

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」

平成30年度年次報告

【成果の概要】

令和元年10月

科学技術・学術審議会測地学分科会

地震火山部会

目 次

【平成 30 年度の成果の概要】

| | |
|---|----|
| 1. はじめに..... | 1 |
| 2. 5年間の成果の概要..... | 5 |
| 2-1. 地震・火山現象の解明のための研究..... | 5 |
| 2-2. 地震・火山噴火の予測のための研究..... | 12 |
| 2-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究..... | 15 |
| 2-4. 研究を推進するための体制の整備..... | 19 |
| 2-5. 優先して観測研究を推進する対象の地震・火山噴火..... | 22 |
| 3. 顕著な地震に関して得られた重要な成果..... | 25 |
| 3-1. 大阪府北部の地震..... | 25 |
| 3-2. 平成 30 年北海道胆振東部地震..... | 27 |
| 4. 平成 30 年度の成果の概要..... | 29 |
| 4-1. 地震・火山現象の解明のための研究..... | 29 |
| 4-2. 地震・火山噴火の予測のための研究..... | 34 |
| 4-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究..... | 38 |
| 4-4. 研究を推進するための体制の整備..... | 40 |
| 4-5. 優先して観測研究を推進する対象の地震・火山噴火..... | 44 |
| 5. まとめ..... | 45 |
| 用語解説..... | 48 |
| 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..... | 58 |
| 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画 平成 30 年度研究課題一覧..... | 59 |

【参考資料】

| | |
|---|-----|
| I. 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（建議）の概要..... | 64 |
| II. 計画推進部会および総合研究グループ等別の成果..... | 69 |
| 1 (1) 海溝型地震..... | 71 |
| 1 (2) 内陸地震..... | 97 |
| 1 (3) 火山..... | 122 |
| 1 (4) 地震先行現象・地震活動評価..... | 145 |
| 1 (5) 地震動・津波等の事前予測・即時予測..... | 216 |
| 1 (6) 地震・火山災害..... | 245 |
| 1 (7) 史料・考古..... | 260 |
| 1 (8) データベース・データ流通..... | 273 |
| 2 (1) 東北地方太平洋沖地震総合研究..... | 284 |
| 2 (2) 南海トラフの巨大地震総合研究..... | 301 |
| 2 (3) 首都直下地震総合研究..... | 312 |
| 2 (4) 桜島火山噴火総合研究..... | 319 |
| 3 拠点間連携共同研究..... | 326 |

[平成 30 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」（以下、「本研究計画」という。）は、地震や火山に関する研究者集団が内在的動機に基づいて立案した学術研究を統合的に推進し、その成果を活用することで災害の軽減に貢献することを目標として、平成26年度からの5か年計画として策定された研究計画である。平成23年の東日本大震災の発生を受け、これまでの「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の方針が大幅に見直された。本研究計画では、地震・火山噴火の現象理解と発生予測を目指す研究を中核としつつも、それらによる災害誘因*を予測する研究も組織的・体系的に進めることとし、それらの成果を最大限に活用することで防災・減災に貢献する方針を明確にした。この計画に基づき、関係機関において地震及び火山の観測研究が実施されてきた。本研究計画は以下の4項目で構成されている。

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. 計画を推進するための体制の整備

上記項目のうち、1は地震・火山噴火の発生予測や地震・火山噴火に伴う地震動、津波、火山灰、溶岩流などによる災害に備えるための基本として重要である地震・火山現象の科学的解明のための研究を行ったものであり、次の中項目からなる。

- (1) 地震・火山現象に関する史料、考古データ、地質データ等の収集と整理
- (2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明
- (3) 地震・火山噴火の発生場の解明
- (4) 地震現象のモデル化
- (5) 火山現象のモデル化

2は、1で得られた科学的理解に基づき地震と火山噴火の予測を目指した研究を行ったものであり、次の中項目からなる。

- (1) 地震発生長期評価手法*の高度化
- (2) モニタリングによる地震活動予測
- (3) 先行現象に基づく地震活動予測
- (4) 事象系統樹*の高度化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、火山灰や溶岩流などの災害誘因を予測するための研究を行うとともに、自然・社会の脆弱性である災害素因*と災害誘因の結びつきを考慮して地震・火山現象による災害事例や災害発生機構を研究し、地震・火山に関する情報を災害軽減に利用するための方策を研究したものであり、次の中項目に分けられている。

- (1) 地震・火山噴火の災害事例の研究
- (2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明
- (3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
- (4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
- (5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

4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) 研究基盤の開発・整備
- (3) 関連研究分野との連携の強化
- (4) 研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成
- (5) 社会との共通理解の醸成と災害教育
- (6) 国際共同研究・国際協力

本研究の実施に当たり、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（以下、「東北地方太平洋沖地震」という。）、南海トラフの巨大地震、首都直下地震、桜島火山噴火については、多項目に亘る実施計画の遂行が災害科学の発展に著実に貢献できることや、発生した場合の社会への影響の甚大さから、上記4項目を含む総合的な研究として重点的に推進した。また、本研究計画の実施期間中、全国の火山で次々と水蒸気噴火が発生し、中でも平成26年の御嶽山噴火と平成30年の草津白根山（本白根）噴火は多数の死傷者を出す災害となった。当初の実施計画では、御嶽山の観測研究に取り組む個別課題がなかったが、同年に噴火した口永良部島と阿蘇山がマグマ性の活動に移行したこともあり、平成27年度から研究課題の一部を再編して、この3火山の観測研究に統合的に取り組んだ。

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146の実施計画（個別課題）及び公募による17の実施計画（個別課題）、拠点間連携共同研究^{2*}としての12の実施計画（個別課題）からなっている。平成26～30年度の個別課題の成果は、各年度の年次報告【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基に、本研究計画の項目別に平成30年度の成果を取りまとめたものが本報告書である。また、平成30年度は5か年計画の最終年度に当たることから、平成26～30年度の成果を改めて概観し、併せて本報告書に記載した。

本報告書では、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て作成した。しかし、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[0101]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（平成30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、名古屋大学、京都大学、鳥取大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、立命館大学、東海大学）、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。両拠点の研究者が中核となって研究計画を立て全国の研究者の参画を募集する「参加者募集型研究」と、両拠点の呼びかけにより研究課題を公募する「課題募集型研究」からなる。

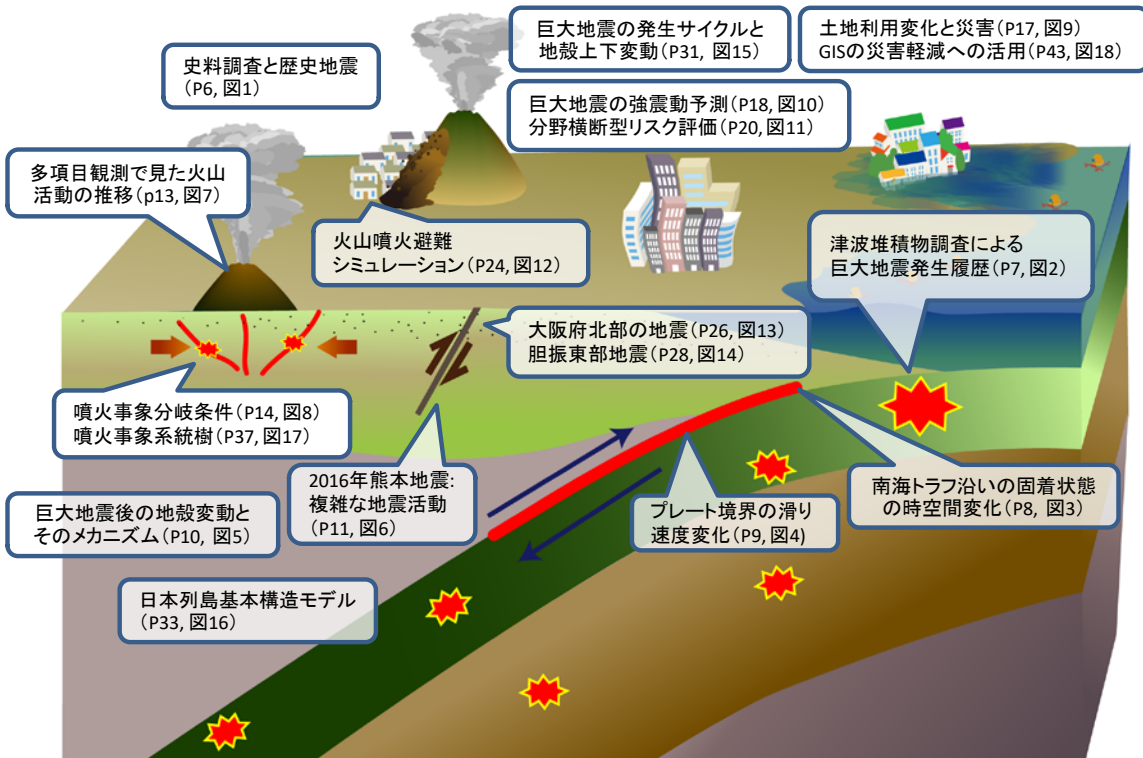
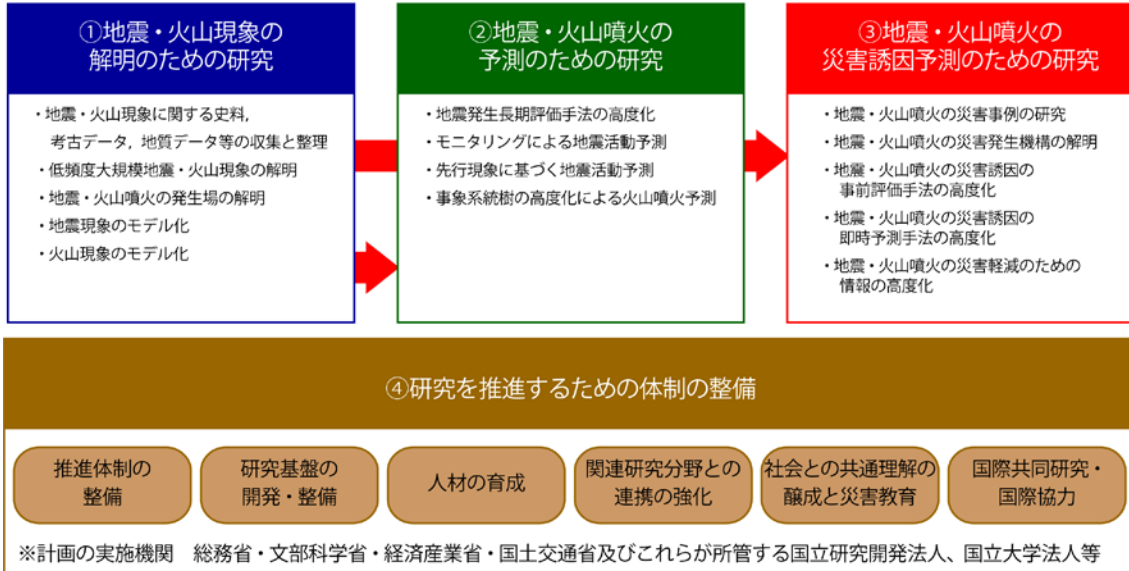
³ 東京大学地震研究所には、本研究計画で立案された研究を推進する目的で地震・火山噴火予知研究協議会が設置されている。

⁴ 用語解説に掲載している用語に、下線（点線）と*を付記している。

また、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 研究分野ごと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4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平成30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. 5年間の成果の概要

2-1. 地震・火山現象の解明のための研究

低頻度大規模現象である地震・火山噴火現象の解明には、近代的観測データだけでなく、史料、考古データ、地形・地質データの活用が必要である。歴史地震研究の基盤である各種地震史料のデジタルデータ化と校訂作業を進め、新たに地震関連史料データベースを構築した。全国各地の遺跡発掘調査報告書から、考古遺跡に残された災害痕跡の記事を抽出・分析し、災害痕跡データベースの作成を新たに開始した。また、これらのデータベースを統合し、より利用しやすいシステムの開発も進んでいる。これらの新たな取組は、長期間にわたる地震・火山現象や、それによる災害の解明の進展を支える重要な基盤となることが期待される。安政南海地震の余震の発生状況を、日記史料から推定する試み等が行われるなど、歴史地震のより具体的な実像が明らかにされつつある(図1)。さらに、各地の史料の発掘や調査が進められ、歴史地震の被害状況などの解明も進められた。津波堆積物の調査も着実に進められ、中世に日本海溝で発生した巨大地震が1454年享徳地震と同定されるなど(図2)、浸水範囲の推定や広域比較による発生年代の検討が進んだ。

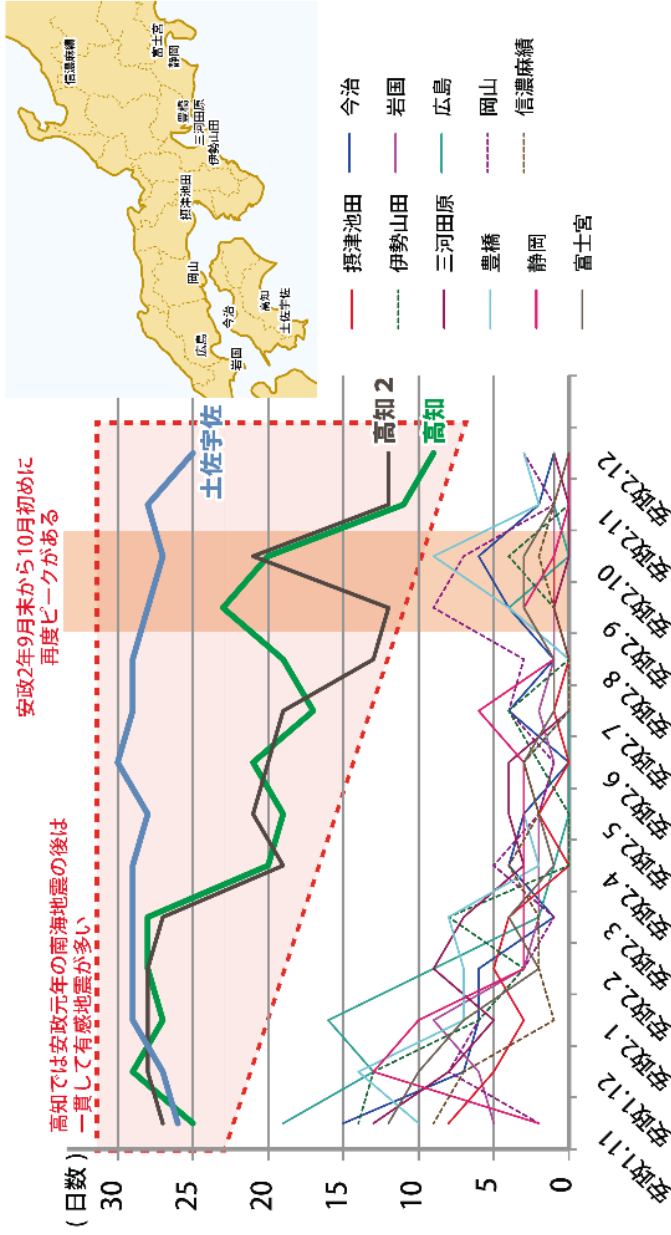
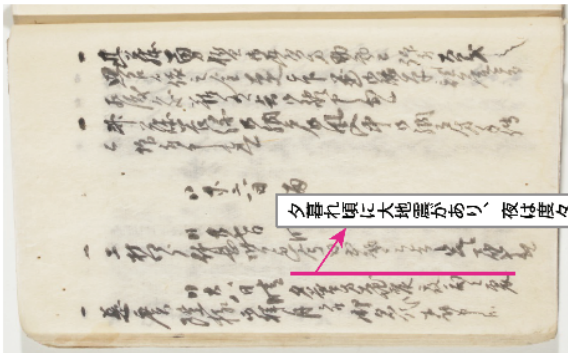
プレート境界で発生するスロー地震について、様々な地域での詳細な研究が進展した。活動特性や発生場の地下構造などの観測研究や、岩石摩擦や摩擦構成則を用いたシミュレーション研究などを通じて、大地震震源域の応力状態や周辺への応力载荷との関係の検討が進んだ。南海トラフでは、広域的なプレート固着の状態や、スロー地震に伴う固着の時間変化が海底地殻変動観測や孔内観測等から明らかにされた(図3)。日本海溝と千島海溝では、周期的なスロー地震が存在し、それが地震活動の活発化に寄与することが確認された(図4)。東北地方太平洋沖地震の震源域の断層帯の構成物質をはじめとする海底掘削や海底面で採取されたサンプルを用いた実験が行われ、岩石や間隙水圧の違いにより多様な滑り現象が起こり得ることが確認された。今後は、これらの成果をさらに発展・融合させ、南海トラフなどで拡充されるGNSS等のモニタリングの実データを用いた断層摩擦パラメータ推定を目指したデータ同化実験などが期待される。

広域的な応力場の変化と内陸部断層への応力载荷を、一つのシステムとして理解する試みが、東北地方太平洋沖地震に関する研究の中で重点的に進められた。海底地殻変動観測で明らかになった西向き地殻変動場の再現や、数百年にわたる地震サイクル間の沿岸部の上下変動の理解には、粘弾性構造の考慮が不可欠であることが確定的になった(図5)。内陸部では、地震活動の活発化や静穏化から、応力の不均質性や地殻流体の関与に関する詳細な検討が行われた。余効変動データを用いたシミュレーションから、東北日本弧下のレオロジー構造の推定が進み、応力場モデリングからは日本海溝のプレート境界の強度がこれまで想定されていたものより非常に弱いことが示唆された。

2016年に発生した熊本地震(図6)では、断層面上の地震時の滑りの方向が、事前の応力場から期待される滑りの方向にほぼ一致していることが明らかにされた。内陸地震発生場の応力場は強い空間不均質性を持つが、列島スケールでは活断層は現在の広域的な応力場に対して滑りやすい方向に形成される傾向にあることが明らかにされた。内陸のひずみ集中帯では、プレート境界の巨大地震のような外力に影響されることなく、ひずみの蓄積が進行することが見出された。地震のメカニズム解から地殻内間隙流体圧場の時空間変化を推定する手法の開発が進み、注水実験による誘発地震や御嶽山周辺域の群発地震活動のデータから、地震の発生における応力と間隙流体圧の役割の理解が進んだ。このように、内陸での応力集中のメカニズムを地下構造や変形場、強度と関連させて統一的に検討する試みが進んだ。これまでに蓄積されてきた日本列島周辺の基本的な構造のコンパイル作業が進められ、プレート境界やモホ面の形状などのデジタルデータが公開された。この情報は、観測データの解釈やシミュレーション等を行う上で欠かせないものであり、広く地震・火山噴火の研究に利用されることが期待される。

日記史料に基づく有感地震の記録日数の推移

「田原藩日記」(三河田原)の
安政2年9月28日の記事



西南日本で記された複数の日記史料を調べ、月ごとの有感地震記録日数をグラフに示した。
西南日本では、安政元年11月の南海地震の翌年9月に、再び有感地震が増加した状況がわかる。

図1. 日記史料に基づく有感地震の記録日数の推移

日記史料には地震の被害だけでなく、日々の有感地震についても詳細に記録されている。西南日本で記された複数の日記史料からは、安政元年(1854年)11月5日の南海地震の本震以降、頻発する有感地震を記録した日数の推移が分かる。グラフは、安政元年(1854年)11月から安政2年(1855年)12月末までの期間について、有感地震の記録日数を月ごとに示したものである。グラフより、西南日本では安政2年9月から再び有感地震が増加した状況が分かる。

1454 年享徳地震の復元

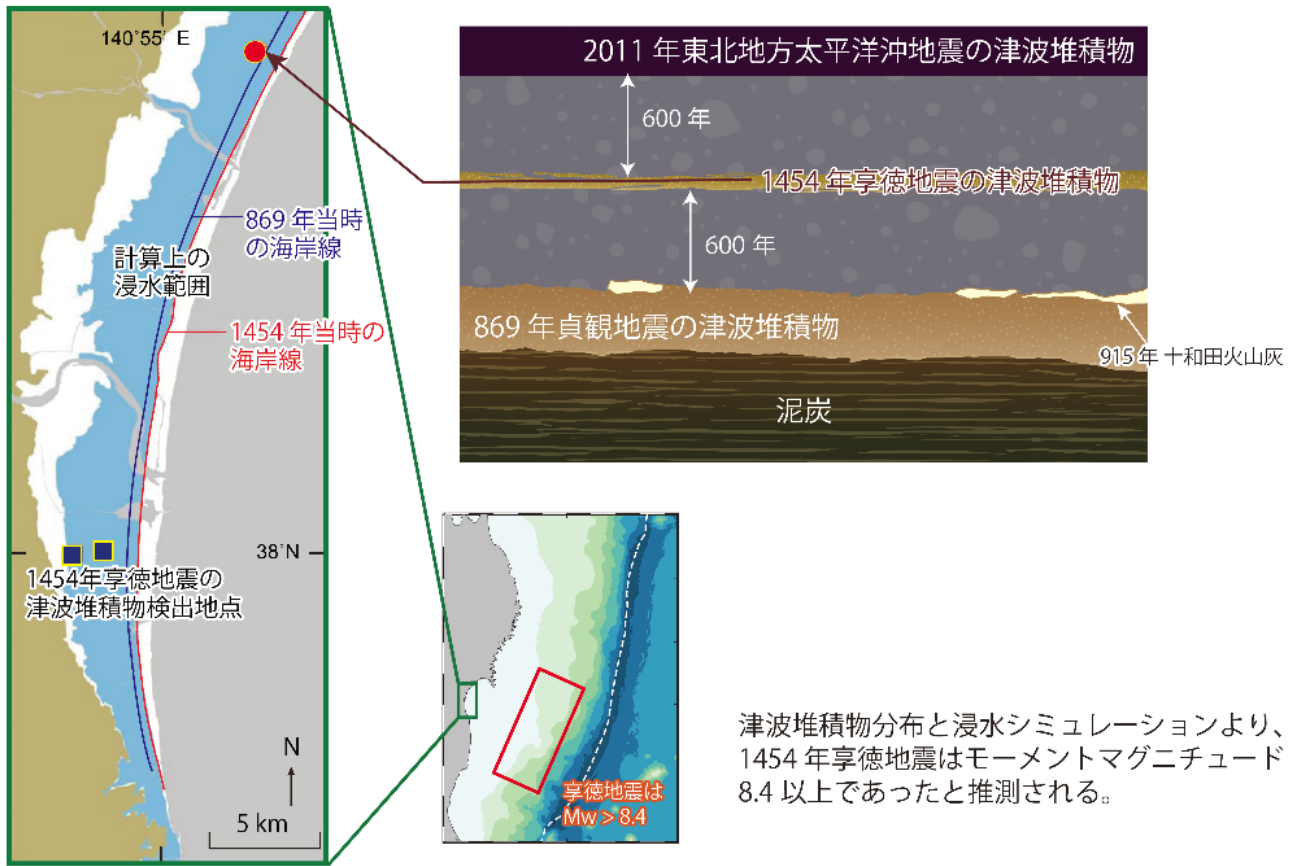
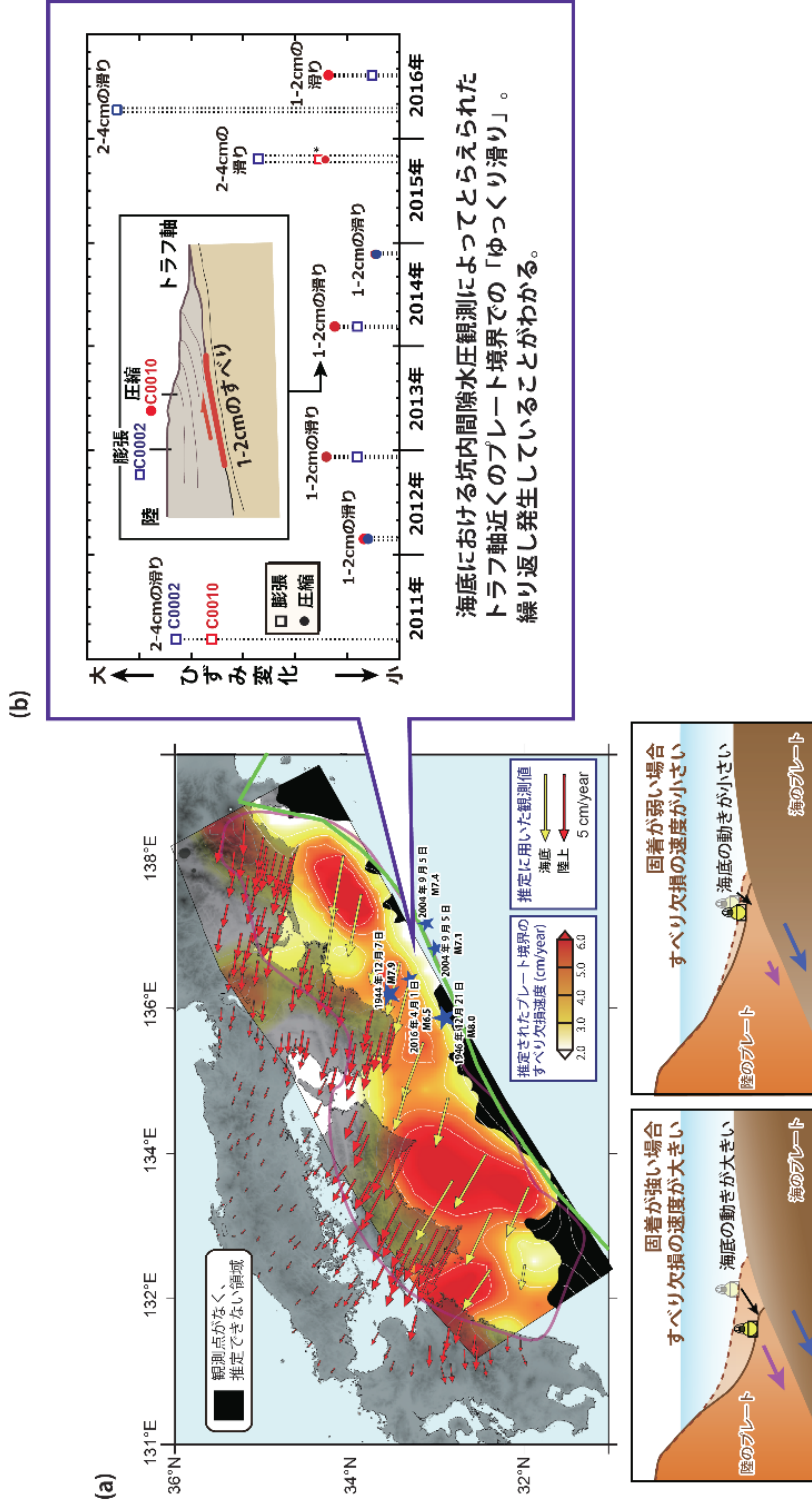


図2. 1454年享徳地震の復元

炭素年代測定から1454年享徳地震によるものと判断された津波堆積物の検出位置と、復元された当時の海岸線を基に行った浸水シミュレーションによって、享徳地震の規模がモーメントマグニチュード (Mw) 8.4 以上であったと推測された。

南海トラフ沿いプレート境界の滑りと固着



海底地震変動観測から推定されたプレート間の固着状況。
赤い部分は固着が強いと考えられる。

図3. 南海トラフ沿いプレート境界の滑りと固着

(a) GPS—音響結合方式による海底地震変動観測によって得られた海底の変動速度から推定された、南海トラフ沿いプレート境界の滑り欠損速度分布。滑り欠損速度の大小はプレート間の固着の強弱を反映していると考えられることから、南海トラフ想定震源域内において固着分布に不均質があることが示された。

(b) 海底における坑内間隙水圧観測によって得られたひずみ変化から推定された、熊野灘のトラフ軸近傍でくり返し起こる「ゆっくり滑り」。間隙水圧変化から得られたひずみの変化の大きさと、その変化がプレート境界での滑りによって生じたと仮定して推定された各イベントの滑り量を示した。2016年4月1日に発生した三重県南東沖の地震 (M6.5) 後に浅部超低周波地震が続発したが、これに連動して大きな滑りが観測されている。

プレート境界の滑り速度変化と地震発生との比較

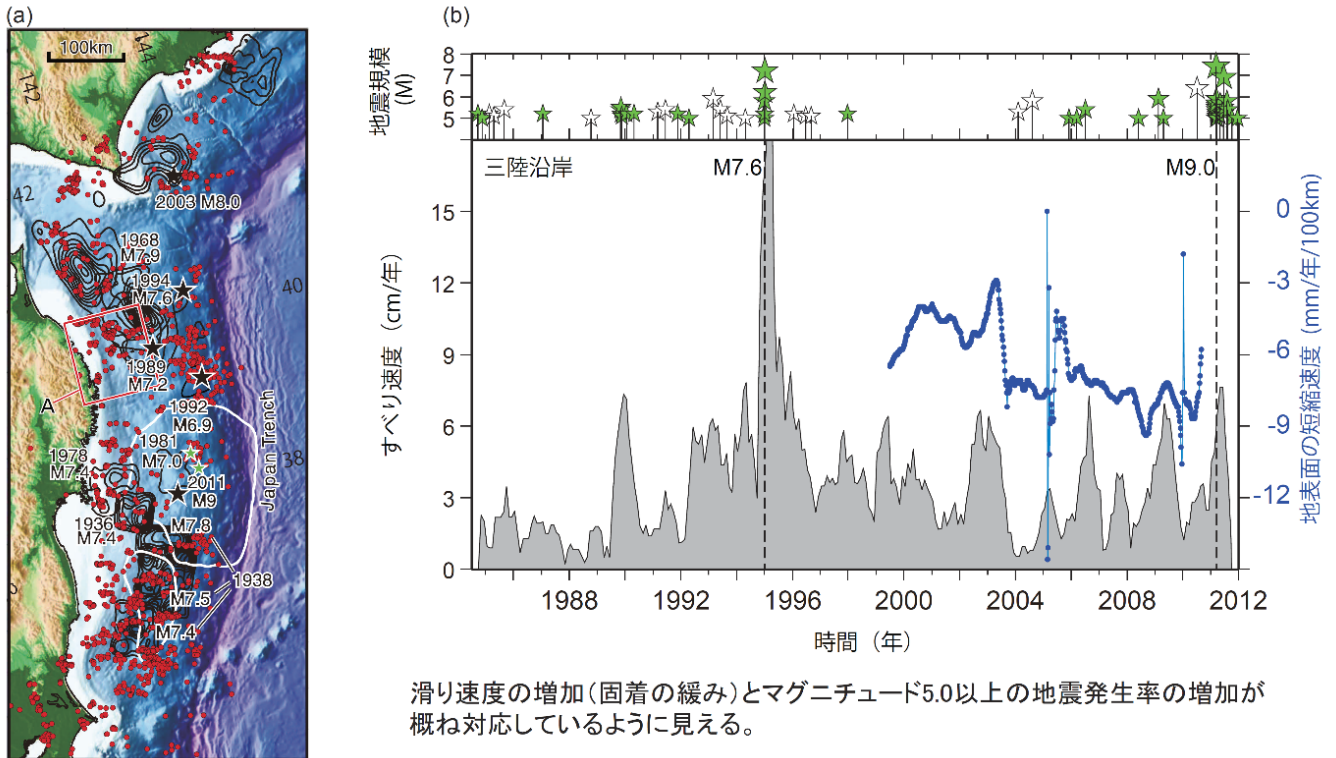
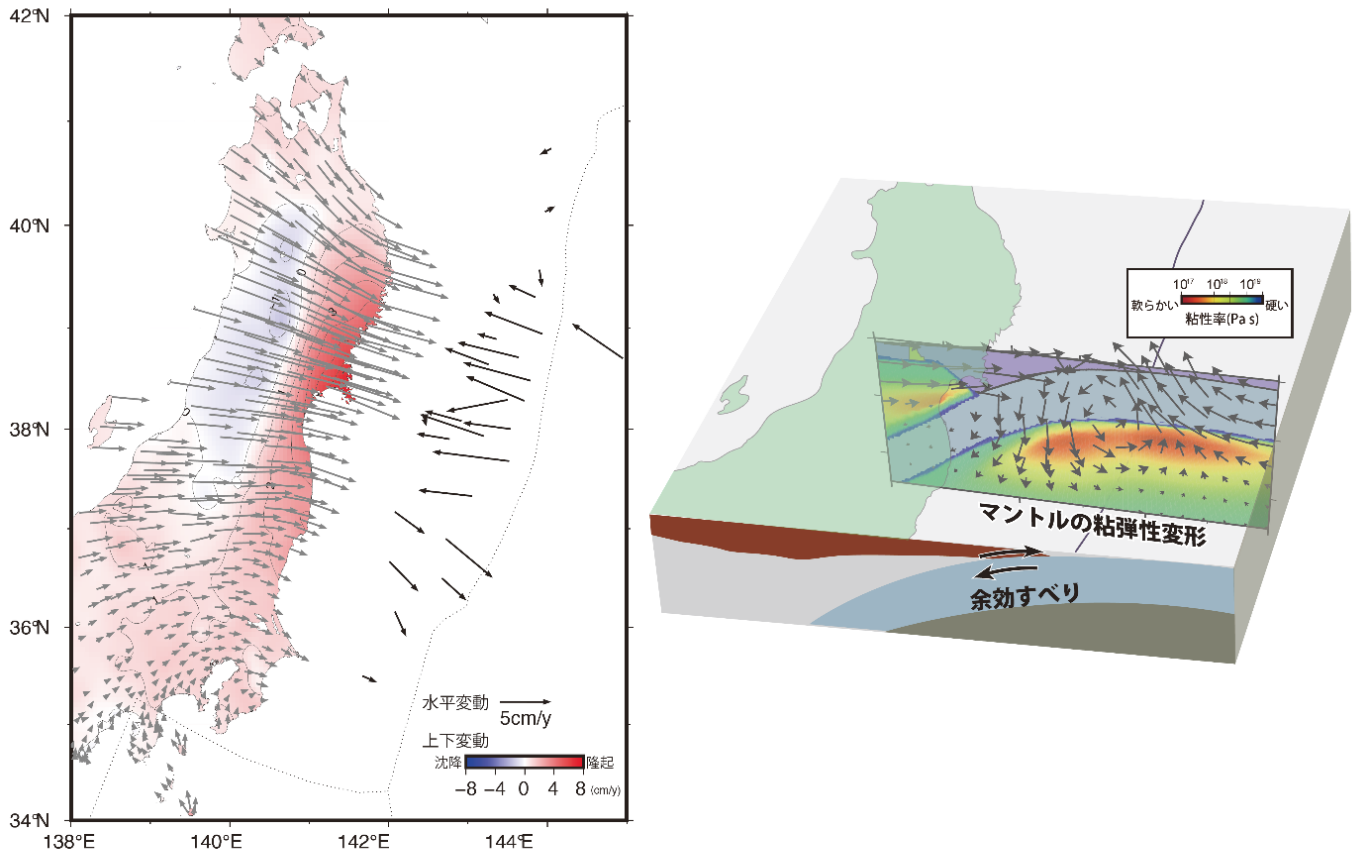


図4. プレート境界の滑り速度変化と地震発生との比較

北海道～関東地方の沖合のプレート境界断層の広い範囲で、プレート境界の滑り速度が概ね周期的に変化していることを小繰り返し地震及び地殻変動データから発見した。滑り速度が普段よりも速くなると、プレート境界の固着が緩むため大きな地震が起りやすくなる傾向があることが示された。(a)解析に用いた相似地震の分布(赤色丸)。赤色の矩形(領域A)は、(b)図の領域に対応する。白線は2011年東北地方太平洋沖地震の滑り域、黒線は他の大地震の滑り域を示す。(b)繰り返し地震データから推定した三陸沖西部でのプレート境界での滑り速度(灰色)と、GNSSデータから推定した地表面の短縮速度(紺色)の時系列。上部のパネルはマグニチュード5以上の地震活動を示し、緑はそのうち、プレート境界の滑り速度が増加している際に発生したものを表す。

2011年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動とその原因を説明するモデル



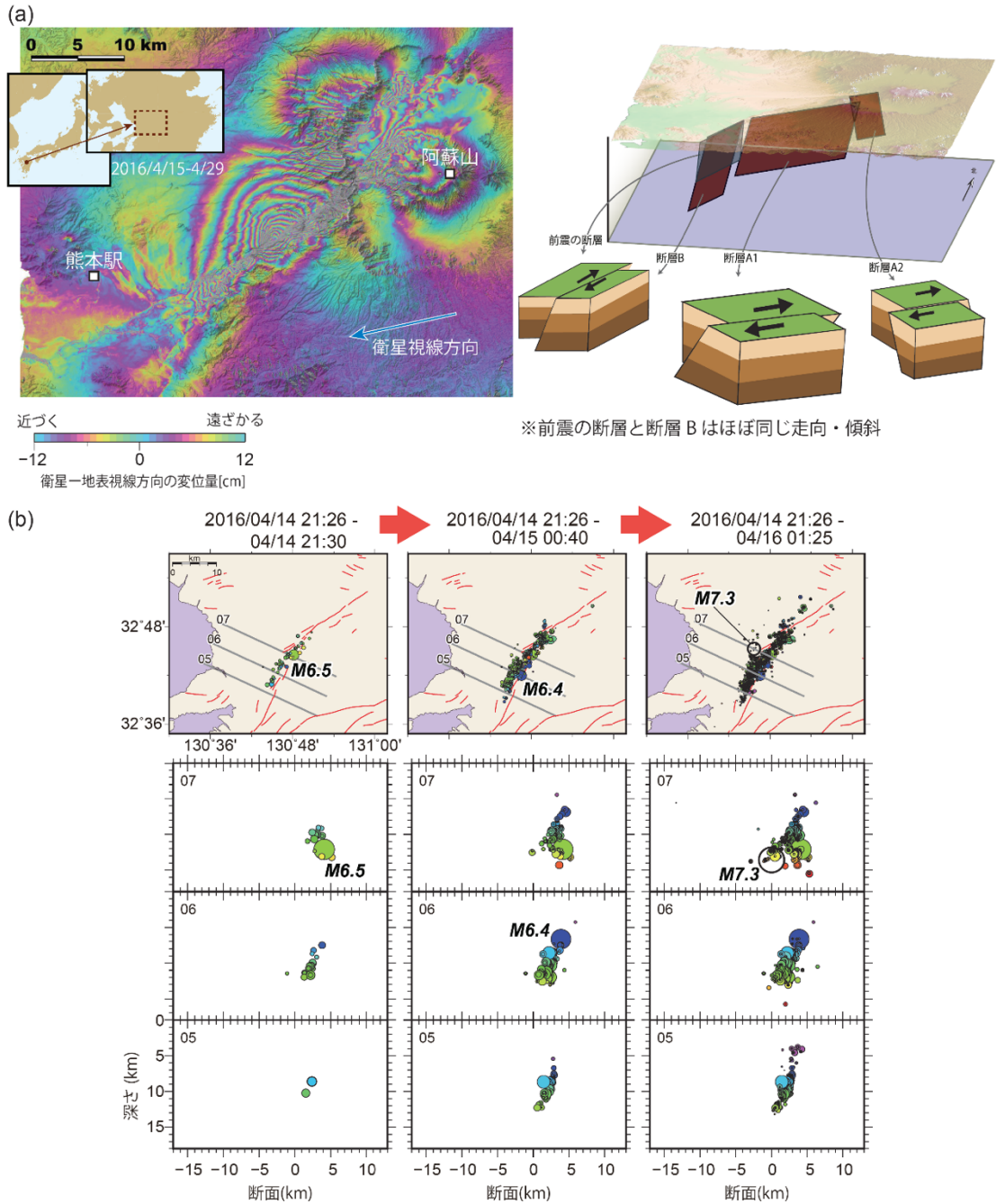
海陸の地殻変動観測によって検出された東北地方太平洋沖地震後の複雑な地殻変動場は、地下のマントルの低粘性的な振る舞いが原因であることが明らかになった。

図5. 2011年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動とその原因を説明するモデル

2011年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動とその変動を説明するモデル。左図：陸上GNSSと海底GNSS-Aによって測定された2012年から2016年間の地殻変動速度。

矢印は水平変動速度で、陸上のコンター（青と赤の色）は上下変動速度。宮城県沖では陸とは逆向きの変動が卓越している。陸上では奥羽山脈を境に東西で上下変動が逆転している。右図：地殻変動のパターンを説明する地下構造のモデル。宮城県沖の海陸の逆向きの変動は、海洋プレート下のマントルの粘性的な振る舞いによって説明される。地震発生時に海溝軸近くの海洋プレートが大きく西向きに動くことにより、特に海溝軸外側（海側）の海洋プレート直下のマントルにも西向きの流れが生じる。この流れにより、地震後も、海溝軸近くの海洋プレートは西向きに動き続ける。陸側のプレートは、地震時に東向きに動くため、陸側のプレート直下のマントルにも東向きの流れが生じ、地震後も陸側のプレートは東向きに動き続ける。

2016年熊本地震：複雑な地震活動



2016年熊本地震にともなう複雑な断層運動。地震に伴う地殻変動の干渉 SAR 解析により、広い範囲にわたって複数の断層面が動いていた様相が捉えられた。また、前震から本震にいたる地震活動域の拡大の様子が明らかにされた。

図6. 2016年熊本地震：複雑な地震活動

(a)左図：熊本地震に伴う干渉 SAR 解析による地表変動の様子。右図：干渉 SAR 解析により提案された熊本地震の震源断層モデル。地表変動を説明するために少なくとも3枚の異なる断層面に沿う断層運動を仮定する必要がある。(b)前震(2016年4月14日 M6.5)から本震(2016年4月16日 M7.3)に至る地震活動の震源分布の推移。震央分布(上)と代表的な深さ断面図(下)に、累積の震源分布を示す。丸印の色と大きさは、地震の深さとマグニチュードをそれぞれ表す。

火山に関しては、カルデラを形成した噴火に着目して地質調査や掘削、岩石学的検討などを行った。九州地域の火山では、カルデラ形成に先行する小規模な活動が認められるのに対し、北海道の火山では認められない傾向があること、カルデラ噴火を引き起こす源であるマグマ供給系は単一の「マグマ溜まり」*ではないこと、噴煙柱形成・崩壊とクライマックスのステージ発生時間間隔などが異なるなど噴火活動の推移に多様性があることを明らかとした。また、2014年御嶽山噴火の前後で、火山性地震のメカニズム解が変化したことをつきとめ、応力場の時間変化に基づく火山活動のモニタリング手法を提案した。

火山現象のモデル化では、過去の噴出物分析と物理観測の両面で進展が見られた。前計画で開発した高精度の分析手法を、2万9千年前の始良カルデラ噴火や1707年の富士山宝永噴火の噴出物に適用することで、マグマ溜まりの含水量や温度圧力の変遷という観点から大規模噴火の準備過程をモデル化した。また、桜島の噴出物については、最新の撮像技術を用いて、石基*中の微結晶（1ミクロン以下）のサイズ分布を調べ、準プリニー式噴火やブルカノ式噴火*、溶岩流出といった噴火様式の違いと火道浅部におけるマグマの上昇速度の関係性を明らかにした。

一方、地球物理観測による噴火のモデル化については、広帯域地震計観測データの解析から、2017～2018年の新燃岳噴火発生前に火道内で圧力が蓄積される過程を明らかにした。また、本計画期間中に発生した口永良部島、御嶽山、草津本白根山の水蒸気噴火を比較したところ、噴火数分～十数分前から火口近傍の観測点で火山性微動と地下浅部の膨張が観測された後、噴火開始とともに地盤が収縮に転じるという共通の特徴があることが分かった。また、噴火準備期にあると考えられる十勝岳や吾妻山、阿蘇山では、2014年口永良部島噴火前と同様な、継続的な熱消磁*が続いており、熱水系*を持つ火山の準備過程に類似性があると推察された。

2-2. 地震・火山噴火の予測のための研究

科学的理解に基づいて地震発生や火山噴火、及び地震活動や火山活動の予測を目指した様々な研究が実施された。

地震発生長期評価手法の高度化のために、津波堆積物、地形地質等の調査を進め、過去の大地震の発生履歴に関するデータが新たに収集され、既存のデータとあわせて解析することで、大地震の発生間隔の多様性に関する理解が進んだ。さらに、近年の地震及び地殻変動の海底観測の進展により、プレート境界の固着状況の詳細が明らかになった。特に、南海トラフ沿いのプレート間では、海底地殻変動観測によって推定された滑り欠損*速度の分布を基に、数値計算によって大地震時の動的な断層破壊過程をシミュレートすることに成功し、今後発生し得る巨大地震のシナリオを複数作成した。

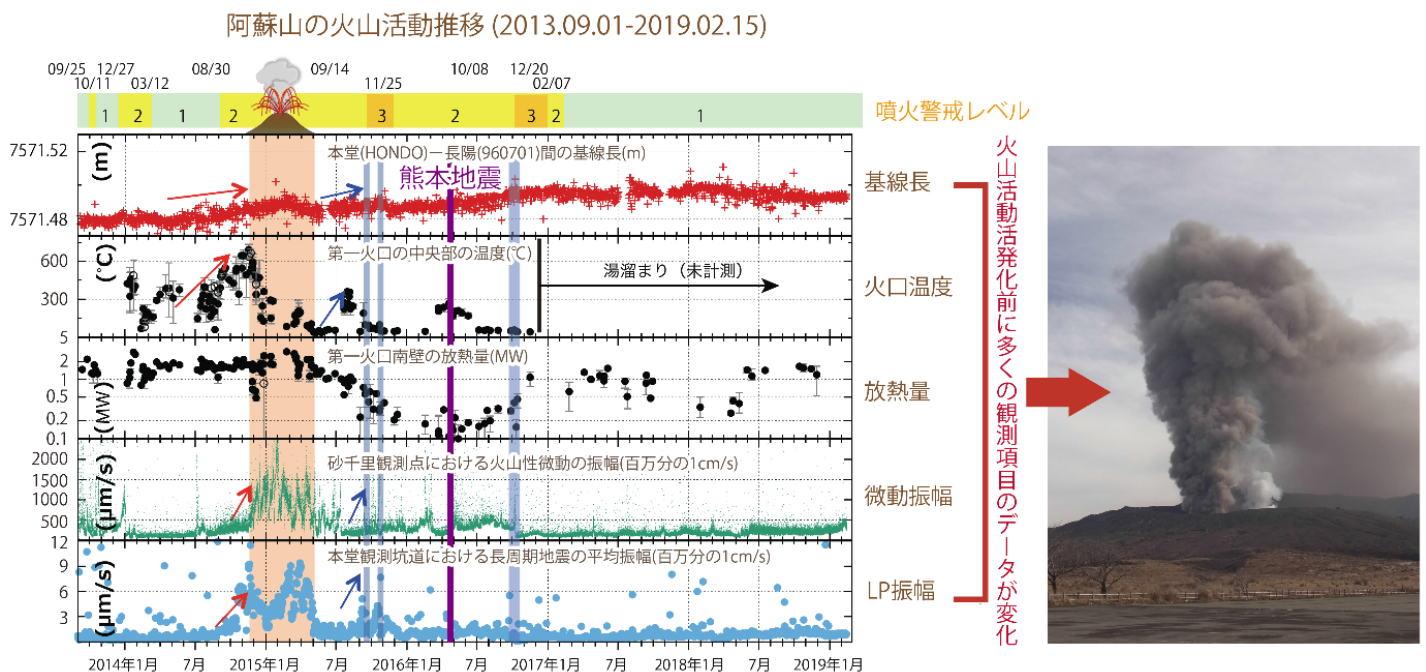
スロー地震に関する様々な研究を中心にして、地震活動や測地データ等の観測データと物理モデルに基づく数値シミュレーション研究の推進によって、プレート境界滑りの時空間発展の包括的な理解が大幅に進んだ。スロー地震の応力载荷により大地震が誘発されたと考えられる観測事例が増えるとともに、プレート境界の滑り速度が一時的に速くなると地震が活発化しやすい傾向にあることも示された。また、新たな海底観測網の導入により、日本海溝や南海トラフ沿いの地殻活動の時空間変化を詳細に捉えられるようになってきた。特筆すべき点として、海溝軸付近のプレート境界浅部でも様々な種類のスロー地震が起きていることが新たに発見された。また、地殻変動データと数値シミュレーションとのデータ同化手法の高度化により、スロー地震発生時のプレート境界面上の摩擦構成則パラメータの推定やその時間変化の抽出にも成功した。

地震に先行して発生した様々な現象のうち十分な精度を持つ観測量について、大地震発生との相関を統計的に評価した。その結果、様々な先行現象の中で、前震活動が他のものに比べ高い確率利得*を有する現象であることが明瞭に示された。ある地震活動を事前に前震と識別することは現時点では不可能ではあるが、群発的な地震活動や空間的に密集度の高い地震活動が前震になりやすい傾向が見出されつつある。また、先行

現象と地震発生を結び付けるメカニズムを明らかにし、先行現象と地震発生との関連について科学的な理解を深めた。例えば、潮汐と巨大地震との関連を調べることで、潮汐力が高い時ほど開始した破壊が止まりにくい状態にあるため、巨大地震が普段よりも僅かに起きやすいという解釈が提案された。

浅間山、十勝岳、阿蘇山、蔵王山等を対象として、地質学的研究成果に基づいた噴火事象系統樹を作成するとともに、一般的な作成手順を考案した。阿蘇山では、噴火発生前に多項目観測のデータに異常が現れ、噴火発生予測に利用できることを示した(図7)。中でも、浅部へのマグマ貫入による熱消磁を示す地磁気変化が、マグマ噴火では現れるのに対し水蒸気噴火では発現しないという、噴火様式の予測のための貴重なデータを得た。桜島における山体変形データから測定されるマグマ貫入率と噴火規模や噴火様式との関係(図8)、国内の火山についてのGNSSデータに基づく噴火発生の判定方法、全世界データに基づく大地震発生後の噴火発生確率など、分岐判断への定量的指標が示された。

多項目観測で見た火山噴火の推移



阿蘇山で、地殻変動、火口温度、放熱量、地震などの多項目観測を実施したところ、噴火の推移に応じて多くの観測項目のデータが明瞭に変化している様子が捉えられた。

図7. 多項目観測で見た火山噴火の推移

九州の阿蘇山で、地殻変動、火口温度、放熱量、地震などの多項目観測を実施したところ、噴火の推移に応じて多くの観測項目のデータが明瞭に変化し、火山活動の活発化を反映している様子が捉えられた。グラフ中の赤矢印は2014年11月のマグマ噴火前に見られた各観測の上昇を表す。青矢印は2015年9月に噴火警戒レベルを2から3に引き上げる直前の活動度の変化を表す。青灰色の縦線は火口周辺に影響を及ぼした比較的大規模の噴火を表す。一方、紫色の縦線が示す2016年4月の熊本地震の際はデータに変化の見られた観測項目は限定的であった。

桜島のマグマ供給系と噴火事象の分岐条件

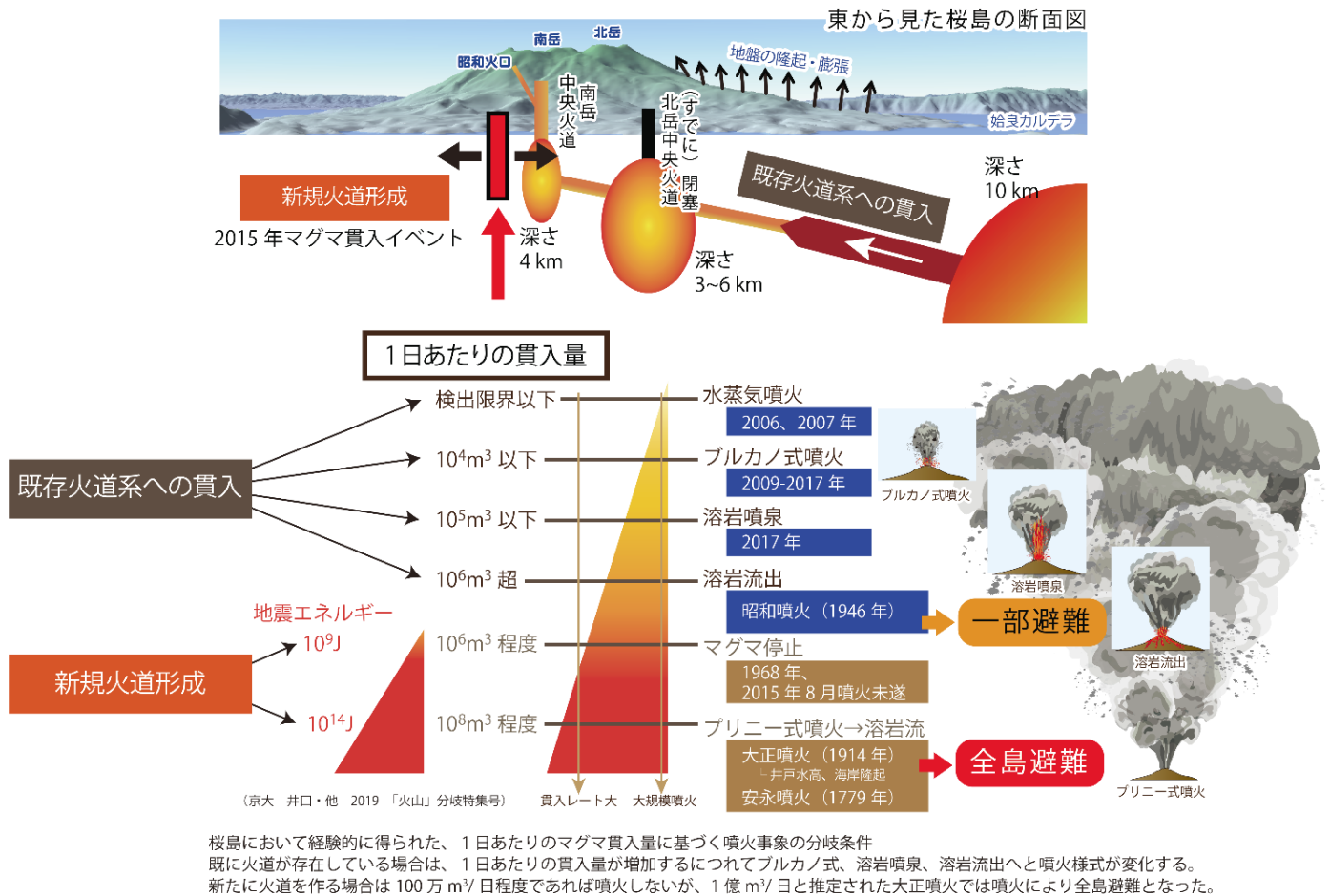


図8. 桜島のマグマ供給系と噴火事象の分岐条件

上図は桜島のマグマ供給系、下図は桜島において経験的に得られた、1日当たりのマグマ貫入量に基づく噴火事象の分岐条件を示す。既に火道が存在している場合は、貫入量が増加するにつれてブルカノ式、溶岩噴泉、溶岩流出へと噴火様式が変化する。新たに火道を作る場合は、 $10^6 \text{ m}^3/\text{日}$ 程度であれば噴火しないが、 $10^8 \text{ m}^3/\text{日}$ と推定された大正噴火では全島避難となるような大規模噴火となった。

2-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

1703年元禄地震、1855年安政江戸地震を始め、976年京都・近江の地震、1498年近畿地方の地震等において、被災状況と災害対応の様子を読み解くことで、歴史災害における災害過程への理解が進んだ。2016年熊本地震の調査研究からは「熊本地震発生前から活断層の存在を知っていた住民（全体の3割）についても、その半数において『地震はたぶん起きない』と考えていた」という研究者とは乖離した住民のリスク認知の実態を明らかとした。また、2018年大阪府大阪北部の地震等の調査研究から「被害量に関わらず、過去2地震と比較して生活再建支援業務における罹災証明書の発行パターンは大きく異なるものではなかった」という災害対応業務と地震被害との関係を明らかにした。地震・火山噴火研究において、本計画から取り組んだ社会誘因*から社会素因*への波及効果の解明においては、歴史地震研究において一連の災害過程の記述を発見したが、災害誘因に関しては科学的理解が進んでいない過去において記述が詳細でないことを確認する結果となった。さらに、科学的解明が進んでいる現代においても災害誘因理解が国民に広がっていないことが明らかとなった。また、社会素因における災害対応業務と被害規模との関わりを明らかにすることで、被害軽減策の側面からの理解を深めた。

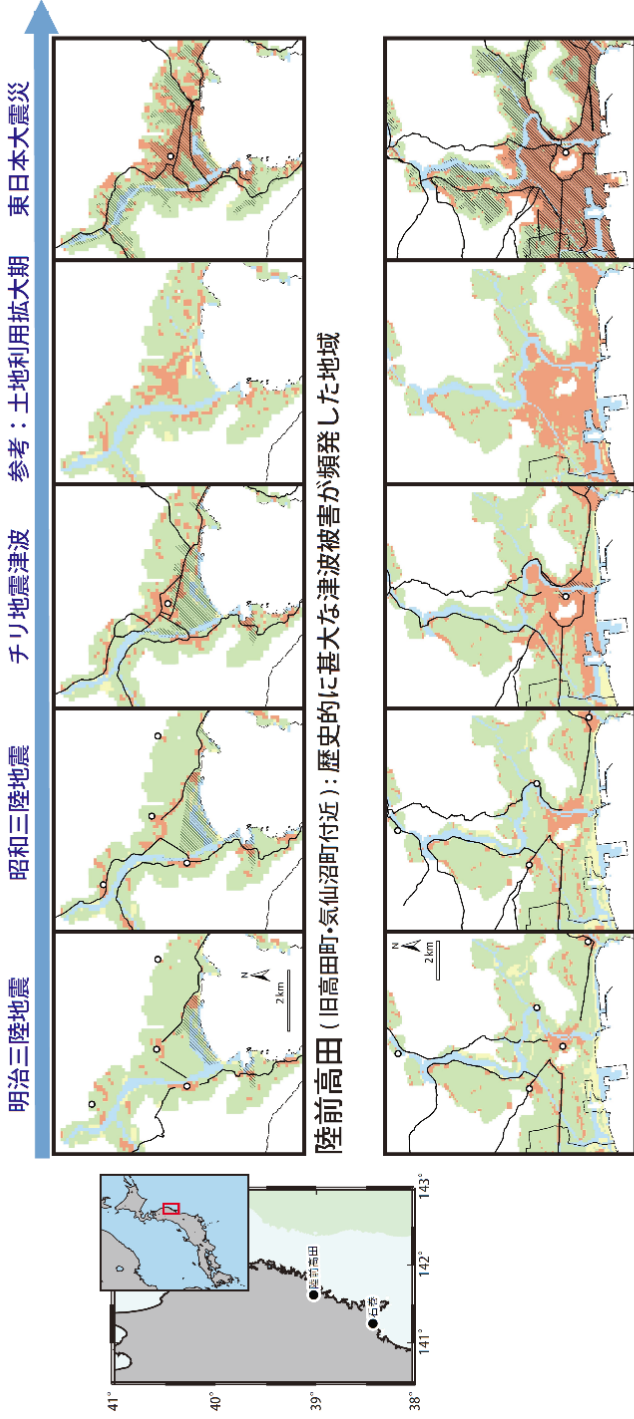
災害誘因（地震や火山噴火）、自然素因（地形や地盤）、社会素因（土地利用や避難行動等の災害対応）の間関係性を明らかにするための研究を実施した。また、堆積平野・堆積盆地での強震動予測については、地下構造モデルが得られない場合でも、震源放射特性係数の補正や経験的グリーン関数法の活用などにより、国外の過去の被害地震の強震動評価を一定の精度で行えることを確認し、現実的な計算手法として利活用可能であることを検証した。桜島大規模噴火による降灰リスクを気象条件を考慮して評価したところ、想定される降灰分布によっては要避難人口の平均が10万人を超え、避難が困難になる可能性が示された。東日本大震災で甚大な津波被害に襲われたまちの土地利用変遷を分析すると、海岸近くの都市的土地利用は、過去の津波浸水経験によって抑制されるが、全国規模の土地利用拡大期にはその効果は限定的なものとなる、との結果が得られた（図9）。

国内外で発生した被害地震の震源インバージョン解析*を精力的に実施し、東北地方太平洋沖地震における周波数別地震波生成の空間的な棲み分けの分析や、既往スケーリング則*の高精度化を通じて強震動予測の高度化を進めた。また、関東平野や大阪平野などで堆積層構造のモデル化や、モデルの検証・改良を進めた。関東平野の3次元地震動伝播シミュレーションでは、内陸浅発地震時に地殻及び堆積層構造により、P波到達直後からS波到達までの間に大きな長周期地震動が生成されることを示した。過去に起こった地滑りの調査を精力的に行い、地震時地滑りの地質・地形的特徴について、火山地域では軽石あるいは軽石直下の火山灰土が滑り面になりやすいこと、非火山地域では重力斜面変形あるいは過去の地滑りに関連して地滑りが発生しやすいこと明らかとした。地震波の散乱・減衰構造、地盤増幅特性の精緻化により、地震動の即時予測手法（PLUM法）の高度化に取り組んだ。また、観測データとの同化*に基づくシミュレーションを試み、地震波が到達するよりも早く長周期地震動の予測結果を示すことができた（図10）。

津波即時評価手法に関しては、S-netの利用を想定して海底圧力波形のデータ同化で津波波動場を予測する手法を開発し、リアルタイム浸水予測手法と合わせ、東北地方太平洋沖地震の場合であれば10分以内に高精度な浸水予測をすることを可能にした。地震規模を即時的に推定するための技術開発として、GNSS搬送波位相*データから断層滑りを直接推定する手法の高度化を行い、リアルタイム地殻変動監視システム（REGARD）の高度化に貢献した。火山灰拡散即時予測に関して、XバンドMPレーダー*、ライダー*、GNSS観測により、噴煙高度や移流・拡散、粒子形状についての情報をリアルタイムで把握できるようになった。また、このようなリモートセンシング技術によるデータと地上降灰観測の比較についての経験式を導出したほか、火山性地震と地殻変動データを用いた火山灰拡散予測システムを構築した。

御嶽山噴火を事例として、住民ならびに登山者への調査を実施した。噴火の3年後においても噴火経験者には高い心理的ストレスが確認された。また、地元住民（下呂市・木曾町・大滝村）への調査では、事前のリスク認識に地域差は見られなかった。リスクコミュニケーションの課題抽出のための調査を国内外の事例から進めた。サンフランシスコ湾岸地域の住民調査では、リスク推定値の不確実性を専門家が明示的に認めることで、専門家は誠実で率直であるという確信が高まり、大きな信頼が得られることが分かった。積雪寒冷地を事例として、避難時の移動の際に生じる課題を検討するためのシミュレーションツールを開発・実装した。防災教育とともに、避難行動訓練のGPSログと想定津波シナリオを重ねて地理空間情報*上で可視化することで、訓練参加者の避難行動がより適切なものへと変容することが期待できる。平時より防災担当者が火山情報などの防災情報と関係機関の各種観測情報を準リアルタイムで収集するシステムを構築した。さらに、観光客や登山者などに火山防災情報をリアルタイムで提供することを目的として、このシステムが釧路市の集客施設に設置された。

東日本大震災被災地の過去 100 年の土地利用変化

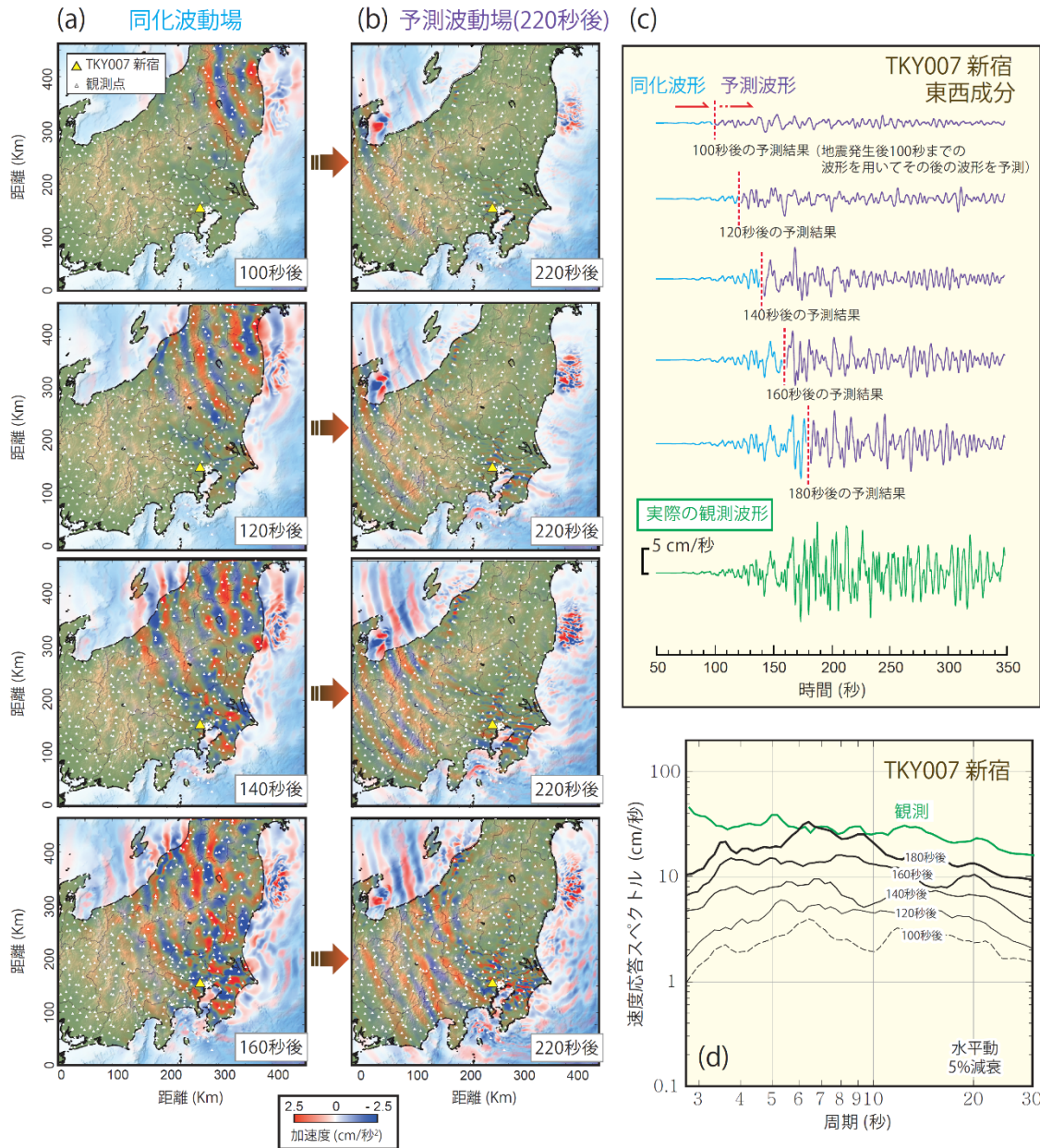


石巻 (旧石巻市・蛇田村・稲井村付近) : (上記地域と比較して) 歴史的に甚大な津波被害の発生が頻発したとは言えない地域

東日本大震災で甚大な津波被害に襲われた陸前高田、石巻と比較すると、1) 海岸近くの都市的土地利用は、過去の津波浸水経験によって抑制される、しかし、2) 全国規模の土地利用拡大期にはその効果は限定的なものとなる、との仮説が成立する。

図9. 東日本大震災被災地の過去 100 年の土地利用変化
 1896 年明治三陸地震、1933 年昭和三陸地震、1960 年千利地震津波、2011 年東北地方太平洋沖地震において、陸前高田と石巻を比較すると、4 つのどの地震・津波においても、陸前高田は広く津波浸水が及んだ。一方、石巻は前 3 つにおいては、浸水はほとんど確認されないか、あったとしても狭い範囲に留まっていた。土地利用の変化を見ると、陸前高田においては、津波浸水域を避ける形で都市的利用が広がったが、1980 年代におけるこの地方の土地利用拡大期において、過去の津波浸水域に一部市街地が広がっている。石巻においては、土地利用拡大期以前から、都市的利用が海岸線付近に広く広がっており、その傾向は土地利用拡大期にさらに加速し、東北地方太平洋沖地震による都市的利用部分に対する津波浸水域が広範囲に及んだ。

2011年東北地方太平洋沖地震の強震観測データ同化に基づく長周期地震動の予測実験



3次元地震波伝播シミュレーションに伝播途中の地震波の観測値を同化(入力)し、実際の地震波が到達するよりも速く、その後の地震波の伝播を計算。

図 10. 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震観測データ同化に基づく長周期地震動の予測実験

(a) 2011 年東北地方太平洋沖地震の発震時から 100, 120, 140, 160 秒後時点の同化波動場 (加速度の南北成分) のスナップショット。(b) それぞれの時点の同化波動場 (左) を用いて計算された、発震時から 220 秒後の予測波動場。(c) それぞれの時点の同化波動場を用いて計算された、新宿 (TKY007) における予測波形と実際に観測された波形 (速度の南北成分)。(d) 予測波形と観測波形の速度応答スペクトル (水平成分) の比較。

2-4. 研究を推進するための体制の整備

地震・火山現象に関する研究を推進する体制を構築し、研究成果を災害軽減に活用するため、観測網やデータベースなどの研究基盤の整備・拡充と成果公開、国際的な共同研究の推進、幅広い人材育成、災害軽減に関する教育や理解増進等の取組を組織的に行った。

推進体制の整備

本研究計画の適切かつ効果的な推進のため、地震火山部会^{*}において各年次の計画の立案、成果の取りまとめを行い、年次報告（成果の概要）を作成し、印刷及びホームページで公開した。地震・火山噴火予知研究協議会においては、平成28年度から行政機関、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た。

本研究計画の推進に当たっては、政府の地震調査研究推進本部が推進する地震調査研究との整合を考慮し、成果報告シンポジウム等の機会において地震本部への研究成果の共有や情報交換を行った。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・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所とが連携して、地震・火山噴火災害をもたらす誘因の予測などに関して共同研究を進め、複合学術領域としての地震・火山噴火に関する災害科学を進展させた。

本計画実施期間の3年次に当たる平成28年度に、計画の実施状況について自己点検を行い、平成29年度には外部評価委員会による外部評価がまとめられた。この中で、災害の軽減に貢献することを意識した研究という方向性の継続及び更なる発展が必要とされたことを受け、令和元年度以降の新たな地震火山観測研究計画の策定を進めた。

拠点間連携共同研究

南海トラフで発生が懸念される巨大地震のリスク評価の精度向上を目指した様々な分野の研究を推し進めた。具体的には、巨大地震の震源過程、震源から居住地域までの深部地下（地殻）構造・波動伝播、強震動、浅部地下構造、津波、構造物等の特性をそれぞれの分野の専門家が検討し、それらがどのように関連し、最終的な被害につながるかの科学的なリスク評価方法の確立を目指した（図11）。さらに、「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」として、全体の研究を、（1）想定される南海トラフ地震の震源過程、（2）深部地下（地殻）構造とそれが地震波動伝播に及ぼす影響、（3）強震動予測手法の高高度化、（4）浅部地下構造が地震動に及ぼす影響、（5）津波予測モデルと津波被害予測手法、（6）構造物の被害予測手法の高高度化、（7）災害のリスク評価と意思決定、（8）災害情報の外部発信とステークホルダの関与、（9）コンピュータシミュレーションを用いた新たな地震リスク評価手法の開発、の9分野に分け、それぞれの分野で研究を深化するとともに、各分野の相互連携を図る地震リスク評価プラットフォームを構築した。

研究分野横断型のリスク評価手法の構築

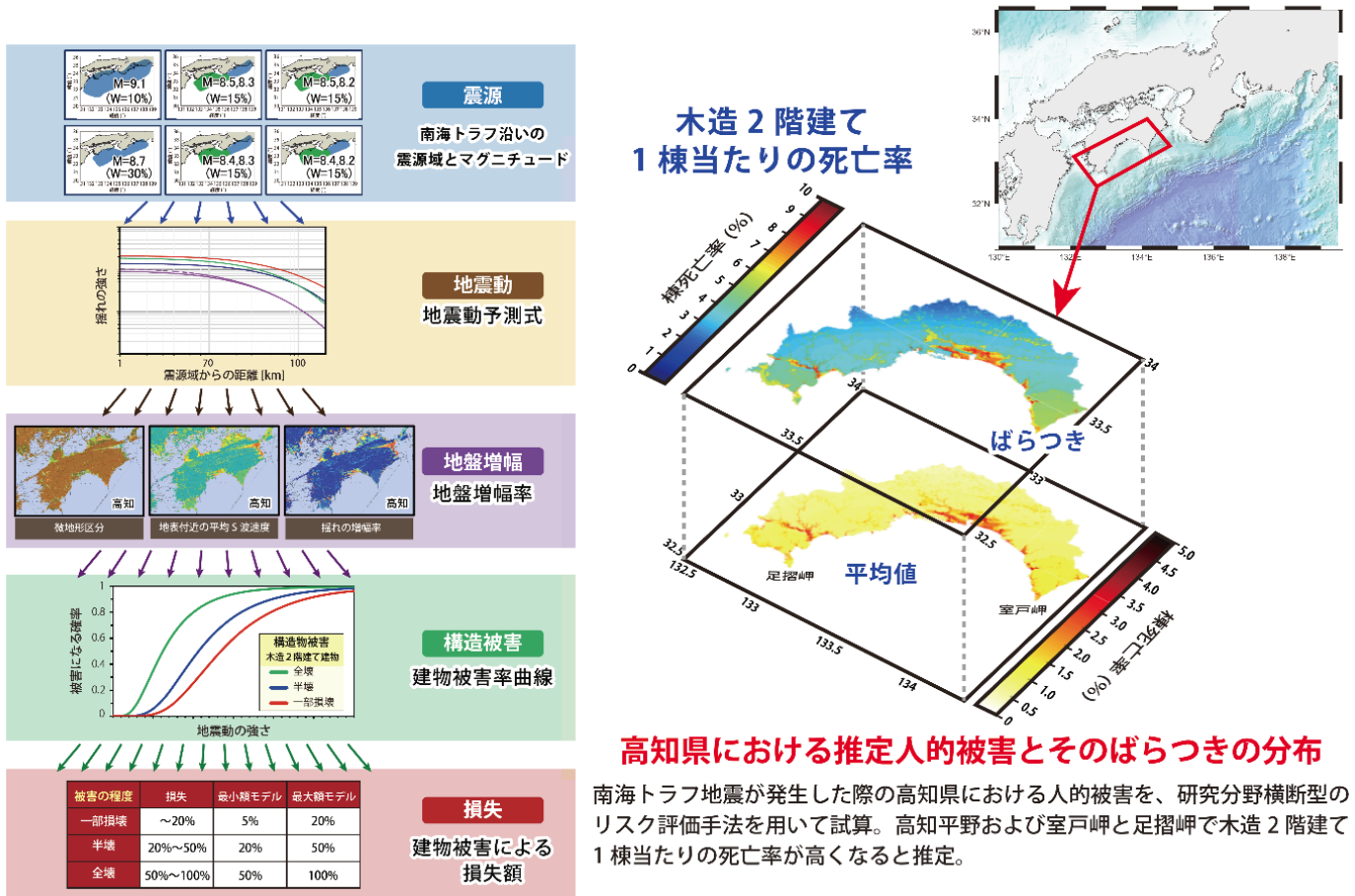


図 11. 研究分野横断型のリスク評価手法の構築

南海トラフ地震が発生した際の高知県における人的被害（棟死亡率：木造2階建て1棟当たりの死亡率）について、震源断層、地震動予測式、地盤増幅率、建物被害率曲線、建物被害による損失額及び人的被害の各モデルの不確実性を考慮して試算した。平均値は高知平野で特に高く、室戸岬と足摺岬及び高知平野と室戸岬の沿岸部で高い。また、棟死亡率のばらつき（予測の幅）も同じ地域で高くなると推定された。

研究基盤の開発・整備

・地震・火山現象のデータベースとデータ流通

地震カタログを作成し、地震月報（カタログ編）として気象庁ホームページで公開した。平成26年11月には英語版のWeb公開を開始した。新たな地震検知手法であるPF法を取り入れ、震源決定等を改善した。これにより、地震カタログに登録される地震数は改善前の約2～3倍となった。また、西南日本の南海トラフ沿いの深部低周波地震について、Matched Filter法*による自動決定手法を導入し、暫定的に運用開始した。

電子基準点リアルタイム解析システムにおいて、全国の電子基準点を対象として安定した運用ができるようシステムの調整を行った。また、精密単独測位法*を導入し、試験運用を実施した。

S-netの観測データについては、海底地震津波観測網データダウンロードページより公開を開始し、JDXnet*

での流通についても準備を進めた。DONETの観測データについては、海底地震津波観測網データダウンロードページより公開を開始した。首都圏地震観測網（MeSO-net）の運用を継続するとともに、ホームページによる観測データの公開を開始した。海域火山基礎情報図調査を西之島、海德海山、伊豆大島、利島至三宅島、若尊（わかみこ）で実施し、海域火山データベースに反映させた。

研究成果共有サーバにおいて、データ共有のためのオープンプラットフォームの ownCloud の利用を進めた。地震連続波形データの解析のための大規模解析システムの整備を進めた。北海道全域を対象に、北海道危機対策課が整備を続けている津波浸水想定データを用いて、マクロな視点による津波被害分析を行い、地域情報（土地利用及び人口など）をGIS*に取り込んで空間データベースを構築した。また、事例市町村を選定し、住民避難に関する地理空間情報も取り込み、避難施設と避難圏域に関する空間データベースを構築した。コミュニティモデル*として、太平洋プレート上面及びフィリピン海プレート上面の形状モデルを構築し、Webサイトで公開した。

・観測・解析技術の開発

海底音響測距*においては、大深度用の機器を開発し、底層流に対して揺れ動かない三脚型の設置方法に切り替え、海溝軸をまたぐ10kmを超える測線でも、一年の観測で1-2 cm/yrの精度で計測できるようになった。また、各基線の中程に中継器を用いる方式を導入し、音響パス確保の困難さを解決した。

従来の電子基準点リアルタイム解析システムでは相対測位法が用いられてきたが、これに加えて精密単独測位法を試験的に導入した。この手法では、固定点を仮定する必要がなく、かつ、固定点付近で発生する地震についても正確な地殻変動を把握することが可能となるため、今後、震源断層モデル推定の安定化が見込まれる^[6004]。また、干渉SAR*時系列解析時に使用するソフトウェアに改良を加えるとともに、電離層起因の誤差を低減する手法を開発した。

火山測地学的技術の高度化を進めた。新たな地表変動モニタリング技術として、地上設置型レーダー干渉計の研究を実施した。小型絶対重力計については、地面振動の影響を補正する技術を開発し、蔵王火山で動作確認を行った。小型単発機に搭載可能な熱赤外カメラによる計測データの処理手法を開発し、10m以内の精度を持つ箱根山大涌谷付近の数値表層モデルを作成した。火山監視情報システムに傾斜データに対する降水補正機能を導入した。また、だいち2号（ALOS-2）のSAR解析環境を再構築し、火山活動活発期に緊急観測の解析を行った。航空機SAR*データによるInSAR解析手法の開発と霧島硫黄山への適用を行った。

阿蘇中岳火口では人工電流源を用いた電磁探査データの3次元解析手法の高度化が実施され、火口直下の地下水挙動の時間変化の検出に成功した。宇宙線（ミュオン）の検出装置において、大口径化などにより可用性を大幅に向上させた。また、ガスの電離をワイヤでピックアップする技術をベースとしたミュオグラフィ観測システムの開発を行い、火山透視画像の高解像度化を実現した。

火山活動を把握するためのその他の手法開発も進められた。二酸化硫黄放出率の測定が簡単にできるようにすることを目的として、従来よりも小型・軽量の簡易型測定装置を開発した。気候変動観測衛星「しきさい」の画像データを火山活動状況の把握や避難計画策定等に活用するため、処理システムを開発した。また、火山噴火の物質科学的な準リアルタイム予測に帯磁率を利用する技術開発を行った。

・社会との共通理解の醸成と災害教育

「1914年桜島噴火災害に学ぶ～地震学・火山学が減災に貢献できること～」(H26)、「南海トラフ巨大地震の予測可能性に関するシンポジウム」(H28)、「熊本地震シンポジウム」(H28)を一般に公開して開催し

た。また、地震・火山噴火予知研究協議会では、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」のパンフレットを作成した。

地震動や津波の不確実な長期予測情報を、災害軽減に有効に役立つものとするためのコミュニケーション手法を確立することは、長期予測情報の高度化に貢献するため、2016～2017年度に大きな地震があったイタリアやニュージーランド、台湾などにおいて被害やリスクコミュニケーションに関する現地調査を行った。

地理空間情報 (G空間情報^{*})、GIS (地理情報システム)、衛星測位 (GNSS、準天頂測位システムなど) の統合的な活用として、高精度避難ナビゲーションシステムを含む防災・減災のための高度情報システム構築及び活用方法開発を行った。このシステムを活用し、災害リスクを軽減させるために、国、地方自治体、住民組織、住民個人の間で、どのような情報流通を行う必要があるか明らかにし、それによって「災害に対する社会的脆弱性」克服のための可能性を検討した。また、火山情報などの準リアルタイムな収集と統合表示を通して、地方公共団体が現況を総合的に把握し、的確な防災対応を行うための支援システムの構築を進めた。

・国際共同研究・国際協力

「スロー地震学国際合同研究集会 2018」, 「International Symposium on Earthquake Forecasting /5th International Workshop on Earthquake Preparation Processes」 (2018)を開催した。ニュージーランドのヒクランギ沈み込み帯において、日本、ニュージーランド、米国で共同して海底地震観測及び海底圧力計を用いた海底上下変動観測を実施し、反射法地震探査で確認されている流体が多く分布していると考えられる地震波強反射プレート境界の周辺域で活動が見られること、微動は沈み込んだ海山の基底部周辺に集中すること、観測されたスロースリップによる断層滑りはほぼ海溝軸まで達したことなどが明らかになった。また、ロシア極東でのGNSS観測により、海溝でのプレート間固着を考慮した北東アジアの長期地殻変動場を検討した。

2-5. 優先して観測研究を推進する対象の地震・火山噴火

以下に挙げる地震・火山噴火に対しては、理学のみならず社会科学等も含む多くの研究項目に跨がる総合的な実施計画の遂行が災害科学の発展のために効果的であると考えられるため、総合的な研究として推進している。ここでは、概要のみ記述し、それぞれの地震・火山噴火に関連する個別の研究成果は2-1から2-3に記述した。

・東北地方太平洋沖地震

東北地方太平洋沖地震は、日本の観測史上最大の地震であり、我が国に甚大な災害をもたらした。しかし、その地震発生の予知はおろか、地震発生ポテンシャルの正しい推定も困難であった。将来の巨大地震による災害の軽減に役立てるために、この地震に関する様々なアプローチからの研究を実施した。例えば、今なお続いている余効変動の推移の把握や、広域の応力場の変化や地殻流体の移動による地震活動への影響、同様な巨大地震の発生による強震動の事前・即時予測や津波即時予測手法の高度化、土地利用調査に基づく災害素因に関する研究などが進められた。

・南海トラフの巨大地震

陸上・海底観測による滑り欠損やゆっくり滑りに関する研究、数値シミュレーションに基づく東南海地震・南海地震の連動の多様性に関する研究、2016年4月1日に三重県南東沖のプレート間で発生したM6.5 (Mw5.8)の地震に関する研究、拠点間連携によるリスク評価手法に関する研究などが進展した。

・首都直下地震

地震像が多様で、発生した場合の社会的影響が甚大な首都直下地震について、その災害誘因予測に必要な基盤となる地球物理的観測データ及び史料・地質データの取得と、それらの解析・分析が行われた。房総半島南部の海岸段丘における地形・掘削試料解析から、フィリピン海プレートと陸のプレートの境界付近で発生する大地震の再来間隔が非常にばらつくことが明らかになった。関東平野における長周期地震動*の生成・増幅特性の方位依存性に関し、表面波*の入射方向と堆積平野の3次元地下構造がその主な要因であることが解明された。また、関東平野下のP波減衰構造を推定し、フィリピン海プレートのマントル東端部で、顕著に高い減衰を示すことを明らかにした。

・桜島火山噴火

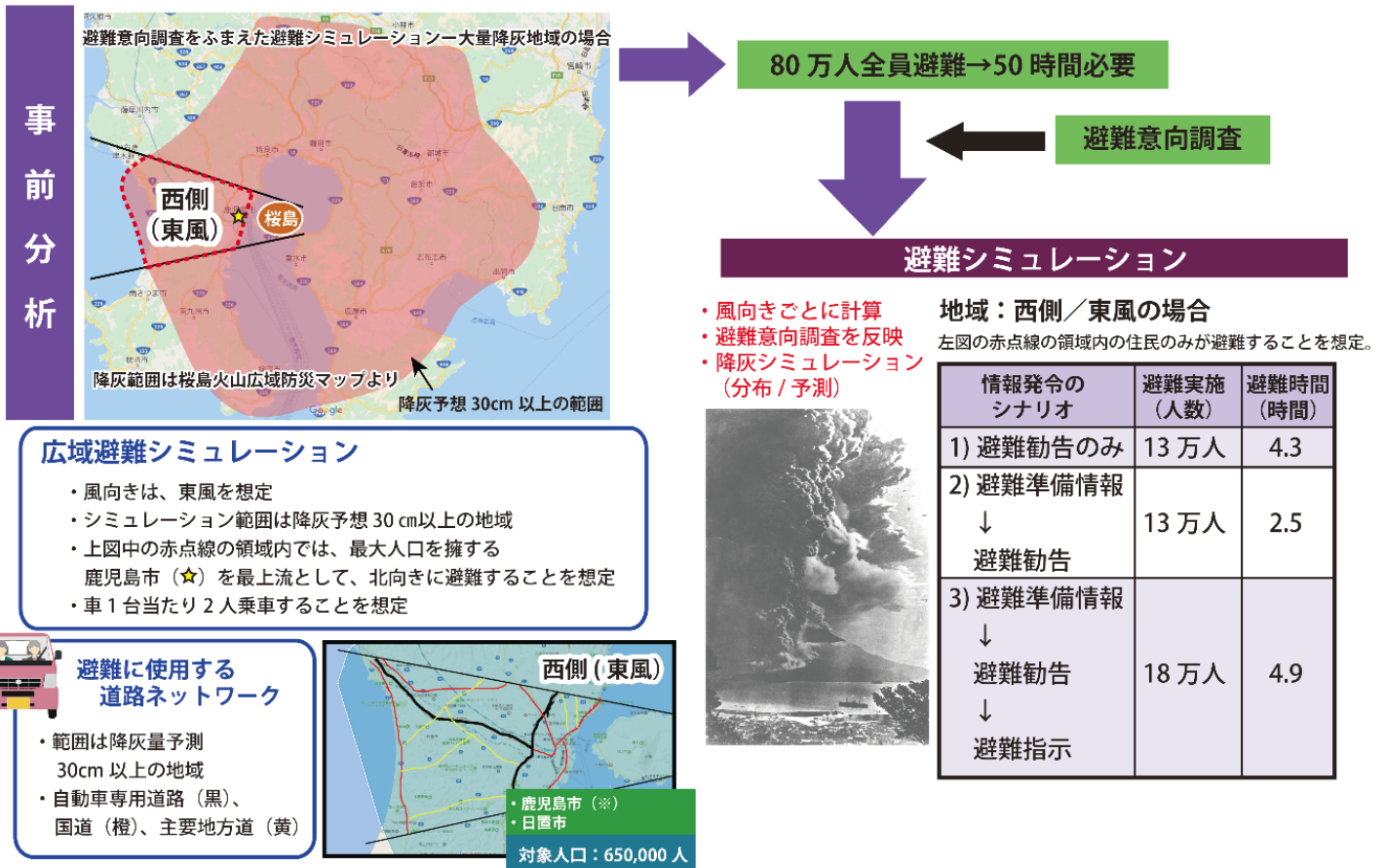
桜島大正噴火の前駆地震について当時の記録を再解析し、震源の位置やメカニズム解などを再評価した。2006年以降の昭和火口噴火活動期の地殻変動源を、観測から3つの増圧・減圧源の組合せでモデル化するとともに、繰り返し反射法地震探査により始良カルデラから桜島へのマグマ供給路の構造変化を捉えた。マグマ貫入期に先行して温泉ガス組成の変化が捉えられた。またマグマ貫入期の噴出物の組成変化から、活動に関与するマグマの種類を推定することができた。

噴火に先行する地殻変動や地震発生状況から噴火の発生時刻や噴火の規模を確率的に予測できることを示し、1日当たりのマグマ貫入量を分岐条件とする経験的な噴火事象分岐論理を構築した(図8)。例えば、既に火道が存在する南岳の場合は、ブルカノ式噴火($1-8 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$)、連続火山灰放出($\sim 1 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$)、ストロンボリ式噴火($0.2-2 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$)の順にマグマの貫入速度が大きい。

降下火山灰の即時予測として、火山灰の粒径と落下速度を測るダイスドロメータ*による降灰のリアルタイム把握、Xバンドレーザ*による噴煙の可視化や地上降灰量の推定、ライダー観測*による火山灰粒子形状推定手法、GNSS衛星からの電波が遅延することを利用した噴煙高度推定手法を開発し、地震・地殻変動データから予測される火山灰放出量や噴煙高度を入力とする火山灰拡散予測システムを構築した。

大正噴火級の噴火規模を想定し、前駆活動及び火山噴火の推移に沿った机上防災訓練を実施した。想定される大量降灰からの避難に関しては噴火規模、気象条件、住民の避難意向アンケートの結果を考慮した避難シミュレーションを行い、避難対象人口が条件に応じて大きく変化するという、避難計画作成上重要な知見が得られた(図12)。更に、早期復旧計画について検討し、降灰量と通行規制の関係、清掃時間や交通量等を考慮した最適な交通ネットワークの復旧分析を行った。

桜島火山における避難シミュレーション



避難勧告のみの場合、13万人が避難し4.3時間かかる。
 避難準備情報を流してから、その後に避難勧告を出す場合、準備ができているために避難時間が2.5時間に短縮。
 避難指示に切り替えることにより18万人が避難するが、必要な時間は4.9時間程度

図12. 桜島火山における避難シミュレーション

最近100年間我が国において発生していないような大規模噴火では、避難の途中において大量の降灰があれば避難を続けられなくなる可能性がある。事前分析として火山灰の堆積厚が30cm以上となる地域に住む80万人の住民全員が避難する時間の予測シミュレーションを行い、50時間となる結果を得た。次に避難意向のアンケート調査を行い、その結果と風向を反映したシミュレーションから、避難する住民の数と避難勧告が発表されたからの避難時間の見積もりは大きく変わることが確かめられた。これは、風向きによって避難すべき地域が絞られ、その地域が避難勧告等で発表されるために避難人数が絞られることと、避難準備情報があれば準備を始められることから避難勧告発表時には素早く避難できることが理由であると考えられる。このようなシミュレーションは、実効性の高い避難計画の作成に役立つ。

3. 顕著な地震に関して得られた重要な成果

3-1. 大阪府北部の地震

2018年6月18日7時58分に、大阪府北部の深さ13kmでマグニチュード(M)6.1の地震が発生した。この地震により大阪府の複数地点で最大震度6弱を観測し、人的被害・構造物被害を伴った。震源過程^{*}に関する理解を深めるため、強震動記録の解析、震源の再決定、余震の追加検出及び活動解析を実施したところ、破壊は北北西-南南東走向の東側傾斜(約45度)の逆断層^{*}(断層面F1)で最初に生じ、約0.3秒後に東北東-西南西走向の高角傾斜の横ずれ断層^{*}(断層面F2)に乗り移り、その後は同時に断層運動が起きていたことが明らかになった(図13)。断層面F2では、南西の浅い側に向かって破壊が伝播していたことも分かった。今回の地震は、有馬-高槻断層帯の数km南側に平行して存在する微小地震の線状配列の東の延長で発生した。断層面F2はこの線状配列の走向と整合的で、かつ、地表に明瞭な痕跡は現れていないため伏在断層の一部(伊丹断層の東部延長)が活動したと考えられる。1987年には、上記の線状配列に沿って右横ずれ型の地震($M_{\text{JMA}}4.2$)が起きている^[1903]。一方、断層面F1と上町断層帯(活断層)の深部延長との詳細な関係は不明であるが、断層面F1の滑りが上町断層帯などの東側傾斜の逆断層に与える応力^{*}変化を計算したところ、断層運動を促進する方向に約0.1MPaの応力変化を引き起こしたことが分かった。水平圧縮応力場が卓越する近畿圏においては、逆断層と横ずれ断層が同時に活動することで、ひとつの地震になる場合があることが示された。地震ハザード評価において2つのタイプの断層の連鎖的破壊も考慮することが今後必要である。また、震源域の北部延長では、地震活動が遅れて活発化しており、その領域の背景地震活動度は時間とともに徐々に増加する傾向を示した。このことは、本震によって震源域の北部延長(地殻内)で非地震的な変形が引き起こされた結果だと解釈できる。

この地震では、北東から南西方向に沿う震度5強以上の強い揺れに加えて、複雑な後続波が観測された。観測された大阪平野の3次元地震波速度構造モデルを用いた強震動シミュレーション(周波数2Hzまで)を行ったところ、上記の震度分布や複雑な後続波の生成は、2つの断層面での破壊過程と大阪盆地北部の地盤構造が主な要因であることが示された。特に、堆積層内の多重反射波や、盆地端部及び平野下の活断層における基盤段差構造によって生じる表面波が複雑な後続波の要因になったと考えられる^[1911]。大阪平野の3次元地震波速度構造モデルの妥当性が確認され、地震動の事前評価手法や即時予測手法の高度化につながる成果である。

人的被害としては、関連死を含めてこの地震による死者は6名であった。うち2名は倒壊したブロック塀の下敷きに(高槻市と大阪市東淀川区)、3名は家の中でたんすまたは本棚(もしくは大量の本)の下敷きに(高槻市、茨木市、大阪市東淀川区)、1名は持病の悪化(箕面市)が原因である。建物の構造的被害による死者はいない。いずれの被害も震央より南西方向の大阪府内に集まっていることが分かる。大きな加速度が観測されたにもかかわらず、建物の構造的被害が少なかったが、これは強震動の卓越振動数^{*}が3Hz程度と建物の固有周期^{*}よりも有意に短く共振がほとんど起きなかったためと推定される。一方、屋根瓦など一部損壊の被害が多く、復旧に時間を要している。大都市域の直下で発生した地震であったため、震度5強以上地域内人口が比較的多く、公共交通機関の運転見合わせやライフラインの停止及び復旧までに時間を要したことによる大きな影響があった。このように、例えマグニチュードがM6程度であっても、都市部で一定以上の揺れになる場合は、日常生活に支障を来すことが明らかとなった。このような地震が発生する頻度は、M7以上の大地震が発生する頻度に比べて約10倍高く、早期復旧のための点検・修理方法を検討することは喫緊の課題であると考えられる。

2018年大阪府北部の地震の震源断層モデル

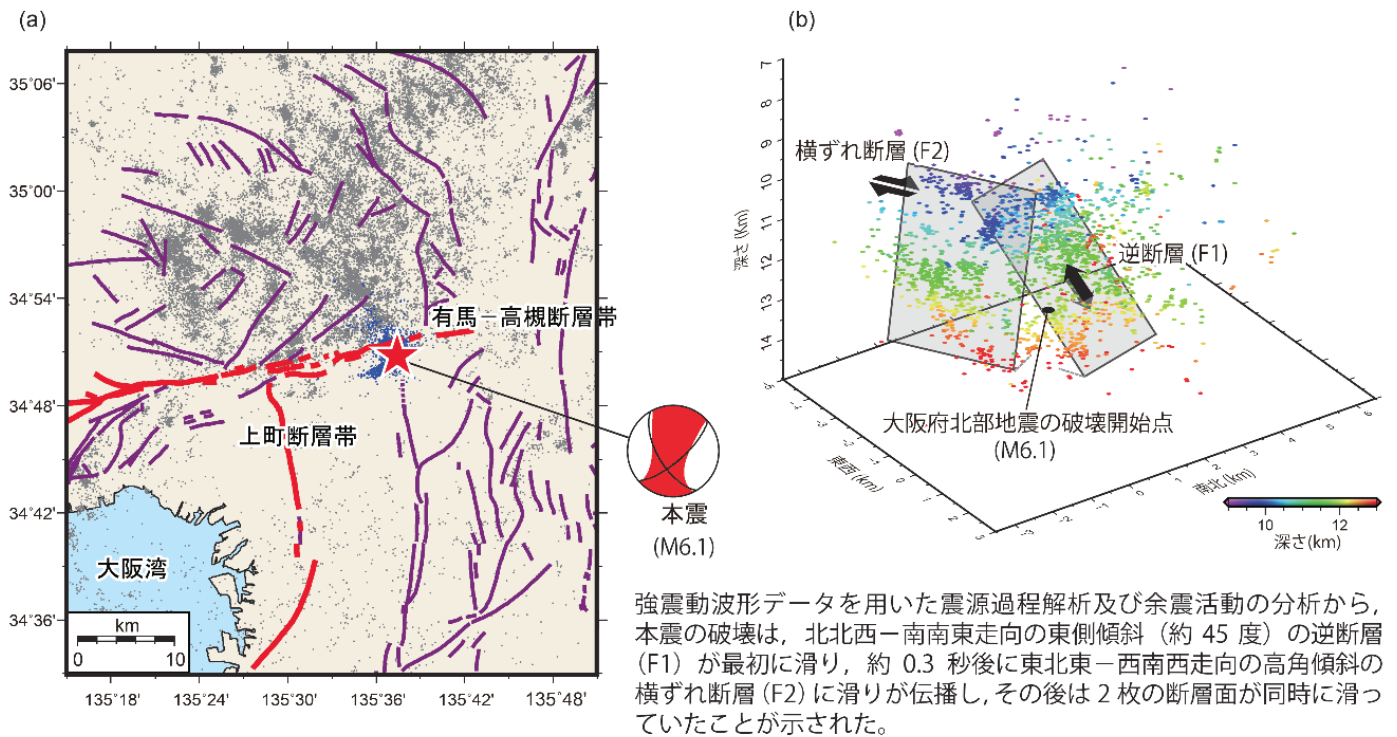


図13. 2018年大阪府北部の地震の震源断層モデル

(a)大阪府北部の地震（2018年6月18日，M6.1）の震央と、活断層の分布を示す。灰色の点と青色の点は、それぞれ大阪府北部の地震の発生前と発生後の地震活動の分布を表す。上町断層帯と有馬高槻断層帯を赤い太線で示す。(b)大阪府北部の地震の震源断層モデル。色のついた点は、大阪府北部の地震の余震分布を表しており、色は深さに対応する。逆断層（F1）と横ずれ断層（F2）に対応する面状の分布が確認される。

3-2. 平成30年北海道胆振東部地震

2018年9月6日午前3時過ぎ、北海道胆振地方中東部を震源とする平成30年北海道胆振東部地震が発生した。この地震のマグニチュードは6.7、深さは37kmと、陸域で発生する地震としては非常に深かった。厚真町鹿沼で震度7を観測したほか、安平町追分のK-NET追分観測点で1,796ガル*（三成分合計*）の最大加速度を記録するなど、北海道中南部を中心に広範囲で強い揺れを観測した。震央から約70km離れた札幌市東区でも震度6弱となった。震源距離が50km以内の観測点では、一般的な距離減衰式*よりも大きな最大加速度が記録されている（Dhakal et al., 2019）。

この地震では、震源に近い厚真町を中心に同時多発斜面崩壊が発生した。今回の地震では41名の直接死の人的被害が出たが、うち36名は厚真町で発生した斜面崩壊による。震源に近い石炭火力発電所の損傷を発端とした電力供給の不安定が発生し、地震発生約18分後には北海道全域が停電となるブラックアウトが発生した。木造家屋の被害が集中したむかわ町市街では、地盤の影響で周期1.5秒程度の地震波が増幅されたことが明らかにされている（Takai et al., 2019）。札幌市内では、谷埋め盛り土の軟弱地盤が原因と考えられる大規模な宅地の液状化*が発生した。

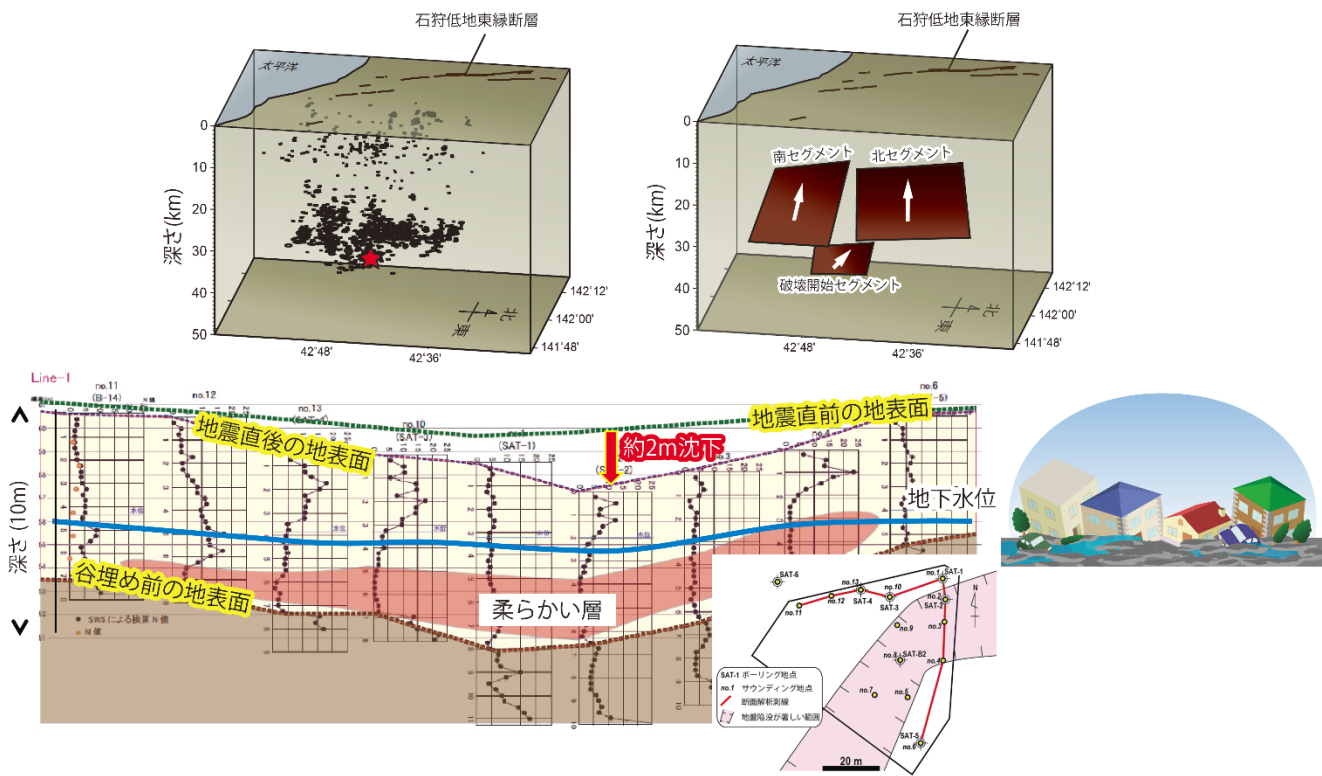
地震のメカニズム解は、東北東-西南西方向に圧力軸を持つ逆断層型である。余震域は、南北約30km程度で、深さは15-40kmで高角な面状を呈しており、InSAR*を用いた地殻変動*観測の結果からも、約70度の傾斜角を持つ高角の節面*が断層面と推定される（Katsumata et al., 2019; Kobayashi T. et al., 2019）。余震域の約10km西側には、国が主要活断層と位置付けている石狩低地東縁断層帯が存在するが、余震分布の形状は想定されている低角の断層面とは一致しない。

本震の震源は余震域の最深部に位置している。また、深さ20-25kmには、余震活動が低調な領域が見られる。今回の地震は、深さ37km付近から初期破壊が始まり、浅部に破壊が伝播したものと推定される（Kobayashi H. et al., 2019）。P波初動解と防災科学技術研究所などのモーメントテンソル解との比較から、断層深部で横ずれで始まった初期破壊が、徐々に逆断層が卓越する浅部での主破壊に進展したものと考えられた（Katsumata et al., 2019）（図14）。地殻変動データの解析によると、今回地震が発生した石狩低地帯はひずみ集中帯*となっており、周辺より一桁大きいひずみ速度*が観測されていた（Ohzono et al., 2019）。

大きな人的被害を出した厚真町の同時多発斜面崩壊は、最近数万年間に表層に堆積した樽前山や恵庭岳の降下火砕物*の底面を滑り面としていた。滑り面からは摩擦を低下させる粘土鉱物が検出されている。斜面崩壊は、地震動とほぼ同時に発生したと見られ、避難する時間はほとんどなかった可能性が高い。日本では、降下火砕物が堆積する地域が広く存在し、地震による斜面災害リスク対策は大きな課題である。また、400m程度の移動量を持つ大規模な岩盤滑り*の発生も確認されている。

北海道の胆振地方中東部から日高地方にかけては、1982年浦河沖地震など、震源が深い地震の発生が知られる。今回の地震の震源は上部マントルに相当する可能性がある。日高山脈の地下は、中期中新世に始まった東北日本弧と千島弧の衝突による複雑な構造が知られているが、今回の地震のような深い地震の発生との関係は良く分かっていない。

平成30年北海道胆振東部地震の余震分布と流動化発生個所の地盤断面図



上図：余震は深さ10～40km付近の、主に3つのセグメントで発生。
 下図：地盤の沈降量の大きい場所では、含水量の多い火山灰層が存在。

図 14. 平成 30 年北海道胆振東部地震の余震分布と流動化発生個所の地盤断面図

上図：臨時余震観測により高精度に推定された平成 30 年胆振東部地震の余震分布。余震は深さ 10～40km 付近に分布している。下図：ボーリング調査で明らかになった液状化に伴う流動化発生個所の地盤断面図。沈降量の大きな部分では含水量の多い特に柔らかい火山灰層が存在していた。

4. 平成 30 年度の成果の概要

4-1. 地震・火山現象の解明のための研究

地震・火山噴火現象の解明から発生予測や災害の軽減を実現することを目指して、史料・考古・地質データ等を含めた長期間の地震・火山噴火現象に関する研究や、地震や火山噴火の発生場や発生機構の理解を目指した観測・実験を、以下のように実施した。

(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整理

長期間にわたる地震・火山噴火現象の解明と、それらに起因する災害の実態解明を目指し、史料・考古データ、地質データの収集とデータベース化、各種データの分析について、次のような研究を実施した。

ア. 史料の収集とデータベース化

既刊地震史料を簡易データベース化することで、効率的に校訂作業を行えるスキームを開発し、データベース化の作業を加速的に進める見通しを得た^[2601]。日記史料有感データベースと気象庁の震度データベースの比較から、前近代に発生した中・小規模地震の震源決定を試みた^[1501]。日本語歴史史料の整理に適した軽量プログラミング言語を開発し、市民参加型翻刻プラットフォームに実装した^[2911]。

イ. 考古データの収集・集成と分析

全国の発掘調査報告書から災害痕跡データの抽出を継続し、被災エリアの可視化や災害発生時期の特定を試みた。災害痕跡データベースと日本地震関連史料データベースとの連携機能として、検索システムや情報入力機能の拡充を進めた^[9001]。

ウ. 地質データ等の収集と整理

津波堆積物の年代を統一的に求める手法を適用し、北海道太平洋沿岸での広域比較を行ったところ、苫小牧以西では 1640 年駒ヶ岳津波、苫小牧からむかわでは 1611 年慶長三陸地震津波、十勝地方から釧路地方にかけては 1611 年より後の津波イベントによる堆積物が分布している可能性が示された^[1002]。

鉱物温度圧力計^{*}を用いてマグマ溜まりの深度を精密に決定することにより、過去の富士山の噴火様式とマグマ溜まりの温度やマグマの含水量の関係を明らかにした。新たなマグマ注入の有無など、マグマ溜まりからマグマが上昇する際の条件の違いが噴火様式の違いとして表れていることを示唆する^[1502]。

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

近代観測データと前近代の地震・火山噴火の史料・考古資料を総合して、低頻度で大規模な地震・火山噴火現象の理解を目指した次のような研究を実施した。

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

古文書の調査と津波堆積物データから、日本海溝で室町時代に発生が指摘されていた巨大地震が 1454 年の享徳地震である可能性が高いことが明らかにされた(図 2)^[5004]。試作版地震関連資料データベースを活用し、これまで 2 つの発生日が考えられていた 1596 年文禄豊後地震の検討を進め、別府湾に津波被害をもたらした地震が発生したのは閏 7 月 9 日であると確定された。1854 年嘉永東南海南海地震の日記史料から、この地震の発生前に山陰地方や近畿地方北部で有感地震の記録が増加していることが明らかになった^[2601]。

東京大学地震研究所が所蔵する明治期の文献資料である「地震学及地理学研究材料 測候所郡役所組合事務所報告」の分析から、福島県楡葉町の慶長年間の海嘯(かいしゅう)*の伝承などの検討を行った[2903]。震度の多次元距離減衰式の再現性を検証し、史料データから歴史地震の震源域を推定を行える可能性を示した[2912]。

放射性炭素年代測定から、志摩半島沖の海底活断層が1万年前以降に1回以上の活動を行い、この期間での上下方向の累積変位量は10mに達する可能性が示された。この海底活断層は陸域に近いので、津波が沿岸に短時間で到達する可能性がある[1703]。

表層地質調査と噴出物採取、ボーリングやトレンチ調査を実施し、約7000年前の摩周カルデラ形成噴火では、先行現象が確認されないこと、噴煙柱形成、マグマ水蒸気爆発、カルデラ形成の3フェーズで推移したことが明らかとなった[1001]。1792年に発生した雲仙岳の眉山崩壊は、山麓付近の岩石中岩石中の間隙水圧上昇が要因となったことを支持する史料が得られた[1001]。桜島大正噴火の際の大地震の震源要素の再解析を行った[1902]。

イ. プレート境界巨大地震

日本海溝域で、海底地震観測と陸上観測データから詳細な地震カタログを作成し、プレート境界面付近の地震活動を解析した結果、地震に伴う応力変化とプレート境界面の摩擦状態変化が原因と考えられる地震活動の変化が、東北地方太平洋沖地震の前後で見られることが明らかにされた[1503]。

東北地方太平洋沖地震後7年間の変位時系列データを用いて、プレート境界の摩擦特性やマンテルウエッジの粘性率など複数のパラメータを同時推定する手法を開発し、余効変動の時空間パターンを説明することに成功した[1803]。

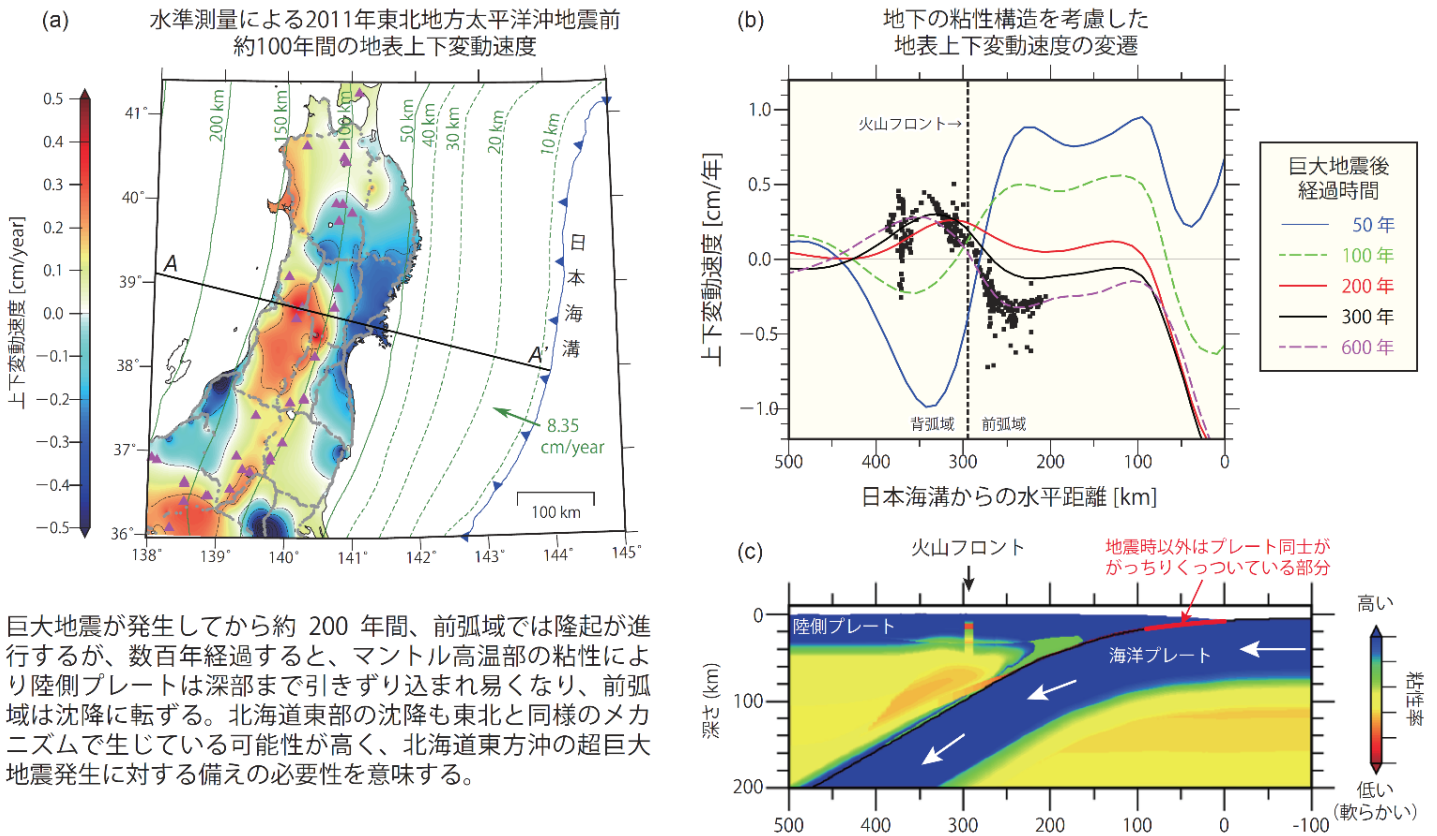
(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

地震・火山噴火の発生場における地下構造や応力場の時空間的な特徴を明らかにするとともに、断層面における摩擦特性や流体の影響、地震と火山噴火の相互作用に関する、以下のような観測や実験的研究を行った。

ア. プレート境界地震

東北地方で粘性構造を入れた地殻変動場の時間変化シミュレーションを実施し、地震の再来周期が600年と非常に長い場合には、本震後に前弧域の隆起が約200年続くが、その後は沈降に転じ、次の巨大地震の発生に至るというモデルが提案された[1203] (図15)。茨城県南西部のフィリピン海プレート上面付近では、繰り返し地震が1年周期で活発化し、それに同期してプレート境界直上の地震波の減衰が大きくなり、数か月遅れで浅い地震活動が活発化することが明らかにされた。この現象には水の移動が関与している可能性がある[1510]。紀伊半島で稠密地震観測等を実施した結果、深部低周波微動の活動が沈み込むフィリピン海プレート内の構造不均質と関連している可能性が示された。また、深部低周波微動の発生域に存在する地下流体が、微動活動を規定している可能性が示唆された[1509]。

東北地方太平洋沿岸域の沈降メカニズム



巨大地震が発生してから約 200 年間、前弧域では隆起が進行するが、数百年経過すると、マントル高温部の粘性により陸側プレートは深部まで引きずり込まれ易くなり、前弧域は沈降に転ずる。北海道東部の沈降も東北と同様のメカニズムで生じている可能性が高く、北海道東方沖の超巨大地震発生に対する備えの必要性を意味する。

図15. 東北地方太平洋沿岸域の沈降メカニズム

- (a) 東北地方太平洋地震発生前の地表で測定（水準測量）された上下変動速度の平面図。
- (b) 中部東北日本を横断する測線（図(a)の直線AA'）周辺の上下変動速度を日本海溝からの距離の関数として示す。黒点は水準測量に基づく観測データで、実線と破線は数値シミュレーションによる上下変動速度を表す。線の色は、巨大地震発生後の各経過時間に対応する。
- (c) 数値シミュレーションの際に仮定した粘性率構造。

イ. 海洋プレート内部の地震

東北地方中央部の太平洋スラブ上面では、正断層地震と逆断層地震が 100m 以内に近接して発生していることが明らかになった。この結果は、スラブ内地震を引き起こす相転移*による応力擾乱*が極めて局所的である可能性を示唆する^[1201]。スラブ内地震の地震波放射エネルギー効率は規模依存性を持つものの、深さ 360km までは深さ依存性を示さないことを確認した^[1201]。

ウ. 内陸地震と火山噴火

熊本地震震源域で地震前後の応力場の変化を検出し、地震前から布田川一日奈久断層が周辺に比べ数 MPa から数十 MPa 差応力が高かったことが示された。また、地震後に布田川断層延長部や日奈久断層延長部ではせん断応力が増加するなど、依然として高い差応力が維持されていることが明らかになった^[2201]。詳細な比抵抗構造調査から、熊本地震の M5 クラスより規模の大きな地震の破壊開始点は低比抵抗域の縁辺外側 5 km

以内であること、大滑り域は低比抵抗域に挟まれた高比抵抗域であることが明らかになった^[2201]。

東北地方太平洋沖地震前後の東北地方前弧域の上盤側応力を再現する有限要素法モデリングから、東北地方太平洋沖地震後のプレート境界の摩擦力は5-11MPa程度であり、プレート境界の強度は30MPa程度以下である可能性が示された^[1203]。

御嶽山では、2007年噴火に伴う火山性地震*のメカニズム解の時間変化を手がかりとして、これまで詳細がわかっていなかった噴火日の推定を試みた^[1907]。

東北地方太平洋沖地震の震源に近くに位置し、この地震の発生以来火山活動が活発化している蔵王山で、多項目の総合観測を行った結果、山頂火口浅部で熱消磁域が存在すること、気泡を含む熱水により長周期地震が発生していることが分かった^[1202]。

(4) 地震現象のモデル化

地震の断層滑りや、プレート境界での多様な滑り様式の理解を進め、地震発生予測のシミュレーションやハザードの予測を効率的に行うために、標準構造モデルの構築や、断層の物理モデルの高度化を目指して、以下のような研究を実施した。

ア. 構造共通モデルの構築

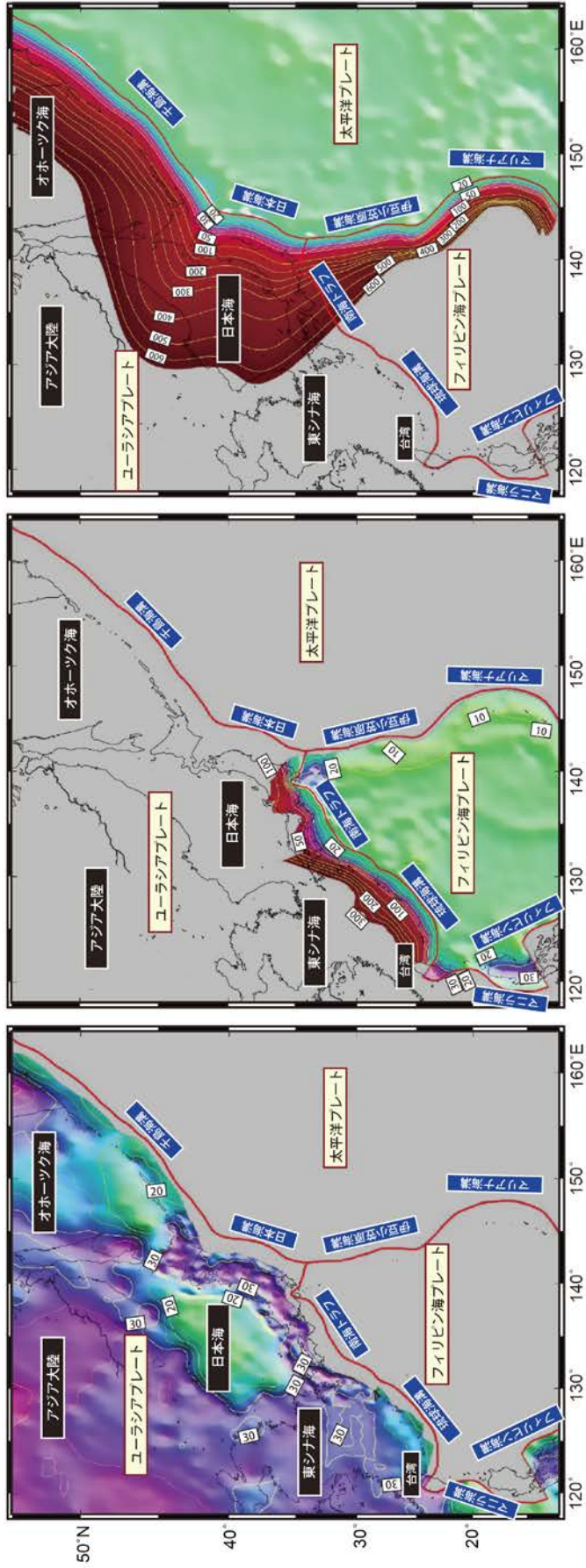
プレート境界の位置の修正、及びフィリピン海プレートと太平洋プレートとの接合部の形状モデルの検討を行った。関東域における構造探査を基に、同地域の複雑なフィリピン海プレート形状の再定義を試みた。リージョナル及びグローバルなモホ面*モデルを滑らかに接続し、日本列島周辺域全体にわたるモホ面モデルを構築し、公開した^[1505] (図16)。

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

大型振動台を利用した岩石摩擦実験を実施し、通常の高速破壊イベントに加え、弾性波速度より高速で伝播するゆっくり滑りが発生していることが明らかになった。ガウジ*を挟んだ実験では、摩擦パラメータは断層長サイズには依存しないものの、滑り距離によって変化することが確認された^[3001]。

粗い断層面を仮定したシミュレーション実験を実施し、地震性高速滑りの発生前に非地震性の遅い滑りが発生することが見出された。また、断層面の粗さが一定以上となると、地震性滑りを起こせなくなることが示された^[1507]。長期的スロースリップ領域での摩擦特性推定には、固着域の滑り欠損速度も同時推定が必要であることが示された^[1801]。

日本列島周辺域基本構造モデルの構築



さまざまなデータを統合して構築した日本列島周辺域の基本構造モデルを公開。

図 16. 日本列島周辺域基本構造モデルの構築

これまでに得られている様々なデータを統合し、日本列島周辺域の基本構造モデルを構築した。左図：地殻構造モデル。地殻とマントルの境界であるモホ面の深さを等深線で表示。中央：フィリピン海プレートの形状モデル。プレート上面の深さを等深線で表示。右図：太平洋プレートの形状モデル。プレート上面の深さを等深線で表示。（深さの単位はいずれも km。）

(5) 火山現象のモデル化

ア. マグマ噴火を主体とする火山

桜島の火砕流を伴う噴火について、噴火活動期の縮退期に発生しやすいことや、噴火発生1時間ほど前から周波数の高い火山性地震が発生し、山体膨張*が停止するケースが多く見られることが明らかとなった^[1908]。霧島新燃岳の2018年3月中に発生した多数の爆発的噴火に伴う地盤の傾斜変動を調べた結果、平均して、噴火の約30分前から膨張が始まり10分前から若干収縮し、噴火に至ることが分かった^[1508]。連続的な噴煙活動と溶岩流出が起こった3月上旬の噴出物と、それ以降の間欠的な爆発が続いた時期の噴出物から、火口内マグマの滞留による結晶化の進行プロセスを推察した^[5006]。

噴出物の結晶サイズを解析することにより、桜島の歴史時代のプリニー式噴火ある大正・安永・文明噴火のいずれにおいても、軽石・火山灰として爆発的に噴出したマグマは、噴火の直前に、深さ約10 kmのマグマ溜まりから桜島直下の深さ1～3 kmの火道に移動していたことが明らかとなった。これにより、大規模噴火は上昇開始からごく短時間で噴火を開始する可能性があることが分かった^[1205]。

イ. 熱水系の卓越する火山

口永良部島、阿蘇山、御嶽山、弥陀ヶ原（みだかはら）、箱根山、焼岳、十勝岳、雌阿寒岳（めあかんだけ）、霧島硫黄山等において、測地測量や地震観測、電磁氣的観測及びそれらのデータ解析、火山ガスや噴出物等の化学的、岩石学的調査が行われ、各火山の活動が定量的に調べられた。また、海底火山の活動評価のため海水分析などが行われた^[1003, 1008, 1403, 1802, 2802, 2949, 1909, 9102]。

草津白根山・本白根山の2018年噴火においては、様々な観測・解析から噴火の実態が明らかになりつつある。例えば、傾斜計データ解析からは本白根山鏡池北火砕丘の直下の開口クラックが噴火直前に膨張し、噴火とともに収縮したことが分かった^[1601]。噴出量は約3.6万トンと推定され、全岩化学組成分析から鏡池北火砕丘と同じ組成を持つ岩塊が放出されたことが推察された^[2942, 1601]。火山灰に付着した水溶性成分の分析から、高温マグマ起源のガスの関与が示唆された^[1601]。無人ヘリを用いた空中磁気測量から、湯釜火口北東域では温度上昇が起きていたが、本白根噴火の火口域の地磁気変化は温度変化ではなく噴火による地形変化によるものと推察された^[1003]。

熱水系の特徴が噴出物の分析から調べられた。十勝岳ではマグマ貫入が頻繁に繰り返され、強酸性の環境で岩石の変質が進んでいること、吾妻山では大穴火口形成噴火（1331年頃）を境に熱水系の状態が大きく変化したことが明らかになった^[1003]。

4-2. 地震・火山噴火の予測のための研究

地震や火山噴火現象の科学的理解に基づき、地震活動や火山活動の予測研究を行った。地震発生予測では、長期評価手法の高度化、モニタリングによる地震活動予測及び先行現象に関する研究を行った。火山活動予測では、火山噴火の規模、推移、様式の予測のために、噴火事象系統樹の高度化に関する研究を進めた。

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

南海トラフ沿いの海溝型巨大地震の動的破壊過程及び内陸地震への影響を調べるために、モデリング研究を実施した^[3001]。GNSS データからプレート境界の応力蓄積速度分布を推定し、それを境界条件として与えることで動的な破壊シミュレーションを行い、今後発生しうる地震のシナリオを複数作成した。また、プレー

ト間の固着が作り出す内陸域のせん断ひずみエネルギーの増減分布と、地震活動の分布との間には、有意な相関があることが示された。

北海道太平洋岸に沿った地質調査により、1611年慶長三陸津波の堆積物は苫小牧市からむかわ町にかけて分布するが、十勝地方から釧路地方に分布する津波堆積物は1611年より後年のイベントによる可能性が高いことが示された^[1002]。また、2014年に長野県北部の地震が発生した神城（かみしろ）断層の活動履歴調査により、複数の地震タイプが併存していることが明らかにされ、地震のタイプごとに変位が生ずる断層が異なる可能性が指摘された^[1702]。

（２）モニタリングによる地震活動予測

物理モデルに基づく数値シミュレーションと地震活動や測地データ等の観測データを比較することにより、プレート境界滑りの時空間発展機構を包括的に理解する研究を実施した。さらに、プレート境界滑りを予測する手法の開発を進めた。また、地殻応力の変動を断層滑りや、広域応力場^{*}、変形場の時空間発展を基に推定する手法を開発し、地震活動を評価した。統計的モデルを用いて地震活動の予測実験を行うとともに、その予測性能を評価した。

ア． プレート境界滑りの時空間発展

東北地方太平洋沖地震の震源域南側となる福島県沖に設置した海底地震計アレイ観測により、低周波微動活動を検出した^[1503]。微動は移動を示すとともに、低角逆断層型のメカニズム解で記述できることが示された。微動の発生域は、東北地方太平洋沖地震後の余効滑り^{*}域内に位置し、比較的狭い領域で余効滑りとスロースリップが共存していると考えられる。

東北地方太平洋沖地震後に発生頻度が増した岩手県釜石沖の繰り返し地震発生域において、地震サイクル後半に小地震活動が活発化する傾向が保たれていたことが明らかとなった^[1501]。小地震活動の静穏化・活発化が釜石沖地震の繰り返し間隔に依存しないという結果は、地震活動が固着域内部での応力状態や階層的な構造等の場の性質に支配されている可能性を示唆する。

GNSS-音響測距結合方式海底地殻変動観測により、紀伊水道沖において2017年末頃から2018年の初め頃にかけて、南向きの非定常地殻変動を複数の地点において観測した^[8001]。海底地殻変動観測点で得られた変位ベクトルを基に、紀伊水道沖のプレート境界浅部においてスロースリップが起きていたことが初めて明らかとなった。

海域の3次元地下構造の影響を考慮したCMT解の推定手法を開発し、陸域で取得された長期間の波形データに適用することで、紀伊半島南東沖で発生する浅部超低周波地震が総じてプレート境界の滑りを反映する低角逆断層となることが示された^[3001]。

琉球海溝南西部八重山諸島近傍において、およそ半年周期で繰り返し発生するスロースリップの滑り速度の時空間変化がイベントごとに異なることが明らかになった^[1803]。また、イベントごとに摩擦パラメータの分布が異なることも示され、プレート境界周辺の流体分布や摩擦の性質が時間変化している可能性が示唆される。

イ． 地殻ひずみ・応力の変動

東北地方太平洋沖地震後に活発化した秋田県中部において、地震発生後の約8年間、領域全体の応力場は顕著な時空間変化を示さなかった。しかし、震源域が徐々に拡大した南端では逆断層型の応力場が確認され、この地域の応力場の不均質性が明らかになった^[1203]。

山陰ひずみ集中帯において、東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動の短波長・長波長成分の分布の特徴に

ついて分析したところ、東北地方太平洋沖地震による応力擾乱の影響をほとんど受けていないことが明らかになった^[1907]。

2000年鳥取県西部地震域の余震のメカニズム解から、本震断層周辺域の応力場の不均質性の評価及び本震時の静的応力変化に基づいた絶対応力場の推定が行われた^[1905]。さらに、地震観測データを基にした地殻内の絶対応力場の推定法を新たに開発した^[1907]。この手法は、大きな地震の発生前後での弾性ひずみエネルギーの変化に着目し、間隙流体圧をパラメータとして絶対応力場を推定するもので、1992年ランダース地震に適用した事例では、その震源となった断層の強度は標準的な岩石のものと矛盾しないことが示された。

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

東北地方太平洋沖地震以降に国内で発生した本震-余震系列を示す地震活動を分析したところ、余震継続時間がマグニチュードに依存しないこと、余震継続時間と活断層（一部プレート境界）の変位速度に負の相関があることが見出された^[1206]。

中規模繰り返し地震に関して、その発生確率を事前に予測し、事後の発生状況から平均対数尤度等を用いて予測モデルの優劣を評価した。その結果、発生間隔が対数正規分布でベイズ統計に基づくモデルで予測を行うと最も予測成績は良く、一方、BPT分布*に基づくモデルに地震本部の採用するパラメータを用いて予測を行うと予測成績は予測したモデルの中で最も悪かった^[7006]。

国際的な地震活動予測可能性共同実験（CSEP）に継続して参加し、今年度も多くのモデルの検証実験を実施した。予測と検証の繰り返し経験が蓄積したので、関東地方においてM4以上の地震に対する予測モデルのパラメータの最適条件を探索し、それによる予測性能を事後的に調べた。その結果、最適パラメータの探索期間が1年程度になると予測性能が頭打ちになるとともに、予測期間が長くなるほどその予測性能が劣化する点も分かった^[1511]。

（3）先行現象に基づく地震活動予測

釧路沖、那珂沖のM5程度の繰り返し地震グループについて詳細な震源滑り分布を求めることで、これらの地域ではM5、M4、M3程度に相当する階層的な構造が存在することが示された^[1402]。さらに、異なる規模の地震でも、地震の始まり方が同じである例が発見された。この観測事実は、地震の始まり方だけを見ても最終破壊サイズを予測できないことを意味する。

地震活動の特徴を抽出するために、気象庁一元化処理震源カタログに対して最近傍法*による客観的かつ自動的なクラスタリング処理を行い、前震・本震・余震の分類を行った。その結果、前震のb値がわずかに小さいこと、前震の発生率が本震の広いマグニチュード範囲において概ね30~40%程度であるなどの特徴が明らかになった^[1206]^[7006]。

イタリアの地震活動に数理統計モデルを適用することで、M2.9以上の地震に対して、約61%が誘発型地震に分類された。また、2005年~2016年に発生した6つの大地震のうち5つは誘発型に分類され、イタリアでは前震の出現率が高いことが示された^[1206]。

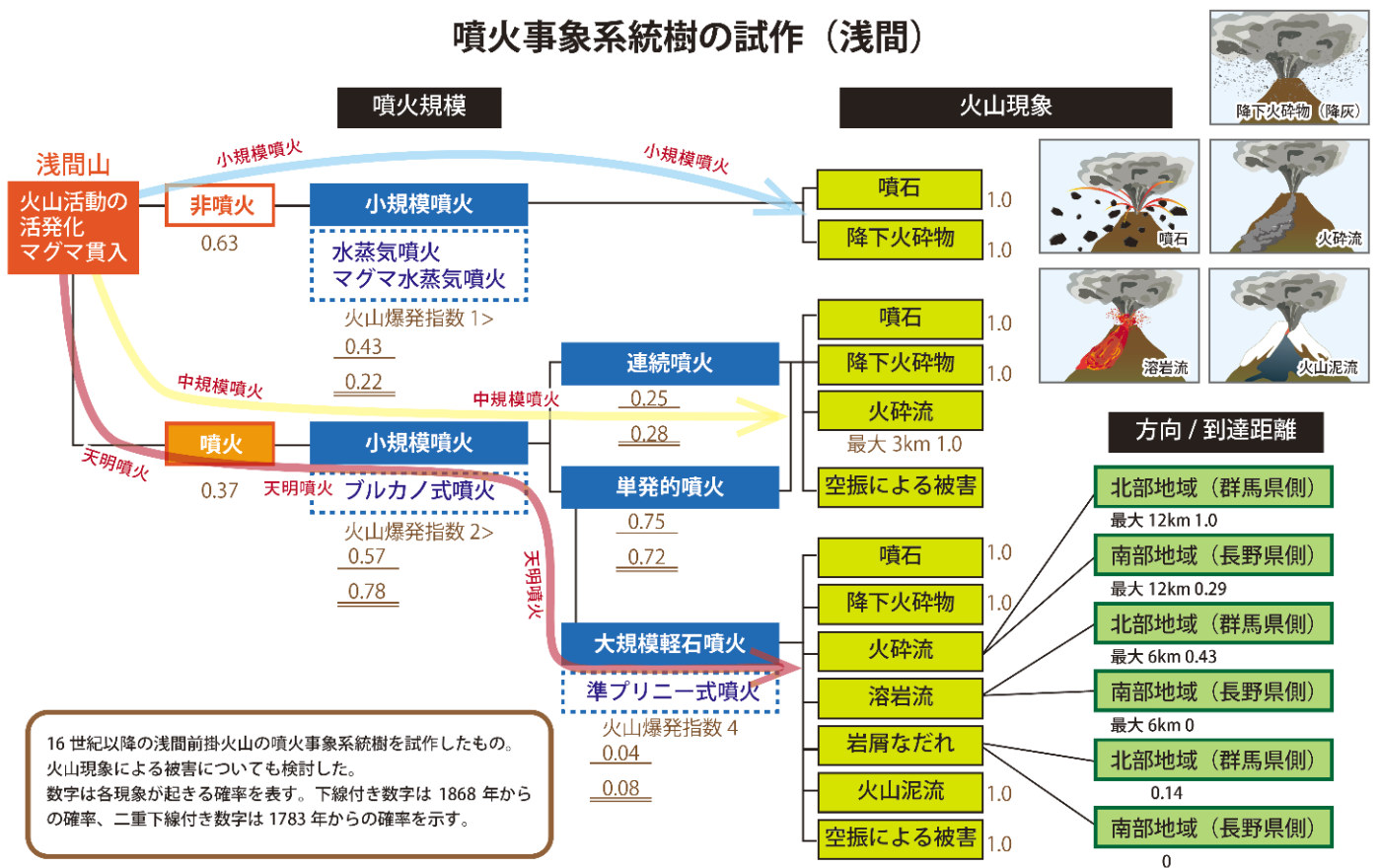
四国地方において、プレート間の滑り欠損速度と深部低周波微動の発生レートとの間に時間的相関のある場所が見つかった。すなわち、微動発生率がゼロになると、滑り欠損速度がプレート収束速度に近くなることが示された^[5007]。このことは、微動がプレート境界の滑り速度の指標になり得ることを示唆する。低速な滑りと高速な滑りの関係を考察するために、透明なゲルシートを使った摩擦実験を行った。その結果、低速な滑りと微動が同期して発生することで、滑りが共振して加速する様子が捉えられた^[1512]。

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

十勝岳、阿蘇山の噴火事象系統樹を作成するとともに、2018年1月の本白根山の噴火を受けて、草津白根火山の噴火事象系統樹の作成に着手した。また、浅間山の噴火開始と噴火未遂の評価手法及び事象分岐確率の算出手法を検討し、同火山の事象系統樹を改訂した(図17)^[1004]。

事象分岐の条件や論理を導き出すため、非噴火期の火山活動事象のうち特に熱水系の関与と考えられる事象を収集した。火山性圧力源や熱源の深度と強度の関係を散布図に整理し、深度と強度が浅い方向へ偏差する事例と噴火発生状況の比較を基に火山噴火発生度を統計的に評価するための基礎資料を作成した^[1003]。また、火山ガス放出率や組成の連続観測を実施し、噴火発生や活動推移との関係を網羅的に調べ、火山ガス放出率とマグマ上昇率の間に比例関係があること、火山ガス中のCO₂/SO₂の増加がマグマ中の気泡の増大ひいては大規模噴火の発生につながる可能性があること、などを示した^[1208, 5006]。

噴火事象系統樹の試作（浅間）



火山現象を網羅的に時系列に沿って示す「噴火事象系統樹」の高度化として、作成手法を一般化し過去の噴火事例に基づく分岐確率を示した。浅間山においては中小規模の噴火が一般的であり、天明噴火クラスの大噴火は稀である。

図17. 噴火事象系統樹の試作（浅間）

火山現象を網羅的に時系列に沿って示す「噴火事象系統樹」の高度化を進めた。多くの火山において系統樹を作成することができるように、作成手順の一般化を進めた。また、過去の噴火事例に基づいて枝分かれの確率を示した。例えば、上図の赤・黄・青の太線はそれぞれ、天明噴火クラスの大規模軽石噴火、中規模噴火、小規模噴火のたどる推移を示す。火山現象の確率が1.0となっているのは、該当する現象が必ず起きることを示している。

4-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

「地震・火山噴火の災害事例の研究」においては、1) 近代的観測開始以前の史料、2) 近代的な観測や調査データ、から、地震発生から災害対応に至るまでの過程を解明した。

1) においては、「江戸大地震之凶」(島津家文書、東京大学史料編纂所蔵)を分析したところ、1855年安政江戸地震による「江戸市中(薩摩藩芝屋敷北の一町)での被害と復興の様子」を知ることができ、同時に「(江戸は平時から大火が多く)地震に起因しない火災からの復興の様子」を知る上でも活用できる可能性を示した^[1513]。

2) においては「揺れの情報をいかに被害軽減並びその後の復旧・復興の実現に還元するか」という点に着目し、柏崎市(2007年新潟県中越沖地震)、益城(ましき)町(2016年熊本地震)、茨木市(2018年大阪府大阪北部の地震)における生活再建の基盤となる罹(り)災証明書発行の日別件数について分析を行った結果、地震災害の特徴・被害量に関わらず、発行傾向には、発行を開始してから一定期間発行が集中し、その後低い発行量で推移するという同様のパターンが見られた。このパターンをモデル化し、強震動分布などを基に推算される建物被害棟数に対してこのモデルを適用することで、罹災証明発行の集中時期、発行量、撤収時期が導出されるため、応援職員派遣・要請に必要な資源量を見積もることができる^[2702]。

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

地下構造モデルが得られていない場合の簡易的な強震動予測のために、観測記録の水平動と上下動の比を用いた補正、震源放射特性係数の補正、経験的グリーン関数法*の活用などの手法開発を行い、台湾・インド〜ブータン等のヒマラヤ前縁・アルジェリア等の国外の堆積平野・堆積盆地を対象に過去の被害地震の強震動を評価した。その結果、平均値としては、各々の国で工学的に用いられている地震動予測式と調和的な結果が得られ、良質な地下構造モデルが構築されるまでの過渡期に有効な計算手法として代替利用が可能であることを確認した^[1515]。

桜島大規模噴火による降灰リスク分析を、噴火と気象シナリオに応じ推定し、降灰量に応じた社会システムへの影響度分析を行った。また、1914年の大正噴火規模を仮定し、3890日分の気象シナリオによる降灰ハザードデータベースを構築した。さらに、降灰分布の予測計算にPUFFモデル*を用い、火山灰輸送シミュレーションを実施した。偏西風や強い風を条件に用いた降灰分布確率から桜島大規模噴火における要避難人口を求めたところ、いずれの年でも5月から10月までの平均は10万人を超え、避難困難が予想されることが分かった^[1914]。

東日本大震災の被災経験に基づいて、コミュニティの災害脆弱性評価のための指標を検討した。今年度は、宮城県の津波被災地5市5町のコミュニティにアンケート調査を実施した。特に、震災後の移転(空間の変化)が生活環境条件に及ぼした影響を分析したところ、移転した地区によって、有意な差が生まれていることが分かった^[1704]。

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

地震動の事前評価に関しては、2018年大阪府北部の地震(M_{JA}6.1)についての強震記録の分析と地震動シミュレーションより、震央の南西に広がった強震動域は放射特性、破壊伝播の指向性効果、堆積地盤による増幅が重なって生じたことが明らかになり、大阪盆地堆積層構造モデルの妥当性も確認された^[1903,1911]。秋田県横手盆地において微動観測に基づき地盤構造モデルを作成し、これを用いて1896年陸羽地震の震動シミュレーションを実施したところ、同地域で地盤が深いために被害域が南に延びたことが分かった^[2953]。2019年1月

3日に発生した熊本県熊本地方の地震(M5.1)で震度6弱を観測した熊本県和水(なごみ)町で、直達S波の後に地盤の影響と考えられる周期0.5秒程度の長い波群が確認された。この周期帯の波は計測震度を大きくするが、木造家屋の倒壊を起こす周期帯(1~2秒)より短いため、被害が限定的であったと考えられる^[1516]。

地震動による災害リスクの事前評価に関して、木造構造物被害の将来時点の予測を行うために、固定資産課税台帳及び住民基本台帳から抽出されたデータを用いて、木造戸建住宅の棟数及び築年数分布を予測する方法を検討した^[2952]。災害リスク評価のばらつきを理解するため、震源モデルや強震動予測モデルについて複数のモデルを用いて災害リスクを評価し、評価結果のばらつきを分かりやすく表示するシステムを構築した。また、ばらつきのある災害リスク評価結果の中からハザードシナリオ選択する際の考え方として、「命を守る」または「業務・生活・地域を守る」など異なる達成目標に応じて選ぶ方法について検討した^[2951]。

地震による地滑りの事前評価に関して、2008年中国ブン川地震、2015年ネパールゴルカ地震による斜面崩壊を分析した結果、谷の侵食加速による谷中谷(こくちゅうこく)*に数多くの崩壊が集中したことが分かった。我が国でも特に西南日本外帯には谷中谷が広く分布しており、南海トラフ地震時に要注意である。2018年北海道胆振東部地震によって発生した壊滅的な地滑りでは、風化した軽石およびその直下の火山灰土に滑り面が生じたことが明らかになり、このような地層が地震時地滑りに対して最も危険であることが再認識された^[1912]。斜面崩壊に伴う地震動の特徴を分析し、概ね1-10Hzが卓越すること、イベントの長さを反映する継続時間は概ね30~200秒であること、特に崩壊域が数百m四方にわたるような大規模崩壊では周期10秒以上の長周期信号が見られること、が分かった^[2994]。

火山噴火による火山灰や溶岩噴出の事前評価に関して、大規模噴火を想定した降灰シミュレーションを実施した。富士山で宝永規模の噴火が起きた場合に都心で10cm以上の降灰になる確率は3.3%、桜島で大規模の噴火が起きた場合に鹿児島市街で1cm以上の降灰になる確率は7.8%と試算された^[7010]。

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

地震動の即時評価に関して、“揺れから揺れを予測する”PLUM法*の高度化、地震波の散乱や減衰構造の精緻化、地盤増幅特性の適正化に取り組み、予測精度を向上させることができた。また、地震動の伝播方向をリアルタイムで推定する方法を考察した^[7008]。PLUM法の改良として、震度の距離減衰、メッシュ状の震度予測点を2次震源とする波動伝播、P波による震度予測を導入し、迅速かつ精度の高い準リアルタイム震度分布の予測を可能にした。観測点における震度情報から周辺の非観測点での震度を予測するため、常時微動を用いた地盤震動特性の稠密に把握し地下構造モデルを構築した^[2001]。さらに、大地震の際に平野で発生する長周期地震動の即時予測の実現に向け、観測データとの同化に基づく地震動シミュレーションを試みた。2007年新潟県中越沖地震や東北地方太平洋沖地震の関東平野の地震動をターゲットに、3次元差分法計算により長周期(2.7秒以上)地震動を計算し、現時点で地震波伝播速度の8倍の速さでの予測が可能となっている(図10)。これにより、データ同化による長周期地震動の即時予測の可能性を示すことができた^[1516]。利用者が多い大規模建物や災害拠点となる施設を対象として、固有周期や立地条件が異なる個別の建物の、建物入力地震動のリアルタイム分類、揺れ継続時間の予測、に取り組んだ^[2958]。

津波の即時評価に関して、日本海溝・千島海溝に沿って設置された津波計(圧力計)の利活用方法の検討として、地震発生後500秒の圧力観測波形の形状のみを利用して海溝型巨大地震による津波発生域(隆起域)及び地震規模を推定する手法を開発した^[1005]。

破壊継続時間が通常の地震よりも長いスロー地震タイプの津波地震に対する気象庁マグニチュードの精度を評価するため、過去に観測された津波地震の震源スペクトルを模した理論波形を合成して気象庁マグニチュードを計算したところ、津波地震のマグニチュードは1以上過小に推定される可能性があることが分かった。この問題に対処するため、新たな規模推定法を開発した^[7009]。津波生成磁場の解析手法を改良し、鉛直

分力が非常に小さい磁気赤道付近でも、陸上の磁場観測により津波生成磁場を検出できる可能性を示した^[7007]。

GNSS 搬送波位相データから断層滑りを直接推定する手法を、2011年3月11日に茨城県沖で発生したMw7.8の地震に対して適用し、強震データから推定された滑り分布と調和的な結果が得られた。ここで、GNSS 衛星の軌道暦*として International GNSS Service が提供する精密暦...(最終暦)*と、GNSS 衛星から直接送信される放送暦*とを解析に用いたところ、両者の結果が良く一致したことから、外部情報に依拠しない地震時滑り分布推定が可能であることが示された^[1209]。GEONETによる日本全国のリアルタイム地殻変動データを用いて地震発生時に矩形断層モデル及びプレート境界面上の滑り分布を即時推定する技術を開発し、電子基準点リアルタイム解析システムに実装した^[6004]。

火山灰や溶岩噴出の即時予測に関しては、XバンドMPレーダーによる噴煙観測を霧島、桜島、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島(すわのせじま)において継続し、2018年において噴火が発生したいずれの火山においても噴煙を検出した。噴火に伴う地震動の振幅と地殻変動から推定される圧力源の体積変化量の線形結合から火山灰放出量を評価する手法を開発した。この手法で評価された火山灰放出率から即時的に火山灰の拡散および降下量を予測することが可能となった^[1913]。航空路火山灰情報(VAA)業務で収集分析された火山灰雲の情報を火山灰の移流拡散の予測計算に取り込むことにより、多くの事例で火山灰雲領域の過大予測が抑制され、予測精度が改善された^[7010]。

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

積雪寒冷地の地域特性を考慮した災害時の避難を検討し、高精度避難ナビゲーションシステムを構築・実装した。また、都市開発が地震・津波災害の災害リスクや社会的脆弱性を増大させる可能性を論じ、地理空間情報活用による津波からの避難行動対策の有効性を検討した。さらに、地域・自治体防災担当者対象に防災教育・地域貢献を実施する等により、効果的な研究成果の普及手法を検討した^[1006]。

2014年御嶽山噴火に伴い、火山災害情報のあり方に関する意識調査を、長野県側(木曾町・王滝村)住民と噴火時の登山者に実施した。事前の噴火リスクの認識においては地域差は見られないこと、及び噴火から3年が経過した時点においても噴火の経験者には未だに大きな心理的ストレスがあることが分かった。また、岐阜県、長野県で実施した調査結果と比較分析を実施した。^[1706]

2016~17年度に大きな地震があったイタリア、ニュージーランド、台湾と、サンアンドレアス断層の地震活動で影響を受ける可能性のあるサンフランシスコ湾岸地域の住民に社会調査を行った。リスク推定値の不確実性を専門家が明示的に認めることで、専門家は誠実で率直であるという確信が高まり、大きな信頼が得られることが分かった^[1517]。

地方公共団体が火山災害の発生の可能性について総合的に把握し、的確な防災対応を行うことを支援するシステムを目指し、火山情報などの防災情報に結び付くインターネットで入手可能な各種観測情報を様々な関係機関から準リアルタイムで収集・統合して表示するシステムを構築し、北海道内の地方公共団体に設置してその効果を検証した。胆振東部地震を契機に、地震・震度情報の取得・表示機能を組み込んだ。さらに、高解像度降雨レーダー画像の取得・表示機能も追加した。釧路市が、観光客や登山者などに火山防災情報をリアルタイムで提供することを目的として、このシステムを集客施設に設置した^[1009]。

4-4. 研究を推進するための体制の整備

推進体制の整備

本研究計画の適切かつ効果的な推進のため、地震火山部会において年次計画の立案、成果の取りまとめを

行い、年次報告（成果の概要）を作成し、印刷及びホームページで公開した。長期間噴火活動を休止している火口／山体における今後の調査研究及び監視のあり方について検討を行い、結果を公表した^[7013]。

拠点間連携共同研究

総括研究（拠点間連携研究〔課題番号：2975〕）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」と題し、平成29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及び(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、リスク評価及びその不確かさに関する検討を行った。

研究基盤の開発・整備

・地震・火山現象のデータベースとデータ流通

地震カタログ作成に当たって、自動震源採用に伴う発破イベント混入に対応するため、波形相関による発破抽出手法を開発し、カタログの質的改善を図った^[7019]。

電子基準点リアルタイム解析システムにおいて、精密単独測位法を導入し、試験運用を実施した^[6012]。S-netの観測データについては、海底地震津波観測網データダウンロードページより公開を開始し、JDXnetについても準備を進めた。DONET*の観測データについては、強震計及び広帯域地震計に加え、水晶水圧計のデータについても海底地震津波観測網データダウンロードページより公開を開始した。首都圏地震観測網*（MeS0-net）の運用を継続するとともに、ホームページによる観測データの公開を開始した^[3004]。海域火山基礎情報図調査を西之島等で実施し、海域火山データベースに反映させた^[8003]。

研究成果共有サーバにおいて、データ共有のためのオープンプラットフォームの ownCloud の利用を進めた。地震連続波形データの解析のための大規模解析システムにおいては、過去の地震波形データの保存をさらに進めた^[1519]。GNSS・地殻変動連続観測等の多項目観測データを全国にリアルタイム流通させるシステムを開発し、データの流通・収集・管理・解析を一元的に実施した^[1009]。コミュニティ・モデルの一つであるプレート境界形状モデルに関して、プレート境界位置の修正及びフィリピン海プレートの、太平洋プレートとの接合部の形状モデルの検討を行い、Web サイトで公開した（図 16）^[1506]。

・観測・解析技術の開発

海溝軸を跨ぐ形での海底間音響測距において、各基線の中程に中継器を用いる方式を導入し、音響パス確保の困難さを解決した^[1210]。

火山測地学的技術の高度化を進めた。小型絶対重力計に対する地面振動の影響を補正する技術を開発し、蔵王火山で動作確認を行った^[1506]。小型単発機に搭載可能なカメラ型センサデータの処理手法を開発し、温度・放出率等の推定を行った^[3005]。火山監視情報システムにおいて、傾斜データに対する降水補正機能を導入した^[7004]。

噴火等、火山の表面活動を把握するための手法開発も進められた。二酸化硫黄放出率を従来よりもはるかに簡単に測定できるようにすることを目的として開発した、シングルボードコンピュータ付きの小型紫外分光装置*を用い、口永良部島火山の噴火に先行するガス放出の変化をとらえた^[1403]。気候変動観測衛星「しきさい」による赤外画像データの処理システムを開発し、正式運用を開始した^[1520]。火山噴出物の分析において、新たに開発した帯磁率測定手法を用いることにより、霧島火山における噴火推移を反映している帯磁率変化をとらえた^[1205]。Lバンド航空機SAR*を用いた3次元地殻変動分布の推定手法を開発した^[1008]。ミュ

オグラフィ自動解析システムによる高画素画像出力の時間短縮化を進めた^[1523]。

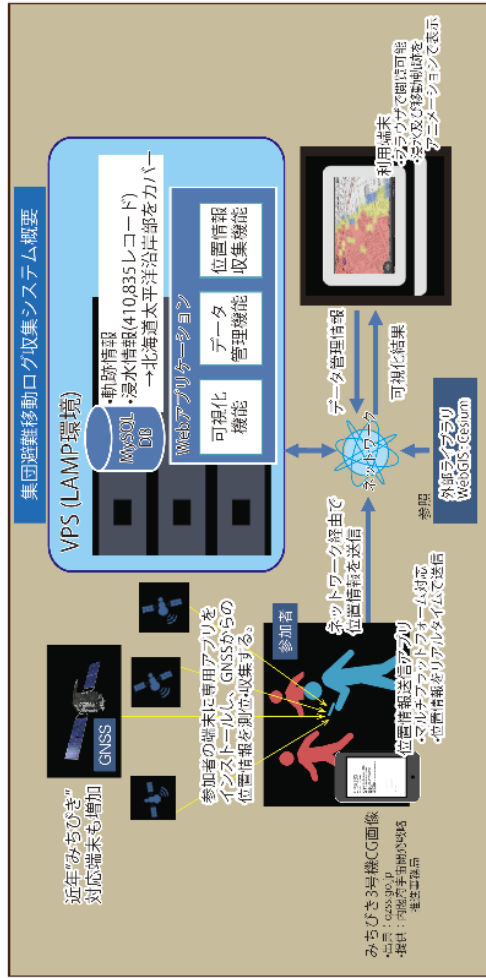
・ **社会との共通理解の醸成と災害教育**

津波浸水想定 の 時間 発展 と 避難 訓練 参加 者 の 行動 軌 跡 と を 合 わ せ て 可 視 化 す る 避 難 訓 練 支 援 シ ス テ ム を 開 発 し、 実 証 実 験 と フ ィ ー ド バ ッ ク 学 習 を 行 う こ と で シ ス テ ム 運 用 の 効 果 と 課 題 を 明 ら か に し た (図 18)^[1006]。 地 方 公 共 団 体 の 的 確 な 防 災 対 応 を 支 援 す る た め に 構 築 し た 準 リ ア ル タ イ ム 火 山 情 報 表 示 シ ス テ ム が、 十 勝 岳 を 有 す る 美 瑛 (び え い) 町 と 雌 阿 寒 岳 を 有 す る 釧 路 市 に よ り、 観 光 客 や 登 山 者 な ど 集 客 施 設 に 設 置 さ れ た^[1009]。

・ **国際共同研究・国際協力**

ニュージーランドのヒクランギ沈み込み帯において、日本、ニュージーランド、米国で共同して設置された海底地震計の観測記録の解析を進め、海洋性地殻内の応力と間隙水圧がスロースリップの発生前後に変化していることを明らかにした^[1524]。

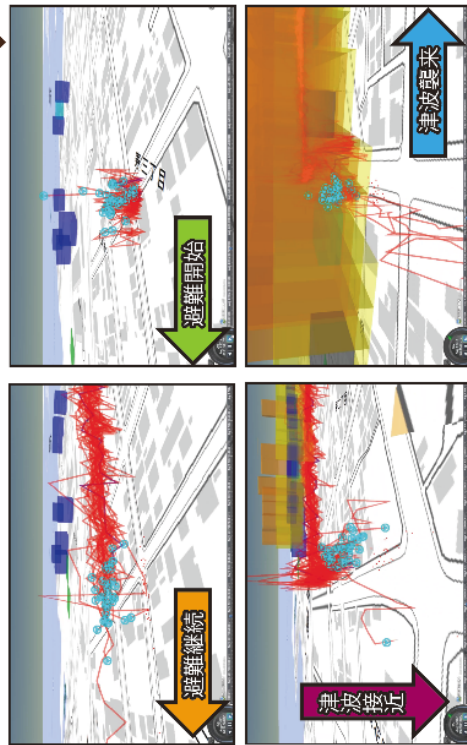
地理空間情報の総合的活用による災害に対する社会的脆弱性克服のための基礎研究



津波シミュレーションをシステムツールにインプット

集団避難移動ログをシステムツールに記録

地震・火山研究によるシナリオ



学習効果
行動変容



地震・火山研究成果を基盤情報とし、GPS情報の取得により集団避難移動過程を記録できるシステムツールを開発した。このツールにより避難行動をふりかえらせることで、学習効果と行動変容が期待できる。

実験後に津波防災教育及び、避難訓練結果フィードバック学習。学習前後でアンケート調査を実施。

図 18. 地理空間情報の総合的活用による災害に対する社会的脆弱性克服のための基礎研究

地震・火山研究成果を基盤情報とし、GPS 情報の取得により集団避難移動過程を記録できるシステムツールを開発した。このツールにより避難行動をふりかえらせることで、学習効果と行動変容が期待できる。併せて、積雪寒冷地の地域特性を考慮した災害時の避難や、都市開発が地震・津波災害の災害リスクや社会的脆弱性を増大させる可能性を検討するの役に立つ機能を開発・実装し、高精度な避難ナビゲーションシステムを完成させた。

4-5. 優先して観測研究を推進する対象の地震・火山噴火

・東北地方太平洋沖地震

日本海溝沿いのGNSS-音響測距結合方式* (GNSS-A) による海底地殻変動観測^[8001]、東北地方太平洋沖地震の震源域北部における海底地震観測^[1503]などにより、地殻変動や地震活動の様相が本震発生直後とは異なっていることが分かった。東北地方太平洋沖地震後の2012年に設置されたGNSS稠密観測網磐越測線の余効変動プロファイルを用いて、3次元不均質粘弾性構造モデルを推定した。また、地温勾配分布等に基づいて島弧走向方向の不均質性も考慮したモデルにより面積ひずみ分布を計算したところ、観測データを概ね再現することがわかった^[1203]。

・南海トラフの巨大地震

豊後水道周辺、四国南部、東海地域で発生している長期的及び短期的SSEを詳しく調べ、滑り速度や規模などについて比較研究を実施した^[1509]。また、GNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測により浅部のスロースリップに起因すると考えられる非定常地殻変動を観測した。

・首都直下地震

大地震の際に平野で発生する長周期地震動の即時予測の実現に向けた、高速計算環境による観測データと高速シミュレーション同化の実現可能性を数値実験により評価した^[1516]。臨時観測を実施し、揺れの大きさの分布と近傍のボーリングデータと比較をしたところ、揺れの大きさは、浅部の地質構造との関係が深いことが明らかになった。揺れの推定には、より稠密な地盤構造の違いを考慮する必要がある^[1514]。

・桜島火山噴火

桜島における火砕流の発生は、マグマからの脱ガスが進行した一連の活動期の後半に当たる地殻変動の収縮期に多いことが分かった。2015年8月15日の開口割れ目へのマグマ貫入に伴う火山性地震について、震源域の深部への延伸と開口割れ目に対応するメカニズム解が得られた。XバンドMPレーダーによる口永良部島などでの噴煙観測事例が増えつつある。大規模噴火を想定した際の要避難人口は、設定する状況や避難者の意向などに大きく依存することが明らかになった。

5. まとめ

平成26年度から5か年計画で推進されてきた「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」では、地震・火山噴火現象の理解とそれに基づいた発生予測に加え、それらによる災害誘引の予測の実現を目指し、過去も含めた地震・津波・火山噴火とそれに随伴する自然現象と社会対応に関する研究を行った。

この5か年間の日本列島における地震活動や地殻変動は、2011年東北地方太平洋沖地震による影響下にあったが、この分析からプレート境界だけではなく内陸で発生する地震についても、その発生場の特徴や発生機構に関する理解が大きく進展した。巨大地震が与えた応力状態の変化に対する応答として内陸での地震活動を捉えることにより、地殻内での応力不均質、地下流体の地震発生への関与や断層強度が非常に小さい場合があることが示された。その一方で、2011年以前から歪速度が大きかった内陸のひずみ集中帯では、巨大地震による擾乱の影響は小さい。いずれも内陸での地震発生機構の理解に向けて重要な知見である。地震観測による地殻内応力の推定技術が向上し、空間不均質とともに時間変化も捉えられるようになり、地下の状態評価に有望な手段となるだろう。

東北地方における粘弾性構造の解明とそれにもとづく海溝型巨大地震の発生サイクルのモデル化においても重要な成果が得られた。粘弾性を考慮することで、巨大地震発生前の継続的な沈降と発生後の隆起の時空間変化が合理的に説明された。こうしたモデル構築は海溝型地震発生 of 長期評価に重要である。2011年東北地方太平洋沖地震の震源域周辺の海域では地殻変動や地震活動に時間変化が現れはじめており、こうした活動推移を継続して捉えることにより、モデルの検証・改良が進むものと期待される。

南海トラフでは、海底地殻変動観測によりプレート境界浅部における滑り欠損分布が捉えられ、それを考慮したシミュレーションを通じて、今後発生しうる南海トラフ巨大地震の多様な姿が示された。プレート境界浅部でも、多様なスロー地震現象がしばしば起こっていることが明らかになりつつあり、こうした活動の詳細な理解は、南海トラフ巨大地震の発生に至る過程の解明に不可欠である。

大地震に先行する多様な現象と実際に発生した大地震と関連を統計的に評価した結果、前震活動を用いた評価は、格段に高い地震発生予測の確率利得を示すことが分かった。現時点では、大地震が発生する前に「前震活動」と識別することはできないが、前震活動の特徴抽出にむけた研究が進展しつつある。

火山現象については、「噴火事象系統樹の高度化」と「火山活動の分岐条件の解明」を共通の目標として取り組んだ。集約的な成果のひとつは、いくつかの個別火山について実施した、噴火堆積物の調査・分析に基づく事象系統樹の整備である。従来よりも高度化された点は、系統樹に「噴火未遂」事象を加え、地震や地殻変動等の観測データを参照することによってその確率を求める手順を導入したことである。これとは別に、観測や理論から得られる知見を事象分岐条件に取り入れ、噴火履歴が未詳の火山にも適用することを念頭に置いたプロトタイプ事象系統樹の作成にも取り組んだが、現状では研究手法別に文献調査を行った段階にとどまっている。今後は、確率を付与したプロトタイプ系統樹の作成に向けて、情報を整理していく必要がある。

山体崩壊等の低頻度大規模火山現象は、事象系統樹では初期段階の分岐事象のひとつとされることが多い。本計画では、実事例の少ないこうした現象の履歴を詳しく調べる研究にも取り組んだ。特に、カルデラ形成噴火については、直前の火山活動の有無や規模・様式について知ることが、予測という観点から重要である。本計画では、トレンチやボーリングによる地質調査で、先行噴火の痕跡を欠く事例があることや、噴火開始後の活動推移には多様性があることが明らかにされた。また、前計画で開発した分析手法を用いて過去の噴出物を系統的に調べたことで、いくつかの大規模噴火イベントについては、マグマ溜まりの含水量や温度圧力の変遷を明らかにできた。こうした成果は、大規模噴火に先行する現象を想定する上で重要であり、モニタリング観測にも指針を与える。

火山現象のモデル化に関しては、噴出物分析とフィールド観測の両面で進展があった。噴出物中の微細な結

晶を最先端の撮像技術で解析することにより、火道浅部で起きるマグマの結晶化と噴火様式との関係が明らかになってきた。物理観測との連携による現象理解とモデル化に今後の展望を開く成果といえる。一方で、熱水系卓越型の火山では、微小地震の群発、地殻変動、消帯磁等の現象が、数ヶ月から数年程度の時間スケールで非噴火期に間欠的に起こっている事例が多いことも見出された。今後、様々な時間スケールで火山現象のモデル化をさらに進めて予測を目指すべきであるが、その際に欠かせないのが多項目の情報である。その観点から、本計画で InSAR 解析手法の高度化、二酸化硫黄放出率の自動測定装置の実用化等の技術開発が進化したことの意義は大きい。また、平成 28 年度から文部科学省の次世代火山プロジェクトが始まったが、その中で取り組まれている新たな観測手法の開発や地下構造探査との連携も、相互に大きな効果をもたらした。

2011 年に東北地方太平洋沖地震が発生したことを受け、本研究計画では、低頻度大規模の巨大地震や大規模噴火についても、長期予測の精度を向上させるための研究に取り組むこととなった。それには、史料、考古データ、地質データ等の活用が不可欠である。そこで、歴史学、考古学分野の研究者にも本計画への参画を呼びかけ、データの収集、データベース化、分析を進めた。歴史地震研究の基盤である各種地震史料のデジタルデータ化と校訂作業を進め、新たに地震関連史料データベースを構築した。また、全国各地の遺跡発掘調査報告書から、考古遺跡に残された災害痕跡の記事を抽出・分析し、災害痕跡データベースの作成に取り組んだ。一方、既刊地震史料を簡易データベース化することで効率的に校訂作業を行えるスキームの開発や、市民参加型翻刻プラットフォームの構築など、データベース化の作業を加速させる取組も平行して行った。津波堆積物の調査も着実に進められ、浸水範囲の推定や広域比較による発生年代の検討が進んだ。これらの新たな取組は、膨大な作業を伴うため、5 年計画の実施期間で完了するものではなく、全体の枠組みを構築してその一部が整備された段階に過ぎないが、これらが重要な研究基盤となりつつあることは間違いない。今後、蓄積されたデータに基づいて、過去の被害分布と近年の観測の比較による個々のイベントの再評価、イベント発生履歴の再整理、さらには将来予測の精度向上に向けて、より具体的な成果が期待される。

地震や火山噴火の発生予測の研究は着実に進展しているが、短期間に予測の精度や信頼性を大きく向上させるのは簡単ではない。現在持っている科学的知見を最大限に利用して、地震動、津波、降灰等の災害誘因の予測研究を強化することで、少しでも地震・火山災害の軽減に貢献することが必要である。そこで、工学、災害科学、人文社会科学の研究者にも本計画への参画を呼びかけ、災害軽減に役立てるための研究を推進する体制を構築した。

災害誘因の予測では、海陸に整備された稠密な観測網と高速数値計算の組み合わせによる即時予測の分野で重要な成果が挙げられた。長周期を含む強震動の予測では、データ同化計算の高度化と高速化により、地震動が伝わるよりも早く、現実に近い強震動予測波形が得られるレベルに到達し、津波においてもデータ同化にもとづく浸水計算手法が開発された。事前予測では、震源から強震動や津波浸水を被る構造物への影響に至るまでの各要素に関する専門家がチームとなって、地震がどのような被害につながるのかを科学的に評価する取組が始まった。これにより、予測の各要素の不確かさを反映した不確実性をリスク評価に付加できると期待される。リスク推定の不確実性を明示することが専門家の評価に対する信頼を高めるとの研究報告があり、こうした取組は重要である。また、事前予測の結果を地理空間情報として可視化し、避難訓練に活用することが適切な避難行動を促す上で有効であることが分かり、理学的予測を災害軽減につなげるための方向性を例示する重要な成果である。

本計画期間中にも、災害をもたらす地震・火山噴火がいくつも発生した。2014 年には長野県北部の地震 (M6.7)、2016 年に熊本地震 (M7.3)、2018 年に大阪府北部の地震 (M6.1) と北海道胆振東部地震 (M6.7) が発生し、いずれも震源を中心とした地域に人的物的な被害をもたらした。直後の調査観測により、各地震の震源となった断層の性状の詳細が明らかになった一方で、地震現象の多様性とその予測の難しさも示された。長野県北部の地震は既知の活断層の一部のみを破壊したものの、熊本地震と大阪府北部の地震は複数の活断層の複合破壊であ

った。こうした実際の地震が示す破壊様式の複雑さを事前に評価することは極めて難しい。長野県北部の地震と熊本地震は本震の発生に先行して顕著な地震活動があり、大地震の前駆的地震活動の重要な事例となった。地震による被害では、強震動による被害のほかに、大規模な斜面崩壊によるものが熊本地震と北海道胆振東部地震で顕著であった。これらの地震による斜面崩壊では降下火砕物層が滑り面となっている点が共通であり、地盤災害予測の観点で注目される。大阪府北部の地震は震源が大都市域にあったため規模の割に広域に被害が発生した。北海道胆振東部地震では、地震後に発生した広範囲での電力のブラックアウトや、軟弱地盤による地盤の液状化が震源から離れたところでも起こるなど、単純に地震の規模や震源の場所だけから、地震災害の規模を予測することが難しいという問題点が浮き彫りになった。

2014年に御嶽山で発生した水蒸気噴火は、多数の登山者に人的被害を与える火山災害となった。これ以外にも、一般に先行現象に乏しく予知の難易度が高いとされる水蒸気噴火が、口永良部島(2014年)、箱根山(2015年)、草津本白根山(2018年)、霧島硫黄山(2018年)などで相次いだ。火口近傍の観測データに共通の特徴がいくつかの事例で確認されたことから、将来には、噴火直前の警報で登山者・観光客に緊急退避を促せるようになる可能性が示されたが、理学だけでは解決できない問題も多く残されている。水蒸気噴火については、噴火直前だけでなくやや長い時間スケールも含めた火山活動の比較研究をさらに進めることが、現象理解・予測のいずれにも重要である。このため、引き続き着実にデータを蓄積していく努力が不可欠である。一方、口永良部島の2015年再噴火、阿蘇山の2014年以降の一連の噴火、2017年～2018年の霧島新燃岳再噴火、2013年以後継続中の西之島噴火など、マグマの関与が明瞭な噴火も多発した。これらの噴火では、無人機等も活用した多項目観測による状況把握と現象・災害の予測が行われた。加えて、総合研究課題として取り組んだ桜島については、一部住民の避難を伴った2015年のマグマ貫入イベントも含め、豊富な噴火・観測事例を活かして、マグマの貫入速度と噴火様式・規模の対応を整理し、さらには避難対応までを分類した。

用語解説

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を応力という。震源域の応力が岩盤の破壊強度より高くなったときに地震が発生すると考えられている。

応力載荷

地震の発生などにより応力場が変化したときに、近傍の構造にそれに伴う応力を作用させること。

応力擾乱

地震の発生や潮汐などによって、応力場に乱れが生じること。

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）

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。

海底間音響測距

海底に設置された複数の音響トランスポンダー（観測点）で、それぞれの観測点間の距離を音波を用いて測定する方法。一定期間、繰り返し測定することによって観測点間の距離の変化が分かり、海底の水平方向の地殻変動を把握することができる。

ガウジ

断層運動に伴う破碎によって生じた細粒・未固結の物質からなる層。

確率利得

無作為に発生していると仮定した場合に予測が的中する確率に対する、実際の予測の的中率。

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。

ガル

CGS 単位系における加速度の単位。1 ガル = 1 cm/s^2 。

間隙水圧

土や岩石中の粒子間のすきま（間隙）に入り込んだ水などの流体にかかる圧力。

干渉 SAR

→「SAR」参照。

岩盤滑り

岩盤を移動層とする地滑り。

既往スケーリング則

ある物理量の大きさを与えれば、そのほかの物理量の大きさも決めることができるスケーリング関係について、過去の事例を参照して決められたもの。

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。

軌道暦

GNSS 衛星の任意の時間の位置を計算するためのデータ。

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。

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。

距離減衰式

地震の揺れの強さと断層面からの距離との関係を式に表したもの。過去に発生した数多くの地震の観測データを統計的に処理して作成された経験的な式である。地震動予測式とも呼ばれる。

経験的グリーン関数法

大きな地震の揺れに関して、同一の断層面で発生した小さい地震では伝播経路、観測点近傍の地盤構造も同じと仮定し、その小地震の実地震観測記録をグリーン関数（ある点に力を加えたときの別の点での応答）として大地震時の地盤の揺れを合成する手法。

広域応力場

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い、その広域的な特徴のこと。

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 SAR

航空機に搭載した SAR システムを使用した調査・解析。→「SAR」参照。

鉱物温度圧力計

岩石中の鉱物の結晶構造や化学組成から、その岩石が地下で置かれていた温度・圧力状態を推定する研究手法の通称。温度圧力の推定に利用できる鉱物そのものをこのように呼ぶこともある。具体的には岩石試料の室内分析であり、野外に持ち出して測定するための「鉱物温度圧力計」という特定の装置があるわけではない。

谷中谷（こくちゅうこく）

一つの大きな谷の中にさらに小さい谷が入り込んでいるもの。

コミュニティ・モデル

地震や火山噴火を含む多様な地殻活動を定量的に理解することを目的として、これまで蓄積された日本列島の沈み込み構造に関する知見を統一的に集約し、統合的に構築した共通モデル。

固有周期

構造物が振動しやすい周期のこと。固有周期で構造物を揺らすと「共振」という現象が起きて、他の周期で揺らした場合に比べて大きく揺れるという特徴がある。

災害素因

災害誘因を受けた際に生じる被害・損失の規模、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。

最近傍法

巡回セールスマン問題（全ての都市をちょうど一度ずつ巡り出発地に戻る巡回路のうちで総移動コストが最小のものを求める）を解くのに使われる組合せ最適化アルゴリズムの1つ。

三成分合計

地震計では上下動1成分、水平動2成分の合計3成分を観測している。加速度地震計の3成分で観測された記録を合わせた振幅。

紫外分光装置

対象物からの紫外領域の光の強度を波長の関数として解析し、対象物の物性を調べる装置。

事象系統樹

火山活動に伴う事象（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。

地震火山部会

文部科学大臣の諮問に応じて、科学技術の総合的振興に関する重要事項及び学術の振興に関する重要事項を調査審議し、または文部科学大臣に意見を述べる科学技術・学術審議会のうち、測地学及び政府機関における測地事業計画に関する事項を扱う測地学分科会のもとで、地震・火山に関する事項を扱う部会。

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。

地震発生長期評価手法

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。

社会素因

生命、財産、社会・経済活動、環境など、社会・組織にとって価値があり、防災力によって災害誘因から守られるべきもの。

社会誘因

災害誘因のうち、地震・火山などの自然現象以外のもの。例えば、火災、テロ、感染症の蔓延、停電、断水等。

首都圏地震観測網

首都圏地震観測網(Metropolitan Seismic Observation network)、通称 MeS0-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。

準プリニー式噴火やブルカノ式噴火

火山の噴火様式。マグマ噴火のうち大量の軽石・火山灰を噴き上げる大規模な噴煙柱を伴う噴火をプリニー式噴火と呼ぶ。噴煙柱は成層圏に達することもあり、広範囲に降下物による被害をもたらす。プリニー式噴火よりもやや規模の小さい準プリニー式噴火では、数時間程度継続する噴煙柱を伴う。継続時間の短い爆発的噴火をブルカノ式噴火と呼び、火山弾など弾道性の噴出物を放出する

ことが多い。

震源インバージョン解析

地震観測データから、震源の位置や断層面上の滑りを推定する解析手法。

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が、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度や方向の時空間変化を運動学的に表したものを指し、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学的に記述する「動的破壊過程」とは区別されることが多い。観測された地震波や地殻変動等のデータを説明できるような震源過程のモデルを震源断層モデルという。

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。

精密単独測位法

搬送波位相を使用することで、基準観測点を必要とせず、単独観測点のみで測位を行う高精度な測位法。

精密暦（最終暦）

GNSS衛星の位置情報について、後処理の精密な解析によって求められたもの。

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。

節面

震源を中心とする仮想的な球面上で、断層運動によって生じる押す力と引く力の領域を分ける直交する二平面。このうちのひとつが断層面に対応する。

相転移

物質が、温度や圧力などの外的条件の変化に伴ってその様相が変化すること。温度・圧力の変化により岩石の結晶構造・密度が変化するのも相転移の一種である。

卓越振動数

地震動は様々な振動数（単位時間当たりの振動回数）の波動の重ね合わせで表せるが、そのうち卓

越したエネルギーを持つ振動数。

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。

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。

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。

ディストロメータ

気象観測における降水の粒径、落下速度をレーザー光により測定するセンサー。これを火山灰の粒径と落下速度の観測に利用することによって、降灰のリアルタイム把握に適用した。

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こと。

熱消磁

磁鉄鉱などの磁性鉱物を含む岩石の磁化（磁性の強さ）が低下、または失われることを消磁といい、特に高温化による消磁のことを熱消磁という。マグマが地表へ近づくなどの原因により火山体内の温度が上昇することで、熱消磁が起こることがある。消磁領域の周辺では磁場（磁界）が変化する。

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。

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な

ため、精密測位に使用される。

ひずみ集中帯

測地観測や地形から推定された地殻ひずみが大きい領域。

ひずみ速度

単位時間当たりのひずみの変化率。

表面波

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

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、隣り合う 2つのプレートの境界がプレート境界である。プレート境界においてはしばしば大きな地震が発生する。

放送暦

測位信号中の航法メッセージに含まれる GNSS 衛星の軌道情報。

マグマ溜まり

火山の地下でマグマが蓄積している場所。その位置や形状、マグマの蓄積状態については未だに不明な点が多い。

摩擦構成則

岩石の破壊強度や断層面上の摩擦強度を滑り量や滑り速度などの関数として記述したもの。

摩擦パラメータ

摩擦構成則で用いられる媒介変数で、これらが摩擦強度の速度依存性などの摩擦の特性を表す。

メカニズム解

地震時の断層運動を断層面の向き（走向、傾斜角）と相対滑りの向き（滑り角）によって表現したもののことをいう。地震波の放射パターンなどから求められ、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。メカニズム解のタイプは、正断層型、逆断層型、横ずれ断層型に大別される。

モホ面

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

余効滑り

地震の後に震源域周辺の断層面で起こる滑り。

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、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。

ライダー観測

レーザー光を対象物に照射して戻ってきた光を分析することで、対象物までの距離や対象物の性質を調べるための装置（ライダー：Light Detection And Ranging）を用いた観測。

BPT 分布

Brownian Passage Time 分布。主要活断層や海溝型で発生する地震は繰り返し発生し、その発生間隔は BPT 分布に従うと考えられている。

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、熊野灘沖東南海震源域に設置された地震・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の南海地震震源域にも整備された（DONET 2）。

G 空間情報

地理空間情報に同じ。

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-音響測距結合方式

海底における地殻変動を観測するための手法のひとつ。海上の船舶やブイの位置を GNSS によって精度良く決定し、それらと海底に設置された基準点（観測点）との距離を、海中音波を用いて測定することにより、海底の基準点の位置を推定する。長期にわたり繰り返し測定して、海底の変動を求

める。

InSAR

干渉 SAR→「SAR」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。

Lバンド航空機 SAR

航空機に搭載された SAR システムのうち、Lバンドの電波帯を用いるものを指す。Lバンドはマイクロ波の周波数帯域の名称のひとつで、0.5 から 1.5 ギガヘルツの帯域。この帯域の電波は木の枝や葉による反射を受けにくいので、植生のある地域での地殻変動観測に適している。また、人工衛星 SAR と異なり、航空機 SAR では飛行経路を自由に設定できるため、様々な方向から対象を観測することにより 3 次的に地殻変動を捉えることが可能である。

Matched Filter 法

既知の地震の波形と類似の波形を連続波形データからパターン検索することで、未検出の地震を検出する方法。小さな地震を検出するのに有効である

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。

PUFF モデル

航空航路への警報を目的として 1998 年にアラスカ大学で開発された火山灰の軌跡計算モデル。複雑な 3 次元の風の動きを考慮することができる。

SAR

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

Xバンド MP レーダー

従来よりも短波長の X バンド (波長約 3 cm) を用いた高分解能なレーダー。さらに水平偏波と垂直偏波の 2 種類の電波を同時に送信・受信するマルチパラメータ (MP) 方式によって精度の良い観測が実現される。

Xバンドレーダ

従来よりも短波長の X バンド（波長約 3 cm）を用いた高分解能なレーダー。

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 秋田大学大学院国際資源学研究科 東京大学大学院理学系研究科 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 東京工業大学火山流体研究センター 新潟大学災害・復興科学研究所 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） 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 立命館大学総合科学技術研究機構 東海大学海洋研究所 | |
| | 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 | | |
| 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 平成30年度研究課題一覧

| 実施機関名 | 番号 | 研究課題名 | 研究代表者 |
|------------|------|--|----------------|
| 情報通信研究機構 | 0101 | 先端リモートセンシング技術による地震及び火山の災害把握技術の開発 | 中川勝広 |
| 北海道大学 | 1001 | 地質および物質科学的データに基づく低頻度大規模火山現象およびその準備過程の研究 | 中川光弘 |
| | 1002 | 北海道沖低頻度大規模地震の総合的理解とそのモニタリングへの基礎的研究 | 谷岡勇市郎 |
| | 1003 | 多項目観測に基づく火山熱水系の構造の時空間変化の把握と異常現象の検知 | 橋本武志 |
| | 1004 | 噴火履歴及び観測事例に基づく噴火事象系統樹の試作 | 中川光弘 |
| | 1005 | 津波浸水域の即時予測手法開発のための研究 | 谷岡勇市郎 |
| | 1006 | 地理空間情報の総合的活用による災害に対する社会的脆弱性克服のための基礎研究 | 谷岡勇市郎 |
| | 1007 | 地殻変動等多項目観測データ全国リアルタイム流通一元化解析システムの開発 | 高橋浩晃・大園真子・山口照寛 |
| | 1008 | Lバンド航空機 SAR による革新的火山観測手法の開発 | 村上亮 |
| | 1009 | 準リアルタイム火山情報表示システムの開発 | 大島弘光 |
| 弘前大学 | 1101 | 地殻流体と地震活動の関係及び過去地震の災害誘因の解明 | 小菅正裕 |
| 東北大学 | 1201 | スラブ内地震の発生メカニズムの解明 | 東龍介 |
| | 1202 | 蔵王山周辺の総合観測 | 三浦哲 |
| | 1203 | 地殻応答による断層への応力载荷過程の解明と予測 | 松澤暢 |
| | 1204 | 地震断層すべり物理モデルの構築 | 松澤暢 |
| | 1205 | 岩石組織に基づく火道浅部プロセスの推定手法の開発 | 中村美千彦 |
| | 1206 | 地震活動の時空間パターンと断層および地震サイクルとの関係 | 遠田晋次 |
| | 1207 | 地震に先行する大気中ラドン濃度変動に関する観測 | 長濱裕幸 |
| | 1208 | 観測事例及び理論予測に基づく噴火事象系統樹の分岐条件の検討 | 西村太志 |
| | 1209 | トランジェント現象リアルタイムモニタリングのための複合測地データ利用の高度化 | 太田雄策 |
| | 1210 | 海溝軸近傍で観測可能な海底地殻変動観測技術の開発 | 木戸元之 |
| 東京大学理学系研究科 | 1401 | 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 | 角森史昭 |
| | 1402 | 地震発生場の階層性を考慮した地震活動予測 | 井出哲 |
| | 1403 | 噴火推移モニタリングのための火山ガス観測装置の開発 | 森俊哉 |
| 東京大学地震研究所 | 1501 | 地震・火山災害の関連史資料に基づく低頻度大規模災害の調査 | 佐竹健治 |
| | 1502 | 揮発性成分定量による活火山爆発力ポテンシャル評価とマグマ溜まり深度の再決定 | 安田敦 |
| | 1503 | 日本海溝・相模トラフプレート境界で起こる多様なすべり現象の包括的モデル構築 | 篠原雅尚 |
| | 1504 | 内陸地震発生の理解と予測に向けて | 飯高隆 |
| | 1505 | 日本列島基本構造モデルの構築 | 岩崎貴哉・佐藤比呂志 |
| | 1506 | 小型絶対重力計を用いた火山監視技術の開発 | 新谷昌人 |
| | 1507 | 次世代プレート境界地震発生モデル構築のための実験的・理論的研究 | 中谷正生 |
| | 1508 | 地球物理・地球化学統合多項目観測および比較研究によるマグマ噴火を主体とする火山の定量化とモデル化 | 大湊隆雄 |
| | 1509 | プレート境界すべり現象モニタリングに基づくプレート間カップリングの解明 | 小原一成 |
| | 1510 | 相似地震再来特性の理解に基づく地殻活動モニタリング手法の構築 | 五十嵐俊博 |
| | 1511 | 地震活動に基づく地震発生予測検証実験 | 鶴岡弘 |

| | | | |
|-----------|------|--|-------|
| | 1512 | 地震活動パラメーターと地震発生場の応力の間に成り立つ定量的関係式 | 波多野恭弘 |
| | 1513 | 歴史時代に発生した地震・火山などの災害に関する多角的な研究 | 佐竹健治 |
| | 1514 | 首都圏に被害を及ぼす地震の解明およびその被害の実像 | 酒井慎一 |
| | 1515 | 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 |
| | 1516 | 広帯域・高解像度強震動シミュレーションに基づく大地震の強震動評価の高度化 | 古村孝志 |
| | 1517 | 地震動・津波誘因の長期予測情報コミュニケーション | 瀬藤一起 |
| | 1518 | データ流通網の高度化 | 鶴岡弘 |
| | 1519 | 研究成果共有システムの構築 | 鶴岡弘 |
| | 1520 | 衛星赤外画像による噴火推移の観測と類型化に関する研究 | 金子隆之 |
| | 1521 | 海底での地震・地殻変動観測に向けた観測技術の高度化 | 塩原肇 |
| | 1522 | 光技術を利用した大深度ボアホール用地震地殻変動観測装置の開発 | 新谷昌人 |
| | 1523 | 素粒子ミュオンを用いた火山透視技術の可用化プロジェクト | 田中宏幸 |
| | 1524 | 日・米・NZ 国際協力によるスロースリップでのプレート境界面断層滑りメカニズムの解明 | 望月公廣 |
| 東京工業大学 | 1601 | 水蒸気爆発場の物理・化学状態の把握と火山流体の挙動 | 小川康雄 |
| | 1602 | 海底火山活動の評価手法開発に関する研究 | 野上健治 |
| 名古屋大学 | 1701 | 古文書解読による南海トラフ巨大歴史地震像の解明 | 山中佳子 |
| | 1702 | 地表面地震断層および活断層の地表形状・変位量データにもとづく直下型大地震の規模・頻度予測手法の高度化—LiDAR 等の高解像度 DEM を用いた検討 | 鈴木康弘 |
| | 1703 | 南海トラフ域における巨大地震断層域の力学・変形特性の把握 | 山岡耕春 |
| | 1704 | 地震・津波被害に対する地域社会の脆弱性測定に基づくボトムアップ型コミュニティ防災・減災に関する文理融合的研究 | 室井研二 |
| | 1705 | 精密制御震源システムの標準化と、ボアホール・海域への設置に関する研究 | 山岡耕春 |
| | 1706 | 火山災害情報およびその伝達方法のあり方 | 山中佳子 |
| 京都大学理学研究科 | 1801 | 地震サイクルシミュレーションの高度化 | 宮崎真一 |
| | 1802 | 水蒸気噴火後の火山活動推移予測のための総合的研究—御嶽・口永良部・阿蘇— | 大倉敬宏 |
| | 1803 | 実観測データに基づく断層面の摩擦パラメータと地殻活動の状態推定のためのデータ同化手法の構築 | 宮崎真一 |
| 京都大学防災研究所 | 1901 | 史料の収集・翻刻・解析による過去の大地震および自然災害の調査 | 西上欽也 |
| | 1902 | 近代観測以降の大噴火時の観測データの整理と低頻度大規模噴火予知に寄与する情報の抽出 | 中道治久 |
| | 1903 | プレート境界巨大地震の広帯域震源過程に関する研究 | 岩田知孝 |
| | 1904 | 南海トラフ巨大地震の予測高度化を目指したフィリピン海スラブ周辺域の構造研究 | 澁谷拓郎 |
| | 1905 | 日本列島変動の基本場解明:地殻とマントルにおける物性、温度、応力、流動—変形 | 飯尾能久 |
| | 1906 | 注水実験による内陸地震の震源断層の詳細な構造と回復過程の研究 | 西上欽也 |
| | 1907 | 横ずれ型の内陸地震発生物理モデルの構築 | 飯尾能久 |
| | 1908 | 桜島火山におけるマグマ活動発展過程の研究 | 井口正人 |
| | 1909 | 焼岳火山の噴火準備過程の研究 | 大見士朗 |
| | 1910 | 短スパン伸縮計等を活用した西南日本における短期的 SSE の観測解析手法の高度化 | 西村卓也 |
| | 1911 | プレート境界巨大地震等の広帯域強震動予測に関する研究 | 関口春子 |
| | 1912 | 強震動によって発生する地すべり現象の発生ポテンシャル評価と事前予測手法の高度化 | 千木良雅弘 |
| | 1913 | 桜島火山におけるマグマ活動発展過程の研究—火山灰拡散即時予測 | 井口正人 |
| | 1914 | 桜島火山におけるマグマ活動発展過程の研究—地域との連携 | 井口正人 |
| | 1915 | 歴史記録の電子化 | 飯尾能久 |

| | | | |
|---------------------|------|---|-------|
| 鳥取大学 | 2001 | 自治体震度計を用いた地震速報の高度化 | 香川敬生 |
| 高知大学 | 2101 | 四国前弧域から中央構造線北方にかけての観測高度化による地震発生場の研究 | 大久保慎人 |
| 九州大学 | 2201 | 地震・火山相互作用下の内陸地震・火山噴火発生場解明およびモデル化の研究 | 松本聡 |
| 鹿児島大学 | 2301 | 海域と島嶼域における地震・地殻変動観測による南西諸島北部のプレート境界域テクトニクスの観測研究 | 八木原寛 |
| 立命館大学 | 2401 | 南アフリカ金鉱山の地震発生場における応力・強度・ひずみ変化の現位置計測 | 小笠原宏 |
| | 2402 | 大規模地震・破壊に先行する極微小な前震活動の発生様式の特徴の解明 | 川方裕則 |
| 東海大学 | 2501 | 電磁気的地震先行現象の観測と統計評価による他種の先行現象との比較 | 長尾年恭 |
| 東京大学史料編纂所 | 2601 | 文献史料による歴史地震に関する情報の収集とデータベースの構築・公開 | 佐藤孝之 |
| 新潟大学 | 2701 | 日本海沿岸地域を中心とした地震・火山噴火災害関連史料の収集と分析 | 矢田俊文 |
| | 2702 | 過去の災害事例に基づく減災科学に係る研究 | 田村圭子 |
| 東京大学 大気海洋 研究所 | 2801 | 津波地震を励起する浅部プレート境界断層の実態解明と物性変動モニタリング | 朴進午 |
| | 2802 | 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 |
| 防災科学 技術研究 所 | 3001 | 巨大地震による潜在的ハザードの把握に関する研究 | 山下太 |
| | 3002 | 基盤地震観測等データのモニタリングによる地殻活動の理解と予測技術の開発 | 松澤孝紀 |
| | 3003 | 噴火予測システムの開発に関する研究 | 藤田英輔 |
| | 3004 | 基盤的地震・火山観測網の整備・維持及び超大容量の地震・火山観測データの効率的流通システムの構築 | 松原誠 |
| | 3005 | 火山活動把握のためのリモートセンシング観測・解析技術に関する研究 | 小澤拓 |
| 海洋研究 開発機構 | 4001 | 先端的掘削技術を活用した総合海洋掘削科学の推進 | 山田泰広 |
| | 4002 | 海域地震発生帯研究開発 | 小平秀一 |
| 産業技術 総合研究 所 | 5001 | 津波浸水履歴情報の整備 | 宍倉正展 |
| | 5002 | 活断層データベースの整備 | 吾妻崇 |
| | 5003 | 地質調査に基づく火山活動履歴調査とデータベース整備 | 石塚吉浩 |
| | 5004 | 海溝型巨大地震の履歴とメカニズム解明 | 宍倉正展 |
| | 5005 | 地震時変位量に基づく連動型古地震像復元手法の研究 | 近藤久雄 |
| | 5006 | 火山性流体と噴出物の解析に基づく噴火推移過程のモデル化 | 篠原宏志 |
| | 5007 | 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 |
| | 5008 | 高分解能地殻応力場の解明と造構造場の研究 | 今西和俊 |
| | 5009 | 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 | 6001 | 内陸の地殻活動の発生・準備過程の解明 | 矢来博司 |
| | 6002 | 火山地域のマグマ供給系のモデリング | 矢来博司 |
| | 6003 | 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 |
| | 6004 | GNSSを用いた震源メカニズム即時推定技術の開発 | 矢来博司 |
| | 6005 | GNSS連続観測(GEONET) | 矢来博司 |
| | 6006 | 地形地殻変動観測 | 矢来博司 |
| | 6007 | 物理測地観測 | 矢来博司 |
| | 6008 | 宇宙測地技術による地殻変動監視 | 矢来博司 |
| | 6009 | 火山基本図・火山土地条件図整備 | 矢来博司 |
| | 6010 | 都市圏活断層図整備 | 矢来博司 |
| | 6011 | 地殻活動データベース整備・更新 | 矢来博司 |
| | 6012 | GNSS観測・解析技術の高度化 | 矢来博司 |
| | 6013 | SAR観測・解析技術の高度化 | 矢来博司 |

| | | | |
|-------------|------|---|-------|
| 気象庁 | 7001 | 火山現象に関する基礎データの蓄積と活用 | 井上和久 |
| | 7002 | 自己浮上式海底地震計観測による宮城県沖の地震活動 | 尾崎友亮 |
| | 7003 | 地殻変動観測による火山活動評価・予測の高度化に関する研究 | 小久保一哉 |
| | 7004 | 火山活動に伴う地殻変動の把握及び評価 | 木村一洋 |
| | 7005 | 地球電磁気学的手法による火山活動監視の高度化 | 山崎明 |
| | 7006 | 地震活動・地殻変動監視の高度化に関する研究 | 小林昭夫 |
| | 7007 | 陸上電磁場観測における津波生成磁場の検知 | 山崎明 |
| | 7008 | 緊急地震速報の予測手法の高度化に関する研究 | 干場充之 |
| | 7009 | 海溝沿い巨大地震の地震像の即時的把握に関する研究 | 勝間田明男 |
| | 7010 | 大規模噴火時の火山現象の即時把握及び予測技術の高度化に関する研究 | 徳本哲男 |
| | 7011 | 津波の予測手法の高度化に関する研究 | 山本剛靖 |
| | 7012 | 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 |
| | 7013 | 火山活動の総合判断 | 宮村淳一 |
| | 7014 | 地震観測, 地殻変動観測 | 尾崎友亮 |
| | 7015 | 潮位観測 | 市川真人 |
| | 7016 | 地磁気精密観測 | 山際龍太郎 |
| | 7017 | 全国における火山観測の強化 | 宮村淳一 |
| | 7018 | 地殻活動・火山活動のための地磁気基準観測, 全磁力精密観測のデータベース化 | 飯野英樹 |
| | 7019 | 全国地震カタログの作成 | 上野寛 |
| | 7020 | 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 | 8001 | 海底地殻変動観測 | 石川直史 |
| | 8002 | 海洋測地の推進 | 山田裕一 |
| | 8003 | 海域火山観測 | 新村拓郎 |
| | 8004 | 地殻変動監視観測 | 山田裕一 |
| | 8005 | 駿潮 | 林王弘道 |
| | 8006 | 海域における地形・活断層調査 | 福山一郎 |
| 奈良文化財研究所 | 9001 | 考古資料および文献資料から見た過去の地震・火山災害に関する情報の収集とデータベースの構築・公開 | 小池伸彦 |
| 北海道立総合研究機構 | 9101 | 日本海沿岸域における過去最大級津波の復元 | 川上源太郎 |
| | 9102 | 地球科学的総合調査による火山のモニタリングと熱水系のモデル化 | 高橋良 |
| 山梨県富士山科学研究所 | 9201 | 富士山における地下水観測 | 内山高 |
| | 9202 | 富士山の噴火事象系統樹の高精度化のための基礎研究 | 吉本充宏 |
| 公募研究 | 2901 | 宏観異常現象の検証- 漁獲量と地震との関係を中心に- | 織原義明 |
| | 2902 | 多種の地震活動度解析による大地震先行的地震活動変動の検知 | 上田誠也 |
| | 2903 | 「地震学及地理学研究材料報告」に基づく歴史津波の痕跡調査 | 蝦名裕一 |
| | 2904 | 白山火山の最近 5000 年間の噴火履歴解明 | 川崎一雄 |
| | 2905 | 北海道中央部, 大雪火山, 御鉢平カルデラ噴火を対象とした噴火推移とマグマ供給系の変遷の解明 | 佐藤鋭一 |
| | 2906 | 後屈斜路カルデラ期の摩周火山及び中島火山の噴火履歴とマグマ供給系 | 和田恵治 |
| | 2907 | 北海道摩周における火山活動の化学的調査 | 鹿児島涉悟 |
| | 2908 | 火山性湖沼における地下熱水流動系の解明: 噴火予測への新たな指標 | 知北和久 |
| | 2909 | 蔵王山, 御釜を火口とする活動の噴火推移の解明 | 伴雅雄 |
| | 2910 | 地震先行 VLF 帯電磁波強度減少研究のための超小型衛星のブレッドボードモデルの開発 | 児玉哲哉 |
| | 2911 | 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 |

| | | | |
|-----------|------|--|----------|
| | 2912 | 史料中の有感地震記録を用いた歴史地震研究の新展開 | 石辺岳男 |
| | 2941 | 富山県弥陀ヶ原火山・地獄谷内での重力探査と地形および地温計測による地熱・火山活動のモニタリング | 楠本成寿 |
| | 2942 | 草津白根火山の完新世噴火履歴説明（総括） | 石崎泰男 |
| | 2943 | 地震先行 VLF 帯電磁波強度減少の統計的評価と発生メカニズムの解明 | 鴨川仁 |
| | 2948 | 南アフリカ大深度金鉱山における M5.5 地震震源域の応力場直接推定 | 伊藤高敏 |
| | 2949 | 地球化学的観測手法を用いた箱根山等における熱水系の構造解明、地震活動評価、および火山ガスの化学的連続観測技術の高度化 | 大場武 |
| 拠点間連携共同研究 | 2951 | 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 |
| | 2952 | 将来時点でのエクスポージャー予測のためのデータ解析とモデル化手法の構築 | 西嶋一欽 |
| | 2953 | 歴史被害地震の活動セグメントの推定とそれを考慮した強震動・建物被害シミュレーションに基づく震源破壊過程の推定に関する研究 | 松島信一 |
| | 2954 | 歴史地震評価のための振動計測と引き倒し実験による伝統木造建造物の耐震性能評価 | 川瀬博 |
| | 2955 | 強震動評価のための浅部地盤と深部地盤の統合モデル化に関する研究 | 山中浩明 |
| | 2956 | 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 | 岡田成幸 |
| | 2957 | 地震随伴火災の経時的な発生予測モデルの開発と出火防止対策の有効性評価 | 西野智研 |
| | 2958 | 建物個別の応答予測と揺れ継続時間のリアルタイム情報配信 | 倉田真宏 |
| | 2975 | 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 | 森田裕一・川瀬博 |
| | 2990 | 巨大地震時における地盤増幅率の予測手法の高精度化 | 上田恭平 |
| | 2991 | 震源モデルに着目した巨大地震に伴う強震動予測の高度化 | 宮澤理稔 |
| | 2994 | 地震時の斜面災害軽減を目的とした地震波動伝播シミュレーションの利活用 | 土井一生 |

[参 考 资 料]

I. 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（建議）の概要

- 地震・火山噴火の現象を理解し、地震と火山噴火の予知を目指すこれまでの方針から、それらに加え、災害を引き起こす地震動・津波・火山灰や溶岩の噴出などの予測にも力を注ぎ、地震・火山災害の発生・推移を総合的に研究することにより、防災・減災に貢献する災害科学の一部として計画を推進する方針に転換。
- 地震予知研究は昭和40年、火山噴火予知研究は昭和49年から、科学技術・学術審議会が建議する計画に沿って、全国の大学や関係機関が協力・連携して推進。平成21年度から両計画を統合して「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」を実施。平成23年東日本大震災を受け、平成24年に計画の見直しを実施。計画が平成25年度末で終了することから、平成24年に実施状況の総括的自己点検及び外部評価を実施。外部評価などの指摘を受けとめ、社会の要請を一層踏まえて計画を策定。
- 低頻度・大規模な地震・火山現象の解明や、地震・火山災害の事例研究、発生機構の解明、地震動、津波、降灰、溶岩流の事前評価と即時予測、体系的な災害情報発表方法の研究を新たに開始。そのため、地震学・火山学を中核に工学、人文・社会科学等を含む総合的かつ学際的に研究計画を推進。

一. 現状認識と長期的な方針

1. 地震及び火山噴火予知のための観測研究に関する現状認識

- ・ 我が国は世界有数の地震・火山国であり、これまで地震や火山噴火による災害が度々発生し、多数の被害を経験。
- ・ 東日本大震災（平成23年東北地方太平洋沖地震）について、その震源域でマグニチュード9に達する超巨大地震の発生の可能性を事前に追究できなかったことを反省し、計画の見直しを実施し、平成24年に建議。
- ・ 現行の計画が平成25年度までであることから、平成24年に実施状況について総括的自己点検評価、及び外部評価を実施。外部評価や「東日本大震災を踏まえた今後の科学技術・学術政策の在り方について（建議）」などの指摘を踏まえ、また、これまでの計画の経緯と成果を鑑み、研究計画を策定。
- ・ 従来は、自然現象としての地震・火山噴火の予知に基づいて災害軽減への貢献を追求。今後は、地震・火山噴火による災害の発生を、地震動、津波、火山灰や溶岩の噴出などの外力（災害誘因）の、人の暮らす社会・自然環境の脆弱（ぜいじゃく）性（災害素因）への作用との認識し、地震・火山噴火の発生から、災害発生やその推移までを念頭に災害誘因の予測を行い、地震・火山災害の軽減に貢献する方針に転換。

2. 地震及び火山噴火予知のための観測研究のこれまでの経緯と成果

- ・ 地震予知研究は約50年間、火山噴火予知研究は約40年間、地震・火山噴火の災害軽減に資すべく継続的に実施。平成21年度から、両計画の統合的かつ効率的な進捗を目指して統合。これまでの成果は、以下のとおり。
- ・ プレート境界での滑りの多様性を世界に先駆けて解明し、巨大地震の発生を含むプレート境界での滑り現象のシミュレーションの手掛かりを獲得。プレート境界の繰り返し地震の中で、発生時期・規模の予測が可能な事例を発見。

- ・ 高密度で多項目の観測や火山噴出物の高精度な解析より、噴火に至るまでの現象、マグマの移動、噴火発生や噴火後の過程の理解が進み、火山噴火機構の総合的理解が進展。噴火に先行する多数の観測事象が集積。
- ・ これまでの計画で開発された三陸沖のケーブル式地震・津波計は、平成 23 年の三陸大津波の襲来 20 分前に巨大津波を観測。その技術は、政府が設置を進める津波観測網へ応用。
- ・ これまでの成果に基づいた有珠山や三宅島などでの火山噴火予知の実践を踏まえ、住民の避難計画と連動した噴火警戒レベルを気象庁は順次運用開始。
- ・ 地震の発生予測や火山噴火の規模や様式、活動推移の予測手法は現時点では未確立であるが、予測につながる地震や火山現象に関する理解が一層深化した。

3. 観測研究計画の長期的な方針

- ・ 地震や火山噴火による災害の発生を、地震動、津波、降灰、溶岩流などの災害誘因が外力となり、社会・自然環境の脆弱（ぜいじゃく）性である災害素因へ作用することと認識。災害誘因を予測して、それに備えることが地震・火山噴火の災害軽減の基本。
- ・ 災害の根本原因である自然現象である地震や火山噴火の発生から、災害誘因の予測、災害発生とその推移を含めて総合的に理解し、それを防災・減災に生かす災害科学の一部として計画を推進。災害に備えることを念頭に、地震や火山噴火の発生とそれに伴う災害誘因から災害を予め（あらかじめ）知り（災害の予知）、それにより災害軽減に貢献することが目標。
- ・ 発生すると甚大な災害となる低頻度・大規模な地震・火山現象について、過去の事象や海外の事例を取り入れて研究を推進。歴史学・考古学・地質学などとの連携や国際共同研究を強化。
- ・ 成果を社会の防災・減災に効果的に役立てるため、政府の施策、行政機関との連携を強化。

二. 本計画の策定の基本的な考えと計画の概要

1. 本計画の基本的な考え

- ・ 計画の目的が地震・火山災害の軽減への貢献であることを一層明確にし、地震や火山噴火の発生予測を目指す研究を継続しつつ、災害誘因予測研究を体系的・組織的に始め、国民の生命と暮らしを守る災害科学の一部として研究を推進。
- ・ これまでよりも広い知の結集が必要であることから、地震学や火山学を中核とし、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの研究者も加わり、専門知を結集し、総合的かつ学際的な研究計画として推進。
- ・ 災害の根源である地震と火山噴火の仕組みを自然科学的に理解する「地震・火山現象の解明のための研究」、地震や火山噴火を科学的に予測する手法を研究する「地震・火山噴火の予測のための研究」、地震動、津波、火山灰や溶岩の噴出など災害の誘因となる自然現象の事前評価・即時予測を研究する「地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究」を実施。長期的な取組で計画を推進し、成果が防災・減災に効果的に活用される仕組みをつくるため「研究を推進するための体制の整備」を実施。
- ・ 東北地方太平洋沖地震、南海トラフの巨大地震、首都直下地震、桜島火山等の優先度の高い地震や火山の研究については、上記の区分を横断して、総合的に実施。

2. 本計画の概要

本計画の基本的な考えに沿って、以下の研究を実施。

2-1. 地震・火山現象の解明のための研究

地震や火山噴火を科学的に理解するための基礎的な観測研究を推進。特に、低頻度で大規模な現象の理解のため、史料、考古データ、地質データ等も活用。

《地震・火山現象に関する史料、考古データ、地質データ等の収集と整理》

古い年代の地震・火山噴火に関する史料の解説・解釈、考古学的な発掘痕跡の集約、地質調査データの調査・分析。その成果のデータベース化。

《低頻度大規模地震・火山現象の解明》

観測データや史料、考古データ、地形・地質データの解析・分析から地震学・火山学の知見に基づき、低頻度・大規模の地震・火山現象解明の研究を推進。特に、東北地方太平洋沖地震、南海トラフ巨大地震の発生機構に関する観測研究を推進。

《地震・火山噴火の発生場の解明》

地震及び火山噴火の発生場の構造、ひずみ・応力の時空間分布と地震・火山活動の関連を研究。特に、東北地方太平洋沖地震とその余効変動による影響に注目。

《地震現象のモデル化》

日本列島域の構造モデル、複雑な破壊現象を表現できる断層の物理モデルを構築。両者を利用し、地震発生機構の定量的な理解やプレート境界での多様な滑りを再現する数値シミュレーション実験を推進。

《火山現象のモデル化》

多項目観測データや火山噴出物の解析から、噴火先行現象やそれに続く多様な火山現象の物理・化学過程を解明。マグマの発泡・脱ガス・破碎などに関する理論・実験研究の成果も取り入れ、火山現象の物理・化学過程のモデル化を推進。

2-2. 地震・火山噴火の予測のための研究

地震や火山噴火現象の科学的理解を踏まえて、地震発生や火山噴火、地震活動や火山活動の予測研究を推進。

《地震発生長期評価手法の高度化》

数値シミュレーションなどを利用した地震発生の長期評価手法を開発し、史料、考古・地質データなどから推定された地震の発生履歴に基づき、地震発生の長期評価手法を高度化。

《モニタリングによる地震活動予測》

観測データと数値シミュレーションの結果を比較し、地殻内の応力やひずみなどの状態を評価し、地震発生や地殻活動の理解の深化を推進。地震活動の統計的性質に基づく地震活動の予測を行い、その性能を評価。

《地震先行現象に基づく地震活動予測》

地震の先行現象の捕捉のための観測を実施。先行現象と地震発生の関係を統計的に評価。統計的に有意な

先行現象は、その発生機構の物理・化学的な根拠を探究。

《事象系統樹の高度化による火山噴火予測》

噴火履歴から、近い将来に噴火が懸念される火山の活動や噴火現象の時系列をまとめた噴火事象系統樹を作成。研究成果を利用して事象系統樹の分岐条件の導出とその判定法を探究し、火山噴火予測を試行。

2-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

防災・減災に貢献するために、地震や火山噴火の発生から災害に至るまでの過程を史料、調査・観測記録から理解し、地震動、津波、降灰などの災害誘因の予測の研究を推進し、災害を予め（あらかじめ）知って対応できる（災害の予知）ことを目指した研究を推進。

《地震・火山噴火の災害事例の研究》

地震・火山噴火による災害の特性を、事例研究に基づいて把握。歴史記録から社会環境の時代的变化に留意して過去の地震・火山災害の特性を知り、地域特性も踏まえ、自然現象としての災害誘因と社会・自然環境としての災害素因を抽出。

《地震・火山噴火の災害発生機構の解明》

地震・火山噴火による災害誘因が、自然・社会環境の脆弱性などの災害素因に与える作用力、波及効果を解明し、災害発生機構を探究。二次災害の抑止、社会混乱の防止などの新たな災害研究の分野を複合学術領域で構築。

《地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化》

地震・火山噴火が引き起こす地震動、津波、地滑り、降灰、山体崩壊などの災害誘因の発生可能性を事前に評価する手法の高度化を目指す研究を推進。

《地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化》

地震・火山噴火が引き起こす災害誘因を、地震・火山噴火発生直後に即時的に高精度に予測するための観測データの利用法や解析手法の高度化を目指す研究を推進。

《地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化》

確率表現の有無、確度の高低など様々な地震・火山噴火予測情報を、それに見合った活用法で災害軽減に役立てる方策を検討。災害啓発情報、災害予測情報、災害情報、災害関連情報などの高度化のための研究を推進。

2-4. 研究を推進するための体制の整備

本計画を達成するための体制の整備。

《推進体制の整備》

国民の生命と暮らしを守る災害科学として計画を実施し、成果が効果的に防災・減災に役立つような計画推進体制を構築。地震・火山防災行政の中で、どのように貢献するべきかを踏まえ、地震調査研究推進本部など関連機関との連携を強化。

総合的かつ学際的に研究計画を推進することから、その進捗状況を把握、達成度の評価、問題点と今後の課題の整理などを行う計画推進体制を整備。

《研究基盤の開発・整備》

行政官庁、研究機関、全国の大学が協力し、地震・火山の活動評価や研究に必要な観測基盤、データを効率的に処理・流通するシステムを維持・拡充。

本計画で得られる成果をデータベース化し、研究者間で共有する仕組みを構築。

新たな観測技術の開発、地殻活動モニタリング手法高度化などの研究を推進。

《関連研究分野との連携の強化》

本計画が災害科学に貢献すべきという観点で、過去の地震・火山噴火の事例調査、災害の発生に至る過程の研究の推進のため、理学だけではなく工学、人文・社会科学などの関連研究分野との連携を強化。

《研究者・技術者・防災業務・防災対応に携わる人材の育成》

関連機関が協力して、若手の研究者、技術者、防災・減災に関わる行政・企業・教育機関などで活躍する人材を育成。

《社会との共通理解の醸成と災害教育》

関連機関が協力して、研究成果を社会にわかりやすく伝え、社会との共通理解の醸成のための取組を強化。地震・火山科学が社会に発信する情報を含め、災害情報の在り方について検討。

《国際共同研究・国際協力》

大規模な地震、津波、火山噴火の災害は世界各地で発生し、海外の事例を研究する必要から、国際共同研究を促進する体制を整備。

災害科学の先進国である我が国の責務として、開発途上国における地震・火山噴火災害の防止・軽減に貢献する体制を維持・整備。

II. 計画推進部会および総合研究グループ等別の成果

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について」(建議)に示された実施内容について、平成30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1の研究グループ(観測・解析技術の開発)、建議において全ての項目を含む総合的な研究として優先して推進するとされた、東北地方太平洋沖地震、南海トラフの巨大地震、首都直下地震、桜島火山噴火についての4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「平成30年度の成果の概要」である。本編の「平成30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

「海溝型地震」計画推進部会長 小原一成(東京大学地震研究所)

副部会長 西村卓也(京都大学防災研究所)

「内陸地震」計画推進部会長 松本 聡(九州大学大学院理学研究院)

副部会長 上嶋 誠(東京大学地震研究所)

「火山」計画推進部会長 大倉敬宏(京都大学大学院理学研究科)

副部会長 野上健治(東京工業大学理学院火山流体研究センター)

「地震先行現象・地震活動評価」計画推進部会長 中谷正生(東京大学地震研究所)

副部会長 長尾年恭(東海大学海洋研究所)

「地震動・津波等の事前予測・即時予測」

計画推進部会長 香川敬生(鳥取大学大学院工学研究科)

副部会長 太田雄策(東北大学大学院理学研究科)

「地震・火山災害」計画推進部会長 木村玲欧(兵庫県立大学環境人間学部)

副部会長 三宅弘恵(東京大学大学院情報学環)

「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 佐竹健治(東京大学地震研究所)

「データベース・データ流通」計画推進部会長 鶴岡 弘(東京大学地震研究所)

副部会長 大見士郎(京都大学防災研究所)

「観測・解析技術の開発」技術開発担当 渡辺俊樹(名古屋大学大学院環境学研究科)

「東北地方太平洋沖地震」総合研究グループリーダー 松澤 暢(東北大学大学院理学研究科)

「南海トラフ巨大地震」総合研究グループリーダー 澁谷拓郎(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)

「桜島火山噴火」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)

○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 佐竹健治(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4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) 海溝型地震

「海溝型地震」計画推進部会長 小原一成（東京大学地震研究所）
副部会長 西村卓也（京都大学防災研究所）

海溝型地震の発生機構を科学的に解明することは、海溝型地震の発生予測ならびに地震に伴う地震動、津波などによる災害に備えるための基本として重要である。海溝型地震計画推進部会では、主としてプレート境界で発生する海溝型地震を対象に、地震現象に関する過去データの収集と整理、地震現象の解明、地震発生場の解明、地震現象のモデル化、モニタリングによる地震活動予測、先行現象に基づく地震活動予測、及び観測・解析技術の開発を進めてきた。加えて、海洋プレート内部で発生するスラブ内地震についても発生機構の解明に関する研究を行っている。

5年間の成果の概要と今後の展望

平成26年度より「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5年間続けられてきた観測研究は、海溝型地震という現象に対する我々の理解を深める多くの成果を挙げてきた。平成30年度における個別の成果は次節に詳しく述べるが、ここでは5年間の成果の概要を述べる。

プレート境界域で発生する低周波微動やスロースリップイベント（SSE）といったスロー地震に関する研究については、様々な地域における詳細な発生履歴や発生過程、スロー地震間の相互作用に関する観測研究、地震波速度や減衰、比抵抗構造などの発生場を理解する研究が活発に行われ、現在最も研究が進んだトピックであると言える。スロー地震に関する研究は、モニタリングに基づく実データを用いた観測研究だけでなく、実験室においてスロー地震発生の背景に潜む摩擦特性を理解しようとする岩石摩擦実験研究や断層摩擦構成則を用いたスロー地震のシミュレーション研究、GNSSデータとシミュレーションのデータ同化による摩擦パラメータの推定と推移予測を目指す研究なども行われ、これらの研究が本部会の成果を牽引している。スロー地震は、通常地震活動が不活発な領域においても頻発に発生する現象であることから、プレート境界面の状態の時間変化をモニタリングする上で貴重な情報をもたらす。スロー地震と大地震の関係性についてはObara and Kato (2016) によって、(1) Analog (類似現象)、(2) Stress meter (応力状態を反映するインジケータ)、(3) Stress transfer (周囲への応力転荷) という3点において整理され、スロー地震を用いた海溝型地震研究のさらなる活性化に貢献した。SSEによる周囲への応力転荷については、東北沖地震でも地震活動や海底水圧計データの解析から地震前にSSEが発生していたことが知られていたが、2014年にチリとメキシコで発生したイクケ地震 (M_w 8.1) とパパノア地震 (M_w 7.3) は、GNSSデータによって本震前にそれぞれの震源域周辺でSSEが発生していたことが明瞭に捉えられており (Ruiz et al., 2014; Radiguet et al., 2016)、SSEによって本震がトリガーされた可能性が指摘されている。似たような事例は近年のGNSS観測網の拡大によって相次いでおり、大地震がスロー地震による応力転荷によってトリガーされることが珍しくないことを示していると考えられる。日本海溝・千島海溝沿いにおいては、繰り返し地震と陸上GNSSのデータから、数年程度の周期的なSSEが発生しているこ

とが発見され、このような周期と同期してM5以上の地震が活動が活発化していることが示された (Uchida et al., 2016)。SSEが大地震をトリガーする条件については、さらなる研究が必要であるが、GNSSデータの解析手法の高度化 (例えば, Nishimura et al., 2014; Takagi et al., 2019) や小繰り返し地震を用いたプレート間滑りの解析技術の高度化 (Nomura et al., 2017) により短期的SSEや長期的SSEの検出精度も向上しており、この5か年の研究によりSSEのモニタリングが大地震の発生予測へ貢献できる可能性を示されたと考えられる。

一方、岩石実験やシミュレーションに基づく断層摩擦特性の理解に関する研究は、本計画の究極的な目標である地震発生予測を行う上でも根幹となる研究であり、この5年間は主としてスロー地震を対象とした研究の進展が見られた。海底掘削や海底面で採取された岩石や調査に基づいて、プレート境界断層を構成する物質を用いた断層摩擦実験からは、断層ガウジの組成や温度圧力条件、断層の滑り速度によって摩擦特性がどのように変化するか調べられた。その結果、同一深度でも断層帯を構成する堆積物・岩石によって、地震性・非地震性双方の多様な断層運動が起こることがわかった。また、東北沖地震の震源域の断層帯の構成物質の実験から、震源に浅部付近の摩擦パラメータ a - b が0付近の領域で間隙水圧が上昇すると、スロー地震が発生する条件が現れることもわかった。シミュレーションにおいても、断層面の幾何形状や物性の不均質に対する地震やスロー地震の発生条件が調べられ、断層の粗さが増すと巨視的な滑り挙動が安定的になることが見出されるとともに、房総沖や八重山諸島で発生したSSEについて推定された断層滑りの時間発展 (例えば, Fukuda et al., 2018; Kano et al., 2018) から、摩擦パラメータの推定が行われている。摩擦構成則を用いた断層滑りのシミュレーションに、GNSSなどのモニタリングデータを同化する研究についても、2003年十勝沖地震のGNSSデータを用いて震源域周辺の摩擦パラメータの推定に成功したこと (Kano et al., 2015) は特筆に値する。データ同化により断層摩擦パラメータ推定の精度を上げるためには、断層滑り速度が時間変化している時のデータを使う必要があるため、SSEはデータ同化による推移予測の検証に最も適した現象である。よって次期計画においては、豊後水道域などの長期的SSE発生領域でデータ同化手法の有効性を確認し、巨大地震発生域を含む南海トラフ全体を対象とした研究などを進めていくことが期待される。なお、海溝型大地震の再来周期は一般に数十年以上であり、決して頻度の高い事象ではない。よって日本列島におけるモニタリングだけでは、モデルを検証するための十分な事例を積み重ねることは難しい。そのため、ニュージーランドなどの海外をフィールドとした観測研究によって事例を増やすことや、断層摩擦構成則に基づくシミュレーションによって、SSEが巨大地震をトリガーする条件やSSEから巨大地震発生までにかかる時間を検討すること (Ohtani et al., 2019) は、次期計画でも推進していくべきである。

スロー地震発生域を含むプレート境界断層及びその周辺の地下構造に関する研究も着実な成果を挙げている。南海トラフや相模トラフなどにおける研究から、地域性はあるものの多くの領域で見られる特徴として、スロー地震の発生領域周辺は、高 V_p/V_s で地震波の減衰が大きく、プレート境界からの反射波が明瞭であるという点が挙げられる。これらは高間隙圧の流体の存在がスロー地震の発生条件に関わっていることを示唆しており、茨城県南西部においてスロー地震の発生と地震波減衰構造の時間変化が同期していること

が確かめられた(Nakajima and Uchida, 2018) ことは、流体とスロー地震の関係性をより明確に示した研究であると言える。流体の存在以外にも、断層の幾何形状や断層物質の物性などが断層滑りの特性を規定していると考えられ、今後もプレート境界域の地下構造や沈み込む海洋プレート側の物質科学的特性と大地震及びスロー地震の関係を明らかにしていく必要がある。

低頻度大規模地震に関して、津波堆積物や地形地質調査などによる過去の地震の履歴に関する研究も、精力的に進められた。東北日本弧においては、まだ確定的な結果は得られていないものの、17世紀の千島海溝地震、1611年慶長三陸津波地震、1454年享徳地震、869年貞観地震などに対応する津波の浸水範囲がかなり明らかになった。西南日本においても過去の南海トラフ地震の津波の浸水範囲が明らかになり、大きな浸水域を伴う地震は歴史地震の再来間隔よりも長い400-1000年間隔であることが明らかになった。また、房総半島南部の海岸段丘の離水年代の再調査から、大地震の再来間隔が非常にばらつきが短くなることが明らかにされ、従来考えられてきた元禄型関東地震の再来間隔を再考する必要性が示された (Komori et al., 2017)。

スラブ内地震についても、高精度の震源決定や断層パラメータの推定により、起震応力が空間的に大きく変化することや相似地震の断層面が相補的であることがわかった。また、スラブ形状と斜め沈み込みを考慮した三次元温度構造のモデリングから、東北・関東地方においてスラブ内地震及びプレート境界地震が起きる温度範囲が明らかになった。また、石膏の脱水摩擦変形試験からは、冷たいスラブ内の代表的な含水鉱物であるローソナイトの変形特性も明らかになり、これらの研究を進めることにより、脱水脆性化によって生じると考えられるスラブ内大地震の発生ポテンシャルが評価できる可能性が示された。

以上の成果に加えて、この5年間における進展として重要なものとして、地震及び地殻変動観測における海底観測技術の進展と海底観測によって初めて明らかになった諸現象があげられる。海溝型地震の震源域の大部分は海底下であるため、微小なシグナルを捉えるためには、海底での観測が必要不可欠である。GNSS-Aでは、観測方法やデータ解析手法の高度化、観測の高頻度化により、日本海溝や南海トラフ沿いの地殻変動の時空間変化が詳細に捉えられるようになった。日本海溝沿いの観測結果は、東北沖地震の余効変動の時空間発展を明らかにし、地下のレオロジー構造やプレート境界断層の摩擦特性に関する情報をもたらした。また、南海トラフ沿いの観測結果は、プレート境界面の現在の固着分布の推定に用いられ、陸上の観測点だけでは空間解像度が乏しい沖合の領域における固着分布の不均質性が初めて明らかになった(例えば, Yokota et al., 2016; Nishimura et al., 2018)。最近では紀伊水道沖で変動速度の時間変化が捉えられ、プレート境界浅部の長期的SSEが発生していると考えられる。また、自己浮上式海底地震計においても広帯域地震計を搭載した機器開発が進められていることに加えて、1年以上の長期観測を繰り返し実施することにより東北沖地震の震源域の時空間変化が捉えられ、本震直後はほとんど見られなかった三陸沖でのプレート境界地震が2-3年後には発生するようになったことがわかった。地震観測網については、南海トラフ沿いにDONET、日本海溝沿いにS-netというケーブル式の海底観測網が構築されたことによっても、沖合のスロー地震活動に対する知見は大きく深まっている。DONETでは、掘削孔における間隙圧や傾斜の測定から南海トラフの浅部で短期的SSEが繰り返し発生していることが示された (Araki et al., 2017)。

災害軽減に貢献するという本計画の目標に関しては、本部会で行われた研究の多くは地震現象の解明のための研究であり、一見すると災害軽減に直結する研究は少ないように見える。特に、前計画から続けられてきた地震発生予測によって災害軽減に資するという目標までは、未だ道半ばと言わざるを得ない。しかし、本計画で進められた過去の海溝型地震や津波の発生履歴による研究は、その地域における過去の災害そのものの記録であり、今後起こりうる災害を想定する上で必要不可欠な情報であるため、災害軽減に貢献するものである。さらに、東北沖地震の余効滑りにより三陸沖北部などの過去に発生した大地震の震源域への応力载荷が進んでいる可能性が示された (Iinuma et al., 2016) ことや、地震サイクルシミュレーションにより、日向灘のM7地震が数年以内に南海トラフ巨大地震をトリガーするシナリオが示されたこと (Hyodo et al., 2016) は、地震調査委員会の海溝型地震の長期評価の見直しや内閣府における南海トラフ地震対策において考慮されるなど、本計画の成果が社会における災害軽減に向けた活動に役立てられている例は多い。

災害軽減に貢献するという本計画の5か年においては、工学や社会学分野の研究者が計画に参画し、成果報告会などにおいて研究成果の共有が行われるようになった。このことは、理学研究者を中心とする本部会においても、他分野や社会からのニーズを直接感じ、自分たちの研究を災害軽減の役立てようという意識が高まったように感じられる。本部会における課題においても、シミュレーションを用いて地震間の応力蓄積過程から地震時のダイナミックな破壊過程、強震動や津波の計算までを統合的なスキームで取り扱う研究が始まっており、地震現象の理解から地震津波災害までを一気通貫して扱う研究が実現しつつある。次期計画でも、本計画で進められた研究の方向性を保ちながら観測研究を継続し、社会へのアウトプットを増やして災害軽減に貢献していくことが望ましい。

平成30（2018）年度の成果の概要

以下では、本計画の5年目である平成30（2018）年度の成果の概略を述べる。

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・火山現象の解明

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

日本海溝・千島海溝、相模トラフ、南海トラフ、南西諸島海溝で発生した巨大地震の履歴と発生様式を明らかにするため、海岸や海底において、津波堆積物、地形地質調査、サンゴや有孔虫などの生物痕跡に基づいたデータ収集と整理が行われた（北海道大学〔課題番号：1002〕、名古屋大学〔課題番号：1703〕、海洋研究開発機構〔課題番号：4002〕、産業技術総合研究所〔課題番号：5004〕）。

北海道太平洋岸の登別市から根室市までの11点で、17世紀の津波堆積物もしくはその候補となる砂層について同一手順・手法でサンプリングと泥炭層の炭素同位体年代を測定し、広域対比を試みた（図1）。その結果、1640年の北海道駒ヶ岳津波の堆積物は噴火湾から苫小牧市まで分布し、1611年慶長三陸津波の堆積物は、苫小牧市からむかわ町にかけて分布するが、十勝地方から釧路地方に分布する津波堆積物は1611年よりは後年のイベントである可能性が高い（北海道大学〔課題番号：1002〕）。志摩半島沖の安乗口海底

谷付近の海底活断層に関して、平成 28-29 年度に取得したコアの一部について有孔虫分析を実施し、放射性炭素年代測定を行った。その結果、コア深度 0.81 m に認められる不整合面の形成時期が約 1 万年前と推定された。この不整合面と断層変位地形から、対象とした海底活断層は約 1 万年前以降、1 回あるいは複数回の活動によって上下方向に約 10 m 変位した可能性がある。この海底活断層は南海トラフのトラフ軸と比べて陸域に近いため、生じた津波は沿岸域に短時間で到達すると考えられる（名古屋大学 [課題番号：1703]）。

イ. プレート境界巨大地震

（東北沖）

2011 年（平成 23 年）東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）の震源域やその周辺では、陸上及び海底での地震・地殻変動観測から東北沖地震以降の様々な地震活動・地殻変動・地下構造の変化が捉えられている（東北大学 [課題番号：1210]，東京大学地震研究所 [課題番号：1503]，東京大学地震研究所 [課題番号：1510]，京都大学理学研究科 [課題番号：1803]，海洋研究開発機構 [課題番号：4002]，海上保安庁 [課題番号：8001]）。

東北沖地震発生前後に日本海溝域で実施された海底地震観測及び陸上定常観測データから、同領域で発生した地震の震源とマグニチュードの詳細なカタログを作成し、東北沖地震前後の地震活動の特徴を明らかにした（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。地震波形の振幅と相関を用いて、プレート境界面付近の地震を自動検出・震源決定し、震源の時空間分布や規模別頻度分布を得た。その結果、東北沖地震発生前においては、北緯 39 度付近で活動が変わり、北側の低活動域が少なくとも東北沖地震発生前の数年間継続したことを示した。一方、東北沖地震発生後においては、本震の大滑り域に顕著な低活動域、その周辺で高活動域が見られた。Gutenberg-Richter 則 (G-R 則) を仮定し、地震の規模別頻度分布から b 値を求めると、東北沖地震後は低 b 値が広く分布することが明らかになった（図 2）。さらに、本震時に高周波破壊を起こした領域では、東北沖地震発生後に b 値が低下し、地震後の頻度分布は G-R 則から逸脱することが推定された。このような地震活動の特徴は、破壊に伴う応力変化とプレート境界面の摩擦状態変化が原因と考えられる。

東北沖地震の地震時変位及び地震後 7 年間の変位時系列データを用いて、プレート境界の摩擦パラメータ、海洋マントル及びマントルウェッジの Maxwell 及び Kelvin 要素の粘性率、地震時の滑り分布とそれに対する平滑化パラメータを同時に推定する手法の開発を行った（京都大学理学研究科 [課題番号：1803]）。このモデルでは、地震時の応力変化によって粘弾性緩和と余効滑りが駆動され、余効滑りの時間発展は摩擦構成則に従うと仮定するため、モデルによる余効変動の計算値は、プレート境界の摩擦パラメータ、マントルの粘性率、地震時の滑り分布等の関数となる。このモデルを東北沖地震の地震時及び地震後 7 年間の地表変位データに適用し、図 3 に示すような地震時の推定滑り分布とモデルから計算される積算余効滑り分布により、観測された余効変動の時空間パターンを水平・上下変動共に概ね説明することができた。

(南海トラフ)

GNSS-音響測距結合方式海底地殻変動観測により、南海トラフ周辺域での地殻変動観測が継続されており、プレート境界固着の影響による地殻変動が観測された(海上保安庁[課題番号：8001])。なお、後述するように紀伊水道沖では、地殻変動速度の時間変化が観測された。

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

茨城県南西部のフィリピン海プレート上面付近で2004年から2015年に発生した地震を用いた解析により、繰り返し地震の活動が約1年周期で活発化すること、その活動と同期してプレート境界直上の地震波の減衰特性が大きくなること、さらにそれから数か月遅れて浅い地震活動が活発化することが明らかになった(図4)(東京大学地震研究所[課題番号：1510], Nakajima and Uchida, 2018)。これら一連の活動は、1) 約1年周期で発生するプレート境界でのスロースリップイベント(SSE)により繰り返し地震が活発化する、2) SSEに伴ってプレート境界の水が上盤に排出され、地震波の減衰を大きくする、3) 排出された水は数か月かけて浅部に上昇し、上盤プレート内で地震を誘発する、と考えることで観測された時空間変化を説明できる。このようなシナリオに基づくと、SSEによって「水の移動」がトリガーされ、移動した水が上盤プレート内やプレート境界の破壊強度を低下させ、そこで地震を誘発する可能性が示唆される。

プレート間の滑り現象を規定する構造不均質を明らかにする目的で、2017年度に和歌山県の深部低周波微動活動が不明瞭な領域における測線(図5)で取得した稠密自然地震観測データ、制御震源地殻構造探査データに対して、トモグラフィー解析、反射法解析をそれぞれ実施した(東京大学地震研究所[課題番号：1509])。また、深部低周波微動活動域の詳細な地震波減衰構造を推定するために、今までの稠密自然地震観測で得られた波形データを使用して、Q値インバージョン解析を行った。深部低周波微動が不活発な領域を通る測線下の反射法断面図(図6)からは、測線北側から中央部の深さ25 km付近に不明瞭な北傾斜の反射面が確認でき、トモグラフィー解析で得られた速度構造(図7)と比較すると、島弧側のモホ面に対応すると考えられる。測線南端の深さ22 km付近から確認できる北傾斜の反射層は、フィリピン海プレート上面に対応すると考えられる。この反射層の層厚は、紀伊半島北東部下の微動活動が活発な領域におけるフィリピン海プレートに対応する反射層(Iwasaki et al., 2008)の層厚よりも薄くなっている。このことから、深部低周波微動活動度と沈み込むフィリピン海プレート内の構造不均質との関連が示唆される。深部低周波微動発生域は紀伊半島東～中部では海洋プレート内、西部では海洋プレート上面付近に存在し、既存研究から高 V_p/V_s 域に位置すると推定されている。地下流体の存在領域は低Q・高 V_p/V_s で特徴づけられることを踏まえると、本研究の結果は紀伊半島の中部・西部では地下流体の存在する環境で深部低周波微動の活動が活発になっている可能性を示している。また、紀伊半島東部では下部地殻の不透水層によって、マンタルウェッジ端部でスラブ起源流体が滞留している可能性がある。さらに、既存研究では中央構造線沿いの領域で高 V_p/V_s が得られていることから、紀伊半島東部の深部低周波微動発生域で生じた高圧流体は、一部がマンタルウェッジへ移動したのち、中央構造線に沿って上昇

している可能性が示唆された。

イ. 海洋プレート内部の地震

東北地方中央部の太平洋スラブ上面で発生している地震の震源とメカニズム解を決定したところ、正断層地震と逆断層地震が 100 m 以内という非常に近接した場所で発生していることが明らかになった（東北大学 [課題番号：1201]）。この結果は、エクロジャイト化に伴う体積減少によりプレート表面近くで正断層地震が発生するという従来の解釈を支持するものであるが、相転移による応力擾乱は極めて局所的であることを強く示唆する。一方、日本列島の周辺で発生しているスラブ内地震の地震波放射エネルギー効率を推定した（東北大学 [課題番号：1201]）。解析では観測点毎の結果のばらつきを小さくするために観測点補正値をインバージョンにより推定し、その値を用いて観測された地震波放射エネルギー効率を補正した。その結果、地震波放射エネルギー効率は地震の規模とともに小さくなることと深さ 360 km までの範囲では顕著な深さ依存を示さないことが明らかになった。

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

(摩擦実験)

防災科学技術研究所が所有する大型振動台を利用した岩石摩擦実験が行われ、以下のような結果が得られた（防災科学技術研究所 [課題番号：3001]）。インド産変はんれい岩を用いたスティックスリップ実験では、通常の高速度破壊イベントに加え、媒質の弾性波速度を越えて高速伝播するゆっくり滑りが発生していることを明らかにした。また、過去の実験データを解析し、高速な破壊伝播を模擬断層から離れて設置した歪みゲージによって観測する際に大きな誤差が発生しうることを指摘するとともに、数値計算から得られた波形と観測波形とをフィッティングさせて模擬断層の真の破壊パラメータを推定する手法を開発した。スティックスリップが繰り返し発生する模擬断層の断層帯が発達する過程を推定するため、断層面に沿って伝播するレイリー波の群速度変化を推定する手法を開発した。1 mm/s の載荷速度で実施した実験結果に適用したところ、約 1000 回のイベント発生を経ておよそ 1% の速度低下が検出された。また、ガウジを断層面に挟んだ摩擦実験からは、速度状態依存摩擦構成則のパラメータが断層長に依存するかどうかを調査した。推定された摩擦パラメータ ($a-b$, D_c) は断層長サイズには依存しない傾向が見られたが、滑り距離に伴って変化する様子が確認された。

(シミュレーション)

フラクタル的な凸凹をもつ粗い断層面における地震発生過程を調べるため、境界要素積分法によるシミュレーションを行った（東京大学地震研究所 [課題番号：1507], Ozawa et al., 2019）。粗い断層は微小な直線セグメントからなっており、各セグメントには速度状態依存摩擦則を仮定し、状態の発展法則には slip law を用いた。この系で震源核形成ダイナミクスを詳細に追った結果、地震性高速滑りの発生前に非地震性の遅い滑りが発生した後、一方向に移動し(図 8)、断層の粗さが増すと(粗さの振幅が大きい/最短波長が短い)

その移動距離がより長くなることを見い出された。このことは、より大きなモーメントが準備段階の間に解放されることを意味する。さらに、断層の粗さがある程度以上になると、断層は地震性の速い滑りを起こせなくなり、スロー地震のようなイベントが期待されることも見い出された。これらの現象は、断層の粗さによる抵抗応力の概念で定量的に記述される。

速度状態依存摩擦則を用いた豊後水道の長期的 SSE 活動のモデル化において、SSE 領域の浅部延長側に位置する南海トラフ巨大地震震源域に対応する固着域の有無による SSE の滑り速度分布の違いを検討した（京都大学理学研究科 [課題番号：1801]）。その結果を図 9 に示す。固着域がない場合では、円形パッチの中心に対称的に滑りが広がるのに対し、固着域がある場合では、滑り速度の大きな領域が浅部に移り、深さ方向に非対称な分布になっており、GNSS データのスパースモデリングにより得られた滑り分布（Nakata et al., 2017）と似ている（図 9）。そのため、長期的 SSE 領域での摩擦特性及び滑り発展推定には固着域での滑り欠損速度の推定も同時に行う必要があることがわかった。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(日本海溝・千島海溝)

東北沖地震の震源域南側となる福島県沖に設置した海底地震計アレイの観測により、低周波微動活動が検知された（図 10）（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。微動は約 1 年間の観測期間中に 5 回の顕著な活動期に集中して発生し、それぞれに活動期の中で震央の経時的な移動が見られる。移動の速さはおよそ 5 km/日であり、南海トラフで観測される微動が示すものより有意に遅いが、東北沖地震前に小繰り返し地震から示された SSE のフロントの移動速さに近い。微動が励起した S 波の振動方向の解析により、微動は低角逆断層型の発震機構解を示す。よって、低周波微動の活動の背景には、繰り返し発生する SSEがあると推測される。微動の発生域は、地殻変動観測から東北沖地震後の余効滑りが継続していると推定されている範囲内であって、比較的狭い時空間の範囲内で余効滑りと SSE とが共存して進行している可能性を示唆する。

岩手県釜石沖の繰り返し地震では、地震サイクル後半に小地震活動が活発化する傾向が、東北沖地震後の地震発生間隔が極端に短くなった期間における傾向は明らかになっていない。そこで、2011 年 3 月 11 日から 34 日間の連続波形データに対し Matched Filter 法 (MF 法) を適用し、釜石沖の繰り返し地震 (M4.8 前後) の極近傍で発生したと考えられる 25 個の地震を検出した（東京大学地震研究所 [課題番号：1510]，奥田・他，2019）。得られた地震活動は、繰り返し間隔が 9～23 日と極端に短くなっている時期においても、地震サイクル後半に活動が活発化する傾向が保存されていたことを示す。地震サイクルにおける小地震の活動の静穏化・活発化が釜石沖の本震の繰り返し間隔に依存しないという結果は、このような活動が、繰り返し間隔の長短によらず固着域内部での応力状態や固着域の階層性といったような同一の性質に支配されている可能性を示唆する（図 11）。

（南海トラフ）

南海トラフの海溝型巨大地震を引き起こす応力蓄積と将来発生する断層の動的破壊過程及び内陸地震への影響を考慮するためのモデリングを実施した（防災科学技術研究所〔課題番号：3001〕）。まず、粘弾性緩和の影響を考慮してGNSSデータからプレート間滑り遅れ速度分布を推定した（Noda et al., 2018）。アセノスフェアの粘弾性緩和を考慮することで、滑り遅れ速度のピークが従来の研究よりも海溝の近くに存在することを示した。次に、滑り遅れ速度の推定結果から算出したプレート境界への応力蓄積速度を入力値として南海トラフ海溝型地震の断層破壊シミュレーションを実施し、今後発生しうる地震のシナリオを複数作成した。また、推定したプレート境界の滑り遅れ分布と小地震解析による西南日本の背景応力場推定とを統合解析し、プレートの沈み込みが内陸地震発生層に引き起こす剪断歪みエネルギー量を推定した。その結果、剪断歪みエネルギーの増減分布と地震分布との間には有意な相関があることを確認した（Saito et al., 2018）。

GNSS-音響測距結合方式海底地殻変動観測により、紀伊水道沖の2観測点において2017年末頃から2018年の初め頃にかけて、南向きの非定常地殻変動を観測した（海上保安庁〔課題番号：8001〕）。海底観測点で観測された変位分布と陸上観測点で地殻変動が観測されていないことから、プレート境界の浅部におけるSSEが原因と考えられる（図12）。

プレート境界浅部（海域）で発生する滑り現象把握のため、海域の現実的な3次元地下構造の影響を考慮した解析手法を開発した（防災科学技術研究所〔課題番号：3002〕, Takemura et al., 2018）。この手法を紀伊半島南東沖で発生する浅部超低周波地震に適用したところ、陸域の広帯域地震観測網F-netの記録のみで、海底地震計による解析結果とほぼ同様な解が得られ、高い精度の解析が可能であることを確認した。海域での観測がなされていない期間の解析結果からも、紀伊半島南東沖で発生する浅部超低周波地震が総じてプレート境界の滑りを反映する低角逆断層となることが示され、陸域観測網のデータの存在する長期の活動把握が可能となった。

（南西諸島海溝）

琉球海溝南西部八重山諸島近傍において、およそ6か月周期で繰り返し発生する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（京都大学理学研究科〔課題番号：1803〕, Kano et al., 2018）、この滑り速度の振る舞いを、1自由度のばねスライダモデルでモデル化し、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いてSSE発生域の摩擦パラメータの推定を試みた。その結果、SSEごと、また一つのSSEの時系列の中でも、推定に使用するデータ期間により摩擦パラメータの分布が異なることがわかった。単純なモデルを用いたため、大自由度系のモデルを用いた場合の検討は必要ではあるが、この結果はプレート境界周辺の流体分布や摩擦の分布が時間変化している可能性を示唆している。

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

（3）地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

（津波災害）

北海道太平洋沖でM9規模の巨大地震が発生した場合の津波による被害の発生過程を解

明するために、東北沖地震による津波が北海道太平洋沿岸に被害を及ぼした大きな津波後続波について解析した（北海道大学〔課題番号：1002〕, Tanioka et al., 2019）。この津波では、特に函館で9時間遅れで最大波が到達し大きな被害が生じた。後続波の生成過程を解析したところ函館湾の基本モード（49.6分）が励起されたことがわかった（図13）。さらに、その基本モードは函館港沿岸で波高が特に大きくなることがわかった。周期の長い（49.6分）の基本モードを励起するには震源域の大きなM9クラスの巨大地震である必要があると考えられ、北海道太平洋沖の巨大地震による津波の場合でも函館港近傍では大きな後続波による被害に警戒する必要がある。

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(海域観測機器)

海底間音響測距に関して、2017年3月に福島沖に設置した機器の回収を行い、通常のDirect Path Ranging (DPR) 基線の解析に加え、音響パスを確実に通すために新たに開発した中継機（インターロゲーター）を用いたIndirect Path Ranging (IPR) のデータについても、データ取得の状況など有用性を精査した（東北大学〔課題番号：1210〕）。DPR方式では5局の組み合わせ中に音響パスが確保できたのは、海溝軸をまたぐ1基線のみであったが、海溝軸の収束状況を計測するという当初の最低限の目的は実現できた。その結果、昨年度までの成果である宮城沖の日本海溝と同様に有意な収束は見られず、福島沖の余効滑りが完全に海溝軸まで達していないか、あるいは2017年以降滑りが止まったことを示す結果を得た。一方、IPR方式は、音響パスを確保する目的通り、中層係留で設置した中継機の周囲の5局に対するすべてのパスが通り、正常に測距が行われていたことを確認した。IPR方式の解析手法はまだ確立されていないが、係留した中継機の動きがどの程度の精度でモニターできるかを解析し、その後、中継機を介した各基線長変化を推定する予定である。

次世代型広帯域海底地震計（BBOBS-NX）において自律展開設置・自己浮上方式を改良した新型機（NX-2G）の長期試験観測を2017年4月から実施し、2018年10月に機器とデータの回収に成功した（東京大学地震研究所〔課題番号：1521〕）。同地点では通常型のBBOBSも設置され記録が取られており、NX-2Gとのノイズレベル比較を実施した結果、これまでのBBOBS-NXとBBOBSでの差程は水平動ノイズレベルの改善が見られなかった。これは、センサー部と記録部を唯一つなぐ水中ケーブルの引き回しが悪く、ケーブルが十分に海底に落ちていなかったため、海中に浮遊状態にある記録部の振動がセンサー部へ伝わってしまったことによると考えられる。これは容易に解決可能であり、2002年に発案し開発を進めてきた、自己埋設方式センサーによる自己浮上型BBOBSが基本的には実現できた。

次世代海底設置システム試験・評価として、BMS（海底設置型掘削装置）に搭載する観測装置設置装置の開発と海域試験を実施し、水深1,879mにおいて海底下約2.5mにダミーセンサーの設置に成功した（海洋研究開発機構〔課題番号：4002〕）。水圧計校正技術の検証として、DONET2観測点近傍において移動式水圧校正装の再現性の検証を行い、0.09hPa（水深0.9mm相当）の再現性を確認した。このような校正技術により水圧計データを用い

た地殻変動観測の高精度化が実現することが示されたといえる。

成果リスト

- Agata, R., S. D. Barbot, K. Fujita, M. Hyodo, T. Iinuma, R. Nakata, T. Ichimura, and T. Hori, 2019, Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake, *Nature Communications*, 10, 1385, doi:10.1038/s41467-019-08984-7.
- Ando, R. and Y. Kaneko, 2018, Dynamic rupture simulation reproduces spontaneous multifault rupture and arrest during the 2016 Mw 7.9 Kaikoura earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 12875-12883, doi: doi.org/10.1029/2018GL080550.
- Arai, T., S. Kodaira, T. Takahashi, S. Miura and Y. Kaneda, 2018, Seismic evidence for arc segmentation, active magmatic intrusions and syn-rift fault system in the northern Ryukyu volcanic arc, *Earth Planets Space*, 70:61, doi:10.1186/s40623-018-0830-8.
- Chiba, T., Y. Nishimura, and T. Otsuka, 2018, Fossil diatom assemblages during the last millennium in the Toveri River mouth area, Hokkaido, Japan. *Diatom*, 34, 8-29, doi: 10.11464/diatom.34.8.
- Cho, I., and T. Iwata, 2019, A Bayesian approach to microtremor array methods for estimating shallow S wave velocity structures: Identifying structural singularities. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 124, doi:10.1029/2018JB015831.
- Fujie, G., S. Kodaira, Y. Kaiho, Y. Yamamoto, T. Takahashi, S. Miura and T. Yamada, 2018, Controlling factor of incoming plate hydration at the north-western Pacific margin, *Nature Communications*, 9:3844, doi:10.1038/s41467-018-06320-z.
- 富士原敏也・金松敏也・笠谷貴史, 2018, 佐田岬半島沖瀬戸内海における海底地形, 浅層構造, 重力調査. *JAMSTEC Report of Research and Development*, 27, 13-25, doi:10.5918/jamstecr.27.13.
- Fukao, Y., O. Sandanbata, H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, S. Watada, and K. Satake, 2018, Mechanism of the 2015 volcanic tsunami earthquake near Torishima, Japan, *Science Advances*, doi: 10.1126/sciadv.aao0219.
- Fujino, S., H. Kimura, J. Komatsubara, D. Matsumoto, Y. Namegaya, Y. Sawai, M. Shishikura, 2018, Stratigraphic evidence of historical and prehistoric tsunamis on the Pacific coast of central Japan: Implications for the variable recurrence of tsunamis in the Nankai Trough, *Quaternary Science Reviews*, 201, 147-161, doi:10.1016/j.quascirev.2018.09.026.
- Hamada Y., T. Hirose, A. Ijiri, Y. Yamada, Y. Sanada, S. Saito, N. Sakurai, T. Sugihara, T. Yokoyama, T. Saruhashi, T. Hoshino, N. Kamiya, S. Bowden, M. Cramm, S. Henkel, K. Homola, H. Imachi, M. Kaneko, L. Lagostina, H. Manners, H.L. McClelland, K.

- Metcalfe, N. Okutsu, D. Pan, M. J. Raudsepp, J. Sauvage, F. Schubotz, A. Spivack, S. Tonai, T. Treude, M.-Y. Tsang, B. Viehweger, D. T. Wan, E. Whitaker, Y. Yamamoto, K. Yang, M. Kinoshita, L. Maeda, Y. Kubo, Y. Morono, F. Inagaki, and V. B. Heuer, 2018, In-situ mechanical weakness of subducting sediments beneath a plate boundary décollement in the Nankai Trough, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:70, doi:10.1186/s40645-018-0228-z.
- Hamahashi, M., G. Kimura, W. Tanikawa, Y. Hamada, Y. Hashimoto, and S. Saito, 2018, Physical property anisotropy of foliated fault rocks: Study from the Nobeoka Thrust, Shimanto Belt, southwest Japan, *Island Arc*, 27, e12257, doi:10.1111/iar.12257.
- Han, R., J.-S. Kim, C.-M. Kim, T. Hirose, J. O. Jeong, and G. Y. Jeong, 2019, Dynamic weakening of ring faults and catastrophic caldera collapses, *Geology*, 47, 107-110, doi: 10.1130/G45687.1.
- Hasegawa, R., A. Yamaguchi, R. Fukuchi, Y. Hamada, N. Ogawa, Y. Kitamura, G. Kimura, J. Ashi and T. Ishikawa, 2019, Postseismic fluid discharge chemically recorded in altered pseudotachylyte discovered from an ancient megasplay fault: an example from the Nobeoka Thrust in the Shimanto accretionary complex, SW Japan, *Prog. Earth Planet. Sci.*, in press
- Hashimoto, Y., M. Stipp, J. C. Lewis and F. Wuttke, 2019, Paleo-stress orientations and magnitudes from triaxial testing and stress inversion analysis in Nankai accretionary prism sediments, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 6:3, doi: 10.1186/s40645-018-0249-7.
- 廣瀬仁・松澤孝紀, 2018, スロースリップイベントによる応力時間変化の計算: 房総半島スロースリップイベントへの適用と地震活動との対比, *神戸大学都市安全研究センター研究報告*, 22, 20-25.
- Iinuma, T., 2018, Monitoring of the spatio-temporal change in the interplate coupling at northeastern Japan subduction zone based on the spatial gradients of surface velocity field, *Geophys. J. Int.*, 213, 30-47, doi:10.1093/gji/ggx527.
- Ikeda, T. and T. Tsuji, 2018, Temporal change in seismic velocity associated with an offshore M_w 5.9 Off-Mie earthquake in the Nankai subduction zone from ambient noise cross-correlation, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:62, doi: 10.1186/s40645-018-0211-8.
- Ioki, K., Tanioka, Y., Yanagisawa, H., and Kawakami, G., 2019, Numerical simulation of the landslide and tsunami due to the 1741 Oshima-Oshima eruption in Hokkaido, Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, in press.
- Ishikawa, T. and Y. Yokota, 2018, Detection of Seafloor Movement in Subduction Zones Around Japan Using a GNSS-A Seafloor Geodetic Observation System from 2013 to 2016, *J. Disaster Res.*, 13, 511-517, doi:10.20965/jdr.2018.p0511.
- Kameda, J. and Hirauchi, K., 2018, Rheological properties of composite serpentine-brucite suspensions: Implications for mudflow behavior on forearc

- seamounts, *Marine Geology*, 403, 191-196, doi: 10.1016/j.margeo.2018.06.004.
- Kano, M., Fukuda, J., Miyazaki, S., and Nakamura, M., 2018, Spatio-temporal Evolution of Recurrent Slow Slip Events Along the Southern Ryukyu Subduction Zone, Japan, From 2010 to 2013. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123. doi:10.1029/2018JB016072.
- Kano, M., N. Aso, T. Matsuzawa, S. Ide, S. Annoura, R. Arai, S. Baba, M. Bostock, K. Chao, K. Heki, S. Itaba, Y. Ito, N. Kamaya, T. Maeda, J. Maury, M. Nakamura, T. Nishimura, K. Obana, K. Ohta, N. Poiata, B. Rousset, H. Sugioka, R. Takagi, T. Takahashi, A. Takeo, Y. Tu, N. Uchida, Y. Yamashita, and K. Obara, 2018, Development of a Slow Earthquake Database, *Seismol. Res. Lett.*, 89, 1566-1575, doi:10.1785/0220180021.
- 加納靖之・細 善信・尾上謙介, 2018, 1960年代の紀伊半島の傾斜計記録の復元, *東濃地震科学研究所地殻活動研究委員会報告書*, 40, 173-175.
- Katakami, S., Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, S. Suzuki, 2018, M. Shinohara, Spatiotemporal variation of tectonic tremor activity before the Tohoku-Oki earthquake, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 9676-9688, doi:10.1029/2018JB016651.
- Kimura, G., H. Koge and T. Tsuji, 2018, Punctuated growth of an accretionary prism and the onset of a seismogenic megathrust in the Nankai Trough, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:78, doi: 10.1186/s40645-018-0234-1.
- Kinoshita, M., K. Shiraishi, E. Demetriou, Y. Hashimoto, and W. Lin, 2019, Geometrical dependence on the stress and slip tendency acting on the subduction megathrust of the Nankai seismogenic zone off Kumano, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 6:7, doi:10.1186/s40645-018-0253-y.
- Koge, H., Y. Yamada, A. Ohde, A. Bauville, A. Yamaguchi and J. Ashi, 2018, Dynamic formation process of thick deformation zone on the shallow plate boundary fault of the Japan Trench: insight from analog experiments of half-graben subduction, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:69, doi: 10.1186/s40645-018-0230-5.
- Kubota, T., T. Saito, Y. Ito, Y. Kaneko, LM Wallace, S. Suzuki, R. Hino, and S. Henrys, 2018, Using tsunami waves reflected at the coast to improve offshore earthquake source parameters: Application to the 2016 Mw 7.1 Te Araroa earthquake, New Zealand, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 8767-8779, doi:10.1029/2018JB015832.
- 日下部哲也・亀伸樹, 2018, 津波のグリーン関数Kajiura Filterの級数表現の導出, *地震* 2, 71, 117-119, doi:10.4294/zisin.2017-16.
- 桑野修, 2018, 高速せん断される摩擦接触面の発熱の可視化—断層高速摩擦の素過程解明を目指して—, *可視化情報学会誌*, 38, 149, 65-68.
- Lackey, J., G. Moore and M. Strasser, 2018, Three-dimensional mapping and kinematic characterization of mass transport deposits along the outer Kumano Basin and Nankai accretionary wedge, southwest Japan, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:65, doi: 10.1186/s40645-018-0223-4.
- Miyakawa, A., M. Kinoshita, Y. Hamada and M. Otsubo, 2019, Thermal maturity structures

- in an accretionary wedge by a numerical simulation, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 6:8. doi:10.1186/s40645-018-0252-z.
- Muramoto, T., Y. Ito, D. Inazu, L. M. Wallace, R. Hino, S. Suzuki, S. C. Webb, and S. Henrys, 2019, Seafloor crustal deformation on ocean bottom pressure records with non-tidal variability corrections: application to Hikurangi margin, New Zealand, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 303-310, doi:10.1029/2018GL080830.
- Nagano, A., Y. Yamashita, T. Hasegawa, K. Ariyoshi, H. Matsumoto, M. Shinohara, 2018, Characteristics of an atypical large-meander path of the Kuroshio current south of Japan formed in September 2017, *Marine Geophys. Res.*, doi:10.1007/s11001-018-9372-5.
- Nakajima, J., and N. Uchida, 2018, Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip, *Nature Geoscience*, 11, 351-356, doi:10.1038/s41561-018.
- Nakano, M., M. Hyodo, A. Nakanishi, M. Yamashita, T. Hori, S. Kamiya, K. Suzuki, T. Tonegawa, S. Kodaira, N. Takahashi and Y. Kaneda, 2018, The 2016 Mw 5.9 earthquake off the southeastern coast of Mie Prefecture as an indicator of preparatory processes of the next Nankai Trough megathrust earthquake, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:30, doi: 10.1186/s40645-018-0188-3.
- Nishimura, T., Y. Yokota, K. Tadokoro, and T. Ochi , 2018, Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, *Geosphere*, 14, 535-551, doi:10.1130/GES01529.1.
- Noda, A., T. Miyauchi, T. Sato, and M. Matsu'ura, 2018, Modelling and simulation of Holocene marine terrace development in Boso Peninsula, central Japan, *Tectonophysics*, 731-732, 139-154, doi:10.1016/j.tecto.2018.03.008.
- Noda, A., T. Saito, and E. Fukuyama, 2018, Slip-deficit rate distribution along the Nankai trough, southwest Japan, with elastic lithosphere and viscoelastic asthenosphere, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 8125-8142, doi:10.1029/2018JB015515.
- Obana, K., Y. Nakamura, G. Fujie, S. Kodaira, Y. Kaiho, Y. Yamamoto, S. Miura, 2018, Seismicity in the source areas of the 1896 and 1933 Sanriku earthquakes and implications for large near-trench earthquake faults, *Geophys. J. Int.*, 212, 2061-2072, doi:10.1093/gji/ggx532.
- Ohtani, M., N. Kame, and M. Nakatani, 2019, Nucleation of characteristic earthquakes in simulated cycles involving deep huge slow slip events, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 124, 1822-1837, doi:10.1029/2018JB016156.
- Otsubo, M., H. Naruse and A. Miyakawa, 2018, Temporal changes in the internal stresses and pore pressures in a large-scale submarine mass transport deposit, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:59, doi; 10.1186/s40645-018-0219-0
- 奥田貴・内田直希・浅野陽一, 2018, Matched Filter法を用いた2011年東北地方太平洋沖地震直後の小地震の検出 - 釜石沖繰り返し地震クラスターへの適用 -, *地震*, 71,

- 87-101, doi:10.4294/zisin.2017-8.
- Okutsu, N., J. Ashi, A. Yamaguchi, T. Irino, K. Ikehara, T. Kanamatsu, Y. Suganuma, M. Murayama, 2018, Evidence for surface sediment remobilization by earthquakes in the Nankai forearc region from sedimentary records, Geological Society, London, Special Publications, 477, SP477. 22. doi:10.1144/SP477.22.
- Ozawa, S. W., T. Hatano, and N. Kame, 2019, Longer migration and spontaneous decay of aseismic slip pulse caused by fault roughness. *Geophys. Res. Lett.* 46, 10.1029/2018GL081465.
- Poiata, N., J.P.Vilotte, P.Berbnard, C.Satriano, K.Obara, 2018, Imaging different components of a tectonic tremor sequence in southwestern Japan using an automatic statistical detection and location method, *Geophys. J. Int.*, 205, 1548-1573, doi:10.1093/gji/ggy070.
- Saito, T., A. Noda, K. Yoshida, S. Tanaka, 2018, Shear strain energy change caused by the interplate coupling along the Nankai trough: An integration analysis using stress tensor inversion and slip-deficit inversion, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 5975-5986, doi:10.1029/2018JB015839.
- Sawazaki, K., T. Saito and K. Shiomi, 2018, Shallow temporal changes in S wave velocity and polarization anisotropy associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 9899-9913, doi:10.1029/2018JB016261.
- Shibazaki, B., H. Noda, and M. J. Ikari, 2019, Quasi-dynamic 3D modeling of the generation and afterslip of a Tohoku-oki earthquake considering thermal pressurization and frictional properties of the shallow plate boundary, *Pure and Appl. Geophys.*, 176, 1-23, doi:10.1007/s00024-018-02089-w.
- Shinohara, M., T. Yamada, H. Shiobara, Y. Yamashita, 2018, Development and Evaluation of Compact Long-term Broadband Ocean Bottom Seismometer, 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO), 1-4, doi:10.1109/OCEANSKOBE.2018.8559338.
- Suetsugu, D., H. Shiobara, H. Sugioka, N. Tada, A. Ito, T. Isse, K. Baba, H. Ichihara, T. Ota, Y. Ishihara, 2018, S. Tanaka, M. Obayashi, T. Tonegawa, J. Yoshimitsu, T. Kobayashi, and H. Utada, The OJP array: seismological and electromagnetic observation on seafloor and islands in the Ontong Java Plateau, *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, 26, 54-64, doi: 10.5918/jamstecr.26.54.
- 高橋美紀・廣瀬丈洋・飯尾能久, 2018, 断層の強度に関する論争と学際的アプローチの必要性. *地質学雑誌*, 124, 725-739.
- 田中愛幸・黒石裕樹・香取秀俊, 2018, 光格子時計の地震・火山研究応用の可能性を探る, *地震ジャーナル*, 65, 36-44.
- Takemura, S., T. Matsuzawa, T. Kimura, T. Tonegawa, and K. Shiomi, 2018, Centroid moment tensor inversion of shallow very low frequency earthquakes off the Kii Peninsula, Japan, using a three-dimensional velocity structure model, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 6450-6458, doi:10.1029/2018GL078455.

- Takeo, A., H. Kawakatsu, T. Isse, K. Nishida, H. Shiobara, H. Sugioka, A. Ito, and H. Utada, 2018, In situ characterization of the lithosphere - asthenosphere system beneath NW Pacific ocean via broadband dispersion survey with two OBS arrays, *G-cubed*, 19, 3529-3539, doi:10.1029/2018GC007588.
- Tanigawa, K., M. Shishikura, O. Fujiwara, Y. Namegaya, D. Matsumoto, 2018, Mid to late Holocene marine inundations inferred from coastal deposits facing the Nankai Trough in Nankoku, Kochi Prefecture, southern Japan, *Holocene*, 28, 867-878, doi:10.1177/0959683617752837.
- Tanioka, Y., M. Shibata, A. Gusman, Y. Yamanaka, and K. Ioki, 2019, Generation Mechanism of Large Later Phases of the 2011 Tohoku-oki Tsunami Causing Disaster at Hakodate, Hokkaido, Japan, *Prog. Earth. Planet. Sci.*, 6:30, doi:10.1186/s40645-019-0278-x.
- Todd, E.K., S.Y. Schwartz, K. Mochizuki, L.M. Wallace, A.F. Sheehan, S.C. Webb, C.A. Williams, J. Nakai, J. Yarce, B. Fry, S. Henrys, Y. Ito, 2018, Earthquakes and Tremor Linked to Seamount Subduction During Shallow Slow Slip at the Hikurangi Margin, New Zealand, *J. Geophys. Res.*, 123, 6769-6783, doi:10.1029/2018JB016136.
- Tsuru, T., J. Park, T. No, Y. Kido, and K. Nakahigashi, 2018, Visualization of attenuation structure and faults in incoming oceanic crust of the Nankai Trough using seismic attenuation profiling, *Earth Planets Space*, 70:31, doi:10.1186/s40623-018-0803-y.
- Tsuru, T., K. Amakasu, J. Park, J. Sakakibara, and 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 Planets Space*, 71: 31, doi:10.1186/s40623-019-1011-0.
- Usami, K., K. Ikehara, T. Kanamatsu and C. M. McHugh, 2018, Super cycle in great earthquake recurrence along the Japan Trench over the last 4000 years, *GeoScience Letters*, doi:10.1186/s40562-018-0110.
- Uchida N, R. Bürgmann 2019, Repeating earthquakes, *Annual Review Earth Planet. Sci.*, 47, doi:10.1146/annurev-earth-053018-60119.
- Uemura, M. Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, M. Shinohara, 2018, Spatio-temporal changes in the seismic velocity induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and slow slip event revealed from seismic interferometry, using ocean bottom seismometer' s records, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:87, doi:10.1186/s40645-018-0240-3.
- Wang, K., T. Sun, L. Brown, R. Hino, F. Tomita, M. Kido, T. Iinuma, S. Kodaira, T. Fujiwara, 2018, Learning from crustal deformation associated with the M9 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geosphere*, 14, 552-571, doi:10.1130/GES01531.1.
- Wang, T., J. Zhuang, J. Buckby, K. Obara, H. Tsuruoka, 2018, Identifying the recurrence patterns of non - volcanic tremors using a 2D hidden Markov model with extra zeros, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 10.1029/2017jb015360.

- Wiersberg, T., S. B. Hammerschmidt, S. Fuchida, A. Kopf and J. Erzinger, 2018, Mantle-derived fluids in the Nankai Trough Kumano forearc basin, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:79, doi: 10.1186/s40645-018-0235-0.
- Xu, S., E. Fukuyama, and F. Yamashita, 2019. Robust estimation of rupture properties at propagating front of laboratory earthquakes, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 124, doi:10.1029/2018JB016797.
- Yabe, S. and S. Ide, 2018, Variations in precursory slip behavior resulting from frictional heterogeneity, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:43, doi:10.1186/s40645-018-0201-x.
- Yamamoto, R., M. Kido, Y. Ohta, N. Takahashi, Y. Yamamoto, A. Pinar, D. Kalafat, H. Ozener, and Y. Kaneda, 2019, Seafloor geodesy revealed partial creep of the North Anatolian Fault submerged in the Sea of Marmara, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 1268-1275, doi:10.1029/2018GL080984.
- Yokota, Y., T. Ishikawa and S. Watanabe, 2018, Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS-A oceanography. *Marine Geophys. Res.*, 1-12.
- Yokota, Y., T. Ishikawa and S. Watanabe, 2018, Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations, *Scientific Data*, 5:180182, doi: 10.1038/sdata.2018.182.
- Yoshida, S., 2018, Numerical simulations of earthquake triggering by dynamic and static stress changes based on a revised friction law, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 4109- 4122, doi:10.1029/2017JB014781.

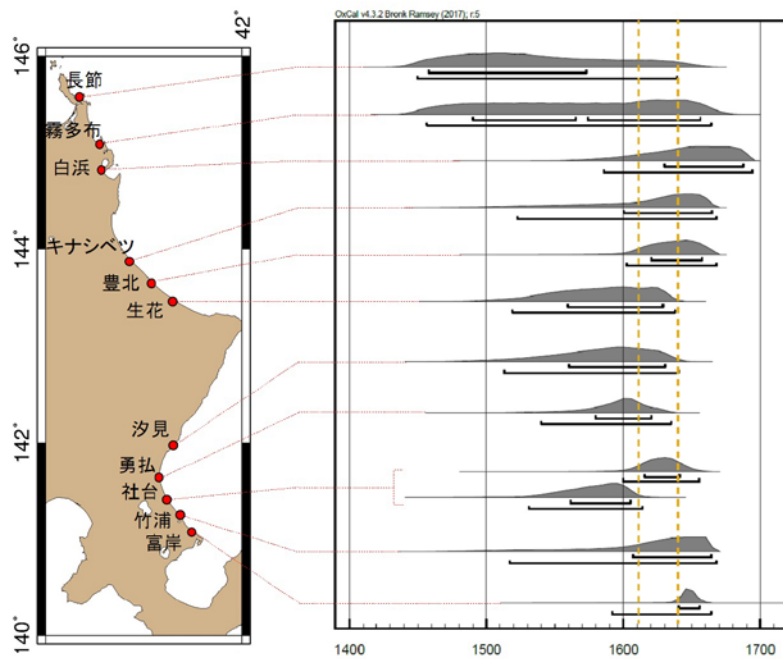


図1. 北海道太平洋沿岸における17世紀津波堆積物の年代推定結果（北海道大学〔課題番号：1002〕）。

右図の縦点線は西暦1611年，1640年の位置を示す。

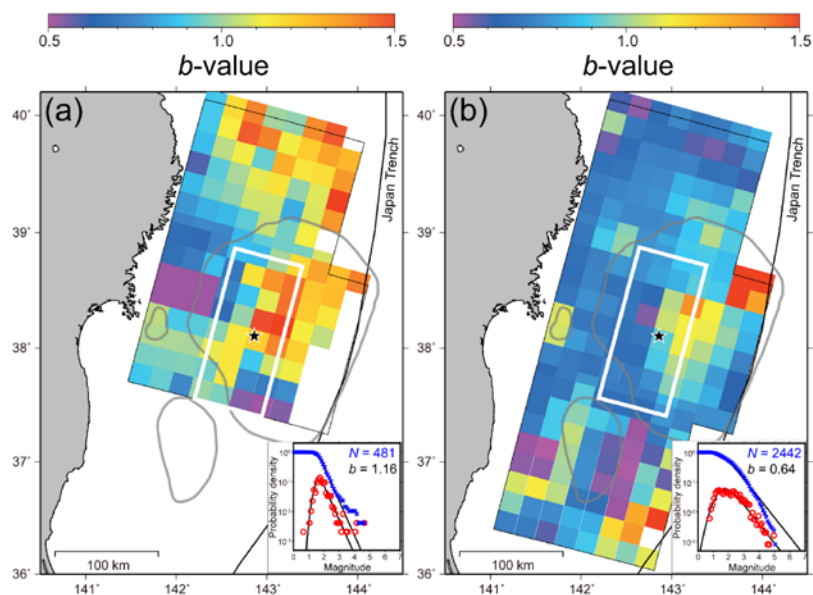


図2. 東北沖のプレート境界で発生した地震に対するb値の時間変化（東京大学地震研究所〔課題番号：1503〕）。

(a) 東北沖地震前及び(b)地震後のG-R則のb値の空間分布。b値推定手法はMaximum Curvature法 (Wiemer and Wyss, 2000)。星印は東北沖地震の震源，灰色コンターはIinuma et al. (2012)による本震時滑り分布 (10 m) を示す。挿入図は地図上の白色矩形域内で発生した地震 (N: 全地震数) の規模別頻度分布 (赤: 非累積頻度, 青: 累積頻度) を示す。ただし，ここでのb値はOgata and Katsura (1993)の最尤推定モデル (黒線) から得た。

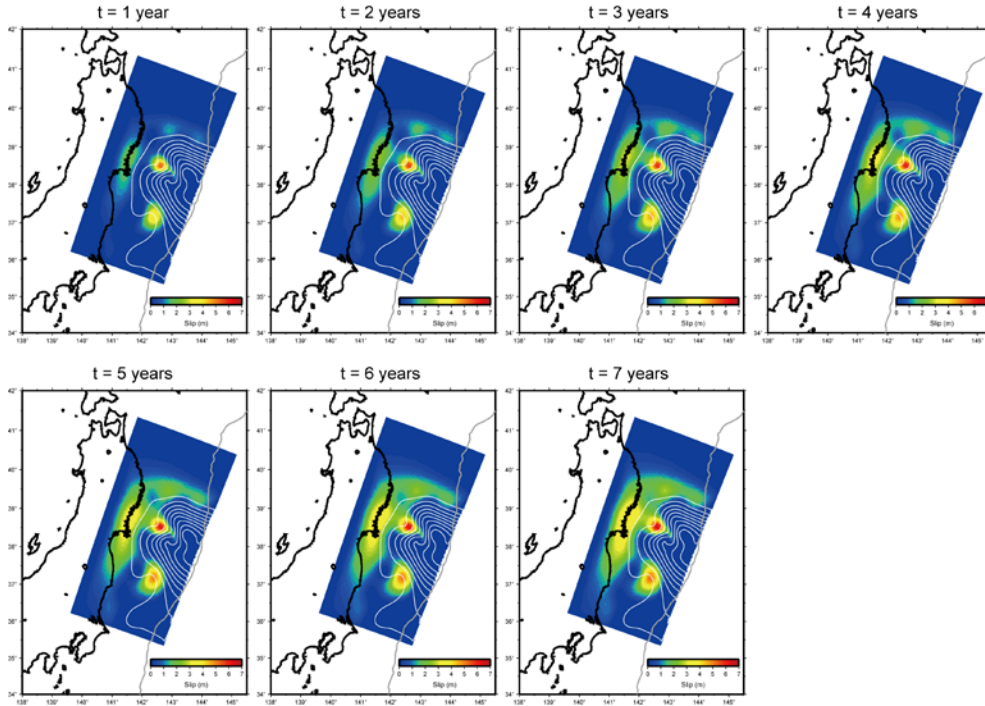


図3. 東北地方太平洋沖地震の余効滑り分布の時間発展（京都大学理学研究科 [課題番号：1803]）。

推定された地震時の滑り分布（白コンター）及び推定されたパラメータを用いてモデルから計算された積算余効滑り分布（カラスケール）の時間変化。コンターの間隔は5 m。

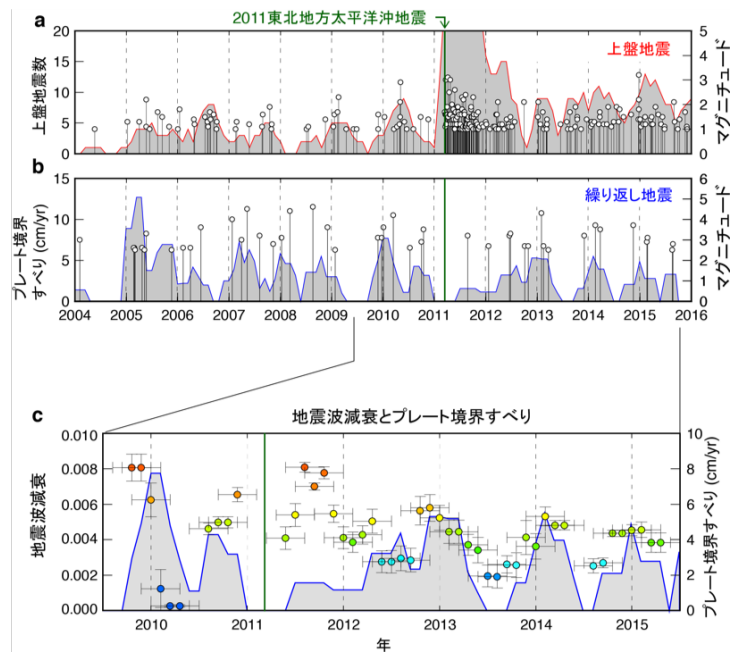


図4. 茨城県南西部における地震活動とP波減衰の時間変化（東京大学地震研究所 [課題番号：1510]，Nakajima and Uchida, 2018）。

(a) 上盤地震の地震数，(b) 繰り返し地震から推定したプレート境界の滑りレート，(c) 地震波減衰の時間変化とプレート境界の滑りレート。

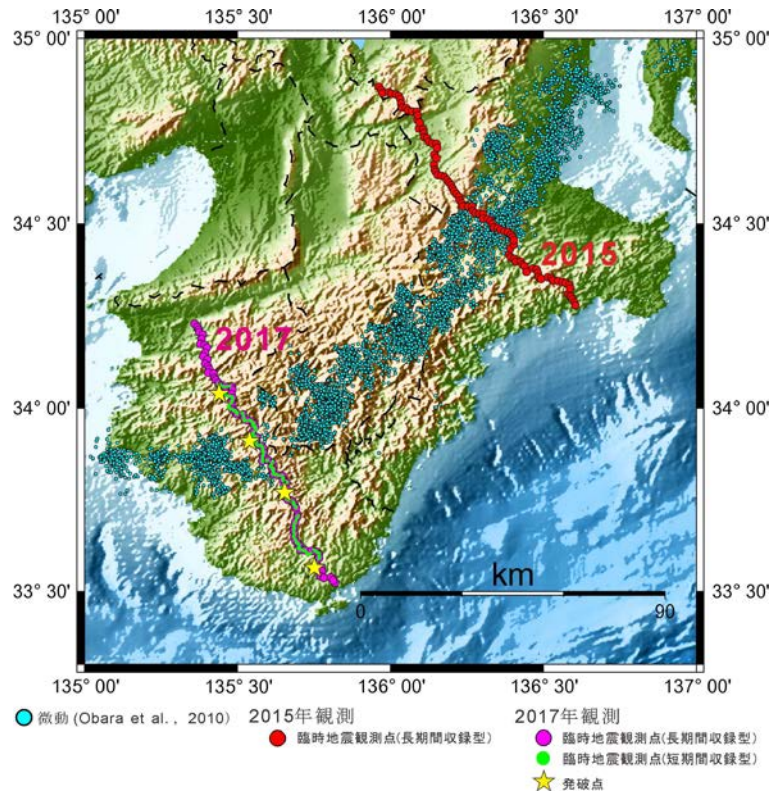


図5. 紀伊半島における臨時地震観測点配置図(東京大学地震研究所[課題番号:1509])。

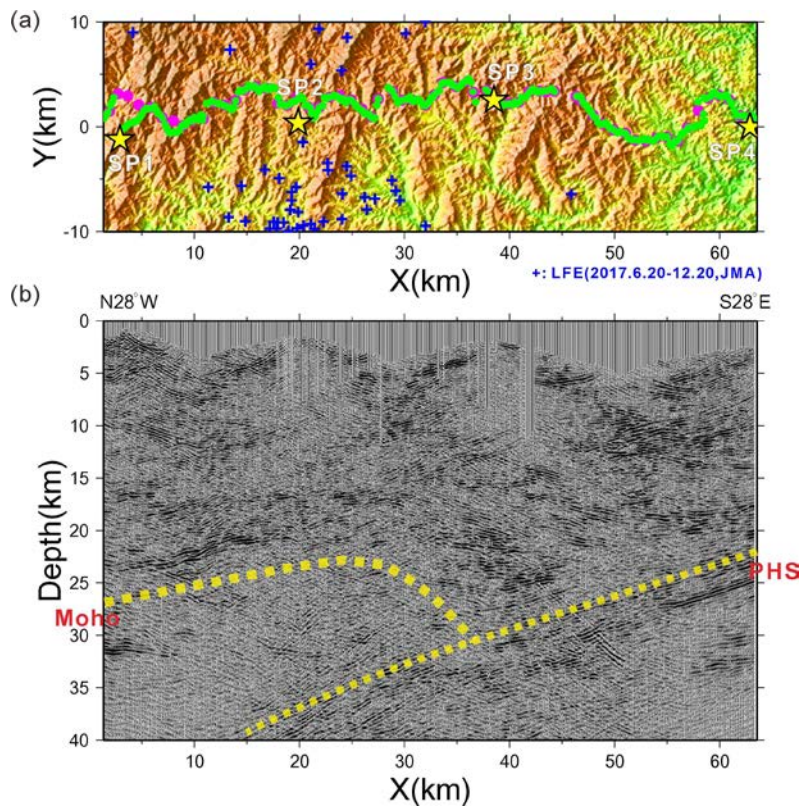


図6. 2017年測線(図5)下の反射法断面図(東京大学地震研究所[課題番号:1509])。
 (a) 探査測線と気象庁一元化震源カタログによる低周波地震(2017.6.20-2017.12.20)の震央分布図。(b) 深度断面図。

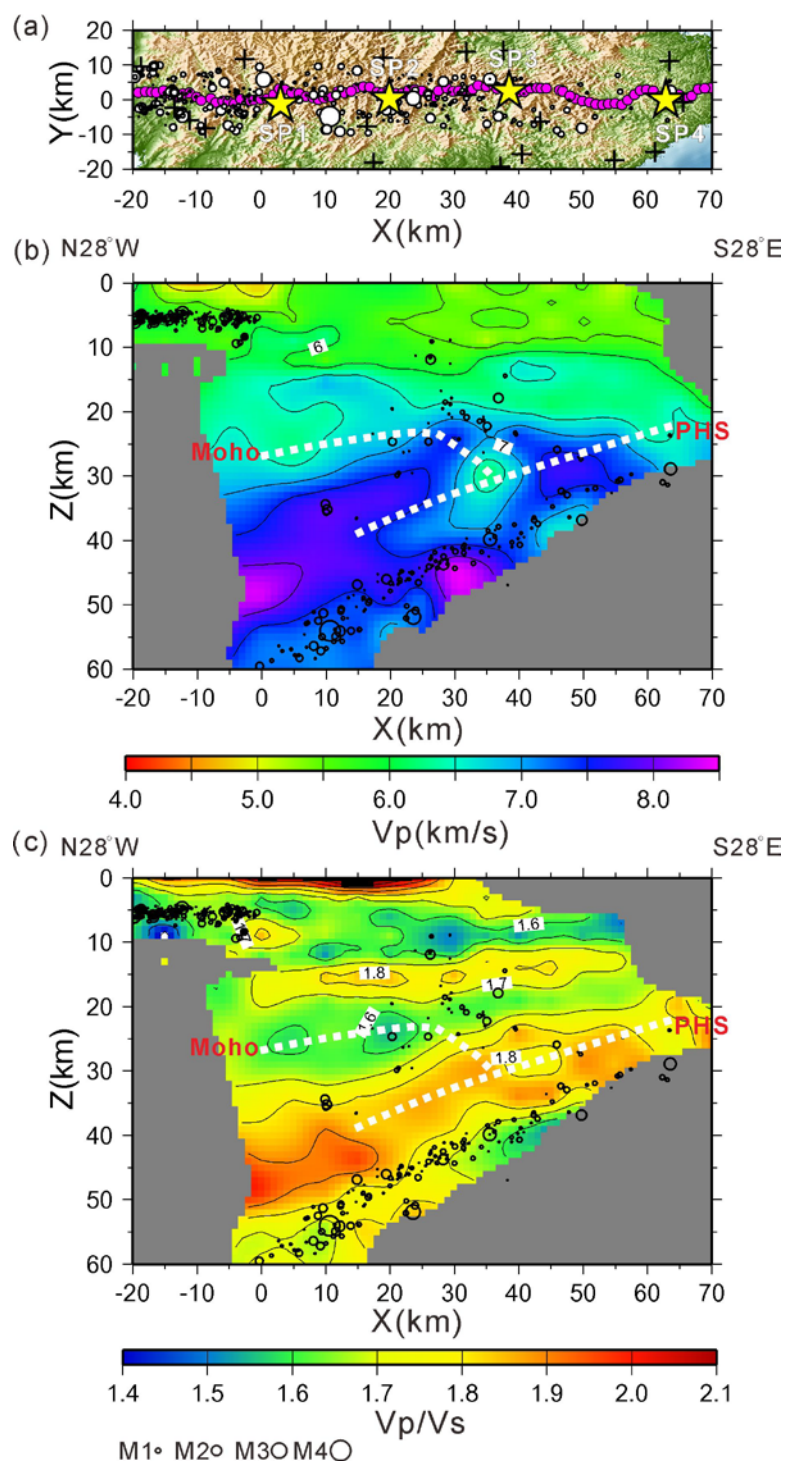


図7. トモグラフィー解析により得られた2017年測線（図5）下の地震波速度構造と震源分布（東京大学地震研究所 [課題番号：1509]）。

(a) 紫色丸印が臨時観測点，+が定常観測点，星印は発破点位置を示す。白色丸印は再決定した震央分布を示し，その大きさがマグニチュードを表す。(b) P波速度構造。(c) V_p/V_s 構造。

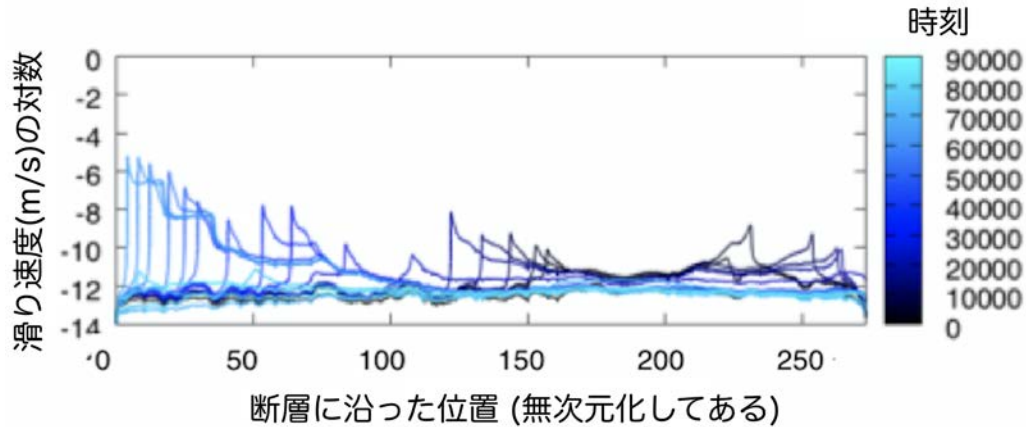


図8. 粗い断層における滑り速度の時間発展の例 (東京大学地震研究所 [課題番号: 1507], Ozawa et al., 2019)。

断層の右側で始まった核形成がなかなか加速せず左側へ移動して行く。

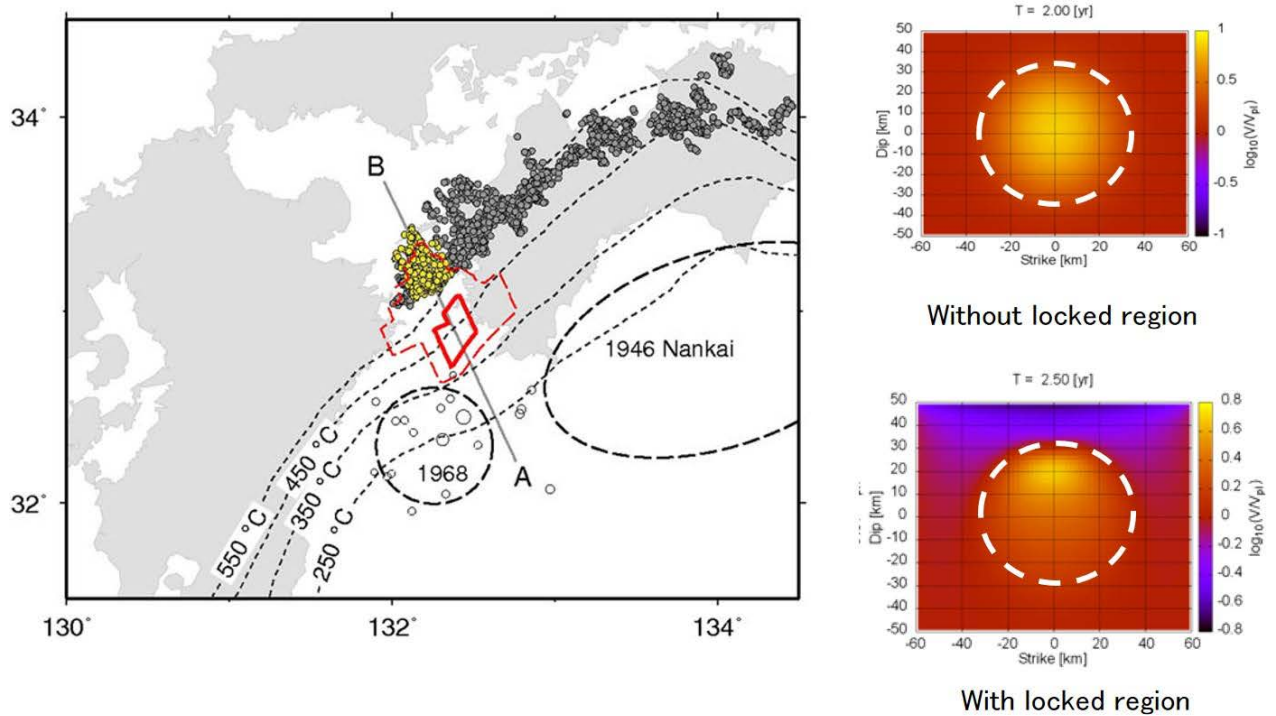


図9. 豊後水道長期的SSE域における滑り分布の観測とシミュレーション (京都大学理学研究科 [課題番号: 1801])。

(左図) Nakata et al. (2017)のスパースモデリングにより推定された2010年豊後水道長期的SSEの滑り分布。赤実線及び赤点線で囲まれた部分は、それぞれ、滑り量が0.2 m, 0.1 m以上の領域を示す。(右上図) 固着域が無い場合の、シミュレーションによる長期的SSE発生時の滑り速度分布。(右下図) 固着域が有る場合の、シミュレーションによる長期的SSE発生時の滑り速度分布。点線円は長期的SSEパッチを示す。

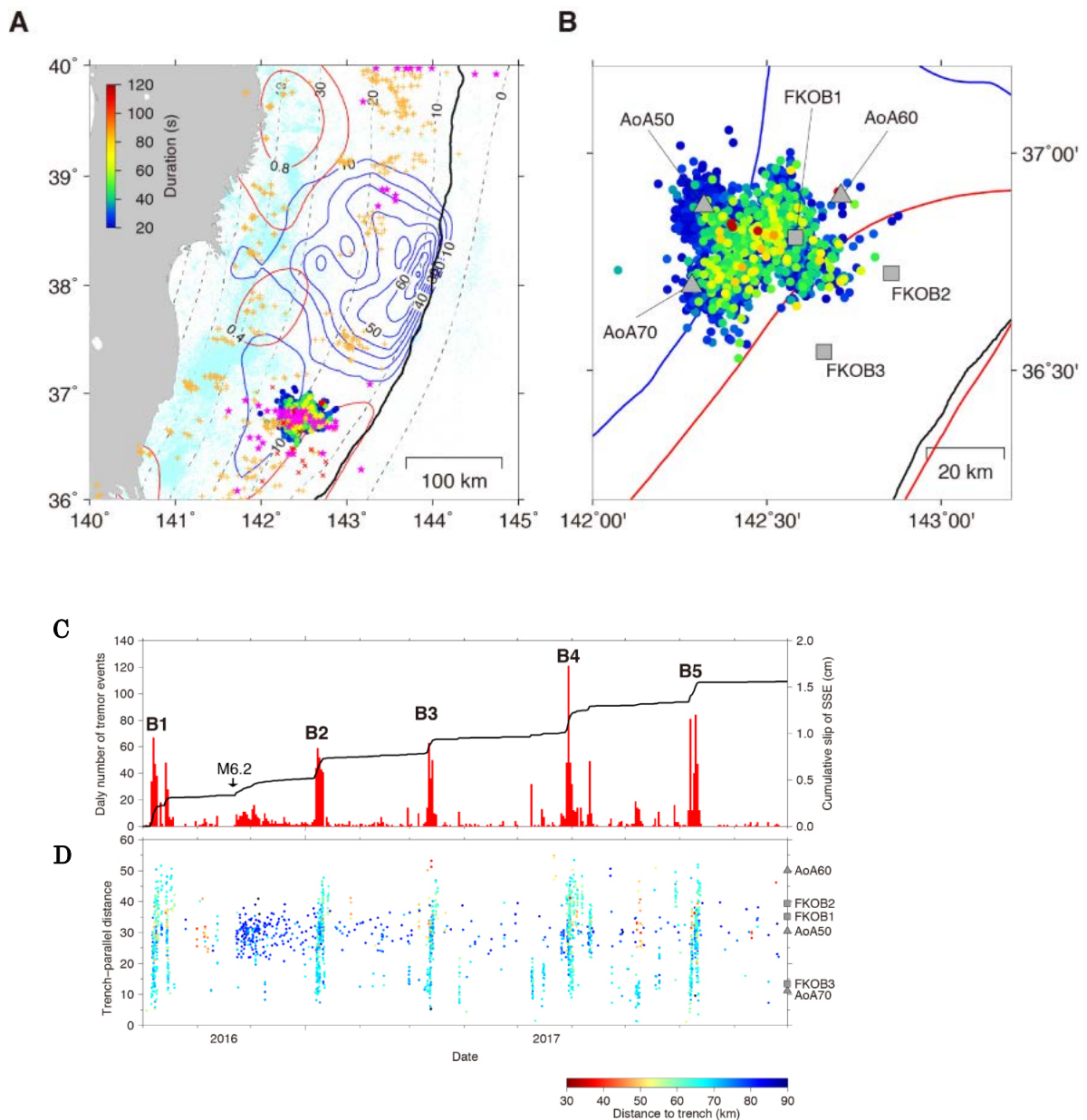


図 10. 日本海溝南部で検知された低周波微動の空間分布と時空間変化。(東京大学地震研究所 [課題番号: 1503])

(A) 微動の継続時間に応じた色をつけた丸印で震央を示す。VLFE (紫星), 小繰り返し地震 (橙十字), 気象庁一元化処理による震央 (水色点) をあわせて示す。青色コンター (10 m 間隔) と赤色コンター (0.4 m 間隔) は, 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う地震時及び余効滑りの分布。(B) 微動発生域周辺の拡大図。海底地震観測点をあわせて示す。(C) 日別の個数分布と微動活動から換算された対応する SSE による累積滑り。(D) 海溝軸に沿う方向に投影した微動活動の時空間プロット。検知された微動イベントをその震央の海溝軸からの距離に応じた色シンボルで示す。

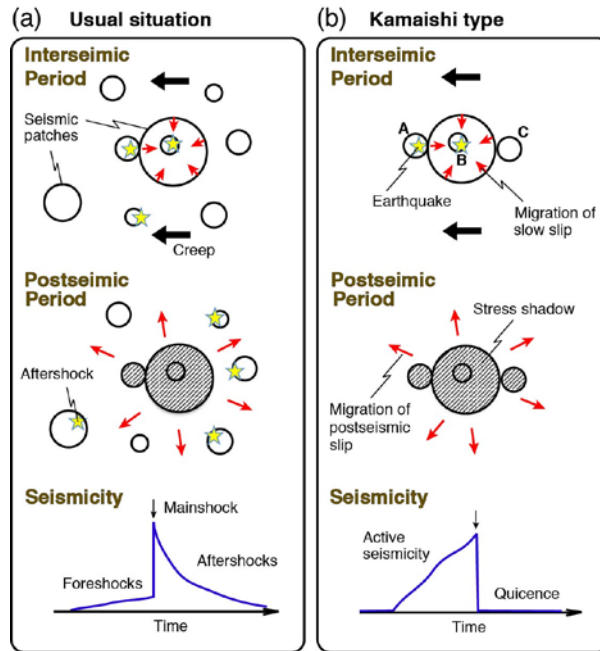


図11. 本震発生前後の地震活動（☆印）を説明するモデル（東京大学地震研究所〔課題番号：1510〕，奥田・他，2018）。

(a)通常の場合、(b)釜石沖地震の場合。通常の場合では、大きな固着域の周りに小さな固着域が存在するが、釜石沖地震の場合はそれが存在しない。地震間（本震前）は通常の場合では、大きな固着域内外で地震が発生する。一方、本震後は大きな固着域の周りに小さな固着域がない釜石沖では余震が発生しない。

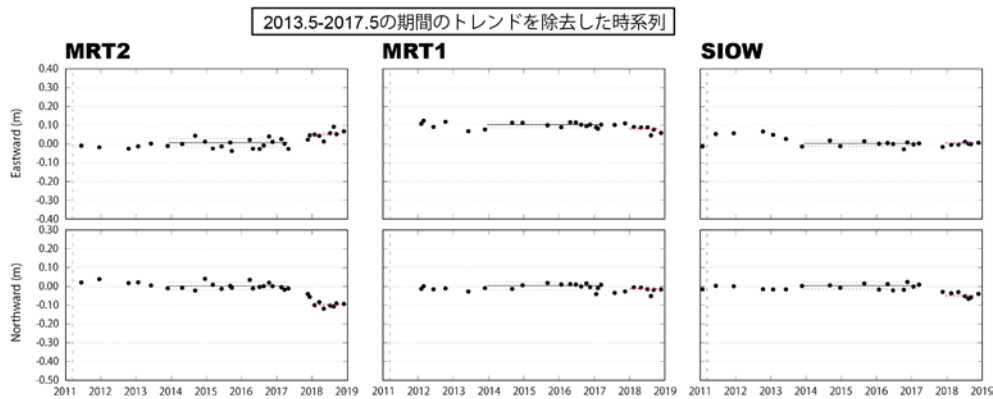
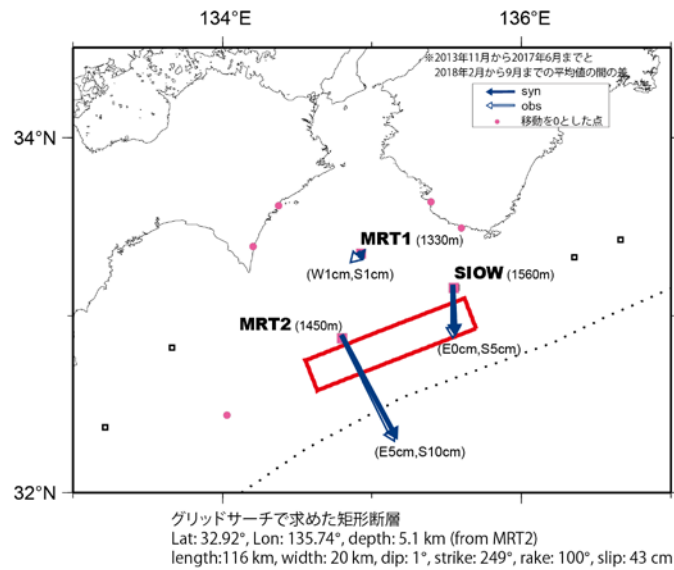


図 12. 紀伊水道沖の海底における非定常地殻変動（海上保安庁 [課題番号：8001]）。
 上図の白抜き矢印は、2013 年 11 月から 2017 年 6 月の間の平均値と 2018 年 2 月から 2018 年 9 月の間の平均値の差から求めた非定常地殻変動。赤四角はグリッドサーチで求めた矩形断層の最適解。赤丸は変動量を 0 とした観測点。青矢印は断層モデルから計算された変動。下図は、上図に示した 3 観測点でのデトレンド後の変位時系列。

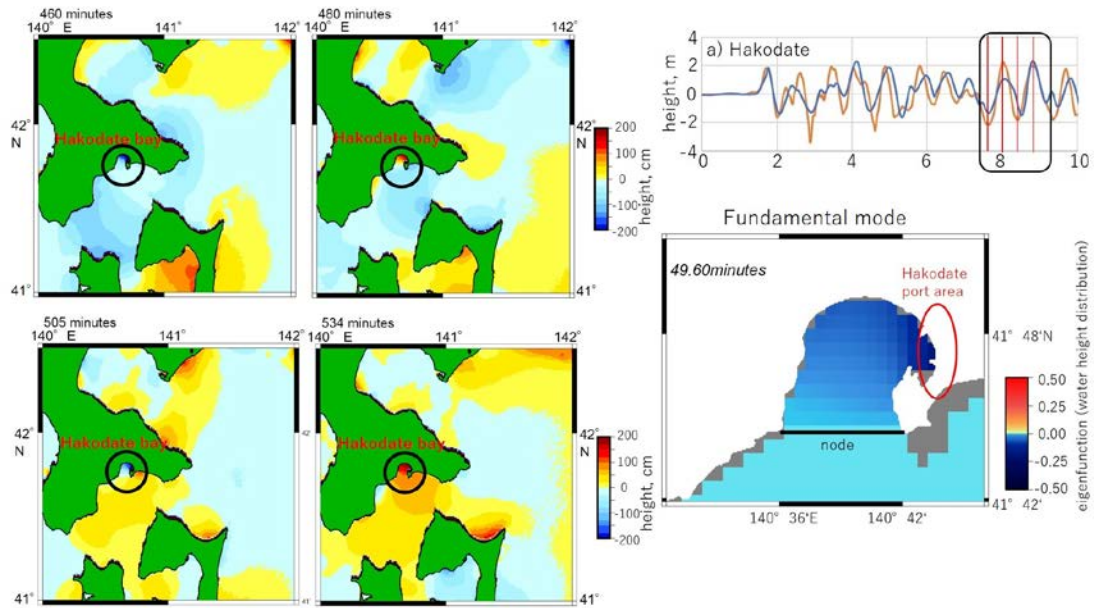


図 13. 2011 年東北地方太平洋沖地震で励起された函館での後続波の解析結果（北海道大学 [課題番号：1002]）。

（左）函館周辺での津波スナップショット（地震発生後 460 分，480 分，505 分，534 分）。（右上）函館での観測津波波形（青）と計算津波波形（橙）。（右下）函館湾の基本モード（周期 49.6 分）。函館港沿岸で波高が特に大きい。

1 (2) 内陸地震

「内陸地震」計画推進部会長 松本 聡（九州大学大学院理学研究院）

副部会長 上嶋 誠（東京大学地震研究所）

1. 5年間の成果

はじめに

内陸地震の発生を予測するためには、広域的に内陸地殻に载荷される応力、地震断層周辺の応答、地震断層での応力状態と強度を把握し、その時間発展を求めなければならない。しかしながらこれらを直接見積もることは現状では困難である。そのため、今期計画においては観測、実験、理論的研究を総合し、地震発生場や地震発生モデル化の研究を進めてきた。特に、規模の大きな地震の発生する場の特性や影響を理解し、地震がどのように発生に至ったのかを解明するための研究をおこなった。今期の研究期間においても2011年東北地方太平洋地震による大きな内陸地震発生場の変化が継続していたと考えられ、地震に対する地殻応答を解明する重要な機会であった。そのため、前期計画に引き続き、地殻応答解明を重要なテーマの一つとして取り上げ、解明を進めた。また、今期計画中には、大きな被害を及ぼした2016年熊本地震（M7.3）が発生したため、その発生メカニズムを探るための多岐にわたる観測研究が推進された。また、地震発生場は火山の存在によって影響されることが考えられるため、地震火山相互作用の研究も進められた。

一方では、現象解明だけではなく、得られた発生場の特性から地震発生空間ポテンシャル評価に向けた研究、海溝—内陸におよぶ島弧システムの変形過程シミュレーションへ資するための構造共通モデル構築を進めた。同時に、地震動即時予測や予測検証実験に本部会で得られた成果を出力するなど、他部会との連携をすすめた。

図1に今期5年間の内陸地震関係研究推進体制を示す。以前の建議に沿った研究においては、小課題が乱立したことによって研究が必ずしも統一的に推進されず、成果も総合的に解釈することが困難であった。その反省を受け、今期においては、多くの方々の努力によって観測—実験—シミュレーションなどを包含する少数の総合研究課題を立ち上げ、その総合研究を推し進めた。また、これらを総合的に議論する課題を策定することにより部会全体で成果や問題点を共有することができた。さらに、将来のための技術開発に関する課題や、基礎的研究を地道に行う課題もあわせて、内陸地震研究は推進された。

以下では内陸地震発生場の解明に向けて行った研究の成果として、東北地方太平洋沖地震後の地殻応答、熊本地震、応力場、変形場、構造、強度、についての主要な成果、地震火山相互作用、地震発生空間ポテンシャルに関する研究や、構造共通モデル構築を目指した研究に関する成果を述べる。

(1) 平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震後の地殻応答

2011年3月11日に我が国観測史上最大のマグニチュード（M）9.0をもつ2011年東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震により、日本列島の地殻は大きな影響を受けた。GNSS観測によって東北日本は東西に伸張され、その後の繰り返し観測により少なくとも地震時・5ヵ年の地殻応答を観測することができた。また、各地で地震活動の活発化・静穏化が見られ、そのメカニズムについての知見が得られた。特に地殻応答の観測による検出・実験・シミュレーションにより内陸地殻のレオロジー構

造を得ることを目的とした研究[1203, 東北大学]が進められた。その結果, 1) 余効変動には粘性緩和の影響が大きく含まれており, また, データとモデルの比較により粘性率の不均質性や非線形性が次第に明らかになってきた。2) 余効滑りに起因する粘性緩和や, 粘性緩和による応力変化に起因する余効滑りの進展など, 余効滑りと粘性緩和の相互作用についても正しく評価することが, 余効変動の長期予測には極めて重要であることもわかってきた。3) プレート境界浅部の固着が数百年にわたり継続することで, マントルウェッジ及びプレート境界深部の粘性せん断帯における粘弾性緩和が進行してプレート境界深部のすべり欠損レートが時間とともに増加し, 前弧域において巨大地震サイクル後半にかけて沈降速度が増加していくことが示された。このようにプレート境界型巨大地震の全体像と発生サイクルを理解するためには粘性緩和を正しく評価することが重要であることがしめされた(例えば図2のように粘性を適切に評価しないと, 地殻や上部マントルの地震の発震機構解を説明できない)。また, 地殻応答を支配する重要な要素である, 構造や応力場, 流体について, 1) 3次元比抵抗構造が次第に明らかになり, 東北地方の下部地殻は, いわき付近を除いて, 基本的に前弧は高比抵抗, 背弧は低比抵抗となっていることが明らかになってきており, これらの分布は地震活動の不均質性とも大局的には良く対応している。2) 内陸の地震発生域もプレート境界も, 強度が30 MPa程度以下しかないこと, 3) 様々な地震活動域の下には顕著な地震波反射面が検出された。これらのことから, 流体による強度低下や低差応力下の応力の擾乱が地震発生に大きくかかわっていることが示唆された。今後, 流体の分布や応力場不均質構造をさらに詳細に明らかにしていくことで, 地震が起りやすい場所が絞り出され, それによって内陸地震発生空間ポテンシャル評価につながる可能性がある。

(2) 平成28年(2016年)熊本地震

2016年4月14日, 熊本県熊本地方の深さ11kmでM6.5の地震が発生し, 熊本県益城町で震度7を観測した。その約28時間後の4月16日には深さ12kmでM7.3の地震が発生し, 熊本県益城町, 西原村で震度7を観測した。この地域は布田川断層帯, 日奈久断層帯, 別府-万年山断層帯が存在し, かねてから地震活動が活発であったため, 地震発生前から地震観測・GNSS観測が稠密に実施されていた[2201, 九州大学]。

今回の一連の地震活動領域には, 布田川断層帯, 日奈久断層帯, 別府-万年山断層帯が存在している。最大前震(M6.5)は日奈久断層側で発生し, 本震(M7.3)は日奈久・布田川断層ですべりを起こした(Asano and Iwata, 2016)。これらの地震に伴って, 布田川-日奈久断層帯の約31kmに渡って地表断層が出現し, 主として横ずれ断層すべりを呈することが明らかになった。地表踏査だけでなくDEMを用いた変位量の検討もなされ, 布田川で地震時の変位量が最大2.5m程度に及ぶことも明らかになった[1702: 名古屋大学]。

GNSS連続観測およびSAR干渉解析によると, 4月14日M6.5および4月15日M6.4の地震の震源断層は, 北東-南西方向のやや西に傾き下がる高角の断層が右横ずれ的に動いたと推定された。4月16日M7.3の本震は, 布田川断層帯および日奈久断層帯に沿った位置に震源断層が推定された[6001: 国土地理院]。一方, 余震活動から見積もられる断層は西傾斜の日奈久断層側, 北西傾斜の布田川断層側の主として2つの断層のほかにも南東傾斜の2つの分岐した断層面が見出された。分岐断層にはM6.5, M7.3の地震の破壊開始点が位置し, 小さい断層から破壊が始まり, 日奈久・布田川断層帯の主断層で大きなすべりを起こしたことが見出された[2201: 九州大学]。

GNSS データの時系列解析から、地震発生直後 60 日間程度には急激な余効変動が継続したが、その後はゆっくりとした変動が現在に至るまで継続していることが明らかにされた[6001：国土地理院，2201：九州大学]。粘性緩和による変動を観測データから取り除いた後に、余効滑りをフォワードモデリングで求める試みもすすみ、余効滑りは布田川断層と日奈久断層帯の境界付近で大きな滑りが分布していることが見いだされた[6001：国土地理院]。

熊本地震を発生させた応力場については、この地震発生前から現地に展開されていた臨時地震観測網により詳細に捕らえられていた。それらによると、地震前から日奈久断層側では横ずれ応力場が卓越、布田川断層側では横ずれ・正断層応力場が卓越する顕著な空間不均質性が存在していた。M6.5, M7.3 の最大前震や本震の地震時すべりはこの応力場と断層面形状から決められる最大せん断方向にほぼ従うことが示された。自然地震でこのような観測結果が検出されたのは世界初の成果であった。また、地震前の応力場と断層面形状から、断層面上に働く応力の影響が異なり、それが地震時のすべりを制御している可能性も示唆された(図3)。この結果は、地震前応力場と断層面を想定することで、地震の複雑なすべりを予測することが可能であることを示し、強震動予測や空間ポテンシャル評価に寄与するものである[2201：九州大学]。

また、2016 年熊本地震の震源域を含む九州中部の地殻構造が詳しく調査され、本震後に活発化した熊本一大分の地震活動は、阿蘇山・九重山・鶴見岳といった活火山下の低比抵抗域を避けて発生していることが明らかにされた[2201：九州大学]。

(3) 応力場，変形場

地殻応力・変形場は、地震発生予測に迫るための重要な情報である。近年発生した内陸地震震源域での高密度な地震観測データから、地殻内の応力場についてさまざまな成果が得られた。2011 年東北地方太平洋沖地震によって大きな応力変化を受けた東北地方各地で発生した誘発地震は、その発生と応力変化の様式との間にあまり関連が認められないことから、地殻深部流体の上部地殻への流入で誘発されたことが示唆された。応力の主軸方向は大きくばらつくが、絶対応力値は必ずしも大きくないことが示唆された[1203：東北大学]。さらに、微小地震の発震機構解から列島規模の応力場が推定され、多くの活断層が現在の応力場に対して滑り易い方向に形成される傾向をもっていることがわかった[1905：京都大学]。また、内陸地震発生域などにおける稠密な地震観測によって、応力場は強い空間不均質を持つことが示された[1203：東北大学，1905・1907：京都大学，2201：九州大学，5008：産総研]。また、地震の応力降下量も不均質であることが示されている[1101：弘前大学]。このように、観測事実として応力状態やその変化が複雑である結果は、地震発生ポテンシャル評価に向けた重要な進歩である。

一方で、変形場は地震発生領域に載荷する応力を検討するためにもきわめて重要な観測量である。GNSS 観測でひずみ集中帯を見つけ、その特性を調べるのが重要であるが、山陰地方においても歪集中帯の存在が確認された[1907：京都大学]。また、2011 年東北地方太平洋沖地震後に行われた GNSS 繰り返し観測から、越後平野のひずみ集中帯で周辺に比べ小さな伸長ひずみが観測され、2011 年東北地方太平洋沖地震のような遠方からの外力に影響されることなくひずみ集中が進行していることが明らかにされた[6001，国土地理院]。さらに、跡津川断層周辺の GNSS データを用いて東北地方太平洋沖地震前・地震後の歪速度場、および地震時の歪変化が推定され、これらから長波長トレンドを除去して局所的な歪速度の変化が調べられた。その結果、地震前および地震後の歪速度場は互いに似ており、

また地震時の歪分布は全く異なるパターンを示した(図4)[1907:京都大学]。これらは、地殻が弾性的のみではなく非弾性的に変形していることを示す結果で、変形場と応力場をつなぐための必須な情報であることが示された。実際、微小地震活動から見積もられた非弾性ひずみの大きな領域の端で2016年熊本地震が発生しており[2201:九州大学]、弾性・非弾性変形の見積もりは今後の研究展開にも重大な役割を担っていくことになる。

求められた応力不均質を生み出す、応力集中・緩和のメカニズムは、変形場や構造とともに検討される必要がある。今期計画においては、さまざまなアプローチを用いてそれに迫ることができた。たとえば、地殻変動データに基づく西南日本地域のブロック断層モデルからは、明瞭な活断層が見られない山陰地方と南九州にひずみ集中帯が存在することが明らかになった。[1907:京都大学]。このブロック断層モデルは、ひずみ集中などの特異な構造を明らかにする有力な手段であり、今後、ブロック内部の弾性・非弾性変形をさらに確かなものにするによって、断層への応力集中の推定精度をあげる必要がある。

(4) 構造

内陸地震発生モデル化へ向けて地殻深部から上部マントルに至る広域の地震波速度や比抵抗の構造が推定された。今期計画においては稠密地震観測による詳細な速度構造だけでなく、広域かつ3次元的な比抵抗構造が求められ、大地震時や地震活動との対比をおこなうことによって、発生メカニズムに関する知見が多く得られた。東北地方の下部地殻は、いわき付近を除いて、基本的に前弧は高比抵抗、背弧は低比抵抗となっていることが明らかになっている(図5)。これらの分布は地震活動の不均質性とも大局的には良く対応している[1203:東北大学]。近畿地方北部においては、S波反射面の推定によるイメージングがおこなわれた。この結果、下部地殻で広域に反射強度の強い反射面が見つかると同時に、活断層との関連も見出された。これらは地殻流体の存在を示唆し、応力集中・強度低下メカニズムを理解するうえで重要な知見が得られた[1907:京都大学]。その他の地域についても、構造、震源モデルとの比較から、多くの場合、規模の大きな内陸地震発生域の直下には低速度かつ低比抵抗域が存在し、大滑り域は対照的に高速度かつ高比抵抗であることがわかった。

また、震源分布の高分解能推定からは、規模の小さな地震でも階層的な断層構造を持ち、その破壊様式が複雑であることも示された[1204:東北大学]。これは断層帯が階層的にさまざまなスケールの断層によって構成されている可能性を示唆し、今後の地震発生予測にとって重要な知見である。

(5) 強度

地震発生を制御するもうひとつの重要なパラメータは断層等の媒質強度である。内陸地震の発生における間隙流体は強度低下の重要なメカニズムとして考えられ、その役割を理解することを目指して研究が進んだ。広域の流体供給源としては沈み込むスラブの影響が考えられる。地震学的方法や岩石学的方法を用いてその供給について検討がなされ、1)日本列島には、「スラブから直接由来した可能性が高い深部流体」としての有馬型塩水が、有馬-高槻構造線および中央構造線沿いに分布し、その組成、特に希土類元素の分析と統計解析から、深部流体の上昇過程が明らかになった。(2)島弧セグメントの接合部、特に中部日本から東北日本弧への遷移の様子が火山岩組成から詳細に議論され、フィリピン海プレートの北東端が東北日本弧南部にまで広がり、スラブ由来流体が南に向かって吸い寄せられていることなどが明らかとなった。(3)日本列島全域にわたるスラブ由来流体量やマントル組成

の大域的性質が明らかとなった。[1905：京都大学]。御嶽山周辺域では地震メカニズムトモグラフィ法 (Terakawa et al., 2010) を適用し、御嶽山周辺域の3次元間隙流体圧場が推定された (Terakawa et al., 2013; Terakawa, 2017)。この結果、群発地震発生域に静水圧を 15 ± 5 MPa 程度上回る間隙流体圧が5年以上に亘って維持されていることがわかり、活発な地震活動が高い間隙流体圧に駆動されて発生している可能性が示された (図6) [1907：京都大学]。

流体が断層運動に与える影響は地震発生において重要な役割を担っている。地震波を用いて推定される強い不均質 (反射面など) の分布は流体分布を示唆するため、その時間変化を見出すことが断層運動の挙動解明へつながると考えられる。この方針に従って、2011年東北地方太平洋沖地震後に発生した山形-福島県境付近の群発地震活動が丹念に調べられ、カルデラの周りに地震波反射面が分布していることが明らかとなった。このことによって、カルデラ壁に沿って流体が存在している可能性が示された。また、この群発地震活動については、深部から浅部に向かって移動していること、活動の様々なパラメータが活動開始から50日くらいまで異常な値を取ることで、それ以降は普通の値に落ち着くことなどが明らかとなった。このことは、群発地震活動の初期の活動が間隙圧増加による強度低下によって生じていたことを強く示唆する [1204：東北大学]。

また、実験に基づき、溶解した石英の析出によるシール形成を再現することに成功した。また、下部地殻の条件下で、水があると強度が下がって変形が進み、さらに水が入って変形しやすくなることを明らかにした [1204：東北大学]。

以上のように、少なくとも群発地震については、流体の急激な上昇によって発生するというメカニズムの妥当性が高いことが示された。また、下部地殻の剪断帯に水が入り込むと、ますます変形が進み、さらに水が入り込むという正のフィードバックが働くことから、水が存在すると強度が低下するのみならず、応力・歪が集中していくことも明らかになった。これにより、断層スケールでも、反射面や比抵抗分布等から水の存在範囲を調べることで、応力や強度についての情報をモデル化することができ、地震の発生しやすい場所をあらかじめ特定できる可能性が示された [1204：東北大学, 1907：京都大学]。

(6) 地震火山相互作用

火山の存在は周辺の応力状態の変化を生み出し、流体の供給による強度低下を引き起こす。その結果、火山周辺域では地震活動が活発化することが予想されたものの、それを実証するためのモデル化可能な観測・実験が必ずしも進んではいなかった。今期においてはこれに対しても進展があり、さまざまな成果が得られた。伊豆大島では、火山性地震の地震活動度と深部からのマグマ供給に伴う山体変形の間接関係を、揮発性成分増加による断層面の流体圧の増減の効果と岩石の摩擦構成則を組み合わせることでモデル化することができた [東大地震研：1508]。富士山では、その山麓部で発生した2011年静岡県東部地震 (M6.4) の震源域に流体の通路を示唆する低比抵抗域が見出された。また、岩石空隙中の気体が2011年東北地方太平洋沖地震による震動で離脱上昇した結果、間隙水圧が高まり、地震が誘発されたとするモデルが提案された [2201：九州大学]。御嶽山では、2014年の噴火の2週間前から、山頂直下での応力場の変化があったことが多数の地震の発震機構解の解析により明らかにされ、火山活動の活発化にともなうマグマだまりの膨張を反映したものと解釈された [1907：京都大学]。また、研究期間中の2014年9月27日には、御嶽山で水蒸気噴火が発生した。この噴火に伴う火山性地震のメカニズム解が詳細に調べられ、噴火を境に東西伸張の正断層・横ずれ断層型から東西圧縮の逆断層

型に推移したことがつきとめられた (Terakawa et al., 2016)。これらのデータの分析から、応力場の時間変化を監視することによる御嶽火山のモニタリング法に対する新しい提案が提出された [1907 : 京都大学]。

(7) 構造共通モデル

近年、詳細な地震観測網の整備による高精度震源分布や大規模な制御震源による地殻構造探査や地震波トモグラフィ、レシーバ関数解析等によって、日本列島の沈み込みシステムの基本構造についての知見が著しく増加した。しかしながら、これらの情報が組織的・統一的に集約され統合的な共通モデルが構築されているわけではない。日本列島の基本構造に対するコミュニティ・モデルの構築とそれらの更新は、日本列島の活動予測にとって本質的に重要であり、現状を把握し、今後の観測を合理的に進めていくためにも欠かせないものである。本研究は、既往の成果を可能な限り収集・整理し、基本構造デジタルモデル構築を目指した。

1. プレート境界モデルの構築

プレート境界位置の設定及びフィリピン海プレート-太平洋プレートとの接合部の形状モデルの検討をおこなった。また、関東域における構造探査を元に、同地域の複雑なフィリピン海プレート形状の再定義を試みた。太平洋プレート及びフィリピン海プレートモデルについて、下記のサイトからの公開を開始した。

<http://evrrss.eri.u-tokyo.ac.jp/database/PLATEmodel/>

2. 日本列島及びその周辺の震源断層モデルの構築

九州・関東・東北・中国・四国・近畿地域において、これまで実施された主な反射法地震探査データを収集するとともに、活断層に関する変動地形・第四紀地質学的データを説明する活断層の幾何学的形状を推定した。このような地質学的データ・解析に基づき断層面の傾斜を推定すると共に、Hi-netの地震活動データに基づく D90 から求められた地震発生層の厚さや、断層深部の地震活動を用いて、九州・関東・東北・中国・四国・近畿地域の内陸活断層について、震源断層モデルを推定した。

3. リソスフェア・アセノスフェア境界の構築

日本海直下のリソスフェア・アセノスフェア境界 (LAB) の検出を目指して、大和海盆および日本海盆において、海底地震計による自然地震観測を行った。これまでに、大和海盆では3年間、日本海盆では1年間の観測データが得られている。これらのデータに対して、実体波トモグラフィ解析・表面波トモグラフィ解析・レシーバ関数解析が適用された。いずれの解析からも、LABを示唆する地震波低速領域が、深さ約60km以深に見られている。

4. 日本列島下のモホ面及び脆性・延性域境界モデルの構築

Matsubara et al. (2017)によるモホ面データをプレートの形状を考慮して切り取るとともに、Matsubara et al. (2017)に含まれない領域についてはグローバルなモホ面モデル (crust1.0, Laske et al., 2013)を用い、これらを滑らかに接続して、モデル領域全体にわたるモホ面モデルを提出した (図7)。

(8) まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震の発生後、内陸地殻には大きな力学的変化があり、従来解決できなかった問題の解決が飛躍的に進んだ。広域のローディングー地震発生領域の変形—断層帯の応答というシステムの中でどのように応力が伝わり、地震発生に至るのか？という問題が定量的に見積もられつつある。さらに内陸地震発生過程の理解・予測へつなげるためにはプレート相対運動など長期広域の応力載荷に関わる問題から断層の応答までさまざまなスケールの研究を統一的に進める必要がある。

2. 平成30年度の成果

平成30年度は5カ年の最終年度として、各課題の成果が取りまとめられた。主だった成果は、上記に記述されている。そこで取り上げられなかったいくつかの成果を以下にまとめる。

(1) 応力場・変形場

差応力の推定

2011年東北地方太平洋沖地震後に活発化した秋田県中部での応力場が求められた。2011-2013年の期間と2014-2017年の期間を比較すると領域全体の応力場（北東-南西方向の最大主応力軸を持つ横ずれ断層型）に顕著な時空間変化はないが、震源域が徐々に拡大した南端付近では逆断層型の応力場も見え、この地域の応力場の不均質性を反映している可能性がある（図8）[1203:東北大学]。

2000年鳥取県西部地震域で得られた約4000イベントの余震の発震機構解（メカニズム解）から、本震断層周辺域の応力場の不均質性の評価及び本震時の静的応力変化に基づいた絶対応力場の推定が行われた。本震前の差応力レベルが3.2MPa/km程度の場合に、観測されたのと同程度の応力不均質を再現できることが示された[1905:京都大学]

間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場のモデル化法が開発され、1992年ランダース地震震源域の絶対応力場が推定された（Terakawa and Hauksson, 2018）。その結果、ランダース地震震源域での最適参照間隙流体圧係数が見積もられ、その係数から、深さ5kmでの最大剪断応力が 44 ± 15 MPaであることが見積もられた[1907:京都大学]。

熊本地震震源域において、応力場が地震の発震機構解から推定され、熊本地震の前と後で変化していたことが明らかとなった。布田川断層延長部や日奈久断層延長部では、せん断応力の増加が検出された。また、差応力推定からは、布田川—日奈久断層において、地震前から数Mから数十MPaの差応力が存在していたという結果が得られた。すなわち、相対的に差応力が高かった領域で大地震が発生したことになる。また、熊本地震発生後も必ずしも領域全体で応力が低下したわけではなく、依然として高い差応力が維持されていることも明らかになった[2201:九州大学]。

前震と余震の応力降下量

2016年11月2日に、森吉山の北西8km程度の領域でM4.2の地震が発生した。この領域では、その1月ほど前から地震活動が見られていた。その前震と余震の応力降下量をS波のスペクトル比から求めた結果、前震が比較的狭い範囲で発生し、それらのマグニチュード・応力降下量ともに大きい値を示していたことが明らかにされた。それに対して、余震では活動域は広がったが、マグニチュード・応

力降下量ともに小さいという違いが認められた。このことから、前震と本震において相対的に大きな応力降下があったために、余震発生時の応力レベルが低下したと考えられた(図9)[1101:弘前大学]。

変形場

山陰ひずみ集中帯(SSZ)の地殻変動を詳細に調べるために、2011年東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動分布の短波長・長波長成分の分布の特徴と深部剪断帯の幅の推定が行われた。ひずみ速度分布は地震前、地震後の2つの期間において、いずれも顕著な右横ずれ運動を示していたことが明らかになった。SSZにおけるひずみ集中機構が、幅をもった地下深部の延性剪断帯の運動によるものと仮定し、その幅の推定を試みた。平行な横ずれ断層が剪断帯内に多数配置されるモデルを用いて、地殻変動観測データを説明するパラメータを推定した。鳥取県西部と中・東部のひずみ集中帯を横切る2つの断面における水平変位速度分布は、前者に比べ後者の方がより変形が集中している様相を呈し、その結果、深部剪断帯の幅はそれぞれ60kmと21.5kmと推定された。ただし、地殻変動観測データは、今回の有限の幅を持った深部剪断帯モデルに基づくことでより良く再現されたが、横ずれ断層1枚(幅が0)のモデルでも、データはある程度は説明可能であったため、GNSSデータだけでは、下部地殻の剪断帯の幅を推定することは困難であることが明らかとなった[1907:京都大学]。

一方、2016年熊本地震の余効変動の観測が継続された。余効変動が継続中とされていた日奈久断層東側の観測点で、2018年7月ころから東西成分の余効変動が止まったように見える。一方で、南北成分については、変動は小さくなったものの現在も余効変動が継続しているように見えた[2201:九州大学]。

(2) 構造

いわきの地震活動域は、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震以降活発となった。図10には、3つの期間の震央分布と反射面の俯瞰図が示されている。一連の地震活動と反射面との位置関係から、3月11日の活動は反射面が分布する領域の上部で始まり(図10a)、4月10日までに反射面を中心に広がっていったことが明らかとなった(図10b)。反射面の分布領域の北部に地震活動の低いところがあり、そこを埋めるように、4月11日の福島県浜通りの地震が発生していた(図10c)[1203:東北大学]。

熊本地震震源域周辺の80点のデータを用いて行った3次元解析により、1) M5クラスより規模の大きい地震の破壊開始点は、低比抵抗領域のへりから外側5km以内に位置すること、2) 熊本地震の大すべり領域は、低比抵抗領域には含まれた数100から数1000 Ωm の高比抵抗領域に対応していることなどが明らかになった。これらは、本震発生や日奈久、布田川断層にわたる地震の運動に、深部低比抵抗層が示す流体の存在が強く関与していたことを示唆する。また、低比抵抗値を定量的な基準を持って評価する試みが始められた。これらは地震発生ポテンシャル推定にとって重要なアプローチである[2201:九州大学]。

断層構造

ここでは、地表地震断層を活用した過去の地震像の解明に関する調査について述べる。神城断層域における地表地震断層の地上踏査を用いた変位量分布調査と、強震動データを用いた震源破壊過程モデルに基づく地表でのすべり量分布との間には、震源中部においてやや齟齬が生じていた。ところが、DEMを用いた地震前後の差分を用いることにより、1km程度の測線でとらえることができる長波長の

変位量が、震源破壊過程モデルに基づくすべり量分布と良い一致を示すことが明らかとなった。これは、地表地震断層の断層近傍の短波長の変位量分布のみでは、深度 1 km 以深の断層運動の解明には不十分である場合があることを示唆する。一方、断層トレースの活動履歴調査から、神城断層には複数の地震像が併存していることが明らかにされ、それらは地震像ごとに変位が生ずる断層が異なる可能性が指摘された[1702:名古屋大学]。

野島断層周辺域では、断層およびその周辺構造の時間変化を調べるため、1999年6月より地震アクロス観測が実施されている。アクロス震源と800m孔底地震計の間の伝達関数を調べることで、全体の傾向として1999年～2018年の19年間において約2 ms (約6%)程度の微小な変化の検出に成功した[1906:京都大学]。

(3) 強度

山形-福島県境付近では、2011年東北地方太平洋沖地震の後、stress shadow になっているにもかかわらず、地震活動が活発化した。経験的グリーン関数法から得られた震源時間関数のパルス幅の方位依存性から、破壊の進行方向を推定した結果、地震活動は時間とともに深部から浅部に移動していく(Yoshida and Hasegawa, 2018a)が、破壊伝播はむしろ浅部から深部に向かう場合が多いことが明らかになった(図11)[1204:東北大学]。

熊本地震震源域、九重山、鶴見由布、霧島山の4つの地域において、内陸地震と比抵抗構造の関係を探るための80点規模の広帯域MT観測が実施され、そのデータを用いて3次元比抵抗構造が推定された。得られた構造から、1)中下部地殻の10Ωm以下の領域の地震活動は低く、その周辺の数100から数1000Ωmの領域で地震活動が活発であること、2)M5クラスより規模の大きい地震の破壊開始点は、前述の低比抵抗領域のへりから外側5km以内に位置すること、3)熊本地震の大すべり領域は、前述の低比抵抗領域には含まれた数100から数1000Ωmの高比抵抗領域に対応していたことなどが明らかとなった。

中下部地殻の10Ωm以下の低比抵抗領域を温度400°Cを超える超臨界水に代表される流体が豊富に存在する領域と解釈すると、高温で流体が豊富な領域では地震活動が低く規模の大きな地震が起こらないこと、微小破壊の開始から地震規模が大きくなるために流体が役割を果たしていることが示唆される。さらに流体は破壊の収束にも寄与している可能性も示唆された。M5より規模の大きい地震は数100～数1000Ωmの高比抵抗領域で起こり、10Ωm以下の低比抵抗領域、10000Ωmを超える超高比抵抗領域では、規模の小さい地震に限定されるという対応関係が得られた[2201:九州大学]。

変形実験との比較のため、静水圧実験(封圧1GPa、温度900°C)が行われ、高圧下での変形時間と含水量の関係が調べられた。その結果、変形によって通常よりも早い速度で水の拡散が進行し、それによってさらに変形が促進される正のフィードバックが示唆された[東北大学:1204]。

地震時に断層が急速に動くとき、断層のジョグでは流体圧が静水圧よりも低くなる「Flash vaporization」が起こる可能性が指摘されている(Wartherlay and Hanley, 2013)。平成30年度には、同様の条件のFlash実験が行われ、シリカ析出様式が検討された。その結果、100-5000 nm程度の球形のアモルファスシリカ粒子が形成されることがわかった。このようなシリカ粒子は、移動性が高く、目詰まりさせるために、亀裂や断層の強度、水理学的特性に大きな影響を与えられられる[東北大学:1204]。

地下深部において低周波地震などの現象が頻発し、地下深部ガスが地上まで上昇していると考えら

れる地域で、地下水溶存ガスに関する連続的モニタリング観測を実施することにより、地下水溶存ガスの成分変化が、地下深部の状態変化によるものか地殻内のチャンネル変化によるものかを分離できる可能性がある。そこで、平成 30 年度より、本宮観測点にて観測が開始された。一方、跡津川観測点では、He・N₂・Ar をつかったガスの成分比が時間とともに変化し、大気と地下深部ガスの混合比が変動することが見いだされた[1401:東京大学理]。

(4) モデリング

沈み込み帯の熱対流モデルによる温度構造 (Horiuchi and Iwamori, 2016) を用いて、Unicycle (Barbot et al, 2017) による 2 次元解析が行われた。解析においては、ベキ乗流動則と Burgers レオロジーが用いられ、応力依存の余効すべり (速度強化摩擦則) が組み込まれている。上記のモデルにより、観測データ (2011~2016 年までの海陸余効変動観測データ (Tomita et al, 2017) と GNSS 時系列データ) をほぼ再現することに成功した。さらに、東北沖地震後の 2012 年に設置された GNSS 稠密観測網磐越測線の余効変動プロファイルを用いて、3 次元不均質粘弾性構造モデルが推定された[東北大学:1203]。

2011 年東北沖地震前及び地震後における東北日本前弧域の上盤内応力場を再現し、その形成メカニズムを明らかにするために、有限要素法を用いたプレート沈み込み及び重力に伴う島弧-海溝系の絶対応力場の二次元モデリングが行われた。その結果、東北沖地震後のプレート境界 (海溝から 40-150 km の範囲) の摩擦力は 5-11 MPa 程度と推定され、地震時の応力降下量が、10-20MPa 程度ということを見ると、プレート境界の強度が 30MPa 程度以下と非常に弱い事が示唆された[東北大学:1203]。

西南日本の内陸地震の活動期をモデル化するために、粘弾性緩和を考慮して南海トラフを模した単純な斜め沈み込み帯における内陸断層のクーロン応力変化 (ΔCFS) を計算し、その結果に対する考察が行われた (水戸川・西村, 2018)。モデル計算の結果は、西南日本で南海トラフ地震前 50 年間、地震後 10 年間に内陸地震が多く発生していたという観測事実 (例えば, Hori and Oike, 1999) を概ね再現していた[1907:京都大学]。

(5) 構造共通モデル

H30 年度においては、6 月に発生した大阪府北部の地震 (M6.1) の震源域周辺の反射法地震探査データを収集するとともに、Sato et al. (2009) の大大特データについて MDRS 法などによる再解析から構造解釈を行い、上町・仏念寺山断層の下方延長部が震源域近傍まで延びていたことが示された [1505:東大地震研]。

(6) 地震火山相互作用

御嶽山周辺域の地震活動を理解するために、詳細な発震機構が求められた。火山性地震は、2014 年 9 月の噴火以降減少傾向にあるが、未だに噴火前の平常時には戻っていない。規模の大きい火山性地震は、広域応力場と調和的なタイプとなる傾向がみられた。また、2014 年噴火の火口付近に、広域応力場では説明できないタイプのイベントが多く発生していたことが明らかにされた。2014 年の噴火では、火山性地震のメカニズム解が、噴火を機に、東西伸長の正断層・横ずれ断層型から東西圧縮の逆断層型に変化していた。この火山活動による、応力場変化に着目し (Terakawa et al., 2016), 2007 年噴火に伴う火山性地震のメカニズム解の時間変化を調べ、噴火日を推定する試みが行われた。その

結果, 2014 年の噴火と同様に噴火を示唆する変化が認められていたことが明らかとなり, 検出されていない噴火現象をこの方法によって見出せる可能性が示された[1907:京都大学]。

富士山では, その山麓部で発生した 2011 年静岡県東部地震 (M6.4) が岩石空隙中の気体が 2011 年東北地方太平洋沖地震による震動で離脱上昇した結果, 間隙水圧を高め地震を誘発したとするモデルが提案された[2201:九州大学]。このように, 地震-火山相互作用を考える上で, 気泡挙動の物理モデルを確立することは重要な意味を持つ。そのために, アナログ物質を用い, 気泡挙動を実験的に検討する研究が開始された。静止場において気液界面張力を変化させた実験を行い, 気泡の離脱条件を決定し, 気泡の変形による necking が, 気泡の離脱の基本過程であることを明らかにした。静止場での気泡の離脱条件を振動場に応用し, 2つの無次元パラメータ (気泡径と振動場の振幅の比, および振動の加速度と重力加速度の比) によって離脱条件が決定されていることが明らかとなった[2201:九州大学]。

成果リスト

相澤 広記, 上嶋 誠, 小山 崇夫, 長谷 英彰, 山谷 祐介, 宇津木 充, 神田 径, 橋本 武志, 塚本 果織, 村松 弾, 桜島・霧島・富士山・九重山での広帯域 MT 連続観測により推定される比抵抗構造時間変化, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉幕張。

Akuhara, T., M. G., Bostock, A. P., Plourde, M. Shinohara, ,2019, Beyond Receiver Functions: Green's Function Estimation by Trans - Dimensional Inversion and Its Application to OBS Data. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JB016499>

雨澤勇太, 森吉山の群発地震における散乱波群とその波形形状の時間変化, 弘前大学理工学研究科平成 30 年度修士論文。

Amaya, A., N. Hirano and N. Tsuchiya, 2018, Thermal prospection of geothermal reservoirs by using thermoluminescence of quartz, Geothermal Resources Council Trans., 42.

新谷昌人, 2018, ファイバーネットワークを用いた地震・津波・地殻変動の計測技術に関する研究, 東北大学電気通信研究所研究活動報告, 24, 129-131.

Becker, W.T., A. Hashima, A. M. Freed, H. Sato, 2018, Stress change before and after the 2011 M9 Tohoku-oki earthquake, Earth and Planetary Science Letters, 504, 174-184.

Fukahata, Y., 2019. Estimate of the contraction rate of central Japan through the deformation of the Philippine Sea slab, Progress in Earth and Planetary Science, 6:4, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0251-0>.

深井雅斗, 小川康雄, 曾國軒, 市來雅啓, 高倉伸一, 2019, 北上山地の三次元比抵抗構造解析, CA 研究会論文集, 印刷中。

Fukushima, Y., S., Toda, S., Miura, D., Ishimura, J., Fukuda, T., Demachi, K., Tachibana, 2018, Extremely early recurrence of intraplate fault rupture following the Tohoku-Oki earthquake. Nature Geoscience, 11, 777-781, DOI: 10.1038/s41561-018-0201-x

Hata, M., M. Uyeshima, Y. Tanaka, T. Hashimoto, N. Oshiman, and R. Yoshimura, 2018, Three-dimensional electrical resistivity distribution beneath the Beppu-Shimabara

- graben with a focus on Aso caldera, Southwest Japan subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 123, 6397–6410.
- Hata, M., N. Matsushima, S. Takakura, M. Utsugi, T. Hashimoto, and M. Uyeshima, 2018, Three-dimensional electrical resistivity modeling to elucidate the crustal magma supply system beneath Aso caldera, Japan, *J. Geophys. Res.*, 123, 6334–6346.
- Hanyu, T., K. Shimizu, T. Ushikubo, J.-I. Kimura, Q. Chang, M. Hamada, M. Ito, H. Iwamori, T. Ishikawa, 2019, Tiny droplets of ocean island basalts unveil Earth's deep chlorine cycle. *Nature Comm.*, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07955-8>.
- Haraguchi, S., K. Ueki, K. Yoshida, T. Kuwatani, M. Mohamed, S. Horiuchi, H. Iwamori, 2018, Geochemical database of Japanese islands for basement rocks: compilation of domestic article. *J. Geol. Soc. Japan*, 124, 1049–1054.
- 林田 祐人, 松本 聡, 飯尾 能久, 酒井 慎一, 加藤 愛太郎, 0.1 満点地震観測グループ, Characteristics of focal mechanism solution of the earthquakes in the source region of the 2000 Western Tottori Earthquake based on "0.1 Manten" hyper dense seismic observation, SCG57-P20, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018. 5. 20–24, 幕張
- 林田祐人, 松本聡, 飯尾能久, 酒井慎一, 加藤愛太郎, 0.1 満点地震観測グループ, 0.1 満点観測によって得られた鳥取県西部地震震源領域における微小地震のメカニズム解の特徴について, S08-P13, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 2018. 10. 9–11, 郡山市
- Ichiki, M., T. Kaida., and Y. Ogawa, 2018, Investigation of flow reverse towards backarc side in the mantle wedge: Electrical conductivity distribution of subduction zone beneath the northern part of NE Japan, AGU Fall Meeting, T31H-0399.
- 石川正弘, 2018, 本州弧の地殻深部及び最上部マントルの構成岩石の推定, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会
- Ishimura, D., S., Toda, S., Mukoyama, S., Homma, K., Yamaguchi, T., Takahashi, (in press) Three-dimensional surface displacement and surface ruptures associated with the 2014 Mw6.2 Nagano earthquake using differential LiDAR. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- 石山達也, 佐藤比呂志, 阿部 進, 2018, 大阪堆積盆地の震源断層モデル, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, S24-04.
- 伊藤嘉秋, 2018, 2011 年東北地方太平洋沖地震の余効変動に基づく不均質レオロジーに関する研究, 東北大学修士論文, 132pp.
- Iwamori, H., H. Nakamura, M. Yoshida, Nakagawa, T., Ueki, K., Nakao, A., Nishizawa, T., Haraguchi, S., 2018, Trace-element characteristics of east-west mantle geochemical hemispheres. *Comptes Rendus Geosci.*, <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.09.007>.
- 神菌 めぐみ, 松本 聡, 志藤 あずさ, 山下 裕亮, 中元 真美, 宮崎 真大, 酒井 慎一, 飯尾 能久, 2016 年熊本地震 合同地震観測グループ, 2016 年熊本地震震源域における地震波減衰構造, SSS10-11, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018. 5. 20–24, 幕張
- Kaneda. H. T. Chiba, 2019, Stereopaired morphometric projection index red relief image maps (Stereo MPI-RRIMs): effective visualization of high-resolution digital elevation

- models for interpreting and mapping small tectonic geomorphic features, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 109, 2370-2391.
- 金田平太郎, 柏原真太郎, 小村慶太郎, 2018, 山上湿地掘削のための可搬型パーカッションコアリングシステム, *月刊地球*, 号外 69, 112-120.
- Katoh, S., Y., Iio, H., Katao, M., Sawada, K., Tomisaka, T., Miura, I. Yoneda, , 2018, The relationship between S-wave reflectors and deep low-frequency earthquakes in the northern Kinki district, southwestern Japan. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 149. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0921-6>
- Kobayashi, F., H. Sumino, R. Burgess, S. Nakai, T. Iizuka, J. Nagao, H. Kagi, M. Nakamura, E. Takahashi, T. Kogiso, and C. J. Ballentine, 2019, Halogen heterogeneity in the lithosphere and evolution of mantle halogen abundances inferred from intraplate mantle xenoliths, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, doi: 10.1029/2018GC007903.
- 小菅正裕, 2019, 地殻浅部での低周波地震活動, *東北地域災害科学研究*, 55.
- Maeda S., T. Matsuzawa, T. Shinji, K. Yoshida, and H. Katao, 2018, Complex microseismic activity and depth-dependent stress field changes in Wakayama, southwestern Japan, *Earth Planets Space*, 70:21, doi: 10.1186/s40623-018-0788-6.
- Masyitha Retno Budiati Kiraman, G. Toyokuni, T. Okada, 2018, Depth estimation of Moho discontinuity beneath Central Indonesia by the cross-correlation analysis of seismic ambient noise, *AGU Fall Meeting*, T23A-0345.
- 松本 聡, 光岡 郁穂, 飯尾 能久, 酒井 慎一, 2016 年熊本地震 合同地震観測グループ, 2016 年熊本地震震源域における応力場のモデル化 (3), SSS15-12, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.5.20-24, 幕張
- 松本聡, 飯尾能久, 酒井慎一, 加藤愛太郎, 0.1 満点地震観測グループ・鳥取県西部満点地震観測グループ, 0.1 満点地震観測でみた鳥取県西部地震震源域の余震活動による非弾性ひずみ, S23-05, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 2018.10.9-11, 郡山市
- 松野弥愛, 2018, 2016 年ニュージーランド・カイコウラ地震における本震断層と余震メカニズム解の幾何形状の類似性の評価, *東北大学卒業研究*.
- Meneses - Gutierrez, A., T., Nishimura, M. Hashimoto, 2019, Coseismic and Postseismic Deformation of the 2016 Central Tottori Earthquake and its Slip Model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JB016105>
- 光岡 郁穂, 松本 聡, 山下 裕亮, 中元 真美, 宮崎 真大, 酒井 慎一, 飯尾 能久, 2016 年熊本地震 合同地震観測グループ, Change in state of stress around Hinagu fault zone through the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, SCG57-26, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.5.20-24, 幕張
- 光岡郁穂, 松本聡, 志藤あずさ, 山下裕亮, 中元真美, 宮崎真大, 飯尾能久, 酒井慎一, 2016 年熊本地震合同観測グループ, 2016 年熊本地震震源断層および日奈久断層周辺の応力場の時空間変化について, S08-P15, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 2018.10.9-11, 郡山市
- 村上英記, 野本和希, 注水実験時に観測された自然電位変動解明のためのアナログ実験 (序報), 第 144 回地球電磁気・地球惑星圏学会, R003-P14, 2018 年 11 月 25 日 (名古屋市).

- 村上英記, 野本和希, 地下水流動モニターにボーリング孔ケーシングパイプを利用する際の留意点, Conductivity Anomaly 研究会, P01, 2019年1月10日(宇治市)。
- 村上英記, 野本和希, 地下水流動モニターにボーリング孔ケーシングパイプを利用する際の留意点, Conductivity Anomaly 研究会論文集 2019 (印刷中)
- Muramatsu D., K., Aizawa, A., Yokoo, M., Iguchi, T. Tameguri, 2018, Estimation of Vent Radii from Video Recordings and Infrasond Data Analysis: Implications for Vulcanian Eruptions from Sakurajima Volcano, Japan, *Geophysical Research Letters*, 45, 12, 829-12, 836. <https://doi.org/10.1029/2018GL079898>. Nakagawa, T., H. Iwamori, R. Yanagi, A. Nakao (2018) On the evolution of the water ocean in the plate-mantle system. *Prog. Earth Planet. Sci.*, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0209-2>.
- 村松 弾, 相澤 広記, 横尾 亮彦, 井口 正人, 為栗 健, 桜島昭和火口におけるブルカノ式噴火の初期段階について—可視映像および空振観測から得られる知見, 日本地球惑星科学連合 2018年大会, 2018年5月, 千葉幕張。
- Muramatsu, D., K., Aisawa, A., Yokoo, M., Iguchi, T. Tameguri, Initial Phase of Vulcanian Eruption at Showa Crater, Sakurajima Volcano, Japan: Insight from the Visual Movie and Infrasond Data, AOGS 15th annual meeting, 2018年6月, Hawaii USA
- Nakagawa, T., H. Iwamori, 2019, On the implications of the coupled evolution of the deep planetary interior and the presence of surface ocean water in hydrous mantle convection. *Comptes Ren. Geosci.*, in press.
- Nakamura, H., H. Iwamori, M. Nakagawa, T. Shibata, J.-I. Kimura, T. Miyazaki, Q. Chang, B.S. Vaglarovb, T. Takahashih, Y. Hiraharai, 2019, Geochemical mapping of slab-derived fluid and source mantle along Japan arcs. *Gondwana Res.*, in press.
- 中尾 茂, 松島 健, 田部井 隆雄, 大久保 慎人, 山品 匡史, 大倉 敬宏, 西村 卓也, 澁谷 拓郎, 寺石 眞弘, 伊藤 武男, 鷺谷 威, 松廣 健二郎, 加藤 照之, 福田 淳一, 渡邊 篤志, 三浦 哲, 太田 雄策, 出町 知嗣, 高橋 浩晃, 大園 真子, 山口 照寛, 岡田 和見, 2016年熊本地震後のGNSSによる地殻変動観測(3), 日本測地学会第130回講演会予稿集, 173-174, 2018. 高知市, 10月
- 中尾 茂, 松島 健, 田部井 隆雄, 大久保 慎人, 山品 匡史, 大倉 敬宏, 西村 卓也, 澁谷 拓郎, 寺石 眞弘, 伊藤 武男, 鷺谷 威, 松廣 健二郎, 加藤 照之, 福田 淳一, 渡邊 篤志, 三浦 哲, 太田 雄策, 出町 知嗣, 高橋 浩晃, 大園 真子, 山口 照寛, 岡田 和見, Post-seismic deformation of 2016 Kumamoto Earthquake by continuous GNSS network (2), 日本地球惑星科学連合 2018年大会, SSS09-P04, 2018. 千葉県幕張, 5月
- Nakao, A., H. Iwamori, T. Nakakuki, Y. Suzuki, H. Nakamura, 2018, Roles of Hydrous Lithospheric Mantle in Deep Water Transportation and Subduction Dynamics. *Geophys. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1029/2017GL076953>.
- 大久保修平, 高木悠, 今西祐一, 田中愛幸, 渡邊篤志, 安藤美和子, 張新林, 大島弘光, 前川徳光, 岡田和見, 三浦哲, 植木貞人, 2018, 2011年東北地方太平洋沖地震後の東日本広域重力変動—粘弾性変形の検出, 日本地震学会秋季大会, S22-06.
- 岡田篤正, 金田平太郎, 杉戸信彦, 中田 高, 2018, 1:25,000 活断層図 濃尾断層帯とその周辺「大

- 野」「冠山」「能郷白山」「谷汲」「美濃」「岐阜」解説書。国土地理院技術資，D1-No.912，29 p.
- 岡田知己，中山貴史，平原聡，堀修一郎，佐藤俊也，松澤暢，2011 年東北地方太平洋沖地震合同余震観測グループ，2018，稠密地震観測で見た，東北沖地震後の内陸誘発地震，地震学会秋季大会，S22-03.
- Okada, T., T. Sato, Y. Iio, S. Matsumoto, S. Bannister, J. Ristau, S. Ohmi, S. Horiuchi, T. Miura, M. Savage, J. Pettinga, F. Ghisetti, and R. H. Sibson, 2018, Stress and strength control on the 2016 Kaikoura earthquake inferred from a seismic observation, Annual Meeting of Geoscience Society of New Zealand.
- Okuwaki, R., Kasahara, A., Yagi, Y., Hirano, S. & Fukahata, Y., 2019. Backprojection to image slip, *Geophys. J. Int.*, 216, 1529-1537, doi: 10.1093/gji/ggy505.
- 大槻憲四郎，2018，A 断層は B 断層で切られたのか，B 断層で停止したのか？，地質学会第 125 年大会.
- Oyanagi, R., A. Okamoto and N. Tsuchiya, 2018, Multiple kinetic parameterization in a reactive transport model using the exchange Monte Carlo method, *Minerals*, 8, 579, doi: 10.3390/min8120579.
- 櫻木 颯，石川 正弘，2018，Elastic wave velocity change caused lawsonite decomposition in blueschist at 1.0 GPa and up to 550 °C，日本地球惑星科学連合 2018 年大会
- 志藤あずさ，松本聡，大倉敬宏，九州地方における地殻の内部減衰と散乱減衰の三次元構造，日本地震学会 2018 年度秋季大会，S06-P14，2018 年 10 月，郡山市
- Shito A., S., Matsumoto, T., Ohkura, Towards more appropriate mapping of scattering and intrinsic attenuation in Kyushu, 2018 JpGU, SSS11-P15, 2018 年 5 月, Makuhari, Japan.
- 杉戸信彦，後藤秀昭，2018，長野県大町市街地の活断層分布に関する一検討，活断層研究，49，17-22.
- Sugito, N., H. Sawa, K. Taniguchi, Y. Sato, M. Watanabe, and Y. Suzuki, 2019, Evolution of Riedel-shear pop-up structures during cumulative strike-slip faulting: A case study in the Misayama-Godo area, Fujimi Town, central Japan, *Geomorphology*, 327, 446-455.
- 鈴木真奈美，2018，東北地方米沢-喜多方地域における地震波反射面の空間分布，東北大学修士論文，134pp.
- Suzuki, M., A. Hasemi, T. Okada, T. Matsuzawa, N. Umino, T. Yamashita, N. Tsumura, and Group for the aftershock observations of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, 2018, Spatial distribution of seismic wave reflectors beneath the Yonezawa-Aizu region, northeastern Japan, AGU Fall Meeting, T31H-0400.
- 鈴木康弘，2018，日本活断層学会設立から 10 年：200～2017，活断層研究，49，57-62
- 鈴木康弘，渡辺満久，中田 高，2018，2016 年熊本地震における益城町中心市街地内の地震断層—変動地形学的意義と建物被害への影響。活断層研究，48，13-34
- Takada, Y., T., Sagiya, T., Nishimura, 2018, Interseismic crustal deformation in and around the Atotsugawa fault system, Central Japan, detected by InSAR and GNSS, *Earth Planets and Space*, vol. 70:32 doi:10.1186/s40623-018-0801-0
- 高田陽一郎，跡津川断層近傍における変形運動と応力蓄積過程，日本地球惑星科学連合 2015 年大会

(招待講演)

- 武石貢佑, 神田径, 木下貴裕, 関香織, 宇津木充, 小山崇夫, 上嶋誠, 霧島火山での広帯域 MT 観測, 日本火山学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月, 秋田.
- 丹羽雄一, 遠田晋次, 石村大輔・森 良樹, 小俣雅志, 2018, 神城断層の極浅部における断層形状と平均上下変位速度:長野県北安曇郡白馬村神城地区におけるボーリング調査. 活断層研究, 49, 1-16.
- 立岩和也, 岡田知己, 2018, P 波の変位振幅の立ち上がりのマグニチュード依存性, 地球惑星科学連合大会, SSS15-P15.
- 立岩和也, 岡田知己, 内田直希, 2018, P 波の変位振幅の立ち上がりのマグニチュード依存性 (2), 日本地震学会秋季大会, S08-P19.
- Terakawa, T. E. Hauksson, Absolute Stress Fields in the Source Region of the 1992 Landers Earthquake, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 23 (B10), 8874-8890, doi: 10.1029/2018JB015765, 2018.
- Terakawa, T., Roles of tectonic stress and pore fluid pressure in earthquake generation, 2nd Asia-Pacific Workshop on Lithosphere and Mantle Dynamics, Yokohama, 2018.8.7. (invited).
- Terakawa, T., E. Hauksson, 3D Absolute Stress Fields in the Source Region of the 1992 Landers Earthquake, AGU 2018 Fall Meeting, S21E-0484, 2018, Washington D.C., USA.
- 寺川寿子, E. Hauksson, 1992 年ランダース地震震源域の絶対応力場, 日本地球惑星連合大会, 千葉, 2018.5.22.
- 寺川寿子, 間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場のモデル化と推定, 東濃地震科学研究所・平成 30 年度第 1 回地殻活動研究委員会, 瑞浪, 2018.9.5. (invited)
- 寺川寿子, E. Hauksson, 1992 年ランダース地震震源域の絶対応力場, 日本地震学会 2018 年秋季大会, 郡山, 2018.10.11.
- Triahadini, A., K. Aizawa, Dan Muramatsu, Kaori Tsukamoto, Keita Chiba, Saki Watanabe, Yui Odasaki, Makoto Uyeshima, Yoshiko Teguri, MAGNETOTELLURIC TRANSECT OF THE UNZEN GRABEN, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉幕張.
- Triahadini, A., K. Aizawa, Y. Teguri, K. Tsukamoto, T. Koyama, D. Muramatsu, K. Chiba, S. Watanabe, M. Uyeshima, Magnetotelluric transect of the Unzen graben and its correlation with seismic profile, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2018 年秋学会, 2018 年 11 月, 名古屋.
- 坪川 祐美子, 石川 正弘, 2018, Ultrasonic velocity measurements of polycrystalline clinopyroxene under high P-T conditions, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会
- Tsukamoto K., K., Aizawa, K., Chiba, W., Kanda, M., M., Uyeshima, T., Koyama, M., Utsugi, K., Seki, T., Kishita, 2018, Three-dimensional resistivity structure of Iwo-yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to shallow seismicity, surface uplift, and a small phreatic eruption, *Geophysical Research Letters*, 45, 12, 821-12, 828. <https://doi.org/10.1029/2018GL080202>.
- 塚本 果織, 相澤 広記, 千葉 慶太, 神田 径, 上嶋 誠, 小山 崇夫, 宇津木 充, 関 香織, 木下貴裕,

- 手操 佳子, 村松 弾, Agnis Triahadini, 湯浅 雄平, 岩佐 優一, 林田 祐人, Alutsyah Luthfian, 霧島硫黄山の三次元比抵抗構造と 2013 年ごろからの火山活動について, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018 年 5 月, 千葉幕張
- 堤 浩之, 遠田晋次, 後藤秀昭, 熊原康博, 石村大輔, 高橋直也, 谷口 薫, 小俣雅志, 郡谷順英, 五味雅宏, 浅野公之, 岩田知考, 2018, 熊本県益城町寺中における 2016 年熊本地震断層のトレンチ調査. 活断層研究, 49, 31-39.
- Yoshida, K., A. Hasegawa, 2018a, Hypocenter migration and seismicity pattern change in the Yamagata-Fukushima border, NE Japan, caused by fluid movement and pore pressure variation, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123 (6), 5000-5017, doi: 10.1029/2018JB015468.
- Yoshida, K., A. Hasegawa, 2018b, Sendai-Okura earthquake swarm induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in the stress shadow of NE Japan: Detailed fault structure and hypocenter migration, *Tectonophysics*, 733, 132-147, doi: 10.1016/j.tecto.2017.12.031.
- Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Yoshida, and T. Matsuzawa, 2018, Heterogeneities in stress and strength in Tohoku and its relationship with earthquake sequences triggered by the 2011 M9 Tohoku-Oki earthquake, *Pure and Applied Geophysics*, doi: 10.1007/s00024-018-2073-9.
- Yoshida, K., T. Kuwatani, T. A. Yasumoto, S. Haraguchi, K. Ueki, H. Iwamori, 2018, GEOFCM: a new method for statistical classification of geochemical data using spatial contextual information. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, <https://doi.org/10.2465/jmps.171127>.
- 湯浅 雄平, 松本 聡, 中尾 茂, 松島 健, 大倉 敬宏, Characteristics of the seismic gap in west part of the central Kyushu, Japan, SCG57-P18, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.5.20-24, 幕張
- 湯浅雄平, 松本聡, 松島健, 中尾茂, 大倉敬宏, 天草地震空白域における非弾性ひずみの検出, S23-P16, 日本地震学会 2018 年度秋季大会, 2018.10.9-11, 郡山市
- 渡邊 了, 2018, 地震波速度・電気伝導度から推定される地殻内の流体分布, 地震予知連絡会会報, 100, 427-430.

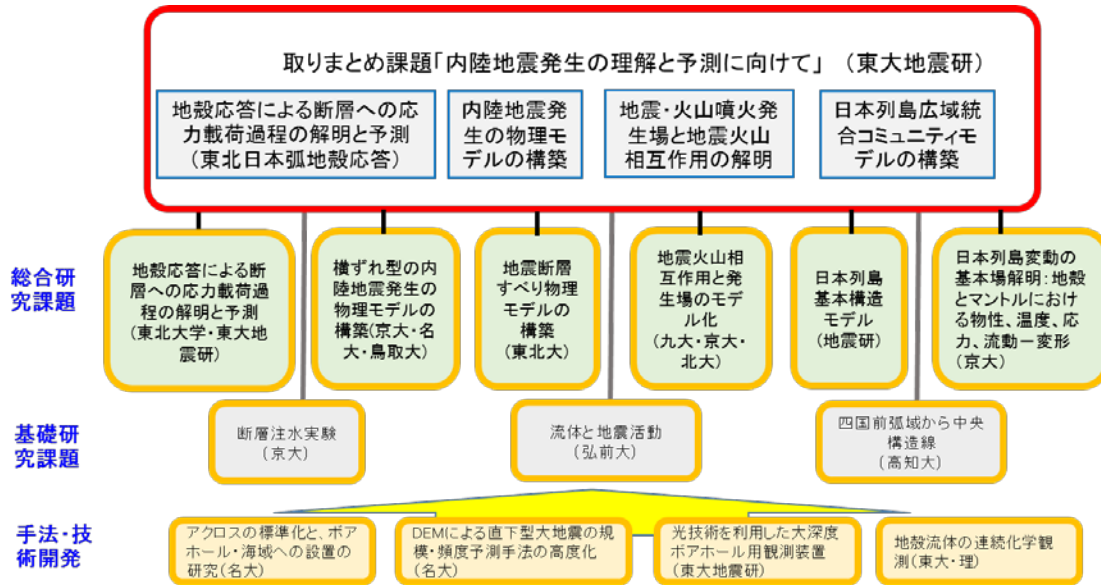


図1. 今期の内陸地震研究推進体制。各枠には課題の中心テーマと代表担当機関を記している。

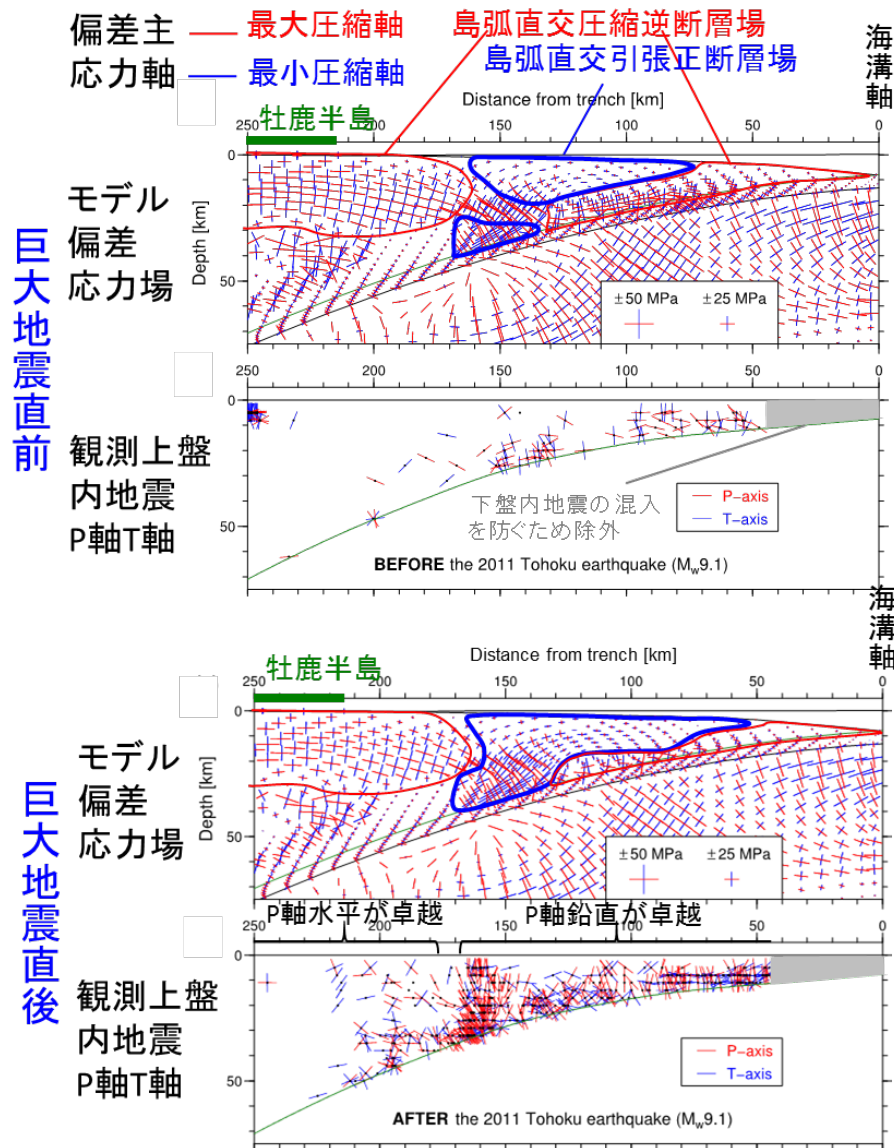


図2. 東北日本島弧の東北沖地震前後における絶対応力場のモデリング。
 巨大地震後のプレート境界の平均摩擦力が9 MPa のケース（ベストモデル）の結果の、巨大地震発生前（上）と直後（下）の、モデルから計算される偏差応力場と観測された上盤内の地震の発震機構解のP軸とT軸の分布の前弧付近における拡大図を示す[1203:東北大学]。

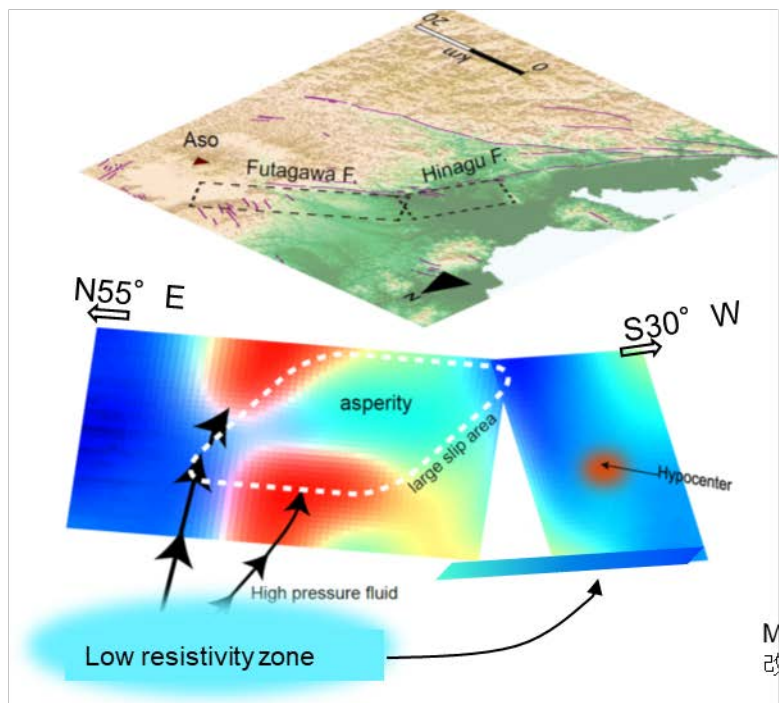
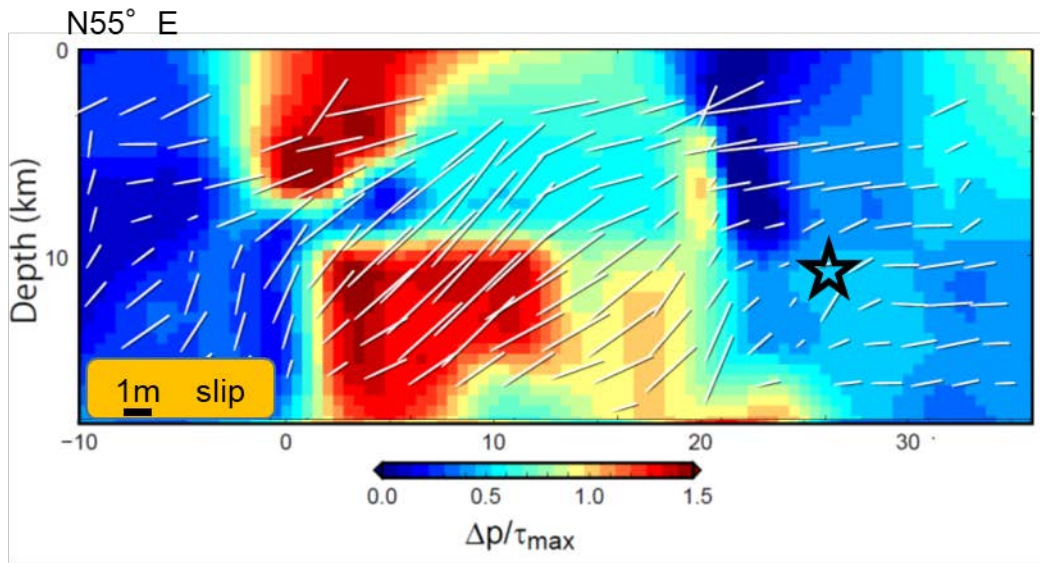


図3. 上) 本震断層沿いでの断層面と応力場最適面の関係。赤いほど面のずれが大きい（最大せん断応力で規格化された間隙流体圧変化として表示, Matsumoto et al. 2018 を改変)。星は破壊の開始点。下) 上図と低比抵抗域の関係を示した模式図[2201:九州大学]。

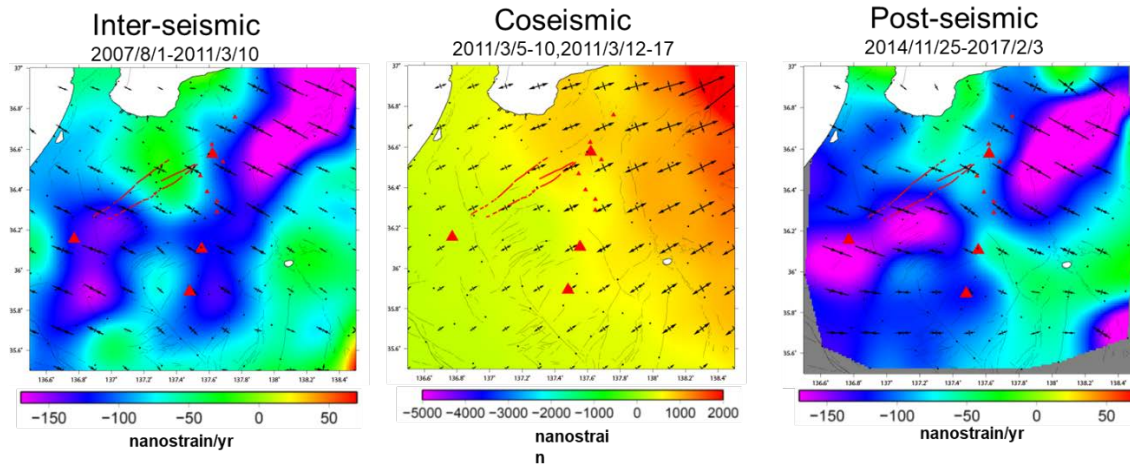


図4. (a) 東北沖地震前および(b) 地震後の面積歪速度 (短波長成分)。 (c) 東北沖地震時の面積歪。赤線が跡津川断層系, 三角は火山, 黒点が GNSS 観測点 [1907: 京都大学]。

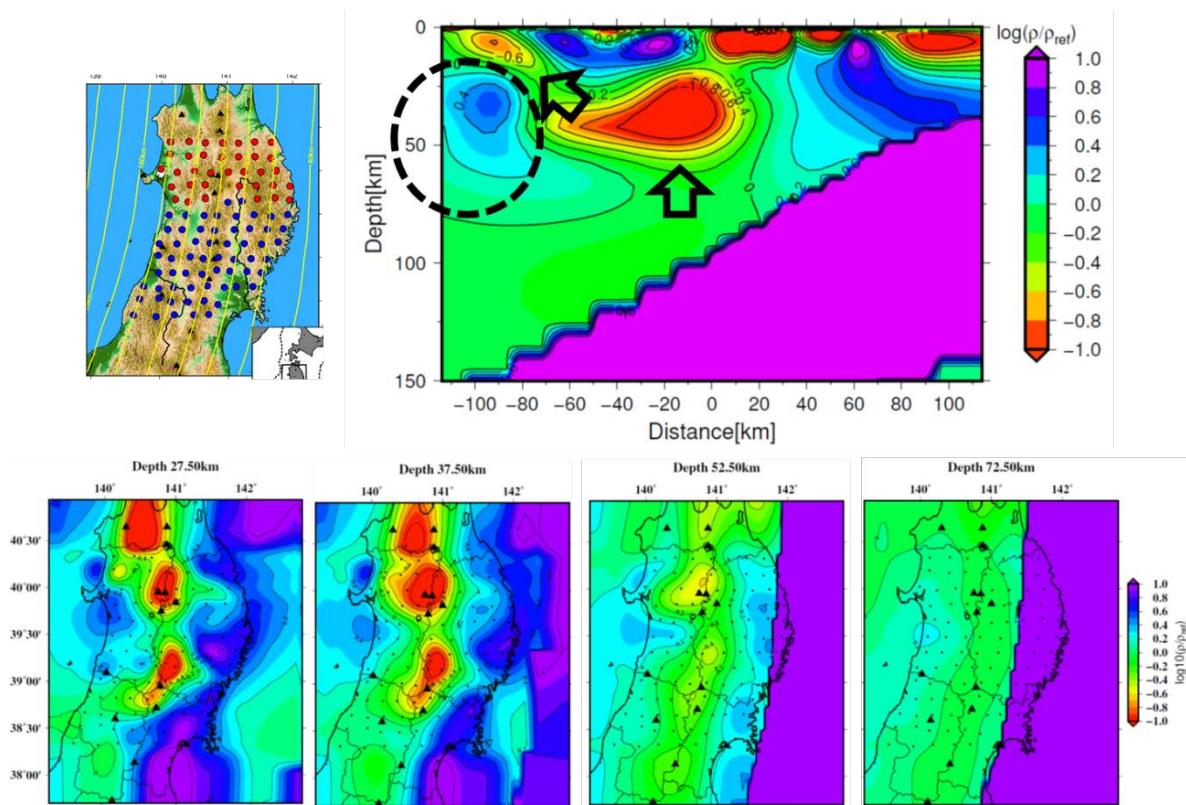


図5. 長周期 MT 観測から推定された 3 次元比抵抗構造。

左上: 観測点配置と断面図の位置。右上: 森吉山・八幡平付近を通る東西断面。下: 各深さにおける比抵抗分布 [1203: 東北大学]。

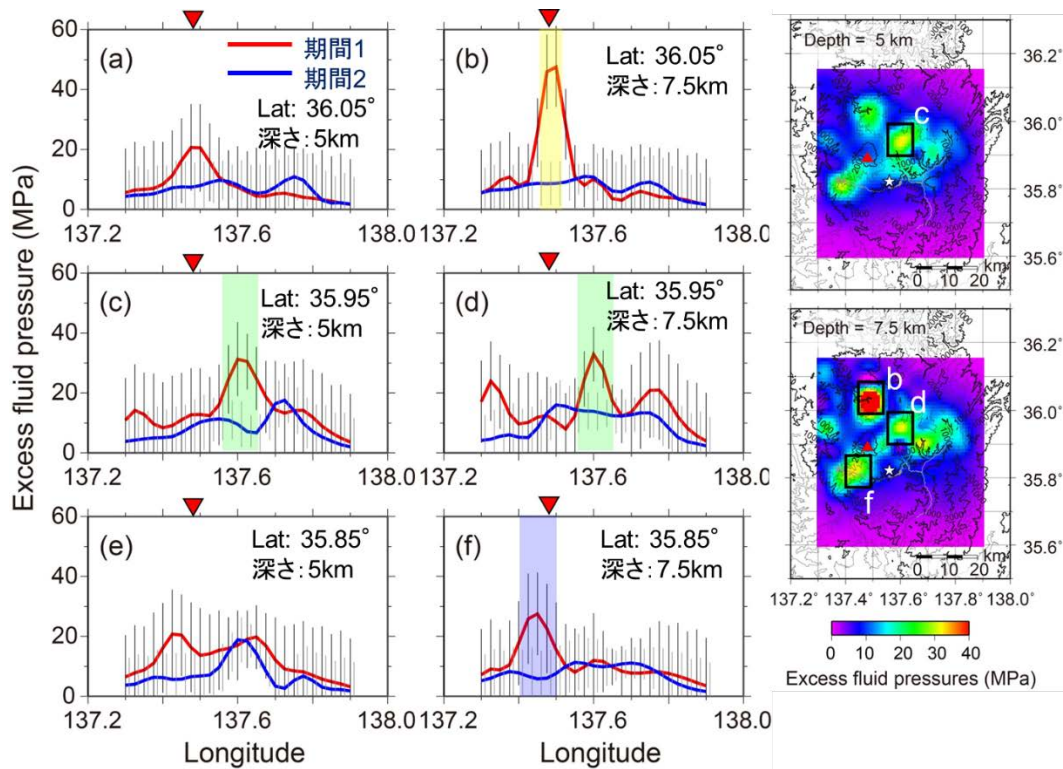


図6. 御嶽山周辺域の3D間隙流体圧場 (Terakawa, 2017)。

深さ5 kmと7.5 kmでの間隙流体圧場と時間変化。右図) 上下はそれぞれ5, 7.5 kmの流体場, 左図) 赤線と青線は, それぞれ期間1 (2012年5月~2014年7月), 期間2 (2012年9月~2014年7月)の結果である (Terakawa et al., 2013; Terakawa, 2017) の結果である。黒及び灰色の縦線は, 68%信頼区間を示す。赤い逆三角形は, 御嶽山山頂の経度を表す。緯度36.05°における (a) 深さ5 km, (b) 深さ7.5 kmの間隙流体圧分布。緯度35.95°における (c) 深さ5 km, (d) 深さ7.5 kmの間隙流体圧分布。緯度35.85°における (e) 深さ5 km, (f) 深さ7.5 kmの間隙流体圧分布。黄色い網掛け領域は, Terakawa (2017) と Terakawa et al. (2013)で参照した応力場の違いが大きい領域 (テンソルの内積の平均は0.56) である [1907: 京都大学]。

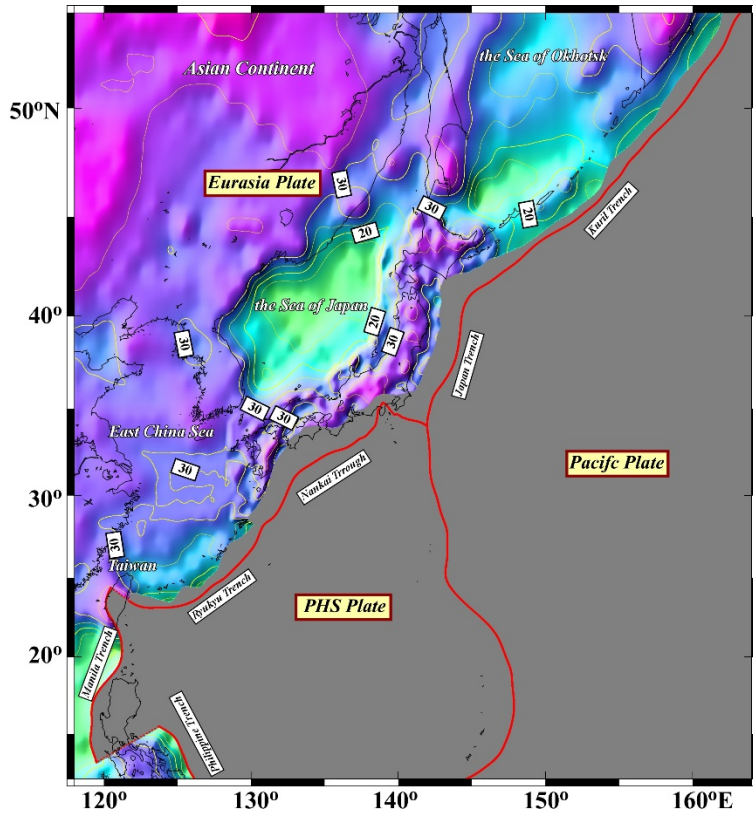


図7. ユーラシアプレートのモホ面。日本周辺は Matsubara et al. (2017), 周辺域は crust1.0 (Laske et al., 2013)による結果を用いた。更に本研究で求めた太平洋プレート境界面で切り取った。

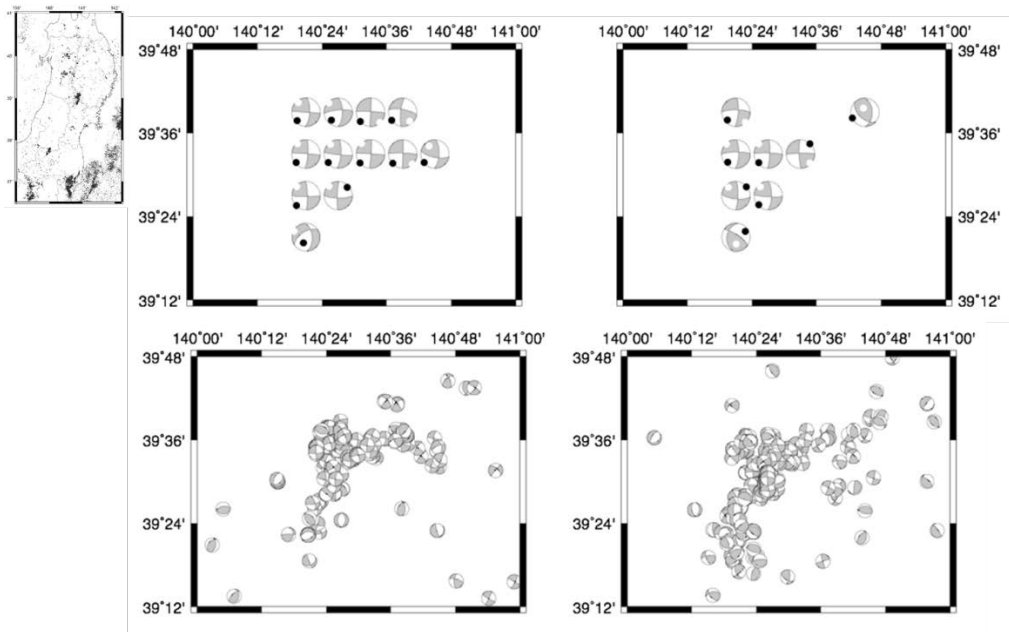


図8. 秋田南部地域における応力インバージョン結果(上)とメカニズム解(下)。左) 2011-2013年の期間と右) 2014-2017年の期間をそれぞれ示す。

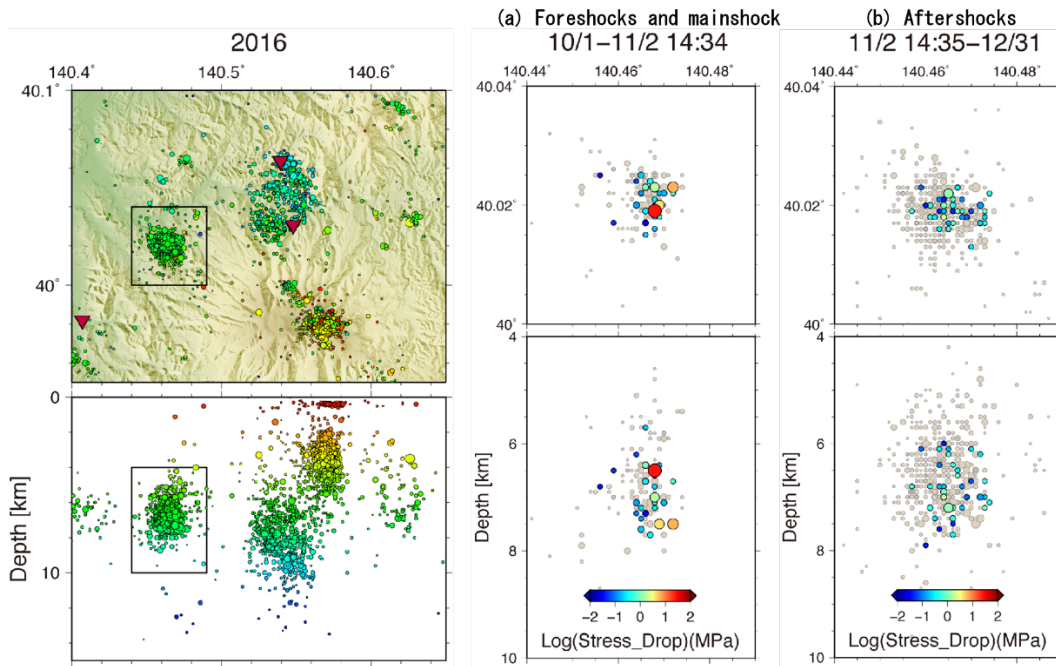


図9. 森吉山北西で発生した地震群の応力降下量の空間分布。

左) 2016年に森吉山とその周辺で発生した地震の震源分布。赤い三角印は観測点の位置を示す。四角の中の領域を右に示す。四角の中において、最大規模のM4.2の地震の発生前の地震を前震、発生後の地震を余震とした。右) (a) M4.2の本震とその前震の応力降下量の分布。(b) 余震の応力降下量の分布。(a) (b)とも、シンボルの丸の大きさはマグニチュードを、色が応力降下量を表す。灰色の丸はそれぞれの期間に発生した地震の震源を示す[1101:弘前大学]。

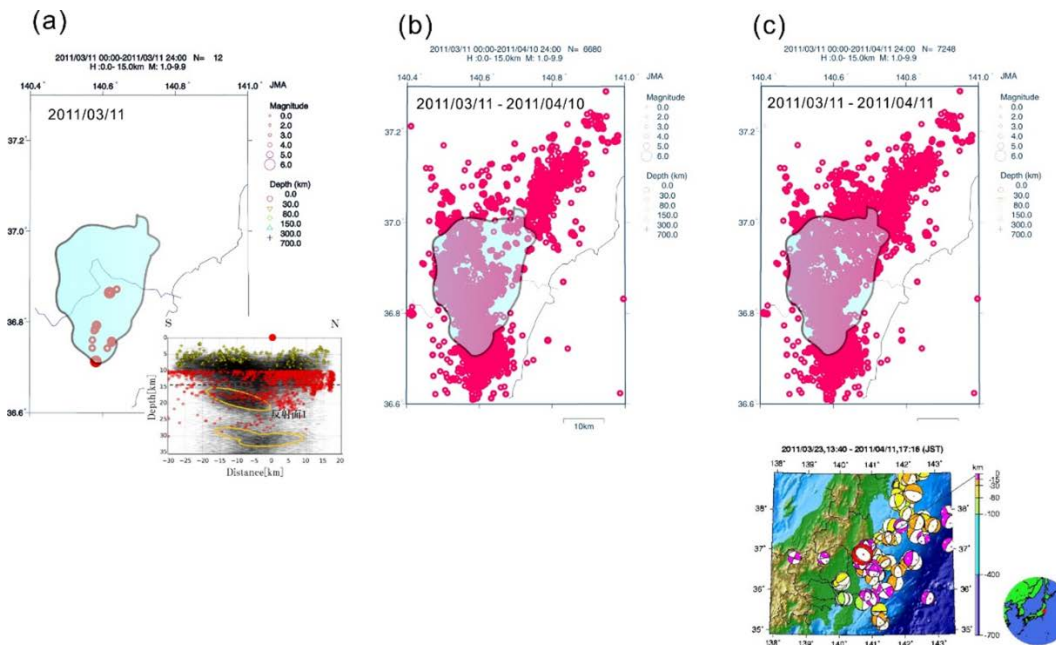


図10. いわきにおける地震活動と地震波反射面の関係。

(a) いわきの地震活動域での3月11日に発生した15 km以浅のM1以上の地震の震源の位置と地殻内反射面の位置。反射面の位置は水色で示してある。挿入図は臼田により求められた反射面の深さ分布(臼

田修士論文, 2018)。 (b) いわきの地震活動域での 2011 年 3 月 11 日-4 月 10 日に発生した 15 km 以浅の M1 以上の地震の震源の位置と地殻内反射面の位置。 (c) いわきの地震活動域での 2011 年 3 月 11 日-4 月 11 日に発生した 15 km 以浅の M1 以上の地震の震源の位置と地殻内反射面の位置。 防災科研による 4 月 11 日の福島県浜通りの地震のメカニズム解を挿入図で示した [1203: 東北大学]。

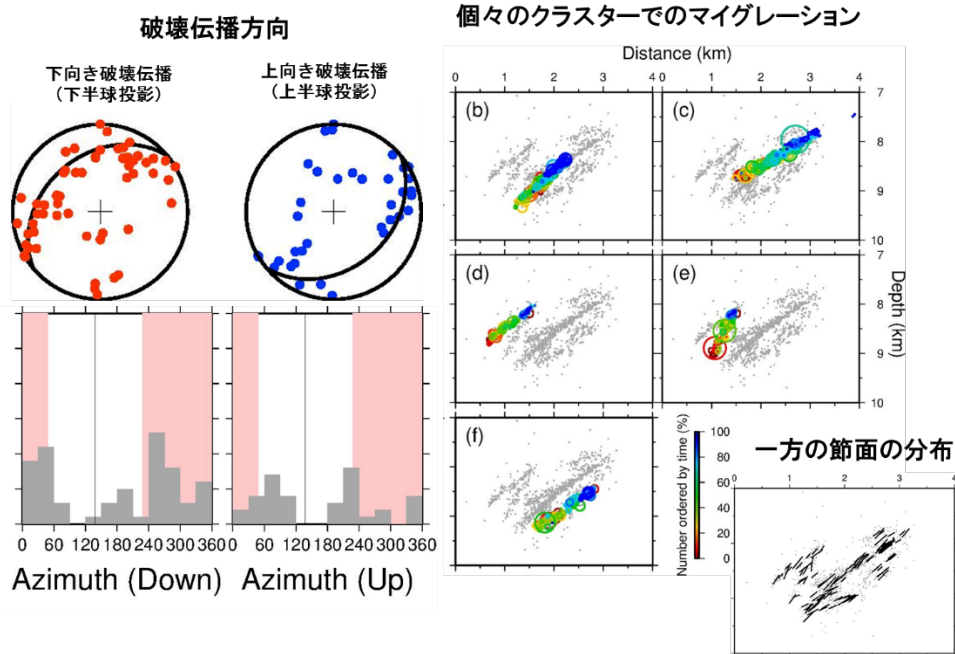


図 11. 経験的グリーン関数法から推定した破壊指向性。

左：経験的グリーン関数法から得られた震源時間関数のパルス幅の方位依存性から、破壊の進行方向を推定した結果。破壊伝播はやはり震源分布と整合する節面に沿って進む場合が多く、また、上向き（青丸）よりも下向き（赤丸）に破壊が伝播した例が多いことがわかる。右：福島-山形県境付近で発生した群発地震のマイグレーション (Yoshida and Hasegawa, 2018a)。色は発生時期をしめしており、地震活動は時間とともに深部から浅部に移動していった。震源分布は発震機構解の一方の節面と同様の傾斜を示しており、この方向に断層が生じていたことを示唆する [1204: 東北大学]。

1 (3) 火山

「火山」計画推進部会長 大倉敬宏（京都大学大学院理学研究科）

副部会長 野上健治（東京工業大学理学院）

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のほかに噴火災害の推移を噴火現象の発展段階に応じて予測することが重要である。またこれらを予測するためには、火山噴火現象そのものの解明もまた非常に重要である。そこで、「火山」計画推進部会では「火山噴火の事象分岐の条件・論理を明らかにし、噴火事象系統樹を高度化することで、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噴火現象の解明、噴火発生場の解明、噴火のモデル化、観測手法の開発および体制の整備に関する研究を5年間にわたり推進してきた。ここでは、5年間の成果の概要を述べたのちに、平成30年度の成果を詳述する。

[1]

1. 5年間の成果の概要

5年間に発生した噴火のうち、2014年9月27日に発生した御嶽火山の噴火では、死者・行方不明者が60名を超える災害をもたらされた。また、草津白根山の本白根山で、2018年1月23日に水蒸気噴火が発生し、1名の方が亡くなられ、多数の方々が負傷された。亡くなられた方のご冥福をお祈りするとともに、被災された方々、ご遺族に心よりお見舞い申し上げます。

本研究計画では、火山噴火予知のための観測研究計画が見直され、観測研究は国民の生命と暮らしを守る災害科学の一部として進められている。「火山」計画推進部会では、噴火予知を目指す観測研究を継続し「火山噴火の事象分岐の条件・論理を明らかにし、事象系統樹の高度化することで、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噴火現象および発生場の解明、噴火のモデル化、観測手法の開発および体制の整備に関する研究等を推進した。ただし、すべての課題において、課題の成果を災害誘因予測のための研究に受け渡すためにはどのようにすればよいかを意識しながらの研究が遂行された。

以下では、まず5年間になされた主要な成果を簡潔に紹介し、その後平成30年度の成果を詳述する。

2. 5年間になされた主要な成果その1

噴火事象系統樹の高度化

これまでに事象系統樹が作成されていない火山を対象として、地質学的研究成果に基づいた噴火事象系統樹を作成することで、一般的な作成手順を提案し、事象系統樹を作成した。提案された手順は（1）検討期間の設定（2）想定火口域の設定（3）前兆現象の整理と噴火未遂の評価（4）噴火タイプの分類（5）噴火回数算出（6）分岐確率算出である。この手順に基づき、浅間山、十勝岳、阿蘇山、蔵王山の噴火事象系統樹が新たに作成された。

3. 5年間になされた主要な成果その2

桜島火山におけるマグマ貫入速度による経験的事象分岐論理の構築

桜島火山において、マグマの貫入速度を分岐条件とする経験的な噴火事象分岐論理が構築された。1914年大正噴火や1946年昭和噴火は住民の記録や鹿児島測候所の報告書をもとに、1955-2005年南岳火口および最近の昭和火口噴火では地盤変動データをもとに、マグマの貫入速度を推定し、噴火事象との比較がおこなわれた。

南岳下を中心とする既存火道系へマグマが貫入する場合、南岳の噴火活動では、ブルカノ式噴火 ($1-8 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$) > 連続火山灰放出 ($\sim 1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$) > スترونボリ式 ($0.2-2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$) 噴火の順にマグマの貫入速度が大きいことが明らかになった。昭和火口のブルカノ式噴火は $10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ のオーダーと小さく、溶岩噴泉のような噴火に至る前は、 $10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ のオーダーに達し、さらに1946年昭和噴火 (2億 m^3 級溶岩流出) では、 $10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ のオーダーと推定される。一方、新規火道を形成し、プリニー式噴火から始まる山腹噴火を起こした大正噴火では $2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{day}$ と推定された。ただし、 $10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ 程度のマグマ貫入では、噴火は発生していない。地盤変動がほとんど検出できていない場合 (2006年、2007年昭和火口噴火) の噴火形態は、水蒸気噴火、もしくはマグマ水蒸気噴火であり、温度上昇、噴気量の増加などが分岐判断の指標として考えられる。

4. 5年間になされた主要な成果その3

阿蘇火山における多項目観測と噴火事象分岐

阿蘇火山について、近代的な地球物理学的観測が展開されて初めてとなる、2014年11月のマグマ噴火から2016年10月の爆発的噴火までの一連の火山活動をもとに各種観測量と噴火現象が調べられた。その結果、以下の分岐指標が得られた。マグマ噴火、水蒸気噴火ともに、噴火時期が近づくにつれて、地下の体積変化量を示す基線長の伸び、熱的活動の活発化、火山性地震の微動振幅増加など、多くの観測項目に火山活動の活発化を示すシグナルが共通に現われる。一方、マグマによる浅部の熱消磁を反映する地磁気変化は、マグマ噴火の発生前のみに観測され、水蒸気爆発前には顕著な発現はない。

5. 5年間になされた主要な成果その4

鉱物組成分析および揮発性成分分析によるマグマシステムの解明

噴出物の化学組成と組織を分析し、マグマ溜まりの含水量と深さを精度よく決定するための研究が行われた。その結果、約3万年前に発生した始良カルデラ噴火の場合、噴火前のマグマ溜り上部の深さは4-5 kmであり大規模噴火の前に十分に爆発力を高めていたことが明らかになった。また、1707年の富士山宝永噴火の噴出物解析からは、深さ4-6 kmに揮発性成分にほぼ飽和したデイサイト質マグマ溜まりがあり、そこに噴火の数日前に深部から上昇した玄武岩質マグマが接触した結果、爆発的噴火を引き起こした可能性が高いことが明らかになった。最近3000年間の噴火でも同様な特徴が見られることから、将来の噴火においても、深部から上昇してきたマグマが浅部マグマと接触する際に何らかの明確な前兆現象が捉えられる可能性がある。

6. 5年間になされた主要な成果その5

新燃岳 2011 年噴火時の噴出物の結晶サイズ分布

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

7. 5年間になされた主要な成果その6

低頻度大規模噴火に関する知見

鬼界、支笏、始良、屈斜路および摩周で発生した大規模噴火について、地質調査や掘削、岩石学的検討などにより、カルデラ形成噴火の推移と前駆活動の有無に関する研究が行われた。その結果、カルデラ形成噴火に先行する噴火活動は鬼界では認められたが、支笏や摩周では確認できなかった。九州では阿蘇でも先行噴火活動が認識されているが、北海道では洞爺でも知られていないことから、先行活動の有無はカルデラ火山地域のテクトニクス場の違いと関連している可能性がある。また検討したカルデラ噴火の推移は、いずれの火山でも噴煙柱形成・崩壊のステージとクライマックスのステージに大別されることがわかった。また両ステージ間には比較的長い時間間隙が存在する事、あるいはそれぞれのステージでの噴火推移についてもこれまで考えられている以上に複雑であることがわかった。これらの噴火をもたらしたマグマ系は、単一の巨大な(成層)マグマ溜りではないことも明らかになった。これまでは単一の巨大な珪長質マグマ溜りからのプリニー式噴火で、大量のマグマが噴出することで陥没が起こり、それによってクライマックス噴火が発生し、カルデラが形成されるというモデルが一般的であった。しかし五カ年の研究によって、時間間隙の存在や噴火推移の中でのカルデラ形成時期の多様性が明らかになった。今後は、活動時期や火山の置かれているテクトニクス場も考慮して、更なる事例研究を積み重ねることが、低頻度大規模噴火現象を理解するために重要である。(図1)

8. 5年間になされた主要な成果その7

霧島新燃岳における観測の高度化

2017年10月に発生した6年ぶりの噴火に関して、広帯域地震計により噴火に先行する微動に伴う傾斜変動が捉えられた。この傾斜変動は新燃岳火口直下深さ 1km 付近における 10^4m^3 の膨張源によって良く説明されることから、火山性微動は噴火に先行して流体が新燃岳の浅部に移動したことに伴い発生したと解釈された。また、2018年3月中に発生した爆発的噴火について火口周辺の広帯域地震波形から傾斜変化を抽出したところ、77回のイベントの平均として、噴火の約30分前から膨張が始まり、噴火10分前から若干収縮して噴火に至ることがわかった。噴火直前の火道内プロセスの定量的理解につながる成果と言える。また、繰返し実施された空中磁気測量では、2011年噴火時に火口に滞留した溶岩の冷却による帯磁、2018年3月再噴火の際の新たな溶岩の噴出による消磁と冷却による帯磁が

捉えられた。

9. 5年間になされた主要な成果その8

熱水系の卓越する火山における比較研究を通じた類似性の抽出

口永良部島（2014. 8. 3）・御嶽山（2014. 9. 27）・阿蘇山（2015. 9. 14）・草津本白根（2018. 1. 23）のについて、噴火時の地動データを比較した結果、阿蘇山を除く3イベントで、噴火開始時に火山性微動に同期した傾斜の加速が認められた。ただしこのような加速期は噴火直前の数分から10数分であり、地動の変化を大まかに見ると、噴火前に地盤が膨張し、噴火開始とともに収縮に転ずるというパターンである。将来、こうした観測データの特徴が類型化でき、リアルタイムで異常を自動検出できるようになれば、登山者や観光客への注意喚起情報として役立つことが可能かもしれない。また、十勝岳・吾妻山・阿蘇山では、活動火口周辺で非噴火期に継続的な消磁が長期間続いた、特に十勝岳では局所的な地盤の膨張にほぼ同期して、間欠的に消磁が加速していた。この特徴は、口永良部島で2014年噴火の10年以上前から観測されていた現象とよく似ており、浅部に熱水系をもつ火山の噴火準備過程に共通するものである可能性が示された。さらに御嶽山、口永良部島、阿蘇での水蒸気噴火後の比較研究から、火山活動の推移予測には、GNSSや水準測量による地殻変動観測、火山ガス(二酸化硫黄)放出率の観測、地震観測が重要であることが再確認された。

10. 5年間になされた主要な成果その9

御嶽山における応力場による火山活動モニタリング

地震のメカニズム解から応力場を推定する手法を御嶽山の火山性地震に適用した。その結果、2014年噴火前の同火山下の応力場は広域応力場からずれていたことが明らかになった。このことは噴火前に火山活動が活発化していたことを示唆する結果である。御嶽山では2014年噴火後も何度かの増圧過程(2015年1～3月, 2016年1～9月)があった可能性があるが、2016年9月には減圧過程となった。この結果は、水準測量などで捉えられている2016年9月以降の山体収縮と調和的である。

11. 5年間になされた主要な成果その10

火山衛星監視システムの構築

人工衛星「ひまわり」および「しきさい」のデータを用いたリアルタイム火山観測システムが開発された。

2015年6～8月のインドネシア・ラウン火山の噴火の際には、ひまわり8号の超高頻度赤外面像(AHI)によって熱異常変化が捉えられ、複数の衛星による高分解能画像から噴火活動状態や溶岩の分布状況が推定された。また、しきさいのSGLI (Second Generation Global Imager) 画像が2018年のハワイ・キラウエア火山の溶岩流などの観測に活用されている。

12. 5年間になされた主要な成果その11

航空機 SAR データの解析技術の向上

人工衛星を用いた干渉解析手法である InSAR 解析を航空機 SAR に応用するための研究

が実施された。その結果、風などの影響により飛行軌跡を均一に保つことが難しい航空機 SAR データにも適用可能な解析手法が開発され、火山活動が高まっていた霧島の硫黄山において、2014 年 から 2016 年と 2016 年から 2017 年の両期間ともに硫黄山付近の膨張を示す地殻変動が明瞭に検出された。また、地殻変動の 3次元変位を取得する方法も開発された。(図 2)

1 3. 5 年間になされた主要な成果その 1 2

火山ガス観測装置の開発と運用

火山ガス測定の経験がなくてもガス放出率測定を容易にできるような二酸化硫黄の簡易型トラバース測定装置の開発が行われた。この装置は、口永良部島に航行するフェリーに装着され、観測を継続しながら装置の改良が進められた。高頻度で得られたガス放出率データは気象庁にも提供されている。そして、口永良部島の 2015 年 5 月 29 日の噴火前後の二酸化硫黄放出率推移や 2018 年 10 月 21 日の噴火前の放出率の上昇など火山活動を理解するうえで貴重な情報がえられ、口永良部島の火山活動の監視に役立てられている。(図 3)

1 4. 5 年間になされた主要な成果その 1 3

阿蘇火山における ACTIVE 観測

阿蘇火山・中岳火口周辺で行われた ACTIVE 観測データの解析手法の高度化が実施され、三次元有限要素法を用いたインバージョンコードが開発された。その手法を用いて 2014 年 11 月のマグマ噴火前後の比抵抗構造の変化を推定した結果、火口底標高付近の地下水層の消失および粘土キャップ層の含水率低下に対応する比抵抗構造の時間変化が検出された。これは噴火様式の予測につながりうる解析結果である。

[2] 平成 30 年度の成果

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料、考古データ、地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

火山現象とそれに伴う災害を長い時間スケールにわたって正確に把握するために、岩石資料や地質調査データなどの分析をおこなうことが重要である。この目的のため、東京大学地震研究所は、顕微赤外反射法によるマグマ中の揮発性成分定量分析とメルトの含水量を考慮した鉱物温度圧力計を用いたマグマ溜まり深度の精密決定を遂行してきた。本年度は分析対象を爆発的噴火のテフラ噴出物以外の溶岩流にも広げ、富士山の噴火様式とマグマ溜まりの環境(温度、含水量)との関係を明らかにした。その結果、溶岩流は高密度・高温・高含水量のマグマにより、爆発的噴火は低密度・低温・高含水量のマグマにより、それぞれ引き起こされていることを示す結果がえられた。このことは、マグマ溜まりからのマグマ上昇の様式の違いが噴火様式に表れていることを示唆するものである([課題番号:1502])。この上昇様式の違いを地震観測や地殻変動観測で捉えることが可能かどうかは今後検討すべき課題であろう。

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

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

低頻度で大規模な火山現象の発生過程や噴火現象を理解するためには，近代的観測データの解析，岩石・地質データの分析を現在の火山学の知見と対比しながら行なうことが必要である。火山部会では，低頻度大規模火山現象としてカルデラ形成噴火と大規模山体崩壊とをターゲットとした研究が実施された。

VEI=7クラスのカルデラ形成噴火の研究では，支笏，鬼界，摩周カルデラを対象として，地質学的調査，物質科学的な解析が行われた。その結果，摩周カルデラでは，カルデラ形成噴火堆積物の噴火様式・構成物の時間推移が検討され，下位から噴煙柱形成・崩壊フェーズ，マグマ水蒸気噴火フェーズそしてカルデラ形成フェーズの，噴火様式の異なる3つに区分できることが明らかになった。また，鬼界カルデラでは認められた，カルデラ形成噴火に先行する噴火活動は摩周カルデラでは確認されなかった（北海道大学〔課題番号：1001〕）。

一方，山体崩壊について雲仙岳1792年噴火時の眉山崩壊に関する史料分析が昨年度に引き続き実施された。その結果，火山活動と連動した雲仙活断層群の活動によって多くの地割れが形成され，山腹の地下水系が破壊されたことが明らかになった。このことから，崩壊の本質は眉山山麓付近の岩石中の間隙水圧の上昇によって起こった液状化と，引き続き地すべりとする過去の研究結果を支持するものとなった（北海道大学〔課題番号：1001〕）。

また，桜島大正噴火時（1914年）に発生した地震の震源要素再決定に関する研究も継続され，この地震は，桜島の南西沖5kmの深さ10kmを震源とするMw6.5の正断層タイプであることが明らかになった（京都大学防災研究所〔課題番号：1902〕）。

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

マグマ溜まりや火道などの構造や物質科学的特性，火山周辺の応力・ひずみの時空間分布を明らかにし，火山噴火現象のモデル化の研究を進めるため，地震・地殻変動観測や電磁気探査などを実施することが重要である。

この目的のため，2011年の東北地方太平洋沖地震以降に活動の活発化がみられる蔵王山周辺において，地震・地殻変動観測，重力観測，地磁気観測，火山ガス観測，火口湖水温観測などからなる総合観測が継続された（東北大学〔課題番号：1202〕）。その結果，蔵王山直下浅部で発生する長周期地震は，火口域直下浅部に存在する破碎帯に気泡を含む熱水が介在することにより発生していることが推定された。そしてこの地震の発生域には熱消磁源が存在することも明らかになった。また火山性地震や微動など活動活発化が，噴気地帯の熱活動活発化にも現れていることが示唆された。

(5) 火山現象のモデル化

「火山」計画推進部会では，マグマ噴火と水蒸気噴火それぞれを主体とする火山に対し，火口近傍や火山周辺における多項目の観測や火山噴出物の解析から，先行現象とそれに続く噴火現象を把握するための観測研究が実施されている。マグマ噴火では，大規模な災害

が引き起こされる可能性が、また水蒸気噴火では噴火規模が小さくても火口近傍での災害が引き起こされる可能性がある。これらの災害を軽減するためにも、噴火現象のモデル化を目指すことが需要である。

ア. マグマ噴火を主体とする火山

2006年に58年ぶりに再開した桜島の昭和火口における噴火活動は、2009年後半から2015年前半までブルカノ式噴火が頻発した。2015年8月15日に急速なマグマ貫入があったものの、2015年以降の噴火活動は低下し、2017年10月末から噴火活動の中心は昭和火口から南岳山頂火口に回帰した。2018年において最大規模の噴火は8月16日に発生した爆発的噴火であり、噴煙高度は4700mに達し、火砕流も約1.3km流下した。この噴火の18時間前の15日13時ごろから山体膨張が始まり、圧力源の体積増加量は約18万 m^3 と見積もられた。噴火発生後には同様に、約18万 m^3 の体積収縮が起こり、15日13時のレベルに戻った。噴火発生の1時間前からBH型地震が発生し始め、膨張の停止を経て、噴火が発生した。このような特性は、火砕流を伴う噴火に前駆する地震活動や地盤変動によく見られ、一連の噴火活動期の縮退期においては火砕流が発生しやすいことと合わせて、火砕流を伴う噴火への分岐条件として挙げることができる（京都大学防災研究所 [課題番号：1908]）。この活動の元となるマグマは始良カルデラ下のマグマ溜まりから桜島北岳下へと移動していると考えられている。GEONETの基線長変化の解析から、始良カルデラ下のマグマ溜まりは膨張収縮を繰り返しながらも体積増加が継続しているがその体積増加率は2017年以降小さくなってきていることが明らかになっている（国土地理院 [課題番号：6002]）。

マグマ噴火のモデル化のためには、地球物理学、地球化学および岩石学的手法を用いた多項目の観測を桜島以外でも推進し、噴火にともなう諸現象の一般性を抽出することが非常に重要となる。この目的を達成するため、東京大学地震研究所は、霧島新燃岳、浅間山、伊豆大島において地震、地殻変動、ガス、電磁気等の多項目観測を継続した。霧島新燃岳では2018年3月から2018年6月まで爆発的噴火が断続的に発生した。その内2018年3月中に発生した爆発的噴火について火口周辺の広帯域地震波形から傾斜変化を抽出したところ、77回のイベントの平均として、約30分前から膨張が始まり、10分前から若干収縮した後に噴火に至ることがわかった。これは、噴火直前の火道内プロセスの定量的理解につながる成果と言える（[課題番号：1508]）。また、同火山において2018年10月に実施された空中磁気測量では、マグマ冷却による全磁力変化が捉えられ、火山現象のモデル化に資する知見が得られた（[課題番号：1508]）。一方、2018年3月に発生した新燃岳の噴出物の時間推移の解析からは、連続的な噴煙活動と溶岩流出が起こった3月上旬の噴出物とそれ以降の間欠的な爆発が続いた時期の噴出物に含まれる本質物質の結晶度の違いから、火道内浅部のマグマ上昇と火口内での滞留による結晶化の進行が推測されている（産業技術総合研究所 [課題番号：5006]）。

火山現象・噴火のモデル化を行なう際には、マグマの挙動についての理論的及び実験的研究の成果を取り入れることも重要である。東北大学は、桜島火山の歴史時代プリニー式噴火（大正、安永、文明噴火）のいずれの噴火でも、軽石・火山灰として爆発的に噴出したマグマは、噴火の直前には従来想定されていた深部（約10 km）のマグマ溜りから、それ

より大幅に浅い火道（桜島直下の深さ1～3 km）に移動していたことを明らかにした。これは、将来の大規模噴火が同じ前駆過程を経る場合、上昇開始からごく短時間で噴火が開始する可能性があることを意味する（[課題番号：1205]）。（図4）

その他、明神礁や西之島など海域火山の観測も継続されている（海上保安庁，[課題番号：8003]）

イ．熱水系の卓越する火山

水蒸気噴火やマグマ水蒸気噴火の準備過程に関連する先行現象の事例を多数集め、それらの現象の理解を深めるため、十勝岳・吾妻山・草津白根山・阿蘇山・口永良部島を対象とし、地球物理的観測、電磁気や熱観測、地質調査と噴出物分析を調査項目とする全国連携の比較研究が継続された（北海道大学 [課題番号：1003]）。これら5火山のうち、2014年に噴火が発生した阿蘇山と口永良部島では、同年に噴火した御嶽山を対象とする新規課題においても水蒸気噴火後の推移予測のための観測研究が実施された（京都大学理学研究科 [課題番号：1802]）。

上述の全国連携研究では、火山活動に伴う地震波速度の時間変化検出を目的とした地震波干渉法解析が実施された。そのうち、吾妻山でのみ火山性の歪変化に対応する地震波速度変化が検出された（北海道大学 [課題番号：1003]）。

十勝岳では、熱水系の特徴を岩石学的に評価するため十勝岳の3.7ka、4.7ka火砕流堆積物および1926年噴出物について変質物の分析がさらに進められた。その結果、マグマ貫入と強酸性変質が頻繁に繰り返されていることが解明された。また吾妻山では、吾妻小富士形成以後の浄土平における一連の火山活動による水蒸気噴火の噴出物の調査が実施された。その火山灰組成変化から、過去4000年以内の活動では、大穴火口形成噴火（AD1331頃）を境に、熱水系の状態が大きく変化したことが明らかになった（北海道大学 [課題番号：1003]）。

草津白根山・本白根山で、全国連携の対象火山では3火山目となる噴火が、2018年1月23日に発生した。白根山湯釜周辺に設置していた3点のボアホール型および2点の地上設置型傾斜計により、噴火前後の変動の詳細が捉えられた。それによると、噴火前の9時59分58秒から噴火発生に対応する10時02分10秒まで湯釜南方が隆起を示し、その後、反転した。主火口に対応する本白根山鏡池北火砕丘の直下に開口クラックを仮定すると、噴火直前の膨張体積49万 m^3 （開口量は0.38 m）、噴火後の収縮体積は33万 m^3 と推定された。噴煙質量収支から、クラック開口を担ったのは主として気相と考えられる（東京工業大学 [課題番号：1601]）。また、本白根噴火前の地震活動を再検討するため、Matched Filter法による微小地震の検出を行った。その結果、通常のルーチン処理に比べ数倍～10倍程度の地震（B型地震）を検出できた。ただし、噴火に先行するような明らかな活動度の変化は認められなかった。地震波干渉法による構造変化も検討したが、噴火発生前後で有意な変化は認められなかった（東京工業大学 [課題番号：1601]）。草津白根山・本白根山では、火口近傍における噴出物調査も実施され、計100点以上の堆積量データが得られた。その結果、噴出量は約3.6万トンと推定された。放出岩塊の全岩化学組成分析によれば、岩塊の岩石学的特徴は鏡池北火砕丘のそれと一致した（富山大学 [課題番号：2942]、東京工業大学 [課題番号：1601]）。また、火山灰に付着した水溶性成分のF、Cl、S04の分析

を実施し、噴火口から近い万代鉱の熱水系と比較した結果、今回の噴火には高温のマグマ起源のガスが関与していることが示唆された（東京工業大学 [課題番号：1601]）。

草津白根山周辺で、無人ヘリを用いた空中磁気測量が2018年6月と10月に実施された。得られたデータを2014年の国土交通省の測量結果と比較することで経時変化を求めたところ、湯釜火口北東域では温度上昇を示す消磁パターンが認められた。本白根噴火の火口域でも変化が見られたが噴火による地形変化である可能性が高い（北海道大学 [課題番号：1003]，東京工業大学 [課題番号：1601]）。また、気象庁は本白根山の熱活動の状況を把握することを目的として、本白根山山頂部周辺において自然電位観測、および地磁気全磁力の繰返し観測を実施した（[課題番号：7005]）。

口永良部島では、2018年8月初めからSO₂の増加が顕著となる（東京大学大学院理学研究科 [課題番号：1403]）と同時に新岳火口直下浅部での地震活動が活発化した。そしてGNSS観測により、8月10日から新岳をはさむ基線が約2 cm伸びたことがとらえられた。その後、8月15日に地震活動が活発化し、噴火警戒レベルが4に引き上げられた。8月27日-28日に実施された水準測量では、路線南部に向かって明瞭な地盤隆起がとらえられている。この変化は2015年噴火前の変動量・パターンともに類似していた。その後、地震活動は急速に低下、地盤の収縮も観測された。これは、地震活動により、マグマ貫入による応力が緩和されたためと考えられる。その後、2018年10月21日から12月13日までほぼ連続的に噴火が発生し、12月18日や2019年1月17日には爆発的噴火が発生した。これらの噴火の前にはGNSS観測で捕捉できる量の地盤変動は生じていなかったが、火山性地震回数の増加がとらえられた（京都大学理学研究科 [課題番号：1802]）。この口永良部島では、口永良部港内や古岳南西海岸で変色海水が常時発生している。海上保安庁の協力を得て、周辺海域で変色海水を2018年と2019年に採取した。また、火山活動の影響を受けていない海水（基準海水）も採取した。2018年の試料は基準海水のpHにほぼ等しくなっていたが、2019年になると明らかにpHが低下していた。F/Cl、Cl/SO₄モル比とpHの関係は、口永良部島沿岸から放出される熱水は、2019年は基準海水と比較して相対的にFとSO₄に富んでいた事を示している（東京工業大学 [課題番号：1601]）。

御嶽山で2014年の噴火以降に年1回のペースで実施された水準測量では、山頂に近い路線で2016年を境に沈降が観測されており、これは山体収縮にともなうものであると考えられる。一方、GNSS観測（京都大学理学研究科 [課題番号：1802]）や衛星SAR（北海道大学 [課題番号：1008]）では火口付近の大きな収縮が現在も継続中であることが捉えられている。この現象を貯水槽の水蒸気放出に伴う減圧現象とする仮説に基づき、放出水量と地殻変動量を比較したところ、火口からの放出水量は、衛星SARで確認された浅部の収縮源からの供給可能量を超過しており、より深部に存在する別の供給源の寄与を考える必要性が示された（北海道大学 [課題番号：1008]）。御嶽山山頂域では、小電力・小型・携帯テレメータ地震観測装置を用いた連続テスト観測が行われている。このデータと定常観測点データを合わせて震源決定を行い、2014年噴火の火口列周辺の深さ-2~-1 kmに南方向から噴気孔までの直線状の震源分布が得られた。この解析でえられた観測点補正値を用いて2014年と2007年噴火前後の震源を求めると、噴火前には0 km以深でほぼ同じ経路で地震が起こっていたこと、また、現在の活動は2014年噴火後の活動よりも浅くなっていることが明らかになった（京都大学理学研究科 [課題番号：1802]）。

阿蘇火山では、中岳第1火口西方約1 km地点において、噴出物層序を観察するとともに、炭化物を採取して放射性炭素 (^{14}C) 年代測定を実施した。その結果、過去300年間に12層の水蒸気噴火堆積物が存在し、同噴火の発生頻度は25年に1回程度と見積られた。中岳における近年の水蒸気噴火あるいはマグマ水蒸気噴火は1958年、1979年、1990年、2015年および2016年に発生しており、得られた結果は、その噴火間隔ともおおむね一致している。直近の爆発的噴火が発生した2016年以降の地下熱水系の状態変化を詳細に捉える事を目的として、火口周辺にACTIVE連続観測システム（人工電流源を用いた電磁探査システム）を構築した。

他の熱水系卓越火山でも観測研究が進められた。京都大学防災研究所は、焼岳火山の観測網を強化し、2018年11月から焼岳西麓で活発化した群発地震活動をとらえ、正断層型のメカニズムを示す地震が発生していることを明らかにした（[課題番号：1909]）。また、富山大学は、弥陀ヶ原火山・地獄谷において水準測量、重力測定、地中温度測定を実施した。水準測量結果はこれまでとはことなり、全線にわたり沈降が観測された。その変動源は深さ100~160 m程度にもとめられ、これまでの膨張源(50m)より深いことが明らかになった（[課題番号：2941]）。気象庁は霧島硫黄山において火山ガスの繰り返し観測を実施し、噴気活動の変化を把握した（[課題番号：7005]）。また、産総研は同火山において、2018年4月19日の噴火に先立つ、急激な火山ガス組成の変化を検知した（[課題番号：5006]）。硫黄山でのMT連続観測からは、2017年10月末ごろから2018年1月上旬にかけて浅部低比抵抗層の一部が高比抵抗化したことを示唆するインダクションベクトルの方向変化が得られた。水蒸気噴火発生直前（5分前）には電磁場変動が観測され、その変化は火口近傍の傾斜計の波形と極めて類似していることが分かった（北海道大学 [課題番号：1008]）。

また、北海道立総合研究機構地質研究所は雌阿寒岳および十勝岳でGPS連続観測と火口域での地温連続観測、噴気および温泉水の地球化学的観測、地下水位連続観測を行った。十勝岳では、2006年以降火口域の膨張を示す変動が継続的に捉えてられていたが、2018年の春頃からは収縮を示す変動へと変化した。また、十勝岳の火山活動の変化に対応している吹上温泉地域での温泉水では、2018年は Cl/SO_4 がやや低下した（[課題番号：9102]）。

東海大学は箱根山の大涌谷と上湯場の二か所で噴気の採取・分析を一月に1回の割合で実施した。その結果、マグマ起源ガスの浅部熱水系に対する流量が低下したことに対応する $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 、 He/CH_4 の低下が観測された（東海大学 [課題番号：2949]）。この箱根火山においては東京大学大気海洋研究所も2ヶ所における継続的に噴気ガスを採取し He の同位体比を測定している（東京大学大気海洋研究所 [課題番号：2802]）。

海底火山の活動は、その周囲が大量の海水に囲まれていることから、大規模な熱水活動を伴うことが特徴であり、陸上の火山活動とは全く異なった様相を呈する。東京工業大学は、海底火山活動の評価手法を確立するために、2015年から2017年の間に3回採取された海水を分析し、その成分変動から火山活動の状況を推定した（[課題番号：1602]）。また、東京大学大気海洋研究所は鹿児島湾の北部に位置する若尊カルデラ近傍で採取した試料の分析を行った（[課題番号：2802]）。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

火山活動の推移を俯瞰的に理解してその予測を目指すためには、史料、考古データ、地質調査、火山噴出物の解析、地球物理観測の研究成果を多角的に取り入れ、可能性のある火山活動や噴火現象を網羅してその時系列を整理した噴火事象系統樹を作成することが重要である。北海道大学は、十勝岳、阿蘇火山の噴火系統樹を作成するとともに、2018年1月の本白根山の噴火を受けて、草津白根火山の噴火事象系統樹の作成に着手した。また、既存の噴火事象系統樹を最新の研究成果により更新するため、北海道大学は、浅間山の噴火開始と噴火未遂の評価手法および事象分岐確率の算出手法を検討し同火山の事象系統樹を改訂した（[課題番号：1004]）。（図5）

一方、火山活動の活発化、噴火の発生、噴火発生後の噴火規模、様式の急激な変化などの予測を行うためには、これまでの火山学的知見や本計画の成果をもとに、観測データの特徴、火山噴出物の解析などから、事象分岐の条件や論理を導き出すことも不可欠である。こうした観点から、非噴火期におけるunrest eventのうち特に熱水系の関与が疑われる事例を収集し、点源モデルで推定されたソースの深度と強度の関係を散布図に整理した。その結果、地磁気変化・地盤変動のいずれにおいても、深度と強度（又は時間変化率）の間に明瞭な正の相関が認められた。今後、ソースの深度と強度がより浅く強い方向に偏差するか否かによって、個々のunrest eventの危険度を統計的に評価できる可能性がある（北海道大学 [課題番号：1003]、東北大学 [課題番号：1208]）。一方、火山ガスに現れる変化を事象分岐の条件とするための研究も進められた。産業技術総合研究所は、定量的な測定に基づく最近の火山ガス放出率や組成の連続観測研究を網羅的に調べ、噴火発生や活動推移との関係をまとめた。その結果、例えば、火山ガス放出率とマグマ上昇率のあいだに比例関係があること、火山ガス中のCO₂/SO₂の増加が、マグマ中の気泡の増大ひいては規模な大きな噴火の発生に繋がる可能性があることがしめされた（[課題番号：5006] および東北大学 [課題番号：1208]）。

4. 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

観測研究の成果が防災・減災に役立てられるためには、行政機関等の関連機関との連携の下に、適切な計画推進体制を整備する必要がある。気象庁は3回の火山噴火予知連絡会定例会を開催し、全国の火山活動の状況についての検討を行った。検討結果は定例会終了後に報道発表し、気象庁の「火山の状況に関する解説情報」で発表するとともに、気象庁のホームページでも公表されている。また、気象庁は火山活動評価検討会を2回開催し、長期間噴火活動を休止している火口／山体における今後の調査研究及び監視のあり方について検討を行い、結果を公表した。（[課題番号：7013]）。

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

ウ. 観測・解析技術の開発

長い時間スケールをもつ火山現象の理解とその予測には、その基盤となる観測網の維

持・拡充を進めるとともに、データの継続的取得と膨大なデータの効率的利用が重要である。また、海域における観測体制の強化、各種観測を火口近傍で安全に実施する技術の開発、人工衛星を利用したリアルタイム火山観測システムの高度化、航空機搭載型センサーを用いた観測技術の開発も必要である。

山梨県富士山科学研究所では、降水と地下水・湧水の水同位体比測定から、不圧・被圧地下水の浸透標高を推定するとともに、ボーリング試料の放射性炭素年代測定を行い、被圧地下水流動系は星山期堆積物中に存在することを明らかにした〔課題番号：9201〕。また、海上保安庁は、海域火山基礎情報図調査を「利島至三宅」、「若尊」で実施した（〔課題番号：8003〕）。

東京大学大学院理学研究科（〔課題番号：1403〕）は、二酸化硫黄可視化モニタリング装置のフィールドテストを十勝岳において実施した。また、屋久島一口永良部島間のフェリーに搭載されている二酸化硫黄放出率モニタリング装置の改良を行い、10月21日噴火に前駆するガス放出の変化をとらえることに成功した。

北海道大学は、Lバンド航空機SARを用いた火山性地殻変動の検出にむけ、得られたSLC画像の詳細な位置合わせ手法を開発することにより、従来は干渉しなかった領域でも地殻変動シグナルの復元が可能になり、航空機SAR観測の有用性を大きく改善させることができた。また、3方向からの航空機SARデータから3次元地殻変動分布を求める手法を開発した（〔課題番号：1008〕）。

防災科学技術研究所は、小型単発機に搭載可能なセンサーであるARTS-SEのカメラ型センサーデータの処理手法を開発してきた。今年度はカメラ型センサーの連続するデータを用いて、箱根大涌谷15-1火口を約 $z0 \sim \pm 9.5^\circ$ の角度で観測することで地熱域特有の観測値のゆらぎが捉えられ、これらをスキャナデータの情報に重畳すれば、よりの確に地熱地帯の情報把握ができることを明らかにした（〔課題番号：3003〕）。

人工衛星を利用した研究では、東京大学地震研究所が2017年12月23日に打ち上げられ2018年12月より正式運用が始まったJAXAの気候変動観測衛星「しきさい」のSGLI（Second Generation Global Imager）画像を用いたリアルタイム観測システムを開発するとともに、その温度画像と可視画像を用いて、ハワイ・キラウエア火山2018年噴火の溶岩流等の噴出物の観測と噴火推移の判読を実施した（〔課題番号：1520〕）。また、小型絶対重力計（TAG-1）の開発においては、絶対重力値の系統誤差の低減が図られた。そして、実際に蔵王火山において観測が実施され、前年より $15 \mu \text{Gal}$ の重力減少が観測された（東京大学地震研究所〔課題番号：1506〕）。

また、火山噴火事象の分岐条件や論理の構築のために分岐前に現れる物理量の変化を検出するための機器開発のみならず、宇宙線（ミュオン）を利用した火山浅部透視技術においては、ミュオグラフィ自動解析システムが完成し、20倍以上に向上された画素データを用いても、画像出力までの時間短縮が達成された（東京大学地震研究所〔課題番号：1523〕）。

一方、噴火活動時に噴出物に含まれる結晶量を短時間で簡便に評価し、その時間変化をモニタリングする手法を開発するため、マイクロライト・ナノライトを含む試料の初期帯磁率分析が行なわれた。霧島火山新燃岳の2017年10月と2018年3月に噴出した火山灰の初期帯磁率測定を行い、マグマ水蒸気爆発からマグマ噴火に至る噴火推移を反映した帯磁率

の変化を捉えることに成功した。このことは、火山灰の初期帯磁率が迅速に測定可能な火山活動度指標となることを示す結果である（東北大学 [課題番号：1205]）。

これまでの課題と今後の展望

「火山」計画推進部会では、火山噴火の事象分岐の条件・論理を明らかにし、事象系統樹の高度化することで、発災の原因である火山噴火を予測するため、つの課題を実施してきた（噴火履歴及び観測事例に基づく噴火事象系統樹の試作（北海道大学 [課題番号：1004]）および観測事例及び理論予測に基づく噴火事象系統樹の分岐条件の検討（東北大学 [課題番号：1208]））。前者の課題は、前計画から継続して推進している噴火履歴をもとにした噴火事象系統樹（噴火シナリオ）作成を基礎にして、本計画では、観測事例を系統樹作成に組み込むことで高度化が図られた。また、一般的な作成手順を示すことで、他の火山に適用可能な手法となっている。今後も多く火山を対象に系統樹作成を進め、火山防災対策整備に貢献していくべきである。ただし、近代的な観測が始まって以降噴火を経験していない火山（たとえば富士山）の作成手法を確立することも今後重要となる。後者の課題は、噴火事象系統樹をより高度なものに発展させることを目指し、現在の火山学的知見および本研究計画により明らかとなる法則をまとめ、噴火事象の分岐判断の基準を作成することを5カ年の到達目標としていた。この課題では、国内のGNSSデータに基づく噴火判定の方法、大地震発生後の噴火発生確率、桜島の噴火様式判断に対して定量的指標が示され、一定の成果が得られた。しかし、これ以外の分岐判断基準作成を今後も引き続きすすめることが重要なのはいうまでもない。また、今後、噴火事象系統樹をさらに発展させるためには、事象の分岐条件をデータや理論に基づき明らかにしていくことが必要となる。そのためにはマグマや火山性流体の挙動に関するモデル化を進めることが重要である。この5カ年で、桜島や阿蘇で明らかになった、マグマ貫入率と噴火（火山活動）様式との関係性は今のところは経験則の域をでていない。今後は上記2火山における関係性についてのモデル化を推し進めていく必要がある。他の火山においても、まずは数ヶ月から数年の時間スケールにおけるマグマ蓄積量を明らかにするための観測研究を推進せねばならない。

成果リスト

- 秋元良太郎・山崎明・山崎貴之・浅利晴紀・高橋幸祐, 活火山での全磁力観測におけるDI補正法の適用, 2019年CA研究会論文集 (印刷中)
- 新谷昌人, 2018, ファイバーネットワークを用いた地震・津波・地殻変動の計測技術に関する研究, 東北大学電気通信研究所研究活動報告, 24, 129-131.
- Araya, N., M. Nakamura, A. Yasuda, S. Okumura, T. Sato, M. Iguchi, D. Miki, N. Geshi, 2019, Shallow magma pre-charge during repeated Plinian eruptions at Sakurajima volcano, Scientific Reports, doi: 10.1038/s41598-019-38494-x
- Cigolini, C., Coppola, D., Yokoo, A., and Laiolo, M., The thermal signature of Aso Volcano during unrest episodes detected from space and ground-based measurements, Earth, Planets and Space, 70, 67, doi:10.1186/s40623-018-0831-7, 2018
- 長谷川健・松本 亜希子・東宮 昭彦・中川 光弘, 2018, 大規模カルデラ形成噴火と活動的後カルデラ火山. 地学雑誌, 127, 289-301.
- 長谷川健・望月伸竜・大岩根尚, 2018, 堆積物から超大規模噴火の継続時間を読み取る方法, 地学雑誌, 127, 273-288.
- 橋本武志・寺田暁彦・森 俊哉, 2018, ドローンによる火山観測, 地理, 63, 29-35.
- 橋本武志・青山 裕・小山 寛・森井敦司・三嶋 涉・荻野 激・高橋 良・岡崎紀俊, 2018, 非噴火時における多項目観測の重要性 (樽前山の事例), 月刊地球, 40, 163-169.
- Hashimoto T., A. Terada and R. Tanaka, 2018, Volcanic smoke reduction in visible and thermal infrared imagery, Earth Planets Space, 70:109, doi:10.1186/s40623-018-0886-5.
- Hata, M., M. Uyeshima, Y. Tanaka, T. Hashimoto, N. Oshiman and R. Yoshimura, 2018, Three - dimensional electrical resistivity distribution beneath the Beppu - Shimabara graben with a focus on Aso caldera, southwest Japan subduction zone, J. Geophys. Res. Solid Earth, 123, 6397-6410, doi:10.1029/2018JB015506.
- Hata, M., N. Matsushima, S. Takakura, M. Utsugi, T. Hashimoto and M. Uyeshima, 2018, Three - Dimensional Electrical Resistivity Modeling to Elucidate the Crustal Magma Supply System Beneath Aso Caldera, Japan, J. Geophys. Res. Solid Earth, 123, 6334-6346, doi:10.1029/2018JB015951.
- 廣瀬 亘・川上源太郎・長谷川健・林 圭一・渡辺真人, 2018, 網走地域の地質 (5万分の一地質図幅および説明書), 産業技術総合研究所地質調査総合センター, pp. 66.
- 堀田耕平・井口正人, 2018, 2017年の南岳爆発に前後する傾斜ひずみ変化, 京都大学防災研究所年報, 61B, 324-329.
- Huang, Y.C., Ohkura, T., Kagiya, T., Yoshikawa, S., and Inoue, H., 2018, Shallow volcanic reservoirs and pathways beneath Aso caldera revealed using ambient seismic noise tomography. Earth, Planets and Space, 70, 169, 10.1186/s40623-018-0941-2.
- Ichimura, M., Yokoo, A., Kagiya, T., Yoshikawa, S., and Inoue, H., Temporal variation in source location of continuous tremor before the ash-gas emissions

- in January 2014 at Aso volcano, Japan, *Earth, Planets, and Space*, 70, 125, doi:10.1186/s40623-018-0895-4, 2018.
- 井口正人・中道治久・為栗 健・堀田耕平・園田忠臣, 2018, 2017年8月桜島溶岩噴泉活動に伴う地震活動及び地盤変動, 京都大学防災研究所年報, 61B, 318-323.
- 井口正人・為栗健・平林順一・中道治久, 2019, マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理, 火山 (受理済) .
- 飯野英樹・山崎明・田中達朗, 2019, 本白根山における2018年噴火後の自然電位および地磁気全磁力観測, 2019年CA研究会論文集 (印刷中)
- 井村 匠・大場 司・中川光弘, 2019, 噴出物中の熱水変質鉱物の特徴: 十勝岳火山噴出物の例, 地質学雑誌, 印刷中.
- 石毛康介・中川光弘・石塚吉浩, 2018, 北海道中央部, 旭岳の形成史: 特に完新世, 後期水蒸気噴火履歴および噴火様式について. 地質学雑誌, 124, 297-310, doi:10.5575/geosoc.2018.0001.
- Ishii, K., Yokoo, A., Kagiya, T., Ohkura, T., Yoshikawa, S., and Inoue, H., Gas flow dynamics in the conduit of Strombolian explosion inferred from seismo-acoustic observation at Aso volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, 10.1186/s40623-019-0992-z, 2019
- 海上保安庁, 2018, 海域火山の最近の活動, 火山噴火予知連絡会会報, 129
- 海上保安庁, 2018, 海域火山の最近の活動, 火山噴火予知連絡会会報, 130
- 神田 径・関 香織・木下貴裕, 2019, コンダクタンスを用いた熱水系構造の比較, Conductivity Anomaly研究会2019年論文集 (印刷中) .
- Kaneko, T., K. Takasaki, F. Maeno, M.J. Wooster, and A. Yasuda, 2018, Himawari-8 infrared observations of the June-August 2015 Mt Raung eruption, Indonesia, *Earth Planets Space*, 70, 89, 1-9.
- Kaneko, T., A. Yasuda, Y. Yoshizaki, K. Takasaki, and Y. Honda, 2018, Pseudo thermal anomalies in the shortwave infrared bands of the Himawari-8 AHI and their correction for volcano thermal observation, *Earth Planets Space*, 70, 175, 1-9.
- Kazahaya R, Shinohara H, Ohminato T, Kaneko T, 2019, Airborne measurements of volcanic gas composition during unrest at Kuchinoerabujima volcano, Japan. *Bull. Volcanol.*, 81:7 <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1262-9>
- 風間卓仁・山本圭吾・平良真純・大島弘光・前川徳光・岡田和見・園田忠臣・井口正人, 2018, 桜島火山における繰り返し相対重力測定 (2017年5月~2018年2月), 京都大学防災研究所年報, 61B, 330-336.
- 火山噴火予知連絡会衛星解析グループ「火山活動の評価及び噴火活動の把握に関する共同研究」平成30年度成果報告書
- 小林知勝, 矢来博司, SARデータによる地殻変動解析および地殻変動データに基づく力学的モデリングに関する研究 (第9年次), 国土地理院調査研究年報 (H30年度)
- 小山崇夫・神田径・宇津木充・金子隆之・大湊隆雄・渡邊篤志・辻浩・西本太郎・本多嘉明, 2019, 無人ヘリによる草津白根山空中磁気測量, Conductivity Anomaly研究会論文集2019, 8 (印刷中)

- Kuritani, T., A. Yamaguchi, S. Fukumitsu, M. Nakagawa, A. Matsumoto, T. Yokoyama, 2018, Magma plumbing system at Izu-Oshima Volcano, Japan: constraints from petrological and geochemical analyses. *Frontiers in Earth Science* 6:178, doi:10.3389/feart.2018.00178.
- 楠本成寿, 2019, モデル形状の仮定を伴わない鉛直変位の力源推定手法, *物理探査*, 72, 1-7.
- Maeno, F., S. Nakada, M. Yoshimoto, T. Shimano, N. Hokanishi, A. Zaennudin, and M. Iguchi, 2019, Eruption pattern and a long-term magma discharge rate over the past 100 years at Kelud volcano, Indonesia. *J. Disaster Res.*, 14, 1, 27-39.
- Maeno, F., S. Nakada, M. Yoshimoto, T. Shimano, N. Hokanishi, A. Zaennudin, and M. Iguchi, A sequence of a plinian eruption preceded by dome destruction at Kelud volcano, Indonesia, on February 13, 2014, revealed from tephra fallout and pyroclastic density current deposits. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, in press.
- Matsumoto, A., T. Hasegawa, M. Nakagawa, 2018, Petrology of the 120 ka Caldera-Forming Eruption of Kutcharo Volcano, Eastern Hokkaido, Japan: Coexistence of Multiple Silicic Magmas and their Relationship with Mafic Magmas, *J. Petrol.*, 59, 771-793.
- Matsumoto, A., M. Nakagawa, Reconstruction of the eruptive history of Usu volcano, Hokkaido, Japan, inferred from petrological correlation between tephras and dome lavas. *Island Arc*, in press.
- Minami, T., Utsugi, M., Utada, H., Kagiya, T., and Inoue, H., Temporal variation in the resistivity structure of the first Nakadake crater, Aso volcano, Japan, during the magmatic eruptions from November 2014 to May 2015, as inferred by the ACTIVE electromagnetic monitoring system, *Earth, Planets and Space*, 10.1186/s40623-018-0909-2, 2018
- 三浦 哲, 山本 希, 市來雅啓, 出町知嗣, 立花憲司, 西村太志, 2018, サブミリ測地解析による火山活動モニタリング, *東濃地震科学研究所報告*, 40, 81-86.
- 宮坂瑞穂・中川光弘, 2018, 支笏火山60 ka社台噴火の噴火推移. *地学雑誌*, 127, 229-246.
- 森 俊哉, 2018, 紫外線CCDカメラを用いた火山ガス噴煙中の二酸化硫黄の可視化, *可視化情報*, 38, 2-6.
- Morita, M., Mori, T., Yokoo, A., Ohkura, T., and Morita, Y., Continuous monitoring of soil CO₂ flux at Aso volcano, Japan: The influence of environmental parameters on diffuse degassing, *Earth, Planets and Space*, 71, 13, doi:10.1186/s40623-018-0980-8, 2019.
- Nakada, S., F. Maeno, M. Yoshimoto, N. Hokanishi, T. Shimano, A. Zaennudin, and M. Iguchi, 2019, Eruption scenarios of active volcanoes in Indonesia. *J. Disaster Res.*, 14, 1, 40-50.
- Nakada, S., A. Zaennudin, M. Yoshimoto, F. Maeno, Y. Suzuki, N. Hokanishi, H. Sasaki, M. Iguchi, T. Ohkura, H. Gunawan, and H. Triastuty, Growth process of the lava dome/flow complex at Sinabung Volcano during 2013-2016. *J. Volcanol. Geotherm.*

- Res., in press.
- Nakada, S., Maeno, F., Yoshimoto, M., Hokanishi, N., Shimano, T., Zaennudin, A., and Iguchi, M., Eruption scenarios of active volcanoes in Indonesia. *J. Disaster Res.*, Vol. 14, pp. 40-50 doi: 10.20965/jdr.2019.p0040, 2019.
- 中川 光弘・宮坂 瑞穂・三浦 大助・上澤 真平, 2018, 南西北海道, 石狩低地帯におけるテフラ層序学: 支笏-洞爺火山地域の噴火履歴. *地質学雑誌*, 124, 473-489.
- 中川光弘・宮坂瑞穂・富島千晴・松本亜希子・長谷龍一, 2018, 支笏湖南方地域の火口近傍堆積物層序からみた46 ka支笏カルデラ形成噴火推移. *地学雑誌*, 127, 247-271.
- Nanayama, F. and F. Maeno, 2018, Evidence on the Koseda coast of Yakushima Island of a tsunami during the 7.3 ka Kikai caldera eruption. *Island Arc*, doi:10.1111/iar.12291.
- Narita, S. and M. Murakami, 2018, Shallow hydrothermal reservoir inferred from post-eruptive deflation at Ontake Volcano as revealed by PALSAR-2 InSAR, *Earth, Planets and Space*, 2018, 70:191, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0966-6>
- 日本大学, 名古屋大学, 京都大学, 九州大学, 東濃地震科学研究所, 気象庁, (2018), 精密水準測量による御嶽山における上下変動(2014年10月~2018年4月), 火山噴火予知連絡会会報, 130
- Nishi, Y., Ban, M., Takebe, M., Alvarez-Valero, A. M., Oikawa, T., Yamasaki, S. (2019) Structure of the shallow magma chamber of the active volcano Mt. Zao, NE Japan: Implications for its eruptive time scales. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 371, 137-161.
- Nishimura, T. (2018) Interaction between moderate earthquakes and volcanic eruptions: analyses of global data catalog. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 8199-8204, doi:10.1029/2018GL079060.
- 大湊隆雄, 2018, 最近の火山観測技術と噴火の予測, *建築防災*, 2018.12, 19-29.
- 及川輝樹・大場 司・藤縄明彦・佐々木寿, 2018, 水蒸気噴火の地質学的研究, *地質学雑誌*, 124, 231-250.
- Olah, L., H. K. M. Tanaka, G. Hamar and D. Varga, 2018, Investigation of the limits of high-definition muography for observation of Mt Sakurajima, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 377, 2137, <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0135>.
- 小沢慎三郎, 地殻変動データに基づく力源モデルによる火山活動の監視手法の開発に関する研究(第9年次), 国土地理院調査研究年報(H30年度)
- Seki, K., T. Ohba, S. Aoyama, Y. Ueno, H. Sumino, W. Kanda, M. Yaguchi and T. Tanbo, 2019, Variations in thermal state revealed by the geochemistry of fumarolic gases and hot-spring waters of the Tateyama volcanic hydrothermal system, Japan, *Bull. Volcanol.*, 81:8, doi:10.1007/s00445-018-1264-7.
- 篠原宏志(2019) 火山ガス観測から推定される火山活動推移過程. *火山*, (印刷中)
- Shinohara, H., Yokoo, A., and Kazahaya, R., Variation of volcanic gas composition during the eruptive period in 2014-2015 at Nakadake crater, Aso volcano, Japan,

- Earth, Planets and Space, 70, 151, doi:10.1186/s40623-018-0919-0, 2018.
- Suzuki, Y., F. Maeno, M. Nagai, H. Shibutani, S. Shimizu, and S. Nakada, 2018, Conduit processes during the climactic phase of the Shinmoe-dake 2011 eruption (Japan): Insights into intermittent explosive activity and transition in eruption style of andesitic magma. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 358, 87-104, doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.02.008.
- 武尾 実・大湊隆雄・前野 深・篠原雅尚・馬場聖至・渡邊篤志・市原美恵・西田 究・金子隆之・安田 敦・杉岡裕子・浜野洋三・多田訓子・中野 俊・吉本充宏・高木朗充・長岡 優, 2018, 西之島の地球物理観測と上陸調査, *海洋理工学会誌*, 24, 45-56.
- 為栗 健・井口正人, 2018, 桜島火山昭和火口で発生する火砕流の特徴, *京都大学防災研究所年報*, 61B, 312-317.
- Tameguri, T., M. Iguchi, 2019, Characteristics of micro-earthquake swarms preceding eruptions at Showa crater of Sakurajima volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 372, 24-33.
- 高橋正樹・安井真也・金丸龍夫・山下大輔, 2019, 浅間前掛火山テフラ・トレンチ調査により得られた降下軽石の全岩主化学組成—浅間前掛火山における最近1万年間のマグマ主化学組成の時間変化, *日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要*, 印刷中.
- Tanaka, R., T. Hashimoto, N. Matsushima and T. Ishido, 2018, Contention between supply of hydrothermal fluid and conduit obstruction: inferences from numerical simulations, *Earth Planets Space*, 70:72, doi:10.1186/s40623-018-0840-6.
- Terada, A., Y. Morita, T. Hashimoto, T. Mori, T. Ohba, M. Yaguchi and W. Kanda, 2018, Water sampling using a drone at Yugama crater lake, Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *Earth Planets Space*, 70:64, doi:10.1186/s40623-018-0835-3.
- Tsukamoto, K., K. Aizawa, K. Chiba, W. Kanda, M. Uyeshima, T. Koyama, M. Utsugi, K. Seki and T. Kishita, 2018, Three-dimensional resistivity structure of Iwo-yama Volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan: Relationship to shallow seismicity, surface uplift, and a small phreatic eruption, *Geophy. Res. Lett.*, 45, 12821-12828, doi:10.1029/2018GL080202.
- 安井真也・高橋正樹・金丸龍夫, 2019, 浅間火山火車岩屑なだれ堆積物の再発見—浅間家畜育成牧場および周辺地域の火山地質—, *日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要*, 印刷中.
- Yokoo, A., Ishii, K., Ohkura, T., Kim, K., Monochromatic infrasound waves observed during the 2014-2015 eruption of Aso volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, 71, 12, doi:10.1186/s40623-019-0993-y, 2019.
- Yoshimura, R., Y. Ogawa, Y. Yukutake, W. Kanda, S. Komori, H. Hase, T. Goto, R. Honda, M. Harada, T. Yamazaki, M. Kakmo, S. Kawasaki, T. Higa, T. Suzuki, Y. Yasuda, M. Tani and Y. Usui, 2018, Resistivity characterisation of Hakone volcano, Central Japan, by three-dimensional magnetotelluric inversion, *Earth Planets Space*, 70:66, doi:10.1186/s40623-018-0848-y.
- 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.

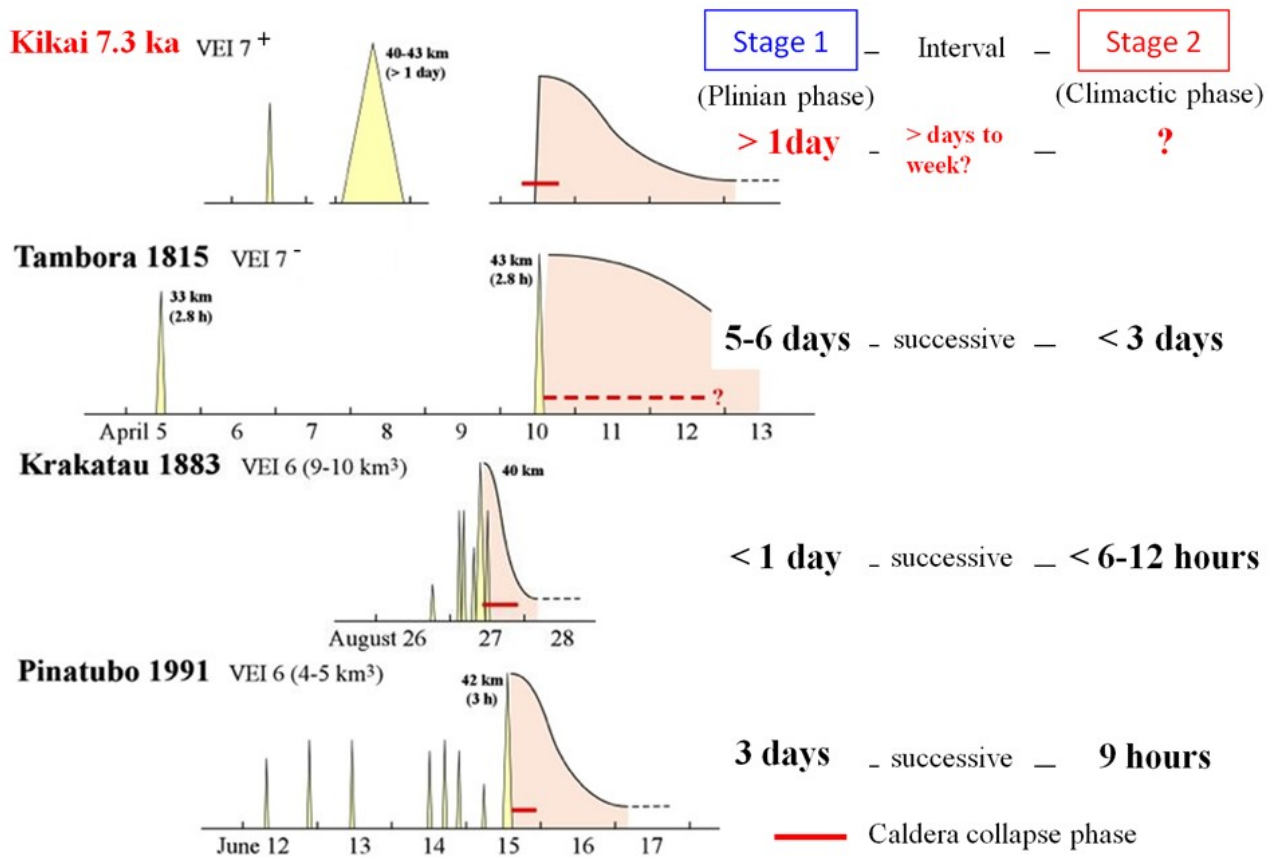


図1. カルデラ形成噴火の推移比較（北海道大学〔課題番号：1001〕）

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

3次元変位 (2016-2017年)

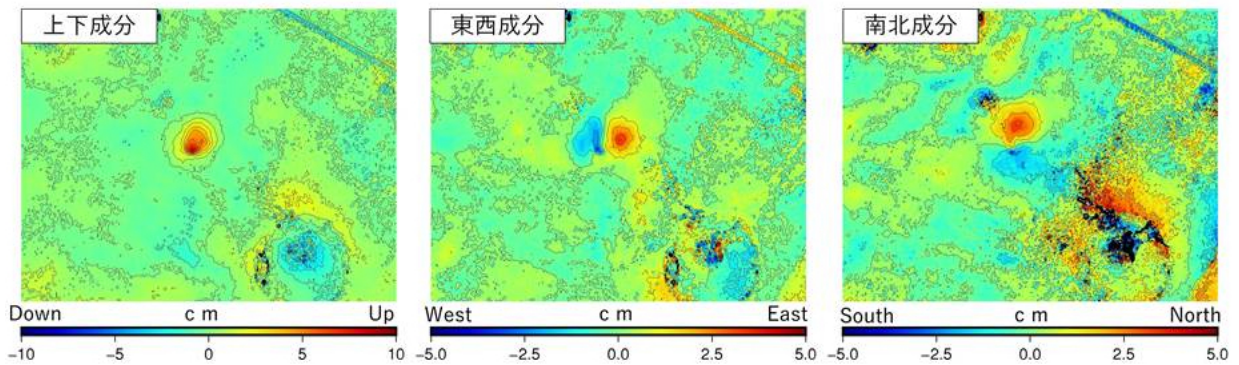


図2. 航空機 SAR データ (2016-2017) に同時期の ALOS2/Palsar2 データを加えて実施した三次元解析結果

画像のほぼ中央部に硫黄山が位置している。上下成分は硫黄山を中心とした隆起が確認できる。また、東西、南北成分では、硫黄山を中心として、それぞれ東西方向および南北方向に拡大するセンスの変動分布が捉えられている。

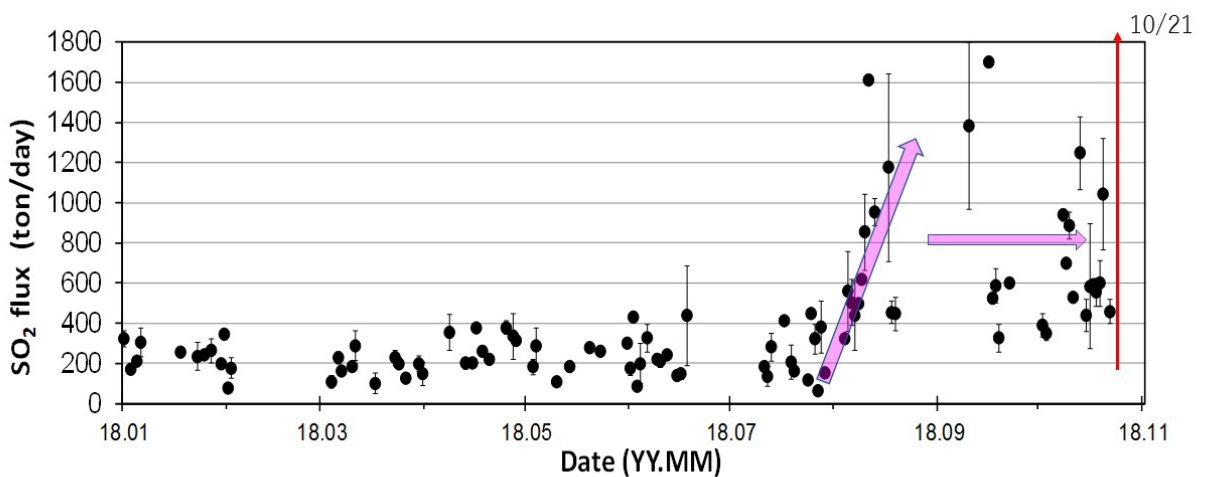


図3. 口永良部島にて簡易型トラバース測定装置で測定した2018年1月～10月の二酸化硫黄放出率の推移。

口永良部島では2018年10月21日に、3年数か月ぶりに小規模な噴火が発生した。二酸化硫黄放出率は、今年度初めごろは100-400 ton/dayで推移していたが、2018年8月以降上昇を始め時折1000 ton/dayを超える値が見られるようになった。噴火の2か月以上前のマグマの上昇または火道の変化をとらえたものと推察される。

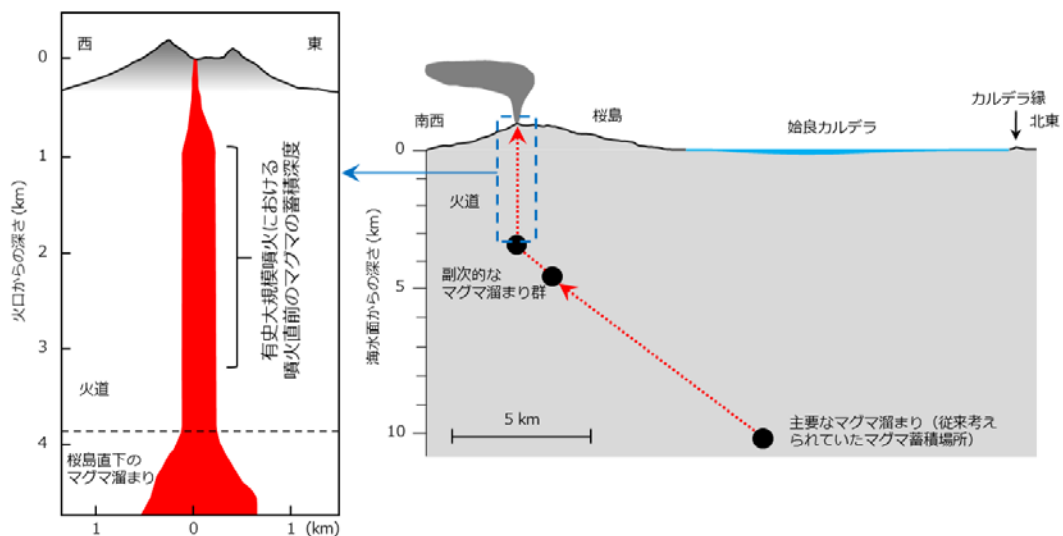


図4. 桜島山頂の火口から桜島直下のマグマ溜まりにかけての拡大図（左）と桜島火山のマグマ供給系（右）（東北大学 [課題番号：1205]）

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

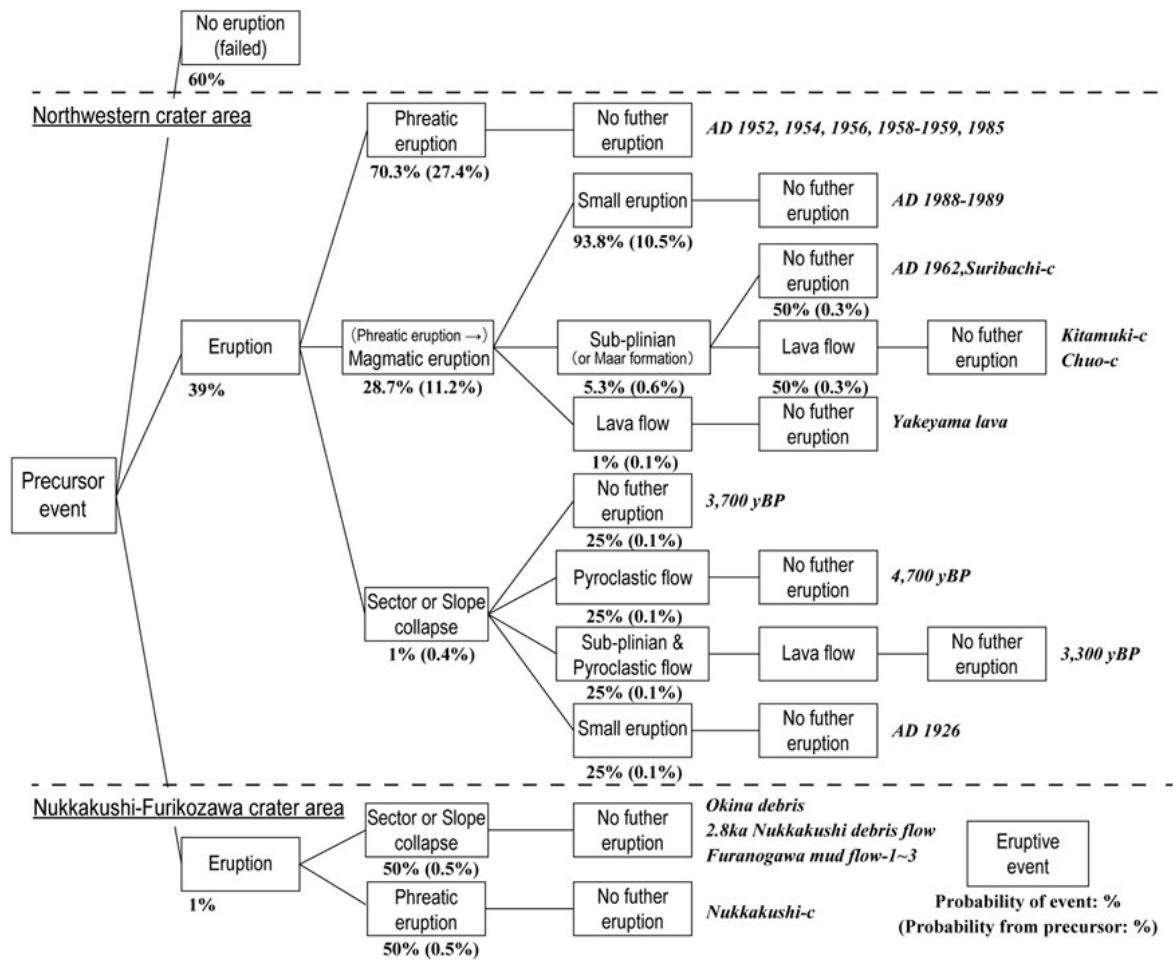


図5. 十勝岳過去5,000年間の噴火事象系統樹の試作（北海道大学〔課題番号：1004〕）

1 (4) 地震先行現象・地震活動評価

「地震先行現象・地震活動評価」計画推進部会長 中谷正生
(東京大学地震研究所)

現行計画には地震発生を予測するためのいくつかのアプローチが含まれている。地震先行現象・地震活動評価部会では、種々のモニタリングデータから断層面の滑り・応力等を推定し滑りの物理的予測モデルと対比するための研究、地震発生との因果関係に合意のとれた物理モデルがなくても、経験則として地震発生の予測に役立つ情報があるのかを統計的に吟味する研究、あるいは先行現象と目される事象の地震発生に対する物理的意義を解明するための研究を行っている。

1. (1) 5年間の成果の概要

観測データから大地震が発生しそうな気配を察知して、大地震発生の確率密度を時空間にわたってマッピングすることが地震予測の目標である。

かつては、固着断層への応力蓄積モデルとGriffithのエネルギーバランスに基づいて、物質、特に不均質な物質は、弾性波速度で伝播する動的な破壊の直前には、多数の微小な破壊、あるいは、限定された領域でのゆっくり滑りが準静的～準動的に進行する「壊れかけ」の状態を経るはずであるから、現行犯逮捕的な直前予知くらいは原理的に可能だろうと考えられていた。しかし、地震サイズと面積あたりの破壊エネルギーが比例することが広く観察された現在では、狭い領域で開始した地震破壊がどこまで拡がれるかについて、このような「壊れかけ」の前兆はほぼ情報をもたないはずだから、少なくとも「現行犯逮捕の直前予知」は、原理的に困難だろうとの見方が優勢である。

にもかかわらず、「これこれのこと」があれば、当分の間は大地震の発生確率が普段より高いと経験的に言える(つまり予測能力をもつ)ような「これこれのこと」—地震先行現象と呼ぶことにする—が、数分から十年程度まで、様々な先行時間で発見されている。前兆と呼ばないのは、このような意味での先行現象は、必ずしも、大地震の発生が近付いている、あるいは大地震が発生しやすい物理的状態から派生したサイン—先行期間に関わらず「前兆」という言葉にはこのタイプの因果関係が無意識に想定されている—であるとは限らず、先行現象自体が大地震がそのタイミングで起きた原因となったようなものもありうる(中谷, 2019, 東北大学 [課題番号: 1206], 東海大学 [課題番号: 2501])からである。実際、前震活動という現象はかなりの程度まで、本震をトリガした地震活動が結果として前震活動として認識されているのだという解釈で説明できるし(e.g., Helmstetter et al., 2003), また、本震に先行したスロースリップも兆しではなく原因としての解釈が可能である(e.g., Roeleoffs, 2006)。

以上の認識のもと、データを評価し、そこから読みとれる危険度を定量的に示すためには以下の3つを進展させる必要がある。(1)地殻活動に関連している可能性のある異常を客観的に定義し、その大地震発生との相関を統計によって評価できるだけの量のデータを集めるために、観測と解析の技術を向上すること。(2)客観的に定義できる異常が地震に

先行する傾向を，統計によって評価すること。(3)先行現象が地震の発生とどう物理的に関係しているのかを解明すること。以下，これらについてこの5年間で得られた主要な成果をレビューする。様々な事例に渡って，3つの側面がかみ合いながら目標に向かって進展したことがわかるであろう。

1. (2) 5年間になされた主要な成果その1：観測と解析の技術

地震活動

地震活動の観測・解析における一つの重要な要素は，検出もれを減らすことである。これは，ゆっくり滑りの鋭敏なセンサーである微小なリピーターの検出，統計地震モデルによる活動予測のための良質のカタログの確保などを通じて予測能力の向上に不可欠である。馬場・他(2015)は，駿河湾でOBS観測を行い，一元化地震カタログに比べて10倍程度の検知率が得られることを示した(東海大学[課題番号:2501])。Iwata(2014)は，地震検知能力の長期的変化と季節変化とを分離して推定することで，カタログの地震捕捉率を時系列で詳細に評価する新手法を開発した(東北大学[課題番号:1206])。

リピーターの検出に関しては，テンプレート波形との相関によって高ノイズな連続波形の中からも多数の小さなイベントを抽出できるマッチト・フィルター(MF)法が多くの事例に適用され，後述するように，ゆっくり滑りが大地震の発生を促進したと思われる多くの事例が見つかった。MF法に関する大きな技術的進歩として，AICを用いることによって，マッチするイベント検出のための相関係数の閾値を，恣意性を排除して決定する方法が提案された(Hirano et al., 2018a, b, 立命館大学[課題番号:2402])。

リピーター活動から断層のクリープ速度を推定することは，ある程度のクリープ速度があるプレート境界でしか行われていない。南アフリカCooke4鉱山内の地質断層上で，M-4級のきわめて小さリピーターが多数発見され，その単位クリープ量当たりの発生レートは，プレート境界でおこるリピーターに対する経験則(Nadeau and Johnson, 1998)とは全く異り，非常に小さなリピーターでは，Nadeau and Johnsonから期待されるより何桁も高いことがわかった(東北大学[課題番号:1206], Naoi et al., 2015a)。これは，非常に小さい地震までモニタすることで内陸断層の低速度クリープがモニターできる可能性を示唆する。

統計モデルによる予測のためのカタログでは，個々のイベントを検出せずとも，統計的性質を正しく保てるようにとりもらしを補完すれば用が足りる場合がある。Zhuang et al. (2017, 2019)は，GR則を仮定せずに，発生する地震のマグニチュードと発生時刻は独立であるということだけを仮定して欠測を埋めることのできる，バイスケール変換を用いた新手法を開発し，2016年4月の熊本地震の余震系列に適用した。この手法により補充された余震データセットでは，ETASパラメータの最尤推定値が十分に安定しており，また，4月14日Mj6.5前震の余震活動に，中期的先行現象としての統計的有意性が確立されている(Ogata, 2001)相対的静穏化が検出された(東北大学[課題番号:1206])。この静穏化は，前震のあった日奈久断層の北側の布田川断層付近で見られた，本震1日前からのp値やb値の顕著な増加(東海大学[課題番号:2501], Nanjo and Yoshida, 2017)とも対応しており，同時期にあったゆっくり滑り(Kato et al., 2016b, 東北大学[課題番号:1206])による応力変化と関係していた可能性がある。

大きな地震が発生した場合に余震を予測するにはリアルタイム処理で得られる品質のカタログで予測を出す必要がある。Omi et al. (2016)は、最近の国内のいくつかの内陸地震について、リアルタイム処理のHi-Net自動震源カタログによって余震の確率予測を行い、後にJMAが手動検出した、より信頼度の高いカタログを用いた場合と同程度の予測成績が得られることを示した。前者のカタログで、予測式のパラメタを対象の活動にチューニングした場合の成績は、後者のカタログに予め固定されたパラメタ値を適用して予測するよりも良かった。Omi et al. (2019)は、大地震の3時間後から1時間更新で予測を出すリアルタイム予測システムを実装した(東北大学[課題番号:1206])。

地震活動の変調を検出するには、地震活動最大の癖である余震活動の影響を適切に取り除くことが必須であり、大森-宇津の余震法則を一般化したETASモデル(Ogata, 1989)が標準的な手法となっている。Tsuruoka and Ogata (2015)は、GUIにより直感的に操作しながらETAS解析ができるソフトウェアXETASを開発した(東北大学[課題番号:1206])。

ETASは、異常抽出および評価のための基準活動モデルとしての重要であるだけではない。前震という現象のかなりの部分がETAS的トリガリングによると考えられる(Helmstetter et al., 2003)以上、ETASの高度化は予測能力の直接的な向上にもつながる。CSEP-JapanでのAllJapanテスト領域での25ラウンドを超える検証では、ETASモデル(HISTETASPA1205)がベストの成績を収めている(Hirata and Tsuruoka, 2017)。しかし、東北地方太平洋沖地震後は、ETASを含めてどのモデルでも総地震数の予測成績が相当に低下した(Hirata et al., 2015)。実のところ、対象地域全体の実際の地震数の推移は、東北地方太平洋沖地震を起点とした大森-宇津則で良好にフィットできるものであり、時空間の関数としての地震確率を与える統計モデルにはまだ大幅な改善の余地がある(東京大学地震研究所[課題番号:1511])。

まず、空間的に不均質であるETASモデルのパラメタを妥当に推定する方法として、重み付き尤度関数を採用した残差解析による推定法を開発し、日本列島の地震活動の地域性を特徴づけた(東北大学[課題番号:1206], Zhuang, 2015)。さらに、Guo et al. (2018)は、ETASモデルを3次元に拡張し、関東地域のデータにおいて予測性能が向上することを示した(東京大学地震研究所[課題番号:1511])。また、一般的なETASモデルでは大きな地震であっても点としてのトリガ源として扱うため、影響カーネルは空間的に等方であるが、実際の余震活動の分布は本震断層面の存在に強く影響された異方性をもつ。この問題を解決するため有限断層ETASモデルを開発した(Guo et al., 2015)。いくつかの大地震の余震分布に適用したところ、本震に直接起因する余震活動はアスペリティの近傍に位置する 경우가多く、一次余震は本震によるすべりを補完する部分に発生することが示された(Guo et al., 2017; Zhuang et al., 2018)。ETASモデルそのものの向上として地震予測に寄与するとともに、本震時のすべりインバージョンの高度化や本震後の短期の余震確率予測にも役立つだろう(東北大学[課題番号:1206])。また、ETASをはじめ、ほとんどの地震活動の統計モデルは、地震の時間的クラスタリングを点過程としてモデリングするものであるが、新しいアプローチとして、地震活動をARでモデリングする理論的枠組みが提案され、2010年ダーフィールド地震系列の事後予測で機能することが確認された(Wang et al., 2018a, 東北大学[課題番号:1206])。

ふだんの地震活動のリファレンスとなるモデルを作るために、Nishikawa and Ide (2015)は、ETASを用いたモデリングにより、全世界の沈み込み帯での定常的な地震活動度をマッ

ピングした。活動度は、基本的には沈み込み速度に比例するが、プレートが大きく屈曲していると大きくなる傾向も見つかり、沈み込み前後のプレート内部への水の輸送過程との関係を指摘した。Nishikawa and Ide (2017)は、この手法で時間変化を扱えるよう発展させ、世界の沈み込み帯の群発的な地震活動を、それまでに知られていものの7倍近い435件検出した。プレートの屈曲との関連も見い出され、群発活動の多くは地殻流体が豊富なところで起きやすいSSEによるものではないかと提案した(東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])。

ETASは、まず地震活動のパターンに関して大森-宇津則という明示的に式化できる規則性に人間が気づき、それをパラメタ化したものである。深部低周波微動の活動にもマイグレーションなど、明らかなパターンはあるが、バリエーションに富んでいて明示的なモデルを作るのは難しい。Wang et al. (2018b)は、2次元隠れマルコフモデルを用いて南海トラフの深部低周波微動をモデリングすることで、ほぼ何も仮定せずに、活動の階層的な空間セグメンテーション、マイグレーションパターンをなどの特徴を自動的に抽出することに成功した。2日間程度であれば、微動活動はうまく予測できる(東北大学[課題番号:1206])。

後述するように、地震活動の変化を応力の変化と関係づけるには、小さい地震までメカニズム解がわかっていることが重要である。Ishibe et al. (2014)は、Hi-NetやF-netによってメカニズム解整備が開始される以前の1985-1998年の地震について、JUNECによって取得された波形に基づきM2までを網羅するメカニズム解カタログを作成した(東北大学[課題番号:1206])。また、ベイズ推定の枠組みで、メカニズム解を経ずに、P波初動の押し引きから直接応力インバージョンを行う方法を開発し、2000年鳥取県西部地震などで地震前後の応力場の変化を捉えた(Iwata, 2018)。さらに、合成データによるテストで、こうして推定した応力場の情報を取り入れることによって、個々のイベントのメカニズム解の推定も向上できることも示した(東北大学[課題番号:1206])。

測地

地殻へのひずみの蓄積、部分的な断層のゆっくり滑りなどは、地震発生に対する効果が最も物理的に推察しやすいものであり、その直接的な観測である測地は、物理モデルによる地震予測の根幹である。

新しい面的な観測手段である干渉SARによって、御前崎・潮岬・室戸岬・足摺岬周辺の定常的な地殻変動の検出を行い、良好な結果を得た。視線距離だけでなく、水平変位と上下変位を分解することもできている(気象庁 [課題番号: 7006])。また、東北地方太平洋沖地震の余効変動は長期・広域に及んでいるため、その他の原因による地殻変動の検出を難しくしている。そこで、GNSS日値を再調査し、新たなパラメタで余効変動を除去したデータを作成し、南海トラフ沿いのGNSS日値を用いた面的監視処理について、監視範囲も変更して、東海地方の長期的SSEを検出しやすくした。さらに、地殻変動監視の速報性を向上するために、国土地理院のGNSS日座標値R3解(速報解)について、基線解析やGNSS面的監視(1ヶ月/3ヶ月)についてはF3解と同程度の精度で監視ができることを確認し、F3解と同様に気象庁本庁においてR3解をWeb上で閲覧できる仕組みを構築した(気象庁 [課題番号: 7006])。

現代的な観測のなかった時代の地殻変動を評価することも行われた。梅田・板場 (2018)は、紀伊半島の5地点において、国土地理院の測量と水路局の潮位データを組み合わせて

1944年東南海地震・1946年南海地震による変動を分離した上下変動時系列を求めた(産総研 [課題番号:5007])。また、弘瀬・中西(2015)は、高知県の古文書「蕨岡家文書」の再解読から得られた安政南海地震後の井戸の水位低下が断層モデルから期待される体積ひずみと調和的であることを見出した(気象庁[課題番号:7006])。

南海トラフでのSSEのモニタリングに関しては、中国地方を領域固定したGNSS日値を用い、フィリピン海プレートの沈み込みと逆方向の成分について、SSE発生領域であるプレート境界等深線25kmおよび30km沿いに並べた地点を中心とする一定範囲内の平均を求め、1年および1週間の傾斜期間を持つランプ関数との相関を取ることで、長期的(2年から数年程度の継続期間)および短期的(数日から1週間程度の継続時間)SSEの時空間分布を得るシステムを開発した(気象庁 [課題番号:7006])。また、ひずみ計データでも、スタッキングや降水補正等を工夫することでスロースリップの検出ができることが示された(宮岡・木村, 2016, 気象庁 [課題番号:7006])。また、産総研の北勢観測井戸をパッカー密閉し、地下水圧の地殻ひずみ感度を著しく向上させて、伊勢湾周辺での深部低周波微動活動に同期した水圧変化を捉えることができた(北川・松本, 2016, 産総研 [課題番号:5007])。また、スロースリップの敏感なセンサーになっていると考えられる微動活動については、これまで地震発生帯の深部側延長で観測されてきたが、新たな海底観測システムであるDONET, DONET2の展開に伴い、南海トラフ島弧側のプレート境界浅部の複数の地域で微動活動が見い出された。深部微動と同様に、地震波でトリガされることも見い出されている(気象庁 [課題番号:7006])。

産総研・防災科研・気象庁では、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自動解析するシステムを運用し、2013年11月以降5年間で162個のSSEイベントの断層モデルを決定した(産総研 [課題番号:5007])。Araki et al. (2017)は、短期的SSEの検出と断層すべり分布の時空間変化の推定を同時に行う新たな発想の解析手法を開発し、合成データでの評価では、高い精度でのすべり開始・終了時点の推定と、すべり量の時空間変化の推定精度の改善がみられた。実際のひずみデータを用いて推定したすべり開始・終了時点は微動発生期間と一致した(産総研[課題番号:5007])。また、津波の早期警報のため、ボアホールひずみ計を用いて巨大地震のモーメントマグニチュードを即時推定する手法も開発された(Itaba, 2018, 産総研[課題番号:5007])。

応力に関して普通の測地学的方法で推定できるのは時間変化のみであるが、ボアホール掘削ができる場合には、絶対値を知ることができる。岩石強度に近い差応力にまで適用できるよう新たに開発された小径のオーバーコアリング法(Ogasawara et al., 2014)と、コアの外径を測るのみで効率的に計測できるDCDA法(Funato and Ito, 2017)が開発され、後述するように複数の震源域の絶対応力を知ることができた(立命館大学[課題番号:2401])。

地殻流体

水文学的な手法による断層モニタリングにおいて、断層周辺の複雑な水理物性の把握は重要な課題である。Matsumoto and Shigematsu (2018)は、三重県内の中央構線断層帯(MTL)の透水係数を、産総研が掘削した2本の井戸の水理試験と長期水位観測で求めた。求めた透水係数は、MTLの露頭で断層帯の中央からの距離ごとにサンプリングされた岩石の実験から求めた詳

細なMTLの透水構造(Wibberley and Shimamoto, 2003)と調和的で、MTLの複雑な透水構造を反映していることがわかった(産総研[課題番号:5007])。また、南海トラフ地震発生帯掘削計画の一環として熊野灘沖合に設置された長期孔内観測システム(LTBMS)の水圧計が周辺の掘削作業に伴って大きく変化していることを受け、これをクロスホール透水試験に見立てて原位置透水係数の推定を行って、先行研究の室内実験や数値シミュレーションの結果と比較することで、スケールが大きくなるほど断層やクラックの数が増え、それらが連結することでより水が流れやすくなることを示唆する結果を得た(Kinoshita and Saffer, 2018, 産業技術総合研究所 [課題番号:5007])。

地下水位/水圧の変動は、弾性的な地殻のひずみを反映している可能性と、非可逆的な損傷を含む透水性の変化を反映している可能性がある(e.g., 小泉, 2013)。小泉・木下(2015)は、地震の前後で道後温泉の地下水位が4 m以上上昇した2014年伊予灘の地震(M6.2, 松山市内の震度4)に際して、水頭拡散率は地震前後で有意に変化しなかったことを示した。また、比嘉・他(2016)は、台湾の地震時地下水位変化の解析から、地震動の寄与の周波数依存性が不圧地下水と被圧地下水で違うことを明らかにした(産総研[課題番号:5007])。

大気中ラドン濃度は、1995年兵庫県南部地震、2011年東北地方太平洋沖地震に数ヶ月先行して顕著な変動をみせたため、地震の短期的先行現象の有力な候補となった。特筆すべきは、放射線管理施設の排気監視モニタデータにバックグラウンドとして計測されているため、既にかかなり長期の連続データが国内各所にわたって存在することである。そこで医薬系を中心とした全国の施設に協力を依頼してモニタリングネットワークを作り、現在25施設が参加している(東北大学[課題番号:1207])。研究目的で取得されているデータではないので、測定方式には施設によってバリエーションがあるが、代表的な測定装置について、現地で感度を検定、十分な性能をもつことを確認した(Tanaka et al., 2017, Ishihara et al., 2018)。また、補完的な測定のために使い勝手の違う様々なタイプのラドン測定装置の精度を検証した(Higuchi et al., 2019; Wakabayashi et al., 2019, 東北大学[課題番号:1207])。

大気中ラドン濃度は地殻状態だけでなく、気象条件等にも大きく影響を受けるので、異常を抽出する前にまずその補正を行う必要がある。まず、日変化については基本的には大気が安定成層する夜間に濃度が高くなることを確認し、下層大気の熱交換プロセスに基いてラドン収支に関するボックスモデルを高度化した(Omori and Nagahama, 2016)。これは、地殻状態を反映する地表でのラドンフラックス推定に役立つ。年周変化については、大気中ラドン濃度の年変動は、季節による気団の入れ替わりが支配的要因で露点と逆相関になることを明らかにし(Hayashi et al., 2015)、国内の大半の地域では、日最小値のデータから正弦回帰による平年変動パターンを引いた残差をみることで、地殻活動に関連する異常抽出のための基本的な手法となることを示した(Kobayashi et al., 2015)。後述のように、この方法で様々な地殻変動との対比をみる事例研究を行った。しかし、この補正方法は過去の長いデータを必要とするため、リアルタイムでの異常検出には向いていない。Iwata et al. (2018)は直近の観測データより構成される部分時系列に対して異常部位を検知するデータサイエンス的な手法である部分空間法(e.g., Ide and Inoue, 2005)を導入した(東北大学[課題番号:1207])。

地下水位等については、非研究目的の井戸で、日常的に使用されていたり、あるいは、

地盤沈下監視等の目的で記録がとられているものが存在する。後で結果を紹介するが、2011年東北地方太平洋沖地震、および2016年熊本地震に先行した変化がなかったかを調べるために、これらの地域で広汎な調査がなされた(東京学芸大学[課題番号:2930])。

電磁気

地震に数日先行して発生すると報告されていたVLF帯電磁波パルス(Asada, 2001)について、メンテナンスの容易な観測装置を開発し(長尾・他, 2016)、中日本に5点の観測網を作って観測を復興した。予察的な解析ではAsada(2001)が指摘していたような直線偏波の電磁波はそれほど多くなく、到達時間差による震源決定が必須である。感度帯域は100kHzまでであるが、ハイサンプリングによって到達時間差による発生源の位置標定に成功し、ARとAICを用いたパルスの到達時間決定手法(Takanami and Kitagawa, 1991)をルーチンで適用する解析システムを作った(東海大学 [課題番号:2501])。

前期計画から継続して維持した伊豆諸島・北海道・九州に加えて、高知県黒潮町内の2カ所にULF帯地磁気、VHF帯電磁波伝播異常、大気電界の観測点を新設した(東海大学 [課題番号:2501])。VHF帯電磁波伝播異常に関しては、見通し内伝播異常(受信強度が異様に上がる)にも地震発生との相関が指摘された(Motojima and Ogura, 2017)ため、清水に観測点を新設した(東海大学 [課題番号:2501])。

DEMETER衛星で取得したVLF帯電磁波の強度データに $M>4.8$ 地震の数時間前での減少傾向(Nemec et al., 2008)が知られている。この項目に限って、より高性能かつ圧倒的安価な観測を超小型衛星(CubeSAT)で行うための測器開発が進んでおり、ブレッドボードモデルが製作された(児玉, 2018; 菊地ら, 2018; 鴨川ら, 2018, JAXA [課題番号:2901])。また、この現象の新たな異常定量化手法として、近隣雷によるノイズを分位解析で除去して平滑化曲線を求めたあと、関数主成分分析を施して第3主成分スコアを用いることが有効であることを見出した。この解析では、電磁波強度が減少を示す事例は、先行現象の条件を満たす全軌道に対してほぼ1割であった(Kamogawa et al., 2018, 東京学芸大学 [課題番号:2501])。

その他

地震活動に先行して海棲生物の行動異常が見られることがある(e.g., Terada, 1932; Tomoda and Hironaga, 1989)。深海魚の出現が地震の前兆ではないかとは、よく巷間ささやかれることであるし、三陸地方においては1868年明治三陸地震(M8.2)、1933年昭和三陸地震(M8.1)の前にイワシやマグロの漁獲異常があった(吉村, 2004)。また、2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)の一週間前には、鹿嶋市の下津海岸でカズハゴンドウ54頭のマス・ストランディングがあった。しかし、これらの現象に有意な先行性があるかは、地震のない時の現象発現レートを知らないとは判断できない(織原・長尾, 2015)ため、系統的なデータの収集を行った。漁獲量については、1973年以降宮城県内の漁港・魚種・月別の漁獲量資料をデジタル化した(織原ら, 2014)。深海魚については、全国紙の地方版や地方紙、水族館や博物館、過去の学術文献等の情報から、1923年以降で最初の深海魚出現日から2011年3.11までの期間のカatalogを作成した(Orihara et al., 2018)。336件あり、ほとんどが地震発生以前に報告がなされたものである。鯨類のストランディングは、日本鯨類研究所が公

開するストランディングレコードがあり、全国から報告が集まるようになった近年では年間200-250件になる。また、2頭以上のマス・ストランディングは年間数回程度で1923年以降48件である(織原・野田, 2015)。先行性について正式な統計的評価はできていないが、予知率も適中率も低いところは明らかになった(東海大学[課題番号:2501, 2901])。

周波数コームの原理で、地下の弾性波構造のわずかな変化をとらえる能動弾性波探査技術であるアクロス(気象庁[課題番号:7006])で、走時に持続的に小さくなってゆく変化及び年周変化があること、また、2011年東北地方太平洋沖地震発生は大きな地震波速度低下を引き起こしたことを見出した。さらに、國友・他(2014)は、複数のアクロス送信点からの観測結果を説明できる浅部からフィリピン海プレート境界にいたるP波及びS波の地下構造モデルを構築した(気象庁[課題番号:7006])。これは、変化源の特定に向けて必要なステップである。また、Kame et al. (2014)は、室内滑り実験での音波透過計測結果をスケールアップして、地震サイクル後半における長期的な固着の剥れによる断層面の弾性波反射率の変化を見積もり、反射探査によって検出できる可能性を示している(東京大学地震研究所[課題番号:1507])。

1. (3) 5年間になされた主要な成果その2：先行現象の発見と評価

予測評価の手法

よほど自明なメカニズムが想定できる例外的なケースを除けば、どの異常がどの地震の発生に関連していたかということ特定しがたいので、ある種の現象が地震に先行する傾向があるかということは、その現象によって試行的に予測を行い、それがランダムな予測よりもよい成績を示すか、すなわち予測の評価を通してしか行うことができない(中谷, 2016, 東海大学[課題番号:2501])。ここで検証されている命題は、実際に地震に先行して起きたその種の異常の中に、そのあと地震が起きたものが含まれているか?であって、実際に先行した異常には偽陽性も含まれていることを織り込み済みで評価できていることに注意すべきである(Nakatani, 2018a, b, 2019, 東海大学[課題番号:2501])。

試行予測の作成と評価はふつう回顧的に行われるが、この場合には、既にあるデータで、既に発生日時を知っている地震を予測できるように予測手法をチューニングできるから、有意な相関を示せたからといって、真のバリデーションにはならない。この点で、真に prospectiveな予測実験であるCSEP(東京大学地震研究所[課題番号:1511])の取り組みは特筆に値する。JAPANセンターにおいては、実験に用いるカタログ(気象庁一元化震源)の品質検証(Schorlemmer et al., 2018a), GR則を仮定した地震カタログ生成のためのシステムを開発などを行った上で、多数の実験ラウンドを重ね(Schorlemmer et al., 2018b), 空間予測の情報利得はMainlandよりもAlljapanがよくなる、Mainlandでは地震数を過大予測しがち、といった現在の統計モデルの一般的傾向や、また、モデルの学習曲線の特徴が見い出された(Tsuruoka, 2017a, b)。さらに、評価法そのものに関する知見も得られた。複数ラウンドにおいて複数モデルを評価する場合において、現行のCSEPの標準的な評価法は、モデルからの予測と観測の比較であるため、モデル間の直接比較ができない。この目的のために、情報利得あるいは対数尤度そのもので比較することが直接的かつ容易である(東京大学地震研究所, 2019)。また、大きな地震のあった地域に領域をしぼった予測実験を事後的に試行す

るなど、臨機応変な試みも行われた(東京大学地震研究所[課題番号:1511])。

CSEPはプロトコルで定められた全時空間グリッドに対して予測を出すことを求めており、また、回顧的な予測を評価するCSEP以外の普通の研究でも、データ(と研究資源)の許す全時空間に予測を作成して評価するのが普通である。しかし、それができる手法と状況は限られている。庄・尾形(2015)は、出したい時にだけ、気紛れに出した予測であっても、地震発生のベースレートに従って予測に校正なオッズをつけてギャンブリングスコア法(Zhuang, 2010)を用いれば、客観的で公正な評価ができることを指摘した。予測ごとに対象地域やマグニチュードがまちまちでも、一元的な成績をつけることができる(東北大学[課題番号:1206])。ただし、このような場合は、予測が事前に出されたものであることが絶対の前提条件である。

前震活動

多くの本震について、その前の地震活動をスタックすることで明瞭にみられる逆大森則(e.g., Jones and Molnar, 1979)に象徴されるように、統計的な傾向としての短期的な前震活動の存在は明らかである。前震活動、すなわち、地震活動がさかんな時期には大地震が発生する可能性がふだんよりずっと高いということは、必ずしも本震発生の近付いた何らかの意味で臨界的な物理状態の産物として前震が発生するのでなくとも、先述したように、活発な地震活動の余震の一つとして本震が起きたという解釈でも説明できる(Helmstetter, 2013)。Zhuang et al. (2018)はイタリアの地震活動をETASモデルで解析し、M2.9以上の地震の61%がトリガー型地震であり、その1/4が5つの大地震によって直接誘発された地震であることを見出した。また、2005-2016年に発生した6つの大地震のうち5つは誘発性であり、イタリアでは前震現象が顕著である。統計的除群法を用いてイタリア全土を16区域に分けて解析したところ、常時地震活動自体がこれらの主要地震に影響を受けており、それぞれ地震活動のフェーズが異なっていることがわかった(東北大学[課題番号:1206])。

一方で、プレスリップ的な震源核の存在を思わせる事例として、Mw2.2地震発生の6ヶ月前から、本震破壊面内にいくつかのクラスターとして極小地震(AE)の活動が観測されていた南アフリカの鉱山内地下3 kmでは、そのうちの1つのクラスターの活動が本震の一週間前から加速し、破壊開始点に向かったことが見い出された。ただし加速活動から予測された時刻より本震の発生は一日遅れており、加速する震源核がスムーズに地震につながったわけではない。最後の1日にはこのクラスターでは前震はなく、そのあと本震破壊開始点に位置するクラスターで本震の数分前に前震が1つおきて本震に至った(Yabe et al., 2015, 東北大学[課題番号:1206])。また、2014年長野県北部地震(Mw6.3)でも本震の震源近傍で前震活動が見られた(東北大学[課題番号:1206])。いっぽう、2011年東北地方太平洋沖地震の13時間後に発生した長野県北部の地震(Mw6.2)の前震活動は、東北沖地震の表面波通過時から始まっており、また、活動の様子は浅部地殻流体の温度と相関があった。Mw6.2は、深部からの地殻流体の移動でトリガされた可能性がある。(Shimojo et al. (2014), 東北大学[課題番号:1206])。

本震破壊直前(時間オーダー)に微小なりピーター前震が多数、破壊開始点に集中して起きる現象は、国内外のいくつかの地震で見つかっており(Bouchon et al., 2011; Doi and

Kawakata, 2012, 2013), 準静的プレスリップによる震源核形成を強く示唆するものである。Toyomoto et al. (2016)は、高感度地震計が本震直上にあった国内のケースを精査し、新たに、2011年長野県中部のM5.4地震の13時間前から20個程度の極微小なリピーター前震があったことを見出した(立命館大学 [課題番号: 2402])。このケースでは、本震近くに4つの高感度三成分地震計があったため、先述の恣意的基準を用いないMF法によって、本震前2年間の連続記録を走査した。新たにみつかったのは4つだけで、しかも、うち3つは地震の3-4日前にまとめて起きたものだった。これは、前震活動が定常的な微小地震の巨大化・頻発化と呼べるものではなく、過去2年間に殆ど例のなかったイベント群の発露であったことを示している(Hirano et al., 2018a, b, 立命館大学 [課題番号: 2402])。

前震活動と本震の物理的關係がどんなものであれ、活発な地震活動によってアラームを立てることで数百倍以上の高い予測ゲインが得られることは事実である。現状、20倍を超える予測ゲインをもつ先行現象は前震活動以外には見つかっていないのに対して、前震活動を用いた予測手法では100-1万倍という高いゲインが得られる(中谷, 2018c, 東海大学 [課題番号: 2501])。大地震のベース発生レートは極端に小さな数字であるため、短期的に予測できる地震確率の絶対値は、1000倍程度のゲインをもってしても、極端な対応をとるレベルにはならない。しかし、数倍のゲインをもつ長期・中期の先行現象と共起した場合には、かなりの絶対確率が生じることがある。Ogata(2017)は、2016年熊本地震に対して、それまでに統計的にゲインが確定していた短期(前震(Ogata and Katsura, 2002))・中期(2005年及び2016年の九州地方のM7地震の余震の相対的静穏化(Ogata, 2001))・長期(地震調査委員会(2015)による30年確率)の先行現象から得られるゲインの積により、2016年4月14日のMj6.5の後には、M7の発生確率として、1日で2-10%、30日で39-79%が得られると指摘している。この時の前震のみでのゲインは300-600倍程度、M7の1日確率にして0.2%、30日で5%であり、それほどものではないが、他の低ゲインの先行現象とかけあわさって生活感覚に訴えるレベルの数字を産み出す要としての決定的な役割を果たしている(中谷, 2018c, 2019, 東海大学 [課題番号: 2501])。今起きた地震が前震かどうかは本震が起きてからしかわからない、というのはよく言われる通りであって、前震で決定論的なコンセプトによる予測ができるということはないが、確率的なコンセプトに基く予測であっても、高い確率値が出た場合には、効果は同じである。

前震を用いた予測にはいくつかの手法が提案されている。複数の中規模地震が時空間的に強く集中して起きた場合に、数日以内により大きな地震が起きる可能性が高いというアラームを出すMaeda(1996)の方法について、日本周辺の様々な地域で回顧的に成績を見たところ、確率利得で100-400倍、予知率20-70%、適中率2-20%程度で、三陸沖・伊豆地域については、特に成績良好であった(e.g., 前田・弘瀬, 2017, 気象庁 [課題番号: 7006])。また、Nishikawa and Ide (2018)は、ETAS解析とリピーター解析を組合せて、茨城沖の30年間の地震活動を吟味し、このあいだに(プレート境界のスロースリップによるらしい)群発地震的な活動は19件あったが、その後M7級の地震が続いたケースは相対的に活動度が高かったことを見出し、前震活動が識別できる可能性を示した(東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])。

前震識別法は、その後大地震が起きやすそうな地震活動のパターンをヒューリスティックに提案し、それを定量的にチューニング、評価をするという形で開発されてきた(e.g.,

Maeda, 1996; Ogata and Katsura, 2012)が、最近、統計的なクラスタリング等で恣意性を排して地震活動をタイプ分けする方法が提案されている(e.g., Zaliapin and Ben-Zion, 2013)。Tamaribuchi et al. (2018)は、自動処理の改良によって地震数が増加した2016年4月以降の一元化カタログ、及び1997年10月以降の一元化震源カタログに対して最近傍法による客観的かつ自動的なクラスタリング処理を行い、前震・本震・余震の分類を行って、前震のb値がわずかに小さいこと、前震の発生率が広いM範囲で概ね30~40%程度であること、最大前震と本震の関係はM、時間、空間においてべき乗則に従うこと、といった前震活動の特徴を明らかにした(気象庁 [課題番号: 7006])。

前震のb値が小さいというのは、前震識別の手がかりとして古くから言われていることだが、個々のケースをみると、そうであることも、そうでないこともある。2009ラクイラ地震の前震では、b値の低いパッチの周りを取り囲んで、b値の低くないリピーターの活動があったことがわかり、強く固着した領域が周囲のクリープによって加速されていたことが推察される(Sugan et al., 2014; Vuan et al., 2018, 東北大学 [課題番号: 1206])。また、熊本地震では前述したように4月14日M6.5の地震発生後にb値が増加した場所があり、M6.5地震によって誘起されたクリープ(Kato et al., 2016b, 東北大学 [課題番号: 1206])との関連が指摘されている(東海大学 [課題番号: 2501])。

地震活動の中期・広域的变化

2014年の長野県神城断層地震(M6.7)においては、震央を中心とした半径150kmの範囲の地震を用いてb値を求めても異常な値は観測されなかったが、断層系に沿って、近傍の地震だけを用いてb値を計算してみると、地震発生1年半ほど前から先行的に顕著なb値の上昇が観測された(井筒・長尾, 2016, 東京大学地震研究所 [課題番号: 2931])。このように、小さい地震までよく震源決定できる観測のある現代では、高い空間分解能でb値を求めることができ、新たな可能性が出てきた。

b値に関してより先行時間の長い現象として、10年程度の長期にわたる低下傾向がいくつかの巨大地震の前にあったことが指摘されている(Nanjo et al., 2012)。全世界でb値が安定して計算できる活動度の高い地域を網羅的に走査し、地域のb値が過去7年にわたって $-0.025/\text{年}$ よりも顕著に下っていれば5年間の警報を出すこととした場合、予測対象としたM8以上の地震29個のうち56%が警報ONの時空で発生し、一方、地域の平均的活動度とGR則から期待されるM8の発生レートで重み付けした上で計算した警報分率は26%であった。確率ゲインは2.1、p値は0.75%となり、肯定的な結果である(楠城, 2018, 東海大学 [課題番号: 2501])。一方、弘瀬・前田 (2017)は、東日本の太平洋沖で1990年以降に発生したM7.0以上の地震6個のうち5個で、地震サイクル後半では規模別頻度分布がそもそもGR則から有意に逸脱したことを指摘し、それを鍵としたシンプルな予測手法で回顧的な評価を試みた。M7.5以上を予測対象とすれば、適中率は低いものの数倍の確率利得がえられた(気象庁 [課題番号: 7006])。

同様の先行期間をもつ現象として、10年を超えるような長期的な静穏化が指摘されている。2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の前に23年(Katsumata, 2011)、2004年Sumatra(Mw9.1)の前に13年(Katsumata, 2015)という長期静穏化が認識されたことを契機に系統的な調査を行った。Katsumata (2016)では、1976-2012年の日本周辺の海溝沿いのMw8.25

以上の地震3個と9年以上の網羅的に検出した長期静穏化(11件)を比較し、有意な先行性(確率利得6.7倍、 p 値0.3%)があることを示した。さらに比較できる地震数を増やすため、 $M_w7.5$ 以上9個を予測するように最適化しても、静穏化の継続時間の閾値としてはやはり10年程度となり、 p 値は1%を切り有意性が確かめられた(勝俣・中谷, 2018a)。オーバーチュールニングの問題を検証するためのクロスバリデーションでは、検証に使える地震数が数個となるため、5%を切る p 値は得られなかったが、ゲイン(数倍)や予測手法の最適パラメータは安定している(勝俣・中谷, 2018b)。また、先行性の評価は行われていないが、全世界の1990-2014年の $M8$ 以上の地震23個について、地震活動の長期的静穏化が先行していたかどうかを調査したところ、バングラドの地震活動が極めて低いため静穏化の有無が判断できなかった4例を除く19例について、本震発生前に10年程度以上の長期静穏化が見られた(東北大学[課題番号:1206]、東海大学[課題番号:2501])。

2016年熊本地震の前には、 Z 値解析とRTM解析によって、熊本地震の震源域から九州西方海域にわたる広範囲な静穏化が2014年末ごろから開始していたことが判明した(Nanjo et al., 2016, 東海大学[課題番号:2501])。ただし、この地域では2015年11月に薩摩半島西方で $M7.1$ の地震も発生している。いっぽう、吉川(2015)は、国内の $M7$ クラス以上の大地震を対象にeMAP法による地震活動の静穏化・活発化解析を行い、破壊開始点と静穏化域との距離、静穏化領域の大きさ、先行時間それぞれに地震規模との相関を見出した。さらに静穏化事例の8割で地震発生前までに静穏化領域が破壊領域を囲むドーナツパターンがあったことがわかった(気象庁[課題番号:7006])。

地震活動の潮汐への同期性の出現は、いくつかの大地震の中期的な先行現象だったのではないかと目されている(e.g., 鶴岡, 1995; Tanaka, 2002 et al.; Li and Xu, 2012; Tanaka, 2012)が、先行性が統計的に有意であるかの検証はなされていない。複雑な解析を要するこのトピックについて網羅的な検証を行うための方策を考察したレビューを行った(岩田, 2015, 東北大学[課題番号:1206])。トンガ・ケルマディック海溝沿いのプレート境界地震の潮汐相関についての調査では、中小の地震までまとめてみると有意な相関はないが、 $M7.0$ 以上の地震に限ればその発生時が特定の範囲の潮汐位相角の範囲内で発生している場合が有意に多いことがわかった(気象庁[課題番号:7006])。

このような潮汐敏感性の出現は断層の物理状態を反映した、本来の意味での「前兆」でありうるが、一方で、潮汐力そのものが日オーダーの先行現象となるような事例も見い出された。Ide et al. (2016)は、朔望周期程度で変化する潮汐応力と地震の相関を調べ、解析できた $M8.2$ 以上の地震12個のうち9個が潮汐応力の振幅が上位1/3の時期に起きたことを見出した。このような傾向は巨大地震についてしか見られず、また、同じ解析によって、 b 値と潮汐力に負の相関が見い出されたことから、潮汐力の高い時には、開始した破壊が止まりにくいのではないかという解釈を提案した(東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。潮汐力の大小は、天体の運行であらかじめ決まっていることで、断層状態の変化を反映した「前兆」ではありえないが、にもかかわらず(中谷, 2019, 東海大学[課題番号:2501])、有意な先行現象として予測には役立つという、「結果としてなる先行現象」のわかりやすい例である。

一方、地殻の物理状態の変化を反映したと思われる新たな現象として、地震波による動的トリガリングに対する感受性の変化がみつかった。Enescu et al. (2016)は、2016年4

月16日の熊本地震の表面波による誘発地震(動的トリガリング)が非常に広域で発生したことを見い出した。誘発された活動は遠くは北海道の阿寒湖火山にまで及び、これらは数kPa~数10kPaといった小さな動的応力変化で誘発されている。誘発地震がおこった地域には、以前の大地震(e.g., 2000年鳥取県西部地震Mj7.3など)によって今回以上の応力擾乱を受けたが地震が誘発されなかったところもある。一つの解釈として、2011年東北地方太平洋沖地震の影響で地殻の状態が変化し地震が誘発されやすくなっていたことが考えられる(東北大学[課題番号:1206])。これを受けて動的トリガリング現象の調査を広く進め、静的トリガリングに比べて、現象の継続時間が短い(一週間程度)などの性質が見い出された(Opris et al., 2018, 東北大学[課題番号:1206])。

また、複雑系の臨界現象ではないかと提案されている現象として、さまざまな規模のイベントの発生順序をみるナチュラルタイム解析によって見い出された(Sarlis et al., 2013), 1984-2011の日本付近のM7.6以上の浅発地震6個の全てに数ヶ月先行して起きた活動異常(そのうち最大のものは2011年東北地震)が、震央周辺の活動変化に起因することが示された(Sarlis et al., 2015, 東京大学地震研究所[課題番号:2931])。ただし、この異常は偽陽性も多く、先行性が有意かどうかは検証されていない。

スロースリップ

固着域の周辺で、きたるべき本震と同じセンスの滑りが起きれば、固着域の载荷が増し、地震の発生を促進する効果があることは自明である。2011年東北地方太平洋沖地震(Kato et al., 2012, Ito et al., 2013; Kato, 2014)以降、観測例が続々と見つかっている(e.g., 加藤, 2018; Kato, 2019 for review)。本計画の本期間で新たに見つかったもの(東北大学[課題番号:1206])としては、2014年イキケ地震(M8.2)(Kato et al., 2016a), 2009年ラクイラ地震(M6.3)(Sugan et al., 2014), 2016年熊本地震(Kato et al., 2016b)などで、破壊開始点へ向う活動のマイグレーションがみられる。また、測地やリピータによるスロースリップの観測がない場合でも、大きな地震に関連した地震活動のマイグレーションがみられる場合もある。2007年能登半島地震(Mw6.7)の本震断層走向方向への余震域の拡大(Kato and Obara, 2014), 2016年鳥取県中部の地震(M6.5)の前2ヶ月間にわたる前震活動では、マイグレーションは飛び飛びに起きており、スロースリップが絡んでいるかはともかく、複雑な断層構造を反映していると考えられる(東北大学[課題番号:1206])。2018年大阪府北部地震の北部延長では、地震活動が遅れて活発化し、その領域の背景地震活動度は時間とともに徐々に増加する傾向を示した。本震によって震源域の北部延長(地殻内)で非地震的な変形が引き起こされたのかもしれない(Kato and Ueda, 2019, 東北大学[課題番号:1206])。

また、小林・弘瀬(2016)は2000年と2005年の銚子市付近, 千葉市付近のM6級地震に伴い、地震が発生した太平洋プレート上面付近において、地震時の数倍の規模の非地震性すべりが1-数ヶ月にわたって発生していたことを見い出した(気象庁[課題番号:7006])。三陸沖の長期データの調査では、中規模以上の地震が、数年周期で消長を繰り返すゆっくり滑りのさかんな時期に集中する傾向(Uchida et al., 2016)もみられている(東京大学地震研究所[課題番号:1510])。2011年東北沖地震の発生直後には、房総半島沖で地震にSSEが誘発されたと思われるケースもみつかった(Kato et al., 2014, 東北大学[課題番号:1206])。深部低周波微動のようなもっと小規模なスロースリップは、非常に応力に敏感であることはよ

くしられている (Obara and Kato, 2016 for review)。深部低周波地震 (LFE) の潮汐相関を、豊後水道・東海地方・紀伊半島東部で調べ、相関の程度はそれぞれの地域内で空間的に不均質であることがわかった。豊後水道ではLFE活動の特に高い領域において、その潮汐相関の程度が長期的ゆっくり滑りに関連した時間変化を示したが、東海地方では長期的ゆっくり滑りに関連した時間変化はなく、体積収縮時にLFEが発生する傾向があった (気象庁 [課題番号: 7006])。また、先述した2次元隠れマルコフモデルを用いて、南海トラフの深部低周波微動の活動に、短期的SSEに週オーダーで先行する特徴や、長期的SSEと関連するかもしれない、数年オーダーの長周期の消長が指摘されている (Wang et al., 2018b, 東北大学 [課題番号: 1206])。

巨大な深部スロースリップが大地震を誘発したと思われるケースで、時系列が細かく分かっている稀有な例として、1946年の南海地震直前のものがある。Linde and Sacks (2002) は、土佐清水の検潮記録から、本震破壊域の深部延長において2mのスロースリップがあり、四国の海岸部で30cm程度の急速な隆起をもたらしたと推定している。Ohtani et al. (2019) は、サイクルシミュレーションを用いて、深部延長の摩擦がカットオフタイムの長い強度回復機構に支配されることを仮定すれば、このような巨大で急速なSSEが巨大地震の直前に先行するのは、ありふれた現象であり、また、非常に高い確率ゲインをもたらすことを示した (東京大学地震研究所 [課題番号: 1507])。このシミュレーションで起きた巨大SSEは、あくまで、地震発生域以深の応力蓄積によってタイミングが決ったものであって、固着域の「ぎりぎりさ」を反映したと解釈できるような節は見あたらなかった。すなわち、「前兆」ではなく、先行現象にすぎないようである。1946年南海地震直前の地殻変動の計器観測は、震源域の西の外れで感度の期待できない土佐清水の検潮記録しかないが、過去数回において地震直前 (日オーダー) の井戸の水位低下が伝承され、とくに1946年のものについては多数の非常に具体的な証言 (中村, 2009) から、数mの水位低下が推定されている。これに関しては海岸部の10cm程度の隆起 (Linde and Sacks, 2002) で説明できるとする説 (梅田・板場, 2018) も出されているが、同じ地震で多数目撃された直前 (半日程度) の数mまでの海水面低下については、その空間・時間分布が複雑で解釈が提出されていなかった。梅田・板場 (2018) は、目撃証言の補強と仔細な検討によって、振動性の海水面変動があったと考えるべきと結論し、小さな津波のようなものが地震に先行して起きていたという解釈を提案した (産総研 [課題番号: 5007])。

また、エピソティックに起きるSSEとは別に、長期的に固着率が下がってゆくという現象も指摘された。Reverso et al. (2016) は、1990年からの房総沖の地震活動度に基づいて、1990年から2011年東北地方太平洋沖地震まで滑り速度が持続的な長期的加速をしていたことを示した (東北大学 [課題番号: 1206])。これは、同じ時期に指摘されている房総の長期的SSEの間隔低下 (Ozawa, 2014) とも調和的である。「壊れ始め」から派生する、真の (津村, 1996) 前兆は、むしろ、こういう中期的な時間スケールの現象として現れるのかもしれない (Sagiya, 2018)。

地震サイクルと長期予測

長期予測における地震発生確率の時間変化は、地震後経過率のコンセプトによっている。東北地方太平洋沖地震による内陸断層での地震活動変化の関係を調べたところ、予察的で

はあるが、地震後経過率が0（例えば丹那断層）または1に近い（例えば牛伏寺断層）、すなわち最近に活動したかあるいはほぼ満期に近い活断層帯ほど顕著な変化を示す傾向が見られた（東北大学[課題番号:1206]）。また、2014年長野県北部地震（神城断層地震）、2016年熊本地震において、古地震データの再解析や現地調査から、2つの地震ともに地震サイクル後期であったことを確認した。しかし、今まで評価されていた以上に活動間隔や破壊長の大きなゆらぎがあることも明らかになった（Okada et al., 2015; 石村・他, 2015; 堤・他, 2018; 遠田・石村, 2019; Ishimura et al., 2019, 東北大学[課題番号:1206]）。また、2018年大阪府北部地震（Mw5.6）においては、逆断層が最初にずれ、0.3秒後に近くの横ずれ断層も破壊を開始、その後は両方の断層がともに運動したことがわかり（Kato and Ueda, 2019）、水平圧縮応力場が卓越する近畿圏においては、逆断層と横ずれ断層が同時に活動することで1つの地震になる場合があることが明示された。これは、現状の長期評価で考慮されていない要因である（東北大学[課題番号:1206]）。また、この地震は、経過率が高いと考えられている上町断層帯のCFSを0.1MPaほど増加させた（遠田, 2018; Kato and Ueda, 2019, 東北大学[課題番号:1206]）。

現行の長期確率予測の最も基本的なコンセプトは地震の繰り返し性である。繰り返し回数が非常に少ないときの長期的発生確率予測の信頼度について、繰り返し小地震を使った予測実験と、合成データを用いた予測手法の検討を行った。（田中・他, 2018, 気象庁[課題番号:7006]）。基本的には、ベイズ統計対数正規分布モデルに基づく予測が優れており、かなりの好成績で予測できるが、経験した繰り返し回数が4回以下では、回数が少なくなるにつれて成績が着実に悪くなることが定量的に示された。

地殻流体

先述の大気中ラドン濃度モニタリングネットワークでは、毎年数施設ずつの過去データをまとめて回収しており、その解析を順次行った（東北大学[課題番号:1207]）。以下に、今期計画期間中の解析によって、平年変動からの残差に異常が見い出された時期に地殻イベントが発生したケースを列举すると、2003年9月26日十勝沖地震（Mw8.0）の1-4ヶ月後@札幌医科大学；2011年3月11日東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）の4ヶ月前から@札幌医科大学、福島県立医科大学、東北医科薬科大学、獨協医科大学；2008年5月8日茨城県沖地震（Mw6.8）から2008年7月19日福島県沖地震（Mw6.9）の間@福島県立医科大学；2010年3月14日福島県沖地震（Mw6.5）の前1年から後10ヶ月@福島県立医科大学；2011年7月5日和歌山北部の内陸浅部地震（Mj5.5）の前数ヶ月@和歌山県立医大；2014年11月22日長野県神城断層地震（Mj6.7）の前1ヶ月@信州大学松本キャンパス；2016年10月21日鳥取中部地震（Mj6.6）の前1ヶ月@鳥取大学；2018年6月18日大阪府北部地震（Mj6.1）から3ヶ月間@大阪薬科大学、となる。2018年9月6日北海道胆振東部地震（Mj6.7）の時期の札幌医科大学のデータには特に異常はなかった。なお、異常は地殻イベントのない時でも発生しており、後述する札幌医科大学と福島県立医科大学のデータ以外では、相関が有意であるかの検証はなされていない。

大気中ラドンは、地殻ガス起源であるから、面積ひずみとの比較も行われた。2003年9月26日十勝沖地震を含む2002-2006年札幌医科大学での大気中ラドン濃度の平年変動からの残差時系列を、周辺の面積ひずみの時系列と比較すると、地震後にみられた大気中ラドン

濃度が増加は、面積ひずみ(速度)が増加(4×10^{-7} 程度)した時期と同じか、やや遅れていた。福島医科大(2002-2011年)でも面積ひずみの増加(1×10^{-7} 程度)時期と大気中ラドン濃度の変動時期に関係があるようにみえる。

札幌医科大学と福島県立医科大学のデータについては、先述の部分空間法による異常検出を行い、異常度の時系列と、周辺の地震活動度時系列(地震モーメントの時間積算)との時系列類似度を動的時間伸縮法(Berndt and Clifford, 1994)で求めたところ、両者に相関がないという帰無仮説のp値は、札幌医科大学で1.9%、福島県立医科大学で13.2%であった(Iwata et al., 2018)。なお、この時系列類似度の算出においてはラドン異常と地震のどちらが先かは問うていない。

また、大気中ラドン濃度の外的刺激への応答性が、大地震と関連して変化したと思われる例も見つかった(東北大学[課題番号:1207])。神戸薬科大学のデータの潮汐分潮解析では、1984-1988年では認められなかったK1分潮に対する変化が兵庫県南部地震前の1990年-1994年の期間では認められた。札幌医科大学データの季節変動の振幅は東北地方太平洋沖地震を境に増加したことが見い出された。

2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の前には様々な先行時間の異常があった(Nagao et al., 2014 for review, 東海大学[課題番号:2501])。井戸水の水位低下・混濁については、1933年の昭和三陸地震(Mw8.4)の20日前から3カ所で確認され(吉村, 2004)ているため、三陸地方で今回も同様の現象がなかったか調査した(東京学芸大学[課題番号:2930])。水温と水位の連続記録をとっていた大船渡市の五葉温泉の源泉井戸(深井戸, 被圧)では、上述の大気中ラドン濃度変動とほぼ同じ時期である、地震の三ヶ月前に水位と水温が大きく低下し地震発生までその状態が持続していた(Orihara et al., 2014)。このような大きな変動は、データのある3.5年間にこの一度だけであった。また、仙台市のもつ地下水観測井44個のうちの1つでもほぼ同時期に急激な水位低下があった。また、宮城県石巻市から岩手県山田町までの三陸海岸地域の聞き取り調査で異常の有無が確認できた17カ所のうち異常があったのは大船渡市の正源寺(1ヶ月前から水位低下)と気仙沼市の万福寺(開始時期不明)の2カ所であった(織原・鴨川, 2016)。どちらも、不圧の浅井戸である。前者では、昭和三陸地震の時も20日前から混濁があった。さらに、より北部の宮古市から青森県八戸市についても聞き取りと、自治体の所有井戸の記録の調査をしたが、東北地方太平洋沖地震に先行した異常は見つからなかった。また、2016年熊本地震の発生をうけて、熊本市が公開している日次データ(深井戸16本, 浅井戸8本, 震源から約10km以内)を精査したが地震の先行変化といえそうなものはなかった(織原・他, 2016, 東京学芸大学[課題番号:2930])。

電磁気

気象庁柿岡地磁気観測所の2001-2010年のULF帯地磁気3成分データについて、人工ノイズを避けるため夜中の0.01Hz帯だけを見て、日毎の異常の有無と周辺100km以内のM>4の地震50個との関係性を評価したところ、地震の8日前に前兆的異常があるとして予測を作った場合に3倍強の確率利得がえられ、また、ROC解析で安定して95%有意をクリアできていることがわかった(Han et al., 2017, 東海大学[課題番号:2501])。

先述のVLF帯電磁波パルスについては、観測点ネットワークの中で起きた2017年6月25日の長野県西部の地震(M5.6)の5日前から翌日までのデータを精査したところ、地震の2日

前だけに7個のパルスが観測されていた。それらは、波形・スペクトルが互いによく似ている。落雷情報データから、この時刻に中部日本で雷活動は発生していなかったことを確認している。到達時間差から位置標定された電磁パルスの波源は、いずれも震央から約20km以内であり、特に決定精度の高かった2つは震央から10km弱のほぼ同じ位置に決まっている(Nagao et al., 2018, 東海大学 [課題番号: 2501])。また、位置標定はできていないが、4月14日の熊本地震(M6.5)の2日前にも、全国的に雷フリーであった時刻に、小金井と静岡で九州方面から到来した電磁パルスが観測された(東海大学 [課題番号: 2501])。

先述のVHF帯FM放送波を利用した見通し外伝播異常(e.g., Moriya et al., 2010)の検出においては、地震活動の活発な日高山脈上を通る広尾放送局-えりも観測点の経路について、2006年3月1日から2014年12月31日までの連続受信強度記録から客観的な基準で回顧的に予測を作成し、有意な先行性が認められるかを評価した。異常判定の閾値を固定して作った予測では、異常から4日間警報をたてた場合、警報分率17%で、半径100km以内のM>5地震19個のうち7個が警報ONの時に起きたことになり、確率ゲインが2.1、p値が3.6%となった(森田・他, 2016)。さらに、異常判定の閾値を過去30日のデータからadaptiveに決めるように工夫すると、警報分率を大きく抑えることができ、警報期間3-5日で確率ゲインが6以上、p値が5%以下を安定して達成することができた(東海大学 [課題番号: 2501])。

2016年の熊本地震系列は、4月14日21時26分のMw6.0の地震から開始したが、島原観測点では、4月14日の朝に、伝播経路に熊本地震の震源域を挟む宮崎放送局からの見通し外伝播が発生していた。到来方向を調べたところ、通常、宮崎局からの電波は南東から到来するが、このときは、ほぼ真東にある震央の方向を向いていた。また、TEC(電離層全電子数)データの解析によれば、この時にスポラディックE層は発生していなかった。そこで、2015年1月1日から2016年11月30日までの宮崎-島原間の受信強度時系列を網羅的に調査したが、地震発生との統計的に有意な相関はみつからなかった(森田・他, 2018, 東海大学 [課題番号: 2501])。

一方、VHF帯放送波の見通し内伝播異常(谷川・他(2017))についても、群馬大学での観測データについてROC解析で先行性を検証し、M>4.5、深さ50km以内、震央が伝播パスから100km以内であれば95%の有意水準で相関があるといえることがわかった。さらに、異常の閾値を決めるための長期データの必要がない方法として変動値積分法を導入したところ、従来法を上回る予知率20%をえた(Motojima and Ogura, 2017, 東海大学 [課題番号: 2501])。

Heki (2011)が地震先行現象だと指摘した、東北地方太平洋沖地震の40分前からの異常を含む、最近のMw8.3以上の4つの地震に同オーダーの先行時間で起きたTECの正の異常(Heki, 2011)については、異常を定義するための基準曲線を推定するにあたって、地震のある程度以上前とある程度以上後ろのデータを多項式フィットで内挿しているが、実は地震後のTEC擾乱(基本的には減少)が想定より長く続くために、推定された基準曲線は本来あるべき平常日変化よりも下ぶれしており、そのせいでアーティファクトとして地震前の正の異常が見えたのだろうとの批判(Kamogawa and Kakinami, 2013; Masci et al., 2015)があった。しかし、Heki and Enomoto (2015)は、地震後のデータを見ない折れ曲り解析によって、折れ曲りがAICによる客観的判断で検出できることを示し、さらに、主に太陽活動起源である多数の異常を排除する努力を全くしない場合でも、この異常の先行性は統計的に有意であることを示した。さらに、He and Heki (2017)は、数値思考実験によって、いったん、地

震前の異常が存在することを認めれば、異常を定義するのに上述のような基準曲線を用いても顕著なアーティファクトは産み出されないことを指摘している。酷いプラズマバブルの発生中で異常の見分けようがないタイミングで起きた2005年Nias地震(Mw8.6)をのぞけば、GNSS-TECデータのあるMw>8.2地震8個の全てに同じパターンの異常が先行し、さらにその折れ曲りの強度、および先行時間が、今から起きる地震のMwに正の依存性をもつことも判明した。数十分という直前の先行現象が高い再現性をもって、しかも地震サイズが破壊開始以前(原理的には異常の開始直後)に予測できるというようなものは、これ以前には全く知られておらず、革命的な発見である。また、地震前の異常の振幅は、その時々背景TECのレベルにも正の依存性をもち、He and Heki(2017)は、M7級の地震でも背景TECの特に高い時には地震サイズに対して同様のスケールリングを示す先行異常が見られることを示した(日置, 2018, 東海大学[課題番号:2501])。

上記の直前異常とは別に、TECには、以前から、台湾、および全世界での統計調査にもとづいて、地震に数日先行する異常が指摘されている(e.g., Liu et al., 2006)。同様の異常を、2000年以降の日本で発生した被害地震12個(M6.5-9.0)に先行する期間で探した。2007年能登半島地震(M6.9)でTECの先行的な増加、2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)で先行的な減少が見られたが、それ以外の地震では顕著な異常は見られなかった。東北地方太平洋沖地震の3-4日前のものは非常に顕著であり、廣岡・他(2016)は、ニューラルネットワークを用いたトモグラフィーによって高度400km付近に広汎な+190%、250km付近に-60%の異常がみられた。この時、太陽活動は比較的穏やかであった(東海大学[課題番号:2501])。

先述のDEMETER衛星のVLF電磁波強度の減少の地震への先行性については、Nemec et al.(2008, 2009), Pista et al.(2013)が統計的な有意性を示しているが、震源距離に関するbinをサンプル数がイーブンになるようにとりなおし、また地震との時間関係の探索範囲や使用データの拡充も含めた独立な検証を行い、先行研究の結論を支持する結果を得た。また、個別の衛星軌道について、テンプレートをもちいた異常検出を行い、異常判定を厳しくするほど適中率が向上することを確認した。これは、異常に地震先行現象が含まれていたことの明白な証拠である(新田・他, 2016, 東京学芸大学[課題番号:2943])。

その他

チベット盆地の各地では2, 3年おきに絶対重力が計測されており、計測確度を大きく超える、地下物質の密度変化によると思われる時間変化が観測されている。Chen et al., (2015)は、この時間変化と2007-2010年に同地域で起きた $M_s > 6.0$ の13個の地震を比較し、重力変化が地震に数年先行するとして予測した場合に、地震活動度の地域性から作った予測に対して2倍程度の確率ゲインがとれることを示した。ROC解析は、この傾向が99%の有意水準をクリアしていることを示している(東北大学[課題番号:1206])。

1. (4) 5年間になされた主要な成果その3:メカニズムの解明

断層

プレート境界断層での応力蓄積について、測地学的な滑りの推定を精密にすることによって新たな知見が得られた。Ochi (2015)は、中国・四国地方のGNSSデータを解析して求め

た1997-2010年のプレート間固着と長期的SSEの履歴の比較から、長期的SSEにより解放されるプレート間固着は滑り欠損により蓄積した量のたかだか40%程度であると結論した。また、6-7年周期で繰り返す長期的SSEから固着状態への回復は1年程度で完了することも見い出している(産総研[課題番号:5007])。さらに、スロースリップの時期以外でも固着のゆらぎと微動活動のゆらぎに相関があることを見い出し、四国地方で見つかった相関のよい場所では、微動発生レートがゼロになるときは固着速度がプレート収束速度に近くなることが期待されることがわかった(Ochi and Tanaka, 2018, 産総研[課題番号:5007])。これは、微動の観測によってプレート境界の固着度の絶対値が推定できることを示唆しており、力学モデルによる発生予測に向けた重要な進展である。

内陸断層での応力について、南アフリカの大深度鉱山で最近大きな地震が発生した、いくつかの断層近傍の絶対応力が様々な方法で測定された(立命館大学[課題番号:2401])。2014年8月のM5.5地震の震源域(地下3.5-7 km)では、ICDP-DSeis計画(Ogasawara et al., 2017)でその上端付近がフルコア掘削され、コア試料の解析(東北大学流体研究所[課題番号:2948])からM5地震の余震発生帯の上端部以深で系統的に差応力が10-20MPa高いことがわかった。断層からは滑り強化性を持つTalcやBiotiteが確認され、活動が新しいことを示唆する非晶質も確認された(金木・他, 2018)。差応力レベルは、採掘レベルである2.9km深で浅での応力解放法の結果の外挿では説明できない大きさであった(石田, 2018)。また、地下3 km深で起きたM2.2の破壊開始点そばを貫通した掘削からは、地震前後及び断層や地質構造との位置関係によって有意に異なる応力値が得られた(Abe, 2017)。その差応力レベルはByerlee則に従う高い摩擦係数を示唆するものであった(東京大学地震研究所[課題番号:1507])。

最近の震源決定精度の向上によって、地殻の定常的な地震活動は、地質断層周辺に広がるダメージゾーンに体積的に分布しているのであって、断層面あるいは断層コアに特異的に集中しているわけではないと指摘されている(Hauksson, 2010; Powers and Jordan, 2010)。しかし、南アフリカの鉱山地下では、地質断層の破断面を、その曲りやjog, branch構造まで精細に描き出すような、微小破壊のすぐれて二次元な集中がみられた(Naoi et al., 2015b)。これらの活動にはb値が1より有意に大きい傾向もみうけられ、地殻体積中の地震のpopulationとは別に、断層「面」の性質を反映した、面上の微小破壊のpopulationというものが存在することを示唆している。大地震が既存断層の破壊であることを考えると、こういった面上に局在する活動は、より直接的な情報を持っている可能性がある(東北大学[課題番号:1206])。

成熟した断層においては、母岩同士が直接接触せず、粉体層が介在しており、断層の変位の大部分は粉体層内及び粉体層と母岩の境界でまかなわれている(e.g., Cehster and Chester, 1998)。粉体層のレオロジーについて、粉体層からの棒状固体引き抜きによる粉体層の固化と摩擦抵抗増大(Furuta et al., 2017, 2019)、凝着性を持つ湿った粉体層中の空隙構造の強度や衝突起因流動崩壊(Shinoda et al., 2018; Takizawa et al., 2019)、粉体サイロ流の流れ場制御(Endo et al., 2017; Katsuragi et al., 2018)の室内実験を行って、ドライな粉体層のせん断による固化と破壊、凝着性粉体層の衝突による流動化など、粉体系特有のレオロジー特性を明らかにした。天然の断層では固化と流動化がこれらの複雑な過程で関連しながら滑りが発生すると考えられる(東京大学地震研究所[課題番号:1512])。

ETASの物理

先述のように、ETAS的な余震トリガは、短期的な前震活動のメカニズムのかなりの部分を占めている。余震の大森則自体には、本震による周辺応力場の変化による遅れ破壊の時間的集中(Dieterich, 1994)という一応の標準的な物理メカニズムがあるが、このモデルで実際の余震活動を予測するとETASよりずっと性能が悪いことが指摘されている。ETASは現状、あくまで経験的なモデルである。Iwata (2016)は、Dieterichモデルに二次余震を取り入れられるように改良し、ETASには及ばないまでも大幅な改善を得た(東北大学[課題番号:1206])。また、Dieterichの物理モデルでは、地域の応力载荷速度と余震継続時間が反比例するべきことが理論的に予想されるが、Toda and Stein (2018)は東北地方太平洋沖地震による12箇所の広域余震活動および東北地方での本震一余震活動8ケースでこの点を検証し、余震継続時間がマグニチュードに依存しないこと、余震継続時間と長期変位速度に負の相関があること、余震継続時間と常時地震活動に負の相関があることを見いだした(東北大学[課題番号:1206])。この知識は、現在の地震活動が地震サイクルのどこに位置するかを推定する助けになる。

階層アスペリティ

地震の動的成長がカスケード的な階層間のトリガリングによる(e.g., Meier et al., 2016)ことなどから、そもそも地震の大きさは地震が発生した時点では決定しておらず、したがって、サイズに関する予見性をもつような先行現象は原理的にありえないのではないかと、というのは、この頃ではかなり定着した見方になっている。具体的な階層構造を観測から求める試みとして、釧路沖、那珂沖のM5程度の繰り返し地震グループについて詳細な震源すべり分布を求め、これらの地域ではM5, M4, M3程度の地震性パッチの階層的な構造の存在が示唆された(Okuda and Ide, 2018a, 東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。さらに、これらの中に、異なる規模の地震でも破壊成長曲線がその初期において絶対値で重なる例が見い出された(Okuda and Ide, 2018b, 東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。

b値の一つの解釈として、カスケードアップのしやすさであるという見方だできるだろう。先述したIde et al. (2016)の潮汐応力とb値の負の相関(東京大学理学系研究科[課題番号:1402])は、まさにそれであるが、「地震の止まりにくさ」が時間的に変化しているという事象が見い出されたことには大きな意味がある。例外的な要因であるにしろ、個々の地震の大きさは、時間的に不変なGR則にしたがったサイコロをふる以上に予測のしようがないという常識を覆す(Ogata et al., 2018, 東京大学地震研究所[課題番号:1511])からである。先述のb値の長期低下や規模別頻度分布のGR則からの逸脱が大地震に対して予測ゲインをもつというのは、そうした例である。

準静的な震源核

Noda et al. (2013)は、数値シミュレーションによって、階層的なアスペリティ構造があり、カスケードアップ地震が起きるような断層であっても、地震の最終破壊サイズに応じたサイズの準静的震源核を経て地震が起きる場合も可能であることを示している。南アフリカ鉱山では、先述の地震一週間前から加速した前震活動以外にも、準静的な滑りによる震源核形成の可能性を示唆する事例がみつかった；採掘前線による応力の集中を受けた既

存の古い地質断層面上に微小破壊の活動域が出現し、さしわたし20m程度まで準静的に拡大してゆく現象が発見された(Naoi et al., 2015c)。その後大きな地震が起きたわけではないので前震ではないが、準静的なすべりが、このような大きなスケールにまで拡がりうることを示す。なお、このサイトで後に行われた絶対応力測定では、非常に高い差応力がみられ(立命館大学 [課題番号: 2401]), また、この断層の周囲では多数のドリリングや採掘活動が行われて、高間隙水圧は存在しなかったことがわかっているため、天然断層のもつ臨界滑り距離が実験室での模擬断層面のそれよりずっと大きかったことが示唆される(東北大学 [課題番号: 1206])。

また、準静的な滑りによる震源核の形成を示唆する極微小なリピーター前震(前述)を念頭に、すべり方向に1.5m、すべり直交方向に0.5mという大きな断層面をもちいた室内スティック・スリップ実験において、試料内に多数の弾性波センサを埋設して、ごく微小な面上のごく微小地震(AE)を検出・位置標定した。断層ガウジが残置された場合のみ、試料全面がすべる大規模な動的すべりイベント(「本震」)に先行して前震が発生することが確認され、その中に、互いに波形が酷似したリピーター的な前震の発生が確認された。それらは「本震」の直前を中心に発生しており、20回の「本震」に対して毎回1-3個ずつ発生した。50回程度の繰り返しを経験する過程を通じて、これらリピーター的な前震の規模の系統的变化は認められなかった(辻村・他, 2017, 立命館大学 [課題番号: 2402])。対して、先述の南アフリカの鉱山地下の地質断層面上で発見されたM-4程度の微小リピーター(Naoi et al., 2015a)については、アスペリティの摩耗を示唆する、繰り返しに伴う系統的なマグニチュードの減少がみられた。さらに、この断層では、逆に新たな噛み合いの生成を示唆するような時空間パターンで、全体的な活動の途中の時期から出現したリピーター群もみられた(Yamaguchi et al., 2018, 東北大学 [課題番号: 1206])。また、10cm程度の岩石の三軸圧縮破壊試験でも、主破壊に先行して発生した微小破壊の中に、主破壊面に沿う位置に高い波形相関を示すイベントのクラスタを検出した。これらクラスタに属する微小破壊(M-7相当)が自然地震からのスケールリング則に従うことも見い出された(Yoshimitsu et al., 2014, 立命館大学 [課題番号: 2402])。

中期・広域的地震活動

先に、前震活動に関して、加速するプレスリップ vs. ETASによる(カスケード的)トリガリングという解釈を述べたが、これらは、主に短期的な前震活動に関するものと考えられる。しかし、いざ動的破壊が始まった場合にカスケード成長が止まりにくい状況の実現といったような、中期的な準備過程であれば、サイズ予見性をもつことは可能だろう。

Lippiello et al. (2012)は、カリフォルニア内陸地震の前後の地震の空間分布の解析から、地震の前には、既にその破壊域全体(=余震域)にあたる領域での地震密度が高まっており、この意味での中期的な前震域の広さがマグニチュード依存性をもつことを見い出した。日本の内陸・海域、台湾の地震カタログで同様の解析を行ったところ、いずれにおいても同様の傾向が見い出された(東京大学地震研究所 [課題番号: 2902])

いっぽう、Moriya et al. (2015)は、南アフリカ鉱山地下のインタクトな岩盤内で、推定破壊サイズ数センチの微小破壊(AE)が、厚味2-3m、さしわたし20m程度の大きな板状クラスタを形成する現象を見い出した。クラスタは採掘前線の10m程度前方の最大剪断応力

ーンで形成し、その後採掘位置が前進して高応力ゾーンから外れると活動を止め、その時点の最大剪断応力ゾーンの位置にまた新たなクラスタが形成されるというパターンを繰り返すものであり、既存の弱構造を反映するものではない。クラスタサイズに比肩するような大きな地震は起きなかったため、これは前震ではないが、微小破壊が自発的に集中した巨視的構造を作り出すという、10cm程度の岩石試料で巨視的破壊の準備過程として知られている微小破壊間の相互作用による広域的にコヒーレントな活動がこのようなスケールでも起きることを示しており (Naoi et al., 2016)、中期的・広域的な前震活動 (e. g., Zoller, 2001) のメカニズムのヒントになる可能性がある。その後の追加解析では、できかけの断層に特徴的な雁行的階層構造もみつかり (山形ら, 2016)、また、採掘域に対する上下の非対称性が岩質境界によるらしい (Mngadi et al., 2019) こともわかった (東北大学 [課題番号: 1206])。

応力インディケータとしての地震活動

Schorlemmer et al. (2005)、Scholz (2015) は、比較地震テクトニクス的な解析によって、 b 値の地域性が差応力の地域性を反映していると提案している。全世界の沈み込み帯での b 値をマッピングした Nishikawa and Ide (2014) は、 b 値に安定した地域性があることを見だし、スラブ浮力が高くてプレート境界面が強く押しつけられている地域ほど b 値が低い傾向を見出した (東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])。

深さ方向に分解能のある震源をうまく活用することで、プレート境界にそ沿った b 値の不均質性を高い空間解像度で求めことにも成功した。Nanjo and Yoshida (2018) は、南海トラフ沿いについて 2006 年以降の気象庁一元化カタログからフィリピン海プレート内とプレート境界の地震だけを用いることで b 値の詳細な空間分布を求め、巨大地震のアスペリティと対応したセグメント化を見出し、さらに、Yokota et al. (2016) の求めた滑り欠損レートと b 値に負の相関があることも見出した。高カップリング域 (滑り欠損が大きい) で差応力が大きいことを示唆している。さらに、帯状分布する低周波地震と重なっているかそれより深い側にある四国北部から伊勢湾北部にかけての 30km 以深の領域の b 値が低いことも注目される。これは、この地域に推定されている高い間隙水圧のために差応力比が高いことを示唆しているのかもしれない (東京大学地震研究所 [課題番号: 2902])。内陸地震の例では、2016 年熊本地震に関して、2000 年から 4 月 14 日の M6.5 前震直前までの b 値の空間分布を調べたところ、熊本地震は b 値の最も低い領域を破壊したことが判明した (Nanjo et al., 2016、東海大学 [課題番号: 2501])。さらに、この領域だけでナチュラルタイム解析を行ったところ、2 年ほど前から $\kappa 1$ という統計量の値が臨界状態の理論値である 0.07 を前後してふらつくようになっていたことが見出された (東京大学地震研究所 [課題番号: 2902])。これらの例は、 b 値が小さいところは、応力が高く大地震の起きるポテンシャルがある場所を探すがかりになる可能性を示している。一方で、Tormann et al. (2015) は、日本海溝から沈み込む太平洋プレート沿いに深さ 200km 程度までの b 値分布を求め、大局的なテクトニクスを反映した差応力の強弱を描き出すことがうかがわれる結果を得たが、それによって個々の巨大地震の発生領域を特定することは困難にみえる (東北大学 [課題番号: 1206])。

地震活動の増減に関する最も古典的な説明は CFS の時間変化である。しかし、地殻には様々な向きの断層があるので、地震活動の静穏化・活発化と CFS の関連を検証するには、ト

リガされた地震個々の断層の向きを考慮して行う(東北大学[課題番号:1206])のが本来的に正しいやり方である。Ishibe et al. (2015)は、2011年東北地方太平洋沖地震前後の関東地方の地震活動をこのやり方で解析し、CFSによる解釈を支持する結果を得た。また、Ishibe et al. (2017)は、先行研究(Miao and Zhu, 2012)で静的応力変化のパターンが余震活動と一致しないと指摘されていた最近の3つのメガスラスト地震(2004年スマトラ沖地震・2010年マウレ地震・2011年東北地方太平洋沖地震)について、常時地震・余震のメカニズム節面へのクーロン応力変化(Δ CFS)を計算し、それらの時系列変化を調べて、3地震とも Δ CFSが正の地震の割合が本震後に増加、本震前にはほぼ0であった Δ CFSの中央値が本震後には正の値を示し、時間経過と共に徐々に減衰することを見出した。なお、減衰度は地震毎に特徴があり、スマトラ沖・マウレ地震が1-2年程度でもとに戻ったのに対し、東北沖地震では5年以上高い状態が継続している(東北大学[課題番号:1206])。また、2011年東北地方太平洋沖地震による2008年岩手・宮城内陸地震の余震の静穏化についても、メカニズム解の考察からクーロン応力によると解釈できることが示された。また、2011年東北地方太平洋沖地震後の日本海遠縁部の顕著な静穏化(石辺・他, 2019)についてもメカニズムの変化がみられ、やはり同様の解釈ができる(東北大学[課題番号:1206])。

かねてから、先行現象としての静穏化のメカニズムとして、断層(深部延長)のスロースリップによるCFSの減少が提案されている(e. g., Ogata, 2007)。先述の熊本地震系列での余震静穏化の例に加えて、長期静穏化についても、東北地方太平洋沖地震前の長期静穏化(Katsumata, 2011)の位置は、2002年頃開始した長期的SSE(Yokota and Koketsu, 2015)とほぼ同じであり、また、2004年スマトラ地震前の長期静穏化域(Katsumata, 2015)は、本震震源域の深部延長が先行的に長期的スロースリップを起こしていたとすると、応力的な説明がつく(東北大学[課題番号:1206])。

断層力学

断層面の摩擦と周辺岩盤の弾性応答による力学モデルは、比較的アドホックな仮定の少ない物理モデルであり、先行現象の解釈や、演繹的な予測のための手段となる。弘瀬・他(2015)は、南海トラフ沿いのプレート境界形状を用いた地震サイクルシミュレーションにおいて、南海トラフ沿いの巨大地震の発生履歴、比較的良好にわかっている昭和東南海・南海地震のすべり分布、最新のすべり欠損レート分、そして繰り返す長期的スロースリップを再現したが、宝永→安政→昭和の発生順は再現できていない(気象庁[課題番号:7006])。

ある程度大きな地震が、固着域の内部で発生した場合には当然その周囲にかなりの応力集中を起すから、巨大地震を誘発するおそれがある。弘瀬・他(2016)は、このモデルを用いて、2016年4月に紀伊半島南東沖で発生したようなM6クラスの地震が南海トラフ巨大地震に与える影響について数値モデルを用いて調査した。低角・M6.5の地震を仮定した場合、サイクル終盤に擾乱を投入すると擾乱の半年-1年以内に巨大地震を誘発し、規模は若干小さくなった。その他の場合は、巨大地震にはほとんど影響を与えない(気象庁[課題番号:7006])。

前震の問題に限らず、地震断層の不均質と破壊の階層性(e. g., Ide and Aochi, 2005; Noda et al., 2013)は、地震発生の可予測性に関して根本的に重要な問題であり、階層性を具体的にとりこんだ断層モデルのシミュレーションがいくつか行われた。この問題に関するレビューであるIde and Aochi (2014)では、歴史地震とb値分布を用いて階層的パッチの具体

的な配置を求め、2011年東北地方太平洋沖地震の破壊過程を再現した例(Ide and Aochi, 2013)を示している。さらに、 b 値を用いてパッチモデルを構築することが可能であることを、北海道沖で実際に b 値の分布を計算して説明し、そのパッチモデルから定性的に将来の地震のシナリオを検討した(東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。いっぽう、日本海溝沿いの広域な領域に対して、従来のアスペリティモデルと階層アスペリティモデルの2モデルを軸にM7-9の主な地震の再現計算を行う試みがなされた(気象庁[課題番号:7006])。M7-8クラスの地震がそれぞれ単独で発生する様子はどちらのモデルでも概ね再現できた。また、M9クラスの地震の破壊域及び余効すべりは階層アスペリティモデルでは概ね再現できた。さらに、津波インバージョンによる断層モデルや過去の大地震周辺の地震活動等からアスペリティの位置をより詳細に設定することで、過去の大地震で見られるような統一的な地震発生パターンを再現できた。

弘瀬・他(2015)は、先述の南海トラフ沿いのプレート境界形状を用いた地震サイクルシミュレーションに階層性を取り込む試みとして、紀伊半島沖のプレスリップ域に小アスペリティを設定した。プレスリップやそれによる陸上観測点で期待される地殻変動の大きさは α (大小アスペリティの大きさの比)に反比例して小さくなり、小アスペリティの破壊が大地震の核形成を代用するカスケードアップ型の地震が発生することがわかった。また、紀伊半島沖に $\alpha=8$ の小アスペリティを設定するだけで、東海地域が割れ残るケースが出現した。このパターンは東海地域の固着の剥がれが不十分な状態で周囲から破壊が進展してきた場合に現れる。東海地域の割れ残りを再現するために、東海地域に沈み込んだ海山を模したパラメータ(大きな特徴的すべり量)を必ずしも与える必要はないことを示している(気象庁[課題番号:7006])。

また、階層的な不均一性の影響のより一般的な考察として、カントール集合的な摩擦の不均質性を仮定したシミュレーションにおいて、破壊エネルギー等の摩擦エネルギーや実行的な臨界滑り距離のスケール依存性が現れることが示された。また、不均質の統計的特徴によって、断層すべりの脆性度が系統的に変化することも示された(Yabe and Ide, 2017, 東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。いっぽう、Yabe and Ide(2018)は、摩擦の不均質性によって、プレスリップによる震源核から逆大森則に従う前震活動が産みだされているような状況でも、前震による擾乱のため、プレスリップが単調に加速していくとは限らないことを示した(東京大学理学系研究科[課題番号:1402])。

弾性体中の応力分布を可視化しながら滑り実験が行えるゲルシートを用いたアナログ実験では、従来のゲル対固い物体の実験(e.g., Rubinstein et al., 2004)ではなく、ゲル同士の滑り実験が可能になり、天然の断層に近い状況が再現できるようになった。摩擦面の凹凸や法線応力の不均一性がすべりダイナミクスに大きな影響を与える様子を詳細に解明した。例えば、ゆっくりすべりと高速破壊の共存、スーパーシアア破壊、イベントサイズ vs 持続時間のスケールリング、ゆっくりすべりと微動の同期など、断層でみられる多彩な地震現象を再現することができた(Yamaguchi et al., 2015a, b, 2016, 東京大学地震研究所[課題番号:1512])。また、大型岩石試料にひずみゲージを多数配置した滑り実験でも本震に先行するひずみの時空間変化を調べ、二次元的な破壊の進展に関してゆっくり滑りとカスケードアップの役割を観察した(Yamashita et al., 2017; Fukuyama et al., 2018, 立命館大学[課題番号:2402])。また、数理モデルでは、RSFを用いた一次元・二次元のバネブロックモデルにおいて、破壊核形成過程~高速破壊(本震)~余効すべりという一連のすべり挙動のみ

ならず、摩擦パラメタに応じて短期的・長期的なスロースリップイベント等の多様なすべり様式が現われることを、シミュレーションと数学的解析により示した (Ueda et al., 2015; Kawamura et al., 2018a,b, 東京大学地震研究所 [課題番号:1512])。

臨界現象

一般に、ナチュラルタイム解析で得られる κ_1 パラメタは、臨界状態において0.07に近付くとされる。粉体層に金属球を押し込んだときにバースト的に発生する弾性波放射イベント (AE) がGR則にしたがうことに着目し、そのナチュラルタイム解析を行ったが、AEバーストの実験では様々な値がみられ、GR則が成り立つからといって系が臨界状態にあるとは限らないことが示唆された。一方で、二つの連続するAEの振幅差が、自己組織化臨界現象に特徴的なq-ガウス分布にしたがうことがみつかった (Tsuji and Katsuragi, 2015, 地震研 [課題番号:1512])。

1995年の兵庫県南部地震に先立つ大気中ラドン濃度の異常は、臨界現象理論で知られる対数周期振動を示し、べき的に増加した (Yasuoka et al., 2006) ことが知られている。同様に、季節変化と長期トレンド除去後の福島県立医科大学データの積算値が、2008年以降東北地方太平洋沖地震まで対数周期振動を示し、べき的に増加していたことが確認された (東北大学 [課題番号:1207])。同地震では、地震活動の積算ベニオフひずみに関しても同様の傾向 (Xue et al., 2012) が報告されている。発散に向う振動現象は、先述のゲルシートを使った摩擦実験においても観察されており、そこでは、ゆっくりすべりの継続時間が系の駆動速度とべき的な関係をもつことも見い出された (東京大学地震研究所 [課題番号:1512])。

地震活動の複雑さの背後にある物理メカニズムを考察するために、岩石破壊の離散モデル (ファイババンドルモデル) の数学解析と数値実験を行った (Roy and Hatano, 2018, 東京大学地震研究所 [課題番号:1512])。このモデルはレオロジー的仮定を一切含まないが、構成要素の微小破壊に伴う応力再配分によりクリープ破壊的挙動が再現されることを示し、そのメカニズムがサドルノード分岐であることを示した。応力をステップ関数的に載荷した際の緩和挙動は大森則に従い、系が完全に破壊される直前には逆大森則に従って破壊が加速することを発見した。さらに、大森則におけるc値の決まり方に注目して解析を行い、c値が応力について弱い正の依存性をもつこと、および、系の不均質性が増すとc値は減少することを示した。特に後者は「複雑な断層形状ほど小さいc値をもつ」ことを示唆する。

ETASは、確率的なトリガリングの繰り返しで表現されたモデルであり、その振舞いを数学的に解析することができ (東北大学 [課題番号:1206])、分岐比とよばれるパラメタが1未満である時には活動は必ず収束する。Luo and Zhuang (2016) は、分岐比が1である場合の解析が先行研究全てで間違っていたことを示し、一発目の地震のマグニチュードによって、そのあと起きる最大の地震の確率分布を求め、ETASパラメタの α (余震生産性のマグニチュード依存性) とGR則のb値の比によって、そのふるまいが3つの領域に別れることを示した。最大余震の大きさに関するパスの法則も導かれている。分岐比は、応力レベル等の物理条件で時空間変化するはずであるから、これが、本報告でいうところの中期・広域的な地震活動の変調を用いた地震の予測性の源である可能性が考えられる (Zhuang, 2018)。いっぽう、分岐モデルを動的な破壊成長のモデルとみなした場合には、GR則やその破れ、破壊成長曲線の多様性などが説明できる (Zhuang et al., 2016, 東北大学 [課題番号:1206])。

静穏化時に地震数が減少するのはある程度以上の大きさの中規模地震であるという指摘 (e.g., Smith and Sacks, 2013, Suyehiro et al., 2014)がある。Suyehiro et al. (2015)は、破壊強度がわりふられた個々のセルが破壊を起こすと周囲に応力を再分配するセルオートマトンモデル(e.g., Rydelek and Sacks, 1996)を用いた地震サイクルのシミュレーションにおいて、ダイラタンシーハードニングを模擬して最も破壊強度に近い応力がかかっている小数のセルで強度をわずかに増加させるとこの現象が再現されることを見いだした(東海大学 [課題番号:2501])。

電磁気

He and Heki (2016)は、先述の巨大地震直前数十分のGNSS-TEC変化について、GNSS局の配置が良かったチリの2010年マウレ(Mw8.8)、2014年イキケ(Mw8.2)、2015年イラペル(Mw8.3)地震直前の電離圏の異常の空間分布を調べた。それぞれMwに応じた空間的広がりを持つ異常が、Mwに応じた先行時間をもって、Mwに応じた強さであらわれていた。特にGNSS局の分布が良い2015年イラペル地震に関して三次元トモグラフィを行った結果、磁場に沿って低高度に正の異常が、高高度に負の異常が並んで生じる構像を見出した。このような異常の空間構造と、異常の強度が背景TECへ依存することをヒントに、Kelley et al. (2017)は、震源域の地表に0.2V/m程度の電界異常が起これば観測された程度の異常が説明できることを示した。また、2011年東北地方太平洋沖地震については、震源域の地磁気共役点であるオーストラリアでも、同様の異常がみつかっており(日置, 2018)、この先行現象が「電気仕掛け」であることをサポートする(東海大学 [課題番号:2501])。

先述のDEMETER衛星で観測された地震数時間前のVLF電磁波強度の減少について、地震に先行した変動がみられた衛星軌道の電場データをスタックすると震央最接近の時刻で平均強度が減少することを見出した(Togo et al., 2016)。さらに、メカニズムの解明のために、雷によって発せられたホイスラー波強度を分析したところ、伝搬経路が地震の震央付近を通る場合には強い吸収を受けることを見出した(Nitta et al., 2016)。伝搬経路シミュレーションからは、そのような吸収がおこるのは高度90-200 kmの電離圏下部で数十パーセント電子密度が増加した場合であることが示唆される(東京学芸大学[課題番号:2943])。先述の巨大地震数十分前のGNSS-TECの異常と関連している可能性も考えられる。

地電位の観測データに先行現象が含まれる場合があることには、統計的な有意性が示されているケース(e.g., Zhuang et al., 2005)もある。界面導電現象はしばしばそのメカニズムとして取り上げられる。地殻での因果関係の明白な例として、三宅島で2000年にカルデラ陥没に先立って火口付近に繰返し発生した時定数20秒程度の力学的イベントに伴い、全島で観測された時定数100秒程度のコサイスマックな地電位の変化(Sasai et al., 2001, 2002)がある。Kuвано et al. (2015)はこのデータをモデリングし、これまでいわれていた力学現象のソース域での水流ではなく、コサイスマックなひずみによる間隙弾性効果による水流が観測点の周囲におこした界面動電現象であるとして定量的に説明できることを示した(東海大学 [課題番号:2501])。

成果リスト(5ヶ年用)

- Abe, S., 2017, In-situ stress in the close vicinity of source fault in South African deep gold mine, 東北大学理学研究科, 修士論文, pp.158.
- Araki., T., Ochi, T., Matsumoto, N., and Akaho, S., 2017, Simultaneous estimation of spatio-temporal distribution and duration of slow slip event by switching model, *Journal of Signal Processing*, 21, 297-308.
- 馬場久紀, 平田賢治, 山崎明, 対馬弘晃, 勝間田明男, 前田憲二, 上野寛, 青木重樹, 小林昭夫, 中田健嗣, 木村一洋, 弘瀬冬樹, 藤田健一, 長尾年恭, 2015, 自己浮上式海底地震計(OBS)を用いた駿河湾石花海周辺海域における連続地震観測, 東海大学海洋研究所研究報告, 36, 23-39.
- Chen, S., C. Jiang, and J. Zhuang, 2015, Statistical Evaluation of Efficiency and Possibility of Earthquake Predictions with Gravity Field Variation and its Analytic Signal in Western China, *Pure and Applied Geophysics*, 173, 305-319, doi:10.1007/s00024-015-1114-x.
- Endo, K., K. Anki Reddy, and H. Katsuragi, 2017, Obstacle-shape effect in a two-dimensional granular silo flow field, *Phys. Rev. Fluids* 2, 094302.
- Enescu, B., Shimojo, K., Opris, A., and Y. Yagi, 2016, Remote triggering of seismicity at Japanese volcanoes following the 2016 M7.3 Kumamoto earthquake, *Earth, Planets and Space*, 68:165, doi: 10.1186/s40623-016-0539-5.
- Fukuyama, E., K. Tsuchida, H. Kawakata, F. Yamashita, and S. Xu, 2018, Spatiotemporal complexity of 2-D rupture nucleation process observed by direct monitoring during large-scale biaxial rock friction experiments, *Tectonophys*, 733, 182-192, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.12.023>.
- Funato, A., T. Ito, 2017, A new method of diametrical core deformation analysis for in-situ stress measurements, *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, 91, 112-118.
- Furuta, T., K. Katou, S. Itoh, K. Tachibana, S. Ishikawa, and H. Katsuragi, 2017, Geometry-dependent constitutive law for granular slow frictional drag, *Int. J. Mod. Phys. B* 31, 1742006.
- Furuta, T., S. Kumar, K. Anki Reddy, H. Niiya, and H. Katsuragi, 2019, Packing-dependent granular friction exerted on a rod withdrawn from a granular layer: the role of shear jamming, *New J. Phys.* accepted.
- Guo, Y., J. Zhuang, and S. Zhou, 2015, An improved space-time ETAS model for inverting the rupture geometry from seismicity triggering, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 3309-3323, doi:10.1002/2015JB011979.
- Guo, Y., Zhuang J., Hirata N., Zhou S., 2017, Heterogeneity of direct aftershock productivity of the main shock rupture. *Journal of Geophysical Res., Solid Earth*, 122, doi:10.1002/2017JB014064.
- Guo, Y., J Zhuang, N Hirata, 2018, Modelling and forecasting 3D-hypocentre seismicity in the Kanto region, *Geophys. J. Int.*, ggy154, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy154>.
- Han, P., Hattori, K., Zhuang, J., Chen, C-H., Liu, J-Y., and Yoshida, S., 2017,

- Evaluation of ULF seismo-magnetic phenomena in Kakioka, Japan by using Molchan's error diagram, *Geophysical Journal International*, 208, 482-490, doi:10.1093/gji/ggw404.
- Hayashi, K., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Muto, J., Ishikawa, T., Omori, Y., Suzuki, T., Homma, Y., and Mukai, T., 2015, Normal seasonal variations for atmospheric radon concentration: A sinusoidal model. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 149-153.
- He, L. and K. Heki, 2016, Three-dimensional distribution of ionospheric anomalies prior to three large earthquakes in Chile, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7287-7293, doi:10.1002/2016GL069863.
- He, L. and K. Heki, 2017, Ionospheric anomalies immediately before Mw 7.0-8.0 earthquakes, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 122, 8659-8678, doi:10.1002/2017JA024012.
- Heki, K. and Y. Enomoto, 2015, Mw dependence of the preseismic ionospheric electron enhancements, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, DOI: 10.1002/2015JA021353.
- 日置幸介, 2018, 地震直前の電離圏変化, *パリテイ*, Vol.33, No.2, 52-56.
- Higuchi, S., Kamishiro, Y., Ishihara, M., Yasuoka, Y., Mori, Y., Hosoda, M., Iwaoka, K., Tokonami, S., Takahashi, R., Janik, M., Muto, J., Nagahama, and H., Mukai, T., 2019, Evaluation of a radon air monitor in the measurement of radon concentration in water in comparison with a liquid scintillation counter. *Radiation Protection Dosimetry*, in press.
- Hirano, S., Y. Toyomoto, H. Kawakata, and I. Doi, 2018a, Application of Extreme Value Theory to a Matched-Filter Analysis, 10th ACES International Workshop -Toward Comprehensive Understanding of Earthquake Physics-.
- Hirano, S., Y. Toyomoto, H. Kawakata, and I. Doi, 2018b, Objective matched-filter analysis for detecting small events, International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop on Earthquake Preparation Process, ~Observation, Validation, Modeling, Forecasting~, Chiba, Japan.
- Hirata, N. and H. Tsuruoka, and D. Schorlemmer, 2015, Five-year Japanese earthquake predictability experiment with multiple runs since 2009 including the 2011 Tohoku-oki earthquake, Abstract of the 9th International Workshop on Statistical Seismology (StatSei9) in Potsdam.
- Hirata, N. and Tsuruoka, H., 2017, CSEP-Japan earthquake predictability experiment and testing results, Abstract of the 10th International Workshop on Statistical Seismology (StatSei10) in Wellington.
- 廣岡伸治, 市川卓, 服部克巳, 韓鵬, 吉野千恵, 劉正彦, 2016, 2011年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) に先行する電離圏異常の時空間分布, *電気気学会論文誌基礎・材料・共通部門誌*, 136, 265-271, DOI: 10.1541/ieeefms.136.265.
- 弘瀬冬樹・中西一郎, 2015, 1854年安政南海地震による愛媛県最南端(愛南町)での地震動・津波被害・地下水位変化-庄屋史料と藩史料の比較から分かる庄屋史料の有用性と地

- 殻変動推定の可能性-, 地震 2, 68, 107-124.
- 弘瀬冬樹・前田憲二・藤田健一, 2015, 南海トラフ沿い巨大地震とスロースリップ, 地震予知連絡会会報, 93, 429-431.
- 弘瀬冬樹・前田憲二・藤田健一, 2016, 三重県南東沖の地震(2016年4月1日, M6.5)による南海トラフ大地震に対する影響, 地震予知連絡会会報, 96, 311-316.
- 弘瀬冬樹, 前田憲二, 2017, 本震前に現れる G-R 則からの逸脱と, その特徴に基づいた地震予測モデルの提案. 地震, 70, 21-40.
- Ide, S., and H. Aochi, 2014, Modeling earthquakes using fractal circular patch models with lessons from the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Journal of Disaster Research*, 9(3), 264-271.
- Ide, S., S. Yabe, and Y. Tanaka, 2016, Earthquake potential revealed by tidal influence on earthquake size-frequency statistics, *Nature Geoscience*, 9, 834-837.
- Ishibe, T., H. Tsuruoka, K. Satake and M. Nakatani, 2014, A Focal Mechanism Solution Catalog of Earthquakes in and around the Japanese Islands for 1985-1998, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 104, 1031-1036, doi: 10.1785/0120130278.
- Ishibe, T., K. Satake, S. Sakai, K. Shimazaki, H. Tsuruoka, Y. Yokota, S. Nakagawa, and N. Hirata, 2015, Correlation between Coulomb stress imparted by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and seismicity rate change in Kanto, Japan, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1093/gji/ggv001.
- Ishibe, T., Y. Ogata, H. Tsuruoka, K. Satake, 2017, Testing the Coulomb stress triggering hypothesis for three recent megathrust earthquakes, *Geoscience Letters*, 4:5, doi:10.1186/s40562-017-0070-y.
- 石辺岳男・橋間昭徳・松浦律子・津村建四朗, 2019, 東北地方太平洋沖地震の背弧側における地震活動度の変化について, CSEP-Japan (日本における地震活動に基づく地震発生予測検証実験) 研究集会, 2019年1月28-29日, 東京大学地震研究所, 東京都文京区.
- 石田亮壮, 2018, 南アフリカ金鉱山地域 M2~5.5 級の地震発生域でのコア変形法による応力測定, 立命館大学理工学研究科修士論文.
- Ishihara, M., Yoshii, M. Minami, N., Yasuoka Y., Tokonami, S., Nagahama, H., and Mukai, T., 2018, Airborne radon concentration measurements using gas-flow Ionization chambers and the effects of temperature changes. *Proceeding of the 19th Workshop on Environmental Radioactivity*, Bessho, K., Matsumura, H., Miura, T, Tagami, K., Takamiya, K., (Eds). (2018, May). Tsukuba, p. 288-293.
- 石村大輔・岡田真介・丹羽雄一・遠田晋次, 2015, 2014年11月22日長野県北部の地震(Mw6.2)によって出現した神城断層沿いの地表地震断層の分布と性状, *活断層研究*, 43, 95-107.
- Ishimura, D., S. Toda, S. Mukoyama, S. Homma, K. Yamaguchi, and N. Takahashi, 2019, Three-dimensional surface displacement and surface ruptures associated with the 2014 Mw6.2 Nagano earthquake using differential LiDAR, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, in press.
- Itaba, S., 2018, Rapid estimation of the moment magnitude of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0) from static strain changes, *Earth, Planets and Space*, 70,

- doi:10.1186/s40623-018-0894-5.
- Iwata, T., 2014, Decomposition of seasonality and long-term trend in seismological data: a Bayesian modelling of earthquake detection capability, *Australian & New Zealand Journal of Statistics*, 56, 201-215.
- 岩田貴樹, 2015, 地球潮汐と地震活動との相関を用いた地震活動予測, *統計数理*, 63, 129-144.
- Iwata, T., 2016, A variety of aftershock decays in the rate- and state-friction model due to the effect of secondary aftershocks: Implications derived from an analysis of real aftershock sequences, *Pure and Applied Geophysics*, 173, 21-33.
- Iwata, T., 2018, A Bayesian approach to estimating a spatial stress pattern from P wave first-motions, *J. Geophys. Res.*, 123, 4841-4858, doi:10.1002/2017JB015359.
- Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., and Yasuoka, Y., 2018, Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes, *Scientific Reports*, 8(1), 13028.
- 井筒 潤, 長尾年恭, 2016, 地震災害予測のためのb値の空間分布マッピングと時系列変化, *東海大学海洋 研究所研究報告*, 37, 21-28.
- Kame, K., K. Nagata, M. Nakatani and T. Kusakabe, 2014, Feasibility of acoustic monitoring of strength drop precursory to earthquake occurrence, *Earth Planets and Space*, 2014, 66:41, doi:10.1186/1880-5981-66-41.
- Kamogawa et al., 2018, Evaluation of the pre-seismic DEMETER's VLF intensity decrease identified by the functional principal component analysis, *The 3rd International Workshop of CSES Mission*, 16-18 Nov. 2018, Beijing, China.
- 鴨川仁, 山崎政彦, 日置幸介, 長尾年恭, 八木橋 宏之, 児玉哲哉, 2018, 超小型衛星群とグローバル地上局ネットワークによる地震発生予測, *宇宙ビジネスアイデアコンテスト (S-Booster) ファイナリスト*.
- 金木俊也・横山友輝・廣野哲朗・矢部康男・小笠原宏, 2018, M5.5 Orkney 地震の余震発生帯から回収された断層岩の鉱物学的特徴 (ICDP DSeis project), *日本地震学会*, S08-06, 郡山, 2018年10月10日.
- Kato, A., 2014, Slow Slip Transients Before the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Journal of Disaster Research*, 9, 311-316.
- Kato, A. and K. Obara, 2014, Step-like migration of early aftershocks following the 2007 Mw 6.7 Noto-Hanto earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL060427.
- Kato, A. T. Igarashi and K. Obara, 2014, Detection of a hidden Boso slow slip event immediately after the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL061053.
- Kato, A., J. Fukuda, T. Kumazawa and S. Nakagawa, 2016a, Accelerated nucleation of the 2014 Iquique, Chile Mw 8.2 Earthquake, *Scientific Reports*, 6, 24792, doi:10.1038/srep24792.
- Kato, A., J. Fukuda, S. Nakagawa and K. Obara, 2016b, Foreshock migration preceding

- the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2016GL070079.
- 加藤愛太郎, 2018, 間欠的な固着のはがれと大地震の発生, *パリテイ*, 33, 06, 48-51.
- Kato, A, 2019, The evolution of fault slip rate prior to earthquake: The role of slow and fast slip modes, *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, in press.
- Kato, A. and T. Ueda, 2019, Source fault model of the 2018 Mw 5.6 northern Osaka earthquake, Japan, inferred from the aftershock sequence, *Earth Planets Space*, 77, 11, <https://doi.org/10.1186/s40623-019-0>.
- Katsumata, K., 2015, A Long - Term Seismic Quiescence before the 2004 Sumatra (Mw 9.1) Earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 105:167-176; doi:10.1785/0120140116.
- Katsumata, K., 2016, Long-term seismic quiescences and great earthquakes in and around the Japan subduction zone between 1975 and 2012, *Pure and Applied Geophysics*, doi:0.1007/s00024-016-1415-8.
- 勝俣 啓・中谷 正生, 2018a, 静穏化による地震の長期予測の試行~千島・東北・伊豆小笠原沈み込み帯の場合, 地球惑星連合大会, SSS13-04, 幕張, May 24, 2018.
- 勝俣啓・中谷正生, 2018b, 静穏化による長期予測の試行~予測と検証, 日本地震学会秋季大会, 2018年10月10日, 郡山, S23-01, 2018.
- Katsuragi, H., K. Anki Reddy, and K. Endo, 2018, Shape dependence of resistance force exerted on an obstacle placed in a gravity-driven granular silo flow, *AICHE J.* 64, 3849-3856.
- Kawamura, H., Maho Yamamoto and Yushi Ueda, 2018a, Slow-slip phenomena represented by the one-dimensional Burridge-Knopoff model of earthquakes. *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 053001-(1-4).
- Kawamura, H., K. Yoshimura, and S. Kakui, 2018b, Nature of the high-speed rupture of the two-dimensional Burridge-Knopoff model of earthquakes. *Phil. Trans. R. Soc. A* 377 20170391.
- Kelley, M. C., W. E. Swartz, and K. Heki, 2017, Apparent ionospheric total electron content variations prior to major earthquakes due to electric fields created by tectonic stresses, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 122, 6689-6695, doi:10.1002/2016JA023601.
- 菊池秀乙, 山崎政彦, 鴨川仁, 宮崎康行, 2018, 地震先行現象検証衛星 PRELUDE の自動運用システムの研究開発, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3M14, 1-6.
- Kinoshita, C., and D. M. Saffer, 2018, In Situ Permeability and Scale Dependence of an Active Accretionary Prism Determined From Cross-Borehole Experiments, *Geophysical Research Letters*, 45, 6935-6943, doi:10.1029/2018gl078304.
- 北川有一・松本則夫, 2016, 井戸密閉化による地下水位の地殻ひずみ応答の改善-北勢観測点の場合-, 日本地震学会 2016 年秋季大会, S13-01.
- Kobayashi, Y., Yasuoka, Y., Omori, Y., Nagahama, H., Sanada, T., Muto, J., Suzuki, T., Homma, Y., Ihara, H., Kubota, K., and Mukai, T., 2015, Annual variation in

- the atmospheric radon concentration in Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 146, 110-118.
- 小林昭夫・弘瀬冬樹, 2016, 千葉県北部の地震活動と同期した非地震性すべり, *地震*, 69, 1-9.
- 児玉哲哉, 2018, 01新世紀地震フロンティア研究: 地上-衛星連携による地震先行現象の確立, *パリティ Vol. 33*(5).
- 小泉尚嗣・木下千裕, 2015, 2014年3月14日の伊予灘の地震(M6.2)に伴う道後温泉の水位変化, *東濃地震科学研究所報告*, 34, 45-52.
- 國友孝洋・山岡耕春・渡辺俊樹・吉田康宏・勝間田明男・生田領野・加藤愛太郎・飯高 隆・津村紀子・大久保慎人, 2014, 弾性波アクロスによる東海地域地殻のP波およびS波速度構造の推定, *地震*2, 67, 1-24.
- Kuwano, O., S. Yoshida, M. Nakatani, and M. Uyeshima, 2015, Origin of transient self-potential signals associated with very long period seismic pulses observed during the 2000 activity of Miyakejima volcano, *J. Geophys. Res.*, 120, 3544-3565, doi:10.1002/2014JB011740.
- Luo, J. and J. Zhuang, 2016, Three regimes of the distribution of the largest event in the critical ETAS model, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 106(3), 1364-1369. doi:10.1785/0120150324.
- 前田憲二・弘瀬冬樹, 2017, 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: 最近の活動事例による検証(3), *地震予知連絡会会報*, 98, 465-469.
- Matsumoto, N., and Shigematsu, N. 2018, In-situ permeability of fault zones estimated by hydraulic tests and continuous groundwater-pressure observations, *Earth, Planets Space*, 70, 13, doi:10.1186/s40623-017-0765-5.
- 宮岡一樹・木村久夫, 2016, ひずみ計によるスタッキング法を用いた長期的ゆっくりすべりの検出, *験震時報*, 79, 15-23.
- Mngadi, S. B., R. J. Durrheim, M. S. D. Manzi, H. Ogasawara, Y. Yabe, H. Yilmaz, N. Wechsler, G. Van aswegen, D. Roberts, A. A. K. Ward, M. Naoi, H. Moriya, M. Nakatani, A. Ishida, SATREPS Team, and ICDP Dseis Team, 2019, Integration of underground mapping, petrology, and high-resolution microseismicity analysis to characterise weak geotechnical zones in deep South African gold mines, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 114, 79-91, doi: 10.1016/j.ijrmms.2018.10.003.
- 森田 笙, 中谷 正生, 茂木 透, 2016, 簡単な客観手法で作成した予測マップによるVHF電波伝播異常と地震発生の相関, *JpGU meeting*, 2016年5月.
- 森田 笙・中谷 正生・日置 幸介・茂木 透, 2018, 島原におけるFM電波伝播異常の観測と2016年熊本地震前の異常について, *地球惑星連合大会*, MIS09-03, 幕張, May 22, 2018.
- Moriya, H., M. Naoi, M. Nakatani, G. van Aswegen, O. Murakami, T., Kgarume, A. K. Ward, R. J. Durrheim, J. Philipp, Y. Yabe, H. Kawakata, and H. Ogasawara, 2015, Delineation of large localized damage structures forming ahead of an active mining front by using advanced acoustic emission mapping techniques,

- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 79, 157-165, doi: 10.1016/j.ijrmms.2015.08.018.
- Motojima K. and Y. Ogura, 2017, Statistical consideration of relationship between occurrences of earthquake and fluctuations in the radio wave propagation, International Workshop on Earthquake Preparation Process 2017, Chiba, May 26-27, 2017.
- Nagao, T., Y. Orihara, and M. Kamogawa, 2014, Precursory Phenomena Possibly Related to the 2011M9.0 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Journal of Disaster Research, vol. 9, No. 3, 303-310.
- 長尾年恭・鴨川 仁・馬場久紀・成嶋友祐・高村直也・櫻田哲生・上原 宏, 2016, 東海大学方式VLF帯パルス電磁波観測装置の開発 -地震先行現象の存在証明にむけて-, 東海大学海洋研究所研究報告, 37, 29-36.
- Nagao, T., J. Izutsu, M. Kamogawa, Y. Orihara, S. Sugiura, H. Kondo, 2018, Electromagnetic observation addressed to the short-term earthquake prediction research in VLF band, Electro-Magnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes 2018 (EMSEV2018), Potenza, Italy, September 2018.
- 中谷正生, 2016, 巨大地震の前兆現象, シンポジウム「南海トラフ巨大地震の予測に向けた観測と研究」, 東京, 2016年9月30日.
- Nakatani, M., 2018a, Short-Term Precursors, Why do I care? (invited), International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27.
- Nakatani, M., 2018b, Statistical Evaluation of Precursory Phenomena ? A Review (invited), the 17th Japan-Taiwan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, Tsukuba, 4 September, 2018.
- 中谷正生, 2018c, 経験則から期待される大地震発生の確率: 相場のレビュー, 地震予知連学会会報, 99, 465-469.
- 中谷正生, 2019, 地震のメカニズム解明—本当に地震予知はナンセンス? あんた, 地震の何なのさ?—短期前兆のメタ理論, パリティ, Vol.34, No.2, 84-88.
- Naoui, M., M. Nakatani, T. Igarashi, K. Otsuki, Y. Yabe, T. Kgarume, O. Murakami, T. Masakale, L. Ribeiro, A. Ward, H. Moriya, H., Kawakata, S. Nakao, R. Durrheim, H. Ogasawara, 2015a, Unexpectedly frequent occurrence of very small repeating earthquakes ($-5.1 < M_w < -3.6$) in a South African gold mine: implications for monitoring intraplate faults, J. Geophys. Res., 120, 8478-8493, doi: 10.1002/2015JB012447.
- Naoui, M., M. Nakatani, K. Otsuki, Y. Yabe, T. Kgarume, O. Murakami, T. Masakale, L. Ribeiro, A.K. Ward, H. Moriya, H. Kawakata, R.J. Durrheim and H. Ogasawara, 2015b, Steady activity of microfractures on geological faults loaded by mining stress, Tectonophysics, 649, 100-114.
- Naoui, M., M. Nakatani, T. Kgarume, S. Khambule, T. Masakale, L. Ribeiro, J. Philipp, S. Horiuchi, K. Otsuki, K. Miyakawa, A. Watanabe, H. Moriya, O. Murakami, Y. Yabe,

- H. Kawakata, N. Yoshimitsu, A. Ward, R. Durrheim and H. Ogasawara, 2015c, Quasi-static slip patch growth to 20 m on a geological fault inferred from acoustic emissions in a South African gold mine, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2014JB011165.
- Naoi, M., M. Nakatani, H. Moriya, and Y. Yabe, 2016, Acoustic emission monitoring for mitigating seismic risks in deep gold mines in South Africa, *International Journal of the JSRM*, 12, 19-22.
- Nanjo, K. Z., J. Izutsu, Y. Orihara, N. Furuse, S. Togo, H. Nitta, T. Okada, R. Tanaka, M. Kamogawa and T. Nagao, 2016, Seismicity prior to the 2016 Kumamoto earthquakes, *Earth, Planets and Space*, 68:18, DOI:10.1186/s40623-016-0558-2.
- Nanjo, K. Z., and A. Yoshida, 2017, Anomalous decrease in relatively large shocks and increase in the p and b values preceding the April 16, 2016, M7.3 earthquake in Kumamoto, Japan, *Earth, Planets and Space*. 69:13, DOI: 10.1186/s40623-017-0598-2.
- 楠城一嘉, 2018, b値に基づく全地球規模の大地震発生予測のモデル, *地震予知連会会報*, 99, 459-462.
- Nanjo, K.Z. and A. Yoshida, 2018, A b map implying the first eastern rupture of the Nankai Trough earthquakes, *Nature Communications*, 9:1117, DOI:10.1038/s41467-018-03514-3.
- Nitta, H., S. Togo, T. Kodama and M. Kamogawa, 2016, Physical mechanism of pre-seismic VLF intensity decrease observed by DEMETER satellite, In *Proceedings of the CSES workshop, China, 23 August 2016*.
- 新田英智・東郷翔帆・Jean-Jacques Berthelier・児玉哲哉・長尾年恭・鴨川 仁, 2016, DEMETER衛星の連続 サンプリング VLF帯データを用いた地震先行電離圏擾乱の統計的研究, *大気電気学会第95回研究発表会*, 2017年1月17日.
- Nishikawa, T. and S. Ide, 2014, Earthquake size distribution in subduction zones linked to slab buoyancy, *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo2279.
- Nishikawa, T., and S. Ide, 2015, Background seismicity rate at subduction zones linked to slab-bending-related hydration, *Geophysical. Res. Lett.*, 42, 7081-7089, doi:10.1002/2015GL064578.
- Nishikawa, T., and S. Ide, 2017, Detection of earthquake swarms at subduction zones globally: Insights into tectonic controls on swarm activity, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 122(7), 5325-5343, doi:10.1002/2017JB014188.
- Nishikawa, T., and Ide, S., 2018, Recurring slow slip events and earthquake nucleation in the source region of the M 7 Ibaraki - Oki earthquakes revealed by earthquake swarm and foreshock activity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(9), 7950-7968.
- Ochi, T., 2015, Temporal change in plate coupling and long-term slow slip events in southwestern Japan, *Earth Planet Sci. Lett.* 431, 8-14, 118, 4847-4860, doi: 10.1016/j.epsl.2015.09.012.

- Ochi, T., and N. Takeda, 2018, Relation between the coupling and tremor rates in the transition zone around the Shikoku region, *Earth, Planets and Space*, 70, doi:10.1186/s40623-018-0883-8.
- Ogasawara, H., H. Kato, G. Hofmann, D. Roberts, P. Piper, T. Clements, A.K. Ward, Y. Yabe, H. Yilmaz, and R.J. Durrheim, 2014, BX CCBO in-situ stress measurements at earthquake prone areas in South African gold mines - a summary of mini-workshop on 13 Feb 2014, Proc. ARMA2014, Minneapolis, on CD-ROM, paper no. 14-7438.
- Ogasawara, H., R.J. Durrheim, Y. Yabe, T. Ito, G. van Aswegen, M. Grobbelaar, A. Funato, A. Ishida, H. Jnr, Ogasawara, S. Mngadi, M.S.D. Manzi, Z. Martin, A. Ward, P. Moyer, M. Boettcher, P. Dight, W. Ellsworth, B. Liebenberg, N. Wechsler, T. Onstott, N. Berset, and the DSeis Team, 2017, Drilling into seismogenic zones of M2.0-M5.5 earthquakes from deep South African gold mines (DSeis): establishment of research sites, Proc. Afrirock Symposium 2017 (ISRM), 30 September - 6 October 2017, Capetown, 237-248.
- Ogata, Y., K Katsura, H Tsuruoka and N Hirata, 2018, Exploring Magnitude Forecasting of the Next Earthquake, *Seismol. Res. Lett.*, 89, 4, 1298-1304, doi: 10.1785/0220180034.
- Okada, S., D. Ishimura, Y. Niwa, and S. Toda, 2015, The first surface-rupturing earthquake in 20 years on a HERP active fault is not 'characteristic:' The 2014 Mw=6.2 Nagano event along the northern Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, *Seismol. Res. Lett.*, 86, 1287-1300, doi: 10.1785/0220150052.
- Okuda, T., and Ide, S., 2018a, Streak and hierarchical structures of the Tohoku-Hokkaido subduction zone plate boundary. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 132.
- Okuda, T., and Ide, S., 2018b, Hierarchical rupture growth evidenced by the initial seismic waveforms. *Nature communications*, 9(1), 3714.
- Omi, T., Ogata, Y., Shiomi, K., Enescu, B., Sawazaki, K., and K. Aihara, 2016, Automatic aftershock forecasting: A test using real-time seismicity data in Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 10.1785/0120160100.
- Omi, T., Y. Ogata, K. Shiomi, B. Enescu, K. Sawazaki, and K. Aihara, 2019, Implementation of a real-time system for automatic aftershock forecasting in Japan, *Seismol. Res. Lett.* 90, 242-250.
- Omori, Y. and Nagahama, H., 2016, Radon as an indicator of nocturnal atmospheric stability: A simplified theoretical approach. *Boundary-Layer Meteorology*, 158, 351-359.
- Opris, A., B. Enescu, Y. Yagi and J. Zhuang, 2018, Triggering and decay characteristics of dynamically activated seismicity in Southwest Japan, *Geophys. J. Int.*, 212(2), 1010-1021, doi:10.1093/gji/ggx456.
- Orihara, Y., M. Kamogawa, and T. Nagao, 2014, Preseismic Changes of the Level and Temperature of Confined Groundwater related to the 2011 Tohoku Earthquake, *Scientific Reports*, doi:10.1038/srep06907.

- 織原義明・鴨川仁・野田洋一, 2014, 東北地方太平洋沖地震前 の漁獲異常に関する調査- 『三陸海岸大津波』との比較-, 地震2輯, 67(2), 81-85.
- 織原義明・野田洋一, 2015, 2011年東北地方太平洋沖地震前に発生したマス・ストランディング-鹿島灘における鯨類のストランディングと日本周辺の地震との関係-, 東海大学海洋研究所研究報告, 36, 39-46.
- 織原義明・長尾年恭, 2015, 『地震前兆現象を科学する』, 祥伝社新書, 226pp.
- 織原義明・鴨川 仁, 2016, 三陸地方における東北地方太平洋沖地震前の井戸水異常の調査 - 岩手県山田町から宮城県石巻市にかけて -, 地震2輯, 69, 31-34.
- 織原義明・鴨川 仁・長尾年恭, 2016, 熊本市が公開する地下水位データにみる2016年熊本地震の先行現象に 関する考察, 日本地震学会講演予稿集2016年度秋季大会, S14-11.
- Orihara, Y., M. Kamogawa, Y. Noda, and T. Nagao, 2018, Are deep-fish appearances an earthquake precursor?, EMSEV (Electro-Magnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes) 2018 International Workshop Abstracts, 203.
- Reverso, T., Marsan, D., Helmstetter, A., and B. Enescu, 2016, Background seismicity in Boso Penin- sula, Japan: Long-term acceleration, and relationship with slow slip events, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 5671-5679, doi:10.1002/2016GL0685.
- Roy, S. and T. Hatano, 2018, Creeplike behavior in athermal threshold dynamics: Effects of disorder and stress. *Phys. Rev. E* 97, 062149.
- Sarlis, N. V., E. S. Skordas, P. A. Varotsos, T. Nagao, M. Kamogawa, and S. Uyeda, 2015, Spatiotempo- ral variation of seismicity before major earthquakes in the Japanese area and their relation with the epicentral locations, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 112, 4, 986-989.
- Schorlemmer, D., N. Hirata, Y. Ishigaki, K. Doi, K. Z. Nanjo, H. Tsuruoka, T. Beutin, and F. Euchner, 2018a, Earthquake Detection Probabilities in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 108(2), 702-717, doi: <https://doi.org/10.1785/0120170-217>.
- Schorlemmer, D., M. J. Werner, W. Marzocchi, T. H. Jordan, Y. Ogata, D. D. Jackson, S. Mak, D., A. Rhoades, M. C. Gerstenberger, N. Hirata, M. Liukis,, P. J. M., A. Strader, M. Taroni, S. Wiemer, J. D. Zechar, and J. Zhuang, 2018b, The Collaboratory for the Study of Earthquake, Predictability: Achievements and Priorities, *Seism. Res. Letters* , 89, 4, 1305-1313.
- Shimojo, K., B. Enescu, Y. Yagi, and T. Takeda, 2014, Fluid-driven seismicity activation in northern Nagano region after the 2011 M9.0 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL061763.
- Shinoda, A., S. Fujiwara, H. Niiya, and H. Katsuragi, 2018, Void structure stability in wet granular matter and its application to crab burrows and cometary pits, *Sci. Rep.* 8, 15784.
- Sugan, M., A. Kato, H. Miyake, S. Nakagawa and A. Vuan, 2014, The preparatory phase of the 2009 Mw 6.3 L' Aquila earthquake by improving the detection capability of low-magnitude foreshocks, *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL061199.
- Suyehiro, K., S. Sacks, T. Takanami, D. Smith, P. Rydelek, 2014, Magnitude Dependent

- Seismic Quiescence of 2008 Wenchuan Earthquake, AGU fall meeting, S53D-4555, December, 2014.
- Suyehiro, K., S. Sacks, T. Takanami, D. Smith, P. Rydelek, and T. Hatano, 2015, Magnitude dependent seismic quiescence and following short-term precursors as dilatancy strengthening and breakdown before large earthquakes and their detection, IUGG General Assembly, Prague.
- Takizawa, S., H. Niiya, T. Tanabe, H. Nishimori, and H. Katsuragi, 2019, Impact-induced collapse of an inclined wet granular layer, *Physica D* 386-387, 8-13.
- Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018, Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog, *Earth, Planets and Space*, 70, 90.
- 田中昌之, 岡田正実, 内田直希, 2018, 繰り返し回数の少ない繰り返し地震系列に対する長期的地震発生確率予測の成績と検証, *地震*, 70, 195-213.
- Tanaka, A., Minami, N., Yasuoka, Y., Iimoto, T., Omori, Y., Nagahama, H., Muto, J., Mukai, T., 2017, Accurate measurement of indoor radon concentration using a low-volume radon monitor. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 177, 324-330, DOI: 10.1093/rpd/ncx050.
- 谷川廣祐, 本島邦行, 羽賀望, 2017, 見通し内VHF帯放送波の伝搬異常と地震及び地表面平均風速の統計的関連性, *J. of Atmos. Electr.*, Vol. 37, No. 1, pp.11-24.
- Toda, S., and R. S. Stein, 2018, Why aftershock duration matters for probabilistic seismic hazard assessment, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 108, 1414-1426.
- 遠田晋次, 2018, 2018年大阪府北部地震の周辺活断層と地震活動への影響, *地震ジャーナル*, 66, 9-21.
- 遠田晋次・石村大輔, 2019, 熊本地震など内陸大地震で見いだされた誘発性地表地震断層と短い活断層の評価, 第四紀研究, 印刷中.
- Togo S. and M. Kamogawa, 2016, Ionospheric earthquake precursors on satellite measurement: physical features and predictability, In Proceedings of the International Workshop Earthquake Precursor, Taiwan, 16 May 2016.
- 東京大学地震研究所, 2019, CSEP参加グループによる予測手法: 予測と実際の活動の比較検証(3), 第221回地震予知連絡会, 2018年11月30日.
- Tormann, T., B. Enescu, J. Woessner and S. Wiemer, 2015, Randomness of megathrust earthquakes implied by rapid stress recovery after the Japan earthquake, *Nature Geoscience*, 8, doi:10.1038/ngeo2343.
- Toyomoto, Y., Hironori Kawakata, Shiro Hirano, Issei Doi, 2016, Foreshock search over a long duration using a method of setting appropriate criteria, AGU Fall Meeting 2016, MR41B-2702.
- Tsuji, D. and H. Katsuragi, 2015, Temporal analysis of acoustic emission from a plunged granular bed, *Phys. Rev. E*, Vol. 92, 042201:1-10., DOI:10.1103/PhysRevE.92.042201.

- 辻村優志, 川方裕則, 福山英一, 平野史朗, 山下太, 徐世慶, 溝口一生, 滝沢茂, 2017, 大型岩石試料のスティック・スリップ試験中に発生した繰り返し地震的活動について, 日本地震学会 2017年度秋季大会, S08-26.
- Tsuruoka, H. and Y. Ogata, 2015, Development of Seismicity Analysis software: TSEIS - ETAS module implementation -, Abstract of the 9th International Workshop on Statistical Seismology (StatSei9) in Potsdam.
- Tsuruoka, H., 2017a, CSEP Japan results of 3-month and 1-year testing class, SCEC Annual Meeting 2017, PalmSprings.
- Tsuruoka, H., 2017b, CSEP-Japan results of 1-day testing class and development of Kanto 3D earthquake forecast model, SCEC Annual Meeting 2017, PalmSprings.
- 堤 浩之・遠田晋次・後藤秀昭・熊原康博・石村大輔・高橋直也・谷口 薫・小俣雅志・郡谷順英・五味雅宏・浅野公之・岩田知孝, 2018, 熊本県益城町寺中における2016年熊本地震断層のトレンチ調査, 活断層研究, 49, 31-39.
- Ueda, Y., S. Morimoto, S. Kakui, T. Yamamoto, and H. Kawamura, 2015, Dynamics of earthquake nucleation process represented by the Burridge-Knopoff model, European Physical Journal B., 88:235, 1-24.
- 梅田康弘・板場智史, 2018, 1944年東南海地震及び1946年南海地震時の海水位変化を利用した紀伊半島沿岸部における上下変動時系列の推定, 地質調査研究報告, 69, 81-89.
- Vuan, A., M. Sagan, G. Amati and A. Kato, 2018, Improving the Detection of Low-Magnitude Seismicity Preceding the Mw=6.3 L' Aquila Earthquake: Development of a Scalable Code Based on the Cross-Correlation of Template Earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 108, 471-480, doi: 10.1785/0120170106.
- Wakabayashi, A., Yasuoka, Y., Janik, M., Nagahama, H., Fukuhori, N., Mori, Y., Arai, Y., Fujii, S., and Mukai, T., 2019, Derivation and validity evaluation of calibration factors for activated-charcoal radon collectors, Radioisotopes, in press.
- Wang, Y., T. Wang, and J. Zhuang, 2018a, Modelling continuous time series with many zeros and an application to earthquakes, Environmetrics, 29, 4, <https://doi.org/10.1002/env.2500>.
- Wang, T., Zhuang, J., Buckby, J., Obara, K. and Tsuruoka, H., 2018b, Identifying the recurrence patterns of non-volcanic tremors using a 2D hidden Markov model with extra zeros, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol.123, Issue8, pp.6802-6825, doi:10.1029/2017JB015360.
- Yabe, Y., M. Nakatani, M. Naoi, J. Philipp, C. Janssen, T. Watanabe, T. Katsura, H. Kawakata, D. Georg, and H. Ogasawara, 2015, Nucleation process of an M2 earthquake in a deep gold mine in South Africa inferred from on-fault foreshock activity, J. Geophys. Res., 120, 5574-5594, doi:10.1002/2014JB011680.
- Yabe, S., and S. Ide, 2017, Slip-behavior transitions of a heterogeneous linear fault, J. Geophys. Res. Solid Earth, 121, doi:10.1002/2016JB013132.
- Yabe, S., and Ide, S., 2018, Variations in precursory slip behavior resulting from

- frictional heterogeneity. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(1), 43.
- 山形直毅, 直井誠, 中谷正生, 森谷祐一, 大槻憲四郎, Thabang Kgarume, Joachim Philipp, 村上理, Thabang Masakale, Luiz Ribeiro, 矢部康男, 川方裕則, Anthony Ward, 石田毅, Ray Durrheim, 小笠原宏, 2016, 南アフリカ Cooke 4 金鉱山地下 1km の切羽沿いに密集する微小破壊の空間分布詳細構造, 日本地震学会秋季大会, 名古屋国際会議場, 2016年10月6日.
- Yamaguchi, J., M. Naoi, M. Nakatani, H. Moriya, T. Igarashi, O. Murakami, Y. Yabe, R. Durrheim, and H. Ogasawara, 2018, Emergence and disappearance of very small repeating earthquakes on a geological fault in a gold mine in South Africa, *Tectonophysics*, 747-748, 318-326. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.014>.
- Yamaguchi, T., Y. Himeno and Y. Sawae, 2015a, Collective behavior of multiple asperities in sliding friction between polymer gels, *Proceedings of International Tribology Conference Tokyo*.
- Yamaguchi, T., Y. Himeno, Y. Sawae, 2015b, Stick-slip motions of polymer gels having multiple artificial asperities, *Proceedings of Malaysian International Tribology Conference 2015*, 78-79.
- Yamaguchi, T., Y. Sawae, S. M. Rubinstein, 2016, Effects of loading angles on stick-slip dynamics of soft sliders, *Extreme Mechanics Letters*, 9, 331-335.
- Yamashita, F., E. Fukuyama, S. Xu, H. Kawakata, K. Mizoguchi, and S. Takizawa, 2017, Two types of foreshock activities observed on meter-scale laboratory faults: Slow-slip-driven and cascade-up, *AGU Fall Meeting 2017*, S34B-07.
- 吉川澄夫, 2015, 地震活動静穏化に基づく予測能力評価, *地震予知連絡会会報*, 93, 410-412.
- Yoshimitsu, N., H. Kawakata, N. Takahashi, 2014, Magnitude -7 level earthquakes: A new lower limit of self-similarity in seismic scaling relationships, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 10.1002/2014GL060306.
- 庄建倉, 尾形良彦, 2015, 地震予測の評価法について, *統計数理*, 63, 29-44.
- Zhuang, J., 2015, Weighted likelihood estimators for point processes, *Spatial Statistics*, 14, 166-178, doi: 10.1016/j.spasta.2015.07.009.
- Zhuang, J., D. Wang, and M. Matsu'ura, 2016, Features of the earthquake source process simulated by Vere-Jones' branching crack model. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Volume 106. doi:10.1785/0120150337.
- Zhuang, J., Y. Ogata, and T. Wang, 2017, Data completeness of the Kumamoto earthquake sequence in the JMA catalog and its influence on the estimation of the ETAS parameters. *Accepted by Earth, Planets and Space*.
- Zhuang, J., M. Murru, G. Falcone, and Y. Guo, 2018, An extensive study of clustering features of seismicity in Italy from 2005 to 2016, *Geophysical Journal International*, 216, 302-318, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy428>.
- Zhuang, J., T. Wang, and K. Kiyosugi, 2019, Detection and replenishment of missing data in marked point processes. *Statistica Sinica*. In press. doi:10.5705/ss.202017.0403.

2. 平成 30 年度の成果

大項目 2. 地震・火山現象の予測のための研究

中項目 (2) モニタリングによる地震活動予測

活断層周辺の応力状態を推定する手法として、P波初動（押し引き）をデータとした応力空間パターン推定手法（いわゆる「応力インバージョン」、Iwata (2018)）の開発を引き続き実施した。この手法は「断層面の向きは一様ランダム」という仮定のもとに、断層面の向き自体を求めることなしに、直接応力場の推定を行うものである。今年度は、昨年度開発した応力空間パターン推定手法を拡張し、推定した応力空間パターンにP波初動データを組み合わせることでメカニズム解推定も行えるようにした（図1）。人工データを用いた検証では、P波初動データのみ用いる場合に比べ、応力場の情報も取り入れた本手法の方が、より真のメカニズム解に近くかつ推定精度も高い（推定のバラツキが小さい）という結果が得られた（図2）。応力場の情報が起こりえるメカニズム解に制約をかけるため、より尤もらしい解を選びやすくなるためである（東北大学 [課題番号：1206]）。

大深度での採掘が行われている南アフリカの鉱山では、実際に地震を起こした断層周辺の応力場を直接測定することが可能である。採掘域前方に、微小破壊の巨視的な面上クラスタが形成されることが見い出された(直井, 2018)Cooke4鉱山では、微小破壊データ・採掘の亀裂マッピング・岩石力学的室内実験・岩石鉱物学的観察を統合した解析によって、クラスタと採掘空洞の関係の非対称性等を解釈することができた(Mngadi et al., 2019, 東北大学[課題番号:1206], 立命館大学[課題番号:2401])。また、ICDPのDSeis計画(Ogasawara et al., 2019, 立命館大学 [課題番号：2401])においては、平成26年8月に発生したM5.5震源断層(地下3.5-7 km, 図3)の上端を貫通する掘削(Hole B,C)によって断層物質を回収し、滑り強化性を持つTalcやBiotiteが確認され、また、活動が新しいことを示唆する非晶質も確認された(金木・他, 2018)。また、前年度に掘削が完了したHole Aでは、天水とは起源が異なる、塩分がほとんど飽和した10MPaの水や、非生物起源の岩石と水の反応を起源とするガスが検出され、(Rusley et al., 2018; Wiersberg et al., 2019),またコア試料の力学解析によって余震域上端にいたる応力場の空間変化の特徴をいくつか見出すことに成功した(図4, 東北大学流体研究所 [課題番号：2948])。

地域の応力载荷速度と余震継続時間が反比例するべきことが理論的に指摘されている(Dieterich, 1994)。この指摘を検証するために、東北地方太平洋沖地震による広域余震活動と東北地方での本震一余震活動8ケースを大森一字津則（一部ETASモデル）によって解析した(Toda and Stein, 2018, 東北大学 [課題番号：1206])。その結果、余震継続時間がマグニチュードに依存しないこと、余震継続時間と活断層（一部プレート境界）の変位速度に負の相関があること、余震継続時間と常時地震活動に負の相関があることを見いだした(図5)。

余震活動など活発な地震活動中には、大量の地震が同時に発生する。そのため、複数の地震の波形が同時刻に重なって観測点に到達し、地震の欠測が顕著となる。この問題を解決するには、再決定されたテンプレート地震の波形を用いて連続波形記録から類似のイベ

ントを検出する手法 (Matched filter technique) が有効である。今年度も、2013年栃木県北部地震の前震活動、2018年大阪府北部地震、2019年熊本地方の地震の余震活動に関して、相対走時差データに基づく震源再決定・テンプレートマッチング解析等を実施した (東北大学 [課題番号: 1206])。例えば、大阪府北部地震の結果 (図6, Kato and Ueda, 2019) からは、北北西 - 南南東走向の東側傾斜 (約45度) の逆断層が最初にずれ、約0.3秒後に東北東 - 西南西走向の高角傾斜の横ずれ断層に破壊が伝播し、その後は同時に断層運動が起きていたことが示された。これらの断層面と上町断層帯の深部延長との詳細な関係は不明ではあるが、大阪府北部地震が上町断層帯などの東側傾斜の逆断層に与える応力変化を計算したところ、断層運動を促進する方向に約0.1MPaの応力変化が生じたことがわかった (遠田, 2018; Kato and Ueda, 2019, 東北大学 [課題番号: 1206])。また、震源域の北部延長では、地震活動が遅れて活発化し、その領域の背景地震活動度は時間とともに徐々に増加する傾向を示した。このことは、本震によって震源域の北部延長 (地殻内) で非地震的な変形が引き起こされた結果と解釈される。本研究により、水平圧縮応力場が卓越する近畿圏においては、逆断層と横ずれ断層が同時に活動することで1つの地震になる場合があることが明示された。つまり、逆断層と横ずれ断層の活断層が共存する近畿圏では、地震ハザード評価において両断層の連鎖的破壊を考慮することが重要である。地震本部が実施している現状の長期評価においてこの点は含まれておらず、少なくとも近畿圏においては逆断層と横ずれ断層の活断層の連鎖的破壊を考慮することが今後必要である (東北大学 [課題番号: 1206])。

地震活動の新たなリアルタイムモニタリングと手法として、自動震源決定手法 (PF法) によって得られた結果を活用し、b値のリアルタイム推定手法を開発した。これを平成28年 (2016年) 熊本地震や2016年10月21日の鳥取県中部の地震に適用し (廣田・溜渕, 2018), b値の時空間分布を推定した。その結果、熊本地震においては、4月14日M6.5の地震発生後にb値が低下したことを明らかにした (気象庁 [課題番号: 7006])。

全国規模での放射線管理施設のモニタリングネットワークの構築により推進している大気中ラドン濃度について、活用できるデータを拡充する観点から、様々なタイプの測定器の感度とデータ補正法を検討した (Higuchi et al., 2019; Wakabayashi et al., 2019; Ishihara et al., 2018, 東北大学 [課題番号: 1207])。

水文学的手法による断層モニタリングにおいて、透水係数のスケール依存性は重要な課題である。南海トラフ地震発生帯掘削計画の一環として熊野灘沖合に設置された長期孔内観測システム (LTBMS) の水圧計が周辺の掘削作業時に伴って大きく変化していることを受け、クロスホール透水試験に見立て、原位置透水係数の推定を行い、先行研究の室内実験や数値シミュレーションの結果と比較することで、スケールが大きくなるほど断層やクラックの数が増え、それらが連結することでより水が流れやすくなることを示唆する結果を得た (図7, Kinoshita and Saffer, 2018, 産業技術総合研究所 [課題番号: 5007])。

地殻変動のモニタリングデータは、断層滑りの時空間履歴を計算・予測する物理モデルとあわせて地震発生の予測に使うことが原理的に可能であり、ゆっくりすべりイベント (SSE) などの非地震性すべりのモニターを高度化する努力が行なわれている。長期的な地殻変動モニタリングの新手法として、SAR衛星ALOS-1のデータを用いた時系列解析から、準東西と準上下方向の変位成分を分解して得る2.5次元解析を開発した (図8, 気象庁 [課題番

号：7006])。固着率の正確な時空間分布をモニタする助けになる。

リアルタイムで南海トラフ周辺地域の短期的ゆっくりすべり(SSE)を解析するため、産総研と防災科研および気象庁との共同研究により、3機関のひずみ・地下水・傾斜データをリアルタイムで共有して自動解析するシステムの運用を継続した。2017年11月-2018年10月の間には、35の短期的SSEの断層モデルを決定した(落・他, 2018, 2019, 産業技術総合研究所 [課題番号：5007])。四国地方でプレート間の固着速度と深部低周波微動の発生レートとの間に時間的相関のある場所が見つかり、相関のよい場所では、微動発生レートがゼロになるときには固着速度がプレート収束速度に近くなることが期待されることがわかった(Ochi and Takeda, 2018, 産業技術総合研究所 [課題番号：5007])。また、ボアホールひずみ計を用いて巨大地震のモーメントマグニチュードを即時推定する手法を開発した。水平ひずみ4成分以上があれば、M9クラスの東北地方太平洋沖地震本震のほか、同地震の最大余震、近年発生した内陸地震でもMwを推定可能であることを示した(図9, Itaba, 2018, 産業技術総合研究所 [課題番号：5007])。また、GNSSによる長期的スロースリップの客観検知法を用いて、2017年から2018年にかけて発生した志摩半島付近の小規模な長期的スロースリップを検出し、すべり分布(Mw6.5相当)を推定した(気象庁 [課題番号：7006])。また、GNSS日値を用いた全国基線長変化について、日本海側の観測点を領域固定して、太平洋側の観測点のプレート沈み込み方向の位置変化を見るように改良した(気象研究所, 2018a, 2019a, 気象庁 [課題番号：7006])。一方で、DONET2データの解析では、2018年3月から8月にかけて、断続的に四国地方南東沖から紀伊半島南方沖で浅部低周波微動活動が活発なことを示した(気象庁 [課題番号：7006])。

ゆっくり滑り・微動・高速破壊の関係を考察するために、透明なゲルシートを使った摩擦実験において、画像相関法を用いて、ゆっくりすべりから高速破壊に至るプロセスを詳細に調べ、ゆっくりすべりと微動が同期して発生することで、すべりが共振して加速する様子が捉えられ(図10)、また、ゆっくりすべりの継続時間が系の駆動速度とべき的な関係をもつことが見い出された(東京大学地震研究所 [課題番号：1512])。

真にプロスペクティブな地震の確率予測検証実験を進めているCSEP(Schorlemmer et al., 2018a)においては、今年度も多くのモデルの検証実験を行った。予測と検証の繰り返し経験が蓄積したので、Relative Intensityモデルを例にとり、学習期間と予測パフォーマンスの関係を事後的に調べ、12ヶ月程度でパフォーマンスが頭打ちになることが明らかとなった(図11)。また予測のターゲット期間が長くなるほどそのパフォーマンスが落ちることもわかった(東京大学地震研究所 [課題番号：1511])。

現在の長期予測の基本となっている、地震の繰り返し性による可予測性の検証として、繰り返し中規模地震の予測実験を継続している。相関係数とコヒーレンスを用いて2018年2月から2019年1月までに10個の繰り返し地震の発生を確認し、2018年2月1日にベイズ統計対数正規分布モデルを用いて発生確率を予測し、指数分布モデルを用いる予測よりも良い成績であることが確認された(田中・他, 2018)。これは、2017年までの79系列の相似地震で見い出された傾向と同じである(気象庁 [課題番号：7006])。

中項目(3) 先行現象に基づく地震活動予測

地震活動の客観的な特徴抽出を高度化するため、自動処理の改良によって地震数が増加

した2016年4月以降の一元化カタログ，及び1997年10月以降の一元化震源カタログに対して最近傍法による客観的かつ自動的なクラスタリング処理を行い，前震，本震，余震の分類を行った。その結果，前震のb値がわずかに小さいこと，前震の発生率が広いM範囲で概ね30～40%程度であること，最大前震と本震の関係はM，時間，空間においてべき乗則に従うこと，といった特徴を明らかにした(Tamaribuchi et al., 2018, 気象庁 [課題番号: 7006]，東北大学 [課題番号: 1206])。

このように，前震活動という短期的先行現象の存在は統計的に非常に明らかで，高い予測ゲインをもたらす(中谷, 2018, 東海大学 [課題番号: 2501])が，必ずしも直前の準静的な準備過程から派生したのではなく，前震活動自体が本震を余震的に誘発することによって前兆として作用したと見ることも可能である(e.g., Helmstetter et al., 2013)。イタリアの地震活動をETASモデルで解析し(Zhuang et al., 2018, 東北大学 [課題番号: 1206])，M2.9以上の地震で約61%がトリガー型地震であり，そのうち1/4が5つの大地震によって直接誘発された地震であることがわかった。また，2005年～2016年に発生した6つの大地震のなかでも，5つは誘発性であり，イタリアでは前震現象が顕著である。統計的徐群法を用いてイタリア全土を16区域に分けて解析したところ，常時地震活動自体がこれらの主要地震に影響を受けており，それぞれ地震活動のフェーズが異なっていることがわかった。6つの大地震の震源断層上では，直接的な余震はアスペリティ周辺に発生し，余震域と本震破壊域が相補的である(Zhuang et al., 2018, 東北大学 [課題番号: 1206])。

断層の破壊エネルギーの空間分布における階層的構造は，地震の可予測性に対して重要な原理的制約となる。釧路沖，那珂沖のM5程度の繰り返し地震グループについて詳細な震源すべり分布を求め，これらの地域ではM5，M4，M3程度の階層的な構造の存在が示唆された(Okuda and Ide, 2018a, 東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])。さらに，この研究に異なる規模の地震でも地震の始まりが同じ例を発見した(Okuda and Ide, 2018b, 東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])。これは階層性を強く示唆する事象である。一方で，茨城沖の群発地震活動の統計的モデルを用いた分析を進め，茨城沖では群発地震活動がM7級の地震になる場合(前震的活動)とならない場合があるが，前震的な活動は，それ以外の群発地震活動より活動度が高い傾向にあり，予測能力を持つ(Nishikawa and Ide, 2018, 東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])ことが示唆された。

一方で，カリフォルニア内陸地震，日本の内陸・海域，台湾の地震カタログで前震活動空間密度を調べ，Lippiello et al. (2012)の指摘した通り，前震活動空間分布のピークを示す領域(これは地震準備過程の領域および余震活動領域を示す)は，余震活動のそれと等しく，本震マグニチュード依存性があることがわかった(図12)。これは，地震は発生する前に最終的な破壊領域，つまりマグニチュードは事前におおよそ決定しているという解釈を支持する結果である(東京大学地震研究所 [課題番号: 2901])。

前震の中でも，本震の破壊開始点ごく近傍で起きるリピーター的な極微小前震(Bouchon et al., 2011)は，破壊の直接的な準備過程の頭れであると期待されている。このような前震活動が確認された2011年長野県中部の地殻内地震(Mj5.4)の前震活動を例にとり，客観的な指標に基づくイベント検出方法を開発した。長期に渡る連続波形とテンプレートとの相互相関の分布を分析し，AICによる恣意性のない検出基準の設定法を提案することができた。気象庁カタログに記載済みの前震は本震13時間前からに限定されていたが，以上の新手

法を基に、本震から遡ること2年間の地震活動を評価してみても、新たに見つかった地震は、本震の2ヶ月前に1つと、3～4日前にまとめて3つのみであった。このことは、前震活動が定常的な微小地震の巨大化・頻発化と呼べるものではなく、過去2年間に殆ど例のなかったイベント群の発露であったことを示している (Hirano et al., 2018a, b, 立命館大学 [課題番号: 2402])。また、前震発生プロセスのモデル化となる不均質摩擦すべりモデルを提案した (Yabe and Ide, 2018, 東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])。

地震活動の複雑さの背後にある物理メカニズムを考察するために、岩石破壊の離散モデル (ファイバーバンドルモデル) の解析と数値実験を行った (Roy and Hatano, 2018, 東京大学地震研究所 [課題番号: 1512])。このモデルはレオロジー的仮定を一切含まないが、構成要素の微小破壊に伴う応力再配分によりクリープ破壊的挙動が再現されることを示し、そのメカニズムがサドルノード分岐であることを示した。応力をステップ関数的に載荷した際の緩和挙動は大森則に従い、系が完全に破壊される直前には逆大森則に従って破壊が加速することを発見した。さらに、大森則における c 値の決まり方に注目して解析を行い、 c 値が応力について弱い正の依存性をもつこと、および、系の不均質性が増すと c 値は減少することを示した。特に後者は「複雑な断層形状ほど小さい c 値をもつ」ことを示唆する。

また、粉体層の複雑な挙動についても理解が進んだ (東京大学地震研究所 [課題番号: 1512])。粉体層に埋められた棒を引き抜く実験で (図13) は、引き抜き時のせん断変形に伴って粉体層が固化することで急激に摩擦抵抗が増大することを明らかにし (Furuta et al., 2019), この挙動を実験と数値計算の双方で確認した。次に、凝着力を持つ湿った粉体層の傾斜地に固体弾を衝突させ (Takizawa et al., 2019), 流動化による雪崩の発生条件、および粉体層内圧力の異方的に伝播・減衰過程を解明した。同様に、固液混合サスペンションに固体弾を衝突させた際の過渡レオロジー特性の計測手法を開発し、固体の衝突とともにサスペンションが瞬時に固化する様子を測定・解析した。その他、凝着粉体層内の空隙構造の強度 (Shinoda et al., 2018) や、粉体流と障害物形状の関係 (Katsuragi et al., 2018) についても実験的關係が得られた。これらの複雑な過程が関連しながら天然の断層では滑り状態などが決定されると考えられ、本実験はそれらの基礎過程に関する実験的研究と言える。

地震活動の静穏化は、代表的な中期的先行現象と目され、実際ほとんどの大地震の前に静穏化が見つかることが報告されている (e. g., Katsumata, 2016)。しかし、静穏化しても大地震が起きないことも多いため、確率ゲインと p 値の算出によって、先行性の有意性の検証を進めてきた。特に本年度は、予測アルゴリズムをチューニングする学習期間と、予測の成績を評価する評価期間を別々にする試みを行った (図14, 勝俣・中谷, 2018b, 東北大学 [課題番号: 1206], 東海大学 [課題番号: 2501])。1985年から2015年までの千島から伊豆小笠原にいたる海溝沿いの $M_w7.5$ 以上、80km以浅の9個を予測対象として実験したところ、全期間のデータでチューニングした場合は、確率ゲイン=4.1, p 値=0.24%であったのに対して、前半を学習期間、後半を評価期間とすると確率ゲイン=2.1, p 値=12%, 逆にした場合は、確率ゲイン=2.8, p 値=25%, となった。クロスバリデーションにおいては p 値が10%を超えてしまい、統計的有意性は強くないが、それでも、ゲインは1を超えており、また、予測に用いるパラメタの最適値は、学習期間にかかわらず似通ったものが得られたので、検証例数が増えて検定力が増せば、有意性が示される可能性は高いだろう。

また、新たな静穏化事例として、気象庁一元化震源カタログを用い、2011年東北地方太平洋沖地震後に日本海東縁部（秋田県沖～新潟県沖）において、顕著な地震活動静穏化が発生していることを見いだした(石辺・他, 2019)。地震発生率がある時刻（地震）を境にして変化したとするモデルと、解析期間中に一定としたモデルの赤池情報基準（AIC）を比較すると、そのAIC差は数十に及び、統計的に有意であることが示された。この静穏化は解析に用いる下限マグニチュードに依存せず、検出率の一時的な低下によるみかけ静穏化ではないと考えられる。静穏化領域では、東北地方太平洋沖地震前には東西圧縮場であり、逆断層型地震が卓越していたが、本震ならびにその余効変動（余効すべり・粘弾性緩和による応力再分配）によって東西引張の応力変化を受けており、応力変化と地震活動度の変化とは調和的である（東北大学 [課題番号：1206]）。

東北地方太平洋沖地震の前に観測されたGNSS-TECの異常がどの程度小さな地震まで検出できるかについては、昨年度にM7クラスでも条件によっては検出できるとの報告がある（He and Heki, 2017, JGR）。今年度はこの現象がはたしてより小さな地震を用いて統計的にも確認できるか一つの検証作業を実施した。この研究のモチベーションは、フランスが2004年に打ち上げたDEMETER衛星のデータ解析で唯一強い統計的有意性が得られた地震発生直前のVLF帯電磁波の吸収という現象が、下部電離層の電子密度が増加していたという事で説明する事ができる（Kamogawa et al., 2018a,b, 東海大学 [課題番号：2501]）ことにある。今回は、GEONETのデータについて、Nemec et al. (2008)がDEMETER衛星の解析のために用いた手法と類似した手法を用いて1997年以降、東北地方太平洋沖地震までに陸域近傍で発生したM5以上の地震（279個）を対象として（1つの地震に対して地震発生時刻に震央に近い6個のSIP（Sub-Ionospheric Point）を追跡したところ、地震発生の数時間前にTECがわずかに増加する傾向がある可能性が示された（図15, 東海大学[課題番号：2501]）。一方で、Nemec et al. (2008)が重ね合わせ解析で示していた地震直前DEMETER衛星のVLF帯電磁波の強度減少（Nemec et al. 2008）について、高度なデータ処理手法を導入して個別軌道での解析を試み（図16）、関数主成分分析の第3主成分のスコアが有効であることを見出した。この解析では、電磁波強度が減少を示す事例は、先行現象の条件を満たす全軌道に対してほぼ1割であった（Kamogawa et al., 2018c, 東京学芸大学 [課題番号：2501]）。また、DEMETERと同様以上の精度でのVLF帯電磁波強度の観測を、大規模かつ圧倒的に安価に行うため、10kg程度の6U-CubeSAT（図17）にのせられる計測器の実現性を確認するためのブレッダボードモデルの製作を行った（児玉, 2018; 菊地・他, 2018; 鴨川・他, 2018, JAXA [課題番号：2901]）。

VHF帯電磁波見通し外伝播異常に関しては、これまで異常を検出する閾値を、全観測期間にわたるデータに対して同じにしていた。しかしその場合、長い期間にわたるデータでは強度や変動が大きい期間や小さい期間があり、異常を判定したい時点での傾向を上手く反映できず、その結果、全体と比較して強度が小さい期間のデータの場合に、本来異常であるべきデータを検出できなかつたり、またその逆に変動が大きいときは余分に異常を検出していたりという問題が発生して、そのことが結果に影響を与えていたことが考えられる。そこで、短周期のトレンドを上手に反映できるよう、またリアルタイムでの即時検出に応用できるようにその時点での異常検出基準を、その時点から過去30日のデータを使って算出し、異常判定を実施した。また、その地点から過去x時間を振り返り、データ中y%以上

異常が検出されている場合にL日間継続して警報を出すことにした。x, y, Lをチューニングすることによって、予測性能が向上し、確率ゲイン9.6, p値1.8%となった(図18, 東海大学[課題番号: 2501])。

VLF帯パルス電磁波は、中日本5点で観測点を続けている。今年度は観測期間中かつ観測ネットワーク内で発生した最大の内陸地震であった2017年6月25日の長野県西部の地震(M5.6)の2日前に観測された電磁パルスについて詳細な解析を実施した。今年度はARとICAを用いた電磁波の到達時間決定手法をルーチンで適用できる所まで開発を行った。今回はこのシステムを用いて波形を詳しくチェックしてみると、7個のうちの2個は極めて波源が良く求まり(図19)震源から10kmの地点であった。さらに観測された波形も極めてよく似ていた。図20は6月23日の3時33分42.022秒に観測された波形である。この時は、4つの観測点(学芸大, 信州大, 東海大, 群馬大)が稼働していた(長尾・他, 2018, 東海大学[課題番号: 2501])。

大気中ラドン濃度変動に関して、全国25の放射線管理施設からデータを得るネットワークができており、順次解析を進めている。今年度は、信州大学医学部のデータ(図21a)から2014年11月22日に発生した長野県神城断層地震前、鳥取大学医学部のデータ(図21b)から2016年10月21日に発生した鳥取県中部地震前、大阪薬科大学のデータ(図22)から2018年(平成30年)6月18日に発生した大阪府北部地震前後に、異常な変動を見出した。また、顕著な地震と関連して、定常的な変動が変化した例を見出した。神戸薬科大学のデータの潮汐分潮解析では、1984-1988年では認められなかったK1分潮に対する変化が兵庫県南部地震前の1990年-1994年の期間では認められた。また、札幌医科大学データの季節変動の振幅が東北地方太平洋沖地震を境に大きくなった(図23)ことが見い出された(東北大学[課題番号: 1207])。

東北地方太平洋沖では、過去3回の巨大地震前に、漁獲量の異常が報告されている。漁獲量異常が地震に先行する傾向があるかを調べるためにデータ収集を行い、1973年1月から35年分の宮城県内の漁港別・魚種別・月別漁獲量のデジタル化作業がほぼ完了した。また、地震の前兆ではないかとマスコミ等で話題にされることの多い、深海魚の出現について、前年度作成した深海魚出現カタログから新聞等で地震との関連性が指摘されているリュウグウノツカイやサケガシラなど8種を抜き出して地震との関連を調べた。1928年11月26日から2011年3月11日までで、深海魚出現数は計336件あるが、深海魚出現日から30日後までに出現地点から半径100km以内で発生したマグニチュード(M)6.0以上、深さ100km以浅の地震が起きたのは、2007年6月19日新潟県柏崎市のサケガシラと7月16日新潟中越沖地震(M6.8)のみであった(Orihara et al., 2018)。さらに、鯨類ストランディングと地震との関係について、日本鯨類研究所が公開するストランディングレコードを用いて全国規模で検証を行った(織原ら, 2018)。日本の海岸で発生するストランディングの数は、全国から報告が集まるようになった近年では年間200~250件になる。一方、マス・ストランディング(集団座礁: 同時に2頭以上が座礁)は年間数回程度で1923年まで遡ることができる。東北地方太平洋沖地震前にもみられたマス・ストランディングに絞って検証した。対象となるマス・ストランディングは1923年から東北地方太平洋沖地震前まで48事例あり、半径200km以内で30日後までにM6.0以上(深さ100km以浅)の地震が発生したのは、2002年5月21日沖縄県石垣港ユメゴンドウ2頭と5月29日石垣島西方沖の地震(M6.1)、2005年7月

23日静岡県沼津市コブハクジラ 2 頭と千葉県北西部の地震 (M6.0) の 2 事例だけであった。なお、2011年東北地方太平洋沖地震前にみられた茨城県でのカズハゴンドウ54頭のマス・ストランディングは、本震と前震いずれの震央からも300km以上離れていたのが対象外となる。また、茨城県と千葉県では、2011年3月4日以前にもカズハゴンドウのマス・ストランディングが6回発生しており、しかも、2011年3月4日より群頭数が多い事例が4回あるが、その後に東北地方太平洋沖地震よりも大きな地震は発生していない。また、他の10頭以上のマス・ストランディングについても、その後にM6.0以上の地震を伴っていない (東海大学 [課題番号: 2901])。

成果リスト (平成 30 年度用)

- Chen, S., J. Zhuang, X. Li, H. Lu, and W. Xu, 2018, Bayesian approach for network adjustment for gravity survey campaign: methodology and model test, *J. Geodesy*, doi:10.1007/s00190-018-1190-7.
- Fukushima, Y., S. Toda, S. Miura, D. Ishimura, J. Fukuda, T. Demachi, and K. Tachibana, 2018, Extremely early recurrence of intraplate fault rupture following the Tohoku-Oki earthquake, *Nature Geoscience*, doi:10.1038/s41561-018-0201-x.
- Furuta, T., S. Kumar, K. Anki Reddy, H. Niiya, and H. Katsuragi, 2019, Packing-dependent granular friction exerted on a rod withdrawn from a granular layer: the role of shear jamming, *New J. Phys.* accepted.
- Gulia, L., A. P. Rinaldi, T. Tormann, G. Vannucci, B. Enescu, and S. Wiemer, 2018, The effect of a mainshock on the size distribution of the aftershocks, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2018GL080619.
- Guo, Y., J. Zhuang, and N. Hirata, 2018, Modeling and forecasting 3D-hypocenter seismicity in the Kanto region, *Geophys. J. Int.*, 214, 520-530, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy154>.
- Han, P., K. Hattori, and J. Zhuang, 2018, On the precursory information in ULF seismo-electromagnetic phenomena, *International Symposium on Earthquake Forecast / 5th International Workshop on Earthquake Preparation Process - Observation, Validation, Modeling, Forecasting - (ISEF-IWEP5)*, Chiba University, Chiba, Japan, May 2018, (invited).
- 韓鵬, 服部克巳, 周媛媛, 常, 2018, Principle component analysis of geomagnetic data associated with the 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0), 日本地球惑星科学連合2018年大会, MIS03-05, 幕張メッセ, 千葉県千葉市, 2018年5月 (招待講演) .
- Hattori, K. and P. Han, 2018, Statistical Analysis and Assessment of Ultralow Frequency Magnetic Signals in Japan As Potential Earthquake Precursors, in *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, edited by Ouzounov et al., 229-240, DOI: 10.1002/9781119156949.ch13, Wiley.
- Hattori, K. and P. Han, 2018, Statistical Analysis and Assessment of ULF Magnetic

- Signals in Japan as Potential Earthquake Precursors, *Electro-Magnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes 2018 (EMSEV2018)*, Potenza, Italy, September 2018.
- Hattori, K., P. Han, and J. Zhuang, 2018, Assessment of ULF geomagnetic precursor for short-term earthquake forecast, *European Geosciences Union General Assembly 2018, EGU2018-17007*, Vienna, Austria, April 2018.
- Hattori, K., S. Hirooka, M. Yagmur, S. Saito, C. Yoshino, and J. Y. Liu, 2018, Spatial and Temporal Characteristics of the Pre-Seismic Ionospheric Anomaly over Japan: Case study for the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) and statistical study, *International Conference for the Decade Memory of the Wenchuan Earthquake with The 4th International Conference on Continental Earthquakes and The 12th General Assembly of the Asian Seismological commission*, Chengdu, Sichuan, China, May 2018.
- Hattori, K., S. Hirooka, M. Yagmur, S. Saito, C. Yoshino, And J. Y. Liu, 2018, Spatial and Temporal Characteristics of the Pre-Seismic Ionospheric Anomaly over Japan: Case Study for the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) and Statistical Study, *15th Annual Meeting for Asia Oceania Geosciences Society (AOGS2018)*, Hawaii Convention Centre, Honolulu, Hawaii, US, oral, IG22-D2-AM2-322B-001 (IG22-A009), June 2018.
- Hattori, K., C. Yoshino, W. Xie, S. Saito, P. Han, T. Mogi, T. Goto, I. Takumi, T. Takano, M. Mouri, M. Kamogawa, C. Yamanaka, Y. Ando, J. Izutsu, D. Ouzounov, V. Tramutoli, J. Y. Liu, 2018, Multi-sensor network for monitoring earthquake precursors and preparation processes near subduction zone at Boso, Japan, *2018 AGU Fall Meeting*, Walter E. Washington Convention Center, Washington, D.C., USA, NH11A-06, December 2018.
- Heidarzadeh, M., T. Ishibe, and T. Harada, 2018, Constraining the source of the Mw 8.1 Chiapas, Mexico earthquake of 8 September 2017 using teleseismic and tsunami observations, *Pure and Applied Geophysics*, doi:10.1007/s00024-018-1837-6.
- Heki, K., 2019, Chapter 5-3: Ionospheric disturbances related to earthquakes in *Advances in ionospheric research: Current understanding and challenges*, Wiley/AGU Book, edited by C. Huang, in press.
- Higuchi, S., Kamishiro, Y., Ishihara, M., Yasuoka, Y., Mori, Y., Hosoda, M., Iwaoka, K., Tokonami, S., Janik, M., Muto, J., Nagahama, H., Mukai, T., 2018, Evaluation of a radon air monitor as a measurement of radon concentration in water in comparison with a liquid scintillation counter. *9th International Conference on High Level Environmental Radiation Areas - For Understanding Chronic Low-Dose-Rate Radiation Exposure Health Effects and Social Impacts (ICHLERA 2018)*, 27 Sep., 2018.
- Higuchi, S., Kamishiro, Y., Ishihara, M., Yasuoka, Y., Mori, Y., Hosoda, M., Iwaoka, K., Tokonami, S., Takahashi, R., Janik, M., Muto, J., Nagahama, H., Mukai, T., 2019, Evaluation of a radon air monitor in the measurement of radon concentration

- in water in comparison with a liquid scintillation counter. *Radiation Protection Dosimetry*, in press.
- Hirano, S., 2018, Aftershocks and the GR law due to a heterogeneous slip model, American Geophysical Union 2018 Fall Meeting, Washington D.C., U.S.
- Hirano, S., Y. Toyomoto, H. Kawakata, and I. Doi, 2018a, Application of Extreme Value Theory to a Matched-Filter Analysis, 10th ACES International Workshop -Toward Comprehensive Understanding of Earthquake Physics-.
- Hirano, S., Y. Toyomoto, H. Kawakata, and I. Doi, 2018b, Objective matched-filter analysis for detecting small events, International Symposium on Earthquake Forecast / 5th International Workshop on Earthquake Preparation Process, ~Observation, Validation, Modeling, Forecasting~, Chiba, Japan.
- 廣田伸之, 溜瀧功史, 2018, 即時的な解説資料における自動震源の活用, 平成28年(2016年)熊本地震調査報告, 135, 67-72.
- 石辺岳男・橋間昭徳・松浦律子・津村建四朗, 2019, 東北地方太平洋沖地震の背弧側における地震活動度の変化について, CSEP-Japan (日本における地震活動に基づく地震発生予 測検証実験) 研究集会, 2019年1月28-29日, 東京大学地震研究所, 東京都文京区.
- Ishihara, M., Yoshii, M. Minami, N., Yasuoka Y., Tokonami, S., Nagahama, H., Mukai, T., 2018, Airborne radon concentration measurements using gas-flow Ionization chambers and the effects of temperature changes. Proceeding of the 19th Workshop on Environmental Radioactivity, Bessho, K., Matsumura, H., Miura, T, Tagami, K., Takamiya, K., (Eds). (2018, May). Tsukuba, p. 288-293.
- Ishimura, D., S. Toda, S. Mukoyama, S. Homma, K. Yamaguchi, and N. Takahashi, 2019, Three-dimensional surface displacement and surface ruptures associated with the 2014 Mw6.2 Nagano earthquake using differential LiDAR, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, in press.
- Itaba, S., 2018, Rapid estimation of the moment magnitude of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0) from static strain changes, *Earth, Planets and Space*, 70, doi:10.1186/s40623-018-0894-5.
- Itoh, R. and T. Hatano, 2018, Geological implication of grain-size segregation in dense granular matter. *Philosophical Transactions A* 377, 20170390.
- Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y., 2018, Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes. *Scientific Reports*, 8(1), 13028, Aug., 2018.
- Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y., 2018, Statistical analysis of the correlation between earthquakes and atmospheric radon concentration. International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop on Earthquake Preparation Process - Observation, Validation, Modelings, Forecasting - (ISEF-IWEP5) Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.
- Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y., 2018, Quantitative Analysis of Anomalies of Atmospheric Radon Concentration and Earthquakes. *Asia Oceania*

- Geosciences Society (AOGS) , The 15th Annual Meeting, Hawaii, 3 Jun, 2018.
- Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y., 2018, Estimation of anomalous variation in atmospheric radon concentration related to earthquakes by Kalman Filter, American Geophysical Union fall meeting 2018, Washington, USA, December 2018.
- Iwata, T., 2018, A Bayesian approach to estimating a spatial stress pattern from P wave first-motions, *J. Geophys. Res.*, 123, 4841-4858, doi:10.1002/2017JB015359.
- 岩田大地・長濱裕幸・武藤 潤・安岡由美, 2018, 地震に先行する大気中ラドン濃度変動: 特異スペクトル変換法による異常検知法 (招待講演), 日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 2018年12月25日.
- 井筒潤, 楠城一嘉, 鴨川仁, 2018, 地震災害予測のための地球観測データのデジタルアースへの適用, 日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第5回学術講演会アブストラクト集, 11-12, 2018年12月.
- Jia, K., S. Zhou, J. Zhuang, C. Jiang, Y. Guo, Z. Gao, and S. Gao, 2018, Did the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake trigger the occurrence of the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou earthquake in Sichuan, China?, *J. Geophys. Res.*, 123, 2965-2983, <https://doi.org/10.1002/2017JB015165>.
- Kamogawa, M., T. Nagao, Y. Orihara, 2018a, J.J. Berthelier, Origin of Pre-seismic whistler wave intensity attenuation observed by DEMETER satellite, EMSEV-2018 International Workshop on Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes, 17-21 September, Potenza, Italy.
- Kamogawa, M., T. Nagao, Y. Orihara, J.J. Berthelier, 2018, D-region ionospheric precursors and its earthquake predictability, EMSEV-2018 International Workshop on Electromagnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes, 17-21 September, Potenza, Italy.
- Kamogawa et al., 2018c, Evaluation of the pre-seismic DEMETER's VLF intensity decrease identified by the functional principal component analysis, The 3rd International Workshop of CSES Mission, 16-18 Nov. 2018, Beijing, China.
- 鴨川仁, 山崎政彦, 日置幸介, 長尾年恭, 八木橋 宏之, 児玉哲哉, 2018, 超小型衛星群とグローバル地上局ネットワークによる地震発生予測, 宇宙ビジネスアイデアコンテスト (S-Booster) ファイナリスト.
- 金木俊也・横山友輝・廣野哲朗・矢部康男・小笠原宏, 2018, M5.5 Orkney 地震の余震発生帯から回収された断層岩の鉱物学的特徴 (ICDP DSeis project), 日本地震学会, S08-06, 郡山, 2018年10月10日.
- 加藤愛太郎, 2018, 間欠的な固着のはがれと大地震の発生, *パリテイ*, 33, 06, 48-51.
- Kato, A, 2019, The evolution of fault slip rate prior to earthquake: The role of slow and fast slip modes, *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, in press.
- Kato, A. and T. Ueda, 2019, Source fault model of the 2018 Mw 5.6 northern Osaka earthquake, Japan, inferred from the aftershock sequence, *Earth Planets Space*,

- 77, 11, <https://doi.org/10.1186/s40623-019-0>.
- Katsuragi, H., K. Anki Reddy, and K. Endo, 2018, Shape dependence of resistance force exerted on an obstacle placed in a gravity-driven granular silo flow, *AIChE J.* 64, 3849-3856.
- Katsumata K. and M. Nakatani, 2018, Long-term earthquake forecast based on the seismic quiescence: trials in the Kurile, the Tohoku, and the Izu-Bonin subduction zones, International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.
- 勝俣 啓・中谷 正生, 2018a, 静穏化による地震の長期予測の試行~千島・東北・伊豆小笠原沈み込み帯の場合, 地球惑星連合大会, SSS13-04, 幕張, May 24, 2018.
- 勝俣啓・中谷正生, 2018b, 静穏化による長期予測の試行~予測と検証, 日本地震学会秋季大会, 2018年10月10日, 郡山, S23-01, 2018.
- Kawamura, H., Maho Yamamoto and Yushi Ueda, 2018, Slow-slip phenomena represented by the one-dimensional Burridge-Knopoff model of earthquakes. *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 053001-(1-4).
- Kawamura, H., K. Yoshimura, and S. Kakui, 2018, Nature of the high-speed rupture of the two-dimensional Burridge-Knopoff model of earthquakes. *Phil. Trans. R. Soc. A* 377 20170391.
- 木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努・武田直人, 2018, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果 (2017年11月~2018年4月)(57), 地震予知連絡会会報, 100, 183-189.
- 木口努・松本則夫・北川有一・板場智史・落唯史・佐藤努, 2019, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果 (2018年5月~2018年10月)(58), 地震予知連絡会会報, 101, 印刷中
- 菊池秀乙, 山崎政彦, 鴨川仁, 宮崎康行, 2018, 地震先行現象検証衛星 PRELUDEの自動運用システムの研究開発, 第62回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3M14, 1-6.
- 木村一洋, 2018, 体積ひずみ計データの降水補正に用いる降水量データについて, 気象研究所研究報告, 67, 35-44.
- Kinoshita, C., and D. M. Saffer, 2018, In Situ Permeability and Scale Dependence of an Active Accretionary Prism Determined From Cross-Borehole Experiments, *Geophysical Research Letters*, 45, 6935-6943, doi:10.1029/2018gl078304.
- 気象研究所, 2018a, 海溝と直交する方向の全国の基線長変化, 地震予知連絡会会報, 99, 24-27.
- 気象研究所, 2018, 内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測, 地震予知連絡会会報, 99, 302-305.
- 気象研究所, 2019a, 海溝と直交する方向の全国の基線長変化, 地震予知連絡会会報, 100, 印刷中.
- 気象研究所, 2019, 内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測, 地震予知連絡会会報, 100, 印刷中.
- 気象研究所, 2018, 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率(2019), 地震予知連絡

- 会会報, 100, 印刷中.
- 北川有一・板場智史・武田直人・松本則夫・落唯史・木口努, 2018, 紀伊半島～四国のひずみ・傾斜・地下水観測結果 (2017年11月～2018年4月), 地震予知連絡会会報, 100, 264-275.
- 北川有一・板場智史・武田直人・松本則夫・落唯史・木口努, 2019, 紀伊半島～四国のひずみ・傾斜・地下水観測結果 (2018年5月～2018年10月), 地震予知連絡会会報, 101, 印刷中.
- 児玉哲哉, 2018, 01新世紀地震フロンティア研究: 地上-衛星連携による地震先行現象の確立, パリティ Vol. 33(5).
- 小林昭夫, 弘瀬冬樹, 堀川晴央, 平田賢治, 中西一郎, 2018, 1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する一史料 ——飯作家「大地震富士山焼之事覚書」の調査と翻刻——, 地震, 70, 221-231.
- 小林孝央・本島邦行, 2018, GPS波観測データを用いた地震発生時における電離層電子密度観測”, 日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第5回学術講演会アブストラクト集, 35-38, 2018年12月.
- Linzer, L., M. Manzi, and ICDP DSeis team, 2018, Interpretation of the merged 3D seismic volume covering the seismogenic zone of M5.5 Orkney earthquake, South Africa, 日本地震学会, S08-05, 郡山, 2018年10月10日.
- Liu, J. E., K. Hattori, and Y. I. Chen, 2018, Application of Total Electron Content Derived from the Global Navigation Satellite System for Detecting Earthquake Precursors, Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies, edited by Ouzounov et al., 305-317, DOI: 10.1002/9781119156949.ch17, Wiley.
- Manzi, M., A. Malehmir, R. Durrheim, H.Y. Ogasawara, H. Ogasawara, and ICDP DSeis team, 2018, Reflection seismic imaging of the causative geological structure of the M5.5 earthquake (2014) in South Africa, 日本地震学会, S08-04, 郡山, 2018年10月10日.
- Matcharashvili, T., T. Hatano, T. Chelidze, and N. Zhukova, 2018, Simple statistics for complex Earthquake time distributions. *Nonlin. Processes Geophys.* 25, 497-510.
- Mngadi, S. B., R. J. Durrheim, M. S. D. Manzi, H. Ogasawara, Y. Yabe, H. Yilmaz, N. Wechsler, G. Van aswegen, D. Roberts, A. A. K. Ward, M. Naoi, H. Moriya, M. Nakatani, A. Ishida, SATREPS Team, and ICDP Dseis Team, 2019, Integration of underground mapping, petrology, and high-resolution microseismicity analysis to characterise weak geotechnical zones in deep South African gold mines, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 114, 79-91, doi: 10.1016/j.ijrmmms.2018.10.003.
- Mori, J. J., Y. Yasutomi, and H. Ogasawara, 2018, Close observations of the rupture for the M5.5 Orkney, South Africa earthquake. Tuesday, 11 December 2018. Abstracts AGU Fall Meeting. S21C-0438.
- Morita, S., K. Heki, M. Nakatani, K. Matsushima and T. Mogi, 2018, Statistical

- evaluation of anomalous propagation of VHF-band radio wave and reliability of the anomaly that immediately preceded the 2016 Kumamoto Earthquake, International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27.
- 森田 笙・中谷 正生・日置 幸介・茂木 透, 2018, 島原におけるFM電波伝播異常の観測と2016年熊本地震前の異常について, 地球惑星連合大会, MIS09-03, 幕張, May 22, 2018.
- Motojima, K., Y. Shiono and Y. Ogura, 2018, Detection of anomalous VHF radio wave propagation associated with earthquake by artificial intelligence, International Symposium on Earthquake Forecast / 5th International Workshop on Earthquake Preparation Process - Observation, Validation, Modeling, Forecasting - (ISEF-IWEP5), pp.94, Chiba, May 25-27, 2018.
- Nagao, T., J. Izutsu, M. Kamogawa, Y. Orihara, S. Sugiura, H. Kondo, 2018, Electromagnetic observation addressed to the short-term earthquake prediction research in VLF band, Electro-Magnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes 2018 (EMSEV2018), Potenza, Italy, September 2018.
- 長尾年恭, 齋藤愛理, 井筒潤, 鴨川仁, 織原義明, 杉浦繁貴, 近藤 斎, 2018, VLF帯パルス電磁波観測による短期・直前予測の研究 -震央から観測されたと考えられる電磁波の予察的解析-, 日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第5回学術講演会アブストラクト集, 62, 2018年12月.
- Nakatani, M., 2018, Statistical Evaluation of Precursory Phenomena - A Review (invited), Proceedings of the 17th Japan-Taiwan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction, 19-23.
- Nakatani, M., 2018, Short-Term Precursors, Why do I care? (invited), International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.
- Nakatani, M., 2018, A revised seismogenesis scenario implied by the discovery of a too consistent, immediate precursor - I think I've figured it out! (invited), International Symposium on Earthquake Forecast/5th International Workshop of Earthquake Preparation Process, Chiba University, Chiba, Japan, May 25-27, 2018.
- 中谷正生, 2018, 経験則から期待される大地震発生の確率: 相場のレビュー, 地震予知連学会会報, 99, 465-469.
- 中谷正生, 2019, 地震のメカニズム解明一本当に地震予知はナンセンス? あんた, 地震の何なのさ? -短期前兆のメタ理論, パリティ, Vol.34, No.2, 84-88.
- 楠城一嘉, 2018, b値に基づく全地球規模の大地震発生予測のモデル, 地震予知連学会会報, 99, 459-462.
- 楠城一嘉, 2018, 地震のナウキャストニングの研究, 日本地震予知学会第5回学術講演会, 東海大学高輪キャンパス, 第5回学術講演会アブストラクト集, 5, 2018年12月.
- 直井誠, 2018, 南アフリカ大深度金鉱山での微小破壊観測による震源の物理の研究, 地震2, 71, 43-62, doi:10.4294/zisin.2017-13 (2016年地震学会若手学術奨励賞受賞記念論

文)

- Nishikawa, T., and Ide, S., 2018, Recurring slow slip events and earthquake nucleation in the source region of the M 7 Ibaraki - Oki earthquakes revealed by earthquake swarm and foreshock activity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(9), 7950-7968.
- Ochi, T., and N. Takeda, 2018, Relation between the coupling and tremor rates in the transition zone around the Shikoku region, *Earth, Planets and Space*, 70, doi:10.1186/s40623-018-0883-8.
- 落唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・武田直人・木口努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦, 2018, 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント (2017年11月~2018年4月), *地震予知連絡会会報*, 100, 165-182.
- 落唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・木口努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦, 2019, 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント (2018年5月~2018年10月), *地震予知連絡会会報*, 101, 印刷中.
- Ogasawara, H., A. Ishida, K. Sugimura, Y. Yabe, S. Abe, T. Ito, A. Funato, H. Kato, B. Liebenberg, G. Hofmann, L. Scheepers, R. J. Durrheim, and the SATREPS and DSeis teams, 2019, Spatial variation in stress in seismogenic zones in South African gold mines, *Proceedings of the 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa, 7-11 May 2019, Okinawa*, accepted.
- 小笠原宏・石田亮壮・小笠原宏幸・杉村幸祐・野田拓・阿部周二・矢部康男・加藤春實・伊藤高敏・船戸明雄, 2018a, 大深度南アフリカ金鉱山の地震発生場での岩盤応力測定, 第53回地盤工学研究発表会, 2018年7月26日(木), サポートホール高松, 高松, DS-2-7, pp. 2.
- 小笠原宏・矢部康男・伊藤高敏・DSeisチーム, 2018b, ICDP 南アフリカ金鉱山 地震発生場掘削の完了, *日本地震学会*, S08-03, 郡山, 2018年10月10日.
- Ogata, Y., K Katsura, H Tsuruoka and N Hirata, 2018, Exploring Magnitude Forecasting of the Next Earthquake, *Seismol. Res. Lett.*, 89, 4, 1298-1304, doi: 10.1785/0220180034.
- 小倉佑哉・本島邦行, 2018, 気象現象による影響を考慮した見通し内VHF帯放送波の伝搬異常と地震の関連性解析, *日本地震予知学会第5回学術講演会*, 東海大学高輪キャンパス, 第5回学術講演会アブストラクト集, 39-42, 2018年12月.
- Okuda, T., & Ide, S., 2018a, Streak and hierarchical structures of the Tohoku-Hokkaido subduction zone plate boundary. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 132.
- Okuda, T., & Ide, S., 2018b, Hierarchical rupture growth evidenced by the initial seismic waveforms. *Nature communications*, 9(1), 3714.
- Omi, T., Y. Ogata, K. Shiomi, B. Enescu, K. Sawazaki, and K. Aihara, 2019, Implementation of a real-time system for automatic aftershock forecasting in Japan, *Seismol. Res. Lett.* 90, 242-250.
- Ootani, Y., J. Xu, T. Hatano, and M. Kubo, 2018, Contrasting Roles of Water at Sliding Interfaces between Silicon-Based Materials: First-Principles Molecular Dynamics

- Sliding Simulations. *J. Phys. Chem. C* 122, 10459.
- 織原義明, 2018, 地震予知学が未科学として認められるには, 日本地震予知学会第5回学術講演会アブストラクト集, 13-16.
- 織原義明, 2018, 2011年東北地方太平洋沖地震前の地下水異常調査, 日本地震予知学会第5回学術講演会アブストラクト集, 67-69.
- Orihara, Y., M. Kamogawa, Y. Noda, and T. Nagao, 2018, Are deep-fish appearances an earthquake precursor?, EMSEV (Electro-Magnetic Studies of Earthquakes and Volcanoes) 2018 International Workshop Abstracts, 203.
- 織原義明・鴨川仁・野田洋一・長尾年恭, 2018, 日本周辺における鯨類のマス・ストランディングと地震との関係に関する考察, 日本地震学会講演予稿集2018年度秋季大会, S13-05.
- Ouzounov, D., S. Pulinets, J. Y. Liu, K. Hattori, and P. Han, 2018, Multiparameter Assessment of Pre - Earthquake Atmospheric Signals, in *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, edited by Ouzounov et al., 339-359, DOI: 10.1002/9781119156949.ch20, Wiley.
- Ouzounov, D., S. Pulinets, K. Hattori, P. Taylor (eds.), 2018, *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, pp. 414, Wiley.
- Roy, S. and T. Hatano, 2018, Creeplike behavior in athermal threshold dynamics: Effects of disorder and stress. *Phys. Rev. E* 97, 062149.
- Rusley, C., T.C. Onstott, R.X. Liang, J.A. Higgins, N.W. Slater, H. Ogasawara, E.D. Cason, B.S. Lollar, T. Wiersberg, M. Zimmer, E. van Heerden, T.L. Kieft, B. Freese, B. Leibenberg, and V.H. Esterhuizen, 2018, Exploring the Limits of Life in a South African Deep Subsurface Brine, 11 December 2018. AGU Fall Meeting. B23E-2552.
- Schorlemmer, D., M. J. Werner, W. Marzocchi, T. H. Jordan, Y. Ogata, D. D. Jackson, S. Mak, D., A. Rhoades, M. C. Gerstenberger, N. Hirata, M. Liukis,, P. J. M., A. Strader, M. Taroni, S. Wiemer, J. D. Zechar, and J. Zhuang, 2018a, The Collaboratory for the Study of Earthquake, Predictability: Achievements and Priorities, *Seismol. Res. Letters*, 89, 4, 1305-1313, doi:10.1785/0220180053.
- Schorlemmer, D., N. Hirata, Y. Ishigaki, K. Doi, K. Z. Nanjo, H. Tsuruoka, T. Beutin, F. Euchner, 2018b, Earthquake Detection Probabilities in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 108(2), 702-717 doi: <https://doi.org/10.1785/0120170-217>.
- Shinoda, A., S. Fujiwara, H. Niiya, and H. Katsuragi, 2018, Void structure stability in wet granular matter and its application to crab burrows and cometary pits, *Sci. Rep.* 8, 15784.
- Shiono, Y. and K. Motojima, 2018, Detection of anomalous VHF radio wave propagation associated with earthquake by Artificial Intelligence, Japan Geoscience Union Meeting 2018, MIS09-06, Chiba, May, 22, 2018.
- Sugan M., A. Vuan, A. Kato, M. Massa, and G. Amati, 2019, Seismic evidence of an early afterslip during the 2012 sequence in Emilia (Italy), *Geophys. Res. Lett.*, 46,

- doi: 10.1029/2018GL079617.
- Takizawa, S., H. Niiya, T. Tanabe, H. Nishimori, and H. Katsuragi, 2019, Impact-induced collapse of an inclined wet granular layer, *Physica D* 386-387, 8-13.
- Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018, Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog, *Earth, Planets and Space*, 70, 90.
- 田中昌之, 岡田正実, 内田直希, 2018, 繰り返し回数の少ない繰り返し地震系列に対する長期的地震発生確率予測の成績と検証, *地震*, 70, 195-213.
- 遠田晋次, 2018, 2018年大阪府北部地震の周辺活断層と地震活動への影響, *地震ジャーナル*, 66, 9-21.
- Toda, S., and R. S. Stein, 2018, Why aftershock duration matters for probabilistic seismic hazard assessment, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 108, 1414-1426.
- 遠田晋次・石村大輔, 2019, 熊本地震など内陸大地震で見いだされた誘発性地表地震断層と短い活断層の評価, 第四紀研究, 印刷中.
- 堤 浩之・遠田晋次・後藤秀昭・熊原康博・石村大輔・高橋直也・谷口 薫・小俣雅志・郡谷順英・五味雅宏・浅野公之・岩田知孝, 2018, 熊本県益城町寺中における2016年熊本地震断層のトレンチ調査, *活断層研究*, 49, 31-39.
- 梅田康弘・板場智史, 2018, 1944年東南海地震及び1946年南海地震時の海水位変化を利用した紀伊半島沿岸部における上下変動時系列の推定, *地質調査研究報告*, 69, 81-89.
- Uyeda, S. and T. Nagao, 2018, International Cooperation in Pre - Earthquake Studies: History and New Directions, *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*, edited by Ouzounov et al., AGU Geophysical Monograph 234, 3-6, Wiley.
- Vuan, A., M. Sukan, G. Amati and A. Kato, 2018, Improving the Detection of Low-Magnitude Seismicity Preceding the Mw=6.3 L' Aquila Earthquake: Development of a Scalable Code Based on the Cross- Correlation of Template Earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 108, 471-480, doi: 10.1785/0120170106.
- Wakabayashi, A., Yasuoka, Y., Janik, M., Nagahama, H., Fukuhori, N., Mori, Y., Arai, Y., Fujii, S., Mukai, T., 2019, Derivation and validity evaluation of calibration factors for activated-charcoal radon collectors. *Radioisotopes*. in press.
- Wang, T., Zhuang, J., Buckby, J., Obara, K. and Tsuruoka, H., 2018, Identifying the recurrence patterns of non-volcanic tremors using a 2D hidden Markov model with extra zeros, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.123, Issue8, pp.6802-6825, doi:10.1029/2017JB015360.
- Wang, Y., T. Wang, and J. Zhuang, 2018, Modelling continuous time series with many zeros and an application to earthquakes, *Environmetrics*, 29, 4, <https://doi.org/10.1002/env.2500>.
- Wiersberg, T., M. Zimmer, C. Kujawa, B. Liebenberg, H. Ogasawara, T.C. Onstott, E. Cason, Jan-G Vermeulen, E. van Heerden, 2019, Investigations on fault zone gases

- in South African gold mines, Abstract EGU2019-5670, SSP1.2/CL1.32/EMRP3.11/GD2.9/GMPV1.7/NH5.12/TS1.4, 7-12 April 2019, Vienna.
- Yabe, S., and Ide, S., 2018, Variations in precursory slip behavior resulting from frictional heterogeneity. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(1), 43.
- Yamaguchi, J., M. Naoi, M. Nakatani, H. Moriya, T. Igarashi, O. Murakami, Y. Yabe, R. Durrheim, and H. Ogasawara, 2018, Emergence and disappearance of very small repeating earthquakes on a geological fault in a gold mine in South Africa, *Tectonophysics*, 747-748, 318-326. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.014>.
- Yamaguchi, T., R. Sato, Y. Sawae, 2018, Propagation of Fatigue Cracks in Friction of Brittle Hydrogels, *Gels* 4, 53.
- Yamaguchi, T., C. Creton, M. Doi, 2018, Simple model on debonding of soft adhesives, *Soft Matter* 14, 6206-6213.
- Yamaguchi, Y., S. Takada, and T. Hatano, 2018, Rheology of Cohesive Granular Particles under Constant Pressure, *J. Phys. Soc. Jpn.* 87, 094802.
- Yasuoka, Y., Nagahama, H., Muto, J., Mukai, T., 2018, The Anomaly in Atmospheric Radon Concentrations Prior to the 2011 Tohoku-Oki Earthquake in Japan. *Radiation Environment and Medicine*, 7(2), 86-94, Aug., 2018.
- 安富達成, 2019, Rupture process of the M5.5 Orkney earthquake using the dense network of a South African gold mine, 京都大学修士論文.
- Zhuang, J., M. Murru, G. Falcone, and Y. Guo, 2018, An extensive study of clustering features of seismicity in Italy from 2005 to 2016, *Geophysical Journal International*, 216, 302-318, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy428>.
- Zhuang, J., T. Wang, and K. Kiyosugi, 2019, Detection and replenishment of missing data in marked point processes. *Statistica Sinica*. In press. doi:10.5705/ss.202017.0403.
- Ziegler, M., M. Rickenbacher, N. Berset, B. Liebenberg, A. Ishida, K. Sugimura, T. Noda, H. Ogasawara, S. Mngadi, R. Durrheim, T. Ito, A. Funato, and the ICDP DSeis team, 2018, Core and borehole logging and stress measurements of a 817 m long borehole drilled from 2.9 km depth toward the Moab Khotsong 2014 M5.5 aftershock zone (ICDP DSeis project in South Africa), EGU2018-10377, Vienna, 12 April 2018.

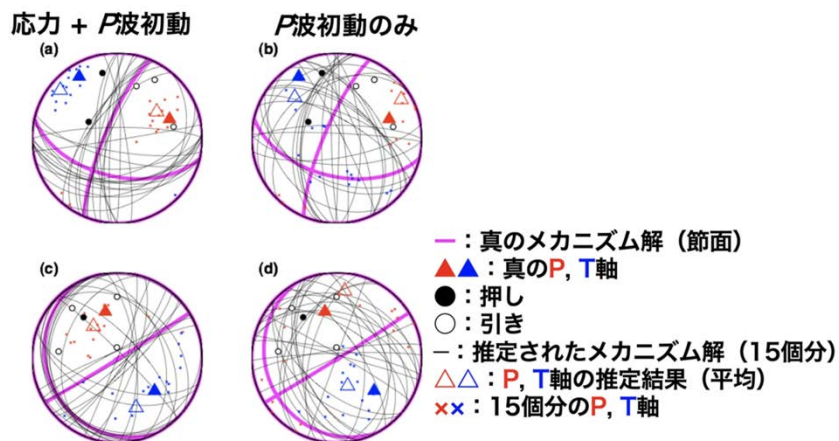


図1. P波初動極性から直接推定した応力場情報を参考にした個々の地震のメカニズム推定法の検証例 (東北大学 [課題番号: 1206])

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

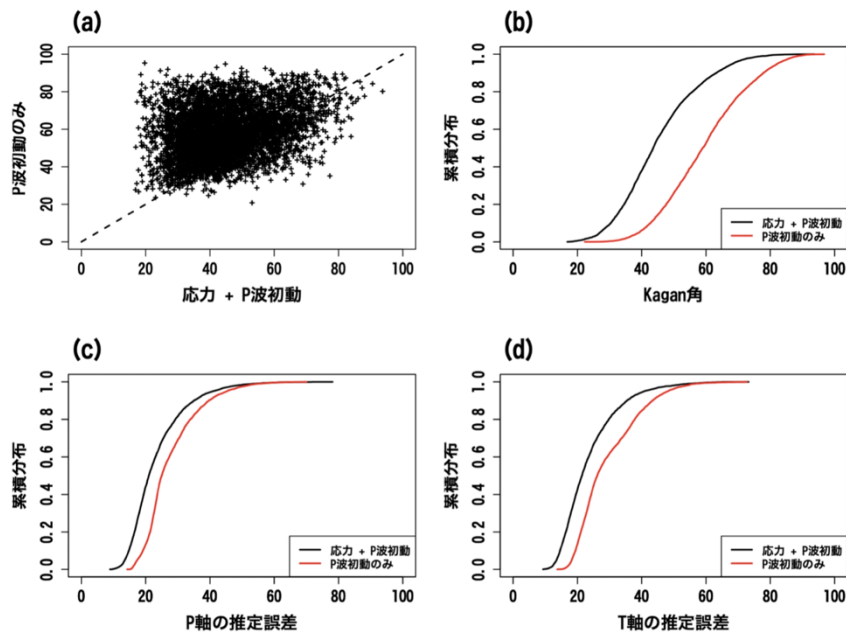


図2. 人工データを用いた2つのメカニズム解推定法の比較 (東北大学 [課題番号: 1206])
 a) 両手法による結果を比較した散布図. 各々の地震に対する「応力情報あり」(応力+P波初動)と「応力情報なし」(P波初動のみ)の推定結果と真のメカニズム解からのズレを Kagan 角で表したものを. 値が大きいほどズレが大きい. 「なし」の推定結果のズレが「あり」のそれより大きい. b) Kagan 角の累積分布. この図でも全体として「なし」の Kagan 角の方が「あり」のそれより大きい. c) d) P 軸, T 軸の推定誤差. 「なし」の方が「あり」の場合より推定精度が低い.

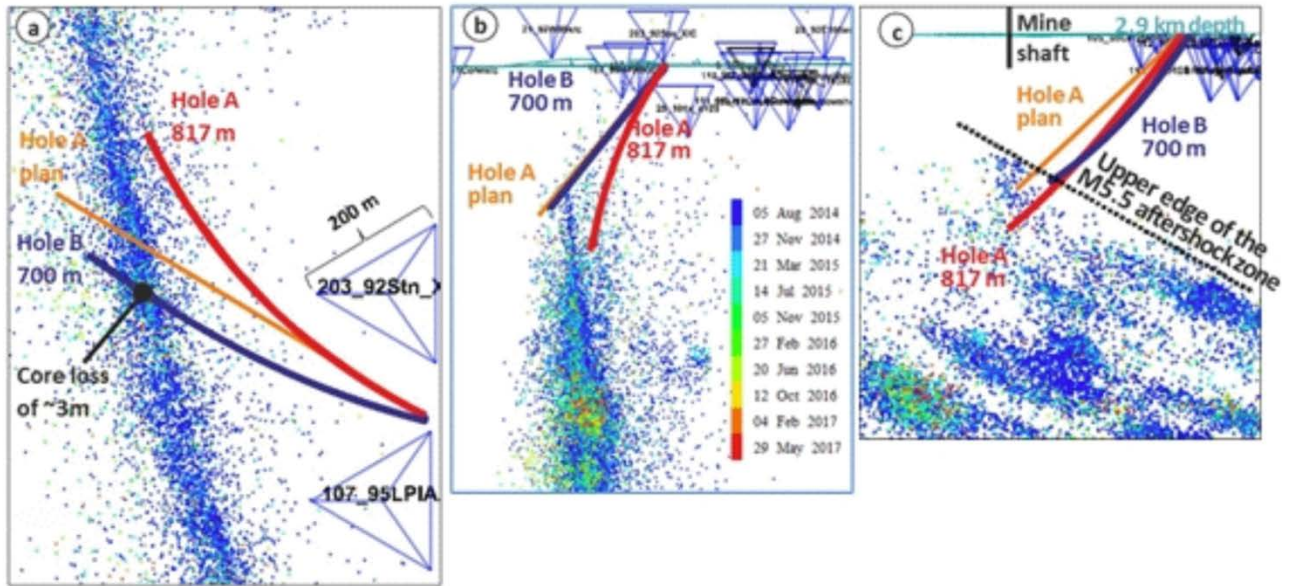


図3. M5.5余震発生帯，および，その上縁部と周囲を調査するための地下2.9kmからの掘削の位置関係（立命館大学〔課題番号：2401〕）

HoleAは、当初計画（橙色）から右にそれたが、HoleBは余震発生帯の上縁部を貫通した。HoleBの544mの地点から約2度異なる方向に分岐孔（HoleC）が掘削され、より多くの断層物質を回収することができた。

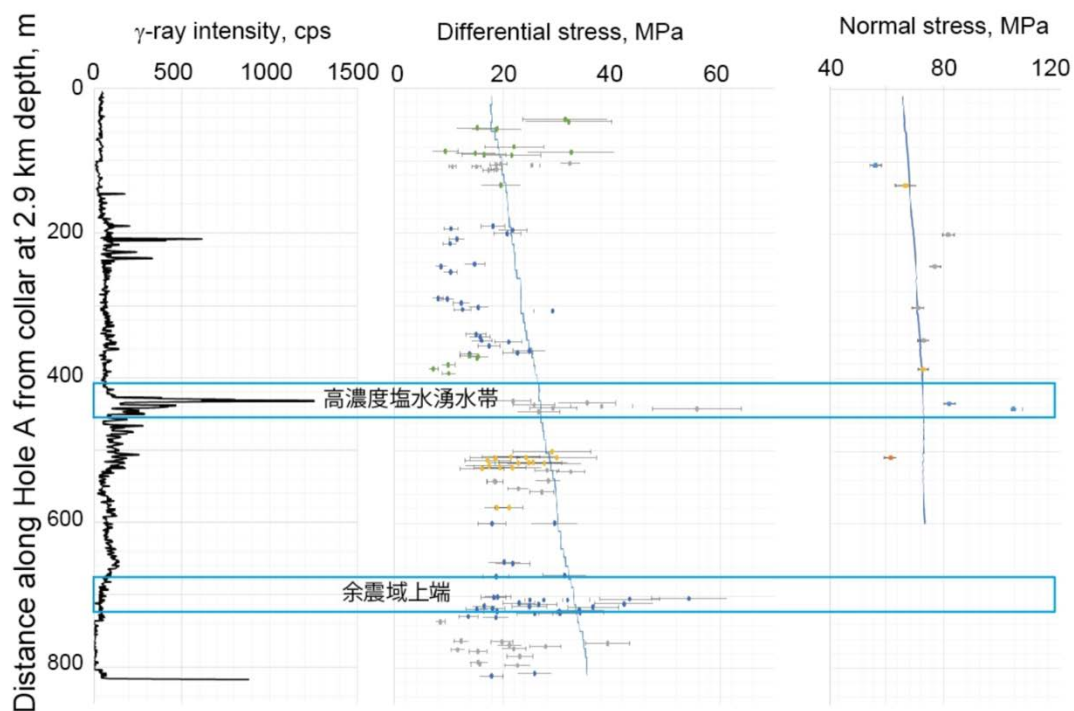


図4. ICDP-DSeisで掘削されたHoleAの解析結果（東北大学流体研究所〔課題番号：2948〕）
 左から順に、孔内検層による自然ガンマ線強度、DCDAにより測定された孔井直交面内の差応力、DRAにより測定された孔軸方向の法線応力の深さ分布応力分布に記された青実線は、弾性数値モデルから期待される応力値。400m地点では、高濃度塩水の湧出がみられた。Hole Aは余震域に交差していないが、700m地点で余震発生深度に達している。

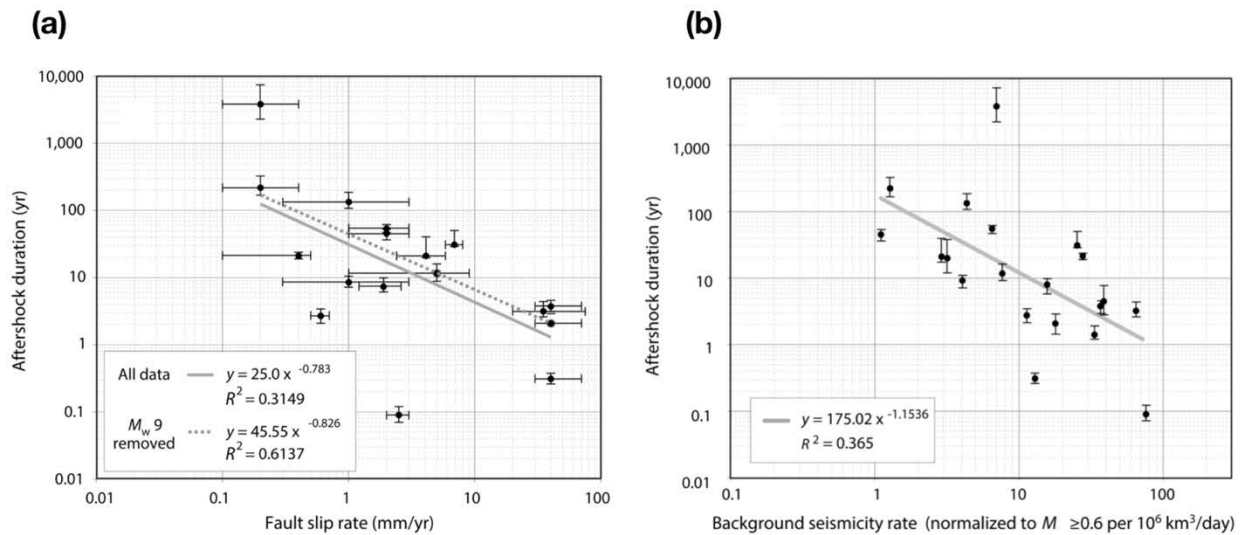


図 5. 東北地方太平洋沖地震の12箇所の広域余震活動域および東北地方で発生した最近の8個の大地震の余震活動継続時間と領域内の活断層・プレート境界の変位速度 (a) および常時地震活動 (b) との関係 (Toda and Stein, 2018, 東北大学 [課題番号: 1206])

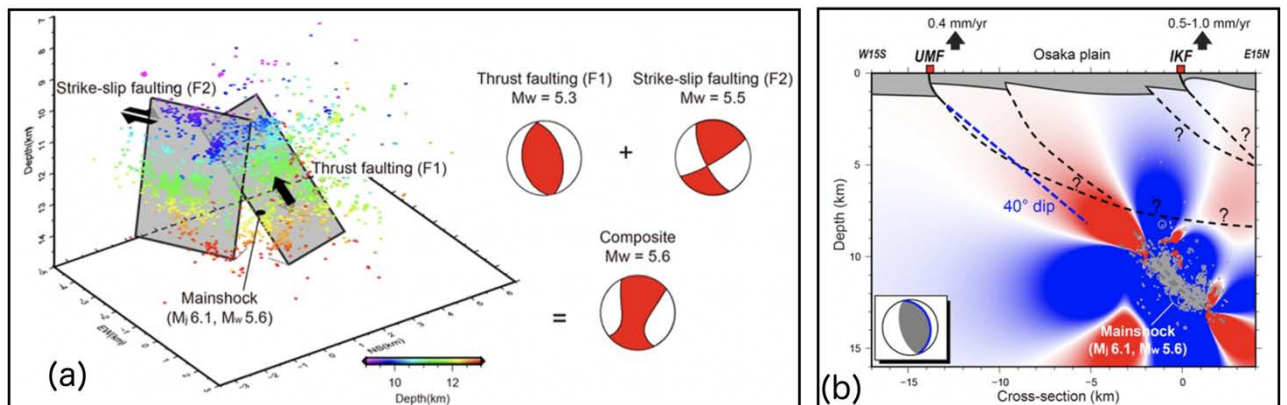


図 6. 震源再決定に基づく2018年大阪府北部の地震 (Mw5.6) の震源断層モデル (Kato and Ueda, 2019, 東北大学 [課題番号: 1206])

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

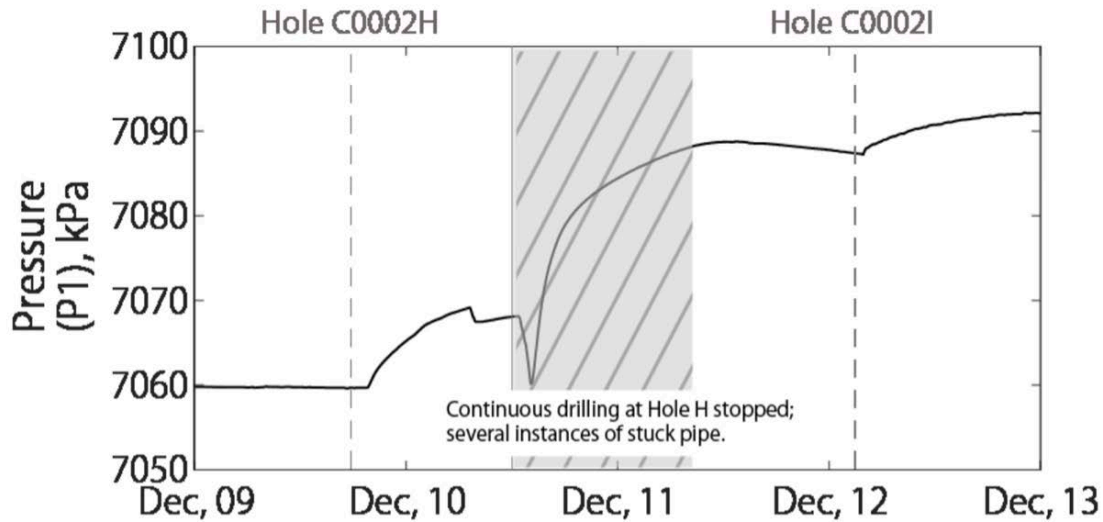


図 7. 熊野灘沖合に建設されたホール C0002G において近傍の掘削作業時に記録された水圧変化

(Kihosnita and Saffer, 2018, 産業技術総合研究所 [課題番号: 5007])

掘削作業はおよそ 100m 離れた C0002H および C0002I で行われた。灰色点線は掘削中のドリルビットが C0002H に設置されている水圧計と同じ深度に達した時の時間を示す。灰色斜線部はオペレーションに不具合が生じたため、解析では使用していない。

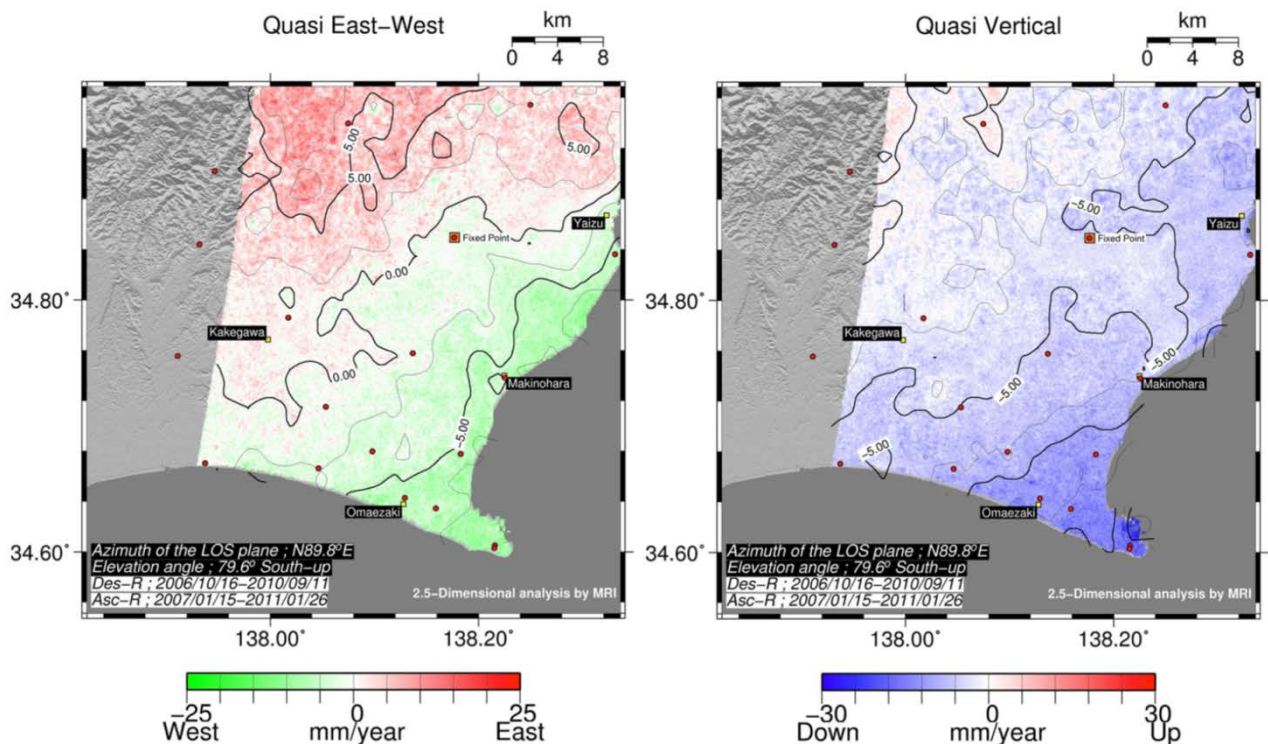


図 8. SAR衛星ALOS-1のデータを用いた時系列解析結果を2.5次元解析した、御前崎付近の準東西(左)と準上下(右)方向の変位速度 (気象庁 [課題番号: 7006])

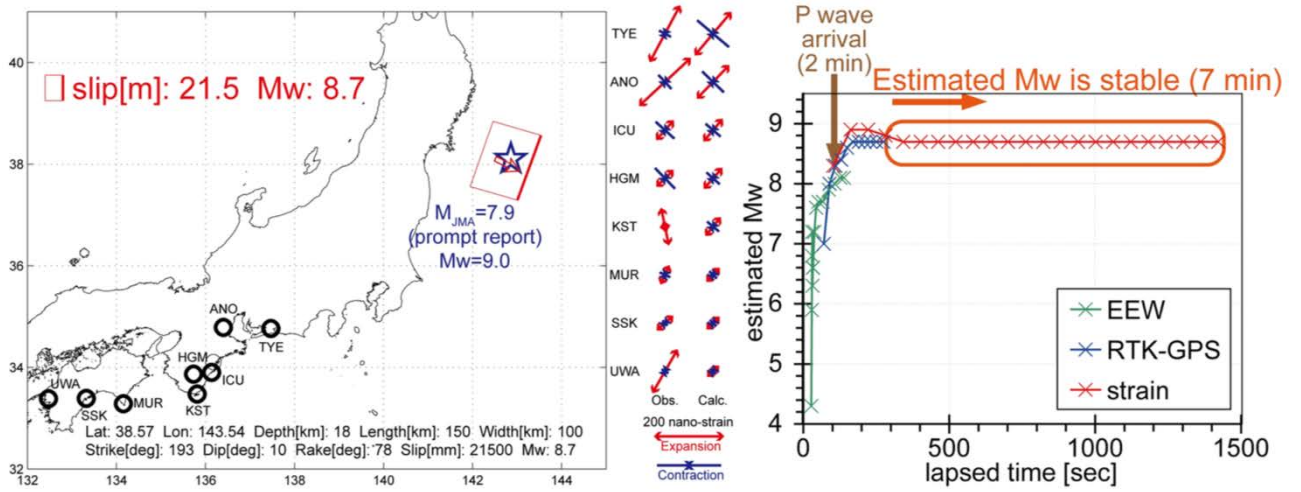


図9. ボアホールひずみ計による巨大地震のモーメントマグニチュードの即時推定 (Itaba, 2018, 産業技術総合研究所 [課題番号: 5007])

(左) ボアホールひずみ計を用いて推定した東北地方太平洋沖地震本震の断層モデル. (中) 各観測点における主ひずみの観測値および計算値. (右) 推定されたMwの時間変化.

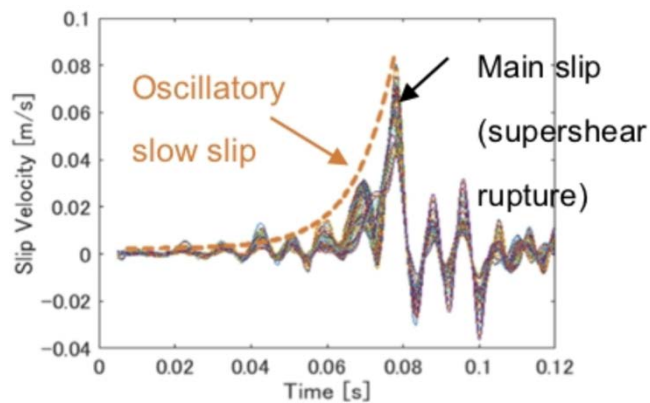


図10. ゲル摩擦実験において、本震的な大きい滑り(時刻0.08秒付近)へ向けて、ゆっくりとした滑りが振動しながら加速していく様子 (東京大学地震研究所 [課題番号: 1512])

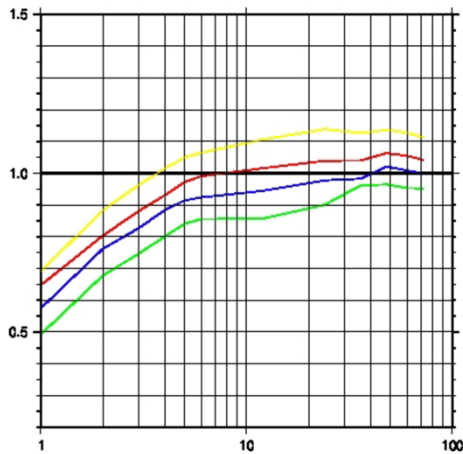


図11. Relative Intensityモデルの学習曲線(東京大学地震研究所 [課題番号: 1511])
 横軸:学習期間(月). 縦軸: 情報利得. 黄: 1ヶ月予測. 赤: 3ヶ月予測. 青: 半年予測. 緑:
 1年予測.

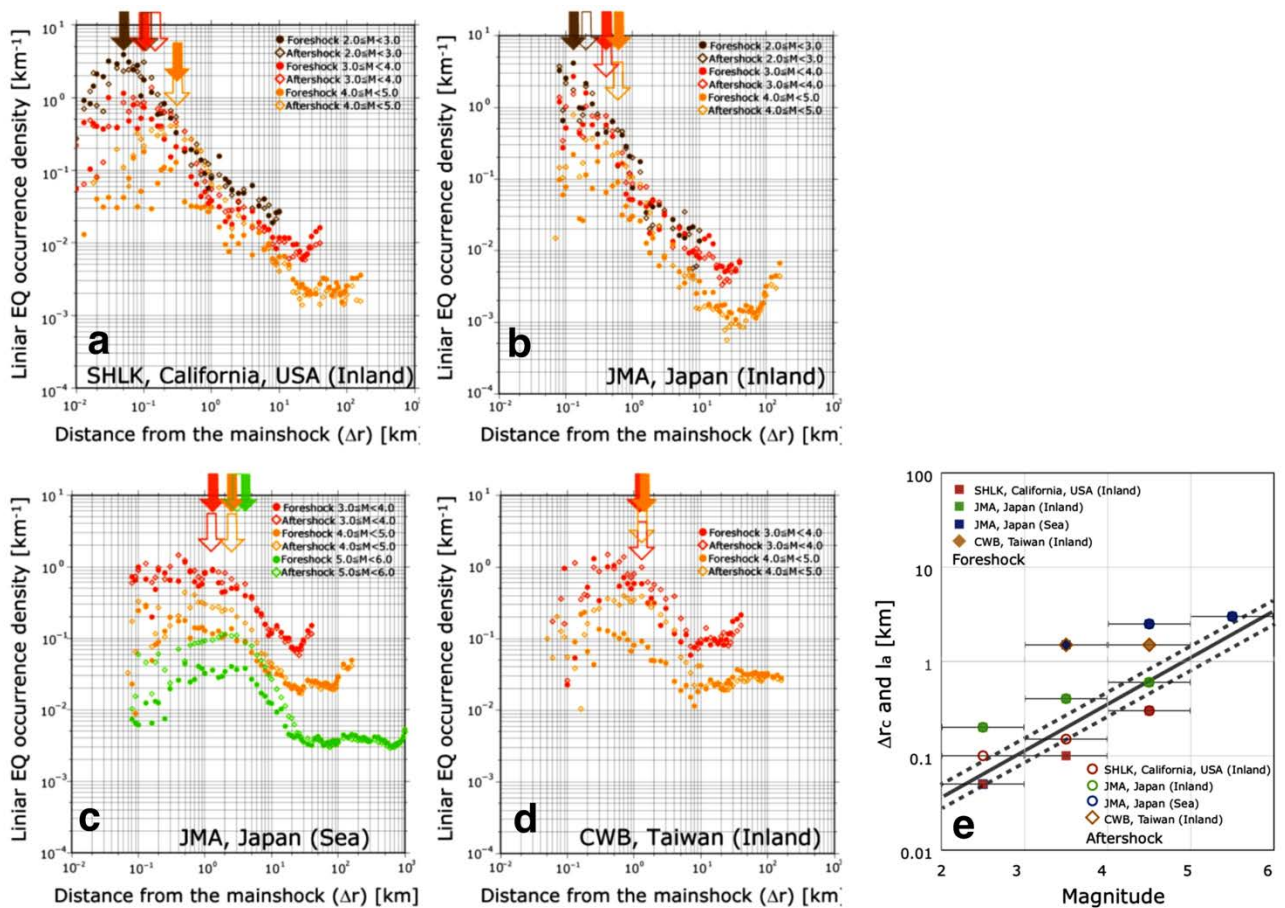


図12. 前震と余震の線密度解析(東京大学地震研究所 [課題番号: 2902])
 a)カリフォルニア, (b)日本の内陸地震, (c)日本の海域地震, (d)台湾. 前震(Solid circle)
 と余震(open diamond). Solid arrowとOpen arrowは, それぞれ, 前震と余震のグラフの折
 れ曲がりの距離(特性距離)を表す. (e) 解析対象地域ごとの本震のマグニチュードごとの前震
 と余震の特性距離. カリフォルニアは赤, 日本の内陸地震は緑, 海域の地震は青, 台湾はオ
 レンジとなっている. 太実線は Skarlatoudiset al. (Bull. Seismol. Soc. Am. 106,

1652-1662, 2016) によるアスペリティーサイズ(半径)を示す. 点線は 1 シグマの標準偏差を示す.

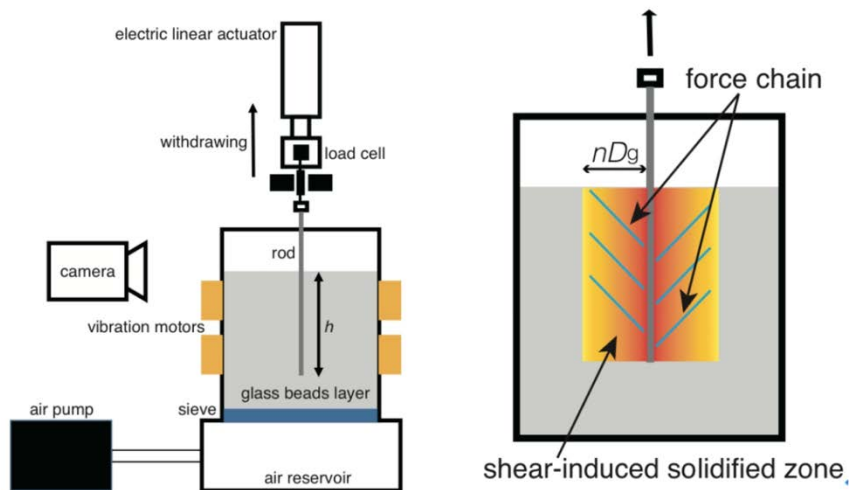


図13. 粉体層からの棒引き抜き実験の概念図(東京大学地震研究所 [課題番号: 1512]) (左)実験スキーマ. (右)粉体層からの棒引き抜きにより形成された実効的固化領域の概念図.

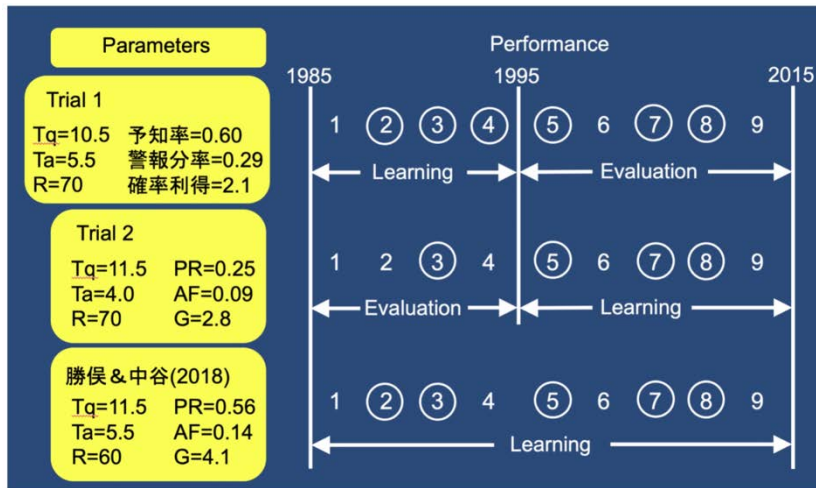


図14. カムチャツカ半島から千島列島, 北海道沖, 東北沖, 房総沖, 伊豆小笠原諸島で発生した Mw7.5以上の地震の静穏化モデルによるレトロスペクティブテスト (勝俣・中谷(2018b), 東北大学 [課題番号: 1206], 東海大学 [課題番号: 2501])
番号は Mw7.5 以上の 9 個の地震を示し, ○囲みが的中した地震である. Learning は学習期間, Evaluation は評価期間を意味する. Trial1, 2, 勝俣・中谷(2018a)の3つのパラメータセットを用いて予測を実施. Td は静穏化 設定期間, Ta は警報期間, R は警報範囲半径を示す.

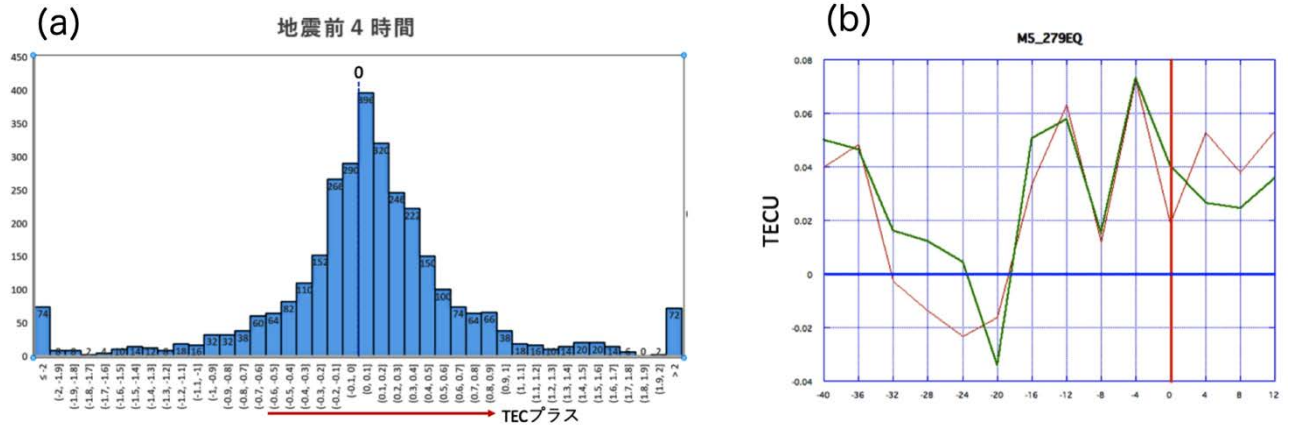


図 15. M>5 の地震 (279 個) 直前の TEC 異常の探索 (東海大学 [課題番号: 2501])
 (a) 地震 4 時間前の TEC 強度残差のヒストグラム. 若干正の値がピークとなっている. (b) 4 時間ごとに計算した TEC 残差. 地震 4 時間前に最も大きな正の値になっている. 赤線は全てのデータを用いた場合. 緑線はヒストグラムの上下 5% の値を削除して求めたもの.

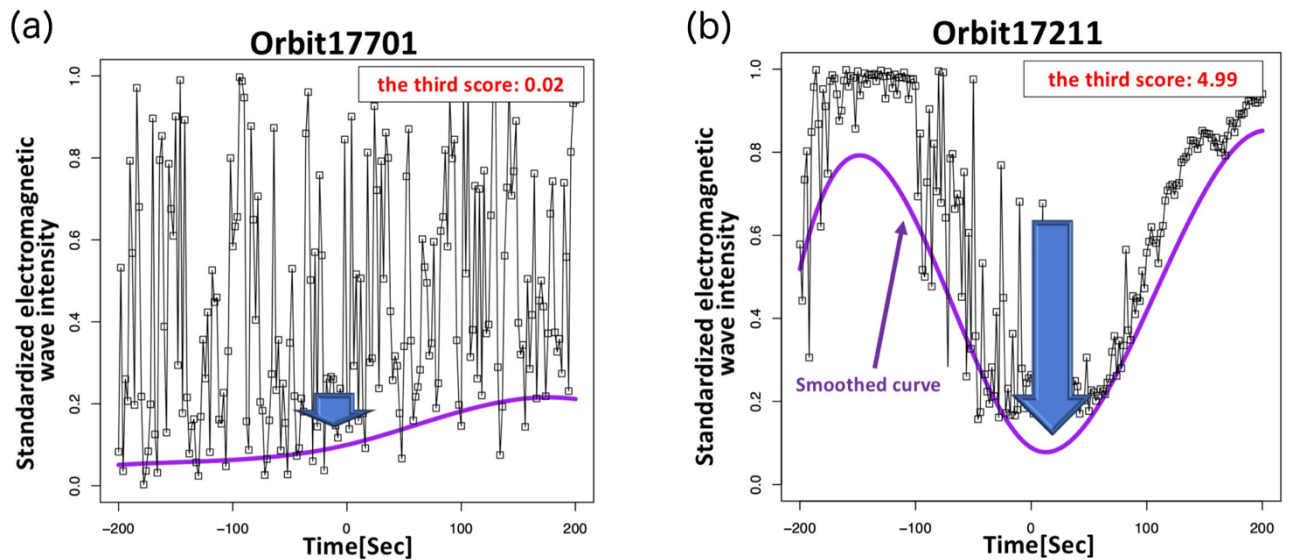


図 16. 直下で地震が起きたときの DEMETER 衛星の VLF 滞電磁波強度の解析例 (東京学芸大学 [課題番号: 2943])
 時刻ゼロは, 衛星が最も震源に近付いたとき. 青線がノイズ処理後に平滑化した強度の時系列. 第 3 成分スコアは, 図中, 右上部に赤字で表示. (a) 2005 年 3 月 28 日 M8.6 (97.108E, 2.085N, 深さ 30 km). 電磁波強度の減少はみられない. (b) 2010 年 10 月 7 日 M4.8 (27.574E, 43.065N, 深さ 10 km). 顕著な減少が見られる.

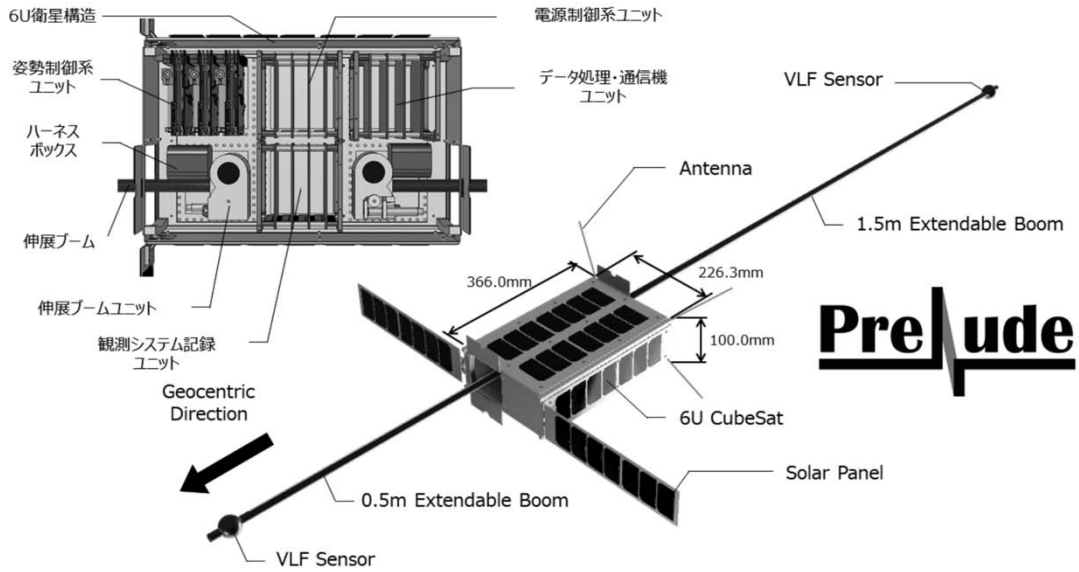


図17. 地震先行現象検証衛星PRELUDEの外見と衛星内のコンポーネント（JAXA [課題番号：2901]）

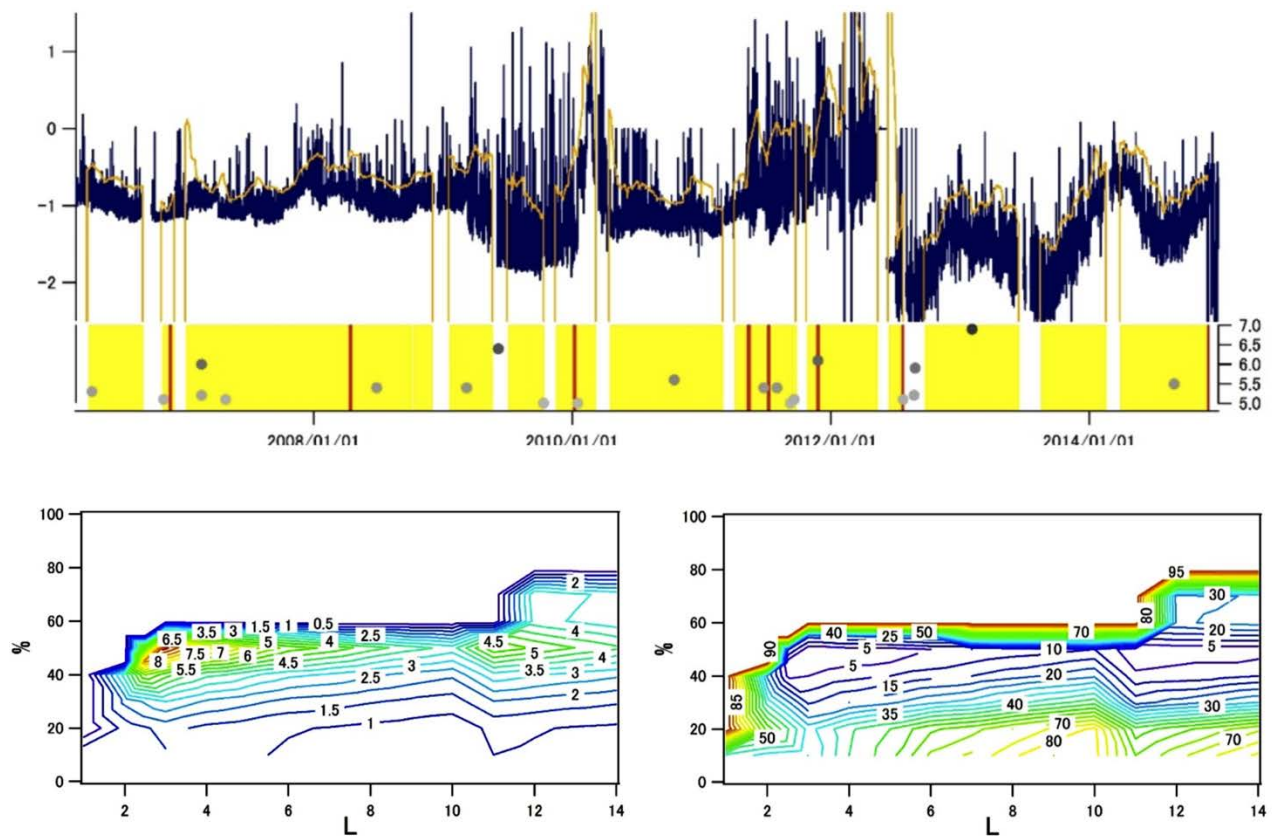


図18. VHF電波異常に基づく地震予測の検証（東海大学 [課題番号：2501]）

(上) えりもでの広尾放送局の電波受信強度(紺)と、アダプティブに決めた閾値(オレンジ)の時系列。下の帯グラフが、黄色が警報OFF、赤色が警報ON期間をあらわす。帯グラフ上の丸が地震の発生した期間とそのときのマグニチュード(右軸)を示す。(左下) 確率ゲインの等高線図。異常と判断するための検出時間割合の閾値(縦軸)と警報持続時間をチューニングパラメタとした。(右下) p値(%)の等高線図。縦軸、横軸は左下と同じ。

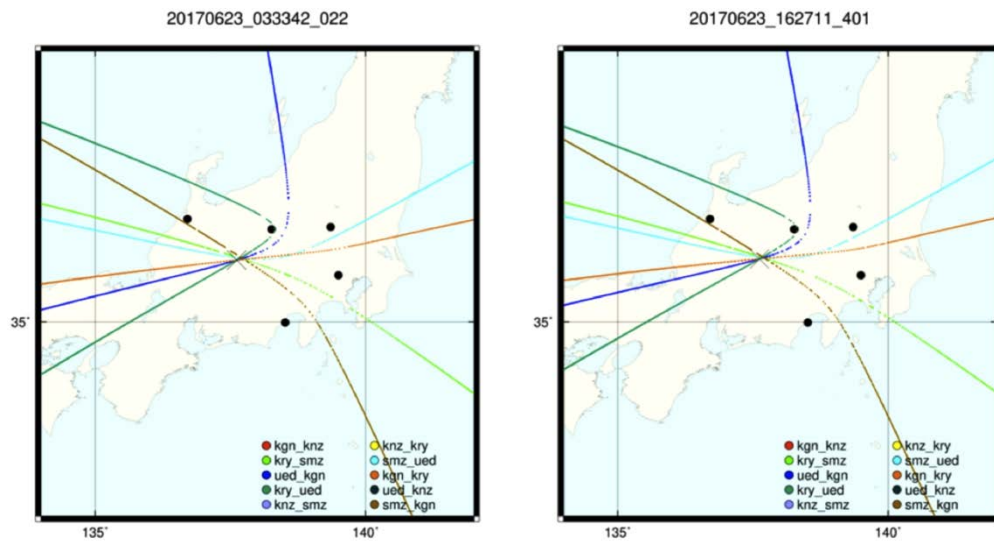


図19. 電磁波の到達時間差による波源位置標定の例（東海大学 [課題番号：2501]）
 2つのパルスとも、2日後に発生した2017年6月25日長野県西部の地震(M5.6)の震央から10kmの同一地点で発生した。

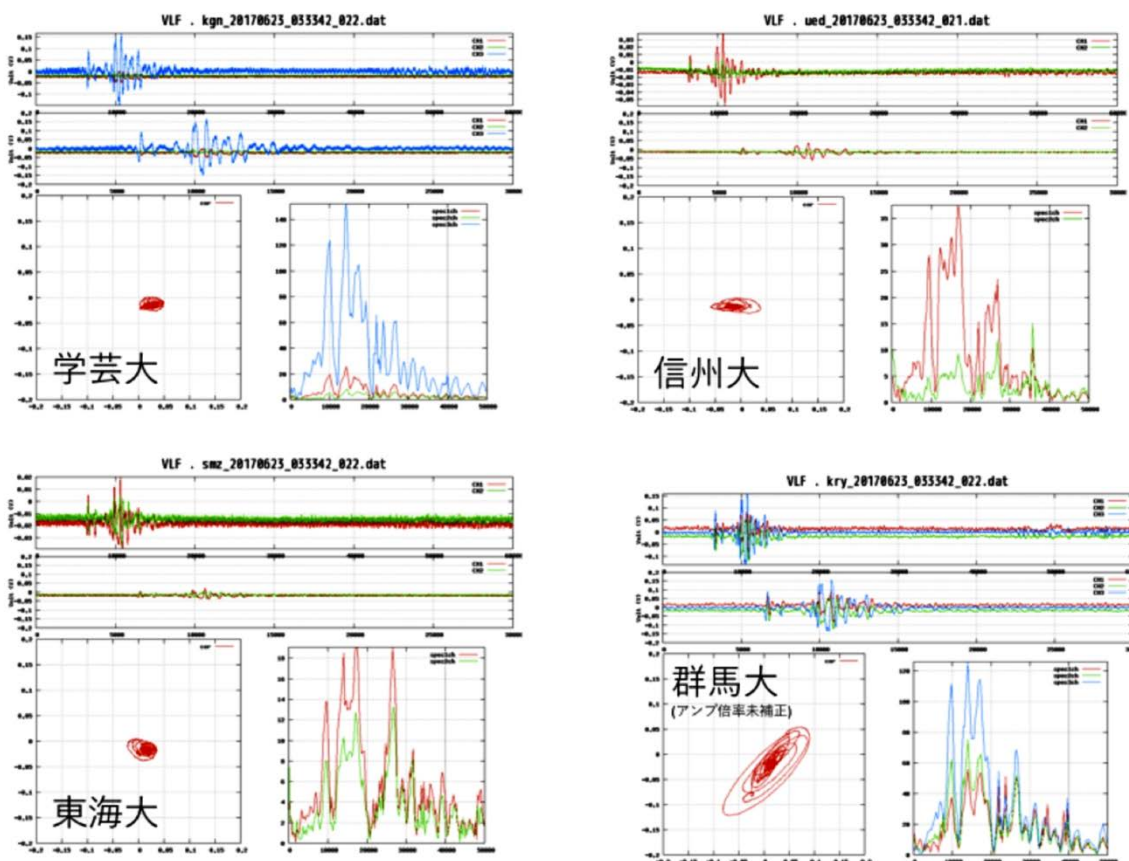


図20. 2017年6月23日の3時33分42.022秒に観測された波形(東海大学[課題番号:2501])
 いずれの観測点でも観測された波形は時系列でもスペクトルでも良く似ていることから、
 同じ事象を観測している事が確認できる。また午前3時台には中部地方では落雷は発生していない
 事がフランクリンジャパンのウェブ上の落雷データから確認できた。

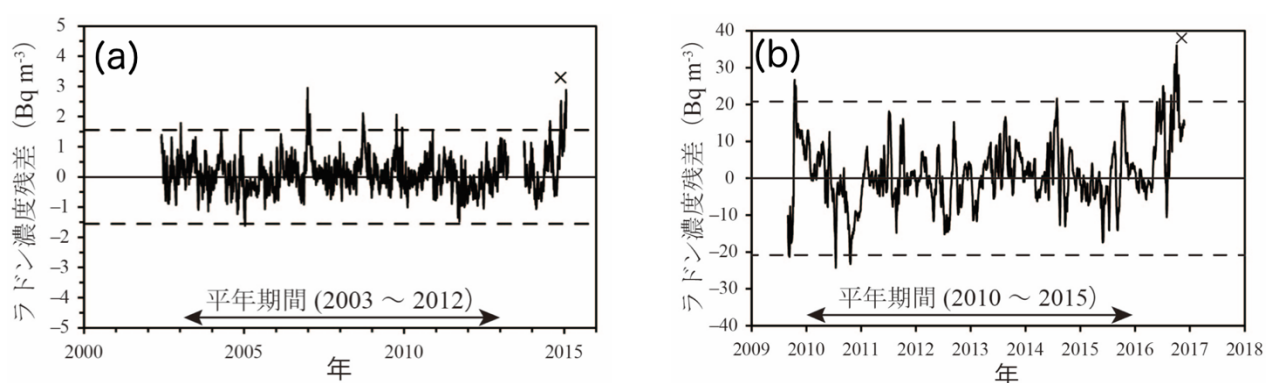


図21. (a)信州大学医学部(b)鳥取大学医学部における大気中ラドン濃度データ (東北大学
 [課題番号:1207])

(a)の×印は、2014年11月22日に発生長野県神城断層地震、(b)の×印は、2016年10月21日に発生鳥取県中部地震。

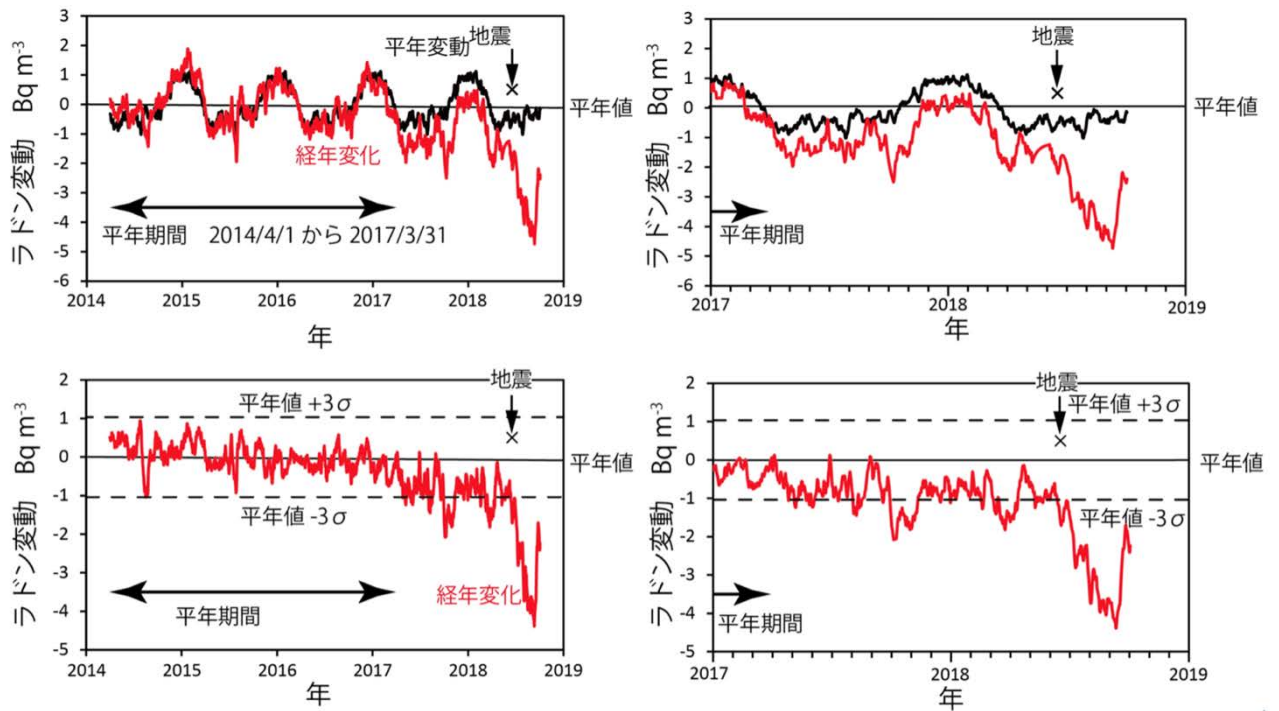


図22. 大阪薬科大学における大気中ラドン濃度データ（東北大学 [課題番号：1207]）
 経年変動と平均変動(上図)と平均変動からの残差(下図). ×印は2018年6月18日に発生した大阪府北部地震.

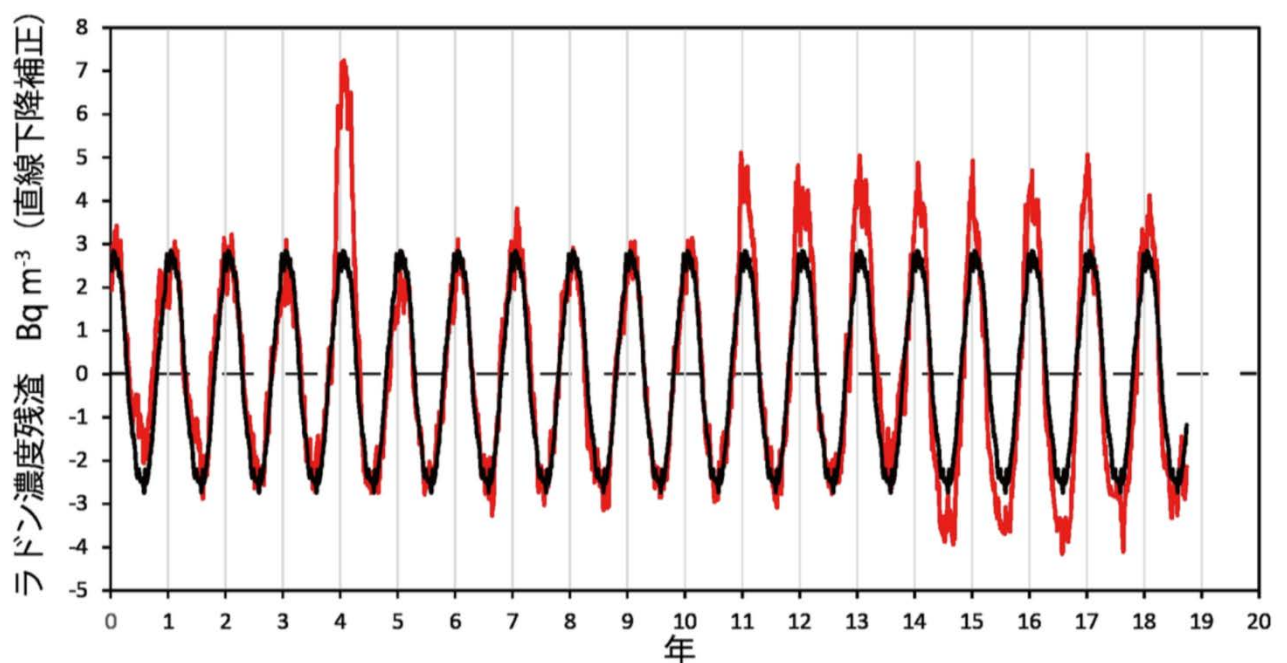


図23. 札幌医科大学における大気中ラドン濃度の長期データ（東北大学 [課題番号：1207]）
 赤線がデータ. 黒線は、2010年以前の平均変動パターン. 2011年3月の東北地方太平洋沖地震以降は、年周変動の振幅が大きくなった.

1 (5) 地震動・津波等の事前予測・即時予測

「地震動・津波等の事前予測・即時予測」計画推進部会長 香川敬生

(鳥取大学大学院工学研究科)

副部会長 太田雄策

(東北大学大学院理学研究科)

1. はじめに

地震、火山噴火に伴う地震動、津波、地すべり、山体崩壊、火山灰や溶岩の噴出などの災害誘因を、その発生前に高精度に評価しておくことは、これらの災害対策に資するために重要である。また、各種観測データの利用法や解析手法を開発、高度化し、地震・火山噴火発生直後に高精度かつ即時的に災害誘因の規模を予測して情報伝達することは、災害および2次災害の軽減にきわめて有効である。そのため本テーマでは、本計画で得られる地震発生や火山噴火の理解や構造モデルなど最新の研究成果を利用して、地震動・津波等の事前予測・即時予測を通じた災害軽減に資する研究を行った。同時に、事前予測・即時予測結果を効果的に社会に還元するため、防災工学や社会科学との連携、および防災に関する現業での活用を指向して研究を進めた。

2. 5年間(平成26-30年度)の成果

(1) 5年間の成果概要

事前評価については地震動および地震時地すべりに、即時評価については地震、津波、地殻変動、火山灰拡散と、地震、火山噴火に伴う多岐にわたる災害誘因を対象とした研究を実施した。その結果、何れの項目についても災害軽減のための現業と密接に連携し、また現業の支援に貢献する成果を得ることができたと考える。以下、大学が実施した研究の5年間の成果のうち、代表的なものをまとめる。

(2) 地震動事前評価手法の高度化

2011年東北地方太平洋沖地震における周波数別地震波生成の空間的な棲み分けをはじめ、国内外で発生した被害地震の震源インバージョン解析を広帯域で精力的に実施し、既往スケーリング則との整合性を通じて強震動予測の高度化を進めた。(京都大学防災研究所[課題番号:1903])

京都盆地および関東平野中川低地において強震観測を維持管理し、堆積盆地構造の地震応答の実測と地盤構造モデルの改良を継続的に行い、特に大阪堆積盆地、京都盆地、奈良盆地を対象として3次元速度構造モデルを高度化した。構築したモデルを用いて2018年大阪府北部の地震(震源モデルは上記[課題番号:1903]による)をシミュレーションした結果(図1)、直達波および明瞭な後続波の多くの相(多重反射、盆地端部・基盤の段差構造で発生する表面波)を良好に再現することができた。(京都大学防災研究所[課題番号:1911])

関東平野での3次元地震動伝播シミュレーションから、長周期地震動の生成にPL波が強く関与していることが示された。PL波は、Rayleigh波と同様に震源の深さに敏感であるた

め、P波直後に観測されるPL波の震幅から後続の長周期地震動(Rayleigh波)を予測する、長周期地震動の即時予測の可能性が示唆された。さらに、地震動予測の広帯域化、高解像度化の到達点として、観測データとの同化に基づく長周期地震動シミュレーションを試み、現時点で地震波伝播速度の8倍の速さでの予測が可能となっている(図2)。このことにより、データ同化による長周期地震動の即時予測の可能性をも示すことができた。(東京大学地震研究所 [課題番号: 1516])

(3) 地すべり事前評価手法の高度化

今期5ヶ年期間中に発生した地震時地すべりと過去の地すべりの調査によって、地震時に発生する地すべりの地質・地形的特徴が明らかになった(図3)。具体的には、火山地域では軽石自体あるいは軽石直下の火山灰土がすべり面となるケースが多く、非火山地域では重力斜面変形あるいは過去の地すべりに関連している。これらより、火山地域・非火山地域ともに、ハザードマップ作製方法の大枠を構築することができた。また、様々なタイプの地すべりにおいて地震動、微動、間隙水圧等の観測を行い、地形や地すべりブロックの形状、地すべり土塊の厚さや地下水位に起因する斜面の揺れ方を明らかにし、強震時の過剰間隙水圧の生成や斜面の変形に関するデータを収集することに成功した(京都大学防災研究所 [課題番号: 1912])。

(4) 地震動即時評価手法の高度化

緊急地震速報を高度化、高精度化するためには、観測点の密度を高くすることが解決方法のひとつである。そこで、現状で最も高密度に配置されている自治体震度計のうち鳥取県の震度観測ネットワークを対象に1秒パケットで最大加速度およびその時点の震度情報を配信できるようにシステム更新をおこない、そのデータにPLUM法を適用し、準リアルタイムに県内震度分布の推移を表示するシステムを作成した。さらに、震度の距離減衰の考慮、予測する1kmメッシュ点の全てを2次震源とする波動伝播の導入、P波振幅より震度を予測する手法の追加、により迅速かつ精度の高い準リアルタイム震度分布の予測を可能とした(図4)。(鳥取大学工学研究科 [課題番号: 2001])

(5) 津波即時評価手法の高度化

リアルタイム浸水予測手法(NearTIF)の高度化を実施し、W-phaseインバージョンに加えてGNSSデータを利用したRAPIDや津波波形データを利用したtFISHデータから得られる津波波源モデルに対する有効性を示した。新たに、震源直上の海底圧力波形を用いたデータ同化手法を開発し、30km間隔で観測が実施された場合、地震の情報が無くても、データ同化により数分で津波波動場を予測できることを示した。この手法と上記NearTIFを組み合わせると2011年東北地方太平洋沖地震津波に適用し、10分以内に高精度な浸水予測までを可能とする手法開発に成功した。さらに、複雑な津波数値計算などを実施することなく、S-Netの観測圧力波形(500秒以内)の処理のみで津波波源域(隆起域)とそれを発生させた地震の規模を推定する手法を開発し、1952年および1968年十勝沖地震の津波に適用し有効性を確認した(図5)。なお、ケーブル式津波観測網が無い地域を対象に、W-phaseインバージョン結果に深さ依存の剛性率を加えることで適切な断層モデルを推定する手法を開発し、1992年ニカラグア津波地震を含む全

ての地震の津波波高及び津波浸水域を高精度で予測可能であることを示した。(北海道大学 [課題番号 : 1005])

(6) 地殻変動即時評価手法の高度化

地震規模を即時的に推定するための技術開発として、GNSS 搬送波位相データから断層すべりを直接推定する手法を用いた地震時すべり推定の高度化を行い、2016年熊本地震 や 2011年東北沖地震の最大余震である茨城沖地震等で実用性を示した。また、リアルタイムに推定される断層すべりの不確実性を定量評価するための手法開発を行い、一枚矩形断層におけるMCMCを用いたアルゴリズムの開発を行った。これは改良を加えた形で2019年2月段階で国土地理院に技術移転され、今後の活用が期待される。また、リアルタイム用途を念頭に同手法のすべり分布への拡張を行ない (図6)、国土地理院と共同で開発しているリアルタイム地殻変動監視システム (REGARD) の高度化に貢献した。さらに、REGARD 等の結果を津波浸水推定に活用するための技術開発を進め、内閣府の総合防災情報システムの機能の1つに実装された。(東北大学 [課題番号 : 1209])

(7) 火山灰拡散即時予測手法の高度化

XバンドMPレーダーによって、霧島新燃岳、桜島、口永良部島、諏訪之瀬島の噴火に伴う噴煙の高度等の外形情報、噴煙柱形成、移流・拡散過程を把握することができた。特に、冠雲によって噴煙が目視できない時でも、レーダーにより噴煙を可視化でき、気象条件に関わらずその有効性が示された (図7)。桜島の噴火については、観測された反射強度の空間分布と地上降灰量を対比し、反射強度と火山灰量との経験式を構築した。ライダー観測により、噴火発生時に加え静穏時でも微小な火山灰粒子を含む白煙が放出されていることを確認し、偏光解消度により粒子の形状が推測可能であることを示した。さらに、火山噴火の噴煙により、GNSSによる搬送位相遅延量とSNRに顕著な変化があることが桜島、阿蘇山の噴火で確認され、衛星-受信機を結ぶ異常伝搬経路の交線から噴煙高度を推定することができた。降下火山灰シミュレーションによって得られる予測量が観測データと良好に対応することを示し、噴火に伴う地震動振幅と地盤変動の線形結合から火山灰放出率と噴煙高度を決定し、それを入力条件とする火山灰拡散予測シミュレーションを実装した。(京都大学防災研究所 [課題番号 : 1913])

3. 平成30年度の成果概要

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 地震動の事前評価

○震源モデルの高度化

2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震 (M_{JMA} 6.6) について、いくつかの観測点では2つの波群が確認されているため、経験的グリーン関数法により2つの SMGA からなる強震動震源モデルを推定した。2つ目の SMGA2 の破壊開始点は SMGA1 の破壊開始点より北北西に7.5km、また傾斜方向には5km浅い位置で、4.4秒後に破壊したと推定された。SMGA1 および2の設定位置に近い余震記録を経験的グリーン関数として波形フィッティングを行った結果、SMGA1 のサイズは $6 \times 6 \text{ km}^2$ 、SMGA2 のサイズは $4.8 \times 4.8 \text{ km}^2$ と求められ、破壊はど

ちらも深い方から浅い方へ進展した。応力降下量は両 SMGA とも約 7 MPa と同様の地殻内地震のそれに比してやや小さい値に求まっている。波形インバージョン結果によるすべり分布と比較すると、SMGA1 はすべりの大きい領域に対応する一方、SMGA2 の位置は波形インバージョンによるすべりの大きい位置とはやや異なる位置に求まっていることがわかった。

2018 年 6 月 18 日に大阪府北部で発生した地震 ($M_{JMA} 6.1$) の震源過程を強震記録の波形インバージョン解析(対象周波数帯域 0.1~2Hz)により推定した(図 8)。ほぼ南北走向の逆断層(断層 1)と北東-南西走向の右横ずれ断層(断層 2)の 2 つの震源断層が関わっていることが明らかとなった。なお、余震のメカニズム解析から推定した応力場は σ_2 と σ_3 がほぼ等しいことが分かっており、この地域では逆断層型、右横ずれ型の両方の地震が起こりえる環境にあり、本震の破壊過程とも矛盾しない。この地震の破壊は、最初に断層 1 で始まり、約 0.3 秒後に断層 2 の破壊が始まり、その破壊は南西の浅い側に向かって進展した。断層 1 および 2 はいずれも 4~5 km 四方の震源断層であり、主たるすべりは深さ 10~13km の範囲に集中し、震源断層の破壊は地表には到達していない。断層 2 は有馬-高槻構造線断層帯の 2~3 km 南に位置する伏在断層の一部(伊丹断層の東部延長)と考えられ、今回の地震の破壊域の西端は 1987 年 8 月 21 日の右横ずれ型の地震 ($M_{JMA} 4.2$) の余震域の東端に対応しており、一連の地震活動と考えられる。(京都大学防災研究所 [課題番号: 1903], 浅野・他, 2018, Asano et al., 2018, 岩田・浅野, 2018, 岩田・他, 2018(1); 永井・他, 2018(1, 2, 3))

○地下構造モデルの高度化

大阪平野とその周辺の数速度構造モデルを検証するため、2018 年 6 月大阪府北部の地震を対象に地震動シミュレーションを行った。用いた 3 次元速度構造モデルは大阪盆地モデルと奈良盆地モデル(関口・他, 2019)であり、後者は平成 29 年度の本研究で作成したものである。震源モデルには、前述の研究によるもの(Asano et al., 2018)を用いた。地震動シミュレーションは、震源モデルと大阪堆積盆地の 3 次元速度構造モデルを与えて 3 次元差分法により周波数 2 Hz までの計算を行い、さらに沖積層等からなる浅部の地震動応答を浅層地盤構造モデルを用いて等価線形化法により計算した(図 1)。計算された地震動最大速度分布では、震央からみて南西~西方向に相対的に大きい値が広がった。これは北東南西走向の横ずれ断層のメカニズムに対応する S 波のラディエーションパターンと破壊伝播の影響がに大阪堆積盆地による地震動の増幅効果が加わって形成されたと解釈できる。また、大阪盆地北縁部や上町断層帯北部の佛念寺山断層の西側に沿って帯状に最大速度が大きい地域が見られた。これは、基盤深さの急変により地震波の波面が大きく曲げられ、波のエネルギーに集中が起きたことによると考えられる。このような分布形状は大局的には観測値の分布と整合している。計算波動場には、直達波の後に堆積盆地基盤面と地表との間の多重反射波(例えば、岩田・他, 2018)や盆地端部および平野下に伏在する活断層による基盤の段差構造から発生した表面波など後続波の発生が見られ、場所によっては直達 S 波より大きな振幅を生じている。大阪平野内の地震観測点の観測波形と後続波の到来はよく対応しており、速度構造モデルは表面波の形成・伝播などの盆地の応答はおよそ再現できていると考えられる。一方、計算地震動の振幅は観測に比べ全体的に小さく、また盆地端部近くの観測点には波形の再現がよくない点があり、構造急変地域でのモデル更新が課題としてあげられる。(京都大学防災研究

所 [課題番号：1911]，岩田・他，2018(2)；関口・他，2018；関口・他，2019(1, 2))

秋田県横手盆地において常時微動単点およびアレイ観測を実施し，地盤構造モデルを作成した。それをを用いて，横手盆地東縁断層北部が活動したとし 1896 年陸羽地震の強震動シミュレーションを実施し，J-SHIS モデルとの比較をおこなった(図 9)。その結果，同地域で基盤が深くなっていることが陸羽地震の被害域が南に延びた主要因であることが分かった。(拠点間連携研究 [課題番号：2953]，佐藤・他，2018；佐藤・他，2019)

2011 年東北地方太平洋沖地震の際に周期 1-3 秒の大きな地震動が観測された東京湾西岸部と小田原地域を対象に，J-SHIS モデル，微動探査結果などを対象に浅部深部統合初期モデルを作成し，1 次元重複反射を仮定したハイブリッドヒューリスティック法による地盤増幅特性の逆解析によって，S 波速度および Q 値を同定した(図 10)。2018 年北海道胆振東部地震の被災域への適用のため，微動探査を実施している。(拠点間連携研究 [課題番号：2955]，津野・他，2019)

同じ土質試験結果を対象としても，解析パラメータ設定のばらつきにより，技術者毎に解析結果に大きな違いが生じる場合があることを確認した。また，2 次元有効応力解析 FLIP を用いて，強震動下の液状化地盤応答を検討した。地盤増幅率と周期比(地盤と入力地震動)の関係では，入力波が増加すると地盤増幅率の変動幅が小さくなる傾向を示した。なお，一般的な液状化指数(PL)では明瞭な傾向が見えなかったが，有効応力減少比を用いて過剰間隙水圧を直接考慮できる液状化危険度指数(LRI)が大きくなる時，地盤増幅率の変動幅が有意に小さくなることが分かった(図 11)。(拠点間連携研究 [課題番号：2990]，地元・他，2019；一井・他，2019；田中・他，2019)

○強震動評価の高度化

2019 年 1 月 3 日に発生した熊本県熊本地方の地震(M5.1)は，震源が浅い(気象庁暫定値 10 km)横ずれ型のメカニズムを持つものであった。この地震により熊本県和水町で震度 6 弱，熊本市北区と熊本県玉東町で震度 5 弱を観測し，住宅の瓦のずれやガラスの破損，神社の石灯籠などに被害が出た。和水町の震度計の波形記録を調べると，S 波に後続して表面波とみられる周期 0.5 秒程度の長い波群が確認された。速度応答スペクトルを求めると，周期 0.5 秒の狭い周期帯に 110 cm/s の強い速度応答が確認された(図 12)。この周期帯は計測震度を大きくするが，木造家屋の倒壊を起こす周期帯(1-2 秒)より短いことから，被害が限定的であった可能性がある。和水町では，2016 年 4 月 14 日の熊本地震前震(M6.5)と 4 月 16 日の本震(M7.3)でも震度 6 弱と 5 弱が観測されている。いずれの地震波形も同様の周期特性を示しており，地盤の影響が考えられる。なお，熊本地震本震では，周期 0.5 秒の強い応答に加え周期 1-2 秒にもやや大きい(>40 cm/s)応答が見られた。これに対して，2019 年 1 月の地震は M が小さく，震源スペクトルが長周期帯で弱かったものと考えられる。(東京大学地震研究所 [課題番号：1516]，古村，2018；Furumura and Kennett，2018；向井・他，2019)

2011 年東北地方太平洋沖地震について，Kurahashi and Irikura(2013)による SMGA1(M7.55)からの地震動を，前弧および背弧側に分けて距離減衰式と比較し，PGA，PGV とも過小評価となることを示した(図 13)。2003 年十勝沖地震についても同様であった。2011 年東北地方太平洋沖地震によって各地で誘発された地震活動変化について既往研究

を交えながら概観し、それらの地震活動変化を引き起こした要因について整理した。(拠点間連携研究 [課題番号: 2991], Ishibe et al., 2018; 木内・他, 2019)

災害リスク評価のばらつきを理解するため、震源モデル(6通り)、強震動予測モデル(5通り)、表層地盤増幅率(3通り)、これらに倒壊率を組み合わせ、評価結果のばらつきを容易に理解することが可能な表示システムの構築を行った。また、ばらつきのある災害リスク評価結果を防災計画の策定に活用するという観点から、命を守る、財産を守る、業務・生活・地域を守る、という3つのレベルの達成目標に応じたハザードシナリオ選択の考え方についての整理を行った。(拠点間連携研究 [課題番号: 2951])

イ. 地震動による構造物被害の事前評価

将来時点の予測をおこなうことを前提に、木造戸建住宅の棟数および築年数分布の将来予測方法を検討した。高知県南国市を対象に、固定資産課税台帳から抽出されたデータを用いて、築年数ごとの建物残存率を疑似的に推定した。これに加え、住民基本台帳から抽出されたデータを用いて、建物用途種別、居住率、1棟あたりの平均居住世帯数の時系列変化を分析した。これらに基づき、固定資産課税台帳から抽出されたデータを用いて将来予測を行った(図14)。(拠点間連携研究 [課題番号: 2952], 河野・西嶋, 2018)

ウ. 地震による地すべりの事前評価

2008年中国ブン川地震、2015年ネパールゴルカ地震による斜面崩壊の分析を進めた結果、谷の侵食加速による谷中谷に数多くの崩壊が集中していることが明らかになった。我が国でも特に西南日本外帯には谷中谷が広く分布していることが判明しつつあり、特に南海トラフ地震時に要注意であることが明らかとなった。2018年北海道胆振東部地震によって発生した壊滅的な地すべりでは、強風化軽石およびその直下の火山灰土にすべり面が生じた(図15)。その他の過去の事例も踏まえると、降下火砕物斜面の地震時地すべりのすべり面形成層準として、風化した軽石とその近傍の地層が地震時地すべりに対して最も危険であることがわかった。これらの分布は、火山灰層序学的に調べることが可能である。

谷埋め盛土において、事例収集できたPGAが200 galまでのイベントでは、PGA、PGV、AI(Arias Intensity)と間隙水圧の上昇量は高い正の相関を示すとともに、震動の周波数特性が異なり、長周期(>1秒)成分を多く含んだイベントはPGVの大きさに比して間隙水圧の上昇量は小さかった(図16)。

四国の大規模地すべり斜面における稠密な常時微動観測から、H/Vスペクトルのピーク周波数が空間的に連続性を持つことがわかり、その連続性が地表変位によって判別した地すべりブロック分割とは異なることが明らかになった。平成30年大阪府北部の地震において、谷埋め盛土における擁壁の変形メカニズムを明らかにするとともに、高い地下水位を持つ公園での地すべり現象を調べた。また、平成30年北海道胆振東部地震において、札幌市および厚真町の谷埋め盛土にて調査をおこない、旧谷筋周辺を2-3m程度埋めた盛土が地すべり状の変状を呈したことを明らかにした。厚真町の大規模岩盤地すべりにおいては余震観測をおこない、特有の周波数(2 Hz)で長く震動することが分かった。(京都大学防災研究所 [課題番号: 1912], Chigira et al., 2018; 土井・他, 2018; Doi et al., 2019; Ma et al., 2019; Tsou et al., 2018; Zhao et al., 2018)

斜面崩壊に伴う地震動の特徴を検討した（表1）。高周波卓越周波数はおおむね1-10Hz程度で崩壊タイプに大きく依存しない。継続時間は概ね30~200秒程度で、イベントの長さを反映していると考えられる。周期10秒以上の長周期信号は、崩壊域が数百m四方にわたり厚さ20mを超える大規模な地すべり性崩壊で確認されることが推察される。あわせて地形がシミュレーションに及ぼす影響も評価している。（拠点間連携研究〔課題番号：2994〕、土井・他，2018；Doi，2018）

エ．火山灰や溶岩噴出の事前評価

大規模噴火を想定した JMA-RATM による降灰シミュレーションから降灰確率を求めた結果、富士山で宝永規模の噴火が起きた場合に、都心で10cm以上の降灰になる確率は3.3%、桜島で大正規模の噴火が起きた場合に鹿児島市街で1cm以上の降灰になる確率は7.8%と試算された。（気象庁気象研究所〔課題番号：7010〕）

（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

現在の緊急地震速報で用いられている“震源とマグニチュードの早期決定”という考え方に加えて“揺れから揺れを予測する”という考え方で研究を進めている。平成30年度は地震波の散乱や減衰構造の精緻化、PLUM法の高度化、地盤増幅特性の適正化に取り組んだ。これにより、これまで以上の精度や堅牢性・迅速性が得られ、速度構造、散乱・減衰構造をとり入れることで、さらに早い段階で精度よく予測できることが分かった。また、強震入力時の海底地震計の挙動とその対策や、地震動の伝播方向をリアルタイムで推定することの考察を進めた。“揺れから揺れを予測する”という考え方は、長周期地震動に対しても十分に適用できることが示された。（気象庁気象研究所〔課題番号：7008〕、Kodera，2018；Kodera et al.，2018；Ogiso et al.，2018）

上記研究のように揺れの実況分布から揺れの伝播を予測するには、観測点密度が重要なため、気象庁観測点よりも高密度で配置されている自治体震度計の利活用を目指した検討を行っている。鳥取県管理の計測震度計34点からの1秒パケットのリアルタイム震度と最大加速度値を、鳥取県情報ハイウェイを介して継続受信し、気象庁緊急地震速報で導入されるPLUM法を用いたリアルタイム震度の表示システムを昨年度に試作した。今年度は、これにPLUM法では考慮されていない距離減衰を導入し、また1kmメッシュとした予測点全てを2次震源とする波動伝播を考慮した。さらに、P波を用いた震度予測の概念の導入も試みた。これらを2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震のリアルタイム震度を模擬したデータに適用したところ、より早く、かつ精度良く震度分布の予測が可能となった（図4）。

震度計観測点における震度情報から周辺の非観測点での震度を予測することを想定し、常時微動を用いた地盤震動特性の稠密把握および地下構造モデルの構築を実施した。今年度は、既往観測点分布が粗な地域のうち、北栄町、倉吉市関金地区、および智頭町を対象とし、既往データを補間した卓越周期分布および浅層地下構造モデルを得ることができた。2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震（M6.6）の被災域および2000年鳥取県西部地震の境港市では、常時微動を用いた地盤卓越周期や地下構造モデルでは説明できない強震動

が観測された。これらは非線形地盤応答による卓越周期の長周期化や短周期地震動の減衰による影響考えられ、これらの観測点における非線形地盤応答の実態について検討をおこなった。(鳥取大学工学研究科[課題番号:2001], 香川, 2018(1, 2), 2019; 香川・野口, 2018; 香川・他(2018); 神定・他, 2018; 神定・他, 2019; 西村・他(2018); 野口・他, 2018(1, 2, 3), ; 吉田・他, 2018)

大地震の際に平野で発生する長周期地震動の即時予測の実現に向けた、高速計算環境による観測データと高速シミュレーション同化の実現可能性を数値実験により評価した。データ同化手法は、震度の即時予測(Hoshiya and Aoki, 2015)や津波の即時予測(例えば, Maeda et al., 2015)で広く活用されている最適内挿法を用いた。2007年新潟県中越沖地震(Mw6.6)の強震観測データ同化と予測では、評価領域を480km×480km×55kmとし、J-SHIS地下構造モデルを0.24kmの格子間隔で離散化して3次元差分法計算により長周期(>2.7秒)地震動を計算した。データ同化は、領域内の482点のK-NET, KiK-net強震観測データを用いて行い、地震発生から30, 50, 70, および90秒までデータ同化を行った後に、高速計算により未来(地震発生から160秒後)の長周期地震動を予測した。予測精度と猶予時間にはトレードオフがあるが、データ同化が進むにつれ長周期地震動の振幅と継続時間が良く予測できることが確認された。データ同化完了後に100秒後の波動場の予測に要する時間は、東大と筑波大が共同運用するOakforest-PACS計算機の並列計算(2048CPU)で12.4秒であった。これは長周期地震動の伝播にかかる実時間よりずっと短く、観測データの取得に合わせて即時予測を繰り返し進め、予測精度を高めることが可能である。2011年東北地方太平洋沖地震への適用例を図2に示した。近年の海域強震観測網(DONET, S-NET)の整備により震源域近傍でのデータ同化が可能となり、より猶予時間のある即時予測が可能になると期待できる。

(東京大学地震研究所[課題番号:1516], Furumura et al., 2019)

利用者が多い大規模建物や災害拠点となる施設を対象として、固有周期や立地条件が異なる個別の建物の、建物入力地震動のリアルタイム分類、揺れ継続時間の予測、に取り組んだ。地震の位置・規模・メカニズムの即時決定システム(GRID MT)を利用し、地震発生直後に災害拠点などで震源情報を有効利用する方法について議論した。これらを直接建物の被害把握などに用いることはできないが、災害拠点となる建物においては、中長期的に避難準備や避難継続の判断、あるいは地域レベルでの復興支援体制の構築を考える上で、震源に関する情報を随時提供することは有意義と考えられる。建物利用者の心理的不安軽減を図るおよび地震収束後の復旧・退避行動の迅速化には、揺れの大小のみならず、揺れ継続時間の情報が必要である。震源特性・震源距離・地盤特性をパラメータとした、敷地地盤の影響等を含む建物振動特性を考慮した揺れ継続時間を分析した。図17は398地震の観測記録に対して、建物の基礎および上部階で得られた揺れ継続時間を示している。マグニチュードが大きくなるにつれて揺れ継続時間の中央値は大きくなる。また、建物の上部階の方が、基礎よりも継続時間が長くなる傾向が見られる。

(拠点間連携研究[課題番号:2958])

イ. 津波の即時予測

日本海溝・千島海溝に沿って150の津波計(圧力計)と地震計がケーブル式ネットワークシステム(S-Net)として設置された。昨年度は、地震発生後500秒の圧力観測波形の形状のみ

を利用して海溝型巨大地震による津波発生域(隆起域)を推定する手法を開発した。今年度は、推定された津波発生域の大きさから巨大地震の規模を推定する手法を開発した。まず過去に提案された4つのスケーリング則(宇津・関(1955), Wells and Coppersmith(1994), Somerville et al.(1999), Blaser et al.(2010))に従って、Mw8.0, 8.2, 8.4, 8.6, 8.8のそれぞれに対する断層モデルを千島海溝沿いにまんべんなく配置し、S-Net観測点で観測圧力波形を数値計算により作成した(図5)。それらの想定観測波形から、昨年度開発した手法により津波発生域を推定した(図5)。その津波発生域の面積を計算し、それらの対数をMwに対してプロットする(図18)。津波発生域の面積の対数とMwの関係を線形で近似するとともに、その誤差(標準偏差 Mw0.08)を推定した。この結果を用いれば津波を発生させた地震の規模を推定することができる。今回開発された手法を1952年十勝沖地震と1968年十勝沖地震の津波に適用し、その有効性を確かめた。1952年十勝沖地震についてはHirata et al.(2003), 1968年十勝沖地震についてはSatake(1989)のすべり量分布からS-Net観測点での海底圧力波形を計算した。それらの観測波形から津波発生域を本研究で開発された手法を用いて推定し、地震の規模を推定した。その結果、図18に示すように津波発生域は高精度で推定され、1952年十勝沖地震の規模は $Mw8.2 \pm 0.08$, 1968年十勝沖地震の規模は $Mw7.9 \pm 0.08$ と精度良く推定された。

なお、上記のようなケーブル式津波観測網がない地域では、地震波形解析により適切な断層モデルを推定する手法を開発する必要がある。特に津波地震に対応できる断層モデルを適切に推定することが重要となる。昨年度は深さに依存する剛性率を仮定することにより、津波地震による津波浸水予測にも対応できる手法を開発した。今年度は上記手法をインドネシアのスマトラ島沿岸では発生した2007年Bengkuru巨大地震(Mw8.4)と2010年Mentawai津波地震(Mw7.8)に適用した(図19)。典型的な巨大地震であるBengkuru地震の津波も、津波地震であったMentawai地震も、津波を上手く予測できることが分かった。さらに、1992年ニカラグア地震については、Gusman et al.(2014)の手法(NearTIF)を用いて津波浸水の即時予測が高精度で可能であることを示した。(北海道大学[課題番号:1005], Inoue et al., 2018. Ratnasari et al, 2018(1, 2); Tanioka, 2018; Tanioka and Gusman, 2018; Tanioka et al., 2018(1-4))

沖合で観測された津波波形の逆解析に基づく津波の即時予測手法システムについて、海底水圧データに記録される津波成分とノイズ成分を波形逆解析において同時推定して分離できるように改良した。また、予測精度をリアルタイムに評価する指標を検討し、概ね適切に評価できることを確認した。津波の減衰過程の予測のため、昨年度の南米沖に加え、ニューギニア島からサモア諸島にかけて発生した地震に伴う遠地津波の減衰過程の特徴について調査を行い、減衰過程における振幅がマグニチュードと関係していることを明らかにした。リアルタイム GNSS 測地データ解析によって推定される震源断層解との統合、波源の広がり小さな津波に対応するための段階的処理手法の導入等、手法の改良を行ったことに加え、波源推定に基づかない予測手法について、データ同化による津波面的把握とそれを用いた津波予測について検討し、マグニチュード8クラスの波源の広がりが大きい津波に対しては概ね適切な予測ができることを確認した。遠地津波の継続時間の予測手法について、沿岸津波観測データの移動自乗平均振幅の成長・減衰過程を数理モデルで表現し、地震のマグニチュードとの関係を明らかにすることで、継続時間の予測可能性を示した。(気象庁気象研究所 [課題番号:7011])

遠地実体波のスペクトル解析から得たスロー地震タイプの津波地震のスペクトルレベルをもつ近地の地震波形を理論波形として合成し、それらの津波地震に対する気象庁マグニチュード等の値を推定した。その結果、気象庁マグニチュードでは津波地震に対して1以上の過小評価の可能性があることを明らかにした。解析結果の公表までに時間を要していた遠地実体波震源過程解析の迅速化のため、サンプリング間隔・基底関数の数等を最適化し、比較的短い処理時間で安定して解が得られるよう処理の自動化を図った。(気象庁 [課題番号: 7009], 安藤, 2018; Tamaribuchi, 2018; Tamaribuchi et al., 2018; 溜渕, 2017)

津波生成磁場に関して、Tyler(2005)による2次元線形長波津波モデルによる津波生成磁場の解析解の改良を試みた。Tyler(2005)の解は津波ダイナモ効果を引き起こす背景主磁場をZ成分のみとして求めたが、本研究では水平成分の効果も考慮した。新しい解は、鉛直分力が非常に小さくなる磁気赤道付近でも津波生成磁場を検出する可能性を示唆するものと考えられる。(気象庁 [課題番号: 7007])

ウ. 地殻変動のリアルタイムモニタと震源断層の即時推定

平成28年度、29年度と開発を継続してきた、GNSS搬送波位相データから断層すべりを直接推定する手法の高度化について、海溝型地震に対して同手法を適用し、その性能評価を行った。また、平成29年度より開発を開始したリアルタイムGNSSデータによって推定される震源断層即時推定における不確定性の定量的評価の高度化については、すべり分布推定への拡張を行った。GNSS搬送波位相データから断層すべりを直接推定する手法 (Phase To Slip, 以下 PTS と表記)を用いて、海溝型巨大地震の地震時すべり分布推定を試みた。

2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震では非常に活発な余震活動が見られ、本震発生から1時間のあいだにM7級の大きな余震が3つ相次いで発生した。このうち、本震から約30分後の15時15分に茨城県沖で発生したMw7.8の地震(以降、茨城沖地震)に対してPTSを適用した。解析では震央から半径100kmにある40点のGEONET点で記録された搬送波データを使用した。解析においては、GNSS衛星の軌道暦としてInternational GNSS Serviceが提供する精密暦(最終暦)と、GNSS衛星から直接送信される放送暦の両者を比較のために用いた。茨城沖地震は、プレート境界で発生した地震であるため、プレート境界面を仮定し、そこに矩形断層を配置することで断層面とした。具体的にはプレート境界等深線に沿って、震央を中心に288枚の矩形断層を仮定した。図20にPTSによって推定された茨城沖地震のすべり分布の結果を示す。地震時すべり量は地震発生時刻の15分前から5分前の10分間の平均をその値とした。精密暦・放送暦の場合ではほぼ同様の結果となった。また、全体的に放送暦の方がわずかに大きいすべりが推定された。両者によるすべり量の差異は断層面全体の平均で5cmとなった。最大のすべりは震央からおよそ40km海溝軸寄りの位置で推定され、1.9~2.0mとなった。平均すべりは0.6~0.7mで、Mw7.8相当である。すべりの方向は大部分の断層面ではほぼ純粋な逆断層性を示している。これら得られた結果は、例えば強震データから推定されたすべり分布(Honda et al., 2013)とも概ね調和的であり、PTSが海溝型巨大地震に対しても有効であることが明らかになった。また、IGS精密暦と放送暦の両者がよく一致する結果を示したことは、外部情報に依拠しない地震時すべり分布推定が可能であることを改めて示唆する結果と考えることができる。一方、PTSで推定されたすべり時系列は地震に伴うステップ状の断層すべりは明瞭に捉えているものの、それ以外の時間

帯域における安定性は低い。また計算に要する時間もまだ短縮の必要があり、今後も継続した技術開発が必要と考えられる。

リアルタイムGNSSデータによって推定される震源断層即時推定における不確定性を定量的に評価することを目標として、マルコフ連鎖モンテカルロ法(Markov Chain Monte Carlo methods: 以下, MCMC)を用いた震源断層推定の不確実性定量評価の高度化を進めた。具体的には、より複雑な断層破壊を表現するために、プレート境界におけるすべり分布推定誤差の定量評価を試みた。すべり分布を推定するためにはプレート境界面上を小断層に分割する必要があるが、多数の小断層上でのすべりをそのままMCMCによって推定しようとする、解の収束に膨大な時間を要し、リアルタイム用途には適さないことが明らかになった。そのため、解析を複数ステージに分割し、ステージが進行するに従ってすべり量が多い領域のみ徐々に小断層のサイズを小さくすることで、すべり量が少ない部分への計算コストを下げる四分木アルゴリズムを開発した。適用事例は2011年東北地方太平洋沖地震であり、地震後600秒後時点のキネマティックPPP解析の結果をデータとして用いた。ステージは全部で4つとし、1, 2ステージでは断層面は8枚と31枚に設定し、その後のステージ3および4では、直前のステージ2もしくは4で、モーメント解放量が全体の上位80%を占める小断層のみを細分化した。これによって、MCMCによるすべり量推定を大幅に効率化することに成功し、観測点267点、サンプル数が 3.1×10^6 の場合で900秒程度で計算を終えることができるようになった。各ステージ毎の、各小断層毎に得られる事後確率分布(PDF)の中央値によるすべり分布を図6に示した。ステージが進むに従い、すべり量が細分化されていく様子が明瞭に分かる。今後は、このように得られた断層すべりの不確実性をどのように活用していくかの検討が必要である。(東北大学 [課題番号1209], Kawamoto et al., 2018; Musa et al., 2018; 大野・太田, 2018; Ohta et al., 2018; Tanaka et al., 2019)

相対測位による GEONET リアルタイム解析から得られる日本全国のリアルタイム地殻変動データを用いて地震発生時に矩形断層モデル及びプレート境界面上のすべり分布を即時推定する技術の開発を行い、電子基準点リアルタイム解析システムに実装した。加えて、電子基準点リアルタイム解析システムにおいて、相対測位法に加え、固定点が不要なため震源断層モデルが安定的に推定できると見込まれる精密単独測位法を試験的に導入した。さらに、観測点周辺の地物からのマルチパス誤差を定量的に評価する手法を開発し、これを補正值としてキネマティック GNSS 解析に用いることで、精度の向上が見込めることを確認した。(国土地理院 [課題番号: 6004], Kawamoto et al., 2018)

エ. 火山灰や溶岩噴出の即時予測

2009年以降、ブルカノ式噴火の発生頻度がきわめて高い桜島を対象に、噴火に伴う噴煙の早期検知と粒子密度の推定を目的とした地上観測を実施した。地上からのリモートセンシング観測で用いた手法はGNSS, XバンドMPレーダー, ライダーであり、この順に波長が短くなる。2015年後半以降、桜島の噴火活動は低レベルで、2017年および2018年の爆発回数は76回及び254回であり、1000回近い爆発が発生した2010年~2015年の1/5程度である。2017年10月までは昭和火口において噴火が発生したが、2017年11月以降は南岳のB火口において噴火が発生し、昭和火口の噴火活動は概ね停止した状態にある。

XバンドMPレーダーによる噴煙観測を霧島、桜島、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島

において継続した。このうち2018年において噴火が発生したのは、霧島新燃岳、桜島、口永良部島、諏訪之瀬島であり、いずれの火山においてもレーダーにより噴煙を検出できた。図7に2018年12月18日に口永良部島で発生した噴火のレーダー画像を示した。噴煙に対応する強い散乱体が火口上の4500m程度上空まで確認できる。噴火発生時は、口永良部島新岳の火口上低い高度に雲があり、目視観測では噴煙の最高到達高度は確認できないが、XバンドMPレーダーを使用することにより、冠雲時でも噴煙を可視化できることを示すことができた。

火山灰拡散シミュレーションには多くのコードがあるが、大気中浮遊または降下火山灰を量的に自動的に予測するものは無い。火山灰粒子の移流を決める風の場合は、気象庁により予測公開されているが、噴出した火山灰量を即時的に評価するシステムが無いためである。また、噴煙高度についても上述したように常に目視観測が可能な訳ではない。Iguchi (2016) は火山噴火に伴う地震動の振幅と地盤変動から評価される圧力源の体積変化量の線形結合から火山灰放出量を評価する手法を開発した。この手法により火山灰放出率をリアルタイムで評価し、経験的に導出された噴出率と噴煙高度の経験式を用いて即時的に火山灰の拡散および降下量を予測することが可能となる。京都大学及び筑波大学のサーバーに火山灰予測を実装した。火山灰拡散予測の結果を図21に示す。火山灰の拡散方向は概ね一致している。降下火山灰量についても、 2 kg/m^3 に達する桜島南西部の降灰量を予測できた。(京都大学防災研究所 [課題番号: 1913], 中道・他, 2018; Tanaka and Iguchi, 2019)

気象研究所で開発した気象レーダー観測網を用いた噴煙高度の確率的推定手法を用いて、霧島山(新燃岳)(2017~2018年)、草津白根山(本白根山)(2018年)、口永良部島(2019年)の噴火事例を解析した。航空路火山灰情報(VAA)業務で作成している現業者による火山灰雲の解析結果を火山灰データ同化システム(プロトタイプ)に取り込めるよう機能を拡張した。これにより多くの事例で火山灰雲領域の過大予測が抑制され、予測精度が改善された。(気象庁気象研究所 [課題番号: 7010], 石井・他, 2018(1, 2); Sato et al, 2018; 佐藤・他, 2018(1-4); 新堀・他, 2018)

4. 今後の展望

5ヶ年の研究計画における最終年として、それぞれの研究課題において既往研究成果の高度化が進み、また新たな取り組みに関して成果が継続して蓄積されており、地震・火山噴火の災害誘因の事前評価や即時推定における実務での活用が試みられている。これを承け、さらなる高度化に向けて継続的な第二次の検討を継続実施する。その際、これら事前・即時予測に関する情報を効果的に社会に伝達し減災に繋げるため、社会科学と連携した検討を引き続きおこない、社会から個人に至る行動を災害の軽減に向けて集約する手法を模索し続ける。

成果リスト

安藤忍, 2018, 陸域観測技術衛星「だいち2号」(ALOS-2/PALSAR-2)を用いた合成開口レーダー(SAR)干渉解析, 平成28年(2016年)熊本地震調査報告, 気象庁技術報告, 135, 35-45.
浅野公之, 岩田知孝, Miroslav HALLO, 2018, 強震記録による2018年6月18日大阪府北部の地震の震源過程, 日本地震学会2018年秋季大会, S24-09.

- Asano, K., T. Iwata, and M. Hallo, 2018, Rupture Process of the 2018 Northern Osaka Earthquake (Mw 5.6), an Earthquake Involving Both Thrust and Strike-slip Faults Near a Junction of Major Active Fault Systems Surrounding the Osaka Basin, Japan, AGU 2018 Fall Meeting, S43C-0602.
- Asano, K., 2018, Source Modeling of an Mw 5.9 Earthquake in the Nankai Trough, Southwest Japan, using Offshore and Onshore Strong Motion Waveform Records, Bull. Seismol. Soc. Am., 108, 1231-1239.
- Chigira, M., Sato, T., Matsushi, Y. & Suzuki, T., 2018, Landslides induced by the 2016 Kumamoto earthquake and its application to future earthquake-induced landslides (Invited), The 5th International symposium on Mega earthquake induced geo-disasters and long term effects, Chengdu, 7-8.
- 地元孝輔, 山中浩明, 是永将宏, 津野靖士, 2019, KiK-net 益城観測点におけるレイリー波位相速度と見かけ比抵抗の同時逆解析, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演, P04.
- Doi, I., T. Kamai, R. Azuma, and G. Wang, 2019, A landslide induced by the 2016 Kumamoto Earthquake adjacent to tectonic displacement - Generation mechanism and long-term monitoring, Engineering Geology, 248, 80-88.
- 土井一生, 釜井俊孝, 王功輝, 千木良雅弘, 2018, 地震時地すべり減災に向けた観測研究 - 斜面地震学の展開-, 日本地球惑星科学連合2018年大会, 招待講演, HDS11-01.
- 土井一生, 前田拓人, 釜井俊孝, 王功輝, 2018, 斜面崩壊によって励起された地震動波形の特徴 - 2017年の事例 -, 日本地球惑星科学連合2018年大会, HDS07-05.
- Doi, I., 2018, Development of a New academic field " Slope seismology" , International Seminar on Geo-science and Disaster Mitigation in Japan and South Korea.
- Furumura, T. and BLN Kennett, 2018, Regional distance PL phase in the crustal waveguide - An analog to the teleseismic W phase in the upper-mantle waveguide, J. Geophys. Res., 123, <https://doi.org/10.1029/2018JB015>.
- 古村孝志, 2018, 2015年5月30日小笠原諸島西方沖深発地震と異常震域の謎, 地震ジャーナル, 66, 40-51.
- Furumura, T., Maeda, T., and Oba, A., 2019, Early forecast of long - period ground motions via data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations, Geophysical Research Letters, <https://doi.org/10.1029/2018GL081163>.
- 一井康二, 植村一瑛, 生頼直樹, 兵頭順一, 2019, 地震応答解析における技術者の違いによるパラメータのばらつきの影響, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演, D29.
- Inoue, M., Y., Tanioka, Y. Yamanaka, 2018, Simple method for real-time tsunami source estimation using seafloor pressure sensor network in Japan, AOGS meeting 2018.
- Ishibe, T., M. Miyazawa, Y. Ogata, H. Tsuruoka, and K. Satake, 2018, Seismicity Rate Change in Japan Following the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, AOGS 15th Annual Meeting, Hawaii Convention Centre, 3-8.
- 石井憲介, 新堀敏基, 佐藤英一, 徳本哲男, 林勇太, 2018(1), 2016年10月8日阿蘇山噴火で

- 放出された二酸化硫黄の静止気象衛星ひまわり8号による観測結果，火山噴火予知連絡会会報，126，181-182.
- 石井憲介，新堀敏基，佐藤英一，徳本哲男，2018(2)，2017年10月10日から17日にかけての新燃岳の気象衛星ひまわり8号による観測結果，火山噴火予知連絡会会報，128，324-326.
- 岩田知孝，2018，震源断層近傍の強震動特性，2018，第15回日本地震工学シンポジウム論文集，698-703.
- 岩田知孝，飯尾能久，松島信一，2018(1)，2018年6月18日大阪府北部の地震，地震ジャーナル，66，1-8.
- 岩田知孝，浅野公之，田中宏樹，2018(2)，大阪堆積盆地北西部の尼崎観測点で観測される繰り返し地震波後続波群の特徴と3次元地震動シミュレーション，第15回日本地震工学シンポジウム論文集，G010-01-11.
- 岩田知孝，浅野公之，2018，2018年6月大阪府北部の地震時の強震動，第55回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集，65-66.
- 香川敬生・野口竜也，2018，自治体震度計ネットワークを用いたリアルタイム震度評価の試み -鳥取県の事例-，日本地球惑星科学連合大会2018年大会，SCG65-06.
- 香川敬生，2018(1)，自治体震度計ネットワークを用いたリアルタイム震度評価の試み -鳥取県の事例-，土木学会第38回地震工学研究発表会，C12-1294.
- 香川敬生，2018(2)，高密度の震度計ネットワークを用いた震度分布の即時推定 -鳥取県の事例-，日本地震学会2018年度秋季大会，S13-12.
- 香川敬生・野口竜也・向坊恭介，2018，1943年鳥取地震による鹿野断層近傍における強震動の推定と被害との対応，第15回日本地震工学シンポジウム，0S2-03-07.
- 香川敬生，2019，鳥取県震度計ネットワークを利用した震度分布の即時推定-課題と対応-，平成30年度東京大学地震研究所協同利用研究集会「地震動のリアルタイム解析：防災・減災に向けた即時的な活用を目指して」，講演番号6.
- 神定 健二・高橋 功・篠原芳紀・香川 敬生・三宅弘恵，2018，東京都市部における地震防災のための震度分布図のリアルタイム推定，日本地球惑星科学連合大会2018年大会，SCG65-05.
- 神定健二・高橋功・篠原芳紀・香川敬生・三宅弘恵，2019，自治体震度計観測網の次期更新計画への提案—観測網の拡充とデータのリアルタイム化—，平成30年度東京大学地震研究所協同利用研究集会「地震動のリアルタイム解析：防災・減災に向けた即時的な活用を目指して」，講演番号7.
- Kawamoto S., N. Takamatsu, S. Abe, K. Miyagawa, Y. Ohta, M. Todoroki, and T. Nishimura, 2018, Real-time GNSS analysis system REGARD: an overview and recent results, J. Disaster Res., 13, No. 3, 440-452, doi:10.20965/jdr.2018.p0440.
- 木内亮太，宮澤理稔，瀨瀬一起，2019，沈み込み帯巨大地震の強震動生成域からの地震動と既存予測式の比較，D31，平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会.
- Kodera, Y., Y. Yamada, K. Hirano, K. Tamaribuchi, S. Adachi, N. Hayashimoto, M. Morimoto, M. Naka-mura, and M. Hoshiba, 2018, The Propagation of Local Undamped Motion (PLUM) method: a simple and robust seismic wavefield estimation approach

- for earthquake early warning. *Bulletin of Seismological Society of America*, 108(2), 983-1003.
- Kodera, Y., 2018, Real-time Detection of Rupture Development: Earthquake Early Warning Using P Waves from Growing Ruptures. *Geophysical Research Letters*, 45, 156-165.
- 河野祐哉, 西嶋一欽, 2018, 高知県南国市を例とした建物ストックの時系列変化の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集.
- Ma N., G. Wang, T. Kamai, I. Doi, and M. Chigira, 2019, Amplification of seismic response of a large deep-seated landslide in Tokushima, Japan, *Engineering Geology*, 249, 218-234.
- 向井優理恵, 古村孝志, 前田拓人, 2019, 関東平野における長周期地震動強度の特徴的方位依存性とその要因, 東京大学地震研究所彙報, 印刷中。
- Musa, A., O. Watanabe, H. Matsuoka, H. Hokari, T. Inoue, Y. Murashima, Y. Ohta, R. Hino, S. Koshimura, and H. Kobayashi, 2018, Real-time tsunami inundation forecast system for tsunami disaster prevention and mitigation, *J. Supercomput.*, 74, 3093-3113, doi:10.1007/s11227-018-2363-0.
- 永井夏織, 浅野公之, 加藤護, 岩田知孝, 2018(1), 経験的グリーン関数法を用いた 2016年鳥取県中部の地震の広帯域震源モデル, 第 15 回日本地震工学シンポジウム論文集, 110-118.
- 永井夏織, 浅野公之, 加藤護, 岩田知孝, 2018(2), 経験的グリーン関数法を用いた 2016年鳥取県中部の地震の震源モデルの推定, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, SSS14-P30.
- 永井夏織, 浅野公之, 加藤護, 岩田知孝, 2018(3), 経験的グリーン関数法を用いた 2016年鳥取県中部の地震の SMGA モデル, 日本地震学会 2018 年秋季大会, S14-05.
- 中道治久, 井口正人, 下村 誠, 竹中悠亮, 2018, 南九州の火山における小型Xバンド偏波レーダーの展開と噴火観測事例, 京都大学防災研究所年報, 61B, 337-343.
- 西村武・西川隼人・野口竜也, 2018, 2016年鳥取県中部の地震を対象とした木造建物の最大応答変形角評価式の検討, 土木学会第38回地震工学研究発表会, A22-1363.
- 野口竜也・西川隼人・香川敬生・吉田昌平, 2018(1), 2016年鳥取県中部の地震における非線形地盤応答の基礎的検討, 土木学会論文集A1, Vol. 74, No. 4(地震工学論文集第37巻), I_1010-I_1016.
- 野口竜也・中井翔・吉見和・上野太士・日高大我・西川隼人・吉田昌平・香川敬生, 2018(2), 2016年鳥取県中部の地震による被害要因と地盤震動特性の把握, 日本地球惑星科学連合大会2018年大会, SSS14-P16.
- 野口竜也・中井翔・日高大我・吉見和・西川隼人・吉田昌平・香川敬生, 2018(3), 微動および地震観測に基づく鳥取県中部域の地盤構造推定と地盤震動特性の把握, 第15回日本地震工学シンポジウム, 0S2-03-08.
- Ogiso, M., M. Hoshihara, A. Shito, and S. Matsumoto, 2018, Numerical Shake Prediction for Earthquake Early Warning Incorporating Heterogeneous Attenuation Structure: The Case of the 2016 Kumamoto Earthquake. *Bulletin of Seismological Society of*

America. 108 (6): 3457-3468.

- 大野圭太郎, 太田雄策, 2018, MCMC を用いたリアルタイム GNSS データによる単一矩形断層推定の不確実性定量評価の試み - 2011 年東北地方太平洋沖地震への適用例 -, 測地学会誌, 64, 39-50, doi: 10.11366/sokuchi.64.39.
- Ohta Y., T. Inoue, S. Koshimura, S. Kawamoto, and R. Hino, 2018, Role of real-time GNSS in near-field tsunami forecasting, J. Disaster Res., 13, No. 3, 453-459, doi:10.20965/jdr.2018.p0453.
- Ratnasari, R.N., Y. Tanioka, and A.R. Gusman, 2018(1), Rapid Determination of Source Models for Tsunami Early Warning Using a Depth Dependent Rigidity Curve: Case Studies for the 2007 Bengkulu and 2010 Mentawai Tsunami Earthquakes, AOGS meeting 2018.
- Ratnasari, R.N., Y. Tanioka, and A.R. Gusman, 2018(2), Rapid determination of source models for Tsunami Early Warning using a depth dependent rigidity curve: case studies for Indonesia, SCSTW 2018 (3rd place of the best presentation award).
- Sato. E, K. Fukui, and T. Shimbori, 2018, Aso volcano eruption on October 8, 2016, observed by weather radars. Earth, Planets and Space, 70:105, 1-8.
- 佐藤英一, 新堀敏基, 福井敬一, 石井憲介, 徳本哲男, 2018(1), 気象レーダーで観測された2016年10月8日阿蘇山噴火に伴う噴煙エコー, 火山噴火予知連絡会会報, 126, 175-180.
- 佐藤英一, 福井敬一, 新堀敏基, 石井憲介, 徳本哲男, 2018(2), 気象レーダーで観測された2017年10月霧島山(新燃岳)噴火に伴う噴煙エコー, 火山噴火予知連絡会会報, 128, 316-319.
- 佐藤英一, 新堀敏基, 福井敬一, 石井憲介, 徳本哲男, 2018(3), 気象レーダーで観測された2018年1月23日草津白根山噴火に伴う噴煙エコー, 火山噴火予知連絡会会報, 129, 78-82.
- 佐藤英一, 福井敬一, 新堀敏基, 石井憲介, 徳本哲男, 2018(4), 気象レーダーで観測した2018年3月から5月にかけての霧島山(新燃岳)噴火に伴う噴煙エコー, 火山噴火予知連絡会会報, 130, 292-298.
- 佐藤啓太, 松島信一, 松下隼人, 増田竣介, 吾妻崇, 野澤貴, 2018, 微動観測記録に基づく横手盆地の地下構造の推定, 第15回日本地震工学シンポジウム, 0S2-01-03.
- 佐藤啓太, 松島信一, 松下隼人, 増田竣介, 吾妻崇, 野澤貴, 2019, 微動観測記録に基づく横手盆地の推定地下構造の増幅特性評価, 京都大学防災研究所研究発表講演会, B06.
- 関口春子, 岩田知孝, 浅野公之, 2018, 2018年6月18日大阪府北部の地震時の強震動シミュレーション, 日本地震学会2018年度秋季大会, S24-15.
- 関口春子, 岩田知孝, 浅野公之, 2019(1), 2018年6月18日大阪府北部の地震による大阪平野の強震動シミュレーション, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, A18.
- 関口春子, 浅野公之, 岩田知孝, 2019(2), 奈良盆地の3次元速度構造モデルの構築と検証, 地質学雑誌, 受理済.

- 新堀敏基, 石井憲介, 佐藤英一, 徳本哲男, 森健彦, 林洋介, 吉田知央, 松田康平, 2018, 2017年10月霧島山(新燃岳)噴火に伴う降灰予測, 火山噴火予知連絡会会報, 128, 320-323.
- Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018, Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog. *Earth Planets and Space*, 70, 90.
- Tamaribuchi K., 2018, Evaluation of automatic hypocenter determination in the JMA unified catalog, *Earth Planets and Space*, 70, 141.
- Tanaka, H., M. Iguchi, 2019, Simulations of volcanic ash plume dispersal for Sakura-jima using real-time emission rate estimation, *Jour. Disast. Res*, 14, 160-172.
- 田中宣多, Gautham Adapa, 澤田凱人, 上田恭平, 2019, 液状化現象を含む地盤の非線形性を考慮した表層地盤増幅率の評価, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演, D30.
- Tanaka Y., Y. Ohta, and S. Miyazaki, 2019, Real-time Coseismic Slip Estimation via the GNSS Carrier-Phase to Fault Slip Approach: A Case Study of the 2016 Kumamoto Earthquake, *Geophysical Research Letters*, 46, doi:10.1029/2018GL080741.
- Tanioka, Y., A.G. Cabrera, and Y. Yamanaka, 2018(1), Determination of a Fault Size from a Dispersive Character of a Tsunami: a Case Study for the 2016 El Salvador-nicaragua Outer-ride Earthquake, AOGS meeting 2018.
- Tanioka, Y., G. Arguello, U. Grillo and A. Cabrera, 2018(2), Real time tsunami inundation forecast method developed for Central America Region, SCSTW 2018.
- Tanioka, Y., A.G. Cabrera, and Y. Yamanaka, 2018(3), Simulation of a Dispersive Tsunami due to the 2016 El Salvador? Nicaragua Outer-Rise Earthquake (Mw 6.9), *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-018-1773-5.
- Tanioka, Y., G.J. Arguello, and A.R. Gusman, 2018(4), Rapid Determination of Appropriate Source Models for Tsunami Early Warning using a Depth Dependent Rigidity Curve: Method and Numerical Tests, EGU meeting 2018.
- Tanioka, Y., 2018, Tsunami simulation method assimilating ocean bottom pressure data near a tsunami source region, *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-017-1697-5.
- Tanioka, Y., and A.R. Gusman, 2018, Near-field tsunami inundation forecast method assimilating ocean bottom pressure data: A synthetic test for the 2011 Tohoku-oki tsunami, *Phys. Earth Plan. Int.*, doi: 10.1016/j.pepi.2018.08.006.
- Tsou, C.Y., Chigira, M., Higaki, D., Sato, G., Yagi, H., Sato, H.P., Wakai, A., Dangol, V., Amatya, S.C. & Yatagai, A., 2018, Topographic and geologic controls on landslides induced by the 2015 Gorkha earthquake and its aftershocks: an example from the Trishuli Valley, central Nepal. *Landslides*, 15, 953-965, doi: 10.1007/s10346-017-0913-9.
- 津野靖士, 山中浩明, 地元孝輔, 宮腰寛之, 三宅弘恵, 高井伸雄, 重藤迪子, 神野達夫, 佐藤浩章, 瀨瀬一起, 松島信一, 川瀬博, 2019, 足柄平野と東京湾西岸部における

地震観測点の 1 次元浅部深部統合地盤モデル, 平成 30 年度京都大学防災研究所研究発表講演会.

吉田昌平・香川敬生・野口竜也, 2018, 2016年鳥取県中部の地震における臨時余震観測に基づいた広域の強震動評価, 土木学会論文集A1, Vol.74, No.4(地震工学論文集第37巻), I_417-I_428.

Zhao, S., Chigira, M. & Wu, X., 2018, Buckling deformations at the 2017 Xinmo landslide site and nearby slopes, Maoxian, Sichuan, China. *Engineering Geology*, 246, 187-197, doi: 10.1016/j.enggeo.2018.09.033.

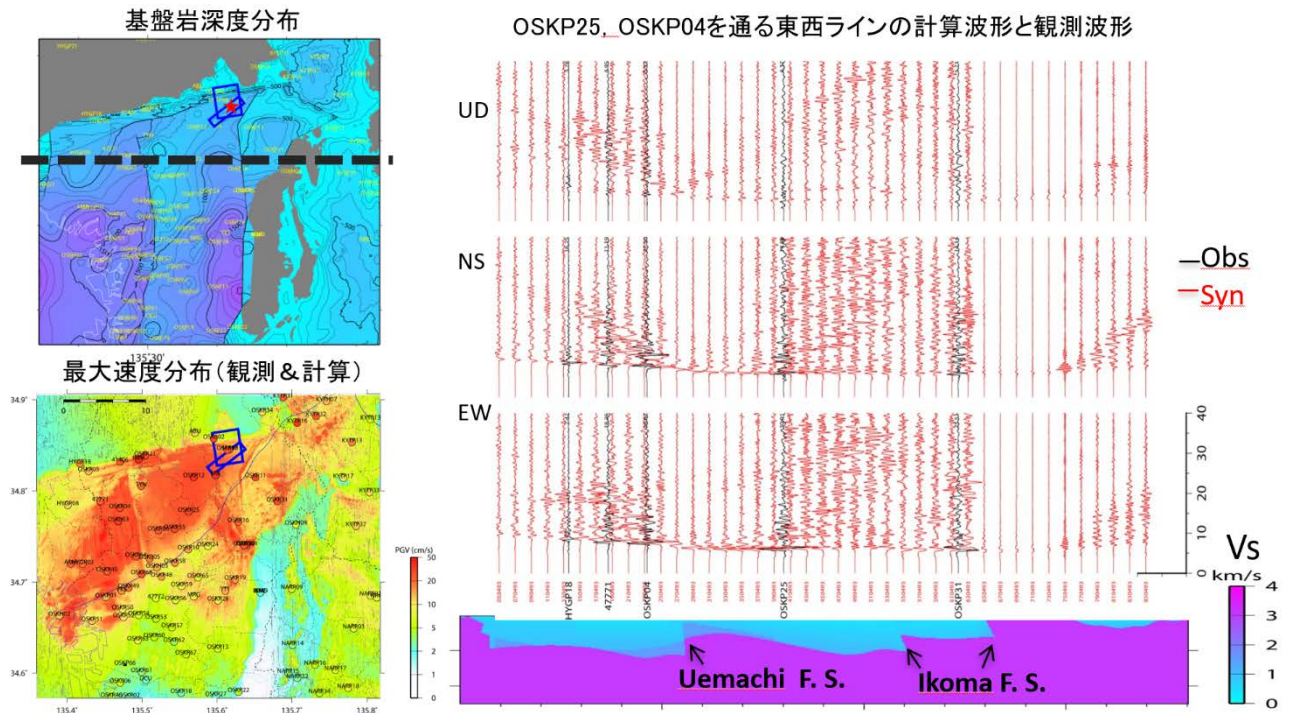


図1. 2018年6月18日大阪府北部の地震 ($M_{JMA}6.1$) による大阪平野-奈良盆地の地震動シミュレーション (京都大学防災研究所 [課題番号: 1903, 1911])

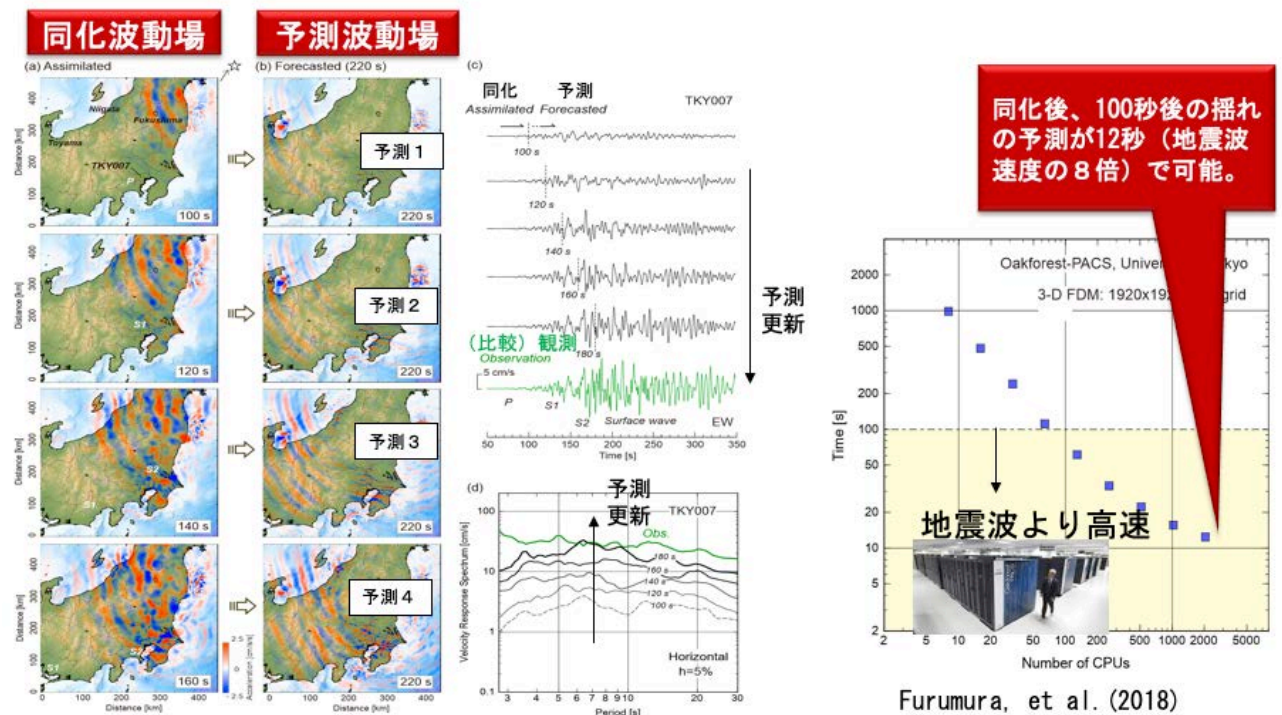


図2. 2011年東北地方太平洋沖地震のデータ同化によるシミュレーション (東京大学地震研究所 [課題番号: 1516])

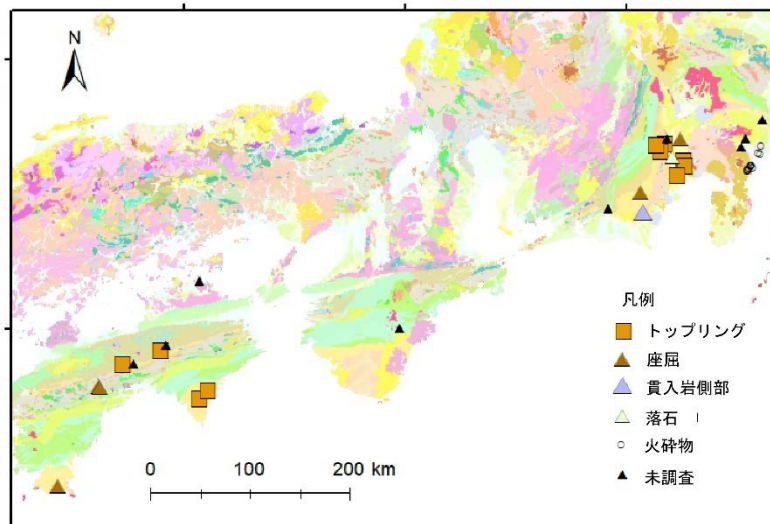
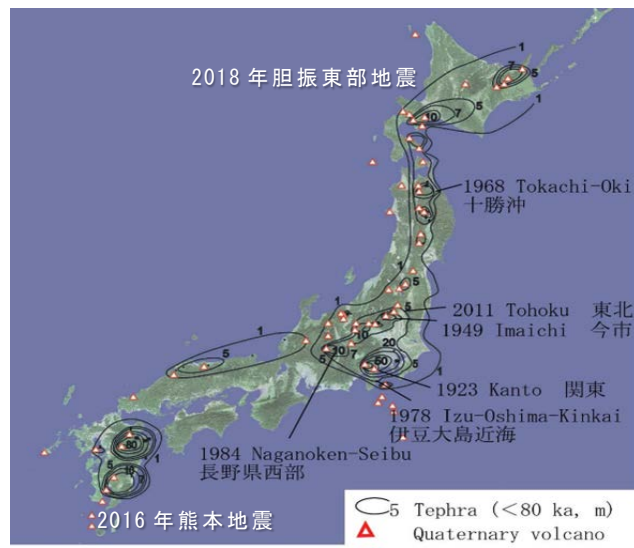


図 3. 火山地域(上)および非火山地域(下) の地震時崩壊の分布と種類

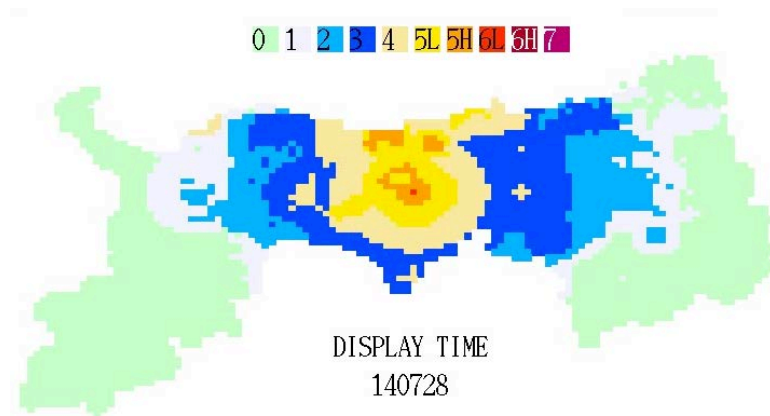


図 4. 鳥取県震度ネットワークを用いた2016年鳥取県中部の地震の事後評価：緊急地震速報第1報が出された時刻における予測震度分布（鳥取大学工学研究科 [課題番号：2001]）

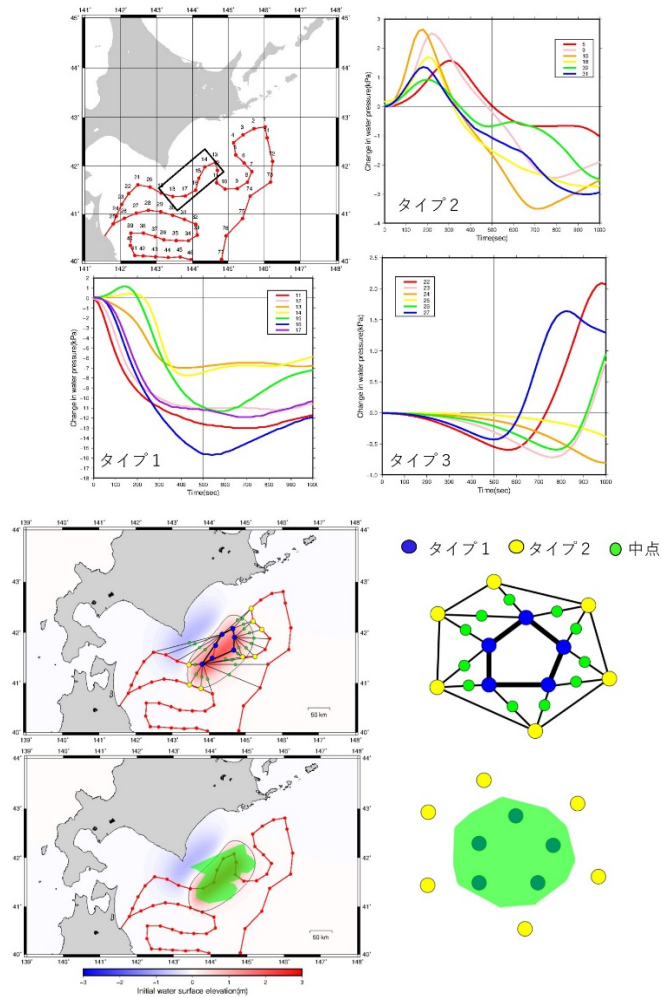


図5. S-NET 観測波形から直接波源を推定する手法：数値計算による津波圧力波形を波源との位置関係で分類し、観測された波形から津波波源を推定(北海道大学[課題番号:1005])

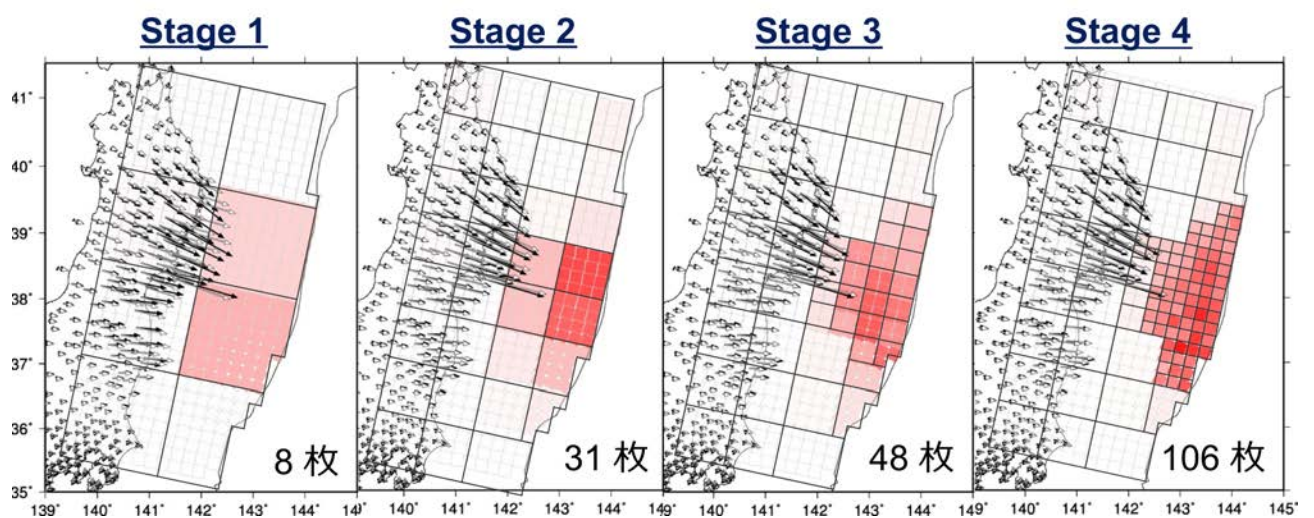


図6. 四分木アルゴリズムによるすべり分布推定：断層面が細分化され不確実性をリアルタイム把握できる可能性がある(東北大学[課題番号:1209])

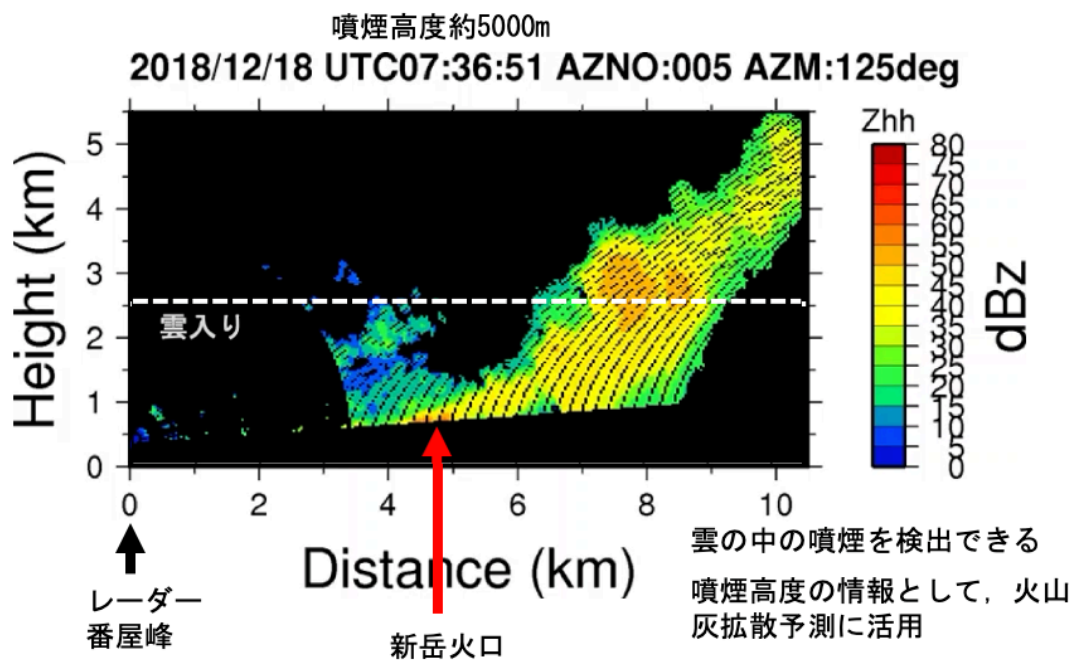


図7. XバンドMPレーダーにより検知された2018年12月の口永良部島噴火の噴煙
(京都大学防災研究所 [課題番号: 1913])

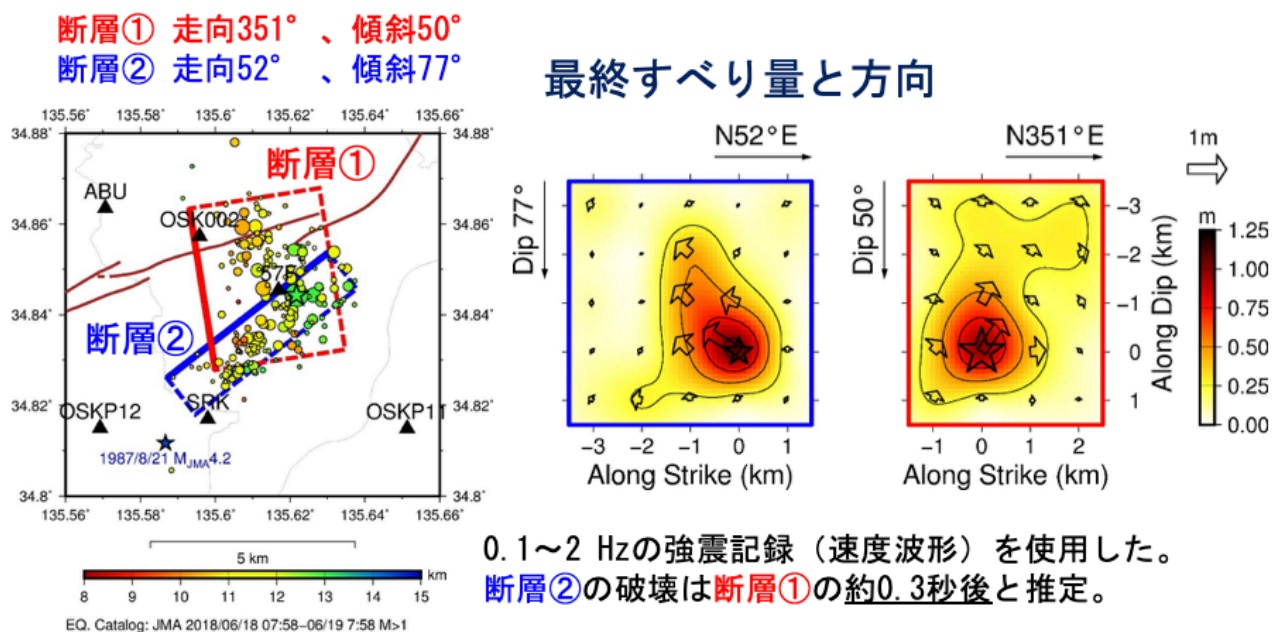


図8. 強震記録を用いた2018年6月18日大阪府北部の地震 ($M_{JMA} 6.1$) の震源過程の推定
(京都大学防災研究所 [課題番号: 1911])

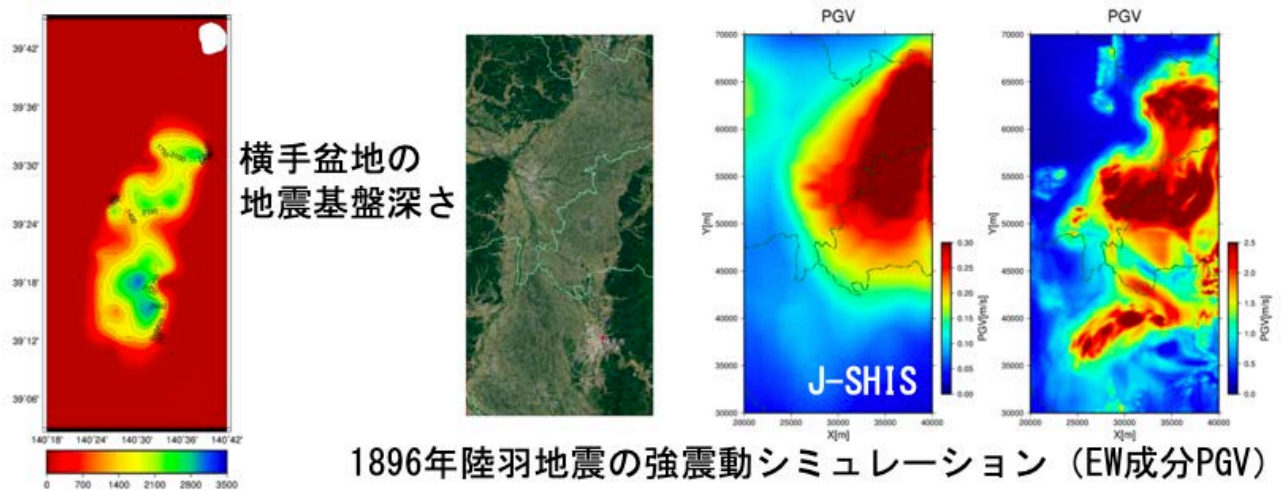


図9. 横手盆地の地下構造モデルと1896年陸羽地震の強震動シミュレーション
(拠点間連携研究 [課題番号: 2953])

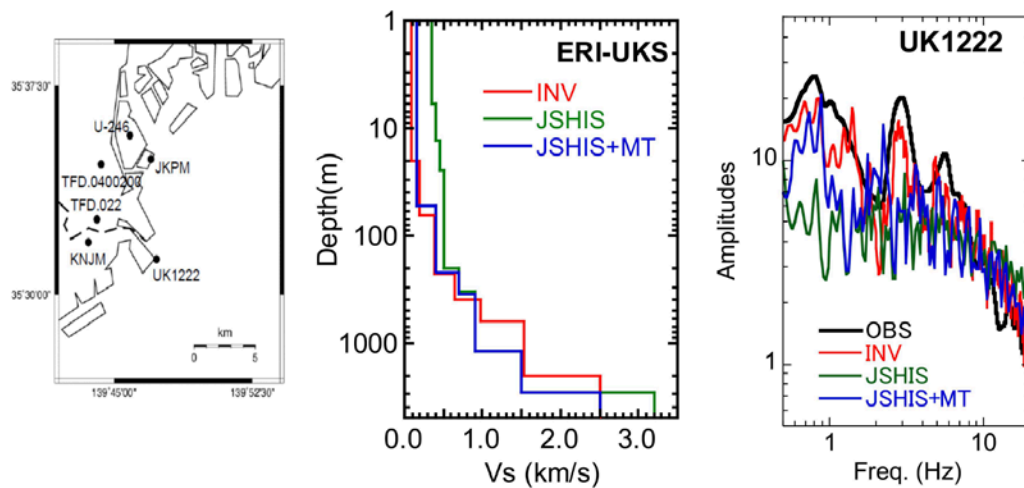


図10. 東京湾西岸部(UK1222)の1次元浅部深部統合地盤モデルとサイト特性の比較
(拠点間連携研究 [課題番号: 2955])

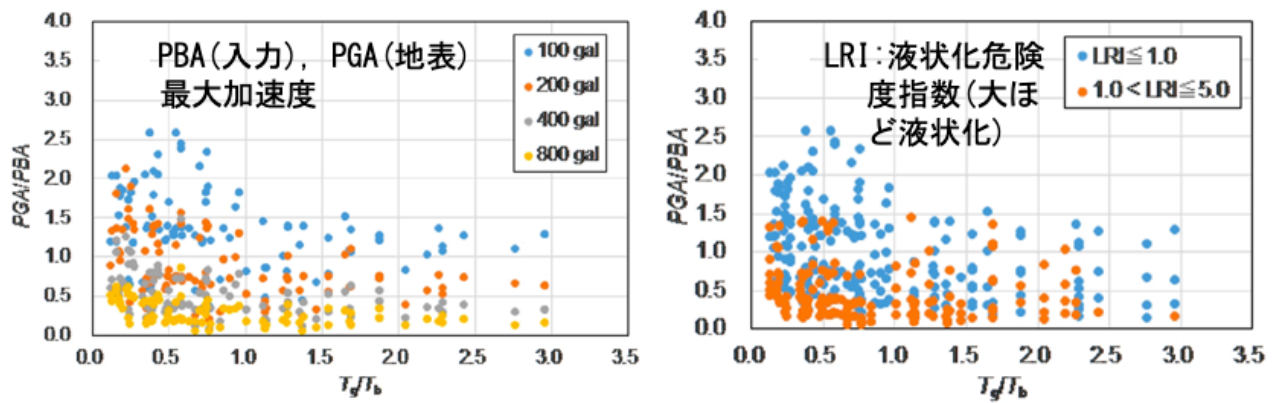


図11. 地盤増幅率（縦軸）と周期比（横軸： T_g (地盤)と T_b (入力地震動)の固有周期)の関係：左は入力加速度で、右は液状化危険度指数(LRI)で分類（拠点間連携研究〔課題番号：2990〕）

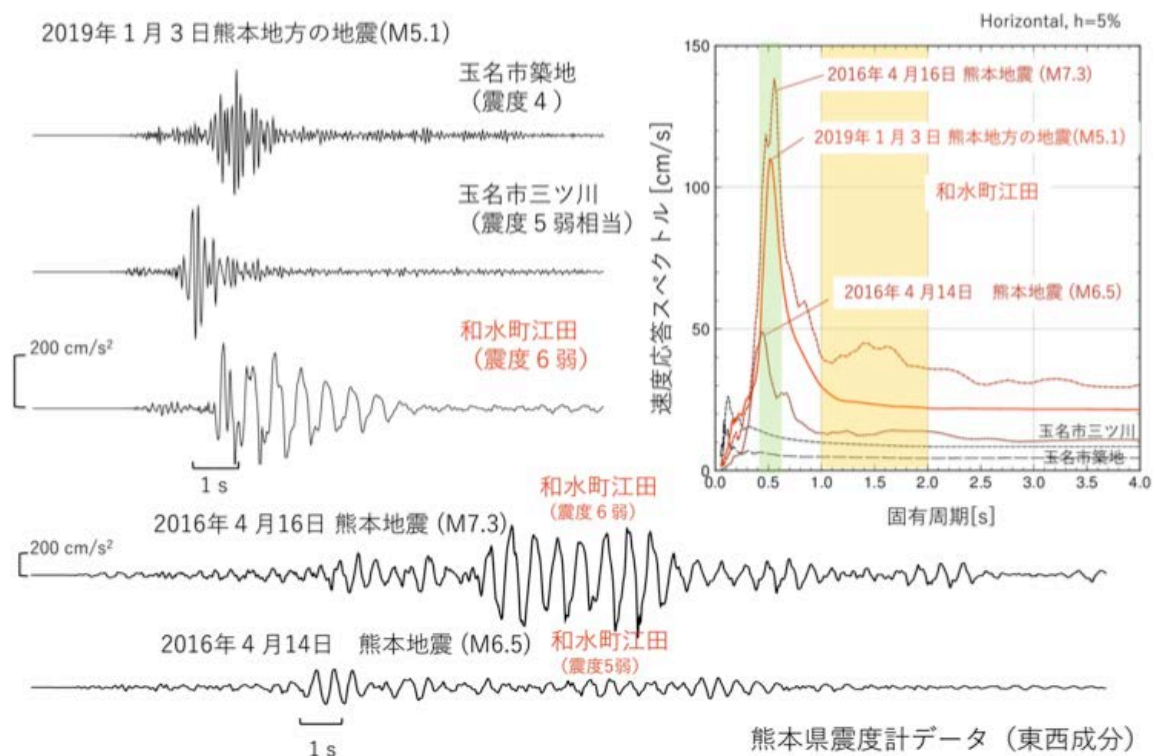


図12. 2019年1月3日熊本地方の地震(N5.1)の強震動（東京大学地震研究所〔課題番号：1516〕）

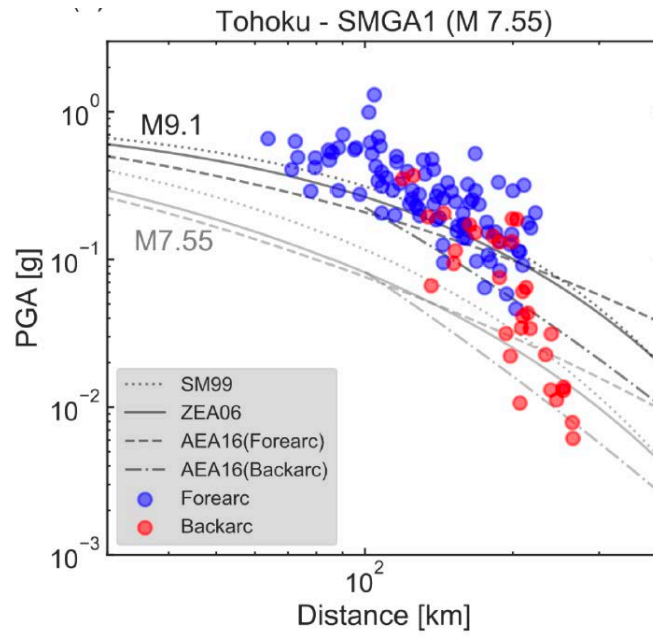


図13. 2011年東北地方太平洋沖地震の強震動生成域(SMGA1)に対する距離減衰
(拠点間連携研究 [課題番号: 2991])

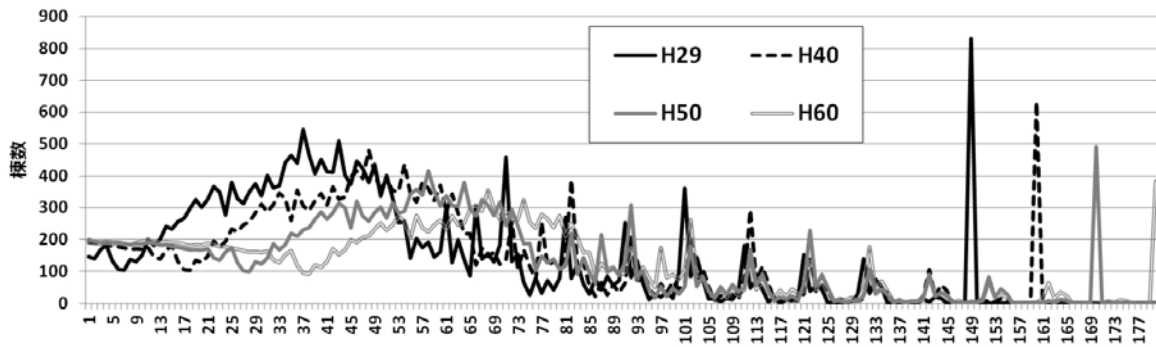


図14. 将来時点での築年数(横軸)ごとの木造戸建住宅の棟数(縦軸)予測
(拠点間連携研究 [課題番号: 2952])

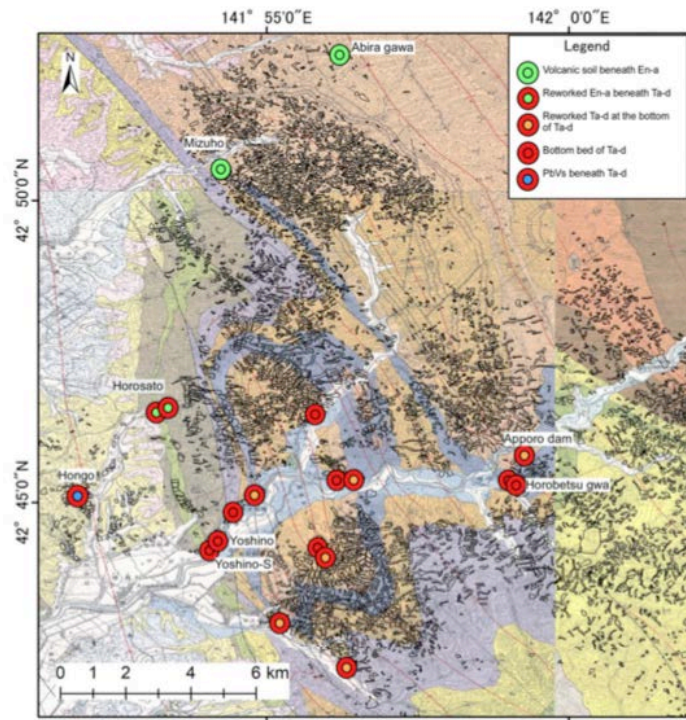


図15. 2018年北海道胆振地震によって発生した地すべりのすべり面の分布：すべり面は，樽前火山から9000年前に噴出したTa-d軽石の最下部で強く風化した層に形成された場合が多かった（京都大学防災研究所 [課題番号：1912]）

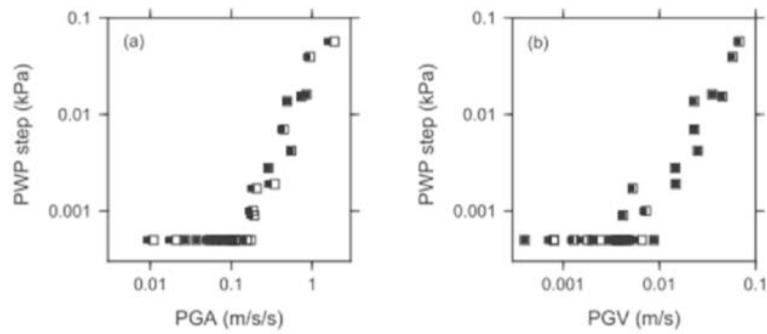


図16. 谷埋め盛り土内における過剰間隙水圧の大きさと (a)PGA, (b)PGVとの関係（京都大学防災研究所 [課題番号：1912]）

表1. 谷埋め盛り土内における過剰間隙水圧の大きさと (a)PGA, (b)PGVとの関係
(拠点間連携研究 [課題番号 : 2994])

| 年・場所 | 2011年 紀伊半島 | 2013年 京都市 | 2013年 伊豆大島 | 2014年 南木曾町 | 2015・2016年 厚岸町 | 2017年 飯山市 | 2017年 日田市 |
|-----------------------|----------------------|--------------------------|---|---------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------|
| 崩壊のタイプ | 深層崩壊 | 表層崩壊・土石流 | 表層崩壊・土砂流 | 土石流 | 再活動型地すべり | 地すべり性崩壊・土石流 | 地すべり性崩壊 |
| 地質 | 付加体 堆積岩 | 粘性土・盛土 | テフラ | 花崗岩 | 粘性土 | 凝灰岩 | 安山岩溶岩・凝灰角礫岩 |
| 長さ・流走距離 | 1 km | 30 m (崩壊) 100 m (土石流) | 50-500 m (崩壊) 2 km (土石流) | 2 km | 70 m | 300 m 800 m (土石流) | 200 m |
| 幅 | 400 m | 20 m | 50-300 m | 50-100 m | 30 m | 150-200 m | 150-200 m |
| 厚さ | 60-100 m | 1 m | 1 m | N/A | 5 m | 20-50 m | 10-20 m |
| 卓越周波数 (震央距離) | 1-4 Hz (10-70 km) | 3-10 Hz (50 m) | 2-6 Hz (500 m - 5 km) | 3-30 Hz (500 m- 30 km) | 震動なし (5 m) | 0.5-2 Hz (8-60 km) | 1-4 Hz (8-20 km) |
| 継続時間 | 50-100 s | 50-100 s | 30-200 s | 20 min | 移動時間は 20 h | 200 s | 30-50 s |
| 長周期 (> 10 s) 信号の有無 | ○ | × | × | ? | × | ○ | × |
| 引用文献 | Yamada et al. (2012) | 土井ほか(2017) | Ogiso, Yomogida (2015) Doi et al. (2016) | 本研究 | 土井ほか(2017) | 本研究 Yamada et al. (2017) | 本研究 |

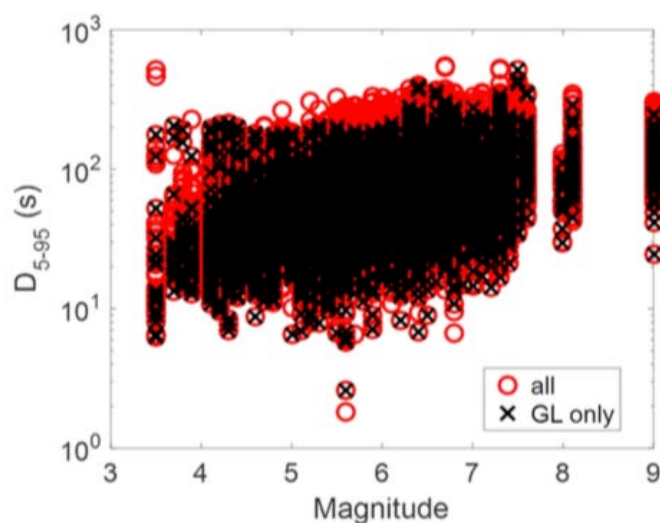


図17. 揺れ継続時間とマグニチュードの関係 (拠点間連携研究 [課題番号 : 2958])

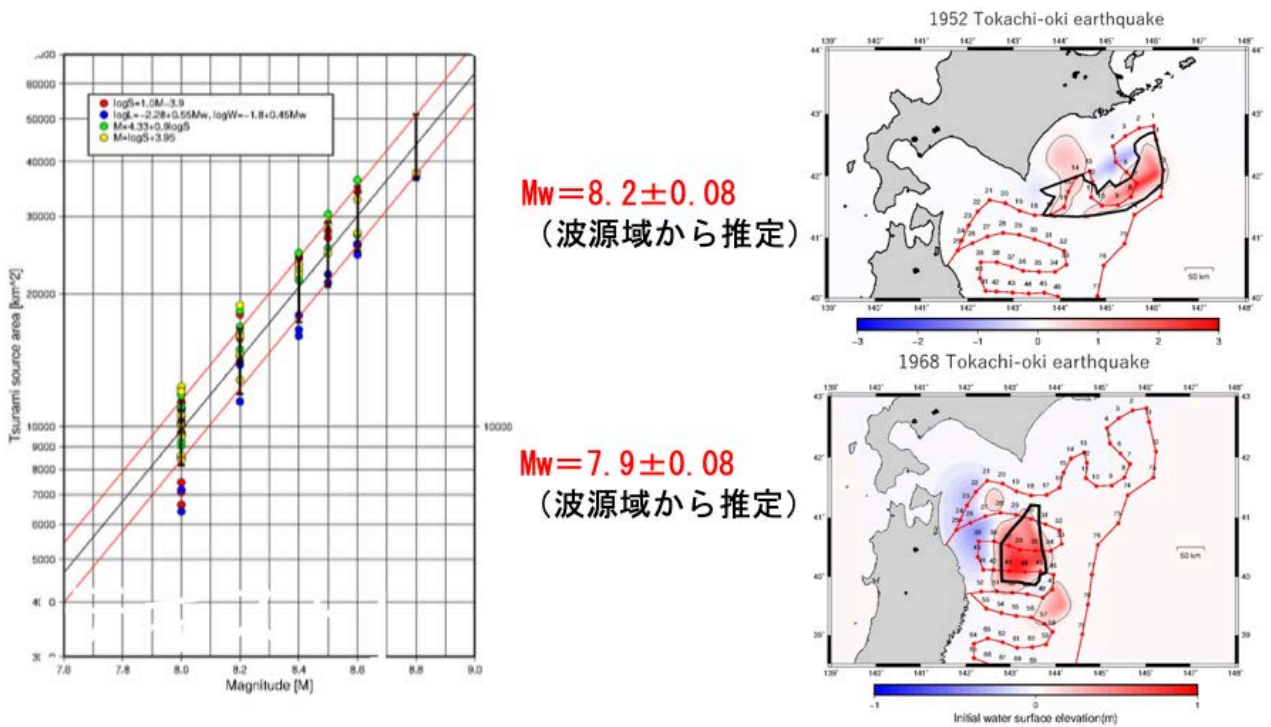


図18. 図5の手法で推定された津波波源域の面積とマグニチュードの関係(左)と1952年および1968年十勝沖地震への適用例(右) (北海道大学 [課題番号: 1005])

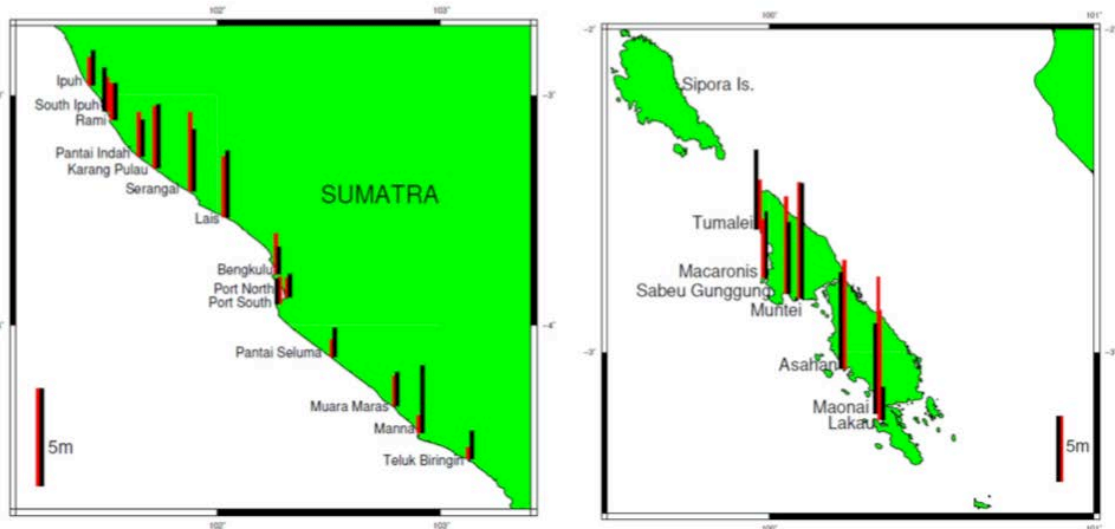


図19. S-NETのような観測点が無い場所の津波地震にも対応できるように開発した津波即時予測手法の2007年Bengkuru巨大地震(Mw8.4)と2010年Mentawai津波地震(Mw7.8)への適用: 黒が調査, 赤が計算 (北海道大学 [課題番号: 1005])

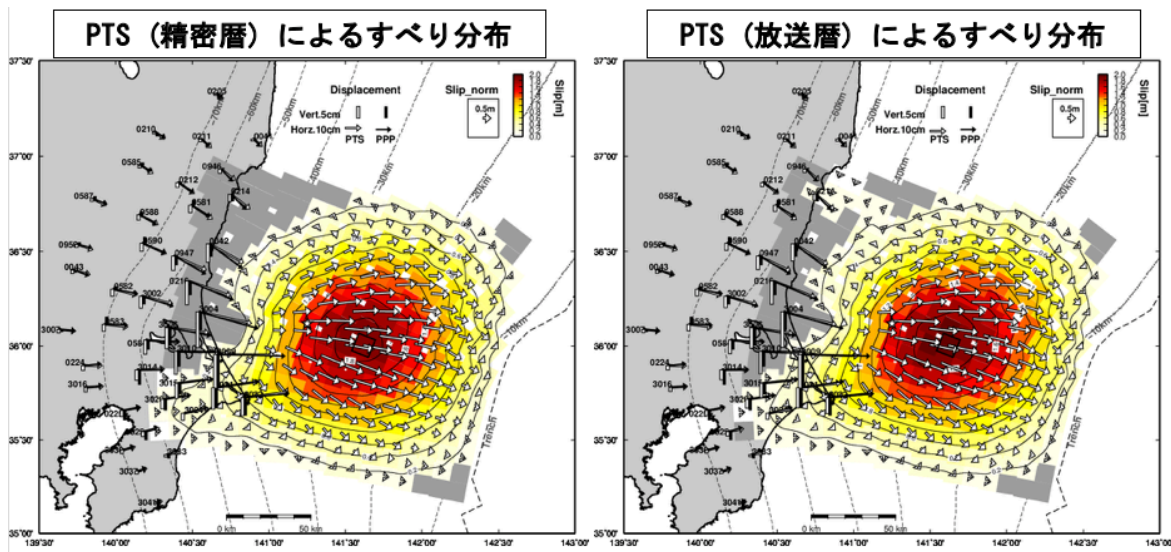


図 20. PTS で推定されたすべり時系列をもとに描画した茨城沖地震のすべり分布
 (a) 精密層, (b) 放送層を用いた場合 (東北大学 [課題番号: 1209])

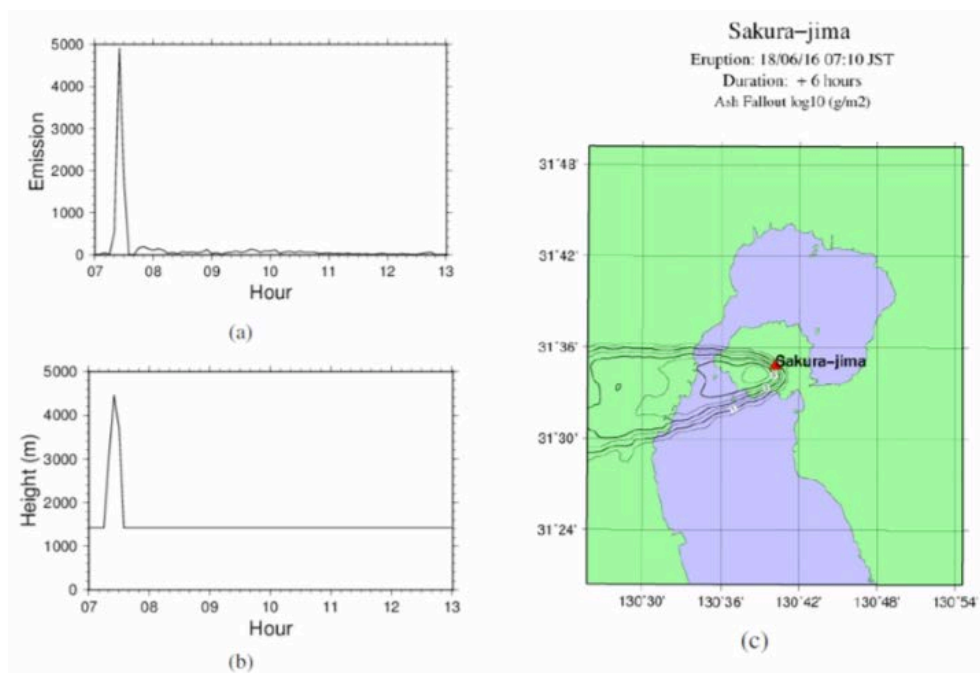


図 21. 桜島南岳において発生した爆発により放出された火山灰の拡散シミュレーション: (a)地震動と空気振動から算出された噴出率, (b)経験式を用いて噴出率から算出された噴煙高度, (c)降下火山灰量(等高線は, 単位面積当たりの降灰量 g/m^2 の対数) (京都大学防災研究所 [課題番号: 1913])

1 (6) 地震・火山災害

「地震・火山災害」計画推進部会長 木村 玲欧

(兵庫県立大学環境人間学部)

副部会長 三宅 弘恵

(東京大学大学院情報学環)

地震・火山災害部会は、災害科学の確立に資するため「災害」現象の解明に焦点がおかれた部会で、本計画『災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画』において初めて設置された部会である。防災・減災に対する社会の要請を意識しながら、理学、工学、人文社会科学など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の実証、地震・火山噴火の災害発生機構の解明、地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化、研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成などを目指した研究を行うものである。

本研究計画を推進するにあたっては、地震・火山噴火などの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（脆弱性: Vulnerability）を解明することが必要である。災害は、災害誘因と災害素因との関係のものにその大きさや特徴が決定すると考えられているからである。

本研究計画を災害科学の一部として捉えた場合、これまで実施してきた災害誘因としての地震・火山噴火に関する研究に加えて、災害素因との関係を意識して研究計画を推進することが必要となる。これは地震火山研究計画について災害誘因研究から災害素因研究へ移行することを意図しているわけではなく、災害の軽減に貢献するための総合的な災害科学の確立のためには、災害発生の要因である災害誘因・災害素因双方の解明が必要十分条件であることを意図している。

現時点における科学的研究成果を鑑みると、災害誘因については、自然現象そのものを消滅させることは不可能なため、現象・被害・影響の発生機構の解明や予知・予測といった現象の理解に基づく研究の重きが置かれている。また災害素因については、構造物・ライフライン・情報システムなどのいわゆるハード面や、社会組織体制や人間行動などのいわゆるソフト面から、発生する被害・影響を小さくする（被害抑止）、そして防ぎきれずに発生した被害・影響をそれ以上大きくさせない（被害軽減）ことを目的とした研究が行われている。特に災害素因の研究について、防災研究もしくは、被害・影響の低減の観点から減災研究とも言われている。こ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、理学だけではなく、防災学・減災学に関連する建築学・土木工学・情報工学・農学などをはじめとする工学、心理学・社会学・福祉学・歴史学・法学・経済学・地理学などをはじめとする人文社会科学などの関連研究分野との連携を図りつつ、計画を推進するものである。

5年間の成果の概要と今後の展望

現行計画では、災害科学の確立に資するため「災害」現象の解明に焦点をあて、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の実証、地震・火山噴火の災害発生機構の解明、地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化、研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成などを目指した研究を実施してきた。

具体的には、地震・火山噴火の災害事例の研究において、近代観測開始以前の史料データベースなどを通して被害地震における地震対応についての検討を行った。また、過去の災害事例の状況をふまえた地震・火山噴火に係る知見の発信技術プロトタイプについて、罹災証明書発行などの実際の災害対応をもとにモデル化を行ったり、2016年熊本地震のような最新事例における人間のリスク認知のあり方について研究を行った。地震・火山噴火の災害発生機構の解明においては、国内外の堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースの増強やサーバーによるデータ共有の開始、地下構造モデル化手法の適用妥当性の実地検証を行った。また、噴火災害において前駆活動及び火山噴火推移の事象の発現に沿った避難計画策定や、特に対策が未整備である「降灰被害」における事前広域避難について検討した。さらに、「脆弱性」の概念的整理についても、東日本大震災を事例とした人文社会科学的検討を行った。地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化については、北海道を事例に地理空間情報・GIS・衛星測位を統合的に活用した津波被害分析と避難支援システムの構築・実証を行い、住民側の火山災害に対するリスク認知や情報ニーズについても社会調査などで明らかにした。研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成については、住民の地震リスク認知や専門家に対する信頼性についての検討および、GUIに特化した準リアルタイム火山情報の配信システムの構築と実証が行われた。

今後は、本計画における研究成果で明らかになった知見をもとに、次期計画等において更なる検証や発展的研究としての体系化・理論構築を図っていくことが重要である。具体的には、地震・火山噴火の災害事例の研究においては、史料データベースや研究データベースなどの資料に基づき、地震・津波・火山災害などの自然災害の災害事例について更に収集を行い、当時の人々の対応や教訓、復興過程、災害研究の全体像などについて検討を続け、複数災害間についても検討する。地震・火山噴火の災害発生機構の解明においては、国内外の堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースをもとに、地震災害誘因の自然素因への作用の解明と地下構造モデル化手法の適用妥当性を検証することや、脆弱性概念の検討についてはこれまでの研究によって明らかになった仮説の検討・検証を、量的調査・質的調査の実施とともに人文社会科学的観点から検証する。地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化においては、準天頂衛星などによる衛星測位と地理空間情報およびGISの統合的活用法を開発し、積雪寒冷地の地域特性を考慮した災害発生時の避難に関する研究を行い、課題抽出と対策を提言することや、火山災害における住民の火山災害情報の受けとり方について、火山間の比較などを通して総合的な検証をする。研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成については、住民の災害リスク認知や専門家に対する信頼について調査分析を行い、火山情報の配信システムについて自治体等の活用実績をもとに受信者側のニーズについての検証をすることが重要である。

平成30年度の成果の概要

1. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

地震・火山噴火の災害事例の研究について、本年度は史料データベースを解析しながら、1855年（安政2年）安政江戸地震に関する絵画史料からみた江戸市中の被災状況や、976年（天延4年）京都・近江の地震における京都での被害要因について検討した。特に、安政二年十月二日（1855年11月11日）夜に発生し、関東地方南部に甚大な被害を及ぼした安政江戸地震における江戸市中での被害と復興の様子を描いた絵巻として、薩摩の島津家に伝来した「江戸大地震之図」（島津家文書、東京大学史料編纂所所蔵）に描かれた内容について、絵巻にある火災の場面は、薩摩藩芝屋敷の北に位置していた一町が全焼したものを描いたものと判断された。被災した屋敷や町などから特定の場所を描いていると判明したことで、絵巻における被災状況の描写の史料価値が認められ、地震に起因しない火災がたびたび起きていた江戸で、火災後に復興していく市中の様相を知るうえでもこの絵巻が史料として活用できる可能性が示された。また、天延四年六月十八日（976年7月17日）に発生して当時の京都とその周辺および近江国南西部に被害を与えた京都・近江の地震について、『日本紀略』の記述から、清水寺の堂宇の倒壊により僧侶と俗人が50人圧死した様子がわかった。平安時代中期以降に観音信仰によって毎月十八日は観音の縁日であり、清水寺の本堂は参詣の庶民で賑わい混雑していた中で本堂の倒壊のみで多数の圧死者が発生したことがわかった（東京大学地震研究所[課題番号：1513]）。

また過去の災害事例の状況をふまえた地震・火山噴火に係る知見の発信技術プロトタイプについての検討を実施した。特に、地震研究が社会要請に応えるためのチャレンジは「ゆれの情報をいかに被害軽減並びその後の復旧・復興の実現に還元するか」という点に着目し、被災者生活再建支援業務の業務量と業務日数の見積もりについて、過去災害の実績値の分析と将来の対応への見積もりシミュレーションを実施した。具体的には、2007年に発生した新潟県中越沖地震の被災地である柏崎市、2016年に発生した熊本地震の被災地である益城町、2018年大阪北部の地震の被災地である茨木市における罹災証明書の発行の日別件数データについて、各自治体から提供を受けて分析をした。その結果、全体傾向として、1) 罹災証明書を発行し始めて3週間弱で発行件数は減少傾向に転じる、2) 2ヶ月強で再び増加傾向に転じ、4ヶ月を超えて収束に向かう、3) 被害量に関わらず、上述の傾向には同様のパターンが見られるという3点が明らかになった。また個別傾向で見ると、被害量が小さい茨木市の方が最も発行が早く進んでおり、次に被害程度が大きかった益城町が続いていた。これは東日本大震災以降「罹災証明書の交付時期が被災者の生活再建のスピードを左右する」という考えに基づき、被災自治体に発行を急がせる傾向があり、その社会的要請に益城町が応えた結果であると推察できる。一方で、全体的に緩やかに発行件数を伸ばした柏崎市の方が、発行件数の増減の幅が小さく、発行業務に焦点をあてると安定した業務の推移となっていることがわかった。これらをもとに罹災証明書の発行パターンをモデル化するためにそれぞれの近似曲線を求めた。これらの研究成果を現在対応中の被災自治体体制に対し発信することで、自治体は「今後の推移の読み解きから、生活再建支援のための戦略的な行動変容」を期待することができる（表1）（図1）（新潟大学[課題番号：2702]）。

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

地震の災害発生機構の解明について、地震災害誘因の自然素因への作用の解明に向けた研究と、地下構造モデル化手法の展開を継続した。また、当初計画通り国外の堆積平野・堆積盆地における適用妥当性の実地検証をとりまとめた。具体的には、台湾・インド～ブータン等のヒマラヤ前縁・アルジェリア等の国外の堆積平野・堆積盆地において、強震動予測に活用できる地下構造モデルが得られていない場合、観測記録の水平動と上下動の比率H/Vスペクトル比を用いた補正、震源近傍強震動パルス再現に必要な震源放射特性係数の補正、経験的グリーン関数法の活用などの手法開発を行うと共に、過去の被害地震の強震動評価を行った。その結果、国内で推進されている強震動評価よりも精度は劣るが、平均値としては、各々の国で工学的に用いられている地震動予測式と調和的な時刻歴波形を再現できることを確認した。これらの手法は、良質な地下構造モデルが構築されるまでの過渡期に有効な計算手法として代替利用が可能である。また、平成26年度より継続的に整備を行ってきた強震観測データベースの対外発表を行うと共に、トリガーデータのみならず連続データも公開できるシステム構築に着手した(図2, 図3)(東京大学地震研究所[課題番号:1515])。

また、火山の災害発生機構の解明について、桜島火山の大規模噴火を想定した降灰リスク分析を、1)噴火シナリオと気象シナリオに応じた降灰分布の推定、2)その降灰量に応じた影響度分析に分けて行った。降灰により災害が予測される分野の整理を行い、火山灰の湿潤時における導電性やその重量、付着した火山ガス成分により、様々な社会システムに影響を与えることを確認した。続いて、その中から、本研究における降灰リスク分析を行う対象分野を、道路、航空、建物という3分野に設定し、それぞれの災害影響度を決定づける閾値について検討した。1914年の大正噴火規模の噴煙を仮定し、3890日分の気象シナリオに基づいて、降灰分布を計算し、降灰ハザードデータベースを構築した。降灰分布の予測計算にはPUFFモデルによる火山灰輸送シミュレーションを用いた。また、そのデータベース内の降灰分布集合に対し、桜島上空の偏西風の影響の変化や、台風を含む強い風速下等を条件に用いた降灰分布確率の算定により、桜島における大規模噴火時の降灰分布について有意な傾向を見出した。算出した降灰分布とその確率分布を用いて、分析対象項目とした道路、航空、建物の3分野における降灰リスクを分析した。航空分野においては、国内の20空港について定めた閾値ごとの降灰確率分布を算出し、そこから羽田空港や新潟空港について、降灰を懸念すべき噴火時期を明らかにした。また、建物倒壊などの降灰リスクを回避するために、要避難人口を求めた。日々変わる気象条件を考慮し、2017年と2013年の2年間、計730日間における各日の要避難人口を求めた。最大の要避難人口は2017年においては8月23日の気象条件下であり、625,186人、2013年においては9月16日の635,171人となった。また、いずれの年でも5月から10月までの平均要避難人口は10万人を超え、避難実施の困難が予想されることがわかった(図4)(京都大学防災研究所[課題番号:1914])。

また「脆弱性」という概念について、前年度に引き続き、東日本大震災の被災経験に基づいて、コミュニティの災害脆弱性評価のための指標を量的および質的分析によって検討した上で、南海トラフ地震の被災想定地域を対象に質的分析によってコミュニティ防災力に関する検討を深めた。具体的には、1)空間(土地利用, 土地条件, 都市計画, 都市機能

など), 2)防災意識・災害文化(災害の集合的記憶とその喚起装置, 災害への備えなど), 3)社会的凝集性(地域住民組織, 防災組織・NPOやその組織間関係, 行政との協働など), 4)災害対策(防災施設等のハード対策と防災計画等のソフト対策)という脆弱性の構成要素に関する作業仮説に基づいて調査研究を進めた。今年度は, 宮城県の津波被災地5市5町(石巻市, 気仙沼市, 名取市, 東松島市, 岩沼市, 亘理町, 山元町, 七ヶ浜町, 女川町, 南三陸町)のコミュニティを対象にアンケート調査を実施した。特に, 震災後の移転(空間の変化)という生活環境条件の変化が, どのような変化をもたらしたかを分析したところ, まず最初に挙げられるのは,)震災前と比較してコミュニティの生活条件が全体として悪化しており, 特に, 買物の便, 公共交通の便, 雇用・生業条件に関してそうした傾向が顕著であること, 次いで, 移転の有無によって生活環境の変化に有意差が生じており, 移転した地区でポジティブな変化とネガティブな変化がともに大きいこと, つまり, 移転地区間で生活環境条件が分極化する傾向が生じていることがわかった。以上の知見はいずれも, 防災事業(移転)と都市計画・生活再建の不調和を示唆するものである。その実態に対する理解を現地調査によって深め, 脆弱性を把握するための地域類型論的な分析枠組を構築し, 南海トラフ地震被災想定地域の現状分析や防災対策に役立てる必要があることがわかった(図5, 図6)(名古屋大学[課題番号:1704])。

(3) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

地震の災害軽減のための情報の高度化について, 災害の人文社会学的研究の側面から, 地理空間情報(G空間情報), GIS(地理情報システム), 衛星測位(GPS, 準天頂測位システムなど)の統合的活用方法の開発を行った。今年度は, まず準天頂衛星などによる衛星測位と地理空間情報およびGISの統合的活用法を開発し, 積雪寒冷地の地域特性を考慮した災害発生時の避難に関する研究を行い, 課題抽出と対策のための提言を行った。なお, ここでは高精度避難ナビゲーションシステムを含む防災・減災のための情報システムを構築し, その活用方法の開発を行った。次に, 地理空間情報とGISの統合的活用法を開発し, 地域防災力を強化し, 防災・減災のための災害情報の高度活用について研究を行った。その中では, 都市開発が地震・津波災害の災害リスクや災害に対する社会的脆弱性を増大させる可能性を論じ, 地理空間情報活用による対策の有効性を検討した。なお, ここでは地方レベル, 市町村レベル, 町内会レベル等の異なる空間スケールごとに分析し, 各スケールにおいて防災・減災のための課題などを明らかにした。さらに, 地域防災のための公開講座の開催, 自治体防災担当者対象の講義の実施, 自治体との相互協力協定にもとづく防災教育・地域貢献の実施等により, 効果的な研究成果の普及手法を検討した。GISや地理空間情報の防災への有効活用について, 自治体や自主防災組織などで講演会や防災GISセミナーを開催した。また, 北海道大学大学院理学研究院地震火山研究観測センターでは地震火山地域防災情報支援室を設置し, 公開講座の実施や地震防災教育活動を実施した(図7)(北海道大学[課題番号:1006])。

火山災害情報およびその伝達方法のあり方について, 2014年9月27日の御嶽山噴火にともない, 地域住民, 観光客といった情報の受け手や, 自治体職員等の情報伝達の担い手にとって有用な災害情報の内容や伝達方法のあり方について検討・提案を行った。特に, 今年度は, 火山災害情報のあり方について, 御嶽山の噴火と対策に関する意識調査を長野県

側（木曾町・王滝村）の住民に対して実施し、あわせて、噴火時に登山していた人に対しても意識調査を実施した。分析の結果、事前の噴火リスクに認識においては地域差はあまり見られないことがわかった。噴火から3年が経過したものの噴火を経験した人には未だに大きな心理的ストレスがあることがわかった。また、岐阜県、長野県で実施した調査結果の取りまとめと比較分析を実施した。さらに、噴火後に新たに創設された御嶽山火山マイスターの運用状況について、長野県に対してヒアリング調査を実施した。住民意識調査の結果について、岐阜県下呂市小坂町をはじめとして、ワークショップを開催し共有し、火山に関する情報伝達のあり方についての意見交換を実施した（図8）（名古屋大学[課題番号：1706]）。

（4）研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

地震動誘因や津波誘因の不確実な長期予測情報が、災害軽減に有効に役立つためのコミュニケーション手法を確立することにより、地震発生長期予測情報の高度化に貢献することを目的として、2016～2017年度に大きな地震があったイタリアやニュージーランド、台湾などにおいて被害やコミュニケーションに関する現地調査を行った。また、サンフランシスコ湾岸地域のサンアンドレアス断層の地震活動の影響を受ける可能性がある住民750名に対して社会調査を行ったところ、リスク推定値の不確実性を専門家が明示的に認めることで、専門家は誠実で率直であるという確信が高まり、大きな信頼が得られることがわかった。また、信頼の高まりは、リスクの予測確率が低いほど、またリスクの予測期間が長いほど大きいこともわかった（東京大学地震研究所[課題番号：1517]）。

情報を高度化することによって、地方公共団体が火山災害の発生の可能性について総合的に把握して、的確な防災対応を行うことを支援するシステムを目指した研究を進めた。具体的には、火山情報などの防災情報に結び付くインターネットで入手可能な各種観測情報を様々な関係機関から準リアルタイムで収集して、統合して表示するシステムを構築し、北海道内の地方公共団体に設置してその効果を検証している。今年度は、6月に十勝岳で臨時解説資料が、11月には雌阿寒岳で火口周辺情報が発表され、システムの改良点を実地で見出す機会を得た。また、9月6日には最大震度7を観測した胆振東部地震が発生し、大規模な土砂崩れにより大きな被害が生じた。その際、全道規模のブラックアウトも発生した。これを契機に、2016年の熊本地震の経験を踏まえて検討していた地震・震度情報の取得・表示機能を組み込んだ。また、ホームページが時々刻々更新されて新たな情報が得られる場合にも、大きな遅滞なく対応できるように開発を進めた。さらに、高解像度降雨レーダー画像の取得・表示機能も追加した。十勝岳を有する美瑛町と雌阿寒岳を有する釧路市が、観光客や登山者など来訪者に火山防災情報をリアルタイムで提供することを目的として、このシステムを集客施設に設置した。これはこのシステムが自治体に評価され、受け入れられていることを示している。秋田市で開催された日本火山学会秋期大会でこのシステムのブース展示して発表した（図9、図10）（北海道大学[課題番号：1009]）。

成果リスト

Deleplanque, T., J.-P., Vilotte, P. Bernard, C. Satriano, and H. Miyake, 2018,

- Development of a high-frequency earthquake rupture imaging method at the regional scale; application to the 2016 Kumamoto earthquakes, JpGU Meeting 2018, SSS06-P02.
- Diao, H., H. Miyake, and K. Koketsu, 2018, Near-fault broadband ground-motion simulations of the 2016 Meinong, Taiwan, earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., 108, 3336-3357.
- Gherboudj, F., H. Miyake, T. Yokoi, and N. Laouami, 2018, Ground motion simulation of the 2003 Boumerdes earthquake using empirical Green's function method, Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering, ID 11467.
- 橋本雄一, 2018, 津波防災と自治体・住民の対応, 地理, 63(8), 60-68.
- 堀田耕平・井口正人, 2018, 2017年の南岳爆発に前後する傾斜ひずみ変化, 京都大学防災研究所年報, 61B, 324-329.
- 井口正人・中道治久・為栗 健・堀田耕平・園田忠臣, 2018, 2017年8月桜島溶岩噴泉活動に伴う地震活動及び地盤変動, 京都大学防災研究所年報, 61B, 318-323.
- 井口正人・為栗健・平林順一・中道治久, 2019, マグマ貫入速度による桜島火山における噴火事象分岐論理, 火山 (受理済).
- 石水英梨花, 阪本真由美, 火山地域における住民主体の防災計画策定に関する考察—口永良部島の事例より—, 地区防災計画学会誌 C+Bousai, Vol.14, 2019.
- 神定健二・高橋功・篠原芳紀・香川敬生・三宅弘恵, 2018, 東京都市部における地震防災のための震度分布図のリアルタイム推定, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, SCG65-05.
- 風間卓仁・山本圭吾・平良真純・大島弘光・前川徳光・岡田和見・園田忠臣・井口正人, 2018, 桜島火山における繰り返し相対重力測定 (2017年5月~2018年2月), 京都大学防災研究所年報, 61B, 330-336.
- Koketsu, K., H. Kobayashi, and H. Miyake, 2018, Irregular modes of rupture directivity found in recent and past damaging earthquakes, Proceedings of the 11th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, ID 645.
- 久利美和・山中佳子, 2018年口永良部火山噴火警戒レベル4での対応と課題, 平成30年度自然災害科学東北地区部会
- Miyake, H., K. Irikura, K. Miyakoshi, and K. Kamae, 2018, Validation of a 3-stage source scaling for crustal earthquakes, Seismol. Res. Lett., 89, 911.
- 三宅弘恵・瀨瀨一起・古村孝志・宮川幸治・田中伸一, 2018, 東京大学地震研究所の強震観測網と強震観測データベース, 第15回日本地震工学シンポジウム論文集, 3306-3311.
- 名古屋大学大学院環境学研究科コミュニティ防災研究会『東日本大震災後の復興と防災に関する調査報告書 (速報版)』名古屋大学大学院環境学研究科, 2018年12月, 総37頁
- 内藤健裕・橋本雄一, 2018, 積雪寒冷都市における津波避難困難地域に関する空間分析—北海道釧路市を事例に—, 地理情報システム学会講演論文集, 27, CD-ROM.
- 内藤健裕・橋本雄一, 2018, 積雪寒冷都市における津波避難困難地域に関する空間分析—

- 北海道釧路市を事例に— (要旨), GIS—理論と応用, 27, 123.
- 奥野祐介・塩崎大輔・橋本雄一, 2018, GNSS を用いた疑似的津波集団避難行動分析—北海道釧路市・厚岸町を事例として—, 地理情報システム学会講演論文集, 27, CD-ROM.
- 大島弘光・宮村淳一・棚田俊收, 2017, 準リアルタイム火山防災情報表示システムの開発, 日本火山学会 2018 年度秋季大会講演予稿集, 248.
- 塩崎大輔・橋本雄一, 2018, WebVR を用いた疑似津波避難訓練システムの開発, 情報処理学会研究報告情報システムと社会環境 (IS), 2018-IS-145, 1-6.
- Sharma, B., H. Miyake, T. Yokoi, T. Hayashida, and O. P. Mishra, Simulation of strong ground motion for north eastern region of India using empirical Green's function method, *Seismol. Res. Lett.*, 89, 833.
- 塩崎大輔・橋本雄一, 2018, 津波の時間発展を考慮した疑似避難訓練システムの利活用, 情報処理学会研究報告情報システムと社会環境 (IS), 2018-IS-146, 1-6.
- 塩崎大輔・橋本雄一, 2018, ICT 及び WebVR 技術を援用した疑似津波避難訓練システムの利活用, 第 27 回学術研究発表大会講演論文集, 27, CD-ROM.
- 鈴木舞・瀨瀬一起, 過去に基づく未来予測の課題: 確率論的地震動予測地図, 「予測がつくる社会」, 東大出版会, 2019.
- 為栗健・井口正人, 2018, 桜島火山昭和火口で発生する火砕流の特徴, 京都大学防災研究所年報, 61B, 312-317.
- Tameguri, T., M. Iguchi, 2019, Characteristics of micro-earthquake swarms preceding eruptions at Showa crater of Sakurajima volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 372, 24-33.
- Tamura, K., Inoguchi, M., Horie, K., Hamamoto, R. and Hayashi, H., Realization of Effective Team Management Collaborating between Cloud-based System and On-site Human Activities -A Case Study of Building Damage Inspection at 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake-, *IEEE International Conference on Big Data2018*, 2018.12.
- 田中重好・黒田由彦・横田尚俊・大矢根淳編『防災と支援—成熟した市民社会に向けて』有斐閣, 2019 年 3 月, 総 382 ページ
- Viens, L., M. Denolle, and H. Miyake, 2018, Ground motion simulation from a large subduction earthquake using the offshore-onshore ambient seismic field, *JpGU Meeting 2018*, SSS14-19.

表1. 対象とした近年の4つの地震災害における罹災証明発行の実態（新潟大学[課題番号：2702]）

| 災害名 | 2018 北海道胆振東部地震 | 2018 大阪北部の地震 | 2016 熊本地震 | 2007 新潟県中越沖地震 |
|------------------|-------------------|-----------------|--------------|------------------|
| 被災自治体 | 安平町 | 茨木市 | 益城町 | 柏崎市 |
| 発災日（本震発生日） | 9月6日 | 6月18日 | 4月16日 | 7月16日 |
| 罹災証明書発行開始日 | 9月30日 | 7月23日 | 5月20日 | 8月17日 |
| 発災日から発行までにかかった日数 | 25日目 | 36日目 | 35日目 | 33日目 |

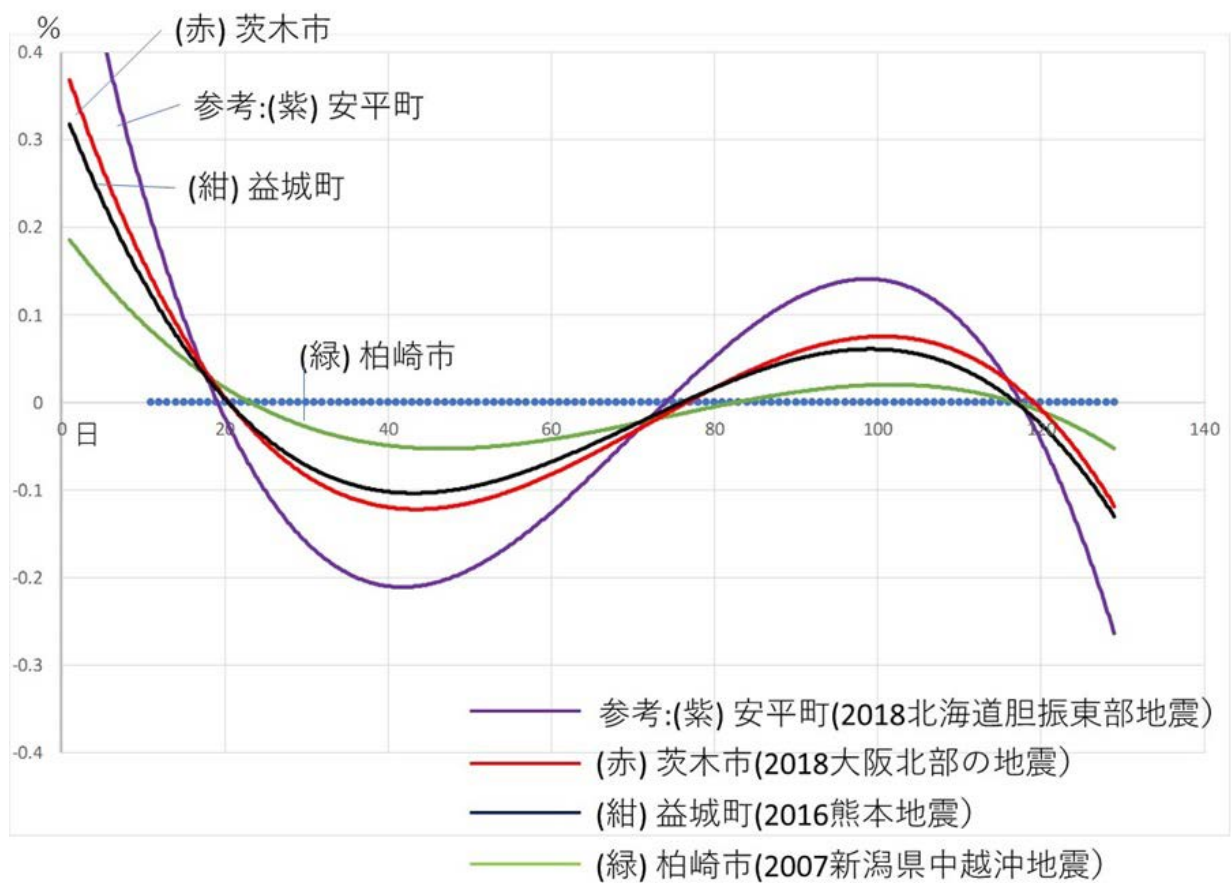


図1. 罹災証明書発行業務のモデル化（新潟大学[課題番号：2702]）

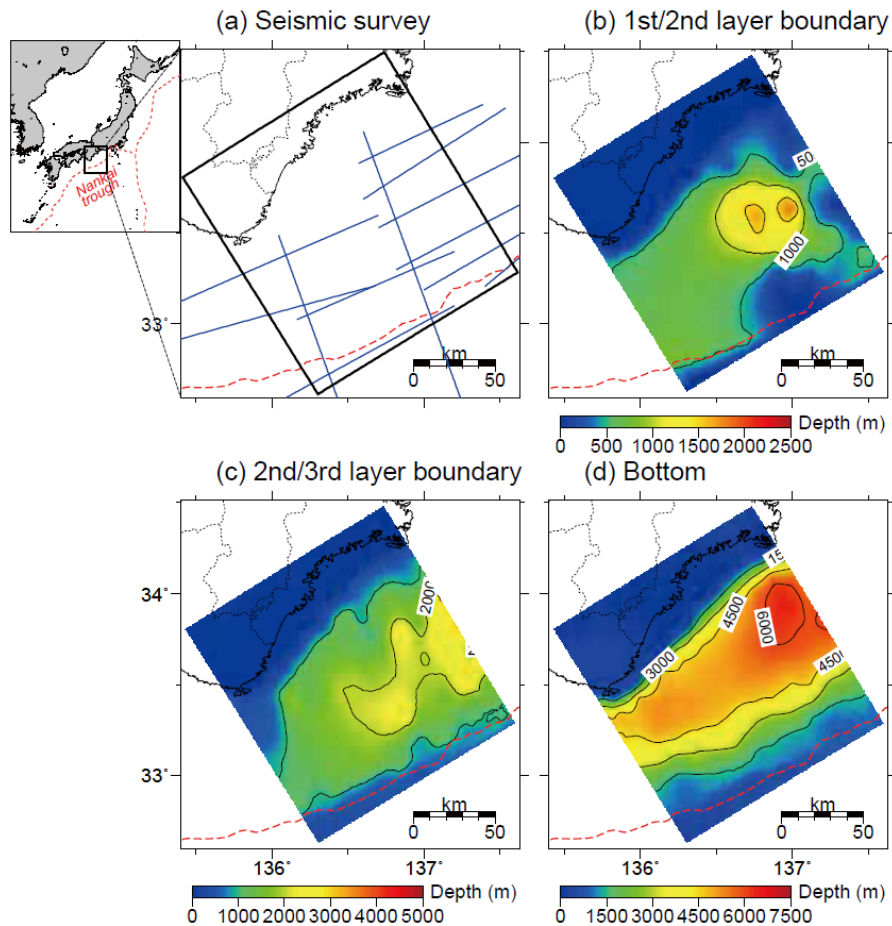


図 2. 長周期地震動増幅に効く南海トラフ付加体の地下構造モデル構築 (マルチスケール解析による三次元構造インバージョン) (東京大学地震研究所 [課題番号: 1515])

工学的需要が高いトリガー観測データ
 東京大学地震研究所
 強震観測データベース

連続観測から切り出したデータ
 東京大学地震研究所
 首都圏強震動総合ネットワークSK-net

相互乗り  入れ開始

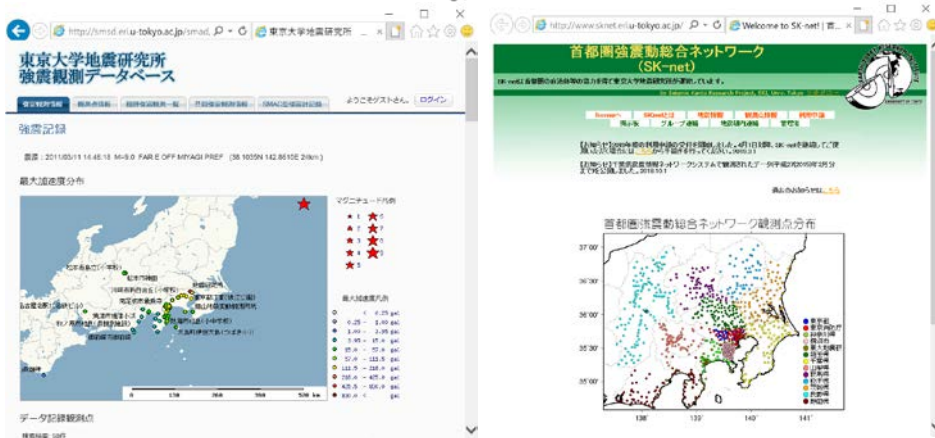


図 3. 堆積平野・堆積盆地における強震データベースの拡充 (東京大学地震研究所 [課題番号: 1515])

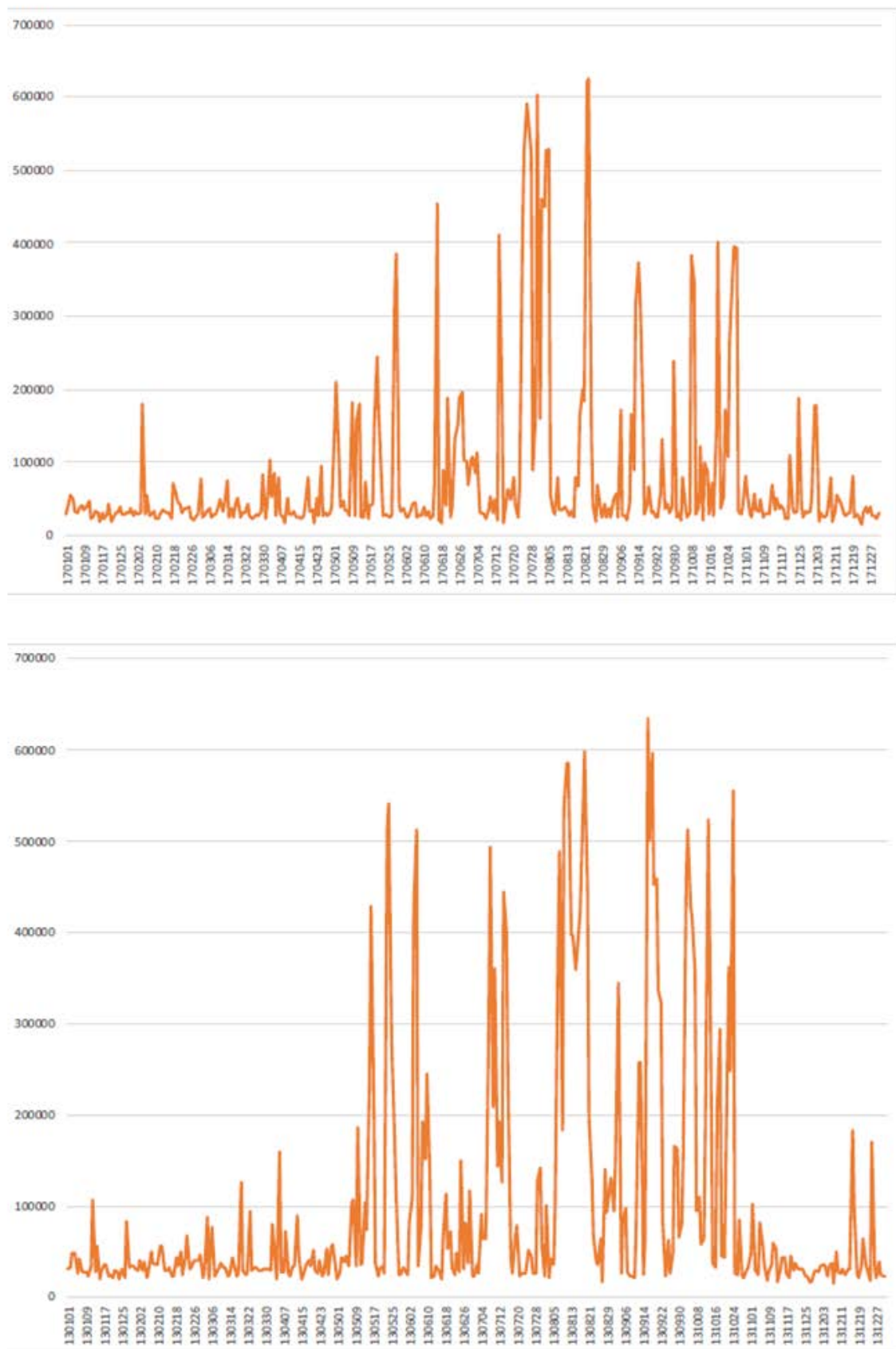


図4. 桜島の大規模火山噴火を想定した事前広域避難計画のための一年を通じた要避難人口の推移(上:2017年, 下:2013年)(京都大学防災研究所[課題番号:1914])

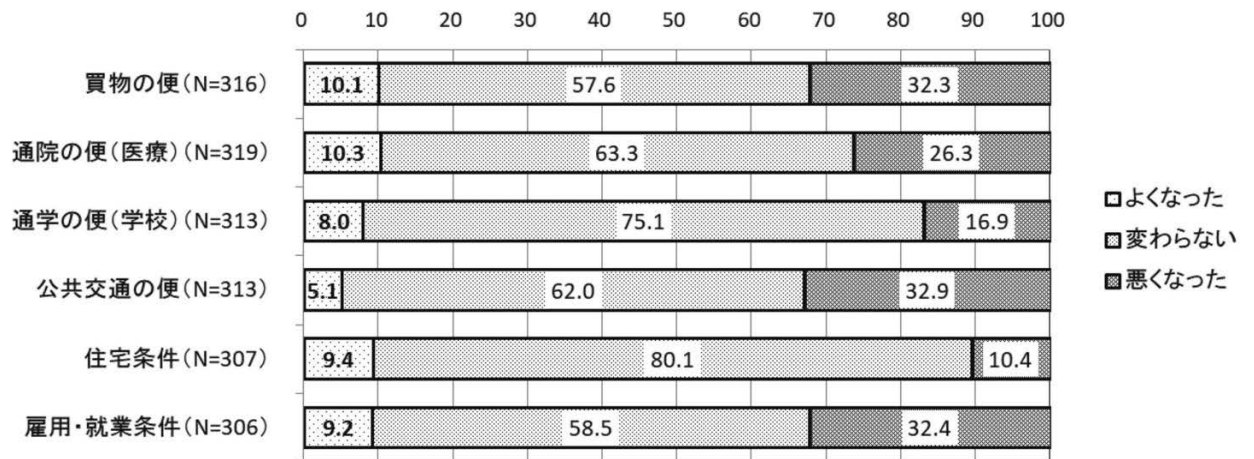


図5. 東日本大震災の被災地における復興後の生活環境条件の変化 (名古屋大学[課題番号: 1704])

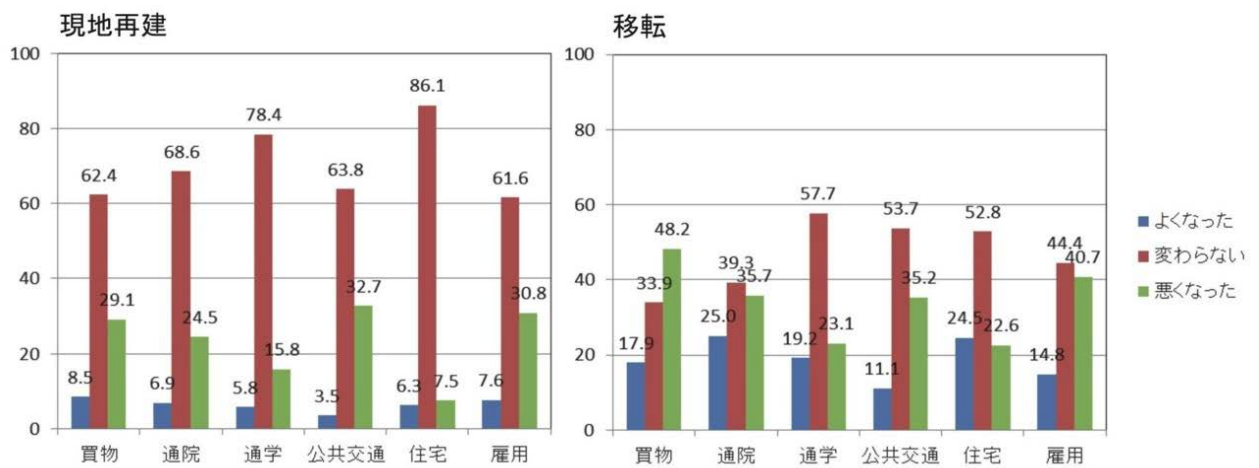


図6. 東日本大震災の被災地における住宅再建方式別の生活環境条件の変化 (名古屋大学[課題番号: 1704])

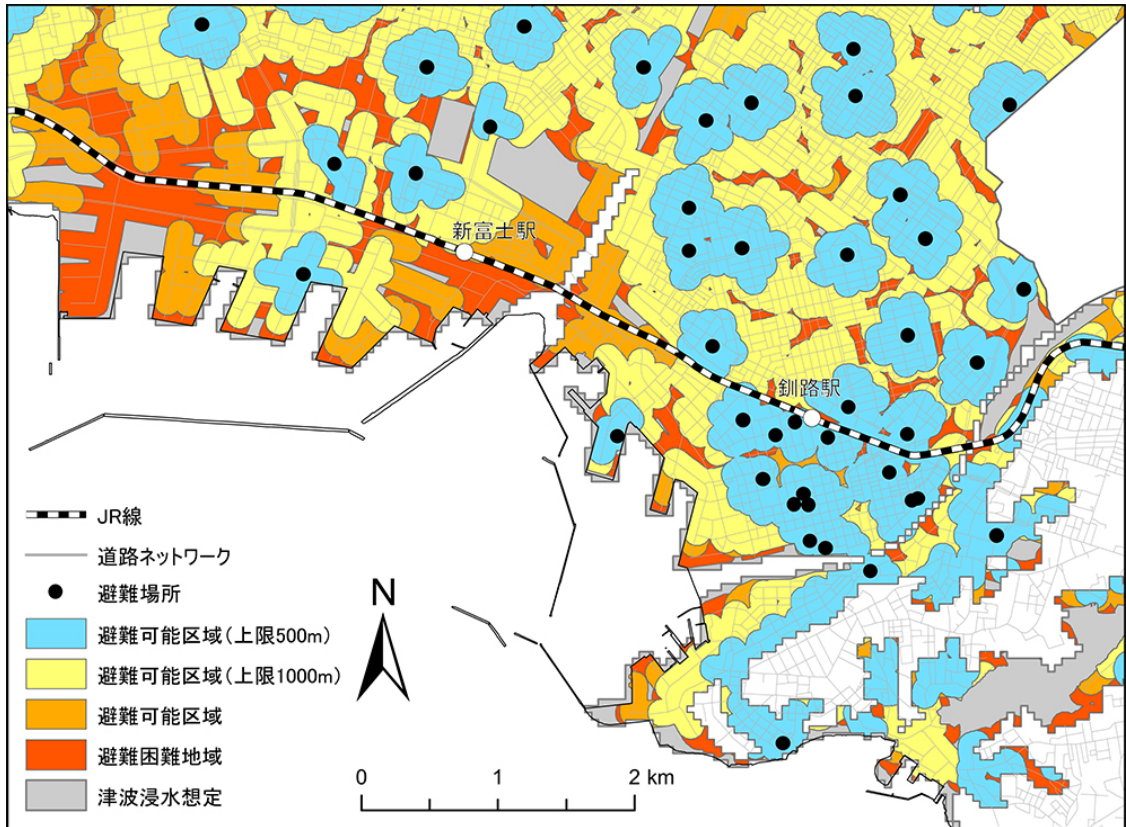


図7. 釧路市における津波発生時の避難可能域と避難困難区域のシミュレーションデータ (北海道大学[課題番号:1006])

(下呂市n=784 木曾町・王滝 n=98 登山者n=37 遺族n=41)

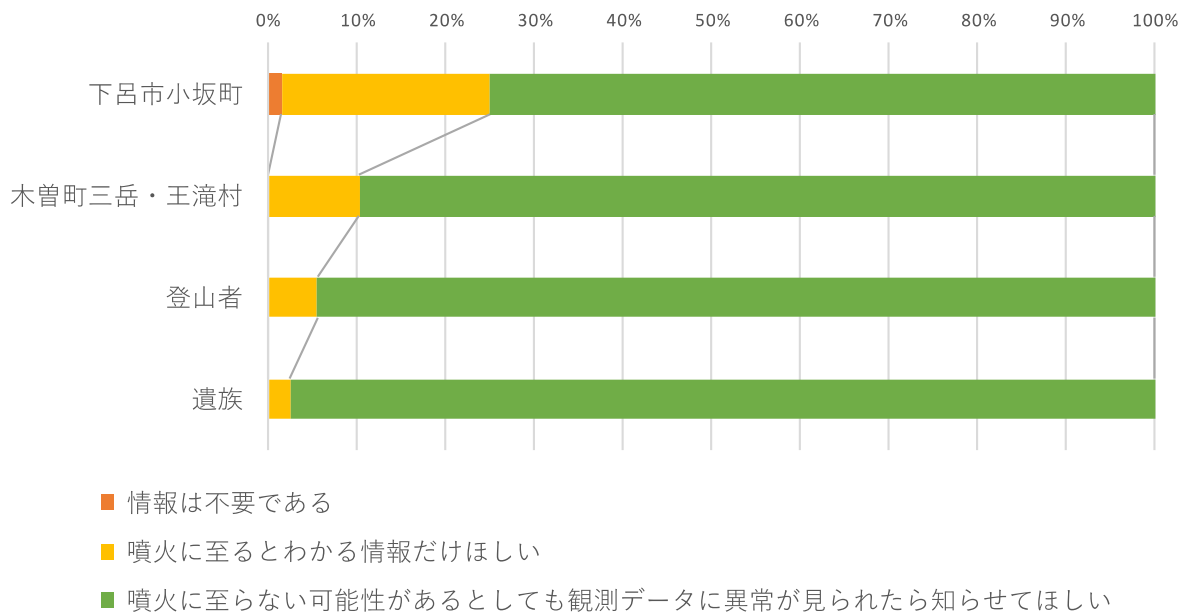


図8. 火山活動に変化が見られた時の情報提供ニーズ (名古屋大学[課題番号:1706])

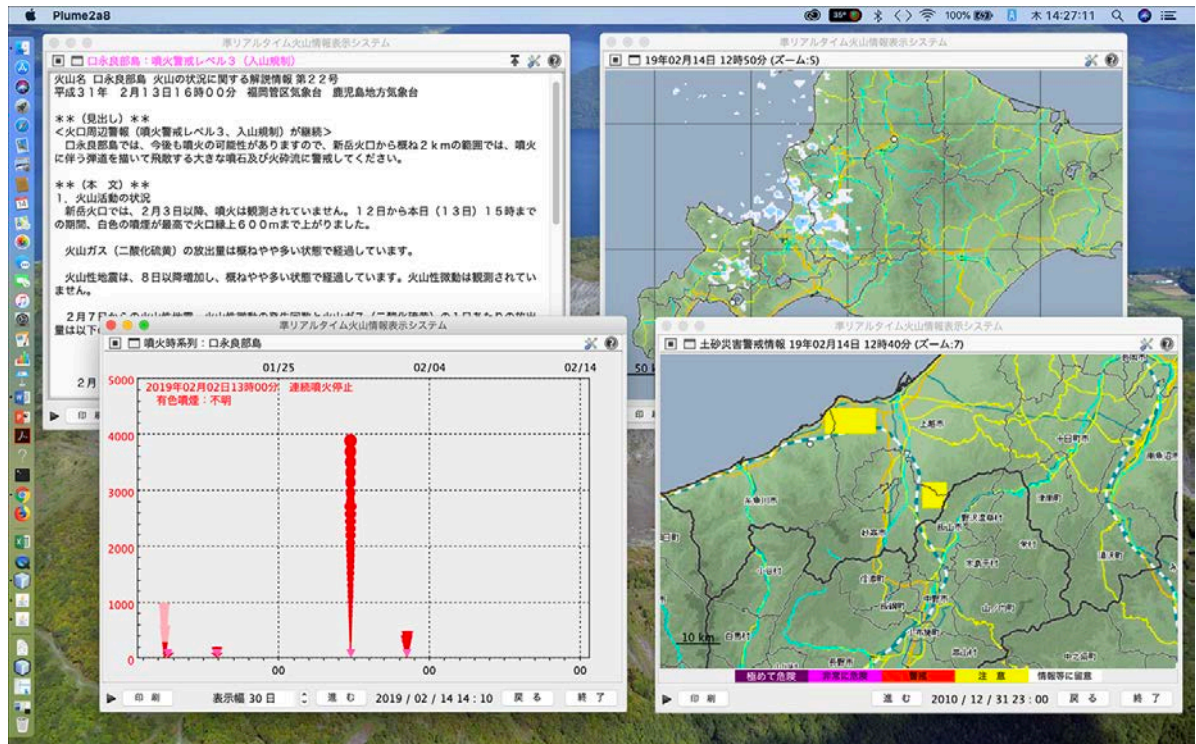


図9. 4つの情報ウィンドウが表示されているデスクトップ(左上:噴火警報・解説情報, 左下:噴火時系列, 右上:高解像度降雨レーダー画像, 右下:土砂災害警戒判定メッシュ情報)(北海道大学[課題番号:1009])

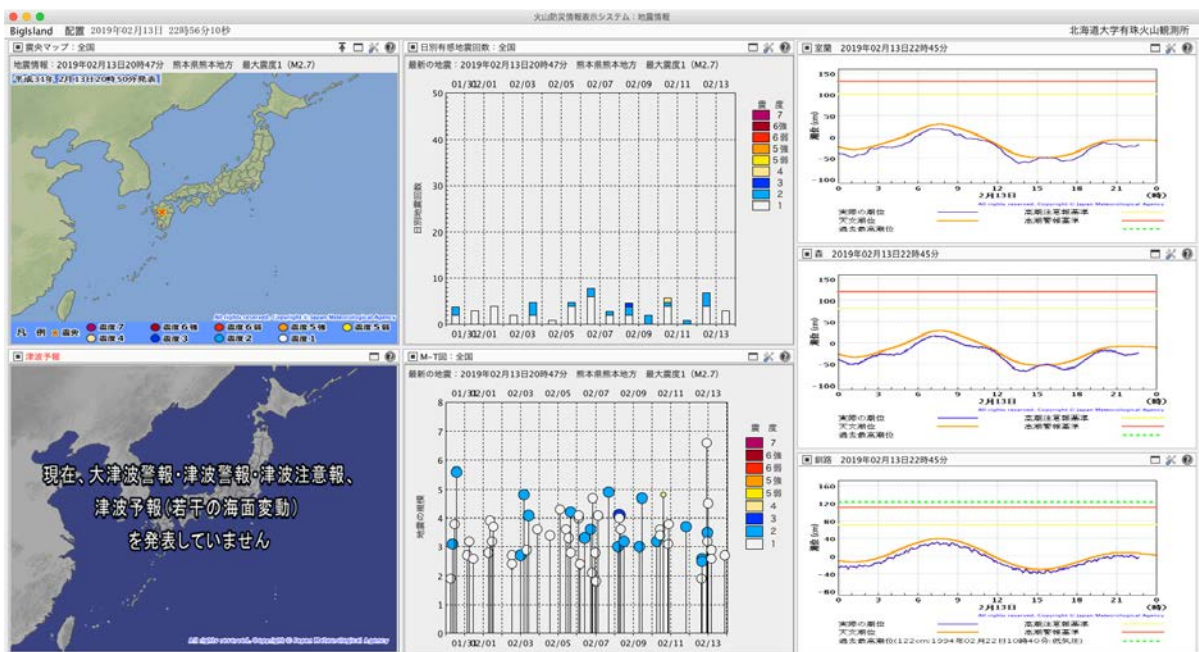


図10. 統合型ウィンドウに表示された震央マップおよび津波情報(試験的)(日別地震回数, マグニチュード-時間分布図, 潮位観測情報。地震発生回数表示には, 地震活動の時間的な推移が把握できるように, 地震情報が更新されるたびに積み上がる, 最大震度をカラーで表した積み上げ棒グラフ形式を用いた。マグニチュード-時間分布図についても,

マグニチュードとともに最大震度がカラーと円の大きさを表されている) (北海道大学[課題番号 : 1009])

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 佐竹健治（東京大学地震研究所）

1. 5年間の成果

(1) 概要

当部会で実施された研究課題における平成26～30年度の成果の概要は次のとおりである。

歴史地震研究の基盤である既刊地震史料集に所収されている多種多様な史料について、史料本文のデジタルデータ化と校訂作業を実施し、地震関連史料データベースを構築した。また、各地の史資料保管機関において地震関連史料の調査・撮影を実施し、その中で特に日記史料の記録に基づいて、1854年安政東海・南海地震の前後の期間における有感地震の発生傾向を分析した。

考古遺跡に残された災害痕跡の記事について、全国各地の発掘調査報告書などから抽出・分析し、データベースの項目設計、発掘現場での情報収集、データの収集と分析、文献の調査などに基づいて、新規に全国的なデータベースの作成を開始した。また、このデータベースを発展させて、地震関連史料データベースと統合した拡張版データベースの試作版も作成した。

津波堆積物に関するデータについて、北海道や北方領土やロシアの沿海州において、歴史津波や先史時代の津波痕跡の調査を実施した。また、津波の痕跡が保存される場所や条件を確認するため、2011年東北地方太平洋沖地震津波で形成された津波堆積物を追跡調査した。一方で、1855年安政江戸地震について、記述内容の信頼性が高い日記史料に記された遠地での有感記録に基づき、有感場所ごとに緯度・経度を特定して震度を推定し、有感範囲の地理情報システムの試作版を作成した。さらに、奈良盆地の考古遺跡で確認された地震に起因する災害痕跡と、史料から判明している被害地震との対応について、複数の事例を用いて検討した。

日本海沿岸地域での歴史地震の実像を探るために、各地の史資料保管機関に所蔵されている史資料の調査や、既刊地震史料集に所収されている史料の原本調査と校訂作業を実施した。これらによって、1804年文化象潟地震については、新たな史料に基づいてこれまでの地震被害数を修正した。また、1858年安政飛越地震については、原史料に基づいて被害一覧表を作成し、正確な家屋被害数と一軒当りの死者数を導き出すとともに、絵図の分析と地形調査によって、大規模な山崩れと天然ダムの形成場所を明らかにした。さらに、1855年安政江戸地震に関する史料記述の分析から、家屋倒壊率を導き出す際に「半潰」軒数を用いるのは好ましくなく、家屋全壊率を家屋倒壊率とするのが妥当であることを明確にした。一方で、新潟県内の考古遺跡の発掘調査で検出された地震痕跡を集成・分析し、1751年越後高田地震において液状化痕跡がほとんど残っていない原因として、段丘の発達や粘土層の厚さによって、大きな地震でも噴砂などが発生しにくい低地があることを指摘した。

既刊地震史料集の史料検索システムや、歴史地震に関連する文献の検索システム、明治

期の地名検索システムなどを構築して、歴史地震研究における環境を整備した。また、各地の史資料保管機関において地震関連史料の調査を実施し、名古屋大学附属図書館所蔵の『高木家文書』については修復と翻刻を実施した。

史料に基づいて幾つかの歴史地震を検討し、歴史地震のカタログにある間違いを提示した。また、地震学の知識を有し史料の読解ができる人材の育成と、幅広い研究分野の人材の交流を目指し、歴史学の専門家の協力を得て、史料の翻刻や古地震に関する研究会を実施した。

(2) 5年間になされた主要な成果 その1

地震火山観測研究計画を実施・運営する地震・火山噴火予知研究協議会の計画推進部会に史料・考古部会が組織され、歴史学や考古学の研究者が複数参加して、地震学・火山学の研究者などと共同で調査・研究が始められた。地震・火山研究に関するこのような文理融合研究は、他に類をみない組織的・長期的な内容のものであり、史料・考古部会における文理融合研究の実施とその継続は主要な成果と言える。

(3) 5年間になされた主要な成果 その2

全国各地の発掘調査報告書の収集・分析に基づいて、災害痕跡データベースの作成が新たに開始された。これまで考古学を主体とする全国的な災害痕跡のデータベースは存在しておらず、災害痕跡記事の抽出やデータの作成、データベースの構成などに新規の研究成果が活用されている。

(4) 5年間になされた主要な成果 その3

災害痕跡データベースを基盤とした災害痕跡 GIS データベースシステムと、地震関連史料データベースとを統合して、相互に検索できるシステムを開発した。これには、地震を起因とする災害痕跡と史料記述にある被害発生場所とを関連付けるために、それぞれの位置情報が活用されており、これによって歴史地震の被害実態について総合的な考察が可能となった。

2. 平成 30 年度の成果

将来発生する地震や火山噴火について知見を得るためには、現在だけでなく過去に発生した事象に関する調査・研究が重要である。地震や火山噴火は日本列島とその周辺域で有史以前から幾度も発生しているが、日本における地震の近代的な機器観測の開始は明治初期以降であり、全国的な機器観測の展開は 100 年に満たない。そのため、機器観測以前に発生した地震や火山噴火について知るためには、歴史学や考古学で用いられている史料や考古資料に基づいた調査・研究が必要になる。特に、一度発生すると甚大な被害をもたらす低頻度で大規模な巨大地震・大地震や大噴火については、機器観測が実施されている期間に比べて発生間隔が長いために、機器観測によるデータは多くない。そこで、史料や考古資料に基づくデータと近代的な観測データとの比較・検討を通して、巨大地震や大噴火の現象解明とそれらの再来間隔や、その前後に発生する中・小規模の地震や火山活動を含

めた全体像の把握に努めていく必要がある。

平成 26 年度より開始された本研究計画ではそれまでの計画とは異なり、過去に発生した地震及び火山噴火の現象とそれらによる災害について、史料や考古資料を用いた研究の必要性が明示されており、当部会はこの研究分野を主体的に推進する立場にある。そこで当部会では、個別の研究課題の成果に基づいて「災害の軽減に貢献する」ことができるような方向性を導き出し、本研究計画が切り拓く文理融合研究の新たな学術的展開に寄与していく必要があると考える。

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整理

歴史学や考古学において研究の基礎となる史料や考古資料について、地震や火山噴火の現象解明とそれらに起因する災害の研究に活用するためには、地震関連史料集や考古遺跡の発掘調査報告書という紙媒体を用いた既存の理学的分析だけでは不十分である。さらなる研究の深化のためには、歴史学・考古学における史資料の学術的な分析とデジタルデータ化が必要であり、不足している部分については新たな史資料の調査・収集も実施する必要がある。今年度も引き続き、史資料の調査・収集や、デジタルデータ化に関する作業方針の検討、及びデジタルアーカイブ化を実施した。また、個別のデータベースを組み合わせ、史料・考古の統合データベースの試作版を構築した。

ア. 史料の収集とデータベース化

・文献史料による歴史地震に関する情報の収集とデータベースの構築・公開

地震・火山噴火史料データベースの構築を目指し、『増訂大日本地震史料』や『新収日本地震史料』といった既刊地震史料集に所収されている史料について、データベース構築に必要な XML データ化作業を継続して実施した。史料本文をデータ化する際に、歴史学的に信頼できる原典史料に遡り、史料記述の間違いの修正や省略部分の補足を行う校訂作業に重点をおいており、史料データの正確性の確保に努めている。史料本文の校訂作業には膨大な手間と時間を必要とするため、当初の計画どおりには進捗していない。そこで、今年度からは計画を部分的に変更して、既刊地震史料集全 33 冊（合計約 27,000 頁）を一端全てテキストデータ化して簡易データベースを作成し、それを基にして校訂作業を実施していく手法を開始した。これによって、平成 29 年度までにデータベース化の作業に着手している約 30.9%に加えて、今年度中に新たに約 24.5%のテキストデータ化が達成された。これらについては順次、試作版の「日本地震関連史料データベース」に組み込んでいく予定である。

また、平成 29 年度に引き続き、東海地方にあって長期間にわたる日記史料が現存する三河国田原藩（愛知県田原市）の『田原藩日記』（田原市博物館所蔵）の調査・撮影を実施しており、今年度で全ての撮影が完了した。

さらに、平成 30 年 11 月 30 日に、地震史料データベースの更なる活用に向けて、地震史料シンポジウム「地域史料から地震学へのアプローチ」を開催した（東京大学史料編纂所 [課題番号：2601]）。

・ 日記史料の収集・分析と前近代の地震活動の解明

平成 29 年度に引き続き、既存の日記史料に新たに調査・撮影した日記史料を加えて、「日記史料有感地震データベース」を構築し、今年度は試作版を公開した。また、このデータベースを基にした地理情報システムを作成し、そこから前近代の有感地震に関する時空間分布図を作成した。さらに、この日記史料有感地震データベースと気象庁の震度データベースの有感範囲を比較・検討して、前近代に日本各地で発生した中・小規模の地震について震源決定を試みた。今後の展開として、日記史料のデータベース化を進めて有感地震の記録地点数と記録期間を増やしていき、19 世紀中頃の日本列島における有感地震の有無や有感範囲などのデータ量を増加させていく計画である。それに対応して、データベースの構成や時空間分布図の改良も予定している（東京大学地震研究所〔課題番号：1501〕）。

・ 日本海沿岸地域を中心とした地震・火山噴火災害関連史料の収集と分析

主に日本海沿岸地域における地震・火山関連史料を収集し分析するために、各地の史料保存機関に所蔵されている史料の調査や、既刊の地震・火山噴火史料集に所収されている史料の原本調査に基づく校訂作業を実施した。これらの原本調査と校訂作業に基づく史料の分析から次のような成果が得られた。

享保三年七月二十六日（1718 年 8 月 22 日）に発生した伊那・三河地震における被害の全体像を明らかにするために、京都の町人が記した良質な史料である『月堂見聞集』などの諸史料を検討した。吉田藩領（愛知県豊橋市他）や淀城（京都市伏見区）では地震による被害があり、現在の松本市・諏訪市・伊那市高遠町・飯田市でも被害があり、そのうち飯田市が最大であった。

弘化四年三月二十四日（1847 年 5 月 8 日）夜 10 時頃に発生した善光寺地震や、その 5 日後の三月二十九日（同 5 月 13 日）昼頃に発生した高田地震ではなく、同三月二十九日朝に発生した地震について検討した。埴科郡森村（長野県千曲市）で記された日記史料である『徒然日記 附 地震大變録』によると、三月二十九日朝の地震は「大地震」とあり、土蔵の屋根瓦が一寸（約 3 cm）ほどずつ下がり下がったとある。このことから森村では、三月二十四日夜の地震よりも三月二十九日朝の地震による被害の方が大きかった状況がわかる。

1854 年嘉永（安政）南海地震後に作成された『嘉永七年寅霜月大坂大地震（仮）』、『大坂大津浪図』、『大坂大洪水図』といった瓦版の絵図について翻刻・検討を行った。『大坂大洪水図』は、多数の残存が確認できる『嘉永七年寅霜月大坂大地震（仮）』を基図にして朱筆による書き込みがある絵図であり、瓦版の入手者の手によって情報が付加されている状況がわかる。

1707 年宝永地震、1854 年嘉永東海地震、1855 年安政江戸地震などにおける家屋の地震被害に関する史料記述を検討し、家屋倒壊率を導き出す方法の再検討を行った。その結果、史料に記されている家屋の「半潰」軒数については、家屋倒壊率を導き出すための被害数として使用することは不適當であり、広域の地震被害を検討する際には、家屋全壊率を家屋倒壊率として用いることが妥当であるとの結論に至った（新潟大学〔課題番号：2701〕）。

・東海地方を中心とした南海トラフ地震関連史資料の収集と分析

三重県や愛知県の自治体史・郷土史などを中心に史料調査を行い、南海トラフ地震に関する地震情報を抽出して、抽出された情報を項目毎にまとめた。収集した史料については、e コミマップを用いて地図と結び付けたデータベースを構築していく予定である。また、高知県・三重県・愛知県・静岡県の明治期の旧版地形図をデジタル化して、e コミマップを用いて閲覧できるようにした。さらに、歴史地震研究に活用するための国土数値情報をe コミマップに追加して、e コミマップの活用方法を検討した。

史料の調査・収集については、公益社団法人全国市有物件災害共済会防災専門図書館所蔵の瓦版（『東海道大阪辺大地震津波図』、『諸国大地震 嘉永七甲寅十一月 新板』、『関東大地震図』など）の翻刻を行った。なお、名古屋大学附属図書館所蔵の『高木家文書』の修復・翻刻については継続して実施している。

データベースについては、大学共同利用機関法人人間文化研究機構が作製した明治期地名データについて、新たに地図や地名から検索できるシステムの構築を行った。今後、史料情報を地図と結び付ける際に活用できると考える。また、これまで構築してきた「歴史史料検索システム」に改良を加え、国立国会図書館で公開されている IIIF 化された『増訂大日本地震史料』の各コマの画像と検索結果をリンクさせて、『増訂大日本地震史料』所収の史料を検索・閲覧できるようにした（名古屋大学〔課題番号：1701〕）。

・歴史災害研究のオープンサイエンス化に向けた検討

災害史資料に含まれる情報の構造化記述を可能にするために、日本語歴史資料の記述に特化した軽量マークアップ言語 Koji (<http://www.koji-lang.org/>) を開発した。Koji は形式文法的一种である解析表現文法 (Parser Expression Grammar) で定義されており、史料中の日時や地名などの情報を明示的にタグ付けすることができる。加えて、言語の処理系を整備するために、縦書きでの記述や構文強調、エラー検知などに対応した Koji のための Web エディタを開発した。このエディタは script タグを含めることで任意の Web ページに設置することができる。

本研究の活動の一環として運営している歴史災害資料の市民参加型翻刻プラットフォーム「みんなで翻刻」(<https://honkoku.org/>) では、東京大学地震研究所図書室が公開している和古書資料 499 点 (画像数 7940 枚) を利用している。2019 年 2 月時点までに、このうちの 94% にあたる 481 点 (画像数 7467 枚, 558 万文字) が 4,600 名の参加者によって翻刻された。

新規に開発した Koji を搭載し、画像情報共有の国際的標準規格である IIIF (International Image Interoperability Framework) に対応した「みんなで翻刻」の試験バージョン (<https://honkoku.org/next/>) を開発・公開した。2019 年 3 月中に稼働を開始し、史料の翻刻に加えてその時空間情報のタグ付けを実施する予定である (公募研究, 国立歴史民俗博物館 [課題番号: 2911]) 。

イ. 考古データの収集・集成と分析

・考古資料の収集・分析とデータベースの構築

平成 29 年度に続き、47 都道府県について発掘調査報告書から災害痕跡データの抽出を

行い、データの検討を行った発掘調査地点数が計 48,352 ヶ所、データの確認のみを行った災害痕跡件数が 21,803 件に達した。これらの災害痕跡データについては、検出地点や検出層位の再検討を進め、被災エリアの可視化や災害発生時期の特定を可能な限り試みることで、特に奈良県において 4 度の巨大地震の被災履歴を捉えることができた。地層中で確認された災害痕跡データというデータ特性のため、史料記述のように明確な時期を決定することは極めて困難である。しかし、近現代の攪乱の多い地層についても、地理学的なアプローチを丁寧に加えることによって、684 年白鳳地震、887 年仁和地震、938 年京都・紀伊の地震、1707 年宝永地震、1819 年伊勢・美濃・近江の地震、1854 年伊賀上野地震、1854 年安政東海・南海地震における地震痕跡の存在が指摘できるようになった。これらの災害痕跡データについては順次入力作業を進めており、データ量の増加に対応して入力項目の整理が必要となったため、各項目の再定義（文字情報、画像情報、ID 化情報など）を行った。これまでの災害痕跡データをこの定義付けに従って更新し、これらのデータについてもデータベース化を進めている。

災害痕跡 GIS データベースシステムでは、東京大学史料編纂所で構築中の試作版「日本地震関連史料データベース」と連携して、災害痕跡データベースと相互に検索できるシステム開発を進め、検索システムや情報入力インターフェースの拡充を進めた。

また、奈良県、京都府、静岡県、長崎県を始めとした各地の発掘調査現場において、主に中近世以前に発生したと考えられる災害痕跡について、地質考古学的調査と試料採取を行った。これらを整理・分析して結果を報告するとともに、災害痕跡の調査・記録方法に関する研究集会を開催した（奈良文化財研究所〔課題番号：9001〕）。

・福岡平野での考古データの収集

福岡平野に位置する警固断層の最新活動は、福岡市中央区浜の町におけるトレンチ調査から、約 8000calBP と推定されている。これは考古年代における塞ノ神Ⅲ式中段階以前であるが、どれだけ年代を遡るかが課題とされていた。今回、福岡平野における縄文遺跡の消長を細別し、型式ごとに整理した結果、警固断層の活動による地震の発生時期について、人類活動の痕跡が急に皆無になる塞ノ神Ⅱ式中段階と結論付けることができた（新潟大学〔課題番号：2701〕）。

ウ．地質データ等の収集と整理

・津波堆積物の調査による古津波の検討

地震の長期評価の説得性を向上させるには、地震やそれによる津波が痕跡を残さない事例、また、痕跡が形成された後に一部もしくは全部が消失してしまう事例についても調査し、その過程を解明する必要がある。青森県の三沢海岸には、2011 年東北地方太平洋沖地震で形成された津波堆積物が残されている。遡上限界付近の薄く不連続な堆積物は消失してしまった所が多いが、粒径の変化を詳細に調査することで、遡上限界付近の特徴である「粗粒で軽量の粒子が集積した堆積物」が識別可能な場合のあることがわかった。これは、津波堆積物の粒径と比重を系統的に調査することで、古津波についても遡上限界まで追跡しているかどうか評価可能であることを示す。

また、ロシアの沿海州や北方領土で歴史時代と先史時代の津波堆積物の調査を進めてい

る。今年度は国後島で約 10 日間の調査を行い、国後島の太平洋沿岸、古釜布～クラオイ川（約 30km の範囲）で、1994 年北海道東方沖地震津波によると思われる明瞭な津波堆積物を確認した。

さらに、1611 年慶長三陸地震による津波の北海道南西部における被害と痕跡について考察した。この地震については、『松前家記』に「十六年辛亥十月東部海嘯民夷多ク死ス」とある。北海道太平洋沿岸における 17 世紀の津波堆積物の年代を統一手法で求めると、苫小牧～むかわの津波堆積物は 1611 年起源で説明でき、噴火湾や襟裳岬より東のものは明らかに後年と考えられる。史料にある「東部」が松前より東部という解釈で良いならば、史料の記述と痕跡は矛盾しないことになる（東京大学地震研究所〔課題番号：1501〕）。

・九十九里浜での地形・地質調査

1703 年元禄関東地震の際に津波が襲来した千葉県東部の九十九里浜平野に位置する片貝村（現、九十九里町片貝付近）には、元禄関東地震の前後に作成された絵図が存在しており、現地比定の結果から現在の九十九里町役場付近まで津波が遡上した可能性が指摘されている。この津波に伴って堆積した「津波堆積物」を検出するため、役場付近の堤間湿地において浅層部の地質調査を実施した。掘削調査で採取された試料について、放射性炭素（¹⁴C）年代測定や光学顕微鏡を用いた珪藻化石群集の調査を行った結果、採取された試料は、津波や高潮などの海側からの流れ込みに伴うイベント堆積物である可能性が高いことが判明した（新潟大学〔課題番号：2701〕）。

（2）低頻度大規模地震・火山現象の解明

前近代の地震・火山噴火に関する史料や考古資料をデジタルデータ化し、同一の地図上に載せて被害分布図など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。これによって、機器観測の開始以前に発生した低頻度で大規模な地震・火山噴火の現象やそれによる災害を対象とした調査・研究が促進され、今後発生する低頻度で大規模な災害の予測や、その被害の軽減に貢献できると考える。

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

・史料に基づく前近代の被害地震の実態解明と地震活動の分析

試作版の「日本地震関連史料データベース」に収められた史料を用いて、文禄五年（1596 年）閏七月に発生し、現在の大分県の別府湾岸に津波被害をもたらした文禄豊後地震に関する史料について再検討した。史料の詳細な検討から、地震・津波の発生日を閏七月九日（1596 年 9 月 1 日）とする複数の史料については、情報源が個々に独立したものであるが、同じく発生日を閏七月十二日（同年 9 月 4 日）とする複数の史料については、後世に日付を改めたものであるため、信頼性のないことが判明した。これによって従来、閏七月九日説と同十二日説の学説が存在していた文禄豊後地震について、別府湾に津波被害をもたらした地震は閏七月九日であったことが確定的となった。

また、嘉永七年十一月四日・五日（1854 年 12 月 23 日・24 日）の東海・南海地震関連の日記史料について集中的に調査・収集し、本震前後の期間における有感地震の記録につい

て分析した。現段階での成果として、東海・南海地震の発生前に、太平洋沿岸地域では目立った有感記録の増加はみられないが、山陰地方や近畿地方北部では本震発生の5年前に有感地震の記録が増加している状況が判明した(東京大学史料編纂所[課題番号:2601])。

・前近代の奈良盆地における被害地震と災害痕跡との対応

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

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

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

高市郡明日香村大字真弓小字カヅマヤマのカヅマヤマ古墳では地割れの痕跡が確認されており、史料から考えられる被害地震として、大きく長い揺れを伴う1361年の南海トラフ沿いの巨大地震が挙げられる。

このように奈良盆地で災害痕跡を生じさせた被害地震は、南海トラフ沿いで発生した巨大地震に起因する場合が多い。そのため、仮にその前後数十年の間に発生した内陸地震によって災害痕跡が生じていたとしても、時期を絞り込むことが困難なために、巨大地震に起因する災害痕跡とされてしまう可能性がある(東京大学地震研究所[課題番号:1501])。

・液状化痕跡による古地震の調査

2018年9月に発生した北海道胆振東部地震を受け、液状化の痕跡である噴砂の地質学的特徴を調査した。苫小牧市、厚真町、むかわ町の例では、噴砂丘、砂脈の構成物や構造には、割れ目の形状や液状化層の構成物(ここでは砂、泥、礫、様々なサイズの軽石)が影響していることがわかった。また、液状化の痕跡は古地震の情報源として使われるため、発掘調査報告書の液状化痕跡の産状記載を確認した。札幌市で公表されている234ヶ所の発掘調査報告書を調査した結果、そのうち54ヶ所で液状化の痕跡が記載されていることがわかった。今後、写真や図版を基に噴砂または液状化の痕跡とみなされた根拠も整理する予定である(東京大学地震研究所[課題番号:1501])。

・史料の収集と分析による歴史地震の調査

今年度は、寛永年間以後および寛文年間の京都周辺における地震活動に関する史料を翻刻した。また、1854年伊賀上野地震の際に伏見で発生した液状化被害について検討し(加納, 2018)、1707年宝永地震と富士山噴火に関する複数の写本を検討し、より原本に近い

史料を特定して未読箇所を翻刻した（服部・中西，2017，2018）。さらに，宝永地震と富士山噴火について，現在知られている中で最も完全で，かつ古い時代に記された史料を特定し翻刻した（小林ほか，2018）。これらの研究から，1707年宝永地震の本震と翌日発生した余震の震源域の推定に有益な情報が得られた。一方で，2018年6月18日に発生した大阪府北部地震における文化財被害の分析を通じて，歴史地震における震度変換手法の高度化に向けた研究を開始した。

市民参加型のオンライン翻刻プロジェクト「みんなで翻刻」に史料を順次追加するなど運営に協力しており，歴史学の専門家の協力を得て，古地震に関する合宿形式の研究会（翻刻を主とした史料読解）を実施した（平成30年9月，平成31年3月）。この研究会では，歴史学の専門家による指導を受けて史料の翻刻と解釈を実践しており，歴史学に関する講演によって史料解釈に必要な歴史学の基礎知識の獲得を目的としている。この研究会は，地震学のバックグラウンドを持ちながら史料の解読もできる人材の育成だけでなく，歴史学，人文情報学，地理学，地質学，気象学，地震学といった幅広い分野の研究者と学生，大学職員，一般市民の交流の場となることを目指している。この研究会において翻刻や史料の取り扱いを学んだ研究者や学生が，上記のような研究成果を発表するようになり，人材育成の効果が顕れはじめていると言える。なお，「みんなで翻刻」の開発や，上記の歴史地震研究の成果は，この研究会での学習，技術開発，情報交換によって生み出されたものである（京都大学防災研究所〔課題番号：1901〕）。

・明治前期における過去の地震・津波報告の分析

明治二十六年（1893年）に当時の帝国大学理科大学は，各地の郡役所・町役場などに過去の地震・津波や海底地形変動に関する情報の提出を求めており，「地震学及地理学研究材料 測候所郡役所組合事務所報告」（東京大学地震研究所所蔵）として各地からの報告がまとめられている。

この報告書に収録されている福島県檜葉町の事例として，かつて檜葉郡木戸村付近の沿岸には脇浜村があったが，慶長年間の海嘯（高浪・高潮）によって壊滅し，生き残った住民はこの海嘯の伝承を有しており，これが地元の旧記にも記されているというものがある。『福島県史』や『檜葉町史』によると，近世初頭に存在した「わきの村」または「脇之浜村」は，近世後期には史料上に現れなくなることが確認されている。元福島県立歴史資料館・山内幹夫氏が昭和49年に実施したフィールドワークによると，檜葉町北田にある北田天満宮の縁起を記した旧記が現存しており，その旧記には脇浜村が慶長年間の洪水・大波によって壊滅したと記されているとされる。

この報告書にある千葉県からの報告には，現在の館山市域の「今境橋」に関わる明応期の地震による隆起の伝承や，上総国興津の禅奥寺の元禄地震津波に関する伝承などが記されている。また，旧銚子町からの報告には『田中玄蕃所蔵ノ記録』として『新収日本地震史料』などに収録されている『先代集』の文章が記載されており，刊本では「洗足の砌波上げ盤浮き」とされている部分について，「盤」の文字が「盥」の誤読であることが確認された。

この報告書の富山県四方町地区からの報告には，安政五年（1858年）二月二十四日の四方海岸において，30間（約54m）の潮の満ち引きがあり，溺死者3名の被害が記されてい

る。この日に発生した地震としては、内陸部を震央とする「飛越地震」が挙げられる。この潮の満ち引きに関連して、他に『地水見聞録』に記された高波による4名の死者、あるいは『魚津在住見聞録』に記された魚網の流失や漁舟の大破などがあり、地震とは別に海嘯が発生していた状況がわかる。

なお、この報告書にある北海道の海嘯記事については、『日本地震史料』に収録されている内容と一部共通しているが、『日本地震史料』に収録されているのは『時風録』からの引用であり、この報告書にはより多くの箇所、海嘯記事が収録されている（公募研究、東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：2903〕）。

・史料中の有感地震記録を用いた歴史地震研究の新展開

史料中の有感地震記録を用いた新たな歴史地震研究の可能性を探るために、気象庁震度データベースや最近構築された震度の多次元距離減衰式を用いて、有感地震回数分布の再現性の検証を行った。また、有感地震記録に基づいて、大地震の震源域を推定する予察的手法を構築し、2004年新潟県中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年福島県浜通りの地震について適用した。

2000年～2010年までに最大震度3以上、深さ20km以浅で発生した約2300の浅発地震を対象にして、田中・他（2017）の多次元距離減衰式から予測震度を計算し、計測（観測）震度との比較を行った。その結果、震源距離10～400km程度の有感域のほぼ全域にわたって残差が±1程度の範囲内に収まり、残差のヒストグラムは平均がほぼ0の正規分布を示すことが判明した。また、既往の距離減衰式に比べて、幅広いマグニチュード、震源距離の範囲内において小さな残差になることが示された。さらに、田中・他（2017）の多次元距離減衰式によって、日本全国で観測された有感地震回数（震度2以上）の分布を概ね再現することができた。これらの結果は、田中・他（2017）による地殻内地震に関する多次元距離減衰式が、既往の距離減衰式に比べて中・小地震や遠方の観測点まで、日本全国の地表における計測震度の推定式として活用できることを示している。

現在の震度観測点が稠密に展開されている状況については、有感地震回数の分布から地震活動度を推定できる可能性が示された。しかし、史料中の有感地震記述への適用可能性を考えた場合、史料から有感地震数を抽出できる点（震度観測点）は現在に比べ極端に少ないことが想定される。そこで、観測点を1/2, 1/4, 1/8, 1/16に間引いた場合に、残差分布ならびに残差が最小となるグリッドがどのように変化するか調査した。その結果、観測点密度が低くなるにつれてイメージングされた震源域は不明瞭になるものの、観測点のカバレッジが保証され有感地震回数が突出する観測点がある場合には、観測点分布が疎になった場合でもある程度、震源域がイメージングされることが分かった。

このような結果からは、今後、史料から有感地震に対する記述を抽出・蓄積するとともに、予察的に構築した手法を高度化することで、歴史地震の震源域を従来の被害記述とは異なった観点から議論できる可能性が示唆される（公募研究、公益財団法人地震予知総合研究振興会〔課題番号：2912〕）。

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においては、近代的な観測が開始された明治期より前

に発生した地震・火山噴火やその災害について、主として地球物理学の分野から研究が実施されてきた。近代的な観測記録が皆無の地震や火山噴火を対象とした調査・研究を実施する際には、観測記録の代わりに史料や考古資料を用いる必要がある。そもそも、史料や考古資料については、本来、歴史学や考古学の手法で取り扱われなければ学術的な妥当性を保持できないものであり、理学的な知見のみで取り扱われた場合には、誤った見解を導き出してしまう危険性がある。このような理由から、近代的な観測記録のない地震や火山噴火に関する史料や考古資料を用いた理学的な研究には、学術的な手続き上看過できない問題が内在していた。

そのため、平成26年度から実施されている「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」においては、近代的な観測記録が存在しない地震や火山噴火について、地震学や火山学といった理学系の分野だけでなく、歴史学や考古学といった人文学系の分野の研究者も組織的に参加し、史料や考古資料を活用した調査・研究が共同で実施されている。このように理学系と人文学系の分野が主体となった文理融合研究は他にあまり類例がなく、本研究計画における学際的な研究として特筆すべき研究体制と言える。史料・考古部会では、次期の研究計画においても、地震・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研究計画を推進していくとともに、新たな学際的な研究分野の創出も視野に入れて、研究の更なる深化と展開を目指していくべきと考える。また今後は、文理融合研究の成果を用いた地域との連携や、地域社会への学術的貢献も検討していく必要がある。

当部会では、文理融合研究を進める上でデータの共有化が必須と考え、平成26年度以降、史料・考古それぞれ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研究を実施してきた。史料データは被害発生の時期は明確であるが場所は必ずしも明確でなく、考古データは被害発生の時期に幅があるものの場所は明確である。今年度は、このような特徴を有する双方のデータについて、奈良盆地を対象として被害発生場所と発生時期とを結合した連続データを作成し、位置情報と時代・時間情報の両方から検索可能な史料・考古の統合データベースの試作版を作成した。

また、史料・考古の統合データベースの作成に向けた研究とは別に、史料データや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にも取り組んでいく必要がある。特に、史料データにある有感地震の記録を用いて、特定期間の広域の有感地震を分析し、巨大地震と大地震だけでなく、その間に発生した有感地震（中・小規模地震）を含めた地震活動の全容を解明する研究は、現行の地震学における地震活動の研究にとって有益と考える。

さらに、史料データにある被害記述に基づいて、地理情報システムを活用した歴史地震の推定震度分布図を作成する研究については、今後、地震学における強震動研究との連携を念頭において研究を進めていく計画である。一方で、史料・考古部会としては、個々の研究課題において歴史地震・火山噴火の事例研究も進めていき、現行の地震学・火山学や災害研究に資する成果を積み重ねていく必要があると考える。

成果リスト

- Chague-Goff, C., Goto, K., Sugawara, D., Nishimura, Y., Komai, T., 2018, Restoration measures after the 2011 Tohoku-oki Tsunami and their impact on tsunami research, In: Santiago-Fandino, V., Norio, M., Iuchi, K., Sato, S. (eds), Reconstruction and Restoration after the Japan 2011 Earthquake and Tsunami, Insights and Assessment after 5 years, Springer, Vol. 47, pp. 229-247.
- 蝦名裕一, 佐竹健治, 2018, 帝国大学理科大学「地震学及地理学研究材料報告」に記載される津波痕跡の検証, 第35回歴史地震研究会(大分大会)講演要旨集, 30.
- Yuta Hashimoto, et al, 2018, Minna de Honkoku: Learning-driven Crowdsourced Transcription of Pre-modern Japanese Earthquake Records, Digital Humanities 2018, Oral, Mexico City, United Mexican States, 26-29 June, 2018.
- 橋本雄太, 宮川真弥, 2018, 日本語文献史料の構造化記述のための軽量マークアップ言語の開発, 人文科学とコンピュータシンポジウム2018論文集, 237-242.
- 服部健太郎, 中西一郎, 2018, 1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する一史料(3) - 元禄地震・宝永地震・宝永富士山噴火を記した「当山本宮記」-, 地震2, 71, 131-137, doi:10.4294/zisin.2017-17.
- 服部健太郎, 中西一郎, 2018, 訂正: 1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する一史料(3) - 元禄地震・宝永地震・宝永富士山噴火を記した「当山本宮記」-, 地震2, 71, 151-152, doi:10.4294/zisin.2018-4.
- 服部健太郎, 中西一郎, 2019, 1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する史料 - 富士山宝永噴火に先行した地震活動に関する記述の検証 -, 地震2, 71, 219-229, doi:10.4294/zisin.2018-5.
- 平井敬, 2018, 殖産興業の民間先駆者 田中長嶺が見た濃尾地震, 日本地震学会2018年度秋季大会講演予稿集, S09-P04.
- 堀健彦, 小野映介, 2018, 1833年庄内沖地震による輪島の津波被害の地域的差異と微地形, 災害・復興と資料, 10, 15-23.
- 石辺岳男, 松浦律子, 津村建四朗, 岩佐幸治, 古村美津子, 2018, 地震活動から探る房総スロースリップイベントの発生履歴, 日本地震学会2018年度秋季大会講演予稿集, S23-24.
- 加納靖之, 2018, 1854年伊賀上野地震の際に伏見で発生した局所的な液状化被害地点の検討, 自然災害科学, 37, 205-217.
- 加納靖之, 水島和哉, 2018, 『伏見酒造組合資料』にみえる明治期の地震, 歴史地震, 33, 213-219.
- 加納靖之, 竹之内健介, 矢守克也, 2018, ハザードマップへの歴史災害地点の重ね合わせ - 災害史と地域防災の新たな連携 -, 京都大学防災研究所2017年九州北部豪雨災害調査報告書, 109-114.
- 片桐昭彦, 西山昭仁, 水野嶺, 2018, 日記史料にみる時間表現の情報化, 人間文化研究情報資源共有化研究会報告集, 8, 33-44.
- 小池伸彦, 2018, 平城第552次調査検出の地震痕跡について, 紀要2018, 独立行政法人国

- 立文化財機構奈良文化財研究所編, 60-61.
- 村田泰輔, 2018, 発掘された歴史的地震・火山災害痕跡データベースー考古学の新たな挑戦, デジタル技術で魅せる文化財, 奈文研と ICT, クバプロ, 159-192.
- 村田泰輔, 2018, 第 6 章第 6 節 自然科学分析からみた高住牛輪谷遺跡(2区)の古環境, 高住牛輪谷遺跡 II, 鳥取県教育委員会編, 393-404.
- 村田泰輔, 2018, 第 4 章第 14 節 自然科学分析からみた大柵遺跡(1-2区)の古環境, 大柵遺跡 III, 鳥取県教育委員会編, 570-602.
- 村田泰輔, 2018, 第 5 章第 10 節 自然科学分析からみた大柵遺跡の古環境, 大柵遺跡 IV, 鳥取県教育委員会編, 453-456.
- 村田泰輔, 2018, 自然科学分析, 平城宮東院地区の調査 第 584 次・第 587 次・第 593 次, 紀要 2018, 独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所編, 178-181.
- 村田泰輔, 2018, 地質学的検討, 平城京左京一条二坊十坪の調査 582 次・第 583 次, 紀要 2018, 独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所編, 216-217.
- 西村裕一, 千葉崇, 2019, 北海道胆振東部地震(2018年9月6日)で出現した噴砂の特徴, 北海道地区自然災害科学資料センター報告, 印刷中.
- Nishiyama, A., M. Ebara, A. Katagiri, Y. Oishi and K. Satake, 2018, Long-term seismic activity database based on historical diaries widely distributed in Japan, EGU General Assembly 2018, EGU2018-12914 (Poster), Vienna, Republic of Austria, Austria Center Vienna (ACV), 8-13 April, 2018.
- 齋藤瑞穂, 2018, 弥生土器型式細別論, 同成社, 304pp.
- 齋藤瑞穂, 2018, 警固断層の考古学的研究事始, 2018年前近代歴史地震史料研究会講演要旨集, 37-39.
- 矢田俊文, 2018, 近世の巨大地震, 吉川弘文館, 248pp.
- 矢田俊文, 2018, 1855年安政江戸地震と1856年安政台風の被害数ー武蔵葛西領・武蔵多摩地域・武蔵川崎領ー, 資料学研究, 15, 1-20.
- 矢田俊文, 2018, 史料から見た一七一〇年伯耆・美作地震と一七一一一年伯耆・美作地震, 災害・復興と資料, 10, 13-18.

1 (8) データベース・データ流通

「データベース・データ流通」計画推進部会長 鶴岡 弘
(東京大学地震研究所)
副部会長 大見士郎
(京都大学防災研究所)

データベースおよびデータ流通は、高感度地震計、広帯域地震計、強震計等からなる多点・多項目の観測データを安定的かつ継続して生産し、それらの連続データをリアルタイムで流通させる研究基盤の運用・維持・管理を実現している。また、観測データ解析アルゴリズム等の高度化も継続して実施し、これらを研究者間で効率的に共有するシステムの開発を進めている。

5年間の成果の概観

5年間にわたり地震火山防災に関する基礎データを着実に蓄積するとともに、それらを流通させるデータ流通基盤を継続して維持した。また、データおよびデータベースを提供するために必要なセキュリティ等の対策についても実施した。気象庁一元化震源カタログについては、新たな地震検知手法であるPF法（溜渕ほか、2016）を取り入れ、地震カタログに登録される地震数が2-3倍となり、さらに、Matched Filter法を導入し、処理の効率化と検知能力の向上が実現された。地震観測網については、防災科研により、日本海溝海底地震津波観測網(S-net)のデータがJDXnetによりリアルタイムで配信されるとともに、高感度地震観測網(Hi-net)・広帯域観測網(F-net)・強震観測網(KiK-net, K-net)の陸域観測網と日本海溝海底地震津波観測網(S-net)と地震・津波観測監視システム(DONET)の海域観測網が統合され、陸海統合地震火山津波観測網(MOWLAS)統合処理体制の基盤が構築された。産総研により、「アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システム」の構築と公開がなされ、世界中から広く利用された。大学においては、北海道大学により、GNSS・地殻変動連続観測等の多項目観測データを全国にリアルタイム流通させるシステムが開発され、データの流通・収集・管理・解析が一元化された。地震データ流通システムJDXnetについては、SINETおよびJGNの次世代広域ネットワーク網への対応がなされた。研究成果共有システムについては完成までには至らなかったが、クラウドシステムの構築など成果共有のための基礎基盤の構築がなされた。

平成30年度成果の概観

以下、平成30年度の主な成果について概観する。

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

気象庁は、火山噴火予知連絡会で中長期的に観測体制の充実が必要とされた50火山について、地震計、空振計、GNSS等の観測データを常時収集し、解析を行い、蓄積した。全国の火山について、地震観測、GNSS繰り返し観測、熱観測等の調査的な機動観測により得ら

れた観測データを蓄積した。平成 30 年度に噴火が発生した霧島山（新燃岳），桜島，及び口永良部島のほか，火山活動の高まりがみられた吾妻山，草津白根山（白根山（湯釜付近）），霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺）等において，緊急観測により収集した火山活動の詳細なデータを解析し，蓄積した。これらのデータの蓄積にあたって，今後の活火山総覧の改訂に活用できるようにデータベース化した〔課題番号 7001〕。産業技術総合研究所においては，青森県六ヶ所村および高知県四万十町で実施した掘削調査で得られた堆積物の情報を Web 上で公開した〔課題番号 5001〕。全国に分布する活断層のうち，大地震の震源となる可能性が高い長さ 10km 以上の活断層について，これまでの調査情報・研究成果のデータ化とそれぞれの活断層のパラメータに関する情報の整備を継続し，活断層データベースの検索画面の表示速度を高速化するため，背景地図，断層線，調査地点といったデータを画像タイル化する作業と，位置情報から各データにアクセスするためのシステム構築を行った〔課題番号 5002〕。さらに，わが国における過去約 30 万年間に発生した VEI=7 クラスの噴火について噴火推移や噴出物の分布・体積等のデータを取りまとめた大規模噴火データベースの整備を進めるとともに世界各国の有史における大規模噴火推移の記録を取りまとめ，大規模噴火推移データベースの整備を進めた〔課題番号 5003〕。

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

気象庁により，全国地震カタログの作成が実施され，平成 30 年度においては，以下の成果が得られた。(1) 地震カタログ（震源，発震機構）を平成 29 年 12 月まで作成し，地震月報（カタログ編）として公開した。自動処理震源の導入に伴う発破イベント混入に対応するため，波形相関による発破抽出手法を開発し，カタログの質的改善を図った。(2) S-net や DONET2 等の海底地震計のデータを一元化処理に活用するために，海域の地震観測網のデータや解析結果に関する調査を実施し，調査結果を平成 30 年 11 月の地震調査委員会「高感度地震観測データの処理方法の改善に関する小委員会」及び 12 月の地震調査委員会に報告し，一元化処理に取り込むことについて合意を得た。(3) 震源過程解析については，平成 30 年北海道胆振東部地震など，近地強震波形または遠地実体波を用いて日本及び海外の大地震を解析し，気象庁ホームページ等で公開した。(4) 過去震源の改訂については，1976 年 7～12 月及び 1977 年の震源決定を行うとともに，1922 年分について各地の気象官署の検測値の原簿などを元に震源決定を行った〔課題番号 7019〕。地震観測，地殻変動観測，潮位観測，全国の火山観測が継続的に進められた。潮位データの伝送においては平成 31 年度での光回線への変更計画を策定した〔課題番号 7014，7015，7016，7017〕。柿岡，女満別，鹿屋，父島の 4 地点に，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，公開した。さらに，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〔課題番号 7018〕。

国土地理院は，GEONET による地殻変動連続観測を実施し，日本列島全域の地殻変動・火山活動のモニタリングを着実に実施した。東北地方太平洋沖地震後の継続的な余効変動，2018 年 4 月 9 日に鳥取県西部で発生した地震，2018 年 6 月 18 日に大阪府北部で発生した地震，2018 年 9 月 6 日に北海道胆振東部で発生した地震，2019 年 1 月 8 日に種子島近海で発生した地震に伴う非定常的な地殻変動を検出した。さらに，2018 年 6 月に房総半島沖，

2018年春頃から九州北部,2018年秋頃から四国西部で発生したプレート間ゆっくりすべり(スロースリップ)現象に伴う非定常的な地殻変動,硫黄島や桜島周辺の火山活動に伴う地殻変動等も検出するなど,防災や地震発生・火山活動のメカニズムに関する研究等に寄与した。また,これらのモニタリング結果は,速やかにホームページなどで公表するとともに,地震調査委員会,火山噴火予知連絡会等に報告した[課題番号 6005]。全国25 験潮場の潮位連続観測を安定的に実施するため,定期的な保守および監視を実施するとともに,これらの観測データをホームページで公開した。また,防災情報の発信への活用のため,関係機関と潮位データの共有化を行った[課題番号 6006]。国土地理院が公開するGNSS 連続観測データに関する所在情報を,引き続きホームページから公開した[課題番号 6011]。電子基準点リアルタイム解析システムにおいて,精密単独測位法を導入し,試験運用を実施した[課題番号 6012]。また,重力測量については,南海・東南海地域を含む全国で基準重力3点の絶対重力観測を実施し,日本重力基準網に準じた重力値を得るとともに,重力値の時間的な変化を把握した。また,過去に整備した二等重力データ(約14,000点)の日本重力基準網2016への整合を図るため,必要な計算を実施した。さらに,航空重力測量の実施に向けて,航空重力計地上検定線を設置して101点で相対重力観測を実施するなど,必要な準備を進めた[課題番号 6007]。ALOS-2のSARデータを用いて北方四島を含む国土全域を対象にSAR干渉解析を行い,国内や海外で発生した地震や火山活動に伴う変動を検出した。霧島山(えびの高原(硫黄山)周辺)では,2018年3月~4月の観測データから硫黄山の南側及びその西側に隆起のピークを検出した。この解析結果は火山噴火予知連絡会において火山活動の評価に活用された。2018年9月6日に発生した平成30年北海道胆振東部地震では,SAR干渉解析により,震央周辺で最大7cm程度の隆起及び隆起域の東側で最大4cm程度の東向きの変動を検出した。また,SAR干渉解析及びGNSSで捉えられた地殻変動を用いて,震源断層モデルを推定した。これらの結果は地震予知連絡会や地震調査委員会において地震活動の評価や検討に活用された。2018年9月28日に発生したスラウエシ島の地震では,震央から南側へ約160kmの広い範囲で地表変動を検出し,最大5m程度の変位が生じたことを明らかにした[課題番号 6008](図1)。GUI操作に基づく干渉SAR時系列解析を行うためのソフトウェアの改造を実施した。また,周波数分割法による電離圏起因の誤差の低減処理やSBAS法等の機能を干渉SAR時系列解析に実装した。さらに,実データへ適用してその効果を確認した[課題番号 6013](図2)。火山基本図「草津白根山」「乗鞍岳」「阿蘇山」「雲仙岳」の数値データを整備した[課題番号 6009]。平成29年度に調査を実施した,糸魚川-静岡構造線断層帯とその周辺「白馬岳 改訂版」「大町 改訂版」,濃尾断層帯とその周辺「大野」「冠山」「能郷白山」「谷汲」「美濃」「岐阜」,山田断層帯とその周辺「宮津」「大江山」,布田川・日奈久断層帯とその周辺「八代 改訂版」「日奈久」12面の1:25,000活断層図を整備・公開及び,牛首・跡津川断層帯,養老-桑名-四日市断層帯の調査を実施した[課題番号 6010]。

海上保安庁は,国土交通省水管理・国土保全局及び港湾局,国土地理院,気象庁と連携し験潮データをリアルタイムでインターネットにより公開した[課題番号 8005]。沿岸海域での海底地形の調査を実施した[課題番号 8006]。

防災科学技術研究所は,高感度地震観測網(Hi-net)・広帯域観測網(F-net)・強震観測網(KiK-net, K-NET)の陸域の基盤的地震観測網を安定的に運用した。これらの良質な地震等

の観測データの流通を図り、関係機関における研究、その他の業務の遂行や我が国の地震調査研究の発展に貢献した。海域に設置した観測網については、昨年度から本格運用された日本海溝海底地震津波観測網(S-net)と平成28年度に海洋研究開発機構から移管された地震・津波観測監視システム(DONET)の維持管理を継続的に実施した。S-netの観測データについては、海底地震津波観測網データダウンロードページより公開を開始した。またJDXnetでの流通も開始した。DONETの観測データについては、強震計及び広帯域地震計に加え、水晶水圧計のデータについても海底地震津波観測網データダウンロードページより公開を開始した。また、DONETの観測網機能を向上させるため、海溝軸付近に位置する観測点の埋設を行った。これらを併せて、陸海統合地震火山津波観測網(MOWLAS)統合処理体制の基盤を構築するとともに、今後の利活用を発展させる準備を整えた。平成29年4月1日に移管された首都圏地震観測網(MeS0-net)の運用を継続するとともに、ホームページによる観測データの公開を開始した。重点的に観測を強化すべき火山に整備した基盤の火山観測網(V-net)について、故障、老朽化した観測機器の更新を行い安定運用に努め、観測データの大学や気象庁への流通を図り、関係機関の研究や火山監視業務等に貢献した。これらの防災科研の地震・火山観測網及び大学・気象庁等の関係機関により得られた波形データを定期的に蓄積し、ホームページから公開した[課題番号 3004]。

産業技術総合研究所は、アジア太平洋地域のハザード関連情報の整備として、震源域、震源、活断層、津波、地震犠牲者数、大規模火砕流、大規模降下テフラ、カルデラ、火山イベント犠牲者数の詳細データを国際標準形式でとりまとめ、アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムへの公開作業を進めた(図3)。震源域については、M7以上の全世界の258個の地震のデータを整備した(図4)。活断層については、タイとフィリピンの活断層データを追加した。津波については、1707年宝永津波、1896年明治三陸津波、1993年北海道南西沖津波の分布を追加した。地震犠牲者数については、東・東南アジア地域の236個の地震について、犠牲者数を要因(火災、建物、地すべり、津波、関連死)別に取りまとめた。大規模火砕流については、東・東南アジア地域のVEI6以上の18個の噴火にとともなう火砕流堆積物の分布を取りまとめた。大規模降下テフラについては、東・東南アジア地域の24の降下テフラについて分布と等層厚線を取りまとめた[課題番号 5009]。

東京大学地震研究所においては、観測データ流通網JDXnetの運用を継続したが、データ流通網の2重化への課題も明らかとなった[課題番号 1518]。研究成果共有サーバにおいて、データ共有のためのオープンプラットフォームのownCloudの利用を進めた。地震連続波形データの解析のための大規模解析システムにおいては、過去の地震波形データの保存をさらに進めた[課題番号 1519](図5)。北海道大学においては、GNSS・地殻変動連続観測等の多項目観測データを全国にリアルタイム流通させるシステムを開発し、データの流通・収集・管理・解析を一元的に実施した[課題番号 1009]。京都大学防災研究所においては、上賀茂観測所の大森式地震計で取得された波形記録の1945年以降の電子化を行った。阿武山観測所において、一般見学会、団体見学会およびペットボトル地震計製作講習を行うとともに、高槻市等の施設において出前講座を行った[課題番号 1915]。

これまでの課題と今後の展望

データ・データ流通部会における課題は、(1)各研究機関において蓄積されているそ

それぞれのデータが有機的に結合したデータベースの開発，（２）研究成果共有システムの開発，（３）地震火山データ等を安定かつ連続して集配信できるリアルタイムシステムの基盤整備，（４）新たな情報技術等への対応がある。本部会では，研究成果共有システム開発にあたり，メタデータのフォーマット及びデータを実際に格納するデータサーバの運用ポリシーの策定が，今後重要であると認識している。この点に関しては，解決すべき課題としてリストアップし，次期計画へ継承した。なお，（３）については，火山のデータ流通を効率的に進める体制を強化する点が，今後の課題である。

基礎データベースは今後も着実に進展すると考えられるので，それらを効率的且つ迅速に解析できる情報基盤の整備が今後ますます必要になると考えられる。処理性能の高い並列計算機のほか大容量のディスク装置などが高速のネットワークで結合された研究基盤の構築が必要である。ただし，これらの整備には時間やコスト等も必要となるため，コミュニティ全体として取り組むことが求められる。ボトムアップでなくトップダウン的な判断も場合によっては必要である。

また，データ保存という観点からは，デジタルでのコピーが一般的になっているため顕在化していないように思われるが，保存媒体は実際のところ長期保存ができない。つまりデータコピーの作業が今後も継続的に続くことになるので，これらの作業の効率化も今後の検討課題である。

成果リスト

- Geshi, N. and Itoh, J., 2018, Pyroclastic density currents associated with the 2015 phreatomagmatic eruption of the Kuchinoerabujima volcano. *Earth Planet Space*, 70:119, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0881-x>
- Kawamoto, S., N. Takamatsu, S. Abe, K. Miyagawa, Y. Ohta, M. Todoriki, and T. Nishimura, 2018, Real-time GNSS analysis system REGARD: an overview and recent results, *Journal of Disaster Research*
- Kobayashi T., 2018, Locally distributed ground deformation in an area of potential phreatic eruption, Midagahara volcano, Japan, detected by single-look-based InSAR time series analysis, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 357, 213-223, doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.04.023
- Kobayashi T., Y. Morishita, and H. Munekane, 2018, First detection of precursory ground inflation of a small phreatic eruption by InSAR, *Earth Planet. Sci. Lett.*, doi:10.1016/j.epsl.2018.03.041, 491, 244-254.
- Kobayashi, T. (2018), Locally distributed ground deformation in an area of potential phreatic eruption, Midagahara volcano, Jpana, detected by single-look-based InSAR time series analysis, *J. Volcanology and Geothermal Res.*, 357, 213-223, 2018, doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.04.023.
- Kobayashi, T. (2018), InSAR-detected local ground deformation in potential areas of phreatic eruption: Way forward to proactive monitoring for disaster risk

- mitigation, proceeding of 13th SEGJ Information Symposium, 2018 (to be published)
- Kobayashi, T., H. Yarai, S. Kawamoto, Y. Morishita, S. Fujiwara, Y. Hiyama (2018), Crustal Deformation and Fault Models of the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence: Foreshocks and Main Shock, *Internasional Association of Geodesy Symposia*, doi:10.1007/1345_2018_37 (to be published)
- Kobayashi, T., Y. Morishita, and H. Munekane (2018), First detection of precursory ground inflation of a small phreatic eruption by InSAR, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 491, 244-254, 2018, doi:10.1016/j.epsl.2018.03.041.
- Kubota, T., Suzuki, W., Nakamura, T., Chikasada, N. Y., Aoi, S., Takahashi, N., & Hino, R. (2018) Tsunami source inversion using time-derivative waveform of offshore pressure records to reduce the effects of non-tsunami components *Geophysical Journal International*, 215, 1200-1214
<https://doi.org/10.1093/gji/ggy345>.
- Morishita, Y., T. Kobayashi, S. Fujiwara, and H. Yarai (2018), Complex crustal deformation of the 2016 Kaikoura, New Zealand, earthquake revealed by ALOS-2, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 108(3B), 1746-1756, doi:10.1785/0120180070.
- Takahashi, N., Imai, K., Sueki, K., Obayashi, R., Ishibashi, M., Tanabe, T., and Kaneda, Y. (2018). Real-Time Tsunami Prediction System Based on Seafloor Observatory Data Applied to the Inland Sea, Japan. *Marine Technology Society Journal*, 52(3), 120-127.
- Takemura, S., Kubo, H., Tonegawa, T., Saito, T., & Shiomi, K., Modeling of Long-Period Ground Motions in the Nankai Subduction Zone: Model Simulation Using the Accretionary Prism Derived from Oceanfloor Local S-Wave Velocity Structures, <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2013-8>
- Toshihiro Yahagi, Kenji Yoshida, Takayuki Miyazaki, Yoshifumi Hiraoka, Basara Miyazawa, 2018, Construction of the Japan Gravity Standardization Net 2016, *Bulletin of the GSI (Vol.66)*.
- Toshihiro Yahagi, Yoshifumi Hiraoka, Shuichi Oomori, Tokuro Kodama, Akira Tomiyama, Erika kichiraku, Hiroshi Kawawa, Koji Matsuo, 2018, Launch of an airborne survey project towards the new geoid-based vertical datum in Japan, the AGU 2018 Fall Meeting.
- Wakasugi T., S. Kurihara, H. Ueshiba, M. Umei, M. Ishigaki, H. Munekane (2018), Current Status of VGOS Observation with Ishioka VLBI Station, proceeding of 10th General Meeting of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (to be published)
- 下司信夫, 2018, 陥没カルデラの構造とその形成メカニズム. *地学雑誌*, 127, 175-189.
- 伊藤順一, 2018, 御嶽山噴火の教訓と噴火予測の現状-過去の火山活動から学ぶ危険予知-. *日本旅行医学会学会誌*, vol.13, 45-51.
- 松本 弾, 2019, 津波分布域 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデ

- ータ 3/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集.
- 石川有三, 2019a, 世界の震源域の分布 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 1/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集.
- 宝田晋治, 2019a, 東・東南アジア地域の大規模火砕流堆積物の分布 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 4/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集.
- 石川有三, 2019b, 世界の震源分布 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 2/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集.
- 宝田晋治, 2019b, 東・東南アジア地域の大規模降下テフラの分布 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 5/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集.
- 宝田晋治, 2019c, 東・東南アジア地域のカルデラの形状 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 6/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集.
- 宝田晋治, 2019d, 東・東南アジア地域の火山イベントの犠牲者数 -G-EVER アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システムデータ 7/7-, 産総研地質調査総合センター研究資料集.
- 国土地理院, 2018, 東海地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 99, 184-225
- 阿部聡他 (2018) : Development of New GEONET Analysis Strategy (GEONET 新解析戦略の開発), 地球惑星科学連合 2018 年大会
- 宮崎隆幸, 2018, 過去の稠密重力データの日本重力基準網 2016 への整合手法の高度化, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会予稿集, (発表番号:SGD01-05) .
- 川元智司他 (2018) : GEONET 新解析戦略 (F4) の開発, 日本測地学会第 130 回講演会
- 川元智司他 (2018) : GEONET 新解析戦略 (F4) の開発, 日本地震学会秋季大会
- 福崎順洋他 (2018) : 昭和 IGS 観測局の連続運用 20 年, 日本測地学会第 130 回講演会
- 後藤秀昭・千田 昇 (2018) : 1:25,000 活断層図 布田川・日奈久断層帯とその周辺「八代 改訂版」「日奈久」解説書. 国土地理院技術資料 D1-No.914, 12p.
- 防災科学技術研究所(2019), 2018 年 5 月 6 日鳥島近海で発生した地震 (MJMA 5.7) による津波—S-net・DONET による水圧変動観測—, 地震予知連絡会報, 101, 印刷中.
- 防災科学技術研究所(2019), 2018 年 5 月 25 日長野県北部の地震, 地震予知連絡会報, 101, 印刷中.
- 防災科学技術研究所(2019), Double-Difference 法による 2018 年 6 月 18 日大阪府北部の地震の震源分布, 地震予知連絡会報, 101, 印刷中.
- 防災科学技術研究所(2019), Double-Difference 法による 2018 年 9 月 6 日胆振東部地震の震源分布, 地震予知連絡会報, 101, 印刷中.
- 防災科学技術研究所(2019), 房総半島沖スロースリップイベント (2018 年 6 月), 地震予知連絡会報, 101, 印刷中.
- 防災科学技術研究所(2019), 三次元地震波速度構造により再決定した平成 30 年胆振東部地震周辺の震源分布, 地震予知連絡会報, 101, 印刷中.
- 国土地理院時報 (第 130 集) 「火山基本図の整備, 公開」を公表。
- 森下遊, 小林知勝, 2018, ALOS-2 干渉 SAR 時系列解析で検出された霧島山の地表変位と大

- 気遅延誤差低減処理の効果，測地学会誌，64，28-38.
- 森下遊・小林知勝（2018），ALOS-2 干渉 SAR 時系列解析で検出された霧島山の地表変位と
大気遅延誤差低減処理の効果，測地学会誌，64，28-38.
- 石塚 治・下司信夫，2018，八丈島火山地質図. 火山地質図 20, 産総研地質調査総合セン
ター，8p.
- 小林知勝，山田晋也，2019，干渉 SAR 時系列解析による国土の地盤変動の時間的推移の
面的検出に関する研究（第 5 年次），国土地理院調査研究年報（平成 30 年度）.
- 小林知勝，森下 遊，山田晋也，2018，干渉 SAR 時系列解析プロトタイプシステムの開
発，国土地理院時報，130.
- 及川輝樹・萬年一剛・下司信夫・中野 俊，2018，Recent eruptions in Japanese Islands.
地質学雑誌，vol.124 ,I-II.
- 及川輝樹・大場司・藤縄明彦・佐々木寿，2018，水蒸気噴火の地質学的研究. 地質学雑誌，
vol.124，231-250.
- 上野寛・上田満治・森脇健・溜淵功史，2018，最近の気象庁一元化震源の動向，日本地震
学会予稿集 2018 年秋季大会，S23-P05.
- 宮岡一樹・武田清史・尾崎友亮・青木元，2018，大阪府北部の地震活動の概要，日本地震
学会予稿集 2018 年秋季大会，S24-P01.
- 平岡喜文，矢萩智裕，松尾功，大森秀一，2018，日本での航空重力測量実現に向けた国土
地理院の取組み，日本地球惑星科学連合 2018 年大会予稿集，（発表番号：
SGD01-12）.
- 岡田篤正・金田平太郎・杉戸信彦・中田 高（2018）：1:25,000 活断層図 濃尾断層帯と
その周辺「大野」「冠山」「能郷白山」「谷汲」「美濃」「岐阜」解説書. 国土地理
院技術資料 D1-No.912，29p.
- 大森秀一，矢萩智裕，平岡喜文，吉樂絵里香，2018，航空重力測量実施に向けた飛行計画
の設計，日本測地学会第 130 回講演会要旨集，149-150.
- 大森秀一，平岡喜文，矢萩智裕，加藤知瑛，吉田賢司，2018，石岡測地観測局における重
力値の水平勾配の評価，日本地球惑星科学連合 2018 年大会予稿集，（発表番号：
SGD01-10）.
- 山本宏章，宮原伐折羅，吉田賢司，菅原安宏，宮崎隆幸，2018，国土地理院の重力測量，
国土地理院時報，131.
- 矢萩智裕，平岡喜文，大森秀一，宮原伐折羅，黒石裕樹，2018，国土地理院のジオイド・
モデルの変遷，日本地球惑星科学連合 2018 年大会予稿集，（発表番号：SGD01-P07）.
- 菅原安宏，宮原伐折羅，吉田賢司，山本宏章，福田洋一，2018，南極地域における国土地
理院の重力測量－地球規模の重力場測定への貢献－，国土地理院時報，131.
- 植田摩耶・中澤尚・安喰靖・齋藤俊信・飯田誠・山中崇希（2018）：1:25,000 活断層図「熊
本 改訂版」及び「阿蘇」の公開. 国土地理院時報，130.
- 海上保安庁海洋情報部研究成果発表会ポスターセッション「P3 豊後水道におけるマルチビ
ーム測深機で得られた海底地形」
- 阿部聡・高松直史・石川典彦・木村勲・畑中雄樹・川元智司（2018）：次世代 GEONET の構
築（第 4 年次），平成 29 年度調査研究年報

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

小坂橋勝，小島秀基，根本悟，宮原伐折羅，平岡喜文，矢萩智裕，2018，ジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver.2)の構築，国土地理院時報，130.

吉田賢司，矢萩智裕，平岡喜文，宮原伐折羅，山本宏章，宮崎隆幸，2018，日本重力基準網 2016 (JGSN2016)の構築，国土地理院時報，131.

山本宏章，宮原伐折羅，吉田賢司，菅原安宏，松尾功二，宮崎隆幸，2018，国土地理院の重力測量の歴史－観測技術と重力基準の変遷－，国土地理院時報，131.

宮原伐折羅，吉田賢司，山本宏章，松尾功二，宮崎隆幸，宗包浩志，2018，国土地理院の重力測量の展望－測定技術と重力基準の将来像－，国土地理院時報，131.

兒玉篤郎，富山顕，吉樂絵里香，矢萩智裕，平岡喜文，河和宏，大森秀一，2018，航空重力測量実施に向けた地上重力検定線の設置，日本測地学会第 130 回講演会要旨集，147-148.

本田昌樹・山下達也・上芝晴香・攪上泰亮・林京之介・桑原將旗・松本紗歩・仲井博之・酒井和紀・宮原伐折羅・宗包浩志・飛田幹男・矢来博司・小林知勝・森下遊・藤原智(2018)，だいち 2 号 SAR データの解析による霧島山噴火に伴う地表変動の検出，国土地理院時報，130.

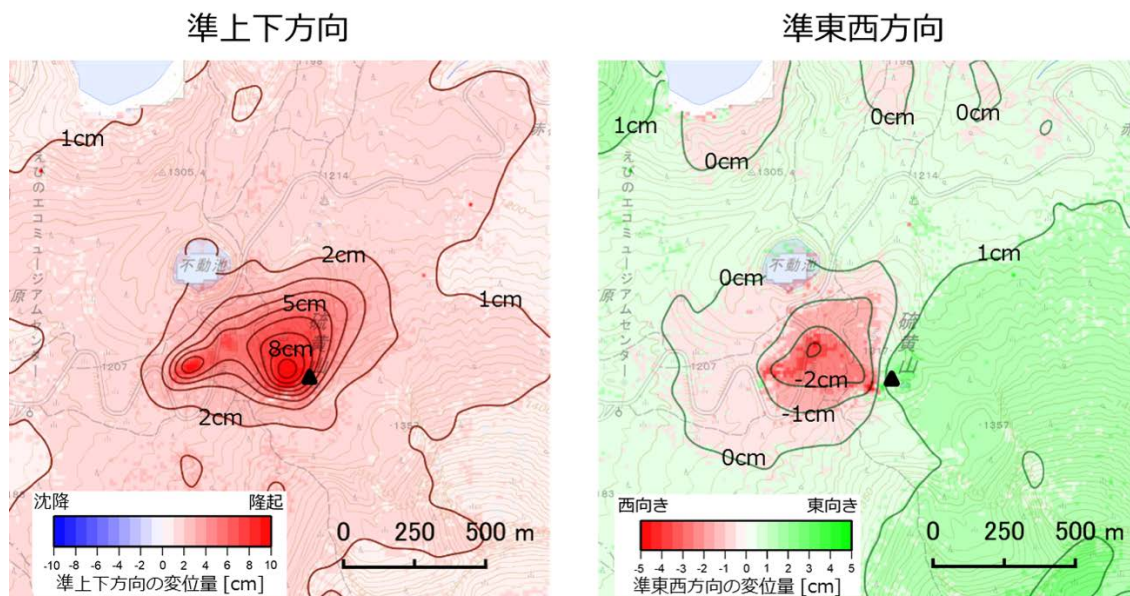


図 1. 2018/03/11-2018/04/22 と 2018/03/12-2018/04/23 の SAR 観測データの解析により得られた霧島山（硫黄山）における準上下・準東西成分の変動量。国土地理院「課題番号 6008」

準上下成分

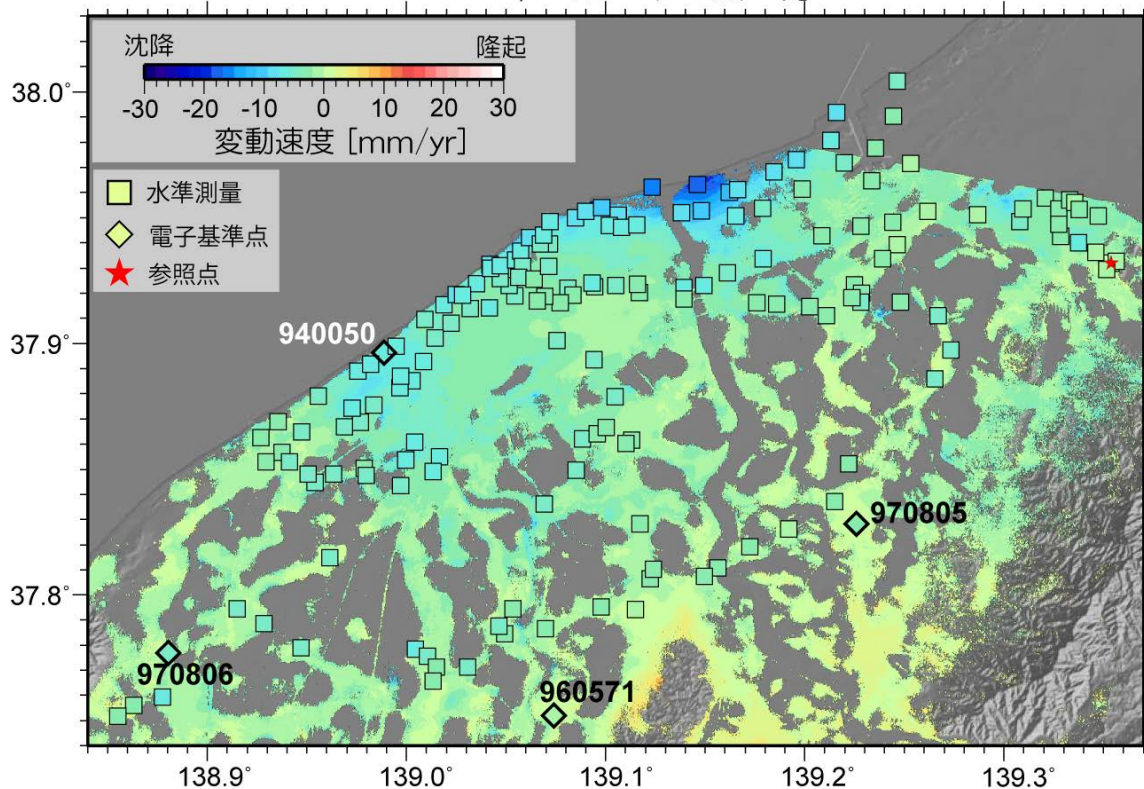


図 2. 干渉 SAR 時系列解析により求めた変動速度（準上下成分）と水準測量データ及び電子基準点データとの比較。 国土地理院「課題番号 6013」

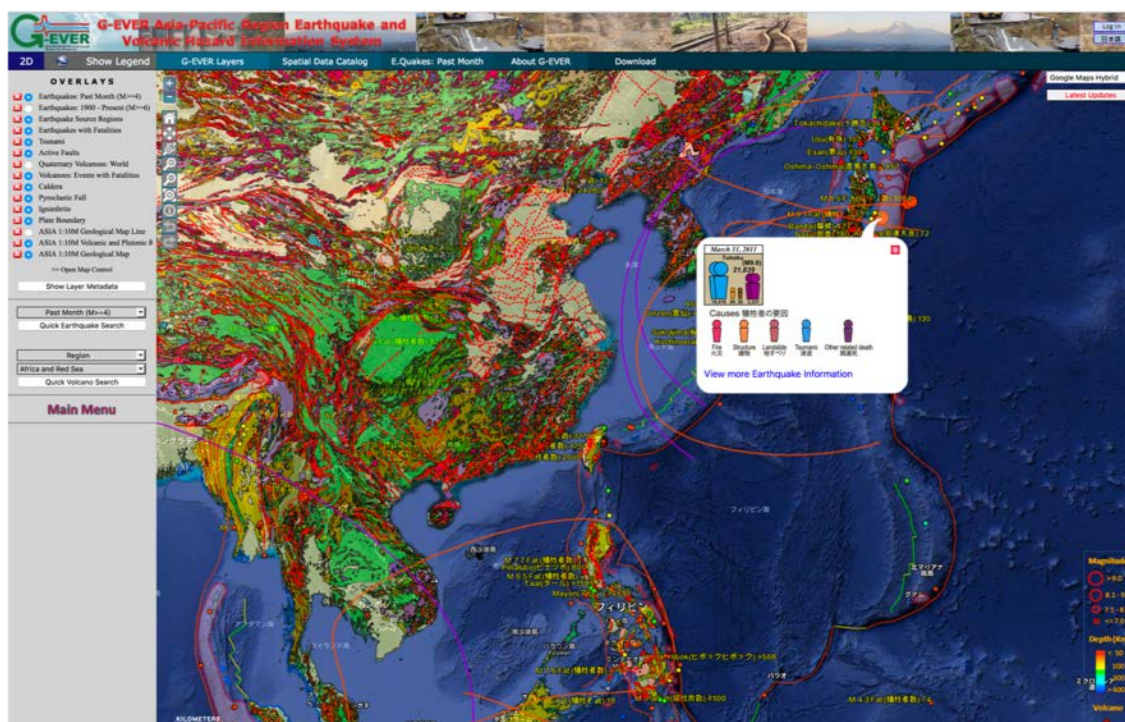


図 3. アジア太平洋地域地震火山ハザード情報システム。産業技術総合研究所「課題番号 5009」

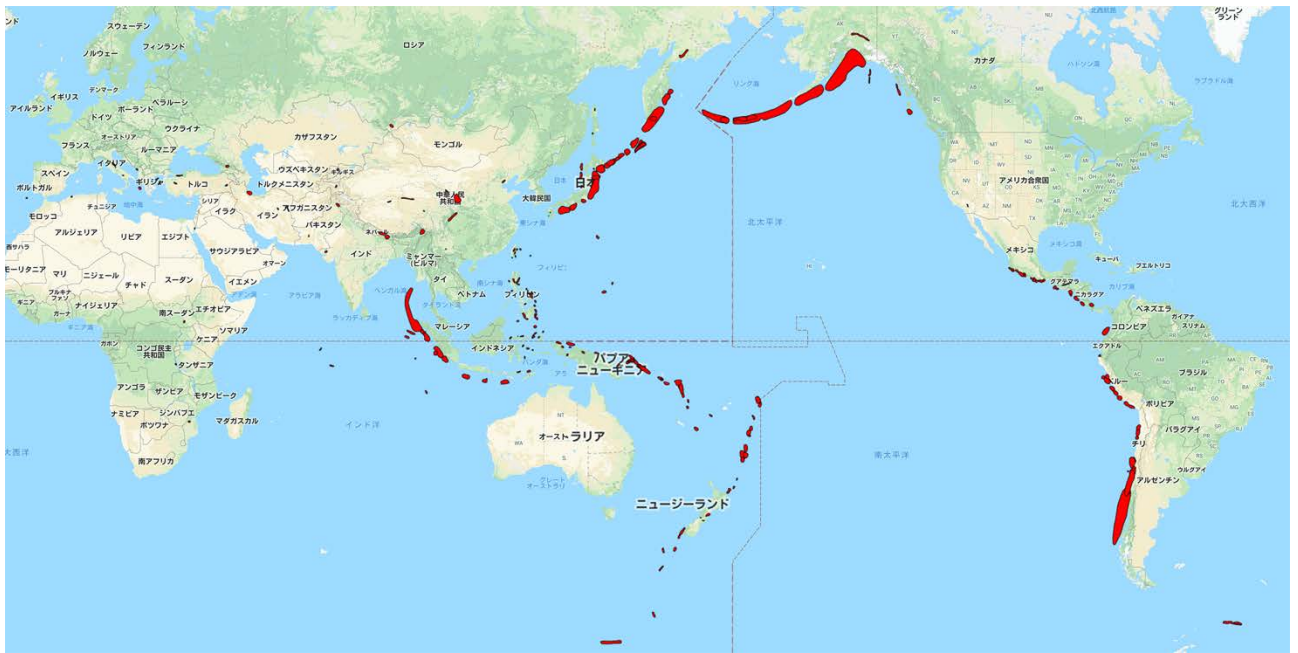


図 4. 世界の地震の震源域。産業技術総合研究所「課題番号 5009」

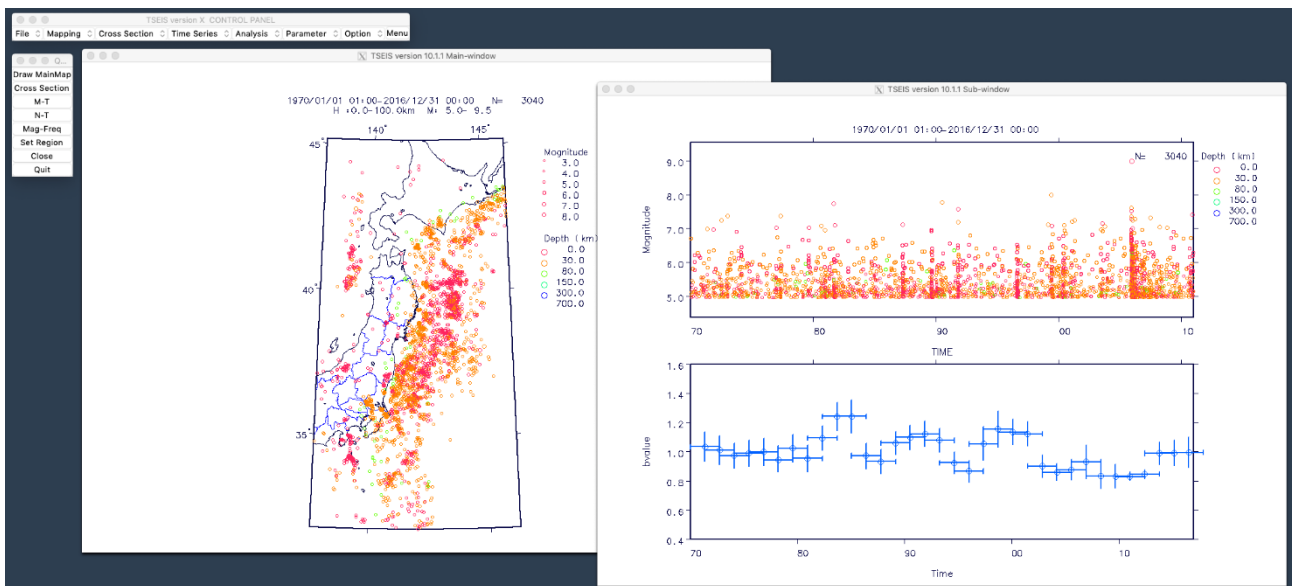


図 5. 地震活動解析ツール(TSEISX)の起動画面例。東京大学地震研究所「課題番号 1519」

2 (1) 東北地方太平洋沖地震総合研究

「東北地方太平洋沖地震総合研究」グループリーダー 松澤 暢
(東北大学大学院理学研究科)

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (M9.0 ; 以下「東北沖地震」と呼ぶ) は、日本の観測史上最大の地震であり、約 40 万戸の家屋が全半壊し、死者・行方不明者が 1 万 8 千人を超えるという東日本大震災をもたらした。震災から 8 年が経過した平成 31 年 (2019 年) 3 月の時点でも、いまだ 2 千 5 百名以上の方々が行方不明のままである。これほどの大規模な地震にもかかわらず、我々はその地震の予知はおろか、その発生ポテンシャルを正しく推定することすらできなかった。今後、同じような失敗を繰り返さないためには、この地震のことを詳しく調べ、将来の巨大地震に備えることが極めて重要である。

平成 26 年度から始まった「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」では、地震や火山の災害軽減のために様々な観測研究を実施してきた。ここでは、この 5 年間の計画の中で、東北沖地震に関係の深い課題の成果を紹介し、災害軽減につなげるために今後どのようにすべきかを論ずることにする。

5 年間の成果の概要

東北沖地震があのような巨大な災害を引き起こしたことについての地震研究者の大きな反省は、前述の通り M9 の地震が東北で発生するとは予見していなかったことと、このために緊急地震速報をはじめとする緊急用の様々なシステムが M9 の地震に対応できるようになっていなかったことである。このため、5 年間の計画で様々な成果が出てきているものの、その中での特に大きな成果として、「観察・観測・モデル化に基づく巨大地震発生に至る過程の理解」と「地震・地殻変動観測データの即時解析に基づく地震・津波の即時予測」を取り上げ、以下で、これらの成果の概要について述べる。

1. 観察・観測・モデル化に基づく巨大地震発生に至る過程の理解

東北沖地震が発生する前に、地震調査委員会が宮城県沖地震の長期評価で高い確率が示されていたために、文部科学省では平成 17-21 年度 (2005-2009 年度) に「宮城県沖地震における重点的調査観測」を実施しており、これにより宮城県沖では海底地震観測のみならず海底地殻変動観測も行われていた。これらの海底観測データと陸上のデータから、本震発生前から現在に至るまでの地殻変動が詳細に明らかになっている。

これらのデータの解析によれば、本震の 1 月くらい前からゆっくりとした滑り (スロースリップイベント ; SSE) が海溝付近のプレート境界で生じ、それが 3 月 9 日の最大前震をトリガし、その前震の余効滑りが本震をトリガしたことが前計画のもとで明らかになっている (Ito et al., 2012, Kato et al., 2012)。その後、東北沖の広い範囲でこのような SSE が数年程度のサイクルで発生していることが、繰り返し地震と GNSS データから明らかになった (Uchida et al., 2016, Nomura et al., 2017)。

このような SSE や余効滑りが大地震の発生を促進するのは明らかであり、多数のシミュレーションから次の大地震の発生を確率的に予測する試みも実施されるようになった

(Nakata et al., 2016)。

海底地殻変動から捉えられた余効変動には、西向きの変位が次第に卓越するようになり、余効変動は従来考えられていたような余効滑りのみならず、粘性緩和が大きな影響を及ぼすことが明らかになった (Sun et al., 2014, Tomita et al., 2015)。このような余効滑りと粘性緩和の分離は陸上の観測点のみでは不可能であり、長期にわたる海底地殻変動観測の観測が極めて重要である (Tomita et al., 2017)。

一方、巨大地震のサイクルを理解する上では、津波堆積物等の地質学的情報が極めて重要である。前述の「宮城県沖地震における重点的調査観測」により貞観地震の調査も精力的に行われて、貞観地震に匹敵する巨大地震が室町時代にも発生していた可能性が高いことが、東北沖地震の前年に指摘されていた。その後、この室町時代の巨大地震は歴史記録の少ない 1454 年の享徳地震の可能性が高いことが、古文書調査 (行谷・矢田, 2014) や津波堆積物の比較 (Sawai et al, 2015) で明らかになった。

このように東北日本弧で繰り返す巨大地震について研究者を悩ませてきたのが地震間の海岸線の沈降であった。東北地方の太平洋沿岸は普段から沈降をしており、さらに東北沖で大地震が起こるたびに沈降を繰り返しており、一方、地質学的には海岸線はほぼニュートラルか僅かに隆起が卓越していると考えられていた。この矛盾を解決するためには、通常の大震災よりもはるかに巨大な地震が稀に発生して、海岸線を隆起させるというアイデアもあったが、実際に東北沖地震が起こったときには海岸はさらに沈降した。その後、深部で大規模な余効滑りが発生して海岸が隆起すると考えられるようになり、実際、東北沖地震後には海岸は隆起に転じたが、その隆起速度は期待していたほどではなく、海岸線が元の高さに回復する前に余効滑りが終息しそうにも見えた。これに対して、粘性構造を入れたシミュレーションにより、地震の再来間隔が約 600 年と非常に長い場合には、本震後の隆起が約 300 年続き、それから約 300 年の沈降に転じて次の巨大地震に至ることがシミュレーションから明らかになった (Sagiya, 2015, Hashima and Sato, 2017, Sasajima et al., 2019)。

2. 地震・地殻変動観測データの即時解析に基づく地震・津波の即時予測

東北沖地震に際しては、気象庁の最初の規模推定が過小評価であったとの反省から、巨大地震にも有効な地震や津波の即時予測手法の開発が行われ、次第に現業で使われるようになってきている。

気象庁では、緊急地震速報においては、複数の地震の同時発生時にも的確に対応できる IPF (Integrated Particle Filter) 法を開発し、信頼度の高い震源と規模の自動推定を行えるようにした (溜淵・他, 2014)。さらに、震度予測については、これまでのような震源情報に依存したやり方のみならず、周囲の震度情報から隣の地点の震度を予測する PLUM (Propagation of Local Undamped Motion) 法と呼ばれる手法が開発された (Kodera et al., 2018)。IPF 法は平成 28 年 (2016 年) 12 月 14 日から運用が始まり、PLUM 法も平成 30 年 (2018 年) 3 月 22 日より運用がなされている。

大規模な地震が発生した場合、断層の広がりや規模を近地観測データから即時に把握するには、地震観測データよりも近地での永久変位 (近地項) をそのまま評価できる GNSS 観測データの方が有利である。このような観点から、GNSS の 1 秒サンプルデータから断

層モデルを即時推定する RAPiD (Real-time Automatic detection method for Permanent Displacement) が前計画で開発された (Ohta et al., 2012)。国土地理院では、この RAPiD をさらに発展させた電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD; Real-time GEONET Analysis system for Rapid Deformation monitoring) を東北大学と共同で開発 (Kawamoto et al., 2017) し、平成 28 年 (2016 年) 4 月から運用している。運用開始直後に平成 28 年熊本地震が発生し、この地震について信頼性の高い矩形断層モデルを推定することに成功した。

津波の即時高精度予測のために、気象研究所では沖合の津波観測データをもとに海岸での津波の高さを高精度で予測する tFISH (tsunami Forecasting based on Inversion for initial sea-Surface Height) の開発・改良を行ってきた (Tsushima et al., 2009, 2012)。気象庁では、この tFISH を平成 31 年 (2019 年) 3 月 26 日から、津波警報を更新する新たな手法として運用を開始した。この tFISH と前述の RAPiD を組み合わせるなど、よりロバストな津波予測手法の開発も進められている (Tsushima and Ohta, 2014)。

平成 30 年度の成果

1. 災害の予測のための研究

新しい計画では、これまでの地震・火山噴火予知研究計画とは異なり、災害誘因 (ハザード) の研究の推進に力を入れており、また、災害誘因の影響を正しく理解するために、災害素因 (脆弱性) の研究も進めている。これらの研究においては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も重要な役割を果たしている。

平成 30 年北海道胆振東部地震時の斜面崩壊の原因を探るために、札幌市及び厚真町の谷埋め盛土において調査を行い、旧谷筋周辺を 2-3 m 程度埋めた盛土が地すべり状の変状を呈したことを明らかにした (京都大学防災研究所 [課題番号: 1912])。この斜面崩壊の多くは、流れ盤構造をなす降下火砕物の特定層準にハロイサイトが形成されて、そこに滑り面が形成されていることと、被災地周辺の丘陵地の斜面は下部に遷急線を持っていて斜面下部からの支えが少なくなっていたという共通の特徴があることがわかった。

沖合で観測された津波波形の逆解析に基づく津波の即時予測手法システム (tFISH) について、地震発生時に海底水圧データに記録される非地殻変動オフセット及びトレンド変化のノイズへの対処策として、波形逆解析において津波成分とノイズ成分を同時推定して分離できるように改良した (気象研究所 [課題番号: 7011])。また、電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD) において、計算負荷が非常に軽いという利点を持つ精密単独測位法を導入し試験運用を開始した (国土地理院 [課題番号: 6012])。

2. 地震・火山噴火の予測

茨城沖では群発地震活動が M7 級の地震になる場合 (前震的活動) とならない場合があり、前震的な活動は、それ以外の群発地震活動より活動度が高い傾向にあることがわかった (東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402], Nishikawa and Ide, 2018)。このような傾向が他の群発地震でも見られれば、群発地震が大きな地震の発生に繋がるか否かの判定に将来は使えるようになる可能性がある。

蔵王火山では東北沖地震の後、しばらくしてから活動が活発になり、2012年から深部低周波地震が、2013年以降は浅部長周期地震が発生するようになった。この長周期地震の波動エネルギーが増大してくると、浅部地震活動が活発化し、地震活動が低下すると長周期地震のエネルギーも低下するという相関があることがわかった（東北大学 [課題番号：1202]）。したがって、このような長周期地震のエネルギーをモニターすることが、火山活動の予測にとって重要であると考えられる。

3. 地震・火山現象の理解

（プレート境界）

東北沖地震前と地震後における東北日本前弧域の上盤内応力場の形成メカニズムを明らかにするために、プレート沈み込み及び重力に伴う島弧-海溝系の絶対応力場の二次元モデリングを、不均質非線形レオロジーを考慮した有限要素法を用いて行った。モデル計算の結果、前弧海域下の上盤内では、「地形・密度構造から重力が作る引張力」及び「定常沈み込みが作る曲げ応力」により、浅部が引張・深部が圧縮の応力場が本震前から形成されていたことがわかった。複数のモデル結果と観測との比較を通じて、東北沖地震後のプレート境界（海溝から40-150 kmの範囲）の摩擦応力は5-11 MPa程度と推定され、地震時の応力降下量が10-20 MPa程度ということ考えると、プレート境界の強度は30 MPa程度以下と非常に弱いことが示唆された（東北大学 [課題番号：1203]）。

日本海溝沿いのGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）による海底地殻変動観測は東北沖地震前から現在に至るまで継続されている。東北沖地震の主破壊域の中では、2018年時点でも本震前より大きな速度で西向きに動いているものの、その速度は本震直後に比べて減少してきている。一方、主破壊域の周辺域では、本震直後よりも西向きの速度が大きくなっているが、2018年時点では本震よりもまだ小さい速度である。福島沖以南については、本震後に東向きの変動が顕著であったが、現在は大きく減衰している（海上保安庁 [課題番号：8001]）。

2013年9月から2014年9月までのほぼ1年間実施した東北沖地震の震源域北部における海底地震観測によって震源分布を求めたところ、本震直後には活動が低調であったプレート境界付近での活動が観測され、これらの地震の発震機構も逆断層型が卓越していることがわかった（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。したがって地殻変動のみならず、地震活動も本震発生直後とは異なってきているようである。

千島海溝域及び日本海溝域において地下構造探査観測研究を実施し、アウターライズ地震断層の発達に伴い海底面付近からマントルに至るまで地下構造が変質していること、その変質割合は両海溝域間で顕著に異なることを明らかにした。また、福島沖での海溝域の陸側斜面やアウターライズの活構造に対応した地震活動が確認され、該当域での地震発生のポテンシャルに関する知見が得られた（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]）。

（内陸）

日本列島全域下の(i)流体付加前のマントル組成と(ii)付加流体量を、主に第四紀火山岩のSr-Nd-Pb同位体比空間における統計解析としてクラスター分析(k-means法)と独立成分分析法を併用して解析したところ、いずれも島弧セグメントごとに違いがあり、

かつ (i)は東日本と西日本で系統的に異なり、ブルーム由来成分が明瞭に分かれることがわかった。これらの違いについては、(i)は地球規模の東西半球構造に関連し、(ii)は沈み込むスラブの温度や沈み込み角度及び組成（特に堆積物成分）の違いを反映していることが明らかとなった（京都大学防災研究所 [課題番号：1905]， Nakamura et al., 2019）。

GNSS 連続観測（GEONET）による日本列島全域の地殻変動・火山活動のモニタリングを着実に実施し、東北地方太平洋沖地震後の継続的な余効変動を図1のように明らかにした。本震後の8年間で、背弧側では地震時の隆起よりも地震後の沈降の方が上回り、火山フロントのすぐ東側では地震時の沈降よりも地震後の隆起が上回っているものの、太平洋沿岸は仙台湾付近を除いて地震後の隆起が地震時の沈降をまだ上回っておらず、地震前の海岸線の高さまで回復するまでまだかなり時間がかかることがわかる（国土地理院 [課題番号：6005]）。

東北全域及び北海道の太平洋岸において、ハイブリッド重力観測を毎年実施してきて、2018年5-7月にも実施した。表層30 kmが弾性体で、それ以深に 5×10^{18} Pa・sの粘性率を持つ層を仮定して、粘弾性球対称地球モデルに基づく理論に基づいて、重力変化の予測値を計算し、観測値と比較した。東北地方太平洋側では観測値と理論計算値とが良く一致し、 $4 \mu\text{gal}/\text{年}$ の変動が認められた。一方、脊梁山脈を越えた日本海側では、太平洋側に比べて、観測量も理論計算値もともに小さいことがわかった。重力変動を引き起こしている原因を調べるため、地球内部の体積歪変化の理論計算を行った結果、東北地方太平洋側直下では、弾性層が圧縮に向かう傾向の方が、粘性層が膨張に向かう傾向よりも卓越していることがわかり、これによる密度場変動で重力変動を説明することができた。一方、日本海側のそれは、弾性層と粘弾性層の効果が拮抗しているため、太平洋側に比べて重力変動が小さくなることがわかり、実際の観測とも整合する結果を得た（東北大学 [課題番号：1203]）。

東北沖地震後の2012年に設置されたGNSS稠密観測網磐越測線の余効変動プロファイルを用いて、3次元不均質粘弾性構造モデルを推定した。余効滑りと粘弾性変形の同時計算にはLambert and Barbot (2016)による等価体積力法を使用し、1日ごとに計算される応力変化から余効滑り及び全体の粘弾性変形を逐次計算した。余効滑りの計算には速度-状態依存摩擦構成則を、粘性計算にはべき乗則Burgersモデルを用いた。得られた最適モデルは、マントルウェッジの100 km以深全体の低粘性と、70 km以浅での火山フロント及びその西側下部の相対的低粘性で特徴づけられる。また、地温勾配分布等に基づいて島弧走向方向の不均質性も考慮したモデルにより面積ひずみ分布を計算したところ、Miura et al. (2014)によって推定された面積ひずみ分布を概ね再現することがわかった（東北大学 [課題番号：1203]）。

秋田県森吉山周辺地域には地震波散乱体が存在することが知られていたため、震源域北方において小アレイ観測を実施し、そのデータのセンブランス解析から散乱体の位置推定を行った。その結果、散乱体は従来の推定よりも東側の、地震クラスターのやや南の深さ13 km程度に存在することが明らかになった（弘前大学 [課題番号：1101]）。この森吉山の下の比抵抗構造を調べてみたところ、森吉山の地震活動域直下の深さ15-30 kmに顕著な低比抵抗帯があることがわかった（東北大学 [課題番号：1203]）。このように地殻深部に流体

が存在しているがためにその上端が顕著な地震波散乱帯となっていて、この流体が森吉山の地震活動を引き起こしている可能性がある。

山形-福島県境付近では、東北沖地震によって東西圧縮の応力が弱まったにもかかわらず、本震の後に群発地震活動が発生し、この震源分布は多数の面状構造を成し、また地震活動は深部から浅部にマイグレーションしており、その深部には地震波反射面が存在していることがわかった。さらに、地震活動・震源過程・構造等を特徴づける様々なパラメータが、活動開始から 50-100 日程度は異常な値を示していたことがわかった。これらのことから、この群発地震は、深部に存在していた高压流体が東北沖地震後に急激に上昇してきたことによって生じたものと考えられる（東北大学 [課題番号：1204], Yoshida and Hasegawa, 2018）。

4. これまでの課題と今後の展望

（東北沖地震による地震発生場のさらなる理解）

この 5 年間で東北沖地震について様々な情報が得られ、巨大地震に対する我々の視野は大きく拡大した。一方で、この地震の前に我々が抱いていた様々な先入観がこの地震によって打ち砕かれたのと同様に、今現在も我々は何かを見落とし、何かを誤解していて、それらが今後の余効変動や他の巨大地震の観測研究によって是正される可能性は極めて高い。

特に余効変動について、変位・歪・応力・重力等を長期にわたって追跡し、その結果から粘弾性構造モデルを構築していくことが重要である。これまでに得られた結果から、地震時滑りによる応力変化のみならず、余効滑りや地震間固着に伴う応力変化によっても粘性緩和が生じ、これが巨大地震間の海岸の隆起・沈降に関わっていたことが明らかになりつつある。このようなシミュレーションと海陸の地殻変動観測と繰り返し地震観測データにより余効滑りの影響と粘性緩和の影響とが正しく分離できれば、プレート境界の摩擦パラメータ分布と 3 次元粘弾性構造の高精度推定が可能となる。このようにプレート境界と媒質の詳細な情報が得られることによって、ようやく、巨大地震の地震発生サイクルについて信頼度の高いシミュレーションが行えるようになる。

また、このような研究は内陸の非弾性的性質もモデル化することを意味しており、それは内陸地震の発生機構の解明にも大きく役立つはずである。東北地方太平洋沖地震の発生によって東北地方内陸の東西圧縮の応力はかなり緩和されたはずで、少なくとも東西圧縮の逆断層型の大地震は、当面、東北地方内陸では発生しにくいように見える。しかし、そのような考え方では、1896 年の 6 月 15 日の明治三陸地震の僅か 2 ヶ月後の 8 月 31 日に陸羽地震が発生した事実を説明できないため、大地震発生を理解するためには、応力の時空間変化のみならず、強度の時空間変化を詳しく検討する必要がある。

東北地方太平洋沖を契機として、断層強度の理解が大きく進み、プレート境界も内陸の地震発生域も、これまで考えられていたよりも強度が 1 桁小さい可能性が高いことがわかってきた。このように強度が低い理由としては、スラブから供給されてきた水によって間隙水圧が上昇しているためというのが最もありそうな仮説ではあるが、これもまだ完全には解明されたわけではなく、今後、さらなるデータの蓄積が必要である。また、スラブから供給された水は断層強度を下げるのみならず前述の粘弾性構造にも大きな意味を持った

め、スラブへの水の取り込みと放出過程についても、今後、さらなる研究を進めていく必要がある。

東北地方太平洋沖地震によってこれまで極めて多くの知見が得られ、今後も得られるものと期待されるが、単年度あたりに得られる情報量は、当然のことながら時間とともに減少していく。一方で、長期的な観測によって初めて得られる情報もあるため、今後、長期にわたって持続可能な観測研究を設計し、継続していくことが重要となっている。1896年の明治三陸地震の後40年近くたって1933年の昭和三陸地震が発生しているわけで、今後、M8級の最大余震が発生するとしても、何十年もたってからとなる可能性は否定できない。したがって、東北地方の災害軽減のためにも、東北地方における観測研究は、今後も長期にわたって継続する必要がある。

(次の巨大地震災害の軽減のために)

日本付近で、次にM9の巨大地震災害が生じるとしたら、千島海溝か南海トラフ沿いの可能性が高いと考えられる。これらの巨大地震の災害を軽減するためには、東北沖地震前と似た現象が出現していないかどうかの検討と同時に、東北沖との類似点と相違点をよく検討することが必要である。

過去のM9地震の知見がなまじあったことが、東北沖でM9が予見できなかった大きな理由となっていたことを忘れてはならない。東北沖地震について知見が増えれば増えるほど、M9の地震について新たな先入観が生じてしまいやすいことについて自覚することが重要である。むしろ、東北沖地震では生じなかったことが、本当に他の場合でも起こらないのか、よく検討する必要がある。たとえば、

- 次の巨大地震は海溝付近より陸の近くで生じるのでは？
- 海溝近くから陸の近くまで全部が大きく滑る地震もありうるのでは？
- 巨大な海底地すべりが生じて、さらに大きな津波を起こすのでは？
- 巨大な分岐断層が動いて、効率よく津波を励起するのでは？
- スラブ内大地震や内陸大地震が連鎖するのではないか？
- 火山噴火が連動するのでは？
- 南海トラフで予想されている「最大規模」を上回る可能性はないのか？

といった検討が必要である。

我々研究者は、過去に起こったことを説明できるモデルや、過去に起こらなかったことを説明できるモデルを探しがちである。しかし、それが「想定外」を生み出すものになっていることを自覚する必要がある。「過去に起こった証拠の無いことは本当に将来も起こらないのか？」という検討こそが、次の巨大地震災害を軽減する上で、極めて重要と考えられる。

成果リスト

「5年間の成果の概要」での引用文献

Hashima, A., and T. Sato, 2017, A megathrust earthquake cycle model for Northeast

- Japan: bridging the mismatch between geological uplift and geodetic subsidence, *Earth Planets Space*, 69:23, doi:10.1186/s40623-017-0606-6.
- Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, and J. Ashi, 2012, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, 600, 14-26, doi:10.1016/j.tecto.2012.08.022.
- Kato, A., K. Obara, T. Igarashi, H. Tsuruoka, S. Nakagawa, and N. Hirata, 2012, Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, 335, 705-708, doi:10.1126/science.1215141.
- Kawamoto, S., Y. Ohta, Y. Hiyama, M. Todoriki, T. Nishimura, T. Furuya, Y. Sato, T. Yahagi, and K. Miyagawa, 2017, REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 1324-1349, doi:10.1002/2016JB013485.
- Kodera, Y., Y. Yamada, K. Hirano, K. Tamaribuchi, S. Adachi, N. Hayashimoto, M. Morimoto, M. Nakamura, and M. Hoshihara, 2018, The propagation of local undamped motion (PLUM) method: A simple and robust seismic wavefield estimation approach for earthquake early warning, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 108, 983-1003, doi:10.1785/0120170085.
- Nakata, R., T. Hori, M. Hyodo and K. Ariyoshi, 2016, Possible scenarios for occurrence of M7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation, *Sci. Rep.*, 6:25704, doi:10.1038/srep25704.
- 行谷佑一・矢田俊文, 2014, 史料に記録された中世における東日本太平洋沿岸の津波, *地震* 2, 66, 73-81, doi:10.4294/zisin.66.73.
- Nomura, S., Y. Ogata, N. Uchida, and M. Matsu'ura, 2017, Spatiotemporal variations of interplate slip rates in northeast Japan inverted from recurrence intervals of repeating earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 208, 468-481, doi:10.1093/gji/ggw395.
- Ohta, Y. T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Iinuma, K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono, and N. Umino, 2012, Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0), *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 117, B02311, doi:10.1029/2011JB008750.
- Sagiya, T., 2015, Paradoxical vertical crustal movement along the Pacific coast of northeast Japan, *Int. Assoc. Geod. Symp.* 145, 73-78, doi:10.1007/1345_2015_189.
- Sasajima, R., B. Shibasaki, H. Iwamori, T. Nishimura, and Y. Nakai, 2019, Mechanism of subsidence of the Northeast Japan forearc during the late period of a gigantic earthquake cycle, *Sci. Rep.*, 9:5726, doi:10.1038/s41598-019-42169-y.
- Sawai, Y., Y. Namegaya, T. Tamura, R. Nakashima, and K. Tanigawa, 2015, Shorter

- intervals between great earthquakes near Sendai: Scour ponds and a sand layer attributable to A.D. 1454 overwash, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 4795–4800, doi:10.1002/2015GL064167.
- Sun, T., K. Wang, T. Iinuma, R. Hino, J. He, H. Fujimoto, M. Kido, Y. Osada, S. Miura, and Y. Ohta and Y. Hu, 2014, Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Nature*, 514, 84–87, doi:10.1038/nature13778.
- 溜淵功史・山田真澄・Stephen WU, 2014, 緊急地震速報のための同時多発地震を識別する震源推定手法, *地震* 2, 67, 41–55, doi:10.4294/zisin.67.41.
- Tomita, F., M. Kido, Y. Osada, R. Hino, Y. Ohta, and T. Iinuma, 2015, First measurement of the displacement rate of the Pacific Plate near the Japan Trench after the 2011 Tohoku-oki earthquake using GPS/acoustic technique, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 8391–8397, doi:10.1002/2015GL065746.
- Tomita, F., M. Kido, Y. Ohta, T. Iinuma, and R. Hino, 2017, Along-trench variation in seafloor displacements after the 2011 Tohoku earthquake, *Sci. Adv.*, 3, e1700113, doi:10.1126/sciadv.1700113.
- Tsushima, H., R. Hino, H. Fujimoto, Y. Tanioka, F. Imamura, 2009, Near-field tsunami forecasting from cabled ocean bottom pressure data, *J. Geophys. Res.*, 114, B06309, doi: 10.1029/2008JB005988.
- Tsushima, H., R. Hino, Y. Tanioka, F. Imamura, H. Fujimoto, 2012, Tsunami waveform inversion incorporating permanent seafloor deformation and its application to tsunami forecasting, 117, B03311, doi:10.1029/2011JB008877.
- Tsushima, H., and Y. Ohta, 2014, Review on near-field tsunami forecasting from offshore tsunami data and onshore GNSS data for tsunami early warning, *J. Diast. Res.*, 9, 339–357, doi:10.20965/jdr.2014.p0339.
- Uchida, N., T. Iinuma, R. M. Nadeau, R. Bürgmann, and R. Hino, 2016, Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan, *Science*, 351, 488–492, doi:10.1126/science.aad3108.

平成 30 年度の主要成果リスト

- Agata, R., S. D. Barbot, K. Fujita, M. Hyodo, T. Iinuma, R. Nakata, T. Ichimura, and T. Hori, 2019, Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake. *Nature Comm.*, 10:1385, doi:10.1038/s41467-019-08984-7.
- Akuhara, T., M. G. Bostock, A. P. Plourde, and M. Shinohara, 2019, Beyond receiver functions: Green's function estimation by trans-dimensional inversion and its application to OBS data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 124, 1944–1961, doi:10.1029/2018JB016499.
- Ando, R., and Y. Kaneko, 2018, Dynamic rupture simulation reproduces spontaneous multifault rupture and arrest during the 2016 Mw 7.9 Kaikoura earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 12,875–12,883, doi:10.1029/2018GL080550.

- 安藤忍, 2018, 陸域観測技術衛星「だいち 2 号」(ALOS-2/PALSAR-2) を用いた合成開口レーダ (SAR) 干渉解析, 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震調査報告, 気象庁技術報告, 135, 35-45.
- Arai, R., S. Kodaira, T. Takahashi, S. Miura, and Y. Kaneda, 2018, Seismic evidence for arc segmentation, active magmatic intrusions and syn-rift fault system in the northern Ryukyu volcanic arc, *Earth Planets Space*, 70:61, doi:10.1186/s40623-018-0830-8.
- Azuma, R., R. Hino, Y. Ohta, Y. Ito, K. Mochizuki, K. Uehira, Y. Murai, T. Sato, T. Takanami, M. Shinohara, and T. Kanazawa, 2018, Along-arc heterogeneity of the seismic structure around a large coseismic shallow slip area of the 2011 Tohoku-Oki earthquake: 2-D Vp structure estimation through an airgun-ocean bottom seismometer experiment in the Japan Trench subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 123, 5249-5264, doi:10.1029/2017JB015361.
- Becker, W. T., A. Hashima, A. M. Freed, and H. Sato, 2018, Stress change before and after the 2011 M9 Tohoku-oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 504, 174-184, doi:10.1016/j.epsl.2018.09.035.
- Doi, I., T. Kamai, R. Azuma, and G. Wang, 2019, A landslide induced by the 2016 Kumamoto Earthquake adjacent to tectonic displacement - Generation mechanism and long-term monitoring, *Eng. Geol.*, 248, 80-88, doi:10.1016/j.enggeo.2018.11.012.
- Fujie, G., S. Kodaira, Y. Kaiho, Y. Yamamoto, T. Takahashi, S. Miura, and T. Yamada, 2018, Controlling factor of incoming plate hydration at the north-western Pacific margin, *Nature Commn.*, 9:1, doi:10.1038/s41467-018-06320-z.
- Fujino, S., H. Kimura, J. Komatsubara, D. Matsumoto, Y. Namegaya, Y. Sawai, and M. Shishikura, 2018, Stratigraphic evidence of historical and prehistoric tsunamis on the Pacific coast of central Japan: Implications for the variable recurrence of tsunamis in the Nankai Trough, *Quat. Sci. Rev.*, 201, 147-161, doi:10.1016/j.quascirev.2018.09.026.
- 富士原敏也・金松敏也・笠谷貴史, 2018, 佐田岬半島沖瀬戸内海における海底地形, 浅層構造, 重力調査, *JAMSTEC Rep. Res. Devel.*, 27, 13-25, doi:10.5918/jamstecr.27.13.
- Fukahata, Y., 2019. Estimate of the contraction rate of central Japan through the deformation of the Philippine Sea slab, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 6:4, doi:10.1186/s40645-018-0251-0.
- Hamada, Y., T. Hirose, A. Ijiri, Y. Yamada, Y. Sanada, S. Saito, N. Sakurai, T. Sugihara, T. Yokoyama, T. Saruhashi, T. Hoshino, N. Kamiya, S. Bowden, M. Cramm, S. Henkel, K. Homola, H. Imachi, M. Kaneko, L. Lagostina, H. Manners, H.-L. McClelland, K. Metcalfe, N. Okutsu, D. Pan, M. J. Raudsepp, J. Sauvage, F. Schubotz, A. Spivack, S. Tonai, T. Treude, M.-Y. Tsang, B. Viehweger, D. T. Wan, E. Whitaker, Y. Yamamoto, K. Yang, M. Kinoshita, L. Maeda, Y. Kubo, Y.

- Morono, F. Inagaki, and V. B. Heuer, 2018, In-situ mechanical weakness of subducting sediments beneath a plate boundary décollement in the Nankai Trough, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:70, doi:10.1186/s40645-018-0228-z.
- Hamahashi, M., G. Kimura, W. Tanikawa, Y. Hamada, Y. Hashimoto, and S. Saito, 2018, Physical property anisotropy of foliated fault rocks: Study from the Nobeoka Thrust, Shimanto Belt, southwest Japan, *Island Arc*, 27, e12257, doi:10.1111/iar.12257.
- Han, R., J.-S. Kim, C.-M. Kim, T. Hirose, J. O. Jeong, and G. Y. Jeong, 2019, Dynamic weakening of ring faults and catastrophic caldera collapses, *Geology*, 47, 107-110, doi:10.1130/G45687.1.
- Hanyu, T., K. Shimizu, T. Ushikubo, J.-I. Kimura, Q. Chang, M. Hamada, M. Ito, H. Iwamori, and T. Ishikawa, 2019, Tiny droplets of ocean island basalts unveil Earth's deep chlorine cycle, *Nature Comm.*, 10:60, doi:10.1038/s41467-018-07955-8.
- Haraguchi, S., K. Ueki, K. Yoshida, T. Kuwatani, M. Mohamed, S. Horiuchi, and H. Iwamori, 2018, Geochemical database of Japanese islands for basement rocks: compilation of domestic article. *J. Geol. Soc. Japan*, 124, 1049-1054, doi:10.5575/geosoc.2018.0027.
- Higuchi, S., Y. Kamishiro, M. Ishihara, Y. Yasuoka, Y. Mori, M. Hosoda, K. Iwaoka, S. Tokonami, R. Takahashi, M. Janik, J. Muto, H. Nagahama, and T. Mukai, 2019, Evaluation of a radon air monitor in the measurement of radon concentration in water in comparison with a liquid scintillation counter, *Rad. Prot. Dosim.*, ncz070, doi:10.1093/rpd/ncz070.
- 本田昌樹・山下達也・上芝晴香・攪上泰亮・林京之介・桑原將旗・松本紗歩・仲井博之・酒井和紀・宮原伐折羅・宗包浩志・飛田幹男・矢来博司・小林知勝・森下遊・藤原智, 2018, だいち 2 号 SAR データの解析による霧島山噴火に伴う地表変動の検出, *国土地理院時報*, 130, 93-108.
- Iinuma, T., 2018, Monitoring of the spatio-temporal change in the interplate coupling at northeastern Japan subduction zone based on the spatial gradients of surface velocity field, *Geophys. J. Int.*, 213, 30-47, doi:10.1093/gji/ggx527.
- Ishikawa, T., and Y. Yokota, 2018, Detection of seafloor movement in subduction zones around Japan using a GNSS-A seafloor geodetic observation system from 2013 to 2016, *J. Disast. Res.*, 13, 511-517, doi:10.20965/jdr.2018.p0511.
- Iwamori, H., H. Nakamura, M. Yoshida, T. Nakagawa, K. Ueki, A. Nakao, T. Nishizawa, and S. Haraguchi, 2018, Trace-element characteristics of east-west mantle geochemical hemispheres. *Comptes Rendus Geosci.*, 351, 209-220, doi:10.1016/j.crte.2018.09.007.
- Iwata, D., H. Nagahama, J. Muto, and Y. Yasuoka, 2018, Non-parametric detection of atmospheric radon concentration anomalies related to earthquakes. *Sci. Rep.*, 8, 13028, doi:10.1038/s41598-018-31341-5.

- Kameda, J., and K. Hirauchi, 2018, Rheological properties of composite serpentine-brucite suspensions: Implications for mudflow behavior on forearc seamounts, *Marine Geology*, 403, 191-196, doi:10.1016/j.margeo.2018.06.004.
- Kano, M., N. Aso, T. Matsuzawa, S. Ide, S. Annoura, R. Arai, S. Baba, M. Bostock, K. Chao, K. Heki, S. Itaba, Y. Ito, N. Kamaya, T. Maeda, J. Maury, M. Nakamura, T. Nishimura, K. Obana, K. Ohta, N. Poiata, B. Rousset, H. Sugioka, R. Takagi, T. Takahashi, A. Takeo, Y. Tu, N. Uchida, Y. Yamashita, and K. Obara, 2018, Development of a Slow Earthquake Database, *Seismol. Res. Lett.*, 89, 1566-1575, doi:10.1785/0220180021.
- Katakami, S., Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, S. Suzuki, and M. Shinohara, 2018, Spatiotemporal variation of tectonic tremor activity before the Tohoku-Oki earthquake, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 9676-9688, doi:10.1029/2018JB016651.
- Kawamoto, S., N. Takamatsu, S. Abe, K. Miyagawa, Y. Ohta, M. Todoriki, and T. Nishimura, 2018, Realtime GNSS analysis system REGARD: an overview and recent results, *J. Disast. Res.*, 13, 440-452, doi:10.20965/jdr.2018.p0440.
- Kobayashi, T., H. Yarai, S. Kawamoto, Y. Morishita, S. Fujiwara, and Y. Hiyama, 2018, Crustal deformation and fault models of the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Foreshocks and main shock, In: Freymueller J., Sánchez L. (eds) *International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World*, Springer, Cham, 149, 193-200, doi:10.1007/1345_2018_37.
- Kobayashi, T., 2018, Locally distributed ground deformation in an area of potential phreatic eruption, Midagahara volcano, Jpana, detected by single-look-based InSAR time series analysis, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 357, 213-223, doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.04.023.
- Kobayashi, T., Y. Morishita, and H. Munekane, 2018, First detection of precursory ground inflation of a small phreatic eruption by InSAR, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 491, 244-254, doi:10.1016/j.epsl.2018.03.041.
- Kubota, T., W. Suzuki, T. Nakamura, N. Y. Chikasada, S. Aoi, N. Takahashi, and R. Hino, 2018, Tsunami source inversion using time-derivative waveform of offshore pressure records to reduce the effects of non-tsunami components *Geophys. J. Int.*, 215, 1200-1214, doi:10.1093/gji/ggy345.
- Ma, N., G. Wang, T. Kamai, I. Doi, and M. Chigira, 2019, Amplification of seismic response of a large deep-seated landslide in Tokushima, Japan, *Eng. Geol.*, 249, 218-234, doi:10.1016/j.enggeo.2019.01.002.
- 森下遊・小林知勝, 2018, ALOS-2 干渉 SAR 時系列解析で検出された霧島山の地表変位と大気遅延誤差低減処理の効果, *測地学会誌*, 64, 28-38, doi:10.11366/sokuchi.64.28.
- Morishita, Y., T. Kobayashi, S. Fujiwara, and H. Yarai, 2018, Complex crustal deformation of the 2016 Kaikoura, New Zealand, earthquake revealed by ALOS-2,

- Bull. Seismol. Soc. Am., 108, 1746-1756, doi:10.1785/0120180070.
- Morishita, Y., T. Kobayashi, S. Fujiwara, and H. Yarai, 2018, Complex crustal deformation of the 2016 Kaikoura, New Zealand, earthquake revealed by ALOS-2, Bull. Seismol. Soc. Am., 108, 1746-1756, doi:10.1785/0120180070.
- 名古屋大学大学院環境学研究科コミュニティ防災研究会, 2018, 「東日本大震災後の復興と防災に関する調査報告書 (速報版)」, 名古屋大学大学院環境学研究科, 37pp.
- Nakagawa, T., and H. Iwamori, 2019, On the implications of the coupled evolution of the deep planetary interior and the presence of surface ocean water in hydrous mantle convection, *Comptes Rendus Geosci.*, 351, 197-208, doi:10.1016/j.crte.2019.02.001.
- Nakagawa, T., H. Iwamori, R. Yanagi, and A. Nakao, 2018, On the evolution of the water ocean in the plate-mantle system. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:51, doi:10.1186/s40645-018-0209-2.
- Nakajima, J., and N. Uchida, 2018, Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip, *Nature Geosci.*, 11, 351-356, doi:10.1038/s41561-018-0090-z.
- Nakamura, H., H. Iwamori, M. Nakagawa, T. Shibata, J.-I. Kimura, T. Miyazaki, Q. Chang, B. S. Vaglarovb, T. Takahashih, and Y. Hiraharai, 2019, Geochemical mapping of slab-derived fluid and source mantle along Japan arcs, *Gondwana Res.*, 70, 36-49.
- Nakano, M., M. Hyodo, A. Nakanishi, M. Yamashita, T. Hori, S. Kamiya, K. Suzuki, T. Tonegawa, S. Kodaira, N. Takahashi, and Y. Kaneda, 2018, The 2016 Mw 5.9 earthquake off the southeastern coast of Mie Prefecture as an indicator of preparatory processes of the next Nankai Trough megathrust earthquake, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:30, doi:10.1186/s40645-018-0188-3.
- Nakao, A., H. Iwamori, T. Nakakuki, Y. Suzuki, and H. Nakamura, 2018, Roles of hydrous lithospheric mantle in deep water transportation and subduction dynamics. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 5336-5343, doi:10.1029/2017GL076953.
- Nishikawa, T., and S. Ide, 2018, Recurring slow slip events and earthquake nucleation in the source region of the M 7 Ibaraki-Oki earthquakes revealed by earthquake swarm and foreshock activity, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 7950-7968, doi:10.1029/2018JB015642.
- Obana, K., Y. Nakamura, G. Fujie, S. Kodaira, Y. Kaiho, Y. Yamamoto, and S. Miura, 2018, Seismicity in the source areas of the 1896 and 1933 Sanriku earthquakes and implications for large near-trench earthquake faults, *Geophys. J. Int.*, 212, 2061-2072, doi:10.1093/gji/ggx532.
- Okuda, T., and S. Ide, 2018, Hierarchical rupture growth evidenced by the initial seismic waveforms, *Nature Comm.*, 9:3714, doi:10.1038/s41467-018-06168-3.
- Okuda, T., and S. Ide, 2018, Streak and hierarchical structures of the Tohoku-Hokkaido subduction zone plate boundary *Earth Planets Space*, 70:132, doi:10.1186/s40623-018-0903-8.

- 奥田貴・内田直希・浅野陽一, 2018, Matched Filter 法を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震直後の小地震の検出 - 釜石沖繰り返し地震クラスターへの適用 -, 地震 2, 71, 87-101, doi:10.4294/zisin.2017-8.
- Okuwaki, R., A. Kasahara, Y. Yagi, S. Hirano, and Y. Fukahata, 2019, Backprojection to image slip, *Geophys. J. Int.*, 216, 1529-1537, doi:10.1093/gji/ggy505.
- Shibazaki, B., H. Noda, and M. J. Ikari, 2019, Quasi-dynamic 3D modeling of the generation and afterslip of a Tohoku-oki earthquake considering thermal pressurization and frictional properties of the shallow plateboundary, *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-018-02089-w.
- 高橋美紀・廣瀬丈洋・飯尾能久, 2018, 断層の強度に関する論争と学際的アプローチの必要性. *地質学雑誌*, 124, 725-739, doi:10.5575/geosoc.2018.0015.
- Takahashi, N., K. Imai, K. Sueki, R. Obayashi, M. Ishibashi, T. Tanabe, and Y. Kaneda, 2018, Real-time tsunami prediction system based on seafloor observatory data applied to the Inland Sea, Japan. *Marine Tech. Soc. J.*, 52, 120-127, doi:10.4031/MTSJ.52.3.12.
- Takemura, S., H. Kubo, T. Tonegawa, T. Saito, and K. Shiomi, 2019, Modeling of long-period ground motions in the Nankai subduction zone: Model simulation using the accretionary prism derived from oceanfloor local S-wave velocity structures, *Pure Appl. Geophys.*, 176, 627-647, doi:10.1007/s00024-018-2013-8.
- Takemura, S., T. Matsuzawa, T. Kimura, T. Tonegawa, and K. Shiomi, 2018, Centroid moment tensor inversion of shallow very low frequency earthquakes off the Kii Peninsula, Japan, using a three-dimensional velocity structure model, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 6450-6458, doi:10.1029/2018GL078455.
- Tamaribuchi, K., 2018, Evaluation of automatic hypocenter determination in the JMA unified catalog, *Earth Planets Space*, 70:141, doi:10.1186/s40623-018-0915-4.
- Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu, and S. Hirano, 2018, Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog. *Earth Planets Space*, 70:90, doi:10.1186/s40623-018-0866-9.
- 田中重好・黒田由彦・横田尚俊・大矢根淳編, 2019, 「防災と支援 - 成熟した市民社会に向けて」, シリーズ 被災地から未来を考える 第 2 巻, 有斐閣, 382pp., ISBN 978-4-641-17439-9.
- Tanigawa, K., M. Shishikura, O. Fujiwara, Y. Namegaya, and D. Matsumoto, 2018, Mid to late Holocene marine inundations inferred from coastal deposits facing the Nankai Trough in Nankoku, Kochi Prefecture, southern Japan, *The Holocene*, 28, 867-878, doi:10.1177/0959683617752837.
- Todd, E. K., S. Y. Schwartz, K. Mochizuki, L. M. Wallace, A. F. Sheehan, S. C. Webb, C. A. Williams, J. Nakai, J. Yancey, B. Fry, S. Henrys, and Y. Ito, 2018, Earthquakes and tremor linked to seamount subduction during shallow slow slip at the Hikurangi margin, New Zealand, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 6769-6783, doi:10.1029/2018JB016136.

- Tsou, C. Y., M. Chigira, D. Higaki, G. Sato, H. Yagi, H. P. Sato, A. Wakai, V. Dangol, S. C. Amatya, and A. Yatagai, 2018, Topographic and geologic controls on landslides induced by the 2015 Gorkha earthquake and its aftershocks: an example from the Trishuli Valley, central Nepal. *Landslides*, 15, 953-965, doi:10.1007/s10346-017-0913-9.
- Uchida N, and R. Bürgmann, 2019, Repeating earthquakes, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 47, 305-332, doi:10.1146/annurev-earth-053018-060119.
- Uemura, M., Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, and M. Shinohara, 2018, Spatio-temporal changes in the seismic velocity induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and slow slip event revealed from seismic interferometry, using ocean bottom seismometer's records, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:87, doi:10.1186/s40645-018-0240-3.
- Usami, K., K. Ikehara, T. Kanamatsu, and C. M. McHugh, 2018, Super cycle in great earthquake recurrence along the Japan Trench over the last 4000 years, *Geosci. Lett.*, 5:11, doi:10.1186/s40562-018-0110-2.
- Wakabayashi, A., Y. Yasuoka, M. Janik, H. Nagahama, N. Fukuhori, Y. Mori, Y. Arai, S. Fujii, and 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., T. Sun, L. Brown, R. Hino, F. Tomita, M. Kido, T. Iinuma, S. Kodaira, and T. Fujiwara, 2018, Learning from crustal deformation associated with the M9 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geosphere*, 14, 552-571, doi:10.1130/GES01531.1.
- Yabe, S., and S. Ide, 2018, Variations in precursory slip behavior resulting from frictional heterogeneity, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:43, doi:10.1186/s40645-018-0201-x.
- Yamamoto, R., M. Kido, Y. Ohta, N. Takahashi, Y. Yamamoto, A. Pinar, D. Kalafat, H. Özener, and Y. Kaneda, Seafloor geodesy revealed partial creep of the North Anatolian Fault submerged in the Sea of Marmara, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 1268-1275, doi:10.1029/2018GL080984.
- Yasuoka, Y., H. Nagahama, J. Muto, and T. Mukai, 2018, The anomaly in atmospheric radon concentrations prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake in Japan. *Radiat. Environ. Med.*, 7, 86-948.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, and S. Watanabe, 2018, Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS-A oceanography, *Marine Geophys. Res.*, doi:10.1007/s11001-018-9362-7.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, and S. Watanabe, 2018, Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations, *Sci. Data*, 5:180182, doi:10.1038/sdata.2018.182.
- Yoshida, K., T. Kuwatani, T. A. Yasumoto, S. Haraguchi, K. Ueki, and H. Iwamori, 2018, GEOFCM: a new method for statistical classification of geochemical data using spatial contextual information. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 113, 159-169,

doi:10.2465/jmps.171127.

Zhao, S., M. Chigira, and X. Wu, 2018, Buckling deformations at the 2017 Xinmo landslide site and nearby slopes, Maoxian, Sichuan, China, Eng. Geol., 246, 187-197, doi:10.1016/j.enggeo.2018.09.033.

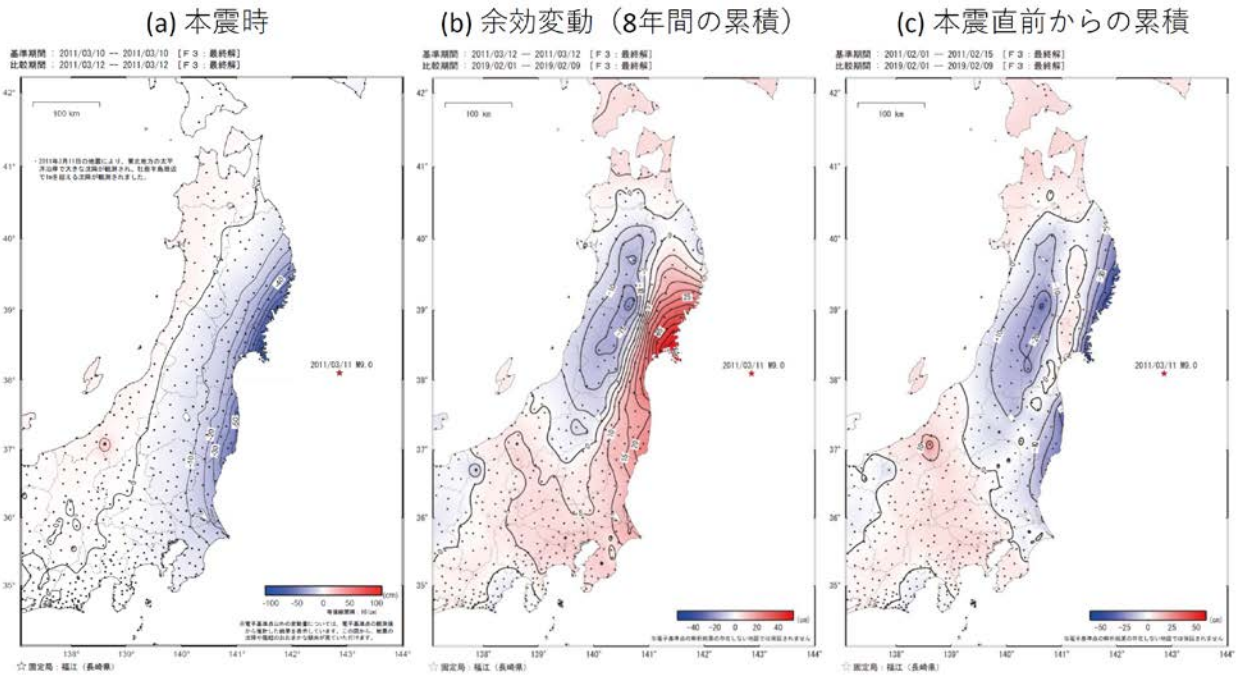


図1. GNSS連続観測により捉えられた2011年東北地方太平洋沖地震に伴う上下変動（国土地理院 [課題番号：[課題番号：6005]]）。(a) 本震時の上下変動。(b) 本震後8年間の余効変動。(c) 本震直前からの累積上下変動。

2 (2) 南海トラフの巨大地震総合研究

「南海トラフの巨大地震」総合研究グループリーダー 澁谷拓郎
(京都大学防災研究所)

1. 5年間の成果

(1) 概要

本研究グループは、「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、海溝型地震部会、データベース・データ流通部会、地震動・津波等の事前予測・即時予測部会、史料・考古部会、地震・火山災害部会、地震先行現象・地震活動評価部会等で行われている南海トラフの巨大地震に関する研究について部会を横断する形でまとめ、総合的に推進することを目的とする。さらに、東京大学地震研究所と京都大学防災研究所という拠点間での連携共同研究における参加者募集型研究として実施される、「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」による南海トラフ巨大地震のリスク評価についての研究とも連携を図って、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」による南海トラフ巨大地震の現象解明、発生予測、災害誘因予測を目指した研究と、拠点間連携共同研究のリスク評価の研究との橋渡しを模索することも、本研究グループの目的である。

(2) 研究スキームの設定

本研究グループでは、南海トラフ巨大地震の災害軽減に資する研究のスキームとして、図1に示すように、地震の発生、地震波の伝播という事象の時間経過およびそれらに伴う情報の伝達の方向性に従い、「震源・地震像」、「地殻構造・波動伝播」、「強震動・津波予測」、「地盤構造・地すべり」、「被害予測（建築物・構造物）」、「リスク評価」という研究項目が並び、これらを「基盤観測・データ流通・データベース・モニタリング」が支え、各研究項目から情報が社会に向かって発信されるという構図を考え、これをもとに南海トラフの巨大地震に関連する研究課題の成果をまとめた。

(3) 研究集会の開催

「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、部会を中心に行われている研究のうち、南海トラフの巨大地震に関するものについて、部会を横断する形でまとめるため、研究集会を開催した。

第1回の研究集会は、平成27年5月に開催され、初年度（平成26年度）の成果に基づき、表1のような発表が行われた。発表1・2・4～6は海溝型地震部会、発表3は史料・考古部会、発表7～9は地震動・津波等の事前予測・即時予測部会、発表10・11は拠点間連携の研究として行われたものであるが、本研究グループで設定した研究項目で分類すると、発表1～4は震源・地震像、発表5・6は地殻構造、発表7・8は強震動予測、発表9は地すべり、発表10はリスク評価となる。研究項目を、図1に示すように、地震の発生、地震波の伝播という事象の時間経過およびそれらに伴う情報の伝達の方向性に従って並べたとき、上流あるいは下流の研究がどのような情報を欲しているかを考えながら研究を行う

ことが重要であることが、総合討論を通じて認識された。

南海トラフ巨大地震に対して、(1) どんな地震像が想定されるか、(2) どんな被害が想定されるか、(3) どんな情報を発信できるか、というような問いに答えるのが、本研究グループの究極の目的と考えられる。第2回の研究集会は、(1) をテーマに平成28年5月に開催された。発表者を表2に記す。地震規模を想定するためには、震源域の情報が必要であるが、これについては、平成27年度に海上保安庁の研究課題8001において、海底地殻変動観測データを用いた南海トラフ巨大地震の固着域の推定という研究がなされた(発表1)。また、発生時期を想定するためには、海底での地殻変動連続観測が不可欠であると考え、発表4・5においてその現状と課題について報告していただいた。総合討論において、そもそも「もっともらしい地震像」が必要かという問題提起があった。何のための情報かによって、用意すべきシナリオは変わるのであって、たとえば、命を守るための情報には、最悪のシナリオが必要なのではないかという意見が出された。また、シナリオの確率密度分布を作れないかという意見もあった。

第3回の研究集会は、平成29年10月に開催された。第2回に引き続き、「もっともらしい地震像」について、もう少し掘り下げてみることにした。発表者を表3に示す。次の南海トラフ巨大地震のもっともらしい地震像について議論するためには、過去にどのような地震が発生したのかという情報が必要であるので、史料地震学に基づいた講演をしていただいた(発表1)。南海トラフ沿いの地震の起き方は、従来考えられていたよりも複雑で類型化が難しいということであった。発表4・5では、南海トラフ巨大地震の発生前と発生時と発生後に震源域で何が起きているのかをリアルタイムでモニタリングすることの重要性が指摘された。総合討論では、「もっともらしい地震像」をあらかじめ絞り込むのは難しいので、いくつものシナリオに対して、どのような事象が発現するかをシミュレーションしておき、モニタリングにより、震源域で何が起きたのか、起きているのかをリアルタイムで把握し、起きる可能性の高いシナリオを絞り込むというような戦略をとる必要があること認識された。

発表2・4は、文部科学省科学技術試験研究委託事業の「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」での研究成果に基づく発表であった。南海トラフ巨大地震という課題に取り組むプロジェクト同士の連携を強化するため、平成31年2月に開催された第4回研究集会では、南海トラフ広域地震防災研究プロジェクトの概要と研究成果について報告していただくとともに、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画からも、震源、地殻構造、地盤構造と強震動予測、拠点間連携研究によるリスク評価などの成果について発表した。発表者は表4の通りである。

2. 平成30年度の成果

(1) 研究成果の概要

平成30年度の「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」における研究課題のうち、南海トラフの巨大地震に関する研究であることが自己申告されたもの、および研究成果報告からそう判断されるものは、56課題であった。部会別には、「海溝型地震」が15課題、「データベース・データ流通」が18課題、「地震動・津波等の事前予測・即時予測」が5課題、「史料・考古」が5課題、「地震・火山災害」が3課題、「地震先行現象・

地震活動評価」が2課題、「拠点間連携」が8課題であった。さらに、主な成果について、上述のスキームにおける研究項目で整理すると、「震源・地震像」が22課題、「地殻構造・波動伝播」が6課題、「強震動予測・津波予測」が5課題、「地盤構造・地すべり」が4課題、「被害予測（建築物・構造物）」が5課題、「リスク評価」が4課題、「基盤観測・データ流通」が22課題、「情報発信」が2課題（複数の研究項目に該当する課題あり）であった。以下に、主な研究項目の成果を述べる。

（2）震源・地震像

ア．プレート境界面の固着状態

東京大学地震研究所〔課題番号：1509〕は、豊後水道周辺における機動的GPS観測を強化・継続し、当該地域で繰り返し発生する長期的SSE（Slow Slip Event）の研究を行った。2015年12月ごろから2016年3月ごろまで四国南部を中心に長期的SSEの可能性のある小さな地殻変動が観測されたが、その変動量や推定されたモーメントマグニチュードは、豊後水道で想定されている長期的SSEの数分の1しかないことがわかった（Hirose et al., 2018）。2018年8月ごろから豊後水道南西部を中心に長期的SSEの可能性のある小さな地殻変動が観測されており、また2018年12月から豊後水道全域で2010年以来の大規模な長期的SSEが発生したと考えられる。東海地域に関しては、2013年頃から開始した長期的SSEに関して、時間発展インバージョンを用いた解析を実施し、結果の詳しい検討を行った。長期的SSEに加えて2013年から2016年1月に、少なくとも2回の短期的SSEが発生し、その位置は長期的SSEのプレート境界深部に位置する北西側であった。推定された短期的SSEのすべり速度は20～30cm/年であり、長期的SSEのすべり速度（約2.3cm/年）よりも1桁早い。長期的SSE領域では深部低周波微動が発生していないが、本研究の結果は微動の発生が周囲のスロースリップのすべり速度に依存しているという仮説（Wech and Bartlow, 2014）を支持する結果となった（Sakaue et al., 2018）。

海上保安庁〔課題番号：8001〕は、GPS－音響測距結合方式による海底地殻変動観測を南海トラフ域で継続し、プレート境界固着の影響による地殻変動を観測している。紀伊水道沖の観測点における2017年末頃からのデータから、浅部のスロースリップに起因すると考えられる非定常地殻変動を観測した（海上保安庁，2018）。

イ．歴史地震の地震像

史料・考古の研究では、名古屋大学〔課題番号：1701〕は、三重県、愛知県の自治体史、郷土史などを中心とした史料調査により、南海トラフ地震を中心に地震情報の抽出を行った。ここで収集した史料について、eコミマップを用いて地図と結びつけたデータベースを構築するため、高知県、三重県、愛知県、静岡県 of 明治期の旧版地形図のデジタル化を行った。

京都大学防災研究所〔課題番号：1901〕は、1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関して、複数の写本を検討し、より原本に近い史料を特定して未読箇所を翻刻した（服部・中西，2017，2018）。また、この地震と噴火について、現在知られているなかで最も完全で、かつ古い時代に書かれた史料を特定し翻刻した。これらの史料から、1707年宝永地震の本震と翌日発生した余震の震源域の推定に重要な情報が得られた。

東京大学史料編纂所〔課題番号：2601〕は、既刊地震史料集に記載されている史料について、歴史的に信頼できる原典史料に遡って、史料記述の間違いの修正や省略部分の補足を行う校訂作業を実施した。また、東海地方にあって長期間にわたる日記史料が現存する三河国田原藩（愛知県田原市）の「田原藩日記」（田原市博物館所蔵）の調査・撮影を実施した。これに関連して、嘉永七年十一月四日・五日（1854年12月23日・24日）の東海・南海地震関連の日記史料について集中的に調査を実施し、本震前後の期間における有感地震の記録について分析した。現段階での成果として、東海・南海地震の発生前に、太平洋沿岸地域では目立った有感記録の増加はみられないが、山陰地方や近畿地方北部では本震発生の5年前に有感地震の記録が増加している状況が判明した。

（3）地殻構造・波動伝播

ア．プレート形状・構造

東京大学地震研究所〔課題番号：1509〕は、四国西部地域における比抵抗構造をネットワークMT応答関数のインバージョンにより求め、地震波減衰構造(Kita and Matsubara, 2016)および長期的SSE域 (Ozawa, 2017) と比較した。その結果、比抵抗の低いところは低 Q_p の減衰の大きな領域に対応し、長期的SSEにおいて滑り量の大きい領域の外側に分布することが分かった (Uyeshima et al., 2018)。

名古屋大学〔課題番号：1703〕は、東海地域においてACROSS震源を用いた地震波速度の時間変化の解析を行い、過去10年間、2011年東北地方太平洋沖地震時の地震波速度減少以外は定常的に地震波速度が増加していることを世界で初めて明らかにした。定常的な地震波速度の増加は、岩盤中のクラックが徐々に閉じることによる剛性の増加を表しており、地下水の化学成分の沈殿による割れ目の閉塞を表していると推測できる (Tsuji et al., 2018)。

京都大学防災研究所〔課題番号：1904〕は、米子－海陽測線の観測点で記録された遠地地震波形を用いてレシーバ関数解析を行い、レシーバ関数イメージを得た。四国東部下に沈み込むフィリピン海プレート内の海洋モホ面とプレート上面は、中国地方中部付近まで明瞭にイメージされた。この結果から四国東部下のフィリピン海プレートは、四国南端の深さ20kmから中国地方中部で深さ40kmに達していて、 6° 程度の傾斜角で沈み込んでいることが分かった (澁谷他, 2019)。

（4）強震動予測・津波予測

ア．震源パラメータの即時推定

産業技術総合研究所〔課題番号：5007〕は、ボアホール歪計を用いて巨大地震のモーメントマグニチュード(M_w)の即時推定を試み、水平歪4成分以上があれば、M9クラスの東北地方太平洋沖地震本震のほか、同地震の最大余震、近年発生した内陸地震でも M_w を推定可能であることを示した (Itaba, 2018)。

国土地理院〔課題番号：6004〕は、相対測位によるGEONETリアルタイム解析から得られる日本全国のリアルタイム地殻変動データを用いて、地震発生時に矩形断層モデルおよびプレート境界面上のすべり分布を即時推定する技術の開発を行い、電子基準点リアルタイム解析システムに実装した (Kawamoto et al., 2018)。

イ. 津波予測

防災科学技術研究所〔課題番号：3004〕は、津波即時予測システムにおいて、DONETを用いたシステムの構築を海洋研究開発機構と連携して進め、すでに和歌山県、三重県、中部電力、尾鷲市に実装・運用しているが、複雑な地形を持つ瀬戸内海沿岸での即時津波予測システムの有効性を確認し（Takahashi et al., 2018）、坂出市と高松市を対象としたシステムを香川大学に構築した。

（５）地盤構造・地すべり

ア. 大阪堆積盆地モデルの検証

京都大学防災研究所〔課題番号：1911〕は、広帯域強震動予測のための震源モデルおよび震源から観測サイトまでの地殻・地盤速度構造モデルの高度化の一環として、2018年大阪府北部の地震の地震動モデリングによる大阪堆積盆地3次元速度構造モデルの検証を行った。大阪平野内の地震観測点の観測波形と比較すると、後続波の到来は観測とよく対応しており、速度構造モデルは表面波の形成・伝播などの盆地の応答はおよそ再現できていると考えている。一方、計算地震動の振幅は観測に比べ全体的に小さく、震源モデルと3次元速度構造モデルのとくに浅部部分に原因があるのではないかと考えられる。また、盆地端部近くの観測点は、波形の再現がよくない点があり、堆積構造の急変地域でのモデル更新が課題としてあげられる（関口他, 2018）。

（６）リスク評価

ア. 火災の発生件数のばらつきの評価

京都大学防災研究所〔課題番号：2957〕は、地震火災の発生件数を予測するため、人口一人あたりの出火確率に着目し、これを計測震度や電力の供給率から説明するモデルを定式化した。この出火モデルと地震動指標の距離減衰式を組み合わせることによって、南海トラフ地震の不確実性を考慮した日本全域での確率論的な出火シミュレーションを行った。ここでは、地震火災の発生件数に大きく影響する地震の不確実要因として、（１）震源域とそれが破壊された際の地震の規模、（２）地震の発生季節、（３）地震の発生時間帯の3種類の要因を仮定し、各要因のバリエーションの組み合わせからなる合計72の地震シナリオに重み係数を設定することによって、地震火災の発生件数と条件付き超過確率の関係を表す出火リスクカーブを消防本部の管轄範囲ごとに推定した。その結果、南海トラフ地震が発生した際、全国のほとんどの消防本部では、保有するポンプ車の台数を上回る数の火災が発生する確率は非常に小さく、水道管や防火水槽の耐震化によって地震時においても消防水利を確保することができれば、放任火災の発生を高い確率で防ぐことができることを明らかにした。

イ. エクスポージャ予測のためのモデル化手法

京都大学防災研究所〔課題番号：2952〕は、地震リスク評価におけるエクスポージャとして、人口および建物ストックの将来予測モデルの構築を試みた。高知県南国市を対象として、人口及び建物ストックの時系列分析を行った。また、その地方自治体での時系列変

化に影響を及ぼす要因についても分析し、人口と建物ストックの相関および建物ストックの時系列変化に関する簡易なモデルを構築した（河野・西嶋，2018）。

（7）情報発信

ア．防災情報の発信と防災知識の普及啓発

気象庁〔課題番号：7012〕は、気象庁から発表する地震・津波に関する防災情報の高度化を図るため、緊急地震速報評価・改善検討会などの検討会等を開催し、報道発表等により広く情報共有を行った。また、気象庁は「南海トラフ地震に関連する情報」を発表することとし、平成29年11月1日からその情報の運用を開始した。

気象庁〔課題番号：7020〕は関係機関と連携し、地域の状況に合った様々な手段を用いて、地震・津波及び火山に関する知識や防災行動についての普及啓発に継続的に取り組んだ。

これまでの課題と今後の展望

冒頭で述べたように、本研究グループの目的は、「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、部会ごとに推進されている研究成果を部会を横断する形でまとめ、南海トラフ巨大地震の災害軽減に資する研究を総合的に推進することである。このために、本研究グループでは、地震の発生、地震波の伝播という事象の時間経過およびそれらに伴う情報の伝達の方向性に従い、「震源・地震像」、「地殻構造・波動伝播」、「強震動・津波予測」、「地盤構造・地すべり」、「被害予測（建築物・構造物）」、「リスク評価」という研究項目が並び、これらを「基盤観測・データ流通・データベース・モニタリング」が支え、各研究項目から情報が社会に向かって発信されるというスキームを設定した。それぞれの研究項目において、上流と下流でなされている研究や必要とされるアウトプットを認識し、研究を行うことが必要と考えられる。このため、研究項目間のコミュニケーションを図ることが重要であり、現行計画では、研究集会を通して研究項目間のコミュニケーションの活性化を実施してきた。しかしながら、年1回開催する研究集会のみでは十分なコミュニケーションを実現することには限界があると思われる。次期計画においては、関連する研究項目を代表する研究者が本研究グループを構成する体制とするなど、部会を横断する研究の推進に関する組織面でのサポートが必要であると考えられる。

成果リスト

服部健太郎・中西一郎，2018，1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する一史料（3）—元禄地震・宝永地震・宝永富士山噴火を記した「当山本宮記」—，地震2，71，131-137，doi: 10.4294/zisin.2017-17.

服部健太郎・中西一郎，2018，訂正：1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する一史料（3）—元禄地震・宝永地震・宝永富士山噴火を記した「当山本宮記」—，地震2，71，151-152，doi:10.4294/zisin.2018-4.

- 服部健太郎・中西一郎, 2019, 1707年宝永地震と富士山宝永噴火に関する史料—富士山宝永噴火に先行した地震活動に関する記述の検証—, 地震 2, 71, 219-229, doi: 10.4294/zisin.2018-5.
- Hirose, H., T. Matsushima, T. Tabei, and T. Nishimura, 2018, A small slow slip event in Bungo Channel from December 2015 to March 2016 detected by a GNSS observation network, T33E-0457, AGU Fall Meeting 2018, Washington, D.C., 10-14 December.
- Itaba, S., 2018, Rapid estimation of the moment magnitude of the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0) from static strain changes, Earth, Planets and Space, 70, doi:10.1186/s40623-018-0894-5.
- 海上保安庁, 2018, 南海トラフ沿いの海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 101.
- Kawamoto, S., N. Takamatsu, S. Abe, K. Miyagawa, Y. Ohta, M. Todoriki, and T. Nishimura, 2018, Realtime GNSS analysis system REGARD: an overview and recent results, Journal of Disaster Research, 13, 440-452, <https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0440>.
- 河野祐哉, 西嶋一欽 (2018) 高知県南国市を例とした建物ストックの時系列変化の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集.
- Sakaue, H., T. Nishimura, J. Fukuda, T. Kato, 2018, Spatio-Temporal Evolution of Long-Term and Short-Term Slow Slip Events in the Tokai Region, Central Japan Estimated from a Very Dense GNSS Network, During 1996-2016, SE27-A016, AOGS 15th Annual Meeting, Honolulu, USA, 3-8 June.
- 関口春子・岩田知孝・浅野公之, 2018, 2018年6月18日大阪府北部の地震時の強震動シミュレーション, 日本地震学会2018年度秋季大会, S24-15, 2018年10月.
- 澁谷拓郎・三浦 勉・長尾愛理・小松信太郎・山崎健一・山下裕亮・井口正人・為栗 健・園田忠臣・大倉敬宏・吉川 慎, 南海トラフ巨大地震の予測高度化を目指したフィリピン海スラブ周辺域の構造研究(5), 京都大学防災研究所研究発表講演会, P14, 宇治市, 2019年2月, 2019.
- Takahashi, N., Imai, K., Sueki, K., Obayashi, R., Ishibashi, M., Tanabe, T., and Kaneda, Y. (2018). Real-Time Tsunami Prediction System Based on Seafloor Observatory Data Applied to the Inland Sea, Japan. Marine Technology Society Journal, 52(3), 120-127.
- Tsuji S, Yamaoka K, Ikuta R, Kunitomo T, Watanabe T, Yoshida Y, Katsumata A (2018) Secular and coseismic changes in S-wave velocity detecting using ACROSS in the Tokai region, EPS, doi.org/10.1186/s40623-018-0917-2
- Uyeshima, M., Hata, M., Ichihara, H., Yoshimura, R. and Aizawa, K. A progress report on the subsurface electrical resistivity structure obtained from the Network-MT survey in the vicinity of area with a forth-coming slow slip event in the SW part of the Shikoku Island, SW Japan, 24th EM Induction Workshop, Helsingoer, Denmark, 2018.

南海トラフ巨大地震の災害軽減

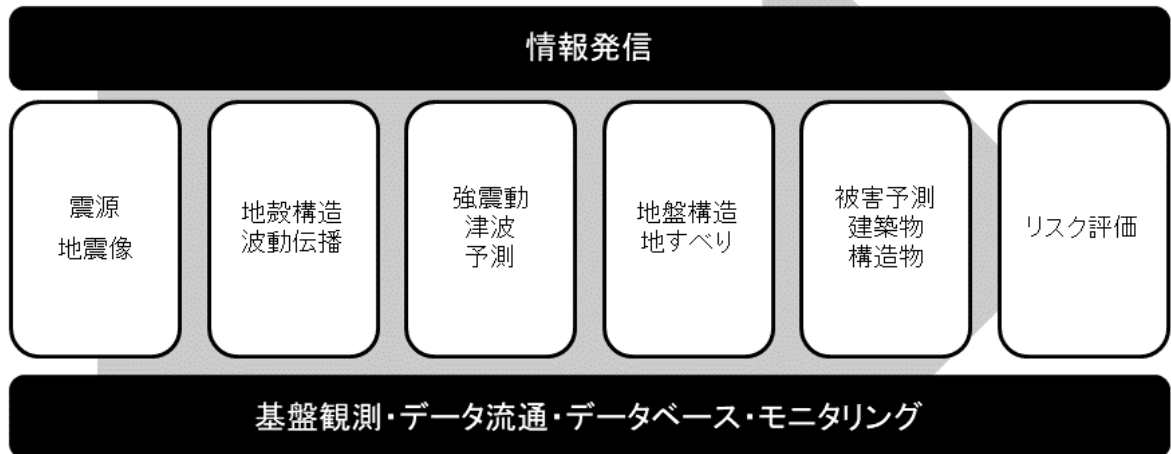


図1. 南海トラフ巨大地震総合研究のスキーム

表 1. 第 1 回研究集会での発表

| | 発表タイトル (課題番号) | 発表者 (所属) | 備考 |
|----|--|--------------------|-----------|
| 1 | プレート境界すべり現象モニタリングに基づくプレート間カップリングの解明 (1509) | 蔵下英司 (東大・地震研) | 震源 |
| 2 | 南海トラフ域における巨大地震断層域の力学・変形特性の把握 (1703) | 山岡耕春 (名大) | 震源 |
| 3 | 古文書解読による南海トラフ巨大歴史地震像の解明 (1701) | 山中佳子 (名大) | 地震像 |
| 4 | 海溝型巨大地震の履歴とメカニズム解明 (5004) | 宍倉正展 (産総研) | 地震像 |
| 5 | 海域地震発生帯研究開発 (4002) | 仲西理子 (海洋研究開発機構) | 地殻構造 |
| 6 | 南海トラフ巨大地震の予測高度化を目指したフィリピン海スラブ周辺域の構造研究 (1904) | 澁谷拓郎 (京大・防災研) | 地殻構造 |
| 7 | 広帯域・高解像度強震動シミュレーションに基づく大地震の強震動評価の高度化 (1516) | 古村孝志 (東大・地震研) | 強震動 予測 |
| 8 | プレート境界巨大地震等の広帯域強震動予測に関する研究 (1911) | 関口春子 (京大・防災研) | 強震動 予測 |
| 9 | 強震動によって発生する地すべり現象の発生ポテンシャル評価と事前予測手法の高度化 (1912) | 千木良雅弘 (京大・防災研) | 地すべり |
| 10 | 地震リスク評価に関する不確実性～定量的評価に向けたプラットフォームの構築～ | 西嶋一欽 (京大・防災研) | リスク 評価 |
| 11 | 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の枠組み | 川瀬 博 (京大・防災研) | 拠点間 連携 |

表 2. 第 2 回研究集会の発表

| | 発表タイトル (課題番号) | 発表者 (所属) | 備考 |
|---|---|--------------------|------------|
| 1 | 海底地殻変動観測による南海トラフ巨大地震の固着域の推定 (8001) | 石川直史 (海上保安庁) | 震源 |
| 2 | 南海トラフ巨大地震のシミュレーション (4002) | 堀 高峰 (海洋研究開発機構) | 震源 地震像 |
| 3 | スロー地震と巨大地震の相互作用 (3002) | 松澤孝紀 (防災科研) | 震源 |
| 4 | 海溝軸近傍での海底地殻変動観測 | 太田雄策 (東北大学) | モニタ リング |
| 5 | DONETによるモニタリングの現状と展望 (4001) | 高橋成実 (海洋研究開発機構) | モニタ リング |
| 6 | 南海トラフ巨大地震の研究において理学コミュニティに期待すること - 効果的な災害対応, 復旧・復興のために - | 牧 紀男 (京大防災研) | 拠点間 連携 |
| 7 | 拠点間連携共同研究 (南海トラフ) のH27年度成果 | 松島信一 (京大防災研) | 拠点間 連携 |

表 3. 第 3 回研究集会の発表

| | 発表タイトル (課題番号) | 発表者 (所属) | 備考 |
|---|--|--------------------|------------|
| 1 | 史料地震学でみた南海トラフ巨大地震の発生履歴の問題点 | 石橋克彦 (神戸大) | 地震像 |
| 2 | 南海トラフ地震の規則性・不規則性とその課題 | 古村孝志 (東大地震研) | 地震像 |
| 3 | 固着の剥がれ方の多様性と大地震の発生 | 加藤愛太郎 (東大地震研) | 震源 |
| 4 | 南海トラフ域でのモニタリングと推移予測のための不均質構造モデル構築と解析手法の高度化 | 堀 高峰 (海洋研究開発機構) | モニタ リング |
| 5 | 次の南海トラフ巨大地震発生前・時・後に何が起きるのかをモニタリングする調査観測 | 平原和朗 (京大理) | モニタ リング |
| 6 | 巨大地震による強振動予測のための強振動生成領域に対する距離減衰式の適用 | 宮澤理稔 (京大防災研) | 拠点間 連携 |

表 4. 第 4 回研究集会での発表

| | 発表タイトル | 発表者 (所属) | 備考 |
|---|---|---------------------------------|-------------------|
| 1 | 南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト (文部科学省科学技術試験研究委託事業) | 平原和朗 (理研) 堀 高峰 (海洋開発研究機構) | |
| 2 | 海陸地殻変動観測データに基づく南海トラフ沿いのプレート間固着分布 | 西村卓也 (京大防災研) | 震源 |
| 3 | 南海トラフ巨大地震の予測高度化を目指したフィリピン海スラブ周辺域の構造研究 | 澁谷拓郎 (京大防災研) | 地殻構造 |
| 4 | 大阪盆地, 奈良盆地の地盤構造モデルとプレート境界地震の強震動震源モデル | 関口春子 (京大防災研) | 地盤構造 強震動 予測 |
| 5 | 南海トラフ巨大地震の地震被害リスク評価に関する拠点間連携共同研究の成果 | 松島信一 (京大防災研) | 拠点間 連携 |
| 6 | 次期計画における南海トラフ巨大地震総合研究グループの役割 | 宮澤理稔 (京大防災研) | |

2 (3) 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
(東京大学地震研究所)

1. はじめに

首都直下地震については「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について(建議)」の中で、災害科学の発展に着実に貢献できることや、発生した場合の社会への影響の甚大さを考慮して、総合的な研究として優先して推進するとされている。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の3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かった。そのため、3つの分野に存在している研究課題の中から、首都直下地震に関連した研究成果を集めて統合し、社会的にも重要である首都直下型地震による災害の軽減につなげることが、本総合研究グループの目標であるとした。

2. 5年間(平成26年-30年度)の成果

(1) 5年間の成果の概要

大学や気象庁・国土地理院・防災科学技術研究所等の各機関は、首都圏においても基盤観測網の維持・拡充を行い、安定的にデータを流通させてきた。その結果、これらの基礎的なデータは、国内外の多くの研究に利用され、多くの成果を得ることに貢献してきた。

速度構造、震源分布、断層パラメータ等の推定によって、関東平野の下に沈み込むフィリピン海プレート内で発生する孤立的な地震の多くは、周辺と温度構造や応力状態に特別な差異が見られないことから、スラブ内の局所的な含水化が原因であると推測された。2014年に房総沖で発生したスロースリップ(SSE)に対する観測とシミュレーションによって、SSEの発生が、ある条件下の速度・状態依存摩擦構成則によりモデル化できることが示された。

関東平野に入射する表面波について、震源の放射指向性の影響と堆積平野の3次元構造による複雑な表面波増幅・伝播特性の影響の二つについて地震波シミュレーションを行い、長周期地震動の生成・増幅特性の方位依存性を明らかにした。首都圏に多く存在する丘陵地帯を切り拓いて作った造成地では、地震動によって地すべり現象を引き起こす可能性があるため、そのような地域での増幅特性を見積もった。地震動の推定に必要な地下構造の分解能を知るために臨時観測を行ったところ、約100m間隔の近距離でもゆれの振幅比が約2倍になる場合があった。また、安政江戸地震における文献や絵画を検討し、余震が続く中での避難方法や避難場所、幕府側の施策、余震の発生状況や気象条件に起因する避難状況の変化などが明らかになった。過去にプレート境界で発生した地震の履歴と隆起パターンなどを復元することで、関東地震の多様性を評価した。

(2) 基盤観測網の維持・拡充

全国の大学だけでなく気象庁・国土地理院・防災科学技術研究所等の機関は、首都直下地震の研究に必要な基盤観測網の維持・拡充を進めた。それらの基礎的なデータを継

続的に安定して取得するために、膨大なデータを効率的に流通させるためのシステムを構築してきた（東大地震研 [課題番号：1518]，国土地理院 [課題番号：6005, 6006, 6012]，気象庁 [課題番号：7012, 7014, 7020]，海上保安庁 [課題番号：8001, 8002, 8004]）。

（３）首都直下地震の解明のための研究

首都直下地震は、統一した地震像が示されていないため、関東地方の平野部に存在する活断層で発生する地震、沈み込むプレートの境界部分で発生する地震、沈み込むプレート内で発生する地震などが考えられている。本計画では、沈み込むプレート内で発生するプレート内地震に関する研究課題において、関東平野下のP波減衰構造を推定し、フィリピン海プレートのマントル東端部で、顕著に高い減衰を示すことを明らかにした。この高減衰域の広がりには蛇紋岩化していると解釈されている地震波低速度の領域とほぼ一致する。一方、高精度震源分布と断層パラメータの推定によって、相似地震のグループ毎の断層面がお互いに重ならず相補的であることや起震応力場が空間的に大きく変化していることを明らかにした。また、伊豆半島の北方で孤立して発生する地震群は、震源および推定された発震機構解から、その多くがプレート内で局所的に発生していたことがわかった。周辺と温度構造や応力状態に特別な差異が見られないことから、局所的な含水化が発生原因であると推測された（東北大 [課題番号：1201]）。

（４）首都直下地震の予測のための研究

首都直下のプレート境界部分で発生する地震に関しては、地震活動や地殻変動を詳細に観察することによって、プレート間の固着状態をモニタリングしようとする試みがなされてきた。本計画の実施期間中の2014年に房総半島沖でSSEが観測され、それに伴って発生した地震活動や地殻変動から、SSEの発生に関する研究が進められた。

房総半島沖のSSEは、これまで約6年の間隔で発生していたが、2011年の東北地方太平洋沖地震の発生によって、発生間隔が乱された可能性がある（東大地震研 [課題番号：1509]）。一方で、小繰り返し地震によるすべりの調査によると、SSEの発生間隔は、東北地方太平洋沖地震によって短くなったものの、その後、元の発生間隔に戻りつつあると考えられる（東大地震研 [課題番号：1510]）。2014年のSSEに関して、傾斜変動データおよびGNSSデータを用いて断層モデルを推定した所、すべり域はこれまでのSSEにおけるすべり域と重なるが、地震モーメントは約半分と小さく推定された（防災科研 [課題番号：3002]）。過去のSSEについても解析を行い、SSEの規模や破壊過程はイベントごとに大きく異なることが示された。特に、2018年に発生したSSEは、2011年のSSEと比較して、地表変位は房総半島中部ではほぼ同程度であるが、北部ではやや大きく、房総半島で観測されたSSEとしては最大規模であると推定された（東大地震研 [課題番号：1509]）。

房総半島沖SSE発生時のフィリピン海プレート上面におけるすべり・すべり速度の時空間発展を、臨時観測点を加えたGNSS時系列データを用いて、時間依存インバージョン解析により推定した。この推定結果と地震活動の時間変化とを比較すると、群発地震活動がSSEによる応力変化によってトリガーされたことが示唆される。さらに、推定されたSSE発生時のすべりや応力の時空間発展を速度・状態依存摩擦構成則に基づいてモデル化した。すべり速度をインバージョン解析からの推定値に固定し、摩擦パラメータ等を未知パラメータと

仮定して摩擦構成則の式を数値的に計算し、インバージョン解析から求められた応力の時空間変化を再現できるような摩擦パラメータ等を推定した。応力の時空間変化は速度・状態依存摩擦構成則で良く説明でき、推定されたパラメータからSSE発生域における臨界断層長は30～50km程度と見積もられた。推定されたSSEのすべり域の半径は臨界半径と同程度かそれよりもやや小さくなり、これはSSEの発生が条件付安定の摩擦特性に支配されていることを示唆する（Fukuda, 2018）（東大地震研 [課題番号：1509]）。

（5）首都直下地震の災害誘因予測のための研究

将来発生が予想されている首都直下地震による強震動や長周期地震動の事前予測の高度化を図った。関東平野における長周期地震動の生成・増幅特性には方位依存性があり、その原因として、震源から関東平野に向けての表面波の放射指向性の影響、堆積平野の3次元構造による複雑な表面波増幅・伝播特性の影響の2つが考えられた。まず震源からの放射特性の影響を評価するためにシミュレーションを行い、都心部での速度応答スペクトルの強度を比べた。その結果、関東平野を伝播する表面波は、2004年新潟県中越地震では強く、2011年福島県浜通りの地震では弱かった。また、長周期地震動に関しては、中越地震では、断層の走向を変えてもあまり変わらないが、浜通りの地震では走向の変化による変動が大きく、発震機構に敏感であることがわかった（東大地震研 [課題番号：1516]）。

次に、関東平野の3次元堆積層構造と長周期地震動の増幅の方位依存性を検討した。中越地震では、関東平野の深い溝状構造で表面波が焦点を結ぶように集まり増幅すること、および、山地を伝わって屈折してきた表面波が合流するため長い波群を作り出すことが確認できた。一方、浜通りの地震では、筑波山付近の浅く緩い堆積層構造を通して平野に入射する際に波面が拡散することで振幅が小さくなること、および、揺れの継続時間も短くなることが確認できた。この特徴は、同じ方位で発生する他の地震でも見られ、関東平野で一般的な現象である（東大地震研 [課題番号：1516]）。

大地震の震動による地すべり現象は災害要因の一つであるが、首都圏では丘陵地帯を切り拓いて作った造成地に多くの住居があることから、そのような地域の増幅特性を見積もった。人工的に改変された盛土では、S波の上下動成分の10Hz前後に顕著な増幅が見られ、揺れの大きさは地山に比べて約3倍に増幅することがわかった。大正関東地震の時に地滑りが発生した地域の調査を行い、一回の地震ですべての地すべりが生成されたのではなく、繰り返す地震によって何度も発生していることが分かった。そのような地域では、今後も地滑りが起こる危険性があることが示唆された。さらに、甚大な地すべり被害を引き起こす降下火砕物について、航空レーザー計測データを活用して分布域を推定し、ハザードマップに反映させる手法の試案をとりまとめた。関東地方南西部の降下火砕物の分布しているところでは、大正関東地震などによって流動的崩壊が多数発生したことがわかった（京大防災研 [課題番号：1912]）。

地震動の推定を行う際には、地盤や地下構造の不均質を知る必要がある。地盤による差が、どの程度の分解能で表れるのかを知るため、約100m間隔の近距離で地震計を設置したところ、観測された地震波形の振幅比が約2倍になる場合があった。揺れの推定には、より高分解能な構造の違いを考慮する必要があることを確認した（東大地震研 [課題番号：1514]）。

首都圏全体に被害を及ぼすような首都直下地震は、大正関東地震を除いて、地震計によって観測されたことが無いため、明確な地震像は得られていない。そのため、歴史資料や地質情報等などに基づく検討がなされた。現代とは異なる社会状況の下で発生した災害への対応を読み解くことにより、今後の防災・減災施策や復興計画などの検討に資する材料を提示することができる。安政江戸地震（1855年）における文献や絵画を検討し、余震が続く中での町人の避難方法や避難場所、幕府側の施策、余震の発生状況や気象条件に起因する避難状況の変化などが明らかになった。江戸市中での被害と復興の様子を描いた絵巻「江戸大地震之図」（島津家文書）の舞台が薩摩藩芝屋敷の周辺であることが判明し、基本史料として用いることが可能となった（東大地震研 [課題番号：1513]）。

また、過去の関東地震の履歴と隆起パターンなどを復元することにより、関東地震の多様性を評価した。房総半島南部千倉低地の海岸段丘について、ボーリングコア試料の解析から離水年代の再検討を行った結果、従来知られていた年代よりも全体的に新しくなった。さらに、房総半島九十九里浜において津波堆積物調査を実施し、これまで歴史上に知られていない津波の痕跡を検出した。房総半島南部の海岸段丘について、詳細DEM（数値標高モデル）の解析とボーリングコア試料の解析から段丘の分布パターンと離水年代の再検討を行った。その結果、段丘の区分と年代が更新され、再来間隔が非常にばらつくことが明らかになった（産総研 [課題番号：5004]）。

3. 平成30年度の成果の概要

首都直下地震の解明のための研究、首都直下地震の予測のための研究、首都直下地震の災害誘因予測のための研究に必要な基盤となる観測網の維持・拡充を進め、データを継続的に取得すると共に、膨大なデータを効率的に流通させるためのシステムを構築してきた（東大地震研 [課題番号：1518]、国土地理院 [課題番号：6005, 6006, 6012]、気象庁 [課題番号：7012, 7014, 7020]、海上保安庁 [課題番号：8001, 8002, 8004]）。

首都直下地震は、統一した地震像が示されていないため、関東地方の平野部に存在する活断層で発生するもの、沈み込むプレートの境界部分で発生するもの、沈み込むプレート内で発生するものが考えられている。沈み込むプレート内で発生する地震に関しては、東北地方中央部の太平洋スラブ上面で発生している地震の震源とメカニズム解を決定したところ、正断層地震と逆断層地震が100 m以内という非常に近接した場所で発生していることが明らかになった。この結果は、沈み込むプレートのエクロジャイト化に伴う体積減少によりプレート表面近くで正断層地震が発生するという従来の解釈を支持するものであるが、相転移による応力擾乱は極めて局所的であることを強く示唆している。中部地方下の深発地震（深さ約350 km）の波形解析により発見された二つの相似地震グループは、数百mから数km離れた一つの断層面上で発生していた。深発地震が既存の弱面の再活動で発生していることを強く示唆している（東北大 [課題番号：1201]）。

千葉・茨城で行っている臨時観測点と周辺の観測点のデータを解析し、2018年6月～7月に房総半島でSSEによると考えられる地殻変動が起きたことが分かった。2011年のSSEと比較して、地表変位は房総半島中部ではほぼ同程度であるが、北部ではやや大きく、房総半島で観測されたSSEとしては最大規模であると考えられる。過去のSSEの時空間発展をGNSS時系列データと改良型のNetwork Inversion Filterを用いて推定した結果、すべりの

加速様式，すべりの伝播方向，伝播速度など，すべりの時空間発展のイベント毎の共通性と違いが明らかになった。SSEの発生と同時に，地震活動や相似地震活動が増加したが，推定される滑り量は，過去に発生したものと同程度であった（東大地震研 [課題番号：1509, 1510]）。

大地震の際に平野で発生する長周期地震動の即時予測の実現に向けた，高速計算環境による観測データと高速シミュレーション同化の実現可能性を数値実験により評価した。データ同化手法には，震度や津波の即時予測で広く活用されている最適内挿法を用いた。データ同化は，領域内のK-NET, KiK-net強震観測データを用いて行い，地震発生から30, 50, 70, および90 秒までデータ同化を行った後に，高速計算により未来（地震発生から160 秒後）の長周期地震動を予測した。予測精度と猶予時間にはトレードオフがあるが，データ同化が進むにつれ，長周期地震動の振幅と継続時間が良く予測できることが確認された。評価領域外で発生した，2011 年東北地方太平洋沖地震においても本即時予測手法が適用できることを確認した。データ同化完了後に100 秒後の波動場の予測に要する時間は，東大と筑波大が共同運用するOakforest-PACS 計算機の並列計算（2048 CPU）で12.4 秒であった。これは，長周期地震動の伝播にかかる実時間よりずっと短く，観測データの取得に合わせて即時予測を繰り返し進め，予測の精度を高めることが可能である。差分法計算の解像度（格子サイズ）を2 倍に広げ，長周期地震動の評価対象を5.4 秒以上に限定すれば，より小規模の計算機システム（128 CPU 程度）でも同程度の時間で実施可能である（東大地震研 [課題番号：1516]）。

昨年度の臨時観測では，約100mしか離れていない観測点でも，ゆれの振幅が約2 倍になることを示した。今年度は，その観測領域を広げて，14ヶ所で臨時観測を行ったところ，ゆれの大きさの分布に特徴が見られた。近傍のボーリングデータと比較をしたところ，揺れの大きさは，浅部の地質構造との関係が深いことが明らかになり，揺れの推定には，より高分解能な地盤構造の違いを考慮する必要があることを確認した（東大地震研 [課題番号：1514]）。

安政江戸地震は，安政二年十月二日（1855 年11 月11 日）夜に発生し，関東地方南部に甚大な被害をもたらした地震である。薩摩の島津家に伝来した「江戸大地震之図」（東京大学史料編纂所蔵島津家文書）には地震に襲われた江戸市中の状況が描かれており，地震後に発生した火事で被害がさらに拡大した様子を見とることができる。関連する文献史料をあわせて検討した結果，絵巻にある火災の場面は，薩摩藩芝屋敷の北に位置し一町が全焼した町を描いたものと判断される。被災した屋敷や町など特定の場所を描いていると判明したことで，絵巻における被災状況の描写の史料的価値が認められ，地震に起因しない火災がたびたび起きていた江戸で，火災後に復興していく市中の様相を知るうえでもこの絵巻を史料として活用できる可能性が示された（東大地震研 [課題番号：1513]）。

房総半島南部の海岸段丘について，おもに平砂浦地域で地中レーダ探査および掘削調査を実施し，また詳細DEM の解析を行った（産総研 [課題番号：5004]）。

4. 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，総合的な研究として優先して推進するテーマの一つとさ

れてきた。ただ、本計画を作る最後の段階で、この考え方が示されたため、解明のための研究、予測のための研究、災害誘因予測のための研究の三分野に、広くまたがるような総合的な研究課題がなかった。そこで、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が、本総合研究グループの目標であるとしてきた。しかし、関連する研究課題数は多くはなく、総合的に研究を推進するという体制を組むこともできなかったため、それらの研究成果を統合させることができなかった。

そこで、今後は、首都直下地震の発生による被害を軽減させるために、どんな研究が必要なのかを検討するための体制づくりから始める必要がある。首都圏という人口の密集地および政治経済の中心地での大地震発生が、どのような複合的な被害を引き起こしてしまうのか、首都圏が被災するということが、日本全体に与える影響といった視点もスコープに入れるべきであろう。そのような、理学だけでは対応できない様々な研究分野を総合的に推進させるような体制が必要であると思われる。

具体的な研究課題は、首都直下地震として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行う。それらの地震が発生する場として、関東平野下の詳細な地盤構造やプレート構造を明らかにして、地震発生環境をモニターする研究を行う必要がある。さらに、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、新たな地震動の予測手法の開発を目指す。また、関東平野の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。そして、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ことが必要である。

成果リスト

- Chigira, M. & Suzuki, K. 2016. Prediction of earthquake-induced landslides of pyroclastic fall deposits. In: Aversa et al. (eds.) Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice. Associazione geotecnica Italiana, Rome, 93-100. Invited paper.
- Fukuda, J., 2018, Variability of the space-time evolution of slow slip events off the Boso Peninsula, central Japan, from 1996 to 2014, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, doi:10.1002/2017JB014709.
- Furumura, T., Maeda, T., and Oba, A. (2019), Early forecast of long - period ground motions via data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations, *Geophysical Research Letters*, <https://doi.org/10.1029/2018GL081163>.
- Igarashi, T., Aseismic slip histories inferred from sequences of small repeating earthquakes beneath the Boso Peninsula, central Japan, American Geophysical Union Fall Meeting, T33F-0481, Washington, D.C., 2018.
- Komori, J., Shishikura, M., Ando, R., 2017, History of the great Kanto earthquakes inferred from the ages of Holocene marine terraces revealed by a comprehensive

drilling survey, *Earth Planetary Science Letters*, 471, p74-84.

Nakajima, J., and N. Uchida, Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip, *Nature Geo-science*, 11, 351-356, doi:10.1038/s41561-018-0090-z, 2018.

2 (4) 桜島火山噴火総合研究

「桜島火山噴火」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)

桜島噴火総合研究グループは、桜島火山におけるマグマ活動発展過程の研究を中核として、ミュオグラフィーなどの新手法を適用しつつ、火山現象を解明し、低頻度大規模現象の再考も含めた事象分岐論理の構築と火山灰拡散予測研究を行うことにより最終的に火山災害軽減研究を推進する。

5年間の成果

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

桜島大正噴火の前駆地震の震度から、マグニチュードおよびエネルギーを算出し、前駆地震全体のエネルギーを 1.3×10^{14} Jと推定した。また、噴火開始後ではあるが、最大地震の桜島地震の震源位置を鹿児島測候所から南南東方向約6kmの鹿児島市街地沖の極浅部に推定した。さらに、この地震のメカニズムを検討し、桜島の南西沖5kmの深さ10kmの正断層のメカニズムが最も観測波形と適合することを示した。

(5) 火山現象のモデル化

近年の桜島の活動を以下にまとめる。

昭和火口における噴火は2006年6月4日に58年ぶりに発生した。まず、桜島昭和火口噴火の前兆現象について述べる。1955年から繰り返されていた南岳におけるブルカノ式噴火活動は2001年以降低下したが、2003年からA型地震が南西部の深さ6-9kmや若尊火山周辺で発生するようになり、地震活動が高まった。また、2004年10月～2005年2月にかけて、GNSS観測によって基線長の顕著な伸長が観測された。2006年に入り、昭和火口周辺の噴気活動が高まるとともに、地表面の温度上昇と熱異常域の拡大が検出された。

次に、噴火活動の推移について述べる。2006年6月4日に始まった昭和火口における噴火は約2週間続いて終息した。2007年も5月から約3週間同様な噴火が発生した。2006年と2007年の噴火はマグマ水蒸気噴火であった。

2008年2月3日と2月6日に火砕流を伴う噴火が発生し、2008年は7月28日まで噴火が間欠的に発生した。2008年2月の噴火の前には、昭和火口周辺の噴気活動が活発化し、白煙は約1kmの高度に達した。

2009年から昭和火口におけるブルカノ式噴火活動が活発化し、噴火活動期は2015年6月頃まで続いた。この間に噴火活動の消長が見られるが、噴火活動活発化とほぼ期を同じくして顕著な地盤の膨張が検出されるという特徴がある(2009年10月～2010年5月, 2011年11月～2012年2月, 2015年1月～6月)。マグマ貫入と同時に噴火活動が活発化するの、開口型火道へのマグマ貫入の特徴といえよう。

2015年8月15日には急速な地盤変動と火山性地震の群発現象が発生したが、噴火活動に直接的に結び付かなかった。先に述べた開口型火道へのマグマ貫入では、等方的な膨張が

見られるのに対し、2015年8月15日の地盤変動では、北西-南東方向への伸長が卓越することから、北東-南西方向に走向をもつ開口割れ目へのマグマの貫入モデルが提示された。

その後、昭和火口における噴火活動は著しく低下した。2017年4月以降に、噴火発生回数は持ち直したが、2017年11月以降は、南岳において噴火活動が発生するようになり、昭和火口の活動は停止した状態にある。

このような活動の下でデータの蓄積が進んだ結果、以下の知見が得られた。

[1]昭和火口において発生する個々の噴火の約90%について前駆する山体膨張と噴火に伴う収縮が観測された。噴火発生に先行する伸長時間、伸長量、伸長量と収縮量の比について統計解析を行ったところ、先行伸長継続時間の頻度、伸長量および伸長速度の頻度、伸長量と収縮量の比の頻度は対数正規分布を示す。これらのことは、爆発に先行する伸長継続時間から発生時刻を、また、膨張量から爆発の規模を確率的に予測することが可能であることを意味する。さらに、噴火発生に先行する伸長ひずみは時間の経過とともに減速、停滞することが多い。この時、BH型地震（卓越周波数5Hz）が加速度的に多発する場合があるので、この場合は、噴火発生時刻の予測が可能となる。

[2]GNSS、水準、傾斜・ひずみの複合的地盤変動観測から、昭和火口噴火活動期の地盤変動は、始良カルデラ下深さ10kmと北岳下4kmの2つの増圧源および南岳下1kmの減圧源によりモデル化された。始良カルデラおよび北岳にはマグマは供給され体積が増加したが、噴火口に近い南岳下では活発な噴火活動を反映して供給量を放出量が上回りマグマの体積が減少した。

[3]2009年～2016年に、反射法探査を毎年繰り返すことにより、始良カルデラから桜島へのマグマの供給路があるとされる桜島北東部において、2009年10月以降の高温で新鮮なマグマ貫入によるマグマ溜まりの速度低下と解釈できる地下構造の時間変化を検出した。人工地震探査に加え、地震波干渉法による地下構造の変化の抽出を試み、波形の相関係数の変化が捉えられつつある。

[4]2009年のマグマ貫入期に先行して同年4月～5月には昭和火口の東4kmにある黒神観測井の温泉ガス中の二酸化炭素および水素の濃度が急激に増加した。これは、2009年のマグマ貫入期に先行する唯一の現象である。また、2009年10月～2010年5月、2015年1月～6月のマグマ貫入期には、噴出物のガラス中の二酸化ケイ素の組成は低下し、玄武岩マグマの関与が指摘されている。火山灰に付着する塩素イオンと硫酸イオンの比は2009年10月以降のマグマ貫入期に対応して増加した。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

先に述べた昭和火口の噴火活動期において得られた知見に、1914年大正噴火、1946年昭和噴火、1955年～2005年の南岳山頂噴火に関する考察を加えることにより、桜島火山へのマグマの貫入速度を分岐条件とする経験的な噴火事象分岐論理を構築した(図1)。南岳を中心とする既存火道系へマグマが貫入する場合は、ブルカノ式噴火($1-8 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$) > 連続火山灰放出($\sim 1 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$) > ストロンボリ式($0.2-2 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$) 噴火の順にマグマの貫入速度が大きい。昭和火口のブルカノ式噴火はこれらよりもさらに小さく $10^4 \text{m}^3/\text{日}$ の

オーダーに過ぎない。ただし、溶岩噴泉のような噴火に至る前は、 $10^5\text{m}^3/\text{日}$ のオーダーに達し、さらに昭和噴火のような2億 m^3 級溶岩流出では、 $10^6\text{m}^3/\text{日}$ のオーダーと推定される。一方、新規火道を形成する場合、 $10^6\text{m}^3/\text{日}$ 級のマグマ貫入では、噴火は発生していない(2015年8月15日マグマ貫入イベント)が、プリニー式噴火から始まる山腹噴火である大正噴火では、マグマの貫入速度が $2 \times 10^8\text{m}^3/\text{日}$ と推定された。地盤変動がほとんど検出できていない場合(2006年、2007年昭和火口噴火)は、温度上昇、噴気量の増加などが指標として考えられる。この場合の噴火様式は、水蒸気噴火もしくはマグマ水蒸気噴火である。

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

降下火山灰の即時予測手法として以下の成果が得られた。[1] 桜島の火口を取り巻くように設置された13台のディストロメータによって降下火山灰量及び密度がリアルタイムで把握できるようになった。[2] XバンドMPレーダーによって、霧島新燃岳、桜島、口永良部島、諏訪之瀬島の噴火に伴う噴煙の高度等の外形情報、噴煙柱形成、移流・拡散過程が把握できた。特に、冠雲によって噴煙が目視できない時でも、レーダーにより噴煙を可視化できるので、悪天候時における有効性が示されたといえる。光を使用するライダー観測は極めて希薄な噴煙も捕捉できるところに特徴がある。静穏時でも微小な火山灰粒子を含む白煙が放出されていることが確認され、偏光解消度から粒子の形状が推測可能であることが示された。火山噴火の噴煙をGNSS衛星からの電波が通過する際に、搬送位相遅延量とSNRに顕著な変化があることが桜島、阿蘇山の噴火で検出され、衛星と受信機を結ぶ異常伝搬経路の交線から噴煙高度が推定された。[3] XバンドMPレーダーによって観測された桜島噴火の噴煙の反射強度の空間分布を地上降灰量分布と対比することにより、レーダー反射強度から地上降灰量を求める経験式が得られた。[4] PUFFモデルを用いたシミュレーションによって得られる降下火山灰予測量と観測データを対比して、良好な結果が得られた。[5] 噴火に伴う地震動振幅と地盤変動の線形結合から火山灰放出率と噴煙高度を決定し、それを入力条件とする火山灰拡散予測シミュレーションを実装した(図2)。

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

噴火活動が激化している桜島において、火山噴火予知研究成果をレビューするセミナーを開催するとともに、噴火事象系統図にリストアップされる桜島の噴火の規模と様式について、前駆活動及び火山噴火推移の事象の発現に沿った避難計画策定の可能性について検討した。前兆事象と噴火規模・様式との対応は上記2.(4)に述べたとおりである。これまでの観測研究から、始良カルデラにおけるマグマの蓄積量は、最近10年間で1914年の大正噴火のマグマ量に匹敵する量に達していることが明らかとなっている。したがって、防災対策を要する噴火規模としては、まず、大正噴火級を想定した。大正3年の噴火に前駆する活動では火山性地震のエネルギー積算量が 10^{14}J に達するなど、顕著な違いが見られるので、地震エネルギー積算量は前兆事象と噴火規模・様式との対応において判断条件となる。大正噴火前の住民の証言から噴火に至る前駆過程を考察し、それに基づいたシナリオに沿って自治体の机上防災訓練が行われた。

本研究課題においては、現在の避難計画でも1914年大正噴火級で避難が必須とされる桜

島島内よりもさらに広域における大量降灰からの避難について5年間かけて検討した。まず、対象区域において広域避難を実施する場合の対象人口及び避難に要する時間を算出した。その後、住民の避難意向アンケートを実施し、避難する住民の人口を限定したうえで、シミュレーションを行い。長距離避難の意向を持つ20%の住民が避難するのに要する時間は約5時間という結果を得た。一方、大量降灰を想定した避難の場合、影響を受ける区域とその人口は気象条件に大きく依存する。最近の長期間の気象条件を考慮したシミュレーションを行い、夏季において対象人口が大きく増加する結果を得た。

さらに、噴火災害時における早期復旧計画についても検討した。2011年霧島新燃岳噴火について、降灰量と道路の通行規制の有無の関係を機能的フラジリティ曲線で近似し、降灰量に対する通行規制の確率分布を求めた。これを用いて、噴火による交通量の初期低下率を把握することが可能となる。さらに、道路の清掃時間、交通量、交通量の低下率の積をすべての道路について足し合わせたものを目的関数として、最適な交通ネットワークの復旧分析を行った。ここで得られた機能的フラジリティ曲線は他の火山にも応用可能であり、噴火発生前のハザード評価に活用できる。

平成30年度の成果

今年度の成果として特筆すべきものとして以下の事項があげられる。①火砕流の発生は、地盤変動の収縮期（マグマからの脱ガスが進行した一連の活動期の後半）に多いことが指摘できた。②2015年8月15日の開口割れ目へのマグマ貫入に伴う火山性地震について、震源域の深部への延伸と開口割れ目の開口方向に整合的なメカニズム解が得られた。③XバンドMPレーダーによる観測により、口永良部島などの噴煙観測事例が充実してきた。④大規模噴火を想定した際の要避難人口の既設依存性が指摘できた。

これまでの課題と今後の展望

始良カルデラでの地盤の隆起は依然として続いており、今後10～20年で、1914年噴火時に沈降した地盤は噴火直前の状態に回復すると予想される。噴火ポテンシャルとしてはすでにVEI5級の噴火の発生が指摘できるので、大規模噴火の直前の変化を捉えることが最も重要である。1914年噴火の前には、南九州における地震活動が活発化したとされており、噴火が近づくとつれ、異常現象が把握される範囲が局在化し、強度を増した。始良カルデラから50km程度の範囲の下部地殻・上部マントルの深さまでの地震活動の推移の検討や、桜島北東部および南西部における詳細な地盤変動の観測が必要である。

平成26年から30年までの計画においては、桜島で発生している昭和火口の噴火を念頭に、降下火山灰の影響の即時予測を行ってきた。今後、発生する噴火の規模をVEI4または5級に設定するのであれば、多様な災害形態を考慮しておく必要がある。代表的なものに火砕流と溶岩流があげられる。火砕流の発生予測についても現計画でも研究を行っているが、ハザードとしては、火砕流の流下範囲の予測に広げていく必要がある。また、噴火が終息しても土石流の発生は続くので、土石流の発生予測の研究も必要である。特に、大規模噴火を想定すれば、土石流の発生域は桜島から周辺30km程度の距離まで広がると思われるので、これまで土石流の発生が想定されていない地域においても土石流ハザードの評価が必要である。実際、1914年噴火後には大隅半島の広い範囲で土石流や洪水が頻発している。

広域避難については、現計画においても取り扱っているが、避難の方法などより高度化した避難に関する研究が必要である。重要なことはインフラの復旧方法など、レジリエンスに関する研究である。すでに降灰後の道路啓開など、火山灰除去に関する問題は行政も注目しており、効率的な火山灰除去順序などを提案していく必要がある。特に、交通網においては、道路だけでなく、鉄路、航空機、海上交通など多岐にわたり、その特性を考慮した研究が必要である。航空路が影響を受けやすい広域火山灰の拡散については、日本全土に及ぶ可能性も十分あり、火山災害を特定の地域の問題として片づけるわけにはいかないであろう。

大規模噴火の発生は決して桜島だけの問題ではない。ここでは、住民の避難を必要とする規模の噴火と定義しなおしてよい。火山噴火予知計画が開始された1974年以降でも住民の避難が実施された火山は、十勝岳、有珠山、伊豆大島、三宅島、雲仙岳、桜島、口永良部があり、決して特殊事例とは言えない。桜島の大規模噴火では火山と都市域の問題があげられるが、完全な離島である伊豆大島、三宅島、口永良部島では状況が異なる。最近、中山間地での避難の例はないが、今後その必要が生じることは、十分考えられる。地理的、社会的環境による対策の違いなど幅広い研究をめざす必要がある。

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 the Sakurajima volcano, Scientific Reports, doi:10.1038/s41598-019-38494-x.
- 堀田耕平・井口正人, 2018, 2017年の南岳爆発に前後する傾斜ひずみ変化, 京都大学防災研究所年報, 61B, 324-329.
- 井口正人・中道治久・為栗 健・堀田耕平・園田忠臣, 2018, 2017年8月桜島溶岩噴泉活動に伴う地震活動及び地盤変動, 京都大学防災研究所年報, 61B, 318-323.
- Iguchi, M., 2018, Volcanic Activity of Sakurajima Monitored Using Global Navigation Satellite System, Journal of Disaster Research, 13, 3, 518-525, doi:10.20965/jdr.2018.p0518.
- 風間卓仁・山本圭吾・平良真純・大島弘光・前川徳光・岡田和見・園田忠臣・井口正人, 2018, 桜島火山における繰り返し相対重力測定(2017年5月~2018年2月), 京都大学防災研究所年報, 61B, 330-336.
- Muramatsu, D., K. Aizawa, A. Yokoo, M. Iguchi, T. Tameguri, 2018, Estimation of Vent Radii From Video Recordings and Infrasound Data Analysis: Implications for Vulcanian Eruptions From Sakurajima Volcano, Japan, Geophysical Research Letters, 45, 12829-12836, doi:10.1029/2018GL079898.
- Murata, T., M. Iguchi, 2019, Deep Modular Multimodal Fusion on Multiple Sensors for Volcano Activity Recognition, Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases, doi:10.1007/978-3-030-10997-4 37.
- 中道治久・井口正人・下村 誠・竹中悠亮, 2018, 南九州の火山における小型Xバンド偏波

- レーダーの展開と噴火観測事例, 京都大学防災研究所年報, 61B, 337-343.
- Poulidis, P., A., T. Takemi, A. Shimizu, M. Iguchi, S. Jenkins, 2018, Statistical analysis of dispersal and deposition patterns of volcanic emissions from Mt. Sakurajima, Japan, Atmospheric Environment, 179, 305-320, doi:10.1016/j.atmosenv.2018.02.021.
- Shimura, T., M. Inoue, H. Tsujimoto, K. Sasaki, M. Iguchi, 2018, Estimation of wind vector profile using a hexa-rotor unmanned aerial vehicle and its application to meteorological observation up to 1000 m above Surface, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 35, 8, 1621-1631, doi:0.1175/JTECH-D-17-0186.1.
- Syarifuddin, M., S. Oishi, H. Nakamichi, M. Iguchi, 2018, Spatiotemporal distribution of rainfall in mount Sakurajima based on weather radar, Annual journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 63, I 187-192.
- 為栗 健・井口正人, 2018, 桜島火山昭和火口で発生する火砕流の特徴, 京都大学防災研究所年報, 61B, 312-317.
- Tameguri, T., M. Iguchi, 2019, Characteristics of micro-earthquake swarms preceding eruptions at Showa crater of Sakurajima volcano, Japan, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 372, 24-33, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2019.01.016.
- Tanaka, L. H., M. Iguchi, 2019, Numerical Simulations of Volcanic Ash Plume Dispersal for Sakura-Jima Using Real-Time Emission Rate Estimation, Journal of Disaster Research, 14, 1, 160-172, doi: 10.20965/jdr.2019.p0160.

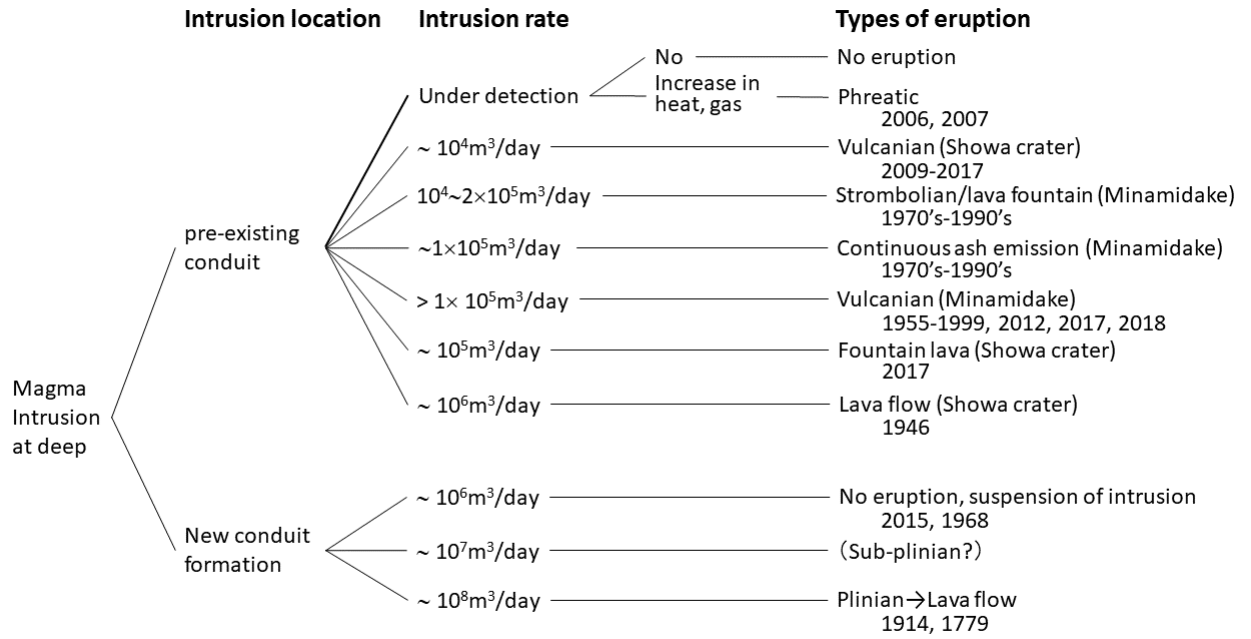


図1. マグマ貫入速度と噴火様式、規模との関係 (京都大学防災研究所 [課題番号: 1908])

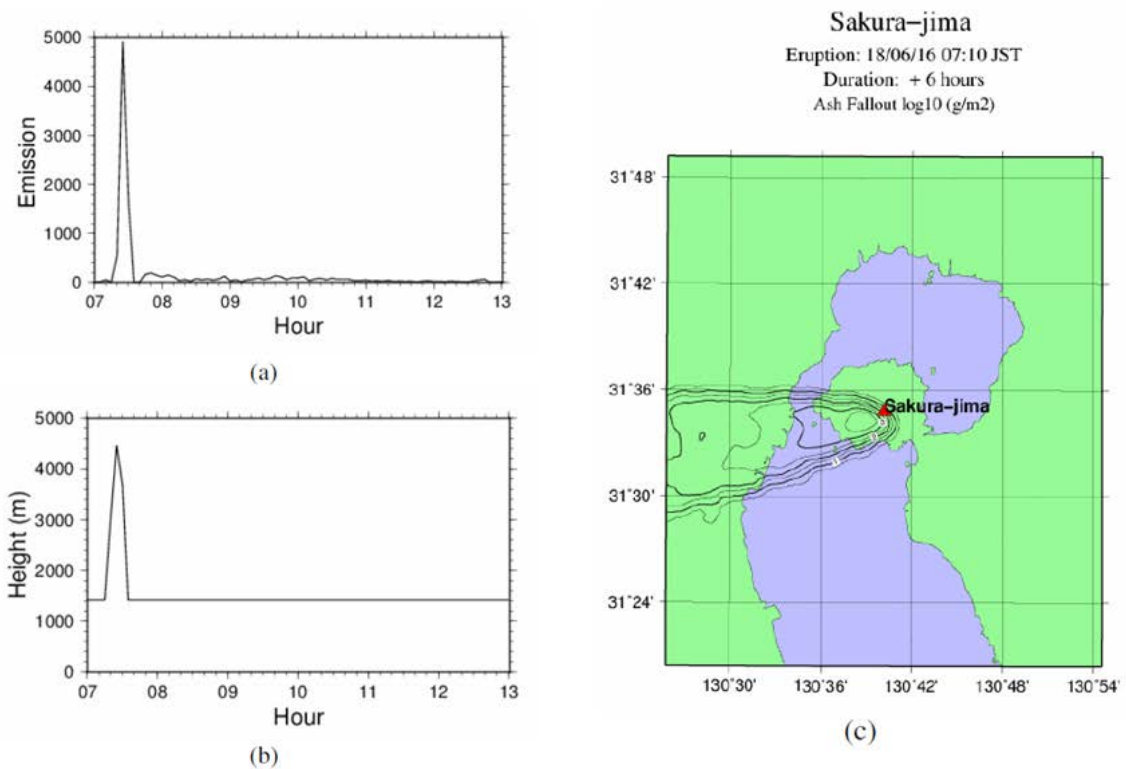


図2. 桜島南岳において発生した爆発により放出された火山灰の拡散シミュレーション。a: 地震動と空気振動から算出された噴出率, b: 経験式を用いて噴出率から算出された噴煙高度, c: 降下火山灰量。等高線は、単位面積当たりの降灰量 g/m^2 の対数を示す (京都大学防災研究所 [課題番号: 1913])。

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)
副部長 佐竹健治
(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「参加者募集型研究」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「課題募集型研究」を平成26年度から開始した。

1. 参加者募集型研究

5年間の成果の概要

参加者募集型研究については、平成26年度の拠点間連携共同研究の開始時に、主として両研究所の中堅研究者からなるワーキンググループで議論し、南海トラフで発生が懸念される巨大地震のリスク評価の精度向上を目指した様々な分野の研究を推し進めることが重要であると合意し、平成26年10月6日～7日に地震研究所で研究集会「地震・火山科学と総合防災学の両共同研究拠点主催シンポジウム 南海トラフ巨大地震の災害リスク評価ー社会の影響から地震発生まで振り返り、評価の不確実性と影響評価について考えるー」を開催した。そこでは、巨大地震の震源過程、震源から居住地域までの深部地下(地

殻)構造・波動伝播, 強震動, 浅部地下構造, 津波, 構造物等の特性をそれぞれの分野の専門家が議論して, それぞれの部分の想定や評価における精度や不確かさを議論するとともに, それらがどのように関連し, 最終的な被害につながるかの科学的なリスク評価方法の確立を目指すことを確認した。さらに, リスク評価に基づき, 事前の災害情報, 災害発生後の対応等のあり方など, 巨大災害の発生から災害発生後の対応まで, 巨大地震に伴い予測される一連の事象に関して, 防災・減災に向けて機能するための研究を発展させることを目指すことになった。主要テーマを「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」として, 全体の研究を, (1) 想定される南海トラフ地震の震源過程, (2) 深部地下(地殻)構造とそれが波動伝播に及ぼす影響, (3) 強震動予測手法の高度化, (4) 浅部地下構造が地震動に及ぼす影響, (5) 津波予測モデルと津波被害予測手法, (6) 構造物の被害予測手法の高度化, (7) 災害のリスク評価と意思決定, (8) 災害情報の外部発信とステークホルダの関与, (9) コンピュータシミュレーションを用いた新たな地震リスク評価手法の開発, の9分野に分け, それぞれの分野で研究を深化するとともに, 各分野の相互連携を図る地震リスク評価プラットフォーム構築を目指した。

平成27年度は, 上記9分野のうち, (7) 災害リスク評価と意思決定および(9) コンピュータシミュレーションを用いた新たな地震リスク評価手法の開発を特定分科研究とし, それぞれの分野の全国の研究者と協力して研究を進めるとともに, 他の7つの分野については総括研究として並行して推進し, 定期的に情報交換を行いリスク評価手法の構築に努めることとなった。平成28年度は, 前述の2分野に加え, (1) 想定される南海トラフ地震の震源過程および(6) 構造物の被害予測手法の高度化も特定分科研究とした。平成29年度は, 平成28年度に加えた2分野に(4) 浅部地下構造が地震動に及ぼす影響(巨大地震時における地盤増幅率の予測手法の高精度化)(拠点間連携共同研究[課題番号: 2990])および(3) 強震動予測手法の高度化(震源モデルに着目した巨大地震に伴う強震動予測の高度化)(拠点間連携共同研究[課題番号: 2991])を加えた4分野について特定分科研究を進めた。平成30年度は, 平成29年度に加えた2分野に, (8) 災害情報の外部発信とステークホルダの関与(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)(拠点間連携共同研究[課題番号: 2951])および(7) 災害リスク評価と意思決定(将来時点でのエクスポージャ予測のためのデータ解析とモデル化手法の構築)(拠点間連携共同研究[課題番号: 2952])を特定分科研究として推進した。各年度とも特定分科研究と並行して総括研究を推進し, 特定分科研究でえられた成果を総括研究に組み込むことで手法の高度化を図って来た。

平成27年度から平成30年度までの各年度において, 参加者募集型研究に申請された研究提案と参画グループについて, 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により審査され, 参加者募集型研究の趣旨に適合する研究提案・参画グループが採択された。

平成30年度の成果の概要

(1) 総括研究

総括研究(拠点間連携研究[課題番号: 2975])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」と題し, 平成29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。

震源過程および強震動予測について，南海トラフ巨大地震の震源像構築に関し一様な断層の滑りモデルから震源モデルの高度化を図るにあたり，強震動生成域を考慮した場合の強震動予測に関する問題点を整理した。深部地盤・伝播経路については，過去に南海トラフに沿った海域で行われてきた人工震源構造調査および自然地震観測の結果について，陸域の地震観測データと合わせて南海トラフ全域にわたる海陸統合した地震波速度構造の再解析が進められている。紀伊半島沖では新たに人工震源構造調査も進められ，また，自然地震観測が計画されている。これらの結果について検討を行い，さらなる構造解明のための観測計画について策定を行なった。浅部地盤構造については，公開地盤情報および過去の地震記録を用いて，地盤の強非線形性を厳密に考慮した逐次非線形地盤応答解析（非液状化解析および液状化解析）を多数実施した。その結果に基づき表層地盤の加速度増幅率を算出したところ，入力地震動のレベルに応じた増幅率の変化に加え，液状化解析の場合には液状化指数（PL値）や液状化危険度指数（LRI）といった液状化指標に増幅率が大きく影響されることがわかった。構造物被害予測について，1900年以前に建てられた古民家の引き倒し実験およびその解析を行い，その静的非線形挙動を把握した上で古民家の地震被害予測モデルを構築し，その妥当性について検討を加えた。リスク評価に関しては，特定の市区町村を対象に南海トラフ地震による影響を受けるエクスポージャ（戸建住宅）の情報を整備した。また，過去のエクスポージャの経時変化をもとに将来のエクスポージャを予測したうえで築年数に応じた地震脆弱性関数を適用し，将来の地震リスクの経時変化を評価した。また，西日本広域の震源データをアップデートし，確率論的地震ハザード解析の計算環境を整備した。プラットフォーム構築については，地震リスク評価のばらつきの要因について分析を行うとともに，評価に用いるモデルの違いによるばらつきの違いの公正な比較のための検討を行った。また，地震時の総合的な影響評価にむけて，病院建物の被害の程度による，医療行為に対する影響評価について地理空間情報を用いて評価した。災害リスク情報に関しては，災害リスク評価のばらつきを理解するため，様々な震源モデル（6パターン），強震動予測モデル（5パターン），表層地盤増幅率（3パターン），倒壊率を組み合わせ，評価結果のばらつきを容易に理解することが可能な表示システムの構築を行った（図1）。またばらつきのある災害リスク評価結果を防災計画の策定に活用するという観点から，命を守る，財産を守る，業務・生活・地域を守るという3つのレベルの達成目標に応じたハザードシナリオ選択の考え方についての整理を行った。

（2）特定分科研究

特定分科研究（その5）「巨大地震時における地盤増幅率の予測手法の高精度化」（拠点間連携研究〔課題番号：2990〕）では，技術者の特性に依存した解析パラメータのばらつきが地震応答特性の評価精度に及ぼす影響の検討の結果，解析パラメータの設定のばらつきの程度や，そのばらつきが解析結果に及ぼす影響について検討した。その結果，地盤だ

けでなく、解析全体のパラメータの設定方法を含めた議論が必要であり、機械的に地盤物性のパラメータを変更した場合は、同じ土質試験結果を対象に設定したパラメータであっても、技術者の違いにより大きな解析結果の違いが生じる場合があることが確認された。また、表層地盤構造のモデル化手法の統合解析による地盤増幅特性評価の高度化について検討した結果、微動アレイ探査結果に加えて表面波探査による高周波数帯域の位相速度も逆解析から第1層目の V_s が既往の研究に比べて小さく推定される結果となった。さらに、地盤の非線形性を考慮した表層地盤増幅率の評価法に関する検討では、非液状化解析により得られた地盤増幅率と周期比の関係では、周期比が0.5付近で、増幅率は最大値をとり、地盤増幅率の変動幅は、入力波が増加すると、小さくなる。また、液状化解析により得られた地盤増幅率と周期比の関係では、入力波が増加すると、地盤増幅率の変動幅は小さくなる傾向にあり、特に、入力地震動が800 galのとき、増幅率はおよそ0.5となった(図2)。液状化解析時の地盤増幅率を評価するために、液状化判定指標を用いた場合、地盤増幅率と液状化指数の大小関係には明瞭な対応は見られなかったが、有効応力減少比を用いて過剰間隙水圧を直接考慮できる液状化危険度指数を用いた場合、地盤増幅率の変動幅は液状化程度で分類できた。液状化解析時の地盤増幅率は、入力地震動に関わらず0から2.5の幅で変動する。液状化危険度指数が大きくなるとき、地盤増幅率の変動幅は0から1.5と小さくなる(図3)。

特定分科研究(その6)「震源モデルに着目した巨大地震に伴う強震動予測の高度化」(拠点間連携研究[課題番号:2991])では、観測された強震動生成域(SMGA)からのPGA、PGVと距離との関係を、前弧・背弧を考慮した距離減衰式(GMPE)と比較した。ただし、観測データがSMGAからの距離を用いているのに対して、比較するGMPEは断層最短距離が距離の関数として定義されている。2003年十勝沖地震では、観測されたPGAおよびPGVがKamae & Kawabe(2004)によって推定されたMw7.5相当のasperity(SMGA)からの地震波に起因するとして比較を行った。観測された地震動はPGA、PGVともにGMPEから予測される地震動よりも大きな値で、とりわけ近距離側でその差が大きかった。また本震のマグニチュードM8.3を用いて比較した場合、観測された地震動との誤差は小さくなったが同様の特徴が見られた。一方、2011年東北地方太平洋沖地震については、Kurahashi & Irikura(2013)によって5つのSMGAが推定されているが、そのうち対応するPGAとPGVが観測波形から明瞭に判別できる2つのSMGA(SMGA1:M7.55, SMGA3:M7.81)を比較するデータとして使用した。PGAは2003年十勝沖地震のケースと同様に、本震のマグニチュードM9.1を用いてもGMPEから予測された値が特に近距離側で過小評価となった。また距離減衰に関しては、観測された地震動が前弧側と背弧側で異なる傾きを持っているが、背弧側では特にGMPEで予測されるよりも強く減衰することが分かった。PGVについては、それぞれのSMGAのマグニチュードを用いた場合に過小評価となることが分かった。2011年東北地方太平洋沖地震によって各地で誘発された地震活動については、東北沖地震の発生前に震源域あるいはその周辺域において様々な地震活動変化があったことが明らかにされてきた。また地震発生から8年近くが経過し、地震発生直後には追いつかなかった膨大な数の地震に対する震源決定が進み、各地の地震活動変化に関する詳細な調査研究からその要因に関する考察がなされている。そこで東北沖地震の発生後に生じた地震活動変化について既往研究を交えながら概観し、それらの地震活動変化を引き起こした要因について整理した。

特定分科研究(その7)「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」(拠点間連携研究[課題番号:2951])では、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。したがって、防災計画を策定する場合には、災害リスク評価にばらつきが存在することを踏まえる必要がある。そのためには、災害リスク評価のばらつきを理解することが重要であり、また計画の目的に応じて適切な災害リスク評価結果を選択することが重要になる。本研究では、災害リスク評価のばらつきを理解するため、様々な震源モデル(6パターン)、強振動予測モデル(5パターン)、表層地盤増幅率(3パターン)、倒壊率を組み合わせ、評価結果のばらつきを容易に理解することが可能な表示システム(図1)の構築を行った。またばらつきのある災害リスク評価結果を防災計画の策定に活用するという観点から、命を守る、財産を守る、業務・生活・地域を守るという3つのレベルの達成目標に応じたハザードシナリオ選択の考え方についての整理を行った。

特定分科研究(その8)「将来時点でのエクスポージャー予測のためのデータ解析とモデル化手法の構築」(拠点間連携研究[課題番号:2952])では、人口および建物ストックの将来予測モデルの構築を目的として、高知県南国市における人口及び建物ストックの時系列分析を行った。まず、平成17, 22, 29年度の固定資産台帳から抽出したデータを用いて、疑似的に残存率を計算する方法を提案した。提案した方法は、築年数が同じであるが建築年が違う場合に異なるであろう残存率の違いを考慮できないものではあるが、異なる2期間のデータがあれば疑似的に残存率を計算できるものである。提案した方法で疑似残存率を計算した結果を図4に示す。全般的に平成22年度と29年度のデータを用いた場合のほうが残存率が高いという結果になっており、近年になるほど住宅の寿命が長くなる傾向を示した。次に、固定資産課税台帳から抽出されたデータと住宅基本台帳から抽出されたデータをアドレスマッチングすることで、住宅種別や築年数などの情報と世帯数や家族人数などの居住者に関する匿名情報とを統合した。統合したデータを用いて、住宅の種別ごとの居住率および1棟あたりの平均世帯数の時系列変化を分析した。その結果、専用住宅および共同住宅等での居住率が増加傾向にあること、専用住宅では1棟あたりの平均世帯数が減少傾向にある一方で、共同住宅等では増加傾向にあることなどが明らかになった。さらに、平成17, 22, 29年度の課税台帳を整理し、各年度における木造戸建住宅棟数と滅失、新設住宅棟数をまとめた。この結果を用いて、築年数ごとに住宅の滅失確率を計算した。また、過去のデータから住宅の1年あたりの変化率を推定した。住宅ストックの変化に対する数学モデルを構築し、上記で得られた過去の変化が将来に外挿できると仮定し、将来時点での木造戸建住宅の棟数および築年数分布を予測した(図5)。住宅戸数の変化率が一定とした今回の仮定の下では、平成29年においては築35年あたりにあったピークは、時間とともにピークが平準化されつつ築年数の平均値が大きくなっていくという結果が得られた。

2. 課題募集型研究

5年間の成果の概要

課題募集型研究では、地震や火山噴火の発生から、それによって引き起こされる災害の発生や推移を総合的に理解し、それを防災・減災に活かすための研究課題を広い視野から募集することとし、以下の分類で公募した。(1)地震・火山噴火の災害事例の研究、(2)

地震・火山噴火災害発生機構の解明，(3)地震・火山噴火災害誘因の事前評価手法の高度化，(4)地震・火山噴火災害誘因の即時予測手法の高度化，(5)地震・火山噴火災害軽減のための情報の高度化，(6)地震・火山噴火災害時の災害対応の効率化，(7)実践的人材育成の仕組みに関する研究の7項目である。

課題募集型研究については，平成26年度は新規12課題，平成27年度は新規4課題，継続8課題，平成28年度は新規11課題，平成29年度は新規6課題，継続5課題が東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究委員会の審査を経て採択された。平成30年度は，6件の新規課題と1件の継続課題が採択された。5年間において，のべ53課題が採択された。

以下に，平成30年度の成果を示す。

平成30年度の成果の概要

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

「歴史被害地震の活動セグメントの推定とそれを考慮した強震動・建物被害シミュレーションに基づく震源破壊過程の推定に関する研究」(拠点間連携研究[課題番号:2953])では，横手盆地における地盤構造モデルの構築のためにまず常時微動観測によって得られたデータから，40.96秒の小区間を50%オーバーラップさせて観測時間分の区間を切り出し，区間毎に微動の水平上下スペクトル比(MHVR)を計算してその平均をとった。このとき，NS/UD，EW/UDはそれぞれ別々に計算している。また，交通振動等のノイズによる影響を避けるため，振幅の二乗和平均が大きい区間は除外した。横手市周辺や盆地北部の地点におけるピーク振動数が低くなっており，それらの地点では深い構造となっていることが推測できる。K-NET横手とJ-SHIS深部地盤地下構造モデルを参考に層構造モデルを作成した。ただし，層2の V_s は層1と層3の間となるような値を設定し，層1～3の V_p ， ρ は V_s からLudwig et al.(1970)の関係式より算出した。次にアレイ3，4において，理論位相速度分散曲線および理論MHVRが観測したものに近づくような1次元地盤構造モデルを構築した。そして，この地盤構造モデルを基に，単点観測点においても観測MHVRのピーク振動数に理論MHVRのピーク振動数が近づくように地盤構造の推定を行った。その際，1次ピークはアレイの構造の層3～層9について，各層の層厚比を固定した上で層厚を変化させることで，2次ピークは層1，層2の層厚を定義することによってピークを再現した。推定した1次元地盤構造と方位依存係数，および重力図を参考に盆地境界(地震基盤深さ0m)を定め，これを考慮して推定した1次元地盤構造をGMTのsurface関数で補間することにより3次元地盤構造を作成した。スペクトルエレメント法の1つであるEFISPEC3D(De Martin, 2011)を用いて，推定した3次元地盤構造の増幅特性を評価した。ただし，層1の物性値を層2と同値としている。入力用モデルの作成にはCUBITを用いた。領域は経度緯度で140.17/140.83/38.97/39.83の範囲とし，メッシュサイズは，深さ20000m以深は5000m，以浅は1667m，盆地内は185mの有効振動数1.89Hzとした。このモデルにスペクトル振幅 $1\text{m}\cdot\text{s}$ のデルタ関数を変位として，深さ20kmからEW方向に平面波入射をした。有効振動数以上の影響を除くため，出力結果に1Hzのローパスとして4次のButterworthフィルターをかけている。1896年陸羽地震は横手盆地東縁断層帯の北部が活動したものと考え，横手盆地東縁断層帯北部の想定地震のケース1のシミュレーショ

ンを、推定した地盤構造モデルを用いて行った。比較のために、J-SHISモデルでの計算も併せて行った。推定地盤構造モデルはEFISPECにより、J-SHISモデルについてGMSによって行った。その結果、図6に示すように、推定地盤構造モデルによる計算では、震源近傍のみならず横手市の西側まで最大速度の大きい領域が現れた。これは、基盤が深くなっていることによることが原因であると考えられ、1896年陸羽地震の際に被害域が南に延びた主な原因であることが示唆される。

「歴史地震評価のための振動計測と引き倒し実験による伝統木造建造物の耐震性能評価」(拠点間連携研究[課題番号:2954])では、今回実施した独自の古民家の微動計測値および過去の計測済み微動計測値、さらに文献に記載されている古民家の微動計測値を収集整理し、その年代別の共振振動数の平均値と分布を把握した。その結果江戸時代後期から明治時代中期までの古民家の振動特性に大きな変化がないことがわかった。築100年以上の古民家の静的挙動を把握するため、1888年頃に建てられた岡山県井原市の伝統構法木造民家IBR01に対して引き倒し実験を実施した。引き倒し実験は、IBR01のY5構面の高さ2271mmの梁に鉄骨を当てその鉄骨の4か所にワイヤーを接続し、梁間方向に均等に加力した。両端構面の層間変位が300mmになるまで加力した結果、最大水平力は102.2kNであり、ベースシア係数は0.32であった。最大変形時の水平力は約78kNであり、ベースシア係数は0.25であった。対象古民家は層間変形角0.13radまで変形させても自重を保持し続けたことから高い変形性能を有していることが確認できた。構造解析用ソフトSNAPを用いてこの引き倒し実験の再現解析を行った。解析結果ではX2Y1のNo.2-2の加力時の層間変形角がわずかに過大評価となった。また、建物全体が非線形した後の除荷ループを再現することはできていない。しかしながら、概ね実験結果のスケルトンカーブを再現することができており、既往の解析用モデルを用いることで、古民家の建物全体が非線形化するまでの挙動を再現できた(図7)。現行の一般木造建造物の年代別被害予測モデルの構築手法に従い、設計基準等から作成した標準建物モデルに対する古民家の耐力比および、耐力分布を決定することで、1900年以前に建てられた古民家の被害予測モデルを構築した。構築手順を以下に示す。

1)建物の固有振動数の二乗と耐力が比例すると仮定する、2)木造建物262棟の常時微動計測結果に基づく固有振動数とその建築年の関係から、各建築年に対する木造建物の平均固有振動数推定式を決定した、3)各建築年に対する平均固有振動数推定式から求めた各年代区分別の固有振動数の二乗と一般木造建造物の年代別被害予測モデルの耐力比の関係から、古民家の耐力比を0.99と推定した、4)古民家の固有振動数の二乗が対数正規分布に従うとし、未補強の古民家17棟の常時微動計測結果に基づく固有振動数から古民家の耐力分布を算定した。

ここで3)において、耐力比と固有振動数の二乗が平均的には比例することが確認できた。従って、1)の仮定は成り立つと考えられる。また、IBR01の引き倒し実験の再現解析結果を用いてIBR01の建築当初と推定される建物モデルを作成したところ、その耐力は本研究で作成した古民家の地震被害予測モデルの耐力分布の幅に収まっており、本地震被害予測モデルの妥当性を支持しているということがわかった。

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

「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」（拠点間連携研究〔課題番号：2956〕）では、日本の標準世帯として木造戸建て住宅を想定した。住家被害を損傷度（Damage Index）、並びに7階級の損傷区分（Damage Level）で評価する関数（損傷度関数）を提案し、世帯住家の耐震補強の有無や補強程度を木造住家耐震評点をパラメータとすることで様々な世帯構成及び対策の条件設定が可能となった。また想定される地震動入力を確定的（想定PGV、あるいは想定震度）のみならず発生確率を考慮した扱いも可能とするものであり、住家耐震対策の将来的効果評価やリスク評価のばらつきも検討可能なモデルとなっている。住家被害及び室内散乱に伴う死傷程度を災害医療で用いられている多発外傷重症度指標（ISS）で評価するモデルを構築し、この指標導入により負傷の場合は、治療による全快時間が評価できるため、身体被害一回復モデルへと展開が可能となった。また、死亡発生確率が高い結果となった場合は、それを防ぐための住家耐震補強対策や室内安全化対策の条件を変えることで、対策の人的被害に与える影響が検討可能となった。個人世帯の家計のバランスシートをベースにした生涯資産評価モデルの標準世帯版を構築した。個人資産は世帯ごとに大きく異なるが、今回の提案は生命保険のライフプランを参考に標準的サラリーマン世帯をモデル構築した。個人世帯により収入支出項目は大きく異なるはずであり、項目数を今後増やすことにより汎用的利用が可能となろう。このライフプラン上で災害発生を想定することで、（1）住家損傷度評価モデルにより住家損傷を含む物的被害の算定と復旧（住家再建費用等）及び（2）身体的被害一回復モデルにより家族の身体的被害治療費等）等々との経済的因果関係がシミュレーション可能となった。また、災害時の公的助成金や地震保険の加入の有無等を考慮することで、資産回復の予測もシミュレーションでき、資産対策の重要性を伝えるツールとしても活用可能である。精神的な障害度をKesslerの指標（K6）で定量化し、その時系列変化を追跡する精神被害一回復モデルを提案した。種々のインシデントをモデルに組み込むことが可能となり、本人の物理的被害よりも家族が傷つくことによる精神的被害の大きさが計量された。高知県南国市を例に、夫婦30代・子6歳で築40年の戸建て木造住宅（持ち家）に住むサラリーマン世帯を想定する。地震動は内閣府が公表しているレベル2クラスの南海トラフ巨大地震のうち陸側に震源を想定した最大地震動の震度分布を与えると、全壊の確率は50%を超え、死亡発生確率14%を得る。この状態に避難生活と収入減少のインシデントが加わった場合の資産及び心の回復シミュレーションを行った。さらに事前対策として耐震改修と地震保険の加入及び事後の生活再建支援法による助成の減災効果をシミュレーションし、FCPの有用性を確認した。本年度は3軸（人的被害、経済被害、精神被害）による個別評価に留まった。しかしこのモデルにより、地震が原因の家屋倒壊→室内破壊→人的被害→資産損傷+精神被害→回復の定量化と時間シミュレーションが可能となった。そしてそのシミュレーションの中に様々な対策を入れることで効果評価も可能となった。しかし今回は結果を十分に可視化するまでには至っていない。一般住民に活用してもらうには可視化も重要なことと考えている。今後は総合評価軸として原点から3次元面までの汎距離を求めることで総合評価が可能となろう。それを時間軸で動かすことで、ライフプランに拡張された対策-被災-回復が一望され、世帯個別の自助対策の診断ツールとなる。

「地震随伴火災の経時的な発生予測モデルの開発と出火防止対策の有効性評価」（拠点間連携研究〔課題番号：2957〕）では、地震火災の発生件数を予測するため、人口1人あたりの出火確率に着目し、これを計測震度や電力の供給率から説明するモデルを定式化するとともに、2011年東北地方太平洋沖地震の出火記録を再現できるよう、モデルの未知パラメータを同定することによって、プレート境界地震に伴う火災の発生件数の予測に利用可能な統計モデルを整備した。特に、感震ブレーカーといった出火防止対策の普及率向上による効果を評価できるよう、発火要因を（1）電気器具・電気配線、（2）ガス器具、（3）石油暖房器具、（4）その他の4つに分類し、それぞれについてモデルを構築した。上記で開発した出火モデルと地震動指標の距離減衰式を組み合わせることによって、南海トラフ地震の不確実性を考慮した日本全域での確率論的な出火シミュレーションを行った。ここでは、地震火災の発生件数に大きく影響する地震の不確実要因として、（1）震源域とそれが破壊された際の地震の規模、（2）地震の発生季節、（3）地震の発生時間帯、の3種類の要因を仮定し、各要因のバリエーションの組み合わせからなる合計72の地震シナリオに重み係数を設定することによって、地震火災の発生件数と条件付き超過確率の関係を表す出火リスクカーブを消防本部の管轄範囲ごとに推定した。その結果、南海トラフ地震が発生した際、全国のほとんどの消防本部では、保有するポンプ車の台数を上回る数の火災が発生する確率は非常に小さく、水道管や防火水槽の耐震化によって地震時においても消防水利を確保することができれば、放任火災の発生を高い確率で防ぐことができることを明らかにした。また、出火防止対策として、感震ブレーカーの普及率が25%に向上した場合の評価を行い、出火リスクカーブがどのように変化するのかを確認した。

（3）地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

「強震動評価のための浅部地盤と深部地盤の統合モデル化に関する研究」（拠点間連携研究〔課題番号：2955〕）では、2011年東北地方太平洋沖地震の際に周期1～3秒付近で大きな地震動が観測された東京湾西岸地域と小田原地域を対象として、1次元浅部深部統合地盤モデルを構築することを試みた。既存の地下構造情報と地震観測記録を用いて、周波数0.5-20Hzの観測増幅特性から、1次元浅部深部統合地盤モデルのS波速度構造と減衰構造を同定する。まず、Miyakoshi et al. (2019)による関東地域の強震観測点の中小地震の地震動記録のS波部分のスペクトル分離解析による東京湾西岸部の強震観測点（図8）での周波数0.5～20Hzの帯域の増幅特性を得た。この解析による増幅特性は、S波速度2.5km/sの地震基盤よりも浅い地層による増幅であると解釈されている。次に、J-SHISなどから既往の深部S波速度構造モデルを収集した。さらに、微動アレイ探査（地元ほか、2018）や検層による強震観測点直下の浅部S波速度構造モデルも得た。これらの既存の地盤情報を用いて、1次元浅部深部統合地盤の初期モデルを作成した。この初期モデルを参考にして、1次元重複反射を仮定して、ハイブリッドヒューリスティック法（山中、2007）による上記の増幅特性の逆解析によって、1次元浅部深部統合地盤モデルのS波速度およびQ値を同定した。なお、減衰構造のモデル化には、佐藤・山中（2010）によるバイリニア型のQ値モデルを仮定した。図8には、東京湾西岸部のUK1222で得られた1次元浅部深部統合地盤モデルを示す。比較のために、J-SHISの深部地盤モデル、J-SHISと微動アレイ探査による初期地盤モデルも示されている。UK1222の浅部深部統合地盤モデルは、

J-SHISモデルよりも-200m程度の深度のS波速度が遅く、地震基盤深度は1 km程度浅くなっている。図8に示した増幅特性では、得られた浅部深部統合地盤モデルが周波数0.8Hzと3Hzの観測ピークを最も良く説明していることが分かる。このように、1次元浅部深部統合地盤モデルは、既存モデルよりもより広帯域で地震動を説明可能なモデルとなっていることが分かる。図9に、足柄平野中央部(NRD)で得られた1次元浅部深部統合地盤モデルが示されている。図には、J-SHISによる深部地盤モデル、J-SHISと微動アレイ探査による初期モデル、既存モデル(Tsuno et al., 2018)も比較されている。NRDの浅部深部統合地盤モデルは、J-SHISモデルよりも深さ-100m程度でS波速度が遅く、地震基盤深度は400m程度浅くなっている。図9右に示した観測増幅特性では、得られた浅部深部統合地盤モデルが周波数2Hzと3Hzの観測ピークを最も良く説明している。一方で、1Hz付近の観測サイト特性を説明できておらず、初期モデルなどの設定など、モデル化に再検討が必要であることを示唆している。以上のように、東京湾西部地域と小田原地域での1次元浅部深部統合地盤モデルを構築することを試み、本研究による1次元浅部深部統合地盤モデルは、既存の1次元地下構造モデルよりもより広い周波数帯域で地震動特性を説明可能なモデルとなることを示した。本研究では、2018年9月に胆振東部地震が発生したことを踏まえて、同地震の被災地域において共同微動観測を実施し、同地域の浅部深部統合地盤モデルを作成するための資料を得た。この地域では、気象庁や防災科研による強震観測点で震度7の強震記録が本震時に得られている。さらに、高井ほか(2018)によって余震観測が実施され、中小地震による強震動記録も得られ、堆積層による増幅効果が強震動特性に及ぼす影響が大きいことも指摘されている。鶴川町地域での強震観測点では微動アレイ探査と表面波探査が行われ、図10に示すように広い周波数帯域のレイリー波を位相速度を得ることができた。図には、既存の地盤情報に基づく理論位相速度も示されており、観測値との矛盾は少ない。今後、これらの結果と強震観測による地震観測記録を合わせて、上記のような分析を行うことによって、浅部深部統合地盤モデルを推定することを考えている。

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

「地震時の斜面災害軽減を目的とした地震波動伝播シミュレーションの利活用」(拠点間連携研究[課題番号:2994])では、斜面崩壊による地震動の特徴の再現し、これまでの研究で明らかにした地形に対応した地震動の特徴を明らかにすることを目的に検討を行った。2017年5月19日に発生した長野県飯山市における斜面崩壊に伴って周囲50 km程度のHi-net観測点において地震波が観測された。地震波は、継続時間100-200秒で約3 km/sの伝播速度を持つ波群に加え、約6 km/sの伝播速度で上下動成分のみに卓越し立ち上がり明瞭な波群から構成された。伝播速度約3 km/sの波群に対し、振幅を用いた震源決定法(Kumagai et al., 2010)によって波源を推定したところ、崩壊源から地震波が放射されたとして矛盾のない結果が得られた。一方、約6 km/sで伝播する波の初動到達時刻を読み取り、JMA2001(上野ほか, 2002)のP波速度構造を仮定して震源決定をおこなったところ、崩壊源周辺に震源が決まった。このことから、崩壊源周辺においては、継続時間が長く徐々に震動が大きくなる力源と比較的短い時間の間に大きな震動を作り出す力源の2種類が存在することが分かった。斜面崩壊による地震動において、短周期地震波の

初動の読み取りが可能な地震波形記録は稀であり、移動土塊の対岸への衝突など何らかの斜面現象を反映している可能性がある点でも特筆すべき点である。また、表 1 に示す、地震動が検知された斜面崩壊の特徴と地震動の特徴（2015/2016 年厚岸町の事例を除く）から、高周波地震波の卓越周波数はおおむね 1-10 Hz 程度に分布し崩壊のタイプには大きく依存しないことがわかった。継続時間もおおむね 30-200 秒程度であり、イベントの長さを反映しているものと考えられる。周期 10 秒以上の長周期信号は、崩壊域が数百 m 四方にわたり厚さが 20 m を超えるような大規模な地すべり性崩壊で確認されることが推察された。さらに、斜面崩壊による地震動の再現の検討において、シミュレーションでは 1 Hz 前後の表面波が極めてよく卓越する理由について検討するため、地形にさまざまなローパスフィルターを施すことで、1 Hz 前後の表面波がどの程度卓越するかを調べた。その結果、ある波長よりも短い成分をカットした地形においては 1 Hz 前後の表面波が生成されないことが結果となった。このことから、地形の短波長不均質による散乱がこのような表面波を作り出し、この効果は地表震源の場合に特に強調されることが分かった。

（５）地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

「建物個別の応答予測と揺れ継続時間のリアルタイム情報配信」（拠点間連携研究〔課題番号：2958〕）では、利用者が多い大規模な建物や災害拠点となる施設を対象として、固有周期や立地条件が異なる個別の建物の、(A)建物入力地震動のリアルタイム分類、(B)揺れ継続時間の予測、に取り組んだ。まず、東京大学地震研究所が公開している即時に地震の位置・規模・メカニズムを決定するシステム（GRiD MT、主開発者：鶴岡弘）を利用し、地震発生直後に災害拠点などで震源情報を有効利用する方法について議論した。図 11 は 2018 年に発生したモニタリング領域内で発生した地震に対して、GRiD MT により決定された震源メカニズム解を示している。GRiD MT は、20～50 秒の長周期波動場をリアルタイムにモニタリングすることにより、震源情報を必要とせず地震発生後ほぼ 3 分で震源位置・モーメントマグニチュード・震源メカニズムを同時に決定するシステムである。震源位置やそのメカニズムは直接には建物の被害把握などに用いることはできないが、地域全体の災害拠点となる建物においては、中長期的に避難準備や避難継続の判断、あるいは地域レベルでの復興支援体制の構築を考えるうえで、震源に関する情報を随時提供することは有意義と考えられる。震源情報については気象庁より地震後に発表があるが本震や大きな余震にとどまるため、より詳細な情報が提供された場合の利用法について、検討を続ける。また GRiD MT が持つ即時計算処理能力を用いた新たな防災情報の提供についても議論した。一方、揺れ継続時間の予測：建物利用者の心理的不安軽減を図るおよび地震収束後の復旧・退避行動の迅速化には、揺れの大小のみならず、揺れ継続時間の情報が必要である。国立研究法人建築研究所に依頼して、地震計を設置している建物の建物応答観測記録および観測地点の詳細な地盤情報の提供を受けた。次に、震源特性・震源距離・地盤特性、をパラメータとした、敷地地盤の影響等を含む建物の振動特性を考慮した揺れ継続時間を分析した。能島（2015）の既往研究を参考に、累積パワーが 95%となる区間を揺れ継続時間と定義し（図 12 参照）、建物内で得られた観測記録の揺れ継続時間を求めた。図 13 は 398 地震の観測記録に対して、建物の基礎および上部階で得られた揺れ継続時間を示している。縦軸は揺れ継続時間（秒）の対数表記、横軸は地震のマグニチュードを示している。ばら

つきはかなり大きいですが、マグニチュードが大きくなるにつれて揺れ継続時間の中央値は大きくなる。また、建物の上部階の方が、基礎よりも継続時間が長くなる傾向が見られる。建物の高さや地盤条件に対しても揺れ継続時間との相関性が一部確認されているが、理論的解釈が成立するかも含めて、今後詳細について慎重に検討を進める予定である。

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参加者募集型研究は、「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、総括研究で出た課題などを特定分科研究において掘り下げその成果を総括研究にフィードバックするとともにさらに総括研究で新たに出た課題を掘り下げる、という循環により研究の高度化を行ってきた。

今後は、参加者募集型研究を総括研究・特定分科研究として推進するとともに、課題募集型研究で提案された課題による成果などを取り込む枠組みを構築しつつ、両者を並行して行うことで、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

(H30年度)

地元孝輔，山中浩明，是永将宏，津野靖士，2019，KiK-net 益城観測点におけるレイリー波位相速度と見かけ比抵抗の同時逆解析，平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演，P04.

土井一生・前田拓人・釜井俊孝・王功輝，2018，斜面崩壊によって励起された地震動波形の特徴－2017年の事例－，日本地球惑星科学連合2018年大会，HDS07-05.

Doi, I. ,2018, Development of a New academic field "Slope seismology", International Seminar on Geoscience and Disaster Mitigation in Japan and South Korea.

一井康二・植村一瑛・生頼直樹・兵頭順一，2019，地震応答解析における技術者の違いによるパラメータのばらつきの影響，平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会，D29.

- Ishibe, T., M. Miyazawa, Y. Ogata, H. Tsuruoka, and K. Satake, 2018, Seismicity Rate Change in Japan Following the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, AOGS 15th Annual Meeting, Hawaii Convention Centre, 3-8 June 2018, Honolulu, USA.
- 木内亮太・宮澤理稔・額綱一起, 2019, 沈み込み帯巨大地震の強震動生成域からの地震動と既存予測式の比較, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D31.
- 河野祐哉・西嶋一欽, 2019, 過去の統計データに基づく高知県南国市における木造戸建住宅の棟数および築年数分布の将来予測, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, B29.
- 河野祐哉・西嶋一欽, 2018, 高知県南国市を例とした建物ストックの時系列変化の分析, 日本建築学会2018年大会学術講演梗概集, F, pp.93-94.
- 増田竣介・佐伯琢磨・松島信一・西嶋一欽・河野裕哉, 2019, 南海トラフ地震による高知県南国市における主要な病院の建物被害予測に基づく影響評価, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, P03.
- 増田竣介・佐伯琢磨・松島信一・西嶋一欽・河野祐哉, 2018, 南海トラフ地震による高知県南国市における地震危険度解析に基づく病院被害による影響人数推定, 第37回日本自然災害学会学術講演会, III-4-6.
- 増田竣介・松島信一, 2018, 南海トラフ地震による高知県南国市における病院被害による影響人数予測に関する研究, 平成30年度(2018年度)日本建築学会近畿支部研究発表会, 2040.
- Nishino, T. and Hokugo, A., A Stochastic Model for Time Series Prediction of the Number of Post-Earthquake Fire Ignitions in Buildings Based on the Ignition Record for the 2011 Tohoku Earthquake, Earthquake Spectra (submitted).
- 岡田成幸・中嶋唯貴・牧紀男・額綱一起, 2019, 地震による被災から回復までの個人世帯生活被災度時間関数の構築, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D27.
- 佐伯琢磨・西嶋一欽・松島信一, 2019, 地震リスク評価における不確実性の分布について, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D28.
- 佐伯琢磨・西嶋一欽・松島信一, 2018, 不確実性を考慮した地震リスク評価に関する研究その1南海トラフ地震を想定した感度分析, 日本建築学会2018年大会学術講演梗概集, B2, pp.559-560.
- 佐藤啓太・松島信一・松下隼人・増田竣介・吾妻崇・野澤貴, 2018, 微動観測記録に基づく横手盆地の地下構造の推定, 第15回日本地震工学シンポジウム, 0S2-01-03.
- 佐藤啓太・松島信一・松下隼人・増田竣介・吾妻崇・野澤貴, 2019, 微動観測記録に基づく横手盆地の推定地下構造の増幅特性評価, 京都大学防災研究所研究発表講演会, B06.
- 田中宣多・Adapa GAUTHAM・澤田凱人・上田恭平, 2019, 液状化現象を含む地盤の非線形性を考慮した表層地盤増幅率の評価, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D30.
- 津野靖士・山中浩明・地元孝輔・宮腰寛之・三宅弘恵・高井伸雄・重藤迪子・神野達夫・佐藤浩章・額綱一起・松島信一・川瀬博, 2019, 足柄平野と東京湾西岸部における地震観測点の1次元浅部深部統合地盤モデル, 平成30年度京都大学防災研究所研究発表講演会, P54.

(平成26年度～平成29年度)

- Adapa, G., K. Sawada, K. Ueda, 2018, Evaluation of Amplification Factor Considering Soil Non-Linearity including Liquefaction, 平成29年度京都大学防災研究所研究発表講演会, A33.
- 有吉一葉・岡田成幸・中嶋唯貴, 2017, Kesslerの心理的苦痛測定指標(K6)による被震に伴う精神的被害の計量およびその時間推移モデルの構築 その2 各種発生事象のK6評価, 日本建築学会大会(広島)梗概集, B-2, 487-488.
- 土井一生・前田拓人, 2018, 2017年5月19日長野県飯山市における斜面崩壊に伴う短周期地震波形の特徴, 東大地震研共同利用「地震波形解剖学の計算科学的新展開」研究集会, 東京, 2018-03-09.
- 土井一生・前田拓人・釜井俊孝・王功輝, 2018, 「斜面崩壊による地震動波形の特徴と崩壊発生メカニズム -2017年の事例-」, 京都大学防災研究所研究発表講演会, 宇治, P05, 2018-02-21.
- 土井一生・釜井俊孝・片尾浩・三浦勉, 2017, ごく近傍に設置された地震計によって捉えられた豪雨による斜面崩壊 -2013年9月京都府京都市山科区における事例-, 平成29年度日本応用地質学会研究発表会, 岡山, 60, 2017-10-13.
- 原田智也・西山昭仁・佐竹健治・古村孝志, 2017, 明応七年六月十一日(1498年6月30日)の日向灘大地震は存在しなかった -『九州軍記』の被害記述の検討-, 地震2, 70, 89-107.
- 原田智也・佐竹健治・古村孝志・室谷智子, 2017, 1944年東南海地震(M7.9)の震度分布 -発生直後に行われたアンケート調査資料の再検討-, 東京大学地震研究所彙報, 92, 1-30.
- Kanaya, N., T. Maeda, K. Obara, and A. Takeo, 2017, Significant Anomalies in Seismograms for Intra-slab Earthquakes Observed in Kanto area, Japan, and their Interpretation, AGU Fall Meeting 2017, New Orleans, USA, S21C-0717, 2017-12-12.
- 是永将宏・津野靖士・地元孝輔・山中浩明, 2018, 熊本市花岡山近傍で観測された地震動特性とその表層地盤構造, 平成29年度京都大学防災研究所研究発表講演会, P04.
- Lee, S. H., K. Nishijima, S. Matsushima, M. Miyazawa, K. Mochizuki, T. Iidaka, K. Ueda, H. Kawase, and N. Maki, 2017, Issues and Challenges in Seismic Risk Evaluation and its Uncertainty Reduction for the Nankai Trough Earthquake, DPRI Annuals, No. 60B.
- Maeda, T., S. Takemura, and T. Furumura, 2017, OpenSWPC: An open-source integrated parallel simulation code for modeling seismic wave propagation in 3D heterogeneous viscoelastic media, Earth Planets Space, 69, 102, doi:10.1186/s40623-017-0687-2.
- Miyake, H., 2017, Seismic hazard assessment of the 1995 Kobe earthquake: Before and after, IAG-IASPEI 2017, S07-2-04.
- Miyake, H., T. Furumura, T. Nishimura, K. Mochizuki, K. Obara, T. Harada, and N. Sekiya, 2017, Variation of earthquake source scenarios along the Nankai Trough for hazard

- and risk assessment, IAG-IASPEI 2017, S13-6-06.
- Morioka, H., H. Kumagai, and T. Maeda, 2017, Theoretical basis of the amplitude source location method for volcano-seismic signals, *J. Geophys. Res.*, 122, 6538-6551, doi:10.1002/2017JB013997.
- Mukai, Y., T. Furumura and T. Maeda, 2017, Characterizing directional variations in long-period ground motion amplifications in the Kanto Basin, Japan, AGU Fall Meeting 2017, New Orleans, USA, S31B-0813, 2017-12-13.
- Nishimura, T., Y. Yokota, K. Tadokoro, and T. Ochi, 2018, Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from GNSS and GPS-A data, *Geosphere*, 14(2), doi:10.1130/GES01529.1.
- Nishimura, T., 2018, A trial of application of geodetic data for assessing activities of inland faults - Coulomb stress changes estimated from GNSS surface displacements, *Journal of Disaster Research*, in press.
- 岡田成幸・中嶋唯貴・有吉一葉・牧紀男・額額一起, 2017, 被災者の心の復興 ～精神的苦痛の計量及びその時間推移モデルの構築～, 日本地震学会2017年度秋季大会予稿集, S15-07.
- Padhy, S., T. Furumura, and T. Maeda, 2017, Waveform anomaly caused by strong attenuation in the crust and upper mantle in the Okinawa Trough region, AGU Fall Meeting 2017, New Orleans, USA, T23A-0593, 2017-12-12.
- 齋藤さやか・関谷直也・田中淳, 2017, 地震予知に関する日本海沿岸部と太平洋沿岸部の住民意識—地震予知, 地震動予測地図とリスク認知を中心に, 第36回自然災害学会学術講演会.
- 齋藤さやか・関谷直也, 2017, 地震発生確率とリスク認知—地震動予測地図の確率表現に関する調査研究, 地域安全学会論文集, 30.
- 齋藤さやか・関谷直也, 2017, 地震発生確率とリスク認知—地震動予測地図の認識に関する基礎的検討, 地域安全学会第40回研究発表大会(春季).
- 齋藤さやか・関谷直也, 2017, 地震動予測地図をめぐる信頼と構成要素, 日本リスク研究学会第30回年次大会.
- 関谷直也・齋藤さやか・田中淳, 2017, 地震予知に関する日本海沿岸部と太平洋沿岸部の住民意識—想定周知, 表現技法を中心に, 第36回自然災害学会学術講演会.
- 棚田嘉博・佐藤公則・井口正人・豊平隆之, 2017, 擬似雑音多重弾性波を用いた火山域の地下探査, 第34回センシングフォーラム資料, 1B2-1, 117-122.
- Tanada, Y, Sato, K, Iguchi, M and Sai, B, 2017, Construction of ZCZ Huffman Sequences for Underground Multiplexing Sonar, *Proc. IWSDA'17*, 122-126.
- 棚田嘉博・井口正人・佐藤公則・豊平隆之・田中幹也, 2017, 高減衰媒質中の波動伝搬への Huffman 系列の適用, 平成29年度電気・情報関連学会中国支部連合大会予稿集, R-17-15-09, 1-2.
- 棚田嘉博・井口正人・山本圭吾・中道治久・森田裕一, 2017, Huffman 系列を用いた火山域の弾性波地中探査システム, 平成29年度計測自動制御学会九州支部大会予稿集, 101A5, 11-14.

- Todoriki, M., T. Furumura, and T. Maeda, 2017, Effects of seawater on elongated duration of ground motion as well as variation in its amplitude for offshore earthquakes, *Geophysical Journal International*, 208, 226-233.
- Todoriki, M., T. Furumura, and T. Maeda, 2017, Effects of seawater on elongated duration of ground motion as well as variation in its amplitude for offshore earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 208(1), 226-233, doi:10.1093/gji/ggw388.
- Toya, M., A. Kato, T. Maeda, K. Obara, T. Takeda, and K. Yamaoka, 2017, Down-dip variations in a subducting low-velocity zone linked to episodic tremor and slip: a new constraint from ScSp waves, *Scientific Reports*, 7, 2868, doi:10.1038/s41598-017-03048-6.
- 和田拓也・新本翔太・倉田真宏・山田真澄・楠浩一・柏尚稔, 2017, 拠点モニタリングを利用したエリア防災のための建物群地震応答の即時推定, *日本建築学会近畿支部研究報告集構造系*, 57, 485-488.
- 和田拓也, 2017, 拠点モニタリングを利用したエリア防災のための建物群地震応答の即時推定(優秀卒業論文賞推薦理由, 2017年日本建築学会優秀卒業論文賞), *建築雑誌*, 1701, 113.
- 和田拓也・新本翔太・倉田真宏・山田真澄・楠浩一・柏尚稔, 2017, 拠点モニタリングを利用したエリア防災のための建物群地震応答の即時推定, *日本建築学会(中国)学術講演梗概集, 構造系*, 377-378.
- 和田拓也・新本翔太・倉田真宏・山田真澄・楠浩一・柏尚稔・池田芳樹, 2018, 緊急地震速報と建物モニタリング情報を利用した地震災害誘因の同定 ―建物頂部変形角の推定―, *京都大学防災研究所研究発表講演会梗概*, A31.
- Yu Nandar Hlaing, K. Ichii, 2017, Ground Response Analysis and Site Characterization of Mandalay City, Myanmar Engineering Society Annual General Meeting (2017), 13th Annual Seminar on Research and Engineering (19-20 January 2018), Myanmar Engineering Council Building, Yangon, Myanmar.
- Lee, S.H, K. Nishijima, S. Matsushima, 2016, Investigation of possibilities to reduce uncertainties of seismic risk evaluation for Nankai Trough earthquakes, 5th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, August 15-17, 2016.
- Lee, S.H., K. Nishijima, S. Matsushima, M. Miyazawa, K. Mochizuki, T. Iidaka, K. Ueda, H. Kawase, N. Maki, 2017, Issues and Challenges in Seismic Risk Evaluation and its Uncertainty Reduction for Nankai Trough Earthquake, *京都大学防災研究所 平成28年度研究発表講演会 特別セッション*.
- 縣亮一郎・市村強・兵藤守・堀高峰・平原和朗・堀宗朗, 2016, 震源断層の想定高度化に関する基礎研究--高詳細な三次元地殻構造モデルを用いた地殻変形解析手法の開発--, *土木学会論文集A1(構造・地震工学)*.
- 藤田航平・市村強・堀宗朗・Wijerathne Maddeggedara Lalith Lakshman・田中聖三, 2016, 都市の高分解能な地震被害想定的高速化のための基礎的研究, *土木学会論文集A1(構造・地震工学)*.

- 藤田航平・市村強・堀宗朗・Wijerathne Maddeggedara Lalith Lakshman・田中聖三, 2016, 多数の地震シナリオに対する高分解能な都市震災想定のためのHPCによる基礎検討, 土木学会論文集A2 (応用力学) .
- 古村孝志, 2016, 昭和南海地震から考える, 次の南海トラフ地震と前後の内陸地震への備え, 日本地震工学会JAEE NEWSLETTER, 5(3), 2.
- Obara, K. and A. Kato, 2016, Connecting slow earthquakes to huge earthquakes, *Science*, 353 (6296), 253-257, doi:10.1126/science.aaf1512.
- 原田智也・西山昭仁・佐竹健治・古村孝志, 2016, 明応七年六月十一月(ユリウス暦1498年6月30日)の大地震に関する『九州軍記』の被害記述の検討, 日本地球惑星科学連合2016年大会, SSS31-12.
- Miyake, H., 2016, Long- and short-period characteristics of megathrust source models and ground motions (invited), UK-Japan Disaster Research Workshop: Cascading Risk and Uncertainty Assessment of Earthquake Shaking and Tsunami.
- Guo, Y., K. Koketsu, and H. Miyake, 2016, Propagation mechanism of long-period ground motions for offshore earthquakes along the Nankai Trough: Effects of the accretionary wedge, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 106, 1176-1197, doi:10.1785/0120150315.
- Kawase, H., S. Matsushima, F. Nagashima, Baoyintu, and K. Nakano, 2017, The cause of heavy damage concentration in downtown Mashiki inferred from observed data and field survey, *Earth, Planet, and Space*, 69:3, DOI :10.1186/s40623-016-0591-1.
- 松島信一・佐藤啓太, 2017, 横手盆地の盆地境界の推定のための地下構造調査, 京都大学防災研究所研究発表講演会, P61.
- Okada S., T. Nakashima, A. Iida, M. Kitahara, 2017, A NEW CAUSALITY MODEL FOR EVALUATING THE PROBABILITY OF HUMAN DAMAGE FROM INJURY TO DEATH IN COLLAPSED BUILDINGS, 16th World, Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2938, pp.1-10, Santiago Chile, January 9th to 13th 2017.
- Iida A., S. Okada, T. Nakashima, M. Kitahara, 2017, Volumetric Loss Estimation for Collapsed Buildings during Earthquakes, 16th World, Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2938, pp.1-11, Santiago Chile, January 9th to 13th 2017.
- 村口紗也・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 地震災害素因の時間変動性を考慮した宅地供給に関するリスクマネジメントの考え方 -札幌市を事例として-, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 89, 63-66.
- 松本将武・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 地震破壊シミュレーションによる建物内死者発生推定のための建物ボリュームロス評価法の検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 89, 83-86.
- 松本将武・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 地震破壊シミュレーションによる建物内死者発生推定のための建物ボリュームロス評価法の検討, 日本建築学会大会(九州)梗概集.
- 村口紗也・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 地震災害素因の時間変動性を考慮した宅地供給に関するリスクマネジメントの考え方 -札幌市を事例として-, 日本建築学会大会(九州)梗概集.

- 中嶋唯貴・岡田成幸, 2016, 少子高齢化の進展が地震時建物倒壊による推定死者数へ及ぼす影響, 日本建築学会大会(九州)梗概集.
- 高橋遥・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 居住環境を考慮した地震時室内変容による人的被害の地域精算評価手法の提案, 日本建築学会大会(九州)梗概集.
- 岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 震後復旧費用個人負担の地域格差, 日本地震学会2016年度秋季大会(名古屋), S15-18.
- 岡田成幸・中嶋唯貴, 2017, 社会動態が地震災害に及ぼす将来的影響の定量評価, 平成28年度京都大学防災研究所 研究発表講演会.
- 倉田真宏・新本翔太・和田拓也・山田真澄・楠浩一・柏尚稔・溜淵功史, 2017, 緊急地震速報と建物モニタリング情報を利用した地震災害誘因の同定, 京都大学防災研究所年次発表会梗概, OSK4.
- 津野靖士・地元孝輔・三宅弘恵・佐藤浩章・松島信一・重藤迪子・高井伸雄・神野達夫・瀨瀬一起・山中浩明・川瀬博, 2017, 足柄平野西部における地盤震動特性の評価, 平成27年度京都大学防災研究所研究発表講演会.
- 地元孝輔・津野靖士・東貞成・佐藤浩章・重藤迪子・高井伸雄・松島信一・早川崇・山中浩明・川瀬博, 2017, K-NET日立近傍における地震と微動観測による地盤震動特性の評価, 平成27年度京都大学防災研究所研究発表講演会.
- Maeda, T., K. Nishida, R. Takagi, and K. Obara, 2016, Reconstruction of a 2D seismic wavefield by seismic gradiometry, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 3, 31, doi:10.1186/s40645-016-0107-4.
- Maeda, T., H. Tsushima, and T. Furumura, 2016, An effective absorbing boundary condition for linear long-wave and linear dispersive-wave tsunami simulations, *Earth Planets Space*, 68, 63, doi:10.1186/s40623-016-0436-y.
- Noguchi, S., T. Maeda, and T. Furumura, 2016, Ocean-influenced Rayleigh waves from outer-rise earthquakes and their effects on durations of long-period ground motion, *Geophys. J. Int.*, 205(2), 1099-1107, doi:10.1093/gji/ggw074.
- 関谷直也, 2016, 企業の防災対策におけるBCPとCSR: 大企業に対する実証調査より, *Nextcom25*, 4-15.
- 関谷直也・田中淳, 2016, 避難の意思決定構造—日本海沿岸住民に対する津波意識調査より—, *自然災害科学J. JSNDS* 35 特別号 91-103, 91.
- 吾妻崇, 松島信一, 市村 強, 野澤 貴, 2016, 活断層と建物被害の情報に基づく歴史被害地震の断層モデル構築に関する研究, 京都大学防災研究所 平成27年度研究発表講演会, P02.
- 新本翔太, 倉田真宏, 鈴木明子, 李小華, 2015, 余震リスク評価に基づく被災建物継続使用の迅速な意思決定支援, *地域安全学会論文集No.27*.
- Fujita, K., T. Ichimura, M. Hori, L. Maddegadara and S. Tanaka, Scalable many-case urban earthquake simulation method for stochastic earthquake disaster estimation, *Procedia Computer Science*, 51, 1483-1493, 2015.
- 林能成, 山田俊弘, 栗田敬, 野内玲, 2015, 地球科学における学際的分野への参入過程—島津康男教授・熊沢峰夫教授のオーラルヒストリーから—, *地球惑星科学関連合同学*

会，幕張メッセ。

廣川夕貴，松島信一，川瀬博，T. Naing, M. Thant, 2016, ミャンマー・ヤンゴン市における常時微動を用い

- 213 -

た地盤構造の推定，日本地震工学会論文集，第16巻，第1号特集号「第14回日本地震工学シンポジウム」その2，49-58.

Ichimura, T., K. Fujita, P. E. B. Quinay, L. Maddegedara, M. Hori, S. Tanaka, Y. Shizawa, H. Kobayashi and K. Minami, 2015, Implicit Nonlinear Wave Simulation with 1.08T DOF and 0.270T Unstructured Finite Elements to Enhance Comprehensive Earthquake Simulation, SC15: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, doi: 10.1145/2807591.2807674.

飯田彬斗，岡田成幸，中嶋唯貴，地震時人的被害推定高度化のための建物内部空間被災度関数の再構築，日本建築学会大会（関東）梗概集，2015.

金幌淑，田中傑，牧紀男，岸川英樹，事前復興計画のあり方に関する基礎的な考察－第1回事前復興計画研究会を通して，地域安全学会梗概集，No. 36，地域安全学会，115-116，2015

倉田真宏，新本翔太，鈴木明子，山田真澄，楠浩一，宮本匠，残存性能モニタリングと広域余震ハザードに基づく被災建物健全性の時間変化予測，京都大学防災研究所年次発表大会梗概，2016.

Kurata M., Suzuki, A., Li, X., Nishino, H., Residual Performance Assessment of Steel Frames through Ambient Strain-Based Model Update: Application to Collapse Test of Steel Frame using Shake Table, Proc. Eng. Mech. Inst. Conf., June 16-19, 2015.

Lee, S. H., K. Nishijima, S. Matsushima, M. Miyazawa, K. Mochizuki, T. Iidaka, T. Tobita, H. Kawase, N. Maki, Investigation of Possibilities to Reduce the Uncertainty of Disaster Risk, 京都大学防災研究所平成27年度研究発表講演会特別セッション，K01，2016.

松島信一，伊藤光菜，2016，1847年善光寺地震における地震動と建物被害の関係把握のための表層地盤構造の推定 京都大学防災研究所 平成27年度研究発表講演会，E21.

Melgar, L. E. A., W. M. L. Lakshman, M. Hori, T. Ichimura and S. Tanaka, 2015, On the Development of an MAS Based Evacuation Simulation System: Autonomous Navigation & Collision Avoidance, Lecture Notes in Artificial Intelligence (in press).

中嶋唯貴，岡田成幸，2015，震動及び津波の複合災害を想定した人的被害推定手法の提案，日本建築学会北海道支部研究報告集，88，101-104.

西嶋一欽，2016，地震リスク評価に伴うモデル不確実性の感度解析，第22回信頼性設計技術WS&第35回最適設計研究会，岡山大学.

岡田成幸，中嶋唯貴，2015，地震時建物倒壊に伴う人的被害の因果律を踏まえた詳細評価手法～建物棟別評価から行政区単位評価まで～，日本建築学会大会（関東）梗概集.

Ryoichiro Agata, Tsuyoshi Ichimura, Kazuro Hirahara, Mamoru Hyodo, Takane Hori, Chihiro Hashimoto and Muneo Hori, 2015, Numerical verification criteria for

- coseismic and postseismic crustal deformation analysis with large-scale high-fidelity model, *Procedia Computer Science*, 51, 1534-1544.
- 清田和宏, 地元孝輔, 佐口浩一郎, 津野靖士, 山中浩明, 2015, 立川断層近傍における表層地盤S波速度構造の空間変動評価の稠密微動探査, 第132回学術講演会講演論文集, 141-143.
- Seita, K., K. Chimoto, K. Saguchi, S. Tsuno, H. Yamanaka, 2015, Application of microtremor exploration to shallow dipping layers under the assumption of horizontally stratified structure, *Proceedings of 12th SEGJ International Symposium -Geophysical Imaging and Interpretation-*, S2-1, Tokyo, Nov. 2015.
- Tsuno, S., K. Chimoto, K. Saguchi, H. Sato, S. Matsushima, M. Shigefuji, N. Takai, T. Kanno, H. Yamanaka and H. Kawase, 2015, Detailed spatial variation of short-period earthquake ground motion in the vicinity of Tachikawa-Fault, *Proceedings of 12th SEGJ International Symposium -Geophysical Imaging and Interpretation-*, P6, Tokyo, Nov. 2015.
- 津野靖士, 佐口浩一郎, 地元孝輔, 佐藤浩章, 松島信一, 重藤迪子, 高井伸雄, 神野達夫, 山中浩明, 川瀬博, 2015, 立川断層近傍における短周期地震動の空間変動特性, 地球惑星関連合同大会講演予稿集S-SS25-P16.
- 山田俊弘, 2015, 拡大された地球科学概念からトランス・サイエンスまで—島津康男教授と1970年代科学史—, 地球惑星科学関連合同学会, 幕張メッセ.
- 山田俊弘, 2015, シームレスな地球科学をめざして—島津康男とディシプリンの越境: 1966-1983年, 日本科学史学会, 大阪市立大学.
- 山田俊弘, 2015, 1970年代の科学教育における変容の性格—島津康男の拡大された地球科学, トランス・サイエンス, 環境学—, 東京大学大学院教育学研究科基礎教育学研究室研究室紀要, 41号, 183-194.
- 西村裕一・中村有吾・添田雄二, 2015, 浦幌町豊北の湿原における古津波堆積物のトレンチ調査, 浦幌町立博物館紀要, 15, 39-47.
- 添田雄二・西村裕一・中村有吾, 2015, 浦幌町で実施した地層剥ぎ取り標本の作成について, 浦幌町立博物館紀要, 15, 49-56.
- 津野靖士, 佐口浩一郎, 地元孝輔, 佐藤浩章, 松島信一, 重藤迪子, 高井伸雄, 神野達夫, 山中浩明, 川瀬博, 2015, 立川断層近傍における短周期地震動の空間変動特性, 2015年地球惑星科学連合大会
- 清田和宏, 地元孝輔, 佐口浩一郎, 津野靖士, 山中浩明, 2015, 立川断層近傍における表層地盤S波速度構造の空間変動評価の稠密微動探査, 物理探査学会第132回(平成27年度春季)学術講演会講演論文集, 141-143, 2015
- 古谷元・牟田庄吾・竹内篤雄・王功輝・油谷洋志・林久夫, 2014, 併用調査により古いため池の地盤構造と流動地下水脈経路の推定, 平成26年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 57-58.
- 佐竹亮一郎・若井明彦・古谷元・王功輝・土井一生, 2015, 古いため池堤体材料の空間的不均質性が力学挙動の不確実性に与える影響, 第18回応用力学シンポジウム, 土木学会応用力学委員会, 印刷中.

佐竹亮一郎・若井明彦・古谷元・王功輝・土井一生，2015，堤体材料の空間的不均質性と系の挙動の不確実性に関する検討(ため池を例に)，第70回年次学術講演会講演概要，土木学会，印刷中。

Ryoichiro Agata, Tsuyoshi Ichimura, Kazuro Hirahara, Mamoru Hyodo, Takane Hori and Muneo Hori, Several hundred finite element analyses of an inversion of earthquake fault slip distribution using a high-fidelity model of the crustal structure, *Procedia Computer Science*, 29, pp.877-887, 2014. DOI:10.1016/j.procs.2014.05.079

関谷直也，2014，地震「想定」を考える，南海トラフ巨大地震の災害リスク評価－社会の影響から地震発生まで振り返り，評価の不確実性と影響について考える－，地震・火山科学と総合防災学の両共同研究拠点主催シンポジウム，2014年10月6日 東京大学地震研究所

関谷直也，2015，「想定を考える」，鉄道気象連絡会，2015年5月20日，ステーションコンファレンス万世橋。

Kurata M., Suzuki, A., Li, X., Nishino, H. “Residual Performance Assessment of Steel Frames through Ambient Strain-Based Model Update: Application to Collapse Test of Steel Frame using Shake Table”, *Proc. Eng. Mech. Inst. Conf.*, June 16-19, 2015.

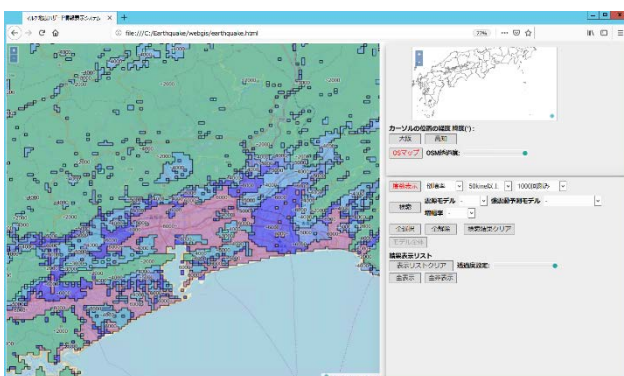
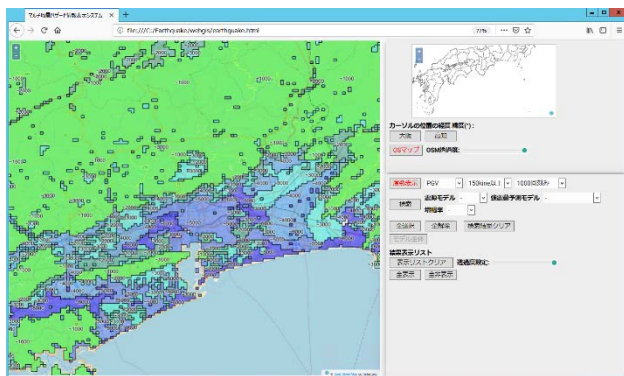
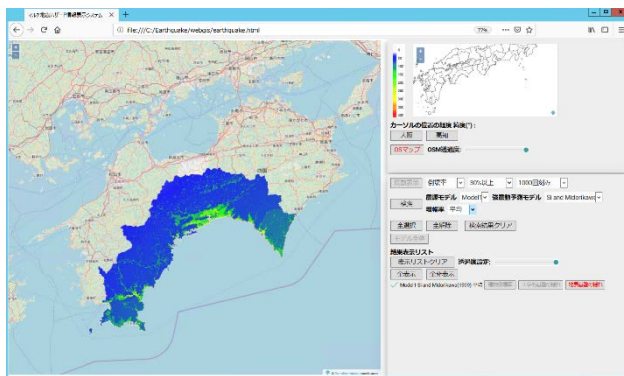
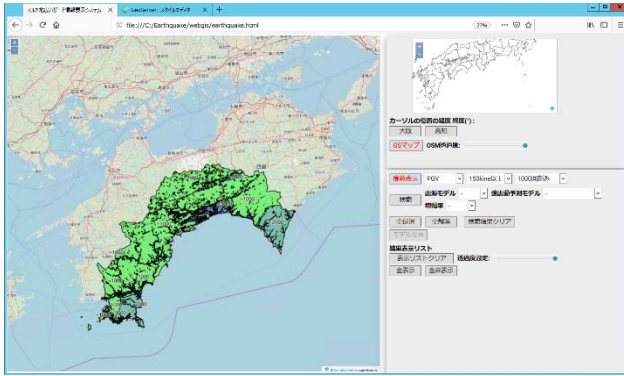


図1. 評価結果のばらつきを容易に理解することが可能な表示システムの表示例（拠点間連携共同研究 [課題番号：2975, 2951]）

左上：最大地表速度が150cm/sを超える回数の度数分布表示例：高知県全域（モンテカルロシミュレーション全体:10,000回）

右上：震源モデルと強震動予測モデルの組み合わせた地表の揺れ表示例：高知県全域
 左下：地表最大速度が150cm/sを超える回数の度数分布表示例：高知県庁付近（モンテカルロシミュレーション全体：10,000回）
 右下：建物倒壊率が30%を超える回数の度数分布表示例：高知県庁付近（モンテカルロシミュレーション全体：10,000回）

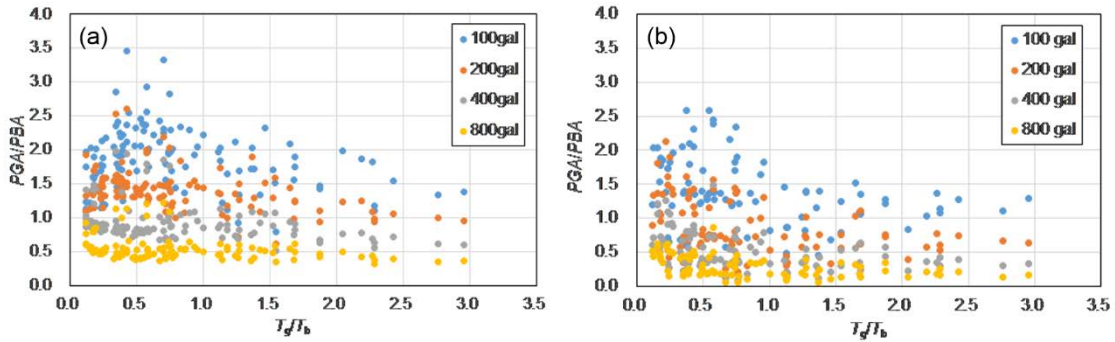


図2．地盤増幅率と周期比の関係（拠点間連携共同研究〔課題番号：2990〕）

左：非液状化解析
 右：液状化解析

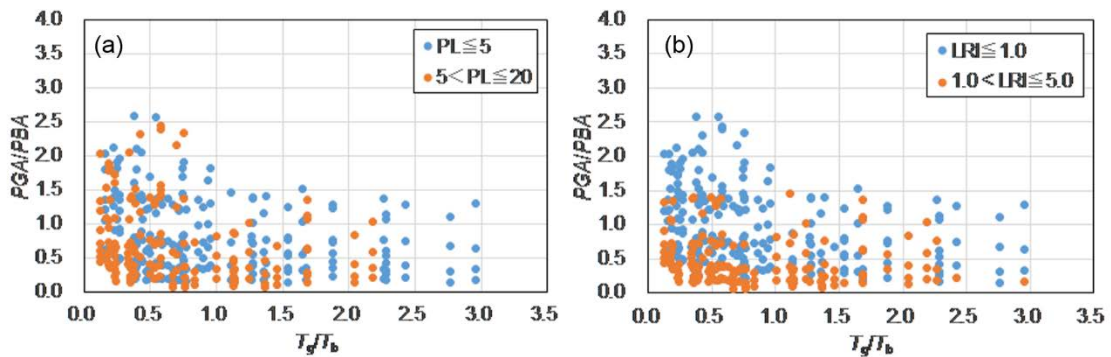


図3．幅率と周期比の関係（拠点間連携共同研究〔課題番号：2990〕）

左：PLで分類した結果
 右：LRIで分類した結果

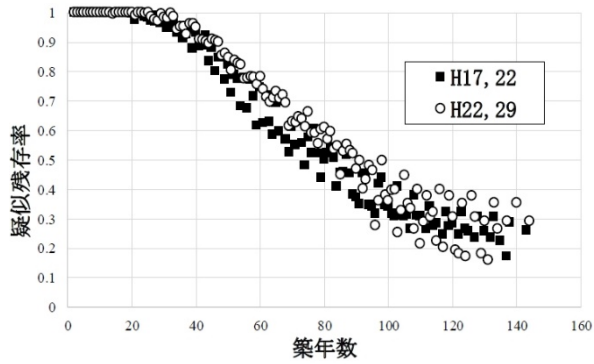


図4. 南国市における建物（住宅）残存率（拠点間連携共同研究 [課題番号：2952])

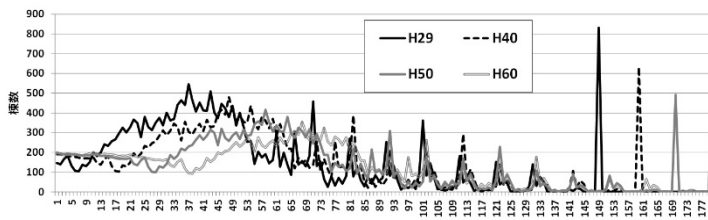


図5. 将来時点での築年数ごとの木造戸建住宅の棟数予測（拠点間連携共同研究 [課題番号：2952])

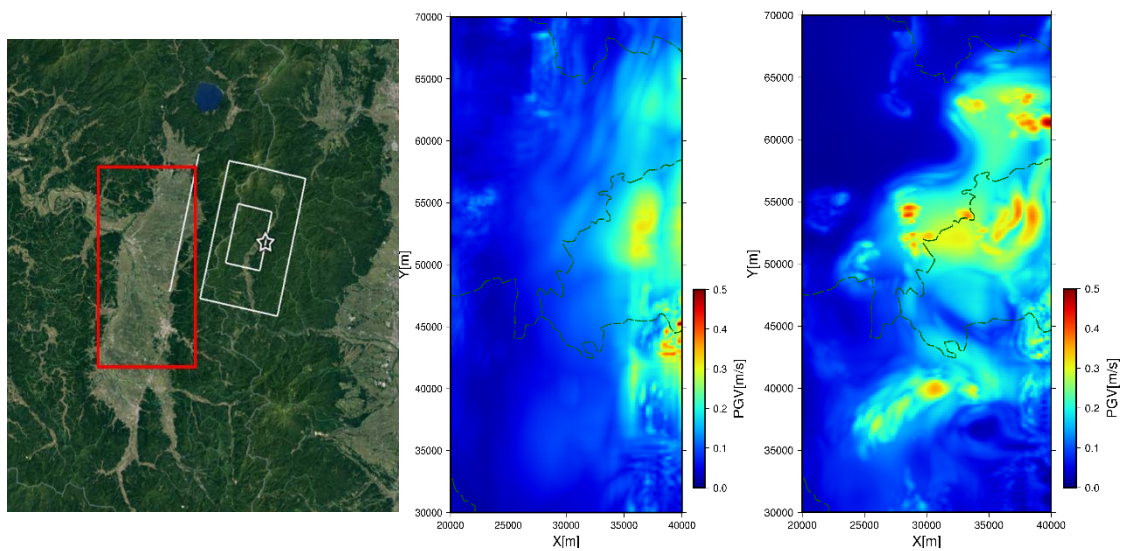


図6. 1896年陸羽地震の強震動シミュレーションによる最大速度分布（EW成分）（拠点間連携共同研究 [課題番号：2953])

左：1896年陸羽地震の震源断層と計算領域（赤枠）の関係

中：J-SHIS深部地盤構造モデルによる結果

右：本研究の推定地盤構造モデルによる結果

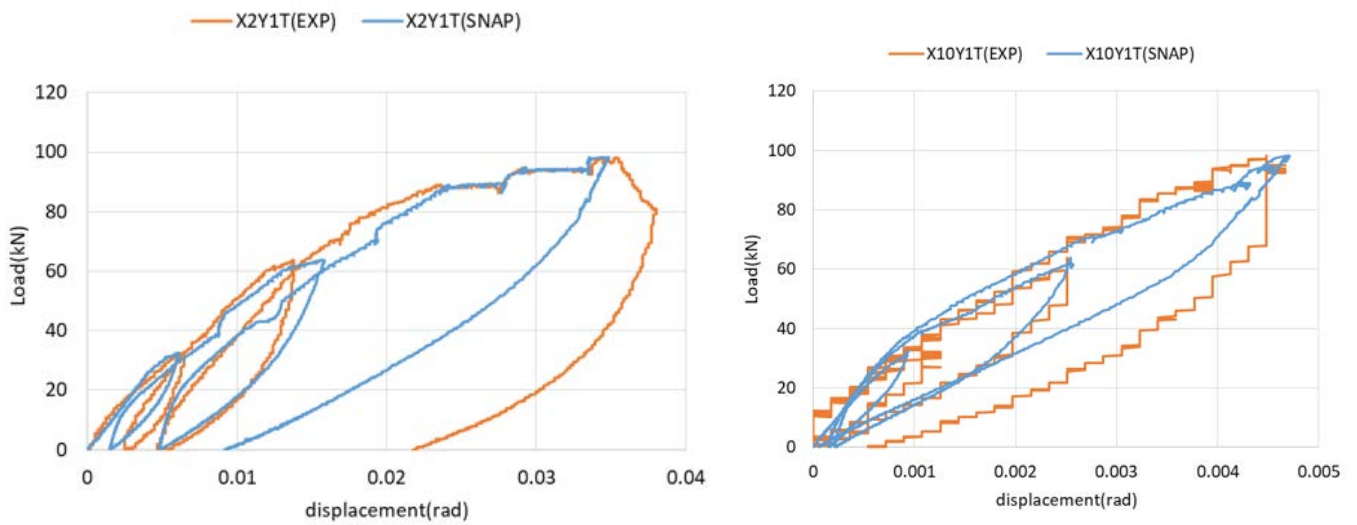


図7. 古民家の変位-荷重関係の再現解析結果（拠点間連携共同研究 [課題番号：2954]）
 橙線（EXP）は実験結果、青線（SNAP）は構造解析用ソフトSNAPによる解析結果。
 左：X2-Y1位置
 右：X10-Y1位置

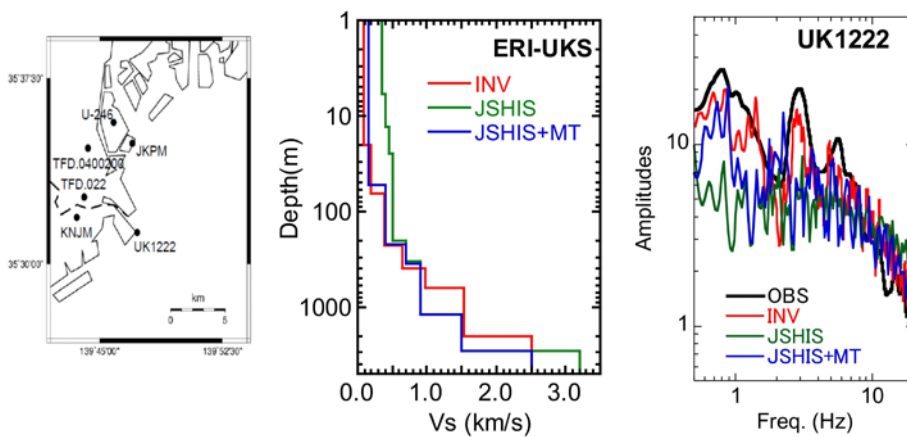


図8. 東京湾西岸部(UK1222)の1次元浅部深部統合地盤モデルとサイト特性の比較（拠点間連携共同研究 [課題番号：2955]）
 左：観測点位置
 中：1次元浅部深部統合地盤モデル
 右：地盤増幅特性

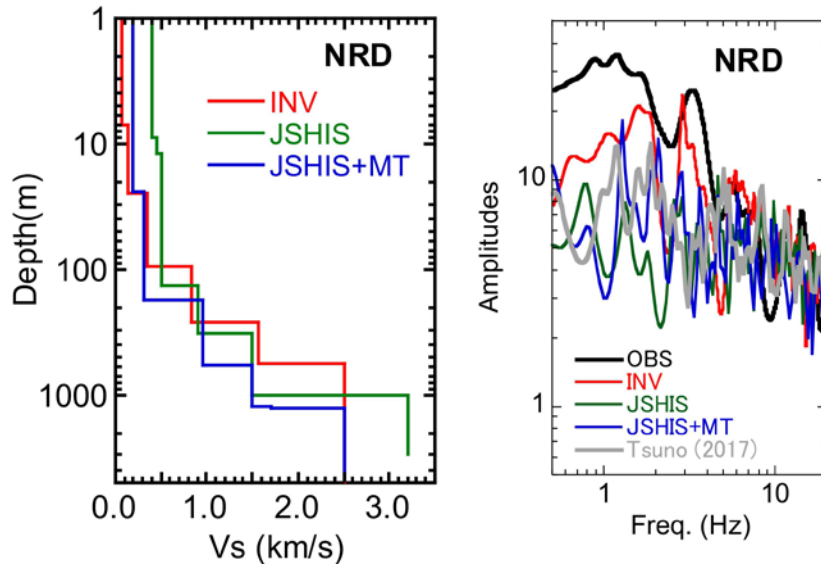


図9. 足柄平野 (NRD) の 1 次元浅部深部統合地盤モデルとサイト特性の比較 (拠点間連携共同研究 [課題番号: 2955])

左: 1 次元浅部深部統合地盤モデル

右: 地盤増幅特性

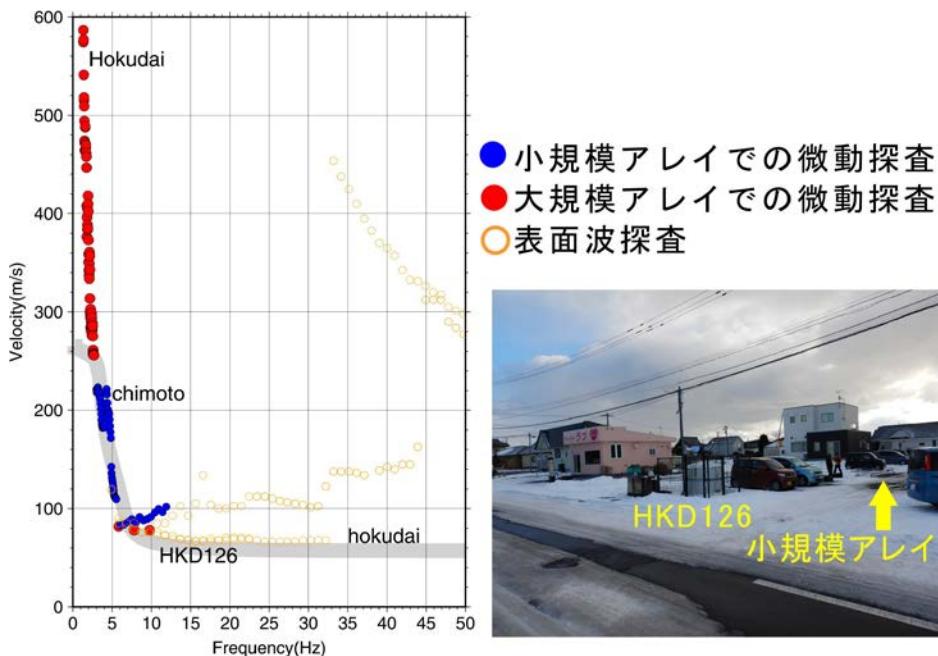


図10. HKD126 (K-NET 鷺川) での微動および表面波探査の結果 (拠点間連携共同研究 [課題番号: 2955])

左: 推定されたレイリー波位相速度

右: 観測点位置

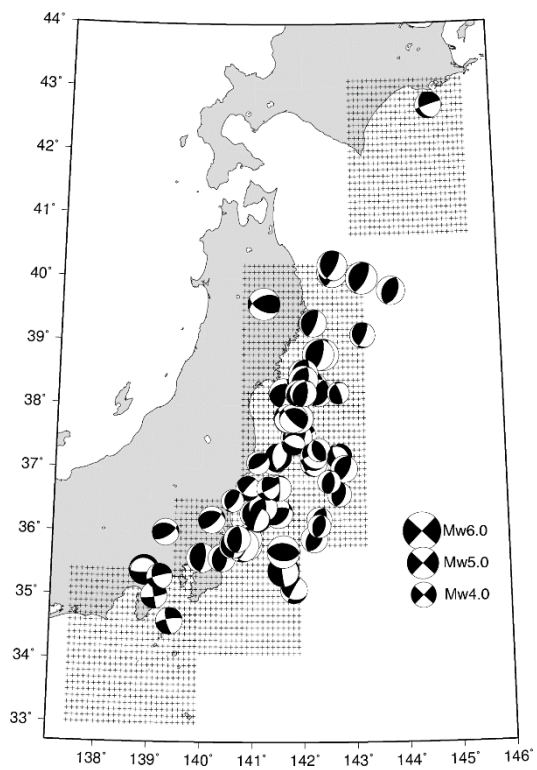


図11. GRiD MTにより決定された震源メカニズム解(拠点間連携共同研究[課題番号:2958])

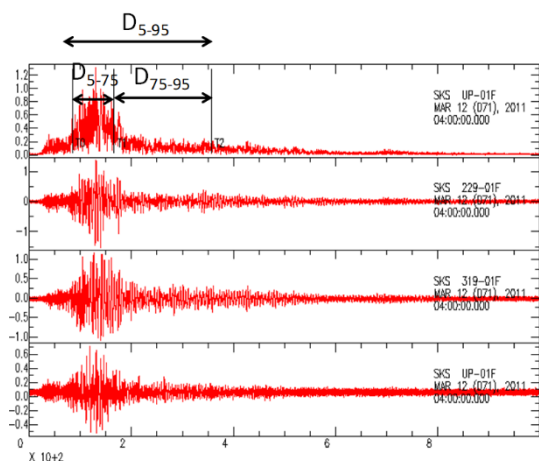


図12. 揺れ継続時間の定義（拠点間連携共同研究 [課題番号：2958]）

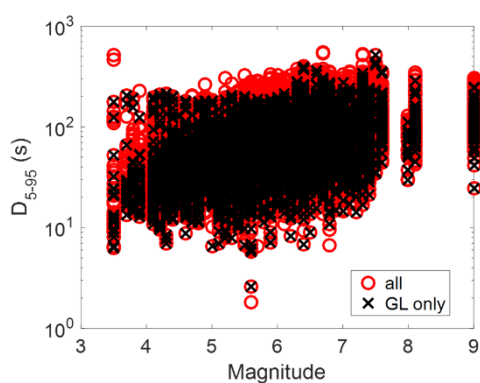


図13. 揺れ継続時間とマグニチュードの関係（拠点間連携共同研究 [課題番号：2958]）

表1. 崩壊とそれに伴う地震動の特徴（拠点間連携共同研究 [課題番号：2994]）

| 年・場所 | 2011年 紀伊半島 | 2013年 京都市 | 2013年 伊豆大島 | 2014年 南木曾町 | 2015・2016年 厚岸町 | 2017年 飯山市 | 2017年 日田市 |
|-----------------------|----------------------|--------------------------|---|----------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------|
| 崩壊のタイプ | 深層崩壊 | 表層崩壊・土石流 | 表層崩壊・土砂流 | 土石流 | 再活動型地すべり | 地すべり性崩壊・土石流 | 地すべり性崩壊 |
| 地質 | 付加体 堆積岩 | 粘性土・盛土 | テフラ | 花崗岩 | 粘性土 | 凝灰岩 | 安山岩溶岩・凝 灰角礫岩 |
| 長さ・流走距離 | 1 km | 30 m (崩壊) 100 m (土石流) | 50-500 m (崩壊) 2 km (土石流) | 2 km | 70 m | 300 m 800 m (土石流) | 200 m |
| 幅 | 400 m | 20 m | 50-300 m | 50-100 m | 30 m | 150-200 m | 150-200 m |
| 厚さ | 60-100 m | 1 m | 1 m | N/A | 5 m | 20-50 m | 10-20 m |
| 卓越周波数 (震央距離) | 1-4 Hz (10-70 km) | 3-10 Hz (50 m) | 2-6 Hz (500 m - 5 km) | 3-30 Hz (500 m - 30 km) | 震動なし (5 m) | 0.5-2 Hz (8-60 km) | 1-4 Hz (8-20 km) |
| 継続時間 | 50-100 s | 50-100 s | 30-200 s | 20 min | 移動時間は 20 h | 200 s | 30-50 s |
| 長周期 (> 10 s) 信号の有無 | ○ | × | × | ? | × | ○ | × |
| 引用文献 | Yamada et al. (2012) | 土井ほか(2017) | Ogiso, Yamogida (2015) Doi et al. (2016) | 本研究 | 土井ほか(2017) | 本研究 Yamada et al. (2017) | 本研究 |

科学技術・学術審議会測地学分科会
地震火山部会

〒100-8959 東京都千代田区霞が関3-2-2
文部科学省研究開発局地震・防災研究課

電話：03-6734-4137 FAX：03-6734-4139

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