

4．平成 30 年度の成果の概要

4－1．地震・火山現象の解明のための研究

地震・火山噴火現象の解明から発生予測や災害の軽減を実現することを目指して、史料・考古・地質データ等を含めた長期間の地震・火山噴火現象に関する研究や、地震や火山噴火の発生場や発生機構の理解を目指した観測・実験を、以下のように実施した。

(1) 地震・火山現象に関する史料、考古データ、地質データ等の収集と整理

長期間にわたる地震・火山噴火現象の解明と、それらに起因する災害の実態解明を目指し、史料・考古データ、地質データの収集とデータベース化、各種データの分析について、次のような研究を実施した。

ア．史料の収集とデータベース化

既刊地震史料を簡易データベース化することで、効率的に校訂作業を行えるスキームを開発し、データベース化の作業を加速的に進める見通しを得た^[2601]。日記史料有感データベースと気象庁の震度データベースの比較から、前近代に発生した中・小規模地震の震源決定を試みた^[1501]。日本語歴史史料の整理に適した軽量プログラミング言語を開発し、市民参加型翻刻プラットフォームに実装した^[2911]。

イ．考古データの収集・集成と分析

全国の発掘調査報告書から災害痕跡データの抽出を継続し、被災エリアの可視化や災害発生時期の特定を試みた。災害痕跡データベースと日本地震関連史料データベースとの連携機能として、検索システムや情報入力機能の拡充を進めた^[9001]。

ウ．地質データ等の収集と整理

津波堆積物の年代を統一的に求める手法を適用し、北海道太平洋沿岸での広域比較を行ったところ、苫小牧以西では 1640 年駒ヶ岳津波、苫小牧からむかわでは 1611 年慶長三陸地震津波、十勝地方から釧路地方にかけては 1611 年より後の津波イベントによる堆積物が分布している可能性が示された^[1002]。

鉱物温度圧力計^{*}を用いてマグマ溜まりの深度を精密に決定することにより、過去の富士山の噴火様式とマグマ溜まりの温度やマグマの含水量の関係を明らかにした。新たなマグマ注入の有無など、マグマ溜まりからマグマが上昇する際の条件の違いが噴火様式の違いとして表れていることを示唆する^[1502]。

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

近代観測データと前近代の地震・火山噴火の史料・考古資料を総合して、低頻度で大規模な地震・火山噴火現象の理解を目指した次のような研究を実施した。

ア．史料、考古データ、地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

古文書の調査と津波堆積物データから、日本海溝で室町時代に発生が指摘されていた巨大地震が 1454 年の享徳地震である可能性が高いことが明らかにされた(図 2)^[5004]。試作版地震関連資料データベースを活用し、これまで 2 つの発生日が考えられていた 1596 年文禄豊後地震の検討を進め、別府湾に津波被害をもたらした地震が発生したのは閏 7 月 9 日であると確定された。1854 年嘉永東南海地震の日記史料から、この地震の発生前に山陰地方や近畿地方北部で有感地震の記録が増加していることが明らかになった^[2601]。

東京大学地震研究所が所蔵する明治期の文献資料である「地震学及地理学研究材料 測候所郡役所組合事務所報告」の分析から、福島県楢葉町の慶長年間の海嘯^{*}の伝承などの検討を行った[2903]。震度の多次元距離減衰式の再現性を検証し、史料データから歴史地震の震源域を推定を行える可能性を示した^[2912]。

放射性炭素年代測定から、志摩半島沖の海底活断層が1万年前以降に1回以上の活動を行い、この期間での上下方向の累積変位量は10mに達する可能性が示された。この海底活断層は陸域に近いため、津波が沿岸に短時間で到達する可能性がある^[1703]。

表層地質調査と噴出物採取、ボーリングやトレンチ調査を実施し、約7000年前の摩周カルデラ形成噴火では、先行現象が確認されないこと、噴煙柱形成、マグマ水蒸気爆発、カルデラ形成の3フェーズで推移したことが明らかとなった^[1001]。1792年に発生した雲仙岳の眉山崩壊は、山麓付近の岩石中岩石中の間隙水圧上昇が要因となったことを支持する史料が得られた^[1001]。桜島大正噴火の際の大地震の震源要素の再解析を行った^[1902]。

イ．プレート境界巨大地震

日本海溝域で、海底地震観測と陸上観測データから詳細な地震カタログを作成し、プレート境界面付近の地震活動を解析した結果、地震に伴う応力変化とプレート境界面の摩擦状態変化が原因と考えられる地震活動の変化が、東北地方太平洋沖地震の前後でみられることが明らかにされた^[1503]。

東北地方太平洋沖地震後7年間の変位時系列データを用いて、プレート境界の摩擦特性やマンテルウエッジの粘性率など複数のパラメータを同時推定する手法を開発し、余効変動の時空間パターンを説明することに成功した^[1803]。

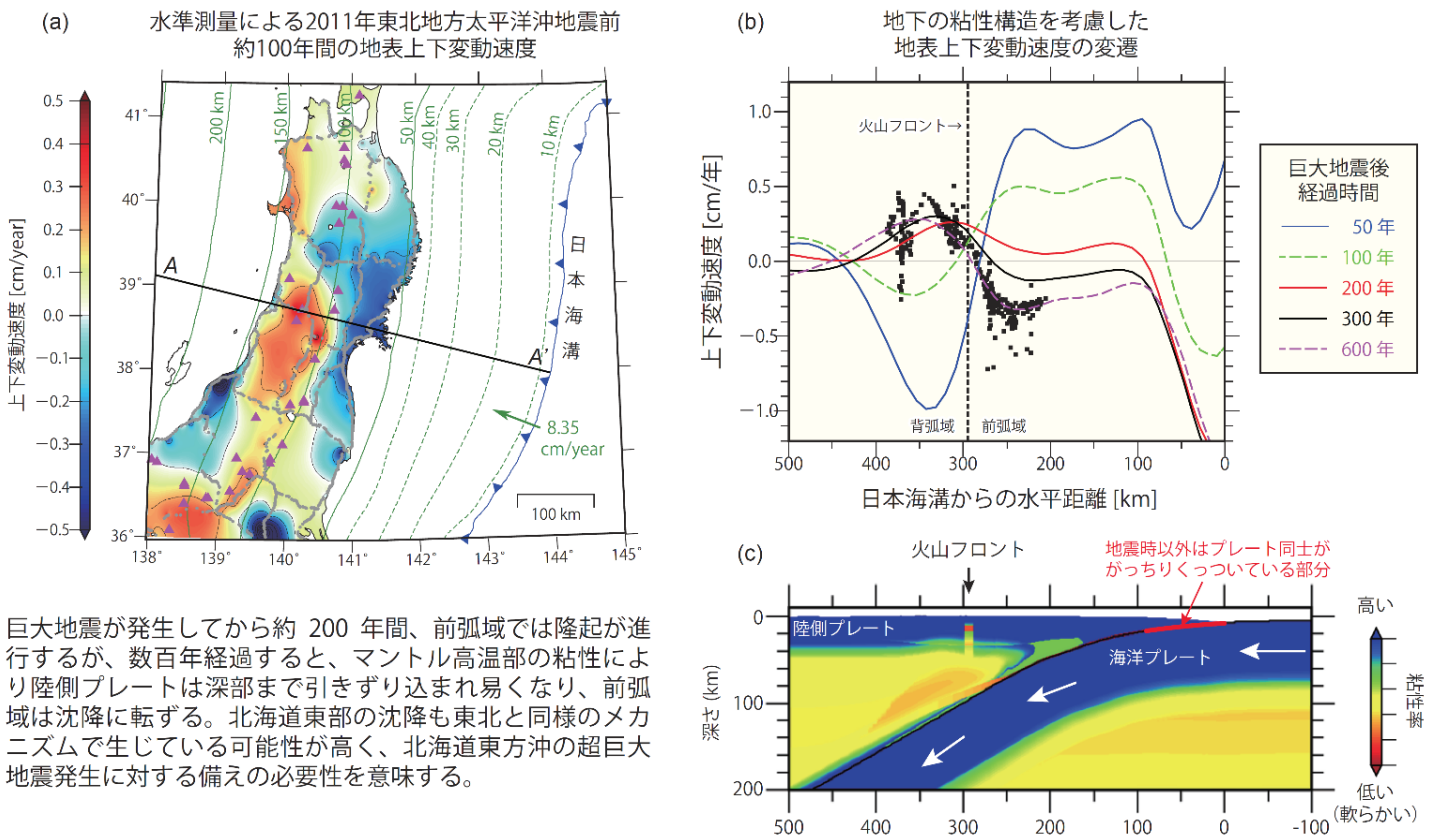
(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

地震・火山噴火の発生場における地下構造や応力場の時空間的な特徴を明らかにするとともに、断層面における摩擦特性や流体の影響、地震と火山噴火の相互作用に関する、以下のような観測や実験的研究を行った。

ア．プレート境界地震

東北地方で粘性構造を入れた地殻変動場の時間変化シミュレーションを実施し、地震の再来周期が600年と非常に長い場合には、本震後に前弧域の隆起が約200年続くが、その後は沈降に転じ転じ、次の巨大地震の発生に至るといふモデルが提案された^[1203] (図15)。茨城県南西部のフィリピン海プレート上面付近では、繰り返し地震が1年周期で活発化し、それに同期してプレート境界直上の地震波の減衰が大きくなり、数か月遅れで浅い地震活動が活発化することが明らかにされた。この現象には水の移動が関与している可能性がある^[1510]。紀伊半島で稠密地震観測等を実施した結果、深部低周波微動の活動が沈み込むフィリピン海プレート内の構造不均質と関連している可能性が示された。また、深部低周波微動の発生域に存在する地下流体が、微動活動を規定している可能性が示唆された^[1509]。

東北地方太平洋沿岸域の沈降メカニズム



巨大地震が発生してから約 200 年間、前弧域では隆起が進行するが、数百年経過すると、マントル高温部の粘性により陸側プレートは深部まで引きずり込まれ易くなり、前弧域は沈降に転ずる。北海道東部の沈降も東北と同様のメカニズムで生じている可能性が高く、北海道東方沖の超巨大地震発生に対する備えの必要性を意味する。

図 15 . 東北地方太平洋沿岸域の沈降メカニズム

(a)東北地方太平洋地震発生前の地表で測定（水準測量）された上下変動速度の平面図。

(b) 中部東北日本を横断する測線（図(a)の直線AA'）周辺の上下変動速度を日本海溝からの距離の関数として示す。黒点は水準測量に基づく観測データで、実線は数値シミュレーションによる上下変動速度を表す。実線の色は、巨大地震発生後の各経過時間に対応する。

(c)数値シミュレーションの際に仮定した粘性率構造。

イ．海洋プレート内部の地震

東北地方中央部の太平洋スラブ上面では、正断層地震と逆断層地震が 100m 以内に近接して発生していることが明らかになった。この結果は、スラブ内地震を引き起こす相転移による応力擾乱が極めて局所的である可能性を示唆する^[1201]。スラブ内地震の地震波放射エネルギー効率は規模依存性を持つものの、深さ 360km までは深さ依存性を示さないことを確認した^[1201]。

ウ．内陸地震と火山噴火

熊本地震震源域で地震前後の応力場の変化を検出し、地震前から布田川 日奈久断層が周辺に比べ数 MPa から数十 MPa 差応力が高かったことが示された。また、地震後に布田川断層延長部や日奈久断層延長部ではせん断応力が増加するなど、依然として高い差応力が維持されていることが明らかにされた^[2201]。詳細な比抵抗構造調査から、熊本地震の M5 クラスより規模の大きな地震の破壊開始点は低比抵抗域の縁辺外側 5km 以内

であること、大すべり域は低比抵抗域に挟まれた高比抵抗域であることが明らかになった^[2201]。

東北地方太平洋沖地震前後の東北地方前弧域の上盤側応力を再現する有限要素法モデリングから、東北地方太平洋沖地震後のプレート境界の摩擦力は5-11MPa程度であり、プレート境界の強度は30MPa程度以下である可能性が示された^[1203]。

御嶽山の2007年噴火に前後して発生した火山性地震のメカニズム解を調べた。その時間変化から、これまで詳細がわかっていなかった噴火開始時刻が推定できた^[1907]。

東北地方太平洋沖地震の震源に近くに位置し、この地震の発生以来火山活動が活発化している蔵王山で、多項目の総合観測を行った結果、山頂火口浅部で熱消磁域が存在すること、気泡を含む熱水により長周期地震が発生していることがわかった^[1202]。

(4) 地震現象のモデル化

地震の断層すべりや、プレート境界での多様なすべり様式の理解を進め、地震発生予測のシミュレーションやハザードの予測を効率的に行うために、標準構造モデルの構築や、断層の物理モデルの高度化を目指して、以下のような研究を実施した。

ア．構造共通モデルの構築

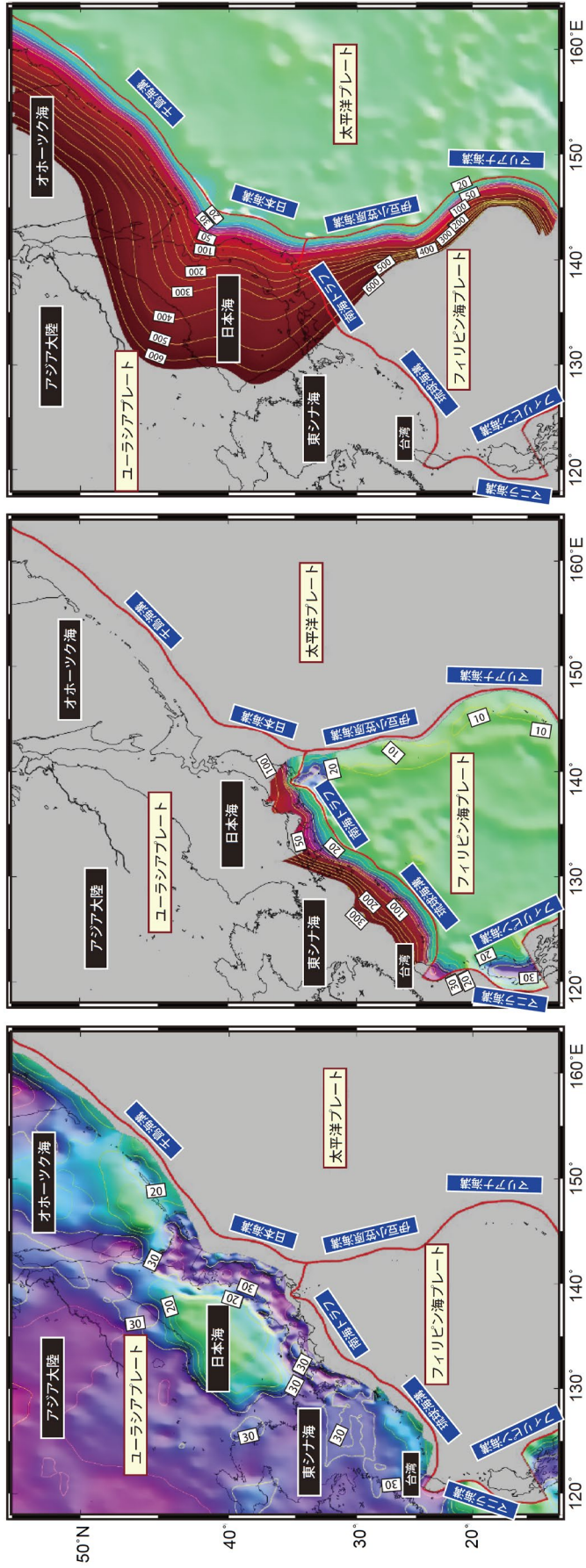
プレート境界の位置の修正、及びフィリピン海プレートと太平洋プレートとの接合部の形状モデルの検討を行った。関東域における構造探査を元に、同地域の複雑なフィリピン海プレート形状の再定義を試みた。リージョナルおよびグローバルなモホ面モデルを滑らかに接続し、日本列島周辺域全体にわたるモホ面モデルを構築し、公開した^[1505] (図16)。

イ．断層滑りと破壊の物理モデルの構築

大型振動台を利用した岩石摩擦実験を実施し、通常の高速破壊イベントに加え、弾性波速度より高速で伝播するゆっくり滑りが発生していることが明らかになった。ガウジを挟んだ実験では、摩擦パラメータは断層長サイズには依存しないものの、滑り距離によって変化することが確認された^[3001]。

粗い断層面を仮定したシミュレーション実験を実施し、地震性高速滑りの発生前に非地震性の遅いすべりが発生することが見出された。また、断層面の粗さが一定以上となると、地震性滑りを起こせなくなることが示された^[1507]。長期的スローリップ領域での摩擦特性推定には、固着域の滑り欠損速度も同時推定が必要であることが示された^[1801]。

日本列島周辺域基本構造モデルの構築



さまざまなデータを統合して構築した日本列島周辺域の基本構造モデルを公開。

図 1 6. 日本列島周辺域基本構造モデルの構築

これまでに得られているさまざまなデータを統合し、日本列島周辺域の基本構造モデルを構築した。左図：地殻構造モデル。地殻とマントルの境界であるモホ面の深さを等深線で表示。中央：フィリピン海プレートの形状モデル。プレート上面の深さを等深線で表示。右図：太平洋プレートの形状モデル。プレート上面の深さを等深線で表示。（深さの単位はいずれも km。）

(5) 火山現象のモデル化

ア．マグマ噴火を主体とする火山

桜島の火砕流を伴う噴火について、噴火活動期の縮退期に発生しやすいことや、噴火発生1時間ほど前から周波数の高い火山性地震が発生し、山体膨張が停止するケースが多く見られることが明らかとなった^[1908]。霧島新燃岳の2018年3月中に発生した多数の爆発的噴火に伴う地盤の傾斜変動を調べた結果、平均して、噴火の約30分前から膨張が始まり10分前から若干収縮し、噴火に至ることがわかった^[1508]。連続的な噴煙活動と溶岩流出が起こった3月上旬の噴出物と、それ以降の間欠的な爆発が続いた時期の噴出物から、火口内マグマの滞留による結晶化の進行プロセスを推察した^[5006]。

噴出物の結晶サイズを解析することにより、桜島の歴史時代のプリニー式噴火ある大正・安永・文明噴火のいずれにおいても、軽石・火山灰として爆発的に噴出したマグマは、噴火の直前に、深さ約10 kmのマグマ溜りから桜島直下の深さ1~3 kmの火道に移動していたことが明らかとなった。これにより、大規模噴火は上昇開始からごく短時間で噴火を開始する可能性があることがわかった^[1205]。

イ．熱水系の卓越する火山

口永良部島、阿蘇山、御嶽山、弥陀ヶ原、箱根山、焼岳、十勝岳、雌阿寒岳、霧島硫黄山等において、測地測量や地震観測、電磁氣的観測およびそれらのデータ解析、火山ガスや噴出物等の化学的、岩石学的調査が行われ、各火山の活動が定量的に調べられた。また、海底火山の活動評価のため海水分析などが行われた^[1003, 1008, 1403, 1802, 2802, 2949, 1909, 9102]。

草津白根山・本白根山の2018年噴火においては、様々な観測・解析から噴火の実態が明らかになりつつある。例えば、傾斜計データ解析からは本白根山鏡池北火砕丘の直下の開口クラックが噴火直前に膨張し、噴火とともに収縮したことがわかった^[1601]。噴出量は約3.6万トンと推定され、全岩化学組成分析から鏡池北火砕丘と同じ組成を持つ岩塊が放出されたことが推察された^[2942, 1601]。火山灰に付着した水溶性成分の分析から、高温マグマ起源のガスの関与が示唆された^[1601]。無人ヘリを用いた空中磁気測量から、湯釜火口北東域では温度上昇が起きていたが、本白根噴火の火口域の地磁気変化は温度変化ではなく噴火による地形変化によるものと推察された^[1003]。

熱水系の特徴が噴出物の分析から調べられた。十勝岳ではマグマ貫入が頻繁に繰り返され、強酸性の環境で岩石の変質が進んでいること、吾妻山では大穴火口形成噴火（1331年頃）を境に熱水系の状態が大きく変化したことが明らかになった^[1003]。

4-2．地震・火山噴火の予測のための研究

地震や火山噴火現象の科学的理解に基づき、地震活動や火山活動の予測研究を行った。地震発生予測では、長期評価手法の高度化、モニタリングによる地震活動予測及び先行現象に関する研究を行った。火山活動予測では、火山噴火の規模、推移、様式の予測のために、噴火事象系統樹の高度化に関する研究を進めた。

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

南海トラフ沿いの海溝型巨大地震の動的破壊過程及び内陸地震への影響を調べるために、モデリング研究を実施した^[3001]。GNSSデータからプレート境界の応力蓄積速度分布を推定し、それを境界条件として与えることで動的な破壊シミュレーションを行い、今後発生しうる地震のシナリオを複数作成した。また、プレー

ト間の固着が作り出す内陸域の剪断歪みエネルギーの増減分布と、地震活動の分布との間には、有意な相関があることが示された。

北海道太平洋岸に沿った地質調査により、1611年慶長三陸津波の堆積物は苫小牧市からむかわ町にかけて分布するが、十勝地方から釧路地方に分布する津波堆積物は1611年より後年のイベントによる可能性が高いことが示された^[1002]。また、2014年に長野県北部の地震が発生した神城断層の活動履歴調査により、複数の地震タイプが併存していることが明らかにされ、地震のタイプごとに変位が生ずる断層が異なる可能性が指摘された^[1702]。

(2) モニタリングによる地震活動予測

物理モデルに基づく数値シミュレーションと地震活動や測地データ等の観測データを比較することにより、プレート境界滑りの時空間発展機構を包括的に理解する研究を実施した。さらに、プレート境界滑りを予測する手法の開発を進めた。また、地殻応力の変動を断層滑りや、広域応力場、変形場の時空間発展を基に推定する手法を開発し、地震活動を評価した。統計的モデルを用いて地震活動の予測実験を行うとともに、その予測性能を評価した。

ア． プレート境界滑りの時空間発展

東北地方太平洋沖地震の震源域南側となる福島県沖に設置した海底地震計アレイ観測により、低周波微動活動を検出した^[1503]。微動は移動を示すとともに、低角逆断層型のメカニズム解で記述できることが示された。微動の発生域は、東北地方太平洋沖地震後の余効滑り領域内に位置し、比較的狭い領域で余効滑りとスロースリップが共存していると考えられる。

東北地方太平洋沖地震後に発生頻度が増した岩手県釜石沖の繰り返し地震発生域において、地震サイクル後半に小地震活動が活発化する傾向が保たれていたことが明らかとなった^[1501]。小地震活動の静穏化・活発化が釜石沖地震の繰り返し間隔に依存しないという結果は、地震活動が固着域内部での応力状態や階層的な構造等の場の性質に支配されている可能性を示唆する。

GNSS-音響測距結合方式海底地殻変動観測により、紀伊水道沖において2017年末頃から2018年の初め頃にかけて、南向きの非定常地殻変動を複数の地点において観測した^[8001]。海底地殻変動観測点で得られた変位ベクトルを基に、紀伊水道沖のプレート境界浅部においてスロースリップが起きていたことが初めて明らかとなった。

海域の3次元地下構造の影響を考慮したCMT解の推定手法を開発し、陸域で取得された長期間の波形データに適用することで、紀伊半島南東沖で発生する浅部超低周波地震が総じてプレート境界の滑りを反映する低角逆断層となることが示された^[3001]。

琉球海溝南西部八重山諸島近傍において、およそ半年周期で繰り返し発生するスロースリップの滑り速度の時空間変化がイベント毎に異なることが明らかになった^[1803]。また、イベント毎に摩擦パラメータの分布が異なることも示され、プレート境界周辺の流体分布や摩擦の性質が時間変化している可能性が示唆される。

イ． 地殻ひずみ・応力の変動

東北地方太平洋沖地震後に活発化した秋田県中部において、地震発生後の約8年間、領域全体の応力場は顕著な時空間変化を示さなかった。しかし、震源域が徐々に拡大した南端では逆断層型の応力場が確認され、この地域の応力場の不均質性が明らかになった^[1203]。

山陰ひずみ集中帯において、東北地方太平洋沖地震前後の地殻変動の短波長・長波長成分の分布の特徴について分析したところ、東北地方太平洋沖地震による応力擾乱の影響をほとんど受けていないことが明らかに

なった^[1907]。

2000年鳥取県西部地震域の余震のメカニズム解から、本震断層周辺域の応力場の不均質性の評価及び本震時の静的応力変化に基づいた絶対応力場の推定が行われた^[1905]。間隙流体圧をパラメータとした絶対応力場のモデル化手法が開発され、1992年ランダース地震震源域の絶対応力場が推定された^[1907]。横ずれ断層が数多く分布する西南日本の内陸地震発生域における応力場の推定へつながる成果である。

ウ． 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

東北地方太平洋沖地震以降に国内で発生した本震－余震系列を示す地震活動を分析したところ、余震継続時間がマグニチュードに依存しないこと、余震継続時間と活断層（一部プレート境界）の変位速度に負の相関があることが見いだされた^[1206]。

中規模繰り返し地震に関して、その発生確率を事前に予測し、事後の発生状況から平均対数尤度等を用いて予測モデルの優劣を評価した。その結果、発生間隔が対数正規分布でベイズ統計に基づくモデルで予測を行うと最も予測成績は良く、一方、BPT分布に基づくモデルに地震本部の採用するパラメータを用いて予測を行うと予測成績は予測したモデルの中で最も悪かった^[7006]。

国際的な地震活動予測可能性共同実験（CSEP）に継続して参加し、今年度も多くのモデルの検証実験を実施した。予測と検証の繰り返し経験が蓄積したので、関東地方においてM4以上の地震に対する予測モデルのパラメータの最適条件を探索し、それによる予測性能を事後的に調べた。その結果、最適パラメータの探索期間が1年程度になると予測性能が頭打ちになるとともに、予測期間が長くなるほどその予測性能が劣化する点もわかった^[1511]。

（3）先行現象に基づく地震活動予測

釧路沖、那珂沖のM5程度の繰り返し地震グループについて詳細な震源すべり分布を求めることで、これらの地域ではM5、M4、M3程度に相当する階層的な構造が存在することが示された^[1402]。さらに、異なる規模の地震でも、地震の始まり方が同じである例が発見された。この観測事実は、地震の始まり方だけを見ても最終破壊サイズを予測できないことを意味する。

地震活動の特徴を抽出するために、気象庁一元化処理震源カタログに対して最近傍法による客観的かつ自動的なクラスタリング処理を行い、前震・本震・余震の分類を行った。その結果、前震のb値がわずかに小さいこと、前震の発生率が本震の広いマグニチュード範囲において概ね30～40%程度であるなどの特徴が明らかになった^[1206] ^[7006]。

イタリアの地震活動に数理統計モデルを適用することで、M2.9以上の地震に対して、約61%が誘発型地震に分類された。また、2005年～2016年に発生した6つの大地震のうち5つは誘発型に分類され、イタリアでは前震の出現率が高いことが示された^[1206]。

四国地方において、プレート間の滑り欠損速度と深部低周波微動の発生レートとの間に時間的相関のある場所が見つかった。すなわち、微動発生率がゼロになると、滑り欠損速度がプレート収束速度に近くなることが示された^[5007]。このことは、微動がプレート境界の滑り速度の指標になり得ることを示唆する。

低速な滑りと高速な滑りの関係を考察するために、透明なゲルシートを使った摩擦実験を行った。その結果、低速な滑りと微動が同期して発生することで、滑りが共振して加速する様子が捉えられた^[1512]。

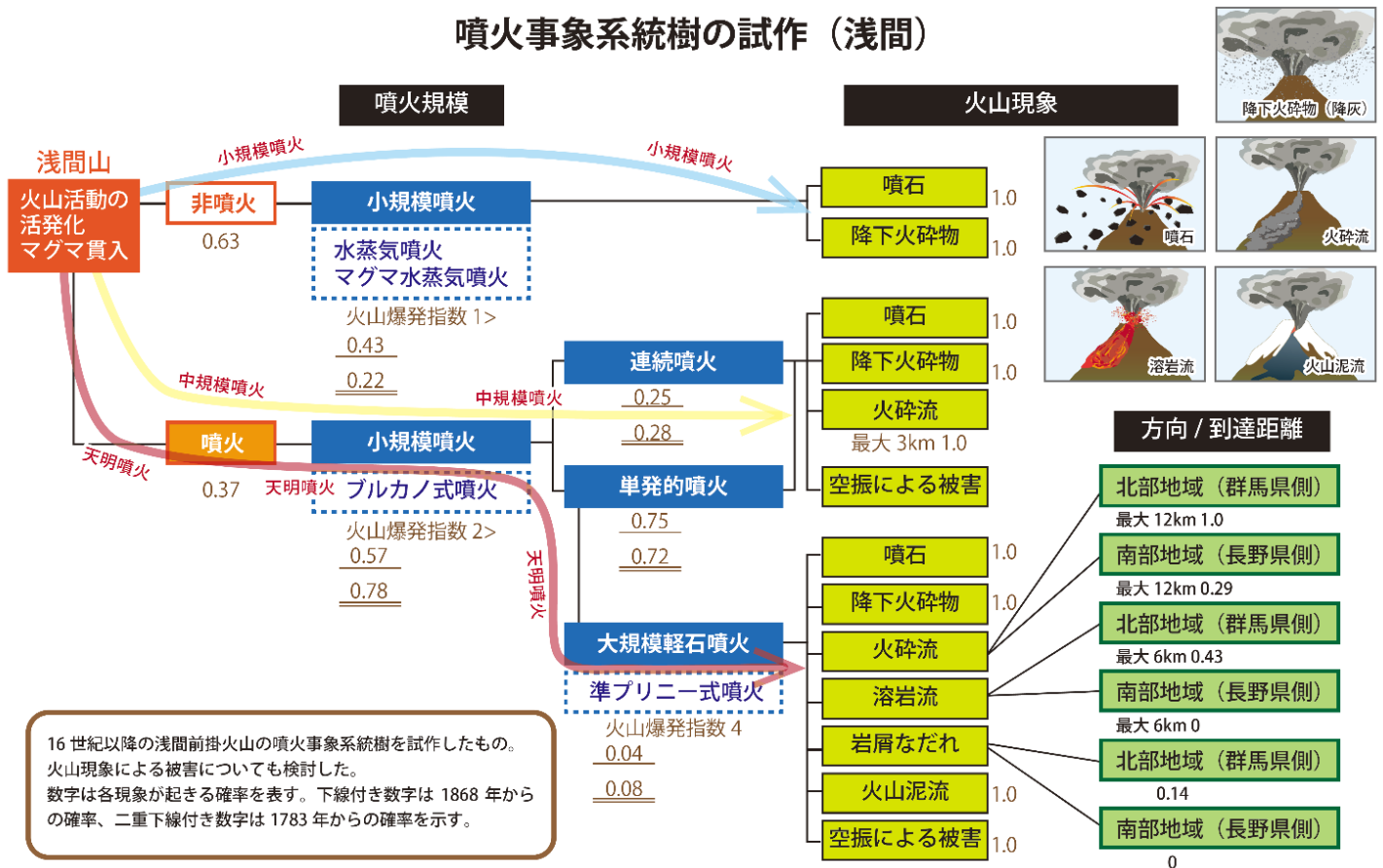
（4）事象系統樹の高度化による火山噴火予測

十勝岳、阿蘇山の噴火事象系統樹を作成するとともに、2018年1月の本白根山の噴火を受けて、草津白根火山の噴火事象系統樹の作成に着手した。また、浅間山の噴火開始と噴火未遂の評価手法および事象分岐確率

の算出手法を検討し、同火山の事象系統樹を改訂した(図17)^[1004]。

事象分岐の条件や論理を導き出すため、非噴火期の火山活動事象のうち特に熱水系の関与と考えられる事象を収集した。火山性圧力源や熱源の深度と強度の関係を散布図に整理し、深度と強度が浅い方向へ偏差する事例と噴火発生状況の比較をもとに火山噴火発生度を統計的に評価するための基礎資料を作成した^[1003]。また、火山ガス放出率や組成の連続観測を実施し、噴火発生や活動推移との関係を網羅的に調べ、火山ガス放出率とマグマ上昇率の間に比例関係があること、火山ガス中のCO₂/SO₂の増加がマグマ中の気泡の増大ひいては大規模噴火の発生に繋がる可能性があること、などを示した^[1208, 5006]。

噴火事象系統樹の試作（浅間）



火山現象を網羅的に時系列に沿って示す「噴火事象系統樹」の高度化として、作成手法を一般化し過去の噴火事例に基づく分岐確率を示した。浅間山においては中小規模の噴火が一般的であり、天明噴火クラスの大噴火は稀である。

図 17 . 噴火事象系統樹の試作（浅間）

火山現象を網羅的に時系列に沿って示す「噴火事象系統樹」の高度化を進めた。多くの火山において系統樹を作成することができるように、作成手順の一般化を進めた。また、過去の噴火事例に基づいて枝分かれの確率を示した。例えば、上図の赤・黄・青の太線はそれぞれ、天明噴火クラスの大規模軽石噴火、中規模噴火、小規模噴火のたどる推移を示す。火山現象の確率が1.0となっているのは、該当する現象が必ず起きることを示している。

4-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

「地震・火山噴火の災害事例の研究」においては、1) 近代的観測開始以前の史料、2) 近代的な観測や調査データ、から、地震発生から災害対応に至るまでの過程を解明した。

1) においては、「江戸大地震之図」(島津家文書、東京大学史料編纂所蔵)を分析したところ、1855年安政江戸地震による「江戸市中(薩摩藩芝屋敷北の一町)での被害と復興の様子」を知ることができ、同時に「(江戸は平時から大火が多く)地震に起因しない火災からの復興の様子」を知る上でも活用できる可能性を示した^[1513]。

2) においては「ゆれの情報をいかに被害軽減並びその後の復旧・復興の実現に還元するか」という点に着目し、柏崎市(2007年新潟県中越沖地震)、益城町(2016年熊本地震)、茨木市(2018年大阪府大阪北部の地震)における生活再建の基盤となる罹災証明書発行の日別件数について分析を行った結果、地震災害の特徴・被害量に関わらず、発行傾向には、発行を開始してから一定期間発行が集中し、その後低い発行量で推移するという同様のパターンが見られた。このパターンをモデル化し、強震動分布などをもとに推算される建物被害棟数に対してこのモデルを適用することで、罹災証明発行の集中時期、発行量、撤収時期が導出されるため、応援職員派遣・要請に必要な資源量を見積もることができる^[2702]。

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

地下構造モデルが得られていない場合の簡易的な強震動予測のために、観測記録の水平動と上下動の比を用いた補正、震源放射特性係数の補正、経験的グリーン関数法の活用などの手法開発を行い、台湾・インド-ブータン等のヒマラヤ前縁・アルジェリア等の国外の堆積平野・堆積盆地を対象に過去の被害地震の強震動を評価した。その結果、平均値としては、各々の国で工学的に用いられている地震動予測式と調和的な結果が得られ、良質な地下構造モデルが構築されるまでの過渡期に有効な計算手法として代替利用が可能であることを確認した^[1515]。

桜島大規模噴火による降灰リスク分析を、噴火と気象シナリオに応じ推定し、降灰量に応じた社会システムへの影響度分析を行った。また、1914年の大正噴火規模を仮定し、3890日分の気象シナリオによる降灰ハザードデータベースを構築し、降灰分布の予測計算にはPUFFモデルを用い、火山灰輸送シミュレーションを実施した。偏西風や強い風を条件に用いた降灰分布確率から桜島大規模噴火における要避難人口を求めたところ、いずれの年でも5月から10月までの平均は10万人を超え、避難困難が予想されることがわかった^[1914]。

東日本大震災の被災経験に基づいて、コミュニティの災害脆弱性評価のための指標を検討した。今年度は、宮城県津波被災地5市5町のコミュニティにアンケート調査を実施した。特に、震災後の移転(空間の変化)が生活環境条件に及ぼした影響を分析したところ、移転した地区によって、有意な差が生まれていることがわかった^[1704]。

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

地震動の事前評価に関しては、2018年大阪府北部の地震($M_{\text{JMA}}6.1$)についての強震記録の分析と地震動シミュレーションより、震央の南西に広がった強震動域は放射特性、破壊伝播の指向性効果、堆積地盤による増幅が重なって生じたことが明らかになり、大阪盆地堆積層構造モデルの妥当性も確認された^[1903;1911]。秋田県横手盆地において微動観測に基づき地盤構造モデルを作成し、これを用いて1896年陸羽地震の震動シミュレーションを実施したところ、同地域で地盤が深いために被害域が南に延びたことがわかった^[2963]。2019年1月3日に発生した熊本県熊本地方の地震($M5.1$)で震度6弱を観測した熊本県和水町で、直達S波の後に地盤の影響と

考えられる周期0.5秒程度の長い波群が確認された。この周期帯の波は計測震度を大きくするが、木造家屋の倒壊を起こす周期帯(1~2秒)より短いため、被害が限定的であったと考えられる^[1516]。

地震動による災害リスクの事前評価に関して、木造構造物被害の将来時点の予測をおこなうために、固定資産課税台帳および住民基本台帳から抽出されたデータを用いて、木造戸建住宅の棟数および築年数分布を予測する方法を検討した^[2362]。災害リスク評価のばらつきを理解するため、震源モデルや強震動予測モデルについて複数のモデルを用いて災害リスクを評価し、評価結果のばらつきを容易に理解できるような表示システムを構築した。また、ばらつきのある災害リスク評価結果の中からハザードシナリオ選択する際の考え方として、「命を守る」または「業務・生活・地域を守る」など異なる達成目標に応じて選ぶ方法について検討した^[2351]。

地震による地滑りの事前評価に関して、2008年中国ブン川地震、2015年ネパールゴルカ地震による斜面崩壊を分析した結果、谷の侵食加速による谷中谷^{*}に数多くの崩壊が集中したことがわかった。我が国でも特に西南日本外帯には谷中谷が広く分布しており、南海トラフ地震時に要注意である。2018年北海道胆振東部地震によって発生した壊滅的な地滑りでは、風化した軽石およびその直下の火山灰土に滑り面が生じたことが明らかになり、このような地層が地震時地すべりに対して最も危険であることが再認識された^[1912]。斜面崩壊に伴う地震動の特徴を分析し、概ね1-10Hzが卓越すること、イベントの長さを反映する継続時間は概ね30~200秒であること、特に崩壊域が数百m四方にわたるような大規模崩壊では周期10秒以上の長周期信号が見られることがわかった^[2394]。

火山噴火による火山灰や溶岩噴出の事前評価に関して、大規模噴火を想定した降灰シミュレーションを実施した。富士山で宝永規模の噴火が起きた場合に都心で10cm以上の降灰になる確率は3.3%、桜島で大正規模の噴火が起きた場合に鹿児島市街で1cm以上の降灰になる確率は7.8%と試算された^[7010]。

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

地震動の即時評価に関して、“揺れから揺れを予測する” PLUM法^{*}の高度化、地震波の散乱や減衰構造の精緻化、地盤増幅特性の適正化に取り組み、予測精度を向上させることができた。また、地震動の伝播方向をリアルタイムで推定する方法を考察した^[7008]。PLUM法の改良として、震度の距離減衰、メッシュ状の震度予測点を2次震源とする波動伝播、P波による震度予測を導入し、迅速かつ精度の高い準リアルタイム震度分布の予測を可能にした。観測点における震度情報から周辺非観測点での震度を予測するため、常時微動を用いた地盤震動特性の稠密に把握し地下構造モデルを構築した^[2001]。さらに、大地震の際に平野で発生する長周期地震動の即時予測の実現に向け、観測データとの同化に基づく地震動シミュレーションを試みた。2007年新潟県中越沖地震や東北地方太平洋沖地震の関東平野の地震動をターゲットに、3次元差分法計算により長周期(2.7秒以上)地震動を計算し、現時点で地震波伝播速度の8倍の速さでの予測が可能となっている(図10)。これにより、データ同化による長周期地震動の即時予測の可能性を示すことができた^[1516]。利用者が多い大規模建物や災害拠点となる施設を対象として、固有周期や立地条件が異なる個別の建物の、建物入力地震動のリアルタイム分類、揺れ継続時間の予測、に取り組んだ^[2958]。

津波の即時評価に関して、日本海溝・千島海溝に沿って設置された津波計(圧力計)の利活用方法の検討として、地震発生後500秒の圧力観測波形の形状のみを利用して海溝型巨大地震による津波発生域(隆起域)および地震規模を推定する手法を開発した^[1005]。

破壊継続時間が通常地震よりも長いスロー地震タイプの津波地震に対する気象庁マグニチュードの精度を評価するため、過去に観測された津波地震の震源スペクトルを模した理論波形を合成して気象庁マグニチュードを計算したところ、津波地震のマグニチュードは1以上過小に推定される可能性があることがわかった。この問題に対処するため、新たな規模推定法を開発した^[7009]。津波生成磁場の解析手法を改良し、鉛直分力が非常に小さい磁気赤道付近でも、陸上の磁場観測により津波生成磁場を検出できる可能性を示した

[7007]

GNSS 搬送波位相データから断層滑りを直接推定する手法を、2011年3月11日に茨城県沖で発生したMw7.8の地震に対して適用し、強震データから推定された滑り分布と調和的な結果が得られた。ここで、GNSS衛星の軌道暦としてInternational GNSS Serviceが提供する精密暦(最終暦)と、GNSS衛星から直接送信される放送暦とを解析に用いたところ、両者の結果がよく一致したことから、外部情報に依拠しない地震時滑り分布推定が可能であることが示された^[1209]。GEONETによる日本全国のリアルタイム地殻変動データを用いて地震発生時に矩形断層モデル及びプレート境界面上の滑り分布を即時推定する技術を開発し、電子基準点リアルタイム解析システムに実装した^[6004]。

火山灰や溶岩噴出の即時予測に関しては、XバンドMPレーダーによる噴煙観測を霧島、桜島、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島において継続し、2018年において噴火が発生したいずれの火山においても噴煙を検出した。噴火に伴う地震動の振幅と地殻変動から推定される圧力源の体積変化量の線形結合から火山灰放出量を評価する手法を開発した。この手法で評価された火山灰放出率から即時的に火山灰の拡散および降水量を予測することが可能となった^[1913]。航空路火山灰情報(VAA)業務で収集分析された火山灰雲の情報を火山灰の移流拡散の予測計算に取り込むことにより、多くの事例で火山灰雲領域の過大予測が抑制され、予測精度が改善された^[7010]。

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

積雪寒冷地の地域特性を考慮した災害時の避難を検討し、高精度避難ナビゲーションシステムを構築・実装した。また、都市開発が地震・津波災害の災害リスクや社会的脆弱性を増大させる可能性を論じ、地理空間情報活用による津波からの避難行動対策の有効性を検討した。さらに、地域・自治体防災担当者対象に防災教育・地域貢献を実施する等により、効果的な研究成果の普及手法を検討した^[1006]。

2014年御嶽山噴火にともない、火山災害情報のあり方に関する意識調査を、長野県側(木曾町・王滝村)住民と噴火時の登山者に実施した。事前の噴火リスクの認識においては地域差は見られないこと、および噴火から3年が経過した時点においても噴火の経験者には未だに大きな心理的ストレスがあることがわかった。また、岐阜県、長野県で実施した調査結果と比較分析を実施した。^[1706]

2016~17年度に大きな地震があったイタリア、ニュージーランド、台湾と、サンアンドレアス断層の地震活動で影響を受ける可能性のあるサンフランシスコ湾岸地域の住民に社会調査を行った。リスク推定値の不確実性を専門家が明示的に認めることで、専門家は誠実で率直であるという確信が高まり、大きな信頼が得られることがわかった^[1517]。

地方公共団体が火山災害の発生の可能性について総合的に把握し、的確な防災対応を行うことを支援するシステムを目指し、火山情報などの防災情報に結びつくインターネットで入手可能な各種観測情報を様々な関係機関から準リアルタイムで収集・統合して表示するシステムを構築し、北海道内の地方公共団体に設置してその効果を検証した。胆振東部地震を契機に、地震・震度情報の取得・表示機能を組み込んだ。さらに、高解像度降雨レーダー画像の取得・表示機能も追加した。釧路市が、観光客や登山者などに火山防災情報をリアルタイムで提供することを目的として、このシステムを集客施設に設置した^[1009]。

4-4. 研究を推進するための体制の整備

推進体制の整備

本研究計画の適切かつ効果的な推進のため、地震火山部会において年次計画の立案、成果の取りまとめを行い、年次報告(成果の概要)を作成し、印刷及びホームページで公開した。長期間噴火活動を休止してい

る火口 / 山体における今後の調査研究及び監視のあり方について検討を行い、結果を公表した^[7013]。

拠点間連携共同研究

総括研究（拠点間連携研究 [課題番号：2975] ）は「巨大地震のリスク評価の精度向上に関する新パラダイムの構築」と題し、平成29年度に引き続き、(1)震源過程、(2)伝播・深部地盤構造、(3)強震動予測、(4)浅部地盤構造、(5)構造物被害予測、(6)リスク評価の研究グループに分かれ、それぞれの分野におけるリスク評価の不確かさの要因についての検討を進めるとともに、これらの知見を統合するための(7)プラットフォーム構築グループおよび(8)ステークホルダの参画に関する研究グループにおいて、リスク評価およびその不確かさに関する検討を行った。

研究基盤の開発・整備

・地震・火山現象のデータベースとデータ流通

地震カタログ作成にあたって、自動震源採用に伴う発破イベント混入に対応するため、波形相関による発破抽出手法を開発し、カタログの質的改善を図った^[7019]。

電子基準点リアルタイム解析システムにおいて、精密単独測位法を導入し、試験運用を実施した^[6012]。S-net の観測データについては、海底地震津波観測網データダウンロードページより公開を開始し、JDXnet についても準備を進めた。DONET[®]の観測データについては、強震計及び広帯域地震計に加え、水晶水圧計のデータについても海底地震津波観測網データダウンロードページより公開を開始した。首都圏地震観測網[®]（MeSO-net）の運用を継続するとともに、ホームページによる観測データの公開を開始した^[3004]。海域火山基礎情報図調査を西之島等で実施し、海域火山データベースに反映させた^[8003]。

研究成果共有サーバにおいて、データ共有のためのオープンプラットフォームの owncloud の利用を進めた。地震連続波形データの解析のための大規模解析システムにおいては、過去の地震波形データの保存をさらに進めた^[1519]。GNSS・地殻変動連続観測等の多項目観測データを全国にリアルタイム流通させるシステムを開発し、データの流通・収集・管理・解析を一元的に実施した^[1009]。コミュニティ・モデルの一つであるプレート境界形状モデルに関して、プレート境界位置の修正及びフィリピン海プレートの、太平洋プレートとの接合部の形状モデルの検討を行い、Web サイトで公開した（図 16）^[1506]。

・観測・解析技術の開発

海溝軸を跨ぐ形での海底間音響測距において、各基線の中程に中継器を用いる方式を導入し、音響パス確保の困難さを解決した^[1210]。

火山測地学的技術の高度化を進めた。小型絶対重力計に対する地面振動の影響を補正する技術を開発し、蔵王火山で動作確認を行った^[1506]。小型単発機に搭載可能なカメラ型センサデータの処理手法を開発し、温度・放出率等の推定を行った^[3005]。火山監視情報システムにおいて、傾斜データに対する降水補正機能を導入した^[7004]。

噴火等、火山の表面活動を把握するための手法開発も進められた。二酸化硫黄放出率を従来よりもはるかに簡単に測定できるようにすることを目的として開発した、シングルボードコンピュータ付きの小型紫外分光装置[®]を用い、口永良部島火山の噴火に先行するガス放出の変化をとらえた^[1403]。気候変動観測衛星「しきさい」による赤外画像データの処理システムを開発し、正式運用を開始した^[1520]。火山噴出物の分析において、新たに開発した帯磁率測定手法を用いることにより、霧島火山における噴火推移を反映している帯磁率変化をとらえた^[1205]。Lバンド航空機 SAR[®]を用いた 3 次元地殻変動分布の推定手法を開発した^[1008]。ミュオグラフィ自動解析システムによる高画素画像出力の時間短縮化を進めた^[1523]。

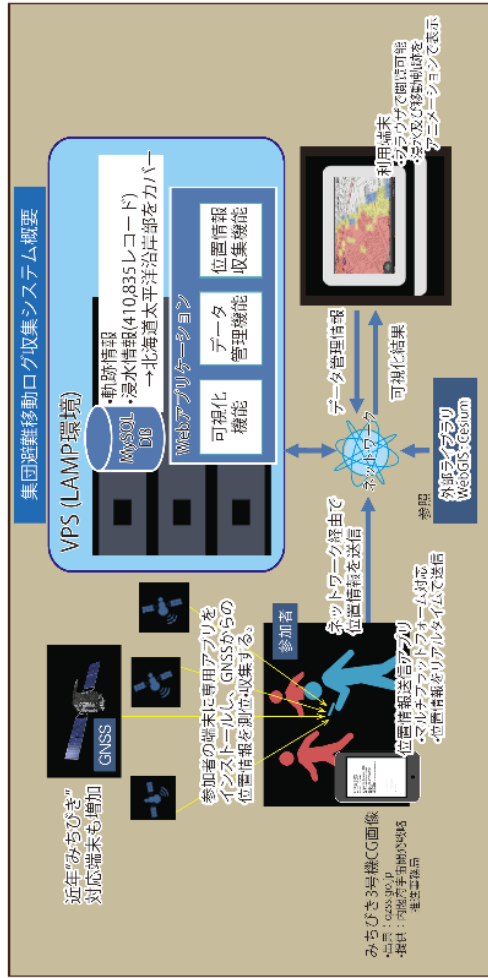
- ・ 社会との共通理解の醸成と災害教育

津波浸水想定 の 時間発展 と 避難訓練参加者の行動軌跡とを合わせて可視化する避難訓練支援システムを開発し、実証実験とフィードバック学習を行うことでシステム運用の効果と課題を明らかにした（図 18）^[1006]。地方公共団体の的確な防災対応を支援するために構築した準リアルタイム火山情報表示システムが、十勝岳を有する美瑛町と雌阿寒岳を有する釧路市により、観光客や登山者など集客施設に設置された^[1009]。

- ・ 国際共同研究・国際協力

ニュージーランドのヒ克蘭ギ沈み込み帯において、日本、ニュージーランド、米国で共同して設置された海底地震計の観測記録の解析を進め、海洋性地殻内の応力と間隙水圧がスロースリップの発生前後に変化していることを明らかにした^[1524]。

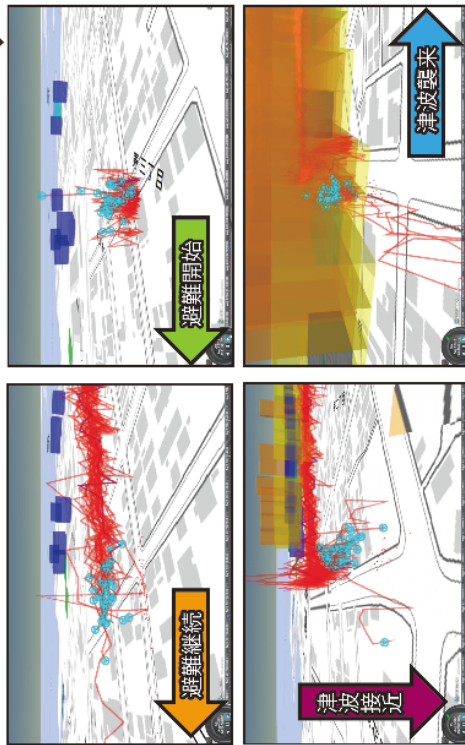
地理空間情報の総合的活用による災害に対する社会的脆弱性克服のための基礎研究



津波シミュレーションをシステムツールにインプット

集団避難移動ログをシステムツールに記録

地震・火山研究によるシナリオ



学習効果
行動変容



実験後に津波防災教育及び、避難訓練結果フィードバック学習。学習前後でアンケート調査を実施。

地震・火山研究成果を基盤情報とし、GPS情報の取得により集団避難移動過程を記録できるシステムツールを開発した。このツールにより避難行動をふりかえらせることで、学習効果と行動変容が期待できる。

図18. 地理空間情報の総合的活用による災害に対する社会的脆弱性克服のための基礎研究

地震・火山研究成果を基盤情報とし、GPS情報の取得により集団避難移動過程を記録できるシステムツールを開発した。このツールにより避難行動をふりかえらせることで、学習効果と行動変容が期待できる。併せて、積雪寒冷地の地域特性を考慮した災害時の避難や、都市開発が地震・津波災害の災害リスクや社会的脆弱性を増大させる可能性を検討するのに役立つ機能を開発・実装し、高精度な避難ナビゲーションシステムを完成させた。

4-5. 優先して観測研究を推進する対象の地震・火山噴火

・東北地方太平洋沖地震

日本海溝沿いのGNSS-音響測距結合方式* (GNSS-A) による海底地殻変動観測^[8001]、東北地方太平洋沖地震の震源域北部における海底地震観測^[1503]などにより、地殻変動や地震活動の様相が本震発生直後とは異なっていることがわかった。東北地方太平洋沖地震後の2012年に設置されたGNSS稠密観測網磐越測線の余効変動プロファイルを用いて、3次元不均質粘弾性構造モデルを推定した。また、地温勾配分布等に基づいて島弧走向方向の不均質性も考慮したモデルにより面積ひずみ分布を計算したところ、観測データを概ね再現することがわかった^[1203]。

・南海トラフの巨大地震

豊後水道周辺、四国南部、東海地域で発生している長期的および短期的SSEを詳しく調べ、滑り速度や規模などについて比較研究を実施した^[1509]。また、GNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測により浅部のスロースリップに起因すると考えられる非正常地殻変動を観測した(海上保安庁, 2018)。

・首都直下地震

大地震の際に平野で発生する長周期地震動の即時予測の実現に向けた、高速計算環境による観測データと高速シミュレーション同化の実現可能性を数値実験により評価した^[1516]。臨時観測を実施し、揺れの大きさの分布と近傍のボーリングデータと比較をしたところ、揺れの大きさは、浅部の地質構造との関係が深いことが明らかになった。揺れの推定には、より稠密な地盤構造の違いを考慮する必要がある^[1514]。

・桜島火山噴火

桜島における火砕流の発生は、マグマからの脱ガスが進行した一連の活動期の後半にあたる地殻変動の収縮期に多いことがわかった。2015年8月15日の開口割れ目へのマグマ貫入に伴う火山性地震について、震源域の深部への延伸と開口割れ目に対応するメカニズム解が得られた。XバンドMPレーダーによる口永良部島などでの噴煙観測事例が増えつつある。大規模噴火を想定した際の要避難人口は、設定する状況や避難者の意向などに大きく依存することが明らかになった。