

「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報告書

令和4年2月

科学技術・学術審議会  
測地学分科会



## I. はじめに

### 1. 背景

日本列島はプレート沈み込み帯に位置することから、有史以前から何度も大地震や火山噴火に見舞われてきた。これらの大地震や火山噴火は、豊かな国土や気候をもたらした一方、多くの人命を奪い、歴史的に我が国の社会・経済に大きな影響を及ぼしてきた。地震や火山噴火による災害を軽減し、国民の生命・財産を守るためには、自然現象である地震・火山噴火への科学的理解を深めるとともに、災害誘因\*の予測や災害発生の仕組みの理解も進め、得られた知見を災害軽減に役立てるための方策を探りつつ対策を立てる必要がある。地震・火山噴火現象は、永続する地殻活動\*を背景とし、その結果として生じる短期的・急激な現象である。そのため、地殻活動の長期的・多角的な観測と蓄積されたデータに基づく地震・火山噴火のメカニズムの解明が、将来の地震・火山噴火の発生や災害誘因の発生の予測の鍵となる。さらに、災害発生メカニズムの解明の研究、地震・火山噴火災害の履歴や将来予測といった知見が有効活用されるためには、社会の防災リテラシー\*の向上に資する研究も不可欠である。

我が国においては、地震及び火山噴火の予測により災害軽減に貢献することを目指して、測地学審議会（現在の科学技術・学術審議会測地学分科会\*）の建議に基づき昭和40年度から地震予知計画が、また、昭和49年度から火山噴火予知計画が開始され、それぞれ複数回の計画として実施された。平成21年度からは、背景となる地球科学的条件の共通性に鑑みて地震予知と火山噴火予知の計画が統合された。これらの観測研究計画等によって、地震及び地殻変動\*の全国的な稠密観測網、活動的火山における高密度多項目観測網が構築され、多様な地震・火山噴火現象が捉えられ、様々な地殻活動や地殻\*構造との関連に関する理解が進んだ。

平成26年度から実施された「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」では、平成23年の東日本大震災の発生を踏まえた方針転換を行った。その結果、地震・火山噴火の発生予測を目指す研究を継続しつつ、研究対象を地震・火山噴火による災害誘因の予測にまで広げた上で組織的・体系的に進めることとなった。新たな方針の下で進められた観測研究計画に対する外部評価（平成29年7月）では、災害軽減への貢献を重視する方針への転換が適切であったと評価され、これに基づく研究をさらに推進することが求められた。この外部評価を受けて科学技術・学術審議会は、前観測研究計画の方針を踏襲しつつ、地震学・火山学と関連研究分野間の連携をより一層強化し災害の軽減につなげることを目指した「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）の推進について」を平成31年1月に建議し、平成31年度に新たな計画が開始される運びとなった。

### 2. 本レビューの目的

本レビューの目的は、「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）」（以下「現行計画」という。）について、研究対象を災害誘因の予測へ広げた前観測研究計画の方針を一層進展させた方向性が適切であったか、また、計画が順調に進捗しているかを含め、総括的に自己点検し、今後の観測研究計画の検討に資することである。科学技術・学術審議会測地学分科会（以下「測地学分科会」という。）では、観測研究計画の進捗状況を把握し、毎年度の成果を取りまとめてきた。

本レビューの構成は次のとおりである。Ⅱ章では、地震火山観測研究計画のこれまでの経緯を振り返るとともに、現行計画の基本的な考え方をまとめる。Ⅲ章では、近年発生し現行計画で扱った重要な地震と火山噴火に関する研究成果を取りまとめる。Ⅳ章では、現行計画の項目ごとに成果を取りまとめ、それぞれについて今後の展望を検討する。また、研究を推進するための体制の整備状況について述べる。Ⅴ章では、計画全体を総括的に評価し、課題を検討することにより、今後の地震火山観測研究計画の方向性などを述べる。

## Ⅱ. 「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）」の基本的な考え方

### 1. 地震火山観測研究計画のこれまでの経緯

我が国における地震や火山噴火について、その発生場所、規模、時期を精度良く予測することを目指し、昭和40年から地震予知計画が、また昭和49年からは火山噴火予知計画が、複数回の

5か年計画として推進された。

地震予知計画については、高感度の地震観測点や地殻変動観測点の整備とデータ蓄積が進んだ。これにより地震現象の理解は大きく進展したものの、地震の前兆現象に関しては複雑性や多様性を把握する段階に留まっていた。第7次計画（平成6～10年度）中に発生した平成7年の阪神・淡路大震災を契機にそれまでの研究成果の総括が行われ、前兆現象の捕捉のみに基づく地震予知には限界があると結論づけられた。これを受けてそれまでの方針を転換し、平成11年度からは地震発生の物理過程の解明とモデル化に基づいて地殻活動の推移予測を目指す「地震予知のための新たな観測研究計画」を開始した。なお、平成7年には地震調査研究推進本部\*（以下「地震本部」という。）が発足し、国の地震調査研究を一元的に推進することになった。地震本部が平成11年にまとめた「地震調査研究の推進について―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―」では、地震予知のための観測研究は、当面推進すべき地震調査研究の一つとされた。

火山噴火予知計画については、複数回の5か年計画として平成20年までに第7次計画まで実施された。活動的火山における高密度・高感度の多項目観測網整備が進み、マグマ\*供給系・熱水系\*のモデル化やマグマの上昇・脱ガスなどの噴火過程に関する理解が進展した。また、観測体制が整備された火山においては噴火時期をある程度予測できるようになった。しかしながら、観測点が十分に整備された火山は少なく、火山活動の詳細な把握や噴火発生前の的確な情報発信ができる火山は限定されていた。平成12年の有珠山と三宅島の噴火は過去の噴火の経験則に基づいて噴火前の情報発信に成功した事例であるが、噴火現象を説明する物理・化学モデルはまだ部分的にしか確立しておらず、噴火様式\*や規模あるいは推移について正確に予測することはできていなかった。

地震と火山噴火は海洋プレートが日本列島下に沈み込むという共通の地球科学的条件の下で発生するものであり、観測研究手法に共通する部分が多く、研究者の中には両者を同時に手掛ける者も多い。地震・火山活動の把握に必要な観測網とデータを有効活用しつつ、地震・火山現象の相互作用や物理過程の理解を深化させるため、平成21年度からは地震予知と火山噴火予知の計画を統合し、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」を開始した。

以上のような長年にわたる観測研究により、地震・火山観測体制の整備が進み、地震や火山噴火の発生機構などの理解は大きく進んだものの、信頼性の高い予測は簡単ではないことが次第に明らかになった。地震現象については、大地震の規模や一定期間内に発生する確率を予測する長期評価\*には大きな不確実性が伴い、大地震の短期的な発生予測は実現されていない。火山現象についても、経験則がある程度成立する場合以外は、噴火の規模や様式・推移の予測は依然として困難な状況であった。

このような状況下で、平成23年には東北地方太平洋沖地震が発生し、死者・行方不明者が約2万人にのぼるなど大きな被害をもたらされた。それまでの観測研究計画では、このような超巨大地震の発生はある程度検討され、津波などの災害を誘発する自然の外力である災害誘因に関する研究も行われていたが、結果的には十分でなかったと言わざるを得なかった。この反省を踏まえ、5か年計画途中の平成24年11月に計画内容の部分的見直しを建議し、平成26年度から始まる次の5か年計画において抜本的な見直しを行うこととした。平成24年10月にまとめられた「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の外部評価では、地震や火山噴火に関する観測研究への社会的な要請自体は極めて強いとされたが、それまでの観測研究計画では社会の防災・減災に十分に貢献できておらず、国民の命を守る実用科学としての地震・火山観測研究の推進、低頻度大規模な地震及び火山噴火の研究の充実、観測研究計画の中長期的なロードマップの提示、社会要請を踏まえた研究と社会への関わり方の改善などが求められた。また、「東日本大震災を踏まえた今後の科学技術・学術政策の在り方について（建議）」（平成25年1月）では、地震・火山学分野だけでなく防災科学分野や人文・社会科学分野を含めた総合的かつ学際的研究の必要性が指摘された。これらの指摘を受けて観測研究計画の抜本的な見直しを行い、平成26年度から「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」（以下「第1次計画」という。）を実施した。

第1次計画では従来の地震・火山噴火の予測を目指す研究に加え、地震・火山噴火による災害誘因予測の研究も行い、災害科学の一端を担う形で計画を推進するという大きな方針転換を行った。災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学分野の研究者、近代観測以前の地震・火山噴火の解明のために歴史学・考古学分野の研究者が新たに参加し、従来からの地震学・火山学研究者との連携により、地震・火山現象の理解に加え、地震・火山噴火による災害を知り、研究

成果を災害の軽減につなげることを目指した。また、関連研究分野間の組織的な連携が進められ、観測研究計画の企画・調整を行うために東京大学地震研究所に設置された地震・火山噴火予知研究協議会\*（以下「予知研究協議会」という。）には、従来の大学に加え平成 28 年度から行政機関や国立研究開発法人など観測研究計画に参加する全ての機関が参加し、より強い連携の下で計画を推進する体制が整った。東北地方太平洋沖地震、南海トラフの巨大地震、首都直下地震\*、桜島火山噴火については、総合的な研究を実施し、地震・火山に関する理学的研究成果を災害軽減につなげるための手法開発等の研究を異なる分野の研究者が連携して取り組んだ。

方針転換後の 5 か年計画においては、地震・火山現象の解明と予測のための研究で着実に研究成果が得られていることに加え、新たに取り組み始めた災害誘因予測の研究においても、地震や火山噴火の発生直後に状況を実時間で把握し、即時予測\*に役立てるための研究が進化した。平成 26 年 9 月に発生した御嶽山噴火では、噴火後に詳細なデータ解析が行われ、比較的規模が小さい噴火であっても直前予測ができる可能性が示された。また、火山災害情報のあり方に関して住民への調査を行うなど、文理融合研究が実施された。平成 28 年 4 月の熊本地震に関しては、地震現象の解明研究のみではなく地震による災害に関する研究が行われた。

なお、御嶽山噴火は噴火規模としては特段に大きくはなかったが、死者行方不明 63 人という戦後最大の火山災害となり、突発的に発生する水蒸気噴火\*は大被害をもたらす可能性があるにもかかわらず研究が十分に進んでいない点が指摘された。そのため、平成 26 年 11 月に「御嶽山の噴火を踏まえた火山観測研究の課題と対応について」がまとめられ、今後の火山観測研究の体制や方向性、戦略が検討された。

このように、東北地方太平洋沖地震への反省を踏まえた見直しを行い、大きな方針転換の下に実施した最初の 5 か年計画である第 1 次計画に関して、平成 29 年 1 月にレビュー報告書が出され、それに基づいて平成 29 年 7 月に外部評価がまとめられた。外部評価では、防災・減災に貢献するための基本となる地震・火山現象に関する基礎的知見を生み出し、社会的波及効果の期待できる研究成果もあらわれてきており、災害の軽減に貢献する方向へ方針転換したことは適切と評価され、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究をより一層推進していく必要があるとされた。一方で、災害軽減を一層強く意識することや研究者間のさらなる連携強化、社会のニーズの把握など今後改善すべき点も指摘された。以上を踏まえ、次の 5 か年計画は、外部評価の指摘を盛り込みつつ転換後の方針を継続することとなり、重点課題の設定・分野横断型の総合的研究の拡充・防災リテラシー向上の研究の追加などによる改善を加えた上で、平成 31 年度から「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）」として現行計画が開始された。

## 2. 現行計画の基本的な考え方

現行計画は、第 1 次計画に引き続き、地震・火山噴火現象を理解し、それらの発生や推移の予測を目指す研究、及び地震・火山噴火による災害誘因の予測に関する研究を継続しつつ、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの関連研究分野の研究者が協働して実施する。現行計画では、従来から行われている地震学・火山学的研究分野と新たに参画した災害や防災に関連する研究分野間の連携をより一層強化することを目指す。また、地震・火山現象の根本的理解とそれらの発生予測に加え、地震動、津波とその浸水域、斜面崩壊、降灰、火砕流\*や溶岩\*噴出などの災害誘因の予測、災害情報の活用に関する研究を実施する。発信する情報を有効な防災対策につなげるため、地震・火山噴火現象や関連する災害誘因に対する国民の基本的な理解を深めることに新たに取り組む。また、参画機関の増加や成果の多様化に対応できるよう実施体制の整備を進める。

以上の方針に基づき、現行計画では以下の 5 つの実施項目を柱として研究を推進する。（1）「地震・火山現象の解明のための研究」では、地震・火山現象の根本的な理解を深め、低頻度大規模現象を含む多様な地震・火山現象の特性を把握し、それらが発生する仕組みや発生する場を解明する。（2）「地震・火山噴火の予測のための研究」では、多様な観測データ、地震・火山噴火の活動履歴や物理・化学過程の数理モデルに基づき、地震・火山噴火の発生予測手法や活動の推移予測手法を開発する。（3）「地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究」では、地震・火山噴火の解明・予測研究の成果を災害軽減に結びつけるために、地震や火山噴火がもたらす災害誘因を事前または発生直後に高精度に予測する手法の開発を進める。同時に、災害誘因予測を災害情報につなげる研究にも取り組む。（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」は現行計画から新たに加えられた実施項目であり、地震や火山噴火による災害

事例に基づく災害発生機構の解明を行うとともに、地震・火山噴火現象に関する社会の共通理解を促すための効果的な手法の確立を目指す。(5)「研究を推進するための体制の整備」では、参加機関や研究分野間の連携を強化し、研究を総合的・効率的に推進する体制を整備する。観測網、データ流通網、データベース、解析ソフトウェアなどの研究基盤を整備・拡充するとともに、新たな観測・解析技術の開発、国際共同研究の推進、社会との共通理解の醸成と災害教育、研究者・技術者などの人材の育成を組織的に行う。

上記5つの柱の下で実施する様々な研究の中でも、将来的に社会実装され災害軽減への貢献が強く期待される地震発生の新たな長期予測、地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測、火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測の3つについては新たに重点的な研究として設定した上で実施する。また、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つについては、地震学・火山学的な見地のみならず災害科学的な重要性も鑑みて、複数の実施項目を横断する総合的な研究として推進し、専門分野の枠を超えた学際連携を一層推し進めることを目指す。総合的な研究は第1次計画でも分野横断型の研究として実施されていたが、現行計画においてはそれを拡充して実施する。

### III. 重要な地震及び火山現象に関する観測研究の成果

#### 1. 主な地震

本節では、近年発生した地震のうち、平成28年度以降に地震発生過程の解明・地震発生予測の研究を進める上で意義深い成果が得られた地震や災害科学的に重要な地震を取り上げた。

##### 1) 平成28年(2016年)熊本地震 M6.5, M7.3

2016年熊本地震は、地震本部で長期評価が行われていた日奈久断層帯、布田川断層帯付近で発生した地震であり、日奈久断層帯で発生したM<sup>s</sup>6.5の地震の約28時間後に、隣接する布田川断層帯でM7.3の地震が発生したという特徴を有する。以前より観測データが充実している地域で発生した地震であり、地殻変動、強震動<sup>\*</sup>、地震波速度構造、比抵抗<sup>\*</sup>構造、応力場<sup>\*</sup>など多角的な観点から分析がなされ、相互に比較されることで地震発生場の理解が大幅に進んだ。

この地震に関連する一連の地震活動をまとめると以下の通りである。

2016年4月14日熊本県熊本地方の深さ11kmでM6.5の地震が発生し、熊本県益城町で震度<sup>\*</sup>7を観測した。発震機構<sup>\*</sup>は北北西-南南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層<sup>\*</sup>型である。その約28時間後の4月16日には深さ12kmでM7.3の地震が発生し、熊本県益城町、西原村で震度7を観測した。発震機構は南北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型である。熊本県益城町では二度も震度7の揺れに襲われ、多くの家屋が倒壊した。これらの地震をはじめとして、熊本県熊本地方、阿蘇地方、大分県中部などにかけての広い範囲で地震活動が活発となり、4月15日のM6.4の地震(最大震度6強)、4月16日のM5.8の地震(最大震度6強)などを含め4月30日までに震度6弱以上を観測した地震は7回、最大震度5弱以上を観測した地震が22回発生している。

この一連の地震活動により、死者249人、負傷者2,790人、住家全壊8,674棟、住家半壊34,563棟、住家一部破損162,312棟などの被害が生じた(平成29年度消防白書)。また、この地震により土砂災害が190件発生し、10人(関連死を除く)が亡くなっている(国土交通省による)。

一連の地震活動領域には、布田川断層帯、日奈久断層帯、別府-万年山断層帯が存在している。4月14日の地震(M6.5)は、主に日奈久断層帯の高野-白旗区間の活動、4月16日の地震(M7.3)は、主として布田川断層帯の布田川区間の活動と考えられている。地震調査委員会<sup>\*</sup>は平成25年に、布田川断層帯(布田川区間)については、活動時にM7.0程度の地震が発生する可能性があり、今後30年以内の地震発生確率はほぼ0~0.9%(やや高い)と評価していた。また、日奈久断層帯(高野-白旗区間)については、活動時にM6.8程度の地震が発生する可能性があり、今後30年以内の地震発生確率は不明との評価であった。

現行計画に関連し以下の主な成果が得られた。まず、これらの地震に伴って、布田川断層帯の布田川区間沿いなどで長さ約28km、日奈久断層帯の高野-白旗区間沿いで長さ約6kmにわたる地表地震断層<sup>\*</sup>が明らかにされた。いずれの地点も主に右横ずれ変位が主体であり、益城町堂園(どうぞん)付近では最大変位約2.2mであった。一部の区間では北側低下の正断層成分を伴う地表地震断層も見つかっている。強震記録<sup>\*</sup>を用いた震源過程<sup>\*</sup>解析によると、4月14日の地震(M6.5)

は日奈久断層帯北部に沿ったほぼ鉛直な断層面上の右横ずれ滑りで特徴づけられる。一方、4月16日の地震(M7.3)では、主な破壊は布田川断層帯沿いの断層面上で起こっており、正断層成分を含む右横ずれ滑りで特徴づけられる。また、大きく滑った場所の浅部延長は地表断層が出現した場所と対応する。

GNSS観測の結果によると、4月14日のM6.5の地震及び4月15日のM6.4の地震の発生に伴って、熊本県内の城南観測点が北北東方向に約20 cm移動するなどの地殻変動が、また4月16日のM7.3の地震の発生に伴って、熊本県内の長陽観測点が南西方向に約98 cm移動するなどの地殻変動が観測されている。地球観測衛星「だいち2号」が観測したSAR画像の解析結果によると、熊本県熊本地方から阿蘇地方にかけて地殻変動の面的な広がりが見られ、布田川断層帯の布田川区間沿い及び日奈久断層帯の高野―白旗区間沿いに大きな変動が見られる。これらの地殻変動から推定された震源断層の長さは約35 kmで、地震波形解析の結果や地表地震断層調査の結果などとも整合的である。

だいち2号が観測したSAR画像の解析結果には、布田川断層帯や日奈久断層帯に沿った大規模な位相の不連続や断層変位に伴う広域的な弾性変形のほか、小さな地表変位を示す線状の位相不連続が多数確認された。これらは地表付近での小規模な断層運動と対応しており、一部は既知の活断層と一致する。こうした地表断層は地震波を励起しておらず、地震に誘発され、受動的に動いた断層が大部分であると考えられる。

GNSS観測から、地震発生直後から60日間程度は急激な余効変動が続いたが、その後はゆっくりとした変動が2021年9月現在に至るまで継続していることが明らかにされた。また、布田川断層帯と日奈久断層帯の境界付近で大きな余効滑りが推定されている。SAR観測からは、布田川断層周辺における隆起や西向きの変位、布田川断層と出ノ口断層の間に挟まれた局所的な沈降など、複雑な空間分布を持つ余効変動が明らかにされた。

震源域の詳細な地震波速度構造を3次元トモグラフィにより調査した結果、地震時の滑り分布との対比から、大滑り域は比較的高速度領域に対応することが示唆された。また、広帯域MT観測により震源域を含む九州中部の比抵抗構造が詳しく調査され、本震後に活発化した熊本県から大分県に至る地震活動は、阿蘇山・九重山・鶴見岳といった活火山下の低比抵抗域を避けて発生していることが明らかにされた。

地震発生前の稠密観測データを用いて震源域の応力場を推定し、布田川断層帯、日奈久断層帯の断層面に働くせん断応力の方向を求めたところ、4月16日のM7.3の地震で観測された複雑な滑り方向と調和的であることがわかった。これは不均質な応力場を反映して大地震の破壊が進むことを初めて観測から示したものであり、今後の強震動予測の高度化に資する。一方、本震の破壊の西端は熊本市地下、東端は阿蘇火山直下に確認された低比抵抗の火山性構造付近で停止しており、破壊の進展が火山によって影響を受けていることが示唆された。

一連の地震による自然斜面の地滑り・崩壊は、カルデラ内の西部とカルデラ壁斜面において発生しており、岩盤急斜面の崩壊とともに、緩斜面でも急速な地滑りが発生したことが確認された。滑り面は、多くの場合、草千里ヶ浜火山降下軽石層やデイサイト溶岩が熱水変質を受け、一部が粘土化した層に位置することがわかった。また、谷埋め盛土斜面の地滑りは旧谷地形と一致していたこともわかった。

4月16日のM7.3の地震により震度7を記録した益城町における強震動の特徴を調査したところ、木造家屋に大きな被害をもたらす周期1～2秒の地震動成分が大きかったことがわかった。この周期1～2秒の地震動成分は過去に震度7を記録した平成7年(1995年)兵庫県南部地震や、平成16年(2004年)新潟県中越地震の記録と同程度かそれ以上であった。また、西原村では、長大構造物に被害を与える周期3秒程度が卓越する長周期速度パルスが観測され、深さ数kmまでの断層面の浅い部分における時定数の長い滑りが原因であることがわかった。なお、熊本と阿蘇地方において長周期地震動階級(最大ランク)が平成25年の運用開始後、初めて発表された。

また、この地震を契機に、研究者と国・地方の行政機関、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、修学旅行生向け学習プログラムの作成を通して防災リテラシーの向上を図る方策を展開している。

## 2) 平成28年(2016年)カイクウラ地震(ニュージーランド) M7.8

2016年カイクウラ地震(ニュージーランド)は、多数の異なる形状、滑り方向の断層が連動し

一つの大きな地震となったもので、活断層帯で将来起こり得る地震の規模や範囲を考える際に大きな影響を与える知見をもたらした。

2016年11月14日、ニュージーランド南島北部の東海岸沿いの地殻内深さ約15 kmでMw7.8の地震が発生した。強い揺れに加えて、最大遡上高\*6.9 mの津波がグースベイにおいて地震発生後の10分以内に観察されたものの、津波自体の被害は小さかった。少なくとも21個の既知の活断層セグメントと未知の断層セグメントに対応する地表地震断層が観察され、上下・水平方向の地表変位量の最大値は約12 mにも及んだ。震源域周辺の広い範囲で約10,000箇所<sup>1)</sup>の土砂崩れが生じ、一部では土砂が河川の流れを堰き止めて天然ダムが出現した。

発震機構は、東西方向に圧力軸を持つ逆断層\*型と横ずれ型の混合タイプであり、大きな非ダブルカップル\*成分を持っていた。断層滑りは震源域の南南東の端から開始し、多数(少なくとも21枚)の断層を破壊しながら、約2分間にわたって北北東へ伝播した。複数の断層が破壊するとても複雑な震源過程であった。破壊域全体の走向方向の長さは約180 kmにわたり、地震時の滑り量分布は不均質に富んでおり、破壊開始点から北北東方向へ約120 km離れた領域で約25 mの最大滑り量が推定された(GNS Science, ニュージーランド)。様々な幾何形状・滑り方向・断層間の相互作用の強さを有する多数の断層が一つの地震として動いたことは、長期評価などで仮定される地震シナリオ策定において複数断層の連動破壊を取り入れる重要性を提示している。

地震発生後に、現地の共同研究者の協力のもと臨時地震観測網を震源域に展開し、高精度な震源\*決定や応力場・地震波速度構造推定、低周波微動\*の検出等の研究を実施した。応力場と断層形状を基に断層の地震前の滑りやすさを評価したところ、破壊開始点・断層間の接合部・大滑り域では断層が滑りやすく、複数の断層が連動することで破壊域が拡大したことが推察される。

今回の地震発生直後から、北島のヒ克蘭ギ沈み込み帯の広い範囲において複数のスロースリップ\*が誘発された。北島北部沖の浅い短期的なスロースリップ(深さ15 km以浅)に加えて、北島南部では長期的なスロースリップが深さ約30 kmで発生した。また、スロースリップとプレート境界地震\*の発生可能性に関する確率予測研究がGNS Scienceを中心に実施され、これは南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会等の議論において参考となる内容である。

GNS Scienceは本地震発生後に地震活動の今後の見通しを示す地震発生確率予測マップを公開した。より大きな地震の発生可能性も考慮した確率の提示は、国内における大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方を検討する上で参考となる。

### 3) 平成30年(2018年)大阪府北部の地震 M6.1

この地震はM6程度の中規模地震だが、大都市域の直下で発生したため震度5強以上の地域内の人口が比較的多く、その影響は社会の広範囲に及んだ。そのため、大都市の災害を考える上での経験や知見が得られた。また、逆断層と横ずれ断層が同時に活動した地震であり、活断層が複雑に分布する地域での連動破壊の可能性を考えるうえで重要な知見をもたらした。

この地震に関連する一連の地震活動をまとめると以下の通りである。

2018年6月18日7時58分、大阪府北部の深さ約13 kmでM6.1の地震が発生した。この地震により大阪府の複数地点で最大震度6弱を観測し、死者6人、負傷者443人、住家全壊18棟、住家半壊517棟などの被害が生じた(平成30年度消防白書)。地震発生直後から、稠密な地震観測網が震源域に設置され波形データが取得された。強震動記録解析と地震活動解析を実施したところ、破壊は北北西-南南東走向の東側傾斜(約45度)の逆断層で最初に生じ、約0.3秒後に東北東-西南西走向の高角傾斜の横ずれ断層に乗り移り、その後は同時に断層運動が起きていたことが明らかになった。今回の地震は、有馬-高槻断層帯の数km南側に平行して存在する微小地震の線状配列の東の延長で発生した。横ずれ断層はこの線状配列の走向と整合的で、かつ、地表に明瞭な痕跡は現れていないため伏在断層の一部(伊丹断層の東部延長)が活動したと考えられる。一方、最初に動いた逆断層と、近傍にあり同様に東傾斜する上町断層帯の深部延長との詳細な関係は不明であるが、この地震が上町断層帯に与えた応力変化を計算したところ、断層運動を促進する方向に応力変化を引き起こしたことがわかった。水平圧縮応力場が卓越する地域においては、逆断層と横ずれ断層が同時に活動することで、ひとつの地震になる場合があることが示された。地震の長期評価やハザード評価において2つのタイプの断層の連動破壊も考慮することが今後必要である。

この地震では、北東から南西方向に分布する震度5強以上の強い揺れに加えて、複雑な後続波が観測された。大阪平野の3次元地震波速度構造モデルを用いた強震動シミュレーション\*を行っ

たところ、堆積層内の多重反射波や、盆地端部及び平野下の活断層における基盤段差構造によって生じる表面波が複雑な後続波の要因になったことが示された。これは地盤の地震動応答に関する知見をもたらし、地震動の事前評価手法や即時予測手法の高度化につながる成果である。この地震による人的被害は、倒壊したブロック塀やタンス等の下敷きになるなどが原因で死者6人であった。大きな加速度が観測されたにもかかわらず、建物の構造的被害が少なかった。これは強震動の卓越振動数が3 Hz程度と建物の固有振動数よりも有意に高く共振がほとんど起きなかったためと推定される。一方、屋根瓦など一部損壊の被害が多数生じた。大都市域の直下で発生した地震であったため、震度5強以上の地域内人口が比較的多く、公共交通機関の運転見合わせやライフラインの停止及び復旧遅延など広い範囲に影響が及んだ。例えM6程度の地震であっても、都市部では広い範囲において日常生活に支障を来すことが明らかとなった。M6の地震が発生する頻度は、M7以上の大地震が発生する頻度と比べて約10倍高く、早期ライフライン復旧のための点検・修理方法を検討することは喫緊の課題である。

#### 4) 平成30年(2018年)北海道胆振東部地震 M6.7

2018年北海道胆振東部地震では深さ37 kmという内陸部のやや深い場所で起こった中規模地震にもかかわらず、広域で被害が発生した。日本列島に広く分布する降下火砕堆積物\*の大規模な崩壊が引き起こされ、震源から約50 km離れた札幌市内で谷埋め盛土の宅地液状化\*が発生するなど、多様な災害が顕著に表れた。震央\*は地震本部で長期評価されていた石狩低地東縁断層帯付近であったが、余震\*分布や地殻変動により推定された断層形状は想定されていたものとは異なっており、活断層の長期評価の不確実性の問題を提起した。

この地震は、2018年9月6日3時7分に北海道胆振地方中東部で発生し、北海道厚真町で震度7、安平町、むかわ町で震度6強の強い揺れを観測した。この地震により、厚真町を中心に同時多発斜面崩壊が発生し多数の人的被害が出たが、その崩壊面積は明治以降の地震災害の中で最大であった。地震動や斜面崩壊による発電設備の停止を発端として、北海道全域が一斉停電となる「ブラックアウト」が我が国で初めて発生し、生活や産業に大きな影響が出た。震源から約60 km離れた札幌市清田区の宅地では、谷埋め盛土の液状化が発生し多数の住宅が全半壊となった。この地震により、死者44人(関連死含む)、負傷者785人、住家全壊491棟、住家半壊1,816棟などの被害が生じた(総務省消防庁)。

現行計画に関連し以下の主な成果が得られた。緊急的な合同余震観測によって詳細な余震分布が得られ、東北東-西南西方向に圧力軸をもつ逆断層型の発震機構解と調和的な高角な東傾斜の面上に分布し、深さは約15 kmから約40 kmにわたることが明らかにされた。これは、震源域直上にある主要活断層の石狩低地東縁断層帯の形状とは一致しない。SAR干渉画像解析やGNSS観測では、震源断層の運動による広域的な地殻変動に加え、震源断層の動きには直接関係しない局所的なリニアメント状の地表変動が検出された。微動\*観測による地盤構造探査や強震計による余震観測が行われ、建物被害が多かったむかわ町市街の強震動の生成には浅部地盤構造による地震波の増幅が影響していたことが明らかにされた。同時多発斜面災害の現地調査から、発生域が数千年前以降の降下火砕物が厚く堆積する地域に一致し、滑り面となった降下火砕物最下部には粘土化した鈹物が見られるとともに、滑り面付近の土層が常に高い含水量を有することが明らかにされた。また、被害シナリオを明らかにするアンケート調査が実施され、室内の家具配置密度と人的被害の関係性が明らかにされた。

#### 5) 令和元年(2019年)山形県沖の地震 M6.7

この地震はひずみ集中帯\*で発生した地震であり、今後、同様の地域で発生する地震の震源特性を考える上で有用な知見をもたらしした。

2019年6月18日22時22分頃、山形県酒田市沖の深さ約14 kmを震源とするM6.7の地震が発生した。この地震により、新潟県村上市で震度6強を観測し、負傷者43人、住家半壊28棟などの被害が生じた(総務省消防庁)。発震機構は西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、これまでに日本海東縁部で起きてきた内陸地震\*と類似する。今回の地震の震源域は日本海東縁部の海域に位置する。日本海東縁部には、ひずみ集中帯と呼ばれる活構造が存在しており、今回の地震はこの構造の一部が関係していると考えられる。

海域の震源に対して精密な余震分布を求めめるために、地震発生直後から陸域の海岸線付近ではテレメータ\*による臨時地震観測点を設置するとともに、海域においては係留ブイ方式を用いた海

底地震計を設置して連続波形データを取得した。これらの波形データを解析することで、余震の震源を高い精度で推定した。余震は主に深さ約 2 km から 12 km に分布し、陸の観測点のみを用いた気象庁震源と比べて全体的に 5 km 程度浅くなる。また、これらの余震は傾斜角 40 度程度で南東に傾斜する面状分布を示し、本震の破壊開始点は面状分布の下端に位置し、今回の地震は震源域深部から浅部に向けて破壊が伝播したと考えられる。日本海沿岸の断層は日本海形成時の影響を受けており、地下構造探査などにより、北西傾斜の断層が多く確認されているが、今回のように南東傾斜の断層による地震も発生する。日本海沿岸で発生する地震を考察する上で、震源断層面の正確な推定は重要である。

地震活動を表す数理モデルの 1 つである HIST-ETAS モデル\*を本地震と 1964 年新潟地震の発生域とその周辺の地震活動に適用し、地震活動度を表すモデルパラメータの空間分布を推定した。その結果と日本海東縁部の活構造分布を比較したところ、2 つの地震の震源域は、定常的な地震活動度とひずみ速度の高い領域に位置することが明らかになった。また、本地震の発生直後から地震活動域が時間とともに拡大することが確認され、流体の寄与が示唆された。

## 6) 令和 3 年 (2021 年) 福島県沖の地震 M7.3

2011 年東北地方太平洋沖地震から 10 年が経過しようとしている時期に発生した、この周辺では約 4 年ぶりとなる M7 クラスの地震であった。さらにこの地震後には 50~80 km 程度離れた宮城県沖のプレート境界\*で M6.9 と M6.8 の地震が立て続けに発生している。巨大地震後に発生する様々な現象の理解と、今後の長期間にわたるハザードについて評価が重要である。

2021 年 2 月 13 日 23 時 7 分に福島県沖の深さ 55 km で M7.3 の地震が発生した。宮城県及び福島県で最大震度 6 強を観測し、死者 1 人、負傷者 186 人、住家全壊 69 棟、住家半壊 729 棟などの被害が生じた (2021 年 3 月 29 日 17 時 00 分現在、総務省消防庁)。この地震により、宮城県石巻港で 22 cm など、宮城県及び福島県で津波が観測された。また、GNSS 観測により福島県で 2 cm 弱の西、もしくは南西方向への変位が観測された。

発震機構は西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層で、震源位置と合わせて考えると、沈み込む太平洋プレート内で発生した地震である。その後の地震活動は、北東-南西走向の長さ約 40 km、南東傾斜の面に分布しており、発震機構解のひとつの節面\*と調和的である。破壊開始点は震源断層の北東端で、滑りの大きい領域はその南西側に位置していた。断層の南西端は太平洋プレート上面付近に達していたと考えられ、その周辺で発生した翌 14 日の M5.2 の地震、15 日の M5.5 の地震はプレート境界で発生した地震であった。また断層の北東端に近いプレート境界でも 5 月 14 日に M6.3 の地震が発生した。

現行計画のこれまでの研究から、東北地方太平洋沖地震の余震活動は、本震時に大きく滑った領域では低調である一方、その周辺領域、とりわけ沿岸域付近では高い状態であることが指摘されている。これは、本震時の滑りとその後の余効滑り、粘弾性\*緩和による応力の再分配の影響と考えられる。巨大地震後の地殻活動の理解と今後の地震活動の予測研究のため、現行計画のもとで観測、研究を続けることが必要である。加えて、陸域に近いプレート内で発生する地震による強震動の事前評価及びハザード評価の高度化が求められる。

## 7) 令和 3 年 (2021 年) 宮城県沖の地震 M6.9

この地震は 2011 年東北地方太平洋沖地震の滑り域の深部端付近で発生しており、同地震から 10 年経過した今日でも、それに伴う応力変化の影響が強く残っていることを示唆している。もともと宮城県沖では M7 クラスの地震が、個々の特徴は異なるものの繰り返し発生している。近年大地震によって破壊されていないプレート境界では、宮城県沖で発生することが想定されている地震を含めた大地震の発生に関し、特に注視すべき状況が続いている。

2021 年 3 月 20 日 18 時 7 分に宮城県沖の深さ 59 km で発生した M6.9 の地震である。宮城県で最大震度 5 強を観測したほか、負傷者 11 人、住家一部破損 2 棟などの被害が生じた (総務省消防庁)。発震機構は西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型で、沈み込む太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した地震である。その後の地震活動は、東西約 30 km、南北約 30 km の領域に分布した。

陸域、海域の観測網を用いた詳細な調査によると、破壊開始点は震源断層の北端で、滑りの大きい領域は、破壊開始点よりもやや浅い場所とその南側に位置していた。また、GNSS 観測により宮城県で 2 cm 強の東方向への変位が観測された。この地震の発生域は、1978 年宮城県沖地震

(M7.4)の発生域の西側と一部重なっていると考えられる。2021年5月1日には3月20日の地震の南東約40kmでM6.8の地震が発生したが、これら2つの地震の破壊域を合わせても1978年宮城県沖地震や2005年宮城県沖の地震(M7.2)の震源域全体には及んでいないことがわかった。

## 2. 主な火山噴火

本節では、平成28年度以降に活動が活発化した日本の火山と災害科学的に重要な火山を取り上げた。

### 1) 草津白根山(本白根山)

2018年1月23日に本白根山鏡池の北側で新火口列を生じる噴火が起こり、近くのスキー場で噴石による人的被害も発生した。従来、草津白根山では歴史時代に水蒸気噴火を繰り返してきた湯釜火口周辺からの噴火を想定した多項目高密度の観測網が敷かれていたが、2018年の噴火は、その観測網の外側(湯釜火口から約2km南)で発生した。この噴火に先立ち、本白根山を対象とした地質調査が行われており、最新のマグマ噴火は1500年前であったことが判明するなど、活動史の更新が進められていたが、当時は本白根山に特化した観測体制は敷かれていなかった。この噴火を受けて、気象庁は草津白根山の噴火警戒レベルを白根山(湯釜付近)と本白根山に分けて発表することになった。歴史時代に限っても、噴火地点(火口)が複数存在する火山は多い。この噴火は、そうした火山における災害軽減の方策について課題を投げかけ、現行計画で「高リスク小規模火山噴火」総合研究グループが設けられた背景の一部にもなった。

噴火の実態は、既存の観測網で捉えられたデータと噴火後の現地調査により明らかになった。噴火により観測網の伝送・電源系統が被害を受けたが、本観測研究計画や2016年度の国立大学法人設備整備費補助金等により複数の系統を整備していたため、観測が中断せず貴重なデータを得ることができた。また、湯釜周辺で多項目観測を長期間維持していたことで、隣接する本白根山の突発的な噴火や噴火前の活動状況について、以下のように重要な科学的知見が得られた。

本白根火砕丘\*付近では、年に2~3回程度の地震活動が観測されていたものの、2018年の噴火に先行する顕著な現象は認められず、噴火の3か月前に実施した空中赤外観測にも、噴火地点周辺の地表面温度に異常はなかった。空振計の記録から、噴火は10時2分10秒に発生したと推定された。湯釜火口周辺の5カ所に設置された傾斜計\*は、噴火の約2分前から湯釜南方の隆起を捉え、噴火発生を機に沈降に転じた。この地盤変動\*は、新火口列直下の鉛直割れ目が噴火前後で開閉したとするモデルでよく説明された。噴出物の全岩化学組成\*分析と野外調査から、この噴火では鏡池北火砕丘と同じ成分をもつ岩塊が約3.6万トン放出されたことがわかった。火山灰\*に付着した水溶性成分の分析から、この噴火にはマグマ起源の高温の火山ガス\*が関与したと考えられた。

現行計画では詳細な地質調査やトレンチ調査\*にも取り組んできた。本白根火砕丘群及び白根火砕丘群の活動年代が明らかになり、主要テフラ\*の層序\*や年代、物質科学的データをもとに完新世の噴火履歴と噴火様式が解明・整理された。また、噴火発生場の理解のため広帯域MT探査を行い、深さ10km程度までの3次元比抵抗構造を明らかにしたことで、深部マグマ溜まり\*から供給されるマグマ性流体の上昇経路のモデルを提示することができた。さらに、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。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、前者の方が火山活動や噴火現象に対する理解度や知識量が顕著に高いことが明らかとなった。利用者の理解度や知識量の違いを意識した情報の内容を検討すべきであることがわかった。

### 2) 霧島山(新燃岳・硫黄山)

2008年から小規模な噴火が続いた新燃岳は、2011年1月に約300年ぶりに本格的なマグマ噴火を起こした。その後活動は休止したが、2017年10月から2018年3月まで再びマグマ噴火が発生した。また、新燃岳の北西約5kmに位置する硫黄山でも活動が活発化し、2018年4月にごく小規模な水蒸気噴火が発生した。霧島山は、噴火様式の変化や活動の消長を多項目観測で捉えることができる場となっており、現行計画の重点的研究の一つである「火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測」を進める上でも重要である。

現行計画などによる新燃岳の継続的な観測により、2011年から2018年の噴火までの火山活動の推移が詳細に捉えられた。2011年9月の噴火以降、火口内のごく微小な隆起沈降現象や溶岩冷却

過程を検知することができた。2017年2月から、噴火に先行した新燃岳北西深部のマグマ溜まりの膨張や10月9日の火口直下浅部への流体移動を示す微弱な傾斜変動と火山性微動\*の検知に成功した。小規模噴火の発生や爆発的噴火、溶岩流出に伴う山体変形も記録された。また、2017年10月の噴火発生から2018年の噴火に向けて微弱な連続微動の振幅が次第に増加する現象が捉えられた。これらの観測記録は、火山活動推移モデル構築に資する基礎データとなる。そのほか、火口内の状況把握を目的として、航空機搭載型 SAR (Pi-SAR2) による観測や、日本と欧州の人工衛星データを用いることで時間分解能を高めた SAR 干渉解析を行い、火口内の膨張源を推定した。また、2018年3月に繰り返し発生した爆発的噴火に伴う傾斜変動データの解析により、爆発の約30分前から始まる地下浅部の膨張、爆発直前10分前からの若干の収縮を経て、噴火発生に至ることがわかった。火道\*内での発泡や増減圧などの定量的理解につながる成果といえる。

物質科学的研究では、火山灰の磁性の違いから、マグマ水蒸気爆発\*とマグマ噴火\*を判別することに成功した。この研究を発展させると、火山灰の分析に基づいて噴火様式を簡単に判定できるようになる可能性がある。そのほか、新燃岳2011年噴火の石質岩片試料を観察・分析したところ、ナノライトと呼ばれる微細な結晶が火道内のマグマの液相部分に晶出することで、マグマの粘性が増加して破碎しやすくなっていたことがわかった。これにより、ナノライトの晶出が溶岩ドーム\*の爆発を起こす要因である可能性が示された。

一方、硫黄山についても2018年の水蒸気噴火\*に関連して各種の観測研究が行われた。噴火前からの継続的な火山ガス組成の採取・分析によって、噴気に含まれるマグマ起源成分の比率が噴火前に高まり、噴火後は低下したことが明らかにされた。大部分の噴気組成は熱水系卓越型に分類されるが、活動活発期の噴気組成にはマグマの関与が認められた。同位体比分析の結果、硫黄山の火山ガスの放出源は地下水ではなく主にマグマであることがわかった。また、この噴火はごく小規模な水蒸気噴火であったが、だいち2号と航空機搭載の合成開口レーダーによる観測データを併用した SAR 干渉解析により、噴火前の局所的な地盤膨張を明瞭に捉えることに成功した。これらはいずれも火山活動推移モデルの構築に大きく貢献する成果である。

### 3) 西之島

2013年の噴火以降、休止期を挟みながら噴火活動を継続している西之島は、東京の南約1,000 km に位置する火山島である。溶岩流や火山灰の噴出により陸地を拡大しているが、火山島の噴火活動の監視技術の向上及び災害リスクの評価を念頭に、現行計画により観測研究を進めている。

観測船を用いる観測としては、海底地震計や海底磁力計の設置、ドローンによる地形観察や火山噴出物採取を行った。2019年9月には、一時的に噴火活動が低下した機会を捉えて上陸し、広帯域地震計や空振計を島内に設置した。得られたデータは衛星回線経由で伝送し、揺れの方向の変化から震動源の時空間分布の推定や、低周波数側に变化する卓越周波数の検出を行った。

離島であることから人工衛星を用いた観測解析も進めている。SAR 干渉解析では西之島の地形変化を検出し、火山灰や溶岩流による陸地の拡大現象を把握することに成功した。2017年の西之島噴火を対象に、ひまわり8号の1.6 μm 画像での熱異常と噴出率の回帰式を求めた。類似の噴火活動を示すラウン火山(インドネシア)の2015年噴火に適用し、その有用性を確認するとともに、2019年12月に始まった西之島4期噴火の最初期の噴出率を推定した。その結果、推定された噴出率  $0.50 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$  は、だいち2号画像を利用した地形的方法により求められた噴出率とよく一致することがわかり、衛星を利用した熱異常測定により噴出率を推定できることを示した。

### 4) 桜島

2016年8月から2017年2月まで噴火がなかった桜島は、2017年3月下旬に南岳山頂火口で、同年4月から10月に昭和火口で噴火が発生した。昭和火口は2018年の4回の噴火以降、噴火活動を停止した。一方、南岳山頂火口は、2017年10月末から噴火活動が再開し、2018年から噴火活動は活発となり、2020年3月から6月にかけて噴出規模の大きな噴火の頻度が増加した。2020年6月4日2時59分の爆発により火山岩塊が火口より約3 km を超えた地点まで飛散した。この噴火では、気象庁の一般気象レーダーや京都大学防災研究所の X バンド MP レーダーの解析から、噴煙高度が火口上 6,000~8,000 m に達していると推定された。このように、噴火地点や噴火様式を変化させながらも活発な噴火活動を続ける桜島は、現行計画においても重要な多くの成果が得られ、重点的な研究である火山活動推移モデルの構築に大きく貢献した。また、総合的研究の対象となっており、分野横断型研究としても大きな成果を生んでいる。

昭和火口では、2017年4月以降に噴火の頻発・溶岩噴泉活動・ブルカノ式噴火頻発と噴火様式の変遷が見られた。これらの異なる様式の噴火現象のいずれにおいても、南岳下のマグマ溜まりの膨張が先行することが検知され、地盤変動観測から推定されるマグマ溜まりの膨張速度とこれらの噴火様式に関連性があることが改めて裏付けられた。2017年10月末には噴火活動が昭和火口から南岳山頂火口に移ったが、両者とも低結晶度の噴出物粒子が増加したことから、昭和火口と南岳山頂火口の両火口へのマグマ上昇が連動していたことが推察される。また、長期的な広域GNSS観測により、始良カルデラ下のマグマ溜まりが膨張収縮を繰り返しながら体積増加を続けていたことが知られているが2017年以降は鈍化していることが明らかとなった。また、桜島と近接する霧島山のGNSSデータを統合した時間依存インバージョン\*解析からは、桜島と始良カルデラでの体積膨張、霧島山での2018年噴火発生時及びその前後の膨張・収縮源の位置と大きさが推定された。

2006年から2018年に桜島昭和火口で発生した火砕流をとまなう噴火47例中27例で顕著な前駆的地震が発生していること、噴火前の膨張レートが減少もしくは停止する際に前駆的地震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を明らかにした。

宇宙線(ミュオン\*)を利用した高解像度の火山浅部透視技術により、南岳のB火口直下の低密度領域が昭和火口直下の低密度領域より大きいことを明らかにした。桜島の黒神地区において小型船舶レーダーを用いた観測を開始し、2019年11月の火砕流噴煙の流下パターンや堆積を明瞭に捉えることに成功した。Multi-GAS\*やセスナ機による火山ガス組成観測から、SO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S比は1~1000の範囲で大きく変動していること、その比が1~30の変動範囲では爆発頻度と相関がある一方、30を超えるのは火山灰放出時に限られることがわかった。また、二酸化硫黄可視化モニタリング装置を一新し、桜島で可視化測定を実施した。

#### 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・火山現象に係る過去の事象、特に近代観測の開始以前のもの理解するためには、文献史料、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・火山現象の現在の状況の把握並びに将来の活動推移の予測に資するものである。膨大な文献史料の中から、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捉えたものであるのか、1855年安政江戸地震の際の蕨宿の被害を記した史料等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。

国土地理院は、熊本地震後の地形調査などの最新知見に基づいて都市圏活断層図を更新した。

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

既刊の地震史料集の全文テキスト化を行い、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も実施した。また、全国数十か所の藩庁や有力者による日記史料を調査して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。さらに、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にも努めた。新出史料と既刊の地震史料を組み合わせ、歴史学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『三国一覧合運図』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日であることがわかった。有感地震の分析から、1854年東海・南海地震前後の全国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関しても分析を行った。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たうえで、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、液状化や地滑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4,000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を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及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絶・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の情報をまとめ、史料に残る近世以降の桜島噴火情報や、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。

1993年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を明らかにした。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りマグマが上昇しやすくなっていた可能性を示した。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含まれる斜長石量が少ないことがわかり、噴火規模予測の指標として斜長石量が使え可能性が示された。浅間山・西之島・諏訪之瀬島の岩石試料を分析し、マグマ溜ま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。

火山地質図の作成及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を作成・公開し、重要火山の火口図作成を進めた。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。

#### エ. 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。

観測研究計画が、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。現行計画で実施する研究として、歴史地震、古地震のデータを増やし、より信頼性の高い情報を提供することで、災害軽減に貢献しているということを、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、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観測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及び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・火山噴火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滑り\*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火山爆発指数\* (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、洞爺や屈斜路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。室町時代に発生が指摘されていた日本海溝周辺の巨大地震が、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。房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か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。

日本海溝沿いで発生する地震の詳細なカタログを作成し、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3次元的地質構造と浅部低周波地震\*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、短期的ゆっくり滑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・噴火様式に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。

VEI7クラスのカルデラ形成噴火の研究では、7,300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、引き続き地滑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・火山噴火現象の解明には、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・火山噴火現象を復元すると、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、海溝型巨大地震の規模や発生間隔の多様性が長期間にわたって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必要がある。

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、防災科学技術研究所及び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\*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・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。摩擦特性が不均質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、断層破砕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。また、日本海溝沿いのプレート境界を模した地震サイクルシミュレーションにより、2011年東北地方太平洋沖地震時に日本海溝南部で滑りが沈み込んだ海山で止められ、地震後に顕著な余効滑りが進行した状況を再現することに成功した。

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、天然のサンプルに見られる岩石と流体が反応して帯状になった部分を詳細に分析することにより流体圧や浸透率\*を制約する新たな手法を開発し、破砕された地殻では未破壊地殻に比べて時間~年のスケールで浸透圧が数桁上昇するという結果が得られた。

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。また、カイクウラ地震前後の地震のメカニズム解の解析から、カイク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わかった。

## イ. 地震断層滑りのモデル化

様々な環境を設定した断層滑りのシミュレーションが実施され、その寄与が調べられた。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。粗い断層面の影響を見るために実施された断層滑りのシミュレーションでは、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。一方、粗さが一定以上になると、地震性滑り\*を起こせなくなることが示された。また、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℃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℃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破壊核の臨界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、通常の高速度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 以上の大きな地震に近接する M4 以下の小さな地震の波形を網羅的に調査し、多くの大きな地震の波形の始まりの部分が小さな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滑りの時空間発展をシミュレーション可能とする新たな数値計算手法を開発した。

## え. 今後の展望

南海トラフでは、海底地殻変動観測や海底地震観測により、浅部スロースリップが新たに検出されるなど、プレート間の固着状態の推定や滑りの時空間変化の理解が大幅に進展した。今後は、海陸連携の観測を一層強化しつつ、固着状態やスロー地震を含めた地震活動全体のモニタリングを充実させ、沈む込む海洋プレートのブロック運動も考慮しながら、地殻活動の包括的理解を進める必要がある。さらに、シミュレーション研究とも連携しながら、南海トラフ地震発生時の強震動生成域の位置や広がりやを推定することが重要である。日本海溝では、2011 年東北地方太平洋沖地震後の余効滑りに関して、観測記録の分析や地震サイクルシミュレーションを基にした研究がなされ成果が得られた。今後は、2011 年東北地方太平洋沖地震の理解のために、本震後のプレート境界面の固着状況や地震活動の回復過程、巨大地震へと成長した滑り現象を説明する物理モデルを明らかにしていく必要もある。一方、同様に巨大地震が発生する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。千島海溝沿いの地域についても、プレート境界の固着状態を推定するために海底地殻変動観測を継続するとともに、スロースリップ等の滑りのモニタリングが実現されるように研究を推進することが重要である。

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を進める必要がある。

地震断層滑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。南アフリカの金鉱山においては地震発生深度で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、実際の滑りに関し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滑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。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。また、沈み込み帯における流体の流れも明らかになりつつある。今後は、流体が地震の発生に及ぼす影響を定量化し、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を進めることが重要である。

#### (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、数理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。桜島や霧島山等を対象として、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・高時間分解能で捉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、地動軌跡\*の変化からマグマ供給系の変化及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、本白根火山における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わかった。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のみ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 0.5 ppmv の精度で SO<sub>2</sub> 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わかった。

噴出物の岩石組織をもとにした研究では、浅間山の 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。吾妻山では、約 5,000 年前の吾妻小富士形成噴火の詳細な推移及び様式の違いに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・屈斜路及び始良カルデラ等において噴出物の層序及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、上下・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噴火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、気泡過剰圧が破砕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、電磁気学的地下構造及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直前の深部マグマ溜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おいて、岩脈貫入過程への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って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、得られた推定値を地球物理・地球化学的観測データと照合することや、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とその巨大地震発生との関連を明らかにし、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載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並びに通常の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観測し、地震波速度・減衰構造、比抵抗構造に関する知見及び室内実験・物質科学的研究からの知見に基づいて、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、自然地震及び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、流体の存在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關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年以降に準静的滑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滑り域と類似した地震波低速度構造が見出されたこと、海底地震計データを用いた解析により1978年宮城県沖地震震源域付近の上盤プレート内(深さ10~40km)の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得られた。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。ヒクラング沈み込み帯では、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、海底光ファイバーひずみ計や海底傾斜計、GNSS-音響測距結合方式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滑りによりモデル化できることが示された。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域が検出された。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・流体の分布・地質構造により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ひずみ集中帯が再現された。このモデルにおける深さ14km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様子が確認され、地下のレオロジー構造の不均質性に関する情報が得られた。その他にも、精度よく推定された震源に基づく陸地地震活動の下限は、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の結果から、地震時滑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 14~16 km では、比抵抗値が低いとともに、流体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が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。

高密度地殻変動観測による成果として、余効滑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及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、鶴見岳・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百 m 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、霧島山硫黄山では、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。本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 4~5 km 以深に低比抵抗領域が検出され、マグマ溜ま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及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踏まえて、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。熊本地震の本震及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、高温や流体の存在と関連すると考えられている低比抵抗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仮定し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、震源域の深さ約 10 km 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、応力場に基づいて噴火の発生を予測できる可能性があることを示した。

現在の火山活動だけではなく、古い火成活動も内陸地震の発生と関連していることが示唆された。九州天草地方にある、活発な地震活動に囲まれた明瞭な地震空白域について調べたところ、地震波速度構造解析からは高速度異常、広帯域 MT 探査からは高比抵抗であること、測地データと地震データを用いた解析からは、過去十年間では周囲と同様の応力が载荷していることが示された。これらのことから、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ことが推定された。一方、周辺部は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 M1.5 以上の地震のメカニズム解を決定し、10 km メッシュの応力マップとしてまとめ、公開した。日本列島基本構造モデル構築の一環として、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。また、プレート境界地震の滑りモデルの高度化を目指して、沈み込み帯構造を含む日本列島の 3 次元速度構造モデルを考慮し、日本海溝と南海トラフのプレート境界面上の単位滑りに対する地表の弾性応答のグリーン関数\*ライブラリを整備した。

#### え. 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地震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、切迫性評価につなげるためには、臨時観測や日本海溝海底地震津波観測網 (S-net\*)、地震・津波監視システム (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ともに、近年、開発が進んでいる海底地殻変動の機動的観測技術と連続観測技術の更なる高度化や、光ファイバセンシング技術の改良等、新たな観測窓を広げることが重要である。

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、日本の事例と比較することにより、普遍性や特異性の理解を深める必要がある。海洋プレート内部の地震に関しては、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マントル由来の流体のモニタリングを行い、流体循環が地震発生に与える影響を解明することが課題となる。

内陸地震に関しては、各地域で地震、地殻変動、地球電磁気等の複合的な調査観測が進み、2016 年熊本地震等近年大きな地震が発生した地域において応力载荷過程及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による強度低下の影響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上がりつつある。引き続き、実験・シミュレーション・地球物理学的観測・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 程度までの浅部については、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にはまだ至っていない。しかしながら、光ファイバ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及びそのような構造と地震活動、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 より深部については、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、稠密観測によって高空間解像度の地震学的構造と電磁気学的構造を調べることにより、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溜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滑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。広域場におけるひずみや応力の数十 km スケール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 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に対する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、数 km スケールの空間解像度を目指した機動的稠密地震観測、電磁気探査、地殻変動観測などを進め、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み、一般公開も果たしている。利用促進のための研究集会も開催した。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を予測する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、超巨大地震や運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、沈み込み帯の詳細な構造を取り入れた3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状況が推定された。

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。日本海溝については浅部断層試料の物性を考慮した動的地震サイクルシミュレーションを行い、巨大地震の発生頻度、滑り量や長期的摩擦発熱量などの観測データをよく説明する結果を得た。

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、その発震機構が低角逆断層型であり、滑り遅れ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期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わかった。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、樫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、津波及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、地震の発生をポアソン過程\*と仮定すると、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3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変化の空間分布が推定され、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。

動力的断層破壊シミュレーションにおいて、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3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研究基盤であり、長期的に観測を維持しつつ観測空白域をなるべく狭めていくことが今後の課題である。その上で、観測データの積極的活用を今後も進めていく。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。海域観測においては、GNSS-音響測距

結合方式による海底地殻変動など新たな観測手法の継続的開発や観測網を長期的に維持するための体制構築も不可欠である。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いく必要がある。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ともなう内陸への応力蓄積源と蓄積状態の解明、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つなげる必要がある。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観測された現象の再現性等に基づく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・文献史料等を収集し、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の作成を進めている。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。微少ながら固着域の中でも滑りが起きていた点は注目すべきであり、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。

S-net や 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、帯状に分布するスロー地震の活動域の長さや滑り量分布の空間的变化が大きいことがわかってきた。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、長距離にわたるスロー地震の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か月周期で繰り返し発生するスロースリップは、ほぼ同じ場所・同じ規模にも関わらずイベントによって始まり方が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・志摩半島においては、長期的スロースリップが繰り返し同じような領域で発生しているものの滑り量が異なることがあるなど、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<sup>\*)</sup>には地震モーメント Mw4 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、3次元地震波速度構造を用いた自動CMT<sup>\*)</sup>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を進め、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やその時間変化を推定した。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推定する手法も開発した。

### 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時の欠測を埋めるための統計学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。リアルタイムで得ら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。

断層が点ではなく有限な広がりを持つこと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、余震は断層面上の地震時に大きく滑った領域の近傍に発生する機会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、前震を含まない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。このことから、この手法は前震に関連する物理を捉える手法であると言える。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）及び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、東西の領域でほぼ同時に地震が発生したり、2年～3年後に発生した事例など、南海トラフ沿い巨大地震に固有の地震発生様式が存在する可能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に限られるため、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つなげるためには、様々な時空間スケールにおけるプレート境界の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了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、周辺域の固着域に応力を載荷するため、海溝型地震の発生確率が一時的に増加する可能性がある。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。

第1次計画において、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、1978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、次

の M7 前半規模の地震の発生時期予測に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。理論研究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・小笠原に至る海溝沿いの地域を網羅的に調査し、10.8年以上の静穏化が続けば、半径 100 km の地域に 4 年間、大地震がおきやすいという予測（警報）を出すという 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千島海溝沿いで 1964～2006 年に発生した M7.5 以上の地震の発生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調査し、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、本震発生の約 2 か月前から前震活動が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わかった。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解放の加速、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も見られた。それらの相似的な前震は、本震の直前を中心に発生していることがわかった。このような現象は2011年に長野県中部で発生したMj5.4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、Mw7級の地震まで含めた解析を行い、Mw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(300~3kHz)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100km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。

気象衛星ひまわりの観測で得られた衛星熱赤外異常が、日本のM6以上の地震に対して先行する現象が統計的に有意であることが示された。

#### 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について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ってい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用することにより、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、噴火発生のパ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、噴火活動のパテンシャル評価を行う。数か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と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、富士山の地質調査及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、霧島山硫黄山、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的及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・収縮及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分析の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、山中湖の湖底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、アトサヌブ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。類似したタイプの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、火山機動観測実証研究事業\*との連携や、次世代火山研究推進事業\*による火山観測データ一元化共有システム（以下「JVND システム\*」という。）の一層の活用が望まれる。現行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。これにより、時期・場所・様式・規模・推移といういわゆる噴火予測の５要素をばらばらのものではなく一体のものとして捉え、噴火予測の精度を上げることを目指す。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1,100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、噴火様式及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て、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、噴火発生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。地盤変動データから推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、桜島及びメラピ山（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 を用いた山体ひず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及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ひず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わかった。

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3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<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>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0.5～3 km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推定す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、比較的単純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。

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、強震観測データに基づき強震動の成因と影響を把握し、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。断層変位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並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。地表地震断層沿いの西原村では卓越周期約3秒の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察された地表地震断層の情報に基づき、複数の震源断層面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滑りが求められたほか、浅部地表近くにも滑りが得られ、浅部と深部で滑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滑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地震動の再現シミュレーションを行い、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わかった。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。地表地震断層が生じた大地震の震源近くの地震動を調べたところ、1999年集地震（台湾）では約5秒、2016年カイクウラ地震（ニュージーランド）では約10秒など、多様な卓越周期の長周期パルス波が発生していたことを確認した。

地盤や構造モデルに関する成果としては、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、微動観測から浅部地盤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基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わかった。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）等の地盤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、北西大西洋での海底地震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 程度の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ド\*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、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 (Mj) は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わかった。紀伊半島南東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技术を開発し、津波の第 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、断層面上の滑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 の市町村ごとに確率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 年グランドバンクス地震津波 (カナダ) について、海底地滑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 120 m 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、2017 年の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。また、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。

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。

地震動の強さと木造建物の被害率の関係を表す被害予測モデルの検証・高精度化のため、地盤構造を考慮して推定した 2016 年熊本地震の益城町の強震動分布に適用したところ、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。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、2011 年東北地方太平洋沖地震の本震時には建物の固有振動数が低下し、減衰定数が増大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、データベース及び 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状況を予測するのに必要なパラメータを取得するために、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。避難困難地区解消の対策を自治体・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、効果的な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。

2018年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は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年福島県沖の地震(M7.3)が発生した際には、このマップと推定震度分布や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、被災状況調査に活用した。

## 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、2016年熊本地震及び2018年北海道胆振東部地震によって発生した地滑りについて、地形解析、現地調査及び室内分析により地質・地形的特徴を抽出した。南海トラフ及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7,300年前の鬼界アカホヤ火山灰近傍の暗色土に多く、これらの地層には、粘土鉱物の一種が生成していることがわかった。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、風化した軽石及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滑りを調査したところ、滑り面には薄板状ハロイサイト(粘土鉱物の一種)が検出され、実験によりハロイサイトの含有量が増えるに従い地震時の流動性が増すことが明らかになった。また、過去の火山噴火による軽石の分布域と過去の地震地滑り箇所を比較したところ、地震時地滑りの滑り面となる可能性が特に高い降下火砕物は、9,000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。

斜面崩壊に伴う地震動の特徴を分析し、概ね1-10 Hz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を見出した。

地震による地滑りの発生メカニズムの解明のため、地滑り土塊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わかった。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。地滑りリスクのある谷埋め盛土斜面で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。北海道東部で多項目観測を実施している海岸地滑り土塊は、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。超高密度DEM<sup>\*</sup>を用いて、四国の主要国道沿いにおいて、重力変形、地滑り、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。また、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オーダーの地形変化を捕捉できるようになった。また、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では、GB-SARによる荒砥沢の地滑りモニタリングのデータのリアルタイム表示を開始した。地震前後の1m-LiDAR<sup>\*</sup> 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滑り性の移動土塊の検出が可能となった。

津波を引き起こした山体崩壊である1741年の渡島大島及び1792年の雲仙眉山の事例について、実地形に基づいて土砂の移動を計算し津波を計算する方法を適用したところ、概ね歴史津波観測高と整合的な計算結果を得た。

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、北海道胆振東部地震震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及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<sup>10</sup>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日の口永良部島噴火において、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を示した。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1707年宝永噴火規模の噴火が起きた場合に都心で10 cm以上の降灰になる確率は3.3 %、桜島で1914年大正噴火規模の噴火が起きた場合に鹿児島市街で1 cm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、火砕流をとまなう噴火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3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いる。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を継続し、震源近傍強震動特性をさらに分析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・千島海溝沿いの地滑り地形に対し、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、建物被害や人的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滑りのポテンシャルの評価、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、火砕流が流下する流域ごとに、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

気象庁及び大学は、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及び改良を行った。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及び波動逆伝播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進めるとともに、リアルタイムに推定される断層滑りの不確実性を定量評価するための手法開発を行い、一枚の矩形断層における MCMC 法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\*及び GNSS の搬送位相遅延量・信号対雑音比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高度を確率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、地下の不均質散乱・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わかった。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遠隔観測点のデータを利用することにより、予測の迅速化が実現できることを確かめた。

鳥取県と連携して自治体の計測震度計から 1 秒パケットのリアルタイム震度と最大加速度値を送信するように計測震度計の改良を行い、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。

長周期地震動の即時予測のため、K-NET、KiK-net 強震波形記録と 3 次元差分法による地震波伝播シミュレーションを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の開発を進めた。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 年茨城県沖の地震（M7.0）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 秒間隔で観測データがある場合、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。さらに、この方法にリアルタイム浸水予測計算を組み合わせた手法を開発し、2011 年東北地方太平洋沖地震津波に適用したところ、10 分以内に浸水までを高精度で予測することができた。また、津波数値計算など、複雑な計算を実施することなく、500 秒間の観測圧力波形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 年十勝沖地震の滑り量分布から発生する津波に適用し、有効性を確認した。

地震にともなう不均質構造中の地震動及び津波波動場を同時にシミュレーションするため、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 を組み合わせたコードを開発し、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、この手法による震源断層モデルの不確実性を定量評価する技術を開発した。さらに、搬送波位相変化から断層滑りを直接推定する手法（PTS）の性能評価を目的とし、2011 年東北地方太平洋沖地震とそれ

に引き続き地震直後の余効滑りの時空間発展推定を行った。その結果、PTS によって地震時及び初期余効滑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、波源の広がりの小さな津波に対応するための段階的処理の導入等の手法の改良に加え、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、津波警報を更新する新たな手法として、平成 31 年（2019 年）3 月 26 日からこのシステムの運用を開始した。

#### 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・拡散過程を把握した。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ため、気象条件が良くない場合にその有効性が示された。火山噴火時の噴煙により、GNSS による搬送位相遅延量と信号対雑音比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複数の火山で実施した。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。また、西之島の火山活動の把握のために迅速に調査を実施し、2020 年噴火の噴出物の全岩化学組成、斑晶鉱物化学組成、メルト含有物化学組成の分析を行い、これまでの安山岩のマグマを噴出する活動から玄武岩質安山岩のマグマを噴出する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での降雨流出・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。クラストの存在で水の浸透過程が変わり、表面流量が増加することがわかった。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わかった。この実験を模した数値シミュレーションもを行い、流路の形成、侵食過程などをある程度再現することができた。

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・面積の予測精度が改善することを確認した。

#### エ. 今後の展望

地震動の即時予測\*については、計算機能力の向上もあり、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。地震動の即時予測については、緊急地震速報をはじめとしてすでに社会実装がなされているが、今後ともその精度や迅速性を向上させるよう、現行計画で開発されたものも含め、実装に寄与できるように新しい手法の開発に継続的に取り組むことが期待される。

津波の即時予測については、リアルタイム浸水予測と組み合わせることで短時間に浸水予測まで算出できる手法が開発されたことが特筆される。津波の沿岸波高の予測だけでなく浸水予測まで即時かつ高精度にできるようになると、予測情報を被害軽減に活用する新たな方策が生まれる可能性が広がると考えられる。今後は津波の即時予測に求められる社会ニーズに即して、予測の精度や迅速性を向上させられるよう、現行計画で開発されたものも含め、新しい手法の開発・実装に継続的に取り組むことが求められる。

火山噴出物による災害誘因の即時予測については、Xバンド MP レーダーによって噴煙の外形情報や噴煙柱の状態を把握できるようになりつつある。今後は、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てデータ同化を行うとともに、移流・拡散モデルと結合させて降灰予報の高度化を図る必要がある。また、降灰予測を災害誘因の即時予測につなげるため、降灰後の土石流などの発生リスクの把握手法の開発をさらに進めることが必要である。現行計画で実施され

ているような室内実験や数値シミュレーションを通じ、土石流などの発生メカニズムの理解を深めることが期待される。

### (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つな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活かされるよう、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、被害軽減につながる地震・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

地震・火山災害情報を活用するために必要となる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ことがわかった。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、一定の震度以上の揺れの継続時間という定義を設定して建物頂部の揺れ継続時間に関する経験式を作成した。予測式には建物階数の寄与も考慮されているが、単純な経験式による表現の限界も明らかとなった。

防災計画を策定する際には、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。そのため、地震・火山噴火等の現象のシナリオと評価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、ユーザが適切に理解できるようにすることを目指した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目指し、2018年北海道胆振東部地震によって生じた人的被害について、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関しては住家の地域特性を考慮する必要性が確認された。人的被害については、医療・防災体制を計画する上でより有意な情報となるよう、救急病院搬送を必要とする重篤者数を重傷と定義し直して負傷率を計算し、既往の各種方法による推計値と比較した。従来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や精度を保証できない一方、提案手法の優位性が示された。

火山情報の表示システムの開発において、新たな地殻変動源自動推定ツールや振幅情報から震源を自動推定するツールの設計・開発を進め、北海道・東北で第1次計画中に設置したシステム

の入れ替えを進めるとともに、九州地方への展開も行った。

不特定多数の観光客への噴火情報の伝達における課題を明らかにすることを目的に、草津白根山近傍のスキー場客を対象にアンケート調査を行ったところ、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

災害誘因の事前予測及び即時予測に関し、予測結果のばらつきの求め方や表現・発信方法についての検討がなされた。また、災害情報の効果的な発信方法を探る観点から、人々の災害情報の受け止められ方や災害リスクに関する知識量の実態の調査が行われ、防災リテラシーの高さが災害情報の受け止め方に大きく影響している可能性を示唆するデータが得られた。このように、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きている。本研究項目に含まれる研究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、他の研究項目の研究と調査対象が共通することもあるため、そのような研究とも協働することにより、より有用な研究となることが期待される。例えば、災害情報の効果的な発信方法と防災リテラシーの関係については、次項の防災リテラシー向上のための研究と大いに関係があるが、災害情報の受け止め方とリテラシーの関係を細かく掘り下げることにより、災害情報発信方法や防災関連教育の効果的かつ具体的な要素が見えてくるのではないかと考えられる。

### 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

過去の災害事例から得られた知見は、過去と現代では社会的背景に違いがあるとは言え、災害のイメージをつかむことに大きく役立つ。災害発生機構に関する知見を社会に広め防災リテラシーの向上につなげるため、災害事例の研究を進める。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。

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

過去に起きた地震・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。

安政東海地震津波（1858 年）の被災地である浜名湖周辺の被害が描かれている『舞坂宿津波図』と『安政地震津波被害絵図』から、現存する寺社や歴史的建造物をもとに地理的位置の同定を行い、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測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ニーズ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、防災リテラシー向上の方策を提案した。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。

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、様々な災害事例を詳細に分析し、災害誘因・災害素因の一般化と社会の多様性の影響の検討を進め、災害発生機構の解明を進めていくことが望まれる。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ことが重要である。

### （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。

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、同地震は学校へ防災教育が本格的に導入されるきっかけとなっており、地震発生メカニズムや被害が兵庫県内の副読本全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る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。そのような情報・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。

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。

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。噴石が居住地域まで達した 2020 年 6 月 4 日の噴火を受け、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ると考え、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。

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。

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、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の調査から、地震・火山災害発生時、様々な場面での対応に必要な知識要素や、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、地震・津波の避難行動・避難訓練について、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いに評価できる。

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ことが望まれる。そこには、社会の多様性への考慮も必要になるであろう。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・火山噴火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ことが望まれる。

## 5. 研究を推進するための体制の整備

### 目的

観測研究計画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。観測研究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

現行計画は、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を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、現行計画開始の令和元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観測研究計画に参画している。

科学技術・学術審議会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、成果の取りまとめを行っている。また、計画の進捗と成果について地震本部と情報交換し、地震本部が将来を展望した新たな地震調査研究の方針を示すために策定した「地震調査研究の推進について―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)―」との整合性を確認している。さらに、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、観測研究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(以下「予知研究協議会」という。)は、観測研究計画に参加する全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。予知研究協議会には企画部\*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、観測研究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。予知研究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、全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。研究者間の連携及び情報共有を図るため、計画推進部会やそれに属する研究課題、分野をまたがる総合研究グループごとの研究集会を単独または合同で随時実施している。年度末には予知研究協議会主催で成果報告シンポジウムを開催し、観測研究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。

現行計画では、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つが設定されており、予知研究協議会は、担当者へのヒアリングの実施や予算上の配慮を行うことにより、それらの研究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。予知研究協議会から新たな長期予測手法の提案を行うとともに、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。

国土地理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、火山防災や火山噴火予知研究の推進に資する役割を担うため、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(本白根山)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、報道発表を行い、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年及び2018年霧島新燃岳、2018年草津白根山、2018年霧島山硫黄山、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JVDNシステム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。地震本部が策定した基本施策で定められている当面10年間に取り組むべき地震調査研究との整合性を意識して研究を実施することで、観測研究計画から得られる基礎研究の成果が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。

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、合同研究集会などの分野間連携のための企画も行い、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

予知研究協議会は、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。以下では、それぞれの総合的研究について、実施状況、成果、今後の展望について述べる。

### ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

南海トラフ沿いでは100年から150年程度の間隔でプレート境界を震源域とする巨大地震が発生しており、前回の地震から70年以上経過した現在切迫性が高まっていると考えられている。これまでに示された地震シナリオ及び強震動予測は過去の観測記録及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 の研究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して研究を実施している。さらに、地震波及び津波の伝播モデルに基づき、西南日本地域の強震動及び津波浸水モデルの提示に向けて研究を進めている。

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、浅部地盤応答及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を進める必要があり、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が、その地震像は未だ統一されたとはいえない。想定される震源は多様であり特定の震源を想定することは容易ではないことから、震源想定にあまり依存しない研究を主に進めている。

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史料の分析から、被害分布を明らかにし、その分布を検証及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。

首都直下地震はその発生による影響が極めて深刻であることから、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、総合的な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総合的な研究として実施している。

対象地域の地殻活動を評価するため、津波堆積物の比較調査・珪藻分析を行い、過去の津波発生イベントの詳細や地殻変動の時系列を明らかにした。考古遺跡の液化化痕跡の整理も進めた。地震活動の統計的分析からは静穏化に基づく地震の警報基準を見出し、海底地殻変動の測定も実施した。また、津波波形のデータ同化により浸水域を数分以内に予測する手法を開発した。リスク評価研究として、避難訓練可視化システムの開発と実避難訓練参加者へのフィードバックを行った。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、災害誘因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。

## 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。

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、1914年の大正噴火記録の再解析結果や住民の記憶をもとに、大規模火山噴火の推移モデルを作成した。机上防災訓練を実施し、最適な交通ネットワークの復旧分析を行った。インドネシアの火山噴火の類似例にならない、広域事前避難に関して注意すべき点を整理した。災害誘因予測研究の一環として、遺構発掘による降下火山灰分布の調査と土石流室内実験を行った。防災リテラシー向上の研究とし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により火山活動に伴う地震波速度構造や温泉ガス組成、噴出物組成の変化を検出した。新たな観測機器・手法の開発を進め、ディスプレイによる火山灰の粒径と落下速度のリアルタイム把握、Xバンドレーダー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衛星からの受信電波の伝播遅延を利用した噴煙高度推定などを行った。地震・地殻変動データと風速データに基づく火山灰拡散範囲の事前及び即時的予測手法の開発を進めた。大規模噴火発生時の観測技術として、衛星やドローンによる観測手法、新たな地震データ伝送手法の開発、遠望観測の強化、SO<sub>2</sub>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貫入速度で区分した噴火事象分岐論理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、防災リテラシーの大項目を横断して、災害の軽減に向けた研究が着実に進められている。個別の研究成果だけでなく、本総合的研究の実施方法や実施体制は、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を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年の草津本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により、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、令和元年12月の突発的な水蒸気噴火に観光客が巻き込まれる火山災害が発生した。小規模火山噴火は、データの収集が難しく、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必要があることから、現行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。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噴火等の噴火履歴調査、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ている。

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。ニュージーランドで開発されたVUI(火山活発化指数)を十勝岳の多項目観測データに適用し、非噴火時の火山活動評価方法の検討を進めた。吾妻山や十勝岳では多項目観測結果と活動様式を比較し、火山活動の特徴抽出を進めた。地下の熱水系を理解するために熱水流動シミュレーションを実施し、火口湖の応答を知るために湖水の熱・化学パラメータの数値的検討を行った。小規模噴

火災害が発生する危険地域を事前に評価する方法を検討するために、過去の水蒸気噴火の噴火履歴調査を十勝岳のヌッカクシ火口や草津白根火砕丘群を対象に実施した。また、草津白根山や御嶽山では比抵抗調査により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、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の突発性に関する説明が不足するものがあり、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ことが提案された。

現行計画においては、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ているが、今後は、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る。小規模火山噴火は特定の火山で頻発するものではなく、全国の火山が対象となる。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。

以上述べた5つの総合研究グループによる研究は、それぞれ進展の段階に違いはあるものの、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であるという点は共通している。今後も継続して研究を進展させることが望ましい。

### (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、海洋研究開発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観測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、東海から四国に至る地域で、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、大学及び海洋研究開発機構は、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・利活用できるシステム（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 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、ゆっくり滑りに伴う非定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。

大学間及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。

東海から四国に至る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、ゆっくり滑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装置を開発した。火山地域で 920 MHz 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。

GEONET データをリアルタイムで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 レベルの地殻変動を把握できる精度を持つことが明らかになった。

南海トラフ沿いでの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滑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。南海トラフ沿い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 3 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滑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ー 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な、次世代の対話型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情報を一元化し、迅速に共有・利活用できるシステム (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、観測データはウェブ経由で火山防災協議会ヘリアルタイムで共有されるようになった。

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、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。

プレート境界デジタルデータ、日記史料有感地震データベース、臨時 GNSS 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による「地震に関する基盤的調査観測計画\*」に基づき整備、維持している基盤的観測網は、本観測研究計画の推進をはじめ、わが国の地震防災施策に必要不可欠なインフラであるとともに、海外の研究者にもそのデータは活用され国際貢献にも大きく寄与している。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。国土地理院により運用されている全国 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、陸上の観測網では検出が難しい重要な情報を提供している。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、日本海溝周辺での微動の発生状況の解明など学術成果ももたらされた。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。

観測研究計画を発展させるためには、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。海域観測は長期的に継続することが不可欠であるが、観測網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。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とともに、予算や人員の長期的確保にむけた体制の整備も必要である。

地震観測網は、できるだけ規模の小さい地震まで偏り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、本観測研究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、本観測研究計画ではより

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、近年経験したことの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、JVND システム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、新たな利用者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、本観測研究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の情報であり、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が開始されたが、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・火山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適時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。本観測研究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いて、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活かし切れているとは言い難い。現行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、観測研究全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、本観測研究計画をはじめ、日本の地震火山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。

予知研究協議会には、現行計画の開始に合わせ、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)年度より現行計画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の推進に貢献している。

大学は古地震研究会(史料解読のための勉強会)を定期的に開催し、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。また、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。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」を開発するとともに、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。

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。

##### 今後の展望

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る関連研究分野間の連携強化を今後も進める必要がある。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りつつある。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、計算機科学分野との共同研究では重要な成果が上がっているため、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、火山活動が活発な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波スプリットイング解析を行った。ヒ克蘭ギ沈み込み帯では、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s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（APRGpt）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 Science 等、海外 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派遣し、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、教育及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 システムと国際的なデータベースである WOVodat システムとのデータフォーマットの共通化を行い、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、学生への研修を実施した。産業技術総合研究所は新たに国際研修を開始し、開発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行っ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について、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、現行計画の「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「高リスク小規模火山噴火」の研究と共通するところもある。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

実施各機関は、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やリスク・コミュニケーション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。

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研究協議会自体を

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、東京大学地震研究所広報アウトリーチ室と共同で、報道関係者等を対象とする地震・火山噴火予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行っている。

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、市民や防災関係者を対象とする公開講義やセミナー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。

現行計画から防災リテラシーの向上に関する研究が計画の柱の一つとなり、効果的に防災リテラシーを向上させるための手法開発や、教育・訓練プログラムの開発が進んでいるものの、現状のプログラム開発は試行的・仮設的な段階にある。サイエンスカフェ、公開講義、セミナー、自治体との連携による防災訓練などの取り組みを通じて、より実践的なプログラム開発につながる情報・知見を得ることが重要であろう。

### (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。また、様々な研究員ポストの確保にも務めている。予知研究協議会でも毎年度特任研究員を雇用し、その後の大学や研究機関への就職につながっており、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・博士課程を修了した学生は、大学、国立研究開発法人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。東京大学地震研究所・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。

予知研究協議会では、観測研究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、オンラインで開催されているが、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つながるよう、大学、研究機関、また予知研究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国の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、進めていくことが望まれる。

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。

## V. 総括的評価

### 1. 現行計画策定までの経過

#### (地震・火山噴火予知計画の主な成果)

測地学審議会の建議に基づく地震予知計画は、前兆現象に基づく地震予知を目指して昭和40年に開始された。高感度の地震観測点や地殻変動観測点の整備とデータ蓄積が進み、データテレメータ化や自動震源決定など観測・解析技術が向上したことにより、プレート運動と地震発生の関係など地震現象の理解は大きく進展したが、データの蓄積が進むとともに地震活動は極めて複雑かつ多様であることが明らかになる一方で、前兆現象に基づく地震予知の実用化への道筋は厳しいものであった。そのような状況下で平成7年の阪神・淡路大震災が発生し、6,400人を超える死者・行方不明者が出た。これを契機にそれまでの研究成果の総括が行われ、前兆現象の捕捉に基づく地震予知を目指すというそれまでの方針から、地震発生の物理過程の解明とモデル化に基づいて地殻活動の推移予測を目指すという方針に転換した。平成11年度からは新たな方針に基づく「地震予知のための新たな観測研究計画」を開始し、プレート境界地震アスペリティモデルの発展、地震発生サイクルシミュレーション、ゆっくり滑りや低周波微動などの新たな現象の発見など国際的に高く評価される学術的研究成果が得られ、地震現象の物理過程の理解に基づく予測方法の開発という方針転換後の新たな目標に近づく知見が徐々に積み上げられていった。

火山噴火予知計画については、観測に基づく火山噴火予知の実用化を目指し、昭和49年度から開始された。いくつかの火山では、観測網の高密度・高感度化が進み、観測項目も徐々に増えた。また、マグマの性質を明らかにする実験や理論的研究も始められた。その結果、火山の内部構造のイメージング、マグマ供給系・熱水系のモデル化、噴火とそれに付随する諸現象に関する理解が進展した。観測データと噴火履歴に基づき、噴火に先行する現象の理解と噴火の関連性がある程度まで明らかになった。また、地質・岩石学的調査によりマグマの特性と噴火様式の関係についての理解が進んだ。平成12年の有珠山や三宅島の噴火の際は、先行現象の検知と過去の噴火履歴に基づいて噴火発生前に情報発信がなされ、事前避難につながった。このように、噴火事例の蓄積が進み、かつ、観測体制が整備された火山においては噴火時期をある程度予測できるようになり、平成19年には気象庁が噴火警報・噴火予報を業務として開始した。

地震と火山噴火は海洋プレートが日本列島下に沈み込むという共通の地球科学的条件の下で発生するものであり、地下構造や応力場などの地下の状態及び地震と火山の相互作用の把握と理解は地震予知と火山噴火予知の両者にとって不可欠である。また、地震と火山噴火では観測研究手法に共通する要素が多く、両者にまたがる研究者も多い。このような点に鑑み、平成21年度からは地震予知と火山噴火予知の計画を統合し、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」を開始した。これにより、地震発生場である沈み込み帯のスラブから供給される水と火山噴火を支配するマグマの発生過程の関係や、火山におけるマグマ蓄積の推移と地震活動の関係についての解明が進むなど、地震・火山研究の統合により、両分野にまたがる新たな科学的成果が得られつつあった。

#### (東日本大震災を契機とした方針転換と第1次計画の開始)

平成23年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では津波などにより死者・行方不明者が2万人近くにのぼった。当時までの観測研究計画ではプレート境界で発生する大地震に関する様々な研

究が実施されていたが、M9クラスの巨大地震発生や津波などの災害誘因に関する研究は不十分であり、計画の見直しが必要とされた。5か年計画の4年目に入っていたことから、観測研究計画の抜本的な方針転換は次の5か年に持ち越し、実施可能な範囲での部分的な見直しを行った。その結果、過去の超巨大地震に関して多くの知見が得られるようになり、地震規模や津波を短時間で予測する手法などの開発も進み、その成果は次の観測研究計画にも引き継がれた。

このような背景から、平成26年度から始まった「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」（第1次計画）では、地震・火山現象の理解に加え、地震・火山噴火による災害誘因の予測も行い、研究成果を災害の軽減につなげるように方針を大きく転換した。災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学分野の研究者や、近代観測以前の地震・火山噴火の解明のために歴史学・考古学分野の研究者が新たに参加し、地震・火山に関する理学的研究成果を災害軽減につなげるために、異なる分野の研究者が連携して取り組んだ。この方針転換により、地震や火山噴火の発生直後に状況をリアルタイムに把握し、災害誘因の即時予測に役立てるための研究が加速した。

### （現行計画の策定）

第1次計画が開始された平成26年に発生した御嶽山噴火は、噴火現象としては比較的小規模であったが多くの登山者が火口付近を訪れていたため甚大な災害となった。この噴火に関しては、水蒸気噴火のような規模の小さい噴火を解明するための理学的研究の推進だけでなく、近隣の住民に加えて観光客や登山者に対する火山災害情報のあり方に関する意識調査などの社会学的研究も進められた。平成28年の熊本地震に関しても、地震そのものの現象解明だけではなく地震がもたらした災害に関する研究など、これまでにない視点での研究も実施されるようになった。このように、第1次計画では地震・火山現象に関する理学的知見を生み出すのみならず、災害科学の視点を取り入れた総合的研究や、文理融合の取組により、防災・減災に向けて社会的な波及効果を期待できる成果が生まれつつあった。その多くはまだ萌芽的段階に留まっていたものの、第1次計画のレビュー報告書に基づいて実施された外部評価では、災害の軽減に貢献する方向への転換は適切であり、より一層推進していくべきとの指摘があった。そのため、次の5か年計画である現行計画は、第1次計画の基本方針を維持し、災害の軽減に貢献することを目指すという共通理念の下、実施体制の強化や実施項目の追加・拡充を行った上で「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）」として開始された。体制の強化としては、新たな実施機関の追加、重点的研究の開始、第1次計画で試行した分野横断の研究連携を総合的研究として立ち上げた点を挙げるができる。実施項目の追加・拡充としては、地震・火山研究の成果を社会の防災・減災に効果的に波及させることを念頭に新たに防災リテラシー向上のための研究を開始した点と、総合的研究の対象に御嶽山噴火のような小規模ながら高リスクである火山噴火を含めた点を挙げるができる。

## 2. 現行計画の成果と課題

### 2. 1 地震・火山現象の解明のための研究

#### （地震発生過程及び地震発生場の解明とモデル化）

プレート境界の地震や構造については、S-net、DONETなどの海底地震津波観測網の追加やGNSS-音響測距結合観測による海底地殻変動観測により拡充が進んだ国内の地震・地殻変動観測網のデータに基づいて多くの研究が展開され、また国際協力による調査観測も実施された。データの増加に伴い、様々な規模、様々な時定数をもつ滑り現象について、その物理機構の理解が進展した。また、プレート形状・物性構造・流体分布・応力場等のモデルの精度が向上し、これらの場の不均質がスロー地震や巨大地震の発生及び規模・時定数の多様性に与える影響についても分析が進められた。

内陸地震の発生場に関しては、各地域で地震、地殻変動、地球電磁気等の複合的な調査観測が進み、2016年熊本地震等近年大地震が発生した地域において応力载荷過程及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、今後は流体の存在量・圧力・存在形態等の定量化が重要な課題となる。

岩石破壊等の室内実験より、震源断層のある地下の物質、温度、流体、応力条件における断層滑りの発生・進展、流体の影響などが精力的に調べられ、複雑な地震現象の物理機構の理解が進

展した。また、観測や実験で得られた知見を再現・活用する数値シミュレーションにより、物理機構の理解を補強し予測につながるような成果が出ている。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ものが提案されつつある。

このように、地下の様々な物理・化学的狀態をモデル化し、地震滑り現象を中心とする地殻活動の推移をモデル化するための知見や技術は蓄積しつつある。しかし、実際の地殻構造の複雑さ、滑り現象の複雑さ、地殻活動の時定数の長さを考えると、現象の理解のためにはさらに密度の高い、長期のデータが必要である。定常観測網の効果的な利活用に加えて臨時観測も実施し、地震発生場の物理・化学的狀態や滑り現象の分析の時空間分解能を向上させると共に、モニタリングシステムの高度化によるデータの質・量の増強やデータ解析手法の高度化、理論的・実験的研究の一層の進展が必要である。また、千島海溝沿いのプレート境界では、巨大地震の切迫が同様に危惧されている南海トラフ、日本海溝沿いに比べ観測・調査研究が遅れている。そのために現行計画で総合的研究を立ち上げ、研究の加速を試みているが、この体制を持続し知見を蓄積する必要がある。

#### （火山現象及び火山地下構造の解明とモデル化）

火山現象の解明に関しては、現行計画において火山周辺や火口近傍における多項目観測が促進され、これらの観測が火山活動の推移を高精度・高時間分解能で捉える上で重要であることがあらためて認識された。噴火前後の山体変形や噴火の準備過程で生じる火山体浅部の消磁現象、火山ガスのふるまい、水蒸気噴火につながる地下の構造など、複数の火山に共通する現象や構造が見出されている。リモートセンシング技術も進み、安全に安定して火山観測を行う観測手法が開発され、異常現象の検知能力も向上している。次の段階として、観測密度を一層高めることにより、火道や岩脈、それらの形成に伴う亀裂やクラックの分布、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のイメージングをさらに進め、それらの微細構造と火山性地震・微動源、火山性圧力源、熱消磁源との関係を明らかにすることにより、火山性流体の挙動を把握することなどが課題となろう。

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マグマ特性変化の時間スケール等の物理条件の情報が得られつつある。岩石学的研究から推定されたマグマの狀態や、火道形状も考慮したより現実的なモデリングも行われた。

今後は、現在火山観測のスタンダードとなった多項目観測を継続・強化し、多くの火山で得られたデータのデータベース化とそれを活用した比較研究を推進していくことが必要である。それにより噴火様式の分岐条件の定量化を目指し、また実験やモデリングを通じた素過程理解の向上に努め、火山内部現象の定量的物理モデル化を進めて噴火現象の予測に貢献していくべきである。

地震現象との相互作用に関する研究も重要である。火山は、局所的な応力狀態の変化や、強度低下を引き起こし、地震発生場に影響を与える。2016年熊本地震に関する研究で示唆されたように、火山及びその周辺の構造が断層の滑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ことから、他地域でも検証を進める必要がある。そのため20 kmスケール以下の範囲に集中した機動的稠密地震観測、電磁気探査、地殻変動観測などを進め、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。

#### （低頻度大規模地震・火山噴火現象に関する史料・考古データ、地質データに基づく研究）

地震・火山噴火現象に関係する過去の事象、特に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は、史料、考古資料、地質・地形調査から得られる情報が不可欠である。史料・考古データについては、地震・火山噴火現象に関するデータベース化が現行計画で急速に進み、歴史時代における地震活動の変化や先史時代の噴火による降灰範囲など新たな知見が得られた。地質・地形調査でも、プレート境界大地震の破壊域や地殻変動の推移を示す情報、火山噴火の推移を明らかにする情報などの重要な発見が着実に積み上げられている。このように、理学の研究者と歴史・考古学の研究者の協働により、過去の現象に関する情報の量と質が確実に向上した。データベースについては拡充を継続するとともに、それを維持する方法についても今後考えていく必要がある。また、過去の現象の推定精度を高めるため、史料・考古・地

形・地質という時間分解能の異なるデータの統合的活用や、これらのデータと現在の観測データとの融合などの課題にも取り組む必要がある。これらのデータベースは防災リテラシー向上に有効であると期待されることから、防災リテラシーに関する研究との連携も検討すべきである。

## 2. 2 地震・火山噴火の予測のための研究

### (地震発生の長期予測)

地震発生の新たな長期予測手法開発は、現行計画の重点的研究の一つである。海溝型巨大地震の長期予測に関しては、史料・考古データ、地質データから得られる過去の大地震の発生履歴やGNSS観測などの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し、地震モーメントの蓄積量などの推定と数値シミュレーションに基づく巨大地震の発生予測手法の開発を進めている。観測に基づいて様々な滑り様式の空間的相補性が明らかになるとともに海底地殻変動観測によってプレート固着の現状を精度良く求められ、これに基づき応力蓄積状態も推定できるようになった。海溝型巨大地震や津波の発生履歴の蓄積と整理が進み、こうした新たな知見が巨大地震の発生サイクルの数値モデリングにも活用されている。日本列島全体を含む3次元有限要素モデルを構築し、プレート境界の応力蓄積率を推定した。また、断層破壊の数値シミュレーションに基づき、今後起こり得る海溝型巨大地震の発生シナリオを複数作成した。このように、長期予測手法の高度化に資する地震発生モデル構築が進展しており、予測の試行を進める段階に入りつつある。一方、過去の地震については発生履歴や震源域の空間分布の把握はまだ十分とは言えず、観測データと比較する数値シミュレーションモデルについても考慮できるパラメータ数を増やすことで比較できる事例を増やすなど、更なる改良が必要である。

内陸地震の長期予測に関しては震源断層モデルの妥当性の検証を行うと共に、応力場や断層形状を考慮した内陸地震の物理モデルを構築し、これらのモデルに基づく新たな長期予測手法の検討を進めている。測地データから推定した陸域のひずみ速度分布を用い、内陸地震の発生確率を試算した。また、日本列島3次元有限要素モデルに基づいて、千島海溝沿いと南海トラフ沿いのプレート間固着に起因する内陸の震源断層への応力载荷速度を推定した。2016年熊本地震のように大きな地震が連鎖する場合の活動推移を予測する手法も開発された。一方、内陸地震に関する物理モデルは特定の地震に基づくものであり、他の地域に適用するためのモデルの普遍化はまだ十分に進んでいない。海溝型巨大地震と比較して内陸地震は震源断層の位置や形状、応力蓄積状態などが複雑であり、長期予測へのハードルは高い。物理モデル、数値シミュレーション、観測データ、統計モデルの融合をさらに進め、長期予測の試行を進めるべきである。

### (モニタリングに基づく地震発生の中短期予測)

地殻活動のモニタリングに基づいて中短期の地震発生確率を求める手法の開発は重点的研究の一つである。中短期の時間スケールでの地震発生予測に関しては、海陸統合の観測データを活用してプレート境界における滑りの時空間変化を推定し、物理・数理モデルに基づいて発生確率を推定する手法やプレート間固着状態をモニタリングするための手法開発が進んだ。また、データ同化手法を活用してプレート間の摩擦パラメータが推定され、プレート境界滑りの時空間的發展を記述するためのより現実的なモデルの構築に近づいた。多様な滑り現象と大地震発生の関係を明らかにすることで地震発生予測につながるが、その前段階として多様な断層滑りの発生と推移を予測する試行実験を行う必要がある。一方、プレート間滑りは複雑な現象であることが明らかになりつつあることから、それを説明するより多様な様々な時間スケールを持つ滑りに対応できるモデルの構築を目指しつつ、複雑な現象の裏にあるシンプルな法則からなぜ多様性が生じるかを議論できる段階を目指すべきである。

中短期の地震発生予測に関し、地震活動そのものの時空間変化を高精度かつ迅速に把握し、統計的手法に基づいて地震発生確率の変化を評価する手法の開発も進んでおり、地震活動の観測に基づく統計的発生予測が試行的に行われた。物理・数理モデルに基づく地震発生確率の予測実験実施や実測データに基づく統計モデルの検証と高度化が今後の課題として残されており、試行実験を繰り返すことで実用化へと近づく見込みである。

一方、地震発生の中短期予測手法の一つとして、地震活動の変化や電離層の変化など大地震発生に先行する現象の事例を蓄積し、統計的評価に基づいて大地震の発生確率を推定する手法の開発も進んでいる。地震活動の静穏化や地震活動の統計的性質の指標であるb値の時間変化、電磁氣的先行現象などの事例蓄積が進んだ。また、先行現象の長期間データに対して統計的手法を適

用し、事後の地震発生予測に対する有意性を検証するとともに、先行現象を説明する物理モデルの提案もなされている。先行現象に基づく地震発生確率予測は客観的な統計的評価ができる段階に進みつつあるが、データのさらなる蓄積やこれまでとは異なる種類のデータの取得が必要である。一方で、先行現象に基づく地震発生予測の信頼度を担保するためには、それらの間の因果関係の理解が不可欠であり、先行現象を説明する物理モデルを観測データや実験等に基づいて検証し、先行現象のメカニズムを解明することも求められている。

### (火山噴火の予測)

長期的な時間スケールの噴火予測に関しては史料や地質データに基づく噴火履歴データベースを活用して噴火様式や規模、マグマの種類の変化を整理し、マグマ供給系の時間変化を推定することで、噴火活動のポテンシャルを評価している。数か月から数年程度の中期的な時間スケールについては多項目の観測を実施し、様々な火山現象と噴火発生を定量的に評価している。これまでに年代測定手法の高度化が進み、噴火履歴とマグマ供給系の時間変化が精密に把握されつつある。また、多項目観測を支える観測・解析技術の開発が進み、多項目データが着実に蓄積された。長期のデータが蓄積された火山において、噴火の切迫度評価につながる活動評価指標である VUI の適用による非噴火時の試行的な活動評価が試みられた。一方、年代測定精度については更なる高度化が必要であり、トレンチやボーリングデータもさらに活用すべきである。VUI に基づく評価を試行する対象火山をさらに増やすことも期待される。多項目観測データをデータベース化し活用することや衛星データのさらなる活用も課題である。また、多項目観測を長期的に維持するための方策を検討することも欠かせない。

火山噴火の予測精度を高める新たな試みとして、火山活動推移モデルの構築が進んでいる。火山活動や噴火現象は多様であり、噴火に先行する現象から噴火の発生、活動の変化、終息までを一連の現象として捉える必要がある。火山現象をこのように捉えるモデルは火山活動推移モデルと呼ばれ、火山の比較研究や噴火に伴い発生する多様な現象の物理モデルを検討する上で有効である。火山活動推移モデルを構築してその背景にある物理現象を理解することにより、時期・場所・様式・規模・推移といういわゆる噴火予測の 5 要素をばらばらのものではなく一体のものとして捉え、火山噴火予測を高度化することができるため、重点的研究の一つとなっている。

火山活動推移モデルの構築に関しては、その前段階として、起こり得る現象を網羅的にまとめ、それらの時系列を整理した噴火事象系統樹の作成や改定を進めている。また、噴火履歴や過去の観測データを精査するとともに、新たな観測量も導入することによって事象の分岐条件の定量化を進めている。地球物理・化学的観測に加え、噴出物の物質科学的研究と火山活動の対応の整理も進んだ。活発な活動が続きデータの蓄積が進む桜島において火山活動推移モデルを試行的に作成した。しかしながら分岐判断手法は限定的であり更なる高度化が必要である。多くの火山で継続的な多項目観測を行うほか、各火山の特性に合わせた集中的な観測により、火山現象や噴火現象の定量的データの蓄積を加速し、データベースの活用による比較研究を実施することが必要である。また、火山活動推移モデルを桜島以外の他火山についても試行的に構築することが必要であろう。

## 2. 3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

### (災害誘因の事前評価手法)

強震動の事前評価に関する研究では、強震動の観点から見た震源モデルや地震動生成メカニズムの解析、強震動に大きな影響を与える地下構造のモデル化が進み、さらに、建物被害予測モデルの検証や災害リスク評価手法の開発も行われた。2016 年熊本地震では、断層浅部の一部に時定数の長い大きな滑りが生じ、その近傍で強い長周期速度パルス波が発生するという現象が確認された。このような震源断層の滑りの不均質構造は震源域の強震動を特徴づける重要要素であり、それを決定論的に設定する方法の開発が必要である。地下構造の研究では、地震動の増幅効果の大きい堆積層が厚く堆積した大規模な盆地や平野を中心に実施され、堆積層構造モデルの作成や検証、地震動特性の分析が進められた。一方、2016 年熊本地震の火山性堆積物や 2014 年長野県北部の地震の地滑り地塊などが地震動被害集中域に対応したことを踏まえ、調査対象を広げる必要性があると考えられる。

斜面崩壊の事前評価に関する研究では、過去の大地震や 2016 年熊本地震、2018 年北海道胆振東部地震など最近の国内外の地震によって生じた地滑りについて調査を行い、危険性の高い地域の

地形・地質学的特徴を明らかにした。また、地滑り土塊や盛土での多項目観測及び滑り面の土質の室内実験による地滑りメカニズムの解明にも取り組んでいる。今後、これらの知見に基づいて地滑りの定量的物理モデル化を進めていく必要がある。

#### （災害誘因の即時予測）

災害誘因の即時予測に関しては、地震動や津波、火山噴火に伴う噴煙の移流拡散に関して、高密度の定常観測網や海底圧力計、気象レーダーなどの観測網の発展を背景に、観測データと数値シミュレーション、データ同化を活用した即時予測手法の開発の進展が顕著であった。また、これ以外にも様々な即時予測手法において、観測記録の処理方法やシミュレーション手法の効率化によって予測に要する時間の短縮が図られる一方、予測結果の高精度化や検証の努力がなされた。中には社会実装が進んでいる即時予測手法もある他、実用化の見通しが立ちつつある手法については社会実装に向けた取り組みが求められる。また、即時予測の社会実装・公開には、受け手に合わせた表現方法の選択などの配慮が必要であり、災害情報や防災リテラシーの研究との連携も必要となる。

#### （災害誘因予測を災害情報につなげる研究）

災害誘因予測を災害情報につなげる研究の分野では、不確実性を含む災害誘因予測が適切に伝わり災害の軽減に活かされるよう、受け手に配慮した情報のあり方を検討した。また、災害リスク評価結果や災害誘因即時予測情報を表示するシステムの開発も行った。避難や防災行動を促す上で有効な災害情報の出し方や、災害誘因の不確実性評価を災害情報にどのように組み込むかについては今後も継続して検討すべき課題である。こうした課題解決に向けては、災害誘因予測の仕組みや性能に関する理解を社会に広めるために防災リテラシーの観点を入れるなど、総合的研究の枠組みを活用することが有効と考えられる。

## 2. 4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

#### （災害事例による災害発生機構の解明）

過去の地震災害事例について、史料の分析に基づき、居住地の空間構造、地形などの社会素因がどのように影響し被害をもたらしたかを推定するなど、災害発生機構の解明を進めた。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も進めている。また、震災後の総合的防災政策の政策効果を検証するために、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変化を分析し、震災後に実施された統一性のない防災事業が復旧復興を遅らせる要因となったことを明らかにした。今後は、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必要がある。

#### （災害に関する社会の共通理解醸成）

住民の防災リテラシーの実態やニーズの把握のため、学校における防災教育の実態とその背景の調査、桜島火山周辺の住民の噴火警戒レベルに関する認知度の調査を行った。南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域在住の住民に対する調査からは、避難するか否かを判断する上で参考にする情報・知識を明らかにすることができた。防災リテラシー向上のための研修プログラムとして、阿蘇火山における修学旅行生を対象としたものや、行政機関の災害対応・防災対策業務への活用を意識したものなどの開発が進んだ。また、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くハザード・リスク評価情報システムが作成公開された。避難訓練可視化システムを使った避難訓練や、オープンサイエンス手法の導入など、防災リテラシー向上のための効果的方法の研究・開発・検証が複数試みられた。今後は各研究課題で得られたリテラシー向上に資する知見の連携統合を図り、知識体系の構築を進め、社会のリテラシー向上に関わる関係者が広く利用しやすい手法にまとめていく必要がある。

## 2. 5 分野横断で取り組む総合的研究

複数の分野にまたがる総合的研究として、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つの研究を実施している。

南海トラフ沿いの巨大地震に関しては、震源や地震波伝播経路に関する研究、強震動や被害に関する研究、災害情報の発信に関する人文・社会学的研究をそれぞれ進めている。南海トラフ沿いの巨大地震の地震像として、主として過去の観測記録及び史料に基づく従来の描像から観測データに基づく描像への転換を目指しており、測地・地震観測により得られたプレート間の固着状態やスロー地震の知見を背景とした広帯域震源モデルの構築を進めている。西南日本地域の強震動や津波浸水モデルの提示も進め、さらに、地震発生時のリスク評価を高精度化するために、地震波を発生する震源からその伝播経路、地盤応答や建物の脆弱性までを総合的に考慮したリスク評価手法の構築を進めている。このリスク評価手法は他の巨大地震に対しても適用可能であろう。今後は、情報が受け手により効果的に伝わることを目指し、発信すべき情報の内容や発信方法を検討することが必要である。

首都直下地震に関しては、想定される地震が多岐にわたり震源モデルを絞り込むことが難しいことから地震像の明確化が課題とされている。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、安政江戸地震を対象に資料に基づいて被害分布を明らかにするとともに、被害分布の検証と定量化を目的とする臨時地震観測を実施することにより地震像の具体化を目指した。また、関東平野を中心とした強震動即時予測手法の開発を進めるとともに、防災リテラシーの観点から災害情報に関する住民調査やキャンペーン報道の学習効果を検討した。これにより新たな知見は蓄積されつつあるものの、地震像の明確化に向けた更なる研究が必要である。具体的な震源像を明らかにする方法について研究者間で議論を継続するとともに、震源像が定まらない場合にどのような方針で研究を進めることが効果的かについて、十分検討する必要がある。

千島海溝沿いの巨大地震については、津波堆積物調査により過去の発生時期を明らかにするとともに、地震活動静穏化に基づく切迫性の評価を行っている。プレート境界浅部での固着状況を把握するための海底地殻変動観測を実施するとともに、M8以上の地震を対象とする迅速な浸水域予測手法を開発した。また、避難訓練可視化システムを開発し、避難訓練の学習効果を高めると共に、地域防災力向上を目指す普及啓発活動を行った。

桜島噴火については、住民避難を伴う大規模噴火を中心に研究を進め、火山噴火予測の高度化、定量化につながる火山活動推移モデルを試作した。また、モデルから予測される噴火シナリオに基づく避難訓練の実施や問題点の整理、住民の意識調査の実施など、災害軽減に向けたより具体的な取り組みを進めた。この成果は他地域でも大いに参考になると考えられる。一方で、火山活動推移モデルは試作段階であり、これをさらに高度化し、より具体的かつ効果的な避難計画の策定につなげることが重要である。

高リスク小規模火山噴火に関しては、小規模噴火が発生する場を理解するため、地下浅部の熱水系を対象とした各種調査が行われ、地下の比抵抗構造と噴火発生位置の関係や、過去に小噴火を発生させた小火口分布と年代などが明らかになった。また、住民や登山客及び観光客に防災情報を伝える役割を担う火山防災ハンドブックなどの記述が、小規模噴火に関しては十分でない場合があることが指摘された。今後の観測研究計画においてより具体的な研究課題を設定することが必要である。

### 3. 計画推進体制の評価と課題 (現行計画の推進体制)

現行計画は地震学・火山学を中核とし、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの幅広い分野の研究者の協力による総合的な学際研究として推進されており、その成果を地震・火山噴火現象に起因する災害の軽減に活用することを目指している。そのため、全国の大学、研究開発法人、行政機関などから35の多彩な機関が参加している。

測地学分会は、行政や社会のニーズ、学術研究の動向に配慮しつつ、全体計画の立案、進捗の把握、成果の取りまとめを行っている。また、地震本部や行政機関等関連機関との連携、調整に尽力し、計画推進を担っている。

参加機関からの委員で構成される予知研究協議会は研究全体の推進を実質的に担っており、研究内容に応じた8つの計画推進部会を設け、全ての研究課題がいずれかの部会に所属しながら研究を実施する体制を敷いている。大学の実施する各研究課題への予算配分の決定、進捗状況の把握、成果の取りまとめを行うとともに、研究全体を災害軽減という大きな共通の目標に向かって進めるべく、部会毎の研究の進捗把握や部会間の連携の調整・強化などを行っている。年度末に

は、予知研究協議会主催により成果報告シンポジウムを開催し、計画に参加する研究者ら300名ほどが年度毎の成果発表を行い、参加者全体で情報と意識の共有を図っている。モニタリング手法の高度化に資する役割を担う地震予知連絡会と火山防災や噴火予知研究に資する役割を担う火山噴火予知連絡会はそれぞれ、本観測研究計画の実施機関である国土地理院と気象庁に事務局を置いており、定期的に会議を開催することによって関係各機関が情報共有する場を提供している。共同利用・共同研究拠点である東京大学地震研究所と京都大学防災研究所は、拠点間連携共同研究を実施し、現行計画の方針に沿った研究について、重点推進研究と一般課題型研究の公募を行っている。

以上のような実施体制により、多彩な参加機関が連携し、幅広い分野の研究を効率的に実施することができている。今後もこの実施体制のもとで計画の推進を図るべきである。

#### (地震本部との関係と火山観測研究の一元的推進体制)

本観測研究計画は、地震・火山防災に関する行政や防災研究全体の中で果たす役割を明確化しつつ推進することが重要である。地震に関する国による調査研究は地震本部が一元的に推進していることから、新たな長期予測手法に関するワークショップの開催などにより地震本部と綿密に情報交換を行い、地震調査研究の基本施策との整合性を確認しながら進めている。地震に関してはこの一元的な体制の存在により本観測研究計画で得られた成果を国の施策に反映させる道筋は比較的是っきりしている。一方、火山噴火に関しては、災害軽減に資する火山の調査研究を一元的に推進する体制は存在せず、火山噴火予知連絡会など情報交換の場はあるものの、得られた成果を国の施策に反映させる過程は必ずしも明確ではない。このような背景のもと、測地学分科会では火山研究推進委員会を設置し、火山研究体制の強化を図っており、将来的には、地震分野における地震本部を頂点とする一元的な施策推進体制に相当する体制を、火山調査研究の分野においても実現することが望まれる。

#### (重点的研究)

将来の社会実装を目指して重点的に取り組む研究として、地震・火山噴火の予測のための研究の中から、地震発生の新たな長期予測、地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測、火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測、の3つが設定されており、予知研究協議会ではそれぞれの研究に関連する課題について、高い優先順位をつけ、予算上の配慮をしつつ推進している。そのなかで地震発生の新たな長期予測については、地震本部の基本施策との関係が深いことから、前項で述べたように綿密な連携を取りながら実施されている。他の重点的研究についても、試行実験を進めることでさらに社会実装に近づけるべきである。

本章の2.2節に記載したとおり、予測手法の精度改善を目指すこれら3つの重点的研究はいずれも順調に成果が得られていることから、重点的な研究として実施すべき研究テーマに関しては今後も予算的な優遇措置をとり、関連する基本施策との連携を強めつつ実施すべきである。研究の進捗に注意を払い必要に応じてサポートを追加することも必要であろう。今後の観測研究計画においても、重点的に実施する研究を選定し現行計画と同様の体制で実施すべきである。その際、予測の試行、手法の検証などの実装に向けた取り組みの強化が不可欠である。

#### (分野横断で取り組む総合的研究)

地震学・火山学的重要性及び災害科学的な重要性に鑑み、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つを複数の分野にまたがり総合的に実施する優先度の高い研究対象として選定した。それぞれに対応する総合的研究グループを設けた上で、複数分野にまたがる研究集会の実施など、関連課題間の連携協力体制を構築しつつ実施している。

南海トラフ沿いの巨大地震は、第1次計画に続き現行計画でも総合的研究の対象となっており、関連各分野の研究成果に拠点間連携共同研究の成果を加えることで、理学的研究、工学的研究、災害情報に関する人文・社会科学的研究を含む総合的研究として実施されている。重点的研究である地震発生の新たな長期予測、地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測の各研究課題や拠点間連携研究に含まれる研究課題など、本総合的研究と関連の深い研究課題との連携をさらに深めることが必要である。

首都直下地震も第1次計画に続き本研究計画においても総合的研究として実施されている。新

たな知見が蓄積されつつあるものの、具体的な震源像の明確化が十分でないために関連分野の役割分担において具体性を欠いている。震源像の明確化と適切な研究課題の設定による分野間連携強化が課題である。

千島海溝沿いの巨大地震については、地震発生の切迫性が高く、特に津波による被害が予想されることから、地域防災力の向上に力点を置いた研究として新たに総合的研究の対象とされた。地殻活動評価の結果からどのように地震・津波ハザードを評価し、得られた予測情報の不確実性を考慮しつつ避難活動につなげるかが重要であり、今後も総合的研究という仕組みを活用し、複数分野にまたがる体系的な取り組みを続けることが重要である。

桜島噴火は、第1次計画に引き続き本研究計画においても総合的研究の対象となり、予測精度向上のための研究から具体的な避難計画策定に関連する研究に至るまで、分野横断型の総合的研究として大きな成果を上げている。桜島は火山活動度が高く、観測解析技術の開発や予測手法の開発・検証に適している。大規模噴火の懸念が高く、防災リテラシー向上に関する研究の実施にも適していることから、今後も同様の総合的研究を継続することが必要である。

高リスク小規模火山噴火については、2014年の御嶽山噴火や2018年の草津本白根山の噴火発生により、小規模な噴火であっても大きな人的・物的被害が起り得るという点が社会的に認識されたことを受けて現行計画から新たに始まった総合的研究である。小規模噴火という現象の理解や災害発生の社会的要因に着目し、課題の洗い出しと研究の方向性を示すことが目標であり、具体的な研究課題の設定につながる成果を得ることが求められている。

現行計画においては、以上のように5つの対象について総合的な分野横断型の研究が進められている。南海トラフ沿いの巨大地震や桜島大規模火山噴火のように第1次計画に引き続き実施され順調に成果が得られているものや、千島海溝沿いの巨大地震のように新たに開始され成果が出始めているが、総合的な見地からの成果を上げるためには長期的な取り組みの継続が必要とされるもの、高リスク小規模火山噴火のように新たに開始され、研究の方向性を示すことが当面の目標となるものなど、各総合的研究の進展段階には大きなばらつきがある。しかしながら、現象の解明・予測から災害軽減につながる取り組みまでを総合的に取り扱うことにより災害軽減へ貢献するという目標は共通である。今後も総合的研究という分野横断研究を実施する仕組みを維持し、進展段階を考慮して研究対象や研究の方向性の明確化などについて必要な改善を加えつつ、研究を進めていくことが望まれる。

#### （拠点間連携共同研究）

地震火山観測研究と防災学の成果を融合することで災害軽減に資することを目標に、「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所が連携する拠点間連携共同研究が平成26年度に始まった。拠点間連携共同研究の推進のため、地震研究所と防災研究所は拠点間連携共同研究委員会を設置し、あらかじめ設定された研究テーマへの参加者を募る「重点推進研究」の内容を検討するとともに、現行計画の趣旨を踏まえた研究テーマをボトムアップで募集する「一般課題型研究」の審査を行っている。直近の重点推進研究では、巨大地震のリスク評価の不確実性評価がテーマに選ばれ、震源過程、地震波伝播経路、地盤構造、構造物等についてそれぞれが持つ不確実性が最終的なリスク評価の不確実性にどう影響するかが検討された。一般課題型研究では、災害誘因の事前評価、即時予測及び災害誘因予測を災害情報につなげる研究の3テーマについて公募が行われ、災害誘因予測に関する様々な成果が得られている。拠点間連携共同研究委員会は、地震研究所と防災研究所の教員のほか、予知研究協議会と防災研究所自然災害研究協議会から推薦された委員等から構成され、多面的な意見を考慮し、適切に運営されている。また、拠点間連携共同研究委員会から推薦された委員が予知研究協議会企画部戦略室に参加することにより、拠点間連携研究の成果を計画全体の中で適切に位置づけることができている。

拠点間連携共同研究の仕組みによって巨大地震のリスク評価において、不確実性をどのように取り扱うべきかについてこれまでは適切な指針が無かったが、不確実性を含む評価事例を具体的に示すことにより一定の方向性が示された。また、災害誘因予測に関して、斜面崩壊に関する研究など、今後の研究のシーズとなり得る多様な研究テーマが立ち上がった。参加研究者からの自主的な提案のみでは、特定の研究分野に研究者が集まる一方で観測研究計画全体にとって重要な研究テーマが抜け落ちることにより研究分野の偏りが生じる恐れがあった。拠点間連携共同研究が適切な研究分野を設定して行う公募は研究分野の偏りを防ぐ効果があり、本観測研究計画にと

って不可欠な仕組みと言える。

#### （研究基盤の開発・整備）

全国をカバーする高感度地震観測網や GNSS 観測網などの観測網に加え、近年は海域の観測網整備も進み陸海統合地震津波火山観測網などが安定的に運用されている。火山観測においては、多項目観測や機動観測が行われ多様なデータが得られている。衛星 SAR 観測データや、地下水等総合観測網のデータ、その他重力や熱学的観測など多様なデータも蓄積されつつある。また、全国的な観測網を補う観測網や機動観測も進められている。火山の火口付近や離島、海底など観測が難しい場所での観測技術や宇宙線を用いる新たな地下探査手法の開発、光ファイバーを用いる新たな観測手法開発など様々な新しい観測技術の開発も進んでいる。データを安定的に配信するデータ流通システムやデータの保存・公開に活用するデータベースの整備も進む。データの新たな解析手法の一つであるデータ同化やデータのリアルタイム処理に関する新たな手法が開発され、即時的予測への活用が始まっている。データ処理ツールの開発やその公開も進み、高度なデータ処理を多くの研究者が手軽に行うことができる環境が整いつつある。生データだけではなく、震源データなどの処理済みデータの公開も進み、多様な研究へ活用されている。活断層や津波堆積物等のデータベース整備や火山に関する基盤的な地質情報図及び災害情報図、海域火山の基礎的な情報など様々な研究基盤の整備が進む。

地震・火山現象の解明と予測、さらに災害誘因予測の成果は長年にわたり整備・維持されてきた観測網のデータに負うところが大きい。現在の観測機器には 20 年以上を経過したものが多いため、現代のデジタル通信環境に対応した新しい機器に計画的に更新する必要がある。また、広域災害を想定し、電源や通信網の冗長化も考慮しなければならない。一方で、観測網の安定的な運用や様々なデータベースの維持管理には膨大なコストがかかることから、ハードウェアの低コスト化、省力化、長寿命化、通信コストの低減などを目指す技術開発が必要である。さらに、観測基盤を維持する人材の育成や技術情報の共有による全体コストの低減など、長期的に安定して運用するための新たな仕組みを検討する必要がある。機材を共同運用する仕組みの検討に関しては、火山機動観測実証研究事業との協力・連携を考慮しても良いのではないかと。

同質のデータを長期間継続して取得蓄積することは地震・火山観測研究にとって不可欠であり、従来型の観測の継続を求める声は強い。しかし、研究の進展にともない従来とは異なる新たなデータの取得が求められる場合も多い。限られた予算と人員という条件下で、データの長期的一貫性の担保と新技術の活用を両立させることは容易ではない。従来型の観測を全て継続しつつ新たな観測を実施することは現実的ではないことから、従来型の観測を対象とした取捨選択が不可欠である。従来型の観測を新たな観測に切り替える場合、データの連続性を可能な限り維持することは重要である。そのため、従来の観測から新たな観測への切り替えは、従来型のデータと新しいデータの比較検討を行い新たな観測の有意性を確認しつつ、徐々に進めていく必要がある。

多点観測への必要性が増していることから、定常的な観測を補って多点の機動的観測を実施するための機材や人員の協力体制に関する検討も進める必要がある。

蓄積が進み大容量化したデータを効率的に解析する新たな手法開発も必要である。データの質と量が増加していることから、特別に高度な専門知識を要せずに一定以上の水準の解析を行うことができるツールの開発や、専門外の研究者であっても活用できる段階まで処理が済んだ一次処理データの公開体制の構築などを検討する必要がある。このような取り組みはコミュニティを広げ、分野間連携を強化することにもつながる。

#### （関連分野間の連携）

第1次計画から始まった文理融合は、初めは手探り状態であったが、現行計画からは理学、工学、人文・社会科学の関連分野の相互理解が進み、連携の強化もが進んだ。また、情報科学、計算科学の近年の進展は目覚ましく、長年蓄積された観測データから機械学習により新たな情報を抽出する試みも盛んに行われている。東京大学では文理融合研究の象徴として地震火山史料連携研究機構が設立され、歴史研究者と地震研究者による共同研究が進んでいる。異分野の融合を進めるため、様々な分野の研究者が参加する研究集会や勉強会が行われ、さらに自治体や企業などとの連携によるリアルタイム被害予測システムも開発された。このように、現行計画に入り関連分野との連携は徐々に強化され、具体的な成果も次々と生まれている。今後もこの方向性を強化しつつ、観測研究計画を推進すべきである。

### (国際共同研究・国際協力)

地震・火山現象の理解には数多くの事例研究が必須であり、国内の研究のみでは十分な事例を得ることはできない。そのため、日本と同じ沈み込み帯に位置するニュージーランドや、プレート境界に近いメキシコ・チリなどとの協働による観測研究が進められている。火山分野においては、活動的な火山を数多く有するインドネシアとの共同研究が盛んである。海外の研究者を招聘し、日本の代表的活火山である桜島を対象とする国際共同研究も実施されている。国際共同研究は観測研究に限らない。歴史地震データの国際化や情報科学技術に関する国際シンポジウムも実施されている。気象庁や国土地理院、海上保安庁、産業技術総合研究所もそれぞれ国際機関とのデータ共有や広域かつ長期間の観測が求められる分野での国際共同研究が活発に行われている。次世代火山研究推進事業で開発されたデータベースである JVDN システムは国際的なデータベースである WOV0dat とのフォーマット共有化による知見の共有を進めている。また、参画機関の多くは海外留学生の受け入れや外国人研究者の招聘を実施しており、国際的な人的ネットワークの交流も進んでいる。

このように、現行計画への参加各機関は様々な国際共同研究・国際協力を積極的に進めている。大規模な地震や火山噴火現象は世界的にも事例が少なく、2004年のインドネシアにおけるスマトラ地震や2019年にニュージーランドのホワイト島で発生した噴火災害事例の知見は国際的な協力を通じて、現行計画の推進に活かすことができた。今後も国際協力を積極的に進めることが不可欠である。

### (教育・人材育成)

大学や研究機関はそれぞれが若手教員のポストの確保に努めている。予知研究協議会でも、現行計画からは特任研究員を雇用できる予算を確保し、数としては年1～2名と多くは無いものの毎年雇用できており、その後は大学や研究機関へのキャリアパスとなっている。しかしながら、これらの多くは任期付きポストであり、人材の受け皿としての機能は十分ではない。大学の修士課程・博士課程を通じて地震・火山・防災等の専門教育を受けた学生は、大学や研究開発法人、気象庁などの研究職や専門職へ就職するものばかりではなく、行政機関や自治体、コンサルタント会社に就職し、防災に携わる立場になる者もいる。研究者の安定したポストが限られていることを反映して博士課程進学者が減少していることに鑑み、大学は、より多様な観点に立った教育を行うことで多様な就職の選択肢を示す必要があるのではないだろうか。

火山分野においては平成28年から次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトが始まり、火山防災を担う人材の育成を目的とした火山研究人材育成コンソーシアム構築事業が立ち上がっている。現行計画の実施機関の多くもこのコンソーシアムに参加し、受講生にフィールド実習や講義を提供することにより人材育成の一端を担うほか、毎年の成果報告会には多くの受講生が参加している。このような事業と引き続き協力し、人材育成を促進することが重要である。

## 4. 現行計画の総括的評価と今後の展望

本節では、総括的評価として、第1次計画の外部評価における指摘事項に対する現行計画での対応状況、現行計画で新たに設定した重点的研究の評価、現行計画から新たに開始した研究項目の評価、現行計画で拡充した分野横断型の総合的研究に対する評価を述べる。続いて、中長期的な展望の下で複数計画にまたがって体系的に取り組むべき課題として挙げられた項目の現行計画での進捗状況について述べる。本節の最後においては、今後の展望として、現行計画の研究の進展状況に鑑みて今後進めていくべき研究の方向性を述べる。

### 4. 1 第1次計画に対する外部評価への対応

第1次計画は、地震学・火山学の研究成果を災害軽減につなげるために、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の研究者と連携して推進するという方針転換後の最初の5か年計画であった。この第1次計画に関して平成29年7月にまとめられた外部評価においては、方針転換は適切でありその方針を一層推進する必要があると評価された。一方で、改善すべき点として以下の事項が指摘された。

- (1) 災害の軽減に貢献するための研究の一層の推進
- (2) 理学，工学，人文・社会科学の研究者間のより一層の連携強化
- (3) 研究目標と目標に対する達成度の明確化
- (4) 社会や他分野の研究者のニーズ把握とそれに合致した研究の推進
- (5) 火山の観測研究を安定して実施する体制の整備

これらの指摘に対する現行計画での対応は以下のとおりである。

(1) 第1次計画に引き続き、地震・火山現象の解明と予測のための研究と災害誘因予測のための研究を着実に進めた。災害誘因予測のための研究では、自治体などを対象とする情報発信ツールの開発と実装が進んだ。また、現象の理解・予測を災害の軽減につなげるための具体的な手法について検討するため、防災リテラシー向上のための研究を今期新たに追加した。これにより、防災リテラシー向上のための研修プログラム開発が進むなど多くの新たな成果が得られている。

(2) 現行計画からは、文理様々な分野から7つの新たな機関が参加している。第1次計画においては異分野の研究者間の交流の機会が増し相互理解も大きく進んだものの、共同研究は萌芽的なものに留まるものが多かった。現行計画においては研究者間の相互理解も進み、共同研究につながる新たなデータの蓄積も進んだことから、共同研究による様々な具体的研究成果が得られた。例えば史料・考古のデータベース化が現行計画において大きく進んだ結果、過去の地震・火山噴火現象に関する知見が飛躍的に増加し、過去の地震・火山噴火事例に関する知見が更新されるなど異なる分野の連携が進んだ。また、異なる分野の研究者が一堂に会する成果報告会の実施や、それをまとめた成果報告書の作成を通じて、計画全体の中での各参加者の位置づけが次第に明確になり、各研究者の役割に対する理解が一層進んだ。また、分野間の役割分担がより明確になったことにより、分野間連携が一層進んだ。

(3) 現行計画では、研究の成果を災害の軽減に役立てるための目標設定を意識した。そのような方向性を明確化するため、特に将来の社会実装にむけて重点的に取り組む3つの研究を設定した。いずれも地震・火山現象の予測手法に関する研究であるが、社会実装という目標に到達するため現行計画期間中はモデルや手法の開発と検証が進められ、それぞれに成果が上がっており、特に、新たな長期予測手法の開発においては試行実験など次の段階が視野に入りつつある。また、南海トラフ巨大地震や首都直下地震については、外部評価での指摘に従い、目標の明確化と解決すべき課題の洗い出しを進めている。個々の研究課題においても、達成度評価の明確化に努める。例えば史料・考古データの収集解析においては、収集すべき資料の範囲を事前に定め、テキストデータベースの構築という具体的な目標を定めることで、達成度を評価しやすくしている。火山に関する研究においても、地下構造を漠然と調べるのではなく、水蒸気噴火の発生につながる場の構造解明というより具体的な目標を設定した上で観測を実施することにより、達成度評価の明確化につなげている。その他の分野においても、研究対象と目標設定をより具体的なものにすることで達成度評価の明確化に努めている。

(4) 現行研究で開始した防災リテラシー向上に関する研究がこの項に対応しているが、その他にも、この指摘に対する様々な対応を行っている。社会に対しては、アウトリーチ活動を通じて防災担当者からのニーズ把握に努めている。研究者に対しては、成果報告シンポジウムに加え、複数研究グループによる合同会議を開くなど、多くの異なる分野の研究者が参加する研究集会を実施することにより、広い分野のニーズ把握に努めている。また、地震発生の長期予測手法に関しては、将来の地震本部による実装を目指した検討を進めるなど、研究成果が社会で実際に用いられることを意識して研究を進めている。

(5) に関しては、参加機関の連携やデータの共有化を徐々に進め、人的資源や観測資源の有効利用を進めることで研究の安定的な実施に向けた体制づくりを進めている。また、文部科学省が実施する次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトとの連携を強化することにより、火山観測研究の安定的な実施に向けた取り組みを進めている。

このように、多くの項目では外部評価からの指摘に応えることができていると言えるが、本レビュー執筆時点で十分ではない項目もある。それらについては、5か年計画の残りの期間において達成を目指すべきである。異なる分野間の連携強化に関しては、5か年をかけてようやく相互理解が進み萌芽的な研究が始まるという時間スケールで進むものであり、5か年内での対応は困難であることから、より長期的な視点に立って今後の観測研究計画においても対応を継続すべきである。

#### 4. 2 現行計画で強化あるいは新たに開始した研究 (重点的研究)

現行計画においては、重点的に実施する研究として(1)地震発生の新たな長期予測、(2)地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測、(3)火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測、の3つを指定している。

(1)については、過去の地震発生履歴に基づく従来の長期予測を改善し、データやモデルに基づく新たな長期予測手法の提案を目標としており、過去の発生履歴に加えて測地データ、地下構造、物理モデル、数値シミュレーションに基づく地震発生予測手法の開発を進めている。内陸地殻内地震に関しては測地データに基づく地震発生確率の試算も行われて有望な成果が得られ始めている。将来の実用化に向けた発生予測実験の実施が視野に入りつつある。

(2)は中短期の時間スケールでの大地震発生確率を観測データに基づいて評価する手法を目指すものである。スロー地震の研究を通じてプレート間の滑り速度変化と地震発生の関連が明らかになりつつある。また、地震活動の統計解析に基づく地震発生予測手法にも、震源の有限性を取り入れたモデルが開発されるなど、中短期予測の基盤となるモデル開発の面で大きな進展が見られた。一方、研究対象となった事例に限られており、一般性がどの程度あるかについては今後も研究を継続しデータの蓄積と手法の検証を継続すべき段階であると考えられる。また、統計モデルと物理モデルの融合研究も進めるべきである。重点的研究として指定したことにより研究が加速したことは認められるが、社会実装を目指し災害軽減に資するという目標に応えるためには研究のさらなる継続が必要と考えられる。

(3)は、これまでの噴火事象系統樹を高度化し、火山噴火の準備段階から噴火発生、噴火後の活動の変化、終息までを一体として扱うモデルの構築を目指している。噴火頻度の高い桜島においてモデルのプロトタイプは構築できたと考えられる。このモデルを用い、限定的ではあるものの観測量に基づく定量的な噴火推移予測も試みられており、今期に目標としていた推移モデル構築は達成しつつある。桜島噴火に対する防災対応への活用が試みられており、社会実装を実現しつつある。今後は他火山への適用を目指した一般化などを進めることで火山噴火予測精度の向上が期待できる。

このように、重点的研究として指定した3つの研究に関しては、社会実装を目指すという目標に対し、概ね期待した成果が得られつつあると考えられる。

#### (新たに開始した研究項目：防災リテラシーの向上に関する研究)

地震・火山噴火現象に起因する災害に対する防災対策を有効に推進するためには、地震・火山現象とそれによる災害誘因、災害リスクに関する国民の基本的な理解を欠かすことはできない。そのため現行計画からは、社会の共通理解の醸成を効果的に行うための手法開発の研究に着手した。災害は災害誘因が社会素因に働きかけることにより発生するが、その発生過程の解明に向けた文理融合研究の実施と、その成果を活かして社会の共通理解の醸成や防災リテラシー向上につなげるためにはなにが必要であるかを明らかにすることを目的とする。

江戸時代や明治時代に起きた災害事例に関する史料に基づく災害発生過程の研究や、東日本大震災を事例とする防災政策の効果の検証、住民の防災リテラシーの地域差など、防災リテラシー向上につながる新たな知見が得られている。火山地域においては、噴火を想定した実際的な避難計画の策定を自治体と共同で行うことで問題点を明らかにするとともに、社会への適切な情報発信手法の検討も進められている。また、防災リテラシーの向上を目指した教育プログラムの開発・実装も進められている。さらに、災害記憶の伝承に関する研究や避難訓練の効果的な実施に向けた知見の蓄積など、効果的な防災リテラシー向上手法が明らかになりつつある。このように、防災リテラシー向上に資するという目標はある程度達成されつつある。

しかしながら、現行計画の他の研究項目とは研究対象が大きく異なるため、研究課題間の連携が不十分な点も見られる。第1次計画では手探りで開始した文理融合研究が、現行計画において軌道に乗り始めたように、新たに開始した防災リテラシー向上のための研究も次第に他の研究分野との連携・協力が進むものと考えられる。研究成果を効果的に社会に還元するためには、地震・火山研究の担当者が情報発信の努力をすれば良いというものではなく、どのような内容をどのように伝えるかという方法論を確立した上で発信する必要がある。本研究項目は、情報発信の方法論を確立し、他の研究項目の成果と社会とを橋渡しする役割を期待されており、今後この部

会の重要性はますます高まる。手厚いサポートを加えつつ、観測研究計画の柱のひとつとすべく育てていくことが必要であろう。また今後は、研究成果の社会還元という視点に加え、観測研究計画に対する社会の認識や期待を研究内容にフィードバックさせるという視点も重要になる。

#### (分野横断型の総合的研究)

分野横断型の研究として、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つの総合的研究を実施している。そのうちのいくつかは異なる分野の成果をまとめることで新たな成果の創出に成功している。例えば、桜島大規模火山噴火においては、理学的研究による火山活動の理解とそれに基づく定量的予測、史料的研究に基づく過去の災害履歴の発掘、それらに基づく知見を活かし、地元自治体との協力による実際の避難計画の策定の試みなど、単独の研究では得られない成果に到達している。一方、進展が見えにくい総合的研究もある。例えば高リスク小規模火山噴火は、多くの分野にまたがる研究対象ではあるものの、現行計画においては、個々の研究成果を融合し災害軽減につなげるための方策が無い状態から開始したため、まずは研究成果の融合に向けてどのような点を解決しなければならないかを明らかにする必要があった。そのため、直ちに大きな成果を得ることは難しいが、本5か年の終了までには、研究の方向性を具体的に示す段階に到達することが期待できる。

このように、これらの総合的な研究に関してはそれぞれ進捗の度合いが異なる。これまでの研究の蓄積が少ない場合や、克服が難しい課題を抱える場合は、サポート体制を強化することも必要となるであろう。いずれにせよ、分野横断型の研究を進めることで新たな成果を目指すという総合的研究の仕組みは概ね順調に成果を出していると考えられ、今後とも改善を加えつつ活用すべきものと考えられる。

#### 4. 3 中長期的展望に挙げられた項目の現行計画での進捗

地震や火山噴火による災害を軽減するための取り組みには、比較的短期間で進展し成果が期待できるものから、短期的な実現は難しいが時間をかけて着実に進展させることによって大きな成果が期待できるものが含まれており、それぞれについて計画的に取り組み着実に実現していくことによって災害の軽減につなげることができる。平成26年から始まった第1次計画では、中長期的な展望の下で体系的に取り組む内容を以下の4項目に整理した。

- (1) 地震や火山噴火が引き起こす災害にはどのようなものがあるかを解明し、国民や関係機関に広く知らしめること、
- (2) 地震や火山噴火が、どこで、どの程度の頻度・規模で発生し、それらによる地震動、地盤変形、津波、噴火様式等がどのようなものかを想定して、長期的な防災・減災対策の基礎とすること、
- (3) 地震や火山噴火の発生直後に、地震動や津波、火砕流や降灰、溶岩流などの災害を予測することにより対策に役立てること、
- (4) 地震や火山噴火の発生とその推移を事前に予測することにより有効な防災・減災対応を採ること。

これらの項目は現計画のみならず今後の観測研究計画に対しても有効と考えられ、計画の進捗に伴い、それぞれの項目における具体的な内容を更新していくことが重要である。

(1) については、過去の長年の観測研究計画に基づいて災害事例の知見の蓄積がある程度進んでいたが、近代的な観測が行われる以前の事象については知見が限られていた。第1次及び現行計画において歴史記録のデータベース化に力を入れることにより、見落とされがち、あるいは技術的に得ることが困難であった低頻度大規模現象に関する知見が大きく上積みされた。対象とする歴史記録や事象を収集済みものに限定し、歴史記録の活用手法を確立することに重点をおく段階から始まり、未収集の歴史記録まで含めて網羅的にデータベース化する段階に移行しつつある。歴史記録や地質学的記録を蓄積しデータベース化するとともに、アクセスのしやすい形で公開することで国民や関係機関に広く知らしめ、災害事例研究に活用するという目標に着実に近づいている。(3)で述べる災害誘因の予測とその可視化も災害を広く知らしめるという点にも寄与している。一方、研究が進むにつれて、起こりうる災害の規模や頻度がこれまでの想定を超える

ことが明らかになるなどの新たな知見も増え、これまでの情報の更新も必要となっている。地震や火山噴火が引き起こす災害を網羅的に解明することは依然として困難であるが、災害現象の解明につながる研究の継続により知見を増やすことは今後も必要であろう。

国民や関係機関に効果的に情報を伝え理解してもらうためには社会の共通理解の醸成や防災リテラシー向上が必須であり、防災リテラシー向上に関する研究が現行計画より開始された。しかしながら、この研究はようやく緒に就いた段階であることから、性急な成果を求めることなく複数分野間の連携を徐々に育みながら継続・発展を目指すべきであろう。

(2) については、データの蓄積により地震や火山噴火の発生頻度や規模に関する知見が増え、地震動や津波、降灰などの災害誘因予測の精度は大きく向上し、長期的な防災・減災対策につながる基礎的な情報は増えた。不確定性を考慮した災害誘因・災害リスク評価が試行され、防災計画策定などの目的に応じて評価結果の選択を支援するシステム作りも行われている。また、防災担当機関へのアウトプットも徐々に進んでいる。一方、巨大地震や大規模噴火の発生間隔は近代的な観測機器によるデータの蓄積がある100年程度の時間スケールよりも一般には長く、史料・考古データ、地質データ等の活用により過去の発生履歴を明らかにする必要がある。第1次及び現行計画により整備が進むデータベースの活用が進み、長期的な予測につながりつつあるものの、今後もデータベースの充実に向けたデータ蓄積の努力が欠かせない。また、得られた情報を地震・火山噴火の長期予測に利用する方法の開発、長期予測に基づく災害誘因予測の検討も必要である。

(3) については、近年、地震や火山噴火の発生直後にその規模を即時的に把握する技術が進展し、緊急地震速報のように実用化がなされたものもある。第1次及び現行計画を通じて、海底観測網のデータを用いた津波規模の即時把握と浸水予測も実用化に近づきつつある。火山噴火直後に噴煙高度を気象レーダーのデータから推定する手法の開発や、噴煙挙動や火山灰降下などのシミュレーション技術に基づいて噴火直後に災害誘因を予測する技術は着実に進歩している。一方、即時的な予測が実現できている災害誘因はまだ限られ、また精度にばらつきがあり、必ずしも直ちに万全の防災対策に対する情報を提供できるレベルにあるわけではない。即時予測することができる災害誘因の種類を増やすと共に予測精度の向上や予測時間の短縮など、今後克服すべき技術的課題は多い。どのような情報をどのような精度・時間で発信できるのか、それ自体が社会に伝えるべき重要な情報である。また、災害誘因の即時予測結果を社会に発信する際には社会の防災リテラシーがどのような段階にあるかに配慮する必要がある。現行計画より始まった防災リテラシーの向上に関する研究との連携が欠かせない。上記(1)とともに継続・発展を目指すべきである。

(4) について、地震分野では地殻変動データから推定したひずみ蓄積に基づく内陸地震発生の長期評価予測手法に関する研究は順調に進んでいる。火山噴火予測に関しては、観測網が充実したことと多くの火山での多年のデータの蓄積が進んできたことから、経験に基づく予測研究として火山活動推移モデルや事象分岐の論理的判断基準が研究されている。ある程度の規模の噴火発生についてはその危険性が定性的に評価されるようになり、気象庁により噴火警戒レベルの発出という形で防災・減災対応が取られている。また、突発的な水蒸気噴火の直前に山体膨張や微動の発現などの前兆現象も捉えることに成功した例もある。しかしながら、防災・減災対応にとって重要な情報である噴火規模や推移予測に関しては経験則に頼っており、より適用性・信頼性が高い観測データと物理モデルに基づく定量的な予測はまだ実用化の目処は立っておらず、基礎研究をしっかりと行う必要がある。また、予測結果を発信する際に防災リテラシーに配慮する必要がある点は(3)と同様であり、(1)との関係も同様である。

以上、中長期的展望に記された各項目に関しては、それぞれの進展状態はまちまちであるものの、第1次及び現行計画を通じて着実に進んでいる。今後も社会実装につなげる段階を目指して、異分野間の連携を強化しつつ研究を着実に継続する必要がある。特に現行計画から始まった防災リテラシー向上に関する研究は、他の研究成果を社会に発信し災害軽減に真に役立てるという目的にとって欠かせないものであり、他の研究項目との連携強化に特に力を入れつつさらに発展させる必要がある。

#### 4. 4 観測研究計画の今後の方向性

現行計画では、地震・火山現象の発生や推移、発生場の解明に関して様々な知見が得られており、例えば、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事例の観測など、発

生予測につながる基礎的な知見が増えている。地震・火山現象の解明は、発生予測や災害誘因予測など災害軽減に貢献する研究全ての基礎になるものであり、観測の長期的な継続は言うまでもなく、時空間的な分解能を上げるための観測・解析手法の開発と高度化、実験や理論的な研究の推進を継続することが求められる。地震・火山観測と並んで、史料・考古資料の分析、地形・地質調査も、近代的観測の開始以前からの地震・火山噴火現象を理解する上で重要な役割を果たしている。現行計画によりデータの蓄積は着実に進み、過去の地震・火山噴火現象に関する新たな知見が得られつつある。史料・考古・地形・地質のデータは断片的である場合が多いが、これらの統合的な整理を進めるとともに、近現代に行われた観測のデータと組み合わせることで、地震・火山現象の理解の深化に寄与することが期待される。

また、このようにして得られる統合データに基づいて、地震・火山噴火現象に対する人間・社会の応答に関する文理融合研究を広範に展開することにより、将来の災害軽減に資するさらなる知見が得られることが期待される。

地震・火山噴火現象の発生予測の研究は、現象解明の成果を災害軽減という観測研究計画の大きな目的につなげる重要な役割を担っている。地震発生予測に対しては、科学的知見と技術を総動員して将来の大地震の発生を予測すべく、観測と物理モデルに基づく地震発生予測研究が重点的に進められている。内陸地震の長期予測に関しては測地データに基づく地震発生確率の試算が行われるなど有望な成果が得られ始めており、将来の実用化に向けた発生予測実験の実施が望まれる。プレート境界については、様々な滑り現象を説明するモデルが提案され始めているが、予測モデル・手法の高度化と社会実装を目指した検証のため、次の段階としては、プレート境界で比較的短期間で繰り返されるスロー地震や繰り返し地震などを対象に、滑り発生の予測実験を試行的に行うことなどが考えられる。また、予測実験を効果的に実施するため、その共通基盤となる構造モデルや物理モデルなどの整備を進める必要がある。

火山噴火予測に対しては、火山噴火の準備過程から、発生・推移変化・終息までを一連の現象として捉えることにより、噴火予測の5要素を一体のものとして捉え、予測の高度化を目指す火山活動推移モデルの構築が重点的研究として進められている。今後も、データの蓄積と火山現象の物理・化学的理解を進め、火山活動推移モデルに基づく予測手法の開発を継続すべきである。その際、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構築が進む多項目データベースの活用が有効であろう。火山の状態を定量的に評価する指標の開発が進んでいることから、いくつかの火山を対象とした噴火推移予測・活動予測実験を試行的に行うことを視野に入れるべきである。

観測研究計画を社会の防災・減災に貢献する実用科学として推進するため、災害誘因の評価や災害リスク評価の研究を推進してきた。災害誘因予測に関しては予測精度やリアルタイム性が向上し、手法のいくつかは社会実装がなされている。また、社会実装に近づきつつあるものもあり、その流れを促進していく必要がある。予測結果に必然的にもなう曖昧さを対象とする研究も社会実装に向けて避けて通ることができないものであり、今後も力を注ぐべきである。

現行計画においては、分野横断型の総合的研究の枠組み、及び拠点間連携研究の枠組みを使って、現象から災害誘因、災害リスク、防災リテラシーまで幅広い分野の研究者が知見を共有する場ができ、研究成果の連携も進んでいる。しかしながら、協働による研究成果はまだ限定的であり、必ずしも各分野の最新の成果が災害誘因や災害リスクの評価に反映されていない場合もあることから、これらの枠組みを改善することで協働の強化に一層取り組むべきである。

このように、現象解明、発生予測、災害誘因リスクの予測、防災リテラシーの各分野の研究において災害軽減へつながる道筋が見え始めており、今後は現行計画での成果に基づいて、第1次計画から続く方針をより一層強化・推進すべきと考える。社会の減災対策への実用化という点での到達度は研究テーマにより様々であるため、今後もその到達度や重要性に鑑みて重点的に行う研究テーマを設定し、実用化に向けた試行を促進するなど中長期的な推進体制をとる必要がある。また、観測研究計画で得られた成果は、地震本部、内閣府の検討会、地震予知連絡会、火山噴火予知連絡会等への情報提供を通じて、政府が地震・火山現象に対し行う施策の基礎にもなっており、今後も、観測研究計画の枠組みで地震・火山の観測・研究・人材育成を継続・発展させていくことが必須であると考えられる。

## 5. まとめ

現行計画は、地震火山観測研究計画を国民の生命とくらしを守る災害科学の一部として推進するという第1次計画からの方針をさらに強化し推進することを目指して立案・実施されている。新たな方針が参加者に浸透した結果、文理融合型の研究が進み、具体的な成果が生まれつつある。地震や火山及びそれらに起因する災害についての社会の理解を効果的に広める手法を研究する分野として新たに開始した防災リテラシーの向上に関する研究においても様々な手法の構築が始まるなど、重要な成果が出始めている。また、研究成果の社会実装を促進するための新たな仕組みとして、地震・火山現象の予測手法に関する3つの研究項目を重点的研究に設定したが、これまでにモデルや手法の開発と検証が進むなどそれぞれに成果が上がっている。特に、新たな長期予測手法の開発に関しては、地震本部による長期評価に活かすという社会実装に向けた情報交換が始まっている。また、現象の理解、それに基づく予測、災害の軽減策を分野横断で進める総合的な研究についても強化・拡充された5つの研究対象について実施され、新たな成果が生まれつつある。

現行研究計画において最も特筆すべき点は、地震発生 of 長期予測に関して、過去事例に重きを置いた従来型の予測から、観測データを活かした予測への転換に向けた第一歩を踏み出したことである。「観測データに基づく予測」という方向性は今後も維持発展すべきであるが、そのためには、その背景となっている全国的な観測網の充実、データの蓄積、現象の理解に基づく物理モデルの構築、予測や観測手法の開発・発展を今後も継続・強化することが前提となる。また、新たな手法の妥当性を検証し、高度化を進めることも欠かせない。

火山分野においては既にデータに基づく予測が幅広く取り入れられており、気象庁による噴火警戒レベルに反映されるなど社会実装が進んでいる。しかし、噴火後の推移予測や突発的な現象の予測、大規模噴火の予測など、更なる研究を必要とする課題も多く、今後も幅広い研究の継続が必要である。

地震火山現象に起因する災害に関する情報を、実際の災害軽減において効果的に活用するためには、社会の理解の醸成や情報伝達手法の向上に関する研究を欠かすことはできない。現行計画において開始された防災リテラシーの向上に関する研究や、分野横断型の総合的研究の仕組みを活用し、文理共同で本観測研究計画全体を発展させていくことが不可欠である。また、研究成果を広く公開し、新たな分野からの参画をさらに進めることも必要であろう。