

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)^[IRID01]。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]。

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

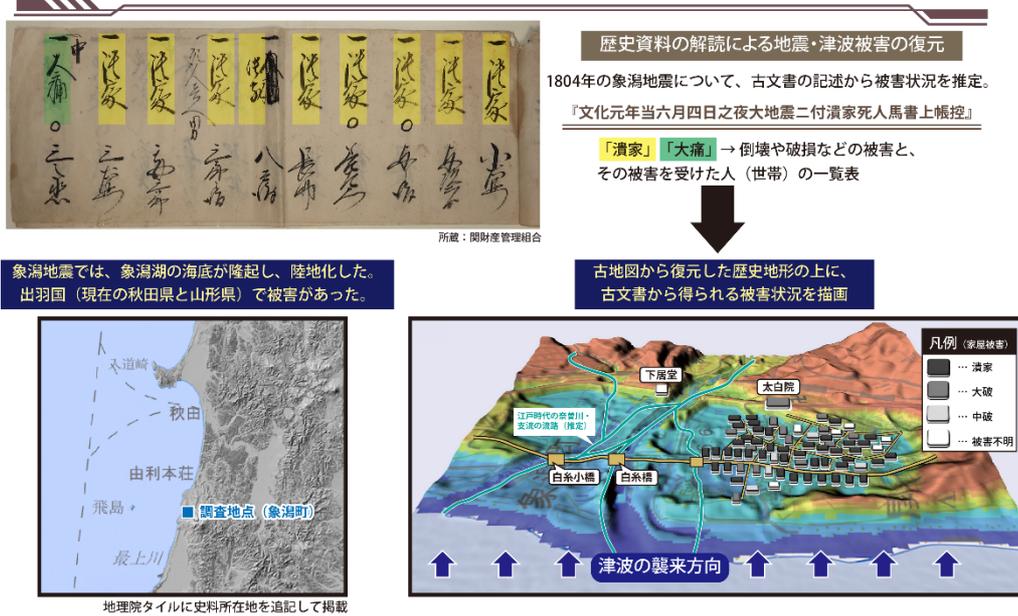


図 4. 東北地方における地震・津波・火山情報に関する歴史資料の所在調査とデータ収集

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 年のフレラ*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 [KOBE01]。

(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カイク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・破砕・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]。

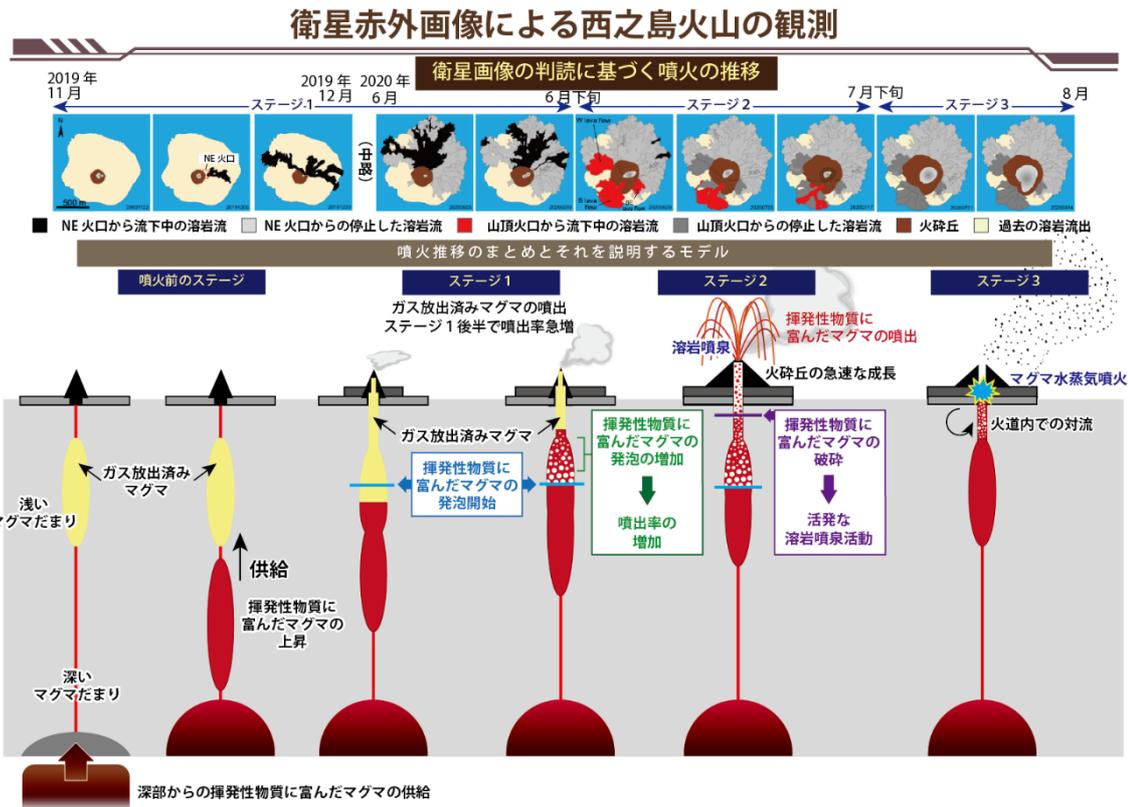


図5. 衛星赤外面像による西之島火山の観測

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^[KGS01]。

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プログラムを組み合わせ解析し、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]。

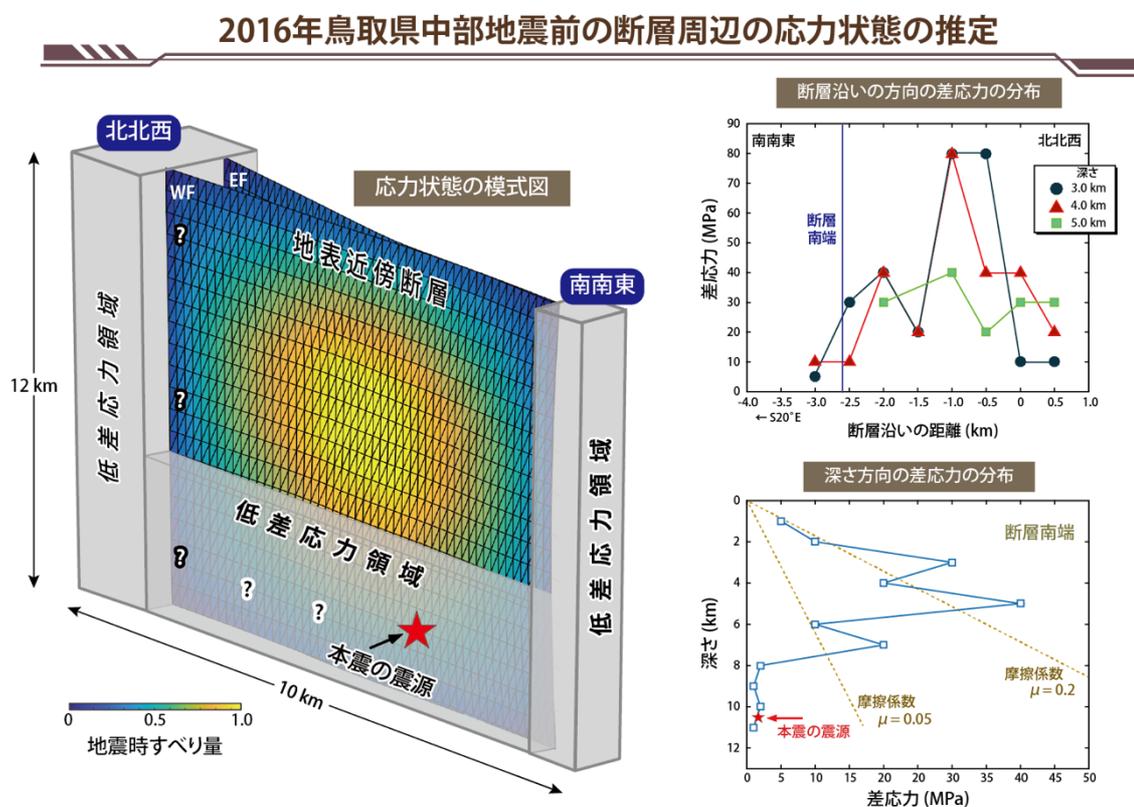


図 6. 2016年鳥取県中部地震前の断層周辺の応力状態の推定

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）^[DPRI04]。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

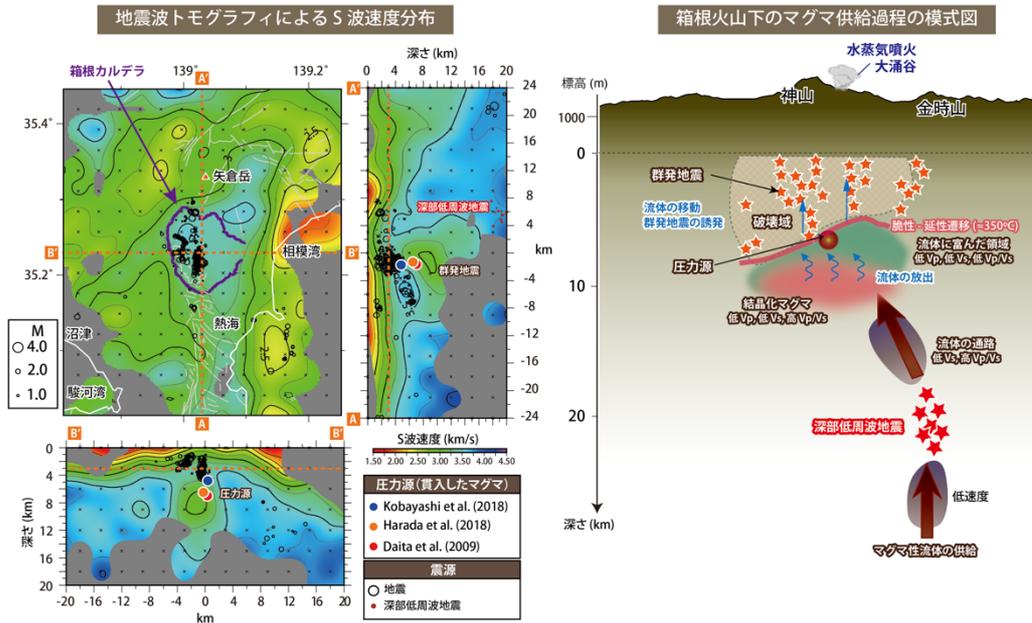


図7. 箱根火山下へのマグマ供給過程

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－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 [DPRI04]。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－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^[DPRI05]。

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^[DPRI05]。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]。

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

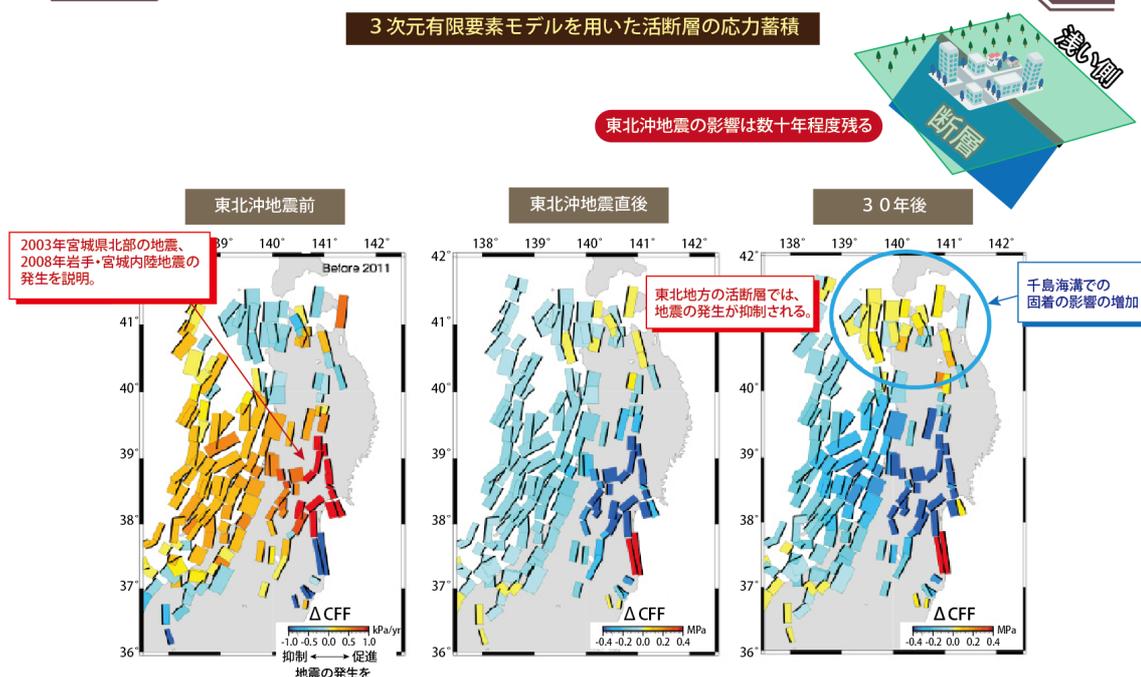


図8. 地震発生予測のための島弧-海溝システムの観測-モデリング統合研究

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ΔCFS > 0(暖色系)は地震の発生を促進ΔCFS < 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^[ERL12]。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^[ERL12]。

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^[ERL12]。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）^[ERL13]。

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]。

日本海溝地域の地震テクトニクスと地震発生予測

地震の発生パターンから前震を識別する方法について、
本震発生の予測が的中する場所の特徴を調査

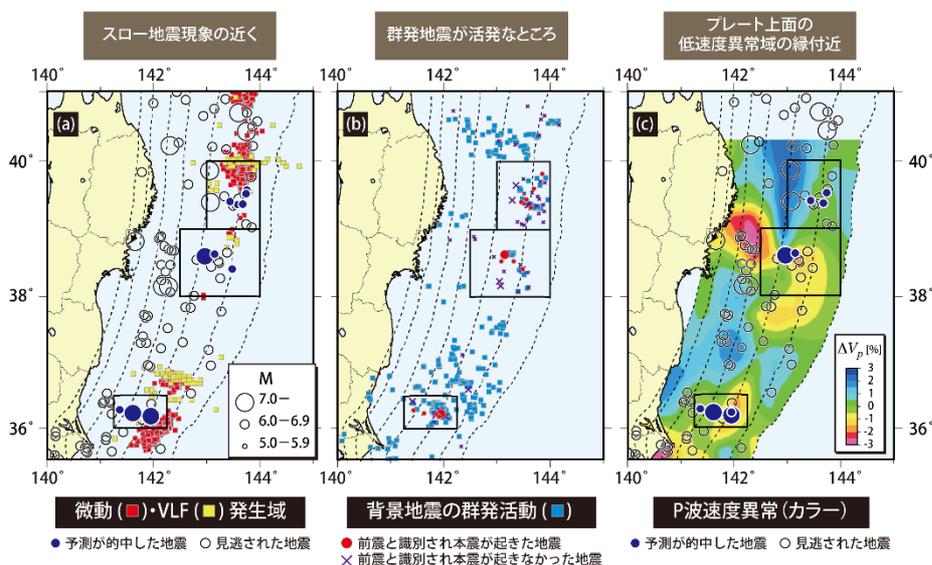


図9. 日本海溝地域の地震テクトニクスと地震発生予測

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以下、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^[DPRI06]。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〕。

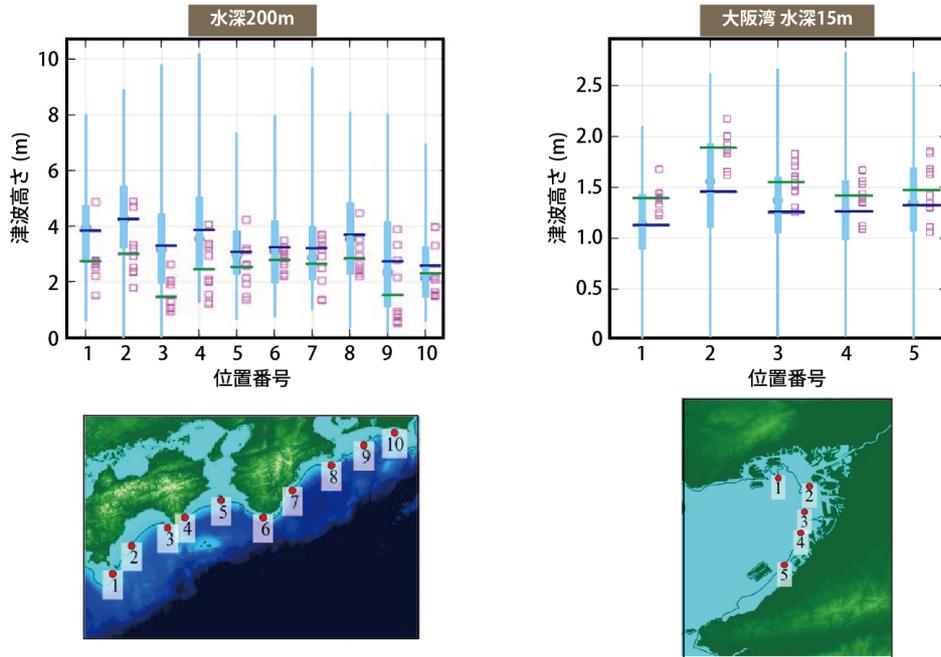
イ. 津波の事前評価手法

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

□ 中央防災会議モデル — 中央防災会議モデル (11 ケース) 平均 — 確率津波モデル (200 ケース) 平均



最大津波波高は全ての地点で確率津波モデルの方が大きい

最大津波波高の平均は中央防災会議モデルの方が大きい

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、JVND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 [III_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標準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〔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的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）^[TRID06]。

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を示唆された〔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曾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]。

災害情報が被害の発生抑止・軽減に資する過程の研究

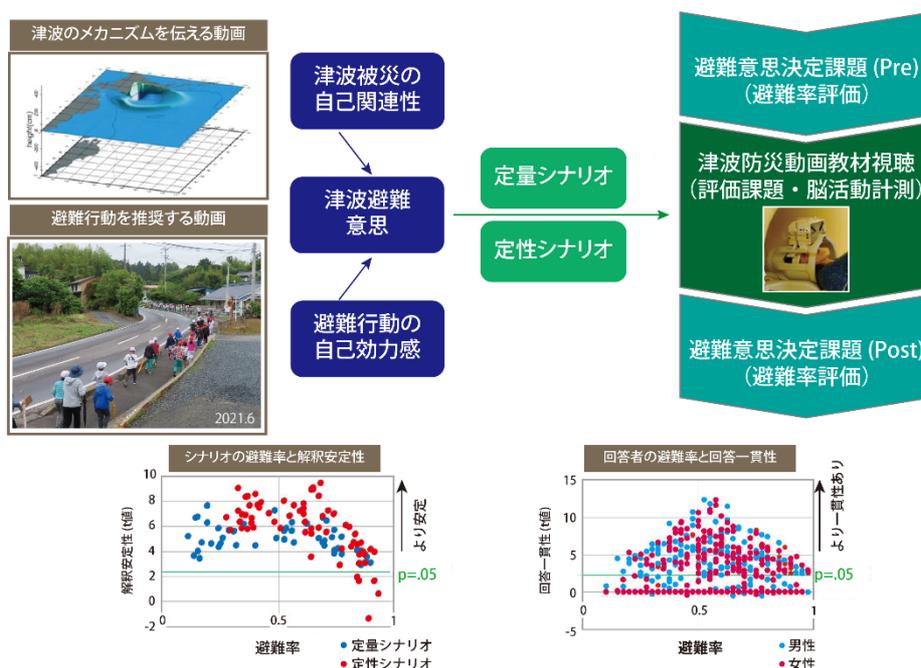


図 11. 災害情報が被害の発生抑止・軽減に資する過程の研究

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^[HIL-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JD^Xnet^{*}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

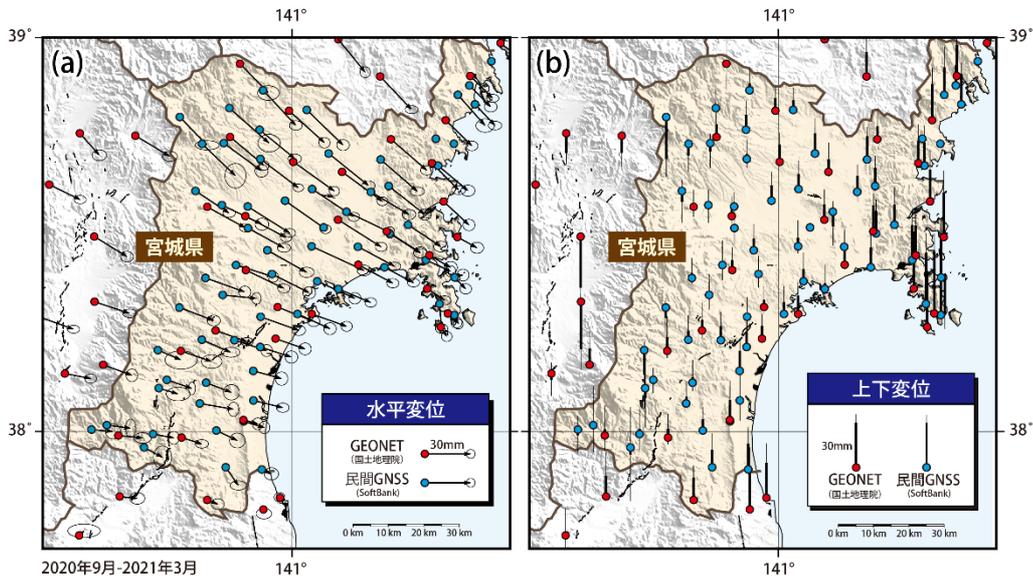


図 12. 民間 GNSS 観測網を活用した高密度地殻変動分布

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、白頭山の大规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、大规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、楡形山脈断層帯、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。低頻度大规模地震・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^[GSL_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。