

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について（報告）【概要】

（科学技術・学術審議会 測地学分科会）

レビューの背景

- 地震や火山噴火による災害から国民の生命・財産を守るため、地震・火山現象の解明と発生予測を目指す観測研究計画を長期にわたり継続してきた。
- 東北地方太平洋沖地震の発生を踏まえ、前観測研究計画からは災害の軽減へ貢献することに力点を移し、災害誘因予測を加えるなど災害科学的視点を取り入れた研究を開始した。
- 平成31年度より始まった「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」（以下、現行計画）では、社会の防災リテラシー向上につながる研究を新たに開始した。
- 現行計画においては、将来の社会実装を目指し地震・火山噴火予測の新技术を開発する重点的研究を立ち上げた。また、地震学・火山学的及び災害科学的に重要であり、これら複数の分野にまたがって実施する総合的研究を、対象とする地震・火山噴火を選定し直した上で継続して実施した。
- 現行計画期間が残り2年となり、次期計画策定に向けた現行計画のレビューを実施すべき時期となった。

レビューの目的

- 現行計画では、研究対象を災害誘因の予測へ広げるという前観測研究計画の方針を維持しつつ、一層進展させることを目指し、防災リテラシーの向上に関する研究を追加した。こうした方針の妥当性や計画の進捗を含め、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を目的とする。

主な成果

（地震・火山現象の解明と発生予測のための研究）

- プレート境界で観測される様々な時定数を持つ滑り現象の物理機構の解明が進むとともに、内陸地震の発生と密接な関係がある地殻内流体について重要な知見が得られた。
- 地震発生場の理解の基盤をなす地殻・マンツルのレオロジーモデルに関する研究が進展し、地震断層滑りの複雑な物理機構に関する理解が深化した。
- 火山周辺構造が地震断層破壊に影響する事例から、火山と地震の相互作用の理解が進んだ。
- 火山観測技術の高度化により複数の火山に共通する噴火先行現象が見出されるとともに、噴出物の分析に基づいて現実的なマグマ上昇モデルが構築された。
- 噴火履歴データベースを活用して長期的時間スケールの噴火ポテンシャル評価が行われた。
- 火山における多項目観測データにより、火山活動や噴火発生現象の定量的記述が進み、噴火の切迫度評価につながる指標の開発が行われた。
- 史料・考古データ、地質データに基づいた分析により、過去の事象に関する情報が質・量ともに充実しつつあり、発生履歴の把握や災害発生機構の解明につながった。

（地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究）

- 断層浅部から強いパルス波が生成された事例の確認、地震動の増幅効果が大きい堆積層地盤構造の調査の進展など、強震動予測手法開発につながる研究が進んだ。
- 大地震に伴う地滑り調査が進み、危険性の高い地域の地形・地質学的特徴が明らかになった。
- 地震動や津波、火山噴煙などの災害誘因の即時予測に関し、観測データと数値シミュレーションの同化による予測手法が大きく進んだ。
- 不確実性を含む災害誘因予測を様々な目的や受け手に応じて適切に伝えることを目的として、情報の内容や伝え方についての調査・研究が進んだ。

（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）

- 地震や火山噴火の被災地域における意識調査の実施や防災担当者を対象とする研修プログラムの開発など、防災リテラシー向上のための効果的手法の研究・開発・検証が進められた。

(重点的研究)

- プレート境界の応力蓄積率の推定や断層破壊シミュレーションに基づき、巨大地震のシナリオが複数作成された。また、津波堆積物・歴史史料等による発生履歴の復元など、長期予測に資する知見の蓄積が進んだ。
- 震源断層モデルの検証や内陸での応力蓄積など、内陸地震発生モデルの構築に資する知見が増えた。また、測地データ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が試算され、観測データに基づく地震発生長期予測手法開発に進展があった。
- 海陸統合の観測データを活用したプレート境界滑りの推定、物理・数理モデルに基づく地震発生確率推定手法やプレート間固着状態のモニタリング手法の開発など、地震発生の中短期予測の基礎となる研究が進んだ。
- 噴火事象系統樹の作成、事象の分岐条件の定量化、噴出物の物質科学的研究が進み、活発な活動によりデータ蓄積が進む桜島においては噴火予測の定量化につながる火山活動推移モデルのプロトタイプが構築された。

(分野横断で取り組む総合的研究)

- 南海トラフ沿いの巨大地震については、データに基づく広帯域震源モデルが構築されるとともに、震源から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が進められた。
- 千島海溝沿いの巨大地震については、津波堆積物調査に基づく発生履歴調査、地震静穏化に基づく切迫性評価、浸水域予測手法の開発、避難訓練可視化により訓練の学習効果を高める実証実験が行われた。
- 桜島噴火については、マグマ貫入速度と噴火様式の対応が明らかになったほか、噴火シナリオにもとづく避難訓練、住民の意識調査など災害軽減に向けた取り組みなどが進められた。
- 高リスク小規模噴火については、地下浅部の熱水系の地下構造と小規模噴火発生位置の関係が推定された。火口付近の登山者らの被害を軽減する観点から、既存の防災情報における問題点の調査を進めた。

今後の課題

(地震・火山現象の解明と発生予測のための研究)

- 地震・火山現象の解明及び予測のための手法開発とその検証に向けて、観測の長期的な継続、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。
- 将来の活動推移の予測に資する史料・考古資料の継続的収集・分析、広く活用可能なデータベース構築、地形・地質調査の継続、及び、観測データとの統合的理解。

(地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究)

- 災害誘因予測の精度及び即時性の向上と、予測の曖昧さを評価する研究の継続。

(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)

- 災害発生機構解明に基づく防災リテラシー向上プログラムの開発及び関係者との協働によるプログラムの評価・改善と普及活動。

(重点的研究)

- 地震発生予測モデルの高度化及び検証と、社会実装を目指した予測実験の試行。
- 火山活動推移を定量的に表現するモデルの構築と、それに基づく予測手法の開発とその試行。

(分野横断で取り組む総合的研究)

- 異なる分野にまたがる協働を促進するサポート体制の強化。

(研究を推進する体制の整備)

- 成果の効果的発信、人材育成の継続と発展。地震本部等関連組織との連携強化。

まとめ

- 現行計画では地震・火山現象の解明や予測による成果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前観測研究計画の方針が継続・強化され、災害軽減に資する研究成果が創出されつつある。
- 地震・火山現象の解明・予測や災害誘因予測に関する研究は、新たな観測網のデータ、史料・考古データの追加、観測・解析技術の開発、分野間連携の浸透などにより大きく進み、防災リテラシー向上に資する教育プログラム開発などの研究も徐々に進みつつある。今後も、調査・観測と技術開発を継続しつつ関連分野間の研究者の連携を強化することを通じて、得られた知見・成果を社会と共有し災害軽減に活用するための計画を推進することが重要である。

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について（報告）【要旨】

（科学技術・学術審議会 測地学分科会）

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。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予測の鍵となる。

我が国においては、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年の東日本大震災を踏まえた方針転換を行い、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。新たな方針が適切であったと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、これに基づいて平成31～令和5年度までの5か年計画として「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。）が進められている。

本レビューでは、今後の観測研究計画の検討に向けて、現行計画の方針の妥当性、観測研究の実施状況や成果を総括的に自己点検するとともに、今後の課題等を取りまとめた。

I. 前書き

- 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・急激な現象であるため、将来の地震・火山噴火の発生や災害誘因の発生の予測をより精度良いものにしていくためには、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研究が不可欠である。
- 我が国においては、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、それぞれ複数回の計画として実施され、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」（以下「第1次計画」という。）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い、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。
- 第1次計画に対する外部評価（平成29年7月）で、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たことを受け、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す

という方針のもと、平成31年度から現行計画が開始された。

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

- 現行計画は、地震・火山噴火現象の解明、発生や推移の予測、および災害誘因予測に関する研究を継続しつつ、研究成果を災害情報に活かすための研究や、地震・火山噴火現象・災害に対する国民の基本的な理解を深めるための防災リテラシー向上に関する研究に新たに取り組んだ。そのため、地震学・火山学的研究分野と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とともに、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た。
- 現行計画では、地震・火山現象の理解に基づき発生する仕組みや場を解明する「地震・火山現象の解明のための研究」、地震・火山噴火の発生や活動推移の予測手法を開発する「地震・火山噴火の予測のための研究」、地震動、津波、降灰、溶岩流などの災害誘因を予測し災害情報につなげる「地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究」、地震や火山噴火災害の発生機構解明と社会の共通理解を促す手法の確立を目指す「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」、連携強化・研究基盤の整備・人材育成などをめざす「研究を推進するための体制の整備」の5つの実施項目に分けて研究を推進した。
- 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、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ことから重点的な研究として実施した。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、複数の実施項目を横断する総合的な研究として推進した。

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

- 2016年熊本地震では、日奈久断層帯で発生したM6.5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、熊本県益城町ではどちらの地震でも震度7を観測した。地震時の滑り分布の大滑り域は地震波速度構造の高速度領域に対応し、滑り方向は地震発生前の震源域の剪断応力の方向と調和的であることがわかった。また、M7.3の地震の破壊の東西両端は低比抵抗の火山性構造付近で停止した。カルデラ内やカルデラ壁斜面において地滑りが発生したが、緩斜面でも急速な地滑りが発生したことが確認され、その滑り面多くは、軽石や溶岩が粘土化した層に位置することがわかった。西原村で観測された周期3秒程度が卓越する長周期速度パルスは、深さ数kmまでの断層面の浅部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。
- 2016年カイクウラ地震（ニュージーランド）（M7.8）は、様々な幾何形状・滑り方向・断層間相互作用を有する多数の断層が一つの地震として動いた地震であり、長期評価において複数断層の連動破壊を取り入れることの重要性を示す事例となった。
- 2018年大阪府北部の地震（M6.1）は、大都市域の直下で発生した地震であり、広範囲に社会的影響が及んだ。逆断層と横ずれ断層が同時に活動した特異な地震であり、また、将来M7.5程度の地震が発生すると推定されている上町断層帯の断層運動を促進する方向の応力変化をもたらした。
- 2018年北海道胆振東部地震（M6.7）では、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の液状化が発生するなど、多様な災害が表れた。震源は石狩低地東縁断層帯付近の深さ37 km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いた。
- 2021年福島県沖の地震（M7.3）は、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域である福島県沖の、深さ55 kmの沈み込む太平洋プレート内部で発生した。この地震の約1か月後及び約2か月半後には、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。

2. 主な火山噴火

- 2018年に草津本白根山で小規模な水蒸気噴火が発生し人的被害が生じた。このような噴火は事前警報が出しにくく、小規模であっても人的被害につながるという点から、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る背景にもなった。本研究計画に基づく調査により詳細な噴火履歴が明らかになり、3次元比抵抗構造からはマグマ性流体の上昇経路が推定された。また、近隣スキー場の利用者を対象としたアンケート調査から、情報発信においては情報を受ける側の理解度や知識量の違いを考慮すべきであることがわかった。
- 霧島新燃岳では、2011年1月に約300年ぶりに本格的なマグマ噴火を起こし、一旦休止した後、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、新燃岳近傍の硫黄山でも2018年4月にごく小規模な水蒸気噴火が発生した。地球物理・地球化学的観測、人工衛星データの解析、および物質科学的研究から、噴火に先行するマグマ溜まりの膨張や流体移動を示す微動発生など、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」につながる各種データが得られた。
- 桜島では、噴火頻度が高いことを活かし様々な知見が得られている。地殻変動から推定されるマグマの貫入速度と噴火様式の対応関係や火砕流を伴う噴火では前駆的地震が多く発生することが明らかになった。XバンドMPレーダー解析による噴煙高度の推定や、宇宙線ミュオンによる火山体透視技術の開発など、新技術開発も進んでいる。住民避難を視野に入れた総合的研究の推進、災害情報を住民へ伝達する手段や避難・復興に資する研究および防災リテラシーの向上に関する研究も周辺自治体と協力しつつ進められている。

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

- 地震・火山噴火現象に関する史料・考古データのデータベース化が進み、1854年東海・南海地震前後の全国の地震活動の変化などの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。今後、データベースの拡充とともに、それを維持し、幅広く活用する方法についても考えていく必要がある。
- 北海道沿岸などで歴史時代の津波の可能性のある痕跡を発見したり、火山噴出物の岩石学的分析より過去の火山噴火の規模や推移を示す情報を得るなど、地質調査により長期予測に資する重要な発見が着実に積み上げられた。
- 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向上した。また、震度の距離減衰を検証したうえで、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が開発された。
- 過去の現象の推定精度を高めるため、史料・考古・地形・地質という時間スケールや場所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。

(2) 低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

- 北海道太平洋沿岸の津波堆積物の分析から、12世紀と17世紀に十勝沖と根室沖で発生したと考えられる巨大地震が両地域で別の年に発生した可能性、また、17世紀の地震による地殻変動量が12世紀に比べ2倍程度大きかった可能性を示した。
- 鬼界火山の7300年前のカルデラ形成噴火での地質調査に基づき、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。

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

- プレート境界の地震については、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。その中で、南海トラフの浅部のスロースリップの発生など、新たな場所、時定数の滑り現象が確認された。
- 岩石摩擦実験より、震源断層のある地下の物質、温度、流体、応力における断層滑りの摩擦パラメータや流体の影響などが精力的に調べられ、高速滑りやスロースリップなど様々な地震現象が生じる物理機構の理解が進んだ。また岩石破壊実験により、破碎された地殻での流体の浸透率など水理学パラメータの理解が進んだ。

- 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、プレート境界面の粗さによる地震破壊の進展への影響など、断層面での多様な滑りの物理機構の理解を補強し予測モデルにつながるような成果が得られた。

(4) 火山現象の解明とモデル化

- 火山周辺や火口近傍における多項目観測が促進され、リモートセンシング技術も進み、火山活動の推移を高精度・高時間分解能でとらえられるようになり、異常現象の検知能力も向上した。多項目観測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。
- 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た。観測密度を一層高め、火山の微細構造や火山内の現象とそのソース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が今後の課題となる。
- 多くの火山で過去の噴火の噴出物の岩石学的分析が行われ、火道でのマグマの温度、圧力、粘性などの状態や移動速度が推定され、火道内過程のモデル化が進んだ。また噴火推移を推定するためのマグマの組成に関する情報が得られた。

(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

- プレートの形状・地震波速度構造・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に与える影響について分析が進められた。
- 地殻流体の分布や役割についての研究が進み、2016年熊本地震によって応力が増加した地域のうち、高圧間隙流体が推定された領域で、地震活動度がより大きく増加する傾向が見られた。
- 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、ひずみ集中帯の再現など観測データを説明しうるものが提案された。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取り組みにより、定量的な地震発生評価を目指したレオロジーモデルの開発が必要である。
- 多数の火山における比抵抗構造の調査で深さ2 km程度までの浅部に厚さ数百 m程度の低比抵抗層が存在することが明らかになったが、地盤変動源や地震活動域との位置関係からこれは熱水変質した難透水層であり、その下部の間隙水圧の上昇により浅部火山活動が発生することが示唆された。
- 2016年熊本地震発生域等を対象とした研究から、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。火山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。
- 日本列島基本構造モデル構築の一環として、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。構造共通モデルは様々な解析やシミュレーションの基盤情報であるため、今後も継続的に整備していくとともに、最新の研究成果を取り込み迅速にアップデートしていく体制が必要である。

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

- 海溝型巨大地震や津波の発生履歴の蓄積と整理を進めるとともに、日本列島全体を含む3次元有限要素モデルを構築してプレート境界の応力蓄積状態を推定した。また、地震サイクルの数値モデリングを実施した。過去の地震の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ない。
- 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。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などの改良が必要である。
- 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状態が精度良く求められるようになった。

- 内陸地震の長期予測に用いる震源断層モデルの妥当性の検証と応力場や断層形状を考慮した物理モデル構築を行い、観測データとモデルに基づく新たな長期予測手法の検討を進めた。
- 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載荷速度を推定した。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した。物理モデルは特定の地震に基づくものであり、モデルの普遍化はまだ十分に進んでいない。様々なモデルの融合を更に進め、長期予測の試行を進めるべきである。

(2) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

- 海陸統合データを活用し、プレート間固着状態をモニタリングする手法の開発やデータ同化手法によるプレート間摩擦パラメータの推定を行った。これによりプレート境界滑りの時空間的發展に関する理解が進み、現実的な予測モデル構築に近づいた。プレート間滑りは複雑な現象であることから、当面はより多様な滑りモデルの構築を目指し、将来的には物理・数理モデルに基づく発生確率の予測実験の実施を視野に入れるべきである。また、海陸統合データ取得とそれによるモニタリングは長期にわたって続けなければならない、そのための方策を検討する必要がある。
- 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を進め、統計的地震発生予測を試行的に実施した。実測データに基づく統計モデルの検証と高度化が課題として残されている。

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

- 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蓄積が進み、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が進んだ。
- 長期にわたり蓄積された地震先行現象のデータを統計的手法により評価するとともに、先行現象を説明する物理モデルが提案され、先行現象にもとづく地震発生確率予測を客観的に評価できる段階に進みつつある。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、および、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が求められている。

(4) 中長期的な火山活動の評価

- 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、マグマの種類の変遷を整理し、マグマ供給系の時間変化を推定することで、長期的な時間スケールでの噴火活動ポテンシャルを評価した。
- 数か月から数年程度の中期的な時間スケールの活動評価を目指し、多項目観測の実施と、様々な火山現象と噴火発生との関係の定量的評価を行った。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た。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。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更に活用すべきである。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。
- 観測データの蓄積が進んだ火山において、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を実施した。VUIにもとづく評価を試行する対象火山をさらに増やす必要がある。

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

- 多様な火山活動推移を体系的に理解するため、噴火に先行する現象から噴火の発生、活動の変化、終息までをばらばらの現象ではなく相互に関連する一連の現象としてとらえる火山活動推移モデルの構築を進めており、その一環として、起こり得る現象を網羅的にまとめ、時系列を整理した噴火事象系統樹の作成や改定を進めた。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

た。

- 噴出物の物質科学的研究と火山活動の対応の整理が進み、活発な活動が続きデータの蓄積が進む桜島においては火山活動推移モデルを試作した。現在の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。データのさらなる蓄積、比較研究の実施により、火山活動推移モデルを他火山においても試行的に構築する必要がある。

3 災害誘因の予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

- 2016年熊本地震、2018年大阪府北部の地震、2018年北海道胆振東部地震をはじめとする大地震の断層破壊過程と強震動の生成メカニズムを調べ、熊本地震では、断層浅部のごく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を確認した。断層の滑りの不均質構造が震源域の強震動を特徴づけるため、これらの位置を決定論的に設定する方法の開発が必要である。
- 関東平野など、地震動の増幅効果の大きい厚い堆積層を持つ大規模な盆地や平野を中心に、堆積層構造モデルの作成や検証、強震動生成・増幅メカニズムの分析が進められた。一方、近年の地震で地震動被害集中域となった地盤や地質をふまえ、地盤構造の調査対象を広げる必要性があると考えられる。
- 南海トラフ巨大地震のリスク評価の精度向上を目指し、研究分野横断型のリスク評価を実施した。震源過程、地下構造、強震動、津波、構造物についてそれぞれのモデルの不確実性を検討し、これらを統合してリスクを試算する、地震リスク評価プラットフォームを構築した。
- 巨大地震に伴う海底斜面崩壊による津波のシミュレーション手法を開発した。また、日本海における60断層について、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論的な津波高さを計算した。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。
- 2003年と1952年に発生した十勝沖地震について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あり、地震シナリオが異なっていることがわかった。
- 北海道八雲町、神恵内村等において、津波避難シミュレーションを行って避難困難地区を特定し、避難困難地区解消の対策を自治体・地域住民と協議し、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。
- 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によって生じた最近の国内外の地滑りについて調査を行い、付加体の地盤や火山灰土などの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、観測や室内実験による地滑りメカニズムの解明にも取り組み、滑り面の鉱物の影響などが明らかになった。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。
- 桜島火山で発生した火砕流を伴う噴火について、発生直前に起きる地殻活動の分析を行い、前駆的地震を伴う場合が多いことがわかった。

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

- 地震動や津波、火山噴火に伴う噴煙の移流拡散に関して、高密度の定常地震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が進展した。震度の即時予測であるPLUM法は平成30年3月に気象庁の緊急地震速報に導入された。
- GEONETから得られるリアルタイム地殻変動データを用いて断層モデル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)。
- 多項目観測による噴出物の迅速なマッピングと噴出量推定、噴出物の化学分析による噴火推移把握を目指した研究を、桜島や西之島など複数の火山で実施した。

(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

- 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な情報発信方法を見出すため、アンケート調査などを実施し、受け手の年代や居住地、知識量に配慮した情報伝達が重要であることがわかった。
- 想定シナリオと評価手法の組み合わせにより変化する災害リスク評価結果や災害誘因即時予測情報を、ユーザが適切に理解できるようにすることを旨とした表示システムの開発を行っ

た。災害誘因予測や防災リテラシーの分野など、相互に関連が強い研究課題間の連携を深めるため、定期的な情報交換を進めることが必要である。

4 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

- 震災後の防災政策の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。
- 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取り組んだ。
- 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を進め、災害誘因・災害素因について個別事例から一般性のある情報を抽出するなどの検討を進め、災害発生機構の解明を進めていく必要がある。

(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

- 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、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判断に参考にする情報の調査を行った。
- 防災リテラシー向上のための研修プログラムの開発、避難訓練可視化システムを使った避難訓練、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。各課題で得られた知見の統合を図りながら、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必要がある。

5 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

- 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しており、全国から35の機関が参加している。参加機関からの委員で構成される地震・火山噴火予知研究協議会が研究全体の推進を実質的に担い、地震予知連絡会、火山噴火予知連絡会は情報共有などを通じて計画推進の一端を担っている。
- 将来の社会実装を目指す研究として「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つを設定し重点的に実施している。
- 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。地震分野では地震本部を頂点とする一元的な施策推進体制が存在し、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。火山調査研究の分野においてもこれに相当する体制を実現することが望まれる。

(2) 分野横断で取り組む総合的研究を推進する体制

- 現行計画においては、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、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に関しては、関連各分野の研究成果に東京大学地震研究所と京都大学防災研究所による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、人文・社会科学的研究を含む総合的研究として実施している。データに基づく広帯域震源モデルの構築、西南日本地域の強震動や津波浸水モデルの提示、地震震源から地震波伝播経路、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。
- 首都直下地震に関しては、具体的に地震像を描くことを目指して歴史資料に基づく被害分布調査を進めている。また、関東平野を中心とした強震動即時予測手法の開発と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の検討を実施した。

- 千島海溝沿いの巨大地震については、津波に対する地域防災力の向上に力点を置く研究として新たに総合研究の対象とした。津波堆積物調査により過去の発生時期の調査、地震活動静穏化に基づく切迫性の評価、海底地殻変動観測、迅速な浸水域予測手法開発、避難訓練可視化システムの開発を行った。
- 桜島噴火に関しては、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、噴火シナリオにもとづく避難訓練の実施など、災害軽減に向けたより具体的な取り組みを進めた。
- 高リスク小規模噴火に関する総合的研究は、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ことから、現研究計画より新たに始まった総合研究である。小規模噴火が発生する場を理解するため地球物理学的観測や地質調査などを実施し、地下の比抵抗構造、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。

(3) 研究基盤の開発・整備

- 参加機関により、高感度地震観測網や GNSS 観測網などの陸域観測網と海域の観測網からなる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。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んでいる。その他にも多様な観測項目が実施されデータ蓄積が進む。GNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測など新たな観測手法開発や解析技術開発も進んでいる。生データ以外に、震源データなどの処理済みデータの公開や活断層や津波堆積物等のデータベース整備、基盤的な地質情報図及び災害情報図など様々な観測研究基盤の整備が進んでいる。これらの研究基盤を活かし、データ公開をさらに進める必要がある。
- 本研究計画の成果は長年にわたり整備が進められてきた観測基盤からのデータに負うところが大きく、観測基盤を維持するための技術開発や人材育成など、長期的安定運用に資する新たな仕組みを検討する必要がある。
- 発生頻度が低い大規模な地震・火山噴火の解明のためには長期にわたる観測データの蓄積は重要であり、効率的な観測技術の開発や持続可能な観測体制の検討が必要である。また、蓄積が進む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。データの多様化に対応するため、非専門家でも扱うことのできる解析ツールの開発や、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。

(4) 関連研究分野との連携強化

第1次計画から進められてきた文理融合は、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さらに進み連携の強化が進んだ。情報科学、計算科学の成果の活用や、歴史研究者と地震研究者による共同研究も進んでいる。現行計画に入り異分野の融合が進み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ことから、今後もこの方向性を強化し本計画を推進すべきである。

(5) 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ることから、日本と類似する地学的条件にある国々との協働による観測研究が進められている。海外研究者の招聘、国際共同観測研究や国際シンポジウムの実施、国際機関とのデータ共有などが活発におこなわれている。また、海外留学生の受け入れや外国人研究者の招聘による国際的な人的ネットワークの交流も進んでいる。

(6) 社会との共通理解の醸成と災害教育

研究成果に基づいて得られた情報が、国民や関係機関に効果的に伝わり活用されるためには地震・火山噴火現象や災害誘因に対する社会の共通理解が醸成され、防災リテラシーが向上する必要がある。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が、この研究はようやく緒に就いた段階であることから、性急な成果を求めず他分野との連携を徐々に育みながら継続・発展を目指す仕組みを整えるべきである。

(7) 次世代を担う研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

- 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が、任期付きのポストが多い。大学で地震・火山・防災等の専門教育を受けた学生は、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などで防災に携わる立場になる者もあり、より多様な観点に立った教育を行うことが必要である。
- 火山分野においては、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。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。

V. 総括的評価

1. 現行計画策定までの経過

- これまで長期にわたり実施されてきた地震及び火山に関する観測研究計画等によって構築された観測網により多様な地震・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。
- 現行計画は、地震・火山に関する観測研究を災害科学の一部として推進するという、大きな方針転換後の第2次計画として始まった。地震学や火山学を中核としつつ、災害や防災に関連する分野の研究者が参加し、協働して計画が実施された。新たに防災リテラシーの向上に関する研究を開始し、分野を跨ぐ総合的な研究についても研究対象を追加した。

2. 現行計画の成果と課題

- 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。地震・火山現象の解明及び予測のための研究では、観測体制の増強に努めて地震・火山現象や地下の様々な物理・化学的状態に関する知見を蓄積し、地震および火山噴火現象を中心とする地殻活動の推移をモデル化する技術を開発した。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。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。

3. 計画推進体制の評価と課題

- 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、参加機関からの委員で構成される予知研究協議会が中心となって研修計画を推進している。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を可能としている現行の実施体制のもとで今後も計画の推進を図るべきである。
- 現行計画では、東京大学地震研究所と京都大学防災研究所が連携し、拠点間連携共同研究を実施している。拠点間連携共同研究では、参加研究者からの自主的な提案の募集に加え研究分野を設定して行う公募も行っている。これは、研究分野の偏りを防ぐ重要な役割があることから、本観測研究計画にとって不可欠な仕組みと言える。
- 本研究計画の成果は長年にわたり整備が進められてきた様々な観測基盤からのデータに負うところが大きく、観測基盤を維持するための技術開発や人材育成など、長期的安定運用に資する新たな仕組みを検討する必要がある。
- 現行計画では異分野の融合が進み関連分野との連携は徐々に強化されている、国際共同研究など国際的な研究協力や人的ネットワークの構築も進む。次世代の人材育成に関しても、参加各機関がポストの確保に務めると共に人材育成事業への協力も進めている。今後もこの方向性を強化し本計画を推進すべきである。
- 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、火山噴火予知連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いる。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。

4. 現行計画の総括的評価と今後の展望

- 第1次計画に対する外部評価で指摘された改善すべき点に関しては、多くの項目で指摘に 대응できているが、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、相互理解が進みつつあるが、より長期的な視点に立ち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。
- 現行計画では、研究成果の社会の減災対策への実用化を進めるため重点的に取り組む3つの研究を設定し、概ね期待した成果が得られつつある。次の段階として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。
- 現行計画では、地震・火山噴火現象や災害誘因に対する社会の共通理解の醸成と防災リテラシー向上に関する研究を新たに開始したが、これらの研究はようやく緒に就いた段階であることから、他分野との連携しつつ継続・発展を目指す仕組みを整えるべきである。
- 現行計画では、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5つの総合研究を選定し、関連課題間の連携協力体制を構築しつつ実施している。各総合的研究の進展段階には大きなばらつきがあるものの、各分野の成果が実際の災害軽減に向けた具体的な取り組みにつながりつつある。今後も総合的研究という分野横断研究の枠組みを維持し、研究対象や研究の方向性の明確化などの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。
- 第1次計画で提示された、中長期的な展望の下で体系的に取り組む内容に関しては、それぞれの進展状態に違いはあるものの、第1次及び現行計画を通じて着実に進んでいる。今後も成果を社会実装につなげることを目指し、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。
- 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。
- 史料・考古資料の分析、地形・地質調査は、近代的観測が開始する以前の地震・火山噴火現象を理解し、将来の活動推移の予測に資するものとして重要である。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ことから、今後もこれらの研究を継続すべきである。
- 断片的な史料・考古・地形・地質のデータを統合的に整理し、さらに近年の観測データと組み合わせることで解釈することや、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。
- 地震発生予測に対しては、これまでに得られた科学的知見や技術を活用し、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。今後は、内陸地震の長期予測実用化に向けた発生予測実験や、プレート境界で比較的短時間で繰り返される地震などを対象とする滑り発生の予測実験を試行すべきである。
- 火山噴火予測に関しては、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さらに推進すべきである。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、噴火推移予測・活動予測実験を試行することを視野に入れるべきである。
- 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。社会実装へ繋がる流れをさらに促進する必要がある。予測結果に必然的にもなう曖昧さを対象とする研究についても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。これらの枠組みをさらに改善しつつ協働の強化に一層取り組むべきである。

5. まとめ

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さまざまであるため、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、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ている。