

資料 1 - 1

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

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

目次

I.	はじめに	1
1.	背景	1
2.	本レビューの目的	1
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
1.	地震火山観測研究のこれまでの経緯	1
2.	本研究の基本的な考え方	3
III.	重要な地震および火山現象に関する観測研究の成果	4
1.	主な地震	4
2.	主な火山噴火	8

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、多くの人命を奪ってきただけでなく、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や得られた知見が有効活用されるために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を通じて、地震およ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前観測研究計画では、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。地震発生・火山噴火の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）」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）」について、研究対象を災害誘因の予測へ広げた前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地震火山観測研究計画部会（以下、「地震火山部会」）では、計画の進捗状況を把握し、毎年度の成果を「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）」年次報告「成果の概要」として取りまとめてきた。本レビューの取りまとめにあたっては、地震火山部会が検討を行った。

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、「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）」の基本的な考え方をまとめる。Ⅲ章では、近年発生し本研究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、計画の項目ごとに成果をとりまとめ、それぞれについて今後の展望を検討する。また、重点的に実施する研究や複数の項目にまたがる総合的研究をとりまとめると共に、研究全体の実施体制について述べる。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. 地震火山観測研究のこれまでの経緯

地震や火山噴火の発生場所、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 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」）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」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、複数次の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、観測研究手法にも共通する部分が多い。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十分に検討されておらず、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不十分であった。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、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」が実施された。

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」（以下、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、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」）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展した。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名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今後の火山観測研究の課題と対応について」が測地学分会地震火山部会によってまとめられ、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、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）」として本研究計画が開始された。

2. 本研究の基本的な考え方

本研究計画は、第1次計画に引き続き地震・火山噴火現象を理解し発生や推移の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関する研究まで広げ、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。本5か年計画では、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関連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、本研究計画では以下の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」では、過去の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つについては重点的に研究を実施する。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。

Ⅲ. 重要な地震およ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)4月16日 熊本地震 M7.3

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7を観測した。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。熊本県益城町では2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(最大震度6強)，4月16日のM5.8(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)。

今回の一連の地震活動領域には，布田川断層帯，日奈久断層帯，別府一万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一白旗区間の活動，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。これらの地震の発震機構は概ね南北方向に主張力軸を持つ横ずれ断層型であった。平成25年に地震調査委員会は，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(高野一白旗区間)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。

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一白旗区間沿いで長さ約6kmにわたって地表地震断層が見つかった。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。強震記録を用いた震源過程解析によると，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すべ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すべりで特徴づけられる。また，大きくすべ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20cm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98cm移動するなどの地殻変動が観測されている。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一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35km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動を出しておらず、地震に誘発され、受動的に動いた「お付き合い地震断層」が大部分であると考えられる。

GNSS 観測から、地震発生直後 60 日間程度には急激な余効変動が継続したが、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分布していることが明らかになった。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、地震時のすべり分布との対比から、大すべ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一大分の地震活動は、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。

震源域において、地震発生前の稠密観測によって応力場を推定したところ、推定した応力場と布田川断層帯、日奈久断層帯の形状から期待されるすべり方向が、4 月 16 日の M7.3 の地震で観測された複雑なすべり方向と相関を持っていることが見いだされた。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、応力場から期待される方向と異なる地震時すべりが火山の近傍で起こっていることがわかり、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 秒の地震動成分が強かったことがわかった。これらは過去に震度 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すべ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表示を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)11月14日 NZカイコウラ地震 M7.8

2016 年 11 月 14 日 20 時 02 分に、ニュージーランドの南島北部の東海岸沿いの地殻内の深さ約 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 6.9m の津波が Goose Bay 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 12m にも及んだ。震源域周辺の広い範囲で約 10,000 箇所土砂崩れが生じ、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るものの、大きな非ダブルカップル成分を持っていた。断層すべりは、震源域の南南東の端から開始し、多数（少なくとも 21 枚）の断層を連鎖的に破壊しながら、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ともに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 25m の最大滑り量が推定された。様々な幾何形状・すべり方向・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鎖破壊を取り入れる重要性を提示している。

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。北島北部の浅い短期的なスロースリップ（深さ 15km 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。今回の地震による静的応力変化に加えて、ヒ克蘭ギ沈み込み帯に発達した付加体によって増幅された表面波の動的応力変化により、上記の一連のスロースリップの連鎖現象を引き起こしたことが考えられる。

3) 平成30年(2018年) 6月18日 大阪府北部の地震 M6.1

2018年6月18日7時58分に、大阪府北部の深さ約13km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名、負傷者443名、住家全壊18棟、住家半壊517棟などの被害(平成30年度消防白書)が生じた。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側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近畿圏においては、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。地震ハザード評価において2つのタイプの断層の連鎖的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。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。人的被害としては、倒壊したブロック塀やタンス等の下敷きなど、この地震による死者は6名であった。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3Hz程度と建物の固有周期よりも有意に短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に比べて約10倍高く、早期復旧のための点検・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) 9月6日 北海道胆振東部地震 M6.7

2018年9月6日03時07分に北海道胆振地方中東部でM6.7の地震が発生し、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60km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名(関連死含む)、負傷者785名、住家全壊491棟、住家半壊1,816棟などの被害(総務省消防庁)が生じた。

発震機構は東北東-西南西方向に圧力軸を持つ逆断層型である。この地震の深さは37kmと日本列島の内陸で発生する地震としては非常に深い。震源域は東北日本弧と千島弧の衝突帯に位置し、地下構造や温度構造が複雑なことが、深い場所で地震が発生した要因と考えられる。余震は、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15kmから約40kmにわたる。震源域直上にある主要活断層の石狩低地帯東縁断層帯の形状とは一致しない。断層破壊は上部マントルに相当する余震域の最深部から始まり、地殻内を浅部に進んだ。震源断層面上の地震時すべり量が大きかった領域では余震活動が低調であった。震源が深く地表地震断層は出現しなかったが、SAR干渉画像解析では、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。また、震源距離100km以内では一般的な距離減衰式よりも大きな最大加速度や最大速度が

観測された。建物被害が多かったむかわ町市街の強震動生成には、浅部地盤構造による地震波の増幅の影響が指摘されている。

同時多発斜面崩壊のほとんどは表層部分がすべったものであり、震源域の北半分に集中して生じた。これらの斜面崩壊の発生域は、約9,000年前の樽前山噴火や1.8万年前の恵庭岳噴火の降下火砕物が厚く堆積する地域に一致する。すべり面となった降下火砕物最下部には粘土化した鉱物が見られ、崩壊土砂からは40%を超える体積含水率が検出された。誘因となった強い地震動に、表層地質と水理環境といった素因が重なることで、広大な面積で斜面崩壊が同時多発的に発生したと考えられる。SAR干渉画像解析でも地盤変動として面的に検出された札幌市清田区宅地の液状化の発生要因として、密度やN値が小さい谷埋め盛土と地下水位の影響が指摘されている。

5) 令和元年(2019年)6月18日 山形県沖の地震 M6.7

2019年6月18日22時22分頃、山形県酒田市沖の深さ約14km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、総務省消防庁によると負傷者43名、住家半壊28棟などの被害(総務省消防庁)が生じた。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、深さ約2kmから12kmに主に分布し、陸の観測点のみを用いた気象庁震源と比べて全体的に5km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2019年山形県沖地震と1964年新潟地震の発生域の地震活動に適用することで、地震活動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、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、定常観測点の波形データを用いた解析により、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る。

6) 令和3年(2021年)2月13日 福島県沖の地震 M7.3

2021年2月13日23時07分に福島県沖の深さ55km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名、負傷者186名、住家全壊69棟、住家半壊729棟などの被害(2021年3月29日17時00分現在、総務省消防庁)が生じた。この地震により、宮城県石巻港で22cmなど、宮城県および福島県で津波が観測された。また、GNSS観測により福島県などで2cm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40km、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、すべ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、15日のM5.5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。

この福島県沖の地震から50~80km程度離れた宮城県沖のプレート境界で3月20日と5月1日にそれぞれM6.9とM6.8の地震が発生した。2011年東北地方太平洋沖地震時のすべりによる応力の再配置により、大すべり域の周辺では太平洋沖地震発生前に比べ地震活動が高まっている。

7) 令和3年(2021年)3月20日 宮城県沖の地震 M6.9

2021年3月20日18時07分に宮城県沖の深さ59kmでM6.9の地震が発生した。宮城県で最大震

度5強を観測したほか、総務省消防庁によると負傷者11人、住家一部破損2棟などの被害（総務省消防庁）が生じた。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30km、南北約30kmの領域に分布した。破壊開始点は震源断層の北端で、すべりの大きい領域は、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観測により宮城県などで2cm強の東方向への変位が観測された。

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年経った今日でも、それに伴う応力変化の影響が強く残っていることを示していると考えられる。また陸域、海域の観測網を用いた詳細な調査によれば、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の余震が発生したが、これら本震と余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。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おり、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。

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10時02分に本白根山鏡池北火口からの噴火が発生した。この噴火では新火口列を生じると共に人的な被害が発生した。この噴火は、2km北側に位置する草津白根山の湯釜を主対象としていた各種観測により捉えられ、またその後の調査により、噴火の実態が明らかとなった。2018年の噴火発生前は、本白根山を対象とした地質調査により、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。噴火後にはごく小規模の噴火も対象にした地質調査により、本白根火砕丘群および白根火砕丘群の活動年代が明らかにされ、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が整理された。また、本白根及び白根火砕丘群の地表調査とトレンチ調査から、火口の形成年代や噴火様式等が明らかとなった。

草津白根山の湯釜火口周辺では、2014年3月から2015年8月にかけて、地震活動の活発化・山体膨張・火山ガス中の H_2S （硫化水素）の減少・湯釜火口湖の温度上昇・湯釜直下の熱消磁などが観測され、これらの一連の活動は、熱化学的考察に基づき、湯釜地下に釣り鐘状に存在している透水性の悪い粘土層下への高温の火山ガス・熱水の流入が続いたことによるものと解釈された。それ以降、緩やかな地盤沈降の継続や、熱活動の低下に対応する地磁気変化、噴気ガスの成分変化、本白根火砕丘付近の年に2－3回程度の群発地震活動が観測された。その一方で、2018年1月23日の本白根山噴火に先行する顕著な火山活動は観測されなかった。また、噴火の3か月前に実施した空中赤外観測にも、鏡池北火砕丘周辺の地表面温度に異常は認められていなかった。

噴火の発生は、空振計の記録から2018年12月28日10時02分10秒と推定された。この噴火発生2分前頃から、湯釜火口周辺の5カ所に設置された傾斜計は湯釜南方の隆起を捉え、噴火発生を機に沈降に転じた。噴火で形成された新火口の直下に、鉛直クラックが存在し、2分間にわたり42.5万 m^3 の体積を増加させたのち、8分間にわたり30万 m^3 の体積減少が起きたと推定される。また、この付近の群発地震の震源分布の中心は2018年に生成した新火口列の北方約500mに位置し、その深度は地殻変動源の鉛直クラックとほぼ一致していた。

全岩化学組成分析と野外調査から、この噴火により、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、この噴火には高温マグマ起源のガスが関与したと考えられる。また、無人ヘリによる空中磁気測量データに見られる本白根噴火の火口域の地磁気変化は、地温の変化ではなく噴火による地形変化によるものと推察される。

噴火発生場の理解のため、草津白根山で広帯域MT観測が行われた。深さ10km程度までの3次元比抵抗構造が明らかとなり、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が示された。また、今後の湯釜の活動を理解するため、湖水の熱・化学パラメータの数値的検

討を行った。湖水の溶存成分が湖底流体と平衡に達するには約 8 年要することから、10 年単位の変動を示す湯釜の活動を判断する場合、このような時間遅れをともなう応答特性を考慮する必要があることがわかった。

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。

なお、2018 年本白根山の噴火により草津白根山の観測網の伝送・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、草津白根山域で多項目の観測を長期間継続的に実施していたことで、隣接する本白根山の突発的な噴火現象や噴火前の活動状況などについて、重要な科学的知見を得ることができた。

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を発生させた。また、新燃岳の北西約 5 km 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。

新燃岳における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が振幅を次第に増加させる現象が捉えられ、今後、火山活動の推移の把握や噴火予測を行う上で有用な成果が得られた。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による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 月に発生した多数の爆発的噴火に伴う傾斜変動データの解析から、約 30 分前から始まる地下浅部の膨張、噴火直前 10 分前からの若干の収縮を経て、噴火発生に至ることが分かり、火道内プロセスの定量的理解につながる成果を得た。セソナ機による火山ガス組成と放出率の観測による SO₂ 放出率の推定が行われた。噴出物の解析からは、構成する粒子の解析によるマグマ水蒸気噴火の同定が行われた。また、2017 年 10 月と 2018 年 3 月に噴出したマイクロライト・ナノライトを含む火山灰の初期帯磁率分析から、マグマ水蒸気爆発からマグマ噴火に至る噴火推移を反映した帯磁率の変化を捉えることに成功し、火山灰分析に基づく火山活動度指標を迅速に得る方法を開発した。そのほか、新燃岳 2011 年噴火の石質岩片サンプルを観察・分析し、ナノライトの晶出により石基結晶度が 5 日～45 日で 9.1vol% 上昇してメルト粘性が増加し、気泡過剰圧が破碎閾値を超えることがわかった。これにより、メルト粘性の上昇が溶岩ドームで発生する爆発的噴火の要因である可能性があることを示した。

硫黄山の火山ガスの放出源は、同位体比分析の結果、地下水ではなく主にマグマであることがわかった。また航空機 SAR による観測により、硫黄山付近の膨張を示す地殻変動が明瞭に捉えることに成功した。また、陸域観測技術衛星「だいち 2 号」(ALOS-2) のデータによる SAR 解析では、硫黄山付近は 2015 年以降ほぼ一定速度で膨張していることが明らかになった。

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 1000km 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、観測研究を進めた。

SAR 干渉解析により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。一時的に噴火活動が低下した機会を捉え、2019 年 9 月に広帯域地震計や空振計を島内の陸地に設置し、衛星回線経由でデータを伝送した。揺れの方向の変化から火山性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知を行った。

2017年の西之島噴火を対象に、ひまわり8号の1.6 μ m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、ALOS-2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、噴出率を測定できることを示した。

4) 桜島

2016年8月から2017年2月まで噴火の発生がなかった桜島は、2017年3月に南岳山頂火口で、同年4月に昭和火口で噴火が発生した。昭和火口は2018年に4回の噴火が発生して以降、噴火活動を停止した。一方、南岳山頂火口は、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02時59分には大きな噴石が火口より約3kmの地点まで飛散する爆発が発生した。この噴火では、気象庁の一般気象レーダーから、噴煙高度が火口上約8000m以上に達していると推定された。

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、噴出物粒子の結晶度の変化から、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明らかになった。また、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が続いていたが、その体積増加率が2017年以降は減少していることが明らかとなった。また、GNSSデータに対して時間依存インバージョンの手法を、桜島と近接する霧島山のデータを統合して解析し、桜島と始良カルデラでの体積膨張、霧島での2018年噴火発生時およびその前後の膨張・収縮源の位置と大きさを推定した。

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例で顕著な前震活動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、 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 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分かった。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。