

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」

令和3年度年次報告

【成果の概要】

令和4年9月

科学技術・学術審議会測地学分科会

地震火山観測研究計画部会

目 次

【令和3年度の成果の概要】

1. はじめに	1
2. 令和3年度に発生した重要な地震・火山噴火と本研究計画の活動について	6
2-1. 2020年末から続く能登半島群発地震活動と地殻変動	6
2-2. 2021年3月20日(M6.9)と5月1日(M6.8)の宮城県沖の地震	7
2-3. 2021年8月13日に発生した福島岡ノ場噴火	8
2-4. 2021年10月20日の阿蘇山噴火	10
2-5. 2022年1月15日のトンガの火山噴火と津波	11
3. 令和3年度の成果の概要	13
3-1. 地震・火山現象の解明のための研究	13
3-2. 地震・火山噴火の予測のための研究	23
3-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究	29
3-4. 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究	39
3-5. 研究を推進するための体制の整備	44
4. まとめ	53
用語解説	55
災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次) 実施機関	88
災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次) 令和3年度研究課題一覧	89

【参考資料】

計画推進部会および総合研究グループ等別の成果	95
1 (1) 地震(現象解明)	97
1 (2) 地震(長期予測)	136
1 (3) 地震(中短期予測)	152
1 (4) 火山	199
1 (5) 災害誘因評価・即時予測	217
1 (6) 防災リテラシー	246
1 (7) 史料・考古	258
1 (8) 観測研究基盤	267
2 (1) 南海トラフ沿いの巨大地震	277
2 (2) 首都直下地震	279
2 (3) 千島海溝沿いの巨大地震	282
2 (4) 桜島大規模火山噴火	286
2 (5) 高リスク小規模火山噴火	290
3 拠点間連携共同研究	296

[令和3年度の成果の概要]

1. はじめに

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

本研究計画は以下の5つの大項目で構成される。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

令和3年度の本研究計画は、国立大学法人等、国立研究開発法人、独立行政法人、政府機関、公設試験研究機関¹が策定した170の実施計画（個別課題）、公募による17の実施計画（個別課題）、及び拠点間連携共同研究²としての29の実施計画（個別課題）からなっている。また、この個別課題の成果は、年次報告【機関別】（文部科学省及び地震・火山噴火予知研究協議会^{*3}のホームページに掲載）に取りまとめられている。これらの個別課題による研究成果をもとに、本研究計画の項目別に令和3年度の成果を取りまとめたものが本報告書である。

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

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

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

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

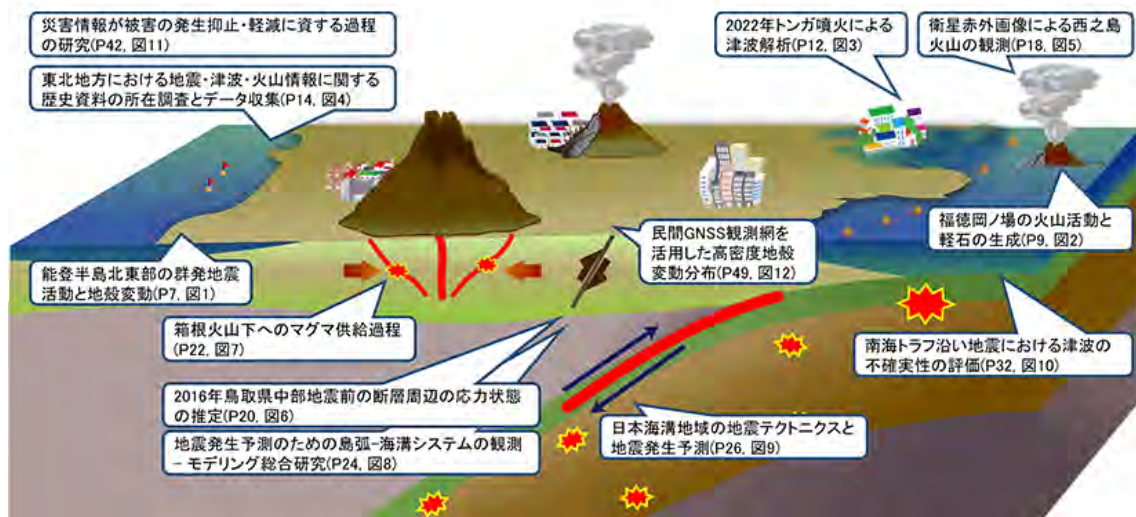
⁴ 用語解説に掲載している用語に、下線（破線）と*を付記している。

また、本報告書では、研究課題を[xxxx01]のように課題番号で示している。それぞれの研究実施機関・研究課題名・研究代表者については「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（令和３年度）研究課題一覧」のページを参照されたい。

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

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

① 地震・火山現象の解明のための研究 ● 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析 ● 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明 ● 地震発生過程の解明とモデル化 ● 火山現象の解明とモデル化 ● 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化	⑤ 研究を推進するための体制の整備 研究推進体制の整備 ● 推進体制の整備 ● 分野横断で取り組む 総合的研究の推進体制 ▶ 南海トラフ ▶ 首都直下 ▶ 千島海溝 ▶ 桜島大規模噴火 ▶ 高リスク小規模噴火 研究基盤の開発 ● 研究基盤の開発・整備 国内外の関連分野との連携 ● 関連研究分野との連携強化 ● 国際共同研究・国際協力 研究成果への理解醸成と人材育成 ● 社会との共通理解の醸成と災害教育 ● 次世代を担う人材の育成 ※ 計画の実施機関 総務省・文部科学省・経済産業省・国土交通省及びこれらが所管する国立研究開発法人、国立大学法人等
② 地震・火山噴火の予測のための研究 重点的な研究 地震発生の新たな長期予測 重点的な研究 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測 重点的な研究 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測 ● 先行現象に基づく地震発生の確率予測 ● 中長期的な火山活動の評価	
③ 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究 ● 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化 ● 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化 ● 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究	
④ 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究 ● 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明 ● 地震・火山噴火に関する社会の共通理解醸成のための研究	



災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）令和3年度成果のまとめ。災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究の全体像を描き、その主要な成果を吹き出しで記述した。詳しくは吹き出しに記載されたページと図を参照。

2. 令和3年度に発生した重要な地震・火山噴火と本研究計画の活動について

2-1. 2020年末から続く能登半島群発地震活動と地殻変動

能登半島（石川県）の北東端部では、過去1年以上に亘り群発地震*活動が続き、顕著な地殻変動も観測されている（図1）。地震活動を遡ると、2018年頃から地震数が増加し始めていた。2020年12月頃からは地震活動が急激に活発になった。地震は北側・西側領域でも起こるようになり、2020年7月頃からは東側へも範囲を広げた。地震活動も一段と高まり、有感地震も数多く観測されるようになった。地震活動の範囲は、地下10-20 km程度にあり、水平には15 km四方ほどにまで広がった（図1上）。また、地震活動の活発化とともに地殻変動が観測され、2020年12月頃から珠洲を中心に隆起が開始した。この様な活動の中、2021年9月16日にはM5.1の地震が発生し、最大震度5弱を記録した。この後も地震活動は高い状態で推移し、2022年3月末の時点で、2020年12月から数えて累計4,000個を超える地震が能登地方で発生し、104回もの有感地震が観測された。珠洲における地殻*の隆起量は約4 cmにも達した（図1下）。

地震活動は、大きく分けて東西南北の4領域で固まりを作って発生している。しかし、それらの発生に対応付けられる断層面は不明瞭で、活断層*との関係も明らかでない。能登半島の北西部では2007年能登半島地震(M6.9)が発生しており、今回の活動はその北東延長部に位置しているが、関連性は不明である。地殻変動においては、地震が発生している領域を中心に放射状に広がる変動が観測されており、地下に変動源が存在することを示唆している。このように地震活動や地殻活動について暫定的な状況把握ができているものの、調査すべき課題が残されている。

過去に日本で発生した有名な群発地震現象として、1965年から年単位で活動の続いた松代群発地震がある。この時とは異なり、現在では様々な観測が高精度かつ高密度に行われている。能登半島の群発地震発生域では、基盤観測網*に加え臨時地震観測が続けられているほか、GEONET*や大学の臨時観測点を利用したGNSS*連続観測をはじめとした測地学的観測、電磁気探査*等が進められている。一般的に、この様な群発地震は活動の推移予測が極めて困難である。しかし、今なお活動が続いている現象である事にも留意しつつ、それらの記録の解析や、新たな調査を通じて、群発地震活動や地殻隆起の原因解明が進むことが期待される。

能登半島北東部の群発地震活動と地殻変動

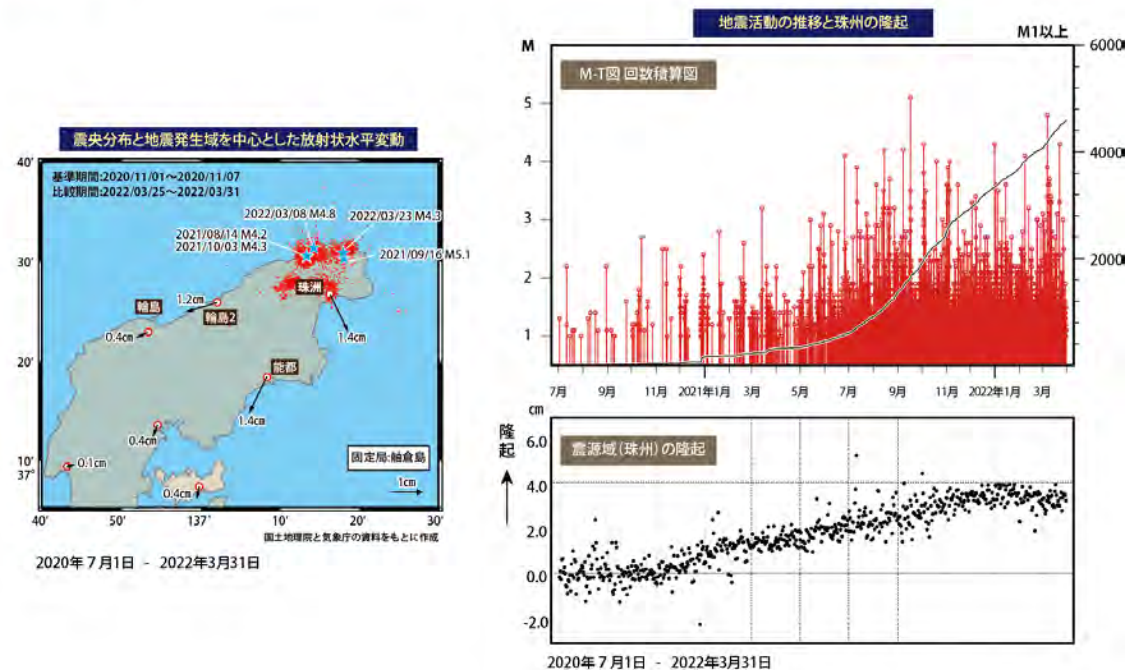


図1．能登半島北東部の群発地震活動と地殻変動

能登半島（石川県）の北東部端では、2020 年 12 月頃から地震活動が急激に活発化し（右上）、震源域周辺を中心とする放射状の水平変動（左）と、隆起（右下）が見られた。この活動の変動源の解明は、今後の課題である。

2-2 ． 2021 年 3 月 20 日（M6.9）と 5 月 1 日（M6.8）の宮城県沖の地震

2011 年東北地方太平洋沖地震（M9.0，以下東北沖地震）からおよそ 10 年経った 2021 年 3 月と 5 月に、宮城県沖で M7 クラスの地震が発生し、それぞれ最大震度 5 強を観測した。両地震ともプレート境界（深さ 50-60 km）で発生した地震であり、震源*は東北沖地震の滑り域の西縁付近（深部延長側）に位置する。プレート境界の深さ 50-60 km の領域では、繰り返し地震*と GNSS データの解析から活発な余効滑り*が発生していたと考えられており、東北沖地震以降活発な地震活動も継続している。一方、精密な震源決定によると、3 月の地震の破壊開始点*はプレート境界型地震*の発生する深さの下限付近に位置し、ここでは東北沖地震後に比較的規模の大きな M5 クラスの繰り返し地震が発生していた。この繰り返し地震は東北沖地震前には発生しておらず、それまで非地震的に滑っていた領域が、東北沖地震後地震的に滑るようになったと考えられる[1]。この繰り返し地震と 3 月の地震の P 波*初動部分はとてもよく似ており、3 月の地震は M5 の繰り返し地震から始まり、さらに広い範囲へと破壊が発展したのと考えられる[1]。

その後、5 月の地震は 3 月の地震の南東で発生した。5 月の地震の破壊開始点は 3 月の地

震によるクーロン応力変化* (ΔCFS) が正である場所にあり、東北沖地震以前から地震活動が比較的活発であった場所に対応していた。このことは、先行する地震の引き起こした応力*変化とプレート境界固有の性質の両方が地震の発生に影響を及ぼしていることを示唆する[1]。

さらに地震波形インバージョン* [1][2]によると、これら2つの地震の滑り域は、1978年のプレート境界型地震である宮城県沖地震 (M7.4) の滑り域の概ね西半分 (深部側) に重なることがわかった。このことは、東北沖地震の余効滑りにより、東北沖地震震源域の深部延長側で地震が発生しやすくなっていることを示唆する。このプレート境界深部領域は、震源が人口の多い陸域に近く、被害が出やすいこと、1978年の宮城県沖地震の滑り域の東半分がまだ破壊されずに残っていると考えられることから、今後も地震活動の推移を見守っていく必要がある。

[1] Yoshida et al. (2022) JGR

[2] 久保・他 (2021)

https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/Miyagiken0ki_20210320/inversion/inv_index.html

2-3. 2021年8月13日に発生した福徳岡ノ場噴火

2021年8月13日に、小笠原諸島に属する海底火山である福徳岡ノ場において大規模な噴火が発生した (図2)。噴煙高度は16 km以上に達し、大量の噴出物により一時的に新島が出現した。福徳岡ノ場では1904年、1914年、および1986年の活動でも新島が形成されたがいずれも浸食により海没している。今回の噴火で生じた新島も浸食により数ヶ月で消滅した。

福徳岡ノ場は最も近い有人島である硫黄島からでも約50 km離れており、当初はこの噴火に伴う大きな被害は無いと考えられていた。しかし、8月15日に撮影された衛星画像では300 km²に及ぶ漂流軽石 (軽石いかだ) が観測され、約2ヶ月後の10月上旬以降、沖縄県や鹿児島県の奄美地方の沿岸に軽石の漂着が始まった。港湾に大量の軽石が漂着することで漁業や海運に大きな被害を及ぼした。1986年噴火でも沖縄などへの軽石漂着が報告されているが、今回の噴火による漂着軽石は規模が遥かに大きい。

この噴火に関しては様々な機関が観測を実施しており、噴火の詳細が徐々に明らかになりつつある。噴火の推移は気象衛星ひまわり等の衛星データ、海上保安庁による空撮、父島における地震・空振*観測等により捉えられている。産業技術総合研究所は噴煙高度に基づく噴火規模の推定を行い、海洋研究開発機構はハイドロフォン観測により噴火を早期に検知するとともに、軽石の採取・分析や、海流に伴う軽石移動のシミュレーション*を実施した。国土地理院は衛星画像*による新島の消長を追跡し、大学は観測データと数値シミュレ

ーションに基づく噴火メカニズムの推定を進めている。

噴火に伴って生じた新島や漂流軽石の体積は衛星画像や航空機の画像から見積もられており、少なくとも 0.1 km^3 に達すると考えられている。この体積は衛星から観測された SO_2 量とも調和的である。この噴出物体積に基づく噴火の規模は $\text{VEI}^*=4$ 以上と推定されるが、噴煙中に含まれる噴出物の量によっては、規模が更に上振れする可能性もある。衛星からの可視・赤外画像や火山ガス*の観測値、噴煙高度に関する数値シミュレーション結果等を総合した結果、軽石は噴煙柱からの降下軽石ではなく、噴火の最盛期に火口から直接生じたものと推定されている。

福徳岡ノ場の火山活動と軽石の生成



図 2. 福徳岡ノ場の火山活動と軽石の生成

a) 福徳岡ノ場の位置 b) 海上保安庁により 2021 年 8 月 13 日 15 時に撮影された噴煙柱*の様子。c) 気象衛星ひまわりの画像による、漂流軽石の分布。d) 噴火最盛期の模式図。水に富んだ噴煙柱の崩壊により火口近傍で火砕物密度流*が発生するとともに、低密度火砕物の集積が急速に進み、漂流軽石が大量に生じた (Maeno et al., under revision に加筆・修正)。

2-4. 2021 年 10 月 20 日の阿蘇山噴火

2021 年 10 月 20 日 11 時 43 分に阿蘇山の中岳第一火口において小規模な噴火が発生した。この噴火により、多数の噴石が放出され、噴煙は火口縁上 3,500 m の高度に達し、火砕流*も発生し最大で火口の北側 1.6 km まで流下した。この噴火をうけ、気象庁は 11 時 44 分に噴火速報*を発表し、11 時 48 分に噴火警戒レベル*を 2（火口周辺規制）から 3（入山規制）に引き上げた。

中岳第一火口では、2019 年 7 月から 2020 年 6 月にかけての小規模なマグマ活動（191 火孔*からの灰放出）以降、火山性微動*振幅は概ね小さい状態で経過するとともに、火山ガス放出量も 200～1,100 トン/日程度であるなど、火山活動は比較的穏やかな状況となっていた。しかし、活動静穏期に見られる湯だまりは復活していなかった。このような状況のもと、2021 年 6 月 18 日には 191 火孔の北東側に直径 50 m、深さ 50 m の円柱状の陥没孔が形成された。その後、8 月下旬には同陥没孔内と 191 火孔内に湯だまりが認められ、その水位は 10 月 4 日までに 20 m 程度上昇していた。

阿蘇火山周辺での多項目観測によれば、2021 年 9 月頃から、マグマ溜まりをはさむ基線長が伸びに転じ、同時期に、火口浅部の温度上昇を示す地磁気変化が観測された。また 10 月初旬から、長周期の火山性地震（LPT）の発生回数が急増するとともに火山ガス放出量が増大したことが捉えられている。そして、10 月 13 日に火山性微動の振幅増大が観測され、噴火警戒レベルが 2 に引き上げられたのち、10 月 14 日の 4 時 43 分頃にごく小規模な水蒸気噴火*が発生した。その後、10 月 18 日に微動振幅増大が観測され、気象庁は火山の状況に関する解説情報*（臨時）を発表した。解説情報（臨時）は 19 日にも発表されたが、20 日の噴火前に噴火警戒レベルが 3 に上げられることはなかった。このことは、噴火規模の予測がいまだ困難であることを示している。

10 月 20 日の噴火後、熊本大学や防災科学技術研究所などにより降灰調査が行われた。この調査は、火山観測データ一元化共有システム（JVDN システム*）を活用した複数機関の連携調査としては初となるものであった。この調査の結果得られた降灰量は約 15,000 トンであった。ただし、この量には火口周辺域の降灰や火砕流堆積物は含まれていない。また、火山灰には本質物質*がほとんど含まれていなかったことから、この噴火は水蒸気噴火であると判断された。一方、火山機動観測実証研究事業*により、ドローンによる噴石の飛散状況調査が実施され、噴出主軸は南～南東側と北西側の二方向であること、噴石の最大飛距離は火口中心から南へ 900 m であることが明らかになった。

この噴火に先立つ 2021 年 2 月に、阿蘇山における観光客の火山認知度、噴火警戒レベルの理解度に関する Web アンケート調査が実施されていた。その結果によると、阿蘇山が活火山であることをはっきりと認識していたのは約 7 割であり、観光や登山前に噴火警戒レベルを確認していた人は約 4 割にすぎなかった。そして、噴火速報に対応したスマートフォンの防災アプリの利用者は 3 割に満たなかった。

この噴火による死者・負傷者は報告されていないが、火山活動の状況や噴火発生時の情報を正確かつ迅速に登山客や観光客に伝達するうえでの多くの課題が明らかになった。気象庁は火山の状況に関する解説情報（臨時）を発表したが、噴火警戒レベルの理解度（約6割）から判断すると、解説情報（臨時）のもつ意味が正しく理解されていたとは言い難い。また、阿蘇火山防災会議協議会*は、10月19日に解説情報（臨時）が発表されたことを受け20日8時30分から中岳に通じる登山道を閉鎖したが、早朝から活動する登山客を止めることは出来ず、噴火時には16名が中岳周辺にいた。そして、噴火直後に発表された噴火速報は、それらの登山客の多くには届かなかった。

これらの課題を受け、気象庁は噴火警戒レベルの判定基準の見直しに着手し、阿蘇火山防災会議協議会は、分かりやすい看板の設置、登山道封鎖手順の見直しを実施している。今後は、噴火速報をエリアメールの様な形で一斉配信する方策も検討されるべきである。

2-5. 2022年1月15日のトンガの火山噴火と津波

2022年1月15日4時14分（世界時）にトンガの海底火山フンガトンガ・フンガハアパイで大規模な爆発的噴火が発生した。一連の噴火は2021年12月20日に始まり、約4週間後に巨大な噴煙柱を伴うプリニー式噴火*のクライマックスに至った。この噴火では、近隣の島々に大量の火山灰が降り、津波によって海岸付近の建物が押し流されて壊滅的な被害がもたらされた地域も多い。また、海底通信ケーブルが断絶したり、トンガ国外からの救援が滞って島民が一時孤立状態になったりするなど、深刻な状況が生じたと報じられている。

1月15日の噴火の爆発性を表すVEI*は少なくとも5に達し、20世紀最大級の噴火とされる1991年のピナツボ噴火に匹敵する規模の噴火だった可能性がある。人工衛星の画像解析によれば、噴火開始からわずか30分程度で噴煙の最高高度は約58kmの中間圏にまで到達し[1]、噴煙の傘の半径は200kmを超えたとの報告がある[1][2]。このような急速な噴煙の発達、マグマの噴出率が高かったことや、マグマが多量の海水と接触することで噴煙柱への水蒸気の取り込みが促進されたことが原因ではないかと考えられている[2]。

この爆発的噴火に伴って大きな気圧変動（空振）が発生した。この気圧変動が海面を揺さぶることで波が励起され、それが何千kmも離れた太平洋沿岸まで伝播しながら発達したと考えられている[3]（図3）。気圧変動に伴う海面変動は従来から「気象津波」として知られていたが、噴火に伴う空振による海面変動の励起・伝播の過程が詳細に観測された例はこれまでなく、気象庁の津波警報*発出にもこうしたメカニズムはこれまで考慮されていなかった。しかし、実際にはこの噴火に伴って日本でも最大1m程度の潮位のゆらぎが観測された。今回のような大規模噴火による海面変動は、低頻度ではあるものの、火山がもたらすハザードの一つとして備えるべき事象であり、そのための研究の必要性も認識された。

日本海溝沿いの海底に設置されている圧力計の観測網（S-net*）によって、空振および海面変動に起因する水圧変動が克明に記録された（図3）。この水圧計記録は、南東方向から北

西方向へ伝播する大気圧力波を仮定したモデリングで説明できる（図3右）。また、東京湾アクアラインの海底トンネルに東京大学が設置しているミュオグラフィ*装置でも同様の海面変動が記録されたことが報告されている[2]。本研究計画において今後これらのデータを精査することで、大規模噴火に伴う津波の予測と警報の精度向上に資する研究がさらに進むことが期待される。

[1] <https://earthobservatory.nasa.gov/images/149474/>

[2] <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/news/15712/>

[3] Tanioka et al. (2022) EPS

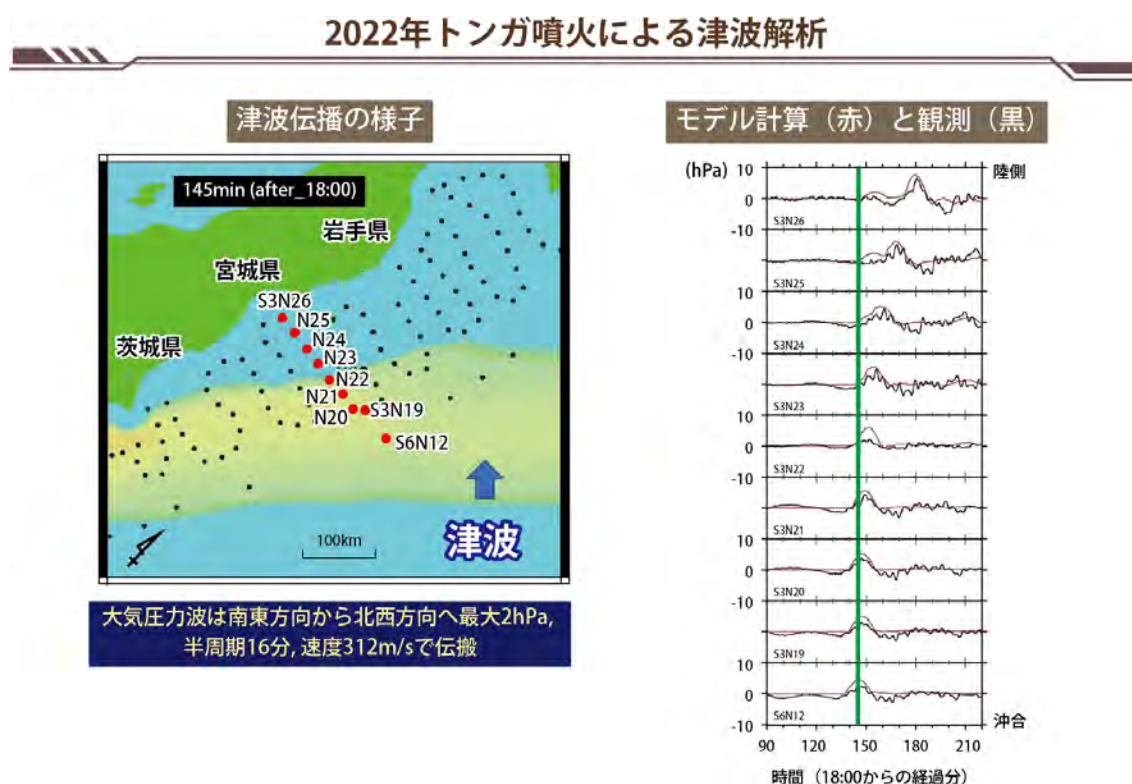


図3．2022年トンガ噴火による津波解析

2022年1月15日のトンガの海底火山フンガトンガ・フンガハアパイでの大規模な爆発的噴火による津波の解析。日本海溝沿いの海底に設置されている圧力計の観測網（S-net）により記録された、海面変動に起因する水圧変動（右黒線）とモデル結果（右赤線および左）を示す。左図は、右図の緑線の時刻の海面変動を示す。右図の観測点は、左図の9つの赤丸の位置に対応する（Tanioka et al., 2022 に加筆・修正）。

3. 令和3年度の成果の概要

3-1. 地震・火山現象の解明のための研究

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

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

長期間における地震・火山現象とそれに伴う災害を正確に把握するために、史料・考古データ、地質データ等の収集・集積と分析を行うことで、データベース化を進めた。

ア. 史料の収集とデータベース化

文化元年(1804 年)象潟地震について、由利郡関村（現、秋田県にかほ市象潟町関地区）に伝来する古文書・古地図を解読し、詳細な被害状況について復元調査したところ、関村の家屋被害率は 80 %を超えることが確認された（図 4）^{〔IR1D01〕}。既刊地震史料集全 33 冊の全文デジタル化を完了させた。そして、デジタル化した地震史料データベースを活用しやすいものにするために、様々な検索方法を整備し、Web による公開を開始した^{〔UTH_01〕}。史料を効率的に理学的解釈に活用することを目的に、フリーの GIS ソフトを用いて情報を面的に整理する仕組みを構築した。このシステムを用いて、三重県を例に、南海トラフ巨大地震史料が含む地域情報を面的に整理し、その効果を確認した^{〔NGY_01〕}。1707 年富士山宝永噴火に関して、復興途上の様子を描いた村絵図の分析を行った^{〔HMEV01〕}。



図 4. 東北地方における地震・津波・火山情報に関する歴史資料の所在調査とデータ収集
文化元年(1804 年)象潟地震について、由利郡関村（現在のにかほ市象潟町関地区）に伝来する古文書・古地図を解読し、詳細な被害状況について調査した。象潟地震における関村の家屋被害について記した『当六月四日之夜大地震ニ付潰家死人馬書上帳控』では、当初は「潰家」「大痛」と判定されていたものが、後に「潰家」「大痛」「中痛」と評価が細分化されて判定されており、これらを含めて計算すると関村の家屋被害率は 80 %を超えることが確認された。また、古絵図から当時の関村の家屋配置、歴史地形を復元し、関地区では津波が集落に到着した可能性は低い一方で、地震動による家屋倒壊や耕作地の被害が大きいことが確認された。

イ. 考古データの収集・集成と分析

縄文時代中期(紀元前 3500～2500 年頃)に発生した三陸地震津波の発生後に着目し、海岸部低平野集落の高台移転の状況や、集落、集落域の大規模整地、家屋遺品の投棄、特異な人骨集積埋葬があったことを確認した^[NGT_01]。これにより、この津波が少なくとも現在の岩手県から宮城県まで東日本太平洋沿岸部を広く襲った大規模な地震によるものであることがわかった。地震痕跡調査と調査結果のデータベース化が進められ、断層帯からの距離と共に痕跡の検出数が減少することや、地形との対応などが明らかとなった^[NAB_01]。

鹿児島湾を中心に遺跡の分布とそれぞれの成立時期について情報をまとめ、さらに史料に残る近世以降の桜島噴火情報と、発掘調査で検出される被災痕跡を集成することで、過去の火山噴火災害についてデータベース化が進められた。その結果、近世以降の桜島噴火のな

かで、これまで被災がなかったと考えられてきた鹿児島湾西側沿岸域に降下火山灰がみられることが示された ^[NAB_01]。

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

17 世紀に千島海溝で発生した巨大地震による津波浸水時の地形復元が行われた ^[AIST08]。北海道十勝地方の当縁川河口域において、従来津波堆積物*が確認されていた海岸線付近に加えて内陸側の湿地や段丘上の調査を実施したところ、湿地域では 1739 年と 1856 年のデフラ*の間の期間に離水したことが明らかになった。このことから、17 世紀の巨大地震に伴う隆起が余効変動*として 200 年以上続いたことが示唆された ^[HKD_01]。

内陸地震の発生履歴に関する調査として、活断層の地震履歴に関する調査も進められた。中央構造線断層帯の讃岐山脈南縁区間鳴門南断層において実施された 3 次元的トレンチ調査*及び年代測定から、縄文時代から鎌倉時代以降に発生したと考えられる 3 回の地震の発生間隔は、600 年から 2,500 年以上とばらつきがあることが認められた ^[AIST02]。糸魚川―静岡構造線断層帯では北部の白馬地区と南部の白州地区での調査が行われた結果、9,000 年間に 4 回の活動が生じた可能性があり、断層変位の観察に基づく活動間隔は従来考えられてきた約 5,000 年よりも短い可能性が示された ^[NGY_03]。

富士火山の爆発的噴火の噴出物の解析からはマグマ中の初期含水量が低い必要があること、より深部からのマグマ注入が必要であることが示唆された ^[ERI_02]。草津白根山本白根火砕丘群に見られる小火口の活動履歴調査から、計 4 ヶ所の火口の活動年代（2,700 年前、1,700 年前、400 年前）や、火砕丘群本体の形成後も VEI 1 程度の水蒸気噴火が頻発していたことが示された ^[TYM_01]。

将来噴火する可能性の高い活火山の中長期的活動評価と予測のため、火山の地質図作成が進められ、恵山火山地質図が出版された。また、大規模火砕流分布図シリーズとして「始良カルデラ入戸火砕流堆積物分布図」が Web 公開された。そして、日本列島の火山の基礎情報を最新の知見に基づいて収集・整理するため、日本の火山データベースに桜島と富士山の完新世噴火イベントのデータが追加されるとともに、20 万分の 1 日本火山図が更新・拡充された ^[AIST03]。

（２）低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

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

日記史料有感地震データベース (<http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/HEVA-DB/>) の改良を継続した。近世後半の日本各地の有感記録と、1900 年代以降の震度観測データとを比較し特徴を調べたところ、一例として、1835 年 5 月に西日本で広く感知された地震の震度分布

が、1968 年 4 月 1 日の日向灘地震(M7.5)と類似していることがわかった [HMEV02]。

伊豆大島では、中規模噴火から小規模噴火への長期的推移において斜長石斑晶量がしだいに増加していることが示された。西之島については 2019-2020 年噴火における噴火様式や化学組成の劇的変化が、より深部に由来する苦鉄質マグマ*の上昇に起因していることが示された [ERI_03]。支笏カルデラでは U-Th 放射非平衡*の解析から、二成分マグマ混合によって生成された珪長質噴出物のうち、一方の端成分マグマの生成率が 15 km³/万年程度であると推定された。阿寒カルデラでは、阿寒富士のマグマ生成の温度圧力条件が推定された [UTH_01]。鬼界カルデラや周辺の島において研究航海が行われ堆積物・岩石試料の物質科学的解析が進められた。ピストンコア試料*とドレッジ試料*について全岩化学組成*分析および火山ガラス*の化学組成分析が行われ、鬼界火山全体のマグマの多様性および噴火活動ステージにおける特徴が明らかにされた [KOE01]。

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

多様な断層滑りや地震活動に関する研究を通して地震発生過程の解明を進めた。また、地球科学的観測や調査、室内・数値実験などを通して、地震断層滑りの物理・化学モデルの構築を行った。

ア. 地震発生機構の解明

大規模地震を対象として次のような研究が行われた。1896 年明治三陸津波地震の破壊過程*を解明するために、速度構造探査から明らかにされている付加体*の存在を考慮した動的破壊のモデルを構築した。付加体により破壊速度は遅くなり、また地震動は付加体の外側の陸域などで弱くなることがわかった [ERI_05]。2011 年東北沖地震の際に日本海溝南部で見つかった、地震後の顕著な余効滑りに着目した数値シミュレーションを行った。海山の沈み込みに起因する構造を考慮した M9 級巨大地震の発生サイクルをモデル化することに成功した [ERI_05]。ニュージーランドで 2016 年に発生した Mw7.8 カイコウラ地震の震源では、周辺域における地震波速度トモグラフィ*の結果、震源域とその周辺域の地殻内断層深部やプレート境界に高い間隙流体圧が存在する可能性があることがわかった。流体の存在が連動破壊や地震後の滑りを促進する効果等が示唆された [THK_01]。

地震の破壊開始点と大きな滑り域を同時推定する手法を開発し、東北地方の沈み込み帯で発生する繰り返し地震を解析した。同じ地点からの破壊であっても、様々な大きさの地震へと成長し得る複雑性が明らかになった [UTS_03]。

イ. 地震断層滑りのモデル化

箱根火山内において 2019 年 5 月に発生した群発地震活動期間中の傾斜変動記録は、開口成分とせん断成分の両方を考えた断層で説明することができた。またこの活動には非地震性滑り*を伴い、その拡大が群発地震震源の移動様式に影響を与えた可能性が示唆された

[THK_02]。

マントル起源の蛇紋岩体に発達している炭酸塩脈*に着目し、その形成メカニズムを調べた。この結果、蛇紋岩の炭酸塩化は、固体体積が収縮しながら脱水する反応で、間隙水圧*の上昇に伴い、亀裂形成・物質移動・反応が自己促進的に進行することがわかった [THK_02]。

(4) 火山現象の解明とモデル化

多様な火山現象を理解するために、活火山周辺や火口近傍において多項目高密度の地球物理・地球化学的観測を実施し、火山下で進行する現象を時空間的に定量化した。さらに、火山噴出物の分析、マグマの流動・破碎・脱ガス・結晶化などの物理・化学的な実験及びマグマ上昇過程などの数理モデルによる理論解析を進めた。深部マグマ溜まりから火山体浅部へのマグマの上昇、浅部での火山活動から噴火の発生を一連の過程と捉えて噴火規模や様式を定量的に理解し、火山活動や噴火機構のモデル化を進めた。

ア. 火山現象の定量化と解明

三宅島では2014年に実施された無人ヘリコプターによる空中磁気測量と同じ範囲でドローンを用いた空中磁気測量が行われた。これは、電動ドローンでも、内燃式エンジンを持つ無人ヘリと同等の観測ができることを示すものである。磁化構造*を求めたところ、カルデラリム下は強い磁性を示す一方、カルデラ内は弱いというコントラストが見られ、2000年カルデラ崩壊により、カルデラ内の磁性が弱化した、もしくは磁化方向がばらばらになり磁化が弱化したようにみえていと解釈された。さらに、2021年と2014年のデータを比較して磁化の時間変化を調べたところ、浅部では天水による冷却を示唆する磁化強度の高まりが検出され、深部では亀裂群に沿って上昇する熱水による加熱を示唆する磁化低下が局所的に見られた [ERI_07]。西之島では2019年から2020年の噴火活動に対して、衛星赤外画像と地形変化から噴出率・噴出量の推定および噴出状況が明らかにされ、3ステージからなる噴火活動モデルが提案された (図5) [ERI_07]。阿蘇山では空中電界変動観測*が行われ、2021年10月14日および20日の噴火に伴う空中電界変動が観測された [THK_03]。空中電界変動は噴出量の即時把握の新たな観測手法として期待される。火山灰自動採取・可搬型分析装置および自動火山灰分類システムが開発・改良された。機械学習を用いて火山灰の構成物の割合を自動把握し、マグマ性噴火*および非マグマ性噴火を即時判定し噴火様式を速やかに決定するための技術の有効性が確認された [NIED01]。

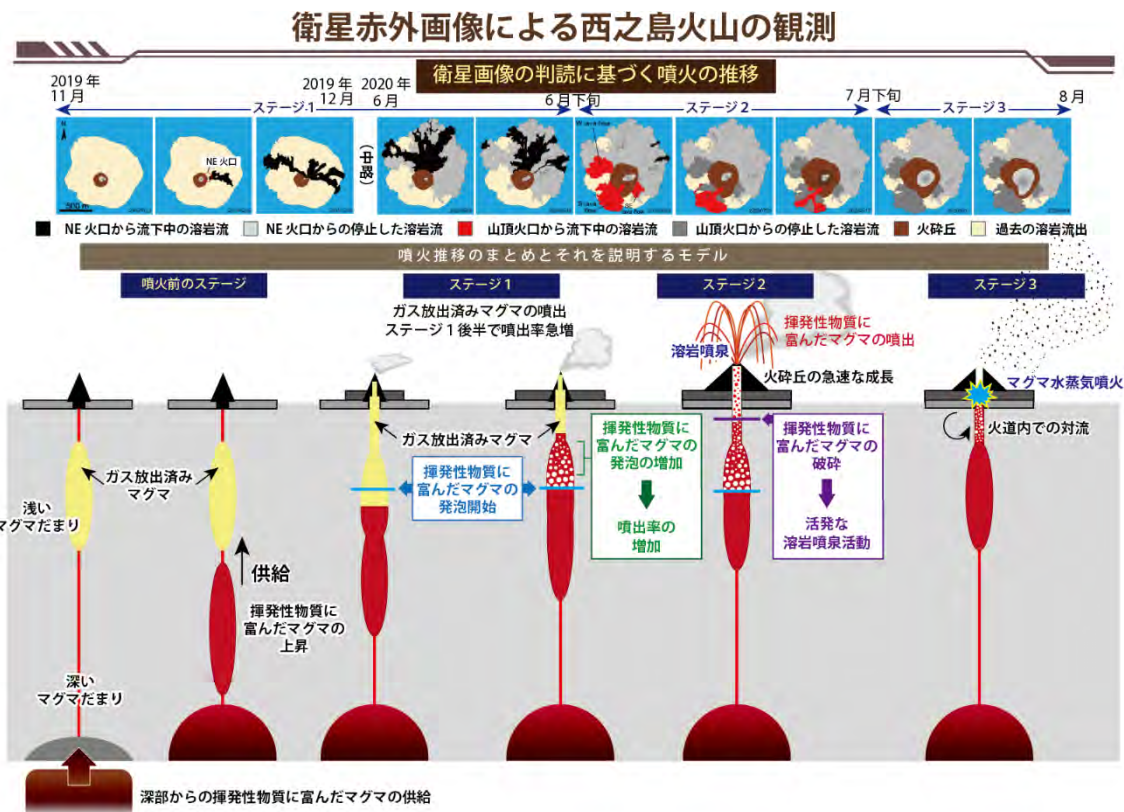


図5. 衛星赤外面像による西之島火山の観測

ひまわり8号の赤外面像による熱異常観測とALOS-2画像から判読した2019-2020年の西之島の噴火状況の推移(上)から推定された噴火様式の時間変化のモデル(下)。この期間の高い平均噴出率、ドラスティックな活動変化、激しい溶岩噴泉による火砕丘*の急成長は、ステージ2において、ガス成分に富むマグマが火道*浅部に達するようになったため、活発な噴泉活動が起き、同時に蓄えられていたマグマが連鎖的に発泡して噴泉として短期間で大量に放出されたとするモデルで説明することができる(Kaneko et al., 2022 に加筆・修正)。

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

火道内をマグマが上昇する際に発生する現象の再現実験により、マグマ中の塩素の濃度分布パターンの変化が明らかにされ、天然の溶岩の塩素濃度分析結果と比較することで、溶岩内部の脱ガス*様式が推定された^[HKD_03]。十和田火山・御蔵山溶岩ドーム試料の岩石記載と浸透率*測定実験からは、石基*は微小な斜長石を骨格とした多孔質構造で、大量のシリカ鉱物が気相成長*した痕跡が認められた。また、空隙率に対して高い浸透率が得られたことから、空隙率に対する浸透率の高さが溶岩ドームの爆発性の支配要素であることが示唆された^[THK_04]。衛星データからは2021年の福徳岡ノ場噴火の二酸化硫黄放出率の時系列変化が推定された^[AIST06]。

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

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

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

S-net と Hi-net*で記録された大量の地震記録を用いて、東北日本前弧域の P 波異方性*トモグラフィ解析を行ったところ、P 波異方性の向きは海溝軸の走向と平行かつスラブ*表面に対して高角に分布することがわかった。このような構造を反映し、2011 年と 2021 年福島沖地震(M7.1)のようなスラブ内地震が起こったと考えられる^[THK_05]。

アウターライズ*域における潜在断層の位置、走向、傾斜等に関する情報を把握するため、日本海溝南部(福島・茨城沖)の海底地震観測記録を解析したところ、海溝軸に並行または斜交する帯状の地震の震源分布が複数分布することがわかった。これらは海底地形に見られるホルスト・グラベン構造*によく一致し、特徴的な地形を形成する正断層がアウターライズ域での地震活動と深く関係していることを示している。また、アウターライズ域の地震活動が低地震波速度の海洋マントル内に及んでおり、正断層が海洋マントルにまで達していることを示唆している^[THK_06]。

南西諸島北部域における海底地震計アレイデータを用いて、プレート境界浅部で発生する低周波微動*の暫定的な解析を実施した。主な活動は観測網内で2つに分かれていると考えられ、明瞭な低活動領域には海山が沈み込んでいる可能性が高い^[KGSM01]。

沖縄トラフ南部において、過去 20 年間の地震活動の震源分布と地震規模の頻度分布を調べたところ、M5 以上の比較的大きな地震が発生する八重山地溝帯等のリフト*中軸部では、周囲より低い b 値* (<0.8) を示し、火山フロントが形成されている石垣海丘や鳩間海丘周辺では大きな b 値 (>1.2) を示していた^[JAMS02]。

イ. 内陸地震

2016 年鳥取県中部地震 (Mj6.7) の余震観測により、詳細な余震分布の推定や応力逆解析*による応力の向きの推定が行われた(図6)。地震前後の応力の向きの時間変化は、地震時応力変化に対する地震前の応力レベルと関係があるため、直接測定することの難しい地震前の応力レベルを推定するための情報となる。分析の結果、この地震の震源断層の両端と深部端において、地震前の差応力*が小さかった可能性があり、応力緩和*が起こっていたことを示すと考えられる。この結果は、余震が断層端付近で急激に減少することとも調和的である^[DPRI03]。

地震と地殻内流体*の関係について多方面から研究が進んだ。2011 年東北沖地震で誘発された東北地方各地の群発地震について系統的な方法で調査したところ、媒質中を流体が拡

散する速さと群発地震の継続時間との間に負の相関があることを発見した [HRS_01]。2017 年鹿児島湾での M5.3 の地震の前震*・本震*・余震*系列の震源を高精度に決定したところ、地震活動の発生場所が徐々に移動したことが分かり、深部から浅部への流体移動が関与していた可能性が考えられることがわかった [THK_07]。比抵抗分布や地震活動に基づき、葛根田や湯沢の地熱地域の海拔下約 2 km 以深に存在する低比抵抗体は石英脈にシールされた 380～400 °C 以上の超臨界地熱貯留層*であると解釈された。更に、地震波速度構造も考慮すると、この領域の流体の体積分率は 0.1～4.2 % であると推定された。吾妻山でも比抵抗構造、地震波速度構造両者からマグマ＋熱水の体積分率が 6 % 以下であることが明らかになりつつある [THK_07]。

大量の微小地震に対し、深層学習による P 波初動極性の自動検測システムと震源メカニズム解決定プログラムを組み合わせで解析し、日本全国の地殻内応力マップを作成した。今後、地震発生予測や日本のテクトニクス研究の基礎的な情報として活用されることが期待される [AIST07]。

2016 年熊本地震の余効変動のモデルを構築し、これを補正した上で阿蘇山マグマ溜まりの体積変化の抽出を試みた。推定されたマグマ溜まりの体積は、地震直後に大きく増加したあと、減少傾向を示した [GSI_01]。

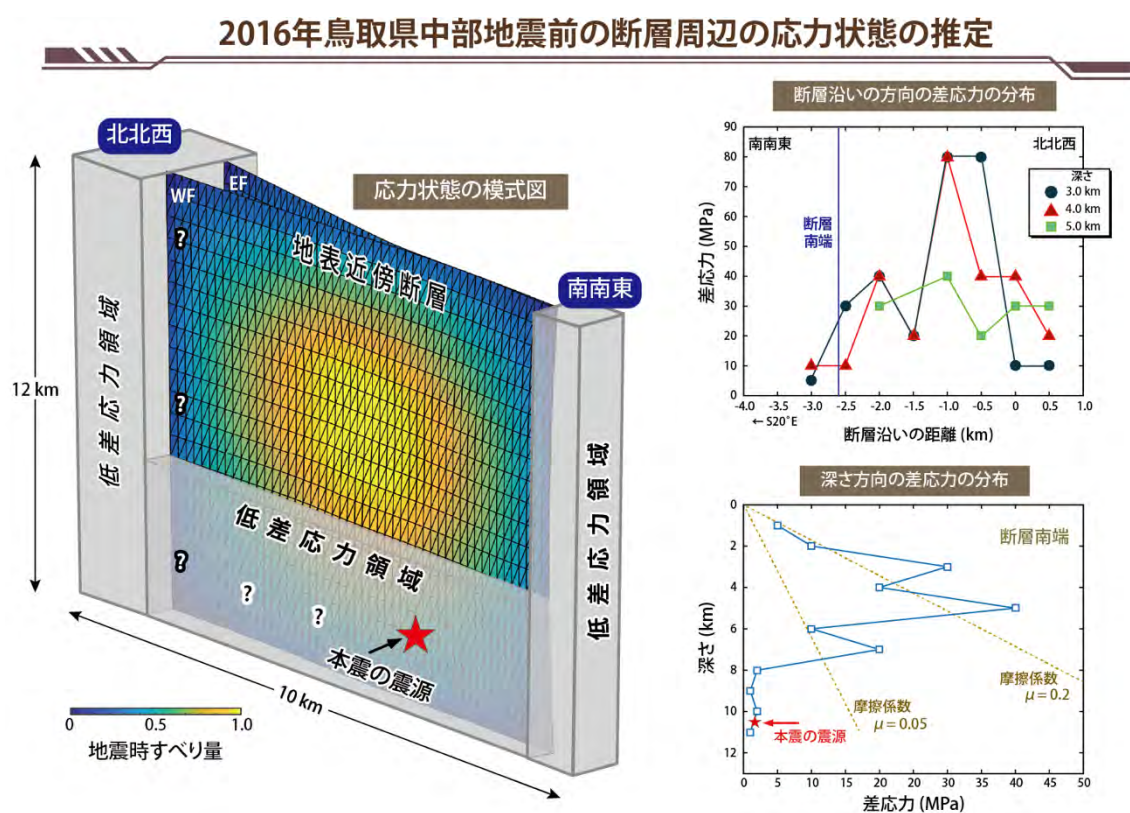


図 6．2016 年鳥取県中部地震前の断層周辺の応力状態の推定

2016 年鳥取県中部の地震について、地震前の差応力分布を応力逆解析の結果をもとに推定した。その結果、断層走向に沿う断層両端（右上）と、断層南端付近における断層下端（右下）で差応力が小さくなることがわかった。差応力の小さい領域は、左の模式図に示すように、地震時の大滑り域の端に対応する。差応力の計算値である。

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

研究船「かいめい」による調査・探査航海が鬼界カルデラを対象に行われ、比抵抗構造推定のための海底磁力計*の回収と海底電位差磁力計*の設置が実施された。また、海底掘削および無人探査機による海底観察および地質試料採取が行われ、鬼界アカホヤ噴火による大規模火砕流堆積物の分布が推定された^[KOBE01, JAMS03]。本白根火山においては2018年水蒸気噴火に伴う傾斜記録の初動付近の解析から、Terada et al. (2021)が推定した開口割れ目の下端部に、新たな増圧源が見出された^[TIT_03]。雲仙火山では自然地震を用いた速度構造トモグラフィ解析が行われ、雲仙火山を頂点とした円錐状の低 V_p 領域（深さ3–16 km）が推定された。S波*速度、 V_p/V_s 、1990–1995年噴火時の震源分布、地殻変動源も考慮して、ほぼ固結しつつあるマグマ溜まりの上面をなぞるようにマグマが上昇していくという新しいマグマ供給系のイメージが提案された^[KYU_01]。

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

箱根火山では、地震波速度構造推定により、深さ9 km付近のマグマ溜まりや、深部低周波地震*発生域（深さ20 km付近）からマグマ溜まりへつながる流体供給経路が推定された。深部低周波地震活動による流体上昇の影響がマグマ溜まりに伝播し、さらにマグマ溜まりからの脱水や脱ガスが促進され、浅部の群発地震や地殻変動が活発化する、という考えが提案された（図7）^[DPR104]。GNSS観測データと地震データから下部地殻の非弾性*ひずみを推定する手法が改良され、九州においては非弾性ひずみ速度は九重、阿蘇などの火山周辺に沿って高いことがわかった。この結果は、深部由来の流体によって弱化された下部地殻における非弾性変形の集中が九州中央部に存在していることを示唆する^[KYU_01]。

箱根火山下へのマグマ供給過程

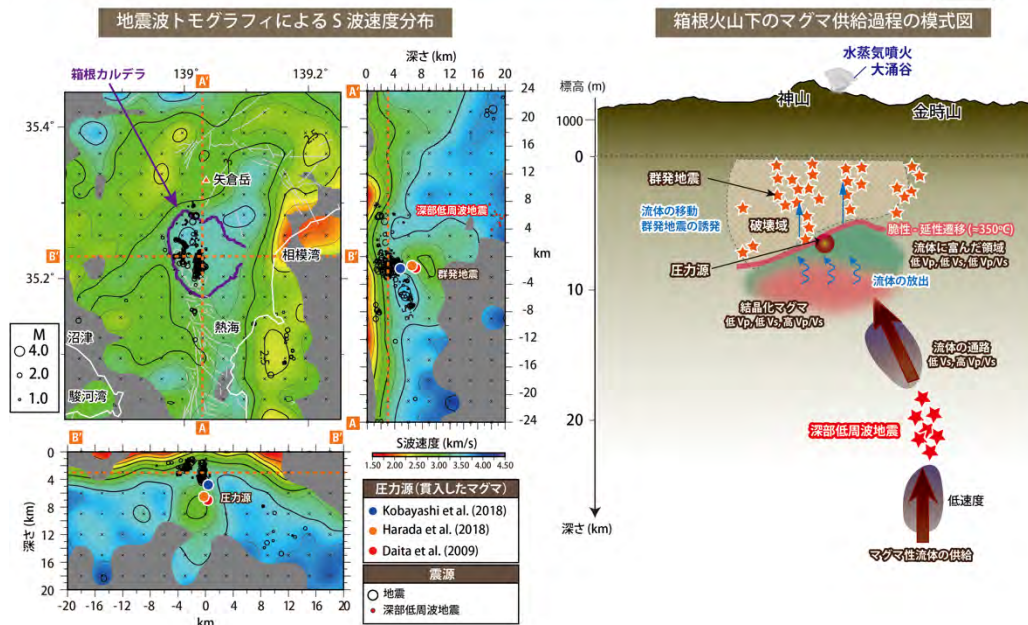


図7. 箱根火山下へのマグマ供給過程

箱根火山下のS波速度構造と地震や深部低周波地震の活動・圧力源の推定（左）とそこから推定された、箱根火山下でのマグマ供給過程を示す模式図（右）。深部からのマグマ供給に伴い深さ20 km付近で深部低周波地震が活発化する。流体は、より浅部の深さ9 km付近のマグマ溜まりに蓄積する。マグマ溜まりから放出された流体が更に浅部に移動し、群発地震や地殻変動などを引き起こす（Yukutake et al., 2021 に加筆・修正）。

オ. 構造共通モデルの構築

空間的に離散的なGNSS測地データから、空間的に連続なひずみ速度場を推定する新たな方法を開発した。この解析結果により、新潟ー神戸ひずみ集中帯や、奥羽脊梁ひずみ集中帯、茨城県北部から北関東を経て愛知県北部に至る前弧*域の低ひずみ帯などが明確になった[DPR104]。前弧域の低ひずみ帯については、当初計画では想定していなかったものであり、流動ー変形場を再現する構造共通モデルの構築と検証にあたって重要な成果である。

3-2. 地震・火山噴火の予測のための研究

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

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

過去 10 年間の GNSS 時系列データから、琉球海溝八重山諸島の南側のプレート境界面上の滑り欠損*レートを推定した。同地域では 1771 年に津波地震が発生しており、それ以降一定の滑り欠損レートで応力を蓄積していると仮定すると、すでに Mw7.5 に相当するエネルギーが蓄積されていることが明らかになった^[KUS_01]。一方で、1771 年の津波の波源*域とされるプレート境界浅部においては、滑り欠損を陸域の測地観測から推定することが難しいため、巨大地震発生ポテンシャルをより正しく評価するためには、海域観測の継続的な実施と観測点の拡充が必要である。

超低周波地震*の検知能力が低かった沖縄本島-宮古島間において、臨時観測による地震波形データを用いて超低周波地震の震央決定を行った。宮古海峡では、超低周波地震はプレート境付近の深さ 10~15 km の範囲でスポット的に発生する一方、沖縄本島南東海域では、SSE*の発生域と固着域の隙間に沿って帯状に発生していることが明らかになった。両海域ともに超低周波地震の発生域と低角逆断層型地震の発生域は相補的であり、南西諸島海溝沿いにおけるプレート間の摩擦特性*の不均質性を示していると考えられる^[NGY_02]。

イ. 内陸地震の長期予測

測地データから推定されるひずみ速度*分布に基づいて内陸地震の発生確率を評価するために、前年度までに構築した西日本の確率予測モデルの再検討及び再評価を行なった。地表のひずみ蓄積レートから地震モーメント*の蓄積を評価する方法については、水平方向の主ひずみ速度と面積ひずみ速度のそれぞれ絶対値のうち最大のものを用いるモデルが、過去の地震活動を最もよく説明することがわかった。一方で、地震モーメントの蓄積を評価するためには、地震発生層*の厚さと剛性率*を一定にした場合と空間変化させた場合を仮定する必要があるが、これらのパラメータを一定にした場合と空間変化させた場合で、過去の地震活動を説明する度合いに大きな差は見られなかった^[DPR105]。

地震活動に基づく内陸地震の長期予測手法の開発に向けて、過去に発生した地震を対象にして、階層型時空間 ETAS* (HIST-ETAS*)モデルの背景活動度と、時空間ポアソン過程*モデルによる予測性能を評価した^[DPR105]。予測対象を中規模以上の地震とした場合、HIST-ETASモデルの背景活動度に基づく長期予測が最も予測性能が高いことが示された。

2011 年東北沖地震の発生後 10 年間の粘弾性緩和*に伴う地震活動の評価のために、東北沖地震の地震時・余効滑り分布に千島海溝沿いのプレート境界における固着状況を含めた応力蓄積計算を行い、東北地方陸域および日本海沿岸域の活断層に作用するクーロン応力変化を評価した (図 8)。東北沖地震の影響は数十年程度残ること、東北沖地震により多くの活断層において地震活動は抑制されることが示された。しかし、福島県の沿岸部の断層については、この地域の一般的な傾向とは異なる挙動をすることがわかった。これらの断層については、滑り角も含め、より詳細な推定が必要である。また、青森県周辺の活断層では、千島海溝での固着の影響で地震を促進する方向に転ずる場所があることがわかった^[ERI_11]。

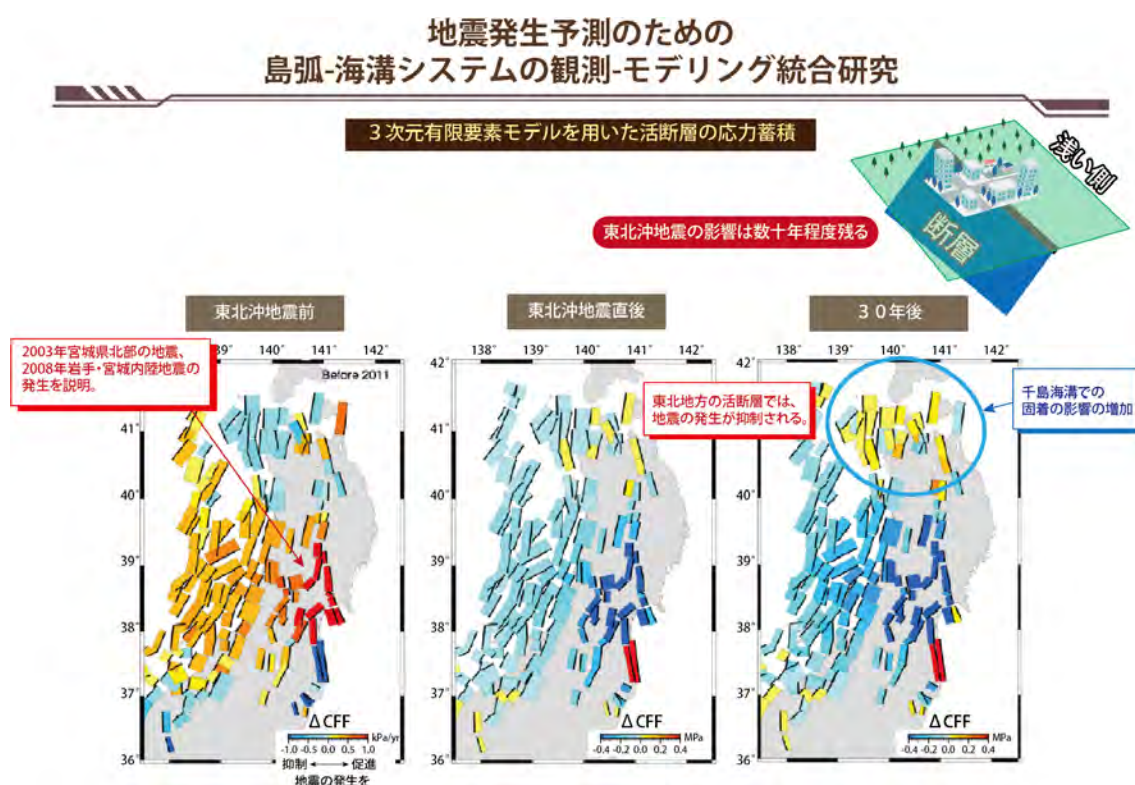


図 8. 地震発生予測のための島弧-海溝システムの観測-モデリング統合研究

東北地方の内陸の活断層での地震の起こりやすさについて、プレート境界での固着や東北沖地震の余効変動によるクーロン応力変化 (ΔCFS) の影響を調べた。図中の矩形は活断層の幾何学的形状で黒い太線は断層の上端を表す (右上図)。活断層のカラーは ΔCFS の値を示しており $\Delta CFS > 0$ (暖色系) は地震の発生を促進 $\Delta CFS < 0$ (寒色系) は地震の発生を抑制することを意味する。東北沖地震前は、宮城県沖を中心とするプレート境界での強い固着

により、東北地方中部からその日本海側について地震発生を促進させる応力変化が起きていたことがわかった（左下）。一方、東北沖地震後は、東北地方の広い範囲で地震を抑制する応力変化があった（中）。この傾向は、東北沖地震から 30 年後も残るが、千島海溝での固着の影響で青森県周辺の活断層では地震を促進する応力変化に転ずる場所もある。

（２）地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

繰り返し地震（相似地震）は、プレート境界・断層の滑り速度の情報を有する。アメリカ地質調査所（USGS）のカタログに掲載された世界の地震のうち、国内の地震観測網で捉えられた比較的規模の大きな地震を用いて相似地震の検出を行い、相似地震の発生状況からプレート境界滑りの時間発展を調べた。その結果、プレート境界型巨大地震の発生直後の 10 年程度の間は余効滑りが支配的で、約 30 年以降においては滑り速度が徐々に増加する傾向が見出された^[ERI-12]。これは、巨大地震サイクル*間における滑り速度変化に対する新たな知見である。

日本海溝沈み込み帯前弧海域において S-net データを用いた地震波干渉法*解析を実施し、スロー地震*発生域が低速度異常域内に位置するのに対し、2011 年東北沖地震や根室沖の巨大地震発生域は高速度異常域に対応することを明らかにした^[ERI-12]。

測地データ等から南海トラフ沿いの深部短期的 SSE の自動検出に成功し、新たな活動の抽出に加えて、四国西部における平均滑り速度が四国東部よりも約 2 倍大きいという特徴が見出された^[ERI-12]。また、南海トラフ浅部のスロー地震の検出及び震源域の位置決定に関して新たな手法を開発し、低周波地震*や超低周波地震の移動現象、SSE の把握がより確実にできるようになった^[JMA-01、JAMS01]。

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

前震活動の群発性の統計的特徴に基づき、一定時間内に本震が発生することを知らせる経験的な前震識別法（Maeda、1996）を実際の地震カタログ*に適用し、ETAS モデルに比べて、予測成績が優れていることを示した。また、前震の識別が成功する場所の特徴として、スロー地震発生域の付近や、群発地震が活発なところ、プレート上面の低速度異常域の縁付近という特徴があることがわかった（図 9）^[ERI-13]。

大地震直後の余震による地震波形記録に極値統計解析を適用することで、各観測点における最大振幅の将来予測を行う手法を開発した。2008 年岩手・宮城内陸地震の本震後 3 時間以内の波形記録に基づいた予測を行った結果、4 日後までの余震による最大振幅を高い精度で推定することができた。この手法には、地震波の重なり合いの影響を受けにくい、マグニチュード*ではなく揺れの予測を行えること等、従来の手法にはない長所があり、余震活動の早期予測に向けて重要な進展をもたらすことが期待される^[NIED02]。

地震のマグニチュード頻度分布は時間的に不変であるという仮定のもと、大地震後の地震カタログの欠測を補う手法を近年発生した5つのM6級の内陸地震に適用した。その結果、大地震直後の地震活動予測に必要なパラメータを迅速かつ信頼性のより高いものとして推定できることを示した [ERI_13]。

東北地方の深さ30~60 kmのプレート境界型地震の破壊過程を調べたところ、約8割の地震において、破壊がプレート境界の深部側から浅部側へ伝播する特徴を示すことがわかった。このことは、プレート境界深部からの定常的な応力载荷*や深部からの流体移動が地震の発生に関与している可能性を示す [THK_09]。

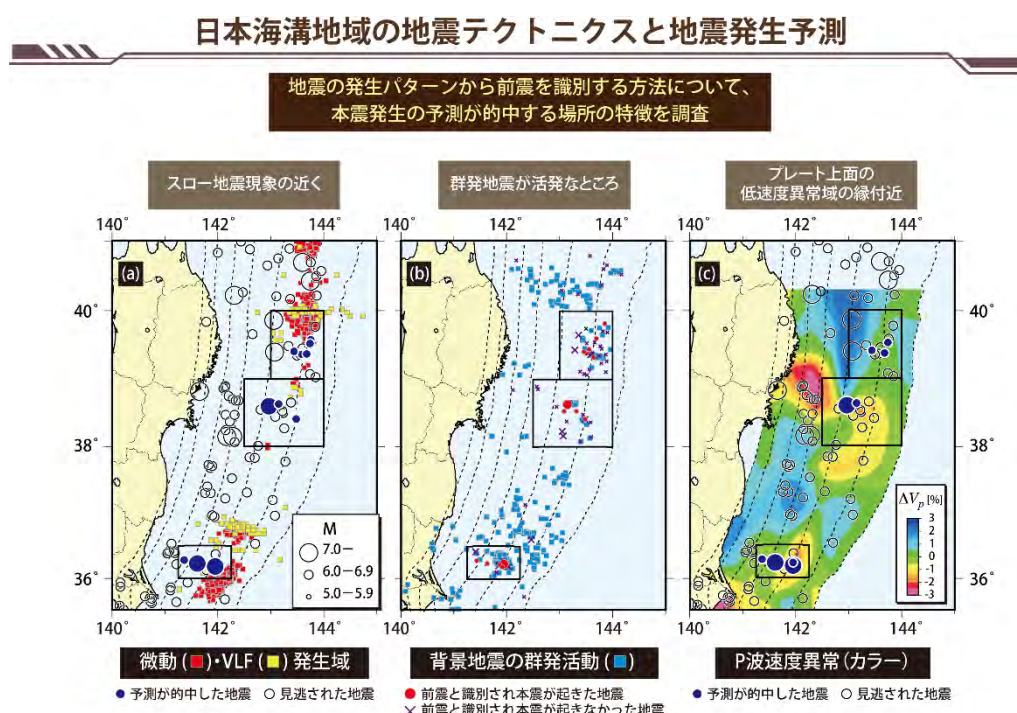


図9. 日本海溝地域の地震テクトニクスと地震発生予測

微動やVLF(超低周波地震)などのスロー地震(左)、群発地震(中)およびプレート上面付近のP波速度異常(右)とMaeda(1996)による前震を識別する方法が的中する場所(主に図中の3つの矩形領域)の関係。前震の識別が成功する場所の特徴として、スロー地震発生域の付近、群発地震が活発なところ、プレート上面の低速度異常域の縁付近という特徴があることがわかった(Hirose et al., 2021に加筆・修正)。

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

トンガ・ケルマディック海溝沿いのプレート境界型地震(1977-2020年、Mw5.5以上、深さ70 km以浅、729個)を対象に、中期的先行現象として指摘されている背景地震活動と地球潮汐との相関について統計的な検証を行った。予測対象の地震をM6.5以上とした場合は、

99%の有意水準で両者の相関が見られた。しかし、確率ゲイン*の値は低く実用性に乏しいのが現状である [JMA_01]。

日本の内陸に位置する5地域のひずみ集中帯*において、背景地震活動度と測地データにもとづくひずみ速度には正の相関があることが明らかになった。同様な相関は、米国のサンアンドレアス断層の周辺域や中国全土においても確認されている。ひずみ速度情報が地震活動度の予測のさらなる向上に資すると考えられ、測地データを取り込んだ新たな内陸地震長期予測手法の開発が重要である [ERI_13]。

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

火山噴火の長期活動を評価するために、火山ごとの噴火履歴やその特徴を調べている。また、年代測定精度の向上や階段ダイアグラム*の高精度化、物質科学的解析に基づく評価方法の構築を進めている。

テフラの気泡組織および鉱物組織の解析環境を整備し、岩石組織のデータをこれまでに取得したテフラの化学組成・粒子形状データと組み合わせることで、テフラ層の同定を進めた [MFR101]。霧島山では、13世紀御鉢噴火の噴出物の粒子物性および岩石組織の定量解析を進め、噴火推移に応じた系統的变化を明らかにした [ERI_03]。白根火砕丘群噴出物のうち噴出年代が不明な溶岩群について、古地磁気年代*や放射性炭素年代*の測定を実施した [TYM_01]。白山火山及び御嶽火山の岩石試料にK-Ar*およびAr/Ar*年代の測定を行い、10万年前より若い火山噴出物の噴火年代を高分解能で明らかにした。また、中長期的活動の評価と予測のため、雌阿寒岳、秋田焼山、御嶽山では地表踏査による噴火履歴調査を継続して実施した [AIST03]。

イ. モニタリングによる火山活動の評価

多項目の地球物理学的・地球化学的な観測データを用いて、火山の状態をできる限り系統的に把握するために、火山活発化指数* (VUI) による活動評価の試行を行った。VUIの評価項目として熱消磁（地磁気変化）の導入を進め、阿蘇山と吾妻山を対象にVUI策定作業を行った [HKD_04, KUS_02]。

GNSSデータに対する時間依存インバージョンの手法を用いて、草津白根山の火山性圧力源の時間変化を推定したところ、2017年後半から続いていた体積膨張が2021年から停滞していることがわかった [GSI_03]。火山ガス放出率観測のための簡易型トラバース測定装置を定期船（フェリー）に搭載し、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島の二酸化硫黄放出率の観測を行った。その結果、口永良部島の二酸化硫黄放出率は2020年5月頃から指数関数的に減少し、2021年後半には数10トン/日以下にまで低下していた。このことは、火山活動の低下を示しているものと考えられる [UTS_06]。草津白根山の湯釜火口湖の湖水採取・分析を行い、1982年以降の全ての噴火の前後で上昇した湖水のMg/Cl比が2019年以降にわずかに上昇し

て増減を繰り返していることを明らかにし、この火口湖の化学成分の変動を説明するマグマ-熱水系モデルを作成した^[JMA_05]。

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

火山噴火予測の精度向上に向けて、火山噴火に先行する現象、噴火発生、噴火規模や様式の時間変化、終息までを一連の現象として捉える火山活動推移モデルの構築を進めた。

インドネシア・グントール火山において、直近の噴火（1847年）から現在までの地震活動が最近30年間の活動と同様であると仮定して見積もられた火山性地震のエネルギー放出量は約220 GJであった。一方、インドネシア・メラピ火山では、噴火に前駆する火山性地震のエネルギー放出量と噴火規模の関係が経験式として求められており、これに当てはめると、グントール火山で今後起こりうる噴火の最大規模はVEI4であると推定された。2021年12月4日にインドネシア・スメル火山で発生した大規模火砕流の発生前には、岩石崩落もなく、また前駆する火山構造性地震*の発生頻度は低かったことから、マグマの急速な貫入によって溶岩ドーム崩落（火砕流）が発生したとは考えづらい。溶岩ドームの不安定性による自己崩壊で火砕流が発生する可能性があることがわかった^[DPR106]。噴火をトリガーする要因として、大地震の発生が考えられてきた。世界の地震・噴火事象の系統的な解析から、大地震の発生により0.5 micro strain以上の膨張場となる火山においては、VEIが2以上の噴火発生数が、大地震発生から5-10年間までは2-3倍程度高まることが明らかになった^[THK_11]。蔵王山について、テフラ層内の岩相変化および噴出物の岩石学的特徴をもとに噴火推移の類型化を進めた^[KOB015]。

3-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

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

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

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

安政江戸地震の被害史料の分析から、被害場所が特定できた地点とその近隣の計 17 ヵ所で地震観測を継続した。これらの地震観測点で得られた記録には、観測点ごとの卓越周波数*や振幅の違いが確認された。デジタル記録のない歴史地震像を把握するためには、現代の観測技術で得られたサイト特性*を史料の分析結果と結びつけて検討することが重要であると考えられる [ERI_15]。

2004年から2021年に北陸地方周辺で発生した201地震について、自治体震度計を含む185観測点の強震波形データを用いてスペクトルインバージョンを実施し、震源特性*を推定した。地殻内の地震に対して、応力降下量*が深さと共に大きくなる傾向が確認された [DPRI09]。

2016年熊本地震の震源周辺域を対象に、地表地震断層*の分布と変位の詳細情報を考慮した断層モデルによる強震動計算を行った。この計算のために、任意の地表地震断層形状を震源断層モデル*として組み込むツールを開発し、熊本地震発生直後から行っている野外調査で得られた地表断層と地中断層モデルを組み合わせた断層モデルを用いてその周辺域の地震動を計算し、地表断層に沿った変位分布の精度が向上することを確認した [NGY_05]。

大阪堆積盆地 3 次元構造モデルの高度化のために、堆積年代および深さと P 波速度の関係を表す経験式の空間変化を調べた。湾岸域の反射法地震探査の P 波速度データを用いて経験式を求めた結果、上町断層帯久米田池断層の上盤側と下盤側で明らかに異なる経験式が得られた [DPRI08]。

強震時の地盤の非線形応答特性*に関して、2021年2月福島県沖の地震におけるKiK-net*山元町(MYGH10)観測点での地表の加速度及び震度が大きい原因を調べるために、強震(本震)及び弱震(余震)の地表と地中の振幅スペクトル比を取ったところ、弱震時に比べて強震時の卓越周波数が低下したことが明らかになった。これは、強震時にこの地点の表層数mの厚

さの粘土層の剛性率が低下したことに起因する可能性があり、極大地震動の主要因として考慮する必要がある^[DPRI09]。

沈み込み帯で発生する地震による強震動の生成メカニズムの評価においては、海洋スラブの形状と物性が重要である。そこで、日本列島の高密度強震観測データの逆伝播計算に基づき、海洋スラブ形状をイメージングする時間反転逆伝播計算* (Reverse-time migration) の実用性を数値実験から検証した。時間反転逆伝播計算では、プレート境界面で生成されるSP変換波*に着目し、これを観測点から変換点に戻すことでプレート境界をイメージングすることを試みる。東北地方の東西断面において数値実験を行った結果、異なるS波入射角を持つ疑似地震波形を用いたイメージング結果を多数重ね合わせてノイズに対するシグナルの比を上げることで、現行のHi-net観測点の配置と間隔でも太平洋スラブの上面、下面、及び海洋性地殻、陸側地殻の形状が推定可能であることを確認した^[ERI_14]。また、熊野灘の海溝軸付近のスロー地震発生域には、定常地震観測網ではカバーしきれず、地下構造のモデル化が困難な領域が存在する。このため、2019年6月に紀伊半島沖南海トラフ沿いに15台の海底地震計を機動的に設置し、海底下地震波速度構造及び震源決定の精度向上を目指す取り組みを始めた^[CTOC03]。

強震動予測について、プレート間大地震・巨大地震に伴う強震動の距離減衰を調べるために、2003年十勝沖地震、2011年東北沖地震の強震動を解析した。個別の強震動生成域に対する地震動の距離減衰式*と、地震毎の強震動生成域に対する距離減衰式を比較したところ、前者の方が距離に対する予測震動分布の偏りが少なく、実用的であることがわかった。また、液状化*の可能性のある地盤上に構築された盛土構造物を対象に逐次非線形地盤応答解析*を実施し、盛土沈下量を評価した。解析では、地盤物性を均質としたケースに加え、地盤物性の空間分布の不確実性を考慮したケースを取り扱った。その結果、地盤物性の不確実性による盛土沈下量のばらつきは、均質なケースで地盤物性を推定誤差内に設定した解析結果の範囲に収まることがわかった。さらに、GPU*を活用し、有限要素法による液状化現象の大規模3次元シミュレーションプログラムを開発し、膨大な回数の計算結果による液状化の大規模データセットを学習してサロゲートAI*を構築することで、液状化推定の低コスト化の可能性を示した^[CTOC01]。

中空ねじりせん断試験装置を用いて液状化試験を実施することで、豊浦標準砂の液状化強度や繰返しせん断特性の評価を行った。この際、供試体の密度やせん断応力といった定量化しやすい物理量の違いに加えて、実験者の個体差が試験結果に及ぼす影響についても分析した。その結果、すべての実験者の平均的な傾向と実験者毎の個体差とを適切に考慮することで、試験結果に基づく液状化強度等の予測区間を従来よりも合理的に評価できることが示された^[CTOC20]。

表層地盤が地震動に及ぼす影響を調べるため、熊本平野のテストサイトの1次元S波速度構造モデルを参考に、表層地盤1層と地震基盤を含めた深部地盤5層から成る6層モデルを用いて地盤増幅特性*の特徴を検討した。各地層の影響を理解するために、増幅特性を

計算するモデルの最下層を順に浅くしてS波の1次元増幅特性を計算した。この結果、周波数3 Hzで震動のピークがみられ、最下層のS波速度を低下させると、この周波数の増幅倍率は徐々に小さくなり、S波速度が1.1 km/s以上となる層の影響が大きいことがわかった。また、より高周波数のピークは、表層地盤のみのモデルの増幅特性でも同様に認められ、表層地盤の影響が支配的であることがわかった〔CTOC24〕。また、テストサイト周辺200 m程度の範囲においては、周期0.3秒以上の地震動の特性は、ほぼ同じであると考えられる。すなわち、周期0.3秒以上の地震動特性を評価する際に、1次元速度構造モデルの仮定が成り立ち、地下構造の不整形性の影響は小さいと考えられる。しかし、周期0.3秒以下に影響を与える極表層部については、地盤構造に空間的に変化がある可能性もあり、短周期地震動の評価に際しては注意が必要であることを明らかにした〔CTOC07〕。

微動観測により得られた推定地盤構造モデルをもとに、邑知潟断層帯の強震動シミュレーションを行った。推定地盤構造モデルを用いたシミュレーションでは、既存モデルに比べて、邑知潟平野内の最大速度が大きくなる範囲が広くなり、中部から南西部の盆地南東端に沿って最大速度が大きくなることがわかった。推定地盤構造モデルは邑知潟平野の盆地境界部の構造についてより詳しい調査結果に基づいてモデル化したことで、盆地による地盤増幅特性がより確からしいものとなった〔CTOC27〕。

イ. 津波の事前評価手法

南海トラフ巨大地震を想定した津波計算を行い、人工的な滑り分布による確率津波モデルと、内閣府中央防災会議モデルの2種類の津波高の特性を比較した。人工的な滑り分布は、地震のスケーリング則や乱数等を用いて計算した。確率津波モデルでは、中央防災会議のモデルと同じ地震規模(Mw9.1)の津波シナリオを200ケース生成した。全シナリオ中の平均的な津波高は、外洋に面した高知県沿岸などは確率津波モデルの方が大きい、大阪湾湾奥部では中央防災会議モデルの津波高さが相対的に高い傾向にあった(図10)。この差異は、評価地点に対する支配的な断層領域の平均滑り量で説明され、断層滑りの深さ方向の多様性が津波高の不確実性の大きな要因となりうることを示す〔CTOC04〕。

メキシコ太平洋沿岸と日本の駿河湾を対象に、確率津波モデルによる多数の津波計算結果から、沿岸地点の津波のスペクトルと波源のスペクトルの比から応答スペクトルを求め、外洋・陸棚・湾と3つの異なる空間スケールの応答スペクトルの抽出を行った。求めた応答スペクトルの卓越周期は、観測データや湾の形状を考慮して概算した固有周期と概ね一致した。確率津波モデルでは、応答スペクトルの評価を通じて任意の地点での海水面の応答特性を求めることが可能であり、その結果を津波の地域特性評価に役立てることが期待できる〔CTOC22〕。

南海トラフ沿い地震における津波の不確実性の評価

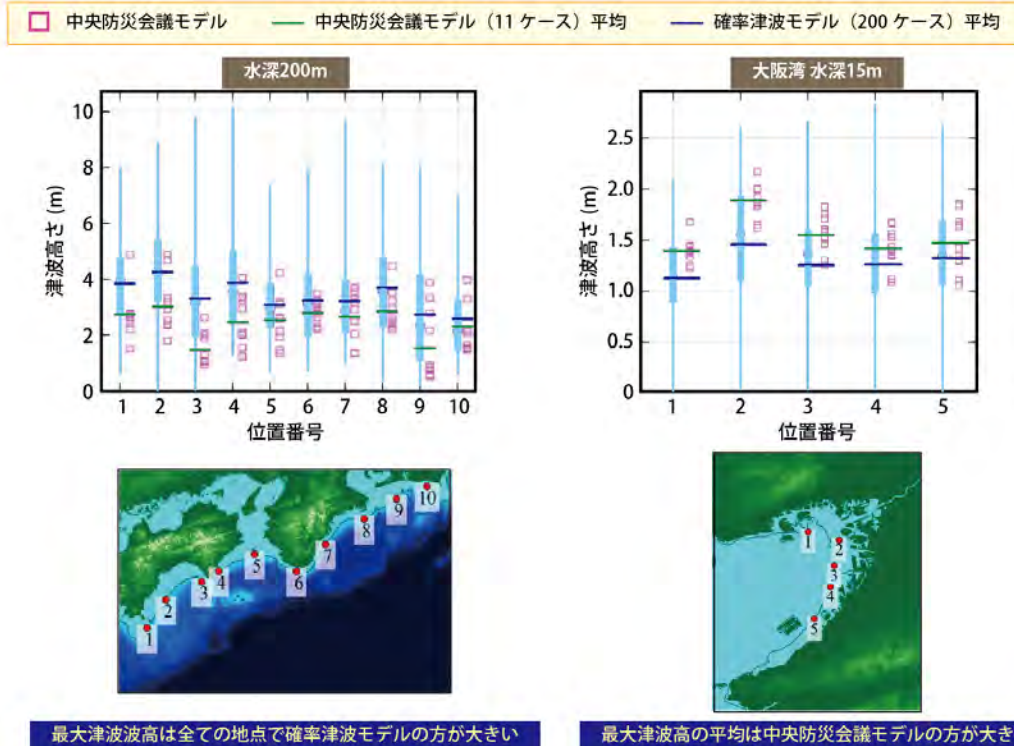


図 10. 南海トラフ沿い地震における津波の不確実性の評価

想定南海トラフ巨大地震についての2つの津波モデルによる津波高の特性を比較した。全シナリオ中の平均的な津波高（横棒）は、外洋に面した高知県沿岸などについては確率津波モデルの方が大きい（左上）が、大阪湾湾奥部では中央防災会議モデルの津波高が相対的に高い（右上）傾向にあった。この傾向の差異は、評価地点に対する支配的な断層領域の平均滑り量で説明できることがわかった。この結果は、断層滑りの深さ方向の多様性が津波高の不確実性の大きな要因となりうることを示している。（上図）箱ひげの範囲は確率津波モデルの200ケースの範囲を表し、箱の下端・丸・上端はそれぞれ第一・第二・第三四分位数を示す。（下図）津波高の計算をした地点が赤丸で示されている（宮下・他，2021をもとに作成）。

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

強震動による地震災害誘因の分析のため、堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースの増強を行った。2021年千葉県北西部の地震の首都圏で観測された強震記録を限定公開した。この地震は、2005年千葉県北西部の地震との類似性が指摘されているため、観測記録の相関係数を計算し、2011年東北沖地震をはじめとする大振幅地震動による地盤増幅変化の影響を見積もった^[ERI_16]。

地盤震動特性および地下構造モデルが把握されていない山間部、丘陵部造成地、地滑り

地形で微動観測を実施し、堆積層と基盤層のコントラストによる卓越周期の分布と、表層地震波速度を用いた層厚モデルを得た。また、鳥取県内においてこれまでに実施した微動探査の利活用を促進するために、同観測データのデータベース化およびGISを用いた表示システムの構築を継続した。さらにシステムの利便性について鳥取県内のコンサルタントおよび県庁で地盤防災に係わる職員にアンケート調査を実施し、今後の改良等への参考意見を得た〔TTR_01〕。

津波避難経路の使用可能性の検証精度を高めることを目的として、地盤ボーリングデータに基づき、強震動および地盤液状化の面的予測のベースデータとなる広域的な3次元地盤モデルを新たに構築した。防災情報伝達では、避難情報の認知の訓練を提案すると共に、自治体を対象に実測調査や数値解析を実施し、伝達状況を改善する技術的課題や解決方法を整理した〔HRO_02〕。

構造物被害予測のために、RC造建物*を対象に、震動速度に基づく被害率関数について検討し、最大速度を利用した既往の被害率関数と比較し、その有効性を確認した。リスク評価高度化のためには、対象となるエクスポージャー情報*の精密化が必要不可欠であり、UAV*等で撮影された写真やその他のリモートセンシング情報を用いて、地理空間情報システム上に展開するフレームワークを構築し、一次情報として建物フットプリントと建物高さ、二次情報として建物固有周期を取り入れることを検討した。また、ステークホルダー参画に関しては、様々な地震動想定を表示可能なシステムについて、過大評価、過少評価等で推定結果を示すことが可能なシステムの改良を行った〔CTOC01〕。

地震動の指標と被害率の関係を示すフラジリティ曲線*について、従来のような建物の実被害ではなく、非線形地震応答解析結果に基づいて作成する方法を検討した。具体的には、単純化したモデルの最大応答値が閾値を超えるものを大破と判定するものとし、解析ケースの半数が大破となるときを被害率50%であるとして被害関数を作成したところ、既往の被害率関数に概ね対応した結果が得られた〔CTOC21〕。

建物の地震レジリエンス性能*を火災リスクの観点から定量的に評価するための枠組みを構築した。こうした観点を事業継続計画の中に盛り込むことを目指し、建物が極めて稀に発生する地震動を受ける場合の評価が可能であること、火災性状や避難行動の予測によらず簡易に評価が可能であること、建物の地震対策が地震後の火災リスクや地震レジリエンス性能に与える効果を考慮できることを重視した枠組みを整備した〔CTOC25〕。

将来発生する地震動が木造建物にどの程度の被害を引き起こすかを調べるために、実大木造建物の復元力特性を再現する簡易試験体の開発を行い、実際の被害を再現できることを確認した。これにより、被害予測にかかるコストや労力の削減が期待できる〔CTOC28〕。

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

波浪を原因とした浸食により不安定化が促進している北海道東部の海岸地滑り土塊*において、観測された地震動記録と地滑り土塊の変位量から、地滑り土塊の抵抗力に比例する臨

界加速度を推定したところ、汀線に押し出された末端部の土塊の浸食が進むにつれてこの土塊が担っていた斜面にある地滑り土塊を滑り落ちないように止めているストッパーの効果が減じ、抵抗力が下がっていくことがわかった〔DPRI10〕。

横浜市内の谷埋め盛土における地震動、間隙水圧の同時観測データを解析した。過剰間隙水圧の発生が認められた地震に対して、間隙水圧と地震動との関係について調べたところ、横浜市内の谷埋め盛土は、間隙水圧の上昇時間が前計画より観測・解析を実施している目黒区内の谷埋め盛土よりも10倍程度長く、同程度の最大速度に対して間隙水圧の上昇量が大きくなる特徴があったことがわかった。これは、盛土の材質や大きさ・形状の違いが影響していることを示唆している。災害誘因を把握するためにはサイト特性を考慮することの重要性を示している〔DPRI10〕。

GB-SAR*（地表設置型合成開口レーダ）の実験を進め、100 m四方面程度の大きさのSAR画像の中から任意の地点について変位のリアルタイム計測が可能であることを示した。また、宮城県栗原市荒砥沢におけるGB-SARによる斜面監視を継続するとともに、栗駒山麓ジオパークビジターセンターにて地滑りモニタリングの結果をリアルタイム表示することを開始した〔IRID03〕。

斜面崩壊・地滑りなどの初期過程には、地殻変動・断層運動を含む地表の振動方向、地表の傾斜量とその方向、最大傾斜方向の斜面下部直上を支持する構造が存在しない地形的特徴があること、母材を構成する物質の強度などが主に寄与していることが明らかになった〔CTOC14〕。

2016年熊本地震前後で得られた1m-LiDAR* DEM*に、地形を見やすく表現する手法を適用し、立野地区の地滑り土塊の範囲を抽出・図化した。地滑り土塊は、斜面上方では沈降しながら斜面下方に移動したこと、斜面下方では斜面に沿って約8 m下方に移動し隆起していることが明らかになった。また、現地での観察により、地滑り土塊の末端部では、谷状地形の部分に斜面崩壊が多発していることも明らかになった〔CTOC26〕。

オ．火山噴火による災害誘因の事前評価手法

桜島火山における火砕流の発生予測に関して、地盤変動、火山性地震、空気振動、火山ガス放出量、映像等の観測データを収集し、火砕流発生に関わる物理パラメータをとりまとめた。その結果、火砕流を伴う噴火の約1時間前から山頂近傍の浅部において微小地震が群発することが多く、地盤変動で見られる噴火前の膨張の時間は30分以上継続することが多いこと、噴火直前には膨張が停止すること、火砕流を伴う噴火は噴出物量が多いことが明らかになった〔DPRI11〕。

（２）地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア．地震動の即時予測手法

強震観測データの時間反転逆伝播計算による震源モデルの即時推定手法を開発し、P波

と S 波エネルギーの相関に基づく震源イメージングの高分解能化を進めた。開発した手法により 2008 年及び 2011 年の茨城県沖の地震時の断層滑り分布の即時推定実験を行い、正しく太平洋プレート上面の滑り分布を推定できることを確認した^[ERI_14]。

鳥取県内の計測震度観測点のデータを鳥取大学で受信し、緊急地震速報で用いられている PLUM 法*に震度の距離減衰と全予測点を二次震源とする改良を加え、P 波振幅による震度予測を加えて「県内 1 km メッシュの震度分布を把握するシステム」を開発した。また、前年度に開発した「250 m メッシュのリアルタイム震度を Web ベースで配信できるシステム」を、県庁とも共有できる仕組みを構築した^[TTR_01]。

周期 10 秒程度までの長周期地震波による地盤増幅特性を、限られた時間の波形から精度よく推定する手法を検討した。また、緊急地震速報等のリアルタイム処理で用いる観測機器の品質管理を目的として、教師なし学習*による連続波形記録の自動分類手法の開発を進め、階層的クラスタリング*の導入により、柔軟な形で波形分類を行う手法を提案した^[JMA_06]。

京都市の医療施設地震時応答観測網の対象建物 2 件において、微動観測により地盤特性を推定した。対象建物の形状や建設状況によってはその応答が複雑になるため、無線式小型微動計による多点常時微動計測も実施した。これまでのところ、地盤特性による地震動増幅の可能性は認められていないが、敷地内で盛土造成されたとみられる一部の地盤は比較的柔らかいことが周辺ボーリングデータから確認できた^[CTOC23]。

地震震源情報を早期に得る新たな手法として、P 波前の地震重力変化*が注目されている。2011 年東北沖地震に対し、理論モデルの予測と観測記録との比較から、傾斜角とマグニチュードを妥当に推定できることを示した^[ERI_06]。

イ. 津波の即時予測手法

2022 年 1 月 15 日にトンガで発生した大規模噴火にともなう気圧パルスの伝搬による津波の再現を大気・海洋結合の数値計算実験から試みた。日本での気圧観測データをもとに、線状気圧パルスが南東から速度 312 m/s で伝搬したと仮定し、大気・海洋結合の数値計算を実施したところ、S-net で観測された波形を比較的良く説明できることがわかった（図 3）。また、気圧パルスの伝搬速度と津波の伝搬速度が近づくことにより生じるプラウドマン共鳴*現象等の津波の挙動が明らかになった。このような津波を即時予測するためには気圧パルスの観測が重要であることが示された^[HKD_05]。

データ同化*による津波波動場の現況把握ならびにそれに基づく津波即時予測の実データへの適用として、2016 年福島県沖の地震への適用を試みた。その結果、津波の来襲より前の地震発生から 35 分の時点で、三陸海岸における津波潮位計の記録を適切に予測できることが示された。また、従来型の潮汐除去とローパスフィルタ*によるデータ処理に比べて経験的モード分解*を用いた新規提案手法による津波検知が、同時刻においてより高い津波予測スコアを示すことを確認した^[HRS_02]。

リアルタイム GNSS データによる震源断層即時推定について、1 枚矩形断層をその不確定

性の定量評価と共に推定するアルゴリズム(RUNE)を開発し、同技術を国土地理院リアルタイム地殻変動監視システム(REGARD*)に取り入れることを進めた。その性能評価を、2021年2月福島県沖の地震と2021年3月宮城県沖の地震において実施し、変位場がきわめて小さい(1-2 cm)にもかかわらず、比較的高精度で断層モデルを推定できることを確認した。また、ハミルトニアンモンテカルロ法*(HMC法)による1枚矩形断層推定アルゴリズムの開発も実施した。HMC法を2016年熊本地震時のリアルタイムGNSSデータに適用し、一般的に用いられているメトロポリス-ヘイスティングス法*(M-H法)と比較した結果、両者の結果はほぼ一致し、HMC法でも断層推定が可能であることが明らかになった [THK_12]。

また、海底水圧計に含まれる長期ドリフトをゼロ点(圧力の印加がない状態での出力)でのドリフト実測値より把握するA-0-A方式*による海底水圧観測システムについて、その実海域試験を行った。開発した試験機と既存のケーブル式水圧計との比較のため、2020年9月にDONETのごく近傍に同観測システムを自由落下で設置し、2021年8月に音響通信による錘切離によって回収した。A-0-A適用後の水圧時系列から、長期的ドリフトを大幅に減少させ得ることを明らかにした [THK_12]。

2016年福島県沖の地震津波の波源について津波伝播計算を行い、沿岸で観測された津波波形を再現した。遡上を伴う津波伝播計算において、水がある状態とない状態との境界の流束を取り扱う際に、従来の方法では計算が不安定になる原因を検討し、全水深の取り扱いを工夫することによって、計算安定性を高められる可能性があることを確認した [JMA_06]。

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

噴火後の短期的な土石流・泥流の発生ポテンシャル変化を調べることを目的として、新規の火山灰堆積土層表面に形成されるクラスト*を模擬した表層を持つ斜面に対する人工降雨実験と数値実験を継続した。その結果、降雨強度の強い場所でクラストが破壊されることで洗掘*孔が形成され、洗掘孔が形成されると急に土砂流出量が大きくなる傾向がみられた。このことが噴火後大規模な土石流が発生しやすくなる原因の一つと考えられる。また、噴火後の中長期的な土石流・泥流の発生ポテンシャルの変化を調べることを目的として、焼岳における凍結融解作用による土砂生産によるポテンシャルの回復について検討した。土砂動態モデルを用いた数値計算の結果、土石流の発生がなかった17年間では、足洗谷全域における貯留土砂が 10^4 m^3 のオーダーに及ぶことが示された。また、融雪型火山泥流発生メカニズムの中の積雪層の融雪過程について、積雪層の中に高温の石礫を挟む形態で融雪過程の実験を行った。その結果、積雪層と石礫が混合した場合に融雪が促進されること、また石礫の粒径が小さい場合、融雪速度が速いことが明らかになった。これらの過程は、熱伝導モデルによって解析され、実験値との比較からその妥当性が検証された [DPRI12]。

気象研究所では、気象研究所XバンドMPレーダー*による噴煙観測と二次元ビデオディストロメータ*による降灰観測を行い、噴煙に含まれる火山灰等を定量的に推定する手法の開発に着手した。また、火山灰データ同化・予測システムにおいて、噴火直後の気象庁移流拡散

モデル*（JMA-ATM）の初期値を作成するための噴煙モデルに関して、各種保存則や大気との相互作用を考慮した新たな噴煙モデル（NIKS-1D）の作成と実事例実験による検証に着手した [JMA_07]。

2021年10月阿蘇中岳噴火の際には、JVDNシステムを活用した複数機関の連携による降灰調査をはじめて実施し、降灰分布や噴出量の迅速な推定を行うとともに、システムの有用性と問題点の洗い出しを行った。西之島で採取した噴出物の化学組成分析により、2020年噴火の際の安山岩から玄武岩質安山岩への劇的な化学組成変化のタイミングに制約を与えることができたほか、2021年も玄武岩質安山岩による活動が継続していることなどが明らかになった [ERI_17]。

（３）地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震波形・GNSS・傾斜計等のデータを即時解析して震源や地盤変動源を表示するシステムの開発と、振幅を用いた震源推定コンテンツを表示システムに取り込む作業を行った [HKD_06]。

これまで「30年確率」で示されていた地震発生確率の表現について、全体的に見ると「10～20年確率」で示した場合より、対策の必要性の意識を高めることがわかった。年齢が高いほどこの意識を高める年確率が短くなることや、地震発生確率が相対的に低い日本海沿岸地域の住民において対策の意識が低いこともわかった。この結果は、地震動予測地図に示される地震の発生確率について、対策の必要性を示す相手の属性（年代や居住地）を考慮した表現を用いることで、より効果的に防災意識を高められる可能性を示している。地震の発生確率情報など災害に関する科学的知見の成果を公表する際には、科学的表現の正確性のみならず受け手の受け止め方を考慮し、最大の効果を発揮するような情報デザインの工夫が、地震・火山噴火による災害軽減のための情報の高度化、災害情報有効に活用されるための情報コミュニケーション手法として求められることがわかった [IIL_01]。

南海トラフにおける地震発生様式を念頭に置き、M8クラス以上（半割れ）および M7クラス（一部割れ）の地震発生後に後発する地震の発生確率計算結果に関して検討を進めた。また、半割れ地震発生後の後発地震による津波リスクマップの開発に着手した。具体的には、高知市周辺をテストフィールドとし、シナリオ断層約660通りについて浸水計算を行った上、想定先発地震震源域ごとに後発地震の発生確率を空間分布モデルに基づいて見積もり、津波浸水・建物被害等のリスクを試算した [IRID04]。

鹿児島市街地における桜島の大規模噴火に伴う大量軽石火山灰降下による被害軽減に資する事前広域避難の実現に向けて、住民自身がいざという時に、避難行動を実際に実行し、円滑に避難が実現するための体制作りを専門家と避難主体である住民が協働して目指す実践的研究を実施した。生き残れるかどうかという不安、避難、事前の備えの必要性、高齢者・身障者支援の必要性などの問題意識が住民自身から提起され、専門家側からのフィードバックを行った [CTOC16]。

地震に代表される被害想定の目的は、減災目標の設定と目標達成のための対策検討に資することであり、そのために国や地方公共団体により想定ハザードに対する被害評価が実施され、結果が公表されている。しかし、その有効性の検証は十分になされているとは言えない。本来あるべき被害想定と被害想定方法を提案し、胆振東部地震の被害実態と検証することで、中央防災会議が提唱する被害想定と被害想定方法が抱える問題点を明らかにした〔CTOC17〕。

文化財の防災対策および災害時の文化遺産レスキュー活動に活用することを目的として北海道・東北地方の市町村が指定する文化財、総数約18,000件の位置情報を収集し、文化遺産マップへの登録作業を進めた。その結果、国指定・都道府県指定の指定文化財35,000件に収集した情報を加えた約5万件のデータベースを収集し、eコシマップ*をプラットフォームとした文化遺産マップを構築した。また、神戸大学の資料ネットと連携し、神戸市域の指定文化財を登録した文化遺産マップを作成した〔CTOC29〕。

地震ハザードシナリオの不確定性、さらにはそのハザード評価結果に対する自治体の受け止め方を示すことが可能なシステムを改良した。また、災害シナリオの多様性を深く理解してもらうため、自治体職員へのヒアリング時に利用する内閣府による地震動想定と表層での速度シミュレーション結果についての見直しを実施した〔CTOC30〕。

3-4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

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

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

地震・火山噴火災害の発生機構を理解するためには、災害事象を、それが生じる場所や地域の歴史的・地理的特性と関連づけて分析することが重要である。近世初期の蝦夷地（北海道）に関係する史料は限られているが、1640 年北海道駒ヶ岳噴火について、同時代に作成され伝来の経緯が確かなくつかの史料群を精査し、火山学で従来参照されてこなかった記述内容を検討した。その結果、内浦湾の対岸への津波の到達、出来瀧崎の形成を示唆する記述など、火山活動に伴って生じた諸現象と整合的な内容が含まれていることを明らかにした^[UTH_02]。津波災害はとりわけ地形環境に大きく影響を受けるため、歴史津波災害の詳細を検討するためには、近代以前の地形を測量地図上に復元する必要がある。岩手県野田村から福島県相馬市に至る東北地方太平洋沿岸の明治期の歴史地形を詳細に復元し、特に宮城県多賀城市に焦点を置いて 1611 年慶長奥州地震津波の浸水範囲や流速を明らかにした^[IRID05]。

近現代の事例についても研究を進めた。2011 年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）の復興過程における集落・人口構造の変化という観点から、宮城県南三陸町・女川町・山元町でアンケート調査を実施し、高台移転という住宅復興政策をとった自治体において世帯の分解と縮小が顕著に進み、災害の記憶の世代間継承の基盤となる家族の条件が脆弱化する傾向を明らかにした^[NGY_06]。大規模火山噴火災害の場合も、住宅復興政策と地域の社会構造とに強い関連性が指摘されている。火山噴火後の警戒区域の設定という土地利用規制に着目し、警戒区域の解除に関わる政策決定プロセスについて、桜島（大正噴火）、雲仙普賢岳、口永良部島の過去の噴火災害を事例に検討した。噴火活動が終息し、復旧・復興の着手までに多くの時間を要するなか、市町村当局が直接経験を持たない過去の火山噴火災害事例に関する科学的知見を蓄積し、火山活動の状況判断や警戒区域設定に対する政策判断に活かすような仕組みが必要である^[HYG_01]。災害誘因予測が精緻化・高度化され、それに基づいて土地利用規制や建築制限が施されても、実態として建物移転が進まない状況にある。1995 年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）の被災地である兵庫県神戸市・尼崎市・西宮市・明石市在住者を対象にアンケート調査を実施し、地震リスクが居住地選択に及ぼす影響は他の種類のハザードに比較して大きいこと、災害リスクが利便性に比して明らかな場合に住宅・土地購入を見合わせる傾向があること、現住地からの移転は補償がないと進まない

可能性が大きいことなどを明らかにした^{〔HYG_02〕}。

地震・津波・火山噴火に関する地域の災害特性や過去の災害履歴等の把握に資するデータベースの整理を進めることは、地域の特性や災害リスクの認知、防災リテラシーの向上につながる。地震ハザード評価のための情報基盤として強震動統一データベースや地震動予測モデルの研究開発を実施した。また、地震ハザードステーション（J-SHIS*）で地震動予測地図 2021 年 NIED 作成版を公開した^{〔NIED04〕}。気象庁ホームページの改善等を通じて、発表する防災情報の改善や高度化に係る知見・成果を関連機関と共有した^{〔JMA_16〕}。地方自治体、教育機関および報道機関等と連携して地域の状況にあった様々な手段を用いて、地震・津波及び火山に関する知識や防災行動についての普及啓発に継続的に取り組んだ^{〔JMA_17〕}。

（２）地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

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

北海道釧路市中心市街地を事例に、津波避難ビル*を避難場所とする場合の有効性と課題をシミュレーションにより検討した。その結果、平地の歩行速度と避難ビル内の階段上昇速度に差異があるために避難ビル入口で滞留が生じるといった、津波避難ビルによる垂直避難*を防災計画に取り入れる際の基礎的な課題が明らかになった^{〔HKD_07〕}。

地震・火山噴火等の自然現象や社会の仕組みに関する知識、また災害予測情報等を災害対応に活用できるか否かは個人差が大きく、この個人差をよく理解して活用することで、より効果的な防災対策が可能になると期待される。防災教育が避難行動に結びつく脳プロセスについて、津波のメカニズムを伝える動画および津波からの避難行動を推奨する動画（津波防災教育動画）の効果を調べ、そのいずれもが、自己関連性（「地震後の津波避難をわがことと感じる」）、自己効力感（「地震後に自分から津波避難行動がとれると感じる」）および避難意思（「地震後にすぐに避難しようと思う」）に効果的に作用することが明らかになった。また、津波防災教育動画の説得効果（視聴後の避難行動の実施率向上）を評価する実験の前段階として、動画の視聴は行わず、主観的な津波発生リスクの程度が異なる架空の地震遭遇シナリオを数多く用意し、避難意思決定課題（避難する／しない）を行わせ避難率を評価した。その結果、実際の実験に用いるシナリオの選定や調査の精度の推定に役立つ結果を得た（図 11）^{〔IRID06〕}。

これまで大規模災害による被害を経験していない富山県において、住民がどのような情報を頼りに避難行動を意識しているか、避難時にどれほど迅速な行動を想定しているかを調査した。富山県氷見市の一地区において全戸配布のアンケート調査を実施した結果、避難

のきっかけとして「揺れを体感すること」が最も多く、外部からの情報では、緊急地震速報よりも行政からの公的な情報発信（呼びかけ）が多く、「近所の人からの声かけ」は予想よりも少なかった。また、避難開始時間については、5分～10分で開始できると考える住民がほぼ半数であり、信頼できる公的機関からの適切な情報発信が災害被害の軽減につながることが示唆された〔TYM_03〕。

一方、日本の多くの火山地域では、観光客を対象とした防災・減災策が図られる必要があり、そのために一般の人々の地震や火山活動などに関する科学的な知識レベルの向上が重要な課題である。本年度は、総合研究グループ「高リスク小規模火山噴火」とも連携して、阿蘇を訪れた観光客に対して火山防災に関するアンケート調査を実施した。その結果、阿蘇山が活火山であることをはっきりと知っていた人は70%、2014年御嶽山噴火災害のことをはっきりと記憶している人は約40%にそれぞれとどまり、また、阿蘇火山火口規制情報、入山ゲートで配布されるパンフレット、火口周辺の注意喚起の看板や放送に対する認知率も低いなど、阿蘇火山防災会議協議会、国立公園ビジターセンターおよび阿蘇火山博物館などの地域の防災を担う組織にとっての基礎的な課題が明らかになった〔KUS_03〕。

2014年に深刻な御嶽山噴火被害を経験した長野県木曽地域でも事情は同じであり、大学と自治体とが共同して、地元地域の火山防災力の向上を図る担い手として火山マイスターの制度*に対する期待は高い。本年度は、全国の類似制度や活動の拠点施設の実態を調査し、比較表を作成した。その結果、どの地域においても、施設運営側の低頻度大災害への防災意識は高いが、観光収入の大きさゆえに火山噴火の負の側面を強調しておらず、知識普及活動の具体的方法や運営資金などに問題を抱えていることがわかった。そして、この問題の解決のためには、全国的なネットワーク形成による課題の共有が必要であると指摘した〔NGY_07〕。

火山地域のうち、桜島では、すでに桜島火山観測所ミュージアム構想が立案されている。この活動は、長年にわたる火山学者と地元ステークホルダーとの連携の成果であり、本年度は、大規模噴火を想定した広域避難を対象に、地元自治体に対するリアルタイム意思決定支援システムの検討を行った。火山灰の移流拡散*の数値計算コードを用いて、季節毎に想定される火山灰堆積量を見積り、建物にダメージが及ぶ閾値や、安全域および避難域の設定の基準の想定を検討した。その結果、台風や前線停滞、冬季の高気圧停滞など特徴的な気象条件では、安全域にも噴火によるハザードが生じることがわかった〔DPRI13〕。

科学者と一般市民との連携手法としてオープンサイエンス手法（市民参画型科学、市民参画型データ収集・管理）が期待されている。その手法に沿って、地震・津波避難訓練支援ツール「逃げトレ」の導入・運用について、南海トラフ地震の臨時情報発表時の事前避難を念頭に「逃げトレ」を改変し、避難訓練に参加した一般市民の行動データを事前避難の要不要の診断に活用するシステムのパイロット版を完成させた〔DPRI14〕。

社会の防災リテラシー向上のためには、科学的研究成果の広報にとどまらず、対象・目標を明確化した上で内容を精選し、方法の吟味、評価・検証とフィードバックからなる一連の研修プログラムの完成が急がれる。本年度は、コロナ禍の影響を考慮し、行政職員対象の非

対面型研修を見据えた映像コンテンツづくりに着手した。本観測研究計画の枠組みと計画推進部会体制に基づいて研究成果を利活用し、行政職員が減災のために学ぶべき地震や火山噴火に関する知識体系を整理した上で、地震火山観測研究セミナー（仮称）として再構成した。昨年度までに完成していた 10 シナリオのうち 3 本を映像コンテンツ化、新たに 2 本のシナリオ化を実施するとともに、行政職員を目指す学生が多い兵庫県立大学の防災関連授業において評価検証を試行的に実施した。その結果、研修の前後で統計的に有意な差が見られ、この研修によって参加者の地震に関する理解が促されたことがわかった [NGT_02]。

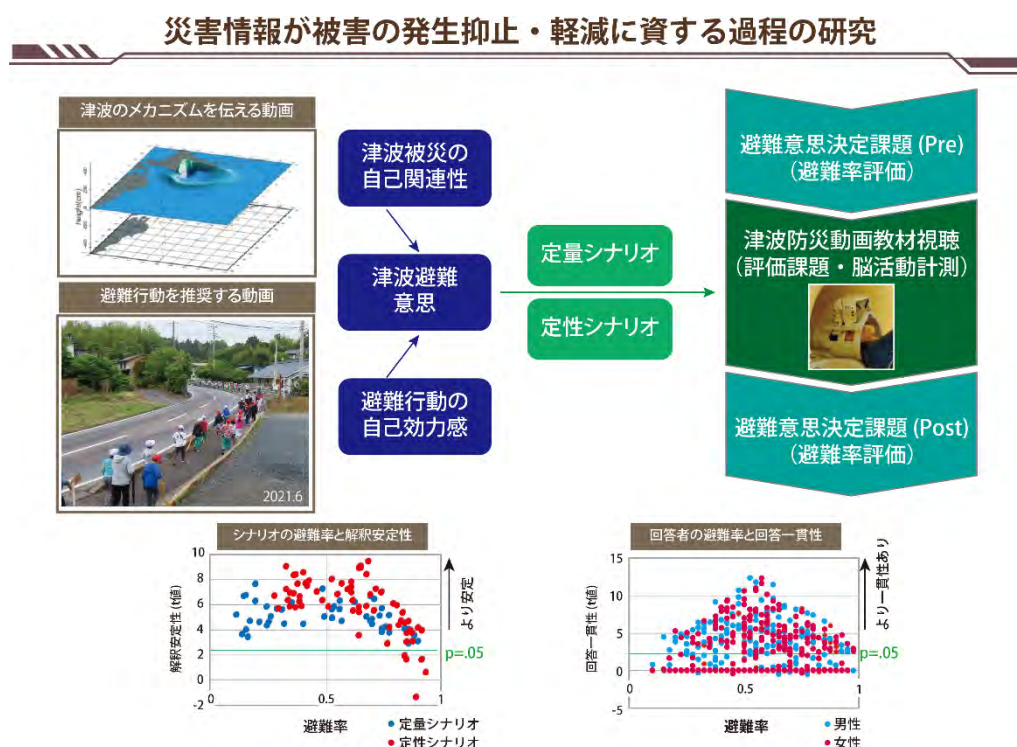


図 11. 災害情報が被害の発生抑止・軽減に資する過程の研究

災害情報が緊急時避難意思決定に結びつく心理過程の仮説と実験デザイン（上）と準備実験 web 調査の結果（下）。健康教育（喫煙・反薬物）の分野で提唱されている、（問題の）自己関連性と（向健康行動の）自己効力感が向健康行動意思に結びつくという 2 経路モデルを災害情報活用の文脈に援用可能と考え、実験デザインをおこなった。今回この実験の準備実験として、動画視聴は行わず、主観的な津波発生リスクの程度が異なる架空の地震遭遇シナリオを数多く用意し、避難意思決定課題（避難する／しない）を行わせ、その避難率を評価した。下図左の横軸はシナリオの避難率であり、縦軸は解釈安定性である。この解釈安定性は、あるシナリオの相対的リスク評価が回答者間でより安定している場合に大きくなる。下図右の横軸は回答者の避難率を、縦軸は解釈一貫性を表している。解釈安定性はリスクに応じた意思決定をしている場合に大きくなる。下図右からは、解釈一貫性には男女差がみられないこと、緑線より上の誠実な回答者群と $t = 0$ 付近に固まる不誠実回答者群の大きく二つ

に分かれることが明らかになった。以上のことから、実際の実験に用いるシナリオの選定や調査の精度の推定に役立つ結果を得た（下図）。

3-5. 研究を推進するための体制の整備

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

(1) 推進体制の整備

地震学・火山学の成果を災害軽減に活用するために、本研究計画は、地震学と火山学を中核としつつ、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの分野を含む総合的な学際研究として推進されている。また、地震調査研究推進本部^{*}（以下「地震本部」という。）や行政機関等と連携し、基礎研究の成果を発展させ、社会実装につなげることを目指している。測地学分科会^{*}は、計画の進捗状況を把握し行政や社会のニーズを踏まえた計画の推進につとめた。地震・火山噴火予知研究協議会は、大学、行政機関、国立研究開発法人等の委員から構成され、密接に情報交換をしながら計画を推進している。協議会には企画部^{*}が設置され、専任教員が研究の進捗状況の把握や研究者間の連絡調整に従事している。企画部内の戦略室では、計画全体の方向性について検討し、研究成果の取りまとめを行っている。協議会には研究内容で分類した8つの計画推進部会を設置し、すべての研究課題はいずれかの計画推進部会に所属し、情報交換を行いながら研究を進めている。年度末には協議会主催で成果報告シンポジウムを開催し、計画全体の進捗状況を確認するとともに、情報交換を行った。今年度は、大学の課題に対する中間評価を実施するとともに、昨年度に引き続き、新型コロナウイルス感染症の観測研究計画への影響を調査し、計画の変更等の適切な対応を行った。また、地震本部との技術的・制度的な連携強化の一環として、地震本部が「当面10年間に取り組むべき地震調査研究」の一つとしている「内陸で発生する地震の長期予測手法の高度化」に関連して、「地殻内地震発生確率評価手法検討ワーキンググループ」を結成し、地震・測地観測データに基づく長期評価手法についての検討会を実施した。

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

火山噴火予知連絡会^{*}は、定例会を年に2度開催し、全国の火山活動の状況についての検討を行った。また、口永良部島部会、霧島山部会と草津白根山部会でそれぞれの火山活動を検討した^[JMA_08]。なお、霧島山部会と草津白根山部会については、両火山の活動状況を踏まえ、定例会にて検討を行うこととし、部会は廃止することとした。

- ・ 拠点間連携共同研究

災害や防災に関連する研究者と協働して計画を推進するためには、「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所と、「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所とが連携して計画を進めることが有効である。このため、前研究計画から両研究所が各分野で連携し、共同研究を進めている。両拠点の研究者が中核となってテーマを決め、それを実現するための研究について全国の研究者からの提案課題を募集して全国規模の共同研究を進める「重点推進研究」と、ボトムアップ研究を公募する「一般課題型研究」を実施している。

重点推進研究では「巨大地震のリスク評価の不確実性に関するパラダイム構築の推進^[CTOC01]」を総括研究として実施し、「ばらつきのある被害リスク評価をふまえた防災計画の検討^[CTOC02]」、「定常的地震活動の震源および地震波速度構造の精度向上による地震波動場推定の高度化^[CTOC03]」、「不確実性を考慮した浅部地盤の非線形応答評価手法の検討^[CTOC20]」、「巨大地震による斜面災害発生個所の事前予測方法の検討^[CTOC14]」を特定型として進めた。一般課題型研究では、地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化の研究、即時予測手法の高度化の研究、および災害誘因予測を災害情報につなげる研究を実施した。

（２）分野横断で取り組む総合的研究を推進する体制

ひとたび発生すれば社会への影響が甚大である５つの地震・火山現象について、研究分野横断による総合的な研究として研究を進めている。

- ・ 南海トラフ沿いの巨大地震

地震・測地観測網で得られたプレート間固着^{*}やスロー地震の知見に基づき、南海トラフ沿いの巨大地震の広帯域震源モデルを構築し、その上で地震波および津波の伝播モデルに基づき、西南日本地域の強震動および津波浸水モデルを提示することを目的とする。令和３年度は主として、長期予測を行うためには不可欠な、プレート形状の高精度化に関する研究を実施した。

- ・ 首都直下地震

首都直下地震は、一旦発生すれば首都機能や我が国の経済活動全体に深刻なダメージを与える可能性が高い。想定される多様な震源について、発生メカニズムや発生可能性を評価できるようにすることを目標とする。これまでのところ、現代の地震観測で得られる知見を用いて、安政江戸地震の震度を検証および定量化することを目指し、東京都文京区本郷地区（根津周辺）に１７観測点による稠密観測を実施中である。暫定的な解析結果では、観測点ごとの卓越周波数や振幅の違いが確認され、これらのサイト特性を史料の分析結果と結びつけて検討することが重要であると考えられる^[ERI-15]。また、地震・火山災害の発生確率に関するアンケート調査・分析を実施した^[III-01]。そのほか、首都直下地震に関連する課題の研

究者による意見交換会をオンラインで行った。

・ 千島海溝沿いの巨大地震

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

千島海溝沿いで発生する巨大地震による災害の軽減を目指し、令和3年度は、津波による低体温症者数を予測するため、低体温症ポテンシャルを有する都市を世界中から抽出した結果、そのほとんどが北日本に集中していることが明らかになった^[HKD_09]。千島海溝南部に設置した3か所の海底地殻変動基準局において、船舶及びウエーブグライダー*を用いた3回目の測定を実施し、2019年及び2020年の観測で得られた太平洋プレートとの固着域の存在を示す地殻変動と調和的な結果が得られた。海中音速の時空間不均質の補正などによる詳細解析を通して、この海域におけるプレート境界浅部における固着状態を明らかにすることができる^[ERI_05]。えりも町百人浜で津波堆積物調査を実施し、標高8 mにある悲恋沼では津波堆積物は検出されず、これまでに津波が到達したイベントがない可能性が示された^[HKD_09]。根室から日高管内の遺跡から噴砂*や地滑りを抽出し、最大で8回のイベントがあった可能性が示された^[HKD_09]。

・ 桜島大規模火山噴火

活発な噴火活動を60年以上続け、今後、大規模噴火の発生が予想される桜島を対象に、各研究項目間で緊密な連携と成果の共有を図り、住民避難を視野に入れた総合的研究を推進している。本総合研究グループには異なる部会に属する27の研究課題が参画しており、令和3年度も12月にハイブリッド研究集会を開催し、参画する各課題の成果から大規模噴火研究に資する知見を取りまとめた。

世界各地で発生した噴火には、火山体深部から溶岩を流出した火口に向かう火山構造性地震の移動が観測された事例が多く、火山構造性地震の発生が避難の意思決定のトリガーとなった事例もある。また、桜島の大正噴火に前駆して火山構造性地震が群発したことを踏まえ、噴火発生予測における火山構造性地震の研究の重要性が再確認された。

大規模噴火では、降下火山灰・軽石、火砕流、溶岩流、地震、津波、土石流など様々な現象が災害を引き起こしており、その災害要因の複合性は極めて高い。ハザード予測は初期条件を与えれば可能となる段階まで進んできているが、初期条件の与え方とハザードの順序に関する研究をさらに進める必要がある。

桜島の大規模噴火を想定した島内からの避難に関しては、防災リテラシーはかなり高いレベルにある一方で、鹿児島市街地側への大量降灰災害についてのリテラシーは低い。鹿児島市が想定する38万人の事前避難を実現するためには、火山噴火の予知・予測情報が適切

な避難へと結びつくような情報の作成と、不断の対話を通じて専門家と住民との共創が必要である。

・ 高リスク小規模火山噴火

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

災害情報の発信に関する研究に関しては、火山活発化指数(VUI)を吾妻山について試算した^[HKD_04, KUS_02]。また、外国人への情報提供方法を検討した^[HYG_01]。御嶽山火山マイスターの火山防災・火山リテラシー向上を目指し、島原半島・雲仙ジオパーク、桜島・錦江湾ジオパーク、磐梯山噴火記念館の火山防災に関する取り組みに対する調査・比較を進めた^[NGY_07]。阿蘇山において、観光客の安全確認行動を促進する要因を明らかにするためのアンケート調査を実施した。その結果、火口周辺の掲示板・音声ガイダンスが行動誘発に有効であった。また、登山客の火山認知度、噴火警戒レベルの理解度に関する課題も明らかになった^[KUS_03]。自治体における噴火時対応タイムライン*の作成と訓練及び研修の実施を進めている^[NIED01]。

小規模噴火の発生する場の把握に関しては、草津白根山湯釜の側噴火*によるリスク軽減を目指し、土壌拡散気体である水銀の検出、希ガスの同位体分析、光ファイバー温度計*を用いた熱異常の検出などによるモニタリングを開始した^[TIT_03]。

観測による火山の活動把握に関しては、空中電界変動を活用する手法の開発を進めている^[THK_03]。また、弥陀ヶ原火山において、活動状態を把握するための多項目地球物理観測を継続している^[TYM_02]。

噴火の予測に関する研究に関しては、噴火・災害ポテンシャル評価のためのモデリング研究の一環として、地球物理的手法と地質学的手法を組み合わせることにより、水蒸気噴火を駆動した熱水量の見積を行った^[NIED01]。

災害の発生状況の調査・整理に関しては、ドローンの活用による被害情報の迅速な把握手法が検討された^[TYM_03]。

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

防災科学技術研究所は、陸海統合地震津波火山観測網* (MOWLAS) 及び首都圏地震観測網* (MeSO-net) を安定して運用し、震源位置、震源メカニズム解、断層モデルの推定、余震活動の予測等を行った^[NIED05]。

国土地理院は、全国に展開されたGNSS連続観測システム(GEONET)を維持するとともに国際GNSS事業(IGS)へ参画し、観測データの提供を行った。加えて、最新のGPS衛星およびITRF*に対応したGNSS連続観測(GEONET)の新しい解析ストラテジ(電子基準点日々の座標値の計算法)の運用を開始するとともに精度評価を実施した。また、口永良部島では従来の

SAR干渉解析では検出困難な微小な変動を検出するとともに、圧力源の位置と体積の時間推移を明らかにした^[GSI_04、GSI_07]。

気象庁は地震観測網や地殻変動観測網などの観測基盤の維持を継続し、関係機関の地震観測データを一元的処理した結果を公開し、南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会や地震調査委員会^{*}において報告を行った^[JMA_09]。また、全国の50火山について全国4か所の火山監視・警報センターにおいて連続的な監視観測を継続するとともに、全国の活火山について、GNSS繰り返し観測、熱観測等の調査的な機動観測を計画的に実施し、噴火警報・火山の状況に関する解説情報・火山活動解説資料等を防災目的の情報や資料として公表した^[JMA_12]。

海上保安庁は、航空機による南方諸島及び南西諸島における海域火山の定期巡回監視観測を実施するとともに、福岡県ノ場および西之島において監視体制を強化した^[JCG_04]。

大学は、観測データ流通網IDXnet^{*}の安定的な運用を継続し、大学と気象庁・防災科学技術研究所間のデータ交換を担うTokyo Data Exchange (TDX)の移転対応を実施した。また、大規模並列計算機を利用したリアルタイム地震データ解析の開発を継続した^[ERI_19]。高知大学は、常時微動アレイ観測点での観測と準リアルタイムの地震波速度構造解析を継続した^[KOC_01]。

イ. 観測・解析技術の開発

東京大学地震研究所は、三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムの予備の光ファイバーケーブルを活用して、新しく開発されたDAS計測^{*}装置の試験観測を約3日間行い、新型計測装置では自己ノイズが軽減され、観測可能距離100 kmまで地震波形を観測できることを確認した^[ERI_22]。東北大学は、無線システムと接続を行う携帯系の通信の検討のため、情報通信研究機構のIoTゲートウェイと学術情報ネットワーク (SINET^{*})の広域データ収集基盤のプロジェクトに引き続き参加し、データ流通網への接続等の動作確認を行った^[THK_13]。また、近年発展している、携帯電話事業者による独自のGNSS観測網データの地殻変動解析への応用可能性を検証するための評価を実施した。図12に得られた地殻変動場を示す。GEONETおよびソフトバンクによるGNSS観測網の変位場は基本的に整合的であり、民間GNSS観測点によって地殻変動場の議論が可能であることを示した^[THK_12]。情報通信研究機構は、Pi-SAR X3^{*}の初期機能・性能確認試験を実施して、15 cm分解能での地表面画像取得に成功した^[NICT01]。

民間GNSS観測網を活用した高密度地殻変動分布

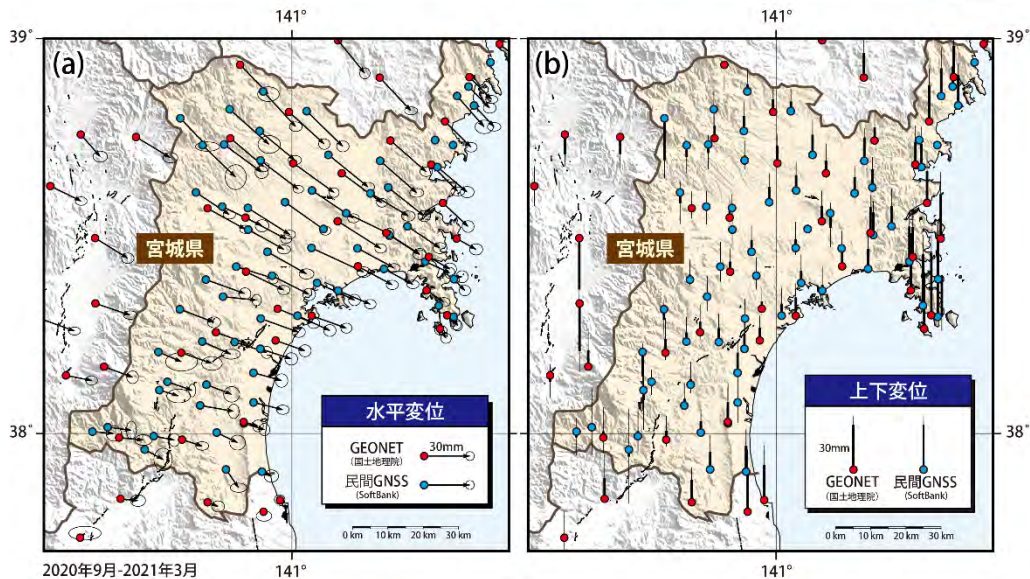


図 12. 民間 GNSS 観測網を活用した高密度地殻変動分布

民間 GNSS 観測網を用いて推定された宮城県周辺の約半年間の地殻変動。民間会社（ソフトバンク株式会社）の独自 GNSS 観測網を初めて地殻変動場の把握に用い、同観測網データの地殻変動解析への応用可能性を検証した。国土地理院 GEONET および民間 GNSS 観測網による変位場は基本的に整合的であり、民間 GNSS 観測点によってこれまでになく高密度の観測による地殻変動場の議論が可能であることが示された。左図は水平変位、右図は上下変位を示し、丸および細線で推定誤差を示す (Ohta and Ohzono, 2022 に加筆・修正)。

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

北海道大学は、地殻変動連続観測データおよびGNSSデータサーバを運用し、GNSSデータサーバに格納した1995年兵庫県南部地震の臨時観測データについて利用しやすいようにパッケージ化し、研究成果共有データベースからの公開を行った^[HKD_08]。東京大学地震研究所は、次世代の対話検出処理系システムについて試作を進め、昨年度試作したソフトウェアを試用するとともに、震源決定プログラムや解析結果の地図表示機能を実装した^[ERI_24]。

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

気象庁は、地震カタログの作成及び震源過程解析を実施し、関係機関へのデータ提供、一般への公開を実施した。日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の観測データを一元化処理業務へ取り組むためのシステム等の準備を進め、特にノイズとなるエアガン*起源のシグナルの除去処理法を2021年7月に一元化処理システムに適用することを開始した^[JMA_14]。産業技術総合研究所は、大規模噴火の前駆活動と噴火推移について、白頭山10世紀噴火、三瓶-木次、ウルルン-隠岐、箱根-東京、御嶽第1、阿蘇3の火山噴火を取りまとめた。また、

屈斜路、三瓶、鬼界、十和田、鬱陵島、白頭山の大規模噴火の前駆活動と噴火推移の研究成果を地質調査総合センター研究資料集として公開した。また、大規模噴火データベースの閲覧検索システムの構築を進めた^[AIST11]。国土地理院は、橿形山脈断層帯、吉野屋断層、頓宮断層、木津川断層帯、大原湖断層及び地福断層、大原湖断層・小郡断層及び地福断層、小郡断層、糸魚川－静岡構造線断層帯及び境峠・神谷断層帯など8面の1:25,000 活断層図を公開した。また、六日町断層帯、十日町断層帯、高田平野断層帯、阿寺断層帯、佐賀平野北縁断層帯、糸魚川－静岡構造線断層帯の位置や関連する地形の分布等の情報を整備した^[GSI_09]。また、「諏訪之瀬島」の火山土地条件調査及び「御嶽山」「神津島」「有珠山」「倶多楽」の火山基本図整備を実施するとともに、「浅間山」の火山土地条件図及び数値データ並びに令和2年度に作成した「十勝岳」「雌阿寒岳」「浅間山」「伊豆大島」の火山基本図及び数値データを公開した^[GSI_10]。地震・火山噴火予知研究協議会では、戦略室が主導して、研究成果共有システムに「地震史料集テキストデータベース」がリンクされたほか、オリジナルデータとして伊豆大島及び周辺部の地震波速度構造2009年構造探査実験、1995年兵庫県南部地震（M7.3）臨時GPS観測データが公開された^[ERI_25]。

（４）関連研究分野との連携強化

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

（５）国際共同研究・国際協力

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

プレート沈み込み帯を対象とした国際共同研究として、ニュージーランドでの地震観測による地震発生機構の解明に関する研究を進めている。令和3年度は、2016年カイクウラ地震発生前より震源域に展開している稠密観測のデータに高精度震源決定法（HYPODD）を適用し、余震分布から断層の詳細形状やプレートの境界面について推定した^[THK_01]。2020年11月にヒ克蘭ギ沈み込み帯中部に位置する固着強度遷移域周辺に設置した海底観測機器により、2021年5月に観測網直下で発生したSSEの直接観測に成功した。これを踏まえて2021年10月の航海で全機器を回収し、初期的解析を実施した^[ERI_08]。

この他に、メキシコ・ゲレロ州沖合で実施している海底地震・測地観測網のデータ解析により、テクトニック微動*の震源メカニズム解の多くが逆断層型として説明できることを示した。また、過去の大地震の震源域付近では微動の放射エネルギーが海溝近傍の微動と比べ

で大きいことを指摘し、プレート間固着の空間的な変化に対応して微動の放射エネルギーが変化する可能性を示唆した^[DPRI01]。また、近地地震と遠地地震のP波走時データの同時インバージョンを行い、カスケード沈み込み帯（北米大陸西海岸沖合）の3次元P波速度構造と異方性分布を求め、地震発生と島弧マグマ生成のメカニズムおよびマンツルの対流パターンを調べた結果、海洋プレートの沈み込みはマンツルの対流パターンを規制することがわかった^[THK_05]。

インドネシアの火山を対象とした国際共同研究では、グントール火山において過去30年間の火山性地震のエネルギー放出率を評価し、その放出率を約170年間の噴火活動休止期に外挿することにより、170年間のエネルギー積算値は220 GJ程度であり、ポテンシャルとしての最大噴火規模をVEI4と推定した。また、2021年12月4日にスメル火山で発生した火砕流について地震発生頻度を精査し、火砕流はマグマの急速な貫入による溶岩ドーム崩落ではなく、溶岩ドームの不安定性による自己崩壊で発生したと推定した^[DPRI06]。

国際VLBI*事業（IVS）の観測計画に基づき、石岡VLBI観測施設においてVLBI国際共同観測を140回実施した^[GSI_07]。石岡局の水平速度は約22.1 mm/年（方位角134°方向）であった。これは、通常のプレート運動の成分に2011年東北沖地震の余効変動を含んでいるものと考えられる。

下里水路観測所においてSLR*の国際共同観測を継続し、日本周辺を含めた広域のプレート相対運動決定に資するデータを取得した^[JCG_01]。

（6）社会との共通理解の醸成と災害教育

地震・火山噴火現象及び地震・火山災害に関する研究成果を社会に広く理解してもらうために、これらに関するアウトリーチ活動を積極的、かつ組織的に展開した。

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

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

気象庁は、関係機関と連携し、地域の状況にあった様々な手段を用いて地震・津波及び火山に関する知識や防災行動についての普及啓発に継続的に取り組んだ。

（7）次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

今年度は熊本地震震災ミュージアムで活動しているガイドを対象にした勉強会を開始した。また、火山活動に関する正確な知識をガイド経由で観光客に伝達するうえでの課題を検討するため、阿蘇山の火口周辺（概ね1 km範囲内）への観光客の火山防災に関する意

識調査を実施した^[KUS_03]。また、自治体職員を対象とした防災リテラシー向上のための研修プログラムについて、地震・火山研究者が「理解してほしいこと」を自治体職員のニーズを元に再構成し、研修プログラムを引き続き構築した^[NGT_02]。

大学や研究機関は、それぞれにおいて観測研究に携わる研究者のキャリアパスを確保するための若手教員のポストの確保に務めている。地震・火山噴火予知研究協議会でも令和3年度に1名の特任研究員を雇用し、人材育成の一端を担っている。また、火山分野においては、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト*において、本研究計画にも参画する大学や研究機関が、火山研究者を志す全国の大学院生に実習や講義などを行い、若手育成に取り組んだ。

4. まとめ

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」の3年目となり折り返し点を迎えた令和3年度は、昨年度に引き続き新型コロナウイルス感染症の影響を受けながらも、徐々にフィールドでの調査・観測が再開され、これまで通りの観測研究スタイルを取り戻す途上にある1年であった。いまだに海外での調査・観測が困難ではあったものの、オンラインによる会議や研究集会を取り入れた研究スタイルがほぼ定着し、観測研究を中心とした本研究計画においても5つの大項目・3つの重点研究・5つの総合研究で多くの成果が得られた。

充実した多項目の観測網を背景に、観測データを理論・実験・数値計算に活かしながら、沈み込み帯で発生する多様な地震・火山現象の解明や予測法の検討・開発が進んだ。新しい観測技術や良質な観測データを解析するための新たな手法の開発も多く報告された。今後、これらの成果は、観測データを活用した地震発生モデルや火山噴火予測モデルの開発に活かされることが期待される。災害軽減に直結する研究としては、地震像の即時予測法の開発を始め、災害素因・誘因に関する地域特性の分析や、これらの中から普遍的な特徴を理解する試みもなされた。いずれの研究分野でも、最新のAI技術を用いた大量のデータ処理が研究基盤として組み込まれ始めている。一方で、デジタル観測以前の史料・考古データのデータベース化を通じて、過去の大地震・火山噴火の理解とこれらの現象と災害軽減を結び付ける研究も堅調であった。

重点研究の1つである「地震発生の新たな長期予測」については、令和2年度に設置されたワーキンググループの下で、測地・地震活動データを活用して、地震発生の長期予測に役立てる新たな手法の試行や中短期的な予測法の性能評価等が行われた。また、「火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測」においては、ドローンなどの無人機や人工衛星により得られたデータも合わせた多項目観測データの解析結果や物質科学的データの分析結果の整理がさらに進められた。また、広い時間および空間スケールにおいて分解能が向上した地球物理学的・物質科学的な分析や解析結果に基づいて、火山活動推移のモデル化や噴火事象系統樹の分岐判断指標の作成などにおいて着実な進展がみられている。

防災リテラシー向上を目指した研究の成果としては、東日本大震災などの近年の災害を事例にしながら、災害復興や防災対策、防災教育などの社会対応の課題に関する検討が積み重ねられ、南海トラフ地震などの将来の災害に備えるための防災計画や土地利用計画の課題に関する示唆が得られている。また、GISなども利用しながら、災害の社会素因*である脆弱性を個人レベルで評価・可視化する手法を開発するとともに、様々な地域や集団を対象に社会の防災リテラシーの実態把握を蓄積した。また、オープンサイエンスやリスクコミュニケーション*など新しい手法を取り入れ、行政機関や一般市民などと連携しながらリスク認知能力を涵養したり知識レベルを向上させたりする取り組みを展開し、具体的な研修プロ

グラムの体系化と教材コンテンツの作成が行われるなど、地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成に関する研究も進展している。

5つの総合研究の1つである「高リスク小規模火山噴火」は、噴気地帯や山頂火口近傍における観光客や登山客等の災害リスクの低減を目指し、本研究計画から新たにスタートしたものである。このグループでは、災害情報の発信に関する研究、小規模噴火の発生する場の把握、観測による火山活動の把握、噴火の予測に関する研究、小規模噴火災害の資料収集に関する情報共有が進められており、火山災害全般に関する一般住民の知識や認識に関するオンラインアンケートも実施されるなど、順調なすべり出しが見られている。「千島海溝沿いの巨大地震」は、本研究計画から開始したものであるが、観測に基づく震源モデルの提示から災害予測、防災リテラシーの向上まで、分野融合研究として着実に進歩している。令和3年度末には、中央防災会議による千島海溝モデルの具体的な被害想定が示されたことを受け、津波や低体温症による死者数の最小化を目指した研究の成果が際立った。「南海トラフ沿いの巨大地震」では、長期予測に不可欠なプレート形状に関する研究に進展があった。「首都圏直下地震」は難航しているが、オンラインによる意見交換会を実施し、課題間の情報共有と連携強化により、具体的な目標の明確化を試みている。

令和3年度は、2011年東北地方太平洋沖地震から10年が経過した年度であったが、2022年3月に発生した福島県沖の地震($M_{JMA}7.4$)により震度6強の強震動が引き起こされ3名の方が亡くなるなど、超巨大地震の影響はいまだ継続している。また、能登半島の群発地震が1年以上に亘り継続中であり、本研究計画でも臨時観測を計画実施中である。今後、現象を引き起こすメカニズムの解明が期待されている。一方、福徳岡ノ場やトンガで発生した海域での大規模な噴火では、大量の軽石漂流、気圧変動に伴う海面変動など、新たなハザードがクローズアップされた1年でもあった。

用語解説

アウターライズ

海洋プレートが海溝から陸域下に沈み込む際にたわむことによって、海溝軸よりも海側（海溝軸からみた陸域の反対側）に形成された海底の高まり。

異方性

物質の物理的性質が方向によって異なることをいう。例えば、P波の伝わる向きやS波の振動方向によってその伝わる速さが異なる性質（P波とS波についてはそれぞれの項を参照）。前者は方位異方性、後者はS波偏向異方性と呼ばれる。これらの異方性は、地殻内の亀裂やマントル内の鉱物結晶が一定の方向に配向することで生じると考えられている。前者は地殻内の応力場を、後者はマントルのダイナミクスを解明する手掛かりとなる。

移流拡散

移流拡散モデルの項を参照。

移流拡散モデル

噴火で放出された火山灰や噴石の挙動のシミュレーションで用いるモデルで、物質や温度等の物理量が流れによって移動する現象である移流と、これらの物理量が拡散する現象を同時に考慮する。

インバージョン

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

ウェーブライダー

自律航走型海洋プラットフォーム。波の力を推進力に換えて航行するため、燃料を必要としない。任意の地点に移動できるほか、一定の範囲内にとどまることもできる。多様な観測機器や発電・蓄電システムを搭載できるが、航海速度が小さいために、速い潮流に逆らって航行することはできない。

衛星画像

人工衛星で取得される画像。その一つである赤外画像は、地球表面の温度によって変化する。特に無人離島や大洋上の隔絶された火山島で発生した噴火活動の状況把握に有効である。

エアガン

水中で圧縮空気を瞬間的に放出し、その衝撃波を震源とすることで水底に向けて地震波を発生させる装置のこと。発生した地震波が地下の地質境界で屈折・反射して海底地震計等の観測機器に伝わってきた波形のデータを解析することによって地下の構造を推定できる。

エクスポージャ情報

ある時刻に発生した地震動・津波など（ハザード：災害誘因）にさらされるもの（エクスポージャ：曝露）に関する情報。具体例としては、建物のフットプリント、建物の高さ、建物の固有周期などがある。

応力載荷

プレート運動や近傍での地震発生、非地震性滑りなどによって、断層面にかかる剪断応力が増加すること。

応力

岩盤等の物体内部に考えた仮想的な面に作用する、単位面積当たりの力。応力の単位は Pa（パスカル）。面に対して垂直な方向の力を垂直応力または法線応力、面に平行な力をせん断応力とよぶ。物体内部の応力の分布を応力場という。震源域の応力が岩盤または断層の強度に達したときに地震が発生すると考えられている。地球科学が取り扱うほとんどの範囲では、応力は6つの独立な成分を持つ2階の対称テンソルとして記述できる。一般に、応力テンソルは対角化が可能であり、3つの固有値と固有ベクトルを、それぞれ主応力と主応力軸と呼ぶ。特に3つの主応力を、圧縮が大きい方から順に最大主応力、中間主応力、最小主応力と呼ぶ。最大主応力と最小主応力の差を差応力と呼ぶ。

応力降下量

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

応力緩和

一時的に断層面にかかっていたせん断応力が低下すること。

階層的クラスタリング

サンプルデータの、最も似ている、または最も似ていない組み合わせを探し出し、順番にグループ分けしていく手法のこと。

階段ダイアグラム

噴火履歴調査で得られた噴火の年代と噴出物量のデータに基づいて、噴出物量の積算量の時間変化を火山ごとに示した図。長期的な噴出率、噴出率変化の規則性、将来の噴火の規模や時期を議論する際に用いられる。

海底磁力計

低ノイズの海底で地磁気3成分の時間変化を捉える観測機器。磁力計、データ収録装置、バッテリー等を封入した耐圧容器に錘を取り付けることにより海底に到達し着底する。

海底電位差磁力計

海底磁力計の機能に加え、耐圧容器の外に腕を拡げるように展開した電極間の電位差の時間変化を捉える機能を合わせもつ観測機器。

確率ゲイン

地震発生の物理モデルや先行現象の発生確率等に基づいた予測手法による大地震の予測確率が、平均再来間隔等の単純な統計モデルから見積もられるものに比べて何倍になるかを表す指標。確率利得ともいう。

火孔

火口内に新たにできた更に小さな火口のことである。噴火活動に伴い、その位置が変わる場合や、複数の火孔が同時に開くこともある。気象庁は、既存の火孔名がある場合は、それにしたがうとともに、いつ生じた火孔かを明瞭に区別する場合は、西暦の下2桁と通し番号を用いて名称を定めている。また、火口内で水蒸気や火山ガスのみを噴出している孔を「噴気孔」と呼び、火孔と区別している。

火砕丘

小規模な噴火を繰り返すことで火口のまわりに火山砕屑物が積もってできた円錐形の地形。

火砕物密度流

噴火で放出された火砕物（固体粒子）と気体からなり、大気よりもやや大きい密度をもつために密度差によって生じる流れのこと。高温の火砕流や火砕サージだけでなく、水蒸気噴火に伴う噴煙から生じる高温ではないが大気よりも温度の高い流れも含まれる。

火砕流

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

火山ガス

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

火山活発化指数（VUI）

VUI は Volcanic Unrest Index の略。数年から数 10 年スケールの中期的な火山活動評価のために考案された噴火が発生していない時点での火山活動に関する客観的・定量的な評価指標で、観測者・科学者と行政・住民とのコミュニケーションツールとしての利活用が念頭におかれている。微小地震活動や地熱活動などが一時的に高まった時、行政・住民は過去の事例と比較した場合の深刻性といった観点で捉えることができる。ニュージーランドで開発され、日本国内の複数の火山で試験的な導入に関する研究が進められている。

火山ガラス

マグマが急速に冷却された際に、鉱物（斑晶）が成長できずに非晶質のまま固結したものをいう。

火山機動観測実証研究事業

火山の噴火やその前兆と思われる現象が発生した際に、迅速かつ効率的に機動観測を行える体制を構築する実証研究を行うことを目的として、文部科学省の下で実施されている事業。

火山構造性地震

マグマ溜まりの圧力の増減やマグマの貫入・伸展に伴うひずみの変化などにより、火山体やその周辺の地下の岩盤が破壊して発生する地震。プレート運動による応力が原因で発生する一般的な地震同様に岩盤のせん断破壊（断層滑り）に伴って発生することから火山構造性地震と呼ばれる。A型地震と呼ばれることもある。

火山性微動

火山活動に伴って起こる微弱な震動。火口直下等の浅部に存在する火山性流体の状態を反映していると考えられているほか、噴煙が連続的に放出されている際にも観測される。火山性地震とは異なり、震動が数分から数時間、ときには数日間にわたって継続することがある。

火山の状況に関する解説情報

火山活動に変化が認められるなど、気象庁が火山活動の状況を伝える必要があると判断した場合に発表される情報。今後の活動推移によっては噴火警戒レベルを引き上げる可能性がある場合などに「火山の状況に関する解説情報（臨時）」が発表される。

火山噴火予知連絡会

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



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

火山噴出物

火山噴火により噴出した物質の総称。火山噴出物は気体、液体、固体と様々な形態をとり、それぞれの例として火山ガス、溶岩、火山砕屑物が挙げられる。火山砕屑物のうち直径 64 mm 以上を火山岩塊（噴石）、直径 2 mm～64 mm を火山礫、直径 2 mm 未満の細かい破片を火山灰という。「噴石」に火山礫を含む場合もある。

火山防災（会議）協議会

活動火山対策特別措置法に基づき、火山地域の都道府県及び市町村が設置する協議会。関係機関及び火山専門家等によって構成され、「噴火シナリオ」や「火山ハザードマップ」、「噴火警戒レベル」、「避難計画」等の一連の警戒避難体制について協議する。

火山マイスターの制度

火山地域の自然や特性について正確な知識を有する人を地域防災のリーダーとして認定し、地域防災力の向上を図るとともに、ガイドを担って地域の魅力発信にも活かしていこうとする目的から、有珠山と御嶽山で設けられた制度。

活断層

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

間隙水圧

土の粒子間や岩石中の孔（間隙）に入り込んだ水にかかる圧力。

企画部

地震・火山噴火予知研究協議会の下に設けられた組織。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。

気相成長

ガス状態（気相）から固体が析出して成長すること。

基盤（的地震）観測網

地震調査研究推進本部の「地震に関する基盤的調査観測計画」（平成 9 年 8 月）及び「地震に関する基盤的調査観測計画の見直しと重点的な調査観測体制の整備について」（平成 13 年 8 月）に基づく、高感度地震計（防災科学技術研究所の Hi-net、気象庁及び大学など）、広帯域地震計（防災科学技術研究所の F-net 及び大学）、強震計（防災科学技術研究所の K-NET と KiK-net）の観測網。

逆解析

インバージョンの項を参照。

教師なし学習

機械学習において、予測や判定の対象である正解が存在しないとして学習させる手法。データの特徴からグルーピングするクラスタリングや正解・不正解が明確でない問題に対応できるほか、データの中に存在する未知のパターンを見つけだすこともできる。

強震動

被害を及ぼすような強い地震動（揺れ）のこと。強震動を振り切れることなく記録するための地震計を強震計と呼び、強震計で記録した波形データを強震記録、または、強震動記録という。

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。

空振

空気振動の略で、空中を音波として伝わる振動のこと。耳に聞こえない低い周波数の音波をさす場合が多い。噴火に伴って火山ガスや噴煙が火口から大気中に放出される際に発生することがよく知られているが、地震、津波、雪崩等の発生時に放出されることもある。

空中電界変動観測

帯電した噴煙が変化することで引き起こされる電界の時間変化を捉える観測手法。噴火現象に相関する長周期の変動に加え、火山雷の発生によると考

えられるインパルス状の変動も観測される。

苦鉄質マグマ

カンラン石や輝石など、Fe や Mg を主成分として含む苦鉄質鉱物に富むマグマのこと。SiO₂ の量が少なく、温度が高く結晶量が少ないことから粘性が低く流動性に富む。地表に噴出して冷却固結すると玄武岩になる。

クラスト

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

繰り返し地震

発生場所（震源域）、発震機構解、マグニチュードがほぼ同じで、繰り返し発生している地震。発生場所と発震機構がほぼ同一であるため観測波形が良く似ることを利用して検出される。波形の相似性が高いことから、相似地震と呼ばれることもある。また、個々の繰り返し地震が小地震の場合は、小繰り返し地震ということもある。

クーロン応力変化

クーロン破壊応力（Coulomb Failure Stress, CFS）は、ある断層に作用するせん断応力と、その断層の摩擦係数と法線応力の積で表現される断層強度（クーロンの破壊規準）の差をいい、その断層がどの程度破壊されやすい状態にあるのかを表す。周辺で発生した地震等の影響で生じたクーロン応力変化（ Δ CFS）が正のとき、その断層で地震の発生が促進されと考えられる。

群発地震

同程度の規模の地震が比較的狭い地域で続発する活動のこと。地震が数年にわたり続発することもある。

経験的モード分解法

任意の時系列データを複数のモードに分解する方法。低次のモードほど高周波に富む傾向をもつ。例えば津波の場合、特定の次数範囲のモードに顕著な振幅のシグナルが現れることが分かれば、ノイズ、潮汐、地震動等のデータの蓄積を待たずに津波の現状把握と即時予測を逐次的にできると考えられる。

考古データ

考古学の調査・研究によって発見された地震や火山噴火等の痕跡、またそのような痕跡に関する記載。

剛性率

弾性率の一つで、物質の変形のしにくさを表す物性値。剛性率が大きい物質ほど変形しにくいことを示す。直方体の物質の下面を固定し上面に平行にせん断応力を加えて直方体の側面が鉛直方向からある角度で傾いた場合、せん断応力の大きさとその角度との比で表される。

古地磁気年代

測定された岩石の生成年代と、その岩石が生成された時期の地磁気の極性の情報を蓄積することによって作成された年代の尺度のこと。

固着

プレート境界や断層においてずれ運動がない状態のこと。

災害素因

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

災害誘因

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

サイト特性

増幅特性の項を参照。

差応力

応力の項を参照。

サロゲート AI

ある現象を表現する数理モデルを構成する数式に含まれるパラメータの値を適切に設定（最適化）するためには、試行計算を繰り返し、その結果が、実際に起きた現象（観測データ）と一致するように調整する必要がある。しかし、数式が複雑であったり、パラメータ数が膨大であったりすると、このための計算コストが非常に高くなり、現象の定量的な理解の妨げとなることがある。そこで、少数の試行計算の結果を学習データとした機械学習によって、パラメータの最適化を行う手法が提案されている。この機械学習をサロゲート AI という。

磁化構造

物質が磁石の性質を帯びる現象を磁化といい、地下における物質の磁化の強さの3次元的な分布を磁化構造という。

時間反転逆伝搬計算

波源（震源や地震波の反射面・変換面など）を再現（イメージング）する手法。波源を発した地震波が観測点まで媒質を伝わってきて観測された波形をデータとして、運動方程式の時間反転計算により観測点から波源に向けてその波が発生した時刻まで逆に伝わらせるような計算を行う。観測点が多数あれば、逆に伝わせた波が波源の位置で足し合されて強調されることで、波源を再現（イメージング）できる。

地震・火山噴火予知研究協議会

科学技術・学術審議会（測地学分科会）による建議に基づく地震及び火山噴火の観測研究に関して、関係機関の連携を緊密にして観測研究計画を協議し、研究の有効な推進を図ること

を目的として東京大学地震研究所に設置されている組織。予知協あるいは予知協議会と略称されることもある。

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



地震カタログ

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

地震サイクル

地震発生後、断層面の強度が回復するとともに、プレート運動などによる広域応力により再びひずみエネルギーが蓄積され、次の地震が発生するまでの一連の過程。

地震重力変化

規模の大きな地震が発生し、地表面や海水が大規模に急激に移動した際に生じる物質密度の分布の変化に伴うわずかな重力変化のこと。この重力変化は光の速さで地球内部を広がっていくため、観測できればタイムラグ無しに地震の発生などを検出できると考えられる。

地震調査委員会

地震調査研究推進本部の項を参照。

地震調査研究推進本部

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



地震波干渉法

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

地震波速度トモグラフィ

多数の地震計で観測された、多数の地震からの地震波の到着時刻から、地球内部の地震波が伝わる速さの分布を推定する手法。また、この解析によって推定された「伝わる速さ」の分布図を指すこともある。一般に、高温あるいは、多くの流体または亀裂を含んでいる岩盤では地震波の伝わる速さが遅くなると考えられている。

地震発生層

地殻のうち地震の発生する深さの範囲。地殻深部になると高温になり、地震が発生しにくくなる。場所により地下の温度が異なると、地震発生層の厚さも異なる。一般に活火山周辺では、活火山に近くなるにつれて地震の発生する深さの下限が浅くなり、地震発生層の厚さが薄くなっている。

地震モーメント

地震の規模を表す最も基本的な量。震源断層の面積と滑り量及び剛性率（岩盤の変形のしにくさを表す物性値）の積で計算される。断層運動の規模を表すために用いられることもある。単にモーメントと略されることがある。

地震予知連絡会

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



地滑り土塊

地滑りによって、斜面下方へ移動した物質の塊をいう。

次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト

平成 26 年の御嶽山の噴火等を踏まえ、火山災害の軽減に資する火山研究の推進（次世代火山研究推進事業）と、広く社会で活躍する火山研究人材の裾野を拡大するとともに、火山に関する広範な知識と高度な技能を有する火山研究者となる素養のある人材の育成（火山研究人材育成コンソーシアム構築事業）を目的として、文部科学省が平成 28 年度から実施している 10 ヶ年（予定）のプロジェクト。

<https://www.kazan-pj.jp/>



シミュレーション

実際の事象を、その事象を支配している法則に基づいてほぼ同様となるように組み立てた模擬空間で再現試行すること。コンピュータを用いた数値シミュレーションを指すことが多い。

社会素因

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

首都圏地震観測網

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

首都直下地震

首都圏の直下を震源として発生する地震の総称で、特定の地震を指すものではない。内閣府の首都直下地震モデル検討会
は、近い将来に発生が予想される M7-8 クラスの地震として想定した 20 通り以上の地震による震度分布・津波高等の検討結果を平成 25 年に公表した。

<https://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutochokkajishinmodel/>

史料

歴史時代の地震や火山噴火等の研究の素材となる、古文書、日記、絵図、建築等の総称。

震源

地震時の断層破壊が始まった場所を震源といい、一般に、緯度・経度・深さで表す。断層破壊が始まった場所であることを強調するために、破壊の開始点ということもある。なお、震源断層や震源域、震源過程を概略的に指して震源と呼ぶこともある。

震源過程

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

震源断層モデル

断層面上における滑り量の分布や滑り方向、破壊の伝播様式を表すモデルのこと。

震源特性

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

浸透率

岩石等の多孔質媒質（小さな間隙がたくさんある媒質）内において、流体がどの程度流れやすいのかを表す指標。媒質に含まれる間隙の大きさや量、形状、間隙同士の連結状態を反映する。

深部低周波地震

低周波地震の項を参照。

水蒸気噴火

マグマ等の熱によって火山体内部または地表付近の水が気化して体積が膨張することで、水蒸気が急激に噴出する現象のこと。噴火口付近の岩石が砕け、火山砕屑物（火山岩塊や細粒火山灰）が飛散する。噴出物には、新鮮なマグマ由来の物質は含まれない。

垂直避難

水害や津波等の発生時に、その建物や近くの建物の2階以上のなるべく上の方の階に移動する避難方法。

滑り欠損

プレート境界面での相対変位を考えた時、プレート相対運動から期待される相対変位から、実際に生じている相対変位を減じた量をいう。滑り欠損が大きいということはプレート間が固着していることを意味する。

スラブ

重い海洋プレートは、大陸プレート等のより軽いプレートの下へ沈み込む。海洋プレートがマントル中に沈み込んだ部分をいう。

スロー地震

通常の地震のように断層が急激に滑ることなく、ゆっくりと滑ることによって、蓄積されたひずみエネルギーを解消させる現象。ゆっくり地震ともいう。プレート境界で発生するスロー地震には、周波数が高いものから低いものの順に以下の種類がある。

- ・低周波微動

数分から数日の間、断続的に微弱な低周波振動（数 Hz～10 Hz）を発生させる現象。低周波地震の重ね合わせと考えられ、プレート境界のゆっくり滑りに伴って発生すると考えられる微動。火山性微動や常時微動とは発生原因が異なり、区別される。テクトニック微動とも呼ばれる。海溝付近の安定滑り域の深部側にある固着域に遷移する領域で発生する浅部低周波微動と、固着域からさらに深部の安定滑り域に遷移する領域で発生する深部低周波微動がある。

- ・超低周波地震

短周期（高周波）成分がほとんど含まれず長周期（低周波）成分が卓越する地震波を放射する地震で、10～100 秒程度の帯域に卓越した周期を持つもの。浅部低周波微動と同様の場所で発生するものを浅部超低周波地震、深部低周波微動と同様の場所で発生するものを深部超低周波地震という。

- ・スロースリップイベント（SSE）

プレート境界面等の断層で発生する非地震性滑りで、非定常なゆっくりとした滑り。継続時間が数日～10 日程度の深部短期的 SSE と半年～数年程度の長期的 SSE がある。南海トラフの場合、長期的 SSE は固着域の深部側に隣接した遷移領域で、深部短期的 SSE は深部の安定滑り域により近い遷移領域で発生する。

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。

全岩化学組成

採取した岩石を化学分析して得られる、岩石を構成する主要元素と微量元素の濃度。主要元素の濃度は酸化物の重量パーセント濃度で表され、火山岩の多くでは 99 重量パーセント以上を占める。主要元素と微量元素の濃度は、マグマの生成・上昇・分化・混合・噴火のプロセスを理解する上で不可欠な情報である。

前弧

島弧－海溝系における火山フロント（火山帯の海溝側の縁）と海溝軸の間の地域。

先行現象

地震や火山噴火の発生前に、震源域や火山体の内部や周辺で発生するさまざまな異常現象。地盤の隆起・沈降、地震活動の変化、電磁気異常、地下水の変化などが報告されている。前兆現象あるいは先駆現象と呼ばれることもある。

前震、本震、余震

比較的大きな地震が発生すると、それより小さな地震が直後から近くで続発する。この最初の大きな地震のことを本震、その後に続発する地震を余震という。また本震の前に、その震源の近くで本震よりも規模の小さな地震が起ることがあり、これを前震という。

増幅特性

表層地盤の影響で地震の揺れが増幅される特性のこと。サイト特性ともいう。

測地学分科会

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



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

側噴火

山頂付近の火口（山頂火口）ではなく、それ以外の中腹や山麓で発生する噴火。

タイムライン

防災行動計画ともいう。防災に関係する機関が連携して、災害時に発生すると想定される状況を共有し、防災行動とその実施主体を時間順に並べて整理したもの。

脱ガス

マグマに溶け込んでいる揮発性（ガス）成分が、マグマの上昇に伴い圧力が低下するなどして溶解度が下がり、気泡として析出してマグマから分離することをいう。そのガス成分が周辺岩体に浸透・拡散するなどして十分に抜ければ爆発性が低下し、ガス成分が残れば爆発性が高まると考えられている。

炭酸塩脈

岩石の割れ目に二酸化炭素を結晶内に含む鉱物（炭酸塩鉱物）が析出したものの。

地殻

地球の固体部分を構成する大きな成層構造のうち、一番外側の層。地殻の下にはマントルが存在する。地殻は海洋地殻と大陸地殻に分類され、海洋地殻は約 6 km のほぼ均一な厚さであるのに対し、大陸地殻は平均的には 30 km 程度の厚さであるが、安定な大陸地塊等では 60～70 km の厚さに及ぶ場所がある。地殻の浅い部分を上部地殻、深い部分を下部地殻と呼ぶ。上部地殻と下部地殻の間に中部地殻が存在する場所もある。

地殻活動

地殻内で発生する現象全般の総称。

地殻変動

地震等の断層運動やマグマの蓄積・放出等の火山活動によって地表に生じた変位やひずみ、傾斜の変化。地盤変動ということもある。

地殻内流体

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

逐次非線形地盤応答解析

強い地震後の建物の健全性等の評価に用いられる入力地震動の設定手法の一つ。地震発生時において地盤の物性値が時々刻々と変化する逐次非線形性をモデル化し、精度の高い入力地震動を設定するために不可欠な時間領域での入力地震動を設定する手法。周波数領域での入力地震動を設定する従来の手法は、地盤の物性値の時間変化を考慮できない。

地表地震断層

地震時の断層運動が地表に達して生じた地表面の食い違い。単に、地震断層、あるいは、地表断層ということもある。

中央防災会議

内閣の重要政策に関する会議の一つ。防災基本計画の作成や、防災に関する重要事項の審議等を行う。内閣総理大臣をはじめとする全閣僚、指定公共機関の代表者及び学識経験者により構成されている。

長期評価

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

超低周波地震

ゆっくり滑りや火山活動に伴って生じる地震で、短周期（高周波）成分がほとんど含まれず長周期（低周波）成分が卓越する地震波を放射する地震。プレート境界域で発生する超低周波地震については、スロー地震の項を参照。

超臨界地熱貯留層

374℃以上の温度、22.1 MPa（水の臨界点）以上の温度・圧力をもつ水を超臨界水といい、この水を利用した超臨界地熱発電の技術開発が行われている。将来、中長期に安定して地熱発電に使用できる量の超臨界水を蓄えている層を超臨界地熱貯留層という。火山地域の5 km程度の深さに存在すると考えられている。

津波警報

地震等の発生後に津波による災害の起こるおそれがある場合に気象庁が発表する警報。各津波予報区の予想される津波の高さや到達予想時刻等の情報が併せて発表される。

津波堆積物

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

津波の波源

津波が発生した領域、すなわち、津波の原因となる海底の隆起や沈降を起こした領域のこと。

津波避難ビル

津波警報や大津波警報が発表され、避難勧告や避難指示が出され、さらに高台などへの避難が困難になったときに緊急的に一時避難するための建物。

低周波地震

短周期成分がほとんど含まれず長周期成分が卓越する地震波を放射する地震。ただし、超低周波地震に比べて卓越する地震波の周波数は高い（概ね 1 ～数 Hz）。活火山近傍の下部地殻やモホ面付近等で発生する深部低周波地震、火山噴火に前後して火山体のごく浅い場所で発生する浅部低周波地震がある。

低周波微動

スロー地震の項を参照。

テクトニック微動

スロー地震の項を参照。

データ同化

複雑な現象の高精度予測のために、数値シミュレーションの結果として得られる物理量が観測データをなるべく再現できるように、観測データを用いて各種パラメータを修正しモデルを改良すること。

テフラ

噴火によって噴煙や火砕流として噴出した火山碎屑物（火山弾、軽石、火山灰など）が地表に堆積した物。噴火堆積物とも呼ばれる。

電磁気探査

地下の構造を調べる手法の一つで、電気的性質を表す電気伝導度や比抵抗（比抵抗の項を参照。）の地下における分布などを調査すること。

ドレッジ試料

円筒形や箱型の容器を海底で引きずることで採取された試料。任意の距離の海底を引きずり採取されるため、試料に異なる底質が混合する可能性があるほか、採取位置や層厚の特定ができない。

トレンチ調査

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

二次元ビデオディストロメーター

光学的な手法によって、降水粒子の粒径分布、3次元形状、落下速度を観測する機器のこと。最近では、火山噴火時の降灰観測に利用する研究が進められている。

粘弾性緩和

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

破壊開始点

震源の項を参照。

（動的地震）破壊過程

震源過程の項を参照。

ハミルトニアンモンテカルロ法

多次元空間の確率分布のサンプリングを行うアルゴリズムであるマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC法）の一つ。目標とする事後分布の勾配を利用した効率的なサンプリングが特徴であり、短いマルコフ連鎖で必要とする確率分布を得ることが可能とされている。

光ファイバー温度計

光ファイバーへの入射光の後方散乱を利用した光ファイバーセンシング技術のひとつ。光ファイバーの構成分子の熱振動によるラマン散乱の強度が温度変化することを利用して、光ファイバー上の温度分布を長距離かつ高空間分解能で連続測定できる。測定したい位置に電力を供給せずに測定が可能であるほか、電磁ノイズの影響を受けないことや電氣的に絶縁性を有するという利点もある。

非地震性滑り

断層面やプレート境界面で発生する、地震波を出さない、ゆっくりとした滑り。

ピストンコア試料

ピストン機構を備えた重力自由落下方式の採泥器で採取された堆積物の柱状の試料（コア）をいう。採取時に擾乱を受けにくいほか、他の採泥器と比較して試料が圧縮されにくいいため、年代をより正確に測定できる。

ひずみ集中帯

ひずみ速度の項を参照。

ひずみ速度

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

非線形応答特性

地盤の増幅特性について、地震基盤から入射する地震動の周波数だけに依存する場合のものを線形応答特性といい、振幅にも依存する場合のものを非線形応答特性という。

比抵抗

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

非弾性

外力によって変形した物質が、外力を除去すると元に戻る性質を弾性といい、元に戻らないものを非弾性という。非弾性で媒質が変形することを非弾性変形という。非弾性的性質には、粘性や塑性等の性質が含まれる。地殻の上部は主に弾性的性質を持つが、深部になると粘弾性的性質や塑性的性質を持つことが知られている。内陸地震の発生のメカニズムを理解するためには、粘弾性的性質や塑性的性質を持つ層の影響を理解することが重要であると考えられている。

微動

長時間にわたって継続する、振幅の小さい地震動のこと。地震等が起こらなくても、波浪や風、人間活動などによって定常的に生じる振動を常時微動または雑微動という。プレート境界域で発生する微動については、スロー地震の項を参照。

付加体

海洋プレートが海溝で陸側プレート下に沈み込む際に、海洋プレートの表面にある堆積物が剥ぎ取られ、陸側プレートに付加したもの。

ブラウドマン共鳴

気圧の波が伝わっていく速さと、この圧力変動でつくられた海の波が同程度の速さで伝わっていくときに、伝わっていく距離が長くなるにつれてこの波の振幅が大きくなる現象のこと。

フラジリティ曲線

基盤の最大加速度と建物の損傷規模に関する確率との関係を示す曲線のこと。例えば、建物の軽微な被害、大破するような被害、倒壊するような被害の境界を表すフラジリティ曲線が作成できれば、基盤の最大加速度を入力することにより、それぞれの被害発生確率を求めることができる。

プリニー式噴火

噴火の様式の一つ。噴火を引き起こしたマグマの粘性が高い場合が多い。数十分から1日程度にわたり、大量の火山ガスと火砕物（火山灰や軽石）からなる噴煙柱を形成する。噴煙柱の高さは成層圏に達し、広範囲に火砕物を降下させる。細粒の噴出物が成層圏にとどまり、世界の気候に影響を及ぼすこ

ともある。噴煙柱の広がり小さいものは、準プリニー式噴火と呼ばれる。

プレート境界

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

プレート境界型地震

プレート境界で発生した地震。その発震機構がプレート境界での相対運動のものと同一タイプである地震をいう。

噴煙柱

火口から噴出した火砕物と火山ガスの混合物が、大気を取り込んで浮力を得ることで生じる上昇流。高度数百 m ～数 km、巨大噴火時には 30 km に達することがある。

噴火速報

気象庁から登山者や地域住民に対して発表される端的な情報。常時観測火山などが対象で、噴火が発生した事実を速やかに伝えるため、火山名と噴火の時刻のみが発表される。

噴火警戒レベル

火山活動の状況に応じて「警戒が必要な範囲（生命に危険を及ぼす範囲）」と防災機関や住民等の「とるべき防災対応」を 5 段階に区分した指標。噴火警戒レベルに応じた「警戒が必要な範囲」と「とるべき防災対応」が地方自治体の地域防災計画に定められた火山において、噴火警報・予報に付して発表される。

噴火事象系統樹

時間と共に進行する一連の事象（イベント）を網羅的に列举し、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。

噴砂

地震時の強い揺れにより、地下水を含んだ砂の層が液状化し、その上の地層を引き裂くように砂が上昇する現象。

ポアソン過程

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

防災リテラシー

地震・火山噴火災害に対して適切な防災対策や避難行動をとることができるよう、地震・火山に関する基本的な知識、住む地域の災害リスクの知識、災害情報（警報、注意報）の知識、防災対策や避難方法に関する知識をもち、それらを活用する能力のこと。

放射非平衡

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

放射性炭素年代

大気中に一定の濃度で存在する炭素の放射性同位体 ^{14}C が半減期 5,568 年で放射性崩壊することを利用し、試料中に取り込まれた ^{14}C の濃度の減少の程度から算出される年代。

ホルスト・グラーベン構造

沈み込む海洋プレートが、海溝軸の手前において正断層で断ち切られて形成された構造。正断層で切られて高まっている地塊をホルスト（地塁）、低くなっている部分をグラーベン（地溝）という。

本質物質

火山噴出物に含まれる物質のうち、その噴火に関係したマグマから直接的に由来した物質をいう。その噴火の前に形成されていた「類質物質」や火山活動とは関係しない堆積岩等の「異質物質」とは区別される。

マグニチュード (M)

地震の規模を表す指標。推定に使うデータやデータ処理の方法により、同一の地震でもマグニチュードの数値が異なることがある。

マグマ性噴火

噴出物のほとんどがマグマから直接由来した噴火。ハワイ式噴火、ストロンボリ式噴火、ブルカノ式噴火、プリニー式噴火などが該当する。

摩擦特性

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

ミュオグラフィ

宇宙線ミュオンを用いた地下の透過イメージング手法のこと。ミュオンは電子と同種の素粒子で、宇宙線が大気中の原子核と反応して生成される二次宇宙線として、地上に絶え間なく降り注いでいる。透過する物質の密度によって宇宙線ミュオンの減衰が異なることを利用して、X線の透視撮影のように地殻内部の密度分布を調べる試み（ミュオグラフィ観測）がなされている。

メトロポリスーヘイスティングス法

多次元空間の確率分布のサンプリングを行うアルゴリズムであるマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC 法）の一つ。未知パラメータに対して乱数によるゆらぎを与え、その候補をある確率で採択/非採択し、それらに基づき確率分布をサンプリングする手法。プログラム上の実装が比較的容易であることなどから一般的に用いられている。

余効滑り

地震が発生した断層面と同一の面上で、地震の後に起こるゆっくりとした滑り。

余効変動

地震の後に震源域あるいはその周囲で発生する地殻変動。

余震

本震、余震の項を参照。

陸海統合地震津波火山観測網

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

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

以下の 8 つの基盤観測網（うち 7 つは既設、1 つは整備中）から構成される。



陸域の基盤観測網

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

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

- ・全国強震観測網（K-NET）：全国に、約 20 km 間隔で設置された 1000 点以上の地表強震観測点からなる観測網。

- ・基盤強震観測網（KiK-net）：全国に展開された約 700 点の強震観測点からなる観測網。各観測点で、地表と地中の双方に強震計が設置されている。

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

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

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

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



海域の基盤観測網

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

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

- ・地震・津波観測監視システム（DONET）：海底に設置された地震計や水圧計等の観測機器ネットワークによって、地殻変動、地震動、津波などを計測する。南海トラフの地震及び津



波を常時観測監視するため、熊野灘沖に展開されたシステム（DONET1）と、紀伊水道沖に展開されたシステム（DONET2）からなる。

<https://www.seafloor.bosai.go.jp/DONET/>

- ・南海トラフ海底地震津波観測網（N-net）：南海トラフ地震の想定震源域のうち、観測網がまだ整備されていない高知県沖から日向灘にかけて設置が計画されているケーブル式海底地震・津波観測システムのこと。



<https://www.jishin.go.jp/main/seisaku/hokoku20a/k84-3-2.pdf>

リスクコミュニケーション

行政、専門家、地域住民、事業者などが、社会活動の中で発生するリスクや災害リスクなどについて情報を共有するとともに考え、出てきた問題点を相互のコミュニケーションによって解決していこうとする行い。

リフト

地殻に伸張の力が働くことにより形成された凹地。

レジリエンス性能

災害の発生によって建物の性能が最低限必要な性能を下回った後、復旧作業によって性能が回復するまでの時間の短さに相当する。建物の災害に対する抵抗力を高めること、復旧力を高めることでレジリエンス性能が向上する。

ローパスフィルタ

あるしきい値よりも高い周波数のシグナルを減衰させて遮断し、しきい値よりも低周波側のシグナルのみを通過させるフィルタ。しきい値よりも高い周波数のノイズ等を遮断する等の目的に用いられる。ここでは、海底圧力計の記録から高周波成分である地震動や海洋音響波に関する成分を遮断し、津波に係る成分を抽出するために用いられている。

A-0-A 方式

A-0-A (ambient-zero/atmospheric-ambient) 方式とは、海底水圧計で問題となる長期ドリフトを現場観測で把握し除去する方法。具体的には水圧計での計測期間中に定期的に既知のゼロ点（圧力の印加がない状態での出力）の計測を挟み、その観測値からドリフト値を把握する。

Ar/Ar（法）

放射年代測定法の一つのアルゴン - アルゴン法のこと。岩石・鉱物試料に中性子を照射することで試料中の ^{39}K の一部を ^{39}Ar に変換し、その量から試料中の K の量を推定する。この量と放射性崩壊起源の ^{40}Ar との同位体比から年代を求めるのは K-Ar 法と同じであるが、この手法には Ar 同位体比の測定のみで年代決定できる利点がある。

b 値

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

DAS 計測

分散型音響センシング（Distributed Acoustic Sensing）技術による計測。光ファイバーケーブルに光パルスを入力すると、ファイバー中の不純物による散乱が生じることを利用して、散乱点のわずかな移動を精密に検出することで、光ファイバーケーブルに沿う方向の変形を短い間隔毎に計測できる。光ファイバーケーブルが敷設されたルート上に極めて短い間隔で多数並ぶ観測点それぞれで、ケーブルが敷設された方向のひずみの変化を測るのと同様のデータが得られる。

GPU

Graphics Processing Unit の略で、ディスプレイに画像を描画するのに必要な計算処理を行う装置のこと。並列処理能力に優れていて大規模で高速な計算が可能である。ただし、単純な計算を行うように設計されており、幅広い処理には向いていない。

DEM

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

e コミマップ

防災科学技術研究所が「災害リスク情報プラットフォームの研究開発」の一環として研究開発している e コミュニティ・プラットフォームの一連の製品のうちのひとつ。別名、庁内情報共有・発信基盤システム。地域の防災情報等を登録することで、防災マップの作成し、地域住民の防災対策の検討と実施を支援する。



<https://ecom-plat.jp/index.php?gid=10457>

ETAS（モデル）

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

GEONET

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



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

GNSS

全球測位衛星システム（Global Navigation Satellite System）の略称。地球上での位置決めや時刻同期を目的とした電波を発射する人工衛星群、地上の支援システム、及び電波を受信して 3 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。米国が構築した GPS、ロシアの GLONASS や、ヨーロッパ連合（EU）の Galileo、日本の QZSS（みちびき）等のシステムがある。

HIST-ETAS モデル

Hierarchical Space-Time ETAS model の略で、データに含まれる時空間的な不均質を考慮してモデルパラメータを推定できるように改良された ETAS モデル。

ITRF

国際地球基準座標系（International Terrestrial Reference Frame）の略。GNSS、VLBI、SLR 等の宇宙測地観測データに基づき国際協定によって決定・維持されている三次元直交座標系であり、地球の重心を座標の原点としている。これに準拠して位置を定義すれば、プレート運動による 2 地点間の相対的な位置の時間変化を容易に表すことができる。

JDxnet

全国地震観測データ流通ネットワーク（Japan Data eXchange network）の略。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

ム流通ネットワーク。

J-SHIS

地震調査研究推進本部が取りまとめた「全国地震動予測地図」に関するデータを一元的に管理し、地震ハザードを地図上に表示する Web サービス。防災科学技術研究所により運用されている。<https://www.j-shis.bosai.go.jp/>



JVDN

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



K-Ar（法）

放射年代測定法の一つのカリウム - アルゴン法のこと。カリウムの放射性同位体 ^{40}K が、半減期約 12.5 億年で ^{40}Ca と ^{40}Ar に放射性崩壊することから、岩石・鉱物試料に含まれる ^{40}K と ^{40}Ar の量比を求めて、鉱物が生成した年代を算出する。

K-NET

陸海統合地震津波火山観測網の項を参照。

KiK-net

陸海統合地震津波火山観測網の項を参照。

LiDAR

Light Detection and Ranging の略で、光を用いたリモートセンシング技術の一つ。パルス状に照射したレーザーの反射光や散乱光を観測して、測定対象物までの距離や対象物の性状を計測する技術。

P 波

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

Pi-SAR X3

情報通信研究機構が開発した、航空機搭載合成開口レーダーの一つ。従来機よりも2倍の高周波帯域に対応した送受信機とアンテナ、高速・大容量の観測データ記録装置、観測データを准リアルタイムで処理する機上処理装置を搭載する。2021年12月に世界最高の分解能15 cmが定常的に得られることが実証された。

PLUM 法

Propagation of Local Undamped Motion 法の略。震源や地震の規模の推定は行わず、震度を予測しようとする地点の周辺の地震計で観測された揺れの強さから、直接、予測対象地点の震度を予想する新しい即時予測手法。巨大地震が発生した際でも精度良く震度を予測できる。

RC 造建物

鉄筋コンクリートで柱や梁等の主要構造部を構築している建物をいう。耐久性、耐震性、耐火性に優れる。

SAR

合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar）の略。レーダーを搭載する人工衛星や航空機の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。SAR 干渉解析（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。

SLR

人工衛星レーザー測距（Satellite Laser Ranging）の略。軌道が正確に推定されている人工衛星に搭載したプリズムに対して、地上基地局からレーザー光線をパルス状に発射し、そのパルスの往復時間から衛星までの距離を高精度に計測する。それを繰り返すことによって、地上基地局の座標を高精度に推定する技術。1 cm 程度もしくはそれより良い精度で地上局の座標が求められる。

SP 変換波

S波がプレートの上層等の速度コントラストの大きい地質境界に入射すると、S波のエネルギーの一部が変換して生成されるP波をいう。

REGARD

国土地理院が運用する電子基準点リアルタイム解析システム（REaltime GEONET Analysis for Rapid Deformation monitoring）の略で、リアルタイム測位サブシステム、イベント検知サブシステム、断層モデル推定サブシステムの3つのサブシステムで構成される。それぞれが、リアルタイム測位による変位時系列の計算、巨大地震発生の検出、自動断層モデル推定による地震規模の計算を行っている。

SINET

Science Information NETwork 6 の略で日本全国の大学・研究機関等の学術情報基盤として、国立情報学研究所が構築、運用している情報通信ネットワーク。<https://www.sinet.ad.jp>

S-net

陸海統合地震津波火山観測網の項を参照。

S 波

Secondary wave（第二波）または Shear wave（ねじれ波、たわみ波もしくはせん断波）の略。伝播方向と直交する面内で振動する弾性波。固体のみを伝わることができる。S波の伝播速度は、 V_s あるいは β と略記されることが多い。

UAV

Unmanned Aerial Vehicle の略で、人が搭乗しない無人航空機。ドローンは UAV の一種。

VEI

Volcanic Explosivity Index の略で、火山噴火の規模を表す指数。爆発的噴火に伴い降下した火山砕屑物の体積に基づいて推定される。指数の推定の際、溶岩ドームや溶岩流として噴出したマグマの量は含まれない。VEI は 0 から 8 までの 9 段階に区分される。1 は小噴火、2～3 は中規模噴火、4～5 は大規模噴火、6 はカルデラ形成をともなう巨大噴火、7 以上は地球規模に影響を及ぼす破局的な噴火に対応する。

VLBI

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

XバンドMPレーダー

Xバンド（9 GHz 帯、波長 25～37 mm）で、振動方向が異なる（鉛直偏波と水平偏波）の電波（マイクロ波）を使ったレーダー。MP は Multi Parameter の略。雨量観測に広く用いられている。火山監視においては、散乱強度と鉛直偏波と水平偏波の散乱強度比から噴煙と水滴（雲や雨）を識別でき、噴出物粒子の形状や量も見積もることができる。

災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次） 実施機関

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

災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次） 令和3年度研究課題一覧

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

	ERI_03	大規模噴火に伴う諸現象とそれを駆動するマグマ溜り―火道システムの解明	前野深
	ERI_04	非線形動力学・計算材料科学との学際連携に基づく地震現象の多様性の統一的理解	亀伸樹
	ERI_05	千島海溝・日本海溝における複合海底地震測地観測によるプレート境界の挙動解明とそのモデル化	篠原雅尚
	ERI_06	より現実的な断層面ダイナミクス	中谷正生
	ERI_07	多項目観測データの比較研究に基づく噴火過程の理解とモデル構築	大湊隆雄
	ERI_08	日本・NZ 国際協力によるヒクラギ沈み込み帯における多様な地震活動と、その発生環境との関係の解明	望月公廣
	ERI_09	内陸地震発生ポテンシャルの予測を目指した島弧の地殻応答と断層における地殻内流体の影響の解明	飯高隆
	ERI_10	東日本における長期的重力変化の観測とモデリング	今西祐一
	ERI_11	地震発生予測のための島弧・海溝システムの観測・モデリング統合研究	篠原雅尚
	ERI_12	スロー地震モニタリングに基づく南海トラフ域の地震発生可能性評価手法に関する研究	蔵下英司
	ERI_13	経験的アプローチによる大地震の確率予測のパフォーマンス調査	中谷正生
	ERI_14	大規模数値シミュレーションに基づく広帯域強震動災害の事前・即時予測	古村孝志
	ERI_15	首都圏の地震被害分布と地震像の解明	酒井慎一
	ERI_16	堆積平野・堆積盆地における地震災害発生機構の解明	三宅弘恵
	ERI_17	堆積物に基づく噴火物理化学パラメータ推定手法の高度化と事象分岐判断への活用	前野深
	ERI_18	観測研究データへの永続的識別子付与	加納靖之
	ERI_19	データ流通網の高度化	鶴岡弘
	ERI_20	光技術を用いた地下深部・火山近傍における地震・地殻変動計測技術の確立	新谷昌人
	ERI_21	高精細ミュオグラフィ画像自動診断による火山活動状況の推移との相関評価	田中宏幸
	ERI_22	海底ケーブルを用いる地震・地殻変動・津波リアルタイム観測技術開発	篠原雅尚
	ERI_23	海底での地震・地殻変動観測に向けた機動的観測技術の高度化	塩原肇
	ERI_24	マルチプラットフォーム次世代 WIN システムの開発	中川茂樹
	ERI_25	研究成果共有データベースの構築	鶴岡弘
東京大学理学系研究科	UTS_01	沿岸巨礫を用いた古津波評価法の検討：南海トラフ～琉球海溝の連動可能性評価に向けて	後藤和久
	UTS_02	巨大地震に伴う粘弾性余効変動の解明	田中愛幸
	UTS_03	地震発生場のテクトニクスとマルチスケール地震現象の予測可能性	井出哲
	UTS_04	地殻流体の化学的観測による地震火山活動評価システムの高度化と応用	角森史昭
	UTS_05	物理モデルと地形・地質学およびテクトニックな観測データを統合した地震発生の長期予測手法の開発と検証	安藤亮輔
	UTS_06	遠隔地火山、特に離島火山における火山ガスモニタリングの高度化	森俊哉
東京大学情報学環	III_01	ニーズ・アセスメントに基づく地震・火山災害に関する発生確率、被害想定、災害情報のコミュニケーション戦略の開発	関谷直也
東京大学史料編纂所	UTH_01	地震火山関連史料の収集・分析とデータベースの構築・公開	榎原雅治
	UTH_02	近代以前の地震・火山災害に関する多角的研究	杉森玲子
東京大学大気海洋研究所	AORI01	巨大津波を引き起こす震源断層の実態解明と流体変動モニタリング	朴進午
	AORI02	地球物理・化学的探査による海底火山および海底熱水活動の調査	小畑元
東京大学地震火山史料連携研究機構	HMEV01	地震火山関連史料に基づく低頻度大規模地震火山災害の調査	大邑潤三
	HMEV02	地震関連史料に基づく近代以前の地震活動の調査	榎原雅治

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

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

	JMA_03	火山活動に伴う地殻変動の把握及び評価	菅井明
	JMA_04	地球電磁気学的手法による火山活動評価の高度化	瀧沢倫明
	JMA_05	化学的手法に基づく火山活動監視・予測に関する研究	高木朗充
	JMA_06	地震動・津波即時予測の高度化に関する研究	鎌谷紀子
	JMA_07	火山噴出物の監視技術とデータ同化に基づく輸送予測に関する研究	新堀敏基
	JMA_08	火山活動の総合判断	中村政道
	JMA_09	地震観測、地殻変動観測	宮岡一樹
	JMA_10	潮位観測	鈴木博樹
	JMA_11	地磁気精密観測	仰木淳平
	JMA_12	全国における火山観測の強化	大賀昌一
	JMA_13	地磁気観測成果のデータベース化	有田真
	JMA_14	全国地震カタログの作成	森脇健
	JMA_15	火山現象に関する基礎データの蓄積と活用	山本哲也
	JMA_16	地震・津波・火山防災情報の改善に係る知見・成果の共有	福満修一郎
	JMA_17	防災・減災に関する知識の普及啓発	福満修一郎
海上保安庁	JCG_01	海洋測地の推進	渡邊俊一
	JCG_02	駿潮	林王弘道
	JCG_03	海底地殻変動観測	石川直史
	JCG_04	海域火山観測	藤原琢磨
北海道立総合研究機構	HRO_01	北海道内の活火山の地球物理学的・地球化学的モニタリング	高橋良
	HRO_02	津波による最大リスク評価手法の開発と防災対策の実証的展開	仁科健二
山梨県富士山科学研究所	MFRIO1	富士山の事象系統樹を精緻化するための噴火履歴の研究	吉本充宏
	MFRIO2	火山モニタリングと地下水流動把握のための多点連続重力観測	本多亮
公募研究	KOBO02	有感地震記述ならびに震度の距離減衰式に基づく地震活動解析	石辺岳男
	KOBO06	古地磁気学を用いた火山活動推移の検討とマグマ供給系の変遷モデルの構築	佐藤鋭一
	KOBO07	地震先行 VLF 帯電磁波強度減少研究のための超小型衛星のエンジニアリングモデル及びフライトモデルの製作	児玉哲哉
	KOBO08	行政等が所有する宏観異常現象に関わるデータを用いた地震発生の確率予測	織原義明
	KOBO09	地震先行 VLF 帯電磁波強度減少の多角的解析による評価と発生メカニズムの解明	鴨川仁
	KOBO11	水蒸気噴火が懸念される火山におけるマグマ起源流体の挙動解明と火山活動評価	大場武
	KOBO12	火山ガス観測による焼岳火山の活動評価とガス輸送システムの解明	齋藤武士
	KOBO13	北海道摩周周辺における火山活動の時間変化に関する地球化学的調査	鹿児島渉悟
	KOBO15	蔵王山、過去約 800 年間の活動の噴火推移の類型化	伴雅雄
	KOBO17	富士山頂における全磁力通年観測	佐柳敬造
	KOBO19	東京海洋大学練習船での海底地殻変動観測	中東和夫
	KOBO20	海底電磁気観測による伊豆大島火山マグマ供給系の解明	多田訓子
	KOBO21	石基組織から読み解く北海道摩周火山の噴火推移過程	佐野恭平
	KOBO22	活火山火口湖の水・熱・化学物質収支の長期評価と火山活動変動との関係について：蔵王山と御釜	知北和久
	KOBO23	阿蘇中岳火山灰の岩石磁気的性質の時系列変化に関する研究	望月伸竜
	KOBO24	有珠山を事例とした住民自治組織の火山防災の基礎情報収集調査－火山防災制度及び火山活動推移の理解度の解明－	地引泰人
	KOBO25	GNSS-A 海底測地観測データの高精度化に向けた精度評価システムの構築	横田裕輔

拠点間連携共同研究	CTOC01	巨大地震のリスク評価の不確実性に関するパラダイム構築の推進	加藤尚之・松島信一
	CTOC02	ばらつきのある被害リスク評価をふまえた防災計画の検討	牧紀男
	CTOC03	定常的地震活動の震源および地震波速度構造の精度向上による地震波動場推定の高度化	望月公廣
	CTOC04	不均質な断層すべり分布を考慮した津波の確率論的予測と不確実性の評価	佐竹健治
	CTOC07	強震動のブラインド予測のための共用地盤モデルの構築に関する研究	山中浩明
	CTOC14	巨大地震による斜面災害発生個所の事前予測方法の検討	齊藤隆志
	CTOC16	桜島大規模火山噴火を対象とした事前避難を実現するためのリスクコミュニケーション方法に関する実践的研究	大西正光
	CTOC17	地震発生の切迫性を伝える災害情報モデルとシナリオの構築～北海道胆振東部地震からみえた新たな課題としての複合連鎖問題の解釈を通して～	岡田成幸
	CTOC20	不確実性を考慮した浅部地盤の非線形応答評価手法の検討	上田恭平
	CTOC21	即時建物被害予測技術の高度化	楠浩一
	CTOC22	津波被害予測における震源モデルの不確実性の評価	宮下卓也
	CTOC23	リアルタイム地震情報配信手法の高度化に向けた地盤特性の影響度評価	倉田真宏
	CTOC24	強震動のブラインド予測結果に基づく強震動予測技術の精度と信頼性に関する研究	山中浩明
	CTOC25	地震により被害を受けた事業継続建築物の火災リスク評価手法の開発	西野智研
	CTOC26	1m-LiDAR DEM を用いて検出された地すべりなどの不安定土塊の微動及び地震動観測による相対的危険度評価	齊藤隆志
	CTOC27	邑知潟平野の推定地盤速度構造の非線形地盤応答を考慮した強震動予測	松島信一
	CTOC28	既存在来木造建物に大きな被害を引き起こす地震動の発生要因に関する研究	境有紀
	CTOC29	文化遺産の所在情報と災害情報の重ね合わせによる文化遺産災害情報マップの構築と活用	蝦名裕一
	CTOC30	ばらつきを考慮したハザード想定結果の「受け取られ方」に関する評価研究	牧紀男

[参 考 資 料]

計画推進部会および総合研究グループ等別の成果

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（第2次）」（建議）に示された実施内容について、令和3年度の成果を計画推進部会および総合研究グループ等別に学術報告として取りまとめた。

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

この報告に基づいて、難解な学術用語をなるべく言い換え、平易な文章で表現して書き直したものが、本編の「令和3年度の成果の概要」である。本編の「令和3年度の成果の概要」の内容について、さらに詳細を知りたい場合、原著論文を参照したい場合には、以下の報告をご参照いただきたい。

○東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会

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

○東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究委員会

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

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

1 (1) 地震 (現象解明)

「地震 (現象解明)」計画推進部会長 飯高 隆

(東京大学・大学院情報学環)

副部会長 望月公廣

(東京大学・地震研究所)

副部会長 岡田知己

(東北大学・理学研究科)

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

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

低頻度で大規模な地震現象の研究では、長期間における地震活動を把握する必要がある。史料や考古学的データや地質データ等の長期間にわたるデータの解析に加えて近代的な観測データを用いた解析を行い、研究を進めていく必要がある。2011年3月11日に、M9という巨大な地震の発生を経験した我々は、低頻度でも巨大な地震がいかに甚大な被害を及ぼすのかを実感している。低頻度の巨大地震については、その災害を想定し対策を講ずることが非常に重要である。その現象の発生が低頻度であるがゆえに、我々はその実像をはっきりと理解することが難しいが、様々な観測や実験によって現象を明らかにすることが重要である。

これまで GNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測 (GNSS-A) は、海域での地殻変動を直上で捉えられる有効な手段として普及してきたが、上下動の計測には移動観測が必要でかつ検出精度も低かったことから、水平変動の検出に重点が置かれてきた。しかし、海底設置トランスポンダを適切なレイアウトで配置して定点観測を実施することで、これまで原理的に上下変動が解けないとされてきた定点観測方式でも上下変動の検出が可能であることがわかってきた (東北大学災害科学国際研究所 [課題番号: IRID02])。根室沖の3観測点 (G21, G22, G23) では、上下変動を捉えるための中心海底局込みでの中心定点観測を、それぞれ 14 時間、10 時間、9 時間実施することがで

きた。さらに定点観測での上下変位検出精度の検証を目指した比較データを得るための移動観測も、それぞれ必要時間実施でき、それらを含めた3回目のキャンペーンデータが得られた。今後、これらの観測記録とシミュレーション結果を比較検討することにより、この領域の固着状況の理解が進むものと期待できる（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID02〕）。

日本海溝、房総半島沖、相模トラフの沈み込み型プレート境界における多様なすべり現象の時空間分布を、長期海底観測により明らかにする研究が行われた（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_05〕）。根室沖におけるGNSS-A観測は、新青丸KS-21-05次航海とこの航海で投入した無人機（ウェーブグライダー）で行われた。この観測は、令和元年度に開始して以来3回目の観測で、過去2回の測位結果に整合的な結果が得られていた。さらに、海中音速の時空間不均質の補正などによる詳細解析を行うことで、この海域におけるプレート境界浅部における固着状態が明らかにされるものと期待できる。また、2014年に発生した房総沖スロースリップの海底圧力計データの解析が行なわれた。2台の圧力計データとその場所に対応した海洋モデルデータに対してマルチチャンネル特異スペクトル解析を用いて成分に分け、圧力計データと海洋モデルの相関がよい成分を海洋変動起源として除去した。その結果、単純に圧力計データから海洋モデルを差し引く（標準偏差は約1.6hPa）より、海洋変動の影響を受けないより良いデータ（標準偏差は約1.0hPa）が得られた（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_05〕）。

日本海溝から千島海溝の海域における低周波微動の実態を明らかにするため、過去に実施された自己浮上式海底地震計を用いた稠密地震観測のデータをもとにした解析が進められた。微動活動が活発化する前後で、微動活動域の近傍で通常地震活動が活発化する事例が複数確認された（図1）。日本海溝北部で観測された活発化イベントの一つを精査したところ、微動活発化に引き続いて、小繰り返し地震を含む通常地震の活動が微動発生域に隣接した場所で活発化したことが確認された。この微動と通常地震の共通した活発化の背景に、非地震性すべりの存在が示唆される。日本海溝―千島海溝会合部では、S-netで観測されている現在の微動発生域において、2003年十勝沖地震（M8.0）の発生直後とその3年後にも、類似の時空間クラスタ構造を呈する微動活動エピソードが見いだされていた。しかし、現在の活動と比べてエピソードの活動継続時間が長く、その発生間隔が短いという違いが認められた。一方で、2008年茨城県沖の地震（M7.0）の直後には、現在の微動活動が活発ではない領域で、微動が発生していたことが明らかとなった。こうした結果は、プレート境界型大地震後の余効すべりが微動活動に及ぼす影響を示す重要な事例である（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_05〕）。

プレート境界地震を理解するためには、沈み込むプレートの形状を把握する必要がある。将来発生が懸念される南海トラフでの沈み込み帯での観測研究が行われた（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI02〕）。徳島市から愛媛県西予市まで東北東―西南西に延びる測線について、未解析の波形データからレシーバ関数を追加して、レシーバ関数イ

メージを更新した。フィリピン海スラブの上面の深さは、東側で 23 km、西側で 34 km であり、測線の中央付近では、海洋地殻がやや厚くなっていることがわかった(図 2)。四国南西部では、土佐清水市から四万十市西土佐奥屋内まで南東―北西に延びる測線上の 7 か所に設置した地震臨時観測点の保守点検とデータ回収を行い、2020 年 5 月から 12 月までのレシーバ関数を用いた暫定的なレシーバ関数イメージを作成した。スラブの傾きは、南側では約 10° であるが、深部低周波地震の発生域付近より北側では約 20° と大きくなる。四国東部の海陽―米子測線でのスラブの傾斜 6° よりやや大きいことがわかった(京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI02])。

巨大なプレート境界地震においては重力も重要な観測量であり、地震時地殻変動に対する曲率や自己重力の影響の評価が行われた(東京大学理学系研究科 [課題番号: UTS_02])。M9 地震を想定した現実的なプレート境界形状を考慮して測地インバージョンを行った。それらの影響を考慮することですべり量の最大値が減少し、やや深い側にすべりのピークが分布することが分かり、すべり分布の正確な議論には、こうした影響による違いを考慮する必要があることが明らかになった。また、密度の水平不均質が地震時地殻変動に与える影響を理論的に見積もった。その結果、密度の変化は長波長の変動の増減に反映されることがわかった(東京大学理学系研究科 [課題番号: UTS_02])。

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

地震の破壊の階層性についての研究も進められた(東京大学理学系研究科 [課題番号: UTS_03])。繰り返し地震によってほぼ同じ領域が破壊されることは知られていたが、その破壊開始時点にもある程度の規則性があることがわかった。それぞれの破壊開始点から様々な大きさの地震が発生する。つまり個々の地域で階層的なパッチが相互作用しながら破壊を繰り返すという震源の性質が明らかになった。

自然大地震の発生場は、これまでに掘削到達例がない。一方、南アフリカの金鉱山は、採掘域から掘削調査が可能な範囲に地震が発生し、研究条件が良い。採掘レベルの珪長質岩盤と、採掘レベルよりも下の超苦鉄質変質ダイクとその周囲を研究対象とし、これまでに Cooke 4 鉱山と Moab Khotson 鉱山から試料を掘削回収し研究が行われた(立命館大学 [課題番号: RTM_01])。同鉱山の、薄板状金鉱脈の母岩である珪岩の層(厚さ数百 m)の上の、太古代 Ventersdorp 巨大火成岩岩区の変質した玄武岩溶岩の層(厚さ数百 m)の試料の摩擦実験が行われ、摩擦特性が速度強化的であることがわかった。

地震の現象の理解に向けて、室内実験、理論研究、数値シミュレーションの連携からなる研究が進められた(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_06])。沈み込み帯のデコルマ断層に限らず、大地震のおこる天然の成熟した断層には、母岩の摩耗で生じた粉体層が介在することが一般的である。ピーク応力後数ミクロンの間は、エイジング効果の解消に対応すると思われる急激な滑り弱화가明瞭に観察される場合ですら、音波透過率の急激な低下が応力ピークまでに完了してしまうという挙動が繰り返し観察された。こ

の現象を理解するため、定量的なモデリングを試みた。主滑り面以外のバルクガウジでの状態変化を記述する定式化において、速度・状態依存摩擦(RSF)の枠組みが使えるよう、バルクガウジでの状態変化や非弾性変形が、便宜的にバルクガウジ内に多数ある副次的剪断面でおきると仮定してモデル化を進めた。このモデルに基づいて数値シミュレーションを行ったところ、音波透過率の急激な低下を含めた挙動を、実験条件全域で定量的に再現できた。この現象についてシミュレーション結果での各状態変数と主・副滑り面での速度を見ると、巨視的な強度は主断層のエイジングが大きいと、(巨視的強度に対して支配的である)主滑り面のエイジング効果の解消過程は応力ピークを過ぎてさらに数ミクロンの滑りを要する。これに対して音波透過に対して支配的な要因である(バルクガウジの状態変化を模した)多数の副滑り面での状態変化は、主滑り面の速度の圧倒的な増加によって応力ピークまでに滑り速度(の対数の)増加が落ち着いてしまうからであると理解できる(図3)(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_06])。

岩石摩擦実験による歴史的な知見は、摩擦力が滑り速度に対数的に単調に依存するというものであり、それは速度状態依存摩擦法則としてまとめられている通りである。しかし、より複雑な物質、特にコア試料などを用いた摩擦実験では、必ずしも単調な対数依存性を示すわけではないことも近年になって知られてきた。このように非単調な速度依存性は、従来の熱的活性化過程と時間依存する回復過程による解釈だけでは理解し難い。同時に、これまで知られている発展法則では、radiation dampingを入れない限りリミットサイクル的挙動を再現できず、解が発散してしまうことが知られている。このことは、速度状態依存摩擦法則自体、未だ本質的な改良の余地があることを示している。地震波を放出しない程度の非定常滑り挙動、例えばSSEなどを説明することができないからである。この問題において、従来知られている発展法則ではリミットサイクルが存在しないことを、数学的な定理を利用して厳密な形で示すことに成功した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_04])。いくつかの代表的な発展法則についてこの作業を行い、radiation dampingなしでは解が発散してしまい周期解が存在しないことを示した。その上で、radiation dampingなしで周期解を実現できる発展法則を複数発見した。これらの発展法則はaging lawの拡張とも見なすことができるが、速度ステップ変化後の緩和過程ではaging lawよりも対称性がよい。さらに、1自由度モデルにおいて実際にradiation dampingなしでリミットサイクルを安定に実現することを示した。

プレート境界域の物質を想定した室内実験もおこなわれた。沈み込み帯プレート境界断層の摩擦挙動に対する層状珪酸塩鉱物の影響を明らかにするべく、石英・滑石混合ガウジを用いて、室温、有効法線応力10 MPaの条件下で摩擦実験が行われた(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_05])。その結果、滑石含有量の増加(0~20 wt%)に伴って、ガウジの摩擦挙動は固着すべり($a - b < 0$)からゆっくりとした固着すべり($a - b \approx 0$)を経て安定すべり($a - b > 0$)へと遷移した。このことは、プレート境界断層帯内の層状珪酸塩鉱物の存在がスロースリップの発生に必要な速度中性条件をもたら

している可能性を示唆している。また、日本海溝に沈み込む太平洋プレートの被覆層チャートの主成分であるオパールについて、日本海溝沈み込み帯浅部の温度 (25~150℃)・封圧 (150 MPa)・間隙水圧 (50 MPa) 条件下で変位速度急変摩擦実験を行い、摩擦特性の温度変化とその要因について検討した。実験の結果、温度上昇に伴って摩擦強度が増大し、100℃以上の温度で変位速度上昇に伴って摩擦強度が低下する速度弱化の挙動となり、150℃で地震性断層運動に対応する固着すべりが起こることが明らかとなった(図4)。変位速度・状態依存摩擦構成則による摩擦データのフィッティングの結果、定常摩擦係数は温度上昇または変位速度低下に伴って増大し、一方、 $a - b$ 値は温度上昇または変位速度低下に伴って減少し、100℃以上の温度で負となり、高温・低変位速度ほど負の大きな値になった。これらの実験結果は、オパールの摩擦特性が温度だけでなく変位速度によっても変化することが示された。100℃以上の温度の実験後、試料にはガウジ粒子の癒着が認められることから、観察された摩擦特性の温度・変位速度による変化は圧力溶解の作用に起因している可能性がある(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_05])。

海山由来の玄武岩試料について、沈み込み帯浅部の温度 (25~150℃)・封圧 (150 MPa)・間隙水圧 (50~125 MPa) 条件下で変位速度急変摩擦実験を行い、沈み込んだ海山がアスペリティとしてふるまう性質を持つ可能性についても検討した。その結果、 $a - b$ 値は温度上昇に伴って正から負へと変化すること、温度 50℃の沈み込み帯浅部の温度条件下では有効圧に関わらず $a - b$ 値が正となることが明らかとなった(図5)。これは、沈み込み帯浅部では海山がプレート境界型地震やスロー地震の震源となる可能性は低いものの、沈み込む深度が深くなり温度が上昇していくと不安定な挙動を示すアスペリティとしてふるまう可能性を示唆している(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_05])。

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

プレート境界地震を考える際に、アウターライズで発生する地震の解明も重要である。アウターライズではプレートの沈み込みに伴う屈曲により海洋プレート浅部に伸張応力場が生じ、海洋性地殻を断ち切る正断層群が発達して、正断層型の地震(アウターライズ地震)が海洋プレート内部で発生する。巨大津波を引き起こす大規模なアウターライズ地震は海溝型巨大地震の後に連動して発生することが知られている。2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) 後には大規模アウターライズ地震が未だに起こっておらず、その切迫度が増している状況にあると考えられる。しかしながら、大規模アウターライズ地震断層の実態に関する知見は極めて不足している。日本海溝の海側に発達する大規模アウターライズ地震断層の実態(構造、物性、流体循環など)を解明するため、地球物理学データを地球化学データと組み合わせて、海溝海側の正断層を学際・総合的に調べた(東京大学大気海洋研究所[課題番号:AORI01])。反射法探査データを解析し、宮城沖の海溝海側 45 km 付近で海底面からモホ面を貫きマントルまで発達する大規模

な正断層(断層 A)のイメージングに成功した。この正断層は垂直変位約 180 m、傾斜角約 74° を示し、過去から最近まで繰り返し活動した活断層の可能性が高い。また、この正断層のモホ面付近の反射強度は周囲のモホ面に比べて異常に弱く、断層の繰り返し活動によって透水性の高い破碎帯(幅 6 km)が形成され、流体移動が容易になっていることを示唆する。この断層の破碎帯は、海溝に平行して 160 km 北方の岩手沖の断層にほぼ連続する。このような反射法探査断面図上で確認された正断層付近で得られた流体関与の証拠(ヘリウム同位体比($3\text{He}/4\text{He}$)異常と $4\text{He}/20\text{Ne}$ 比)に基づき、日本海溝アウターライズにおいてマントルと海洋を結ぶ大規模な流体循環モデルを構築した。流体循環は主に南北方向の同じ断層破碎帯に沿って起こるが、破碎帯がある程度厚い(例:断層 A 付近の幅 6 km)場合、破碎帯に直交する東西方向での流体循環も示唆された。

詳細な震源分布や震源メカニズムからアウターライズ域における潜在断層の位置、走向、傾斜等に関する情報を把握するため、東北沖地震の主破壊域の南側に位置する日本海溝南部の福島、茨城沖で海底地震計を用いた地震観測記録を解析した(東北大学理学研究科[課題番号:THK_06])。アウターライズ域では海溝軸に並行または斜交する、長さ 100 km ほどの地震の帯が複数分布することがわかった。これらは海底地形に見られるホルスト・グラaben構造とよく一致し、ホルスト・グラabenを形成する正断層がアウターライズにおける地震活動と深く関係していると考えられる(図 6)。また、地震波トモグラフィ解析により、アウターライズ域の地震活動が低地震波速度の海洋マントル内に及んでいることが明らかとなった。こうした観測事実は、正断層が海洋マントルに達していることを示唆する。

浅部低周波微動の観測研究は日本の様々な地域で行われており、20 km スパンの海底地震計アレイデータを用いて、期間中に発生した浅部低周波微動(以下「浅部微動」という。)の暫定的な解析を実施した(鹿児島大学[課題番号:KGSM01])。浅部微動の波形を波形記録から目視で確認したところ、浅部微動の主な活動は観測網内及び周辺において、2020 年 8 月上旬~中旬、2021 年 1 月中旬~下旬、2021 年 2 月~3 月、2021 年 3 月~4 月の期間に見られた。マイグレーションを伴う活動も複数回確認され、昨年度の結果同様にマイグレーション方向は南北両方向に存在している(図 7)。マイグレーションの特徴から、活動域が観測網内で 2 つに分かれているようにも見える。このうち、2021 年 3 月から 4 月の活動は、2 つの活動域を縦断するように南から北にマイグレーションした。微動活動域には明瞭な低活動領域が存在していることがわかった。2020-2021 観測(第 2 期観測)網の内部に位置しており、微動が発生していれば検知できていること、および震源決定誤差を考慮すると、低活動領域では実際にはほとんど微動が発生していないことが示唆された。微動の低活動領域のスケールは 20 km 程度であり、過去の構造探査の結果から、周辺では海山の沈み込みが明らかになっており、海山のスケールは一致しているが位置はずれていることが分かっている。その一方で、地磁気異常のデータを見ると、空白域およびその周辺に海山の沈み込みを示唆する分布が見られる。今後、

重力等、他の地球物理学データとの対比が必要であるが、この空白域には海山が沈み込んでいる可能性が高いと考えられる（鹿児島大学〔課題番号：KGSM01〕）。

プレート境界地震の研究においては海外における観測研究もおこなわれている。津波生成過程の理解のためには浅部スロー地震の理解が重要である。メキシコ・ゲレロ州沖合で2017年11月から実施している海底地震・測地観測網のデータを解析し、観測されたテクトニック微動の震源メカニズム解と放射エネルギーをそれぞれ推定した。その結果として震源メカニズム解の多くが逆断層型として説明可能なこと、過去に大地震の発生した領域近くの微動の放射エネルギーが海溝近くの微動と比べて大きいことを指摘し、プレート間固着の空間的な変化に対応して微動の放射エネルギーが変化する可能性に言及した（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI01〕）。2014年～2017年に実施された海底地震観測のデータを解析し、既存の活動領域（西側活動域）よりも東側の活動域の詳細を明らかにした。東側活動域は、西側活動域から東にマイグレーションし、海溝軸近傍まで活動が確認された。マイグレーション速度について西側活動域は30–60km/dayであるのに対し、東側活動域は2～20km/dayと遅い。このマイグレーション速度の違いは、プレート間固着の強さの違いを反映している可能性がある。東側活動域は四国沖の南海トラフ沿いの固着域により近い性質をもつため、南海トラフを対象としたシミュレーション研究から指摘されている固着の剥がれによる浅部スロー地震活動の変化が見られる可能性が考えられる。

ニュージーランド沖での海外観測も実施されており、成果が得られつつある（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_08〕）。2018年10月にヒ克蘭ギ沈み込み帯北部のギズボーン沖に設置し、2019年10月に回収された5台の海底地震計で取得したデータの解析を進めている。この観測期間中の2019年3月から4月にかけて、観測網直下で大規模なスロースリップ（SSE）が発生し、これに伴って活発な微動も観測された。本海域では、2014年9月から10月にかけても大規模なSSEおよびそれに伴う微動が発生したが、日本–NZ–米の国際共同観測（Hikurangi Ocean Bottom Investigation of Tremor and Slow Slip：HOBITSS）によって観測網直下での観測に成功し、それらの活動の詳細が明らかになっていた。2019年3月の大規模SSEに伴う微動活動は、2014年の微動活動と同様、SSEのすべりが終息する時期に活動が活発化したことがわかった。

プレート境界地震の調査研究を含めた海域での観測研究は大学以外の研究機関でも進められている。海溝型地震震源域海底において、GNSS-Aによる地殻変動観測を継続して実施した（海上保安庁〔課題番号：JCG_03〕）。日本海溝沿いにおける観測から、東北地方太平洋沖地震の余効変動が続いていること（図8）、および南海トラフ沿いにおける観測から、プレート境界固着の影響による地殻変動が継続していることが明らかとなっている（図9）。また、東北沖地震後10年にわたる海底地殻変動観測データから余効変動を詳細に調査した結果、福島県沖の海溝軸付近に大きな地震時すべりが生じていたことを示唆する結果が得られた。このすべりは、津波から推定されていた結果と整合

的であり、津波インバージョンの結果を測地データによって裏付ける結果となった。また、地震時の大すべり域の南北縁において発生した余効すべりは、地震後概ね2-3年程度で急激に減衰したことも示された（図10）。

沖縄トラフ南部では背弧リフトに伴う火山・熱水活動に加えて、群発的な地震活動がしばしば発生する。海洋研究開発機構では、こうした地震活動の発生要因を理解するため、過去20年間の地震活動の分布と統計的な性質（ b 値）を調べ、その空間分布を反射法探査に基づく地下構造と比較した（海洋研究開発機構〔課題番号：JAMS02〕）。その結果、M5以上の比較的大きな地震は八重山地溝帯等のリフト中軸部の近くで発生しており、そこでは周囲より低い b 値（ <0.8 ）を示すことがわかった。対照的に、石垣海丘や鳩間海丘周辺では大きな b 値（ >1.2 ）を示し、そこでは火山フロントが形成されていることが示唆された。

活断層によって発生する内陸地震の現象解明も重要な課題であり、多くの研究が進められた。2016年の山陰地方の地震帯で発生したMj6.7の地震である鳥取県中部地震について研究が進められた（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI03〕）。約50km西で発生した2000年鳥取県西部地震（Mj7.3）の断層の南端付近で、本震のすべりによる応力変化に調和的なP軸の分布が見出されていたことから、断層端の謎を解明することを主な目的として、京大・九大・東大地震研による合同余震観測が行われ解析が進められた。余震分布は最深部においてはお椀型を示しているように見えるが、両端部においてはほぼ鉛直な直線的な形状を示している。地震破壊は震源から同心円状、あるいは楕円状に広がっていくと考えられるが、余震分布はそれに対応した形ではなく矩形を呈している。このことは、断層の両端に、何か特別なものが存在していることを示唆しており、実際断層の北端付近には第四紀火山が存在している。また、山陰の地震帯において、大きな地震の断層両端において、応力緩和が起こっている可能性を示唆している。断層両端における応力状態をより直接的に推定するために、応力逆解析を行った（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI03〕）。その結果、断層の両端において、地震前に差応力が小さかったことが確認された（図11）。また、断層深部においても、差応力が小さかったことが見出された。今後は解析を進めることにより、これらの結果が発生する地震の断層の大きさとどのように関係するのかを調べる必要がある（図12）。

内陸地震発生メカニズムを解明することは、災害を軽減するために非常に重要な課題である。また、内陸地震のメカニズムを理解するためには、断層への応力集中とひずみの蓄積について理解することが重要である。さらに、内陸地震発生には地殻内流体の存在が大きく関係していることがわかってきている。そのような地殻内流体が、島弧のシステムの中でどのように生成され、移動し、断層近傍に存在するのかについて理解することは重要な研究課題である。いわきの地震活動域から新潟に延びる測線において電磁気学的構造を明らかにする研究がおこなわれた（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_09〕）。測線上において上部地殻からマントルにかけて3つの領域で低比抵抗域が検

出できた。ひとつは火山フロント中心部の低比抵抗域であり、マントルから地殻中部まで見られた。2つ目は火山フロントの前面部に位置し地殻中部に存在する低比抵抗域である。3つ目は、測線の西端での上部地殻に存在する低比抵抗域である。火山フロント近傍の低比抵抗域は明らかにマントルから地殻下部に延びており、深部のマントル中から延びて上部地殻に入り込んでいることがよくわかる。今後は、この低比抵抗域の原因と地殻内流体の関係を明らかにし、地殻内流体の供給源との関係について調べることで、内陸地震発生ポテンシャルについて調べていく必要がある。

このように低比抵抗域と火山フロントとの関係が明らかになっていく中で、火山活動との関係も重要な課題である。火山地域での比抵抗構造の研究が進められ、地殻内の低比抵抗体の実体が明らかにされつつある（九州大学〔課題番号：KYU_01〕）。また、マグマ供給系の実体をとらえるために雲仙火山において自然地震を用いた速度構造トモグラフィ解析が行われた。雲仙火山では1990-1995年の噴火活動を引き起こしたマグマは島原半島の西部、橘湾の地下10~15km付近から雲仙山頂に向かい斜めに上昇してきたことが、GNSS+水準測定の観測、および震源の移動により明らかになっている。インバージョン結果は雲仙火山を頂点とした円錐状の形状の低 V_p 領域（深さ3-16 km）を示し、マグマの上昇経路はその上面付近に対応する。S波速度、 V_p/V_s も考慮して、この定 V_p 領域はメルトの存在量が大きく見積もって5%以下の、高度に結晶化したマグマだまりであると推定された。マッシュ状のマグマだまりの内部をマグマが鉛直に上昇するという考えとは異なり、ほぼ固結しつつあるマグマだまりの上面をなぞるようにマグマが上昇していくという、新しいマグマ供給系のイメージが得られた（図13）。また、島原半島全域で2017-2021年にかけて得た70点の広帯域MT観測データの解析から、雲仙1990-1995年噴火のマグマの移動経路は、深さ5 kmより深部に存在する100-3000 Ωm 程度の高比抵抗体、およびその上部に位置する1-10 Ωm 程度の低比抵抗体のいずれとも一致せず、両者の境界付近に位置することが分かった。また、九重火山での稠密広帯域MT観測からは、火口や地熱地帯は深さ3~5 kmの低比抵抗体の上部に位置するという発見があり、構造境界での流体の存在を裏付けた（図14）。

内陸地震に強く関連すると考えられている地殻流体は、群発地震にも大きく寄与していると考えられている。そのため、群発地震の研究も進められた（弘前大学〔課題番号：HRS_01〕）。2011年東北地方太平洋沖地震でトリガーされた東北地方各地の群発地震について、その継続時間と群発地震開始位置からの拡散的時空間発展を系統的な方法で調査し、群発地震の震源位置の拡散係数と群発地震の継続時間との間に負の相関があることを発見した。群発地震の継続時間に関する特徴を明らかにしたもので、群発地震のみならず内陸地震発生と流体の関係について理解する上で大きな貢献になりうるものである（弘前大学〔課題番号：HRS_01〕）。

火山下の詳細な構造の解析やマグマだまりの存在を求める研究も進められた。箱根火山下における地殻構造の推定を進め、地震波速度構造を通して火山下のマグマ溜まりや、

深部低周波地震発生域からマグマ溜まりへの供給経路を示唆する低速度域の存在を明らかにした（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI04〕）。火山の深さ 6 km より深部で顕著な低速度域が推定され、これらの低速度域において、深さ 9 km 付近にはマグマ溜まりを示唆する高 V_p/V_s 域、またその上部深さ 6 km 付近にはマグマ由来の熱水やガスの存在を示唆する低 V_p/V_s 域の存在が認められた。群発地震活動は低速度域より上部深さ 6 km 以浅で発生し、また GNSS 観測により推定された圧力源は低速度域上部の深さ 6 km 付近に位置することが分かった（図 15）。さらに、深さ 20 km 付近に発生する深部低周波地震発生域にかけて、低速度域が分布している描像も推定された。深部低周波地震は、先行研究により浅部の群発地震活動や地殻変動と時間的に連動していることが報告されており、ここでは深部低周波地震がやや先行して活発化し、その後深さ 6 km 付近を圧力源とする膨張性地殻変動やより浅部での群発地震活動が開始することが示されている。これらの結果をもとに考察すると、深部からのマグマ供給に伴い深さ 20 km 付近で深部低周波地震が活発化し、その影響がより浅部の深さ 9 km 付近のマグマ溜まりに伝播し、マグマ溜まりからの脱水脱ガスの促進にともない群発地震や地殻変動などを引き起こしている可能性が示唆される（図 16）。

地震と地殻内流体の関係を探る研究は他の地域でも行われた。2017 年鹿児島湾での M5.3 の地震の前震-本震-余震系列の高精度震源決定を行なった（東北大学〔課題番号：THK_07〕）。前震活動・余震活動の発生場所が徐々に移動したことが分かった。このことから前震-本震-余震系列の発生に深部から浅部への流体移動が関与していた可能性が考えられることがわかった（図 17）。比抵抗モデルによって得られた表層付近の比抵抗値を物質モデリングで解釈する方法についても研究を進めた（東北大学〔課題番号：THK_07〕）。葛根田や湯沢の地熱地域では低比抵抗体が海拔下約 2 km 以深に存在しており、低比抵抗体の内部は微小地震が発生していないので、脆性-延性境界の延性域にあり、石英脈にシールされた超臨界地熱貯留層であると解釈される。上部が石英脈にシールされ石英溶解度曲線を考慮すると、低比抵抗体内は 380~400℃ 以上であることや NaCl-H₂O 系で考えると二相卓越形または単相型の超臨界水を含む地熱貯留層であることが示唆されている。また地震波速度構造と同時に解釈することにより、塩濃度に依存するが湯沢地熱地域での流体の体積分率は 0.1~4.2 % であることが推定されている。同じく比抵抗と地震波速度を同時に解釈して吾妻山のマグマだまりでもマグマ+熱水の体積分率が 6 % 以下であること、マグマ単独では解釈が難しく、比抵抗の低い熱水が卓越していることなどが明らかになりつつある（東北大学〔課題番号：THK_07〕）。

地殻内部における流体の移動についての研究も進められた。マントル起源の蛇紋岩体に炭酸塩脈が発達していることを発見し、反応と破壊、せん断変形を繰り返しながら複数の炭酸塩鉱物が析出していることを見出した（東北大学〔課題番号：THK_02〕）。さらに、この蛇紋岩の炭酸塩化は、固体体積が収縮しながら脱水する反応で、間隙水圧の上昇が起こるために、き裂形成・物質移動・反応が自己促進的に進行することをつきとめ

た（図 18）。

国の研究機関においても内陸地震の研究が進められた。熊本地震の余効変動のモデルを構築し、これを補正した上でマグマだまりの体積変化の抽出を試みた（国土地理院〔課題番号：GSI_01〕）。熊本地震の余効変動のうち、粘性緩和の寄与分については、表層が弾性層、基盤層が Maxwell 粘弾性体の半無限 2 層構造を仮定して補正した。計算には RELAX を用いた。また、地震断層モデルとしては矢来・他（2016）を使用し、構造パラメータ（粘弾性層の厚さ、基盤層の粘性）については、地殻変動データからグリッドサーチにより推定した。余効すべりについては、地震断層モデルを含む拡大面を小断層で離散化し、それぞれの小断層でのすべりを地殻変動データから推定した。

内陸断層の深部における地震発生と塑性流動の関わりを明らかにするため、三重県中央構造線の地質調査、地質調査に対応した岩石変形の解明のための実験が行われた（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST05〕）。これまでに断層走向沿い東西方向 1 km の範囲の調査により、塑性変形条件下での 200 MPa を超える高差応力領域の空間分布を明らかにした。また、これまでの研究で明らかになった高差応力領域について、4 km 西方までの広がりを見出した。

内陸地震の研究においても海外での観測研究が進められた。ニュージーランドのカイコウラ地震の震源域での研究が進められた（東北大学〔課題番号：THK_01〕）。地震波速度トモグラフィの結果、カイコウラ地震の震源域、地殻内断層の深部やプレート境界に沿った地震時・地震後すべり域付近に地震波速度低速度・高 V_p/V_s の領域を見出した。この地震波速度低速度・高 V_p/V_s の領域は高い間隙流体圧の領域を示しており、断層活動や地震活動と流体との関連、特に流体による連動破壊や地震後すべり発生への寄与、が示唆される。さらに、多様なテクトニック環境下でのスロー地震発生メカニズムを理解するために、カイコウラ地震震源域を含むマルボロ断層系において、微動活動の検出と震源決定を行い、カイコウラ地震発生に関係した微動活動の変化が見られた（東北大学〔課題番号：THK_01〕）（図 19）。

世界の様々な沈み込み帯での研究もおこなわれた。近地地震と遠地地震の走時データの同時インバージョンで M9.0 以上の巨大地震が起った 6 つの沈み込み帯地域の詳細な 3 次元 P 波速度構造を調べた結果、以下のことがわかった（東北大学〔課題番号：THK_05〕）。（1）沈み込んだ海洋スラブ下のマントルに顕著な低速度異常体（subslab low-velocity anomaly, SLVA）が存在する。これは、熱いマントル上昇流を反映すると思われる。（2）巨大地震の震源は SLVA の端部や複数の SLVA の間（SLVA ギャップ）の真上に位置する。（3）巨大地震の地震時すべりは主に SLVA ギャップの真上に分布する。（4）SLVA と SLVA ギャップの浮力の違いが巨大地震発生の一因となる。（5）巨大地震の発生には、スラブ上面付近や上盤プレートの構造と応力場だけでなく、スラブ下の不均質構造も影響を及ぼすと推定できる。これらの成果は、巨大地震発生メカニズムの解明およびその震源位置と破壊範囲の予測への重要な手がかりとなると思われる。

超電導重力計や絶対重力計を用いた重力の観測研究もおこなわれている（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_10〕）。長野県松代における超伝導重力計 iGrav（28 号機）による重力連続観測はひきつづき順調であり、高品質のデータが取得されている。松代においては 2016 年から 2018 年にかけて従来型の超伝導重力計との並行観測を行ったが、今回そのデータの詳細な解析を行った。その結果、ノイズレベル、ドリフト特性などの点で、2 台の重力計のデータの品質はほぼ同等であることが確認された。また、地震研究所が所有する 2 台の絶対重力計の器差を精密に検定する実験を、山梨県富士山科学研究所（山梨県）において行なった。その結果、1 マイクロガルオーダーの精度での検定を行うことができた（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_10〕）。

地球化学的アプローチによる研究も進められている（東京大学理学系研究科〔課題番号：UTS_04〕）。本宮地域の地熱帯において電源開発の目的で NEDO が多数掘削した調査孔の一つ（NEDO 井）を観測のために借用し、深部起源ガスを検出して変化を観測する試みを行った。NEDO 井に加えて、自噴の温泉が湧出する川湯温泉（Kawayu 井）でも観測を行った。NEDO 井の観測では、大気リークを解決できず観測を断念した。川湯温泉では大気リークの無い観測が実現していたものの、溶存ガスは大気そのもので、深部起源ガスを検知することができなかった。そこで、500m 深度から採水している渡瀬温泉に観測場所を変えて、深部起源ガスの検知を試みるようにする（東京大学理学系研究科〔課題番号：UTS_04〕）。

大規模データを活用した観測研究も進められている。大量の微小地震を用いて日本全国の地殻内応力マップを作成した（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST07〕）。昨年度開発した、深層学習による P 波初動極性の自動検出システムと震源メカニズム解決定プログラム HASH を用いて、日本全国の内陸部及び沿岸海域（海岸線から 50km 以内）の下で 20 km より浅い場所で発生した微小地震の震源メカニズム解を決定した。解析した 66 万件のうち 21.6 万件ほどの微小地震について、震源メカニズム解が良好に求まった。これらの震源メカニズム解を用いて、応力インバージョンを実施した。その結果、大局的な東西圧縮に加えて、地域的な応力場の傾向、局所的な応力方位の異常などを見ることができる応力マップが出来上がった。布田川断層・日奈久断層、四国地方の中央構造線、糸魚川静岡構造線の南端部、北上高地の西端など、地質境界を境に水平主圧縮軸方位が異なる様子が見られた。地震発生予測や日本のテクトニクス研究の基礎的な情報として活用されることが期待される成果である。

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

（1）地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

現代の地震観測で得られる知見を史料の分析結果と結びつけ、歴史地震の震度の検証および、その定量化に向けた研究もおこなわれている（東京大学地震研究所〔課題番号：

ERI_15])). 安政江戸地震の揺れの検証を目的のひとつとし、同地震の被害史料の分析から被害場所が特定できた地点とその近隣地点に観測点を置いた。観測点を徐々に追加していき、現在は 17 点で観測をしている。これまでに文京区本郷で震度 1 以上を記録した地震は 51 回あり、それらのデータを用いた暫定的な結果では、観測点ごとの卓越周波数や振幅の違いが確認できている（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_15]）。

5. 研究を推進するための体制の整備

（3）研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

海底観測においては機器の技術開発も重要な課題である。海底において空間的に高密度なやや広帯域地震観測の実施をめざして、小型広帯域地震計を搭載した長期観測型海底地震計の開発を行い、観測に用いている（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_23]）。自由落下自己浮上式海底地震計は、どのような傾きで海底に着底しても地震計の鉛直・水平を保持する必要がある、低消費電力で小型の広帯域地震計センサー向けのレベリング装置を開発して、小型広帯域海底地震計に用いている。2021 年は、このレベリング装置の機能強化を行った（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_23]）。

これまでの課題と今後の展望

低頻度大規模地震の現象解明においては、千島海溝沿いや三陸沖に設置された観測機器による海域観測が進められており、データが蓄積されている。これらのデータを用いた今後の成果が期待される。また、滑りの多様性という観点においては、国内ばかりでなく海外のフィールドを含めた様々な沈み込み帯での微動やスロースリップを対象とした観測研究が進められており、様々な成果が得られている。今後は、それぞれの沈み込み帯で得られた結果を比較検討し、それぞれの地域の特徴の類似・相違点を明らかにしたうえで、現象を普遍的に捉えた研究がなされるものと期待される。また、地震の滑りについては室内実験等の研究も進んでおり、実際のプレート境界のすべりと関連付けると共に、現象の本質に関係する要因を明らかにしていく必要がある。観測と計算機を用いたシミュレーションの比較研究もなされており、多くの成果が得られつつある。これらのデータを実際のマクロな地震現象にどのようにつなげていくかが次の課題であるように思われる。内陸地震については、それぞれの地域での現象が明らかにされ、多くの地域で、沈み込み帯における水の流れを背景とした内陸地震と地殻内流体との関係が明らかになりつつある。本年度は、電磁気学的手法によって描き出される構造の精緻化がめざましく、地殻内流体の定量評価に向けた取り組みも多くみられる。この部会では、プレート境界地震やプレート内地震、さらに活断層を代表とした内陸地震と、様々な研究対象や分野で多様な成果が得られつつある。

今後は得られる個々の成果をまとめ、地震の現象解明にむけ全体像を明らかにしていく必要がある。また、得られた個々の成果や全体像を他部会へとつなぎ、発生の予測や災害軽減にどのようにつなげていくかを考えて進めていくことが重要である。

成果リスト

- Aizawa, K., M., Ustugi, K., Kitamura, T., Koyama, M., Uyeshima, N., Matsuhima, S., Takakura, H., Inagaki, H., Saito, Y., Fujimitsu, 2022, Magmatic fluid pathways in the upper crust: Insights from dense magnetotelluric observations around the Kuju Volcanoes, Japan, *Geophysical Journal International*, 228, 755–772, <https://doi.org/10.1093/gji/ggab368>
- Aizawa, K., S., Takakura, H., Asaue, K., Koike, R., Yoshimura, K., Yamazaki, S., Komatsu, M., Utsugi, H., Inoue, K., Tsukamoto, M., Uyeshima, T., Koyama, W., Kanda, T., Yoshinaga, N., Matsushima, K., Uchida, Y., Tsukashima, T., Matsushima, H., Ichihara, D., Muramatsu, Y., Teguri, A., Shito, S., Matsumoto, H., Shimizu, 2021, Electrical conductive fluid-rich zones and their influence on the earthquake initiation, growth, and arrest processes: observations from the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Kyushu Island, Japan, *Earth, Planets and Space*, 73–12, doi.org/10.1186/s40623-020-01340-w
- Akuhara, T., K. Nakahigashi, M. Shinohara, T. Yamada, H. Shiobara, Y. Yamashita, K. Mochizuki, and K. Uehira, 2021, Lithosphere-asthenosphere boundary beneath the Sea of Japan from transdimensional inversion of S-receiver functions, *Earth Planets Space*, 73(1), 171, [doi: 10.1186/s40623-021-01501-5](https://doi.org/10.1186/s40623-021-01501-5)
- Amezawa, Y., T., Maeda, M., Kosuga, 2021, Migration diffusivity as a controlling factor in the duration of earthquake swarms, *Earth, Planets and Space*, 73, 148, [10.1186/s40623-021-01480-7](https://doi.org/10.1186/s40623-021-01480-7)
- Arai, R., 2021, Characteristics of seismicity in the southern Okinawa Trough and their relation to back-arc rifting processes, *Earth Planets and Space*, 73, 160, [10.1186/s40623-021-01491-4](https://doi.org/10.1186/s40623-021-01491-4)
- Asaah, A.N.E., T., Yokoyama, H., Iwamori, F., Tongwa, A., J., Tamen, T. Kuritani, T., Usui, T., Hasegawa, E. M. Fozing, 2022, Geochemical composition of dykes along the Cameroon Line (CL): Petrogenesis and similarities with the Central Atlantic Magmatic Province, *Geochemistry*, in press, <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2022.125865>
- Asaah, A.N.E., T., Yokoyama, H., Iwamori, H.L.A. Nche, T., Ohba, 2021, High- μ signature in lavas of Mt. Oku: Implications for lithospheric and asthenospheric contributions to the magmatism of the Cameroon Volcanic Line (West Africa),

- Lithos, 400–401, DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106416
- Chang, T., S., Ide, 2020, Hypocenter Hotspots Illuminated Using a New Cross-Correlation-Based Hypocenter and Centroid Relocation Method, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 126, e2021JB021991, 10.1029/2021JB021991
- Chiba, K., 2021, Stress State Inferred from b Value and Focal Mechanism Distributions in the Aftershock Area of the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake, *Pure Appl. Geophys.*, 178, 1165–1179, doi:10.1007/s00024-021-02691-5
- Cruz-Atienza, V. M., J. Tago, C. Villafuerte, M. Wei, R. Garza-Girón, L. A. Dominguez, V. Kostoglodov, T. Nishimura, S. I. Franco, J. Real, M. A. Santoyo, Y. Ito, and E. Kazachkina, 2021, Short-term interaction between silent and devastating earthquakes in Mexico, *Nat. Commun.*, 12, doi:10.1038/s41467-021-22326-6
- Dandar, O., A. Okamoto, M. Uno, and N. Tsuchiya, 2021, Redistribution of magnetite during multi-stage serpentinization: Evidence from the Taishir Massif, Khantaishir ophiolite, western Mongolia, *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 116, 176–181, doi:10.2465/jmps.201130a
- Dhar, S., J. Muto, Y. Ito, S. Miura, J. D. P. Moore, Y. Ohta, T. Iinuma, 2022, Along-Arc Heterogeneous Rheology Inferred from Postseismic deformation of the 2011 Tohoku-oki Earthquake, *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1093/gji/ggac063
- Fan, J., D. Zhao, 2021, Subslab heterogeneity and giant megathrust earthquakes, *Nat. Geosci.*, 14, 349–353
- Fan, J., D. Zhao, 2021, P wave tomography and azimuthal anisotropy of the Manila - Taiwan - southern Ryukyu region, *Tectonics*, 40, e2020TC006262
- 藤田雅之, 松本良浩, 佐藤まりこ, 石川直史, 渡邊俊一, 横田裕輔, 2021, 定常的な GNSS-A 海底地殻変動観測の確立と地震学への貢献, *地震*, 74, 55–65, 10.4294/zisin.2020-18
- Fujiwara, T., 2021, Seafloor Geodesy From Repeated Multibeam Bathymetric Surveys: Application to Seafloor Displacement Caused by the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Frontiers in Earth Science*, 9, 371, 10.3389/feart.2021.667666
- Fukao, Y., T., Kubota, H., Sugioka, A., Ito, T., Tonegawa, H., Shiobara, M., Yamashita, T., Saito, 2021, Detection of “rapid” aseismic slip at the Izu-Bonin Trench, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2021JB022132, doi:10.1029/2021JB022132
- Fukuda, K., T. Hatano, K. Mochizuki, 2022, Model for tectonic tremors: Enduring events, moment rate spectrum, and moment-duration scaling, *Physical Review E*, 105, 014124, 10.1103/physreve.105.014124
- Hirauchi, K., Y., Nagata, K., Kataoka, R., Oyanagi, A., Okamoto, K., Michibayashi, 2021, Cataclastic and crystal-plastic deformation in shallow mantle-wedge

- serpentinite controlled by cyclic changes in pore fluid pressures, *Earth and Planetary Science Letters*, 572, 117232, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117232>
- Hirauchi, K., I., Segawa, Y., Kouketsu, Y., Harigane, Y., Ohara, J., Snow, A., Sen, M., Fujii, K., Okino, 2021, Alteration processes recorded by back-arc mantle peridotites from oceanic core complexes, Shikoku Basin, Philippine Sea, Island Arc, 90, e12419, <https://doi.org/10.1111/iar.12419>
- Huang et al., 2021, Anelasticity and lateral heterogeneities in Earth's upper mantle: impact on surface displacement, self-attraction and loading and ocean dynamics, *JGR*, 10.1029/2021JB022332
- Huang, Y., H. Guo, T. Nakatani, K. Uesugi, M. Nakamura, and H. Keppler, 2021, Electrical conductivity in texturally equilibrated fluid-bearing forsterite aggregates at 800° C and 1 GPa: Implications for the high electrical conductivity anomalies in mantle wedges, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 126, e2020JB021343, doi:10.1029/2020JB021343
- Ichiki, M., T. Kaida, T. Nakayama, S. Miura, M. Yamamoto, Y. Morita, and M. Uyeshima, 2021, Magma reservoir beneath Azumayama Volcano, NE Japan, as inferred from a three-dimensional electrical resistivity model explored by means of magnetotelluric method, *Earth Planets Space*, doi: 10.1186/s40623-021-01451-y
- Ide, S., 2021, Empirical Low-Frequency Earthquakes Synthesized From Tectonic Tremor Records, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 126, e2021JB022498, 10.1029/2021JB022498
- Iio, Y., S., Matsumoto, Y., Yamashita, et al., 2021, Stress relaxation arrested the mainshock rupture of the 2016 Central Tottori earthquake, *Commun Earth Environ*, 2, <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00231-6>
- 今西和俊・野田朱美, 2021, 内陸応力場の時空間パターン: 発震機構解とプレート間固着を用いた新手法から明らかになった特徴とそのテクトニックな意味, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, SCG50-13
- 今西和俊・野田朱美, 2021, オフフォルト地震と地殻変動データを用いた新手法による東北沖プレート間固着の詳細な時空間変動の推定, 日本地震学会 2021 年度秋季大会, S08-08
- 今西祐一・西山竜一・本多亮・田村良明, 印刷中, 絶対重力計 FG5 #109 と #241 の器差の検定についてー東京および富士山における相互比較ー, *測地学会誌*, 67
- Inoue, T., Y., Ito, L. M., Wallace, Y., Yoshikawa, D., Inazu, E. S. M., Garcia, T., Muramoto, S. C., Webb, K., Ohta, S., Suzuki, R., Hino, 2021, Water depth dependence of long - range correlation in nontidal variations in seafloor pressure, *Geophys. Res. Lett.*, 48(8), e2020GL092173, doi:10.1029/2020GL092173

- Ishizu, K., Y. Ogawa, K. Nunohara, N. Tsuchiya, M. Ichiki, H. Hase, W. Kanda, S. Sakanaka, Y. Honkura, Y. Hino, K. Seki, H. T. Kuo, Y. Yamaya, T. Mogi, 2022, Estimation of spatial distribution and fluid fraction of a potential supercritical geothermal reservoir by magnetotelluric data: a case study from Yuzawa geothermal field, NE Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 127, doi: 10.1029/2021JB022911
- Iwamori, H., K. Ueki, T. Hoshide, H. Sakuma, M. Ichiki, T. Watanabe, M. Nakamura, H. Nakamura, T. Nishizawa, A. Nakao, Y. Ogawa, T. Kuwatani, K. Nagata, T. Okada, E. Takahashi, 2021, Simultaneous Analysis of Seismic Velocity and Electrical Conductivity in the Crust and the Uppermost Mantle: A forward Model and Inversion Test Based on Grid Search, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-SOLID EARTH*, 126, 10.1029/2021JB022307
- Jamali Hondori, E., C. Guo, H. Mikada, and J.-O. Park, (2021), Full-waveform inversion for imaging faulted structures: A case study from the Japan Trench forearc slope, *Pure Appl. Geophys.*, 178, 1609–1630, doi:10.1007/s00024-021-02727-w
- Jiang, G., G. Zhang, D. Zhao, Q. Lu, D. Shi, H. Li, and X. Li, 2021, Mantle flow and dynamics beneath central-east China: New insights from P-wave anisotropic tomography, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2020JB020070
- 海上保安庁, 2021, 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, 106, 428–432
- 海上保安庁, 2021, 日本海溝沿いの海底地殻変動観測結果, 地震予知連絡会会報, 106, 104–109
- Kameda, J., A. Okamoto, 2021, Generation of oxidising fluids by comminution of fault rocks, *Geochem. Perspect. Lett.*, 19, 32–35, doi:10.7185/geochemlet.2131
- Kanamatsu, T., K. Ikehara, K.-H. Hsiung, 2022, Stratigraphy of deep-sea marine sediment using paleomagnetic secular variation: Refined dating of turbidite relating to giant earthquake in Japan Trench, *Marine Geology*, 443, 106669, 10.1016/j.margeo.2021.106669
- 加納靖之, 2021, 紀伊半島における土地傾斜ブロマイド記録のデジタルアーカイブ構築, 東京大学地震研究所技術研究報告, 26, 16–19
- 片岡俊一, 2022, 青森県階上町道仏震度観測点の特異性確認のための町内各地の地盤震動特性調査, 東北地域災害科学研究, 58, 印刷中
- Katori, T., N. Shigematsu, J. Kameda, A. Miyakawa, R. Matsumura, 2021, 3D fault-zone architecture across the brittle-plastic transition along the Median Tectonic Line, SW Japan: Fault-rock characterization, *Journal of Structural Geology*, Elsevier Ltd., 153, 104446, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104446>
- 木戸元之・福田達也・太田雄策・富田史章・本荘千枝・飯沼卓史, 2021, ウェーブグライダーによる GNSS-A 観測データの準リアルタイム伝送, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会

- 木戸元之・本莊千枝・木村友季保, 2021, 様々な観測形態による GNSS-音響方式での上下動検出について, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会
- Kimura, M., N. Kame, S. Watada, A. Araya, T. Kunugi, and R. Wang, 2021, Determination of the source parameters of the 2011 Tohoku-Oki earthquake from three-component pre-P gravity signals recorded by dense arrays in Japan, *Earth Planets Space*, 73, 223, doi:10.1186/s40623-021-01553-7
- Kortink, M., A. Yates, M. Savage, W. Wang, T. Okada, S. Matsumoto, Y. Iio, K. Jacobs, 2021, Velocity changes around the Kaikōura earthquake ruptures from ambient noise cross-correlations, *Geophysical Journal International*, doi:10.1093/gji/ggab514
- Kubota, T. et al., 2021, Improving the constraint on the Mw 7.1 2016 off-Fukushima shallow normal-faulting earthquake with the high azimuthal coverage tsunami data from the S-net wide and dense network: Implication for the stress regime in the Tohoku overriding plate, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 10.1029/2021jb022223
- Kubota, T., T., Saito, Y., Fukao, H., Sugioka, A., Ito, T., Tonegawa, H., Shiobara, M., Yamashita, 2021, Earthquake rupture and tsunami generation of the 2015 Mw 5.9 Bonin event revealed by in situ pressure gauge array observations and integrated seismic and tsunami wave simulation, *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL095915, doi:10.1029/2021GL095915
- Kundu, S., A., Opris, Y., Yukutake, T., Hatano, 2021, Extracting Correlations in Earthquake Time Series Using Visibility Graph Analysis, *Frontiers in Physics*, 9, doi:10.3389/fphy.2021.656310
- Kuritani, T., E. Sato, K. Wada, A. Matsumoto, M. Nakagawa, D. Zhao, K. Shimizu, and T. Ushikubo, 2021, Conditions of magma generation at the Me-akan volcano, northern Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 417, 107323
- Mannen, K., Y., Abe, Y., Daita, R., Doke, M., Harada, G., Kikugawa, N., Honma, Y., Miyashita, Y., Yukutake, 2021, Volcanic Unrest at Hakone Volcano after the 2015 phreatic eruption – Reactivation of a Ruptured Hydrothermal System?, *Earth, Planets and Space*, 73, 80, doi:10.1186/s40623-021-01387-3.
- Matsumoto, Y., K., Yoshida, T., Matsuzawa, A., Hasegawa, 2021, Fault-valve behavior estimated from intensive foreshocks and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake sequence, Kyushu, southern Japan, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2020JB020278, doi:10.1029/2020JB020278
- Matsuno, S., M., Uno, A., Okamoto, N., Tsuchiya, 2022, Machine-learning techniques for quantifying the protolith composition and mass transfer history of metabasalt, *Sci. Rep.*, 12, 1385, doi:10.1038/s41598-022-05109-x

- 松野有希・小菅正裕・前田拓人, 2021, 北海道雌阿寒岳における深部・浅部低周波地震活動, 東北地域災害科学研究, 57, 109-114
- Miyano, K., K., Aizawa, T., Matsushima, A., Shito, H., Shimizu, 2021, Seismic velocity structure of Unzen Volcano, Japan, and relationship to the magma ascent route during eruptions in 1990 - 1995, Scientific Reports, 11, 22407, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00481-6>
- Mizushima, R., T. Hatano, 2021, Slow periodic oscillation without radiation damping: new evolution laws for rate and state friction, Geophysical Journal International, 229, 274, 10.1093/gji/ggab471
- Mochizuki, K., S. Henrys, D. Haijima, E. Warren-Smith, and B. Fry, 2021, Seismicity and velocity structure in the vicinity of repeating slow slip earthquakes, northern Hikurangi subduction zone, New Zealand, Earth Planet. Sci. Lett., 563, doi:10.1016/j.epsl.2021.116887
- Murakami S., T. Ichimura, K. Fujita, T. Hori, and Y. Ohta, 2021, Sensitivity analysis for seafloor geodetic constraints on coseismic slip and interseismic slip-deficit distributions, Front. Earth Sci., 9, 600946, doi:10.3389/feart.2021.614088
- Nagano, A., Y. Yamashita, K. Ariyoshi, T. Hasegawa, H. Matsumoto, and M. Shinohara, 2021, Seafloor Pressure Change Excited at the Northwest Corner of the Shikoku Basin by the Formation of the Kuroshio Large-Meander in September 2017, Front. Earth Sci., 8, 583481, doi:10.3389/feart.2020.583481
- 長尾優樹・岡田里奈・梅田浩司・鎌滝孝信, 2022, 1804 年象潟地震による津波堆積物の堆積構造, 東北地域災害科学研究, 58, 印刷中
- Nakajima, J., A. Hasegawa, 2021, Prevalence of shallow low-frequency earthquakes in the continental crust, J. Geophys. Res.: Solid Earth, 126, e2020JB021391, doi:10.1029/2020JB021391
- Nakamura, H., H., Iwamori, N., Morikawa, N., Kharitonova, G., Chelnokov, I., Bragin, Q., Chang, 2021, Upwelling of deep-seated fluid in the Sikhote-Alin region, Far East of the Eurasian Plate, Aquatic Geochemistry, 27, 269-282, <https://doi.org/10.1007/s10498-021-09398-y>
- Nakanishi, N., T., Yokoyama, S., Okabayashi, H., Iwamori, T., Hirata, 2021, Geochemical constraints on the formation of chondrules: Implication from Os and Fe isotopes and HSE abundances in metals from CR chondrites, Geochimica et Cosmochimica Acta, 319, 254-270, 10.1016/j.gca.2021.11.009
- Nakata, R., T. Hori, S. Miura, and R. Hino, 2021, Presence of interplate channel layer controls of slip during and after the 2011 Tohoku-Oki earthquake through the frictional characteristics, Sci. Rep., 11, 6480, 1-11, doi:10.1038/s41598-021-

- Noda, H., 2021, Shear strength of a shear zone in the brittle-plastic transition based on tensorial strain partitioning, *J. Struct. Geol.*, 146, 104313, doi:10.1016/j.jsg.2021.104313
- Noda, H., 2021, Dynamic earthquake sequence simulation with a SBIEM without periodic boundaries, *Earth Planets Space*, 73, 137, doi:10.1186/s40623-021-01465-6
- Nomuulin, A., N. Tsuchiya, O. Dandar, A. Okamoto, M. Uno, U. Batsaikhan, and J. Wang, 2021, Multi-stage serpentinization of ultramafic rocks in the Manlay Ophiolite, southern Mongolia, *Mong. Geosci.*, 26, 1-17, doi:10.5564/mgs.v26i53.1787
- Nurdiana, A., A. Okamoto, K. Yoshida, M. Uno, T. Nagaya, N. Tsuchiya, 2021, Multi-stage infiltration of Na- and K-rich fluids from pegmatites at mid-crustal depths as revealed by feldspar replacement textures, *Lithos*, 388-389, 106096, doi:10.1016/j.lithos.2021.106096
- Obana, K. G., Fujie, Y., Yamamoto, Y., Kaiho, Y., Nakamura, S., Miura, S., Kodaira, 2021, Seismicity around the trench axis and outer-rise region of the southern Japan Trench, south of the main rupture area of the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. J. Int.*, 226, 131-145, doi:10.1093/gji/ggab093
- 小笠原宏・美間良大・石田亮壮・S. MNGADI・東 充也・矢部康男・船戸明雄・伊藤高敏・中谷正生・R. DURRHEIM, 2022, 大深度高応力鉱山でのルーチン的な採掘ハザード定量化に資する岩盤コア絶対差応力 DCDA 測定法の試評価, *材料・日本材料学会*, 受理
- 太田雄策・木戸元之・本荘千枝・木村友季保・佐藤真樹子・鈴木秀市・東龍介・大園真子・青田裕樹・高橋浩晃・富田史章・飯沼卓史・篠原雅尚・日野亮太, 2021, GNSS-A 観測に基づく千島海溝根室沖における海底地殻変動の予備的結果, *日本地球惑星科学連合 2021 年大会*
- 岡田 知己・中山 貴史・平原 聡・立岩和也・堀内 茂木・勝俣 啓・大園 真子・小菅 正裕・前田 拓人・山中 佳子・片尾 浩・松島 健・八木原寛・2011 年東北地方太平洋沖地震緊急観測グループ, 2022, 東北地方中南部における臨時地震観測, *東北地域自然災害研究*, 58, 19-24
- Okada, Y., T. Nishimura, T. Tabei, T. Matsushima, and H. Hirose, 2022, Development of a detection method for short-term slow slip events using GNSS data and its application to the Nankai subduction zone, *Earth Planets Space*, doi:10.1186/s40623-022-01576-8
- Okamoto, A., H. Ishii, R. Oyanagi, and N. Tsuchiya, 2021a, Albite-K-feldspar-quartz equilibria in hydrothermal fluids at 400, 420° C and 20-35 MPa: Experimental measurements and thermodynamic calculations, *Geothermics*, 94, 102109, doi:10.1016/j.geothermics.2021.102109
- Okamoto, A., R. Oyanagi, K. Yoshida, M. Uno, H. Shimizu, and M. Satish-

- Kumar, 2021b, Rupture of wet mantle wedge by self-promoting carbonation, *Commun. Earth Environ.*, 2, 151, doi:10.1038/s43247-021-00224-5
- Okazaki, T., Fukahata, Y. & Nishimura, T., 2021, Consistent estimation of strain-rate fields from GNSS velocity data using basis function expansion with ABIC, *Earth Planets Space*, 73:153, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01474-5>.
- 大竹和機, 2022, 沈み込み帯の付加体構造を考慮した静的弾性応力場の計算 -XBIEM を用いて-, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻修士論文
- Oyanagi, R., A. Okamoto, M. Satish-Kumar, M. Minami, Y. Harigane, and K. Michibayashi, 2021, Hadal aragonite records venting of stagnant paleoseawater in the hydrated forearc mantle, *Commun. Earth Environ.*, 2, 243, doi:10.1038/s43247-021-00317-1
- Park, J.-O., N. Takahata, E. Jamali Hondori, A. Yamaguchi, T. Kagoshima, T. Tsuru, G. Fujie, Y. Sun, J. Ashi, M. Yamano, and Y. Sano, (2021), Mantle-derived helium released through the Japan trench bend-faults, *Sci. Rep.*, 11, 12026, doi:10.1038/s41598-021-91523-6
- Park, J.-O., T. Tsuru, G. Fujie, E. Jamali Hondori, T. Kagoshima, N. Takahata, D. Zhao, and Y. Sano, 2021, Seismic reflection images of possible mantle-fluid conduits and basal erosion in the 2011 Tohoku earthquake rupture area, *Front. Earth Sci.*, 9, 687382, doi:10.3389/feart.2021.687382
- Plata-Martinez, R., R. Ide, M. Shinohara, E. S. Garcia, N. Mizuno, L. A. Dominguez, T. Taira, Y. Yamashita, A. Toh, T. Yamada, J. Real, A. Husker, V. M. Cruz-Atienza, and Y. Ito, 2021, Shallow slow earthquakes to decipher future catastrophic earthquakes in the Guerrero seismic gap, *Nat. Commun.*, 12, doi:10.1038/s41467-021-24210-9
- Sawa, S., J. Muto, N. Miyajima, R. Shiraishi, M. Kido, and H. Nagahama, 2021, Strain localization bands in fine-grained aggregates of germanate olivine and pyroxene deformed by a Griggs type apparatus, *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sci.*, 104812, doi:10.1016/j.ijrmms.2021.104812
- Sawa, S., N. Miyajima, J. Muto, and H. Nagahama, 2021, Strain-induced partial serpentinization of germanate olivine with a small amount of water, *American Mineralogist*, 106, 11, doi:10.2138/am-2021-7735
- Sawaki, Y., Y. Ito, K. Ohta, T. Shibutani and T. Iwata, 2021, Seismological Structures on Bimodal Distribution of Deep Tectonic Tremor, *Geophys. Res. Lett.*, 48(8), e2020GL092183, doi:10.1029/2020gl092183
- 篠原雅尚・山田知朗・悪原岳・望月公廣・酒井慎一, 2021, 分散型音響センシング計測と三陸沖海底光ケーブル観測システムによる地震観測, *月刊地球*, 44, 37-43

- Shinohara, M., S. Sakai, T. Okada, H. Sato, Y. Yamashita, R. Hino, K. Mochizuki, and T. Akuhara, 2022, Precise aftershock distribution of the 2019 Yamagata-oki earthquake using newly developed simple anchored-buoy ocean bottom seismometers and land seismic stations, *Earth Planets Space*, 74(5), doi:10.1186/s40623-021-01562-6
- Shinohara, M., T. Yamada, H. Shiobara, and Y. Yamashita, 2021, Development of a Compact Broadband Ocean Bottom Seismometer, *Seismol. Res. Lett.*, 92, 3610-3625, <https://doi.org/10.1785/0220210100>
- Shinohara, M., T. Yamada, K. Uehira, S. Sakai, H. Shiobara, and T. Kanazawa, 2021, Development and operation of an Ocean Bottom Cable Seismic and Tsunami observation system (OBCST) in the source region of the Tohoku-oki earthquake, *Earth Space Sci.*, doi:10.1029/2020EA001359, 2021
- Shiobara, H., A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara, and T. Sato, 2021, Tilt observations at the seafloor by mobile ocean bottom seismometers, *Front. Earth Sci.*, 8, 599810, doi:10.3389/feart.2020.5998102021
- 塩原肇・太田豊宣, 2021, 一高機能海底地震計開発試験に向けた一深海用加速度データロガーの開発, 東京大学地震研究所技術研究報告, 27
- Shiraishi, K., T. No, G. Fujie, in press, Seismic reflection imaging of deep crustal structures via reverse time migration using offshore wide-angle seismic data on the eastern margin of the Sea of Japan, *Earth Planets and Space*
- Shiraishi, K., T. Watanabe, 2021, Passive seismic reflection imaging based on acoustic and elastic reverse time migration without source information: theory and numerical simulations, *EXPLORATION GEOPHYSICS*, 1, doi:10.1080/08123985.2021.1917293
- Shiraishi, R., J. Muto, A. Tsunoda, S. Sawa, and A. Suzuki, 2022, Localized Deformation of Lawsonite during Cold Subduction, *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2021JB022134
- Suhendro, I., A. Toramaru, T., Miyamoto, Y., Miyabuchi, T., Yamamoto, 2021, Magma chamber stratification of the 1815 Tambora caldera-forming eruption, *Bulletin of Volcanology*, 83, 1-20, <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01484-x>
- Sugiyama D, S. Tsuboi Y, Yukutake, 2021, Application of deep learning-based neural networks using theoretical seismograms as training data for locating earthquakes in the Hakone volcanic region, Japan, *Earth, Planets and Space*, 73:135, doi:10.1186/s40623-021-01461-w
- Tago, J., V. M. Cruz-Atienza, C. Villafuerte, T. Nishimura, V. Kostoglodov, J. Real, Y. Ito, 2021, Adjoint Slip Inversion under a Constrained Optimization Framework:

- Revisiting the 2006 Guerrero Slow Slip Event, *Geophys. J. Int.*, 226(2), 1187–1205, doi:10.1093/gji/ggab165
- Takahashi, T., Y. Kaiho, Y., Ishihara, K., Obana, S., Miura, S., Kodaira, Y., Kaneda, 2021, Trans-dimensional imaging of the random inhomogeneity structure in the southern Ryukyu arc, Japan, *Geophys J Int*, ggab518, 10.1093/gji/ggab518
- Tanaka, E., K. Yasukawa, K. Nakamura, J. Ohta, T. Miyazaki, B. Stefanov Vaglarov, S. Machida, K. Fujinaga, H. Iwamori, Y. Kato, 2022, Secular Variations in Provenance of Sedimentary Components in the Western North Pacific Ocean Constrained by Sr Isotopic Features of Deep-Sea Sediments, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23, <https://doi.org/10.1029/2021GC009729>
- Tonegawa, T., T. Kimura, K. Shiraishi, S. Yabe, Y. Fukao, E. Araki, M. Kinoshita, Y. Sanada, S. Miura, Y. Nakamura, S. Kodaira, 2021, Weak faults at megathrust plate boundary respond to tidal stress, *Earth, Planets and Space*, 73, 89, 10.1186/s40623-021-01414-3
- Toyokuni, G., D. Zhao, 2021, P-wave tomography for 3-D radial and azimuthal anisotropy beneath Greenland and surrounding regions, *Earth Space Science*, 8, e2021EA001800
- Toyokuni, G., D. Zhao, K. Chen, 2021, Structural control on the 2018 and 2019 Hualien earthquakes in Taiwan, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 312, 106673
- Tsuchiyama A., J. Nakajima, 2021, Diversity of deep earthquakes with waveform similarity, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 314, 106695, doi:10.1016/j.pepi.2021.106695
- Uno, M., K. Koyanagawa, H. Kasahara, A. Okamoto, and N. Tsuchiya, 2022, Volatile-consuming reactions fracture rocks and self-accelerate fluid flow in the lithosphere, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 119, e2110776118, doi:10.1073/pnas.2110776118
- Usui, Y., M. Uyeshima, T. Ogawa, R. Yoshimura, N. Oshiman, S. Yamaguchi, H. Toh, H. Murakami, K. Aizawa, T. Tanbo, Y. Ogawa, T. Nishitani, S. Sakanaka, M. Mishina, H. Satoh, T. Goto, T. Ksaya, T. Mogi, Y. Yamaya, I. Shiozaki, Y. Honkura, 2021, Electrical resistivity structure around the Atotsugawa fault, central Japan, revealed by a new 2-D inversion method combining Wideband-MT and Network-MT datasets, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, doi:10.1029/2020JB020904
- Victor Levy dit Vehel, T. Hatano, L. Vanel, K. J. Måløy, O. Ramos, 2021, Dilation as a precursor in a continuous granular fault, *EPJ Web of Conferences*, 249, 15006, 10.1051/epjconf/202124915006
- Villar-Muñoz, L., M. Kinoshita, J. P. Bento, I. Vargas-Cordero, E. Contreras-Reyes, U. Tinivella, M. Giustiniani, N. Abe, R. Anma, Y. Orihashi, H. Iwamori, T. Nishikawa, E. Andres Veloso & S. Haraguchi, 2021, A cold seep triggered by a hot ridge subduction, *Scientific Reports*, 11, 10.1038/s41598-021-00414-3

- Wang, Q.-Y., M. Campillo, F. Brenguier, A. Lecointre, T. Takeda, and K. Yoshida, 2021, Seismic evidence of fluid migration in northeastern Japan after the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 563, 116894 – 116894, doi:10.1016/j.epsl.2021.116894
- Wang, Z. W., D. Zhao, and X. Chen, 2022, Seismic anisotropy and intraslab hydrated faults beneath the NE Japan forearc, *Geophysical Research Letters*, 49, e2021, doi:10.1029/2021GL097266
- 渡邊俊一, 2021, 海洋情報部における 2011 年から 2020 年にかけての GNSS-A 海底地殻変動観測の発展と成果, *海洋情報部研究報告*, 59, 95-114
- Watanabe, S., T. Ishikawa, Y. Nakamura and Y. Yokota, 2021, Co- and postseismic slip behaviors extracted from decadal seafloor geodesy after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Earth, Planets and Space*, 73, 162, 10.1186/s40623-021-01487-0
- Yamashita, Y., M. Shinohara, T. Yamada, 2021, Shallow tectonic tremor activities in Hyuga-nada, Nankai subduction zone, based on long-term broadband ocean bottom seismic observations, *Earth, Planets and Space*, 73(1), 196, doi:10.1186/s40623-021-01533-x
- Yamashita, S., Y. Yagi, R. Okuwaki, K. Shimizu, R. Agata, Y. Fukahata, 2021, Consecutive ruptures on a complex conjugate fault system during the 2018 Gulf of Alaska earthquake, *Scientific Reports*, 11:5979, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85522-w>
- 山本有人・相澤広記・村松弾・安仁屋智・田辺暖終・若林翌馬・藤田詩織・志藤あずさ・小山崇夫, 2021, 別府地熱地帯の比抵抗構造から推定する流体の移動経路, *Conductivity Anomaly 研究会論文集*, 36-37, http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/CA/2021/Yamamoto_et_al_CA2021.pdf
- Yamaya, Y., Y. Suzuki, Y. Murata, K. Okamoto, N. Watanabe, H. Asanuma, H. Hase, Y. Ogawa, T. Mogi, K. Ishizu, T. Uchida, submitted, 3-D resistivity imaging of the supercritical geothermal system in Sengan geothermal region, NE Japan, *Earth and Space Science Open Archive*, doi:10.1002/essoar.10509292.1
- Yarce, J., A. Sheehan, S. Roecker, and K. Mochizuki, 2021, Seismic Velocity Heterogeneity of the Hikurangi Subduction Margin, New Zealand: Elevated Pore Pressures in a Region with Repeating Slow Slip Events, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, doi:10.1029/2020JB021605
- Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe and Y. Nakamura, 2021, Crustal deformation detection capability of the GNSS-A seafloor geodetic observation array (SGO-A), provided by Japan Coast Guard, *Progress in Earth and Planetary Science*, 8, 63, 10.1186/s40645-021-00453-4

- 吉田圭佑, 2021, 地殻深部から上昇する流体が地震の発生に及ぼす影響の研究 -2011 年東北地方太平洋沖地震に誘発された地震活動による拘束-, 地震 2, doi:10.4294/zisin.2020-20
- Yoshida, K., H. Noda, M. Nakatani, and B. Shibazaki, submitted, Backward earthquake ruptures far ahead of fluid invasion: Insights from dynamic earthquake-sequence simulations, *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2021.229038
- 行竹洋平・萬年一剛, 2021, 水蒸気噴火の発生場と噴火過程の観測—最近の進展と今後の展望—, 地学雑誌, 130, 731-753, doi:10.5026/jgeography.130.731
- Yukutake, Y., Y. Abe, R. Honda, S. Sakai, 2021, Magma reservoir and magmatic feeding system beneath Hakone volcano, central Japan, revealed by highly resolved velocity structure, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2020JB021236, doi:10.1029/2020JB021236
- Zhao, D., Y. Hua, 2021, Anisotropic tomography of the Cascadia subduction zone, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 318, 106767

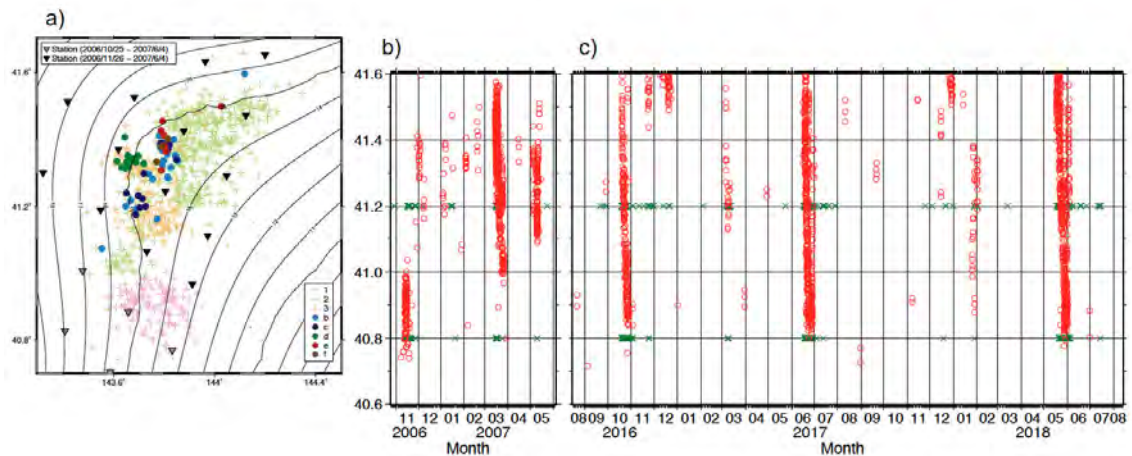


図 1．日本海溝―千島海溝会合部におけるテクトニック微動活動。(a) 2006～2007 年の観測で検知された微動の震央分布。3 期の顕著な活動エピソード（1～3）と高頻度小規模活動（b～f）が認められた。(b) 2006～2007 年の微動活動の時空間分布。緑×は Baba et al. (2020) による VLFE。(c) 2016～2018 年の微動活動 (Nishikawa et al., 2019) の時空間分布（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_05〕）。

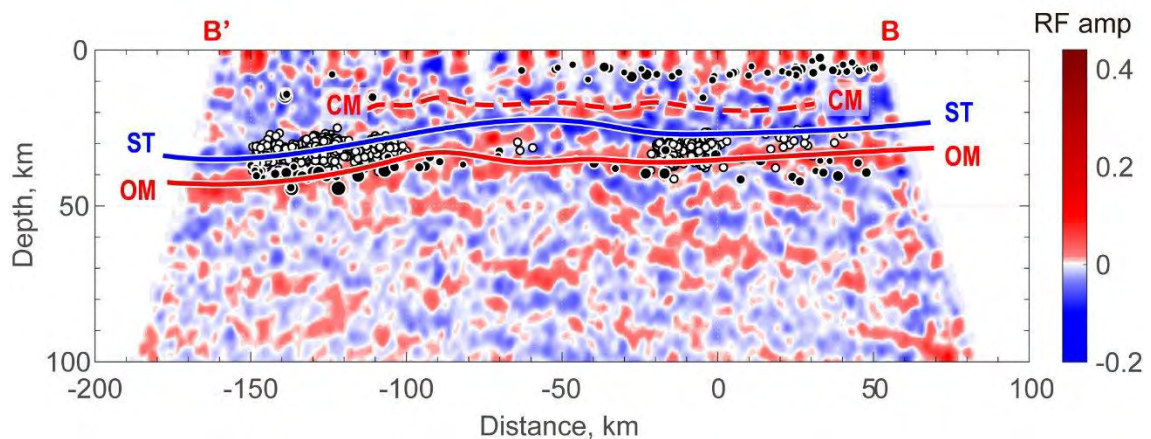


図 2．徳島―西予測線でのレシーバ関数イメージ

B が徳島市側、B' が愛媛県西予市側。ST はスラブ上面、OM は海洋モホ、CM は大陸モホを示す。黒丸は通常地震、白丸は深部低周波地震を示す（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI02〕）。

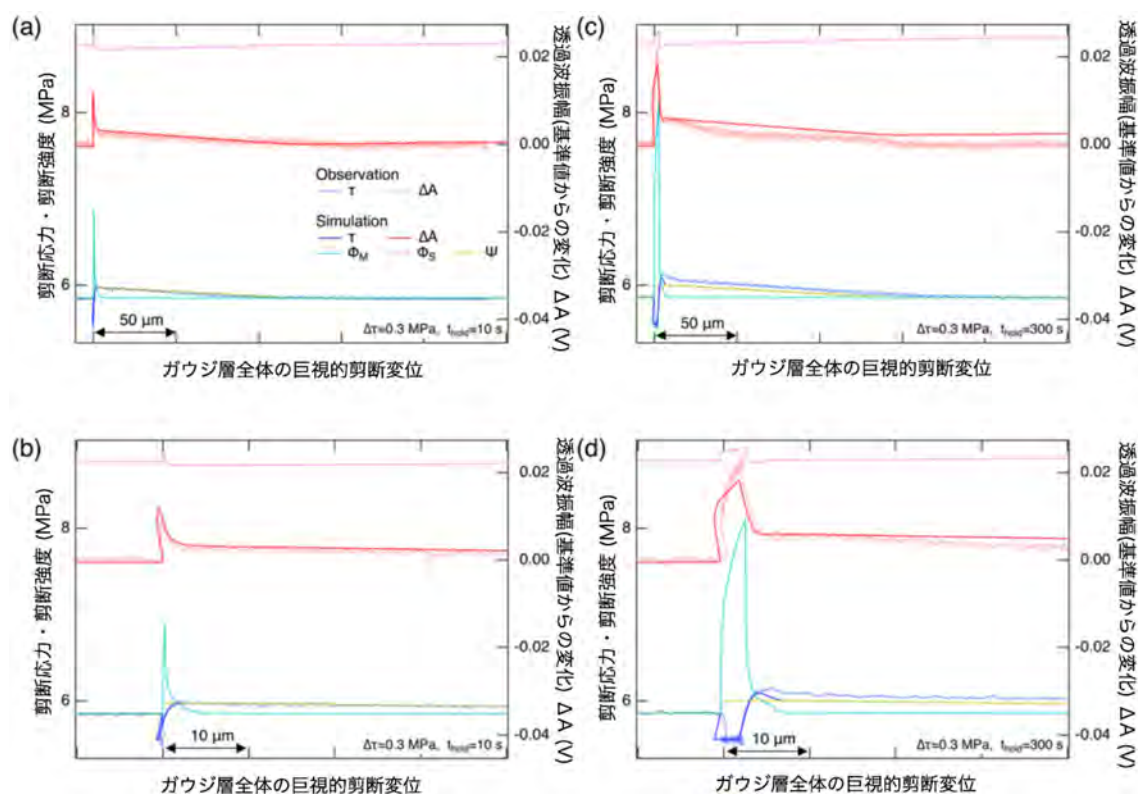


図3. 初期層厚 1mm の実験における Slide-hold-slide 試験の結果と再現シミュレーション結果の比較例 (永田ら、私信)。実験で観察された剪断応力 τ 、透過振幅変化 ΔA と、シミュレーションによる τ 、 ΔA に加え、シミュレーションによるエイジングによる主断層及び副断層の強度 Φ_M 、 Φ_S 、圧密効果による強度 ψ を示す。横軸はガウジ層全体の巨視的相対変位。Hold 後再載荷開始時の変位を揃えている。(a) エイジング効果によると思われる剪断応力ピークが現れない例。(b) (a) 中の hold 前後の拡大。(c) エイジング効果によると思われる剪断応力ピークが現れる例。(d) (c) 中の hold 前後の拡大 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_06])。

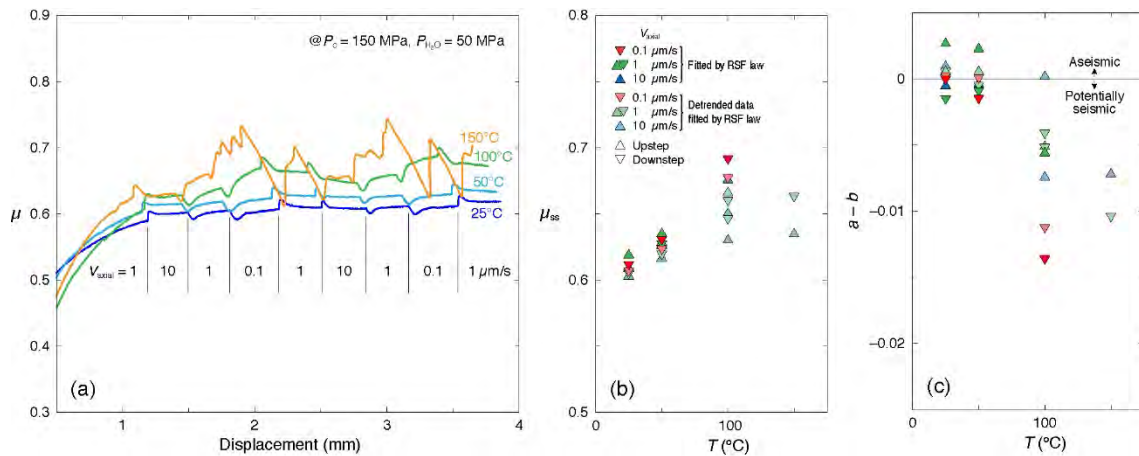


図 4. (a) オパールガウジの変位速度急変摩擦実験結果。(b) 定常摩擦係数の温度変化。(c) $a - b$ 値の温度変化。 μ : 摩擦係数, μ_{ss} : 定常摩擦係数, T : 温度, V_{axial} : 軸方向変位速度, P_c : 封圧, P_{H_2O} : 間隙水圧, RSF law: 変位速度・状態依存摩擦構成則 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_05])。

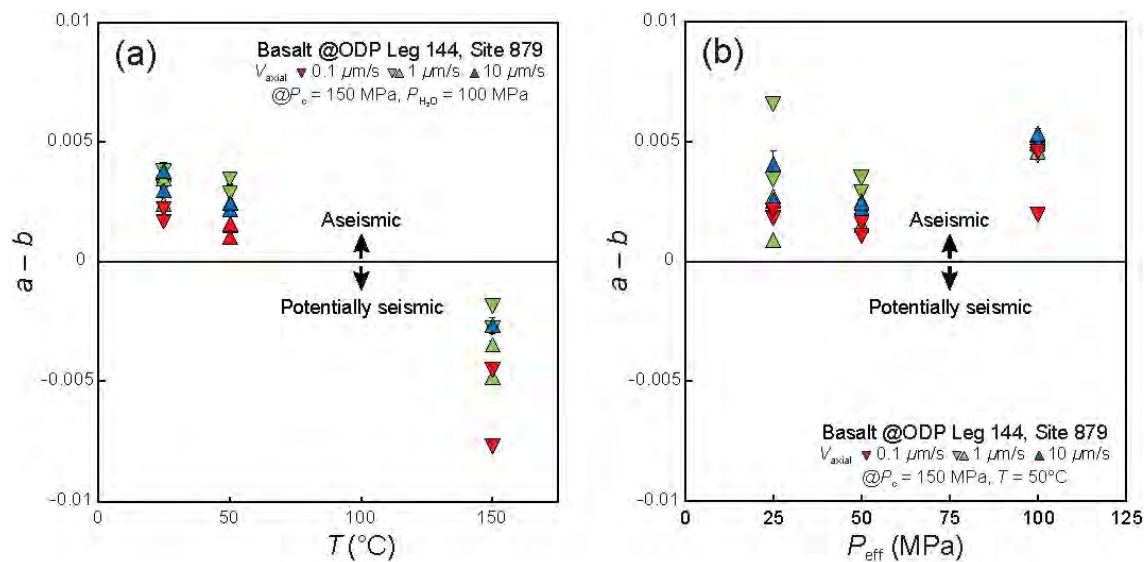


図 5. 武岩の変位速度急変摩擦実験から得られた $a - b$ 値の温度依存性 (a) および有効圧依存性 (b)。 V_{axial} : 軸方向変位速度, T : 温度, P_c : 封圧, P_{H_2O} : 間隙水圧, P_{eff} : 有効圧 (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_05])。

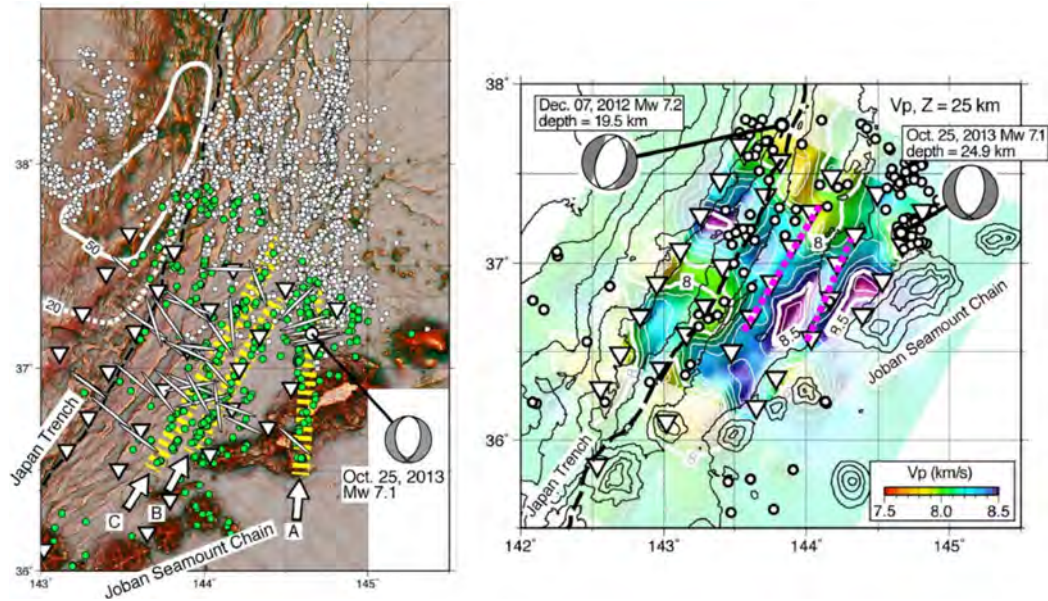


図 6. (左) 宮城県沖アウターライズ域の地震震央分布。緑丸と白丸はそれぞれ Obana et al. (2021) と Obana et al. (2019) による深さ 14 km 以浅の地震の震央。白矢印と黄色の帯は、主要な地震列。(右) 深さ 25 km での海洋マントル内 P 波速度分布 (Obana et al., 2021)。マゼンタは地震活動の低調かつ低 P 波速度の領域。白丸は深さ 20~30 km の地震の震央 (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_06])。

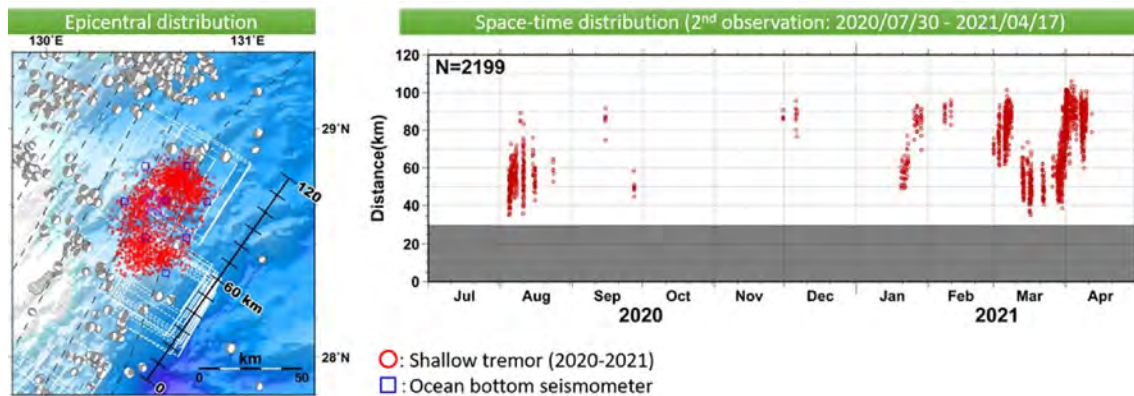


図 7. 浅部微動の震央分布と時空間分布。震源決定された浅部微動を赤○で示す。震央分布図の□は第 2 期観測の LOBS 観測点である。また F-net の MT 解を重ねて示した (鹿児島大学 [課題番号: KGSM01])。

Site name	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Velocity (cm/yr) (deg)	Period	Data	Update
(1) KAMN	38.89	143.36	4.3 282.3	08/19/2017 - 08/21/2021	10	*
(2) KAMS	38.64	143.26	5.9 291.1	08/19/2017 - 08/22/2021	12	*
(3) MYGI	38.08	142.92	5.7 278.0	08/19/2017 - 08/22/2021	15	*
(4) MYGW	38.15	142.43	0.6 217.1	08/18/2017 - 08/21/2021	16	*
(5) FUKU	37.17	142.08	1.8 147.7	08/18/2017 - 08/20/2021	16	*
(6) CHOS	35.50	141.67	1.2 268.1	08/23/2017 - 08/23/2021	13	*
(7) BOSN	34.75	140.50	1.3 323.4	08/02/2017 - 08/19/2021	14	*
(8) SAGA	34.96	139.26	4.0 5.1	08/02/2017 - 06/19/2021	16	*
GEONET				08/23/2017 - 08/23/2021		



図 8．日本海溝沿いの直近約 4 年間の水平移動速度。北米プレート固定（海上保安庁〔課題番号：JCG_03〕）。

Site name	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Velocity (cm/yr) (deg)	Period	Data	Update
(9) TOK1	34.08	138.13	1.9 290.5	11/19/2017 - 10/11/2021	19	*
(10) TOK2	33.88	137.60	3.5 299.6	11/19/2017 - 11/17/2021	19	*
(11) TOK3	34.18	137.39	4.7 297.8	11/18/2017 - 07/05/2021	16	*
(12) ZENW	33.09	137.55	- -	02/20/2020 - 07/06/2021	6	*
(13) KUM1	33.67	137.00	4.0 291.8	11/18/2017 - 11/16/2021	21	*
(14) KUM2	33.43	136.67	3.1 316.9	11/17/2017 - 10/12/2021	22	*
(15) KUM3	33.33	136.36	3.7 295.0	11/17/2017 - 09/13/2021	22	*
(16) KUM4	33.08	136.64	- -	02/21/2020 - 09/13/2021	8	*
(17) SHOW	33.16	135.57	3.4 309.3	11/17/2017 - 09/14/2021	21	*
(18) SIO2	32.98	135.99	- -	03/18/2020 - 09/14/2021	8	*
(19) MRT1	33.35	134.94	4.9 300.4	07/31/2017 - 07/03/2021	21	*
(20) MRT2	32.87	134.81	3.3 289.0	11/16/2017 - 11/16/2021	26	*
(21) MRT3	32.80	135.35	- -	08/10/2019 - 09/15/2021	10	*
(22) TOS1	32.82	133.67	5.0 307.6	11/15/2017 - 11/15/2021	19	*
(23) TOS2	32.43	134.03	5.9 299.3	11/13/2017 - 11/15/2021	19	*
(24) ASZ1	32.37	133.22	5.8 307.5	11/14/2017 - 09/16/2021	19	*
(25) ASZ2	31.93	133.58	4.5 303.1	06/19/2017 - 06/27/2021	18	*
(26) HYG1	32.38	132.42	3.0 290.2	11/15/2017 - 11/14/2021	19	*
(27) HYG2	31.97	132.49	2.4 299.1	11/14/2017 - 11/14/2021	21	*
GEONET				11/17/2017 - 11/17/2021		

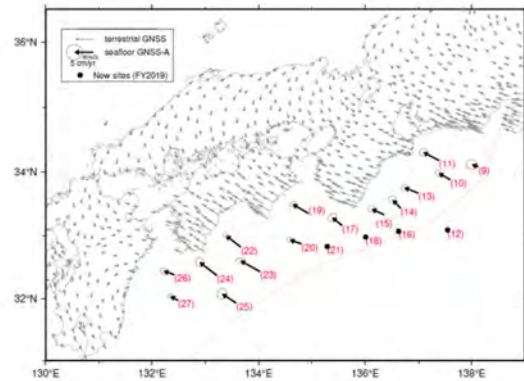


図 9．南海トラフ沿いの直近約 4 年間の水平移動速度。アムールプレート固定（海上保安庁〔課題番号：JCG_03〕）。

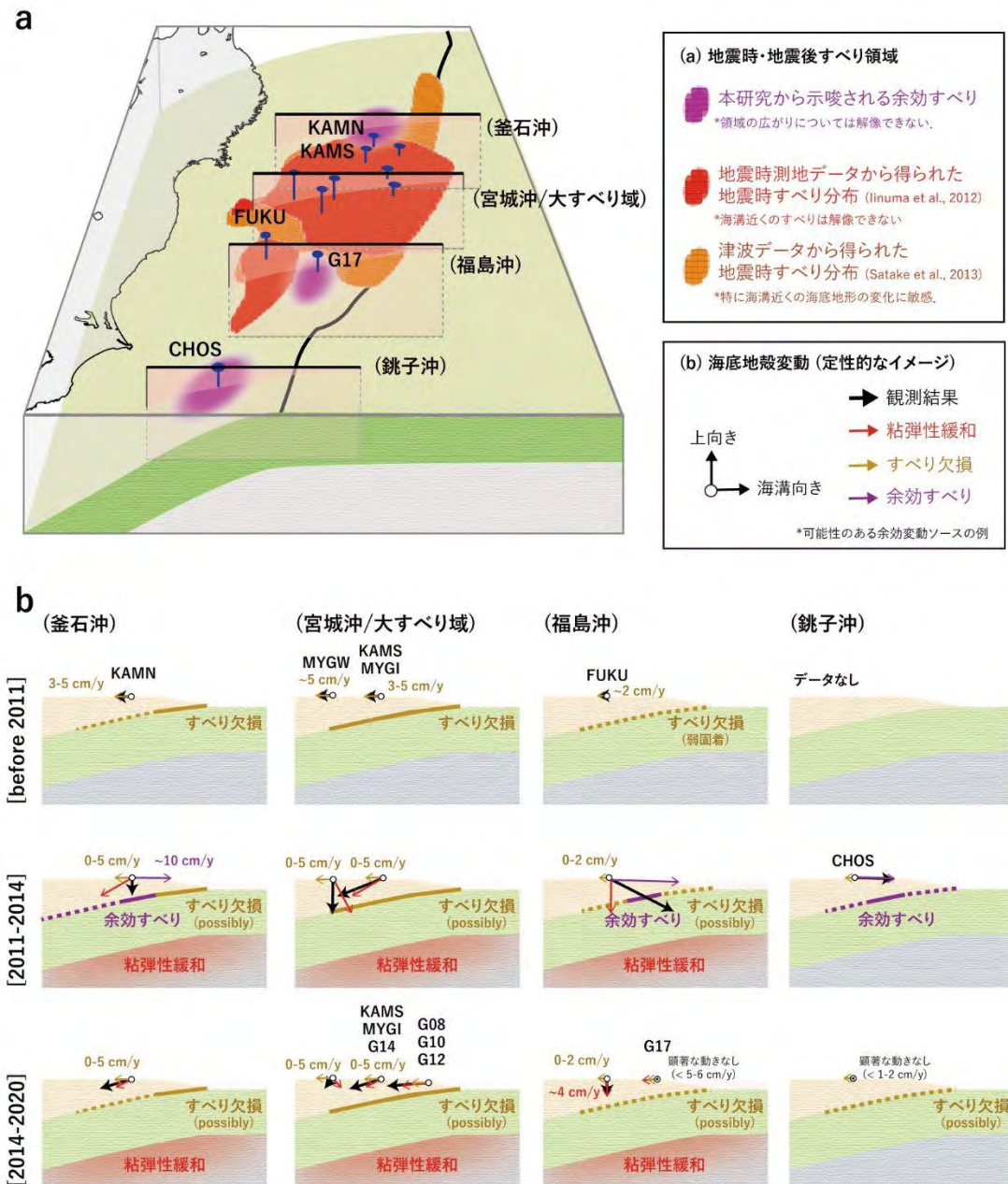


図 10. 海底下にある地殻変動ソースの模式図。(a) プレート境界でのすべり領域のイメージ、(b) 各地殻変動ソースが各 GNSS-A 観測点に与える影響として考えられるもの。凡例は図中を参照のこと (海上保安庁 [課題番号: JCG_03])。

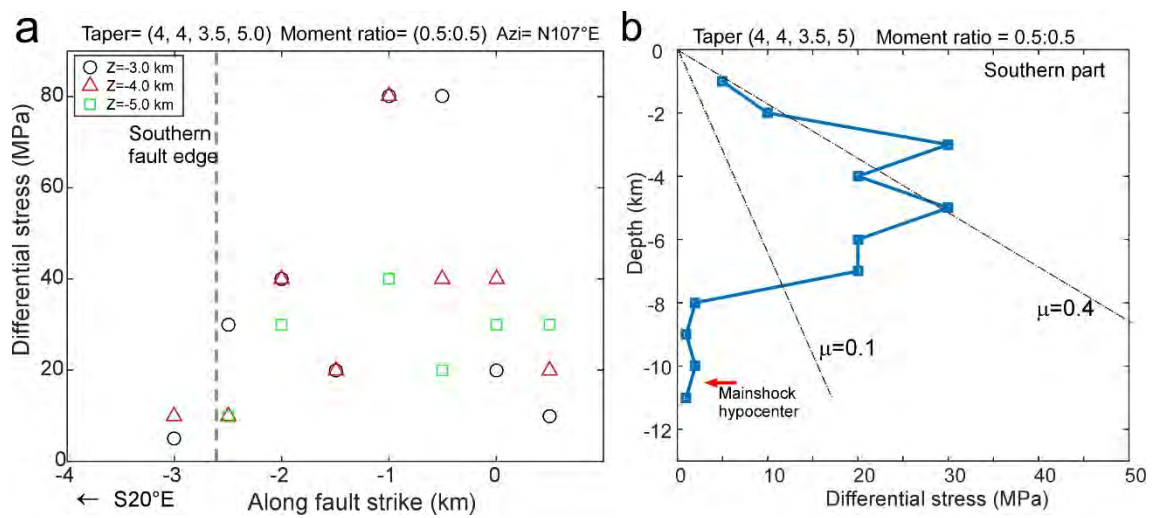


図 11. 地震前の差応力の大きさのプロファイル

a) 南端付近における断層に沿う方向の差応力の空間変化。b) 南端付近における深さ方向の差応力の空間変化。一元化震源による本震の深さが示されている。 $\mu=0.1, 0.4$ の点線は、それぞれの摩擦係数に対応する最もすべりやすい断層に加わる差応力の計算値 (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI03])。

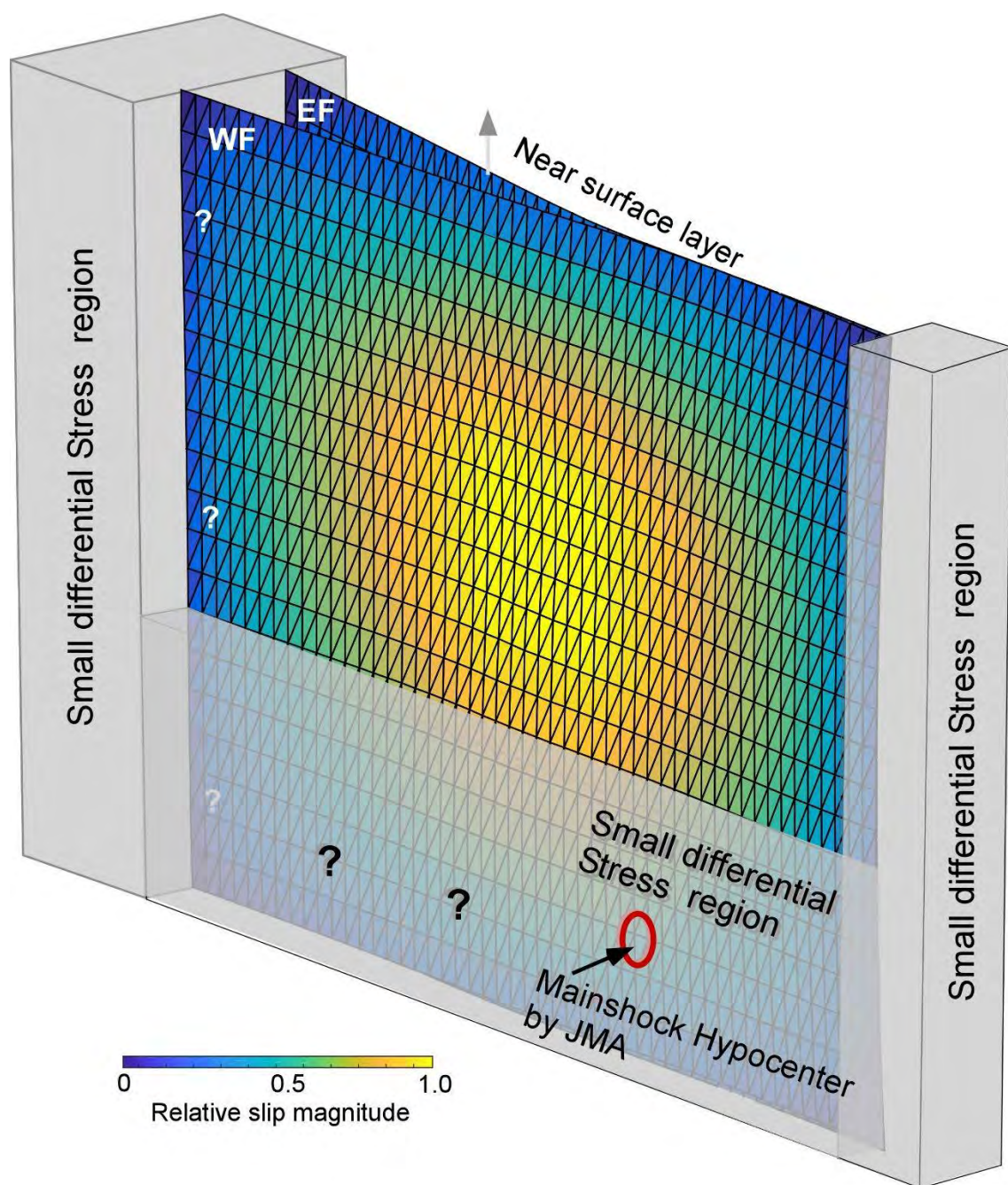


図 12. 鳥取県中部の地震の断層付近の低差応力の領域の模式図（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI03]）。

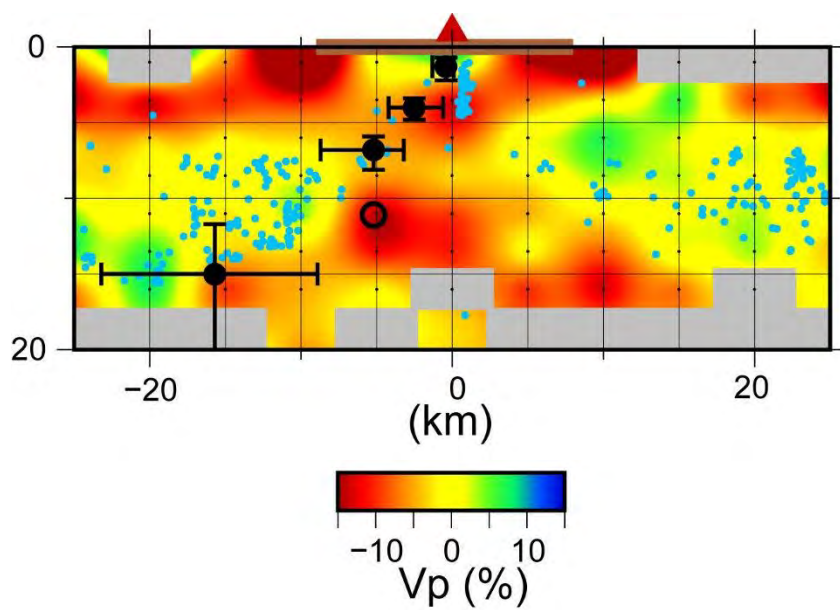


図 13. 雲仙火山の地震波速度構造 (V_p) 東西断面 (Miyano et al., 2021 より抜粋)。黒丸は水準測量と GNSS 観測による 1990–1995 年噴火時の圧力源 (Kohnno et al., 2004)。白丸は GNSS 観測による圧力源 (Nishi et al., 1999) (九州大学[課題番号:KYU_01])。

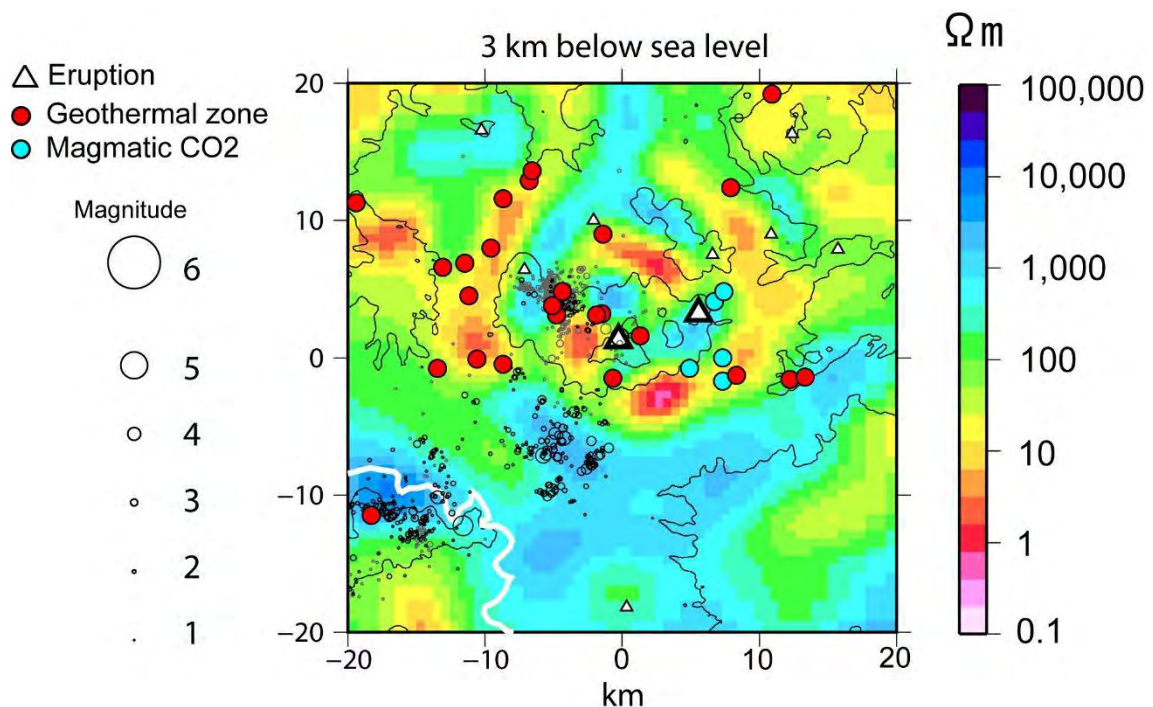


図 14. 九重火山の海拔下 3 km の比抵抗断面 (Aizawa et al. 2022 より抜粋)。火口、地熱地帯、炭酸水は低比抵抗領域の中心ではなく端部に分布している (九州大学 [課題番号: KYU_01])。

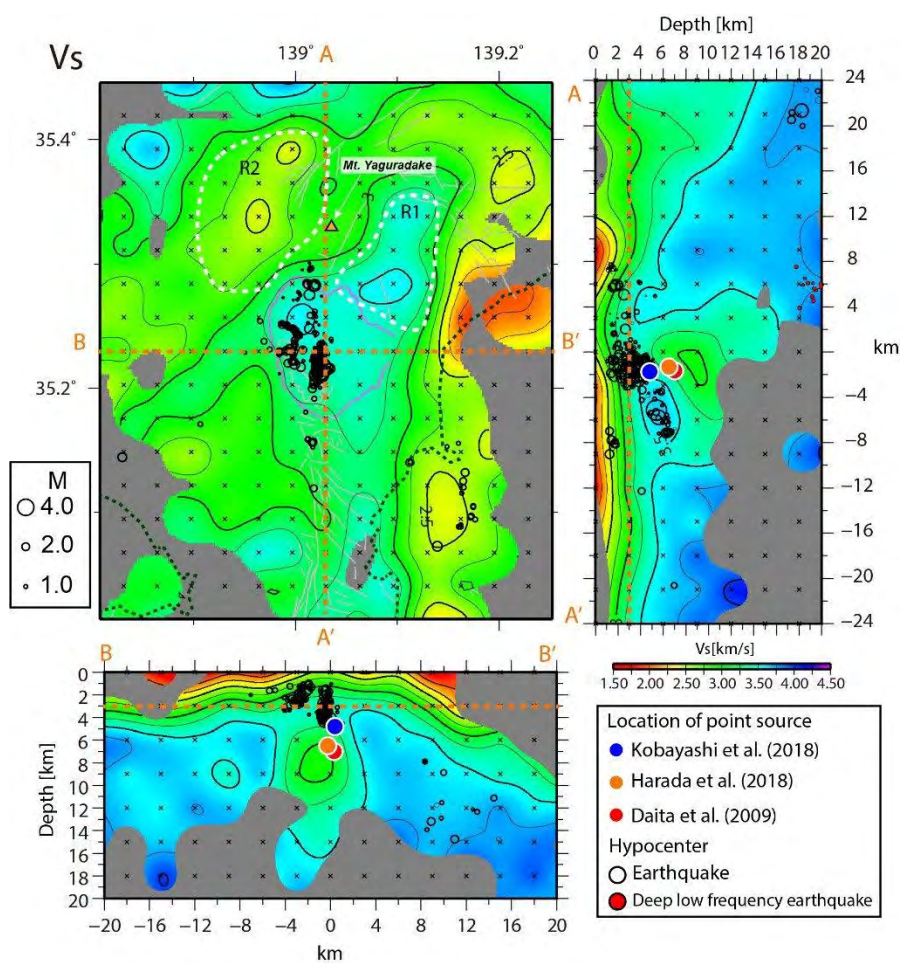


図 15. 箱根火山及び周辺域の S 波速度構造。中央図は深さ 3km における速度構造を、右及び下図は中央火口丘を南北及び東西に通る断面上に投影した速度構造を示す。黒丸は構造性地震の震源位置を、青丸・オレンジ丸・赤丸は GNSS データにより推定された圧力源の位置を示す（京都大学防災研究所 [課題番号：DPRI04]）。

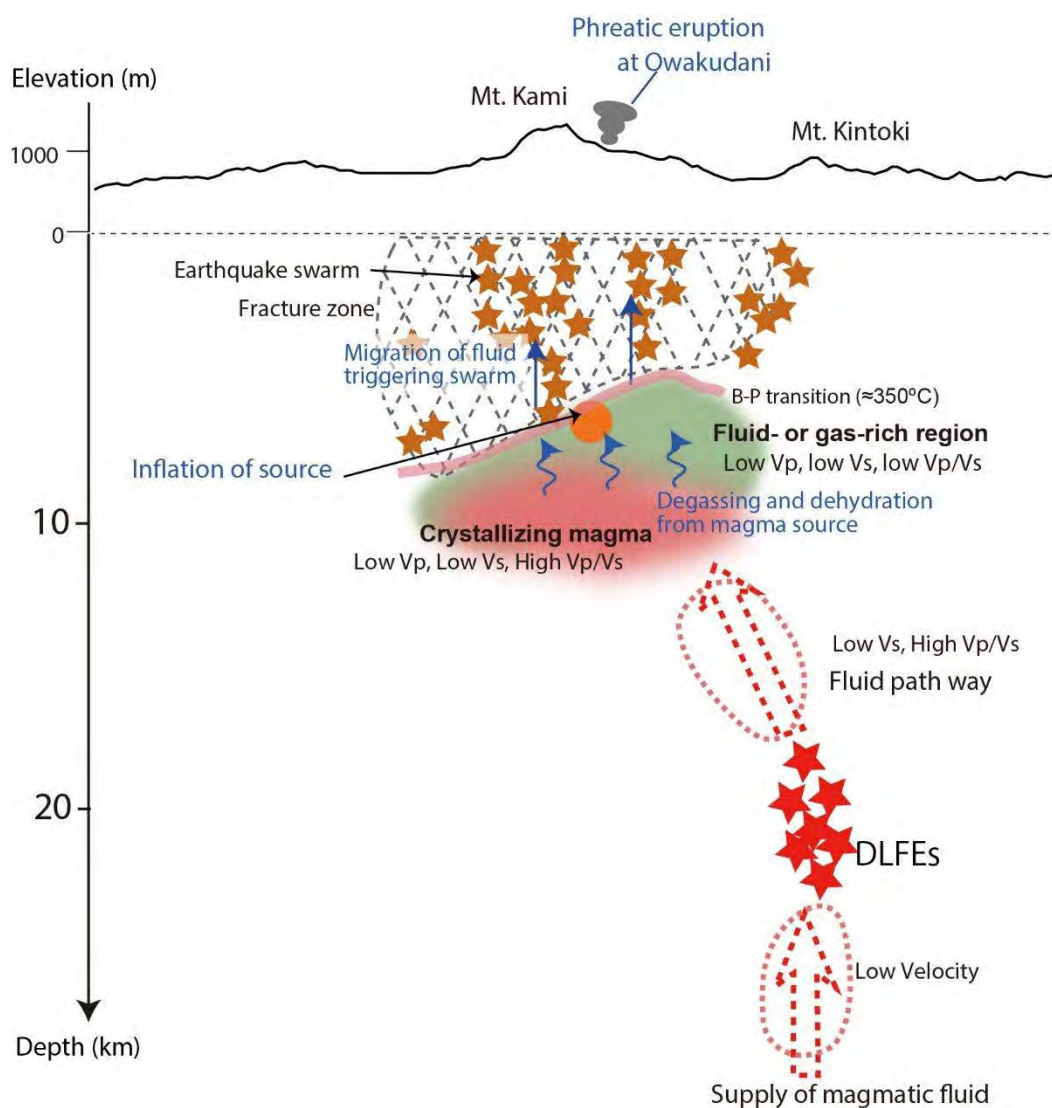


図 16. 地殻構造、構造的な地震や深部低周波地震の活動、地殻変動の分布から推察された、箱根火山下でのマグマ供給過程を示す模式図（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI04〕）。

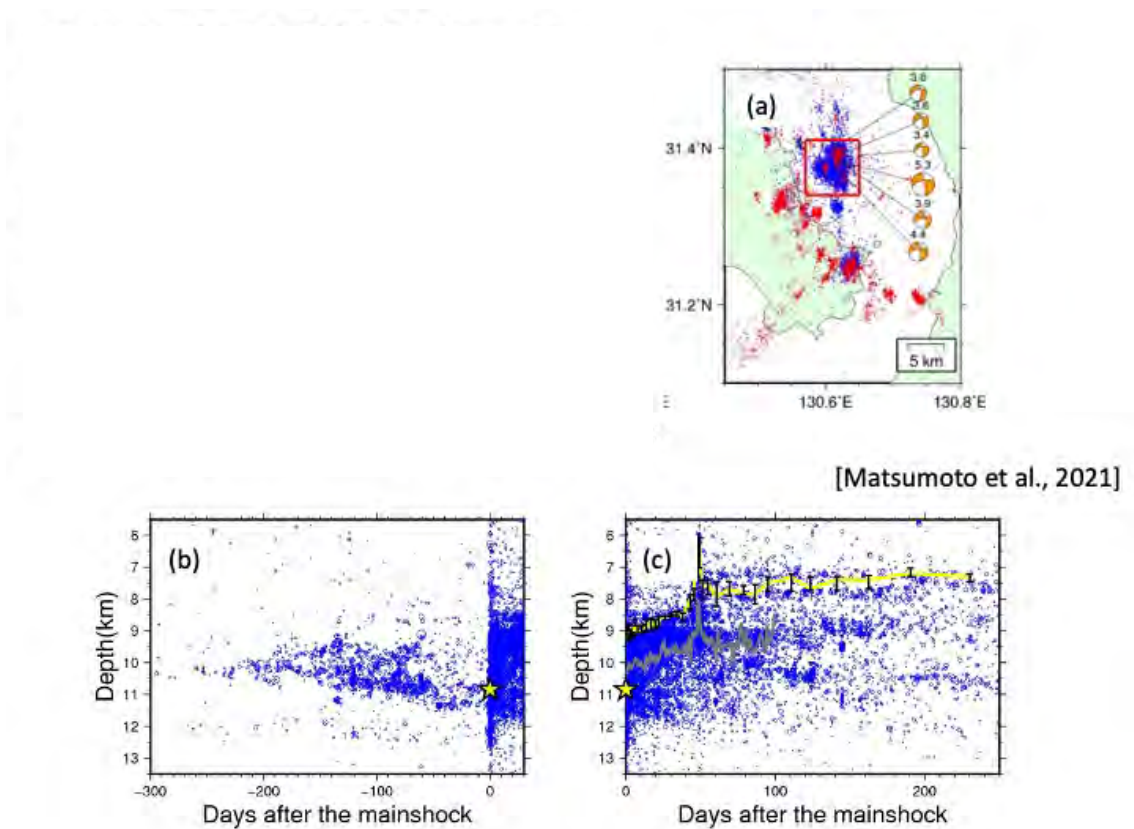


図 17. 2017 年鹿児島湾の地震の震源分布。(a) 2017 年鹿児島湾の地震の震源分布 (2003. 1. 1-2018. 8. 8)。赤・青はそれぞれ前震・余震を示す。赤の四角は震源域を示す。発震機構解 (数字はマグニチュード) を合わせて示す。(b) 震源の時間一深さ分布。星は本震を示す。(c) 余震の時間一深さ分布。黄色の線は 400 地震毎に浅いほうから 10% の地震の深さを示す。黒のエラーバーは 95%信頼区間を示す。灰色の線は 100 日間 1 日毎のすべての余震の平均の深さを示す (東北大学 [課題番号: THK_07])。

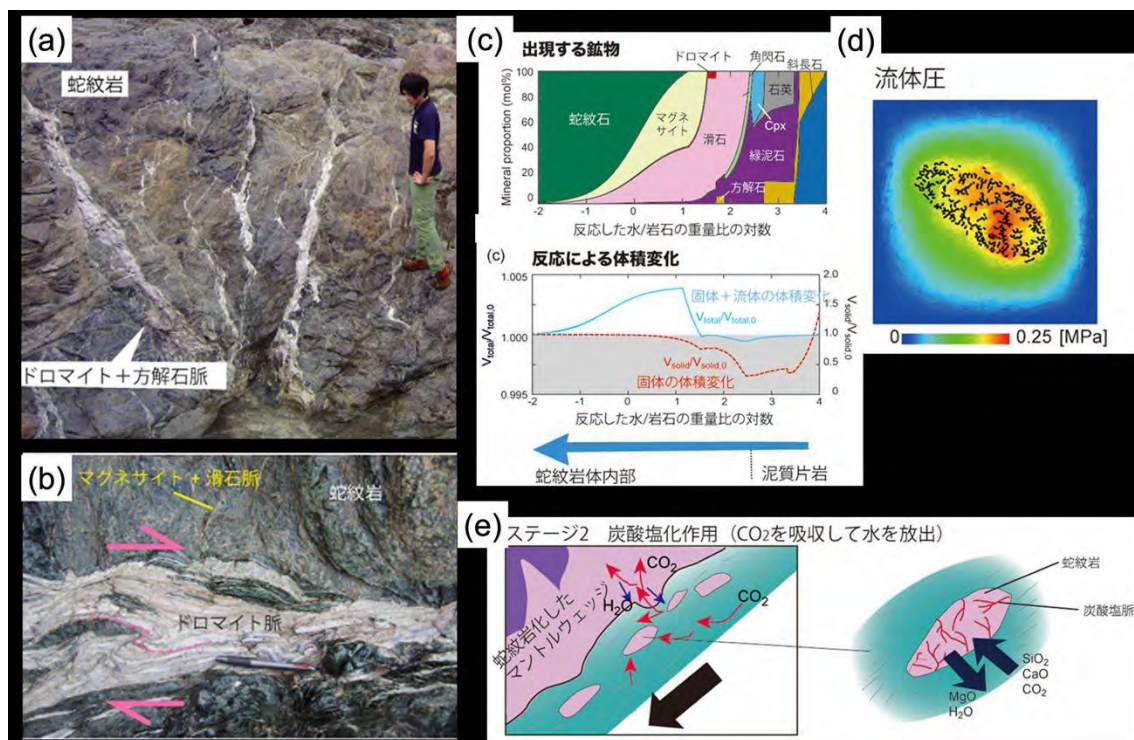


図 18. マントルウェッジ蛇紋岩の炭酸塩化 (三波川変成帯; Okamoto et al., 2021b)。(a, b) 蛇紋岩体中の炭酸塩脈の産状。(a) 蛇紋岩を切って発達する炭酸塩脈のネットワーク (ドロマイト: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, 方解石: CaCO_3)。(b) 炭酸塩脈の構造は脈形成後にせん断変形を受けている。(c) 岩石-流体平衡計算の結果。炭酸塩(マグネサイト MgCO_3)の生成に伴い、流体が発生し、固体+流体の体積が増加していることがわかる。(d) 離散要素法を用いた模式的な炭酸塩化反応によるき裂形成と流体圧の変化。(e) マントルウェッジでの炭酸塩化作用の模式図。蛇紋岩化したマントルウェッジは CO_2 流体が流入すると脱水しながら、局所的に炭酸塩化反応が進行する。この反応はき裂を作りながら自己促進的に進行する。マントルウェッジの一部は変成岩の中に取り込まれ、本岩体のように変成帯の一部として上昇する (東北大学 [課題番号: THK_02])。

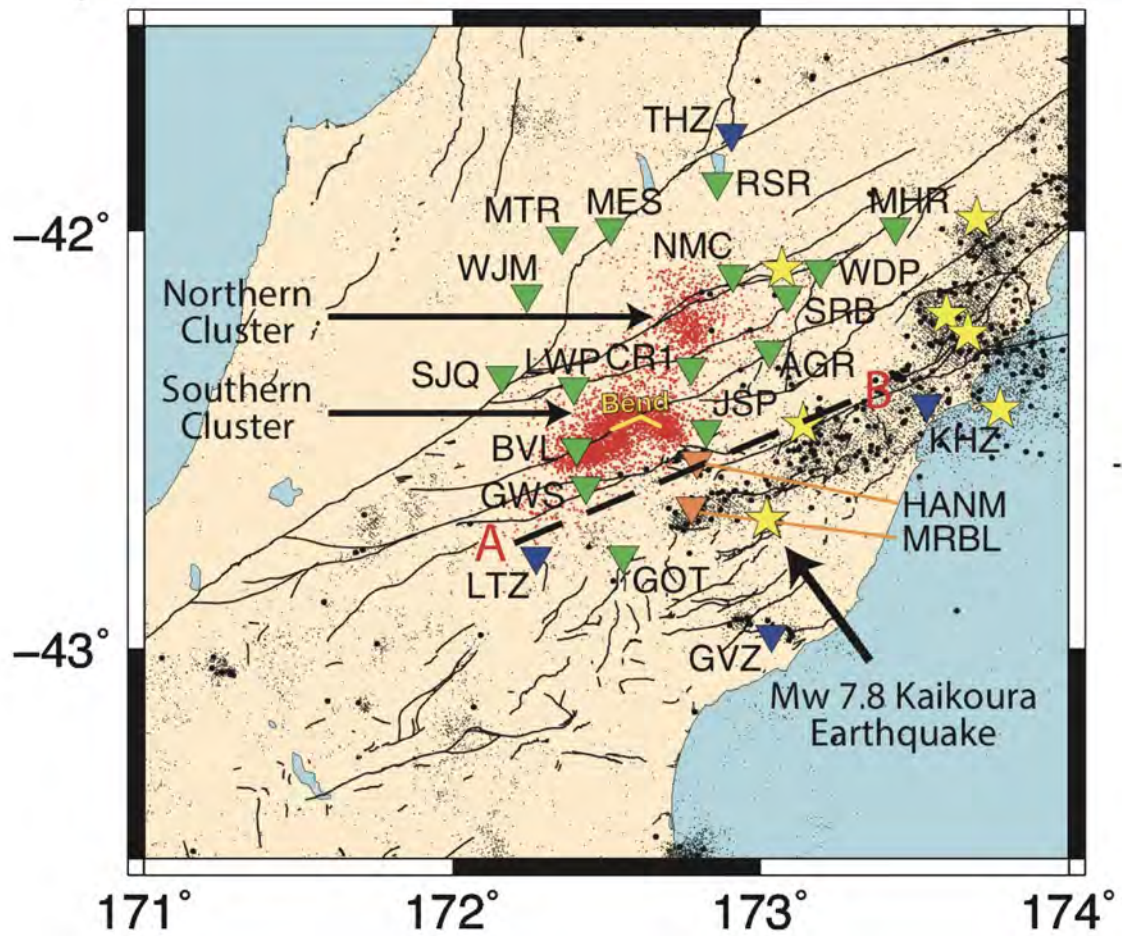


図 19. ニュージーランド南島北中部における微動分布 (2013 年～2019 年)。赤点が微動を示す。黄色星・黒点・灰色点はそれぞれ Mw6 以上、4 以上、4 以下の通常の地震を示す。赤・青・緑の逆三角はそれぞれ、GNSS の定常観測点、地震の定常観測点、地震の臨時観測点を示す (東北大学 [課題番号 : THK_01])。

1 (2) 地震 (長期予測)

「地震 (長期予測)」計画推進部会長 西村卓也

(京都大学防災研究所)

副部会長 穴倉正展

(産業技術総合研究所)

大地震の長期予測は、日本国内では地震調査研究推進本部による長期評価という形で実施され、その評価結果は全国地震動予測地図などの形で社会に公表されている。大地震の長期予測は、災害軽減や防災対策の立案に役立てられることが期待されるが、大地震の発生は極めて低頻度な現象であるため、おもに過去の地震の発生履歴に基づいて行われてきた長期予測には大きな不確定性が伴っている。本部会では、地質・地形データや史料・考古データを活用して地震の発生や地殻変動の履歴を解明する手法の高度化を進めるとともに、各地域での調査から過去の履歴データを蓄積して、大地震の予測精度の向上を目指した観測研究を行う。さらに、これまでは十分に活用されていなかった地殻変動や地震活動などの地球物理学的観測データや地震発生の物理モデルの利用により、長期予測手法の高度化を目指した観測研究を行う。以下では、本部会に属する各課題について令和3(2021)年度の成果の概略と今後の展望について述べる。

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ア. 史料の収集とデータベース化

前年度から引き続き、日記史料有感地震データベース (<http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/HEVA-DB/>) の改良を継続している。主に近世後半の日本各地の有感記録と、1900年代以降の震度観測データとを比較することにより、長期にわたる地震活動の時間変化の特徴について検討した。その一例として、1800年から安政東海・南海地震に至るまでの期間の西日本において最も広い範囲で震動が記録されている1835年5月18日(天保6年4月21日)の地震について検討した(図1)。この地震では目立った被害記事がなく、『日本被害地震総覧』にも掲載されていないが、既刊史料集掲載史料のほかに今回の調査で新たに見つけた史料によって、鹿児島と高知で「大地震」と記録されているほか、佐賀、山陰、近江、岐阜でも揺れが感知されていたことが分かった。このような揺れの分布は、1968年4月1日の日向灘を震源とする地震(深さ22 km, M7.5)の震度分布に似ている(東京大学地震火山史料連携研究機構[課題番号:HMEV02])。

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

海溝型地震の発生履歴に関する調査としては、引き続き沿岸での津波堆積物や巨礫群を用いた古津波と、海岸段丘地形や生物痕跡に基づく地震性隆起の評価が行われた。

千島海溝・日本海溝周辺域では、17世紀の千島海溝でのイベントをはじめとした過去の超巨大地震による津波浸水時の地形復元に関するデータを取得した(産業技術総合研究所[課題番号:AIST08])。また、北海道十勝地方の当縁川河口域において、従来津波堆積物が確認されていた海岸線付近だけでなく、内陸側の湿地や段丘上の調査も実施し

た（北海道大学〔課題番号：HKD_01〕）。その結果、湿地域では1739年と1856年のテフラの間の期間に離水したことが明らかになり、17世紀の地震に伴う隆起は余効変動として200年以上続いたことが示唆される。

南海トラフ周辺域では、高知県での津波浸水域復元のための地形・地質調査が実施された（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。また、変動地形学的見地に基づき、熊野灘周辺の伊豆マイクロプレート西端部と志摩海脚周辺での海底地形調査・浅層地質構造調査が行われ、その解釈が行われた。銭洲海嶺・檜野埼海丘間の西半部の海域には、北西側隆起を示す撓曲があり、この撓曲崖を形成した断層が伊豆マイクロプレートとフィリピン海プレートとの境界である可能性が高い。地形的な特徴から横ずれ成分は、極めて小さいと考えられる。なお、撓曲崖直下には逆断層運動を示す地下構造が見られないため、断層本体は探査深度よりもさらに深部に存在するものと考えられる。

南西諸島海溝沿いでは、琉球列島中部・北部において台風起源と考えられるサンゴ礁上の巨礫群を制約条件として活用することにより、これらの巨礫をより内陸に運搬する規模の津波はサンゴ礁形成後に発生していないとの仮定のもとで最大津波規模を数値計算により推定し、それを説明できる地震規模を推定した（Minamidake et al., 2022）（東京大学理学系研究科〔課題番号：UTS_01〕）。相模トラフ周辺では、房総半島南部の海岸段丘の年代を再評価し、過去の関東地震の発生年代と再来間隔について復元した。また、伊豆半島東部における元禄地震の津波と地殻変動について検討を行った（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST08〕）。

内陸地震の発生履歴に関する調査としては、中央構造線断層帯の讃岐山脈南縁区間鳴門南断層において実施された三次元的トレンチ調査及び年代測定により、3回のイベント（それぞれ740-900 Cal BP以降、3370-3560 Cal BP、4180-4530 Cal BP）が同定された。これらのイベントの発生間隔はそれぞれ2500年以上、600～1100年となるため、少なくとも最近3回の発生間隔は等間隔ではなかった可能性が高い。一方、本地点から東へ数kmに位置する段関地点では、先行研究により4回のイベントが推定されており、両者の整合性をさらに検討する必要がある（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST02〕）。糸魚川―静岡構造線断層帯（以下「糸静線」という。）では北部の白馬地区と南部の白州地区での調査が行われた。白馬地区では2014年長野県北部の地震の地表地震断層の北部延長と南部延長の調査地点において、2014年と1714年の地震に伴う断層変位は認められないが、それ以前に大きな断層変位が認められ、イベント発生時期はそれぞれ554-601 Cal AD以降、433-537 Cal AD以降と推定された。また、白州地区では、1648-2108 Cal BPと2993-4273 Cal BPの2回の変位イベントが検出され、上下変位量はそれぞれ変形ゾーン全体で1 mと0.5 mであることが推定された。過去9000年間の上下変位速度は0.4-0.6 mm/yrと推定され、過去2回の活動と同程度の変位が繰り返したと仮定した場合、9000年間に4回以上の活動が生じた可能性が示唆される。よって、糸静線南部白州断層では地震による変位量は一定ではなく、活動間隔は従来推定されてきた約5000年より短い可能性が高いことが示された（名古屋大学〔課題番号：NGY_03〕）。

これらの古地震イベントに関する地質データを検索、表示できるデータベースは、引き続き充実が図られている。産業技術総合研究所では、活断層及び津波浸水履歴情報を「活断層データベース」「津波堆積物データベース」として整備しており、「活断層データベース」では新規データの入力のほか、入力インターフェース及び表示システムの改

善、位置精度向上に関わるデータ更新が行われた（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST01、AIST04〕）。

（３）地震発生過程の解明とモデル化

イ．地震断層滑りのモデル化

E-ディフェンス施設における大型振動台を利用した摩擦実験において、断層面の不均質性が異なる岩石試料を用いて、均質な断層ではプレスリップ型、不均質な断層ではカスケードアップ型の地震の始まり方を再現することに成功し、両者で前震活動の発生様式や統計的性質が大きく異なることを明らかにした（Yamashita et al., 2021、防災科学技術研究所〔課題番号：NIED02〕）。

（５）地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア．プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

計算機上において、巨大地震震源域の深部側で繰り返し発生するスロースリップイベント（SSE）に加え、日向灘北部・南部を震源域とする長期的SSEおよび日向灘から足摺沖で発生するSSEの再来間隔の地域的違いの再現に成功した。このシミュレーションの更なるパラメータチューニングを実施するため、紙記録として保存されている古い観測波形をデジタイズし、過去のスロー地震発生状況を把握する技術の開発を進めた（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED02〕）。

イ．内陸地震

令和元年度に実施された東北日本を横断する日本海溝から大和堆までの海陸統合構造探査のデータを用いて、陸域部における屈折・広角反射法データ処理に基づく速度構造モデル構築を行った。震央距離50-60 km以遠の走時データから、深さ8-15 kmに速度が6.4-6.5 km/sの中部地殻の存在が明らかとなり、Moho面の深さは30-31 kmと推定された。下部地殻（深さ15-30～31 km）の速度は6.6-7.1 km/sであるが、深さ19-21及び24-26 kmに2枚の速度不連続面がある。更に、モホ面の下、深さ38及び46 kmにも不連続面が存在する。この測線下における地震活動は、ほぼ中部地殻以浅で発生しているが、測線西端部では、発生域が20 km以深にまで及んでいる。また、出羽丘陵と新庄盆地境界部下で低周波地震群が認められ、その下限は今回推定した深さ38 kmの上部マントル内不連続面に対応している（図2）（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_11〕）。

2016年11月22日に陸側プレート内で発生した福島県沖の地震による津波に対し、S-netの広域かつ稠密な観測点で得られた観測記録を震源域近傍の観測データとして解析することにより、震源断層すべりを高精度かつ高信頼度で推定することに成功した。この解析により、2016年福島県沖の地震時に解消されたひずみは東北沖地震により増加したひずみより大きいこと、すなわち、東北沖地震以前からひずみが蓄積していた領域に東北沖地震が作用することで発生した地震であったことを明らかにした。これらの研究は、水圧計の地震動成分の活用可能性を示した点でも有用である（Kubota et al., 2021、防災科学技術研究所〔課題番号：NIED02〕）。

オ．構造共通モデルの構築

東北日本弧とその沿岸海域において、震源断層の位置形状だけでなくすべり角の情報も持つ矩形断層モデルを作成した。震源断層の位置については、活断層図や地質図、重力異常図などを参考にし、形状については深部反射法地震探査の結果から推定した。活断層の分布が知られていない場所で発生する地殻内地震も考慮するため、伏在する断層についても地質構造に着目して震源断層を抽出した。地震発生層の深さは基本的には、Hi-netの観測データによるD90（90%の浅発地震が発生する下限深さ）を参考にした。すべり角は、Terakawa and Matsu'ura（2010）の広域応力場に基づき、断層すべりは断層面にかかる最大剪断応力の方向に起こると仮定して計算した（図3）。このような断層モデルは、地震の力学的な発生予測や被害予測の基礎となるものである（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_11〕）。

2．地震・火山現象の予測のための研究

（1）地震発生の新たな長期予測

ア．海溝型巨大地震の長期予測

南海トラフ東側の熊野灘における海底地殻変動観測について、2021年2月に実施した観測まで含めて解析を行い、南海トラフ軸近傍の陸側の観測点2点（TCAとTCB）と沈み込むプレート側の観測点1点（TOA）におけるアムールプレートに対する変位速度ベクトルを求めた。変位速度の方向と大きさは、TOAでは $N70 \pm 30^\circ$ W方向に 50 ± 29 mm/年、TCAでは $N59 \pm 18^\circ$ W方向に 38 ± 33 mm/年、TCBでは $N45 \pm 26^\circ$ W方向に 70 ± 61 mm/年である（図4）。TOA観測点における速度ベクトルはMORVEL(DeMets et al., 2010; 2011)に基づくフィリピン海プレート（PH）の運動と概ね一致しており、この観測点が伊豆マイクロプレート（IZM）とPHとの境界のやや南東側、すなわちPH側に位置することと調和的であるが、この周辺にはPHの内部変形を示唆する複数の構造の不連続があることから、さらに検討する必要がある。また、TCAにおいてはMORVELによるアムールプレートに対するフィリピン海プレートの相対運動速度に対して2/3程度の速度である点は興味深い。ただし、3観測点とも推定速度の誤差が大きいため、より精度の高い地殻変動の検出のためには継続して観測する必要がある（名古屋大学〔課題番号：NGY_04〕）。

南西諸島海溝沿いでは、沖縄本島から宮古島の間、海溝軸付近のプレート境界深度10 km弱の海底に地殻変動観測点RKCとRKDを2016年9月に設置し、本年までに2-3回の観測を実施して、変位速度を推定した。暫定的な変位速度ベクトルは、沖縄本島及び宮古島付近を固定した場合、RKCでは $N172^\circ$ W方向に21 mm/年、RKDでは $N136^\circ$ E方向に41 mm/年であった（図5）。ともに変位速度ベクトルは海洋プレートの沈み込み方向を向いておらず、現時点では当該海域においてプレート間固着を示す積極的な証拠は得られていない（名古屋大学〔課題番号：NGY_02〕）。超低周波地震の検知能力が低かった沖縄本島-宮古島間において、防災科学技術研究所のF-net観測点および地震予知総合研究振興会による5か所の臨時観測点で収録された上下動波形を用いて超低周波地震の震央決定を行った。解析期間は2015年6月～2019年12月である。その結果、宮古海峡ではプレート境界深さ10～15 kmの範囲に超低周波地震がスポット的に発生する一方、沖縄本島南東海域では、SSEの発生域（Nishimura, 2014）と固着域（Tadokoro et al., 2018）の隙間に沿ってプレート境界深さ12～15 kmの範囲に帯状に発生していることが明らかになった。両海域と

もに超低周波地震の発生域と低角逆断層型地震の発生域は相補的であり、南西諸島海溝沿いにおけるプレート間の摩擦状態の不均質性を示していると考えられる（名古屋大学〔課題番号：NGY_02〕）。

イ．内陸地震の長期予測

測地データから内陸（地殻内）地震の発生ポテンシャルを評価するために、前年度までに構築した西日本の確率予測モデルの再検討及び再評価を行なった。ひずみ速度の推定において空間平滑化をABICで最適化する手法（Okazaki et al., 2021）を用い、地震発生層の厚さと剛性率については、先行研究に基づき場所によって変化するモデルと一律に12 km、30 GPaとするモデルの2種類のモデル（図6 a、b）を試作し、用いるひずみ速度の成分についても先行研究により提案されている3種類を用いて、どのモデルが過去の地震活動（図6 c、d）と最も整合的であるかを複数の統計量を用いて評価した。ひずみ速度成分については、水平方向の主ひずみ速度（2成分）と面積歪み速度のそれぞれ絶対値のうち最大のものを用いるモデルが、過去の地震活動をもっともうまく説明するが、地震発生層の厚さと剛性率については一様なモデルと可変のモデルで大きな差は見られないことがわかった（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI05〕）。

地震活動を用いた長期予測手法の高度化のため、階層型時空間ETAS (HIST-ETAS) モデルの背景強度と関連する時空間ポアソン過程モデルを使って、日本列島の内陸大地震に対する長期時空間確率予測を行い（図7）、その結果を対数尤度比スコア（情報利得）で評価した（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI05〕）。

2011年東北地方太平洋沖地震（以下「東北沖地震」という。）後10年間の粘弾性緩和に伴う地震活動の評価のために、東北沖地震の地震時・余効すべり分布に千島海溝の固着など広域のプレート境界過程を含めたモデル計算を行い、東北地方陸域および日本海沿岸域の震源断層にかかる応力を計算した。東北沖地震の影響は東北地方から、新潟、北陸地方にかけて、数十年程度残ることを示した。この地域の多くの震源断層においては、東北沖地震により震源断層の活動は抑制されるが、特に東北地方北部では千島海溝の固着の効果が無視できない。なお、福島県の沿岸部の断層については、周囲の断層と異なる挙動を示すという結果になった（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_11〕）。

物理モデルと観測データの統合による地震規模を含む動的破壊過程予測手法および地震繰り返し過程（サイクル）予測手法の開発と検証のために、計算手法開発とモデルの検証を行った。動的破壊シミュレーションについては、前年度から引き続き、断層形状の複雑性が詳細に観測されている2016年カイクウラ（ニュージーランド）地震を対象として応力蓄積履歴の効果、断層形状の小スケールでの非平面性の効果を検証した。特に、2016年に連動破壊しなかった本地域の主要活断層であるHope断層の挙動に注目し、最近構築された断層形状モデルを取り入れて、Hope断層の応力状態を広域応力場で与えられるものから一様に減じる効果を応力蓄積率パラメタとして導入した。その結果、応力比の大小にかかわらず、応力蓄積率が約70%以下の場合、Hope断層が連動破壊しないことが分かった。古地震学的調査の最新の成果（Hartem et al., 2019など）を踏まえると、Hope断層は、2016年時点で前回のイベントから176-285年経過しており、応力蓄積率を決める地震後時間経過率は57-160%と見積もられる。古地震履歴研究による地震後経過率は誤差

が大きい、応力蓄積率の低さがHope断層の連動しなかった要因であるというシナリオも許容される（東京大学理学系研究科〔課題番号：UTS_05〕）。

（２）地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア．プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

2020-2021年にかけて発生した南海トラフ浅部SSEについて、海底地殻変動連続観測データの解析を行うとともに、それに伴うDONET広帯域地震計でのVLFEの解析を行って、プレート境界でのすべりであることを確認するとともに、時空間変化の詳細を明らかにした（Yamamoto et al., 2022、海洋研究開発機構〔課題番号：JAMS01〕）。さらに、浅部SSEの解析精度を高めるとともにSSEの発生時期と黒潮による応力変化との関係を見出した（Ariyoshi et al., 2021、海洋研究開発機構〔課題番号：JAMS01〕）。

Suito(2017)、水藤(2017)の成果に基づいて、東北沖地震、熊本地震の余効変動を補正し、Takagi et al. (2019)の領域分けを参考にして定常変動を地殻変動データから差し引き、南海トラフ域のスロースリップ（SSE）を調べた（図8）。その結果、2019年初めころの豊後水道、四国中部、紀伊水道のSSEの時空間変化を推定できた。また、2020年半ば頃からの日向灘南部のSSEや2019年種子島地震（M6.4）の余効滑りが検出された。さらに2020年半ば頃から日向灘北部でSSEが発生している可能性が示された（国土地理院〔課題番号：GSI_02〕）。

イ．地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

大地震直後の余震による地震波形記録に極値統計解析を実施し、解析観測点における最大振幅の将来予測を行う手法を開発した。2008年岩手・宮城内陸地震にこの手法を適用した結果、本震後3時間以内の波形記録を用いた予測により、4日後までの余震による最大振幅を高い精度で推定することができた。この手法には、データの質が地震波の重なり合いの影響を受けにくい、マグニチュードではなく揺れの予測を行える等、地震カタログを用いた従来法にはないメリットがあり、余震活動の早期予測に向けて重要な進展をもたらすと考えられる（Sawazaki et al., 2021、防災科学技術研究所〔課題番号：NIED02〕）。

5. 研究を推進するための体制の整備

（３）研究基盤の開発・整備

イ．観測・解析技術の開発

愛知県豊橋市にある名古屋大学三河観測所では、P波を効率的に発震できる新型の震源装置を1年間あまり連続稼働し、主として名大三河（震央距離200 m）で記録された信号を用いてP波速度（ V_p ）とS波速度（ V_s ）の変化の同時測定を行った。 V_p と V_s の変化をO' Connel & Budiansky [1974]の結果を用いてクラック密度と飽和度で解釈したところ、乾燥時のクラック密度と飽和度の減少、降雨時のクラック密度と飽和度の上昇がACROSS信号の解析からモニターできることが明らかになった（Suzuki et al., 2021、名古屋大学〔課題番号：NGY_04〕）。

東北地方太平洋沖ではS-netデータを用いた高精度震源決定技術の開発を行った。S-net観測点に対し、構造探査により推定した堆積層厚から求めた観測点補正値を適用するとともに、簡易的な三次元速度構造を用いた震源決定を行ったところ、従来の震源カタログで見られた震源のばらつきが低下し、太平洋プレートの沈み込みや起震断層の分布が明確化した。また、AQUAシステムにS-netデータを取り込んだところ、規模や発震機構の推定結果に大きな変化は無かったものの、セントロイド深さはより正確に求まることが明らかになった。東北地方太平洋沖で令和2年度末から発生した主なイベントのすべり分布推定を実施し、過去に発生した宮城県沖の地震との対比を行った。南海トラフ域においては、三次元地下構造に基づくCMT解析手法の自動処理システムを開発するとともに、試験運用を通じてシステムの改修を行った。本システムにより、南海トラフ域で発生した中規模以上の地震の発生層特定の精度が向上した（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED02〕）。

これまでの課題と今後の展望

3年目を迎える本計画において「地震（長期予測）」計画推進部会に所属する各課題では、新型コロナウイルス感染症が長期化しているため、前年度に引き続き特にフィールドでの調査が大きく制限され、複数の課題において研究計画の進捗に影響が見られるいが、成果は着実に挙がっている。糸静線や中央構造線での活断層調査によって明らかになった地震の発生履歴からは、地震の再来間隔や滑り量がイベント毎にかなり異なることが示され、従来の固有地震的な長期予測モデルでは不十分であることが明らかになった。過去の地震の発生履歴に関する更なる調査が必要なのはもちろん、断層のセグメンテーション、地震規模、再来間隔などの多様性を考慮したモデルの構築が望まれる。また、南海トラフ周辺や南西諸島域における海底地殻変動観測によって数年スケールでの変位速度ベクトルが推定され、数十から百km程度の距離でも変動方向やその速度が大きく異なることが明らかになりつつある。これらはプレート境界断層の固着分布の不均質性を反映しており、海溝型地震の発生ポテンシャルを明らかにするためには、観測回数を増やして速度の推定精度を高めるだけでなく、観測地点も大きく増やす必要がある。

海域や島嶼部の地震・地殻変動観測網のデータを用いたモニタリング技術の高度化は着実に進展しており、震源決定やメカニズム解推定、津波の波源推定の高度化が着実に行われた。プレート境界断層におけるスロー地震のモニタリングについては、地殻変動観測において水圧計などの海底観測のデータが広く用いられるようになり、特にプレート境界浅部で発生するSSEの分布や超低周波地震と他のスロー地震や通常地震の棲み分けが明らかになりつつある。今後はこのような情報を海溝型地震のポテンシャル評価に繋げていく研究が望まれる。

GNSSによって観測された地殻変動データから計算された内陸地震の予測モデルについては、そのモデルの改良が行われ、歴史地震との比較からその予測性能の定量的評価が行われた。また、ETASモデルを用いた内陸の背景地震活動度を用いた予測についても定量的評価が行われ、いずれのモデルも予測性能が実証されつつある。今後は、さらに実用化に向けた研究が進められるとともに、従来から地震本部で行われている活断層評価に基づく予測との融合についても進めていくことが期待される。

成果リスト

- Ariyoshi, K., T. Kimura, Y. Miyazawa, S. Varlamov, T. Iinuma, A. Nagano, J. Gomberg, E. Araki, T. Miyama, K. Sueki, S. Yada, T. Hori, N. Takahashi, and S. Kodaira, 2021, Precise Monitoring of Pore Pressure at Boreholes Around Nankai Trough Toward Early Detecting Crustal Deformation, *Front. Earth Sci.*, 9, doi:10.3389/feart.2021.717696.
- Bellanova, P., M. Frenken, Y. Nishimura, J. Schwarzbauer, K. Reicherter, 2021, Tracing woody-organic tsunami deposits of the 2011 Tohoku-oki event in Misawa (Japan), *Scientific Report*, 11, 8947, doi:10.1038/s41598-021-88199-3.
- Chiba, T., Y. Nishimura, Y. Yanagisawa, 2021, Distinguishing reworked diatoms derived from Neogene marine strata in modern coastal assemblages for understanding taphonomic processes and reconstructing Holocene paleoenvironments in the Tokachi coastal area, Hokkaido, Japan, *Marine Micropaleontology*, 164, 101970, doi:10.1016/j.marmicro.2021.101970.
- Dhakal, Y. P., T. Kunugi, W. Suzuki, T. Kimura, N. Morikawa, and S. Aoi, 2021, Strong motions on land and ocean bottom: Comparison of horizontal PGA, PGV, and 5% damped acceleration response spectra in Northeast Japan and the Japan Trench area, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 111, 3237-3260, doi:10.1785/0120200368.
- Fukao, Y., T. Kubota, H. Sugioka, A. Ito, T. Tonegawa, H. Shiobara, M. Yamashita, and T. Saito, 2021, Detection of "rapid" aseismic slip at the Izu-Bonin Trench, *J. Geophys. Res.*, 126, e2021JB022132, doi:10.1029/2021JB022132.
- 加納靖之, 2021, 地震の歴史をまなび伝えるー同和火災コレクションと歴史地震研究の交流ー, 京都文化博物館(編)「伝えるー災害の記憶あいおいニッセイ同和損保所蔵災害資料」, NHK サービスセンター, 22-130.
- Kubota, T., T. Saito, H. Tsushima, R. Hino, Y. Ohta, S. Suzuki, and D. Inazu, 2021, Extracting near-field seismograms from ocean-bottom pressure gauge inside the focal area: application to the 2011 Mw 9.1 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2020GL091664, doi:10.1029/2020GL091664.
- Kubota, T., H. Kubo, K. Yoshida, N. Y. Chikasada, W. Suzuki, T. Nakamura, and H. Tsushima, 2021, Improving the constraint on the Mw 7.1 2016 off-Fukushima shallow normal-faulting earthquake with the high azimuthal coverage tsunami data from the S-net wide and dense network: Implication for the stress regime in the Tohoku overriding plate, *J. Geophys. Res.*, 126, e2021JB022223, doi:10.1029/2021JB022223.
- Kubota, T., T. Saito, Y. Fukao, H. Sugioka, A. Ito, T. Tonegawa, H. Shiobara, and M. Yamashita, 2021, Earthquake rupture and tsunami generation of the 2015 Mw 5.9 Bonin event revealed by in situ pressure gauge array observations and integrated seismic and tsunami wave simulation, *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL095915, doi:10.1029/2021GL095915.

- Matsubara, M., K. Shiomi, K. Baba, H. Sato, and T. Nishimiya, 2021, Improved geometry of the subducting Philippine Sea plate beneath the Suruga Trough, *Glob. Planet. Change*, 204, 103562, doi:10.1016/j.gloplacha.2021.103562.
- Minamidate, K., Goto, K., Kan, H., 2022, Numerical estimation of maximum possible sizes of paleo-earthquakes and tsunamis from storm-derived boulders, *Earth and Planetary Science Letters*, 579, 117354, doi:10.1016/j.epsl.2021.117354.
- 文部科学省研究開発局・国立研究開発法人産業技術総合研究所, 2021, 連動型地震の発生予測のための活断層調査研究, 令和2年度成果報告書, 91
- 西澤あずさ・植平賢司・望月将志, 2022, マルチチャネル反射法地震探査から推定された S-net 観測点下の堆積層分布及び堆積層補正を用いた震源決定例, 防災科学技術研究所研究資料, 471, 1-18
- Noda, A., T. Saito, E. Fukuyama and Y. Urata, 2021, Energy-based scenarios for great thrust-type earthquakes in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan, using an interseismic slip-deficit model, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2020JB020417, doi:10.1029/2020JB020417
- 大邑潤三, 2021, 同和火災コレクション成立の背景とその来歴, 京都文化博物館(編)「伝える—災害の記憶あいおいニッセイ同和損保所蔵災害資料」, NHK サービスセンター, 132-141
- Ogata, Y., 2021, Visualizing heterogeneities of earthquake hypocenter catalogs: modeling, analysis, and compensation, *Progress in Earth and Planetary Science*, 8, 8, doi:10.1186/s40645-020-00401-8.
- Ogata Y., K. Katsura, M. Tanemura, D. Harte and J. Zhuang, 2021, Hierarchical Space-Time Point-Process Models (HIST-PPM), *Computer Science Monographs*, The Institute of Statistical Mathematics, No. 35
- 尾形良彦, 2021, 階層的時空間 ETAS モデルに基づく短期・中期・長期予測および背景率予測 — 自動予測の開発に向けて —, 地震予知連絡会会報, 105, 493-499
- 小沢慎三郎・宗包浩志, 2022, 広域地殻変動データに基づくプレート境界の固着とすべりの時間変化に関する研究, 国土地理院調査研究年報 (令和3年度)
- Sawazaki, K., 2021, Early forecast of maximum amplitude due to aftershocks by applying extreme value statistics to a single continuous seismogram, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 111, 2825-2845, doi:10.1785/0120200365
- Suzuki, T., K. Yamaoka, S. Tsuji, and T. Watanabe, 2021, Ground water-induced changes in velocities of P and S waves (V_p and V_s) measured using an accurately controlled seismic source, *Earth Planets Space*, 73, 152, doi:10.1186/s40623-021-01484-3.
- Tsuji, S., K. Yamaoka, and T. Ikuta, 2022, Temporal change in seismic wave attenuation using highly-stable vibration sources, *Earth Planets Space*, 74, 15, doi:10.1186/s40623-022-01570-0.
- Yamamoto, Y., K. Ariyoshi, S. Yada, M. Nakano and T. Hori, 2022, Spatio-temporal distribution of shallow very-low-frequency earthquakes between December 2020 and January 2021 in Kumano-nada, Nankai subduction zone, detected by a permanent

seafloor seismic network, *Earth Planets Space*, 74, 14, doi:10.1186/s40623-022-01573-x.

Yamashita, F., E. Fukuyama, S. Xu, H. Kawakata, K. Mizoguchi, and S. Takizawa, 2021, Two end-member earthquake preparations illuminated by foreshock activity on a meter-scale laboratory fault, *Nature Communications*, 12 (1), 4302, doi:10.1038/s41467-021-24625-4.

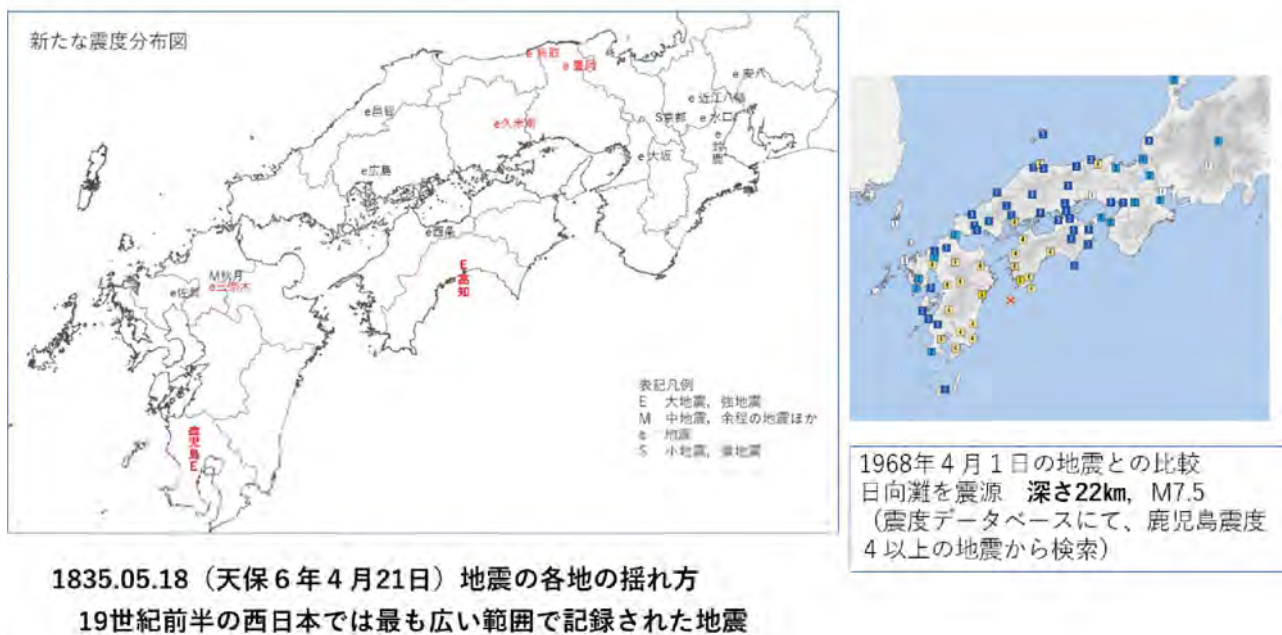
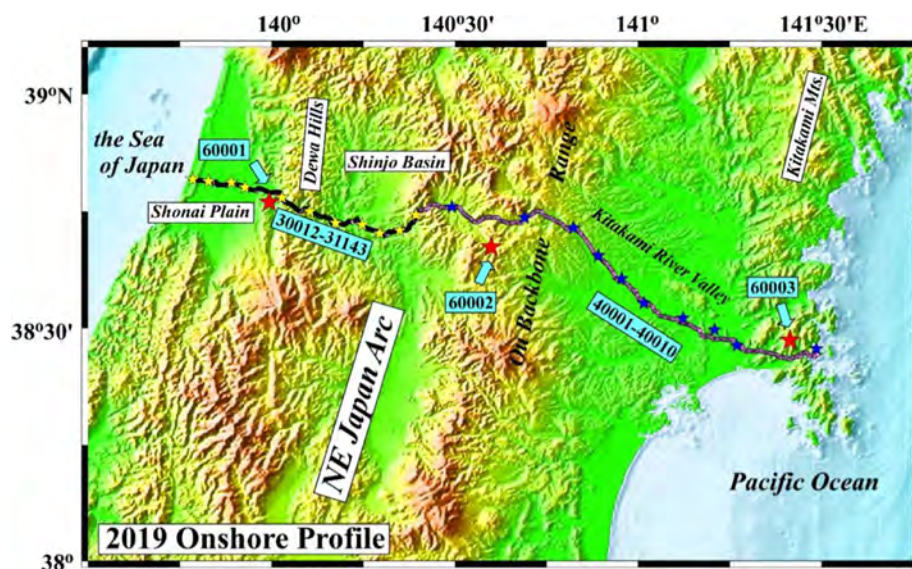


図1．1835年5月地震の震度分布。西日本の各地の揺れ方（左）に類似した震度分布を気象庁震度データベースで検索すると、1968年4月の日向灘地震（右）と類似している（東京大学地震火山史料連携研究機構〔課題番号：HMEV02〕）。

(a)



(b)

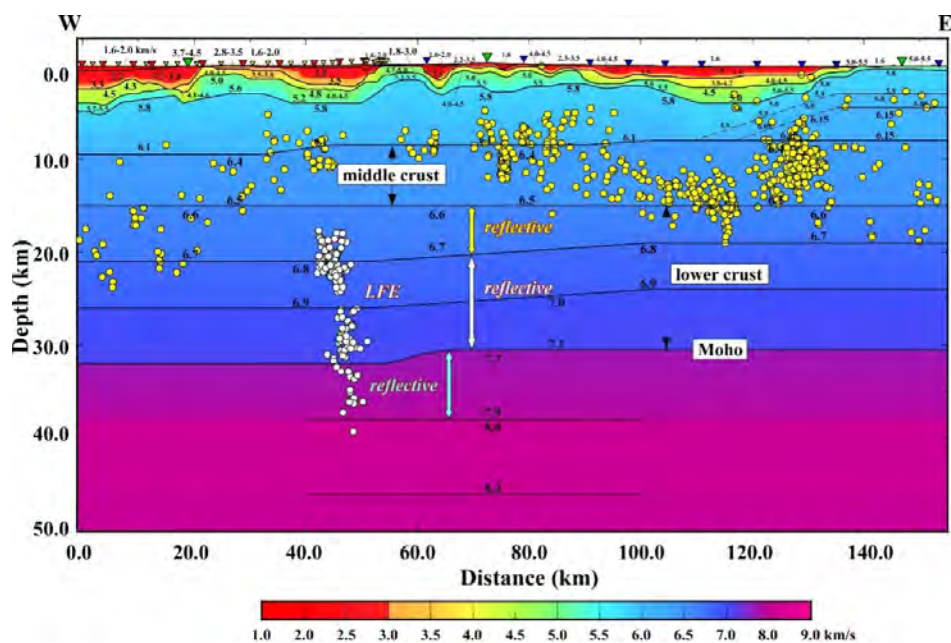


図2. 東北日本を横断する構造探査(令和元年度実施)の陸域部の測線と地殻・最上部マントルの速度構造モデル(東京大学地震研究所〔課題番号: ERI_11〕)。(a)測線図。ダイナマイト発震点と震源車による多重発震点をそれぞれ赤と黄・青の星印で示した。(b)地殻・最上部マントルの速度構造。黄丸及び白丸は、気象庁一元化震源(2010-2019)に基づく地殻内地震と低周波地震である。

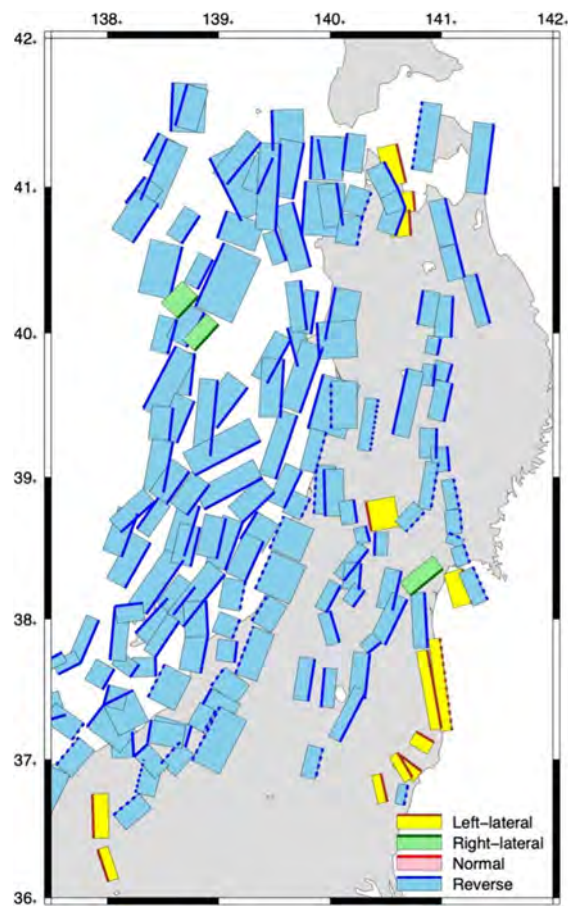


図 3．東北日本と日本海東縁の震源断層の矩形モデル（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_11〕）。矩形は震源断層、太線は断層の上端、破線は断層面の上端の伏在を示す。断層のタイプ（すべり角）は、広域応力場（Terakawa and Matsu'ura, 2010）から求めた。

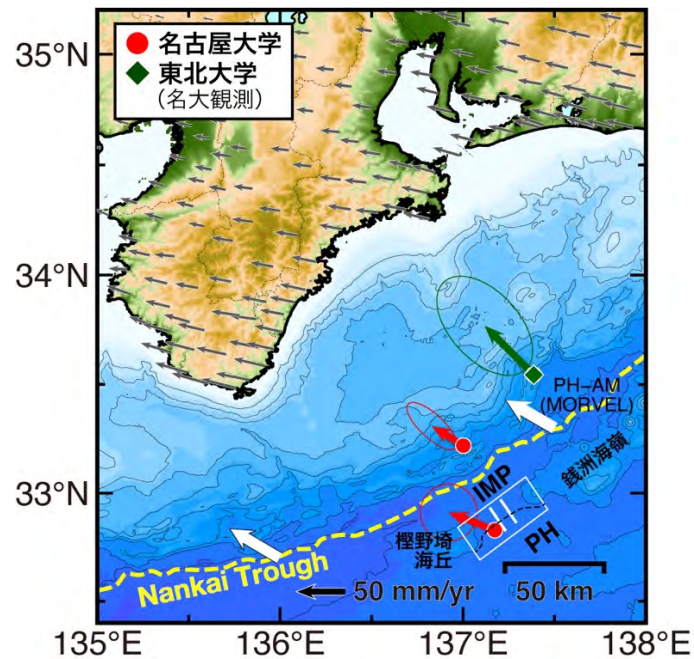


図 4．南海トラフ沿い熊野灘における海底地殻変動観測点における変位速度（名古屋大学〔課題番号：NGY_04〕）。赤及び緑矢印は海底地殻変動観測点におけるアムールプレートに対する相対運動速度を表す。白矢印は MORVEL によるアムールプレートに対するフィリピン海プレートの相対運動を表す。変動地形学的見地から明らかとなった伊豆マイクロプレートとフィリピン海プレートとの境界を黒色の破線で示す。

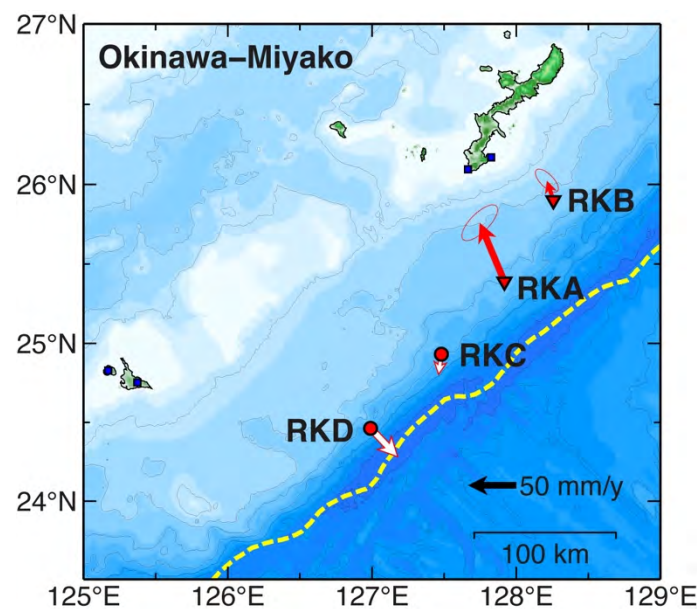


図 5．南西諸島海溝沿いにおける海底地殻変動観測点における変位速度（暫定）（名古屋大学〔課題番号：NGY_02〕）。海底観測点の変位速度は、沖縄本島及び宮古島の 4 か所の GEONET 観測点（青四角）における変位速度の平均を各海底地殻変動観測点での変位速度から差し引いて表示した。Tadokoro et al. [2018] による RKA 観測点での変位速度も併せて示す。

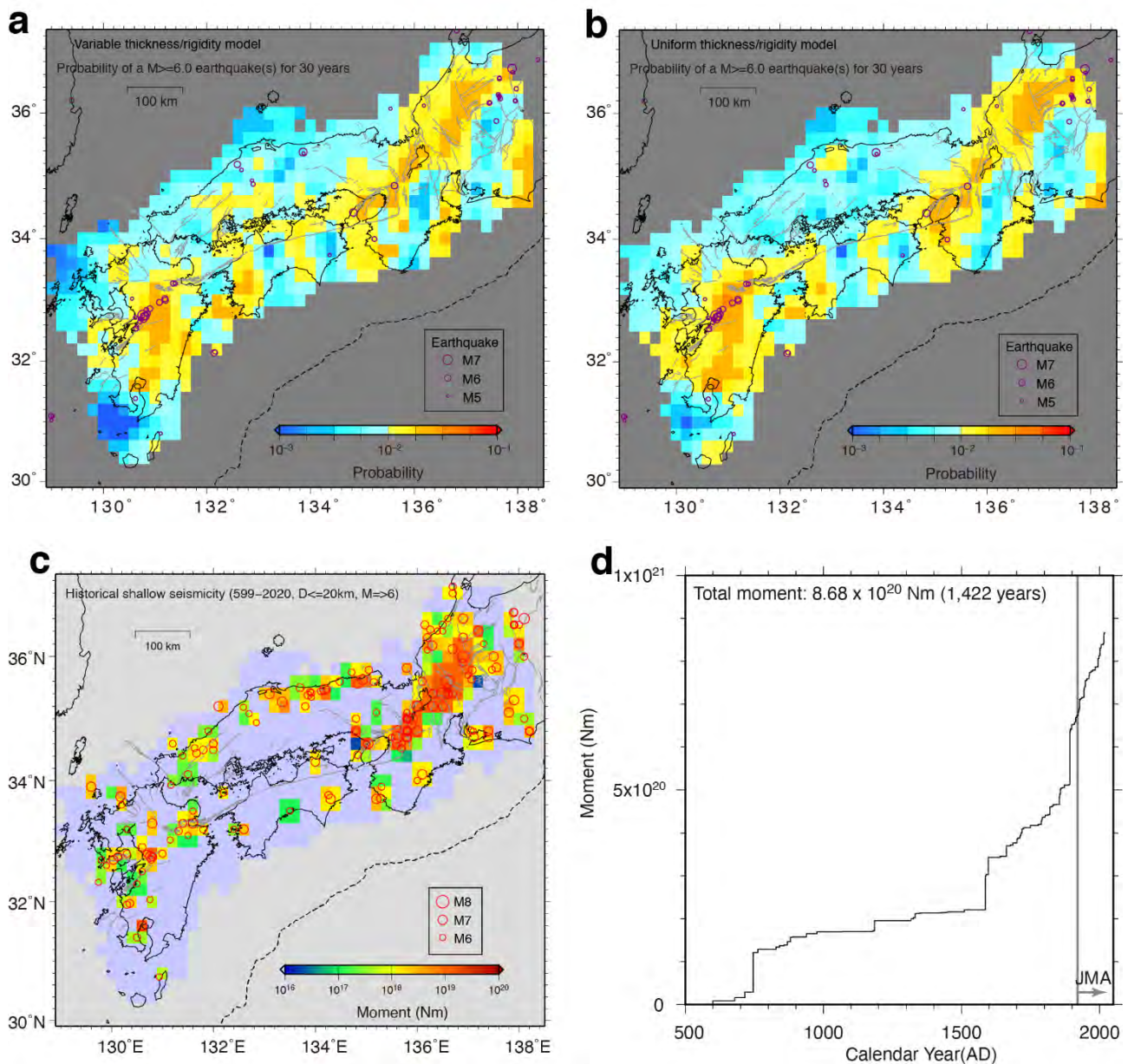


図 6．西日本のGNSSデータに基づく30年間にM6.0以上の内陸地震が発生する確率の試算例（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI05〕）。(a)地震発生層の厚さと剛性率を場所によって変化させたモデル。カラスケールは、 0.2° 毎のグリッドにおける発生確率を表す。(b)地震発生層の厚さと剛性率を一様としたモデル。(c)西暦599年から2020年までの地殻内地震の震央と 0.2° 毎のグリッドにおける地震モーメント分布。(d)(c)に示した地殻内地震の地震モーメントの時間発展。

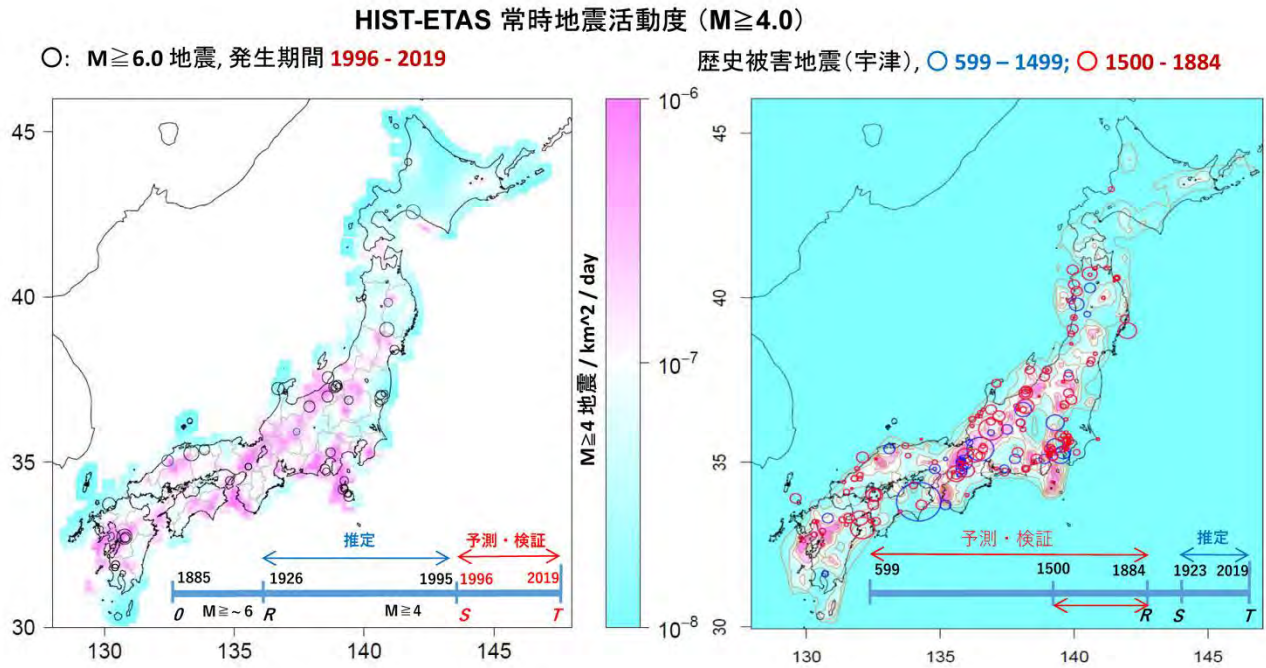


図 7. HIST-ETASモデルによって推定された常時地震活動度と大地震の分布の比較（京都大学防災研究所〔課題番号: DPRI05〕）。カースケールは常時地震活動度を表す。常時地震活動度の推定に用いた期間と表示した大地震のの期間を図中に示す。

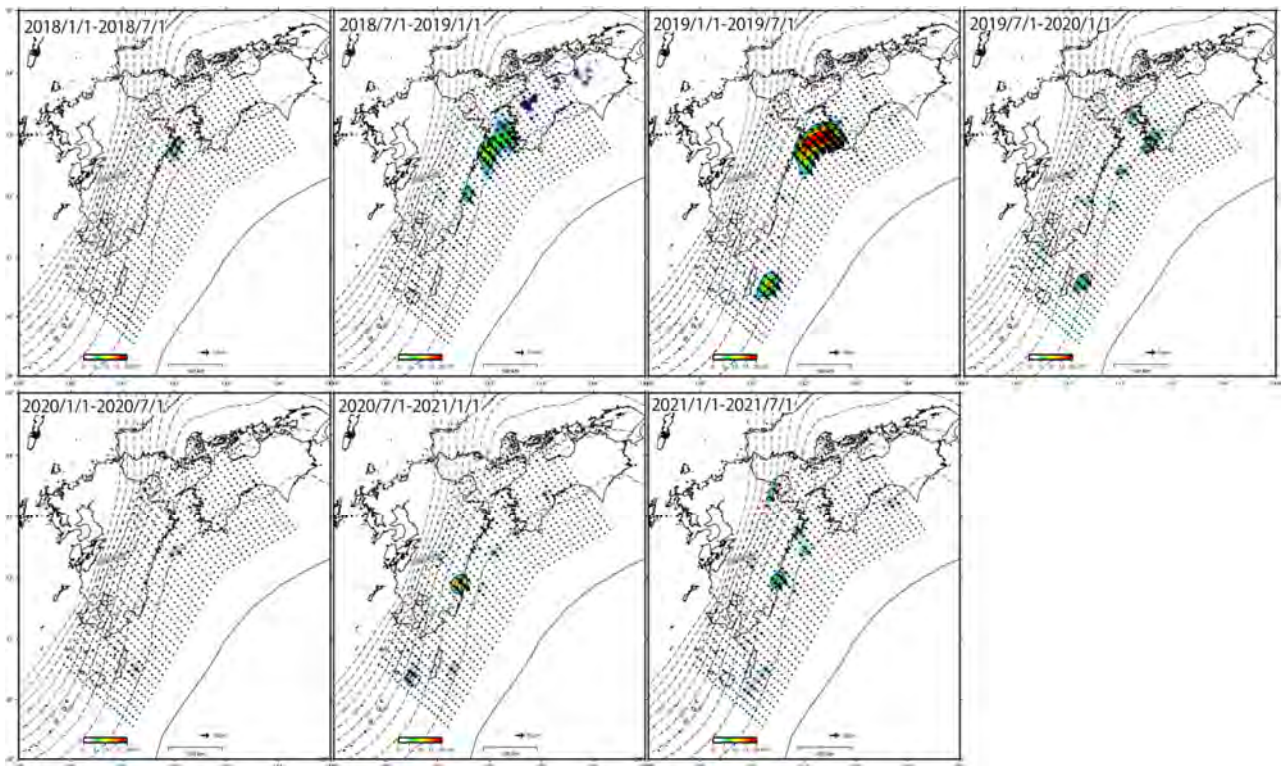


図 8. 四国西部から九州にかけての非定常地殻変動から推定したプレート境界滑り（国土地理院〔課題番号: GSI_02〕）。

1 (3) 地震 (中短期予測)

「地震 (中短期予測)」計画推進部会長 中谷正生

(東京大学地震研究所)

副部会長 内田直希

(東北大学大学院理学研究科)

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

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

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

○繰り返し地震

繰り返し地震 (相似地震) は、プレート境界・断層の滑りを監視するすぐれた方法である。今年度、日本の地震観測網 (1340局) で捉えられた1989年9月15日から2016年2月29日までの世界個の地震 (M4.5以上震央距離90° 以内の37,341個、震源情報はUSGSのカタログによる) の波形相関を調べたところ、1125系列、3579イベントの相似地震が検出された。相似地震の発生状況からNadeau and Jonson (1998) の経験則を用いて推定したプレート境界の背景滑り速度を、それぞれの地域でのメガスラスト地震 (Mw8.3以上) サイクルでの経過時間に対してプロットしたところ、メガスラスト地震の直後10年程度は、プレート収束速度の10倍から1倍程度に減衰する余効滑りが支配的で、一方、30年以降はプレート収束速度の20%程度から徐々に加速する傾向がみられた。ただし、これは相似地震の見つかった場所についてのだけの結果であって、強く固着して相似地震が見られないような時空間の情報は含まれていない (図1、東北大学理学研究科 [課題番号: THK09]、Igarashi and Kato, 2021)。

繰り返し地震は内陸でも発生している。今年度は、2016年熊本地震の震源域周辺で発生した地震 (Mj1.5~4.5) を対象に、2016年4月14日から約2年間の期間において4つ以上の相似地震候補をもつ地震群に対して震源再決定を行い、11組の相似地震を検出した。これらの相似地震の組は全て2つの地震から構成されている。相似地震は日奈久断層帯の震源域とその南西延長部の余震域に分布するが、布田川断層帯の震源域では相似地震は検出されなかった (図2)。日奈久断層帯の震源域の相似地震はAsano and Iwata (2016) によるすべり量の小さな領域に位置しており、先行研究と同様にアスペリティの位置とは相補的な関係が見られた。余震域での相似地震からSomerville et al. (1999) のスケ

リーング則を用いて推定されたすべり速度はHashimoto (2020)で測地学的に観測されたすべり速度と調和的であった。一方、Nadeau and Johnson (1998)のスケリーング則を用いると過大な滑り速度が推定された(東北大学理学研究科[課題番号:THK09]、森・平松, 2021)。

○深部スロー地震

南海トラフでおきる長期的・短期的なスロースリップ・イベント(SSE)については、GNSS、地下水、歪み、傾斜の定常観測データから準リアルタイムで自動検出と滑り量推定を行っている。産業技術総合研究所・防災科学技術研究所・気象庁の3機関はひずみ・地下水・傾斜データをリアルタイムで共有して解析するシステムを運用しており、2020年11月-2021年10月までの1年間では、SSE30個の震源断層が決定された(図3)。2011年9月の運用開始以来の総計は10年2ヶ月で308イベントになる(産業技術総合研究所[課題番号:AIST09]、気象庁[課題番号:JMA_01]、矢部・他, 2021, 2022)。

GNSSによる検出に関しては、今年度、長期的SSEの客観検知処理の対象地域を日向灘沿いを含めるように拡張した(気象庁[課題番号:JMA_01])。また、GNSS時系列データから短期的SSEを自動的に検出する新たな手法を開発し、1997-2020年の東海～九州地域に適用して284イベントを検出した。この中には、九州沖合での超低周波地震や繰り返し地震活動に同期したSSEといった、これまで見い出されていなかった活動もある。また、SSEの平均すべり速度が、四国西部では四国東部や九州に比べ、おおよそ倍程度大きいという特徴も見い出された(図4、東京大学地震研究所[課題番号:ERI_12]、Okada et al., 2022)

一方、テンプレートを使わずに連続波形からLFEを自動検出するBackTrackBB法(Poiata et al., 2016, 2018; 連続波形から特徴関数として周波数依存のKurtosisを求め、その観測点間でのcoherencyに基づいてイベント検出と位置推定を実施)によって、Hi-net波形から四国の深部LFEカタログを構築した。その時空間的分布や挙動は非常に複雑でかつ不均質であり、沈み込むプレートの構造や応力集中、流体分布の複雑さを反映する可能性がある(図5、東京大学地震研究所[課題番号:ERI12]、Poiata et al., 2021)。

Mw3程度以下のSSEは存在しても、現状の測地技術では観測する手段はないと考えられている。そこで、南海トラフの深部微動やLFEのカタログを用い、これらのイベントのクラスタが小さなSSEであると見做してスケリーング則を探ることを試みた。2004年4月から2013年3月までのIdehara et al. (2014)による82, 275個の微動(継続時間10-300秒)とJMAによる約20, 000個のLFEから、Mw0.5-2相当のクラスタ約900個を見い出した。すべり域形状は等方的であること、滑り域面積とモーメントの関係は応力降下量一定を示すこと、イベント継続時間は普通の地震とスロー地震の間であること、クラスタ内のイベント間の伝播はdip方向であることが多く、その伝播速度は数十km/時で、10km/日程度であるクラスタ全体での伝播速度よりも速いこと、などが見い出された(図6、東京大学地震研究所[課題番号:ERI12]、Aiken and Obara, 2021)。一方、微動は通常の地震と規模別頻度分布が異なることが知られているが、南海トラフ震源域の深部延長で起きている微動の規模(地震モーメント)分布に対し、従来から用いられているベキ分布や指数分布を混合することで適合度がある程度改善されることを示した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI13]、岩田・平松, 2021)。

○浅部スロー地震

プレート境界浅部のSSEについては、近くの海底に設置された孔内間隙水圧計に変動が現れることが示されている(Araki et al., 2017)。今年度は、間隙水圧記録の補正に近傍のDONETの海底水圧記録を活用することで孔内の体積歪の精度向上を図った。これにより潮汐によるノイズを従来の1/4~1/2以下に軽減、2020年3月に発生したSSEから20 km以上離れた南海トラフ軸直近で発生したSSEによるわずか10ナノストレインの体積歪変化を直接捉えることに成功した(図7)。さらに、最新の海中天気予報(JCOPE-TDA)を活用して気象・海象擾乱による海底圧力変化を解析した結果、南海トラフ沿いで繰り返し発生している浅部SSEが黒潮蛇行に伴う海洋擾乱の影響を受けている可能性を示した(東北大学理学研究科[課題番号: THK09]、Ariyoshi et al., 2021)。

また、浅部LFEの検出および震源決定について、DONETを活用した最大振幅とエンベロープ相関を用いたハイブリッド法による新たな手法を開発した(図8、気象庁[課題番号: JMA01]、溜渕・小木曾, 2021b)。また、日本周辺以外で浅部VLFEの存在が確認されているコスタリカにおいて実施された機動的広帯域地震観測データを解析し、2004年7月から2006年1月までの間に70個弱の浅部VLFEを検出した。その活動域は大地震震源域の浅部延長の海溝近くで、過去に発生したSSEのすべり域と調和的である(図9)。これらのVLFEに伴う微動シグナルを検出し、両者の比であるスケールドエネルギーを評価したところ、南海トラフの浅部スロー地震とほぼ同様であった(東京大学地震研究所[課題番号: ERI12]、Baba et al., 2021)。

○スロー地震と構造の関係

プレート間固着の時間変化を推定し、その発展を予測するためには、プレート境界周辺の構造、物性や応力を知ることも重要である。令和元年に科研費・新学術領域研究「スロー地震学」によって四国西部で取得した制御震源地殻構造探査データと、それ以前に取得されていた制御震源地殻構造探査データとを統合したデータに対して2次元波線追跡法および反射法解析を適用して、島弧地殻や沈み込むフィリピン海プレートの形状を得た(Kurashimo et al., 2021a)。四国西部下の島弧モホ面は25-30 kmの深さに位置し、北傾斜の沈み込むフィリピン海プレート上面は、深さ25-33 km付近に位置している。深部低周波微動発生域の南端は、島弧下のマントルウエッジが確認できる南端と良い一致を示している。さらに、四国東部での構造解明のための臨時稠密地震観測(図10)を開始した(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_12])。

透水性の低い半遠洋性の泥岩層が沈み込む室戸岬沖南海トラフでは、浅部スロー地震が見られる。このことは、同地域のマルチチャンネル地震波探査によって求められたP波速度から推定される浅部デコルマの高間隙水圧(Tobin and Saffer, 2009)と調和的である。今年度は、これまで浅部スロー地震が殆ど報告されていない潮岬沖南海トラフでJAMSTECが2011年に取得した探査データ(測線KI01)に対して、Tobin and Saffer (2009)と同様の解析を行った。潮岬沖ではデコルマに沿って透水性の高い砂岩層を含むタービダイトが沈み込んでおり、海溝軸からdowndip側へ13 kmまでの浅部においては、室戸沖

に比べて過剰間隙水圧比が低く鉛直有効応力が高いことがわかった。これは、潮岬沖では浅部VLFEがないこと(Takemura et al., 2019)、固着が強いこと(Noda et al., 2018)と調和的である(図11、東京大学地震研究所[課題番号:ERI12]、Yu et al., 2021)。

一方、日本海溝沈み込み帯前弧海域において、S-netデータの常時微動記録を用いて、地震波干渉法による表面波トモグラフィーを行ったところ、微動に代表されるスロー地震は低速度異常域内に位置するのに対し、2011年東北沖地震や根室沖の巨大地震発生が予想される領域は高速度異常域に対応することが明らかになった(図12、東京大学地震研究所[課題番号:ERI_12]、Takagi and Nishida, 2021)。

○断層滑りのデータ同化

観測データから、プレート境界の滑り履歴と摩擦特性を同時に推定するデータ同化は、原理的には、そのまま今後の滑り予測にも使えるはずである。本年度は、安定滑り領域の中に地震発生領域とSSE発生領域が近接して存在する数値モデル(平面断層にaging lawを仮定)を用いて、アジョイント法データ同化による予測能力を見定める実験を行った(田村, 2022)。(1) スロースリップ発生域の摩擦パラメータ b に異なる値を与え、アジョイント法によりこの b の値を推定する実験、および、(2) SSE発生域の状態変数の初期値 θ に異なる値を与え、アジョイント法により θ の初期値を推定する実験を行い、どちらの実験でも真の値に近い推定値が得られた。推定結果を用いたモデルで予測された地震発生の時期は、探索初期値を用いた予測より向上し、予測エラーは(1)で5~8日、(2)で50日であった(京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01])。

このようなデータ同化による予測を試みるのに適した地域である、およそ6ヶ月周期でSSEが繰り返す琉球海溝南西部八重山諸島においては、国土地理院の観測点に加えて、京都大学と九州大学がGNSS観測を2010年ごろから継続している。本年度は、これまでの10年間のGNSS時系列を基に定常変位速度を推定し、バックスリップモデルを用いてすべり欠損の空間分布を求め、八重山諸島の南側のプレート境界のすべり欠損レートが17-47 mm/yrであることが分かった。この領域はSSE発生域の浅部に相補的に位置し、プレート境界の摩擦特性などの物理的性質がプレートの傾斜方向に深さ変化していることが示唆される。同地域では1771年に津波被害をもたらす地震が発生しているが、以降250年間同様のすべり欠損レートで歪を蓄積していると仮定するとMw7.5に相当するエネルギーが蓄積されていることになる。一方、Nakamura (2009)で1771年の津波の波源域とされているプレート境界浅部のすべり欠損は陸域のGNSS観測からでは解明できないため、巨大地震発生ポテンシャルのより正確な評価には今後の海域観測の継続的な実施と観測点の拡充が必要である(図13、京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01]、Kano et al., 2021)。

観測データからシミュレーションのパラメータの最適値のみならず、その不確実性を明らかにするためには、逆問題を確率論的に定式化し、パラメータの事後確率分布を推定する必要がある。昨年度までに、パラメータ空間が比較的低次元の場合に適用可能な事後確率分布推定手法の構築を行ったが、この手法はパラメータ空間が高次元の場合、多数回のフォワード計算を行うことが必要になり、計算コストが大きい。今年度は、より少ない回数のフォワード計算に基づき事後確率分布を推定することができる手法の構築に向け、アンサンブルデータ同化手法の一部であるensemble smoother (ES)とiterative

ensemble smoother (IES)の事後確率分布推定能力を検討した。モデルが線形で事後確率分布がガウス分布の場合、これらの手法から同一の結果が得られ、それらは真の事後確率分布に一致した。一方、モデルが非線形の場合、ESから得られる結果は真の事後確率分布に一致せず、非線形性が強くなるほど真の分布からの乖離が大きくなる。IESを用いることによりESよりも良い推定結果が得られるが、非線形性が強くなるほど真の分布に近い推定結果を得るためには多数回の反復が必要であることが分かった。以上の結果から、非線形性の強いモデルに対する事後確率分布推定にはIESがより適していると考えられる(京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01]、Fukuda and Johnson, 2021a, 福田・Johnson, 2021b)。

○地震サイクル

プレート収束速度に対するプレート境界滑り速度の不足(滑り遅れ)によってプレート境界断層の剪断応力は増加してゆく。メガスラスト地震は、こうしてプレート境界周辺に蓄積された剪断応力を解放する現象である。南海トラフにおいて直近の数十年は、典型的なインターサイスミックの応力蓄積フェーズにあると考えられるので、本年度は、2005年3月から2011年2月の測地データから推定された南海トラフにおける滑り遅れレートの空間分布(Noda et al., 2018)をインターサイスミック期の剪断応力増加レートに焼き直し、過去の南海トラフ地震のアスペリティに蓄積された剪断応力を推定して、どのようなアスペリティの組合せによるメガスラスト地震が発生可能な状態であるかを評価する方法を提案した。地震発生が可能かどうかは、仮に蓄積された応力をリセットするような滑りが起きた場合に、解放される弾性エネルギーとそのときの滑り弱化過程で散逸するエネルギーのどちらが大きいかで判断した。自発的破壊のエネルギー的な必要条件に着目していることになる(図14、気象庁[課題番号:JMA01]、Noda et al., 2021)。

最近の観測・理論・実験的研究の成果をもとに、大地震の発生に至るプロセスの概念モデルを提案した。ダメージ蓄積、変形局所化(e.g., Ben-Zion and Zalliapin, 2020)に続く最終段階において、移動をとまなう前震活動やスロー地震による载荷が本震をトリガするというコンセプトを提示した。このプロセスはステップ的な時間進行を見せる傾向にあるため、大地震の精度の高い直前予測が困難な点についても言及した。(図15、東京大学地震研究所[課題番号:ERI12]、Kato and Ben-Zion, 2021)。また、2011年のM9東北地方太平洋沖地震について、その震源及び周辺域での様々なスロー地震の役割を含むレビューを出版した(図16、東京大学地震研究所[課題番号:ERI12]、東北大学理学研究科[課題番号:THK09]、Uchida and Burgman, 2021a,b)。

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

地震活動は20世紀前半からの網羅的観測データがあり、予測手法の検証・実践に関して格段のポテンシャルを有しているため活発な研究が続けられている。

○地震活動の異常度評価法

地震活動の異常度を定量的に評価する新たな手法の開発を目指して、2000年～2020年8月の日本全国の過去約20年間の地震活動の規模別頻度分布、潮汐相関に関する指標値

について、空間グリッドサイズ一定、解析震源数一定の機械的な解析を行い、各指標値の頻度分布の統計的性質に着目して全国的に他の活動と区別することができない“ふつう”の地震活動の特徴づけ、これを基準として異常度を定量化することを試みた（気象庁〔課題番号：JMA01〕、永田・他，2021a, b, c）。

○ETASと前震活動

現象的な相関としては前震活動の存在は疑うべくもないが、物理的な役割については、前震活動はその余震のうちの一つが偶々大きな地震にまで成長して本震と見做されただけであって、本震の物理的準備過程が存在することを示すものではないという考えも根強い。本年度、ETASモデルにおいて大きな余震が発生する確率を解析的に導いた一連の理論をまとめ、さらに、これまでに出版された「ETAS効果では説明できない本震」の存在を主張する主要な論文についての批判的見解をまとめた（Zhuang, 2021）。本物の前震が存在する可能性を完全に否定することはできないが、ETAS効果だけによっても大きな地震の短期的な予測を相当な確率ゲインをもって行うことができるのは確かであり、地震研では地震の発生確率を準リアルタイムで計算し地形図や任意の期間・深さ・規模の震央、活断層の地表トレースなど様々な情報と組みあわせて二次元の地図上に表示して対話的に図の拡大・縮小や表示した各要素の詳細情報へのアクセスができるGISによるマッピングツールの試作を行なっている。今年度は、日々更新される地震発生確率値及び震央データを自動的に取得し、ArcGISonline上の本マッピングツールに毎日定時に自動的に展開する機能を追加した。この機能追加により地震発生確率マップと震源分布等の情報が自動的に更新されるため、大地震後の余震活動や群発地震時における活動の推移を予測する上で本マッピングツールを利用して重要な知見が得られることが期待される（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕）。

上述のZhuang(2021)でも指摘されているようにETASモデルのパラメタ推定はデリケートであり、これを改善することは非常に重要である。特に大地震直後の欠測の影響は大きい。地震のマグニチュード分布は時間的に不変であるということだけを仮定して、欠測を補う方法を前計画で提案（Zhuang, 2017, 2020）した。今年度は、この手法を日本の内陸で最近発生した5つのM6.7-7.0の地震に適用した（Zheng et al., 2021）。いずれのケースでも、補完によって大森-宇津則のc値は非常に小さくなり、また、p値はいずれも1.1前後のせまい範囲に決まった。今回は、解析すべき空間領域を客観決定する方法を取り入れたこともあって、ロバストな余震活動の予測をリアルタイムで行うことが十分可能となった。また、マッチトフィルタ法による検測結果と比較し、マッチトフィルタ法では本震直後の小さい余震が拾いきれず、本手法の方が早く信頼できる余震活動パラメタを得られることが示された。また、前計画から、従来のトリガ源を点震源として扱うことによるETASモデルの性能限界を改善するために、大きな地震の震源域形状及び震源の深さ分布を考慮した有限三次元ETASモデル（Guo et al., 2015, 2017, 2018, 2019）を開発してきたが、今年度は、これを南加の1980-2019のカタログに適用した（Guo et al., 2021）。この期間にあった4つの大地震（Mw6.7-7.3）は有限断層として扱うことで、モデルのフィットが向上したことを確かめた。ETASモデルではトリガの連鎖で定義した地震の家系図を作ることができ、複雑な余震活動の特徴を解きほぐすことができた。その結

果、本震震源域の余震のうち2-4割が本震によって直接トリガされたものであり、さらに活動域は移動していくこと、大滑り域には余震が少いという傾向は明白であること、大きな余震は、小さな余震が群れている領域のエッジに起きる傾向があること、を認識することができた(ただし、Ridgecrestは多くの点で例外)。さらに、余震活動の予測においては、最初の数日においてETASモデルの有限断層化及び三次元化の効果が顕著であることもわかった(図17)。また、耐震政策等に必要な長期的な危険度のゾーニングにETASモデルを用いるメリットを工学者向けに解説する論文(Pei et al., 2021)を出版した(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13])。

ETASモデルは、現象論的モデルとしては非常に優秀であり、上述のように、さらに性能を上げてきているが、物理的根拠は不明である。今年度は、摩擦構成則に基づく地震活動モデル(Dieterichモデル)に余効変動のような非定常な応力変化を組み入れ、ETASモデルのように「全ての地震が余震を引き起こす」可能性を考慮し、実データへ適用することで、どのような地震活動が表現されるかについて示した。また、この取り組みについてHawkes過程の視点からレビューを行った(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13]、岩田, 2021)。

昨年度、個数ベースの簡単な基準で所与の地震活動が前震であるかを識別する前田法(Maeda, 1996)がもつ地震予測能力が、ETAS効果だけでは説明できないことを示すために、ETASに従って作った合成カタログに前田法を適用し、実カタログに適用した場合より顕著に成績が落ちることを報告した。今年度は実用的な観点から、前田法とETAS法を特定の地域の実カタログに適用して予測成績を比較し、前田法の方が概ね成績が良いことを示した(図18、気象庁[課題番号: JMA01]、東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13]、Hirose et al., 2021c)。

○複合的なメカニズムによる前震活動

2011年のM9東北沖地震の13時間後に長野県北部でおきたM6.2の地震は、遠地からの波動によってトリガされただけでなく、顕著な前震活動を伴ったことから興味深い例である。歪み集中帯プロジェクトによって同地域に展開されていた稠密地震観測網の連続波形データをマッチトフィルタ法で解析したところ、M9地震の30分後からM6.2地震の発生までの間に、M2.2以下の微小地震が285個見い出された。M6.2地震断層の上盤内では拡散係数 $D=50\text{m}^2/\text{s}$ 程度での間隙流体の拡散によると思われる活動域の拡がりを示す群発地震活動であり、東北沖地震の大きな余震たちからの表面波通過時に活発化した。一方、M6.2地震がおきる断層面に沿う活動はM6.2の破壊開始点から2 km以内であり、間欠的に三度活動し、それぞれで1-2 km/時でM6.2の破壊開始点へ向かう移動がみられた。三度目の活動はM6.2の破壊開始点から数百mの位置で始まり本震直前まで続いた。これは過去に他地域で報告されているゆっくり滑りによる地震活動に似ている。また、一度目と三度目の活発化は、東北沖地震の大きな複数の余震からの表面波通過と対応しており、また震源の移動速度から見ても、流体の移動が関与していたと推察される。総合的にみて、大きな表面波によって誘起された間隙流体の移動によってゆっくり滑りが始まり、それがM6.2地震の震源核となったというシナリオが考えられる(図19、東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13]、Shimojo et al., 2021)。

○動的トリガリング

上述の長野県北部の例でも見られるように、遠地地震の地震波動による動的トリガリングは、いまや明白な事実である。地震波動は、破壊が伝播する向きに強く放射されるため、そちら側に多くの余震をもたらす可能性が考えられる。そこで、地殻内の地震活動が活発で且つ稠密地震観測網が展開されている北茨城-いわき地域に着目し、経験的グリーン関数法により推定した各観測点における見かけの震源時間関数を用いて二次モーメント推定を行い、99個の地震のうち58個の地震が明確に破壊伝播の指向性を示すことを見い出した。破壊伝播方向は様々であり、非常に近接した地震同士の破壊伝播の向きが逆であることも珍しくない。地殻内の断層形状や応力状態の短波長不均質を反映したものと考えられる。これらの58イベントについて、その近傍で発生した余震数を気象庁地震カタログに基づいて、破壊フロントが向かう側と遠ざかる側に分けて数えてみると、破壊フロントが向かう側で2倍近く多くの余震がおきていた。これは、動的トリガメカニズムから期待されるセンスである（図20、東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕、横谷，2021）。

○直前の微小前震

前震の中には、本震の破壊開始点近傍で本震直前に多数の微小な相似地震としておこるものがある(e.g., Bouchon et al., 2011; Doi and Kawakata, 2012, GRL, 2013 EPS)。これらは、プレスリップによる震源核の形成に伴う活動である可能性が高いため、昨年度までに、テンプレートなしで総当たりの波形比較を行って微小な相似地震を検出する新たな方法を提案してきた。しかし、前震研究の文脈で本来重要なのは、波形の相似性ではなく、同じ場所が繰り返し破壊する「繰り返し地震」かどうかということである。そこで本年度は、正確な震源と発震機構解(Uchide, 2020)が分かっている2018年大阪府北部地震の余震活動を使って、それぞれの相似地震検出手法で用いられる波形類似度を震源位置・発震機構解の相違度を用いて検証したところ、本計画で提案された2つの手法(2bit-hashとkhash)は、計算量が圧倒的に削減できたにもかかわらず、従来の波形相互相関による手法と同程度の繰り返し地震選別能力(特異度・感度・その調和平均であるF値)を持つことが示された（図21、立命館大学〔課題番号：RTM02〕、高山・他，2021）。

一方、繰り返し地震でない直前の微小前震(e.g., Ellsworth and Bulut, 2018)の例も新たに確認された。2003-2019年の気象庁カタログのM4以上の浅い(15km以内)地震のうちHIST-ETASモデルにより余震でないと判断された地震2029個を精査し、27個が直前60秒以内に前震をもつことを見い出した。このうち直前10分以内に四つ以上の前震をもつものが三個あり、震源決定精度の良い茨城県北部と山形県置賜地方の二例を調べた。いずれも前震は本震の破壊開始点近傍に集中していたが、その破壊域は互いにあまり重ならず、また本震の破壊域との重なりも小さかったので、カスケード前震説(Ellsworth and Bulut, 2018、Gomberg, 2018)を支持する（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI13〕、山名，2021）。

○震源の位置・メカニズム情報

地震活動を用いる研究において地震カタログの品質は生命線である。今年度、S-netを含む日本全国の観測網を用いて自動震源カタログを作成した。自動震源にはノイズ等の誤検知が5%程度含まれるため、機械学習の一種であるアンサンブル学習(ランダムフォレストとAdaBoost)による地震ノイズ識別手法を開発した。その結果、自動震源中のノイズの頻度を約1/5(全体の1%に相当)に低減できた。ノイズ除去後の2020年1-8月の自動震源から、日本海溝沿いの微小地震はプレート等深線の深さ20-50 kmに集中しており、等深線10-20 kmのスロー地震とは相補的な分布をしていることが明瞭になった(図22、気象庁[課題番号:JMA_01]、Tamaribuchi et al., 2021)。

前震・余震活動も含めて地震間の相互作用の仕組みを理解するためには、地震の検出下限を下げることに、精密に震源位置を決定することが必要である。本年度は、連続波形から地震カタログを作成するプロセスを、1) 観測波形から走時の確率トレースを計算するプロセスと、2) 多数の観測点の走時確率トレースから震源座標と発震時刻を推定する2つに分解し、これらを2つの深層学習ネットワークで処理することを試みた。1)ではすでに検出処理されている波形を、2)では、仮想的に与えた震源の理論走時をもとにデータを作成し、ネットワークの学習に用いた。本年度は、室内水圧破碎実験(Tanaka et al., 2021)で得られたAEデータを対象として過去の研究で得られた波形記録と、数値的に作成した震源の確率トレースをもとにネットワークの学習を行い、誤差を与えて作成した確率トレースに対してある程度の精度で震源決定ができることを確認した(東北大学理学研究科[課題番号:THK09]、直井, 2022)。

地震の相互作用を理解するためには微小地震の震源メカニズム解も重要な情報であるが、高密度の地震カタログが得やすい鉱山での超微小地震観測や室内実験で使われる圧電式AEセンサは特性が複雑で、メカニズム解を推定することが難しい。本年度は、前述の室内実験(Tanaka et al., 2021)で得られたAE波形記録からのP波初動振幅読み取りに深層学習の技術を用いることで、12個の供試体の実験データから合計46,857個のイベントのモーメント・テンソル解を得ることに成功した。得られた解の中には、剪断・開口・閉合型という多様なタイプが存在しており、顕著な時間変化も観察された。測定帯域が狭いことや、AEの震源メカニズム・規模の時間変化に起因するバイアスがかかるために、結果の解釈には注意が必要でだが、得られた $-9.1 \leq M_w \leq -6.3$ のAEのうち半分程度は、せん断型破壊に対して従来から報告されている応力降下量一定則と調和的な地震モーメントとコーナー周波数を有する。残りはより低周波成分が卓越していたが、これは流体注入による高い間隙流体圧の存在によるのかもしれない(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、直井・他, 2021a, b)。

また、東北地方の深さ30-60 kmで発生したプレート境界型地震について、その破壊過程の特徴を調べた。この研究では、海域のS-netを活用し、小地震の波形を経験的グリーン関数として用いて見かけの震源時間関数を推定し、破壊伝播指向性を系統的に調べた。見かけの震源時間関数にモデルの当てはめをした結果、80%以上の地震が破壊の指向性を持ち、破壊が深部側から浅部側に伝播する地震が多いことがわかった。この結果は、プレート境界深部からの定常的なローディングあるいは、深部から浅部への流体移動が関係している可能性がある(図23、東北大学理学研究科[課題番号:THK_09]、Yoshida et al.,

2022)。

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

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

○前震以外の地震活動異常

沈み込み帯において10年程度の長期間M5以上の地震がおきない長期静穏化が巨大地震の中期的先行現象として提案されている (Katsumata, 2011, 2017)。先行傾向を統計的に評価する目的で、千島から小笠原にかけて、客観的・網羅的な静穏化の検出をおこない、9-12年程度以上続く静穏化があればそこから50-70 km程度の範囲に4-8年程度有効な警報を出すという試行予測による警報マップと、1988年からおきたM7.5以上8.5未満の地震8個とを比較した結果、確率ゲインが2程度、p値が5%をきることを確認した。しかし、学習に使ったデータと評価に使ったデータが同じなので、過学習による好成績である可能性がある。そこで、実験期間を前半・後半にわけて、片方で最適化したパラメタで他方の予測を行うクロスバリデーションを行った。この場合、評価はわずか4個の地震に対して行うことになるため低いp値は得られなかったが、後半データで学習して最適化した予測モデルは前半の地震の予測に対しても確率ゲインが2程度の予測ができ、また、この最適化された予測モデルの内容は全期間のデータで学習したモデルと同様であった。一方、前半データで学習した場合は、この期間におきた地震前の静穏化に継続期間の特に長いものが複数あったために異常検出の閾値が厳しすぎるモデルが選好されてしまい、学習期間では確率ゲインが4を超えるが評価期間では1程度となる(i.e., 予測できていない)典型的な過学習となった。いずれにしろ、8個の地震に対して学習したモデルはロバストに見えるので、評価に使える地震数を2倍にすれば、クロスバリデーションに合格できるかもしれない(図24、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Katsumata and Nakatani, 2021)。また、既存の静穏化の検出手法は、静穏化を定義する空間範囲を恣意的に設定するものであったが、偶然ではもっとも起りにくい静穏化が見えるように自動的に調節する新しい検出手法(PMAP法)を開発した。ZMAP法(Wiemer and Wyss, 1994)では静穏化が検出できなかった2006年のM8.3の千島の地震を含めて、1964-2006千島地方のM7.5以上の地震の多くに先立つ静穏化が検出できることを確認した(図25、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Katsumata and Zhuang, 2020)。

また、別の中期的先行現象として、背景地震活動と地球潮汐との相関が高まる傾向が指摘されている (Tanaka et al., 2002)。トンガ・ケルマディック海溝はMw7を超える地震の頻度が高く統計的な検証に適しているため、トンガ・ケルマディック海溝沿いのプレート境界型地震(1977-2020年、Mw5.5以上、深さ70km以浅、729個)を対象にROC(モルチャン)ダイアグラムを用いて検証した(図26)。予測対象を大きな地震だけに絞った場合ほど、ROCはランダム予測の成績である右下対角線から下に大きく膨らみ、予測性能(確率ゲインやピアスのスキルスコア)が良い。最も良いスキルスコア($SS_p^{Omax} = 0.31$)が出たのは、直近720日間での潮汐相関の強まりに基いて360日長のM7予測を出した場合(図

26aの赤星)で、警報分率46%で予知率78%を達成した(確率ゲイン1.70)。しかし、検定に使えるサンプル数が9個と少いため、99%有意をぎりぎりクリアできていない。一方、M6.5以上を予測対象とした場合の SS_p^{Omax} は0.29(図26bの赤星、警報分率44%、予知率74%で確率ゲイン1.68)で、M7以上を対象にした場合の性能よりわずかに低い、34個とサンプル数が多いため99%有意を軽々とクリアしている。(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、気象庁[課題番号:JMA_01]、Hirose et al., 2022)。

大地震の前にはb値が下がる、あるいは、差応力とb値に逆相関があるという指摘は昔からあり、それに基いたリアルタイムでの予測の可能性も指摘されている。Gulia and Wiemer (2019)が真陽性の例として指摘した2016年熊本地震は、活動を詳細に見れば偽陰性のケースであることを昨年度指摘したが、これを今年度出版した(図27、Nanjo et al., 2022)。一方で、2021年3月20日、5月1日に隣接して起きたM6.9、M6.8の宮城県沖のプレート境界型地震に関して、2012年以降の同地域のb値の時空間分布を調べたところ、地震前の数年間に両地震の破壊域のb値が0.6-0.4という非常に低い値にまで低下していたことを見い出した(図28、Nanjo and Yoshida, 2021)。これらの地震は、そのupdip側隣接域である1978年宮城県沖地震の大滑り域へ差応力の増加をもたらしたと考えられるが、そこから期待されるb値の減少は起きていない。一方、3月と5月の地震で滑って応力が下ったはずのb値は0.6程度と低いままであった(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13])。

○測地学的変動と地震発生確率の相関

2017年8月8日にチベット高原の東縁でおきたMs7のJiuzhaigou地震の前数年にわたって見られた大きな重力変化を見い出した。同地域で2014-2017年にされた稠密な繰り返し精密観測から得られた変化は、浅部地下水の影響や、測定点の隆起沈降、機器ドリフトなどでは説明できない大きなもので地殻深部で大きな広域的物質移動があったことは確実と考えられる(図29、東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、Yang et al., 2021)。

外部からの準静的な応力による地震活動の変調として、地表付近の水の荷重による季節性の活動変化の可能性も指摘されている。昨々年度に山陰地方と新潟地方の例を示した(Ueda and Kato, 2019)が、今年度は、台湾において、地下水位、GNSS鉛直変位と、地震活動の相関を、季節性の観点から調査した。台湾西部の活動は明らかに地表水荷重から期待される変調がみられ、また、歴史地震にもそのような傾向がうかがえたが、台湾東部の18km以浅の地震は、むしろ、期待と逆センスの季節性がみられた(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、Hsu et al., 2021)。

昨年度、山形地域について背景地震活動度とひずみ速度には正の相関を報告(Ueda et al., 2019)したが、今年度は、日本の内陸に位置する5地域のひずみ集中帯において、同様の相関が確認できた(上田, 2022)。さらに活火山近傍では、同じひずみ速度の地域と比較して背景地震活動度が高くなる傾向が見られた。活火山近傍では、火山性流体により断層強度が低下するため、同じひずみ速度の地域と比較して地震活動度が高くなると解釈される(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、上田, 2022)。

また、二層のドロネー分割を用いてGNSSの測地データから連続的な歪み速度場を推定する手法を開発し、これを用いて中国全土の歪み場を求めたところ、テクトニクスとよく対応す

る空間分布が得られた。ROC解析によって1997-2017の観測から得られた歪み場と同期間の背景地震活動(M3以上)と比較すると、最大剪断歪みの大きい場所で地震活動が高い傾向がみられ、さらに、2017-2019の地震活動とも同様の相関を示したことから、歪み速度情報がETASなどによる長期的な地震活動度の予測のさらなる向上に資すると考えられる(図30、東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、Xiong et al., 2021)。

○地殻流体の挙動と地震発生確率の相関

地殻流体に見られる変動もしばしば地震に先行することがある。今年度は牡鹿半島において2005年から東北地方太平洋沖地震発生までの間、宮城県原子力センター(当時)が小型電離箱を用いておこなった大気中ラドン濃度のモニタリングのデータを解析した。日最小値の月平均値を解析した結果、2008年岩手宮城内陸地震発生後に大気中ラドン濃度が増加し始め、2008年12月に減少に転じて東北地方太平洋沖地震発生まで減少し続けた。後者はYasuoka et al. (2018)が報告した仙台市と栃木県壬生町における大気中ラドン濃度変化とも対応し、減少幅が1Bq/m³程度であることも一致することから、広域的な地殻変形を反映していると考えられる。従来の地震に関連したラドン濃度変動の報告では放射線管理施設の据置型大容量電離箱が用いられていたが、本結果により可搬型小容量電離箱もモニタリングに有用であることが示唆された(東北大学[課題番号:THK_10])。

また、2018年6月18日に発生した大阪府北部地震発生前後に大阪医科薬科大学で観測された大気中ラドン濃度データを詳細に解析した結果を出版した(図31、Muto et al., 2021)。2014年から観測されていた大気中ラドン濃度は、地震の約1年前から減少し、本震後2020年6月まで低かったことを明らかにした。観測点周辺での地震活動も同じ次期に静穏化を示した。さらに、本震後の地震活動も余震域を除く近畿地方全域で低下しており、このことが地震後もラドン濃度が増加しなかった原因として考えられる(東北大学[課題番号:THK_10])。

昨年度までに、千葉県旭市で行っている地中ラドン濃度観測データから気圧および温度による変動を除去して求めたラドンフラックスの時系列に、2時間の降雨量が20mmを超える場合に有意な増加が生じることを見出した(小島・他, 2020)。今年度は、雨水の浸透による地中ラドンフラックス増加が原因であることを観測的に確認し、そのモデルを検討した(根本・他, 2021)。降雨効果を観測するために複数の土中水分を測定できるように装置の改良を実施し、試験観測を開始した(千葉大学[課題番号:CBA_01])。

宮城県は漁海況調査として、沿岸と沖で海水温と塩分の定点観測を長期にわたって行っている。昨年度1978年までのデータをデジタル化した、「みやぎ水産NAVI」のホームページが改修され、漁海況調査データの一部がホームページから直接ダウンロードできるようになった。このサービスを利用して、1978年から2011年までの定置水温(宮城県の歌津、江島、佐須浜、田代島)のデータを入手した。この期間に周辺200 km以内でM7.0以上の地震は2011年東北地方太平洋沖地震を含め4回あったが、先行異常と思しき挙動は見受けられなかった。また、漁獲については、「みやぎ水産NAVI」のホームページに2017年からの水揚げ日報(日別の漁獲量)が掲載されていたが、残念ながら2011年まで遡ることは、ここではできなかった。(公募研究、東京学芸大学[課題番号:KOB008])。

同一地点に深さの違う3つの井戸を設置し、地下水位・歪・傾斜を観測する産業技術

総合研究所の地下水等総合観測施設は、南海トラフの想定震源域に20点を計画し、2006年から順次整備を進め、現在16点まで進んでいる。本年度は和歌山県の日高佐和観測点の歪み計設置に成功した。気象庁の歪み計ネットワークが東海地域に集中しているのに対して、この観測網は四国西部までの広域をカバーしている(図32)。気象庁は2020年6月よりその歪みデータを南海トラフ沿いの24時間監視に取り入れて、南海トラフ全域で南海トラフ地震臨時情報を発表することが可能になった。また、今年度、ひずみデータの正確な原位置キャリブレーションのために、ひずみ計の設置深度を考慮したひずみ計に対する海洋潮汐の影響を計算するためのプログラム`gotic2_mod`を開発した。海岸からの距離と設置深度との比が20以下の場合にひずみ計の設置深度を考慮したグリーン関数が必要であることを示し(図33)、さらに、海洋潮汐による理論ひずみを産業技術総合研究所のボアホールひずみデータと比較し、同プログラムの有効性を示した(Kamigaichi et al., 2021)。地下水計測において観測井の透水性は重要な情報である。産業技術総合研究所では電気伝導度検層によって透水性の評価を行っているが、多くの観測井で、孔壁崩壊の防止を優先したため、孔内水の置換や水頭の低下などの電気伝導度検層の標準的な測定手順が変更される制約があった。このような制約下における測定がデータの品質や解析へ与える影響について、孔内水と地層水の圧力差などの観点から取りまとめ(木口・桑原, 2021)、さらに、今後の測定における対応策や解析における注意点なども整理した(産業技術総合研究所[課題番号:AIST09])。

○電磁気的な地震先行現象

電磁気的な先行現象候補の一つである、VLF帯パルス(Asada et al., 2001)については、中日本の5点で観測をしている。本年度、100MHzサンプリングの収録波形にARモデルとAICを用いる方法(Takanami and Kitagawa, 1988)で、パルス波の到来時刻同定を精密化したところ、トリガタイムを用いた場合に比してパルス源の位置標定が大幅に向上することが確認できた(図34、Nagao et al., 2021)。この試行的位置標定は、2017年5月の5点運用体制の開始以降、ネットワーク域内でおきた最も顕著な内陸浅発地震である、2017年6月25日のM5.6に先立つ5日間の記録に関して行い、地震の2日前にだけ、震源の付近で7発の電磁パルスが発生していた。この時間帯に中日本地域で雷はなく、地震の前兆であった蓋然性が高い。なお、東海大学観測点において、従来の観測場所が、新学部開設のため使用できなくなったので、別の校舎の屋上にセンサを移設した。それに伴い、ノイズフィルターの特性の現場試験を行い変更した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、千葉大学[課題番号:CBA_01])。

情報通信機構(NICT)の国分寺イオノゾンデ観測データによる地震発生予測能力の評価について、今年度は陸域の地震と海域の地震に分けて解析してみた。イオノゾンデデータから日毎に判定できるNmF2異常の時系列と、1958年1月1日-2019年9月30日に国分寺観測点から震央距離350km以内で発生した $M \geq 6.0$ 、震源深さ $D \leq 40\text{km}$ の地震を比較した。予測対象地震の発生日数は海域で71日、陸域で19日であった(全解析日数は22553日)。海域地震に関しては地震に6-15日先行して、陸域地震に関しては地震に1-20日先行してNmF2異常が有意に発生することがわかった。みかけの予知率は、陸域の地震に対しては9/19、海域の地震に対しては19/71であった。さらに、先行現象としての有意性は地震の発生時系列をランダム化すると消失することを確認した。また、GPSデータと同様に日々NICTにて公開されるイオノゾンデデー

タを用いてリアルタイム解析が実施できるようにした（千葉大学〔課題番号：CBA_01〕）。

巨大地震の数十分前に報告されているGNSS-TEC変動に関して、Heki and Enomoto (2015)は、類似の変動が地震と関連なく頻繁に起きていることを認めた上で、2011年東北沖地震前の4ヶ月間についてそのような変動の出現頻度(10時間に1度)を求め、この程度の出現頻度では、Mw8.5以上の地震5つ全てにおいてその直前1.5時間以内にTEC変動があったことを説明できず、TEC変動には地震直前の先行現象が含まれていることを主張した。これに対してIkuta et al. (2020)は同様の解析を、ただし、利用できる衛星を全て考慮して行くとTEC変動の出現頻度は2倍程度に上がり、Heki and Enomoto (2015)で報告されているMw8.0以上の地震のうち5つにTEC変動が先行したという観察は、地震と関係ない変動がたまたま地震直前の時期におきたという、偶然の時の一致で説明できると主張した。しかし、Iwata and Umeno (2016)は、近隣の観測点の相関に注目するCRA解析を適用したところ、東北沖地震の1時間前の大きな異常は残るが、周期性の強い太陽活動起源による異常が抑えられて、地震に関係のない時期の異常出現頻度は圧倒的に低下することを示した。これに対して、Ikuta et al. (2021)は、日本全国のより大きなデータセットに対して同様の解析を行い、Iwata and Umeno (2016)の示した東北沖地震の前の変動は、統計的にみて異常に大きいとはいえないと論じた。これに対して、本年度、CRA解析の出力変動の統計は、SIPの場所(特に緯度)に大きく依存するから、異常の閾値を決めるためには、同一地域にSIPをもつデータのCRA結果の統計を見るべきであり、そうした場合には、東北沖地震の1時間前のCRA値はやはり圧倒的に異常と言えると反論した（千葉大学〔課題番号：CBA_01〕、Umeno et al., 2021）。

昨年度、2011年東北沖地震前後のTEC異常について電離圏電子密度の三次元トモグラフィーを行い、preseismicな異常とpostseismicな異常(主に津波による)の場所がずれていること、また、preseismicな異常は陸域に限られることを見いだした(Muafiry and Heki, 2020)が、今年度は、同様の解析を2010年マウレ地震(チリ中部)について行った。地上局の偏在のために、300 kmより高い高度の電離圏については、電子密度分布を忠実に再現することが容易でないことがわかったが、それでも、震源上空約300 kmの電離圏F領域に正の電子密度異常が生じていたことが見いだされた（千葉大学〔課題番号：CBA_01〕、Muafiry and Heki, 2021）。

昨年度、2018年2月2日に打ち上げられた中国の地震電磁気衛星(CSES-1)のIn-situ電離圏電子数変動、およびヨーロッパの軌道決定センターが発表している全球電離圏マップ(CODE-GIMTEC)のデータと、インドネシアで発生した35個のM5.8以上の地震を比較する統計解析から、地震の1-7日前に電離圏電子数変動の有意な正の異常を見いだした(Song et al., 2020)。今年度は、CSES1データについて、さらに(1)2020年10月30日のトルコの地震(M7.0)、(2)2020年1月28日のジャマイカ地震(M7.7)について調査した。

(1)のトルコの地震については磁気嵐と重なっており、CSES1のIn-situ電離圏電子関連データには地震に先行する明確な変動は確認できなかった。一方、(2)のジャマイカの地震に関して地震に先行する変動が確認され、GIM-CODEを用いた統計解析を実施中である（千葉大学〔課題番号：CBA_01〕）。

フランスのDEMETER衛星が地震にリードタイム4時間以内で先行傾向のある異常を捉えた(Nemec et al., 2008, 2009)VLF帯電場強度異常を多数の小型衛星(CubeSat)で捉える

ための衛星開発は、エンジニアリングモデルにより6Uサイズ(10×20×30cm)で可能なことが示せており、今年度は、運用ダイアグラム等より具体的なミッション設計と、BBM(新規技術要素を有する開発において、設計の実現性を確認するために高価な宇宙用の部品ではなく、地上の一般用部品や材料を使用して製作・試験されるモデル)の設計・製作・試験を進めた(公募研究、宇宙航空研究開発機構[課題番号:KOB007]、飯田, 2021; 山崎, 2021)。

○地震・火山・津波によって誘起されるTEC変動

早期警報等に役立つと期待される、地震・津波・火山によって励起されるTEC変動についても事例解析を進めた。地震時電離圏擾乱に含まれる音波成分(AW)と内部重力波成分(IGW)の振幅を、2011年東北沖地震、2010年マウレ地震、2003年十勝沖地震、1994年北海道東方沖地震に加え、津波地震として知られる2010年メンタワイ地震の計5個の地震についてGNSS観測網のデータを解析して求め、(1)大きな地震ほど大きなIGW/AW比を示すこと、(2)津波地震はそれらのトレンドから大きくずれた大きなIGW/AW比を示すことが明らかになった。これは断層運動が長い時間かけて起こるほど、地殻上下変動もゆっくり進行し、その結果長い周期の大気波動をより効率的に励起することを示唆することがわかった(Heki and Takasaka, 2021a, b)。また、GNSSデータを利用したTECデータから浅間山、新燃岳、桜島、口永良部島の2004~2015年の5回の爆発的な火山噴火に対する電離圏応答を比較した(Cahyadi et al., 2021)。その結果、電離層のF領域の音波速度で外側に伝播する周期が約80秒のN字型の擾乱を引き起こすことがわかった。これらのTEC擾乱の振幅は、バックグラウンドのVTEC値の数%であることもわかり、火山爆発の強度の新しい指標となることを示した(千葉大学[課題番号:CBA_01])。

電離圏電子密度の三次元のトモグラフィー解析手法についても進展があった。まず、電離圏電子密度の分布について、従来のカルマンフィルタの計算要件を軽減するために、再帰的な更新プロセスを必要としない、時間に依存しない簡略化されたカルマンフィルタ(SKF)を採用したトモグラフィー手法を開発した。この手法は初期値依存性があり、電離圏電子分布が静穏な場合は、実際に近い電子密度分布を再構成することがわかったが、擾乱時には再構成精度にやや問題があることがわかった(Song et al., 2021a)。そこで、従来の線形正則化法を改良した。従来の方法では、対象とする空間ボクセルに対して東西南北上下の6方向への変動に着目して拘束条件をかけているが、この方法では擾乱時に適切な結果が得られていない。本研究では、この拘束条件を上下の2方向に限ることにより、変動の大きい擾乱時の電離圏電子密度分布も再現可能な手法を開発した。この手法の再構成精度の評価を、国際標準電離圏モデル(IRI)による静穏時の電離圏電子密度や、これに人工的な局所電子密度擾乱を付加した場合において行い、その有効性を担保した(Song et al., 2021b)。次に、実際のデータを用いて、日本付近の典型的な電離圏電子密度擾乱である大規模・中規模伝搬性電離圏擾乱や、近年わかってきた台風や地震動・津波によって励起された電離圏擾乱を再構成し、これらの電子密度擾乱の3次元構造を解析・考察した。その結果、大規模・中規模伝搬性電離圏擾乱は電離圏不安定、地震動は音波、台風や津波は大気重力波によって電離圏擾乱が励起されていることを示した。(宋, 2022)。このトモグラフィー手法で2011年のM9.0東北地方太平洋沖地震発震後の電子

密度構造を調査したところ、電離層中を水平方向に速度約2.3-3.3 km/sで伝播する、地震動(レーリー波)に励起された擾乱と、水平方向に速度200-230 m/sで伝搬する、津波に励起された擾乱を検知できた(図35)。これは、昨年度の解析結果と調和的である。また、地震動励起の擾乱に関しては垂直方向に450-600 kmの波長があり、津波に関しては垂直方向に約200-250kmの波長があることも初めてわかった。特に津波に関しては、推定される背景の中性大気が北方向に49.3 m/sで移動することが初めて観測的に推定することができた。これらの数値は大気重力波の条件(分散式)を満足する合理的な値であり、津波による電離層の擾乱が大気重力波で発生したことを強く示唆する。従来の手法では不可能であった電離圏密度擾乱の3次元構造について、観測に基づいて現実的な空間分布を再構成したことは意義深く、今後、地震や津波に関連する影響の理解や把握に大きく貢献すると期待される。具体的には、津波発生領域の海面変動の検知による新しい津波緊急地震速報の開発や、地震前兆的電離圏変動の理解や物理機構の解明・評価である(千葉大学[課題番号:CBA_01])。

これまでの課題と今後の展望

DONET、S-netデータの活用が本格化し、海域における地震観測網の巨大な空白域がなくなったことで、日本海溝、南海トラフのプレート境界の監視能力が増している。また、AE、微小地震、LFE、微動、繰り返し地震など様々な微小イベントの検出において、機械学習等のデータサイエンス技術を用いて連続波形を総当たりに走査する客観的な自動検出技術が活用され始めた。こういった手法は、テンプレートイベントの偏り等のバイアス要因が避けられているので検出率の均質性に優れると期待でき、地震発生確率の時間変化との相関を探る目的に適している。本計画でULF磁場、イオノゾンデデータ、背景地震活動の潮汐同期などについて示されたように、サンプル数が十分ある場合には確率利得がわずかに1を超える程度の弱い傾向でも先行性の実在が示されることがある。先行現象の種類による予知率の高低、あるいは各々の先行現象の予知率の予測対象地震の特性への依存性は、地震発生プロセスと先行現象のメカニズムについてのユニークな情報であり、様々な先行現象を大きなデータセットで正確に評価するべきであろう。また、VLFEやSSEなど、より規模の大きなスロー地震もデータの質及び量が増しており、地震発生との相関を多数例から統計的に評価する経験的なアプローチが可能な段階かもしれない。

成果リスト

- Aiken, C. and K. Obara, 2021, Data-driven clustering reveals more than 900 small magnitude slow earthquakes and their characteristics, *Geophys. Res. Lett.*, 48, doi:10.1029/2020GL091764.
- Aizawa K., S. Takakura, H. Asaue, K. Koike, R. Yoshimura, K. Yamazaki, S. Komatsu, M. Utsugi, H. Inoue, K. Tsukamoto, M. Uyeshima, T. Koyama, W. Kanda, T. Yoshinaga, N. Matsushima, K. Uchida, Y. Tsukashima, T. Matsushima, H. Ichihara, D. Muramatsu, Y. Teguri, A. Shito, S. Matsumoto, and H. Shimizu, 2021, Electrical conductive fluid-rich zones and their influence on the earthquake initiation, growth, and arrest

- processes: observations from the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Kyushu Island, Japan, *Earth Planets Space*, 73:12, doi:10.1186/s40623-020-01340-w.
- Ariyoshi, K., T. Kimura, Y. Miyazawa, S. Varlamov, T. Iinuma, A. Nagano, J. Gomberg, E. Araki, T. Miyama, K. Sueki, S. Yada, T. Hori, N. Takahashi, and S. Kodaira, 2021, Precise Monitoring of Pore Pressure at Boreholes Around Nankai Trough Toward Early Detecting Crustal Deformation, *Frontier Earth Science*, 9, 717696, doi:10.3389/feart.2021.717696.
- 浅井 ゆう子・島 伸和・羽入朋子・松野哲男・廣瀬 仁・南 拓人・杉岡裕子, 2021, 鬼界海底カルデラ付近 で得られた海底圧力観測の初期的な結果, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG45-13.
- Atoltz, M., G. Stoltz, K. Obara, T. Wang, and D. Bryant, 2021, Acceleration of hidden Markov model fitting using graphical processing units, with application to low-frequency tremor classification, *Computers and Geosciences*, 156, doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104902.
- Baba, S., K. Obara, S. Takemura, A. Takeo, and G.A. Abers, 2021a, Shallow Slow Earthquake Episodes Near the Trench Axis Off Costa Rica, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2021JB021706, doi.org/10.1029/2021JB021706.
- 馬場 慧・小原一成・武村俊介・竹尾明子・栗原 亮, 2021b, 日本周辺の超低周波地震活動における時間変化の特徴の定量化, 日本地震学会2021年度秋季大会, S09-26.
- Baba, S., S. Takemura, and K. Obara, A. Takeo, Y. Yamashita, M. Shinohara, 2021c, Scaled energy of shallow slow earthquakes in Hyuga-nada, southwest Japan, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG39-P10.
- Cahyadi, M.N., E.Y. Handoko, R.W. Rahayu, and K. Heki, 2021, Comparison of volcanic explosions in Japan using impulsive ionospheric disturbances, *Earth Planets Space*, 73(228), doi:10.1186/s40623-021-01539-5.
- Chen, H., M. Miao, Y. Chang, Q. Wang, XH. Shen, K. Hattori, and P. Han, 2021, Singular Spectrum Analysis of the Total Electron Content Changes Prior to $M \geq 6.0$ Earthquakes in the Chinese Mainland During 1998-2013, *Front. Earth Sci.*, 9, 677163, doi:10.3389/feart.2021.677163.
- Chujo, N., H. Hirose, T. Kimura, 2021a, The moment release rate of short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula based on NIED Hi-net tilt data (2002-2020), *International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021*, 0-09.
- Chujo, N., H. Hirose, T. Kimura, 2021b, The moment release rate of short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula from 2002 to 2015 based on NIED Hi-net tilt data, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG39-17.
- Enescu, B., Y., Takeda, and M. Miyazawa, 2021a, Dynamic triggering of earthquakes in volcanic and geothermal areas before and after the 2011 M9.0 Tohoku-oki earthquake, *AGU Fall Meeting 2021*, S41A-02, December 16 (oral, online).
- Enescu, B., I.-A. Moldovan, and C. Ionescu, 2021b, Analysis and forecasting of Romanian seismicity (AFROS) project: aim and preliminary results, *AGU Fall Meeting 2021*,

NH25A-0542, December 14 (poster, online).

Fukuda, J. and K. M. Johnson, 2021a, Bayesian inversion for a stress-driven model of afterslip and viscoelastic relaxation: Method and application to postseismic deformation following the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2020JB021620, doi:10.1029/2020JB021620.

福田淳一・K. M. Johnson, 2021b, ベイズ統計学による測地データの非線形逆解析(招待講演), 日本地震学会2021年度秋季大会, S23-08.

Genzano, N., R. Colonna, C. Filizzola, K. Hattori, M. Lisi, N. Pergola, and V. Tramutoli, 2021, A focus on the capability of the RST-based satellite TIR anomalies for the short-term seismic hazard assessment in Japan (invited), 日本地球惑星科学連合2021年大会, MIS08-14.

Gresse, M., M. Uyeshima, T. Koyama, H. Hase, K. Aizawa, Y. Yamaya, Y. Morita, D. Weller, T. Rung-Arunwan, T. Kaneko, Y. Sasai, J. Zlotnicki, T. Ishido, H. Ueda, and M. Hata, 2021, Hydrothermal and Magmatic System of a Volcanic Island Inferred From Magnetotellurics, Seismicity, Self-potential, and Thermal Image: An Example of Miyakejima (Japan), *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126(6), doi:10.1029/2021JB022034.

Guo, Y., J. Zhuang, and H. Zhang, 2021, Heterogeneity of aftershock productivity along the mainshock ruptures and its advantage in improving short-term aftershock forecast. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2021JB020494, doi:10.1029/2020JB020494.

Hamama, I. and M.-Y. Yamamoto, 2021, Infrasonic Earthquake Detectability Investigated in Southern Part of Japan, 2019, *Sensors*, 21(3), 894, doi:10.3390/s21030894.

Han, P., J. Zhuang, K. Hattori, C.-H. Chen, F. Febriani, and H. Chen, 2021, Assessing the potential earthquake precursory information in ULF magnetic data recorded in Kanto, Japan during 2000-2010: distance and magnitude dependences (invited), 日本地球惑星科学連合2021年大会, MIS08-05.

Heki, K., 2021a, Chapter 21: Ionospheric Disturbances Related to Earthquakes, in *Ionospheric Dynamics and Applications*, *Geophys. Monograph*, 260, edited by C. Huang, G. Lu, Y. Zhang, and L. J. Paxton, Wiley/American Geophysical Union, 511-526, doi:10.1002/9781119815617.ch21.

Heki, K., 2021b, Ionospheric disturbances before and after large earthquakes: How can we utilize the information (invited), NSF Convergence Workshop on Bringing Land, Ocean, Atmosphere and Ionosphere Data to the Community for Hazards Alerts (online), May 28.

Heki, K. and Y. Takasaka, 2021a, Slow earthquake signatures in the ratio between AW and IGW amplitudes in coseismic ionospheric disturbances (invited), EGU General Assembly 2021, doi:10.5194/egusphere-egu21-758.

Heki, K. and Y. Takasaka, 2021b, Slow earthquake signatures in the ratio between acoustic and internal gravity wave amplitudes in coseismic ionospheric disturbances, JPGU (online), Jun. 5.

Heki, K. and T. Fujimoto, in press, Atmospheric modes excited by the 2021 August

- eruption of the Fukutoku-Okanoba volcano, Izu-Bonin Arc, observed as harmonic TEC oscillations by QZSS, Earth Planets Space.
- Hiramatsu, Y., Y. Tanaka, and A. Kobayashi, 2021a, Gravity data analysis to extract temporal gravity anomalies associated with slow slip events in the Ryukyu trench, AGU Fall Meeting 2021, G006-854520.
- Hiramatsu, Y., Y. Tanaka, and A. Kobayashi, 2021b, Gravity data analysis to extract temporal gravity anomalies associated with slow slip events in the Ryukyu Trench, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG39-P26.
- Hirose, H., T. Matsushima, T. Tabei, and T. Nishimura, 2021a, Slow slip events in the Bungo Channel and Hyuganada areas from 2018 to 2019 detected by a GNSS observation network, International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021, P-19.
- Hirose, H., T. Matsushima, T. Tabei, T. Nishimura, 2021b, Slow slip events in the Bungo Channel and Hyuganada areas from May 2018 to June 2019 detected by a GNSS observation network, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG39-P15.
- Hirose, F., K. Tamaribuchi, and K. Maeda, 2021c, Characteristics of Foreshocks Revealed by an Earthquake Forecasting Method Based on Precursory Swarm Activity, J. Geophys. Res.: Solid Earth, 126, e2021JB021673, doi:10.1029/2021JB021673.
- 弘瀬冬樹・前田憲二・上垣内 修, 2021d, 背景地震活動の地球潮汐相關情報に基づく地震予測モデルの効率: トンガ・ケルマディック海溝沿いのプレート境界型大地震に対して, 日本地震学会2021年秋季大会, S14P-01.
- Hirose, F., K. Maeda, and O. Kamigaichi, 2022, Efficiency of earthquake forecast models based on earth tidal correlation with background seismicity along the Tonga-Kermadec trench, Earth Planets Space, 74, 10, doi:10.1186/s40623-021-01564-4.
- Hsu, Y.-J., H. Kao, R. Burgmann, Y.-T. Lee, H.-H. Huang, Y.-F. Hsu, Y.-M. Wu, and J. Zhuang, 2021, Synchronized and Asynchronous Modulation of Seismicity by Hydrological Loading: A Case Study in Taiwan. Science Advances, 7(16), eabf7282. doi:10.1126/sciadv.abf7282.
- Igarashi, T. and A. Kato, 2021, Evolution of aseismic slip rate along plate boundary faults before and after megathrust earthquakes, Commun. Earth Environ., 2, 1, 1-7, doi:10.1038/s43247-021-00127-5.
- 飯田智之, 2021, 航行用VLF電波の軌道上データを用いた地震先行現象検知検証衛星のミッション設計の提案, 日本大学理工学部航空宇宙工学科卒業論文.
- Iida, T., R. Futamata, M. Yamazaki, and M. Kamogawa, 2021, Design and Development of Prelude, Satellite for Seismic Precedence Detection and Verification Using VLF Radio Waves for Navigation Obtained in Orbit, The 35th Annual Small Satellite Conference, 262.
- 飯田智之・山崎政彦・鴨川 仁, 2022, 地震発生前直前の人工電波と雷電波の衛星軌道上電磁波強度減少について, 第100回日本大気電気学会研究発表会, PB1-4.
- 池田里奈・吉田圭佑・高橋 諒・松澤 暢・長谷川 昭, 2021, 2011年東北沖地震後から福島-茨城県境周辺で活発化した地震活動に見られる内陸の繰り返し地震, 日本地球惑星科学連

合2021年大会.

- Ishiyama, R., E. Fukuyama, and B. Enescu, 2021, Estimation of Time-Variable Friction Parameters Using Machine Learning, AGU Fall Meeting 2021, MR33A-07, December 15 (oral, online).
- 岩田貴樹, 2021, 地震学における非線形Hawkes過程: 摩擦構成則に基づく地震活動モデル, 統計数理, 69(2), 209-222.
- 岩田貴樹・平松良浩, 2021, 混合分布による南海トラフ深部低周波微動の規模分布, 日本地震学会2021年度秋季大会, S09-09.
- Jamali Hondori, E., C. Guo, H. Mikada, and J.-O. Park, 2021, Full-waveform inversion for imaging faulted structures: A case study from the Japan Trench forearc slope, Pure Appl. Geophys., doi.org/10.1007/s00024-021-02727-w.
- Kano, M., A. Ikeuchi, T. Nishimura, S. Miyazaki, and T. Matsushima, 2021, Potential of megathrust earthquakes along the southern Ryukyu Trench inferred from GNSS data, Earth Planets Space, 73, 199, doi:10.1186/s40623-021-01531-z.
- Kamigaichi, O., N. Matsumoto, and F. Hirose, 2021, Green's function at depth of borehole observation required for precise estimation of the effect of ocean tidal loading near coasts, Geophys. J. Int., 227, 275-286, doi.org/10.1093/gji/ggab216.
- Kato, A. and Y. Ben-Zion, 2021, The generation of large earthquakes, Nature Reviews Earth & Environment, 2, 26-39, doi.org/10.1038/s43017-020-00108-w.
- 加藤 愛太郎・竹尾明子・小原一成, 2021, 短周期地震計アレイ観測による深部低周波微動の高速移動現象, 日本地震学会2021年度秋季大会, S09-19.
- Katsumata, K. and J. Zhuang, 2020, A New Method for Imaging Seismic Quiescence and Its Application to the Mw=8.3 Kurile Islands Earthquake on 15 November 2006, Pure Appl. Geophys., 177, 3619-3630, doi:10.1007/s00024-020-02498-w.
- Katsumata, K. and M. Nakatani, 2021, Testing the seismic quiescence hypothesis through retrospective trials of alarm-based earthquake prediction in the Kurile-Japan subduction zone, Earth Planets Space, 73, 100, doi:10.1186/s40623-021-01418-z.
- 川方裕則・大内智博, 2021, 4MHz程度まで感度を有する広帯域超音波トランスデューサの較正, 日本地震学会2021年度秋季大会, S12P-02.
- 木口 努・桑原保人, 2021, 産総研地下水等総合観測井における透水性評価のための孔井内測定手法の適用事例: 主に測定時の制約に対応するために, 地質調査総合センター研究資料集, 726, 1-32.
- 木口 努・今西和俊・松本則夫, 2021a, 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果(2020年11月~2021年4月), 地震予知連絡会報, 106, 330-331.
- 木口 努・松本則夫・北川有一・板場智史・落 唯史・佐藤 努・矢部 優, 2021b, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2020年11月~2021年4月)(63), 地震予知連絡会報, 106, 323-329.
- 木口 努・今西和俊・松本則夫, 2022a, 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果(2021年5月~2021年10月), 地震予知連絡会報, 107, 印刷中.
- 木口 努・松本則夫・北川有一・板場智史・落 唯史・佐藤 努・矢部 優, 2022b, 東海・関

- 東・伊豆地域における地下水等観測結果(2021年5月～2021年10月)(64), 地震予知連絡会報, 107, 印刷中.
- 気象研究所, 2021a, 全国GNSS観測点のプレート沈み込み方向の位置変化, 地震予知連絡会会報, 105, 37-41.
- 気象研究所, 2021b, 南海トラフ沿いの長期的スロースリップの客観検知, 地震予知連絡会会報, 105, 373-377.
- 気象研究所, 2021c, 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, 105, 378-381.
- 北川有一・板場智史・松本則夫・落 唯史・木口 努, 2021a, 紀伊半島～四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2020年11月～2021年4月), 地震予知連絡会報, 106, 440-450.
- 北川有一・松本則夫・佐藤 努・板場智史・落 唯史・木口 努・矢部 優, 2021b, 近畿地域の地下水位・歪観測結果(2020年11月～2021年4月), 地震予知連絡会報, 106, 451-454.
- 北川有一・板場智史・松本則夫・落 唯史・木口 努, 2022a, 紀伊半島～四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2021年5月～2021年10月), 地震予知連絡会報, 107, 印刷中.
- 北川有一・松本則夫・佐藤 努・板場智史・落 唯史・木口 努・矢部 優, 2022b, 近畿地域の地下水位・歪観測結果(2021年5月～2021年10月), 地震予知連絡会報, 107, 印刷中.
- Kobayashi, T. and T. Sato, 2021, Estimating effective normal stress during slow slip events from slip velocities and shear stress variations, *Geophys. Res. Lett.*, 48(20), e2021GL095690, doi:10.1029/2021GL095690.
- Kurashimo, E., K. Mochizuki, T. Iidaka, T. Takeda, K. Shiomi, S. Kodaira, and K. Obara, 2021a, Detailed seismic structure of the slow-earthquake source region beneath the western part of Shikoku, SW Japan, revealed by active seismic experiments, *International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021*, P-28.
- Kurashimo, E., T. Iwasaki, N. Tsumura, and T. Iidaka, 2021b, The Role of Fluid-Related Heterogeneous Structures in Controlling the Fault Slip Behavior in the Slow-Earthquake Source Region Along the Nankai Subduction Zone, Southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 48(4), e2020GL089882, doi:10.1029/2020GL089882.
- Kurihara, R. and K. Obara, 2021a, Spatiotemporal characteristics of relocated deep low-frequency earthquakes beneath 52 volcanic regions in Japan over an analysis period of 14 years and 9 months, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, doi.org/10.1029/2021JB022173.
- 栗原 亮・小原一成, 2021b, 雌阿寒岳・日光・焼岳での周期的に発生する火山性深部低周波地震活動, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG48-04.
- Liu, Y., J. Zhuang, and C. Jiang, 2021, Background Seismicity before and after the 1976 Ms 7.8 Tangshan Earthquake: Is Its Aftershock Sequence Still Continuing?, *Seismological Research Letters*, 92, 877-885, doi:10.1785/0220200179.
- Maeda, T., K. Obara, and A. Takeo, T. Matsuzawa, 2021a, Comprehensive detection of tremor migration using multiple time windows beneath Kii Peninsula, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG39-21.
- 前田拓也・小原一成・竹尾明子・松澤孝紀・田中優作, 2021b, 深部低周波微動から検出された2

次的スリップフロントの特徴, 日本地震学会2021年度秋季大会, S09-21.

松原 誠・汐見勝彦・馬場久紀・佐藤 比呂志・西宮隆仁, 2021, 駿河トラフから東海地域に沈み込むフィリピン海プレート形状, 日本地震学会2021年度秋季大会.

Matsumoto, Y., K. Yoshida, , T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2021, Fault-valve behavior estimated from intensive foreshocks and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake sequence, Kyushu, southern Japan, *J. Geophys. Res.*, 126, e2020JB020278, doi:10.1029/2020jb020278.

松澤 暢・吉田圭祐・内田直希, 2021, 2021 年 3 月 (M6.9) と 5 月 (M6.8) の宮城県沖の地震について, 地震予知連絡会会報, 106.

本山 真・山崎政彦・鴨川 仁, 2022, 地震発生前の大気電場変動モデルの検討, 第100回日本大気電気学会研究発表会, PB2-6.

森 絵万・平松良浩, 2021, 2016年熊本地震の相似地震, 日本地震学会2021年度秋季大会, S08P-01.

Muafiry, I. N. and K. Heki, 2021, 3D tomography of the ionospheric anomalies before the 2010 Maule earthquake, Chile: Comparison with the 2011 Tohoku-oki and 2015 Illapel earthquakes, *JPGU* (on-line), Jun. 6.

Muto, J., Y. Yasuoka, N. Miura, D. Iwata, H. Nagahama, M. Hirano, Y. Ohmomo, and T. Mukai, 2021, Preseismic atmospheric radon anomaly associated with 2018 Northern Osaka earthquake, *Sci. Rep.*, 11, 7451, doi:10.1038/s41598-021-86777-z.

Nagao, T., M. Kamogawa, J. Izutsu, T. Suzuki, A. Saito, A. Sugiura, and H. Kondo, 2021, Development and Preliminary Analysis of a VLF-Band Electromagnetic-Wave Observation System for Short-Term Earthquake Precursory Monitoring, *Front. Earth Sci.*, 9, 658825, doi:10.3389/feart.2021.658825.

永田広平・野田朱美・溜渕功史・弘瀬冬樹, 2021a, せん断ひずみエネルギー変化はb値を変化させるか—熊本地震及び西南日本のプレート間固着を例に一, 日本地球惑星科学連合2021年大会.

永田広平・溜渕功史・弘瀬冬樹・野田朱美, 2021b, 統合的な地殻活動指標の構築に向けて—“ふつう”の地震活動の特徴抽出—, 日本地球惑星科学連合2021年大会.

永田広平・溜渕功史・弘瀬冬樹・野田朱美, 2021c, 日本海溝沿いの地震活動の規模別頻度分布に関する指標値の地域特性とプレート間のすべり現象との比較, 日本地震学会2021年度秋季大会.

中谷正生, 2021, 階層的アスペリティを前提とした短期前兆のメカニズムについて, 地震予知連絡会会報, 105, 500-504.

楠城一嘉, 2021, b値にもとづく大地震発生予測のモデルのレビュー, 地震予知連絡会会報, 105, 489-492.

Nanjo, K. Z. and A. Yoshida, 2021, Changes in the b value in and around the focal areas of the M6.9 and M6.8 earthquakes off the coast of Miyagai prefecture, Japan, in 2021. *Earth Planets Space* 73, 176, doi.org/10.1186/s40623-021-01511-3.

Nanjo, K. Z., J. Izutsu, Y. Orihara, and M. Kamogawa, 2022, Changes in seismicity pattern due to the 2016 Kumamoto earthquake sequence and implications for improving

the foreshock traffic-light system, *Tectonophysics*, 822, 229175, doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229175.

直井 誠, 2022, 走時の確率トレースを利用した深層学習による震源決定, 防災研究所研究発表講演会.

直井 誠・今北啓一・陳 友晴・山本和敏・田中 壘・川方裕則・石田 毅・福山英一・有馬 雄太郎, 2021a, 室内水圧破碎実験によって誘発された微小破壊の地震モーメント・コーナー周波数推定, 日本地震学会2021年度秋季大会, S08-20, 2021年10月16日, オンライン.

直井 誠・陳 友晴・田中 壘・有馬 雄太郎, 2021b, 室内水圧破碎実験で誘発された微小破壊のモーメントテンソル解析を目的とした深層学習によるP波初動振幅読み取り, 日本地震学会2021年度秋季大会, S22-P02, 2021年10月14日, オンライン.

根本和秀・小島春奈・吉野千恵・金子 柊・北出明嗣・服部克巳・茂木 透・小西敏春, 2021, 地表面付近の地中ラドンフラックス変動について: 強い降水の影響, *Journal of Atmospheric Electricity*, 40(1), 37-41, doi:10.1541/jae.40.37.

Noda, A. and T. Saito, 2021a, Energy-based method to generate rupture scenarios for megathrust earthquakes in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan: A necessary condition for earthquake generation, AGU Fall Meeting 2021.

Noda, A. and T. Saito, 2021b, Energy-based scenarios for megathrust earthquakes in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan, International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021.

野田朱美・齊藤竜彦, 2021c, 測地データと地震データを併用した非弾性変形の解析: 新潟神戸変形集中帯への適用, 日本地震学会2021年度秋季大会.

Noda, A., T. Saito, E. Fukuyama, and Y. Urata, 2021, Energy-based scenarios for great thrust-type earthquakes in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan, using an interseismic slip-deficit model, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2020JB020417, doi:10.1029/2020JB020417.

野村俊一・田中昌之, 2021, 余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の予測, *統計数理*, 69(2), 239-254.

Obara, K, 2021a, Systematics and heterogeneity of deep and shallow slow earthquakes, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG39-19.

小原一成, 2021b, スロー地震の活動様式とその地質学的背景, 日本地質学会第128年学術大会, T3-0-1(招待).

小木曾 仁・溜渕功史, 2021, 地震波振幅の空間分布から推定した紀伊半島南東沖で発生する浅部低周波微動の時空間分布: 2020年12月から2021年1月, 日本地震学会2021年度秋季大会.

Okada, Y., T. Nishimura, T. Tabei, T. Matsushima, H. Hirose, 2021, Development of the detection method for short-term slow slip events using GNSS data and its application to the Nankai subduction zone, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG39-13.

Okada, Y., T. Nishimura, T. Tabei, T. Matsushima, H. Hirose, 2022, Development of a detection method for short-term slow slip events using GNSS data and its application to the Nankai subduction zone, *Earth Planets Space*, 74, 18, doi.org/10.1186/s40623-022-01576-8.

- Omori, Y., H. Nagahama, J. Muto, and Y. Yasuoka, 2021, Atmospheric radon monitoring for earthquake studies -insights from 25-y experiences, Seminar on Earthquake Early Warning System Through Real Time Radon Gas Monitoring, 09-12 November 2021, University of Pannonia, Veszprem, Hungary.
- 小野里 和樹・本島邦行, 2021, 見通し内VHF帯放送波における伝搬異常の発生要因解析, 日本地震予知学会学術講演会, 2021年12月25日, 21-02.
- 織原義明, 2021a, ヤフーコメントから探る民間の地震予測を信じる理由, 日本地震学会2021年秋季大会, S18-03.
- 織原義明, 2021b, これからの地震予知研究に関する一考察, 日本地震予知学会第8回学術講演会, 21-14.
- Park, J.-O., N. Takahata, E. J. Hondori, A. Yamaguchi, T. Kagoshima, T. Tsuru, G. Fujie, Y. Sun, J. Ashi, M. Yamano, and Y. Sano, 2021a, Mantle-derived helium released through the Japan trench bend-faults, *Scientific Reports*, 11, 12026, doi.org/10.1038/s41598-021-91523-6.
- Park, J.-O., T. Tsuru, G. Fujie, E. Jamali Hondori, T. Kagoshima, N. Takahata, D. Zhao, and Y. Sano, 2021b, Seismic reflection images of possible mantle-fluid conduits and basal erosion in the 2011 Tohoku earthquake rupture area, *Front. Earth Sci.*, 9, 687382, doi:10.3389/feart.2021.687382.
- Pei, W., S. Zhou, J. Zhuang, Z. Xiong, and J. Pia, 2022, Application and discussion of statistical seismology in probability seismic hazard assessment studies. *Science China Earth Sciences*, 65, 257-268, doi:10.1007/s11430-021-9824-0.
- Poiata, N., J. P. Vilotte, N. M. Shapiro, M. Supino, K. Obara, 2021, Complexity of Deep Low-Frequency Earthquake Activity in Shikoku (Japan) Imaged From the Analysis of Continuous Seismic Data, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2021JB022138, doi.org/10.1029/2021JB022138.
- Shimojo, K., B. Enescu, Y. Yagi, and T. Takeda, 2021, Nucleation process of the 2011 Northern Nagano earthquake from nearby seismic observations, *Sci. Rep.*, 11, 8143, doi:10.1038/s41598-021-86837-4.
- Shiobara, H., A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara, and T. Sato, 2021, Tilt Observations at the Seafloor by Mobile Ocean Bottom Seismometers, *Front. Earth Sci.*, 8, 599810, doi:10.3389/feart.2020.599810.
- 副島庸平・廣瀬 仁, 2021, 紀伊半島北部における短期的スロースリップイベントのすべり領域の傾斜データによる制約-すべり領域と微動発生領域の空間的比較-, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 25, 9-21.
- Song, R., K. Hattori, X. Zhang, and C. Yoshino, 2021a, The three-dimensional ionospheric electron density imaging in Japan using the approximate Kalman filter algorithm, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.*, 219, 105628, doi:10.1016/j.jastp.2021.105628.
- Song, R., K. Hattori, X. Zhang, J.-Y. Liu, and C. Yoshino, 2021b, Detecting the ionospheric disturbances in Japan using the three-dimensional computerized

- tomography, J. Geophys. Res.: Space Physics, 126, e2020JA028561, doi:10.1029/2020JA028561.
- 竹尾明子・小原一成, 2021, SEEDフォーマット地震記録のリアルタイム伝送システム構築とGPS故障点の時刻補正, 日本地球惑星科学連合2021年大会, STT35-P04.
- Takagi R. and K. Nishida, 2021, Ambient noise tomography in the offshore forearc region along the Japan trench using S-net dat, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SSS02-04 (Invited talk).
- 高山裕紀・平野史朗・川方裕則, 2021, ハッシュ法を用いた類似波形検出手法の性能比較, 日本地震学会2021年度秋季大会, S09P-12.
- Takemura, S., K. Obara, K. Shiomi, A. Takeo, and S. Baba, 2021, Migration characteristics of shallow very low frequency earthquake episodes southeast off the Kii Peninsula, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG39-P01.
- 竹澤直樹・本島邦行, 2021, MF帯放送波の日没時伝搬異常と地震発生の関連性解析, 日本地震予知学会学術講演会, 2021年12月25日, 21-03.
- Tamakuma, Y., M. Hosoda, Y. Omori, H. Nagahama, T. Ishikawa, M. Shimo, and S. Tokonami, 2021, Car-borne survey for a black shale area and influence of snowfall on absorbed dose rate in air of a coastal area, Radiat. Environ. Med., 10, 96-101.
- Tamaribuchi, K. and M. Ogiso, 2021a, Shallow low frequency earthquake monitoring system based on envelope cross-correlation and amplitude, International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021.
- 溜瀧功史・小木曾仁, 2021b, エンベロープ相関と振幅に基づく浅部低周波地震モニタリングシステム, 日本地震学会2021年度秋季大会.
- Tamaribuchi, K., F. Hirose, A. Noda, Y. Iwasaki, K. Iwakiri, and H. Ueno, 2021, Noise classification for the unified earthquake catalog using ensemble learning: the enhanced image of seismic activity along the Japan Trench by the S-net seafloor network, Earth Planets Space, 73:91, doi:10.1186/s40623-021-01411-6.
- 溜瀧功史・小木曾仁・野田朱美, 2022, 浅部低周波地震モニタリングシステムの構築, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学的諸現象のリアルタイム監視予測システムと活用」.
- Tanaka, M., 2021a, Relationship Between the Moderate Repeating Earthquakes and the Larger-scale Earthquakes on the Trench Side, AOGS2021 VIRTUAL 18th Annual Meeting.
- 田中昌之, 2021b, 中規模繰り返し相似地震と周辺の規模の大きな地震との態様について, 日本地球惑星科学連合2021年大会.
- Tanaka, R., M. Naoi, Y. Chen, K. Yamamoto, K. Imakita, N. Tsutsumi, A. Shimoda, D. Hiramatsu, H. Kawakata, T. Ishida, E. Fukuyama, H. Tanaka, Y. Arima, S. Kitamura, and D. Hyodo, 2021, Preparatory AE activity of hydraulic fracture in granite with various viscous fluids revealed by deep learning technique, Geophys. J. Int., 226, 493-510, doi:10.1093/gji/ggab096.
- Tanioka Y., N. Uchida, A. R. Gusman, M. Shishikura, and T. Nishimura, 2021, Special issue, "Kurile arc subduction zone: View of great earthquake generation and

- disaster mitigation of related phenomena”, *Earth Planets Space*, 63, 1-2, doi:10.1186/s40623-021-01439-8.
- Teshiba, S. and H. Hirose, 2021, A comparison of the source areas in Hyuganada among afterslip of two interplate earthquakes in 1996 and successive slow slip events, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG39-P28.
- 露木貴裕, 2021, 天竜船明レーザーひずみ計による地殻変動観測, 日本地球惑星科学連合2021年大会.
- 上田 拓, 2022, Seismicity analysis based on statistical modeling: Connection with stress change, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・博士論文.
- 山名祐輝, 2021, 本震直前の地震活動, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・修士論文.
- Uchida, N. and R. Burgmann, 2021a, A decade of lessons learned from the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Rev. Geophys.*, 59, e2020RG000713, doi:10.1029/2020RG000713.
- Uchida, N. and R. Bürgmann, 2021b, Learning from a disastrous megathrust earthquake, *EOS*, 102, doi:10.1029/2021E0159741.
- Umeno K., R. Nakabayashi, T. Iwata, and M.G. Kao, 2021, Capability of TEC correlation Analysis and Deceleration at Propagation Velocities of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances: Preseismic Anomalies before the Large Earthquakes, *Open Journal of Earthquake Research*, 10(4), 105-137, doi:10.4236/ojer.2021.104008.
- Xiong, Z., J. Zhuang, S. Zhou, M. Matsu'ura, M. Hao, and Q. Wang, 2021, Crustal strain-rate fields estimated from GNSS data with a Bayesian approach and its correlation to seismic activity in Mainland China, *Tectonophysics*, 81, doi:10.1016/j.tecto.2021.229003.
- 矢部 優・落 唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・木口 努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦, 2021, 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント(2020年11月～2021年4月), 地震予知連絡会報, 106, 271-322.
- 矢部 優・落 唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・木口 努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦, 2022, 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(2021年5月～2021年10月), 地震予知連絡会報, 107, 印刷中.
- 山崎政彦, 2021, 地震先行電離圏変動現象検知のためのCubeSatのエンジニアリング・モデル製作:衛星バス・サブシステムの統合, 第十一回気象文化大賞.
- Yang, J., S. Chen, B. Zhang, J. Zhuang, L. Wang, and H. Lu, 2021, Gravity Observations and Apparent Density Changes before the 2017 Jiuzhaigou Ms7.0 Earthquake and Their Precursory Significance. *Entropy*, 23, 1687, doi:10.3390/e23121687.
- 横谷直人, 2021, 二次モーメントによる小中規模地震の震源過程の推定, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・修士論文.
- 吉田圭佑・金森博雄, 2021, Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japa, 日本地震学会2021年秋季大会.
- 吉田圭佑・松澤 暢・内田直希, 2021a, Initiation of the M[~]9 earthquake cycle: the 2021

- Miyagi-Oki Mw7.0 earthquake at the deep seismic/aseismic transition, 日本地震学会 2021年秋季大会.
- Yoshida, K., H. Noda, M. Nakatani, and B. Shibazaki, 2021b, Backward earthquake ruptures far ahead of fluid invasion: Insights from dynamic earthquake-sequence simulations, *Tectonophysics*, 229038, doi:10.1016/j.tecto.2021.229038.
- Yoshida, K., A. Hasegawa, S. Noguchi, and K. Kasahara, 2021c, Low-frequency earthquakes in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan, 日本地球惑星科学連合2021年大会.
- Yoshida, K., N. Uchida, H. Kubo, R. Takagi, and S. Xu, 2022, Prevalence of updip rupture propagation in interplate earthquakes along the Japan trench, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 578, 117306, doi:10.1016/j.epsl.2021.117306.
- Yu, F., E. Jamali Hondori, and J.-O. Park, 2021, Pre-stack depth imaging and pore-fluid pressure estimation along the Nankai Trough subduction zone off the Kii Peninsula, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG45-06.
- 行竹洋平・吉田圭佑・本多 亮, 2021, Aseismic process driving the earthquake swarm, revealed by the dense seismic observation, 日本地球惑星科学連合2021年大会.
- Zheng, Y., B. Enescu, J. Zhuang, and C. Yu, 2021, Data replenishment of five moderate earthquake sequences in Japan, with semi-automatic cluster selection, *Earthquake Science*, 34, 310-322, doi:10.29382/eqs-2021-0030.
- Zhuang, J., 2021, Chapter 4. Explaining foreshock and the Bath law using a generic earthquake clustering model. In *Statistical Methods and modelling of seismogenesis*, ed. by Limnios, E. Papadimitriou, and G. Tsaklidis, ISTE Ltd., pp.105-130, ISBN:9781789450378.

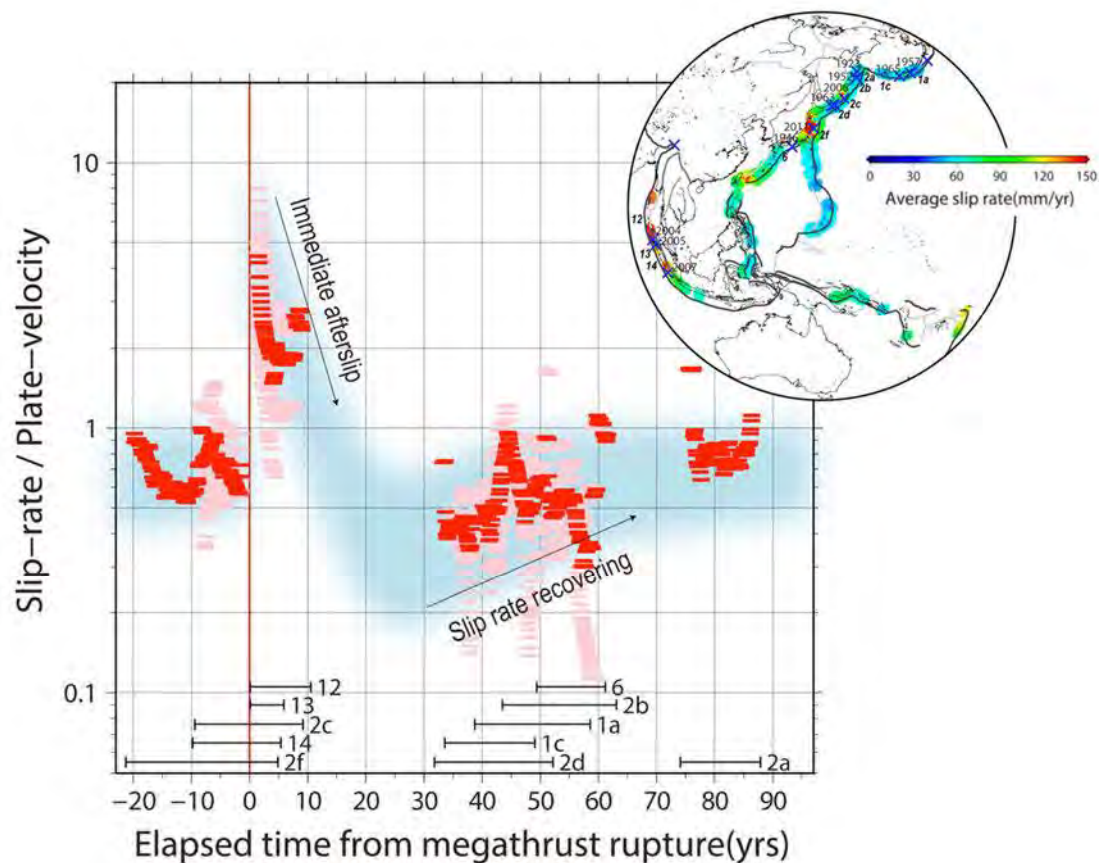


図 1．繰り返し地震から求めた世界の沈み込み帯の背景滑り速度（Igarashi and Kato, 2021より改変、東北大学理学研究科〔課題番号：THK_09〕）

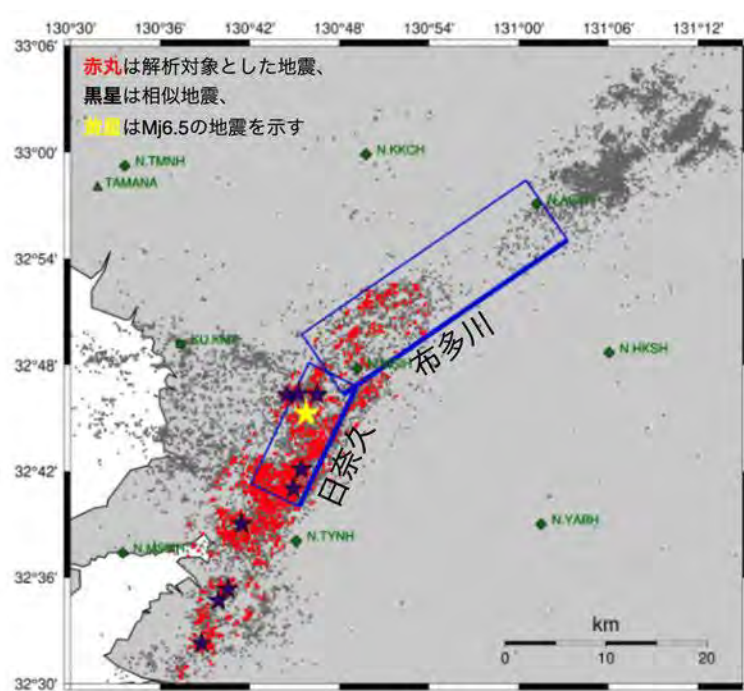


図 2．2016年熊本地震震源域周辺で発生した相似地震の探索（森・平松，2021より改変，東北大学理学研究科〔課題番号：THK_09〕）

防災科学技術研究所Hi-netや九州大学、気象庁の観測点で記録された地震波形を使用。

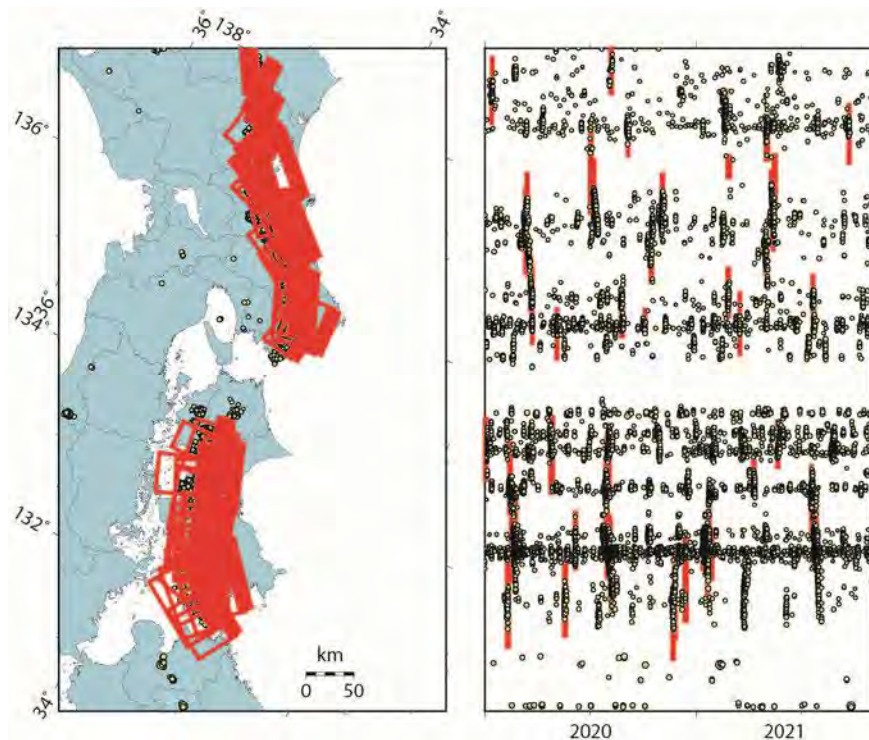


図 3．産業技術総合研究所・防災科研・気象庁の歪・地下水・傾斜データリアルタイム共有により決定した短期的SSEの断層モデルの位置および時空間分布（矢部・他，2021，2022より改変，産業技術総合研究所〔課題番号：AIST09〕，気象庁〔課題番号：JMA_01〕）
黄色の丸は同期間の気象庁一元化震源カタログによる深部低周波地震（微動）の震源位置と時空間分布。

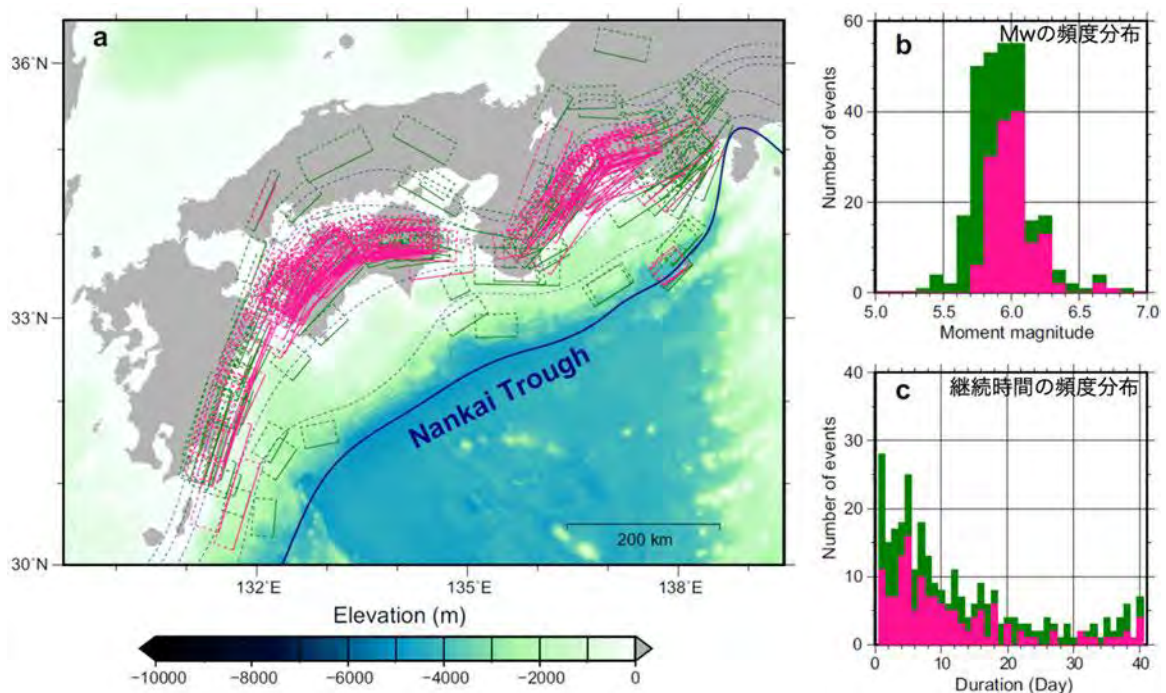


図 4．新手法によってGNSS時系列データから自動検出された1997-2020年の短期的SSE（Okada et al., 2022より改変，東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_12〕）
ピンクは信頼度の高いもの。

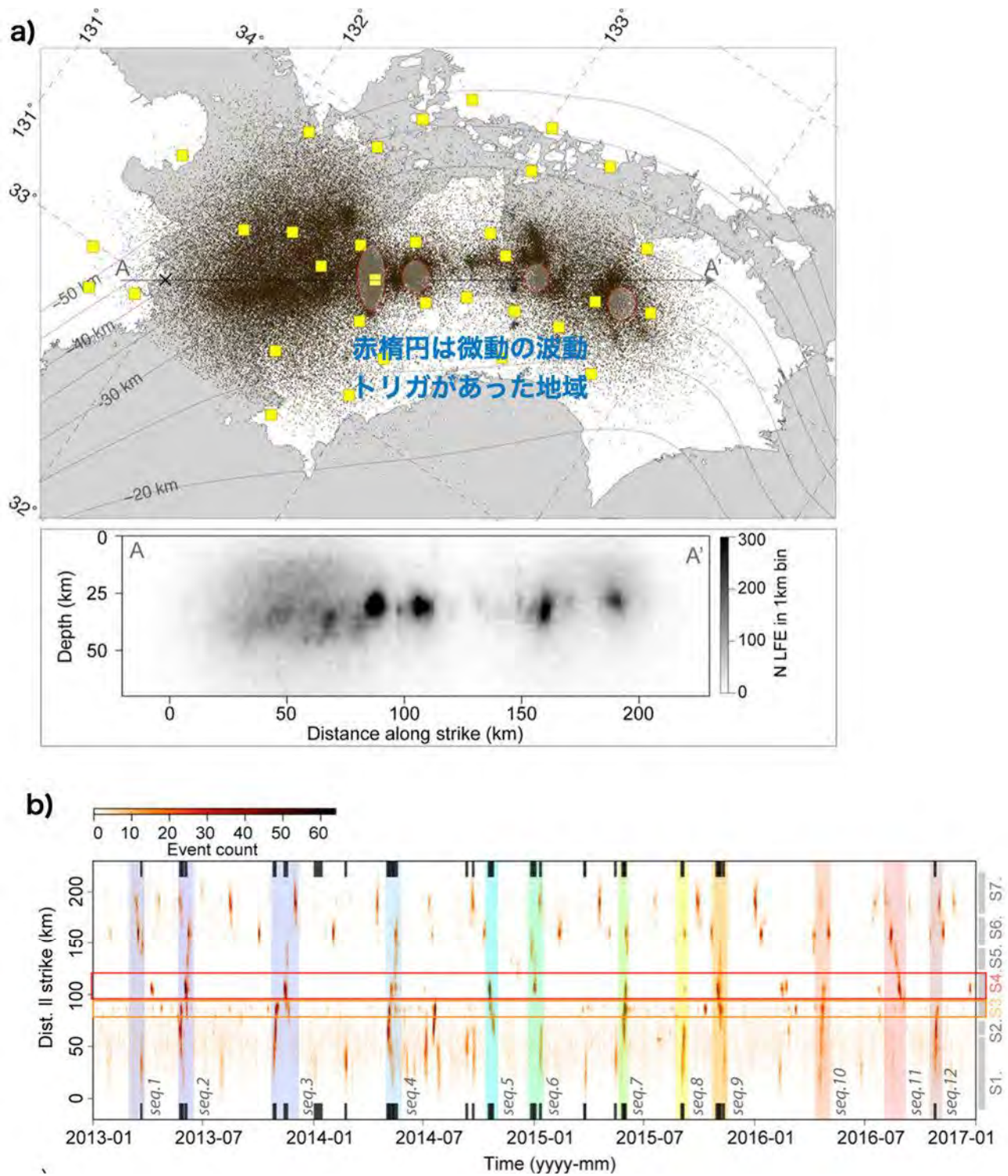


図5．テンプレートを使わない新手法で検出された四国地域のLFE (Poiata et al., 2021より
改変, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])

a)空間分布。 b)1日2kmのビン中のイベント数の時空間分布。12度の顕著なLFE活動期を色付け
ハイライトしてある。上下の短い黒棒は産業技術総合研究所カタログによる短期的SSEの時期。
右端のS1-S7はストライク方向のセグメンテーション。

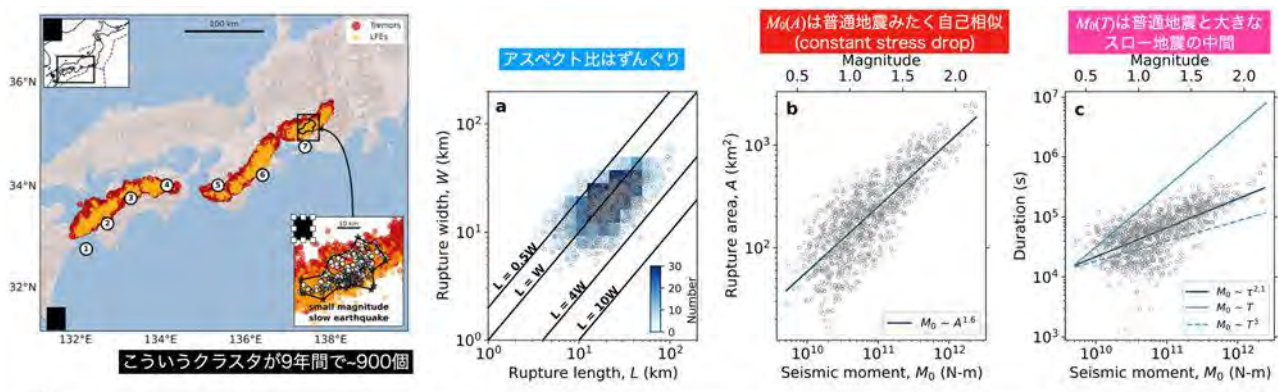


図6. 微動やLFEのクラスターを小さなSSEだと見做した解析 (Aiken and Obara, 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])

上段左端: 解析に用いた微動とLFEおよびクラスターの定義

上段のa-c: クラスターのスケールリング

下段: クラスターの破壊伝播特性

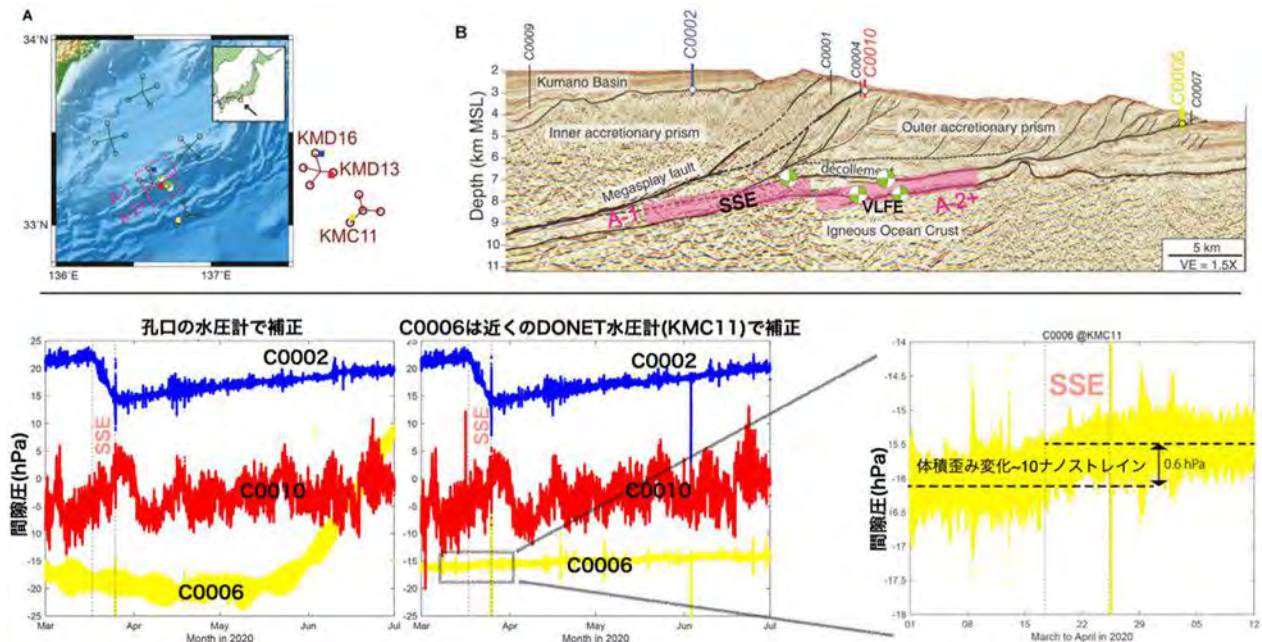


図7. 間隙水圧変化で捉えた浅部SSE (Ariyoshi et al., 2021より改変、東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09])

上段: A) DONET観測点と間隙水圧観測孔(四角印)の配置図。A-1、A2+はSSEの断層モデル、ビーチボールはVLFEのメカニズムを示す。B) 反射法地震探査による構造断面図と解釈線。色太線は間隙水圧観測孔。下段: SSE発生時を含む間隙水圧記録

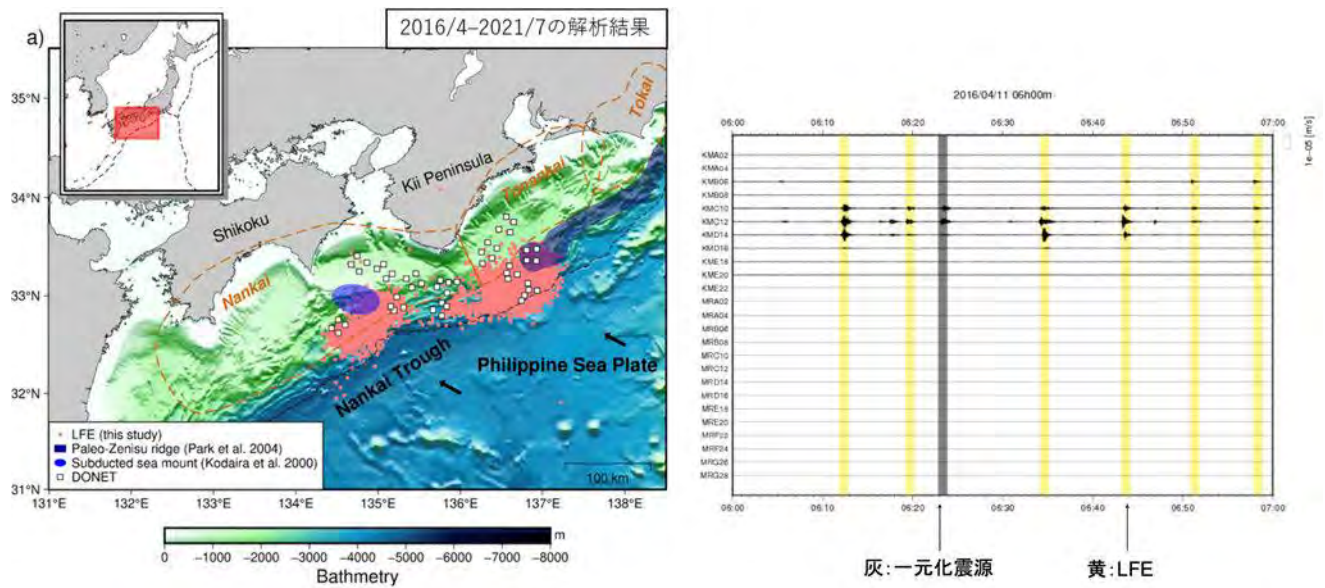


図 8．最大振幅とエンベロップ相関を用いたハイブリッド法を用いて検出された浅部LFE（溜
 瀧・小木曾，2021bより改変、気象庁〔課題番号：JMA_01〕）
 ピンク点は本手法により検出された浅部低周波地震。薄い青色はそれぞれ沈み込んだ海山や海嶺、
 四角印はDONETの観測点を表す。

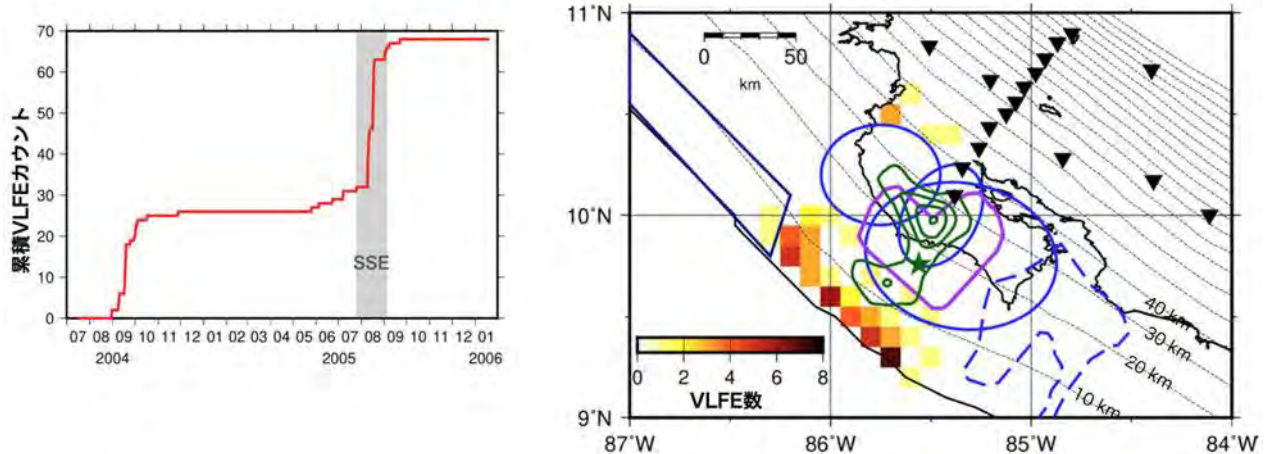


図 9．コスタリカの機動的広帯域地震観測データから検出された浅部VLFE（Baba et al., 2021
 より改変、東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_12〕）

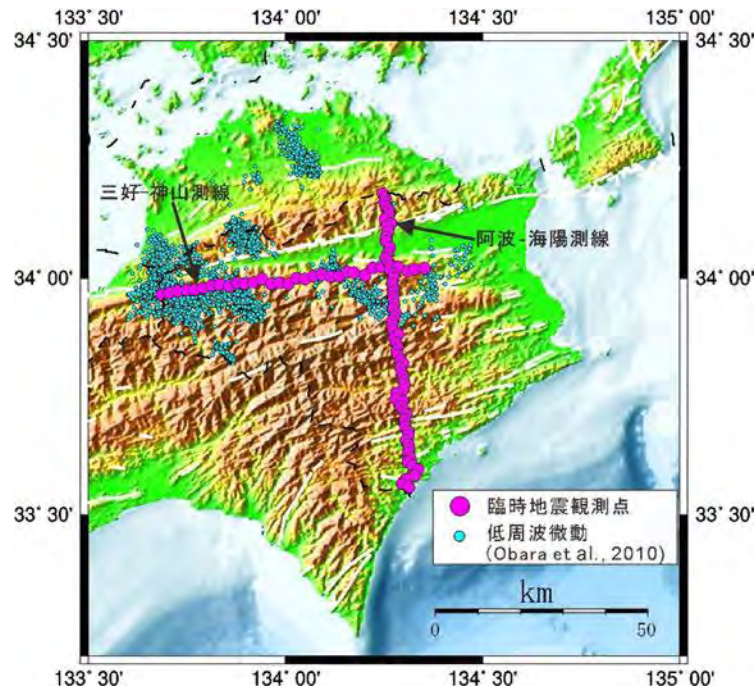


図10. 四国東部の臨時稠密地震観測（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_12〕）
2021年12月13日よりデータ収録開始。2022年12月まで収録予定。

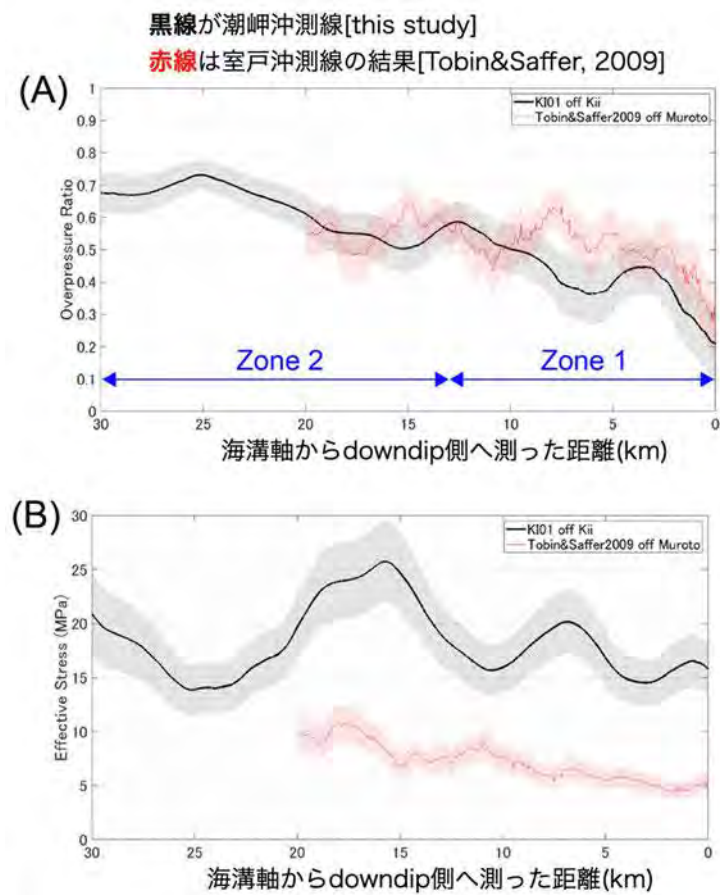


図11. P波速度構造から推定した潮岬沖の(A)過剰間隙水压比と鉛直有効応力（Yu et al., 2021より改変、東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_12〕）
Zone1とZone2の区分はデコルマの物性や付加体の層厚変化に基づく。

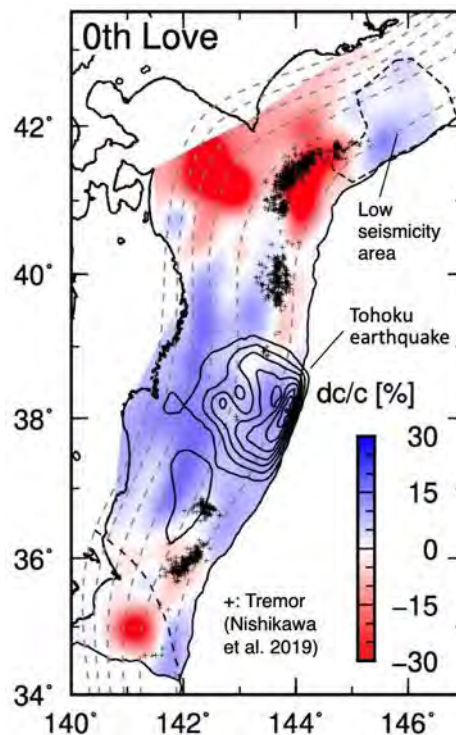


図12. 周期14秒のラブ波基本モードの位相速度マップ (Takagi and Nishida, 2021より改変、東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_12〕)

2011年東北沖地震すべり域はIinuma et al. (2012)、根室沖の微小地震空白域はTakahashi and Kasahara (2007)、微動はNishikawa et al. (2019)による。

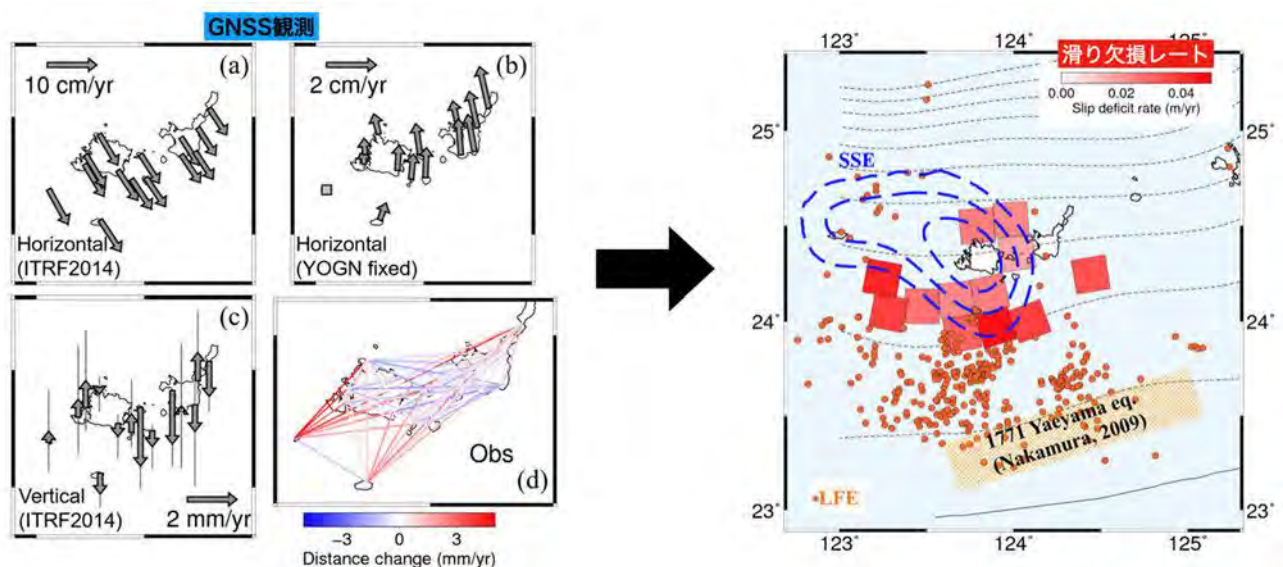


図13. 八重山地方のGNSS観測(左図)から求めた滑り欠損レートの分布 (Kano et al., 2021より改変、京都大学理学研究科〔課題番号：KUS_01〕)

左図：(a) ITRF2014に準拠した水平定常速度ベクトル。(b) (a)をYOGN観測点(四角で示した図中の最西端の観測点)固定に変換した水平ベクトル。(c) ITRF2014に準拠した上下定常速度ベクトル。1 σ の推定誤差を示しているが、水平速度ベクトルでは視認できないくらい小さい。(d) 水平定常速度ベクトルから計算した各観測点間の基線長変化

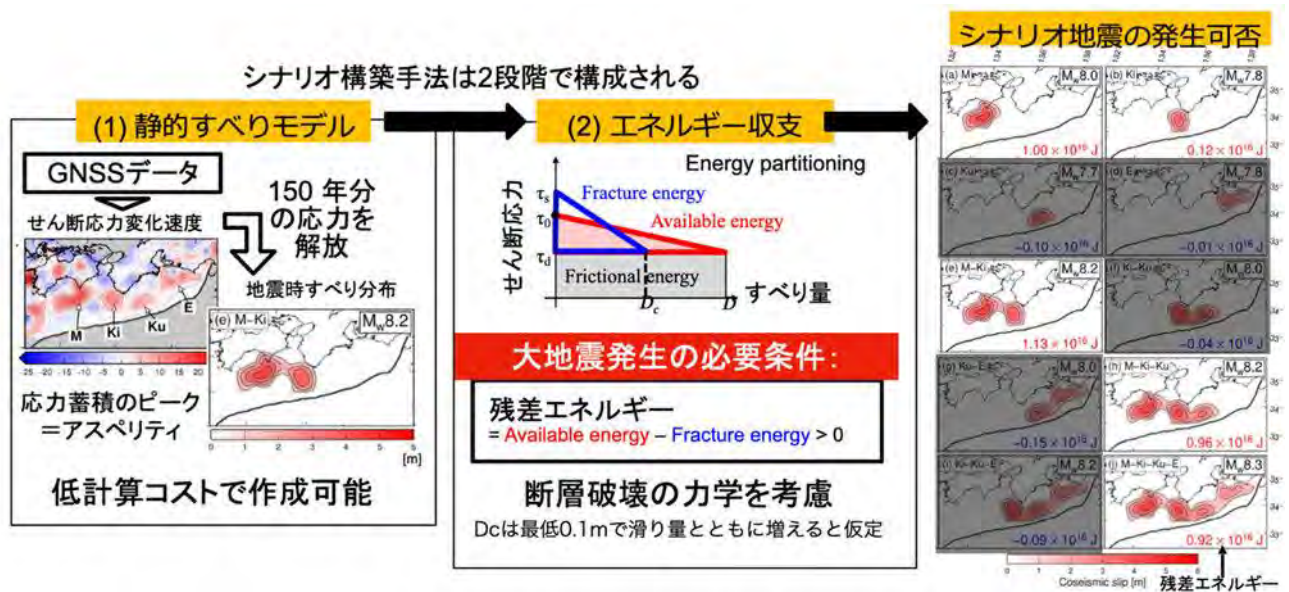


図14. 滑り遅れレートに基いてエネルギー収支を考慮した地震発生シナリオの評価法 (Noda et al., 2021より改変、気象庁 [課題番号: JMA_01])

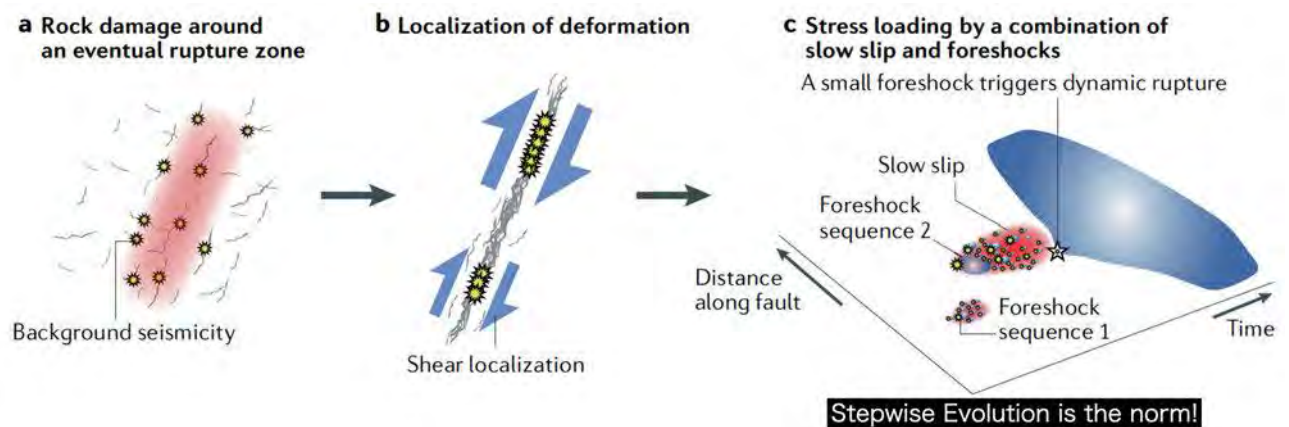


図15. 大地震準備過程の概念モデル (Kato and Ben-Zion, 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09])

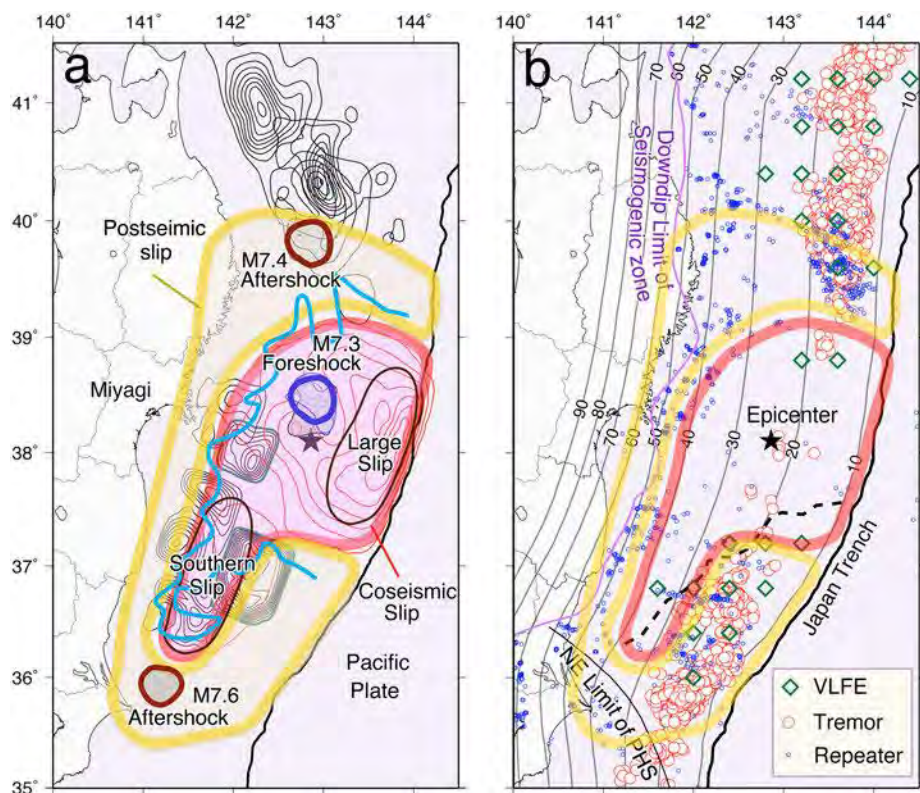


図16. 2011年M9東北沖地震の震源域周辺の(a)大規模なプレート間滑りイベントと(b)小規模なプレート間滑りイベント (Uchida and Burgman, 2021bより改変、東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_12〕、東北大学理学研究科〔課題番号：THK_09〕)

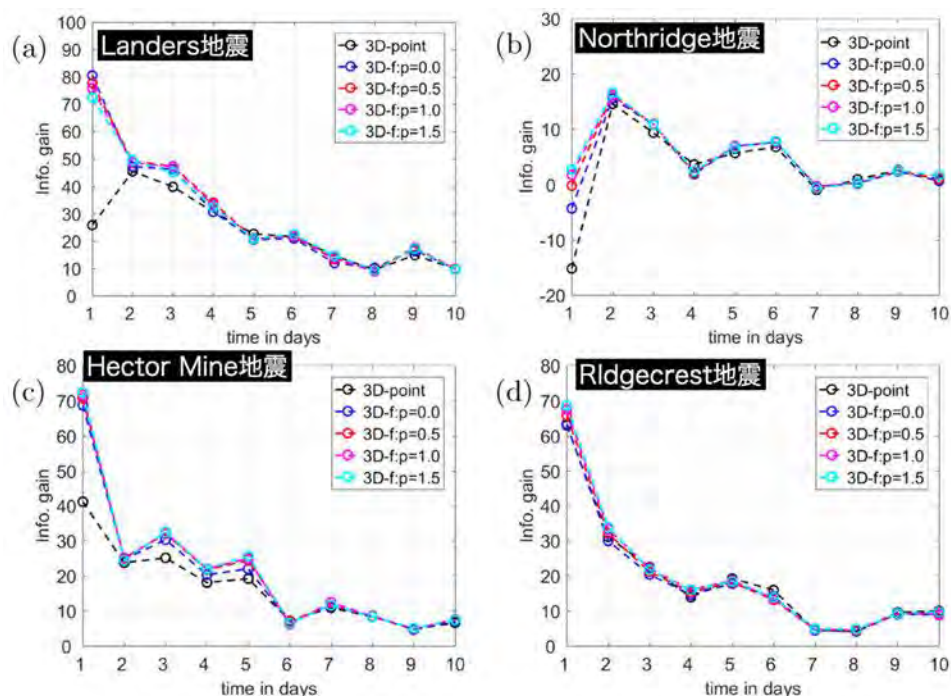


図17. 3次元点震源ETAS及び3次元有限断層ETASモデルによる余震予測の成績 (Guo et al., 2021より改変、東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕)

2次元点震源ETASモデルによる予測を基準にした情報利得を、本震からの経過日数に対してプロット。凡例の p は3次元有限断層ETASモデルで用いた大森・宇津余震減衰式の p 値。

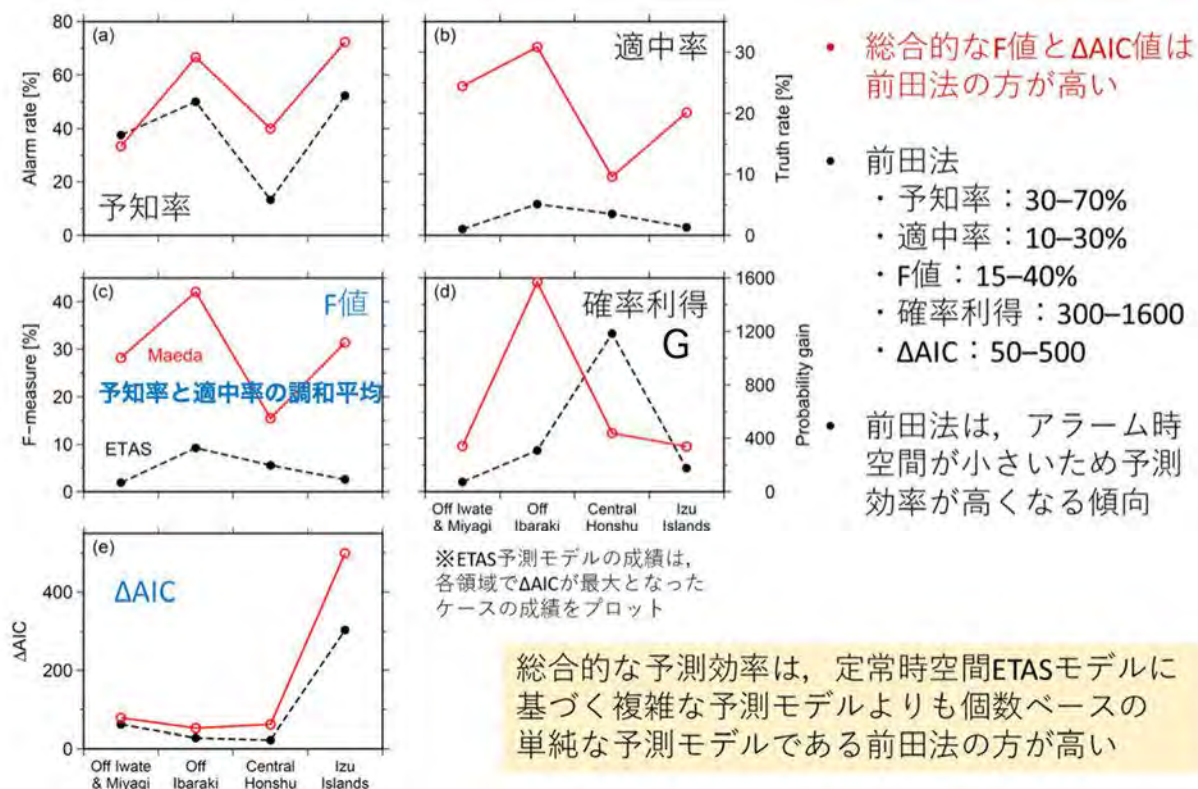


図18. 岩手・宮城沖、茨城沖、本州中部、伊豆諸島での前田法とETASモデルによる短期地震予測の成績 (Hirose et al, 2021cより改変、気象庁 [課題番号: JMA_01]、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])

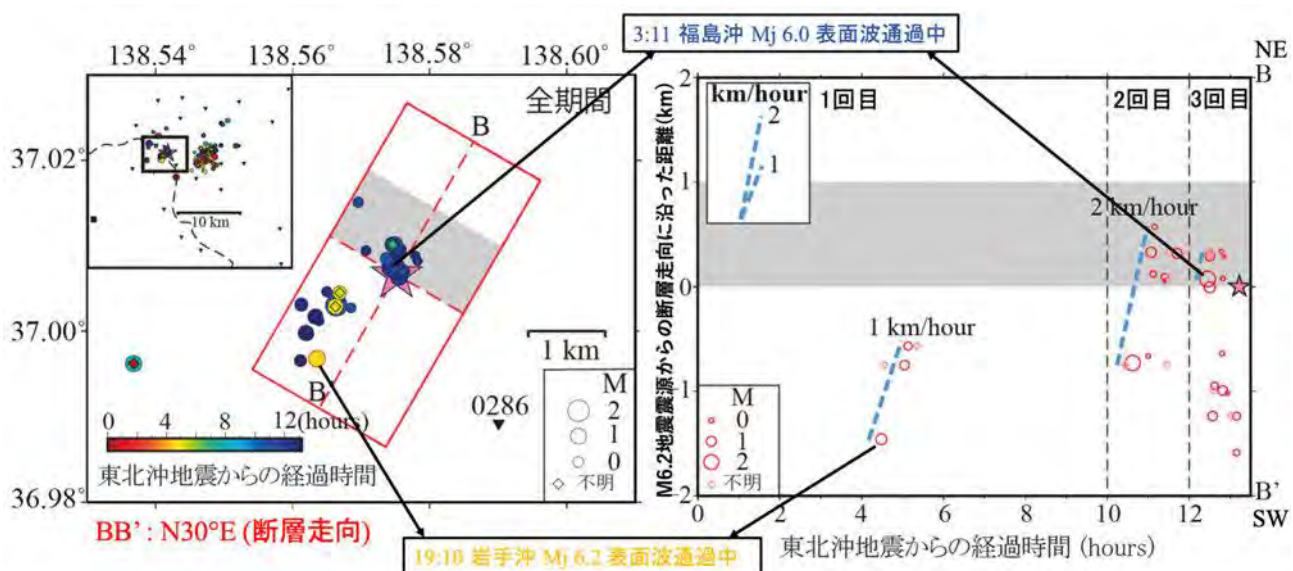


図19. 2011年M9東北沖地震の13時間後におきた長野県北部M6.2地震の前震活動 (Shimojo et al, 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])

(左図)震源分布。星印はM6.2地震の破壊開始点。赤い長方形はその震源断層。(右図)M6.2の地震断層の走向にそって活動の時空間分布を示した。

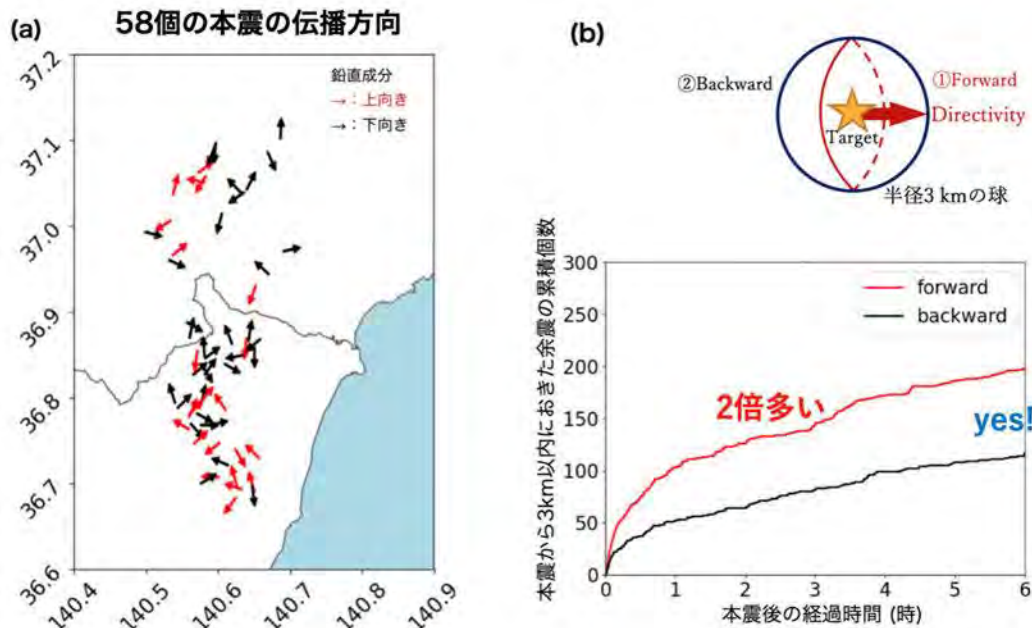


図20. 小地震の破壊伝播の指向性が余震活動に及ぼす影響（横谷，2021より改変、東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕）

(a)明瞭な指向性をもった地震の破壊伝播方向。(b)本震の破壊フロントが向う側と遠ざかる側に分けてカウントした余震個数(気象庁地震カタログに基づく)。

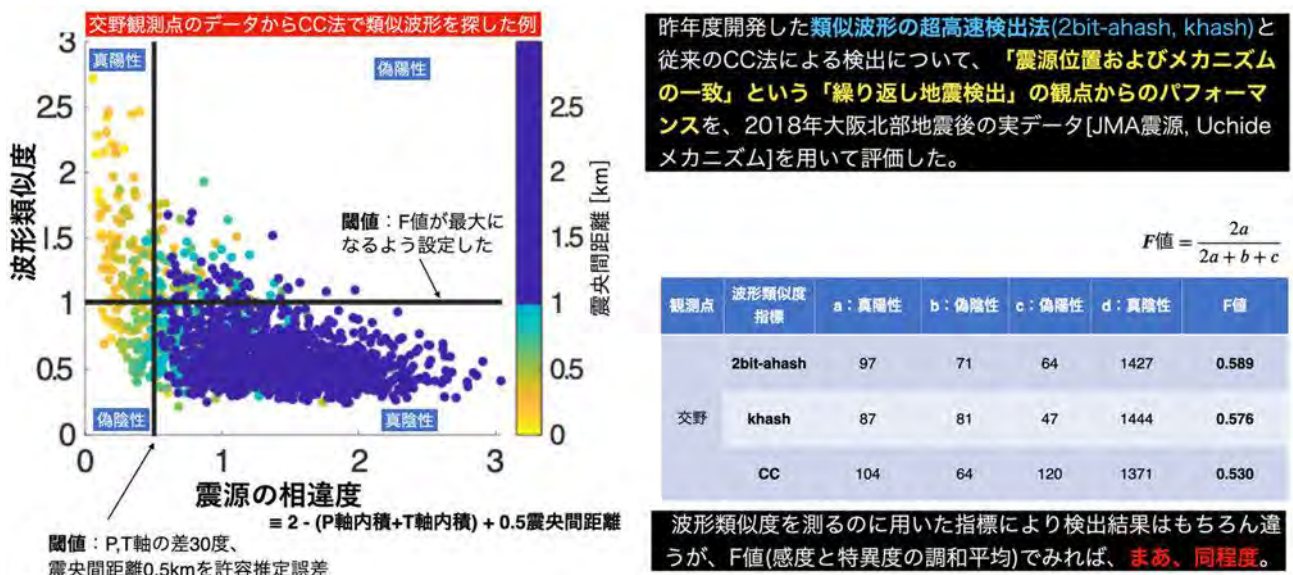


図21. 波形類似度と震源の相違度の比較（高山・他，2021より改変、立命館大学〔課題番号：RTM_02〕）

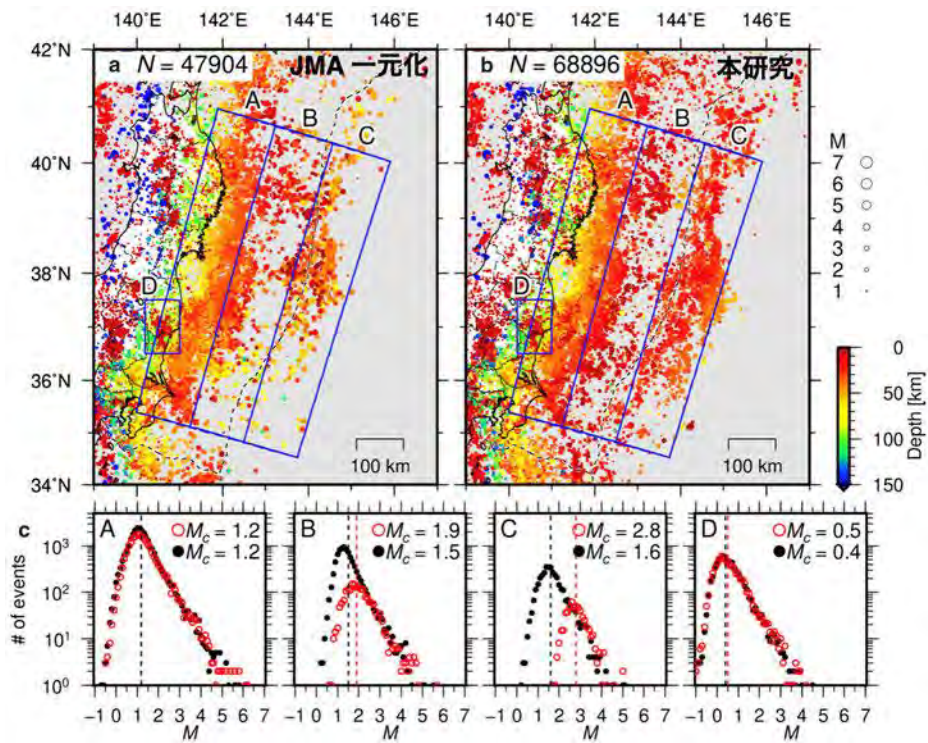


図22. S-netを含む基盤的地震観測網のデータから、機械学習による自動ノイズ除去法を適用して作成した震源カタログ（Tamaribuchi et al., 2021より改変、気象庁〔課題番号：JMA_01〕）

下段の規模別頻度分布には、JMA一元化カタログによるものを赤丸、本研究によるものを黒丸で示した。

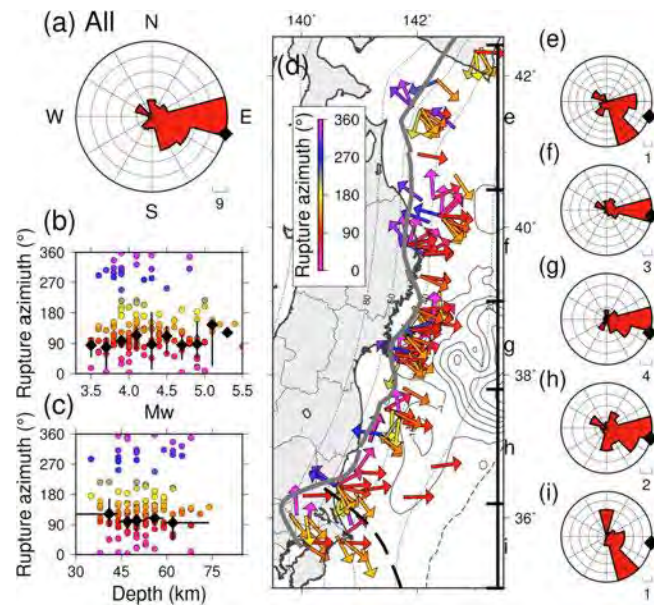
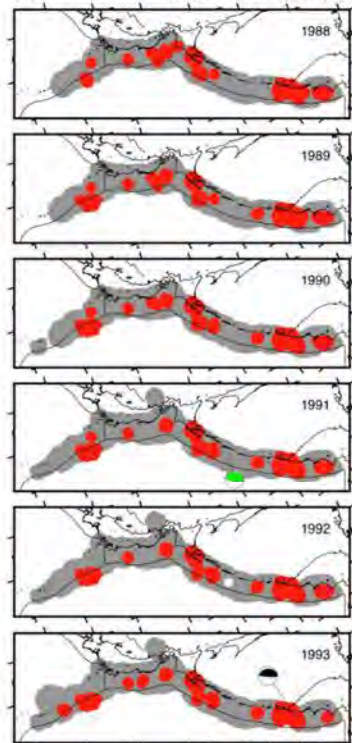


図23. プレート境界地震の破壊伝播方向の方位依存性の推定結果 (Yoshida et al., 2022より
改変、東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09])

(a)破壊の進行方向の頻度分布。黒いひし形はメカニズム解データに基づくupdip方向。(b,c)破壊の進行方向とモーメントマグニチュード、セントロイド深さとの関係。(d)破壊の進行方向。破線はフィリピン海プレートの北東限 (Uchida et al., 2009)、灰色線はプレート境界型地震の下限(Igarashi et al., 2001; Uchida et al., 2009; Kita et al., 2010)。黒線は東北沖地震のすべり分布(Iinuma et al., 2012)。 (e-i) (d)で示した各領域の頻度分布。

アラームマップの例: 赤がアラームON,
(a) 灰がアラームOFF域。



1988-2015のM7.5-8.5全て(8個)
をターゲットにした場合のROC。

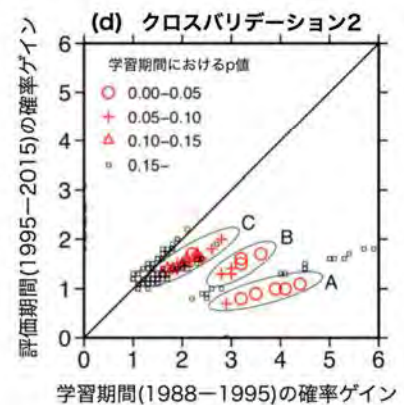
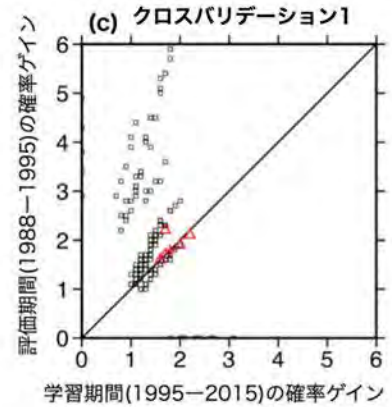
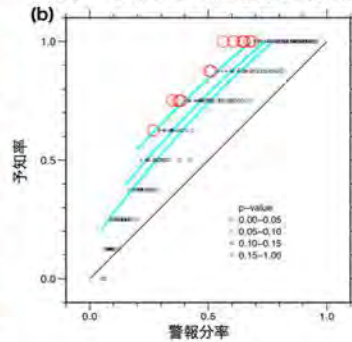


図24. 長期静穏化によるM7.5-7.8地震の試行予測成績とクロスバリデーション (Katsumata and Nakatani, 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])

(a) 黒白のビーチボールは警報ONの時空におきた予測対象地震。緑白のビーチボールは警報OFFの時空におきた予測対象地震(見逃し)。(d)では過学習が起きており、A、B、Cの楕円は過学習メカニズムの内実に対応

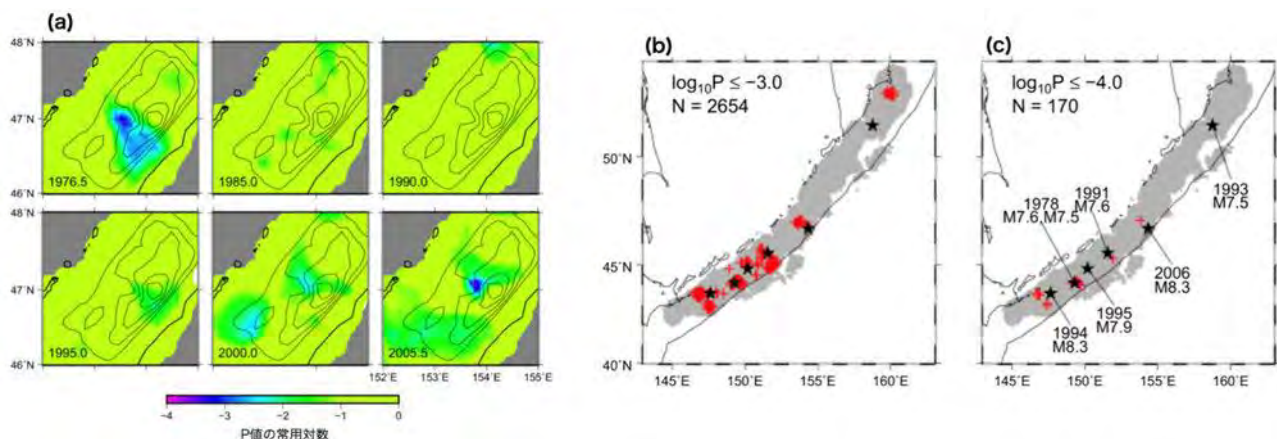


図25. PMAP法による静穏化現象の検出 (Katsumata and Zhuang, 2020より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])

(a) 2006年11月15日のM8.3地震の震源域でのP値分布のスナップショット。コンターは2006年11月15日のM8.3地震の滑り量1、4、7、10、13m (Lay et al., 2009)。 (b) P値が0.1%以下である静穏化が検出された位置を赤十字で示す。星印は、研究期間におきたM7.5以上の地震。 (c) P値が0.01%以下の静穏化が検出されたグリッドの位置を赤十字で示す。星印は、研究期間におきたM7.5以上の地震。

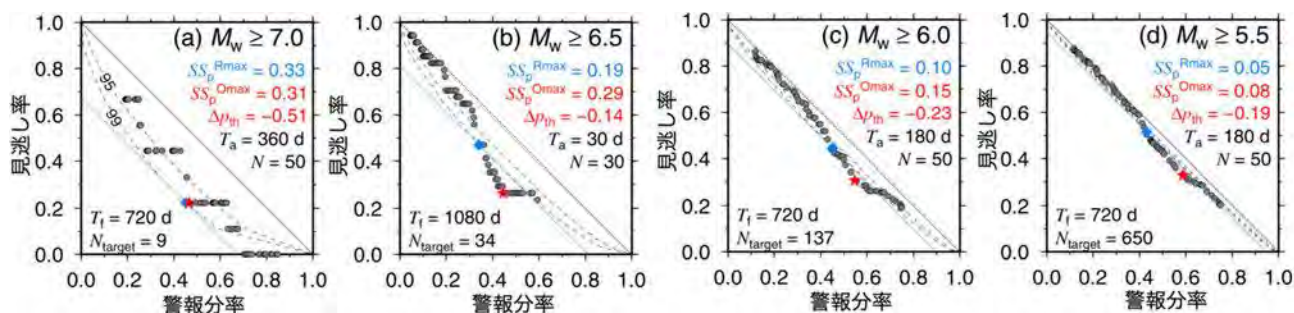


図26. 背景地震活動の潮汐同期に基づく、トンガ・ケルマディック地域の地震予測成績を示すROCダイアグラム (Hirose et al., 2022より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、気象庁 [課題番号: JMA_01])

(a) $M7.0$ 以上、(b) $M6.5$ 以上、(c) $M6.0$ 以上、(d) $M5.5$ 以上の地震を予測対象とした場合。黒実線は無相関の場合に期待される関係。破線は帰無仮説(無相関)を有意水準99%および95%で棄却する閾コンター。各パネルの右上に予測対象とする地震の下限マグニチュードを示した。左下に示した N_{target} は予測対象地震の数。赤い星はピアスのスキルスコアが最大(値 SS_p^{Omax})になるよう最適化した予測モデルの成績で、そのモデルのパラメタ (T_f (潮汐同期の変化をみる期間), Δp_{th} (同期が強くなったと判断するシュスター値変化の閾値), T_a (警報の持続期間), N (シュスター値計算に使うイベント数)) の値を各図に示した。青い菱形は99%有意のコンター上でスキルスコアが最大(値 SS_p^{Rmax})になるところ。青い細線は $SS_p = SS_p^{\text{Rmax}}$ のコンター。

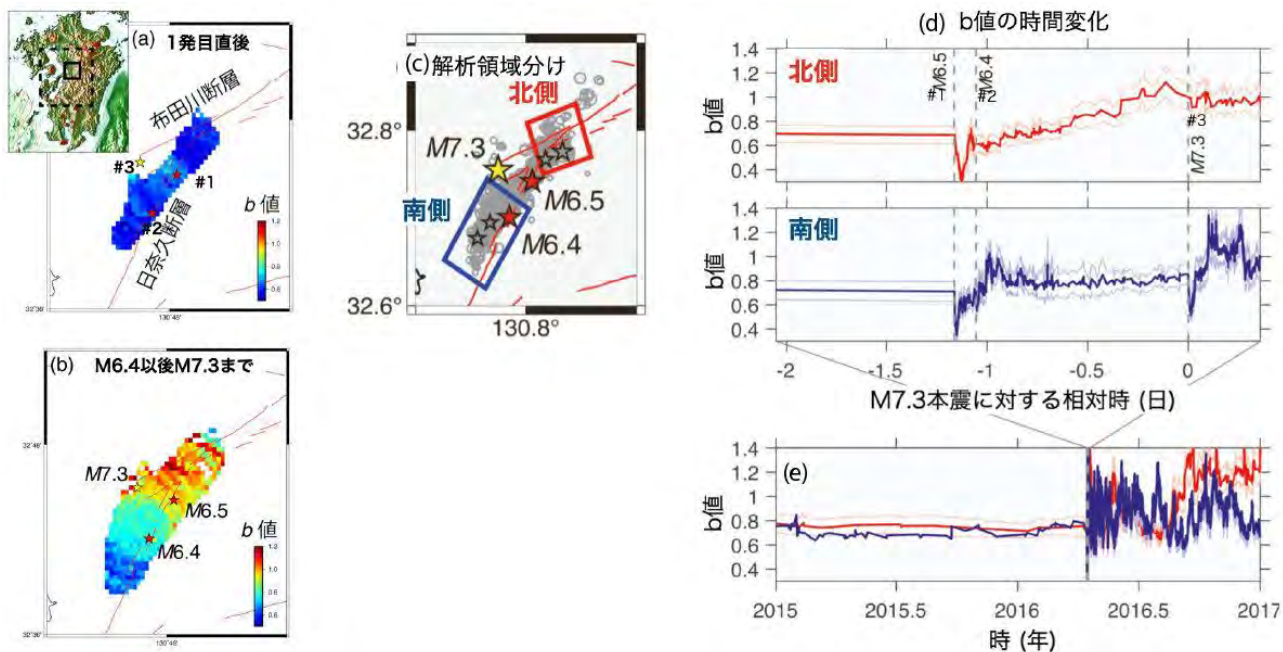


図27. 2016年熊本地震系列におけるb値の時空間変化（楠城, 2021, Nanjo et al., 2022より改変、東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕）

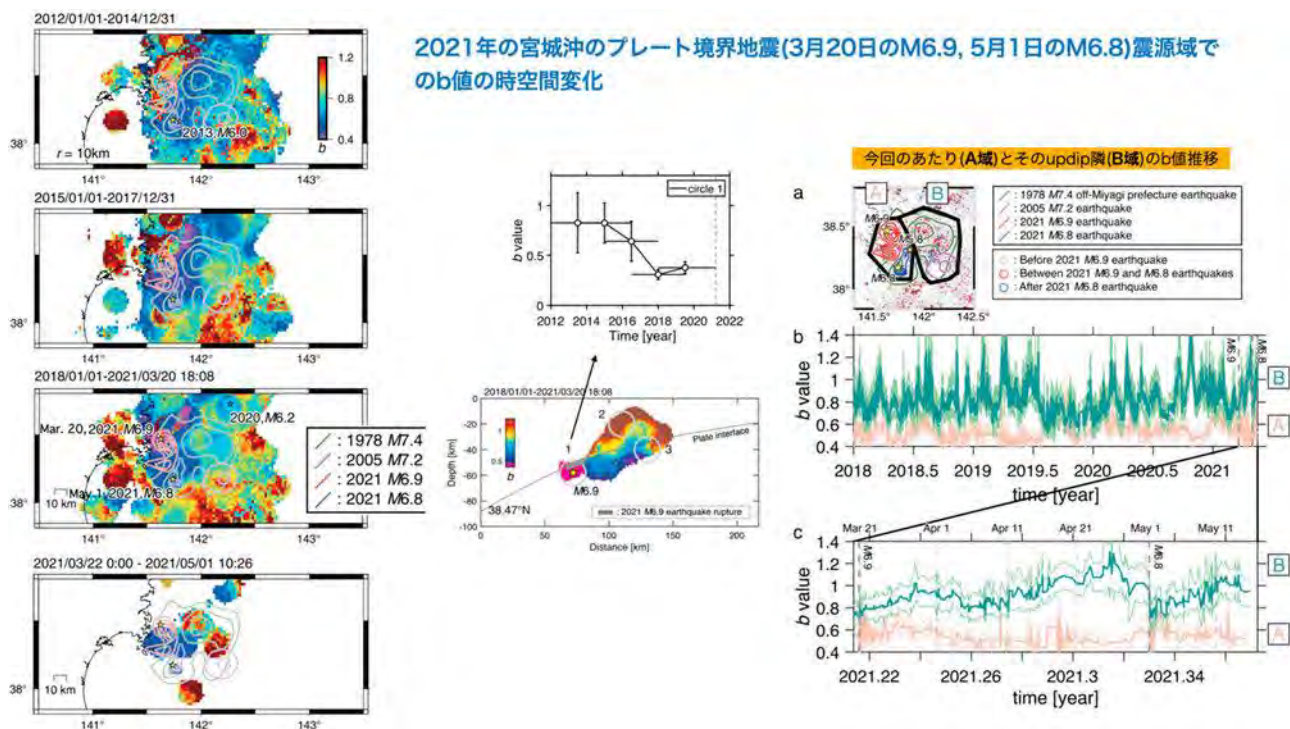


図28. 2021年宮城県沖のプレート境界型地震の震源域におけるb値の時空間変化（Nanjo and Yoshida, 2021より改変、東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_13〕）。

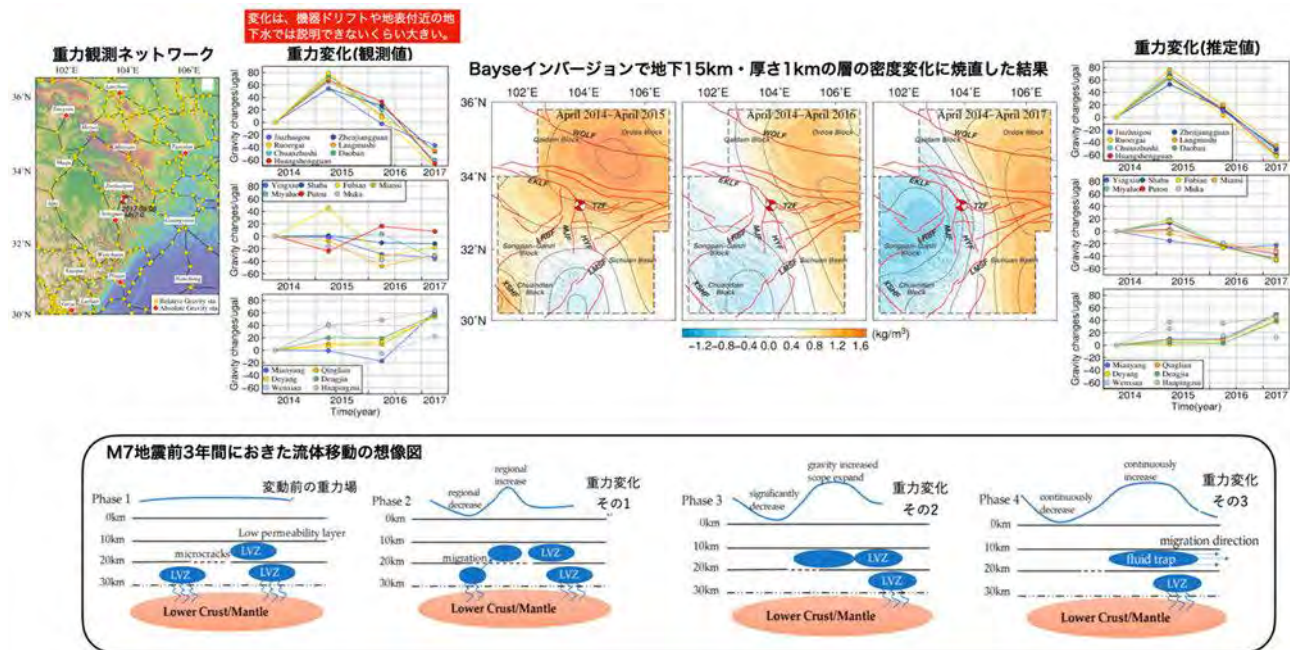


図29. 2018年8月8日チベット高原東縁Jiuzhaigou地震(M7)数年前の広域重力変化(Yang et al., 2021より改変、東京大学地震研究所〔課題番号: ERI_13〕)

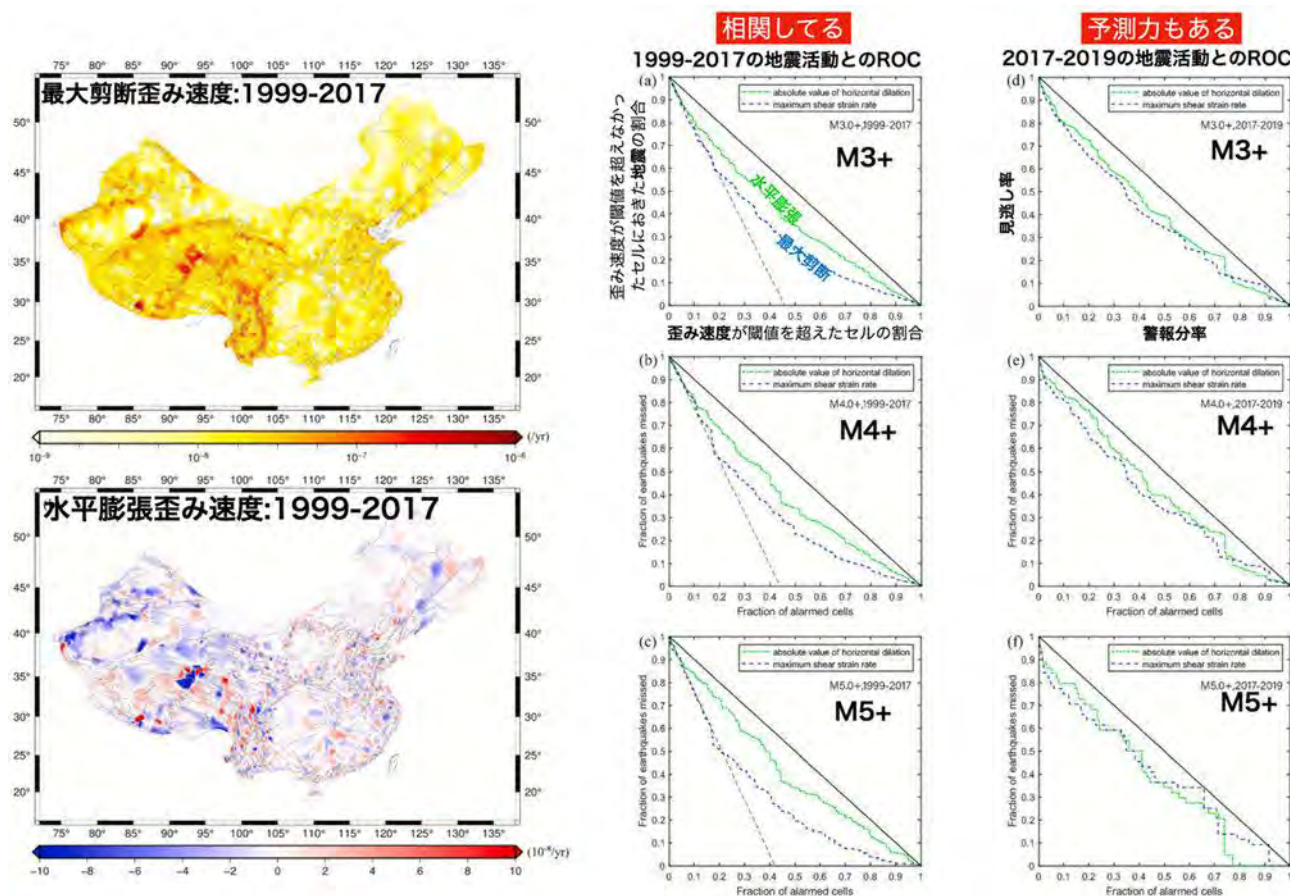


図30. 中国全土のGNSS歪みレートと背景地震活動の比較(Xiong et al., 2021より改変、東京大学地震研究所〔課題番号: ERI_13〕)

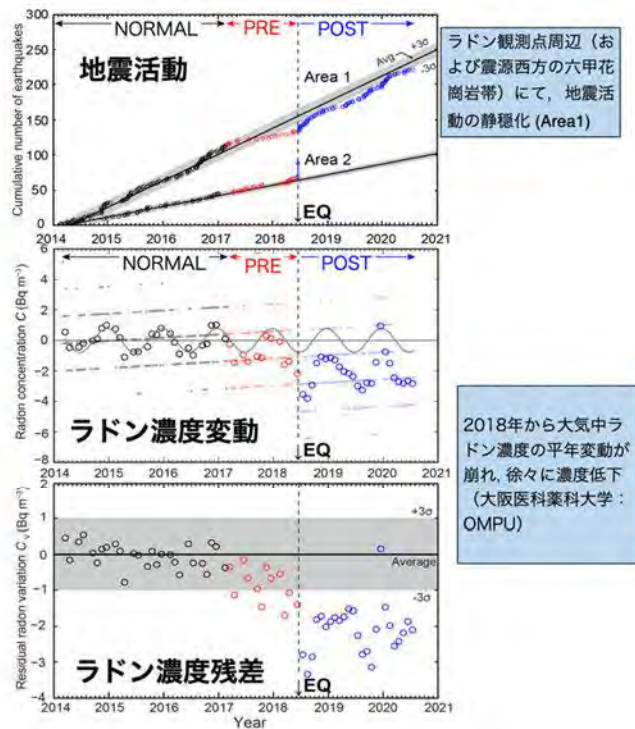
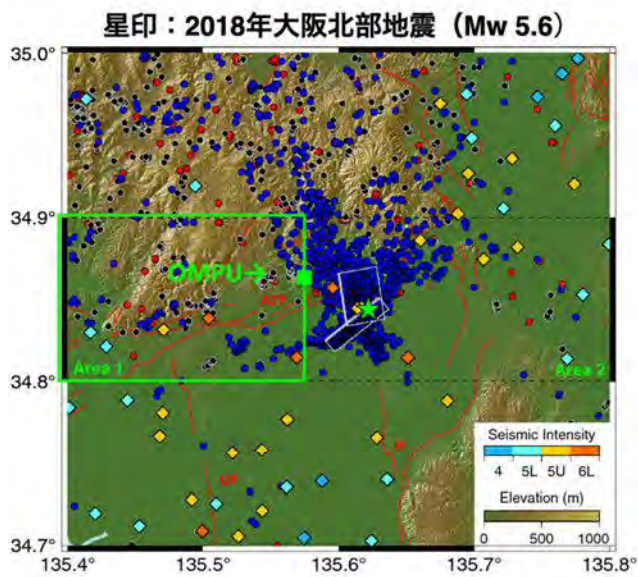


図31. 2018年大阪府北部地震に先行した大気中ラドン濃度変動（Muto et al., 2021より改変、東北大学〔課題番号：THK_10〕）

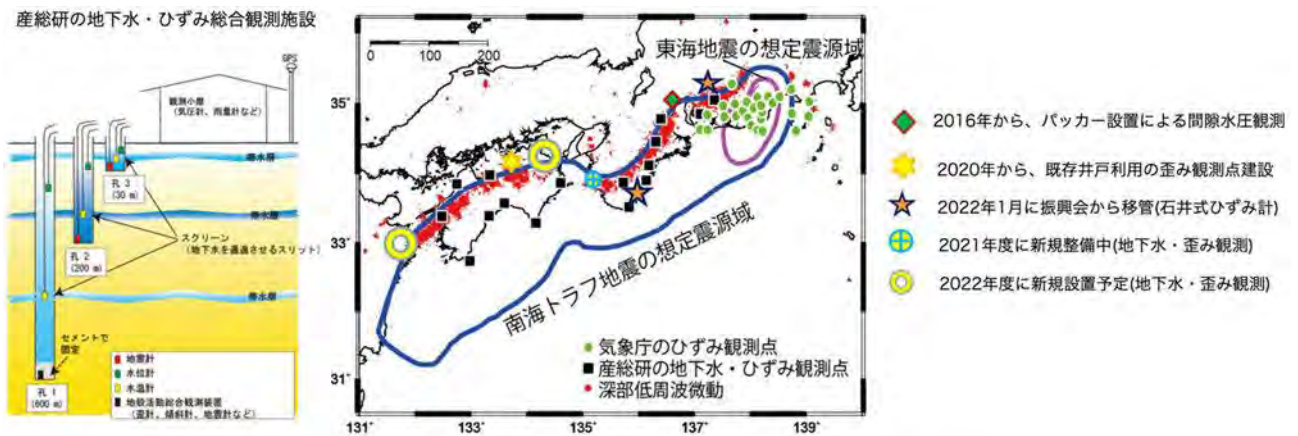


図32. 南海トラフ地下水・歪み観測網の整備状況（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST09〕）

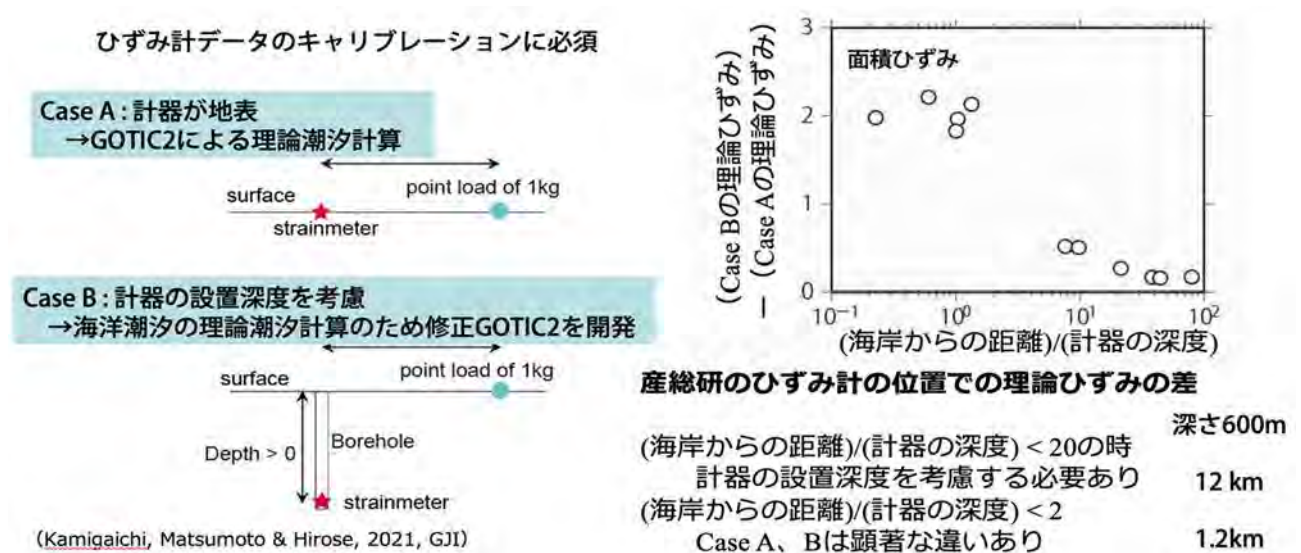


図33. 設置深度を考慮した海洋潮汐による理論ひずみの計算 (Kamigaichi et al., 2021より改変、産業技術総合研究所 [課題番号: AIST09])

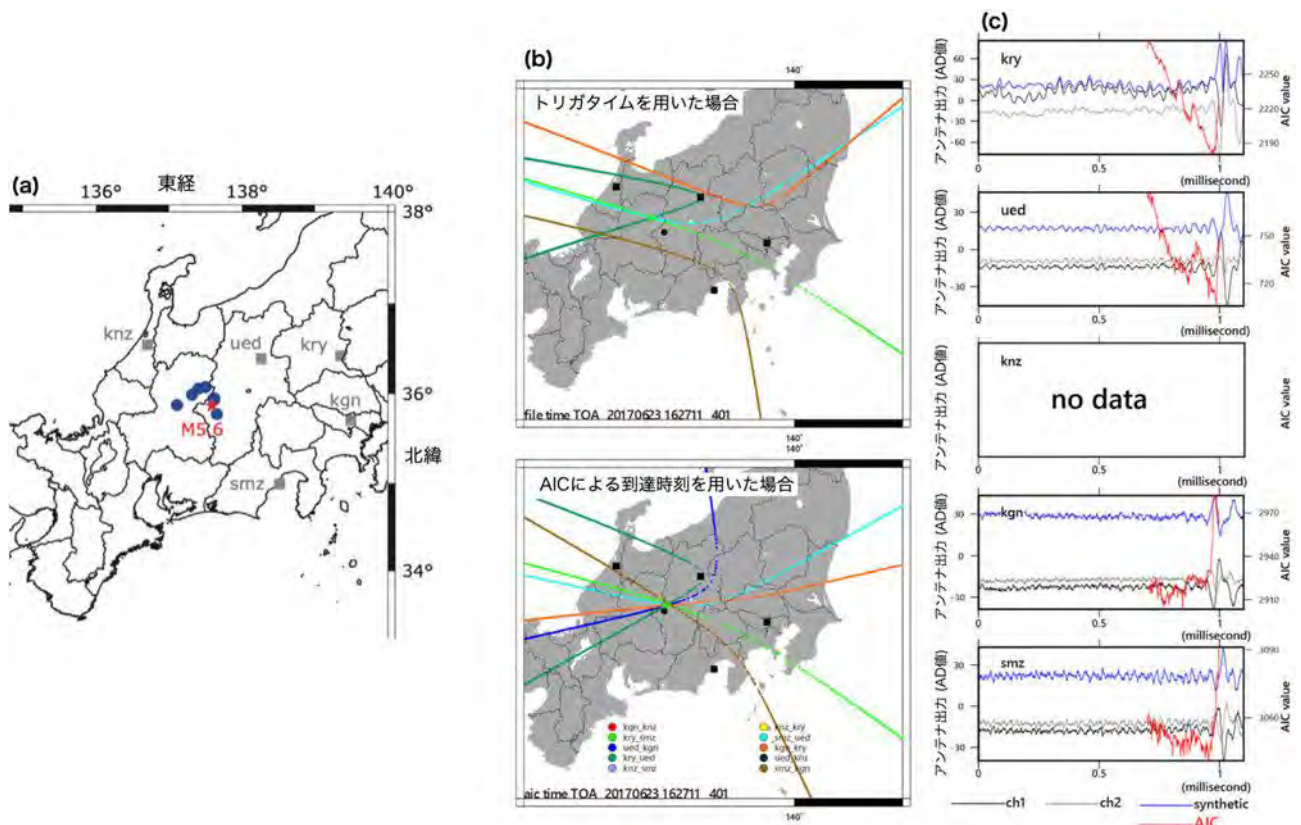


図34. 地震前兆の可能性のあるVLF帯電磁波パルスの観測例 (Nagao et al., 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、千葉大学 [課題番号: CBA_01])

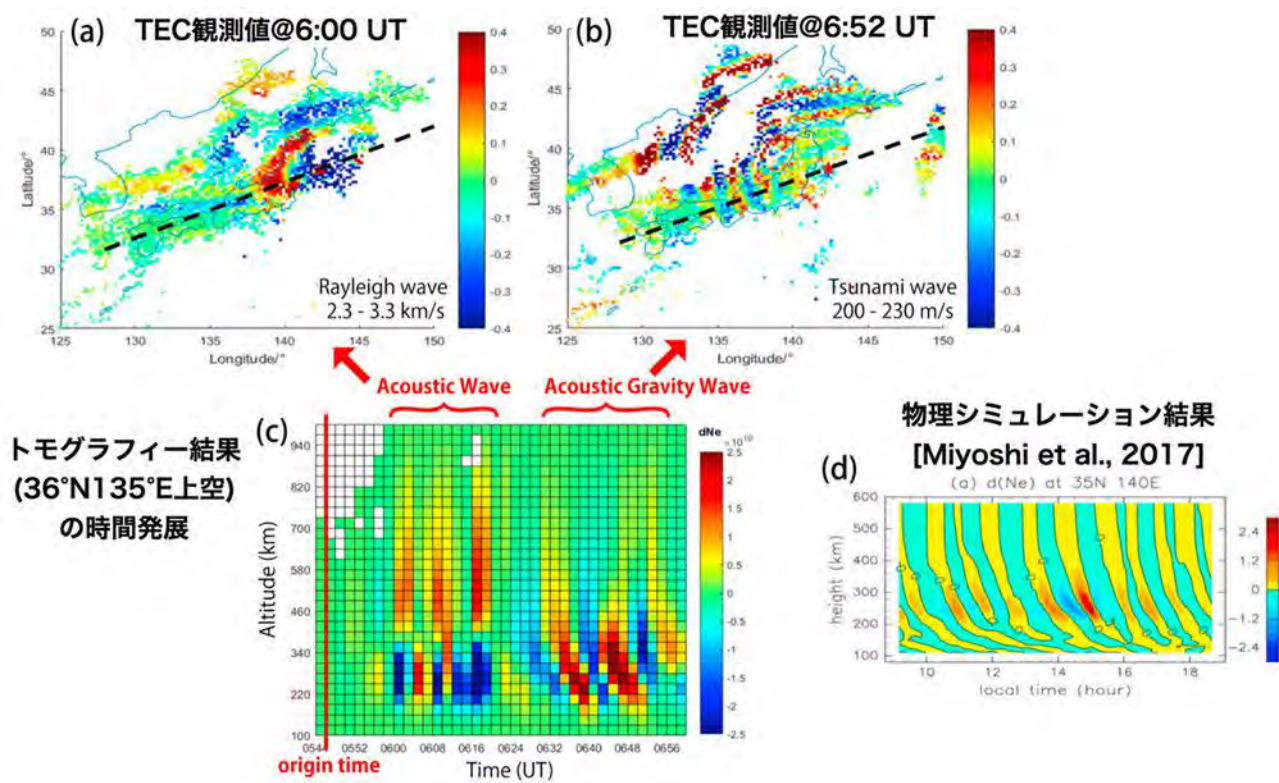


図35. 東北沖地震(2011031105h46mUT)の地震動および津波で励起された電離圏電子変動の3次元構造(宋, 2022より改変、千葉大学[課題番号:CBA_01])

1（4）火山

「火山」計画推進部会長 中道 治久

（京都大学防災研究所）

副部会長 前野 深

（東京大学地震研究所）

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

1. 地震・火山現象の解明のための研究

（1）地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

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

マグマの状態と噴火様式の関連性を調べるために、富士火山の爆発的噴火による噴出物の全岩化学組成の分析およびRhyolite-Meltsプログラムによる熱力学的解析を進め、マグマ供給系について考察した。その結果、定圧および減圧どちらの条件の結晶分化においても、組成変化の傾向を再現するためにはマグマ中の初期含水量が低い必要があることがわかった。また冷却や減圧に伴うマグマの密度変化を考慮すると、深部マグマ溜まりからマグマが上昇開始するためには、より深部からのマグマ注入による過剰圧の獲得が必要であることもわかった（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_02〕）。約7500年前の摩周カルデラ形成期の降下火砕物（Ma-g~j）を対象に地質調査および採取した軽石試料の発泡度、気泡数密度の分析を行い、噴火後半にかけて発泡度が増大し、気泡数密度が低下していく傾向を明らかにした（公募研究〔課題番号：KOB021〕）。白根火砕丘群の各噴出物の層序・分布調査、薄片記載と全岩化学組成分析等の物質科学的解析を行い、白根火砕丘群の溶岩と火砕丘構成物（火砕堆積物）がそれぞれ固有の組成範囲と組成変化傾向をもっていることを明らかにした。また、本白根火砕丘群に見られる小火口の活動履歴調査により、計4個の火口の活動年代（2700年前、1700年前、700年前、400年）や、火砕丘群本体の形成後もVEI 1程度の水蒸気噴火が頻発していたことを明らかにした（富山大学〔課題番号：TYM_01〕）。将来噴火する可能性の高い活火山の中長期的活動評価と予測のため、火山の地質図作成を進め、恵山火山地質図を出版したほか、日光白根火山の地質図及び論文をまとめた（草野・他，2021）。伊豆大島では海陸をつなぐ沿岸部水深400 m程度までの範囲で精密海底地形地質調査を実施した。また、大規模火砕流分布図シリーズとして「始良カルデラ入戸火砕流堆積物分布図」をWeb公開した。日本列島の火山

の基礎情報を最新の知見に基づいて収集・整理するため、日本の火山データベースに桜島と富士山の完新世噴火イベントのデータを公開するとともに、20万分の1日本火山図を更新・拡充した（宝田・他，2021）（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST03〕）。

（２）低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

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

伊豆大島の大規模噴火（Y1やY4など）の推移で見られる斜長石斑晶量の増加と同様に、中規模噴火から小規模噴火への長期的推移において斜長石斑晶量がしだいに増加していることを明らかにした。このことは噴火規模により時間スケールは異なるものの、斜長石増加の共通の仕組みが存在することを示唆する。また、大中規模噴火噴出物の岩石組織や粒子物性を比較したところ、噴火強度と噴出物の微細構造・組織に相関があることがわかった。西之島については2019-2020年噴火における噴火様式や化学組成の劇的変化が、より深部に由来する苦鉄質マグマの上昇に起因していることを明らかにした（Maeno et al., 2021）（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_03〕）。カルデラ噴火については、噴火準備段階からの活動の推移・履歴を把握するとともに、その推定精度を上げる手法の開発・改良を進める必要がある。支笏カルデラ試料のU-Th放射非平衡の解析を行い、二成分マグマ混合によって生成された珪長質噴出物のうち一方の端成分マグマの生成率を15 km³/万年程度と推定した。阿寒カルデラの後カルデラ活動についての解析では阿寒富士を対象に物質科学的解析を進め、マグマ供給系やマグマ生成条件を解明した（Kuritani et al., 2021）（北海道大学〔課題番号：HKD_02〕）。鬼界カルデラを対象にした研究航海により、海底電位差磁力計等の長期海底観測機器の回収・設置と、航走観測、試料採取を行った。また、鬼界カルデラ周辺の島においても地質調査を行うとともに、これまでの研究航海により取得した地球物理学的観測データの解析や堆積物・岩石試料の物質科学的解析を進めた。ピストンコア試料とドレッジ試料については全岩化学組成分析および火山ガラスの化学組成分析を行い、鬼界火山全体のマグマの多様性および噴火活動ステージにおける特徴を明らかにした（神戸大学〔課題番号：KOBE01〕）。

（４）火山現象の解明とモデル化

ア．火山現象の定量化と解明

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

ドローンと無人ヘリコプターを用いた空中磁気観測の実施及びデータ解析を行っており、三宅島において無人ヘリコプターと同じ範囲でドローンを用いた空中磁気測量を行った。そして、磁化強度分布の推定から、カルデラリム下の強い磁性と、カルデラ内側の弱い磁性が見出されたことから、2000年噴火によるカルデラ崩壊によるカルデラ内の磁性の弱化もしくは磁化方向のランダム化が示唆された（図1）。また、西之島の2019年から2020年の噴火活動に対して、衛星赤外画像と地形変化から噴出率・噴出量の推定と噴出状況を明らかにし、3ステージからなる噴火活動モデルを提案した（図2、Kaneko et

al., 2022) (東京大学地震研究所[課題番号:ERI_07])。2020年11月に阿蘇山にて空中電界変動観測を開始し、2021年10月14日および20日の噴火に伴う空中電界変動を比較したところ、20日の変動が14日の変動に比べて20倍以上大きいことを明らかにした(東北大学理学研究科[課題番号:THK_03])。火山活動にともなって放出されるマグマ起源の二酸化炭素を面的に測定するための小型かつ安価な装置の開発を進めており(図3)、二酸化炭素センサー部を更新することにより、既存機と同等の性能が得られた(東京工業大学[課題番号:TIT_02])。弥陀ヶ原火山の地獄谷において2015年から毎年水準測量を実施しており、2016年から2020年にかけて最大6 cm程度の沈降を検出した。この沈降は、噴気活動が継続している紺屋地獄・新噴気帯の直下の深さ50 mに長さ650 m、幅425 m、傾斜角67度の割れ目が59 cm閉口することで説明された(図4)(富山大学[課題番号:TYM_02])。地震波ノイズの相互相関を用いて連続的に測定した地震波速度変化量と波形相関の低下量の異常度を定量的に評価する手法を開発し、2016年10月8日の阿蘇山の爆発的噴火に前駆する異常度の増大を検出した。また、火山灰自動採取・可搬型分析装置および自動火山灰分類システムを開発・改良し、機械学習を用いて火山灰の構成物の割合を自動把握し、マグマ性噴火および非マグマ性噴火を即時判定する技術の有効性を確認した(防災科学技術研究所[課題番号:NIED01])。岩石磁気学および古地磁気学手法を用い、阿蘇火山中岳新期山体および最新期火砕丘の噴火活動時期の分類と年代測定を行った(穴井・他, 2021)(公募研究[課題番号:KOB023])。

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

火道内をマグマが上昇する際に発生する現象の再現実験を行い、マグマ中の塩素の濃度分布パターンの変化を明らかにし、天然の溶岩の塩素濃度分析結果と比較することで、溶岩内部の脱ガス現象を明らかにした(Yoshimura and Nakagawa, 2021)(北海道大学[課題番号:HKD_03])。十和田火山・御蔵山溶岩ドーム試料の岩石記載と浸透率測定実験を行ったところ、石基は微小な斜長石を骨格とした多孔質構造で、大量のシリカ鉱物が気相成長した痕跡が認められた。また、空隙率に対して高い浸透率が得られた。これらの結果をもとに、空隙率に対する浸透率の高さが溶岩ドームの爆発性の支配要素であることを示した(東北大学理学研究科[課題番号:THK_04])。阿蘇山と桜島にてMulti-GASの火山ガス組成観測を行うとともに、福徳岡ノ場2021年噴火の二酸化硫黄放出率の時系列変化を衛星データから明らかにした(産業技術総合研究所[課題番号:AIST06])。

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造解明

火山地域においては、火山活動を支配する場のモデル化を進めるために、地震波速度・減衰構造や比抵抗構造等を明らかにすることが必要である。

鬼界カルデラを対象とする、研究船「かいめい」によるKM21-5航海において、海底磁力計の回収と海底電位差磁力計の設置を行った。また、薩摩硫黄島、竹島、黒島に陸域用磁力計を設置することで、海陸電磁気観測網を構築した。また、KM22-01航海にて、海底掘削および無人探査機により海底観察および地質試料採取を行い、鬼界アカホヤ噴火による大規模火砕流堆積物の分布を推定した(神戸大学[課題番号:KOB001]、海洋研究開発

機構[課題番号: JAMS03])。火山人工地震探査データからH/V比とサイト増幅特性を求めて、火山地帯における地震波動場の特性の検討を行った。その結果、人工地震のコード波と雑微動から推定した相対的サイト増幅係数は一致することが明らかになった(図5) (東北大学理学研究科[課題番号: THK_08])。2018年本白根山噴火直後に草津白根火山で実施した空中磁気測量データから磁化分布を推定し、逆帯磁と地質構造との対応を見出した(Koyama et al., 2021)。また、2018年本白根山噴火に伴う傾斜記録の初動付近の解析から、Terada et al. (2021)が推定した開口割れ目の下端部に新たな増圧源を見出した。さらに、湯釜火口湖の化学組成成分の時間変動予測モデルを構築した(Terada et al., 2022) (東京工業大学[課題番号: TIT_03])。鹿児島湾および南西諸島海域を対象に、ヘリウム-3をトレーサーとして用いる海底火山活動調査を実施し、ヘリウム-3が始良カルデラの同じマグマ溜まりに起源をもつ若尊カルデラと桜島火山の活動度の違いを反映していることを明らかにした(Nakajima et al., 2022) (東京大学大気海洋研究所[課題番号: AORI02]、公募研究[課題番号: KOB013])。蔵王火山の御釜周辺での気象観測と御釜湖の水溫・溶存物質濃度の観測を行い、熱流量変化の解析から、御釜への流入水は有意な熱量を持つ地下水起源であることを明らかにした(Chikita et al., 2022) (公募研究[課題番号: KOB022])。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

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

高精度なテフラ対比を行うため、テフラの気泡組織および鉱物組織の解析環境を整備し、実際に解析に着手した。岩石組織のデータをこれまでに取得したテフラの化学組成・粒子形状データと組み合わせることで、テフラのキャラクタリゼーションを進めた。また山中湖のコアを用いて湖沼堆積物のC14年代測定を実施し、年代-深度モデルの構築を進めた(Yamamoto et al., 2021; Ota et al., 2021) (山梨県富士山科学研究所[課題番号: MFRI_01])。伊豆大島、浅間山、霧島山において、過去数100年の噴火を対象とした噴出物の地質調査を行い、テフラ層の区分や特徴の明確化と、岩石鉱物化学組成・組織など物質科学的情報の収集を進めた。とくに霧島山については歴史時代の大規模噴火の推移や小規模噴火を含む中長期履歴を明らかにするための調査を行い、火砕堆積物の分布や層区分を検討した。13世紀御鉢噴火については、粒子物性および岩石組織の定量解析を進め、噴火推移に応じた系統的变化を明らかにした(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_03])。白根火砕丘群噴出物のうち噴出年代が不明な溶岩群について、古地磁気年代や放射性炭素年代の測定を実施した(富山大学[課題番号: TYM_01])。中長期的活動評価と予測のため、雌阿寒岳、秋田焼山、御嶽山では地表踏査による噴火履歴調査を継続して実施した。また活動的火山で高分解能な噴火履歴を解明するために、白山火山及び御嶽火山の岩石試料を対象としたK-ArおよびAr/Ar年代測定を実施し、10万年前より若い火山噴出物の噴火年代を明らかにした(産業技術研究所[課題番号: AIST03])。

イ. モニタリングによる火山活動の評価

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

火山活発化指数（VUI）の試験的導入を進めており、VUIの評価項目として熱消磁（地磁気変化）の導入を検討した（橋本，2022）。また、吾妻山（Ichiki et al., 2021）と十勝岳（Tanaka et al., 2021）では3次元比抵抗構造が高分解能で推定された（北海道大学[課題番号：HKD_04]）。阿蘇火山と吾妻山を対象にVUI策定作業を進め、吾妻山について作業を完了させた（北海道大学[課題番号：HKD_04]、京都大学理学研究科[課題番号：KUS_02]）。定期船（フェリー）搭載の簡易トラバース装置にて薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島の二酸化硫黄放出率の観測を行い、口永良部島の二酸化硫黄放出率の2020年5月頃からの指数関数的な減少と、2021年後半の数10トン/日もしくは検出限界以下レベルへの低下を明らかにした（東京大学大学院理学系研究科[課題番号：UTS_06]）。時間分解能の高い歴史記録を有する世界の噴火20事例を収集した噴火推移データベースを作成し、福岡ノ場火山およびHunga Tonga火山の噴火事例を収録してデータベースの上で過去の噴火事例と比較できるようにした。また、霧島新燃岳の2011年噴火と2018年噴火の近傍堆積物の層序および組織の解析からブルカノ式噴火発生メカニズムの解明を進めた（Matsumoto et al., 2021）（産業技術総合研究所[課題番号：AIST10]）。草津白根山、浅間山、伊豆大島、桜島、霧島山について、GNSSデータに対する時間依存インバージョンの手法を適用し、マグマ溜まりの時間変化を推定した。草津白根山については、2017年後半から見られた体積膨張が2021年から停滞していることが分かった（Munekane, 2022）（国土地理院[課題番号：GSI_03]）。雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島にて全磁力の繰り返し観測から熱的活動の推定を行うとともに、雌阿寒岳と草津白根山においては磁気測量により磁気異常分布を明らかにした（気象庁[課題番号：JMA_04]）。草津白根山の湯釜火口湖の湖水採取・分析を行い、1982年以降の噴火の前後で上昇した湖水のMg/Cl比が2019年以降にわずかに上昇して増減を繰り返していることを明らかにした（Yaguchi et al., 2021）。また、焼岳の1962年噴火の火山灰を分析し、火山灰が熱水変質帯由来であり、黄鉄鉱や石膏などの鉱物種と多量の水溶性成分が存在することを明らかにした（Yaguchi et al., 2022）（気象庁[課題番号：JMA_05]）。北海道駒ヶ岳にて温泉水の地球化学的観測と火口での噴気温度観測、山麓での地下水位連続観測を行った。さらに、これらのデータに加えて、噴出物中の熱水変質鉱物の検討を行い、火山体内部の熱水系について検討した（Takahashi, 2022）（北海道立総合研究機構[課題番号：HR0_01]）。

（５）火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

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

インドネシアの火山を対象に火山活動推移モデルの構築を進めた。グントール火山において過去30年間の火山性地震のエネルギー放出率を評価した。1847年の最後の噴火か

ら現在までの約170年間の噴火活動休止期における地震活動が最近30年間の活動と同様と仮定すれば、170年間のエネルギー積算値は220GJ程度となり、あり得る最大噴火規模はVEI4と推定される。また、2021年12月4日にスメル火山で火砕流が山頂から南東方向に16 km流下したが、火砕流に前駆する火山構造性地震の発生頻度は低く、2021年1月・2月の火砕流発生以降は岩石崩落もない(図6)。そのため、マグマの急速な貫入による溶岩ドーム崩落によって火砕流が発生したのではなく、溶岩ドームの不安定性による自己崩壊で火砕流が発生したと推定した(京都大学防災研究所[課題番号: DPRI06])。桜島火山を対象に地震、GNSS、伸縮、傾斜、ガスの連続観測ならびに火山灰のサンプリング調査を行った。また、繰り返し水準測量と重力測定から、桜島中央部における年間最大7 mmの地盤沈降と、年間最大4.3 microgalの重力増加が継続していること(図7)が明らかになり、この重力増加は地盤沈降だけでは説明出来ず、桜島直下の質量増加を示唆している。2017年以降の南岳活動期において、始良カルデラから桜島へのマグマ移動は顕著ではないが継続しており、gas-richな噴火などにより脱ガスが卓越しているため、その分、桜島直下における質量増加が進行したと解釈できる。また、複数の地震観測点の波形相関を用いて、桜島におけるB型地震と連続微動を自動検出し、震源決定を行ったところ、両者ともに山頂火口下の深さ4 kmまでに分布し、水平方向の分布は深部へ貫入したと推定されているダイクの走向に沿っていることが明らかになった(Permana et al., 2021)(京都大学防災研究所[課題番号: DPRI07])。観測データの解析結果や物質科学的データの分析結果を整理して、火山活動推移のモデル化と噴火事象系統樹の分岐判断指標の作成を進めた。その一環として、大地震の発生による噴火の誘発を調べたところ、大地震の発生により0.5 micro strain以上の膨張という条件を満たす領域にある火山においては、VEIが2以上の噴火発生数が、大地震発生後数年間は2-3倍程度高まることが明らかになった(Nishimura, 2021)(東北大学大学院理学研究科[課題番号: THK_11])。蔵王山の過去800年間の噴火推移の類型化を進め、テフラ層内の岩相変化および噴出物の岩石学的特徴をもとに噴火推移の解明を試み、マグマ水蒸気噴火と小規模マグマ噴火の発生順序を明らかにした(Takebe et al., 2021)(公募研究[課題番号: KOB015])。

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

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

堆積物解析手法の高度化と、噴出物時系列解析・分析手法の高度化を目指した研究を霧島、阿蘇、諏訪之瀬島、榛名等の活動的火山で実施した。2021年10月阿蘇中岳噴火の際には、火山観測データ一元化共有システム(JVDNシステム)を活用した複数機関の連携による降灰調査をはじめて実施し、降灰分布や噴出量の迅速な推定を行うとともに、システムの有用性と問題点の洗い出しを行った。草津白根火山2018年水蒸気噴火における噴出物分布と複数手法により検討した噴出量に関する論文を出版した(Kametani et al., 2021)。西之島における2019-2020年噴火および2021年噴火の噴出物の調査および試料採取、地形データの取得を環境省と協力して実施した。西之島の採取試料の化学組成分析

により、2020年噴火の際の安山岩から玄武岩質安山岩への劇的な化学組成変化のタイミングに制約を与えることができたほか、2021年も玄武岩質安山岩による活動が継続していることなどを明らかにした（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_17〕）。

5. 研究を推進するための体制の整備

（１）推進体制の整備

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

2021年6月と12月に火山噴火予知連絡会本会議を開催し、全国の火山活動の状況についての検討を行った。また、本会議とは別に火山活動の検討が必要とされた火山では、部会を設置して集中検討体制を確保することとしており、口永良部島部会を2021年6月と12月に、霧島山部会と草津白根山部会を6月にそれぞれ開催し、火山活動の検討を行った（気象庁〔課題番号：JMA_08〕）。

（３）研究基盤の開発・整備

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

全国50火山を対象に地震計、空振計、GNSS、監視カメラ等による連続監視観測を継続した。また、GNSS繰り返し測定や熱の機動観測を実施し、口永良部島、阿蘇山、桜島などにおいて二酸化硫黄放出率観測を実施した（気象庁〔課題番号：JMA_12, JMA_15〕）。光計測技術を用いた地震計と重力計の開発を進めるとともに、それらを光ファイバで接続することによって地下深部や火山近傍に観測網を構築するための手法の確立を目指している。その一環として、小型絶対重力計を開発して南極にて観測を実施した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_20〕）。桜島火山に設置した超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムからの画像データを機械学習することで噴火判定を導出する技術（MuNET-2）を開発し、2019年以降の画像と南岳火口の噴火との関係を見出した（図8）（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_21〕）。航空機による南方諸島および南西諸島における海域火山の定期巡回監視観測を実施した。なお、福徳岡ノ場および西之島については監視体制を強化し、月1回程度の監視観測を実施した。また、測量船により硫黄島の海域火山基礎情報調査を実施した（海上保安庁〔課題番号：JCG_04〕）。

これまでの課題と今後の展望

「火山」計画推進部会には、41の研究課題に加えて、当該年度の公募研究が10課題あり、地震火山観測研究計画において最大の計画推進部会（以下、部会）である。そのため、課題間の連携やそれぞれの課題における研究の深化のための取り組みも部会の重要な役割と考えられる。そのため、単独課題による研究集会に加えて、部会に関係の深い総合研究グループによる研究集会や複数課題による合同研究集会が開催されている。桜島大規模噴火総合研究グループ研究集会が12月21日・22日に鹿児島市で開催されたほか、北海道大学の課題（HKD_04）と京都大学理学研究科の課題（KUS_02）合同の研究集会が5月24

日・25日に、東北大学理学研究科の課題（THK_11）の研究集会が2022年1月13日・14日にオンラインでそれぞれ開催された。また、部会全体の研究集会は2月15日・17日・24日にオンラインで開催した。このように、各課題は部会と総合研究グループの両方で研究の議論をする形が定着した。

この3年間における部会の研究課題に見られた様々な進展の特徴について以下にまとめる。なお、火山活動の状態や分岐・遷移を表すパラメータ間の相互関係が見えてきたことについては昨年度の報告書で述べたとおりであるので省略する。

この3年間における進展の特徴の一つ目は、観測手法や分析および解析手法の開発が大きく進展したことである。無人機を使った空中磁気観測においては、従来利用されている無人ヘリコプターに加えて電動ドローンの使用も進んでいる。無人ヘリコプターの運用において人工衛星経路による遠隔操作手法が確立されたことから、長時間飛行が可能な無人ヘリコプターは比較的広域の観測用、電動ドローンは小規模で低コストの観測用という住み分けが進んだ（東京大学地震研究所[課題番号:ERI_07]）。また、年代測定手法のひとつであるU-Th放射非平衡測定法が確立されたことで、カルデラ形成噴火の準備段階としてのマグマ停留時間が解明された（北海道大学[課題番号: HKD_02]）。二酸化硫黄放出率のトラバース測定装置（東京大学理学系研究科[課題番号:UTS_06]）と二酸化炭素放出率測定装置（東京工業大学[課題番号:TIT_02]）といった地表における火山ガス観測装置の高度化が進み、前者は定期船フェリーに搭載され火山監視データの取得に活用されている。一方、二酸化硫黄放出率の推定には人工衛星データが活用され、二酸化硫黄放出率を数百キロスケールで求めることや、一定時間間隔でのサンプリングが可能となった（北海道大学[課題番号:HKD_04]、産業技術総合研究所[課題番号:AIST06]）。火山モニタリングにおける人工衛星の活用に関しては、可視光や熱赤外観測や測地観測が従来から行われているが、マルチパラメータ化がさらに進んだと言えよう。人工衛星による観測は広範囲を把握できる特徴があるため大規模噴火のモニタリングに欠かせないことから、多様な衛星データ活用のための体制整備をさらに進めていくべきであろう。

この3年間における進展の特徴の二つ目は、広い時間および空間スケールにおいて分析や解析の分解能が向上したことである。例えば、古地磁気年代測定の導入により年代測定が高精度化されることで、テフラ層序から草津白根火山の完新世の噴火履歴の詳細が明らかになった（富山大学[課題番号: TYM_01]）。また、火山灰の高時間分解能サンプリングにより、火山灰構成粒子の時間変化が明らかになり、新燃岳2018年噴火の3つのステージにおける火道内プロセスの推定に貢献した（産業技術総合研究所[課題番号:AIST10]）。さらに、温泉水の高頻度サンプリング装置を用いることで、十勝岳の温泉水分析の時間分解能が向上し、Cl濃度やCl/SO₄比の変化と火映発生との対応関係の議論が進んだ（北海道立総合研究機構[課題番号: HR0_01]）。空間分解能の向上は火山深部構造の解明において見られ、例えば、草津白根山の湯釜火口周辺だけでなく本白根山、横手山、志賀高原を含めた領域での3次元比抵抗構造が明らかになり、草津白根山の広域のマグマ熱水系モデルの構築が行われた（東京工業大学[課題番号: TIT_03]）。

成果リスト

- 穴井千里・宮縁育夫・宇津木充・吉川慎・望月伸竜・渋谷秀敏・大倉敬宏, 2021, 古地磁気・岩石磁気学的手法を用いた阿蘇火山中岳火口周辺域の完新世噴出物の分類と噴火年代の再検討, 火山, 66, 3, 171-186, doi:10.18940/kazan.66.3.171.
- Chikita, K., A. Goto, J. Okada, T. Yamaguchi, S. Miura and M. Yamamoto, 2022, Hydrological and chemical budgets of Okama crater lake in Active Zao Volcano, Japan, Hydrology, 9, 2, 28, doi:10.3390/hydrology9020028.
- Cole, R.P., White, J.D.L., Dürig, T., Büttner, R., Zimanowski, B., Bowman, M.H., Conway, C.E., Leonard, G.S., Pure, L.R., Townsend, D.B., 2021, Controls on andesitic glaciovolcanism at icecapped volcanoes from field and experimental studies, Geology, 49, 1069-1073, doi:10.1130/G48735.1.
- 藤原 寛・山崎誠子・永塚弘樹, 2021, SPTを用いた重液分離の一例：K-Ar年代測定のための火山岩石基試料の分離, 地質学雑誌, 127, 727-732, doi:10.5575/geosoc.2021.0032.
- 橋本武志, 2021, 火山の活動不安定評価における熱消磁現象の活用と噴火予測の可能性, 地学雑誌, 130, 771, doi:10.5026/jgeography.130.771.
- Hotta, K., S. Kusumoto, H. Takahashi and Y.S. Hayakawa, 2022, Deformation source revealed from leveling survey in Jigokudani valley, Tateyama volcano, Japan, Earth Planets Space, 74, 32, doi:10.1186/s40623-022-01593-7.
- Ichiki, M., T. Kaida, T. Nakayama, S. Miura, M. Yamamoto and Y. Morita, 2021, Magma reservoir beneath Azumayama Volcano, NE Japan, as inferred from a three-dimensional electrical resistivity model explored by means of magnetotelluric method, Earth Planets Space, 73, 150, doi:10.1186/s40623-021-01451-y.
- 石塚吉浩・山元孝広・中野 俊・吉本充宏, 2021, 富士火山、須走期噴出物の噴出量見積もり, 地質調査総合センター研究資料集, 715, 6.
- Kametani, N., Ishizaki, Y., Yoshimoto, M., Maeno, F., Terada, A., Furukawa, R., Honda, R., Ishizuka, Y., Komori, J., Nagai, M., Takarada, S., 2021, Total mass estimate of the January 23, 2018, phreatic eruption of Kusatsu-Shirane Volcano, central Japan, Earth, Planets and Space, 73, doi:10.1186/s40623-021-01468-3.
- Kaneko, T., F. Maeno, M. Ichihara, A. Yasuda, T. Ohminato, K. Nogami, S. Nakada, Y. Honda, and H. Murakami, 2022, Episode 4(2019-2020) Nishinoshima activity: Abrupt transitions in the eruptive style observed by image datasets from multiple satellites, Earth Planets Space, doi:10.1186/s40623-022-01578-6.
- 今野裕三・高島帆風・小檜山雅之・吉本充宏・久保智弘, 2021, 火山災害対応における認知バイアスを克服するための訓練ツール, 地域安全学会論文集, 39, 233-243.
- Koyama, T., W. Kanda, M. Utsugi, T. Kaneko, T. Ohminato, A. Watanabe, H. Tsuji, T. Nishimoto, A. Kuvshinov and Y. Honda, 2021, Aeromagnetic survey in Kusatsu-Shirane volcano, central Japan, by using an unmanned helicopter, Earth Planets Space, 73, 139, doi:10.1186/s40623-021-01466-5.
- 草野有紀・及川輝樹・石塚吉浩, 2021, 日光白根火山1649年噴火の復元, 火山, 66, 327-346, doi:10.18940/kazan.66.4.327.

- Kuritani, T., E. Sato, K. Wada, A. Matsumoto, M. Nakagawa, D. Zhao, K. Shimizu, and T. Ushikubo, 2021, Conditions of magma generation at the Me-akan volcano, northern Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 417, 107323, doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107323.
- Maeno, F., Yasuda, A., Hokanishi, N., Kaneko, T., Tamura, Y., Yoshimoto, M., Nakano, S., Takagi, A., Takeo, M., Nakada, S., 2021, Intermittent growth of a newly-born volcanic island and its feeding system revealed by geological and geochemical monitoring 2013–2020, Nishinoshima, Ogasawara, Japan, *Frontiers in Earth Science*, 9, 773819, doi:10.3389/feart.2021.773819.
- Matsumoto, K. and N. Geshi, 2021, Shallow crystallization of eruptive magma inferred from volcanic ash microtextures: a case study of the 2018 eruption of Shinmoedake volcano, Japan, *Bull. Volcanol.* 83, 31, doi:10.1007/s00445-021-01451-6.
- Minami Y., Matsumoto K., Geshi N., Shinohara H., 2022, Influence of hydrothermal recharge on the evolution of eruption styles and hazards during the 2018–2019 activity at Kuchinoerabujima Volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, 74, 21, doi:10.1186/s40623-022-01580-y.
- 南 裕介・中川光弘・佐藤鋭一・和田恵治・石塚吉浩, 2021, 雌阿寒岳火山ボンマチネシリにおける過去1000年間の火山活動史, *火山*, 66, 211–227, doi:10.18940/kazan.66.3_211.
- Munekane, H., 2022, Modeling long-term volcanic deformation at Kusatsu-Shirane and Asama volcanoes, Japan, using the GNSS coordinate time series, *Earth Planets Space*, 73, 192, doi:10.1186/s40623-021-01512-2.
- Nakajima, M.E., N. Takahata, K. Shirai, T. Kagoshima, K. Tanaka, H. Obata and Y. Sano, 2022, Monitoring the magmatic activity and volatile fluxes of an actively degassing submarine caldera in southern Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 317, 106–117, doi:10.1016/j.gca.2021.10.023.
- Nishimura, T., 2021, Volcanic eruptions are triggered in static dilatational strain fields generated by large earthquakes, *Scientific Reports*, 11, 17325, doi:10.1038/s41598-021-96756-z.
- Ota, K., Yokoyama, Y., Miyairi, Y., Yamamoto, S., Miyajima, T., 2021, Lake water dissolved inorganic carbon dynamics revealed from monthly measurements of radiocarbon in the Fuji Five Lakes, Japan, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9, doi:10.1525/elementa.2020.00149.
- Permana, T., T. Nishimura, H. Nakahara and N. Shapiro, 2021, Classification of volcanic tremors and earthquakes based on seismic correlation: application at Sakurajima volcano, Japan, *Geophys. J. Int.*, 229, 1077–1097, doi:10.1093/gji/ggab517.
- Tada, N., Ichihara, H., Nakano, M., Utsugi, M., Koyama, T., Kuwatani, T., Baba, K., Maeno, F., Takagi, A., Takeo, M., 2021, Magnetization structure of Nishinoshima volcano, Ogasawara island arc, obtained from magnetic surveys using an unmanned aerial vehicle, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 419, 107349, doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107349.

- Takahashi, R., 2022, Mineralogical and geochemical investigations for subvolcanic hydrothermal alteration environments at an active volcano: An example of Hokkaido-Komagatake volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 423, doi:10.1016/j.jvolgeores.2022.107497.
- 宝田晋治・金田泰明・池上郁彦・松本恵子・西野佑紀・下司信夫・川邊禎久・中野 俊・星住英夫・石塚吉浩・工藤崇・及川輝樹・古川竜太, 2021, 産総研地質調査総合センターの火山データベース, *Proceedings of the International Meeting on Eruptive History and Informatics (福岡大学)*, 2021-1, 97-103, ISSN:2189-5163.
- Takebe, M., M. Ban, M. Sato and Y. Nishi, 2021, The temporal variation of magma plumbing system of the Kattadake pyroclastics in the Zao volcano, northeastern Japan, *Minerals*, 11, 4, 430, doi:10.3390/min11040430.
- Yamada, H., Tateyama, K., Naruke, S., Sasaki, S., Torigata, S., Honda, R., Kubo, T., Yoshimoto, M., Fujii T., 2021, Impact resistance of steel materials to ballistic ejecta and shelter development using steel deck plates, *Journal of Applied Volcanology*, 10, doi:10.1186/s13617-021-00105-8.
- Yamamoto, S., Nishizawa, F., Yoshimoto, M., Miyairi, Y., Yokoyama, Y., Suga, H., Ohkouchi, N., 2021, Dating Lake Sediments Using Compound-Specific ^{14}C Analysis of C_{16} Fatty Acid: A Case Study From the Mount Fuji Volcanic Region, Japan., *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2020GC009544, doi:10.1029/2020GC009544.
- Yamamoto T., Nakano S., Ishizuka Y., 2021, Temporal variations of eruption rate and magma composition at Fuji Volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, 73, 169, doi:10.1186/s40623-021-01505-1.
- Tanaka, R., Y. Yamaya, M. Tamura, T. Hashimoto, N. Okazaki, R. Takahashi and T. Mogi, 2021, Three-dimensional inversion of audio-magnetotelluric data acquired from the crater area of Mt. Tokachidake, Japan, *Earth Planets Space*, 73, 172, doi:10.1186/s40623-021-01502-4.
- Terada, A., W. Kanda, Y. Ogawa, T. Yamada, M. Yamamoto, T. Ohkura, H. Aoyama, T. Tsutsui and S. Onizawa, 2021, The 2018 phreatic eruption at Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane volcano, Japan: Eruption and intrusion of hydrothermal fluid observed by a borehole tiltmeter network, *Earth Planets Space*, 73, 157, doi:10.1186/s40623-021-01475-4.
- Terada, A., M. Yaguchi and T. Ohba, 2022, Quantitative assessment of temporal changes in quaqueous hydrothermal activity in active crater lakes during unrest based on a time-series of lake water chemistry, *Front. Earth Sci.*, 9, 740617, doi:10.3389/feart.2021.740671.
- Yaguchi, M., T. Ohba and A. Terada, 2021, Groundwater interacting at depth with hot plastic magma triggers phreatic eruptions at Yugama Crater Lake of Kusatsu-Shirane volcano (Japan), *Front. Earth Sci.*, 9, 741742, doi:10.3389/feart.2021.741742.
- Yaguchi, M., T. Ohba, Y. Hirayama and N. Numanami, 2022, Volcanic ash from the June 17, 1962 eruption of Yakedake volcano: stereomicroscopic, XRD, and water-soluble

components analyses, J. Disaster Res., 17, 257, doi:10.20965/jdr.2022.p0257.

吉本充宏, 2021, 富士山の噴火への課題—将来の噴火に備えて—, 建設工業調査会ベース設計資料, 189, 21-25.

Yoshimura, S. and M. Nakagawa, 2021, Chlorine heterogeneity in volcanic glass as a faithful record of silicic magma degassing, J. Geophys. Res. Solid Earth, 126, e2020JB021195, 1-24, doi:10.1029/2020JB021195.

三宅島磁化強度分布推定

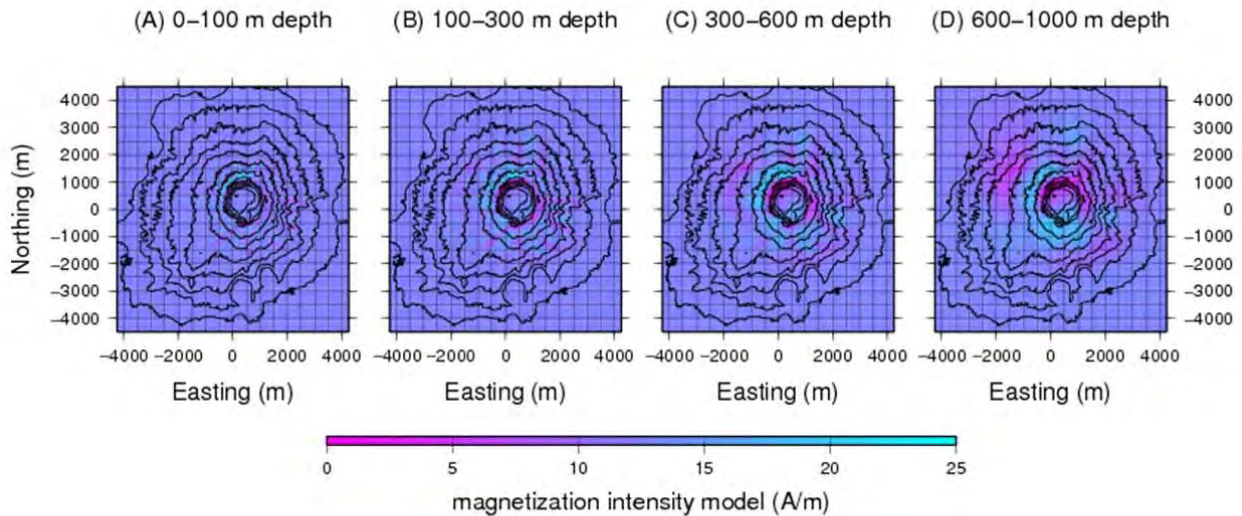


図1. 三宅島の磁化強度分布（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_07〕）
カルデラリム下は強い磁性を示す一方、カルデラ内は弱い磁性を示す。

衛星赤外画像による火山の観測

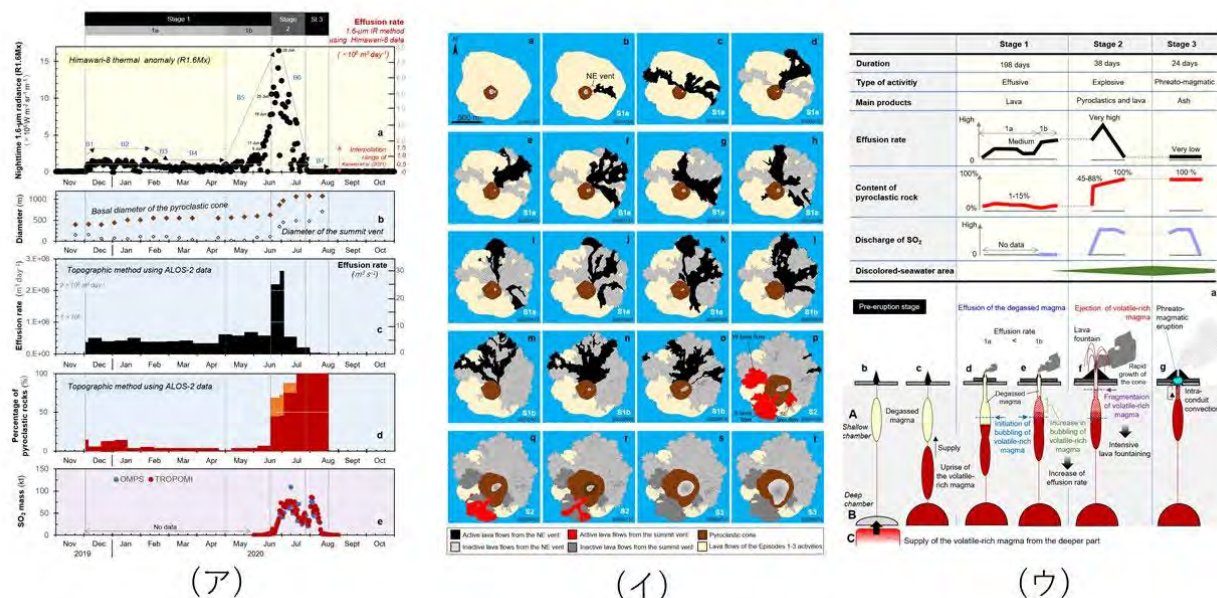


図2. 衛星赤外画像による西之島の観測（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_07〕）

(ア) : 各種観測の時間変化。a ひまわり 8 号 1.6 μm バンドの輝度。b ALOS-2 画像による火砕丘の基底径と火口径。c 同じ画像を用いて地形的手法にて推定した噴出率。d 噴出率に占める火砕岩の割合。e 紫外光-可視光センサーによる二酸化硫黄放出率。

(イ) : ALOS-2 画像から判読した噴火状況の推移。

(ウ) : 噴火推移のまとめと噴火様式変化を説明するモデル。

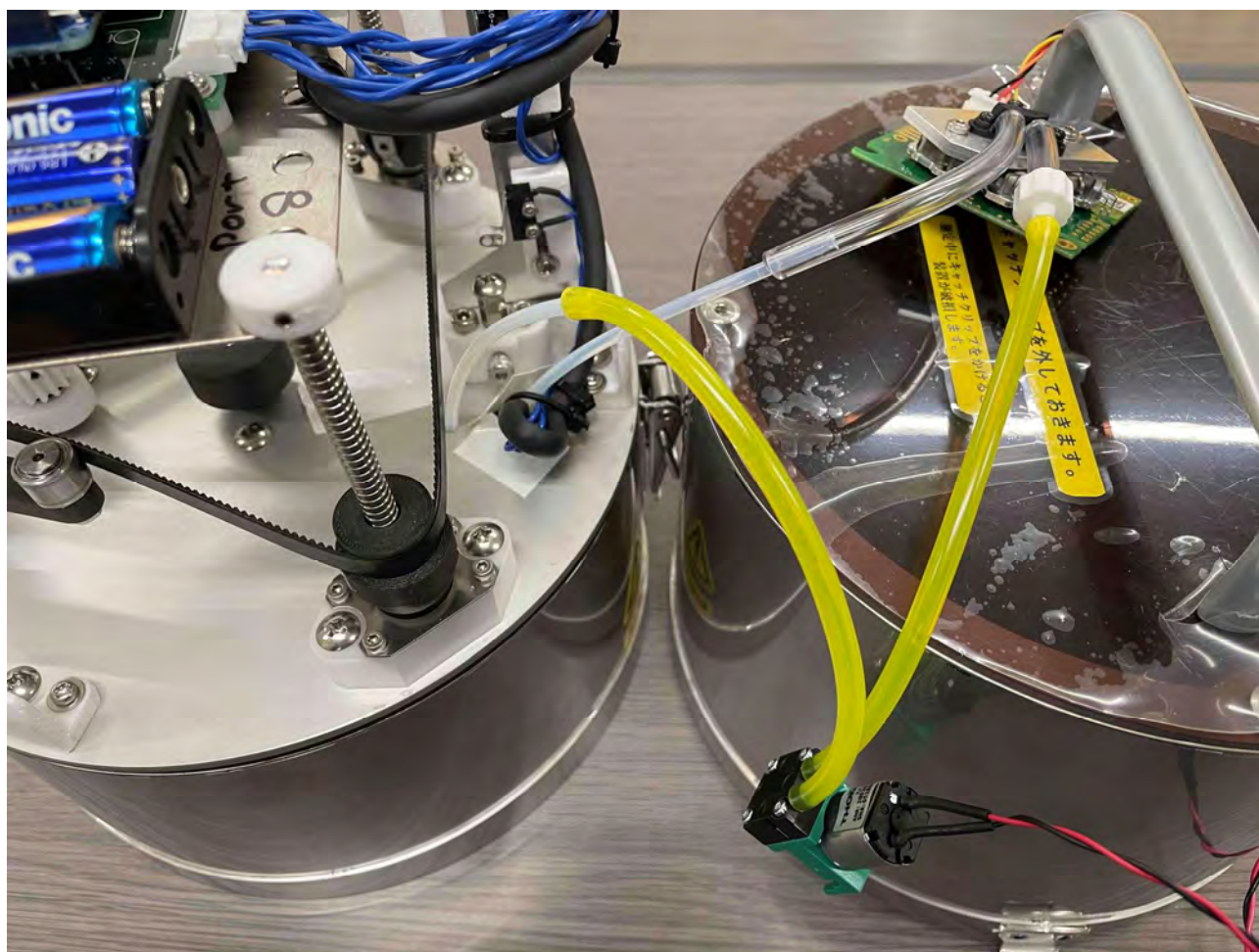


図 3. 二酸化炭素放出率測定装置（東京工業大学[課題番号:TIT_02]）
新たな二酸化炭素センサーとポンプシステムを示す。

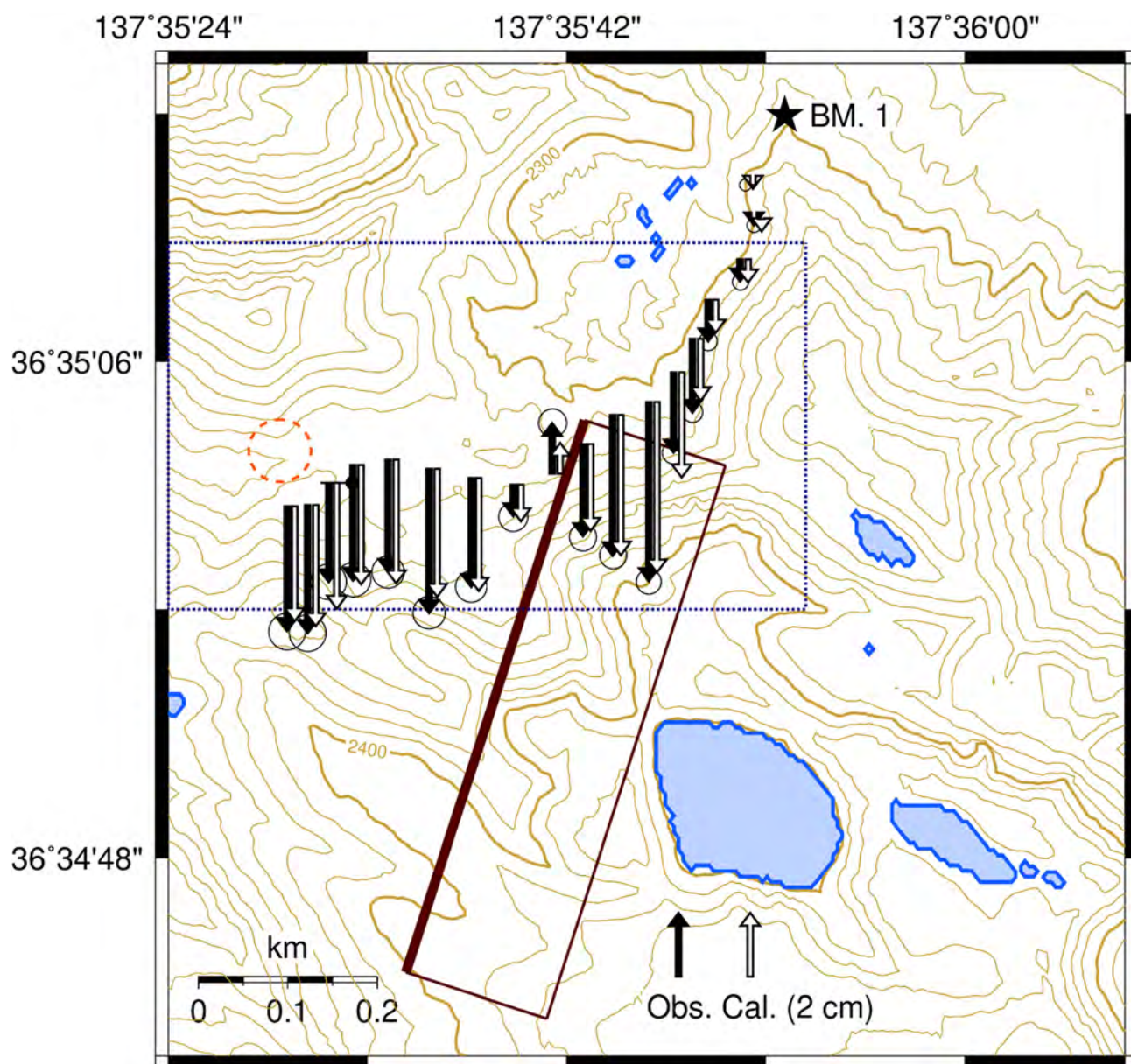


図4．水準測量による2016年と2020年のBM. 1に対する上下変動（富山大学[課題番号:TYM_02]）
 上下変動は矢印（黒は観測値，白は計算値）で示される。また、茶色実線の長方形は上下変動から推定された割れ目の位置（太線が上端）を示す。

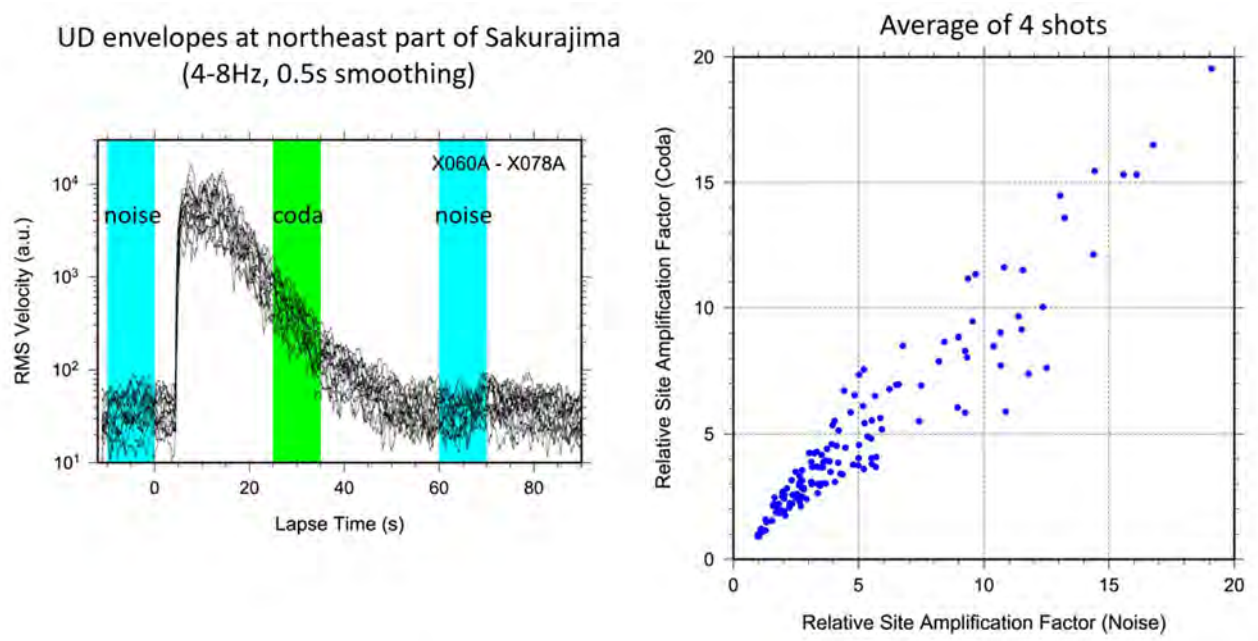


図5．コード波・雑微動を用いて推定した相対的サイト増幅特性の関係（東北大学大学院理学研究科[課題番号:THK_08]）

左：人工地震探査における桜島北東地域の観測点のエンベロープ波形

右：相対的サイト増幅値（横軸：ノイズ部、縦軸：コード部）

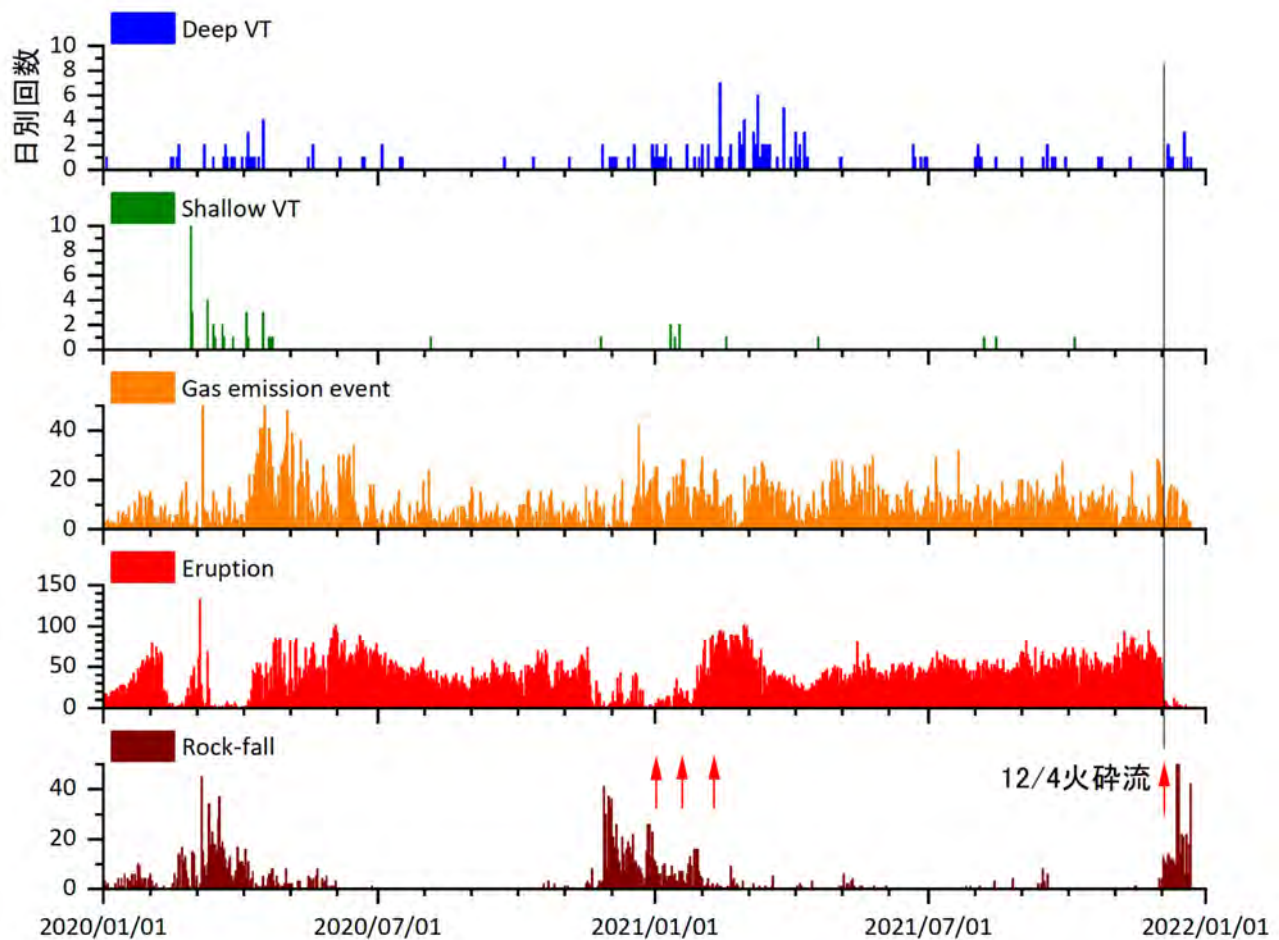


図6．スメル火山の火山性地震の日別発生回数と噴火回数（2020年～2021年）（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI06]）

1 段目：深い火山構造性地震、2 段目：浅い火山構造性地震、3 段目：ガス放出イベント、4 段目：噴火、5 段目：岩石崩落。赤矢印は火砕流発生時刻を示す。

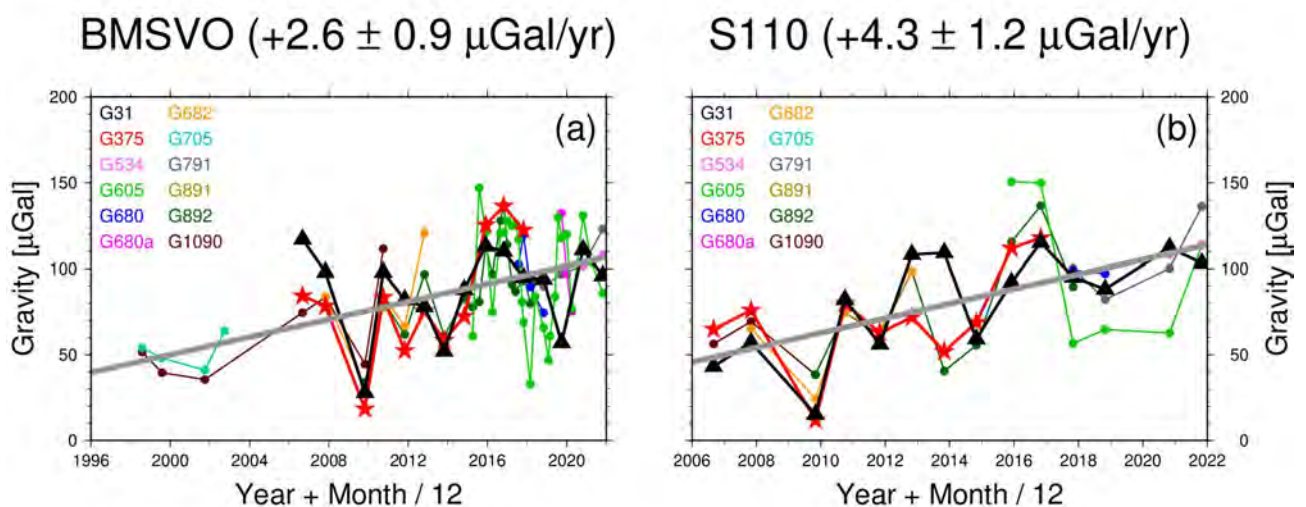


図7．桜島火山における相対重力変化（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI07]）

左図：ハルタ山重力点における1998年～2021年の重力変化

右図：大正噴火火口至近の重力点における2006年～2021年の重力変化

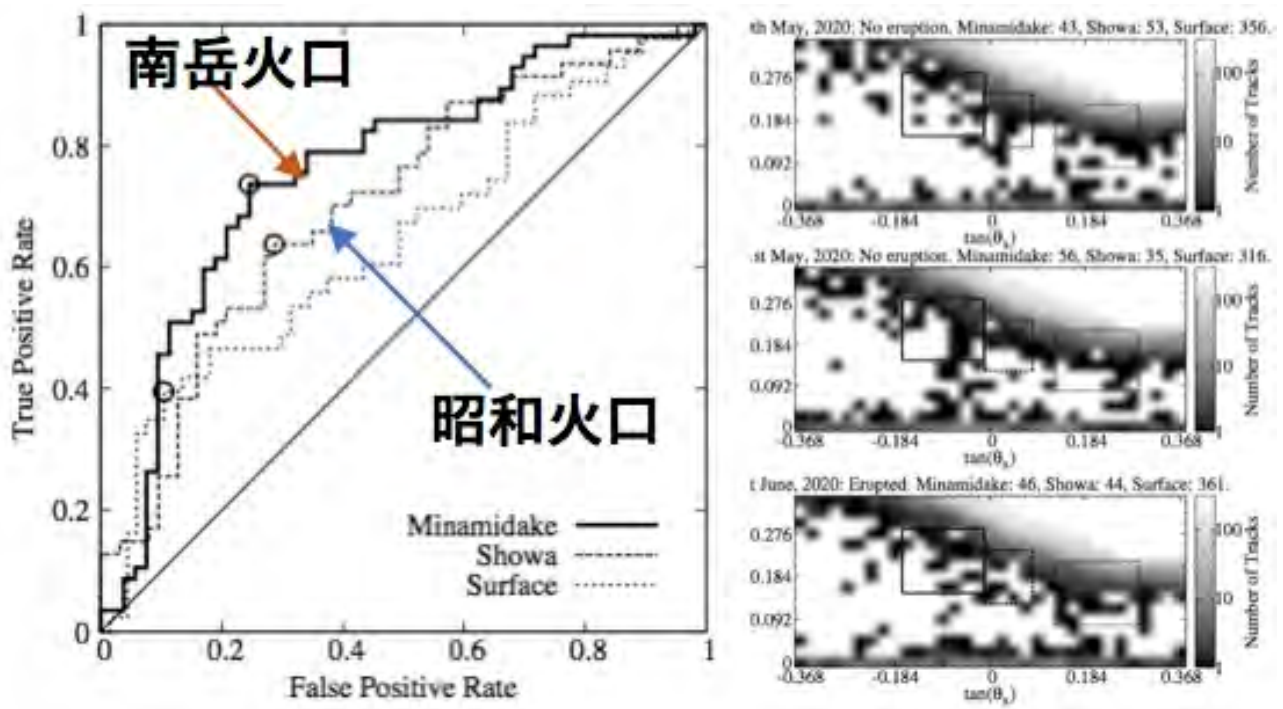


図 8．桜島の各種入力データに対するROC曲線 (Receiver Operating Characteristic curve) (東京大学地震研究所[課題番号: ERI_21])
 南岳火口、昭和火口、その他の領域において判定した結果が示されている。

1 (5) 災害誘因評価・即時予測

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

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

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

○震源モデルの高度化

2004年から2021年に発生した北陸地方周辺で発生した201地震 (M_{JMA} : 3.1–5.5) を、福井・石川・富山・岐阜県北部の自治体震度計を含む計185観測点の波形データを用いてスペクトルインバージョンを実施し、その震源特性を調べた。同解析で用いた地震は地殻内のものに限られていて深さ約18 kmまでのイベントであるが、応力降下量には深さ依存性が確認された。同傾向は令和元年度に報告した静岡県下の強震観測データを用いて調べた深さ120 kmまでのイベントにおける傾向と類似する結果となった(図1)。(京都大学防災研究所[課題番号: DPRI09])

長周期地震動と津波の即時予測に向けて、K-NET、KiK-net強震観測データの時間反転逆伝播計算(DA-TRI)による、震源モデルの即時推定手法の開発を令和2年度に継続して進めた。時・空間的に広がる大地震の断層すべり分布の推定に向けて、P波とS波エネルギーの相関に基づく震源イメージングの高分解能化を進めた。KiK-net強震観測記録を用いて、2008年及び2011年の茨城県沖の地震の断層滑り分布の即時推定実験を行い、100秒間の強震波形記録の地震波逆伝播計算により、太平洋プレート上面の断層滑り分布を推定することに成功し、得られた結果は、近地強震記録と遠地波形を用いた既往の震源インバージョン結果と良く対応した。(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_14])

2016年熊本地震の地震断層近傍とその周辺における、地表地震断層の分布と変位の詳細情報を考慮した断層モデルによる強震動計算を行った。任意の地表地震断層トレース形状を強震動計算のための震源断層モデルに組み込むツールの開発を行った。作成した

ツールを熊本地震発生直後から行っている野外調査データによる地表地震断層トレースデータに適用し、地表断層と地中断層モデルを組み合わせた断層モデルを用いて断層周辺域の地震動を計算し、地表断層に沿った変位分布の精度が向上することを確認した。

(名古屋大学 [課題番号: NGY_05])

2016年熊本地震における建物被害の分布は、地表断層出現位置から100 m程度以内に被害が集中し、断層から離れると急激に建物被害率が低下することが示されている。このような局所的な建物被害分布の主たる原因を断層近傍に集中する地震動と仮定し、それが既往の強震動予測手法で説明可能かどうかを検討した。具体的には熊本地震の断層面を模した傾斜角とすべり角の断層面を設定し、地震発生層内(深さ2 km以深)の強震動生成域(SMGA)とSMGAに接するが地震発生層より浅い領域(断層浅部)におけるすべりを組み合わせて断層近傍地震動の計算を行った。その結果、従来の枠組みの震源断層モデルでは断層距離ゼロ付近で極大となる地震動は再現されないことが示された。(図2)(名古屋大学 [課題番号: NGY_05])

○地下構造モデルの高度化

大阪堆積盆地3次元構造モデルの高度化のために、堆積年代および深さとP波速度の経験式について新しいデータから経験式の空間変化を調べた。今年度は湾岸域の反射法地震探査のP波区間速度データを用いて経験式の係数を求めた。その結果、大津川反射測線について、上町断層帯久米田池断層の上盤側と下盤側で明らかに異なる経験式が得られた。(京都大学防災研究所[課題番号: DPRI08])

強震観測点のサイト増幅特性を用いて地下構造モデルを高度化することを目的として、2004年から2021年に北陸地方周辺で発生した201個の地震と、福井・石川・富山・岐阜県北部の自治体震度計を含めた計185観測点のデータを用いてサイト直下の地盤構造モデルを推定した。得られた最適解は、観測サイト増幅特性の全帯域(0.2-10Hz)を適切に再現した(図3)。高周波数側のサイト増幅特性は、浅部層の寄与が大きかった。また、PS検層情報のある地点では、推定した浅部層がPS検層のS波速度構造と良く一致していることが確認された。(京都大学防災研究所[課題番号: DPRI08])

強震時の地盤の非線形応答特性に関して、2021年2月13日福島沖地震(M_{jma} 7.3)における事例研究を実施した。同地震では、KiK-net山元町(MYGH10)地表で最大加速度1432cm/s/s(3成分合成)、計測震度相当値6.4を記録した。その原因を調べるために、強震(本震)及び弱震(福島県沖の地震の余震)の地表/地中振幅スペクトル比を取ったところ、弱震時は7-8Hzのピーク周波数を持っていたのに対して、強震時は3-5Hzにピークが移動していたことが明らかになった。同様の事例は、2011年東北地方太平洋沖地震前後の本観測点の同様の比較から、野口・他(2016)が強震時前後の地表/地中振幅スペクトル比についてすでに指摘しており、同じ現象が再現されたと考えられる。同現象は、KiK-netで公開されている地質柱状図や速度構造から、この地点の表層にある数mの厚さのS波速度の遅い粘土層が強震時に剛性率が低下したことに起因する可能性があり、極大地震動の分析における1つのコントロールファクターとして考慮が必要と考えられる。(京都大学防災研究所[課題番号: DPRI09])

○強震動評価の高度化

令和2年度までに開発した、強震観測と地震波伝播シミュレーションのデータ同化に基づく長周期地震動リアルタイム予測手法 (Furumura, Maeda & Oba, 2020; Oba, Furumura & Maeda, 2021) の実用化に向け、全国地震観測データ流通ネットワーク (JDXnet) と東大情報基盤センターWisteria/BDEC-01スパコンを結合した、長周期地震動即時予測プロトタイプシステムを開発し、リアルタイム予測実験を行った (中島・古村・鶴岡・他, 2021)。地震動の入力データとして2007年中越沖地震 (Mw6.8) のF-net強震計データ18点を用いた試験ではOdysseyの2048 CPUを用いた並列計算により、240秒後の長周期地震動の予測が28秒で実行可能であることを確認した。予測の精度と長周期地震動の到来までの猶予時間にはトレードオフの関係があるため、データ同化の進展とともに、高速計算により短い間隔で予測の修正を繰り返すことの有効性も確認された。(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_14])

大地震の震源断層すべりモデルの推定と、強震動の生成メカニズムの評価に向け、海洋スラブの形状と物性の探査が重要である。同観点より、日本列島の高密度強震観測データの逆伝播計算に基づき、海洋スラブ形状を推定 (イメージング) するReverse-time migration (RTM) の実用性を数値実験から検証した。RTMでは、プレート境界面で生成したSP変換波に着目し、これを観測点から変換点に戻すことで、変換点すなわちプレート境界をイメージングすることを試みた。東北地方の東-西断面において、不均質地殻・マントル構造を用いて遠地地震による平面波入射を仮定した疑似観測波形を用いた数値実験を行い、SP変換が発生した境界のイメージングを試行した。その結果、異なるS波入射角 (-20~20度) を持つ地震の疑似観測波形を用いたイメージング結果をスタックすることで、現行のHi-net観測点の配置と間隔で太平洋スラブの上面、下面、及び海洋性地殻、地殻の形状が推定可能であることを確認した。(図4) (東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_14])

本観測研究計画及び国内外の研究者コミュニティからのフィードバックを受けて、地震波伝播シミュレーションのオープンコード (Open SWPC; Maeda et al., 2017) の改修と機能拡張を進めた。(東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_14])

イ. 津波の事前評価手法

巨大地震に伴う海底斜面崩壊による津波の数値計算手法開発を継続し、1946年アリユーション津波地震の海底地すべりによる沿岸波高の再現数値実験を行った。1946年アリユーション地震は現在知られている最も異常な津波地震 (Ms7.4, Mt9.3) で、ハワイやアメリカ西海岸で大きな津波が観測されている (Tanioka and Seno, 2001)。さらにアリユーション列島沿岸で最大40 m近くの津波高が調査されている (Okal et al., 2003)。また、沿岸で25 mを超える津波が調査されている場所は比較的局所的で海底地すべりにより津波がより大きくなったことが示唆されている。そこで前年度までに開発された海底地すべりによる津波計算モデルによる数値計算を実施し、暫定的な調査地点近傍での最大津波波高比較を行った。(図5) (北海道大学 [課題番号: HKD_05])

2022年1月15日にトンガで発生した大規模噴火にともなう気圧パルスの伝搬による津波の再現を大気・海洋結合の数値計算実験から試みた。具体的には日本での気圧観測データをもとに、最大2hPaで半波長300 kmを持つ線状気圧パルスが南東方向から北西方向に走向44°を持って、速度312m/sで伝搬したと仮定し、大気・海洋結合の数値計算を実施したところ、S-netで観測された波形を比較的良く説明できる事が分かった。また、気圧パルスの伝搬速度と津波の伝搬速度が近づくことにより生じるProudman共鳴現象等の津波の挙動が明らかになった。さらに、このような津波を即時予測するためには気圧パルスの観測が重要であることが示された。（北海道大学〔課題番号：HKD_05〕）

ウ．大地震による災害リスク評価手法

2021年10月7日に発生した千葉県北西部の地震（Mw5.9）の首都圏で観測された強震記録（図6）を限定公開した。この地震は、2005年7月23日に発生した千葉県北西部の地震（Mw5.9）との類似性が指摘されているため、観測記録の相関係数を計算し、2011年東北地方太平洋沖地震をはじめとする大振幅地震動による地盤増幅変化の影響があるかどうか見積もった。（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_16〕）

地盤震動特性および地下構造モデルが把握されていない山間部において、微動を用いた面的な調査を計画し、鳥取市街の丘陵部造成地、郊外の地すべり地形部で現地調査を実施した。具体的には、1970年代以降に大規模な宅地造成がおこなわれた鳥取県東部鳥取市内の北園地区および若葉台地区、および鳥取市南部佐治町内における地すべり地形分布域において観測を実施し、堆積層と基盤層のコントラストによる卓越周期の分布と、アレイ観測によって把握した表層地震波速度を用いた層厚モデルを得た。（図7）（鳥取大学〔課題番号：TTR_01〕）

鳥取県内においてこれまでに実施した多くの微動探査（単点3成分およびアレイ観測）の利活用を促進するために同観測データのデータベース化およびGISを用いた表示システムの構築を継続した。さらにシステムの利便性について鳥取県内のコンサルタントおよび県庁で地盤防災に係わる職員にアンケート調査を実施し、今後の改良等への示唆を得た。（鳥取大学〔課題番号：TTR_01〕）

鳥取県内の34計測震度観測点からのデータを鳥取大学で受信し、緊急地震速報で用いられているPLUM法に震度の距離減衰と全予測点を2次震源とする改良を加え、P波振幅による震度予測を加えて県内1 kmメッシュの震度分布を把握するシステムを開発した。令和2年度に250 mメッシュのリアルタイム震度をWebベースで配信できるシステムの開発を行ったが、令和3年度にはこれを鳥取県庁とも共有できる仕組みを構築した。（鳥取大学〔課題番号：TTR_01〕）

津波避難経路の使用可能性の検証精度をさら高めることを目的として、強震動および地盤液状化の面的予測のベースデータとなる広域的な3次元地盤モデルを、地盤ボーリングデータに基づき新たに構築した（図8）。津波避難のリスク評価結果を避難行動に反映させるために、市町村と共同で防災教育を実践し、避難準備、避難目標までの経路、要配慮者の介助など時系列の行動に応じた訓練方法を提案した。防災情報伝達では、避難情報の認知の訓練を提案すると共に、自治体を対象に実測調査や数値解析を実施し、伝

達状況を改善する技術的課題や解決方法を整理した。（北海道立総合研究機構地質調査所〔課題番号：HR0_02〕）

エ．地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

これまでに実施していた1mDEMの解析で四国山地の地震時に不安定な斜面地形の分析を進め、高知県北部地域の分析がほぼ完了した。さらに、既往地震斜面崩壊地の地質調査も高知県および徳島県地域において完了した。前者ではこれまでに知られていない、多数の線状凹地などが発見された。付加体中の斜面不安定性をもたらす岩盤内構造の分析と、地震の重力変形斜面への関与の分析のために、電気探査と音響探査を活用できるかどうかを確認する試験を行った。砂岩中において、斜面岩盤に不安定さをもたらす断層破砕帯の比抵抗構造のイメージングに成功した。（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI10〕）

1854年安政南海地震で崩壊したと伝えられ、岩盤に亀裂が生じ、今後の地震でも崩壊が予想される高知県大豊町トウジ山斜面において、複数の地震計、傾斜計などによる観測を継続した。データの蓄積により、これまでは降雨や地震に対応して傾斜の変化がないことが確認され、また、微小地震による地震波形記録の解析から観測点ごとの増幅特性が明らかとなった。波浪を原因とした浸食により不安定化が促進している北海道東部の海岸地すべり土塊において、観測された地震動記録と地すべり土塊の変位量から、地すべり土塊の抵抗力に比例する臨界加速度を推定したところ、浸食が進むにつれて抵抗力が下がっていくことが分かった。横浜市内の谷埋め盛土における地震動、間隙水圧の同時観測データを解析した。過剰間隙水圧の発生が認められた7地震に対して間隙水圧の特徴と地震動との関係について調べたところ、間隙水圧の上昇時間が目黒区内の谷埋め盛土（前計画より観測・解析を実施、Doi and Kamai, 2020）よりも10倍程度長く、同程度のPGVに対して間隙水圧の上昇量が大きくなることが分かった。（図9）（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI10〕）

火山体斜面にて異なる火山灰土層における含水量変化に関する計測を継続した結果、風化したテフラ層がずっと高い含水量を有することが分かった。ボーリング掘削を実施し、2016年熊本地震の斜面崩壊においてすべり面となった草千里ヶ浜軽石層が見られた深さに間隙水圧計を、移動体中央部に傾斜計を、土壤水分計を移動体およびすべり面付近に合計3台設置し、連続観測を開始した。（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI10〕）

2011年11月に開始した宮城県栗原市荒砥沢におけるGB-SARによる斜面監視を継続するとともに、同地域における地すべりモニタリングの結果について栗原市が運営する栗駒山麓ジオパークビジターセンター（<https://www.kuriharacity.jp/geopark/060/index.html>）にてリアルタイム表示を開始した。（図10）（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID03〕）

79GHz帯のMIMO型GB-SARの実験を進め、基本的なイメージングが可能なこと、100 m程度までのSAR画像を再構成できること、1秒間に20回程度の計測が可能なことを確認した。これにより100m x 100m程度の大きさのSAR画像の中から任意の地点について数Hz程度までの変位のリアルタイム計測が可能なことを示した。また実証実験として、20 m程度の範囲で石垣に小石などを置いて作成した人工的な変位を検知できることを明らかにした。

また鉄道橋梁を計測し、列車の通過に伴う振動計測が可能な事を示した。（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID03〕）

オ．火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

火砕流の発生予測に関して、地盤変動、火山性地震、空気振動、火山ガス、映像等の観測データを収集し、火砕流発生に関わる物理パラメータ解明についてまとめを行なった。火砕流を伴う噴火の約1時間前から山頂近傍の浅部において微小地震が群発することが多く、地盤変動で見られる噴火前の膨張の時間は30分以上継続することが多い。さらに、噴火直前には膨張が停止する。また、火砕流を伴う噴火は噴出物量が多い（噴火後の収縮量が多い）ことが明らかになった。（図11）（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI11〕）

昨年度観測を開始した桜島島内の黒神観測点における小型船舶レーダーを用いた観測を継続したが、現時点まで火砕流の発生は認められていない。噴出物の火砕流配分比については十分な観測量が得られない可能性が高いことから、配分比について、その比率を何種類か仮定して流下シュミレーションでの検証のための準備を開始した。（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI11〕）

（２）地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア．地震動の即時予測手法

周期10秒程度までの長周期領域での地盤増幅特性を、限られた時間（6～20秒程度）の波形から精度よく推定する手法を検討するため、自己回帰モデルによるスペクトル解析を用いた地盤増幅率の周波数特性評価を行い、高速フーリエ変換（FFT）を使用したものと比較した。その結果、周波数特性評価には長周期領域であってもFFTを使用する方が適当であることが分かった。震源近傍の観測値が得られないような場合においても面的な地震動分布を早期に把握することを目的として、逆伝播を用いた地震動の面的分布推定手法を試作し、その問題点を示した。緊急地震速報等のリアルタイム処理で用いる観測機器の品質管理を目的として、教師なし学習による連続波形記録の自動分類手法の開発を進め、階層的クラスタリングの導入により、あらかじめクラスタ数を与えることなく、より柔軟な形で波形分類を行う手法を提案した（図12）。（気象庁〔課題番号：JMA_06〕）

イ．津波の即時予測手法

これまでに開発してきたデータ同化による津波波動場の現況把握ならびにそれに基づく津波即時予測の実データへの適用として、S-net 記録を用いた 2016 年福島県沖の地震（M7.4）への適用を試みた（Wang and Satake, 2021）。その結果、津波の来襲より前の地震発生から35分の時点で、三陸海岸における津波潮位計の記録を適切に予測できることが示された（図13）。また、従来型の潮汐除去とローパスフィルタによるデータ処理よりも、Wang et al. (2020) による EEMD 法（経験的モード分解法）による津波検知のほうが、同時刻においてより高い津波予測スコアを示した。このことから、EEMD 法による検知（Wang et al., 2020）、データ同化法による現況把握（Maeda et al., 2015）、そしてグリーン関数を用いたデータ同化に基づく津波予測（GFTDA; Wang et al., 2017）の3種の組み合わせで効果的な津波即時予測が実現できると期待される。また、これま

での手法開発およびその応用についての総まとめとなるレビュー論文 (Wang et al., 2021) を出版した。(弘前大学理工学研究科 [課題番号:HRS_02])

リアルタイムGNSSによる震源断層即時推定における不確実性の定量評価をマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)で行うための技術開発および同技術の国土地理院リアルタイム地殻変動監視システム(REGARD) への技術移転を進めた。1枚矩形断層を推定するアルゴリズムとして” Real-time automatic uncertainty estimation of the cosesimic single rectangular fault model based on GNSS data (RUNE)” を開発 (Ohno, Ohta et al., EPS, 2021) し、同技術の国土地理院REGARDシステムへの技術移転を進め、2021年2月13日福島沖地震の地震(Mj7.3)、2021年3月20日宮城県沖の地震(Mj6.9)においてその性能評価を実施し、変位場がきわめて小さい(1-2cm)にも関わらず、比較的高いVariance Reduction (分散減少) で断層モデルを推定することに成功した。この結果は、現行のREGARD内部における矩形断層モデル推定アルゴリズムを、MCMCを活用したRUNEによって将来的に置換できる可能性を示唆する成果である。(東北大学大学院理学研究科 [課題番号: THK_12])

ハミルトニアンモンテカルロ法 (HMC法) による1枚矩形断層推定アルゴリズムの開発を実施した。HMC法を2016年熊本地震時のリアルタイムGNSSデータに適用し、一般的に用いられているメトロポリス-ヘイスティングス法 (M-H法) と比較した。その結果、HMC法の結果とM-H法の結果はほぼ完全に一致し、HMC法で断層推定が可能であることが明らかになった。また、収束までに必要としたマルコフ連鎖数が、M-H法の数%程度で十分であることを明らかにした。(東北大学大学院理学研究科 [課題番号: THK_12])

海底水圧計に含まれる長期ドリフトをゼロ点(圧力の印加がない状態での出力)でのドリフト実測値より把握するA-0-A方式による海底水圧観測システムの実海域試験を行った。開発した試験機と既存のケーブル式水圧計との比較を行うことを目的とし、2020年9月6日にDONET 2C-10ノードのごく近傍に同観測システムを自由落下で設置し、2021年8月17日に音響通信による錘切離によって回収した。A-0-A適用後の水圧時系列から、長期的ドリフトを大幅に減少させることを明らかにした。(東北大学大学院理学研究科 [課題番号: THK_12])

携帯電話事業者が独自に展開する超稠密GNSS観測網で地殻変動場を捉えられることを初めて定量的に実証した(図14)。(東北大学大学院理学研究科 [課題番号: THK_12])

2016年の福島県沖の地震津波の波源について事例解析をした。地震の規模にあわせて要素波源の大きさを即時予測で用いているものよりも細かくして、日本海溝沿いの沖合水圧計観測網の観測データから初期水位分布を推定した。その分布を初期値として津波伝播計算をしたところ、沿岸で観測された津波波形を再現できた。2016年の福島県沖の地震の震源断層モデルを用いたケーススタディから、この場所を震源とする地震による津波が福島県から宮城県沿岸で高くなる条件には、震源断層の走向が強く関係していることを示した。遡上を伴う津波伝播計算において、水がある状態とない状態との境界の流束を取り扱う際に、従来の方法では計算が不安定になる場合があることが知られており、その原因を検討した。この場合に全水深の取り扱いを工夫することによって、計算安定性を高められる可能性があることを確認した。(気象庁 [課題番号: JMA_06])

ウ．火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

噴火後の短期的な土石流・泥流の発生ポテンシャル変化を調べることを目的とした、新規の火山灰堆積土層表面に形成されるクラストを模擬した表層を持つ斜面に対する人工降雨実験と数値実験を昨年度に引き続き継続した。人工降雨実験では、クラストの有無による比較を行い、クラストの形成・破壊が降雨時における斜面からの土砂流出特性に与える影響について検討した。その結果、クラストのある場合、降雨強度の強い場所でクラストが破壊されることで洗掘孔が形成され、クラスト破壊領域の上流側の境界で土砂が崩落してクラストが破壊されることによってガリが発達する様子が観察された。また、クラストが破壊されるまでの土砂流出は小さいが、洗掘孔が形成されると急に土砂流出量が大きくなる傾向がみられた。これは、噴火後大規模な土石流が発生しやすくなる原因の一つと考えられる。クラストの形成・破壊を考慮した斜面侵食数値解析では、クラストの初期破壊形状を複数仮定することで、クラストの初期破壊形状の違いが、ガリの発達及び斜面土砂流出へ与える影響を検討した。その結果、クラストの破壊領域が斜面方向に長いほど表面流が洗掘孔に集中することによって、ガリの規模が大きくなるなどの特徴を捉えた(図15)。(京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI_12〕)

噴火後の中長期的な土石流・泥流の発生ポテンシャルの変化を調べることを目的として、焼岳における凍結融解作用による土砂生産によるポテンシャルの回復について検討した。具体的には、土砂動態モデルにより、堆積土砂の流出過程を土砂動態モデルで計算することで、溪床堆積土砂量の経年変化を解析した。降雨データはこの流域から最も近い栃尾の2003年から2019年のアメダス観測値を用いた。降雨量の大小により、年間の貯留土砂量は -2000m^3 から $+5000\text{m}^3$ の範囲に分布している。土石流の発生のなかった17年間では、足洗谷全域における貯留土砂が 10^4m^3 のオーダーに及ぶことも示された。(京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI_12〕)

融雪型火山泥流発生のメカニズムの中の積雪層の融雪過程について、実験と解析を継続して実施した。今年度は、積雪層の中に高温の石礫を挟む形態で、融雪過程の実験を行った。その結果、混合した場合に融雪が促進されること、また細かな粒径の場合、融雪速度が速いことが分かった。この過程は、円筒座標系を使った熱伝導モデルによって解析され、その妥当性が実験値との比較から検証された。(京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI_12〕)

気象研究所XバンドMPレーダー(MRI-XMP)と二次元ビデオディスδροメータ(2DVD)による噴煙・降灰の観測・事例解析を行い、噴煙に含まれる火山灰等を定量的に推定する手法の開発に着手した。火山噴火予知連絡会において、改良した噴煙高度の確率的推定手法(MPE法, Sato, 2021)を用いた資料の提出(2021年阿蘇山・諏訪之瀬島噴火事例)を開始した。MRI-XMPによる噴煙観測と2DVDによる降灰観測を継続した。気象庁移流拡散モデル(JMA-ATM)に入力する全球モデルの地上風予報値と再飛散の火山灰情報発表状況を比較調査した。火山灰データ同化・予測システムにおいて、噴火直後のJMA-ATMの初期値を作成するための噴煙モデルに関して、各種保存則や大気との相互作用を考慮した新たな噴煙モデル(NIKS-1D)の作成と実事例実験による検証に着手した(図16)。(気象庁〔課題番号：JMA_07〕)

（３）地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

地震波形・GNSS・傾斜計等のデータを即時解析して震源や地盤変動源を表示するシステムの開発を継続した。北海道大学の有珠観測所に設置していた現行システムの基幹サーバーを、北大札幌キャンパスに複製移設するとともに、今後の開発・配布を容易にするためのGitサーバ機能を組み込んだ。これまでに試作した振幅震源推定コンテンツを表示システムに取り込む作業を行った。THK_12の課題で開発したRUNE (Ohno et al., 2021) を改変してその性能評価を行った。動作確認のために、球状圧力源＋ダイクによる疑似データを生成し、マルコフ連鎖モンテカルロ法で逆推定した。両者ともに、ソースパラメータの事後確率分布は概ね妥当な中央値を示す一方で、ダイクについては幅と深さにトレードオフ関係が見られることも明らかになった（図17）。（北海道大学〔課題番号：HKD_06〕）

地震・火山災害の発生確率、被害想定など災害情報に関する調査を実施、分析した。全国47都道府県に住む20代～60代の男女（性年代均等割付）を対象に、各地域200名ずつ、合計9,400名に向けて実施した。調査実施機関は「楽天インサイト」を通し、ネットモニターを対象として行った。調査においては、当時最新であった2018年度版の確率論的地震動予測地図を呈示しつつ設問を設け、回答を得た。その結果、「30年確率」で示されていた地震発生確率の表現について、全体的に見ると「10～20年確率」で示した場合に、より「対策の必要性」意識を高めることが分かった。また年齢が高いほど、この「対策の必要性」の意識を高める年確率は短くなることが明らかになった。すなわち20代～40代は「30年確率」で示された場合、50～60年代は「10年確率」で示された際に、最も「対策の必要性」意識が高まるということが明らかになった。（東京大学大学院情報学環〔課題番号：III_01〕）

南海トラフにおける地震発生様式の固有性を融合させる方法について、令和2年度に実施した M8クラス以上（半割れ）および M7クラス（一部割れ）の地震発生後に後発する地震の発生確率計算結果に関して検討した。具体的には、南海トラフの過去のケースでは後発地震の発生事例数がグローバル地震カタログから推定される確率よりも大きいことを考慮し、確率の減衰曲線はグローバル地震カタログ解析結果を用いつつ、確率の絶対値は南海トラフの発生履歴と整合的になるよう上方補正することとした。また、半割れ地震発生後の後発地震による津波リスクマップの開発に着手した。具体的には、高知市周辺をテストフィールドとし、シナリオ断層約660通りについて浸水計算を行ったうえ、想定先発地震震源域ごとに後発地震の相対的発生確率を空間分布モデルを用いて与え、津波浸水・建物被害等のリスクを試算した（図18）。（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID04〕）

これまでの課題と今後の展望

「災害誘因評価・即時予測部会」では災害誘因や災害リスクを事前に高い精度で評価する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化」ならびに地震や火山噴火が発生した直後に高精度かつ即時的に災害誘因を予測する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化」を推進するとともに、それら災害誘因

予測を効果的に防災対策の推進に結びつけるための「地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究」を進めている。計画3年目である本年度においては、それぞれの研究課題において既往研究の高度化や新たな取り組みに関して成果が着実に得られ、論文出版、学会発表等の対外的な成果発表も活発に行われた。今後は課題間の連携や、拠点間連携共同研究との連携等を一層進展させることで、成果を最大化すること、および開発された技術ほかを現業機関他と連携して社会実装を進めることが課題と考える。以下に、各小項目において取り組むべき事項および展望について特に令和4年度に焦点を当てて示す。

（１）地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

大阪盆地、奈良盆地等での地震動再現性の悪い地域における微動・地震観測等の実施を踏まえた地盤構造モデルを改良する。強震観測（中川低地、京都市内）を継続する。プレート境界地震の広帯域震源モデルを基礎とした内陸地殻内地震の広帯域震源モデルを開発する。期間内に生じた大地震の強震記録を用いた震源断層破壊過程を求める。極大地震動生成に関する解析を継続する。

南海トラフや日本海溝沿いの大地震による長周期地震動の即時予測に向け、陸域及び海域の強震観測データに基づく震源断層すべりの即時推定と、長周期地震動の即時予測の実用化研究を令和3年度に継続して進める。また、令和3年に引き続き海・陸リアルタイム・連続地震観測と、地震データ流通網に直結したリアルタイムスパコン（東京大学情報基盤センターWisteria/BDEC-01）を用いて長周期地震動即時予測のプロトタイプシステムの実証実験を行う。

インバージョンモデル（再現）や特性化震源モデル（予測）と、地表で複雑な分布を見せる地表地震断層（再現）・活断層分布（予測）との接合に関する分野間の議論とモデル化を行う。2016年熊本地震の益城町宮園や西原村における地表地震断層の直上等における現象の要因の考察と地震動の計算（再現と予測）を行う。

1946年アリューシャン津波地震による地震津波と海底地すべり津波の再現実験をまとめる。さらに海底地すべり発生による津波励起が知られている1998年パプアニューギニア地震津波への適用を試みる。また、日本での海底地すべり津波の解析を開始する。

大地震による災害リスク評価に向けて、堆積平野・堆積盆地における地震動増幅特性と、建物被害や人口被害の脆弱性の研究を推進する。また、首都直下地震や南海トラフ巨大地震を対象に、地震災害の素因と誘因の関係や災害発生機構を多面的に分析し、災害を制御する要件を明らかにする。

鳥取県内の地震動予測高度化のため、地盤震動特性および地下構造の把握、およびGISデータベースの拡充を継続的に実施する。鳥取県震度計ネットワークを用いたWEBベースのリアルタイム震度表示システムおよびWEB-GISシステムについて、自治体での利活用を促すとともに、利用に関する意見を継続収集する。これらのツールを総合的に活用し、県民を対象として鳥取県内の地震災害リスクを分かり易く伝えるためのコンテンツの試作をおこなう。また、鳥取県の環境特性を考慮した災害リスク評価のための分析、方法論の構築を始める。

四国内の主要国道沿いの危険斜面の調査および抽出作業を進め、危険性を分析する。電気探査など簡便な斜面内部構造調査を試験し、特に付加体斜面での危険斜面抽出に利

用可能か検討を進める。山地のゆるみ発生過程を調査し、周期的な地震と山の変形との関係を調査する。また、西南日本における地震時地すべりが発生する可能性の高いテフラの分布のマッピングについて完成させる。

四国、紀伊山地、北海道、首都圏、火山研斜面で稼働中の地震や斜面の観測を継続し、斜面の地震動特性を調査するとともに、おおむね震度 4 以上の地震に対して斜面の変形および間隙水圧についてデータを蓄積する。阿津江地すべり地において、複数台の地震計を新規に設置し、より密度の高い連続観測をおこなう。また、高密度電気探査を実施し、地すべり土塊の内部構造を調べる。地震に伴う傾斜変化や間隙水圧の挙動を明らかにする。さらに、観測データの解析を進め、崩壊斜面内部における地震動の多様性について明らかにする。

79GHzMIMO レーダを利用した、より広域な計測をめざしたシステム設計と実験実証を進める。併せて 17GHzMIMO レーダによる従来型 GB-SAR の置換を行うための実験を進める。両周波数共に、大気補正の手法検討を継続する。栗原市荒砥沢の長期モニタリングは継続するが、それ以外で緊急の計測が必要な事象が発生した場合はモニタリングに機材を派遣する体制を維持する。

過去に発生した火砕流について、地球物理学的観測データから見られる前兆現象から推定される噴出物量と火砕流シミュレーション結果に対して実際の火砕流流下範囲を参照して、シミュレーションパラメータのチューニングを行う。また、山頂火口だけではなく、大規模噴火の際には山腹からの噴火も想定されるため、噴火地点と噴出物量に応じたシミュレーションを行い、データベースの作成を行なう。また、地域自治体向けの火砕流ハザードマップのセミナーを実施する。

（２）地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

データ同化を用いた津波の即時予測について、これまでの手法の進展を踏まえ、巨大地震がもし発生した場合にはデータ同化法の適用によりその予測能力の評価やさらなるブラッシュアップをはかる。また、震源直上における大きな海底地殻変動が発生した場合の圧力計記録のデータ同化の取り扱いについて、初期水位を推定する逆問題手法を援用して安定な津波予測の実現の可能性を検討する。

ハミルトニアンモンテカルロ法（HMC 法）を用いた震源断層推定手法をすべり分布推定に拡張するとともに、推定時のすべりの平滑化を制御するパラメータも同時推定する手法の開発を進める。GNSS の搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法(PTS)を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震の初期余効すべりの時空間発展から断層面における摩擦パラメータの抽出を試みる。令和 3 年度に開始した民間 GNSS 観測点の活用による地殻変動把握とその精度評価について継続して実施し、その有効性を明らかにする。

長周期地震動を含めた地震動の即時予測について、データ同化手法や波動伝播シミュレーションの効率的な計算手法等を検討し、地震動波形の予測モデルの構築を進める。

津波後続波の観測事例を再現する津波波源の推定、及び長時間津波伝播計算による後続波と減衰過程の再現に基づき、沿岸域地形データ等の計算条件設定を改良してその再現精度の向上を図る。それらの結果に基づき、津波事前・即時予測手法、及び津波継続時間予測手法の改良を進める。

桜島を対象とした噴火後の短期的土石流や泥流の発生ポテンシャルのモデルについて検討する。とくに、降雨の流出率や斜面侵食に及ぼす火山灰の堆積の影響を明らかにしながら、発生ポテンシャルの変化をモデル化する。また、焼岳を対象として、噴火後中長期的な土石流発生ポテンシャルのモデルについても検討する。次の噴火までの間の土石流の発生ポテンシャルについて、凍結融解による土砂生産による溪床堆積土砂量の経年変化、その動態解析を行う。さらに、土石流や融雪型火山泥流のメカニズムに関する検討も行う。土石流については、その流動過程に大きな影響を与える間隙水の土砂濃度の現地観測、融雪型火山泥流については、いくつかの異なる融雪過程を考慮した泥流シミュレーションについて検討する。

二重偏波気象レーダー等による噴煙の観測結果から、噴煙に含まれる火山灰等の分布を定量的に推定する手法の開発を継続する。新たに開発した移流拡散モデルへ導入する凝集、再飛散過程等の物理過程を検証して改良する。火山灰データ同化・予測システムについて、定量的な濃度予測のための火山灰プロダクトの利用に関する評価を行う。

（３）地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

準リアルタイム火山情報表示システムの改修・開発とシステムの入替えを行う。開発部分の具体的な実施内容として次世代火山研究推進事業で展開しつつある有珠山GNSS観測網との連携（リアルタイム測位表示や、実際の観測網配置に基づくMCMC力源推定の精度検証）を行うとともに、実際の観測データを含めた、より現実的な事象への適用による精度評価への着手（有珠山2000年噴火時のデータ等への適用）をする。

地震災害に関する住民調査を前提に、地震災害・火山災害の発生確率、被害想定、関連する災害情報（火災情報や降灰情報）などの住民の受け止め方に関する詳細な解析を行う。

M8クラスの地震発生後に後発する地震による津波リスクマップの開発を進める。想定ユーザーに含まれる地方自治体等の意見を聞き、後発地震の発生確率評価や津波リスクマップの表現方法の改善を検討する。ゆっくりすべり後にM8クラスの地震が発生する確率評価に着手する。

成果リスト

Asano, K. and T. Iwata, 2021, Revisiting the source rupture process of the mainshock of the 2016 Kumamoto earthquake and implications for the generation of near-fault ground motions and forward-directivity pulse, Bull. Seismol. Soc. Am., 111, 2426-2440, doi:10.1785/0120210047

Asano, K., T. Iwata, and M. Yoshimi, 2021, Ground Motion Simulation of the Mainshock in the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence, Japan, Using a Newly Developed 3D Velocity Model, Proc. 6th IASPEI/IAEE Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, paper no. GS4-P03

浅野公之・岩田知孝・関口春子・杉山長志, 2021, 近江盆地南部における微動アレイ探査, 京都大学防災研究所年報, 64B, 9-20

- 浅野公之・岩田知孝・吉田邦一・井上直人・染井一寛・宮腰研・大堀道広, 2022, 函館平野三次元速度構造モデルによる長周期地震動増幅特性, 日本地震学会秋季大会, S15-14
- Cochran, E. S., J. K. Saunders, S. E. Minson, J. Bunn, A. Baltay, D. Kilb, C. O' Rourke, M. Hoshiba, and Y. Kodera, 2022, Alert Optimization of the PLUM Earthquake Early Warning Algorithm for the Western United States, *Bull. Seism. Soc. Am.*, doi: 10.1785/0120210259
- Shenghua Cui, Xiangjun Pei, Yao Jiang, Gonghui Wang, Xuanmei Fan, Qingwen Yang, Runqiu Huang, 2021, Liquefaction within Bedding Fault: New Understanding of the Initiation and Movement of the Daguangbao Landslide Triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake ($M_s = 8.0$), *Engineering Geology*, 295, 10.1016/j.enggeo.2021.106455
- Fukutome, S., K. Asano, T. iwata, and H. Sekiguchi, 2021, Estimation of Basin Basement Depth Using Autocorrelations of Strong Motion Waveform Data in the Osaka and Kyoto Basins, Japan, *Proc. 6th IASPEI/IAEE Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, paper no. GS2-P11
- Furumura, T. and BLN Kennett, 2021, Azimuthal Variation of Lithospheric Heterogeneity in the Northwest Pacific Inferred From Po/So Propagation Characteristics and Anomalous Large Ground Motion of Deep In-Slab Earthquakes, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, 5, doi:10.1029/2021JB021717
- Furumura, T. and T. Maeda, 2021, High-resolution source imaging based on time-reversal wave propagation simulations using assimilated dense seismic records, *Geophys. J. Int.*, 225, 1, doi:10.1093/gji/ggaa586
- 林豊, 2021, 断層モデルパラメータに対する津波高の感度測定: 2016年福島県沖の地震を基準としたケーススタディ, *土木学会論文集*, B2-77(2), I_187-I_192, doi: 10.2208/kaigan.77.2_I_187
- 林豊, 2021, 日本の文献が根拠とされる1537年メキシコの津波は誤り, *日本地球惑星科学連合2021年大会*, S-SS10
- 林豊, 2021, 1780年ウルップ島地震による日本への津波の影響, *第38回歴史地震研究会*, 0-01
- 林豊, 2021, 1780年ウルップ島地震による北海道への津波の影響, *日本地震学会2021年度秋季大会*, S10-04
- 林豊, 2021, 断層モデルパラメータに対する津波高の感度測定: 2016年福島県沖の地震を基準としたケーススタディ, *第68回海岸工学講演会*, 3-R2-3-43
- Hayashi, Y., 2021, The Oldest Report of a 1537 Mexico Tsunami Based on Japanese Literature Is Erroneous, *Seismol. Res. Lett.*, 92, 3452-3459, doi: 10.1785/0220200453
- Hayashi, Y., 2021, Two false tsunamis of the 16th century based on Japanese literature: the 1537 Mexico and 1586 Peru earthquakes, *International Tsunami Symposium 2021*, e90185
- 干場充之・対馬弘晃, 2021, 地震動と津波の即時予測: 最近10年の研究の進展, *日本地球惑星科学連合2021年大会*, U02-07

- 今野光康・権田豊, 2021, 桜島・有村川流域におけるKinematic wave法を用いた土石流流出解析モデルのパラメータの経年変化の研究, 令和3年度（公社）砂防学会研究発表会概要集, 303-304
- 石井憲介・西條 祥・小屋口剛博, 2021, 気象庁の火山灰予測業務で用いる一次元噴煙モデルの開発, 日本火山学会, A3-11
- 石丸 聡・小木曾 仁・伊藤陽司・槇納智裕, 投稿中, 凍結・融雪期の大雨により生じた土石流-雌阿寒岳2008年5月の大雨による事例-, 日本地すべり学会誌
- 岩城麻子・藤原広行, 2021, 2016年熊本地震の地表断層ごく近傍の強震動について, 日本地震学会秋季大会, S15P-04
- 岩城麻子・森川信之・前田宜浩・藤原広行, 2021, 強震動予測レシピに基づく2016年熊本地震(Mj7.3)の強震動シミュレーション, 日本地球惑星科学連合, SSS11-P18
- Iwata, T., 2021, Source and Site Effects of the 2016 Kumamoto, Japan, Mainshock, Proc. 6th IASPEI/IAEE Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, paper no. GS1-I01
- Kagawa, T., 2021, Application of Modified PLUM Method to Dense Seismic Intensity Network of a Local Government in Japan - Case Study on Tottori Prefecture -, Frontiers in Earth Science, section Solid Earth Geophysics, The New Frontiers of Earthquake Early Warning Systems, <https://doi.org/10.3389/feart.2021.672613>
- Kagawa, T., Nishimura, I., Noguchi, T., 2021, Effect of Nonlinear Soil Response on Ground Motions at Nearby Sites, 6th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion
- Kagawa, T., Noguchi, T., 2021, A Study on Ground Motion Characteristics Close to Surface Earthquake Faults, The 17th World Conference on Earthquake Engineering
- 香川敬生・西垣壮真・野口竜也, 2021, 鳥取大学常設観測点における常時微動の長期変動, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SSS11-02
- 鎌谷紀子・小木曾 仁, 2021, 自己回帰モデルによるスペクトル解析を用いた地盤増幅率の周波数特性評価の試行, 日本地震学会2021年度秋季大会, S21P-01
- 鎌谷紀子・小木曾 仁, 2022, 自己回帰モデルによるスペクトル解析は地盤増幅率の周波数特性評価に有効か?, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学的諸現象のリアルタイム監視予測システムと利活用」
- 小林和生・蘆田龍・西村武・野口竜也・香川敬生, 2021, 吉岡・鹿野断層近傍における地盤震動特性の変化とその要因の検討, 第73回 2021年度（令和3年）土木学会中国支部研究発表会
- 小林正直・藤田正治・竹林洋史・宮田秀介・山野井一輝・坂井紀之, 2021, 焼岳噴火後の足洗谷における土石流発生の長期的変化, 令和3年度（公社）砂防学会研究発表会概要集, 637-638
- Kodera, Y., N. Hayashimoto, K. Tamaribuchi, K. Noguchi, K. Moriwaki, R. Takahashi, M. Morimoto, K. Okamoto, and M. Hoshiba, 2021, Developments of the nationwide earthquake early warning system in Japan after the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki earthquake, Front. Earth Sci., 9, 726045, doi: 10.3389/feart.2021.726045
- 小寺祐貴・酒井慎一, 2021, 階層的クラスタリングによる地震波形データの教師なし自動分類, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG52-P03

- Koketsu, K., H. Miyake, and K. Okumura, 2021, A future scenario earthquake for seismic hazard analysis in Kathmandu, Nepal, JpGU Meeting 2021, SCG40-P02
- Kubota, T., H. Kubo, K. Yoshida, N. Y. Chikadasa, W. Suzuki, T. Nakamura, and H. Tsushima, 2021, Improving the constraint on the Mw 7.1 2016 off-Fukushima shallow normal-faulting earthquake with the high azimuthal coverage tsunami data from the S-net wide and dense network: Implication for the stress regime in the Tohoku overriding plate, *J. Geophys. Res.*, 126, e2021JB022223, doi: 10.1029/2021JB022223
- Kubota, T., T. Saito, H. Tsushima, R. Hino, Y. Ohta, S. Suzuki, and D. Inazu, 2021, Extracting near-field seismograms from ocean-bottom pressure gauge inside the focal area: application to the 2011 Mw 9.1 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2020GL091664, doi:10.1029/2020GL091664
- Kubota, T., T. Saito, H. Tsushima, R. Hino, Y. Ohta, S. Suzuki, and D. Inazu, 2021, Extracting near-field in-situ ground motion waveforms with large displacements of the 2011 Tohoku-Oki earthquake from ocean bottom pressure change inside the focal area, AGU Fall Meeting 2021, S53B-04
- 久保田達矢・久保久彦・吉田圭佑・近貞直孝・鈴木亘・中村武史・対馬弘晃, 2021, 2016年11月22日福島県沖の地震におけるS-net津波観測記録：広域・稠密観測データによる高精度震源断層モデル推定, 第11回巨大津波災害に関する合同研究集会, 第5セッション-1
- 久保田達矢・齊藤竜彦・対馬弘晃・日野亮太・太田雄策・鈴木秀市・稲津大祐, 2021, 海底動的圧力変動成分記録から抽出した2011年東北沖地震の震源域内部の大振幅地震動波形, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG54-P01
- Makinoshima, F., Y. Oishi, T. Yamazaki, T. Furumura, and F. Imamura, 2021, Early forecasting of tsunami inundation from tsunami and geodetic observation data with convolutional neural networks, *Nat. Commun.*, 12, doi:10.1038/s41467-021-22348
- 南雅晃, 2021, 非線形長波方程式の有限差分法による津波計算における計算不安定の原因とその対処, 日本地球惑星科学連合2021年大会, HDS09-04
- 南雅晃, 2021, 津波浸水計算におけるwet/dry境界の新しい計算法, 日本地震学会2021年度秋季大会, S17-02
- 南雅晃, 2021, 津波浸水計算におけるwet/dry境界の新しい計算法, 第11回巨大津波災害に関する合同研究集会, 第2セッション-4
- Miyake, H., 2021, Characterization of extreme ground motions, JpGU Meeting 2021, SCG40-P05
- Miyake, H., K. Irikura, H. Fujiwara, N. Morikawa, T. Maeda, A. Iwaki, and A. Pitarka, 2021, Recipe for strong ground motion prediction: Current and future, The 6th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, GS4-I01
- Miyake, H., T. Taira, L.-W. Chen, 2021, Near-surface velocity reduction and anisotropy for early aftershocks revealed by coda interferometry, 2021 AGU Fall Meeting, S35F-0276

- 中里友輔・市田児太郎・堤大三・宮田秀介, 2021, 融雪型火山泥流の発生に及ぼす火山噴出物と雪の混合及び火砕流サージの影響, 令和3年度(公社)砂防学会研究発表会概要集, 121-122
- 中島研吾・古村孝志・鶴岡弘・松葉浩也・坂口吉生・住元真司・笠井良浩・池田輝彦・八代尚・荒川隆・塙敏博, 2021, 観測データ同化による長周期地震動リアルタイム予測へ向けた試み, 情報処理学会研究報告ハイパーフォーモンスコンピューティング, 8, 1-11
- Nishimura, I., T. Noguchi, and T. Kagawa, 2021, Estimation of Subsurface Structures and Ground Motion Characteristics in the area damaged in the 2016 Central Tottori Prefecture Earthquake in Japan, International Journal of GEOMATE, Vol. 20, No. 82, 15-21
- 西村武・西村菜沙・香川敬生, 2021, 大規模盛土造成地における微動探査を用いた地盤震動特性の把握 -鳥取市北園の事例-, 日本地震学会2021年度秋季大会, S16P-08
- 西村武・島田敦史・野口竜也・香川敬生, 2020, 地すべり地帯における微動探査を用いた地盤震動特性の把握 -鳥取市国府町楠城・雨滝の事例-, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SSS11-P11
- 西村武・吉川菜緒・野口竜也・香川敬生, 2021, 微動観測に基づく吉岡断層ごく近傍の地盤構造推定及び地盤震動特性の把握, 日本地震工学会・大会2021, T2021-065
- 野口恵司・林元直樹・溜渕功史・小寺裕貴, 2022, Hi-net活用のためのIPF法の高度化, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学的諸現象のリアルタイム監視予測システムと利活用」
- Noguchi, T., Kagawa, T., Kobayashi, K., Nishimura, I., 2021, Subsurface Structure and Ground Motion Characteristics Near Active Fault, The Case Study on The Shikano and Yoshioka Faults, Japan, 6th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion
- Noguchi, T., Nishimura, I., Kagawa, T., 2021, Subsurface Structure Based on Microtremor and Seismic Observation in The Ohda Area, Shimane Prefecture, Japan, The 17th World Conference on Earthquake Engineering
- Noguchi, T., Nishimura, I., Kagawa, T., 2021, Estimation of Subsurface Structure of Landslide Area Based on Microtremor Observation in the Hojojima, Nawashiro and Amedaki Area, Tottori, Japan, The 11th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials & Environment, gxi279
- 野口竜也・蘆田龍・小林和生・西村武・吉川菜緒・香川敬生, 2021, 1943年鳥取地震による地震断層近傍における微動探査-鳥取市宮谷・大塚地区-, 日本地震学会2021年度秋季大会, S16P-03
- 野口竜也・小林和生・蘆田龍・西村武・香川敬生, 2021, 鹿野・吉岡断層近傍における微動特性および地下構造, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SSS11-P09
- 野口竜也・西村武・佐々木梨乃・香川敬生, 2021, 地すべり地域 -鳥取市佐治地区- における微動および地震観測に基づく地盤構造推定, 日本地震工学会・大会2021, T2021-074
- 野口竜也・島田敦史・中桐圭右・西村武・香川敬生, 2021, 微動探査による鳥取県北栄町北条地域の地盤構造推定, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, CS10-09

- 野口竜也・島田敦史・西村武・香川敬生, 2021, 微動探査に基づく鳥取県内の地すべり地域における地盤震動特性および地盤構造, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, CS10-08
- 野口竜也・山室雅輝・西村武・香川敬生, 2021, 鳥取県中部域における3次元地盤構造モデルの推定, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SSS11-P10
- Octantyo, A., H. Miyake, and T. Yokoi, 2021, Strong ground motion simulation of the 2019 Java earthquake using empirical Green's function method, Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, 1d-0138
- 小木曾 仁, 2021, 地震波振幅を用いた震源分布の準リアルタイム把握, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SCG53-06
- 小木曾 仁, 2021, 地震波振幅を用いた震源域のリアルタイム把握に向けた検討, 日本地震工学会2021年大会, T2021-020
- 小木曾 仁, 2022, 地震動の逆伝播を用いた面的震度分布の早期推定に向けた検討, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学的諸現象のリアルタイム監視予測システムと利活用」
- 小木曾 仁・石丸 聡, 投稿中, 2008 年 5 月 20 日に雌阿寒岳で発生した土石流に伴う地震波の記録, 日本地すべり学会誌
- 小木曾 仁・溜渕功史, 2021, 地震波振幅の空間分布から推定した紀伊半島南東沖で発生する浅部低周波微動の時空間分布: 2020年12月から2021年1月, 日本地震学会2021年度秋季大会, S09-20
- Ohno K., Y. Ohta, R. Hino, S. Koshimura, A. Musa, T. Abe, H. Kobayashi, 2022, Rapid and quantitative uncertainty estimation of coseismic slip distribution for large interplate earthquakes using real-time GNSS data and its application to tsunami inundation prediction, Earth Planets Space, 74:24, 1-18, 10.1186/s40623-022-01586-6, 2022.
- Ohno, K., Y. Ohta, S. Kawamoto, S. Abe, R. Hino, S. Koshimura, A. Musa, and H. Kobayashi, 2021, Real-time automatic uncertainty estimation of coseismic single rectangular fault model using GNSS data, Earth Planets Space, 73, 127, doi:10.1186/s40623-021-01425-0
- Ohta, Y. and M. Ohzono, 2022, Potential for crustal deformation monitoring using a dense cell phone carrier global navigation satellite system network, Earth Planets Space, 74:25, 1-9, 10.1186/s40623-022-01585-7.
- Ohta, Y., 2022, Development of the low-cost GNSS receiver and data logger system for the geodetic purpose, AGU Fall Meeting 2021, G32B-07D
- Ohta Y., R. Hino, M. Sato, S. Suzuki, H. Otsuka, H. Kajikawa, T. Kobata, 2022, Development of long-term drift elimination system of OBP for deep-sea observation by "A-0-A" approach, Ocean Science Meeting 2022
- Ohta, Y., 2022, Application of GNSS for real-time prediction of geohazards and its transformation to disaster information, Geospatial Capacity Development Conference on GNSS applications and DRR

- 太田雄策, 日野亮太, 佐藤真樹子, 鈴木秀市, 大塚英人, 梶川宏明, 小畠時彦, 2021, 非定常地殻変動の把握を目指したA-0-A方式による深海対応海底水圧計ドリフト補正システムの開発(第4報), 日本測地学会第136回講演会, 06
- 太田雄策, 大園真子, 2021, 民間GNSS観測網を用いた地殻変動モニタリングの可能性, 日本測地学会第136回講演会, 28
- 太田雄策, 大園真子, 2022, 民間GNSS観測点を用いた地殻変動即時把握の可能性, 令和3年度東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学的諸現象のリアルタイム監視予測システムと利活用」
- Sekiguchi, H., K. Asano and T. Iwata, 2020, Strong ground motion simulation in Osaka basin, Japan, for the 2018 northern Osaka prefecture earthquake, Proc. 17th World Conference on Earthquake Engineering, Paper no. C001162
- Shimazu, H., T. Iwata, K. Asano, K. Somei, and S. Senna, 2021, Estimation of Site Effects at Strong Motion Sites in Shizuoka, Prefecture, Japan, Using the Spectral Inversion Method, Proc. 6th IASPEI/IAEE Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, paper no. GS5-P34
- 染井一寛・浅野公之・岩田知孝・大堀道広・宮腰 研, 2021, 北陸地方の強震観測点におけるサイト増幅特性とそれを用いた速度構造モデルの推定, 京都大学防災研究所2021年度研究発表講演会, B120
- 田中 優介, 太田 雄策, 宮崎 真一, 2021, GNSS搬送波位相変化から直接断層すべりを推定する方法で得られた, 2011年東北地方太平洋沖地震の初期余効すべり, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SGD01-11
- 田中 優介, 太田 雄策, 宮崎 真一, 2021, PTS解析による地震時の動的な破壊過程から初期余効すべりまでの連続的な推定 ～2011年東北地方太平洋沖地震の事例～, 日本地震学会2021年度秋季学術大会, S03P-01
- 土井一生・松浦純生・大澤光・岡本隆・柴崎達也・土佐信一, 2021 (投稿中), 不安定化が促進した海岸地すべりににおける地すべり土塊の変形特性, 地すべり学会第60回(2021年度)研究発表会および現地見学会
- Saito S., S. Yasumoto, N. Sekiya, 2021, Earthquake Probability in National Seismic Hazard Maps for Japan and People's Risk Perceptions: The Search for More Effective Expression., Earth, Planet and Space (Special Issue on "Structure Earthquakes and Tsunami Hazards in the Sea of Japan").
- Sato, E., 2021, Kusatsu-Shirane volcano eruption on January 23, 2018, observed using JMA operational weather radars, Earth Planets Space, 73, 117, 10.1186/s40623-021-01445-w
- 佐藤英一・瀧下恒星・井口正人, 2021, 非球形粒子の抵抗係数に関する理論の二次元ビデオディスプレイストロメーターによる降灰観測への応用について, 日本火山学会, B2-10
- 関谷直也, 2021, 『災害情報——東日本大震災から次の大規模災害への教訓』, 東京大学出版会
- 新堀敏基・石井憲介・甲斐玲子・長谷川嘉臣・林 洋介・林 勇太, 2021, 火山灰移流拡散モデルの更新, 日本火山学会, P2-08

- Tamaribuchi, K. and M. Ogiso, 2021, Shallow low frequency earthquake monitoring system based on envelope cross-correlation and amplitude, International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021, P-02
- 溜瀧功史・小木曾 仁, 2021, エンベロープ相関と振幅に基づく浅部低周波地震モニタリングシステム, 日本地震学会2021年度秋季大会, S09P-14
- 溜瀧功史・小木曾 仁・野田朱美, 2022, 浅部低周波地震モニタリングシステムの構築, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学的諸現象のリアルタイム監視予測システムと利活用」
- Tsushima, H., Y. Hayashi, and T. Yamamoto, 2021, Evaluation of tsunami source and propagation modeling using dense offshore tsunami measurements: case study of 2016 Mw 6.9 off Fukushima earthquake, Japan, AGU Fall Meeting 2021, NH25B-0576
- Tsushima, H. and T. Yamamoto, 2021, Operational use of tsunami source inversion in near-field tsunami warning by JMA, International Tsunami Symposium 2021, e90133
- 対馬弘晃・山本剛靖, 2021, 1952年カムチャツカ地震における顕著な津波後続波, 日本地震学会2021年度秋季大会, S17P-06
- 対馬弘晃・山本剛靖, 2021, 1952年カムチャツカ地震における顕著な津波後続波, 第11回巨大津波災害に関する合同研究集会, 第1セッション-3
- 対馬弘晃・近貞直孝, 2021, 沖合津波波形の常時解析に基づく津波の自動検知手法の検討, 日本地球惑星科学連合2021年大会, HDS09-06
- Wang G., F. Zhang, G. Furuya, K. Hayashi, W. Hu, M. McSaveney, Runqiu Huang, 2021, The debris avalanche in Donghekou area triggered by the 2008 Wenchuan (M8.0) earthquake: features and possible transportation mechanisms, Engineering Geology, 280, 10.1016/j.enggeo.2020.105922
- Wang, Y., H. Tsushima, K. Satake, and P. Navarrete, 2021, Review on recent progress in near-field tsunami forecasting using offshore tsunami measurements: source estimation and data assimilation, Pure Appl. Geophys., 178, 5109-5128, doi: 10.1007/s00024-021-02910-z
- 王功輝, 2021, 頻発化・激甚化・多様化する斜面災害の脅威に備えて, 京都大学防災研究所2021年度公開講座
- 王功輝, 2021, 降下火砕物斜面における地震時地すべりの発生・運動機構について: 日本で近年発生した土砂災害を例として, 2021年度土砂災害予測に関する研究集会
- 王功輝・松島信一・古谷元・李孝波・常承睿・黄超, 2021 (投稿中), 振動台実験による地震時テフラ斜面の安定性評価: 2018年北海道胆振東部地震時に生じた一地すべりを例として, 地すべり学会第60回 (2021年度) 研究発表会および現地見学会
- Wang, Y. and K. Satake, 2021, Real-time tsunami data assimilation of S-net pressure gauge records during the 2016 Fukushima earthquake, Seismol. Res. Lett., 92, 2145-2155, doi:10.1785/0220200447
- Wang, Y., h. Tsushima, K. Satake, and P. Navarrete, 2021, Review on recent progress in near-field tsunami forecasting using offshore tsunami measurements: Source

inversion and data assimilation, Pure and Applied Geophysics, 178, 5109-5128, doi:10.1007/s00024-021-02910-z

渡邊達也・三浦竜・山崎新太郎・松浦純生, 2021, 同時多点GNSS観測で捉えた海岸地すべりの複雑な挙動, 令和2年度日本地すべり学会北海道支部・北海道地すべり学会特別講演および発表会予稿集, 3-8

山田大介, 太田雄策, 2021, 単一矩形断層推定に関するハミルトニアンモンテカルロ法の適用可能性, 日本地球惑星科学連合2021年大会, SSS05-05

山田大介, 太田雄策, 大野圭太郎, 2021, ハミルトニアンモンテカルロ法を活用した断層モデル推定とメトロポリス・ヘイスティング法との比較, 日本地震学会2021年度秋季学術大会, S23-03

Yamada T., Y. Ohta, 2021, Efficient estimation of the fault model using the GNSS data based on the Hamiltonian Monte Carlo approach, AGU Fall Meeting 2021, NG15B-0430

山田太介, 太田雄策, 2021, ハミルトニアンモンテカルロ法を活用した断層モデル推定とメトロポリス・ヘイスティング法との比較, 日本測地学会第136回講演会, 16

Yasuda, T., K. Imai, Y. Shigihara, T. Arikawa, T. Baba, N. Chikasada, Y. Eguchi, M. Kamiya, M. Minami, T. Miyauchi, K. Nojima, K. Pakoksung, A. Suppasri, and Y. Tominaga, 2021, Numerical simulation on detailed urban inundation processes and their hydraulic quantities - Tsunami analysis hackathon theme 1, J. Disaster Res., 16, 978-993, doi: 10.20965/jdr.2021.p0978

安本真也・河井大介・齋藤さやか・関谷直也, 2021, 防災啓発番組の視聴は地震の備え行動につながるのか : ドラマ「パラレル東京」の効果検証, 日本災害情報学会第23回学会大会

安本真也・河井大介・齋藤さやか・関谷直也, 2022, 首都直下地震に関する映像による認知の変化 - パネル調査を用いたドラマ「パラレル東京」の効果分析 -, 災害情報, 20(1), 印刷中

安本真也・関谷直也, 2022, 火山噴火に対する意識 : 「登山者」と首都圏住民へのアンケート調査をもとに, 東京大学大学院情報学環紀要 情報学研究・調査研究編, 38, 印刷中

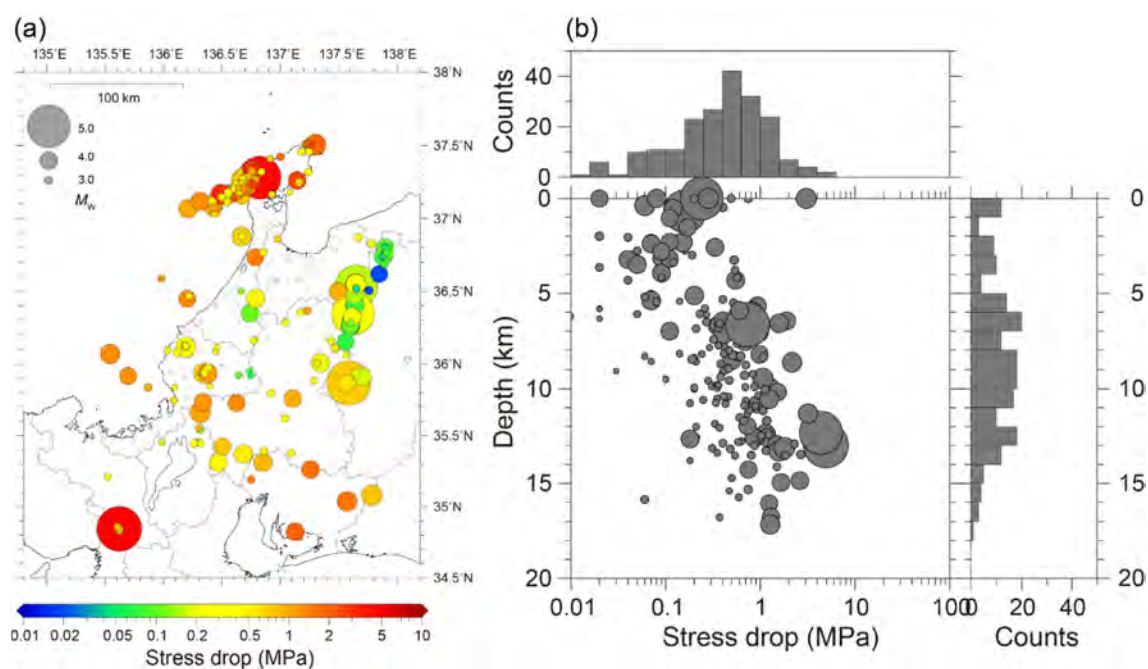


図 1. 北陸地方で発生した地震に対して、スペクトルインバージョンで得られた震源項に ω^{-2} スペクトルモデルを当てはめ、コーナー周波数と円形クラック半径の関係 (Brune, 1970, 1971)、円形クラックの応力降下量式 (Eshelby, 1957) より応力降下量を推定した結果。(京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI09])

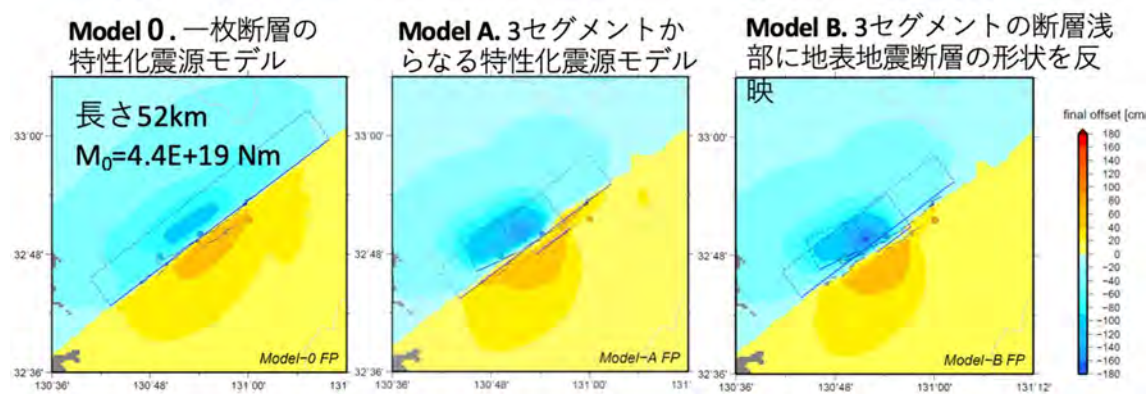


図 2. 2016 年熊本地震における複数のモデルによる変位量の比較。ここで用いた断層モデルでは強震動生成域や断層浅部の食い違いが数 km 以上の広がりを持つ。地表断層から数 100m～数 km 離れた位置に強い地震動を生じさせるものの、断層から 100m 程度以内の集中的な被害を説明することはできない。(名古屋大学 [課題番号: NGY_05])

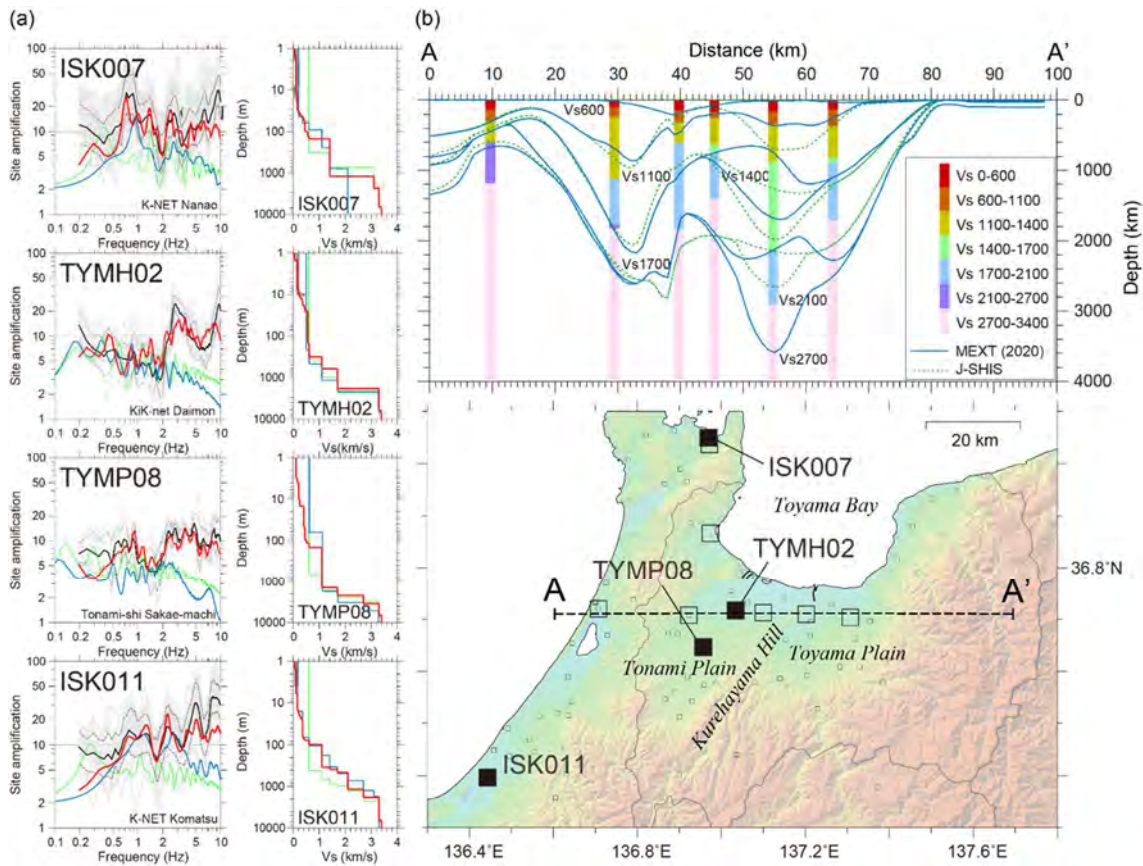


図3．2004年から2021年に発生した北陸地方周辺で発生した201個の地震と、福井・石川・富山・岐阜県北部の自治体震度計を含めた計185観測点のデータを用いてサイト直下の地盤構造モデルの推定結果。(a) 黒線・灰色線が観測値および誤差を、赤が推定値、緑色線がJ-SHISによるものをそれぞれ示す。(b) 微動探査から推定された地下構造モデルとJ-SHISのモデルの比較。

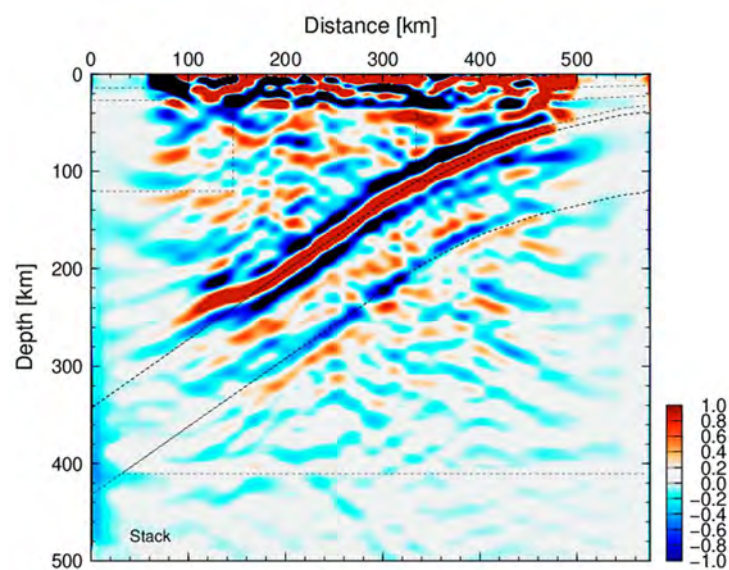
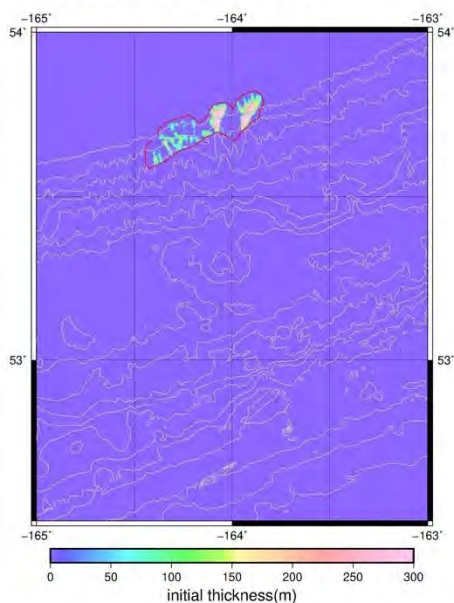


図4．Reverse-time migration (RTM) により推定されたSP変換波を用いた海洋スラブ形状のイメージング結果。(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_14])

斜面の下に地すべり源を設定



沿岸での計算最大波高と調査データの比較

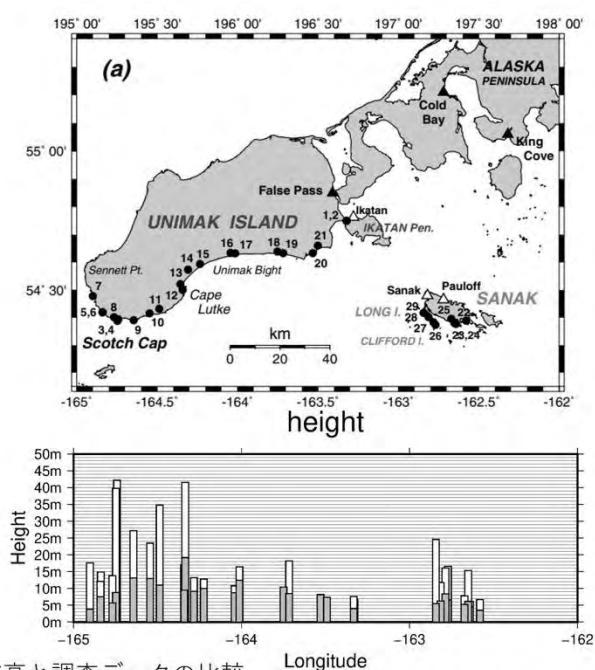
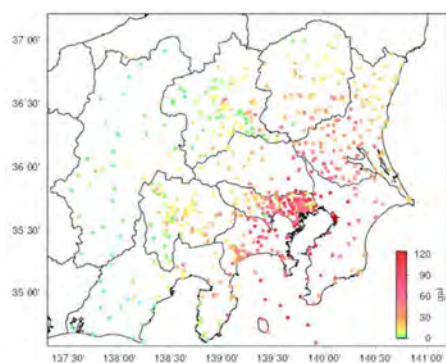


図5．（左）1946年アリューシャン津波地震の海底地すべりモデルに使用した地すべりの発生した場所と層厚。（右）計算津波高（灰色）とOkal et al. (2003)により調査された津波高（白）との比較。（北海道大学〔課題番号：HKD_05〕）



最大加速度

←2021年

2005年→

東大地震研
SK-net

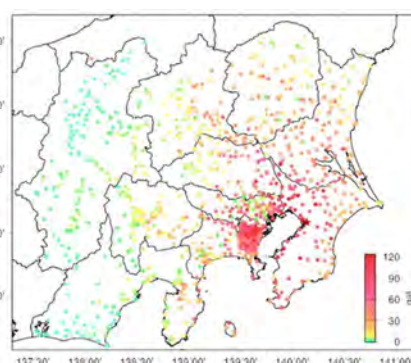


図6．2021年と2005年千葉県北西部の地震による加速度の比較。（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_16〕）

切盛造成地での微動卓越周期

切土部は微動H/Vの卓越周期が明瞭ではない地点が多いが、盛土部では明瞭なピークが見られる。アレイ観測による表層S波速度から堆積層厚さを推定すると、盛土厚さと整合する。

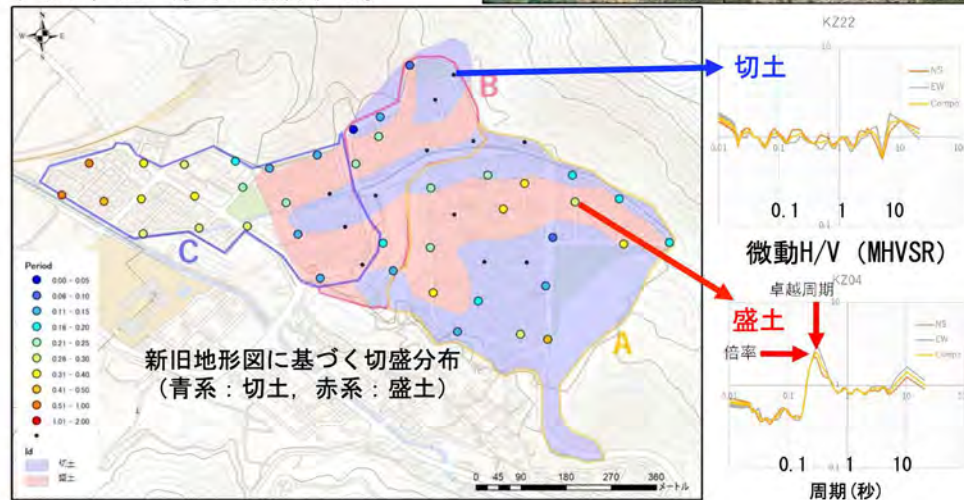


図7．1970年代以降に大規模な宅地造成がおこなわれた鳥取県東部鳥取市内の北園地区および若葉台地区、および鳥取市南部佐治町内における地すべり地形分布域において観測結果。（鳥取大学 [課題番号：TTR_01]）

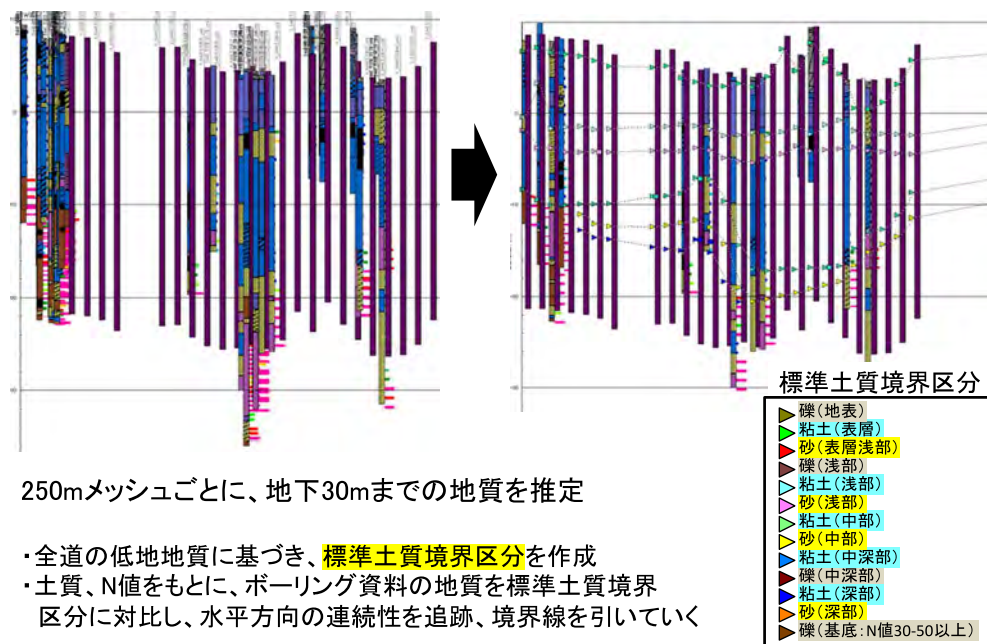


図8．津波避難経路の使用可能性の検証精度をさら高めることを目的として地盤ボーリングデータに基づき構築された、強震動および地盤液状化の面的予測のベースデータとなる広域的な地盤モデル。（北海道立総合研究機構地質調査所 [課題番号：HRO_02]）

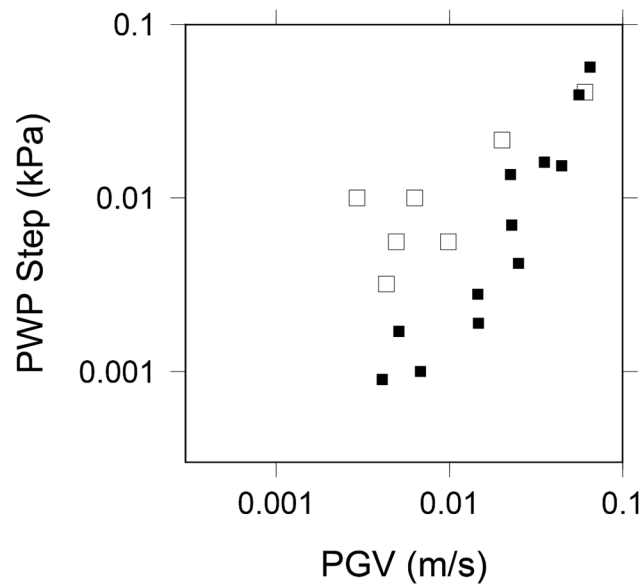


図 9．間隙水圧の情報が認められた東京：12 地震、横浜：7 地震におけるおける PGV と間隙水圧の上昇量の関係。黒四角が東京、白抜き四角が横浜の例。横浜の方が同程度の PGV に対して間隙水圧の上昇量が多い。（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI10〕）



図 10．2021 年 10 月から栗駒山麓ジオパークビジターセンター（栗原市栗駒松倉東貴船 5 番地：旧栗駒小学校）の展示室で関連するパネルと共にリアルタイムの画像展示を開始した。（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID03〕）

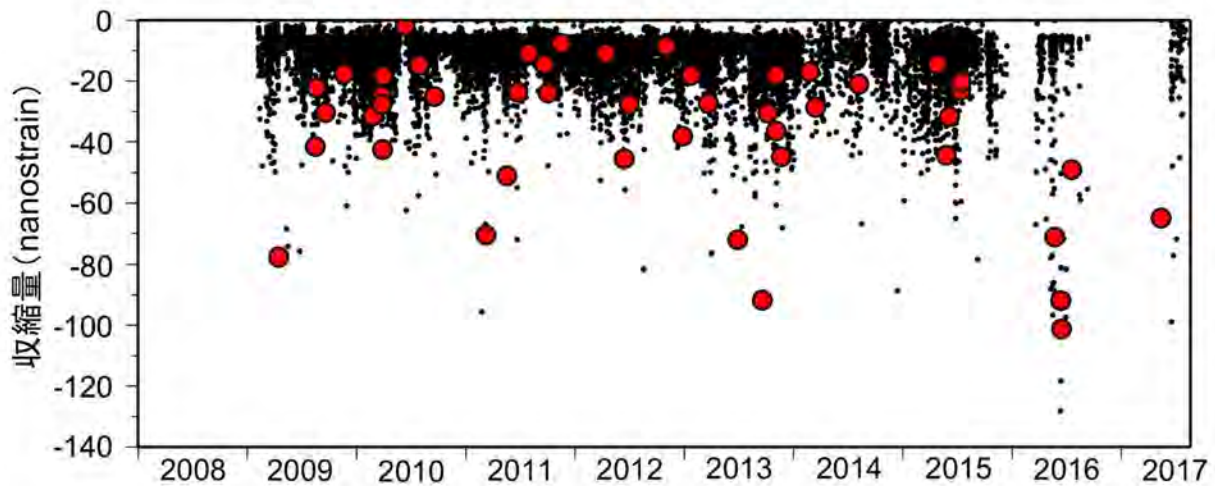


図 11. 桜島火山 有村観測坑道伸縮計 T 成分時系列データと火砕流の発生との比較。火砕流をともなう噴火は収縮量が大きい。すなわち噴出物が多い噴火の際に火砕流が発生しやすい。（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI11〕）

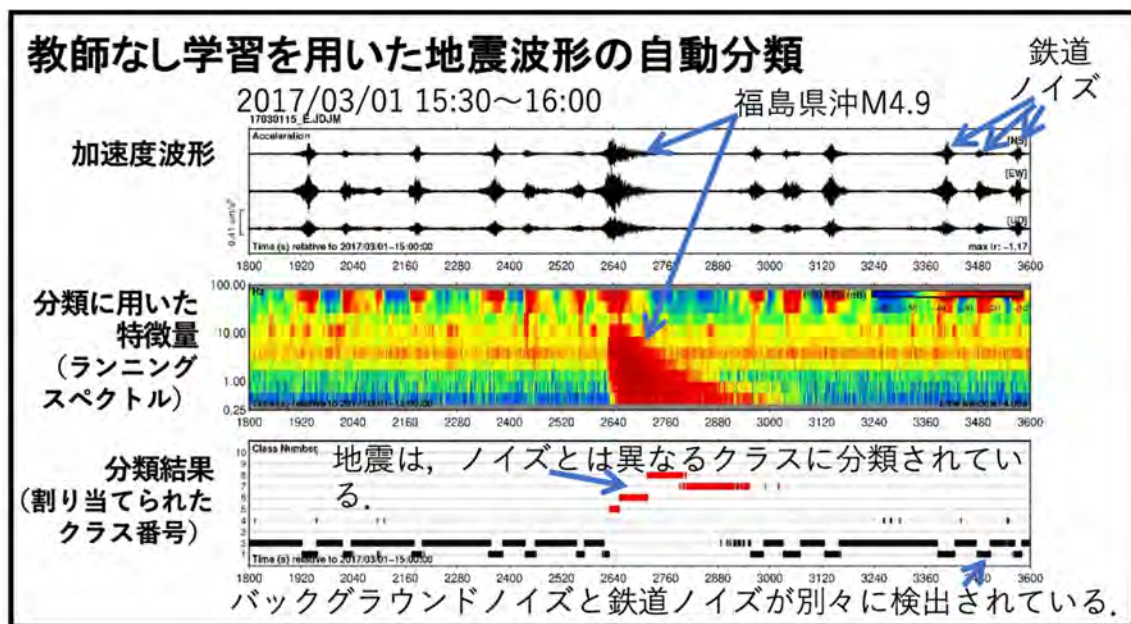


図 12. 緊急地震速報といったリアルタイム処理で用いる観測機器の品質管理を目的として、教師なし学習による連続波形記録の自動分類手法の開発を進め、階層的クラスタリングの導入により、あらかじめクラス数を与えることなく、より柔軟な形で波形分類を行う手法を提案した。（気象庁〔課題番号：JMA_06〕）

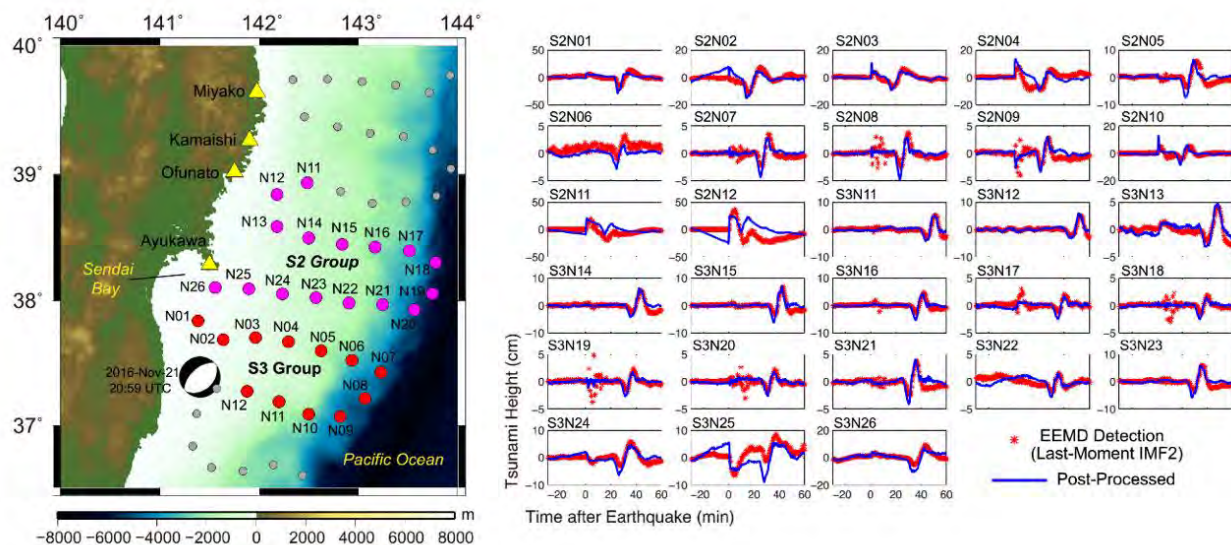


図 13. 2016 年福島県沖の地震 (M7.4) に対するデータ同化による津波波動場の現況把握ならびにそれに基づく津波即時予測の実データへの適用。(弘前大学理工学研究科 [課題番号:HRS_02])

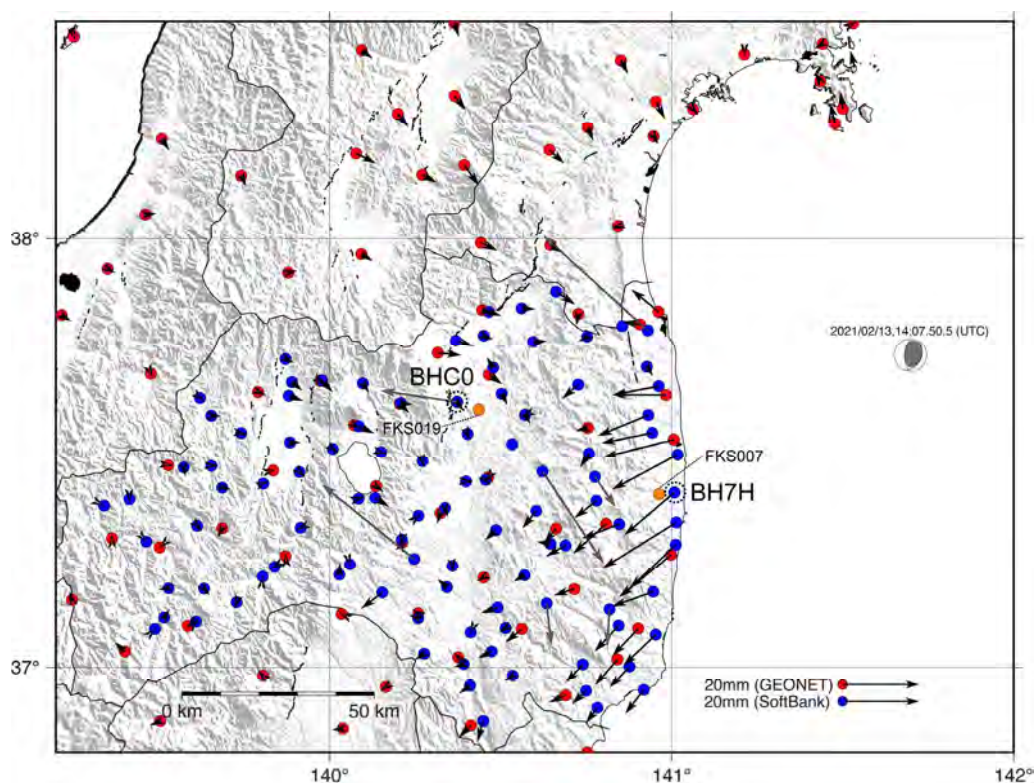


図 14. 2021 年 2 月 13 日福島沖地震の地震時水平変位分布。赤丸が GEONET、青丸が携帯電話事業者であるソフトバンクが運用する独自 GNSS 観測点をそれぞれ示す。(東北大学大学院理学研究科 [課題番号: THK_12])

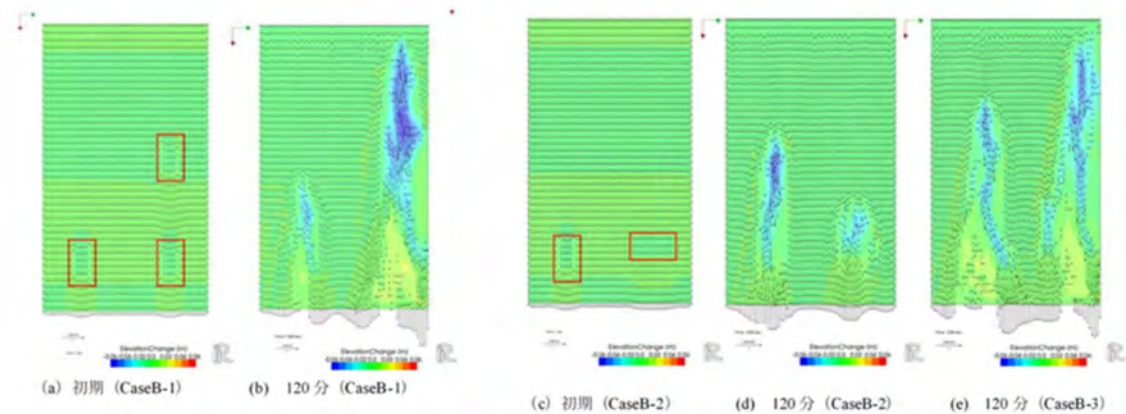


図 15. 初期クラスト破壊領域(赤枠)と 120 分後の斜面変動量および水深平均流速。(数値解析、単位:m) (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI12])

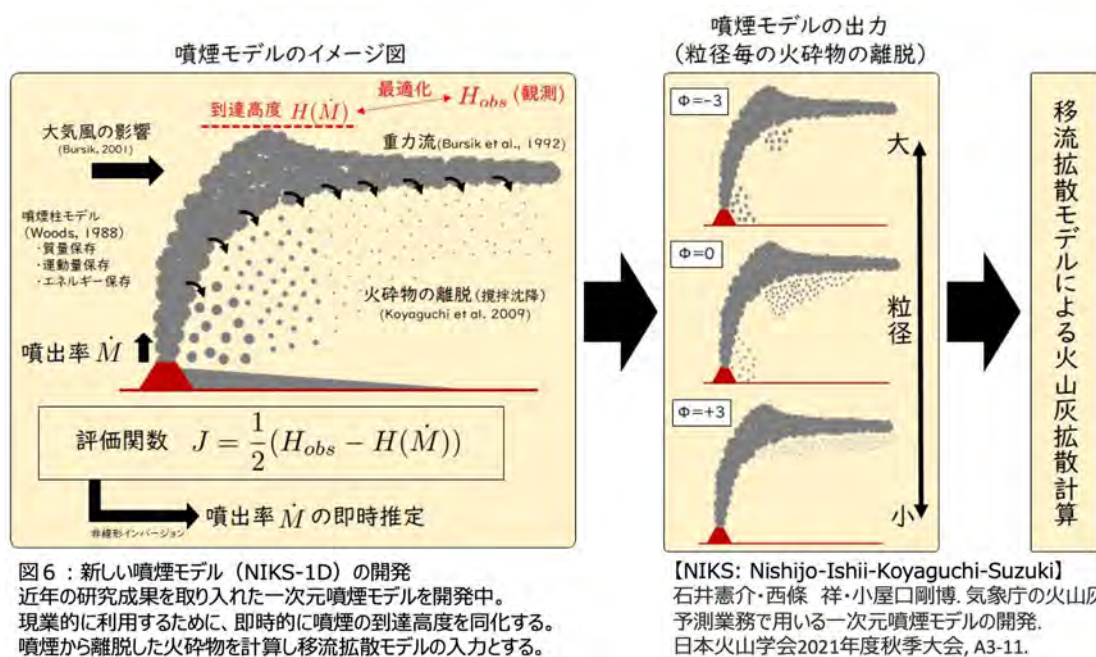


図 16. 火山灰データ同化・予測システムにおいて、噴火直後の JMA-ATM の初期値を作成するための噴煙モデルに関して、各種保存則や大気との相互作用を考慮した新たな噴煙モデル (NIKS-1D) の作成と実事例実験のフロー。(気象庁 [課題番号: JMA_07])

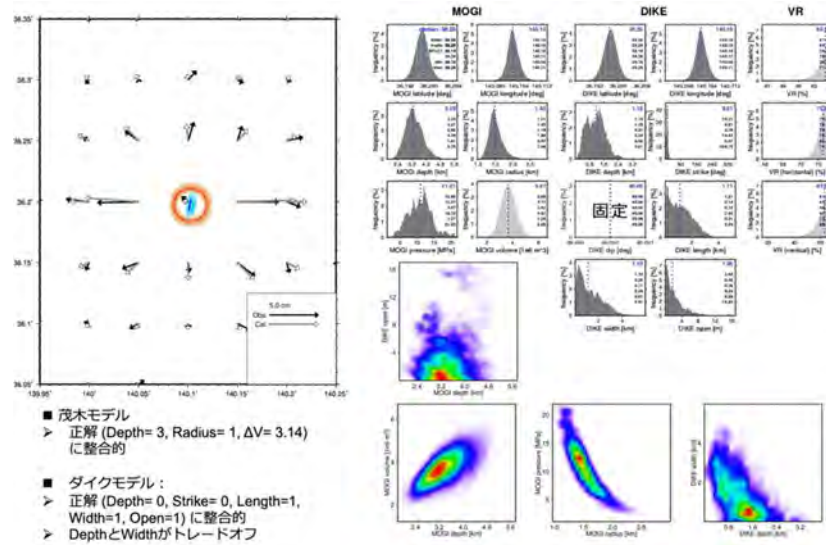


図 17. THK_12 の課題で開発した RUNE (Ohno et al., 2021) を改変して活用した球状圧力源およびダイクの同時推定の例。(北海道大学 [課題番号: HKD_06])

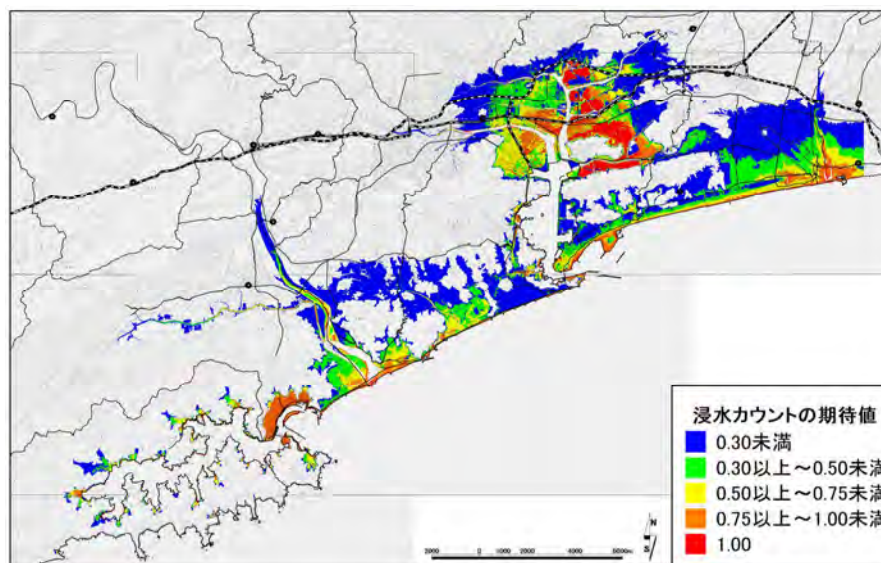


図 18. 紀伊半島より東側全体が破壊し、それ以外が割れ残った場合の後発地震による高知市周辺の浸水確率マップの例。(東北大学災害科学国際研究所 [課題番号: IRID04])

1 (6) 防災リテラシー

「防災リテラシー」計画推進部会長 高橋 誠

(名古屋大学大学院環境学研究科)

副部会長 井ノ口 宗成

(富山大学都市デザイン学部)

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

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

防災リテラシー部会は、基本部分を前計画における地震・火山災害部会から引き継ぎながら新たに設置された。防災・減災に対する社会の要請を意識し、理学・工学・人文社会科学の研究者が連携することによって、災害事例に基づき、災害の発生要因を災害誘因と災害素因とに関連づけて解明する研究を従前どおり推進する。また、マイクロジオデータやオープンサイエンスの手法なども活用し、産業界や行政機関、一般市民などのステークホルダーとの連携を深めつつ、社会における防災リテラシーの実態調査や災害軽減に効果的な知識体系要素の探求などを通して、地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究を行うものである。

4. 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

地震・火山噴火災害の発生機構を理解するためには、災害事象を、それが生じる場所や地域の歴史的・地理的特性と関連づけて分析することが重要である。近代以前の歴史災害の場合、現存する記録の信頼性についての史料批判が不可欠である。とりわけ近世初期の蝦夷地（北海道）に関係する史料は限られているが、本年度は、1640年北海道駒ヶ岳噴火を取り上げ、同時代に作成され伝来の経緯が確かないいくつかの史料群を精査し（図1）、火山学で従来参照されてこなかった記述内容を検討した。その結果、内浦湾の対岸への津波の到達、出来淵崎の形成を示唆する記述など、それらに、火山活動に伴って生じ

た諸現象と整合的な内容が含まれることを明らかにした（東京大学史料編纂所〔課題番号：UTH_02〕）。

津波災害はとりわけ地形環境に大きく影響を受ける。日本の多くの沿岸地域では、近代以降の大規模開発によって地形が大きく改変されており、歴史津波災害の詳細を検討するためには、近代以前の地形を測量地図上に復元する必要がある。本年度は、岩手県野田村から福島県相馬市に至る東北地方太平洋沿岸の明治期の歴史地形を詳細に復元した。特に宮城県多賀城市に焦点を置き、仙台藩の地誌『安永風土記』に記された津波到達伝承や、考古学調査によって発見されたイベント堆積層などの情報と復元された歴史地形とを重ね合わせ（図2）、1611年慶長奥州地震津波の具体像（浸水範囲や流速）を明らかにした（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID05〕）。

2011年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）のような巨大災害の場合、地震・津波に関する自然科学的解明とともに、社会科学的観点から長期にわたる災害過程を丹念に分析することが重要である。本年度は、東日本大震災の復興過程における集落・人口構造の変化という観点から、巨大災害後のコミュニティの脆弱性に関する示唆を得た。宮城県南三陸町・女川町・山元町における質問紙調査の結果、東北地方の被災地では元々世帯規模の大きさと社会的紐帯の強さによって地域の防災力が支えられてきたが、特に高台移転という住宅復興政策をとった自治体において世帯の分解と縮小が顕著に進み（図3）、災害の記憶の世代間継承の基盤となる家族的条件が脆弱化する傾向を明らかにした（名古屋大学〔課題番号：NGY_06〕）。

津波災害と同じく、場所限定性が強く低頻度大災害という特徴を持つ大規模火山噴火災害の場合も、住宅復興政策と地域の社会構造とに強い関連性が指摘されている。本年度は、火山噴火後の警戒区域の設定という土地利用規制に着目し、警戒区域の解除に関わる政策決定プロセスについて、桜島（大正噴火）、雲仙普賢岳、口永良部島という過去の噴火災害を事例に検討した。その結果、それらの市町村では、噴火活動が終息し、復旧・復興が着手されるまでに多くの時間を要する一方で（図4）、市町村当局が往々にして低頻度の噴火災害に対して直接経験を持たないため、過去の火山噴火災害事例に関する科学的知見を蓄積し、火山活動の状況判断や警戒区域設定に対する政策判断に活かすような仕組みが必要であると指摘した（兵庫県立大学〔課題番号：HYG_01〕）。

自治体による土地利用規制が私権の制約につながることもあり、災害誘因予測が精緻化・高度化され、それに基づいて土地利用規制や建築制限が施されても、実態として建物移転が進まない状況にある。この点に関して、本年度は、1995年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）の被災地である兵庫県神戸市・尼崎市・西宮市・明石市在住者を対象に質問紙調査を実施し、居住地選択における自然災害リスクの認知と移転意向についての状況把握を行った。その結果、地震リスクが居住地選択に及ぼす影響は他の種類のハザードに比較して大きいこと、災害リスクが利便性に比して明らかな場合に住宅・土地購入を見合わせる傾向があること、現住地からの移転は補償がないと進まない可能性が大きいことなどを明らかにした（図5、兵庫県立大学〔課題番号：HGY_02〕）。

（2）地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

社会における防災リテラシーの実態の把握については、本年度も、応急期を想定したシナリオに基づいて、個人レベルにおけるリスク認知や避難行動の量的分析を行う研究

が蓄積された。

まず、北海道釧路市中心市街地を事例に、津波浸水想定の更新後における津波避難場所の分布と避難圏の変化を分析し、街区の道路ネットワークと津波避難ビル内の階段とを GIS 上で結合した上で、避難ビルを避難場所とする場合の有効性と課題を検討した。住民一人を 1 エージェントとしてマルチ・エージェント・シミュレーションを行い、避難開始から避難ビルに到着した割合、ビル内階段の上昇を開始した割合、(浸水予測から安全とされる) 5 階を通過した割合、最上階に到着した割合を時系列的に分析した結果、平地の歩行速度と避難ビル内の階段上昇速度に差異があるために避難ビル入口で滞留が生じるといった(図 6)、津波避難ビルによる垂直避難を防災計画に取り入れる際の基礎的な課題が明らかになった(北海道大学[課題番号: HKD_07])。

地震・火山噴火等の自然現象や社会の仕組みに関する知識、また災害予測情報等を災害対応に活用できるか否かは個人差が大きく、この個人差をよく理解して活用することで、より効果的な防災対策が可能になると期待される。こうした観点で、認知・脳科学仮説に立って、災害情報が緊急時避難意思決定に結びつく心理過程について体系的な研究を行っている。本年度は、防災教育が避難行動に結びつく脳プロセスについて、主観的な津波発生リスクの程度が異なる架空の地震遭遇シナリオを数多く用意し、実験的に避難意思決定課題(避難する／しない)を行わせた結果、定量シナリオと定性シナリオとの間に避難率分布に多少の違いがあるものの、解釈安定性に大きな差は見られないことがわかった(図 7)(東北大学災害科学国際研究所[課題番号: IRID06])。

現実の問題として、これまで大規模災害による被害を経験していない富山県においては、住民の災害への危機意識はあるものの経験値が十分ではなく、どのような情報を頼りに避難行動を意識しているか、避難時にどれほど迅速な行動を想定しているかを調査した。富山県氷見市の一地区において全戸配布の質問紙調査を実施した結果、避難のきっかけとして「揺れを体感すること」が最も多く、外部からの情報では、緊急地震速報よりも行政からの公的な情報発信(呼びかけ)が多く、「近所の人からの声かけ」は想像よりも少なかった(図 8)。また、避難開始時間については、5 分～10 分で開始できると考える住民がほぼ半数であり、信頼できる公的機関からの適切な情報発信が災害被害の軽減につながることを示唆された(富山大学[課題番号: TYM_03])。

一方、日本の多くの火山地域では、観光客を対象とした防災・減災策が図られる必要があり、そのために一般の人々の地震や火山活動などに関する科学的な知識レベルの向上が重要な課題である。本年度は、総合研究グループ「小規模・高リスク噴火」とも連携して、阿蘇を訪れた観光客に対して火山防災に関する質問紙調査を実施した(図 9)。その結果、阿蘇山が活火山であることをはっきりと知っていた人は 70%、2014 年御嶽山噴火災害のことをはっきりと記憶している人は約 40%にそれぞれとどまり、また、阿蘇火山火口規制情報、入山ゲートで配布されるパンフレット、火口周辺の注意喚起の看板や放送に対する認知率も低いなど、阿蘇火山博物館や国立公園ビジターセンター、地域の防災を担う阿蘇火山防災会議協議会の活動にとっての基礎的な課題が明らかになった(京都大学理学研究科[課題番号: KUS_03])。

2014 年に深刻な御岳山噴火被害を経験した長野県木曽地域でも事情は同じであり、大学と自治体とが共同して、地元地域の火山防災力の向上を図る担い手として火山マイスターの制度に対する期待は高い。ただ、昨年度までの分析の結果、この制度の課題として

は、具体的な制度設計や運営、活動を取り巻く外的環境にかかわることが明らかになっており、本年度は、全国の類似制度や活動の拠点施設の実態を調査し、比較表を作成した（図 10）。どの地域においても、施設運営側の低頻度大災害への防災意識は高いが、観光収入の大きさゆえに火山噴火の負の側面を強調しておらず、知識普及活動の具体的方法や運営資金などに問題を抱えていることがわかり、これらの全国的なネットワーク形成による課題の共有が必要であると指摘した（名古屋大学〔課題番号：NGY_06〕）。

これらのうち、桜島では、すでに本部会の研究グループが主導して桜島火山観測所ミュージアム構想の立案に着手している。この活動は、長年にわたる火山学者と地元ステークホルダーとの連携の成果であり、本年度は、桜島大規模噴火を想定した広域避難を対象に、地元自治体に対するリアルタイム意思決定支援システムの検討を行った。火山灰の移流拡散の数値計算コードを用いて、2008 年から 2020 年までの気象場にて計算し、季節毎に想定される火山灰堆積量を見積り、建物にダメージが及ぶ閾値や、安全域および避難域の設定の基準を検討した。その結果、台風や前線停滞、冬季の高気圧停滞など特徴的な気象条件では、安全域が設定されてもゼロミスにならないことがわかった（図 11）（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI13〕）。

科学者と一般市民との連携手法としてオープンサイエンス手法（市民参画型科学、市民参画型データ収集・管理）が期待されており、その階梯論（図 12：矢守ほか、2021）に沿って、具体的に、サイエンスミュージアム「阿武山地震観測所」の運営による地震リテラシー向上、地震・津波避難訓練支援ツール「逃げトレ」の導入による市民参画型地震・津波訓練、自然災害に関する歴史資料の「みんなで翻刻」プロジェクト、内陸地震観測「満点計画・0.1 満点計画」によるオープンサイエンス型地震学試行といった 4 つの取り組みを行っている。本年度は、とりわけ地震・津波避難訓練「逃げトレ」の導入・運用について、南海トラフ地震の臨時情報発表時の事前避難を念頭に、津波避難訓練支援ソフト「逃げトレ」を改変し、避難訓練に参加した一般市民の行動データを事前避難の要不要の診断に活用するためのシステムのパイロット版を完成させた（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI14〕）。

最後に、社会の防災リテラシー向上のためには、科学的研究成果の広報にとどまらず、対象・目標を明確化した上で内容を精選し、方法の吟味、評価・検証とフィードバックからなる一連の研修プログラムの完成が急がれる。本年度は、コロナ禍の影響を受け、行政職員対象の非対面型研修を見据えた映像コンテンツづくりに着手した。本地震火山観測研究計画の枠組みと計画推進部会体制に基づいて研究成果を利活用し、行政職員が減災のために学ぶべき知識体系を整理した上で、地震火山観測研究セミナー（仮称）として再構成した（図 13）。昨年度までに完成していた 10 シナリオのうち 3 本を映像コンテンツ化、新たに 2 本のシナリオ化を実施するとともに、行政職員を目指す学生が多い兵庫県立大学の防災関連授業において評価検証を試行的に実施した。その結果、研修の前後で統計的に有意な差が見られ、この研修によって参加者の理解が促されたことがわかった（新潟大学〔課題番号：NGT_02〕）。

これまでの課題と今後の展望

第 2 次の観測研究計画では、地震・火山噴火現象の理解・予測を災害の軽減につなげるための災害科学の確立を目標として、防災・減災に対する社会の要請を意識しながら、全

国の大学における理学・工学・人文社会科学の研究者が連携することによって、地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の研究と、地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究を実施してきた。

具体的に、地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の研究においては、近世・近代の史料を批判的に検討し、災害の具体像を復元するとともに社会の対応を分析した。また東日本大震災などの近年の災害を事例にしながら、災害復興や防災対策、防災教育などの社会対応の課題に関する検討を蓄積し、南海トラフ地震など、将来の災害に備えるための防災計画や土地利用計画の課題に関する示唆を得た。地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究に関しては、GISなども利用しながら、災害の社会素因である脆弱性を個人レベルで評価・可視化する手法を開発するとともに、様々な地域や集団を対象に社会の防災リテラシーの実態把握を蓄積した。また、オープンサイエンスやリスクコミュニケーションなど新しい手法を取り入れ、行政機関や一般市民などと連携しながらリスク認知能力を涵養したり知識レベルを向上させたりする取り組みを展開し、具体的に研修プログラムの体系化と教材コンテンツの作成を行った。

今後は、過去3年間における検討をさらに深化させながら理論構築を進めていくことが重要である。地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の研究においては、歴史資料などに基づき過去の地震・津波・火山災害などの自然災害事例を蓄積し、当時の人々の対応や教訓、復興過程などについて総合的に検討する。また、災害誘因の事前評価と災害素因、とりわけ脆弱性概念とを結び付けて災害発生機構の理論を洗練させ、とりわけ災害の予測や予防、災害対応にかかわる知識要素を検討することによって防災リテラシーの体系化を図る。地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究においては、社会における防災リテラシーの実態やニーズの把握にさらに努めるとともに、他の計画推進部会や総合研究グループとの連携によって最新研究成果を取り入れながら、行政職員やボランティアなど、対象を絞った講習・研修プログラムの試行とフィードバックを重ね、完成を目指す。その際、ジオマイクロデータやGISを利用した空間分析法の構築、地震・火山情報の配信システムの整備、オープンサイエンスやワークショップといった市民参加型リスクコミュニケーションなど、新しい手法の開発を継続させることが重要である。

成果リスト

深田秀実・橋本雄一，2021，エージェントモデルを用いた津波避難シミュレーション手法の開発—釧路市における津波避難ビルの垂直避難を対象として，地理情報システム学会講演論文集，30，B30-3-1.

深田秀実・橋本雄一，2021，マルチ・エージェント・シミュレーションによる津波避難ビルへの避難行動分析—北海道釧路市中心市街地を事例として，地理学論集，96(2)，7-187-18.

橋本雄一，2021，北海道太平洋沿岸における津波浸水想定域の空間分析，北海道大学文学研究院紀要，165，129-166.

橋本雄一，2021，国土数値情報を利用したハザードマップ作成，地理情報システム学会教育委員会(編)「地理空間情報を活かす授業のためのGIS教材 改訂版」，古今書院，89-94.

井口正人，2022，自然災害の科学：火山噴火の科学，日本自然災害学会(編)「自然災害科学・防

- 災の百科事典」，丸善出版，84-85.
- 川村壮・橋本雄一，2021，港湾都市の土地利用の空間パターンの変化と津波災害リスク，地理情報システム学会講演論文集，30，B30-3-6.
- 工藤由佳・橋本雄一，2021，北海道日本海沿岸における津波避難の空間分析，地理情報システム学会講演論文集，30，B30-3-4.
- 京都文化博物館(編)，2021，「伝えるー災害の記憶あいおいニッセイ同和損保所蔵災害資料」，NHKサービスセンター，183pp.
- 三井和・橋本雄一，2021，苫小牧市における保育施設の災害時避難の課題，地理情報システム学会講演論文集，30，B31-2-5.
- 三好達也・橋本雄一，2021，BIM/CIM・GIS連携と北海道におけるGISコミュニティの活動，地理情報システム学会講演論文集，30，C31-3-5.
- 室井研二，2022，地域と事業所の防災協力はいかに可能か，NETT・ほくとう総研，115，22-25.
- Muroi, K., 2022, Post-disaster reconstruction in the rural-urban fringe following the Great East Japan Earthquake, E3S Web of Conferences 340, Open access, 1-9.
- 中道治久，2021，災害と住まい 火山，日本家政学会(編)「住まいの百科事典」，丸善出版，482-483.
- 中道治久，2022，火山災害：噴火のメカニズム，日本自然災害学会(編)「自然災害科学・防災の百科事典」，丸善出版，154-155.
- 中道治久，2022，火山災害：地殻変動，日本自然災害学会(編)「自然災害科学・防災の百科事典」，丸善出版，166-167.
- 岡田夏美・中野元太・原夕紀子・舟橋宗毅・矢守克也，2021，学校閉校後も持続する学校ー地域協働型防災活動フレームワーク：防災ミュージアムの設立と期待される効果，地区防災計画学会誌，21，75-87.
- 奥野祐介・橋本雄一，2021，歩行速度に着目した疑似的津波集団避難行動分析，地理情報システム学会講演論文集，30，B30-3-3.
- 小野塚仁海・橋本雄一，2021，携帯電話人口統計を用いた災害時における都市内の分布変化に関する研究ー平成30年北海道胆振東部地震の事例，地理情報システム学会講演論文集，30，B31-2-2.
- 阪本真由美・中道治久・高橋若菜・荒島千鶴・荒木田勝，2021，欧州の越境火山災害をめぐるガバナンスの萌芽ー2010年アイスランド火山噴火を契機として，自然災害科学，40(1)，51-66.
- Sato, S., R. Ishibashi, and M. Sugiura, 2021, Two major elements of life recovery after a disaster: Their impacts dependent on housing damage and the contributions of psycho-behavioral factors, Journal of Disaster Research, 16(7), 1107-1120, doi:10.20965/jdr.2021.p1107.
- 塩崎大輔・橋本雄一，2021，ニセコひらふ地区におけるリゾート開発と土砂災害リスク，地理学論集，96(1)，1-6.
- 塩崎大輔・橋本雄一，2021，観光地におけるVR疑似避難訓練システムを用いた避難行動分析，地理情報システム学会講演論文集，30，B31-2-3.
- 菅原大助，2021，仙台湾および三陸海岸における慶長奥州地震の津波堆積物の数値シミュレーションによる検討，「歴史が導く災害科学の新展開Ⅴー文理融合による1611年慶長奥州地震

津波の研究」，東北大学災害科学国際研究所，60-65.

Sugiura, M., R. Ishibashi, T. Abe, R. Nouchi, A. Honda, S. Sato, T. Muramoto, and F. Imamura, 2021, Self-help and mutual assistance in the aftermath of a tsunami: How individual factors contribute to resolving difficulties, PLoS ONE, 16(10), e0258325, doi:10.1371/journal.pone.0258325.

高橋誠，2021，東海地方の都市と農村をめぐる地域的人口分布とその変動(試論)，砺波散村地域研究所研究紀要，37，1-10.

高橋誠，2021，災害の地理学に求められること，地理，66(9)，54-60.

田中重好，2021，コロナ禍への社会学からの問い，社会学研究，106，57-80.

矢守克也・飯尾能久・城下英行，2021，地震学のオープンサイエンスー地震観測所のサイエンスミュージアム・プロジェクトをめぐって，実験社会心理学研究，69，82-89.



図 1. 寛永17年10月11日沢庵書状（部分写、国立公文書館所蔵）（東京大学史料編纂所〔課題番号：UTH_02〕）

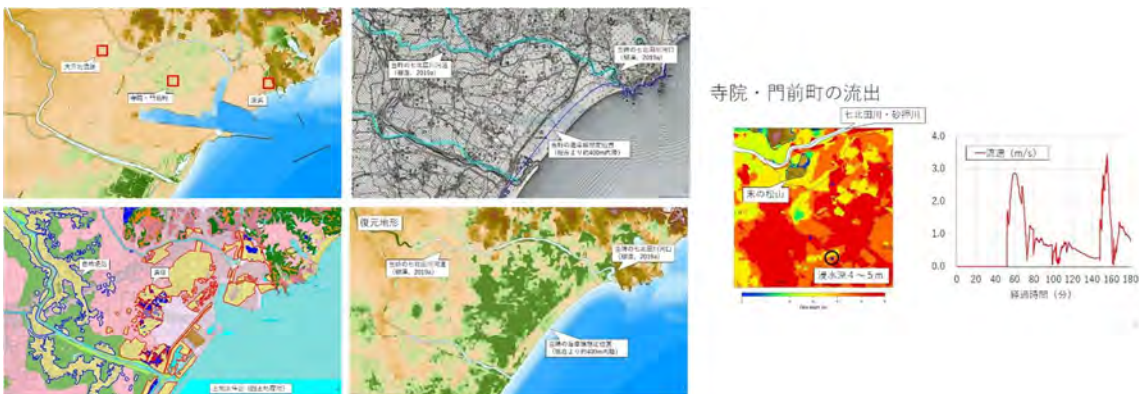


図 2. 宮城県多賀城市付近の歴史地形復元と1611年慶長奥州地震津波の具体像の解明（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID05〕）

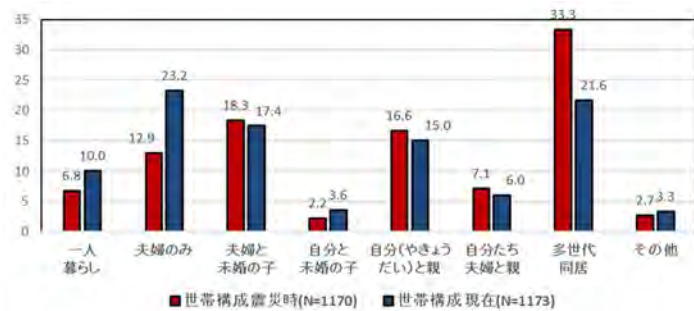


図 3. 宮城県南三陸町・女川町・山元町の東日本大震災被災地における世帯構成の変化（名古屋大学〔課題番号：NGY_06〕）

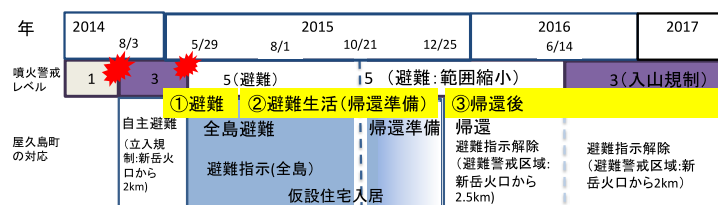


図 4. 2015 年沖永良部島噴火における全島避難から帰還に至るプロセス（兵庫県立大学〔課題番号：HYG_01〕）

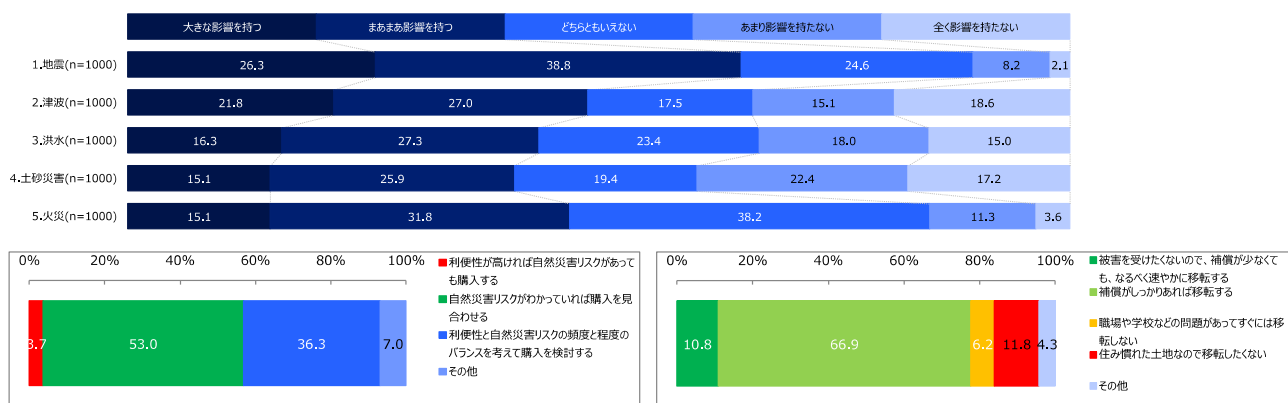


図 5. 災害リスク認知の居住地への影響度（上）および住宅・土地購入や居住地移転との関係（下）に関する質問紙調査結果（兵庫県立大学〔課題番号：HGY_02〕）



図 6. 道路ネットワークとモデル化した階段を連結した津波避難ビルへの避難行動シミュレーション（事例では 1,000 人収容の避難ビルに、津波到達までの 30 分間で 30% 程度しか避難できなかった）（北海道大学〔課題番号：HKD_07〕）

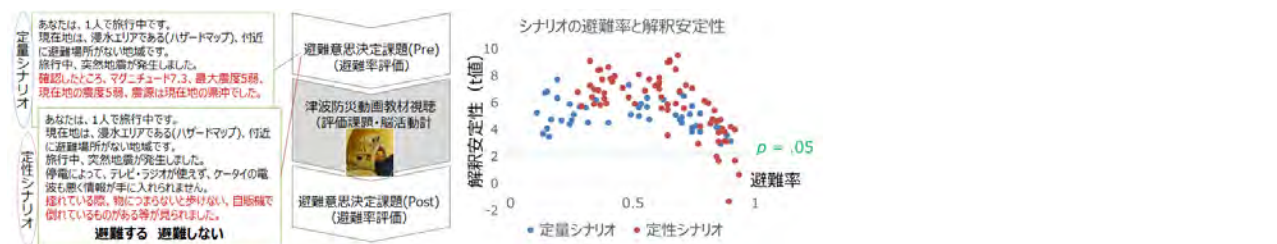


図 7. 脳計測実験デザインと津波避難意思決定課題および津波避難シナリオの検証・選定（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID06〕）

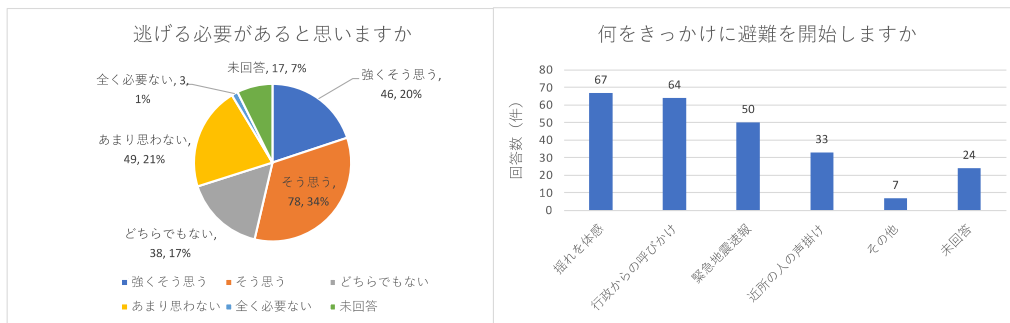


図 8. 氷見市宇波地区における地震災害への避難意識：避難の必要性（左）と避難行動のきっかけ（右）（富山大学〔課題番号：TYM_03〕）

○阿蘇山が活火山であることをはっきりと知っていた：	70%
□さらなる情報発信、啓発活動の必要性	
○2014年御嶽山の噴火災害をはっきりと記憶：	40%
□記憶の風化、啓発活動の必要性	
○火口周辺の注意喚起の看板や放送の内容を記憶：	44%
阿蘇火山火口規制情報HPを確認：	28%
入山ゲートで配布されるパンフレットを記憶：	25%
□情報伝達手段としては、現地での注意喚起の看板や放送が最も効果的	
○阿蘇中岳火口周辺の噴石跡に気付いた：	36%
うち半数近くが緊急時の避難先（待避壕）を確認	
□噴火の影響の直感的な判りやすさが防災行動につながっていることを示唆	
○観光や登山の前に噴火警戒レベルを確認：	36%
□対象者の属性を理解し入山規制の方法を検討する必要性	
○スマホの防災アプリを活用：	27%
□噴火速報など緊急時の情報伝達には緊急時一斉配信が必要	

図 9. 阿蘇を訪れた観光客の火山防災に関するアンケート調査結果（概略）（京都大学理学研究科〔課題番号：KUS_03〕）

	御嶽山	有珠山	磐梯山	雲仙	桜島
設立目的・役割	御嶽山火山マイスター 御嶽山ビジターセンター	洞爺湖・有珠火山マイスター／火山科学館	磐梯山噴火記念館	雲仙防災記念館	桜島ミュージアム
災害経緯の継承	噴火災害を風化させない	噴火の記憶・経緯を自らの言葉で語り継ぐ	地震・火山の啓蒙、自然災害から人命の保護	噴火災害を後世に伝える	小学校での火山の授業で防災意識を高める
火山防災	火山の防災が置かれている地域を目指す	災害を軽減する知恵を語り継ぐ	美しい景観が形成された火山活動について学ぶ場 雨天時の観光場所	住居の防災意識を高める	桜島をまるごと博物館と考えて現地で本物を見て楽しみながら学べる地域を作ることを目指し、観光や街づくりに取り組む
観光・地域振興	本宮地域特有の魅力や観光資源として発信していく 地域の活性化に貢献	洞爺湖や有珠火山地域の魅力発信	美しい景観が形成された火山活動について学ぶ場 雨天時の観光場所	島原半島の地域振興・観光振興の推進	桜島をまるごと博物館と考えて現地で本物を見て楽しみながら学べる地域を作ることを目指し、観光や街づくりに取り組む
普及・啓蒙・教育	知識の普及啓蒙活動	洞爺湖・有珠火山地域の自然や歴史について学び伝える	磐梯山周辺の山歩きをする人々に知られる自然環境の保護	火山学館の中核施設として教育的な学習活動を行う	桜島の噴火や歴史を伝える「桜島センター・センター」の運営
施設の比較（抜粋）					
噴火映像		噴火活動の映像	映像（セントヘレンス）	平成大噴火シアター	桜島と鎮江湾の紹介ビデオ
実物	2022.07 オープン予定	実物モデル	1888年噴火の模型	災害までの経緯	火山噴出物
モデル			噴火についての資料	島原大変遷	噴火の歴史
歴史		噴火の歴史	有珠山の噴火	雲仙防災スクワイア	噴火の歴史
自然			世界初の地震計等	桜島の庭	観音データリアルタイム表示
その他	観音データリアルタイム表示				

図 10. 有珠山・磐梯山・雲仙・桜島の各地域における火山リテラシー向上に関わる取り組みの特色および御嶽山地域との比較（名古屋大学〔課題番号：NGY_06〕）

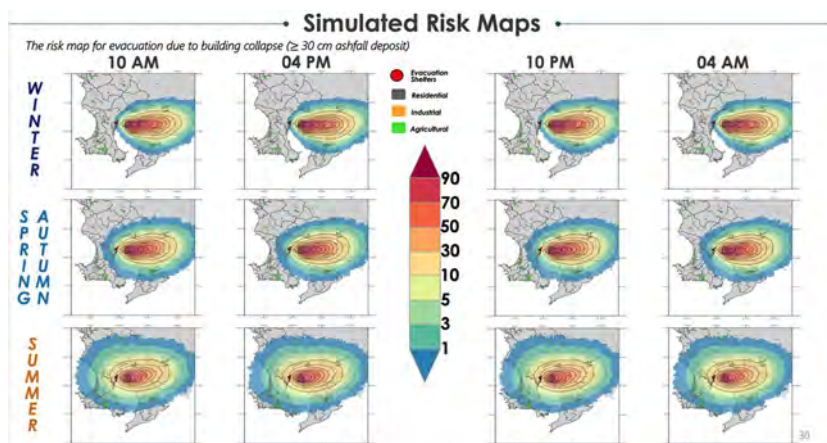


図 11. 建物被害をもたらす桜島火山の火山灰堆積量を季節ごとの予測したリスクマップ
(京都大学防災研究所 [課題番号 : DPRI13])

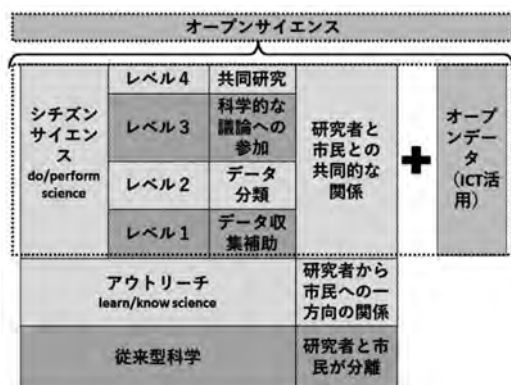


図 12. オープンサイエンスとシチズンサイエンスの階梯論 (矢守ほか、2021 : 京都大学防災研究所 [課題番号 : DPRI14])



図 13. 非対面型研修を見据えた映像コンテンツづくりのフレーム（新潟大学〔課題番号：NGT_02〕）

1 (7) 史料・考古

「史料・考古」計画推進部会長 榎原雅治

(東京大学史料編纂所)

副部会長 山中佳子

(名古屋大学大学院環境学研究科)

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

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

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

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

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

ア. 史料の収集とデータベース化

・地震火山関連史料の収集・分析とデータベースの構築・公開

既刊地震史料集全33冊の全文デジタル化計画のうち、前年度までに未了となっていた3冊分についてのデジタル化を実施した。これによって予定していた全冊のデジタル化を完了させることができた。デジタル化した地震史料データベースを活用しやすいものにするために、用語・年月日による基本検索のほかに、①年月ごとの地震史料数の一覧表から検索方法、②史料の所在地名から検索する方法、③理科年表掲載の歴史地震名から検索する方法を整備し、Webによる公開を開始した（東京大学史料編纂所〔課題番号：UTH_01〕）。史料データや考古データなどを統合的に分析可能なデータベースの構築に向けて、既刊地震史料集のテキストデータベースのAPIを改良した（東京大学地震火山史料連携研究機構〔課題番号：HMEV01〕）。

デジタル化した史料中に記された地名を地図上に表示させるシステムを構築するために、情報学の研究者と連携して、史料中の地名を自動的に読み取る技術の開発に着手した。（東京大学史料編纂所〔課題番号：UTH_01〕）。1596年に畿内で発生した地震に関して、地震史料のGISデータ化を試みた。89件の史料群のうち登場する地名や場所について現代の位置を特定し、397件について緯度経度情報および震度判定結果を付して公開した。このデータを用い、1596年に畿内で発生した地震について、先行研究の震度判定結果の再検討および余震活動の推移の分析を行った。震度判定の再検討については、史料の多い京都一奈良地域が震源であるとの強い先入観に基づき、大阪や兵庫方面の被害については、地盤やがけ崩れを理由に震度を低く判定している事、史料の文言解釈に問題がある可能性を指摘した。1707年富士山宝永噴火に関して、復興途上の様子を描いた村絵図の分析を行った（東京大学地震火山史料連携研究機構〔課題番号：HMEV01〕）。

安政東海・南海地震、安政江戸地震について書かれている大沢家文書の翻刻を行った。また防災専門図書館所蔵のかわら版の翻刻を行い、これらの翻刻集を冊子にまとめた。かわら版すごろく解説書も作成した（名古屋大学〔課題番号：NGY01〕）。既刊の地震史料集に収録されていない地震・火山関連史料の収集として、1847年善光寺地震の被害を記した地方文書、1854年安政東海地震における甲府の被害家屋数を記した史料、1854年安政南海地震における高知の被害や余震数を記した史料などを入手した（東京大学地震火山史料連携研究機構〔課題番号：HMEV01〕）。

・日本海沿岸地域を中心とした地震・火山現象の解明のための史料収集と解析

日本海沿岸地域を中心とした地震・火山現象を解明するために、各地の史料保存機関に所蔵される史資料の調査や、既刊の地震・火山噴火史料集に所収される史料の原本調査に基づく校訂作業を実施した。（1）近世後期に成立した陸奥（宮城県石巻市）の『加納家年代記』、上野（群馬県前橋市）の『赤城神社年代記』を用いて、享徳3年（1454）11月23日陸奥の津波、上野の地震について検討した。（2）明応2年（1493）6月の越後・会津の地震史料を検討した。（3）1611年会津地震により形成された山崎新湖の規模について、1645年の山崎新湖消滅以前に作成された国絵図系統の絵図の描かれ方を網羅的に

検討した。その結果、最も詳細かつ地震に近い1618～1619年の作製と推定できる東京大学総合図書館南葵文庫所蔵「奥州図」に描かれた山崎新湖の形状、湖周辺の村の位置から山崎新湖の広がりをも復原したところ、寒川（1987）の復原図よりも小さく、『新編会津風土記』『家世実紀』の記載にある東西35町余・南北20町余に近いことが明らかになった。これは地震発生直後に蒲生氏が排水工事を完了した後の状態を示すものであり、寒川の復原図は地震直後の山崎新湖の最大範囲を示すと考えるのが妥当であるとした。（4）1847年善光寺地震の救済関連史料の検討から、地震とその後の洪水それぞれの被害状況の違いを区別して把握できることを確認した。（5）1891年濃尾地震における一軒当たり死亡者数を検討した。（6）20世紀前期の新潟地方測候所の地震観測に関して検討した。（新潟大学〔課題番号：NGT_01〕）

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

文化元年(1804)象潟地震について、由利郡関村（現在のにかほ市象潟町関地区）に伝来する古文書・古地図を解説し、詳細な被害状況について調査した。象潟地震における関村の家屋被害について記した『当六月四日之夜大地震ニ付潰家死人馬書上帳控』では、当初は「潰家」「大痛」と判定されていたものが、後に「潰家」「大痛」「中痛」と評価が細分化されて判定されており、これらを含めて計算すると関村の家屋被害率は80%を超えることが確認された。また、関地区では地震動による家屋倒壊や耕作地の被害が大きかったことが確認された。また、1611年に発生した慶長奥州地震津波について、歴史資料の再検討から、現在の東北地方から東京（江戸）に及ぶ地震と、北海道から東北地方沿岸部に人的被害をもたらした津波について明らかにするとともに、1454年の享徳津波よりも規模が大きかった可能性を指摘した。令和3年12月4日にはシンポジウム「歴史が導く災害科学の新展開Ⅴ—文理融合による1611年慶長奥州地震津波の研究—」を開催し、歴史学・考古学・地質学・津波工学の研究者らとともに慶長奥州地震津波についての研究報告をおこない、判別の難しかった14～17世紀の津波堆積物が慶長奥州地震津波の可能性が高いことや、その地震規模について $M_w 8.8 \pm 0.1$ となる可能性を指摘した（東北大学災害科学国際研究所〔課題番号：IRID01〕）。

・史料を地震研究に活用する方法についての検討

三河地震(1945)における三河地方の寺院被害状況を整理した。寺院被害と集落別住宅被害率との関係を見ると、全半壊率で見た揺れの強さと寺院被害状況がより整合しており、この研究で設定した寺院被害程度の評価方法が地域の揺れの強さを示す指標として有効であることを示している。また、地盤増幅率と住家全壊率および寺院被害との関係を調べてみると、概ね地盤増幅率と住家全壊率・寺院被害程度の大きさの傾向は一致していた（名古屋大学〔課題番号：NGY_01〕）。

e-コミマップを用いて南海トラフ巨大地震史料の見える化を試みた。これまでさまざまな歴史地震史料検索システムを構築してきたが、例えば安政東海・南海地震であれば日本全国の2700件もの史料があり、ある特定の地域について詳細に検討しようとしても史料がどの情報を含んでいるかは読まないといけないため、史料を理学的解釈に活用することは至難の業である。そこで、既刊の史料をフリーのGISソフトであるe-コミマップを使って面的に整理することを考えた。今回三重県を例にe-コミマップでの整理を開

始した。併せて、紙媒体の明治期旧版地形図のデジタル化、カラーによる地形陰影図、南海トラフアスペリティ分布のデジタル化を行い、e-コミマップで見られるようにした(図1)。(名古屋大学[課題番号:NGY_01])。

Matsu'ura et al. (2020, BSSA) によって構築された震度の距離減衰式の更新されたパラメータを用いて、震度ならびに有感地震回数の再現性の再検証を実施し、震度ならびに有感地震回数が精度良く再現できることを確認した。太平洋プレート、フィリピン海プレート上面の地震、スラブ内地震ならびに地殻内地震に対して上記の計測震度の多次元距離減衰式は構築されている。そこで、近年に発生した中規模以上の地震(且つ距離減衰式の構築には用いられていない地震)を対象に、それぞれの地震タイプに対して構築された距離減衰式と観測された震度分布の残差分布について統計的解析を実施しその特徴を整理した(石辺・他, 2021)。令和2年度に『津軽藩御日記』、『榊原藩日記』ならびに気象庁震度データベースを用いて纏められた江戸・東京の有感地震回数と、江戸時代の限られた期間に記された日記史料中に記述された有感記録との比較に着手した。近年の震度データを用いた地震活動変化の分析・調査を継続し、史料中の有感記録への適用可能性を引き続き検討するとともに、有感地震記録を用いた歴史時代の地震活動解析に向けた今後の課題等について整理した(石辺・佐竹, 2021)。(公募研究[課題番号:KOB002])。

・研究コミュニティの構築・教育・市民への普及

2021年11月14日に第9回歴史地震史料研究会をオンラインにて開催し、本課題研究者メンバーを中心とした歴史学者10人・考古学者1人・地理学者2人による研究発表・討議を行った(参加者41人)(新潟大学[課題番号:NGT_01])。

古文書解読のための定期的な勉強会(週1回、京都とつくばの2か所、オンラインまたはハイブリッド)を継続的に開催している。また、合宿形式の勉強会(2021年8月26日～28日、2022年3月17日～19日、いずれもオンライン)を開催した。参加者の解読技術の向上をはかるとともに、これまで歴史地震研究に関わっていなかった研究者や学生、あるいは市民の方々に研究を普及する機会となった。歴史地震のカタログや震度分布を活用したツールの開発とデジタルアーカイブを活用するためのWebアプリの改良を行い、関係者でテストした。気象庁の地震月報(カタログ編)の震度データを検索できるようなWebアプリを公開した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_01])。

イ. 考古データの収集・集成と分析

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

令和2年度から、近畿エリア、九州エリア、中国エリア、関東エリアの発掘調査成果資料(発掘調査報告書、概要報告書、年次報告書、学術論文など)を中心に、発掘調査にともなう明らかとなる表層地質情報と、そこに含まれる地震、火山噴火、水害、副次的災害(火災や建造物の倒壊など自然災害にともなう人の活動や活動域が被災するもの)の痕跡データの整理を継続し、過去の低頻度巨大地震の発生時期の検証と被災分布や具体的な被災像を追跡している。

地震痕跡については、（１）複数の断層帯付近において、断層をトレースするように地震痕跡が集中して検出され、断層帯から遠ざかると痕跡が検出されなくなる傾向がみられた。（２）断層帯付近の山地・丘陵部、台地、さらに段丘上には地すべりや墳墓等の倒壊・崩落痕跡が、山地・丘陵や台地の裾部、段丘下部や沖積平野には液状化の痕跡が集中して分布している。（３）これらの地震痕跡の大半は、形成時期から断層の活動によるものではないが、いずれも震度５弱以上で発生するものとして認識されており、断層の活動とは関わらない地震動も、断層帯付近においては振動が大きくなり、表層地質に構造変形を付加することを示唆した。（４）断層帯から離れた地域では、地形要素の境界にあたる遷急点や遷急線付近に集中して液状化痕跡が検出された。これは堆積層の変わり目や地下水面－地表間距離が短いなど、地質構造的なギャップが存在し、液状化の誘因となっていることが推定された。（５）軟弱地盤によって構成される沖積平野において、現況では地形の変化がみられない地域でも液状化が集中して分布する地域が確認された。これは偶発的な分布ではなく、（４）で推定された地質構造的なギャップが埋没している可能性が考えられる。（６）地震痕跡の形成時期について検討すると、広域かつ同時期に被災したものと断層帯周辺に被災地が集中している２つのパターンがみられ、震源が海溝型地震と内陸型地震に依拠している可能性がある。（７）上記の成果において、近世以降の史料に残らない規模の大きな地震の存在が示唆されてきており、引き続き地震発生時期の検証と、史料との突合検証を進めていく。（８）上記の成果は、南海トラフ起源の地震とされる災害痕跡と、それ以外の地震痕跡を識別する必要性を強く示すものであり、調査研究の深化が必要である。（９）以上の成果は、本災害痕跡データベースが地震災害における被災想定域、想定被災レベルを検討する上で重要な基盤情報を提供可能であることを示している（奈良文化財研究所〔課題番号：NAB_01〕）。

火山噴火痕跡については、（１０）鹿児島湾を中心に遺跡の分布とそれぞれの成立時期について情報をまとめ、さらに史料に残る近世以降の桜島噴火情報と、発掘調査で検出される降下火山灰、火山弾等の火山噴火に伴う被災痕跡を集成して過去の火山噴火災害についてデータベース化を進めている。（１１）近世以降の桜島噴火のなかで、これまで被災がなかったと考えられてきた鹿児島湾西側（現・鹿児島市）沿岸域に降下火山灰がみられることがわかってきた。（１２）上記の成果は、火山噴火シナリオの更新や噴火シミュレーションの想定範囲の更新を促すものと考えられる（奈良文化財研究所〔課題番号：NAB_01〕）。

・縄文三陸地震津波の解明のための考古学的調査

縄文時代中期（4490-3220 calBP）に発生した三陸地震津波の発生後に焦点をあて、縄文集落の分析から津波冠水範囲の特定と復興経過の復原を行った。①すでに岩手県の宮古湾岸・山田湾岸・大槌湾岸などで確認していた大木８－９式期の異変は、仙台湾岸の仙台市上野遺跡でも確認でき、縄文時代中期の津波が東日本太平洋岸を広く襲った大規模な地震津波であることが明らかになった。②この津波により、標高10m未満の海岸部低平地では集落が断絶し高台への移転し、一方、海岸からやや離れた低位段丘面では断絶なくそのまま集落が継続したことを明瞭に確認できた。③仙台市上野遺跡で地震津波発生直後の大木９式期から、集落域の大規模な整地や、大きな溝への過去の家屋の遺品などの投棄が観察され、大規模な復興に着手している様子が確認できた。④宮古市上村貝塚

では、この時期他に例のない特異な人骨集積埋葬がみられ、何らかの原因による複数の被災者とみられ注目される（新潟大学〔課題番号：NGT_01〕）。

（２）低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

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

・史料を用いた地震現象の分析

茨城県内に残る幕末の日記史料に見える地震表現の出現頻度と気象庁の震度データベースを比較し、「大地震」が震度３、「地震」が震度２程度に相当すると考えられることを確認した。1800年から安政東海・南海地震に至るまでの期間の西日本において最も広い範囲で震動が記録されている1835年５月18日（天保６年４月21日）の地震について検討した。この地震では目立った被害記事がなく、『被害地震総覧』にも掲載されていないが、既刊史料集掲載史料のほかに今回の調査で新たに找けた史料によって、鹿児島と高知で「大地震」と記録されているほか、佐賀、山陰、近江、岐阜でも揺れが感知されていたことが分かった。1968年４月１日の日向灘を震源とする地震（深さ22km、M7.5）に類似していると考えられる。16世紀以前の地震記録を調査する手がかりとなるのは「年代記」と呼ばれる一群の史料である。その史料の信頼性を検証するために、南九州に残る各種の年代記の比較検討を行った（東京大学史料編纂所〔課題番号：UTH_01〕）。

成果リスト

・論文・報告書等

- 蝦名裕一・今井健太郎, 2021, 由利郡関村の歴史資料にみる文化元年（1804）象潟地震の被害状況, 『歴史地震』, 36, 191-203.
- 原 直史, 2021, 文政十一年災害史料の流布をめぐってーシーボルト台風と三条地震を中心にー, 災害・復興と資料, 13, 8-13.
- 原 直史, 2021, 文政十一年大地震にて破損村々取調帳控, 佐渡・越後文化交流史研究, 21, 25-29.
- 原田和彦, 2021, 『大地震一件』からみた一八四七年善光寺地震の被害分布, 災害・復興と資料, 13, 14-26.
- 堀 健彦, 2021, 「津波之由来」所載絵図にみる1854年南海地震津波被害の空間的表現, 災害・復興と資料, 13, 30-40.
- 石川寛・平井敬, 2021, すごろくで学ぶ安政の大地震, 風媒社, 131.
- 加納靖之・橋本雄太, 2021, 古文書解説の現在地：最新技術と共同作業が拓く未来, 茶道雑誌, 85, 78-87.

- 片桐昭彦, 2021, 史料にみる中世の鎌倉の津波被害, 季刊考古学, 154, 43-46.
- 片桐昭彦, 2021, 中世の災害記録としての『三国一覧合運図』写本一東山文庫本・龍谷大学本, および『大唐日本王代年代記』の史料学的検討一, 災害・復興と資料, 13, 1-7.
- 水野嶺, 年代記にみる中世南九州の災害ー災害研究における年代記試論ー, 國學院雑誌, 122.
- 村田泰輔, 2021, 災害痕跡データベースの構築・公開に向けてー考古学の新たな挑戦, 地域防災, 36, 4-9.
- 村田泰輔, 2021, 藤原宮下層運河SD1901Aの層序, 奈文研論叢, 2, 151-159.
- 村田泰輔, 2021, 歴史災害痕跡データベースの構築とその有効性, 考古学研究, 68-3, 16-19.
- 大邑潤三, 2021, GISのジオリファレンス機能を用いた近世村絵図の分析ー富士山宝永噴火からの復興を事例としてー, 西洋史学, 271, 73-76.

・学会・シンポジウム等での発表

- 榎原雅治, 2021, 日本の地震災害と地震史料研究の現在, 2021日本史学会夏期ワークショップ「日本史を通じて見る災害と国家」.
- 蝦名裕一, 2021, 454 年享徳地震津波と 1611 年慶長奥州地震津波の比較分析, 第38回歴史地震研究会若小牧大会.
- 蝦名裕一, 2021, 象潟地震における家屋倒壊率についてー由利郡関村を事例にー, 第9回歴史地震史料研究会.
- 蝦名裕一, 2021, 歴史資料にみる慶長奥州地震津波, 歴史が導く災害科学の新展開Ⅴー文理融合による1611年慶長奥州地震津波の研究ー.
- 原田和彦, 2021, 松代藩における善光寺地震後の復興策ー勘定所元々『変災日記』の分析ー, 第9回歴史地震史料研究会, 10.
- 堀 健彦, 2021, 1611年会津地震による山崎新湖の形成とその消滅ー絵図に注目してー, 第9回歴史地震史料研究会, 7.
- 平井敬, 2021, 大沢家本願寺関係文書に記された安政東海・南海地震, 歴史地震研究会, P-04
- 加納靖之・大邑潤三, 2021, 歴史地震と気象庁カタログの連続性を考慮した震度データ点カタログ, 日本地球惑星科学連合2021年大会, MIS27-08.
- 加納靖之, 2021, クラウドソーシングによるデータ構築から古地震研究へ, 日本学術会議公開シンポジウム「総合知創出に向けた人文・社会科学のデジタル研究基盤構築の現在」
- 加納靖之, 2022, 前近代と近代以降の地震カタログの統合検索ツールの開発, 第128回人文科学とコンピュータ研究会発表会, 10.
- Yasuyuki Kano・Junzo Ohmura・Kiyomi Iwahashi, 2021, Evaluation of Damage Descriptions Around Mt. Hiei During the 1830 Kyoto Earthquake, Joint Scientific Assembly IAGA-IASPEI 2021.
- 片桐昭彦, 2021, 近世成立の年代記に記される古代・中世の地震記事の出典, 第9回歴史地震史料研究会, 5.
- 水野嶺, 2021, 薩摩藩記録にみる文明桜島噴火, 2021年歴史地震史料研究会.
- 村田泰輔, 2021, 発掘調査でわかる平城宮周辺の地質と過去の災害痕跡データベースの構築と災害の軽減に向けた考古学の新たな挑戦, 佐保川歴史教室第8幕第5回講義.
- 中村 元, 2021, 20世紀前期新潟測候所の地震観測について, 第9回歴史地震史料研究会, 13.

- Junzo Ohmura・Miki Hamano, 2021, Aftershock Activity of the 1596 Earthquake in Kinki Region of Japan Revealed by Diaries, Joint Scientific Assembly IAGA-IASPEI 2021.
- 大邑潤三・濱野未来・橋本雄太・加納靖之, 2021, 歴史地震史料のGISデータ化の試みと課題, 日本地球惑星科学連合2021年大会, MIS27-P01.
- 大邑潤三・盆野行輝・加納靖之, 2021, 新たな史料で判明した1854年安政東海地震における甲府盆地の被害と震度, 第38回歴史地震研究会, 0-27.
- 齋藤瑞穂・鈴木正博, 2021, 縄文三陸地震津波研究(4)―被災した縄文集落のその後―, 2021年歴史地震史料研究会講演要旨集, 1-5.
- 齋藤瑞穂・鈴木正博, 2021, 縄文三陸地震津波研究(4)―被災した縄文集落のその後―, 第9回歴史地震史料研究会, 1.
- 齋藤瑞穂, 2021, A fine-tuned pottery typochronology for detailing prehistoric tsunamis: From Sanriku Coast of NE Japan as an example., The 30th International Tsunami symposium, e90034.
- Reiko Sugimori・Kazuko Ariizumi・Kenji Satake, 2021, Origin Time of the 1854 Tokai Earthquake Recorded on Logbook of Russian Frigate Diana, Joint Scientific Assembly IAGA-IASPEI 2021.
- 都築充雄, 2021, 三河地震(1945)における三河地方の寺院被害状況の整理, 歴史地震研究会, 0-33.
- 漆原惇・加納靖之・大邑潤三, 2021, 「高野家記録」を用いた18世紀の宮城県南部の地震活動の分析, 日本地震学会2021年度秋季大会, S10-06.
- 山中佳子・宇佐美龍夫, 2021, 歴史地震総表のWEB検索システムの構築, 歴史地震研究会, 0-10.
- 片桐昭彦, 2021, 近世成立の年代記に記される古代・中世の地震記事の出典, 2021年歴史地震史料研究会講演要旨集, 14-18.
- 矢田俊文, 2021, 一軒当りの死亡者数と災害―1742年寛保台風と1891年濃尾地震―, 第9回歴史地震史料研究会, 12.
- 吉岡誠也, 2021, 安政東海地震における佐賀藩江戸上屋敷の被害と修復, 2021年歴史地震史料研究会.

1 (8) 観測研究基盤

「観測研究基盤」計画推進部会長 鶴岡 弘

(東京大学地震研究所)

副部会長 青山 裕

(北海道大学)

地震火山研究にとって不可欠である観測データを安定的かつ継続的に取得するために、日本全国に展開されている陸域および海域の地震、地殻変動、津波、潮位、電磁気、重力等の観測基盤を維持すること（観測基盤の整備）、さらにこれらの観測データの解析技術等の開発・高度化（観測・解析技術の開発）を進展させること、観測データをリアルタイムに効率的に流通する基盤（地震・火山現象のデータ流通）を維持することとともに、観測データの公開や研究成果を共有するシステムの開発（地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開）を観測研究部会において引き続き粛々と進めている。以下に令和3年度の成果の概要をまとめた。

5. 研究を推進するための体制の整備

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

防災科学技術研究所は、陸海統合地震津波火山観測網(MOVLAS)及び首都圏地震観測網(MeSO-net)を安定して運用し、地震、低周波地震、超低周波地震、スロースリップイベントについてイベント検出および震源位置、震源メカニズム解、断層モデルの推定、余震活動の予測等を行った。さらにその活動状況のモニタリング結果をわかりやすく情報発信を行うとともに、地震調査委員会、地震予知連絡会等に随時提供を行った。また、令和3年6月には、2017年3月以前のMeSO-net波形データの公開も開始した。2021年2月13日23時7分頃、福島県沖の深さ55 km付近を震源とするMJ7.3 (Hi-net震源の深さ57 km、Hi-netマグニチュードMHi7.6) の地震に関して、観測点補正值を用いた震源再決定を行なった結果、MJ7.3 の地震とその余震は、北東-南西方向に約30 km、北西-南東方向に約20 kmの拡がりを持ち、深さ方向には約40-60 kmに分布することがわかった。また、Hi-netとS-netの手動検出震源を初期震源とし三次元地震波速度構造を用いた震源再決定の結果は、この地震活動が沈み込む太平洋プレート内の低速度域で発生したことを示した。さらに、同地震発生後の地震活動について連続地震波形エンベロープ解析から得られた4-20 Hz帯域のエネルギー輻射量推定結果により、本震発生から10日後までの余震による積算エネルギー輻射量は本震の高周波エネルギー輻射量の0.57%であり、この割合は同じく太平洋プレート内の地震である2003年宮城県沖の地震(MHi7.5、0.85%)や、2011年宮城県沖の地震(MHi7.6、0.87%)と同程度であることがわかった。2021年3月20日18時9分頃、宮城県沖の深さ60 km付近を震源とするMJ6.9 (Hi-net震源の深さ65 km、MHi7.0) の地震について、観測点補正值を用いた震源再決定を行い、MJ6.9の地震以降に発生した地震の多くは西北西傾斜の面に沿って分布し、主に海陸プレート境界に沿って発生したプレート間地震であることがわかった。また、海域観測網を含めた三次元地震波速度構造を用いて再決定した2021年3月20日および5月1日の宮城県沖の地震MJ6.8の震源分布から、

3月20日の地震は1978年宮城県沖地震の地震時すべり域の西端に、5月1日の地震は1978年宮城県沖地震の地震時すべり域の南半分かつ2005年の宮城県沖の地震の地震時すべり域の西端に位置することがわかった（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED05〕）。気象庁は地震観測網や地殻変動観測網などの観測基盤の維持を継続し、関係機関の地震観測データの一元的処理結果の関係機関への提供を実施し、南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会や地震調査委員会において報告を行った。震源データを日々、更新するとともに、2020年3月までの精査後の震源データ（確定値）を公開した（気象庁〔課題番号：JMA_09〕）。国土地理院は、全国において、GNSS 連続観測点を維持し、観測を継続した。また、国際 GNSS 事業（IGS）へ参画し、観測データの提供を行った。加えて、最新のGPS衛星およびITRFに対応したGNSS 連続観測（GEONET）の新しい解析ストラテジの運用を開始するとともに精度評価を実施した。地殻変動の監視においても、新しい解析ストラテジによる座標値に基づき行われ、従来手法に比べ、僅かながら季節変動を抑えられるようになった（国土地理院〔課題番号：GSI04〕）。全国の電子基準点を対象とした電子基準点リアルタイム解析システム（REGARD）を引き続き運用した。令和3年5月1日に発生した宮城県沖を震源とする地震において、地殻変動をリアルタイムに検知した。また、矩形断層モデルの推定に際し、MCMC法（マルコフ連鎖モンテカルロ法）を使用するアルゴリズムを試験的に導入し、システムの高度化を進めた。さらに、断層モデル推定の入力値となるリアルタイム地殻変動情報の品質（妥当性）を点検し、REGARDの推定結果に付与するアルゴリズムを開発した（国土地理院〔課題番号：GSI_08〕）。さらに、緊急解析により、国内外で発生した地震や火山活動に伴う地殻変動を検出した。国内では、2021年8月の福岡ノ場の火山活動により生じた新島について、島の形成から縮小の様子を捉えた（図1）（国土地理院〔課題番号：GSI_07〕）。

大学は、観測データ流通網JDXnetの安定的な運用を継続し、TDXの移転対応を実施した（令和3年12月）。また、SINET5からSINET6への移行を実施予定である（令和4年3月）。柏にて接続された東京大学情報基盤センターの大規模並列計算機を利用したリアルタイム地震データ解析の開発を継続した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_19〕）。高知大学においては、地震動観測点における、観測点ごく近傍の地盤構造を把握することが可能となった。また機器故障についても得られた地盤構造指標の時間変化をモニタリングすることによって、観測状況の把握が可能である。今後は時間変化の指標（定常的にある速度、層境界位置の変化幅の把握）をめざす予定である（高知大学〔課題番号：KOC_01〕）。

気象庁、国土地理院及び海上保安庁は、潮位連続観測を継続した（気象庁〔課題番号：JMA_10〕、国土地理院〔GSI_05〕、海上保安庁〔JCG_02〕）。気象庁は、柿岡、女満別、鹿屋及び父島での地磁気4成分観測を実施し、陸域、海域での磁気測量をはじめ、大学等による電磁氣的観測研究あるいは幾つか提案されている日本域における標準的な全磁力磁場モデルの算出方法の検証・改良を進めるために、高精度の地磁気基準値を提供した。データの引用・追跡を容易にするため、令和3年度から地磁気観測所のデータに、DOI（Digital Object Identifier）が付与された（気象庁〔課題番号：JMA_11〕）。国土地理院は、重力測量について航空重力測量に必要な飛行場重力点の設置を、女満別、丘珠、鹿児島各飛行場にて実施した。また、主に北海道、東北、近畿、九州地方において、航空重力測量を実施し、上空の重力データを取得した（国土地理院〔課題番号：GSI_06〕）。

山梨県富士山科学研究所は、富士山科学研究所基準点でのgPhone重力計による連続観測を継続するとともに、比較的通年でアクセスが可能なスバルライン4合目重力点を設置した（山梨県富士山科学研究所〔課題番号：MFRI02〕）。北海道立総合研究機構地質研究所は、雌阿寒岳、十勝岳、樽前山、倶多楽、有珠山及び北海道駒ヶ岳において、地球物理学的・地球化学的モニタリングを継続して行い、火山活動の変化を捉えるためのデータの蓄積を行った。また、倶多楽（登別地域）と北海道駒ヶ岳については、熱水系について検討した（北海道立総合研究機構〔課題番号：HRO_01〕）。

気象庁は、全国の50活火山について、全国4カ所の火山監視・警報センターにおいて、地震計、空振計、GNSS、監視カメラ等による連続的な監視観測を継続した。全国の活火山について、GNSS繰り返し観測、熱観測等の調査的な機動観測を計画的に実施した（気象庁〔課題番号：JMA_12〕）。

イ．観測・解析技術の開発

東京大学地震研究所は、定常的な海域観測網の高度化に関して、2014年に復旧した既設の三陸沖海底光ケーブル式地震津波観測システムおよび2015年に設置した海底光ケーブル式地震津波観測システム（新規開発のOBCSTシステム）の両方を用いた併行観測を継続している（図2）。また、光ファイバセンシング技術の一つであり、振動計測が可能な分散型音響センシング(DAS)を利用した地震観測を実施している。2021年3月には新しく開発された計測装置の試験観測を約3日間行った。新型DAS計測器では、自己ノイズが軽減され、距離100kmまで地震波形を観測できることを確認した。DAS計測は単位時間に大量のデータを生成するために、長期にわたって定常観測を行うためには改良が必要であり、DAS計測の常時観測可能なシステムを開発している。DAS計測技術を用いた常時地震観測システムの構築にあたってのハードウェア、ソフトウェアを検討し、ハードウェアについては、DAS計測器の内蔵ディスクでは容量が足りないために、大容量の外部ディスク装置を増設し、各種処理を行うための観測サーバを追加する。ソフトウェアについては、1．DAS測定器から生成される計測データを取得する機能、2．大量の計測データの中から重要と思われる情報だけを抽出し保管する機能、3．計測データを表示（可視化）する機能の3機能を実装することとした（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_22〕）。

大学は、新たな無線通信帯域・技術を活用した地震火山データ伝送システムの開発及びこれを利用した地震・火山活動状況を高精度かつ迅速に把握可能なシステムの開発を進めている。東北大学においては、無線システムと接続を行う携帯系の通信の検討のため、情報通信研究機構のIoTゲートウェイと学術情報ネットワーク（Sinet）の広域データ収集基盤のプロジェクトに引き続き参加し、データ流通網への接続等の動作確認を行った（東北大学理学研究科〔課題番号：THK_13〕）。名古屋大学においては、小電力、小型・携帯テレメータ地震観測装置の改良開発を実施している。昨年度改良（ファームウェア：記録優先モード、ハードウェア：コンパクト化、非接触スイッチなど）を加えたロガー5機を山頂試験観測点に設置（置き換え）した。年末を挟んだ積雪により発電条件が悪くなった地点に対して、追加機能である記録優先モードに切り替え、機能の有効性を確認することができた（名古屋大学〔課題番号：NGY_08〕）。

情報通信研究機構においては、Pi-SAR X3の初期機能・性能確認試験を実施して、空間分解能15cmで地表面の画像取得に成功した。初観測が成功したことで、新しい観測基盤の構築へ繋がることが期待される（図3）（情報通信研究機構〔課題番号：NICT01〕）。

ウ．地震・火山現象のデータ流通

北海道大学は、地殻変動連続観測データ、および、GNSSデータサーバを運用し、地殻変動等多項目データの一元的な流通とデータ蓄積などを継続した。地殻変動データサーバのセキュリティ機能を維持するために必要なシステムのアップデートについて情報収集と手法の検討を行った。GNSSデータサーバに格納した1995年兵庫県南部地震の臨時観測データについて、利用しやすいようにパッケージ化し、企画部戦略室が運用する研究成果共有データベースからの公開を行った（北海道大学〔課題番号：HKD_08〕）。

東京大学地震研究所は、前年度に引き続き、次世代の対話観測処理系システムについて試作を進めた。前年度は、複数のプラットフォーム上で動作し波形表示と手動検測の最小限の機能を備えた対話検測ソフトウェアのベース部分を作成した。今年度は、昨年度試作したソフトウェアを本課題の担当者及び関係者で試用するとともに、震源決定プログラムや地図表示機能（図4）を実装した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_24〕）。高知大学においては、次世代WINプロトコル策定のため、現状のWINシステムで行われている常時データ伝送（方式、プログラム）について精査を行った（高知大学〔課題番号：KOC_02〕）。

エ．地震・火山現象のデータデースの構築と利活用・公開

東京大学地震研究所は、DOI等の永続的識別子付与と公開について、昨年度末に本計画に関連するデータ公開の状況や今後の予定について尋ねるアンケートを実施した。回答内容の詳細について回答者に確認しつつ、アンケートの分析を進めた。回答者に事例を紹介してもらうセミナーを企画し情報交換を進める予定である。また、機関リポジトリでデータを公開する際の課題について、学内の担当者と情報交換を行なった。東京大学では機関リポジトリ（UTokyo Repository）に外部で公開しているデータベース等のメタデータを登録できることがわかり、いくつかのデータを登録し、DOI付与も実現した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_18〕）。

気象庁は、地震カタログ（震源、発震機構）を2020年8月分まで作成し、地震月報（カタログ編）として公開した。海域観測網の観測データを用いて自動震源を決定する際に、ノイズとなるエアガン起源のシグナルの除去ロジックを2021年7月に一元化処理システムに適用した。以降、海域観測網の設置海域における自動震源決定の際にエアガン起源のシグナルの除去に成功している。（気象庁〔課題番号：JMA_14〕）。定常観測点の4地点（柿岡、女満別、鹿屋、父島）に、祓川を加えた5観測点における地磁気4成分連続観測データを月毎に地磁気観測所データベースに登録、公開するとともに、定常観測点のデータを国際的なデータセンターに提供した。データの引用・追跡を容易にするため、令和3年度から地磁気観測所のデータに、DOI（Digital Object Identifier）が付与された（気象庁〔課題番号：JMA_13〕）。常時観測火山に選定された全国の50活火山について、東京の火山監視・警報センター、札幌、仙台、福岡の地域火山監視・警報センター、及び

鹿児島地方気象台において、地震計、空振計、GNSS等の観測データを常時収集するとともにデータの解析を行い、それらの成果の蓄積を進めた（気象庁〔課題番号：JMA_15〕）。

産業技術総合研究所は、アジア太平洋地域の地震火山ハザード情報整備、国際標準化、データ共有・相互利用、国際的な連携の推進を目的として、アジア太平洋地域の研究機関と連携し、地震火山活動に関連する地質ハザード情報の取りまとめを進めている。大規模噴火の前駆活動と噴火推移について、これまでに、新たに白頭山10世紀噴火、三瓶-木次、ウルルン-隠岐、箱根-東京、御嶽第1、阿蘇3の火山噴火を取りまとめた。また、屈斜路、三瓶、鬼界、十和田、鬱陵島、白頭山の大規模噴火の前駆活動と噴火推移の研究成果を地質調査総合センター研究資料集no.728として取りまとめた。また、大規模噴火データベースの閲覧検索システムの構築を進めた（図5）（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST11〕）。

国土地理院は、令和2年度に調査を行った「浅間山」の火山土地条件図及び数値データ並びに令和2年度に作成した「十勝岳」「雌阿寒岳」「浅間山」「伊豆大島」の火山基本図及び数値データを公開した。令和3年度においては、「諏訪之瀬島」の火山土地条件調査及び「御嶽山」「神津島」「有珠山」「倶多楽」の火山基本図整備を実施した。（国土地理院〔課題番号：GSI_10、GSI_09〕）。

研究成果共有システムの運用方法と目標について検討を実施し、以下のポリシーで運用を行うこととした。運用責任は戦略室とし、戦略室が中心となってポリシーの検討、コンテンツの調整、課題や部会への関係情報収集や依頼、周知広報を実施する。システム運用は企画部の学術支援職員と戦略室教員及び課題担当者で実施する。収集する情報は、課題間連携及び部会間・総合研究グループ間連携で必要となるメタ情報を中心とし、課題間連携や部会間・総合研究グループ間連携で活用可能な関係情報の所在を示すハブ的な役割を目指す。本システム独自のデジタル識別子情報（doi）は付与しないが、既存のデータリポジトリやデータベース、データジャーナルのdoi情報を提供する。収集する具体的な情報として、建議で整備されたデータベースへのリンクやdoi情報、建議で開発されたソフトウェアやdoi、建議で実施された臨時観測や構造探査のオリジナルデータ、成果管理システムにある論文情報等である。また、部会内や部会間・総合研究グループ間連携を促進するため、共有オンラインストレージ（Nextcloud）を新たに整備した。成果共有システムには新たに「地震史料集テキストデータベース」がリンクされたほか、オリジナルデータとして伊豆大島及び周辺部の地震波速度構造（2009年構造探査実験）、1995年兵庫県南部地震（M7.3）臨時GPS観測データが公開された。（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_25〕）。

これまでの課題と今後の展望

地震・火山・防災研究にとって必要不可欠である観測データを安定的かつ継続的に取得することの技術的な課題等は明らかとなっており、観測データおよび解析結果等を有効に活用して研究の進捗ペースを加速するための、データ流通・データベース化・データ公開は時間とコストを考慮してゆっくり進められている。データ公開については、昨今のセキュリティ事情もあり、個々で進められる段階から集約化がさらに進められた。DXを含むクラウドも急速に普及しつつあるが、大規模データベースを長期にわたり維持するという

観点からはまだまだ評価・検証が必要と考えられる。来年度にむけては、これらの課題を解決し、データベースの統合化や研究成果共有システムをのさらなる構築が求められる。

成果リスト

村松弘規・高松直史・阿部聡・古屋智秋・加藤知瑛・大野圭太郎・畑中雄樹・攪上泰亮・大橋和幸, 2021, 新しいGEONET解析ストラテジによる電子基準点日々の座標値 (F5解・R5解) の公開, 国土地理院時報, 134

Ichimura, M., K. Mikiyara, N. Ishikura, K. Shimazaki, M. Ishimoto, Y. Sato, T. Kobayashi and H. Munekane, 2021, Monitoring Active Volcanoes in Japan Using InSAR Time Series Analysis System with ALOS-2 Data, AGU Fall Meeting 2021, G25A-0344

Takagi, Y., H. Ueshiba, T. Nakakuki, S. Matsumoto, K. Hayashi, T. Yutsudo, K. Mori, T. Kobayashi, 2021, VLBI-GNSS co-location survey at the Ishioka Geodetic Observing Station in 2018 and 2020, EGU General Assembly 2021, EGU21-810

Matsumoto, S., H. Ueshiba, T. Nakakuki, Y. Takagi, K. Hayashi, K. Mori, T. Yutsudo, T. Kobayashi, Y. Sato, 2021, VLBI-GNSS co-location at the Ishioka Geodetic Observing Station, IAG Scientific Assembly 2021

Masahiro Nakashima, Kento Iio, Yasuhiro Iitsuka, Shinobu Kurihara, Kumikazu Ochi, Shuichi Omori, Tokuro Kodama, Masato Kuroyanagi, Masami Handa, Hiroaki Yamamoto, Takashi Toyofuku, Chiaki Kato, Koji Matsuo, 2021, The Airborne Gravity Measurement for Development of a New Precise Gravimetric Geoid Model in Japan, IAG 2021

Masahiro Nakashima, Shuntaro Fukaya, Yasuhiro Iitsuka, Takashi Toyofuku, Kumikazu Ochi, Hiroaki Yamamoto, Shuichi Omori, Chiaki Kato, Masato Kuroyanagi, Masami Handa, Koji Matsuo, 2021, Quality control of airborne gravity survey in Japan, AGU Fall Meeting 2021

Tanaka, R., Y. Yamaya, M. Tamura, T. Hashimoto, N. Okazaki, R. Takahashi, and T. Mogi, 2021, Three-dimensional inversion of audio-magnetotelluric data acquired from the crater area of Mt. Tokachidake, Japan., Earth, Planets and Space, 73, doi.org/10.1186/s40623-021-01502-4

Takahashi, R., 2022, Mineralogical and geochemical investigations for subvolcanic hydrothermal alteration environments at an active volcano: An example of Hokkaido-Komagatake volcano, Japan, J. Volcanol. Geotherm. Res., 423, doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107497

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

Spica, Z. J., J. C. Castellanos, L. Viens, K. Nishida, T. Akuhara, M. Shinohara and T. Yamada, 2022, Subsurface Imaging With Ocean-Bottom Distributed Acoustic Sensing and Water Phases Reverberations, Geophys. Res. Lett., <https://doi.org/10.1029/2021GL09528>

- 篠原雅尚・山田知朗・悪原岳・望月公廣・酒井慎一，2022，分散型音響センシング計測と三陸沖海底光ケーブル観測システムによる地震観測，月刊地球，44，37-43
- 牛腸 正則，2021，アンテナパターンと距離減衰を考慮した合成開口レーダの波数領域，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.121， No.127， p.1-6.
- 牛腸 正則，2021，Deconvolution ISTAを用いたSARのスパース再構成と高分解能化，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.121， No.191， p.116-121
- 宝田晋治・西原 歩・星住英夫・山崎 雅・金田泰明・下司信夫，2022，始良カルデラ入戸火砕流堆積物分布図，大規模火砕流分布図，産総研地質調査総合センター，1，1-32
- 宝田晋治・金田泰明・池上郁彦・松本恵子・西野佑紀・下司信夫，2021，大規模噴火・火山灰データベースの構築，Proceedings of the International Meeting on Eruption History and Informatics，2020-2，66-70

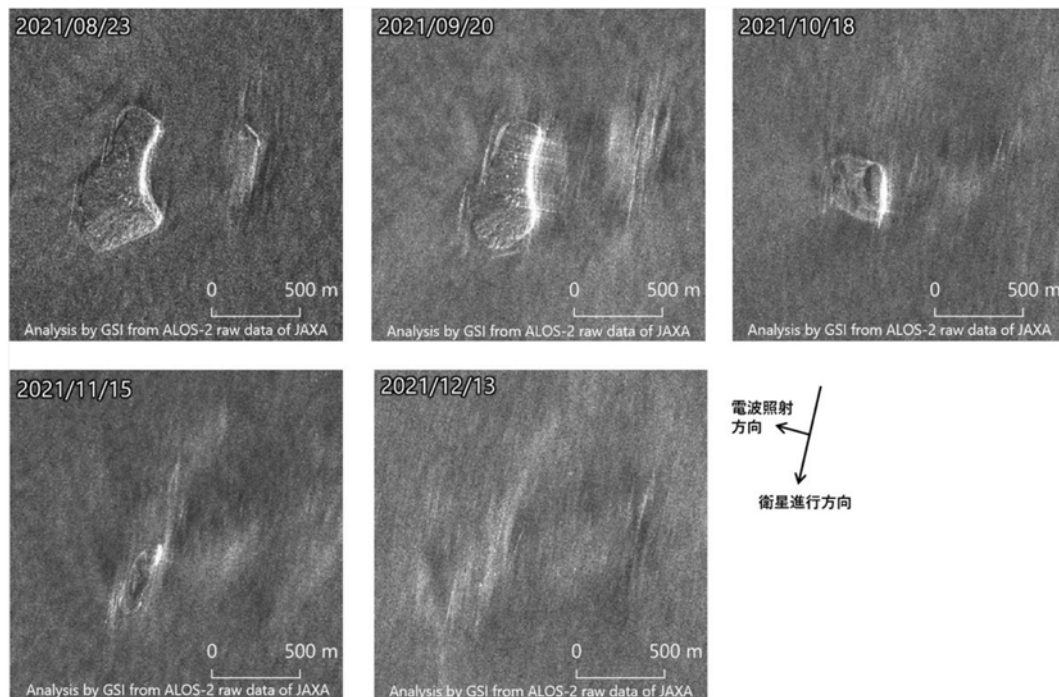


図 1. 「だいち 2 号」 SAR強度画像による福徳岡ノ場の新島の形状の時間推移

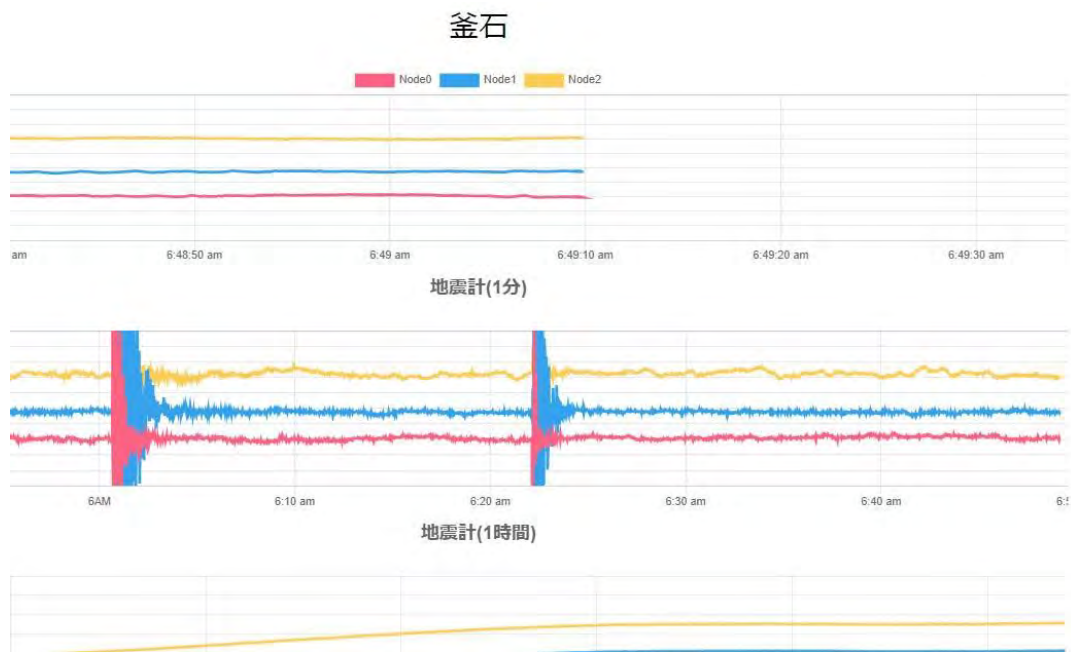


図 2. 2015年に設置したシステムのデータ表示用のwebシステム（試作品）による観測波形の例。

リアルタイムで、3台の地震計と水圧計のデータを即時表示する。

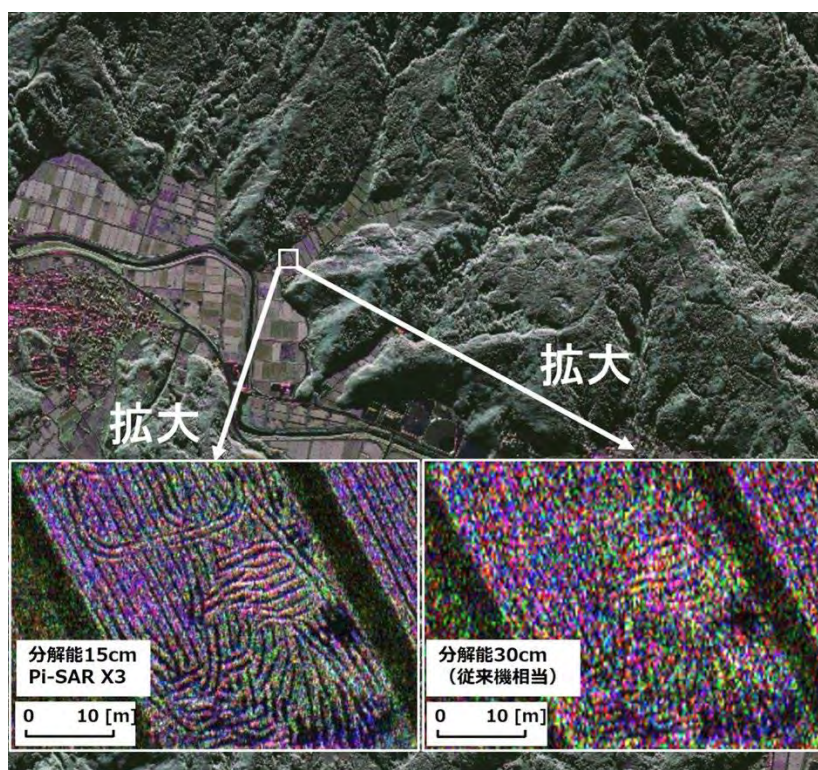


図 3．Pi-SAR X3による観測結果例

拡大右図は従来機相当の空間分解能30cm、拡大左図はPi-SAR X3の空間分解能15cmによる観測結果。空間分解能15cmの図では、田んぼのわだちがきれいに観測されている。

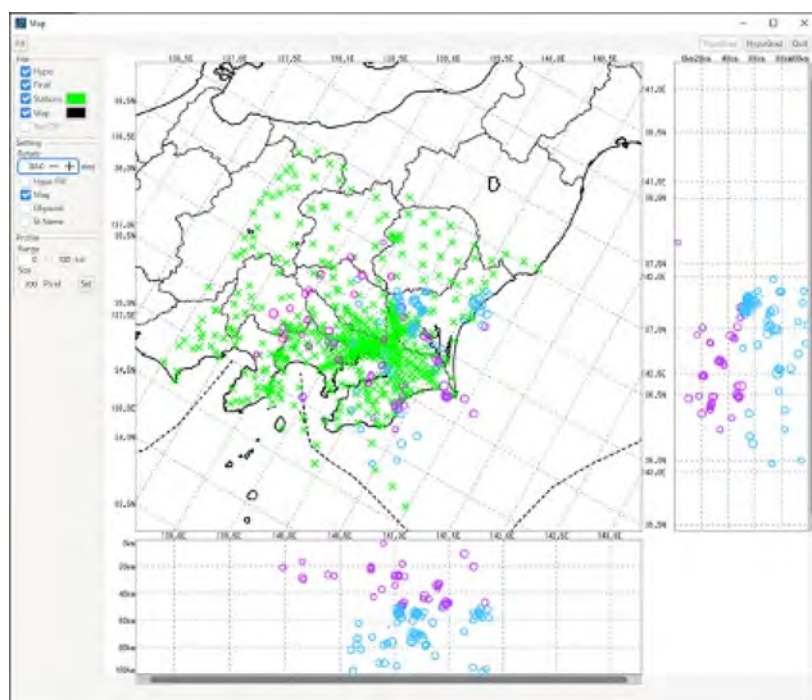


図 4．対話検測ソフトウェアの地図表示画面

作成した対話検測ソフトウェアの地図表示画面。震源と観測点が地図上に表示されている。地図は回転することが可能である。

2（１）南海トラフ沿いの巨大地震

「南海トラフ沿いの巨大地震」総合研究グループリーダー 伊藤喜宏
(京都大学防災研究所)

1. 目的

内閣府および地震調査研究推進本部により南海トラフ沿いの巨大地震の地震シナリオおよび強震動予測はすでに実施され、公開されている。しかしながら、これまでに示された地震シナリオおよび強震動予測は過去の観測記録および歴史資料に基づいて構築されたものであり、現状の測地・地震観測により得られた知見を十分反映したものでない。南海トラフ巨大地震総合研究グループ（以下「南海総合G」という。）では、南海トラフ巨大地震に関連した50課題の成果に基づき、地震・測地観測網で得られたプレート間固着やスロー地震の知見に基づき南海トラフ沿いの巨大地震の広帯域震源モデルを構築する。その上で地震波および津波の伝播モデルに基づき、西南日本地域の強震動および津波浸水モデルを提示することを目的とする。

2. 拠点間連携のフレームワークの利用

前5カ年計画の地震研究所—防災研究所拠点間連携（H26-H30）では、地震時のリスク評価の高精度化を目的として、震源モデル・シナリオ、地震波速度・減衰構造、浅部地盤応答、および構造物の脆弱性の各モデルを総合的に考慮したリスク評価の手法の提案および高精度化に関する研究が進められた。特に各課題が提案する複数の最適なモデルを組み合わせる不確実性を含む地震リスク評価の計算手法が提案された。南海総合Gでは、前計画の拠点間連携で得られた成果を取り入れて、各課題で得られた成果を実際に使用して、震源モデル・シナリオ—地震波伝播—工学的基盤までの地震動を計算することを目的とする。その上で、必要なアウトプットを関連課題の要請に基づき提供することとする。前5カ年計画の拠点間連携で研究対象とした大阪府および高知県について、浅部地盤応答も含めた地震動を求めて、構造物の脆弱性評価や地すべりのリスク評価などに活用する。

3. 震源モデル・シナリオの高度化に向けた今年度の取り組み

今年度は地下構造、特にプレート形状に関する研究の進捗状況について情報を収集した。その上で西南日本深部のプレート境界モデルについては関連課題（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI02〕）から、さらに浅部については海洋研究開発機構による構造探査に基づくモデルの構築状況を調べた（海洋研究開発機構〔課題番号：JAMS01〕）。

従来の陸海域で実施された地震波構造探査に基づくモデルや、レシーバ関数、地震波トモグラフィーや、それらをコンパイルして得られたプレート境界モデルが公開されており、コミュニティ内で利用されている。特に全国1次地下構造モデル（JIVSM）は、地震調査研究推進本部により作成され、防災科研では地震ハザードステーション（J-SHIS）で公開する全国地震動予測地図の作成で利用している。本観測研究計画において、課題（京都大学防災研究所〔課題番号：DPRI02〕）でも深部におけるプレート境界モデルの調査が実

施されている。また、西南日本深部のプレート境界モデルがリニア地震計アレイ観測記録に基づくレシーバ関数解析により構築されつつある。結果として、スラブ上面に相当する低速度層上面からの変換波が四国側から中国地方中央部まで明瞭にイメージされた。また、その下部には海洋モホ面に相当する高速度層上面からの変換波が、同様に中国地方中央部までイメージされた。結果として、四国中央部から瀬戸内海、中国地方中央部まで低角に沈み込むフィリピン海プレートが確認された。

深部のスラブ形状について従来の結果と比較する。全体の傾向は一致するものの、細かく見ると、いくつかの地域において、その深度についていくつかの相違点を見出された。例えば、四国西部の足摺岬から八幡浜に至るプレートの沈み込み方向にほぼ並行な側線では、深部（八幡浜の直下）で従来のモデルよりもプレートの沈み込み角が大きい。また徳島から八幡浜に至る沈み込み方向にほぼ直交する側線では徳島の直下付近でプレート上面の深さが従来のモデルと比べて 5 km 以上浅い。特に室戸岬から倉敷に至る側線（プレートの沈み込み方向にほぼ並行）では、プレート上面の深さが従来のモデルと比べて 10 km 以上浅い。一方、海側、つまり沈み込み帯浅部では、従来のモデルと大きな差異は見出されていない。

4. 震源モデル・シナリオの高度化へのインパクトと今後の展望

プレート上面の深度が従来のモデルとの差が大きい領域は、南海トラフ巨大地震の地震時すべり域や強震動生成域から離れているため、強震動の計算時にはそれほど影響がないかもしれない。一方で、プレート境界モデルに依存するプレート間固着の推定や、地震発生シミュレーションの計算時には、これらの違いが影響する可能性を今後検討する必要がある。

フィリピン海プレートの沈み込み帯の浅部について、海洋研究開発機構がプレート境界を含む地下構造のモデルを構築している（海洋研究開発機構〔課題番号：JAMS01〕）。その実施状況は、防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクトの成果をベースにして、これまでにいくつかの会議等で報告されている。強震動の長期評価と関連したプロジェクトと連携し、地震調査研究推進本部が公開する JIVSM に海域モデルを統合した地下構造モデルが構築される。この統合モデルの有用性は、本観測研究計画でも十分に認識されている。本研究観測計画の成果も、統合モデルの構築に貢献できるよう働きかけると共に今後も引き続き情報を収集していく必要がある。

成果リスト

特になし

2（2）首都直下地震

「首都直下地震」総合研究グループリーダー 酒井慎一
(東京大学情報学環・東京大学地震研究所)

1. はじめに

首都直下地震に関しては『災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）の推進について（建議）』の中で「分野横断で取り組む総合的研究」の一つとして位置づけられている。この総合研究は前計画から始まった新しいカテゴリーで「地震学・火山学的な見地のみならず災害科学的な重要性も鑑みて、複数の実施項目を横断する総合的な研究として推進する。総合的な研究を通して、専門分野の枠を超えた学際連携を現状よりも一層進め、地震学・火山学の成果を災害の軽減につなげるための方策を提案する。」とされ、他の8つの計画部会とは違った観点から結び付けた体制で研究が進められている。

第5章「研究を推進するための体制の整備」（2）分野横断で取り組む総合的研究を推進する体制の項では「首都直下地震は、一旦発生すれば首都機能や我が国の経済活動全体に深刻なダメージを与える可能性が高い。想定される多様な震源について、発生メカニズムや発生可能性を評価する研究を進める。詳細な地盤構造や多様な震源モデルによる揺れの予測に、稠密観測データや地震史料の情報を反映し、新たな地震動予測手法の開発を目指す。また、複雑な地殻構造を用いた大規模数値シミュレーションに基づいて、地震動を高精度に予測する手法を高度化する。さらに、各項目の研究成果を有機的に結び付け、高度に集約化された社会環境下での防災リテラシー向上に資する総合的研究を実施する。」と書かれ、首都直下地震ならではの総合的な成果が期待されている。

しかし、地震・火山現象の解明のための研究、地震・火山噴火の予測のための研究、地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究、地震・火山噴火に対する防災リテラシーの向上のための研究の4分野に、広くまたがるような総合的な研究課題は存在しない。そのため今年度は、それぞれの研究課題の中から首都直下地震に関連したものを集め、それら同士をつなげていくことを本総合研究グループの目標とした。

2. 令和3年度の成果

産業技術総合研究所は、房総半島南部の海岸段丘の年代を再評価し、過去の関東地震の発生年代と再来間隔について復元した。また伊豆半島東部における元禄地震の津波と地殻変動について検討を行った（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST08]）。

東北大学は、スラブから脱水した水と地震活動の関わりを調べるため、茨城県南西部下で発生するスラブ内の地震クラスターとその直上で活動するプレート境界地震、上盤プレート内クラスター周辺のP波減衰の時間変化の抽出を試みた。直上のMeS0-

net観測点の地震波形をスペクトル比法で解析した結果、スラブ内での減衰が1~1.5年間隔で増加する傾向が見られた。さらに、それより0.2~0.3年の位相遅れでプレート境界地震活動の活発化、上盤プレート内の減衰の増加も認められた。これら3つの現象に時間的な相関があることから、約1年周期で活発化するプレート境界のクラスター活動の背景には、数ヶ月先行して満水期を迎えたスラブ内流体のプレート境界への排出が起こっている可能性がある（東北大学理学研究科〔課題番号：THK_06〕）。

東京大学地震研究所では、長周期地震動と津波の即時予測に向けて、K-NET、KiK-net強震観測データの時間反転逆伝播計算（DA-TRI）による震源モデルの即時推定手法の開発を継続して進めてきた。観測波形データと地震波伝播シミュレーションを同化しながら、発震時に時間を遡って地震波逆伝播計算を進めることで、陸域の観測網から離れた海溝型地震や、深い地震であっても高い解像度での震源イメージングを確認した。時・空間的に広がる大地震の断層すべり分布の推定に向けて、P波とS波エネルギーの相関に基づく震源イメージングの高分解能化を進めた。KiK-net強震観測記録を用いて、2008年及び2011年の茨城県沖の地震の断層滑り分布の即時推定実験を行い、100秒間の強震波形記録の地震波逆伝播計算により、太平洋プレート上面の断層滑り分布を推定することができた。得られた結果は、近地強震記録と遠地波形を用いた既往の震源インバージョン結果と良く対応した。また、陸域のKiK-net観測に加えて、S-net海域観測網による地震観測データの有効性を数値実験により確認した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_14〕）。

また、東京大学地震研究所は、強震動による地震災害誘因の分析のため、堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースの増強を引き続き行った。また、2021年10月7日に発生した千葉県北西部の地震（Mw5.9）の首都圏で観測された強震記録を限定公開した。この地震は、2005年7月23日に発生した千葉県北西部の地震（Mw5.9）との類似性が指摘されているため、観測記録の相関係数を計算し、2011年東北地方太平洋沖地震をはじめとする大振幅地震動による地盤増幅変化の影響があるかどうかを見積もった（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_16〕）。

一方、東京大学地震研究所は、現代の地震観測で得られる知見を史料の分析結果と結びつけ、歴史地震の震度の検証および定量化を目標として、2020年9月から根津周辺における稠密観測を継続している。安政江戸地震の揺れの検証を目的のひとつとし、観測点は同地震の被害史料の分析から被害場所が特定できた地点とその近隣地点にした。観測点を徐々に追加していき、20地点にまで増やしたが、2022年2月時点では17点で観測をしている。これまでに文京区本郷で震度1以上を記録した地震は51回あり、それらのデータを用いた暫定的な結果では、観測点ごとの卓越周波数や振幅の違いが確認できた。また、MeS0-net等の観測記録を用いて首都圏に発生した地震の処理を行った（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_15〕）。

東京大学情報学環は、地震・火山災害の発生確率、被害想定など災害情報に関する

調査を実施・分析した。地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化、災害情報が災害軽減に有効に活用されるための情報コミュニケーション手法を開発することを目的として、地震動予測地図において、これを分析するものである。

これまで「30年確率」で示されていた地震発生確率の表現について、全体的に見ると「10～20年確率」で示した場合より、対策の必要性の意識を高めることがわかった。また年齢が高いほど、この意識を高める年確率が短くなる。この意識は、居住地によっても違い、地震発生確率が相対的に低い日本海沿岸地域の住民において対策の意識が低かった。この結果は、地震動予測地図に示される地震の発生確率について、対策の必要性を示す相手の属性（年代や居住地）を考慮した表現を用いることで、より効果的に意識を高められる可能性を示している。地震の発生確率情報など災害に関する科学的知見の成果を公表する際には、科学的表現の正確性のみならず受け手の受け止め方を考慮し、最大の効果を発揮するような情報デザインが、地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化、災害情報が災害軽減に有効に活用されるための情報コミュニケーション手法として求められることがわかった（東京大学情報学環〔課題番号：III_01〕）。

そのほか、2022年1月11日に首都直下地震に関する意見交換会をオンラインで行った。関連する課題の研究者たち6名が集まり、それぞれの研究成果を紹介した。今後の総合研究としての研究計画の進め方を議論し、まずは、連携できる課題同士を探すところから始めることとしたが、コロナ禍で上手くいかない点もあったことが報告された。

3. 今後の展望

首都直下地震が発生した場合には、我が国の首都機能や経済活動全体に深刻なダメージを与える可能性が高いことから、分野横断的に取り組む総合的な研究として推進するテーマの一つとされてきた。関連があると思われる課題で、総合研究グループが構成されているため、それぞれの課題は独立している。そのため、課題ごとの成果があったとしても、その成果は総合研究グループに対する関与が薄く、何をこのグループの成果とすべきかが曖昧である。網羅的に構成された研究課題群ではないので、首都直下地震に対して全体を通したストーリーを描けず、成果の寄与が不十分な研究課題に対する対応ができない体制であった。次期計画を策定する際には、総合研究グループとしての目標を掲げ、何をどこまで達成するのかを明確にし、それを実行するための課題群とそれらを運用する体制づくりが必要ではないだろうか。

成果リスト

特になし

2（3）千島海溝沿いの巨大地震

「千島海溝沿いの巨大地震」総合研究グループリーダー 高橋浩晃
(北海道大学大学院理学研究院)

1. はじめに

太平洋プレートが沈み込む千島海溝南部では、縄文海進以降に津波堆積物が追跡可能である約 6,500 年間に繰り返し巨大津波が発生していることが確認されている。国の地震調査研究推進本部の長期評価では、M8.8 程度以上の超巨大地震の平均発生間隔は約 340-380 年、最新発生時期は 17 世紀前半、30 年間発生確率が 7~40%と発生が切迫していると評価している。国の中央防災会議（内閣府）は、2021 年 12 月 21 日に最大クラスの地震による被害想定を、2022 年 3 月 22 日にはその対策についての報告書を公表した。千島海溝モデルの場合、太平洋沿岸部で最大震度 7 の揺れとなり、地震発生後 20~30 分で高さ 20m を超える津波が到達する結果、最大約 10 万人の死者が発生し、その大半は津波によるものとした。また、低体温症要対処者数が 2 万人に上ることが明らかになった。一方、避難の迅速化や、津波緊急避難施設の活用・整備、建物の耐震化を進めることで、死者数が約 1 万 9 千人に減少するともした。加えて、M7 クラス以上の地震が発生した場合には、M9 クラスの巨大地震への注意を促す情報発表を行うこととした。

総合研究グループでは、千島海溝沿いの巨大地震をターゲットとした課題の成果に加え、建議研究で行われている様々な課題から得られるハザード評価手法や防災リテラシー研究の成果を有機的かつ総合的に取り入れることで、超巨大地震による地震動や津波による災害の軽減に必要な技術や評価手法の開発を進めている。リスク軽減に向け、津波被害の最小化に向けた津波避難の定量的な評価、リスク評価に必要な予測の振れ幅を内包した地震動と津波浸水の事前予測手法の高度化、津波発生ポテンシャル評価や地殻活動評価を支える観測やデータ解析、古地震や古津波の様相を記録する津波堆積物や遺跡液状痕跡データなど、関係課題の成果の統合化から地域の防災施策を支えるアウトプットの創出を目指す。

北海道太平洋沿岸部では、津波避難施設の整備や指定が進められているが、今般の国や道の被害想定をうけ、各市町で施設整備等の検討が加速すると見られる。一方、津波緊急避難場所は、収容人数や施設の空間密度だけではその機能を的確に評価することはできず、施設への津波到達時刻や周辺人口、人流速度などを考慮した評価手法を確立することが求められている。加えて、地震防災対策は長期的な取り組みが必要であり、人口減少下の厳しい自治体財源の中で、長中期的な財政安定化を見据えた最大効率化の要件を満たす必要がある。特に、北海道は人口の分散・低密度や広い土地という他地域とは異なる地理的特徴があり、徒歩原則による避難場所への移動を基本としながら、車利用避難のリスク・ベネフィットを評価することで、死者数最小化と財政負担最小化の両条件をクリアするモデルを検討することが必要である。

社会的な境界条件のもとにリスク評価を行うには、津波や地震動などハザード予測の振れ幅の情報に発生確率が加味された被害想定が必要となる。特に、津波浸水の時空間的なデータは、避難のリードタイムを検討する上で決定的な指標であり、起こり得る最悪ケースと、確率的に最も起こり得るケースとの差異を評価することが、避難困難区域

での施設整備や避難計画の重要な指標となる。また、中央防災会議の被害想定では、低体温症対策が死者数に大きく影響する可能性が示されたが、大量に発生する要対処者への対策はこれからの大きな課題である。現実的には、発災直後の医療アクセスは困難であることから、要対処者数を地区別に推計したうえで、自治体の地区ごとの備蓄体制に反映させる必要があり、きめ細かな検討が必要となってくる。

2. 令和3年度の主な成果

津波避難ビルなど、安全な高さまで階段を上る必要がある津波緊急避難場所の整備を行うには、津波到達までに浸水深よりも高層階に物理的に移動できる実人数を評価する必要がある。釧路市中心部にある収容人数1,000名の大規模な津波緊急避難ビルを対象に、マルチ・エージェント・シミュレーションを用いた避難行動分析を実施した。津波到達時（地震発生後30分）までに安全な階まで階段を上れるのは、ビルに到着した避難住民の3分の1程度であることが明らかにされた。津波緊急避難施設に物理的に十分な収容能力があり、津波到達時間までに住民が施設の前まで到着できたとしても、安全階まで避難できない住民が相当数出る可能性を示した重要な結果である。避難困難度の評価には、津波避難場所までの距離に加え、避難施設が持つ特性を評価する必要がある（北海道大学[課題番号：HKD_07]）。また、津波避難訓練時の災害情報伝達手段についてアンケート調査を実施し、エリアメールよりも、従来型の屋外スピーカーや個別受信機により避難スイッチが入った事例が多いことが明らかにされた。近年、エリアメールでの災害情報伝達が一般的であるが、屋外スピーカーの有用性が再確認された興味深い結果である（北海道立総合研究機構[課題番号：HR0_02]）。

道路網が複雑である市街地での津波緊急避難施設への避難経路の検討や、施設の耐津波性能設計の仕様を検討する上で、防潮堤を越流した津波の市街地での浸水拡大パターンや、流速・流量・浸水深等の動的パラメータの検討を進める必要があるが、現状では実測データが限られている。ライブカメラから得られる動画映像は、2次元空間に配置された各ピクセルの輝度値の時系列変化データと捉えることが出来る。市街地に設置されているテレビ局の天気情報用ライブカメラを用い、2011年東北地方太平洋沖地震時に釧路市で撮影された映像を解析し、護岸に沿った津波水位の時間変化を抽出することに成功した（北海道大学[課題番号：HKD_09]）。

津波の死者を減らす上で、低体温症対策が極めて重要なパラメータであることが国の被害想定から示された。全世界の沈み込み帯を対象とし、被害津波を引き起こした過去の地震発生履歴、都市分布と人口、津波浸水予測範囲、各都市の月平均気温から、低体温症が発生する可能性を調査し、世界の中で北日本の都市のみが高い低体温症発生ポテンシャルを有することを明らかにした。津波災害における低体温症対策は日本独特の課題であるとともに、北日本の太平洋側・日本海側の都市部での対策の必要性が定量的に示された（Ohshiro et al. 2022）。

プレート間のすべり遅れの空間分布は、津波励起の空間特性に関係している可能性があり、津波浸水事前予測の観点で重要な情報である。令和元年度に根室沖に設置された3か所の海底地殻変動基準局において3回目の測定が実施され、予察的な変位ベクトルの推定が行われた。海溝軸付近のプレート境界浅部まで強く固着している可能性が示唆されたものの、観測時に海水温擾乱が見られ測定誤差が大きな結果となったため、誤

差評価を含めた変位ベクトルの評価は来年度以降のデータ蓄積を待つ必要がある（東北大学災害科学国際研究所[課題番号：IRID02]）（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_05]）（北海道大学[課題番号：HKD_09]）。

十勝地方沿岸部において、珪藻等を用いて淡水・汽水・海水環境の時間変化から、過去約1,000年間の地殻上下変動時系列を明らかにする調査が継続された。標高の違う3地点間の比較を行うことで信頼性の向上が図られた。地震前には沈降が継続し、地震時の変動量は小さいこと、地震後に時間をかけて隆起が継続し、その後、沈降に転じて現在に至るという、地殻上下変動時系列の特徴が複数の地点で確認された（北海道大学[課題番号：HKD_01]）。

超巨大地震発生時の地震動による被害予測は、建物崩壊による脱出困難者を少なくし津波避難時間を確保する上で重要な課題である。根室沖で発生した地震を用いて、コーナー周波数と震源の深さや地震モーメントの比較がなされたが、プレート境界付近での地震活動が低く、解析に利用できる地震数が少ないため、明瞭な震源スペクトルの特徴の抽出には至っていない。サンプル数を増やすため、より小さな地震を用いた解析にも着手する予定である。遺跡の液状化痕跡からは、過去の強震動の履歴が得られる可能性がある。北海道東部の遺跡痕跡からは、過去約10,000万年間に最大で8回程度の痕跡が認められた。これは、津波堆積物から得られる過去6,500年間の津波発生回数に比べ半数程度である。超巨大地震が起こす地震動が、液状化を起こす割合が小さい可能性を示唆している（北海道大学[課題番号：HKD_09]）。

十勝沖の地下構造や地殻活動の時空間変化の検出を目指した構造探査データの解析や長期海底地震観測が実施された。十勝沖で見られる浅部微動の活動間隔が、2003年十勝沖地震の余効すべり速度の変化と相関している特徴が見られた。また、地震活動や微動活動に同期して、自己相関関数が増加している可能性が示唆された。これらの現象は、プレート境界の状態変化を反映している可能性があり、地殻活動モニタリングに利用できる可能性がある（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_05]）。

地域防災力の向上を目指し、気象台に協力し自治体職員向けの津波警報に関する勉強会や、自治体のハザードマップ作製支援をオンラインで実施した。昨年来、オンラインでの講習が一般化してきており、対面開催に比べ多くの自治体関係者の参加が見られている。また、事前防災対策に加え、被災後の復旧復興を見据えたトータルな対策を目指した、事前復興に関する情報交換会を北海道庁や北海道開発局の協力のうえ実施した。一般住民を対象とした総合研究の成果を報告するシンポジウムをオンラインで開催し、180名を超える参加者があり、千島海溝沿いの巨大地震への関心の高さが伺われた（北海道大学[課題番号：HKD_09]）。

3. これまでの課題と今後の展望

中央防災会議の報告が発表されたことで、甚大な人的被害の発生可能性が具体的に示された。これを受けて、各市町では津波避難タワーなどの緊急避難施設整備に向けた検討を進めている。浸水予測範囲と人口分布データからは、相当数の避難施設の新設が必要となる地域も予想されるが、財政状況や利用可能な土地の面から、すべての住民を収容できる施設の整備は事実上難しい地域も出てくると考えられる。

津波の到達時間は地区ごとに異なることから、避難施設内移動を含めた避難に要する

時間をある程度定量的に検討することで、たとえば、津波到達時間が速い場合には小規模分散型、到達まである程度時間がある場合には大規模集中型施設を検討するなど、より効果的な避難施設の配置の検討に必要な知見が得られる可能性がある。また、津波避難施設の整備が難しいというえ徒歩避難が困難な場合や、災害対策基本法の改正で努力義務とされた要支援者の個別避難計画を考えた場合、車避難の可能性を具体的に検討する必要がある。これまで行われてきた避難シミュレーション技術を応用し、徒歩避難と車避難の避難方法に加え、避難施設の特性や季節ごとの環境変化や要支援者の人口動態パラメータを組み合わせた検討を行うことが望ましい。

M7以上の地震が発生した場合に発表される後発地震への注意を促す情報は、地殻活動モニタリングに深く関係する課題であり、地震活動や地殻変動データ等の観測データを活用する方策を今後検討すべきである。余効すべり速度に関係すると考えられる浅部微動活動の時間変化は、プレート境界の状態変化を示唆する可能性のある興味深い現象であり、長期的な活動状況をモニタリングしていくことが望ましい。遺跡痕跡から抽出された液状化痕跡の回数が津波堆積物より少ないことは、プレート境界の超巨大地震の震源特性を示す可能性があり、実データを用いた震源スペクトルの特徴との比較検討が望まれる。

成果リスト

Oshiro, K., Y. Tanioka, J. Schweizer, K. Zafren, H. Brugger, P. Paal, 2022, Prevention of Hypothermia in the Aftermath of Natural Disasters in Areas at Risk of Avalanches, Earthquakes, Tsunamis and Floods, International Journal of Environmental Research and Public Health, doi: 19,1098,10.3390/ijerph19031098.

2（4）桜島大規模火山噴火

「桜島大規模火山噴火」総合研究グループリーダー 井口正人
(京都大学防災研究所)

活発な噴火活動を60年以上続け、今後、大規模噴火の発生が予想される桜島を対象に、各研究項目間で緊密な連携と成果の共有を図り、住民避難を視野に入れた総合的研究を推進する。観測研究を通じて、マグマの動きとマグマ供給系への理解を深め火山活動推移モデルを高度化することで、噴火発生予測研究を進展させる。噴火発生前の規模の予測と、噴火発生直後の噴出物の把握を即時的に行うことで災害予測研究を進める。災害予測に基づき、住民への情報伝達などの火山災害情報に関する研究と、避難や交通網の復旧などの対策に資する研究を行う。他の火山における類似研究と連携し、都市、中山間地域、離島などの地理的、社会的環境による対策の違いなど幅広い研究を目指す。本総合研究グループには異なる部会に属する27の研究課題が参画している。令和3年度も、12月に対面とオンラインによるハイブリッド研究集会を開催し、グループに参画している課題の成果から大規模噴火研究に資する知見を取りまとめた。

桜島ではマグマ蓄積が進行していると考えられる始良カルデラの隆起と膨張が観測されている。始良カルデラの比高は、1914年に発生した大正噴火直前のレベルに近づいており、今後、同等規模の噴火発生が懸念される。大規模噴火に伴い、桜島島内では以前から島外避難の対策の高度化が進められてきた。桜島からの島外避難に加え、鹿児島市街地側の広域避難のための対策も進められようとしている。幸いなことに21世紀の我が国における住民の避難を要する噴火は、2000年に発生した有珠山噴火及び三宅島噴火、2011年霧島新燃岳噴火、2015年口永良部島噴火、2015年桜島群発地震にとどまっており、最大の避難人口は2000年有珠山噴火の1万6千人であった。一方、世界では令和3年度だけでも、セントビンセント島のLa Soufriere火山、コンゴのNyiragongo火山、カナリア諸島ラ・パルマ島のCumbre Vieja火山、インドネシアのSemeru火山、トンガのHunga Tonga-Hunga Ha'apai火山（以下「HTHH火山」という。）において噴火が発生し、数千人から数十万人の住民が避難した。桜島の大規模噴火では鹿児島市は38万人の住民の避難を想定しており、まさに世界クラスの噴火に対する予測と災害研究が必要とされている。

La Soufriere火山やCumbre Vieja火山では有感となる火山構造性地震が多発した。La Soufriere火山では、M4級の火山構造性地震が避難の意思決定のトリガーとなっているし、Cumbre Vieja火山の火山構造性地震は深部から溶岩を流出した火口に向かって見事に移動している。桜島の大正噴火に前駆して有感を含む火山構造性地震が群発し、噴火開始から8時間後にはM7級の地震を発生させている。極めてクラシックな研究課題であるが、火山噴火の発生予測研究において今一度火山構造性地震の研究に立ち戻るべきと考える。HTHH火山噴火においては、2022年1月15日に発生した極めて強い爆発と津波は想定外であったかもしれないが、その前日には爆発が発生しているし、前駆的な噴火活動は前年12月から始まっており、その噴煙高度も10 kmをはるかに超えるものであった。

一方、Semeru火山の溶岩ドーム崩壊による火砕流発生では前駆的な異常が検知されて

いない。溶岩ドームは12年の歳月をかけて成長したため、その成長速度が極めて遅く、溶岩ドームの成長を忘れさせてしまった可能性がある。このような例外があるものの、一般的には大規模噴火には前駆的な強い異常現象がみられ、詳細な観察と研究が必要である。

大規模噴火では、その災害要因の複合性は極めて高い。桜島の過去の大規模噴火でも降下火山灰・軽石、火砕流、溶岩流、地震、津波、土石流など様々な現象が災害を引き起こしている。ハザード予測は初期条件を与えれば可能となる段階まで進んできているが、初期条件の与え方とハザードの順序については依然として研究が必要である。総マグマ量については、地盤変動などからある程度予測は可能であるが、それが、どのハザードに分配されるかは過去の噴火記録に立ち戻り詳細検討する必要がある。Explosiveな噴火であれば、降下火山灰と軽石が卓越するであろうし、Effusiveな噴火であれば、溶岩流となる。桜島の大正噴火では溶岩流の量が多いが、これに相当するマグマ量がExplosiveな噴火で噴出すれば、多量の火山灰と軽石が降下することになる。ハザードの視点に立てば、噴火様式に対応するマグマのハザード要因ごとの分配が問題となる。

桜島の大規模噴火を想定した島内からの避難計画は改良を繰り返されている。避難訓練は50年以上の歴史をもち、防災リテラシーはかなり高いレベルにある。一方、大規模噴火によって鹿児島市街地側への大量降灰災害についてはリテラシーは低い。鹿児島市が想定する38万人の事前避難を実現するためには、火山の予知・予測情報が適切な避難へと結びつくような情報の作成と、不断の対話を通じての専門家と住民との共創が必要である。

本建議研究計画の総合研究グループは、実施課題が部会をまたがって連携することが基本である。現状の総合研究グループは、グループの意思とは無関係に立ち上げられた各課題の寄せ集めにすぎない。建議で実施される課題を集めるだけでは、総合研究グループの目標に到達できるはずもなく、建議以外のプロジェクトとの連携が必須である。総合研究グループには研究集会を実施する程度の予算配分しかなく、実施体制は極めて脆弱である。課題の寄せ集め体制とはいいい加減に決別し、総合研究グループを中核課題とし、それを中心とした課題募集と、グループリーダーによる予算配分を行うべきである。現在の専門分野ごとの部会を中心とした実施体制は、専門分野の研究を高度化するには有効であるが、本建議が目標とする「災害軽減」の道筋が見えにくくなっており、部会体制は限界にあると考える。

総合研究グループのような連携を進めるためには、それを組織化する必要がある。京都大学防災研究所は、令和3年12月に火山防災連携ユニットを立ち上げた(図1)。火山防災連携ユニットは、火山観測データに基づく噴火発生予測をもとに、ハザード予測、リスク評価、対策研究までを一気通貫で進める。すなわち、火山観測から得られるデータから複雑な推移を示す火山噴火の様式と規模を逐次予測し、火山噴火発生に起因する災害の要因ごとのハザード評価研究を行う。さらに、交通など様々なインフラ等へのリスク評価と対策研究を行う。さらに、発生予測にもとづく火山噴火の切迫性評価を避難等の対策に活用する研究を行う。また、これまで構築されてきた国際協力関係を発展・拡充し、世界の火山災害の軽減に資することを目指すものである。連携ユニット自体に予算が配分されるわけではないが、研究組織を構築することが、連携の第一歩と考える。

成果リスト

- Diaz Vecino, M. C., E. Rossi, V. Freret-Lorgeril, A. Fries, P. Gabellini, J. Lemus, S. Pollastri, A. P. Poulidis, M. Iguchi, and C. Bonadonna, 2022, Aerodynamic characteristics and genesis of aggregates at Sakurajima Volcano, Japan, *Scientific Reports* 12, 2044.
- Iguchi, M., T. Yamada, and T. Tameguri, 2022, Sequence of volcanic activity of Sakurajima volcano, as revealed by non-eruptive deflation, *Frontiers in Earth Science* doi:10.3389/feart.2022.727909.
- Kosei Takishita, Alexandros P. Poulidis, Masato Iguchi (2022, In-situ measurement of tephra deposit load based on a disdrometer network at Sakurajima volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 421, 107442, doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107442.
- Liu, M., T. Maruyama, K. Sasaki, M. Inoue, M. Iguchi, and E. Fujita, 2021, Measurement of aerodynamic characteristics using cinder models through free fall experiment, *Atmosphere* 12, 5, 608, doi:10.3390/atmos12050608.
- Maki, M., R. Takaoka, and M. Iguchi, 2021, Characteristics of Particle Size Distributions of Falling Volcanic Ash Measured by Optical Disdrometers at the Sakurajima Volcano, Japan, *Atmosphere* 12, 5, 601, doi:10.3390/atmos12050601.
- Maki, M., Y. Kim, T. Kobori, K. Hirano, D. I. Lee, and M. Iguchi, 2021, Analyses of three-dimensional weather radar data from volcanic eruption clouds, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 412, 107178, doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107178.
- Poulidis, A. P., A. Shimizu, H. Nakamichi, and M. Iguchi, 2021, A computational methodology for the calibration of tephra transport nowcasting at Sakurajima volcano, Japan, *Atmosphere* 12, 1, 104, doi:10.3390/atmos12010104.
- Poulidis, A. P., S. Biass, G. Bagheri, T. Takemi, and M. Iguchi, 2021, Atmospheric vertical velocity – a crucial component in understanding proximal deposition of volcanic ash, *Earth Planet. Sci. Lett.* 566, 116980, doi:10.1016/j.epsl.2021.116980.
- Poulidis, A., and M. Iguchi, 2021, Model sensitivities in the case of high-resolution Eulerian simulations of local tephra transport and deposition, *Atmospheric Res.*, 247, 1, 105136, doi:10.1016/j.atmosres.2020.105136.
- Sasaki, K., M. Inoue, T. Shimura, and M. Iguchi, 2021, In situ, rotor-based drone measurement of wind vector and aerosol concentration in volcanic areas. *Atmosphere* 12, 3, 376, doi:10.3390/atmos12030376.
- Shimizu, A., M. Iguchi, H. Nakamichi, 2021, Seasonal variations of volcanic ash and aerosol emissions around sakurajima detected by two lidars, *Atmosphere* 12, 3, 326, doi:10.3390/atmos12030326.
- Syarifuddin, M., S. F. Jenkins, B. Taisne, S. Oishi, A. Basuki, and M. Iguchi, 2021, Estimating the velocity of pyroclastic density currents using an operational dual-PRF radar, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 29, 107462, doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107462.

Takebayashi, M., M. Onishi, and M. Iguchi, 2021, Large volcanic eruptions and their influence on air transport: The case of Japan, J. Air Trans. Manag., 97, 102136, doi:10.1016/j.jairtraman.2021.102136.

Takemi, T., A. P. Poulidis, and M. Iguchi, 2021, High-resolution modeling of airflows and particle deposition over complex terrain at sakurajima volcano, Atmosphere 12, 3, 325, doi:10.3390/atmos12030325.

Takishita, K., A. P. Poulidis, and M. Iguchi, 2021, Tephra4d: A python-based model for high-resolution tephra transport and deposition simulations- applications at sakurajima volcano, Japan, Atmosphere 12, 3, 331. doi:10.3390/atmos12030331.

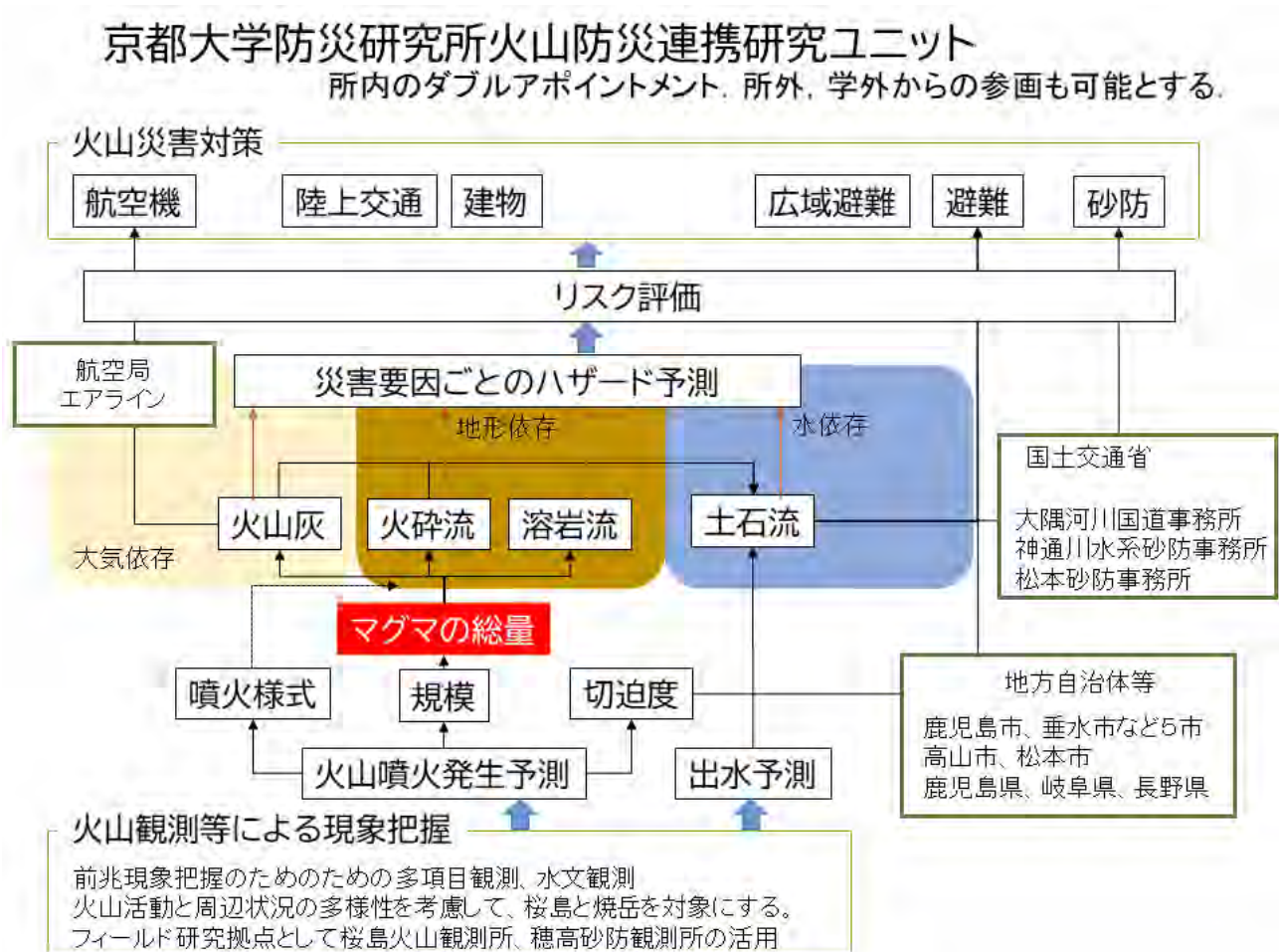


図1. 桜島総合研究グループ設置背景を考慮した研究体制の組織化の事例。京都大学防災研究所火山防災連携研究ユニット。

2（5）高リスク小規模火山噴火

「高リスク小規模火山噴火」総合研究グループリーダー 大湊隆雄
(東京大学地震研究所)

目的

火山では、噴気地帯や山頂火口近傍に、多くの観光客や登山客が訪れたり、観光施設が設けられている場合が多く、平成 26 年の御嶽山噴火や平成 30 年の草津本白根山噴火のように、規模が小さくても人的・物的被害等が生ずる場合がある。また、小規模な噴火は発生頻度が相対的に高いことから、観光客や登山客等の災害リスクの低減という観点から重要な研究対象である。そこで、噴火災害に関する史料の収集、地質調査による水蒸気爆発等の噴火履歴調査、各種観測による活動把握、災害誘因である噴石や土石流などの予測研究、災害情報の発信に関する研究等を実施する。これらの成果を総合的に検討し、研究の課題や方向性を明らかにする。

実施方法

（１）既存課題の成果を活用

- ・噴火災害資料の収集、災害発生状況の整理、災害発生時の火口からの距離等の文献調査、災害関連学会での情報収集
- ・地質調査による水蒸気爆発等の噴火履歴調査
- ・地球物理・地球化学的各種観測による活動把握
- ・比抵抗調査等による熱水系の構造探査による水蒸気噴火ポテンシャルの評価
- ・災害情報の発信に関する研究の活用（御嶽、本白根の事例研究など）

（２）建議の研究の枠外（社会科学、災害科学分野など）の成果を活用

- ・災害関連学会等からの情報収集
- ・社会科学、災害科学分野等の研究者に、火山分野への応用を検討してもらうための方策（集会・セミナー等）の検討

（３）既存研究成果を精査し、研究分野の過不足の有無を洗い出し、あらたな研究課題や研究の方向性の提案につなげる。

（４）上記に関連する研究集会の企画

本年度の実施内容

本研究グループに関連する課題は、大きく次の 5 つの項目に分類することができる。

1) 災害情報の発信に関する研究、2) 小規模噴火の発生する場の把握、3) 観測による火山の活動把握、4) 噴火の予測に関する研究、5) 小規模噴火災害の資料収集。

今年度は 2022 年 1 月 18 日にオンラインで研究集会を実施し、関連課題代表者による研究成果発表および議論を行った。昨年度は 2) から 4) に対応する報告が多かったが、

今年度は1)に関する報告が増えた。また、高リスク小規模噴火を含む火山災害全般に関する一般の方々の知識や認識に関するオンラインアンケートを2022年3月に実施した。

以下では、研究集会における報告を中心として、各項目毎の成果を紹介する。各課題の成果はその課題が属する部会報告でも報告されており、内容的に重なる部分もあるが、本総合研究グループの目標への寄与という視点に立って紹介する。オンラインアンケートについては実施概要の報告に留め、次年度以降アンケート結果の解析を進めた上で報告する予定である。

1) 災害情報の発信に関する研究

ニュージーランドで開発されたVUI(火山活発化指数)を日本の火山に適用するための具体的な検討を進めている。VUIとは、噴火前の各種観測データの変化から火山活動の活発化の度合いを客観的に評価する指標である。VUIは本総合研究の対象である高リスク小規模噴火の評価にも応用できる可能性があり、災害情報としてどのような情報を発信することが可能であるかを評価することにつながる。昨年度までに十勝岳と阿蘇山を対象にVUIの評価基準の作成とVUI値の月別推移の試行的作成を行ったが、今年度は吾妻山に関するVUIの評価を進めた(北海道大学[課題番号:HKD_04]、京都大学理学研究科[課題番号:KUS_02])。なお、VUIの評価は火山活動の状況把握そのものでもあり、この研究は、3)観測による火山の活動把握、との関係も深い。

外国人(観光客あるいは在留外国人)への火山に関する情報提供方法を検討した。具体的事例として、北海道胆振東部地震の事例を検討した。この事例は火山とは直接の関係は無いが、外国人に対する災害情報発信の対応事例として大いに参考になる。この例から得られた知見として、観光客が団体客なのか個人客なのかによって、避難情報を得る経路が異なる点が挙げられる。団体客は大使館や総領事館経由の場合が多いが、個人客は観光協会や観光窓口で情報を得る場合が多い。また、観光客に情報を提供する場合は英語あるいは多言語が効果的であったが、在留外国人に対してはやさしい日本語が効果的であった。これらの知見は、火山を訪れる外国人に対する情報提供方法を検討する場合にも活かすことができる。また、火山における観光客への対応例として、箱根火山の2015年の大涌谷噴火を受けて、行政・観光協会・温泉地学研究所が協力して対応した例を挙げることができる。これは、他の火山周辺観光地における情報発信においても参考にすることができる(兵庫県立大学[課題番号:HYG_01])。これらの取り組みは、高リスク小規模噴火に関する情報を外国人観光客にどのように提供するか、という問題を考える際に大いに参考になる。

御嶽山噴火を受けて、名古屋大学は2017年に御嶽山火山研究施設を設け、「火山活動評価力の向上」、「地域主体の防災力向上を支援」、「火山防災人材の育成と火山に対する知見の普及」を目標とした活動を続けている。その活動の一環として、御嶽山地域の火山防災に関する知識の効果的普及・啓発や火山と共生する地域のすばらしさを内外に伝える役割を持つ御嶽山火山マイスターの活動を支援している。御嶽山火山マイスター制度の向上を目指し、他火山における火山防災に関する先進的な取り組みとの比較を進めており、今年度は島原半島・雲仙ジオパーク、桜島・錦江湾ジオパーク、磐梯山噴火記念館の火山防災に関する取り組みに対する調査・比較を進めた。調査の結果、頻度の低い噴

火現象だけでなく毎年のように発生する土石流災害など砂防という観点から防災意識を高めることが重要、火山地域は観光が主たる収入源であることから啓発・教育において火山の恵みも伝えることが必要、子供を対象とすることが効果的、ボランティアではなく有償化により責任を持たせることでガイドの質を担保することが必要、などの知見が得られた。次年度以降は阿蘇火山博物館、伊豆大島および洞爺湖・有珠山のマイスター制度の調査を予定している（名古屋大学〔課題番号：NGY_07〕）。

阿蘇山を訪れる観光客を対象として、観光客が退避壕に入るという安全確認行動を促進する要因はなにか、を明らかにするためのアンケート調査を実施した。2021年2月26日から3月2日の期間、インターネット調査を実施し、400人の有効回答を得た。看板設置、噴火の痕跡を残すこと、気象庁による噴火警戒レベルの情報提供が有効であること、阿蘇中央火口周辺の掲示板・音声ガイダンスが有効であることが分かった。一方、これら掲示板・音声ガイダンスは火山ガスの危険性を喚起することが主目的であり、退避壕への避難はガス対策として有効でないにもかかわらず、退避壕避難を促す理由を明らかにすることは今後の検討課題である。火口近くで配布するパンフレットはあまり有効でないという結果が出たが、その詳細も今後の検討課題として残された（東北大学〔課題番号：KOB024〕）。

火山災害軽減のためのリスクコミュニケーションに関する研究の一環として、自治体における噴火時対応タイムラインの作成と訓練及び研修の実施を進めている。これまでに実施した訓練や、防災研修、自治体に対する調査の結果、噴火を想定した防災訓練へのニーズが得られたことを受けて、これまでに実施した手法を用いた訓練と研修の実施に向けた準備を開始した（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED01〕）。

阿蘇山では、環境省による退避壕更新や、警戒範囲を回避するように登山道を変更する事業が進められている。阿蘇山における登山客の火山認知度、噴火警戒レベルの理解度に関するアンケート調査によると、阿蘇が活火山だと認知していた観光客は7割に過ぎないことが分かった。また、警戒レベルの理解度は火山毎に違うこともわかった。2021年10月噴火の際には、早朝から登る登山客に対応できなかったという情報伝達に関する課題も明らかになった（京都大学理学研究科〔課題番号：KUS_03〕）。

ここまでで紹介した、御嶽山、阿蘇山などにおける情報発信に関する取り組みは、高リスク小規模噴火に関する情報発信という課題においてもそのまま活用することができる。

本総合研究グループ独自の取り組みとして、以下の内容を目的とするインターネット調査を実施した。1) 火山噴火など火山の様々な活動に伴って発生する自然災害について一般の方々がどのような知識や認識を持っているか、2) 特に、噴火災害のなかでどのような災害を危険だと思っているか、3) 噴火の規模と被害の関係についてどのような認識を持っているか、4) 火山周辺を訪れたことがある方や火山周辺に居住する方とそうでない方々との認識に違いはあるか。調査は2022年3月18日から22日にかけて実施し、8000件のサンプル数を得た。得られたデータの解析は来年度に実施する予定である。

2) 小規模噴火の発生する場の把握

草津白根山の湯釜は、火口湖が定常的に存在し熱的な活動度が高い状態が続いており、過去に小噴火を繰り返している。しかし、地震や地殻変動、熱活動の活発化である unrest がしばしば見られるものの、全ての活発化が噴火に至るとは限らない。これに対し、湯釜の南方に位置する本白根山は、普段の活動度は低いにもかかわらず 2018 年に不意打ちともいえる噴火が発生し、人的被害が出た。両火口の unrest の現れ方の違いと噴火発生の関係について、比抵抗探査や震源分布、地殻変動解析などから推定されている浅部構造の違いに着目して検討を進めた。一方、湯釜においては、過去に側噴火の事例が数多くあるにもかかわらず、火口中心からの距離に応じて警戒範囲が設定されており、側噴火の発生リスクが十分に考慮されているとは言い難い状況である。そこで、側噴火によるリスク軽減を目指した地球化学的観測の試行として、土壌拡散気体である水銀の検出、希ガスの同位体分析、光ファイバー温度計を用いた熱異常の検出などによるモニタリングを開始した（東京工業大学〔課題番号：TIT_03〕）。草津白根山周辺は、小規模高リスク火山噴火の発生場を理解する上で最適なフィールドの一つであり、本課題で得られる知見は、草津白根山にもならず、水蒸気噴火の発生が予測される他火山においても大いに活用することができる。

3) 観測による火山の活動把握

噴火の早期検知手法として、空中電界変動を活用する手法の開発を進めている。桜島での観測からは、爆発的噴火だけでなく地震・空振をあまり励起しない灰噴火も検出可能であることが判った。他の観測項目と合わせることで、噴火の検知能力が上がることを期待される。阿蘇山では 2021 年 10 月噴火に伴う電界変動を検出した。浅間山においても 2 点による観測を開始した（東北大学〔課題番号：THK_03〕）。本課題で想定する小規模水蒸気噴火は、地震・地殻変動・空振などの既存の地球物理的観測手段では見落とされるおそれがあり、新たな噴火検出手法の開発には大きな期待を寄せている。

富山県弥陀ヶ原火山の全体像は、過去の各種観測やその解析結果によって以下の様に捉えられている。深部ではマグマ供給に関連すると見られる低周波地震の活動が報告されている。深さ 4 km 付近には地震波低速度領域が見出されており、深部マグマだまりの可能性がある。比抵抗探査からは深さ 50m 付近に熱水・ガスだまりがあり、その膨張収縮が干渉 SAR で捉えられている。地表においては 2011 年ごろから地獄谷において噴気活動の活発化が見られるが干渉 SAR では地殻変動が検出されていない。

この弥陀ヶ原火山において、活動状態を把握するための多項目地球物理観測を継続しており、弥陀ヶ原火山全体の活動状況把握を目指す広域地震観測、地獄谷における浅部熱水・ガスだまりの活動推移の把握を目指した水準測量と GPS 観測、噴気活動の定量化を目指す微動観測、熱水流動経路の把握を目指す熱活動観測を実施している。地獄谷遊歩道沿いで実施した水準測量により検出された 2.9 cm/年の沈降は、活発な噴気活動が継続している紺屋地獄・新噴気帯付近に位置するほぼ鉛直なダイクの閉口により説明された。地獄谷では 2020 年 8 月と 10 月に GPS 繰り返し観測を実施していたが、2021 年 8 月からは連続的観測に移行した（富山大学〔課題番号：TYM_02〕）。噴気地帯に隣接する観光地は、本総合研究グループの重要な研究対象であるが、多項目の観測が行われて

いる事例は少ない。弥陀ヶ原における観測により貴重な観測データの蓄積が進むことが期待される。

4) 噴火の予測に関する研究

噴火・災害ポテンシャル評価のためのモデリング研究の一環として、水蒸気噴火を駆動した熱水量の見積を行った。噴出物の到達範囲は水蒸気噴火を駆動する熱水の量に支配されることから、熱水量は防災上重要な情報である。地球物理的手法で求められる固体と熱水を合わせた総噴出量と、地質学的手法で求められる固体噴出量から熱水量を見積もる手法を開発し、硫黄島の水蒸気噴火に適用した。地震・空振シグナルから見積もられた固体と熱水の総噴出量は $4.3 \times 10^4 \sim 7.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、地質調査による固体噴出量は $8.0 \times 10^2 \sim 1.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ であり、これらの観測量に対して新たに開発した手法を適用することにより熱水量を $2.4 \times 10^4 \sim 4.2 \times 10^6 \text{ kg}$ と見積もることができた。また、火道を上昇するマグマの振る舞いを調べるため、高粘性流体中の発泡シミュレーション手法の開発を進めており、計算上の各種設定や計算手法を変えてシミュレーションを行い結果の比較を行った（防災科学技術研究所〔課題番号：NIED01〕）。このような、噴火ポテンシャル評価を目指す研究の成果は、小規模水蒸気噴火においても活用できると考えられる。

5) 災害発生状況の調査・整理

ドローンの小型化、高性能化とともに、災害発生時の被害情報把握へ応用するための研究が進められている。ドローン調査により得られる「噴出物の飛散範囲等の動的情報」と「人・家・施設等の静的情報」を組み合わせ、被害情報を迅速に把握することが期待される。ドローンの飛行範囲や運用コストは、本研究のターゲットである小規模噴火に対し、過大でも過少でもない適度な規模であり、将来的な活用が期待される（富山大学〔課題番号：TYM_03〕）。

これまでの課題と今後の展望

・これまでの課題

火山活動による人的被害の程度は必ずしも噴火規模に依らない。噴火が発生する場所からの「距離」が人的被害の規模を大きく左右する。大規模噴火であっても十分な距離まで避難できれば人的被害は生じない。逆に小規模噴火であっても近くで発生すれば人的被害はまぬかれない。

マグマ噴火等の大規模噴火の場合はほとんどの場合明瞭な先行現象があり、噴火前に避難し人的被害が少ない場合が多い。また、噴火規模が大きくても周囲に人がいなければ被害が無い。これに対し、水蒸気噴火、ガス噴出、ガスの滞留等の比較的規模の小さい火山活動については、先行する現象が弱いあるいは無いために事前把握が難しく、危険性がわかりにくい。噴気地帯などはそのまま観光スポットになっていることも多く、観光客や登山客が危険性がわからないまま接近し、被害が出る場合がある。

小規模噴火にもかかわらず高リスクである理由の一つは、上記で述べたように発生場所や時期が予測困難だという点である。また、高リスクであるもう一つの理由として社

会的要因も考えられる。各自治体が発行する防災マップや、噴火に関する情報発信を担う気象庁が設定している噴火警戒レベルを見ると、防災マップの多くは噴火がある程度予測できることを前提とした記述となっており、高リスク小規模噴火に関する記述はほとんど見られず、危険性の存在が周知されにくい。噴火警戒レベルについても、非専門家が正確にその内容を理解しているとは考えにくく、専門家と非専門家の認識が大きく乖離している可能性がある。例えば、レベル1であれば安全であると考え、火口付近に無防備に接近して突発的な噴火に巻き込まれるという事が起こり得る。

・今後の展望

本課題のターゲットである小規模火山噴火は、データの取集が難しく、科学的な研究の対象とするためには困難を伴うため、観測研究計画の中でこれを明示的にターゲットとする研究は限られていた。しかしながら、小規模ゆえに発生頻度が高く人的被害も少なくない現象に対して、被害低減につながる具体的な方策を探るための研究は本観測研究計画の中で実施されてしかるべきものであった。そこで、2019年度に始まった観測研究計画において「高リスク小規模火山噴火総合研究グループ」を立ち上げ、その活動を開始した。

本総合研究は、予測困難性と社会的要因に着目して研究の方向性を検討し、将来の研究課題のシーズを育てることを目標とする。予測困難性に関しては、これまでの知見を活用することで予測可能性を高めることはできないか、あるいは、予測可能性を高めるためにはどのような研究を新たに立ち上げるべきか、という観点から検討を進める。社会的要因に関しては、専門家と非専門家の認識のギャップを埋め、どうすれば非専門家が危険性を正しく理解することができるのか、そのためには何をすべきか、という観点から社会科学的、防災科学的研究の方向性に関して検討を進める。

3年目となる今年度は、関連する研究課題の整理と問題点の洗い出しを継続して進めた。昨年度に本総合研究で実施すべき研究項目を1) 災害情報の発信に関する研究、2) 小規模噴火の発生する場の把握、3) 観測による火山の活動把握、4) 噴火の予測に関する研究、5) 小規模噴火災害の資料収集、の5つに整理した。昨年度までの関連課題の研究成果を見ると、1) に関する課題の成果を十分に把握することができていなかった。これに対し今年度の研究集会では、1) に関する社会学的、情報学的な成果報告が増えた。また、5) に関連する報告もあった。2) ～4) については継続して成果が報告されている。来年度以降も、それぞれの項目に関する成果の掘り起こしと整理を進める予定である。また、今年度末に実施したアンケート調査結果を整理し、高リスク小規模火山噴火に関する効果的な情報発信を検討するための情報抽出を目指したい。

成果リスト

特になし

3 拠点間連携共同研究

東京大学地震研究所・京都大学防災研究所 拠点間連携共同研究委員会

委員長 松島信一

(京都大学防災研究所)

副委員長 加藤尚之

(東京大学地震研究所)

これまでの地震・火山観測研究計画では、地震や火山噴火の発生の予測を最大の目標とし、それにより地震や火山噴火による災害の軽減を目指してきた。しかし、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の発生により多くの犠牲者が出たことを踏まえ、地震や火山噴火の科学的な予測が極めて困難であっても、現在の地震学や火山学には災害軽減に役立てられる多くの知見が集積されていることから、平成26年度から開始された「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」（建議）において大きく方針を変更した。即ち、地震や火山噴火の発生予測の実現を重点とした方針から、それらの予測を目指す研究を継続しつつも、地震・火山噴火災害をもたらす誘因の予測研究も組織的・体系的に進める方針に転換した。そのため、地震学や火山学を中核としつつも、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの分野の研究者が参加して、協働して推進することになった。

これまでの建議に基づく観測研究計画では、自然現象である地震発生や火山噴火現象の理解に基づきそれらの科学的な予測を目指すという考え方から、「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所が中核となって計画を推進してきた。しかし、災害や防災に関連する研究者と協働して計画を推進するためには、東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所とが連携して、計画を進めることが有効であるとの結論に至り、両研究所が協働し、それぞれの分野の共同利用・共同研究拠点として、連携して共同研究を進めることとなった。具体的には、両拠点の研究者が中核となって建議に沿った大テーマを決め、それを実現するための研究について全国の研究者からの提案・参画を募集して全国規模の共同研究を進める「重点課題研究」と両拠点がそれぞれ関連が深い地震火山研究コミュニティと自然災害研究コミュニティの2つの学術コミュニティに呼びかけ建議の主旨を踏まえたボトムアップ研究を公募する「一般課題型研究」を実施している。

1. 重点推進研究

(1) 総括研究

総括研究（拠点間連携共同研究〔課題番号：CT0C01〕）は「巨大地震のリスク評価の不確実性に関するパラダイム構築の推進」と題し、2020年度に引き続き、（1）震源過程、（2）伝播・深部地盤構造、（3）強震動予測、（4）浅部地盤構造、（5）構造物被害予測、（6）リスク評価の研究グループに分かれ、それぞれの分野におけるリスク評価の不確かさの要因についての検討を進めるとともに、これらの知見を統合するための（7）プラットフォーム構築グループ、（8）ステークホルダの参画に関する研究グループおよ

び(9)大規模計算のためのコンピュータサイエンスグループの9グループで実施した。

震源過程および強震動予測について、プレートの沈み込み帯で発生するプレート間大地震・巨大地震に伴う強震動の距離減衰の特徴を調べるために、2003年十勝沖地震、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netで観測された強震動を解析し、本研究で提唱した個別の強震動生成域に対する地震動の距離減衰式を、地震毎の強震動生成域に対する距離減衰式と比較するために、線形混合効果モデルにより評価を行った。前者の方がintra-event variabilityの値が有意に小さく、距離に対する分布に偏りが見られないことが確認された(図1、図2)。

深部地盤および伝播経路については、2020年に1946年昭和南海地震震源域西端にあたる豊後水道沖で、海底地震計およびハイドロホン・ストリーマーを用い、エアガンを人工震源とする屈折法・広角反射法地震波構造調査を実施した。取得された波形に対して波形インバージョンを適用し、九州パラオ海嶺の沈み込みを含む不均質構造の詳細について、解析を進めている。また、紀伊半島沖で実施している海底地震計を用いた地震観測データに対して、レシーバー関数、および表面波構造解析の適用による、海底下S波速度構造の把握を進めている。

浅部地盤構造に関しては、液状化の可能性のある地盤上に構築された盛土構造物を対象に、有効応力法に基づく逐次非線形地盤応答解析を実施した。解析では、液状化層の地盤物性を均質と仮定した確定的なケースに加え、地盤物性の空間的な不確実性を考慮した検討も行った(図3)。その結果、不確実性を考慮した場合の盛土沈下量のばらつきは、確定的なケースで地盤物性を平均値±標準偏差とすることで包含できることがわかった(図4)。

構造物被害予測のために、RC造建物を対象に、速度応答を指標とした地震応答解析に基づく被害率関数の構築手法に関する研究について議論を行った。研究では、被害率と重み付け速度応答積分値の関係について検討を行った。重み付け速度応答積分値とは、速度応答スペクトルのその周期帯の値である。また、重み付け速度応答積分値をPGV相当に戻して、既往の被害率関数と比較し、その有効性を確認した。また、地震被害発生後に、地震発生から建物の被害までを横断的にカバーする新しい重点研究の可能性についても議論を行った。

リスク評価については、リスク評価高度化のためには、対象となるエクスポージャ情報の精密化が必要不可欠である。このために、UAV等で撮影された写真やその他のリモートセンシング情報を用いて、エクスポージャに関するパラメータを位置情報とともに取得し、地理空間情報システム上に展開するフレームワークを構築した。本年度は特に、構築したフレームワーク上に展開する一次情報として、建物フットプリントと建物高さ、二次情報として建物固有周期を検討した。

プラットフォーム構築としては、地震発生時の総合的なリスクに関する影響評価にむけて、南海トラフ沿いに発生する巨大地震の多くのバリエーションを考慮する方法について検討した。

コンピュータサイエンスに関して、Capability/capacity computingにより生成された大規模データセットを用いたサロゲートAI構築手法の開発を行った。液状化現象の大規模3次元シミュレーションを多数回実行可能なGPUを活用した高速3次元動的有限要素解

析手法を開発し、これを活用することで生成された液状化の大規模データセットを学習してサロゲートAIを構築することで液状化推定のさらなる低コスト化の可能性を示した。液状化をはじめとした複雑な現象のUQや最適化への適用が期待される。

ステークホルダ参画では、様々な地震動想定を表示可能なシステムについて過大評価、過少評価等で推定結果を示すことが可能なシステムについて、新たな推定結果をシステムに取り組むためのインターフェースの構築を行い、システムの改良を行った。

（２）特定型（その１）

「ばらつきのある被害リスク評価をふまえた防災計画の検討〔課題番号：CT0C02〕」においては、これまで、シナリオ・手法の組み合わせにより変化する災害シナリオ評価結果を適切に理解することが可能なシステムの構築を行ってきており、高知県の地震動想定結果のばらつき表示を行ってきている。昨年度から、内閣府の地震動想定結果の検討を実施している。内閣府の想定では地表面での速度推定は行われておらず、公開されている震度データを童・山崎（1996）の方法を用いて、簡易的に速度データに変換し、ばらつき表示の試行を行った（図５）。また、その結果もふまえより厳密に地表面での速度データを得るための方法論についての検討を行った。

（３）特定型（その２）

「定常的地震活動の震源および地震波速度構造の精度向上による地震波動場推定の高度化〔課題番号：CT0C03〕」について、沈み込み帯でのプレート間固着強度分布を把握するためには、海底地殻変動データに加え、通常地震からスロー地震まで、プレート境界周辺での断層すべり運動の性質を理解することが重要である。南海トラフ沿い巨大地震断層域に当たる紀伊半島沖では、ケーブル式地震・津波観測監視システムDONETによって、海域下の多様な地震活動をリアルタイムで観測している。ここで観測される地震活動を詳細に把握するためには、特に速度の遅い堆積層を含む海底下S波速度構造を考慮に入れ、精度の高い震源分布を求める必要がある。これまでに、DONETの観測記録を用いたレーシーバー関数解析によって、構造探査に匹敵する解像度でS波速度構造を推定できることを示している。

熊野灘より海溝軸近辺のスロー地震が比較的頻繁に発生する場所では、紀伊半島南東沖のDONET1と紀伊半島南西沖のDONET2の間に若干の観測網でカバーできていない領域が存在するため、海底地震計を用いた機動的観測を行うことによって海底下速度構造および震源決定の精度を向上させることができる。この目的のために、2019年6月に紀伊半島沖南海トラフ沿いに15台の海底地震計を設置して観測を開始した。2021年6月に、この海底地震計を全台回収し、良好な観測記録が得られていることを確認した。本観測記録中の2020年12月から2021年1月にかけて、この観測網周辺にて活発な微動活動も発生しており、プレート境界の空間的特徴を把握するためには通常地震と微動との判別をする必要が生じた。これには機械学習による手法の適用を念頭に検討を進めており、海底地震計観測波形から代表的な地震は検出可能であることを確認した。さらに、微動と地震の検出判定に関して、その判別精度の確認を進めている。

（４）特定型（その３）

「不確実性を考慮した浅部地盤の非線形応答評価手法の検討[課題番号：CT0C20]」について、地盤地震工学の分野において液状化実験等で用いられることの多い豊浦標準砂を対象に、異なる３組の実験班による一連の室内土質試験を実施した。まず、地盤工学会基準に基づき物理試験（土粒子の密度試験、粒度試験、砂の最小・最大密度試験）を実施することで、豊浦標準砂の物理特性を把握するとともに、結果に及ぼす不確実性の因子（実験者の違い等）について分析した。また、中空ねじりせん断試験装置を用いて液状化試験（非排水繰返しせん断試験）を実施することで、豊浦標準砂の液状化強度や繰返しせん断特性の評価を行った。この際、供試体の密度や外力（せん断応力）といった定量化しやすい違いに加えて、実験者の個体差が試験結果に及ぼす影響についても分析した。その結果、すべての実験者の平均的な傾向と実験者毎の個体差とを適切に考慮することで、試験結果に基づく液状化強度等の予測区間を従来よりも合理的に評価できることが示された。

（５）特定型（その４）

「巨大地震による斜面災害発生個所の事前予測方法の検討[課題番号：CT0C14]」では、2016年熊本地震により阿蘇カルデラ内に発生した地表（平坦地・尾根部・斜面など）の亀裂を抽出する方法を開発し、その手法を阿蘇カルデラの西半分に適用し、亀裂の位置・大きさを図化した。また、この手法を適用する際に、地表面の変位の方向と大きさを図化する方法を開発した。この手法を斜面崩壊の発生した箇所周辺に適用すると、地表の振動方向・地表の変位方向・崩壊土砂の移動方向の関係を明らかにすることが可能となった。Particle motion は、地殻変動、地表の地震動、そして構成する母材の力学的特性を含めた設置点の地震中の移動軌跡を示している。地表に出現する永久変位は亀裂を生じない程度の変位（破損以下）、亀裂を生じる弾性変形、塑性変形、さらに母材が二つ以上の物体に分離する破断（崩壊）の範囲を示すと考える。このうち、土砂災害を引き起こす斜面崩壊や地すべりは、仮にその土塊の上に地震計があったとすると、Particle motion の軌跡の途中で大きく変位し、記録として残らないであろう。ここでは、KiK-netの観測点阿蘇の記録をFujiwara et al. (2016)から引用し、地形を視覚的に理解しやすくする方法（以下、土砂災害基本図）を地震の前後の比較からの結果と変位量を比較すると、北北西に約1.4mとほぼ一致する。このことから、永久変位が小さい塑性変形までの範囲の場合は、土砂災害予測基本図を用いた手法は、永久変位を良く再現するとし、破断が生じた部分の周辺の地殻変動と地表の地震動による永久変位出現の効果はほぼ破断が生じた部分と一致すると仮定し、破断は構成する母材の物性の差によるとして、議論を進める。この母材の物性の効果には、地形および地質の影響が含まれると考える。また、尾根部での地震波の収斂などの効果は、考えていない。阿蘇カルデラのほぼすべての地域を解析対象として進めた。その中で、次の地域に特徴的な傾向が認められた。

- ・ 傾斜の小さい田んぼなどに生じた亀裂
- ・ 傾斜の少し大きな斜面に生じた斜面崩壊（京都大学火山研究センター周辺）
- ・ さらに傾斜の大きな斜面で生じた阿蘇大橋を破壊した斜面崩壊
- ・ 北向山断層として新たに認められた地表断層の近傍の大きな地すべり性変位

次に手法の比較を検討した。

二時期の土砂災害予測基本図を比較、差分、そしてPIV(Particle Image Velocimetry)を用いた結果の比較の3手法である。比較は、二時期の土砂災害予測基本図をアニメーションのように表示することで、視覚的にどの部分に大きな変位が生じているか、直感的に把握しやすい。土砂災害予測基本図の中の一情報である侵食量の傾斜は、地形的に特徴の縁辺境界を視覚的にとらえやすくする。この情報は、道路の両端、田んぼの畔、地表に生じた亀裂、尾根部に生じた亀裂を特徴的に表現可能である。同様の手法の赤色立体図では、尾根部に生じた亀裂を表示することはできない。土砂災害予測基本図の侵食量の傾斜(値は0-90度)の二時期の差分($\text{Diff} = \text{Slope of Erosional Volume}(\text{Post-event}) - \text{Slope of Erosional Volume}(\text{Pre-event})$)は、変位が生じていると地震前の位置は負の値で、変位先の値は正の値で示され、道路の両端や、田んぼの畔などが連続的に示される。この負の連続した値の線と正の連続した値の線を追跡することで水平的な変位量を得ることが可能である。また、注目する地点の地震前後の標高値の差分から鉛直方向の変位をえることができる。すなわち、粒子追跡が可能である。同様に、PIV(Particle Image Velocimetry)を用いて変位の方角と大きさを求めた。地震前後の二時期の差分とほぼ同様の結果を得ることができた。しかし、PIVでは破断(崩壊)が発生した箇所は変位が大きすぎることと追跡する対象が消失していることから、その部分ではマスクを用いる必要があること、さらに前出の差分の方法よりも極端に大きい変位が表示される例があることが明らかになった。この点は、注意を要する。

以上のことから、斜面崩壊・地すべりなどの初期過程は、地殻変動・断層運動をふくむ地表の振動方向、地表の傾斜量の大きさとその方向、最大傾斜方向の斜面下部にすぐ直上の部分を支持する構造が存在しない地形的特徴があること、母材を構成する物質の強度などが主に寄与していることが明らかになった。

(6) 特定型(その5)

「即時建物被害予測技術の高度化[課題番号:CT0C21]」については、地面での最大加速度や最大速度といった地震動の指標値を予測または計測し、経験的に求めたその指標値と被害率の関数を用いて被害程度を推定する方法はこれまでも広く用いられてきた。この指標値と被害率の関数は「脆弱性曲線」と呼ばれ、一般的にはこれまでの地震被害における実建物の被害程度と予測・観測された最大地動加速度(PGA)や最大地動速度(PGV)の関数から経験則として求められてきた。最近でも2016年熊本地震や2011年東北地方太平洋沖地震での被害を参考に、木造建物の脆弱性曲線は更新されてきた。一方、近年の巨大地震では構造被害が限定的となりつつある鉄筋コンクリート造建物では、同様の手法で脆弱性曲線を推定することは困難となりつつある。

そこで本研究では、近年の脆弱性曲線の検討例とともに、地震被害ではなく、非線形地震応答解析を援用した脆弱性曲線の作成方法の開発についても、その可能性を検討した。特に、鉄筋コンクリート造については、木造建物と比較すると地震被害を受けた建物棟数が少なく、その多くが甚大な被害をもたらした兵庫県南部地震による被害であり、被害関数はこの被害に適合するように作成されていることがほとんどである。そこで、一質点系モデルの地震応答解析による被害関数の構築手法に関して検討をおこ

なった。RC建物モデルとしてTAKEDAモデルを用いた。建物モデルの弾性周期と降伏時ベークスシア係数のばらつきは、建物階数別の棟数統計データ・既往文献をもとにそのばらつきを確率密度関数として仮定し、これらの分布に沿うような一質点系モデルを一万通り作成した。入力地震動としては観測点周りの建物被害率が求められている53か所の強震観測記録を、建物弾性周期の4倍の周期分布で重みづけした速度応答値で基準化して使用した。地震応答解析による最大応答値が閾値（ここでは塑性率4）を超えるものを大破と判定することとして、解析ケースの半数が大破となると被害率50%であるとして被害関数を構築しところ、既往の被害率関数に概ね対応した結果が得られた。

衛星を用いた被害把握では、人工衛星搭載の合成開口レーダ（SAR）を用いて熊本地震の全壊判定の建物の詳細被害（層破壊、傾斜、壁・屋根被害）の検出可能性について検討を行い、地震前後の位相情報の干渉性から、被害程度を検出できる可能性があることを明らかにした。また、建物の被災度は現状では目視調査により区分判定を実施しているが、ドローンを用いて被害把握を実施する可能性について検討した。建物の被災度を無被害・軽微・小破・中破・大破・倒壊に分類する手法を開発し、木造建物の振動台実験をドローンにより撮影することによりその有効性を確認した。インフラ設備については、2016年熊本地震の熊本市および益城町、2011年東北地方太平洋沖地震の仙台市と福島県いわき市、2007年新潟県中越沖地震の新潟県柏崎市の上水道管路の被害データを用いて、現行の被害予測式との比較を行った。具体的には、上水道管路の被害率に対する様々な要因の影響度を明らかにするために、これらの上水道管路被害データを用いて、管路被害率を目的変数とした数量化理論I類による回帰分析を行った。その結果、PGVの影響度が最も大きく、次いで管種、液状化の影響度が大きいという結果になった。微地形、微地形境界条件の影響度はほぼ同程度で、あまり大きくないことが分かった。

2. 一般課題型研究

地震・火山噴火という自然現象が引き起こす地震動、津波、火山噴出物、斜面崩壊などの災害誘因が、自然や社会に潜在的に存在する脆弱性などの災害素因に働きかけ、これらの誘因と素因の組み合わせと相互作用の状態に応じて様々な規模の災害が発生する。そのため災害誘因予測の高度化は、災害の軽減に結びつく有効な手段の一つである。このような視点から、一般課題型研究では、災害誘因や災害リスクを事前に高い精度で評価する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化の研究」、地震や火山噴火が発生した直後に、高精度かつ即時的に災害誘因を予測する手法を開発する「地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化の研究」、災害誘因予測を防災対策の推進に効果的に結びつけるための「地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究」に関連する研究を公募した。

2021年度は新規9課題が東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究委員会の審査を経て採択された。また、新型コロナウイルス感染症対策対応のため、2020年度からの研究期間延長課題4課題が実施された。

（１）地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化の研究

「不均質な断層すべり分布を考慮した津波の確率論的予測と不確実性の評価[課題番号:CTOC04]」に関して、2018年9月にインドネシア・スラウェシ島で発生した地震(Mw=7.5)によって、パル湾南岸で浸水深約4mの津波が発生し、被害をもたらした。この地震についてまず遠地地震波形の解析を行い、震源から南へ延びる横ずれ断層上のパル湾周辺で大きなすべりがあったことを確認した。このモデルから計算した津波は、パル湾内で記録された津波波形と同程度の振幅を生じることから、この津波波形と合成開口レーダーデータを用いて、断層を3つのセグメントに分けて詳細なすべり分布を求めたところ、パル湾付近のセグメント上で大きなすべりが推定された。このすべりによって浸水深2m程度の津波は発生するが、パル湾南岸での津波を完全に再現するためには、地滑りなどの二次的な波源が必要であることもわかった。

南海トラフ巨大地震を想定した津波計算を行い、京大防災研グループが開発しているランダムにすべり分布を生成する確率津波モデルと、内閣府中央防災会議モデルの2種類の津波高の特性を比較した。確率津波モデルについては、中央防災会議のモデルと同じMw9.1の津波シナリオを300ケース生成した。全シナリオ中の平均的な津波高は、外洋に面した高知県沿岸などについては確率津波モデルの方が大きいが、大阪湾湾奥部では中央防災会議モデルの津波高さが相対的に高い傾向にあった。この傾向の差異は、評価地点に対する支配的な断層領域の平均すべり量で説明できることがわかった。この結果は、断層すべりの深さ方向の多様性が津波高の不確実性の大きな要因となりうることを示している（図6）。

「強震動のブラインド予測のための共用地盤モデルの構築に関する研究[課題番号:CTOC07]」について、昨年度までの研究によって、第6回ESG国際シンポジウム(ESG6)の熊本テストサイト周辺の20地点における臨時地震観測によって強震記録が得られている。図7に示すようにESG6のテストサイトは、熊本平野西部のJR貨物熊本駅付近の強震観測点であり、その周辺の200m程度の狭い範囲の20地点に臨時に強震計が約半年間設置された。ESG6のブラインド予測の強震観測点は、臨時観測の観測点16の近傍にある。臨時観測点の多く（観測点1～11）は、北東—南西方向に並んでいる。観測点数はこの方向に少ないが、直交する方向にも観測点（観測点14～21）を配置した。また、ブラインド予測での岩盤サイトの観測点である金峰山のSEV0（九州大学地震火山観測研究センターの熊本地震観測点）地点でも臨時強震観測を行った。

得られた33地震の地震記録からテストサイト近傍の観測点16に対する各点の水平および上下成分のフーリエスペクトルの比を求めた。水平スペクトルの算出は、S波部分の水平2成分の相乗平均を用いた。また、上下成分は、P波部分を用いた。図8に示す水平スペクトル比は、周期0.5秒以上の帯域では、ほぼ1倍であり、この周期帯域の地震動特性は、テストサイト周辺でほぼ同様であると考えられる。一方、周期0.5秒以下では、スペクトル比の変動が大きくなり、各観測点は、テストサイトの地震動特性と異なる特性を持っている。とくに、周期0.3秒付近では1倍を下回る地点が多く、周期0.2秒付近では1倍を超える地点が多い。上下成分のスペクトル比は、より短周期の0.2秒までフラットな形状である。なお、両成分ともに、周期3秒程度以上では、スペクトル比に大きな違い

が認められるが、これらは小地震の記録を用いているために生じたノイズによるものと考えられる。図9には、水平成分のスペクトル比の空間的な分布が示されている。周期0.8-1.6秒の比は、空間変動が小さいが北側の地点ほど比率が小さくなっている。周期0.3秒付近のスペクトル比は、テストサイトの強震観測点から離れると、小さくなる。さらに、短周期の0.2秒付近のスペクトル比は、空間変動が大きく、テストサイトの南東側で大きくなる。

以上の観測結果から、テストサイト周辺200m程度の範囲においては、周期0.3秒以上の地震動の特性は、ほぼ同じであると考えられる。すなわち、周期0.3秒以上の地震動特性を評価する際に、1次元速度構造モデルの仮定が成り立ち、地下構造の不整形性の影響は小さいと考えられる。しかし、周期0.3秒以下に影響を与える極表層部については、地盤構造に空間的に変化がある可能性もあり、短周期地震動の評価に際しては注意が必要である。

各観測点では、地表付近のS波速度を知るために簡易な表面波探査を実施した。測線長は、7mであり、固有周波数4.5Hzの地震計を1m間隔に設置し、ハンマー加振による上下成分を計測した。得られた記録の周波数一波数スペクトル解析によって、図10左に示すレイリー波の位相速度を得た。すべての地点で位相速度は、測線長が短いため、位相速度は周波数約15Hz以上に限定されるが、ほぼ一定値に収束している。これは、レイリー波の高周波数の位相速度の下限値を示しており、近似的に地表付近のS波速度とみなせると考えられる。そこで、各地点での20から40Hzの位相速度を平均して、図10右の平均位相速度を求めた。テストサイトの強震観測点近傍では、130m/s以下の平均位相速度が多く、離れると150m/s程度となっている。この空間分布は、周期0.3秒のスペクトル比の分布と類似しており、地表付近のS波速度の違いが周期0.3秒の地震動の空間的変化の原因であると考えられる。

「津波被害予測における震源モデルの不確実性の評価[課題番号:CTOC22]」では、数値モデルによる浸水評価の不確実性については、和歌山県海南市の詳細な地形モデルを用いて、津波浸水に対する4つの非線形長波方程式を基礎とする数値モデルの性能を水槽実験の結果と相互に比較した。水槽実験は2018年に京大防災研グループによって行われたものである。また、比較する4つの数値モデルの中には、これまでに東大地震研グループと京大防災研グループがそれぞれ多く用いてきたJAGURSやTUNAMI-N2のモデルを含んでいる。モデル間比較によって次のような結果が得られた。(1)常に湿っている地域ではモデル間の変動は小さい。(2)wet-dry境界の伝播により浸水到達時間、最大水位、流速のモデル間変動が大きくなる。(3)浸水域と最大水位は、浸水先端部の速度や最大流速に比べてモデル間の変動が小さい。この原因は、wet-dry条件に関する詳細な実装の手法の差異と考えられる。これらの結果から、建物を対象としたシミュレーションによる浸水域と水位は比較的高い信頼性を持つが、速度の予測値はいずれも誤差が大きく、シナリオアンサンブル計算を使用する場合のみ考慮すべきである。以上の成果は、Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineeringに掲載済である。

地形による津波の応答関数については、メキシコ太平洋沿岸と日本の駿河湾を対象に、確率津波モデルによる多数の津波計算結果から、スペクトル解析を用いて沿岸地点にお

ける周波数応答関数を推定した。さらに推定した地形による応答関数をもとに、沿岸域のスペクトルから津波波源の影響と地形による影響を分離し、波源と地形のそれぞれが津波のエネルギーに寄与する割合を求めた。この寄与率を多数のシナリオおよび複数の地点で求め、その寄与率の範囲と空間特性の統計的特性について把握した。主要な結論は以下の通りである。沿岸地点の津波のスペクトルと波源のスペクトルの比から応答スペクトルを求め、さらに外洋・陸棚・湾と3つの異なる空間スケールの応答スペクトルの抽出を行った。求めた応答スペクトルの卓越周期は、観測データや湾の形状を考慮して概算した固有周期と概ね一致した。応答スペクトルより確率津波モデルは任意の地点での波の応答特性を求めることが可能であり、津波の地域特性評価に有用であることがわかった。この成果は国際会議International Tsunami Symposiumで口頭発表された。

「強震動のブラインド予測結果に基づく強震動予測技術の精度と信頼性に関する研究[課題番号:CT0C24]」において、ESG6でのブラインド予測の結果と観測記録との一致の程度を定量的な指標によって評価した。ここでは、最大余震による強震動を予測するステップ2 (BP2) に対して評価した結果を説明する。図11には、Anderson(2004)の指標による各参加者の計算値と観測値との比較を示している。これらの指標は、継続時間(C1-2)、エネルギー(C3-4)、最大値(C5-7)、スペクトル特性(C8-9)、相互相関係数(C10)の10個である。さらに、これらを平均した総合指標S1も比較に用いた。相互相関係数(C10)は、全体的に低い値であり、S波走時などの不一致による低下であると考えられる。しかし、継続時間、最大値、スペクトル特性に関する指標は、高い値である。とくに、継続時間は、BP参加者間でのばらつきも小さく、安定した強震動予測が行われていると考えられる。一方、最大値は、ばらつきが大きく、予測時の適切な仮定が必要であると考えられる。

ESG6のブラインド予測(BP)では、減衰特性も含めて地下構造モデルのチューニングも行われている。熊本平野のテストサイトKUMAでは、PS検層に基づく詳細な地下構造モデルを事前に提供した。一方、岩盤サイトでは、特定の地下構造モデルを事前に与えていなかった。上記のBPの結果のばらつきの一因には、岩盤サイトの地下構造情報が少ないことが考えられる。そこで、本研究では、BPの岩盤サイトKU.KMP1において微動探査と表面波探査を実施し、地下構造情報を得ることを試みた。

図12に示すように、表面波探査は3つの測線で行われた。各測線では、1もしくは2m毎に上下成分地震計を設置した。測線の両端および中心点で上下加振が行われ、その地動速度を24chの探鉱器で計測した。表面波探査のうちで最も長い測線1の結果について説明する。測線1の北側での加振による上下成分の速度記録を図13左に示す。分散性を持つ波動が顕著に認められる。距離12-40mの波形に対してビームフォーミング解析を適用し、図13右に示すように位相速度を得た。10~60Hzの周波数帯域では、周波数の増加に伴って位相速度は徐々に小さくなる。さらに、60~80Hzでは、位相速度が大きくなり、高次モードの影響の可能性が高いと考えられる。しかし、この周波数帯域でも基本モードに対応する振幅の大きい位相は認められる。

微動探査では、測線1付近で2つの異なるサイズのアレイで微動の上下成分の計測が行われた。それぞれのアレイは、半径が29mと12mの円形上の3点と中心点の4点で構成されている。微動のアレイ記録を81.92秒間のセグメントに分割し、SPAC法による解析

から、図14左に示す位相速度を求めた。各セグメントの位相速度を平均して最終的な位相速度とした。図には、測線1での北西端の加振による記録による位相速度も示されている。微動探査による位相速度は、周波数7～14Hzの間で表面波探査による値とよく一致している。

熊本平野のテストサイトKUMAでの地表から地震基盤までの1次元S波速度構造モデルを参考にして、表層地盤1層と地震基盤を含めた深部地盤5層で構成される6層モデルを仮定した。図14右に逆解析結果を示す。S波速度3.2km/sの地震基盤までの深度は、約150mである。一方、S波速度430m/sの工学的基盤の深さは、3m程度と浅い。岩盤サイト近傍では、ボーリングによる土質調査が行われている。地表から2.8mまでは粘土化した凝灰岩風化層であり、さらに、深さ25mまでは角礫凝灰岩となっている。地表付近の風化層の厚さは、探査の結果と同様である。

得られた地下構造モデルを用いて地盤増幅特性の特徴を検討する。各地層の影響を理解するために、増幅特性を計算するモデルの最下層を順に浅くして、S波の1次元増幅特性を計算した。Q値は、S波速度(m/s)の1/10の一定値を仮定した。計算の結果を図15に示す。地震基盤まで含めたモデルでは、周波数3Hzでピークがみられる。最下層のS波速度を低下させると、この周波数の増幅倍率は徐々に小さくなる。この周波数の増幅特性には、深部地盤、とくに、1.1km/s以上のS波速度を持つ層の影響が大きいことがわかる。また、周波数8～12Hzのピークは、表層地盤のみのモデルの増幅特性でも同様に認められ、表層地盤の影響が支配的になっている。

「地震により被害を受けた事業継続建築物の火災リスク評価手法の開発[課題番号：CT0C25]」では、建物の地震レジリエンス性能を火災リスクの観点から定量的に評価するための枠組みを構築した。ここでの地震レジリエンス性能とは、地震後の出火率や防火関連設備の地震脆弱性に基づいて評価される地震後の火災リスクが平常時のそれと同等になるような使用可能床面積を地震からの経過日数の関数として評価したものを言う(図16)。将来的にこうした観点を事業継続計画の中に盛り込むことを目指し、①建物が極めて稀に発生する地震動(震度6強程度)を受ける場合の評価が可能であること、②火災性状や避難行動の予測によらず簡易に評価が可能であること、③建物の地震対策が地震後の火災リスクや地震レジリエンス性能に与える効果を考慮できること、を重視した枠組みを整備した。

まず、建築物の火災リスクを、複数の防火関連設備の奏功・不奏功の組み合わせから成る各火災シナリオの生起確率と各火災シナリオで生じる死傷者数の積の和、すなわち、日間(または年間)火災死傷者数の期待値と定義し、①地震後の出火率、②防火関連設備の地震被害率、③防火関連設備の復旧率をパラメータとして火災リスクを地震からの経過日数の関数として定式化した上で、地震後の火災リスクが平常時のそれと同等になるような使用可能床面積の簡易算定式を誘導した。

評価に必要な地震後の出火率については、日本火災学会の2011年東北地方太平洋沖地震の出火記録や産業技術総合研究所の東北地方太平洋沖地震の推定地震動マップを活用し、出火率を地震動強さ指標で説明する回帰式を作成した。防火関連設備の地震被害率については、研究代表者らが熊本地震の影響を受けた病院を対象に実施したアンケート

調査データを活用し、被害件数の多かった火災感知器・スプリンクラーヘッド・防煙垂れ壁・防火戸について、それぞれの被害率を代表最大床応答加速度または代表最大層間変形角で説明する回帰式を作成した。防火関連設備の復旧率については、建築設備技術者協会による熊本地震の建築設備被災状況調査の結果を活用し、建築設備の被害事例381件の復旧日数別単純集計結果から、復旧率を地震からの経過日数の関数として近似した。

建物や揺れの条件等を仮定したケーススタディを行った(図17)。ここでは、6階建ての建物が計測震度6.2、最大地動速度0.8m/sの地震動を受ける場合を想定した。簡単のため、各階は一樣な最大床応答加速度を受けるものとし、その値に日本建築構造技術者協会が提案する建物の耐震余裕度レベルに応じた限界値(10.0、5.0、2.5m/s²)を設定することで、建物応答を安全限界値以下に制御することが地震レジリエンス(使用可能床面積率)の向上にどの程度つながるのかを調べた。地震から1日間は、出火率が非常に高いため、使用可能床面積率は耐震余裕度が高くても約5%となり、火災リスクの観点からはほとんどの人を屋外に退避させる必要性が示唆される。その後、約一週間程度で出火率が平常時のレベルに戻るため、耐震余裕度がない場合で約47%、耐震余裕度が高い場合で約81%まで回復する。その後は長い日数をかけて設備の復旧が期待されるため、使用可能床面積率はゆっくりと増加していく。地震による建物応答を抑えるほど設備の地震被害率が低下するため、耐震余裕度を高めることで火災リスクの観点からも建物の継続使用性が向上することが分かる。ただし、ここでの結果はあくまで計算例であり、評価に用いる防火関連設備の復旧率関数などには改善の余地がある。

「1m-LiDAR DEMを用いて検出された地すべりなどの不安定土塊の微動及び地震動観測による相対的危険度評価[課題番号:CT0C26]」では、2016年熊本地震前後で得られた1m-LiDAR DEMに地形を視覚的に見やすく表現する手法を適用して抽出された立野地区の地すべり土塊の範囲を図化した。その地すべり土塊の周辺に発生し、確認された斜面上の地表亀裂を同図に示した。これらの結果から、地震計の設置位置を決定した。平行して地震計の現地設置のための準備を継続中である。

初年度の研究成果は、PIV手法で周辺よりも変位の大きいと考えられる地すべり土塊の範囲を抽出し、これに地震前後の標高変化も重ねて示すことにより、地すべり土塊は斜面上方では沈降しながら斜面下方に移動したこと、斜面下方では約8メートル斜面下方に移動し隆起していることが明らかになった。また、地すべり土塊の末端部では、谷状地形の部分に斜面崩壊が多発していることも現地での観察で明らかになった。これは、谷頭部では下に支持する構造が欠落していることに加えて斜面上方の土塊がこの不安定な土塊を斜面上方から押して崩壊の端緒となったと考えることができる(図18)。この二つの量から三次元的な粒子追跡が可能となる。この作業中に、対象とした地すべり土塊の範囲外に、北向山断層による地表の永久変位を確認することができた(図19)。図19はPIV手法とは異なる変位量の検出方法で、たとえば図中の赤は地震前の特徴的な地物(例えば道路の両端や田んぼのあぜなど)の位置、青は地震後のもので、地震前後で建設された林道は、地震前の赤部がなく、青のみで示される。同様に、地震後に出現した地表断層も青のみで示される。このような斜面末端部の谷頭部、すべり土塊の中央部に近い部分また地すべり土塊の範囲外の地盤を選び、危険度の評価を実施するために、複数の長周

期サーボ型速度計3成分（東京測振製）により微動および地震動観測を実施した（図18の中に、微動観測を実施した点を▲で示す）。この斜面は、大津町の所有地であるが、立ち入りには建設省立野ダム工事所の許可が必要であった。立野ダム工事事務所指定の駐車場から斜面上方（標高差約150メートル）に観測機材を観測地点一点につき約50キロ（地震計10キロ、記録計10キロ、電源バッテリー20キロ、他物品10キロ）の物資輸送を研究分担者で実施した。当初この作業を委託する予定であったが、適当な受け手がなく、受け手を探すのに時間を要し、観測実施に遅れが生じた。この地震動記録の一例を図20に示す。詳細は、現在解析中であるが、斜面上の不安定と考えられる谷頭部や崖の縁辺と地すべり土塊の中央部、地すべり土塊の範囲外で異なる特性がとらえられている可能性があり、今年度の残りの期間に観測点を増設し計測を継続する。

「邑知潟平野の推定地盤速度構造の非線形地盤応答を考慮した強震動予測[課題番号：CT0C27]」では、邑知潟平野の地盤構造を推定するため、図21に示す地点において常時微動観測を行い、3地点で常時微動アレイ観測を行った。アレイ半径はLLL:400m、LL:135m、L:45m、M:15m、S:5m、SS:1.5m、SSS:0.5mの7サイズとし、LL～Mは60分、S～SSSは30分の同時観測とした。また、盆地を横切る方向に測線01～07の7測線を、盆地に沿う方向に測線08の1測線を設定し、計99地点で独立した30分の常時微動単点観測を行った。さらに、南東側の山中でも同様に14地点の単点観測を行った。

常時微動アレイ解析には微動解析プログラムBID0 (Tada et al., 2010) を用い、全アレイサイズのRayleigh波位相速度分散曲線を求めた。そして各アレイサイズに応じた周波数帯を接続したものを最終的なRayleigh波位相分散曲線とみなした。常時微動単点観測点での解析は以下の手順で行った。まず、観測によって得られた30分間分の加速度時刻歴データを50%オーバーラップさせ、40.96秒の小区間に切り出す。次に、切り出した各小区間でNS、EW、UD成分のフーリエスペクトルを計算し、NS/UD、EW/UDの微動フーリエスペクトル比 (MHVR) を算出する。算出された小区間ごとのスペクトル比の平均を各地点のMHVRとした。ただし交通振動などのノイズの影響を取り除くため、ノイズの大きい区間を30～80%除外している。

防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET) のK-NET七尾 (ISK007) とK-NET羽咋 (ISK008) の土質データおよび地震ハザードステーション (J-SHIS) の深部地盤データを参考に全地点共通の層構造の物性値を定めた。次に、アレイ観測地点で観測されたMHVRと位相速度分散曲線に理論値が近づくように各層の層厚を合わせ、それを推定モデルとした。理論MHVRの計算には拡散波動場理論に基づき理論MHVRを計算し、理論位相速度分散曲線の計算には成層地盤におけるグリーン関数及び正規モード解を計算する公開プログラム (Hisada, 1995) を用いた。そして、アレイ地点での推定モデルを基準とし、単点微動観測点において理論MHVRが観測MHVRに近づくように層厚を決め、地盤構造を推定した。強震動シミュレーション用の地盤構造モデルは、推定した地盤構造における第4層～第10層の下面深さを補間することで、三次元地盤構造モデルを作成した (図22)。ただし、邑知潟平野の南東側では盆地端部から約10kmの範囲を最表層が $V_s=1100\text{m/s}$ の山地部と想定し、平野と山地部以外の地域はJ-SHIS深部地盤構造をそのまま用いた。

微動観測により得られた推定地盤構造モデルをもとに、防災科学技術研究所公開の差

分法プログラムGMSを用いて強震動シミュレーションを行った。計算の簡略化のため、推定地盤構造のうち層4～層10の7層をモデルとして計算に用い、各層の物性値はJ-SHIS深部地盤構造モデルv3.2と同一とした。強震動シミュレーションには、地震調査研究推進本部の公開する邑知潟断層帯の想定地震ケース2を用いた。その結果、推定地盤構造モデルを用いたシミュレーションでは、J-SHISモデルに比べて、邑知潟平野内でモデル最上面での最大速度（PGV）が大きくなる範囲が広くなり、特に邑知潟平野の中部から南西部の盆地南東端に沿ってPGVが大きくなることが分かった（図23）。推定地盤構造モデルは邑知潟平野の盆地境界部の構造についてより詳しい調査結果に基づいてモデル化したことで、J-SHISモデルと比べて盆地による地盤増幅特性がより確からしいものとなったと考えられる。

「既存在来木造建物に大きな被害を引き起こす地震動の発生要因に関する研究[課題番号：CT0C28]」では、今年度は、実大木造建物の復元力特性を再現する実大1層4P試験体の開発を行った。まず静的試験を行ってその結果を重ね合わせ、想定するベースシア係数になるように錘の重量を調整、二層から一層になることによる周期を地震動の時刻みを補正することで振動実験を行い、実際の被害を再現できることを確認した。

将来発生する地震動が木造建物にどの程度の被害を引き起こすか、即ち、地震動の破壊力を測る方法として、実大在来木造建物（以下、木造建物）を使った振動実験が有効であるが、多大な費用と労力がかかる。様々な被害関数も提案されているが、過去の強震記録と被害データに基づいたものであり、将来これまでにない性質をもった地震動が発生すれば、被害予測を誤る可能性がある。地震応答解析によって求める方法も開発されているが、非構造部材の影響や復元力特性モデルにおける繰り返し特性など未だに不明な点も多い。

そこで、将来発生し得るこれまでにない性質をもった地震動の破壊力を測る手段として、実大木造建物の挙動を再現できる簡易試験体の開発を行った。

今回の試験体は、大地震で被害を受ける日本に存在する木造建物の中でも耐震性能が低い建物を想定し、木造建物の平均的な降伏ベースシア係数 C_y の分布における、累積確率の下位5%を目標と定めた結果、 $C_y=0.2$ とした。そこで、 $C_y=0.2$ となる試験体を作成するために、静的実験を行い、性能を把握した後、振動実験を行う際の付加重量を設定し、振動実験を行った。

試験体は幅4000mm、高さ2910mmの構面で、軸組のみが1体（試験体名：FR）、壁を2ヶ所に配置したものを2体（試験体名：WL、WL-BR）作成し、配置した壁はWLがサイディングおよび石膏ボード、WL-BRがサイディング・石膏ボードおよび三ツ割筋かいとなっている。次に、振動実験の試験体の性能を把握するために、静的実験の結果を加算した。ここで、振動実験の試験体は全3構面のため、FRを2構面、WLもしくはWL-BRを1構面用いることとし、それぞれを加算した性能を比較した。ここでは、最低限の筋かいが入っている建物を想定し、振動実験の試験体はFRを2構面・WL-BRを1構面用いることとした。

振動実験の試験体は、加振方向4000mm、直交方向1925mmの1層の箱型試験体とし、外側に静的実験のFR、内側にWL-BRを配置した。試験体に付加する重量は、静的実験の荷重を加算（この際、P- Δ 効果を考慮した）し、総重量で割ったものが1/120rad時で $C_y=0.2$ とな

るよう、合計4tonの錘を天井に配置した。

入力地震動は、既存の建物は大地震を受ける前に中小地震を経験していると考え、2003年宮城県沖の地震のJMA大船渡を震度5強程度となるよう50%に縮小したものを入力した後、震度6強の大地震を入力した。具体的には周期0.5秒以下の極短周期が卓越した2003年十勝沖地震のK-NET 広尾N50W方向と、建物の大きな被害と相関がある周期1-1.5秒が卓越した1995年兵庫県南部地震のJR鷹取NS方向の2種類を用いた。なお、2層を1層に縮小しているため、1層と2層の周期の違いを補正するために、地震動の時間軸を0.91倍に縮小した。

K-NET広尾は震度6強であったが周辺に全壊といった大きな被害を受けた建物が見られていない一方、JR鷹取は木造全壊率59.4%と甚大な被害が生じている。なお、大地震入力前の損傷レベルを揃えるために、K-NET 広尾入力後に壁の交換といった試験体の復旧を行い、ステップ加振を行って復旧できていることを確認した。

実験結果として、K-NET広尾では、最大変形角は0.01radであり、サイディングの割れといった軽微な被害に留まった。JR鷹取では、最大変形角は0.25radと非常に大きく、筋かいの座屈・折損が見られ、全壊程度の大きな被害となった。以上の結果は、実際の強震観測点周辺の被害状況と対応している。

静的実験と振動実験の性能を比較については、全体的に振動実験の方が大きく、振動実験の試験体のベースシア係数 C_y (1/120rad時)は0.26と静的実験に対して1.3倍程度となった。この要因としては、鉛直荷重・試験方法・載荷速度の違いが考えられる。

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化の研究

「リアルタイム地震情報配信手法の高度化に向けた地盤特性の影響度評価[課題番号：CT0C23]」では、令和3年度は京都市左京区内の医療施設地震時応答観測網の対象建物のうち、日本バプテスト病院、吉川病院において、ミニアレイ微動観測を実施し地盤特性を推定した。図24に、病院の位置関係と花折断層の破壊により生じる地震動(PGA)の推定マップ(京都府、2010年)を重ねる。地震動の予測では、鴨川に近い京大病院と吉川病院が同等で600-1000 cm/s^2 程度、山間に位置する日本バプテスト病院は400-600 cm/s^2 程度である。

図25左は吉川病院駐車場で実施した微動アレー観測の様子である。地盤の微動観測記録に自己空間相関法(SPAC法)を適用し、表層地盤の速度構造を探索した。図25右に得られた位相曲線を示す。位相曲線から表層地盤(地表からおおよそ30m程度の深さまで)の平均S波速度を推定すると300m/s程度と大きな値となり、吉川病院の建物応答推定においては、一般的な地盤における増幅を考慮するのみで良いと考えられる。ただし、建物の形状はL字型で特徴のある平面を有し、さらに屋上の塔屋はスレンダーな形状をしているため、建物応答が複雑である可能性が高いと判断された。そのため、無線式の小型微動計による多点常時微動計測を実施し、応答特性の分析を進めることとした。現在、観測データを分析中で詳細は割愛するが、塔屋が大きく揺れる振動モードが多く、またL字型平面に起因するねじれ振動モードも多く抽出されている。

日本バプテスト病院の敷地は斜面に位置しており、病院の入り口は1階だが、建物裏側に位置する駐車場への出入り口は3階になる。地盤の擁壁と建物の間にはスペースが設け

られているが、擁壁の剛性を確保するためか、建物との間に控え壁が配置されており、建物と地盤が完全に独立していない。控え壁上部と建物の接統部には、地震に起因するとみられる亀裂が見られた。このように建物には変土圧が作用している可能性があり、多点常時微動計測を同時に実施した。現在、データを分析中である。微動アレー観測を実施した位置と位相曲線を図26に示す。地盤は予想よりも良好で、特にサイト特性による地震動の増幅が大きくなる可能性は見いだせなかった。しかしながら、敷地内で盛土造成されたとみられる一部の地盤は比較的柔らかいことが、周辺ボーリングデータから確認できた。

（３）地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

「桜島大規模火山噴火を対象とした事前避難を実現するためのリスクコミュニケーション方法に関する実践的研究[課題番号：CT0C16]」は、鹿児島市街地における桜島の大規模噴火に伴う大量軽石火山灰降下による被害軽減に資する事前広域避難の実現に向けて、住民自身がいざという時に、避難行動を実際に実行し、円滑に避難が実現するための体制作りを専門家と避難主体である住民が協働して目指す実践的研究である。令和３年度前半も依然として新型コロナウイルス感染拡大によって、対面でのイベントが実施できない状況が続いていた。第１回のワークショップは2021年11月22日に、最大1mの降灰が予想されている鹿児島市八幡校区のコミュニティ協議会を実施主体として開催した。本研究では、「生命を守るのは自分自身である」という理念に基づき、「検討の場の主体は、あくまでも住民であり、専門家はサポート役である」という関係性」と「長期的継続」という２点について、専門家と住民との間で共有して進めた。住民が避難動機を持つためには、まずは「大量軽石火山灰降下によって、何が起こるのか？」について明確に認識する必要があるという問題意識から第1回は、50cmの軽石火山灰が降り積もった場合の状況をイメージしてもらい、「どのような懸念事項があるか」、そして「今後、どのようなことを考えていく必要があるか」についてグループに分かれて話し合ってもらった。その結果、主に、生き残れるかどうかという不安、避難、事前の備えの必要性、高齢者・身障者支援の必要性などの話題が中心となった。これらのテーマは専門家の間では当たり前のことであるが、住民自身からの語りでこれらのテーマが提起されたことに意義がある。これを受けて、専門家を交えず、住民自身が検討をしていく自主勉強会が立ち上がることとなった。また、住民の問題意識を受けて、専門家側からのフィードバックを行うことで、住民の関心に沿った情報をドラフトすることができた。

「地震発生の切迫性を伝える災害情報モデルとシナリオの構築～北海道胆振東部地震からみえた新たな課題としての複合連鎖問題の解釈を通して～[課題番号：CT0C17]」は、令和元年度に始まり、今年度をもって３カ年の区切りとする。

地震に代表される被害想定のは、減災目標の設定と目標達成のための対策検討に資することであり、そのために想定ハザードに対する被害評価がマクロ的には国（中央防災会議、以下内閣府とも記載）が、また各地方においては地方公共団体（都道府県、市町村）が実施し、結果が公表されている。しかし、想定されている被害内容・公開情報は減災対策検討に十分なものであるだろうか。その検証は十分になされているとは言えな

い。たとえば南海トラフ巨大地震の被害想定第一次報告（平成24年8月29日、中央防災会議）には、被害想定 の意義として以下要約するに「具体的な被害を算定し被害の全体像を明らかにすること、その上で各種の防災対策を立案する」とある。さらに続けて「防災対策を講ずることによる具体的な被害軽減効果を示すことで、防災対策を推進するための国民の理解を深める」とある。すなわち、被害想定と被害軽減効果は別途計算し、国民の対策への理解を求めることが被害想定 の目的であり意義と謳われている。本研究はここに異議を唱え、本来あるべき被害想定 の目的とそのための被害想定方法を提案し、それを胆振東部地震の被害実態と検証することで、中央防災会議が提唱する被害想定 の標準方法が抱える問題点を明らかにしたことを、この3カ年の成果として以下にその概要を報告する。

(i) 災害誘因予測に基づく被害想定が災害軽減に貢献する情報足る条件

本来、具体的軽減対策はその対策実施による被害軽減量を被害想定手法により算定し、対策の有無による被害量の差をもってその効果評価とし、その基で対策の適否判断がなされるべきである。そのプロセスを省略し軽減効果として公表したとしても、真にそれだけの効果があるのかの検証が得られていない故に、国民の納得は得られないであろう。この理由から、被害想定手法は対策の効果評価が可能な形で考慮されていなければならないのは明らかである。すなわち、被害量を単に見積もるだけの相関モデルではなく、対策の手段が「陽」の形で検討可能な因果モデルで構成される必要があるが、標準の想定手法として中央防災会議が提示している手法はその条件を十分に満たしていると言えるのであろうか。加えて、モデルの基となる被害データ（公表値）は地域被害及びその後の対策（復旧）の実態を捕まえた量であるのは当然であるが、意外とその検討はされていないことに気づくべきである。

(ii) 想定地震と2018年北海道胆振東部地震とのハザード比較

北海道は地震防災対策の基礎調査資料として、2011年に道内及び周辺に31 地震193 パターンの地震動分布を、その6年後に平成28年度地震被害想定調査結果報告を公表している。胆振東部地震に震源位置が最も近似している想定地震は石狩低地東縁断層帯南部（モデル30_5）と称するものである（図27右）。震源諸元を比較すると両者の震源形状は大きく異なり当該地震は想定震源ではない。また道内で観測された計測震度を想定地震の自治体単位最大震度と比較すると（図27左）、想定地震の方が大きな震度を与えている。よって、被害が広域に及ぶ土木系被害の検証には十分とは言えないが、厚真・安平・むかわの被災3町については胆振東部地震とほぼ同じ震度が計算されており、地震動を1指標（震度あるいはPGV）で代表し被害計算するのが一般的な単独被害（木造住家被害や人的被害）の検証には3町の被害比較は問題なく、災害誘因予測の意義を災害対策と結びつける検証にもなろう。

(iii) 木造住家の被害比較と対策に必要な情報について

当該地震の被災3町の木造住家についての公表被害実数と、想定地震を対象に内閣府の方法と北海道の方法による被害数比較を表1に示す。内閣府の想定手法は阪神・淡路大震災の被災地の住家築年代と被害率の関係を用いて計算する(図28)。一方、北海道の方法は当該地域の住家の耐震性能のばらつきを加味するため耐震診断値(耐震評点)を確率分布で与え、岡田・高井(2004)による損傷度関数(震度-耐震評点-損傷度の関係)を

用い、より詳細なDamage Index (D-Index) またはDamage Level (D-Level) による損傷度評価を行っている(図28)。胆振東部地震の被害実数との比較は、地域性の考慮のない内閣府の方法に比べ、北海道は実態に近い被害評価を与えており、木造住家の被害想定には地域性(住家耐震評点の実分布)の考慮の重要性が確認できる。

さらに、必要な住家被害情報について注目したいのは実被害の判定基準である。実被害の実態公表値となる災害対策本部発表の「全壊」の定義は、「居住のための基本的機能喪失が床面積の70%以上、または経済的被害の損害割合が50%以上」とされており、罹災証明の判定基準にほぼ等しい。それに対し被害想定は一般に建築構造的損傷度により判断するものであり、両者は乖離している(図28)。表1からは当該地震の公表被害実数で厚真町が他2町よりも大きい。3町で1981年以前の古い木造住家割合はそれぞれ55%・48%・61%であり、構造耐震性に然程の差は認めがたく、同表に併記した罹災証明で認定された被害率からも、厚真町は構造損傷よりもむしろ復旧に関わる経済的損傷の観点から被害認定した可能性は否定できない。罹災証明による被害認定は、その後の復旧助成に大きく関わることから、地域復旧の遅速にも影響することが予想される。それが発端となり集落消滅など地域の将来的社会構造から都市再生マスタープランにまで影響する。実際、当該地域は他の地震(中越、九州地方)に比べ、全半壊住家共に「再建」の費用工面ができず、罹災証明による被害判定で応急修理助成が受けられる「補修」で対応する世帯が多かった事実が、その後の調査により判明している(図29、岩崎・他、2020)。災害対策の観点からは、被害想定には構造的被害に加え復旧に関わる被害認定の指標も同時に検討する重要性を指摘しておきたい。なお、住家被害損傷度(D-Index)は罹災証明の判定区分とも相性が良い(図28)。

(iv) 人的被害の比較と対策に必要な情報について

住家被害に伴う人的被害についての手法比較を図30に示す。内閣府の方法は近年発生の5地震に関する全壊建物棟数と死者数の相関関係から求めるものである。阪神・淡路大震災で判明したとおり、全壊といえども層崩壊しない建物(D-Level D4)では死者は殆ど発生しない。北海道が採用している建物損傷度D-Index (D-Level) に基づく棟死亡率関数による人的被害評価法(田畑・岡田、2006)のほうがより精度が高い。死傷者の実数比較(表2)においても内閣府の方法では負傷者の全員が重傷者にカウントされており不自然であるが、北海道は実数と想定に乖離は認められない。

人的被害情報についても、これまで議論の中心とされてこなかった被害定義の問題を指摘しておく。災害対策本部が公表値として集計する死傷者の定義は、交通事故統計あるいは警察出動有無判断で用いる傷度3区分(死/重傷/軽傷)にほぼ近い。すなわち、当該災害が原因で死亡した者(または死亡したことが確実な者)を、災害発生時に滞在していた市町村の死者として扱い、負傷し1ヶ月以上の治療を要した者を重傷、1ヶ月未満を軽傷とする。しかし、この数値が防災対策に活用されていない実態に留意すべきである。本来災害時においては医療態勢に関わる情報がより重要なはずであり、消防庁(災害救急)で用いる症度(重症/中等症/軽症)で判断すべきであろう。平常時においては入院加療を要する中等症であっても、大災害時においては二次救急病院における重症患者措置を必要としない判断もある。症度情報は傷度情報と同様に人的被害情報として必要である。この情報は事前の医療防災対策の観点からも重要であり、想定被害情報としても有効な

はずである。このことに配慮できる外傷重症度指標ISS(またはAIS)評価を推奨する。本研究では当面、内臓損傷($ISS \geq 12.5$ または $AIS \geq 4$)以上を重症とする。医療処置は必要だがより症度の軽い火傷・捻挫・脱臼・単数骨折程度($12.5 > ISS \geq 3$ または $4 > AIS \geq 2$)を中等症とする(図31)。

もう一つの問題は被害実数の信憑性である。重軽傷者の定義の曖昧さに加え、対策本部が把握し公表している負傷者数は災害対策本部基準によれば、災害時において救急医療チームが当該自治体の第二次救急病院に搬送した負傷者のみをカウントしているケースが多く、災害発生時に居留の市町村負傷者数から漏れてしまうこともあるということである。事実、当該地震において厚真町の公表重傷者はゼロであるが、足部骨折により他市の病院に救急搬送され入院加療1ヶ月以上を要した重傷者がいた。当研究グループが被災3町全世帯を対象に実施したアンケート調査による負傷者数を集計し表2中に示す。公表値に比べアンケートでは他市町病院に入院した重傷患者をも捕捉しており、負傷率に不自然さはない。被害データ(公表値)は、種々の評価式構築のための基礎となる値であり、この値に信憑性がなくなると被害評価そのものの信頼性が失われ由々しき事態となる。公表値といえどもデータの収集法、また定性的データの場合はその尺度の定義を含め、細心の注意が必要である。

(v) シナリオ連鎖型被害評価法の提案

南海トラフ巨大地震被害想定報告書には「建物の現状の耐震化率(約8割)を約9割まで上げることによって、全壊棟数は約4割減少すると推計される」との記載がある。また「家具等の転倒・落下防止対策の実施率の現状は約26%であり、実施率を75%に強化した場合、それによる死者数は約半減すると推計される」とある。しかし内閣府の被害推定手法によりこの軽減効果を合理的に説明するのは不可能である。なぜなら、同手法では住家の建築年をパラメータとした被害推計であり、耐震化強化策による耐震性能向上を陽の形で検討はできないし、家具固定もその実施率強化が対策ではあるものの、推定式内での実施率とは何らかの固定対策を実施している世帯割合であり、世帯による固定家具数の違いについては何の配慮もなく、実質的家具固定率ではない。

人的被害は建物倒壊に伴う部材落下によるもの、それに加えて室内の家具配置密度(これは地域性や世帯年代、加えてライフスタイルが強く反映する)に大きく左右される室内散乱状態下における居住者の避難行動の適否(これは地震発生時間帯が大きく影響する)、家具等との接触状態など、種々の物理的条件とその時間展開の中で発生する。これらを被害推定式で因果関係として記載し、さらに先に提案の被害指標に従った被災状態推定により、始めて具体的軽減対策情報となり対策の効果評価も可能となる。内閣府と北海道の方法比較において胆振東部地震の被害検証を通して北海道の有意性を明らかにしたところではあるが、まだ不十分であることがこれからも明らかであろう。図32~34は住家と人的被害に関するそのための被害想定手法の提案である(岡田・中嶋, 2018)。

この被害想定手法で計算した結果は表2中の最右列である。ハザードは想定震度分布ではなく、胆振東部地震のQuiQuake分布を用いたため想定被害と直接比較はできない。また、負傷者数は多少多く推定されているが、その理由を提案式から検討した。推定に用いるパラメータは「揺れている最中の負傷非回避行動能力 $(1-B) = 100\%$ (回避行動は全くとれなかったとした)」と「家具配置密度に関わる家具転倒領域率 $R = 15\%$ (全国消

費実態調査報告の北海道の平均値を採用)」としたが、実際には被災3町の寝室の家具転倒領域率がそれぞれでかなり小さかった(11.8%・7.2%・13.2%)ことが理由に挙げられ、このように室内状況の地域性も検討可能となる(図35)。

「文化遺産の所在情報と災害情報の重ね合わせによる文化遺産災害情報マップの構築と活用[課題番号:CT0C29]」について、令和3年度は、北海道・東北地方の市町村が指定する文化財、総数約18000件の位置情報を収集し、文化遺産マップへの登録作業を進めた(図36)。市町村指定文化財については、自治体別に公開の有無、情報の詳細が異なり、位置情報の把握が困難なものも多く、位置情報が判明しないものについては、周辺情報や座標情報を収集し、これらを登録した。現段階で、国指定・都道府県指定の指定文化財35000件に、今年度収集した情報を加えた約5万件のデータベースを収集し、eコミマップをプラットフォームとした文化遺産マップを構築した。また、神戸大学の資料ネットと連携し、神戸市域の指定文化財を登録した文化遺産マップを作成した(図37)。

災害時における文化遺産マップの活用については、令和4年1月22日に発生した日向灘の地震について、気象庁の発表した推定震度分布をもとに、大分県・宮崎県の国・県の指定文化財に加え、震度5強を観測した自治体の指定文化財情報を収集し、現地の資料保全関係者に共有するとともに、1月26日に被災地の資料保全ネットワークや現地の博物館関係者などとオンラインによる会議を開催し、文化遺産マップ(図38)を媒介として、被害状況の情報共有と今後の対応について協議した。

「ばらつきを考慮したハザード想定結果の「受け取られ方」に関する評価研究[課題番号:CT0C30]」では、地震ハザードシナリオに多様性、さらには多様な地震ハザードシミュレーションにおける自治体のシミュレーションの位置づけを示すことが可能なシステム(図39)についての自治体職員に対するヒアリング調査を実施し、システム改良点ならびに、システムを用いた災害シナリオの多様性の理解についての調査を行い、調査結果をもとにシステムの改良を行うとともに、災害シナリオの多様性理解を深めるためのあり方についての検討を行う予定であった。しかし、新型コロナウイルスの影響でインタビュー調査を実施することが困難であったため、システムの改良の作業を行うとともに、ヒアリング時に利用する内閣府による地震動想定を表層での速度シミュレーション結果についての見直しを実施した。

これまでの課題と今後の展望

これまでの地震・火山観測研究計画では、地震や火山噴火の発生の予測を最大の目標とし、それにより地震や火山噴火による災害の軽減を目指してきたが、災害の軽減への貢献が限定的であることから、前計画から地震・火山噴火災害をもたらす誘因の予測研究を新たに組織的・体系的に進める方針に転換した。このため、地震学や火山学を中核としつつも、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの分野の研究者が参加して、協働して推進することになり、主に全国の工学、人文・社会科学の分野の研究者が拠点間連携共同研究を推進してきた。

拠点間連携共同研究の重点推進研究は、「巨大地震のリスク評価の不確実性に関する

パラダイム構築の推進」を主要テーマとして推進し、総括研究において震源から被害予測及びそのステークホルダまでの伝達までを一貫して行い、さらにステークホルダとの協働の成果をフィードバックすることで、研究の方向性を議論している。また、総括研究において見いだされた課題や新たな展開を特定型において掘り下げて詳細に検討するとともに新しい技術や考え方について検討し、その成果を総括研究にフィードバックし、さらに総括研究で新たに出た課題を特定型で掘り下げる、という循環により研究の高度化を目指している。

今後は、重点推進研究の中での循環による研究を進めることと並行して、一般課題型研究で提案され、実施されてきた研究課題による成果や手法などを取り込む枠組みを構築することで、災害の軽減に貢献するための研究を高度化しながら継続し、高度化した成果を供出することを目指す。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のみならず、工学、人文・社会科学の研究の発展に必要な観測計画の立案が必要になると考えられる。

成果リスト

- Chimoto, K., H. Yamanaka, S. Tsuno, M. Shigefuji, T. Kanno, H. Sato, S. Higashi, D. Shinoyama, M. Yoshimi, T. Sugiyama, N. Takai, S. Matsushima, F. Nagashima, H. Kawase, T. Hayakawa, T. Uetake, S. Senna, Y. Inagaki, T. Hayashida, and S. Oji, 2021, Results of blind prediction step 1: Subsurface velocity structure model of Kumamoto test site, The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, SS102.
- Fukui, N., Chida, Y., Zhang, Z., Yasuda, T., Ho, T.-C., Kennedy, A., & Mori, N., 2022, Variations in Building-Resolving Simulations of Tsunami Inundation in a Coastal Urban Area, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 148(1), doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000690.
- 福井信気, 森信人, 千田優, 安田誠宏, 2021, 都市地形を対象とした津波浸水時の陸域の流速場の比較検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 77(2), I_211-I_216, https://doi.org/10.2208/kaigan.77.2_I_211.
- 福井信気, 森信人, 千田優, 安田誠宏, 2021, 都市地形を対象とした津波浸水時の陸域の流速場の比較検討, 第68回海岸工学講演会.
- Ho, Tung-Cheng, 2021, What we learned from the 2011 Tohoku Tsunami that unveils the 1960 Chile Earthquake, The 30th International Tsunami Symposium, e90130.
- Ho, T-C., Satake, K., Watada, S., and Fujii, Y, 2021, What we learned from the 2011 Tohoku Tsunami that unveils the 1960 Chile Earthquake., The 30th International Tsunami Symposium.

- Ho, T., Satake, K., Watada, S., Hsieh, M., Chuang, R. Y., Aoki, Y., Mulia, I. E., Gusman, A. R., & Lu, C., 2021, Tsunami Induced by the Strike - Slip Fault of the 2018 Palu Earthquake (Mw=7.5), Sulawesi Island, Indonesia, *Earth and Space Science*, 8(6), doi.org/10.1029/2020EA001400.
- 小林純平・中嶋唯貴・岡田成幸, 2021, 夜間発生地震に対する人体損傷度関数の適合性並びに応用拡張性の検討, 第48回地域安全学会研究発表会(春季), C-9.
- Kusakabe, Ryota, Tsuyoshi Ichimura, Kohei Fujita, Muneo Hori, Lalith Maddeggedara, 2022, GPU-accelerated Multiphysics-based Seismic Wave Propagation Simulation and its Surrogate Model with Machine Learning, HPC Asia 2022: The International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region.
- Maki, N., T. Baba, K. Nishijima, T. Saeki, S. Shite, 2021, How can we communicate with people about variety of hazard simulation outputs? shaking and tsunami of Nankai trough earthquake, 17th World Conference on Earthquake Engineering, N° C001878.
- Matsushima, S., H. Yamanaka, S. Tsuno, H. Sato, and Y. Inagaki, 2021, Results of borehole survey at the target site of ESG6 blind prediction exercise and laboratory tests, The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, SS101.
- 松島信一・吾妻崇・市村強・野澤貴・中山智貴・中嶋唯貴, 2022, 邑知潟平野の推定地盤速度構造の非線形地盤応答を考慮した強震動予測, 拠点間連携共同研究実施報告書(研究実績報告書).
- Miyashita, Takuya, 2021, Estimation of tsunami response functions considering bathymetry in the pacific coast of Japan, The 30th International Tsunami Symposium, e90039.
- 中山智貴・松島信一, 2022, 邑知潟平野の地盤構造推定とそれを用いた強震動予測に関する研究, 京都大学防災研究所令和3年度研究発表講演会, B118.
- 中山智貴・松島信一, 2021, 常時微動を用いた邑知潟平野の地盤構造推定, 日本地震工学会・大会-2021, B-4-7.
- 宮下卓也・倉田一輝・安田誠宏・森信人・志村智也, 2021, 確率津波モデルを用いた南海トラフ巨大地震による津波高の不確実性評価, 土木学会論文集B2(海岸工学), 77(2), 1_181-1_186, https://doi.org/10.2208/kaigan.77.2_I_181.
- 宮下卓也, 倉田一輝, 安田誠宏, 森信人, 志村智也., 2021, 確率津波モデルを用いた南海トラフ巨大地震による津波高の不確実性評価, 第68回海岸工学講演会.
- Miyashita, T., Mori, N., and Ho, T-C., 2021, Estimation of Tsunami Response Functions Considering Bathymetry in the Pacific Coast of Japan, The 30th International Tsunami Symposium.
- 岡田成幸・中嶋唯貴・竹内慎一, 2021, 地震被害想定を検証 その2 一対策に必要な人的被害情報とその評価法-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 21024.
- 岡田成幸・中嶋唯貴・岩崎祥太郎・竹内慎一・松島信一・三宅弘恵, 2022, 北海道胆振東部地震からみえた地震被害想定情報の新たな課題, 令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会, B119.
- 大西正光, 2021, 大量軽石火山灰降下からの事前広域避難体制確立に向けた実践的研究, 2021年度桜島大規模火山噴火総合研究グループ研究集会.

- 齊藤隆志, 2022, 地震前後の地表変位から考えられる斜面崩壊・地すべりの発生メカニズム, 京都大学防災研究所令和3年度研究発表講演会, D101.
- 菅沼亮輔, 宮下卓也, 森信人, 志村智也, 2022, 南海トラフ地震を対象とした津波および強振動被害の複合評価, 令和3年度防災研究所研究発表講演会.
- 竹内慎一・岡田成幸・中嶋唯貴・森松信雄・宮内淳一・長瀬拓也・齊藤隆典・戸松誠, 2021, 北海道胆振東部地震の被害を考慮した木造被害率関数の検討 ―その1 地震被害情報による被害率関数のベイズ更新―, 第94回日本建築学会北海道支部研究発表会, No. 112.
- Tsuno, S., H. Kawase, H. Yamanaka, S. Matsushima, T. Iwata, T. Hayakawa, T. Ikeura, S. Noguchi, and K. Kaneda, 2021, Results of blind prediction step 2: Simulation of weak motions observed at the Kumamoto test site, The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, SS103-BP2.
- Tsuno, S., H. Kawase, H. Yamanaka, S. Matsushima, T. Iwata, T. Hayakawa, T. Ikeura, S. Noguchi, and K. Kaneda, 2021, Results of blind prediction step 3: Simulation of strong motions observed at the Kumamoto test site, The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, SS103-BP3.
- 山中浩明・津野靖士・地元孝輔, 2021, 熊本地震の強震動のブラインド予測, 日本地震工学会誌, 第43号.
- 山中浩明, 津野靖士, 重藤迪子, 神野達夫, 高井伸雄, 松島 健, 2021, 2016年熊本地震の強震動ブラインド予測の岩盤サイトにおけるS波速度構造探査, 物理探査学会第145回(2021年度秋季)学術講演会, 63-65.
- Yamanaka, H., S. Tsuno, M. Shigefuji, T. Kanno, K. Chimoto, T. Matsushima, and S. Matsushima, 2021, Temporary strong motion observation around kumamoto test site for blind prediction of strong ground motion, The 6th IASPEI / IAEE International Symposium: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, GS5-P36.

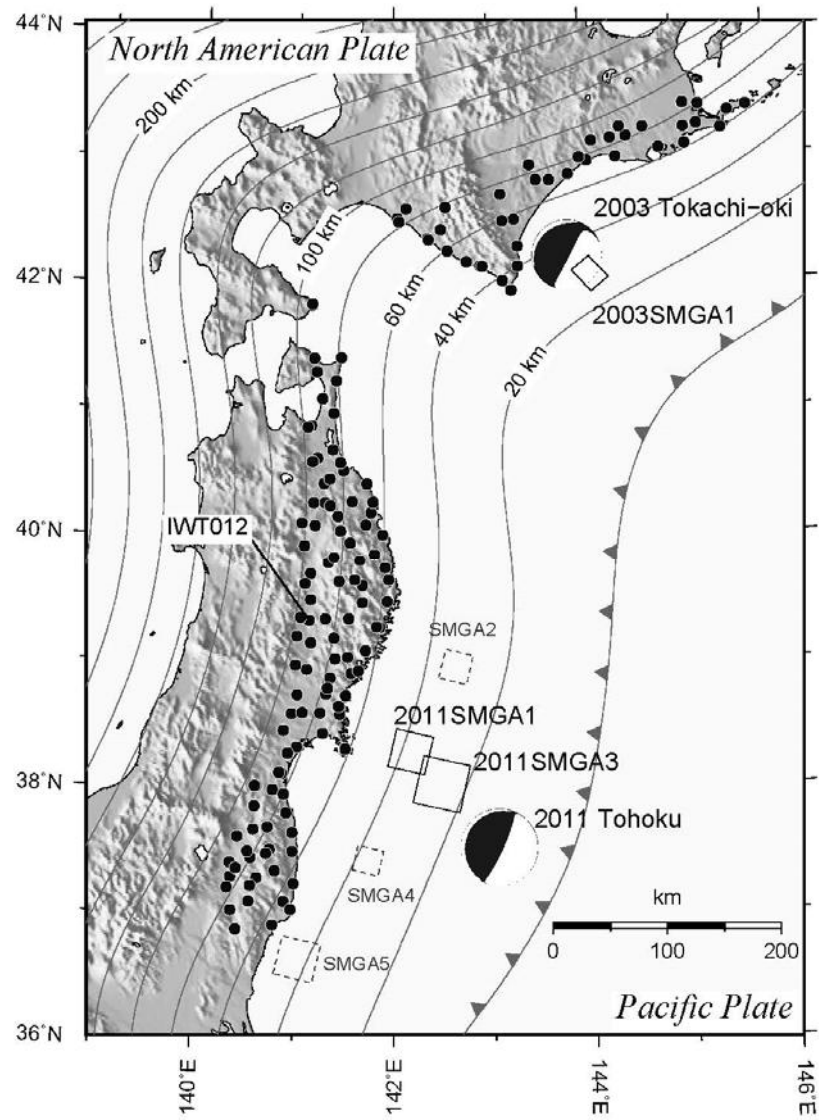
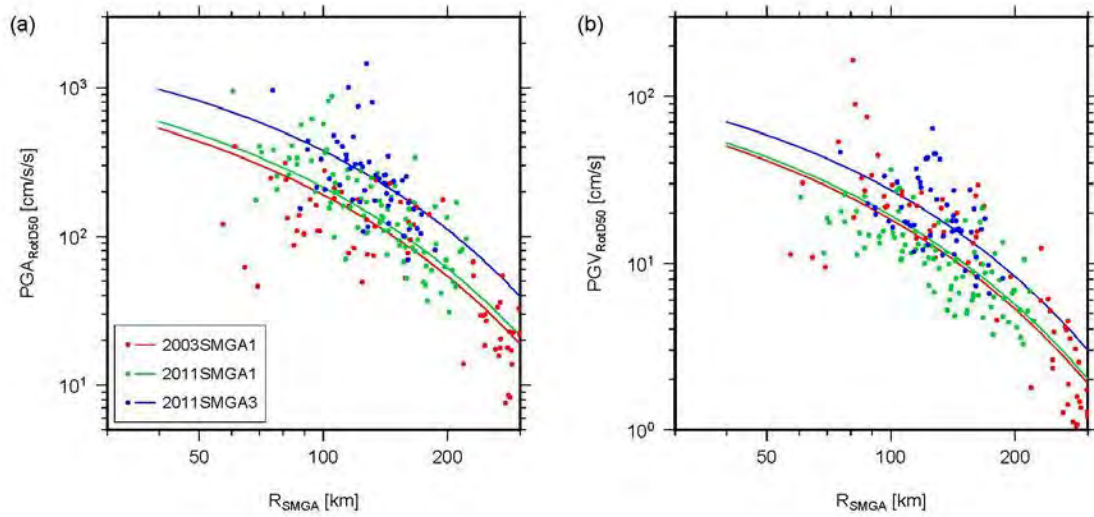
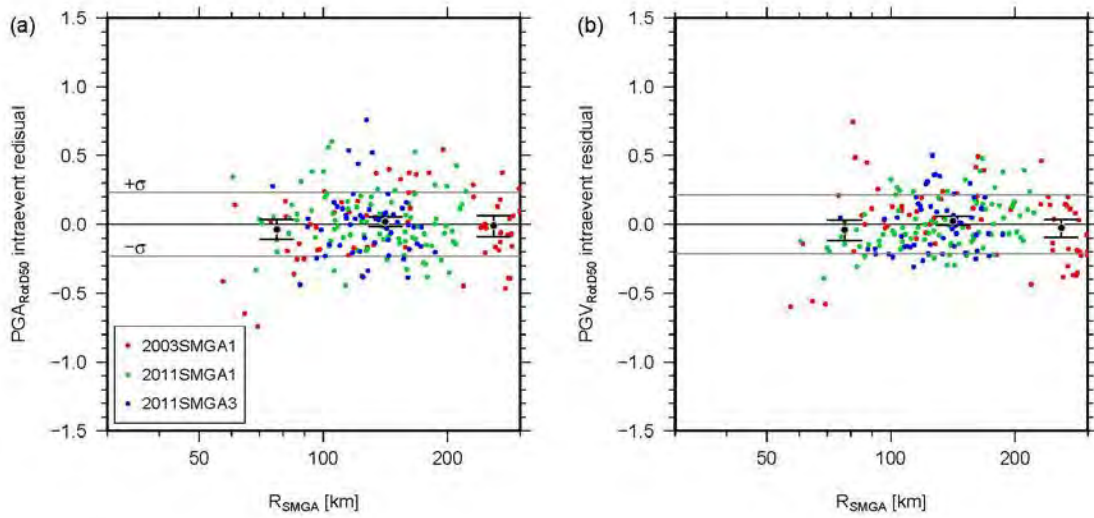


図 1 . 2003年十勝沖地震と平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の強震動生成域と解析に用いた観測点位置



(a) RotD50の最大加速度 (PGA) (左) とRotD50の最大速度 (PGV) (右)



(b) RotD50のPGAのinter-event残差 (左) とRotD50のPGVのinter-event残差 (右)

図 2. 強震動生成域に特化した地震動の距離減衰式 [課題番号: CT0C01]

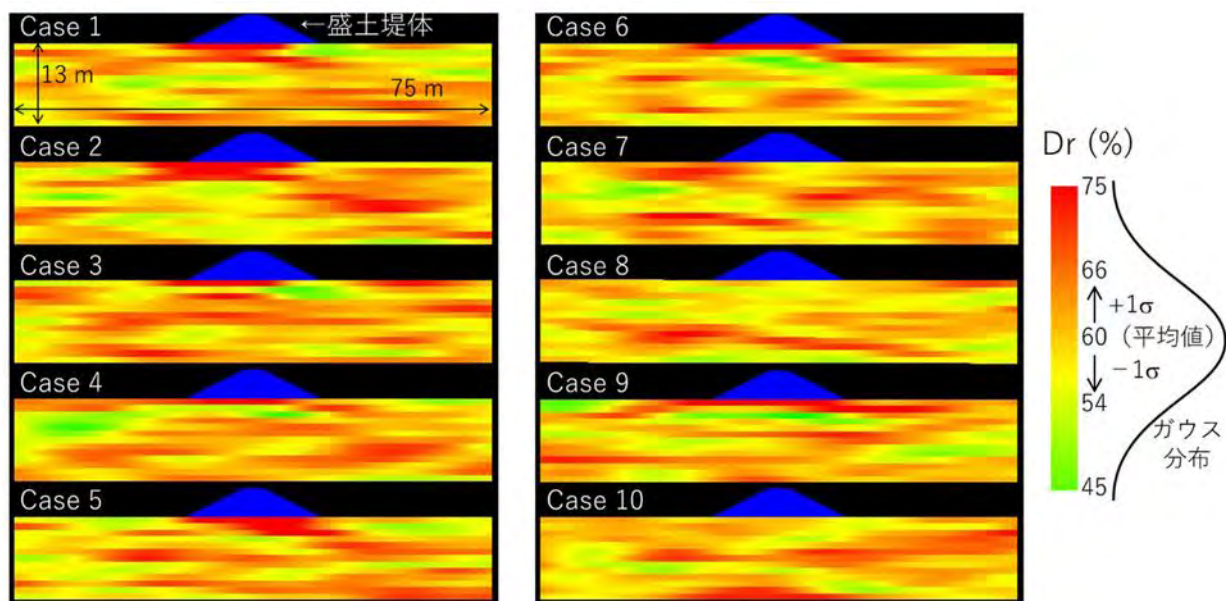
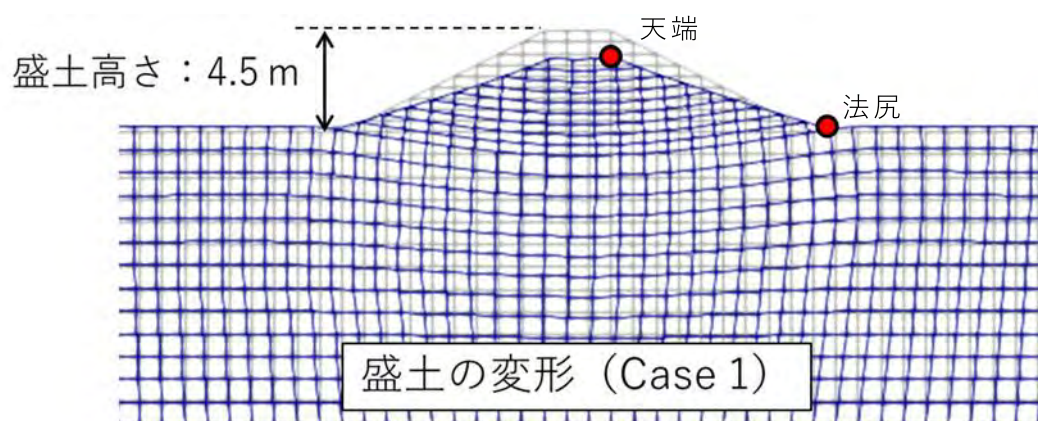
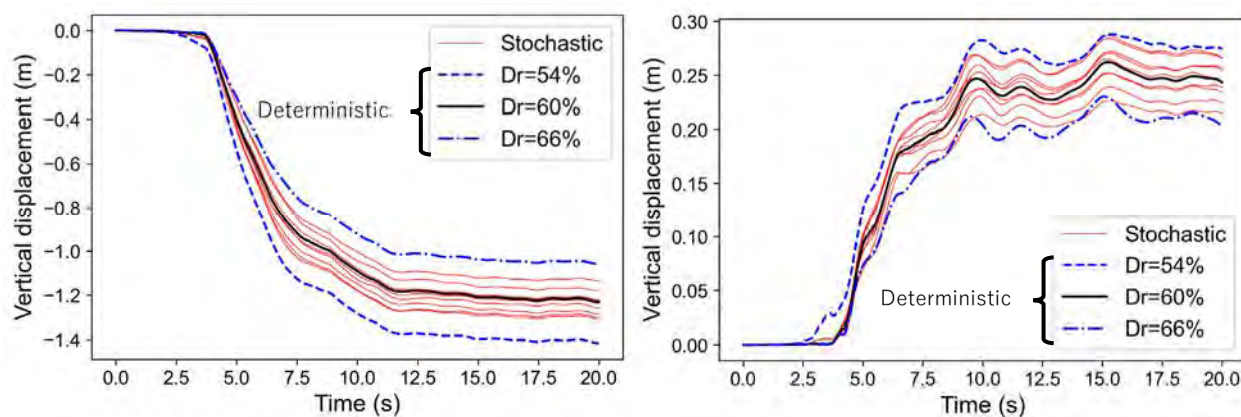


図 3．基礎地盤における相対密度（Dr）の空間的不均質性 [課題番号：CT0C01]



(a) 盛土および基礎地盤の変形の例



(b) 盛土の天端（左）と法尻（右）での沈下量

図 4．基礎地盤における相対密度の空間的不均質性を考慮した場合と平均値±標準偏差の確定的な相対密度を用いた場合の盛土沈下量 [課題番号：CT0C01]

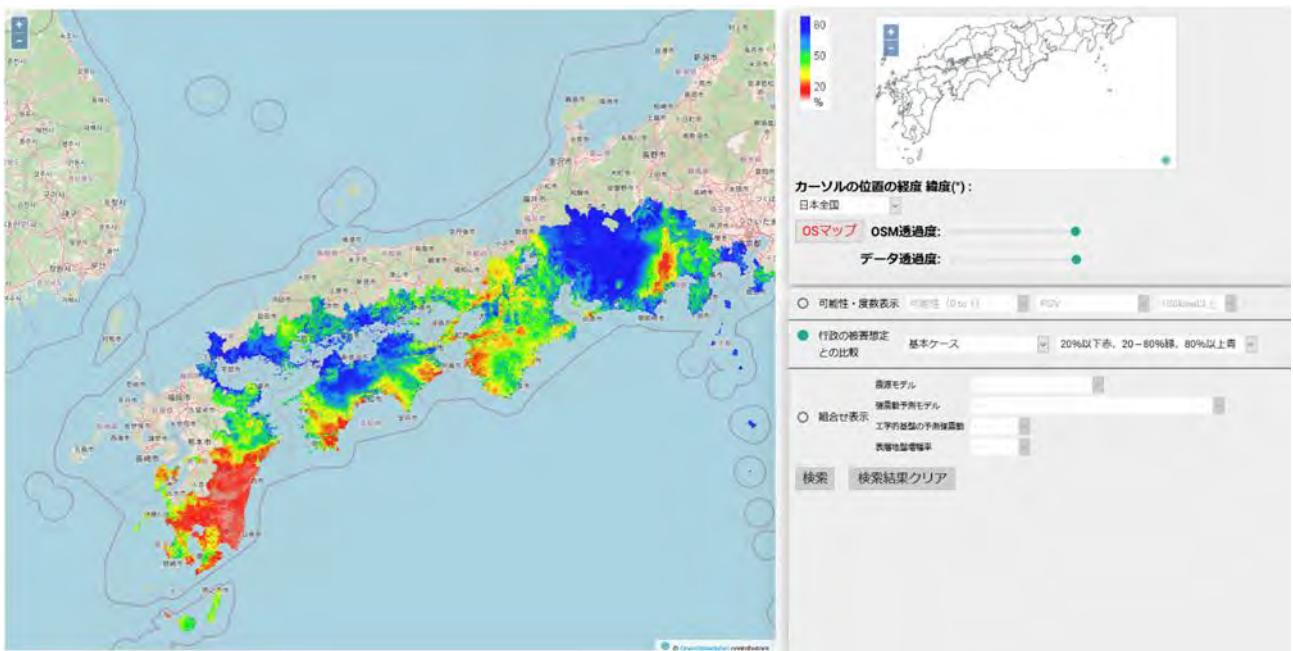


図5．南海トラフ地震の地震動評価のばらつき評価の試行（基本ケース）〔課題番号：CT0C02〕

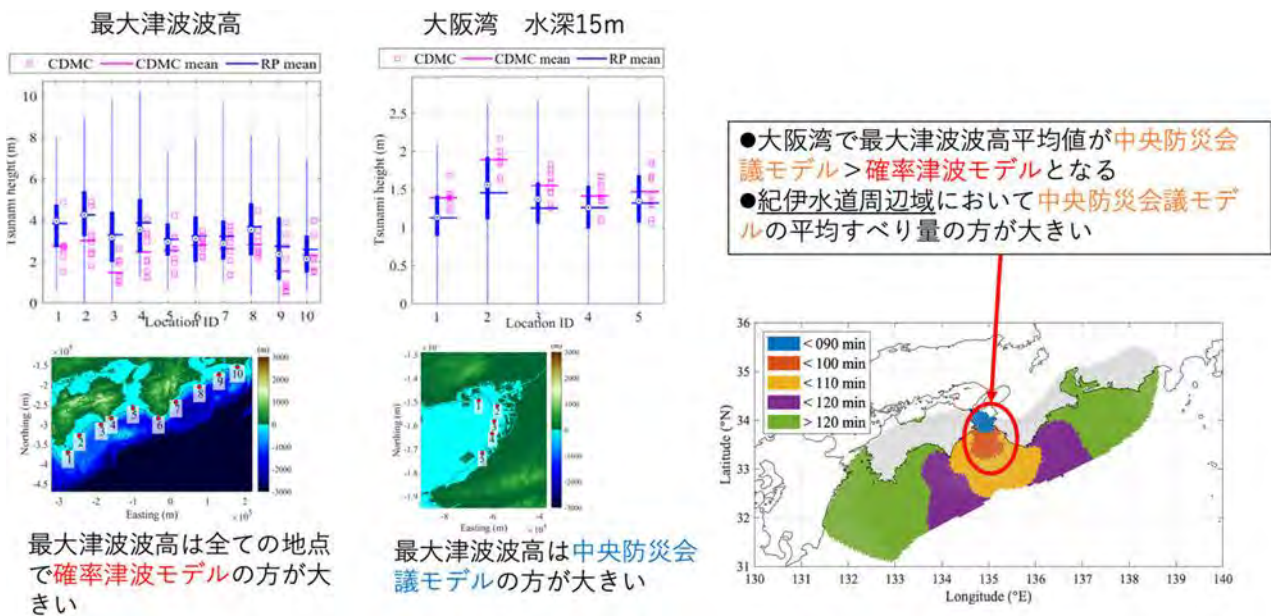


図6．京大防災研グループが開発しているランダムにすべり分布を生成する確率津波モデルと、内閣府中央防災会議モデルの2種類の津波高の特性の比較〔課題番号：CT0C04〕

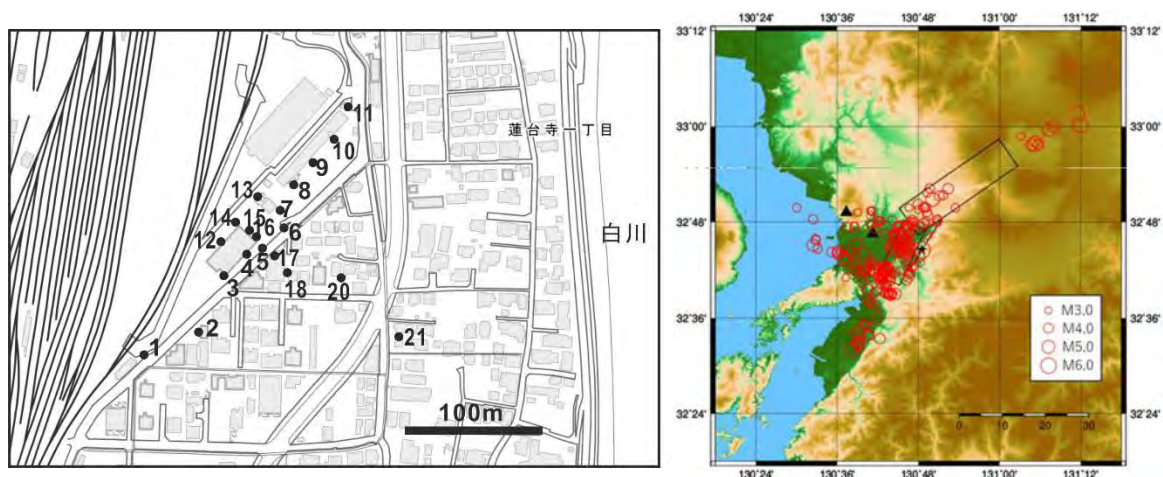


図 7. 臨時観測点の位置（左）と観測された地震の震央（右） [課題番号：CT0C07]

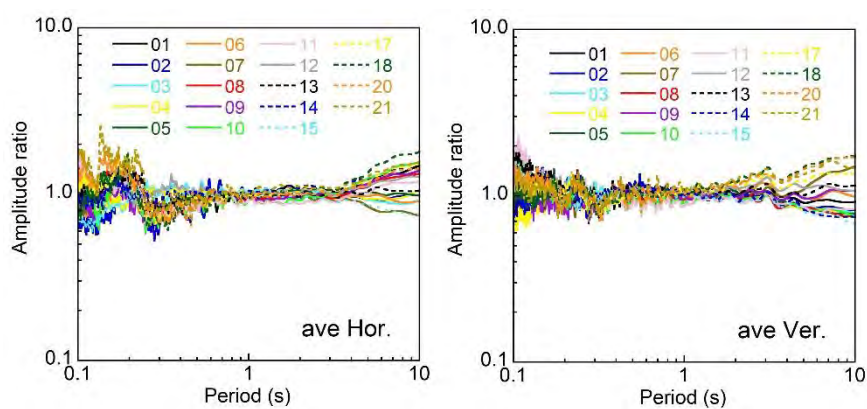


図 8. 観測点16に対する水平（左）および上下（右）成分のスペクトル比 [課題番号：CT0C07]

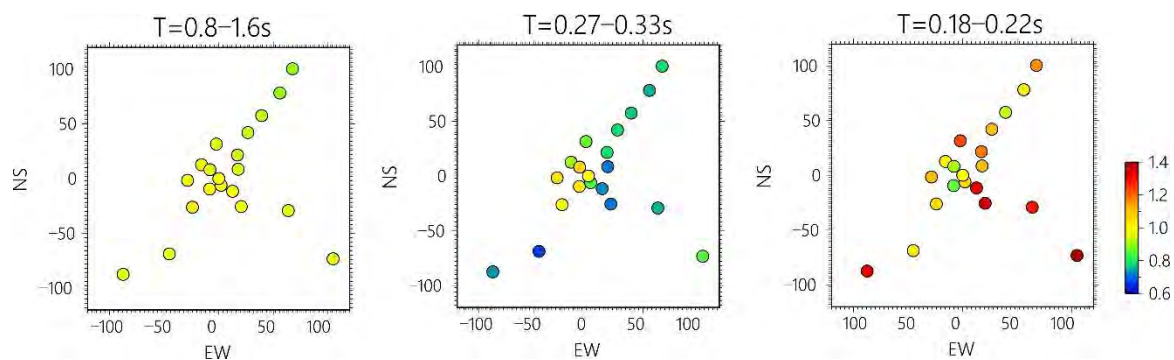


図 9. 周期毎の水平成分のスペクトル比の分布 [課題番号：CT0C07]

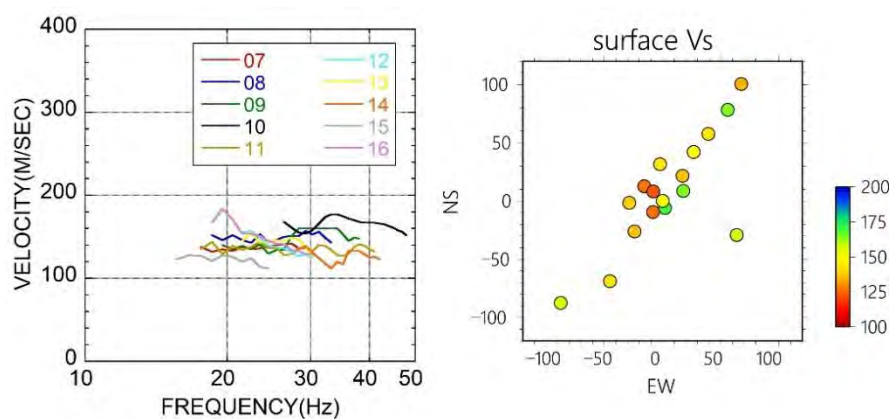


図10. 各観測点での表面波探査の結果 [課題番号：CT0C07]

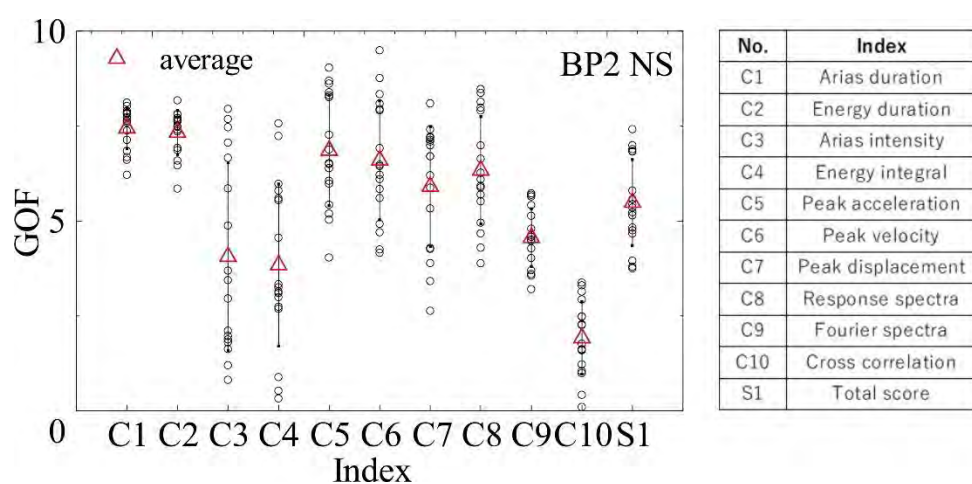


図11. ESG6での強震動のブラインド予測 (BP2) の結果の定量的評価 [課題番号：CT0C24]

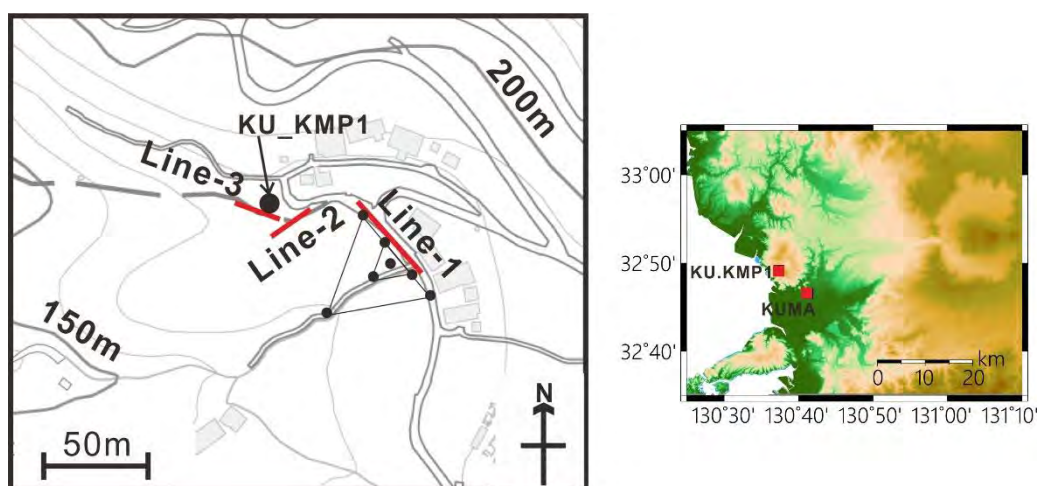


図12. 表面波探査を実施した3測線とアレイ微動観測地点 (左) と岩盤サイトKU.KMP1とテストサイトKUMAの位置関係 (右) [課題番号：CT0C24]

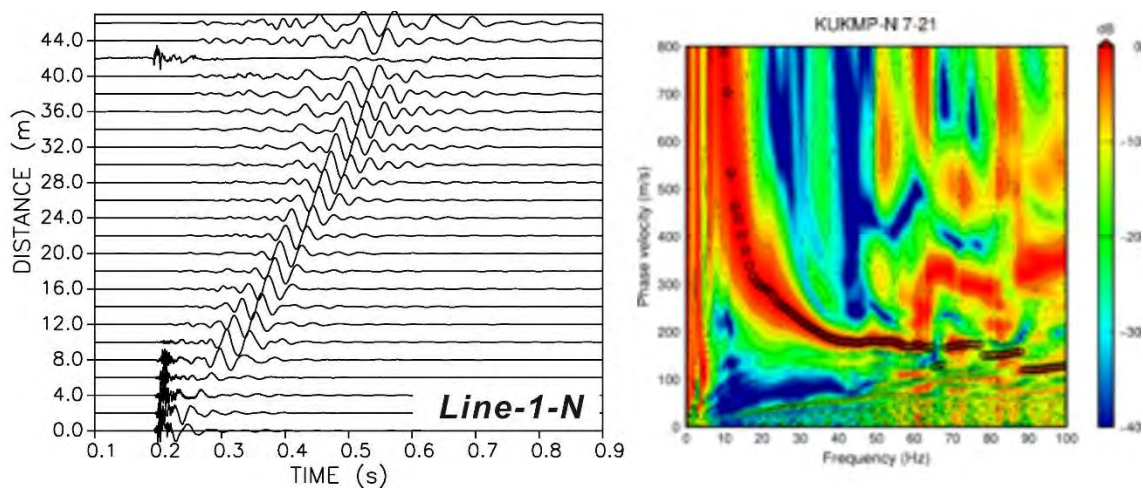


図13. 測線1の北側での加振による上下成分の速度記録（左）とビームフォーミング解析により得られた位相速度（右）〔課題番号：CT0C24〕

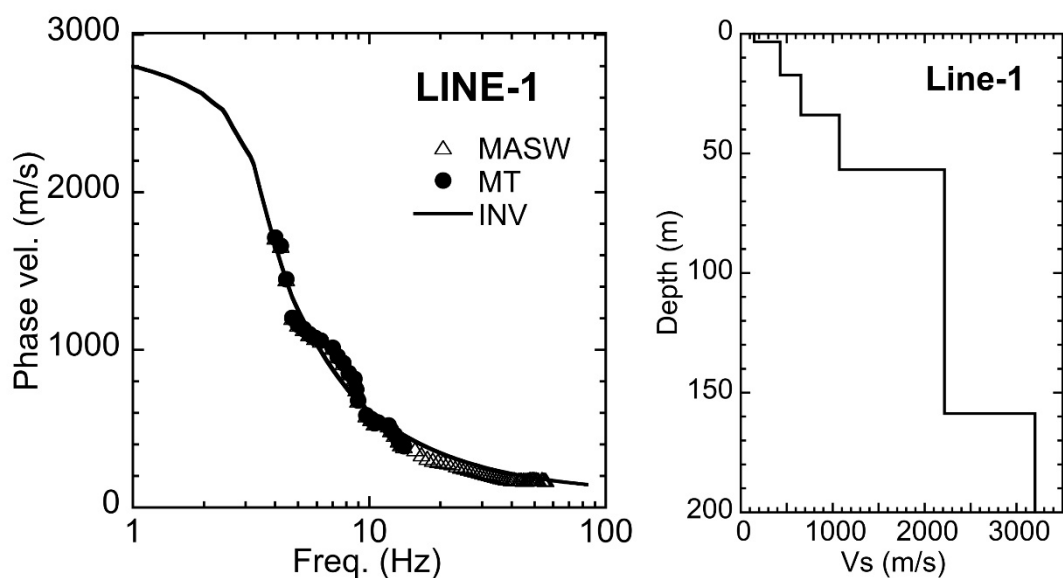


図14. 岩盤サイトでのレイリー波の位相速度（左）と逆解析されたS波速度構造モデル（右）〔課題番号：CT0C24〕

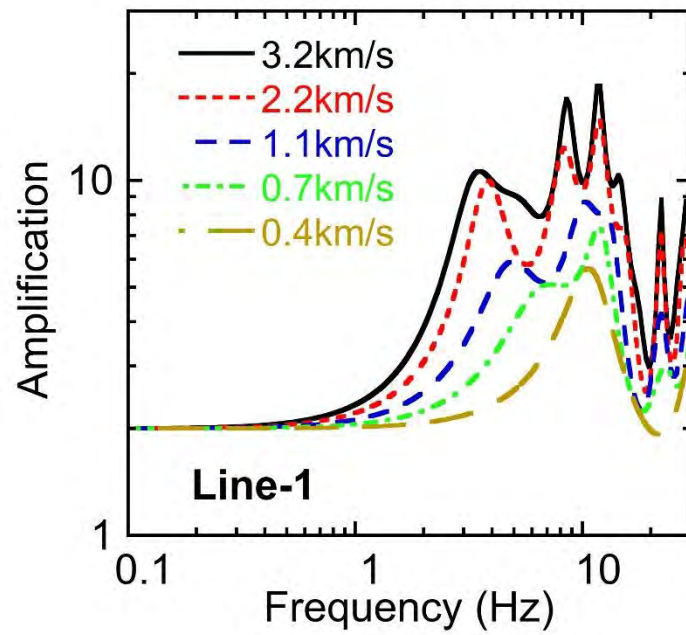


図15. 岩盤サイトの地下構造モデルの最下層を変えた場合の増幅特性 [課題番号: CT0C24]

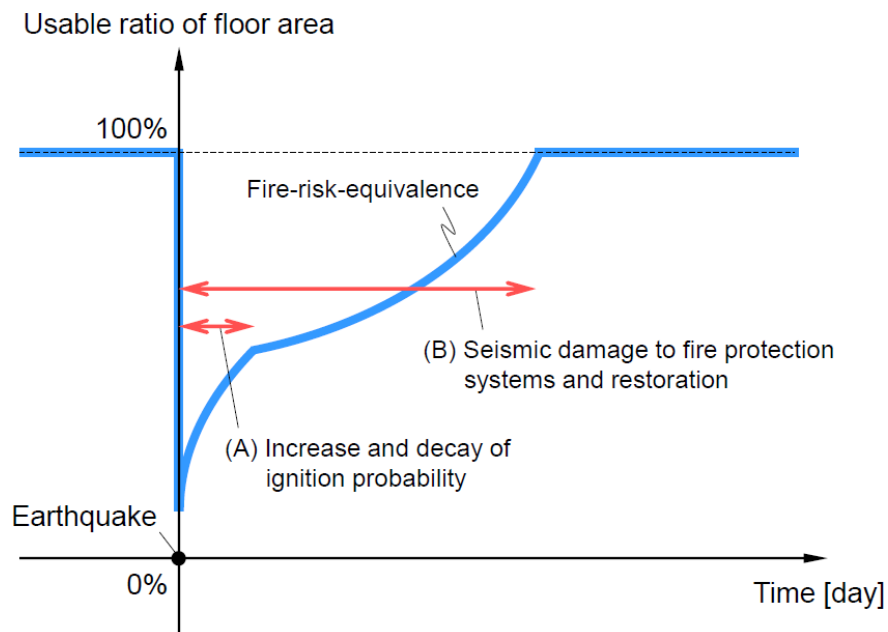


図16. 火災リスクの観点からの地震レジリエンス評価の概念 [課題番号: CT0C25]

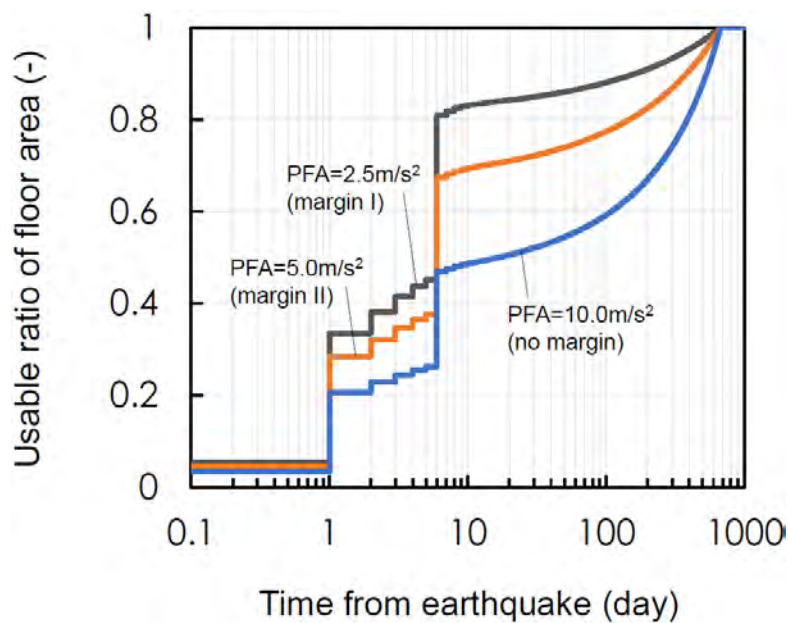


図17. 計算例 [課題番号 : CT0C25]

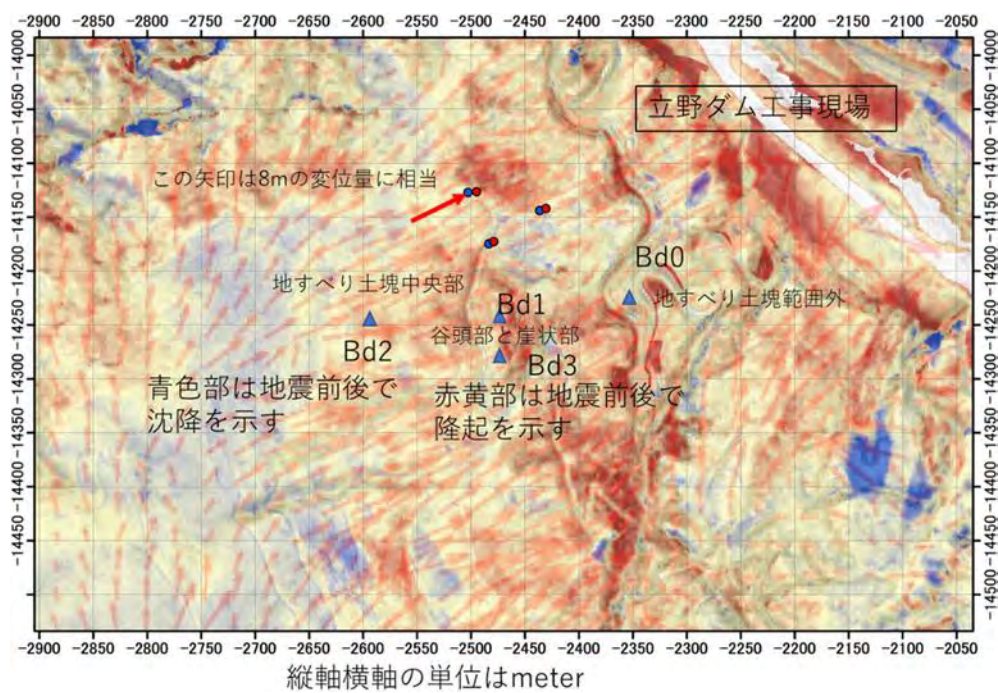


図18. 熊本立野地区の地震前後PIVによる地表変位および観測点など [課題番号 : CT0C26]

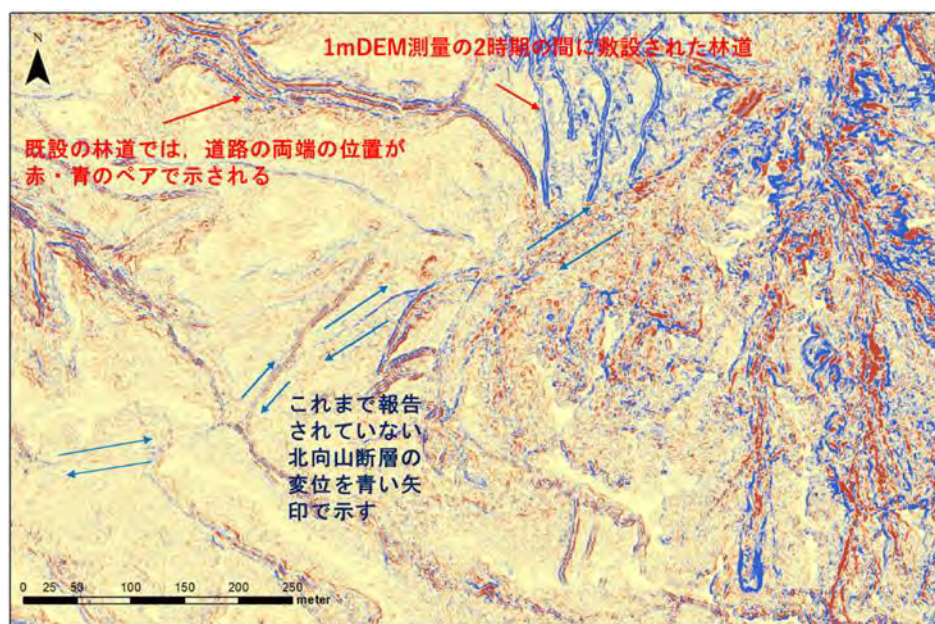


図19. 本手法で検出された地表変位（北向山断層）[課題番号：CT0C26]

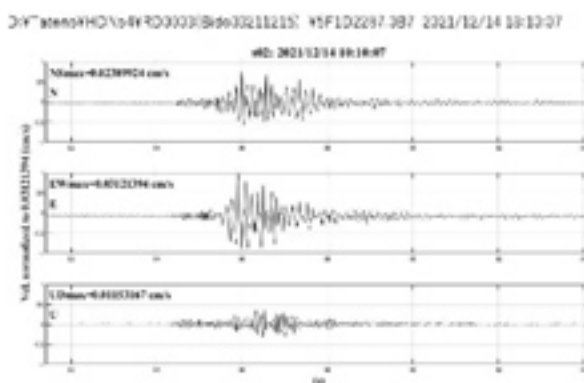


図20. 地震動観測で得られた波形例 [課題番号: CT0C26]

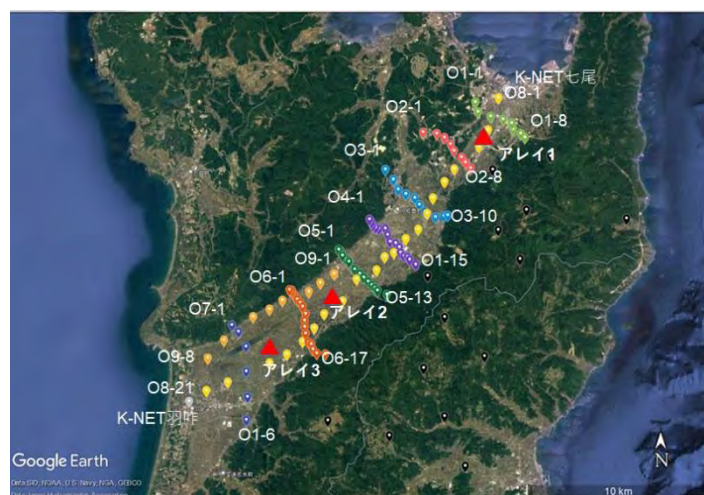


図21. 微動観測点配置（Google Mapに加筆） [課題番号：CT0C27]

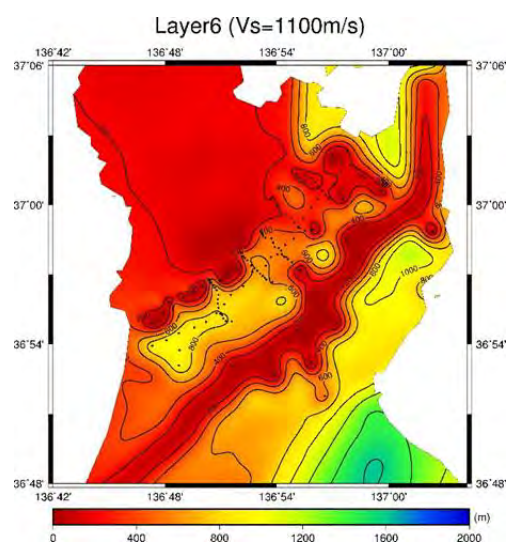


図22. 推定地盤構造モデル ($V_s=1100\text{m/s}$ 上面深さ) [課題番号: CT0C27]

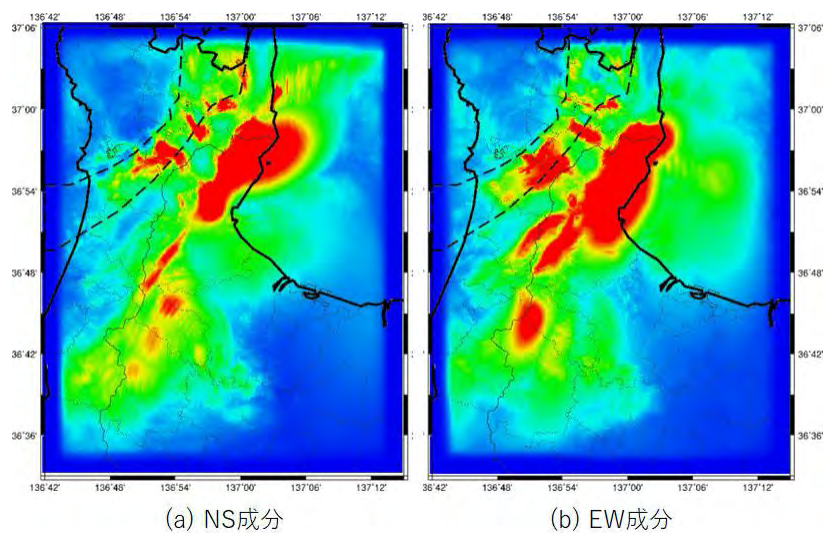


図23. 邑知潟断層帯の想定地震ケース2によるモデル最上面最大速度分布 [課題番号: CT0C27]

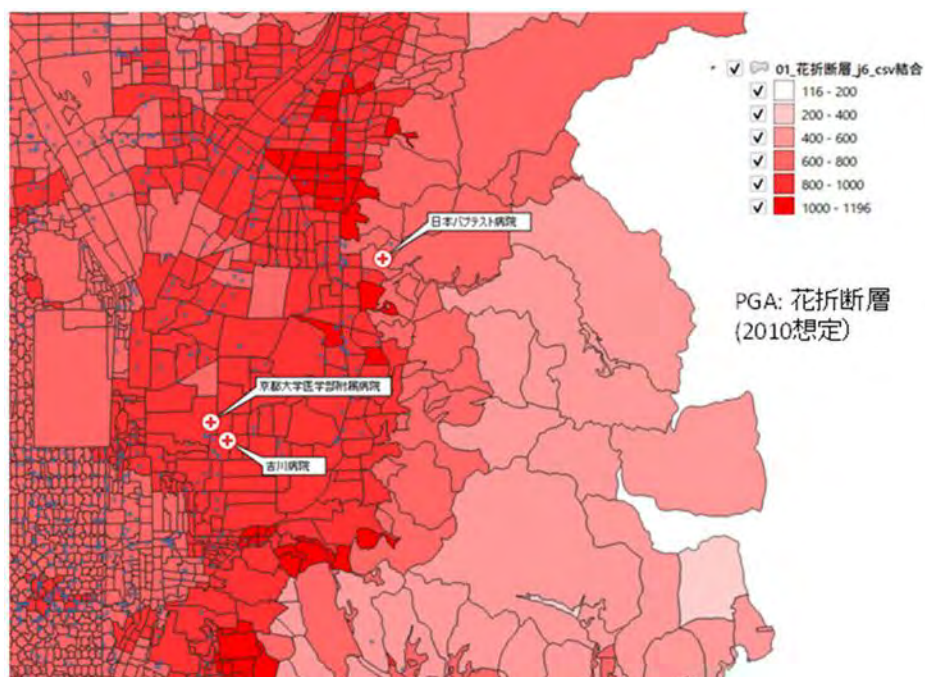


図24. 観測中の医療施設 [課題番号 : CT0C23]

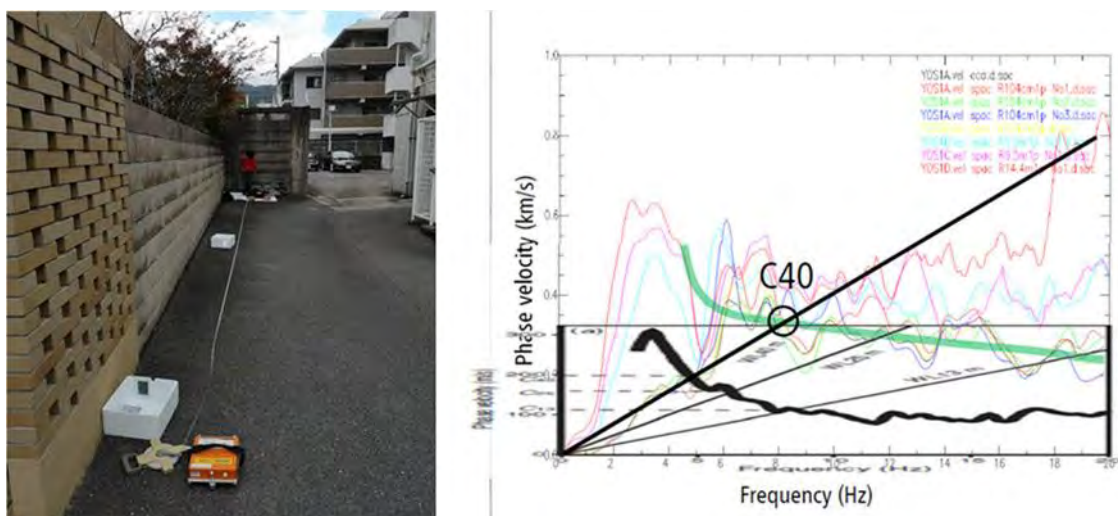


図25. 吉川病院の微動観測と地盤位相曲線 [課題番号 : CT0C23]

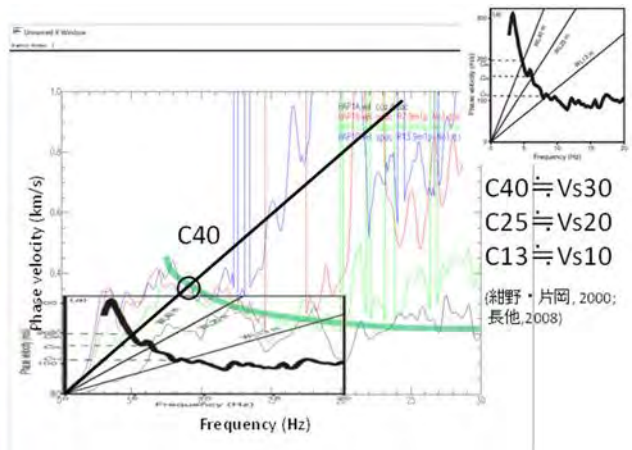


図26. 日本バプテスト病院の微動観測と地盤位相曲線〔課題番号：CT0C23〕

表 1. 木造住家に関する想定地震と
胆振東部地震との比較
〔課題番号：CT0C017〕

被害種別	被害		想定地震		胆振東部地震		
	程度	対象地域	北海道	内閣府	公表被害実数 全世帯アンケート 住人判定	罹災証明	
木造住家	全壊数 (全壊率)	厚真町	196棟 (10.40%)	1,014棟 (53.82%)	235棟 (12.47%)	(7.04%)	(10.26%)
		安平町	175棟 (5.90%)	1,219棟 (41.09%)	93棟 (3.13%)	(2.31%)	(2.53%)
		むかわ町	174棟 (5.19%)	1,405棟 (41.93%)	40棟 (1.19%)	(1.91%)	(0.64%)
	半壊数 (半壊率)	厚真町	284棟 (15.07%)	459棟 (24.36%)	335棟 (17.78%)	(4.90%)	(15.90%)
		安平町	333棟 (11.22%)	838棟 (28.24%)	366棟 (12.34%)	(2.93%)	(12.10%)
		むかわ町	398棟 (11.88%)	1,015棟 (30.29%)	186棟 (5.55%)	(2.80%)	(5.52%)

表 2. 人的被害に関する想定地震と
胆振東部地震の比較
〔課題番号：CT0C017〕

被害種別	被害		想定地震		胆振東部地震		
	程度	対象地域	北海道	内閣府	公表被害実数	全世帯アンケート 換算値	提案手法 非回避行動率1.0
住家被害に伴う人的被害	死者数 (死者率)	厚真町	5人 (0.11%)	10人 (0.21%)	0人 (0%)	0人 (0%)	5人 (0.11%)
		安平町	4人 (0.05%)	12人 (0.15%)	0人 (0%)	0人 (0%)	7人 (0.09%)
		むかわ町	4人 (0.05%)	13人 (0.16%)	0人 (0%)	0人 (0%)	3人 (0.04%)
	重傷者数 (重傷者率)	厚真町	4人 (0.09%)	32人 (0.69%)	0人 (0%)	0人 (0.00%)	20人 (0.43%)
		安平町	7人 (0.09%)	53人 (0.65%)	7人 (0.09%)	4.7人 (0.06%)	33人 (0.40%)
		むかわ町	8人 (0.10%)	67人 (0.80%)	27人 (0.32%)	4.3人 (0.05%)	14人 (0.17%)
	軽傷者数 (軽傷者率)	厚真町	64人 (1.37%)	0人 (0%)	61人 (1.31%)	19.9人 (0.43%)	241人 (5.17%)
		安平町	66人 (0.81)	0人 (0%)	10人 (0.12%)	32.6人 (0.40%)	463人 (5.66%)
		むかわ町	80人 (0.95%)	0人 (0%)	250人 (2.98%)	60.0人 (0.67%)	286人 (3.41%)
	2≦AIS<4 (中等症)	厚真町	0人 (0%)	0人 (0%)	0人 (0%)	0人 (0%)	0人 (0%)
		安平町	0人 (0%)	0人 (0%)	0人 (0%)	0人 (0%)	0人 (0%)
		むかわ町	0人 (0%)	0人 (0%)	0人 (0%)	0人 (0%)	0人 (0%)

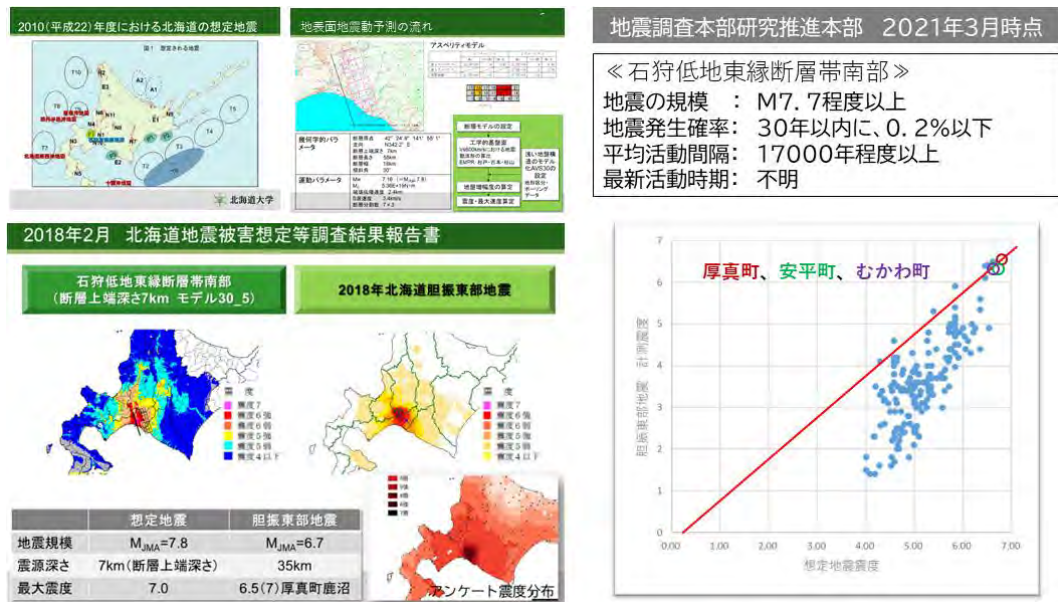
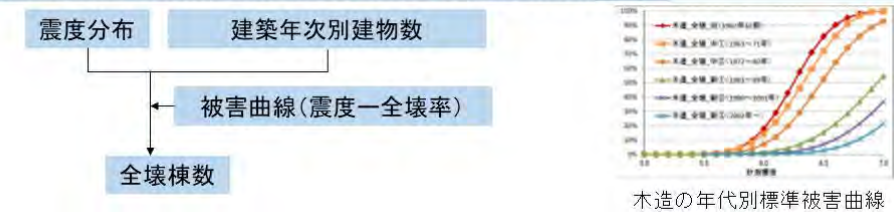


図27. 北海道の想定地震と2018年北海道胆振東部地震の震源及び市町村震度比較 [課題番号: CT0C017]

■内閣府の標準的方法(南海トラフ巨大地震被害想定、2019)



■北海道独自の方法

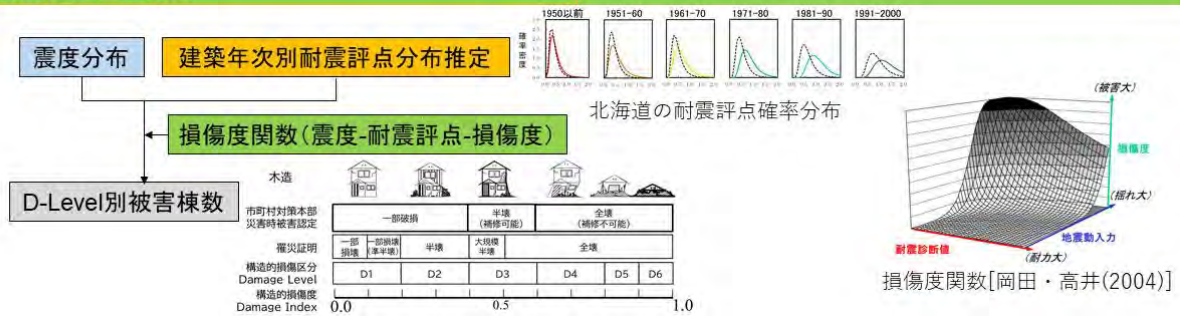
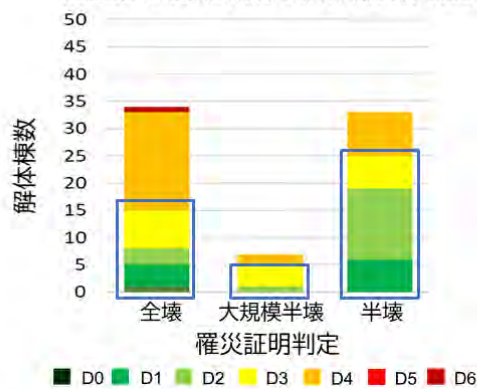


図28. 木造住家被害想定手法の比較 [課題番号: CT0C017]

胆振東部地震における解体撤去の状況



その後の再建(新築)状況の比較

調査地区	罹災証明	解体率	補修率	再建率
2004年 新潟県中越地震	全壊	72%	28%	23%
	半壊	93%	7%	83%
2007年 能登半島地震	全壊	86%	14%	67%
	半壊	20%	80%	67%
2016年 熊本地震	全壊	99%	1%	28%
	半壊	83%	12%	31%
2018年 北海道胆振東部地震	全壊	60%	34%	30%
	半壊	21%	77%	42%

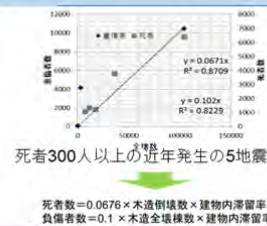
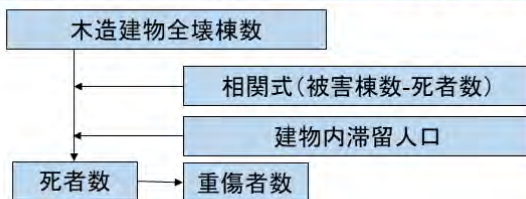
この地域の特徴

- 構造被害が小さくても(D0～D3)、全壊判定されるケースがある。
- 構造被害が小さくても、解体撤去するケースが多い。
- 撤去後の再建率が低く、その後町を離れるケースが多い。
- 全・半壊共に再建費用が工面できず、助成のある補修で対応する世帯が多い。

⇒世帯復旧には「罹災証明判定」が有用。対策に直接関与する被害認定基準の導入の必要性。

図29. 復旧と罹災証明の実態：地震後1～2年後の調査から [課題番号：CT0C017]

■内閣府の標準的方法(南海トラフ巨大地震被害想定、2019)



■北海道独自の方法

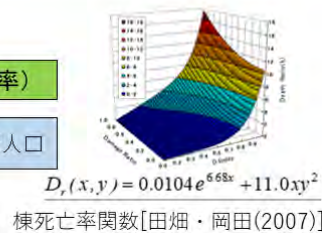
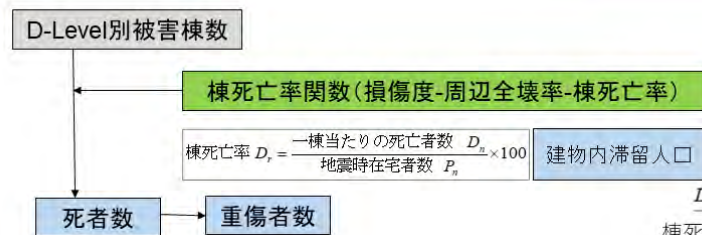
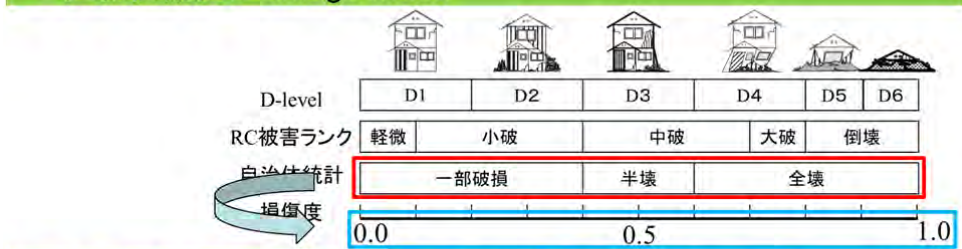
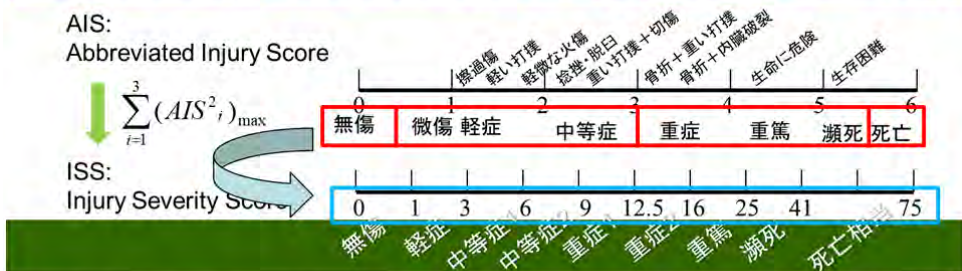


図30. 人的被害想定手法の比較 [課題番号：CT0C017]

■ 建物損傷度: Damage Index



■人体損傷度:多発性外傷重症度指標 Injury Severity Score (ISS)



⇒この指標によるシナリオ連鎖型評価式で減災対策の適否を検討

図31. 新たな被害指標の導入 [課題番号: CT0C017]

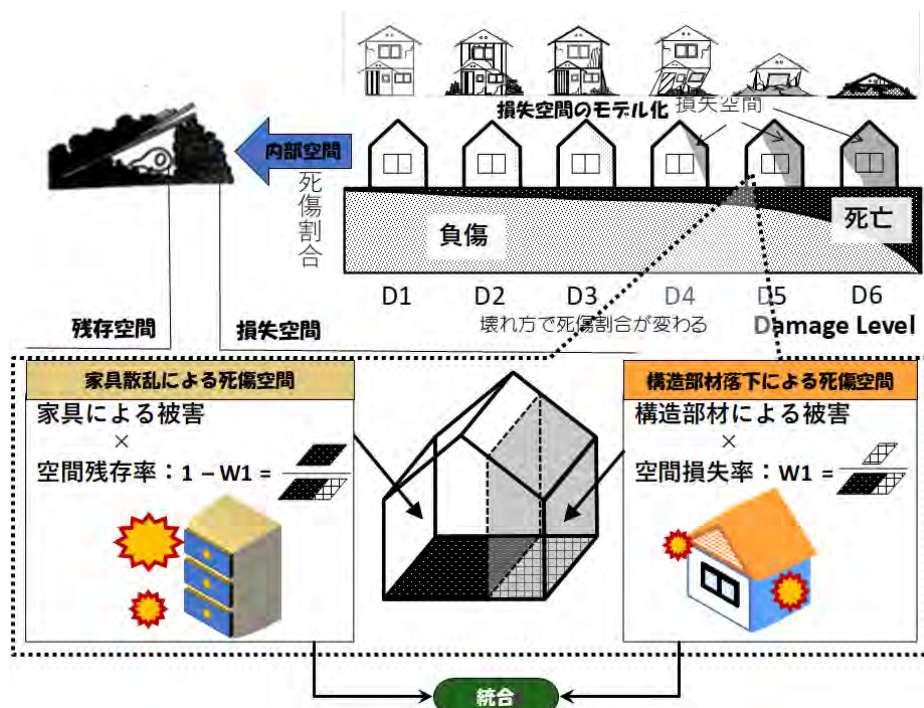


図32. 人的被害に結びつくシナリオ連鎖型（構造被害＋室内被害）統合式〔課題番号：CT0C017〕

建物損傷度別木造住宅内人的重症度分布(人)

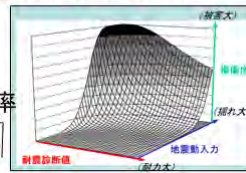
築年代分布・木造率でモデル化 ⇒ 地域内損傷度分布 ⇒ 地域内のISS値を確率分布

$$M_{ISS}(\theta) = \sum_{\Delta x=0.6}^{1.0} \sum_{I=0}^{7.4} M_f(I) \cdot P(I, \Delta x) \cdot W_{\Delta x} \cdot f''_{\Delta x}(\theta)$$

- $P(I, \Delta x)$: 岡田・中嶋の損傷度関数による損傷度 Δx の超過確率
- $M_f(I)$: 木造住宅内震度暴露人口
- $W_{\Delta x}$: 建物内部空間損失率(W値)
- $f''_{\Delta x}(\theta)$: 建物損傷度別ISS発生確率 ←
- (岡田・中嶋: 阪神淡路大震災のデータからベイズ更新)

〈計算時に参照するデータ〉

- ・ 人口分布: 総務省国勢調査(2015)
- ・ 震度分布: 各自治体想定(札幌市: 250m区画)
- ・ 木造率: 総務省住宅土地統計(～1950, 1951, 1961, 1971, 1981, 1991～)
- ・ 築年代分布(耐震評点分布): 総務省住宅土地統計(同上)



住家の損傷度関数
[岡田・高井(2004)]

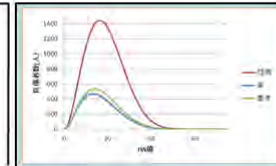
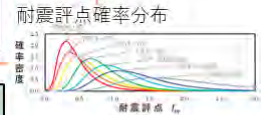
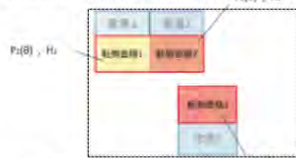


図33. 建物損失空間における構造物落下による人的被害の評価 [課題番号: CT0C017]

室内被害: 家具転倒による人的ISS分布(人)

■ 既往研究: 1世帯における家具転倒による人的ISS評価

(1) 家具転倒領域率による負傷確率(名知・岡田2007)



$$P_X(x=k) = {}_nC_k \cdot R_{tr}^k \cdot (1 - R_{tr})^{n-k}$$

(2) 家具転倒による人的ISS評価(岡田2011)

$$p(\theta|y) = k \cdot l(y|\theta) \cdot p(\theta) \\ = Be(a_0 + r, b_0 + n - r)$$

地域に拡張

■ 提案式: 地域の家具転倒による人的ISS評価

地域の世帯人員別の保有家具種類・家具数の平均モデル化

$$F_{I,T,U}(\theta) = \sum_{n=1}^6 \{P_{n,I}(\theta) \times U \times N_n(I) \times T\}$$

家具配置密度, 行動能力, 世帯人数, 地震時の在宅率

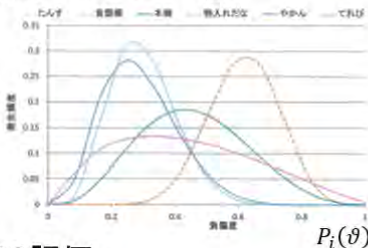


図34. 建物残存空間における人的被害想定式の構築 [課題番号: CT0C017]

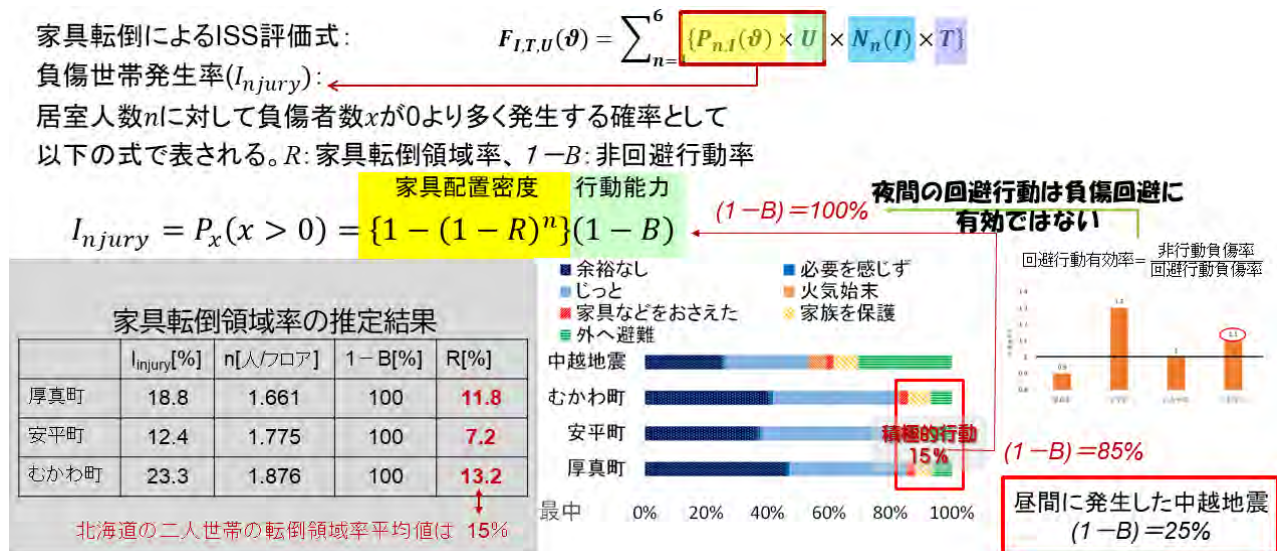


図35. 室内家具転倒による負傷確率算定式から【夜間でも負傷者が少なかった理由を】推測する [課題番号：CT0C017]

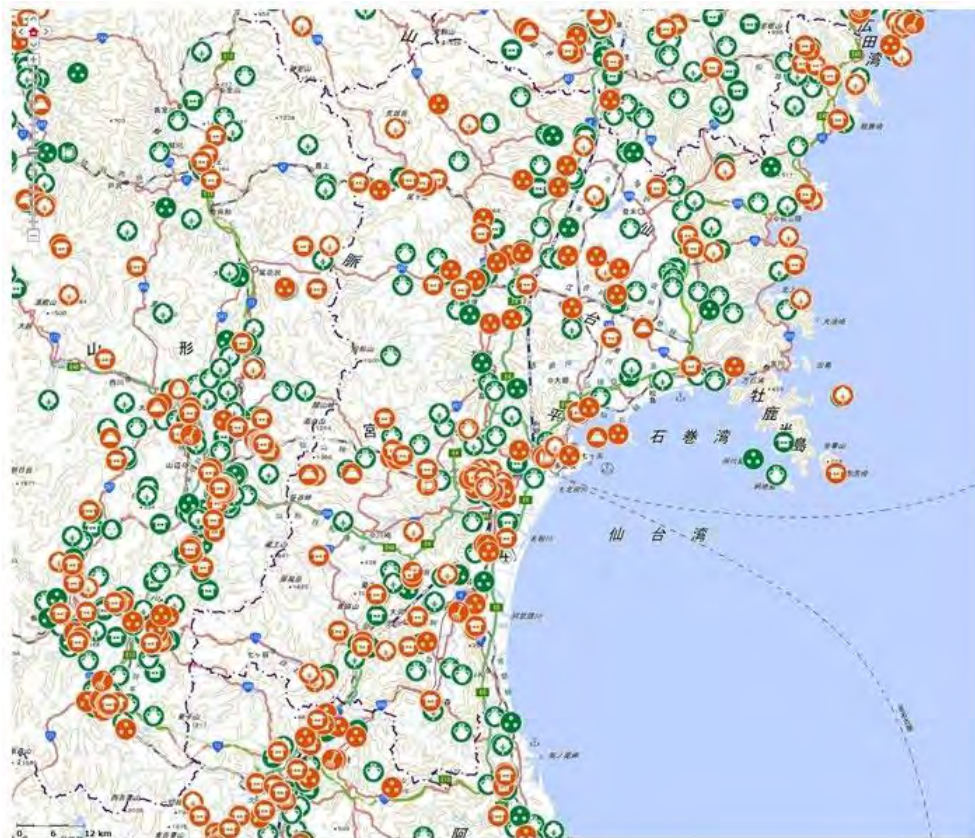


図36. 東北地方の文化遺産マップ [課題番号：CT0C029]



図37. 神戸市の文化遺産マップとハザード情報 [課題番号：CT0C029]

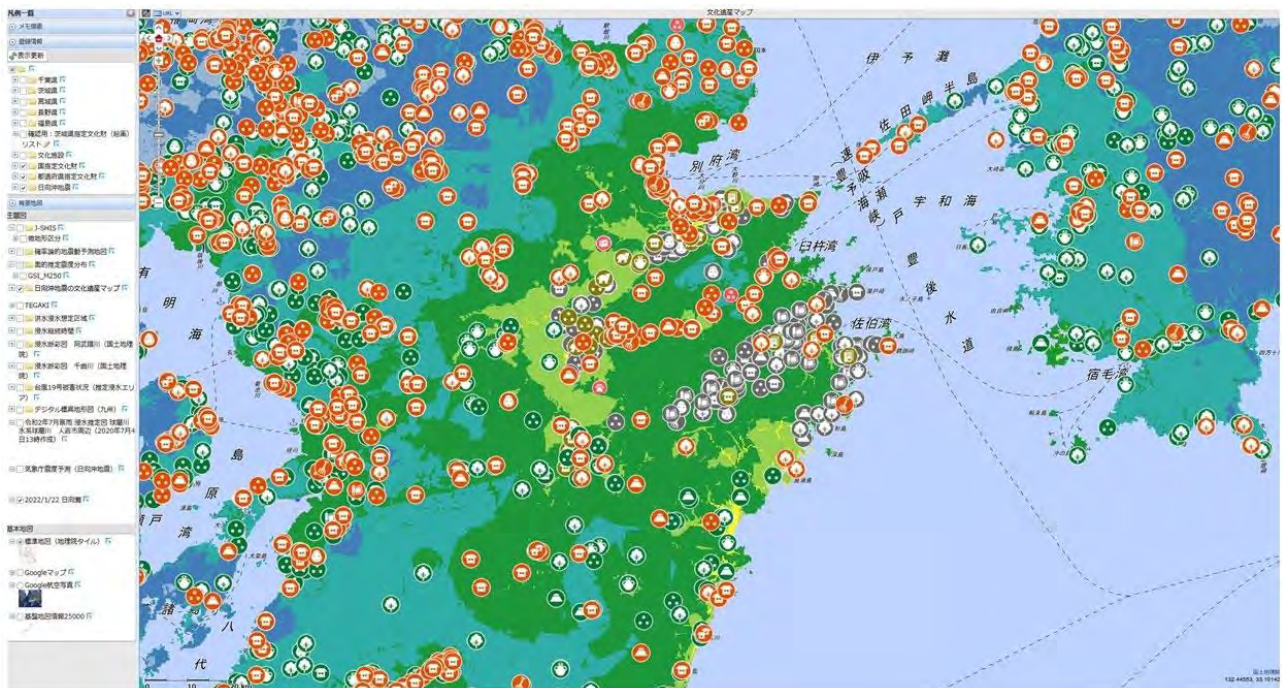


図38. 令和4年1月22日日向灘の地震に対応した文化遺産マップ [課題番号：CT0C029]



図39. 地震動推定結果のばらつき表示 [課題番号：CTOC030]

本表示は青が過小評価、赤が過大評価。赤が過小評価、青が過大評価という表示も可能