

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.	現行計画の基本的な考え方	3
III.	重要な地震及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	9

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や、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）」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地震火山観測研究計画部会（以下「地震火山部会」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「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、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取りまとめると共に、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

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、複数次の 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。）が実施された。

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 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、重点課題の設定・分野横断型の総合研究の拡充・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および、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 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^{*}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。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^{*}、地震波速度構造、比抵抗^{*}構造、応力場^{*}解析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11 km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。発震機構^{*}は北北西-南南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層^{*}型である。その約28時間後の4月16日には深さ12 km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(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)。

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。これらの地震の発震機構は概ね南北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型であった。地震調査委員会^{*}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28 km、日奈久断層帯の高野-白旗区間沿いで長さ約6 kmにわたる地表地震断層^{*}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2.2 m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みられ、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「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いたる地震活動は、阿蘇山・九重山・鶴見岳といった活火山*下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、日奈久断層帯の形状から期待される滑り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、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年カイコウラ地震（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¹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MMM6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強以上の地域内人口が比較的多く、社会の広範囲に影響が及んだ。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将来起こり得る連動破壊を考えるうえで重要な知見をもたらした。

2018年6月18日7時58分に、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名、負傷者443名、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3 Hz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MM6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。MM6の地震が発生する頻度は、MM7以上の大地震が発生する頻度に比べて約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帯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、発生域が数万年以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鉱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名、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 名、負傷者 186 名、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、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。

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) 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 MM7 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、現行計画の重点項目である「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1,000km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1.6μm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3km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6,000~8,000m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、また、総合的研究の対象となっている。

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もなう噴火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（ミューオン*）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、SO₂/H₂S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。