

## 資料 1 - 1

科学技術・学術審議会  
測地学分科会 地震火山部会  
地震火山観測研究レビュー委員会（第5回）  
H28.12.19

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の  
実施状況等のレビューについて報告書本文（案）



## 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」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. 本計画の基本的な考え方	2
III. 地震火山観測研究計画の変更について	3
1. 東北地方太平洋沖地震の発生を受けて実施した前計画の見直しと現行計画の策定	3
2. 御嶽山の噴火を受けて実施した観測研究体制の見直しと取組	4
IV. 重要な地震・火山現象と拠点間連携共同研究	5
1. 近年発生した地震及び火山現象に関する重要な観測研究	5
(1) 主な地震	5
(2) 主な火山噴火	9
2. 優先度の高い地震・火山噴火に対する総合的な取組	12
3. 拠点間連携共同研究	15
V. 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の実施状況と今後への課題	17
1. 地震・火山現象の解明のための研究	17
(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整理	17
(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明	19
(3) 地震・火山噴火の発生場の解明	22
(4) 地震現象のモデル化	26
(5) 火山現象のモデル化	28
2. 地震・火山噴火の予測のための研究	31
(1) 地震発生長期評価手法の高度化	31
(2) モニタリングによる地震活動予測	32
(3) 先行現象に基づく地震活動予測	35
(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測	37
3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究	38
(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究	38
(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明	39
(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化	40
(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化	42
(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化	45
4. 計画を推進するための体制の整備	47
4. 1 実施状況及び成果	47
(1) 推進体制の整備	47
(2) 研究基盤の開発・整備	48
(3) 関連研究分野との連携の強化	51
(4) 研究者, 技術者, 防災業務・防災教育に携わる人材の育成	51
(5) 社会との共通理解の醸成と災害教育	52
(6) 国際共同協力・国際協力	52
4. 2 実施状況及び成果	53
(1) 推進体制の整備	53
(2) 研究基盤の開発・整備	54
(3) 関連研究分野との連携の強化	57
(4) 研究者, 技術者, 防災業務・防災教育に携わる人材の育成	57
(5) 社会との共通理解の醸成と災害教育	57
(6) 国際共同協力・国際協力	57
VI. 総括的評価	58
1. 現行計画策定までの経過	58
2. 現計画の成果と課題	59

3. 計画推進体制の強化	65
4. 現計画の統括的評価と今後の展望	67
5. まとめ	70
[用語解説]	73
参考資料	99
1. 地震関係観測点数一覧	
2. 全国の活火山(110火山)	
3. 火山噴火予知観測網	
4. 火山関係観測点数一覧	
5. 国立大学法人の常時観測項目と観測点数(火山)	
6. 気象庁の常時及び定期観測項目と観測点数(火山)	
7. 国土地理院の常時観測項目と観測点数(火山)	
8. 海上保安庁における海域火山の監視・観測状況	
9. 山梨県富士山科学研究所の常時観測項目と観測点数(火山)	
10. 防災科学技術研究所の常時観測項目と観測点数(火山)	
11. 産業技術総合研究所の常時観測項目と観測点数(火山)	
12. 北海道立総合研究機構の常時観測項目と観測点数(火山)	
13. 気象庁の火山機動観測実施状況	
14. 御嶽山に関する火山噴火予知連絡会の活動経過	
15. 口永良部島に関する火山噴火予知連絡会の活動経過	
16. 桜島に関する火山噴火予知連絡会の活動経過	
17. 阿蘇山に関する火山噴火予知連絡会の活動経過	
18. 「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の個別課題一覧(機関順)	
19. 「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の個別課題一覧(項目順)	
20. 東京大学地震研究所(共同利用・共同研究拠点)の地震・火山噴火の解明と予測に関する公募研究実施課題一覧	
21. 東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究実施課題一覧	
22. 国際共同研究一覧	
23. 予算及び機構定員整備状況	
24. 「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」に関する主要論文リスト	
25. 国際協力機構火山学総合土砂災害対策コース研修員受入れ人数	
26. 関連分野の研究者数	
27. 「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」実施機関	
28. 第8期科学技術・学術審議会測地学分科会委員名簿	
29. 第8期科学技術・学術審議会測地学分科会地震火山部会委員名簿	
30. 第8期科学技術・学術審議会測地学分科会地震火山部会地震火山観測研究レビュー委員会委員名簿	
31. 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の実施状況等のレビューに関する審議状況	
[概要・要旨・付属資料]	185

## I. はじめに

### 1. 背景

プレート沈み込み帯に位置する日本列島は、有史以前から何度も地震や火山噴火に見舞われてきた。これらの地震や火山噴火は、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極力小さなものにするためには、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、得られた知見を災害軽減に役立てるための方策を探る必要がある。

地震・火山噴火が避けられない我が国においては、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、地震予知と火山噴火予知の計画が統合されて「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」が実施された。この観測研究計画実施中の平成23年3月に平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震（以下、「2011年東北地方太平洋沖地震」）が発生し、死者・行方不明者2万人近くに上る東日本大震災を引き起こした。

それまでの観測研究計画では、マグニチュード9に達するような超巨大地震発生の可能性は十分に検討されていなかった。その結果、超巨大地震による災害の発生を事前に強く警告することはできなかった。また、地震による津波などの災害誘因の予測の研究が不足していた。科学技術・学術審議会測地学分科会では、超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究を推進するため、観測研究計画の見直しを行い、平成24年11月に建議した。

平成26年度からの観測研究計画の策定に当たっては、東日本大震災の発生を踏まえ、地震や火山噴火に関する科学的な研究成果を防災・減災につなげていくことの重要性を指摘した「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（平成24年10月）を受けて、科学技術・学術審議会測地学分科会で検討された。それまでの地震・火山噴火の予知に基づいて災害軽減に貢献するという方針を転換し、地震や火山噴火の予測にとどまらず、それらが引き起こす地震動、津波、火山灰や溶岩の噴出などの災害誘因の予測に基づき災害の軽減に貢献することを目標とした「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」が平成25年11月に建議され、平成26年度に新たな計画が開始された。

### 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」について、地震・火山噴火の予知を目標とした観測研究計画からの方針転換が適切であったか、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、次期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」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当たっては、科学技術・学術審議会測地学分科会地震火山部会（以下、「地震火山部会」）の下に地震火山観測研究計画レビュー委員会を設置し検討を行った。

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」の基本的な考え方をまとめる。III章では、2011年東北地方太平洋沖地震を受けた前計画の見直しと現行計画の策定及び現行計画実施中の平成26年9月に発生し戦後最大の火山災害となった御嶽山の噴火を受けた取り組みについて述べる。IV章では、近年発生した地震と火山噴火の研究成果、本計画で総合的に取り組んでいる優先度の高い地震・火山噴火についての研究成果、さらに、地震・火山噴火に対する科学的理解を災害軽減に役立てるために実施した東京大学地震研究所（以下、「地震研」）と京都大学防災研究所（以下、「防災研」）の拠点間連携共同研究の成果を取りまとめる。V章では、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した。VI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」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

地震による災害を軽減することを旨として、地震予知に関する観測研究計画は、地震による災害を軽減することを旨として、地震予知計画が測地学審議会（現在の科学技術・学術審議会測地学分科会）において建議され、昭和40年度から実施された。この計画では、全国に高感度の地震観測点や地殻変動観測点を整備し、地震の前兆現象の検出を主とした地震予知の技術を構築することを目指した。第7次計画（平成6～10年度）までに、研究者も増加し、地震及び地殻変動に関するデータなどに基づき地震現象の理解は確実に深まった。しかしながら、地震の前兆現象には複雑性や多様性があり、その中に系統性が見出せるほどにはデータが蓄積されなかった。そのような中で、平成7年に兵庫県南部地震（以下、「1995年兵庫県南部地震」）阪神・淡路大震災が発生した。これを契機に計画を総括し、観測データに現れる前兆現象のみに基づく地震予知には限界があると結論付けた。平成11年度に始まった「地震予知のための新たな観測研究計画」では、実験や理論などに基づき地震発生機構をモデル化し、地震発生に至る一連の過程を知ることが地震予知の実現に著実につながるの考えに基づき、基礎的研究を重視した計画となった。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。同本部が平成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。

一方、火山噴火予知計画は、昭和49年度から火山噴火予知の実用化を目指して昭和49年度から始まった。観測網の整備と実験観測を推進し、活動的火山における高密度・高感度の多項目の観測網整備が進み、火山体の地下構造の把握やマグマ貫入の把握、噴火現象やその先行現象の理解が進んだ。また、地質・岩石学的調査に基づく、火山活動の長期予測や噴火ポテンシャル評価も行われるようになった。平成12年には、有珠山や三宅島において、先行現象の検知に基づく噴火発生前の情報発信が行われるなど、噴火予知の情報に基づく災害対応も実践された。このように適切な観測が行われている火山で、過去の噴火事例を考慮できる場合には、観測データの異常から噴火の開始や推移を定性的に予測することができるようになってきた。しかしながら、観測点が十分に整備されている火山は少ないため、研究成果を活用した火山活動の把握や噴火発生前に情報の発信ができる火山は限定されている。また、噴火現象を説明する物理・化学モデルは提案されてはいたものの部分的であり、平成12年の三宅島のカルデラ形成と大量のガス放出活動を想定できなかったように、噴火様式やその推移、あるいは、規模について、予測方法は確立されていない。

これまでの地震及び火山噴火予知の観測研究の成果に基づく、地震発生と火山噴火は、主にプレート運動に起因するという同じ科学的背景をもつ自然現象であり、それぞれの現象には共通の発生場の理解がさらに必要であることが認識されるようになった。そこで、平成21年度からは、地震予知と火山噴火予知の計画は、地震・火山現象の相互作用や物理過程の理解の深化のため、また、地震・火山活動の把握のために必要な観測網とデータの有効利用を行うため、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」として統合され、5年計画として策定された。高感度・高密度の地震及び地殻変動観測網による観測や多項目火山観測のデータに基づき、地震研究では、繰り返し地震の発生予測やプレート境界滑りの多様性の発見、火山研究では、小規模噴火の規模予測やマグマ蓄積過程の多様性の発見などの成果を得た。また、それらの物理・化学過程の理解の深化や数値シミュレーション技術の進展があった。両分野の統合により、沈み込むプレート活動とマグマ上昇経路との関連性、マグマ貫入と地震活動への影響などの新しい成果も得られた。

平成21年度から始まった新計画の成果が上がりつつあった平成23年3月にマグニチュード9の2011年東北地方太平洋沖地震が発生した。このような甚大な災害を及ぼす超巨大地震の発生はこれまでの計画でほとんど追究されていなかったため、関連の学協会や海外研究者、外部評価委員会の意見・提言を踏まえ、平成24年11月に「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画の見直しについて（建議）」を取りまとめ、超巨大地震に関し当面実施できる観測研究を推進することとなった。これについては、Ⅲ章であらためて詳述する。

## 2. 本計画の基本的な考え方

2011年東北地方太平洋沖地震の発生とそれによる震災の経験を踏まえ、地震・火山の観測研究計画は、国民の生命と暮らしを守るための災害科学の一部としてあらためて位置付けられた。災害は、地震・火山噴火などの自然現象に起因する災害誘因に加え、地形・地盤等の自然環境や人間社会が持つ脆弱さなどの災害素因により決まる。つまり、強震動や津波、火山灰や溶岩流などの災害誘因が人の住む自然環境や社会環境に作用し、脆弱性のあるところに災害が起きる。そこで、地震や火山噴火の発生予測ができればおのずと防災に貢献できるという考え方を見直し、本計画は、災害を引き起こす

地震や火山噴火の発生予測とともに、それらによる災害誘因の予測の研究も行い、地震・火山噴火に関連する災害の軽減に貢献するという考えのもとに立案された。つまり、地震・火山現象の理解を深め、その発生予測を目指した観測研究を継続的にかつ着実に実施することに加えて、地震動や津波、火山灰や溶岩の噴出など災害を引き起こす現象の予測を含め、災害の軽減に貢献する研究を進める。

なお、現行計画の前は地震及び火山噴火の「予知」という語を計画名に用いていたが、「予知」は将来の現象を前もって知る意味で幅広く使われ、必ずしも科学的な内容を示さない。現行計画では、科学的な知見に基づき将来の現象を定量的に推定することについては原則として「予測」という語を用いている。

本計画より前の観測研究計画にも、防災や減災につながる成果が得られていた。例えば、高密度観測網や海底観測データに基づく地震や津波の即時予測、震源断層の詳細な滑り分布や内陸ひずみ分布の推定による地震発生ポテンシャル評価、火山活動の推移を俯瞰的に理解し防災・減災対策に活用できる火山噴火事象系統樹などである。これらの成果を踏まえつつ、理学だけでなく、防災に関連する工学、人文・社会科学等の関連分野と連携し、災害素因との関係を意識した研究を推進する。また、地震・火山現象の推移や低頻度大規模地震・火山噴火現象を理解するために、近代観測データに基づく研究だけではなく、過去の事例を調査できる歴史学や考古学などと連携して、歴史地震・歴史火山噴火研究を進める。

上記の考え方をもとに、現行計画では、地震・火山災害の根本原因から災害発生までを視野に据え、以下の4項目を柱にして研究を推進している。(1)「地震・火山現象の解明のための研究」では、地震・火山噴火現象の物理・化学過程を解明し、地震・火山噴火予測や災害予知の基礎とする。(2)「地震・火山噴火の予測のための研究」では、物理・化学過程に基づくモデリングによる演繹的手法や観測事例に基づく帰納的手法を用いて地震・火山噴火の発生予測を目指す。(3)「地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究」では、地震や火山噴火が引き起こす災害に照準を合わせ、地震学・火山学的手法による災害予測及び災害軽減に結びつける方策の構築を研究する。(4)「研究を推進するための体制」では、本計画の進捗状況を把握して研究を進める体制、観測網やデータベース、観測・解析技術開発などの研究基盤の整備・拡充を図るとともに、研究者・技術者育成、国際共同研究、本計画の実施状況の広報のための取り組みを組織的に行う。

### Ⅲ. 地震火山観測研究計画の変更について

#### 1. 東北地方太平洋沖地震の発生を受けて実施した前計画の見直しと現行計画の策定

2011年3月11日に発生した2011年東北地方太平洋沖地震では、日本海溝から沈み込む太平洋プレートと陸のプレートの境界面で、南北約500km、東西約200kmにわたる領域が破壊し、宮城県沖の海溝近くを中心に広い領域で数十mを超える大きな地震性滑りが発生した。そのマグニチュード9.0は我が国の観測史上最大であり、世界的にも最大級の地震であった。この地震による津波は最大遡上高が約40mに達する巨大なもので、日本国内では北海道から関東にかけての広い地域で津波による死者・行方不明者が出たほか、国外でも津波による被害があった。

2011年東北地方太平洋沖地震の破壊の開始点である宮城県沖では、プレート境界大地震の発生が危惧され調査・研究が進められていたが、マグニチュード9に達するような超巨大地震発生の可能性については十分に追究されていなかった。また、それまでの地震予知計画では、地震そのものの予知による災害軽減への貢献を目標としていたため、地震により引き起こされる地震動や津波など災害誘因の予測の研究は対象となっていなかった。このような問題点に対応するため、平成23年10月に科学技術・学術審議会測地学分科会地震火山部会の下に地震及び火山噴火予知のための観測研究計画再検討委員会を設置し、計画の見直しの検討を開始した。計画の見直しは平成24年11月に科学技術・学術審議会において建議され、超巨大地震に関して当面実施すべき観測研究として、超巨大地震の発生機構や発生サイクルの解明、超巨大地震の長期評価手法や超巨大地震による津波の予測の研究などに取り組むことになった。

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」は平成25年度末で終了することになっていたため、計画の見直しでは超巨大地震について緊急に取り組むべき研究への対応にとどめ、地震・火山観測研究の抜本的な見直しは、平成26年度から開始する新計画での実現を目指すことになった。平成24年11月に地震火山部会の下に次期計画検討委員会を設置し、次の指摘を考慮して、検討を開始した。

地震及び火山噴火予知のための観測研究計画に関する外部評価報告書(平成24年10月26日)に

において、社会の防災・減災に十分に貢献できていない等の課題に対応するために改善すべき点として指摘された事項は、

- ・国民の命を守る実用科学としての地震・火山研究の推進
- ・低頻度ながら大規模な地震及び火山噴火に関する研究の充実
- ・研究計画の中・長期的なロードマップの提示
- ・世界的視野での観測研究の一層の推進
- ・火山の観測・監視体制の強化
- ・研究の現状に関する社会への正確な説明
- ・社会要請を踏まえた研究と社会への関わり方の改善

「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 17 日）において、地震研究等の抜本の見直しとして指摘された事項は、

- ・東北地方太平洋沖地震のような超巨大地震の発生やそれに伴う巨大な津波の発生の可能性を事前に国民に十分伝えられなかった。
- ・人文・社会科学も含めた研究体制を構築し、総合的かつ学際的に研究を推進する必要がある。
- ・低頻度で大規模な自然現象を正しく評価するとともに、防災や減災に貢献できるよう、研究方法や研究体制の抜本的な見直しを早急に行う必要がある。
- ・科学的見地から、自然災害に対して地方自治体が適切な防災対策を取ることができるよう、助言を行う取り組みが必要である。

平成 25 年 11 月に科学技術・学術審議会において建議された「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」は、地震発生・火山噴火の予測を目指す研究を継続しつつも、計画の目標を広げ、地震・火山噴火による災害誘因の予測の研究も組織的・体系的に進め、国民の生命と暮らしを守る災害科学の一部として推進することとなった。地震や火山現象の理解にとどまらず、地震や火山噴火が引き起こす災害を知り、研究成果を地震、津波及び火山噴火による災害の軽減につなげることを目指す計画となるため、地震学や火山学の研究者に加え、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が参加することとなった。

## 2. 御嶽山の噴火を受けて実施した観測研究体制の見直しと取組

2014 年（平成 26 年）9 月 27 日に発生した御嶽山（長野県・岐阜県）での水蒸気噴火は、死者 58 名、行方不明者 5 名（2015 年 11 月 6 日時点）もの人的被害をもたらした、戦後最悪の火山災害となった。この火山災害を踏まえ、科学技術・学術審議会測地学分科会地震火山部会において火山観測研究の現状に関する課題を整理し、今後の対応について議論が行われた。御嶽山における観測研究体制、火山観測研究全体の方向性、戦略的な火山観測研究体制、火山研究者の人材育成、防災・減災対策への貢献について検討され、2014 年 11 月に「御嶽山の噴火を踏まえた火山観測研究の課題について」を取りまとめた。

御嶽山では、2014 年噴火以降の推移を把握するための観測体制の整備、噴火に至った経緯の解明のための調査が早急に必要とされ、科学研究費補助金（特別研究促進費）「2014 年御嶽山火山噴火に関する総合調査」が実施された。また、現行計画の開始当初、御嶽山を対象とした課題はなかったが、2015 年度からは「水蒸気噴火後の火山活動推移予測のための総合的研究－御嶽・口永良部・阿蘇－」という課題を設定し、同じく 2014 年に水蒸気噴火が発生した他の 2 火山との比較研究を進めた。

水蒸気噴火のような規模の小さな噴火に対して、現行計画当初より、火口近傍を含む火山体周辺における地震観測、地盤変動観測や地球電磁気観測の拡充が進められてきたが、気象庁は、これまでの山麓部に加え、水蒸気噴火の可能性のある火山の火口周辺にも観測施設を設置した。大学は、火山活動の活発化の認められる蔵王山において、浅部構造把握のための人工地震探査を行った。また、水蒸気噴火からマグマ噴火への移行を捉えるためには、水蒸気噴火発生後の観測を、迅速かつ安全に行う必要があり、遠隔観測や無人機観測の技術の実用化が進められた。

近年は、大学の法人化により限られた研究リソースで効果的に研究を進めるために、重点的に観測研究を推進する火山を絞ってきた。しかし、御嶽山の噴火のように、現時点で活動度が高いと評

働されていない火山でも大きな災害につながる噴火が発生する可能性のあることを、あらためて考える必要が出てきた。そのため、重点的・集中的観測研究の他に、継続的・網羅的な観測施設の維持と、機動的な観測研究体制の構築について再検討がなされた。重点的に観測研究が必要な火山を研究対象とする大学に、水蒸気噴火実験観測設備や火山性流体移動検知システム等の火山観測関係設備の整備が2015年度に行われたが、他の施設についても今後計画的に更新を進める必要性が指摘されている。また、当初より研究対象とされていた十勝岳、吾妻山、草津白根山、阿蘇山、口永良部島のほか、御嶽山、雌阿寒岳、蔵王山、那須岳、箱根山、焼岳、九重山等においても観測施設の強化や臨時観測が行われた。気象庁は、八甲田山、十和田、弥陀ヶ原を常時観測火山として追加し、緊急増設用火山機動観測機器の整備や水蒸気噴火の兆候を早期に把握する手法の開発も進めている。

継続的な観測点の維持・管理に携わり、観測を基盤として火山噴火現象の解明や火山噴火予測研究を実施している火山研究者の不足が指摘され、地震・火山観測研究のコミュニティとして、有効な人材育成や研究者のポストの確保ができていなかった問題が顕在化した。状況改善のためには、観測データの一元的な流通、他分野との連携、国際交流の促進により、火山研究参画者を増やすこと、並びに若手人材の育成とキャリアパス確保のために火山コミュニティ全体で方策を検討することが挙げられた。また、継続的・長期的な観測研究に携わる研究者の、大学間・分野間における競争力の確保も重要な問題である。九州大学には「実践的火山専門教育拠点」が設置され、文部科学省からは「次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト」をが開始するされるなど、新しい取り組みが始まっている。

観測研究の成果や火山研究者人材が災害軽減に貢献するためには、国の機関、地方公共団体、研究者間で連携し、た情報の流通と人材の活用が重要である。気象庁は、火山の監視・活動評価・情報提供を強化するため、職員の増員や大学等の火山専門家と連携した技能向上等の具体的取り組みを行った。また、大学は、社会科学の研究者と地元の火山研究者を中心に、地方自治体等と協力して避難計画や避難行動の調査や試行を行った。

#### IV. 重要な地震・火山現象と拠点間連携共同研究

##### 1. 近年発生した地震及び火山現象に関する重要な観測研究

###### (1) 主な地震

本節では、近年発生した地震のうち、平成24年度以降に地震発生過程の解明・予測で重要な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23年(2011年)東北地方太平洋沖地震と、それに関連する地殻活動

2011年3月11日に我が国の観測史上最大のマグニチュード(M)9.0の2011年東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震により、宮城県では最大震度7、福島県・栃木県・茨城県では最大震度6強の揺れに見舞われ、強震動は約3分間継続した。津波は場所によっては10mを超え、最大遡上高は約40mに達し、また海岸から内陸に最大約6kmまで浸水した。これらの強震動と大津波は広域に甚大な被害をもたらした。死者・行方不明者は12道都県で18,452人、全半壊家屋は400,381戸にも達し、また震災関連死も2016年3月末までに3,472人となった。さらに、この大きな地震動と津波により福島第一原子力発電所において事故が起こり、近隣住民10万人以上が避難した。このような未曾有の事態をうけて、政府は今回の震災を「東日本大震災」と呼称することを閣議決定した。この大震災により、一時は45万人以上の人々が避難し、地震発生から5年経過した2016年3月現在でも、避難者の数は約17万1千人となっている。

今回の大震災の主たる災害誘因は継続時間の長い強震動と巨大な津波である。GNSSや海底地殻変動、地震波、津波等の解析により、今回の地震では長さ約500km、幅約200kmの広大なプレート境界断層が動いたことが明らかになっており、強震動の継続時間が長かったのは、震源域がこのように巨大であったことが第一の原因である。また、この強震動は主として宮城県沖と福島・茨城県境沖の海岸に近いやや深部のプレート境界で生成され、この継続時間の長い大きな強震動が広域に建物に被害を与え、さらに液状化や地滑りといった地盤災害をもたらした。

この強震動被害に関わる周期0.1~10秒の地震波の生成域は、これまでに東北沖で繰り返し発生したM7~8クラスの地震のアスペリティと一致する可能性が示された。一方、長周期(周期10秒以上)の地震波形や津波波形データの解析から、宮城県沖の海溝付近のプレート境界浅部では滑り量が50m以上に達する広大な滑り域が推定されたが、この部分では強震動はほとんど生成され

ていない。この巨大な震源域により波長の長い津波が生成され、そのために平野部の内陸奥深くまで津波が侵入した。また、海溝付近の大きな滑りにより、パルス状の高い津波が生じ、これが三陸地域で防潮堤を越えて、大きな津波被害をもたらした。これらの結果から、強震動を作り出す周期10秒以下の波を放射する領域と、大きな津波を生成する大変位の領域が異なることが明らかになった。

強震計の波形とGNSSデータを用いて、2011年東北地方太平洋沖地震の30分後に茨城県沖において発生したM7.6の余震の滑り分布を調べたところ、大きな滑りの領域は沈み込むフィリピン海プレートの北東限と沈み込む海山に囲まれた場所に位置し、大地震の発生場所と震源域の広がりや海底地形やプレート構造などの地学的要因に規定される可能性があることがわかった。本震前後のプレート境界地震の発生レートから、本震時の滑り領域はプレート境界地震の減少域とよく一致し余震活動が低調であること、その周囲はプレート境界地震の増加域に当たりあたり余効滑りの到達域を示すことがわかった。このプレート境界地震増加域の北側は平成6年(1994年)三陸はるか沖地震の滑り域の中心に及んでいない。プレート境界地震発生レートの変化の分布は摩擦特性の違いによるものである可能性がある。

宮城県沖から福島県沖にかけての領域では、GNSSデータの解析により、観測が始まった1990年代半ばから固着の強い時期が続き、2000年代半ばから固着が緩んだように見えることが示されていた。本震の発生直前には、3月9日のM7.3を最大前震とする活動があったが、それに先立って本震の破壊開始点の北東側で2011年2月にMw7.0相当のゆっくり滑りが発生した。このゆっくり滑りに伴って、M5級の地震を含む群発活動が生じた。このゆっくり滑りはその西側に隣接する地域に応力を集中させ、そこで3月9日の前震(M7.3)が発生した。この前震の余効滑りが南側に伝播し、その南端に応力を集中させて、3月11日の本震をトリガーしたと見られる。このように、非地震性滑りと地震性滑りが交互に生じて最終的に本震発生に至ったと考えられるが、この2011年2月と同様のゆっくり滑りは2008年にも生じていたことが、2011年東北地方太平洋沖地震発生前から宮城県沖で行っていた自己浮上式海底圧力計による繰り返し観測から明らかになっている。どのような場合に、ゆっくり滑りの発生が大きな地震の発生に繋がるのか、その解明が重要となっている。

2011年東北地方太平洋沖地震後の余効変動についても観測とその解析が進められ、GPS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測では、日本海溝沿いの海底基準点で余効変動による西向きの変動を含む複雑な海底変動を捉えた。これまで地震直後の地殻変動観測データの解析では余効滑りが主たる要因であると考えられてきた。しかしこの地震では粘弾性変形が大きな要因になっていることが示され、粘弾性変形を考慮することの重要性が指摘された。

## 2) 2013年4月13日 淡路島付近の地震 (M6.3)

2013年4月13日 ~~05時33分~~に淡路島付近の深さ15kmでM6.3の地震が発生した。この地震は、1995年~~1月17日の「平成7年(1995年)兵庫県南部地震」(M7.3、最大震度7)~~の余震域の南西端に近接する領域の地殻内で発生した逆断層の地震であった。兵庫県淡路市で震度6弱、南あわじ市で震度5強の強い揺れを観測し、負傷者34人、住家被害8,414棟(全壊8棟、半壊101棟、一部破損8,305棟)、非住家被害34棟を生じた(2013年10月29日現在、総務省消防庁ホームページより)。

この地域で発生する地震の発震機構解析から、震源域周辺では広域の差応力は高くないが地震発生前に断層近傍で応力集中が起こっており、間隙水圧が静岩圧に近い状態であったと推定された。

## 3) 南米の海溝型巨大地震

海外で発生した海溝型巨大地震ではあるが、この南米沖地震では2011年東北地方太平洋沖地震などの海溝型巨大地震と共通した特徴がみられたことから、プレート境界巨大地震を考える上で海外の巨大地震との比較検討も重要であることからここで取り上げた。

2014年4月2日(日本時間)に、チリ北部沿岸の深さ25kmにおいてMw8.2のイキケ(Iquique)地震が発生した。この地震による津波は、北海道から九州にかけての太平洋沿岸、沖縄県、伊豆・小笠原諸島を含む太平洋の広い範囲で観測された。この地震は沈み込むナスカプレートと南米プレートとの境界で発生し、破壊は破壊開始点から南南東方向の深い側へ伝播し、本震の約2日後に南端延長部でMw7.7の最大余震が発生した。プレート境界面の固着率が高い地震空白域と考えられていた地域であるが、この地震により解放された滑り欠損は一部に過ぎず、依然巨大地震の発生が懸念されている。地震活動度を調べてみると、本震発生の約270日前から間欠的に増加し始め、その増加率も時間とともに大きくなり、約2週間前には本震時に大きく滑った領域の浅い側で顕著な

前震活動とそれに関連した地殻変動が観測された。また、震源移動現象の発生頻度も本震発生が近づくにつれて増加する傾向が見られた。地震性滑りに加えて非地震性滑りもプレート境界面上で進行し、本震破壊領域の端で固着が間欠的に緩み破壊域への応力集中が生じたことで本震の発生が促進されたと考えられる。

一方、2015年9月17日(日本時間)にチリ中部沿岸の深さ21kmで発生したイヤペル(Illapel)地震(Mw8.3)では、1997年に最大M6クラスの群発地震が発生したものの、本震発生直前に顕著な地震活動の増加は見られなかった。この地震による津波は、岩手県久慈港で78cmを観測するなど北海道から九州地方にかけての太平洋沿岸、沖縄県、伊豆・小笠原諸島で観測された。

#### 4) 2014年11月22日 長野県北部の地震(M6.7)

2014年11月22日、長野県北部の深さ5kmでM6.7(Mw6.2)の地震が発生し、長野県長野市、小谷村、小川村で震度6弱、長野県白馬村、信濃町で震度5強の強い揺れを観測した。この地震により、負傷者46人、住家全壊77棟、住家半壊136棟などの被害を生じた(2015年1月5日13時30分現在、総務省消防庁による)。この地震発生の4日前の11月18日18時頃から、白馬村ではM3程度を最大規模とする小さな群発地震活動があったため、東京大学地震研究所は11月20日から震源域の直上に観測点を設置していた。

この地震の発震機構は西北西-東南東方向に主圧力軸を持つ逆断層である。余震は小谷村から白馬村にかけての南北約20kmの領域で発生し、余震分布は概ね東下がりの傾斜となっている。強震動を生成したと考えられる領域では余震はほとんど発生していない。また、余震分布には鉛直や西傾斜の面状構造が見られ、複雑な断層群の存在を示唆している。この地震では、白馬村北城から白馬村神城まで既知の神代断層沿いの長さ約9kmに渡って地表地震断層が断続的に出現した。多くの地点で撓曲変形の様相を呈する東側隆起の上下変位が生じ、水平短縮も認められた。最大上下変位は白馬村塩島地点で約90cmであった。だいち2号のデータを用いたSAR干渉画像解析により、白馬村を中心とする東西約30km、南北約30kmの地域において、この地震に伴う地殻変動が検出された。GEONETによる地殻変動データも用いて震源断層モデルの構築を行ったところ、東に傾き下がる断層面上で、左横ずれを含む逆断層運動が推定された。本震破壊域は、水平方向に約20km、深さ方向に約10kmであった。

地震調査研究推進本部(以下、「地震本部」)・地震調査委員会が1996年9月に公表した糸魚川-静岡構造線活断層系の長期評価では、約1200年前に同断層系の白馬から小淵沢までの区間(約100km)が活動し、活動間隔は1000~2000年とされていた。このため将来の活動もM8程度と評価していたが、今回の地震では活動した区間が短く、規模も小さかった。トレンチ調査によれば、今回の地震に先行する活動は1714年正徳小谷地震で、その時の上下変位量は今回の地震と同等の0.5m程度、その前の活動は約2000年前以降に生じ、上下変位量は約2m以上であった可能性が高い。

#### 5) 2015年4月25日 ネパールの地震(Mw7.8)

2015年4月25日、ネパールのゴルカ地方においてMw7.8の地震が発生し、震源域に大きな被害をもたらした。特に震源域内に位置する首都カトマンズでは、歴史的な建造物が数多く倒壊するなど大きな被害が生じ、ネパール国内で7,675名の死者及び16,392名の負傷者を出した。また5月12日には、震源域の東端付近でMw7.3の最大余震が発生した。

震源断層は、インドプレートとユーラシアプレートの衝突境界に形成された3枚本の主要な断層の一つである主ヒマラヤ衝上断層と考えられている。

陸域観測技術衛星「だいち2号」のScanSARデータを用いたSAR干渉解析により、東西約160kmの範囲に及ぶ広域の地殻変動の全貌が短期間で捉えられた。SAR干渉解析の結果からは、地表に顕著な地表地震断層は現れていないことが示唆された。

震央は震源域の西端付近に位置し、遠地地震波形を用いた震源過程解析から、破壊は震源から東方に進展したと推定されている。また、地殻変動からは、カトマンズの北東20~30kmの領域の直下を中心とした最大6m超の大きな滑りが推定された。一方で断層の浅部では滑りがほとんど生じておらず、ひずみが蓄積されたままである可能性が指摘されている。

#### 6) 2015年5月30日 小笠原諸島西方沖の地震(M8.1)

2015年5月30日に小笠原諸島西方沖の深さ682kmでM8.1の深発地震が発生した。この地震により東京都小笠原村、神奈川県二宮町で震度5強、埼玉県鴻巣市、春日部市、宮代町で震度5弱など

気象庁の観測史上初めて47全都道府県で震度1以上を観測した。この地震による負傷者は東京都で8名、埼玉県で3名、神奈川県で2名であったほか、東京都で火災が1件発生するなど、深発地震にもかかわらず首都圏で被害が生じた地震である(総務省消防庁による)。この地震では関東地方を中心に約1万9000基のエレベーターが停止、うち14基で人の閉じ込めが発生した(国土交通省による)。

小笠原諸島周辺で発生する深発地震は、沈み込む太平洋プレートに沿って深さ500km付近までは急傾斜で分布し、それ以深では緩やかな傾斜で分布している。今回の地震は、沈み込むスラブが水平に折れ曲がる屈曲点付近で、横たわるスラブの下面付近の深さで発生したという点が特異である。また発震機構解もこれまでの深発地震のメカニズム(スラブの沈み込む向きに圧縮軸が向く)とは違い、鉛直方向に主圧力軸、東西方向に主張力軸を持つ。この地震の発生メカニズムの解明はプレート沈み込みのダイナミクスを理解するために重要であろう。

## 7) 平成28年(2016年)熊本地震

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、大分県中部等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16169人、負傷者21,69266人、住家全壊87,369900棟、住家半壊3223,478663棟、住家一部破損14617,382612棟、火災156件などの被害が生じた(2016年12月6日124日184時03分現在、総務省消防庁による)。4月15日(M6.4)と4月16日(M7.3)の地震では、気象庁による長周期地震動に関する観測情報の発表の試行開始後初めて階級4を観測した。4月14日のM6.5および4月16日のM7.3の地震で震度7を記録した益城観測点の記録を見ると、周期1秒程度の揺れが極めて強く、平成7年(1995年)兵庫県南部地震で甚大な被害を出したJR鷹取観測点の記録と同程度の激しい揺れであったことがわかった。また、この地震により土砂災害が190件発生し、10名(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、別府一万周年山断層帯が存在している。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、30年以内の地震発生確率はほぼ0%~0.9%(やや高い)、布田川断層帯を含む九州中部の区域におけるM6.8以上の地震の発生確率は18~27%と評価していた地域である。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、日奈久断層帯北部から破壊が始まり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。4月16日の地震(M7.3)の断層面は走向235°、傾斜60°であり、破壊開始点から北東方向の浅い方に約20秒かけて30kmほど滑りの大きな領域が拡大し、阿蘇山のカルデラ内にまで破壊が及んだことが示唆された。

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-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。

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。

今回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石英安山岩質溶岩が熱水変成を受け、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。

震度5強以上の揺れに見舞われた市町村は、4月14日の地震では熊本県14市町村、16日の地震

コメント【橋本1】:「変質」は高温高压下で起こる作用なので、「熱水変質」ではないのでしょうか

では熊本県 30 市町村、大分県では 6 市町、その他、福岡県、佐賀県、長崎県、宮崎県と広域にわたった。被害範囲については、政令指定都市（熊本市）、地方中心都市（例：宇城市、菊池市）、中山間地域（例：南阿蘇村）にわたり、地域特性に応じた対応が求められた。また、2 度の大きな揺れとその後の余震の発生が、避難行動や応急・復旧活動のあり方に影響を与えた。今後の防災対策には、地震発生後の空地（うち）避難の必要性の認識向上、余震の見通し情報の災害対応活動への活かし方等の検討、の必要性が想定される。避難生活も長期化しており、直後には 18 万人超（4 月 17 日 183,882 人）、1 か月後は 1 万人超（5 月 13 日 10,477 人）が避難しており、同時に車中泊や軒先避難が多数見られるなど避難生活の形態に影響を与えた。3 か月後の避難の主たる理由については、避難者が最も多い益城町総合体育館避難者のデータ分析から「居宅被害の甚大さ（46.9%）」「高齢者（60 歳台 46.4%）」であることが明らかとなっており、災害由来の避難行動から被災由来の避難生活への傾向変化が見られる。

コメント [橋本2]: もう少しコンパクトにできないか？

## (2) 主な火山噴火

本節では、平成 24 年度以降に火山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) 御嶽山

2014 年 9 月 27 日の御嶽山噴火は、噴火の規模は大きくなかったが、紅葉シーズンの好天候の休日昼時という火口周辺に多数の登山客のいる中で発生し、死者 58 名、行方不明者 5 名（2015 年 11 月 6 日時点）の戦後最悪の火山災害をもたらした。

コメント [橋本3]: 言葉遣いとしてやや違和感がありますが、適切な代替表現をすぐに思いつきません。規模の絶対的大きさではなく、ほぼ同じ噴出物量・様式でありながら人的被害のなかった 1979 年噴火と比較してはどうでしょうか。

火山性地震は、噴火発生の約 1 か月前（8 月末）から発生し、9 月中旬にやや活発化したものの、その活動は減少傾向にあった。また 9 月中旬以降、低周波地震も観測されたが、しかし、1991 年及び 2007 年の噴火前の活動と比較して地震活動は小規模であった。また、山体変形や噴気活動の変化も認められなかった。噴火直前の 11 時 41 分頃からは火山性微動が、11 時 45 分頃からは急激な山体膨張が発現した。気象庁では、その変化を捉えていたが、山体膨張から間もなく 11 時 52 分頃に噴火が始まった。

噴火発生の直後には、山麓での火山灰採取、航空機による地形変化の計測や映像観測等が行われた。加えて、火口付近で被災した登山客により記録された映像や証言も、噴火の初期過程を知る重要な情報となった。これらのデータの分析の結果、地獄谷の中央部に新たに形成された火口から噴火が始まったこと、最初の約 20 分で噴石を飛ばす爆発や火砕流が発生したこと、その後典型的な水蒸気噴火が起こり噴煙から火山灰混じりの雨が降る等の推移をたどったこと、が明らかになった。

噴火発生後には詳細なデータ解析が行われた。水準測量のデータ解析から、2006 年から 2013 年 8 月（噴火前の最後の測量）まで山頂方向が隆起する傾向にあったが、噴火により 2006 年からの隆起量と同程度の沈降が生じたことがわかった。また、複数の GNSS 観測のデータにノイズを低減する解析手法を適用し、山頂直下の浅部及び深部での微弱な膨張が噴火の 1 か月半前から始まっていたことを見出した。このような膨張は、火山性地震のメカニズム解から推定される局所的応力場の変化とも調和的であった。また、地震の自動検出アルゴリズムを利用した解析から、多数の火山性地震の震源が、地獄谷の火口列の分布とよく一致する北北西から南南東方向に伸びた鉛直面上に広がったこと、噴火直前の 10 分間には北北西方向と南南東方向、及び浅部に拡大したことがわかった。噴火開始 25 秒前に発生した超長周期地震は、火山性地震の震源域東端において、震源が分布する方向と走向が一致するクラックの開口によって起きたと推定された。

コメント [橋本4]: 主語がありません。複数の GNSS 基線によるスタッキング法のことを指しているのであれば気象庁ですが、前後の記法に合わせて受動態にしてはどうでしょうか

以上の 2014 年御嶽山噴火のデータ解析結果や、次節で述べる口永良部島噴火の事例は、噴火直前に山体変形が起こった捉えられることがあることを示している。高感度の地盤変動観測点を複数設置し、各種観測を充実して迅速なデータ解析技術を開発することにより、水蒸気噴火であっても、直前に噴火が発生する可能性についての高いという情報を発信し、火口周辺の登山者らに危険を伝える体制を構築できる可能性があることがわかった。

噴火の約 1 ヶ月前から発現した火山性地震の活動について、気象庁は、9 月 11 日に「火山の状況に関する解説情報」を発表して、火口内及びその近傍に影響する程度の火山灰等の噴出に対する注意を喚起するとともに、その後の活動経過を解説情報や週間火山概況により報告した。大学は、火山活動のさらなる活発化に備え、観測体制の点検、臨時地震観測点の設置、故障中の長野県の地震観測点の復旧に協力した。このような噴火前の情報発信や対策は行われていたものの、被害を起こす噴火が発生するとの判断に至らず、災害を軽減する有効な情報として役立てられなかった。また、

コメント [橋本5]: 「ことには役立たなかった」？

地域住民を対象としたアンケート調査では、噴火の未経験者や地方公共団体職員のリスク認識が低いことが明らかになった。現行計画から研究対象に加えられている、不確実性を含む情報の提供の在り方と住民への災害対策の普及方法について、有効な方策を研究する必要があることが改めて認識された。

## 2) 口永良部島

~~新岳火口やその東側の割れ目火口において~~1931年から1980年まで1～10年ほどの間隔で噴火を繰り返してきた口永良部島は、2014年8月3日に34年ぶりに噴火した。この噴火の約15年前の1999年7月に火山性地震活動が活発化し、以降、地震活動は新岳火口直下500m以浅に集中した。また、地震活動の活発期には、山頂直下浅部を膨張源とする地盤変動が進行した。2003年頃からは、**全磁力の変化として地熱異常が検出され、**地表面の温度変化や噴気の活発化も徐々に顕著となった。2008年10月以降は、火口からの噴気量が増大し、**二酸化硫黄放出量は300トン/日に達した。**2009年以降は、地震活動も比較的高く、火山活動の高まった状態が継続していた。噴火の顕著な先行現象は、約1時間前から始まり、20分前に急加速した山体膨張現象である。これは、2014年御嶽山噴火直前と類似している。しかしながら、地震活動の1ヶ月ほど前からの活発化など、中期的な先行現象は観測されなかった。

口永良部島は、本計画当初より重点的に研究すべき対象火山とされ、火口近傍に多数の観測点が設置されていたが、2014年噴火によってその多くが使用不能となった。そこで、噴火活動の推移を把握するため、大学は、**無人ヘリコプター無人機**を用いた観測点の設置や船舶を利用した火山ガスの観測を行った。その結果、2015年噴火は、2014年噴火よりも顕著な中期的な先行現象を伴ったことがわかった。二酸化硫黄放出量は、2014年8月の噴火以降やや多い状態が続き、2014年11月末には3000トン/日まで急増した。同時に島全体が膨張し、地震活動や地熱活動の活発化が段階的に進行した。2015年5月23日に有感地震が発生し、山頂域での地震活動が活発化したのち、2015年5月29日に再度噴火が発生した。この噴火では、火砕流が火口から2kmを超える**範囲とこ**ろまで到達した。気象庁は運用開始後初めて噴火警戒レベル5を発表し、全島民が島外へ避難した。

大学・気象庁等は、2015年5月の噴火後も、多項目の観測・調査を継続して実施し、火山性地震の活動低下、山体膨張の停止、火山ガス放出量の減少を捉えた。これらの結果は規制区域の縮小や警戒レベルの引き下げの判断に有効に利用された。

## 3) 箱根山

箱根山大涌谷では、2015年6月29日から7月1日にかけて、ごく小規模な水蒸気噴火が発生した。神奈川県温泉地学研究所、大学等の研究機関、気象庁等が協力して多項目の臨時観測を実施し、地震活動の活発化、山体膨張、蒸気井の暴噴、大涌谷内の地表面の膨張等、水蒸気噴火に至る過程を理解する上で有用な観測データを取得した。

2015年4月26日頃から、大涌谷付近から神山付近の浅い所を震源とする火山性地震の発生数が増加した。箱根町湯本では震度1を記録する有感地震が5月以降に多発し、火山性地震の活動は5月15日にピークを迎えた。その後、地震活動は減少傾向となったが、6月29日07時32分頃から1分以上の継続時間をもつ傾斜変動や火山性微動が発生し、12時45分頃には、**火山降下物が大涌谷の北から北東にかけて最大約1.2kmの範囲で確認された。**地震発生数は、7月には噴火前のレベルに戻り、2015年12月頃には今回の火山活動の活発化以前と同程度となった。

地震活動の活発化に先行する4月上旬頃から6月末の水蒸気噴火の発生まで、GNSSによる基線長変化の伸びが観測された。SAR干渉解析により検知された、5月7日から始まる大涌谷での局所的な隆起域は、今回の水蒸気噴火により形成された火口・噴気孔群の位置と一致した。これは水蒸気噴火の発生位置を予測できる可能性を示す結果である。

今回の水蒸気噴火は、2000年代に進展した地質調査の結果に基づいて作成された箱根町火山防災マップの想定範囲内で起こり、その降灰範囲も予想域内であった。また、噴火警戒レベルに伴う規制範囲についても大きな問題は生じなかった。その一方で、マスコミ報道や観光客激減対策に伴う地元からの情報発信に対する社会的反響を踏まえ、観測成果の適切な開示・説明の方法や、火山を抱えた自治体や観光地が異常時にどのような対処をすべきか考える上での課題が明らかになった。

## 4) 西之島

小笠原諸島の西之島は、2013年11月に噴火活動を開始した。本土から遠く離れた離島の噴火であ

コメント [橋本6]: 地磁気変化が表れ始めたのは2001年頃からです

コメント [橋本7]: 地下浅部の高温化が地磁気変化として

コメント [橋本8]: 降下火砕物? もしくは単に「噴出物」あるいは「火山灰」では? 要確認

っても、周辺を航行する船への影響や、海底斜面崩壊による津波の発生が懸念されるため、火山活動の把握や推移の予測が必要である。そこで、衛星画像解析、航空機観測、岩石採取、遠隔地における空振観測、海底地震観測、海水分析など可能な限りの手法を駆使して、火山活動を把握するための観測が行われた。

噴火は、2013年11月21日に、前回の噴火（1973年～1974年）で生じた西之島新島の海岸より南東に数百m離れた海底から始まった。その後、溶岩の流出によって面積を拡大し、1年後にはもとの西之島をほぼ覆い尽くすまでに成長した。衛星画像データと海底地形の比較により、2015年1月までの総噴出量は0.1km<sup>3</sup>、1日当たりの噴出量は平均20万m<sup>3</sup>と推定された。2014年4月より、西之島から東方に130km離れた父島において空振計のアレイ観測を行い、西之島の火山活動の把握を行った。2015年2月以降、大学、海洋研究開発機構、国土地理院、海上保安庁、気象庁が協力し、航空機や海洋調査船による西之島周辺の調査、海底地震計の設置・回収、岩石サンプルの採取、海底探査等を行った。海底地震計のデータ解析から、観測開始（2015年2月28日）から9ヶ月間で3万6千回以上の地震が発生していること、2015年7月中旬から地震活動が低下していることが明らかとなった。火山活動の低下は、航空機による定期観測、気象庁による二酸化硫黄の放出率観測、静止気象衛星による輝度温度観測からも確認された。

西之島での斜面崩壊を想定した津波シミュレーションも行われ、人の住む最も近い陸地である父島に20分弱で津波が到達すると推定された。しかしながら、この想定が発表された際、小笠原村役場では事態を把握できておらず、研究成果の伝達の仕方について課題が残された。

## 5) 阿蘇山

阿蘇山では、1989～1995年の活動以後約20年ぶりとなるマグマ噴火が、2014年11月25日から中岳第一火口で始まった。一連の噴火活動は、2016年3月まで消長を繰り返しながら継続した。2016年4月の平成28年（2016年）熊本地震（以下、「2016年熊本地震」）直後には火山活動の活発化は見られなかったが、2016年10月8日に爆発的噴火が発生した。

2014年のマグマ噴火に先行して、2014年1月から火口湖（湯だまり）がほぼ消失し、ごく小規模な水蒸気噴火（土砂噴出）が断続的に繰り返されていた中で、8月30日に噴火警戒レベルが1から2に引き上げられた。同年11月25日に小爆発を繰り返すマグマ噴火へ移行し、数ヶ月間継続した。2015年5月3日には火口底の一部が大規模に陥没し、火口内で水蒸気噴火を繰り返す様式へと推移した。火口はその後の数ヶ月間で徐々に閉塞気味になったが、同年9月14日に少量のマグマが関与する爆発的噴火が起こり、小規模な火砕流も発生した。気象庁は、この噴火直後に、初めての「噴火速報」を発表するとともに、噴火警戒レベルを2から3に引き上げた。爆発的噴火の活動は10月23日まで継続したが、11月24日に噴火警戒レベルは2に引き下げられた。その後、噴火活動はやや低下しつつも2016年3月まで断続的に小規模な水蒸気噴火を繰り返していたが、2016年10月8日に爆発的噴火が発生し、再び噴火警戒レベルは3に引き上げられた。2014年11月から2016年10月8日までの噴火活動による総噴出物量は数百万トンで、最近100年間の主要な噴火期と比較すると有意に少ない。今のところは大規模な噴火には至っておらず人的被害はないものの、農業や観光など社会活動への影響があった。

大学等の研究機関、及び気象庁等による常時観測や臨時調査により、2014年の一連の噴火に関連して以下の知見が得られた。2013年の9月から二酸化硫黄の放出率が増え始め、火山活動に変化の兆しが見られた。2014年11月のマグマ噴火活動に数年前から先行して検知されたGNSS基線長の伸び、数ヶ月前から観測された長周期微動の振幅の増大と発生回数の増加、1か月前より検知された火口地下浅部の熱消磁によると考えられる地磁気変化など、多くの先行現象が観測された。また、マグマ噴火の発生に先立ち、火口浅部の膨張によるひずみ・傾斜変動も捉えられたほか、活動の消長に伴う火口直下の見かけ抵抗変化も検出された。2014年11月25日の比較的規模の大きな噴火以後は、随時、現地調査が行われ、噴出物量が測定された。2014年11月及び2015年9月の水蒸気噴火からマグマ噴火への移行にやや先行して、火口近傍で断続的に発生する長周期微動の卓越周期の明瞭な変化が見られた。この卓越周期の変化は、推定されているマグマ溜まりを挟むGNSS基線長変化とも対応しており、マグマ溜まりの増圧が浅部火道への流体供給の量や組成に変化をもたらしていたことを示唆する。阿蘇山においては水蒸気噴火やマグマ水蒸気噴火を引き起こす浅部流体の状態監視に、地震学的手法と地盤変動観測が特に有効であることを示す特筆すべき観測結果である。

以上の一連の噴火活動は、次のようなマグマ活動によるものと推察された。2014年11月の本格的な活動に先行してマグマが地下浅部に上昇し、浅部熱水系との接触を経て、比較的安定した火道が

数ヶ月間確保され、マグマ噴火が繰り返し発生した。その後、火口へのマグマ供給の低下に伴い浅部熱水系が復活し、水蒸気噴火主体の活動形態に移行した。また、一連の噴火活動の様式変化と分岐現象の発現時期の予測は、地盤変動観測、地震活動の監視に加え、火山ガス・電磁気・放熱率・噴出物分析／組織解析等の情報も加えた総合的判断によってなされた。

## 6) 桜島

2006年6月に噴火活動が再開した鹿児島県桜島の昭和火口では、2009年9月以降、噴火活動が活発化し、年間1000回近くの頻度でブルカノ式噴火が発生している。ブルカノ式噴火が特に継続して頻発した時期は2009年12月～2010年4月、2011年12月～2012年4月、2015年2月～6月であり、噴火活動の活発化と同期して伸縮計の伸びや、傾斜計による火口方向の隆起が観測された。GNSSによっても桜島及び始良カルデラ周辺の地盤の隆起・膨張が観測された。3つの球状圧力源を仮定した解析から、活発な噴火活動を反映して南岳直下の1km以浅に減圧源が求められる一方、増圧源が始良カルデラ中央部の深さ10km付近と北岳直下の深さ3～4kmに推定された。火山体の膨張と噴火活動の活発化が同期して起こったことは、マグマの貫入と同時に火道最上部までマグマが移動・噴出したことを意味し、開口型火道系の特徴の一つと考えられる。また、2012年7月の南岳山頂爆発とその前後に発生した昭和火口爆発の噴出物の比較により、石基ガラス組成が火道内でのマグマ上昇速度の簡便な指標になり得ることが示された。

このようなマグマの貫入は、人工地震探査による地下構造の変化としても捉えられている。桜島では2008年以降、反射法探査を桜島の東部から北部にかけて1年おきに繰り返してきたが、2009年から2010年の観測の間で地震波の反射強度の変化が桜島北東部において検出され、深さ6km付近における発泡度の高いマグマがシル状に貫入したと解釈された。

2015年8月15日に発生した群発地震活動とそれに伴う地盤変動は、これまでと全く異なるマグマ貫入により発生した。火山性地震活動は15日の7時ごろから始まり、9時前に増加、10時半ごろにはさらに活発化した。15日の1日だけでも900回近い地震が発生し、マグニチュード2～3の有感地震も発生した。また、地震活動に同期して、傾斜及びひずみ量は8時50分及び10時28分に加速的に変動した。これらの地盤変動量は、通常のブルカノ式噴火前後に発現する変化量の100倍以上に達した。これらの変動は、GNSSや、干渉SAR干渉等の解析から、昭和火口下深さ1km程度に存在する北東-南西走向の割れ目の開口、つまり、ダイク状にマグマが貫入したものと推定された。これは、通常の供給系へのマグマ貫入に伴って観測される等方的な地盤変動とは明確に異なるものである。

2015年8月の活動の際には、気象庁は噴火警戒レベルを3から4（避難準備）へ引き上げ、鹿児島市からの避難勧告により77名が一時避難する事態となった。噴火には至らなかったが、水準測量によると、始良カルデラ下のマグマ溜まりは、桜島の北東方向にその膨張源の中心があり、1993年以降マグマの蓄積を再開し、1914年大正噴火直前の蓄積量に近づいている。2015年のダイク状マグマの貫入は、桜島が北西-南東方向に開口する場となっていることを示しており、多項目精密データの解析結果も合わせて総合的に考えると、北東部からマグマが貫入しやすい場になっていると推察された。

## 7) シナブン山

インドネシア国スマトラ島北部にあるシナブン山では、2010年8～9月に有史以来初めてとなる噴火（水蒸気噴火）が発生し、休止期を経て2013年9月に再び水蒸気噴火が発生した。同年12月初旬にかけて火山活動は活発化し、ブルカノ式噴火を繰り返すようになった。2013年12月末には山頂火口に安山岩の溶岩が出現した。溶岩は、崩落を繰り返しながらドーム状に大きく成長するとともに、溶岩流として南東斜面を水平距離約3km流下した。2015年秋からは小さなブルカノ式噴火を連日繰り返し、これらの噴火によって発生した火砕流は南斜面から東斜面にかけて広く流下し、最大で火口から約5kmまで到達した。このような活動は2016年に入っても継続している。

今回の溶岩ドームを形成する噴火活動に対して、噴火前から地震観測やGNSS観測が行われた。その結果、雲仙普賢岳などの過去の溶岩ドーム噴火と火砕流の発生機構などで多くの類似点が認められた。一方、溶岩供給率の低下後にブルカノ式噴火が頻発するなどの相違点があることもわかった。この結果は、国内に多くある溶岩ドーム噴火を繰り返す火山（九重山、焼岳、アトサヌプリなど）の活動を検討する上で、貴重な噴火事例となると考えられる。また、この火山では有史の噴火記録がないため、噴火前に地質調査を実施し、噴火履歴を検討した。その結果と、類似の溶岩ドーム噴

コメント【橋本9】:「ダイク状に貫入したマグマ」または、「ダイク状にマグマが貫入したこと」

コメント【橋本10】:「従来知られていた」?

火を行った普賢岳などの噴火推移を参考にして、噴火事象系統樹が作成された。これは観測や防災対応の指針として評価された。

## 2. 優先度の高い地震・火山噴火に対する総合的な取組

### 1) 東北地方太平洋沖地震

2011年東北地方太平洋沖地震は日本の観測史上最大の地震であり、この地震に関する知見は、将来の災害軽減において極めて重要な意味を持つため、前計画に引き続き、本計画においても様々な研究が行われている。

まず、この地震においては、地震の規模や津波の高さを地震発生直後には過小評価してしまったことの反省から、地震発生直後に地震の規模をより正確に推定し、津波の予測を高度化する手法の開発が進められた。地震の規模については、GNSSデータの即時処理により規模を推定する等の手法の開発が進められている。津波予測については、海底津波計データの即時処理により、津波の波動場そのものをモデル化して予測する手法の開発が進んだ。北海道から東北、関東の東方沖でオンラインの日本海溝海底地震津波観測網(S-net)が整備されたことにより、今後、上記の津波の即時予測のみならず、緊急地震速報もこれまでより早く、またより信頼度が高くなると期待される。

2011年東北地方太平洋沖地震で滑りが大きかった領域のプレート境界直上では地震波速度が速いことが明らかになっており、今後S-netにより高精度の震源分布と詳細な地震波速度構造が得られれば、将来の大地震の震源域の推定もできるようになる可能性がある。

2011年東北地方太平洋沖地震の発生によって東北地方の太平洋沿岸は最大約5m東に動き、また約1m沈降した。東北地方太平洋沿岸は少なくとも過去約100年にわたって長期的に沈降を続けていたので、今回のような巨大な地震が起こった後、その余効変動による隆起でこれらの長期的な沈降も地震時の沈降も解消されるのではないかと考えられていた。しかしながら本震のあとの余効変動で実際に海岸は隆起したものの、最も地震時の沈降の大きかった牡鹿半島では、地震時の1.2mの沈降に対して、本震の5年後でも0.4mしか回復していない。余効変動は本震発生直後が一番大きいことと、牡鹿半島から三陸海岸南部にかけての地域の本震前の平均的な沈降速度が5~10mm/年程度であったことを考えると、今から数十年後に地震直前の状況にまでは回復しても100年前の状況までに回復しそうなものに見える。このような長期の変動について正しいモデル化ができなければ、それはそのまま地震発生サイクルのモデル化の不確定性に直結するため、この問題の解決は極めて重要である。

長期の地殻変動をモデル化する上で、海域の地殻変動観測は極めて重要な情報をもたらしてくれる。本震発生直後は余効変動の大部分は余効滑りで説明できると考えられていたが、宮城県沖の海底の観測点の大部分が西に動いていることが判明し、余効滑りだけでなく粘弾性変形の影響が無視できないことがわかった。このような余効変動と長期の地殻変動を正しくモデル化できなければ、次の巨大地震の予測は極めて難しくなるため、粘弾性変形と余効滑りのモデル化を行い、また長期広域の海水面上昇の影響も考慮しながら、今後慎重に検討を行う必要がある。

2011年東北地方太平洋沖地震では1978年宮城県沖地震(M7.4)の震源域も大きな滑りを生じたため、一見次の「宮城県沖地震」は遠のいたかのように見えたが、その後、その周囲で余効滑りが活発に生じていることが判明したため、この「宮城県沖地震」の震源域ではひずみエネルギーが急速に増加している可能性がある。前述のような巨大地震のサイクルだけでなく、このようなM7級の被害地震の予測のためにも、粘弾性変形と余効滑りを正しく評価することが重要となっている。また、これまでの最大余震の規模はM7.6であるが、M9.0の地震の余震としてはM8.0程度の地震が起こってもおかしくない。津波堆積物の調査から、北海道の沖合でも、約500年に一度程度、巨大地震が発生していたことが明らかになっており、もし今回の震源域の北側でM8級の最大余震が生じた場合、そのまま北海道の巨大地震と連動する危険性もある。また、三陸沖では1896年の津波地震(M8.2~8.5)のあと1933年にM8.1の地震が海溝外側で発生したことを考えると、アウターライズ地震でM8級の余震が起こる可能性も否定できない。さらに、震源域の南側でも1677年延宝地震(M8.0)が再来する可能性があり、これらの予測のためにも広域の余効変動を正しく把握することが重要となっている。

今回の地震により、日本列島は大きく揺れ、また東西に伸長した。これによる地震活動の変化や地殻変動を調べることで、内陸地震発生域の強度や地殻流体が地震発生に及ぼす影響<sup>※</sup>、ひずみ集中帯の生成原因<sup>等</sup>の解明が進んでいる。今後これらをさらに進展させることにより、プレート境界のみならず、内陸の地震による災害軽減にも重要な知見が得られるものと期待される。

今回の地震では、津波の被害と地盤災害が大きくクローズアップされ、その背景として土地利用の変化が指摘されている。今後、災害誘因を正しく把握し、大きな災害誘因が予想されている場所での、脆弱性や曝露性についても考慮しながら、災害軽減のための研究を進める必要がある。

## 2) 南海トラフ地震

南海トラフ巨大地震の発生予測に関しては、想定される地震像（規模・震源域）を絞り込むため、震源断層であるプレート境界面の固着状態を推定する研究がなされている。近年開発された GPS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測により、南海トラフ巨大地震の震源域に展開されている 15 点の海底局における地殻変動データが得られた。これと陸域の地殻変動データを合わせて解析することにより、震源域におけるプレート境界面の固着状態の分布が推定された。また、海域における反射法データと深海掘削データの統合解析から沈み込みに伴う堆積層間隙率の空間変化を推定する新手法も開発された。この結果に基づき、**デコルマの反射極性**から震源域におけるプレート境界面の固着度の空間変化が推定された。史料・考古データの調査により、過去の南海トラフ巨大地震の地震像の多様性を解明する研究も進められている。地震発生サイクルシミュレーションでは、このような**南海トラフ巨大地震**の多様性を再現できるモデルが研究されている。また、ゆっくり滑りと巨大地震の相互作用の重要性も示唆された。

強震動予測の研究では、広帯域震源モデルの改良が行われた。また、南海トラフ巨大地震から射出される強い地震波が、大阪や京都といった大都市圏に向けて伝播する際の経路に当たる紀伊半島や四国などの地震波速度構造の研究も進められている。紀伊半島では延べ 100 点以上の観測点による臨時観測が行われ、陸域モホ面や海洋モホ面などの地震波速度不連続面の 3 次元分布や詳細な地震波速度不均質構造が推定された。波動伝播に関しては、1707 年宝永地震の震源モデルを用いた長周期地震波に対する破壊伝播の効果の検証が行われ、破壊進行方向での増幅率は、均質媒質モデルでは 10 倍以上になるのに対し、不均質媒質モデルでは 2 倍程度に抑えられることが示された。大阪堆積盆地モデルの検証も行われ、この地下構造モデルが 2Hz 程度の地震波まで適用可能であることが示された。また、2011 年東北地方太平洋沖地震との比較により南海トラフ沿いの地震で生じる得る長周期地震動の特性を明らかにするため、2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデルを南海トラフ沿いに置いて長周期地震動評価を行った結果、震源距離がほぼ等しい都心**周辺地点**で、地震波伝播経路の構造の違いのために長周期地震動が 2 倍程度になることがわかった。津波予測の研究では、DONET 水圧計データを用いた津波増幅率による津波即時解析システムが開発され、和歌山県では即時津波予測の運用段階にある。

コメント [三浦11]: 一般にはわかりにくいのでは? 「デコルマからの反射波の極性」

## 3) 首都直下地震

首都直下地震はその地震像が統一されていないが、プレート境界部分で発生する地震に関しては、地震活動や地殻変動を詳細に観測することによって、プレート間の固着状態をモニターしようとする試みがなされてきた。例えば、2014 年 1 月に発生した房総半島沖ゆっくり滑りでは、これまで**の**発生間隔は**が**約 6 年であったが、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生以降、その間隔に乱れが生じ、今後の地震発生サイクルを考える上で重要な問題が指摘された。ただ、首都直下地震として想定される震源域は、房総半島沖だけではない。首都圏の他の地域で発生する地震に関しても研究を進め、地震像を明確にする必要がある。

首都圏**が位置するを擁する**関東平野の堆積層構造やその地震動応答についての研究は、数値シミュレーション及び地震波干渉法による、地震動特性の定量化や既往地下構造モデルの検証など、着実に積み上げられている。また、首都圏の丘陵地帯の造成地にある谷埋め盛土では、地震観測により特定の周波数帯における上下動の顕著な増幅が明らかになった。これは、盛土内の地下水面や旧河川の沖積層底部といった不連続面における変換波が原因として考えられている。ただ、首都圏は丘陵地帯だけでなく、河川沿いの低地や海岸近傍の埋め立て地など、堆積層が厚い地域が広がっていて、強固な地盤はほとんど存在しない。様々な地盤構造をもつ関東平野において、地震動がどのような挙動を示し、地表の被害にどの程度の影響を与えるのか、さらに研究を進める必要がある。また、具体的な首都直下地震の震源を想定した地震動評価の研究は行われておらず、今後の課題である。

一方、首都圏は江戸時代から 400 年以上政治の中心地としての歴史があるため、歴史時代に発生した地震災害に関する史料が数多く残されている。それらを検討し、現代とは異なる社会状況の下で発生した災害の対応から、今後の防災・減災施策や復興計画などの検討に資する材料を提示する

ことができる。例えば、元禄関東地震(1703年)の時に日光東照宮では被害が軽微であったことや、1855年安政江戸地震の時には発生の約1週間前から地震活動が活発であったことなどが、当時の史料からわかってきた。このような史料に基づく地震災害の研究からは、地震計による地震観測が始まる以前の地震活動を知ることができ、地震規模や地震発生サイクルを考える際の重要な情報になりうる。

#### 4) 桜島火山

桜島火山におけるマグマ活動発展過程の研究を中核として、ミュオンなどの新手法を適用しつつ火山現象を解明し、低頻度大規模現象の再考も含めた事象分岐論理の構築と火山灰拡散予測研究を行うことにより、最終的に火山災害軽減研究を推進した。

火山灰拡散予測のため、GNSS信号やレーザー・ライダー等複数の電磁波帯域を用いて火山灰を検知するリモートセンシング技術を開発した。2012年7月24日に南岳山頂火口において発生したブルカノ式噴火では、噴煙高度が8000mに達したが、この時GNSS観測において、特異な信号が検出され、南岳上空の高度約4000mにおいて噴煙中を伝播してきたものであることがわかった。このことを利用し、また、解析手法を高度化することにより、噴煙の有無だけでなく状態の違いを検知できる可能性が示された。降雨観測に用いられるXバンドMPレーダー(波長3cm)やライダー(波長532nm)の観測においては、偏光特性を利用して火山灰と雨滴を識別する方法や、レーダーの反射強度から地上降灰量を即時予測する経験式の開発などが確実に進みつつある。

岩石学的研究からは、上述の2012年7月の南岳山頂噴火とその前後に発生した昭和火口噴火の爆発噴出物の比較により、石基ガラス組成が火道内でのマグマ上昇速度の簡便な指標になり得ることが示された。

桜島の噴火の規模と様式に関する桜島火山の事象系統樹を作成し、1日当たりのマグマ貫入量と地震活動に注目して想定される避難行動を整理した。最近数十年の噴火については、地盤変動観測データの統計的解析からマグマ貫入量の代表的な値を評価した。これと大正噴火時では、井戸水の変化等の目撃記録とを最近の観測結果を照らし合わせることでマグマ貫入量を推定した。

事象分岐判断の提示や火山灰量の即時的な評価は、避難や復旧計画に徐々に考慮されつつある。降灰量と道路の通行規制の有無の関係は機能的フラジリティ曲線で近似され、降灰量に対する通行規制の確率分布で表される。この手法は噴火発生前のハザード評価にも活用できる。これまでの本研究計画の成果を活用し、大正噴火に至る前駆過程を考察した結果、それに基づいたシナリオに沿って鹿児島県、鹿児島市など自治体の机上防災訓練が行われた。また、大規模噴火が発生しうる状況での避難の意向調査を鹿児島市街地において実施し、避難行動を分析した。分析結果は鹿児島市など自治体の避難計画に活用できる。

#### 3. 拠点間連携共同研究

地震学と火山学を中核とし、防災学に関連する工学や人文・社会科学の研究者が参加する総合的な学際研究をとして推進するため、「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の2つの拠点が連携して共同研究を進めている。それぞれの研究者が中核となり、現行計画に沿ったテーマを決めて具体的な研究計画を立て、全国の研究者の参加を募集して全国規模の共同研究を進める「参加者募集型共同研究」と、両拠点がそれぞれに関連が深い、地震火山研究コミュニティと自然災害研究コミュニティに呼びかけ、現行計画の主旨を踏まえたボトムアップ研究を公募する「課題募集型共同研究」を設定し、平成26年度にから開始した。

##### (参加者募集型共同研究)

参加者募集型共同研究については、南海トラフで発生が懸念される巨大地震のリスク評価の精度向上を目指した多様な分野の研究を推し進めた。全体の研究を、(1)南海トラフ地震の想定される震源過程、(2)地殻構造とそれが波動伝播に及ぼす影響、(3)強震動予測の問題点、(4)地下浅部の地盤構造と地震動の関係、(5)津波予測と津波被害、(6)建造物の被害予測モデル、(7)災害のリスク評価と意思決定、(8)災害情報の外部発信、(9)コンピューターシミュレーションを用いた新たな地震リスク評価手法の開発の9分野に分け、それぞれの分野で研究を深化させるとともに、シンポジウムや研究会を実施するなどして各分野の相互連携を図った。なお、(7)及び(9)に関連する研究をそれぞれ特定分科研究として掘り下げ型の研究を行う一方で、全項目をまとめて

コメント【橋本12】:「現象の再考」が何を意図しているのかわかりません。大正噴火の規模や地震活動等を再検討したということでしょうか。  
「1914年噴火級の低頻度大規模現象も含めた」では不都合でしょうか

コメント【橋本13】:「分岐論理」という言葉は適切でないと思います。  
「事象分岐の判断指標」?

コメント【橋本14】:「最終目標である」?

コメント【橋本15】:「事象分岐の判断根拠となる観測量」?

1つの分野横断型の統括研究として実施された。「災害リスク評価と意思決定」に関連する特定分科研究では、災害の大きさに影響を与える、対象地域の人口、社会構造、産業構造、建築基準法の改定、建築工法などの時代による変化を考慮し、それらが巨大地震の発生時点でどのように寄与するかを検討した。「コンピューターシミュレーションを用いた新たな地震リスク評価手法の開発」に関連する特定分科研究では、人口、建築物、交通、ライフラインが集中し、複雑な構造を持つ都市部における地震災害予測を、高分解能コンピューターシミュレーションにより試行する研究を、全国の大学の研究者と協力し、複数の都市について実施した。また、シミュレーションに必要な都市モデルを、複数のデータを統合して自動構築する手法を開発し、新潟市と甲府市の都市モデルを作成した。これらを用いて、地震動による建築物の応答や地下埋設物に大きな影響を与えるひずみの計算が可能となり、例えば、信濃川の河口の軟弱な地盤の上に広がる新潟市では、地盤増幅効果を考慮しない場合と考慮した場合で、建物応答に大きな差が出ることが示された。

統括研究では、(1)震源過程、(2)伝播・深部地盤構造、(3)強震動予測、(4)浅部地盤構造、(5)構造物被害予測、(6)リスク評価の研究グループに分かれ、それぞれの項目で南海トラフ巨大地震を想定した予測モデルの構築・選択と、それらのモデルを用いることによるリスク評価の不確かさに関する検討を実施し、リスクプラットフォーム構築グループがこれらの知見を統合してリスク評価の不確かさの定量的評価方法を提示した。

#### (課題募集型共同研究)

課題募集型共同研究では、災害を引き起こす地震や火山噴火の発生から災害の発生や推移を総合的に理解しそれを防災・減災に生かすための研究を広い視野から募集することとし、以下の分類で研究課題を公募した。(1)地震・火山噴火災害事例の研究、(2)地震・火山噴火災害発生機構の解明、(3)地震・火山噴火災害誘因の事前評価手法の高度化、(4)地震・火山噴火災害誘因の即時予測手法の高度化、(5)地震・火山噴火災害軽減のための情報の高度化、(6)地震・火山噴火災害時の災害対応の効率化、(7)実践的人材育成の仕組みに関する研究の7項目で研究課題を公募した。

「地震・火山噴火災害の事例の研究」については、地質記録に基づく古津波履歴復元の高度化に向けて地中レーダーによる探査を導入した。北海道十勝郡浦幌町の津波堆積物の調査では、津波による砂層の分布や層厚変化が明瞭に追跡され、地中レーダーが津波堆積物の面的調査の効率化に役立つことが示された。また、1847年善光寺地震について、既往の震源モデルや断層の地表トレースの情報に加え、微動観測により推定された表層地盤を考慮した地盤モデルを用いて震度分布の推定を行ったところ、山側及び盆地西端に集中した実際の被害分布と整合することが示された。さらに、1611年慶長奥州地震津波の実像に迫るため、大正時代の地形図を使って人工改変前の地形を復元し、明治時代の絵図史料を用いて寺院や街路と人工改変前の地形の位置合わせを行うことにより、この津波に関する地域の伝承が津波の河川遡上で説明が可能なことが明らかになった。

「地震・火山噴火災害発生機構の解明」研究については、地震時地滑り発生過程に関する研究が進められた。既往の地震時地滑りの変位量推定式を室内実験結果に基づいて過剰間隙水圧状態に拡張し、2011年東北地方太平洋沖地震の時の塩釜の地震記録に適用したところ、斜面傾斜14度以上で地滑りが発生すると推定され、実際に斜面傾斜10～20度でも多くの谷埋め盛土の崩壊が見られたことと整合的な結果となった。また、地震及び津波による建物崩壊に伴い人間が被災するプロセスを詳細に追跡するため、人的被害の評価方法について新たな基準を提案し、これを用いて南海トラフ巨大地震を想定した高知県南国市の人的被害の発生確率を算出した。加えて、大きな地震により損傷を受けた建物が、余震により倒壊する可能性を評価し、継続使用の判定を支援する手法を開発した。2016年熊本地震のように余震が多い場合もあり、本震で損傷を受けた家屋を継続使用できるかどうかの判定が科学的に実施できれば、その利用価値は大きい。

「地震・火山噴火災害誘因の事前評価手法の高度化」研究においては、立川断層を横切る測線の浅部地盤構造を微動と表面波探査から推定し、断層を境に東西で速度構造が大きく変わり、この構造により断層近傍で地震波の増幅が起こることを観測データで明瞭に示した。また、古い土木建造物である「ため池」の地震の際の安全性を確認するため、物理探査による地盤構造の可視化、地温測定による流動地下水の動態把握を行い、これらの結果を用いて数値解析により地震時の堤体安定性を評価する方法を提案した。

「地震・火山噴火災害軽減のための情報の高度化」については、企業の災害予測情報の活用実態と減災対策を明らかにするためのアンケート調査が行われ、企業はBCP(事業継続計画)を作成する

際に、政府や防災機関の発表する被害想定を必ずしも厳密に捉えてはいないが、少なからず参考していること、全般的な被害想定よりも、事業に直接関わる交通、電力、通信、水道、ガスなどのインフラの被害や、サプライチェーンや取引先のリスク要因の想定に苦慮していることがわかった。施策として実施する地震調査研究のニーズとして、被害想定をより具体的なインフラに与える影響評価にも広げる必要性を示している。

「地震・火山噴火災害時の対応効率化」について研究では、地震により被災した建造物の残存性能の定量化、巨大地震後の短期的な余震ハザード評価、建物健全性時間変動予測と意思決定について研究を進めた。

## V. 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画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整理

##### あ. 目的

地震学、火山学、歴史学、考古学、地質学の研究機関が連携して、近代的な観測データが存在する以前の地震・火山現象に関する情報を把握する。地震や火山噴火について記した文献史料、考古遺跡の発掘調査資料、津波堆積物や火山噴出物などの地質調査データなどから、近代以前にさかのぼる地震・火山現象に関する情報を収集して、解説・分析する。そして、これまでそれぞれの分野において独立に研究されてきた史料・考古・地質データを整理し、相互に参照できる仕組みとともに、近代的な観測データと統合しやすいデータベースを構築する。

##### い. 実施状況

###### ア. 史料の収集とデータベース化

大学では『増訂大日本地震史料』『新収日本地震史料』『日本の歴史地震史料拾遺』など、既刊の地震史料集 35 冊に収録された史料の検索、検証の利便性を向上させるために、史料本文の電子情報化を進めた。この取り組みでは、本文中の地名に緯度・経度による位置情報を付与することによって検索結果を地図上に表示させるとともに、考古データとの統合検索を可能とするさせる仕組みをつくることを目指している。

現存する近世史料の膨大さを考えると、既刊の地震史料に収録されていない地震史料は相当に存在することが予想されるため、それらの情報収集と分析に努めた。特に日本海側では、19 世紀前半に連続して大規模な地震が発生しているため、これらに関する史料を調査し、地震の被害像を明らかにした。

南海トラフ地震に関しては、明治 12 年内務省通達により作成された高知県、和歌山県の寺院明細帳、神社明細帳に基づいて、宝永と安政の南海トラフ地震の被害状況をデータベース化し、広範囲にわたる被害の全体像を分析した。

地震研究において史料を活用する場合の質を向上させるために、史料の記述から地震被害の規模を判定するための方法を再検討した。

火山活動については、大学は、1741 年の噴火と 1792 年の山体崩壊を起こした渡島大島火山の活動に関する史料を収集した。気象庁は、地震観測、GNSS 繰り返し観測などの観測で得られた記録をデータベース化し、『活火山総覧』の改訂に活用できるようにした。

2016 年熊本地震で被災した史料の救出や緊急調査も実施した。

###### イ. 考古データの収集・整理・集成とデータベース化

奈良文化財研究所（以下、「奈文研」）では、全国の考古学的歴史災害痕跡について、奈文研が所蔵する 52,600 冊以上の遺跡発掘調査報告書、ならびに現在、奈文研や各地の地方公共団体等が実施している発掘調査現場から情報を収集・整理し、データベース化を進めた。

発掘調査報告書からの情報収集では、都道府県ごとに悉皆的に報告書を検索して災害痕跡に関する記録を抽出し、遺跡情報・災害情報・表層地質情報を整理・集成した。

これらの情報を地理情報システム（GIS）に搭載して、災害の痕跡種類・発生年代などが発掘調査地点の緯度・経度に基づく位置情報とともに地図上に表示される仕組みを構想した。さらに、年代や位置情報の相互参照等によって、史料データベースとの連動を可能にするシステム構築を目指している。

大学は、1751 年高田地震をはじめ、たびたび地震に見舞われている新潟県上越市の高田平野において、地質調査の分析を行った。

## ウ. 地質データ等の収集と整理

大学は、主に北海道沿岸の地質調査で確認された津波堆積物などの試料を収集・分析し、データベース化に向けた整理を行うとともに、ロシアでの文献資料収集や地質調査などを行った。

産業技術総合研究所は、地形・地質調査などによって得られた活断層や津波堆積物、火山に関する基礎データなどの情報について収集と整理を行い、データベース化及びその更新・維持を行うとともに、活動的火山の地質図整備を進めた。

大学は、マグマ噴火が想定される火山について、主に始良カルデラ噴火や富士山を対象に火山ガスの成分量に関する分析を進め、データの蓄積を行った。

## う. 成果

### ア. 史料の収集とデータベース化

既刊地震史料集の本文データの構造を検討し、「日本歴史地震関連史料データベース」を設計した。これは史料集本文データを任意の語句で検索できるデータベースである。また既刊地震史料集の本文データの電子化に取り組み、XML テキストの作成と位置情報を付与すべき地名の抽出を行った。また、既刊地震史料集から、地震の発生した年月日、典拠史料名を抽出したデータベースを構築し、資料を検索できる WEB サイトを公開した。

宇津徳治が作成した「世界の被害地震の表」より中国宋代までのデータを抽出し、「中国地震史料データベース」を作成した。その過程で「表」に記載されていない地震史料が多く存在することが判明し、適宜データベースに入れ込んだ。

既刊の地震史料集に収録されていない新たな歴史地震・火山活動史料の収集のため、各地の史料所蔵機関で調査を行った。愛知県田原市立博物館では安政東海地震に関する史料、新潟県長岡市立中央図書館、秋田県公文書館ほかでは三条地震、飛越地震など 19 世紀に日本海側で発生した地震に関する史料、京都大学文学部では 1847 年の善光寺地震、天明浅間山噴火に関する史料を調査し、それぞれの史料本文や図の翻刻、公開を行った。愛媛県愛南町では安政南海地震に関する史料を調査し、既刊史料集収載の翻刻の誤りを正し、当該地域における津波被害の状況を訂正した。岡山市立中央図書館、福山市立博物館では安政江戸地震に関する史料を調査し、安政江戸地震による揺れの西限とされていた史料の誤読を明らかにした。2011 年東北地方太平洋沖地震の津波被災地域である岩手県海岸部で史料調査を行い、1856 年の八戸沖地震に関する新たな史料を見つけた。

高知県、和歌山県の寺院明細帳、神社明細帳を調査し、宝永と安政の南海トラフ地震の被害状況をデータベース化した。その結果、高知県内では宝永地震による土砂崩れや津波による被害が大きいのにに対し、安政南海地震ではほとんど被災の記述がないことを明らかにした。また、名古屋大学、徳川林政史研究所、佐賀県立図書館、唐津図書館などの所蔵する史料を調査して、従来知られていなかった安政東海地震に関する史料を発見し、名古屋地域での被害状況の詳細を明らかにした。さらに、名古屋大学図書館春季特別展「古文書にみる地震災害」を開催して、研究成果を一般に公開した。

被害規模の判定方法については、1828 年越後三条地震を例に、家屋倒壊率を算定する従来の方法の妥当性を検討し、被害状況の全体的規模を捉える上でより適切な方法を提案した。火山活動に関しては、北海道立図書館、国立国会図書館、国立公文書館などで渡島大島火山の活動に関する史料を収集し、1741 年以後 1790 年に至るまでの期間、北海道本島や青森県地域で降灰や**焦気**などの現象が断続的に発生していたことを明らかにした。

### イ. 考古データの収集・整理・集成とデータベース化

北海道と沖縄県を除く全国 45 都府県について、発掘調査報告書を中心として情報の収集・整理・集成を実施し、新潟県で約 11,700 件、熊本・大分・福岡県で約 220 件、その他 41 都府県で約 1,100 件の災害痕跡考古データを収集した。また、現在発掘調査中の奈良県の平城京跡・都塚古墳、鳥取県の青谷上寺地遺跡・青谷横木遺跡、山口県の竹久川下流条里遺跡などで、これまで認識されていなかった複数時期の大地震によると見られる噴砂痕跡を確認した。

「歴史災害痕跡 GIS データベースシステム」を設計し、公開に向けたパイロット版データベースシステムの運用テストを実施した。また、東京大学史料編纂所（以下、「史料編纂所」）の構築した「日本歴史地震関連史料データベース」との連動や、国土地理院ならびに産業技術総合研究所から公開されている日本地図のデータ利用、地質情報システムとの連携を視野に入れた開発について具体的に検討した。

コメント [m16]: 広辞苑にない語

新潟県上越市の高田平野はたびたび地震に見舞われている地域でありながら考古的な液状化痕跡が乏しいことに注目して地質調査データを分析し、この地域は段丘化による地下水位の低下と厚い粘土層の存在によって噴砂の起きにくい地層であることを明らかにした。

#### ウ. 地質データ等の収集と整理

主に北海道の津波堆積物に関して、既存資料のデータベース化を進めるとともに、論文等で記載されている津波堆積物の信頼性について、堆積構造や微化石、地球化学的性質など、津波由来である可能性を示す上での認定項目を設け、評価を行った。

公開中の活断層データベースについて、最新の研究成果に基づき、活動セグメントや調査地点データ、文献の追加及び活動セグメントの形状やパラメータの見直しを行った。また津波堆積物に関する調査地点の情報を整理し、web上で閲覧できる津波堆積物データベースを公開した。特に青森県、宮城県、福島県と茨城県の一部地域に関しては、地質柱状図の情報と869年貞観地震の津波浸水シミュレーション結果を表示できるように整備した。火山に関しては、蔵王山、九重山、富士山の火山地質図を作成し、刊行した。また、公開中の火山データベースについて、鳥海山、蔵王山、沼沢、新島、神津島、九重山、池田・山川、開聞岳の活火山に関する詳細データを追加した。

始良カルデラ噴火の噴出物の分析を行い、噴火前のマグマ溜りの上部は100MPa程度の圧力下(深さ4-5kmに相当)に置かれており、従来の推定よりも浅いことを明らかにした。

富士山については1707年宝永噴火など最近の噴出物を分析し、その噴火プロセスを明らかにするとともに、マグマ溜まりの構造についても推定した。

#### エ. 今後の展望

近代的観測データが存在しない時代の地震・火山活動を把握するためには、地震学、火山学、歴史学、考古学、地質学が連携して、史料、考古、地質データによって必要な情報を収集することが欠かせない。それぞれの分野において、この3年間に継続してきたデータの基礎的蓄積と電子情報化を進めていくが、既刊の地震史料集や発掘調査報告書、地質調査データだけでも膨大な量にのぼる。さらに新たな地震関連史料の発見、新たな遺跡発掘や地質調査も続いている。史料と考古データを統合検索する仕組みは現行計画の中に構築するが、十分な情報を蓄積していくためには今後も継続的な取り組みが必要である。

津波堆積物データベースについては、現在は複数の機関で作業が進められていることから、相互で情報共有を行うとともに、将来的な統合も視野に体制を整えていくことが望ましい。さらには、史料・考古データと地質調査データとを統合的に把握できる仕組みを考えていくことも必要である。

### (2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

#### あ. 目的

過去の低頻度・大規模な地震・火山現象について、観測データのある近代以降の現象の発生機構などを参考に、史料、考古学的な発掘痕跡調査、地形・地質調査などのデータを収集、解析を行うことで、具体像を明らかにする。特にプレート境界における低頻度大規模地震については、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域や日本海溝及び南海トラフ域において海底での地震・地殻変動観測、地下構造・地形調査などを行い、発生様式及び発生場を理解する。またプレート境界での掘削試料を用いて摩擦実験などを行い、プレート境界巨大地震の多様な滑り現象を明らかにする。

#### い. 実施状況

##### ア. 史料、考古データ、地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

大学は、千島-日本海溝沿いで過去に発生したプレート境界型巨大地震の震源過程を解明するため、北海道太平洋沿岸の津波堆積物の面的分布を得るための現地調査を実施した。また1611年慶長三陸地震に関する津波の数値モデリングを行った。プレート境界型巨大地震の発生が懸念される南海トラフ沿いの東海・南海地域や首都直下地震の発生が懸念される関東地方などを対象地域として、史料、考古データ、地形・地質データなどの収集を行い、データベース化や地図上での表示を行った。

産業技術総合研究所は、糸魚川―静岡構造線活断層系などにおいて、断層セグメントの運動履歴を解明するため、同断層系北部及び中部においてトレンチ調査を実施した。また同断層系北部で発生した2014年長野県北部の地震に関する地表地震断層調査及びトレンチ調査を行った。海溝型地震については、過去約3000年間の巨大地震・巨大津波の履歴と規模を解明するため、千島海溝から日本海溝、相模トラフ・南海トラフ沿いで、津波堆積物調査や過去の地殻変動の調査を実施し、これら地震の断層モデル構築のため、津波シミュレーションを実施した。

大学は、形成年代が新しく、VEIが6以上の規模の噴火を起こした北海道の支笏及び屈斜路・摩周火山、九州の始良及び鬼界カルデラについて、地表踏査を行い、先行噴火の有無とその様式・規模の検討、カルデラ噴火の噴火様式と規模の推移を検討した。同時に高密度に試料採取を行い、噴火推移に伴うマグマ特性の変化を調べた。鬼界カルデラについてはカルデラ噴火の先行活動とされる、長浜溶岩を流出した活動の全体像を明らかにするために、掘削深度140mのボーリングを実施した。

大学は、磐梯山1888年噴火に伴う~~その~~山体崩壊について、崩壊直後の調査研究論文、福島県庁文書、そしてそれらを総括した論文、解説書等の文書記録の収集を行った。また、現地調査により、岩屑なだれの堆積物の岩石学的記載を行い、岩屑なだれ岩塊の崩壊前の山体への復元を試みた。また、上記噴火について既存の研究や記録を再検討し、最初の噴火発生位置や噴火プロセスを検証した。噴火以外の要因で生じたと考えられる火山体の崩壊の事例として、南西北海道奥尻島の神威山の山体崩壊について、その発生時期を明らかにする目的で現地調査と放射性炭素年代測定を行った。

大学は、気象庁と共同して桜島大正噴火時の鹿児島測候所の地震記録紙を調査した。

#### イ. プレート境界巨大地震

大学及び気象庁は、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域や日本海溝域において、臨時海底地震観測を継続して実施することにより、長期にわたる地震活動の推移を調べた。大学及び海上保安庁は、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域や日本海溝及び南海トラフ域において、繰り返し海底地殻変動観測を実施した。海洋研究開発機構は、高分解能地下構造調査により、日本海溝の海溝軸付近及び南海トラフ前縁断層周辺の変形構造を調べた。大学は、深海掘削で得られた日本海溝に沈み込む太平洋プレートの試料等を用いて、プレート境界の状態を再現した摩擦実験を行った。さらに、これらの実験により得られた摩擦構成則に基づき数値モデリングを行い、プレート境界で起こる滑り現象の多様性を説明できるモデルの構築を試みた。

大学は、南海トラフの熊野灘において詳細な海底地形調査を実施し、海底活断層の分布等に関する検討を行った。

### ウ. 成果

#### ア. 史料、考古データ、地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

北海道太平洋沿岸の面的津波堆積物分布を得るための現地調査から、標津町で白頭山火山灰(10世紀)の直下に砂層を確認した。また、北方四島の国後島において火山灰層や広域に分布する薄い砂層を確認し、千島海溝沿いの津波履歴と規模の解明に資するデータを得た。これまでの津波堆積物調査から17世紀に北海道太平洋沖で巨大地震が発生したことが明らかになっており、十勝沖と根室沖の連動型のプレート境界~~型~~地震(M8.5)と推定され~~ていた~~。最新の津波堆積物調査結果を含む北海道太平洋沿岸の11地域での津波到達範囲・地点をデータとし、それらを全て説明できる断層モデルを推定した結果、従来の断層モデルで推定された滑りに加えて、海溝軸近傍のプレート境界浅部の幅30kmの断層で、25mにも及ぶ滑りが生じていたとすればデータを説明できることが分かった。この巨大地震の規模はM8.8と推定され、2011年東北地方太平洋沖地震と同様に、17世紀の北海道太平洋沖の巨大地震により、海溝近傍浅部のプレート境界が非常に大きく滑った可能性を示す結果である。このほか1611年慶長三陸津波地震について、1896年明治三陸地震の断層モデルを参考に歴史記録を説明しうる断層モデルを推定した結果、明治三陸地震断層より南側のプレート境界も破壊している可能性が高いことがわかった。

関東地方で江戸時代に発生した1855年安政江戸地震について、『安政見聞誌』(全3巻)などを用いて被害発生場所を特定し、地震発生~~の~~12年前の天保十四年(1843)に作成された「江戸大絵図」を用いて地図上に図示した。また遠地での信憑性の高い日記史料に基づいた有感記録について、位置情報(緯度経度)を導き出し、地理情報システムの試作版を作成した。

糸魚川-静岡構造線活断層系沿いの古地震調査から、同断層系中部の諏訪湖周辺のセグメント境界の運動性について検討した結果、約 3000 年前の活動では運動して活動したが、約 1200 年前の活動では運動せず活動時期が異なっていたことを解明した。また同断層系北部の神城断層と松本盆地東縁断層北部のセグメント境界付近は、最新の活動で約 2m の変位を生じたことを明らかにした。

三陸海岸広田湾海域で高解像度の音波探査記録を参考に海底掘削を行った結果、2011 年の津波痕跡及びそれより前の津波の可能性を示す痕跡を検出することに成功した。仙台平野で検出した津波堆積物に基づいて、1454 年享徳地震津波の断層モデルを構築し、869 年貞観地震と同等の規模であった可能性を示した。房総半島九十九里浜において、1677 年延宝房総沖地震と 1703 年元禄関東地震以外に、歴史上知られていない津波が過去約 1500 年間で少なくとも 2 回あったことを明らかにした。静岡県沿岸及び高知県沿岸では、それぞれ過去の津波と思われる複数枚の砂層を検出し、各地での南海トラフ沿い大地震による津波履歴を明らかにした。

大学は、大規模噴火について以下の成果をあげた。まず支笏火山の 4 万年前のカルデラ形成噴火には前駆的な噴火活動がなかったことが明らかになった。一方で、屈斜路火山では最大のカルデラ噴火である 12 万年前の KpIV 噴火に先立つ爆発的噴火を新たに見出した。さらに KpIV 噴火の詳細な推移を明らかにして、噴火初期に複数火道が形成されたことがわかった。これらカルデラ形成噴火である KpIV と鬼界アカホヤのマグマと、これらに先行した噴火によるマグマをそれぞれの火山と比較したところ、両者は区別できることがわかった。そのことから少なくともマグマ溜りとしては、両者は分離して独立に存在していたと考えられる。さらに支笏、KpIV 及び鬼界アカホヤのカルデラ形成噴火のマグマシステムについて検討した結果、これらのカルデラ噴火では、これまで大規模・均質な珪長質マグマが主体であると考えられていたが、実際には珪長質マグマは均質ではなく、複数マグマの混合により形成されていること、その混合珪長質マグマに苦鉄質マグマが貫入してカルデラ噴火が発生したことがわかった。

火山体崩壊現象については以下の進展があった。磐梯山 1888 年噴火の山体崩壊は、爆発開始前の異常現象は 1 週間前以降の鳴動・地震程度であったこと、山体崩壊は爆発開始の約 1 時間半後に発生した可能性があることが明らかになった。さらに、この噴火の最初の噴火位置は小磐梯山ではなく、沼ノ平であったことを明らかにした。また、小磐梯山の山体崩壊とそれに伴う岩屑なだれは、沼ノ平の最初の噴火の後に起こったことが明らかとなった。奥尻島神威山の崩壊物である岩屑なだれ堆積物中から、新たに 10 世紀の年代を示す白頭山テフラ (B-Tm) を含む未固結堆積岩と多数の生木を含む土石流ブロックを見出した。テフラと生木の年代から山体崩壊が 13~14 世紀に発生したと推定された。

大学は、桜島で 2015 年 8 月に発生した群発地震のエネルギーは、大正噴火時に前駆した地震のエネルギーに比べ 5 桁小さいことを明らかにした。また、1914 年桜島地震 (M7.1) については、その初動の粒子軌跡方向及び S-P 時刻の残差分布から震源位置を再評価した。

#### イ. プレート境界巨大地震

2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域において、自己浮上式の海底地震計や海底圧力計の設置・回収を繰り返し行うことにより、広域の余震活動の時空間変化を捉えた。それによると、余震数は時間とともに減少していたが、陸側プレート内での余震活動は引き続き活発であること、本震の前には北部震源域下のマントル内で地震活動が確認されていたが、本震後はほとんど地震が発生していないことなどがわかった。一方、2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域最浅部と昭和三陸地震震源域における高分解能地下構造調査からは、太平洋プレートの沈み込みに伴うアウターライズ上の折れ曲がり断層の分布・比高などが海溝軸付近の断層の変形構造の発達に関連していることがわかった。

日本海溝に沈み込む太平洋プレート表層部の岩石試料等を用いてプレート境界での状態を模した環境下で摩擦実験を行い、摩擦強度と断層運動の特性について調べた。海域観測データと物理モデルを用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震の前震とその後の、前震余効滑り、本震初期破壊過程など一連の破壊過程を再現するモデルを作成し、余効滑り域に動的破壊が進展する様子を定性的に再現することができた。

南海トラフ沿いの海底地殻変動観測の結果、震源域におけるプレート境界の滑り欠損分布の地域性を推定することができ、滑り欠損速度の小さい領域は超低周波地震発生や海山の沈み込みに関連していることを示した。

コメント [三浦17]: 海底圧力計による成果の記述がない

## え. 今後の展望

低頻度大規模地震・火山現象について解明を進めるためには、実際に過去に発生した生じた現象を精査し、できるだけ過去に遡って復元していくことが重要である。したがってそのためには、史料・考古遺跡や地形・地質に残された記録を調査し、解読していくことが最も有効な手法である。

プレート境界で発生する巨大地震・津波に関しては、津波浸水シミュレーションなどの手法も合わせて、過去に発生した大規模地震・津波の実態を分析し、断層モデルを構築することで強震動・津波の発生予測などの検討に資することが望まれる。千島-日本海溝沿いの17世紀巨大地震や、相模トラフ、南海トラフ沿いにおける過去の地震の規模と多様性などの解明のため、引き続き歴史地震に関わる各種資料の収集、解析とともに、地形・地質の痕跡に関する検出精度、識別技術の向上も今後は重要になってくる。このほか変動地形学的観点から、詳細な海底地形データを利用し、地震学・測地学的視点とは異なる観点から視点で巨大地震断層モデルを検討することもまた重要である。

プレート境界巨大地震の発生機構解明のための各種海底観測については、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域で現在も進行中の諸現象の観測を継続することにより、これまでに観測されたことのない巨大地震後のプレート間滑りの多様性や時空間変化が捉えられ、粘弾性変形を考慮した余効変動の解明に大きく貢献できると期待される。また、日本海溝及び南海トラフ域の海底地殻変動観測においては、プレート間固着状態の空間分布の不均質性を捉えることが可能となっており、今後は観測の空白域である地震時に大きく滑った海溝軸付近や沈み込む直前のプレート上での観測が必要である。また、測定値の精度を上げるとともに、既設のケーブル式海底観測網への接続などを検討し、連続データを取得可能な観測手法も加えることで、時間変化を検出することが重要である。さらにこれらの海底観測や深海掘削で得られた結果を制約条件として、摩擦実験や数値シミュレーションを継続して進めることにより、プレート境界での多様な滑り現象が起る条件・要因を明らかにし、より現実的なプレート境界巨大地震モデルの推定が可能となる。

糸川-静岡構造線活断層系に代表される長大な活断層の運動性については、内陸活断層帯において、過去の地震に伴う複数セグメントの連動履歴を地質学的・古地震学的な調査から解明していく必要がある。そこから、最近数回の地震サイクルにおける古地震シナリオを構築することで、地震規模予測及び長期予測の高度化につながっていくものと期待される。

低頻度大規模噴火としてはカルデラ噴火と山体崩壊現象を対象とする。まずカルデラ噴火については噴火推移の詳細と先行噴火を解明するため、摩周火山と鬼界アカホヤ噴火についてボーリング掘削を含め調査を行う予定である。さらにカルデラ噴火とその先行噴火について物質科学的解析を加える。その際には、それぞれのカルデラ噴火でマグマ供給系の基本的な構造は明らかになっているので、複数存在するマグマシステムにおいてそれぞれの構造、温度、圧力などの情報と内部プロセスについて明らかにし、異なるマグマシステムの相互作用を明らかにする。その際には、鉱物内の元素移動の検討などの手法により、時間軸を考慮することに留意する。これらの情報からは、カルデラ火山におけるマグマ溜りの深度や、そこでのマグマ滞留時間などが明らかになり、カルデラ火山の深部構造の解明やその観測について重要な指針を与えることが期待できる。

山体崩壊現象については、噴火に関連した事例や地震に関連した事例のそれぞれについて古文書や地質調査によって現象の復元を行うことで、崩壊現象のメカニズムの共通点と相違点を示すことが重要である。そしてこれらの結果をもとに、マグマ及び熱水系がどのように火山体を変質させるのか、またその過程をどのように観測で検知するかを検討する必要がある。

### (3) 地震・火山噴火の発生場の解明

#### あ. 目的

地震や火山噴火が発生する場の構造や応力・ひずみの時空間変動などを把握し、プレート境界、海洋プレート内部、内陸の地質的性質の異なるそれぞれの場の特徴を明らかにするため、地震・地殻変動観測や電磁気探査などの観測研究を実施する。室内実験や数値シミュレーションから得られる情報を組み込み、プレート境界での地震性滑りや非地震性滑りが発生する場の摩擦特性や、アウターライズ地震やスラブ内地震が発生する海洋プレート内部の物理特性を調べる。内陸地震発生モデル化を目指し、内陸地殻の非弾性変形や応力場と構造や地殻流体の関係から応力集中

機構について調べる。火山噴火発生場の構造や応力・ひずみの時空間変化を調べるとともに、2011年東北地方太平洋沖地震及びその余効変動による応力場の擾乱などを明らかにし、地震活動や火山活動への影響や、それらの相互作用について調べる。

## い. 実施状況

### ア. プレート境界地震

大学、気象庁、防災科学技術研究所、海洋研究開発機構は、海域の構造探査や海陸の地震観測点で得られた自然地震の波形及び走時データを用いた解析を行い、日本海溝や南海トラフ沿い及びニュージーランドなどの沈み込み帯におけるプレート境界断層近傍の地震波速度及び地震波減衰率の空間変化を推定するとともに、陸域の地震・地殻変動観測点で取得されたデータとの総合的な解析からプレート境界断層に沿った地震性・非地震性滑りの分布を明らかにした。得られた地下構造モデルと滑り分布の対応関係を明らかにすることで、プレート境界における滑り特性を規定する環境要因に関する検討を進めた。これと並行して、海底下科学掘削により得られた地震発生帯の構成物質の分析及び試料を用いた室内実験から、プレート境界断層上での摩擦特性を推定した。

海上保安庁は、和歌山県下里水路観測所において人工衛星レーザー測距(SLR)観測を1982年より継続して実施し、日本周辺のプレート相対運動決定の高精度化に貢献している。

防災科学技術研究所は、プレート境界型地震の震源モデルの精度向上のため、海洋音響波・地震波・津波の連成シミュレーション手法及び断層破壊と地震動・津波の連成シミュレーション手法を開発した。

### イ. 海洋プレート内部の地震

大学及び海洋研究開発機構は、日本海溝の海側斜面における地震・地殻変動観測と構造探査により、2011年東北地方太平洋沖地震の影響により進行している太平洋プレート内の変形とそれに伴う応力変化を明らかにした。また、プレート内地震の震源分布と発生領域の地下構造の空間分解能向上を図った。さらに、沈み込み帯下の3次元的な温度構造モデルを構築した。

大学は、南関東(首都圏)に展開された高密度な地震観測網のデータを解析し、その下に沈み込んでいるフィリピン海プレートの詳細な地震波速度・減衰構造の推定を行うことにより、プレート内地震の発生域に対応する地下構造について検討を行った。

### ウ. 内陸地震と火山噴火(火山・地震火山相互作用)

大学は、2011年東北地方太平洋沖地震後のひずみ速度場の変動を観測・解析し、これをシミュレーションにより再現することで、東北日本弧の粘弾性構造の推定を行った。また、誘発地震域で見られる地震活動の移動現象と地殻流体との関係を明らかにした。

大学は、高密度な地震や地殻変動観測、比抵抗構造探査を九州や西日本、中部日本で実施し、応力やひずみ場の推定やレシーバー関数解析、S波反射強度マッピングを行ったほか、応力集中機構解明のための数値シミュレーションや地震発生ポテンシャル評価手法の開発を行った。

大学は、列島規模及び特定地域の地震波速度構造解析や比抵抗構造探査を実施した。また、地下水に溶け込んだガスの成分比等を準連続的に観測する装置を開発し、地殻活動に関連する変動の検出を目指して試験運用を開始した。さらに、火山噴火発生場における地震学的構造、比抵抗構造、変形場、応力場、温度構造を推定するために九州、本州、北海道域の活動的火山において高密度な地震、地殻変動、電磁気、重力などの観測を実施して応力やひずみの時空間変化を検出したほか、地下構造の推定やマグマ供給系に関する研究を行った。

国土地理院は、GEONETやSARにより、日本列島全域の地殻変動モニタリングを着実にを行うとともに、ひずみ集中帯などにおいて、GNSS繰り返し観測やSAR干渉解析等による高密度な地殻変動観測を実施した。

## う. 成果

### ア. プレート境界地震

2011年東北地方太平洋沖地震のプレート境界断層近傍において、地震波速度が平均より高速である領域で地震時滑り量が大きい傾向があることが明らかとなった。ただし、日本海溝軸近傍の領域に関しては、プレート境界上盤の地震波速度が極めて低速である範囲で50mを越えるような巨大な地震時滑りが発生している。この地震の震源域北部においては、構造探査で検知されるプレート境界断層からの反射波の強度が、この地震の発生前後で変化したことが示され、大規模な地震時滑りによる断層の状態変化が捉えられた。

フィリピン海プレートが沈み込む南海トラフ・南西諸島（琉球）海溝沈み込み帯においても、プレート境界での滑り特性に対比可能な地下構造の変化が明らかになってきた。四国地域の長期的ゆっくり滑り発生域では、プレート境界上盤側の地殻内でのP波減衰率の空間変化と深部低周波微動活動のセグメント構造との間に対応関係があることが判明した。紀伊半島の深部低周波微動発生域で認められた地震波低速度異常と高  $V_p/V_s$  異常は、巨大地震発生領域よりもさらに深い位置において、沈み込む海洋性<sup>性</sup>地殻から脱水が起こっていることを示唆する。南九州のウエッジマンタルの最前縁部には、沈み込む海洋性<sup>性</sup>地殻との相互作用による含水化を示すと考えられる地震波低速度異常があり、その直下のプレート境界は蛇紋岩化により安定滑り特性をもつ可能性がある。

日本海溝に比較的近いプレート境界浅部において超低周波地震の活動があったことが示された。さらに、日本海溝沿いのプレート境界では、プレート間固着の強さに数年程度の周期の変動があることが見出され、固着が弱くなった時期にプレート境界型<sup>型</sup>地震の活動が活発化する傾向が示された。

#### イ. 海洋プレート内部の地震

2011年東北地方太平洋沖地震の発生後に活発化している太平洋プレート内の地震の発震機構の解析から、巨大地震後の応力場の推定が行われた。2011年東北地方太平洋沖地震は太平洋プレート内の応力場と地震活動に影響を及ぼしたが、その様相は地域によって異なる。海溝海側では地震前に比べてより深部にまで正断層型地震が発生していることから、引張応力の高まりが指摘された。一方で、2011年7月10日に2011年東北地方太平洋沖地震の震源近くで発生した横ずれ型地震（M7.3）に関する解析から、この領域での太平洋プレート内の引張応力の高まりは海溝海側ほど大きくなかったことが示唆された。また、2011年4月7日に宮城県沖の太平洋プレート内で発生した逆断層型の地震（M7.2）は、地震波低速度異常域を震源として発生した。震源域の低速度異常は、アウターライズで形成された正断層が含水化された状態にあるためと解釈され、周囲より摩擦強度が低いところに2011年東北地方太平洋沖地震による応力擾乱が加わったため、その断層が再活動したものと解釈される。

北海道東部下に沈み込む海洋性地殻の地震波速度構造を推定したところ、含水中央海嶺玄武岩から期待されるP波速度よりも低い値を示す領域が見出されたが、ここでは含水鉱物と水が共存し、その水がスラブ内の地震発生に寄与していることが示唆される。沈み込む海洋性地殻の脱水により伴うと考えられる地震波速度が周囲より大きくなっていると考えられる領域の上昇は、紀伊半島下や南九州下でも認められ、脱水により放出された水はその直上のプレート境界断層の摩擦特性にも影響を及ぼしている可能性がある。

また、東北・北海道と関東におけるスラブ形状を取り入れた3次元シミュレーションにより、千島・日本海溝下の上盤プレート内でのマンタル対流パターンと温度構造とスラブ上盤におけるマンタル対流パターンを推定した。得られた対流パターンは火山配列やS波異方性パターンと整合する。北海道下での太平洋プレート内の地震波速度構造や地震活動は、東北地方下とは異なる特徴を示すことが知られていたが、北海道下の温度構造が太平洋プレートの斜め沈み込みの影響により、2次元モデルでほぼ説明可能な東北地方下と異なっていることがその原因であることが示唆された。

南関東（首都圏）下のフィリピン海プレートについては、マンタル東端部に地震波高減衰域が見出され、その西縁で1921年と1987年に発生した2つのスラブ内地震（それぞれ、M7.1とM6.7）が発生していることから、スラブ内地震の発生には構造の不均質が密接に関係していることが示唆された。

#### ウ. 内陸地震と火山噴火

内陸地震発生のモデル化へ向けて地殻深部から上部マンタルに至る広域の地震波速度や比抵抗の構造が推定された。特に、濃尾平野断層周辺での集中観測により推定された地震波速度構造から、断層直下の下部地殻に地震波低速度異常や不連続構造の存在が認められた。さらに、電磁探査的観測により、濃尾地震断層に沿った三次元比抵抗構造が求められ、上記の下部地殻低速度異常に対応する低比抵抗域や、太平洋スラブ起源の流体と考えられる低比抵抗域が上部マンタルに存在することが明らかになった。その他の地域についても、流体分布や温度構造、震源モデルとの比較から、多くの場合、規模の大きな内陸地震発生域の直下には低速度域や低比抵抗域が存在し、大滑り域は対照的に高速度、高比抵抗であることがわかった。また、近年発生した内陸地震震源域での高密度な地震観測データから、応力の主軸方向は大きくばらつき絶対応力値は必ず

コメント [三浦18]: 地震本部では「濃尾断層帯」

コメント [三浦19]:

しも大きくないことが示唆された。さらに、微小地震の発震機構解から列島規模の応力場が推定され、多くの活断層が現在の応力場に対して滑り易い方向に形成されていることがわかった。

横ずれ断層への応力集中機構のモデル化に向けた取り組みの中では、高密度な地震観測が西南日本地域で実施され、大量の波形データから、詳細な地震波速度構造や応力場が明らかになった。地殻変動データに基づく西南日本地域のブロック断層モデルからは、明瞭な活断層が見られない山陰地方と南九州にひずみ集中帯が存在することが明らかになった。地震活動データに基づく九州地方における非弾性変形の見積もりからは、別府や熊本で大きなひずみ速度が推定された。発震機構解を用いた地震発生ポテンシャル評価手法を開発し、福岡県・警固断層で試行した結果からは断層近傍での応力集中は見られなかった。近畿地方での詳細なモホ面深度分布の推定からは、内陸の活断層周辺はモホ面が変形しきせていないことが明らかになった。地殻流体に関する理解の進展としては、地震波反射面の分布からマントル起源の流体が活断層の深部へ到達していることを示唆するイメージが得られた。化学分析により、から兵庫県・有馬温泉の深部由来流体はフィリピン海プレート起源で有馬高槻構造線沿いに上昇している可能性が示された。

伊豆大島では、火山性地震の地震活動度と深部からのマグマ供給に伴う山体変形の関係を、揮発性成分増加による断層面の流体圧の増減の効果と岩石の摩擦構成則を組み合わせることでモデル化することができた。富士山では、その山麓部で発生した2011年静岡県東部地震(M6.4)の震源域に流体の通路を示唆する低比抵抗域が見出された。また、岩石空隙中の気体が2011年東北地方太平洋沖地震による震動で離脱上昇した結果、間隙水圧を高め地震を誘発したとするモデルが提案された。御嶽山では、2014年の噴火の2週間前から、山頂直下の応力場が変化していたことが多数の地震の発震機構解の解析から明らかにされた。噴火前に火山ガスや熱水が上昇して間隙圧が増大し、地下浅部で開口割れ目が形成された可能性がある。

阿蘇山では、山体下の中中部～下部地殻に、マグマの存在を示唆する地震波低速度域が検出された。九重山では、電磁比抵抗構造探査から高比抵抗域が検出され、過去の貫入マグマもしくは高温ガス通路である可能性が示された。2016年熊本地震の震源域を含む九州中部の地殻構造や応力場が詳しく調査され、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。

2011年東北地方太平洋沖地震後に行われたGNSS繰り返し観測から、余効変動により広域的には伸長ひずみが卓越する東北日本の中で、越後平野のひずみ集中帯では短縮変形が進んでいることが明らかになり、遠方からの外力に影響されることなくひずみ集中が進行していることが明らかにされた。また、2011年東北地方太平洋沖地震による列島規模での余効変動の時空間特性が明らかにされた。東北地方の火山フロントでは、2011年東北地方太平洋沖地震後の余効変動として短縮ひずみが観測され、数値シミュレーションから地殻深部の粘性構造が影響を与えていることが示唆された。2011年東北地方太平洋沖地震後によって大きな応力変化を受けた東北地方各地で発生した誘発地震は、地震波速度構造および比抵抗構造の特徴から、大きな応力変化を受けたために地殻深部流体が上部地殻への流入したために誘発されたことが示唆された。

## え. 今後の展望

2011年東北地方太平洋沖地震の震源域でみられた地震時滑り量と地震波速度の空間的な相関は、構造不均質が断層面上での滑り特性を規定する要因となっていることを示唆する。また、プレート境界断層で発生する多様な滑り現象の間には相互作用があることから、高頻度のゆっくり滑りの活動特性をもとに、将来の巨大地震の破壊域を予測できる可能性がある。滑り現象の多様性とそれらの相互作用といった断層滑りの特性を規定する要因を特定するために、構造モデルの空間分解能のさらなる向上が必要である。さらに、海洋プレート内地震の震源近傍には、プレート変成過程の一部である含水・脱水に伴う構造不均質が存在し、地震発生に関与する可能性があると考えている。このような構造不均質から海洋プレート内での含水と脱水状況を推定することを通して、海洋プレート内大地震の発生ポテンシャルの評価の実現が近づくものと期待される。内陸大地震の震源域においても、地殻流体の分布などを反映した構造不均質と大滑り域の範囲や震源近傍の応力場との相関に関する検討が進みつつある。内陸地震断層で検出されている断層スケールの不均一応力場や地殻非弾性変形は、断層の応力載荷を規定し、構造を通して断層への応力集中により地震発生に至る過程を支配する要因である。そのため、精度の高い観測によって地下構造や応力情報のさらなる蓄積を図り、シミュレーション等を用いた応力集中機構に関する物理モデルの構築につなげることが望まれる。火山周辺では、阿蘇山で得られた中部～下部地殻の構造

不均質とマグマ溜まりの関係を示すような観測事例を増やすなどによって、詳細な地下構造をもとに深部から浅部に至るマグマ供給系の実態の解明とモデル化を進めることが必要である。

構造不均質と断層挙動の関係を理解するには、断層構成物質の物性の違いが摩擦特性に及ぼす影響を調べる必要がある。断層から採取された岩石試料を用いた室内実験の成果が期待される。封圧が高い地下深部で発生する海洋プレート内地震の発生機構の理解には、地震発生域の温度・圧力条件下における海洋プレート構成物質の脱水反応やそれに伴う変形特性に関する基礎的な研究が重要である。また、海洋プレート内地震の発生場を理解するため、スラブ及びウエッジマントルにおける温度分布と水の移動過程のモデルを、室内実験や数値シミュレーションを通して高度化することも海洋プレート内地震の発生場を理解する上で推進すべきである。

火山近傍での高密度地震観測は、噴火前後の応力場の時間変化の検出を可能とするもので、火山活動の活発化に伴う場の変化を定量的にモデル化する上で有効である。こうした観測の成果を活用して、火山活動の活発化や噴火に伴う応力場の変化の再配置が地震活動に与える影響を継続して検討するべきである。さらに、火山近傍での高密度観測の成果に加えて、地震活動や地殻変動データからマグマ内の揮発性物質の挙動を推定するモデルの構築のような、観測で得られる力学データから噴火様式を規定するパラメータを抽出する手法の開発を様々な火山についても継続することが重要である。これにより、火山噴火事象分岐系統樹の構築に対して重要なデータの提供が可能となるとともに、噴火災害誘因予測の高度化も期待される。

長期広域的な変動場にある日本列島では、海溝型地震や内陸地震、火山噴火などの過渡的な現象が時空間的に重畳し、相互に作用して地殻活動が起きている。2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動は現在も継続中であり、今我々は、巨大地震による内陸地震や火山噴火の誘発の有無や、その機構を解明する上で極めて重要な時期を迎えている。2011年東北地方太平洋沖地震後の地震活動と地殻変動の精力的な観測研究から、地震活動への流体の関与や日本列島の詳細な粘弾性構造などが解明されつつある。いずれも、地震発生域への応力集中機構の理解に不可欠なものであり、継続した観測をもとにプレート境界巨大地震に対する長期的な応答を定量的に把握するとともに、こうした知見を活用して地震発生ポテンシャル評価手法の開発と試行も引き続き行うことが必要である。地震と火山噴火の相互作用については、短期的な因果関係のみという概念にとらわれず、数十年スケールの影響も視野に入れた仮説の提案やその検証に向けた観測が、地震火山相互作用のさらなる理解に新たな道を開く可能性がある。また、火山の存在による地殻構造の不均質が、周辺の地震活動をどのように規定するのかという視点からのモデル化も、引き続き取り組むべき重要課題である。

#### (4) 地震現象のモデル化

##### あ. 目的

地震発生予測のためのシミュレーションや高精度の地震動・津波のシミュレーションを効率的に行い、地震発生機構の定量的な理解や、プレート境界での多様な滑りを再現するためには、プレート境界面形状や地震波速度などの構造モデル、地殻やマントルの変形特性やプレート境界面の摩擦特性の推定が必要である。このため、これまで得られたデータや、新たな観測データを統合して、多様な研究において共通して利用可能な日本列島域の構造共通モデルを構築する。さらに、摩擦構成則や複雑な破壊現象を考慮した現実をよりよく説明できる断層物理モデルを構築する。

##### い. 実施状況

###### ア. 構造共通モデルの構築

構造共通モデルとは、震源断層モデルの構築やシミュレーション研究などでの活用を目指し、これまでに得られているさまざまな情報から作成される統一的な構造モデルである。

大学及び海洋研究開発機構は、既往の成果を可能な限り収集・整理し、地形・海溝軸モデル、プレート境界モデル、日本列島及びその周辺の震源断層モデル、日本列島下のモホ面及び脆性・延性域境界モデル、リソスフェア・アセノスフェア境界、日本列島下の岩石モデル・レオロジーモデルの6つの要素について、デジタルモデルの構築に着手した。

###### イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

摩擦構成則や複雑な破壊現象を取り入れたより現実に近い断層物理モデルを構築するためには、様々な野外観察、室内実験や数値シミュレーションが必要となる。

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・化学的影響を明らかにする研究を実施した。

大学及び防災科学技術研究所は、摩擦構成則の改良や、摩擦滑り時の複数の素過程の相互作用を考慮した各種実験に着手した。

## 5. 成果

### ア. 構造共通モデルの構築

日本列島全体及びその周辺域を対象領域とする構造共通モデルの構築に向けて、地形・海溝軸モデル、プレート境界モデル、日本列島及びその周辺の震源断層モデルの構築が推進された。海溝位置と水深モデルが作成・確定されるとともに、構造探査等の既往成果を統合したプレート上面位置データが作成された。

### イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

断層滑りと破壊の物理モデル構築のためには、断層周辺の応力や強度の振る舞いを知る必要がある。野外観察、室内実験や数値シミュレーションにおいてこれらの基本的な挙動の解明が進展した。

野外観察に関しては、地震発生帯における地殻流体の熱力学情報の精密化と実フィールドでの検証に向けて、断層の温度を計測する手法を開発した。また、地震時滑り量分布が良く調査されている世界の純粋な横ずれ地表地震断層の形態を調べ、発達様式をまとめた結果、自然の断層帯も階層的な自己相似性を保って進化している証拠が得られた。さらに、断層周辺の流体挙動に関しては、野島断層におけるこれまでの注水実験やアクロス連続運転データの解析を進め、断層近傍でのクラック密度の減少による長期的な地震波速度の増加（強度回復）を示唆する結果が得られた。

室内実験に関しては、沈み込みプレート境界に多量に存在するスメクタイトと石英を様々な割合で混合した模擬物質を用いて、スメクタイト量比が摩擦挙動に与える影響を調べた。スメクタイト量比が比較的大きな日本海溝では低速でも摩擦強度が小さく地震時に大きな応力降下をもたらさないのに対し、スメクタイト量比が比較的小さい南海トラフでは、大きな応力降下が発生する可能性が示された。脆性-塑性遷移領域における断層のせん断強度への間隙水圧の影響について調べるため、岩塩ガウジを用いた実験を、温度・封圧・間隙水圧のそれぞれを独立に変えて岩塩ガウジを用いた実験を行った。有効法線応力としては、真実接触面積に無関係に、封圧から間隙水圧を減じたものを使うべきであると結論され、その物理的解釈も提示した。また、防災科学技術研究所の大型振動台を利用した岩石の二軸摩擦実験を実施し、断層面上で生成・成長する応力の空間的不均質に起因して摩擦滑り特性が変化することを明らかにした。

数値シミュレーションに関しては、プレート境界の起伏の影響が地震サイクルにどのように影響するのか、法線応力の変化を考慮した地震サイクルシミュレーションを行った。モデル化したプレート境界に凸部を設けると局所的に法線応力が低下し、強度が下がって破壊しやすくなり、地震の繰り返し間隔が短くなることがわかった。また、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域を念頭に凸部のあるプレート境界モデルを設定し、境界積分方程式法を用いた数値シミュレーションを実施した結果、同地震時の滑り分布と同様に海溝付近における大きな滑りが再現された。

地震サイクルにおけるプレート境界の固着の程度の変化を、プレート境界面からの弾性反射波の観測から検知できるかについてを、岩石の摩擦構成則に基づいて理論的検討を行った。そ地震サイクルシミュレーションの結果によると、地震発生前の滑りすべり加速期に固着の程度が低下するが、これに伴う地震波の反射率の増加は少なくとも5%、大きい場合は50%程度となり、反射法地震探査により検知可能な変化であると予測された。

潮汐等による応力変化が地震やゆっくり滑りの発生に及ぼす影響を評価するためについて、簡単な物理モデルによって周期的外力の応答を数値シミュレーションにより調べた。その結果、ゆっくり滑りに伴う応力変化は数10~100kPa程度と小さいため、数kPa程度の地球・海洋潮汐による応力変化によっても滑りの発生と外力の位相がそろえる可能性があることがわかった。これらは、地球・海洋潮汐などの周期的外力及び単独の繰り返し間隔を持つアスペリティの相互作用より生じる同期現象を示唆する。

高温高圧下での塩水の電気伝導度は、実験データが存在しないため、分子動力学シミュレーションによって調べた。求められた塩水の電気伝導度を、地殻の地震発生域や断層帯の電気伝

導度構造を比較することで、断層帯や地震発生域にどの程度の流体が存在するかについて定量的に議論することが可能となった。

#### え. 今後の展望

構造共通モデルの構築に関しては、これまでの研究で得られた日本列島周辺のプレート境界面の形状や、地震波速度構造、地震発生層の下限深度などの構造情報を整理し、多くの研究者が利用できる標準的な構造共通モデルが作成されつつある。また、構造についての情報が不足している領域での観測や、現時点で未推定の粘弾性などの物理パラメータを得るための観測を実施し、構造共通モデルを補う必要がある。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。観測等に基づき構造共通モデルを改良するとともに、シミュレーション研究等で構造共通モデルを使用した結果なども参考にしながら、モデルを高度化することが研究推進に不可欠である。

断層滑りと破壊の物理モデルの構築に関しては、摩擦構成則を用いた数値シミュレーションやデータ同化において、余効滑りやゆっくり滑り及び、~~また~~これらの同期現象を対象にした研究が行われた。また、実験及び観測・観察に関しても、断層物理モデル構築に必要な破壊・摩擦素過程に関する理解が着実に蓄積されている。ただし、地震発生メカニズムの断層物理モデル構築には、個々の素過程を統合してモデル化を行い、観測事実等との比較により検証することが必要である。断層物質の摩擦特性のさらなる解明を進めるとともに、それらを統合した断層破壊過程のモデル化が重要と考えられる。

今後、これらの構造共通モデルと断層物理モデルを利用して、地震発生機構の定量的な理解を進め、地震やプレート境界での滑り過程の数値シミュレーションがより定量的に再現されるようになれば、予測問題への本格的応用が期待される。

### (5) 火山現象のモデル化

#### あ. 目的

本項目では、各種観測や火山噴出物の解析から、噴火に先行する異常現象とその後の火山活動を捉え、先行現象の発生機構や、各現象の相関・因果関係を明らかにする。その際、火山の性質や噴火様式に着目し、火山ごとの類似点・相違点を比較検討する。さらに、マグマの挙動に関する理論及び実験的研究の成果も取り入れて、観測された火山現象の物理・化学過程を明らかにし、そのモデル化を進めることを目的としている。火山噴火は、規模・様式・発生機構が多様であるため、本項目では、マグマ噴火を主体とする火山と、熱水系が卓越し水蒸気噴火をしばしば伴う火山とに大別して研究を進めている。

#### い. 実施状況

##### ア. マグマ噴火を主体とする火山

大学は、有珠山、浅間山、伊豆大島、桜島等で、火山性地震、地盤変動、火山体の地震波速度や比抵抗の構造とその時間変化、固形噴出物・火山ガスの成分変化を総合的に理解し火山現象の定量的把握を行うための多項目観測を実施した。特に、活発な噴火を続ける桜島と、2015年にごく小規模な噴火が発生した浅間山では、マグマの蓄積・上昇・発泡・破砕などの過程に関する理解を深め、そのモデル化も行った。霧島山（新燃岳）と口永良部島については、噴火中の入山規制の下で、無人ヘリを利用した空中磁気測量や臨時地震観測点の展開、火山ガス観測などを繰り返し実施した。また、海外の火山との比較研究として、米国・イタリア・インドネシアにおいて、地震・傾斜の臨時観測や噴出物調査等を相手国と共同で展開した。さらに、新たなモニタリング手法の一つとして、地震波干渉法による地震波速度変化検出システムを試作し、気象庁が配信する連続データを用いて、熱水系が卓越する火山も含めた国内の20火山に適用した。

防災科学技術研究所は、SAR干渉解析の高度化及び火山活動評価への応用を進めるとともに、火山噴火数値シミュレーション手法を開発した。

産業技術総合研究所は、桜島、阿蘇山、浅間山、口永良部島、御嶽山において、火山ガスや固形噴出物の分析・解析を行った。また、伊豆大島と薩摩硫黄島では自然電位観測を行い、数値計算を通じてマグマ—熱水系の定量的モデル化を進めた。

国土地理院は、桜島・伊豆大島の地殻変動に対して時間依存インバージョンを用いた地殻変動解析を行い、マグマ供給系とその時間変化のモデリングを行うとともに、解析手法の高度化も並行して進めた。

気象庁は、桜島や口永良部島などにおいて、傾斜計、GNSS 及び SAR 干渉解析を通じて、火山活動に伴う地殻変動源のモデル化及び即時推定と変動予測の研究を進めた。また、大学と共同して桜島の反復人工地震探査を行った。

海上保安庁は、南方諸島及び南西諸島の海域火山において、航空機を使用した目視観測、熱画像撮影や磁気測量などの定期巡回監視を実施した。西之島については、海域火山基礎情報図調査を行った。伊豆諸島海域においては、通年の GNSS 連続観測を実施した。

#### イ. 熱水系の卓越する火山

大学は、熱水系の卓越する十勝岳・吾妻山・草津白根山・阿蘇山・口永良部島等で、火口近傍を含む火山体周辺において地震・地殻変動・地球電磁気・地球化学的観測を行った。十勝岳・吾妻山・草津白根山については、臨時連続観測点の増強を行い、火山体浅部熱水系の物理・化学的特性や状態の時空間変化の検知能力を向上させた。十勝岳と吾妻山では、地質・岩石学的調査と鉱物学的分析とを組み合わせる過去に噴火堆積物の調査・解析を進めた。さらに、他火山の過去の噴火事例や文献も参照しつつ、発生機構を意識した水蒸気噴火の分類体系を整理し、熱水系が卓越する火山の地下構造やその中長期的変遷について概念モデルを提案した。大学は、上記5火山以外にも、2015年にごく小規模な噴火を起こした箱根山で火山ガス地球化学的観測（採取試料火山ガスの成分比や元素同位体比の分析）を高頻度で行った。焼岳については、2015年より地震観測・地殻変動観測を増強し、地磁気地球電磁気観測の一部を開始した。蔵王山においては、人工地震探査の他、多項目の連続・反復観測網を整備した。

大学と産業技術総合研究所は、2014年9月に水蒸気噴火を起こした御嶽山も比較研究の対象に加えて、各種物理・化学観測や噴出物の分析を行った。

大学と海上保安庁は、海域火山の火山性流体の化学組成の特徴を明らかにし、海域火山の活動を評価する新手法の開発を目指して、特に西之島周辺域の海水の化学分析を行った。

気象庁は、雌阿寒岳、草津白根山などにおいて、地磁気全磁力の連続観測及び繰り返し測量を実施し、火山活動の消長に応じた時空間的な磁場変動とその原因を客観的に評価する手法の開発を進めた。

産業技術総合研究所と大学は、薩摩硫黄島、雌阿寒岳、十勝岳、草津白根山、弥陀ヶ原などにおいて、電磁気・熱及び地球化学的手法に基づき熱水系の実態を明らかにするための観測を行った。また、いくつかの火山については数値計算を活用して定量的モデルを提案した。

北海道立総合研究機構環境・地質研究本部地質研究所は、北海道内の主要火山において地球物理・地球化学観測と地質調査を行った。特に、十勝岳については大学及び気象庁と共同して調査を行い、熱水系を含む火山体内部構造のモデル化を行った。

### 5. 成果

#### ア. マグマ噴火を主体とする火山

数理的アプローチによる研究では、ブルカノ式噴火の火道流モデルに基づく山体変形の特徴が数値計算により調べられ、桜島で噴火時に観測された傾斜変動の基本的な特徴が再現された。これにより、マグマ破砕面の降下速度や破砕時の発泡度といった火道内過程を、力学的観測から推定できる可能性が示された。

霧島山（新燃岳）では、2011年の一連の噴火に関連する様々な研究（観測・数値計算・室内実験・噴出物解析）により、爆発的マグマ噴火のモデル化が進んだ。例えば、GNSS 観測からは、深さ約10kmの推定マグマ溜まりでは、準プリニー式噴火に同期した収縮だけでなく、その後の再膨張が捉えられた。SAR 干渉解析からは、主要な噴火活動が終息した後も火口内にマグマが僅かずつ供給されていたことが明らかにされた。空振データと地震データの相互相関をとることで、一地点の観測でも空振信号を簡便に抽出する手法が開発され、地震信号と合わせて霧島山（新燃岳）噴火のモデル化に役立てられた。また、非定常火道流モデルの数値計算により、実際に起こった噴火様式遷移の原因について定量的な検討が加えられた。

室内実験では、マグマが減圧開始よりも遅れて爆発する遅延破砕という現象が確認され、霧島山（新燃岳）の準プリニー式噴火の開始過程のモデル化に適用された。また、最新の観察技術を用いてブルカノ式噴火と準プリニー式噴火の噴出物を比較解析することで、結晶サイズ分布のサブミクロンスケール領域において明瞭な違いを検出することに成功した。これは、火道浅部においてマグマが受ける減圧過程が噴火様式によって異なることを意味し、噴出物解析から噴火様式を判別できる可能性を開く成果である。

霧島山（新燃岳）や口永良部島の噴火では、無人ヘリの活用や簡易型 SO<sub>2</sub> 放出率測定装置の実用化が進み、噴火に伴う入山規制時における遠隔地からの状態把握に威力を発揮した。また、宇宙線ミュオンを利用した火山体内部の透視技術は着実な進展を続けており、薩摩硫黄島では噴火によるマグマ放出により火道の平均密度が低下した様子が捉えられた。

浅間山では、2000 年代の噴火活動に伴う地殻変動と SO<sub>2</sub> 放出率変化の関係が再検討された結果、マグマの蓄積や輸送過程の議論において脱ガスの効果を考慮することの重要性が示された。

海外との共同研究では、インドネシアのロコン山における臨時地震・空振・傾斜観測網の展開を通じて、ブルカノ式噴火に伴う火道内力学過程のモデル化と我が国の火山との比較が行われた。一方、典型的なストロンボリ式噴火の発生機構とされる火道内スラグ流モデルに基づいた火山体変形の数値計算コードが開発され、現象の特徴が明らかにされた。ところが、実際にイタリアのストロンボリ山で臨時展開した傾斜観測のデータは、従来のモデルから想定されるものとは特徴が異なっており、ストロンボリ式噴火の発生機構の解明には力学的観測とモデルの両面から調べる必要があることが示された。

#### イ. 熱水系の卓越する火山

大学や気象庁等により火口近傍の多項目観測が行われてきた火山のうち、過去に水蒸気噴火を繰り返している火山を選定して比較した。その結果、浅部に熱水系が卓越するとされる火山では、非噴火時にも各種観測項目に明瞭な変動が確認できた。特に、口永良部島・吾妻山・十勝岳では、非噴火時にもごく浅部の山体膨張と岩石の磁化消失（消磁）が長期間続いている点が共通していた。また、この変化は単調ではなく、群発地震や間欠的な膨張・消磁の加速を伴いつつ、一方向的に進行していた。

草津白根山や阿蘇山では、上記 3 火山との共通点も認められるものの、地盤変動と地磁気変化の対応関係や、変化の反復性といった点で一部異なる面があった。活動的火山湖を有し熱水系が地表に顕在化しているこの 2 火山では、数値モデルと放熱率観測に基づいて火山湖の熱収支が検討された。九重山では、1995 年の（マグマ）水蒸気噴火以後、一貫して地盤の収縮と冷却帯磁が継続していたが、2014 年頃からその傾向が停滞もしくは反転を始めたことが明らかにされた。蔵王山では、御釜火口地下浅部の消磁や長周期微動の増加などが見られ、人工地震構造探査で御釜火口から噴気活動域にかけての地震波減衰域が推定された。これらの特徴は、他の熱水系卓越型火山（特に阿蘇山）とも共通性があり、比較研究の基礎情報として重要な知見である。

有珠山では、2000 年火口近傍に掘削した孔井により、マグマ水蒸気噴火発生場となった地下構造の直接的検証が行われた。500 m の孔井は 2000 年噴火の貫入マグマには到達せず、最深部の温度勾配も周辺地域と大きな差は認められなかった。このことから、地盤変動や地磁気変化から従来推定されていた変動源の位置には、マグマは貫入していなかった可能性が高いことが示された。孔井コアの解析からは、数百 m 以深は変質作用で生成された粘土鉱物に富むことが明らかとなり、水蒸気爆発噴火を繰り返した 2000 年噴火の発生場では、難透水性の粘土層が圧力を蓄える役割を果たしていたことが裏付けられた。

箱根山・草津白根山・十勝岳では、噴気や温泉水等の化学的調査も精力的に行われた。特に、箱根山では高頻度で噴気の採取・分析が行われ、2015 年 6 月の微噴火直前もしくは噴火に同期した化学組成や安定同位体比の変化は、難透水層の形成と部分破壊に伴ってマグマ性ガスが上昇した結果であるとするモデルが提案された。

これらの事実を総合すると、熱水系卓越型の火山では、各種観測データの長期変動は、（マグマ）水蒸気噴火の切迫性を把握する上で重要な背景情報といえる。また、現象の方向性や間欠性は、浅部熱水系の変質鉱物の沈積に伴う難透水層の形成と部分破壊を示唆している。

#### え. 今後の展望

マグマ噴火中の火山については、噴出物の化学分析や組織解析に物理観測データを組み合わせることによって、火道内のマグマ上昇過程に関してより詳しい情報（例えば、上昇速度や滞留時間）を引き出すことも可能になってきた。今後は、こうした推定値を火道流モデルなどの数値計算に取り入れることにより、モデルの妥当性を検証しつつ現象の全体像の理解をさらに進めるべきである。また、地震・地盤変動観測との比較は、モデルの検証にも利用できる。現在噴火していない火山についても、観測的手法と物質分析的手法科学（地質・岩石・鉱物学的手法）の連携は有効である。例えば、過去の水蒸気噴火堆積物に含まれる鉱物組成を詳細に解析し、鉱床学で提唱されている一般的モデルと対比することで、堆積物その噴出物が噴火前に置かれていた温

度・圧力等の条件を推定する試みがなされている。また、過去のマagma噴火堆積物噴出物に含まれるメルト包有物分析と鉱物組成の条件から、マagma溜まりにおける含水量を簡便に測定することが可能となったため、現計画ではいくつかの火山・噴火について対して多量の分析データが得られた。こうした物質科学的手法から得られる山体内部の描像を地下構造探査で検証することでモデルの精度を高めたり、マagma溜まりの条件を与えた数値計算により、想定される噴火のパリエーションを確率的に評価したりすることが、今後の研究課題として想定される。

熱水系卓越型火山については、今後、難透水層の実体や形成過程を個々の火山で解明するとともに、静穏期に山体内で進行する現象を理解する鍵となる観測項目については、長期的変動の把握を継続することが望ましい。多くの場合、未だ概念的解釈の段階にある熱水系卓越型火山のモデルを、将来的に噴火事象系統樹の分岐判断の根拠として利用できるまでに一般化するためには、海外の事例も参照しながら比較研究の対象火山を広げる努力や、検証のための継続的観測とともに、様々な条件を検討与えることができる数値計算の援用も有効であろうと考えられる。

マagma噴火を主体とする火山、熱水系の卓越する火山のいずれに対しても、多項目観測データの同一時間軸上での比較や、噴火様式の類似した火山間の比較は、噴火時における火道内のマagmaの振る舞いや、噴火準備期におけるマagma供給系や熱水系の時間発展の理解を深める上で有効性が高いことがあらためて認識された。今後のさらなる発展が望まれる課題のひとつとして、噴煙量・放熱量の定量的モニタリングの精度を高めることが挙げられる。これらは、噴火規模の即時的把握や噴火ダイナミクスの解明に効果的であるだけでなく、非噴火時における準定常的な熱エネルギー輸送や、数10年の時間スケールで繰り返す噴火のサイクル全体を俯瞰的に理解する上でも重要である。

## 2. 地震・火山噴火の予測のための研究

### (1) 地震発生長期評価手法の高度化

#### あ. 目的

地震発生の長期評価は、計画的に地震災害に備えるために有用であり、その信頼性や精度の向上は重要である。史料、考古データ、地質データなどに基づき推定された長期間の地震の繰り返し特性や、変動地形の精査による活断層の特性などを理解し、さらに、近年の観測データや高性能計算機による数値シミュレーションなどを利用する手法を開発して、地震発生の長期評価の高度化を行う。

#### い. 実施内容

大学と海洋研究開発機構は、数値シミュレーションにより、過去に南海トラフで発生した巨大地震の多様な発生サイクルや日本海溝域の巨大地震発生サイクルの再現を試み、観測事実等との整合性を検討した。

大学は、航空レーザー測量や無人小型マルチコプター (UAV) による空中写真撮影と3次元計測技術を利用して、数値標高モデル (DEM) から活断層とずれの量をマッピングする手法を検討した。

#### う. 成果

過去に南海トラフで発生した巨大地震の多様な発生様式やゆっくり滑りについて、数値シミュレーションにより、観測事実を説明するモデルが構築された。さらに南海トラフ沿いの陸域で GEONET により観測されている地殻変動の観測結果から、数値シミュレーションモデルの尤もらしさを確認する手法も開発された。

阿寺断層において UAV による空中写真撮影と3次元計測技術を用いることにより、変動地形学的議論に耐え得る3次元地表データの取得が可能であることが明らかになった。さらに2014年長野県北部の地震による地表地震断層について、UAV などによる最新測量技術を用いた高密度の変位量分布と既存活断層の平均変位速度分布との比較を試みた結果、最近発生した何回かの地震は、今回の地震と同様に破壊域が北方へ広がる地震であった可能性が示された。砺波平野を対象に、DEMを用いた詳細な変位地形の抽出を試行し、ステレオ画像により、高岡市街地を横切る断層変位地形や法林寺断層の北延長に僅かな背斜状の変動地形が新たに見出された。いずれも平野部を横切る長波長の変形であり、空中写真や地形図などの地形資料からは抽出困難な変動地形であった。

#### え. 今後の展望

地震発生の長期評価手法の高度化は、地震現象の理解を災害軽減への貢献につなげる重要な出

口の一つである。2011年東北地方太平洋沖地震の発生を受け、あらためて、プレート境界で発生する巨大地震の多様性をモデル化しその結果を長期評価につなげる手法を開発する重要性が認識された。その過程で、過去の南海トラフ沿いの巨大地震の発生様式とゆっくり滑りを統一的に説明できる多数の数値シミュレーションモデルが構築されてきた。数値シミュレーションが長期評価に使える可能性を示した一方で、発生様式を説明可能な物理モデルやパラメータ分布は非常に多いため、実際に次の地震の評価につなげることは現時点で難しい。海域を含む地殻変動の観測データを同化することで、シミュレーションをより現実近づけていくことができると期待される。ただし、これらの結果を確率評価とどのように結びつけるかについての検討が必要であろう。さらに、上述のようなシミュレーションを用いた高度化に限らず、従来の長期評価の枠組みの中での活用を含めて、史料、考古データ、地質データ等から推定される長期的な地震活動履歴のさらなる利用が今後も望まれる。

プレート境界型巨大地震の長期評価手法の高度化には、長期の陸上地殻変動データや海底地殻変動データの解析による滑り欠損の蓄積やゆっくり滑りを定量化して、次に起こり得る地震の規模や滑り分布を評価する手法を開発していけば、道が開ける可能性がある。

一方、プレート境界型巨大地震と違い、繰り返し間隔の長い内陸地震の長期評価の高度化には、まず、詳細な変動地形の解析による活断層の認定と活動性評価の高精度化が不可欠である。航空レーザー測量や UAV などによる最新測量技術を用いることにより、高精度で活断層の位置とその変位量分布を明らかにする手法が開発されており、変動地形の理解において今後も活用していくことが望まれる。一方、2014年長野県北部の地震における神代断層のように、想定よりも規模が小さく、短い区間での断層活動の可能性や、2016年熊本地震における日奈久断層帯と布田川断層帯との関係のように、断層帯を跨いだ活動の可能性など、新たに課題が顕在化してきている。今後は、内陸地震についても発生様式の多様性を明らかにし、そのモデル化を進め、長期評価の高度化につなげる必要がある。

## (2) モニタリングによる地震活動予測

### あ. 目的

物理モデルに基づく数値シミュレーションと地震活動や測地データ等の観測データを比較することにより、プレート境界滑りの時空間発展機構の包括的理解を目指す。さらに、プレート境界滑りを予測する手法を開発する。また、地殻ひずみ・応力の変動を、断層滑りや広域応力場を基に推定し、地震・火山現象に及ぼす影響を評価する。統計的モデルを用いて、地震活動の予測実験を行うとともに、その予測性能を評価する。

### い. 実施状況

#### ア. プレート境界滑りの時空間発展

国土地理院は、ブロック断層モデルを用いて日本を構成するマイクロプレートの動きを考慮し、陸上地殻変動だけでなく海底地殻変動のデータも取り入れて日本周辺のプレート境界の滑りの時空間発展を明らかにする手法を開発し、ブロック間の固着状態の推定を行った。

大学は、日本列島及び世界で発生した小・中規模相似地震活動の空間分布・時間変化の特徴及び各プレート境界における滑りの特徴を調べ、それらを利用したプレート間固着状態のモニタリングが可能であることを示した。

海洋研究開発機構は、海底ケーブルネットワークを中心としたリアルタイムモニタリングシステムを構築し、即時解析に向けた取り組みを実施した。

海上保安庁は、海底地殻変動の観測を強化し、日本海溝沿いや南海トラフ沿いのプレート境界の固着状態、特に固着の強さの空間的不均一性とゆっくり滑りの発生域との関連を明らかにした。

大学、気象庁及び産業技術総合研究所は、北海道太平洋沿岸から九州・南西諸島まで日本各地で発生する各種ゆっくり滑りとそれに誘発される群発地震、低周波地震、低周波微動の活動を観測し、それらの時空間発展を明らかにし、ゆっくり滑りを含む多様な滑り現象との間の相互作用を理解するモデルを提案した。さらに過去のデータの再解析を行い、ゆっくり滑りの発生履歴を長期にわたって調査した。

大学、気象庁、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、様々な滑り現象について数値シミュレーションに基づくモデル構築を行い、地震発生予測につながる知見を得た。

大学及び海洋研究開発機構は、数値シミュレーションと地殻活動データとの比較により、摩擦パラメータ等を推定するデータ同化手法を開発した。さらに、観測される地殻変動場を、データ同化手法に準即時的に適用する技術開発を進めた。また、豊後水道のゆっくり滑りを対象として予測への適用可能性を探った。

気象庁、防災科学技術研究所及び海洋研究開発機構は、海陸の地震・地殻変動観測網から得られるデータなどを逐次的に解析することによりプレート境界の滑りの異常を検知するための技術の開発を進めた。

#### イ. 地殻ひずみ・応力の変動

大学は、高密度な地震観測によるデータを利用して、内陸で発生する地震の高精度な震源位置を求め、発震機構解のカタログから地震活動と応力場との関係を明らかにした。

産業技術総合研究所は、微小地震の発震機構解から応力の時空間変化を推定する手法を開発した。

大学は、南アフリカ鉱山において、震源ごく近傍で地震発生前後の絶対応力を測定し、解析した。

#### ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

大学は、統計モデルや物理モデルに基づいて現在と過去の地震活動を評価し、また、将来の地震活動を予測する手法を開発しつつ、観測データに基づいて予測の可能性・妥当性を評価・検証した。

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 (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability: CSEP) に参加し、地震発生予測モデルの開発や検証方法の改善、実験方法の改善に貢献した。

大学は、地震活動履歴や余震活動などを考慮して、地震サイクル中の地震活動の特徴の変化を明らかにした。また、世界の巨大地震前後の地震活動を再解析して、各地域の地震発生場の違いを見出した。

### 5. 成果

#### ア. プレート境界滑りの時空間発展

ブロック断層モデルを用い、GNSS データに加えて海底地殻変動のデータも取り入れて日本のプレート境界の滑りの時空間変化を解析できる手法が開発され、2011年東北地方太平洋沖地震前の日本列島の解析が行われた。その結果、2003年(平成15年)十勝沖地震(以下、「2003年十勝沖地震」)の余効滑りとその北側、南側のプレート境界で生じた滑り欠損、さらに西南日本では、豊後水道の長期的なゆっくり滑りや東海の長期的なゆっくり滑りなど様々なゆっくり滑り現象が統一的に理解された。

世界で発生した小・中規模の相似地震活動について、その空間分布・時間変化及びプレート境界における非地震性滑りの特徴を調べた結果、プレート境界型巨大地震発生後、その余震発生域では相似地震の再来間隔が短くなり、余効滑りの発生が示唆された。また、ほとんどの領域では、プレート間の相対速度と同じ、もしくは、より遅い~~小さい~~滑り速度が推定され、背弧拡大域ではプレートの沈み込みから想定される速度よりも速い滑り速度が推定された。相似地震を広い領域で抽出し、活用することにより、世界各地のプレート間固着状態がモニタリング可能となることが検証された。

海底地殻変動観測の強化により、日本海溝沿いの2011年東北地方太平洋地震後のプレート境界の固着状態や、南海トラフ沿いプレート境界の固着状態の空間的不均一の把握が進んだ。特に南海トラフ沿いにおいて、内閣府による南海トラフ巨大地震の想定震源域の全体が固着していることがわかった。また、足摺沖では1940年代の東南海・南海地震の震源域よりもプレート境界浅部側に滑り欠損速度の速い~~高い~~領域が広がっていることも示された。逆に滑り欠損速度の遅い~~低い~~領域は低周波地震の分布と整合的であることが初めて示された。

北海道千島海溝沿いの沈み込みプレート境界で、GNSS データを用いた短期的ゆっくり滑りの網羅的検出を行ったところ、検出できたイベント数は約20年間で2回だけであり、この領域では短期的ゆっくり滑りは珍しい現象であることが示された。

2011年東北地方太平洋沖地震発生前の相似地震カタログから東北沖プレート境界上の準静的滑りの時空間的变化を推定した結果、福島県沖における2008年からの長期的ゆっくり滑りの時間推

移、2011年東北地方太平洋沖地震の半年程前から震源より北側で発生した滑りの加速とその南への伝播が捉えられた。

フィリピン海プレート上面における滑りの時空間発展をGNSSデータを用いた時間依存インバージョン解析により推定するとともに、波形相関を利用した解析手法によりプレート境界地震の検出を行った。その結果、ゆっくり滑りの滑り速度と地震の発生個数及びゆっくり滑りの伝播と地震の震源の移動の間には強い相関が見られ、群発地震活動がゆっくり滑りによる応力変化によってトリガーされたことが示された。また、房総半島沖では2011年東北地方太平洋沖地震の直後にゆっくり滑りが発生していたこともわかった。房総半島ではこれまで群発地震を伴うゆっくり滑りが約6年間隔で発生してきたが、2011年東北地方太平洋沖地震後、その発生間隔は一旦7ヶ月まで短くなってから少しずつ延びており、この地域の準静的滑り速度の時間変化を示唆する。

**相似地震及び地殻変動データから**、北海道～関東地方の沖合のプレート境界断層の広い範囲で、周期的なゆっくり滑りが発生していることを**相似地震及び地殻変動データから**発見した。このゆっくり滑りの発生間隔は地域によって異なり、1～6年の場所が多かった。また、その発生に同期してその地域のM5以上の**規模の大きな**地震の活動が活発化しており、2011年東北地方太平洋沖地震が発生した時期にも、三陸沖ではゆっくり滑りが発生していた。周期的なゆっくり滑りが発生しているときに大地震が起こりやすくなる傾向を活用すれば、それを地震・地殻変動観測で検知することによって、大地震発生時期の予測の高度化に貢献できる可能性がある。

広帯域地震観測網で得られた地震波形の相関から、南海トラフ及び南西諸島海溝の近傍で発生する浅部の超低周波地震を検出した。その結果、その発生頻度は紀伊半島沖～四国沖で低く、日向灘・南西諸島と南西に向かうにしたがって高くなることがわかった。この傾向は、相似地震から推定される準静的滑り速度の地域性と高い相関があり、**速い大きな**滑り速度が浅部超低周波地震活動を活発化させている可能性を示す。

2003年及び2010年に発生した豊後水道長期的ゆっくり滑りに伴う微動活動の活発化を詳細に調べたところ、微動活動域は約25km/年の非常にゆっくりした速度で豊後水道から内陸方向に伝播したことが明らかになり、長期的ゆっくり滑りがその深部側で発生する微動活動に影響を及ぼしたことがわかった。

GNSSデータを用い、九州から南西諸島における短期的ゆっくり滑りの発生状況を系統的に明らかにした。九州では四国のゆっくり滑り発生域の南西部延長(深さ30～40km)で発生しているが、その数は南西ほど少なくなること、また、琉球海溝沿いでは、種子島沖、喜界島沖、沖縄本島南部沖、八重山諸島において短期的ゆっくり滑りの活発な領域が見られ、八重山諸島を除いた3領域の発生深度は10～30kmと浅いことがわかった。

過去に南海トラフで発生した巨大地震の多様な発生様式やゆっくり滑りについて、数値シミュレーションにより観測事実を説明するモデルが構築された。また、南海トラフ全域について、地震サイクル間におけるゆっくり滑りの発生を再現する数値シミュレーションを行った結果、地震サイクル前半から中盤にかけては短期的ゆっくり滑りの発生間隔が減少するが、サイクル後半では、長期的ゆっくり滑り発生**により**のために短期的ゆっくり滑りの発生間隔は大きな擾乱を受ける結果が得られた。

日本海溝域に関しては、2011年東北地方太平洋沖地震だけでなく、それまでに発生したM7クラスの宮城県沖地震を含む過去の大地震、2011年東北地方太平洋沖地震の前震・最大余震・余効滑りを再現できる様々な摩擦パラメータのモデル群を構築し、次の宮城県沖地震の発生が平均の繰り返し間隔から予測されるよりも早くなる可能性が**示唆され高いと推測**した。

東北地方太平洋沖地震の余効滑り発生領域では、データ同化実験のための三次元物理モデルの構築や断層摩擦特性推定手法の開発を行った。余効滑りに適合するプレート境界面の摩擦特性を計算したところ、摩擦特性の空間変化や滑り速度依存性を考慮する必要性が示唆された。摩擦構成則に基づく断層滑りのシミュレーションにおいて、データ同化法を用いて摩擦パラメータを推定する手法を、摩擦パラメータが空間的に不均一である場合にも適用可能な手法に拡張し、2003年十勝沖地震後にGNSSで推定された地震後の余効滑り速度に適用した。得られた摩擦パラメータの空間分布を用いて、その後の余効滑りの時空間発展を予測した。さらに、摩擦パラメータと初期条件を同時推定する手法として、データ同化手法をゆっくり滑りに対して適用するための数値実験を実施し、**高精度の良**い推定に必要な地殻変動観測点分布やデータ量を求めた。

気象庁による南海トラフ沿いの面的監視処理では、2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動を除去したGNSS観測データを用い、監視範囲を変更して、東海の長期的ゆっくり滑りを検出しやす

くした。また、体積ひずみ計の降水補正についての改善手法を開発した。

#### イ. 地殻ひずみ・応力の変動

微小地震の発震機構解に基づき上町断層帯周辺における詳細な応力場推定を行った。推定された応力場と断層深部形状を考慮すると、断層帯中央部や南部に比べ、北部の活動性が低いと推定された。

南アフリカの鉱山で起こった Mw2.2 地震の発生前後に断層周辺で採取したボーリングコアを新しい応力測定法で解析し、地震前後や断層と地質構造との位置関係によって有意に異なる応力値を得た。

#### ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

これまでの発生履歴と統計モデルに基づいて、日本海溝沿いの小繰り返し地震の予測可能性を調査したところ、2010 年までに限れば良好な予測成績が得られることがわかった。地震活動の特徴から前震である可能性の高いものを選別する手法を群発活動が特徴的な伊豆地域に適用し、予測性能が検討された。2011 年東北地方太平洋沖地震の滑り域での地震活動の時間変化を見ると、地震後しばらく高くなっていった  $b$  値がほぼ平常値に近いレベルまで戻っていることがわかった。

地震活動予測手法の比較検証を目的とする CSEP と連携し、検証に用いる地震活動データベースなどの共通基盤を整備し、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実施された。2011 年東北地方太平洋沖地震後は、どのモデルでも総地震数の予測成績が相当低下し、統計モデルにまだ改善の余地があることが明らかになった。モデルの優劣を客観的に評価する体制を構築するという目的はほぼ達成された。

地震活動度を定量的に評価するために ETAS モデルでは余震の影響を取り除くことが標準的に行われているが、そのモデルパラメータの時空間的な変化を推定することは難しい。そこで、地震活動の特徴に基づき日本列島域を多数の区域に分割し、それぞれの区域で適切なパラメータを統計的手法により推定した。また、余震活動に関して、応力変化と摩擦構成則に基づく物理的なモデルが提唱されているが、実際の余震への適応においては ETAS のような経験的な統計モデルに及ばないとされてきた。この物理的モデルを、「全ての地震が余震を引き起こす」という仮定を取り入れ改良したところ、余震の観測事実の説明では、ETAS には及ばないまでも大幅な改善がみられた。

#### エ. 今後の展望

これまでに、巨大地震の震源域近傍で発生した様々なプレート境界の滑り現象を包括的に説明できるモデルが構築され、プレート境界の摩擦特性の不均一性に関する研究が進んだ。一方、新しく北海道から関東にかけて広い範囲で周期的なゆっくり滑り現象が観測され、地震活動の活発化との相関も見られている。今後、広範囲な周期的ゆっくり滑り現象が定常的プレート運動の周期的擾乱としてモデル化され、複雑なプレート運動の理解が進めば、地震発生予測につながる可能性がある。

上記のように発生域や時定数が異なる様々な滑り現象が観測されているが、これら多様な滑り現象の理解を地震発生滑りの予測につなげることを目指している。その際には、データから推定された様々なプレート境界滑り現象を包括的に説明できる摩擦パラメータの分布モデルを観測誤差に応じた幅をもって推定し、そのような摩擦パラメータ分布モデル群を用いて将来のプレート境界の滑りを予測する必要がある。2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域近傍で観測された様々な滑り現象を数値シミュレーションで再現できる摩擦パラメータモデル群を作成し、これらから次の宮城県沖地震の発生時期の予測分布を得た成果は、今後の予測の方向性を示した。一方で、地殻変動の時空間観測データを数値シミュレーションに同化させ、摩擦パラメータや初期条件を推定し、プレート境界での滑りを予測し、その予測精度を評価する手法の開発も進んだ。今後、シミュレーションと観測データの比較から物理量やモデルパラメータを適切に推定し現実的な予測を目指すためには、数値シミュレーションのデータ同化手法の高度化だけでなく、数値実験により、海溝軸からどの程度の距離でどの程度の観測点間隔で地殻変動観測・地震観測等を実施し、どの程度の観測精度が必要であるかを明らかにしなければならない。また、それに伴った観測点配置や観測量を得るためには、どのような技術を開発しどのような調査観測を実施すべきかを総合的に考えながら共同研究を進めることが必要となる。そのためには、これらに関係する研究者間またはグループ間で最新の研究に関する情報交換ができる体制を構築する必要がある。

また、過去の地震活動の評価から地震活動を予測するための研究にも進展があった。余震活動

の物理モデルが改良され、余震の発生系列を統計的モデルとほぼ同程度に説明できるようになってきた。統計的モデル間の優劣を客観的に評価する手法もととのった。今後、さらに地震活動の物理的理解を取り込みながら統計的モデルを高度化する研究を進展させていく必要がある。

### (3) 先行現象に基づく地震活動予測

#### あ. 目的

地震・火山噴火の予測のための研究の一環として、地震に先行すると報告されている現象の統計学的検証と発現過程理解に基づき地震発生の短期予測を目指す「先行現象に基づく地震活動予測」の研究を行う。これまで地震の先行現象を観測したとの報告は多いが、内容は非常に多様であり、それらの系統性は必ずしも明瞭ではない。ここでは先行現象の捕捉を目指した観測を行い、これまでに得られているデータも含めて、観測された現象と地震の関係の統計的有意性を評価し、その物理・化学過程を研究する。

#### い. 実施状況

大学は、地震活動や電磁気現象、地球化学現象などの大地震に先行すると報告されている種々の現象の観測を行い、それらと地震発生の相関を客観的に評価した。また、衛星データを利用して、電磁気現象と地震発生の関係を統計的に検証した。さらに、室内実験や数値シミュレーションなどのモデリングを通じて、前震や地震発生に先行する電磁気現象の発生メカニズムを研究した。

気象庁は、様々な地域の地震活動から客観的な異常を抽出し、本震発生予測の性能を評価した。

#### う. 成果

本震の震源近傍で数日前から先行して発生する微小繰り返し地震を、国内の複数の内陸地震で見出した。国内の複数の地域において、地震活動のクラスタリングに着目した前震の事前識別を行い、その予測性能を評価した。南アフリカ金鉱山内で発生した地震の震源域では、本震に先行する地震活動がいくつかのクラスターに分かれており、一部のクラスターの活動は本震発生直前に加速したことが明らかとなった。また、南アフリカ金鉱山では、微小地震発生域の準静的拡大が明瞭に観測され、岩石実験やシミュレーションで確認されている破壊核形成過程に相当する現象である可能性がある。さらに、大きなアスペリティの内部に小さなアスペリティが存在する場合の破壊過程を数値シミュレーションにより調べ、前駆滑りの規模と本震の規模の関係の多様性を明らかにした。

大地震に先行する中期的な変化としてよくとりあげられるものに、地震活動の静穏化がある。この現象を系統的に評価するために、1964年から2012年までの日本列島周辺の海溝沿いにおいて、客観的基準により網羅的に静穏化現象を検出した。10年以上継続する長期静穏化は11回発生し、うち3回は巨大地震に先行した。特に、2011年東北地方太平洋沖地震の震源域では、2002年頃開始した長期的ゆっくり滑りと1989年から2000年にかけての静穏化領域がほぼ同じ場所であることから、両者が密接に関連している可能性がある。また、国内の大地震を対象に地震活動の静穏化・活発化解析手法を適用した結果、静穏化事例の約8割で地震発生前までに静穏化領域が破壊領域を囲む一現象が見られた。この他、1984年から2011年東北地方太平洋沖地震直前までの日本列島周辺の地震活動に対して、臨界現象の時系列解析を行ったところ、対象期間中に6回発生したM7.6以上の浅発地震すべてに対するものを含め9回の異常が検出された。地震活動の異常は本震に数ヶ月先行して発生した。

電磁気先行現象に関しては、局所的な地電位の異常が地震に先行する傾向の統計的有意性を、神津島の1997年から2000年の活動に対して示した。また、三宅島の火口付近で繰り返し発生したパルス状の超長周期地震波に同期して全島で観測された地電位の変化が、地震に伴うひずみが起こす水流による界面動電現象で定量的に説明できることが示された。

電離層に現れる先行現象に関しては、日高山脈を挟んだVHF電波の伝播異常について客観的基準を用いた網羅的検出を行い、地震発生に数日先行する傾向の有意性を示した。また、先行時間の短さから、本震破壊の開始への密接な関与が推察される現象の一つに、巨大地震の一時間程度前に見られる電離層全電子数の変化がある。この現象について、津波による擾乱を受ける地震後のデータを用いない手法でも、**同様の異常**が解析を行った世界のM8.2以上の巨大地震8例全てについて**同様の異常**が検出され、主に太陽活動に起因する平時の電離層異常の発生率を考慮しても、

地震に先行する傾向が統計的に有意であることが示された。さらに、本震が大きいほど、異常の振幅が大きいことがわかった。また、電離層異常のメカニズムとしてよく使われる正孔電荷による電流について、**岩石圧縮実験**によって岩石中の正孔濃度が激増することを**岩石実験**で直接的に示した。

大気中ラドン濃度について、全国のモニタリングネットワークを構築し、気象要素による変動を補正する手法を開発した。また、地下水中の様々な化学種の濃度を自動連続観測する装置を開発した。また、中伊豆観測点の地下水中ラドン濃度について、2011年東北地方太平洋沖地震に数か月先行する顕著な増加を捉えた。

#### え. 今後の展望

確率表現を用いて地震発生予測を定量化することは世界的な流れであり、本計画でも強く意識されている。様々な先行現象候補が検討されており、多くの課題で観測事象と地震発生の関係が、否定的な結果も含めて定量的に**評価表現**された。系統だった網羅的な検証はまだ一部に限られているため、今後、先行現象の対象を拡げていくことが**重要大事**である。また、先行現象のメカニズムの解明においては、先行現象が反映するものが、本震破壊の準静的な開始を**示す**のか、地震発生の準備が整ったことを**示唆する**のか、あるいは、本震のトリガーとして働いているのかを峻別することが望ましい。

先行現象に関しても予測の試行を通じた確率論の枠組みでの評価が浸透してきており、地震発生予測を確率化する方向性が示されている。当該情報の社会的価値を冷静に議論するためにも、地震発生予測の定量化及び予測成績の定量的な評価を充実していく必要がある。

### (4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

#### あ. 目的

これまでに作成されてきた噴火事象系統樹と同様に、過去の噴火履歴とマグマ系の変遷の情報をもとに、近年も火山活動が活発であり、噴火が発生した場合の社会的影響が大きいと考えられる複数の火山を選択し、新たに噴火事象系統樹を作成する。また既存の噴火事象系統樹を高度化するために、噴火履歴やマグマ進化データ、地震や地殻変動データに関する新たなデータを収集し、噴火事象系統樹の高度化を目指す。さらに事象の分岐点について、過去の観測データによる経験、理論・実験的な予測等に基づき、事象分岐の判断方法をまとめる。

#### い. 実施状況

本研究計画開始時点から蔵王山の地震活動や地殻変動が活発になり、噴火の可能性が指摘されるようになった。そのため大学は当初の計画にはなかった蔵王山の噴火事象系統樹を作成することとした。まず、噴火履歴、噴火様式、古記録から見た噴火活動、マグマ変遷及び最近の地球物理学的観測に関して、関係機関による研究集会を開き、その後大学・産業技術総合研究所・気象庁からなるコアメンバーにより、噴火事象系統樹を作成した。また、当初計画した火山では、有珠山、浅間山及び十勝岳に関して大学、気象庁、産業技術総合研究所及び北海道立総合研究機構による研究集会を実施し、噴火事象系統樹作成に必要なデータを蓄積し、有珠山と浅間山について噴火事象系統樹を作成した。

大学は、雲仙岳、モンセラート島（スープリエール・ヒルズ）、シナブン山、伊豆大島、三宅島、霧島山（新燃岳）、御嶽山、口永良部島、雌阿寒岳、ストロンボリ山、エトナ山などについて調査した。地震・地殻変動観測、電磁気学的観測、火山ガス観測の結果を過去の文献等（論文、報告書など）をもとに、噴火事象・観測量の時系列を作成し、電子ファイルとしてまとめた。

防災科学技術研究所は、16火山において基盤的火山観測網やリモートセンシング技術によって得たデータを国際データベース WOVodat に蓄積し、他の火山との比較を行った。また、火山の噴火様式や推移予測、火山活動分岐判断に必要なパラメータとなる地震活動や地殻変動の解析を霧島山、口永良部島、箱根山等で行った。また、火道内のマグマ挙動の数値シミュレーションをおこない、噴火の過程を検討するとともに、2011年東北地方太平洋沖地震やその誘発地震を事例とした巨大地震発生に伴うマグマへの影響評価に関する数値シミュレーションを実施した。

#### う. 成果

蔵王山は近代観測網により噴火活動が観測されていない火山であり、噴火事象系統樹を古記録

と地質調査による噴火履歴・様式に関するデータを基に作成した初めての事例である。そのため事象分岐に確率を付与することはできなかったが、これまでの噴火活動事例を整理し、発生の可能性の大小を示した事象系統樹を試作した。現在、火山活動は低下しており、試作した噴火事象系統樹を現場で試用することはなかったが、国内に多くある噴火の観測事例を欠く火山での、噴火事象系統樹作成の指針となった点は評価できる。

一方、有珠山及び浅間山は近代的観測が始まった20世紀入って以降も噴火活動が頻発しており、その観測網も日本で最も高性能・高密度である火山の一つであり、噴火事例だけではなく、浅間山では噴火未遂事例も複数観測されている。さらに地質学的な研究も進んでおり、完新世あるいはそれより古い時期からの噴火履歴がよくわかっている。このような恵まれた条件の中で作成された噴火事象系統樹は、分岐での確率を示すことができた。加えて特筆すべきことは、浅間山では最近の地殻変動観測結果をもとに、前兆現象が観測された後の噴火未遂と噴火発生の分岐確率を示したことである。その意味で、現時点では最も高度な噴火事象系統樹が作成されたと考えられる。

国内外の活動的火山の噴火事象・観測量の時系列データベースを検討した結果、より大きな規模の噴火に分岐する前やマグマ噴火の開始前には、山体膨張の発現、地震活動やガス放出の活発化、全磁力の変化などが多くの場合に見られ、このような観測量のモニタリングが分岐判断に有効であることが確かめられた。一方で、観測項目によっては、噴火直前に変化しない例があることもわかった。この結果を踏まえ、重要な分岐現象と噴火予測の判断基準を考えるために、これまで国内外で作成されてきた噴火の事象系統樹をレビューした。

火山活動分岐判断に関しては、マグマ噴出率変化とマグマ溜まり圧力変化の同時観測によって、爆発的噴火への遷移過程を直前予測できる可能性があることを示した。また、静岡県東部地震の影響による富士山のマグマ溜まりの変動量を評価し、応力変化として0.1~1.0MPa程度、変位量として数cm程度であることを明らかにした。

#### え. 今後の展望

噴火履歴を基にした従来型の噴火事象系統樹は、分岐判断基準に欠けるという問題点はあるが、自治体や住民が火山活動を俯瞰的に理解するという点では必要不可欠な情報である。今後も噴火履歴データ等の蓄積に応じて、新たな火山での系統樹の作成や既存の系統樹の改訂を進めていくべきである。一方で、本研究成果を含めた火山学的知見を活用して、事象分岐の条件や論理を明らかにすること、さらに理論的あるいはシミュレーションによって予測を行うことに今後は重点を置くべきであろう。そのためには、噴火活動の観測事例の豊富な複数の火山で、観測データの特徴や噴出物の解析などを進め、事象分岐基準について議論を進めることが重要である。

### 3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

#### (1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

##### あ. 目的

強震動、津波、火山灰・溶岩の噴出などといった自然現象としての災害誘因が、地形・地盤など災害の自然要因のみでなく、災害への曝露人口、建造物の脆せい弱性、社会の回復力などの社会要因とどう結びついて災害を出現させたかを、近代的な観測や調査データ、近代観測開始以前の史料に残る地震・津波・噴火の記載に基づき長期的視野をもって明らかにする。近代的な観測・調査データや史料より、地震・火山災害の特性や地域性を明らかにし、データベース化を図るとともに、地震・火山噴火による災害と社会環境の関係を明らかにする。さらに、国内外の事例研究により社会の地域的特性と地震・火山災害との関係を明らかにする。

##### い. 実施状況

###### (史料データベースによる災害と社会環境の関係解明)

大学は、史料データベースの構築・解析を行いながら、過去の災害事例をモデルケースとして、当時の人々の対応や教訓などを分析した。その際、史料が多く存在し、当日の地震対応の様子を総合的に描くことができる江戸時代の1703年元禄関東地震と1855年安政江戸地震の災害対応を分析対象とした。

###### (社会の地域的特性に基づく地震・火山災害事例の知見集約・発信化)

大学は、新潟県を事例に、地域特性を持つ過去の災害事例について、焼山火山災害、新潟地震、

平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震（以下、「2004 年新潟県中越地震」）、平成 19 年（2007 年）新潟県中越沖地震等の評価・検証を行った。特に研究初年度の平成 26 年度は、新潟地震 50 周年、焼山火山災害 40 周年、2004 年新潟県中越地震 10 周年という契機の年であったために、火山・地震災害の被害やその後の復旧状況の評価・検証した。

大学は、イタリア、アメリカ、イギリスなどにおいて現地調査を行い、当地における地震動の長期予測情報のリスク・コミュニケーション手法について検討を行った。特にイタリアの 2009 年ラクイラ地震についての現地調査では、地震発生に際して地震学者の情報発信のあり方と市民とのリスク・コミュニケーション事例について分析を行った。

## う. 成果

### （史料データベースによる災害と社会環境の関係解明）

大学は、元禄関東地震と安政江戸地震についての史料から、当時の幕府の災害対応においては、日光東照宮への地震伺いといったような幕藩体制の維持に重きが置かれており、また多面的な権力構造が江戸城中心の災害対応に何らかの支障を来していたことが考えられ、現代のような被災者の救済とは異なる優先度が付けられていたことが推定された。

### （社会の地域的特性に基づく地震・火山災害事例の知見集約・発信化）

大学は、新潟県と共同で、2004 年新潟県中越地震における経験と教訓を科学的な知見とするための活動を実施し、その成果として得られた災害知見を「次代の災害復興モデルの構築を目指して～にいがたからの知見の教訓と発信～」として、(1) 中山間地域の住宅再建、(2) 農業を中心とした産業復興、(3) 経済の活性化、(4) 中山間地域を含む被災地における生活再建、(5) 他地域への効果的な普及方策の検討、(6) 広域的なコミュニティの創造、の観点でまとめて発信した。2004 年新潟県中越地震と 1995 年兵庫県南部地震阪神・淡路大震災の復興過程を被災者の主観的評価から検証したところ、中山間地と都市年という違いがありながら復興の時間変化に共通性が見られるなど日本社会における復興の構造に一般性があることが明らかになった。

大学は、~~イタリアの 2009 年~~ラクイラ地震について分析を行ったところ情報を発信する地震学者と市民とのリスク・コミュニケーションの手段が限定的であったことと、情報を統括・整理・更新する公的機関の脆弱性がリスク・コミュニケーションに影響を与えていたことがわかった。

## え. 今後の展望

これまでの計画では、自然科学を中心に災害誘因の解明に焦点をあてた地震・火山研究が行われてきたが、本計画を災害科学の一部としてとらえた場合、これに加えて、人文・社会科学を巻き込んだ災害誘因・災害素因の双方の観点から地震・火山災害研究も視野に入れて進めていく必要がある。特に、過去の地震・火山噴火の理学的側面の現象解明は多く行われているものの、過去の災害事例の人文社会科学的な側面については現象解明がほとんどなされておらず、過去の災害事例を温故知新として、自然現象の発生過程だけでなく、社会現象としての災害について明らかにする必要がある。

~~具体的には、前近代の地震・災害については史料の分析により、最近の地震・火山災害については被災者への質問紙調査などの社会調査によって、災害誘因が災害素因とどのように結びついて災害を引き起こしたかを解明する。そのために、例えば、災害時の市民の心理・行動や政府の災害対応なども考慮する必要がある。また、2016 年熊本地震の例などから示唆されるように、地震・火山災害からの復旧過程の研究では、災害を引き起こした地震・火山噴火発生後の余震等の長期的な地殻活動の影響を検討することも重要である。~~

~~（上の段落を少し修正してみました）~~

具体的には、前近代の地震・災害については史料の分析により、最近の地震・火山災害については被災者への質問紙調査などの社会調査によって、災害誘因が災害素因とどのように結びついて災害を引き起こしたかを解明する。そのために、例えば、災害時の市民の心理・行動や政府の災害対応などを調べる必要がある。また、2016 年熊本地震の例などから示唆されるように、地震・火山災害からの復旧過程の研究では、災害を引き起こした地震・火山噴火発生後に引き続き中・長期的な地殻活動（余震や継続する噴火など）の影響を検討することも重要である。

本研究計画実施中にも、2014 年御嶽山噴火や 2016 年熊本地震など、人的被害を伴う地震・火山災害が発生している。これらの新しい災害事例の研究も含めながら、これまでの災害事例の検証を丁寧に行い、知見の集約化と効果的な発信手法を提案することが望まれる。そして本研究計画によ

て導出・提案された知見・発信手法をもとに、一般市民、行政の災害担当者の防災リテラシー（災害に立ち向かうために必要な能力）を向上させるための防災教育や、災害研究者を目指す大学院学生などの教育カリキュラムの構築、災害科学の体系化へと昇華させていくことが望まれる。

## （２）地震・火山噴火の災害発生機構の解明

### あ. 目的

地震・火山噴火による災害誘因が災害素因に与える作用力だけでなく、自然環境や社会が受ける損傷、破壊などの影響、災害による経済機能の低下、被害拡大、社会混乱などの社会・経済的影響の波及効果を検証し、災害発生機構を解明し、誘因と素因の関係において、防災・減災に資するための誘因研究の新たなモデルを構築する。具体的には、①人口密度が高い堆積平野・堆積盆地を対象にして、地震災害発生機構を多面的に分析する、②地域防災対策への貢献のために、火山災害発生機構を解明する、③歴史的に繰り返す災害による社会的な要因の変化を災害発生機構から検証する、等の調査研究による成果を導出する。

### い. 実施状況

大学は、「人口密度が高い堆積平野・堆積盆地を対象にした地震災害発生機構の多面的解明」について、国内外の堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースの増強を開始し、特に国内では諏訪盆地、国外ではカトマンズ（ネパール）を対象として、地震波の増幅特性の地形等の効果を調べることで、地震災害発生機構の多面的な分析を実現した。「地域防災対策への貢献に資する火山災害発生機構の解明」については、火山の前駆活動及び噴火推移の事象の発現に沿った避難計画策定の可能性について検討し、また降灰の長期的影響について交通ネットワークの復旧分析を実施した。「歴史的に繰り返す災害による社会的な要因の変化による災害発生機構の検証」では、東日本大震災の被災地において、被害から明らかとなる脆弱性に規定された長期的土地利用の変化を検証し、南海トラフ巨大地震の被災想定地域における脆弱性と事前復興対策について分析した。

### う. 成果

「人口密度が高い堆積平野・堆積盆地を対象にした地震災害発生機構の多面的解明」について、国内では、諏訪盆地で観測されるに係る地震波解析の結果として、地震動増幅特性の把握に効果的な盆地端部のペア観測点を見出した。また、国外では、ネパール国カトマンズ盆地において、マグニチュード5程度の地震動記録を収集・解析することで、既往の距離減衰式と調和的であることが確認できた。

「地域防災対策への貢献に資する火山災害発生機構の解明」については、2011年霧島山（新燃岳）噴火の降灰を事例として、降灰量と道路通行規制の有無の関係を機能的フラジリティ曲線で近似し、降灰量に対する通行規制の確率分布を求めた。このモデルでは、目的関数を道路の清掃時間、交通量、交通量の低下率の積を対象とするすべての道路について和を取ったものとして最適解を求めた。また、桜島噴火を事例として、地盤変動から推定されるマグマの貫入速度の量に応じた噴火規模や様式を想定し避難計画案を策定した。

「歴史的に繰り返す災害による社会的な要因の変化による災害発生機構の検証」においては、津波の被災地において、歴史的土地利用の変化パターン（暴露性の高まり）と土地利用の変化メカニズム（脆弱性の進展）に着目し、農村的土地利用の都市的土地利用への転換（都市化）、未利用地の都市的土地利用への転換（高度化）を空間形態に基づいて可視化・解明した。

### え. 今後の展望

地震・火山災害発生機構の解明のためには、災害誘因だけでなく災害素因についても研究し、誘因と素因の相互作用を理解する必要がある。たとえば、震源での地震波の発生や複雑な地殻構造での地震波の伝播、地形・地盤等の自然素因が地震動や地滑りに及ぼす影響などの理学的研究に加え、建造物等への影響や構造物被害等による経済的損失を考慮して、総合的に災害を予測する際に、地震学の成果がどのように貢献するかを検討することは、災害予測の高精度化に資する研究につながると考えられる。

火山噴火による降灰が道路交通に及ぼす影響の評価や、桜島火山の噴火予測に基づく避難計画の検討は、災害誘因と災害素因をともに考慮して災害軽減の方策を検討するうえでは重要な成果

である。これらの手法を他の火山に適用することを検討するとともに、降灰や噴火の予測精度の向上が災害軽減にもたらす効果の評価なども研究すべきである。

### (3) 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

地震・火山噴火による災害軽減に資するため、地震や火山噴火に伴う地震動、津波、地滑り、山体崩壊などを、地震や火山噴火前に高精度に評価する手法を開発する。そして、本計画で得られる地震発生や火山噴火の理解や、地下構造モデルなどの最新の研究成果を利用して、災害誘因の事前評価を行う。

#### い. 実施状況

##### (地震動予測)

大学は、プレート境界地震及び内陸地震やスラブ内地震において、地震波を強く発生する場所の事前推定を目指し、地震波形逆解析などの震源過程解析手法を用いてアスペリティ領域（大滑り域）や、強震動生成域の高精度マッピングを行い、過去の大地震の解析事例を増やした。

大学は、地震動の増幅に大きな影響を持つ堆積層地盤を調べるため、探査や観測を行った。また、平野や盆地の堆積層構造や、スラブの不均質構造を含む3次元不均質構造モデルについて、地震波伝播の数値シミュレーションを実施し、複雑な地下構造内を伝播する特徴的な地震波の再現や、観測との比較に基づく地下構造モデルの検証・更新、過去の大地震の地震動の再現や将来発生する可能性のある大地震による地震動予測を行った。

##### (地滑り予測)

大学は、地滑りを起こし得る斜面や人工盛土で地震動や間隙水圧などの観測を行い、土質や地形に応じた地震応答特性を調べた。さらに、地滑りの調査を行い、発生状況や地滑り面の地層を明らかにした。

##### (火山灰や溶岩噴出の予測)

気象庁は、火山の大規模噴火時の降灰予測において、日々変化する気象場の影響を検討した。

#### う. 成果

##### (地震動予測)

2011年東北地方太平洋沖地震の震源解析では、近地強震動、遠地実体波、地殻変動、津波等の単独の観測データ、または、それらの統合データによる解析が行われた。周期10秒以上の長周期地震波形や津波波形成データの解析からは、破壊開始点付近から海溝よりの浅部に大きな滑りをもつ、広大な滑り域が推定された。

その他、震源破壊過程解析により、国内外で発生した大地震の断層面上の大滑り域や強震動生成域のマッピングを継続的に進めた結果、これらのスケール則が高精度化した。加えて、断層破壊伝播速度がS波速度を超え強い加速度を生み出す地震や、強い揺れを伴わない津波地震、高周波数の地震波放射が極めて小さい地震など、断層破壊現象の多様性についても知見が蓄積された。

関東平野の地震基盤の非対称な形状が地震動にもたらす影響を調べるため、同規模の地震が新潟県中越地方で発生した場合と、福島県東部で発生した場合について地震波伝播の数値シミュレーションを行った。その結果、福島県東部に設定した地震の地震波は基盤深度の変化が緩やかな北東方向から入射するため長周期地震動の振幅は小さく、新潟県中越地方に設定した地震の場合の3分の1以下になることが確認された。

大阪堆積盆地北西部の観測点における中小地震記録に見られる孤立的な後続波群の特徴を波形解析と地震動シミュレーションにより調べた。後続波群は地表と堆積層/地震基盤の境界間の多重反射S波であり、基盤の3次元的形状の影響で震動卓越方向が変化していくことを明らかにした。また、大阪堆積盆地を伝播する中小地震の地震動シミュレーションにより、盆地内を伝播する後続波の評価に重要な堆積層減衰定数の推定や、現状では地下構造モデルの不十分な区域の把握を行った。

異常震域の原因となるスラブ内のラミナ状不均質構造とその起源を調べるため、太平洋プレートを伝播する地震波を調べ、年代が古く厚いプレートほど高周波数地震動の散乱が強いこと、ラ

ミナ構造は海洋プレートが海嶺で生成される際に既に形作られているがプレート年代が古くなるとともにその厚さが増すことがわかった。

大地震の地震動や津波の発生過程の理解と、強震動・津波の事前予測に有効なシミュレーション技術にも大きな進展があった。京コンピュータを用いて2011年東北地方太平洋沖地震の強震動、水中音波、地殻変動の同時シミュレーションが行われ、複雑な断層運動に伴う強震動と津波の生成過程の評価が進められた。2015年小笠原諸島西方沖地震の3次元構造モデルによる日本列島の地震動のシミュレーションでは、同地域の過去に発生した深発地震より震源が深かったために従来とは異なる異常震域分布となったことを再現することができた。

#### (地滑り予測)

首都圏の丘陵地帯の人工盛土における地震観測により、地山に比べて揺れの大きさが増幅され、特にS波の上下動成分において特定の周期帯の地震波が顕著に増幅するなど、特徴的な地震応答特性が確認された。2011年東北地方太平洋沖地震など過去の地震でも、排水設備が不十分だったり、締固めの悪かったりした盛土が、大振幅地震動により地盤崩壊や液状化を起こしており、人工盛土の地震動応答の解明は崩壊予測の高精度化に資するものである。

火山地域での地震による地滑り被害研究のレビューを行い、最も甚大な被害は降下火砕物の崩壊性地滑りによるものであることを確認した。そのような地滑りの例として、1949年今市地震による火山地域の崩壊性地滑りの調査を行った結果、この地震及びこの地震以前の多数の崩壊性地滑りを確認した。また、深い地滑りの滑り面は自然含水量が高い火山礫層に当たり、地震によって地滑りが始まると滑り面付近に高い過剰間隙水圧が発生し、高速長距離地滑りになりやすいことがわかった。

#### (火山灰や溶岩噴出の予測)

大規模噴火時の降灰予測に気象場の変化が与える影響を調べるため、1707年富士山宝永噴火及び1914年桜島大正噴火を想定した降灰シミュレーションを毎日行い、その日の気象場に基づいた計算結果を蓄積している。桜島大正噴火を対象とした計算では、気象条件によっては東北地方や北海道まで降灰が到達する起きることが予測された。

### え. 今後の展望

地震・火山噴火の災害誘因である、地震動、地殻変動、津波、火山灰降下、地滑り現象の事前予測のアウトプットは、観測体制の強化、事例解析の深化や増大、数値シミュレーション技術の高精度化により、非常に高度化している。また、工学研究が増強されたことにより、事前予測のアウトプットがどのような災害につながるのかについても具体像が示されるようになりつつある。しかし、地震も火山噴火も複雑な地殻構造の中で起こる非線形現象であり、発生時や発生過程の詳細など、予測精度を上げるのが難しい要素も多い。そのため、現状の事前予測には大きな不確定要素が内在し、それが事前予測結果を利用しづらい原因にもなっている。不確定要素の中でも、災害誘因の予測結果への影響が大きく、かつ、現状に鑑みて次のステップとして妥当な要素をターゲットに据え、予測結果の幅を狭める努力を積み上げていく必要がある。例えば、地震動の事前予測では、地下構造のより詳細なモデル化や、強震動を特に強く発生する強震動生成域の形成要因などがターゲットになる可能性がある。一方で、このような予測の現状を踏まえ、いつ、どこへ、どのような情報を発信すべきか、災害への適確な備えに役立つ予測情報の形とその社会実装への具体的なロードマップを考えていく必要がある。

### (4) 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

地震発生後の地震波・津波などの観測データや、それらから速やかに推定される震源特性などを用いて、強震動と津波の即時予測手法の高度化を行う。また、火山噴火の特性の即時推定や、それらによる様々な災害の予知につながる方法を検討するとともに、火山灰の監視技術の向上と、数値シミュレーションを用いた予測手法の高度化を図る。

#### い. 実施状況

##### (震源特性の即時推定と地震動の即時予測)

大学は、数日以内の時定数を持つ地殻変動場を精密に捉えるため、GNSS解析の高精度化に関する研究開発を進めた。キネマティックGNSS解析(kGNSS)における対流圏遅延と座標推定値の分

離能力の向上を試みるとともに、精密可動台の開発を開始し、リアルタイムキネマティック (RTK) GNSS の精度評価を行った。

大学は、輻射伝達理論に基づく解析手法を用いて、九州地方の地殻における地震波の散乱減衰と内部減衰とを定量的に分離推定し、その結果を使用して、モンテカルロシミュレーションによる地震動エネルギー伝播の予測を行った。

国土地理院は、GEONET リアルタイム解析から得られる地殻変動データを用いて、矩形断層モデルまたはプレート境界面上の小断層モデル(滑り分布モデル)等を即時推定する技術の開発を行った。

気象庁は、地盤の増幅特性のリアルタイム補正、データ同化手法による震度分布の実況把握及びその実況分布から波動伝播の物理に則って震度を予測する手法を組み合わせる実波形データに適用した。また、実波形データを用いた地盤の増幅特性を全国の観測点で推定した。

気象庁は、国土地理院と共同して、GNSS データを用いた W-phase 解析によりモーメントテンソルを推定し、さらにそのモーメントテンソル解と地殻変動に整合的な断層面を推定する手法を開発した。また、データ同化手法を取り入れた、地震動の時間履歴推定法、粒子フィルターや波形相関を用いた震源決定法、3次元速度構造を用いて高速に震源計算を行う手法等を開発した。

#### (津波の即時予測)

大学は、リアルタイム浸水予測手法の高度化のために、GNSS 観測データのリアルタイム解析による震源モデルの推定手法の利用や、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を遠洋津波波観測データに適用することで、予測精度の向上を図った。また、防災科学技術研究所で整備されつつある S-net の津波観測データを入力として津波数値計算を実施する新しい数値計算手法の開発に取り組んだ。

気象庁は、房総沖の気象庁ケーブル式海底水圧計の近くに、高精度自己浮上式海底水圧計を設置して観測を実施し、期間中に発生した福島県沖の地震 (M7.0) に伴う地震動や津波による圧力変化を観測し、得られた海底水圧データの周波数解析を行った。また、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、2011 年東北地方太平洋沖地震の津波観測データを用い、その手法の改良を検討した。さらに、同システムの予測結果を円滑に活用できるように、統計的手法等に基づいて予測精度をリアルタイムに評価する指標の開発を進めた。津波エネルギーの伝達過程を基に組み立てられた、津波の成長過程を含めた全期間の振幅時間変化を説明するための数値モデルを用いて、各パラメータが津波の挙動にもたらす効果の検討を行った。

#### (火山噴火の特性の即時推定や火山灰の監視と予測の高度化)

大学は、桜島で噴火によって放出され、大気中を浮遊する火山灰の粒子密度の測定を実施した。また、火山灰の粒子密度の連続測定を桜島の地上において実施した。噴煙粒子の形状と落下速度の関係を明らかにすることを目的として、桜島で採取した噴煙粒子のサンプルを、防災科学技術研究所の大型降雨実験施設内で自由落下させ、落下速度、形状、落下姿勢などの噴煙パラメータを求めた。火山灰の量的把握を目的として、桜島噴火のレーダー画像を解析し、反射されるレーダー電波の強さの時空間分布と降灰量を比較した。

大学は、噴火発生時にその情報をすばやく収集して解析する手法を開発するため、桜島において噴火直後の降灰を収集し、その画像データを取得して実験室におけるデータと比較し、火山灰の単位面積当たりの質量や粒度と画像から得られる情報の関係を調べた。

気象庁は、御嶽山噴火時の降灰域について、気象レーダーで抽出された噴煙高度の時間推移を活用し、解像度の高い数値予報モデルを用いた領域移流拡散モデル (RATM) による予測を行った。大規模噴火の過去事例として、1914 年桜島大正噴火について、当時の噴煙高度や降灰分布を整理し、RATM による火山灰拡散・降灰予測実験を行った。大規模噴火時に成層圏に達した火山灰の輸送を予測する際に問題となる、高層で空気が希薄になることによる落下速度の変化について、RATM を用いた検討を行った。3次元噴煙モデルによる計算結果をもとに、2011 年霧島山 (新燃岳) 噴火に特化した新しい噴煙柱モデルを構築した。

## う. 成果

### (震源特性の即時推定と地震動の即時予測)

GNSS 解析の高精度化のために、全球数値気象モデルから期待される 6 時間ごとの天頂湿潤大気遅延量の予測値を用いた場合と、用いない場合のそれぞれについて kGNSS を多数の観測点におい

コメント [三浦20]: どのような成果につながったかについて「う. 成果」に記載が見当たらない。

て実施し、推定される湿潤大気遅延量に明瞭なオフセットが生じ得ることがわかった。これによって、全球数値気象モデルを用いることにより、kGNSS における座標値と対流圏遅延量パラメータの分離能力を向上させ得ることがわかった。また、精密可動台を用いて kGNSS の精度評価を行った結果、10mm 以下の精度で与えた動きを再現できることがわかった。

輻射伝達理論に基づく地震波の分析により、九州地方の地殻では、散乱減衰及び内部減衰が強い水平不均質を示すこと、特に火山体周辺で散乱減衰及び内部減衰が大きいことが明らかになった。また、この分析によって得られたる散乱減衰と内部減衰の不均質な構造を使用したモンテカルロシミュレーションによる地震動エネルギー伝播の予測は、均質な構造を仮定した時よりも観測データの再現性が良いことが確かめられた。

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推定する手法を、2003 年十勝沖地震時及び 2011 年東北地方太平洋沖地震時に得られた観測データと、南海トラフ地震のシミュレーションデータに対して適用した結果、地震発生から 3 分以内に高精度で断層モデルの推定が可能であることを確認した。

震源決定を行わず、ないで地震動の観測結果と波動伝播理論に基づいて震度を予測する手法を、2011 年東北地方太平洋沖地震(M9.0)、2004 年新潟県中越地震(M6.8)、2014 年長野県北部の地震(M6.7)で観測された実波形データに適用した結果、10~秒後や 20 秒後程度のほど近い未来の予測ならば、ほぼ実時間で誤差 1 以内で震度予測が可能であることを確認した。

粒子フィルターに基づく震源決定手法、パターンマッチを用いたイベント検出法の評価試験を行った結果、内陸地震については、一元化震源と比較して検知能力や震源決定精度が十分であることが確認され、さらに海域の地震についても多くの地震の震源決定が可能であることが確認された。

#### (津波の即時予測)

防災科学技術研究所の S-net の津波観測データを直接の入力として津波数値計算を実施する新手法の開発を行い、実際の S-net 程度の観測点間隔に適用して長周期の大きな津波の再現性などを確認し、S-net の観測点配置でも十分、即時津波予測が可能であることを示した。

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、海溝付近の急峻な海底地形のによって水平変位によってから生じる見かけの上下変位を考慮できるように逆解析手法の改良を行い、実データへの適用を通してその有効性を確認した。津波エネルギーの伝達過程を基に組み立てられた数値モデルを用いて検討した結果、減衰定数などのパラメータによって津波の第一波到着から最大波出現までの時間に違いを生じることを確認した。

#### (火山噴火の特性の即時推定や火山灰の監視と予測の高度化)

大型実験施設内で噴煙粒子を自由落下させる実験で、噴煙粒子の落下速度は、粒径と形状、落下姿勢に依存することが確かめられた。これらの結果は噴煙のレーダー観測結果の分析に役立つと考えられる。

噴煙高度が 5000m に達した 2013 年 8 月 18 日の桜島噴火のレーダー画像を解析し、反射される電波の強さの時間積算と地上時間降灰量との関係を調べた結果、まだ、一例ではあるが、反射される電波強度から降灰量を求めることが可能であることが示された。

ライダー装置により、微弱な火山ガス放出時でも南岳火口上において火山ガスが冷却されて形成された水滴及び硫酸ミストを検出することができた。散乱強度は火口から離れるにつれて低下するという空間分布から、約 2km 付近まで微小粒子を追跡可能であることがわかった。少数ではあるが、火山灰も検出することもできた。

桜島において、噴火直後の降灰の採取と、その画像データの分析及び実験室での再現実験などにより、粒度がそろった状態の火山灰であれば、画像解析から火山灰の単位面積当たりの重量を推測できる可能性が示唆された。

火山灰の落下速度の変化について RATM を用いた検討を行った結果、ミクロンオーダーの火山灰の落下過程や広域に長期間浮遊する火山灰の輸送予測には、高層で空気濃度が影響することを確認した。

3 次元噴煙モデルによる計算結果をもとに、2011 年霧島山(新燃岳)噴火に特化した新しい噴煙柱モデルを構築し、数値予報モデルを組み込んだ火山灰輸送実験を行ったところ、従来に比べ火山灰雲分布の再現性が向上することを確認した。

コメント [三浦21]: Matched filter 法のことであれば、「波形相関」としてはどうか

## え. 今後の展望

地震・火山噴火の災害誘因の即時予測においては、地震動、津波、火山灰の予測のいずれの分野においても、現象の発生源、現象の伝播あるいは拡散の過程、そして、それぞれの場での災害誘因としての発現のそれぞれにおいて観測あるいは予測の技術を高度化させることが課題となる。従来は、これらの一連の流れで予測を行うことが基本であり、各段階での技術を高度化することが、災害誘因の予測の高度化に不可欠であった。しかし、近年の観測技術や観測網の高度化により、必ずしも現象の発生源を精緻に把握しなくても、現象の伝播あるいは拡散の過程での現象の把握と予測の技術を進化させることで、予測精度を向上できるようになった。

例えば、現在、実際に運用されている緊急地震速報は、地震計データを用いて即時に震源を決定し、その震源からの地震波の伝播を距離減衰式で予測し、各最終的なそれぞれの地点の震度を地盤増幅度を用いて算出している。しかし、近年の研究では、2011年東北地方太平洋沖地震での課題を踏まえ、震源位置の推定を必ずしも必要とせず、伝播途中の地震動の観測結果に基づき実況把握を行い、それに基づいて波動伝播の法則に従ってその後の地震動を予測するという手法の研究が進められている。このような手法の利点は、震源域の広い巨大地震でも精度の良い予測ができることであるが、一方で、即時予測の観点では、現象の途中経過から予測することから、時間的な猶予がとりにくい不利な点もある。

このように、今後の地震・火山噴火の災害誘因の即時予測の高度化のためには、それぞれの分野において、従来の発生源からの予測と、近年開発された実況把握からの予測を組み合わせ、それぞれの利点を生かしていくことが重要となる。

## (5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

### あ. 目的

平常時における「災害啓発情報（特に、地震・火山噴火に関わる科学的情報）」、発災直前の「災害予測情報」、発災直後の「災害情報（特に、地震・火山噴火がもたらす二次自然災害の可能性）」、復旧・復興期の「災害関連情報（特に、当該災害を受けて今後の災害発生の見通し）」など時には不確実さを伴う情報を災害軽減に有効に役立てるための方法を検討し、災害素因の影響も考慮したリスク・コミュニケーションの方法論を研究する。

### い. 実施状況

#### (地震の長期評価・強震動ハザードマップなどの災害情報によるリスク・コミュニケーション手法)

大学は、長期予測情報が災害軽減に有効に役立つためのリスク・コミュニケーションの方法論の研究を行った。具体的には、調査会社にモニター登録する名古屋市内在住の一般市民を対象に「住民の地震リスク認知や専門家に対する信頼がどのように変化するか」という問題を実証的に検討するため社会調査を実施した。

#### (火山の災害軽減のためのリスク・コミュニケーション手法)

大学は、北海道内の火山をモデルケースとして、火山災害を軽減するためのリスク・コミュニケーション手法を提案するために、関係機関の各種観測情報などの火山防災情報を収集・統合させてリアルタイムで表示する準リアルタイム火山情報表示システムを開発した。開発したシステムは、北海道内の地方公共団体をモデルケースとして実装し、ユーザー側の実用に即したシステムの評価・改良を図った。

大学は、桜島をモデルケースとして、避難計画の立案・実施などの地域防災対策などに反映させることを目的として、火山現象理解のための研究や噴火規模の即時評価の研究成果を集約しながら、地方自治体の防災担当者、一般住民、報道機関など様々な層を対象にした情報発信実践を行った。

大学は、2014年御嶽山噴火をモデルケースにして、2014年9月27日の御嶽山噴火の際の実際の情報伝達事例などを分析して、地域住民、観光客等のといた情報の受け手や、自治体職員等の情報伝達の担い手にとって有用な災害情報の内容や伝達方法のあり方について検討・提案を行った。

#### (地理空間情報活用による地域開発と社会的脆弱性との関係)

大学は、地理空間情報（G空間情報）、GIS（地理情報システム）、衛星測位（GPS、準天頂測位システムなど）に基づく情報システム構築によって、地域開発と自然災害リスクとの関係を分析し、その結果から災害に対する社会的脆弱性の関係を解明した。分析においては地方レベル、市町村

レベル、町内会レベルというように空間スケールごとに分析を行い、各スケールにおける開発と災害リスクの関係や、リスク軽減のための課題などを明らかにした。また、分析結果を情報システムに反映させ、災害を軽減するための災害啓発情報・災害予測情報・災害情報のあり方について、情報システムにおける高精度避難ナビゲーションシステムを実装しながら「災害に対する社会的脆弱性」克服のための方策を検討した。

大学は、災害リスクを軽減させるために、国、地方自治体、住民組織、住民個人の間で、どのような情報流通を行う必要があるか明らかにした。また、地域防災のための公開講座の開催、自治体防災担当者対象の講義の実施、自治体との相互協力協定に基づく防災教育・地域貢献などを実施しながら研究成果の効果的な普及手法を検討した。

#### (地震・津波・火山防災情報の改善に係る知見・成果の共有)

気象庁は、地震や火山噴火の災害軽減に資するため、最新の研究成果、技術の進展や社会要請等を踏まえて実施する津波警報、緊急地震速報、長周期地震動に関する情報、噴火警報、降灰予報などの防災情報の改善のための検討で得られた知見や成果を地方自治体・関係防災機関と共有した。

## う. 成果

### (地震の長期評価・強震動ハザードマップなどの災害情報によるリスク・コミュニケーション手法)

長期予測情報に関するリスク・コミュニケーションの方法論を提案するための社会調査では、地震リスク認知、地震研究の専門家に対する信頼、地震への備え、地震対応政策への支持などについて行われ、長期評価の発信手法の工夫が重要であることを明らかにした。

### (火山の災害軽減のためのリスク・コミュニケーション手法)

北海道内の火山をモデルケースとして、~~火山の災害軽減のためのリスク・コミュニケーション手法を提案するために、関係機関の各種観測情報などの火山防災情報の収集・統合させてリアルタイムで表示する準リアルタイム火山情報表示システムを開発した。開発したシステムは北海道内の地方公共団体に実装して、ユーザー側の実用に即したシステムの評価・改良を図った。~~

また、1914年桜島大正噴火に関する証言から大正噴火に至る前駆過程を考察し、それに基づいたシナリオに沿って鹿児島県、鹿児島市など自治体の机上防災訓練が行われた。

御嶽山噴火をモデルケースにして、火山災害情報のあり方についての地域住民向けアンケートを御嶽山の岐阜県側に位置する下呂市小坂地区(旧小坂町)の全世帯を対象に行った。質問内容は、火山噴火に対するリスク認識、災害情報の伝達、火山防災対策の3点であり、この結果を分析し、噴火の未経験者のリスク認識が低いこと、また気象庁や役所からの情報提供を求める一方で、住民を対象とした防災学習や避難訓練の実施についても意識が低いことを明らかにした。

### (地理空間情報活用による地域開発と社会的脆弱性との関係)

情報システムを構築するに当たり、タブレット型PCに基盤地図情報、国土数値情報、国勢調査(小地域)データなどをベースとし、自治体が整備した津波浸水想定、避難場所、都市計画基礎調査などを統合した現地調査用の携帯型地理情報システムを構築し、フィールドで運用テストを行った。また、その収集データ(特に避難行動の移動履歴データなど)をGISで分析する方法を開発した。このシステムを活用することにより避難訓練(擬似的な訓練も含める)の行動情報を数値化して保存することが可能となった。

さらに、衛星測位を利用した津波災害時避難の分析システムの構築を行い、地域情報(土地利用及び人口等)と被害想定に関する時系列的分析、避難施設と避難圏域に関するデータの収集と分析、住民の避難行動に関するデータの収集と分析などを行い、地域開発と社会脆弱性の関係について考察した。特に北海道危機対策課が整備を続けている津波浸水想定データを用いて、浸水域人口の推定を行った。なかでも、津波浸水想定域人口の多い市町村に関しては、土地利用及び人口などのマイクロジオデータをGISに取り込んで空間データベースの構築を進め、地域性を反映した市町村別の危険度を評価した。

### (地震・津波・火山防災情報の改善に係る知見・成果の共有)

気象庁は、地震・津波に関する防災情報の高度化を図るため各種検討会等を開催し、報道発表等により広く情報共有を図った。具体的には、「緊急地震速報評価・改善検討会」、「長周期地震動に関する情報検討会」、「津波予測技術に関する勉強会」を開催した。火山については、平成26年度に「火山情報の提供に関する検討会」を開催し、最終報告を受けて、1)臨時の「火山の状況等

に関する解説資料」の提供開始、2)噴火警戒レベル1及び噴火予報のキーワードを「平常」から「活火山であることに留意」に変更、3)「噴火速報」の運用開始を行った。

#### え. 今後の展望

災害を軽減するためには、一般市民や行政等を中心とする災害対応従事者などの災害軽減・防災・減災リテラシー（災害に立ち向かうために必要な能力）を向上させることが必要である。そのためには、過去の災害事例や研究成果から導き出されたそれらに関する知見をもとに、対象者にわかりやすい災害啓発情報、災害予測情報、災害情報、災害関連情報という情報の内容そのものの検討と、対象者に理解してもらうためのリスク・コミュニケーションの手段という情報の送り手と受け手とのコミュニケーション手法の両方について、質問紙調査・フィールドワーク（参与観察や社会実装・社会実験など）といった手法を用いながら解明していくことが必要である。

短期予測情報や長期予測情報が災害軽減に有効に役立つためのリスク・コミュニケーションの方法論については、今後も調査の検討を続けながら、災害場面においては、平常時における災害啓発情報、発災直前の災害予測情報、発災直後の災害情報、復旧・復興期の災害関連情報など、時間経過にともない異なった情報が必要となるが、これらの情報の内容自体の研究、情報の伝達手段についての研究などを行っていく必要がある。今期に開発を進めた準リアルタイム火山情報表示システムなどのように、迅速に地震・火山活動の情報や災害関係の情報、避難行動に関する情報などを伝達するシステムの構築を進めることが重要である。同時とともに、それらを受け手がどのように利用し実際の行動に結びつけるかを分析し、避難施設などの地域的特性も考慮しつつ、地域開発と災害に対する社会脆弱性との関係について災害軽減の観点から提案していく必要がある。

本研究計画によって研究が進められているリスク・コミュニケーションの方法論を深化させていくこと、また、防災リテラシーを醸成できるような教育プログラム・教材の開発・効果測定といった研究を進めることにより、災害事象・災害研究全体の理解を一般の人々に浸透させることが重要である。

### 4. 研究を推進するための体制の整備

#### 4. 1. 実施状況及び成果

##### (1) 推進体制の整備

本計画では、地震・火山防災行政、防災研究全体の中でどのように貢献すべきかを十分に踏まえた上で実施計画を立案している。特に、地震本部が策定する「新たな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―」（以下、「新総合基本施策」）との整合性にも留意している。2016年熊本地震の調査研究に関しては、地震本部が計画する活断層の重点的調査に、本計画と連携して進めている調査研究（科学研究費補助金（特別研究促進費）「2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」）の成果を活用する方針が、地震本部・政策委員会調査観測計画部会で議論された。

地震火山部会は、学術的な研究の動向にも配慮しつつ、各年次の計画立案、進捗の把握、取りまとめを行い、各年度の観測研究の成果を年次報告「成果の概要」として取りまとめ報告書を公表している。また、計画進捗、成果について地震本部と情報交換し、「新総合基本施策」との整合性を確認している。そのために、毎年、地震本部・政策委員会総合部会において、現状及び次年度以降における基本的考え方等についてのヒアリングを受け、新総合基本施策との整合性が評価され、基礎研究としての本計画が、新総合基本施策の推進に貢献していることが確認されている。

東京大学地震研究所に設置されている地震・火山噴火予知研究協議会（以下、「予知協議会」）では、研究分野ごとの8つの計画推進部会において研究課題の進捗状況の把握や成果の取りまとめの作業を行っており、予知協議会企画部（以下、「企画部」）において全体成果の取りまとめ作業を行っている。また、東北地方太平洋沖地震、南海トラフ巨大地震、首都直下地震、桜島火山の各課題については、現象の解明・予測から災害誘因予測、研究体制整備までを含む現行計画の実施4項目（Ⅱ. 2.）を横断して総合的に取り組むため、予知協議会ではそれぞれに対応する総合研究グループを計画推進部会の枠を越える形で設置し、緊密な情報交換により総合的な研究を推進している。さらに、大学間や、大学と行政機関または研究開発法人との間で企画部流動教員等の人事交流を行うことにより、関係機関の連携をより強固なものとしている。

地震火山部会において本計画の実施機関について検討した結果、地震、火山分野だけでなく、

コメント [三浦22]: 文が長すぎ、構造が不明確。「…検討と、…手法の両方について、…解明していく…」何が言いたいかわからない

コメント [三浦23]: 一文が長すぎるので、整理が必要

防災分野や人文・社会科学分野を含めた研究体制に基づき、総合的かつ学際的に研究を推進する必要性を認識した。そのために、計画開始の平成26年度から新たに**東京大学史料編纂所**、新潟大学災害・復興科学研究所、**国立文化財機構奈良文化財研究所**が計画に参加することになった。さらに、観測研究体制を強化し研究を加速するために、平成27年度には実施機関の公募を行い、東京大学大気海洋研究所、北海道立総合研究機構環境・地質研究本部地質研究所、山梨県富士山科学研究所が本計画に参画した。

火山災害としては戦後最大の犠牲者を出した平成26年9月の御嶽山噴火を受けて、地震火山部会では火山観測研究体制について検討を行い、「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」を取りまとめた。また、火山観測研究に関連する課題の追加、再編を行った。

現行計画は、地震学、火山学だけではなく、防災に係る工学、人文・社会科学も加わる学際的な計画であり、また、大学、行政機関、研究開発法人等の多様な機関が参加する計画でもある。多くの研究分野、機関が緊密に連携して研究を推進するためには、研究推進体制の抜本的な見直しが必要であるが、そのために予知協議会の下に「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画推進体制検討ワーキンググループ」(以下、「**ワーキンググループ**」)を設置して検討を開始した。これまでの予知協議会は、観測研究計画に参加する大学のみで構成され、行政機関、研究開発法人等はオブザーバー参加であったが、ワーキンググループの検討結果に基づき、平成28年度からは観測研究計画に参加する全機関が予知協議会に正式参加することになった。また、研究課題の連携による観測研究のより一層の推進を図るため、企画部内に戦略室を新たに設置した。さらに、この戦略室と計画推進部会には、行政機関、研究開発法人等が正式に委員として参加することになり、異なる機関の研究課題間の連携強化が図られることになった。ワーキンググループでは、研究分野、機関間の連携のより一層の強化に向けて検討を続けている。

地震・火山災害軽減のための研究を、地震・火山の理学研究者と防災に係る工学、人文・社会科学研究者が連携して推進するために、「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**は、平成26年に拠点間連携に関する協定を結び、拠点間連携共同研究を開始した。両研究所が設置した拠点間連携共同研究委員会が中心となり、課題募集型と参加者募集型の公募研究を実施している。

**国土地理院が事務局を担当する**地震予知連絡会は、年4回開催される会議において、地震活動・地殻変動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担っており、関係各機関での情報の共有を行った。また、2016年熊本地震など注目すべき地震や、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。

**気象庁が事務局を担当する**火山噴火予知連絡会は、年3回開催の定例会において、全国の火山活動の総合的な評価を実施している。また、平成26年8月3日の口永良部島の噴火、平成26年9月27日の御嶽山の噴火、平成27年5月29日の口永良部島の噴火、平成27年8月15日の桜島の急激な地殻変動・地震多発について、拡大幹事を臨時に開催し、詳細な火山活動評価を行った。その内容は、拡大幹事会見解として取りまとめ、気象庁から「火山の状況に関する解説情報」として発表するとともに、気象庁のホームページでも公表した。

火山噴火予知連絡会には、2008年より「火山観測体制等に関する検討会」が設置され、調査研究の推進とその成果に基づく監視体制のあり方、観測データの流通及び共有体制のあり方、関係各機関の役割分担と火山観測網のあり方を検討しており、2016年3月までに計15回の会合を開催している。平成26年9月27日の御嶽山の噴火災害の際には、この検討会に加えて、「火山情報の提供に関する検討会」を設置し、両検討会において活火山の観測体制の強化及び火山活動に関する情報提供のあり方を検討し、平成26年11月に緊急提言を、平成27年3月に最終報告をとして取りまとめた。

さらに、「御嶽山の噴火災害を踏まえた活火山の観測体制の強化に関する緊急提言」を受け、平成27年3月には既に設置されていた「火山活動評価検討会」において、監視・観測体制の充実等が必要な火山として八甲田山、十和田及び弥陀ヶ原の3火山について追加選定を行った。

## (2) 研究基盤の開発・整備

### ア. 観測基盤の整備

防災科学技術研究所は、基盤的地震観測網の安定的運用を行い、データを流通、保管、公開し

た。基盤的火山観測網に関しては、「今後の大学等における火山観測研究の当面の進め方について」（平成 20 年 12 月、科学技術・学術審議会測地学分科会火山部会）に基づく整備を完了し、データを流通、公開した。また、日本海溝海底地震津波観測網(S-net)の構築を進めている。海洋研究開発機構は、平成 27 年度までに地震・津波観測監視システム(DONET)の基本的な整備を完了し、防災科学技術研究所に移管した。DONET が提供する地震観測データは、緊急地震速報でも利用されている。

大学は、陸域、海域及び火山周辺の地震、地殻変動等の観測点を維持、管理するとともに、2016 年熊本地震等の大地震や火山噴火等が発生した際には迅速に臨時観測点の設置を行った。火山観測点については、「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」（地震火山部会）を受けて観測体制を強化した。また、リアルタイム地震観測データの全国的な流通のため、全国の大学等を結ぶネットワークを構築・管理運用した。東京大学地震研究所は、これまでに整備された衛星通信システム及び地上テレメータ装置、データロガー、地震計等の観測機器合計約千台を、共同利用の手続きにしたがって全国の大学の研究者に貸し出している。東京大学地震研究所の予知協議会及び京都大学防災研究所の自然災害研究協議会は、地震・火山災害発生時に、緊急調査や臨時観測の提案、調査・観測グループの組織化や経費補助を行った。

気象庁は、津波警報や地震情報等を適切に発表するため、全国に展開している地震計及び震度計、東海地域を中心に展開しているひずみ計などの観測を継続するとともに、文部科学省と協力して、大学や防災科学技術研究所など関係機関の地震観測データを合わせて一元的に処理し、その結果を大学等の関係機関に提供している。

国土地理院は、GNSS 連続観測(GEONET)を維持し観測を継続した。御前崎及び切山においてひずみ計等による地殻変動連続観測を継続し、地殻変動の監視を行っている。全国の一等水準路線の改測のほか、南海トラフ地震、首都直下地震等が想定される地域で水準測量を実施した。日本列島域で絶対重力観測及び地磁気の連続観測を実施するとともに、地殻変動に伴う局所的な重力の変化を詳しく捉えるため重力測量を実施した。南海トラフ巨大地震の想定震源域においては、繰り返し絶対重力観測を実施し、富士山中腹においては全磁力の連続観測を行っている。陸域観測技術衛星 2 号(だいち 2 号)等を利用し、SAR 干渉解析により全国の地殻変動を高精度に捉えた。地震に伴う災害発生時は、緊急的に SAR 干渉解析を実施し、その結果を迅速に提供した。

気象庁、国土交通省港湾局、国土地理院及び海上保安庁は、潮位連続観測を継続し、地殻変動に伴う地盤の上下動を連続的に検知するとともに、津波の発生状況を把握した。集約された全国の潮位データは国土交通省防災情報提供センターのホームページで公開されている。

国土地理院は、火山周辺域において GNSS 火山変動観測装置(REGMOS)及び自動測距測角装置(APS)による連続観測、GNSS 測量、水準測量、重力測量等による観測を実施した。全国の活動的な火山については、航空機 SAR 観測を実施し火口付近の地形情報を収集保存し、活発な噴火活動によって災害が発生した際には、山体地形の変化の推定に利用した。さらに、国際 VLBI 事業に参加して国際共同観測を定常的に実施することで、地殻変動やプレート運動監視の基準となる ITRF 座標系の構築等に貢献した。

気象庁は、全国の活火山について、全国 4 か所の火山監視・情報センター(平成 28 年 4 月 1 日に改組し、以降は火山監視・警報センター)において、地震計、空振計、GNSS 等により連続的な監視観測を行った。火山観測施設の更新計画に基づき、各年度 5～6 火山の観測施設を更新した。特に、火山活動の活発化や噴火があった霧島山、八甲田山、蔵王山、口永良部島、御嶽山、箱根山については、臨時に観測機器を設置するなどして観測を強化した。また、火山噴火予知連絡会の「火山観測体制等に関する検討会」における検討結果を踏まえ、防災科学技術研究所と地震計、空振計等の観測データの交換を実施した。気象庁、防災科学技術研究所、大学は、火山監視に必要なデータを交換するための協定を締結しデータの流通を進めた。気象庁は、柿岡など 5 観測点における地磁気 4 成分連続観測データを、月ごとに地磁気観測所データベースに登録、公開するとともに、4 地点のデータを国際的なデータセンターに提供した。さらに、活動的な火山を対象とする全磁力精密観測データを継続してデータベースに登録した。また、平成 26 年度には、48 火山において、水蒸気噴火の先行現象を検知するため火口付近の観測施設の増強を行った。

海上保安庁は、2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域や日本海溝及び南海トラフなどで、GPS 一音響測距結合方式による海底地殻変動観測を実施するとともに、プレート境界域等において海底変動地形等の調査を実施した。また、沿岸における GNSS 連続観測点データを利用した地殻変動の検出を実施した。さらに、海域火山において航空機や無人測量船等などによる機動的観測や人

工衛星によるリモートセンシング技術を活用した観測を実施した。また、船舶の安全航行確保のための航行警報等による情報提供を必要に応じて行っている。

産業技術総合研究所は、南海トラフの巨大地震発生予測のための地下水等総合観測施設 14 地点の運用を行うとともに、平成 24 年度に新たに 2 カ所に観測施設を構築した。観測データは気象庁にリアルタイムで提供するとともに、地震に関する地下水観測データベースで公開している。

北海道立総合研究機構地質研究所は、道内 5 火山の火山観測を実施し、十勝岳においては多項目の現地調査を実施した。山梨県富士山科学研究所は、富士山東麓において、地震観測 1 地点を維持し、防災科学技術研究所とデータ共有を行っている。また、富士山北麓において、平成 27 年度に新設した 1 地点を含め合計 4 地点で地下水観測を実施している。

#### イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

防災科学技術研究所による高感度地震観測網、広帯域地震観測網、強震地震観測網等による統合地震波形データベース、気象庁による全国の地震カタログ、国土地理院による GNSS 観測データや潮位観測データのデータベース等々のデータベースが整備・運用され、基礎データの収集と蓄積が進んでいる。これらのデータは、2011 年東北地方太平洋沖地震をはじめとする地殻活動の調査研究に多大な貢献をした。

気象庁は、過去に遡って震源決定の再解析を行い、精度を大幅に改善して地震カタログに反映させた。また、自動処理による地震検出を検測処理の基本とした作業手順により新たな震源決定手法を確立した。これにより、品質を確保しつつ、より充実した地震カタログが得られることになり、2011 年東北地方太平洋沖地震以降著しく増加した微小地震を地震カタログに掲載できるようになった。また、発震機構解析及び大地震時の震源過程解析を実施した。

国土地理院は、水準測量、GNSS 連続観測 (GEONET)、潮位観測等の地殻活動総合解析システムのデータベースを運用している。また、監視・観測体制の充実が必要とされた火山を対象に、火山基本図や火山土地条件図の整備を行っている。さらに、全国の都市圏活断層図を整備し公表している。

大学は、ひずみ計・傾斜計データの流通と一元化を進め、全国データ流通システムを構築した。2011 年霧島山 (新燃岳) 噴火や 2011 年東北地方太平洋沖地震等に際して、このシステムの有用性が確認された。さらに、このシステムを GNSS データ等に拡張し、地殻変動連続観測等のデータの全国流通・公開を実施している。また、過去の煤書き地震記録の電子化も行った。データベースの統合化を行う前段階として、関連機関が構築しているデータベースの所在情報をまとめたポータルサイトを構築した。さらに、計画参加者が研究成果を共有できる成果共有システムの開発に取りかかっている。

産業技術総合研究所は、地殻応力場、活断層、活火山、火山衛星画像などの各種データベースを統合して、地震や火山活動に関する地質情報データベースを作成するとともに、蔵王山、九重山、富士山の火山地質図を作成して刊行した。また、アジア諸国の研究機関と協力して、東・東南アジア地域における過去に災害を引き起こした大規模な地震、津波、火山噴火に関する情報を 1 枚の地質図上にまとめた「東アジア地域地震火山災害情報図」を作成した。

気象庁は、地磁気基準観測及び全磁力精密観測の成果をデータベース化し、国際的なデータセンターに提供している。海上保安庁は、海域火山基礎情報図の整備を行い、海域火山データベースを更新している。

#### ウ. 観測・解析技術の開発 (海底観測技術)

海上保安庁及び大学は、GPS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測のノイズ軽減や解析の高精度化等の技術開発を進めた。その結果、海域によらず、年 1 回、3 年間程度の観測によって、変位速度ベクトルを約 1 cm/年<sup>±</sup>の精度で推定できるようになった。大学は、長基線での海底間音響測距観測の技術開発を行い、水深 6,000m 以深において 10km の測線長で安定した観測ができることを確認した。

大学は、自己埋設型広帯域海底地震計や高精度水圧計を併設した長期観測可能な自己浮上型海底地震計の開発を進めた。これにより、水深 6,000m 以深の超深海域での地震・地殻変動観測が可能になり、巨大地震の震源域周辺<sup>±</sup>を観測可能な範囲に納めることができるようになってきた。海底ケーブル式の各種観測機器の研究開発が進められ、大学は次世代型のケーブル地震観測網海底地震計を開発した。海洋研究開発機構は、超大深度掘削や長期孔内観測システムの構築に向けた機器の開発、性能向上による先端的掘削技術の開発や、コア試料の高精度高分解能な同位

体分析法の開発などを実施している。

#### (宇宙測地技術等によるリモートセンシング)

衛星を利用した宇宙測地技術、航空機等を利用したリモートセンシング技術に関しては、GNSSや合成開口レーダー(SAR)の解析手法の開発が継続的に進展し、広域の地殻変動、震源断層や火山活動の迅速かつ正確な把握に役立てられるようになった。

国土地理院は、電子基準点による地殻変動監視において、観測データの大气擾乱の影響を評価する手法や誤差特性を分析する手法、観測点固有の誤差をモデル化してデータを補正するツールなどを開発し、観測データの精度を向上させた。また、GPS以外の測位衛星への対応を進め、GNSS連続観測網の地殻変動情報を高度化している。

大学は、リアルタイムGNSS時系列を用いた地震時変位の自動検知及び地震時変位量推定の高度化を進め、地震発生後60秒以内に地震発生を判定できるアルゴリズムを開発した。国土地理院は、リアルタイムGNSS解析システムにこのアルゴリズムを実装し運用している。

国土地理院は、SAR干渉解析による地殻変動観測技術を向上させるとともに、研究の基盤となる解析ツールを開発した。また、霧島山(新燃岳)や口永良部火山のモニタリングを実施した。永続散乱体干渉法(PS-InSAR)によって、年間約5mmから1cm程度の地盤変動が抽出できるようになり、長期間継続する地盤変動や噴火活動のない火山体の監視に有効であることが示された。さらに、GNSSデータを利用してSAR干渉画像内に含まれる電離圏の影響による誤差を低減する手法を開発した。情報通信研究機構は、航空機搭載SARの開発を進め、2014年御嶽山噴火に際し緊急観測を実施して、情報を即時に提供した。大学は宇宙航空研究開発機構と連携して、衛星赤外画像を用いた火山監視のシステムの開発を進めている。防災科学技術研究所は、SAR干渉解析ツール(RINC)による解析結果をSAR時系列解析ソフトウェアGIANTに組み込むツールを開発した。火山ガス・温度等の把握を目的とした航空機搭載型光学センサーの技術開発を進め、浅間山や箱根山で観測を実施した。

#### (地下状態のモニタリング技術)

大学は、宇宙線ミュオンを利用した火山透視技術を高度化した。カロリメータ方式の改良と解析アルゴリズムの高度化によりノイズ低減を進め、火山内部構造の可視化に必要な観測時間を大幅に短縮し、対象距離の透視限界を延伸できた。さらに、装置のモジュール化を進め、機動性を向上させ、有珠山、薩摩硫黄島、霧島山(新燃岳)各火山の内部構造の透視に成功した。また、地下構造の時間変化を検出する技術の高度化を進め、新たに精密制御信号システム(アクロス)を桜島に設置し、地下構造の時間変化と火山活動との関係を調べている。また、震源装置の標準化とモジュール化を進め、低コストで製作でき、かつ柔軟な運用が可能な第二世代震源装置を開発した。装置の回転軸を水平にすることで鉛直加振が可能となり、すべての成分の伝達関数の取得が可能となった。

#### (活動が活発な地域や従来観測が困難であった地域における観測技術)

大学は、火山噴火時に各種観測を火口近傍で安全に実施するために、アクセスが困難な場所での諸観測に有効な無人ヘリを用いた観測技術の開発を行い、霧島山(新燃岳)、樽前山において空中磁気測量、霧島山(新燃岳)と桜島において各種観測機器の設置・回収試験を行った。また、二酸化硫黄簡易型測定装置の改良と高度化及び解析ソフトの改良を行った。この装置は口永良部島の噴火の際に二酸化硫黄放出率モニタリングに使用され、マグマ噴火への移行を判断する観測量として火山活動の評価に活用された。

防災科学技術研究所及び気象庁は、気象レーダーを利用した噴煙災害予測の高度化を目指し、XバンドMPレーダーによる噴煙推定手法の高度化を進めた。

大学は、小型絶対重力計の開発を進め、従来の絶対重力計よりも小型・軽量で同等の観測精度を持つ装置を完成させた。また、大深度ボアホールの高温環境下における地震・地殻変動の観測のためのレーザー干渉技術を利用した観測装置を開発し、温度300℃まで動作可能であることを実証した。

### (3) 関連研究分野との連携の強化

低頻度大規模地震・火山噴火の解明等のため、史料や考古データに基づいて近代的観測以前の地震・火山噴火とその災害を研究する必要がある。このため、当該分野において全国の中心的な役割を担っている**東京大学史料編纂所**と**奈良文化財研究所**が、平成26年度から本計画の実施機関となった。**東京大学史料編纂所**では、所内に地震史料研究チームを設置し担当教員を配置した。

奈良文化財研究所では、歴史災害痕跡情報収集のために、考古・地質・歴史・年代・動物など、奈良文化財研究所内の幅広い分野の研究者による研究体制を立ち上げた。東京大学史料編纂所、奈良文化財研究所、東京大学地震研究所は、歴史学、考古学、地震学の研究者による検討会を年に数回開催するとともに、地震・火山噴火に関する文献史料と考古資料を統合検索するシステムの開発に着手した。東京大学地震研究所と東京大学史料編纂所は、東京大学の学内において連携研究推進を検討している。奈良文化財研究所は、災害痕跡の検討のため、考古学者と地質学者による共同研究体制を整えるとともに、GIS データベースについては国土地理院や産業技術総合研究所と連携を進めている。また、地質考古学的災害痕跡認定基準の検討や地質考古学的知識・技術の向上・普及のため、関連分野研究者との連携を図った。

地震・火山の理学研究者と防災に関する工学、人文・社会科学研究者が連携して地震・火山災害軽減のための研究を推進するために、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開始した。研究の推進の中心となっ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、予知協議会と京都大学防災研究所・自然災害研究協議会の推薦による委員等で構成され、地震学、火山学、工学等の多くの分野の研究者が実施計画の立案から成果の取りまとめまでを行っている。その結果、土木工学、地盤工学、建築工学、災害学の研究者が研究計画に参加するようになってきている。

気象庁は、大学等の火山研究者や火山に関する専門的な知見を習得した人材を火山活動評価に参画させる体制を平成 28 年度に整備した。

#### (4) 研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

大学は、物理学、化学などの基礎的な学術分野、観測や地質調査などのフィールド調査、観測機器の開発や数値計算技術などの幅広い内容の教育を行い、地震・火山現象の理解と、地震・火山噴火の発生予測及び災害誘因予測の方法の構築と検証を行うために、継続的な人材育成を行っている。研究開発法人等は、連携大学院制度等を利用して、より幅広い分野の経験をもった人材育成に協力している。

大学や研究開発法人等は、本計画の推進に関係する研究員を雇用することにより、大学院を修了した若手研究者のキャリアパスを確保している。大学院等で本計画に関連する研究に携わった学生の多くが、地震・火山防災に関係する行政機関や研究開発法人等に就職している。各大学は、総長裁量による教員の再配分などを利用し、人材の確保に努めている。

大学は、リーディング大学院における教育、自治体職員の受託研究員等としての受け入れ、自治体職員を対象とするセミナーの開催などにより、防災業務・防災対応に携わる人材の育成を進めた。また、大学の教員が気象庁職員の技術研修の講師を務め、防災業務に携わる人材の育成に協力したり、大学の技術職員と防災業務にあたる気象庁職員と交流の機会をつくったりしている。産業技術総合研究所は、地震・津波に関する自治体職員用研修プログラムや、気象庁職員向けの火山灰分析技術の講習等を行っている。

大学は、新たに収集した歴史地震に関する古文書の解説にあたっては、若手地震研究者や歴史地震に関心をもつ社会人も参加する研究会を組織し、膨大に存在する近世の災害関連史料を解説できる人材の育成に努めている。

「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」では、火山研究者が少ないことから、若手火山研究者の確保・育成の必要性が指摘され、これを受けて文部科学省では、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において、10 年計画の「火山研究人材育成コンソーシアム構築事業」を立ち上げた。大学や研究開発法人等は、このコンソーシアムに参加し、広く社会で活躍する火山研究人材の裾野を拡大、火山に関する広範な知識と高度な技能を有する火山研究者となる素養のある人材の育成を目指した仕組み作りをに取り組み始めた。

#### (5) 社会との共通理解の醸成と災害教育

各機関は、国民に地震・火山噴火の予測の現状や、地震・火山災害への理解を深めてもらえるように、地震学や火山学だけでなく、工学や人文・社会科学などの関連研究分野と協力して公開講座や公開講義を開催する試みを増やしている。また、報道関係者向けの懇談会等や教員免許更新講習などでも、地震・火山噴火の予測研究の現状などについて説明し、最新の研究の状況を理解してもらう取り組みを行っている。予知協議会では、本計画の目的や推進体制等を国民にわかりやすく伝えるために、パンフレットを新たに作成した。また、関係機関の各種観測情報などの

火山防災情報を収集・統合し、**リアルタイムで表示する**準リアルタイム火山情報表示システムを開発し、北海道の火山周辺自治体に試験的に設置して、地方自治体や住民に火山防災対策の重要性を伝えている。

気象庁は、地方自治体等と連携した防災訓練への協力、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、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んでいる。

**国土地理院が事務局を担当する**地震予知連絡会は、モニタリングによる地殻活動の理解の状況、関連する観測研究の現状を社会に伝えることを目的に、議事の公開、重点検討課題などの検討内容の Web 配信などを行っている。また、地震発生の予知予測に関する研究の現状を社会に伝えることを目的に、「重点的検討課題」において、前震活動に基づく地震発生の経験的予測など地震活動の予測手法の現状の報告、検討を行い、地震予知研究の現状を社会に伝えた。

**気象庁が事務局を担当する**火山噴火予知連絡会は、2014 年御嶽山噴火災害を受けて設置した「火山情報の提供に関する検討会」において、わかりやすい火山情報の提供等について検討を行い、噴火警報の発表基準の公表、噴火警戒レベル 1 におけるキーワード「平常」の表現の見直し、噴火速報の発表等の提言を、平成 27 年 3 月に取りまとめた。

#### (6) 国際共同研究・国際協力

大学は、低頻度で大規模な地震・火山噴火の研究に際してより多くの知見を得るため、南米の沈み込み帯の巨大地震や、インドネシアのシナブン山の噴火等の海外の事例研究を行った。各機関は、地球規模課題対応国際科学技術協力プログラムに参加するなど、海外、特にアジア諸国（インドネシア、中国、ネパール等）に地震・火山・津波災害の軽減技術を移転する取り組みを行った。また、各大学はアジア諸国を含む海外からの学生を受け入れ、地震・火山災害に関する最新の研究成果を反映した教育を行っている。大学は、プレート境界浅部で発生するゆっくり滑りの発生メカニズムの解明を目指して、同様の現象が観測されているニュージーランドにおいて、日本、米国、ニュージーランドによる国際共同研究を実施している。

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・協力を通じて、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を通じて、国際的な研究活動の進展に寄与している。

国土地理院は、アジア太平洋地域（キリバス、インドネシア、フィリピン）において GNSS 連続観測を行い、日本周辺のプレートの広域的な運動及びアジア太平洋地域の地殻変動を把握するとともに、GNSS 連続観測・データ解析等に関して現地機関への技術移転を行った。また、アジア太平洋地域で発生した大規模地震について、衛星 SAR データの解析により地震による地殻変動を把握した。国連地球規模の地理空間情報管理に関するアジア太平洋地域委員会（UN-GGIM-AP）の下で実施される GNSS キャンペーン観測に参加し、地殻変動監視の基準となるアジア太平洋地域の基準座標系（APREF）の構築に貢献している。また、APREF 構築のために、アジア・オセアニア VLBI グループによる測地観測に関する事業に参画している。

海上保安庁は、国際レーザー測距事業（ILRS）に引き続き参加し、レーザー測距データの情報共有を行った。

大学は、地震・火山研究を行っている海外の大学や研究機関等との学術交流協定等の締結、**東京大学地震研究所**での国際地震・火山研究推進室の活動や**京都大学防災研究所**での国際共同研究の枠組の活用などの組織的な取り組みにより国際共同研究を推進し、外国人客員教員等による講義や国際研究集会等を実施した。防災科学技術研究所は、16 火山で行った地震活動や地殻変動の解析結果を国際火山データベース WOVodat に蓄積し、国際的な学術交流に貢献している。

大学は、根拠となる史料のデータを含んだ中国地震史料データベースを作成したほか、東アジア地殻災害史の研究会を開催し、中国の史書記録を地震学研究の基礎データとして活用するために留意すべき点等について検討した。

#### 4. 2. 今後の展望

## (1) 推進体制の整備

地震・火山防災行政、防災研究全体の中で本計画が果たす役割を明確化した上で、地震火山部会において実施計画を策定し、計画を推進することは重要である。「新総合基本施策」との整合性にも留意して計画が推進されており、また、計画の基本的な考え方や進捗状況等を地震本部の政策委員会総合部会で毎年報告し、本計画の位置付けを確認している。地震防災行政が長期的に適切に進展していくためには、本計画で推進している、新しい観測・解析技術の開発、多様な物理・化学素過程に基づく地震・火山噴火過程のモデルの開発、災害誘因予測の新技术開発、また、関連研究分野との新たな連携の取り組みなどは本質的に重要である。本計画による基礎的研究や取り組みの成果が、地震本部が実施する調査研究に活用されるように、今後、情報交換をより密にしていける必要がある。

火山防災行政については、地震本部のように、火山防災対策の強化や火山噴火による被害の軽減に資する火山調査研究に関連する施策を、国として一元的に推進する組織は存在しない。戦後最悪の火山災害となった平成26年9月の御嶽山噴火を受けて、地震火山部会において火山観測研究の課題と対応策を検討し、「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」を取りまとめたが、それを国の施策に反映させる過程は必ずしも明確ではない。国として火山観測研究及び火山防災行政を総合的に検討し、施策に結びつける体制の実現が望まれる。

現行計画は地震学・火山学と防災等の関連研究分野が連携して推進するものとなったことから、従来の実施機関だけでは計画の目的の達成は難しい。観測研究体制の強化と研究の加速のために、地震火山部会において公募等により新たな実施機関について審議し、6機関の参加を認めた。本計画は5年計画で実施しているため、できれば計画の検討段階から情報交換し、計画の開始に合わせての参加が望ましい。次期計画以降でも、新たに参加を希望する機関を募り、観測研究体制の強化を図ることは必要であろう。

予知協議会では、これまでオブザーバーであった行政機関や研究開発法人が正式参加となり、企画部戦略室において成果の取りまとめ作業等を行うことにより、大学、行政機関、研究開発法人等の計画実施機関の間でより密接な意見交換ができるようになった。研究推進体制の抜本的な見直しのために予知協議会の下に設置した「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画推進体制検討ワーキンググループ」の活動は継続中であり、研究分野や機関の連携の一層の強化に向けた検討を期待する。また、大学間や、大学と行政機関・研究開発法人の間の人事交流は、互いの機関の状況等を理解し、研究推進体制強化に有効であるため、今後も継続することが望ましい。

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は、2つの異なる研究分野の共同利用・共同研究拠点が組織的に連携して推進するユニークなものである。共同研究推進の中心となっている拠点間連携共同研究委員会に、東京大学地震研究所の予知協議会と京都大学防災研究所の自然災害研究協議会からの委員が加わることによって、全国の関連研究分野の研究者が実施計画の検討などに参加しており、全国規模の分野連携研究が適切に運営されている。今後も両研究所の地震・火山学と総合防災学のネットワークを通して、2つの研究コミュニティの研究者が連携を深めていく必要がある。

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通じ、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とともに、それらの研究の現況について、社会に適切に発信していくことが重要である。

火山噴火予知連絡会は、2014年御嶽山噴火災害を受けて行った火山噴火対策の検討結果を踏まえて、火山活動の総合評価や、噴火警報・火山情報の質の向上に係る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ことが重要である。

## (2) 研究基盤の開発・整備

### ア. 観測基盤の整備

各機関が地震本部の方針にしたがって整備、維持している基盤的観測網は、本計画の実施に不可欠であり、これまでに世界的に見ても極めて重要な研究成果を生み出してきた。現行計画の実施期間中も観測網は安定的に運用され、データは流通、公開されて、地震の震源や震度分布の即時的な把握、緊急地震速報及び津波警報などの防災情報に利用されるとともに、世界中の地

震学研究者に利用されてきた。基盤的観測網により2011年東北地方太平洋沖地震の震源や震度分布の即時把握の精度が高まり災害の軽減にも寄与したと考えられ、また、基盤的観測網がなければこの地震の解明も不十分なものになっていたであろう。現行計画の実施期間中には、海底地震津波観測網の整備も進められており、この観測網で得られるデータに基づく成果が期待される。近い将来、発生が予想される南海トラフ巨大地震の発生過程を正確に把握するためにも、このような観測網を維持、発展させることが重要である。特に、海域における観測網は、現在のところ北海道・東北地方から関東にかけての太平洋岸と、東海沖、東南海沖、紀伊半島・四国沖に整備されたのみであり、ほとんどが未整備である。また、整備された観測網も陸域の観測網と比較して観測点密度が著しく低く今後重点的に整備が必要である。

火山観測網については、地震火山部会が取りまとめた「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」にしたがい整備が開始された。気象庁により火口付近の観測点が飛躍的に拡充されることとなったものの、各火山に設置する観測点数は少ないため、火口内の映像による状況把握や地震活動の異常検知に限られる。本計画の観測研究により、水蒸気噴火の発生直前にも先行現象が表れることが明らかとなっており、災害の軽減に資する研究成果を迅速かつ有効に取り入れられるよう、さらなる観測網の整備と各機関の連携のあり方の検討が必要である。2016年熊本地震では、京都大学地球熟学研究施設火山研究センターが被災し、施設の利用ができなくなった。近年火山活動が活発化する阿蘇山の火山観測と監視及び火山学研究や学生教育にも利用されている拠点の復旧は、可及的速やかに実施する必要がある。

大地震や火山活動活発時などの臨時観測のためには、一定数の観測機器を常時維持、管理している必要がある。大学では、地震研究所が共同利用の枠組みで全国の研究者に観測機材を貸し出し、機材の有効利用を図っている。今後も観測機材の更新等の整備を進めていく必要がある。

#### イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

現行計画の下<sup>完</sup>で、地震観測・地殻変動観測等の各種の観測データの流通と一元化が継続的に図られてきている。また、これらの基礎データや、それらから得られる各種の基礎的な情報が継続的に蓄積されデータベース化され<sup>て</sup>、研究者に提供されるとともに広く公開されている。これらは観測研究計画全体を推進するための重要な貢献となっており、今後もこれらをさらに維持し、推進することが必要である。

データ流通に関しては、良質な観測データを流通させ、データ共有を実施するとともに、十分な品質が確保されたカタログやコミュニティの合意に基づく共通構造モデルなどの情報を一元的に提供することが、本計画全体を支える上で不可欠である。また、多項目の観測データをリアルタイムで流通させるシステムは、モニタリング研究を推し進め、予測システム研究を実現していく上で重要となる。現在運用している地震・地殻変動などのデータ流通システムを今後も継続的に維持、拡充していく必要がある。しかしながら、火山における各種の観測は、火山噴火時や火口近傍の観測など火山特有の厳しい条件下で行われることも多く、定期的なデータ流通が困難となる場合もある。安定的に取得できる観測データ等については、できる範囲で着実にデータ流通が進められてきているが、観測の支援体制の整備や研究者のインセンティブにも配慮したデータ流通のあり方について早急に検討することにより、さらなる観測データの流通と一元化を進展させるべきである。将来的には、大容量、多項目の観測データを即時にかつ柔軟に流通させ、また通信障害時にも耐性を持つように、最新のネットワーク技術に対応した次世代データ流通システムを開発していく必要がある。研究計画全体の効率的な推進には、共用データストレージに加え、解析ソフトウェアを備えた共用の解析基盤の開発・整備が効果的であろう。

一方、群発地震や大地震の発生とそれに伴う余震の発生、あるいは、火山活動の活発化等の際には、地震・火山活動の監視や推移予測、また、観測研究のために臨時観測が必要である。これらの臨時観測のデータも一元化され、多面的にデータが解析されることによって、信頼性の高い予測情報の発信技術の構築や、地震火山現象の理解の深化が大きく期待される。しかしながら、高精度・高密度の観測網展開による良質で最先端科学を支えるこれらのデータ取得は観測研究の要であるものの、多大な労力を必要とするため、臨時観測等に従事する研究者のインセンティブの確保を図ることが必須である。データ取得と流通がバランス良く図られる観測体制の構築は、観測研究の伸展には不可欠である。

各種観測データの基礎データベースについては、今後も各機関が継続してデータ蓄積を行

うことが求められる。現行計画は、災害科学として学際的な共同研究を実施しており、観測データだけでなく、古文書や発掘調査報告、考古史料などのデータベース化が進められているほか、大規模な地震、津波、火山噴火災害に関する情報も集約されている。そのため、その分野の専門家でなくても利用できるような、可視化システムを開発するなど、ユーザーにとって利用しやすいシステムにすることが求められる。また、災害情報に関するデータベースの開発やそれを用いた災害情報提供の研究も必要である。

統合型データベースの構築に関しては、複数の基礎データベースを統合して総合的なデータベースを作成する試みが行われているほか、機関を横断したデータベース利用のポータルサイトが構築され、一定の成果があった。しかし、多種多様なデータベースが有機的に結合された統合的なデータベースは構想されているものの、具体的な開発計画が提示されるまでには至っていない。本計画の多様な研究課題がデータベースを介して有機的に結合されることによって、研究成果へのアクセスが容易となり、新しいアウトプットを生み出すことが可能となる。まずは、現在準備が進められている研究成果共有システムの開発を着実に実施することを端緒に、長期的な視野で進めていくべきである。

データ流通・データベースは、研究計画の基盤として位置付けられ、その重要性は今後も変わることはない。データ流通システムやデータベースには、地震火山研究と異なる専門的な技能を要することから、その開発は担当の研究者にのみ依存しがちである。しかし、統合型データベースの構築には、個々の基礎データベースの開発・運用担当者だけでなく、データベースを利用する立場の研究者も加わることが望ましく、研究へのデータベースの利用と研究成果のデータベースへのフィードバックが円滑に行えるよう、議論を深めるべきである。また、データベースの開発が研究者の単なる負担やサービスにとどまることなく、研究上の評価につながるように、研究計画全体からの支援体制の強化が必要である。

#### ウ. 観測・解析技術の開発

現行計画では、観測・解析技術の開発は観測研究の基盤として位置付けられ、地震火山現象の解明と予測、災害軽減の研究を推進するために実施してきた。その結果、従来の観測の高精度化、信頼性向上だけでなく、従来は観測が困難であった場所における観測データや、新しい種類の観測データや情報が得られるようになり、重要な科学的知見をもたらしている。今後も技術開発の位置付けや重要性は変わることなく、これをさらに推進することが必要である。

2011年東北地方太平洋沖地震以降、プレート境界域での地震や地殻変動の観測の重要性があらためて強く認識され、南海トラフでの観測の必要性も重要であることから、海底における諸観測の技術開発が重点的に行われた。GPS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測は、近年急速に進展し、高精度化が進められている。今後は、観測点密度の向上、ブイや無人移動体等による効率的・定常的な観測の実現によって時間分解能の向上と準リアルタイム化を進めていく必要がある。自己浮上型観測機器による機動観測や海底間音響測距観測については、特に、海溝軸付近での観測が重要であることから、より大水深に対応可能な観測機器の開発や長期間連続観測などの高度化を目指す。

海底における長期連続観測と、リアルタイムでのデータ利用を可能にするために、海底ケーブル式の各種観測機器の研究開発をさらに進める必要がある。最新の技術を用いたインテリジェントな次世代型のケーブル地震観測網の開発を進め、また、センサーの追加や交換が可能なシステムの開発により展開力を高め、海底孔内観測・長期モニタリングシステムとの結合を可能とする必要がある。一方で、我が国周辺において広域の海底観測システムを展開するために、より安価で簡便に構築できる低コスト型システムの開発、低消費電力化、小型化を推進しなければならない。

衛星を利用した宇宙測地技術、航空機等を利用したリモートセンシング技術に関しては、近年、GNSSや合成開口レーダー(SAR)の解析手法の開発が進展し、地震や火山噴火発生時に迅速かつ正確な現象の把握に役立っている。例えば、大学と国土地理院によるリアルタイムGNSS時系列を用いた地震断層モデル発生の即時解析技術は、大学の研究成果が現業部門に利用された好例であるとともに、防災への具体的な応用が期待できる成果である。電子基準点による地殻変動監視においては、高い時間分解能を有する地殻変動の情報を抽出する技術を開発する。また、リアルタイムGNSS解析の安定化、高精度化を図る。「だいち2号」等による衛星SARデータを用いた地殻変動観測・解析技術の高度化、火山活動等に際し機動的な観測が実施できる航空機搭載SARの開発、衛

星赤外画像を用いた火山監視システムの開発は継続して行う必要がある。

地下状態のモニタリング技術は、データ同化に基づく、地下状態の時間変化予測システムを確立するには不可欠である。宇宙線ミュオンを利用したミュオグラフィは画期的な火山透視技術として確立しつつあり、今後は、高解像度化を図るとともに、機器の低価格化、軽量化を進め、機動性を向上させる。また、時間分解能を高め、自動画像診断技術の開発などにより準リアルタイムでの火山内部モニタリングを目指すことが望まれる。精密制御信号システムは装置の標準化とモジュール化を進めるほか、海底観測孔等で長期安定使用が可能な震源装置の開発を進める。

火山近傍の各種観測は、活動監視だけでなく、噴火直前予測にも有効であることが示された。積雪や雷雨の影響を受ける観測困難地域ではあるが、定常観測が安定的に実施できるような技術開発やシステム構築が必要である。噴火時に各種観測を火口近傍で実施するためには、アクセスが困難な場所での諸観測に有効である無人ヘリやドローンを用いた観測技術や、遠隔操作あるいは自律型の動作が可能なロボット技術を積極的に導入し、サンプル採取装置や物理的・化学的データの観測装置の小型軽量化を進め、多項目観測システムを開発する必要がある。

現行計画ではあまり指向されていないが、災害時の情報発信や普及周知に有効な技術が今後必要となると考えられる。スマートフォンなどのモバイル情報端末や通信機器、IoT技術を利用し、情報の受け手が災害誘因を具体的にイメージして、減災・防災に繋がる行動が取れる技術の開発などが期待される。そのためには、情報科学、社会科学といった分野との連携が重要であろう。また、これまで観測機器のハードウェア技術の開発が主流であったが、観測のシステム化、解析の高度化、リアルタイム化を目指すにはソフトウェア技術の開発にも力を入れる必要がある。

観測・解析技術の開発は、地震火山研究者からの要請（ニーズ）がシーズとなっている。そのため、地震火山研究者と技術開発研究者との距離を狭め、情報交換ができる体制が望ましい。現行計画で試行している実施体制を今後も継続して行うべきである。このような技術開発課題は、将来の現業への技術移転に向けたパイロット的なものと位置付け、技術開発における一定の進展をもって早急に実用試験を行い、開発へのフィードバックを行うことが必要である。一方で、新技術には、その段階に応じて、このような実用前段階のもの以外に萌芽的なものもあり、将来を見据えて地震火山分野における適用を探ることも必要であろう。

技術開発を専門とする研究者には研究上の評価につながるように、また、必ずしも技術開発を主としない研究者には技術開発への労力の負担を軽減できるように、技術開発を支援する体制の整備が望まれる。技術開発に関する情報交換の機会を設けるとともに、例えば、部品調達や設計・開発の共同化による開発コストの低減、人的支援などの方策を検討することが望ましい。

### (3) 関連研究分野との連携の強化

現行計画からは、地震学、火山学を中核に防災に関係する人文・社会科学分野を含めた総合的かつ学際的なものになったため、関連研究分野との連携強化は極めて重要である。地震学・火山学以外の研究を行っている機関が新たに計画に参加し、**東京大学地震研究所**と**京都大学防災研究所**とが拠点間連携研究を開始するなど、組織的な連携研究体制の構築には大きな進展があった。従来からの地震、火山研究者と防災に関係する工学や人文・社会科学の研究者が、共同で進めている研究課題も多い。地震・火山噴火に関する文献史料と考古資料の統合データベースの構築や南海トラフ巨大地震のリスク評価研究など、具体的な進展も見られている。現行計画が開始されてまだ3年目であり、全体的に見れば、互いの研究分野の状況等がわかってきたところである。今後、関連研究分野間で共同研究を継続することにより、より密接な連携が可能となり、共同研究の深化も期待できるであろう。

本計画を進めてきて、歴史学・考古学、工学、人文・社会科学と地震学・火山学とでは連携に対する考え方には違いがあることもわかってきた。現行計画は、地震学・火山学の成果を災害軽減に役立てられるようにするという目的で、関連研究分野の研究者の意見も聞いて策定されたが、互いの研究分野に対する理解が必ずしも十分ではなかったため、計画の項目立てなどには改善の余地がある。現行計画での連携研究の経験を生かして、今後の計画を検討する必要がある。

### (4) 研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

大学では、博士課程進学者が少ない状況が続いている。地震学・火山学の魅力や、災害軽減に貢献するという社会的な意義を知ってもらう活動を行うとともに、博士取得者のキャリアパスを確保することが重要である。大学、研究機関や地震・火山防災に関係する国の機関等に限定する

ことなく、地震・火山の知識が防災対策等に活用できる地方自治体等での活躍の場を広げていく努力が必要である。同時に、現在地方自治体等で地震・火山防災に携わっている職員等に地震学・火山学の現状を理解してもらうことも重要である。自治体職員への講習等の活動はこれまでも行われているが、今後も継続が必要であり、より組織的な取り組みを検討すべきであろう。

火山研究者の確保・育成のため、平成 28 年度から文部科学省が次世代火山研究・人材育成総合プロジェクトを開始し、「火山研究人材育成コンソーシアム構築事業」を立ち上げている。大学や研究開発法人、国の機関、地方自治体や民間企業がコンソーシアムを組んで大学院生の研究指導を行うというものである。従来の研究教育システムの良いところを最大限有効利用しつつ、多様化した学問や社会に対応できる研究者養成が行えるようにすることは重要であろう。

#### (5) 社会との共通理解の醸成と災害教育

各機関は、地震や火山噴火の予測の現状や地震・火山噴火による災害などの研究成果を国民にわかりやすく説明する努力を続けている。広報やアウトリーチ専任の職員を置いている機関もあるが、機関ごとの努力には限界があり、より組織的な取り組みを検討する必要がある。また、地震火山研究の必要性を理解してもらうためには、研究成果だけではなく、本計画が何を目的とし、どのような体制で推進されているかについても知ってもらうことは重要である。

国民や地方自治体に、地震・火山噴火に関する防災情報を適切に活用してもらうためには、予測の不確実性などを含め、これらの情報についての理解を深めてもらうことが重要である。また、研究成果や防災情報の知識を一般の国民によりよく理解してもらうためには、防災に関する人文・社会科学研究者等の専門家の助力を得ることが有効である。新たな研究分野である地震考古学においては、災害痕跡の認定基準の策定や、現場調査員向けのマニュアルの作成が必要である。研究成果を地震・火山災害の軽減に活用するためには、防災情報の発信の仕方の改善や、国民の理解を深めるための努力を継続する必要がある。

#### (6) 国際共同研究・国際協力

各機関では国際共同研究が活発に行われており、大学では学术交流協定等の締結などの組織としての取り組みも増加している。また、外国人客員教員による講義の開講や研究指導が行われることも多く、学生の視野を広げる効果などが期待できる。従来の地震学・火山学の国際共同研究は活発化しているが、災害軽減を目的とした国際共同研究はまだ少なく、今後、共同研究の幅を広げていく必要がある。

地震・津波・火山噴火等の情報は、国際的にも防災等のために重要であり、国際機関への情報提供は今後も継続する必要がある。また、我が国は、地震・火山研究や、地震学・火山学に基づく防災への取り組みにおいて先進国であるため、地震・火山・津波災害軽減の技術を移転する取り組みは国際貢献として今後も重要であり、継続する必要がある。

## VI. 総括的評価

### 1. 現行計画策定までの経過

#### (地震予知・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、地震の前兆現象の観測に基づいた地震予知を目標として昭和 40 年度に開始された。地震や地殻変動などの観測網が整備された結果、地震の起こり方とプレートなどの構造との関係が明らかになるなど、地震に関する理解は着実に進展した。しかし、地震に先行する現象の観測結果は複雑で多様であり、多くの地震で同じように観測された前兆現象は知られておらず、地震予知の実用化への道筋は明確なものにはならなかった。そのような状況の中で 1995 年平成 7 年に兵庫県南部地震が発生し、死者・行方不明者が 6400 人以上にのぼる阪神・淡路大震災をもたらした。この地震を契機に、それまでの地震予知計画を総括し、地震前兆現象の観測に基づいて地震を予知するという方針を見直した。そして、観測や実験、理論に基づき地震発生機構をモデル化し、地震発生過程全体を解明した上で、地震発生の予測を目指すことにした。このような考え方に基づいた「地震予知のための新たな観測研究計画」は平成

11 年度に開始され、主にプレート境界地震のアスペリティモデルの発展、地震発生サイクルのモデル化に基づく数値シミュレーションの実現、多様なゆっくり滑りや低周波微動の発見など、国際的にも高く評価されている多くの研究成果が得られた。

火山噴火予知計画は昭和 49 年度から、各火山における観測に基づいた火山噴火予知の実用化を目指して始まった。高密度多項目観測網の整備と実験観測を推進した結果、マグマ貫入の時空間変化の把握、火山体の地下構造の理解が進んだ。また、各観測データの時系列をもとに、火山活動や噴火活動の定量的記述がなされ、先行現象と噴火発生との関連性が明らかになった。地質・岩石学的調査に基づき、火山活動の長期評価が行われ、噴火様式とマグマ特性との関連性の理解が進み、起こりうる噴火現象を地図上に示した火山ハザードマップや発生順を示した噴火事象系統樹として防災に役立てられた。また、有珠山や三宅島において観測による先行現象の検知に基づく噴火発生前の情報発信が行われ、災害軽減にも役立てられた。これらの成果は、適切な観測体制のある火山では噴火時期をある程度予測できることを示しており、平成 19 年より気象庁は、防災機関や住民が取るべき防災対策と連動した火山ごとに異なる噴火警戒レベルの運用を順次開始した。

日本列島で発生する地震と火山噴火は、プレートの沈み込みを共通の原因として発生しており、日本列島域の構造や応力場などの地学的環境の解明は、地震予知と火山噴火予知の両方にとって重要である。また、地震と火山噴火が相互作用する可能性が指摘されており、地震と火山噴火では地球物理的観測手法や現象の物理・化学モデル化でも共通点がある。このようなことから、平成 21 年度から開始された「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」では、それまで個別に推進されてきた地震予知と火山噴火予知の計画を統合し、地震学と火山学の研究者が協力し、より効率的に研究を進めることになった。地震予知と火山噴火予知の研究計画の統合の成果としては、沈み込み帯におけるスラブからの水の供給とマグマの発生・上昇過程の解明や、伊豆半島東方沖におけるマグマの貫入による群発地震活動の解明と予測などがある。

#### (東日本大震災)

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」を実施中の平成 23 年 3 月には東北地方太平洋沖で M9.0 の巨大地震が発生し、津波などによる死者・行方不明者が 2 万人近くに上る東日本大震災をもたらした。それまでの計画では、M9 クラスの地震の発生可能性に関する研究は十分ではなかった。また、巨大地震による津波のような災害誘因の予測に関する研究も不足していた。このようなことから、観測研究計画を見直し、超巨大地震に関して当面実施すべき観測研究として、超巨大地震とそれに起因する現象の解明と予測及びそのための新技術開発の研究を実施することになった。津波堆積物の調査に基づいた過去に発生した超巨大地震の解明、地震発生直後にできるだけ短時間で地震の規模を正確に推定する手法の開発、沖合の津波計のデータも活用して津波が沿岸に到達する前に正確に津波を予測する手法の開発などで重要な成果が得られた。

#### (現行計画の策定)

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の見直しにより、超巨大地震に関する観測研究を強化し成果が得られたが、国民の命を守る実用科学としての地震・火山研究を推進するために、計画を抜本的に見直す必要があった。地震・火山噴火の予知に基づいて災害軽減に貢献することを目標としていたそれまでの計画の方針を転換し、災害誘因の予測に基づき災害の軽減に貢献することを最終的な目標とする「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」を平成 26 年度から開始した。現行計画は、地震発生・火山噴火の予測を目指す研究を継続しつつも、計

画の目標を広げ、地震・火山噴火による災害誘因の予測の研究も組織的・体系的に進め、国民の生命と暮らしを守る災害科学の一部として推進することとなった。地震や火山現象の理解にとどまらず、地震や火山噴火が引き起こす災害を知り、研究成果を地震、津波及び火山噴火による災害の軽減につなげることを目指す。そのため、地震学や火山学を中核とし、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の研究者が参加し、協働して計画を推進する。現行計画は、このような方向転換の最初の5か年の計画と位置付けられた。

## 2. 現計画の成果と課題

### (優先度の高い地震・火山噴火に対する総合的な取組)

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、本計画実施期間に災害科学の発展に貢献できる見込みがあることや、発生した場合の社会への影響の甚大さを考慮して、総合的な研究として優先して推進することになっている。総合的な研究を推進するために、**地震・火山噴火予知研究協議会**に4つの対象それぞれについての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。

東北地方太平洋沖地震については、発生から5年余りたっているが顕著な余効変動が続いている。余効変動の観測データなどに基づいた東北地方の粘弾性構造の解明が進められ、物理モデルに基づいた今後の地震発生の予測シミュレーションが行われるなど、重要な科学的成果が得られている。また、この地震で観測されたデータを利用して、津波の即時予測実験などの災害誘因予測の研究が進められ、手法の高度化が実現したことは、地震・火山研究の成果を災害軽減に役立てることができる重要な成果である。この地震の影響は、広域に長期間に及ぶものと思われ、隣接域でのプレート境界大地震やアウトラーサイズ地震発生の懸念がなくなったわけではない。余効変動の観測も含め、この地震の影響を継続して研究する必要がある。また、この地震による津波や地滑りなどによる災害には、土地利用の変化が関係していることが指摘された。災害要因も含めて、この地震による災害の発生機構を解明することは、今後の巨大地震による災害軽減を検討する上では重要な研究である。

南海トラフ巨大地震については、海底地殻変動観測によりプレート境界の固着の状況の地域性がこれまで以上に詳細に解明されるなど、モニタリング技術の進展による重要な成果があった。南海トラフ巨大地震が発生に至るまでの過程をできるだけ詳細に観測し、その物理的な意味を明らかにすることは、その予測可能性を検討する上でも極めて重要である。拠点間連携共同研究では南海トラフ巨大地震のリスク評価研究を参加者募集型共同研究として実施し、南海トラフ巨大地震の震源や地震波の伝播といった理学研究、地震動や構造物被害といった工学研究、災害情報の発信などの人文・社会科学的研究を含む、南海トラフ巨大地震への総合的に研究を進めた。南海トラフ巨大地震を対象として、このようにリスク評価に必要な一連の要素を総合したシステムが確立すれば、他の地震などにも適用できる**可能性がある**。

首都直下地震については、房総半島沖のゆっくり滑りの解明、地震動による地滑り発生可能性の研究、史料に基づく江戸時代の大地震の研究、関東平野の地震波伝播特性の研究などの成果は得られた。しかし、首都直下の構造は複雑であり、対象とする地震が多様であるため、地震による災害に関する研究も、やや系統性を欠くものになっている。今後は、まず首都直下で発生する可能性のある地震像を明確にすることが必要である。また、それら地震により引き起こされる可能性のある災害について検討していくべきであり、長期的で計画的な取り組みが必要になる。

桜島火山については、地震、地盤変動、電磁気、地球化学といった従来の観測に加えて、ミューオンなどの新手法も適用しながら、**火山体地下内部**のマグマ活動の高精度な把握に基づく火山

活動の解明が進められた。特に、深部からのマグマの供給率と中長期的な噴火活動の様式や規模に関連性が見出されたこと、2015年8月には既存の火道近くに新たにマグマが貫入したことが明らかとなった。また、気象レーダーやライダー観測、GNSS観測による火山灰噴出の把握、数値シミュレーションによる火山灰拡散予測といった災害誘因に関する研究が進むとともに、降水量による交通網への影響評価も行われた。加えて、噴火事象系統樹を利用した自治体の防災訓練や大噴火時の住民の避難意向調査に基づく行動分析が行われた。以上のように、頻発する噴火を利用した科学的研究の実施と、その成果に基づく将来起こりうる大噴火発生時への対策に関する研究が連携して行われている。近傍に鹿児島市街地を抱える桜島は、火山災害の軽減を意識した研究を実施する良いフィールドである一方、来たる大噴火時には、その成果を有効的に利用し、災害をできる限り防ぐためにも、今後も継続して研究を実施する必要がある。

以上のように、優先度の高い地震・火山噴火である4つの対象について総合的な取り組みを行ってきた。地震学・火山学的な現象解明・予測の研究から災害軽減に向けての取り組みまでを総合的に検討することにより、それぞれの対象ごとに研究の不足している部分などが明らかになり、今後の研究の進める上でも参考になる点があった。今後、対象とする地震・火山噴火や推進体制についても見直した上で、優先度の高い地震・火山噴火の分野を横断した総合的研究を進めていく必要がある。

#### (拠点間連携共同研究)

拠点間連携共同研究は、地震火山観測研究の成果を災害軽減に役立てることを目標に、「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して平成26年度に開始した。両拠点が、地震・火山噴火予知研究協議会と自然災害研究協議会という、それぞれが中核となっている研究者コミュニティが協力して組織的に研究を推進していることは重要である。現時点で開始から2年あまりしか経っていないため、研究成果としては予備的なものが含まれている。しかしながら、複合学術領域としての地震・火山噴火に関する災害科学を発展させるという目的の下、理学・工学・人文・社会科学に至る幅広いテーマの研究課題が立ち上げられ、地震で損傷を受けた建物が余震で倒壊する可能性の評価など、これまでになく新しい成果の芽が現れ始めている。また、異なる分野間で連携研究を進める中で、ライフラインなどのインフラ設備の被害予測など社会が必要とする災害予測情報と、従来の研究成果とに食い違いがあるなどの新たな発見もあった。災害対策を考える現場の視点から、災害軽減を推進するためにどのような研究があるかという観点で研究課題を再構成することも有効だと思われる。また、災害対策に活用される災害リスク評価を実現するには、信頼性のある定量評価が必要であるが、そのためには、災害予測の過程における研究分野の相互（依存）関係の明確化が必須であることも、分野間連携の課題から明らかになった。

#### (低頻度大規模地震・火山現象)

2011年東北地方太平洋沖地震の発生により、近代的観測データだけでは解明できない低頻度大規模地震・火山現象の研究の重要性があらためて認識された。近代観測以前の地震・火山現象を解明するためには、史料、考古データ、地質データを活用する必要がある。特に、史料・考古データに基づく地震・火山現象の解明では、現行計画から歴史学や考古学の研究者が参加し、地震学・火山学の研究者と組織的な連携研究を開始した。史料、考古データ、地質データの収集とデータベース化は、それぞれ着実に進展している。また、史料と考古データのデータベースを統

合検索できるようなシステムが検討されている。現行計画の新たな取り組みとしては、順調に進展しているといえるであろう。利用できる史料、考古データは膨大であるため、今後も継続した取り組みが必要である。また、史料、考古データの分析に時間がかかることを考えると、対象とする地域や時代などについての優先順位を検討することも重要であろう。

津波堆積物などの地質データベースは、複数の機関で作業が進められている。今後、これら複数のデータベースのデータを統合的に解析できるような仕組みを構築することが重要である。さらに、近代観測以前の地震・火山現象の解明のためには、史料、考古データ、地質データを統合解析すること必要であるため、これを可能にするシステムを構築すべきである。

史料、考古データ、地質データの収集とデータベース化と同時に、これらデータを地震発生の長期評価の改善や大噴火発生に至る過程の理解に役立てるような手法を開発することが重要である。これまでに、津波堆積物のデータに基づき、17世紀に北海道太平洋沖で巨大地震が発生した可能性の指摘や地質データ分析に基づく奥尻島山体崩壊の年代推定など、史料、考古データ、地質データから過去の巨大地震や大規模噴火の解明の研究は進んでいるが、これらデータをより有効に使い、将来の大規模地震・火山噴火の予測に利用するための研究も重要になってくるであろう。

#### (内陸地震)

現行計画実施期間中に発生した、2014年長野県北部の地震と2016年熊本地震は、どちらも地震調査委員会でも長期評価の対象とされた既知の活断層で発生した。長野県北部の地震は、活動の評価対象よりも短い区間で断層が破壊されたものであった。このような活断層の部分的な破壊を評価する手法を開発することは、今後の重要な課題である。また、2016年熊本地震は、隣接する2つの断層帯が続いて活動し、複雑で比較的長期の地震活動となった。複雑な断層系での地震活動の推移を的確に予測する手法を開発することは、災害軽減に貢献するためにも極めて重要である。

2014年長野県北部の地震については、本震の4日前から前震活動があり、本震発生前に臨時観測点を展開していた。2016年熊本地震は、M6.5の地震の発生から約28時間後にM7.3の地震が発生した。これらの地震活動について、臨時観測データも利用したデータ解析による研究が実施された。今後、前震活動や大きな地震の続発性について、近年の豊富な観測データや統計モデルを利用して地震発生過程の解明や予測につながる研究を進めることが重要である。

多くの地震の発震機構解を用いた応力場推定や、地震波速度ならびに比抵抗構造の推定などにより、内陸地震発生場の理解は進んできている。その成果を利用して、内陸地震発生の物理モデルを発展させて、観測データと物理モデルに基づいた長期的な活動度評価を目指した研究が必要であろう。

#### (地震と火山の相互作用)

大地震や噴火が一旦発生すると、近隣の断層や火山の活動活発化による新たな災害が懸念される。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震の発生後に、内陸地震や火山地域の地震活動に顕著な変化が観測された。2016年熊本地震の断層は阿蘇カルデラ内にまで延びており、阿蘇山の火山活動への影響が懸念されている。地震・火山は、地殻内応力などを通じて相互に何らかの影響を及ぼしていると考えられるものの、両者の関係を定量的に調べられる事象は多くはない。少ない事象を多項目観測で漏らさず捉えて定量化するとともに、火山のような特異な構造不均質性と断層運動との関連性に関する理論的な研究をもとに、相互作用の物理機構を丁寧に調べることは重要である。また、過去のデータの系統的な解析などを通して、相互作用の有無を網羅的に調べるこ

とも必要であろう。

#### (海溝型地震)

海溝型のプレート境界地震については、前計画から引き続き、プレート境界における多様なゆっくり滑り現象の解明やモデル化、海底地殻変動観測による固着域の詳細な推定などで成果があった。測地データ等と物理モデルに基づくデータ同化手法開発の研究も進められており、プレート境界における摩擦特性の推定や、滑りの推移予測実験などが行われている。モニタリングと物理モデルによりプレート境界滑りの推移を予測する研究は、地震発生予測を目指す本計画の柱の一つとして継続すべきである。

プレート境界には地震性滑りが発生しやすい場所や非地震性滑りが発生しやすい場所などが存在することから、摩擦特性は様々ではないと考えられ、このことを支持する観測結果は現行計画でも多く得られている。プレート境界面の摩擦特性の分布を明らかにすることは、物理モデルに基づくプレート境界地震などの数値シミュレーションでも必須のものである。地震波速度構造と摩擦特性の関係を示唆する観測結果はあるが、両者の定量的な関係は明確になっていない。この関係を明らかにすることは、モニタリングと物理モデルによりプレート境界滑りの推移予測のためには重要である。なお、滑りが地震性になるか非地震性になるかは、その場の摩擦特性だけで定まるものではなく、その場の有効弾性特性や動的摩擦特性にも依存することに注意すべきである。岩石の摩擦実験などにより、動的なものも含め摩擦特性の詳細を解明することは重要である。

海洋プレート内で発生する地震については、2015年小笠原諸島西方沖の深発地震のように、これまで災害軽減のための研究対象としてはあまり重視されていなかった深発地震でも被害が発生することがわかった。また、海洋プレート内地震と構造不均質の関係についても理解が進んだ。海洋プレート内地震の中短期予測は当面困難と思われるため、構造不均質などから海洋プレート内地震が発生しやすい場所を明らかにし、長期予測に役立てることを当面の目標とすべきであろう。

#### (地震先行現象・地震活動評価)

地震の短期予測を実現するためには、地震に先行する現象を観測して適切に評価する必要がある。複雑で多様である地震先行現象の確からしさを明らかにするために、現行計画では観測された先行現象の統計的な評価に重点を置いて研究が進められている。これまでに、大地震発生前に前震活動や地震活動静穏化が現れる割合などを調査した。このような結果を、確率的な地震発生予測に利用できるように、さらに解析を進め、予測手法の開発を進める必要がある。また、他の先行現象についても統計的な評価を進めるとともに、様々な先行現象の発生機構を解明する必要がある。将来的には、プレート境界滑りの推移予測のためのモデルのような物理モデルと統合することを目指すべきである。

#### (火山現象のモデル化 (マグマ噴火、熱水系の卓越する火山))

マグマ噴火の卓越する火山、熱水系の卓越する火山ともに、充実した多項目観測が実施されている火山では、地下の現象の時空間変化や噴煙及び火山ガス放出などの定量化は着実に進んでいる。

マグマ噴火については、2011年霧島山(新燃岳)の一連の噴火活動に関する研究にあるように、観測データに基づく研究成果に、マグマ火道流モデルや噴出物特性の分析結果を合わせることで、噴火のメカニズムや様式、またその推移について、定量的な検討も行われるようになった。

今後も、理論、物理的観測、物質科学的分析による研究を連携して行うことにより、マグマ噴火の活動特性の定量的理解にとどまらず、予測方法の構築への道筋が見えてくると期待される。

一方、水蒸気爆発の発生が懸念される熱水系の卓越する火山については、現行計画から本格的に観測・研究に取り組んだ。熱水系の卓越する火山は、一般的に、静穏期が長く噴火の発生頻度も高くないことから、火口近傍における多項目観測を実施し、非噴火時における通常時の活動から異常活動の発現する、あるいは噴火発生に至るまでの先行現象を明らかにすることを目的とした。そのような状況の中、2014年に口永良部島と御嶽山で相次いで水蒸気噴火やマグマ水蒸気噴火が発生した。現行計画で新たに展開する予定であった観測点の設置は間に合わなかったものの、これまでの観測研究計画等で整備した観測網により、貴重なデータを得ることができた。特に、口永良部島では20年ほど前から浅部火山活動が段階的に活発化している中で噴火が発生しており、火山活動の理解には安定した長期の観測が重要であることが改めて示された。また、御嶽山は噴火の約1ヶ月前から火山活動が活発化しており、水蒸気噴火の発生は、中長期的な活動活発化の中で発生することがわかった。しかし、噴火発生までの時間スケールはその時々で大きく異なることから、火山災害を軽減するための危険情報をどのように発信するのか、今後解決すべき重要な課題となった。一方、高精度の地盤変動観測を行うことにより、水蒸気噴火のように規模の小さな噴火でも、噴火の数時間から数分程度前から急激な山体膨張が発現することがわかった。噴火の発生直前ではあるが、警報を山頂付近にいる観光客らに伝えることにより、災害を軽減できる可能性が高い。火口付近の複数観測点の設置や観測困難地域での安定的な運用が可能なシステムを開発することにより、課題を解決することができよう。

#### (噴火事象系統樹)

噴火事象系統樹は、それぞれの火山で今後起こりうる噴火の特徴を一覧することができることから、防災対策を実施する担当者あるいは住民にとって、火山活動の全体像を理解し、避難計画をはじめとした火山防災を考える上で非常に重要である。また、火山現象が網羅的にまとめられていることから、学術的な視点からも非常に役立つ。今後も、より客観的で、災害軽減に資する噴火事象系統樹の作成が必要である。

浅間山や有珠山、桜島など、近代的な観測網が整備され、噴火事例がある火山では、噴火活動の推移と観測量の関係が十分に得られることから、噴火現象の分岐の判断に観測量が取り入れられるなど高度化が進んでいる。一方、たとえ観測網が整備されていても、噴火活動が記録されていない火山が多く存在する。このような火山では、事象分岐に確率を付与することは難しい。現行計画で試作した蔵王山のように、地質学データや史料を整理して発生の可能性の大小を示す、また、日本に限らず世界の火山における観測成果をの活用する、など、利用できる限りのデータを活用した噴火事象系統樹の作成が必要であろう。これらに加え、マグマ特性や火山体構造をもとに、火山活動がに分岐する現象が発現する条件を理論的に調べることで、火山活動や噴火の規模や様式状況が変化する前に観測される特徴を明らかにし、より信頼度の高い分岐判断の指標を用意しておくことにより、火山活動の活発化の際に有効に利用できよう。

#### (災害誘因予測のための研究)

災害誘因予測のための研究は、2011年東北地方太平洋沖地震の発生を受けて新たに本計画で扱われるようになったが、地震発生直後に地震の規模を正確に推定する手法の開発や、津波伝播や津波浸水域の即時予測などで大きな進展があった。火山噴火に関係するものでも、降灰の拡散範囲の予測に必要な火山灰粒子密度の推定手法の開発等が行われた。このような研究は、地震学・

コメント [橋本24]: これは事実ではないと思います。

火口近傍の多項目観測が重要である理由は、水蒸気噴火では、マグマの直接的関与が必然ではなく、噴火の源が比較的浅く、先行現象が火口近傍に局在しているケースが多い、等ではないでしょうか

コメント [橋本25]: 主な火山噴火の欄では、15年前から地震活動が活発化という記述があるので、それに合わせて15年とすべきでは?具体的には1999年の地震活動活発化だと思います

コメント [橋本26]: 明確に言及できるのは微小地震活動だけではないでしょうか?

コメント [橋本27]: 「水蒸気噴火=小規模」という固定観念が流布することを恐れます。この部分を削除してはどうでしょうか

コメント [橋本28]: 活発化だけではなく、沈静化する際の判断にも有用だと思います

火山学の研究成果が災害軽減に直接役立つものであるため、今後も継続して行っていく必要がある。また、このような研究の成果は、行政機関等で実用化されることに価値があるため、大学、研究開発法人及び行政機関が十分に連携した上で推進することが重要である。

地震動や津波等の事前予測の研究では、2011年東北地方太平洋沖地震のようなプレート境界巨大地震の地震波放射特性の空間的不均一性や、地震波伝播経路の構造が地震動に及ぼす影響などについての研究に進展があり、津波に影響を及ぼす海溝軸近くの摩擦特性などの研究も行われた。これらの研究は、地震動・津波の事前予測の高度化につながる成果である。また、地震性地滑りの発生メカニズムに関する研究も進展している。これらの研究成果は、構造物被害などの工学的研究や災害情報・災害対応などの人文・社会科学的研究と連携することで、さらに災害の予測の分野で活用することができよう。このような観点から現行計画では拠点間連携研究を推進した。今後も、地震学・火山学の成果を災害軽減に役立てるために、工学や人文・社会科学と連携することが重要である。

#### **(災害事例、災害発生機構、災害情報の研究)**

地震や火山噴火に関する研究成果を災害軽減に役立てるためには、地震や火山噴火といった自然現象の理解にとどまらず、災害素因に関する理解に基づき災害軽減に貢献するための地震・火山研究を推進することが必要であるため、人文・社会科学研究者と連携することにより、現行計画から新たに災害事例、災害発生機構、災害情報等の研究に取り組むことになった。2011年東北地方太平洋沖地震、2014年御嶽山噴火、2016年熊本地震などの国内における近年の地震・火山災害だけではなく、史料に基づく江戸時代の地震災害の研究や、海外の災害事例の研究も行い、地震や火山噴火による被害の状況や復興状況の知見を集積した。地震や火山噴火の発生を防ぐことは不可能であるため、これらが災害を引き起こす過程の理解に基づいて、災害軽減のための方策を検討する研究は今後も重要である。また、災害誘因予測結果などの災害情報の適切な提供の仕方も、地震学・火山学の成果を効果的に災害軽減に役立てるためには重要であることは明らかである。

現行計画で地震・火山学の研究者と防災に関する人文・社会科学の研究者の連携研究が開始され、両者の相互理解は徐々に進んできている。相互理解が進むと同時に、ともに地震・火山災害の軽減を目指している両分野の研究者間の組織的な交流がこれまで少なすぎたことがわかった。これは反省すべきことである。現状では、地震学や火山学の最新の研究成果の防災に関する人文・社会科学への活用は十分に行われているわけではない。今後、地震・火山学の研究者と防災に関する人文・社会科学の研究者の情報交換をより活発に行うことにより、地震学・火山学の成果をより有効に活用できるよう、研究手法を検討していく必要がある。

### **3. 計画推進体制の強化**

#### **(地震本部との関係と火山観測研究の一元的推進体制)**

我が国では、地震防災対策の強化を目標として、地震本部が地震に関する調査研究を一元的に推進している。地震本部が推進する調査研究は、トップダウンで進める特定の地域や地震を対象とした大規模なものになるのに対し、本計画では研究者の自由な発想に基づくボトムアップ研究を推進している。地震本部で推進している調査研究の多くは、本計画で開発された観測技術や解析手法を発展させたものである。新たな観測技術や解析手法は、多様な考え方にに基づき、研究者が創意工夫することによって生まれることが多いため、国の地震調査研究を継続的に発展させるためには、本計画で行う基礎的な研究は重要である。本計画の成果が国の地震調査研究に有効に

活用されるためには、今後、地震本部との連携を一層強化しなければならない。

火山活動の把握や噴火の予測技術は発展途上であり、本計画のようなボトムアップ型の研究は不可欠である一方、すでに火山研究の成果の一部は、噴火警戒レベルの設定などに活用され、社会活動と非常に密接に関連している。しかしながら、地震本部のような、火山に関する調査研究を一元的に推進し、本計画で得られた基礎的な成果を組織的・体系的に社会に還元する仕組みが確立していない。現在、研究成果の一部は、気象庁火山噴火予知連絡会において個々の火山の活動評価で活かされている。しかし、適切な火山観測設備や監視体制、調査研究について、国全体として方向性を議論し、社会に反映できるよう実行に移す組織がないため、最新の科学的知見を反映した火山防災体制を効果的に実社会に展開できていない。5年前のレビューでもすでに指摘されているが、火山調査研究の成果に基づく火山防災施策の高度化は必要不可欠であり、国が責任を持って今後の研究戦略と成果の普及展開について考える火山調査研究の組織・体制を検討する必要がある。

#### (本計画の推進体制)

本計画は、地震火山部会において計画の進捗状況を把握し、成果の取りまとめを行っている。今後も、地震火山部会において、各年度の成果を把握し、計画の方針を確認した上で、計画を推進していくべきである。地震火山部会で各課題の進捗状況を常時把握するのは難しいため、予知協議会企画部と拠点間連携共同研究委員会が常時活動し、計画全体として成果があがるように、課題間連携等を図っている。平成28年度から計画に参加する全機関が予知協議会に正式参加することになったが、全機関がこれまで以上に密接な連携のもと計画を進めていく上では望ましい。また、企画部内に戦略室を設置し、異なる研究分野間の連携強化のため、合同研究集会の企画等の取り組みを行っている。地震学・火山学の成果を災害軽減につなげるためには、このような活動を今後も継続して行っていくことが重要である。また、大学等による基礎的研究の成果を行政等で活用するために、予知協議会において計画参加機関の間での情報交換を活発に行い、それぞれの機関の目的や強みを考慮して、計画を推進していくことも重要である。

#### (基盤的な観測の維持、発展)

これまでの地震・火山噴火の現象解明や予測及び災害誘因予測の研究には、地震や地殻変動の基盤的観測網が大きく貢献してきた。南海トラフにおける地震・津波観測監視システムや、整備が進められている日本海溝地震津波観測網や海底地殻変動観測によって、これまでは高精度の観測が難しかった海域の地震、地殻変動をより正確に把握できるようになってきているため、特に、海溝型地震についての現象解明や予測及び災害誘因予測の研究の加速が期待できる。地震・火山現象の解明と予測のためには、現象の推移を把握することが重要であるため、長期間安定して観測データを取得することが必要である。特に、発生が予測されている南海トラフ巨大地震については、発生に至るまでの詳細な過程を観測することは、巨大地震の予測可能性を検討する上でも極めて重要である。

火山における多項目観測データは、火山研究だけでなく、適切な噴火警戒レベルを設定するためにも不可欠である。また、長い時間をかけて変化する火山活動を把握するためには継続的な観測が不可欠であり、その観測基盤は国が責任をもって整備維持する必要がある。現在、火山の観測は、国の機関や研究開発法人だけでなく、火山噴火予知研究計画の中核を長年担ってきた国立大学法人に強く依存している。しかしながら、国立大学の法人化以降、定常的な観測設備や人材に対しての予算を十分に確保することができず、過去に整備された高精度な観測施設さえも更新

ができないため、十分なデータが得られなくなりつつある。2014年御嶽山噴火発生などを受け、火山観測点の整備や拡充も一部で進んでいるものの、一元的推進体制がなく各省庁間での調整が十分ではない。設備だけでなく観測を維持する人的、予算的資源の確保を含めた中長期的な視点に立った~~を持った~~、火山の基盤観測体制の整備が必要である。

地震の発生直後には、余震や余効変動などの活発な地殻活動が発生する。また、火山活動の活発化や噴火活動中には、火山性地震の活発化や山体膨張が起き、多様な噴出物が放出される。地震活動や火山活動の推移予測のためにも、現象のより正確な把握が必要である。そのため、このような時には、必要に応じて、迅速に臨時観測を行ってきた。また、定常観測点では検出できないような詳細な構造や活動を解明するために、臨時観測を行ってきた。このような観測を行うために必要な観測機材や人的資源、機関間~~同士~~の連携を含めた観測体制を常に整備しておくことも重要である。

#### (データベース・データ流通)

地震・地殻変動等の定常観測データについては、多くのものが広く流通し、多くの研究者により利用されることにより研究に役立っている。流通するデータは年々増大しているため、データ流通システムの維持・拡充は今後も着実にやっていく必要がある。

本計画で得られた臨時観測等のデータや解析結果などの成果は、必ずしも多くの研究者が使いやすいような形で公開されているわけではない。これらデータを公開し、多くの研究者が利用できるようにして、研究を加速することを目的に、これらをデータベース化し、研究者間で共有する仕組みの構築を目指してきた。しかしながら、このようなシステムの構築は必ずしも順調に進んでいない。一方、これまでに蓄積されたデータは膨大であり、これらすべてを公開することが現実的とは思えない。このようなデータベースの構築・維持のためのコストも考慮した上で、データを広く公開する方向に進めるべきであろう。

#### (技術開発)

地震・火山現象の理解を進めるためには、これまで以上に精度の高い観測や、観測が困難な場所でのデータ取得、観測データからのノイズ除去など、観測・解析技術の高度化が重要なことは明らかである。本計画でも、これまで継続的に観測・解析技術の開発を進めてきたが、その重要性は今後も変わらない。海底観測技術、宇宙測地技術、地下状態のモニタリング技術などでは、技術開発研究者と地震・火山現象の研究者とが密接に連携を取り開発を進めていく必要がある。また、災害軽減に資する技術の開発という点からは、地震・火山災害発生時の災害情報発信技術などについても検討を進めていく必要がある。

#### (教育・人材育成)

多様な地震・火山現象や、それらによる災害の発生機構も、実社会に応用できるまで学問が進展しているわけではない。そのため、我が国あるいは世界の地震・火山災害の軽減を図るためには、地震・火山現象や災害を研究する人材及び高度な知識を有し防災業務に携わる人材の育成が必要である。また、人材の継続的な育成には、大学院生の確保のみならずと、育てた人材が適切に就職できるなど社会に受け入れられることが重要である。昨今、大学における博士課程進学者が減少している問題は、必ずしも地震学、火山学分野に限ったことではなく、他分野にも含めた共通する課題として、大学院生に対する経済的支援や博士号取得後の活躍の場の確保など、博士課程進学者を増やす施策を実行することが求められる。また、地震学や火山学においては、

コメント【橋本29】:「その知識や技能を発揮できる職場を得る」?

コメント【橋本30】:「応援する」?

地球のダイナミクスを追**究**する学問としての**面白さ**、予測科学としての**面白さ**、災害軽減に貢献する学問としての**魅力**を伝えることは当然のこととして、国や地方自治体で地震・火山防災施策を実施する人材、また、民間企業等で防災関係の業務に従事する人材の拡充を**社会に強く働きかける必要がある**。**ことを実践的に社会に示してゆく努力が必要である**。地震学や火山学分野の人材育成が、ひいては、国の防災力を高めることにつながる。**その実現**のためには、大学の教育や研究開発法人、国や地方自治体の機関で実施されているシステムを有機的につなげ、また、改良し、効果的な人材育成体制を作ることが必要であろう。

#### (社会との共通理解の醸成と災害教育)

地震学・火山学の成果を災害軽減に役立てるためには、防災業務に携わる自治体職員や被災地になる可能性のある地域の多くの住民に、地震学・火山学で得られる災害に関する知見を理解し活用してもらうことは重要である。これまで、各機関において国民や自治体の防災関係者らを対象に、講演会等を開催し、地震・火山噴火予測の研究の現状や、地震・火山災害などについて理解してもらうための活動を行ってきた。このような活動は、特に大学においては、個々の研究者の努力に負うところが大きく、計画全体として組織的に行ってきたものではなかった。また、知識の伝達方法についてのノウハウの蓄積もほとんど行われなかった。必ずしもわかりやすいとはい**言**えない地震学・火山学の成果を、理解してもらい防災のために役立てってもらうためには、人文・社会科学研究者と共同して、効果的に伝えるための方法を研究すべきであろう。

#### 4. 現計画の総括的評価と今後の展望

現行計画は、地震発生・火山噴火の予測を目指す研究を継続しつつも、計画の目標を広げ、地震・火山噴火による災害誘因の予測の研究も組織的・体系的に進め、国民の生命と暮らしを守る災害科学の一部として計画を推進するという方針転換の最初の5年と位置付けられている。そのため、地震学や火山学を中核とし、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の研究者が参加し、協働して計画を推進することになった。実際に、歴史学、考古学、防災に関連する人文・社会科学の研究機関が計画に参加するようになったほか、**東京大学地震研究所**と**京都大学防災研究所**の拠点間連携研究の実施により工学も含めて関連研究分野の研究者が参加することになった。これらの取り組みにより、地震学や火山学の研究者と関連研究分野の研究者の交流の機会が大幅に増加し、相互理解が大きく進んだ。しかし、両者による共同研究は萌芽的なものが多く、今後さらなる発展を目指さなければならない。関連研究者の相互理解が進んでいるため、地震学・火山学の成果を災害軽減に活用するための本格的な研究の準備は整ってきている。

#### (地震・火山現象の解明と予測の研究)

近代観測以前の地震や火山噴火を解明するために、史料、考古データ、地質データを収集・分析し低頻度大規模地震火山現象の解明と予測の研究を重視することになった。そのために、これまでは計画に参加していなかった歴史学や考古学の研究者が参加するようになったことが最も大きな変更点である。史料と考古データに基づき近代観測以前の地震と火山噴火を解明するための研究に着手し、データベース構築に向けた取り組みは着実に進展している。膨大なデータがあるため、今後も継続的な取り組みが必要である。また、収集したデータを低頻度大規模地震火山現象の予測に活用するための手法開発が今後の課題である。

内陸地震やスラブ内地震などのプレート内地震については、現行計画実施中に発生した2014年長野県北部の地震や2016年熊本地震などの解析を通して、現象解明に進展があった。一方、既知

**コメント [橋本31]:** 「面白さ」は、やや口語的にすぎる印象があるのと、その後にも出てくるので、「広がり」としてはどうでしょうか

**コメント [橋本32]:** 魅力

**コメント [橋本33]:** 「社会的重要性」

**コメント [橋本34]:** 橋本：  
この部分は文章が少しおかしい気がします。元々はひとつながりの文だったのでは？

の内陸活断層で発生する地震の長期的な予測については、規模の予測などの課題が明確になった。また、2016年熊本地震のような複雑な断層系で発生する地震活動の推移予測も課題である。内陸地震は比較的規模が小さいものでも、局地的に大きな被害につながるため、その長期予測や活動の推移予測は災害軽減のためにも大変重要である。断層の深部構造や応力場の解明などにより断層への応力集中機構をモデル化し、観測データとモデルに基づき内陸地震の発生予測につながる成果を目指す。

海溝型のプレート境界地震については、多様なゆっくり滑り現象の解明がさらに進み、ゆっくり滑り現象とプレート境界大地震発生との関係についての研究も進められた。データ同手法開発による、プレート境界面上の摩擦特性の推定や滑りの推移予測のための研究も着実に進められている。学術的に重要な成果も多く得られており、この方針を継続して地震発生予測を目指すべきである。

前震やゆっくり滑りなどの地震に先行する様々な現象の観測事例が増え、それらの統計的評価が進められている。近年の高精度の観測データなどにより観測事例を蓄積し、その客観的評価を進めるとともに、地震先行現象の物理過程を解明することにより、地震発生の短期予測につながる成果が期待される。

火山活動および噴火の予測に関する研究は、噴火事象系統樹の高度化を中心に進められてきた。過去の噴火履歴を知るために、地質データに加えて、史料、考古データの分析結果を系統的にまとめることにより、客観性のある噴火事象系統樹の作成が着実に進められる。また、観測データ分析や、火山現象の理論モデルとその検証は、火山活動や噴火現象に現れる事象分岐の判断の高度化に不可欠である。今後も、噴火事象系統樹の高度化を中心に据え、研究を進めることが有効であろう。また、噴火発生の直前予測に有効であることがわかった火口近傍を含めた多項目多点の観測網の展開は大変重要である。

#### (災害誘因予測等の研究)

地震動・津波・火山噴火による降灰等を、地震や火山噴火の発生前に、また、最新の計測技術を利用して発生後ただちに予測するための手法開発は、地震学や火山学の研究者により活発に行われ大きな進展があった。今後もこのような研究を継続し、災害誘因予測の高度化を進めることは重要である。また、これらの研究成果を災害軽減に役立てるため、地震本部で本計画の成果が活用されることを期待して、地震本部における課題や本計画の研究成果等について情報交換することも有益であろう。

同時に、このような地震学・火山学の研究成果による災害軽減を実現するには、関連研究分野との連携が欠かせない。地震・火山災害を理解し、災害軽減を目指すためには、災害素因との関係を視野に入れた研究が必要であろう。地震動や津波等の外力をより正確に予測することにより、構造物等の被害に及ぼす影響などを評価する工学的研究に役立てたり、降灰予測の高精度化により、交通の復旧などの災害対策立案に貢献することができる。これらを効果的に実現するために工学研究者等と連携して地震学・火山学が貢献できる研究を推進することは、本計画の重要な役割である。

また、地震や火山噴火による災害の発生機構を解明し、地震や火山噴火に関する知識や情報を災害軽減に役立つように発信するための方法を、人文・社会科学的手法等により研究することも重要である。地震や火山噴火の発生は避けられないが、研究者と行政・関係機関・住民等が協働することで地震・火山災害を軽減することは可能である。地震学・火山学の科学的理解に基づき災害発生機構を解明し、人命を守るための対応に結びつける必要がある。地震や火山噴火の発生

から災害の発生までの一連の過程を解明し、適切な時期に地震や火山噴火に関する適切な情報を行政や住民に発信する方法を研究開発して、住民や行政の対応に影響を及ぼせるようにすることは、地震・火山研究の成果を災害軽減に活用するために重要であり、地震・火山研究者と人文・社会科学研究者の協働が一層望まれる。

このような関連研究分野間の連携研究は現行計画から始まり、関連研究分野の研究者間の相互理解が深まってきたため、今後、さらなる発展が期待できる。適切な推進体制を検討した上で、地震・火山現象の解明や予測の成果を災害軽減につなげるための研究を継続すべきである。

#### (推進体制)

現行計画は、従来からの地震学・火山学に加え、歴史学、考古学、防災に関連する工学、人文・社会科学などが参加する、地震・火山災害の軽減を目指す総合的な計画となった。これら新たな研究分野の研究者が参加するため、地震火山部会や予知協議会は適切に対応したほか、**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開始した。これらにより、関連研究分野が連携して計画を推進するための体制は整えられた。しかし、異なる分野の研究者が十分に意思疎通し、実のある共同研究を行うことは必ずしも容易なことではない。予知協議会企画部に戦略室を設置し、異なる研究分野間の連携強化を促す取り組みを行い、拠点間連携共同研究委員会を設置するなどの努力を行っているが、今後も継続的な努力が必要である。

また、地震火山部会で計画の進捗状況を常時把握することは難しいため、計画に参加するすべての機関が予知協議会に参画することにより、これまで以上に機関間の連絡を密にして計画全体を調和的に推進するための体制を整えた。

#### (中長期的な展望)

本計画は、地震・火山噴火による災害を軽減するため、次のような取り組みを中長期的な展望の下、体系的に実施している。

- (1) 地震や火山噴火が引き起こす災害に**いかに**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せること、
- (2) 地震や火山噴火が、どこで、どのくらいの頻度・規模で発生し、それらによる地震動、地盤変形、津波、噴火規模・様式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、溶岩流などを予測することにより避難に役立てること、
- (4) 地震の発生や、火山噴火の発生や推移を事前に予測することにより防災・減災対応をとること。

(1)については、史料、考古データ、地質データに基づき低頻度大規模地震・火山現象の研究を強化し、災害事例研究を新たに開始するなど、研究は着実に進められている。観測等に基づく地震・火山現象の詳細な解明が、これら研究の基礎として重要であることは言うまでもない。また、防災に関する人文・社会科学研究者の参加により、地震・火山研究の成果を国民や関係機関に広く知らせるための効果的な方法の検討も進められた。このような研究は、研究成果を災害軽減につなげるためには、今後ますます重要になるであろう。

(2)については、史料、考古データ、地質データに基づく近代観測以前の地震・火山噴火に関するデータベースの構築が進められ、長期的な地震・火山噴火の予測に必要な基礎データが集積されている。これらのデータは膨大であり、今後も継続的な取り組みが必要である。また、物

理モデルに基づく地震発生の長期予測や、地震動、津波、火砕流や降灰、溶岩流の事前予測のためのシミュレーションを行うなど、新たな手法も検討された。今後、このような予測手法に、史料、考古データ、地質データに基づく地震や火山噴火のデータを有効に活用することが重要な課題である。また、予測手法の改良・高精度化が必要である。

(3)については、地震や火山噴火の発生直後に、観測データの即時処理に基づき、地震動や津波、降灰などを予測する手法が開発・改良された。これらについては実用の段階に近いものもあり、今後、精度や信頼性を高め、実用化を進めていくことが重要である。

(4)については、プレート境界の摩擦特性の理解に基づく先行現象のモデル化の研究、巨大地震に先行するゆっくり滑りの研究、多様な地震先行現象の系統的な評価、火山噴火に先行する加速的な地盤地殻変動と噴火強度の関係の研究など、地震や火山噴火の発生予測に関連する重要な研究が行われた。このような地震や火山噴火に先行する現象の研究成果を災害軽減に役立つような予測の実現につなげる必要がある。

## 5. まとめ

国民の生命と暮らしを守る災害科学の一部として推進するという方針転換が行われて最初の5年と位置付けられている現行計画では、近代観測以前の地震・火山現象の解明のため新たに歴史学、考古学研究者が、また、地震学、火山学の成果を災害軽減につなげるために防災に関する工学や人文・社会科学の研究者が参加するようになった。このように、新たな機関が計画に参加したことにより観測研究計画の裾野が広がり、災害科学の一部としての計画が推進できた。さらに、予知協議会の改革や、[東京大学地震研究所](#)と[京都大学防災研究所](#)による拠点間連携研究の実施など、推進体制においても大きな変革を行った。新たな推進体制のもと、地震学、火山学の成果を災害軽減につなげるための新たな取り組みが関連研究分野の連携のもと進められ、着実に進展している。まだ大きな成果として結実してはいないが、地震・火山災害軽減を目指す研究としての第一歩を踏み出せたと考えられる。今後も、関連研究分野の研究者間の連携を一層強固なものとして、この方向で進めていくべきであろう。

現行計画実施期間中にも、2014年御嶽山噴火、2014年長野県北部の地震、[2014年及び](#)2015年口永良部島噴火、2016年熊本地震などの地震・火山災害が発生した。これらは、比較的規模の小さい水蒸気噴火の予測、活断層における地震の評価、複雑な地震活動の推移予測など、自然現象の解明・予測の面で課題を突きつけた。また、2016年熊本地震の際には、地滑りの発生により被害が拡大し、大きな地震の続発や地震活動の長期化が災害を大きくした。本計画のように関連研究分野が連携して取り組むことにより、地震学や火山学ができる災害軽減への貢献を考えて計画で取り上げていくことが重要である。