

3. 令和2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、大地震や火山噴火の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継続した。

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において、高精度文字認識ソフトウェアの導入などで効率化を実現し、全体の90%を超える工程が完了した^[UTH_01]。新収日本地震史料などの宇佐美龍夫収集資料から、日本の有史以来明治5年までの24,361件の地震を1行1地震として整理した日本歴史地震総表2020を作成するとともに、webから検索できるシステムを構築し公開した^[NGY_01]。

中世の史料である「三国一覧合運図」の龍谷大学本と東山文庫本、及び「大唐日本王代年代記」が同時代史料であることを確認し、1361年から1585年までの30件の地震記事が信頼できることを明らかにした^[NGT_01]。また、史料の有感地震の記録から、1855年安政遠江・駿河の地震は静岡県焼津市付近を震源とする内陸地震だった可能性が明らかになった^[HMEV02]。

イ. 考古データの収集・集成と分析

奈良盆地東縁断層と生駒断層周辺の遺跡で確認された地すべり*や液状化*の痕跡は、9世紀-11世紀、15世紀-16世紀、17世紀-18世紀に集中しており、史料に記述のある9世紀以降の地震に対応している可能性が示された^[NAB_01]。三陸海岸の海浜遺跡が縄文後期前葉（約3660年前-4000年前）と縄文後期中頃（約3330-3660年前）に中断衰退しており、これらの時期に巨大津波が発生していた可能性が示された^[NGT_01]。

噴火災害については、南九州の桜島を中心とした、縄文時代から江戸時代にかけての約4000カ所の遺跡の情報に基づいて、降灰範囲だけでなく、噴火に先行する液状化や噴砂など、様々な災害痕跡を集成した。また、桜島大正噴火の降灰範囲については、これまでの桜島の東側のみであったとする定説を覆す知見が得られた。こうした成果から、今後降灰災害シミュレーションの更新や深化の促進が期待される^[NAB_01]。

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

北海道太平洋沿岸の津波堆積物*の詳細な年代測定によって、12世紀と17世紀のイベントについて、十勝地域と釧路根室地域とで発生年代が異なる可能性が示された。十勝沿岸河口域の珪藻分析から、10世紀から18世紀までの連続的な地殻上下変動の時系列が明らかにされ、12-13世紀に発生した超巨大地震後から続いた隆起が14-15世紀に沈降に転じたことと、17世紀イベントの変動量が12世紀に比べ2倍程度大きかった可能性が示された^[HKD_01]。布田川断層系と日奈久断層系の合流部に近い御船町高木でトレンチ調査*を実施し、2016年熊本地震の明瞭な痕跡が残っていないこと、それ以前の2回のイベントの変位の様式が熊本地震とは異なることを明らかにした^[NGY_03]。富士火山の爆発的噴火の噴出物解析によって、御殿場岩屑なだれ以降の数百年間にわたり、石基*の斜長石量の急減やガラス量の急増が続いたことが明らかになり、山体崩壊によって荷重が減ったことで、マグマ*が上昇しやすくなった可能性が示された^[ERI_02]。20世紀の伊豆大島山頂噴火の文献データを再整理したところ、マグマ噴出量の大きな噴火ほど斜長石の量が少ないことがわかり、噴火規模予測の指標として斜長石量が使える可能性が示された(図3)^[ERI_03]。草津白根火山の地質調査によって、本白根火砕丘*群および白根火砕丘群の活動年代が明らかになり、主要テフラ*の層序*と年代、物質科学的データをもとに完新世*の噴火履歴が整理された^[TYM_01]。将来の噴火の可能性が高い活火山の中長期的活動評価と予測のため、火山地質図の作成およびその基礎となる調査が進められた。そして、日本の火山データベースについては、択捉島と富士山の完新世噴火イベントのデータ作成と公開、重要火山の火口図作成が開始された^[AIST03]。

伊豆大島山頂噴火時のマグマの斜長石量と噴出量の関係

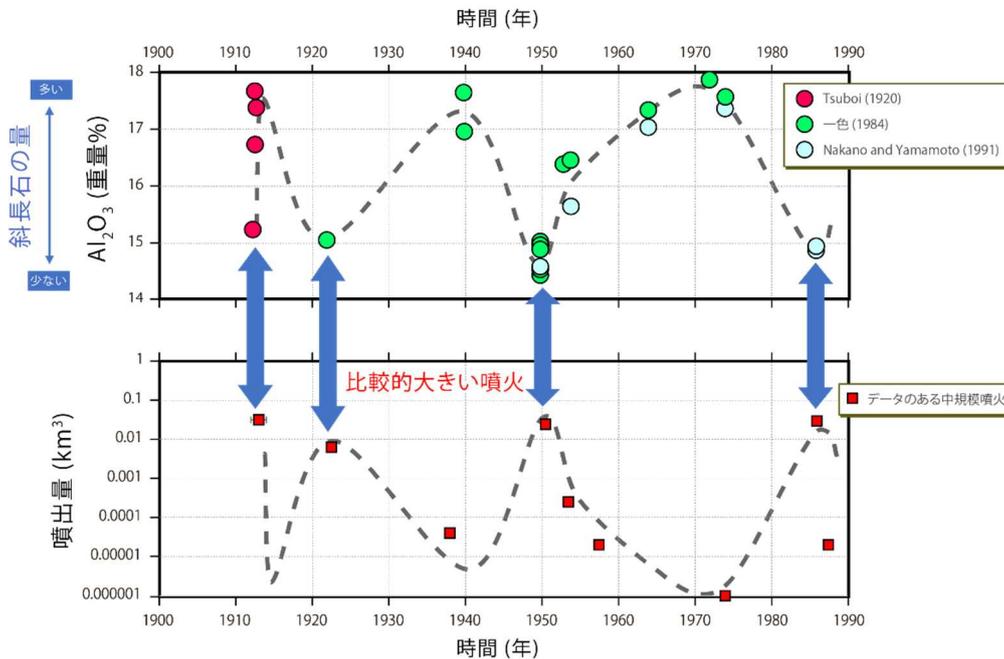


図3. 伊豆大島山頂噴火時のマグマの斜長石量と噴出量の関係

文献データを再整理したところ、20世紀の伊豆大島山頂噴火では、数ヶ月から数10年の時間スケールで見ると、比較的大きな噴火の噴出物の斜長石量と噴出量は逆相関の関係になっている可能性が示された。すなわち、噴出量の予測のための指標として斜長石量が使えうる可能性があることがわかった。

(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。

琉球列島中部沿岸に存在する巨礫の空間分布を制約条件とする数値計算を行い、既往の津波及び地震規模の上限を推定した(図4)^[UTS_01]。京都・奈良の日記史料と東海地方の年代記「大唐日本王代年代記」「常光寺王代記并年代記」の信頼できる地震記事との比較検討を行ない、明応2年(1493年)10月から12月、静岡県浜松市、愛知県知多郡から京都・奈良を含む地域で地震が高頻度で続いたことを確認した(図5)^[NGT_01]。今後、近代的な機器観測に基づくデータとの比較・検討の進展が期待される。安政東海地震の発生時刻を外国船の航海日誌等から特定し、遠地験潮記録から推定される時刻と整合的であることを確認した^[HMEV_01]。史料と気象庁震度データベースから江戸・東京の過去350年間の有感地震数を整理し、元禄や安政江戸地震による有感地震数の増加などの時間変化を検出した^[KOB002]。

文禄5年(1596年)の文献史料で畿内や美濃に降ったとされる「長く白い毛」について検討した。別の史料によれば、この前後に台風が九州を通過していたことから、気象庁の台風データベースで風向風速を検証した結果、これが浅間山からもたらされたペレの毛(マグマが噴火時に急冷して糸状になったもの)である可能性が高いことがわかった^[UTH_01]。伊豆大島の12-18世紀に発生した大規模噴火、浅間山の天明噴火、霧島山の新燃岳享保噴火について、層序の特徴、岩石鉱物化学組成*、組織解析等の分析が進められ、噴火様式*や噴火推移との関係が検討された。また、霧島山の13世紀御鉢噴火については、新たな堆積物データを考慮した結果、従来の推定よりも大規模な噴火である可能性が示された^[ERI_03]。屈斜路カルデラ噴出物の化学分析とU-Th放射非平衡*分析によって、カルデラ噴火*に先立つ珪長質マグマの大量生成に3万年程度を要していたとする予察的結果が示された^[HKD_02]。全岩化学組成分析から、屈斜路カルデラの活動における中島の位置付けが明らかになり、野外調査からアトサヌプリやリシリ溶岩ドーム*のテフラ分布や層序が整理された^[KOB004]。鬼界カルデラで、反射法地震探査及び海底地磁気観測のデータ解析、堆積物・岩石試料の解析が進められ、鬼界アコハヤ噴火噴出物の面的広がりや総量が見積もられた^[KOB001]。

沿岸巨礫の分布を用いた古津波の評価



図4. 沿岸巨礫の分布を用いた古津波の評価

沖縄県久高島の岩礁に堆積する巨礫の分布は、台風などの高潮によって現在の分布になっていることが分かった。過去に津波が発生していたとしても、岩礁が形成された時代(3500年前)以降、Mw8.3を超えるような地震・津波は発生していないと推察される(Minamide et al., Sci. Rep., 2020に加筆)。

史料から明らかになった明応東海地震前の地震活動

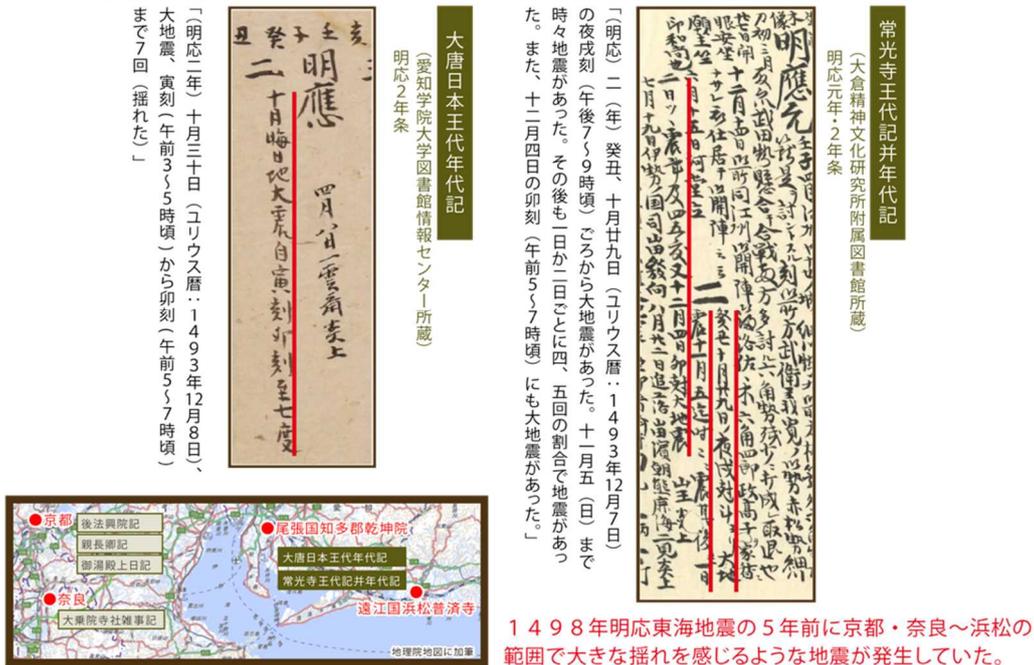


図5. 史料から明らかになった明応東海地震前の地震活動

同時代の信頼できる史料である京都・奈良の日記と東海地方の年代記を比較検討して、その時代の地震活動について調べた結果、1498年明応東海地震の5年前に京都・奈良から静岡県浜松地域にかけて大きな地震が頻発していたことが明らかになった。これは東海地震の前の地震活動を理解する上でも重要な情報である（史料出典：大倉精神文化研究所附属図書館，愛知学院大学図書館情報センター）。

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

日本海溝から採取した試料を用いた摩擦実験を実施し、摩擦係数は粘土鉱物含有量の増加に伴い系統的に低下し、温度の上昇に伴い増加する傾向があることがわかった^[ERI_05]。この結果は、プレート境界の摩擦特性*の水平不均質が、粘土鉱物含有量を反映している可能性を示唆する。中下部地殻での岩石破壊にともなう水理学パラメータを制約するため、天然の岩石-流体反応帯から間隙流体圧*や浸透率*を推定する新たな手法を開発し、破碎された地殻では未破壊地殻に比べて時間～年スケールで浸透率が数桁上昇するという結果が得られた^[THK_02]。一方、波形の立ち上がりを利用した精密震源決定法を開発し、震源の集中度合いから地震の発生しやすい場所を推定する試みもなされた^[UTS_03]。

イ. 地震断層滑りのモデル化

複雑な断層形状や破壊様式の動的地震破壊過程*を、安定かつ高速に再現する数値計算手法の開発が進んだ^[ERI_06]。大型振動台を用いたメートルスケールの摩擦実験から速度・状態依存摩擦構成則に関するパラメータを取得し、先行研究の結果と調和的であることを確認した^[NIED02]。また、水・二酸化炭素・塩の多成分流体の実験により、塩がかんらん石の親水性を効果的に高めることがわかった。多成分流体と反応したかんらん石は融液*に近い状態となり、地震波トモグラフィ解析*による弾性*的性質の違いに基づき、水などの流体と区別できる可能性があることもわかった^[THK_02]。

(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

西之島では、2019年の噴火活動の推移を広帯域地震および空振観測で捉えることに成功した。時間とともに地震波の卓越周波数が低周波数側にシフトしたことや、振動軌跡*の変化からマグマ供給系の変化および圧力源の移動が推定された。吾妻山に敷設されている光ファイバーケーブルを用いた分散型音響センシング (DAS)*のデータを用いて、火山性地震*の震源決定と浅部地盤構造の推定が行われた。火山研究のための新たな観測手法として期待される(図6)^[ERI_07]。桜島では、Multi-GAS*やセスナ機による火山ガス*組成観測が行われた。SO₂/H₂S比は1-1000の範囲で大きく変動しており、比が30を超えるのは火山灰*放出時に限られることや、比が1-30の変動範囲では爆発頻度と相関があることが分かった^[AIST06]。

光ファイバーケーブルとDASによる火山性地震の震源決定

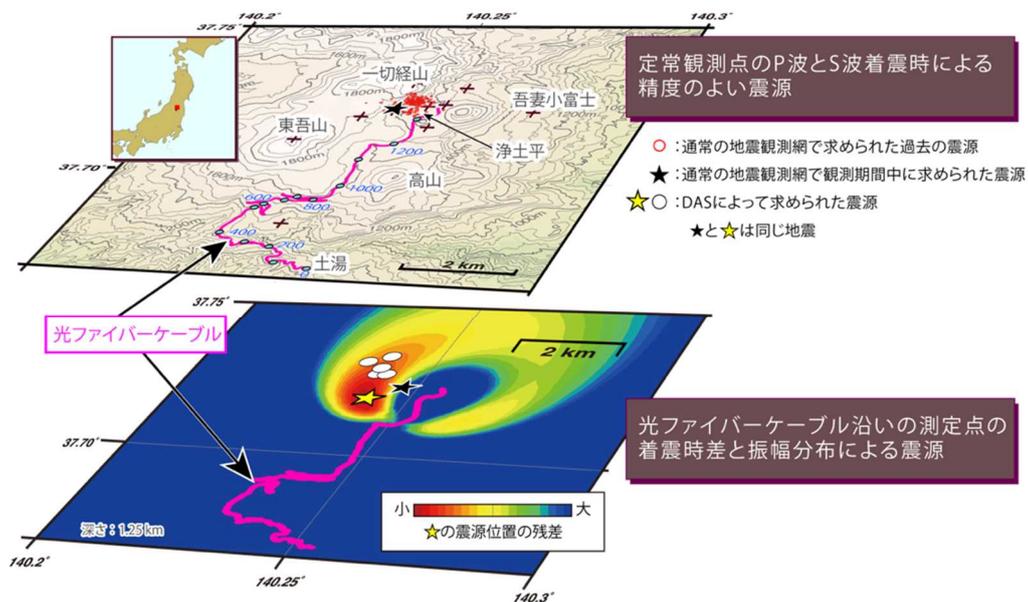


図6. 光ファイバーケーブルとDASによる火山性地震の震源決定

通信用の光ファイバーケーブルを振動センサーとして利用する新手法を用いて、吾妻山で火山性地震の震源推定を行った。通常の震源推定は、地震計観測網（上図の+印）の地震波の到達時間差を解析して行われる。光ファイバーケーブルを利用して推定した震源は、既存の方法による推定結果ともよく合うことが示された。この観測手法は遠隔操作が可能であることや、光ファイバーケーブルは埋設されており噴火時でも火山灰や火山弾による損傷のリスクが少ないため、火山での運用に適している（Nishimura et al., Sci. Rep., 2021 に加筆）。

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

霧島火山新燃岳 2011 年噴火の石質岩片サンプルを観察・分析し、溶岩ドーム形成におけるマグマの結晶化と自爆性との関係を考察した。その結果、ナノライトの晶出により石基結晶度が5日～45日間で9.1 vol%上昇してメルト粘性が増加し、気泡過剰圧が破碎閾値を超えることで溶岩ドームにおける爆発性の獲得が説明できることが分かった^[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

海域の地震・地殻変動観測の充実により、プレート境界やスラブ内の震源域に関する様々な研究が進んだ。S-net*で観測された常時微動*記録に地震波干渉法*を適用し、2011年東北沖地震の大滑り域などでS波*速度が速い傾向があることがわかった^[THK_02]。日向灘から奄美大島にわたる地域で発生する小繰り返し地震*を利用して、フィリピン海プレートの準静的滑り速度が求められた。この地域では全体的に滑り速度が増加しており、とくに、M6クラスの地震が発生している種子島東方・奄美大島付近・大隅半島南東沖において、2016年以降の滑り速度の増加は周囲より相対的に大きいことが明らかになった^[KGS01]。

スロー地震*に関しては、海底圧力計観測から、2018年房総沖スロースリップ*に伴う隆起を検出した^[ERI_05]。日向灘や熊野灘では、通常地震活動とスロー地震の発生位置の違いや、地質構造やテクトニクスとスロー地震の発生分布との関係が詳細に調べられた^[DPRI01, JAMS02]。また、四国西部の深部低周波微動*については、フィリピン海プレートからの脱水がその発生に関与している可能性が示された^[NIED02]。

プレート内地震については、スラブ内の温度圧力条件下でのエクロジヤイト*の形成やロニソソ石*の脱水反応といった物質の振る舞いとスラブ内地震の発生メカニズムとの関係が調べられた^[THK_06]。スラブ内地震である2018年アンカレッジ地震(Mw7.1, 米国)の震源域の上下に、スラブの脱水による流体を示す顕著な高ポアソン比の異常体が検出された^[THK_05]。

また、プレート境界地震の滑りモデルの高度化を目指し、日本海溝と南海トラフにおける単位滑りに対する地表での弾性応答のグリーン関数ライブラリを整備した^[JAMS01]。

イ. 内陸地震

内陸地震の発生には、地殻内流体が重要な役割を果たすと考えられている。このような背景の下、2016年熊本地震震源域をはじめとした内陸地域で、様々な手法により地殻内流体を検出し、地震の発生メカニズムとの関係を調べる研究が進んだ。2016年熊本地震については、地震のメカニズム解*から間隙流体圧レベルを推定する逆解析法と地震時応力変化の計算を組み合わせ、地震前後の地震活動度の変化における間隙流体圧と応力の役割について調べられた。この結果、従来から指摘されているクローン応力変化*(ΔCFS)の上昇だけでなく、間隙流体圧の上昇が地震活動度の増加に影響を与えていることがわかった。

(図7)^[DPRI03]。また、地球電磁気学的観測による比抵抗分布の推定に基づき、地殻内の流体分布と内陸地震震源域との位置関係が調べられた。熊本地震震源域においては、地震波速度構造と比抵抗探査結果から、地震時滑り域の端部が低速度領域や低比抵抗体の端部などの構造的特徴を持つことが明らかになった^[KYU_01]。この他にも、内陸地震の震源域直下に流体が存在することが示唆されたことは興味深い^[ERI_09, THK_07]。

地殻変動データから、下部地殻のレオロジー*に関する研究成果も得られた。余効滑り*と粘弾性*変形を分離する手法により熊本地震の余効変動*データを分析し、下部地殻の粘性係数が $2\text{-}5 \times 10^{18}$ Pa \cdot s 程度であると見積もられた^[GSI_01]。2011年東北沖地震の余効変動データからマントルウエッジ*の高粘性領域の幅を推定し、福島県付近に比べ宮城県付近の方が狭くなっている可能性が示唆された^[THK_07]。

3次元速度構造モデルを用いた詳細な震源分布から、陸域地震活動の下限深さの空間分布は、地下温度 300 度の空間分布と同じ傾向を示すことが明らかになった^[NIED02]。これは、地震活動の少ない地域においても、地下の温度分布から地震発生層*の下限を把握できることを意味する。

2016年熊本地震前後の地震活動度の変化：応力・間隙流体圧との関係

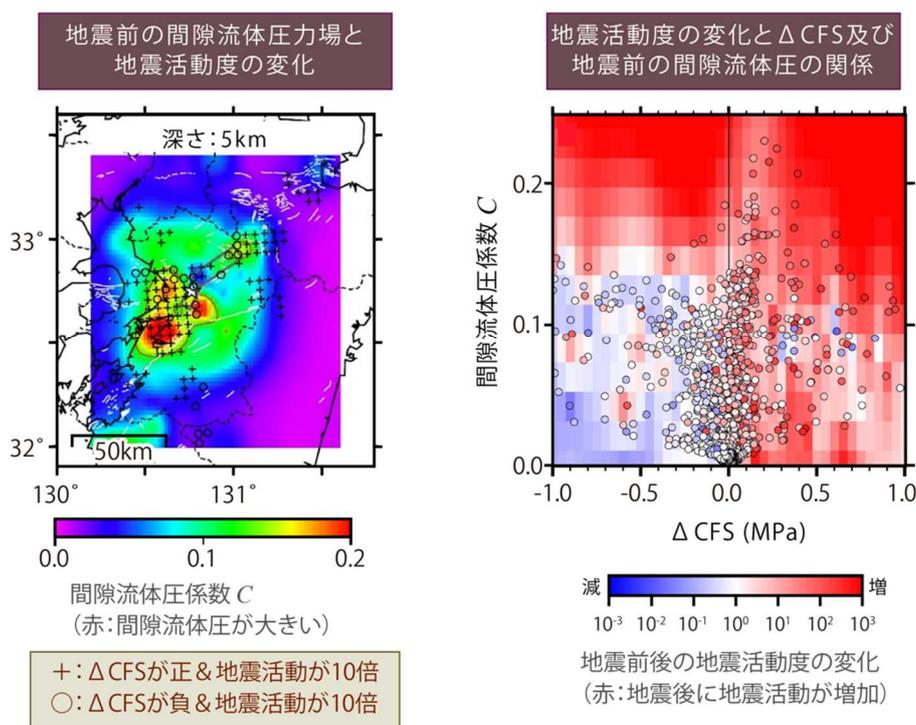


図 7. 2016 年熊本地震前後の地震活動度の変化：応力・間隙流体圧との関係

2016 年熊本地震前の地下の間隙流体圧力場、熊本地震による応力場の変化から求めた各地の Δ CFS と熊本地震前後の地震活動度の変化を比較した。間隙流体圧係数は、間隙流体圧の静水圧からのずれを、静岩圧と静水圧の差で規格化した無次元量である。右図の○は評価点での地震活動度の変化である。 Δ CFS が正となる場所では熊本地震後の地震活動が活発になったことに加え、 Δ CFS が負となる地域でも、間隙流体圧のレベルが地震前から高かった地域で地震活動度が上昇していること等が明らかになった (Nakagomi et al., Earth Planet. Space, 2021 に加筆)。

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

海洋研究開発機構の研究船「かいれい」による調査・探査航海により、鬼界海底カルデラで航走調査・長期海底観測機器の設置・試料採取が行われた^[JAMS03, KOBE01]。火山性流体の分布や運動によって生じた火山体浅部の構造不均質性を過去の火山人工地震探査のデータを活用して推定したところ、阿蘇山・霧島山・磐梯山・岩手山のいずれにも共通した特徴が見られることがわかった^[THK_08]。草津白根山で行われた広帯域 MT 観測*により、深さ 10 km 程度までの 3 次元比抵抗構造が明らかとなり、深部マグマ溜まりから供給されるマグマ性流体の上昇経路のモデルが示された^[TIT_03]。

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

下部地殻の非弾性*ひずみを推定する手法を開発し、地震活動が活発な別府島原地溝帯で非弾性ひずみ速度*が大きいことを明らかにした。また、地温勾配が大きいために地震発生層が薄く、下部地殻には低速度異常が見られる別府阿蘇地域では、顕著に非弾性ひずみ速度が大きいことがわかった^[KYU_01]。

オ. 構造共通モデルの構築

中国地方で発生する地震のメカニズム解を小地震まで含めて推定し、10 km メッシュの応力マップを作成した。当該地域にあるほとんどの主要活断層は、現在の応力場の下で地震が発生しやすい条件を満たしていることが明らかになった^[AIST07]。近年取得された反射法地震探査データ等の統合解析を実施し、日本海及びその沿岸域、東北日本の青森平野や庄内平野、富士川河口断層帯、中央構造線断層系などの断層モデルを推定した^[ERI_11]。

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、地殻活動の観測データの解析と、理論・実験等に基づく物理的解釈・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

南西諸島海溝沿いの沖縄本島南東沖と波照間島南方沖で、GNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測*を実施した。過去の観測データと合わせて地殻変動速度を推定すると、沖縄本島沖では海溝付近のプレート間固着*が示唆される。一方、波照間島沖では、沖縄トラフの伸張変形を支持する結果が得られたが、海溝軸付近の固着状態を拘束することは現状では難しいことがわかった^[NGY_02]。

南海トラフ沿いの固着状況から応力分布をモデル化し、今後起こりうる複数の海溝型巨大地震の発生シナリオを作成した。破壊シナリオの中から実現性の高いものを選択するために、経験的摩擦則とエネルギーバランスに基づく手法の開発を進めた^[NIED02]。

イ. 内陸地震の長期予測

内陸地震の新たな長期予測手法の構築を目指して、GNSS連続観測システム(GEONET*)の測地データから推定されるひずみ速度分布に基づいて、東日本の内陸地震の発生確率を試算した。ひずみ速度を応力蓄積率に相当するモーメント*速度に換算し、過去の地震の発生状況から経験的に地震発生率を見積もり、ポアソン過程*を仮定することで、約20 km四方の格子内において、今後30年間にM6以上の内陸地震が発生する確率を計算した。その結果、日本海東縁～新潟-神戸ひずみ集中帯、南関東・伊豆地方、奥羽脊梁山地沿いで1%を超える高い値を示した(図2)^[DPRI05]。

西南日本に沈み込むフィリピン海プレートの運動と上盤プレート内の地震活動の関連性を明らかにするために、粘弾性を考慮した有限要素モデルと測地データを用いて、プレート間固着が引き起こす主要な震源断層におけるクーロン応力変化(ΔCFS)を計算した。九州では、近年発生した3つのM7級の内陸地震を含め ΔCFS が正となる震源断層が多く存在することがわかった。これらの震源断層では、プレート間の固着が進むことで断層破壊を促進

する方向に応力が载荷されていると推察される^[ERI_11]。

大地震が連発して発生する事例は多く、近年では2016年熊本地震や2019年リッジレスト地震(M7.1, 米国)などが例として挙げられる。このような連発する大地震の活動予測を行うために、応力変化を考慮した地震応答予測モデルを改良し、リッジレスト地震に適用したところ、震源域周辺の地震活動の推移を的確に説明することができた。また、近傍の主要活断層帯で、このモデルの予測と既往の地質学的な長期評価と組み合わせることにより、より現実的な予測確率と確率利得が示された^[DPRI05]。

この他にも、現実的な初期応力場と断層形状を取り入れた動的破壊過程予測手法の開発や、伏在断層の長期的な変位速度の推定なども行われた^[UTS_02, ERI_11]。

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

A. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

スロー地震と繰り返し地震の活動の検出を中心として、プレート境界面での非地震性滑り^{*}の状態を調べ、これを巨大地震の発生予測につなげることを目指した研究が多く進められた。まず、プレート境界の滑りをモニタリングする上で有用な、長期間にわたる繰り返し地震カタログ^{*}や南海トラフ沿いの低周波・超低周波地震^{*}カタログ、短期的SSE^{*}カタログ等を公表したことが挙げられる^[THK_09, ERI_12]。また、南海トラフ周辺地域を対象に、3次元地震波速度構造を用いた自動セントロイドモーメントテンソル(CMT^{*})解析システムの開発に加えて、S-net データを用いた日本海溝沿いの低周波微動検出の自動処理化に着手した^[NIED02]。大規模地震の発生を念頭に置き、即時に震源や断層運動様式を推定する解析システムの改良も行われた^[NIED02]。

観測網の充実やスロー地震検出の解析手法の高度化により、スロー地震の発生様式の理解が大きく前進した。四国地域における短期的SSEについて、2001年-2019年の傾斜変化のデータに基づいて滑り分布が推定され、累積滑り量は空間的に不均一であることや、滑り域は2012年頃を境に南海トラフの走向方向へ拡大している傾向があることがわかった^[ERI_12]。また、深部超低周波地震はプレートの固着率^{*}が低い場所でしか起きていないのに対し、浅部超低周波地震は様々な大きさの固着率の場所で発生しており、プレート境界浅部における強い不均質性が示唆される^[ERI_12]。2019年豊後水道の長期的SSEの発生前後に、日向灘北部や四国中部において小規模な長期的SSEが起きていたことが捉えられ、スロースリップ間の相互作用に関する新たな知見が得られた^[ERI_12, GSI_02]。

岩手北部～青森沖にかけて、1年前後の周期で太平洋プレートの滑り速度が変化する領域があり、その領域の周辺では、滑り速度が速い時期に中規模地震(M4-6)の地震活動度が高くなる傾向、同時にb値^{*}が小さくなる傾向が見い出された^[THK_09]。この他に、スロー地震の振る舞いや大地震の余効変動データからプレート境界面の摩擦特性を推定する研究なども進められている^[ERI_12, KUS_01]。

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

地震活動の変調をとらえ、これを大地震の発生予測につなげることを目指した研究が行われた。出発点となるのは、地震活動を独立地震*と先行する地震により誘発された地震に分けて把握すること(デクラスタリング)である。イタリア北東部の地震データ(1977-2018年)に2つの代表的なデクラスタリング手法を適用し、結果に大きな違いがないことを確認するとともに、独立地震の割合が全体の50%強であることを示した^[ERI_13]。

内陸の繰り返し地震に関しても進展があった。函館地方の非火山性低周波地震*と通常地震に関する詳細な分析により、深さ15-35 kmにかけて低周波地震のみが起きる傾いた円柱状のクラスタ*があり、その延長線に位置する深さ約10 kmで低周波地震と通常地震が混在して発生する領域があることが示された。通常地震の活動には繰り返し地震が含まれており、これらの地震活動は深部流体によって断層内の間隙流体圧*が一時的に上昇することで発生している可能性が示された^[THK_09]。

2000年鳥取県西部地震の震源域における多点・高密度地震観測(計1000点)により、断層面の幾何学的複雑さが地震破壊に影響を与えることが分かった。高精度な震源は、長さ約20 kmの主断層付近に分布するほか、5 kmから30 mまでの様々な大きさに鉛直板状に分布し、小スケール断層の雁行配列まで観測された^[ERI_13]。大地震の断層形状の複雑さを直接マルチスケールで明らかにした観測例であり、地震発生予測の研究を新たな段階に進める契機となる可能性がある。

手法の開発としては、大地震発生後数時間程度の連続波形記録から、揺れの最大振幅の超過確率に基づいて、その後の余震活動の推移を予測する手法が挙げられる。この手法は震源カタログを必要とせず、1つの観測点の地震波形のみで計算できる点が特徴である^[NIED02]。

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

ある地域で地震活動が高まった際に、より大きな地震へとつながるのか、つまり観測された地震活動がより大きな地震の前震*となりうるのかを識別するための手法開発が進められた。具体的には、岩手-宮城県沖・茨城県沖・伊豆諸島・長野県北中部の4地域において、前震識別法(Maeda, 1996)をETASモデル*に基づいて作成された模擬地震カタログ(独立地震のランダムな発生と独立地震により誘発された余震活動だけで構成された地震活動)と実データカタログの両方に適用し、本震発生の予測性能を比較した。いずれの地域でも、実データに適用した場合の方が高い予測性能を示し、前震識別法は前震活動に関連する物理的特徴をうまく抽出できる手法であることがわかった。上記のプレート境界の2地域(岩手-宮城県沖及び茨城県沖)は、群発地震*やスロー地震が観測されている地域であり、SSEによって誘発された地震活動が前震として捉えられている可能性がある。一方、地殻内の2地域(伊豆諸島及び長野県北中部)では、地殻内流体に関連する群発地震が前震として発生していることが示唆される^[ERI_13]。

2019年リッジレスト地震(米国)では、最初にM6.4の地震により共役な二つの断層が動き、そのうちの一つの断層において34時間後にM7.1の地震が発生した。M7.1が発生した断層で、M6.4の震源からM7.1の震源までの約5 kmの区間において、b値が小さい値をとることがわかった^[ERI_13]。類似の特徴は、2016年熊本地震の最初の前震(M6.5)の震源域南部でも捉えられたが、本震の震源付近では本震の発生直前までにb値が上昇に転じたという報告もある。b値のモニタリングは大地震後の地震活動の推移を予測する上で重要な知見となる可能性があるが、更なる研究が必要である。

(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

山中湖南方で実施したトレンチ調査により見出されたテフラ層から、富士山は過去約4000年間に少なくとも14回噴火したことが明らかになった。富士山麓の古地磁気方位データをもとに、紀元前1000年から西暦1100年までの古地磁気永年変化曲線を作成し、噴火履歴調査のための基礎資料とした^[MFRI01]。伊豆大島、浅間山、霧島山において、過去数百年の噴火を対象とした噴出物の地質調査を行い、テフラ層の区分やその特徴の明確化、岩石鉱物化学組成・組織などの物質科学的情報の収集を進めた^[ERI_03]。草津白根山本白根及び白根火砕丘群について、地表調査とトレンチ調査から、火口の形成年代や噴火様式等を明らかにした^[TYM_01]。雌阿寒岳、秋田焼山、御嶽山及び日光白根山において、火口周辺域を含むトレンチ調査や地表踏査による噴火履歴調査を行った。白山および御嶽山では、高分解能の噴火履歴を得るために、 $K-Ar^*$ 及び Ar/Ar^* 年代データの比較研究および10万年前より若い火山噴出物の年代測定を実施した^[AIST03]。十勝岳のヌッカクシ火口の調査から、約1800年前までの $マダマ噴火^*$ 活動後は $水蒸気噴火^*$ および小規模な山体崩壊が散発的に発生していたことがわかった。このことは、小規模噴火が現在活発な活動を示す火口以外でも発生しうる事を示しており、今後同じような火口の活動評価を行なう必要があることが改めて示された^[THK_11]。

イ. モニタリングによる火山活動の評価

各種観測データに基づき数年から数十年スケールの中期的な火山活動評価(特に $unrest^*$ 事象の定量的評価)を行うにあたり、ニュージーランドで開発された $火山活発化指数^*$ (Volcanic Unrest Index)を日本の火山に適用するための方法を検討し、十勝岳のVUI毎月値を1970年から2019年について算出した^[HKD_04, KUS_02]。

十勝岳、蔵王山、吾妻山、草津白根山、伊豆大島、焼岳における全磁力観測、北海道駒ヶ岳、有珠山、樽前山、十勝岳、雌阿寒岳、吾妻山、焼岳、御嶽山、阿蘇山、九重山、口永良部島における地震および地殻変動の連続観測を実施し、中長期活動を評価するための時系列データを取得した^[HKD_04, KUS_02]。十勝岳では、2020年9月14日の傾斜変動と微動の振幅比の変化が捉えられ、火山性流体等に起因する活動が浅くなっていることが示唆された。ま

た、機械学習による微小地震の自動検知アルゴリズムを開発し、御嶽山の微小地震に適用した^[KUS_02]。

GNSSデータに対して時間依存インバージョン*の手法を草津白根山、浅間山、伊豆大島、桜島、霧島山に適用し、マグマ溜まりの時間変化を推定した。特に桜島と霧島では両者のGNSSデータの統合解析を行い、桜島と始良カルデラでの体積膨張、霧島での2018年噴火前・噴火時・噴火後それぞれの地殻変動源の位置と変動量が推定された^[GSI_03]。

簡易トラバース装置を用いて、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った。2020年に噴火活動が活発化した諏訪之瀬島では、二酸化硫黄放出率の変化と爆発回数や地震活動との関係は明確でないことが分かった^[UTS_06]。焼岳における2020年4月の群発地震時に観測された山麓での異常湧出の高温泉は、化学組成と安定同位体比の分析から、焼岳の火山活動と直接的な関係はないことが明らかとなった^[JMA_05]。

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

インドネシアのメラピ火山について、マグマの貫入速度と噴火規模および様式との関係を調べた結果、貫入速度が検出限界未満の場合は水蒸気爆発、3000-4000 m³/dayおよび380,000 m³/dayの場合は溶岩ドーム形成噴火、3,160,000 m³/dayの場合はプリニー式噴火と分類された^[DPR106]。世界で発生する地震および火山噴火のデータを系統的に解析した結果、大地震の発生による応力変化が膨張となる火山において、噴火発生の頻度が2～3倍程度、地震発生後数年間高まることが分かった^[THK_11]。火山活動の変化に対する火口湖の応答について、湖水の熱・化学パラメータの数値的検討を行った。その結果、草津白根山の湯釜の湖水濃度が、湖底に供給される流体と平衡に達するまでに要する時間は約8年であることが明らかになった。10年単位の変動を示す湯釜の活動を湖水の成分濃度の変化から判断する場合、このような応答特性を考慮する必要があることがわかった^[THK_11]。伊豆大島の大規模噴火初期と中規模噴火は、噴出物中の長石量が少なく、マグマ組成や岩石組織は類似している一方、小規模噴火では長石に富んでいた。また、大規模噴火では、長石量は短時間で増大していた。これらのことから、地下のマグマの急上昇や脱ガス過程と関連して、規模と噴出物に関連性があることが推察された^[THK_11]。

3-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

災害の発生の直接的な原因となる、地震動、津波、火山噴出物、斜面崩壊など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過去の地震の震源過程*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。

震源モデルの高度化については、想定し得る最大の地震動の生成メカニズム解明のため、国内で発生した地震の既往の震源断層不均質滑りモデルの特徴を抽出した。1つの地震における断層面上の滑り角のゆらぎは約20度であることや、強震動生成域の応力降下量*には明瞭な深さ依存性があることがわかった^[DPRI09]。

2016年熊本地震本震の震源過程について、詳細な断層面形状や信頼性の高い地盤構造モデルを用いた再解析を行った。大局的には従来の結果と同様に、布田川断層で大きな滑りが求まり、更に地表近くにも有意な滑りが推定された。この滑り分布による地震動の計算波形は、震源域北端の阿蘇カルデラ内の記録の特徴をよく再現できた^[DPRI09]。また、断層浅部の滑り量や断層面形状など活断層研究から得られる情報を滑りモデルに取り入れることで、地震動の再現性が向上することも確認された^[NGY_05]。

地下構造モデルの高度化について、低次元有限要素法のコードをGPU上で実装することにより地盤増幅解析を実現し、これを人工知能と組み合わせ、高速に地盤内部構造を推定する手法を開発した^[CTOC01]。紀伊半島南東沖で実施された構造調査測線の周囲で発生した地震のうち635個について、DONET*の検測値と構造調査で得られた速度構造を用い、震源の再決定を行った。得られた震源はJMAカタログよりも全体的に浅く、特に2016年4月1日に三重県南東沖で発生したM6.5の地震は、プレート境界地震である可能性が高いことを示した^[CTOC03]。

強震動評価の高度化に向けて、太平洋スラブ内の深発地震により励起される強震動を評価するため、北西太平洋でのOBS観測で得られた海洋リソスフェア*を伝播する波の方位依存性を分析したところ、海洋プレート内にN45°E方向に長軸（相関距離20 km）、N135°Eに短軸（相関距離0.25 kmと2 km）を持つマルチスケールな短波長不均質構造が推定された^[ERI_14]。

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、2011年東北沖地震の強震動を解析し、強震動生成域の規

模とそこからの距離を用いて距離減衰を予測するモデル式を作成した^[CTOC01]。

強震観測点におけるサイト特性*評価手法の開発では、多国間共同研究が進められており、フランス・グルノーブル盆地や米国・インペリアルバレーにおける地下構造を明らかにする取り組みがなされた^[CTOC05]。

イ. 津波の事前評価手法

大地震にともなう海底斜面崩壊による津波である1929年グランドバンクス津波（米国）の再現数値実験を行った。海底ケーブルが切断された位置に基づいて海底地すべり域を仮定し、海底地すべりの数値計算手法を改良して津波の再現計算を行い、観測波形をおおよそ再現できることを明らかにした^[HKD_05]。

津波の波線追跡の新技术を開発し、津波第1波や反射波の波線と海底地形との関係を明らかにした。また、日本海における60断層について、断層面上の滑り分布の不均質性を考慮した7万通り以上のシナリオを想定し、日本海沿岸の約150の市町村ごとの確率論的な津波高さを計算した。津波計算手法の高速化も進めた^[CTOC04]。南海トラフでも、滑り遅れ分布に基づいてシナリオ地震の震源モデルを生成する手法を構築した^[JAMS01]。

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*データベースを増強した。また、2003年と1952年の十勝沖地震について、最新のプレート形状と地下構造モデルを使用し、近地と遠地の古い地震波形記録を精査して震源インバージョンを行った。その結果、1952年十勝沖地震では、Mw6.1の初期破壊に続いてMw8.1の十勝沖でのdown-dip方向への破壊があり、さらに破壊は東方向へ伝播してMw8.0の規模の厚岸沖の破壊が生じていたことが明らかになった。この地震の震源時間関数は、十勝沖と厚岸沖の破壊に対応する2つのピークを示している。これに対して2003年十勝沖地震は十勝沖のMw8.1のdown-dip方向への破壊のみであり、両者には明瞭な相違が確認された(図8)^[ERI_16]。

鳥取県内の堆積平野を中心とした地域で実施した微動探査記録の総合的利活用を目指し、データベースおよびGIS*による表示システムを構築した^[TTR_01]。津波避難データの取得のために、千島海溝周辺海溝型地震により大津波が想定されている中学校において避難訓練を実施した。群衆・高齢者装具・車いす・自力避難困難者のリヤカー運搬等、避難条件の違いによる避難速度の違いをGPSで計測した。また、学習効果を確認するため、訓練後のアンケートの分析も進めた^[HRO_02]。

防災計画策定においては、災害シナリオ評価結果がシナリオ・手法の組み合わせによりばらつきを持つことを適切に理解する必要がある、そのためのシステム開発と対象地域の拡大を進めている^[CTOC02]。

災害被害予測における不確実性の定量化への期待が高まってきている背景から、自然災害による被害をサロゲートモデル*と数値解析を組み合わせることで、低計算コストで確率

論的に評価する枠組みを提案し、南海トラフの巨大地震の津波被害の確率評価に適用することでその有用性を確認した(図9) [CTOC18]。

2018年北海道胆振東部地震を例に、想定地震に対する既往の被害推定手法の妥当性を検討した。被災3町全世帯アンケートより胆振東部地震の被災町の負傷率を推定し、既往の各種方法による推計値と比較したところ、従来の建物被害との相関関係に重点を置いた人的被害評価法では十分でない可能性があることがわかった [CTOC17]。

文化財等の災害の予測や被災状況の把握を目的とし、都道府県の指定文化財、登録文化財、指定外の文化財約23000件について位置情報を入力した文化遺産災害情報マップを作成した。加えて、2021年2月13日に発生した福島県沖を震源とするM7.3の地震について、文化遺産災害情報マップに推定震度分布や建物被害推定情報を重ね合わせて、文化遺産の被災可能性の高い場所を可視化し、これを東北大学災害科学国際研究所や歴史資料保全に関わる地元のNPOと共有して被災状況調査を実施した [CTOC19]。

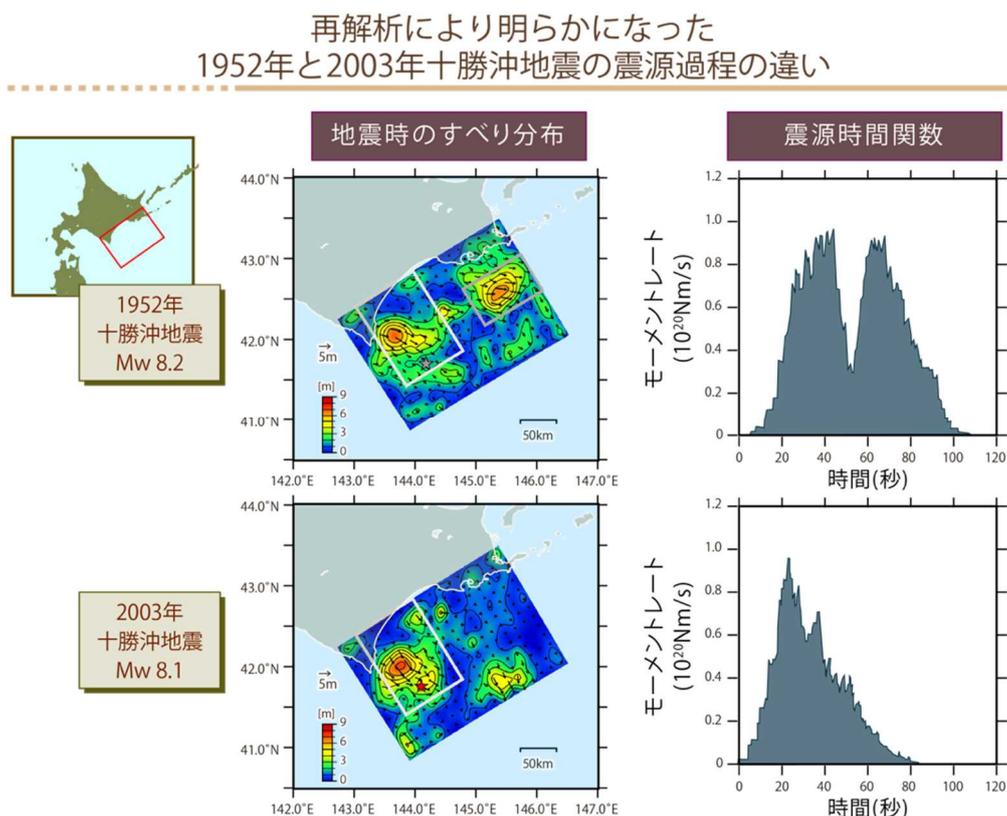


図8. 再解析により明らかになった1952年と2003年十勝沖地震の震源過程の違い

1952年十勝沖地震、2003年十勝沖地震について、これまでの観測記録を集めて再解析した結果、2つの地震が異なる特徴を持つことが明らかになった。☆は初期破壊の位置。1952年十勝地震では、2003年十勝沖地震と同様の滑り域(図中の白い□)に加え、厚岸沖(図中の灰色の□)でも滑りが生じていたことが明らかになった(Kobayashi et al., JGR, 2021に加筆)。

地震シナリオの不確実性を考慮した津波波高の確率論的評価

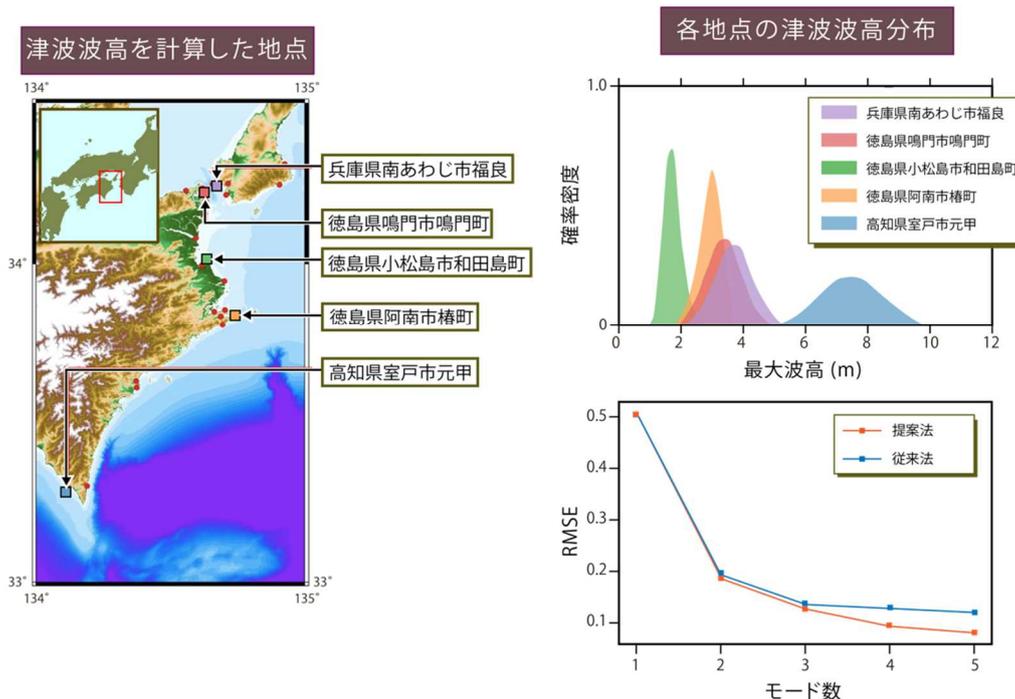


図9. 地震シナリオの不確実性を考慮した津波波高の確率論的評価

解析対象地域である四国地方・淡路島周辺での地形の解像度を段階的に上げ、2次元差分法を用いた解析を実施し、対象とした5点（左図）を含む25箇所における最大波高を計算した。その際、断層パラメータには内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会による「断層パラメータ_ケース03」を基本とし、滑り角と滑り量に±25%までの変動を与えた。その中で25例の計算結果を基礎データとしたサロゲートモデルを用いて、滑り角と滑り量のばらつきを考慮した場合の最大波高の確率分布を求めた結果、各観測点の分布の特徴が異なること（右上図）や、最大波高の近似を工夫した提案手法では、モデルのパラメータ（モード数）を増やすごとに従来の手法と比べて誤差(RMSE)が減少し、推定精度が向上すること（右下図）がわかった。

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

四国の主要国道沿いにおいて、0.5 m-超高密度DEM*を用いて、重力変形、地すべり、過去の崩壊痕跡、急崖など、項目別に分類した危険斜面の分布を抽出した。北海道東部の海岸地すべり土塊において継続している多項目観測データから、波浪を原因とした浸食により不安定化が促進しており、これまでに報告された事例よりも弱い地震動で変位したことが明らかになった^[DPRI10]。

地表設置型合成開口レーダーの大気補正手法を開発し、mmオーダーの変化を捕捉できるようになった。さらに小規模な地すべりの表面状態の変化から土砂すべりの兆候と思われる

る現象を捉えることに成功した^[IRID03]。地震前後の1m-LiDAR* DEMを用いて特徴的な地物の移動方向と変位の大きさを得る手法を開発することにより、地震断層の地表変位や地すべり性の移動土塊の検出が可能となった^[CTOC14]。

2018年北海道胆振東部地震発災地の山地斜面におけるテフラの供給と再堆積を、テフラの給源火山の噴火史に基づいてシミュレートし、その結果をテフラ堆積量の実測値と比較することによりシミュレーションの精度検証をおこない、適切なパラメータを付与するうえで有益な情報を得た。また、水文観測および化学・鉍物分析によって、テフラ累層中での長期間にわたる間隙水の不均質な透過とそれに伴う風化変質を調べるとともに、粘土鉍物に吸着蓄積する大気由来の宇宙線生成核種¹⁰Beを分析して、テフラの強度低下をもたらす粘土化の進行過程を調べた^[CTOC15]。

オ. 火山噴火による災害誘因の事前評価手法

桜島火山における地球物理学的観測量と火砕流*流動を関連付けるパラメータ群の精査を行った。その結果、火砕流をともなう噴火47例中27例にみられた顕著な前震活動の多くは、噴火前の膨張レートが減少もしくは停止する際に活発化すること、また火砕流を伴う噴火は噴火後の収縮量が大きいことなどが明らかになった^[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

大地震の震源即時推定に向け、強震観測データと地震波伝播シミュレーションのデータ同化*にもとづく震源イメージングの有効性を検証した。同手法によりKiK-netデータを用いて2008年茨城県沖地震の震源イメージングを行なったところ、発震時に震源近傍に初期波動場が良好に再構築され、データ同化を行わない従来のイメージング法と比較して震源像をより明瞭に推定できることが示された^[ERI_14]。令和元年度に引き続き3次元差分法に基づく地震波伝播シミュレーションのオープンコード (OpenSWPC, Maeda et al., 2017) の改良、機能拡張を進め、2020年8月13日にVer. 5.10をGitHubに公開した^[ERI_14]。

“揺れから揺れを予測する” PLUM法*において、P波*を検知する方法を発展させ、初期破壊のP波の上下動成分のみから得られる震度を予測に用いることで地盤増幅特性*が不明な観測点でも適用できる方法を開発し、約2割の地震において従来のPLUM法よりも迅速に警報を発表できることを確認した。この改良法と従来法を柔軟に組み合わせることで、従来よりも迅速な震度予測が可能となる。また、断層破壊全体を反映する地震の規模の即時推定をしてから地震動を予測する方法では強い揺れに間に合わない場合でも、密な観測網が利用可能な状況では、PLUM法によって迅速な警報を発信できる場合があることを事例検証により示した^[JMA_06]。

イ. 津波の即時予測*手法

任意の時系列信号を逐次的に処理することでデータの蓄積を待たずに複数の振動パターンに分解することのできる手法（経験的モード分解法）を適用し、ノイズ成分、地震動、潮汐成分等を含む実データからの津波信号の効果的な抽出を試みた。海底における津波記録の場合には、ごく微小な津波から2011年東北沖地震による巨大津波まで、特定の次数範囲のモードに顕著な振幅の信号が現れることを見出した。さらに、地震・津波双方を含む現実に近い記録を数値的に合成し、予測手法のテストを行うというプロセスを実現するため、地震・津波運動を計算できる融合数値計算法と海底圧力を再現できる地震津波シミュレーション手法をシームレスにつなぎ、実用的かつ現実的な不均質構造を組み込んだシステムを実装し、既存手法との比較を行った^[HRS_02]。

GNSSの搬送波位相*変化から断層滑りを直接推定する手法の性能評価のため、2011年東北沖地震とそれに引き続く地震直後の余効滑りの時空間発展を推定した。地震時滑りによる各観測点の地表変位を搬送波位相変化に反映させることで、本震、大きな余震、および余効滑りを連続的に抽出することに成功した。海底の動きを迅速にとらえることを目指し、実海底環境下でドリフト特性を把握できる海底水圧計観測システムのプロトタイプ機を用いて三陸沖北部の水深4178 m地点で観測を行い、データを取得することに成功した^[THK_12]。

津波の減衰予測に関しても、その性能評価が進んだ。近地津波については沿岸津波観測データへのリアルタイム回帰分析手法を、遠地津波については経験的減衰式を過去の事例に適用して予測性能を評価したところ、いずれも概ね±12時間の幅で減衰予測できることがわかった。また、地震波形の周期成分ごとの振幅分布から津波地震*の規模を推定する手法を考案した^[JMA_06]。

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

火山灰堆積後の土石流発生の予測モデル構築のため、降灰によるクラスト*に覆われた斜面表面に対する降雨流出・土砂流出に関する室内実験を行った結果、クラストの存在が表面流量を増加させることや侵食の発達過程に影響を与えることがわかった。また、数値シミュレーションにより、流路の形成、侵食過程などをある程度再現することができた。さらに、焼岳を対象として噴火後60年間の土石流発生ポテンシャルの変化について調べ、土石流発生ポテンシャルが下がっている状況で発生した土石流は、源頭部に集中した強度の大きい降雨が誘因であったことを明らかにした^[DPRI_12]。

気象レーダーを用い、2020年6月4日に発生した桜島爆発的噴火の噴煙高度が火口上約8000 m以上に達していたことを明らかにした。領域移流拡散モデルと全球移流拡散モデルを統一した新しい気象庁移流拡散モデル（JMA-ATM）を開発し、JMA-ATMと結合した火山灰データ同化・予測システムで作成した初期値を用いることで、火山灰雲の中心位置と面積の予測が改善することを確認した^[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

地震発生確率に関する意識について、確率を計算する期間を変えた場合、人の意識はどのように変わるのかについてアンケート調査を行ったところ、確率の高低にかかわらず、10～20年間の確率を計算した場合に不安を感じる人の割合が最も高くなった^[III_01]。

南海トラフでM8クラス以上（半割れ）およびM7クラス（一部割れ）の地震が発生した後に、M8クラスの地震が後発する確率を把握するために、最近100年間のグローバルな地震カタログを用いた世界の事例を信頼区間も含めて分析した。その結果、例えばM8クラスの地震発生後から1週間以内にM8クラスの地震が発生する確率は2.9%（30回に1回程度）となり、政府がガイドラインで目安として提示している数字と整合的となった。一方で、ガイドラインで「程度」としている部分については幅があることに留意すべきことなどが明らかになった^[IRID04]。

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構築のため、振幅を用いた震源自動推定ツールと火山性地殻変動源自動推定ツールの開発に取り組んだ^[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

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

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、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。安政江戸地震（1855年）に関する重要な史料として「安政大地震絵巻」（三康図書館所蔵）を取り上げ、昨年度検討した「江戸大地震之図」（東京大学史料編纂所所蔵）との比較によって、個々の絵が描写する場所や時間を詳細に検討し、地震の揺れに関する検討材料になりうる記述があることなど、絵巻の史料としての信頼性や可能性を明らかにした^[UTH_02]。津波は災害誘因としての場所限定性が強い。安政東海地震津波（1854年）の被災地である浜名湖周辺、特に、浜名湖南東岸と北東岸について、現存する寺社や歴史的建造物などの位置をもとに地理的位置の同定を行い、それぞれ「舞坂宿津波図」と「安政地震津波被害絵図」から街並みや古地形を復元するとともに浸水地点を判定した^[IRID05]。

近年の地震・津波災害についての研究も実施した。2011年東北沖地震（東日本大震災）を事例に、震災後における避難・土地利用・防災施設を組み合わせた総合的防災政策の政策効果を検証するため、被害から復興に至る地域社会の長期変動について調査した。三陸地域では、漁村の災害文化に対する過小評価と防災施設への依存、防潮堤計画と地域防災計画の分離、防災集団移転事業における避難道計画の不備などを指摘した。また仙台平野では、基幹産業である農業生産と防災集団移転中心の土地利用規制とのミスマッチ、長期にわたる広域的な交通障害による人口流出などによって生活基盤の脆弱化が進んでいることを明らかにした^[NGY_06]。土地利用計画と防災政策とのバランスは重要な政策的課題である。南海トラフ地震の発生が想定される和歌山県那智勝浦町を事例に事前復興と津波対策の取り組みについて調査し、想定される被害の大きさと対策とのギャップを指摘した^[HGY_02]。土地や住宅の問題は地域による差異が大きく、災害の軽減を図るためには、地域の実情を調査し、より効果的な対策を考える必要がある。富山県を事例に国勢調査の「世帯構造等基本集計」から住宅の保有構造（持ち家と借家）と建物構造（木造と非木造）を調べた結果、それぞれ全国に比して持ち家と木造の比率が圧倒的に高いことがわかった。富山県のような地方圏では、持ち家・木造住宅を想定したシステムを早急に整備する必要があることを指摘した^[TYM_03]。

防災教育における地震災害事例に関する研究成果の活用について、兵庫県を対象に調査

した結果、阪神・淡路大震災（1995年兵庫県南部地震）は、学校における防災教育が本格的に導入されるきっかけとなり、地震発生のメカニズムや被害が兵庫県内の副読本すべてに掲載されているが、震災を経験した教員の高齢化により、被災経験を主題とした授業の実施機会が減少し、対照的に南海トラフ地震を主題とした教材利用が増えていることが明らかになった。一方、1925年北但大震災の事例は、主な被災地であった豊岡市城崎町の学校教育において現在も継続して活用されており、その要因として災害記憶の継承に対するコミュニティの役割が重要であることを指摘した^[HYG_01]。

（２）地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

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。

北海道稚内市での北海道大学の学生を対象とした避難実験から収集した避難移動履歴データを用いて、地震による津波と土砂災害との複合災害を想定して集団避難行動の空間分析を行った。その結果、津波のみの場合には避難時間に猶予が見られるが、複合災害の場合には時間的な猶予がほとんどなく、より迅速に避難を開始する必要性が明らかになった。また、参加者に避難実験結果をフィードバックした結果、特に避難行動速度と事前防災学習の重要性に関して参加者の意識に変化が見られ、津波からの避難を検討する際の基礎的な課題が明らかになった（図10）^[HKD_07]。

認知科学のアプローチから、南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域在住の成人から得られたデータを分析した。その結果、避難するか否かを判断する上で参考にする情報・知識は、津波の特性や被害の予測、避難所の利用可能性や避難生活の見通し、居住地の位置や海拔、自治体やマスメディアなどの情報源といったカテゴリーに整理することができた。さらに、避難判断の参考とする情報元として、メディアから発信されたものに絞った場合、発信者・発信ツール・発信内容の3つのカテゴリーの重要性が明らかになった。今後、これを元にメディアの災害情報が被害の発生抑止・軽減に資する過程とその個人差を明らかにする検証実験を行う^[IRID06]。

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。2020年6月4日の噴火を受け、鹿児島市や気象庁と連携して火山防災勉強会を開催し、噴石飛散や噴火警戒レベルなどについて住民の認知度を調査した。その結果、桜島火山の噴火警戒レベルの意味や、噴石の飛散距離によって噴火警戒レベルが上がることに対する認知度はかなり高いものの、噴火警戒レベル5の基準である噴石の飛散距離はほとんど知ら

れておらず、被害に直結する具体的な数値について認知度を上げる必要があることを指摘した^[DPRI13]。

一方、2014年に深刻な御嶽山噴火被害を経験した長野県木曾地域は、観光地に位置しながらも超過疎の問題を抱えており、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を整備してきた。本年度は、引き続き活動記録を蓄積するとともに、火山マイスターに対するインタビュー調査と結果の予察的な質的分析を行った。そこで抽出された課題は、マイスター自身の知識レベルの問題というよりも、制度設計や具体的な運営、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た^[NGY_06]。

近年大規模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の設置とともに、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。とりわけ、阿蘇火山博物館を訪れる修学旅行生を対象としたガイドプログラム(防災教育プログラム)作成のため、熊本県観光統計表の教育旅行来熊者発地リストから上位都道府県を抽出し、そのニーズを把握するとともに、対象都道府県の防災マップの収集を開始した。また、都道府県自治体職員を主対象とした火山防災特別セミナーにおいて「高リスク・小規模噴火との共存」にかかわる講習を実践し、講習資料を整備した^[KUS_03]。

防災リテラシー向上のための研修プログラムの開発については、試行段階において、研修の対象や方法を明確化することが重要であり、本年度は、実務者(行政担当)を対象に、地震・火山研究者が「理解してほしいこと」に基づく座学部分の研修プログラムを試行的に作成した。具体的には、研修項目ごとに学習目標を検討、地震研究者による研修スライドと指導上の留意点を作成、育成フレームにおける知識を評価するために確認テストの作成を実施した。併せて、Web環境を活用したオンライン研修・オンデマンド研修・リアルタイム研修・ハイブリッド型研修、また構成要素として座学・動画・演習等の組み合わせといった研修方法について、自治体の業務手順に沿った研修プログラムにおいて検討した^[NGT_02]。

また、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)を、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つの取り組みに具体的に導入し、防災リテラシーの向上に対する可能性を検討した。とりわけ市民参加型であるがゆえに、感染症拡大の状況下において、研究者と市民、また市民同士の対面コミュニケーションに限界を抱える一方で、オンラインツールを用いた手法の可能性も明らかになった^[DPRI14]。

複合災害を想定した避難行動実験

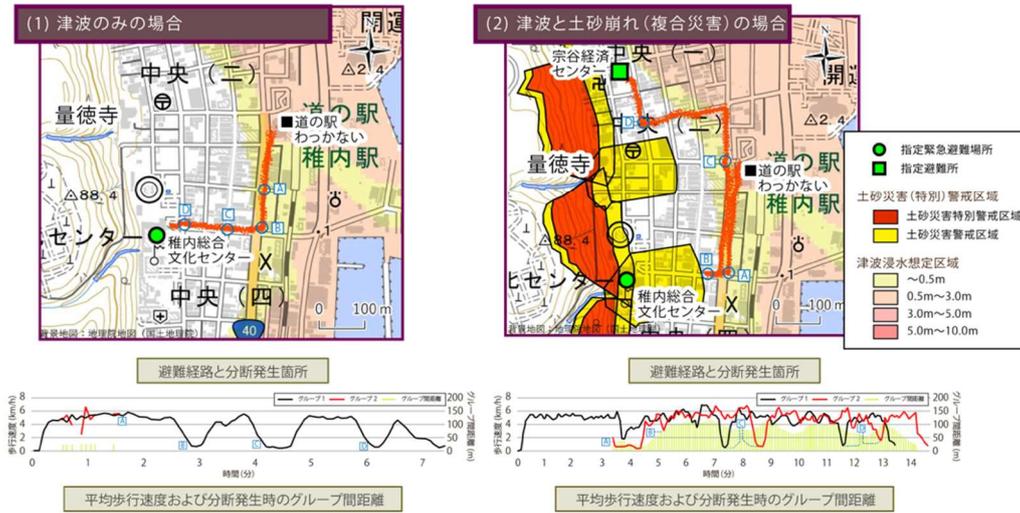


図 10. 複合災害を想定した避難行動実験

北海道稚内市を対象地域として、地震による津波と土砂災害との複合災害を想定した避難行動実験の結果。地図上の赤点があらかじめ指定された避難経路を示し、グラフは平均歩行速度及び分断発生時のグループ間距離を示している。津波のみを想定した場合、道の駅わっかないから避難場所（地図中の緑丸）へ8分以内に移動が完了し、津波到達までの時間的余裕がある（左の地図とグラフ）。一方、地震により土砂崩れが発生し、当初目標としていた避難場所へ移動できないことを想定した場合、歩行速度は津波のみの場合と大きくは変わらず、A地点で二つのグループに分かれ、グループ間の差はB地点でさらに広がった。そして、その差は別の避難所（地図中の緑四角）へ移動するまでに縮まらなかった。最終的に、遅い方のグループの避難完了までに14分以上を要した。

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

地震学・火山学の成果を災害軽減に活用する観点から、地震学と火山学を中核とし、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの分野を含む、総合的な学際研究として本研究計画を推進している。また、地震本部や行政機関等と連携し、基礎研究の成果を発展させ、社会実装につなが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、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貫として、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」に関するワークショップを2020年12月に開催した。

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、関係各機関の情報の共有を行っている。

火山噴火予知連絡会*は、定例会を2度開催するとともに、4月に口永良部島部会を設置したほか、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]。

・ 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・参画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]」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

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。今年度は、防災科学技術研究所により提案された、応力分布モデルに基づく地震発生シナリオの作成手法^[NIED03]を検討し、現状の測地観測から得られた知見を反映した震源モデル・シナリオの設定の可能性を議論した。また、スロー地震のモニタリング結果に基づく地震シナリオの高度化についても検討し、海底地形またはプレート境界面形状や固着率との比較の重要性を指摘した。

・ 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。新潟大学は、『里正日誌』所収「安政二卯年十月二日大地震略記」に基づき、安政2年の江戸地震の被害の境界地域を検討した^[NGT_01]。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用いて、安政江戸地震の震度を検証および定量化する狙いで、根津周辺における稠密観測を開始した^[ERI_15]。東京大学情報学環は、住民の災害に関する意識調査分析（ドラマ『パラレル東京』や関連するNHKスペシャルを軸とした、首都直下地震や災害に関する調査の解析）を実施した^[IIL_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。政府の地震本部は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、本年度は、十勝・根室沖のS-net観測点のデータを用いることにより、地震発生後数分以内に津波浸水の予測が可能な即時津波浸水予測手法を開発した^[HKD_09]。根室沖の陸側プレート前縁部の地震波トモグラフィ解析から低V_p堆積物ウェッジ構造を求め、その構造が2011年東北沖地震時に海溝軸に至る大滑りを起こした宮城沖のものと類似していることを指摘した。千島海溝での超巨大地震発生時にも、海溝軸まで滑りが到達する可能性がある^[ERI_05]。根室・釧路管内の縄文以降の遺跡報告を網羅的に調査した結果、過去1万年に最大8回の液状化痕跡が認められた。この回数は、津波堆積物から推定されているイベント数の半分程度である^[HKD_09]。液状化痕跡と津波堆積物の年代を比較することで、地震動と津波規模の関連性が明らかになる可能性がある。

・ 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。

マグマの動きとマグマ供給系の理解に関しては、2015年8月15日に発生した開口性のマグマ貫入イベントと同時に発生した群発地震の関係を調べた。また、従来は球状圧力源の組み合わせで説明されてきた桜島のマグマ供給系モデルに開口性割れ目を加えたモデルの検討を進めた^[DPRI07]。大規模噴火の発生予測に資するため、小型センサーを用いて二酸化炭素濃度を測定するためのパラメータの検討を進めた^[TIT_02]。マグマの貫入速度と噴火様式に関しては、マグマの貫入速度が小さく、非爆発的な噴火になった事例としてインドネシアのシナブン火山とメラピ火山の噴火プロセスを明らかにし、桜島におけるマグマの貫入速度と噴火様式との比較をおこなった^[DPRI06]。

大規模噴火発生時の噴火活動推移把握のための観測技術として、衛星やドローンを用いた観測手法の開発^[ERI_07, JMA_03]や2012年7月から新たに日本国内で利用可能となった920 MHz帯を用いた地震データ伝送手法の開発^[THK_13]、遠望観測の強化^[JMA_12]、SO₂の簡易トラバース測定^[UTS_06]を継続した。

近世末の遺構発掘による降下火山灰分布の調査を行い、降灰分布は気象条件の影響を強く受けることが明らかになり^[NAB_01]、今後のハザード予測には風速場の時間発展などを組み

込むことが重要であることが分かった。2009年以降の火砕流発生事例の解析から、噴火活動の後半の脱ガスが進んだ状態で火砕流が発生しやすいことが判った^[DPRI11]。降灰の土石流や洪水発生への影響に関し、降灰によるクラストが斜面を覆うと表面流量が増えることを室内実験により明らかにした^[DPRI12]。

防災リテラシー向上に関しては、2020年6月4日に発生し、火山岩塊が居住地に達した噴火に関するアンケートを行い、噴火警戒レベルの認知度は高いが警戒を要する範囲の認識が不十分であることが判った^[DPRI13]。また、鹿児島市内への大量降灰災害に市街地側住民の事前避難を実現することにつながる研究に着手した^[CTOC16]。

・ 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として、VUI（火山活発化指数）を十勝岳について試算し、阿蘇中岳についてもVUI算出基準の検討を開始した^[HKD_04, KUS_02]。また、災害情報の発信に関する研究の問題点を整理するため、a)情報を発信すべき対象、b)現在使われている防災資料の内容、c)噴火警戒レベルと小規模噴火、d)モニタリングは誰が行うか、の4項目について検討を進めた。

小規模噴火の発生する場の把握に関しては、白根火砕丘群形成史の解明のため地質図の試作と各火砕丘の活動年代推定を実施した^[TYM_01]。また、草津白根火山において広帯域MT観測による3次元比抵抗構造モデルの構築を行うとともに、御嶽山で比抵抗構造モデル推定のための試験観測を実施した^[TIT_03]。

火山の活動把握に関しては、白根火砕丘周辺における多項目観測の継続^[TIT_03]、伊豆大島における人工電流源による地下比抵抗連続モニタリングの継続^[TIT_03]、弥陀ヶ原における水準測量、GPS繰り返し観測、地震観測、ドローンによる熱観測^[TYM_02]、を行った。また、北海道駒ヶ岳・有珠・樽前・十勝・雌阿寒・吾妻山・伊豆大島・焼岳・御嶽・阿蘇・九重においても各種観測を継続している^[KUS_02]。基盤的火山観測網（V-net）等のJVDN*システムに集約されたデータの活用も進めている^[NIED01]。また、多数の登山客が訪れる富士山において全磁力連続観測を実施した^[GSI_06]。小規模火山噴火に関する研究を推進するため、活火山の常時監視体制の継続や、地震計や監視カメラの増強を進めている^[JMA_12]。

噴火の予測に関する研究として、課題番号THK_11との合同研究集会を実施し、意見交換を行った。

(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^[NIED_05]。

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。また、西之島では、火山活動が活発化した2019年12月以降、溶岩*等によるとみられる地形や海岸線の変化の様子を検出した^[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、草津白根山に埋設型の地震計・傾斜計及び空振計を整備した^[JMA_12]。

海上保安庁は、海域火山の定期巡回監視観測を実施するとともに、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JDxnet*の安定的な運用を継続し、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開始した^[ERI_19]。高知大学は、地震動観測記録のモニタリングを準リアルタイムで行うシステムを構築した^[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、分散型音響センシングによる構造調査を実施した^[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申請を行い、動作確認を行った^[THK_13]。情報通信研究機構は、次世代航空機搭載SAR*の開発のため、機械学習をベースにした土地被覆分類に関する研究などを進めた^[NICT01]。

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

北海道大学は、新たに気象庁のひずみ計観測網の25観測点141チャンネルのデータ流通及び収集、産業技術総合研究所の超伝導重力計データのオフライン収録を開始した^[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開始した^[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、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、震源決定のルーチン業務を2020年9月から開始した(図11)^[JMA_14]。産業技術総合研究所は、支笏、洞爺、濁川、大山、十和田、阿蘇、鬼界、

屈斜路火山における大規模噴火の前駆活動と噴火推移をとりまとめ、その成果の一部をGSJ研究資料集として公開した^[AIST11]。国土地理院は、浅間山の火山土地条件調査を実施するとともに、十勝岳などの火山基本図及び数値データを整備した^[GSI_10, GSI_09]。地震・火山噴火予知研究協議会では、戦略室が主導して、研究成果共有サーバ (evrss) に、日本列島周辺域のプレート境界面分布、日記史料有感データベース、2003年十勝沖地震臨時GPS観測データなどへのリンク登録を行なった^[ERI_25]。

S-net導入前後の震源分布の比較

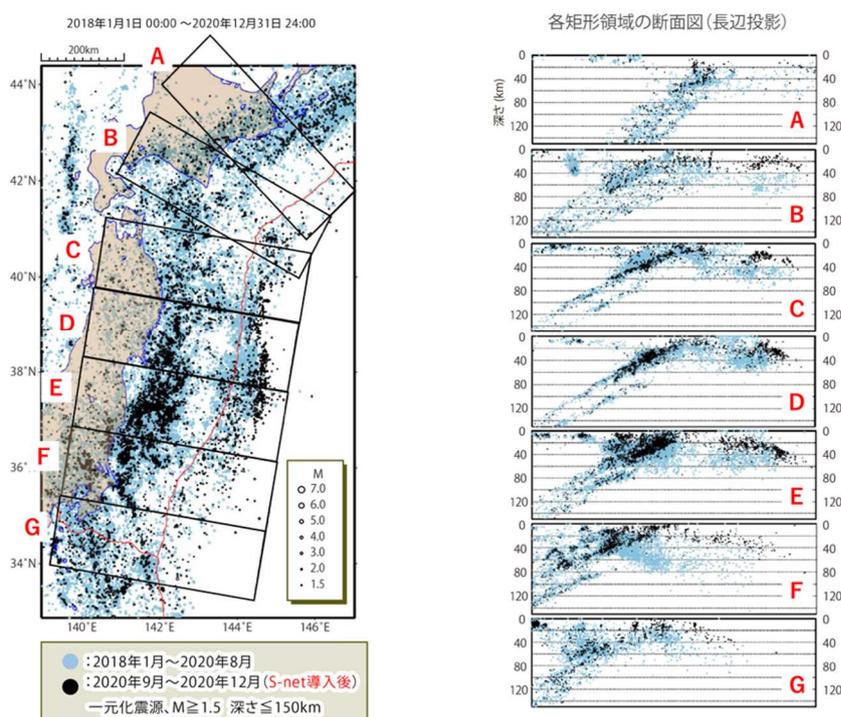


図 11. S-net 導入前後の震源分布の比較

気象庁は、2020年9月から、S-netの地震観測データを取り込んだ一元化震源処理のルーチン業務を開始した。東北日本の震源分布について、S-netのデータ導入前(2018年1月から2020年8月まで、薄青)とS-net導入後(2020年9月から2020年12月まで、黒)を比較すると、S-netデータを用いた震源決定では震源の深さが系統的に浅くなる傾向があることがわかった。S-net導入により海域の地震観測点が増えたことにより、従来よりも精度よく震源の推定ができるようになったと考えられる。

(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。

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，臨時観測網の2013年から2018年までのデータを用いて，2016年カイコウラ地震震源域のS波速度異方性*構造解析を行った^[THK_01]。2020年11月にニュージーランドの調査観測船Tangaroaを用いて，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，海底地震計10台，海底圧力計4台，さらにニュージーランドの海底圧力計10台による海底観測網を設置した^[ERI_08]。コロナ禍で海外渡航が大幅に制限される中，日本人研究者は最小限の3人が入国を許可された。

プレート沈み込み帯周辺の国際共同研究においては，メキシコ・ゲレロ州沖合で回収された地震計記録の解析，微小地震活動および低周波微動の分布と海底地形との比較から，ゲレロ空白域内の浅部プレート境界の一部で，通常の地震や低周波微動のいずれも発生しない領域が存在することが分かった。プレート境界面上の窪みに蓄積する海洋性堆積物がゲレロ地震空白域の要因となっている可能性を示唆した^[DPR101]。また，アラスカ南部地域の地殻および上部マントルの地震波速度とポアソン比の3次元微細構造解析から，2018年11月30日アンカレッジ地震(Mw7.1)と1964年アラスカ巨大地震の震源域の構造と発生メカニズムについて，太平洋スラブの脱水と震源域の構造不均質の関係を指摘した^[THK_05]。

フランスや米国との共同研究では，地震動のデータを使って詳細な地下構造を明らかにした。グルノーブル盆地で得られた速度構造は，地質境界の約2.5倍の深さのところで地震基盤に達することを明らかにした。インペリアルバレーでは，盆地全体の構造を明らかにするために，強震動波形の長周期域の水平上下スペクトル比が重要な情報を持つことが示された^[CTOC05]。

インドネシアの火山を対象とした国際共同研究では，2020年8月に噴火したシナブン火山と2021年1月に噴火したメラピ火山について水蒸気噴火からマグマ噴火に至るまでの10年を超える期間における活動推移を，主に地震活動と地盤変動に着目して整理し，メラピ火山におけるマグマの貫入速度と噴火規模および様式との関係を定量的に明らかにした

[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 48 回実施した^[GSI_07]。石岡局の水平速度は約 22.5 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

社会との共通理解の醸成を図るために、地震・火山噴火現象及び地震・火山災害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、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・火山噴火現象の予知研究や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

現地での防災対応に携わる都道府県自治体職員を主対象とした火山防災特別セミナーにおいて「高リスク・小規模噴火との共存」にかかわる講習を实践し、講習資料を整備した^[KUS_03]。また、実務者 (行政担当) を対象に、防災リテラシー向上のための研修プログラムの開発を進めており、地震・火山研究者が「理解してほしいこと」に基づく座学部分の研修プログラムを試行的に作成した^[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 2 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。