

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

低頻度大規模現象である地震・火山噴火現象の解明には、近代的観測データだけでなく、史料、考古データ、地形・地質データの活用が必要である。歴史地震研究の基盤である各種地震史料のデジタルデータ化と校訂作業を進め、新たに地震関連史料データベースを構築した。全国各地の遺跡発掘調査報告書から、考古遺跡に残された災害痕跡の記事を抽出・分析し、災害痕跡データベースの作成を新たに開始した。また、これらのデータベースを統合し、より利用しやすいシステムの開発も進んでいる。これらの新たな取組は、長期間にわたる地震・火山現象や、それによる災害の解明の進展を支える重要な基盤となることが期待される。安政南海地震の余震の発生状況を、日記史料から推定する試み等が行われるなど、歴史地震のより具体的な実像が明らかにされつつある(図1)。さらに、各地の史料の発掘や調査が進められ、歴史地震の被害状況などの解明も進められた。津波堆積物の調査も着実に進められ、中世に日本海溝で発生した巨大地震が1454年享徳地震と同定されるなど(図2)、浸水範囲の推定や広域比較による発生年代の検討が進んだ。

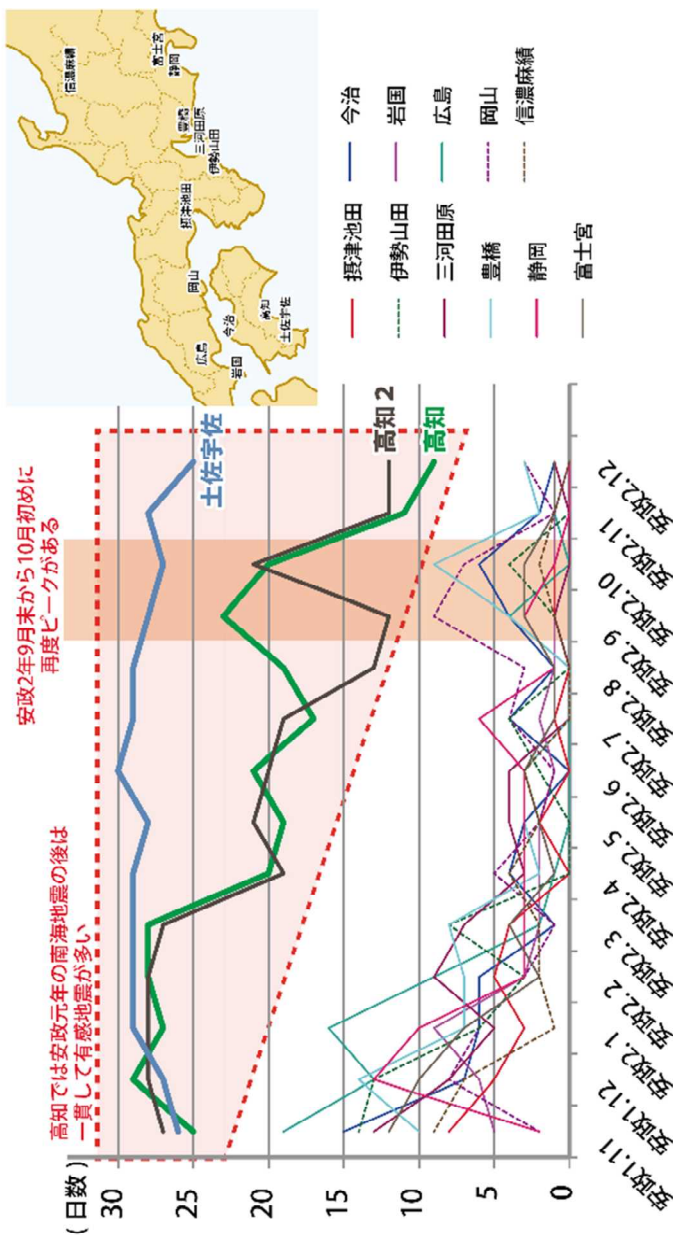
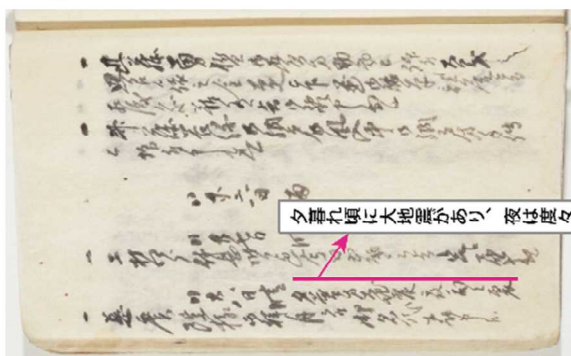
プレート境界で発生するスロー地震について、様々な地域での詳細な研究が進展した。活動特性や発生場の地下構造などの観測研究や、岩石摩擦や摩擦構成則を用いたシミュレーション研究などを通じて、大地震震源域の応力状態や周辺への応力载荷との関係の検討が進んだ。南海トラフでは、広域的なプレート間固着の状態や、スロー地震に伴う固着の時間変化が海底地殻変動観測や孔内観測等から明らかにされた(図3)。日本海溝と千島海溝では、周期的なスロー地震が存在し、それが地震活動の活発化に寄与することが確認された(図4)。東北地方太平洋沖地震の震源域の断層帯の構成物質をはじめとする海底掘削や海底面で採取されたサンプルを用いた実験が行われ、岩石や間隙水圧の違いにより多様な滑り現象が起こり得ることが確認された。今後は、これらの成果をさらに発展・融合させ、南海トラフなどで拡充されるGNSS等のモニタリングの実データを用いた断層摩擦パラメータ推定を目指したデータ同化実験などが期待される。

広域的な応力場の変化と内陸部断層への応力载荷を、一つのシステムとして理解する試みが、東北地方太平洋沖地震に関する研究の中で重点的に進められた。海底地殻変動観測で明らかになった西向き地殻変動場の再現や、数百年にわたる地震サイクル間の沿岸部の上下変動の理解には、粘弾性構造の考慮が不可欠であることが確定的になった(図5)。内陸部では、地震活動の活発化や静穏化から、応力の不均質性や地殻流体の関与に関する詳細な検討が行われた。余効変動データを用いたシミュレーションから、東北日本弧下のレオロジー構造の推定が進み、応力場モデリングからは日本海溝のプレート境界の強度がこれまで想定されていたものより非常に弱いことが示唆された。

2016年に発生した熊本地震(図6)では、断層面上の地震時の滑りの方向が、事前の応力場から期待される滑りの方向にほぼ一致していることが明らかにされた。内陸地震発生場の応力場は強い空間不均質性を持つが、列島スケールでは活断層は現在の広域的な応力場に対して滑りやすい方向に形成される傾向にあることが明らかにされた。内陸のひずみ集中帯では、プレート境界の巨大地震のような外力に影響されることなく、ひずみの蓄積が進行することが見出された。地震のメカニズム解から地殻内間隙流体圧場の時空間変化を推定する手法の開発が進み、注水実験による誘発地震や御嶽山周辺域の群発地震活動のデータから、地震の発生における応力と間隙流体圧の役割の理解が進んだ。このように、内陸での応力集中のメカニズムを地下構造や変形場、強度と関連させて統一的に検討する試みが進んだ。これまでに蓄積されてきた日本列島周辺の基本的な構造のコンパイル作業が進められ、プレート境界やモホ面の形状などのデジタルデータが公開された。この情報は、観測データの解釈やシミュレーション等を行う上で欠かせないものであり、広く地震・火山噴火の研究に利用されることが期待される。

日記史料に基づく有感地震の記録日数の推移

「田原藩日記」(三河田原)の
安政2年9月28日の記事



西南日本で記された複数の日記史料を調べ、月ごとの有感地震記録日数をグラフに示した。
西南日本では、安政元年11月の南海地震の翌年9月に、再び有感地震が増加した状況がわかる。

図1. 日記史料に基づく有感地震の記録日数の推移

日記史料には地震の被害だけでなく、日々の有感地震についても詳細に記録されている。西南日本で記された複数の日記史料からは、安政元年(1854年)11月5日の南海地震の本震以降、頻発する有感地震を記録した日数の推移が分かる。グラフは、安政元年(1854年)11月から安政2年(1855年)12月末までの期間について、有感地震の記録日数を月ごとに示したものである。グラフより、西南日本では安政2年9月から再び有感地震が増加した状況が分かる。

1454 年享徳地震の復元

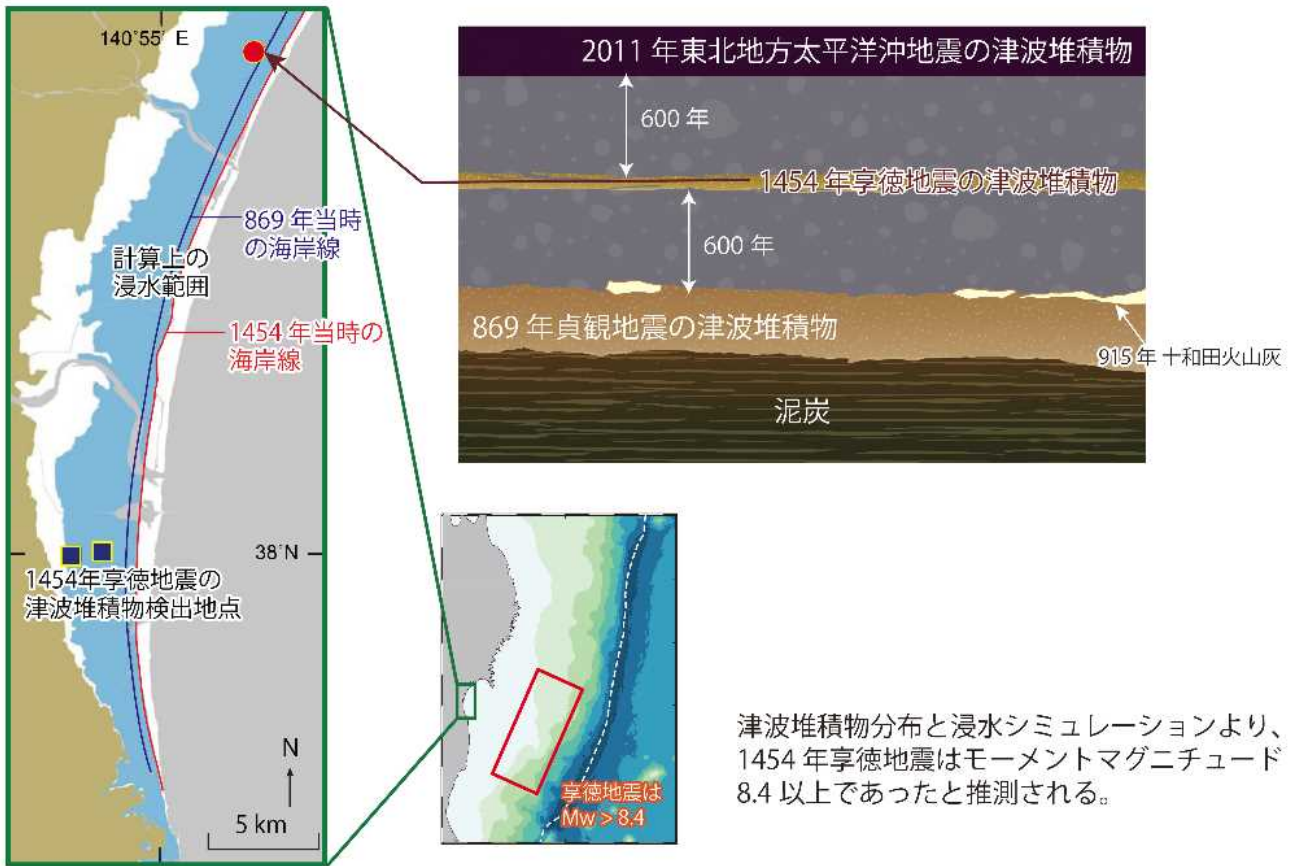


図 2. 1454 年享徳地震の復元

炭素年代測定から 1454 年享徳地震によるものと判断された津波堆積物の検出位置と、復元された当時の海岸線を基に行った浸水シミュレーションによって、享徳地震の規模がモーメントマグニチュード (Mw) 8.4 以上であったと推測された。

南海トラフ沿いプレート境界の滑りと固着

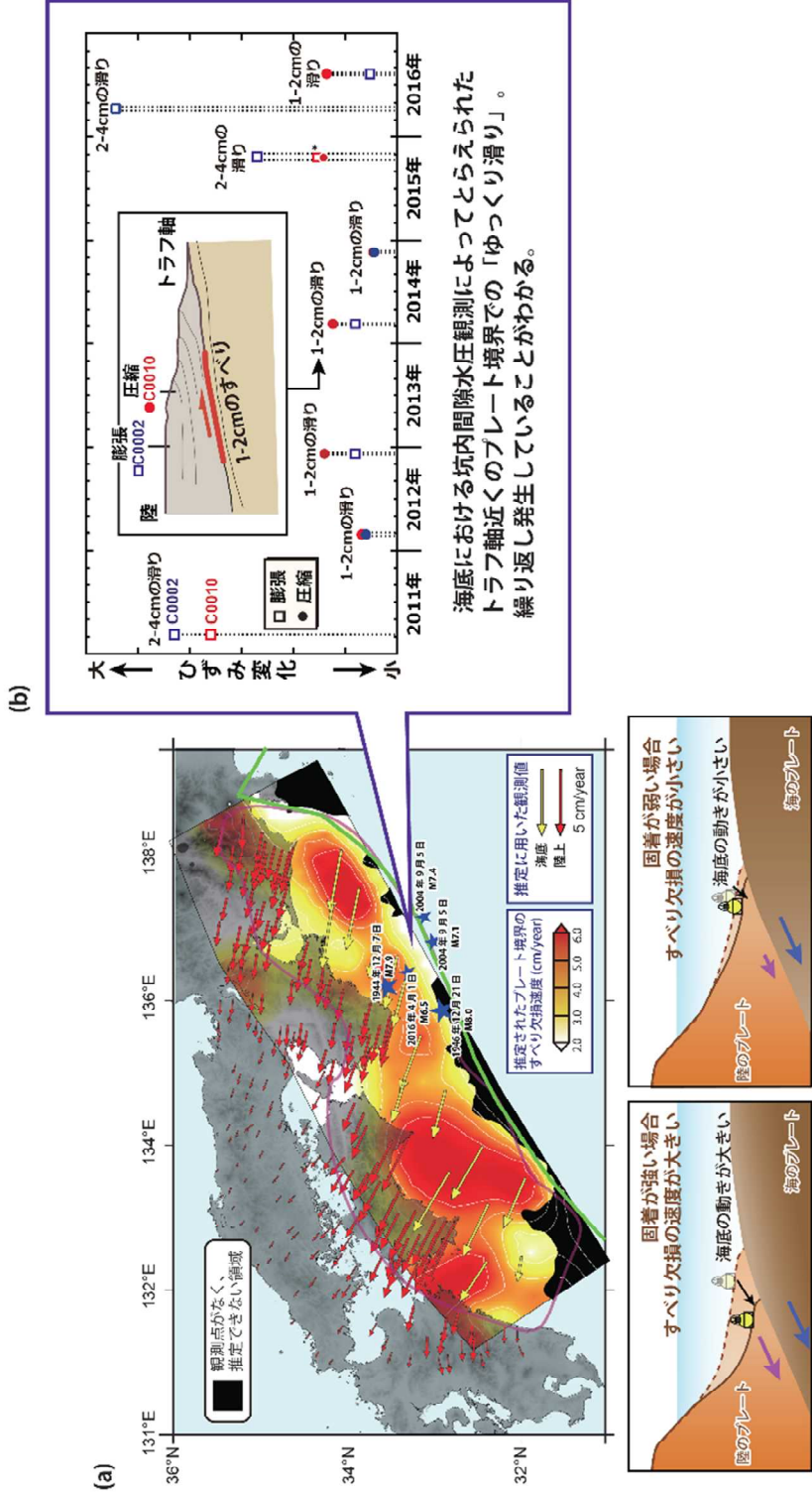


図3. 南海トラフ沿いプレート境界の滑りと固着

(a) GPS—音響結合方式による海底地殻変動観測によって得られた海底の変動速度から推定された、南海トラフ沿いプレート境界の滑り欠損速度分布。滑り欠損速度の大小はプレート間の固着の強弱を反映していると考えられることから、南海トラフ想定震源域内において固着分布に不均質があることが示された。

(b) 海底における坑内間隙水圧観測によって得られたひずみ変化から推定された、熊野灘のトラフ軸近傍でくり返し起こる「ゆっくり滑り」。間隙水圧変化から得られたひずみの変化の大きさと、その変化がプレート境界での滑りによって生じたと仮定して推定された各イベントの滑り量を示した。2016年4月1日に発生した三重県南東沖の地震 (M6.5) 後に浅部超低周波地震が連続したが、これに連動して大きな滑りが観測されている。

プレート境界の滑り速度変化と地震発生との比較

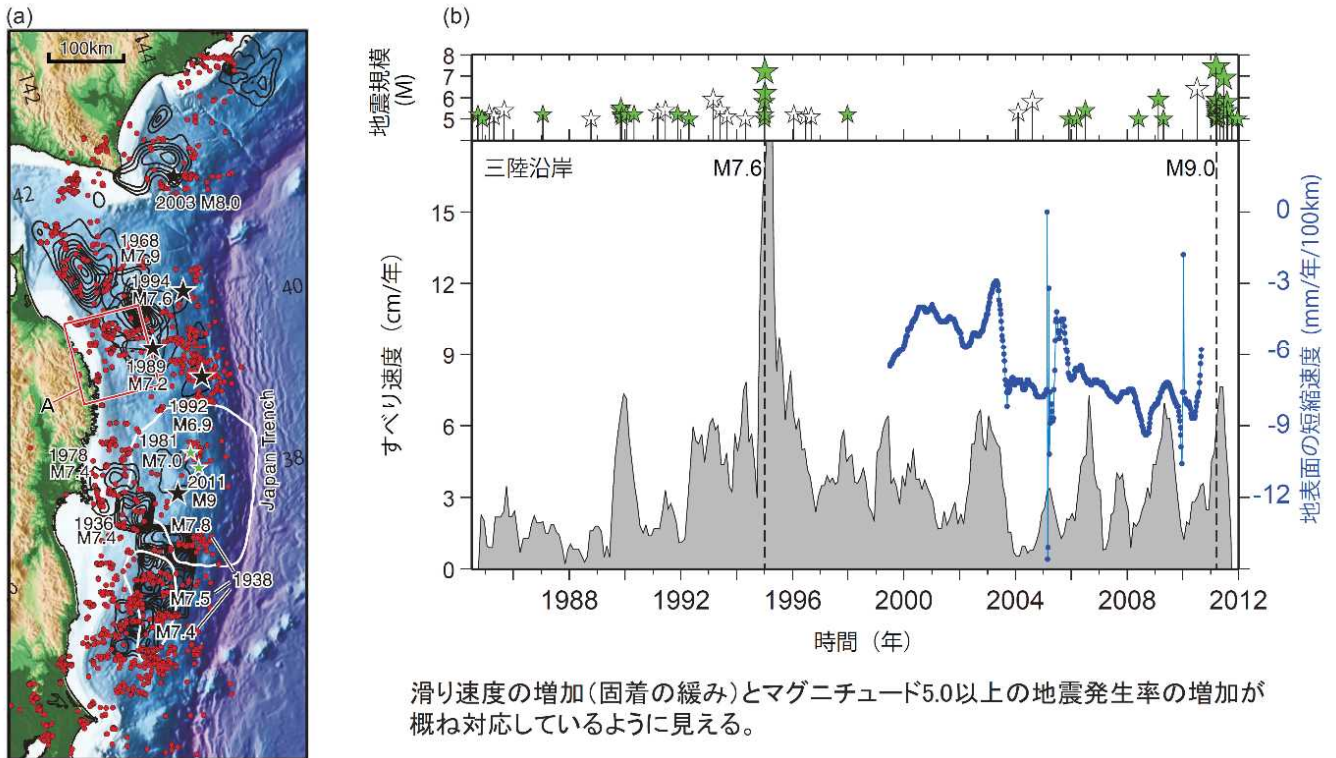
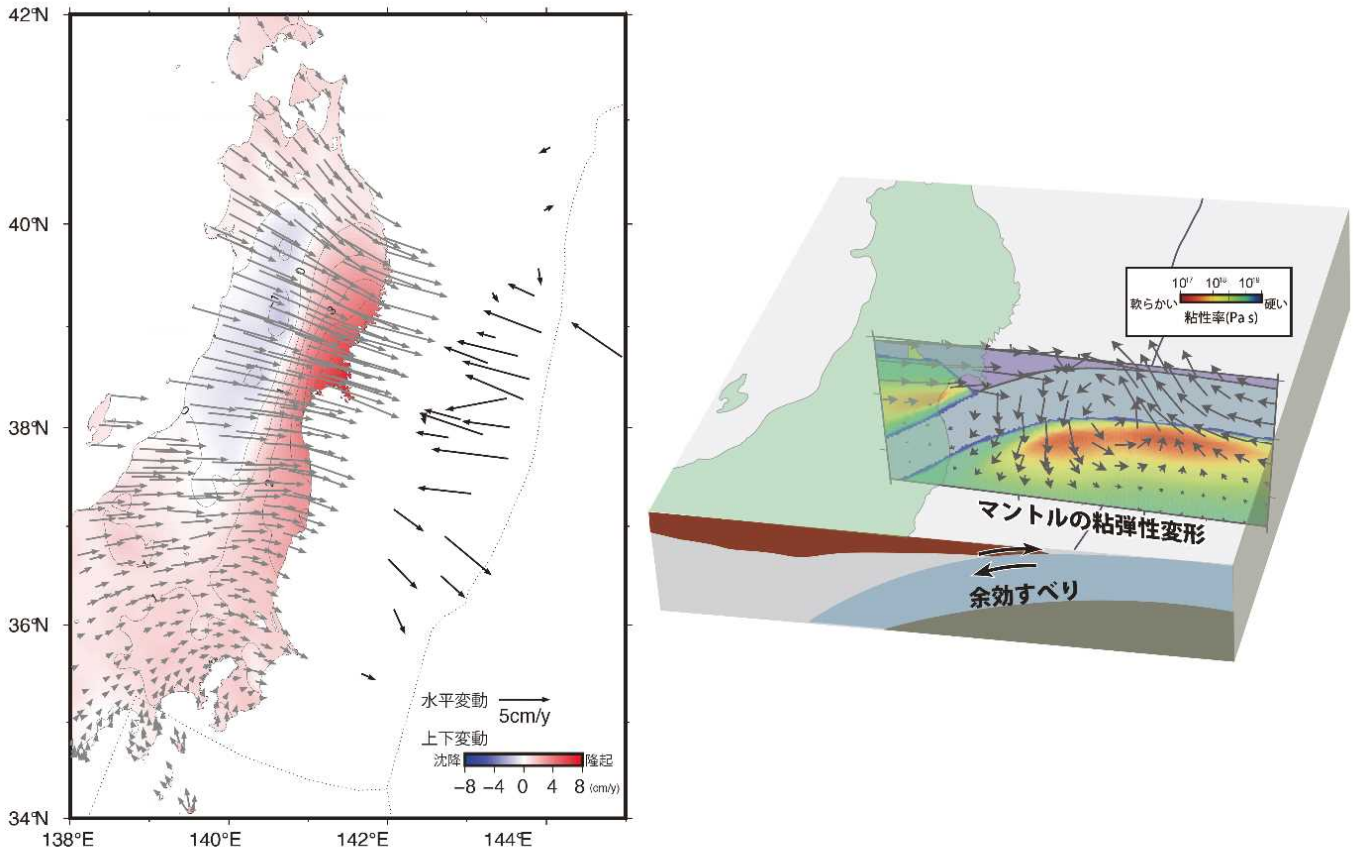


図4. プレート境界の滑り速度変化と地震発生との比較

北海道～関東地方の沖合のプレート境界断層の広い範囲で、プレート境界の滑り速度が概ね周期的に変化していることを繰り返し地震及び地殻変動データから発見した。滑り速度が普段よりも速くなると、プレート境界の固着が緩むため大きな地震が起りやすくなる傾向があることが示された。(a)解析に用いた相似地震の分布(赤色丸)。赤色の矩形(領域A)は、(b)図の領域に対応する。白線は2011年東北地方太平洋沖地震の滑り域、黒線は他の大地震の滑り域を示す。(b)繰り返し地震データから推定した三陸沖西部でのプレート境界での滑り速度(灰色)と、GNSSデータから推定した地表面の短縮速度(紺色)の時系列。上部のパネルはマグニチュード5以上の地震活動を示し、緑はそのうち、プレート境界の滑り速度が増加している際に発生したものを表す。

2011年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動とその原因を説明するモデル



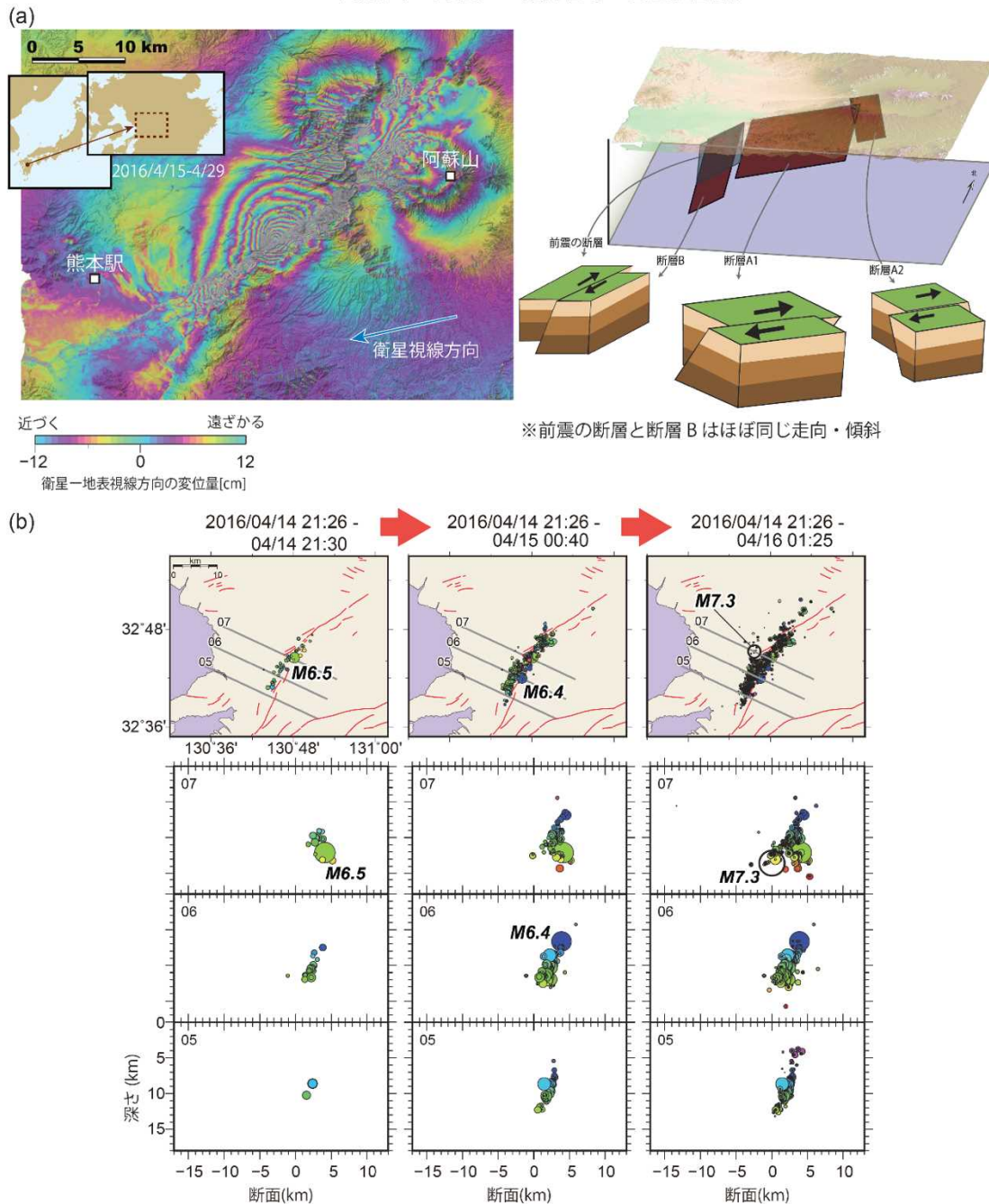
海陸の地殻変動観測によって検出された東北地方太平洋沖地震後の複雑な地殻変動場は、地下のマンツルの低粘性的な振る舞いが原因であることが明らかになった。

図5. 2011年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動とその原因を説明するモデル

2011年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動とその変動を説明するモデル。左図：陸上GNSSと海底GNSS-Aによって測定された2012年から2016年間の地殻変動速度。

矢印は水平変動速度で、陸上のコンター（青と赤の色）は上下変動速度。宮城県沖では陸とは逆向きの西向きの変動が卓越している。陸上では奥羽山脈を境に東西で上下変動が逆転している。右図：地殻変動のパターンを説明する地下構造のモデル。宮城県沖の海陸の逆向きの変動は、海洋プレート下のマンツルの粘性的な振る舞いによって説明される。地震発生時に海溝軸近くの海洋プレートが大きく西向きに動くことにより、特に海溝軸外側（海側）の海洋プレート直下のマンツルにも西向きの流れが生じる。この流れにより、地震後も、海溝軸近くの海洋プレートは西向きに動き続ける。陸側のプレートは、地震時に東向きに動くため、陸側のプレート直下のマンツルにも東向きの流れが生じ、地震後も陸側のプレートは東向きに動き続ける。

2016年熊本地震：複雑な地震活動



2016年熊本地震にともなう複雑な断層運動。地震に伴う地殻変動の干渉 SAR 解析により、広い範囲にわたって複数の断層面が動いていた様相が捉えられた。また、前震から本震にいたる地震活動域の拡大の様子が明らかにされた。

図6. 2016年熊本地震：複雑な地震活動

(a)左図：熊本地震に伴う干渉 SAR 解析による地表変動の様子。右図：干渉 SAR 解析により提案された熊本地震の震源断層モデル。地表変動を説明するために少なくとも3枚の異なる断層面に沿う断層運動を仮定する必要がある。(b)前震(2016年4月14日M6.5)から本震(2016年4月16日M7.3)に至る地震活動の震源分布の推移。震央分布(上)と代表的な深さ断面図(下)に、累積の震源分布を示す。丸印の色と大きさは、地震の深さとマグニチュードをそれぞれ表す。

火山に関しては、カルデラを形成した噴火に着目して地質調査や掘削、岩石学的検討などを行った。九州地域の火山では、カルデラ形成に先行する小規模な活動が認められるのに対し、北海道の火山では認められない傾向があること、カルデラ噴火を引き起こす源であるマグマ供給系は単一の「マグマ溜まり」*ではないこと、噴煙柱形成・崩壊とクライマックスのステージ発生時間間隔などが異なるなど噴火活動の推移に多様性があることを明らかとした。また、2014年御嶽山噴火の前後で、火山性地震のメカニズム解が変化したことをつきとめ、応力場の時間変化に基づく火山活動のモニタリング手法を提案した。

火山現象のモデル化では、過去の噴出物分析と物理観測の両面で進展が見られた。前計画で開発した高精度の分析手法を、2万9千年前の始良カルデラ噴火や1707年の富士山宝永噴火の噴出物に適用することで、マグマ溜まりの含水量や温度圧力の変遷という観点から大規模噴火の準備過程をモデル化した。また、桜島の噴出物については、最新の撮像技術を用いて、石基*中の微結晶（1ミクロン以下）のサイズ分布を調べ、準プリニー式噴火やブルカノ式噴火*、溶岩流出といった噴火様式の違いと火道浅部におけるマグマの上昇速度の関係を明らかにした。

一方、地球物理観測による噴火のモデル化については、広帯域地震計観測データの解析から、2017～2018年の新燃岳噴火発生前に火道内で圧力が蓄積される過程を明らかにした。また、本計画期間中に発生した口永良部島、御嶽山、草津本白根山の水蒸気噴火を比較したところ、噴火数分～十数分前から火口近傍の観測点で火山性微動と地下浅部の膨張が観測された後、噴火開始とともに地盤が収縮に転じるという共通の特徴があることが分かった。また、噴火準備期にあると考えられる十勝岳や吾妻山、阿蘇山では、2014年口永良部島噴火前と同様な、継続的な熱消磁*が続いており、熱水系*を持つ火山の準備過程に類似性があると推察された。

2-2. 地震・火山噴火の予測のための研究

科学的理解に基づいて地震発生や火山噴火、及び地震活動や火山活動の予測を目指した様々な研究が実施された。

地震発生長期評価手法の高度化のために、津波堆積物、地形地質等の調査を進め、過去の大地震の発生履歴に関するデータが新たに収集され、既存のデータとあわせて解析することで、大地震の発生間隔の多様性に関する理解が進んだ。さらに、近年の地震及び地殻変動の海底観測の進展により、プレート境界の固着状況の詳細が明らかになった。特に、南海トラフ沿いのプレート間では、海底地殻変動観測によって推定された「滑り欠損」*速度の分布を基に、数値計算によって大地震時の動的な断層破壊過程をシミュレートすることに成功し、今後発生し得る巨大地震のシナリオを複数作成した。

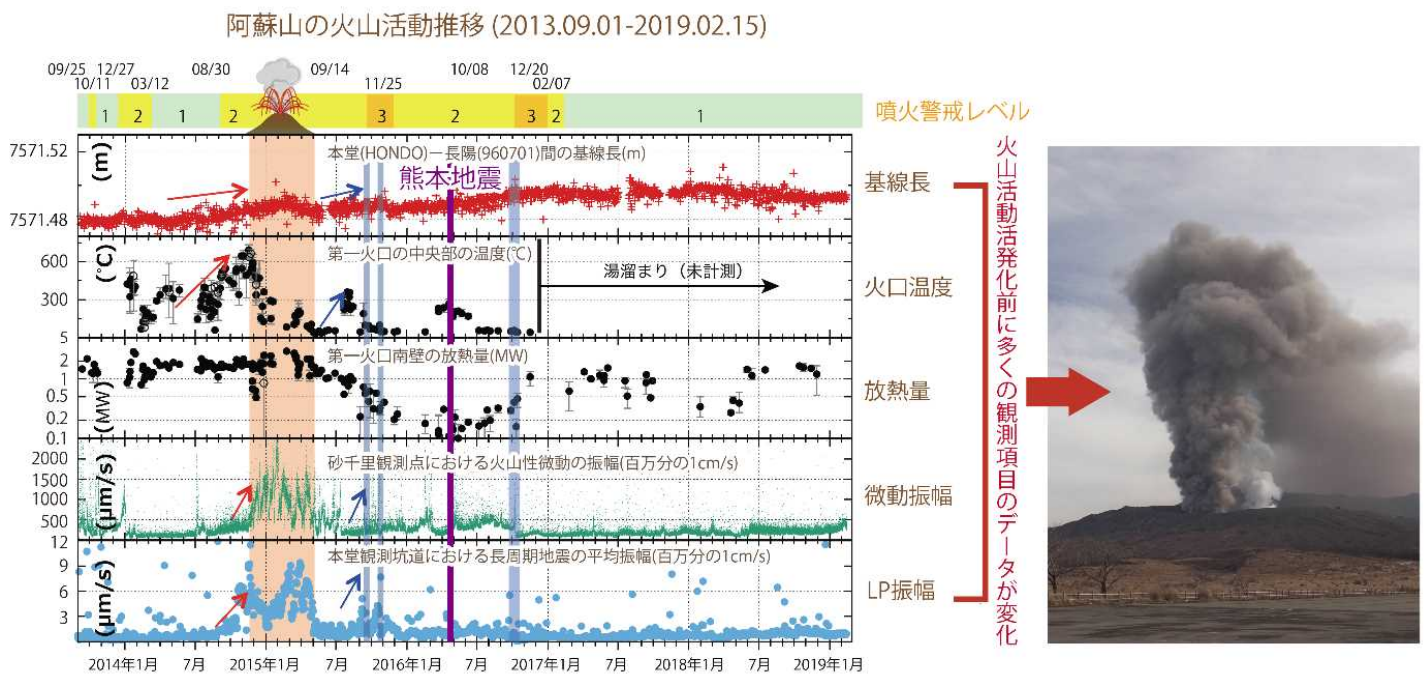
スロー地震に関する様々な研究を中心にして、地震活動や測地データ等の観測データと物理モデルに基づく数値シミュレーション研究の推進によって、プレート境界滑りの時空間発展の包括的な理解が大幅に進んだ。スロー地震の応力载荷により大地震が誘発されたと考えられる観測事例が増えるとともに、プレート境界の滑り速度が一時的に速くなると地震が活発化しやすい傾向にあることも示された。また、新たな海底観測網の導入により、日本海溝や南海トラフ沿いの地殻活動の時空間変化を詳細に捉えられるようになってきた。特筆すべき点として、海溝軸付近のプレート境界浅部でも様々な種類のスロー地震が起きていることが新たに発見された。また、地殻変動データと数値シミュレーションとのデータ同化手法の高度化により、スロー地震発生時のプレート境界面上の摩擦構成則パラメータの推定やその時間変化の抽出にも成功した。

地震に先行して発生した様々な現象のうち十分な精度を持つ観測量について、大地震発生との相関を統計的に評価した。その結果、様々な先行現象の中で、前震活動が他のものに比べ高い「確率利得」*を有する現象であることが明瞭に示された。ある地震活動を事前に前震と識別することは現時点では不可能ではあるが、群発的な地震活動や空間的に密集度の高い地震活動が前震になりやすい傾向が見出されつつある。また、先行現

象と地震発生を結び付けるメカニズムを明らかにし、先行現象と地震発生との関連について科学的な理解を深めた。例えば、潮汐と巨大地震との関連を調べることで、潮汐力が高い時ほど開始した破壊が止まりにくい状態にあるため、巨大地震が普段よりも僅かに起きやすいという解釈が提案された。

浅間山、十勝岳、阿蘇山、蔵王山等を対象として、地質学的研究成果に基づいた噴火事象系統樹を作成するとともに、一般的な作成手順を考案した。阿蘇山では、噴火発生前に多項目観測のデータに異常が現れ、噴火発生予測に利用できることを示した(図7)。中でも、浅部へのマグマ貫入による熱消磁を示す地磁気変化が、マグマ噴火では現れるのに対し水蒸気噴火では発現しないという、噴火様式の予測のための貴重なデータを得た。桜島における山体変形データから測定されるマグマ貫入率と噴火規模や噴火様式との関係(図8)、国内の火山についてのGNSSデータに基づく噴火発生の判定方法、全世界データに基づく大地震発生後の噴火発生確率など、分岐判断への定量的指標が示された。

多項目観測で見た火山噴火の推移



阿蘇山で、地殻変動、火口温度、放熱量、地震などの多項目観測を実施したところ、噴火の推移に応じて多くの観測項目のデータが明瞭に変化している様子が捉えられた。

図7. 多項目観測で見た火山噴火の推移

九州の阿蘇山で、地殻変動、火口温度、放熱量、地震などの多項目観測を実施したところ、噴火の推移に応じて多くの観測項目のデータが明瞭に変化し、火山活動の活発化を反映している様子が捉えられた。グラフ中の赤矢印は2014年11月のマグマ噴火前に見られた各観測の上昇を表す。青矢印は2015年9月に噴火警戒レベルを2から3に引き上げる直前の活動度の変化を表す。青灰色の縦線は火口周辺に影響を及ぼした比較的大規模の噴火を表す。一方、紫色の縦線が示す2016年4月の熊本地震の際はデータに変化の見られた観測項目は限定的であった。

桜島のマグマ供給系と噴火事象の分岐条件

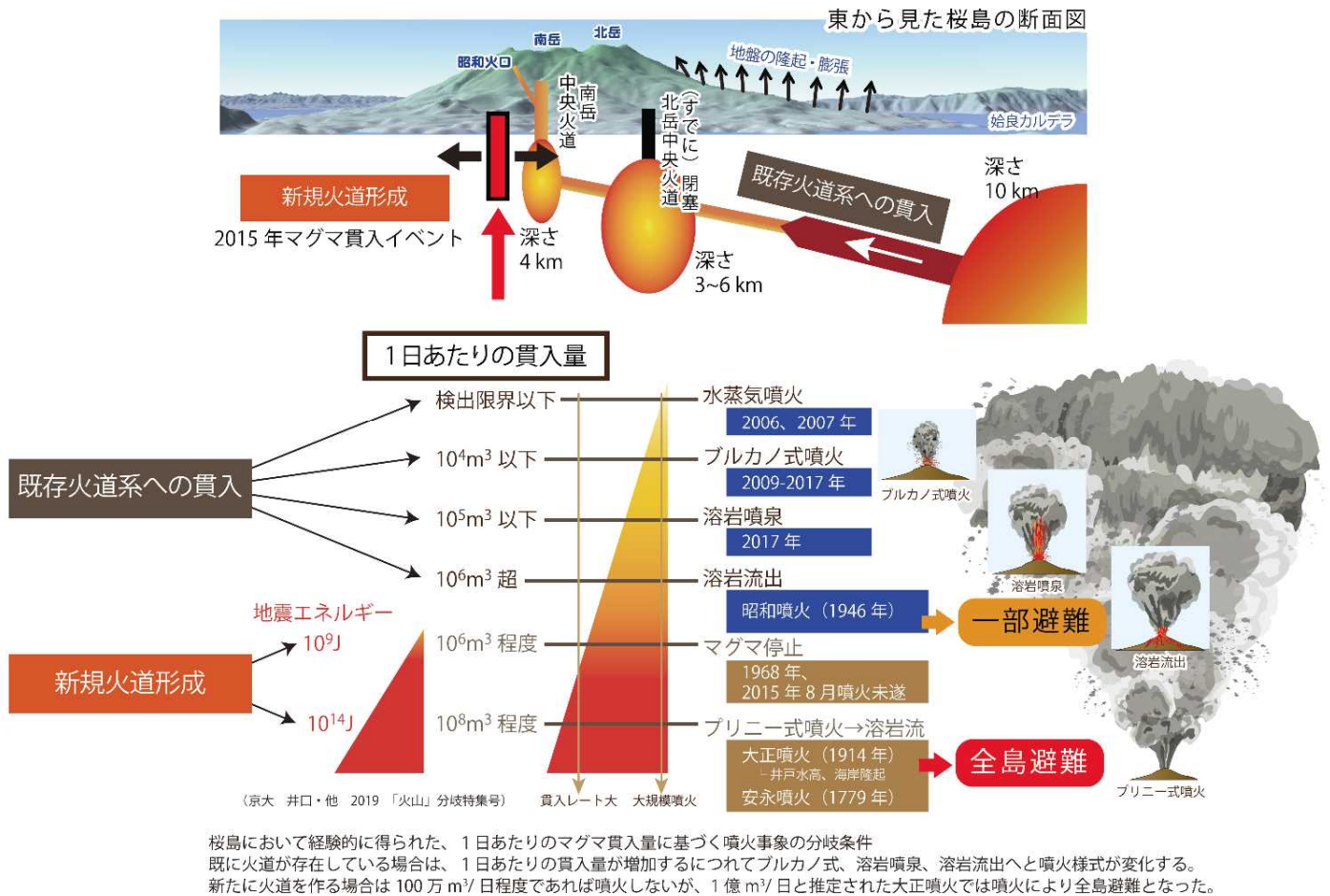


図8. 桜島のマグマ供給系と噴火事象の分岐条件

上図は桜島のマグマ供給系、下図は桜島において経験的に得られた、1日当たりのマグマ貫入量に基づく噴火事象の分岐条件を示す。既に火道が存在している場合は、貫入量が増加するにつれてブルカノ式、溶岩噴泉、溶岩流出へと噴火様式が変化する。新たに火道を作る場合は、10⁶m³/日程度であれば噴火しないが、10⁸m³/日と推定された大正噴火では全島避難となるような大規模噴火となった。

2-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

1703年元禄地震、1855年安政江戸地震を始め、976年京都・近江の地震、1498年近畿地方の地震等において、被災状況と災害対応の様子を読み解くことで、歴史災害における災害過程への理解が進んだ。2016年熊本地震の調査研究からは「熊本地震発生前から活断層の存在を知っていた住民（全体の3割）についても、その半数において『地震はたぶん起きない』と考えていた」という研究者とは乖離した住民のリスク認知の実態を明らかとした。また、2018年大阪府大阪北部の地震等の調査研究から「被害量に関わらず、過去2地震と比較して生活再建支援業務における罹災証明書の発行パターンは大きく異なるものではなかった」という災害対応業務と地震被害との関係を明らかにした。地震・火山噴火研究において、本計画から取り組んだ社会誘因*から社会素因*への波及効果の解明においては、歴史地震研究において一連の災害過程の記述を発見したが、災害誘因に関しては科学的理解が進んでいない過去において記述が詳細でないことを確認する結果となった。さらに、科学的解明が進んでいる現代においても災害誘因理解が国民に広がっていないことが明らかとなった。また、社会素因における災害対応業務と被害規模との関わりを明らかにすることで、被害軽減策の側面からの理解を深めた。

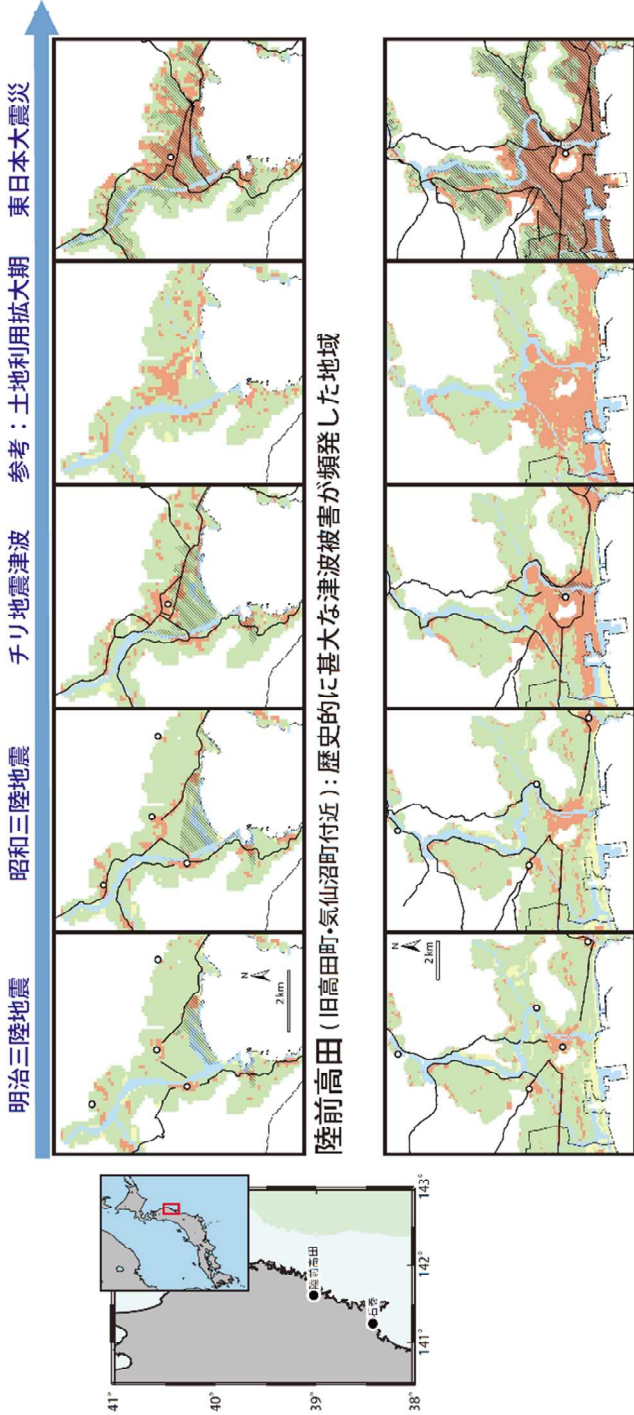
災害誘因（地震や火山噴火）、自然素因（地形や地盤）、社会素因（土地利用や避難行動等の災害対応）の間の関係性を明らかにするための研究を実施した。また、堆積平野・堆積盆地での強震動予測については、地下構造モデルが得られない場合でも、震源放射特性係数の補正や経験的グリーン関数法の活用などにより、国外の過去の被害地震の強震動評価を一定の精度で行えることを確認し、現実的な計算手法として利活用可能であることを検証した。桜島大規模噴火による降灰リスクを気象条件を考慮して評価したところ、想定される降灰分布によっては要避難人口の平均が10万人を超え、避難が困難になる可能性が示された。東日本大震災で甚大な津波被害に襲われたまちの土地利用変遷を分析すると、海岸近くの都市的土地利用は、過去の津波浸水経験によって抑制されるが、全国規模の土地利用拡大期にはその効果は限定的なものとなる、との結果が得られた（図9）。

国内外で発生した被害地震の震源インバージョン解析*を精力的に実施し、東北地方太平洋沖地震における周波数別地震波生成の空間的な棲み分けの分析や、既往スケーリング則*の高精度化を通じて強震動予測の高度化を進めた。また、関東平野や大阪平野などで堆積層構造のモデル化や、モデルの検証・改良を進めた。関東平野の3次元地震動伝播シミュレーションでは、内陸浅発地震時に地殻及び堆積層構造により、P波到達直後からS波到達までの間に大きな長周期地震動が生成されることを示した。過去に起こった地滑りの調査を精力的に行い、地震時地滑りの地質・地形的特徴について、火山地域では軽石あるいは軽石直下の火山灰土が滑り面になりやすいこと、非火山地域では重力斜面変形あるいは過去の地滑りに関連して地滑りが発生しやすいこと明らかにした。地震波の散乱・減衰構造、地盤増幅特性の精緻化により、地震動の即時予測手法（PLUM法）の高度化に取り組んだ。また、観測データとの同化*に基づくシミュレーションを試み、地震波が到達するよりも早く長周期地震動の予測結果を示すことができた（図10）。

津波即時評価手法に関しては、S-netの利用を想定して海底圧力波形のデータ同化で津波波動場を予測する手法を開発し、リアルタイム浸水予測手法と合わせ、東北地方太平洋沖地震の場合であれば10分以内に高精度な浸水予測をすることを可能にした。地震規模を即時的に推定するための技術開発として、GNSS搬送波位相*データから断層滑りを直接推定する手法の高度化を行い、リアルタイム地殻変動監視システム（REGARD）の高度化に貢献した。火山灰拡散即時予測に関して、XバンドMPレーダー*、ライダー*、GNSS観測により、噴煙高度や移流・拡散、粒子形状についての情報をリアルタイムで把握できるようになった。また、このようなリモートセンシング技術によるデータと地上降灰観測の比較についての経験式を導出したほか、火山性地震と地殻変動データを用いた火山灰拡散予測システムを構築した。

御嶽山噴火を事例として、住民ならびに登山者への調査を実施した。噴火の3年後においても噴火経験者には高い心理的ストレスが確認された。また、地元住民（下呂市・木曾町・大滝村）への調査では、事前のリスク認識に地域差は見られなかった。リスクコミュニケーションの課題抽出のための調査を国内外の事例から進めた。サンフランシスコ湾岸地域の住民調査では、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分かった。積雪寒冷地を事例として、避難時の移動の際に生じる課題を検討するためのシミュレーションツールを開発・実装した。防災教育とともに、避難行動訓練のGPSログと想定津波シナリオを重ねて地理空間情報*上で可視化することで、訓練参加者の避難行動がより適切なものへと変容することが期待できる。平時より防災担当者が火山情報などの防災情報と関係機関の各種観測情報を準リアルタイムで収集するシステムを構築した。さらに、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、このシステムが釧路市の集客施設に設置された。

東日本大震災被災地の過去 100 年の土地利用変化



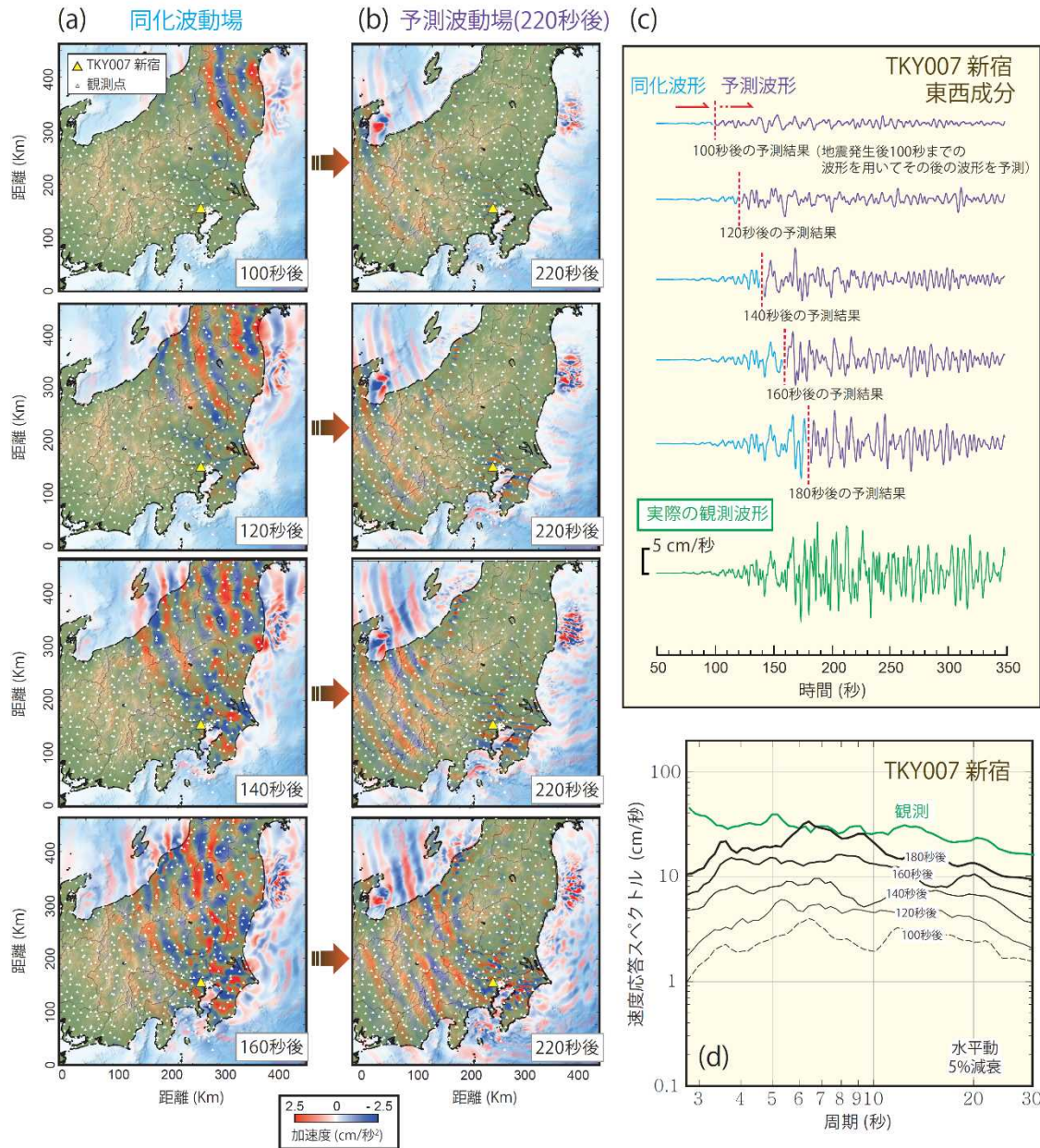
石巻 (旧石巻市・蛇田村・稲井村付近) :

(上記地域と比較して) 歴史的に甚大な津波被害の発生が頻発したとは言えない地域

東日本大震災で甚大な津波被害に襲われた陸前高田、石巻と比較すると、1) 海岸近くの都市的土地利用は、過去の津波浸水経験によって抑制される、しかし、2) 全国規模の土地利用拡大期にはその効果は限定的なものとなる、との仮説が成立する。

図9. 東日本大震災被災地の過去 100 年の土地利用変化
 1896 年明治三陸地震、1933 年昭和三陸地震、1960 年チリ地震津波、2011 年東北地方太平洋沖地震において、陸前高田と石巻を比較すると、4 つのどの地震・津波においても、陸前高田は広く津波浸水が及んだ。一方、石巻は前 3 つにおいては、浸水はほとんど確認されないか、あったとしても狭い範囲に留まっていた。土地利用の変化を見ると、陸前高田においては、津波浸水域を避ける形で都市的利用が広がったが、1980 年代におけるこの地方の土地利用拡大期において、過去の津波浸水域に一部市街地が広がっている。石巻においては、土地利用拡大期前から、都市的利用が海岸線付近に広く広がっており、その傾向は土地利用拡大期にさらに加速し、東北地方太平洋沖地震による都市的利用部分に対する津波浸水域が広範囲に及んだ。

2011年東北地方太平洋沖地震の強震観測データ同化に基づく長周期地震動の予測実験



3次元地震波伝播シミュレーションに伝播途中の地震波の観測値を同化(入力)し、実際の地震波が到達するよりも速く、その後の地震波の伝播を計算。

図 10. 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震観測データ同化に基づく長周期地震動の予測実験

(a) 2011 年東北地方太平洋沖地震の発震時から 100, 120, 140, 160 秒後時点の同化波動場 (加速度の南北成分) のスナップショット。(b) それぞれの時点の同化波動場 (左) を用いて計算された、発震時から 220 秒後の予測波動場。(c) それぞれの時点の同化波動場を用いて計算された、新宿 (TKY007) における予測波形と実際に観測された波形 (速度の南北成分)。(d) 予測波形と観測波形の速度応答スペクトル (水平成分) の比較。

2-4. 研究を推進するための体制の整備

地震・火山現象に関する研究を推進する体制を構築し、研究成果を災害軽減に活用するため、観測網やデータベースなどの研究基盤の整備・拡充と成果公開、国際的な共同研究の推進、幅広い人材育成、災害軽減に関する教育や理解増進等の取組を組織的に行った。

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*において各年次の計画の立案、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。地震・火山噴火予知研究協議会においては、平成 28 年度から行政機関、国立研究開発法人等が正式に参加し、また、企画部*内に戦略室を設置するなど実施体制の強化が図られた。

本研究計画の推進に当たっては、政府の地震調査研究推進本部が推進する地震調査研究との整合を考慮し、成果報告シンポジウム等の機会において地震本部への研究成果の共有や情報交換を行った。津波や地震動の即時予測及び事前想定的高度化、海溝型地震の発生予測手法の高度化、などの課題に対し、本計画は基礎・学術研究の面から取り組んでおり、地震調査研究推進本部の施策に資するものと考えられる。

「地震・火山科学の共同利用・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、地震・火山噴火災害をもたらす誘因の予測などに関して共同研究を進め、複合学術領域としての地震・火山噴火に関する災害科学を進展させた。

本計画実施期間の 3 年次に当たる平成 28 年度に、計画の実施状況について自己点検を行い、平成 29 年度には外部評価委員会による外部評価がまとめられた。この中で、災害の軽減に貢献することを意識した研究という方向性の継続及び更なる発展が必要とされたことを受け、令和元年度以降の新たな地震火山観測研究計画の策定を進めた。

拠点間連携共同研究

南海トラフで発生が懸念される巨大地震のリスク評価の精度向上を目指した様々な分野の研究を推し進めた。具体的には、巨大地震の震源過程、震源から居住地域までの深部地下（地殻）構造・波動伝播、強震動、浅部地下構造、津波、構造物等の特性をそれぞれの分野の専門家が検討し、それらがどのように関連し、最終的な被害につながるかの科学的なリスク評価方法の確立を目指した（図 11）。さらに、「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」として、全体の研究を、（1）想定される南海トラフ地震の震源過程、（2）深部地下（地殻）構造とそれが地震波動伝播に及ぼす影響、（3）強震動予測手法の高度化、（4）浅部地下構造が地震動に及ぼす影響、（5）津波予測モデルと津波被害予測手法、（6）構造物の被害予測手法の高度化、（7）災害のリスク評価と意思決定、（8）災害情報の外部発信とステークホルダの関与、（9）コンピュータシミュレーションを用いた新たな地震リスク評価手法の開発、の 9 分野に分け、それぞれの分野で研究を深化するとともに、各分野の相互連携を図る地震リスク評価プラットフォームを構築した。

研究分野横断型のリスク評価手法の構築

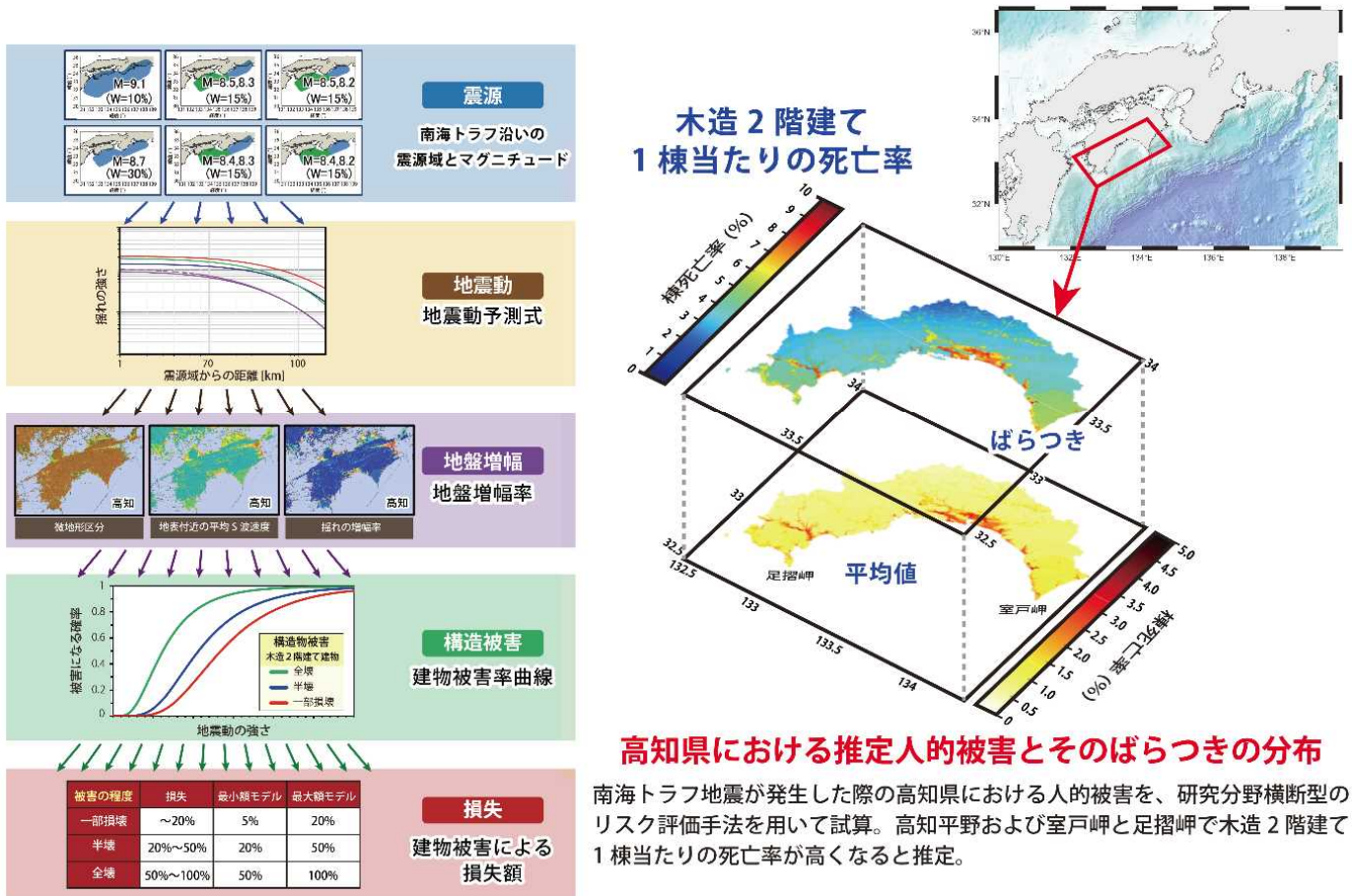


図 11. 研究分野横断型のリスク評価手法の構築

南海トラフ地震が発生した際の高知県における人的被害（棟死亡率：木造2階建て1棟当たりの死亡率）について、震源断層、地震動予測式、地盤増幅率、建物被害率曲線、建物被害による損失額及び人的被害の各モデルの不確実性を考慮して試算した。平均値は高知平野で特に高く、室戸岬と足摺岬及び高知平野と室戸岬の沿岸部で高い。また、棟死亡率のばらつき（予測の幅）も同じ地域で高くなると推定された。

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

地震カタログを作成し、地震月報（カタログ編）として気象庁ホームページで公開した。平成26年11月には英語版のWeb公開を開始した。新たな地震検知手法であるPF法を取り入れ、震源決定等を改善した。これにより、地震カタログに登録される地震数は改善前の約2~3倍となった。また、西南日本の南海トラフ沿いの深部低周波地震について、Matched Filter法*による自動決定手法を導入し、暫定的に運用開始した。

電子基準点リアルタイム解析システムにおいて、全国の電子基準点を対象として安定した運用ができるようシステムの調整を行った。また、精密単独測位法*を導入し、試験運用を実施した。

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*

での流通についても準備を進めた。DONET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。海域火山基礎情報図調査を西之島、海徳海山、伊豆大島、利島至三宅島、若尊（わかみこ）で実施し、海域火山データベースに反映させた。

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の整備を進めた。北海道全域を対象に、北海道危機対策課が整備を続けている津波浸水想定データを用いて、マクロな視点による津波被害分析を行い、地域情報（土地利用及び人口など）をGIS*に取り込んで空間データベースを構築した。また、事例市町村を選定し、住民避難に関する地理空間情報も取り込み、避難施設と避難圏域に関する空間データベースを構築した。コミュニティ・モデル*として、太平洋プレート上面及びフィリピン海プレート上面の形状モデルを構築し、Web サイトで公開した。

・観測・解析技術の開発

海底間音響測距*においては、大深度用の機器を開発し、底層流に対して揺れ動かない三脚型の設置方法に切り替え、海溝軸をまたぐ10kmを超える測線でも、一年の観測で1-2 cm/yrの精度で計測できるようになった。また、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。

従来の電子基準点リアルタイム解析システムでは相対測位法が用いられてきたが、これに加えて精密単独測位法を試験的に導入した。この手法では、固定点を仮定する必要がなく、かつ、固定点付近で発生する地震についても正確な地殻変動を把握することが可能となるため、今後、震源断層モデル推定の安定化が見込まれる^[6004]。また、干渉SAR*時系列解析時に使用するソフトウェアに改良を加えるとともに、電離層起因の誤差を低減する手法を開発した。

火山測地学的技術の高度化を進めた。新たな地表変動モニタリング技術として、地上設置型レーダー干渉計の研究を実施した。小型絶対重力計については、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。小型単発機に搭載可能な熱赤外カメラによる計測データの処理手法を開発し、10m以内の精度を持つ箱根山大涌谷付近の数値表層モデルを作成した。火山監視情報システムに傾斜データに対する降水補正機能を導入した。また、だいち2号（ALOS-2）のSAR解析環境を再構築し、火山活動活発期に緊急観測の解析を行った。航空機SAR*データによるInSAR解析手法の開発と霧島硫黄山への適用を行った。

阿蘇中岳火口では人工電流源を用いた電磁探査データの3次元解析手法の高度化が実施され、火口直下の地下水挙動の時間変化の検出に成功した。宇宙線（ミュオン）の検出装置において、大口径化などにより可用性を大幅に向上させた。また、ガスの電離をワイヤでピックアップする技術をベースとしたミュオグラフィ観測システムの開発を行い、火山透視画像の高解像度化を実現した。

火山活動を把握するためのその他の手法開発も進められた。二酸化硫黄放出率の測定が簡単にできるようにすることを目的として、従来よりも小型・軽量の簡易型測定装置を開発した。気候変動観測衛星「しきさい」の画像データを火山活動状況の把握や避難計画策定等に活用するため、処理システムを開発した。また、火山噴火の物質科学的な準リアルタイム予測に帯磁率を利用する技術開発を行った。

・社会との共通理解の醸成と災害教育

「1914年桜島噴火災害に学ぶ～地震学・火山学が減災に貢献できること～」（H26）、「南海トラフ巨大地震の予測可能性に関するシンポジウム」（H28）、「熊本地震シンポジウム」（H28）を一般に公開して開催し

た。また、地震・火山噴火予知研究協議会では、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」のパンフレットを作成した。

地震動や津波の不確実な長期予測情報を、災害軽減に有効に役立つものとするためのコミュニケーション手法を確立することは、長期予測情報の高度化に貢献するため、2016～2017年度に大きな地震があったイタリアやニュージーランド、台湾などにおいて被害やリスクコミュニケーションに関する現地調査を行った。

地理空間情報 (G 空間情報)、GIS (地理情報システム)、衛星測位 (GNSS, 準天頂測位システムなど) の統合的な活用として、高精度避難ナビゲーションシステムを含む防災・減災のための高度情報システム構築及び活用方法開発を行った。このシステムを活用し、災害リスクを軽減させるために、国、地方自治体、住民組織、住民個人の間で、どのような情報流通を行う必要があるか明らかにし、それによって「災害に対する社会的脆弱性」克服のための可能性を検討した。また、火山情報などの準リアルタイムな収集と統合表示を通して、地方公共団体が現況を総合的に把握し、的確な防災対応を行うための支援システムの構築を進めた。

・国際共同研究・国際協力

「スロー地震学国際合同研究集会 2018」, 「International Symposium on Earthquake Forecasting /5th International Workshop on Earthquake Preparation Processes」(2018)を開催した。ニュージーランドのヒクランギ沈み込み帯において、日本、ニュージーランド、米国で共同して海底地震観測及び海底圧力計を用いた海底上下変動観測を実施し、反射法地震探査で確認されている流体が多く分布していると考えられる地震波強反射プレート境界の周辺域で活動が見られること、微動は沈み込んだ海山の基底部周辺に集中すること、観測されたスロースリップによる断層滑りはほぼ海溝軸まで達したことなどが明らかになった。また、ロシア極東での GNSS 観測により、海溝でのプレート間固着を考慮した北東アジアの長期地殻変動場を検討した。

2-5. 優先して観測研究を推進する対象の地震・火山噴火

以下に挙げる地震・火山噴火に対しては、理学のみならず社会科学等も含む多くの研究項目に跨がる総合的な実施計画の遂行が災害科学の発展のために効果的であると考えられるため、総合的な研究として推進している。ここでは、概要のみ記述し、それぞれの地震・火山噴火に関連する個別の研究成果は2-1から2-3に記述した。

・東北地方太平洋沖地震

東北地方太平洋沖地震は、日本の観測史上最大の地震であり、我が国に甚大な災害をもたらした。しかし、その地震発生の予知はおろか、地震発生ポテンシャルの正しい推定も困難であった。将来の巨大地震による災害の軽減に役立てるために、この地震に関する様々なアプローチからの研究を実施した。例えば、今なお続いている余効変動の推移の把握や、広域の応力場の変化や地殻流体の移動による地震活動への影響、同様な巨大地震の発生による強震動の事前・即時予測や津波即時予測手法の高度化、土地利用調査に基づく災害素因に関する研究などが進められた。

・南海トラフの巨大地震

陸上・海底観測による滑り欠損やゆっくり滑りに関する研究、数値シミュレーションに基づく東南海地震・南海地震の連動の多様性に関する研究、2016年4月1日に三重県南東沖のプレート間で発生したM6.5 (Mw5.8)の地震に関する研究、拠点間連携によるリスク評価手法に関する研究などが進展した。

・首都直下地震

地震像が多様で、発生した場合の社会的影響が甚大な首都直下地震について、その災害誘因予測に必要な基盤となる地球物理的観測データ及び史料・地質データの取得と、それらの解析・分析が行われた。房総半島南部の海岸段丘における地形・掘削試料解析から、フィリピン海プレートと陸のプレートの境界付近で発生する大地震の再来間隔が非常にばらつくことが明らかになった。関東平野における長周期地震動の生成・増幅特性の方位依存性に関し、表面波の入射方向と堆積平野の3次元地下構造がその主な要因であることが解明された。また、関東平野下のP波減衰構造を推定し、フィリピン海プレートのマントル東端部で、顕著に高い減衰を示すことを明らかにした。

・桜島火山噴火

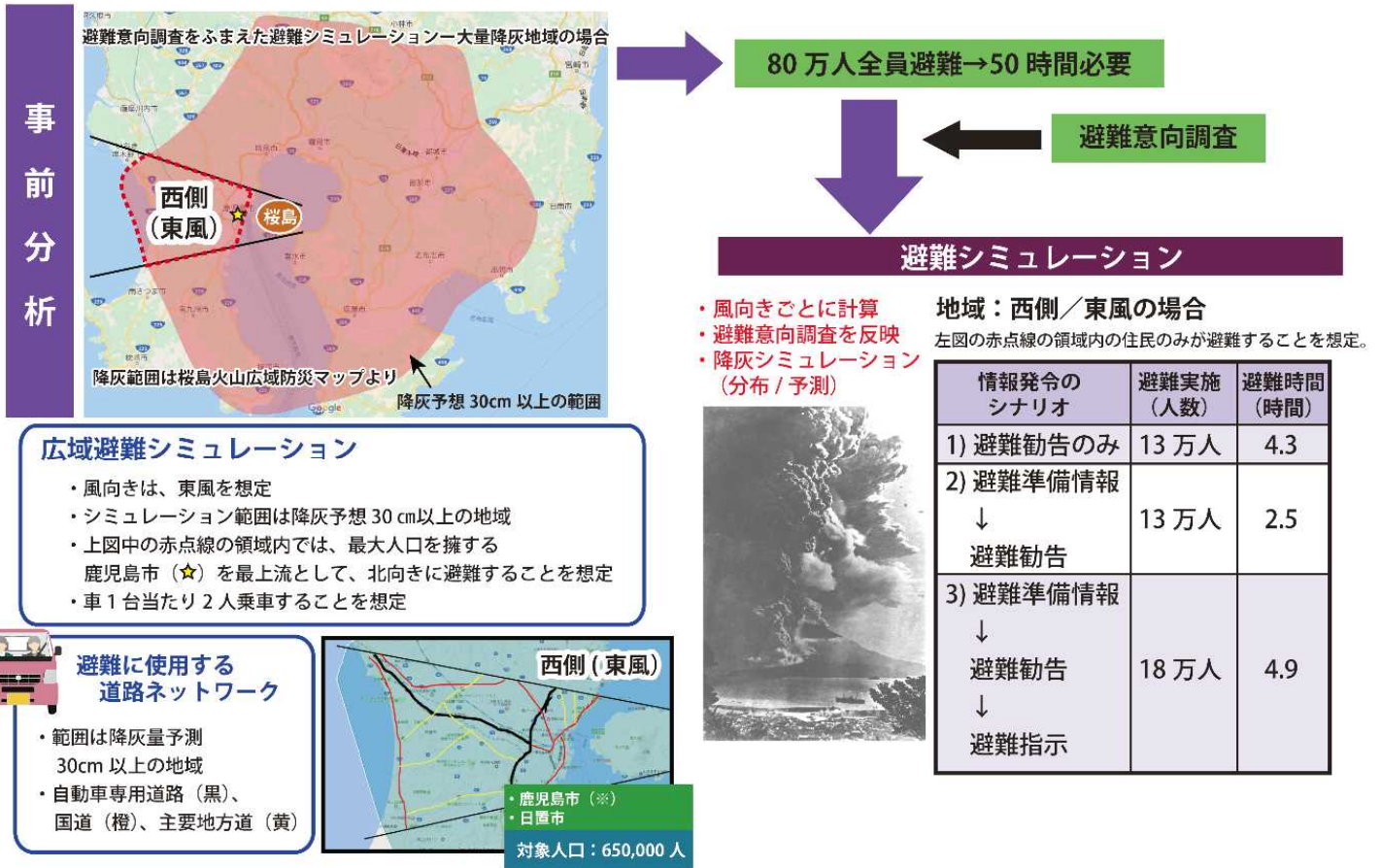
桜島大正噴火の前駆地震について当時の記録を再解析し、震源の位置やメカニズム解などを再評価した。2006年以降の昭和火口噴火活動期の地殻変動源を、観測から3つの増圧・減圧源の組合せでモデル化するとともに、繰り返し反射法地震探査により始良カルデラから桜島へのマグマ供給路の構造変化を捉えた。マグマ貫入期に先行して温泉ガス組成の変化が捉えられた。またマグマ貫入期の噴出物の組成変化から、活動に関与するマグマの種類を推定することができた。

噴火に先行する地殻変動や地震発生状況から噴火の発生時刻や噴火の規模を確率的に予測できることを示し、1日当たりのマグマ貫入量を分岐条件とする経験的な噴火事象分岐論理を構築した(図8)。例えば、既に火道が存在する南岳の場合は、ブルカノ式噴火($1-8 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$)、連続火山灰放出($\sim 1 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$)、ストロンボリ式噴火($0.2-2 \times 10^5 \text{m}^3/\text{日}$)の順にマグマの貫入速度が大きい。

降下火山灰の即時予測として、火山灰の粒径と落下速度を測るディストロメータによる降灰のリアルタイム把握、Xバンドレーザによる噴煙の可視化や地上降灰量の推定、ライダー観測による火山灰粒子形状推定手法、GNSS衛星からの電波が遅延することを利用した噴煙高度推定手法を開発し、地震・地殻変動データから予測される火山灰放出量や噴煙高度を入力とする火山灰拡散予測システムを構築した。

大正噴火級の噴火規模を想定し、前駆活動及び火山噴火の推移に沿った机上防災訓練を実施した。想定される大量降灰からの避難に関しては噴火規模、気象条件、住民の避難意向アンケートの結果を考慮した避難シミュレーションを行い、避難対象人口が条件に応じて大きく変化するという、避難計画作成上重要な知見が得られた(図12)。更に、早期復旧計画について検討し、降灰量と通行規制の関係、清掃時間や交通量等を考慮した最適な交通ネットワークの復旧分析を行った。

桜島火山における避難シミュレーション



避難勧告のみの場合、13万人が避難し4.3時間かかる。
 避難準備情報を流してから、その後に避難勧告を出す場合、準備ができているために避難時間が2.5時間に短縮。
 避難指示に切り替えることにより18万人が避難するが、必要な時間は4.9時間程度

図12. 桜島火山における避難シミュレーション

最近100年間我が国において発生していないような大規模噴火では、避難の途中において大量の降灰があれば避難を続けられなくなる可能性がある。事前分析として火山灰の堆積厚が30cm以上となる地域に住む80万人の住民全員が避難する時間の予測シミュレーションを行い、50時間となる結果を得た。次に避難意向のアンケート調査を行い、その結果と風向を反映したシミュレーションから、避難する住民の数と避難勧告が発表されたからの避難時間の見積もりは大きく変わることが確かめられた。これは、風向きによって避難すべき地域が絞られ、その地域が避難勧告等で発表されるために避難人数が絞られることと、避難準備情報があれば準備を始められることから避難勧告発表時には素早く避難できることが理由であると考えられる。このようなシミュレーションは、実効性の高い避難計画の作成に役立つ。