏のカルデラ形成噴火（約44 ka）を対象に、噴出物のU-Th放射非平衡測定を行った。その結果、支笏カルデラの珪長質マグマは、マントル由来の玄武岩マグマの結晶分化作用ではなく、地殻物質の部分融解によって生成したことや、斑晶に富み未分化な特徴をもつ噴出物はUに過剰な放射非平衡を示し、マントル起源の玄武岩マグマの分化に由来することが明らかになった。また、約114kaの洞爺カルデラ噴出物について野外調査、試料採取、全岩主要元素・微量元素濃度測定や、EPMAによる鉱物・ガラスの組成分析を行った（北海道大学 [課題番号：HKD_02]）。

屈斜路カルデラ内の中島火山の地質調査を行い火山地質図を作成するとともに、中島火山の噴火史を確立した。また、屈斜路カルデラのポストリサージェンス活動により形成されたアトサヌプリ溶岩ドームについて、地質調査、化学分析や年代測定をもとに、火山活動の詳細を明らかにした（公募研究、室蘭工業大学 [課題番号：KOB004]）。

鬼界カルデラにおいて調査・探査航海を実施し、鬼界アカホヤ噴火を中心とした堆積物・岩石試料の採取を行い、地質学的・物質科学的解析を進め、アカホヤ噴火の総噴出物量の精密推定を目指している（図3）（神戸大学 [課題番号：KOB001]）。

（４）火山現象の解明とモデル化

火山噴火の様式は、マグマが火道を上昇する際に経験する脱ガス過程に支配される。火道内の脱ガスの記録が噴出物の塩素濃度の不均質に残されている可能性があることを提案した。また、塩素は拡散が遅いため、他の揮発性成分が失われたり均質化した後においても脱ガス時の拡散性の不均質を保持しているため脱ガス履歴が分かることを示した（Yoshimura et

al., 2019, 北海道大学 [課題番号: HKD_03])。

桜島火山1914年大正噴火軽石を用いて、火道浅部での減圧結晶化を模擬した低水蒸気圧下での結晶化実験を行い、ナノスケールの結晶の晶出条件を調べ、火道浅部においてマグマが経験した圧力、温度、および定置時間を制約できる可能性を指摘した(図4)(東北大学大学院理学研究科 [課題番号: THK_04])。

火山の比較研究に活用することを目的として、地震波干渉法をもとに、位相の不明瞭な火山性地震・微動の震源決定法を開発した。伊豆大島の火山性地震に開発した震源決定法を適用して、2km程度の精度で震源決定できること、また、仮定する内部減衰パラメータの深さの絶対値が大きく変化する振幅法に比べ深さ精度が高いことが分かった(図5)(Permana et al., 2019)。干渉SARデータ解析から有珠山と浅間山の小規模な地殻変動の抽出に成功した。有珠山においては10mm/year以上の沈降が観測され、過去の噴火に伴って生じた溶岩ドームの熱収縮によるものと考えられる(図6)。浅間山においては、山体北西側と南東側に最大6mm/yearの変動が観測され、これらは山頂付近の熱水活動によるものと山体不安定によるものと解釈された(Wang et al., 2019, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_07])。

航空機搭載型赤外カメラシステム(STIC)のセンサ技術を応用したポータブルな画像分光装置(G-STIC)を開発した(Jitsufuchi, 2019, 防災科学技術研究所 [課題番号: NIED01])。

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

箱根火山大涌谷の噴気観測から、2015年6月の噴火前後にてヘリウム同位体比の変化を検出した。地震活動の増加後に噴火し、その後同位体比異常が最大となったことから、その原因について、間隙圧の上昇が地震と噴火を誘発し、噴火に伴い流体が移動したためだと解釈した(東京大学大気海洋研究所 [課題番号: AORI02], Kagoshima et al., 2019, 公募研究, 東京大学大気海洋研究所 [課題番号: KOB013])。

草津白根火山で広帯域MT観測を実施し、3次元比抵抗構造を推定し、湯釜直下から本白根山にかけて深さ1~3 kmに広く存在する低比抵抗域を見つけた。そして、低比抵抗は導電体であり火口湖の水および温泉の源泉に対応していると解釈した(Matsunaga et al., 2020, 東京工業大学 [課題番号: TIT_03])。

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

山梨県富士山科学研究所は、富士山の溶岩の年代決定や層序対比を行うため、他の手法により年代決定している溶岩および火砕岩について、古地磁気測定を実施した。その結果、古地磁気方位から、鷹丸尾溶岩は西暦600-700年、剣丸尾第1溶岩は西暦1000年と推定された。また、宝永山に含まれる火山弾の古地磁気方位をもとに、宝永山が西暦1707年に形成されたと推定した。一方、トレンチ試料を用いて、陸上植物起源の脂肪酸と炭化木片の¹⁴C年代測定を行い比較した結果、両者の年代範囲は誤差の範囲内で概ね一致した。このことから、炭化木片が産出しない土壌試料でも、脂肪酸を利用した年代推定が可能であることが示され

た（山梨県富士山科学研究所 [課題番号：MFRI_01]）。東京大学地震研究所は、霧島山について18世紀享保噴火を含む歴史時代の個々の噴火の推移や中長期履歴をレビューするとともに、代表的噴火の堆積物の露頭調査を行い分布や層区分について検討した。また、享保噴火の噴出物の解析を進め、降下軽石における茶・灰色および白色の2タイプの軽石の全岩化学組成が2011年噴火と同様のトレンドを有し、温度・組成差のある2端成分マグマが関与したことなど、基礎的な岩石学的情報を収集した（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_03]）。富山大学は草津白根火山において、また産業技術研究所は、雌阿寒岳火山、日光白根火山、秋田焼山火山、御嶽火山において、活動履歴解明のための噴火履歴調査を進めた（富山大学 [課題番号：TYM_01]、産業技術総合研究所 [課題番号：AIST03]）。

イ. モニタリングによる火山活動の評価

各種観測データに基づく、数年～数10年スケールの中期的な火山活動評価を行うにあたり、火山活動推移モデルと活動評価手法に関する研究集会を合同で開催した。課題参画機関の代表者から各火山の活動についての報告を受け、ニュージーランドで開発されたVUI（火山活発化指数）を日本の火山に適用するための具体的な検討を始めた。十勝岳を対象とし、観測データからVUI計算シートの評価項目と基準を決め暫定的にVUIを評価した。また、（橋本・他、2019）の磁気モーメント変化率と変化源深度とVUIの対応を明らかにした（北海道大学 [課題番号：HKD_04]、京都大学大学院理学研究科 [課題番号：KUS_02]）。

御嶽山2014年噴火後の山頂付近の局所的な沈降がInSARデータから検出され、GNSSデータ解析と合わせて二つの異なる深さの収縮圧力源が求まり、異なる時定数の指数関数で近似された。そして噴煙写真から推定される水蒸気量の変化との比較から、深部収縮源の急速な減衰は、噴火の開始時の激しい流体の放出による急速な減圧を反映している一方、浅部収縮源の緩やかな収縮は噴火に対しての寄与は小さいことが示唆された（Narita et al., 2019, 京都大学大学院理学研究科 [課題番号：KUS_02]）。

簡易型トラバース測定装置を定期船に装着して口永良部島の二酸化硫黄放出率測定を継続しており、2020年1月11日からの噴火活動に先行して1月はじめから二酸化硫黄放出量の増加が明らかになった。2018-2019年の噴火活動期に比べ、火山ガス放出率が高いことから、脱ガスに関与するマグマ量やその位置などに違いがあると推定される（東京大学大学院理学系研究科 [課題番号：UTS_06]）。

2019年に噴火した浅間山と阿蘇山を対象に、噴火中の火山ガスの化学組成およびその変化の推定のために火山灰から抽出した水溶性物質の化学分析を実施した。そして、浅間山2019年噴火では新鮮なマグマの関与はないため、水蒸気噴火によって既存の火砕物が放出されたと推定された（Yaguchi et al., 2020, 気象庁 [課題番号：JMA_05]）。

北海道の複数の火山においてGNSS観測、火口域の地温観測、噴気および温泉水の地球化学的観測、地下水位観測を行った。そして、十勝岳において2006年から続いていた火口域の膨張が2018年に収縮傾向に変化し、2019年は停滞したことが分かった。また、地震活動と温泉水のCl濃度などに相関が認められたが、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く、島弧のマグマ水と類似した値を示したことが分かった（Takahashi et al., 2019, 北海道立総合研究機構地質研究所 [課題番号：HR0_01]）。

箱根火山の噴気の採取と化学分析を行い、CO₂/H₂S比、He/CH₄比およびN₂/He比の時間変化と火山性地震の発生数の比較を行った。そして、2015年5月～8月の群発地震に先行してこれ

らの比の値が増加し、地震活動の低下とともに比の値が低下したことから、マグマ起源ガスの浅部熱水系に対する増加が群発地震を起こしたと解釈された(図7)(Ohba et al., 2019, 公募研究, 東海大学 [課題番号: KOB011])。

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

国内の活動的火山について、活動推移のモデル化や分岐判断指標の作成をするため、研究集会を開催し観測データ等を検討した。その結果、国内外の多くの火山の地震活動について、地震発生と噴火との相関性、大地震による応力場と噴火の発生との関連性を見出すことができた(西村, 2019)。また、国内の多くの火山の地殻変動の継続期間と変動量について噴火および噴火未遂のときの比較、継続期間と変動量の比較を行い、噴火の場合は地殻変動の継続期間が181日以上が多いことが分かったが、変動量と噴火および噴火未遂の関係性は見いだせなかった(高木, 2019, 東北大学大学院理学研究科 [課題番号: THK_11])。

シナブン火山の噴火活動において、水蒸気噴火からマグマ噴火への推移における地盤変動および地震活動との関係を明らかにした(図8)(京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI06])。

既存の火道系にマグマが貫入し噴火が発生する場合と、別のところに新たにマグマが貫入する場合とに分けてマグマの貫入速度を事象分岐の条件として噴火事象の経験的分岐論理を構築した。また、相対重力測定データおよび地盤変動データ解析から、桜島北岳直下において質量蓄積が起こっていることが明らかになった(図9)(井口・他, 2019, 京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI07])。

蔵王火山について、最新活動期の活動履歴をもとに噴火推移予測図を作成した。そして、前兆現象のみで終息する場合、水蒸気噴火に至る場合、さらにマグマ噴火に至る場合、大規模噴火に至る場合を想定すると、1894年以降の事例から、前兆現象のみあるいは水蒸気噴火に至って終息した場合のみで、今後の活動として同様の推移をたどる可能性が高いことを示した(伴・他, 2019, 公募研究, 山形大学 [課題番号: KOB015])。

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

噴火発生直後に、火山噴出物などの災害誘因を高精度かつ即時的に予測する手法を開発することは重要である。今年度は、近年の代表的事例である霧島新燃岳2018年噴火における噴火様式の変化と噴出物の岩石組織との対応関係を明らかにし、噴出物をもとにした現象の把握や予測への活用について検討した。また、新燃岳2018年噴火の推移を踏まえた霧島火山の噴火事象系統樹の作成を開始した。噴出物分布にもとづく噴出量推定においては、従来の手法を実際の現象で試行し評価しつつ、最適な手法を開発することが急務である。本年度は、2019年8月に浅間山で発生したごく小規模な噴火の降灰調査を行い、噴出量の推定や火山灰構成物の解析に基づく噴火様式の推定を、課題参加機関および関係機関で連携して実施し、迅速に速報値を公表した。また、噴出物モニタリングや噴出量・構成物の迅速解析における課題について課題参加者間で問題意識を共有し、その手法の高度化や、噴火対応時における効率的かつ機動的な調査の実践方法、データ共有方法、噴火事象分岐判断への活用について議論を行った(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_17])。

5. 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

2回の火山噴火予知連絡会本会議を開催し、全国の火山活動の状況についての検討を行った。また、霧島山部会および草津白根山部会を開催して、霧島山および草津白根山の火山活動について、それぞれ検討を行った（気象庁〔課題番号：JMA_08〕）。

(3) 研究基盤の開発・整備

桜島においてミュオグラフィ観測を行い、2017年終わってから2018年はじめにかけて噴火活動が昭和火口から南岳火口に推移した時期に火口底において密度上昇を検出し、プラグ状の物体が形成されたと解釈した（図10）（Oláh et al., 2019, 東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_21〕）。

八丈島の火山土地条件図および数値データを整備し、箱根山の火山土地条件調査を実施して数値データを整備した。また、岩手山、秋田駒ヶ岳、日光白根山の火山基本図および数値データを整備した（国土地理院〔課題番号：GSI_10〕）。

全国50活火山の常時監視観測を継続するとともに、草津白根山への広帯域地震計の配備と全国7箇所への監視カメラの配備を行った。また、口永良部島、阿蘇山、桜島にて二酸化硫黄ガス観測を実施したほか、ドローンによる可視・熱赤外観測を草津白根山・霧島山・阿蘇山・口永良部島で実施した（気象庁〔課題番号：JMA_12〕）。

海域火山（薩摩硫黄島、口永良部島、口之島、諏訪之瀬島、横当島、西之島、南硫黄島、福徳岡ノ場、硫黄島）の定期巡回監視を実施した（図11）。また、海域火山基礎情報調査「海徳海山」、「伊豆大島」の成果を公表した（海上保安庁〔課題番号：JCG_04〕）。

これまでの課題と今後の展望

「火山」計画推進部会には、41の研究計画課題に加えて、該当年度の公募研究は9課題あり、地震火山観測研究計画において最大の計画推進部会である。そこで、課題間の連携やそれぞれの課題における研究の深化を進めるきっかけとなるように2019年5月にキックオフミーティングを開催した。「火山活動の事象分岐の条件・論理を明らかにし、火山活動推移モデルを構築し、発災の原因である火山噴火を予測すること」が最上位目標であり、該当する2（5）火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測を最関連項目とする課題（東北大学大学院理学研究科〔課題番号：THK_11〕）が2020年1月に研究集会を開くとともに、項目2（5）の直近下位に位置づけられる項目2（4）中長期的な火山活動の評価の主要2課題（北海道大学〔課題番号：HKD_04〕、京都大学大学院理学研究科〔課題番号：KUS_02〕）が2019年12月に合同研究集会を行った。初年度であるため、それぞれの目的にて研究集会を行ったわけであるが、両方の研究集会に関わっている参加者が多いこともあるため、次年度以降は項目2（4）と2（5）の連携がより意識される方向に進むであろう。

この一年においては顕著な火山災害は無かったが、これまでの活動からすれば今期の計画中に国内の火山で災害をおよぼす噴火はあると考えるのが自然である。そういった噴火が発生した場合は、集中的に調査・観測による研究体制を強化するために、「火山」計画推進部会は地震・火山噴火予知研究協議会企画部・戦略室と連携し、特別研究促進費による研究の立ち上げと実施を主導する。同時に、「火山」計画推進部会は次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの火山噴火緊急観測部会と連携し、内閣府の火山防災に関わる調査企画委員

会が検討してきた研究の方向性を踏まえた現地調査・観測の実施に貢献する。

成果リスト

- Aizawa K., W. Kanda, Y. Ogawa, A. Yokoo, M. Iguchi (2009), Shallow resistivity changes of Sakurajima volcano from magnetotelluric continuous observation, CA 研究会2010年論文集, 80
- 伴雅雄, 及川輝樹, 山崎誠子, 後藤章夫, 山本希, 三浦哲 (2019), 近代的噴火観測事例のない火山での噴火推移予測: 蔵王火山の例, 火山, 64, 131-138, doi:10.18940/kazan.64.2_131
- Goto, Y., T. Danhara, A. Tomiya (2019), Catastrophic sector collapse at Usu volcano, Hokkaido, Japan: failure of a young edifice built on soft substratum, Bull. Volcano., 81, 37, doi:10.1007/s00445-019-1293-x
- Goto, Y., A. Tomiya (2019), Internal structures and growth style of a Quaternary subaerial rhyodacite cryptodome at Ogariyama, Usu volcano, Hokkaido, Japan, Front. Earth Sci., 7, 66, doi:10.3389/feart.2019.00066
- 橋本武志, 宇津木充, 大倉敬宏, 神田径, 寺田暁彦, 三浦哲, 井口正人 (2019), 非マグマ性の火山活動に伴う消磁及び地盤変動のソースの特徴, 火山, 64, 103-119, doi:10.18940/kazan.64.2_103
- 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, 64, 33-51, doi:10.18940/kazan.64.2_33
- 伊藤順一 (2019), 岩手火山, 一本木原岩層なだれ堆積物の¹⁴C ウィグルマッピング年代と崩壊堆積物の特徴: 活火山における小規模な表層崩壊堆積物, 火山, 64, 153-167, doi:10.18940/kazan.64.3_153
- Jitsufuchi, T. (2019), Development of an optical multispectral remote sensing system for measuring volcanic surface phenomena -Promotion Project for Next Generation Volcano Research B2(subtopic2-2), J. Disast. Res., 14, 5, 728-743, doi:10.20965/jdr.2019.p0728
- Kagoshima, T., Y. Sano, N. Takahata, H. Lee, T. Lan, T. Ohba (2019), Secular variations of helium and nitrogen isotopes related to the 2015 volcanic unrest of Mt. Hakone, central Japan, Geochem. Geophys. Geosys., 20, doi:10.1029/2019GC008544
- 亀谷伸子, 石崎泰男, 勝岡菜々子, 吉本充宏, 寺田暁彦 (2020), 草津白根火山, 白根火砕丘群, 弓池マールおよび逢ノ峰火砕丘の岩石学的特徴, 地質学雑誌, 印刷中.
- Kaneko, T., F. Maeno, A. Yasuda (2019), Observation of the eruption sequence and formation process of a temporary lava lake during the June-August 2015 Mt. Raung eruption, Indonesia, using high-resolution and high-frequency satellite image datasets, J. Volcanol. Geotherm. Res., 377, 17-32, doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.03.016
- 草野有紀, 石塚吉浩 (2020), トレンチ調査に基づく日光白根火山1400年間の噴火履歴, 地質調査研究報告, 71, 1-18, doi:10.9795/bullgsj.71.1
- Maeno, F., S. Nakada, M. Yoshimoto, T. Shimano, N. Hokanishi, A. Zaennudin, 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, 27-39, doi:10.20965/jdr.2019.p0027
- Matsunaga, Y., W. Kanda, S. Takakura, T. Koyama, Z. Saito, K. Seki, A. Suzuki, T. Kishita, Y. Kinoshita, Y. Ogawa (2020), Magmatic hydrothermal system inferred from the resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 390, 106742, doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.106742
- Minami, Y., T. Ohba, S. Hayashi, Y. Saito-Kokubu, K. Kataoka (2019), Lahar record during the last 2500 years, Chokai Volcano, northeast Japan: Flow behavior, sourced volcanic activity, and hazard implications, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 387, 106661, doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.106661
- Miura, D., R. Furukawa, K. Arai (2019), Late Pleistocene-Holocene Volcaniclastic Ejecta Along the Southern Apron of the Esan Volcanic Complex, Japan, *J. Disaster Res.*, 14, 755-765, doi:10.20965/jdr.2019.p0755
- Nakada, S., F. Maeno, M. Yoshimoto, N. Hokanishi, T. Shimano, A. Zaennudin, M. Iguchi (2019), Eruption Scenarios of Active Volcanoes in Indonesia, *J. Disaster Res.*, 14, 40-50, doi:10.20965/jdr.2019.p0040
- Narita, S., M. Murakami, R. Tanaka (2019), Quantitative relationship between plume emission and multiple deflations after the 2014 phreatic eruption at Ontake volcano, Japan, *Earth Planet. Space*, 71, 145, doi:10.1186/s40623-019-1124-5
- 西村太志 (2019), 噴火発生頻度の時空間的特徴, *火山*, 64, 53-61, doi:10.18940/kazan.64.2_53
- Ohba, T., M. Yaguchi, K. Nishino, N. Numanami, Y. Daita, C. Sukigara, M. Ito, U. Tsunogai (2019), 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, *Earth Planet. Space*, 71:48, doi:10.1186/s40623-019-1027-5
- Oláh L., H. K. M. Tanaka, T. Ohminato, G. Hamar, D. Varga (2019), Plug formation imaged beneath the active craters of Sakurajima volcano with muography, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 10417-10424, doi:10.1029/2019GL084784
- Permana, T., T. Nishimura, H. Nakahara, E. Fujita, H. Ueda (2019), Reliability evaluation of volcanic tremor source location determination using cross-correlation functions, *Geophys. J. Int.*, 220, 1300-1315, doi:10.1093/gji/ggz523
- 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*, 64, 121-129, doi:10.18940/kazan.64.2_121
- 田島靖久, 中田節也, 長井雅史, 前野深, 渡邊篤志 (2019), 霧島火山群, えびの高原硫黄山の2018年4月の小噴火, *火山*, 64, 147-151, doi:10.18940/kazan.64.2_147
- 高木朗充 (2019), 深部圧力源による火山性地殻変動に基づく噴火発生予測の評価, *火山*, 64, 63-81, doi:10.18940/kazan.64.2_63
- Takahashi, R., N. Okazaki, M. Tamura, T. Ogino, Y. Murayama (2019), The

- interaction of volcanic gas and deep magmatic fluid with shallow aquifers at Tokachidake volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 388, 106678, doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.106678
- Wang, X., Y. Aoki (2019), Post-eruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu volcano, Japan, 1992-2017, *J. Geophys. Res.*, 124, 335-357, doi:10.1029/2018JB016729
- Wang, X., Y. Aoki, J. Chen (2019), Surface deformation of Asama volcano, Japan, detected by time series InSAR combining persistent and distributed scatters, 2014-2018, *Earth Planet. Space*, 71, 121, doi:10.1186/s40623-019-1104-9
- Yaguchi, M., A. Terada, Y. Ogawa (2020), Air-Fall Ash from the Main Crater of Asama Volcano on August 7, 2019, and its Water-Soluble Components, *J. Disast. Res.*, 15, 53-56, doi:10.20965/jdr.2020.p0053
- 安田敦, 馬場章, 藤井敏嗣, 外西奈津美 (2019), 富士火山焼野溶岩に捕獲された斑れい岩について: その起源とマグマ供給系についての考察, *火山*, 64, 2, 83-101, doi:10.18940/kazan.64.2_83
- 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

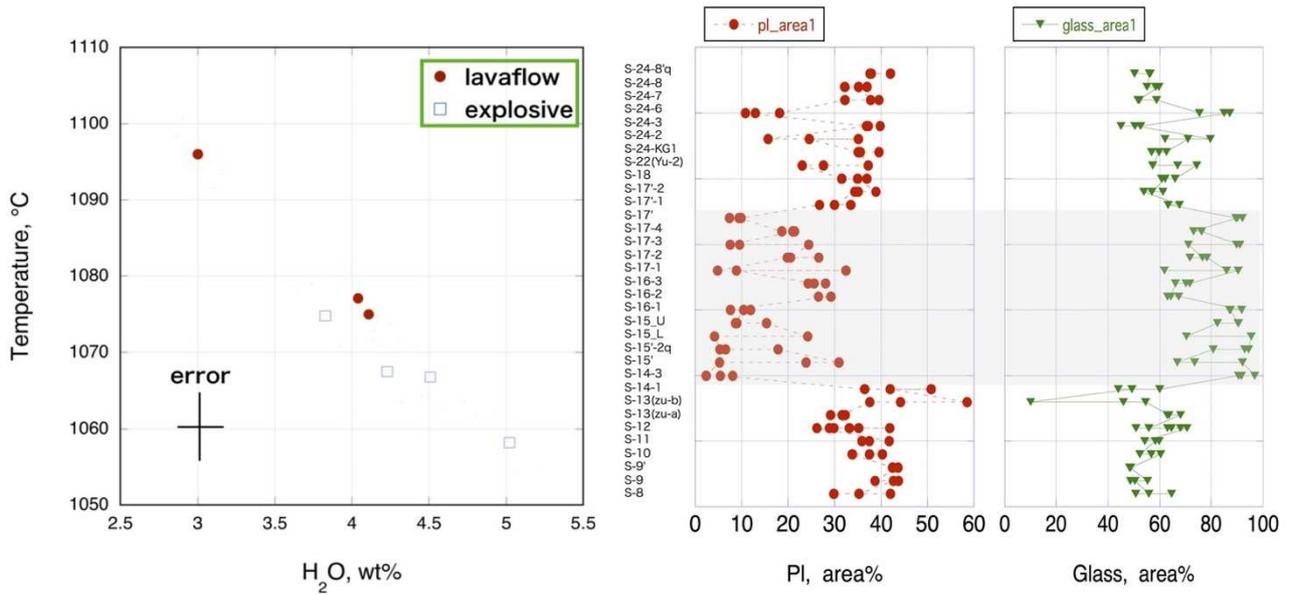


図1. 富士山の斑晶化学組成から推定された含水量とマグマ温度との関係（左図）と富士山の爆発的噴火による噴出物の石基組織の時代変化（右図）。左図のerror barは斑晶組成の計測誤差に起因する温度と含水量評価誤差。右図の赤色は斜長石微結晶量，緑色は石基ガラス量。時代変化が観察される部分で背景に影をつけている（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_02]）。

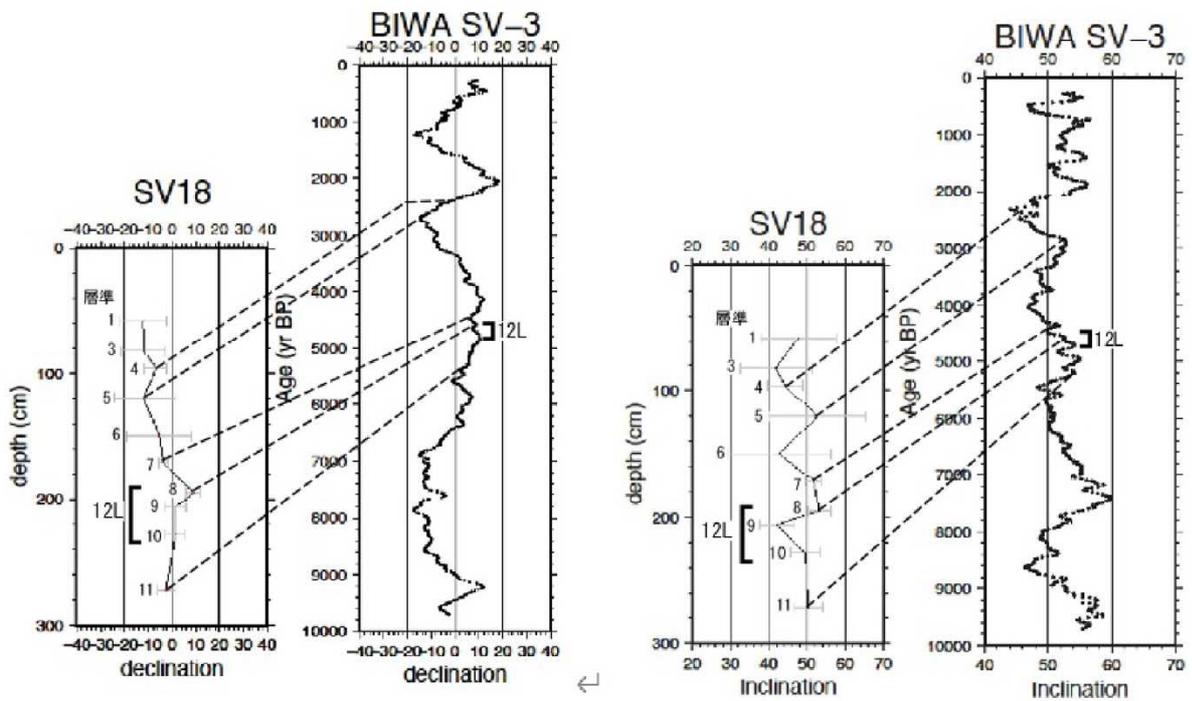


図2. 草津白根火山 (SV18) と琵琶湖の古地磁気永年変化曲線 (BIWA SV-3: Ali et al. 1999 を一部改変)。なお、草津白根火山における誤差は $\alpha 95$ 値 (富士大学 [課題番号: TYM_01])。

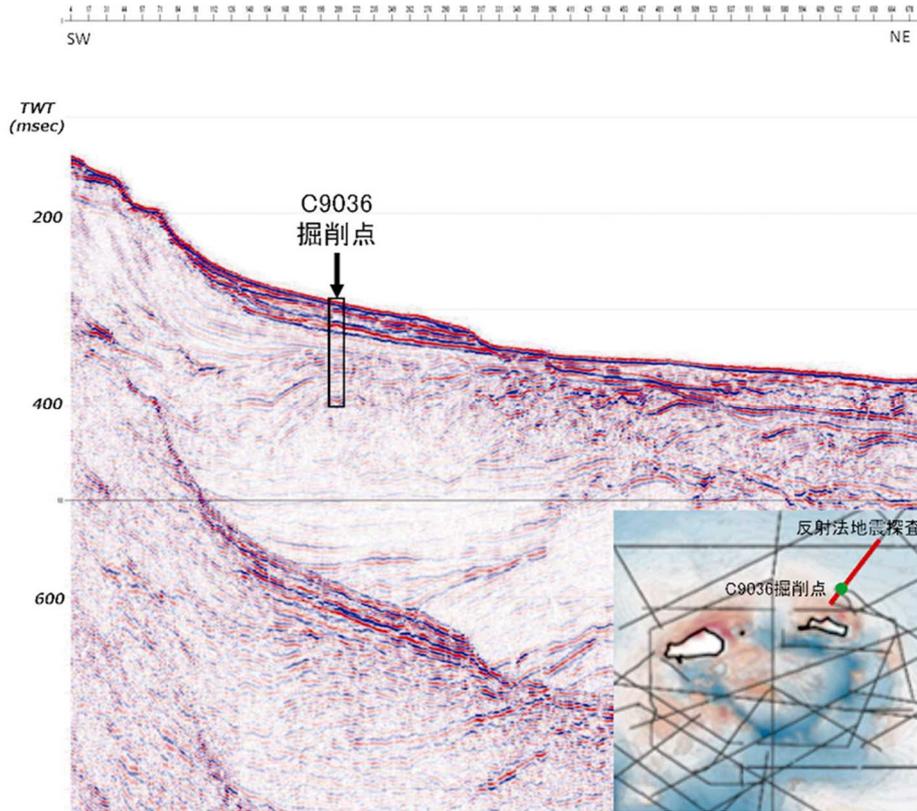


図3. 地球深部探査船「ちきゅう」によるピストンコアリングの地点（C9036掘削点）とその場所での反射法地震探査断面図（神戸大学 [課題番号：KOBE01]）。

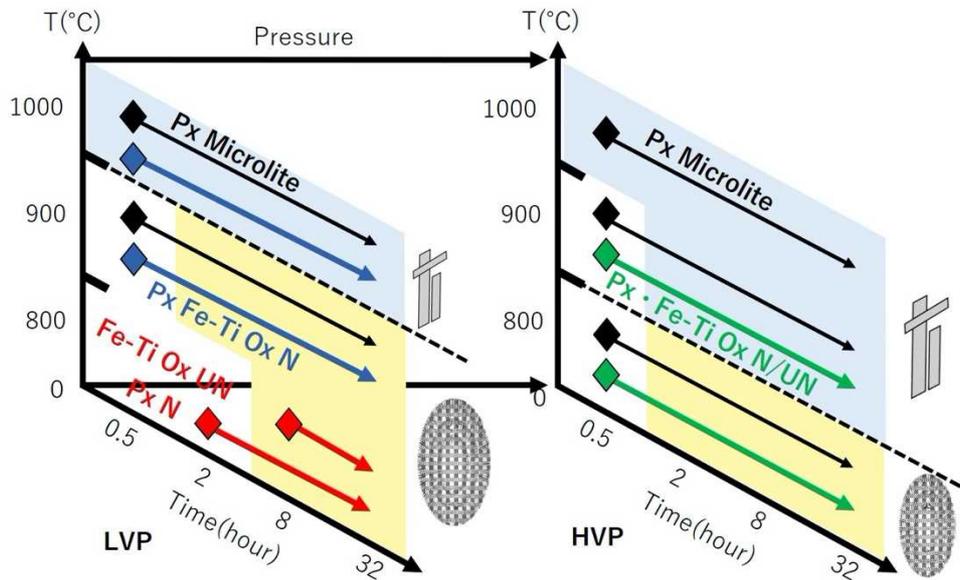


図4. 火道浅部を模擬した減圧結晶化実験で明らかになった、結晶の晶出速度・圧力・時間の関係（東北大学大学院理学研究科 [課題番号：THK_04]）。

伊豆大島の火山構造成地震による新手法の検証

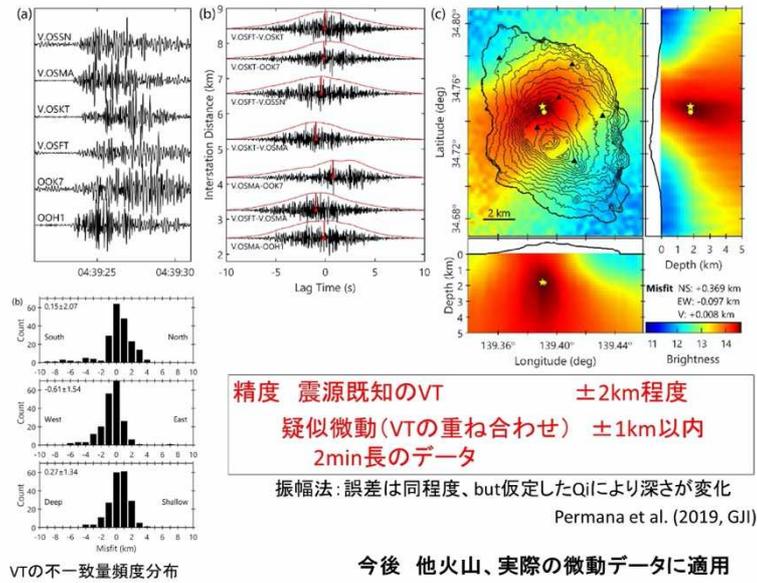


図5. 地震波干渉法に基づく新たな震源決定手法の検証。(a) 波形, (b) エンベロープとLag Time, (c) Misfit分布と最適解, (左下) 火山性地震の初動による震源との不一致の頻度分布 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_07])。

有珠山溶岩ドームの収縮

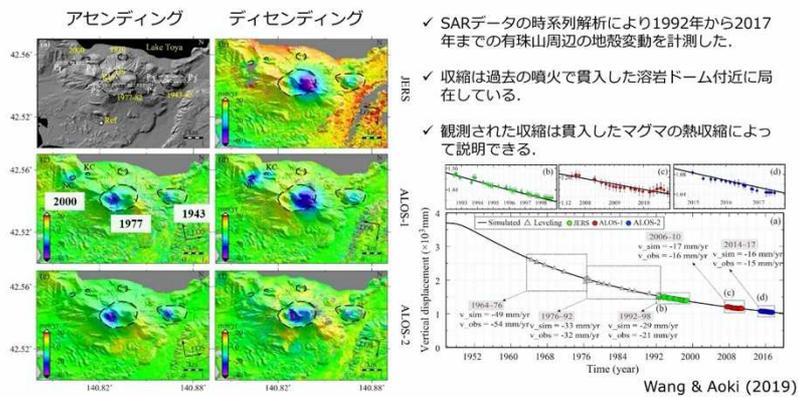


図6. 干渉SAR解析で検出した有珠山溶岩ドームの収縮。左: アセンディング干渉画像, 中: ディセンディング干渉画像, 右下: 鉛直変位の時間変化 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_07])。

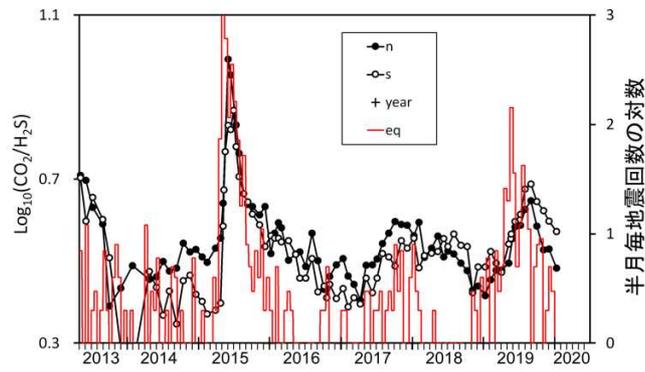


図1. 箱根山火山ガスの組成変動(地震回数は気象庁の観測に基づく)

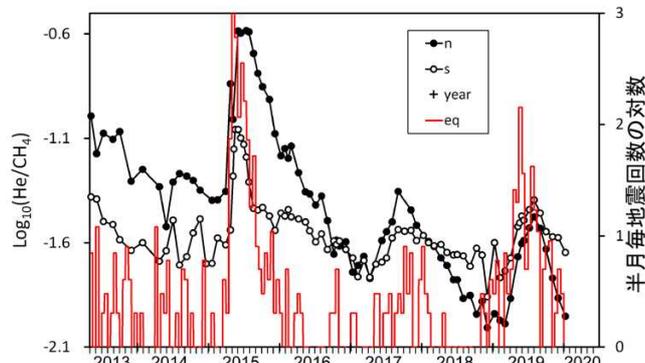


図2. 箱根山火山ガスの組成変動(地震回数は気象庁の観測に基づく)

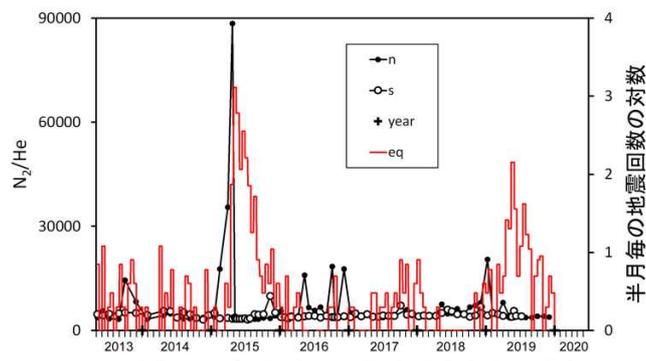


図3. 箱根山火山ガスの組成変動(地震回数は気象庁の観測に基づく)

図7. 箱根火山の噴気ガスにおける化学組成の時間変化。上段： $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の時間変動，中段： He/CH_4 比の時間変動，下段： N_2/He 比の時間変動（公募研究，東海大学 [課題番号：KOB011]）。

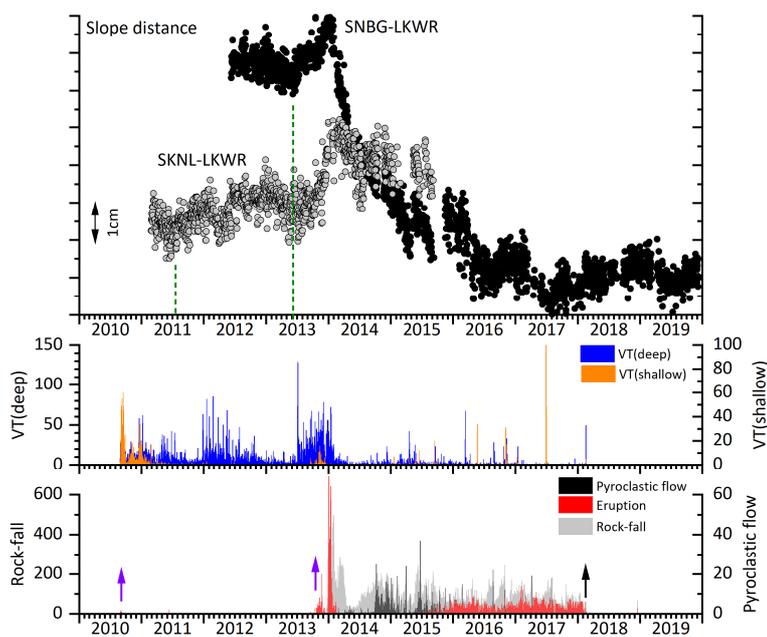


図 8. シナブン火山における地盤変動および地震活動と噴火活動との関係。上段：GNSSにより観測された2基線の射距離の変化，中段：地震活動，下段：噴火活動。紫の矢印は水蒸気噴火を，黒の矢印は2018年2月19日に発生した最大規模の噴火を示す(京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI06])。

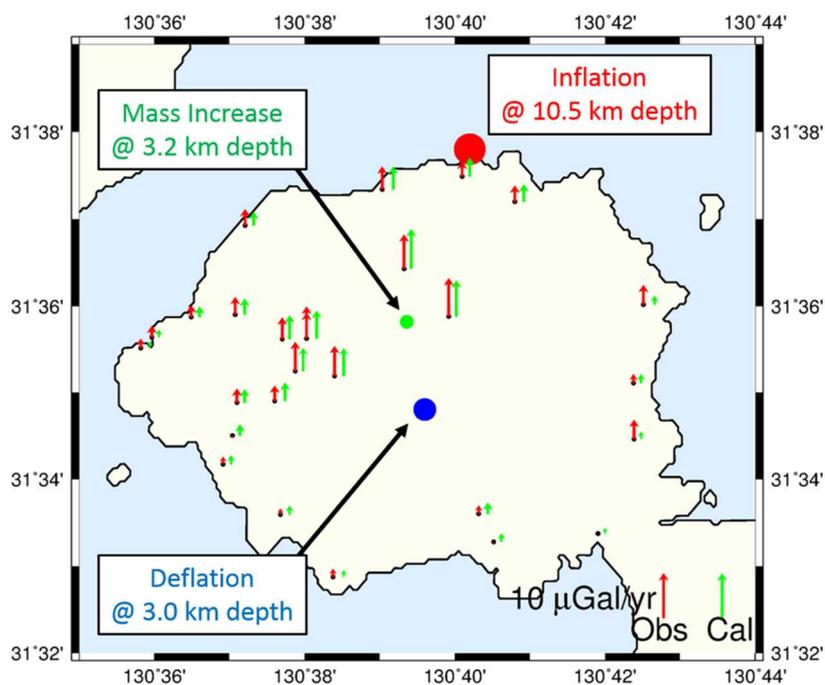


図 9. 相対重力繰り返し測定と地盤変動観測データから推定した桜島直下における膨張・収縮・質量変動ソースの位置 (京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI07])。

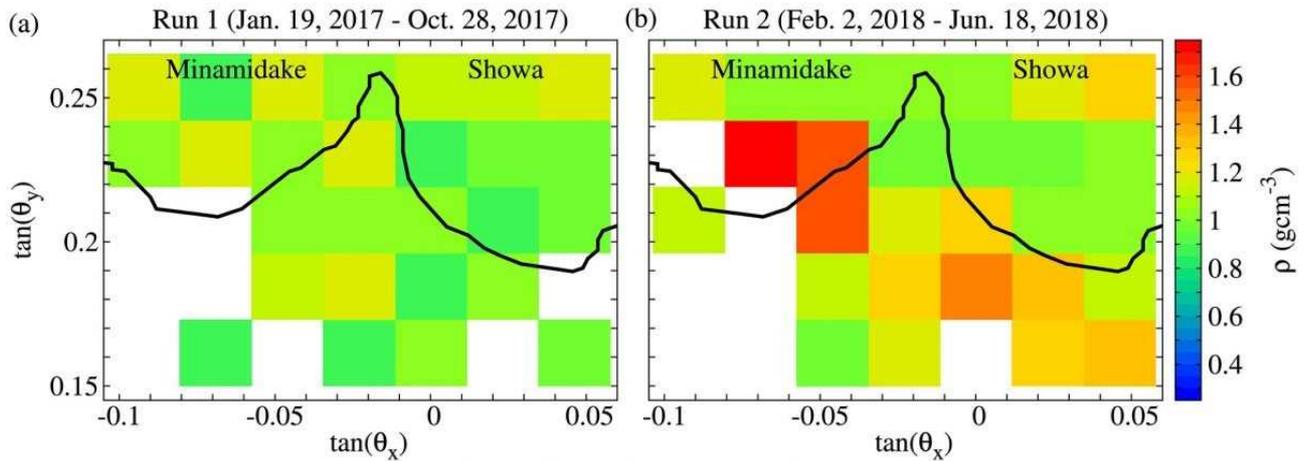


図10. 桜島昭和火口直下および南岳火口近傍における密度上昇を示すミュオグラフィ画像。色は密度変化量を示す。(a) 2017年7月～10月にかけて得られたデータ, (b) 2018年2月～6月にかけて得られたデータ (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_21])。



図11. 航空機による海域火山の定期循環監視観測による口永良部島の海域写真 (海上保安庁 [課題番号: JCG_04])。

1 (5) 災害誘因評価・即時予測

「災害誘因評価・即時予測」計画推進部会長 太田雄策
(東北大学大学院理学研科)
副部会長 三宅弘恵
(東京大学地震研所)

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

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

○震源モデルの高度化

M_{jma} 6.7の2018年北海道胆振東部地震の断層破壊を強震記録を用いた波形インバージョン(周波数0.04-0.5Hz)および経験的グリーン関数法による強震動シミュレーションによるSMGAモデリング(周波数 0.3-10Hz)により求めた(図1)。波形インバージョンにおいては、対象地域の複雑な地盤・地殻構造の影響を考慮して、全国一次地下構造モデル(Koketsu et al., 2012)による3次元地盤・地殻構造モデル(最小S波速度0.6km/s)を用いて理論グリーン関数を計算し、利用した。その結果、主破壊は深さ約22~32kmの震源(破壊開始点)より浅い、震源上方からやや南方に広がっていることが分かった。最大すべり量は約1.7mだった。この主破壊領域はこの地域の下部地殻に限定され、破壊は上部地殻までは達していないと考えられる。また、主破壊領域では余震活動が活発でないことも分かった。さらにこの震源断層モデルを3次元速度構造モデルに組み入れ、波動シミュレーションを行い、長周期地震動の伝播特性を調べた。震源域直上から西方向に広がる厚い堆積層を持つ勇払平野方向へ、大きな速度パルス波が伝播していく様子が見られた。さらに、経験的グリーン関数法(Irikura, 1986; 入倉・他, 1997)による広帯域強震動シミュレーションを行い、この地震の震源モデル(SMGA震源モデル)を推定した。推定された震源モデルは、2つのSMGAモデルで成り立っており、SMGA1が震源時の7.2秒後に破壊開始し、その破壊開始点は震源より約5.7km南西、震源より約10km浅く、SMGA1の大きさは7.2km×7.2km、地震モーメントは 5.1×10^{18} Nm、応力降下量33MPaと求められた。SMGA2は震源時の12.9秒後に破壊開始し、破壊開始点は震源より約5.6km南西、震源より約13km浅く、SMGA2の大きさは5.4km×5.4km、地震モーメントは 1.2×10^{18} Nm、応力降下量18MPaと求められた。またこの震源モデルを用いて、震度7を記録した地点のフォワードシミュレーションを行ったところ、観測に比して卓越周波数が高く最大加速度値が過大と

なることが確認され、これらの大震動時には、地盤の非線形応答があった可能性が示された (Asano and Iwata, 2019; Nagai et al., 2019, 京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI09])。

静岡県下の強震波形データを用いて、スペクトルインバージョン法による、震源、地震波伝播、サイト各特性の分離を行った。0.2-10Hzを解析対象範囲として、M3.5-6.0程度の震源スペクトルを求め、 ω^2 乗モデルを当てはめて応力降下量を求めた。このマグニチュード範囲では、応力降下量の地震規模依存性は明らかではなかったが、地殻内地震から沈み込むプレート内地震を含む、深さ1kmから121kmに分布する今回解析したイベントの応力降下量には深さ依存性が確認された(図2)(島津・他, 2019, 京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI09])。

2016年熊本地震を事例とした地表地震断層の詳細情報の精査とモデル化を行った。具体的には地震後のインバージョン結果に基づく地下の震源断層モデルと、地表で観察された地表地震断層の分布をそれぞれ100m間隔の3次元点群化モデルで表現した(図3)。次に、地下の震源断層モデルと地表地震断層の分布を考慮した地表下浅部の点群の接合・収斂について、地震・強震動分野の研究者と変動地形分野の研究者で議論を重ねて、複数のモデルを提案した。また、布田川断層からは遠隔にある清正公道沿いの地表変状(rupture)と被害の関係について見直した。ここでは地震時に右横ずれを伴うruptureが連続的に出現するとともに、近傍において強震動による構造物被害が生じた。その位置はかつての清正公道を埋め立てた際の盛り土境界付近に該当し、地盤の影響によるruptureである可能性も指摘されていた。しかし、2019年1年と11月にトレンチ調査を実施したところ、ruptureは盛り土境界ではなく、半固結ローム層を明瞭に断ち切り、系統的な右横ずれを伴う地震断層であることが判明し、清正公道断層と呼ぶべきものであることを明らかにした(名古屋大学 [課題番号: NGY_05])。

○地下構造モデルの高度化

大阪、京都、奈良堆積盆地を中心とした地域で、2018年大阪府北部の地震の観測波形データの再現シミュレーションを通じて、既往地下構造モデル(Sekiguchi et al., 2016)の検証と盆地堆積層での地震動形成メカニズムの分析を行った。今年度は特に、堆積Q値の検討と大阪盆地地下構造モデルの改良を実施した。差分法計算でQ値を変えてシミュレーションを行い、観測波形と計算波形を狭帯域で比較することにより、0.1~2.0Hzの間のQ値の周波数依存性をモデル化した(図4)。既往地下構造モデルの大阪平野から大阪湾地域に関し、新たな探査データや表層地質情報を追加し、データの内外挿方法などモデル構築作業の改善を行い、モデルの改良を実施した(関口・他, 2019, 京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI08])。

静岡県地域の強震波形データを用いて、スペクトル・インバージョン法による震源、地震波伝播、サイト各特性の分離を行い、地震基盤以浅の地下構造モデルの検証を進めた。静岡県東西ブロックにおける各伝播経路特性として、分離によって得られたQ値を1.0-10Hzの周波数帯域においてモデル化した結果、西部では $Q=245.4f^{0.38}$ 、東部では $Q=74.1f^{0.96}$ と、異なる特徴を持つQ値が求まった。得られたサイト増幅特性を、東海地域の最新の浅部・深部統合地盤モデル(Wakai et al., 2019)の観測点直下のS波速度構造モデルを取り出して求められる1次元理論S波増幅率と比較すると、卓越周波数や増幅レベルといった点でよい対応を示した(図5)。また、2009年駿河湾の地震と2011年静岡県東部の地震でPGA200cm/s/s以上の強震動を観測した点の強震時のサイト増幅特性を、強震時サイト増幅特性=観測/震源特性/伝播特性として求め、弱震のサイト増幅特性と比較したところ、地盤の非線形応答の特徴と考えられるサイト増幅特性の卓越周波数の低周波側への移動が14観測点、多くはAVS30の小

さい軟弱な地盤上で確認された(島津・他, 2019, 京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI08])。

○強震動評価の高度化

大地震で生成し、近地～遠地で誘発地震やスロー地震を発生させる大振幅のLove波パルス(G波)の生成原因を評価した。具体的には標準地球モデルを用いた理論分散曲線の解析と、3次元差分法計算による地震波伝播シミュレーションから、薄い海洋構造では広い帯域(15～200秒)でLove波の分散性が弱く、また群速度と位相速度が近い値を持つために、波形位相を保って伝播することを確認した。2011年東北地方太平洋沖地震の近地強震波形と遠地広帯域波形を調べると、震源からのLove波の放射が強い西南日本と太平洋の対岸において振幅の大きなG波の到来が確認された(図6)。G波の到達直後に中部～西南日本で地震活動が活発化し、太平洋沿岸の沈み込み帯で低周波数地震や微動活動が報告されるなど(例えば、Miyazawa, 2011; Chao et al., 2013)、大地震による表面波の影響が全地球に広がったことが確認された(Furumura and Kennett, 2020, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_14])。

太平洋プレートで深発地震が発生すると、太平洋岸の震度が大きくなる異常震域が生じる。しかし、2013年5月24日のオホーツク海深発地震(610km, Mw 8.3)では、稚内や秋田など日本海側で最大震度3が観測され、通常の深発地震とは逆の震度分布となった。F-netとHi-net記録を解析し、日本海側の強い揺れは太平洋プレートを伝播した高周波数S波ではなく、(1)上部/下部マントル境界付近の深い震源から放射されたS波のcaustics, (2)地表でのsP変換波と後続のsPL波、そして(3)sS反射波により作り出されたことが確認できた(Kennett and Furumura, 2019; Furumura and Kennett, 2019, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_14])。

南西諸島域について地震の応力降下量の分布を調べた。対象とする地震は2002年6月から2017年5月までの15年間に発生したイベントで、F-netで地震モーメントが報告されている震源のみを選択した。その結果、応力降下量の値は1～100MPaの範囲(中央値はほぼ10MPa)に分布し、0th(2013)が推定した九州同様に比較的高い値が求まるとともに、琉球海溝から沖縄トラフにかけて応力降下量が低下する傾向にあること、沖縄トラフ内部では台湾周辺や宮古海山を除いた地域で低く、地殻熱流量が高い場所に対応することが分かった。また、琉球海溝沿いでは奄美大島北東沖(トカラ・ギャップの衝突域)などの応力降下量が特に高い領域が存在することが確認できた(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_14])。

3次元差分法に基づく地震波伝播シミュレーションのオープンコード(OpenSWPC; Maeda et al., 2017)について、利用者コミュニティからの改善点や機能追加に関するフィードバックを受けて改良と機能拡張を進めた(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_14])。

2016年熊本地震を例として、強震動計算手法の高度化のための検討を行った。観察された地表地震断層の長さ34kmに基づいて、地震本部の強震動予測手法「レシピ」に従った断層モデルにより熊本地震の強震動計算を行ったところ、地震モーメントや地震動が過小評価となった。一方、観測に基づく熊本地震の地震モーメントを既知として設定した断層モデルを「レシピ」で計算したところ、地震動分布は観測記録をおおむね説明できた。ただし、地表地震断層ごく近傍の観測点における周期1秒程度以上の地震動は過小評価のままであった。このことについて、地震発生層よりも浅い領域に断層すべりを考慮した断層モデルで計算を行うと、結果が改善することが確認された(名古屋大学 [課題番号: NGY_05])。

イ. 津波の事前評価手法

巨大地震に伴う海底斜面崩壊による津波の数値計算手法を開発し、1929年Grand Banksで発生した地震に伴う津波イベントに適用を試みた。巨大地震は発生しないとされているアメリカ東海岸の沖合で、1929年にGrand Banks地震 (M7.2)が発生した。この地震直後に震源近傍のケーブルが切断され、海底地すべりが発生していたことが確認されている。また、地震波形解析から地すべり自体が地震波を励起したとされている (Hasegawa and Kanamori, 1987)。さらにこの地震(海底地すべり)は津波を励起し、震源域近傍で大きな被害が報告されている。Halifax(カナダ)の検潮記録には津波波形も記録されている。そこで、先行研究で提示されている海底地すべり域を参考に地すべり域を仮定し、地すべりの層厚を変化させて、海底地すべりと津波の数値計算を実施し、Halifaxの津波波形(第1波)の再現実験を行った。その結果、海底地すべりの量は約100km³程度であることを見積もることに成功した(図7) (Ioki et al., 2019, 北海道大学 [課題番号: HKD_05])。

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

強震動による地震災害誘因の分析のため、堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースの増強に着手した。堆積平野・堆積盆地の地震動増幅特性の定量化に向けて、東京大学地震研究所共同利用の枠組みで可搬型微動・強震観測システムを運用した。また、2018年北海道胆振東部地震や2004年米国パークフィールド地震、トルコ西部の被害地震等を対象として、国内外の強震記録の分析を行い、堆積平野・堆積盆地の地震動増幅特性を定量化すると共に、震源解析や強震動シミュレーションを行った(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_16])。

2016年熊本地震の際の建物被害についての分析を行った。具体的には益城町市街地において、詳細な地表地震の性状を解明し、建物被害との関係を明らかにした。その結果、①地震断層から120m以内の範囲に全壊家屋の総数の94%が集中すること、②被害率については近傍120mの範囲内において断層からの離隔距離と被害率には負の相関があること、③建築年代を昭和50年以前と以後に分けて分析すると新旧に寄らず②の関係が成立することが明らかとなった(図8) (名古屋大学 [課題番号: NGY_05])。

地震被害想定における不確実性を低減することを目的として、鳥取県大山町役場と連携して、微動を用いた町内の面的な地盤震動特性の把握、および地下速度構造の推定を実施した。あわせて、同町内の避難所施設として指定されている20棟の建物(主に体育館)内で微動観測を実施し、振動特性(卓越周期)の調査を行った。また、2016年鳥取県中部の地震で被害を生じた県中部域(倉吉市、湯梨浜町、北栄町)において微動観測を追加するとともに、これまでに実施した調査(余震観測、微動探査、重力探査)を総合的に再解析し(図9)、地下構造のモデル化を行った。さらに、2000年鳥取県西部地震で被害を生じた鳥取県境港市の強震観測記録を精査し、強震動の面的予測において表層地盤の非線形地盤応答特性の評価に一般的に用いられる等価線形手法のパラメータの合理的設定に向けた検討を開始した。具体的には、小地震と大地震の地震観測H/Vに拡散波動場理論を適用し、それぞれの地盤ひずみレベルに応じた等価線形地盤(地震波速度、減衰)を同定し、小地震の地盤(線形)を初期値として大地震の等価線形地盤に移行するような地盤の非線形応答特性を逆推定するための検討を行った(香川・他, 2019, 鳥取大学 [課題番号: TTR_01])。

津波避難モデル地域(北海道八雲町、神恵内村等)において、実測した歩行速度に基づき避

難場所までの避難シミュレーションを行い、想定津波における避難困難地区を特定した。シミュレーションでは、避難設備の現地での確認調査を踏まえて発災時に使用できないと判定された避難路を除外して計算を実施した。避難困難地区の対策を自治体・地域住民と協議し、新たに避難路の整備が必要な個所を抽出したほか、役場庁舎の建て替えに合わせて庁舎に津波避難ビル機能を持たせることを決定した。庁舎の設計では、想定津波に耐える強度、冬季を想定した発災下での暖房の確保、想定される避難人数などを考慮した。新設する避難設備を条件に組み込んで再度避難シミュレーションを実施し、避難困難地区が解消されることを確認するとともに、地区ごとの避難場所の最適化を図った（図10）。以上に加えて、地震の強震動や液状化による道路破損を想定した車避難のリスク評価を行い、渋滞発生箇所を推定した。これらの研究データは今後、地域の避難計画の更新に活用する予定である（北海道立総合研究機構地質研究所〔課題番号：HR0_02〕）。

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

地震動に伴って発生する地すべり現象の発生ポテンシャル評価と事前予測手法のさらなる高度化を進めるために、観測による災害誘因メカニズムの検討を行った。具体的には9000年から12万年前までの軽石が10cm以上の厚さで分布している範囲を新編火山灰アトラスから抽出（図11）し、関東から北海道にかけて分布図を作成し、既往地震地すべりとの比較を行ったところ、地震時地すべりのすべり面となる可能性が特に高い降下火砕物は、9000年よりも古い軽石およびそれに伴う火山灰土であることが分かった。少なくともこの範囲は今後の地震時地すべりの要注意域と考えられる。

地すべり内での地震動のばらつき、伝播特性を把握するために、紀伊山地における深層崩壊のすべり残りブロック上に多点の稠密地震観測アレイを設置し、観測を開始した。谷埋め盛土斜面における間隙水圧変動について同時に記録された地震動との関係から議論した。観測されたPGAが120galまでのイベントに対し、間隙水圧の上昇量はPGAやArias Intensityと強い相関があること、間隙水圧の立ち上がり時刻は、そのタイミングにおける瞬間的な揺れの強さで決まること、間隙水圧の上昇時間は比較的強い揺れが続く継続時間に由来することが示された。さらに北海道南東部の再活動型地すべりにおいては、素因として、海岸浸食や間隙水圧の上昇に伴ってどの程度地すべりの安定性が低下しているのかを連続観測データから示した。また、北海道胆振東部地震によって変状が現れた谷埋め盛土斜面で表面波探査を実施し旧地形に対応する地下構造を推定することによって、谷埋め盛土と地山のテフラ層が一体となって地震時に地すべり性の変状を示したことが明らかになった。

また、2018年北海道胆振東部地震により、厚真町のテフラ斜面において発生した地すべりを調査した結果、すべり面には多くの地震による崩壊斜面のすべり面から検出されている粘土鉱物の薄板状ハロイサイトが含まれていることが分かった。さらに同ハロイサイトの特徴を調べたところ、チューブ状のハロイサイトの含有量が増えるにしたがって、試料全体のせん断抵抗が下がり、保水力が上昇すること、すなわち、せん断された際には内包された水を原因として流動性が増すことが明らかになった（Chigira et al., 2019; Doi et al., 2019; Liu and Wang, 2020, 京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI10〕）。

宮城県荒砥沢地区ならびに熊本県南阿蘇村立野に設置している2台のGB-SARの連続計測を継続し、GB-SARデータを取得した。南阿蘇立野地区には2017年に地上設置型合成開口レーダ(GB-SAR)を設置した（図12）。主に2019年1月から11月までのデータから推定した面的変位

速度からは大きな変位は確認されていない。同地区はこれまで2016年熊本地震による崩落地帯の安定化、国道ならびに鉄道の復旧工事が行われてきたが、これらの工事が年度末でほぼ終了する見込みである。斜面の安定化事業により、GB-SARで観測してきた地域は金属ネットで覆われ、植生が進められた結果、従来の計測状態から変化したため、安定化の確認が主たる目的となっている。しかし例えば2019年6月30日に大雨により崖面一部の崩落が観察されたが、GB-SARではこれを的確に捉えることに成功した。

SAR画像のピクセルごとの位相・強度情報を用い、2枚のSAR画像を干渉させる(位相の差をとる)ことにより、2回の観測の間における変位量を推定する。しかし、観測間において大気屈折率が時間的・空間的に変化した場合、その変化量は電波の伝搬速度を変化させ、結果的に干渉SARにおける位相差として現れる。この大気誤差を軽減するため、多数のSAR画像を使用して変位速度を推定するPersistent Scatter Interferometry (PSI)技術を使用した。PSI技術により、2枚のSAR画像間で変位量を求める従来手法よりも少ない誤差で変位を推定することができる。同解析を南阿蘇におけるGB-SARデータに適用した。現場ではバックホウにより掘削作業が行われており、発生した土砂により干渉画像が著しく変化していることが確認できた。さらに宮城県荒砥沢地区におけるGB-SAR観測では2019年10月の豪雨に伴う斜面の侵食が確認された。この時、斜面各点で計測した地表面変位から変位による体積変化を推定した。これは土砂の流出量に対応すると考えることができる。更に降雨量と地表面変位の相互相関をとると、降雨後4日程度で地表面変位が現れることを見いだした。同手法は、今後の土砂侵食の予想へつながる成果と考えられる(佐藤・他, 2019, 東北大学災害科学国際研究所 [課題番号: IRID03])。

オ. 火山噴火による災害誘因の事前評価手法

火砕流の発生メカニズムの解明を目的とし、桜島火山における地盤変動、火山性地震、空気振動、火山ガス、映像等の観測を行い、爆発的噴火および火砕流のデータを収集した。特に今年度は、火砕流の流下パターンや堆積量を知るために桜島島内の黒神観測点において小型船舶レーダーを用いた観測を開始した。レーダー設置後に火砕流を伴う噴火かは発生していないが、例えば2019年11月8日の噴煙をレーダーで明瞭に捉えることに成功している。また、過去の火砕流を伴う噴火の前駆地震・地殻変動データの解析から、火砕流を伴う噴火では直前の膨張停滞時間が30分以上継続すること、火砕流を伴う噴火では47例中27例で前駆地震が発生することが明らかになった。これは火砕流を伴う噴火では火道中で通常の噴火とは異なる現象が発生している可能性を示唆する結果である(京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI11])。

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測手法

大地震による大規模平野での長周期地震動の即時予測の実現に向け、観測・計算データ同化に関する研究を進めた。データ同化・予測では、同化波動場を初期値としてスパコンを用いた3次元差分法計算に基づき、数十秒先の波動場を予測する手法(Furumura et al., 2019)を用いた。今年度は予測の高速化を目指し、予め計算した同化観測点～予測地点の伝達関数(グリーン関数)を用いて、評価地点の揺れを瞬時に予測する方法を検討した。さらに本手法を用いて、南海トラフ巨大地震の長周期地震動の即時予測の可能性を検討した。まず、内閣

府の1944年東南海・1946年南海地震震源モデルとJIVSM 地下構造モデル(Koketsu et al., 2008)を用いて模擬強震記録を合成し、これを観測波形と見なして同化・予測実験を行った(図13)。その結果、DONETやN-net(計画中)により震源域直上で地震発生直後にデータ同化を進めることができれば、数十秒以上の猶予時間をもって関東平野等の遠地での長周期地震動の即時予測が可能であることが示された(Oba et al., 2019; Oba, 2020, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_14])。

PLUM法の高度化に関する研究を進めた。具体的には、S波群中のP波を検知する方法を發展させ、上下動成分のみから得られる震度を予測に用いることを検討した。また、距離減衰を導入することを考察した。これらにより、PLUM法が、揺れの強さを予想してから実際の揺れが来るまでの時間的猶予が短時間になるという弱点を軽減する可能性を見出した(図14)。また、予測計算の堅牢化のために、機械学習によって観測点の品質を自動的に監視する方法を検討した。継続時間も含めた揺れの予測の精度向上を目指し、減衰・散乱・速度構造などの地下構造の詳細な推定や地盤増幅特性のモデル化を進めた。また、データ同化や波動伝播シミュレーションでの計算時間を短縮する方法について開発に着手した。さらに、詳細な観測網が利用可能な状況では、(断層破壊の全体を捉える)モーメントマグニチュードの即時推定による即時地震動予測では強い揺れの到来に間に合わず、揺れをモニターする方法が有効であることを示唆する結果を得た(Cochran et al., 2019; Kodera, 2019; Meier et al., 2019; Kodera et al., 2020, 気象庁 [課題番号: JMA_06])。

イ. 津波の即時予測手法

Green関数を用いたデータ同化に基づく津波即時予測手法(GFTDA; Wang et al., 2017)を海底地震津波観測網DONETが捉えた2016年鳥島沖地震津波に対して適用し、津波即時予測実験を行った(図15)。同試行はリアルタイムに取得された記録に対してデータ同化手法を適用した初めてのケースである。同地震は海底火山カルデラ内で約10年周期で繰り返し発生する津波地震(Fukao et al., 2018)であり、その津波の規模に比して地震動は極めて小さく、かつ励起源がカルデラ床の上下変位が支配的なCLVDメカニズムのため、地震動からの解析によって津波を即時的に予測することが困難な事例である。しかしデータ同化手法を適用することで、同イベントに対する津波予測を迅速に行い得ることを示した。さらに、リアルタイムな実データに対して適用するための信号処理手法の検討も開始した。実データは単にばらつきやノイズ成分が多いだけでなく、地震動や潮汐成分も重畳している。そこで、大気分野で活用されている経験的モード分解法を海底圧力計記録の津波信号に適用し、津波信号の効果的な抽出を試みた。また、地中海西部において仮想的な海底津波観測網を考え、津波データ同化による予測実験から海底観測網とそれに基づく津波即時予測の有効性を検討した(Wang et al., 2019; Heidarzadehetal., 2019, 弘前大学理工学研究科 [課題番号: HRS_02])。

搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法(Phase To Slip, 以下PTS)の性能評価を目的とし、2011年東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)とそれに引き続く岩手県沖地震(Mw 7.4)および最大余震である茨城県沖地震(Mw 7.8)に対して同手法を適用した。データには関東から東北にかけてのGEONET観測点62点の1秒ごとの搬送波位相データを用いた。沈み込む太平洋プレート上面を386の小断層に分割し、それら小断層上のすべり分布を平滑化拘束を課した状態で推定した。グリーン関数にはOkada(1992)の手法を用いた。推定された断層面上でのすべり分布を見ると、2011年東北地方太平洋沖地震本震については陸上GNSSの変位デ

ータを用いたものとはほぼ同等の結果が得られた。さらに引き続く余震に注目すると、明瞭なすべり量のステップが岩手県沖地震、茨城県沖地震双方で確認できた。さらにそれらのすべり分布についても先行研究とはほぼ同等の結果が得られた。これらの成果は、PTSによって1日以下で連続する地震現象のモニタリングが可能であることを示唆する結果と考えられる(図16)。また、実海底環境下でドリフト特性をその場で把握できる海底圧力観測システムのプロトタイプ機を開発し、同機を実海域に短期間設置することでその動作確認を行った結果、想定した通りの動作を確認することができた。さらに、リアルタイムGNSSによる震源断層即時推定における不確実性の定量評価をマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)で行うための技術開発を進めた。本年度は、単一の矩形断層モデルをリアルタイムGNSSによる永久変位場にもとづき即時的に得ることを目指したアルゴリズム開発を行った。同手法ではリアルタイムでの活用を念頭に、各パラメータの初期値や、尤度関数やそれを規定するパラメータ等を自動設定するアルゴリズムを構築した(田中・他, 2019; 大野・他, 2019, 東北大学理学研究科 [課題番号: THK_12])。

近地津波について、後続波で高い津波が観測された過去事例を収集し、津波数値計算で再現するため初期波源など条件設定の検討を行い、福島県沖から関東東方沖にかけての海域を波源とする津波が福島県沿岸で反射して東北地方沿岸に後続波をもたらす事例を再現した(図17)。遠地津波について、南米沖及び南太平洋西部を波源とする津波に加えて北太平洋を波源とする津波についてその減衰過程を近似する関数形の解析を行い、指数関数的に減衰する過程の初期振幅が地震の規模に比例することを確認した。スロー津波地震の規模推定法として開発した積分変位を用いた手法を日本近海の地震に対して適用し、マグニチュード7クラス以上の地震についてはモーメントマグニチュードの差が十分に小さく推定できることを確認した。この規模推定法を代表的な津波地震である1992年ニカラグア地震の観測波形に適用し、従来の変位振幅に基づく手法に比べて適正に規模を推定できる可能性が高いことを示した。2018年スラウェシ島パル湾で発生した津波について、観測された遡上高・ビデオ記録から再現された津波波形などを説明しうる海底地すべりによる津波のモデルを提示した(気象庁 [課題番号: JMA_06])。

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

焼岳における昭和37年噴火後の土石流の発生に関して、従来の研究から発生ポテンシャルの変化に関する知見を得た。また、ポテンシャルが低下する中、昨年18年ぶりに発生した土石流は、10分間雨量とその降雨域がその発生要因であることを明らかにした。以上より、噴火後の土石流発生ポテンシャルの変化と発生条件に関するモデルのフレームワークを明確にした(図18)。シナブン火山の噴火後のラハールについては、観測を継続した。焼岳の融雪型火山泥流については、融雪実験結果を整理し、泥流モデルへの導入を開始した。桜島の土石流については、土砂濃度特性の観測や斜面侵食過程に関する検討のために、基礎調査や計測機器の開発を行った(京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI_12])。

気象研究所XバンドMPレーダーおよびKuバンド高速スキャンレーダーによる噴煙観測と2次元ビデオディストロメーター(2DVD)による降灰観測を実施した。2DVDによる観測では、扁平な小粒子が多いことが確認された。このことは、大きな粒子の離脱によって、小さな粒子が数多く残った噴煙または火山灰雲をMPレーダーで観測した際に、反射因子差が増加することに対応すると考えられる。また、気象庁一般気象レーダーにより噴火事例(2019年8月

7日浅間山，2020年1月11日・2月3日口永良部島）を解析するとともに，一般気象レーダーによる噴煙高度の確率的推定手法について，桜島の遠望観測データを用いた手法の検証を試行し，降水エコーとの区別など検証をする上での問題点を整理した。さらに全球移流拡散モデルと領域移流拡散モデルを統一した新しい気象庁移流拡散モデル（JMA-ATM）について，開発に着手した。2016年10月8日阿蘇山噴火の事例について，降灰データを逆解析して新旧移流拡散モデルを実行し，初期値の不確定性を示した（図19）（佐藤 他，2019，気象庁〔課題番号：JMA_07〕）。

（3）地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震・火山災害情報の活用のための住民の知識体系に関する基礎調査を行った。具体的には日本放送協会による「体感・首都直下地震ウィーク」を刺激とする社会的実験調査（パネル調査）を実施し，認知，知識，行動，態度，確率評価への効果を検討した。ここで社会的実験調査とは，通常の調査とは異なり，ある対象（今回の場合は特定の放送キャンペーン）に接した人（実験群）と，接していない人（統制群）に分類し，キャンペーン（実験刺激）の効果を見る手法である。その結果，番組内で強調された火災旋風のみ単語としての認知度が向上したことや，NHKスペシャル「パラレル東京」を「見た人」の方が新たに（改めて）地震対策をとっていること，さらに番組を見た人，見ていない人双方ともに「火災からの避難を第一に考えるべき」という知識のみが上昇し，直接の視聴効果にとどまらず，話題性効果があることが明らかになった。一方で「地震発生確率，被害発生確率」などの用語や，「不安感」などの「感情」には態度変化が確認されず，簡単にそれらを変化させることが容易ではないことも同時に明らかになった（図20）（東京大学情報学環〔課題番号：III_01〕）。

ハザード事象系統樹の設計について検討した。系統樹は，起こりうる現象のシナリオの選択肢を整理し視覚化するのには優れているものの，時間的な変化の表現には課題があることが分かった。そこで，起こりうる現象の発生確率の時間変化の表現方法について検討を行った。その結果，確率の時間変化の表現には系統樹よりも表形式のほうが適しているという結論を得た。さらに，その基本スキームを構築した（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID04〕）。

2018年1月の草津白根山の噴火事例において，噴火に関する情報が火山近傍の関係団体にどのように伝達され，理解されたのか，情報内容に課題があったのかを分析することを目的とし，草津白根火山近傍の「草津温泉スキー場」の利用者を対象としたインターネット調査を実施した。アンケートは2020年1月31日から2月2日にかけて実施した。アンケートの質問項目は，2018年1月23日の草津白根山での噴火についておぼえているか，草津白根山が活火山であることを知っていたか，水蒸気噴火について，噴火警報・噴火警戒レベル・噴火速報について，回答者自身の情報入手についてなど，合計20問で構成した。結果として，全体的に火山防災の専門用語や知識についての理解が低調であることが分かった。一方で，2018年1月の本白根山の噴火を「はっきりおぼえている」群と，そうではないグループに分けて比較すると，「はっきりおぼえている」群では，顕著に理解度や知識量が高い傾向にあることが明らかになった。一方で，噴火の記憶がはっきりしていないグループは，理解度や知識が低い傾向がある。加えて，情報伝達については携帯電話を用いても情報は届かない可能性が高いことが明らかになった。これらのことから，不特定多数のゲレンデ利用者といっても，利用者の特徴ごとにより細分化して，どのような項目の知識を高めるべきか，情報伝達

をすべきかについて検討を進めるのが今後の課題と考えられる(図21)(公募研究, 東北大学[課題番号: KOB016])。

地震波形・GNSS・傾斜計等のデータを即時解析して震源や地盤変動源を表示するシステムに新たに導入するコンテンツとして, 振幅震源自動推定ツールと地殻変動源自動推定ツールの基本設計に取り組んだ。振幅震源自動推定ツールについては, Battaglia and Aki(2003)およびKumagai et al. (2010)の解析手法を用いて試作を進めた。winシステムでテレメータされている地震波形のデータを用いて, 専用の解析サーバー上で震源を逐次推定し, 結果を画像として保存していく処理系を設計した。本年度はwin-UDPパケットを受信して自動解析を行うプログラムの試作と北海道大学のサーバ内での試運転を開始した。地殻変動源自動推定ツールについては, リアルタイムでテレメータされるGNSSデータを念頭に置いたソース推定について概念設計を行った。具体的にはあらかじめ火山周辺にグリッド状に圧力源モデルを配置し, 観測データが流れ込むに従って, それぞれのグリッド点における膨張・収縮量の最適値を推定・表示する仕様を検討した。このようなシステムにより, ソース推定の不確かさの情報も含めて表示できるため, 意思決定に役立つことが期待される(北海道大学[課題番号: HKD_06])。

これまでの課題と今後の展望

「災害誘因評価・即時予測部会」では災害誘因や災害リスクを事前に高い精度で評価する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化」ならびに地震や火山噴火が発生した直後に高精度かつ即時的に災害誘因を予測する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化」を推進するとともに, それら災害誘因予測を効果的に防災対策の推進に結びつけるための「地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究」を進めている。計画初年度である本年度においては, それぞれの研究課題において既往研究の高度化や新たな取り組みに関して成果が着実に得られつつある。特に今計画から新しく加わった「地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究」では, 災害誘因予測情報の受け手の視点から, どのようにそれら情報を有効活用すべきかについて研究が進展していることは, 最終的な目的である災害の軽減という観点からきわめて重要である。以下に, 各小項目において取り組むべき事項および展望について示す。

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

強震動の事前評価手法における震源モデルの高度化については, 広帯域震源モデル・プロトタイプの改良を行うとともに, 極大地震動を生成する要因の検討を観測記録に基づいて継続する。また, 断層ごく近傍域での強震動予測精度の向上を目指して, 2016年熊本地震の地震断層周辺全域への適用・モデル改良を進め, 強震動分布を説明できる計算モデルを確立することを目指す。

地下構造モデルの高度化については, 大阪盆地, 奈良盆地等での地盤モデルの地震動応答特性評価を継続する。また地震動の再現性が低い地域, 地盤情報の少ない地域における微動・地震観測を実施する。

強震動の事前評価手法における強震動評価の高度化については, 近地～遠地地震観測により捉えられた広帯域(短周期～長周期)強震動の成因を, 震源特性と不均質地殻・マントル構造における地震波伝播の観点から評価する。そして, これらの効果を適切に評価できる震源・

地下構造モデルを用いた地震波伝播シミュレーションを行い、強震動の事前評価の精度向上に取り組む。また、2016年熊本地震において強震動の出現に著しい地域差があることに注目して、地震断層・活断層の特徴との相関を分析する。また、断層近傍における強震動分布の詳細な地域差を表現できる断層モデルおよび強震動計算方法を検討し、強震動予測手法の高度化を目指す。

津波の事前評価手法の高度化については、令和元年度に引き続き、1929年Grand Banks Tsunamiの再現実験を完成させることで、海底地すべり数値計算手法の妥当性を検証する。第2段階として1998年パプアニューギニア地震津波への適用を試みる。

大地震による災害リスク評価手法に関する研究では、堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースの増強を完了させると共に、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。さらに鳥取県内の地震動予測高度化のため、主に微動探査・重力探査・観測地震動の解析を通じた地盤震動特性および地下構造の把握を継続的に実施する。鳥取県が令和2年度に市町村と共有する危機管理情報の高度化に合わせ、これと連携して、鳥取県震度計ネットワークを用いた地震動即時予測の実務への取り込みと地域に固有の災害リスク評価手法の検討を加速する。さらに令和元年度に行った津波避難モデル地域(北海道八雲町、神恵内村等)における避難シミュレーションにもとづく避難場所の最適化等の成果をもとに、市町村に向けて成果の普及活動を行う。

地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法の高度化では、災害復旧に重要な役割をすると予想される四国にある国道196号線および32号線に沿って、地震時不安定地形・地質構造を抽出し、抽出された箇所の追加調査により危険性判定を行うとともにこれらを総合した危険斜面分布図の作成を行う。また、引き続き四国の大規模地すべり斜面に対する稠密地震動観測を行い、斜面对策工事の進行に伴う地すべり土層の震動特性変化を調べ、対策工事による斜面の安定化過程の評価手法を開発する。そして、紀伊山地の大規模地すべりにより形成された天然ダムの堤体において、高密度電気探査および微動観測を行い、ダム堤体の内部構造を解明すると共に、その内部構造と地すべりの地質、地形および崩土運動特徴との関係を解明する。

さらに、北海道胆振東部地震によりテフラ斜面において発生した地すべりに対する現地調査を行い、テフラの堆積層準、風化特性と斜面の保水力を調べて、地震時すべり面となる層準を探る。また、地震観測を継続し、地震動だけではなく変位、変形量や間隙水圧等のデータの収集に引き続き努める。強震動を受けた斜面の変位や変形量、間隙水圧について揺れとの関係について解析を継続する。また地すべり内で実施しているアレイ観測のデータを用いて、センブランス解析など地すべり内での地震動の伝播特性について特徴を抽出する。

また、熊本県南阿蘇村高野台地域の崩壊していない斜面に対して、降雨前後において電気探査を行い、降雨による雨水の浸透過程を解明する。また、斜面の異なる土層から土試料を採取し、これらの土試料に対して異なる含水量で土質せん断実験を実施し、降雨や地震による斜面崩壊の発生危険度を評価する。

この他、宮城県荒砥沢地区ならびに熊本県南阿蘇村立野に設置している2台のGB-SARの連続計測を継続し、GB-SARデータの取得を継続する。現在開発中のMIMOレーダによる計測システムの置換を検討し、長期モニタリングの信頼性向上を目指す。またGB-SAR解析時の大気補正手法についても検討を継続する。

火山噴火による災害誘因の事前評価手法の高度化では、令和元年度に引き続き、過去の火砕流を伴う噴火の地震・地盤変動・空気振動など地球物理学的観測データを基に火砕流の物理学的特徴を明らかにする。噴火に伴う地盤収縮量から求められる噴出物量と降灰量観測とを比較することにより総噴出物量に占める火砕流への配分比を決定する。降下火山灰量を非火砕流により上方へ噴出した噴出物量とし、降下火山灰量を差し引くことにより、噴出物の火砕流配分比を決定することを試みる。また、レーダー観測を継続し、火砕流を検知できるか実証を行う。さらに、火山灰の上方への移動量と火砕流となって山腹を下降する量が検出可能かについて調査を行う。

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

地震動の即時予測の高度化については、高密度地震観測データの波動逆伝播シミュレーションに基づいて、震源要素(位置・深さ、震源域の広がり)の即時推定手法を開発する。陸域と海域の高密度強震観測から、M7地震の正確な位置(プレート境界 or プレート内)と、M8-9巨大地震の震源域の強震動生成域と震源域の広がり の推定可能性を検討する。また、地震波伝播計算と強震動被害の事前評価の高度化に向け、地震波伝播オープンコード(OpenSWPC)への断層型震源の導入ツールの整備や、令和元年度に導入された Oakbridge-CX スパコンでの性能チューニングとコードの改良を進める。強震動の事前評価モデルの改善に向けて、南西諸島域の地盤構造モデルを改良する。また、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。そのために 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。

津波の即時予測手法の高度化では、近地津波について津波後続波の観測事例の整理を行い、それらの観測事例を再現する津波波源を推定する。遠地津波の減衰過程を説明する近似関数パラメータの改良についてまとめる。遠地津波と近地津波のそれぞれについて観測事例を用い、長時間津波伝播計算による後続波と減衰過程の再現の精度向上のため、沿岸域地形データ等の計算条件設定の改良を試みる。また、津波地震の規模推定手法の検証を進める。巨大津波は低頻度巨大災害のため、海底観測網で捉えられる僅かな記録のみで手法を構築することは困難である。そのため地震・津波双方を含むできるだけ現実的な記録を数値的に合成し、それに対して予測手法のテストを行うというプロセスが重要となる。そのため3次元的な地震・津波運動を計算できる融合数値計算法 (Maeda and Furumura, 2013) から海底圧力を合理的に再現できる地震津波シミュレーション手法 (Saito et al., 2016) をシームレスにつなぎ、実用的かつ現実の不均質構造を組み込んだ地震に伴う全波動現象を実現する。そのため、これまで国内コミュニティで開発してきたオープンソースの地震動シミュレーションコード OpenSWPC (Maeda et al., 2016) と津波シミュレーションコード JAGURS (Baba et al., 2015) を利用し、その成果もオープンソースとして広く公開する。

超巨大地震等に伴う津波の即時予測を達成するためには、測地観測データの高度化も重要な課題である。そのため、令和元年度に進めた搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法(PTS)の性能評価を継続し、特に1日以下の時間窓におけるモニタリング能力の精度向上を目指した対流圏遅延推定のためのハイパーパラメータ等の最適化を行う。また実海底環境下でドリフト特性をその場で把握できる海底圧力観測システムのプロトタイプ機でより長

期間の海域試験を行い、その精度評価を行う。さらに、リアルタイム GNSS による震源断層即時推定における不確実性の定量評価をマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) で行うための技術開発を継続するとともに、それらを災害情報として活用するための方策について検討を開始する。

火山噴出物による災害誘因の即時予測手法の高度化については、令和元年度に焼岳を対象に構築した、噴火後の土石流の発生ポテンシャルの変化を考慮した土石流発生予測モデルのフレームワークを桜島に適用するために、流域の火山灰の堆積による降雨浸透能の変化モデルの構築について検討を開始する。

気象レーダー等、リモートセンシング技術で得られた観測結果が噴煙のどの部分に対応しているかを知ることが、その結果の解釈を行う上できわめて重要である。そのため、気象レーダー等による噴煙の解析結果を降灰や大気中の火山灰の実観測データによって検証するスキームを確立する。また、領域移流拡散モデルと全球移流拡散モデルを統一した新しい移流拡散モデルを開発する。さらに、火山灰データ同化システムと新しい移流拡散モデルを結合した火山灰データ同化・予測システムで予報官による(実況)解析の利用について必要な機能を追加する。

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震・火山災害情報の活用のために住民の知識体系に関する基礎的調査の解析を行う。令和元年度に実施した調査に加えて追加のアンケート調査を行い、それらを統合した結果の分析を行う。特に知識や不安感などに関して、災害から一定の時間が経過した後、どの程度変化するのか住民の災害に対する知識体系を明らかにする。

令和元年度にハザード事象系統樹に代わる表現方法として提案した表形式の基本スキームに基づき、M8クラス(半割れ)およびM7クラス(一部割れ)の地震発生後の後発する地震の発生確率について、最近100年間のグローバルな地震カタログを用いて計算する。この際、内閣府が公表した南海トラフ地震臨時情報の防災対応検討ガイドラインと整合させるために、地震発生直後から一週間後、および、地震発生から一週間後～二週間後の2期間の時間ウィンドウを用いる。これにより、片割れケースと一部割れケースの場合について、ハザード事象の確率推移表の基本形を完成させる。

また、地震波形・GNSS・傾斜計等のデータを即時解析して震源や地盤変動源を表示するシステムの開発を継続する。振幅震源自動推定ツールについては、テスト運用の結果に基づいて不具合の修正や改良を行い、表示システムへの実装試験までを行う。地殻変動源自動推定ツールについては、ノイズ付きのシンセティックデータを用いて茂木モデルによるソース推定ツールを試作する。

成果リスト

秋山祐也, 佐藤源之 (2019), MIMOレーダを用いた干渉SARによる表面変位測定, 信学技報, vol. 119, no. 55, EMT2019-5, 23-28

秋山祐也, 佐藤源之 (2019), MIMOレーダのアジマス分解能評価, 信学技報, vol. 119, no. 121, SANE2019-32, 79-84

浅野公之 (2019), 気仙沼沖 M6 級繰り返しプレート境界地震の震源特性のばらつき評価, 日本地震工学会論文集, 19(5), 34-45

- Asano, K., T. Iwata (2019a), Source rupture process of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake deduced from strong-motion data considering seismic wave propagation in three-dimensional velocity structure, *Earth Planet. Space*, 71:101, doi:10.1186/s40623-019-1080-0
- Asano, K., T. Iwata, (2019b), Source Rupture Process and 3D Long-period Ground Motion Simulation of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, Japan, AGU Fall Meeting, S33A-06
- Baichuan LIU, G. Wang (2020), Role of halloysite on the initiation and movement of coseismic land- slides occurring on tephra slopes, 令和元年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D08
- Chigira M., J. Tajika, S. Ishimaru, T. Suzuki (2019), Geological features of landslides of pyroclastic fall deposits induced by the 2018 Eastern Iburi Earthquake and other previous earthquakes, Japan Geosciences Union meeting 2019, HDS14-P10
- 千木良雅弘, 田近淳, 石丸聡 (2019), 2019年胆振東部地震による降下火砕物の崩壊:特に火砕物の風化状況について, 京都大学防災研究所年報, 62B, 348-356
- Cochran, E., J. Bunn, S. Minson, A. Baltay, D. Kilb, Y. Kodera, M. Hoshihara (2019), Event Detection Performance of the PLUM Earthquake Early Warning Algorithm in Southern California. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 109(4), 1524-1541, doi:10.1785/0120180326
- Doi, I., T. Kamai (2020), Relationship between earthquake-induced excess pore water pressure and strong ground motion observed in a monitored fill slope, *Engineering Geology*, 266, 105391, doi:10.1016/j.enggeo.2019.105391
- 土井一生, 大澤光, 松浦純生 (2019), Seismological and geotechnical surveys on the landslides induced by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, HDS09-09
- 土井一生, 東良慶, 釜井俊孝 (2019), 平成30 (2018)年北海道胆振東部地震による厚真町における谷埋め盛土の崩壊, 日本地すべり学会研究発表会熊本大会, P37
- Furumura, T., BLN Kennett (2020), Propagation of distinct Love-wave pulses from regional to teleseismic distances in continental and oceanic environments, *Geophys. I. Int.*, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa028>
- Furumura, T., T. Maeda., A. Oba (2019), Early forecast of long - period ground motions via data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations, *Geophys. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1029/2018GL081163>
- Gonda Y., S. Miyata, M. Fujita, D. Legono, D. Tsutsumi (2019), Temporal Changes in Runoff Characteristics of Lahars After the 1984 Eruption of Mt. Merapi, Indonesia, *J. Disaster Res.*, 14(1), 61-68, doi:10.20965/jdr.2019.p0061
- Heidarzadeh, M., Y. Wang, K. Satake, I. E. Mulia (2019), Potential deployment of offshore bottom pressure gauges and adoption of data assimilation for tsunami warning system in the western Mediterranean Sea, *Geoscience Lett.*, 6(1), doi:10.1186/s40562-019-0149-8
- 平川泰之, 岡野和行, 植野利康, 里深好文, 堤大三, 宮田秀介 (2019), 近年の雲仙普賢岳における土石流発生の地形・地質的条件, *砂防学会誌*, 72(1), 21-31

- HoushmandViki, A., H. Hamzehloo, H. Miyake, A. Ansari (2019), Estimation of strong motion generation area for the 2004 Parkfield earthquake using empirical Green's function method, *Pure Appl. Geophys.*, <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02327-9>.
- Hurlimann, M., V. Coviello, C. Bel, X. Guo, M. Berti, C. Graf, J. Hubl, S. Miyata J.B. Smith, H-Yuan Yin, 2019, Debris-flow monitoring and warning: review and examples, *Earth Science Reviews*, 199, 102981, doi:10.1016/j.earscirev.2019.102981
- Ioki, K., Y. Tanioka, H. Yanagisawa, G. Kawakami (2019), Numerical simulation of the landslide and tsunami due to the 1741 Oshima-Oshima eruption in Hokkaido, Japan, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2018JB016166
- 岩城麻子, 森川信之, 藤原広行, 前田宜浩, 久保久彦, 藤原広行 (2019), 平成30年北海道胆振東部地震の広帯域地震動シミュレーション, 日本地球惑星連合2019年大会, SSS13-P08
- 香川敬生 (2019a), 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-, 土木学会論文集 A1, Vol. 75, No. 4(地震工学論文集第38巻), pp. 1674-1677
- 香川敬生 (2019b), 自治体震度計ネットワークによるリアルタイム震度評価の高度化 -鳥取県の事例-, 日本地球惑星科学連合大会2019年大会, SCG59-07
- 香川敬生 (2019c), 地震ハザードマップへの非線形地盤応答の影響, 日本地球惑星科学連合2019年大会, U07-05
- 香川敬生, 星山賢太郎, 野口竜也 (2019), 2000年鳥取県西部地震境港市役所における強震動の推定, 土木学会第74回年次学術講演会, CS12-21
- 香川敬生, 星山賢太郎, 野口竜也 (2019), 2000年鳥取県西部地震による気象庁境港観測点における非線形地盤応答特性と境港市役所における観測記録の再現, 土木学会第39回地震工学研究発表会, B12-1411
- Kagawa T., Y. Ohta (2020), Prior and Real-Time Estimations of Ground Motions, Tsunamis, and Other Geodynamic Hazards, *J. Disaster Res.*, Vol. 15, No. 2, pp. 144-151, doi:10.20965/jdr.2020.p0144
- 香川敬生, 吉田昌平, 野口竜也 (2019), 鳥取県境港市で観測されるやや長周期地震動, 日本地震学会2019年度秋季大会, S21-P09
- 釜井俊孝 (2019), 宅地崩壊-なぜ都市で土砂災害が起こるのか, NHK出版新書(4/10刊行), pp. 233
- Kennett, BLN, T. Furumura (2019), Significant P wave conversions from upgoing S waves generated by very deep earthquakes around Japan, *Prog. Earth, Planet. Sci.*, 6, 49, doi:10.1186/s40645-019-0292-z
- Kobayashi, H., K. Koketsu, H. Miyake (2019), Rupture process of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earth-quake derived from strong motion and geodetic data, *Earth Planets Space*, 71:63, <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1041-7>
- Kodera, Y. (2019), An Earthquake Early Warning Method Based on Huygens Principle: Robust Ground Motion Prediction Using Various Localized Distance - Attenuation Models, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 124, 12981-12996, doi:10.1029/2019JB017862
- Kodera, Y., N. Hayashimoto, K. Moriwaki, K. Noguchi, J. Saito, J. Akutagawa, S. Adachi, M. Morimoto, K. Okamoto, S. Honda, M. Hoshiba (2020), First-Year Performance of a Nationwide Earthquake Early Warning System Using a Wavefield-Based Ground-Motion

- Prediction Algorithm in Japan, *Seis. Res. Lett.*, doi:10.1785/0220190263
- Ling, S., M. Chigira (2020), Characteristics and triggers of earthquake-induced landslides of pyroclastic fall deposits: An example from Hachinohe during the 1968 M7.9 Tokachi-Oki earthquake, Japan, *Engineering Geology*, 264, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105301
- Meier, M. A., Y. Kodera, M. Bose, A. Chung, M. Hoshiya, E. Cochran, S. Minson, E. Hauksson, T. Heaton (2020), How often can Earthquake Early Warning systems alert sites with high-intensity ground motion?, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 125, e2019JB017718, doi:10.1029/2019JB017718
- Miyake, H., G. Tanircan, H. Yamanaka, O. Ozel (2019), Large stress release during normal-faulting earthquakes in western Turkey supported by broadband ground motion simulations, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 21, EGU2019-12094-1
- Miyake, H., S. Babita, K. Koketsu, S. N. Sapkota (2019), Broadband source modeling for the Himalayan collision zone, *JpGU Meeting 2019*, SSS13-24
- Nagai, K., K. Asano, T. Iwata (2019), A SMGA Source Model of the 2018 Hokkaido Eastern Iwate, Japan, Earthquake, *AGU Fall Meeting*, S31C-0529
- 西川隼人, 野口竜也, 西村武, 宮島昌克, 香川敬生 (2019), 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, *土木学会論文集 A1*, Vol.75, No.4(地震工学論文集第38巻), pp. I383-I390
- 西川隼人, 野口竜也, 宮島昌克, 香川敬生 (2019), 微動 H/V の 1 次ピークの振動数と振幅に基づいた地盤増幅度評価式の検討, *日本地震工学学会論文集*, Vol.19, No.7, pp. 7_41-7_55, doi:10.5610/jaee.19.7_41
- 西村武, 野口竜也, 香川敬生 (2019), 微動探査に基づく鳥取県湯梨浜町における地盤構造の推定, *土木学会第39回地震工学研究発表会*, B11-1401
- 西村武, 野口竜也, 香川敬生 (2019), 鳥取県湯梨浜町小鹿谷・高辻の稠密微動探査による地盤構造の推定, *土木学会中国支部第71回研究発表会*, I-3
- 西村武, 野口竜也, 香川敬生 (2019), 鳥取県北栄町西園・由良地域における稠密微動探査と地盤構造の推定, *土木学会第74回年次学術講演会*, CS12-14
- 野口竜也, 西川隼人, 吉田昌平, 香川敬生 (2019), 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, *日本地震工学学会論文集*, Vol.19, No.6, pp. 6_258-6_271
- Oba, A., T. Furumura, T. Maeda (2019), Early forecast of long-period ground motions for large earthquakes in the Nankai trough based on data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations, *AGU 2019 Fall meeting*, S53G-0552
- Oba, A. (2020), Data-assimilation-based early forecasting of long-period ground motions for large earthquakes along the Nankai Trough, Master's thesis, Dep. Earth and Planetary Science, Graduate School of Sciences, The University of Tokyo
- 大野圭太郎, 太田雄策 (2019a), MCMCによる震源断層モデル推定の不確実性リアルタイム評価手法の開発, *日本地球惑星科学連合2019年大会*, SCG59-10
- 大野圭太郎, 太田雄策 (2019b), GNSSによる断層すべり分布推定の不確実性定量評価-南海トラフを対象とした数値シミュレーション-, *日本測地学会第132回講演会*, 52

- 大野圭太郎, 太田雄策, 村松弘規, 阿部聡 (2019), 震源断層モデル推定の不確実性リアルタイム評価手法の開発 -2019年山形県沖の地震への適用-, 日本地震学会2019年秋季大会, S24P-04
- 齋藤さやか, 関谷直也, 安本真也 (2020), 地震対策行動の規定因に関する探索的研究, 9. 22, 第38回日本自然災害学会学術講演会, II-7-5
- 先名重樹 (2019), 熊本平野における広帯域強震動評価のための浅部・深部統合地盤モデルの構築, 「平成28年(2016年)熊本地震とESG研究」シンポジウム (10/21) 講演集, 日本地震工学会
- 先名重樹, 若井淳, 谷田貝淳, 稲垣賢亮, 松山尚典, 藤原広行 (2019), 阿蘇地域全域における微動アレイ観測結果, 第54回地盤工学研究発表会, 0954
- 佐藤英一, 福井敬一, 新堀敏基, 石井憲介, 徳本哲男 (2019), 気象レーダーで観測した2019年1月17日口永良部島噴火に伴う噴煙・火山灰雲エコーについて, 火山噴火予知連絡会会報, 132, 420-426
- 佐藤源之, 鄒立龍, ジョバンニ ニコ, 菊田和孝 (2019), GB-SAR(地表設置型合成開口レーダ)による変位・振動計測, 電子情報通信学会B論文誌, vol. J-102B, no. 11, 844-852
- 関口春子, 浅野公之, 岩田知孝 (2019), 2018年大阪府北部の地震の大阪平野における強震動シミュレーション, 日本地震学会2019年秋季大会, S16P-14
- 島津颯斗, 岩田知孝, 浅野公之, 染井一寛 (2020), 静岡県の強震観測網を用いた震源特性, 伝播経路特性, サイト増幅特性評価, 令和元年度京都大学防災研究所研究発表講演会, B17
- Suzuki, Y., M. Watanabe, T. Nakata, 2020, Extremely strong ground motions associated with the 2016 Kumamoto earthquake: Special references to Mashiki and Ozu areas. HOKUDAN2020
- 田中優介, 太田雄策, 宮崎真一 (2019), PTSによる地震時および地震後の断層すべり現象の検出: 2011年東北地方太平洋沖地震の事例, 日本測地学会第132回講演会, 10
- Tanircan, G., H. Miyake, H. Yamanaka, O. Ozel (2019), Large stress release during normal-faulting earthquakes in western Turkey supported by broadband ground motion simulations, Pure Appl. Geophys., <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02357-3>
- 堤大三, 孝子綸図, 山野井一輝, 藤田正治 (2019), ストリームチューブによる地形分割を基にした表層崩壊解析手法, 砂防学会誌, 72(2), pp. 3-13
- 王功輝, 古谷元, 渡部直喜, 土井一生, 馬寧 (2019), 平成30年北海道胆振東部地震による土砂災害の特徴, 京都大学防災研究所年報 第 62 号 A: 48-56
- Valentine D. C., M. Sato (2019a), Integration of GB-SAR and Spatial Data Processing for Real-Time Landslide Monitoring, IEICE Technical Report, vol. 119, no. 121, SANE2019-31, 73-78
- Valentine D. C., M. Sato (2019b), Integration of GB-SAR and Spatial Data Processing for Real-Time Landslide Monitoring, Remote Sensing Society of Japan (RSSJ) annual meeting
- Wang, Y., K. Satake, O. Sandanbata, T. Maeda, H.-Y. Su (2019), Tsunami data assimilation of cabled ocean bottom pressure records for the 2015 Torishima volcanic tsunami

earthquake, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 124(10), 10413-10422,
doi:10.1029/2019JB018056

渡辺満久, 鈴木康弘 (2020), 清正公道に沿って現れた2016年地表地震断層と地震被害, 日本地理学会講演要旨, doi:10.14866/ajg.2020s.0_317

山口翔大, 宮田秀介, 堤大三, 村重慧輝, 藤田正治 (2019), 数値解析による積雪条件の異なる融雪型火山泥流予測, 砂防学会誌, 71(6), 3-13

安本真也, 石濱陵, 森野周, 関谷直也 (2020), 「南海トラフ地震に関連する情報」に対する住民の反応, 災害情報18, 日本災害情報学会誌, 95-97

安本真也, 田中淳, 関谷直也 (2020), 漁港における津波対策の現状と課題—沿岸部自治体の悉皆調査結果より—, 自然災害科学特別号, 日本自然災害学会, 38, S06, 109-122,
doi:1024762/jnds.j.28.S06_109

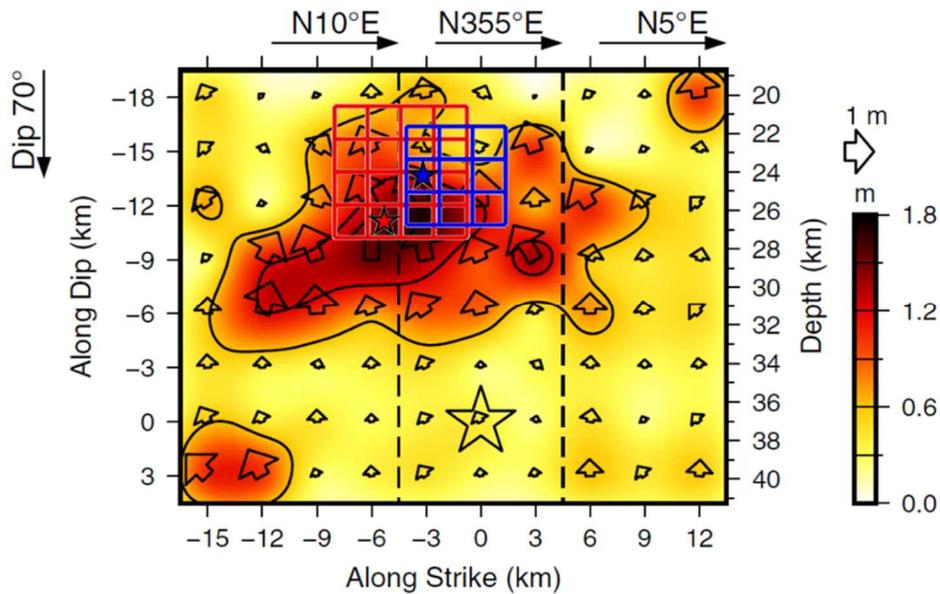


図 1. 2018 年北海道胆振東部地震の強震波形インバージョンによるすべり分布 (Asano and Iwata, 2019) と強震動シミュレーションに基づく SMGA モデル (永井・他, 2020) の比較: すべりの大きい場所 (カラーコンターですべり量を示す) と SMGA (赤と青の矩形で示した領域) が対応 (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI09])。

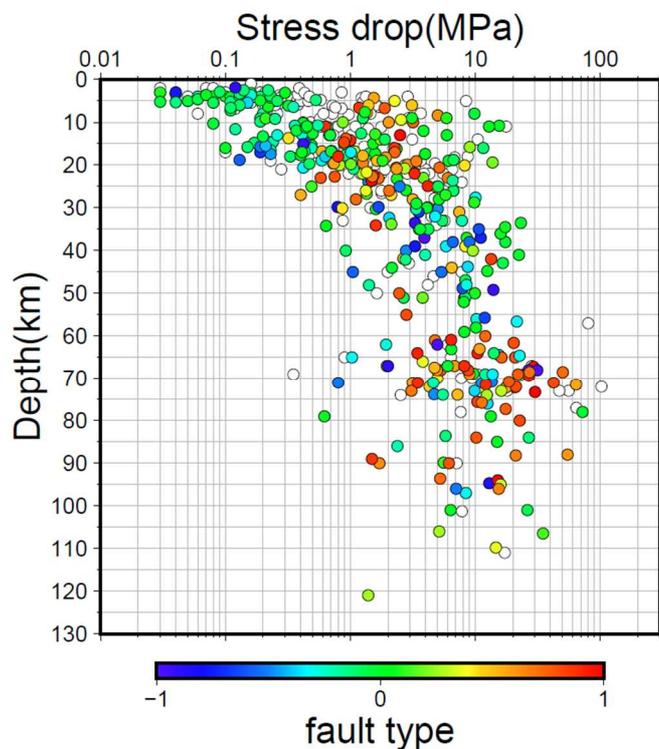


図 2. 静岡県下の強震観測点 (SK-net を含む全 166 点) 記録を用いたスペクトルインバージョンにより推定された震源特性で深さ 2~120km で発生したイベントの応力降下量は深さ依存性を示す。色は断層タイプ (-1 (正断層型) ~0 (横ずれ断層型) ~+1 (逆断層型)) を示す (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI09])。

100m点群化モデルA
(地表地下収斂)

100m点群化モデルB
(地表地下独立)

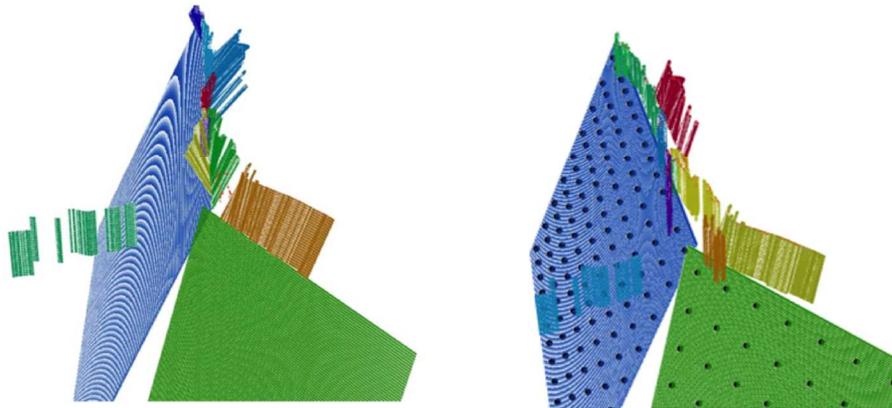


図3. 2016年熊本地震で観察された地表地震断層の極近傍での建物被害の原因を探るため、また、地震計に記録されたメートルオーダーの永久変位を説明するために地下の震源断層と地表地震断層とのモデル化を実施した。図は2つの点群化モデルをそれぞれ示す。左図：浅部と深部を震源断層上端で収斂させたモデル。右図：高角の浅部の断層と深部が独立しているモデル（名古屋大学 [課題番号：NGY_05]）。

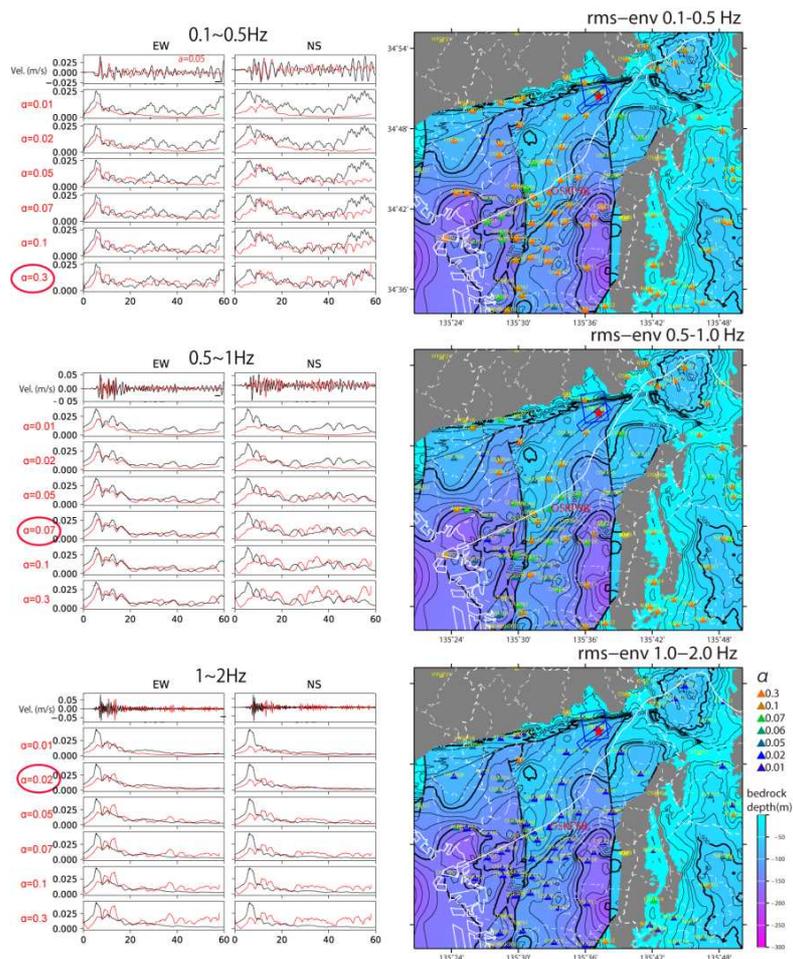


図4. 2018年大阪府北部地震の再現シミュレーションによる既往地下構造モデルの検証。堆積層Q値を変えた場合の観測波形と理論波形の狭帯域における比較。上から0.1~0.5Hz, 0.5~1.0Hz, 1~2Hzをそれぞれ示す（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI08]）。

浅部地盤の統合による説明力の向上について 深部地盤モデルと浅部・深部統合地盤モデルでの比較例
Wakai et al.(2019)

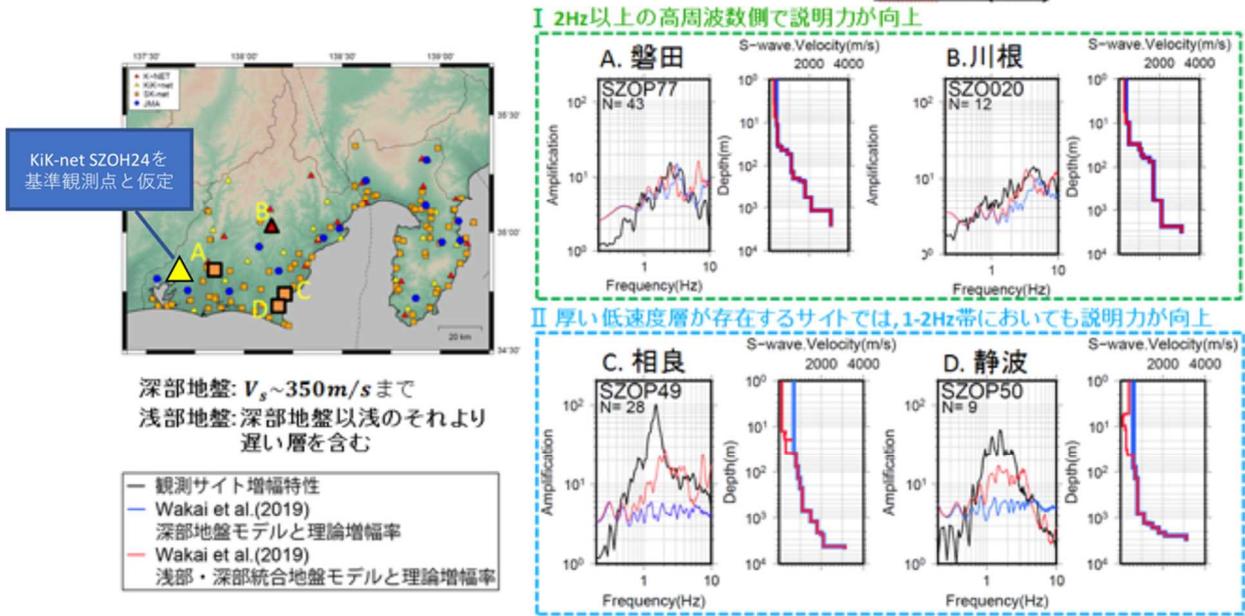


図5. 静岡県下の強震観測点 (SK-net を含む全 166 点) 記録を用いたスペクトルインバージョンにより観測サイト増幅特性を推定し, 堆積層構造モデル (Wakai et al., 2019) の理論増幅特性と比較した結果 (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI08])。

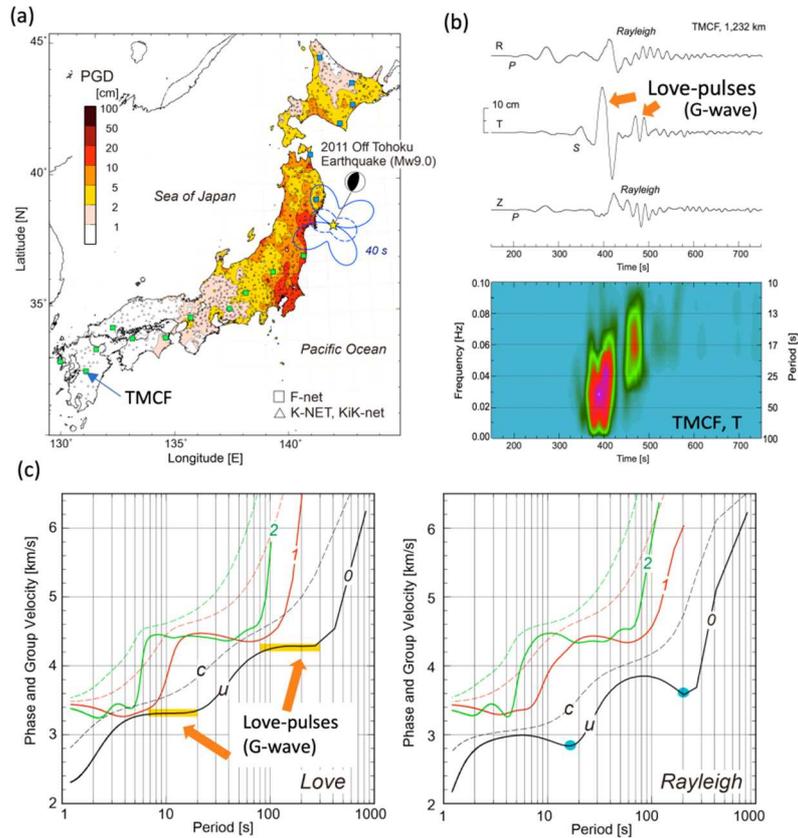


図6. 2011年東北地方太平洋沖地震のLove波伝播による近地—遠地強震動。(a) Love波の放射パターン(青実線)と最大地動分布(PGD) (b)九州 TCMF 観測点の3成分変位波形 T成分に見られる二つのLove波パルスと周波数特性, (c左) Love波理論分散曲線(0:基本モード, 1,2:高次モード, u:群速度, c:位相速度)に見られる, 二つの位相速度一定の領域(黄色ハッチ), (c右) Rayleigh波理論分散曲線と Airy phase (青)(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_14])。

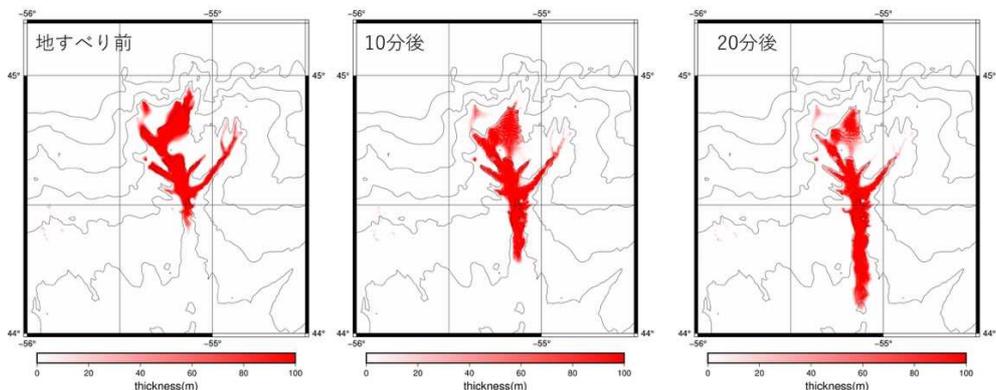


図7. 1929年 Grand Banks 地震 (M7.2)に伴う海底地すべりによる津波を, 先行研究で提示されている地すべり域を参考に, 地すべりの初期の層厚を変化させて津波数値計算を実施した。図は海底地すべりの数値計算結果で赤色でその量を示す。(北海道大学 [課題番号: HKD_05])。

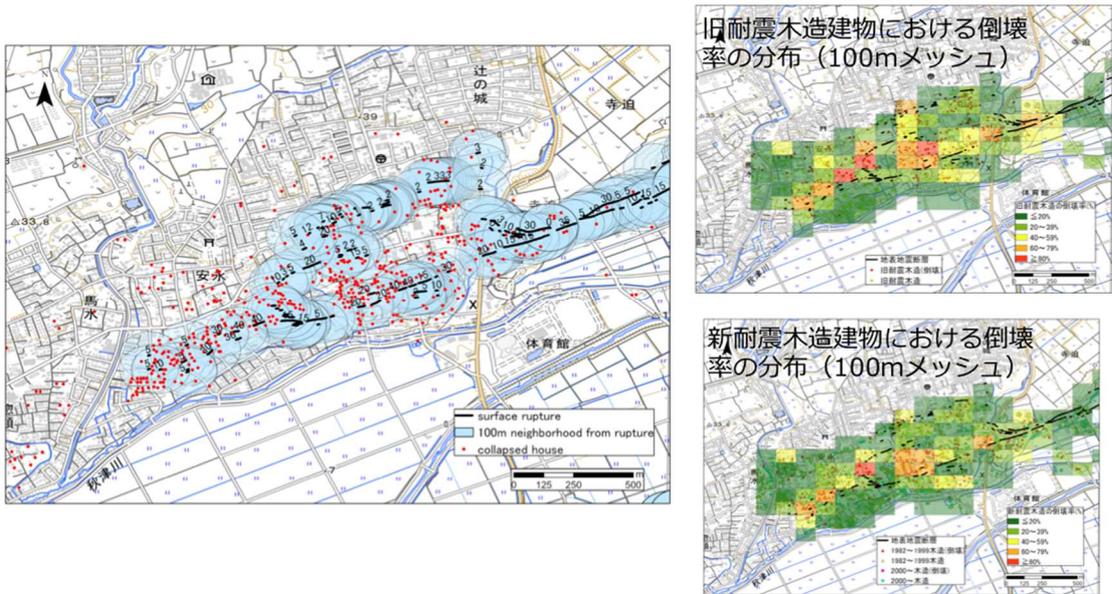


図 8 . 2016 年熊本地震の際の建物被害についての分析。(左図) 益城町における倒壊建物と地表地震断層の分布。数字は右横ずれ変位 (cm) を示す。(右図上) 旧耐震木造建物における倒壊率の分布。100m メッシュで色で倒壊率を示す。(右図下) 新耐震木造建物における倒壊率の分布。地表地震断層から 100m の範囲に倒壊建物の約 80% が集中していること, 旧耐震基準, 新耐震基準ともに地表地震断層より北側で倒壊率が高いことが分かる (名古屋大学 [課題番号: NGY_05]) 。

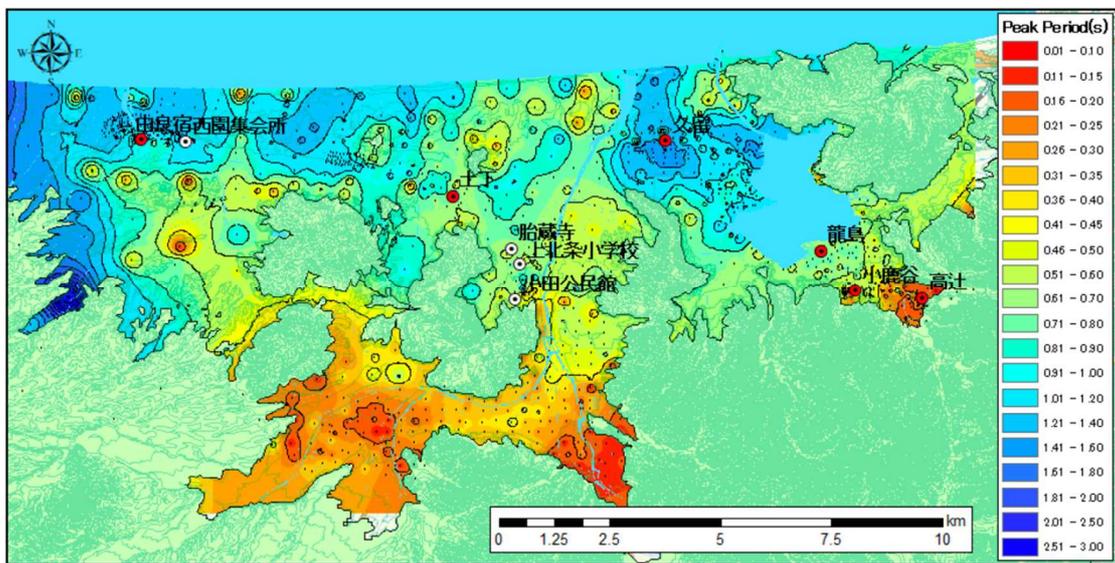


図 9 . 鳥取県中部域の微動卓越周期分布。色で卓越周期を示す(鳥取大学 [課題番号: TTR_01])。

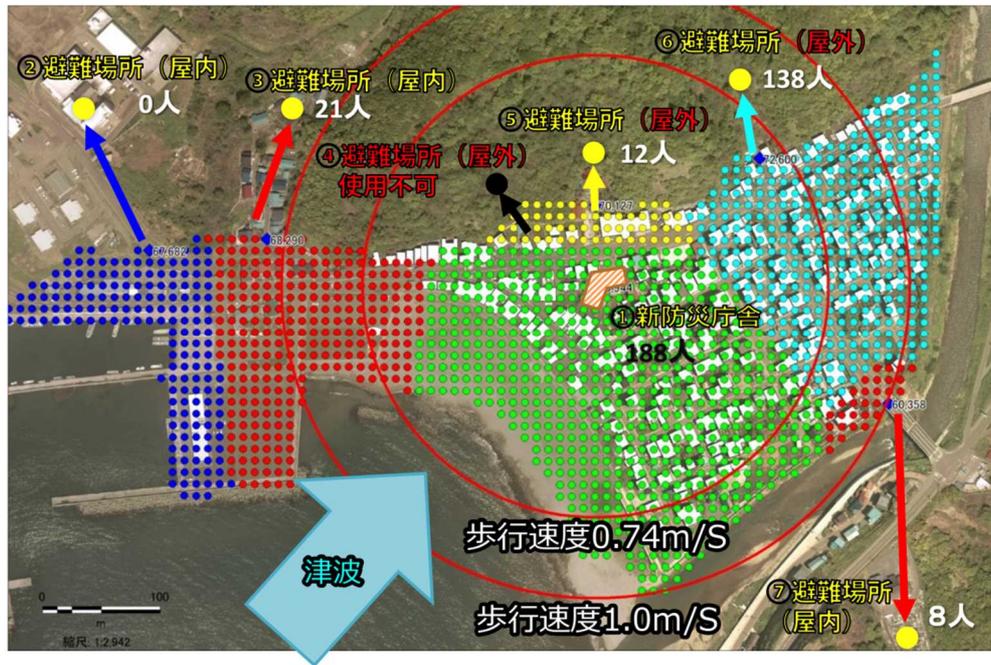


図 10. モデル地区における避難シミュレーションに基づくリスク評価例。実測した避難速度 (1.0m/s) を元に、それぞれのエリア毎 (色で区分) に最適な避難場所 (①～⑦) を設定することで最適化を図った (北海道立総合研究機構地質研究所 [課題番号: HRO_02]) 。

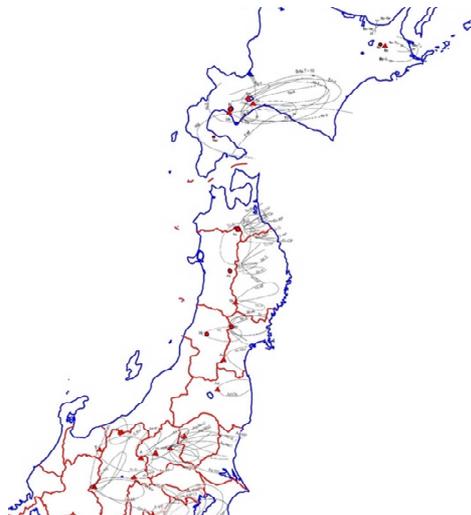


図 11. 新編火山灰アトラスから抽出した関東以北における 9000 年から 12 万年前の時代で厚さ 10 cm 以上の軽石層の分布範囲 (灰色線)。風化が進んだ 9000 年以上前の軽石層がすべり面形成に大きな役割を果たしており、これらの地域が地震によるテフラの崩壊の発生が危惧される場所と考えられる (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI10]) 。

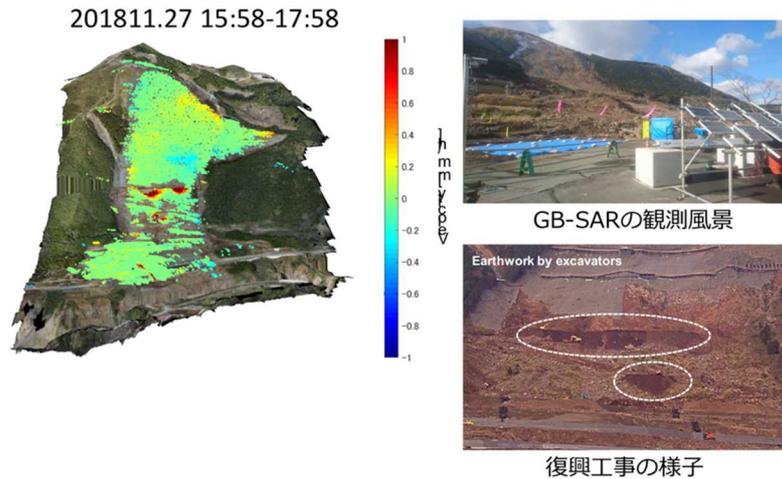


図 12. 熊本県南阿蘇村立野に設置している 2 台の GB-SAR の連続計測による計測結果。工事に伴う変位を観察したところ明瞭な対応（左図中の赤色で示された部分）が確認できた（東北大学災害科学国際研究所 [課題番号：IRID03]）。

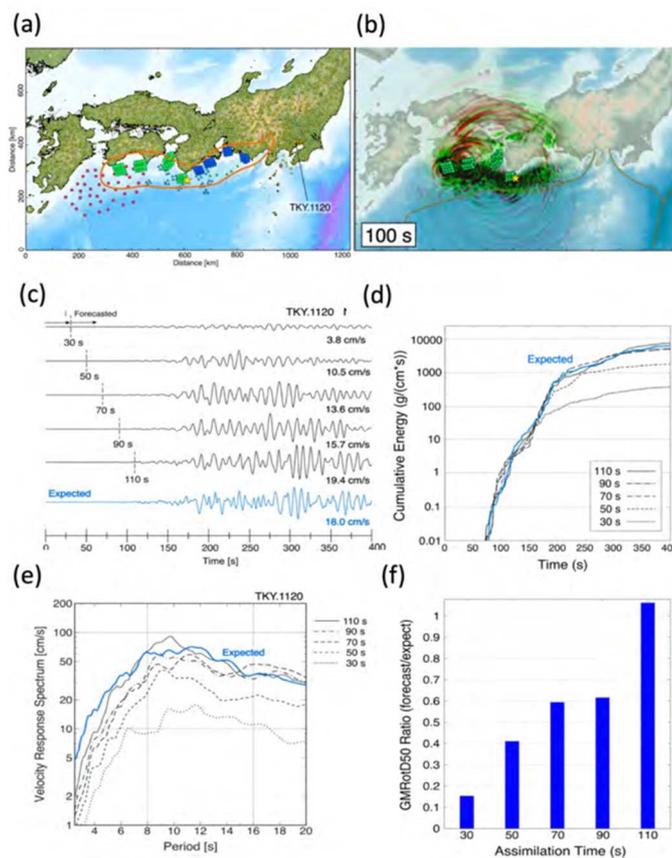


図 13. 南海トラフ地震による長周期地震動のデータ同化と即時予測実験。(a) 南海トラフ地震震源モデル（内閣府による）と陸域及び海域観測点の配置，(b) 南海地震モデルによる地震波伝播シミュレーション，(c) 都心部の長周期地震動の予測結果（同化時間 30 秒，50 秒，・・・110 秒の場合）と期待される地震動（青線）の比較，(d) それぞれのデータ同化時間による予測波形と期待波形の弾性エネルギーの積算値の比較，(e) 速度応答スペクトルの比較，(f) 固有周期 8 秒での速度応答スペクトル比（予測／期待）の比較（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_14]）。

P波検知方法、上下動震度の活用を検討

現在は、S波が観測されるまで待つ必要がある

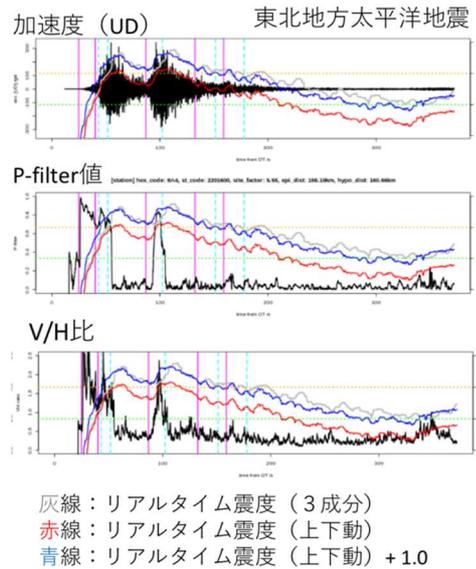
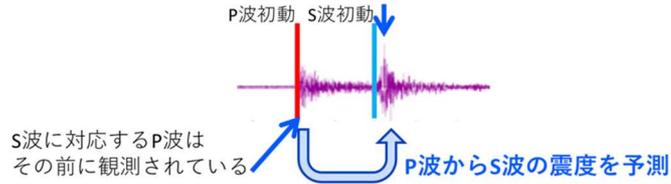


図 14. PLUM 法の機能向上の概念図。S 波群中の P 波を検知する方法を發展させ、上下動成分のみから得られる震度を予測に用いることで PLUM 法が持つ近い未来しか適用できないという弱点を克服できる可能性を示した (気象庁 [課題番号: JMA_06])。

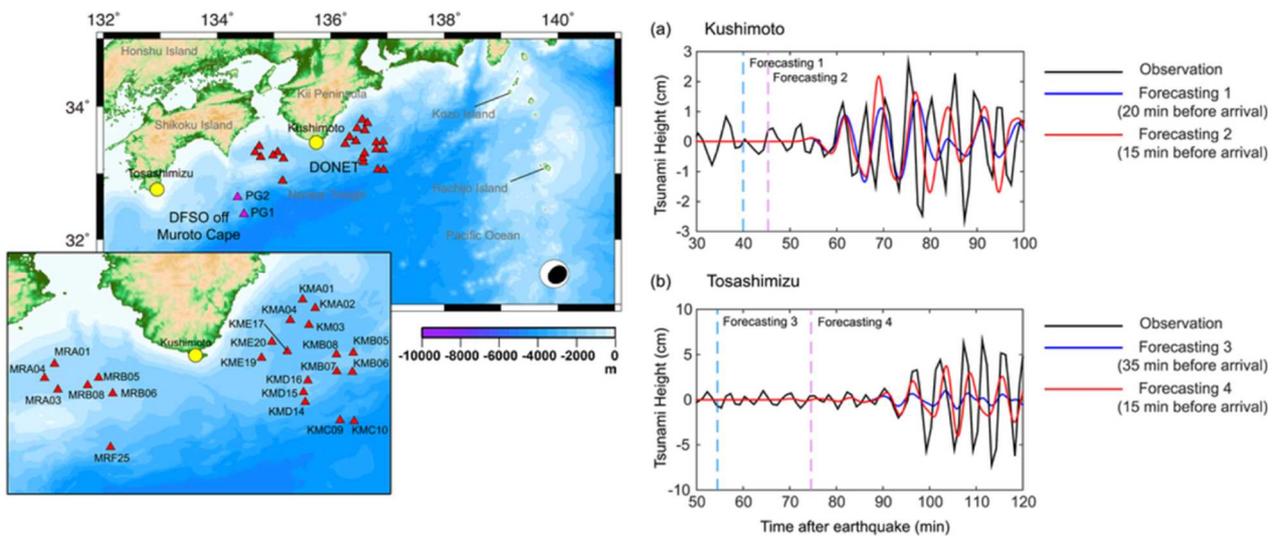


図 15. 2016 年鳥島沖地震に対する Green 関数を用いたデータ同化に基づく津波即時予測手法結果。左図：震源と同化に利用した観測点 (赤) 予測ターゲット地点 (黄) を示す。右図：縦点線の時点における津波予測 (青, 赤の線) と観測記録 (黒線) との比較を示す (弘前大学理工学研究科 [課題番号: HRS_02])。

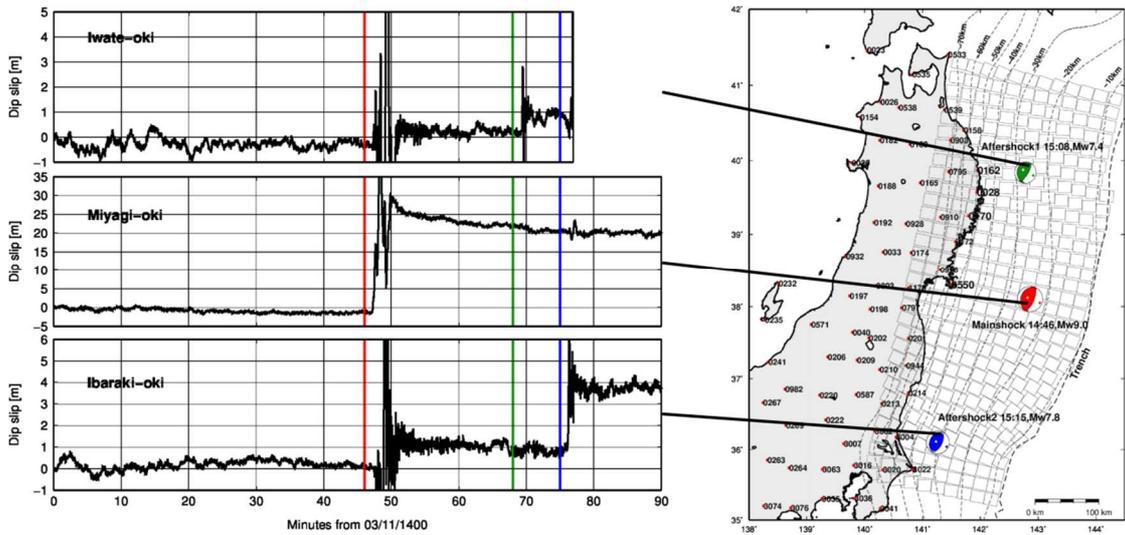


図 16. PTS によって推定された 2011 年東北地方太平洋沖地震とそれに引き続く余震に伴う断層すべりの時系列。右図の各断層パッチのすべり時系列を左に示す。左図中の赤線が 2011 年東北地方太平洋沖地震本震，緑線がそれに引き続く岩手県沖地震，青線が最大余震である茨城沖地震の発生時刻を示す（東北大学理学研究科 [課題番号：THK_12]）。

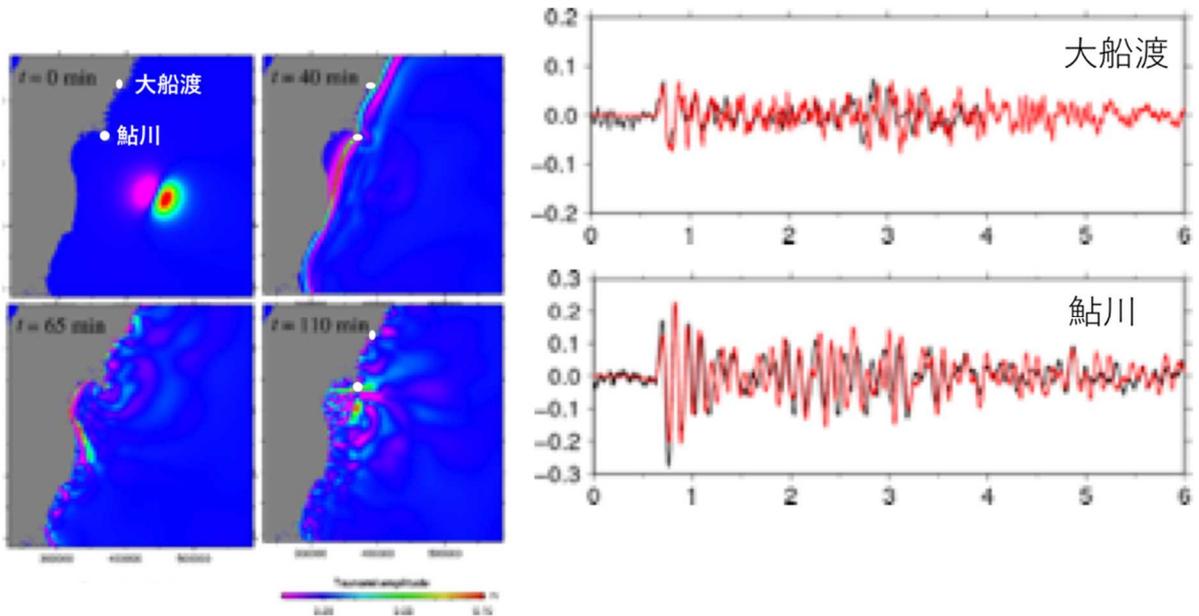


図 17. 2008 年 7 月 19 日 福島県沖の地震 (M6.9) の観測事例の津波数値計算による再現。左図：波面場の時間発展。右図：赤色が大船渡と鮎川における津波の計算値，黒色が観測値をそれぞれ示す。縦軸の単位は m (気象庁 [課題番号：JMA_06])。

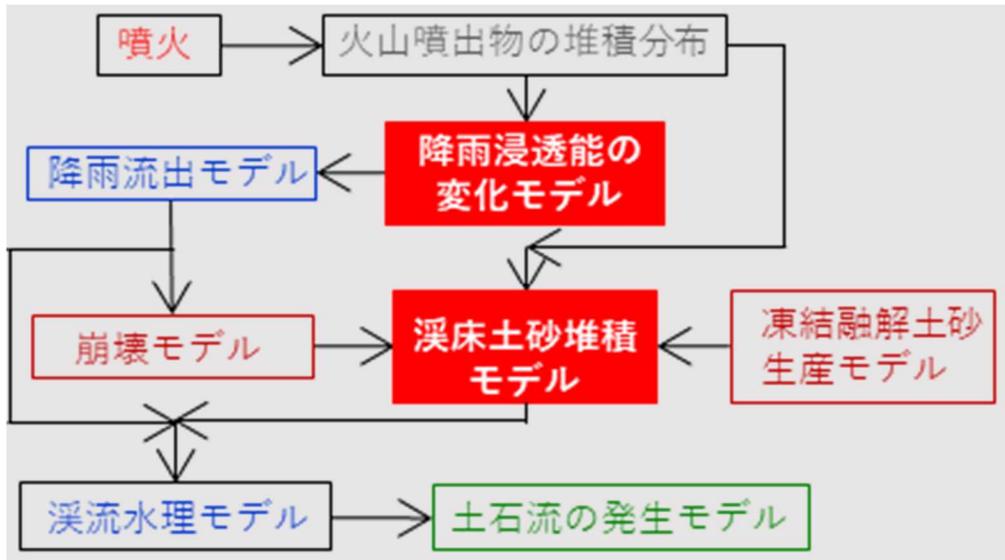


図 18. 噴火後の長期的な土石流発生モデルのフレームワーク。降雨浸透能は火山灰の堆積により減少するが、徐々に回復する。一方で渓床堆積土砂量は、土砂生産現象により増加、土石流が発生すると減少する（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI_12]）。

現初期値 (Suzuki, 1983)
+ 新ATM (開発中)

逆解析値 (Ishii, 2018)
+ 新ATM (開発中)

Total Deposition (g/m²)

Total Deposition (g/m²)

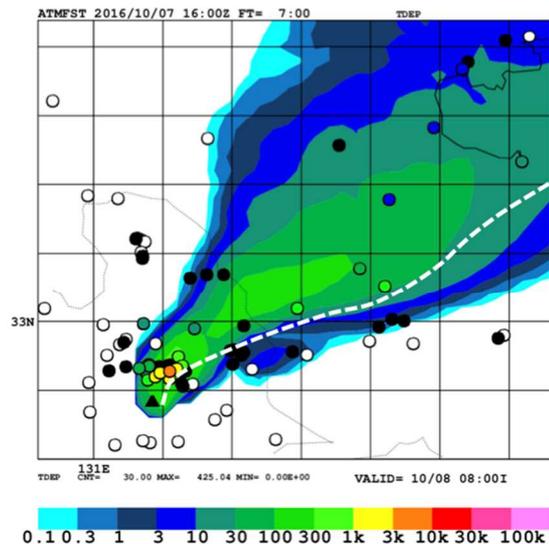
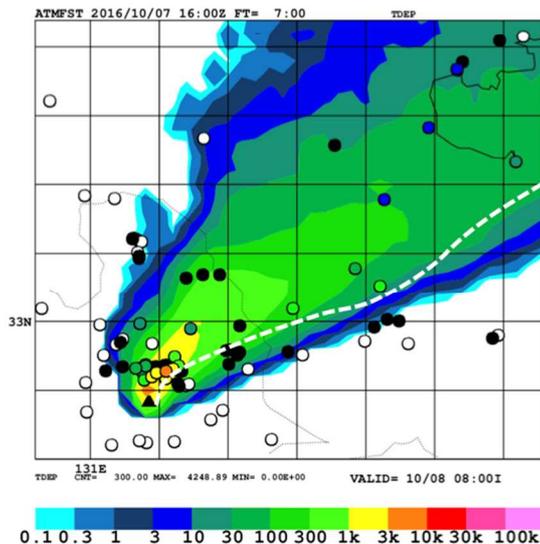


図 19. 降灰のデータ同化による初期値の不確定性。2016年10月8日01時46分阿蘇山噴火に対して降灰データを逆解析して新しい気象庁移流拡散モデル (JMA-ATM) を実行し、初期値の不確定性を示した。図中の黒丸が降灰があった箇所、白丸が降灰が無かった場所をそれぞれ示す (気象庁 [課題番号：JMA_07])。



図 20. 日本放送協会による「体感・首都直下地震ウィーク」を刺激とする社会的実験調査（パネル調査）の実施結果（東京大学情報学環 [課題番号：III_01]）。

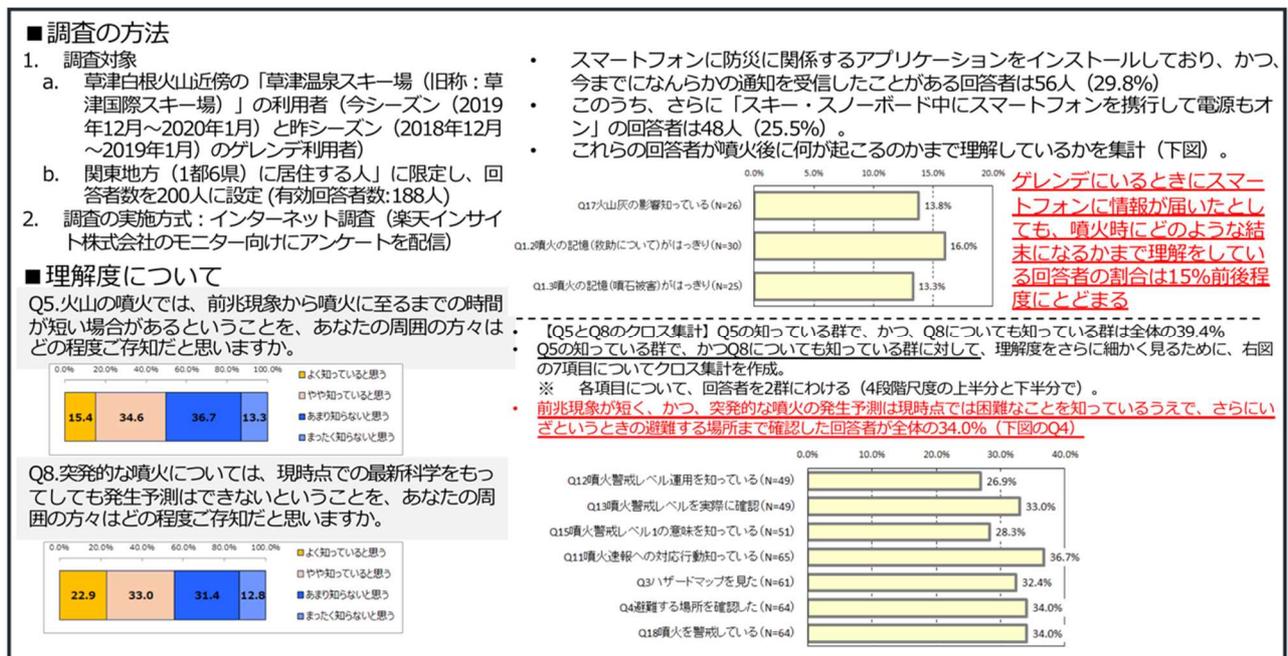


図 21. 2018年1月の草津白根山の噴火事例において、噴火に関する情報が火山近傍の関係団体にどのように伝達され、理解され、情報内容の課題があったのかを分析することを目的とし、草津白根火山近傍の「草津温泉スキー場」の利用者を対象としたインターネット調査結果の抜粋（公募研究，東北大学 [課題番号：KOB016]）。

1 (6) 防災リテラシー

「防災リテラシー」計画推進部会長 高橋 誠

(名古屋大学大学院環境学研究科)

副部会長 木村 玲欧

(兵庫県立大学環境人間学部)

地震・火山噴火現象の理解・予測を災害の軽減につなげるためには、地震・火山噴火といった自然現象に起因する災害誘因（外力：Hazard）だけでなく、地形・地盤などの自然環境や、人間の持つ特性や社会の仕組みといった災害素因（自然素因と社会素因、たとえば脆弱性：Vulnerability）を理解し、地震・火山噴火による災害の発生機構を総合的に解明することが必要であり、また、それらの研究成果を社会に対して適切に還元することが求められる。研究成果の社会還元を適切に行うためには、社会が地震・火山噴火災害による被害の発生を抑止・軽減したり、また、その対策を考えたりするために必要な知識体系を明らかにすることが必要である。

現時点における科学的研究成果に鑑みると、災害誘因としての自然事象に関する理解や予知・予測、災害誘因と災害素因との結び付きによって災害が発生する要因や機構に関する理解から、被害が発生した場合の社会の対応にかかわる方策を得ることによって、災害の軽減を図ることが目指されている。とりわけ災害素因については、構造物や土地利用にとどまらず、人間の認知や行動、社会体制などにおける脆弱性の理解、災害シナリオの作成や災害情報の発信といった災害予防の側面に重点が置かれる。また、過去の地震・津波・火山災害事例を対象に、被害・応急・復旧・復興といった災害過程に沿った社会の回復力に焦点を当てた研究も行われている。一方、社会の防災リテラシーの実態やニーズに関する調査に基づいてその向上のために必要とされる知識要素を探り、教材や研修プログラムの開発につなげようとする実践的な試みも行われている。

本計画を災害科学の一部として捉え、それらの研究を総合的な災害科学研究として推進するためには、理学だけではなく、建築学・都市計画学・土木工学・情報工学といった工学、歴史学・心理学・社会学・法学・経済学・地理学といった人文社会科学など、防災・減災に関連する諸研究分野との連携を図る必要がある。また、研究成果の社会還元に関しては、マイクロジオデータやオープンサイエンスの手法なども活用しつつ、産業界や行政機関、一般市民などのステークホルダーとの連携が求められる。

防災リテラシー部会は、基本部分を前計画における地震・火山災害部会から引き継ぎながら新たに設置された。防災・減災に対する社会の要請を意識し、理学・工学・人文社会科学の研究者が連携することによって、災害事例に基づき、災害の発生要因を災害誘因と災害素因とに関連づけて解明する研究を従前どおり推進するとともに、社会における防災リテラシーの実態調査や災害軽減に効果的な知識体系要素の探求などを通して、地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究を行うものである。

4. 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

社会とのかかわりにおいて地震・火山噴火災害の発生機構を理解するためには、自然

事象が生じる場所や地域の歴史的・地理的特性は重要な研究項目である。本年度は、災害誘因としての場所限定性の強い津波について、その常習地である岩手県山田町船越地区を事例に、「陸中国閉伊郡第拾七区船越村絵図面」、「山田警察分署所轄海嘯被害明細図」など、津波災害発生前後の史料を収集・解析し、当時の地形や被害状況との対応関係を復元・可視化した(図1)。同地区の中心部は、江戸時代にいくつかの枝村を差配する親村として成立し、明治維新後は役場所在地となったが、明治29年の明治三陸地震津波災害では、半島と陸地を繋ぐトンボロ(陸繋砂州)部分がほぼ壊滅した。リアス式海岸に特徴的な急傾斜地形と集落立地との関係に着目すると、標高と被害程度との間に明瞭な対応関係があり、そのことが被災後の高台移転につながったことを明らかにした(東北大学災害科学国際研究所[課題番号:IRID05])。

同じく津波災害については、2011年東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)を事例に、宮城県の津波被災地における災害対応過程や生活条件の地域間比較分析を行った。災害後の避難過程でコミュニティの分解が進んだが、まとまりを強くする場面もあった。特にリアス漁村では、仮設住宅入居時でも集落のまとまりが維持され、住宅再建や集団移転、防潮堤建設事業といった地区再建方針も主体的に決定されたケースがあった。しかし、それにもかかわらず、集落移転が地区の生活環境条件を悪化させ、災害文化の継承にもネガティブな影響を及ぼしたことなどを明らかにした(図2)。これらのことから、災害経験が地域社会のまとまりを強くする反面、地域の社会特性に応じた災害対応がとられないときに、逆に社会の脆弱性が增大することが示唆された(名古屋大学[課題番号:NGY_06])。

一方、近代以前の歴史地震に関しては、国宝・島津家文書のうちに伝来する「江戸大地震之図」(東京大学史料編纂所所蔵)をもとに、安政江戸地震(1855年)における被害の状況と人々の対応や復興過程の実態を検討した。この絵巻の史料的価値は未検討だったが、文献史料と丹念に照合すると、絵巻に描かれた内容や表現が事実とよく符合した。つまり、この史料が事実に基づいて特定の場所や出来事を描いており、歴史資料としての信頼度が高いことを明らかにした。その上で、地震や火事による被害状況や、仮設住宅や瓦礫の処理、米の配給などの復興課題が現代とも共通し、歴史的な経験が今後の防災施策や復興施策の検討に資すること指摘した(図3)(杉森,2020,東京大学史料編纂所[課題番号:UTH_02])。

中越地震や東日本大震災後の集落復興においては、危険区域の設定や移転用地の確保などに土地制度上の問題が広範に生じた。土地所有・利用にかかわる私権制約の問題は、観測技術の進展によって災害誘因の予測が精緻化されているものの、たとえば災害危険度の高い活断層近傍地域において被害軽減を図る土地利用規制・建築規制が進まないことと関連する。こういう問題意識のもとで、新潟県中越地方における割地制度と土地総所有制の実態を調べ、現代の土地利用施策への応用可能性を検討した。その結果、土地から生産される利益の配分と災害による被害の分散のためにこの2つの制度が運用されてきたことがわかった。地域全体で利益を共有し、暮らしの再建を目指せるような制度づくりが重要であることを指摘した(図4)(兵庫県立大学[課題番号:HGY_02])。

また、災害対応・復興に対して地震・火山観測情報がどのように活用されてきたのかという問題について、口永良部島新岳と箱根大涌谷の火山噴火対応、兵庫県加古川市養田南地区での地区防災計画策定における住民と専門家とのリスクコミュニケーションを事

例に検討した。前者については、気象庁による噴火警戒レベルの判断基準となる観測情報に対して住民が敏感に反応していたことを確認した。後者では、統合地震シミュレーターによる時刻歴応答解析と建物構造種別ごとの被害分析の結果を地区レベルで詳細に可視化・提示し（図5）、これらの情報が、住民自身が対策を具体的に検討する際に有効に機能したことを確かめた（兵庫県立大学〔課題番号：HYG_01〕）。

（2）地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

地域社会は災害に対処する仕組みを備える一方で、近年の社会変動によって潜在的な脆弱性を増大させており、そのことは災害の発生によって被害を拡大する要因となる。災害の軽減を図るためには、こうした脆弱性をどう捉え、それをどう解決するかが重要となる。災害が生活に与える影響の把握方法について、本年度は、地域に潜むリスクを脆弱性の観点から評価し、それに対する方策を検討した。富山県を対象に、国勢調査データに基づいて人口密度ならびに乳幼児・高齢者人口の密度を算出し、脆弱性尺度として災害時弱者支援力「見守られ率」（成年一人当たりの乳幼児・高齢者数）を地図上で可視化した（図6）。その結果、乳幼児ならびに高齢者に対し、防災意識を高め、自助力を高めるアプローチが必要であるという課題が明らかになった。それに対する方策として、保育園や高齢者福祉施設等でのレクリエーション活動において活用可能な「富山の防災を知る歌」を設計・開発した（富山大学〔課題番号：TYM_03〕）。

一方、地震・火山等の自然現象に関する知識、また災害予測情報等の活用可能性には個人差も大きく、より効果的な防災対策を可能にするためには、こうした個人差をよく理解する必要がある。認知科学のアプローチから、災害情報を活用する個人の態度・能力・考え方と関係する「災害を生きる力」因子を整理する調査設計のために、本年度は基礎的検討と試行調査を行った。南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域在住の成人240名を対象としたウェブ調査を実施し、「通常の大地震発生とそれに伴う大津波からの避難」と「南海トラフ地震臨時情報（巨大地震警戒）に基づいた避難」の両シナリオ間での避難見通しの差異を検討し、その程度には大きな差はなかったものの、前者のシナリオでは「絶対避難しない」、「必ず避難する」の回答が後者のシナリオの回答より多いなどの結果を見いだした（図7）（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID06〕）。

個人レベルにおけるリスク認知と避難行動とのギャップについては、地理空間情報とICT（情報通信技術）による新たな災害情報共有システムの構築と利活用方法の開発を目指して、地理空間情報、GIS、衛星測位に現代的ICT技術を統合した改良型基盤システムを構築し、活用方法を開発する計画に着手した。具体的には、WebVR技術を用いた疑似避難訓練システムを開発して3回の実験を行った（図8）。このようなシステムを用いれば実施困難な避難実験を行うことが可能となり、たとえば地形の複雑な地域において「海から離れなければ」という意識で逆に津波が来る方向に逃げようとするなど、津波災害時に注意すべき行動が明らかになった（北海道大学〔課題番号：HKD_07〕）。

地震・火山噴火に関する一般市民の科学的知識レベルの向上は、緊急性の高い火山噴火災害の場合、喫緊の課題である。桜島は現在活動中の火山のうち人口50万以上の大都市に最も近接する火山であり、科学者と市民との共同によって観測から防災に至る一連の対応システムの構築が試みられている。そのための基礎資料として、約100名の一般市民を対象に噴火情報に関する意識調査を行った。鹿児島市などの隣接地域において噴

火警戒レベルの認知度が有意に高く、噴火に至るかどうかが不明であっても観測データに異常が見られる場合の情報が必要とされていること、情報の信頼性の高い公的機関や専門機関からの情報発信のニーズが高いこと、火山災害を減らすためには災害情報にかかわる取り組みが重要だと考えられていることなどを明らかにした(図9)(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI13])。

一方、日本有数の観光地に位置し、近年大きな地震や火山噴火が発生した熊本県阿蘇地域では、研究者と国や県、地元行政機関などが連携して、地震・火山観測の準リアルタイムデータ表示システムの設置を行うとともに、観光客に触れる機会の多いジオパークガイドの養成を通して防災リテラシーの向上を図る方策を展開してきた。本年度は、その養成講座の講習内容を検討するために、現役ガイドと新人ガイドに対して熊本地震に関するアンケート調査を実施するとともに、現役ガイドの活動に関するアクションリサーチを行った(図10)。その結果、新人ガイドと現役ガイドの間には活断層認知率など科学的知識レベルに差異があり、地球科学リテラシーの向上につながる講習内容に課題があることを見いだした(京都大学理学研究科[課題番号:KUS_03])。

また、2014年に深刻な御嶽山噴火被害を経験した長野県木曾地域は、観光地に位置しながらも超過疎の問題を抱えており、地元の火山防災力の向上を図る担い手の確保に腐心している。そのため、専門家と県や地元自治体が連携して、火山マイスターとして認定された地域内外の一般市民のネットワークを専門家が支援し、火山マイスターの活動記録をもとに、必要とされる知識や防災効果を評価・検証・フィードバックする制度を構築した(図11)。本年度は、基礎資料を作成するために、木曾地域の関連行事における参与観察、関係者へのインタビュー調査などを行い、マイスターの属性を整理するとともに、過去2年間の活動記録を蓄積した(名古屋大学[課題番号:NGY_06])。

地震・火山研究の成果を防災対策や災害対応に活かすための、より一般的・体系的な取り組みとして、実務者(行政担当)を対象にした防災リテラシーの向上のための研修プログラムを開発し、開発した研修プログラムをモデルケースとして実装し、その効果を検証することでプログラムの高度化を図る研究に着手した。本年度は、その基礎となる「育成したい人材の特性」「育成フレームの同定」「育成プログラムのプロトタイプ」を検討した(図12)。特に育成プログラムにおいては、一方向の研修だけではなく、研修によって一定の基礎知識が共有された段階で、育成対象者から研究者コミュニティへのフィードバックを実施し、双方向のリスクコミュニケーションが実現することを目指したプログラムの試作を行った(新潟大学[課題番号:NGT_02])。

最後に、「オープンサイエンス」(市民参画型科学,市民参画型データ収集・管理)をキーワードとして、オープンサイエンスの手法を地震防災学の分野にも導入し、地震・火山・津波災害データベースの構築・共有を進めながら、それを通じた防災リテラシーの育成を目指す取り組みを開始した。取り組み内容は多岐にわたる研究項目から構成されるが、本年度は、(1)サイエンスミュージアム「阿武山地震観測所」の運営による地震リテラシーの向上、(2)地震・津波避難訓練支援ツール「逃げトレ」の導入による市民参画型の地震・津波訓練の推進、(3)自然災害に関する歴史資料の解説を行う「みんなで翻刻」プロジェクトの推進、(4)内陸地震観測「満点計画・0.1満点計画」によるオープンサイエンス型地震学の試行を実施し、それらの基本フレームとアウトカムを整理・図式化した(図13)(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI14])。

これまでの課題と今後の展望

今年度から開始された観測研究計画においては、地震・火山噴火現象の理解・予測を災害の軽減につなげるための災害科学の確立を目標として、防災・減災に対する社会の要請を意識しながら、全国の大学における理学・工学・人文社会科学の研究者が連携することによって、地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の研究と地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究を実施してきた。

具体的に、地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の研究においては、近世・近代の史料データベースなどを活用して被害の状況や社会の対応を検討した。また東日本大震災などの近年の災害を事例に、災害復興などにおける社会対応の課題について検討した。地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究に関しては、災害の社会素因である脆弱性を地域および個人レベルで評価・可視化する手法を開発するとともに、社会の防災リテラシーの水準を把握した。また、オープンサイエンスやGIS、リスクコミュニケーションなど新しい手法を取り入れ、行政機関や一般市民などと連携しながらリスク認知能力を涵養したり知識レベルを向上させたりする取り組みを開始し、具体的な研修プログラムのプロトタイプも作成した。

今後は、初年度である本年度における検討をさらに深化させながら理論構築を図っていくことが重要である。地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の研究においては、史料データベースといった歴史資料などに基づき過去の地震・津波・火山災害などの自然災害事例を蓄積し、当時の人々の対応や教訓、復興過程などについて総合的に検討する。また、災害誘因の事前評価と災害素因、とりわけ脆弱性概念とを結び付けて災害発生機構の理論を洗練させ、とりわけ災害の予測や予防、災害対応にかかわる知識要素を検討することによって防災リテラシーの体系化を図る。地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究においては、ジオパークガイドや行政職員など、対象を絞った講習・研修プログラムのプロトタイプについて、前段にかかわる最新研究成果を取り入れながら試行・フィードバックすることも必要である。その際、GISを利用した空間データベースの構築、地震・火山情報の配信システムの整備、オープンサイエンスやワークショップといった市民参加型リスクコミュニケーションなど、新しい手法の開発を継続させることが重要である。

成果リスト

秋本弘章，橋本雄一，河合豊明（2019），「地理総合」とGIS—その意義と汎用・基礎データの
存続・課題と支援・実践，学術の動向，24(11)，18-22

蝦名裕一，行谷祐一，今井健太郎（2019），岩手県山田町における明治三陸津波以前の歴史地形
復元，2019年度歴史地震研究会徳島大会予稿集，0-23

Goltz, J., G. Nakano, H. Park, and K. Yamori (2020), Earthquake ground motion and
human behavior: Using DYFI data to assess behavioral response to earthquakes,
Earthquake Spectra, doi:10.1177/8755293019899958

橋本雄一編著（2019），五訂版GISと地理空間情報—ArcGIS 10.7とArcGIS Pro 2.3の活用，古今
書院，175pp

橋本雄一，塩崎大輔（2019），津波浸水想定データを援用した避難訓練可視化システムの開発と

- 利活用, 地理情報システム学会講演論文集, 28, 2019, CD-ROM
- 橋本雄一 (2019), 汎用・基盤的データの存続と地理教育, 日本地理学会発表要旨集, 95, p16
- 井口正人, 中道治久 (2019), 桜島の大規模噴火を考える, 自然災害科学, 38(3), 279-345
- 井口正人, 轟朝幸, 村岡猛, 平田輝満, 佃健次, 小田切義憲 (2019), 今ここにある桜島噴火, ていくおふ, 157, 4-15
- 井口正人, 轟朝幸, 村岡猛, 平田輝満, 佃健次, 小田切義憲 (2020), 今ここにある桜島噴火 (2), ていくおふ, 158, 4-17
- Inoguchi, M., K. Tamura, R. Hamamoto (2019), Establishment of Work-Flow for Roof Damage Detection Utilizing Drones, Human and AI based on Human-in-the-Loop Framework, IEEE Big Data, 4618-4623, doi.org/10.1109/BigData47090.2019.9006211
- 井ノ口宗成, 田村圭子, 濱本両太, 堀江啓 (2019), ドローンによる空撮画像を活用した屋根被害把握と被災者支援への利用ー2019年山形沖地震における村上市の対応を事例として, 土木計画学研究・講演集, 60, CD-ROM
- Ishibashi, R., R. Nouchi, A. Honda, T. Abe, M. Sugiura (2019), A Concise Psychometric Tool to Measure Personal Characteristics for Surviving Natural Disasters: Development of a 16-Item Power to Live Questionnaire, Geosciences, 9(9), 366
- Ishimizu, E., M. Sakamoto (2019), Issues of Japan's volcanic disaster prevention system as viewed from overseas alert systems, Japan Geoscience Union Meeting 2019, MZZ50-P03
- 石水英梨花, 阪本真由美 (2019), 火山災害軽減に効果的な地域の関係性に関する考察ー口永良部島におけるヒアリング調査から, 日本火山学会2019年度秋季大会, p111
- 川村壮, 橋本雄一, 戸松誠, 竹内慎一 (2019a), 積雪寒冷地の港湾都市における建物立地状況と津波からの避難可能性に関する空間分析, 地理情報システム学会講演論文集, 28, CD-ROM
- 川村壮, 橋本雄一, 戸松誠, 竹内慎一 (2019b), 港湾都市の津波浸水想定地域における施設立地の変化, 日本地理学会発表要旨集, 96, p50
- 三好達也, 橋本雄一 (2019), 北海道におけるGIS コミュニティの発展, 地理情報システム学会講演論文集, 28, CD-ROM
- Nakamichi, H. (2019), Mitigation of volcanic hazard in Sakurajima, Japan, through the coordinating committee and through communication with the public, Japan Geoscience Union Meeting 2019, MZZ50-03
- Nakamura, H., K. Yamaoka, M. Horii, R. Miyamae (2019), An open dialogue approach to volcano disaster resilience and governance: action research in Japan in the aftermath of the Mt. Ontake eruption, J. Disaster Res., 14, 829-842, doi:10.20965/jdr.2019.p0829
- Noda, T., Yamori, K., Harada, K. (2019), Development of disaster response applications and improvements in regional disaster prevention capacity, Based on collaborative information use, J. Disaster Res., 14, 375-386, doi:10.20965/jdr.2019.p0375
- 奥野祐介, 塩崎大輔, 橋本雄一 (2019), 津波と土砂崩れによる複合災害を想定した集団避難行動分析ー北海道稚内市を事例としてー, 地理情報システム学会講演論文集, 28, 2019, CD-ROM

- 小野塚仁海, 橋本雄一 (2019), 生鮮食料品店への近接性からみた日本における買物困難圏の推定, 地理情報システム学会講演論文集, 28, CD-ROM
- 小野塚仁海, 橋本雄一 (2019), 北海道北部における買い物困難圏と移動販売車の果たす役割, 日本地理学会発表要旨集, 96, p90
- Sakamoto, M. (2019), Governance for Trans-boundary Volcanic Disaster: a case of 2010 Eyjafjallajkull Eruption, Japan Geoscience Union Meeting 2019, MZZ50-P01
- 阪本真由美, 中道治久, 荒島千鶴, 高橋若菜, 荒木田勝 (2019), 越境火山災害をめぐる国際リスクコミュニケーション—2010年アイスランド火山噴火対応の事例より, 日本火山学会2019年度秋季大会, B2-18
- 澤田雅浩 (2019), 割地制度の実態把握と被災地への応用可能性に関する一考察—新潟県長岡市信濃川沿岸での実態調査を通じて, 地域安全学会論文集, 35, 59-66
- 杉森玲子 (2019), 1855年安政江戸地震後の旗本屋敷の状況, 2019年前近代歴史地震史料研究会講演要旨集, 37-38
- 杉森玲子 (2020), 「江戸大地震之図」を読む, KADOKAWA, 272pp
- Sugiura, M., S. Sato, R. Nouchi, A. Honda, R. Ishibashi, T. Abe, T. Muramoto, F. Imamura, (2019), Psychological processes and personality factors for an appropriate tsunami evacuation, *Geosciences*, 9(8), 326, doi:10.3390/geosciences9080326
- 杉山高志, 矢守克也 (2019), 津波避難訓練支援アプリ「逃げトレ」の開発と社会実装—コミットメントとコンティンジェンシーの相乗作用, 実験社会心理学研究, 58, 135-146
- 田村圭子, 井ノ口宗成, 堀江啓 (2019), 地震災害における生活再建支援業務マネジメントツールを活用した罹災証明書発行業務解析, 電子情報通信学会安全・安心な生活とICT研究会, ICTSSL2019-10
- 田中重好 (2019), 災害とコミュニティ, 第81回全国都市問題会議: 防災とコミュニティ, 3-7
- Tanaka, S. (2020), Design toward the Systematization of Disaster Sociology, 尚綱学院大学大学院総合人間科学研究科・人間学論考, 2, 50-90
- Watanabe, T., M. Makimura, Y. Kaiwa, G. Desbois, K. Yoshida, K. Michibayashi (2019), Elastic wave velocity and electrical conductivity in a brine-saturated rock and microstructure of pores, *Earth Planet. Space*, 71, doi.org/10.1186/s40623-019-1112-9
- 安江健一, 廣内大助 (2019), 帯磁率を用いた活断層の変位把握の試み, 日本活断層学会2019年度秋季学術大会, P-14
- 安江健一, 倉橋奨 (2019), 小学生による活断層を紹介するパンフレットの製作, 愛知工業大学地域防災研究センター年次報告書, 15, 59-62

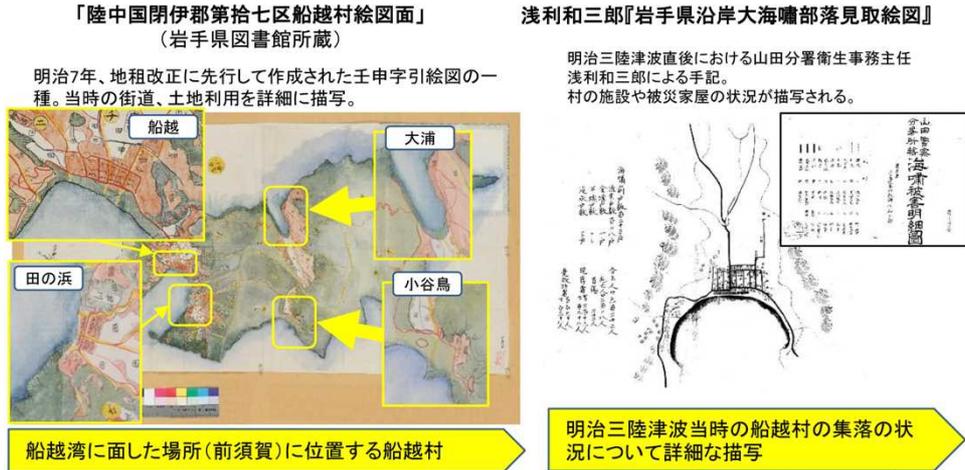


図1. 岩手県山田町船越地区における集落立地・土地利用と明治三陸地震津波被害の復元（東北大学災害科学国際研究所 [課題番号：IRID05]）。

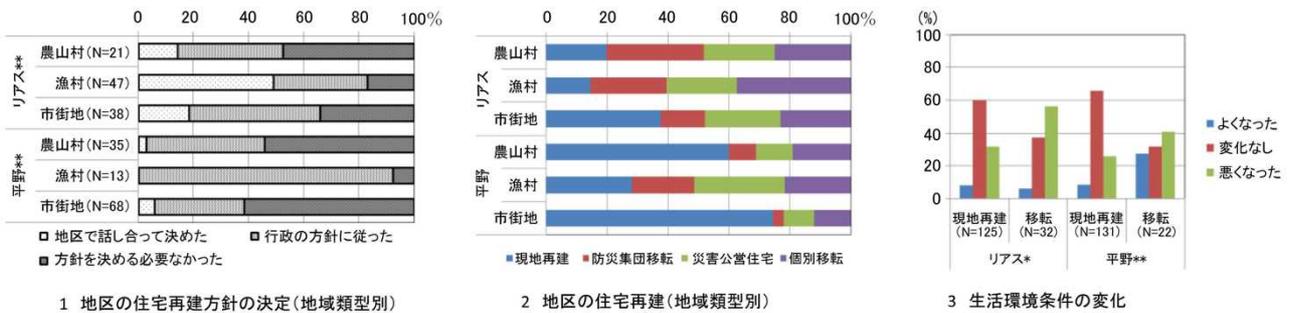
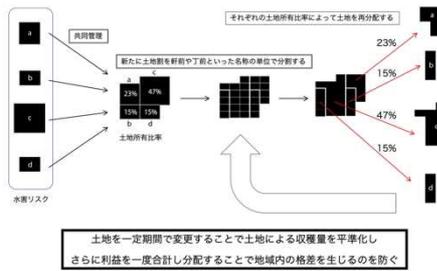


図2. 宮城県の東日本大震災被災地における地区再建方針等の地域的差異（名古屋大学 [課題番号：NGY_06]）。

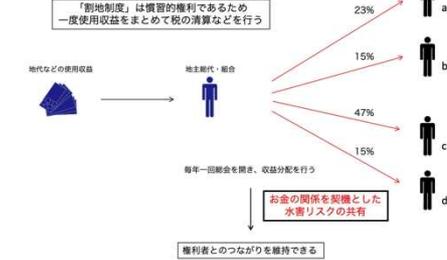


図3. 「江戸大地震之図」に描かれた安政江戸地震（1855年）における被害の状況と人々の対応および関連する文献史料との照合例（東京大学史料編纂所 [課題番号：UTH_02]）。

■ 割地制度の枠組み



■ 割地制度を維持する必要性



■ 今後の防災減災土地利用方策への展開

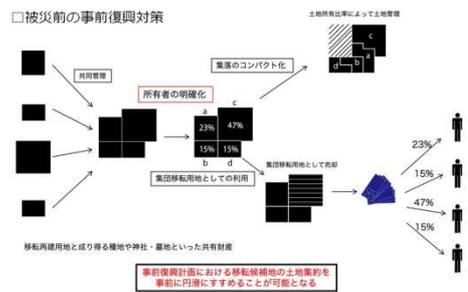
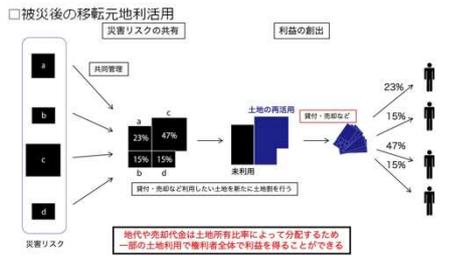


図4. 割地制度の枠組みと維持メカニズムおよび今後の防災減災土地利用方策への展開図式（兵庫県立大学 [課題番号：HGY_02]）。

地震観測情報を地域防災に活用するための方策として、①地区レベルでの地震の揺れの可視化、②ワークショップを通じた地区レベルでの専門家と住民とのコミュニケーションを実施した①想定南海地震（陸側ケース）のNS方向の地表面加速度とEW方向の地表面加速度から作成した波形を活用し、統合地震シミュレーター（IES：Integrated Earthquake Simulator）による時刻歴応答解析を行い、建物の構造種別（木造、S造、RC造）に層間変形角を用いて被害分析を行った。地区において、どこが揺れやすいのか、また、どのような構造種の建物がどこに位置しているのかを詳細に可視化した。

②兵庫県加古川市養田南地区にて実施している地区防災計画策定ワークショップにおいて、本シミュレーション結果を活用したワークショップを実施した。同地区は南海地震による地震・津波が想定されているエリアである。1995年阪神・淡路大震災では震度4、5弱程度の揺れだったこともあり地域住民のなかには「揺れない地域」という認識を持っていた人もいたが、自らが住む地区の揺れが可視化されたことは、建物被害を想定した対策や避難方法について具体的に検討するための意識付けにおいて有効だった。



図5. 地区防災計画策定過程における専門家と住民とのリスクコミュニケーション（兵庫県立大学 [課題番号：HYG_01]）。

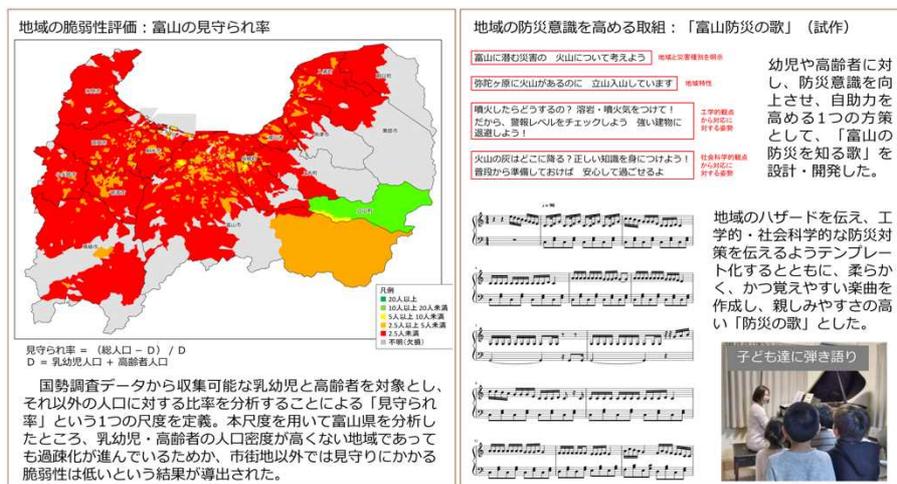
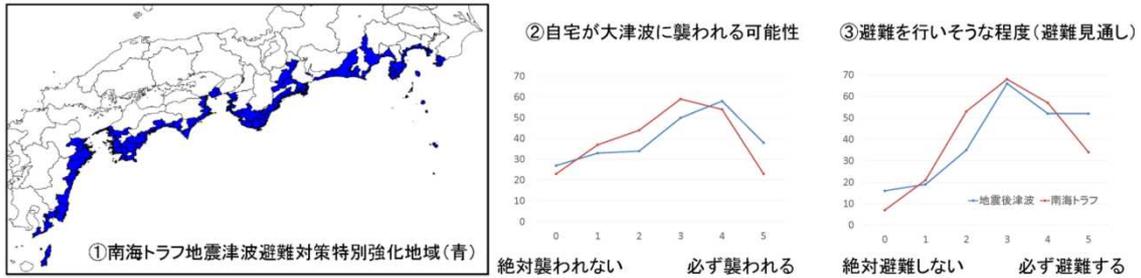


図6. 富山県を事例とした地域の脆弱性評価と地域の防災意識を高める取り組み（富山大学 [課題番号：TYM_03]）。



・シナリオ

- A: 自宅で休日に強い地震(震度6強を想定)に遭遇し停電等で何も情報が入らない
- B: 回答者の居住地域の反対側(紀伊半島沖で回答者を東西に分割)で発生した大地震(M8.3)に基づいた臨時情報「後発地震が発生してからの津波避難では間に合わない可能性のある地域、高齢者などの要配慮者は1週間程度避難」

図7. 津波避難の見通しに関する認知科学的分析の結果例(東北大学災害科学国際研究所[課題番号: IRID06])。

WebVR技術を用いた疑似避難訓練システム 塩崎大輔氏(北大・院)との共同研究

システム概要

- VPS (LAMP環境)
 - MySQL DB: 浸水情報(410,835レコード) - 北海道太平洋沿岸部をカバー
 - ストレージ
- VR疑似避難訓練機体群
 - 避難訓練機能
 - 避難行動再現機能
 - 条件付き避難訓練機能

GoogleStreetViewAPI
リクエストパラメータの位置情報を基に周辺画像を提供

360度カメラ
GoogleStreetViewでは再現できない地域・時期をカバー

VR-

(2)現時点での進捗状況、特に今年度の成果

対象地域外観および実験エリア

第2回実験は最短経路以外をすべてエラーとした。第3回実験では新たな経路を追加し、参加者の行動軌跡を収集

(2)現時点での進捗状況、特に今年度の成果

プロトタイプによるVR疑似避難訓練実験(第1回)

- 北海道大学大学院文学研究科・文学部の学生8名を対象とし、厚岸町における疑似避難訓練を実施
- 端末にはスタンドアロンVRディスプレイのOculusGoを利用
- 周辺画像にはGoogleStreetViewを利用
- 参加した学生8名の内、5名は実際に集団避難実験に参加し、避難ルートを経験済み

(2)現時点での進捗状況、特に今年度の成果

VR疑似避難訓練実験(第2・3回)

- 北海道大学大学院文学研究科・文学部の学生36名、一般モニター12名を対象とし、函館市における疑似避難訓練を実施
- 第2回実験では学生・一般モニター11名を対象に実験を行い、そこで得られたデータを第3回実験にフィードバック
- 周辺画像には独自の360度画像を用意
- 端末にはVRディスプレイのOculusGo及びVivePROを利用

図8. WebVR技術を用いた疑似避難訓練システムの開発と実験(北海道大学[課題番号: HKD_07])。

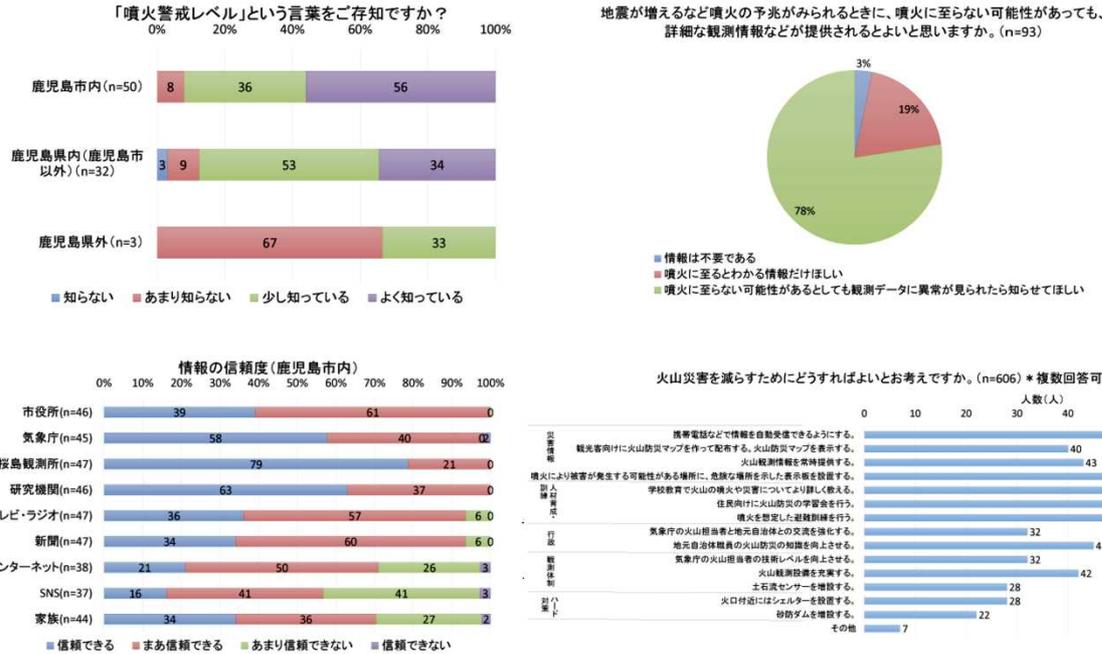


図 9. 火山噴火情報に関する意識調査の結果 (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI13])



図 10. ジオパークガイド養成講座内容を検討するためのアンケート調査とアクションリサーチ (京都大学理学研究科 [課題番号: KUS_03])

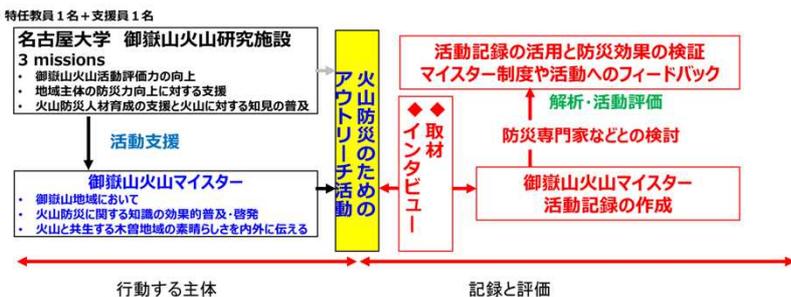
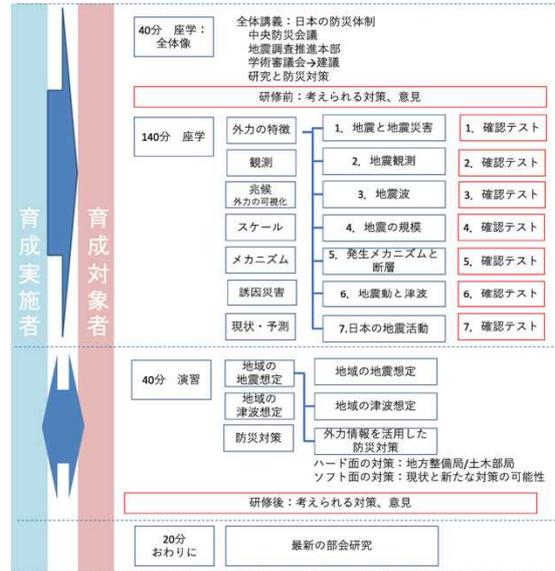


図 11. 御嶽山火山マスターと専門家とのネットワークの仕組み (名古屋大学 [課題番号: NGY_07])



1. 育成したい人材の特性



2. インストラクショナルデザインのADDIEモデルにおける育成フレームの同定

3. 育成プログラムのプロトタイプの検討（地震）

図 12. 地震・火山にかかわる防災リテラシー向上のための実務者対象研修プログラムの開発に向けた3段階の検討（新潟大学 [課題番号：NGT_02]）

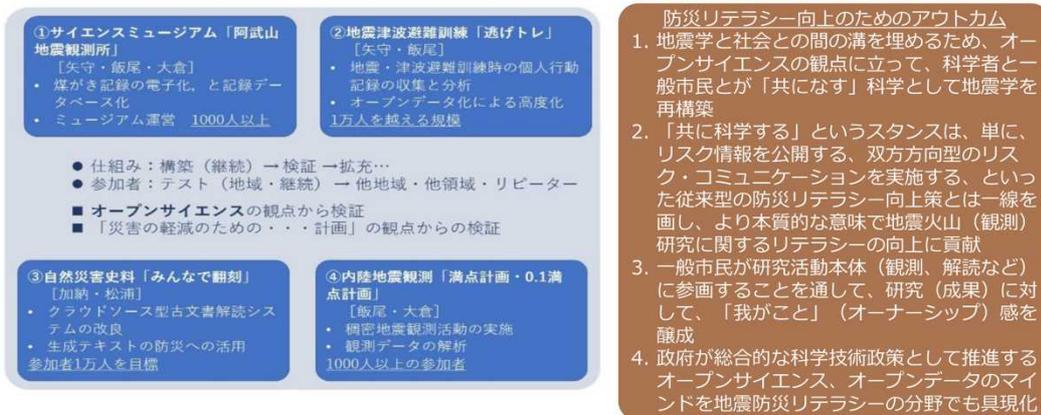


図 13. オープンサイエンス手法による防災リテラシー向上のための基本フレームとアウトカム（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI14]）

1 (7) 史料・考古

「史料・考古」計画推進部会長 榎原雅治

(東京大学史料編纂所)

副部会長 加納靖之

(東京大学地震研究所)

日本列島において近代的な観測機器による地震観測が開始されたのは明治時代前期以降であり、それ以前に発生した地震・火山噴火現象、またはそれらによる災害に関する知見を得るためには、史料や考古資料に基づく地震や火山噴火のデータが必要不可欠である。そのため、日本における地震火山関連史料の収集・編纂とそれらを用いた地震や火山噴火の研究は、明治時代後期より実施されており、各種の地震史料集や火山噴火史料集が刊行されている。

史料や考古資料に基づく地震火山関連のデータは、人間の感覚による記録や地中に残された痕跡に基づくデータであるために、近代的な観測機器を用いた地震・火山の観測データと比較して、その精度が格段に劣るのは当然である。そこで重要になってくるのが、歴史学的手法を用いた史料とその記述の正確な分析・解読や、地質学的手法を活用した考古遺跡における災害痕跡の分析といった、これまでの地震・火山噴火の研究において積極的に用いられてこなかった手法の導入である。地震・火山噴火関連の史料データ・考古データのデータベースの構築や統合と共に、これらのデータを活用した新たな研究手法の検討や利用も重要な研究課題である。このような新たな研究への取り組みは、史料や考古資料に関する読解や分析が十分とは言えなかった従来の研究手法を改善し、それぞれの分野の学術研究に裏打ちされた精度と確度の高い研究を目指すものである。この取り組みによって、地震学や火山学の分野から信頼性が問題視されてきた史料・考古データや、それらに基づく研究成果について、これまで以上の信頼性を確保できると考える。

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

史料や考古資料の分析に基づいて、近代的な機器観測が開始される前に発生した低頻度で大規模な地震・火山噴火やそれらによる災害を調査・研究することは、今後発生するそれらの現象や災害の様相を予測し、その被害の軽減に貢献できると考えられる。百数十年から数百年の期間において同一地域で発生する低頻度大規模地震や火山噴火は、明治時代に開始された近代的な機器観測を用いて、それぞれ数回の事象に関して観測データが取得されているのみである。しかし、低頻度の現象や災害は機器観測の開始以前にも発生しており、機器観測によるデータは皆無であるが、歴史学や考古学で用いられる史料や考古資料には、地震や火山噴火に関連した記述や災害痕跡が含まれている。このような史料や考古資料について地震学や火山学の研究に役立てるためには、従来のような史資料の収集・編纂のみに止まらず、観測データとの比較・検討を目的としたデジタルデータ化とデータベースの構築が必要になってくる。これによって、地震学や火山学の研究に史料や考古資料を活用する際の利便性が向上するだけでなく、信頼性の高い史料・

考古データをデータベース化することで、歴史地震や火山噴火の研究における信頼性を高めていけると考える。

ア. 史料の収集とデータベース化

・地震火山関連史料の収集・分析とデータベースの構築・公開

本研究計画で実施されてきた地震火山関連史料データベースの構築作業について、新たに高精細OCR入力技術を基盤とした構築方法を導入した。これによって、既刊地震史料集の全文デジタルデータ化が大幅に進捗し、本年度は9巻（計7,456頁）分が完了した。この完了分に、前研究計画において完了した9巻（計5,779頁）分を合わせると、計18巻（計13,235頁）分の全文デジタルデータ化が完了していることになる。これは、本研究課題における全文デジタルデータ化対象の既刊地震史料集全28巻（計22,771頁）のうち、頁数にして約58.1%に相当し、データ化は順調に進捗している。また、既刊地震史料集に所収されている史料の校訂作業について、前研究計画においては紙媒体を用いて紙面上で作業を行っていた。本年度からは、新たに開発したTXTファイルからXMLファイルへの変換システムを導入することで、紙媒体を介さずにデジタルデータ上での校訂作業が可能となった。この新たな手法の開発によって、これまで膨大な時間と労力を要していた既刊地震史料集の校訂作業について、従来よりも作業負担の軽減化と効率化が進むと考える（東京大学史料編纂所〔課題番号：UTH_01〕）。

・日本海沿岸地域を中心とした地震・火山現象の解明のための史料収集と解析

主に日本海沿岸地域を中心とした地震・火山現象を解明するために、各地の史料保存機関に所蔵される史資料の調査や、既刊の地震・火山噴火史料集に所収される史料の原本調査に基づく校訂作業を実施した。これらの調査に基づく史料の解析から次のような成果が得られた。

15世紀中頃の越中国（富山県）での地震に関する史料について、典拠史料を調査して検討した結果、文安五年（1448）の地震津波記事のある史料3点は、近世の『和漢皇統編年合運図』の記事を元に加筆・文飾した年代記である可能性が高く、信頼できないことが確認できた。また、三河国渥美郡堀切村（現愛知県田原市）の常光寺に伝来した『常光寺王代記并年代記』の影写本（原本は1945年に焼失）を史料学的に検討した。その結果、本年代記のうち、文正元年（1466年）以降の記事は、事件が発生した時点で書き継がれてきた史料であることが明らかになった。さらに、俳人の岡西惟中が地震の実体験を記した連歌「大地震祈祷連歌」の内容を史料学的に分析し、大坂に居住していた惟中が記した1707年宝永地震の大坂での犠牲者数や橋の被害に関する情報は貴重であり、今後、幕府史料などにみられる被害情報との比較・検討が必要であることを明示した。

地震による家屋倒潰率と1軒当りの死亡者数について、1804年象潟地震における庄内藩預所（由利郡内）、1828年越後三条地震における桑名藩預所3か村・長岡藩栃尾組6か村、1854年嘉永（安政）東海地震における江川太郎左衛門代官領、それぞれの被害事例の史料を分析した。その結果、地盤条件の悪い場所に立地する村落に家屋の全潰率が高い場合があり、既存の活断層近傍の村落に家屋の全潰率が高く、1軒当りの死亡者数も多い場合があることがわかった。

1847年善光寺地震による被害については従来、地震後の火災被害、地震後の犀川湛水

の決壊による水害，本震から5日後三月二十九日の高田地震の被害も含め，一括して捉えられてきた。三月二十四日の善光寺地震の地震被害の実像を知るためには，これらの被害全体から火災や水害等の被害を差し引かなければならない。そこで，善光寺町とその周辺の地震被害について，松代藩の勘定所元締が領内の被害を記した『大地震一件』に掲載された日毎の被害を集計し，その分布の変遷を分析した。その結果，火災や水害を除くと地震による被害はそれほど大きくなく，被害が集中した地域は現在の長野市信州新町周辺であり，善光寺町地域では善光寺境内周辺の町々で被害が大きかった状況等が明らかになった。

昭和36年(1961年)2月2日に発生した長岡地震の災害状況について，2つの歴史資料を検討した。その結果，地震発生時の長岡市の災害対応を記録した「長岡市地震災害救助実施要項 昭和36.2.2」には，被災直後に近い時期に調査した被害数値が記載されており，避難先として想定されていた公共施設(「部落公会堂等」)の被害が大きく，避難が困難であった状況がわかった。また，被災地域の長岡市寺宝町に所在した王寺川小学校5年生28名の作文からなる文集(ガリ版刷)の記述内容について，地震発生時，地震直後の屋内被害，地震から朝までの行動，翌朝の食事，翌朝の学校，翌日夜の状況の6つに分類し，被災直後の具体的な行動や様相を明らかにした。

1854年嘉永(安政)南海地震の被害が描かれている「穴喰浦荒図面」について，絵画的な描写や浸水深等の文字記載に関する地理学的な検討を行った。その結果，徳島県海陽町穴喰に残る「穴喰浦荒図面」は，組頭庄屋クラスの者が穴喰浦で情報を収集し，被害状況を観察した上で描かれたものであることがわかった。この絵図では，居宅の近隣や社会的に近い家の被害がより詳細に描かれており，被害書上のような史料とも対比ができる信頼性の高い絵図史料として評価できる。絵図の凡例から，「流家」→「潰家疼み潰家同断」→「潮入家」→「無難家」という尺度で評価し描き分けている。このような絵図の被害記載と現在の標高を比較・検討すると，嘉永南海地震の津波は穴喰川を遡上する形で到達して市街地に最大被害をもたらしたが，近隣の「三反田」や「松本」「松原」といった地区を越える形でも穴喰浦に到達した状況が明らかになった(新潟大学[課題番号:NGT_01])。

・東北地方における地震・津波・火山情報に関する歴史資料の所在調査とデータ収集

東北地方での歴史資料の調査として，岩手県釜石市唐丹地区の行政文書について撮影・デジタル化を実施し，同地区における昭和8年(1933年)の昭和三陸地震津波の被害状況に関する情報を得た。同資料群には，字界の範囲で区切られた5枚の絵図が含まれており，昭和三陸地震津波前後の地形及び居住形態について詳細に記されている。このうち「字小白濱絵図」には，昭和三陸地震津波後に整備された復興地区とみられる地割と坪数を示した図が付録として添付されており，役場の照合年月もみられる。この絵図からは，当時と場所に変化がない盛岩寺が右端中段に位置し，宅地の配置や軒数から絵図の下部が海面及び海岸線と判断できた。また，津波浸水範囲であった部分に加え，「新開地」とされる南西側の土地が海岸線に至るまで，昭和16年(1941年)の時点までに拓かれていた状況がわかった。さらに，絵地図に付録されていた「小白浜第一住宅地」には，宅地の区画と坪数が記されており，小白浜における移転地造成の区割りや敷地面積等の昭和三陸津波後における復旧・復興の過程が具体的にわかった。

秋田県にかほ市象潟町関地区では、江戸時代の肝煎文書を撮影・デジタル化し、1804年象潟地震の際の家屋倒壊や田畑の被害に関連する古文書や古絵図を収集した。撮影した史料群に基づいて、象潟地震の際に発生した津波の浸水状況に関する現地調査を実施した。現地調査と当時の絵図史料との比較・検討から、象潟地震当時の関地区の居住形態を復元し、「当六月四日之夜大地震ニ付潰家死人馬書上帳面控」に記された家屋の全壊・大痛・中痛の被害状況を重ね合わせて、象潟地震の被害状況を復元した。これによって、象潟地震における関地区の被害状況には、津波被害にみられるような規則的な家屋の破壊は見受けられず、関村の被害は地震動による家屋倒壊であったことが明らかとなった。また、文化六年（1809年）に描かれた奈曾川流域の荒所の状況を記した絵図には、「地震荒所」とある場所が奈曾川上流部に多数みられ、象潟地震においては、関村周辺だけでなく関村上流部の田畑でも被害が大きかった状況が明らかになった（東北大学災害科学国際研究所 [課題番号：IRID01]）。

・歴史災害研究のオープンサイエンス化に向けた検討

市民参加による大規模データ構築について、2019年7月に IIIF (International Image Interoperability Framework) 及び AI による自動文字認識に対応した次期バージョンの「みんなで翻刻」を公開した。新バージョンでは、東京大学総合図書館が所蔵する災害史料群「石本コレクション」の翻刻が進行しており、2020年2月までに578件ある史料のうちの353件についての翻刻が完了している。翻刻作業に参加する市民の数は500名を超えており、歴史災害史料のテキスト化にシチズンサイエンスの手法が有効であることを実証した。

災害史料の構造化記述モデルの構築について、「みんなで翻刻」上で翻刻された600万字を超えるテキストを構造化記述し、地名や日時等の地震研究上の重要情報を自動抽出するための検討を実施した（公募研究、国立歴史民俗博物館 [課題番号：KOB001]）。

イ. 考古データの収集・集成と分析

・考古・文献資料からみた歴史災害情報の収集とデータベース構築・公開ならびにその地質考古学的解析

奈良文化財研究所が発掘調査を実施した平城宮第一次大極殿院地区（平城第612次調査）、法華寺阿弥陀浄土院隣接地（平城第613次調査）、藤原宮大極殿院地区（藤原第200次調査）をはじめ、全国各地で液状化や地滑り・地割れといった地震痕跡が発見された。これら地震痕跡の識別に関しては、地質切取試料や地質剥ぎ取り試料について、粒度分析、軟X線やX線CTスキャンを用いた微細堆積構造解析を通じ、精度の高い検出が可能になってきた。これによって、発掘調査中に検出される地震痕跡の可能性がある事例について、現場での調査・記録方法、その後の分析作業による調査方法の蓄積が進展した。

地震の発生時期については、前述の3調査地点において、放射性炭素年代測定、土器型式編年、遺構の切り合い、木簡文字史料等を駆使し、5世紀後半、7世紀後半～末、8世紀後半～9世紀半ばに震度5弱以上の震動に見舞われたことを明らかにした。この調査過程において、地震発生時期の特定に関わる調査・記録方法について開発が進み、今後、継続的に活用してその実践性を検証すると共に、調査方法の普及・啓発のためのリーフレット等の作成を進める予定である。

前近代の火山噴火現象の痕跡については、浅間山、榛名山の山麓に位置する金井東裏遺跡、金井下新田遺跡（群馬県埋蔵文化財事業団との共同調査）の発掘調査に関わり、調査方法の開発を進めている。また、桜島大規模火山噴火調査グループとの提携を進めることにより、さらに広範囲での調査方法の蓄積が進むと考えられる。

古代から近世に至るまで継続的に史料が残る奈良盆地での地震被災について、古墳時代以降の遺跡の被災類別や被災分布の集成を進めた。その結果、盆地内の低地域において震度5弱以上の震動による液状化、丘陵部付近で震度7以上の震動で発生するとされる地滑りや地割れの痕跡が、上記の時期に集中して発生している傾向が確認できた。また、河川地形域で土石流や洪水の頻発もみられ、包括的な災害実像に迫れる可能性を見出した。

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については、遺跡から解明される細かな人間活動の変遷を時間軸とすることによって、地震・火山噴火の発生像が見え始めている。地震・火山噴火という単一現象に止まらず、斜面崩壊による土石流や洪水の発生等の多様な災害現象の現出像に着目して、今後も調査・研究を進めていく（奈良文化財研究所〔課題番号：NAB_01〕）。

・日本海沿岸地域を中心とした地震・火山現象の解明のための考古学及び地形・地質の調査

縄文時代中期に発生した三陸地震津波の年代について、以前の成果（齋藤，2014；Saitoh, 2015）に、新たに発掘された岩手県山田町浜川目沢田1遺跡、浜川目沢田2遺跡等の大規模な縄文集落遺跡を加えて再分析した。その結果、津波の年代は大木9式の直前、すなわち大木8-9（中間）式期とみるのが妥当であることが明らかになった。また、炭素濃度の乱高下する特定パターンの気候変動下で、大地震が発生するとの考え方を提示した（齋藤，2019）。

新潟・長野県境の真那板山が、文亀元年（1502年）の越後南西部地震で山体崩壊し、姫川を堰き止めたとする説について検討した。真那板山の崩壊堆積物を覆う「三角州堆積物」出土の埋もれ木の14C年代値が、 $510 \pm 90\text{BP}$ であると報告されていることから、越後南西部地震の誘因説が生まれた。しかし、成立プロセスや根拠に問題がある上、報告された $510 \pm 90\text{BP}$ は未校正とされ、校正した年代値が1300-1430calBP（1502年より170年前、もしくはそれ以上前）を提示しているため、文亀元年越後南西部地震起因説は再検討の余地がある（新潟大学〔課題番号：NGT_01〕）。

（2）低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

近代的な機器観測による観測データ取得開始以前に発生した地震・火山噴火について知るためには、歴史学や考古学で用いる史料や考古資料に基づいて、調査・研究を実施していく必要がある。これらの史料や考古資料をデータベース化し、位置情報や時間情報を付与して被害分布図等を作成することによって、近代的な機器観測に基づく観測データとの比較・検討が可能になる。このような被害分布図等を活用して、前近代に発生した低頻度大規模地震や火山噴火現象とそれらによる災害の実態を解明することは、長期的な災害対策の策定に寄与できると考える。

・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

既刊地震史料集に所収されている日記史料の中から、長期間にわたる江戸での有感地震の記録があるものを選び出し、日記史料ごとに有感地震の回数を集計した。個々の日記史料には有感地震の記録がない年もあるが、複数の日記史料を組み合わせることで有感地震の記録されていない年を補完することができる。17世紀前半から19世紀中頃の江戸屋敷における有感地震の記録がある6つの大名家の日記史料を用いて、1年ごとの有感地震の回数を調査した。その結果、特に1649年（約50回）、1704年（約60回）、1855年（約50回）に地震の回数が多いことがわかった。これらの年はそれぞれ、1649年7月30日の慶安川越地震と同年9月1日の慶安川崎地震、1703年12月31日の元禄関東地震、1855年11月11日の安政江戸地震が発生した年に対応しており、被害地震の発生直後に多発した余震を示していると考えられる。

1885年以降の東京での有感地震については、気象庁の震度データベースを用いて有感地震の回数を集計した。1年ごとの震度2以上の地震記録を調査した結果、1923年（36回）、1924年（35回）、2011年（148回）に回数の多い年があった。これらは、1923年9月1日の大正関東地震、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の発生年に対応しており、地震発生直後に多発した余震や誘発された地震活動を示していると考えられる。17世紀前半から21世紀初頭までの約400年間に及ぶ（1869～1884年の記録は未調査）江戸・東京での有感地震の回数についてまとめると、周辺や直近で発生した被害地震の直後に特に多くなっている状況がわかった。

また、別の研究課題において構築中の「日本歴史地震関連史料データベース」に収められている史料データを用いて、前近代の奈良における被害地震について被害実態を調査した。奈良では、地震による被災後も現存している建造物が複数存在しており、史料と建造物の両側面から地震被害について検討できる。史料に記された明確な建造物被害に基づくと、8世紀初頭の平城京遷都から19世紀中頃までの前近代において、奈良に被害を及ぼした地震は少なくとも8回ある。その中には、奈良盆地近傍の内陸活断層による地震の他に、紀伊半島沖で発生した南海トラフ巨大地震（東海地震・南海地震）も含まれる。このことは、前近代の奈良における被害地震の特徴として挙げられる。

東大寺の鐘楼は、大仏殿東方の高台に位置しており、永祚元年（989年）の大風による倒壊後に再建され、延久二年（1070年）、嘉保三年（1096年）、治承元年（1177年）の地震の際には鐘楼自体は倒壊しなかったが、鐘の鈕が切れて鐘が地面に落下した。その後、13世紀初頭には鐘楼が新規に創建されており、延応元年（1239年）には地震とは関係なく鐘が落下したために、釣手金具が新調されている。これ以後は、地震や大風による鐘の落下は確認できないことから、11世紀後半から12世紀後半に至る3回の地震による鐘の落下は、地震の揺れだけでなく、鐘の鈕や釣手金具といった鐘自体と鐘楼との接続部分の脆弱性にも要因があったと考える。（東京大学地震火山史料連携研究機構 [課題番号：HMEV01]）。

・古文書解読による南海トラフ巨大歴史地震像の解明～歴史地震情報の可視化システムの構築とその活用～

前研究計画において構築してきた検索システムの高速化を目的として、これまでのデータベースの再構築を行った。歴史地震史料データベースの検索システムを高速化し、

検索結果が大量であった場合の表示方法を改善した。文献検索システムもバージョンアップし、検索できる雑誌として各地の「博物館紀要」等を追加した。これらの検索サイトは以下のとおりである。

<http://wwwevrc.seis.nagoya-u.ac.jp/HistEQ/>（歴史地震史料検索・文献資料検索）

<http://wwwevrc.seis.nagoya-u.ac.jp/HistEQMap/>（歴史地震史料検索システム）

岐阜市在住の大沢家において史料調査を行い、その史料群中に 1854 年安政東海・南海地震と 1855 年安政江戸地震の記録を多数確認し、写真撮影を行った。

歴史地震史料の可視化に向けて、地震史料を e-コミマップを用いて面的に整理することを試みた。今年度は表現方法の検討をしつつ、三重県の鳥羽地域を対象にして、既刊地震史料集に所収されている 1707 年宝永地震、1854 年安政東海地震に関する地震史料について、e-コミマップを用いて面的に整理した。視覚的にこれらの地震の被害状況が比較できるようにするため、シンボル等をもう少し工夫する必要がある。このような e-コミマップに、三重県の旧版地形図、地震ハザードステーション (J-SHIS) にある表層地盤の揺れやすさの情報、シームレス地質図、三重県の石碑の情報等を追加して、史料に基づく被害状況との比較・検討を行った（名古屋大学 [課題番号：NGY_01]）。

・歴史地震史料を活用した地震学的解析

京都において「古地震研究検討会」（日本地震学会 2019 年度秋季大会の会期中）と合宿形式の古文書解読のための勉強会（2019 年 9 月に 3 日間）及び定期的な勉強会を開催し、東京でも勉強会を開催した（2019 年 10 月に 2 日間）。このような活動は、参加者の歴史地震に関する史料解読技術の向上を図ると共に、これまで歴史地震研究に関わっていなかった研究者や学生、市民に研究活動を普及する機会となった。

「法蓮寺堂再建記木札」の実物や翻刻資料を再調査し、これまでの解釈が誤りであった可能性を示し（加納・他，2019），歴史地震や洪水等の自然災害についてまとめた一般向けの書籍を刊行した（大邑・他，2019）。

震度予測式（距離減衰式）を利用した地震史料の分析手法について検討し、震源位置、マグニチュード、観測点を入力すると震度予測式に従って震度を出力する Web アプリケーションを試作した。

別の研究課題において実施されている「みんなで翻刻」を基盤として、歴史地震研究におけるデジタルアーカイブの活用や、人文情報学的手法の導入について検討した（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_01]）。

・有感地震記述ならびに震度の距離減衰式に基づく地震活動解析

近年の稠密観測網によって観測された震度データ（気象庁震度データベース等）を用いて、様々な地震活動変化（大地震発生、地震活動の活発化（群発的地震活動を含む）・静穏化、グーテンベルグ・リヒター則の b 値変化等）が有感地震の時空間的特徴にどのような影響を及ぼすのか、2011 年東北地方太平洋沖地震の前後を中心に調査した。

その結果、2011 年東北地方太平洋沖地震後に東北地方内陸で活発化した群発的活動では、それらの震源域近傍の観測点で有感地震回数の顕著な増加が認められる一方で、震源域から離れた観測点では近傍に比べ頻度の増加が小さい傾向がみられた。また、近年に日本内陸で発生した顕著な地震後の有感地震回数の時空間的特徴について調べた。そ

の結果、震源域近傍の観測点では、有感地震回数の累積頻度分布は余震の時間的減衰の特徴を表す大森一字津公式から予測されるように急激な増加から徐々に緩やかな増加になる形状を示した。一方で、震源域から離れるに従って累積頻度分布は顕著地震の直後にのみステップ状に増加する、より階段状の形状へと変化する様子が見出された。これらの結果は、有感地震回数の時空間的特徴から歴史地震前後の地震活動変化（静穏化・誘発地震活動の発生）の検出や、歴史地震の震源域推定の可能性を示唆する。

また、近年の地震を対象に、観測震度と計算震度との残差分布に基づく大地震の類型化に関する基礎的検討を実施した。気象庁震度データベースに報告のある全ての有感地震を対象に近年、太平洋プレート内部、太平洋プレート上面、フィリピン海プレート内部の地震、ならびに地殻内地震について構築された地表における計測震度の多次元距離減衰式（田中・他，2017；Matsu'ura et al., 2018）に基づき震度計算を実施し、データベース化すると共に、それぞれの地震について残差が最小となる距離減衰式のタイプを求めた。その際、J-SHIS の表層 30m における平均 S 波速度 (AVS30) を用いた（公募研究、地震予知総合研究振興会 [課題番号：KOB002]）。

これまでの課題と今後の展望

平成 26 年度から平成 30 年度の 5 か年にわたり実施された「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」においては、地震学や火山学など理学系の分野だけでなく、歴史学や考古学など人文系の分野の研究者も本研究計画に組織的に参加し、近代的な機器観測によるデータが存在しない前近代の地震や火山噴火に関して、史料や考古資料を活用した調査・研究を共同で実施してきた。人文系の分野が主体となり、理学系の分野と共同で研究を実施する文理融合研究は日本国内ではあまり類例がなく、本研究計画において特筆すべき学際的な取り組みである。

今年度から開始された「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」(第 2 次)においては、文理融合研究の更なる深化と展開を目指して、地震学・火山学や関連諸分野との連携を強化し、他の部会と協力して本研究計画を推進していくことが重要と考える。また今後は、本部会での文理融合研究の成果を用いて、地震の発生可能性を評価する長期予測における精度改善への提言や、地域社会の災害研究における学術的貢献も検討していく必要がある。

本部会では、文理融合研究を進める上で、史料や考古資料のデジタルデータ化とその共有化が必須と考え、史料・考古データのデータベース化に向けて、データ構成の検討やデータベースの構造などについて様々な検討を重ねてきた。既刊史料集の全文テキスト化については一両年以内に完了できる見通しとなった。今後、本研究計画では、このような基礎的な研究の成果を踏まえて、史料・考古の統合データベースを理系の研究者や一般市民が利用しやすい形で公開できるようにするための研究に取り組んでいく必要がある。あわせて史料・考古データを活用した前近代の地震・火山噴火、及びそれらによる災害の実態解明の研究も同時に実施していき、本部会で作成された史料・考古データの地震学・火山学分野への有効性を提示することも必要と考える。

成果リスト

蝦名裕一，今井健太郎（2019），秋田県関村における歴史地形と象潟地震被害の復元，第 36 回

- 歴史地震研究会（徳島大会）講演要旨集，47
- 原直史（2019），安政地震における泉北地域の家屋被害，2019年前近代歴史地震史料研究会講演要旨集，32-34
- 原田和彦（2019），善光寺町（長野市）における災害と復旧・復興，2019年前近代歴史地震史料研究会講演要旨集，26-28
- Hashimoto Y. (2019), Honkoku2: Towards a Large-scale Transcription of Pre-modern Japanese Manuscripts, Proceedings of the 9th Conference of Japanese Association for Digital Humanities, 97-100
- 堀健彦（2019），1854年南海地震による津波被害絵図について，2019年前近代歴史地震史料研究会講演要旨集，29-31
- 加納靖之，大邑潤三，山村紀香，濱野未来（2019），「法蓮寺堂再建記木札」と応永一四年の地震，地震 2，72，53-56，doi:10.4294/zisin.2018-18
- 加納靖之（2020），デジタル歴史地震史料の活用，人文科学とコンピュータ研究報告，2020-CH-122(5)，1-3，<http://id.nii.ac.jp/1001/00202854/>
- 加納靖之，大邑潤三（2020），震度予測式を利用した地震史料の検討，東濃地震科学研究所報告，44
- 片桐昭彦（2019），15世紀の越中における地震と津波，2019年前近代歴史地震史料研究会講演要旨集，14-16
- 村田泰輔（2019），6地質学的調査「藤原宮大極殿院の調査 第195・198次」奈良文化財研究所紀要2019，76-84
- 中村元（2019），歴史資料に見る1961年長岡地震の災害状況，2019年度日本地理学会秋季学術大会発表要旨集，30
- 大邑潤三，加納靖之，橋本学（監修）（2019），京都の災害をめぐる，小さ子社，128pp
- 齋藤瑞穂，鈴木正博（2019），縄文三陸地震津波再論—山田湾の復興を考える手掛かりとして—，2019年前近代歴史地震史料研究会講演要旨集，1-5
- Satake K. (2019), Annual Number of Felt Earthquakes in Tokyo in Last 400 Years from Historical Daily Records and Seismic Intensity Measurements, 27th IUGG General Assembly, IUGG19-0496 (Oral), Montreal, Canada, Palais des Congres de Montreal, 8-18 July, 2019
- 佐竹健治（2019），日記史料と震度データベースからみた過去400年の江戸・東京の有感地震，第36回歴史地震研究会（徳島大会）講演要旨集，21
- 矢田俊文（2019），俳人岡西惟中と宝永地震，2019年前近代歴史地震史料研究会講演要旨集，22-25

1 (8) 観測研究基盤

「観測研究基盤部会」計画推進部会長 鶴岡 弘
(東京大学地震研究所)
副部会長 青山 裕
(北海道大学)

地震火山研究にとって不可欠である観測データを安定的かつ継続的に取得するために、日本全国に展開されている陸域および海域の地震、地殻変動、津波、潮位、電磁気、重力等の観測基盤を維持すること(観測基盤の整備)、さらにこれらの観測データの解析技術等の開発・高度化(観測・解析技術の開発)を進展させること、観測データをリアルタイムに効率的に流通する基盤(地震・火山現象のデータ流通)を維持するとともに、観測データの公開や研究成果を共有するシステムの開発(地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開)を観測研究部会において進めている。以下に令和元年度の成果の概要をまとめた。

5. 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

防災科学研究所は、陸海統合地震津波火山観測網(MOWLAS)及び首都圏地震観測網(MeS0-net)を安定して運用し、地震、低周波地震、超低周波地震、スロースリップイベントについてイベント検出および震源位置、震源メカニズム解、断層モデルの推定、余震活動の予測等を行った。さらにその活動状況のモニタリング結果をわかりやすく情報発信を行うとともに、地震調査委員会、地震予知連絡会等に随時提供を行った(防災科学技術研究所[課題番号:NIED05])。気象庁は地震観測網や地殻変動観測網などの観測基盤の維持、関係機関の地震観測データの一元的処理結果を関係機関へ提供し、南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会や地震調査委員会において報告を行った(気象庁[課題番号:JMA_09])。国土地理院は、全国における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した(国土地理院[課題番号:GSI_04])。電子基準点リアルタイム解析システムを運用するとともに変動点検知機能を強化し、令和元年6月18日に発生した山形県沖を震源とする地震において、震源近傍の観測点で約5cmの地殻変動をリアルタイムに検知し、後処理解析と整合する結果が得られた(国土地理院[課題番号:GSI_08])。さらに、AOLS-2のSARデータを使用して国土全域を対象に定期的にSAR干渉解析を行い、西之島では、2019年12月からの火山活動に伴う地殻変動及び溶岩等によるものと見られる地形変化を検出した(図1)(国土地理院[課題番号:GSI_07])。国際VLBI事業の観測計画にも基づき、石岡VLBI観測施設においてVLBI国際共同観測を86回実施した。

大学は、観測データ流通網JDXnetの安定的な運用を継続し、東京大学地震研究所の接続ポイントにおいてはSINET経由によりJGN接続を実現し、ネットワークの冗長化を復旧させた。また、柏キャンパスでの接続も開設し東京大学情報基盤センターの大規模並列計算機を活用できる基盤を構築した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_19])。高知

大学においては、地震観測点における観測状況の健全性の時間変化を把握する手法の開発を進めるため土居観測点にやや広帯域の速度計地震計の設置を行った（高知大学〔課題番号：KOC_01〕）。

気象庁、国土地理院及び海上保安庁は、潮位連続観測を継続し、地殻変動にともなう地盤の上下動を連続的に検知した（気象庁〔課題番号：JMA_10〕、国土地理院〔課題番号：GSI_05〕、海上保安庁〔課題番号：JCG_02〕）。気象庁は、柿岡、女満別、鹿屋、父島での地磁気4成分観測、及びいわき北浦での全磁力精密連続観測を実施し、高精度の地磁気基準値を提供した（気象庁〔課題番号：JMA_11〕）。国土地理院は、航空重力測量に必要な飛行場重力点として調布、名古屋、八尾、仙台、青森、北九州において観測点を設置した（国土地理院〔課題番号：GSI_06〕）。山梨県富士山科学研究所は、gPhone重力計の導入を行い、連続観測を開始した。また、気象観測装置の併設も行った（山梨県富士山科学研究所〔課題番号：MFRI02〕）。北海道立総合研究機構地質研究所は、雄阿寒岳、十勝岳、樽前山、倶多楽、有珠山および北海道駒ヶ岳において地球物理学的・地球化学的モニタリングを継続した（北海道立総合研究機構地質研究所〔課題番号：HRO_01〕）。

気象庁は、全国の50活火山について、全国4カ所の火山監視・警報センターにおいて、地震計、空振計、GNSS、監視カメラ等による連続的な監視観測を継続した。令和元年度においては、草津白根山に広帯域地震計を整備し、また全国7カ所に監視カメラの増設を実施した（気象庁〔課題番号：JMA_12〕）。

イ. 観測・解析技術の開発

東京大学地震研究所は、光ファイバセンシング技術の一つであり、振動を計測する分散型音響センシング(DAS)を利用した地震観測を実施した。具体的には、1996年に設置した三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムの予備の光ファイバーケーブルを活用して2019年2月、6月、11月の計三回の空間的に高密度な海底地震観測を実施した。2月の計測では、測定全長100km、チャンネル間隔5mとして、合計2日間実施し、計測装置を設置した陸上局から70km程度まで連続して地震波が記録されることを確認した（図2）（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_22〕）。

大学は、新たな無線通信帯域・技術を活用したデータ伝送システムの開発及びこれを利用した地震・火山活動状況を高精度かつ迅速に把握可能なシステムの開発を進めている。東北大学においては、920MHz帯の省電力無線通信試験を行った。この試験では、情報通信研究機構が中心となって開発したLoRa試験機およびLoRaを用いたWIN波形伝送用無線機の二つを用いた電波の伝搬試験を行った（図3）（東北大学〔課題番号：THK_13〕）。名古屋大学においては、小電力、小型・携帯テレメータ地震観測装置の改良開発を実施しているが、令和元年度においては現用機に対して小規模な改良を実施し、部品の選定、改良テスト機への実装を行った（名古屋大学〔課題番号：NGY_08〕）。

情報通信研究機構においては、地震や火山等の自然災害発生時における被災地の状況把握を詳細かつ迅速に行うための次世代航空機搭載SARの開発を実施し、令和元年度においては、①機械学習をベースにした土地被覆分類に関する研究、②GISデータとSARデータを用いた情報抽出技術に関する研究、③クロストラック干渉SARとレーダグラメトリを用いた地形変化抽出に関する研究を実施した（情報通信研究機構〔課題番号：NICT01〕）。

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

北海道大学は、地殻変動連続観測、およびGNSSデータサーバの運用を継続し、地殻変動等多項目データの一元的な流通とデータの蓄積などを行った。地殻変動連続観測サーバでは、419チャンネルのデータの収集を行い、GNSSデータサーバに格納する過去の機動観測データの発掘・整理を行った。さらに、気象庁の地殻ひずみ計データの流通に向けて関係機関との調整を開始した。また、地殻変動観測技術の伝承を目的としたひずみ計測の研修会を実施し、全国の大学院生や技術職員20名程度が参加した（北海道大学〔課題番号：HKD_08〕）。

東京大学地震研究所は、現WINシステムにおける課題と次世代システムへの要望の集約を行った。WINシステムに関連の深い研究者や技術者にメール等によりアンケートを実施し、18機関（北海道大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、琉球大学、防災科学技術研究所、神奈川県温泉地学研究所、気象庁、気象大学校、地震予知総合研究振興会、企業4社）から回答が得られた。データ量（チャンネル数）の増大、通信の高速化、再送機能の充実、高精細かつ多色表示可能な操作環境の普及などへの対応が検討事項として挙げられ、hypomh以外の震源計算プログラムや他の解析プログラムへの対応、WINシステムのチュートリアルの実装などの課題も明らかとなった（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_24〕）。加えて、高知大学においては、この課題と連携し、国内研究者が望む伝送プロトコルについて調査を行った（高知大学〔課題番号：KOC_02〕）。

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

東京大学地震研究所は、DOI等の永続的識別子付与と公開について、現状と克服すべき課題を整理するため、さらに広く地震学とオープンデータについて議論することを目的として、地震学会秋季大会において特別セッション「オープンデータと地震学」を企画した。識別子付与だけでなく、データジャーナルやデータリポジトリの活用の事例や可能性が提示され、また大学・研究機関や様々なプロジェクトにおけるデータの蓄積あるいは公開のためのデータベースの構築・運用の実際や課題など、本研究課題を進めるために重要な情報が得られた（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_18〕）。

気象庁は、総合的な地震カタログの作成と発震機構解析及び大地震時の震源過程解析を実施し、それらを公開した。1919年～1921年の過去震源について、各地の地震観測原簿等を用いて震源計算を行い、2020年1月に公開した。これにより日本周辺の地震活動について一定品質の地震のデータが100年以上の期間で利用可能となった（気象庁〔課題番号：JMA_14〕）。定常観測点の4地点（柿岡、女満別、鹿屋、父島）に、祓川を加えた5観測点における地磁気4成分連続観測データを月毎に地磁気観測所データベースに登録、公開するとともに、定常観測点のデータを国際的なデータセンターに提供した。また、女満別および鹿屋を対象として地磁気アナログ記録のデジタルデータ化を進めた。1968～1969年の地磁気アナログ記録をデジタル画像化したほか、1973～1974年のデジタル画像を高時間分解能のデジタルデータへ変換した（気象庁〔課題番号：JMA_13〕）。令和元年度（平成31年度）に噴火が発生した浅間山、阿蘇山、桜島、薩摩硫黄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））、箱根山等において、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（気象庁 [課題番号：JMA_15]）。

産業技術総合研究所は、アジア太平洋地域の地震火山ハザード情報整備、国際標準化、データ共有・相互利用、国際的な連携の推進を目的として、アジア太平洋地域の研究機関と連携し、地震火山活動に関連する地質ハザード情報の取りまとめを進めた。今年度においては、トバ（VEI = 8）、白頭山、タンボラ、リンジャニ・サマラス、タール、阿蘇、始良、鬼界、阿多、洞爺、支笏、阿寒、屈斜路（VEI = 7）、クラカタウ、バツール、ピナツボ、ラバウル、ロングアイランド、ダカタウア、ウイトリ、ビリーミッチェル、ウルルン、十和田、濁川、摩周、萌消（VEI = 6）のカルデラを対象に、地形的なカルデラ縁の形状をトレースし、GISデータとして公開した（図4）（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST11]）。

国土地理院は、監視・観測体制の充実などが必要とされた火山を優先して、火山防災に資する基礎的な地理空間情報の整備を進めるとともに、地震災害の軽減に資するため、地形分類情報の整備を進めるほか、全国活断層帯情報（活断層図）を整備した（国土地理院 [課題番号：GSI_10, GSI_09]）。

データベースの方向性について検討を実施し、現有の研究成果共有システムを活用する方向で調整を行うこととした。サーバーの運用体制やポリシーについても検討を行った。データの格納を行うにあたり、著作権等の検討から、関係者の承諾が取れているものから実装を展開する方針とした。

また、戦略室を主導として、研究成果共有システムの構築に向けた検討を進めた。具体的には格納を行う情報・データの検討を実施するとともに、コンテンツの整理を先行的に進めた。成果報告時に登録される成果物のリスト、火山構造探査データ、機動GNSSデータのほか、これまでの建議研究で作成されているデータベースやソフトウェアへのリンク、建議研究で実施されている観測や調査に関するメタ情報について、本システムで一元的に収集することとした（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_25]）。

これまでの課題と今後の展望

地震火山研究にとって不可欠である観測データを安定的かつ継続的に取得することの技術的な課題等はクリアできているが、観測データおよび解析結果等を有効に活用し研究を加速するための、流通、データベース化、公開は時間とコストの問題もあり進捗についてはゆっくり進められているのが現状である。来年度にむけては、これらの課題を解決する研究成果共有システムのさらなる進展が求められる。

成果リスト

有馬悠馬（2019）、Pi-SAR X2（航空機SAR）×深層学習による土地被覆分類、情報通信研究機構研究報告、Vol.65, No.1, 63-66

有馬悠馬（2019）、深層学習によるPi-SAR X2偏波観測データの土地被覆分類、日本リモートセンシング学会第67回学術講演会論文集、233-236.

Bandibas, J.C., S. Takarada (2019a), Mobile Application and a Web-Based Geographic Information System for Sharing Geological Hazards Information in East and Southeast Asia, Journal of Geographic Information System, 11, 309-320,

doi:10.4236/jgis.2019.113018

Bandibas, J. C., S. Takarada (2019b), Geoinformation Sharing System for East and Southeast Asia using SDI, OGC Web Services and FOSS, *International Journal of Geosciences*, 10, 209-224, doi:10.4236/ijg.2019.102013

本田昌樹・岩田昭雄・山下達也・林京之介・桑原將旗・酒井和紀・宗包浩志・住谷勝樹・堤隆司・加古孝範・齋田宏明・矢来博司・小林知勝・森下遊 (2019), 平成30年北海道胆振東部地震におけるSAR干渉解析及び基準点復旧測量, *国土地理院時報*, 132

本多亮, 柳澤孝一, 田中俊行, 浅井康弘 (2019), 重力変化で捉える既知の水理地質構造中の地下水流動 - 岐阜県東濃地域における長期水圧低下を例として -, *物理探査*, 72, 34-48, doi:10.3124/segj.72.34

堀川信一郎 (2020), 御嶽山火口域における通年地震テレメータ観測の試み, *名古屋大学理学部技術報告*, VOL.24

Imai, H., K. Ito, T. Aoki, J. Uemoto, S. Uratsuka (2019), A Method for Observing Seismic Ground Deformation from Airborne SAR Images, in "Proceedings of International Symposium on Remote Sensing 2019", 1506-1509 July 2019, Yokohama, Japan, 5816-5819. doi:10.1109/IGARSS.2019.8900352

石川有三 (2019), 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, no. 667, 産総研地質調査総合センター, 1-10

加納靖之 (2019a), オープンデータと地震学, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/ykano/od4s/>

加納靖之 (2019b), 「みんなで翻刻」にみる歴史地震研究への非専門家の参加, 第1回 SPARC Japan セミナー2019, 「人文社会系分野におけるオープンサイエンス ～実践に向けて～」, https://www.nii.ac.jp/sparc/event/2019/pdf/20191024_3.pdf

加納靖之, 汐見勝彦, 内田直希 (2019), 秋季大会特別セッション「オープンデータと地震学」開催報告, *地震学会ニュースレター*, 72, NL4, NL-4-40, <https://www.zisin.jp/publications/news72.html>

Kobayashi, T. (2019), 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*, 186-169, doi:10.1190/SEGJ2018-050.1

Kobayashi, T., K. Hayashi, H. Yarai (2019), Geodetically estimated location and geometry of the fault plane involved in the 2018 Hokkaido Eastern Iburu earthquake, *Earth Planets Space*, 71:62, doi:10.1186/s40623-019-1042-6

児島正一郎, 有馬悠馬 (2019), 航空機搭載合成開口レーダー Pi-SAR X2とGISデータを用いた浸水領域の抽出法に関する研究, *情報通信研究機構研究報告*, Vol.65, No.1, 49-55.

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 2/7 -, 産総研地質調査総合センター研究資料集, no. 679, 産総研地質調査総合センター, 1-9

長町信吾, 仰木淳平, 島村哲也, 藤井郁子 (2020), 2013年の女満別観測施設の庁舎一部解体撤去工事に伴う恒久的影響量の評価, *地磁気観測所テクニカルレポート*, 気象庁地磁気観測

- 所, Vol.16, No.01, 9-29.
- 篠原雅尚 (2019), 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, 31(1), 11-16
- Shinohara, M., T. Yamada, T. Akuhara, K. Mochizuki, S. Sakai (2019), Precise Distributed Acoustic Sensing measurements by using the seafloor optical fiber cable system offshore Sanriku for earthquake monitoring, AGU 2019 Fall meeting, OS13B-1524
- Shinohara, M., T. Yamada, T. Akuhara, K. Mochizuki, S. Sakai, M. Hamakawa, T. Kasajima, T. Arioka, S. Kubota (2019), Distributed Acoustic Sensing measurement by using seafloor optical fiber cable system off Sanriku for seismic observation, OCEANS 2019 Seattle, doi:10.23919/OCEANS40490.2019.8962757
- Takahashi, R., Okazaki, N., Tamura, M., Ogino, T., Murayama, Y. (2019), The interaction of volcanic gas and deep magmatic fluid with shallow aquifers at Tokachidake volcano, Japan, J. Volc. Geotherm. Res., 388, 106678, doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.106678
- 高橋伸也, 吉藤浩之, 山口智也, 越智久巳一 (2020), 予測値計算手法の構築と精度評価, 2019年度CA研究会論文集, (発表番号: CA2019-P11)
- 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 3/7 -, 産総研地質調査総合センター研究資料集, no. 683, 産総研地質調査総合センター, 1-30
- 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 4/7 -, 産総研地質調査総合センター研究資料集, no. 684, 産総研地質調査総合センター, 1-15
- 宝田晋治 (2019c), 東・東南アジア地域の大規模カルデラの形状 -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 5/7 -, 産総研地質調査総合センター研究資料集, no. 685, 産総研地質調査総合センター, 1-33
- 上本純平, 児島正一郎, 灘井章嗣, 中川勝広 (2019), クロストラック干渉SARデータセットの土砂崩れに関する解析, 情報通信研究機構研究報告, Vol.65, No.1, 57-62
- 上本純平, 森山敏文, 航空機搭載SARにより取得されたシングルパス干渉データの処理ツールの作成, 日本リモートセンシング学会第67回学術講演会論文集, 293-294.
- Yamashina, T, M. Okubo, T. Tabei, U. Muksin, N. Ismail (2019), Exploration of the fault extension using SITES method; Aceh and Seulimeum segments of the Sumatran fault, Indonesia, AGU Fall meeting 2019, S11D-0373

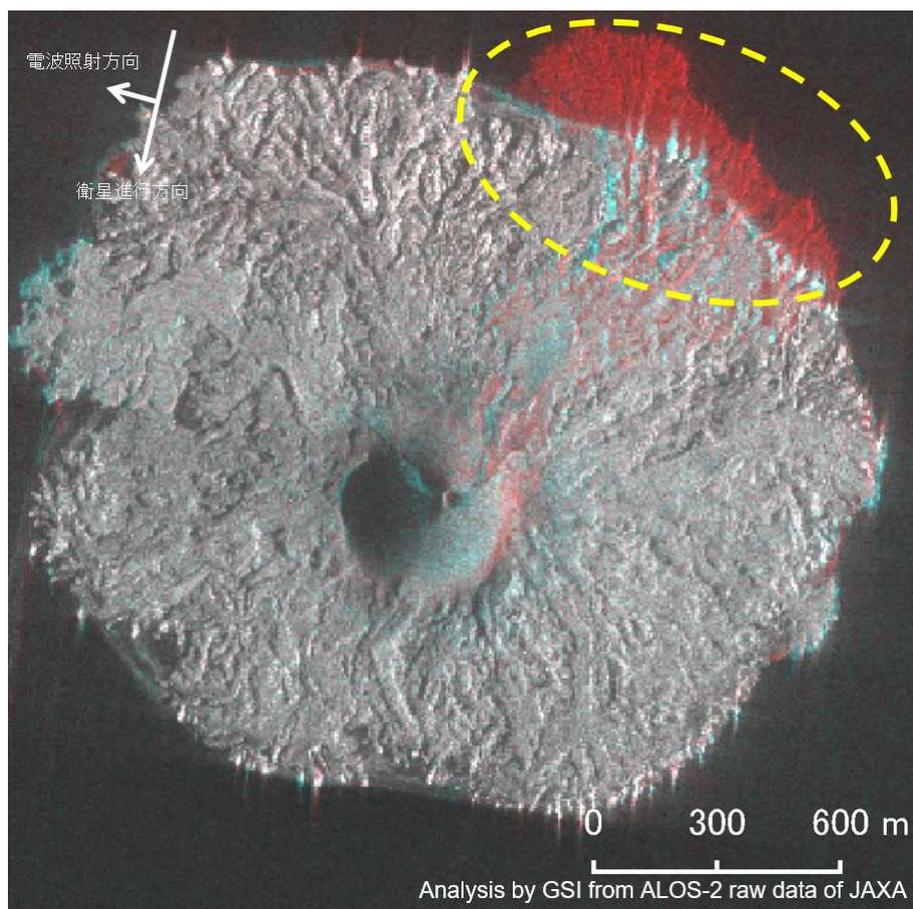


図 1 . SAR強度画像の加色混合法による西之島の解析結果。黄点線中の赤色部分で陸地が拡大したことを示す。青は2019年12月20日に、赤は2020年1月3日にそれぞれ観測したものである（国土地理院 [課題番号：GSI_07]）。

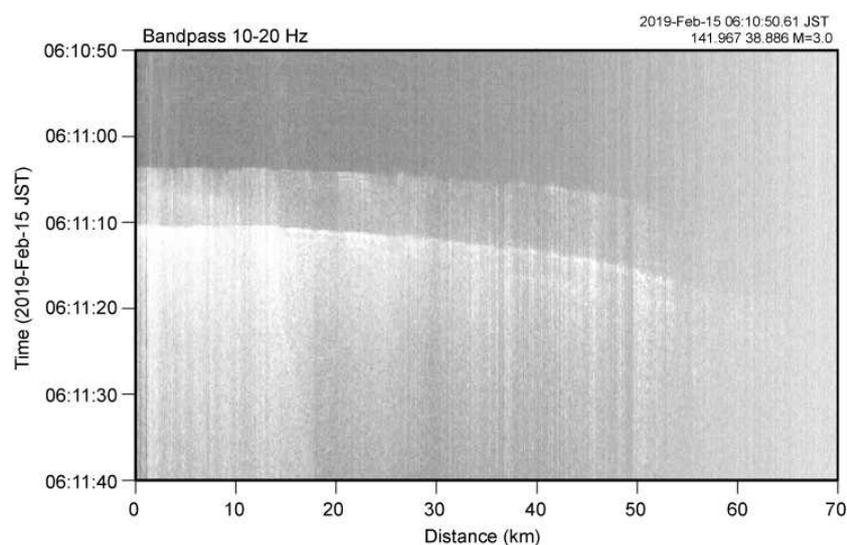


図 2 . DAS計測により記録された地震の例。1996年に設置した三陸沖海底光ケーブル式地震津波観測システムの空き光ファイバーを用いて、DAS計測の試験観測を行った。横軸は陸上局からの距離、縦軸は時間である。P波とS波が明瞭に記録されている（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_22]）。

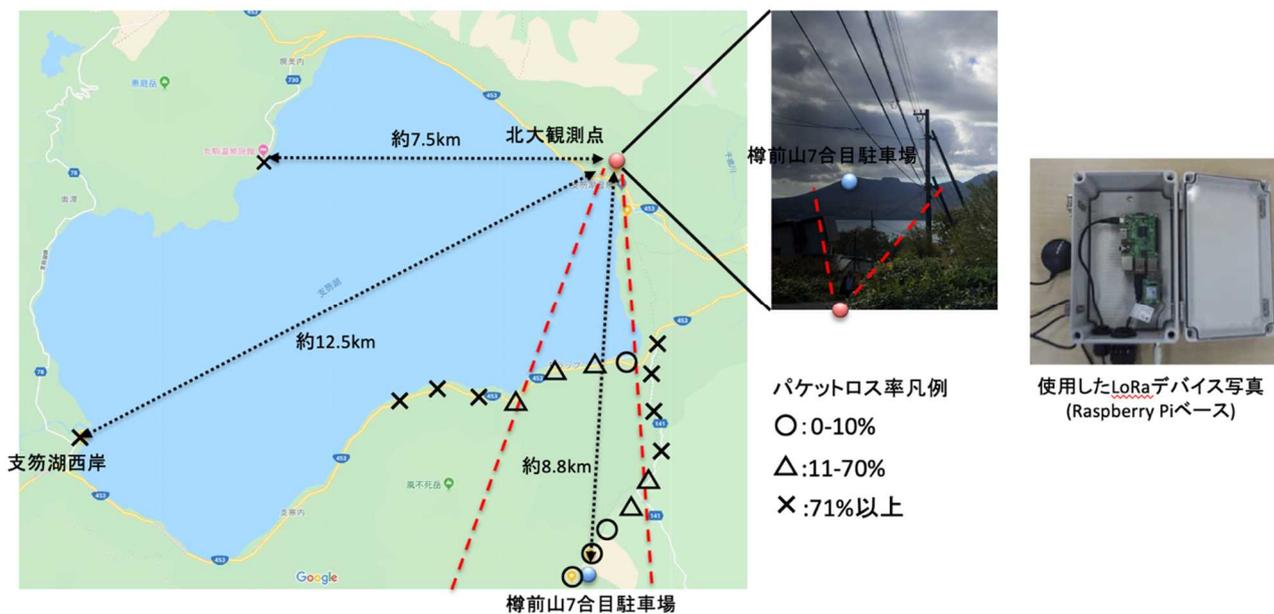


図3. WIN波形伝送装置での試験の様子とその結果（東北大学 [課題番号：THK_13]）。

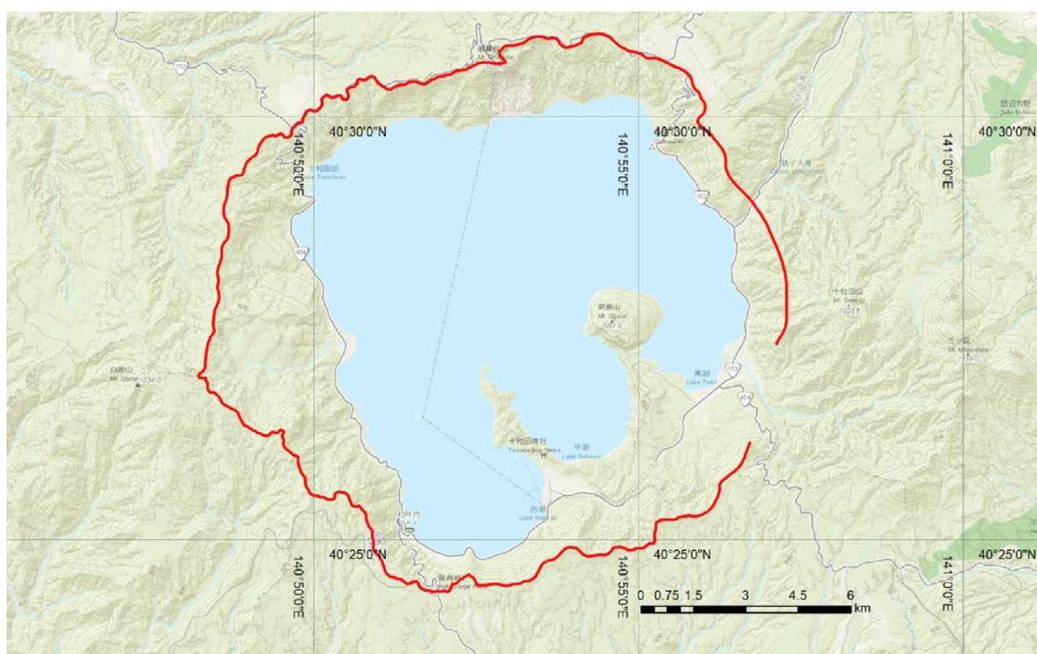


図4. 十和田カルデラ縁の形状トレース（赤線）（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST11]）。

2 (1) 南海トラフ沿いの巨大地震総合研究

「南海トラフ沿いの巨大地震」総合研究グループリーダー 伊藤喜宏
(京都大学防災研究所)

目的

内閣府および地震調査推進本部により南海トラフ沿いの巨大地震の地震シナリオおよび強震動予測はすでに実施され、公開されている。しかしながら、これまでに示された地震シナリオおよび強震動予測は過去の観測記録および歴史資料に基づいて構築されたものであり、現状の測地・地震観測により得られた知見を十分反映したものでない。南海トラフ巨大地震総合研究グループ（以下、南海総合G）では、南海トラフ巨大地震に関連した50課題の成果に基づき、地震・測地観測網で得られたプレート間固着やスロー地震の知見に基づき南海トラフ沿いの巨大地震の広帯域震源モデルを構築する。その上で地震波および津波の伝播モデルに基づき、西南日本地域の強震動および津波浸水モデルを提示することを目的とする。

1. 拠点間連携のフレームワークの利用

前5カ年計画の地震研究所—防災研究所拠点間連携（H26-H30）では、地震時のリスク評価の高精度化を目的として、震源モデル・シナリオ、地震波速度・減衰構造、浅部地盤応答、および構造物の脆弱性の各モデルを総合的に考慮したリスク評価の手法の提案および高精度化に関する研究が進められた。特に各課題が提案する複数の最適なモデルを組み合わせる不確実性を含む地震リスク評価の計算手法が提案された。南海総合Gでは、前計画の拠点間連携で得られた成果を取り入れて、各課題で得られた成果を実際に使用して、震源モデル・シナリオ—地震波伝播—工学的基盤までの地震動を計算することを目的とする。その上で、必要なアウトプットを関連課題の要請に基づき情報を提供することとする。全5カ年計画の拠点間連携で研究対象とした大阪府および高知県については浅部地盤応答も含めた地震動を求め、構造物の脆弱性評価や地すべりのリスク評価などに活用する。

2. 構造モデルおよび震源モデル・シナリオの高度化

本研究グループでは特にモニタリングおよび最新の研究知見に基づく地震シナリオの作成を目指す。まず、これまでに得られた地下構造モデルを精査し、沈み込むフィリピン海プレート上面の形状モデルを再作成する。次に、陸上GNSSおよび海底GNSS/A観測から得られるプレート間固着モデルに従い、地震時すべり域を設定する。さらに過去の大地震の研究事例を精査して、強震動生成域と地震波速度およびプレート形状等の関係を調べる。その上で将来の南海トラフ地震時における強震動生成域を予測しモデルを作成する。

3. スロー地震発生域と固着域から予測する破壊の開始点

スロー地震のモニタリングおよび過去の研究事例に基づき、南海トラフ沿いでの破壊の開始点を想定する。特に東北地方太平洋沖地震やメキシコ、チリのプレート間大地震

に先行したスロースリップと破壊の開始点の位置関係を参考に、破壊の開始点を設定する。

これまでの課題と今後の展望

南海総合Gでは、地震・測地観測記録およびこれまでの研究事例から想定される「科学的に最も起こりうる震源モデルと強震動予測モデル」の構築を目的とする。その上で、社会科学に関連した研究課題や地すべり等に関する研究課題と連携し、必要とされる強震動予測をいくつかの空間スケールで提供し、ある自治体の脆弱性評価や地すべりリスクの評価などに役立てる。また予測される地震シナリオに基づく津波の浸水モデルの構築も進める。

さらに本震発生時に想定される各課題間の輻合作用（例えば、強震動に伴う液状化および地盤の軟化と浅部地震動非線形応答など）を考慮したモデル作成時の問題点等を整理し準備を進める。

成果リスト

特になし

2（2）首都直下地震総合研究

「首都直下地震」総合研究グループリーダー 酒井慎一
(東京大学地震研所)

1. はじめに

首都直下地震に関しては、『災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）の推進について（建議）』の中で、「分野横断で取り組む総合的研究」の一つとして位置づけられている。この総合研究は前計画から始まった新しいカテゴリーで、「地震学・火山学的な見地のみならず災害科学的な重要性も鑑みて、複数の実施項目を横断する総合的な研究として推進する。総合的な研究を通して、専門分野の枠を超えた学際連携を現状よりも一層進め、地震学・火山学の成果を災害の軽減につなげるための方策を提案する。」とされ、他の8つの計画部会とは違った観点から結び付けた体制で研究が進められている。

第5章「研究を推進するための体制の整備」（2）分野横断で取り組む総合的研究を推進する体制の項では、「首都直下地震は、一旦発生すれば首都機能や我が国の経済活動全体に深刻なダメージを与える可能性が高い。想定される多様な震源について、発生メカニズムや発生可能性を評価する研究を進める。詳細な地盤構造や多様な震源モデルによる揺れの予測に、稠密観測データや地震史料の情報を反映し、新たな地震動予測手法の開発を目指す。また、複雑な地殻構造を用いた大規模数値シミュレーションに基づいて、地震動を高精度に予測する手法を高度化する。さらに、各項目の研究成果を有機的に結び付け、高度に集約化された社会環境下での防災リテラシー向上に資する総合的研究を実施する。」と書かれ、首都直下地震ならではの総合的な成果が期待されている。

しかし、地震・火山現象の解明のための研究、地震・火山噴火の予測のための研究、地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究、地震・火山噴火に対する防災リテラシーの向上のための研究の4分野に、広くまたがるような総合的な研究課題は存在しない。そのため、今年度は、それぞれの研究課題の中から、首都直下地震に関連したものを集め、それら同士をつなげていくことを本総合研究グループの目標とした。

2. 令和元年度の成果

産業技術総合研究所は、房総半島南部沿岸の海岸段丘について掘削調査を行い、得られた試料の年代測定値の統計処理を行うことで、離水年代の検討を行った（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST08]）。

千葉大学は、地中ラドン濃度データの解析を行った。千葉県旭市で観測している地中ラドン濃度と、地殻変動との関係を調査した。気象の影響を除去するため、マルチチャンネル特異スペクトル解析を地中ラドン濃度、気温、気圧の3チャンネルに適用し、地中ラドンフラックスを推定した。観測点近傍の累積地震モーメントと E_s 指数との関係を調査した結果、観測点直下で地震が発生した数日前に地中ラドンフラックスが、 3σ を超える異常を示していた。これらの地震が、太平洋プレート上盤付近で発生した逆断層型の地震であった。このことは、地震準備過程における応力集中によって、地表付近の上向きの地下ガスの流量が増加したことに対応すると考えられる。そこで、国土地理院の F3 解を用いて面積ひずみを求め、地中ラドンフラックスの変動との関連について調

査した。その結果、地中ラドンフラックスは、弾性圧縮に対して増加し、弾性膨張に対して減少する傾向がみられ、地殻の応力変化に感度をもつことが示唆された。大きな巨大地震の前兆すべりやスロースリップ地震に対して有効な指標となる可能性があることがわかった。今後は、地殻変動との関連の調査を進めるため、ラドン観測点を2か所増強し、同様な傾向がみられるかどうかを検証する（千葉大学〔課題番号：CBA_01〕）。

京都大学防災研究所は、既往の地震地すべりの調査から、地震時にすべり面となる可能性が高い降下火砕物が、9000年よりも古い軽石およびそれに伴う火山灰土であることを示した。9000年から12万年前までの軽石が10cm以上の厚さで分布している範囲を新編火山灰アトラスから抽出し、関東から北海道にかけて分布図を作成した。少なくともこの範囲は今後の地震時地すべりの要注意域と考えられる（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI10〕）。

東京大学地震研究所は、1855年安政江戸地震を対象として研究を進めた。成田周辺には、成田山新勝寺や佐倉城址等の江戸時代から続く建物や施設があり、過去の地震被害の記述が多く残されている。そこで、それらの記述から被害地点を特定し、地震計を設置した。2019年9月から11月までの約2か月間、千葉県成田市、佐倉市、我孫子市、印西市、茨城県取手市、利根町の27か所で臨時観測を行った。固有周期1秒の3成分一体型地震計を地表に設置し、単一乾電池32本で約2か月間の観測を行った。観測された地震波形は、観測点ごとに最大振幅や卓越周期に違いがみられ、振幅が2倍以上大きくなる地点もあった。この観測を行うことで、古文書等に記述のなかった地点での揺れも推定できることを確認し、根津周辺における稠密観測の準備を行った（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_15〕）。

東京大学情報学環は、地震・火山災害情報の活用のための住民の知識体系に関する基礎的調査を実施した。2019年12月1日～8日、日本放送協会による「体感・首都直下地震ウィーク」が実施され、ドラマ『パラレル東京』や関連するNHKスペシャルが放映された。その時に、地震防災に関連する「地震の発生確率」「ハザードマップ」「被害想定」「関連する災害情報」等への関心が高まると考え、このキャンペーン報道による学習効果も含めて検討した（東京大学情報学環〔課題番号：III_01〕）。

そのほか、首都直下地震に関する意見交換会を2020年2月13日に東京大学地震研究所で行った。様々な研究部会から、関連する課題の研究者10名が集まり、それぞれの研究成果を紹介した。今後の総合研究としての研究計画の進め方を議論し、まずは連携できる課題同士を探すところから始めることとした。

3. 今後の展望

首都直下地震が発生した場合には、我が国の首都機能や経済活動全体に深刻なダメージを与える可能性が高いことから、分野横断的に取り組む総合的な研究として推進するテーマの一つとされてきた。ただ、広い分野にまたがるような総合的な研究課題がないため、研究課題の中から、首都直下地震に関連した研究成果を集めて統合させることを、本総合研究グループの目標とする。

成果リスト

特になし

2 (3) 千島海溝沿いの巨大地震総合研究

「千島海溝沿いの巨大地震」総合研究グループリーダー 高橋浩晃
(北海道大学)

1. はじめに

千島海溝沿いでは、2011年東北地方太平洋沖地震と類似した巨大地震が、繰り返し発生していることが津波堆積物の調査から明らかにされている。政府の地震調査研究推進本部では、M8.8程度以上の超巨大地震の発生が切迫している可能性が高いと評価しており、津波や地震動による大きな被害が予想される。一方、千島海溝沿いでは、国によるプロジェクト研究がほとんど実施されておらず、ハザード評価に必要な基礎的なデータが不足している。今後進むであろう体系的な災害対策を下支えする、北海道に最適化された地震動や津波の事前予測・即時予測手法の高度化も萌芽的な段階にある。北海道の社会素因や自然素因を考慮した防災対策を総合的に進めるためのシーズが必要となっている。

本総合研究グループでは、千島海溝沿いで発生する巨大地震による災害の軽減を目指した総合的な研究を横断的に実施する。総合研究グループが目指す最終的なアウトプットは、津波避難計画に代表される災害軽減に貢献する地域防災スキームのプロトタイプ提示である。避難計画は1つのシナリオしか作成できないため、災害誘因と災害素因の不確実性を反映させたロバストな仕様とすることが必要である。災害誘因である地震動と津波の事前予測やその信頼区間の推定と、地域や時代ごとに異なる災害素因を重畳させて最適な避難計画を検討することが望ましい。事前予測シナリオは、その性質上、不確実性を内包しているため、リアルタイムデータによる即時的な防災情報との組み合わせが重要となる。千島海溝沿いで地震が発生した場合、北海道太平洋沿岸への津波到達は20分程度と見積もられており、防災科学技術研究所のS-net水圧計データを活用した津波のリアルタイム予測手法の開発は特に重点的に進めるべき課題である。

近年の津波堆積物の網羅的な調査から、巨大津波履歴の概要の把握は飛躍的に進んだ。しかし、津波事前予測や地震長期予測の高度化には、直近の17世紀初頭のイベントをはじめ、各イベントの規模や波源域の違いの有無について更にデータを蓄積する必要がある。特に、十勝沖～根室沖の領域が日本海溝北部や北方領土以東と連動する可能性は、最大マグニチュードを含めた津波浸水予測の波源域設定を行う上で重要な問題である。プレート間固着の空間分布は、地震時断層のすべり分布に起因する津波の特性を規定すると考えられる。海底地殻変動観測によるプレート間固着状況の把握は、津波予測に事前情報を与えることが期待される。

前回の超巨大地震から約400年が経過している千島海溝南部は、超巨大地震の準備～直前段階にあると考えられる。これまでに千島海溝で発生した巨大地震では、長期的な地震活動の静穏化や前震の存在が報告されており、2008-2015年にも地震活動の低下が見られている(松浦, 2019)。また、20世紀以降に発生したM8クラスの巨大地震の大すべり域と地下構造や定常的地震活動との空間的な関連性の報告がある。一方、東北地方太平洋沖地震においても、大すべり域と地震波速度構造や地震波反射強度との空間的関連性や、スロースリップをはじめとした直前～長期的な前駆的現象の可能性が検討されている。

地震活動やプレート間固着などの震源域の動的な現況や、大すべり域周辺の地下構造といった静的な特徴などの基礎的なデータの蓄積を図り、東北地方太平洋沖地震などで得られた知見を参照することで、地震発生に至る過程に関する研究を進める。また、北海道は歴史的背景から他地域に比べて史料が極めて限られる。遺跡から発見される液状化痕跡は、巨大地震の発生履歴や揺れの特徴を記録している可能性があり、北海道でも網羅的な調査を進める必要がある。

地震や津波災害は地域性の強い現象である。事前予測に基づくハザードマップや避難計画に実効性を担保するためには、実証実験に基づいた課題の検討と対策の検証による最適化を行うことが望ましい。その際、北海道特有の人口分散・低人口密度という社会素因と、積雪寒冷という自然素因の考慮が求められる。整備が進む地理空間情報と避難訓練の実データを融合した空間分析手法は、避難計画設計への大きな貢献が期待される。一方、住民はもとより、地方行政機関や防災情報を伝える地域の報道機関においても、地震津波の災害リテラシーの向上は大きな課題である。災害現象は地域性が強いため災害リテラシー向上の一元的な知識体系は確立されていないが、関係機関や地域社会と試行錯誤的に連携を積み重ねることはすべての基盤となる。能動的・受動的に地域防災力の向上を目指した取り組みを行っていくことは、災害の社会素因の把握のためにも重要である。

以上のように、本総合研究グループでは、北海道太平洋沿岸に最適な災害軽減スキームのプロトタイプ作成を目標として、要素技術である津波や地震動の事前・即時予測手法の高度化、避難計画の地理空間的解析、震源域の現況評価、巨大津波履歴情報の拡充などの課題間の連携をとり、その成果をインタラクティブに共有することで、現象理解・現象予測・災害誘因予測を結びつけた横断的研究を推進する。

2. 令和元年度の主な成果

津波堆積物の年代決定の高度化を目指した北海道太平洋沿岸での調査から、17世紀前半の伊達市有珠・登別市富岸・竹浦の津波堆積物は1640年北海道駒ヶ岳噴火起源であること、白老町社台・苫小牧市勇払・むかわ町汐見の津波堆積物は1611年慶長地震津波起源の可能性が高いことがわかった。また、十勝の大樹町における17世紀津波堆積物の年代は、浦幌町と同様に1611年よりは新しい時代のものであると推測された（北海道大学 [課題番号：HKD_01]）。

千島海溝南部の根室沖に海底地殻変動観測基準局を3か所設置し、1回目の測定を実施した。また、海溝軸を跨ぐ形で3点の海底間音響測距機器を設置し観測を開始した。釧路・根室沖の地震活動が比較的活発な海域で、海底地震計10台を用いた自然地震観測を2か月間実施した（図1）（北海道大学 [課題番号：HKD_09]、東北大学災害科学国際研究所 [課題番号：IRID02]、東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_05]）。

地震活動の静穏化現象を用いて、カムチャツカ半島東岸から千島列島、北海道沖、東北日本沖、伊豆小笠原諸島にかけての沈み込み帯での長期予測を試行した。1988年から2015年までに発生した震源の深さ70km以浅、Mw7.5以上の9個の地震を予測対象とし、15年間のサブカタログを作成して空間格子の周囲から6個の地震を選び、地震の発生間隔が11年以上の場合を「静穏化」と判定して警報ONにした場合の確率利得は1.9となり、ランダムな予測より高い結果が得られた（北海道大学 [課題番号：HKD_09]）。

地殻変動観測や地震活動評価から得られたプレート間固着の状態把握を先見情報として利用し、かつS-netで観測される圧力波形データから津波即時予測を実施する手法として、S-net観測網で地震発生後500秒以内に観測された圧力波形を3つのタイプに分類することで津波波源域（地震時隆起域）を推定し、かつ隆起域の面積から地震のマグニチュードを推定する手法を開発した。震源域近傍の海底圧力観測データ同化による津波数値計算手法を用いて、実際のS-net観測点分布で津波がどの程度予測可能かを1968年十勝沖地震の断層モデルに適用し、津波の高さ分布が過大に見積もられる傾向にあることがわかった（図2）（北海道大学〔課題番号：HKD_09〕）。

避難訓練結果を可視化する避難訓練可視化システムを開発し、集団避難実験における運用を通して、システムの効果及び課題を検証した。避難訓練可視化システムの運用はおおむね良好に進められた。特に端末側アプリの機能簡略化によって、参加者もアプリを意識することなく、避難行動を行うことができた。システムを利用したフィードバック学習に関しては、動的な訓練結果と災害関連情報を可視化することによって、参加者の防災意識を変化させる効果があったと考えられた（北海道大学〔課題番号：HKD_07〕）。さらに、関係機関との情報共有や、公開講座・防災機関向け・報道機関向けの地震津波防災勉強会を実施したほか、津波警報時の呼びかけ方法について報道機関とフィールドワークを実施し、地域防災力の向上を図った。（北海道大学〔課題番号：HKD_09〕）。

3. これまでの課題と今後の展望

海域のプレート間固着の状況は、津波浸水予測の断層モデル設定において重要な情報であり、海底地殻変動観測の結果が期待される。千島海溝南部では、2008年以降M6.8以上の地震が発生しておらず、地震活動は低調な状態が続いている。地殻活動のデータを用いた地震活動の変化を定量的にモニターしていくことが重要である。17世紀巨大津波の波源を特定する決定的な物証はいまだない状態であり、津波堆積物の広域比較から千島海溝と日本海溝の接合部での地震発生の可能性を含めて検討を引き続き行うことが必要である。津波即時予測には大きな役割が期待されているが、S-netの運用が始まってから北海道の沖合観測網では実際に津波が観測された事例がなく、実データを用いた検討が行われていない。津波避難計画の策定には、津波浸水の時系列に加え、強震動による建物被害の評価が必要である。震源特性と地盤情報を組み合わせた広帯域強震動予測手法の高度化が期待される。被災後の復旧復興には事前復興計画が重要であるが北海道では策定事例がない。津波や強震動の事前予測情報から被害を推定し、それに基づいた復興計画の策定が望まれる。

総合研究グループの関連課題は、これまでの研究をベースとし、それを更に発展させることで進められており、上記のように成果が挙がっている。一方、総合研究グループとしての目標を達成するためには、関連課題の担当者が総合研究グループで期待されるアウトプットを把握し、他の成果との結合親和性を考慮して研究を進める必要がある。事前情報を整理して全体スキームの共通認識を図るとともに、総合研究グループには含まれていないが、予防災害対策に重要な課題を検討することが必要である。関連課題を含め、災害軽減の事後確率の最大化が期待される課題を特に重点的に推進することが、限られた研究リソースの活用の観点から重要である。

成果リスト

- 青田裕樹, 大園真子, 富田史章, 高橋浩晃 (2019), 陸域GNSSデータによる釧路・根室沖の簡易的なプレート間固着の推定, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SSS16-P05
- 橋本雄一, 塩崎大輔 (2019), 津波浸水想定データを援用した避難訓練可視化システムの開発と利活用, 地理情報システム学会講演論文集28, CD-ROM
- Inoue, M., Y. Tanioka, Y. Yamanaka (2019), Method for Near-Real Time Estimation of Tsunami Sources Using Ocean Bottom Pressure Sensor Network (S-Net), Geosciences, doi:10.3390/geosciences9070310
- 井上真優, 谷岡勇市郎, 山中悠資 (2019), 海底圧力観測網(S-net)を用い即時的に津波の規模を推定する手法の開発, 日本地球惑星科学連合2019年大会, HDS13-P03
- 奥野祐介, 塩崎大輔, 橋本雄一 (2019), 津波と土砂崩れによる複合災害を想定した集団避難行動分析ー北海道稚内市を事例としてー, 地理情報システム学会講演論文集28, CD-ROM
- 川村壮, 橋本雄一, 戸松誠, 竹内慎一 (2019), 積雪寒冷地の港湾都市における建物立地状況と津波からの避難可能性に関する空間分析, 地理情報システム学会講演論文集28, CD-ROM
- 川村壮, 橋本雄一, 戸松誠, 竹内慎一 (2019), 港湾都市の津波浸水想定地域における施設立地の変化, 日本地理学会発表要旨集, 96, 50p
- 西村裕一, 石澤堯史, 千葉崇, 横山祐典, 宮入陽介 (2019), 津波堆積物から描く慶長地震津波(1611年)の北海道における波高分布, 歴史地震研究会, 0-06
- 太田雄策, 木戸元之, 東龍介, 佐藤真樹子, 鈴木秀市, 山本龍典, 高橋秀暢, 木村友季保, 大塚英人, 本荘千枝, 日野亮太, 大園真子, 岡田和見, 青田裕樹, 高橋浩晃, 篠原雅尚, 富田史章, 金松敏也, Kan-Hsi Hsiung, 飯沼卓史 (2019), 千島海溝南西部根室沖における海底測地観測網の構築, 日本地震学会2019年秋季大会, S03-10
- Tanioka, Y. (2019a), Tsunami simulation method assimilating ocean bottom pressure data for real-time tsunami forecast; A case study for the 1968 great earthquake, EGU General Assembly, EGU2019-11714
- Tanioka, Y. (2019b), Tsunami forecast method assimilating ocean bottom pressure data in the source area; A case study for the Tokachi-oki earthquake (Mw8.0), 27th IUGG General Assembly, IUGG19-0492.
- Tanioka, Y., M. Inoue, Y. Yamanaka (2019), Near-real time estimation of tsunami sources using a classification of waveforms observed at dense ocean bottom pressure sensors, AGU Fall Meeting, NH33A-03

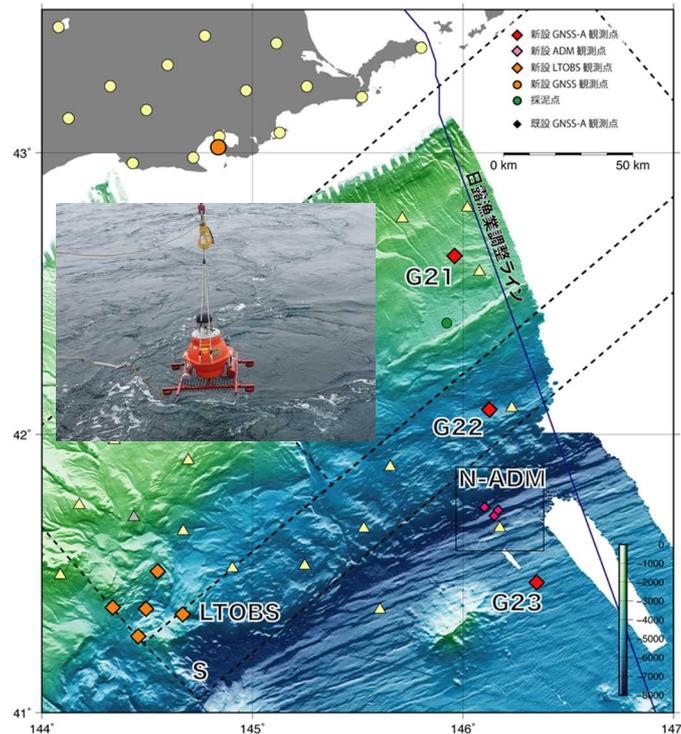


図1．海底地殻変動基準局の設置状況。G21・G22・G23がGNSS/A基準局（東北大学災害科学国際研究所 [課題番号：IRID02]）。

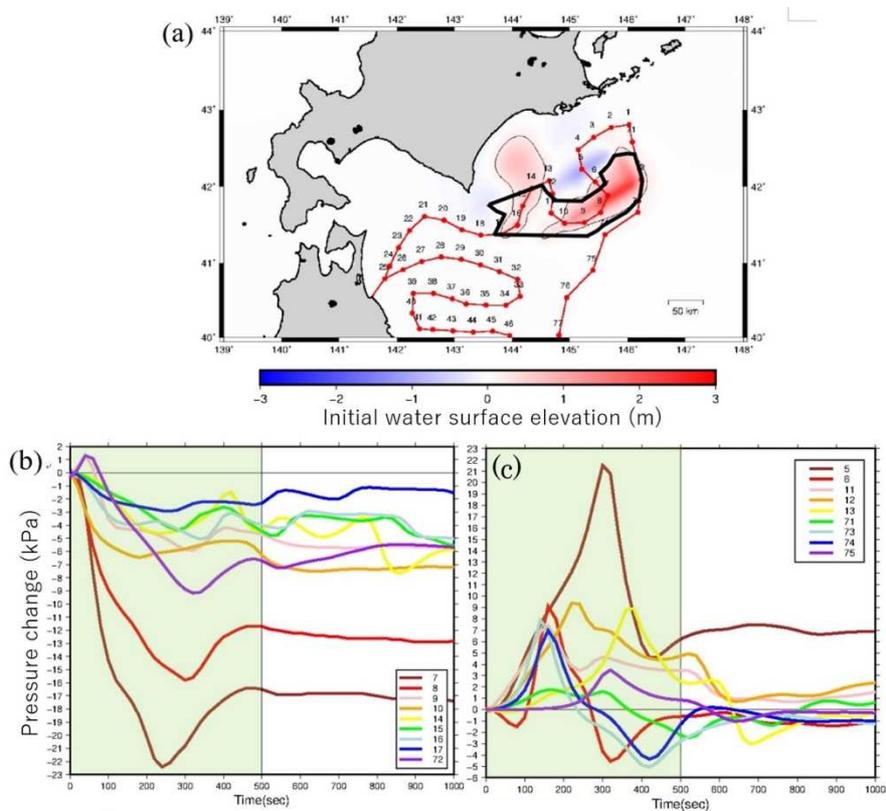


図2．1952年十勝沖地震の地震時隆起域を，S-net観測網の観測点で計算された水圧計波形のタイプ分けにより推定した。(a) 1952年十勝沖地震断層による海面上昇の初期値とS-net地震観測網の観測点分布（赤丸，数字は観測点番号），(b) 各観測点で想定される水圧の時間変化（Inoue et al., 2019）（北海道大学 [課題番号：HKD_09]）。

2 (4) 桜島大規模火山噴火総合研究

「桜島大規模火山噴火」総合研究グループリーダー 井口正人
(京都大学防災研究所)

活発な噴火活動を60年以上続け、今後、大規模噴火の発生が予想される桜島を対象に、各研究項目間で緊密な連携と成果の共有を図り、住民避難を視野に入れた総合的研究を推進する。観測研究を通じて、マグマの動きとマグマ供給系への理解を深め火山活動推移モデルを高度化することで、噴火発生予測研究を進展させる。噴火発生前の規模の予測と、噴火発生直後の噴出物の把握を即時的に行うことで災害予測研究を進める。災害予測に基づき、住民への情報伝達などの火山災害情報に関する研究と、避難や交通網の復旧などの対策に資する研究を行う。他の火山における類似研究と連携し、都市、中山間地域、離島などの地理的、社会的環境による対策の違いなど幅広い研究を目指す。本総合研究グループの研究項目と各課題担当は図1に示す通りであり、異なる部会に属する27の研究課題が参画している。

火山活動推移モデルの構築

1914年に桜島で発生した大規模噴火は、20世紀以降我が国における最大規模の噴火である。火山灰軽石などの堆積量は、0.6立方キロメートルで、VEI（火山爆発強度指数）4とされるが、溶岩の流出が多く、1.5立方キロメートルが噴出した。また、噴火開始から8時間後にマグニチュード7の地震が鹿児島湾において発生した。これらの現象に伴い、降下火山灰、軽石、溶岩流による集落の埋没、家屋の倒壊、土石流など多様な形態の災害が発生した。一方、死者・行方不明者は、地震災害を含めても58名であり、噴火の規模の割に犠牲者は少ない（例えば、2014年御嶽山噴火では死者・行方不明者は64名）。これは、噴火発生の30時間前から有感地震が群発したため、多くの住民は身の危険を感じて噴火発生前に避難行動を開始していたからである。このことは、大規模噴火においても異常現象の時系列から構成される噴火の前駆過程の把握が極めて重要であることを意味する。

井口（2019）は大正噴火時の住民の記憶をまとめた「桜島爆発の日（野添，1980）」などにもとづき、大規模噴火に至るまでの過程を、始良カルデラ下のマグマ溜まりの膨張で生じた地殻内応力集中による桜島から離れた場所での地震発生（1913年6月）、桜島島内での二酸化炭素濃度の増加（7月）、桜島島内の弾性変形を伴う非地震性地盤変動（7月～12月）、噴火の30時間前からの群発地震と急速な地盤変動に整理した（図2）。

桜島島内における最初の異常現象は地中からの二酸化炭素の発散量の増加であり、本総合研究グループでもチャンバー内において小型センサーで二酸化炭素濃度の上昇を測定し、その放出率を求める装置の開発がすすめられており、実装が待たれる（東京工業大学〔課題番号：TIT_02〕）。群発地震という噴火直前の現象の前には、マグマの貫入に伴う弾性変形のみが進行する非地震性地盤変動期が認められる。非地震性地盤変動期から火山体の脆性破壊を伴いながらマグマの貫入がさらに進行する地震性地盤変動期への推移は、インドネシアにおいて最近発生した2010年メラピ火山噴火や2013年～2017年のシナブン火山における溶岩ドーム形成と火砕流の頻発の前に認められる（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI06〕）。非地震性地盤変動期はマグマの貫入に伴う弾性変形のみが

進行する段階，地震性地盤変動期は応力が岩石の破壊強度を超えた段階と考えられる。桜島の1914年噴火では，約半年の山体隆起と直前30時間の火山性地震の群発が起きたとされており，「マグマ貫入に伴う火山体の弾性変形と応力集中→応力が岩石の破壊強度を超えることによって発生する火山構造的な地震→噴火の発生」というプロセスは火山噴火の前駆過程の標準モデルとして有望である。

地盤変動などから見積もられるマグマの貫入速度は，噴火の規模と様式を予測する指標となりうる（井口・他，2019）。これまでの経験式をさらに高度化するために，地盤変動観測を繰り返し実施した（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI07]）。一方，地盤変動として検知できない場合は，検知深度に難はあるもののミュオグラフィにより得られる地下の密度変化（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_21]）や，質量の変化を反映する重力測定も火山活動の推移把握の手法として有望である。特に，推移については，大気中の二酸化硫黄ガス量の測定や火山灰の自動採取・画像伝送装置（防災科学技術研究所 [課題番号：NIED01]）など，物質科学的な分析を主体とする観測に期待が持てる。

ハザード範囲予測

大規模噴火では，降下火山灰・軽石，火砕流，溶岩流，地震，津波，土石流など様々な現象がハザード要因となる。このうち，降下火山灰・軽石の拡散と降下域の予測については，次世代火山研究推進事業のうち「リアルタイムの火山灰ハザード評価手法の開発」によって噴火発生に伴う諸現象を即時的に解析して火山灰の拡散範囲をシミュレーションにより予測するだけでなく，噴火前の地盤の膨張量から噴出マグマ量を予測し，火山近傍の高分解能の風速データをもとに噴火発生前の拡散予測も行われている。このように，ハザードごとの予測においては噴火の規模を予測することが最も重要である。

火砕流についても同様にシミュレーションにより予測可能であるが（図2），噴出マグマのうちどれだけの量が火砕流として流下するかという配分予測に依然として問題がある。また，火砕流は常に発生するわけではないので，その発生予測そのものも重要なテーマである。これまで昭和火口の噴火活動から火砕流の発生しやすい火山活動条件について知見が蓄積されつつある（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI11]）。

降雨がトリガーとなる桜島の土石流の予測については，土石流発生ポテンシャルの把握と，1回の土石流の流出土砂量を規定する雨の降り方の把握が重要である。焼岳等における知見を桜島にも活用できるかどうか検討する（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI12]）。また，土石流発生ポテンシャルは降下火山灰量に依存するので，降下火山灰予測とリンクする必要がある。なお，大規模噴火発生時には，研究機関の観測インフラも深刻な影響を受ける。地震・火山データの無線伝送技術の開発と運用の検討が始まっているが，桜島では400MHz帯無線によりデータ伝送を二重化するレジリエントな火山総合観測システムを設置した（東北大学 [課題番号：THK_13]）。

防災リテラシーの向上

桜島の大規模噴火を想定した防災リテラシーは，現在の火山活動状態と今後中期的に起こりうる噴火への認識，噴火前後の危機的状況における避難等の行動，避難時の災害イメージの醸成，復旧・復興への行動イメージなどによってわかる。現在の活動状態と警報は気象庁の発表する噴火警戒レベルにより情報提供される。「噴火警戒レベル」の認知

度調査アンケートに対し、鹿児島県外の認知度は3割であったが、鹿児島市内では9割、鹿児島市を除く鹿児島県内でも8割以上から、少し知っている・よく知っているという回答が得られ、桜島周辺ではその認知度が高いことが分かった(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI13])。避難などの対策、交通インフラへの影響、大規模噴火についての社会の共通理解醸成の方策について、日本自然災害学会誌に特集記事「桜島の大規模噴火を考える」を掲載し、桜島火山防災連絡会メンバーである自治体および国の地方機関に配布するなどリテラシーの向上に努めた。また、桜島大規模噴火にて想定される広範囲の航空インフラへの影響について航空会社研究所の季刊誌に掲載した。

これまでの課題と今後の展望

今年度は計画初年度であったが、それぞれの課題において新たな取り組みや研究の高度化がなされている。2019年12月に行った桜島火山大規模噴火総合研究グループの研究集会において、参画している各課題担当者から研究計画の発表をしてもらい、総合研究グループとしての今後の連携についての議論も行った。考古・文献資料から桜島に限らず大規模噴火の発生履歴の追跡を行う。新しいデータ伝送方法、火山ガス観測機器についての研究紹介もあり、桜島において機器の実験を行う。多項目観測、活動分岐の研究を進める。具体的な噴出物量を与えることで火砕流や土石流の発生予測、流下のシミュレーションを行い、ハザード範囲予測の高精度化を行う。また、自治体、防災関係者、市民向けの火山活動に関するセミナー開催などにより防災リテラシーの向上を行う。令和2年度においても12月に総合研究グループの研究成果、課題間連携を確認する研究集会を行い、総合的な研究を推進する。

成果リスト

- 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* 9, doi:10.1038/s41598-019-38494-x
- 新谷昌人 (2019), 光ファイバーネットワークを用いた火山活動監視のための重力計測技術に関する研究, 東北大学電気通信研究所研究活動報告, 25, 285-287
- 伴雅雄, 及川輝樹, 山崎誠子, 後藤章夫, 山本希, 三浦哲 (2019), 近代的噴火観測事例のない火山での噴火推移予測: 蔵王火山の例, *火山*, 64, 131-138, doi:10.18940/kazan.64.2_131
- Gonda, Y., S. Miyata, M. Fujita, D. Legono, D. Tsutsumi (2019), Temporal Changes in Runoff Characteristics of Lahars After the 1984 Eruption of Mt. Merapi, Indonesia, *Journal of Disaster Research*, 14(1), 61-68, doi:10.20965/jdr.2019.p0061
- Hasib, M., T. Nishimura, H. Nakahara (2019), Spectral ratio analyses of explosion earthquakes at Sakurajima volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 381, 302-311, doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.05.005
- 橋本武志, 宇津木充, 大倉敬宏, 神田径, 寺田暁彦, 三浦哲, 井口正人 (2019), 非マグマ性の火山活動に伴う消磁及び地盤変動のソースの特徴, *火山*, 64, 103-119, doi:10.18940/kazan.64.2_103

- 平川泰之, 岡野和行, 植野利康, 里深好文, 堤大三, 宮田秀介 (2019), 近年の雲仙普賢岳における土石流発生の地形・地質的条件, 砂防学会誌, 72(1), 21-31
- 堀田耕平, 井口正人 (2019a), 2017年の南岳爆発に前後する傾斜ひずみ変化, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SVC38-16
- 堀田耕平, 井口正人 (2019b), 2017年11月13日南岳爆発に伴う傾斜ひずみ変化, 日本火山学会2019年度秋季大会, B1-08
- Hurlimann, M., V. Coviello, C. Bel, X. Guo, M. Berti, C. Graf, J. Hubl, S. Miyata J. B. Smith, H-Y. Yin (2019), Debris-flow monitoring and warning: review and examples, Earth-Science Reviews, 199, 102981, doi:10.1016/j.earscirev.2019.102981
- Iguchi, M., H. Nakamichi, H. Tanaka, Y. Ohta, A. Shimizu, D. Miki (2019), Integrated Monitoring of Volcanic Ash and Forecasting at Sakurajima Volcano, Japan, J, Disaster Res., 14, 5, 798-809, doi:10.20965/jdr.2019.p0798
- 井口正人 (2019a), 桜島大規模噴火の発生予測－非地震性地盤変動から地震活動を伴う地盤変動への推移, 日本自然災害学会誌, 38, 306-317
- 井口正人 (2019b), 地盤変動に続く地震活動に関する考察, 日本火山学会2019年度秋季大会, B1-05
- 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, 64, 2, 33-51, doi:10.18940/kazan.64.2_33
- 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, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SVC38-15
- 井口正人, 中道治久 (2019), 桜島の大規模噴火を考える, 自然災害科学, 38, 3, 279-345
- 井口正人, 轟朝幸, 村岡猛, 平田輝満, 佃健次, 小田切義憲 (2019), 今そこにある桜島噴火, ていくおふ, 157, 4-15
- 井口正人, 轟朝幸, 村岡猛, 平田輝満, 佃健次, 小田切義憲 (2020), 今そこにある桜島噴火 (2), ていくおふ, 158, 4-17
- Iguchi, M., T. Tameguri, J. Hirabayashi, H. Nakamichi (2019), Forecasting Volcanic Eruption of Sakurajima Volcano Based on Magma Intrusion Rate in Rete in Recent 100 Years, 27th IUGG General Assembly, V20p-431
- Ikenaga, Y., F. Maeno, A. Yasuda (2019), Time-series variation in the textures of ejecta of the An'ei eruption, Izu-Oshima, Japan Geoscience Union Meeting 2019, SVC34-P07
- Ishimizu, E., M. Sakamoto (2019), Issues of Japan's volcanic disaster prevention system as viewed from overseas alert systems, JpGU Meeting 2019, MZZ50-P03
- 石水英梨花, 阪本真由美 (2019), 火山災害軽減に効果的な地域の関係性に関する考察 口永良部島におけるヒアリング調査から, 日本火山学会2019年度秋季大会, P111
- Jitsufuchi, T. (2019a), Development of an optical multispectral remote sensing system for measuring volcanic surface phenomena -Promotion Project for Next Generation Volcano Research B2 (subtopic2-2), J. Disast. Res., 14, 5, 728-743, doi:10.20965/jdr.2019.p0728
- Jitsufuchi, T. (2019b), "Repeated Observations with Short Time Intervals for Measuring Temperature Distribution of a Volcanic Crater Using an Airborne Imaging

- Spectrometer,” IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1809-1812, doi:10.1109/IGARSS.2019.8898090
- Jitsufuchi, T. (2019c), ” Development of an Airborne Radiative Transfer Spectral Scanner for a Single-Engine Aircraft,” IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 9141-9144, doi:10.1109/IGARSS.8897914
- Kaneko, T., F. Maeno, A. Yasuda (2019), Observation of the eruption sequence and formation process of a temporary lava lake during the June-August 2015 Mt. Raung eruption, Indonesia, using high-resolution and high-frequency satellite image datasets, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 377, 17-32, doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.03.016
- 風間卓仁 (2019), 日本の火山地域における重力観測の現状と陸水擾乱問題, *火山*, 64, 3, 189-212, doi:10.18940/kazan.64.3_189
- 風間卓仁, 山本圭吾, 大島弘光, 岡田和見, 大柳諒, 園田忠臣, 井口正人 (2019), 桜島火山における繰り返し相対重力測定(2018年5月~2019年2月), *京都大学防災研究所年報*, 62B, 318-324
- Laszlo O., H. K.M. Tanaka, T. Ohminato, H. Gergo, V. Dezso (2019), Plug Formation Imaged Beneath the Active Craters of Sakurajima Volcano With Muography, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 17-18, 1-28, 10417-10424, doi:10.1029/2019GL084784
- Maeno, F., S. Nakada, M. Yoshimoto, T. Shimano, N. Hokanishi, A. Zaennudin, 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, 27-39, doi:10.20965/jdr.2019.p0027
- 前野深 (2019), 火山噴出物の解析にもとづく噴火物理パラメータの推定ー噴火ダイナミクスの理解進展に向けてー, 日本地球惑星科学連合2019年大会, U04-06
- 三輪学央, 下司信夫, 伊藤順一, 棚田俊收, 井口正人 (2019), VOLCAT による降灰その場自動観察, 日本火山学会2019年度秋季大会, A1-11
- 宮町宏樹, 高橋浩晃, 青山裕, 大園真子, 椎名高裕, 高田真秀, 一柳昌義, 山口照寛, 薄田悠樹, 齊藤一真, 伊藤ちひろ, 村井芳夫, 中垣達也, 筒井智樹, 竹井瑠一, 多田悠也, 山本希, 平原聡, 中山貴史, 東龍介, 鈴木秀市, 佐藤利典, 蔵下英司, 安藤美和子, 田中伸一, 池澤賢志, 山田知朗, 中東和夫, 前田裕太, 堀川信一郎, 松廣健二郎, 奥田隆, 辻修平, 十川直樹, 片尾浩, 澁谷拓郎, 三浦勉, 中川潤, 米田格, 為栗健, 瀧下恒星, 仲井一穂, 山下裕亮, 松島健, 内田和也, 宮町凜太郎, 八木原寛, 平野舟一郎, 久保武史, 坂尾健有 (2019), Seismic refraction and wide-angle reflection experiment in southern Kyushu, Japan: (3) the 2018 exploration report, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SVC38-P40
- 宮町宏樹, 小林励司, 八木原寛, 平野舟一郎, 久保武史, 海野直弘, 松島健, 内田和也, 宮町凜太郎, 片尾浩, 澁谷拓郎, 三浦勉, 中川潤, 米田格, 為栗健, 瀧下恒星, 仲井一穂, 山下裕亮, 前田裕太, 堀川信一郎, 松廣健二郎, 奥田隆, 辻修平, 十川直樹, 中東和夫, 蔵下英司, 山田知朗, 安藤美和子, 田中伸一, 池澤賢志, 佐藤利典, 山本希, 平原聡, 中山貴史, 東龍介, 鈴木秀市, 筒井智樹, 竹井瑠一, 多田悠也, 高橋浩晃, 青山裕, 大園真子, 椎名高裕, 高田真秀, 一柳昌義, 山口照寛, 伊藤ちひろ, 薄田悠樹, 村井芳夫, 中垣

- 達也 (2019), 人工地震探査による南九州横断測線下の速度構造 (4), 日本地震学会2019年度秋季大会, S06-21
- 宮町宏樹, 小林励司, 八木原寛, 平野舟一郎, 久保武史, 早田正和, 坂尾健有, 海野直弘, 松島健, 内田和也, 宮町凜太郎, 磯田謙心, Agnis Triahadini, 手操佳子, 神谷義之介, 清水洋, 片尾浩, 澁谷拓郎, 三浦勉, 中川潤, 米田格, 加藤慎也, 為栗健, 瀧下恒星, 仲井一穂, 山下裕亮, 前田裕太, 渡辺俊樹, 堀川信一郎, 松廣健二郎, 奥田隆, 辻修平, 十川直樹, 長谷川大真, 中東和夫, 蔵下英司, 岩崎貴哉, 篠原雅尚, 山田知朗, 阿部英二, 安藤美和子, 田中伸一, 池澤賢志, 佐藤利典, 山本希, 平原聡, 中山貴史, 東龍介, 日野亮太, 大友周平, 鈴木秀市, 筒井智樹, 井上雄介, 竹井瑠一, 多田悠也, 高橋浩晃, 青山裕, 大園真子, 椎名高裕, 高田真秀, 一柳昌義, 山口照寛, 小野夏生, 齊藤一真, 伊藤ちひろ, 薄田悠樹, 村井芳夫, 中垣達也, 田中康久 (2019), 人工地震探査による始良カルデラ下の速度構造 (4), 日本火山学会2019年度秋季大会, A3-12
- 森俊哉 (2019), 上空二酸化硫黄測定装置観測網による桜島の二酸化硫黄放出率観測, 日本火山学会2019年度秋季大会, P095
- Nakada, S., F. Maeno, M. Yoshimoto, N. Hokanishi, T. Shimano, A. Zaennudin, M. Iguchi (2019), Eruption Scenarios of Active Volcanoes in Indonesia, *J. Disaster Res.*, 14, 40-50, doi:10.20965/jdr.2019.p0040
- 仲井一穂, 井口正人, 大倉敬宏 (2019), GNSSデータによる始良カルデラ周辺の広域上下変動, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SVC38-P36
- Nakamichi, H. (2019), Mitigation of volcanic hazard in Sakurajima, Japan, through the coordinating committee and through communication with the public, *JpGU Meeting 2019*, MZZ50-03
- 中道治久 (2019), 深部低周波地震の発生と火山深部のマグマ供給との関係について, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SSS17-06
- 中道治久, 清水厚, 下村誠, Syarifuddin Magfira, 井口正人 (2019), 桜島におけるXバンドMPレーダーとライダー同時噴火観測と口永良部島噴火のレーダー観測, 日本地球惑星科学連合2019年大会, MIS16-02
- 西村太志 (2019), 噴火発生頻度の時空間的特徴, *火山*, 64, 53-61, doi:10.18940/kazan.64.2_53
- Ohashi, M., M. Ichihara, F. Maeno, B. Kennedy, D. Gravley (2019), The textural analysis of pumice from the Plinian eruption of Taupo volcano: implications for tube pumice, *JpGU Meeting 2019*, SVC34-P07
- 大久保修平, 山本圭吾, 井口正人, 田中愛幸, 今西祐一, 西山竜一, 安藤美和子, 渡邊篤志 (2019), 絶対重力の長期変動から読み解く桜島の火山活動 (2009年~2018年), 日本地球惑星科学連合2019年大会, SGD01-07
- Okubo, S., K. Yamamoto, M. Iguchi, H. Tanaka (2019), Diagnosis of Conduit State of Sakurajima Volcano Using Continuous Records on Gravity and Crustal Movements and Muon Radiography, *27th IUGG General Assembly*, V20p-433
- 大柳諒, 風間卓仁, 山本圭吾, 大島弘光, 岡田和見, 園田忠臣, 井口正人 (2019), 繰り返し相対重力観測で明らかになった桜島火山における1990年代以降の重力時空間変化, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SVC38-P38

- 大柳諒, 風間卓仁, 山本圭吾, 井口正人 (2019), 繰り返し相対重力観測で明らかになった桜島火山における1990年代以降の重力時空間変化, 日本測地学会第132回講演会, 20
- Permana T., T. Nishimura, H. Nakahara (2019), Source location of volcanic earthquakes and tremors at Sakurajima volcano based on seismic correlation, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SSS11-04
- Permana, T., T. Nishimura, H. Nakahara, E. Fujita, H. Ueda (2019), Reliability evaluation of volcanic tremor source location determination using cross-correlation functions, *Geophys. J. Int.*, 220, 1300-1315, doi:10.1093/gji/ggz523
- Sakamoto, M. (2019), Governance for Trans-boundary Volcanic Disaster -a case of 2010Eyjafjallaj kull Eruption-, JpGU Meeting 2019, MZZ50-P01
- 阪本真由美, 中道治久, 荒島千鶴, 高橋若菜, 荒木田勝 (2019), 越境火山災害をめぐる国際リスクコミュニケーションー 2010年アイスランド火山噴火対応の事例よりー, 日本火山学会2019年度秋季大会, B2-18
- 坂内野乃, 中村美千彦, 安田敦, 奥村聡, 新谷直己, 井口正人, 味喜大介, 下司信夫 (2019), 桜島火山ブルカノ式噴火前のマグマプロセス: 岩石学・地球物理学の連携研究, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SVC37-05
- 澁谷拓郎, 寺石眞弘, 小松信太郎, 山崎健一, 山下裕亮, 大倉敬宏, 吉川慎, 井口正人, 為栗健, 園田忠臣 (2019), 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, 京都大学防災研究所年報, 62B, 279-287
- 嶋野岳人, 日野英逸, 安田敦, 井口正人, 上木賢太, 桑谷立 (2019), 火山灰測色値と地球物理データとの時系列相関解析ー桜島昭和火口2009-2015年活動についてー, 日本火山学会2019年度秋季大会, A1-03
- 嶋野岳人, 安田敦, 井口正人 (2019), 火山灰採取装置SATSUMAによる噴出物モニタリングの進展, 日本火山学会2019年度秋季大会, P082
- 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*, 64, 121-129, doi:10.18940/kazan.64.2_121
- 田島靖久, 中田節也, 長井雅史, 前野深, 渡邊篤志 (2019), 霧島火山群, えびの高原硫黄山の2018年4月の小噴火, *火山*, 64, 147-151, doi:10.18940/kazan.64.2_147
- 高木朗充 (2019), 深部圧力源による火山性地殻変動に基づく噴火発生予測の評価, *火山*, 64, 63-81, doi:10.18940/kazan.64.2_63
- Takano, T., T. Nishimura, H. Nakahara, H. Ueda, E. Fujita (2019), Sensitivity of Seismic Velocity Changes to the Tidal Strain at Different Lapse Times: Data Analyses of a Small Seismic Array at Izu-Oshima Volcano, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 124, 3011-3023, doi:10.1029/2018JB016235
- 瀧下恒星, 井口正人, 園田忠臣 (2019), 落下速度観測から推定された桜島ブルカノ式噴火の噴煙からの火山灰粒子分離高度と粒径分布, 日本地球惑星科学連合2019年大会, MIS16-P04
- Tameguri, T., M. Iguchi (2019), Characteristics of micro-earthquake swarms preceding eruptions at Showa crater of Sakurajima volcano, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 372, 15, 24-33, doi:10.1016/j.jvolgeores.2019.01.016
- 堤大三, 孝子綸図, 山野井一輝, 藤田正治 (2019), ストリームチューブによる地形分割を基にした表層崩壊解析手法, *砂防学会誌*, 72(2), 3-13

- Ueda, H., T. Yamada, T. Miwa, M. Nagai, T. Matsuzawa (2019), Development of a Data Sharing System for Japan Volcanological Data Network, *J. Disaster Res.*, 14, 571-579, doi:10.20965/jdr.2019.p0571
- 内田雅喜, 大倉敬宏, 澁谷拓郎, 安部祐希, 小松信太郎, 山崎健一, 山下裕亮, 吉川慎, 井口正人, 為栗健, 園田忠臣 (2019), レシーバ関数解析を用いた九州南部下のフィリピン海スラブの構造の推定, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SSS12-P12
- 海野直弘, 八木原寛, 仲谷幸浩, 平野舟一郎 (2019), 阿多カルデラ周辺の地殻の3次元地震波速度構造及び加久藤カルデラ下の速度構造との比較, 日本火山学会2019年度秋季大会, A3-11
- Wang, X., Y. Aoki (2019), Post-eruptive thermoelastic deflation of intruded magma in Usu volcano, Japan, 1992-2017., *J. Geophys. Res.*, 124, 335-357, doi:10.1029/2018JB016729
- 山口翔大, 宮田秀介, 堤大三, 村重慧輝, 藤田正治 (2019), 数値解析による積雪条件の異なる融雪型火山泥流予測, *砂防学会誌*, 71(6), 3-13, doi:10.11475/sabo.71.6_3
- Yamaoka, K., S. Tsuji, T. Watanabe, T. Kunitomo, H. Miyamachi, H. Yakiwara, M. Iguchi, T. Tameguri (2019), Temporal variation of seismic propagation property of Sakurajima Volcano, Japan, 27th IUGG General Assembly, S04p-114
- 山崎雅, Freysteinn Sigmundsson, 井口正人 (2019a), 上部地殻でのマグマ流入出に対する粘弾性地殻の応答: 1914年桜島噴火前後の始良カルデラの隆起について, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SSS16-10
- 山崎雅, Freysteinn Sigmundsson, 井口正人 (2019b), 始良カルデラにおける粘弾性地殻変動, 日本火山学会2019年度秋季大会, A3-13
- Yamasaki, T., F. Sigmundsson, M. Iguchi (2019), Viscoelastic crustal response to magma supply and discharge in the upper crust: Implications for the uplift of the Aira caldera before and after the 1914 eruption of the Sakurajima volcano, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 531, 1, 115981, doi:10.1016/j.epsl.2019.115981
- 山本圭吾, 松島健, 吉川慎, 井上寛之, 園田忠臣, 瀧下恒星, 仲井一穂, 内田雅喜, 大柳諒, 神谷義之介, 大倉敬宏 (2019), 水準測量によって測定された桜島火山の地盤上下変動 (2017年11月~2018年11月), 日本地球惑星科学連合2019年大会, SVC38-P37

研究項目と各課題担当

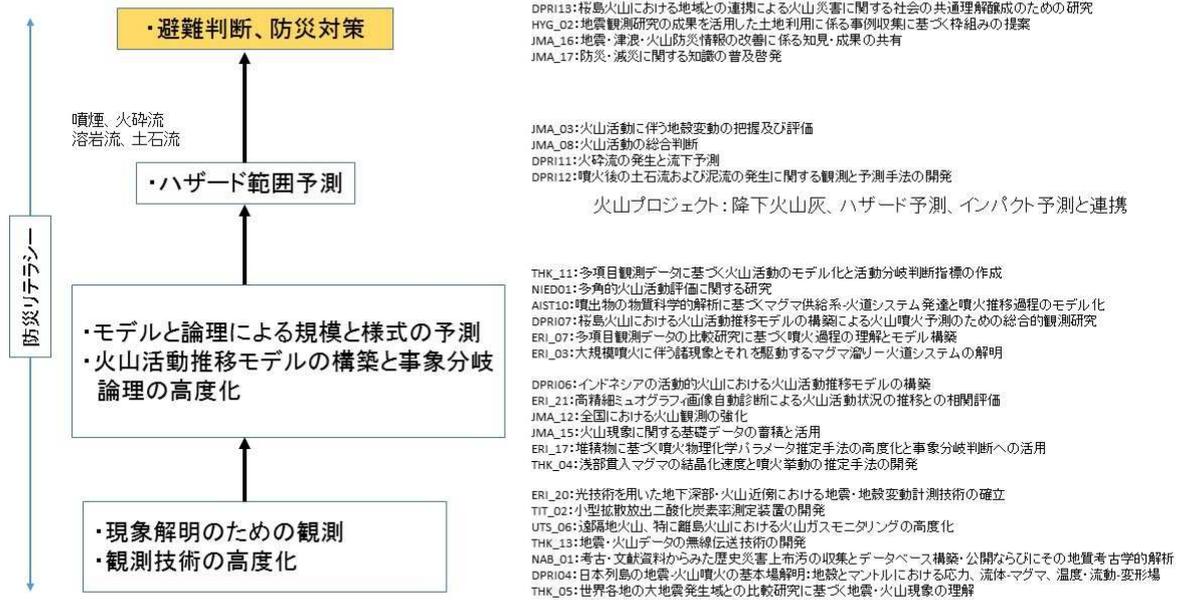


図 1. 桜島総合研究グループの研究項目と各課題。

総合研究グループ: 桜島大規模噴火

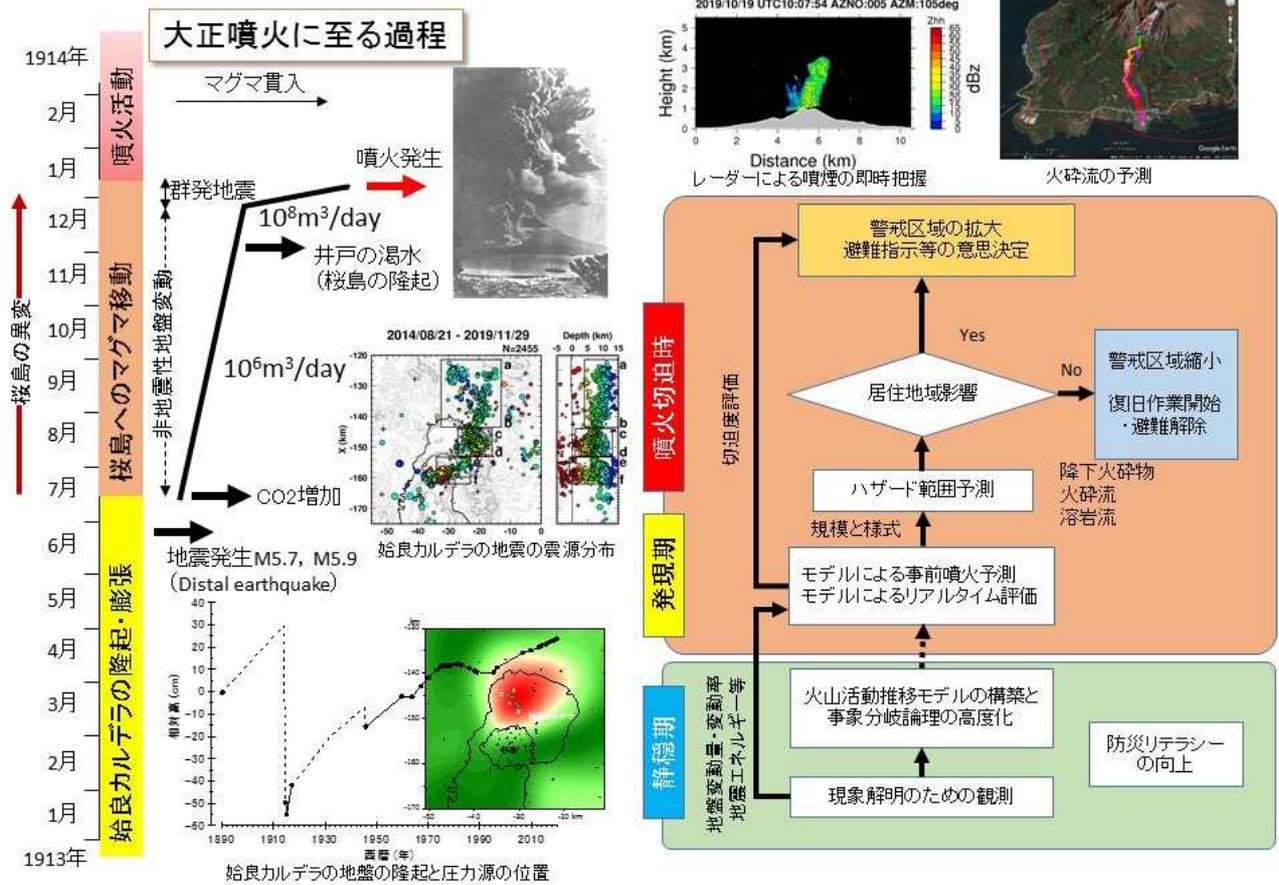


図2. 今年度の成果と今後の研究の進め方。左：1914年に発生したVEI4の大規模噴火発生に至るまでのプロセスを明らかにした。始良カルデラ下のマグマ溜まりの膨張で生じた地殻内応力集中による桜島から離れた場所での地震発生（1913年6月）、桜島島内でのCO2の増加（7月）、桜島島内の弾性変形を伴う非地震性地盤変動（7月～12月）、噴火の30時間前からの群発地震と急速な地盤変動が発生。右上：XバンドMPレーダーにより観測された桜島南岳噴火の噴煙の断面図，地盤変動観測から求められた圧力源の体積変化量から予測した火砕流の到達範囲。右下：総合研究グループでの研究の進め方。

2 (5) 高リスク小規模火山噴火総合研究

「高リスク小規模火山噴火」総合研究グループリーダー 大湊隆雄
(東京大学地震研所)

目的

火山では、噴気地帯や山頂火口近傍に多くの観光客や登山客が訪れたり、観光施設が設けられている場合が多く、平成 26 年の御嶽山噴火や平成 30 年の草津本白根山噴火のように、小規模な噴火でも人的・物的被害等が生ずる場合がある。また、小規模な噴火は発生頻度が相対的に高いことから、観光客や登山客等の災害リスクの低減という観点から重要な研究対象である。そこで、噴火災害に関する史料の収集、地質調査による水蒸気爆発等の噴火履歴調査、各種観測による活動把握、災害誘因である噴石や土石流などの災害ポテンシャル予測研究、災害情報の発信に関する研究等を実施する。これらの成果を総合的に検討し、研究の課題や方向性を明らかにする。

実施方法

(1) 既存課題の成果を活用

- ・ 噴火災害史料の収集、災害発生状況の整理、噴火災害発生時の噴火の規模や火口からの距離等に関する文献調査
- ・ 地質調査による水蒸気爆発等の噴火履歴調査
- ・ 地球物理・地球化学的各種観測による活動把握
- ・ 熱水系の構造探査（比抵抗調査等）による水蒸気噴火ポテンシャルの評価
- ・ 災害情報の発信に関する研究の活用（御嶽，本白根の事例研究など）

(2) 建議の研究の枠外（社会科学，災害科学分野など）の成果を活用

- ・ 災害関連学会等からの情報収集
- ・ 社会科学，災害科学分野等の研究者に，火山分野への応用を検討してもらうための方策（集会・セミナー等）の検討

(3) 既存研究成果を精査し，研究分野の過不足の有無を洗い出し，あらたな研究課題や研究の方向性の提案につなげる。

(4) 上記に関連する研究集会の企画

本年度の実施内容

- (1) 本総合研究の進め方を議論するために，2020 年 2 月 17 日に少人数による検討会を実施した。
- (2) 既存課題の成果活用に向けて，実施課題の中から本総合研究に関連する成果を以下のように選び出した。

- ・ 地質調査による水蒸気爆発等の噴火履歴調査

草津白根山について、噴火履歴の解明および噴火ポテンシャル評価に関する研究が進められている（富山大学 [課題番号：TYM_01]）。小規模水蒸気噴火の発生頻度に関する知見を得られることが期待される。

- ・ 地球物理・地球化学的各種観測による活動把握

小規模火山噴火に関する研究を推進するためには、火口近傍の観測体制の充実が不可欠である。気象庁による活火山の常時監視体制の継続（気象庁 [課題番号：JMA_12]）や、地震計や監視カメラの増強は本総合研究にとって極めて重要である。

箱根大涌谷では噴気観測データから噴火前後のヘリウム同位体比の変化を検出し、噴火に関する流体移動の役割を明らかにした（東京大学大気海洋研究所 [課題番号：AORI02]）。草津白根山では広帯域 MT 観測により、湯釜直下から本白根山にかけての深さ 1-3 km に広がる低比抵抗域を検出した（東京工業大学 [課題番号：TIT_03]）。水蒸気噴火発生場の詳細と噴火ポテンシャル評価に寄与する重要な成果と言える。

一方、国内の活動的火山について、活動推移のモデル化や分岐判断指標の作成をするために観測データ等の検討が進められている（東北大学 [課題番号：THK_11]）。多くの火山活動の初期段階で小規模な水蒸気噴火が発生することから、本総合研究に関連する知見を得られることが期待される。

- ・ 災害情報の発信に関する研究の活用

ニュージーランドで開発された VUI（火山活発化指数）を日本の火山に適用するための具体的な検討が始まっている（北海道大学 [課題番号：HKD_04]、京都大学理学研究科 [課題番号：KUS_02]）。これは、噴火前の各種観測データの変化から火山活動の活発化の度合いを客観的に評価する試みであり、その成果は本総合研究の対象である高リスク小規模噴火の評価にも応用され、災害情報としてどのような情報が発信可能であるかを評価することに繋がる。

これまでの課題と今後の展望

- ・ これまでの課題

マグマ噴火等の大規模噴火ではほとんどの場合明瞭な先行現象があり、噴火前に避難し人的被害は少ない場合が多い。また、噴火規模が大きい場合でも周囲に人がいなければ被害が無い。これに対し、水蒸気噴火、ガス噴出、ガスの滞留等の比較的規模の小さい火山活動であっても近くで発生すれば人的被害はまぬがれない。さらに、先行する現象が弱いかあるいは無いために事前把握が難しく、危険性がわかりにくい。噴気地帯などはそのまま観光スポットになっていることも多く、観光客や登山客が危険性がわからないまま接近し、被害が出る場合がある。

小規模噴火にもかかわらず高リスクである理由の一つは、上記で述べたように発生場所や時期が予測困難だという点である。また、高リスクであるもう一つの理由として社会的要因も考えられる。各自治体が防災マップを発行しているが、その多くは噴火がある程度予測できることを前提とした記述となっており、高リスク小規模噴火に関する記述はほとんど見られず、危険性の存在が周知されにくい。噴火に関する情報発信を担う

気象庁が設定している噴火警戒レベルについても、非専門家はその内容を正確に理解しているとは考えにくく、専門家と非専門家の認識が大きく乖離している可能性がある。例えば、噴火警戒レベル1であれば安全であると、非専門家は誤って理解し、火口付近に無防備に接近して突発的な噴火に巻き込まれるという事が起こり得る。

- ・ 今後の展望

本課題のターゲットである小規模火山噴火は、データの取集が難しく、科学的な研究の対象とするためには困難を伴うため、観測研究計画の中でこれを明示的にターゲットとする研究は限られていた。しかしながら、小規模ゆえに発生頻度が高く人的被害も少ない現象に対して、被害低減につながる具体的な方策を探るための研究は本観測研究計画の中で実施されてしかるべきものであった。そこで、2019年度に始まった本観測研究計画において「高リスク小規模火山噴火総合研究グループ」を立ち上げ、その活動を開始したところである。

本総合研究は、予測困難性と社会的要因に着目して研究の方向性を検討し、将来の研究課題のシーズを育てることを目標とする。予測困難性に関しては、これまでの知見を活用することで予測可能性を高めることはできないか、あるいは、予測可能性を高めるためにはどのような研究を新たに立ち上げるべきか、という観点から検討を進める。社会的要因に関しては、専門家と非専門家の認識のギャップを埋め、どうすれば非専門家が危険性を正しく理解することができるのか、そのためには何をすべきか、という観点から社会科学的、防災科学的研究の方向性に関して検討を進める。

初年度は、関連する研究課題の整理と今後の研究の進め方の議論に留まったが、次年度以降、より具体的な活動を進める予定である。

成果リスト

特になし

3 拠点間連携共同研究

東京大学地震研究所・京都大学防災研究所 拠点間連携共同研究委員会

委員長 松島信一

(京都大学防災研究所)

副委員長 市村 強

(東京大学地震研究所)

これまでの地震・火山観測研究計画では、地震や火山噴火の発生の予測を最大の目標とし、それにより地震や火山噴火による災害の軽減を目指してきた。しかし、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の発生により多くの犠牲者が出たことを踏まえ、地震や火山噴火の科学的な予測が極めて困難であっても、現在の地震学や火山学には災害軽減に役立てられる多くの知見が集積されていることから、平成26年度から開始された「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」(建議)において大きく方針を変更した。即ち、地震や火山噴火の発生予測の実現を重点とした方針から、それらの予測を目指す研究を継続しつつも、地震・火山噴火災害をもたらす誘因の予測研究も組織的・体系的に進める方針に転換した。そのため、地震学や火山学を中核としつつも、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの分野の研究者が参加して、協働して推進することになった。

これまでの建議に基づく観測研究計画では、自然現象である地震発生や火山噴火現象の理解に基づきそれらの科学的な予測を目指すという考え方から、「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所が中核となって計画を推進してきた。しかし、災害や防災に関連する研究者と協働して計画を推進するためには、東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所とが連携して、計画を進めることが有効であるとの結論に至り、両研究所が協働し、それぞれの分野の共同利用・共同研究拠点として、連携して共同研究を進めることとなった。具体的には、両拠点の研究者が中核となって建議に沿った大テーマを決め、それを実現するための研究について全国の研究者からの提案・参画を募集して全国規模の共同研究を進める「重点課題研究」と両拠点がそれぞれ関連が深い地震火山研究コミュニティと自然災害研究コミュニティの2つの学術コミュニティに呼びかけ建議の主旨を踏まえたボトムアップ研究を公募する「一般課題型研究」を実施している。

1. 重点推進研究

(1) 総括研究

総括研究(拠点間連携研究[課題番号:CT0C01])は「巨大地震のリスク評価の不確実性に関するパラダイム構築の推進」と題し、平成30年度に引き続き、(1)震源過程、(2)伝播・深部地盤構造、(3)強震動予測、(4)浅部地盤構造、(5)構造物被害予測、(6)リスク評価の研究グループに分かれ、それぞれの分野におけるリスク評価の不確かさの要因についての検討を進めるとともに、これらの知見を統合するための(7)プラットフォーム構築グループおよび(8)ステークホルダの参画に関する研究グループにおいて、リスク評価およびその不確かさに関する検討を行った。2019

年度からは、さらに（９）大規模計算のためのコンピュータサイエンスグループを加えた９グループで実施した。

震源過程および強震動予測について、巨大地震による強震動予測を目的とした、強震動生成域に対する距離減衰を求めるために、諸問題を整理し、強震動生成域の分かっている地震に対する波形処理を行った。深部地盤・伝播経路については、海洋研究開発機構の観測船「新青丸」を利用し、そのKS-19-18次航海で15台の海底地震計を7観測点に設置した。そのうちの5観測点では、それぞれ1台ずつの海底地震計を設置し、それ以外の2観測点は海溝軸近傍の微動や超低周波地震の発生域にあたり、5台の海底地震計を用いた半径およそ2kmの十字アレイを構築した（図1）。さらに今年度は、気象庁一元化震源カタログからマグニチュード2以上の地震を抽出し、これまでに南海トラフ周辺で得られた速度構造を参照して震源再決定を行うための準備を行なった。また、DONET観測波形を用いた海域から陸域まで通した地震波伝播特性を理解するため、精度を向上した震源情報に基づいた解析を行うための準備を行なった。浅部地盤構造に関しては、液状化の可能性のある2次元水平地盤を対象に、有効応力法に基づく逐次非線形地盤応答解析を実施した。解析では、地盤物性が解析領域において均質であると仮定したケースに加え、地盤物性の空間的なばらつきを考慮した不均質地盤に対する検討も行った。その結果、不均質性を考慮することで地表面加速度の増幅が均質地盤と比べ抑えられる傾向にあるものの、地盤の剛性・強度によりその傾向が変化することがわかった。構造物被害予測に関しては、建物被害のデータベースの構築とその応用を目的として、次の3点を検討した。1. 衛星やドローンを用いた広域被害の即時把握の可能性、2. 我が国の部材実験等の膨大な論文から作製したデータベースの活用と、論文中に示された荷重変形関係のデジタル化による非線形挙動特徴点の推定方法の開発、3. 過去の膨大な地震被害調査写真を用いたAI技術による被害程度判断技術開発の可能性。リスク評価については、経験的距離減衰式を用いた確率論的地震ハザード解析を実施する際の震源モデルについて、南海トラフ地震以外の震源域（プレート境界、活断層、それ以外）についてモデルパラメータを更新した。また、2016年熊本地震により阿蘇カルデラ内で多くの斜面崩壊・地すべりが発生したため、京都大学火山研究センターの周辺で発生した斜面崩壊・地すべりの発生メカニズムの初期段階に注目し、強振動の方向と移動土塊の方向との関係、崩壊が発生した地形に共通する特徴について検討を行った。詳細数値地形図（LiDAR-DEM, 1m）を用い、地形を視覚的に理解しやすく可視化する方法を用い、発生場の地形的特徴を明確にし、地震によって発生した斜面崩壊・地すべりの前後比較を行った。地形の変化部周辺の明瞭化を行い、変化のおよぶ範囲の特徴と移動土塊の移動痕跡を追跡した。その結果、地震を引き起こした断層運動によって生じた地表の振動方向と斜面崩壊・地すべりの発生箇所の斜面方向には、非常に良い一致が認められた。また、崩壊・地すべりの初動方向は、この方向と一致すること、崩壊箇所は移動する土塊の斜面下方にその土塊を支持する物質がないという共通する特徴が認められることが明らかになった（齊藤, 2020）。プラットフォーム構築では、地震時の総合的な影響評価にむけて、地震リスク評価の応用として病院建物の被害の程度と周辺のライフライン（水道管網）のリスク評価を考慮した病院建物での医療行為に対する影響について評価した（増田・他, 2020）。コンピュータサイエンスでは、大規模三次元地盤増幅解析手法の高度化を目

指し、液状化構成則の導入とそれに適した数値解析手法の構築を行った。これにより従来よりも広域をより高い分解能で高速に液状化解析できるようになった（Kusakabe et al., 2019）。今後も、地盤構造の曖昧さへの対処など大規模三次元地盤増幅解析手法の高度化を図る。災害リスク情報としては、災害リスク評価結果は想定シナリオ・手法により変化することから、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ため、昨年度は災害リスク評価のばらつきを防災計画に反映するためのハザードデータの構築手法についての基礎的検討を行った。今年度は、昨年度の基礎的検討結果にもとづき大阪府、高知県において様々な手法の組み合わせによる地震ハザードの計算の実施を行った。具体的には工学的基盤の地震動、表層地盤における地震動について様々な手法による組み合わせ計算を実施し、その結果を表示するシステムの開発を行った（図2）。

（2）特定型（その1）

「ばらつきのある被害リスク評価をふまえた防災計画の検討 [課題番号:CT0C02]」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を行うことを目的とした研究を行った。これは、災害リスク評価結果は想定シナリオ・手法により変化するため、防災計画を策定する場合には災害リスク評価にばらつきが存在することを踏まえる必要があり、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、かつ、計画の目的に応じて適切な災害リスク評価結果を選択することが重要となるためである。昨年度は災害リスク評価のばらつきを防災計画に反映するためのハザードデータの構築手法についての基礎的検討を行った。今年度は、昨年度の基礎的検討結果にもとづき大阪府、高知県において様々な手法の組み合わせによる地震ハザードの計算の実施を行った。具体的には工学的基盤の地震動、表層地盤における地震動について様々な手法による組み合わせ計算を実施した。図3は、地震動予測と表層地盤増幅のばらつきの違いによる、高知県における地震動予測結果（最大速度）の違いを示す。

（3）特定型（その2）

「定常的地震活動の震源および地震波速度構造の精度向上による地震波動場推定の高度化 [課題番号:CT0C03]」では、南海トラフ沿いの海域に設置されている海底ケーブル地震観測網のデータを利用し、詳細な沈み込み構造および精度の高い震源を決定するとともに、震源・伝播経路・サイトの特性を求めることによって、将来発生が予測されている巨大地震の震源域モデル、またそれによる陸域における地震動予測の高度化を詳細に検討することを目的として実施した。

南海トラフ沿いでは、2010年以降、ケーブル式の地震・津波観測監視システム（DONET1および2）が整備され、海域における地震活動をリアルタイムで詳細に把握することが可能となった。その結果、紀伊半島南東沖の熊野灘海底下のプレート境界ではスロースリップや微動、超低周波地震などのスロー地震が南海トラフ軸近傍まで発生していることが確認されている。この南海トラフ周辺の海域下で発生する地震について、DONETの観測記録を用いることによって、海底下地震波速度構造を詳細に決定し、さらには震源の決定精度を上げることが可能となり、巨大地震発生震源域の検討や地震波伝播特性につ

いても、詳しい議論が可能となる。一方で、熊野灘より海溝軸近辺のスロー地震が比較的頻繁に発生する場所では、DONET1とDONET2の観測網の間に若干のカバーできていない領域も存在するため、海底地震計を用いた機動的観測を行うことによって、速度構造や震源決定の精度を向上させることができる。

今年度は、気象庁一元化震源カタログからマグニチュード2以上の地震を抽出し、これまでに南海トラフ周辺で得られた速度構造を参照して震源再決定を行うための準備を行なった。また、DONET観測波形を用いた海域から陸域まで通した地震波伝播特性を理解するため、精度を向上した震源情報に基づいた解析のための準備を行なった。

一方、DONET1およびDONET2の観測網でカバーされない領域においては、海洋研究開発機構の観測船「新青丸」を利用し、そのKS-19-18次航海で15台の海底地震計を7観測点（SHM1～SHM7）に設置した。それぞれの海底地震計は固有周期1Hzの3成分速度計を装備している。SHM1からSHM5の5観測点では、それぞれ1台ずつの海底地震計を設置し、SHM6およびSHM7の2観測点では、5台の海底地震計を用い、中心に1台、残りの4台をおよそ2km離して設置して十字アレイを構築した。海底地震計は舷側から海底まで自由落下で設置し、正確な設置位置は船舶からの音響測距で測定した。

2. 一般課題型研究

地震・火山噴火という自然現象が引き起こす地震動、津波、火山噴出物、斜面崩壊などの災害誘因が、自然や社会に潜在的に存在する脆弱性などの災害素因に働きかけ、これらの誘因と素因の組み合わせと相互作用の状態に応じて様々な規模の災害が発生する。そのため災害誘因予測の高度化は、災害の軽減に結びつく有効な手段の一つである。このような視点から、一般課題型研究では、災害誘因や災害リスクを事前に高い精度で評価する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化の研究」、地震や火山噴火が発生した直後に、高精度かつ即時的に災害誘因を予測する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化の研究」、災害誘因予測を防災対策の推進に効果的に結びつけるための「地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究」に関連する研究を公募した。

2019年度は新規10課題が東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究委員会の審査を経て採択された。

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化の研究

「不均質な断層すべり分布を考慮した津波の確率論的予測と不確実性の評価 [課題番号：CTOC04]」では、東京大学地震研究所と京都大学防災研究所のグループがワークショップを開催し、確定論的な津波解析結果と確率論的な予測手法に関する情報交換および確率論的な手法の高度化に向けた共同研究を行った。令和元年9月19日に京都大学防災研究所において両グループの合同セミナーを行い、東京大学地震研究所から大学院生2名、研究員2名が、京都大学防災研究所から大学院生2名、特任助教1名が、それぞれの研究内容を発表し情報交換を行った。また東京大学地震研究所の大学院生だった1名が9月からJSPS研究員として京都大学防災研究所グループに加わり、2018年インドネシア（スラウェシ）地震について、地震波・地殻変動（InSAR）・津波データから、そのメカニズムや断層面上のすべりの不均質性を調べ、そのモデルに基づくパル湾における津波

の浸水について計算した。その結果を、京都大学防災研究所の現地調査結果と比較したところ、パル湾南部のパル市周辺では、実測された浸水深や浸水距離を説明できず、断層すべり以外にも二次的な津波波源が必要であることが示された (Tung-Cheng Ho et al., 2019)。

「強震観測点におけるサイト特性評価手法の開発に関する多国間共同研究 [課題番号:CTOC5]」は、米国・イタリア・フランスとの多国間共同研究により、我が国で開発されてきた強震観測点におけるサイト特性評価手法と彼らの国で標準的に用いられている評価手法との相互比較を行い、我が国で開発されてきた手法の優位性を実証することにより、その国際展開を図ることが目的である。米国についてはAlan Yong氏が京都大学防災研究所に12月半ばから1か月間滞在し、今後の研究方針について議論するとともに、検討対象とその優先順位を決定した。そして彼の協力のもとでカリフォルニア州の強震観測点における強震観測データを公開サイトからダウンロードするとともに、微動データも入手し、それをターゲットに我々の開発した地下構造同定手法を適用してその実施可能性を確認した。Imperial Valley内の観測点において地震動EHVRを求めて地下構造を同定し、Alan Yongらの浅部調査のみの構造から求めた理論解と比較したところ、2Hz~10Hzの高振動数域では両者は比較的良好に対応しているが、浅部のみの彼らの構造では周期8秒の最大ピークを再現することはできないことがわかった (Nagashima and Kawase, 2019, Nagashima et al., 2020, Yong et al., 2020)。イタリアに関してはINGVのDaniela Famiani研究員が2019年9月から約1か月間日本に滞在して、当方の解析プログラムに習熟し、Amatrice地震の観測データの解析の実施に着手した。解析の結果わかったことは、彼らが地震直後(2週間以内)に計測したMHVRは同地点のEHVRとほとんど同じである一方で、本研究代表者とCecile Cornou教授がINGVと共同で地震から約1年後に観測したMHVRは日本のEMRの約半分ほどのEMRが生じていたことである。今後これらのデータに対してEHVR同定法およびMHVR+EMR同定法を適用し、得られた地下構造をアレー微動で求めた地下構造と比較しその妥当性を検証する。フランスに関しては防災研究所の特定研究員が2018年度にGrenobleに赴きGrenoble盆地およびアルプス周辺での強震観測データおよび微動観測データを入手しその解析に着手していた。今年度はまず盆地内の強震観測点5地点でのEHVRとMHVRの比からGrenoble盆地特有のEMR (EMR_G)を求め、それが微動データから擬似EHVRを計算するのに適切なものであることを示すとともに、EHVRから得られた地震基盤までの地下構造を別途求められていた重力による基盤の深さに対応づけて、微動の基本ピーク振動数から深部の速度構造を推定する回帰式を求めた。このEHVRから得られた構造の重要な点は、地質境界は $V_s=1.3\text{km/s}$ の層境界に対応しており、 $V_s=3\text{km/s}$ 以上の地震基盤そのものではないこと、地質境界の前後で速度構造は漸増する傾向を示しており、それによって基本ピークにおける振幅が決定されている、ということである。さらに回帰式でMHVRの基本ピーク振動数から初期モデルを構築し、MHVRとEMR_Gから計算した擬似EHVRを用いて微動観測データしかない盆地を横断する観測線上の速度構造を求めた。上述のEHVRから求めた速度構造と同じく、 $V_s=1.3\text{km/s}$ の層境界が重力異常から求められている地質境界とよく対応していることがわかる (Ito et al., 2019, Kawase et al., 2019, Ito et al., 2020)。

「テフラの成層構造の発達と風化に伴う物性変化を考慮した斜面崩壊発生場の予測 [課題番号:CTOC6]」は、山地の斜面に成層構造をもって堆積した未固結の降下火砕物

(以下、テフラという)が、強震動を誘因として高速で長距離を流動的に滑動する現象に着眼し、その発生場を予測する手法を開発することを目的とした。本年の研究により、テフラの給源火山の噴火史に基づき、山地の斜面におけるテフラの供給と再堆積のシミュレーションを行うプログラムを開発することができた。このモデルでは、火山学的に復元されたアイソパックマップに基づくテフラの降下供給量の空間分布を入力し、地形に依存したテフラの二次移動を計算する。このモデルを検証するため、熊本地震や胆振東部地震での発災地を対象に、地形条件の異なる多数地点で鉛直試孔の断面記載により実際のテフラ堆積量を測定したが、火山活動の静穏期に供給される風成物のローカルな集積が実際のテフラ累層の積分厚みに大きな影響を及ぼすことが分かった。そのため、単純な対比によるモデルの精度・確度の検証には至らなかった。テフラのもつ水理・力学的な物性についても、降下堆積以降の風化作用による透水性の減少や保水性の増大、あるいはせん断強度の低下といった斜面災害に関連する特性を定量化することができた。一方、定置後数千年程度の長い時間スケールでの、元素の溶脱やガラス基質の水和と粘土鉱物の沈殿といった化学・鉱物組成の変化が、どのような機構によって進行するのかについては、十分に明らかにすることはできなかった。粘土鉱物の定量法や生成機構にかかわる議論については分析手法の開発を含め前進があったものの、環境中での実際の水岩石反応や地中水文過程との関連については、不明な点が多く残った。テフラ累層中での長期間にわたる間隙水の不均質な透過とそれに伴う風化変質の追跡が課題である。特にアルミノケイ酸塩を母材として生成するアロフェンやハロイサイトといった粘土鉱物の生成がテフラの強度低下をもたらす過程を解明する必要がある。また、これらが、テフラ累層中に偏在することで、将来的にすべり面となりうる水理・力学的な不連続面を生じさせる過程をモデル化することが必要である。

「強震動のブラインド予測のための共用地盤モデルの構築に関する研究 [課題番号: CT0C07]」は、2021年3月第6回ESG国際シンポの強震動のブラインド予測で用いる熊本市のテストサイトに対する浅部深部統合地盤の共用1次元モデルを構築することを目的とした。第6回ESG国際シンポジウムで実施される2016年熊本地震の強震動のブラインド予測でのテストサイトでの浅部および深部地盤の暫定的な1次元速度構造モデルを作成した。テストサイトは、図4のLL1で示す熊本市蓮台寺付近に位置し、その周辺で微動のアレイ観測と表面波探査を実施した。微動観測では、浅部地盤および深部地盤のS波速度構造モデルを推定するために、1mから約1kmまでのサイズの二重三角形アレイを展開した。最も大きなアレイの観測点配置図を図4に示し、測定された上下成分の微動の例を図5上に示す。これらのデータからSPAC係数を求め、レイリー波の位相速度を推定した。また、強震計の近傍であるLL1地点では、浅部地盤を探査するために、表面波探査を約30mの測線で実施した。測線の両端の地表での上下加振により得られた上下成分の速度波形の例を図5下に示す。それらのデータからも周波数一波数スペクトル法によってレイリー波の位相速度を得た。テストサイトでは、浅部地盤のボーリング調査が別途実施されており、ボーリング調査の際に、テストサイトおよびその周辺地域の地形を視察し、現地での研究会において研究の進め方および共用地盤モデル作成方針について議論を行った。研究会で検討したモデル化の方針に沿って、既存の地下構造モデル情報を参考にして、これらの2つの位相速度から、浅部地盤と深部地盤の1次元S波速度構造モデルを作成した。このモデルをブラインド予測での共用地盤モデルの暫定版とし、上記のボー

リングの結果などを考慮して、浅部地盤の修正が必要となる可能性がある。さらに、共用地盤モデルの1次元仮定の妥当性について検討するために、テストサイト周辺において中小地震を対象にした臨時観測の準備を実施した。現在のところ、2020年3月に観測機器を設置し、臨時観測を開始する予定で観測場所の交渉を行っている。

「火山砕屑物からなる斜面の崩壊に対する地震とその前後の降雨の影響評価 [課題番号：CTOC08]」では、京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を用い、年度当初の計画通り模型実験を行った。予備実験として、新たに作成した遠心場の降雨発生装置の調整を行った。本実験ではマサ土を用いた斜面模型を作成し、加振の有無がその後の降雨時の斜面挙動に与える影響を検討した。計画では火山性砕屑物を使用する予定であったが、今年度は火山性砕屑物との比較のため、入手が容易であったマサ土を利用した。結果として、今年度実施した実験条件では降雨前の加振による斜面の変状が小さかったため、その後の降雨による斜面挙動に対して加振の明確な影響はみられなかった (Xu et al., 2020)。引き続き、事前降雨量、加振力、加振後の降雨量などをパラメータとして実験を実施し、地震とその前後の降雨が斜面の安定性に与える影響を定量的に評価する。

「活断層における地殻変動に伴う盆地形成過程から推定される盆地端部での基盤構造を考慮した地震動増幅特性に関する研究 [課題番号：CTOC09]」では、まず、既往の調査観測などから研究対象とすべき盆地を選定し、既往文献や微動観測などと活断層における地殻変動に伴う盆地形成過程を考慮し、盆地端部での基盤構造の形状や深さなどについて把握した。その結果、邑知潟平野を対象とすることとした。邑知潟平野は石川県中部に分布する邑知潟断層帯に接する平野である。邑知潟断層帯は今後30年の地震発生確率が日本の主な活断層の中ではやや高いグループに属しており、その規模は気象庁マグニチュード7.6程度と推定されている。このような場所では地盤の増幅特性を把握することが地震被害予測と対策のために非常に重要である。そして地盤増幅率を把握するためには地盤構造を推定することが必要である。そこで、邑知潟平野で常時微動観測を行い、その観測記録に基づき地盤構造を推定した。邑知潟平野の北西—南東方向に4測線、北東—南西方向に2測線、合計72地点で単点観測を行った。また、盆地中央の測線間にアレイを2つ配置し同時観測を実施した (図6)。単点においては、独立して30分ずつ観測した。アレイ観測によって得られたデータについて微動解析プログラムBIDOを用いて解析し、得られたレーリー波の位相分散曲線と微動の水平上下スペクトル比 (MHVR) から速度構造モデルを推定した。ただし、1100m以深の構造は地震調査研究推進本部の全国一次深部地盤データ (JIVSM) を利用した。単点観測地点については、MHVRのピーク振動数とピーク振幅を読み取り、アレイによる速度構造モデルを基準として地盤構造を推定した。図7に03-9地点におけるMHVRを観測と理論を比較して示す。図8に03測線 (図7赤色) で推定された地盤構造を示す。これにより、邑知潟平野南西部では北から南に向かって基盤が深くなっていることが確認された (中山・松島, 2020)。

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化の研究

「建物の応答を考慮した高精度地震情報配信手法の開発 [課題番号：CTOC10]」では、震源特性と伝播経路特性、立地地盤の特性、建物の諸元、さらには建物内の上層階と下層階での被害差などを考慮した高精度地震情報配信手法の開発を命題に、建物の応答予測としてより確度の高い情報を提供するために、A) 建物と地盤の動的相互作用のモード

特性変動としての評価，B) 揺れ継続時間の推定式の提案，に取り組んだ。得られた知見は次の通りである。

課題A：建築研究所が収集した建物内の強震記録を利用して，揺れ継続時間の推定を試みた。揺れ継続時間の定義は，能島の研究に従って，全パワーで正規化された累積パワー曲線において5～95%の占有時間(s)とする。能島では，K-NETの地表記録を用いて，モーメントマグニチュードと震源距離，揺れ継続時間の経験式を作成している。本研究では，この経験式を建物内の基礎部で記録された強震動記録に適用して，妥当性を検証した(図9)。その結果，建物によって経験式の整合性が良いものと悪いものがあり，その差は建物階数と相関があることが分かった。つまり，建物階数が高く固有周期が長い建物ほど，基礎部での揺れ継続時間が長くなる傾向にある。そのため，経験式に建物階数の項を追加し，新たな経験式を回帰分析で求めた。新しい経験式は，能島よりも誤差が小さく，建物基礎部での揺れ継続時間を良く表現できる。

課題B：建築研究所が長年に亘って地震観測記録を蓄積している建物から，建物内とその周辺地盤の地表面に記録がある6棟を選び，建物と地盤の動的相互作用の影響を調べた。いずれの建物もコンクリート系の6～8層の耐震構造で，最上階，基礎部および地表面の3ヵ所で加速度が記録されている。今年度は，解析モデルを事前にもたずに，振動記録だけで建物と地盤の動的相互作用がどこまで評価できるかを検討した。建物が剛構造で，観測点数は少ないことから，1次モードの等価線形特性を同定した。特に2011年東北地方太平洋沖地震の前震，本震，余震の記録を詳細に分析した。図10aに示す結果では，動的相互作用により建物の見かけの固有振動数は低下し，本震では低下率が-20%に達している建物が多かった。一方，図10bに示すモード減衰比は建物自体に比較して2～6%上昇していた。この変化には振幅依存性があり，それは大きい振動ほど顕著であった。建物の重量に関する情報があれば，得られたモード特性から，簡易モデルによって水平地盤ばねを評価する方法も提案した。現時点では，建物図面，地盤構造および地表観測点の情報が不足しており，その情報を入手して，分析を深めることが必要である。

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

「地震発生 of 切迫性を伝える災害情報モデル構築～北海道胆振東部地震の主要被災3町(厚真・むかわ・安平)における人的被害に関する全世帯調査を通して～[課題番号:CT0C11]」では，人的被害の発生メカニズムは複雑であり，地震動の大きさ，建物被害，室内散乱，避難様態，復旧状況など様々な要因が関わってくることを踏まえ，世帯に発生した一つ一つの事例を丹念に追跡し，シナリオ解析して行く必要があることから，これまでの当研究室で開発してきた調査法(アンケート震度調査，建物外観調査，アンケート個別被害調査，室内ヒアリング，精神的ストレス調査，等々)を，適所に応用した関連資料収集・分析を通し，上記問題に取り組んだ。発生が予想される地震の人的被害情報からその切迫性を伝える方法を提案することを目的に，2018年9月に発生した北海道胆振東部地震による人的被害を調査し，地域ごと・世帯ごとに異なる被害シナリオを明らかにすべく，以下の調査を実施した。調査対象は，北海道胆振東部地震の主要被災地である厚真町，むかわ町，安平町である。

(1) 被災エリアの建物被害外観調査

むかわ町と安平町について，特に建物被害が多く発生していた道道10号線沿いの商店

街を中心に，713棟を外観目視により破壊パターン・構造種別・建築年・構造要素別被害状況等を実態調査した。岡田・高井による木造建物破壊パターンと被害棟数との関係を図11に示す。全壊のほとんどが層崩壊に至らないD4レベルに留まっていた。建物被害の多くは専用住宅ではなく，耐震性に乏しい1階の壁が少ない店舗あるいは店舗併用住宅に集中している（岡田・中嶋，2019，岩崎・他，2019，中嶋・岡田，2019）。

（2）3町の全世帯被害アンケート調査

計測震度7を観測したが，建物被害は小規模であった。その理由並びに人的被害との関係を探るべく，厚真町（2000世帯），むかわ町（4000世帯），安平町（4000世帯）の全世帯を対象に以下の項目についてアンケート調査を実施した。回収率は全体で22.7%であった。

- 1) 地域の揺れを算定するための震度調査：太田によるアンケート震度調査項目を踏襲した設問から求めた各町の平均震度と全壊率との関係を図12に示す。他の地震と比較してあるが，北海道は全国と比較して同震度での被害率は小さく「（1）被災エリアの建物被害外観調査」の結果を支持している。
- 2) 被災前の建物耐震診断：旧建設省住宅局監修・（財）日本建築防災協会編集『わが家の耐震診断と補強方法』にならい簡易的に耐震診断値を計算できるように，質問が設定されている。世帯ごとに求められた耐震診断値に，各町単位で対数正規確率分布を当てはめたものを図13に示す。3町とも住家の耐震性は全国平均よりも高く，住家被害率が小さかった理由を説明している。
- 3) 建物被害：アンケート回答者に自宅の被害状況を岡田・高井の破壊パターンから選択してもらった。「2）被災前の耐震診断値」との関係は図14のとおりである。耐震診断値が小さい建物ほど被害程度（D-Level）は大きいとの関係が見てとれ両者の関係は明快である。
- 4) 人的被害状況：負傷状態は災害医療分野で標準化されている外傷重症度指標（Injury Severity Score：ISS）で議論するため，居住者各人ごとに負傷部位とその程度を選択する方式を採用している。入院が必要なISS=9以上と判断された住人は20名で，全員が入院治療を受けていた。しかし負傷のほとんどはISSが小さく，未明午前3時に発生した地震にもかかわらず軽症に留まったケースが多いようである。
- 5) 居住者の被害回避行動状況：地震発生直前にいた室内環境及び居住者の状態，地震発生直前・最中・地震直後の行動について選択式質問群を設定している。未明にもかかわらず，回答者の20%近くが起床していた。その中での地震発生であり，意識的行動がとれなかった割合は40%であった。昼間に発生した他の地震では，危険回避できなかった住人の割合は25%程度であるので，夜間，しかも全道がブラックアウトのため暗闇での回避行動という状況にあった。
- 6) 室内散乱状況：そのような悪条件下にあっても，負傷率・負傷程度は小さい。その理由を以下の負傷世帯発生率から推測する。一般に負傷世帯発生率（Injury）は，居室人数nに対して負傷者xが0より多く発生する確率として求められ，家具転倒領域率（R）と負傷回避行動率（B）との間に以下の関係が成立する。

$$\text{Injury} = P_x(x > 0) = \{1 - P_x(x = 0)\} = \{1 - nC0R0 \{1 - (1 - R)^n\} (1 - B)\} = \{1 - (1 - R)^n\} (1 - B)$$

ここに，(1-B)は上記の非回避行動率である。個々の変数をアンケートから求める

と表1となる。一般に負傷者が発生する転倒領域率は50%以上であるので、当該地域の小ささが際立っている。アンケートより家具固定率を推計すると、38%となり、全国平均(37%)とほぼ同じで、特段に家具固定対策を率先しているわけではない。常時からの寝室における家具配置密度が低かったことが深夜においても負傷を軽度にとどめた大きな理由と考えられる(西嘉山・他, 2019)。

(3) 3町の建物復旧状況調査

上記調査より、北海道で初めて計測震度7を観測した地震であったが、住居及び人的被害など個人世帯に与えた被害は軽度にとどまった。しかし、復旧は大幅に遅れており思うようには地域復興は進んではいない。特に、被害が顕著であった商店は後継者がいないこともあり、ヒアリングによりこの地震を機会に閉店・廃業を決定した世帯が多いことが分かった。仮に家屋被害がD3程度の軽微被害であっても、解体撤去や他地域(主に札幌圏)への転出を選択するなど、地震後10ヶ月を経過しても未補修の世帯が安平町(75%)、むかわ町(73%)もあり、商店街の消滅、そして地方消滅への端緒となりかねない。

(4) みつかった新たな課題総括

当該地域は北海道危機対策課により想定地震Mw7.16(気象庁マグニチュードM7.7程度以上)による被害想定がなされていた。実際に発生した胆振東部地震はM6.7であるが、それとの比較検証の結果(想定|実数)、揺れによる建物全壊棟数(1,661棟|462棟)、それによる死者数(36人|0人)、急傾斜地崩壊による建物全壊数(2棟|不明)、それによる死者数(0.2人|36人)、札幌市の液状化による建物全壊数(7棟|40棟以上)であり、土木系の想定被害はかなりの過小評価であった。これは、当該地震が地震動に加え前月から続いた多量の降雨を主な原因とする斜面崩壊の誘因複合化が重なったためである。地球温暖化が進む中、自然環境変化による異常気象と地震等の他の災害誘因との同時発生あるいは後続発生による複合災害が常態化しつつあること、それにより災害シナリオがインフレーション化する懸念があり、それを踏まえた災害対策が今後重要となっていくであろう。本編では触れてはいないが、かつては北海道には生息していなかったシロアリによる蟻害も発見された。自然環境変化は、災害の様相をも変えつつある。また、それらへの対策の早期順応が求められていることに気づくべきであろう。そして、少子高齢化現象という社会環境変化が加わり、特に地方において複合災害による脆弱さが際立つことが、当該地震により示唆された。すなわちこの変化は地域生業の後継者育成を阻害し、店舗のメンテナンス軽視を助長し災害発生を契機に復旧断念・廃業そして地方消滅の道を加速させる(岡田, 2019a, 岡田, 2019b, 岡田, 2019c, 岡田・他, 2020)。

「訪日外国人旅行者に対する地震・火山に関する情報提供と風評被害対策に関する事例分析 —2018年胆振東部地震, 2018年大阪府北部地震, 2018年草津白根噴火, 2015年箱根山噴火を対象として— [課題番号: CT0C12]」では、1)訪日外国人旅行者を対象として、地震や火山噴火において、時間軸の中でどういった災害情報の提供時の課題、2)地震が発生した応急対応、火山の前兆時・噴火時については、大規模な宿泊施設を対象として、外国人旅行者に対してどのような情報が提供され、どういった課題が発生したのか、3)復旧復興期(または終息時)の風評被害の影響を軽減し、いち早く平常時に戻すための情報戦略について、また平常時の観測情報やハザードマップ等の情報提供について、アンケートやヒアリング調査により明らかにすることを目的とした。得られた主な成果は次の3点である。

1. 文献調査

主に東日本大震災以降の訪日外国人旅行者に対する災害情報提供に関するマニュアルやガイドライン、主な地震や火山噴火時の対応事例について資料や文献の収集を行った。時間軸の取り扱いや訪日外国人旅行者向けで留意すべき事項について整理を行った。

2. ヒアリング調査

訪日外国人旅行者に対する災害情報提供について、2018年胆振東部地震、2018年大阪北部地震、2015年箱根山噴火、2014年御嶽山噴火を対象として、北海道、札幌市、大阪府、神奈川県、箱根町、長野県にヒアリング調査を実施した。対応における課題と教訓について整理を行った。

3. 宿泊施設へのアンケート調査

訪日外国人旅行者を受け入れ旅行者への災害情報の提供を担う宿泊施設に対して、アンケート調査を実施した。2018年胆振東部地震と2018年大阪北部地震を対象とし、札幌市と大阪市内のホテルを対象に質問紙の郵送による調査を実施し、訪日外国人旅行者への情報提供の実態と課題を明らかにした。

以上の調査結果を踏まえて、今後の風評被害対策に関する知見をとりまとめた（南沢・秦，2019）。

「災害に備えた文化財等データベースの作成と防災マップの構築 [課題番号:CTOC13]」では、国や自治体が指定する文化財やこれに類する歴史資料、歴史的建造物の所在情報をデータベース化し、災害時のレスキューや保全活動を想定した所在マップを作成し、加えて文化財等所在マップの情報を地震調査研究推進本部の公開する全国地震動予測地図、産業技術総合研究所の公開する活断層データベースのほか、各自治体が作成・公開しているハザードマップなどの各種災害危険度情報を重ね合わせることで、文化財・史料に対して危惧される災害被害を予測するための災害危険度マップを作成し、将来の災害における文化財・史料に対する具体的な防災対策を計画・立案することに資することを目指した。

全国の指定文化財のうち、①国宝・国指定の文化財、②各都道府県の指定文化財の合計約35,000件の所在情報のうち、約20,000件についてデータ化を完了した。また、東北6県の市町村指定文化財の入力を完了した。これらのデータを文化財について、国宝・国指定、都道府県、市町村に加え種別（美術・工芸、建造物、歴史・考古資料、史跡、天然記念物）に分類し、Googleマップ上の文化財マップを構築した（図15）。また、これらの文化財マップの活用・運用について、2回の研究会を開催した。この文化財マップを活用し、2019年6月18日に発生した山形沖地震において震度6を観測した山形・新潟地域において、クライシスレスポンスサイトで公表された震度推定分布をGoogle Earth上で重ね合わせた文化財被害予測マップを作成し、新潟資料ネットの事務局が置かれている新潟大学へ提供した（図16）。また、2019年10月の台風19号被害においては、宮城県をはじめ、福島県・茨城県・長野県において水害の懸念される地域について、国土地理院が公開した浸水段彩図などを重ねあわせ、各地の文化財関係者や歴史資料ネットの関係者に提供した（図17）。さらに、宮城県においてはこの文化財危険度推定マップを活用して被災地の文化財被災状況の巡回調査を行うとともに、被災地の災害ゴミ集積所において、廃棄されている襖の下張り文書などを救出することができた。

また、Googleをプラットフォームとした場合の限界性から、eコミマップをプラット

フォームとした文化財マップの構築に着手し、現在東北6県分のデータベースの構築まで完了した。

これまでの課題と今後の展望

これまでの地震・火山観測研究計画では、地震や火山噴火の発生の予測を最大の目標とし、それにより地震や火山噴火による災害の軽減を目指してきたが、災害の軽減への貢献が限定的であることから、現行計画では、地震・火山噴火災害をもたらす誘因の予測研究を新たに組織的・体系的に進める方針に転換した。そのため、地震学や火山学を中核としつつも、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの分野の研究者が参加して、協働して推進することになり、主に全国の工学、人文・社会科学の分野の研究者が拠点間連携共同研究を推進してきた。

拠点間連携共同研究の重点推進研究は、「巨大地震のリスク評価の不確実性に関するパラダイム構築の推進」を主要テーマとして推進し、総括研究において震源から被害予測及びその伝達までを一貫して行い、総括型研究で出た課題などを特定型研究において掘り下げ、その成果を総括型にフィードバックするとともに、さらに総括型で新たに出た課題を特定型で掘り下げる、という循環により研究の高度化を目指している。

今後は、重点推進研究を進めることと並行して、一般課題型研究で提案されて来ている研究課題による成果や手法などを取り込む枠組みを構築することで、災害の軽減に貢献するための研究を継続して行う。そのためには、実際に被害を受ける構造物や社会システムに直接携わっている工学、人文・社会科学の分野が理学分野の成果を咀嚼して活用出来るような体制を整える必要がある。つまり、観測計画において、これまでの理学的な観測網の維持だけではなく、工学、人文・社会科学に必要な観測計画の立案が必要になると思われる。

成果リスト

Tung-Cheng, H., K. Satake, S. Watada, I. E. Mulia, R. Y. Chuang, Y. Aoki (2019),

Source Analysis for the 2018 M7.5 Sulawesi Earthquake and Tsunami, AGU 2019 Fall Meeting, NH43D-0966

Ito, E., C. Cornou, H. Kawase, F. Nagashima (2019), Estimation of EMR correction factor in the Grenoble Basin; an attempt to establish a simple method to get earthquake HVR from microtremors, 2019 SSA Annual Meeting, 22-26 April 2019

Ito, E., H. Kawase, K. Nakano (2020), Empirical Horizontal Site Amplification Factor (HSAF) from Observed Earthquake Horizontal-to-Vertical Ratio (EHVR) and Vertical Amplification Correction Function (VACF), 2020 SSA Annual Meeting, 27-30 April 2020 (abstract投稿済, 発表はキャンセル)

岩崎祥太郎・中嶋唯貴・岡田成幸・植松武是・松島信一・佐伯琢磨, 2019, 2018年北海道胆振東部地震の被害調査 その2 被災中心地域の住家被害悉皆調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 21183

Kawase, H., F. Nagashima, E. Ito, C. Cornou (2019), S-wave velocity inversion based on microtremor HVR: Effectiveness of the EMR correction for the Grenoble basin, 7th ICEGE

- Kusakabe, R., K. Fujita, T. Ichimura, M. Hori, L. Wijerathne (2019), A Fast 3D Finite-Element Solver for Large-Scale Seismic Soil Liquefaction Analysis, In: Rodrigues J. et al. (eds) Computational Science - ICCS 2019, ICCS 2019, Lecture Notes in Computer Science, vol 11537, Springer, Cham
- 増田 峻介, Pierre Gehl, 松島 信一 (2020), 高知県南国市における南海トラフ地震による水道管網被害の病院機能への影響評価, 京都大学防災研究所令和元年度研究発表講演会, P17
- 南沢 修, 秦康 範 (2019), 自治体の火山担当者の育成及び火山災害経験者の活用, 日本災害情報学会, 第21回研究発表大会予稿集, B1-1
- Nagashima, F., H. Kawase (2019), Subsurface structure identification based on H/V ratio and surface to borehole ratio, 7th ICEGE
- Nagashima, F., Y. Mori, E. Ito, H. Kawase (2020), Velocity structure inversion based on diffuse field concept for earthquake, together with the earthquake-to-microtremor ratio (EMR) method for microtremors, 2020 SSA Annual Meeting (abstract投稿済, 発表はキャンセル)
- 中嶋 唯貴, 岡田 成幸 (2019), 2018 年北海道胆振東部地震の被害調査 ―その 3 安平町全世帯アンケート調査の基礎解析―, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 21184
- 中山 智貴, 松島 信一 (2020), 邑知潟平野における微動観測記録に基づく推定地盤構造, 京都大学防災研究所令和元年度研究発表講演会, B22
- 西嘉山 純一郎, 中嶋 唯貴, 岡田 成幸, 寺西 祐平 (2019), 2018年北海道胆振東部地震の被害調査 ―厚真町全世帯アンケート調査の基礎解析―, 地域安全学会梗概集, 41
- 岡田 成幸 (2019a), 北海道胆振東部地震にみる積雪寒冷地住宅の強靱さと新たな問題, 特集 北海道胆振東部地震 (平成30年), 消防防災の科学, 138, 22-29
- 岡田 成幸 (2019b), 地震動による人的被害と室内被害軽減のための自助マネジメント, 平成30年北海道胆振東部地震を振り返り, 今後の減災・復興を考えるシンポジウム, 厚真町総合福祉センター
- 岡田 成幸 (2019c), 家庭でできる地震防災対策 ―北海道胆振東部地震からの教訓―, 北海道大学公開講座「北海道の地震と防災」
- 岡田 成幸, 中嶋 唯貴 (2019), 2018 年北海道胆振東部地震の被害調査 その 1 北海道全域のアンケート震度マクロ調査と被害概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 21182
- 岡田 成幸, 中嶋 唯貴, 松島 信一, 瀬瀬 一起 (2020), 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, 令和元年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D27
- 齊藤 隆志 (2020), 2016年熊本地震の崩壊発生初期過程と振動方向の関係, 京都大学防災研究所令和元年度研究発表講演会, A28
- Xu, J., R. Uzuoka, K. Ueda (2020), Centrifuge model tests on the dynamic response of slopes subjected to water storage at the toe area, 8th Japan-China Geotechnical Symposium
- Yong, A., F. Nagashima, E. Ito, H. Kawase, J. B. Fletcher, K. Hayashi, A. Martin, A. Grant, E. Yu, S-L. Chen (2020), Comparison of VS30 and f0 values by the single station earthquake-to-microtremor ratio (EMR) method to those by traditional multi-station array-based site characterization methods, 2020 SSA Annual Meeting, 27-30 April 2020 (abstract投稿済, 発表はキャンセル)

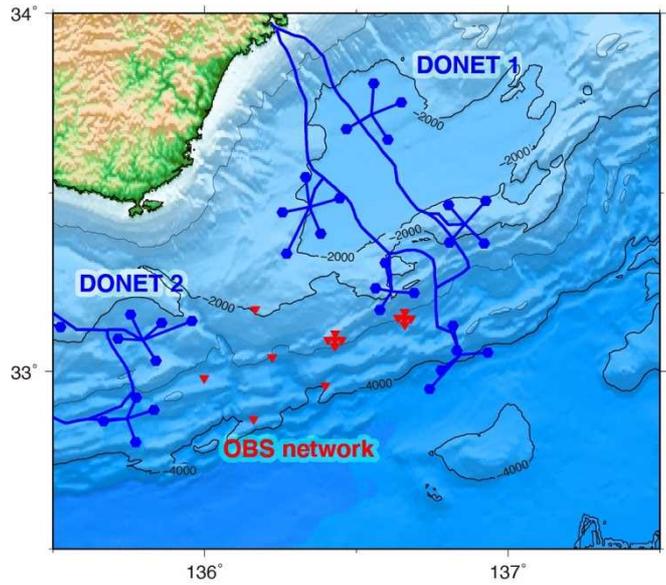


図 1 . 海底地震計観測網の配置図 [課題番号 : CT0C01]。

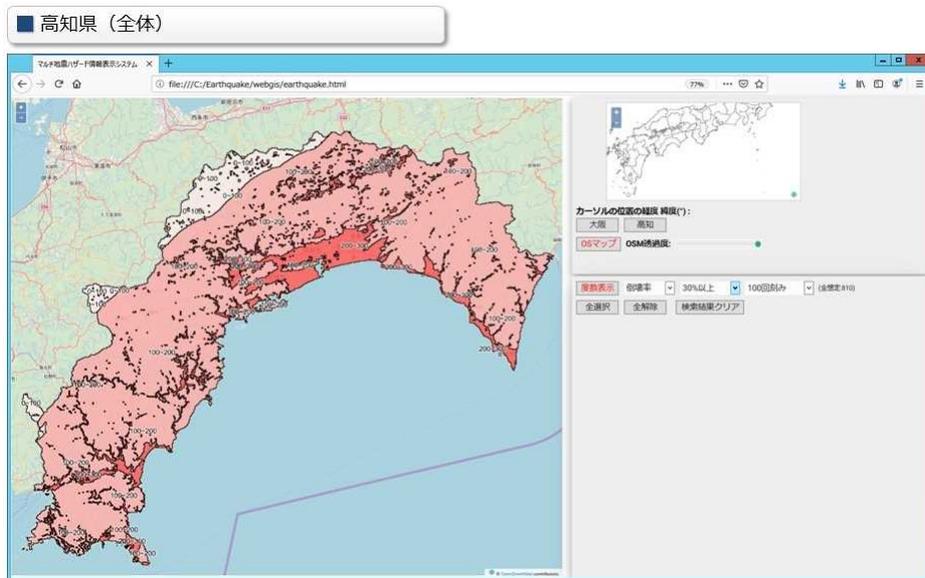
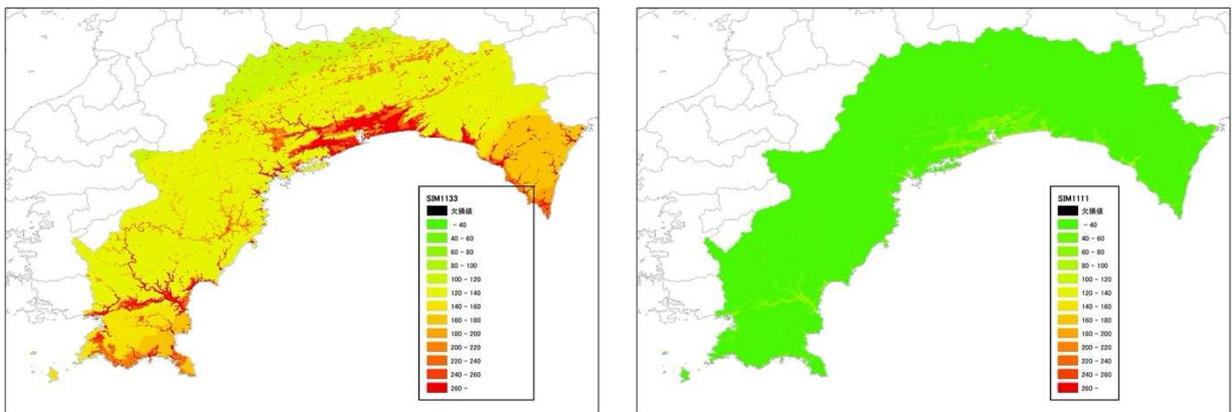


図 2 . マルチ地震ハザード情報表示システムの表示例 [課題番号 : CT0C01]。



(a)ばらつき大

(b)ばらつき小

図 3 . 高知県における, 地震動予測・表層地盤増幅のばらつきの違いを考慮した地震動予測結果 (最大速度) [課題番号 : CT0C02] 。

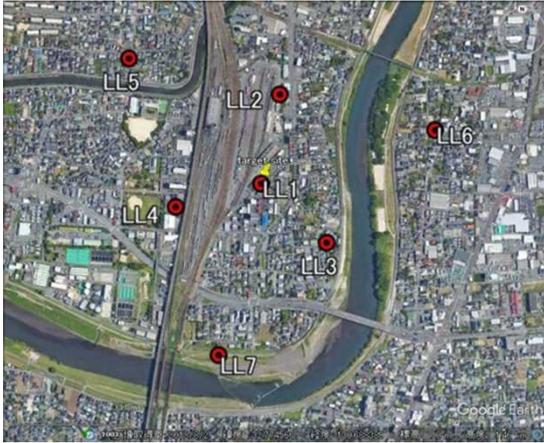


図4. テストサイト(LL1)と微動観測アレイの位置 [課題番号:CTOC07]。

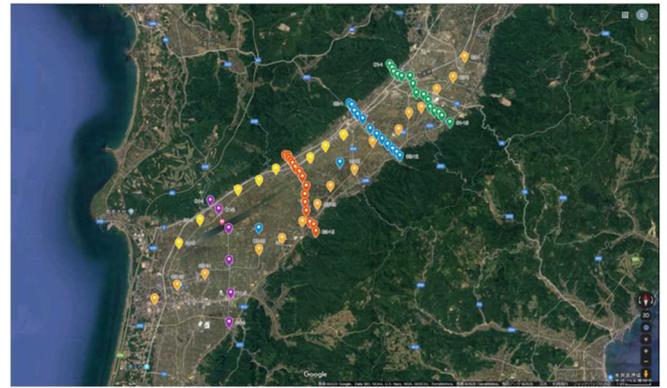


図6. 邑知潟平野における微動観測点配置 (Google Mapに加筆) [課題番号:CTOC08]。

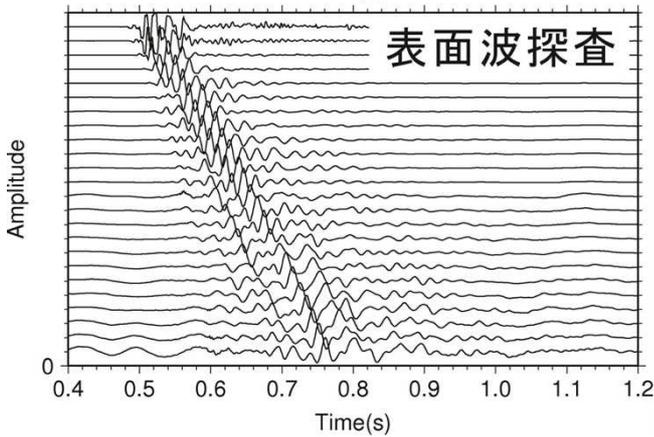
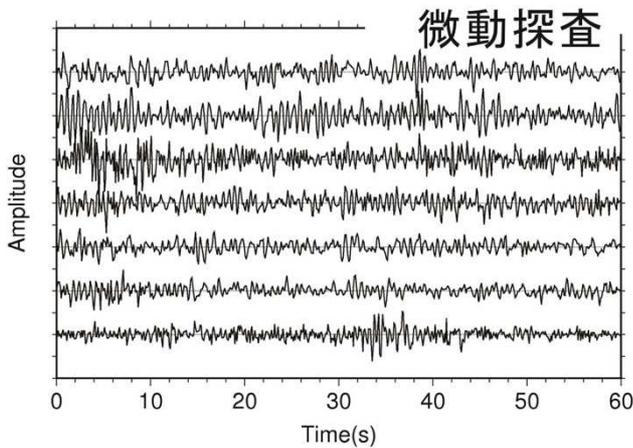


図5. 微動探査(上)と表面波探査(下)での上下成分の観測記録の例 [課題番号:CTOC07]。

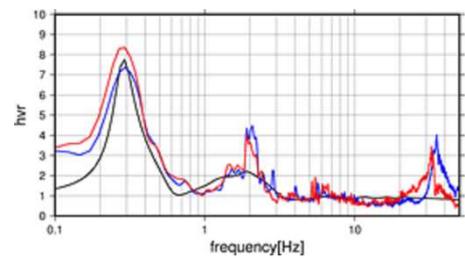


図7. 地点03-9における観測と理論のMHVR (青:観測NS/UD, 赤:観測EW/UD, 黒:理論) [課題番号:CTOC08]。

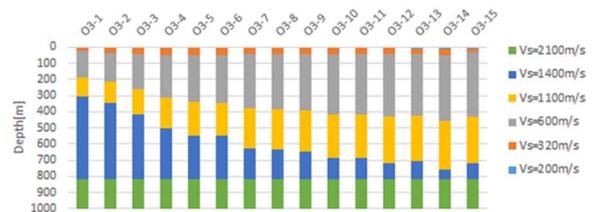


図8. 推定された測線03の地盤速度構造 [課題番号:CTOC08]。

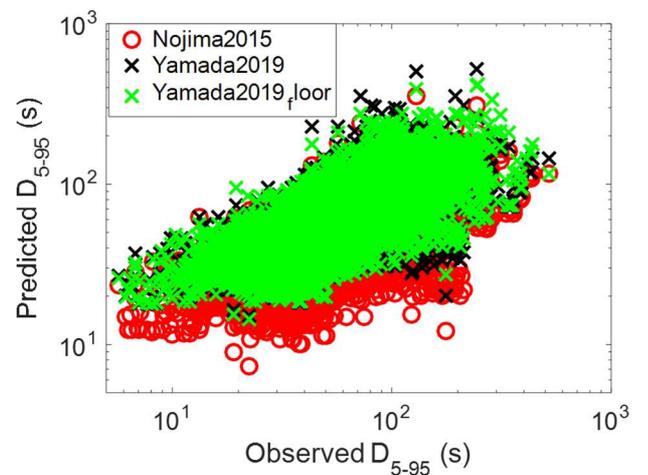
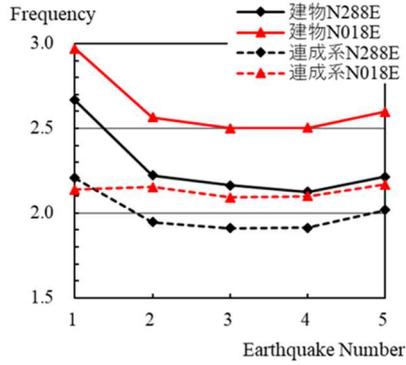
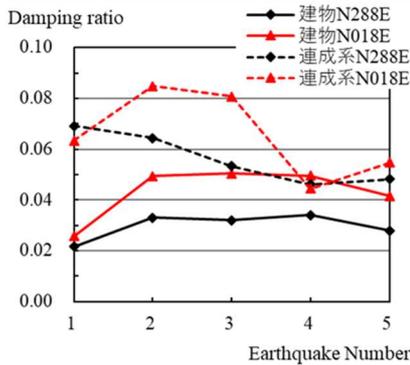


図9. 揺れ継続時間: 観測結果(横軸)と3つの経験式による予測値(縦軸) [課題番号:CTOC10]。



(a) 固有振動数



(b) 減衰定数

図10. 6層建物の1次モード特性の地震による変化 [課題番号: CT0C10]。

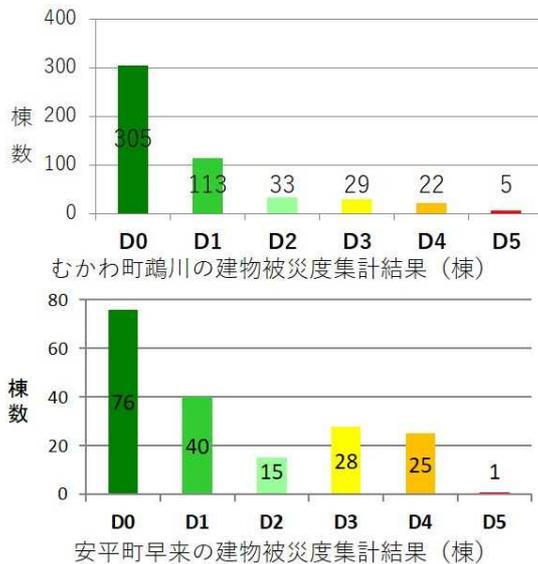


図11. 悉皆調査による木造住家被災度の集計結果 [課題番号: CT0C11]。

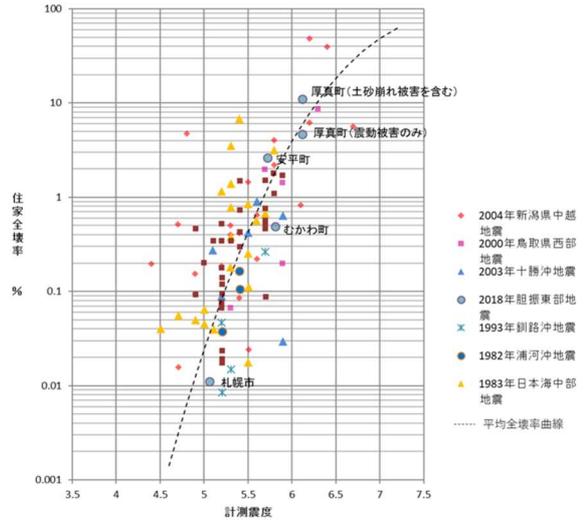


図12. 市町村単位でみた震度と住家全壊率の関係と全国比較 [課題番号: CT0C11]。

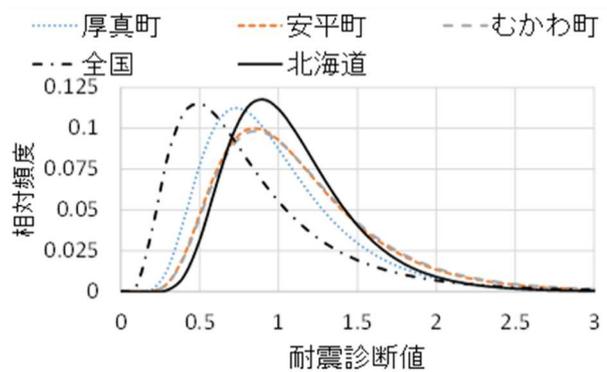


図13. アンケートによる住家耐震診断値の集計結果 (対数正規分布で近似) [課題番号: CT0C11]。

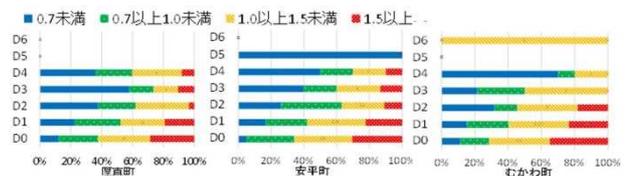


図14. 耐震診断値と建物被災度との関係 [課題番号: CT0C11]。

表1. 家具転倒領域率の推定結果 [課題番号: CT0C11]

	I_{injury} [%]	n [人/フロア]	$I-B$ [%]	R [%]
厚真町	18.8	1.661	46.1	27.1
安平町	12.4	1.775	36.6	20.9
むかわ町	23.3	1.876	40.6	36.6

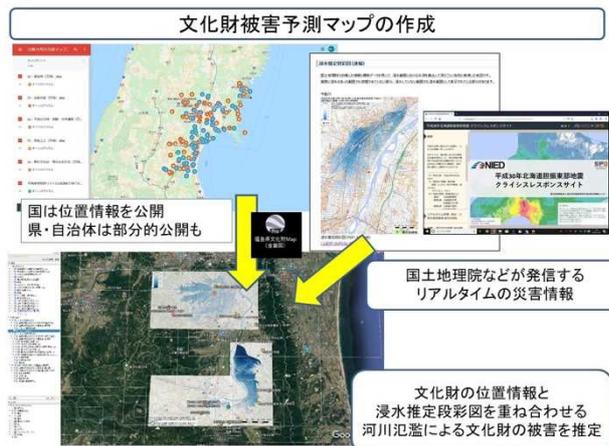


図15. 文化財マップの構成 [課題番号：CTOC13]。

2019.6.18 新潟山形地震の文化財マップ



図16. 2019年6月山形沖地震に対応した文化財マップ [課題番号：CTOC13]。

台風19号対応における文化財マップ

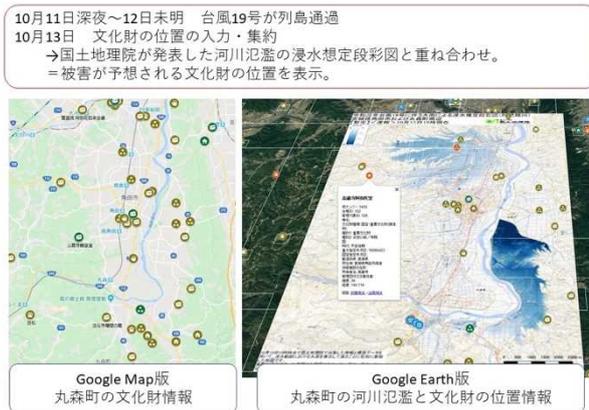


図17. 2019年10月台風19号に対応した文化財マップ [課題番号：CTOC13]。

