

資料 1-2

科学技術・学術審議会 測地学分科会
地震火山観測研究計画部会（第42回）
R3. 9. 24

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」 の実施状況等のレビュー草案（IV章）

目次

IV. 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）の実施状況と今後への課題	1
1. 地震・火山現象の解明のための研究	1
（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	1
（2）低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明	3
（3）地震発生過程の解明とモデル化	5
（4）火山現象の解明とモデル化	8
（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	10
2. 地震・火山噴火の予測のための研究	14
（1）地震発生の新たな長期予測	14
（2）地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測	17
（3）先行現象に基づく地震発生の確率予測	20
（4）中長期的な火山活動の評価	21
（5）火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測	23
3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究	25
（1）地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化	25
（2）地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化	29
（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	31
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	33
（1）地震・火山噴火の災害事例による災害発生機構の解明	33
（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	34
5. 研究を推進するための体制の整備	36
（1）推進体制の整備	36
（2）分野横断で取り組む総合的研究を推進する体制	38
（3）研究基盤の開発・整備	41
（4）関連研究分野との連携強化	45
（5）国際共同研究・国際協力	46
（6）社会との共通理解の醸成と災害教育	47
（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	48

IV. 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）の実施状況と今後への課題

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

あ. 目的

地震・火山噴火現象に関係する過去の事象、特に近代観測の開始以前のもを理解するためには、史料、考古資料、地質・地形調査から得られる情報を活用する必要がある。これは、地震・火山噴火現象の現在の状況の把握、ならびに将来の活動推移の予測に資するものである。文献として信頼できる地震・火山活動関連史料、10万冊以上に及ぶ考古遺跡の調査報告書から抽出できる地震・火山現象に関連する遺物や災害痕跡などの資料、活断層の位置、形状、過去の活動履歴・地震規模に関する情報、地震に伴う地質学的な痕跡や津波堆積物、活動的火山の噴火堆積物、海底火山や海洋底の地質・岩石学的データなどが対象となる。それぞれについて多くの資料を収集するとともに、同定、識別や分析を高度化し、信頼性や精度を高める。その上で得られた資料を整理してデータベース化を進める。

い. 実施状況

ア. 史料の収集とデータベース化

大学は、既刊の地震・火山関連史料集（『大日本地震史料』や『新収日本地震史料』など既刊の地震史料集35冊）の全文テキストデータベースを構築し史料の検索機能を強化し、部分的な校訂作業を通してデータの正確性を向上させた。史料中に現れる地名に位置情報を与えることを試みた。また、既刊の地震史料集に収録されていない地震・火山関連史料を収集した。

大学は、史料に記述された地震・火山現象に関連する言語表現が、どのような自然現象をとらえたものであるのか、各種史料の比較検討によって確定し、地震・火山活動の規模や態様の推定のための指標として検討した。また、史料から検出できる家屋倒壊率を震度推定として適切に活用する方法について前近代の各種の事例をもとに検討した。

大学は、近世・近代の村絵図、国絵図、地籍図等から得られる地理情報を分析して、地形の歴史の変遷を考察した。それによって、過去の地震災害の実態解明を進めた。

イ. 考古データの収集・集成と分析

奈良文化財研究所は、全都道府県の既存考古データを網羅するとともに、災害痕跡考古資料の収集とデータベース作成・公開事業を拡充した。南海トラフ沿いの巨大地震や桜島火山などを念頭に、特定地域の災害考古資料の収集と災害履歴の再構築・分析を実施した。

大学は、災害痕跡考古データベースと、既刊の地震・火山関連史料集のデータベースを統合して検索することが可能なシステムの構築を進めた。

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

産業技術総合研究所は、地形・地質調査により、全国の活断層のセグメント区分の見直しや活動評価を進め、熊本地震後の調査などの最新知見に基づいて活断層データベースを整備・更新した。複数セグメントにわたる連動型地震の履歴を解明し、地震の発生頻度や地震規模、破壊の多様性を明らかにした。

大学及び海洋研究開発機構は、津波堆積物の認定・対比手法の確立や、年代決定手法の改良を進め、津波をもたらした海溝型巨大地震の発生履歴とその規模の解明を進めた。同時に、既存の津波堆積物データの再検討に加え、国内外での堆積物調査を実施した。産業技術総合研究所は、津波堆積物等の調査結果に基づき、津波による浸水履歴データベースを整備・更新した。

大学は、過去の噴火に関し、噴火の規模や継続時間、爆発性、噴火活動の推移を評価する上で重要となる噴出量等の基礎データを収集・整理した。特に、火山噴出物を用いて岩石・鉱物学的解析を行い、マグマ溜まりの深度や温度、含水量等の情報を得た。

産業技術総合研究所は、火山防災のために監視・観測体制の充実が必要な火山を対象として火山地質図の整備を推進した。また、全国の火山を対象として、噴出量や歴史記録を含めた噴火年代等の基礎的な地質情報を収集した火山データベースを整備・更新した。さらに、火山噴出物から噴火年代を高分解能で推定する年代測定手法を開発した。

う. 成果

ア. 史料の収集とデータベース化

既刊の地震・火山関連史料集の全文テキスト化を完了し、テキストデータベースとして公開した。冊子体である史料集を効率的にテキストデータ化し、使い易いデータとするため、OCR や文書の構造化など情報技術を活用した。より正確なデータとするため、部分的に史料の校訂を実施したが、デジタル化により効率よく作業を進める手順を新たに開発した。各地の藩庁や有力者による日記史料の調査・撮影により、有感地震の記事を収集し、日記史料有感地震データベースとして公開した。また、日本の有史以来明治5年までの24,361件の地震を1行1地震として整理した日本歴史地震総表2020を作成するとともに、ウェブから検索できるシステムを構築し公開した。

新たな地震関連史資料の収集を進めた。新出史料と既刊の地震史料を組み合わせ、歴史的な手法や地震学的な知見を活用した分析を行い、過去の地震に関してより正確、あるいは、信頼性の高い描像を得た。例えば、中世の史料である「三国一覽合運図」の龍谷大学本と東山文庫本、及び「大唐日本王代年代記」が同時代史料であることを確認し、1361年から1585年までの30件の地震記事が信頼できることを明らかにした。1596年文禄豊後地震について、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日であると確定した。有感地震の分析から、1854年東海・南海地震前後の全国の地震活動の変化を検出した。1891年濃尾地震、1933年昭和三陸地震など、明治期以降の地震についても分析を行った。また、1847年2月15日に越後高田で、1855年8月16日に米子で発生したとされてきた地震被害などいくつかのイベントについて、実際には発生していなかったことを確認した。

震度の距離減衰式の再現性を検証し、史料に表われる有感地震のデータから歴史地震の震源を推定する手法を開発した。市民参加型翻刻プラットフォーム「みんなで翻刻」のシステムを改良して地震史料の翻刻を進めた。

イ. 考古データの収集・集成と分析

全国の埋蔵文化財発掘調査報告書に記載されている、災害痕跡に関する記載を収集し、発掘調査地点ごとに災害痕跡データを整理した。また、各地の遺跡発掘現場において、液状化や地すべり等の地震痕跡等の地層資料を採取し、災害発生時期を推定するため遺跡の年代を示す考古資料と照合して、整理・分析を進めた。火山噴火についても、九州の約4000遺跡の情報に基づいて、降灰範囲だけでなく、噴火に先行する液状化や噴砂など、様々な災害痕跡を集成した。

収集・整理したデータを格納する災害痕跡GISデータベースを構築した。データベース項目やデータ入力、表示のインターフェイスを設計し、データの入力作業を実施した。このデータベースと既刊地震史料集のテキストデータベースと連携して相互に検索できるようなシステムを開発した。

考古データをもとに被災エリアの可視化や災害発生時期の特定を試みた。奈良盆地において、遺跡で確認された地震痕跡が5世紀後半、7世紀後半～末、8世紀後半～9世紀半ばに集中している可能性、および、奈良盆地東縁断層と生駒断層周辺の遺跡で確認された地震痕跡が、9世紀～11世紀、15世紀～16世紀、17世紀～18世紀に集中しており、史料に記述のある9世紀以降の地震に対応している可能性を明らかにした。三陸海岸の海浜遺跡が縄文後期前葉と縄文中期に中断衰退しており、これらの時期に巨大津波が発生していた可能性を示した。桜島噴火について、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降下火山灰、火山弾等の火山噴火に伴う被災痕跡を集成して過去の火山噴火災害についてデータベース化を進めた。

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

布田川断層系と日奈久断層系の合流部に近い御船町高木でトレンチ調査を実施し、2016年熊本地震の明瞭な痕跡が残っていないこと、それ以前の2回のイベントの変位の様式が熊本地震とは異なることを明らかにした。

活断層データベースに地形陰影図や航空写真等を表示させる機能を追加し、活断層と地形や構造物などとの関係を認識しやすくした。

北海道南西沖地震の津波堆積物*が認められるロシア沿海州のバレンティン湾周辺や、1994年北海道東方沖地震の津波が最も高かった国後島北東部の海岸での調査から、歴史時代の津波痕跡の候補を発見した。津波の痕跡が保存される条件を明らかにするため、2011年東北地方太平洋沖地震津波で青森県三沢市の海岸に形成された津波堆積物を分析し、堆積物分布の限界はイベント発生後に海側に後退することが明らかになった。17世紀千島海溝の超巨大地震の津波浸水計算に必要な古地形の復元を行った。

富士火山の爆発的噴火の噴出物解析によって、御殿場岩屑なだれ以降の数百年間にわたり、石基の斜長石量の急減やガラス量の急増が続いたことを明らかにし、山体崩壊によって荷重が減ったことで、マグマが上昇しやすくなった可能性を示した。また、高温かつ低含水率のマグマは溶岩流噴火を起こしやすく、低温かつ高含水率のマグマは爆発的噴火をする傾向があることがわかった。20世紀の伊豆大島山頂噴火の文献データを再整理したところ、マグマ噴出量の大きな噴火ほど斜長石が多く含まれることがわかり、噴火規模予測の指標として斜長石量が使えらる可能性を示した。草津白根山の噴出物層序調査、放射性炭素年代測定、水蒸気噴火によるテフラの粘土鉱物解析を実施した。浅間山・西之島・諏訪瀬島の岩石試料を分析し、マグマ溜りの深度や状態を検討した。浅間山の1783年天明噴火では3つのマグマが海拔0m付近で混合し短時間で噴火に至った可能性のあることがわかった。諏訪之瀬島の全島避難につながった1813年噴火の噴出物分析を行った。

火山地質図の作成およびその基礎となる調査を進めた。日本の火山データベースについては、択捉島と富士山の完新世噴火イベントのデータ作成と公開、重要火山の火口図作成を開始した。20万分の1スケールの日本火山図公開のためビューアー開発とデータ作成を行い、約440の火山データの公開を進めた。

え. 今後の展望

史料、考古、地質データの蓄積は着実に進んでいる。史料の収集とデータベース化については、既刊の地震・火山関連史料集のデジタルテキスト化が完了し、データベースとして公開された。災害痕跡考古データベースも着実に整備が進んでいる。活断層や津波堆積物、噴火履歴に関するデータベースは地図情報としても重要な位置を占め、ハザードマップの作成などにも資するものである。新たな史料の収集、史料の校訂や史料の正当性の検討を今後も継続し、信頼性を確保しつつ過去の地震や火山噴火に関する知見を蓄積していくことが重要である。『新収日本地震史料』以降は除外されてきた全国の噴火史料の集成とデータベース化も必要となろう。これらの新規に収集整理される史料も、構築済のデータベースに追加していくことが必要である。構築済のデータベースや史資料を長期にわたって保存していくための方策も検討を要する。研究だけでなく、広く社会にも活用され得るデータベースであるため、オープンデータとしての利便性も考慮すべきである。

整備された各種のデータベースや、外部の関連するデータベースを活用して、地震学や火山学、人文・社会科学の最新の知見や視点に基づいて、過去の地震・火山噴火事象を分析していくことが求められる。これまでに知られている被害地震について、史料の再検討等により震源や被害分布が更新される例も出てきており、今後もより正確な情報に更新していく努力を続ける必要がある。また、無被害の地震の分析により、本震・余震系列や、各地域の過去の地震活動の推移を明らかにできる可能性がみえてきた。史料の空間的な分布の偏りや、内容の信頼性に基づいて、過去の地震データに関しても誤差や精度つきの情報とすることで、地球物理学的な手法で扱いやすくすることも必要である。

本計画が、地震学、火山学、地質学と、歴史学、考古学との共同研究を推進するきっかけとなり、上記のような多様な成果が得られてきた。「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」で実施する研究として、歴史地震、古地震のデータが増え、より信頼性の高い情報が得られることが、災害軽減に貢献することを、今後さらに示していく必要がある。たとえば、史資料から過去の事実を明らかにするだけでなく、被害地震や火山噴火を「低頻度現象」として位置づけ、得られたデータに自然科学的な予測手法を適用することで将来予測に資するような手法を検討していかなければならない。データの蓄積や研究を通じて、自然科学と人文・社会科学の幅広い協働関係を醸成し、研究を進めていくことが重要である。そのためには、多分野の研究者が集まる本研究計画の利点をより強化するため、データや成果の交換や相互利用の機会を増やすとともに、関連する研究分野の研究者との交流を深め、異なるアイデアや視点を持つ研究者との協働の機会を増やすことが求められる。

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

あ. 目的

低頻度で大規模な地震・火山噴火現象の発生履歴、規模、場所を解明するために、史料・考古データ、地質データ等の分析や、近代的な観測データと対比・統合から、過去の地震・火山現象

の定量的な理解を進める。特に、東北地方太平洋沖地震の震源域、南海トラフ沿い及び千島海溝沿いの巨大地震に関する研究を実施する。カルデラ噴火を含む低頻度・大規模噴火現象に関して、噴火準備段階からの活動の推移・履歴を把握するとともに、噴火の発生場所や発生時等の推定精度を上げる手法の開発・改良を進める。

い. 実施状況

大学は、北海道太平洋沿岸の津波堆積物の詳細な年代測定や珪藻分析を実施した。外国船航海日誌等を用いて安政東海地震の発生時刻を調査した。史料と気象庁データベースを連結し江戸・東京の過去350年間の有感地震を整理した。安政東海・安政南海地震の前後数年間の日記史料から有感地震を抽出する作業を実施した。日本海溝で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。日本海溝、千島海溝、カムチャツカ海溝において、大地震前の地震活動の統計的評価を実施した。絶対重力測定による東北地方太平洋沖地震の余効的重力変化のモニタリングと、それをモデル化する手法の開発を行った。

産業技術総合研究所は、古文書と津波堆積物データを利用して日本海溝で室町時代に発生が指摘されている巨大地震の調査を実施した。房総半島南部の海岸段丘の分布パターンと離水年代の検討を行った。

海洋開発研究機構は、日向灘の浅部超低周波地震の震央決定を実施した。南海トラフ地震発生帯で得られた構造探査データの3次元解析と、海底地震観測による房総半島沖の詳細な地下構造調査を実施した。

防災科学技術研究所は、東北地方太平洋沖地震の震源域、南海トラフ沿いや千島海溝沿いにおける地震活動や震源過程の調査を実施した。

産業技術総合研究所と防災科学技術研究所は、南海トラフ周辺地域のひずみ計等のデータを用いた短期的ゆっくりすべりのモニタリングを行った。

大学は、伊豆大島や霧島山等での爆発指数（VEI）が4～5クラスの大規模噴火を対象として、地質調査や、噴出物に対する物質科学的解析、数値モデル解析を行った。

大学は、カルデラ噴火に至るマグマの蓄積や分化の過程を解明するため、洞爺や阿蘇等のカルデラ火山を対象として、放射非平衡を利用した年代測定法などを適用した。また、鬼界カルデラ等の海底カルデラを対象として物質科学的研究を進めた。また、1707年富士山宝永噴火に関して、古記録などをもとに噴火の被害状況を整理した。

う. 成果

北海道太平洋沿岸の津波堆積物の詳細な年代測定から、12世紀と17世紀のイベントの発生年が十勝地域と根室地域で異なる可能性を示した。また、珪藻分析から10世紀から18世紀までの連続的な地殻上下変動の時系列を明らかにし、17世紀イベントの変動量が12世紀に比べ2倍程度大きかった可能性を示した。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年享徳地震である可能性が高いことを古文書と津波堆積物から解明した。総半島南部の海岸段丘の形成年代の間隔がばらつくことを明らかにした。

安政東海地震の発生時刻を外国船の航海日誌から特定し、アメリカ西海岸の驗潮記録から推定される時刻と整合的であることを明らかにした。江戸・東京の過去350年間の有感地震数を整理し、元禄江戸地震や安政江戸地震後の有感地震数の増加等を検出した。安政東海・安政南海地震の発生前に、山陰地方や近畿地方北部で有感地震が増加したこと、地震の約10カ月後から西南日本において有感地震が増加したことを明らかにした。

日本海溝沿いで詳細な地震カタログを作成し、東北地方太平洋沖地震による応力変化とプレート境界面の摩擦状態変化が原因とみられる地震活動の変化を検出した。南海トラフ地震発生帯の地下構造解析を実施し、熊野海盆の付加体内部の変形構造や、プレート境界の構造、及び巨大分岐断層周辺の三次元的な地質構造と浅部超低周波地震の発生位置の関係を明らかにした。日向灘では、浅部超低周波地震の発生深度が沈み込む海山の影響を受けて変化している可能性が示された。南海トラフ周辺地域のひずみ計等のデータから、短期的ゆっくりすべりの断層モデルを推定した。

東北地方太平洋沖地震による余効的重力変化のモニタリングとして実施された国立天文台水沢VLBI観測所における絶対重力測定から、2020年まで数年続いてきた絶対重力値の減少が2021年から増加に転じたことが明らかにされた。地球の曲率や水平方向の不均質を考慮した粘弾性変形の計算手法を開発した。

VEI4 クラスの伊豆大島の大規模噴火（Y1, Y4）の研究では、噴出物の層序再構築や組織・化学分析が行われ、噴火推移に対応した斑晶量の増加や、噴出率・噴火様式と対応した石基組織等の変化があることが明らかとなった。この結果は、噴火発生後の噴出物モニタリングが噴火推移・様式の予測において重要であることを示唆する。VEI5 クラスの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。GISによるジオリファレンス機能を用いた分析により、火山灰の除去が遅れた土地の面積や地形との関係が明らかになった。

VEI 7 クラスのカルデラ形成噴火の研究では、7300年前の鬼界火山噴火について、地質調査に基づき、プリニー式噴火後の静穏期の存在や、カルデラ崩壊に至るまでの詳細な噴火推移が明らかにされた。また、反射法地震探査データに基づき、噴出物の空間分布や総量が見積もられた。摩周火山のカルデラ形成噴火については、噴煙柱形成・崩壊、マグマ水蒸気噴火、カルデラ形成の、3つの異なる噴火フェーズに区分できることがわかった。4万4千年前の支笏カルデラ噴火については、噴出物のU-Th放射非平衡測定が行われ、マグマの由来が明らかにされた。屈斜路カルデラを対象に化学分析とU-Th放射非平衡分析が行われ、マグマの生成に3万年程度要していたことが明らかになった。

山体崩壊については、雲仙岳1792年噴火時の眉山崩壊に関する資料分析や地質調査が実施され、崩壊が眉山山麓付近の岩石中の間隙水圧の上昇によって起こった液状化と、引き続き地すべりとする過去の研究結果を支持する結果が得られた。

え. 今後の展望

低頻度大規模地震・火山現象の解明には、近年の観測で得られた知見をベースとして、地層や史料に記された事象を読み解く作業が必要となる。史料・考古遺跡や地形・地質に残された記録の網羅的な収集・解読を継続してデータ数を増やすとともに、史料の正当性等の検討や年代測定の精度検討など、品質の評価を継続することが重要である。史料や考古、津波堆積物等のデータは断片的であり、大規模地震・火山現象を復元すると、必然的に多くの不確実性が内包されることになる。復元される大規模現象のばらつきの評価手法を検討するとともに、その結果がハザードやリスク評価にどのような影響を与え得るのかも考慮しながら進めることが必要である。

津波堆積物や海岸段丘の調査から、長期間にわたる海溝型巨大地震の規模や発生間隔の多様性が明らかになりつつある。地震サイクルの多様性を支配する地下構造や物理パラメータの検討を進め、過去の事象の再現を行うとともに、現在観測されているデータの評価にも活用することを目指すことが必要である。

史料・考古遺跡・地形・地質などから得られる多様なデータと観測データを組み合わせて、地震ハザード評価に利用する先駆的な取り組みが求められている。過去に発生した巨大地震像の復元とその多様性の評価は、地震発生の長期予測の高度化に直結する重要な課題である。今後は、断片的かつ不確実性を含む先験情報を、将来発生する大規模地震のハザード予測につなげていくスキームの検討が期待される。特にデータの多い南海トラフ沿いや首都圏では、総合研究グループ等で具体的な検討を行うことが望ましい。

大規模噴火については、地質・史料に記録が残る事例について噴火の詳細な推移が明らかになりつつある。今後、斑晶鉱物や石基に記録された物質科学的情報を組み合わせ、マグマの蓄積条件や上昇過程に制約が与えられることが期待される。また、より頻度が高い中小規模噴火との関係や、マグマ組成が異なる事例の間での比較を進め、噴火事象の推移を一般化し、分岐条件について検討する必要がある。

カルデラを形成する規模の噴火については、カルデラ周辺のサンプリング調査・地球物理観測・構造探査が進められており、噴火時の地表面現象や正確な噴火規模、マグマ溜まりの位置など、カルデラ噴火の特徴や火山体の基本的構造が明らかになることが期待される。また、U-Th放射非平衡等の分析法の確立により、カルデラ火山のマグマ生成プロセスに対する制約が進むことが期待される。今後、他の岩石鉱物学的分析と組み合わせるとともに、対象を拡大することで、カルデラ火山の一般的なマグマ生成と蓄積の時間スケールを明らかにすることが重要である。

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

あ. 目的

断層滑りの多様性、地震時の動的破壊過程、複雑な断層系における断層間の力学的相互作用、地震活動の階層性等に関する研究を通して地震発生過程の解明を進める。また、地球物理・地球

化学的観測，野外観察，海域・陸域の科学掘削，室内実験や数値シミュレーションなどを通して，断層面の摩擦特性や地殻流体の挙動等に関する理解を深め，地震断層滑りの物理・化学モデルの構築を行う。

い．実施状況

ア．地震発生機構の解明

大学及び防災科学技術研究所は，地震発生場における物理量分布の統計的性質と地震活動の特徴を比較し，大地震発生に至る過程における地震活動変化の特徴を調査した。また，粘弾性媒質中でのプレート境界地震と内陸地震を連成させた地震サイクルシミュレーションを行い，プレート境界地震と内陸地震との力学的相互作用について理解を進めた。

大学及び防災科学技術研究所，海洋研究開発機構は，プレート境界で発生する様々な時間スケールをもつ滑り現象を明らかにするために，陸域及び海域における長期間の観測を行った。日本海溝沿いでは，東北地方太平洋沖地震発生後のプレート間の固着状態と，周辺の応力場の時空間変化を調べた。また，南海トラフ沿いでは，モニタリング手法の高度化を進めるとともに，プレート境界周辺の詳細な不均質構造を推定し，多様な滑り現象の発生機構を解明した。

大学及び海洋研究開発機構は，地震・地殻変動観測に基づいて震源分布，地震波速度構造，ひずみ・応力場等を推定するとともに，室内実験や数値シミュレーションに基づいて，複雑な断層系における断層間の相互作用及び連鎖的な動的破壊過程についての理解を深めた。また，地球物理・地球化学的観測や室内実験，数値シミュレーション，野外観察に基づいて，地震発生及び下部地殻・上部マントルのレオロジー特性に及ぼす流体の影響や地殻流体の存在形態を調べた。

大学は，地震活動の階層性を定量化する手法を開発した。また，世界各地の沈み込み帯を対象とした国際共同研究を推進し，異なる地質学的環境における地震活動の階層性の特徴を調べた。

大学は，鉱山で得られた掘削コア等の分析と，震源のごく近傍で取得された観測データの解析から，応力と地震活動の関係を調べた。

イ．地震断層滑りのモデル化

大学及び防災科学技術研究所は，各種実験に基づく摩擦構成則の改良や複数の素過程の相互作用を考慮した断層滑りモデルを構築し，地震発生モデルの高度化を進めた。

大学は，プレート境界，活断層，その他の地震発生域における地球物理及び地球化学観測や野外観察，室内実験や数値シミュレーションなどを通じて，断層帯の微細構造や間隙流体の存在が断層強度や破壊過程に及ぼす物理・化学的影響を調べた。また断層周辺の不均質構造と地震断層破壊との力学的相互作用や，断層帯の間隙流体と摩擦滑りとの非線形相互作用を取り入れた定量的な地震発生モデルを構築した。

大学及び海洋研究開発機構は，国内外の海域及び陸域の科学掘削で採取された試料や，地球物理・地球化学的観測，室内実験，数値シミュレーション，野外観察から得られた情報を統合して，断層面の摩擦特性の解明など地震断層滑りの物理・化学モデルの高度化に取り組んだ。応力載荷速度の変化などの様々な擾乱に対する断層滑りの応答を室内実験や理論により解明し，観測データと比較することで，断層滑りのダイナミクスを明らかにした。摩擦特性が不均一な断層における複雑な滑り及び地震サイクルの複雑性に関する理解を深めた。

産業技術総合研究所は，地質調査に基づいて，岩石のレオロジーの空間的不均質が断層の滑り挙動に与える影響を評価した。また，断層破碎帯の微細構造解析及び室内実験に基づいて，断層の滑り機構・強度や脆性―塑性遷移領域におけるひずみの集中過程を調べた。

う．成果

ア．地震発生機構の解明

南海トラフで実施されている海底地殻変動の観測データを統計的に解析することで，スロースリップ由来と考えられる非定常地殻変動*を複数の観測点で検出した。また，房総半島沖で行った海底地震観測データ等による速度構造解析等から，フィリピン海プレート上面の深さが従来のモデルより3～6 km 浅く，スロースリップは北米プレートとフィリピン海プレートの地殻同士が接している部分でのみ発生していることを明らかにした。

日本海溝から採取した試料を用いた摩擦実験を実施し，粘土鉱物の含有量と温度により摩擦係数が変化することを明らかにした。

日本海溝南部では2011年東北地方太平洋沖地震時に大規模なすべりが沈み込んだ海山で止めら

れ、地震後に顕著な余効すべりが進行したことを、地震サイクルシミュレーションによって再現した。

中下部地殻での岩石破壊にともなう水理学パラメータを制約するため、天然の岩石と流体反応帯から流体圧や浸透率を制約する新たな手法を開発し、破碎された地殻では未破壊地殻に比べて時間のスケールから年のスケールへ浸透圧が数桁上昇する可能性が示された。

地震の破壊開始点を精密に震源決定する手法を開発し、破壊開始点の分布はランダムでなく集中する場合があることを発見した。

カイコウラ地震前後の地震のメカニズム解の解析から、カイコウラ地震前の差応力は地震時の応力降下量の大きさと比べて大きいと考えられることが分かった。

イ. 地震断層滑りのモデル化

地球潮汐の影響を取り入れた SSE 発生サイクルの数値シミュレーション研究により、潮汐は SSE 発生サイクルを安定化させる役割を持つ可能性が示唆された。

断層滑りのシミュレーションにおいて粗い断層面を仮定すると、地震性高速滑りの発生前に非地震性の遅い滑りが発生することが見出された。また、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。

スロースリップによる载荷が地震をトリガする効果をシミュレーションにより評価したところ、地震の発生サイクルがスロースリップに完全に同期する現象が発生することを確認した。

断層滑りの物理の解明のため、高速せん断実験中の接触点温度分布の直接測定を行った。新技術により、局所的瞬間的発熱(フラッシュヒーティング)によって発生した温度の絶対値を正しく捉えることが可能になり、接触点の最高温度は常圧での試料の融点を越え、2500°C程度まで上昇していることが明らかとなった。

日本海溝沈み込み帯深部に分布すると考えられる、変成作用を受けた岩石を試料として摩擦実験を行ったところ、温度 100~300°Cの間で a-b 値が負となることが示された。東北地方太平洋沖地震の震源域温度が約 160°C程度と推測されていることから、この岩石の摩擦特性は震源核形成に関与し得ると考えられることがわかった。さらに、a-b 値が正の温度条件においても、間隙水圧の上昇により a-b 値が負に遷移し、スロー地震*の発生条件が現れることが示唆された。一方で、大型振動台を利用した岩石摩擦実験の結果からは、载荷速度の増加につれて震源核サイズが減少し高速な破壊が励起されやすくなることや、断層面の粗さが初期及び主破壊過程に大きく影響することが示された。大型振動台を利用した岩石摩擦実験を実施し、通常的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。

日本海溝から千島海溝南部の M4.5 以上の大地震に近接する M4 以下の小地震の地震波形を網羅的に調査し、多くの大地震の波形の始まりの部分が小地震と同じであることを発見した。岩石破壊実験から、差応力に対して 0.1%程度の微弱な流体圧変動が微小破壊*の発生率と有意に相関があることを明らかにした。

断層の不均質性や複数の破壊様式などの条件下でも安定かつ高速に断層すべりの時空間発展をシミュレーション可能な新たな数値計算手法を開発した。

え. 今後の展望

日本海溝では 2011 年東北地方太平洋沖地震後の観測記録を基にした研究において成果が挙げられた。また南海トラフでは海底地殻変動から固着状態の推定やスロースリップの検出が行われている。一方、他にも巨大地震の発生の可能性のある千島海溝においては調査研究が遅れている。したがって、この様な領域についても、海底地殻変動観測結果を基にした固着状況モデルを推定できるように、観測研究を継続するとともに、毎年得られるデータをもとに、スロースリップのモニタリングが実現されるように研究を進める必要がある。日本海溝では、2011 年東北地方太平洋沖地震の理解のために、本震後の地震活動の回復過程や、巨大地震となったすべり現象を説明するモデルを明らかにしていく必要もある。海外の沈み込み帯においても観測研究が進み、今後得られる成果を比較検討し、それぞれの地域の特徴の類似・相違点を明らかにしたうえで、現象を普遍的に理解していくことが必要である。ニュージーランドで観測された内陸地震から海溝型地震に至る一連の地震活動を理解するための研究手法や成果は、日本を含む他地域の地震を研究する際に重要である。海域における地殻変動観測では、観測手法の改善による精度の向上も重要な

課題であり、現在も改良が進められている。今後も手法の開発を含めた研究が進められる必要がある。

地震断層すべりをモデル化するには、地質調査と岩石変形実験を基に、地震の破壊開始と断層深部の塑性流動や流体との関わりを明らかにするアプローチも重要である。鉱山における地震発生深度では地震発生場を直接調べることができるため、岩石力学、地質学、化学的な総合調査を一層進めていくことが重要である。現象の理解を深めるために、観測とシミュレーションの比較研究もなされているが、用いるパラメータにより結果が変わることから、実際の滑りにおいて本質的に滑りに影響を及ぼす重要な要素を明らかにしていく必要がある。階層性パラメータが予測可能性に及ぼす影響を明らかにするほか、流体の寄与を考慮した新たな地震断層すべり物理モデルの構築が必要である。多様な滑りイベントが大地震を誘発する可能性について、室内実験、理論研究、数値シミュレーションが連携しながら取り組まなければならない。内陸地震については、国内外の様々な地域で観測研究の成果として、内陸地震と地殻内流体の密接な関係が指摘されてきている。今後は、地殻内流体が内陸地震の発生に及ぼす影響を定量化する必要がある。多くの地域で内陸地震と地殻内流体との関係が議論される中で、沈み込み帯における水の流れが明らかになりつつあるため、得られた成果をもとに現象の理解を予測につなげる研究が重要である。

(4) 火山現象の解明とモデル化

あ. 目的

噴火の推移や多様性を理解するために火山の深部から浅部で進行する様々な過程や噴火現象を時空間的に定量化する。また、火山現象はマグマの動きや状態の変化に支配されるため、マグマの流動・破碎・脱ガス・結晶化などの各素過程の物理・化学的な実験研究や、数値モデルによる理論解析を進め、マグマ溜まりや火道内過程のモデル化を行う。さらに、噴火様式の分岐条件や噴煙形成の支配因子を定量化し、多くの火山に適用することを念頭に置いて噴火機構モデルの一般化を目指す。

い. 実施状況

ア. 火山現象の定量化と解明

大学及び海洋研究開発機構は、霧島山、阿蘇山、伊豆大島等、海域を含む国内外の活動的な火山や最近噴火した火山を対象に、火山周辺や火口近傍における多項目観測、リモートセンシング観測、噴出物の物質科学分析を行い、噴火発生前、噴火継続中、噴火終息後の火山活動の推移やその多様性を把握した。これらの結果と素過程の理解に基づいて火山活動のモデル化が進められた。また、新たな観測・分析手法の開発や既存の手法の高度化を進展させた。

防災科学技術研究所は、基盤的火山観測網やリモートセンシング技術等による多項目の火山観測データを活用し、多様な火山現象の発生機構の解明や火山災害過程を把握するための研究開発を進めた。

産業技術総合研究所は、活動的な火山において火山ガス観測を実施し、マグマ性の噴火を繰り返して大量の火山ガス放出を継続している火山において噴火活動推移の多様性をもたらす火山ガス放出過程のモデル化を行った。マグマ噴火を繰り返す火山を対象として、火山活動履歴に基づく活動推移の類型化を試みた。桜島や霧島等を対象として、火山灰粒子の岩石・鉱物学的特徴の経時変化と、地球物理・地球化学的観測データを比較することで、爆発的・非爆発的噴火の分岐メカニズムを判断する材料を得た。また、噴火準備段階から噴火に至るまでのマグマ挙動の解明に向けて、噴火履歴に沿った噴出物の岩石・鉱物学的特徴の解明を進めた。特に、大規模カルデラ火山に対して、マグマ供給系の時間発達過程を明らかにし、大規模噴火の準備過程や噴火の開始に関する研究を行った。

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

大学及び防災科学技術研究所は、火道内における気液固混相流マグマの上昇過程（火道流）の数値モデル解析を行い、噴出量・噴出率などの物理パラメータや噴火様式の多様性を検討した。また火道流がもたらす地殻変動観測の数値シミュレーションを実施した。マグマ溜まりや火道内過程を支配するマグマの流動・脱ガス・結晶化などの各素過程に対する物理・化学的な実験を行い、噴火様式を支配するマグマの物質科学的性質を調査した。

う. 成果

ア. 火山現象の定量化と解明

火山周辺や火口近傍における多項目観測により火山活動の推移を高精度・高時間分解能でとらえられることがあらためて認識された。西之島における 2019 年のマグマ噴火では、活動の推移とともに地震波の卓越周波数が低周波数側にシフトしたことや、振動軌跡の変化からマグマ供給系の変化および圧力源の移動が推定された。西之島では衛星による熱異常観測からマグマ噴出率を推定する手法が適用され、マグマ噴火の推移把握に活かされた。水蒸気噴火については、噴火開始数分前から微動を伴う傾斜変動が発生することが多数の火山で確認され、元白根火山における 2019 年噴火の傾斜変動は深さ 0.5~1 km に位置する開口クラックにより説明された。また、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が水蒸気噴火に関与していることが示唆された。長期的な水蒸気噴火の準備過程として、十勝岳では局所的な地盤の膨張にほぼ同期して、間欠的に消磁が加速していることが分かった。この特徴は、口永良部島で 2014 年噴火の 10 年以上前から観測されていた現象と類似しており、浅部に熱水系をもつ火山の噴火準備過程に共通する現象である可能性が示された。

安全に安定して火山監視を行う観測手法の開発も進んだ。吾妻山の山麓から山頂近くまで敷設されている光ファイバーケーブルを用いた DAS (分散型音響計測システム) のデータから火山性地震の震源決定と浅部地盤構造の推定が行われた。桜島における空中電位の計測からは、噴火発生時刻より数秒程度遅れて電位差変動が発現することが明らかになった。噴火時に空振波を伴わず空中電界変動が観測された事例が半数にのぼることから、空中電位計による観測を加えることで噴火発生の検知レベルの向上が見込まれることが示された。また多眼カメラで構成されるマルチバンド型の赤外カメラの開発が行われ、約 0.5ppmv の精度で SO₂ ガスを可視化するシステムが実現された。桜島火山では火山ガス組成の連続観測、セスナ機による繰り返し観測の結果を解析し、火山ガス組成の特徴と活動推移に伴う組成の変化を明らかにした。伊豆大島においては位相の不明瞭な火山性地震・微動の震源を決定する手法が開発され、火山性地震に適用した結果、2 km 程度の精度で震源決定できること、振幅法に比べ深さ精度が高いことが分かった。

噴出物の岩石組織をもとにした研究では、浅間山 18 世紀天明噴火噴出物の気泡組織の解析が行われ、噴煙柱形成時よりも火砕流発生時に気泡数密度が顕著に大きな値を示すことから、マグマの減圧率の大きな変化が事象分岐と関係している可能性が指摘された。水蒸気噴火堆積物に含まれる変質物の分析をもとに、御嶽山では大規模で安定した熱水系が、十勝岳では浅所の不安定な熱水系が発達していることが明らかにされ、それぞれの火山でのマグマ貫入頻度の違いを反映していると解釈された。吾妻火山では、約 5000 年前の吾妻小富士形成噴火の詳細な推移および様式の違い対応した斑晶量の違いが明らかとなり、事象分岐条件を判断する材料が得られた。

鬼界アカホヤ、大山、白頭山など歴史時代及び地質時代に発生した大規模噴火の推移について、噴火推移をコンパイルした火山噴火推移データベースの整備作業を行った。阿蘇・屈斜路および始良カルデラ等において噴出物の層序および年代測定を実施した。また噴出物の保存が良好な桜島・霧島山で、噴火記録と噴出物の対比・噴出物の岩石学的解析による噴火推移の復元を進めた。

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

伊豆大島 1986 年噴火を主な対象とし、マグマ発泡、縦・横方向へのガス分離(脱ガス)や結晶化を伴う火道内の気液固混相流を数値モデル化し、これまでに観測されている溶岩流出や爆発的噴火などの多様な噴火様式を再現した。岩石学的研究から推定されたマグマ組成、温度、結晶量をパラメータとして用い、火道形状や火道の弾性変形の効果も考慮した現実的なモデリングを行った。

2018 年 3 月に発生した新燃岳の噴出物の時間推移の解析からは、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に含まれる本質物質の結晶度の違いから、火道内浅部のマグマ上昇と火口内での滞留による結晶化の進行が推測された。噴出物中の鉱物結晶の解析をもとに、桜島の歴史時代のプリニー式噴火のいずれにおいても、マグマが噴火直前に深さ約 10 km のマグマ溜まりから深さ 1~3 km の火道に移動していたことが明らかにされた。これにより、大規模噴火はマグマの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。また、火道浅部での減圧結晶化を模擬した実験が行われ、ナノスケール結晶の晶出条件をもとに、火道浅部においてマグマが経験した圧力、温度、定置時間を制約できる可能性が指摘された。霧島火山新燃岳 2011 年噴火の石質岩片を用いた研究では、ナノライトの晶出により石基結晶度が短時間で上昇してメルト粘性が増加し、気泡過剰圧が破碎閾値を超えることで溶岩ドームにおける爆発性の獲得が説明できることがわかった。一方、マグマ

上昇に伴い発生する発泡、開放系脱ガス、気泡の再溶解等の再現実験が行われ、これらの過程で生じるマグマ中の揮発性成分（特に拡散が遅い塩素）の濃度分布パターンが明らかにされた。この結果と天然の溶岩に残された不均質な塩素濃度の分析をもとに、溶岩の脱ガス現象に制約が与えられた。

え. 今後の展望

火山周辺や火口近傍における多項目観測により、マグマ噴火直前の膨張収縮過程や、水蒸気噴火直前の微動を伴う傾斜変動、衛星データにより明らかになった深さ 100 m 程度を中心とした極浅部膨張など、多くの火山に共通する現象が抽出されつつある。今後も多項目観測の継続により、多くの火山に共通する現象の抽出に努め、その類似性、相違点を定量化しデータベース化しておくことが有用である。共通する現象が確認された火山では、観測項目と解析手法を共通化した比較研究を推進し、地震学的地下構造、電磁気学地下構造、および地質学的構造を比較し現象の理解を目指す。物質分析的手法を用いて大規模噴火の噴火直前の深部マグマだまりから浅部へのマグマ移動や、マグマ混合についての比較研究を進め、噴火に先行する現象の時間スケールやマグマ貯留条件の変化を明らかにすることが必要である。数値シミュレーションにて、岩脈貫入過程へ熱過程の導入や不均質構造の影響を考慮することなど、より現実的な火道内過程のモデリングを行い、噴火現象の再現を試み、噴火様式の違いや、噴火・噴火未遂の事象分岐を生じさせる物理化学的要因を明らかにすることが必要である。

噴出物の化学分析や組織解析をもとに、マグマの蓄積・上昇の素過程（発泡、脱ガス、結晶化等）とそれに関連する物理化学パラメータ（粘性、揮発性成分量、減圧率等）を推定する試みが進められており、特に火道浅部で発生する現象について、これまでわかっていなかった時間スケール等の物理条件の情報が得られつつある。今後は、得られた推定値の地球物理・地球化学的観測データとの照合や、理論・数値モデルの妥当性の検証への活用を通して、噴火事象の分岐条件の理解と定量化をさらに進めるべきである。

(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

あ. 目的

地質学的環境の特性に応じて、プレート境界域と海洋プレート内部、内陸を含む地殻・マントル内の地震発生域、火山地域に分けて、震源分布、構造、応力場、ひずみ場、流体分布等を観測により明らかにする。特に、プレート境界域においてはスロー地震活動等の滑りの多様性を明らかにし、内陸地震発生域においては、実験・物質科学的知見に基づくレオロジー構造モデルの構築や震源断層への応力载荷過程についての理解を深める。さらに、火山周辺地域に関しては、観測データの解析と物質科学的研究を統合し、熱水系及びマグマ供給系を含む火山体浅部からやや深部までの構造を明らかにする。

地震活動と火山活動の誘発・抑制現象の事例を引き続き蓄積するとともに、地震発生及び火山現象を支配する場の理解に加えて、室内実験、理論モデルを通して地震と火山活動の相互作用に関する研究を推進する。

海域から陸域までを包括した地震波速度・減衰構造、構造境界の分布の精緻化を進めるとともに、比抵抗構造、応力場、変形場などの情報を含めることにより、多くの研究者が利用できる標準的な構造共通モデルをより一層発展させ、地殻活動データ解析や地震発生数値シミュレーション、強震動の事前評価・即時予測手法、火山災害予測手法などの高度化につなげる。

い. 実施状況

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

大学、海洋研究開発機構及び産業技術総合研究所は、日本周辺及びニュージーランドなどの海外の沈み込み帯において、プレート境界面の形状とプレート境界周辺の地下構造及び応力場、ならびに通常地震活動とスロー地震活動の分布等を推定した。

大学及び海洋研究開発機構は、長期孔内観測システムを含む海域における地殻変動観測を推進し、ゆっくり滑りや地震の発生等の地殻活動の現状把握に努めた。日本海溝アウターライズ域周辺の地震観測と構造探査を実施し、沈み込む前の海洋プレート内の地下構造や震源断層の分布等を推定した。スラブ内地震の震源域における不均質構造を高い空間分解能で推定した。

イ. 内陸地震

大学及び海洋研究開発機構は、東北地方太平洋沖地震後の地震活動・応力場・ひずみ場の時間変化を捉え、地震波速度・減衰構造、比抵抗構造及び室内実験・物質科学的知見に基づいて、レオロジー構造モデルの高度化に関する研究を進めた。

大学は、地震活動及び発震機構解の特徴、電磁気観測の結果に基づいて、内陸地震の発生に及ぼす地殻流体の役割を分析した。

国土地理院は、GNSS・SAR 干渉解析・水準測量による高密度地殻変動観測を実施した。

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

大学は、草津白根山、蔵王山、御嶽山、伊豆大島、霧島山、雲仙岳で比抵抗構造を推定する MT 法や自然地震や雑微動を用いた地震学的解析により地表から深さ 10 km 程度までの地下構造を推定した。大学及び海洋研究開発機構は、鬼界海底カルデラを対象に、航走調査と長期海底観測機器の設置、試料採取を行い、カルデラ噴火の噴出量を推定した。

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

大学は、地震及び活火山の分布や地震学的構造、電磁気学的構造、応力場、温度場、地球化学的特性、数値シミュレーションなどを組み合わせ、地震の発生しやすい領域とマグマなどの地殻流体の生成と蓄積が起きる領域との関係を推定した。また、火山が地震活動や断層の動的破壊過程へ及ぼす影響を推定した。

オ. 構造共通モデルの構築

大学及び防災科学技術研究所、海洋研究開発機構、産業技術総合研究所は、日本列島及びその周辺域を対象とする海域から陸域までを包括した地震波速度・減衰構造、構造境界の分布の精緻化を進めるとともに、比抵抗構造や応力場、変形場、震源断層の形状などの情報を含めた構造共通モデルの構築を進めた。

大学は、球体地球における広域粘弾性余効変動モデルの構築に向け、手法開発を行った。

う. 成果

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

プレート境界地震の発生場に関して、水の分布を示す低比抵抗層の分布と微動発生位置の比較により、フィリピン海プレートからの脱水が四国西部の深部低周波微動の発生に関与している可能性が示された。種子島東方・奄美大島付近・大隅半島南東沖では、2016 年以降に準静的すべりが増加していることが明らかになった。プレート形状、構造、応力場に関しては、四国を東西に横断する 27 観測点からなる測線下のレシーバー関数解析に基づきフィリピン海プレートの上面と海洋プレートモホ面のイメージングに成功したこと、根室沖の海溝軸付近において 2011 年東北沖地震の浅部の大すべり域と類似した地震波速度が遅い構造が見出されたこと、海底地震計データを用いた検討により東北沖地震前の水平面内差応力の大きさは 15MPa 程度と推定されるなどの成果があがった。その他、2011 年東北沖地震主破壊域の北側において、海溝軸陸側海底での地震波構造探査から斜面崩壊痕跡が発見され、津波の波源となった可能性があることもわかった。ヒクランギ沈み込み帯では、北部ギズボーン沖に設置した海底地震計のデータ解析及び、3 次元屈折法地震波構造調査による P 波速度構造とその方位異方性構造推定を実施し、海域下プレート境界における低周波地震の発生様式には沈み込むプレートの表面形状が影響している可能性が示された。

海域における地殻変動観測に関しては、海底光ファイバー歪計や海底傾斜計、GNSS-A による観測技術の開発を継続した。掘削孔内の間隙水圧や傾斜計では 2020 年 12 月～2021 年 1 月にかけて起こった南海トラフ近傍のスロースリップの検出に成功し、その変動量はトラフ近傍のごく浅い断層でのスロースリップによりモデル化されることが示された。また、海底圧力計観測から、2018 年房総沖スロースリップに伴う隆起を検出した。

アウターライズ地震に関しては、三陸沖での構造探査から、多数の海底活断層を高解像度でイメージングすることに成功した。2012 年に三陸沖で発生したアウターライズ地震の震源モデルから、せん断強度が大幅に小さいプレート内断層が存在し、東北沖地震に伴う応力変化で 2012 年の三陸沖地震が誘発された可能性が示された。また、スラブ内地震に関して、海洋プレート内で発生した 2018 年アンカレッジ地震 (Mw7.1) の震源域の上下に顕著な地震波速度の異常体が検出された。M9.0 以上の巨大地震が起こった世界中の 6 つの沈み込み帯の詳細な 3 次元地震波速度構造を調べ、巨大地震の発生にはスラブ上面付近や上盤プレートの構造と応力場だけでなく、スラブ下のマントル内の不均質構造も影響を及ぼす可能性を指摘した。

イ. 内陸地震

レオロジーモデルの高度化に向けた研究として、中部日本の地殻を温度構造・水の分布・地質構造でモデル化し東西圧縮場を仮定することで、新潟から飛騨山脈に至る歪集中帯が再現された。このモデルにおける深さ 14 km での応力場と震源の比較から、地震は高応力の脆性領域で発生し、低応力の延性領域では発生しないことが明らかにされた。また、2011 年東北沖地震の余効変動データからマントルウエッジの高粘性領域の幅を推定し、福島県付近に比べ宮城県付近の方が狭くなっている可能性が示唆された。その他、広帯域 MT 探査から、長崎県南島原から熊本県天草にかけてみられる地震空白域の上部地殻は、低温で水をあまり含まず破壊強度が高い高速度・高比抵抗の岩石から成ることが明らかになったこと、精度よく決められた震源から推定された陸域地震活動の下限は、地下温度 300 度の空間分布と同じ傾向を示すことが明らかになるなど、レオロジーモデル構築に必要な情報が集まりつつある。

内陸地震発生モデルに関しては、地殻流体の役割について重要な成果が得られた。地震メカニズムトモグラフィー法により 2016 年熊本地震発生前の間隙流体圧場を推定するとともに、本震前後の地震活動度の変化における応力と間隙流体圧場の影響を定量的に調べた。その結果、熊本地震による応力増加域のうち、震源断層南側の高圧間隙流体が推定された領域では、地震活動度がより大きく増加する傾向が見られた。また、熊本地震震源域の地震波速度構造と比抵抗探査結果から、地震時すべりの停止位置が低速度領域や低比抵抗体端部などの流体の存在が示唆される構造的特徴をもつことが明らかになった。その他、北茨城市からいわき市にかけての地震多発地域の地震波反射面が見られる地下 14~16km では、比抵抗値が低いとともに、水の割合が大きいことが示された。高温高圧状態における地殻流体の存在形態の解明に向け、 $H_2O-NaCl$ 系流体とカンラン石を用いた高温高圧実験を行い、 $NaCl$ が流体の浸透性に影響する鉱物と流体の接触角を引き下げる効果大きいことが明らかにされた。この結果と東北地方の広域的な比抵抗構造から、東北日本弧の地殻流体供給モデルが提案された。西南日本のひずみ集中帯に関しては、山陰地方の地震帯における地震波トモグラフィーにより、鳥取県から山口県にかけての下部地殻で低速度異常が推定され、東部では地震発生層の下限が浅い領域と良い対応が見られた。このことから、山陰地方の地震帯の直下の下部地殻に存在が示唆されている Weak zone の形成において、東部では温度構造が寄与していると考えられる。

高密度地殻変動観測による成果として、余効すべりと粘弾性変形を分離する手法を導入し、熊本地震について統計的にパラメータ推定を行った結果、粘性係数が時間変化していた可能性が示された。

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

自然地震や雑微動を用いた地震波速度構造の推定が蔵王山、雲仙岳等で行われた。雲仙岳では地殻変動源および地震活動から推定される 1990~1995 年噴火時のマグマ上昇経路の下部に地震波低速度領域が推定された。鬼界カルデラにおいては反射法地震探査が実施された。鬼界アカホヤ噴火の噴出物と考えられる堆積層を認定し、堆積層の平面的な広がりや層厚からその総量の見積もりがなされた。

地下の比抵抗構造を推定する MT 観測が、草津白根山、御嶽山、伊豆大島、三宅島、吾妻山、霧島山、雲仙岳、鶴見伽藍岳、鬼界カルデラ等で精力的に行われた。深さ 2 km 程度までの浅部においては厚さ数 100m 程度の低比抵抗層が存在することが明らかになった。草津白根山、霧島硫黄山ではその下部に地盤変動源や地震活動域が位置することから低比抵抗層の実体は熱水変質した難透水層であり、その下部の間隙水圧上昇が浅部火山活動の要因であることが示唆された。元白根火山では水蒸気噴火地点の下部で低比抵抗部分が欠損しており、噴火により浅部低比抵抗層が失われたことが示唆された。草津白根山のより深部においては、西方~北方を中心とする領域の深さ 4-5km 以深に低比抵抗領域が検出され、マグマ溜りとその上部に形成される高塩濃度の熱水の領域と解釈された。この低比抵抗領域の上部には広域 GNSS 観測から推定された地盤変動源も位置していることがわかった。雲仙岳においては深さ 5 km より深部に高比抵抗領域、およびその上部に低比抵抗領域が推定され、両者の境界付近が、1990-1995 年噴火時のマグマの移動経路と一致することがわかった。高比抵抗領域は地震波低速度領域と対応しており、岩石学的研究から推定したメルトの比抵抗値もふまえて、メルトの存在量が 5%以下になっている領域であると解釈された。

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解

火山の存在は、応力状態の局所的な変化や、流体供給による強度低下を引き起こし、その周辺で地震活動を活発化させ、その一方で火山方向に進展する地震の破壊に対してはバリアとなることが示された。2016 年熊本地震震源域周辺での比抵抗構造調査、地震波減衰構造から、熊本市地下と阿蘇火山地下に 2 つの低比抵抗-高散乱減衰領域が推定された。本震で大きく滑った領域は両者の中間に位置しており、熊本市付近にも第四紀火山が位置していることから、熊本地震の本震は火山性の構造に挟まれた場所で発生した内陸地震であることが推定された。熊本地震の本震

および前震の破壊停止位置が低比抵抗領域の端部に相当することから、高温—高間隙水圧領域の内側に向かっては破壊が進展しにくいことが示唆された。屈斜路—阿寒地域で行われた比抵抗構造調査と歴史地震との対応関係からも火山性の構造に挟まれた場所で内陸地震が発生し、その最大規模が火山性の構造に規定されていることが示唆された。火山近傍のひずみや応力の局在化については低比抵抗体を低粘性媒質と考えた数値計算もなされるようになった。数値計算では偏差応力の絶対値を用いる必要があるが、熊本地震の最大前震前と本震後の2期間の偏差応力場は、最大前震と本震の断層近傍で、有意に変化していることが確認され、熊本地震震源域の応力場の差応力は15 MPa程度であることが推定された。御嶽山では2007年噴火に伴う火山性地震のメカニズム解の時間変化を調べられ、2014年の噴火と同様に流体の貫入を示唆する変化が得られた。

現在の火山活動だけではなく、古い火成活動が内陸地震の発生と関連していることが示唆された。九州天草地方では20~30 kmの帯状の活発な地震活動に囲まれた明瞭な地震空白域が存在するが、測地データと地震データを使用した解析によって、地震空白域においても10年の単位では上部地殻に応力を蓄積しつつあることが示され、地震空白域の上部地殻に相当する深度に破壊強度が高い深成岩体が存在すると推定された。深成岩体の周辺部は規模の大きな内陸地震により応力が解放される領域であると推定された。

オ. 構造共通モデルの構築

関東地域と中国地域で過去10年強の期間に発生したマグニチュード1.5以上の地震のメカニズム解を決定し、10kmメッシュの応力マップとして纏め、データベース化され公開された。日本列島基本構造モデルとして、近年取得された反射法地震探査データ等の統合解析を実施し、日本海及びその沿岸域、東北日本の青森平野や庄内平野、富士川河口断層帯、中央構造線断層系などの断層モデルを推定した。さらに、日本海溝と南海トラフにおいて、断層すべりの高度化に不可欠な地下構造等を考慮した断層すべりに対する地殻変動の応答ライブラリを整備した。

エ. 今後の展望

プレート境界地震については、国際協力による調査観測も精力的に実施し、国内外の沈み込み帯における発生場の理解が進んだほか、大津波を引き起こす大規模なアウトライズ地震に関する知見も蓄積された。特にプレート形状、構造、応力場の不均質がスロー地震や巨大地震の発生や多様性にどのように影響を及ぼすかが明らかになりつつある。一方、巨大地震の震源位置や破壊範囲の予測、切迫性評価に繋げるためには、臨時観測やS-net、DONETの他、今後敷設されるN-netなどの海底観測データも活用し、プレート境界における固着の状況など、地震発生場の時空間分解能をさらに向上させると共に、モニタリングの更なる高度化が必要である。国内だけでなく、国外研究機関との協力のもとに海外のプレート境界地震の研究を進め、日本の事例との比較することにより、普遍性や特異性の理解を一層深める必要がある。海洋プレート内部の地震に関しては、地球化学的アプローチとして、海底付近の堆積物と海水からヘリウム同位体比($^3\text{He}/^4\text{He}$)を定期的に測定するなど、断層に沿った流体変動モニタリングが望まれる。

内陸地震に関しては、地域ごとの地震、地殻変動、MT等による複合的な調査観測が進み、2016年熊本地震、2016年鳥取県中部地震、2018年大阪府北部の地震等における応力载荷過程および断層の強度低下の解明に資する結果が得られつつある。特に地震発生と密接な関係がある地殻内流体の役割について重要な成果が得られているが、今後は流体の量・圧力・形態等の定量化や応力と流体(強度)の切り分けが重要な課題となる。また、地震発生予測に不可欠なレオロジーモデルについては、東北地方や中部日本において観測データを説明しうる成果があがりつつある。引き続き、実験・シミュレーション・地物観測・野外調査等の総合的な研究体制を維持するとともに、定量的な地震発生評価を目指した研究の取り組みが望まれる。

火山の深さ2 km程度までの浅部においては、地下比抵抗構造モデリングの高精度化が進み、地震の震源、地盤変動源、熱消磁源の時空間分布との信頼性のある比較検討から、例えば火山性流体の蓄積場所や移動経路モデルが提案されるようになった。その一方で、地震や地盤変動、流体の移動に直接関連すると考えられる亀裂やクラックを構造としてイメージングすることにはまだ到達していない。しかしながら、光ファイバーケーブルを仮想的な地震計として用いるDASによる超高密度データの解析や、低消費電力かつ軽量の地震や電磁場観測機材の開発により地震学的・電磁気学的微細構造や、その時間変化の検出が視野に入ってきた。今後はテストフィールドを設定し、火山地下の微細構造のイメージングを試みるとともに、水蒸気噴火を引き起こすと考えられる地下水層や難透水性の構造、地震活動、地盤変動源、熱消磁源との位置関係を調査すること

が有効であろう。

火山の深さ 2 km より深部においては低比抵抗領域と地震波低速度領域が空間的に一致しない例、GNSS により推定される地盤変動源が両者と空間的に一致していない例が報告され、噴火に寄与する結晶度が低くメルト含有量が高い動けるマグマは構造の異常体の中心部ではなく、その端部に位置する可能性が示された。深部に圧力源が推定されている、つまり動けるマグマ”を有する火山を対象に、稠密観測によって推定される高空間解像度の地震学的構造と電磁気学的構造を系統的に調べることにより、マグマ蓄積・上昇過程のモデル化を進めることができると期待される。また、大規模噴火の前には、深部から上昇するマグマが浅部に位置する結晶度が高くメルト含有量が低い動けないマグマと混合することにより動けるマグマとなることが、物質科学的な研究により示唆されている。地震学的構造・電磁気学的構造・噴出物の統合解析によるマグマだまりのイメージングに加え、マグマに含まれるメルトの含有量を定量的に推定する手法の開発を行うべきである。

地震発生場に対し、火山は応力場にゆらぎを与え強度不均質を生み出す。2016 年熊本地震に関する研究で示唆されたように、火山体構造が断層のすべり方向の変化や破壊の停止に寄与する可能性があり、内陸地震の発生場所や規模評価に直結するため他地域でも検証を進める必要がある。

地殻内流体は活動的火山の近傍だけでなく、第四紀火山の周辺にも存在し得るため、地震・火山相互作用の理解には、広域な視点で調査を行うことが必要である。数 100 km スケールの広域場におけるひずみや応力の局在化については、測地データや地震データを用いて定量化できるようになったが、地下構造調査と同様の数十 km スケールの空間解像度までは得られていない。M7 クラスの地震の発生場所や各地域で起こる地震の最大規模への火山の影響評価のためには、広域調査により注目すべき領域を絞り込みつつ、ダウンサイズして断層系と火山の相互作用を見出す必要がある。そのため 50 km スケール以下の機動的稠密地震観測、電磁気探査、地殻変動観測などをすすめ応力場・構造・変形のシステムを詳細に把握することが必須である。また、応力場・構造・変形の 3 者を包括した数値シミュレーション手法を開発し得られたデータに適用することで、これらの定量的な関係の理解につなげることが望まれる。

構造共通モデルに関しては、日本列島及びその周辺域における応力場や震源断層の形状などの情報整備が進んだ。構造共通モデルは様々な解析やシミュレーションの基盤情報であるため、今後も継続的に整備していくとともに、最新の研究成果を取り込み迅速にアップデートしていく体制が必要である。

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

あ. 目的

近年、海域によってはプレート境界面の固着状況が明らかになり、観測と数値シミュレーションとの対比が可能になりつつある。そこで、海域のプレート境界で発生する巨大地震に関しては、史料・考古データ、地質データで得られる過去の地震の発生履歴や、陸域及び海域で得られている測地データに基づいて、プレート境界での滑りの時空間変化を定量的に把握することで、長期間の滑り遅れや地震モーメント蓄積量を推定し、数値シミュレーション等に基づいて巨大地震の発生予測手法を新たに構築する。

内陸地震に関しては、測地データや地震活動データ、数値シミュレーション等に基づく新たな長期予測手法を開発し、現行の活断層の活動履歴に基づく長期評価手法と組み合わせることで長期予測手法の高度化のための研究を進める。また、従来の活断層評価などで想定されてきた内陸地震の震源断層モデルを近年の観測例に基づいて検証する。さらに、物理モデルに立脚した長期予測に向け、プレート境界とプレート内部を一つの力学的システムとして統合し、観測された地殻変動・応力状態を説明可能なレオロジー構造モデルを構築する。

い. 実施状況

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

大学は、史料に記述された数百年間の有感地震の記録を活用して、大地震の発生前後の中・小規模の地震活動を抽出するとともに、史料から推定された有感地震記録と、近代的な機器観測による中・小地震データとの比較を行った。

大学及び海洋研究開発機構は、日本列島を含む広範な領域を対象とした 3 次元のレオロジー

構造モデルの構築や、プレート境界面上の詳細な摩擦状態の解明を行った。

大学及び産業技術総合研究所は、津波堆積物や巨礫等の調査を行い、海溝型巨大地震・津波の発生履歴の復元を進めた。

大学、防災科学技術研究所及び海洋研究開発機構は、超巨大地震や連動型地震などを含めた地震発生サイクルの数値モデリングを行い、南海トラフにおいて実際の地震発生履歴に類似した発生のパターンを再現できる複数のシナリオを構築した。

海上保安庁及び大学は、海溝沿いの巨大地震想定震源域や海溝軸近傍において、GNSS-音響測距結合方式等による海底地殻変動観測を実施した。

イ. 内陸地震の長期予測

大学は、測地データに基づいてひずみ集中域を特定し、さらに定常的地震活動度や地震の規模別頻度分布などの地震活動データも取り込んで新たな内陸地震の長期予測手法を開発し、予測モデルを試作した。

大学は、従来の活断層評価などで想定されてきた内陸地震の震源断層モデルを、地表地震断層の調査や地震波解析等から推定される震源過程の特徴に基づき検証した。また、内陸地震の長期予測手法の高度化をめざして、プレート境界面の固着状態や、断層セグメントの連鎖的破壊などの観測結果を取り入れた内陸地震の発生モデルの構築に関する研究を推進した。

大学及び防災科学技術研究所は、広域応力場や断層の幾何学的形状、古地震履歴、応力蓄積率などを考慮した物理モデルを構築し、数値シミュレーションを実行することで、動的破壊過程を含む地震の規模や発生時期及びそのばらつきを予測するための手法を検討した。

う. 成果

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

日本列島を含む広範な領域を対象とした三次元有限要素モデルが構築され、千島海溝や南海トラフのプレート間固着の進行にともなう北海道地域や九州-西南日本の震源断層における応力蓄積の様子が推定された。

日本海溝・千島海溝域では、プレート境界面上の摩擦状態の詳細な描像を得るために日本海溝海底地震津波観測網（S-net）による観測記録の解析が行われた。その結果、十勝沖・三陸沖の日本海溝近傍で低周波微動が捉えられ、その詳細な分布域が把握されるとともに、低周波微動発生域は、巨大地震の破壊域、余震域と相補的であることが明らかになった。また、千島海溝域におけるプレート境界での滑りの時空間変化を定量的に把握するために北海道太平洋岸で津波堆積物調査が進められ、1611年慶長三陸津波を含む17世紀の津波イベントによる堆積物のほかに12世紀の津波イベントによる堆積物も発見された。

南海トラフ域では、プレート境界面の固着状態を推定するために想定震源域内の海溝軸近傍においてGNSS-音響測距結合方式等による海底地殻変動観測が継続して実施され、海溝軸近傍での変位速度は、プレート運動モデルによる理論値の3分の2程度の大きさであるとの結果が得られた。また、浅部超低周波地震の多くは、そのCMT解が低角逆断層型であり、滑り欠損速度が大きい領域の周囲かつ地震波速度が遅い領域で活発に発生していることが明らかとなった。海溝型巨大地震の長期予測手法の高度化に資する地震発生モデル構築のため、GNSS観測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が行われた。これをもとに、今後起こりうる海溝型巨大地震の発生シナリオが複数作成された。また、経験的摩擦則とエネルギーバランスに基づいて破壊シナリオの中から実現性の高いものを選択する基本手法の開発が進められた。過去に発生した大地震の発生前後の中・小規模の地震活動を抽出するために京都で記された日記史料の分析が進められ、1707年宝永地震の発生直後には有感地震の記録は増加するが、宝永地震を挟む前後数年の間については地震の記録数に顕著な差はみられないことが分かった。伊豆マイクロプレートとフィリピン海プレートの南西端部の境界を明らかにするために海底地形及び浅層地質構造調査が行われ、檜野埼海丘の南東縁基部から北東に延びる撓曲崖が見つかった。この撓曲崖は、伊豆マイクロプレートとフィリピン海プレートの境界に相当する可能性が高いと考えられる。

南西諸島海溝域では、海溝軸近傍におけるプレート境界面の固着状態を明らかにするためにGNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測が進められた。その結果、沖縄本島南東沖の海溝軸付近のプレート間に固着域が存在することが明らかになり、当該海域で発生する地震の長

期予測に資する情報が得られはじめた。過去数千年にわたる時間スケールでの津波の履歴と規模を時空間的に復元するために、奄美大島から石垣島にかけて巨礫や津波堆積物、隆起珊瑚礁地形の調査が行われ、後期完新世の地震性隆起量の推定や、津波および地震の最大規模推定が行われた。

イ. 内陸地震の長期予測

内陸地震の新たな長期予測手法の構築をめざして、測地データから推定されるひずみ速度を用いて西日本及び東日本における内陸地震の発生確率の試算が行われた。GNSS 観測データに基づいた地殻ひずみ速度から変換したモーメント速度と、歴史地震及び近年の地震活動から推定した地震として解放されるモーメント速度をもとに、地震の発生時刻としてポアソン過程を仮定すると、西日本では 30 年間に M6.0 以上の内陸地震が発生する確率は、最大 4.3%との結果が得られた。東日本でも同様の試算を行い、今後 30 年間に M6.8 以上の内陸地震が発生する確率を計算したところ、日本海東縁から新潟―神戸ひずみ集中帯、南関東・伊豆地方、奥羽脊梁山地沿いの各地で 1%を超える高い値を示した。

内陸地震の震源断層モデルを検証・再構築するために、1894 年庄内地震の震源断層を含む庄内―新庄盆地や、日本海とその沿岸海域、富士川河口断層帯、中央構造線活断層系、琵琶湖西岸断層帯等で近年取得された反射法地震探査断面について地質構造解釈・変動地形との整合性の考察が行われ、断層モデルが作成された。さらには、2018 年大阪府北部の地震についても震源断層モデルが推定された。

プレート境界面の固着による内陸への応力蓄積過程を明らかにするために、日本列島域の三次元有限要素モデルに基づいて、測地データから千島海溝沿いと南海トラフ沿いのプレート間固着の進行にともなう内陸の震源断層への応力載荷速度が推定された。九州では、近年発生した 3 つの M7 級の内陸地震を含め、プレート間の固着が進むことで断層破壊を促進する方向に応力が載荷されている断層が多く存在することが明らかになった。また、プレート間の固着による内陸でのせん断ひず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。

2016 年熊本地震や 2019 年リッジレスト地震（米国）のように、大きな地震が連鎖的に発生するケースの活動推移予測を行うために、既存の地震活動モデルを改良し、応力変化による地震応答の予測手法が構築された。これをリッジレスト地震に適用したところ、震源域周辺の地震活動の推移を的確に説明することができた。また、近傍の主要活断層帯における地質学的な既往の長期評価と組み合わせることにより、より現実的な予測確率と確率利得が示された。また、2016 年熊本地震による地殻内のせん断ひずみエネルギーの空間変化が推定され、せん断ひずみエネルギーの変化量が背景応力の大きさに強く依存することと、せん断ひずみエネルギーが増加した場所で余震が顕著に活発化したことが明らかになった。

地震発生履歴を反映した応力蓄積率を考慮したモデル化が行われ、大地震の際に他の活断層が連動破壊を起こすために必要な応力蓄積率を定量的に見積ることが可能になった。2016 年カイクウラ地震（ニュージーランド）を例に検討したところ、この地震によって連動破壊を起こさなかったホープ断層における応力蓄積率は、古地震データから推定される値を下回っている可能性が示唆された。また、物理モデルと観測データの統合による地震規模を含む動的破壊過程予測手法の開発と検証のために、断層形状と広域応力場を地震活動のデータから拘束して動力学的破壊シミュレーションが行われた。2018 年北海道胆振東部地震を対象としたシミュレーションの結果、動的破壊過程と滑りの空間分布の大局的な特徴が再現され、動的パラメータが非平面的な断層形状を反映した初期応力分布に強く依存していることが示された。

え. 今後の展望

海溝型巨大地震の長期予測については、日本列島を含む広範な領域を対象とした三次元有限要素モデルの構築、海陸の地震・地殻変動観測データに基づくプレート間の詳細な固着状態の時空間変化や摩擦特性の把握、津波堆積物や歴史史料等の調査による地震・津波の発生履歴の復元など、長期予測に不可欠な知見の蓄積が着実に進んだ。しかし、現状では地震・津波発生履歴の全貌の把握には至っておらず、またプレート間の固着状態の把握が不十分な海域も残されている。固着状態の時間変化の把握も含めて、これらの調査・観測は今後も長期間にわたって継続的に推進することが不可欠である。特に海域の観測網は、沈み込み帯のプレート境界に

おける地殻活動の把握と理解にとって強力なツールであり、今後も積極的に活用するとともに、観測空白域をなるべく狭めていくための観測体制の更なる充実が今後の課題である。その際、陸域における観測との連携の一層の強化が必要である。調査・観測結果の活用の観点では、海溝型巨大地震の長期予測手法の高度化に資する地震の発生シナリオが複数提唱されるなど、海溝型地震の発生モデルの構築が着実に進んでいる。今後は、調査・観測と地震発生数値シミュレーションの融合研究をより強化し、得られた最新の知見に基づいて地震発生モデルを逐次更新してゆく必要がある。その上で、スロー地震やプレート境界滑りの発生予測実験を進めることが重要である。

内陸地震の長期予測については、震源断層モデルの検証と再構築、プレート境界面の固着にともなう内陸への応力蓄積の解明、断層セグメントの連鎖的破壊と応力蓄積率との関係など、地震発生モデルの構築に資する知見の蓄積が進んだ。しかし、現状では個別の地震や地域に対する知見にとどまっているため、今後は知見の蓄積をより一層進めるとともに普遍性の検証も行うことで、応力蓄積から断層破壊に至るまでの一連のモデル構築を進め、内陸地震の長期予測手法の高度化に繋げる必要がある。また、観測データと物理モデルの統合による動力学的破壊シミュレーションも進められている。今後は、シミュレーションを進める過程での物理モデルの妥当性の検証と更新、シミュレーションをより精緻化するために必要な観測項目の提案と観測データの取得など、物理モデルとシミュレーション、観測、さらには統計モデルの有機的な連携を深め、長期予測の高度化を実現する必要がある。従来の活断層における地震発生履歴をもとにした手法とは異なり、測地データと歴史地震を含む地震活動データをもとにした長期予測の試行も行われている。このような新たな手法による長期予測を実験的にさらに推進することが重要である。

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

あ. 目的

海陸統合の観測データを活用することでプレート境界の滑りの時空間変化を推定し、物理モデルに基づく数値シミュレーションや数理モデルの構築を通して、中短期の時間スケールでの大地震の発生確率や地震発生可能性の相対的な高まりを評価する手法を構築する。また、地震活動の時空間変化を高精度かつ迅速に把握する手法を高度化するとともに、地震活動データに基づく地震発生予測モデルを用いて地震活動の予測を行い、その予測性能を統計的手法に基づいて評価する。さらに、過去の多様な地震活動や地殻変動等の時間的推移を整理した地震活動事象系統樹を作成し、地震活動予測の新たな手法の開発を進め、高度化につなげる。

い. 実施状況

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

大学、防災科学技術研究所、海洋研究開発機構、産業技術総合研究所、気象庁及び国土地理院は、日本各地で発生する様々なスロー地震活動を観測し、それらの時空間変化を明らかにすることで、滑り現象の多様性と相互作用の理解を深めた。さらに、繰り返し地震・微小地震の検出や海底地殻変動観測などプレート境界滑り現象の時空間変化をモニタリングする手法を高度化し、滑り速度が異なる現象間の相互作用を明らかにした。そして、これらの滑り現象のモニタリングと数値シミュレーション等に基づいて、プレート境界大地震の発生可能性の時間的変化を評価する手法の開発を進めた。

大学及び海洋研究開発機構は、測地データや地震活動データ等を用いて、プレート間の固着状態を逐次的にモニターする手法を開発し、固着状態の時空間変化に基づく地震発生予測手法の構築を進めた。

大学及び海洋研究開発機構は、データ同化手法を地殻変動観測データに適用することで、ゆっくり滑りの時空間発展を予測するために必要なプレート境界面上の摩擦特性を推定した。

気象庁、国土地理院、防災科学技術研究所、産業技術総合研究所及び海洋研究開発機構は、陸域及び海域の地震観測網等から得られるデータを逐次的に解析することで、プレート境界滑りを評価するための地殻活動監視技術の高度化を行った。

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

大学は、地震活動の時空間変化を高精度かつ迅速に把握するための手法の開発を進めた。逐

次的に更新される地震活動データに地震活動の統計モデルを適用することで、地震発生確率の時空間変化を評価する手法を開発した。また、地表の荷重変化や潮汐等の応力擾乱に対する地震活動の応答を評価した。

大学は、地球規模の広域な地震活動や、世界の様々な地域の地震活動の予測・検証実験を行うために、国際的な地震活動予測可能性共同実験（CSEP）に継続して参加した。世界標準の地震発生予測モデルや検証方法の改善、実験方法の改良にも貢献した。

大学は、過去の観測データ・地震の発生履歴・文献資料等を収集し、海溝型巨大地震や内陸大地震の発生前・発生後の地殻活動を整理することで、地震活動事象系統樹を作成する。さらに、大地震発生前後の特徴的な地震活動等の発現頻度等を把握し、地震発生予測手法の高度化に貢献した。

う. 成果

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

スロー地震と繰り返し地震の検出を中心としたスロースリップのモニタリングに基づく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。さらに、物理モデルの構築・予測に関する多数の興味深い成果も得られた。特に、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少しずつ増えるとともに、プレート境界の滑り速度が一時的に速くなると中規模以上の地震が活発化しやすい傾向にあることが明らかになった。深部低周波地震活動を基準にして解析することで、深部で短期的スロースリップが発生している最中に、浅部の固着域においてもわずかな滑りが起きていたことを見出した。微少なながらも固着域の中でも滑りが起きていた点が特徴的であり、応力が固着域へ間欠的に载荷されていると考えられ、スロー地震と固着域の関係性を理解する上で重要な成果である。

日本海溝海底地震津波観測網（S-net）や地震・津波監視システム（DONET）の導入により、日本海溝や南海トラフ沿いの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次々に発見され、固着域から非固着域への遷移域におけるスロー地震の活動様式に関する理解に大きな進展が見られた。浅部スロー地震は、プレート境界深部と比較して、低周波地震・超低周波地震・スロースリップの伝播などの共通した特徴があるものの、発生領域は海溝軸に沿って不連続に分布し、発生間隔もばらつきが大きいなど、プレート境界浅部では強い不均質性が存在することが示唆される。

南海トラフ沿いの深部スロー地震発生域における低周波地震・超低周波地震・短期的スロースリップの長期的な発生履歴が明らかになり、スロー地震の活動域の長さや滑り量分布の空間方向の変化が大きいことが分かってきた。特に、九州沖から四国にかけてのフィリピン海プレート境界域の深部及び浅部において、スロー地震の長距離にわたる移動現象が検出されるとともに、異なる種類のスロー地震の間に相互作用が見られることが明らかになった。また、南西諸島海溝の八重山諸島付近において約6ヶ月周期で繰り返し発生するスロースリップの始まり方は、同じ場所・同じ規模にも関わらずイベントによって異なることが明確になった。さらに、日向灘・豊後水道・四国中部・紀伊水道・志摩半島において長期的スロースリップが繰り返し同じ様な領域で発生しているものの滑り量が異なる時が見られるなど、スロー地震活動の複雑性に関する知見が新たに得られた。

短期的スロースリップが起きている最中に、継続時間が約1時間で規模がMw5.0のスロースリップが発見された。スロー地震の継続時間に関するスケーリング則には地震モーメント Mw 4 から5、継続時間数百秒から1日にギャップがあったがそのギャップを埋める現象の存在が示された。また、南海トラフ周辺地域を対象に、三次元地震波速度構造を用いた自動CMT解析システムの開発に加えて、S-net データを用いた日本海溝沿いの低周波微動検出の自動処理化を試行している。

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、2011年東北地方太平洋沖地震後の余効滑り発生時や、南海トラフ沿いの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を抽出した。プレート境界面の摩擦パラメータだけでなく、マンツルの粘性率・地震前の滑り速度・地震時の滑り分布・モデル誤差に関するパラメータを未知数として推定する手法開発に成功した。

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

本震直後に発生する活発な地震活動の欠測を埋めるための統計的手法が複数提案されるとともに、それらの手法を用いた余震活動の推移予測研究が進められた。リアルタイムで推定される自動処理震源データや地震波のエネルギー量の時間変化を用いることで、2018年大阪府北部の地震や2018年北海道胆振東部地震、2019年山形県沖の地震などの大地震後の地震活動の推移予測が行われた。また、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出された。これは、変位速度から余震活動の継続時間を推定できることを示した重要な成果である。

有限断層を考慮に入れた統計的地震活動モデルを用いて、大地震の滑り分布と余震との関係を推定した結果、本震に直接起因する余震は地震時に大きく滑った断層領域近傍に発生するケースが多いことがわかった。この研究成果は、余震分布を活用することによる本震時滑り領域推定の高度化や、本震後の短期の余震確率予測に役立つことが期待される。

統計地震モデル（階層型ベイズ ETAS モデル）を用いて、余震などのトリガ効果を除いた地震活動度の高低を表す常時地震活動度の分布を推定したところ、常時地震活動度の大きな領域は、過去の大地震の震源域やひずみ集中帯・小繰り返し地震の発生域と良く対応していることが示され、地震発生確率が周辺よりも高いことが考えられる。また、地震活動予測可能性共同実験（CSEP）を通して、国際的な枠組みのもと、地震発生の統計モデル・物理モデルに基づく地震活動予測手法の開発や、異なる予測手法間の比較実験が行われた。地震発生予測検証実験を運用するテストセンターの検討が進められるとともに、予測手法間の性能比較には CSEP の標準テストではなく、対数尤度あるいは確率利得による評価が有効であることが明らかとなった。

前震活動は本震を予測する上で有望な現象と期待されており、実際に本震が発生する前に通常の地震活動から前震を識別するための手法開発を進めている。この前震識別法を岩手-宮城県沖・茨城県沖・伊豆諸島・長野県北中部の4地域に適用したところ、ETASモデルから作成された合成地震カタログに比べて高い予測性能を示すことが示された。上記の地域では、群発地震やスロー地震の発生、地殻内流体の関与が示唆されており、前震活動を引き起こしやすい構造的な不均質性が存在すると考えられる。

南海トラフ沿いの巨大地震に関して、最近100年間のグローバルな地震カタログを整理することで、M8クラス以上（半割れ）およびM7クラス（一部割れ）の地震発生後における巨大地震の発生確率を計算した。その際、南海トラフ沿いの地震発生様式の固有性についても考慮した。

え. 今後の展望

プレート境界の滑り速度の一時的な増加と中規模以上の地震発生との関連が示された点は、今後の地震発生予測手法の構築を進める上で重要な知見である。今後も、海陸統合の観測網のデータを最大限に活用して、プレート境界滑りの時空間発展を明らかにし、大地震発生との関連性を明らかにすることが欠かせない。また、大地震発生直前のスロー地震の発生に関しても事例が限られるため、観測データの蓄積と解析を継続的に進めるべきである。同時に、このような観測事例を地震発生予測に繋げるためには、プレート境界の様々な時空間スケールにおける複雑な滑りを説明できる物理モデルの構築の進展が欠かせない。

スロー地震に関する知見の蓄積により、スロー地震は様々な時空間スケールにわたって起こっている多様な現象であることが徐々に示されてはいるが、その全貌解明には至っていない。そのためにも、既往のスロー地震に比べて継続時間や規模の異なる新たなスロー地震の検出が大切である。特に、海溝軸付近で発生する浅部スロー地震に関しては、海底の地震・測地観測網で取得されるデータの解析や観測網の高密度化を通して、重点的に研究を進めるべきである。

測地データを用いたデータ同化手法の進展により、スロー地震発生域や余効滑り発生域におけるプレート境界面上の摩擦パラメータ推定が行われている。次の段階として、測地データに加えてスロー地震や繰り返し地震の活動を用いたデータ同化手法の更なる発展を通して、スロー地震や大地震後の余効変動によるプレート境界面上の滑りの発生予測実験を試行することが必要である。また、プレート境界面上の滑りは、周辺域の固着域へ応力を载荷するため、海溝型地震の発生確率が一時的に増加すると考えられる。滑り速度の一時的な変化と大地震の発生確率を結びつける理論研究の進展も重要である。

前計画において、次の宮城県沖時地震（M7前半）の発生時期の予測研究が行われたが、2021

年3月と5月に発生した宮城県沖の地震は M6.9 と M6.8 と一回り小さい規模で、1974 年宮城県沖地震の震源域の西側と重なる。一回り小さい規模の地震の発生は、上記の予測研究では考慮されておらず、宮城県沖地震の主破壊域に対して短期間の応力載荷を引き起こしたことから、発生時期にも影響を及ぼすことが考えられる。今後は、一回り小さなスケールの地震活動も取り入れた予測モデルの構築や、それに基づく予測研究を進める必要がある。

また、過去の地震活動評価に基づいて大地震後の活動推移を予測する統計モデル・統計解析に関する研究にも進展があり、地震調査研究推進本部での活動評価の際の基礎資料としても利用されている。地震活動の統計モデルから得られた特徴と地球物理学的な知見との比較研究が行われ、常時地震活動度の大きな領域は、ひずみ集中帯などの応力載荷速度の速い領域に一致することが示されている。今後も、このような比較研究を通して、地震活動の物理的理解を深めることで統計モデルの高度化や物理モデル、予測シミュレーションとの融合研究を進めることが欠かせない。

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

あ. 目的

地震活動の変化や電離圏の状態など大地震の発生に先行する現象の事例蓄積を継続するとともに、中短期の地震先行現象の統計的評価に基づき大地震の発生確率を推定する手法を開発する。多様なデータに対して、先行現象の新たな抽出及び統計的評価に着手する。さらに、機械学習等のデータ駆動科学の最新手法を取り入れることで、新たな先行現象の抽出及び統計的評価を行う。理論や室内実験等により、先行現象の発現メカニズムの解明も進める。

い. 実施状況

大学は、従来から地震発生に先行する傾向があると示唆されている地震活動や電磁気現象などの現象に対して、過去のデータを用いて客観的手法で予測を行い、予測性能を統計的に評価した。また、地震波形データの解析と室内での岩石破壊実験等を活用して、主破壊に先行する微小破壊の活動様式や発生機構について調べ、大地震の発生確率評価への適用可能性について検討した。

う. 成果

地震発生の長期静穏化について、千島から伊豆・小笠原にいたる海溝沿いの地域を網羅的に走査し、10.8 年以上の静穏化が続けば、半径 100km の地域に 4 年間、大地震がおきやすいという予測（警報）を出す、1 年更新の予測マップを試作した。確率利得などの評価により、この静穏化は地震の有意な前兆であるとの結果が得られた。静穏化の検出において対象とする地震の探索範囲を自動的に調整する新しい手法（PMAP 法）を開発した。この手法により従来の手法では検出できなかった 1964～2006 年に千島地方で発生した M7.5 以上の地震前の静穏化を検出することができた。

地震活動の統計的性質を表す b 値が大地震前に低下することに関して、活動度の高い地域を全世界で網羅的に走査し、当該地域の b 値が過去 7 年にわたって $-0.025/\text{年}$ よりも顕著に下がっていれば、5 年間の警報を出すこととした。予測対象となっていた M8 以上の地震 29 個のうち 55.5%が、警報が出されている期間内に対象地域内で発生した。警報分率、確率利得、偶然である確率などを検討した結果、検出された b 値の低下は有意な地震の前兆であることが示された。

2019 年リッジレスト地震（米国）では、M6.4 の地震により共役な二つの断層が最初に動き、そのうちの一つの断層において 34 時間後に M7.1 の地震が発生したが、M7.1 の地震発生前に、M6.4 の震源付近の M7.1 の断層系に沿う約 5 km の区間において顕著な b 値の低下が先行したことを見いだした。一方、2016 年熊本地震では、M6.5 の前震の 28 時間後に Mj7.3 の本震が起こったが、本震の破壊開始点では、本震の発生 1 日前から b 値が顕著に高くなっていたことが明らかになった。

2016 年に発生した鳥取県中部の地震（M6.6）に関して、前震活動が本震発生の約 2 ヶ月前から震源域周辺で発生し、不連続な移動を起こしながら本震の破壊開始点へと近づいて行ったことが分かった。ある地域で地震活動が高まった際に、より大きな地震の前震となりうるのかを識別するための手法開発が進められた。岩手-宮城県沖・茨城県沖・伊豆諸島・長野県北中部の 4 地域において、この前震識別法は高い予測性能をもつことが示された。

確率的な地震破壊成長の抽象的微視モデルである分岐クラックモデルに臨界ゾーンという概念を導入することで、予測可能性向上につながる可能性のある新たな枠組みが提案された。臨界ゾーンの見地からは、先行異常は決定論的な震源核のように破壊開始点付近に限定されず、臨界ゾーン全体でみられると考えられる。このことは、先行現象とみなされるモーメント放出の加速、 b 値の低下、地球潮汐による載荷/除荷時の地震活動変化の比、重力変化、電磁気変化、GNSS 変位異常などが広範囲に観測されることと調和的である。

岩石試料を用いた実験において、断層ガウジが残置された条件下で試料全面が滑る大規模な動的滑りイベントに先行して前震が発生することが確認され、その中には互いに波形が酷似した相似的な前震の発生も見られた。それらの相似的前震は、「本震」の直前を中心に発生していることが分かった。このような現象は 2011 年に長野県中部で発生した $M_j5.4$ 地震の前にも観測されている。

巨大地震直前の GNSS データを用いて計測した電離圏全電子数 (TEC) の変化について、 M_w7 級の地震まで含めた解析を行い、 M_w が大きな地震ほど異常の振幅が大きく、先行時間が長いという明確な傾向が示された。

ULF 帯 (300~3 kHz) の地磁気データから、ノイズの少ない深夜帯だけに着目して異常を網羅的に検出し、周辺 100 km 以内で起こった $M4$ 以上の地震 52 個と比較した結果、異常が見られてから 8~9 日後の間に地震が発生すると仮定したときに、その地磁気異常が、先行現象としての有意性が高いことが示された。

え. 今後の展望

様々な観測で良質なデータが一定期間蓄積され、また解析技術の進歩にも助けられて、多くの興味深い事実が見いだされてきた。確率利得などを導入することにより、 b 値、地殻流体、電磁気的な現象などの様々な先行現象の有無と強さを客観的に評価できるようになった。また、どのように前震を伴うかの地域性が明らかにされてきており、今後もこのような研究を継続して推進するとともに、小さな前震を積極的に検出することによって本震との因果関係を問うような検証をさらに進めていくべきである。

データ同化等の物理モデリング技術の進展により、これまで計算量が壁となつてできなかったことが少しずつできるようになってきた。先行現象と本震との関係について提唱された臨界ゾーンという概念を様々な現象について適応することにより、予測研究の発展が加速する可能性がある。また、観測を含めたデータの拡充、解析技術の向上によって研究を深化させ、先行現象発現のメカニズムの解明を目指すことが重要である。

(4) 中長期的な火山活動の評価

あ. 目的

火山噴火の予測を高度化するためには、多項目の調査・観測によって噴火履歴や火山活動の状態を把握し、噴火発生のポテンシャルやマグマの蓄積状態などを評価する必要がある。長期的な時間スケールに関しては、史料や地質データ等に基づく噴火履歴のデータベースを活用し、噴火様式や規模、マグマの種類などの特徴を明らかにする。また、階段ダイアグラムの高精度化や物質科学的解析に基づいて、マグマ供給系の長期的変化を推定し、噴火活動のポテンシャル評価を行う。数ヶ月から数年の中期的な時間スケールについては、多項目の地球物理学的・地球化学的なモニタリングにより火山の状態を把握することで、様々な火山現象と噴火発生の関係を定量的に評価する。加えて、新たなモニタリング技術及び解析手法の開発も進める。

い. 実施状況

ア. 火山噴火の長期活動の評価

大学は、地質学・岩石学的手法により、詳細な噴火履歴とマグマ供給系の変遷の解明に取り組んだ。その際、既存の露頭観察に加えてトレンチやボーリングによって詳細な地質情報を収集した。得られた知見は、噴火事象系統樹の作成にも活かされた。

山梨県富士山科学研究所は、富士山の地質調査およびトレンチ調査を行うことで、噴火履歴を高精度に推定し、噴火事象系統樹の精緻化を目指した。また、古地磁気永年変化を利用した年代推定や、堆積物中の有機分子の放射性炭素年代測定も試み、噴火年代を高精度で推定することに取り組んだ。

イ. モニタリングによる火山活動の評価

大学は、火山活動の中期的推移を定量的に把握することを目指し、地震、地盤変動、重力、磁場、熱活動等のモニタリング観測を行った。十勝岳、阿蘇山、吾妻山等では、観測データに基づく火山活動の新たな評価手法を試行的に適用した。箱根山、草津白根山、霧島硫黄山、焼岳、アトサヌプリ等、水蒸気噴火の発生が懸念される火山では、火山ガスや温泉水等の化学組成や同位体組成のモニタリングも実施した。また、これまでは観測頻度が少なかった離島火山を対象として、火山ガスの二酸化硫黄放出率や組成比を自動測定する装置の開発や改良を進めた。八幡平～秋田駒ヶ岳における熱水系の地下水化学組成、熱・水収支の解明に取り組んだ。富士山では磁場のモニタリング観測を開始した。

産業技術総合研究所は、マグマ供給系-火道システム発達と噴火推移過程のモデル化を目指して、大規模噴火の噴出物の岩石学および地質学的解析を行った。

国土地理院は、マグマ溜まりの膨張・収縮およびマグマの移動まで含めた地殻変動モデリングを可能にする解析手法を導入した。

気象庁は、全国の火山で活動監視の基礎となる各種モニタリング観測を着実に行うとともに、いくつかの火山では化学・電磁気観測も実施した。また、衛星 SAR の干渉解析や GNSS 解析の精度を高める手法開発に取り組んだ。

北海道立総合研究機構は、北海道内の主要活火山を対象に、地盤変動、熱、化学モニタリングを実施した。

う. 成果

ア. 火山噴火の長期活動の評価

地質調査の結果に、粒子の形状分析や全岩化学組成の分析結果を加えることで、富士山のテフラ層序が詳細に解明された。また、山中湖の表層堆積物中の各種有機分子の放射性炭素年代測定や、噴火堆積物の磁化方位を古地磁気永年変化曲線と照合する方法により、噴出物の年代推定法の再検討が進み、富士山の噴火履歴の高精度化に道が開けた。なお、古地磁気永年変化曲線の推定そのものも、富士山周辺に残された長期間・高頻度の噴火堆積物の試料から実現したもので、古地磁気学など周辺分野にも貢献する研究成果である。それ以外にも、伊豆大島、霧島山、摩周、草津白根山、雌阿寒岳、日光白根山、秋田焼山、御嶽山、アトサヌプリ等の火山で詳細な噴火履歴が明らかになった。

イ. モニタリングによる火山活動の評価

多くの火山で多項目のモニタリング観測が展開されるとともに、それを支える観測・解析技術の開発が進み、火山活動推移モデルの構築や火山活動評価の基礎となるデータが着実に蓄積された。噴火中だけでなく、一見静穏に見える非噴火時にも各種の観測量に顕著な変化があり、いくつかの火山ではそれらの発現パターンに共通の特徴が見られることも明らかになってきた。過去数十年の観測データの蓄積があるいくつかの火山に対しては、ニュージーランドで開発された火山活発化指数（VUI）の試行的適用を通じて、非噴火時の活動評価に定量的・客観的な基準を与える方法が検討された。タイプの類似した火山を共通の手法でモニタリングすることにより、活動状態に応じた観測データの特徴を分類するなど、火山間の比較に基づく評価も試みられた。化学的観測の高頻度化・自動化・高度化が進んだことの意義は大きい。例えば、定期航路フェリーに自動観測装置を搭載することで、離島火山の二酸化硫黄放出率の観測頻度が格段に上がった。化学的観測と他の地球物理的観測との比較が本格的に可能になり、気象庁に共有された観測データは活動監視にも役立てられた。

鬼界、大山、白頭山、霧島山などを対象として、地質時代及び歴史時代に発生した大規模噴火の推移をコンパイルした大規模噴火データベースの作成・公開が進められた。

衛星 SAR や GNSS 観測による地殻変動解析において、対流圏遅延補正の改良や時間依存インバージョンを導入することにより、マグマの蓄積や移動などを検出する能力が高まった。人工衛星のリモートセンシングデータの解析にも進展があり、離島火山などのモニタリングに有効性が高いことが示された。

え. 今後の展望

長期活動の評価に関しては、詳細な噴火履歴を明らかにすることが基本的なアプローチであるが、地質学的調査に基づく噴出量推定だけでなく、高精度な年代推定も必要である。古地磁気永年変化の利用など、新手法による年代推定の精緻化が進んでおり、今後も多くの火山に対して適用が見込まれる。また、トレンチ調査やボーリング調査の併用は、水蒸気噴火など小規模な噴火の履歴を把握するためにも重要である。

モニタリングによる活動評価については、非噴火期における火山活動の不安定度を、観測データに基づいて定量的に評価する試みとして、VUI の活用が進められている。VUI そのものは予測を目的として作られたツールではないが、継続的にデータを蓄積し、火山活動の不安定化事象（アンレスト； unrest）と事後の噴火との関係を定量的に整理することで、将来は噴火の確率予測に応用できる可能性もある。また、次節の火山活動推移モデルの研究をさらに進め、今後は様々なモデルに基づいて、噴火予測に資する火山活動の定量的評価方法を構築することが必要である。モニタリングによる活動評価は、その基礎となる観測が安定的に行われることが必要不可欠であり、そのための組織間協力や適切なデータ共有等の体制作りも重要であることから、火山機動観測検証研究事業との連携や、次世代火山研究推進事業による Japan Volcanological Data Network (JVDN) の一層の活用が望まれる。今期の計画で作成された大規模噴火データベースは、その活用により、噴火に伴うマグマシステムの挙動のモデル化や、降灰等のハザード予測の高度化などへの波及効果が期待される。今後は、より多くの火山で同様のデータベースを構築するとともに、火山防災の現場での積極的な活用方法も検討する必要がある。また、持続可能で安定的な稠密観測は火山現象の理解の基礎であるため、新たな観測技術を使ったモニタリング方法の開発や実用化も求められる。

（５）火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

あ. 目的

起こりうる火山活動や噴火現象を網羅的にまとめ、その時系列を整理した噴火事象系統樹を作成する。それをさらに発展させ、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た火山活動推移モデルを構築する。また、各事象に先行して現れる物質科学的・地球物理学的データの相違点や共通点の整理、数理モデルの高度化を進め、噴火ダイナミクスの支配要因に基づき、火山活動の推移を決定する条件を明らかにする。さらに、地震活動の活発化や山体膨張等の先行現象が発現したにもかかわらず噴火に至らない噴火未遂現象や火山体から離れたやや広域の地殻活動変化にも着目し、過去の観測記録や文献調査等も活用する。

い. 実施状況

大学、産業技術総合研究所、山梨県富士山科学研究所及び防災科学技術研究所は、全国の主要な活火山を対象として、地質調査や史料、近年の噴火履歴に関する最新の調査結果及び先行研究の成果をもとに、火山・噴火活動に関する噴火事象系統樹の作成を進めた。地球物理学的観測や物質科学的分析から得られる各種パラメータに基づいて噴火現象の分岐指標を整理し、分岐判定に対する論理的評価方法を開発した。水蒸気噴火に対しては、浅部熱水系の時間発展に着目した数値シミュレーションを行い、多項目観測データとの比較を通してモデルの構築に活かした。

大学は、噴火事象系統樹をさらに発展させて観測データをもとに事象分岐が起こる条件を調べた。さらに、山体構造や地質学的環境が火山活動に及ぼす影響、火山現象の科学的解釈や今後進展しうる事象の分岐予測に基づくとともに、火山ガスやマグマなどの火山性流体の貫入・噴出の量やその時間変化率などに着目して、桜島などを対象に、噴火先行現象、噴火発生、噴火規模・様式の変化など、先行現象から噴火終息までの一連の活動推移をモデル化した。観測データや噴出物の岩石・鉱物解析を通じて、大正噴火・昭和噴火から、近年の南岳・昭和火口活動期の噴火について噴火規模や様式に着目した火山活動推移モデルの構築を進め、火山噴火予測手法の高度化を進めた。

う. 成果

地質調査、年代測定、岩石学的解析に基づく基礎データの収集を行い、国内の火山における噴火事象系統樹を作成した。例えば、草津白根山では、山頂域でマグマ噴火による火砕丘の形

成が約1万年前には始まり、約1100年前には水蒸気噴火の活動期に入っていたことを明らかにした。十勝岳について、過去100年間の火口域、噴火タイプおよび前兆的な地震活動度を考慮し、噴火に至らないケースを含めた噴火事象系統樹を再構築し、それぞれの分岐に経験的確率を与えることに成功した。浅間山では、噴火開始と噴火未遂の評価手法及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。蔵王火山について、最新の火山活動・噴火活動の履歴から、前兆現象のみで終息する場合、そののちに水蒸気噴火に至る場合、水蒸気噴火からマグマ噴火へ移行する場合、大規模噴火に至る場合に分けて噴火推移予測図を作成した。以上のように、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。

山体変形の評価から事象分岐の条件を調べる研究が進められた。地盤変形データから測定されるマグマ貫入速度をもとにした事象分岐の論理を、桜島およびメラピ山（インドネシア）を例にして構築し、測地学的観測から噴火規模や噴火様式を予測する新たな方法を考案した。国内の火山周辺に展開されるGNSSを用いた山体歪みの時系列データの解析から噴火発生を判定する方法が構築され、その的中率を評価した。世界で発生する地震および火山噴火のデータを系統的に解析し、大地震の発生により火山周辺の地殻内歪みが膨張場となる火山において、大地震発生後の数年間にわたって噴火発生頻度が2～3倍程度高まることが分かった。

多項目観測データをもとに事象分岐の条件を導くことを目指す研究も行われた。熱水系火山の非噴火期の火山活動事象を収集し、事象分岐の条件や論理を導き出すため、火山性圧力源や熱源の深度と強度の関係を噴火発生状況と合わせて散布図に整理し、火山噴火発生度をまとめた。阿蘇山、桜島、口永良部島、霧島山、十勝岳、吾妻山、草津白根山などにおいて観測データの解析結果の時間変化を系統的に整理し、噴火した火山については、多くの項目の観測量に火山活動の活発化を示すシグナルが噴火前に現れることを見いだした。特に阿蘇山の2014年噴火では、浅部へのマグマ貫入による熱消磁を示す地磁気変化は、マグマ噴火では発現するのに対し、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。シナブン火山（インドネシア）では、水蒸気噴火からマグマ噴火へ移行する際に特徴的な地盤変動と地震活動が現れることが明らかになった。ひまわり8号の超高頻度赤外面像、高分解能衛星画像、全球三次元地形データを組み合わせて解析を行い、2015年6～8月にラウン火山（インドネシア）で発生した噴火において、前駆期、2回の溶岩噴出期、そして終息期からなる噴火推移の全貌を定量的に捉えることに成功した。

地球化学的データの分析に基づく研究から、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 CO_2/SO_2 比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つながる可能性があることが明らかとなった。火口湖について、湖水の熱・化学パラメータの数値的検討を行った結果、湖水成分の時間変化から火山活動を評価する際には、湖水の溶存成分が湖底流体と平衡に達する時定数を考慮する必要があることが示された。

噴火の規模や推移に関する物質科学的研究も進められた。桜島火山における歴史時代（文明・安永・大正）のプリニー式噴火では、メルト包有物の揮発性成分含有量から軽石噴火の噴出体積のほぼ全てが噴火直前には深さ0.5～3kmの火道浅部に貫入した状態であったことが推定された。この深度範囲にわたってマグマが分布していたとすると、軽石噴火の噴出体積のほぼ全てが、噴火直前には浅部の火道に貫入した状態であったと推定される。したがって、噴火規模の予測のためには、マグマ貫入量を正確に決めることが重要であることを示している。伊豆大島の大規模噴火の初期と中規模噴火では、噴出物中の長石量が少なくマグマ組成や岩石組織は類似している一方で、小規模噴火では長石に富むこと、また大規模噴火では長石量は短時間で増大することなどが明らかとなった。これは、地下のマグマの急上昇や脱ガス過程と関連して、噴火規模と噴出物との間に関連性があることを示唆している。

気象庁の噴火警戒レベルの判定基準の根拠を明示して公表するため、過去のデータを改めて精査し、注目すべき現象の整理と判定基準の具体化を進めるとともに、必要な見直しを行った。

え. 今後の展望

各火山周辺で多項目観測を実施し、比較的シンプルな条件下での理論的な予測を背景に、定量化される諸現象の時系列データから事象分岐の判断基準となる指標を抽出することで、火山噴火予測の方法が徐々に構築されてきた。しかし、国内外での噴火発生数は必ずしも多くないため、引き続き、噴火発生頻度の高い火山における集中的な観測研究と、複数の火山間の比較

研究を通じて、事象分岐の条件の抽出を行うことが必要である。今後は、火山活動の評価指標をもとにした噴火発生の可能性を即時的に評価する方法を構築し、噴火予測の試行実験を行うことも必要である。現在、気象庁ではホームページで各種のデータ分析値を毎月掲載している。また、文部科学省の次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトでは、多項目のデータベースの構築が進んでいる。このように、多くの研究者が多角的な視点でデータ分析を行える環境が整いつつある。これを最大限利用することにより、新たな分岐判断基準の論理構築や火山活動推移のモデル化が促進されることが望まれる。近年、火山浅部の熱水系の挙動や火道内マグマ挙動などの理論研究も進み、期待される観測量もシミュレーションで求められるようになってきた。これらの研究成果は、複雑な挙動を示す観測データから事象分岐の条件を見いだすため、あるいはより効果的な観測方法を構築するためにも利用できる」と期待される。

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

あ. 目的

強震動評価、津波事前予測、地震災害リスク評価について、より複雑な構造モデルや断層運動の不確実性などのこれまで取り込まれてこなかった特徴や情報を考慮することで、従来の評価手法を高度化する。また、地震動や火山活動に伴う斜面崩壊や火砕流の発生の事前予測に関する手法、及び火山泥流発生に関するポテンシャル評価手法の開発を行う。

い. 実施状況

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。

大学及び産業技術総合研究所は、過去のプレート境界型地震や内陸地震などによる強震動や長周期地震動・津波災害の発生要因の検証に基づいて、震源断層モデルや堆積盆地などの地下構造モデルの高度化を進めるとともに、それらに立脚した広帯域強震動・津波評価手法を研究した。

(前建議)

大学は、短周期から長周期までの広帯域強震動予測の高度化のために、強震動の成因と影響を強震観測データに基づき把握し、プレート境界地震や地殻内・プレート内地震を対象に、断層運動の不確実性を考慮した震源断層モデル化手法に関する研究を行った。また中～大規模地震の実地震記録を対象とした地震動シミュレーションを行い、地下構造モデルの妥当性の検証と改善を進めた。建物被害に直結する震源域での強震動特性を理解することで、将来発生する強震動の評価手法の高度化に向けた研究を進めた。断層のずれが地表に到達する場合の強震動生成モデルに関する研究を実施した。

イ. 津波の事前評価手法

大学、産業技術総合研究所及び海洋研究開発機構は、津波堆積物等に基づく過去の超巨大津波の知見とプレート境界の固着状態を統合した津波の事前評価手法を開発した。

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

大学及び海洋研究開発機構は、震源・深部地下構造・浅部地盤構造・強震動予測・構造物被害・リスク評価・情報伝達までを一貫して扱った研究を推進し、地滑り、津波などの二次災害も含めた災害リスク評価手法の高度化に関する研究を行った。また、断層運動の不確実性を考慮することで、評価結果に幅をもたせた災害リスク評価手法を確立した。

大学は、人口密度が高く災害リスク評価において脆弱と捉えられている堆積平野・堆積盆地などを対象に、強震記録データベースを増強し、また、震源解析や強震動シミュレーションを行って地震災害の素因と誘因の関係や災害発生機構を多面的に分析した。地震被害想定の不確実性を低減するために、震源断層モデルや地下構造モデルの精緻化、地域固有の構造物被害・リスク評価の高度化を地域の自治体と連携して進めた。想定結果を広く住民に伝える手法についても地域の自治体と共に検討した。

北海道立総合研究機構は、積雪寒冷や暗夜条件下での津波による最大リスク評価手法に加えて、地域の人口や土地利用の経年変化を考慮した津波防災対策効果の評価手法を開発した。モデル地

域において、住民や自治体と共に津波避難計画や津波防災地域づくり計画の作成に参画した。

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

大学は、大規模数値シミュレーションを活用し、広帯域強震動による斜面崩壊等の自然環境への影響の事前評価手法を検討した。既往崩壊地及び近傍未崩壊斜面において、物理探査、掘削試料の土質試験、掘削坑内での物理観測を実施した。地震動や火山活動などによる地滑り現象と地形・地質的要因の関連を、現地調査や室内試験、地震動観測などに基づいて明らかにし、地震動に伴う地滑り発生ポテンシャル評価と事前評価手法の高度化に関する研究を行った。

オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

大学は、桜島等を対象として、噴火に前駆する地震及び地盤変動から火砕流発生予測、ならびにその規模を事前に評価する手法を開発した。また、遠隔観測及び地上観測から火山灰堆積分布量を推定して火山泥流（土石流）発生ポテンシャルを評価する手法を構築した。

う. 成果

ア. 強震動の事前評価手法

2016年熊本地震の研究を通じた、震源・地下構造モデルの高度化と強震動特性の解析が進められた。地表地震断層が生じた、熊本地震を含む大地震の震源近くの地震動を調べたところ、周期約3秒程度が卓越する長周期速度パルス波が発生していたことを確認した。熊本平野や八代平野では、周期1秒以上の長周期帯域で振幅が顕著に増幅することがわかった。地下の震源断層モデル*と、地表で観測された地表地震断層*の情報とに基づき、複数の震源断層形状のモデルを提案した。布田川断層から離れた清正公道沿いの地表変状においてトレンチ調査を実施し、右横ずれ断層*であることを明らかにした。詳細な断層面を設定し、信頼性の高い地盤構造モデルを用いて震源インバージョンの再解析を行ったところ、布田川断層に対応する震源断層面で大きなすべりが求められたほか、浅部地表近くにもすべりが得られ、浅部と深部ですべり速度関数が異なっていた。断層浅部に観測地表変位量を与えた上で地震動を計算したところ、益城町における変位波形の再現性が向上した。このように断層浅部のすべり量や断層面形状など活断層研究から得られる情報が変位分布と速度分布の推定にとって重要であることが明らかになった。

2018年大阪府北部の地震について、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。

2018年北海道胆振東部地震の断層破壊過程を調べ、主破壊域の広がりや主破壊域中の2つの強震動生成域を特定した。震度7を記録した地点では、卓越周波数や最大加速度値が観測値を再現できず、地盤の非線形応答があった可能性が示された。

その他の地震の震源や、強震動の特性に関わる研究についても成果を得た。2004年新潟県中越地震について、P波とS波の間に周期5～10秒の大振幅かつ長時間継続するPL波が確認され、堆積平野で強く増幅されることがわかった。関東平野では、表面波の放射パターンと平野における表面波の伝播・増幅特性との相乗効果とで、長周期地震動の増幅が方位に依存することが、地震動シミュレーションから分かった。静岡県下の強震データから、地震の応力降下量*には深さ依存性があることが確認された。また南西諸島域の地震の応力降下量を調べたところ、琉球海溝から沖縄トラフにかけて低下する傾向にあり、奄美大島北東沖など特に値の高い領域が存在することが確認できた。

東京湾西岸部では、2011年東北地方太平洋沖地震時に局所的に観測された周期2～3秒の長周期地震動について、微動観測から浅部と深部地盤の影響が分離できないことがわかり、統合的な地盤モデルの必要性が明らかになった。大阪・京都堆積盆地の構造モデルについて、観測された堆積盆地地盤面からの反射波の往復走時と、堆積盆地構造モデルから予測される値との比較により、モデルの妥当性が評価された。大阪、京都、奈良堆積盆地を中心とした地域でQ値*周波数依存性のモデル化などの改良を行った。静岡県地域について強震波形データを用いた地震基盤以浅の構造モデルの検証を進め、既往の地盤構造モデルの検証を行った。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、1896年陸羽地震の震動シミュレーションに利用したところ、同地域で基盤が深いために被害域が南に延びたことが分かった。地盤増幅解析の高速化をGPUの実装により実現し、最適化過程を学習する人工知能を組み合わせることで、高速な地盤内

部構造推定手法を開発した。このほか常時微動解析により、邑知潟平野、グルノーブル盆地（フランス）、インペリアルバレーにおける盆地（米国）等の構造を明らかにした。

2011年東北地方太平洋沖地震でも観測され、地球規模で影響を与えた大振幅のラブ波*パルス（G波）の生成原因を、標準地球モデルによる理論分散曲線*と3次元差分法による地震波伝播シミュレーション結果の比較により推定した。

太平洋スラブでの深発地震に伴う強震動を評価するため、北西大西洋でのOBS観測から海洋プレート内の短波長不均質構造を推定したところ、数km程度規模の短波長不均質構造がラミナ構造を持って発達していたため、強い前方多重散乱を起こした地震波がラミナに沿って伝播し、海域で観測されるPn/Sn波は高周波数に富んだ長いコーダを持つことが推定された。

プレートの沈み込み帯で発生するプレート間巨大地震に伴う強震動の距離減衰の特徴を調べるために、過去の巨大地震の強震動を解析し、強震動生成域に対する距離減衰を予測するモデル式を作成した。過去の南海トラフ巨大地震での建物被害と現在の地震リスク評価手法により推定される建物被害を比較し、震源域から山陰地方にかけての地域の減衰特性が過大評価されていることを示した。

地震の気象庁マグニチュード（M）がモーメントマグニチュード*（Mw）より大きく、西日本ではその差が顕著であるが、西日本では、周期5～6秒の表面波が震源から遠く離れた場所でもあまり減衰しないためであることが分かった。紀伊半島南島沖で実施された構造調査測線の周囲で発生した地震のうち、DONET観測点を用いて震源の再決定を行ったところ、震源は気象庁による震源よりも全体的に浅く、特に2016年M6.5の地震はプレート境界付近に求まった。

長周期地震動と津波の即時予測に向けて、K-NET、KiK-net強震観測データの時間反転逆伝播計算（DA-TRI）による、震源モデルの即時推定手法の開発を進めた。

イ. 津波の事前評価手法

津波の波線追跡の新手法を開発し、津波第1波や反射波の波線と海底地形との関係を明らかにした。また、日本海における60断層について、断層面上のすべり分布の不均質性を考慮した7万通り以上のシナリオを想定し、日本海沿岸の約150の市町村ごとの確率論的な津波高さを計算した。津波計算手法の高速化も進めた。

巨大地震にともなう海底斜面崩壊による津波として知られている1929年Grand Banks Tsunamiについて、海底地すべりにより切断された海底ケーブルの情報を用いて津波の再現計算を行ったところ、観測波形をおおよそ再現できることを明らかにした。

ウ. 大地震による災害リスク評価手法

2016年熊本地震の益城町市街地において、詳細な地表地震断層の分布と建物被害との関係を調べたところ、地震断層から120m以内の範囲に全壊家屋の総数の94%が集中することがわかった。2018年北海道胆振東部地震や2004年米国パークフィールド地震、トルコ西部の被害地震等国内外の強震記録の分析を行い、堆積平野・堆積盆地の地震動増幅特性*を定量化した。

2003年と1952年に発生した十勝沖地震について、最新のプレート形状と地下構造モデルを使用し、近地と遠地の古い地震波形記録を精査して震源過程を解析したところ、2つの地震の破壊域の広がりには明確な違いが見られ、十勝沖のプレート境界に起こる地震シナリオにバリエーションがあることがわかった。小地震と大地震の地震観測記録から、線形応答時の地盤構造とともに大地震時の非線形応答特性*を逆推定する方法を開発した。

木造建物の被害予測モデルの検証・高精度化のため、2016年熊本地震の益城町の地盤構造を考慮して推定した強震動分布に対し適用したところ、平均的被害率を概ね再現することができた。木造構造物被害の将来時点の予測を行うために、固定資産課税台帳及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及び築年数分布を予測する方法を検討した。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分かりやすく表示するシステムを構築した。建物の強震観測記録の分析から、地盤一構造物の動的相互作用には振幅依存性があること、東北地方太平洋沖地震の本震時は建物の固有振動数が低下し、減衰が増加する傾向にあったことがわかった。

地震被害想定における不確実性の低減を目的として、鳥取県内で総合的な微動解析を通じ、山間部を含む地域で地下構造をモデル化した。また、その利活用を目指し、データベースおよびGISによる表示システムを構築した。

千島海溝周辺海溝型地震による大津波からの避難データの取得のために、群衆・高齢者装具・車いす・自力避難困難者のリヤカー運搬等、避難条件の違いによる避難速度の違いを計測した。北海道八雲町、神恵内村等において、実測に基づく津波避難シミュレーションを行い、避難困難地区を特定した。対策を自治体・地域住民と協議し、新たに避難路の整備、役場庁舎の津波避難ビル機能付加の計画につなげた。

災害リスクの評価結果には想定シナリオや地盤効果の計算手法の違いによるばらつきがある。ばらつきを含む結果を防災計画に反映させるための表示システム開発を進めた。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提案し、南海トラフの巨大地震の津波被害の確率評価に適用することでその有用性を確認した。

北海道胆振東部地震を例に、想定地震に対する既往の被害推定手法の妥当性を検討したところ、建物被害との相関関係に重点を置いた従来の人的被害評価法で、負傷率の推定に十分でない可能性があることがわかった。

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、文化遺産災害情報マップを作成した。また 2021 年福島沖の地震の推定震度分布と建物被害推定情報を重ねることで、文化遺産の被災可能性の高い場所を可視化し、情報共有を行い、被災状況調査を実施した。

エ. 地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法

過去の海溝型地震、および、2016 年熊本地震によって発生した地滑りについて、地形解析、現地調査、および室内分析により地質・地形的特徴を抽出した。南海トラフおよび相模トラフの海溝型地震による大規模崩壊は、主に太平洋側の付加体*で発生していることがわかった。熊本地震による斜面崩壊の滑り面は、約 3 万年前の草千里ヶ浜軽石や約 7300 年前の鬼界アカホヤ火山灰近傍の暗色土に多く、これらの層には、粘土鉱物の一種が生成していることがわかった。また、地震による地滑りの発生メカニズムの議論のため、地滑りブロック内での多点地震観測や高密度微動観測を実施し、斜面の震動の多様性を明らかにした。2008 年四川地震（中国）、2015 年ゴルカ地震（ネパール）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（こくちゅうこく）*に数多くの崩壊が集中したことが分かり、日本でも特に西南日本外帯には谷中谷が広く分布しているため、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滑りに対して最も危険であることが再認識された。同地震により厚真町のテフラ斜面において発生した地すべりを調査したところ、滑り面に広く見られる粘土鉱物の薄板状ハロイサイトを検出され、ハロイサイトの含有量が増えるに従い、せん断された際には流動性が増すことが明らかになった。超高密度 DEM を用いて、四国の主要国道沿いにおいて、重力変形、地すべり、過去の崩壊痕跡、急崖など、項目別に分類した危険斜面の分布を抽出した。北海道東部で多項目観測を実施している海岸地すべり土塊は、不安定化するにつれ、より弱い地震動で変位が生じることがわかった。谷埋め盛土斜面の地すべりメカニズム解明のため、地震動と間隙水圧*変動を同時観測したところ、間隙水圧が上昇するタイミングや上昇量は地震動の強さと強い相関があることが示された。

過去の火山噴火による軽石の分布域と過去の地震地すべり箇所を比較したところ、地震時地すべりの滑り面となる可能性が特に高い降下火砕物*は、9000 年よりも古い軽石及びそれに伴う火山灰土であることがわかった。

山体崩壊*による津波について、実地形に基づいて土砂の移動を計算し、その結果から津波を計算する方法を 1741 年の渡島大島及び 1792 年の雲仙眉山の事例に適用し、概ね歴史津波観測高と整合的な計算結果を得た。

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。

GB-SAR（地表設置型合成開口レーダ）の大気補正手法を開発し、mm オーダーの変化を捕捉できるようになった。また GB-SAR による荒砥沢の地滑りモニタリングを、栗原市が運営する栗駒山麓ジオパークビジターセンターにリアルタイムで表示することとなった。地震前後の 1 m-LiDAR DEM を用いて特徴的な地物の移動方向と変位の大きさを得る手法を開発することにより、地震断層の地表変位や地すべり性の移動土塊の検出が可能となった。

テフラの給源火山の噴火史に基づき山地の斜面におけるテフラの供給と再堆積のシミュレーションを行うプログラムを開発し、胆振東部地震発災地で実際のテフラ堆積量を測定してモデルの

精度を検証した。また、地層中の不均質な風化過程および物性変化の定量的モデルを得るため、テフラ累層中での長期間にわたる間隙水の不均質な透過とそれに伴う風化変質を調べたほか、粘土鉱物に吸着蓄積する大気由来の宇宙線生成核種 ^{10}Be を分析し、テフラの強度低下をもたらす粘土化の進行過程を調べた。

オ. 火山噴出物による災害誘因の事前評価手法

火山噴火による火山灰や溶岩噴出の事前評価に関して、2015年5月29日の口永良部噴火において、衛星観測による火山灰分布計測値に合うように全球移流拡散モデル*の初期値を調整することで、精度の高い大気中の火山灰濃度予測シミュレーションを行える可能性が示された。大規模噴火を想定した降灰シミュレーションにより、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。

桜島火山の黒神地区において船舶用小型レーダーを用いた観測を開始し、2019年11月8日の火砕流*噴煙の流下パターンや堆積量を明瞭に捉えることに成功した。桜島火山では、火砕流をともなう噴火47例中27例で顕著な前震活動を伴うこと、噴火前の膨張レートが減少もしくは停止する際に前震活動が多く発生すること、また火砕流を伴う噴火は噴火後の収縮量が大きいことなどが明らかになった。

え. 今後の展望

様々な被害地震の強震動の観測事例や地震波伝播シミュレーションから広帯域強震動の特徴が詳細に調べられ、同時に三次元地盤構造モデルの高度化や検証が進められてきた。一方で、地震動再現性に乏しい地域や、山間部を含め地下構造情報の少ない地域も残されており、微動・地震観測や歴史地震の被害分布などを活用した構造調査の継続、および更に震源近傍強震動特性を考慮していく必要がある。精度の高い強震動評価手法が確立され、地震本部においてシナリオ地震による地震動予測に活用されることが期待される。

津波の事前評価手法については、多様な大規模津波シミュレーションを通じて確率論的な津波予測やリスク評価法を確立していく必要がある。また、海底地滑りと関連して、南海トラフ沿いや日本海溝・千島海溝沿いの地すべり地形に対し、津波災害ポテンシャルを評価していく必要がある。

大地震による災害リスク評価手法では、建物被害や人口被害の脆弱性評価の研究を推進するほか、首都直下地震や南海トラフ巨大地震を対象に、地震災害発生機構の解明から災害を制御する要件を明らかにしていく必要がある。また社会実装を見据えて地震発生時の切迫性を伝える災害情報モデルとシナリオの構築が益々重要となってくる。

地震動や火山活動による斜面崩壊の事前評価手法においては、南海トラフ巨大地震により誘発される地すべりのポテンシャルを評価、地表面変位の計測手法の高度化、また火山地域において地震動によって崩壊しうる斜面の特定が必要である。

火山噴出物による災害誘因の事前評価手法では、桜島の流域ごとに、先行地盤膨張量と火砕流堆積量、流下距離の関係を示した火砕流ハザードマップの作成が必要である。

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

あ. 目的

大地震によって引き起こされる強震動・津波・長周期地震動などを、地震・測地・津波等の陸域及び海域における単独もしくは複数の観測量に基づいて、即時的かつ高精度に推定する手法を開発する。さらに、地震・火山噴火による斜面崩壊や山体崩壊による津波の即時予測手法の開発に向けた研究に着手する。また、火山の遠隔観測及び地上観測により、火山灰・火砕流・溶岩流・火山泥流・土石流を即時的に予測する技術を開発する。

い. 実施状況

ア. 地震動の即時予測手法

気象庁および大学は、地震計で観測された揺れの強さから直接震度を予測する手法の開発および改良を行った。また、長周期地震動予測の予測精度向上に努めた。

大学は、高密度地震観測データと波動伝播シミュレーションのデータ同化に基づいた地震動予測手法の開発および波動逆伝搬シミュレーションによる震源要素の即時推定手法の開発を行った。

イ. 津波の即時予測手法

大学は、高密度観測網による海底圧力計の観測波形などを活用して津波発生域を即時推定する手法の開発を行った。

国土地理院は、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。

大学は、震源断層の即時推定に関して、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開発をすすめるとともに、リアルタイムに推定される断層すべりの不確実性を定量評価するための手法開発を行い、一枚矩形断層におけるMCMCを用いたアルゴリズムの開発を行った。

気象庁は、沖合で観測された津波波形の逆解析に基づく津波の即時予測手法システムの開発を行った。

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

大学は、XバンドMPレーダーおよびGNSSの搬送位相遅延量・SNRによる噴煙の即時把握手法を開発した。

大学は、噴出物時系列解析・分析手法の高度化を行った。

大学は、火山灰堆積後の土石流発生の予測モデルの構築を行った。

気象庁は、気象レーダー等の観測データを用いて、噴火現象の検知や噴煙に含まれる火山灰等を定量的に推定する手法を開発した。

う. 成果

ア. 地震動の即時予測手法

データ同化手法によって揺れの分布の現状を正確に把握し、その実況分布から波動伝播の物理に則って未来の波動場を予測する手法の高度化を進めており、その基本的な考え方を取り入れた手法(PLUM法)が平成30年3月に気象庁の緊急地震速報に導入された。さらに、不均質散乱・減衰構造を取り入れることで、その精度、堅牢性や迅速性を向上させられることが分かった。また、PLUM法のさらなる高度化のため、P波の検出手法を改良し、その上下動成分のみから後続のS波による震度を予測する手法を開発するとともに、地震動の距離減衰を考慮した遠隔観測点のデータの利用により、予測の迅速化ができることを確かめた。

自治体の計測震度計に1秒パケットのリアルタイム震度と最大加速度値を配信する改良をおこない、そのデータを受信するシステムを構築した。また、取得したデータを基に、PLUM法を基礎としたリアルタイム震度の表示システムを試作し、有用性を確認した。

3次元差分法によるK-NET, KiK-net 強震波形記録と地震波伝播シミュレーションとデータ同化した波動場を初期値として、高速計算から未来の時刻の長周期地震動を予測する手法開発を進めた。さらに、大地震の震源即時推定に向け、強震観測データと地震波逆伝播シミュレーションのデータ同化に基づく震源イメージングを試行した結果、2004年新潟県中越地震と2008年茨城県沖地震について、発震時に震源近傍に初期波動場が良好に再構築されることを確認した。

イ. 津波の即時予測

震源直上の海底圧力波形を用いた新しいデータ同化手法を開発し、30秒間隔で観測が実施された場合、地震の情報が無くても、数分でデータ同化により津波波動場を予測できることを示した。また、リアルタイム浸水予測手法を組み合わせ、2011年東北地方太平洋沖地震津波に適応し、浸水予測まで高精度で10分以内に予測できる手法の開発を行った。さらに、津波数値計算など、複雑な計算を実施することなく、観測圧力波形(500秒以内)の処理のみで津波波源域(隆起域)とそれを発生させた地震の規模を推定する手法を開発した。その手法を1952年十勝沖地震と1968年十勝沖地震のすべり量分布から発生する津波に適応し、有効性を確認した。

実用的かつ現実の不均質構造を組み込んだ地震にともなう全波動現象を実現するため、オープンソースの地震動シミュレーションコードOpenSWPCと津波シミュレーションコードJAGURSを利用した実装を行い、既存手法との比較を行った。

相対測位によるGEONETリアルタイム解析から得られ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すべり分布を即時推定する技術の開発を行い、電子基準点リアルタイム解析システムに実装した(REGARDシステム)。また、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マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)で行うための技術開発を実施した。開発したアルゴリズムの国土地理院のREGARDシステム

への技術移転を進め、リアルタイム GNSS データから推定された変位場との組み合わせによる動作試験を開始し、実データでの動作を確認した。さらに、搬送波位相変化から断層すべりを直接推定する手法 (Phase To Slip, 以下 PTS) の性能評価を目的とし、2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw 9.0) とそれに引き続く地震直後の余効すべりの時空間発展推定を行った。その結果、PTS によって地震時からそれに引き続く初期余効すべりを連続的に捉えることに成功した。

沖合で観測された津波波形の逆解析に基づく津波の即時予測手法システムについて、リアルタイム GNSS 測地データ解析によって推定される震源断層解との統合、波源の広がり小さな津波に対応するための段階的処理手法の導入等、手法の改良を行ったことに加え、観測データに含まれる非津波成分への対処や予測結果の妥当性評価の指標の開発等を行って実用性を高めた。気象庁では、この開発したシステムを平成 31 年 (2019 年) 3 月 26 日から、津波警報を更新する新たな手法として運用を開始した。

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

X バンド MP レーダーによって、霧島新燃岳、桜島、口永良部島、諏訪之瀬島の噴火に伴う噴煙の高度等の外形情報、噴煙柱形成、移流・拡散過程が把握できた。特に、冠雲によって噴煙が目視できない時でも、レーダーにより噴煙を可視化できるので、気象条件がよくない時にその有効性が示された。火山噴火の噴煙により、GNSS による搬送位相遅延量と SNR に顕著な変化があることが桜島、阿蘇山の噴火で示され、衛星-受信機を結ぶ異常伝搬経路の交線から噴煙高度を推定できた。

堆積物解析手法の高度化について、噴出物の迅速なマッピング、噴出量・噴出率の高精度推定を目指した研究を、噴出物時系列解析・分析手法の高度化については、化学組成、組織、色等の情報取得とその活用を目指した研究を複数の火山で実施した。迅速な現象把握及び調査の実践の一環として、西之島において 2020 年噴火の噴出物の全岩化学組成、斑晶鉱物化学組成、メルト包有物化学組成の分析を行い、これまでの安山岩の活動から玄武岩質安山岩の活動に変化したことやマグマ供給系の描像を明らかにした。

火山灰堆積後の土石流発生の予測モデル構築のため、降灰によるクラストが斜面表面を覆った条件に対する降雨流出・土砂流出に関する室内実験を行い、この流出過程に及ぼすクラストの影響について検討した。クラストの存在で浸透過程が異なるため、クラストの存在が表面流量を増加させることが分かった。また、斜面の侵食強度の弱い個所、または降雨強度が大きい個所で侵食が始まり、そこから侵食が発達することが分かった。これに関する数値シミュレーションもを行い、流路の形成、侵食過程などがある程度再現できた。

複数の気象レーダーにより、火山の監視カメラでは不明な場合でも、噴煙高度を確率的に推定することができた (例えば、草津白根山 (本白根山) の噴火事例)。また全球と領域の移流拡散モデルを統一して、即時予測に適した新しい気象庁移流拡散モデル (JMA-ATM) を開発した。JMA-ATM と結合した火山灰データ同化・予測システムで作成した初期値を用いることで、火山灰雲の中心位置・面積の予測が改善することを確認した。

え. 今後の展望

それぞれの研究課題において既往研究の高度化や新たな取り組みに関して成果が着実に得られつつある。特に、近年の計算機能力の向上もあり、地震・火山ともに観測データによる実況把握とシミュレーションを組み合わせたデータ同化手法が精力的に開発され、より精度の高い予測が可能となってきたことが特筆される。また、本計画により開発された即時予測手法が一部すでに社会実装され、減災に貢献していることは評価できる。

今後は課題間の連携や、拠点間連携共同研究との連携等を一層進展させつつ、一層の手法の高度化につとめるとともに、必要に応じて現業機関等と連携しつつ社会実装を進めていく。

(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

あ. 目的

大地震や火山噴火の予測結果は確率で表されるが、往々にして誤差が大きく数値自体が小さいためにリスクが小さいという印象を与えがちである。また、大地震に先行する地殻活動の発現など、大地震の発生可能性が相対的に高まっていることを示す情報が得られたとしても、災害発生の切迫性を社会に的確に伝える方法はいまだ確立していない。一方、噴火の危険性が十分に理解されないまま火口や噴気地帯に観光客が近付くことにより、小規模な噴火が大きな被害に繋がり

かねない観光地も少なくない。本質的に不確実性を含む災害誘因予測が、気象庁の防災情報等として適切に伝えられることで少しでも災害の軽減に生かされるよう、受け手側に配慮した地震・火山噴火情報のあり方を検討すると共に、防災担当者による火山噴火情報の活用を支援する方法に関する研究も進める。

い. 実施状況

大学は、地震・火山噴火の予測情報に対する、住民・企業・地方公共団体などのユーザのニーズや活用実態の調査を通じて、被害軽減に繋がる地震・火山噴火情報のあり方に関する研究を行った。

大学は、火山噴火活動について、火山噴火が切迫した段階や噴火中に刻々と変化する状況を把握するための地震波形・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を試作し、そこから得られる情報を準リアルタイム火山情報表示システムに組み込むための開発研究を行った。また、これらの情報を、地元の自治体や防災担当者が活用するための方策を検討した。2018年1月の草津白根火山の噴火事例において、噴火に関する情報の内容、伝達、理解に関する課題を分析するため、噴火から約2年後、草津白根山近傍の草津温泉スキー場の利用者を対象としたアンケート調査を実施した。

う. 成果

南海トラフ沿いの巨大地震について起こりうる現象の発生確率の時間変化の表現方法について検討し、系統樹よりも表形式のほうが適していることから、表形式による基本スキームを構築した。基本スキームに基づき、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について、最近100年間のグローバルな地震カタログを用いて信頼区間も含めて計算し、地震発生様式の固有性を融合させるために確率の絶対値は南海トラフの発生履歴と整合的になるよう上方補正することとした。

地震・火山災害情報の活用のための住民の知識体系に関する調査からは、地震動予測地図に示される地震の発生確率について、情報の受け手の属性（年代や居住地）を考慮した表現を用いることで、より効果的に意識を高められる可能性があると考えられることが分かった。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が地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化、災害情報が災害軽減に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。

建物内の居住者に揺れ継続時間の情報を提供するための推定式を構築するために、既往の提案式で用いられている95%のエネルギー継続時間ではなく、震度 x 以上の継続時間、という閾値を定義に利用し、建物頂部で観測された揺れ継続時間を予測する経験式を作成した。建物頂部の揺れ継続時間予測式は、建物階数を考慮した方が相関は良くなるが、単純な経験式では建物の個性を十分には表現しきれず、統一的な経験式の限界も明らかとなった。

防災計画を策定する際に、災害リスク評価にばらつきが存在することを踏まえ、災害リスク評価のばらつきを理解した上で、計画の目的に応じて適切な災害リスク評価結果を選択することが重要となるため、シナリオ・手法の組み合わせにより変化する災害シナリオ評価結果を適切に理解することが可能なシステムを構築した。

人的被害情報の切迫性を適切に伝えることをめざし、2018年北海道胆振東部地震による人的被害を調査し、地域ごと・世帯ごとに異なる被害シナリオを明らかにすべく現地調査を実施した。既往の想定地震ハザードに基づく被害評価と比較したところ、木造住家の被害評価において住家の地域特性に配慮する重要性が確認された。人的被害については、救急病院搬送を必要とする重篤者数を考慮した推計値など各種方法による推計値を比較した結果、従来の建物被害との相関関係に重点を置いた評価法では対策に十分な情報並びに精度が保証できないことを示された。

火山情報の表示システムの開発においては、新たな地殻変動源自動推定ツール・振幅震源自動推定ツールの設計・開発を進め、前計画で設置したシステムの入替を北海道・東北で進めるとともに、九州地方への展開を行った。

草津白根火山噴火事例に関する調査からは、2018年1月の噴火を「はっきりおぼえている」グループとそうではないグループでは、前者のほうが理解度や知識量が顕著に高いことが明らかになり、利用者の理解度や知識量の違いを意識した情報伝達を検討すべきであると考えられた。

え. 今後の展望

災害誘因予測のばらつきの求め方や表現方法についての検討や得られた情報の発信方法とその受け止められ方など、災害誘因予測結果を災害情報につなげるための研究が実施され、その成果が少しずつ得られて来ている。本節の研究課題は相互に関連が強い内容であるため、定期的な情報交換を実施することが有効と考えられる。また、他節の研究課題と対象が同じものがあるため、それらの研究課題とも協働して研究を実施することにより、より有用な研究となることが期待される。

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

あ. 目的

史料・考古データ、地質データ等に基づく先史時代から現代に至るまでの災害事例のデータベースを活用するとともに、近年発生した地震・津波・火山災害の事例検証を通して、地震動・津波・火山噴出物などの災害誘因が、居住地の空間構造、コミュニティ構造、社会的脆弱性などの社会素因とどのように関連し被害をもたらすのか、その発生過程の解明に向けた文理融合による研究を行う。また、過去に起きた地震・津波・火山災害事例を対象に、災害からの復旧・復興過程に関して社会の回復力に焦点を当てた研究を進める。さらに、地震・火山研究で得られた知見の社会への発信に関しては、地域の行政機関やステークホルダーと連携する。

い. 実施状況

大学は、過去に起きた地震・津波・火山災害事例を対象に、当時の社会情勢や周辺環境との関係を検討して被害の実態や人々の対応、復旧・復興過程を明らかにし、時代的・地域的な特性を導き出した。また、明治時代や江戸時代の史料をもとに古地形等を復元・可視化し、地形と災害被害の関連性を明らかにした。加えて、歴史的な地形変遷から将来の災害を予測し、災害予防と防災意識の啓発等への活用を図った。

また、大学は、近年の地震災害に注目して、被害の地理的・社会的分布の分析と、コミュニティの社会的脆弱性や防災対策、リスク認知や防災意識などの検討を通して、地域的な災害発生機構を解明した。また、災害発生機構と防災リテラシーとの関連性を調査し、防災リテラシーを向上させるための方策を提案した。一方、火山地域における災害軽減策に寄与するため、地域の行政機関やステークホルダーと連携して地震・火山研究の知見を整理し、社会へ適切に発信する手法について検討した。

気象庁は、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で、地域の特性や災害リスクの認知、防災リテラシーの向上を図った。

う. 成果

過去におきた地震・津波・火山災害事例の中でも、安政江戸地震（1855年）に関する重要な史料として「江戸大地震之図」（東京大学史料編纂所蔵）や「安政大地震絵巻」（三康図書館蔵）を取り上げ、復旧・復興過程における政治的勢力関係の関与などの時代的・地域的特性を描き出すことができた。さらに、地震の揺れに関する検討材料になりうる記述があることなど、絵巻の史料としての信頼性や可能性についても明らかにした。

明治時代や江戸時代の史料について、災害誘因としての場所限定性が強い津波を題材として安政東海地震津波（1858年）の被災地である浜名湖周辺、特に、浜名湖南東岸と北東岸について、現存する寺社や歴史的建造物などの位置をもとに地理的位置の同定を行い、それぞれ「舞坂宿津波図」と「安政地震津波被害絵図」から街並みや古地形を復元することに成功した。また、「歴史的な地形変遷から将来の災害を予見できるこれらのデータの一般公開活動を通じて、災害予防と防災意識の啓発を行った。

近年の震災後における避難・土地利用・防災施設を組み合わせた総合的防災政策の政策効果を検証するため、2011年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）を事例に、被災から復興に至る地域社会の長期的な変化について分析した結果、三陸地域では、漁村の災害文化に対する過小評価と防災施設への依存、防潮堤計画と地域防災計画の分離、防災集団移転事業における避難道計画

の不備といった事柄が復興を遅らせる主な要因となったことを明らかにすることができた。また仙台平野では、基幹産業である農業生産と防災集団移転中心の土地利用規制とのミスマッチ、長期にわたる広域的な交通障害による人口流出などによって生活基盤の脆弱化が進んでいることを明らかにした。また、南海トラフ地震の発生が想定される和歌山県那智勝浦町における土地利用計画と防災政策とのバランスを明らかにするため、事前復興と津波対策の取り組みについて調査し、想定される被害の大きさと防災対策との差異によって災害発生が拡大する可能性について検討し、防災リテラシーの向上の方策について提案した。また、富山県を事例に国勢調査の「世帯構造等基本集計」を調べた結果、全国に比して、借家に対して持ち家の、また非木造に対して木造の比率が圧倒的に高いことがわかった。住民の防災リテラシー向上対策には、その地域の住宅事情を加味する必要性を指摘した。

火山地域における災害軽減策に寄与するため、現在活動中の火山のうち人口 50 万以上の大都市に最も近接する火山である桜島を対象として、科学者と地域の行政機関やステークホルダーとの共同によって観測から防災に至る一連の対応システムの構築を行っている。2020 年 6 月 4 日の噴石が居住地域まで達した噴火を受け、鹿児島市や気象庁と連携して火山防災勉強会を開催し、噴石飛散や噴火警戒レベルなどについて住民の認知度を調査した。噴石の飛散距離によって噴火警戒レベルが上がる点など桜島火山の噴火警戒レベルの認知度は高いものの、レベル判定の基準となる噴石の飛散距離はほとんど知られていないことがわかった。被害に直結する具体的な数値について認知度を上げる必要があり、防災リテラシー向上方策として社会への適切な情報発信手法について整備を進めている。また、近年大規模な地震や火山噴火が発生した熊本県阿蘇地域では、研究者と国・地域の行政機関、ステークホルダーが連携して、地震・火山観測の準リアルタイムデータを表示するシステムを阿蘇火山博物館に設置するとともに、ジオパークガイドの養成を通して防災リテラシーの向上を図る方策を展開した。阿蘇火山博物館を訪れる修学旅行生の防災リテラシー向上のための教育プログラム作成手法の開発をはじめた。また、都道府県自治体職員の防災リテラシー向上をめざした「高リスク・小規模噴火との共存」の教育プログラムを整備した。さらに、2014 年に深刻な御嶽山噴火災害をうけた長野県木曾地域は、大学と地域の行政機関が共同して、地元地域住民の防災リテラシー向上を図るための担い手である火山マイスター制度の整備について検討をしている。

気象庁では、関係機関と連携し、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ながら、地域の特性や災害リスクの認知状況などに応じ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などの防災リテラシーについての普及啓発に継続的に取り組んだ。特に、地方自治体等と連携した防災訓練への助言・協力や HP 等での相互協力、教育機関と連携した学校防災教育へ助言・協力、防災関係機関、民間団体等と連携した出前講座・防災講演会等の実施、関係機関と連携した合同登山・学習登山の実施、報道機関と連携した防災番組への協力などを実施した。

え. 今後の展望

地震・火山噴火の災害事例をもとに、地震動・津波・火山噴出物などの災害誘因が、居住地の空間構造、コミュニティ構造、社会的脆弱性などの社会素因とどのように関連し被害をもたらすのか、という災害発生機構の解明に向けた研究成果は着実に得られている。特に、過去の災害事例の分析を通じて災害誘因・災害素因の関連による災害発生機構を解明したことや、地域の行政機関やステークホルダーとの連携のもとに防災リテラシー向上を目指した方策・教育プログラムの開発・実装を進めていることは大きく評価できる。

今後は、課題間の連携、特に文理融合研究など異分野間の連携促進を一層図りながら、様々な災害事例の詳細な分析と、災害誘因・災害素因の一般化の検討を進め、災害発生機構の解明を進めていく。また、得られた知見を社会へ発信するために、地域の行政機関やステークホルダーとの連携を一層深めながら、防災リテラシー向上のための具体的な方策・教育プログラム開発に取り組む。

(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

あ. 目的

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を明らかにすることを目的として、活動的な火山や想定巨大地震などを対象に社会

の防災リテラシーの実態やニーズ調査を実施する。知識体系を明らかにする過程で、実効性のある防災対策に必要な知識要素を特定する。さらに、それらの知識要素を組み合わせることで構築した実践的な防災リテラシーの研修プログラムを、特定の地域において開発し、その効果を検証することで実効性を高める。また、マイクロジオデータやオープンサイエンスの手法を活用することで、社会の共通理解の醸成と防災リテラシーの向上を図る。

い. 実施状況

大学及び防災科学技術研究所は、活動的な火山や想定される巨大地震に着目し、住民や行政に対し防災リテラシーの実態やニーズの調査を実施した。自然災害の事例を表した地図やモニタリング情報等を積極的に活用しながら、実効性のある防災対策に必要な知識体系を構成する要素を特定した。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開発し、その効果を検証した。

また大学は、地理空間情報、GIS、衛星測位データを統合して時空間データベースを構築し、避難行動に関するマイクロジオデータ等を収集して、防災・減災に関して社会的有効性の高い統合的な情報活用法を開発した。さらに、一般市民と研究者とが共同して観測研究や災害軽減の取り組みを進める「オープンサイエンス」の手法により、防災リテラシーの向上に向けた研究を進めた。

う. 成果

1995年兵庫県南部地震の被災地である兵庫県を対象に、住民や行政に対する防災リテラシーの実態やニーズについて調査した。その結果、阪神・淡路大震災は学校における防災教育が本格的に導入されるきっかけとなっており、地震発生のメカニズムや被害が兵庫県内の副読本すべてに掲載されていることがわかった。その一方、震災を経験した教員の高齢化により、被災経験を主題とした授業の実施機会が減少し、対照的に南海トラフ地震を主題とした教材利用が増えていることが明らかになった。1925年北但大震災の事例は、主な被災地であった豊岡市城崎町の学校教育において現在も継続して活用されており、その要因として災害記憶の継承に対しコミュニティが重要な役割を果たしていたことが明らかになった。また、南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域在住の住民が、避難するか否かを判断する上で参考にする情報・知識について認知科学のアプローチから調べた。それらの情報・知識は、津波の特性や被害の予測、避難所の利用可能性や避難生活の見通し、居住地の位置や海拔、自治体やマスメディアなどの情報源といったカテゴリーに整理できるが、メディア情報に関しては、災害情報が被害の発生抑止・軽減に寄与する過程に発信者・発信ツール・発信内容の3者がどのように関与するのかを推定することができた。

また、自然災害の事例を表した地図やモニタリング情報等を積極的に活用することも行われた。地震本部による地震活動モデル及び地震ハザード情報に基づき、全国を対象とした建物リスク評価、人的リスク評価を実施した。リスク評価結果の公開に向けて、公開内容等について学識者・民間企業の有識者から意見聴取し、全国概観版地震リスク評価公開システム（J-SHIS Map R）を公開した。また、建物特性に応じた地震リスク評価のための被害関数の開発を行うとともに、認識論的な不確実性を考慮した断層モデルについて検討し、ロジックツリーを試作し一部地域で地震リスクの試算を実施した。

防災リテラシー向上のための研修プログラムの開発については地震・火山研究者が「理解してほしいこと」に基づく座学部分の研修プログラムを、実務者（行政担当）を対象に、試行的に作成した。災害対応・防災対策に役立てるために、観測研究の成果を直接的に発信するだけでなく、各行政機関の業務をシミュレーションするなどして、成果を業務に活用してもらえるような方法も検討した。

避難行動に関するマイクロジオデータについて、避難訓練可視化システムを開発し、集団避難実験における運用を通して、システムの効果及び課題を検証した。具体例として、北海道稚内市を事例に避難移動履歴データを用いて、地震による津波と土砂災害との複合災害を想定した集団避難行動の時空間分析を行った。その結果、津波のみの場合には避難時間に猶予が見られるが、複合災害の場合には時間的な猶予がほとんどなく、マルチハザードが起きることを想定して迅速に避難を開始することの必要性が明らかになった。また、参加者に避難実験の結果をフィードバックした結果、特に避難行動速度と事前防災学習に関して参加者の意識に変化が見られ、津波からの避難に関して、防災リテラシー向上を検討する際の知識要素・学習目標を明らかにすること

ができた。

オープンサイエンス手法（市民参画型科学，市民参画型データ収集・管理手法）を，サイエンスミュージアム「阿武山地震観測所」の運営，地震・津波避難訓練支援ツール「逃げトレ」を用いた地震・津波訓練，自然災害に関する歴史資料の「みんなで翻刻」プロジェクト，内陸地震観測「満点計画・0.1満点計画」の4つの取り組みに導入し，防災リテラシーの向上に対する可能性を検討した。コロナ禍において，研究者と市民，また市民同士の対面コミュニケーションに制限がある一方で，オンラインツールを用いた手法の有用性を提示することができた。

え. 今後の展望

防災リテラシーの実態やニーズ調査から，地震・火山災害などにおける様々な場面で必要な知識要素や，効果的な防災リテラシー向上手法が明らかになってきている。また，すでに一部の課題で，特に地震・津波の避難行動・避難訓練については，防災リテラシー向上のための教育・訓練プログラムが試行的・仮説的に開発・検証されていることは大きく評価できる。

今後は，各課題で解明された知識要素や開発された教育・訓練プログラムなどの連携・統合を図りながら，防災リテラシー向上のための知識体系と向上手法の検討を一層進めていく。実践的な防災リテラシーの研修プログラムを開発し，特定の地域でその効果検証を進めることで研修プログラムの実効性を高めることも必要である。またその過程では，マイクロジオデータやオープンサイエンスの手法も活用することで，社会における地震・火山現象への共通理解の醸成と防災リテラシーの向上を実現する。

5. 研究を推進するための体制の整備

目的

観測研究の成果を災害軽減に効果的に活かすため，関連する諸機関との強い連携の下に適切に研究を実施する体制を整備する。計画を災害科学の一部として推進することによって災害軽減という大きな目標を達成するため，研究項目間の連携を強化し，分野を横断する総合的な研究を実施する。地震・火山現象を解明して予測につなげるために長期的視点に立った継続的な観測，観測対象を広げるための技術開発，得られたデータを蓄積し将来にわたって活用するためのデータベース構築を行う。災害科学は総合科学であるので，理学，工学，人文・社会科学，歴史学，考古学，数理科学，情報科学等との連携を強化し学際的に研究を進める。地震・火山噴火災害は地球規模の課題であるので，国際的な視点に立って研究を実施する。研究成果を効果的に災害軽減に活かすため，情報の受け手である社会における地震・火山災害の共通理解の醸成にも取り組む。さらに，幅広い分野において，地震・火山災害の軽減を志す若手研究者や技術者を育成し，社会の様々な関連分野に地震・火山の専門教育を受けた人材の供給に努める。

(1) 推進体制の整備

実施状況

本計画は，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・社会科学などの分野を含んだ，総合的な学際研究として推進している。地震本部や行政機関等と連携し，課題の抽出や研究成果についての情報交換を行い，基礎研究の成果を発展させた応用研究・開発研究の可能性や成果の社会実装について検討しつつ実施している。観測研究体制の強化と研究の加速のために，平成31年度から新たに東北大学災害科学国際研究所，東京大学情報学環防災情報センター，東京大学地震火山史料連携研究機構，千葉大学理学研究院，富山大学都市デザイン学部，神戸大学海洋底探査センター，兵庫県立大学減災復興政策研究科が本計画に参画している。

測地学分科会は行政や社会のニーズを踏まえた計画の推進に努め，学術的な研究の動向にも配慮しつつ，各年次の全体計画の立案，進捗の把握，取りまとめを行い，各年度の観測研究の成果を年次報告「成果の概要」として公表している。また，計画進捗，成果について地震本部と情報交換し，地震本部による地震調査研究の基本施策との整合性を確認するとともに，行政機関や地震本部等の関係機関との技術的・制度的な連携を進め，本計画による研究成果や観測・解析技術が災害軽減に貢献できるよう，災害・防災対策に係る行政や社会のニーズを踏まえ，計画を推進している。

地震・火山噴火予知研究協議会（予知協議会）は，観測研究計画に参加するすべての機関から

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。予知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。また、企画部は大地震や火山噴火発生時に、臨時観測を含む緊急の研究計画の立案を行っている。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。予知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。また、部会間の連携を図るために、戦略室は複数部会合同の研究集会等を企画している。年度末には予知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、情報交換を行っている。令和2年度は、新型コロナウイルス感染症の観測研究計画への影響を調査し、計画の変更等の適切な対応を行った。

予知協議会はさらに、災害科学として重要であり分野横断で行うべき総合的研究5つと将来の社会実装を目指して重点的に取り組む研究3つを設定し、研究の進捗をサポートしている。総合的研究については次節で詳しく述べる。重点的に取り組む研究のうち「地震発生の新たな長期予測」に関しては、地震本部が「当面10年間に取り組むべき地震調査研究」のひとつとしている「内陸で発生する地震の長期予測手法の高度化」とも関連する研究項目であるため、地震本部との技術的・制度的な連携強化の一貫として、ワークショップを2020年12月に開催した。予知協議会から新たな長期予測手法の提案をするとともに、現状と問題意識の共有及び新たな手法について地震本部関係者と意見交換を行った。特に、内陸で発生する地震の長期予測手法についてはワーキンググループを設置し、将来の地震本部における実装を目指した具体的な手法についての検討を進めている。

地震学・火山学の研究成果を災害軽減につなげる目的で、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科学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は拠点間連携共同研究を実施している。地震研究所と防災研究所が共同で設置した拠点間連携共同研究委員会において、重点推進研究のテーマを設定するとともに一般課題研究の審査を行い、観測研究計画の方針に沿った研究を推進している。

国土院が事務局を担当する地震予知連絡会は、モニタリング手法の高度化に資する役割を担うため、年4回定期的に会議を開催し、地震活動・地殻変動などに関するモニタリング結果の情報交換を行い、関係各機関の情報の共有を行っている。また、注目すべき地震や地震予知研究における重要な問題などを「重点検討課題」として集中的な検討を行っている。重点検討課題の一つとして、地震活動の予測手法の現状について議論を行った。

気象庁が事務局を担当する火山噴火予知連絡会は、定例会において全国の火山活動の総合的な評価を実施した。また、平成29年10月以降の霧島山（新燃岳）の噴火、平成30年1月23日の草津白根山（元白根山）の噴火について、火山噴火予知連絡会（拡大幹事会）を開催し、詳細な活動評価を行い、検討結果をとりまとめた。定例会及び拡大幹事会の検討結果は、報道発表し、気象庁の「火山の状況に関する解説情報」で発表するとともに、気象庁ホームページでも公表した。さらに、各地の火山防災協議会にも提供して防災・減災活動を支援している。

火山研究における連携強化の取り組みのひとつとして、大学が中心となり、噴火時の噴出物モニタリングや噴出量の迅速解析における課題について関係機関の間で問題意識を共有し、効率的かつ機動的な噴出物調査方法の開発と噴火対応時における実践、噴火事象の分岐判断への活用について議論を行うとともに、データ共有の枠組みの整備について検討している。近年の噴火（2017年および2018年霧島新燃岳、2018年草津白根山、2018年霧島硫黄山、2019年浅間山）においては、噴火直後の噴出物調査を関係機関の間で連携をとりながら実施し、迅速な噴出量の推定や火山灰構成物の解析に基づく噴火様式や推移の推定に貢献した。このうち2018年の新燃岳噴火と草津白根山噴火では合同降灰調査班を構成し、噴火時に役割分担を明確にしながら調査を実施した。また、降灰調査と噴火物理パラメータの推定をスムーズに行うために、防災科学技術研究所が運用するJVND（Japan Volcanological Data Network）に基づくデータ共有の枠組みについて検討し、噴火対応への活用方法について議論を続けている。

今後の展望

災害軽減に着実につながる研究成果を得るためには、地震・火山災害軽減のための課題を整理した上で、研究成果が災害軽減につながるまでの道筋を明確に意識して研究を進める必要がある。そのためには、地震・火山災害軽減のための課題に直面している地震本部や行政機関等と連携し、課題の抽出や研究成果についての情報交換を行い、基礎研究の成果を発展させた応用研究・開発

研究の可能性や成果の社会実装について引き続き検討すべきである。地震本部は、将来を展望した新たな地震調査研究の方針を示す「地震調査研究の推進について 一地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な 施策(第3期)一」を策定し、その中で当面 10 年間に取り組むべき地震研究調査研究を定めている。観測研究計画から得られる基礎研究の成果は、それらの調査研究の進展に貢献することが期待される。

重点的研究に関しては、特定分野の研究を推進する仕組みとして十分機能していることから、この仕組みのさらなる有効活用を検討すべきである。

地震・火山噴火予知研究協議会は、計画参加機関が連携して効率的に計画を推進するために適切に機能している。企画部戦略室を中心に、分野間連携のための企画なども行い、少しずつ成果が出てきている。また、大地震・火山噴火発生時の緊急の研究計画の策定は、予算面の対応も含め、企画部を中心に迅速に行われている。今後も、関係機関との連携をさらに緊密にして観測研究計画を協議し、計画の有効な推進を図ることが重要である。

東京大学地震研究所と京都大学防災研究所の拠点間連携研究は、拠点間連携共同研究委員会で決定された方針に従い、効率的に実施されている。地震発生・火山噴火が災害誘因となる事象に関して共同研究を推進し、複合学術領域としての地震・火山噴火に関する災害科学の発展のために、拠点間連携を継続する必要がある。

地震予知連絡会は、地震活動・地殻変動などに関するモニタリング結果や地震の予知・予測のための研究成果などに関する情報交換を行うことにより、モニタリング手法の高度化に資する役割を引き続き担うことが重要である。

火山噴火予知連絡会は、火山活動の総合評価や、噴火警報・火山情報の質の向上に向けた技術的検討を通じて火山防災に資するとともに、研究成果・観測結果の情報交換、火山観測データの流通・共有の促進、活発化した火山における臨時観測に関する総合的な調整、研究成果の社会への発信などを通じて、火山噴火予知研究の推進に引き続き寄与していく必要がある。

(2) 分野横断で取り組む総合的研究を推進する体制

地震・火山噴火のうち、災害科学として重要な、南海トラフ沿いの巨大地震、首都直下地震、千島海溝沿いの巨大地震、桜島大規模火山噴火、高リスク小規模火山噴火の5つの対象について、分野横断で研究を実施するべく、それぞれ総合研究グループを設置し、関連する課題間の連携協力体制を構築した。

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

これまでに示された地震シナリオおよび強震動予測は過去の観測記録および歴史資料に基づいて構築されたものであるが、加えて現状の測地・地震観測により得られた知見を取り入れることでこれらの高度化が可能と考えられる。南海トラフ巨大地震総合研究グループでは、南海トラフ巨大地震に関連した 50 課題の成果を踏まえ、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の構築を目指す。さらに、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の提示を目指す。

地震時のリスク評価の高精度化に向けた震源モデル・シナリオ、地震波速度・減衰構造、浅部地盤応答、および構造物の脆弱性の各モデルを総合的に考慮したリスク評価に関する関連研究について情報を収集するとともに、スロー地震に関する研究課題からの情報収集を着実に実施し、プレート間固着と浅部スロー地震の発生様式に関するモデルを提案した。

今後は、これまでの成果を踏まえて巨大地震の新たな予測手法や中短期の切迫度を評価する手法開発を進めるとともに、情報発信の内容や方法の検討も進める必要がある。関連課題間との連絡をさらに密に取りつつ、他の研究プロジェクトとの連携も含めて活動を実施することが必要である。

イ. 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ことから、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ている。

歴史史料の情報と現在の地震学的知見を結びつけて、詳細な地盤構造や多様な震源モデルによる揺れの予測を行うため、安政2年(1855年)の安政江戸地震を対象とした歴史史料の分析から、

被害分布を明らかにし、その分布を検証および定量化する目的で稠密地震観測を実施している。また、3次元地殻構造を用いた長周期地震動の即時予測のため、強震波形記録と地震波伝播シミュレーションをデータ同化し高速計算で未来の時刻の地震動を予測する手法の開発を進め、関東平野を中心としたエリアを対象に実地震に適用しその有効性を検討した。防災リテラシーの面からは、住民の災害情報に関する知識体系について調査を実施し、首都直下地震に関するキャンペーン報道による学習効果を検討した。

首都直下地震の発生は我が国に深刻なダメージを与える可能性が高いことから、分野横断的に取り組む総合的な研究として推進するテーマの一つとされてきた。しかし、現在の取り組みでは広い分野にまたがる総合的な研究課題が設定されておらず、首都直下地震に関連した個々の研究課題から成果を集めている状態で、総合研究としてカバーしきれていない部分も存在する。俯瞰的な、災害の軽減という視点で取り組む課題、災害後の復興も念頭に入れた取り組みなど、首都直下地震をターゲットとした課題をより多く設定し、分野横断研究を進めて、今後の研究を発展させることが必要である。

ウ. 千島海溝沿いの巨大地震

千島海溝沿いでは、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、その発生の切迫性が地震本部により評価されている。津波による大きな被害が予想されており、地域防災力の向上を目指した総合的研究を実施した。

地殻活動の評価として、北海道の太平洋沿岸の津波堆積物の広域的な比較を行い、17世紀のイベントの発生時期が胆振沿岸と十勝沿岸で異なる可能性などが示された。十勝沿岸河口域の珪藻分析から、10世紀以降の長期的な地殻上下変動時系列を明らかにした。北海道東部の考古遺跡の液状化痕跡の網羅的な整理が進んだ。日本海溝からカムチャツカ海溝にかけての地震活動静穏化を検討し、統計的有意性を示す警報基準を見出した。根室沖の3か所の海底地殻変動基準局を新たに設置し測定を3回実施した。ハザードの即時予測研究として、S-net津波計波形をデータ同化して十勝根室沖のM8以上の津波波源域を即時的に推定し、数分以内に浸水予測を行う手法を開発した。リスク評価研究として、避難訓練可視化システムを開発し、実避難訓練参加者にフィードバックすることで、避難訓練の学習効果の向上が見られた。地域防災力の向上を目指し、自治体を対象とする勉強会を実施し、地震津波ハザードや防災対策の普及啓発を図った。

総合研究グループ会合を開催し、関係課題間での情報共有とリスク評価に向けた全体戦略、地域防災の向上を進めるうえで今後解決すべき課題や必要となる要素技術を検討した。千島海溝沿いでは、地殻活動の現況把握が不十分であるため、調査や観測を継続することが重要である。今後は、それらのデータを、どのように地震動・津波浸水の予測やリスク評価に取り入れていくかも検討する必要がある。また、ハザード予測の不確実性を評価や、それが津波避難の最適化にもたらす影響度も考慮する必要がある。防災リテラシーの長期的な持続性担保の観点から、関係情報の共有化や普及啓発にDXを活用することなどを検討する必要がある。総合研究グループによる研究は、体系的な取り組みが求められる災害軽減を進めるうえで有効な体制であり、今後も継続して研究を発展させることが望ましい。

エ. 桜島大規模火山噴火

活発な噴火活動が60年以上続き、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。各研究課題の桜島に関連する研究成果をもとに、噴火事象系統樹や火山活動推移モデルの高度化を図り噴火予測研究を進展させてきた。また、災害予測手法の開発と、それに基づく災害情報を住民へ伝達する手段や避難・復興に資する研究、防災リテラシーの向上に関する研究を進めてきた。

噴火に先行する地殻変動や地震活動をもとにした、噴火の発生時刻や噴火の規模を確率的に予測する手法の開発、起こりうる噴火様式や規模に関して1日当たりのマグマ貫入量を分岐条件とする噴火事象分岐論理を構築した。危険度の大きい火砕流の発生は地盤変動の収縮期に多いことを示した。1914年の大正噴火について、当時の記録の再解析結果とともに、住民の記憶をまとめた「桜島爆発の日(野添, 1980)」もとに、大規模火山噴火の推移モデルを作成し、机上防災訓練を実施した。降灰量や通行規制、清掃時間、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。広域事前避難に関しては、インドネシアの火山噴火の類似例から、過去の噴火の教訓、避難場所の確保、避難方法の確認、避難訓練等が重要であるという知見が得られた。ハザード予測研究の一環として、近世末の遺構発掘による降下火山灰分布の調査、降灰分布と雨水の表面流量に着目した土石流に関する室内実験をおこなった。防災リテラシー向上の研究として、

2020年6月4日の爆発時に火山岩塊が居住地まで飛来したことについてアンケート調査を行い、噴火警戒レベルに関する認知度は高いものの警戒を要する範囲の認識が不十分であることがわかった。

火山噴火活動の継続的な観測や新たな観測機器の開発も進めた。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、マグマ貫入期に先行する温泉ガス組成の変化、マグマ貫入期の噴出物の組成変化などを捉えることに成功した。降下火山灰について、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バンドレーダ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、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、などの手法を開発した。加えて、噴火発生に伴う地震・地殻変動データの解析結果と火山近傍の風速データに基づく火山灰の拡散範囲を事前及び即時的に予測する手法の開発を進めた。大規模噴火発生時の噴火活動推移把握のための観測技術として、衛星やドローンを用いた観測手法の開発や920MHz帯を用いた地震データ伝送手法の開発、遠望観測の強化、SO₂の簡易トラバース測定を継続した。

以上のように、桜島では、大正噴火から現在までの100年以上にわたる観測データや史料を分析・解析することにより、火山噴火様式や規模をマグマ供給量で区分した噴火系統樹や火山活動推移モデルが構築された。モデルから予測される噴火シナリオをもとにした避難訓練の実施による問題点の整理、住民の意識調査などの研究も行われ、現象理解・予測、災害誘因予測、防止リテラシーの大項目にまたがって、災害の軽減に向けた研究が着実に行われている。各分野の研究成果だけでなく、本総合的研究の実施方法や研究成果は、地域住民の避難を伴う噴火発生が懸念される他火山地域での研究実施や防災体制の構築に参考になる点が多い。桜島は現在も活発な活動を続けており、火山噴火現象の理解や予測に関する研究を実施する上で、また、ハザード予測手法の開発と検証を行う上で非常に重要な火山である。さらに、各種のモニタリング技術の開発も進めることができる。大正噴火クラスの大規模噴火の発生も懸念されており、効果的な防災リテラシー向上方法を構築することも強く求められている。以上から、今後も桜島の総合的研究は推進していくことが重要と考えられる。

オ. 高リスク小規模火山噴火

平成26年の御嶽山噴火や平成30年の草津白根山噴火のように、小規模な噴火であっても火口付近に登山客や観光客などが訪れることより、多大な人的・物的被害が生ずることがあることが改めて認識された。国外においても、ニュージーランドのホワイト島では、地質災害情報センター(GeoNet)が警戒レベル2(中程度からやや高い火山活動, moderate to heightened volcanic unrest)を出している中で、火口域を巡る観光ツアーが企画され、令和元年12月の突発的な水蒸気爆発に観光客が巻き込まれる火山災害が発生した。このような小規模な火山噴火であっても高リスクであるので、小規模噴火による災害に関する資料の収集、地質調査による水蒸気爆発等の噴火履歴調査、各種観測による活動把握、災害誘因である噴石や土石流などの予測研究、災害情報の発信に関する研究等を実施し、これらの成果を総合的に検討することにより、現象理解・予測や社会的要因に関係する研究課題や方向性を検討した。

小規模噴火現象の理解及び予測法の構築のため、地震、地盤変動、放熱量の観測、人工電流源による地下比抵抗連続モニタリングなどにより地下浅部の熱水系挙動の定量化が進められた。干渉SAR解析により、隆起量が大きい地点ほど高温の熱水・噴気が噴出している傾向を見出した。ニュージーランドで開発されたVUI(火山活発化指数)を十勝岳における多項目観測データを用いて1970年から2019年について毎月算出し、高リスク小規模噴火の懸念される火山の活動評価の方法の検討を進めた。吾妻山や十勝岳を対象に火山性地震発生域や膨張・収縮源、低比抵抗領域、活動様式の比較から、火山活動の特徴抽出を進めた。また、火山活動の理解のため、十勝岳の熱水系を念頭に、熱水流動シミュレーションによる地下の熱水系のふるまいが調べられた。火山活動の変化に対する火口湖の応答について、湖水の熱・化学パラメータの数値的検討を行った。

小規模噴火災害の発生する危険地域を事前に評価する方法を検討した。十勝岳の三段山山体の活動中に起こった山体崩壊により生じたヌッカクシ火口においては、マグマ噴火は約1800年前までであるが、その後は水蒸気噴火および小規模な山体崩壊が散発的に発生していることがわかった。草津白根火砕丘群の山頂域に分布する小火口を把握し、各火口を形成した水蒸気噴火の発生年代を推定した。草津白根火山や御嶽山においてMT観測を行い、比抵抗構造の推定結果から深部マグマ溜りからのマグマ性流体の供給路や噴火口近傍浅部の流体の存在を示唆する低比抵抗層を見いだした。

社会的要因である災害情報の発信に関しては、富士山におけるビーコン等を使い登山客の行動パターンを把握した上で情報発信の方法を検討することが有効であると考えられた。自治体が発行する火山防災ハンドブックなどには「噴火には前触れがありその前に避難すれば良い」という印象を与えるものがあるが、上に述べた事例のように噴火発生が不意打ちとなる場合もある。噴火被害の低減という観点からは内容を見直す必要があるが提案された。

本課題のターゲットである小規模火山噴火は、データの収集が難しく、科学的な研究の対象とするためには困難を伴った。そのため、これまでの観測研究計画の中でこれを明示的にターゲットとする研究は限られていたが、被害低減につながる具体的な方策を探るため、本観測研究計画から総合的研究として新たに実施することとなった。社会的要因と現象理解・予測に着目して研究の方向性を検討し、まずは課題の洗い出しを行い、研究の方向性を明らかにすることを目標に進めた。今後は、今回明らかになった問題点を解決するための研究を進めることが必要であろう。小規模火山噴火は特定の火山で頻発するものではないため、全国の火山が対象となり、発生場や噴火様式だけでなく、災害要因も多様である。災害リスクを考慮しながら、まずは現象理解・予測から社会的要因を研究できる対象を選定することが必要である。

(3) 研究基盤の開発・整備

実施状況

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) の安定的運用を行い、関連施設の更新を行った。重点的に強化すべき火山の観測施設の整備・運用を推進した。観測データの共有や利用促進を図った。

気象庁は、防災情報発表のために全国に展開している地震計・震度計・ひずみ計等の観測を継続した。文部科学省と協力し、大学、防災科学技術研究所、海洋開発研究機構など関係機関の地震観測データを一元化処理し、その結果を大学や関係機関に提供した。また、精密な地磁気観測を継続した。常時観測火山において、地震計、空震計、GNSS、傾斜計、監視カメラ等による多項目の常時観測及び機動観測を実施した。

国土地理院は、全国の GNSS 連続観測点を維持するとともに、データ解析手法の高度化を図った。衛星 SAR 観測データの解析を定常的に実施したほか、火山地域で航空機 SAR 観測を実施した。標高基準の精度向上のため航空重力測量を実施するとともに、地上重力や地磁気、潮位、VLBI、地磁気の観測を継続した。

大学は、全国の陸域、海域及び火山周辺に設置された地震・地殻変動などの多項目種観を維持するとともに、観測網から得られるデータを即時的に流通させるシステムを運用した。大地震や火山噴火時の機動的な観測や、構造探査等を実施するための機材や人的資源を共有する体制の整備を行った。

産業技術総合研究所は、東海から四国にかけての地域で、地下水等総合観測網の整備・運用を実施するとともに、気象庁とリアルタイムでデータの共有を行った。

山梨県富士山科学研究所は、一等重力点を新たに整備し連続重力測定を開始した。北海道立総合研究機構は、雌阿寒岳、十勝岳等において熱や地球化学的な観測を継続した。

イ. 観測・解析技術の開発

大学及び海洋研究開発機構は、海域で陸上と同等の機動的広帯域地震観測を行うための海底地震計の開発や、海底での上下変動及び傾斜観測に必要な技術開発を行った。

大学は、火口域での多点連続地震観測手法の高度化、人工電磁信号を利用した火山の比抵抗モニタリングシステムや宇宙線を用いた観測手法の開発を行った。新たな無線通信帯域や、携帯電話通信網と地上情報ネットワークを連携させたデータ伝送システムを開発した。衛星技術や無人ヘリなどを用いた観測困難地域での観測手法の高度化と実証観測を実施した。

気象庁は、地震動・津波の即時予測の高度化に必要な地震動データの同化手法や津波波源推定など解析技術の高度化を進めた。

国土地理院は、地殻変動を即時的・高時間分解能で把握するため、キネマティック解析システムを含む電子基準点リアルタイム解析システムの高度化を行った。また、廉価版 GNSS 受信機の性能評価を実施した。

海上保安庁、大学及び海洋開発研究機構は、海溝型巨大地震の発生が想定される海域において、GNSS-音響測距結合方式や海底間音響測距、海底圧力観測による海底地殻変動観測を継続すると

ともに、測位精度向上に必要な観測・解析技術の高度化を行った。

防災科学技術研究所及び海洋研究開発機構は、海域の不均質な地下構造を考慮した地震・地殻変動観測データの解析手法を開発した。

情報通信研究機構は、被災地の状況把握を詳細かつ迅速に行うための次世代航空機搭載 SAR の開発を行った。

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

大学は、GNSS や地殻変動観測など多項目観測データを全国に流通させるシステムを運用しデータの収集、共有、公開と解析機能の強化を行った。全国規模の地震波形データ流通及びデータ処理で用いられているプログラムの機能強化を図った。

防災科学技術研究所は、データの活用促進を目的とし、火山観測データを共有・利活用出来るシステム（JVND システム）を開発した。

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

大学は、公開された解析ソフトウェアやデータ、データベースに一元的にアクセス可能なポータル機能をもったデータベースを拡充・運用した。共有データの効率的な公開と利用促進に向けた永続的識別子の活用について検討を行った。

気象庁は、震源情報や発震機構解などの地震カタログの作成を継続した。地震観測データ一元化処理で海域観測網（S-net）地震波形データの運用を開始した。地磁気観測を継続しデータベースへの登録を行った。常時観測火山で常時観測や機動観測を実施してデータを蓄積するとともにデータベース化を図った。火山防災協議会での観測成果の共有を継続した。

産業技術総合研究所は、地質や地球物理情報の整理を継続し、地質図やデータベースとして公開した。また、アジア太平洋地域の地震・津波・火山ハザード情報の収集と共有化を行った。

国土地理院は、GNSS などの観測データの公開を継続するとともに、GNSS データクリアリングハウスの更新を行った。監視・観測の充実が必要な火山の地理空間情報、地形分類、全国活断層帯情報を整備した。

海上保安庁は、海域火山の定期巡回監視及び海域火山基礎情報整備を継続し、情報を海域火山データベースに反映した。

成果

ア. 観測基盤の整備

MOWLAS をはじめとする基盤的な観測網が運用され、高品質なデータの取得・蓄積が進むとともに、通信回線やデータ処理・蓄積システムの継続的な更新を図ることでシステムの安定運用が実現した。また、新たな基盤的観測網として、南海トラフ海底地震津波観測網（N-net）の整備が開始されている。令和 2 年 9 月から、地震観測データ一元化処理に海域観測網データの取り込みが開始されたことで、海域における震源の深さの決定精度と検知能力が飛躍的に向上した。

GEONET による地殻変動連続観測から、日本列島全域の地殻変動のモニタリングが継続的に実施され、東北地方太平洋沖地震の余効変動や、被害地震による地震時地殻変動、ゆっくりすべりに伴う非正常地殻変動のモニタリングが行われた。GEONET データに新たな解析戦略が導入されたことで、座標推定の精度向上が図られた。2018 年北海道胆振東部地震や 2018 年草津白根山噴火等の干渉 SAR 解析や航空機 SAR 観測から、面的な地殻変動や地形変化が検出され、地震活動・火山活動評価で活用された。航空重力測定から、地上測定ではデータ取得が困難な山間部や沿岸海域等を含む日本全国を網羅した稠密な重力データが取得できた。

大学間および関係機関間においては、高速ネットワーク網を用いた地震観測データの全国的なリアルタイムデータ流通が安定的に維持され、全国千数百点に上る観測点のデータ共有が実現されており、研究や監視業務に必要な不可欠なデータとして利用されている。2018 年大阪府北部の地震や 2018 年北海道胆振東部地震、2018 年草津白根山噴火をはじめ、大地震や火山噴火等が発生した場合には、共同利用機材等を用いた機動的な地震観測点の設置が大学等により迅速に行われた。

東海から四国にかけての地下水等総合観測網のデータが気象庁にリアルタイムに提供されることで、ゆっくりすべり等の地殻活動の監視能力の強化が図られた。また、ひずみ計センサーの小型化や設置工事の低廉化を実現する新たな技術が開発され、産業技術総合研究所の地下水等総合観測点数は 17 箇所まで増強された。

イ. 観測・解析技術の開発

長期観測型短周期海底地震計のセンサーを換装し、レベリング制御技術を改良することで、広

帯域型海底地震計を開発した。海底傾斜計を開発し、南海トラフ域での展開を開始した。精密制御人工電磁信号送信システム（ACROSS）の開発を行い、火山の比抵抗構造モニタリングシステムの運用を可能とした。火口域での多点連続地震観測に必要な、省電力モードや通信エラー時対応機能を付加した小型軽量地震テレメータを開発した。火山地域で 920MHz 帯小電力無線通信の実地試験を行い、電波伝播特性を明らかにした。携帯回線網と情報通信研究機構の IoT ネットワーク、学術情報ネットワークを接続する新たなデータ収集システムが試作された。桜島火山において、噴火活動を行う火口下の密度変化をミュオグラフィ観測により検出した。火山の衛星観測熱異常データから、溶岩の噴出率を推定する手法を開発し、西之島噴火へ適用して有効性を確認した。無人ヘリを用いることで、桜島や口永良部島の立ち入り禁止区域での安全な地震計設置とデータ回収に成功した。

緊急地震速報への海底地震観測網データの利用を開始し、精度の高い情報をより迅速に社会へ提供することが可能となった。長周期地震動予測手法の検討・検証が進み、予報業務許可事業者による予測情報の提供が開始されるとともに、社会実装も進んだ。

全国の電子基準点をリアルタイムに解析するシステムの開発を継続し、安定的な運用を可能とした。廉価版 GNSS 受信機の性能試験から cm レベルの地殻変動の把握できる精度を持つことが明らかになった。

南海トラフ沿いで海底地殻変動観測から、プレート間固着の空間分布やゆっくりすべり現象の発生が明らかにされた。日本海溝沿いでの海底地殻変動観測から、東北地方太平洋沖地震後の余効地殻変動の時空間分布が明らかにされた。南海トラフでの海底下での水圧長期変化が水深に強く依存することが判明するなど、海底上下地殻変動観測における水圧計キャリブレーション技術が開発され、精度向上への目処がたった。

海域の三次元地震波速度構造を用いた地震や浅部超低周波地震のメカニズム解の詳細な解析が可能となり、地震活動評価等で利用された。地下構造の不確かさを取り込める断層すべり推定手法の開発や、全国一次地下構造モデルを取り入れたプレート境界での弾性応答グリーン関数ライブラリの構築が行われ、より現実的な解析手法の実現がなされた。

次世代航空機搭載合成開口レーダ Pi-SAR-X3 が開発され、試験観測の実施体制が整備された。

ウ. 地震・火山現象のデータ流通

地殻変動等多項目データの全国流通一元化公開解析システムに、気象庁が運用する東海地域のひずみ観測点 25 点の観測データが新たに加わるなど、多項目データの流通一元化が進んだ。地震データ大規模解析サーバが構築され、長期間連続地震波形データの効率的な解析が可能となった。地震波形データの読み取り作業などの一次処理に必要となる、次世代の対話検出処理システムの試作が進んだ。火山活動と火山災害の全情報を一元化し、火山防災に関わる関係者に迅速に共有・活用できる火山防災情報プラットフォーム（JVDN システム）が開発された。

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

オープンデータに関する地震学会での特別セッションの開催や、アンケートによる情報収集から、永続的識別子やデータジャーナルなど地震・火山現象データのオープン化に向けた可能性と課題の整理が行われた。

気象庁地震カタログ整備が継続され、1919～1921 年の震源が新たにカタログに反映されたほか、一元化処理以前の大学等の検出値を取り込んだ地震カタログ作成が進捗した。地磁気観測データをデータベースに登録・公開するとともに、過去のアナログデータがデジタル化され、データ解析が飛躍的に容易になった。常時観測火山での多項目観測データの蓄積が進むとともに、観測データは火山防災協議会へ Web 経由でリアルタイムに共有された。

活断層、津波堆積物、地殻応力場データベースへの新規データの追加や機能強化がなされた。富士山など 3 火山の地質図や 20 万分の 1 日本火山図が公開された、基盤的な火山地質情報の拡充がなされた。アジア太平洋地域等の地震火山災害情報の網羅的な収集と公開が行われた。

雌阿寒岳や草津白根山などの火山基本図及び、浅間山や箱根山などの火山土地条件図が整備された。糸魚川―静岡構造線断層帯や濃尾断層帯などの活断層図が整備された。

研究成果共有サーバにおいて、プレート境界デジタルデータ、日記史料有感データベース、臨時 GPS 観測データや地震活動解析ソフトウェア等が公開・共有された。

今後の展望

関係機関が地震本部の調査観測計画に基づき整備、維持している基盤的観測網は、本計画の推

進をはじめ、わが国の地震防災施策に必要な不可欠なインフラである。高感度地震観測網では、防災科学技術研究所や大学等による千数百点に及ぶ膨大な観測データを即時的に流通するシステムが安定的に運用され、リアルタイムなオープンデータとして広く公開されていることは極めて重要な成果である。全国 GNSS 連続観測システムでは、千数百点において安定的に地殻変動の観測が継続されており、地震や火山活動に伴う地殻変動をほぼリアルタイムに把握することで地震・火山活動評価に大きく貢献している。また、新たなリアルタイム監視システムの運用により、地震断層モデルの即時推定が実現している。強震観測網は、大地震時にもれなく強震動を観測し、震度情報の発表や震源過程の解析などの防災情報や学術研究に多く利用されている。南海トラフや日本海溝で実施されている海底地殻変動観測は、大地震準備過程におけるプレート間固着状況やスロー地震、大地震後の余効変動など、陸上の観測網からは検出が難しい重要なデータを提供している。日本海溝海底地震津波観測網データの緊急地震速報、津波警報、一元化処理での利用が開始されたことで、防災情報の迅速化・高精度化に加え、日本海溝での微動の発生状況の解明など学術成果にも重要なデータを提供している。南海トラフでも海底地震津波観測網の整備が進んでおり、防災情報の高度化や学術研究の一層の推進が期待される。本計画を進展させるためには、基盤的観測網の安定的な運用を引き続き図ることが必要不可欠である。多くの大地震が海域で発生する日本では、海域観測網のより一層の拡充が必要である。南海トラフ海底地震津波観測網の整備を着実にを行うとともに、日本海東縁部や南西諸島など未整備地域への展開を検討することが望ましい。海溝型巨大地震が発生する海域での海底地殻変動観測は地震評価に欠かせないデータを提供することから、観測が実現していない千島海溝南部や琉球海溝にも観測を拡充することが必要である。海域観測の設置と運用には多大な予算や船舶などの長大設備が必要とされるため、低コスト化・省力化・長寿命化を目指した新たな技術開発をより一層進める必要がある。

地震観測網は、地震をもれなく観測することが必須であり、観測システムを長期的かつ安定的に運用することが求められる。現在利用している地震計やテレメータ・ロガー装置など観測機器は、開発整備から 20 年以上経過しているものが多く、老朽化が著しく進んでいて早急に更新が必要な状態にある。また、観測データはデータセンターにリアルタイムで集約する必要があるため、進展するデジタル通信技術などに対応しながらシステムの管理と高度化を切れ目なく行うことが必須である。南海トラフ地震や首都直下地震などの広域複合災害時にも着実な観測・データ収集ができるよう、観測点電源や通信網の冗長化もより進める必要がある。一方、観測を支える人材や予算の不足は、危機的な状況が続いている。基盤的観測網を運用する関係機関や大学は、観測技術の開発・維持を行う人材の教育・育成や、技術情報の共有を協力して進めることで、戦略的に観測を継続する体制を検討することが必要である。我が国では、観測機器は小規模なメーカーが中心となって開発してきた経緯があるが、事業縮小や承継問題など産業界における構造的な課題も影響し、国内での開発・生産が困難な状況になりつつある。一方で、世界的には光ケーブルを用いた超多点計測や、廉価な汎用システムを用いた低価格観測システムの一般化も進んでいる。メーカーが持続的に製品の開発や供給を行えるよう、関係機関での開発仕様の一元化や、長期的な計画に基づく調達方法の検討なども必要である。

火山観測網については、気象庁や防災科学技術研究所が観測点や観測項目の拡充を進めた結果、常時観測火山については以前に比べ大幅な進展が見られている。今後も、多様な火山現象をもれなく観測するための観測項目の充実等を進める必要がある。一方、火山活動の活発化においては、多様な異常現象が局所的かつ立ち入り禁止困難地域に発現することが多く、活動推移に合わせた機動的な観測が重要である。大学と関係機関は、文部科学省の次世代火山・人材育成総合プロジェクトや、火山機動観測実証研究事業においても新たな技術の開発や機動観測の高度化を進めているが、本計画と他事業の特長を十分に勘案して効果的に観測研究を進める必要がある。特に、立ち入りが困難な火口近傍や火口内での多項目観測や、光技術を用いた超多点観測、急速に発展するドローン等を用いた新たな観測技術の開発においては、本計画ではより萌芽的かつチャレンジングな視点で取り組むことが望ましい。また、現在の観測網は火山の山体に比較的近い場所に設置されていることが多いが、近年経験したことがない大規模噴火時にも着実にデータ取得ができるよう、観測点の堅牢化や通信の多重化、中域観測網の拡充も検討されるべきである。火山で実施されている多様な観測データの流通・統合・公開は長年の課題であったが、火山観測データ一元化共有システム（JVDN）が実現し運用を開始したことは特筆すべき成果である。長期的に安定して維持運用を行うとともに、収集データの項目を増やし、新たなユーザーを獲得していく取り組みが期待される。大学では、火山観測を担う人材の不足はなお深刻な問題として継続してい

る。関係機関間での機材や人員エフォートの共有化や、技術的に共通する部分も多い地震観測分野との更なる連携を進めることで、持続可能な観測体制を引き続き検討する必要がある。

観測データの流通とデータベース化は、本計画を支える重要な取り組みであり、安定的な運用と技術的な開発を継続する必要がある。地震波形や全国 GNSS 連続観測データの流通と公開は、他分野に先駆けてオープンデータとして広く利用されてきた実績を有し、多くの重要な学術成果を生み出してきており、今後も維持拡充すべきである。震源データ・火山地質図・活断層や火山の基本図等も、研究を進めるうえで必要不可欠な基盤的情報であり、継続的にアップデートを図っていくことが肝要である。海底地殻変動データと解析ソフトウェアの公開が始まったことは、観測回数が限られる海底観測データを共有し有効に活用する観点で大きな進展であり、今後、関係機関でフォーマット等の統一化が図られることが望ましい。また、気象庁の東海地域ひずみ観測網データのリアルタイム流通も開始されるなど、今後も、より一層の多項目データの流通・公開・データベース化を進め、オープンデータとして利用できる環境の整備を続ける必要がある。大地震・噴火サイクルは長期間であり、データがデータベース化され長期に蓄積されることで、はじめて地震や火山活動の異常性・平常性の統計的評価が可能となる。急速に発展するデータサイエンス解析技術を遡及的に適用することで、新たな現象の発見をもたらす可能性もある。一方、データベースは、その整備と維持には相応の人員とコストを投入する必要がある。本計画は長期的な視点に立って進められており、データアーカイブを安定的に維持するための一層の予算とエフォートを投入すべきである。最近急速に進むオープンデータ政策をより意識して、データリポジトリを運用する機関との協力等を含め、戦略的かつ効果的に検討を進める必要がある。

流通し蓄積されたデータを処理するには、研究目的に応じた解析プログラムを利用する必要がある。特に、近年は大容量化する観測データの効率的な解析が必要とされており、解析ソフトウェアやプロトコルの共通化をより一層進める必要がある。一方、我が国ではプログラム開発専門職がほとんど配置されておらず、ソフトウェア開発を研究者個人で行っている現状があり、十分に大容量データを生かし切れているとは言い難い。現計画で試みられている、主に大学で利用されている基幹的な地震波形流通処理ソフトウェアのバージョンアップのような取り組みは、観測研究すべての分野に関係する重要な課題として、関係機関間の連携をより進め、長期的な戦略のもと計画的かつ重点的に推進する必要がある。

内陸地震や火山活動の活発化においては、稠密な観測網を展開することで詳細な余震活動の推移や火山性地震・微動の発生状況の把握が進むことが多い。大学や関係機関においては、機動的な臨時観測が速やかに行えるよう、共同利用機材の整備や人員の連携体制の構築を普段から行うておくことが必要である。

これまで、我が国では基盤的観測網をはじめとする新たな観測網の整備が精力的に行われてきた。観測密度が十分でない地域では、引き続き新たな観測網の整備を目指す必要があるが、既存観測網のより効率的な運用や、より利用しやすいデータ提供方法の検討、解析ソフトウェアの共有化など、データ資源の有効活用とシステムの持続的運用に向けた基盤整備と技術開発の重要性が増している。観測基盤の整備からデータ流通、アーカイブ、解析ソフトウェアの整備までを、オープンデータシステムとしてデザインするとともに、持続可能なシステムとして包括的なディレクションを行えるデータサイエンスを専門とする人材の確保を進めていくことが必要である。観測基盤の継続的な開発・整備なくしては、本計画をはじめ、日本の地震防災施策を進めることは不可能である。このため、観測基盤に関わる研究者のインセンティブ確保を意識的に図っていくことも重要である。

(4) 関連研究分野との連携強化

実施状況

地震・火山研究の成果を災害軽減に役立てるために、理学にとどまらず、工学、人文・社会科学などの関連研究分野間の相互理解に努め、連携をより一層強化した。また、低頻度大規模地震・火山噴火現象の規模、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。さらに、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を取り入れるために、これらの研究分野との連携を強化した。

地震・火山噴火予知研究協議会には、本計画（第2次）の開始に合わせ、防災に関する人文・社会科学を研究する5機関・部局があらたに参加し、文理融合研究が拡充された。

東京大学の地震研究所と史料編纂所が連携して東京大学地震火山史料連携研究機構が 2017(平成 29)年度に設立され、学内組織として分野融合研究を進めている。2019(平成 31, 令和元)年度より本計画(第 2 次)に参加して歴史研究者と地震研究者の協働により史料の収集、解析を進めており、分野融合研究のハブとして研究計画の推進に貢献している。

東京大学地震研究所では古地震研究会(史料解読のための勉強会)を定期的に行き、地震学だけでなく、歴史学、人文情報学、地理学、地質学、気象学といった幅広い分野の研究者間で情報交換を行っている。奈良文化財研究所では、考古学、地質学、地震学、歴史学、情報学研究者等と連携し、発掘調査や地質調査に基づく災害痕跡データベースの構築を進めている。

京都大学防災研究所は火山活動の観測・活動評価から災害を予測するために、砂防工学、気象学、社会科学と連携する異分野融合型のプロジェクトを国内外において立ち上げた。

東北大学大学院理学研究科は工学や計算科学の研究者、自治体、企業と連携して、「リアルタイム津波浸水被害予測システム」を開発した。東京大学大学院理学系研究科は、計算機科学分野と共同で地震発生シミュレーションの高効率化を行った。

今後の展望

地震・火山噴火予知研究協議会では、企画部戦略室において異分野連携研究を促進するための研究集会等により、関連研究分野間の連携強化を進めている。大学においては、共同研究や研究集会・勉強会を通じて、歴史学、人文情報学、地理学、地質学、気象学などの研究者との学際研究を推進するための研究ネットワークが広がった。今後、このネットワークにより、過去の地震や火山噴火現象、それに対する人や社会の対応の理解を深めていくための研究を深化させることが重要である。また、計算機科学分野と共同研究では重要な成果があがっているので、今後も継続していくべきである。

(5) 国際共同研究・国際協力

実施状況

大学や研究機関は、日本と同様に沈み込み帯での地震活動、火山活動がある海外の諸国と共同研究を実施している。ニュージーランドにおいては、2016 年に発生したカイコウラの地震に関連して、地震発生以前から南島に展開されている臨時地震観測点のデータと定常観測網による地震観測点データを統合し、カイコウラ地震の余震分布を詳細に決定するとともに、震源域の S 波スプリッティング解析を行った。ヒクランギ沈み込み帯では、地震観測に加え電磁気観測、掘削調査なども行われ、プレート沈み込み構造の解明、スロー地震挙動についての研究にも取り組んでいる。また、米国、メキシコ、チリ、インドネシア、トルコ、ネパール、ロシアなどのプレート境界地域においても地震観測などの国際共同研究を行った。

大学は、近代の日本では未経験な、大規模火山噴火災害が発生している海外の火山を対象として、火山活動推移モデル構築及び事象分岐条件設定のための調査観測研究を実施している。インドネシアのケルト火山やクラカタウ火山を対象に噴出物調査を行い、噴火の規模や推移を解明する研究を行った。また、桜島をフィールドとする米国、英国、ドイツ、イタリア、オーストリアなどとの国際共同観測・研究により、火山噴煙の移動速度や火山雷の発生メカニズムに関する研究が進展した。

地震・火山の理学的研究のみならず、歴史地震データの国際化、情報科学技術関連の国際交流も進んでいる。大学は、欧州の歴史地震アーカイブに準拠した歴史地震の震度データベースを構築するとともに、イタリアの歴史地震研究者を招聘して国際シンポジウムを開催した。また、IEEE 国際学会において、防災×ICT の研究成果を発表するとともに、他分野の研究者と意見交換を実施し、関係性を築いている。

気象庁は、国際地震センター、米国地質調査所、包括的核実験禁止条約機構、米国大学間地震学研究連合(IRIS)及び近隣国との地震観測データの交換などの組織的な連携・協力に取り組んだ。また、航空路火山灰情報センター及び北西太平洋津波情報センターの国際協力業務や開発途上国における地震・火山の観測や津波警報の発表などの体制整備に必要な技術的な支援に取り組んだ。

国土地理院は、アジア太平洋地域の基準座標系(APREF)構築に関する活動の一環として、アジア太平洋地域測地観測プロジェクト(APRGP:Asia-Pacific Regional Geodetic Project)のキャンペーン観測に参加するとともに、VLBI 石岡局を用いてアジア・オセアニア VLBI グループによる

測地観測を実施した。2018年インドネシア・パル地震や2021年ニーラゴンゴ火山の噴火などについて、だいち2号のSAR干渉解析により地殻変動を明らかにし、現地機関に情報提供した。

海上保安庁は、国際レーザー測距事業(ILRS)に参加しており、レーザー測距データの提供を継続し、日本周辺を含めた広域のプレート間相対運動の把握に資するデータを取得した。

産業技術総合研究所は、米国地質調査所、ニュージーランドGNSサイエンス等、海外の8機関と地震・火山の研究協力を進めている。

大学や研究機関は、海外との情報共有を行うために、これらの成果を情報共有するためのシンポジウムや研究集会、オンライン会議を企画・開催した。加えて、外国人研究者招聘事業を実施しているほか、海外の大学・研究機関とサマースクールを開催し、国際共同研究の促進、国際的な研究者育成などを推進している。大学は諸外国の防災対応職員を対象とした研修の講師を務め、防災業務に携わる人材の育成に協力した。留学生を大学院博士前期課程、後期課程に継続的に受け入れ、教育および専門家の人材育成も行っている。データの国際的な共有も進んでおり、防災科学技術研究所は、次世代火山研究推進事業で開発しているJVDNと国際的なデータベースであるWVO0datシステムとのデータフォーマットの共有化を行い、知見の共有を進めている。ホームページで公開している観測データや情報は、海外からもアクセスされ、世界で有効に利用されている。海洋研究開発機構は、アジア諸国の若手職員、学生への研修も実施した。産業技術総合研究所は新たに国際研修を開始し、発展途上国における人材育成及び人的ネットワークの構築につなげた。

今後の展望

国内だけでなく海外で発生する地震・火山噴火やそれらによる災害の知見を幅広く集約し比較検討することは、低頻度の地震・火山噴火現象の特徴・多様性の把握や、災害研究を進める上で極めて重要である。新型コロナウイルス感染症拡大の影響を受け、近年は海外への渡航、海外からの学生や研究者の受け入れが難しい状況ではあるが、その中でも許される最大限の範囲で観測研究を実施している。また、この環境下で新たなオンライン活用による国際的な研究、交流のあり方も生まれ、今後も現地とオンラインの併用による研究の進展が見込まれる。国際的なデータベースフォーマットの共有化により、全世界での情報共有が可能になりつつある。今後はそのデータベースの維持管理・体制整備を継続的に進めていくことが重要である。

地震・火山噴火の研究とともに、その防災対応の取り組みは、日本の事例と海外の事例を共有して進めていくことが期待される。2004年スマトラ地震を経験したインドネシアでは、オンライン会議で過去の災害経験や被害状況把握の重要性が議論されている。また、ニュージーランドで発生した2019年ホワイト島の噴火の事例は、観測や噴火の予測の難しさ、観光客の被害など、本計画の「分野横断で取り組む総合的研究を推進する体制」で取り組んでいる「高リスク小規模噴火」の研究と共通するところもあり、日本や海外の事例を国内外の研究者や行政機関の関係者と共有することで、国際的な災害軽減にも貢献することになると期待される。

(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

実施状況

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・火山噴火の予測研究の等身大の現状や、最新の研究成果、地震・火山災害に関する基本的な知識等を社会に効果的に伝えるための情報発信方法について検討した。

地震・火山噴火予知研究協議会は、観測研究計画や、これを推進するための組織である予知協議会自体を紹介するためのパンフレットを作成し、広報活動に活用した。また、地震研究所広報アウトリーチ室と共同で、報道関係者等を対象とする地震・火山噴火予測研究のサイエンスカフェを開催するなど、地震・火山噴火の予測研究や研究活動の現状を理解してもらうための取組を継続的に進めている。

大学は、地震・火山噴火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などを対象とした公開講義、セミナー、ラボツアーなどを行っているほか、報道関係者向けの懇談の場を開催した。その他、地域広報誌にコラムの掲載、一般向けの書籍の刊行、ジオパーク活動も行った。

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み、基本的な知識や防災行動に関す

る知識の普及に貢献した。具体的には、地方自治体等と連携した防災訓練への助言・協力、報道機関と連携した防災番組への協力、火山防災協議会を通じた普及・啓発などを行った。

今後の展望

地震・火山噴火の予測研究の現状を理解してもらうことの重要さは外部評価でも指摘されているところであり、報道関係者等を対象としたサイエンスカフェなどの試みを今後も継続して実施することが重要である。

(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

実施状況

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。予知協議会でも毎年度特任研究員を雇用しており、その後の進路として大学や研究機関で職を得ることができており、人材育成の一端を担っている。地震・火山等の専門教育を受けた修士課程・博士課程を終了した学生は、大学、国立研究所や気象庁などの研究職、専門職のみならず、行政機関、自治体、コンサルタント業界等へも就職しており、社会や防災行政に携わる場も就職先の選択肢として定着しつつある。また、行政機関や自治体職員向けの専門的、実践的な教育の場を設けることにより、専門知識を持った職員の人材育成も行われている。専門技術についても、全国の大学等に勤務する地震火山調査観測に係る技術職員を対象に職員研修会を毎年実施し、これらの技術職員の技能の向上を通して、全国における地震火山観測研究に貢献している。地震研究所・気象庁・防災科学技術研究所の観測業務に従事する職員間では、地震・火山観測業務に係る情報共有会を開催している。

火山研究分野においては、平成 28 年度から開始した次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトとも連携し、次世代の火山研究者の育成が進んでいる。参画する大学や研究機関は、火山学を志す全国の大学院生に対して実習や講義など、総合的な教育メニューを提供し、若手育成に努めている。

予知協議会では、本計画の成果を公表する成果報告会を毎年開催し、地球科学の専門家の研究推進や、防災業務の改善、次世代の研究者育成に資する情報を提供している。令和元年度以降は、新型コロナウイルス感染症拡大の影響を受け、オンラインでの開催を行っているが、これまで同様多くの研究者、学生、関係者、一般の参加があり、成果の共有が行われている。

今後の展望

地震・火山噴火の現象の理解、被害発生予測手法の高度化とその検証には、世代を超え継続的な観測研究の推進を支える人材の育成が極めて重要である。大学は博士課程進学者の積極的な受け入れや研究支援を行うとともに、その後の研究者としてのキャリアパスに繋がるよう、大学、研究機関、また予知協議会などのコミュニティでも若手研究者の継続的なポストの確保を引き続き行っていく必要がある。また、分野間連携を推進するための広い分野での人材も重要である。地震・火山・防災の専門教育を受けた人材が行政機関や自治体の場で活躍し、防災に携わる場も増えてきているが、まだ十分とはいえない。研究者が提供する専門的な情報が、自治体などで実際にどのように活用できるのか、また研究者に対する社会や自治体のニーズが何であるのかを相互に理解し、有効な防災対応を行うためには、これまでの講習会や教育活動、人材交流をより体系化した教育プログラムの構築等により、互いの理解を発展させることが望まれる。

火山研究者の確保・育成のために立ち上げられた次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトの「火山研究人材育成コンソーシアム構築事業」では、大学や研究開発法人、国の機関、地方自治体や民間企業による幅広い立場からの大学院生の研究指導が行われており、また、専門知識を習得した修了生が火山や防災に関連する進路へ進んでいる。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には、このような体系的な取り組みが継続されることが重要である。