

## 5. まとめ

平成 26 年度から 5 か年計画で推進されてきた「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」では、地震・火山噴火現象の理解とそれに基づいた発生予測に加え、それらによる災害誘引の予測の実現を目指し、過去も含めた地震・津波・火山噴火とそれに随伴する自然現象と社会対応に関する研究を行った。

この 5 か年間の日本列島における地震活動や地殻変動は、2011 年東北地方太平洋沖地震による影響下にあったが、この分析からプレート境界だけではなく内陸で発生する地震についても、その発生場の特徴や発生機構に関する理解が大きく進展した。巨大地震が与えた応力状態の変化に対する応答として内陸での地震活動を捉えることにより、地殻内での応力不均質、地下流体の地震発生への関与や断層強度が非常に小さいことが示された。その一方で、2011 年以前から歪速度が大きかった内陸のひずみ集中帯では、巨大地震による擾乱の影響は小さい。いずれも内陸での地震発生機構の理解に向けて重要な知見である。地震観測による地殻内応力の推定技術が向上し、空間不均質とともに時間変化も捉えられるようになり、地下の状態評価に有望な手段となるだろう。

東北地方における粘弾性構造の解明とそれにもとづく海溝型巨大地震の発生サイクルのモデル化においても重要な成果が得られた。粘弾性を考慮することで、巨大地震発生前の継続的な沈降と発生後の隆起の時空間変化が合理的に説明された。こうしたモデル構築は海溝型地震発生の長期評価に重要である。2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域周辺の海域では地殻変動や地震活動に時間変化が現れはじめており、こうした活動推移を継続して捉えることにより、モデルの検証・改良が進むものと期待される。

南海トラフでは、海底地殻変動観測によりプレート境界浅部におけるすべり欠損分布が捉えられ、それを考慮したシミュレーションを通じて今後発生しうる南海トラフ巨大地震の多様な姿を予測できることが示された。プレート境界浅部でも、多様なスロー地震現象がしばしば起こっていることが明らかになりつつあり、こうした活動の詳細な理解は、南海トラフ巨大地震の発生に至る過程の解明に不可欠である。

大地震に先行する多様な現象と実際に発生した大地震と関連を統計的に評価した結果、前震活動を用いた評価は、格段に高い地震発生予測の確率利得を示すことがわかった。現時点では、大地震が発生する前に「前震活動」と識別することはできないが、前震活動の特徴抽出にむけた研究が進展しつつある。

火山現象については、「噴火事象系統樹の高度化」と「火山活動の分岐条件の解明」を共通の目標として取り組んだ。集約的な成果のひとつは、いくつかの個別火山について実施した、噴火堆積物の調査・分析に基づく事象系統樹の整備である。従来よりも高度化された点は、系統樹に「噴火未遂」事象を加え、地震や地殻変動等の観測データを参照することによってその確率を求める手順を導入したことである。これとは別に、観測や理論から得られる知見を事象分岐条件に取り入れ、噴火履歴が未詳の火山にも適用することを念頭に置いたプロトタイプ事象系統樹の作成にも取り組んだが、現状では研究手法別に文献調査を行った段階にとどまっている。今後は、確率を付与したプロトタイプ系統樹の作成に向けて、情報を整理していく必要がある。

山体崩壊等の低頻度大規模火山現象は、事象系統樹では初期段階の分岐事象のひとつとされることが多い。本計画では、実事例の少ないこうした現象の履歴を詳しく調べる研究にも取り組んだ。特に、カルデラ形成噴火については、直前の火山活動の有無や規模・様式について知ることが、予測という観点から重要である。本計画では、トレンチやボーリングによる地質調査で、先行噴火の痕跡を欠く事例があることや、噴火開始後の活動推移には多様性があることが明らかにされた。また、前計画で開発した分析手法を用いて過去の噴出物を系統的に調べたことで、いくつかの大規模噴火イベントについては、マグマだまりの含水量や温度圧力の変遷を明らかにできた。こうした成果は、大規模噴火に先行する現象を想定する上で重要であり、モニタリング観測にも指針を与える。

火山現象のモデル化に関しては、噴出物分析とフィールド観測の両面で進展があった。噴出物中の微細な結

晶を最先端の撮像技術で解析することにより、火道浅部で起きるマグマの結晶化と噴火様式との関係が明らかになってきた。物理観測との連携による現象理解とモデル化に今後の展望を開く成果といえる。一方で、熱水系卓越型の火山では、微小地震の群発、地殻変動、消帯磁等の現象が、数ヶ月から数年程度の時間スケールで非噴火期に間欠的に起こっている事例が多いことも見いだされた。今後、様々な時間スケールで火山現象のモデル化をさらに進めて予測を目指すべきであるが、その際に欠かせないのが多項目の情報である。その観点から、本計画で InSAR 解析手法の高度化、二酸化硫黄放出率の自動測定装置の実用化等の技術開発が進展したことの意義は大きい。また、平成 28 年度から文部科学省の次世代火山プロジェクトが始まったが、その中で取り組まれている新たな観測手法の開発や地下構造探査との連携も、相互に大きな効果をもたらした。

2011 年に東北地方太平洋沖地震が発生したことを受け、本研究計画では、低頻度大規模の巨大地震や大規模噴火についても、長期予測の精度を向上させるための研究に取り組むこととなった。それには、史料、考古データ、地質データ等の活用が不可欠である。そこで、歴史学、考古学分野の研究者にも本計画への参画を呼びかけ、データの収集、データベース化、分析を進めた。歴史地震研究の基盤である各種地震史料のデジタルデータ化と校訂作業を進め、新たに地震関連史料データベースを構築した。また、全国各地の遺跡発掘調査報告書から、考古遺跡に残された災害痕跡の記事を抽出・分析し、災害痕跡データベースの作成に取り組んだ。一方、既刊地震史料を簡易データベース化することで効率的に校訂作業を行えるスキームの開発や、市民参加型翻刻プラットフォームの構築など、データベース化の作業を加速させる取り組みも平行して行った。津波堆積物の調査も着実に進められ、浸水範囲の推定や広域比較による発生年代の検討が進んだ。これらの新たな取り組みは、膨大な作業を伴うため、5 カ年計画の実施期間で完了するものではなく、全体の枠組みを構築してその一部が整備された段階に過ぎないが、これらが重要な研究基盤となりつつあることは間違いない。今後、蓄積されたデータに基づいて、過去の被害分布と近年の観測の比較による個々のイベントの再評価、イベント発生履歴の再整理、さらには将来予測の精度向上に向けて、より具体的な成果が期待される。

地震や火山噴火の発生予測の研究は着実に進展しているが、短期間に予測の精度や信頼性を大きく向上させるのは簡単ではない。現在持っている科学的知見を最大限に利用して、地震動、津波、降灰等の災害誘因の予測研究を強化することで、少しでも地震・火山災害の軽減に貢献することが必要である。そこで、災害科学、人文社会科学の研究者にも本計画への参画を呼びかけ、災害軽減に役立てるための研究を推進する体制を構築した。

災害誘因の予測では、海陸に整備された稠密な観測網と高速数値計算の組み合わせによる即時予測の分野で重要な成果が挙げられた。長周期を含む強震動の予測では、データ同化計算の高度化と高速化により、地震動が伝わるよりも早く、現実に近い強震動予測波形が得られるレベルに到達し、津波においてもデータ同化にもとづく浸水計算手法が開発された。事前予測では、震源から強震動や津波浸水を被る構造物への影響に至るまでの各要素に関する専門家がチームとなって、地震がどのような被害につながるのかを科学的に評価する取り組みが始まった。これにより、予測の各要素の不確かさを反映した不確実性をリスク評価に付加できると期待される。リスク推定の不確実性を明示することが専門家の評価に対する信頼を高めるとの研究報告があり、こうした取り組みは重要である。また、事前予測の結果を地理空間情報として可視化し、避難訓練に活用することが適切な避難行動を促す上で有効であることがわかり、理学的予測を災害軽減につなげるための方向性を例示する重要な成果である。

本計画期間中にも、災害をもたらす地震・火山噴火がいくつも発生した。2014 年には長野県北部の地震 (M6.x)、2016 年に熊本地震 (M7.3)、2019 年に大阪府北部 (Mx.x) と北海道胆振東部地震 (Mx.x) が発生し、いずれも震源を中心とした地域に人的物的な被害をもたらした。直後の調査観測により、各地震の震源となった断層の性状の詳細が明らかになった一方で、地震現象の多様性とその予測の難しさも示された。長野県北部の地震は既知の活断層の一部のみを破壊したものの、熊本地震と大阪府北部の地震は複数の活断層の複合破壊であった。こ

うした実際の地震が示す破壊様式の複雑さを事前に評価することは極めて難しい。長野県北部の地震と熊本地震は本震の発生に先行して顕著な地震活動があり、大地震の前駆的地震活動の重要な事例となった。地震による被害では、強震動による被害のほかに、大規模な斜面崩壊によるものが熊本地震と北海道胆振東部地震で顕著であった。これらの地震による斜面崩壊では降下火砕物層が滑り面となっている点が共通であり、地盤災害予測の観点で注目される。大阪府北部の地震は震源が大都市域にあったため規模の割に広域に被害が発生した。北海道胆振東部地震では、地震後に発生した広範囲での電力のブラックアウトや、軟弱地盤による地盤の液化が震源から離れたところでも起こるなど、単純に地震の規模や震源の場所だけから、地震災害の規模を予測することが難しいという問題点が浮き彫りになった。

2014年に御嶽山で発生した水蒸気噴火は、多数の登山者に人的被害を与える火山災害となった。これ以外にも、一般に先行現象に乏しく予知の難易度が高いとされる水蒸気噴火が、口永良部島(2014年)、箱根山(2015年)、草津本白根山(2018年)、霧島硫黄山(2018年)などで相次いだ。火口近傍の観測データに共通の特徴がいくつかの事例で確認されたことから、将来には、噴火直前の警報で登山者・観光客に緊急退避を促せるようになる可能性が示されたが、理学だけでは解決できない問題も多く残されている。水蒸気噴火については、噴火直前だけでなくやや長い時間スケールも含めた火山活動の比較研究をさらに進めることが、現象理解・予測のいずれにも重要である。このため、引き続き着実にデータを蓄積していく努力が不可欠である。一方、口永良部島の2015年再噴火、阿蘇山の2014年以降の一連の噴火、2017年~2018年の霧島新燃岳再噴火、2013年以後継続中の西之島噴火など、マグマの関与が明瞭な噴火も多発した。これらの噴火では、無人機等も活用した多項目観測による状況把握と現象・災害の予測が行われた。加えて、総合研究課題として取り組んだ桜島については、全島避難を伴った2015年のマグマ貫入イベントも含め、豊富な噴火・観測事例を活かして、マグマの貫入速度と噴火様式・規模の対応を整理し、さらには避難対応までを分類した。