

2. 5年間の成果の概要

2-1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

史料、考古、地質データに基づき、過去の事象の特徴が把握されるようになり、その情報も充実した。日本各地の地震火山関連史料の収集・分析とデータベースの構築・公開を行い、これらの情報を効率的に利用することが可能となった。さらに、史料を地震研究に活用する方法について検討し、研究コミュニティの構築・教育・市民への普及を図った。考古・史料からみた歴史災害情報の収集とデータベース構築・公開ならびにその地質考古学的解析を行った。その結果として、縄文時代前期に東北の三陸では津波を伴う大地震が、また関東地方では房総半島先端部の隆起を伴う大地震が、それぞれ発生していたことが推測された。また、北海道沿岸や南海トラフ沿いでは、海溝型地震*の地質学的手法に基づく津波堆積物*の調査が行われ、千島海溝沿いの13世紀と17世紀の巨大地震の津波波源*域の推定や、1662年日向灘地震の規模の見直しを行った。南西諸島の海溝沿いでは、津波堆積物やサンゴ礁上の巨礫から、過去に発生した津波の特性と津波の最大規模の絞り込みを行った。陸域の活断層*調査については、断層地表トレースの複雑な形状や地震の活動履歴を明らかにした。

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

低頻度大規模地震の解明に関する研究を、千島海溝、日本海溝、南海トラフにおいて進めた。日本海溝及び南海トラフにおける定常的なGNSS-A*観測による地殻変動モニタリングの実施結果は、地震活動の評価に活用された。また他の地域においても継続的なGNSS-A観測の実施により、プレート境界の固着*状況が海溝軸付近まで把握されるようになった(図2-1)。特に17世紀の巨大地震時に大きくすべったとされる千島海溝沿い根室沖では、海溝軸付近も固着していることがわかってきた(図2-1右)。また、日本海溝の海溝軸付近の地震探査*の解析から、2011年東北地方太平洋沖地震(東北沖地震)の発生域において間隙水圧*が異常に高いことが、大きなすべりと津波をもたらした原因である可能性を示唆した。日向灘から南西諸島北部では、小繰り返し地震*の解析によりプレート境界の固着状態の時空間的な変化を把握した。このほか、巨大地震の発生が懸念されているメキシコ・ゲレロ州沖においても、地震・測地観測により、プレート境界におけるスロー地震*の検出や地震空白域の特徴を把握するなどの研究を進めた。

火山噴出物の分析から活動様式の変化やマグマ*供給についての理解が進んだ。西之島2019~2020年噴火では、噴火様式*や化学組成*の変化が深部に由来する苦鉄質マグマ*の上昇に起因することを明らかにした。浅間山18世紀天明噴火では、噴火様式の遷移がマグマの減圧率(上昇速度)に強く影響を受けたことを明らかにした。支笏・屈斜路・洞爺・十和田・

始良のカルデラ*火山のいずれにおいても、噴火直前に蓄積された膨大な量の珪長質マグマ*が、40万年以上前から存在した主要マグマと新しい時期に断続的に生成した付加的マグマから構成されることが明らかになり、カルデラ噴火に関わるマグマ供給系*の発達過程の理解が進んだ。

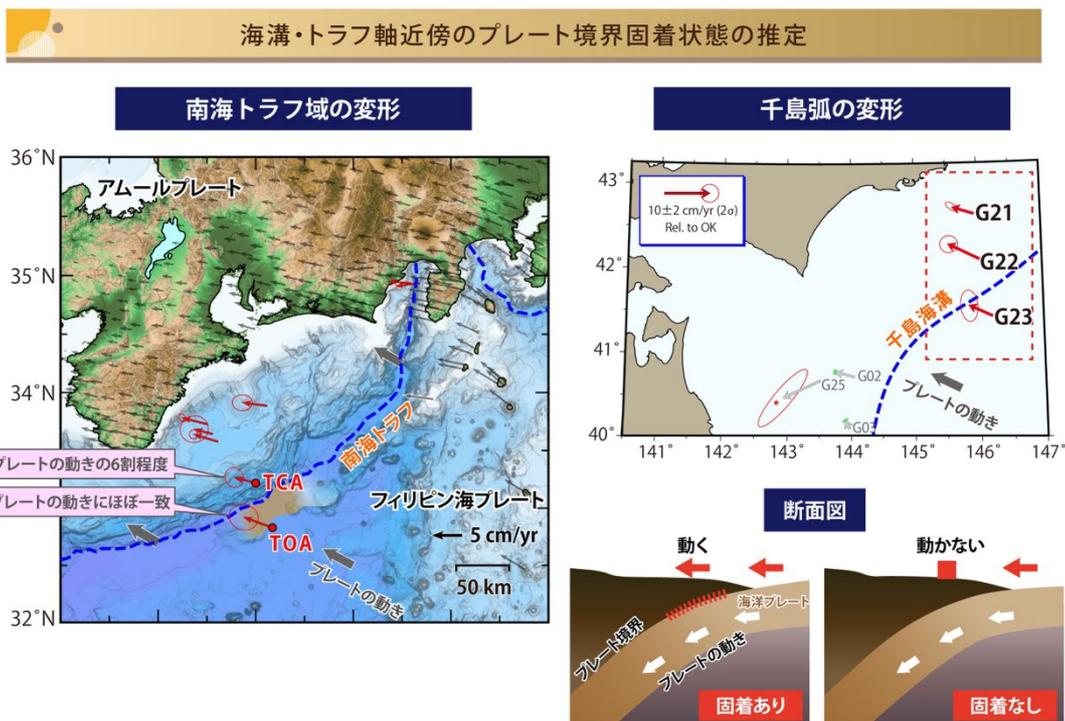


図2-1 海溝・トラフ軸近傍のプレート境界固着状態の推定。左図はアムールプレート*に対する各観測点の年間移動量を、方向とともに赤矢印で示す。南海トラフより外側（南東側）では、これまで知られているプレート相対運動と同じであるが、内側（北西側）ではその約6割程度の移動が観測された。右図は千島海溝根室沖に設置された観測点のオホーツクプレートに対する年間移動量を赤矢印で示す。海溝より内側（北西側）でプレート収束速度と同程度の年間約7 cmの移動が観測された。これらの結果は、いずれの領域でもプレート境界浅部ではプレートが固着しており、この固着域の周りではひずみ*が蓄積していることを示す（右下図参照）。

（3）地震発生過程の解明とモデル化

地震発生過程に関する研究では、地震波形記録を網羅的に調べることで、大規模地震と小規模地震の破壊の始まりが同じであることがわかり、地震破壊に階層性*があることを発見した。室内岩石実験と野外調査から、高間隙水圧下での微動*は亀裂が開くパターンの破壊（開口破壊）に伴って発生し、短期的スロースリップ*イベント（Slow Slip Event, SSE）

は粘性^{*}的な特徴を持つせん断帯の活動に対応していることがわかった。また、海底掘削試料を用いた実験から、地震性・非地震性を決める岩石の摩擦特性^{*}が温度に大きく依存することがわかり、プレート境界の物性を知る上で有効な情報を提供した。

(4) 火山現象の解明とモデル化

多項目観測や、地下構造を考慮した地震波形解析により火山現象についての新たな知見を得た。桜島では人工地震探査による地震波速度構造を用いた震源^{*}の再決定によって、桜島の爆発的噴火^{*}の励起源が火口底下の数100 mにあることを明らかにした。霧島新燃岳における爆発的噴火は、ナノライト^{*}の晶出によりマグマの粘性が上昇し、気泡過剰圧が溶岩ドーム^{*}の破壊強度を超えることで発生すると推定した。霧島山と阿蘇山では、噴火前にマグマの上昇によると考えられる微動の振幅増大や発生位置の変化を捉えた。

積極的に新しい観測手法を導入して火山観測を行った。吾妻山では、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) ^{*}観測にて火山性地震^{*}の震源決定と浅部地盤構造推定に成功した。伊豆大島、三宅島、霧島山では、無人航空機の繰り返し観測により浅部の詳細な磁化構造^{*}推定とその時間変化の検出に成功した。西之島では、赤外画像など複数項目の衛星観測によって2019年から2020年の一連の噴火プロセスを推定した。阿蘇山・桜島では、噴火に伴う電界変化の観測に成功し、噴火の即時把握にむけた電界観測の応用可能性を示した。火山灰^{*}自動採取・可搬型分析装置及び自動火山灰分類システムの開発・改良を行い、さらにマグマ性噴火^{*}及び非マグマ性噴火を機械学習^{*}により火山灰の色から即時判定する技術の有効性を確認した。

(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

地震発生場を理解するために、プレートの沈み込み帯^{*}を対象として、大地震を発生させるプレート境界の詳細な構造調査、地震発生場の近くで発生するスロー地震の解析、スラブ内地震^{*}の起源に関する研究を行った。日本国内やニュージーランドでは、内陸地震^{*}の発生場について、地殻内流体^{*}の分布が地震発生に強く関係することを明らかにした。大地震の断層面の形状やすべり域と、比抵抗^{*}分布の特徴が空間的によく対応することがわかった。また、大地震の破壊開始点の特徴が調べられ、内陸地震が発生する場の空間的な関係の評価につながる可能性を示唆した。

稠密及び広域の観測から、地震波速度構造や比抵抗構造の高精度推定が進み、推定された地下構造と各種観測から推定された流体^{*}移動との関係が議論された。箱根山では、深部低周波地震^{*}活動の活発化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・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モデルが提案された。雲仙火山では、ほぼ固結したマグマ溜まりの上面をなぞるようにマグマが上昇し、そして1991～1995年噴火が引き起こされたと推定した。草津白根山では、地下浅部に釣鐘状に広がるキャップロック^{*}と、その下部の流体貯留域、及びマグマ溜まりに対応す

る領域を、比抵抗構造の推定により見だし、流体移動の経路のモデルを提示した。海域の鬼界カルデラでは、地震波反射構造、比抵抗構造を推定し、噴出物の分析から鬼界アカホヤ噴火以降の珪長質マグマと苦鉄質マグマの混合によるマグマ供給系モデルを提示した。

草津白根山では、湯釜火口北側噴気の火山ガス* (希ガス) のヘリウム/アルゴン比 ($^3\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 比) が地下でのマグマ発泡度を反映していることが提案され、さらに発泡度の変化が浅部熱水だまりの膨張収縮と同期していることから、マグマ発泡がその上部の浅部熱水系*に影響を及ぼすことがわかった (図 2-2)。

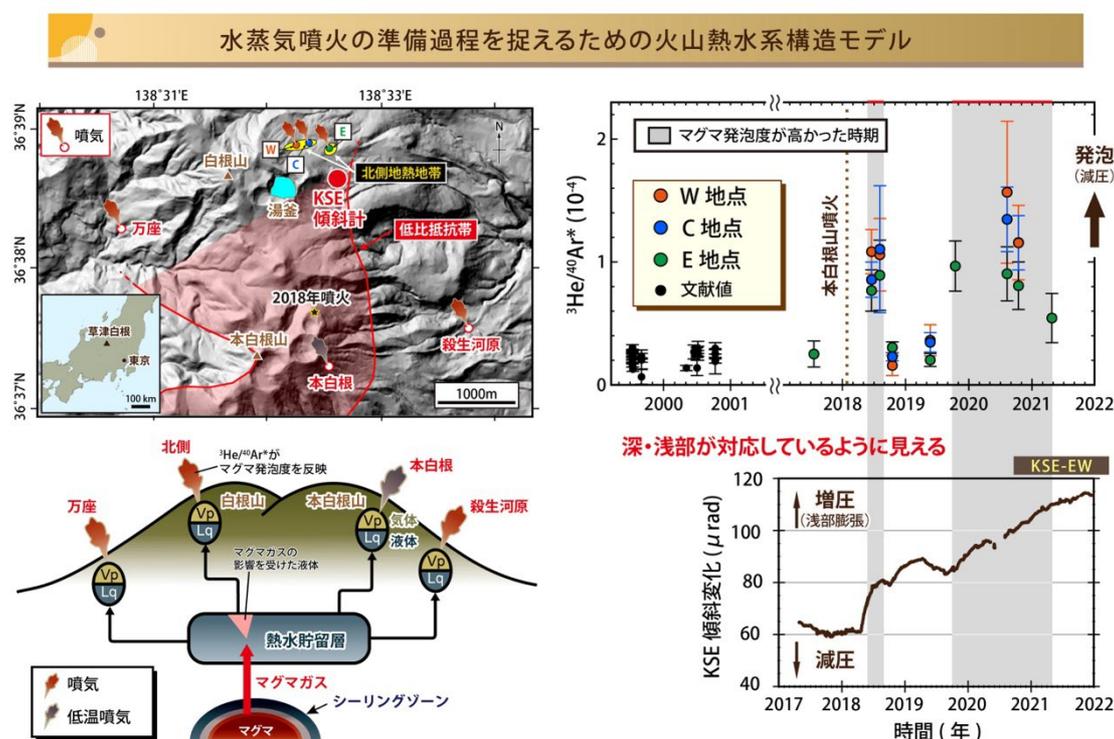


図2-2. 水蒸気噴火*の準備過程*を捉えるための火山熱水系構造モデル。草津白根山の湯釜火口北側の噴気について、 $^3\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 比に基づきマグマ発泡度の変化が検出された。発泡度変化のタイミングは浅部熱水だまりの膨張・収縮とよく一致しており、同火山の活動の活発化を駆動するマグマ～浅部活動の物質科学的*なつながりが確認できた。 $^3\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 比 ($^{40}\text{Ar}^*$ はマグマ由来の ^{40}Ar を意味する) というこれまで使われていなかった指標が火山活動活発化と関係していること、さらにマグマの発泡で説明できることを示した。草津白根山のような熱水が卓越している火山の活動活発化にマグマ (おそらく熱水系より深部) の寄与を示唆した意義もある。希ガスなので複雑な反応を考える必要がなく、今後、火山活動モニタリングの指標の一つとして活用が期待できる。

2-2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

地震発生長期評価手法の高度化のために、史料・考古・津波堆積物・地形地質等の調査に基づく過去の大地震の発生履歴に関するデータ収集に加えて、地震活動・測地データの解析、数値シミュレーション*研究などを進めた。海溝型巨大地震に関しては、GNSS*の地殻変動データに基づいて、相模トラフや南海トラフ沿いのプレート境界面上における力学的固着を応力*蓄積速度として表現し、大地震発生シナリオを構築する研究が進展した。内陸地震については、GNSS 測地データや背景地震活動度を用いて日本列島全域における M6 以上の地殻内地震の発生確率モデルを新たに提案し、地震調査研究推進本部*（以下、地震本部）と情報交換を通して連携を深めた。

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

地殻活動モニタリングに関しては、陸海の地震・測地観測網のデータを用いたスロー地震検出手法の高度化により、新たなスロー地震や震源の移動が検出された。また、数値シミュレーション研究や構造探査*が行われ、スロー地震の発生様式の理解が大きく前進した(図 2-3)。西南日本では、固着域浅部と深部で起きるスロー地震の発生パターンに違いを見いだし、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。一方、日本海溝沿いでは、スロー地震と通常地震活動が近接して発生していることを示した。また大地震発生後の余震*活動の推移を、従来の震源カタログ*を用いずに予測する手法として、大地震発生直後数時間程度の連続波形記録から計算できる新たな手法を開発し、1 観測点の地震波形のみからでも推定可能であることを示した。

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

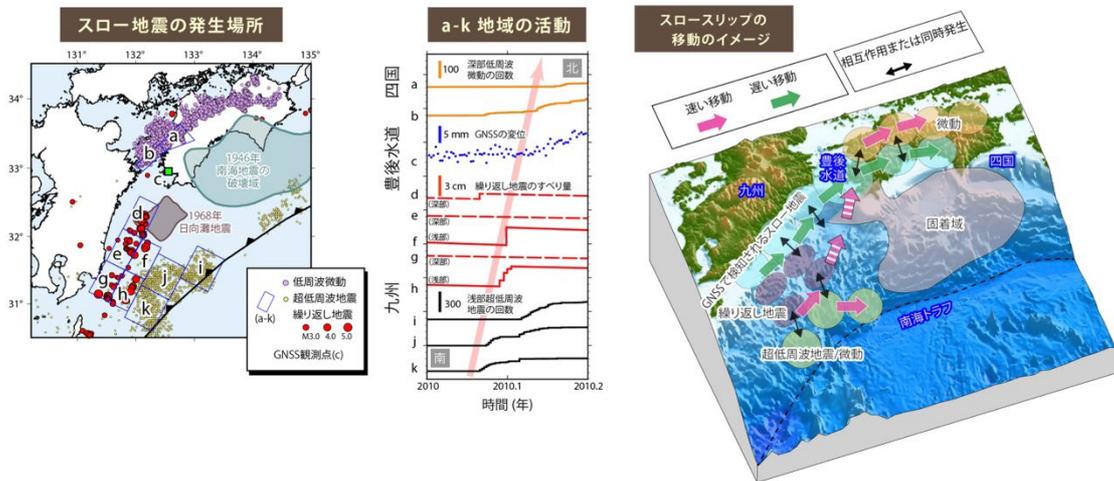


図 2-3 スロー地震の総合解析による南海地震の固着域へ向かうスロースリップの長距離移動。左で示すように鹿児島沖から四国沖にかけての南海トラフのプレート境界で複数の種類のスロー地震を捉え、それらが深部と浅部、別々の時間スケールで長距離移動する様子がわかった。左の図で示す a~k の領域について、深部低周波微動^{*}、GNSS 観測から得られた変位、繰り返し地震のすべり量、浅部超低周波地震^{*}の回数を時間変化として中央の図のように並べると、1 ヶ月程度で南から北に向かって移動している様子がみえる。これらの南海トラフ沿いのスロースリップの移動についてまとめたイメージを右に示す。

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

統計的特徴に基づいた経験的な前震^{*}識別法に関する研究により、群発的な地震活動が前震になりやすい傾向を見出すとともに、地震活動の特徴量に基づく前震確率予測モデルを開発した。また、大地震の発生前に b 値^{*}が低下するという報告例が増えており、b 値のモニタリングは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を示した。

(4) 中長期的な火山活動の評価

多項目観測データの解析結果や物質科学的データの分析結果を整理して、火山活動推移のモデル化、噴火事象系統樹の分岐判断指標の作成、分岐判断事象の理解が進んだ。富士山の噴火履歴を精緻化するための噴出物層序^{*}の確立、年代測定、富士山のマグマ組成の特徴を把握するための噴出物の化学組成分析、及び既存文献に基づいた噴出物データベースの作成を行った。

国内のいくつかの火山を対象とした火山活発化指数 (VUI) ^{*}の試験的導入を通じて、多項目モニタリングに基づく火山活動の定量的評価にひとつの道筋を示した (図 2-4)。

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

観測データの解析結果とマグマからの熱及び物質の供給との関係の議論を深化させ、火山性地震の活発化の数値モデリングや火口湖の湖底熱活動の評価を行った。さらに、国内外の噴火に至った火山活動の推移について、マグマ貫入^{*}速度、脱ガス、周囲の地盤の破壊に着目したモデルを提案した。また、桜島昭和火口の2023年噴火再開に前駆した、火口熱及び微動活動のモデル化を進めた。

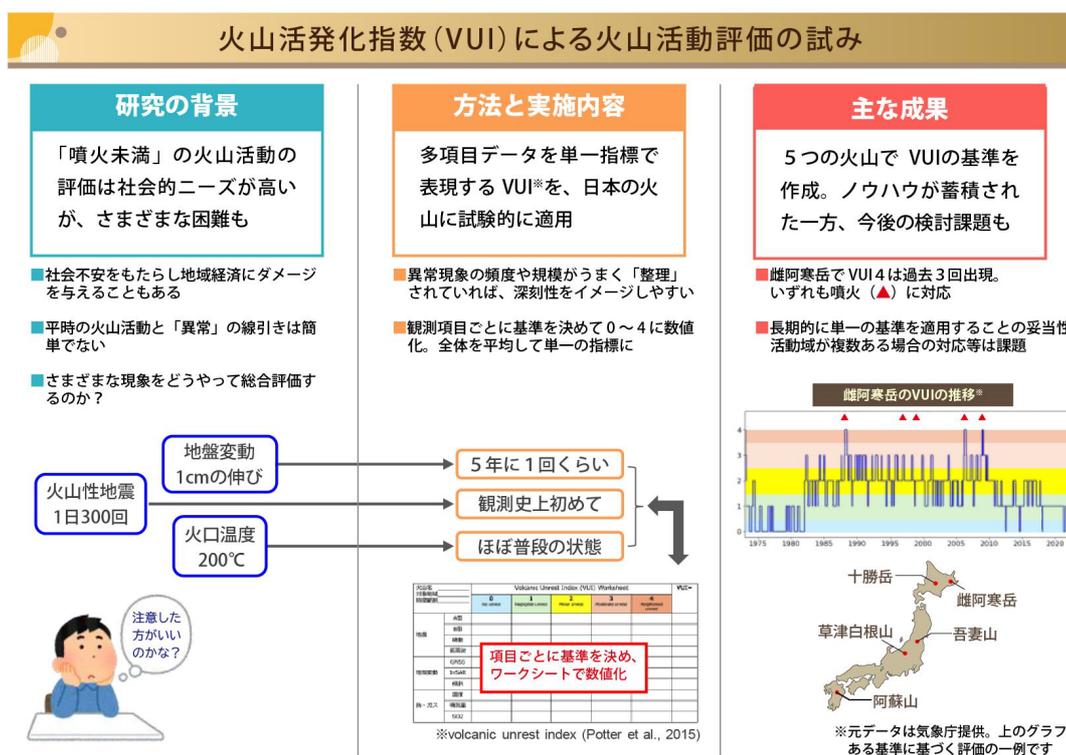


図 2-4 火山活発化指数 (VUI) による火山活動評価の試み。観測データに基づいて火山活動を定量的に評価する方法のひとつとして、火山活発化指数 (VUI) を十勝岳、雌阿寒岳、吾妻山、草津白根山、阿蘇山に適用した。多項目のデータを統合するため特定の観測に評価が偏重せず、算出方法が単純であるため自動化も可能である。

2-3. 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

地震・火山噴火の災害誘因予測の事前評価手法の高度化を行った。強震動*に関しては、大阪・京都・奈良盆地の地盤構造モデルの妥当性の検証や改善点の洗い出しを実施して、強震動予測のための震源断層モデル*や広帯域地震動特性に関係する浅部・深部地盤構造モデルの検証と改良を行った。また、平成30年北海道胆振東部地震(M6.7)など近年の顕著な地震の震源過程を強震記録*を用いて求め、強震動予測のための震源断層モデルの統計的特徴と比較することで、現状の耐震基準を上回る規模の地震動(極大地震動)の特徴について震源過程や地盤構造の観点から検討した。加えて、広域応力場と複雑な断層形状を取り入れた動的破壊シミュレーション研究の進展により、地震動の事前予測手法の高度化につながる成果が得られた。このほか、西日本の地殻内地震で観測された、気象庁マグニチュード*の過大評価の原因となる Love 波*パルスの生成メカニズムや、深発地震*で太平洋岸での震度*が大きくなる異常震域*に関する研究を行った。オープンソースである地震波伝播シミュレーションコード Open SWPC について、国内外からのフィードバックを受けて機能拡張を行った。また、シナリオ地震*の強震動評価として、日本で開発された強震動予測手法を国際的なプラットフォームに実装した。低次元有限要素法*コードを GPU*上に実装することで高速に地盤構造を推定する手法を開発した。2003年十勝沖地震時に北海道の KiK-net*厚真観測点で記録されたような、2秒よりやや長い周期が卓越する地震動は、表層30mの平均S波速度が小さい軟弱地盤で発生していることがわかった。1830年文政京都地震の際の京都盆地東縁部に沿った被害の集中については、盆地端部におけるエッジ効果*が原因となつたと推察された。液状化*推定の低コスト化に向けてGPUを用いた3次元液状化シミュレーションコードを開発した。

地殻変動に関して、ソフトバンク株式会社が運用する独自GNSS観測網データの精度評価を行い、このデータが地殻変動の研究で利用できる精度を保持することを確認した。これに基づき、地震学・火山学を含む幅広い地球科学用途でのデータの利活用を目的とした「ソフトバンク独自基準点データの宇宙地球科学用途利活用コンソーシアム」を設立し、内陸活断層や活火山周辺など、各地の高空間分解能での地殻変動監視を可能にした。

津波に関しては、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、検潮記録と海底ケーブルの切断時間を再現できる海底斜面崩壊モデルを推定することに成功した。火山島の山体崩壊*による津波の即時予測手法の開発を行い、インドネシアのジャワ島西岸やスマトラ島東岸での津波予測に適用した。日本海の60断層を想定した7万通り以上のシナリオによる確率論的津波高を計算した。南海トラフ地震を想定した津波計算を行い、断層すべりの深さ方向の多様性が津波高推定の不確実性の要因となり得ることを示した。高速に沿岸域の津波水位を求める目的で、地形効果による津波増幅率を推定し、沿岸域の津波水位に対する、波源情報と沿岸地形による津波増幅率とを分離することが可能とな

った。この津波増幅率は、地域ごとの波源に依存しない津波ハザード指標としても有用であることが示唆された。

災害リスク評価手法に関しては、サロゲートモデル*と数値解析を組み合わせることで自然災害による被害を低計算コストで確率論的に評価する枠組みを開発した。平成30年北海道胆振東部地震の負傷率を推定し、建物被害との相関に基づく人的被害推定は十分でない可能性を示した。RC造*建物を対象として、従来の最大速度に代えて振動速度に基づく被害率関数を検討し、その有効性を確認した。確率論的地震リスク評価を、地震火災を含めた手法に拡張し、京都の木造住宅密集地を対象とした地震と火災のマルチハザードリスク評価を実施し、シングルハザード評価では過小評価が起きることを示した。斜面崩壊に関しては、1m-LiDAR*DEM*を活用する手法開発を進めたほか、斜面崩壊に影響するテフラ*の分布や強度低下の調査を行うとともに、斜面崩壊を起こしやすい地形的特徴を明らかにした。

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

強震動に関しては、鳥取県内の計測震度観測点から受信したデータをリアルタイムで県内各地の震度に変換するシステムを構築し、鳥取県庁に設置した。また、強震観測*波形データと地震波伝播シミュレーションのデータ同化*に基づく、未来の時刻の揺れの広がりや長周期地震動*の即時予測に向けた研究開発を行った。地殻変動に関しては、リアルタイムGNSSによる震源断層*即時推定における不確実性の定量評価を考慮した推定手法として、単一の矩形断層モデルを対象とした方法(RUNE)を開発した。津波に関しては、最適内挿法*に基づくデータ同化手法の津波即時予測への応用を検討し、次世代に向けた高精度な手法の開発とその準備を進めた。

火山における主な災害誘因のなかでも、防災上重要なものとして土石流*と泥流*が挙げられる。火山灰堆積後の降雨による土石流・泥流の発生及び噴火時の融雪型火山泥流の発生に関して、その危険度や規模を予測する手法の確立を目的とし、観測と予測モデル開発を行った。時間的に変化する泥流・土石流の発生危険度や規模を予測する手法を検討するとともに、融雪型火山泥流の発生に関する従来の研究をさらに進展させた。

(3) 地震・火山噴火の災害誘因予測を災害情報につなげる研究

世界の地震カタログ*を用いて、M8クラスの地震が近傍で連発する(半割れ*ケース)の確率と、M7クラスの地震のあとに近傍でM8クラスの地震が発生する(一部割れケース)の確率の評価を行い、南海トラフに適用した(図2-5)。また、地震本部が作成している地震動予測地図では「30年確率」を用いているが、受け手側の世代や年齢層によって対策の必要性の意識が高まる「x年確率」の値が異なることを明らかにした。

桜島の大規模噴火を想定し、円滑な避難を行うための体制づくりを目指した専門家と住民による実践的研究を実施した。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23,000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。地震ハザードシナリオの不確実性とそのハザード評価結果に対する自治体の受け止め方を表示するシステムを改良した。火山災害誘因（ハザード）について住民の認知度を調べるオンライン調査を実施した。

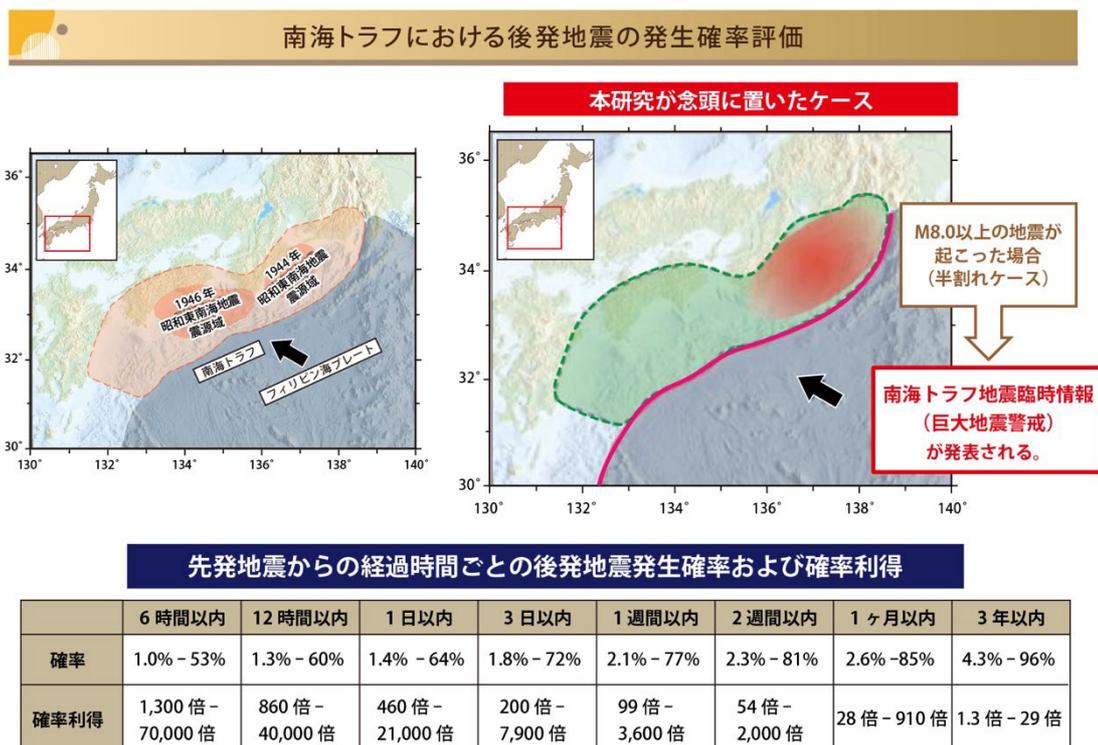


図 2-5 南海トラフにおける後発地震の発生確率評価。M8 クラス以上（半割れ）及び M7 クラス（一部割れ）の地震発生後に後発する地震の発生確率を、南海トラフにおける地震発生履歴を考慮し、評価を行った。例えば M8 クラス以上の地震発生から 1 週間以内に、M8 以上の後発地震が発生する確率は約 2%~77%、平時の約 100~3,600 倍と算出される。

2-4. 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明

地震・火山噴火現象の理解・予測を災害の軽減につなげるための災害科学の確立を目標として、防災・減災に対する社会の要請を意識しながら、全国の大学における理学・工学・人文社会科学の研究者が連携し、地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の研究と、地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究を実施した。具体的には、近世・近代の史料を批判的に検討し、1855年安政江戸地震や1640年北海道駒ヶ岳噴火など、災害の具体像を復元するとともに社会の対応を分析した。また、東日本大震災などの近年の災害を事例にしなが、災害復興や防災対策、防災教育などの社会対応の課題に関する検討を続けてきた。とりわけ、自治体の応急対応や防災計画に加え、企業やコミュニティが南海トラフ地震などの将来の災害に備えるための課題に関する示唆を得た。

これまで運用されてきた地震ハザードステーション(J-SHIS*)や津波ハザードステーション(J-THIS)*及びJ-SHIS Map Rの基盤の整備・拡充も進められた。そこで作られた地震発生の多様性・不確実性を考慮したモデルや、新しい微地形区分及び関東地方の「浅部・深部統合地盤モデル」は、地震本部の全国地震動予測地図2020年版や南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価に取り入れられた。また、地震及び津波ハザードステーションにリスク評価のための基盤データを加え、ハザード・リスクステーションとして提供することができた。関係機関と連携し、津波警報*、緊急地震速報*、長周期地震動に関する情報、南海トラフ地震に関連する情報*、噴火警報*、降灰予報*などの気象庁の発表する防災情報の改善や高度化に係る知見・成果の共有と、気象庁から発表する地震・津波及び火山に関する防災情報の高度化を図った。国、地方自治体等の防災関係機関、報道機関、教育機関、大学等研究機関の連携により、地震・津波及び火山に関する現象や警報をはじめとする防災情報(津波警報、緊急地震速報、長周期地震動に関する情報、南海トラフ地震に関連する情報、噴火警報、降灰予報など)に関する、知識、防災・減災等に対する住民の意識の向上に取り組んだ。

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

社会が地震・火山噴火災害による被害の発生を抑止、あるいは軽減する対策を考えるために必要な知識体系の解明、実効性のある防災対策に必要な知識要素を特定するとともに、社会の共通理解醸成と防災リテラシー向上のためのマイクロジオデータ*やオープンサイエンス*の活用方策の確立を推進した。

実践的な防災リテラシー向上のための仕組みとして、2017年3月に閣議決定された地理空間情報*活用推進基本計画(第3期)に基づき、地理空間情報、GIS*、衛星測位に現代的ICT技術、AI、IoTなどを統合し、防災・減災に関して社会的有効性の高い情報システムと避難時における被災・避難の想定可視化への活用を進めた。具体的には、「避難困難地域の空

間分析法の開発」「集団避難実験と地理的可視化」「WebVR 技術による疑似避難訓練システムの開発」を行うとともに、これらをすでに開発されていた情報システムとあわせて利用することで「津波避難ビル*の階段上昇シミュレーション」「中学校・高校と連携した防災リテラシー向上」を実施した（図 2-6）。また、情報技術を活用し情報管理を効果的に運用し、潜在的に防災リテラシーを向上させる取組として、「防災リテラシー向上に資するタイムライン*作成支援ツールの整備」「生活再建支援の相談対応に関するデータ分析」「住家被害認定調査・罹災証明書交付の効果的な運用方法検討」に取組み、生活再建支援といった復興期に至るまでの防災リテラシー向上のための仕組みを整備した。一方で、災害情報活用の社会・心理学的枠組みの構築を目指し、文献調査に加えて、津波避難意思決定の心理実験、脳計測実験を行うことで、認識しているリスクの大小に関わらず「まず避難」する意思決定に、脳内の感情反応抑制が重要であることを示した。この結果により、被災リスクや避難行動に対する忌避感情を抑制することが防災リテラシー向上に不可欠であること、また、災害情報活用において災害リスクを不適切に恐怖感情に訴求することなく学術知見に基づいて災害リスクを適切に提示する工夫が必要であることを、心理学的・脳科学的に明らかにした。

火山の防災リテラシーに係る知識・技術・態度の定着化に向けては、各地域に共通する主な課題として「噴火災害経験の継承」、「地域住民への火山防災啓発」、「登山者・観光客への火山防災啓発」、「観光と防災の両立」の4つを挙げ、御嶽山を事例としてマイスター制度*の継続実施により、登山者だけでなく地域住民への火山防災啓発を試みた。一方、桜島火山に対しては、鹿児島市と連携して火山防災勉強会を桜島の各地区において複数回実施し、火山観測情報の発信と並行して、火山情報についての理解に関する住民向け調査も行うことで、火山岩塊の飛散距離によって噴火警戒レベル*が引き上げられること自体は住民に認識されているが、基準となる飛散距離についての認識は高くないことを明らかにした。火山観測や火山現象の理解を進める試みとして、京都大学防災研究所桜島火山観測所にサイエンスミュージアムとしての機能を付与するためのコンテンツ作りを行った。リスクコミュニケーション*の観点から、地震・火山の観測情報に基づく潜在的リスクと社会的に想定される被害を、正しい理解と行動に結びつけて発信することで、観測情報の有用性に対する社会側の理解が向上すること、及び、過去の噴火対応から得られる知見を生かした市町村の政策判断をサポートする仕組みの整備が重要であること明らかにした。また、桜島の住民の火山情報のアンケート調査及び桜島火山観測所の一般公開参加者のアンケート調査から、地震や火山の観測情報を防災リテラシーに活用するためには、多様な団体とのコミュニケーションを通じて情報公開プロセスを市民（非専門家）に対してより開かれたものとする必要性が示された。

社会の防災力を向上させる取組としては、京都大学防災研究所阿武山観測所を拠点に「サイエンスミュージアム『阿武山観測所』の運営による地震リテラシーの向上」「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・津波訓練の推進」「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」「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」を実施した。実務者の理解を深める取組としては、地震・火山研究者が「理解してほしいこと」と、実務者が「理解したいこと（疑問に思っていること）」のそれぞれを分析することで要素の洗い出しを行った。その上で「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の作成ならびに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」の3つを整理枠組みの要件と位置づけた。これらの結果に基づき、現場とWeb環境を適切に組み合わせた研修体系を構築し、地震の基礎知識習得にかかる研修プログラム1編、火山の基礎知識取得にかかる研修プログラム8編を開発した。また、関東地震/関東大震災100周年にかかる報道やイベント等の機会をとらえ、科学的研究によって得られた知見を社会発信し、自然誘因から社会素因・被害発生との対応といった災害過程の一連の理解を進め、過去災害を事例として学ぶための理解枠組みについての醸成を推進した。

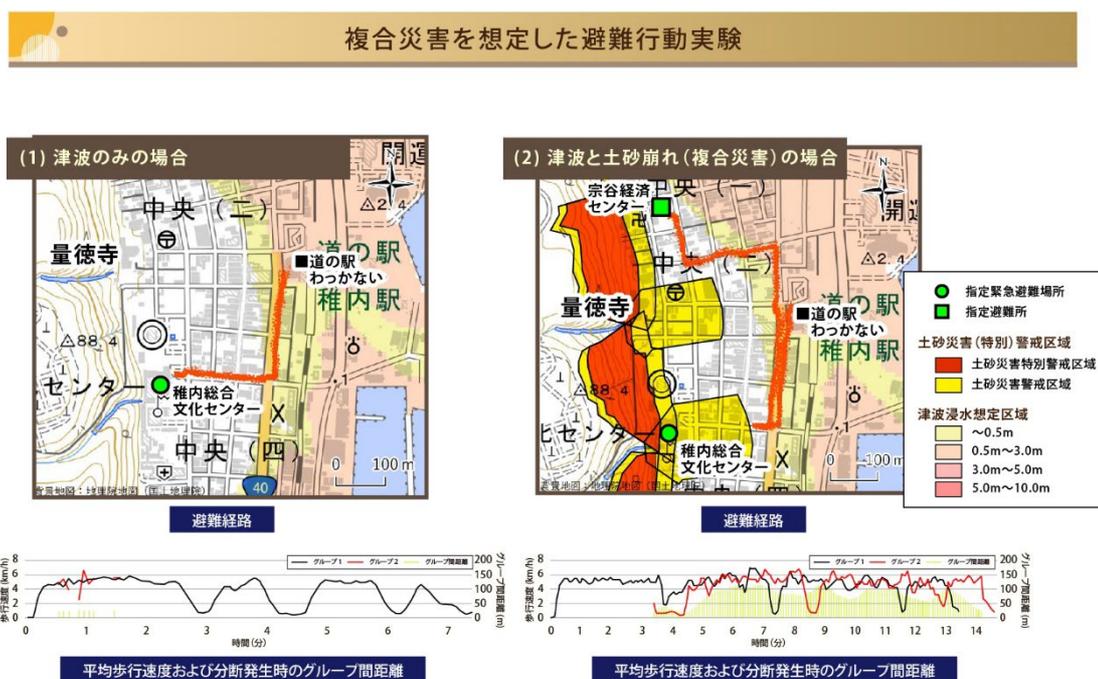


図 2-6 複合災害を想定した避難行動実験。北海道稚内市を対象地域として、地震による津波と土砂災害との複合災害を想定した避難行動実験の結果。地図上の赤点があらかじめ指定された避難経路を示し、グラフは平均歩行速度及び分断発生時のグループ間距離を示している。津波のみを想定した場合、道の駅わっかないから避難場所（地図中の緑丸）へ8分以内に移動が完了し、津波到達までの時間的余裕がある（左の地図とグラフ）。一方、地震により土砂崩れが発生し、当初目標としていた避難場所へ移動できないことを想定した場合、歩行速度は津波のみの場合と大きくは変わらず、A地点で二つのグループに分かれ、グループ間の差はB地点でさらに広がった。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。

2-5. 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

本研究計画は地震学・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、人文学・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した。また、地震本部や行政機関等と連携を強化し、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た。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努めた。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、密接に情報交換しながら計画を推進した。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。3年次にあたる令和3年度には、大学の課題に対する中間評価を実施した。また、本研究計画期間は、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。地震予知連絡会*は、年4回定期的に会議を開催し、地震活動・地殻変動等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た。火山噴火予知連絡会*は、年2回定例会を開催し、全国の火山活動の状況について取りまとめた。また、火山噴火予知連絡会のあり方について検討を行い、令和5年度から新たな体制で活動を開始した。

・ 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、「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及び地震・火山噴火予知研究協議会と、「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及び自然災害研究協議会とが連携を図り、共同研究を進めた。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、災害誘因予測の高度化のための研究を公募する「一般課題型研究」を実施した。重点推進研究のうち総括研究では「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」と題し、南海トラフ沿いで巨大地震が発生した際の地震リスクの評価の方法論や、実際のリスク評価やその影響について検討を行った。(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) ステークホルダー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グループで実施し、理学、工学、人文学・社会科学等の分野の研究者が協働して研究を推進した。

(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た。

- ・ **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、人工地震波を用いたプレート境界の位置情報等、最新の地球物理学研究の知見に基づき、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た。また、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*の構築を進めた。また、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。成果の社会実装・ステークホルダーへの成果の還元を目的とした活動を実施した。

- ・ **首都直下地震**

首都直下地震として想定される多様な震源について、発生メカニズムや発生可能性を評価する研究を進めた。相模トラフ沿岸を襲った津波の歴史記録について整理を行い、それに関連した野外調査を実行することで、当時の津波の高さについて検討を行った。現代の地震観測で得られる知見を用いて、歴史地震*の震度を検証及び定量化する狙いで、東京都文京区と千葉県成田市周辺で稠密観測を実施した。文献資料に基づき、安政2年の江戸地震の被害場所の境界地域を検討した。住民の災害に対する意識調査・分析を実施した。

- ・ **千島海溝沿いの巨大地震**

超巨大地震の発生が切迫している可能性が高い千島海溝沿いにおいて、巨大地震による災害の軽減を目指し、地域防災力の向上を目指した総合的研究を実施した。津波避難に焦点を当てた地理空間情報を活用した研究が行われ、津波避難困難区域の空間分析法の開発、集団による津波避難の実証実験、VR 技術を活用した疑似避難訓練システムの開発等を実施した。津波堆積物の調査から、十勝地方沿岸部の約千年間にわたる長期間の地殻上下変動時系列が解明された。根室沖での海底地殻変動観測*の実施により、プレート境界が浅部まで強く固着している可能性が示された。北海道全域の遺跡発掘報告書にある地震波液状化痕跡と考える記述を調査し、過去数千年にわたる強震動履歴に関する情報を収集した。また、自治体・インフラ産業・報道機関の防災施策への助言を行ったほか、職員向け・一般住民向けのセミナーや公開講座、勉強会を主催した。

- ・ **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、住民避難を視野に入れた総合的研究を推進した。大規模噴火現象を解明するため、過去の噴火履歴調査及びマグマ圧力源のモデル化を行い、マグマのダイク*貫入が大規模噴火の前駆過程として重要であることが提起された。また、地盤変動*等から見積もられるマグマの貫入速度は、噴火規模と様式を予測する指標となり得ることを明らかにした。火山灰ハザード

予測について多くの知見が得られた。降下火山灰・軽石の拡散範囲と降下域については、シミュレーションにより予測する手法が開発された。火山岩塊、火砕流*、土石流の予測についても研究が進んだ。大量降灰災害が予想される鹿児島市街地側住民の事前避難の実現を目指し、専門家と住民との対話を通じて避難における課題の解決策を共創するため、ワークショップを開催した。

・ 高リスク小規模火山噴火

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研究を行った。災害情報の発信に関する研究に関しては、VUI を日本の火山に適用するための具体的な試みが進展した。また、火山防災において有効な火山情報発信方法に関する知見の蓄積が進んだ。小規模噴火の発生する場の把握に関しては、土壌ガス観測に基づく側噴火*リスクの評価や地質図の試作と各火砕丘*の活動年代推定を実施した。多項目観測による火山活動の把握が多くの火山で進められた。観測データの解析結果や物質科学的データの分析結果を整理することで、予測に資する火山活動推移のモデル化や、噴火事象系統樹の分岐判断指標の作成が進んだ。ドローンの小型化と高性能化を受けて災害発生時の被害情報把握へ応用するための研究を進めた。

(3) 研究基盤の開発・整備

・ 観測基盤の整備

日本全国の陸域・海域に展開された地震、地殻変動、津波、潮位、電磁気等の観測基盤からデータを取得し、本研究計画で高度化された解析技術を用いることにより調査研究を進めた。解析結果は、地震調査委員会*、地震予知連絡会や Web 等に随時提供した。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) の安定的な運用に加え、南海トラフ海底地震津波観測網 (N-net*) の整備を進めた。関係機関の地震観測データを一元的に処理した震源カタログを作成した。電子基準点*リアルタイム解析システム (REGARD*) の高度化を進めた (図 2-7)。さらに、汎用的な GNSS 機器を用いた小型 GNSS 観測装置の開発を進めた。高頻度観測データを用いた 干渉 SAR* 時系列解析を可能とするための解析手法の高度化やシステム構築を進めた。重力*観測網を構築し、火山のモニタリング体制を整えた。継続的な地球物理学的・地球化学的モニタリングを実施し、気象庁や大学と結果を共有するとともに、地元自治体等へ情報を提供した。

高速な断層推定

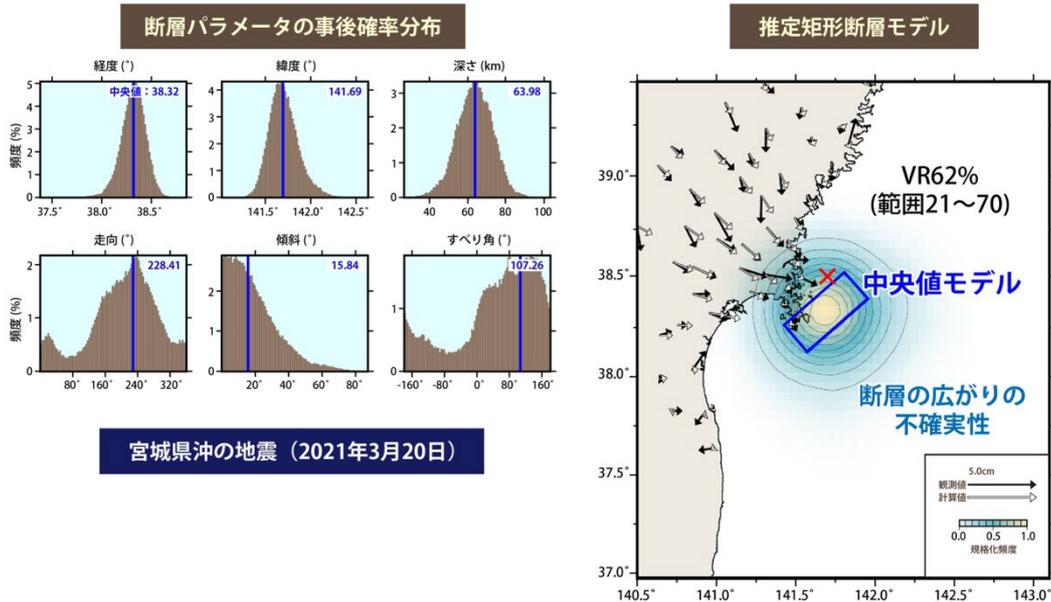


図 2-7 高速な断層推定。REGARD による 2021 年 3 月 20 日に発生した宮城沖地震の地殻変動から断層パラメータを推定したもの。左は断層パラメータの事後確率分布、右は推定された矩形断層モデルの位置とその広がりの不確実性を示す。左の青線は中央値で、右上にその数値を示す。東北大学で開発された推定パラメータの不確実性を評価できるプログラムを国土地理院に技術移転した。従来法からの置き換えに向け、試験運用中である。

・ 観測・解析技術の開発

DAS 計測, GNSS-A 観測や海底孔内観測などを統合する観測システムの開発が進められた。Pi-SAR X3*による 15 cm 分解能での火山観測に成功し、新たな火山の観測体制を整備した。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。また、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し、地殻変動場の議論が可能であることを示した。

・ 地震・火山現象のデータ流通

地殻変動連続観測等の多項目観測データの全国流通・一元化によりデータの蓄積・公開を実施し、気象庁のひずみ計観測網データのリアルタイム流通を実現した。全国規模の地震観測データ流通網 JDXnet* (Japan Data eXchange network) の運用を安定的に行うとともに、データ処理で広く用いられているプログラム (WIN*) について、その近年の状況に合わせ

た使用の更新と機能向上を着実に進められるよう、伝送プロトコル*の検討を進めた。

・ 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

地震の一元化処理*において、2020年9月から海域観測網（S-net^{*}、DONET2）のデータの活用を開始し、自動震源決定の際にノイズとなるエアガン*起源のシグナルの除去手法についても2021年7月から適用を始めた（図2-8）。Digital Object Identifier（DOI^{*}、論文等の永続的識別子）の適切な利用の検討を進め、幾つかのデータを機関リポジトリに登録し、DOI付与を実現した。研究成果共有システムは、そのデータフォーマットやポリシー等が検討され、令和3年度から観測や開発したソフトウェア等のメタ情報を収集・整理し、閲覧可能とした。

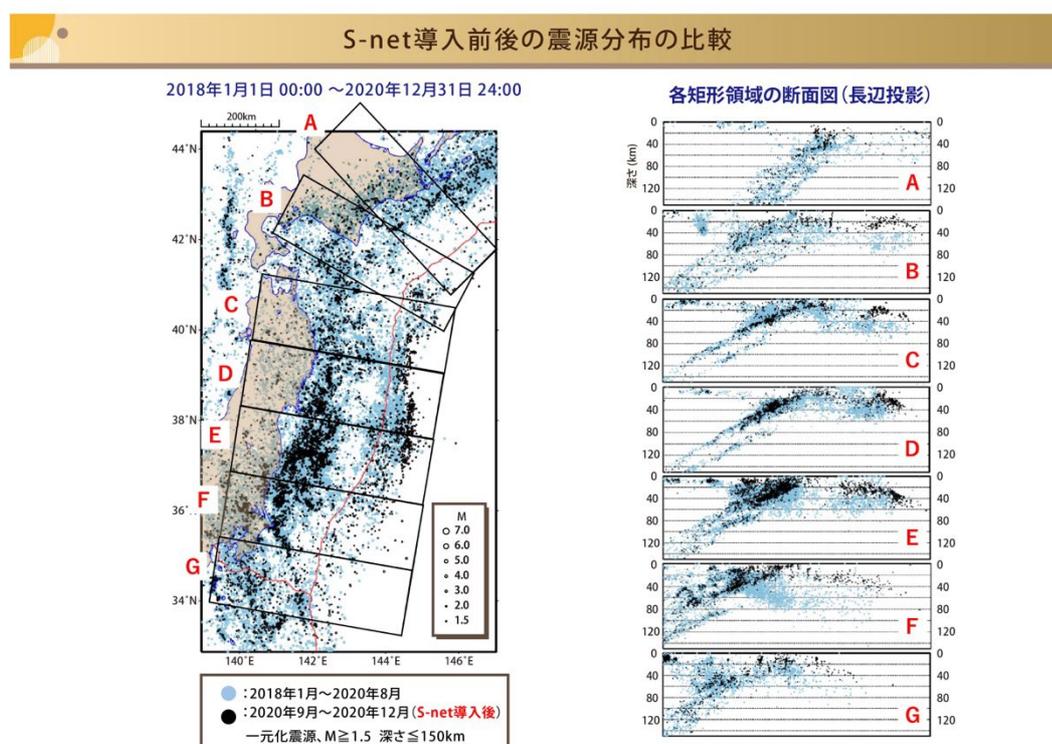


図2-8 S-net 導入前後の震源分布の比較。気象庁の一元化震源処理のルーチン業務に S-net の地震観測データが取り込まれた。東北日本を例に、S-net のデータ導入前（2018年1月から2020年8月まで、薄青）と S-net 導入後（2020年9月から2020年12月まで、黒）を比較すると、S-net データを用いた場合に震源の深さが系統的に浅くなる傾向があることがわかった。S-net 導入により海域の地震観測点が増え、従来よりも精度よく震源の推定ができるようになったと考えられる。

（4）関連研究分野との連携強化

理学，工学，人文学，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られるようにした。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，歴史学・考古学と連携して計画を進めた。拠点間連携共同研究の一般課題型研究では，これまで本研究計画に参画していなかった機関・研究者の参画が更に増え，関連研究分野との連携強化の一翼を担った。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た。

(5) 国際共同研究・国際協力

本研究計画期間は，新型コロナウイルス感染拡大の影響を受けた。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たが，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。ニュージーランドでは，地震発生機構の解明のための国際共同研究が実施され，2016年カイクウラ地震震源域*の詳細な構造等を推定した。また，ヒクランギ沈み込み帯中部に設置した海底観測機器により，2021年5月の短期的SSEの観測に成功した。インドネシアでは，火山活動推移モデルの構築に向けた国際共同研究を実施し，噴火に至るまでの地震活動，地盤変動，火山ガス等の活動推移を検討した。そのほか，メキシコ，アメリカ，南アフリカ，フランス，ハンガリー等の研究機関と共同研究を行い，地震活動や地盤構造の推定，高精細ミュオグラフィ*の開発等の研究が実施された。

(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を紹介するためのパンフレットを作成し，本計画に参画している関係機関を通じ，関係機関への訪問者に対して配布し，またオンラインによって配布するなどして広報活動をした。また各機関では，小中高生，住民，行政等の防災担当者，報道関係者等に対して，地震・火山噴火現象の予測研究や研究活動の現状を理解してもらうための公開講義，セミナー，ラボツアー等を行った。

(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

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努めた。地震・火山噴火予知研究協議会は，毎年度特任研究員を雇用し，人材育成の一端を担った。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。熊本県では火山博物館やジオパークのガイドを対象とした地震・火山噴火災害に関する勉強会を実施した。自治体職員を対象とした防災

リテラシー向上のため，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，研修プログラムを構築した。