

3. 令和元年度の成果の概要

3-1 地震・火山現象の解明のための研究

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

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

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

ア. 史料の収集とデータベース化

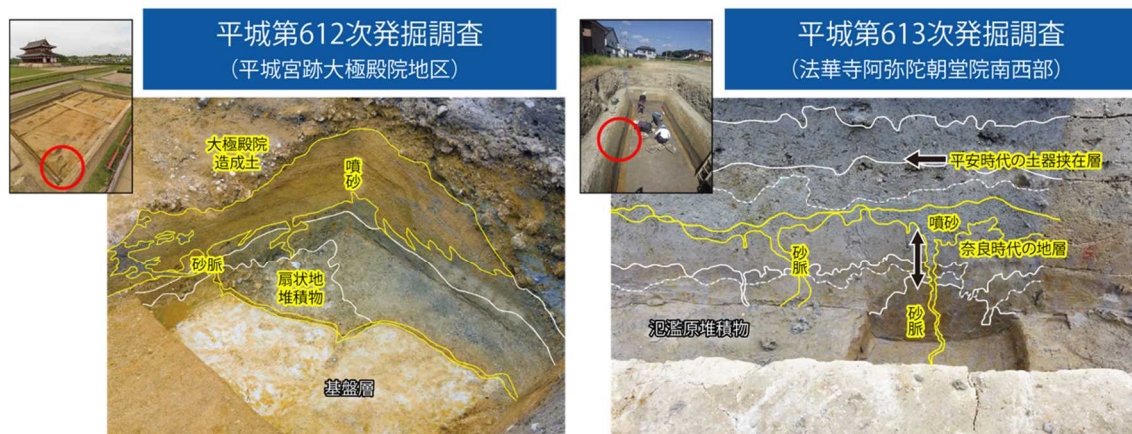
既刊地震史料の全文デジタル化作業は順調に進捗し、全史料中の60%弱が完了した。史料の校訂過程も紙媒体利用からXML形式のデジタルファイルを用いることで、作業の一層の効率化が可能となった^[UTH_01]。15世紀中頃の越中国の地震や1804年象潟地震などの日本海側沿岸地域や、1933年昭和三陸地震関連の史料収集や校訂作業を進めた^[NGT_01, IRID01]。画像公開の国際基準であるIIIFに準拠した市民参加型翻刻システムの新しいバージョンを公開した^[KOB001]。恵山火山の地質図原稿の取りまとめを行った。また、20万分の1スケールの日本火山図公開のためビューアー開発とデータ作成を行い、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

イ. 考古データの収集・集成と分析

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

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

考古発掘調査による地震痕跡と歴史記録との対応



平城京・京跡や藤原宮・京跡の
発掘調査から砂脈や噴砂の痕跡を発見



近畿地方の歴史記録から
どの地震が候補を特定

候補1：827年京都地震(天長4年)

候補2：855年奈良地震(斉衡2年)

図2. 考古発掘調査による地震痕跡と歴史記録との対応

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

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

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

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

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

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

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

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

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

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

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

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

ア. 地震発生機構の解明

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

南海トラフ沿いで検出された浅部SSE

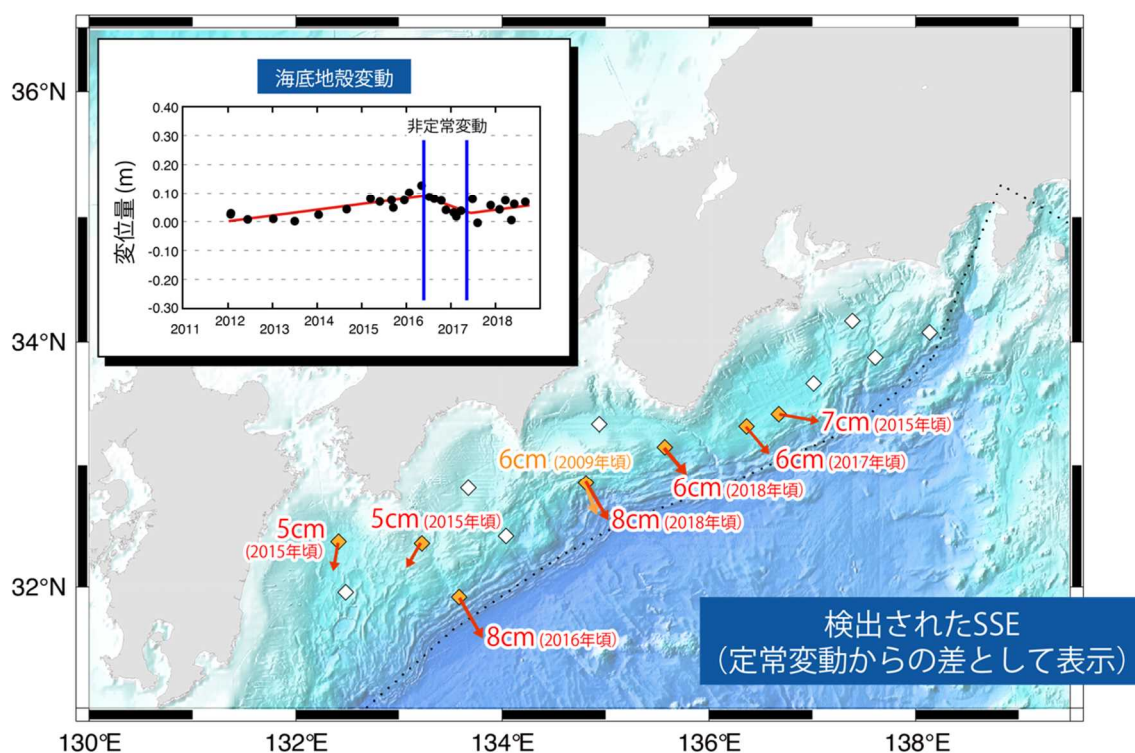


図3. 南海トラフ沿いで検出された浅部SSE*

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

イ. 地震断層滑りのモデル化

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

「階層的地震破壊」の概念図

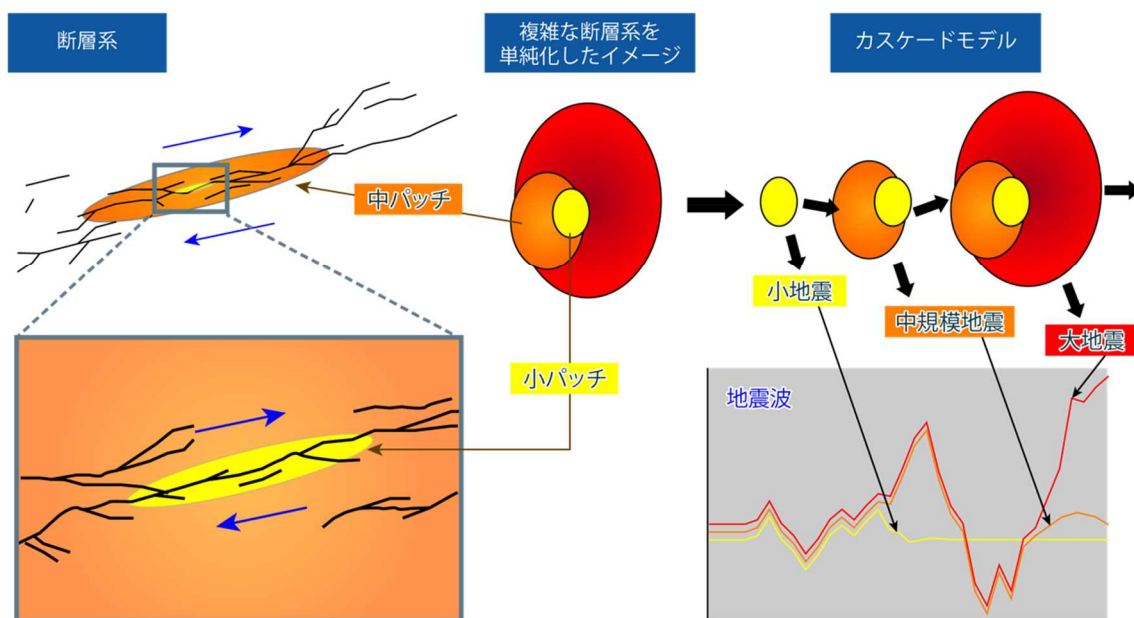


図 4. 「階層的地震破壊」の概念図

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

(4) 火山現象の解明とモデル化

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

ア. 火山現象の定量化と解明

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

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

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

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

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

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

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

イ. 内陸地震

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

中部日本における3次元レオロジーモデルの構築

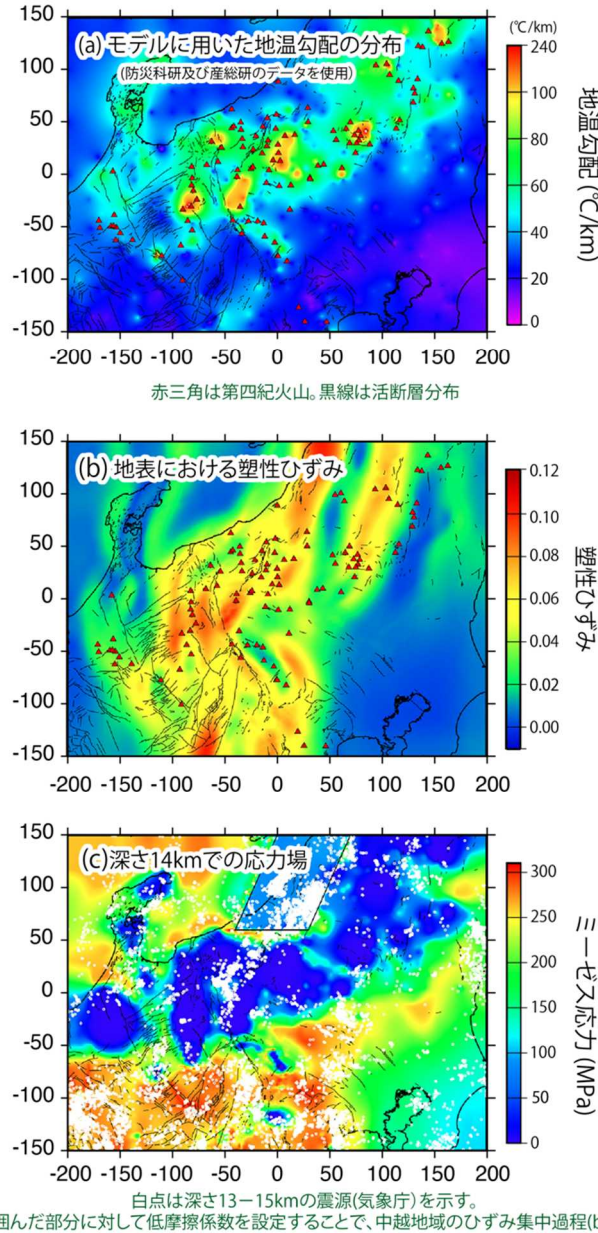


図5. 中部日本の3次元レオロジーモデルの構築

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

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系*の構造の解明

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

3次元比抵抗構造から推定した草津白根火山の熱水系

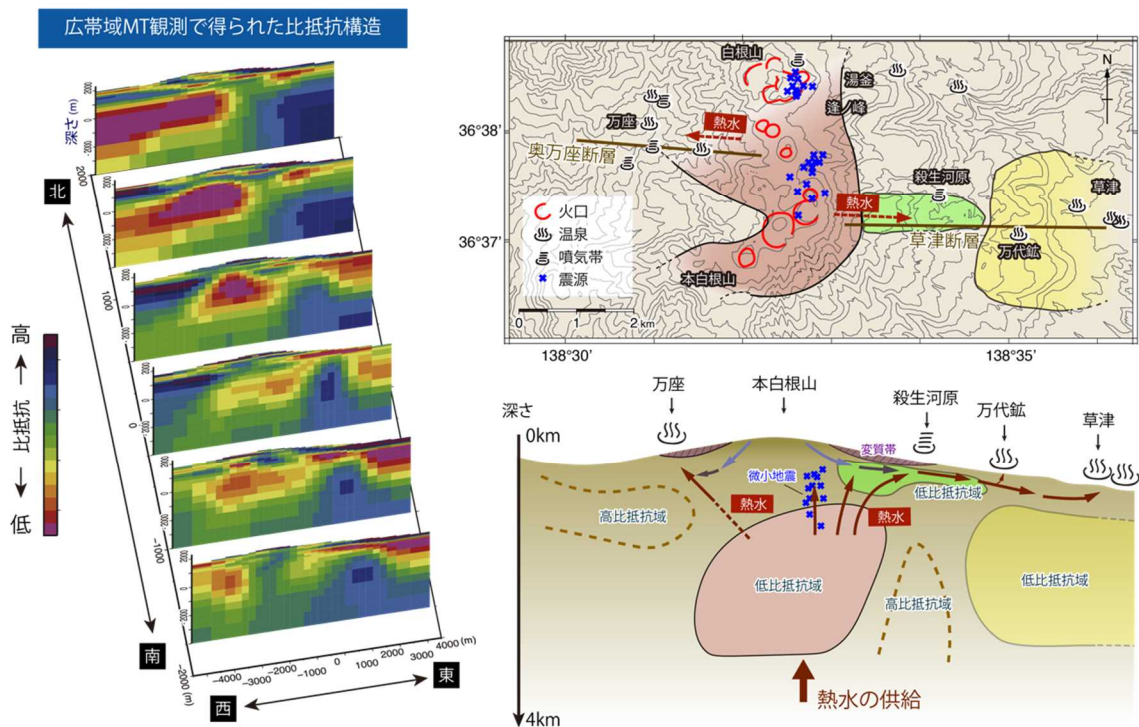


図6. 3次元比抵抗構造から推定した草津白根火山の熱水系

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

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

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

オ. 構造共通モデルの構築

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

3-2 地震・火山噴火の予測のための研究

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

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

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

イ. 内陸地震の長期予測

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

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

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

測地観測データに基づく内陸地震長期評価手法の開発

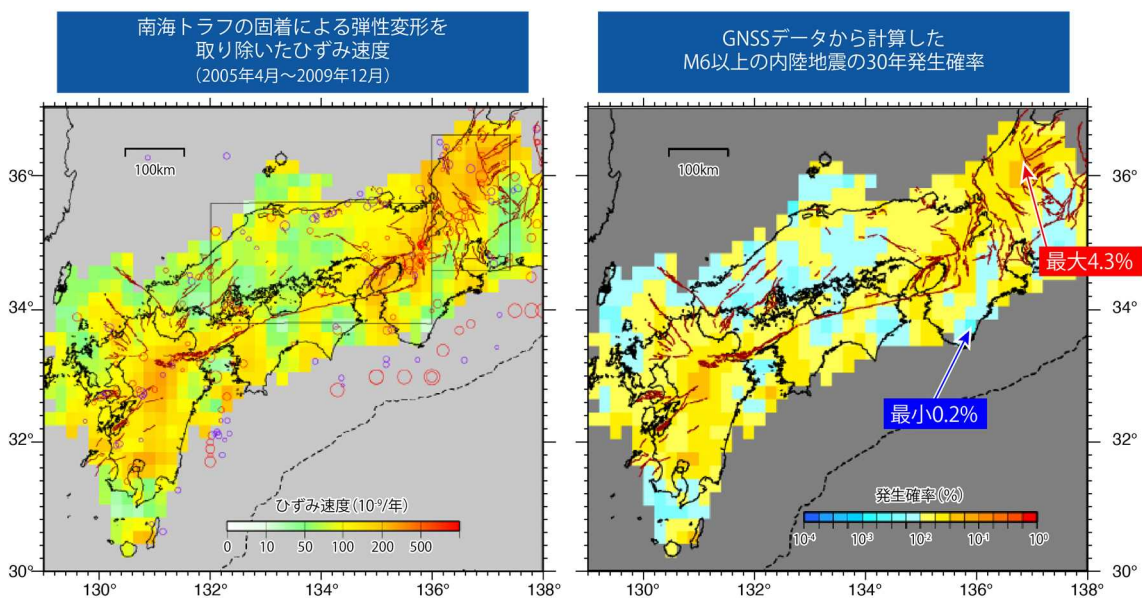


図7. 測地観測データに基づく内陸地震長期評価手法の開発

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

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

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

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

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

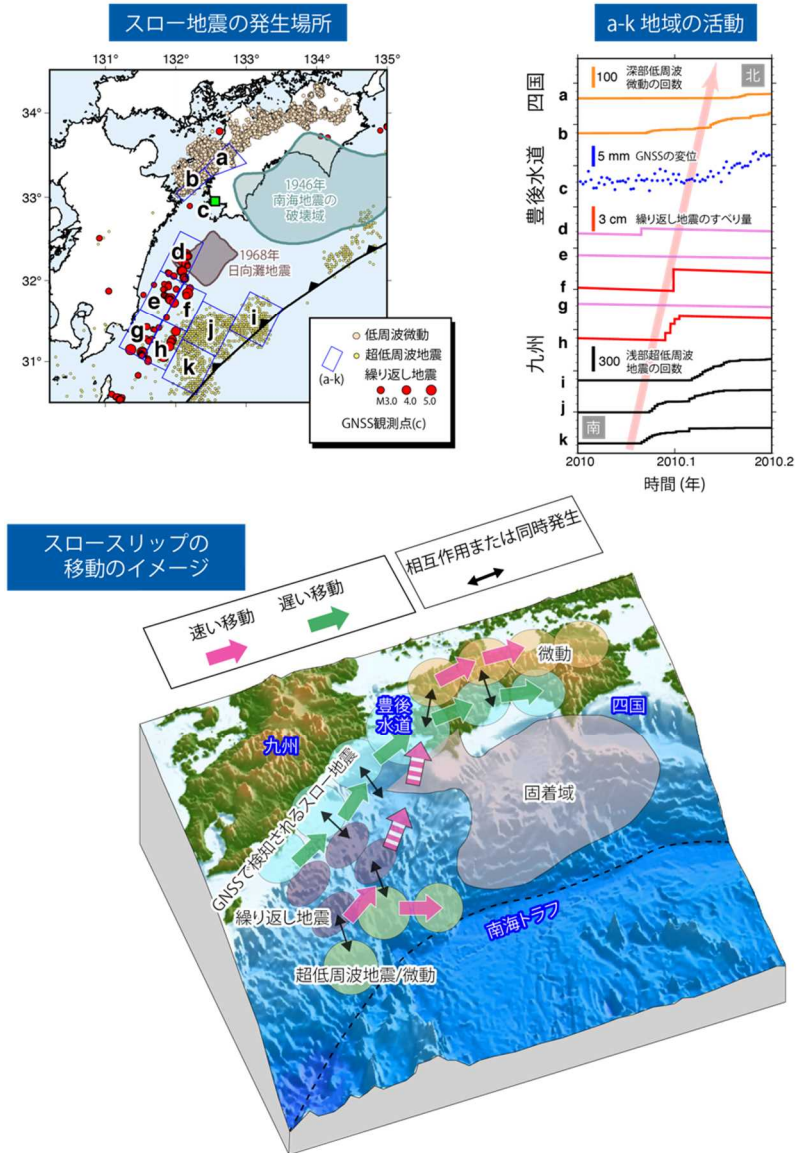


図8. スロー地震の総合解析による南海地震の固着域へ向かうスロースリップの長距離移動

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

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

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

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

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

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

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

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

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

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

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

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

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

イ. モニタリングによる火山活動の評価

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

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

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

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

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

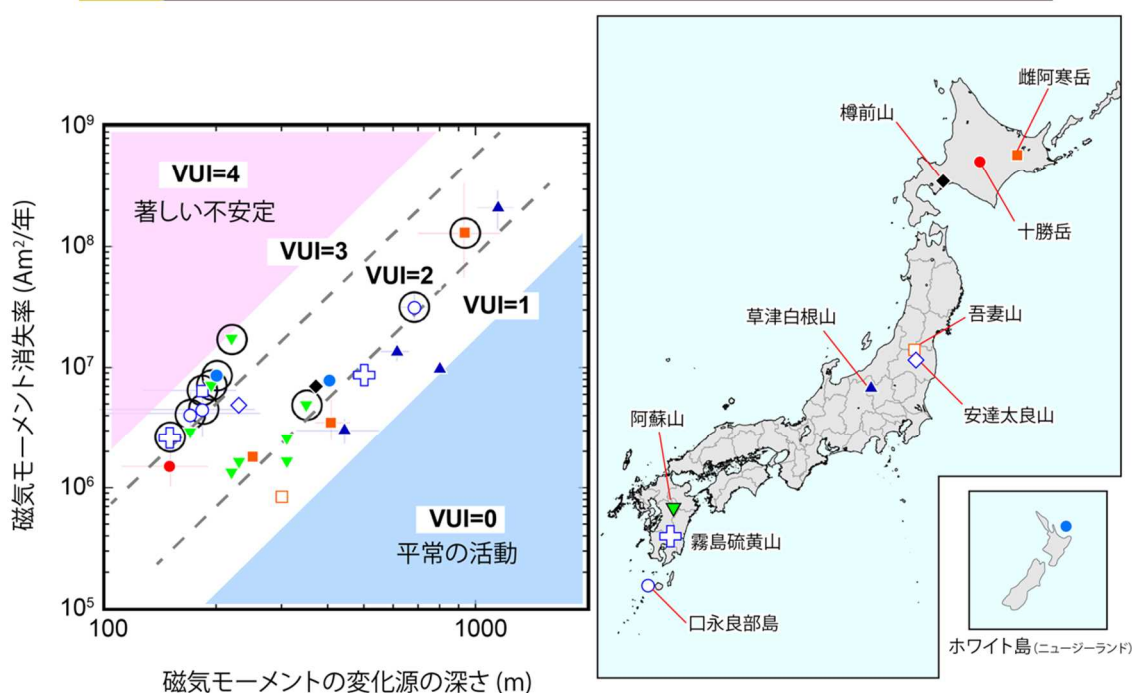


図9. 火山活動のアンレストに伴う熱消磁の事例収集と VUI への対応付け

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

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

火山活動推移のモデル化や分岐判断指標の作成をするために観測データ等を検討した。大地震と噴火の発生に相関があること、火山噴火を伴う地殻変動は約半年以上先行して継続することが多いことなどがカタログデータ解析から明らかとなった^[THK11]。また、インドネシア国シナブン火山を対象に、水蒸気噴火からマagma噴火*への移行期の地盤変動*と地震活動の連動性を明らかにした^[DPR107]。既存の火道系へのマagma貫入*と、そうでない場所へのマagma貫入の場合に分けた、マagmaの貫入速度と噴火事象の経験的分岐論理を構築した

[DPRI07]。

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

3-3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動*の事前評価手法

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

地震危険度評価結果表示システムの開発

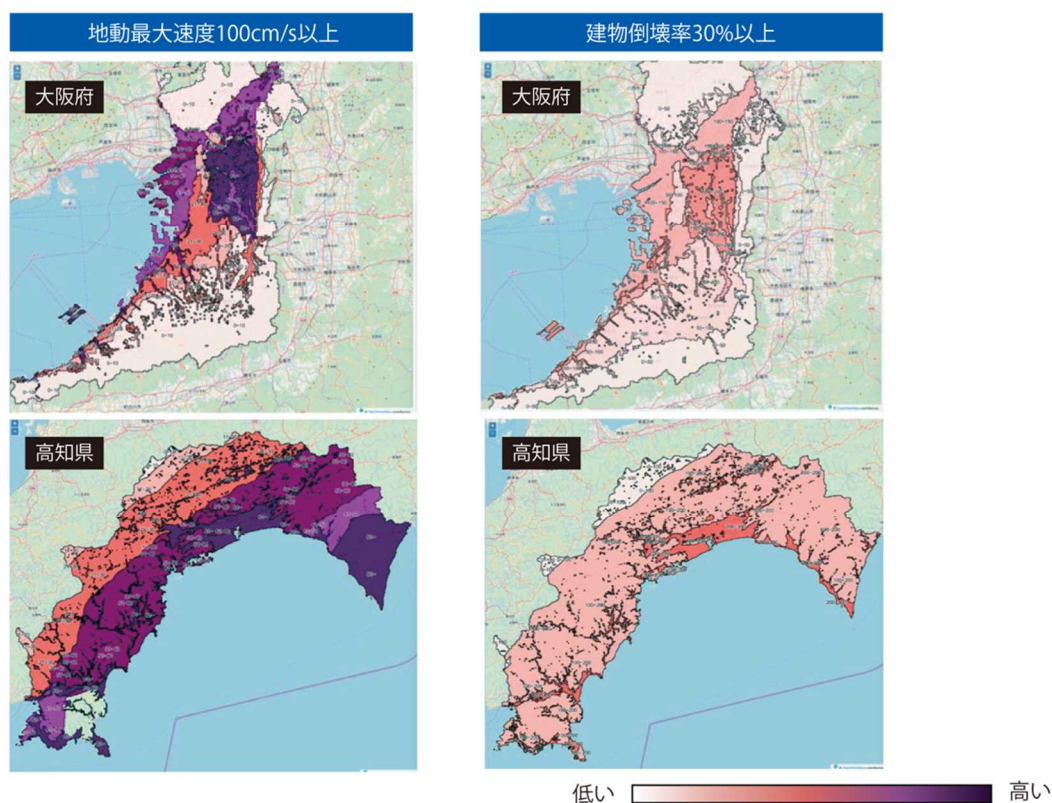


図10 地震危険度評価結果表示システムの開発

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

イ. 津波の事前評価手法

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

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

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

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

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

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

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

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

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

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

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

オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

桜島火山の黒神地区において小型船舶レーダーを用いた観測を開始し、2019年11月8日の火砕流*噴煙の流下パターンや堆積量を明瞭に捉えることに成功した。また、桜島の過去の噴火の前駆地震・地殻変動データから、火砕流を伴う噴火では直前の膨張停滞時間は30分以上継続し、47例中27例で前駆地震が発生することが明らかになった。この結果から、火砕流を伴う噴火では火道内の状態が通常の噴火前とは異なっている可能性が示唆された [DPRI11]。

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測*手法

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

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

イ. 津波の即時予測*手法

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

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

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

リアルタイム観測実記録に基づくデータ同化津波予測実験

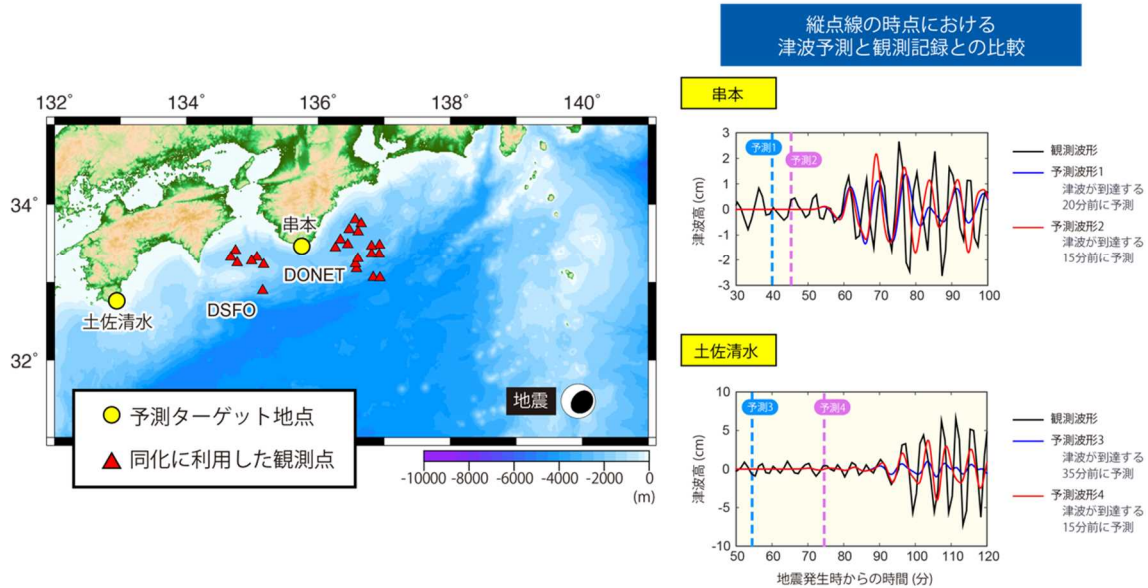


図 11. リアルタイム観測実記録に基づくデータ同化津波予測実験

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

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

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

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

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

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

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

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

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

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

3-4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

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

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

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

「江戸大地震之図」の震災を描く絵巻から江戸の社会を読み解く

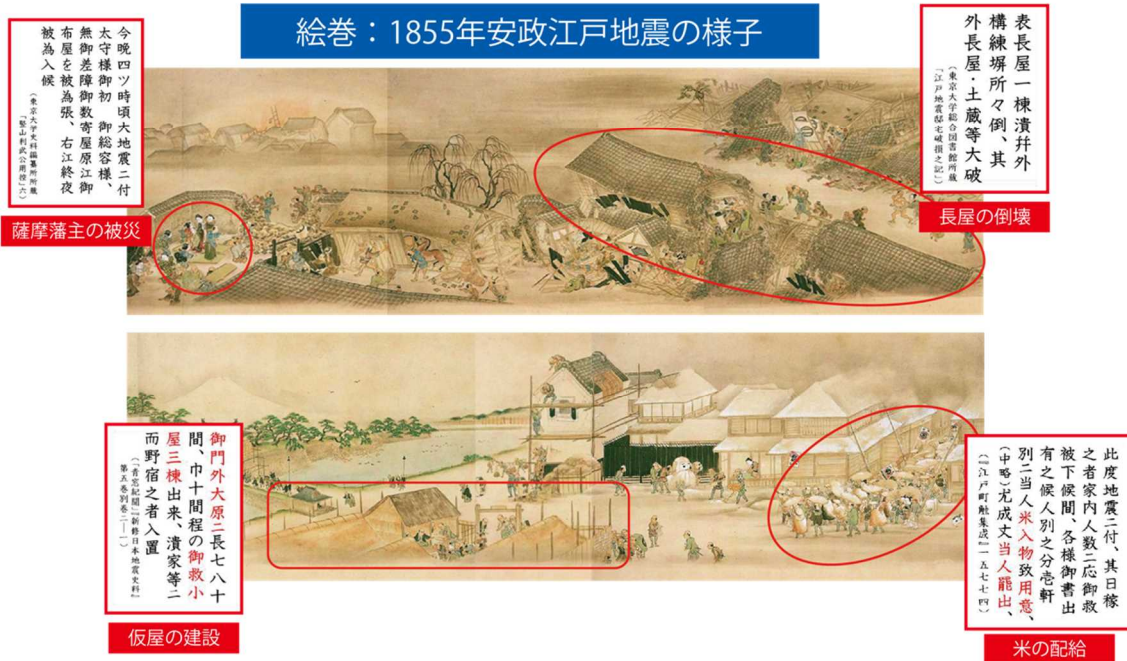


図 12. 「江戸大地震之図」の震災を描く絵巻から江戸の社会を読み解く

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

（2）地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3-5 研究を推進するための体制の整備

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

(1) 推進体制の整備

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

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

(2) 拠点間連携共同研究

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

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

（３）分野横断で取り組む総合的研究を推進する体制

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

・ 南海トラフ沿いの巨大地震

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

・ 首都直下地震

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

・ 千島海溝沿いの巨大地震

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

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

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

・ 桜島大規模火山噴火

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

・ 高リスク小規模火山噴火

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

(4) 研究基盤の開発・整備

・ 観測基盤の整備

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

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

気象庁は地震観測網や地殻変動観測網などの観測基盤の維持、関係機関の地震観測データの一元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^[JMA_09]。また、全国の 50 活火山について、全国 4 カ所の火山監視・警報センターにおいて連続的な監視観測を継続するとともに、いくつかの火山で新たな観測装置の配備や臨時観測を実施した^[JMA_12]。

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

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

山梨県富士山科学研究所は、gPhone 重力計の導入を行い、連続観測を開始した^[MFRI02]。北海道立総合研究機構地質研究所は、北海道の活火山において地球物理学的・地球化学的モニタリングを継続した^[HRO_01]。

・ 観測・解析技術の開発

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

・ 地震・火山現象のデータ流通

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

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

・ 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

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

（５）関連研究分野との連携強化

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

（６）国際共同研究・国際協力

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

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

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

国土地理院は国際 VLBI 事業の観測計画に基づき、石岡 VLBI 観測施設において VLBI 国際共同観測を 86 回実施した^[GSI_07]。

(7) 研究成果への理解醸成と人材育成

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