

火山噴火予知計画の実施状況等のレビューについて（報告）

目 次

はじめに	1
I 火山噴火予知の観測体制	4
1. 観測体制の整備	4
2. 観測体制の整備と火山噴火予知の社会対応	8
3. 課題と今後の展望	9
II 予知手法等の開発及び基礎的研究の推進	12
1. 第4次計画までの実施状況と成果	12
2. 第5次計画の進捗状況	21
3. 達成度と問題点	24
4. 今後の課題	28
III 特定火山の観測研究	31
1. 集中総合観測と構造探査	31
2. 主な火山噴火への対応	34
IV 総括的評価	39
1. 火山噴火予知計画を通しての総括的評価	39
2. 世界の中での日本の火山噴火予知の位置付け	41
3. 火山噴火予知の観測成果の社会への還元	42
4. 今後の展望	42
参考資料	
1. 全国の活火山（86火山）	44

2 . 火山噴火予知観測網の昭和49年度と平成28年度の比較	45
3 . 火山噴火予知計画における各機関の役割	46
4 . 火山情報の流れ	47
5 . 火山噴火予知計画実施機関の変遷	48
6 . 火山噴火予知計画の整備進捗状況	49
7 . 国立大学の常時観測項目と観測点数	51
8 . 気象庁の常時及び定期観測項目と観測点数	53
9 . 防災科学研究所及び国土地理院の常時観測項目と観測点数	54
10 . 集中総合観測及び構造探査実施火山の一覧	55
11 . 集中総合観測及び構造探査実施火山の報告書一覧	56
12 . 気象庁の火山機動観測実施状況	57
13 . 伊豆大島に関する火山噴火予知連絡会の活動経過	58
14 . 雲仙岳に関する火山噴火予知連絡会の活動経過	59
15 . 火山噴火予知計画に関する主要な論文リスト	60
16. 測地学審議会委員名簿（第24期）	66
17. 測地学審議会地震火山部会委員名簿（第24期）	67
18. 測地学審議会地震火山部会噴火予知特別委員会委員名簿（第24期）	68
19. 火山噴火予知計画実施状況等レビュー起草小委員会委員名簿	69
20. 火山噴火予知計画実施状況等レビューに係る審議状況	70
火山噴火予知計画外部評価報告書における指摘事項への対応	71
火山噴火予知計画実施状況等のレビュー案に関する外部評価報告書	78

はじめに

我が国は、世界有数の火山国であり、世界の活動的な火山の約1割にあたる86の活火山がある。それらには、玄武岩質の溶岩噴泉を伴う火山噴火から安山岩質の爆発的火山噴火、デイサイト質の溶岩ドームを作る火山噴火まで、マグマの性質によって様々な噴火様式が認められる。活火山数の多さと多種多様な噴火形態が存在することが、我が国の火山活動の大きな特徴をなしている。火山

活動が静穏な時期には火山のもたらす様々な恵みを享受しているが、過去には、1783年の浅間山大噴火、1792年の雲仙眉山の大崩壊と誘発された津波、明治21年(1888)の磐梯山の山体崩壊、大正3年(1914)の桜島の大噴火等、火山噴火によって多数の犠牲者を伴った大災害が繰り返し引き起こされた事は噴火史に明らかである。古来、活火山の近傍を生活の場とする住民にとって眼前の火山が安全か否かは常に大きな関心事であり、噴火を予知し災害を最小限にとどめたいという潜在的な社会的願望があった。我が国では、明治の近代化に伴い、震災予防調査会が、地震現象の調査とともに、噴火の現地調査・研究や資料収集、火山地質の調査・解析を組織的に実施し、国内の火山について膨大な調査報告や地質資料を残した。その後、これらの研究成果を踏まえ、大学や気象庁は、浅間山、桜島、阿蘇山等で火山活動の観測を独自に行い、火山噴火機構解明の基礎研究を継続してきた。これらの研究は、火山噴火予知研究の先鞭をつけるものであり、この分野で我が国は世界の学会を先導してきた実績を有している。しかし、火山観測研究が小規模で個別的研究のレベルに留まっている限り火山噴火現象の持つ複雑性・多様性を克服し火山噴火予知を実現することは困難であった。

近年、我が国の社会発展に伴って火山周辺の地域開発が急速に進み、もし大噴火が起きれば、災害の規模が大きくなることが懸念されるようになった。このような社会的背景を受けて、火山噴火予知の実用化に対する要請が強まり、予知の方策を検討し実施に移すことが急務な課題となった。このため、測地学審議会は、長期的な視野に立って火山噴火予知のあり方や実用化の可能性を専門的見知から慎重に審議し、昭和48年に「火山噴火予知計画の推進について」をとりまとめ文部大臣をはじめ関係大臣に建議した。これを受けて、昭和49年度から火山噴火予知計画が実施に移された。その後、測地学審議会は第2次から第5次までの計画を策定し建議してきた。火山噴火予知に関する観測計画の内容は多方面にわたることから大学及び関係機関は、それぞれの機関の持つ観測・調査機能の特徴を生かしつつ、役割を分担して推進することとした。

これまでの計画年次とそれぞれの期間の実施計画の主な特徴は次のようにまとめられる。

第1次計画(昭和49~53年)地震観測のテレメータ化等と観測基盤の整備

第2次計画(昭和54~58年)観測対象火山の拡大と観測の広域化

第3次計画(昭和59~63年)予知手法の多様化とデータの良質化

第4次計画(平成元~5年)観測の多項目化、高密度化、高精度化

第5次計画(平成6~10年)火山体構造把握ための観測研究の推進

第1次から第3次計画までは、大学や気象庁における火山観測の中核をなしてきた地震や地殻変動観測等の地球物理学的観測手法に基礎をおき、活動的火山における噴火機構の解明と短期的予知の基礎となる前兆現象の検出に取り組んできた。火山噴火予知の方法には、過去の事実に基づく経験的な予測から、それらを総合して確率を見積もったもの、噴火の物理モデルを用いて、様式、規模、推移を含めてきめ細かく予知するものまで、いくつかの段階がある。年次計画の進展に伴って、噴火機構の解明も進みいくつかの火山では、噴火の物理モデルが提案され、それに基づく予知方法も議論されるようになった。また、1977年~79年の有珠山や1990~95年の雲仙岳のように噴火活動が長期化した場合、噴火の推移の予測が防災面で重要になることが改めて認識され、この方面の観測研究を重点的に推進することが課題となった。さらに、中・長期的予知の重要性が広く認識され、観測内容も地球化学的手法や地質学・岩石学的手法の導入と強化が図られ、火山噴火予知の観測研究は着実に発展を遂げてきた。今後は、多様な予知手法の開発の一環として、火山性地震などデータの蓄積が進んだ観測手法については、観測データをもとに活動を評価して、噴火発生の可能性を数値として表現するなど確率的予測手法の導入も検討課題になろう。

第5次計画では、火山体下のマグマ供給システムの理解を深めることが噴火機構の解明と火山噴火予知の実用化に向けた展望を開く上で不可欠であるとの認識に立ち、火山体の構造把握のための基礎研究を幅広く推進することとした。

これまでの年次計画中に幾つかの噴火が発生したが、噴火現象に内在する複雑性のため、時間、場所、規模の3要素に加えて、噴火様式やその推移を的確に予測する段階には残念ながら達していない。しかし、多くの前兆現象や噴火の実態が把握され、防災対応の面ではほぼ大過のない対応をし一定の実績を積んできたことは貴重な経験である。火山噴火予知研究は学問的にも、技術的にもまだ発展途上にあるが、実用化に向けて着実に成果を上げている。

これまでに陸域で発生した噴火の多くは、予知計画に基づき観測体制がある程度整備された火山

で起きたほか海域においても、噴火活動がしばしば起きている。このような火山では、噴火前に何らかの異常が観測されることが多い。関係諸機関は、年3回開催される火山噴火予知連絡会、あるいは、緊急の場合は臨時の連絡会において、観測データを持ち寄り異常活動や噴火の推移は、統一見解等として気象庁を通じて地元防災機関、関係政府機関、報道機関に情報が伝達されてきた。また、海底火山の噴火等に係る情報は、海上保安庁から関係機関や船舶に対して航行警報によって周知され、当該海域の船舶の航行等の安全が図られるなど、最終的には国民の火山防災に活用されてきた(参考資料4)。また、連絡会で検討した内容は、「火山噴火予知連絡会会報」として定期刊行され一般公開されている。会報は国内の関係機関ばかりでなく、国外にも送付される予知の基礎資料として国際的に活用されている。また、予知計画の中で蓄積された基礎研究等の成果は、噴火に伴う災害要因を分かりやすく解説した火山災害危険予想図(いわゆるハザードマップ)作成の基礎資料として有効活用されている。これらは、長期的には国民の防災意識の高揚に寄与するものである。

火山噴火予知の実用化という社会的目標に向けてスタートした火山噴火予知計画は、四半世紀が経過しようとしている。この間、国内にあっては、雲仙普賢岳の火砕流災害等幾多の火山災害を経験し火山情報に対する社会的な要求の内容にも変化が起きている。また、国際的には「国際防災の十年」や今世紀最大級の噴火といわれるフィリピン・ピナツボ火山の噴火災害等の経験をふまえ、グローバルな視点から火山防災や火山噴火予知の協力体制のあり方が議論されている。

今般、第5次計画の節目の時期に当たり、大学及び関係機関の実施してきた火山噴火予知計画に対する達成度や問題点の所在を明らかにし、今後の定量的な火山噴火予知のあり方を展望するため、第1次計画から第5次計画までの実施状況を再検討し、総括的な評価を行うこととした。

I 火山噴火予知の観測体制

1. 観測体制の整備(第1次～第5次計画)

(1) 当初の目標

昭和48年(1973)の建議で開始された火山噴火予知計画の第1次計画(昭和49～53年度)では、活動的火山で地震テレメータ観測網の整備や観測所の新設等観測体制の整備を行い、多様な項目にわたる研究的観測と特定火山活動の活発化に際しての機動的観測、火山噴火予知に関する基礎資料の収集・解析を目的に火山活動移動観測班を整備する。併せて、観測研究の情報交換、観測研究体制の調整及び円滑化のため関係機関による火山噴火予知連絡会を組織する。

第2次計画(昭和54～58年)では、観測対象火山を「特に活動的な火山」(有珠山、浅間山、伊豆大島、阿蘇山、霧島山及び桜島の6火山)と「その他の火山」に分類して、火山の監視、観測研究体制の拡充強化を進める。特に活動的な6火山においては、常時監視観測の強化や広域観測網の整備を行う。火山活動機動・移動観測班の整備を進め、火山噴火予知連絡会の機能強化を図る。また、火山活動の基礎資料を整備する。

第3次計画(昭和59～63年度)では、観測対象火山を「活動的で特に重点的に観測研究を行うべき火山(12火山)」、「活動的火山及び潜在的爆発活力を有する火山(23火山及び活動的な海底火山)」及び「その他の火山」に分類し、多種多様な手法による精密な観測研究、機動・移動観測による監視・観測など火山の特性に応じた観測研究を行う。このため、引続き火山の監視、観測研究体制の拡充強化を目指す。

第4次計画(平成元～5年度)では、引続き観測対象火山を3種類に分類し、「活動的で特に重点的に観測研究を行うべき火山」では観測の多項目化、観測点の高密度化、観測井や坑道を用いた観測の高精度化を軸に観測研究を推進する。「活動的火山及び潜在的爆発活力を有する火山」及び「その他の火山」では、常時観測機能の整備と機動・移動観測により監視・観測を行い、潜在的爆発活力評価を行う。引き続き、地形図・地質図等の基礎資料の整備を進める。

第5次計画(平成6～10年度)では、これまでと同様に、全国の観測対象火山を3種類に分類し、これまでの成果を踏まえて、火山活動状況の把握と前兆現象や噴火機構のより正確な理解のため、観測の一層の高精度・高密度・多項目化を進め、観測研究体制の強化を推進する。観測体制の拡充強化にあたっては、個々の火山に応じた観測研究を重点的に進めるとともに、常時観測を補いあるいは観測研究の重点的展開を図るために、機動・移動観測機能の一層の強化を進め、繰り返し観測や高密度観測の充実を図る。また、広域テクトニクスと火山活動の関係の究明のため、地震予知観測研究との緊密な連携を行う。活動的火山においては、特定火山の集中総合観測及び火山体の構造探査を実施し、基礎資料の収集及び活動状況の把握を図るとともに、マグマの実体の把握に努める。

(2) 実施状況

ア. 監視観測体制

α. 陸域火山の監視観測体制

火山噴火予知計画の発足当時、気象庁により実施された陸域火山の監視観測は、77の活火山のうち16火山であったが、その後、草津白根山、御嶽山、伊豆東部火山群が加えられ、常時監視観測の対象火山は19火山となった。このうち5火山では、地震計5点以上の監視観測が実施されている。また、計器観測による常時監視に加え、近接官署からの遠望観測及び定期的な現地観測が継続的に実施された。さらに、連続監視観測が実施されていない活火山では、火山機動観測班による現地観測が繰り返し実施され活動度の把握が行われた。火山噴火予知計画発足後、各地域を担当する機動観測班の整備も進み、観測項目も次第に多項目化が進行しつつある。また、噴火など火山活動が高まった火山においても、火山機動観測班が中心となって、臨時の観測体制や現地観測等監視観測体制の強化が図られた。

第5次計画では、雲仙岳を精密観測火山に指定するとともに、北海道の地域機動観測班の強化、遠望観測装置の導入等観測機器の強化が図られた。一部の火山では、気象庁または管区気象台で震動や映像のテレメータ化やデータ処理が進められた。

この間に、気象庁の観測部火山室は、地震火山部火山課へと拡充強化された。また、各管区気象台には地震火山課が設置されるとともに、地震情報官等が配置された。

ロ．海域火山の監視観測体制

海底火山の監視観測は海上保安庁水路部が担当し、南方諸島及び南西諸島の海域火山について航空機により定期的に、あるいは船舶・航空機からの異常発見に対応し実施された。航空機による監視では、目視観測と併せて計画で整備した赤外線熱映像装置やマルチバンドカメラによる、熱や変色水の観測及び航空磁気測量が実施された。また、船舶による詳細な海底地形、重力、地磁気観測等が計画的に行われた。伊豆東部火山群や雲仙岳の噴火に際しては、海底地形等の緊急調査が実施された。

自航式観測アイ「マンボウ」が開発され、危険海域での、海底地形調査、水温分布観測、海水採取が安全に実施されるようになった。現在、新マンボウを搭載し、地殻熱流量計やサイドスキャンソナーも装備した新型測量船の建造が進められている。また、海底地震計とハイドロフォンの観測網を構築し、リアルタイム観測が可能となる海底火山観測システムの開発も進められている。

イ．観測研究体制

α．国立大学の観測研究体制

国立大学は、火山活動の基礎的な解明と、その成果を火山噴火予知の実用化に生かすため、特定火山を主な対象として観測研究体制の整備・拡充が図られてきた。火山噴火予知計画の発足時、国立大学の火山観測研究施設は桜島火山観測所(京都大学防災研究所)、火山研究施設(阿蘇、京都大学理学部)、島原火山観測所(九州大学理学部)、霧島火山観測所、浅間火山観測所(東京大学地震研究所)の5施設であったが、計画の進行によって、北海道大学理学部に有珠火山観測所、東北大学理学部に地震予知・噴火予知観測センター、東京大学理学部に地殻化学実験施設、東京大学地震研究所に伊豆大島火山観測所、東京工業大学に草津白根火山観測所、名古屋大学理学部に地震火山観測地域センターが整備された。また、弘前大学理学部と鹿児島大学理学部にも地震火山の観測所等が整備され、15施設となり観測研究体制の充実が図られた。この間、東京大学地震研究所は、地震予知研究と火山噴火予知研究の中核としての役割を担うことを目的として共同利用の研究所に、京都大学防災研究所の共同利用化に伴い、附属桜島火山観測所は火山の実験・研究場として共同利用を行う同研究所附属火山活動研究センター(桜島観測所)に、九州大学理学部の島原火山観測所は島原地震火山観測所に改組された。

また、活動的な火山での多項目にわたる研究的観測、活動の活発化に際しての機動的観測、火山噴火予知に関する基礎資料の収集・解析を目的として、地域を設定して5つの火山活動移動観測班が整備された。併せて地球化学的観測を担当をする全国地球化学移動観測班も整備された。

観測設備の整備の面では、計画発足直後は地震観測の強化とテレメータ化が重点的に整備されたが、その後は地殻変動観測、電磁気観測、地球化学的観測、重力観測等多項目にわたる観測設備が整備された。併せて、観測点の高密度化及び広域化が図られた。火山体周辺の広域的な地殻変動観測では、GPS(汎地球測位システム)の整備が進んだ。また、桜島、十勝岳、樽前山、伊豆大島、雲仙岳等では、観測井や観測坑道を用いた地震・地殻変動観測が実施され、観測の高品位化・高精度化が図られた。

第2次計画の半ばから火山活動状況の把握や推移の予測に地球化学的観測や電磁気学的観測の重要性が認識され、火山ガスや火口湖の地球化学的連続観測設備が草津白根山、伊豆大島、桜島に、地磁気の連続観測装置が伊豆大島等で整備され、地震観測、地殻変動観測などと併せて総合的な観測が行われるようになった。また、火山噴出物の分析と火山性流体の解明などのため蛍光X線分析装置、プラズマ発光分光分析装置、同位体質量分析装置等の設備、火山ガス放出量やガス組成の遠隔観測装置も整備された。

活動的な火山においては、特定火山の集中総合観測及び火山体の構造探査が計画的に実施され、基礎資料の収集及び活動状況の把握が図られた。噴火機構解明等を目的とした基礎研究の推進のため、小型データロガーが開発・整備され、火山体の構造探査に用いられた。

ロ．関係機関の観測研究体制

国土地理院は、航空機に搭載した熱赤外映像装置による火口域の地表面温度分布の観測、大縮尺精密火山基本地形図の作成や測地測量等を担当し、これまでに桜島をはじめ23火山で火山基本図が、

北海道駒ヶ岳等7火山で火山土地条件図が作成され、地表面温度分布測定が24火山で実施された。また、伊豆半島において、GPS連続観測や繰り返し辺長・水準測量が実施され、潮位観測も引続き行われている。神津島等ではGPS観測点を整備し、雲仙岳、三宅島及び北海道駒ヶ岳でGPS機動観測が実施された。雲仙岳では水準測量路線の追加整備が行われた。さらに、火山活動状況を把握するため小型航空機搭載のSAR(合成開口レーダー)の整備を進めている。連続的な測地観測を実施し、情報提供の要請に応える測地観測センターが整備され、火山解析係が整備された。また、環境と防災に関する地理調査を行うため火山調査係が設置された。

防災科学技術研究所は、硫黄島、伊豆大島、富士山、三宅島、那須岳に順次観測設備を整備し、観測体制の強化を図った。三宅島や伊豆東部火山群では観測井による高精度観測設備が整備された。また、火山の精密な地表面温度分布を観測するため、航空機搭載型の火山専用赤外映像装置が開発され、雲仙岳や九重山等噴火した火山で重点的な運用が行われた。基礎資料の整備の一環として、雲仙岳等4火山地域の傾斜分級図が作成された。また、火山観測を担当する火山防災研究室が火山噴火予知研究室に名称変更された。

地質調査所によって、火山噴火の長期予測の観点から重点的に地質調査が実施され、これまで7火山で火山地質図が作成された。また、阿蘇山や支笏カルデラで地震探査等を実施し、地下構造の研究が行われた。伊豆大島、雲仙岳、九重山の噴火では、火山ガスや辺長測量の連続観測が実施され、計測分野の観測研究が拡充された。また、環境地質部に火山地質課が整備された。

気象研究所は火山担当の研究室を増設し、火山活動を把握するための各種観測システムやリモートセンシング手法の開発を進めた。

通信総合研究所は、第5次計画から参加し、人工衛星や航空機に搭載するリモートセンシング技術の開発を担当し、高分解能3次元マイクロ波映像レーダーの開発及び地形測量用の航空機搭載レーザー高度計の技術開発を進めている。

(3) 成果と達成度

火山噴火予知計画の開始以来、気象庁では組織の整備が進み、陸域火山の常時監視観測体制の拡充強化によって、多くの活動的活火山で長期間の均質な観測データが収集され、火山ごとの活動特性の理解や、活動評価の基礎が次第に築かれてきた。また、地域機動観測班の整備も進み、常時観測施設のない火山の定期診断や活動に異常が見られる火山の観測強化が実施され、基礎資料の蓄積が進んだ。

海域の火山活動については、海上保安庁による、定常的な監視観測が着実に進むとともに、遠隔監視観測手法の開発や自航式ブイ等の利用により、観測の安全性が確保されるようになった。

国立大学の観測体制は計画開始時に比べ、観測研究施設の新設や整備、観測設備の年次の整備が行われ、観測の広域化、高品位化、高密度化、多項目化が進み観測研究の充実が図られた。活動的火山に隣接した火山観測所が中心となり、噴火機構等の研究に多くの成果を挙げてきた。

これによって、幾つかの活動的火山では、噴火の直前予測が可能となり、活動の総合評価システムの基礎が築かれた。また、計画発足直後に地震観測の強化で始まった観測研究体制は、その後、地殻変動観測の強化が進み、重力観測、地球化学的手法、電磁気学的手法、地質学・岩石学的手法等新たな予知手法が逐次取り込まれ、総合的な体制の整備が進んだ。

特に活動的な火山では、噴火発生に先駆けて観測研究施設の整備や特定集中総合観測が実施され、前兆現象の早期の検知や活動推移の予測に有効な基礎資料が蓄積された。また、集中総合観測によって、大学及び関係機関による多項目観測体制が整い、噴火発生時には直ちに大学及び関係機関による現地総合観測班が組織されることとなった。

国土地理院による繰り返し測地測量の実施により、火山活動と関連したと思われる地殻変動、マグマ溜りの膨張を示す変動、活動の終息を示唆する変動など観測された。防災科学技術研究所により、観測井での傾斜や地震の精密観測データにもとづき、マグマの貫入や移動の力学モデルが構築された。地質調査所により、雲仙岳や九重山等で、トレンチやボーリングを併用した系統的な地質調査が行われた結果、最近数万年以内の噴出物の年代や噴出量等が詳細に明らかにされた。

第1次計画から進められた精密火山基本地形図、火山地質図、傾斜分級図、火山土地条件図、精密海底地形図等の基礎資料は、担当諸機関によって計画的に作成された。また、活動的火山の基礎資料として噴火史把握のため日本活火山要覧が作成された。

2. 監視観測体制の整備と火山噴火予知の社会対応

(1) 火山噴火予知連絡会と主な噴火への対応

火山噴火予知計画では、火山噴火予知の実用化を図る計画の実施途上においても、観測体制の整備・拡充により得られた観測資料や研究成果を、社会の要請である火山災害の軽減に向けて活用するため、従前から努力を続けてきた。このため観測データの総合的解釈と観測成果の社会的活用のため、大学や関係機関が連携して昭和49年(1974)に火山噴火予知連絡会が組織され、活動の総合判断や情報発信等を通じて、火山防災での社会的要請に応えてきた。

火山噴火予知連絡会は、昭和52年(1977)の有珠山噴火、昭和61年(1986)の伊豆大島噴火時などには「総合観測班」を組織し、関係機関の観測網の調整と火山活動の総合判断を行うとともに、観測データを解説付きで迅速に地元行政機関等に提供する等、その機能が十分に生かされた。また、伊豆大島及び伊豆東部火山群の噴火活動では、火山噴火予知連絡会に「部会」が設置され、観測資料による火山活動の総合判断や社会に対する速やかな対応が行われた。火山噴火予知連絡会で検討された火山活動状況や調査・研究結果は「火山噴火予知連絡会会報」として公表されている。

火山噴火予知連絡会に、ワーキンググループが組織され、新たな活火山の認定、長期予測、火山情報の発信等に関する検討が進められた。その結果、計画発足時に77火山であった活火山は86火山となった。また、火山活動度のレベル化等が検討されている。

(2) 火山情報

火山噴火予知への国民の期待に応えるためには、火山活動の異常や変化に速やかに対応し、総合的な観測資料に基づく迅速で適切な情報の公表が最も重要である。陸域の活火山に関する火山情報は気象庁が、海底火山や海域の火山についての情報は、海上保安庁水路部が発表し、社会の防災対策等に貢献してきた。

雲仙岳の噴火が契機となり、平成5年(1993)に火山情報の種類・名称が見直され、新しい火山情報は、緊急性や重要度を伝えやすくする観点から、「緊急火山情報、臨時火山情報、火山観測情報、定期火山情報」と整理された。

3. 課題と今後の展望

(1) 監視観測体制

22年間の火山噴火予知計画で、観測設備の整備が進んだ活動的火山では、噴火に先駆けての前兆現象を検知し噴火開始を想定して事前の観測強化がなされ、火山活動の理解が大きく進展した。しかし、常時監視観測体制の対象の火山は19火山にとどまっている現状である。たとえ、地震計1台だけの監視であっても、前兆現象を検出し、適切な対応により減災に成功している例は少なくない。今後、全ての活火山で常時監視観測体制を構築し、基礎データを蓄積するとともに、長期予測を目指していく必要がある。

観測手法の多項目化や観測点の高密度化が進むにつれて、大学においても業務的作業が増加し、基礎的な観測研究の進展に支障をきたしている。これまでの火山噴火予知計画で確立された観測手法を、気象庁などの監視観測業務へ早期に活用する必要がある。

昭和の年代に入り、わが国の火山活動は、幸いにして、大きな人的災害を伴う噴火がなかったが、それ以前には数百名以上の人的災害を伴う噴火が多発した。今日、火山周辺での土地利用が進んでいるだけに、大規模災害軽減の対策としても、今後、火山の監視観測体制の拡充・強化を一段と進める必要がある。

陸域火山の機動観測では、噴火発生の場合に緊急に監視体制を強化するなどの対応をとってきた。火山活動の平穏時における状況を把握するための観測では、全ての活火山を巡回するのに数年を要している。今後は、観測頻度を高めるとともに、観測期間の長期化と観測機能の向上を図る必要がある。

海域火山の監視観測は、航空機等による定期観測と併せて、海底ハイドロホンアレイの整備や衛星による監視を進めていく必要がある。また、航空磁気測量による海底火山の噴火前後の特性把握や、海域火山の山体の構造調査も重要な研究課題である。

熱赤外映像の観測は、陸域活火山の1/3で実施されたが、大部分が1回限りのため、地熱分布

の変化を火山噴火予知に活用する目的は達していない。今後、観測頻度をあげるための組織的検討と、実施されていない活動的火山での早期観測が必要である。測地測量も、火山活動が始まってから観測を開始する状況が続き、噴火に至るまでの現象解明が十分に進んでいない。活動のある程度の期間休んでは噴火する火山では、噴火サイクルを測地観測で理解して火山噴火予知を進める必要があり、今後GPSや水準測量等を長期計画に基づき計画的に進める必要がある。

活動的な大多数の火山では、土地利用が進んでいるにもかかわらず、一部の火山を除いて詳細な地質調査や火山土地条件図の作成が実施されていない。これまでの地質学者による個別の調査研究に加えて責任ある機関が組織的なトレンチやボーリングによる調査、地質調査、地形調査、年代測定等を行い、噴火史を詳細にし、噴火の長期予測研究の基礎を積極的に進める必要がある。

火山噴火予知計画開始以降の噴火においても、御嶽山や伊豆東部火山群の噴火は、火山噴火予知計画で監視観測の対象となっていなかったが、地震予知の観測点が近くに設置されていたために、前兆現象の検出や小噴火発生の段階で評価のためのデータが得られた。このように他の分野の観測資料も火山噴火予知に役立ち、今後も関連する分野との緊密かつ有機的な連携の促進が必要である。特に、全ての火山に監視の目を行き届かせるためには、最低限火山性地震・微動の活動度を把握する必要があり、そのためには火山噴火予知計画独自の観測網に加えて、地震観測網の有効利用を積極的に検討すべきである。

（２）観測研究及び基礎研究体制

大学や関係機関における観測研究体制は、計画発足当初は地震観測の拡充強化から始まり、地殻変動観測の導入、観測点の広域化、観測坑道や観測井による精密観測の実施、各種観測設備の充実と施設の整備が図られた。また、物理学・化学・地質・岩石学的分野による総合的な基礎研究によって、火山噴火予知研究が推進されてきた。これによって、一部の活動的火山では総合的な活動評価や噴火の直前予測が可能となってきた。しかし、多くの火山では十分な観測設備が整備されていない。普遍的な火山噴火予知の観測研究を進めるためには高精度・高密度・多項目観測の整備を行い、良質の観測データを蓄積するとともに、マグマの物性や流動を理解するための実験的研究と併せ、噴火機構解明の基礎的研究を推進する必要がある。また、火山体の熱水系とマグマとの相互作用は、水蒸気爆発の発生機構の解明にも重要な課題であり、重点的に観測研究を進める必要がある。これらの基礎研究を推進するために幅広い人材の確保と組織の整備が重要である。人工衛星やリモートセンシング技術の利用、SAR等の面的な地殻変動の検出、山頂と山麓でのGPS・重力の同時比較観測、多成分火山ガス連続観測等新たな手法の導入が重要な課題であり、これを推進する体制を整備する必要がある。

火山噴火予知は、関連諸分野の総合的研究の推進が基礎となっており、研究補助者や技術者・技官の適切な配置も必要である。米国では、火山噴火予知・研究及び減災計画への従事者の2/3が博士号取得者であることも参考になろう。

（３）火山情報と防災

火山噴火予知連絡会は、雲仙岳の噴火において溶岩ドームの出現前に、溶岩流出の可能性を指摘するなど成果を得た一方で、火砕流の発生や警戒区域の設定に資する情報で、社会の期待に必ずしも十分応えられなかったという指摘がある。防災を担当する行政または住民が真に必要なきめ細かい情報発信を行う必要がある。

観測情報については、観測データの迅速な総合判断が必要であり、そのためには、気象庁、火山噴火予知連絡会の機能の強化も重要な課題である。併せて、防災機関や住民、マスコミ等、観測情報の受け手への事前啓蒙も課題の一つである。火山情報の発信方法は、諸外国の例も参考に活動度の変化を速やかに発信し、災害軽減に資する方策を検討すべきである。

また最近、航空機が噴煙に遭遇する事例が発生し、航空機の安全運航が妨げられ重大な事故になる危険性が問題となっている。噴火による火山灰情報等を迅速に周辺諸国へ提供する業務が平成9年度から開始されるが、噴煙の検出や拡散予測について一層の精度向上を図る必要がある。

II 予知手法等の開発及び基礎的研究の推進

第1次～第4次計画までと、現在進行中の第5次計画とに区分して記述する。具体的な成果のうち主なものについては、各小項目の記述の後に参照番号を示し、対応する文献のリストを巻末の参考資料に含めた。

なお、学術的な成果に関する総括的な文献は参考資料の文献リストの冒頭に付した。

1. 第4次計画までの実施状況と成果

(1) 予知手法等の開発

ア. 当初の目標

地下のマグマの動きを多種の火山観測により探知するために、観測測定が多項目化、連続化及び精密化を目指して新たな観測装置及び観測手法の開発研究を行う。諸機器の効果的な活用を図りつつ、予知の新手法の開発を図る。

イ. 実施状況と成果

従来から基本的な火山観測手法であった地震や地殻変動について、観測の近代化とデータの高品位化のための整備が実施され、顕著な噴火活動が生じた火山では、地震及び地殻変動観測が火山活動に伴う火山体内部の力学的状態変化の把握に有効であることが示された。また、火山噴火予知計画の発足後取り入れられた地球化学的及び地球電磁気学的観測も、火山体内部の熱的な状態変化やマグマの挙動等を捕捉する有効な手法であることが、いくつかの火山において検証された。

α. 地震、地殻変動、重力等の観測手法

火山噴火予知計画発足とともに、地震観測点の増設と煤書き現地記録方式からテレメータによる集中記録方式への切り替えが順次実施され、震源決定が可能になり、火山性地震の発生機構等の研究の進展を促した。また、光波測距儀、気泡式傾斜計が火山の地殻変動観測に取り入れられ、有珠山や雲仙岳のように比較的顕著な変形を伴うデイサイト質溶岩の貫入噴出過程の観測研究に、また、火口に近接して気泡式傾斜計の多点観測を行えば、火山性地震・微動の発生等に対応した微小な火山体の変形の検出も可能であることが伊豆大島等で示された。第2次計画からは、ボーリング孔や観測坑道にセンサーを設置して火山体のごく微小な変形や内部で発生する微小な地震を捉える試みが順次開始された。その結果、十勝岳、伊豆大島、阿蘇山、桜島等で、噴火及び火山性地震や微動の発生に対応した火山体の微小な変形が明瞭に観測された。また、地中地震計及び広帯域地震計により、データの高品位化が実現し、火山性地震の発生機構の研究に進展がみられた。近年は火山体とその周辺やや広範囲な地殻変動観測にGPSが活用され、伊豆東部火山群や雲仙岳の活動に際してその有効性が示された。いくつかの火山では、マグマ貫入等によって引き起こされる地下の密度変化に伴う微小な重力変化を検出するための調査が、集中総合観測等を通して組織的に行われた。伊豆大島、三宅島、桜島等ではマグマの貫入・後退やマグマ溜り付近での密度変化に起因すると考えられる重力変化が捉えられた。他方、測定された重力変化には、地下水位の変動の影響が大きい場合もあることが、有珠山、伊豆大島、雲仙岳等で判明した。(文献1～5)

β. 電磁気学的観測手法

火山活動に伴う火山体浅部の温度変化等物理的状态の変化を電磁気学的手法により検知する試みとして、伊豆大島において地磁気連続観測及び電気抵抗の繰り返し測定が行われた。その結果、昭和61年(1986)の噴火に先行して、火口近傍の地下浅部の電気抵抗の異常な変化及び熱消磁によると見られる全磁力変化を検出した。さらに、従来、地磁気変化の検出が困難と考えられていた阿蘇山、草津白根山、雲仙岳、霧島新燃岳のような安山岩質やデイサイト質の火山でも、全磁力観測により火口浅部の熱的状态変化を反映していると考えられる地磁気変化が明瞭に観測された。

超低周波(VLF; 10kHz前後)から極超低周波(ULF; 10^{-4} ～1Hz)にいたる周波数帯域の電場・磁場観測から火山の地下構造を探るための調査が伊豆大島、阿蘇山、霧島山、雲仙岳等で実施され、火山体やカルデラの浅部から深部にいたる比抵抗構造が明らかにされた。また、阿蘇山では、極低周波(ELF; 1～100Hz)帯の連続観測により比抵抗変化を検出し、それに基づいて地下の温

度変化を推定する手法の開発が試みられた。しかし、電極の経年変化の影響が無視できず、比抵抗の変化は容易には得られなかった。雲仙普賢岳、伊豆大島等では自然電位の観測が実施され、火山活動に伴う熱水系の盛衰に対応すると考えられる自然電位分布の変化が捉えられた。

また、桜島や雲仙普賢岳では空中電界変動の観測が実施され、爆発的噴火発生や噴煙柱の成長に伴って大気電場が変動することが示され、その種の観測が噴火の発生検知や噴煙柱の成長分散過程の研究に役立つことが示された。(文献6~10)

c. 熱的状态等の火山活動の隔測手法

第1次予知計画では火山噴火に対する短期的予知の手段として熱的状态の監視が有効と考えられ、放射温度計、赤外線走査装置等を用いた主要活火山の熱的状态の調査が行われた。引き続き、火山観測用の航空機搭載型赤外線走査装置の開発が行われ、雲仙岳、桜島、伊豆大島等での試験運用により、その性能が検証された。また、海底火山活動に特有な変色水域の定量的評価のために、マルチバンドカメラと赤外線映像装置が導入されるとともに、海底火山活動の監視のために、音響センサーの開発実験、遠隔操作可能な自航式ブイの製作と手石海丘等での運用が行われた。阿蘇山において火山噴煙観測システムの試験観測が実施された。衛星データを火山活動監視に活用するための解析手法に関する研究は、噴煙の検出、あるいは海底火山活動による変色水域の抽出を目的にすすめられ、ある規模以上の活動であれば、その検出が可能であり、活動の推移の監視に役立つことが分かった。

火山爆発による空振波を計測するための超低周波マイクロホンが開発され、爆発的噴火及び火砕流発生の検知に有効であること、また、ピナツボ火山や伊豆大島の噴火を例に、遠隔火山の活動の推移監視にも役立つことが示された。さらに、火山性地震や微動の中に空振の発生を伴うものがあることが見出され、火山性地震の発生機構解明に貴重なデータを提供した。(文献11~16)

d. 地球化学的手法

二酸化硫黄(SO_2)が特定波長の紫外線を吸収する性質を利用した遠隔測定装置(相関スペクトロメーター: COSPEC)を用いた繰り返し観測が行われた結果、 SO_2 放出量が火山活動に対応して増減することが多くの火山で確認された。しかし、雲仙岳噴火のように、溶岩噴出開始後まで SO_2 放出が観測されなかった場合もある。活動火口や噴気孔から放出される火山ガス、温泉水及びこれに溶存するガスの化学組成、同位体組成の繰り返し観測の結果、 H_2 濃度、 HCO_3 濃度、 HCl/SO_2 比、 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比等が火山活動の変化に対応する成分として特定され、桜島、伊豆大島、草津白根山では、これら成分の連続観測システムが開発導入された。

また、世界に先駆けて遠隔赤外分光観測が雲仙岳で試みられ、火山ガスの HCl/SO_2 比の遠隔測定が可能であることが分かった。火口湖にハイドロフォンを設置して、火口湖湖底の噴気活動を把握する方法が試みられ、火口湖に設置した水温水質水位の連続観測装置とともに活動的火山湖の湖底からの火山ガス突出の検知が可能となった。(文献17~22)

e. 地質学的・岩石学的手法

蛍光X線分析装置による火山岩の主成分及び微量成分の迅速分析の手法が確立し、噴出物が入手できる場合には、噴火継続中にマグマの組成を特定することが可能となった。昭和61年(1986)伊豆大島噴火の際には、この手法を用いて噴出物を準リアルタイムで分析し、2つの独立なマグマ供給系が存在することが認められたが、この結果は噴火機構や推移の予測に役立った。また、平成元年(1989)の伊豆東部火山群海底噴火では、噴出物の解析により、噴火の主因となったマグマが伊東市の海岸に漂着したデイサイト軽石ではなく、玄武岩マグマの噴出にあることが確認され、噴火機構を考察する上で重要なデータとなった。

水蒸気爆発の噴出物中に新鮮なガラス片が発見された場合、その噴火にマグマが関与した可能性が高いことが雲仙岳噴火で示され、噴火の推移を予測する上で重要な観測事実となることが分かった。(文献23~26)

f. 火山観測データの即時処理

地震、地盤変動等の観測データを即時処理し、解析結果や微動の振幅レベル等を表示するシステ

ムの開発がなされた。また、パソコンを用い、公衆電話回線を介して、安価に遠隔火山の多項目観測データを準リアルタイムでテレメータするシステムが開発され、薩南諸島の火山観測等に使用された。また、急峻な火山体での高密度地震観測や火山体構造の稠密地震探査を目的に、高精度、軽量でかつ低消費電力のデータロガーの開発が着手された。(文献27, 28)

㉔. 桜島での噴火予測システムの開発・試行

山頂火口で爆発的噴火活動を繰り返している桜島では、火口直下を震源域とする低周波地震、いわゆるB型地震が群発すると、その直後から数日～約2週間にわたり爆発的噴火が多発する。この経験則をもとに活動を評価するためのシステムの開発が行われた。まず、各種の火山性地震・微動をリアルタイムで自動分類する。次に、そのデータを用いてB型地震の発生状況に関するある指標を計算し、過去1ヶ月間のこの指標の変動と爆発発生との関係について統計的解析を行い、今後24時間の爆発発生の可能性を評価する。約2年間の試行実験では、発生した爆発の約80%が「危険」と判断された日に発生した。しかし、顕著な爆発が「安全」と判定された日に発生した事例もあるので、B型地震の発生状況をもとにした「1日単位」の予測は、火山弾、噴石の脅威にさらされている地域住民にとって、実用的ではないことが分かった。

より確かな前兆として、坑道での精密な傾斜と歪み観測により、個々の噴火の直前、数10分～数時間前から火山体の極く微小な隆起膨張現象(傾斜: 0.01～0.3マイクロラジアン)が観測された。リアルタイムでデータに各種の処理を施し、地下浅部に蓄積しつつあるマグマ量を評価して、隆起量に応じて3種類の警告を発する直前予知システムが開発された。顕著な爆発的噴火の90%以上、小規模な爆発を含めても約70%の爆発に対して事前に警告を発している。しかし、火口底や火道の状態は常に変化していて噴火発生に至るまでの地盤の膨張率及び膨張量は一定でないため、噴火発生時刻の正確な予測及び火山弾がどこまで飛ぶかといった爆発強度の事前評価は困難である。なお、このシステムは一部の関係機関に設置され、リアルタイムでデータが提供されている。(文献29, 30)

(2) 火山噴火予知の基礎研究

ア. 当初の目標

火山噴火予知の実現は、観測データから火山体内部の状況が的確に評価できることが前提であり、そのために火山活動についての知識を深める必要がある。各種データや試料の解析、各種実験及び理論的考察に基づき、噴火機構、火山体内部構造、活動史、マグマの物性等に関する基礎研究を推進することとした。

イ. 実施状況と成果

顕著な噴火が発生した火山では、観測データの解析や採取された試料の分析に基づく噴火機構等に関する研究が進展した。また、噴火が発生しなかった火山でも、蓄積されたデータの解析、あるいは各種の手法を用いて、地下構造、活動史等に関する研究がなされた。さらに、火山噴火予知に関する基礎研究における国際協力の意義が、ザイール、インドネシア等との共同研究を通して確認された。

㉑. 火山性地震の発生機構

活動的火山を中心に、火山性地震の震源過程に関する研究がなされ、地殻変動データ等との比較対象により、その発生機構について新たな知見が得られた。昭和52年(1977)にデイサイト質の軽石を多量に噴出し、数年間にわたって顕著な地震活動と潜在溶岩丘の上昇が継続した有珠山では、潜在溶岩丘のステップ状の隆起運動と同期して、顕著な地震の発生が観測された。山頂火口原内のU字型の隆起部分に対応した震源分布と発震機構が明らかにされた。さらに、地震波形のインバージョン解析によって求められた断層パラメータが、実測された断層の変位と整合することが示された。

昭和58年(1983)に割れ目噴火を生じ、玄武岩質溶岩を流出した三宅島では、全観測点で初動が「押し」、あるいは「引き」でしかも明瞭な横波相が認められ、通常地震の発生メカニズムでは解釈できない地震が多数観測された。この地震を説明するために、開口割れ目の端にクラックが発生す

るという震源モデルが提唱された。また、昭和61年(1986)の伊豆大島の割れ目噴火発生前後に発生した震源域の成長と発震機構が丹念に解析され、割れ目噴火の発生機構が論じられた。

平成元年(1989)の伊豆東部火山群海底噴火直後の地震の精密な震源決定により手石海丘直下は地震の空白域になっていることが明らかにされ、マグマの上昇経路との関連が指摘された。

平成2年(1990)から噴火活動を開始した雲仙普賢岳では、噴火に先立ち雲仙岳西方の橘湾から雲仙普賢岳へむけて震源域が順次接近したこと、雲仙普賢岳山頂直下の1~3kmでは地震の発生がまったく見られないことが明らかにされ、地殻変動の解析結果と調和的な、橘湾から雲仙普賢岳にのびるマグマ供給系の存在が示唆された。なお、同様に、火山体直下の数kmより深い部分に地震が発生しない領域があり、それと地殻変動を引き起こす力源の位置が一致することから、マグマ溜りの存在が推定された例として、伊豆大島、桜島及びザイルのニアムラギラ火山が挙げられる。

爆発的噴火を繰り返してきた桜島では、火口直下で発生する立ち上がりの信号がはっきりとしている地震、いわゆるA型地震の発生機構が調べられ、発震機構は活動期に対応して変化することが示された。浅間山及び桜島では、山頂火口の下で多数発生するB型地震には、やや高周波が卓越するタイプ(BH型地震)と低周波が卓越するタイプ(BL型地震)があることが判明し、桜島では、この種の地震波の初動部分の解析から、上下方向に膨張、あるいは収縮する発震機構を有することが明らかにされた。また、震源域の深さの違い、対応する地殻変動(BH:隆起膨張, BL:沈降収縮)と表面現象との関係から、BH型地震はマグマが火道に貫入する過程で発生するのに対して、BL型地震は火道中をマグマが火口底へ向け上昇・溢出する過程で発生することが示された。(文献31~38)

b. 火山性微動の発生機構

火山性微動については、その発生機構の研究にとって興味深い観測結果と新たな知見が得られた。十勝岳、桜島等の安山岩質火山では、活動期に単一の周波数が卓越し波群全体が紡錘形をなす微動が観測される。

桜島では、スペクトル解析により、1Hz前後のピーク周波数を基本としてその整数倍の周波数にピークが現れることが示された。しかも周波数が短時間のうちに変動する。このような特徴から火道柱のガス溜りが振動源であると推定された。諏訪之瀬島及びインドネシアのスメル火山についても同様の解析結果が得られた。

伊豆大島では、昭和61年(1986)噴火後に周期的に繰り返された火山性微動と同期して、膨張から収縮へ、または収縮から膨張への地殻変動が傾斜計、体積歪計により観測され、その原因が北西山腹の地下にあることが決められた。火山性微動が流体の流れに起因することを示す新しい証拠として注目される。同様の結果は、十勝岳でも得られた。また、伊豆大島では、火口に近接した高密度地震観測網によって、微動発生源から等方的な地震波が放出されていることと、その振動が時間間隔ほぼ0.1秒のパルスの繰り返しからなることが明らかにされた。雌阿寒岳、浅間山、口永良部島などでは、振動が数10秒から数分継続する減衰振動型の低周波地震が観測される。

草津白根山で発生するこの種の地震についてスペクトル解析がなされ、複数のスペクトル・ピークの位置と幅が、地殻中に想定される流体溜りの共鳴で説明できることが示された。(文献39~42)

c. 火山性地殻変動のモデル化等

観測坑道や観測井内での傾斜、歪の精密連続観測によって、火山性地震や噴火に伴う微小な変動が十勝岳、伊豆大島、手石海丘、阿蘇山、雲仙岳、桜島等で捉えられた。また、水準測量、光波測量、GPS測量によって、顕著な噴火に伴う広域的な変動が捉えられた。特筆される成果として、昭和61年(1986)の伊豆大島噴火を契機とする割れ目噴火のモデル化の研究が挙げられる。伊豆大島の割れ目噴火では、火口列にそって線対称的な地殻変動が生じ、開口割れ目モデルによって、地下に形成された割れ目の位置、形状、開口幅が推定された。また、噴火前後の重力変化と地殻変動をあわせて説明するためのモデルが提唱され、割れ目火口列の地下にはクラックが生じ、水、ガス等のマグマより低密度の物質に満たされている状態であることが推定された。なお、割れ目噴火に対応した傾斜、歪み変化が観測され、その解析から溶岩流出によって減圧を生じた伊豆大島の地下のマグマ溜りの位置が推定された。開口割れ目モデルは手石海丘噴火前後の変動、大正3年(1914)の桜

島の噴火にも適用され、割れ目の位置と形状が推定され、他のデータと併せてそれらの噴火の発生機構が論じられた。

一方、雲仙岳の活動に関連して、島原半島では同心円状の地殻変動分布が観測された。データの解析からマグマ溜りの位置の推定がなされ、地殻変動の意味が論じられた。溶岩ドーム出現以前には島原半島西部を中心に緩やかな隆起膨張傾向にあり、溶岩流出後は逆に沈降収縮に転じたことが明らかにされ、解析によって、普賢岳から西方に向かい次第に深さを増すという、地震の震源分布と調和的なマグマ供給系の存在が推定された。また、溶岩噴出率と地盤の変形率の関係から、平成3年(1991)以降数年間にわたり深部からのマグマの上昇率が增大したことが推定された。桜島では、水準測量の繰り返しによって、過去少なくとも100年にわたり、始良カルデラ地下のマグマ溜りへ年間1000万 m^3 のマグマの供給が続いていることが示された。

また、昭和58年(1983)に噴火した三宅島及び昭和61年(1986)に噴火した伊豆大島では噴火終息後も、水準測量、GPS測量等地殻変動観測が継続して実施され、マグマの再蓄積を示唆する緩やかな膨張が、着実に進行していることが確認された。なお、伊豆大島では昭和61年(1986)の噴火後も精密重力測定が繰り返された結果、噴火後のマグマの後退と関連した重力変化が検出され、火道中のマグマの頭位の変化について定量的な推定がなされた。

桜島では個々の山頂噴火の前の微小な隆起膨張と噴火後の沈降収縮現象について解析がなされ、この変動はマグマが山頂火口直下2~6kmのマグマ溜りから火道にかけての領域に貫入したために引き起こされた現象であることが明らかにされた。さらに、爆発と同時に火道上部で急激な減圧が生じたことを示す歪みステップが観測され、その量が空振の強度とほぼ比例することから、爆発発生直前に火道上部に形成されたガス層の破裂によると解釈された。(文献43~48)

d. 噴火現象の解析研究

浅間山や桜島で発生するいわゆるブルカノ式噴火では、衝撃波の発生、火山弾及び噴煙の放出とともに、火口直下で爆発地震が発生する。浅間山及び桜島では爆発地震の初動部分の解析から、その震源域の大きさと圧力変化がそれぞれ見積もられ、その圧力変化は数パール未満という結果が得られた。桜島では、観測井で得られた地震データの初動部分の解析及び長周期地震波の波形のインバージョン解析から、爆発地震の震源過程が論じられ、最初に震源域で上下方向の膨張が生じ、次に、物質放出に対応して、より顕著な収縮過程を伴うことが示された。また、爆発的噴火現象の映像等の解析から、爆発地震の発生が火口での爆発現象の発生に約1秒先行する事が明らかにされ、爆発地震が爆発の直接的なトリガーの役割を果たしていることが示された。

また、衝撃波発生、噴煙の成長過程の解析等から爆発発生直前には火道上部にはガス層が形成されていることが推定された。雲仙岳の溶岩ドームの崩落による火砕流の発生について、長周期地震計、データのインバージョン解析、超低周波マイクロホンデータ及びビデオ画像データの解析により、溶岩ドームからの岩塊の剥離、落下、更に流下に至る過程が定量的に明らかにされ、火砕流の発達過程における岩塊の大きさやその中に含まれる火山ガスの役割などが考察された。(文献49~53)

e. 活火山の浅部及び深部構造

火薬、パイロサイス、エアガン等の人工震源、重力、各種の電磁気学的手法を用いた火山体やカルデラの構造調査が、支笏湖、有珠山、秋田駒ヶ岳、磐梯山、伊豆大島、三宅島、阿蘇山、霧島山等において実施され、火山体及びカルデラ地域の地殻上部の速度構造、浅部から地殻上部にいたる電気抵抗構造等が明らかにされた。

昭和新山では、人工地震による地震波速度の繰り返し調査によって、溶岩ドーム内部の弾性波速度の時間変化が明らかにされ、溶岩ドームの冷却過程との関係が論じられた。磐梯山や伊豆大島では、エアガンを用いた稠密な地震探査が重力測定とともに実施され、地震波速度構造及び密度分布から見ると山体の中心部地下では、周囲に比べると高密度・高速度になっていることが明らかにされ、基盤の盛り上がりも推定された。阿蘇山では常時地震観測データを解析して、地震波の速度異常域及び異常減衰域を検出する研究がなされ、カルデラ内部の6km~10km以深にマグマ溜りが存在する可能性が指摘された。

東北地方では、微小地震観測網と広域火山観測網のデータを用いて、地殻及び上部マントルの詳

細な3次元速度構造が求められた。その結果、火山地域直下の上部マントルから地殻に伸びるマグマ上昇経路を示唆するような低速度域が見つかり、その周辺に反射面や低周波地震の活動域が存在することが明らかになった。活火山の深部の構造の地震活動に関する研究は、他の地域でも行われた。(文献54~59)

f. 揮発性成分の挙動

複数の活動的火山で火山ガスや温泉水などの化学組成の連続観測及び繰り返し観測が行われ、これらに現れる化学組成や温度などの変化は噴火活動に先行して、あるいは同時に現れるものが多いものの、噴火発生後に変化が現れる場合もある。このような観測データの蓄積によって、活動的火山の山頂火口からの火山ガスはマグマから分離した直後の組成を保っていることが多いことがわかり、化学組成の熱力学的解析からマグマの温度を推定することができるようになった。この結果は、固体噴出物の解析によるマグマの温度の推定と調和的である。

また、雲仙岳で溶岩ドーム出現以降のSO₂放出量がマグマ供給量の増減に伴って変化することが確認され、火山ガスの放出量の観測が火山活動の推移予測に有効であることが判明した。

火山ガスや湧水の酸素、水素、炭素の安定同位体の研究によって、マグマ物質に混入する地下水、堆積有機物の影響の評価、噴火に関与する地下熱水系の解明に大きな進展が得られ、火山ガスの化学組成や噴出物に付着するガス成分の解析等と併せて噴火様式の推定に寄与した。(文献56~60)

g. 火山噴出物の研究

三宅島の昭和58年(1983)噴火を例に、火山灰の分布、その粒度分布等と実際の噴火推移との関連を対比させた結果、噴出物の解析が噴火推移の推定に有効であることが分かった。また、雲仙岳の火砕流堆積物の解析、火砕流の観測に基づいて、溶岩ドームの崩落に伴う火砕流の発生機構が解明された。噴出物の岩石学的解析によりマグマ中に含まれていた水の量を推定する方法に関する研究が進んだ。(文献65~70)

h. 火山活動史の調査研究

雲仙岳の過去の噴火活動に関する地質学的調査に基づいて噴火史を検討した結果、今回の噴火が数千年に一回程度の頻度で発生する、比較的大規模な噴火活動であることが判明した。さらに、いくつかの活動的火山でも地質調査が行われ、有珠火山でこれまで泥流堆積物とされてきたものが岩屑なだれであることや、北海道駒ヶ岳の歴史時代の主な噴火は火砕流を伴ったものであったこと、草津白根火山の有史の噴火はすべて水蒸気爆発であったことなどが分かった。また、伊豆大島でも側火山の分布が新たに確定されるなど、過去の活動史に関する研究が進んだ。溶岩流のシミュレーション手法が昭和58年(1983)三宅島噴火、昭和61年(1986)伊豆大島噴火、大正3年(1914)桜島噴火の際の溶岩流の分布状態を再現することが確認され、災害予測図の作成に貢献した。(文献71~73)

i. マグマの物性等に関する研究

マントルにおけるマグマの発生条件に関する実験的研究が進み、マグマ発生の温度圧力条件とマグマの化学組成の関係についての研究が進んだ。高压下における粘性や密度等のマグマ物性を測定する手法が確立されたほか、さまざまな種類のマグマへの水の溶解度に関する実験的研究が進み、噴火様式と関連の深い揮発性成分の発泡現象に関する基礎データの集積が進んだ。(文献74~77)

(3) 火山活動資料の整備

ア. 当初の目標

今後の火山活動の予測に役立つ基礎資料を整備することは、火山噴火予知の推進にとって重要な課題である。このため、関係機関はそれぞれの特色を生かして、基礎的資料を順次整備する。

イ. 実施状況と成果

α. 大縮尺精密火山基本地形図

十勝岳、樽前山、有珠山、北海道駒ヶ岳、草津白根山、浅間山、伊豆大島、三宅島、阿蘇山、雲

仙岳，霧島山，桜島の活動的で重点的に観測研究を行うべき火山，及び雌阿寒岳，岩手山，秋田駒ヶ岳，蔵王山，吾妻山，磐梯山，那須岳，焼岳，御嶽山の活動的火山及び潜在的爆発活力を有する火山について，5千分の1また1万分の1精密火山基本図を作成した。噴火のあった伊豆大島，三宅島，雲仙岳については修正図を作成し，特に雲仙岳については数か月毎に改訂してマグマ噴出率算出の基本資料となったほか，2万5千分の1の数値標高データが作成された。

b. 精密海底火山地形図

20万分の1「新島」，「神津島」を作成し，「八丈島南西方」，「八丈島南方」，「須美寿島西方」，「鳥島西方」，「鳥島東方」，「鳥島」及び5万分の1「横当島」，「硫黄鳥島」，「相模湾南西部」，「西表島北部」，「硫黄島」，「南硫黄島」，「西之島」，「石垣島北部」，「薩摩硫黄島」，「鹿児島湾」，「橘湾」，「島原湾」の海底地形図を刊行した。また，明神礁，手石海丘，南日吉海山，福德岡ノ場，噴火浅根，海徳海山の精密海底火山地形図を作成した。

c. 火山地質図

200万分の1地質図「日本の火山」第2版及び500万分の1「日本及び隣接地域第四紀火山図」を作成した。火山地質図「桜島」，「有珠」，「草津白根」，「阿蘇」，「北海道駒ヶ岳」，「浅間」，「青ヶ島火山及び伊豆諸島南方海底火山」及び2万5千分の1の特殊地質図「大島火山1986年の噴火」を作成した。また，秋田駒ヶ岳，鳥海山，安達太良山，伊豆大島，御嶽山，焼岳，乗鞍岳等を含む5万分の1の地質図幅を作成した。

d. 火山土地条件図等の整備

北海道駒ヶ岳，十勝岳，草津白根山，雲仙岳，阿蘇山，桜島の火山土地条件図を作成した。さらに，傾斜分級図が雲仙岳，伊豆大島，三宅島及び八幡平について作成された。

e. その他の火山活動基礎資料の整備

活動的火山の噴火史の把握のために日本活火山要覧が作成された。その後，日本活火山総覧として発展した。新たな情報を追加して第2版も作成・刊行された。

2. 第5次計画の進捗状況

(1) 噴火機構解明のための基礎的研究の推進—火山の構造把握を中心として—

ア. 当初の目標

マグマ溜りやマグマ供給系を含む火山体内部の構造を明らかにするために，霧島山，雲仙岳等をテストフィールド火山として，人工震源を用いた稠密地震探査，電磁気学的探査，重力探査，火山ガス，地下水の観測及び地殻変動観測を実施する。状況に応じて，マグマポーリングを含む検証的探査を行う。また，噴火のモデル化を目指して，多項目の観測データに基づき火山活動度を定量的に評価する研究やマグマの物性と噴火等の関係等についての基礎的研究を幅広く行う。

イ. 実施状況と成果

a. 火山体内部の構造と状態の把握

第5次計画当初に実用化されたGPS刻時装置付きデータロガーを用いて，人工震源による稠密地震探査が霧島山及び雲仙岳で実施された。また，両火山では，重力探査，電磁気学的探査等が実施された。霧島山ではその北西部の地下約10kmに低比抵抗層が存在することが明らかにされた。一方，常時観測のデータを用いた3次元地震波トモグラフィでも，ほぼ同じ領域に低速度層及び地震波の減衰域の分布が見出された。また，九重山でも常時地震観測データの解析により，九重山の北方約5～20kmに地震波の異常減衰域が存在することが分かった。地震データから地下構造に関する新たな情報を得る解析手法として，散乱波トモグラフィの方法が開発され，遠地地震波のデータを用いて伊豆大島火山地下の散乱体分布が求められた。散乱体分布と震源分布及び地殻変動等から推定されたマグマ溜りの位置等との比較から，強い散乱体の存在する領域がマグマ溜りの位置に相当する可能性があることが指摘された。(文献78～80)

ロ．火山の活動度と噴火の様式に関する基礎研究

火山性微動発生モデル化のために、粘性流体で満たされた球や円柱の振動の理論波形を計算する方法が開発された。また、水蒸気爆発のメカニズム解明のために、マグマと地下水の相互作用の不安定化の条件の特定等をめざした実験的研究が開始された。降下火山灰の粒度解析から、噴火時の噴煙の拡散に関するダイナミクスを復元する理論的手法が開発され、平成3年(1991)ピナツポ火山噴火への適用が行われた。海底火山の活動に伴う変色海水の色調の違いは海水中に懸濁した鉄-アルミ-シリカ系の低結晶物質の化学組成によること、また、その化学組成は海底火山から海水に混入した火山性熱水に支配されることが明らかになった。(文献81~86)

(2) 予知手法等の開発と基礎資料の整備

ア．当初の目標

予知の実用化と精度の向上に向けて、火山特有の諸現象に即した観測手法や機器システムの開発を行う。特に、衛星や航空機を用いたリモートセンシング技術の開発を行う。さらに、可搬型観測機器の開発を推進し、また、多項目にわたる諸観測データの即時処理システムの研究開発を推進する。火山活動の予測の基礎となる地形図、地質図等の整備を引き続き進める。地質学・岩石学的調査を行い、各火山についての噴火様式および推移に関するデータを集積する。更に蓄積されつつある多種多様の膨大な観測データの活用を図るため、データベースの構築を進める。

イ．実施状況と成果

α．リモートセンシング技術の開発

第4次計画で実用化された火山専用の空中赤外映像装置の制御部等の改修や機能向上がなされ、観測結果の画像化処理の迅速化を図った。また、いくつかの機関では衛星のSARデータの干渉処理により、硫黄島、伊豆大島、雲仙岳等の地殻変動の検出が試みられた。また、航空機に搭載したレーザ高度計による火山地形測定技術の研究が開始された。噴煙活動の定量的把握のために、マイクロ波放射計等を用いた観測が阿蘇山で実施され、高分解能3次元マイクロ波映像レーダの開発も着手された。衛星からのSO₂放出量測定のための研究が着手された。さらに、海底観測ケーブルにハイドロホンを配置して海底火山活動をリアルタイムで常時監視するシステムの開発が着手された。(文献87~90)

ロ．観測装置の開発

刻時装置付きデータロガーが実用化され、地下構造探査及び国内外の活火山において多点地震観測に用いられた。月の地震を観測するために開発されたペネトレータの技術を応用した火山投下用の地震計が開発され、雲仙岳で投下実験が行われた。火山における地震波速度の繰り返し観測を目指して、孔井用エアガンを用いた基礎調査が実施されたほか、精密制御震源装置の開発も行われ、試験機が制作された。火山ガスの安定した連続測定を目的として、事前に脱水処理をおこなって火山ガスの分析を行うシステムが開発され、伊豆大島において試験観測が行われた。(文献91)

シ．即時処理システム等の研究開発

活動評価の精度向上のために即時処理システムのソフト改良等が継続的におこなわれている。桜島では、温泉及び火山ガスの各種測定データのテレメータによる集中記録及び表示システムが開発設置され、地球化学的データを含めた火山活動評価方法の検討が行われている。

ス．噴火タイプ及び推移に関するデータの集積

溶岩の噴出年代の推定に地磁気の経年変化を利用する古地磁気学的手法が適用され、噴出年代が不明であった桜島の長崎鼻溶岩が7~8世紀の噴出であることなどが判明した。九重火山山頂部のトレンチ調査と古文書による活動履歴調査により、過去約4千年間の活動履歴が明らかにされたほか、阿蘇火山のボーリングコアの解析から、阿蘇カルデラ内にカルデラ形成直後からの2万年間で厚さ800mの火山岩が噴出・堆積したことが明らかになるなど、活動的火山における噴火履歴の調査が進みつつある。さらに、那須火山調査によって、茶臼岳の噴火に周期性が認められることが確

認された。

e. 基礎資料の整備

国土地理院は岩木山，鳥海山，九重山の精密火山基本図，三宅島の火山土地条件図を作成した。海上保安庁水路部は，測量船により海底火山及び火山島周辺の海域の海底地形，海底地質，地磁気，重力，地熱等の調査を行い，精密な海底地形図等を刊行するとともに，これらの調査結果をまとめた海域火山基礎情報図の整備を検討している。地質調査所は，那須岳，伊豆大島等で地質調査を行うとともに，火山地質図「雲仙」を刊行した。

3. 達成度と問題点

(1) 予知手法等の開発

火山噴火予知計画発足以降，予知手法として急速に進展が見られ，特に注目されるのは，電磁気学的手法と地球化学的手法であろう。例えば，静穏期から活動期へ移行しようとする火山において噴火口の地下浅部での温度変化を間接的に検出する手段としての全磁力観測の有効性が，玄武岩質からデイサイト質にいたる複数の火山で実証された。しかし，噴火口近傍で観測する必要があり，爆発的噴火活動を繰り返している危険な火山でこの手法を適用するにはいくつかの工夫が必要である。また，地球化学的観測手法も複数の噴火を経験し，一般的には火山ガス放出量(特に SO_2)が噴火発生に先行して増加すること，マグマの供給率とよい相関があること，火山活動の変化に連動して変化することなどが観測された。ただし，活動の変化に対応する放出量の変化が観測されなかった場合もあり，必ずしも確実な前兆現象として捉えられるわけではない。また，火山ガスや温泉水中の成分濃度，組成比，同位体比が活動の消長と関連することが経験的には判明しているが，定性的な理解の域をでていない。このように，問題点はいくつかあるものの，地磁気変化など電磁気学的手法及び火山ガスや温泉水を対象とした地球化学的手法が，地震観測を中心とした地球物理学的手法と並んで，火山活動の消長を把握する有効な手法であることは確かである。

また，組織的に繰り返された精密重力測定によって，高精度の重力測定を行えば，マグマの貫入による地下の密度変化が検出できる見通しが得られた。地下水位の変化の影響が大きい場合があるが，他の観測とあわせれば，火山体内部のマグマや熱水等の動きを検出できる有効な観測手法であるといえる。地質学・岩石学分野では，いくつかの火山で過去の噴火履歴の解析が進んだ。また，噴出物の化学組成と噴火様式などとの対応関係が明確になっている火山で噴火が発生した場合，噴出物の迅速な分析を行って噴火推移の予測に役立てることができるようになった。しかし，現実には，噴出物の化学組成と噴火様式等との対応関係が未だ分かっていない火山が多く残されている。さらに，火山ガスや噴出物の分析を手段とする手法に関しては，試料そのものの採取が不可欠であるが，噴火時には多大な危険を伴うため，必ずしも実現できない。遠隔観測を利用するとともに，試料採取の方法が検討される必要がある。

火山噴火予知計画発足後に開発・導入された各種の火山活動の遠隔観測手法の内，そのいくつかは火山監視業務に取り入れられつつある。例えば，衛星で得られた画像に基づく噴煙の検出技術は航空機の噴煙による被災防止を目的に設置された「航空路火山灰情報センター(仮称)」で，また，空振計や可視光・赤外線等による遠望観測装置はいくつかの火山での活動監視に活用されている。これらは，直接火山の噴火発生の予測に役立つわけではないが，火山活動の推移の予測にとって重要な情報を提供するものであり，今後とも火山活動の監視に有効な手法の開発と改良を続けていく必要がある。

従来から主要な火山観測手法であった地震及び地殻変動の観測においても，テレメータの導入，観測井及び観測坑道による高品位データの取得，GPS等の新たな測定技術の導入により，火山体の力学的状態を捕捉する能力が飛躍的に発展した。適切な場所に機器を設置すれば，顕著な噴火について，その前兆現象が捉えることが実証された。しかし，機器設置に適切な場所の選定はそれぞれの火山の内部構造等に対する理解度に依存すると同時に，地形，電力などの各種の観測上の制約を受けるので，基礎研究の進展及び観測手法の開発が必要である。また，これまで経験した噴火について振り返れば明らかなように，活動予測と関連した多項目観測データの総合的評価は，限られた数の専門家の経験と知識に依存しているのが現状である。

今後，火山噴火予知の実用化に向けて，蓄積された知識とデータに基づくデータベースの作成，

観測データの即時処理及び活動評価のためのシステム開発が必要である。このことについては、気象庁における火山監視の目的での活用を念頭において、各火山ごとの観測データ及び火山噴火予知連絡会での検討結果を含めたデータベースの作成を計画している。このようなデータベースは火山噴火予知研究にも極めて有用であるので、その活用を推進すべきである。

（2）基礎的研究の推進

ア．火山性地震と微動

火山性地震・微動の発生機構の研究は、顕著な噴火活動を生じた火山を中心に進展が見られた。その進展は、高精度の震源決定を可能にした高密度観測、高品位のデータ取得を目的とした地中地震計や広帯域地震計等センサーの改良及び波形解析による震源過程推定手法の向上などによってもたらされたが、同時に、地殻変動など他の観測データとの比較対照により得られた知見もある。例えば、伊豆大島、桜島等では、ある種の微動や地震は、火道近傍でのマグマ等流体の動きと関連していることが推定された。また、観測される火山性地震・微動は多種多様であるが、噴火様式やマグマの性質が類似した火山では、似たような地震・微動が観測されるということも分かってきた。

しかし、現在までのところ、個々の火山についての事例研究の段階にとどまっている。火山性地震・微動の発生機構の解明には、これまで得られたデータについて個々の火山で解析研究を一層進めることはもちろんであるが、複数の火山で共通に観測された事象についての比較研究も必要であろう。また、発生域の物理的状態と構造、マグマや火山ガスの挙動を考慮した火山性地震と微動の発生機構のモデル化の研究の進展が望まれる。

イ．マグマ供給系

マグマ供給系の研究も、伊豆大島、阿蘇山、雲仙岳、霧島山、桜島等で各種の観測データ及び試料の解析、また、各種地下探査手法により進展が見られた。これらの火山では、火山体やカルデラの地下数km～10kmにマグマ溜りが存在する可能性を示唆する地球物理学的な証拠が得られた。また、いくつかの火山ではマグマの蓄積状況が地殻変動観測等によって把握されつつある。しかし、マグマ溜りの具体的な形状、その内部と周囲の状態等については殆ど分かっていないのが現状である。一方、火山噴出物の解析からマグマ溜まりの温度・圧力条件をもとめたり、噴火の激しさと密接な関連があるマグマ中に含まれていた水の量を推定する方法は一定程度進展した。しかし、地球物理学的観測手法から要求される深さの精度と岩石学的手法で求められる圧力の精度の間にはまだ隔りがあるなど問題点は残されており、更なる研究が必要である。

ウ．噴火機構

地震、地殻変動、爆発現象等の地球物理学的観測により、マグマ性噴火の発生前にはマグマの貫入により火山体浅部の火道やマグマ溜り内の圧力が増大し、発生する火山性地震や微動のタイプも時間的に変化することが示された。例えば、雲仙普賢岳での溶岩ドーム出現過程では、高温ではあるが固い岩体が上昇しつつあることが、地磁気、地震、地殻変動などの総合的な観測により捉えられた。さらに、桜島の地下2～3kmの火道内では、マグマから揮発成分が分離している可能性が示され、爆発的噴火発生直前には噴火口直下にはガス層が形成していることが推定された。しかし、これまで得られたデータと知見を総合して、より普遍的な噴火機構モデルを構築しようとする研究、特に、物理計測により解明されつつある火山の地下の構造及び物理的状態と物質科学的に推定されたマグマの性質やその変化を比較検討する研究はいまだ進展していない。

また、水蒸気爆発や海底火山の前駆現象及びそのメカニズムの解明は、観測事例が少なく、従来に比べてほとんど進展していない。他方、水蒸気爆発の実験や噴煙のダイナミクスの理論的考察など、噴火のメカニズムを定量的に捉えようとする研究が進展してきた。更に、実際の噴出物の解析と結びつけようとしており定量的な火山物理学へと向かっている方向性は適切である。しかし、まだ真に定量化と言うにはほど遠く観測による事例研究も含め、更なる研究が望まれる。

溶岩流や火砕流の運動に関するシミュレーションも試みられ、防災上の観点からはかなりの成果をあげたと言える。また、溶岩ドーム崩落による火砕流発生のプロセスが地球物理学的観測や火砕流堆積物の解析によって明らかにされた。しかし、一般的には火砕流発生メカニズムなどについては不明な点も多く、今後の研究が必要である。

また、マグマの高圧下における揮発性成分の溶解度や物性測定の手法は確立されたものの、具体的なデータの蓄積に関してはまだ不十分であり、噴火機構の物理モデルを構築するうえで障害となっている。噴火機構を物質科学的に理解するためには、マグマ及び岩石の物性や地球化学的な研究を一層推進する必要がある。

エ．火山体浅部の流体の挙動

火山ガスや温泉水の化学組成変化が火山活動と関連していることは明らかとなった。しかし、組成変化が火山活動と連動して変化しない場合や火山活動の変化に遅れて変動する例も観測されるなど、依然として解明されていない点も多い。この意味で火山ガス・温泉水データの地球化学的観測設備と多項目の地球物理学的観測設備が整備された桜島など活動の活発な火山において、火山活動と火山ガス成分の化学組成変化の関係についての基礎的研究の進展が期待される。また、このような観測研究と同時に、マグマ中の揮発性成分の濃度やマグマからの脱ガス過程など揮発性物質の挙動の解明も進める必要がある。

一方、火山活動に関連して重力変化の中にはマグマの貫入やその密度変化ではなく、地下水位の変化に起因すると考えられる結果も得られた。また、地電位測定からは火山活動に伴い地下水及び熱水の流動様式が変化することが推定されている。したがって、マグマの挙動を定量的に把握するためには、火山体浅部の地下水・熱水の分布や流動を支配する要因を理解するための研究の進展も望まれる。

オ．火山活動史

雲仙普賢岳の例にみられるように、詳細な地質調査をおこなえば、火山活動史や個々の噴火の様式をかなり細かく解析する事ができる。しかし、一般的な地質調査では必ずしも個々の小噴火に対応するような地質学的証拠を挙げられない。火口周辺でのトレンチ調査等、噴火活動の解明という明確な問題意識をもった地質調査が必要である。地質調査所による九重火山山頂付近でのトレンチ調査はこの種の研究が有効なことを示したと言える。また、噴出年代と噴出物の累積量との関係を時間-積算噴出量階段ダイヤグラムで表現し、噴火活動を定量的に取り扱うことも行われるようになった。しかし、これまで火山噴火予知計画として位置づけられてきたわけではないので、系統的に調査が進んではいない。この階段ダイヤグラムは長期予測や推移予測の重要な基礎データであるのでトレンチ調査を含む系統的な調査と年代データを増やす努力がおこなわれることが望まれる。

(3) 火山活動基礎資料等の整備

雲仙岳噴火の際に精密火山基本地形図や空中写真が果たした役割は大きい。数か月おきに改訂・作成された地形図に基づき噴出率の算出が行われ、噴火推移の把握に有効であった。また、観測機器の配置に際しても重要な基盤資料となる。このように、基礎資料としての精密地形図は陸上、海底を問わず重要であり、今後ともその充実に努めるべきである。なお、噴煙や地殻変動の解析にTOMS(全オゾン量測定装置)、SAR等の衛星データやドップラーレーダーなどの活用も試みられており、今後も手法の開発が望まれる。火山噴火の長期予測や個々の火山の特徴把握に必要な基礎データとして、火山地質図等地質データの集積が充実してきた。伊豆大島噴火時の噴火推移予測に地質学データが用いられたように、地質データは明らかに火山学の基礎データとしては有効であるが、噴出物の特徴や性質と噴火の様式、規模、推移との対応が明らかになっていない火山も多い。このため、噴火が生じた際の噴火推移の予測には任意性が残る。今後、噴火予測を意識した噴出物の調査と分析及びデータベースの整備が行われる必要がある。

4. 今後の課題

ここでは、前項の達成度と問題点の評価に立って、達成度が不十分な点や問題点を解決するために重要と思われる、予知手法の開発と基礎研究に関わる課題に絞って述べることにする。このため、これまでも着実に成果をあげてきた地震観測や電磁気観測などの地球物理学的手法による噴火前兆現象の把握や、着実に蓄積が図られてきた基礎資料の充実などについては特に触れないが、これらが基本的に重要であることは言うまでもない。

(1) 地殻内流体の挙動把握

火山噴火の推移や規模の予測のためには、マグマの火山体内部における位置や量を捉えるだけでなく、火山体地下における流体すなわち、マグマ、熱水、ガス、地下水の動きを計器観測により捉えることが本質的である。したがって、これらの流体の動きを含めた噴火機構のモデル化の作業によって、火山体内部での流体の動きが地表での観測事象にどの様に反映されるかを理解する必要がある。このためには、火山体内部構造の理解は不可欠であるが、流体の流動特性、マグマの発泡現象などの基礎的研究の進展も望まれる。

また、火山活動の消長と調和的に変化することが確認された火山ガス、特に SO_2 については放出量の繰り返し観測の頻度を高めるとともに、 SO_2 以外の成分、たとえば、 CO_2 、 H_2O の放出量測定手法の開発を押し進めることも重要である。これと並行して、マグマ中の揮発性成分の溶解度、及び挙動に関する実験的研究、メルト含有物中の揮発性成分の濃度測定などを行い、マグマ中の揮発性成分濃度、脱ガスの程度と火山ガス放出量との関連をより明確にすることが期待される。

（2）噴火ポテンシャルの評価

噴火活動の推移や終息の予測、あるいは長期予測の観点からみると、それぞれの火山の地下に既に蓄積された、あるいは供給されつつあるマグマ量など噴火の潜在的エネルギー、つまり、噴火ポテンシャルを何らかの方法で評価することが重要である。そのためには、先ず、個々の活動的火山における噴火活動史を正確に把握することが必要である。特に、階段ダイヤグラムの作成によって長期的なマグマの放出率を定量的に把握することが重要である。この種の研究の多くは、これまで個々の研究者の関心によって行われてきたものである。火山噴火予知研究の観点から見たとき、重要性の高い火山について行われているとは限らない。また、これまでに蓄積された噴出物の年代データや噴出物量の見積の精度も火山によって大きな差がある。噴火の長期予測の有効な手法とするには、今後何らかの方策により、系統的な調査と資料の整備が行われることが望まれる。このような作業の基本となる年代測定的手法として、火山砕屑物中に取り込まれた樹木の年輪解析や微量有機物質に対する加速器を利用した ^{14}C 年代法などの積極的利用が必要である。火口周辺にのみ堆積物を残すような比較的小規模な噴火の履歴解析も噴出物にはさまれた腐植土の年代測定などにより可能となろう。ただし、これらの手法は噴出物そのものの年代を求めるものではなく、噴出物中に取り込まれた木質や噴火休止期間に堆積した有機物質の年代をマーカーとして使用するものであり、このような試料が全ての噴出物中に保存されているわけではない。この意味では、噴出物そのものの年代を決定する手法、例えばU-Th系列の放射非平衡を利用するといった新しい年代測定手法の確立も早急におこなわれることが望まれる。

また、比較的短期の噴火ポテンシャルの評価という観点からは面的広がりを持つ地殻変動量の連続観測手法の確立が期待される。火山体やカルデラの深部へのマグマの蓄積によって広域的な地殻変動が観測され、火山活動の活発化に先立つ火山体内部へのマグマの貫入過程が局所的な地殻変動として観測されることはこれまで行われてきた水準、GPS、光波測量等の研究により明らかである。したがって、地殻変動観測の高精度化、高密度化によって、面的広がりを持った地殻変動量の連続観測が行われれば、既成の火口以外の場所からはじまる噴火の前兆を捉えることも含め、潜在的噴火活力を持つ火山の噴火のポテンシャル評価にも有効であろう。このような目的のためには、衛星や航空機によるSARの観測が能力を発揮することが期待され、干渉法による観測の高精度化が望まれる。

（3）観測手法の開発

これまでの多項目観測によって、適切な観測機器の配置が行われれば、前兆現象を捉えることも可能であることが明らかになってきた。適切な配置は、適切なシグナルを捉えるために重要なものであり、計測器を信号源に接近させて配置することが一つの実現方法である。すなわち、危険も予想される火口近辺に計測器を配置する観測も必要である。これを実現するためには、投下型観測システムの開発や衛星を利用したデータ転送技術の有効活用が不可欠であるが、これと並んで、計測器の軽量化、低電力化を進める必要がある。また、ボーリング孔への機器設置など、高S/N比観測も適切なシグナルを捉えるための手法であることはいうまでもない。

火山やカルデラ周辺で群発地震や顕著な地変が生じた場合、その原因がマグマ、ガス、地下水のいずれによるものかを判断することが重要になる。その重要な情報のひとつは地下の密度変化であ

るが、バネ式の相対重力測定では起伏と重力差の大きい火山体で微小な重力変化を高精度で測定するにも限界がある。このため、高精度で重力変化を計測するための新しい装置の導入・手法の開発が望まれる。

また、火山ガスの分析や噴出物の迅速分析が火山活動の変化や推移を予測するうえで重要な役割を果たすことが理解されているが、多くの場合噴火の最中には試料の採取に危険を伴う。このため、必要な試料を分析することができない事態も多い。このような事態に備えて、地球化学観測、噴出物採取等が遠隔操縦で行える無人探査装置の開発が望まれる。

Ⅲ．特定火山の観測研究

1．集中総合観測と構造探査(第1次～第5次計画)

(1) 目的, 経緯, 実施状況

昭和49年度(1974)に、伊豆大島と桜島の火山活動が活発化し、多種の地球物理学的・地球化学的観測が科学研究費で実施され、火山活動に対する情報量の飛躍的増大と総合的な判断に著しい成果を挙げ、噴火の可能性のある火山について、適当な間隔での集中観測の必要性が唱えられた。昭和51年度(1976)以降、火山噴火予知計画事業の一環として毎年2火山を対象として集中総合観測が実施されてきた。本事業は大学が世話役を務め、気象庁の基礎調査など関係機関の調査や民間企業の自主的調査と併せて進められてきた。本事業の一環として第3次計画では磐梯山で、第4次計画では秋田駒ヶ岳、有珠山、阿蘇山で人工地震、重力による地下構造の解明が試みられた。第5次計画ではこれを引き継ぎマグマの実体把握などを目的とし、新たに開発したデータロガーを用いた火山体の構造探査観測が新たな事業として始まった。これに伴って、集中総合観測は年1火山実施されている。

これまでに実施された集中総合観測ならびに構造探査の一覧は参考資料にまとめた。

(2) 成果と達成度

集中総合観測によって、対象火山における活動時及び静穏時の多項目観測による膨大な基礎資料の蓄積がなされた。特に、三宅島(昭和58年(1983)噴火)、伊豆大島(昭和61年(1986)噴火)、雲仙岳(平成2年(1990)～7年(1995)噴火)等では噴火以前に集中総合観測が実施され、観測結果が噴火発生及びその後の活動推移の把握に十分に生かされた。例えば、三宅島では過去の噴火サイクルを考慮して、噴火の3年前に第1回の集中総合観測が行われ、地震活動は静かであること、カルデラの熱的状態や地下水の存在を確かめるとともに、後の噴火に備えて重力の精密測定、磁気観測点の整備と観測、島内の熱分布調査等が行われた。昭和58年(1983)に実施された伊豆大島の集中総合観測の結果では、地震、地殻変動、火山ガス観測などでは活動の活発化を示す異常は検知されなかったが、全磁力観測では三原山内部の温度上昇を示唆する変化を、また、熱観測では火口内部の熱異常を検知している。これまで行われた集中総合観測によって、マグマの蓄積と地盤変動及び重力変化、マグマの移動と地磁気・比抵抗変化、火山活動と火山性微動・熱異常・火山ガスの組成及び放出量・温泉の水質との関連が明らかにされ的確な活動状況の把握がなされるようになった。

桜島火山では9回の集中総合観測が実施され、多種の地球物理学的・地球化学的・地質岩石学的観測が行われ多角的な火山活動の評価が可能となり、個々の観測データによる活動評価法も確立された。同時に集中総合観測の結果、火山ガスの化学組成が火山活動の推移に先行あるいは調和して変化することが確かめられ、火山ガスの連続観測など地球化学的観測法も定常的観測に組み込まれ、観測井における地震傾斜観測、観測坑道における傾斜、歪み観測の整備と併せて直前予測が可能となる多項目観測網が整備された。他の活動的火山においても、20余年にわたって続けられた集中総合観測によって、観測技術の向上、観測設備の整備が進み定常的観測体制は飛躍的に拡充強化され、所期の目的が達成されつつある。また、集中総合観測の実施を契機に活動的火山において定期的な観測が継続されている項目もある。

集中総合観測の実施での大きな成果として、多くの機関、多種の観測項目による共同観測研究体制が確立されたことが挙げられる。この体制は昭和52年(1977)有珠火山の噴火の際に生かされ、その後も三宅島、伊豆大島、伊豆東方沖、雲仙岳等の噴火時には直ちに合同観測班が組織され多項目にわたる総合観測が実施された。

第3次及び第4次計画で試みられた地下構造の探査では、火山体の構造についての新知見、カルデラの生成過程に関する資料が得られた。第5次計画からの高密度地震観測による構造探査によって、霧島山では、詳細な速度構造や密度構造、地震波減衰域の解明に成功している。また、電磁気学的観測では火体内部の詳細な比抵抗構造が、地球化学的観測では地下の地熱構造が、重力観測では埋没カルデラの存在や新燃岳周辺には局所的な重力異常のないことが明らかとなった。しかし、所期の目的の一つであるマグマの位置、規模などその実体の把握には至っていない。

(3) 問題点と今後の課題

多くの活動的火山では、火山噴火予知計画発足時に比べ飛躍的に観測網の整備・充実が進み集中

総合観測の所期の目的が達成されつつあり、これら火山での集中総合観測の必要性は少なくなった。一方で、活動状態の把握に必要な観測設備が未整備の火山も多くある現状を考えれば、今後これら火山で観測設備の整備を進めるとともに集中総合観測を実施し、活動状況の把握と基礎資料の収集を図る必要がある。また、必要に応じて特定の観測項目についての高密度観測の実施、マグマの動きを検知する新たな観測手法の開始、活動との対応づけのための新たな観測手法の開発、噴火ポテンシャルの評価等を目指した総合共同観測への発展も考える必要がある。

これまで実施された集中総合観測で得られた成果は報告書にまとめられ、以後の観測研究に利用され大きな成果を挙げてきたが、第3次計画以降は伊豆大島や雲仙岳の噴火の観測研究に追われたこともあり、成果報告書の出版は少ない。今後は、このような貴重な成果を十分生かすよう、成果報告書にまとめることに努力することが重要である。

また、噴火の発生、活動の長期化等により多くの人員が割かれ、そのため集中総合観測に参加できないなどの問題も生じている。

第5次計画からの構造探査は、得られる成果が大きい反面、観測の実施とデータの解析に膨大な人力と時間を必要とし、観測及びデータ解析に工夫が必要である。同時に目的であるマグマの実体及び供給系把握のための観測を一層進めることが重要である。

外国の火山噴火に対しての機動的な調査研究は、短時間に多種の噴火様式を経験でき、我が国における火山噴火予知研究推進に重要であるが、しかし、これに対応する人員は十分に整っているとはいえず、今後検討すべき課題の一つである。特定火山の観測研究の実施にあたっては、今後一層の観測設備の整備、体制の拡充強化と併せて経費の確保が必要である。

2. 主な火山噴火への対応

(1) 実施状況と成果

火山噴火予知計画開始以降の主な噴火活動には、桜島(1972～)、伊豆大島(1974)、有珠山(1977～1982)、御嶽山(1979)、草津白根山(1976、1982～1983)、阿蘇山(1979～1980)、口永良部島(1980)、三宅島(1983)、伊豆大島(1986～1987)、十勝岳(1988～1989)、伊豆東部火山群(1989)、雲仙岳(1990～1995)、九重山(1995)、南方諸島及び南西諸島の海底火山がある。このうち、御嶽山と南方諸島及び南西諸島の海底火山を除くほとんどの噴火で、事前に短期的な異常現象が観測された。桜島(1972～)及び伊豆大島(1974)の活動に際しては、活発化した火山活動の現状を把握するために、関係機関が協力して昭和49年(1974)に総合的な観測が行なわれ、その後の集中総合観測の端緒となった。また、その後の噴火に際しては、集中総合観測等の共同観測の経験が生かされ、総合的な観測体制が迅速に構築された。その結果、各種観測結果を総合的に考察することにより、噴火前後のマグマの挙動をかなり把握できるようになってきた。以下に、主要な噴火活動について観測調査の実施状況と成果を列挙する。

桜島南岳は昭和30年(1955)から山頂噴火活動が継続していたが、昭和47年(1972)から爆発的噴火活動が急激に高まった。爆発による火山弾の危険性のため、火口から2km以内での観測調査が不可能な状況の中で、昭和49年(1974)以降、観測網の整備と集中総合観測などによる多種目の観測調査が行われ、マグマ供給系や噴火の前駆現象の研究に大きな進展が見られた。さらに、昭和59年(1984)からは、火山体地下でのマグマの挙動を把握するために、観測坑道及び観測井を用いた高品位の地殻変動及び地震観測体制が整備された。数十年にわたる水準測量、潮位観測等の地殻変動データの解析から、桜島北方の鹿児島湾、すなわち始良カルデラの地下約10kmにマグマ溜りがあり、それと連結したマグマ溜りが桜島南岳地下約4kmに存在することが推定された。広域的な地殻変動と火山噴出物量との関係について定量的な検討がなされ、カルデラ地下には年間1000万 m^3 のマグマが上昇供給されてきたこと、噴火活動が高まる前には桜島の地盤が周辺に対して相対的に隆起することが明らかにされた。また、火山性地震の精密な震源分布から桜島南岳直下の火道の位置と形状が明らかにされた。さらに、表面現象や地殻変動観測結果と比較対照することにより、火道周辺で発生するA型地震及び火道内部で発生する爆発地震、B型地震などの低周波地震の発生機構とマグマの挙動との関係が検討され、従来の地震観測による噴火の経験的な短期予測(A型地震→B型地震群発→爆発)に火山学的な根拠を与えた。個々の山頂噴火に対して、噴火の数十分～数時間前からは、桜島直下のマグマ溜りや火道下部での圧力増加に伴う山頂地盤の極微小な隆起膨張が、また、噴火発生後は、噴出物量にほぼ比例した地盤の沈降収縮が捉えられた。自動的に隆起膨張量を評価して警告を発するシステムが開発試行され、中小爆発を含めその予測成功率は70%という結果を得た。このシステムは一部の関係機関に設置され、リアルタイムでデータが提供されている。

有珠山の活動(昭和52～57年：1977～1982)では、噴火前の昭和52年度(1977)に北海道大学理学部有珠火山観測所が新設され観測研究に着手していた。噴火後に現地総合観測班が組織され、観測と防災の両面で適確な対応をする上で非常に有効であった。この噴火では、本格的な有線・無線テレメータ網による観測がなされ、迅速な火山活動の把握と震源決定などが可能となった。長期に及ぶ地震、地殻変動等の総合的な観測によって、震源分布と発震機構の推移、地震と隆起運動の関連などデイサイトマグマの地下浅部への貫入過程が詳しく捉えられた。また、地震エネルギー放出率と新山の隆起速度の推移にもとづいて、活動の推移予測が行われた。さらに、噴火後長期に及んだ新山隆起運動の起源について、デイサイトマグマの緩やかな発泡によるモデルが提唱された。しかし、噴火前に観測網が整備されていなかったためもあり、マグマ溜りの存在場所やマグマ供給システムについては、ほとんど情報が得られなかった。

三宅島の噴火(昭和58年(1983))では、割れ目噴火開始の2～3時間前から多発し始めた地震が捉えられ噴火前に情報が出されたが、地震観測点が気象庁の1点のみであったため震源が特定できず、初期の防災対応に問題をもたらした。それ以外の前兆現象は観測されなかった。噴火後は、テレメータを用いた臨時地震観測によって、噴火直後の地震活動の特徴が明らかとなった。特に、割れ目火口付近に発生した高周波地震の発震機構として、引っ張り－せん断割れ目モデルが提唱され、マグマの移動と強く関係していることが示唆された。また、噴火前後に実施した電磁気、熱の観測データにもとづいて、昭和58年(1983)噴火とその後の推移が考察され、火山体浅部の帯水層とマグマとの熱的な相互作用を考慮することによって、これらの観測データが良く説明できることが示され

た。噴火前後の水準、重力測量によって、割れ目噴火にともなう変動分布が得られた。航空機による噴火状況、変色水、周辺の海底火山などの調査も行われた。火山灰の分布、量の解析から噴火の推移を再現可能であることが確認された。さらに、溶岩流のシミュレーション手法が開発され、昭和58年(1983)溶岩流に適用された。その結果が溶岩流に埋没した阿古地区の復旧計画策定やハザードマップの作成に活用されたことは、防災に対する重要な寄与であった。噴火後の集中総合観測において実施されたGPS観測によって、山体膨張の進行が捉えられている。

伊豆大島の活動(昭和61~62年(1986~1987))では、山頂火口からの噴火に引き続いて、5世紀ぶりに山腹割れ目噴火が発生した。噴火前の昭和59年度(1984)に、東京大学地震研究所伊豆大島火山観測所が設置され観測体制の整備に努めていた。山頂火口の周辺では、噴火の数か月前から地磁気・比抵抗の顕著な変化や火山性微動が観測されたが、山頂部の隆起や膨張は噴火前の数年間観測されなかった。この一見矛盾するような現象のために、火山噴火予知連絡会は、近い将来噴火が起こるかも知れないが、本格的な噴火はしばらく後だろうと判断した。その後、観測データの総合的な再検討の結果、マグマの蓄積期と上昇期の2段階を経て噴火に至ったとする仮説によって統一的に解釈できることが示された。また、割れ目噴火に前駆する地震や傾斜などの異常現象は捉えていたが、割れ目噴火の可能性の認識が不十分であったこと、傾斜データがテレメータされていなかったことなどのため、事前に噴火を予測することができず、全島避難に至った防災対応にも有効な予知情報を提供できなかった。噴火後の活動状況の把握と推移の予測は、火口に近接した地磁気、比抵抗、重力等の観測データにもとづいてある程度行うことができた。その結果、昭和62年(1987)11月の噴火は、マグマが地下深部へ後退することに伴って発生したことが分かった。また、ヘリコプターを用いた観察や観測が初めて本格的に実施された。噴火前後の高密度な総合観測によって、地震・微動などの火山現象、割れ目噴火の発生機構、マグマ供給システムなどについての貴重なデータが大量に得られ、理解が大きく進展した。また、噴出物の調査分析が迅速に行われ、山頂噴火と割れ目噴火ではマグマの化学組成が全く異なることが明らかにされ、マグマ供給系のモデルを構築する上で重要な制約条件となった。さらに噴火後には、マグマの再蓄積を示す山体膨張の進行が捉えられ、詳細な構造探査の結果とあわせてマグマ供給システムについての理解がさらに進んだ。

伊豆半島東部とその周辺海域では、昭和53年(1978)伊豆大島近海地震の後、群発地震活動とそれに伴う地殻変動が繰り返し発生していたが、平成元年(1989)7月に伊豆東部火山群の手石海丘海底噴火が起こった。この噴火に際しては、測量船、自航式ブイ、ヘリコプターによって、噴火の目視観察、映像や衝撃音の記録、海底地形などの調査が行われ、海底火山の誕生が克明に捉えられたことが特筆される。噴火前の群発地震活動とそれに伴う地殻変動は、地震予知計画に基づいて行われていた地震、傾斜、歪、電磁気等の観測によって捉えられた。噴火前後の震源の移動及び地殻変動分布とその変化から、開口割れ目モデルに基づいて割れ目の伝搬過程が詳細に推定されたことは重要な成果であった。さらに噴火後の臨時観測結果及び過去のデータと併せて、震源分布と地下速度構造との関係、過去の活動との関係等が解明された。しかし、割れ目に大規模にダイクが貫入したかどうかについては、意見が分かれている。群発地震活動とそれに伴う地殻変動は、噴火後も繰り返し起こっている。

雲仙岳の活動(平成2年~7年：1990~1995)では、関係機関の協力で噴火過程を究明するための総合的な観測が行われた。噴火前のマグマの蓄積状況については、4年前の集中総合観測で実施された水準測量結果と比較することにより、噴火前にマグマの蓄積が進行していたらしいことが示唆された。噴火開始の前兆はほぼ把握され、活動の現状把握も迅速に行われ防災に寄与した。マグマの蓄積量などについての観測データは不十分であったが、活動の推移予測も試みられた。平成2年(1990)11月噴火の1年前に火口西方の橋湾下で群発地震が発生し、その後震源域は雲仙普賢岳西麓から山頂部へと拡大し、噴火の数ヶ月前には山頂直下で火山性微動が観測された。平成3年(1991)5月の溶岩ドームの出現は、約10日前から山頂直下の群発地震、傾斜計及び光波測量による山頂部の山体膨張、地磁気観測による火口周辺での熱消磁などが観測され、それらに基づいて事前に予測された。火砕流の発生に対しては、その危険性を指摘し、避難勧告が出された。ドームの出現後は、航空機を用いた頻繁な観察、写真撮影と地形図の作成、マグマの上昇に伴う傾斜変動等にもとづいて、溶岩の噴出量が計測されたことは、火山観測史上画期的なことであった。さらに、地殻変動データから求めた地盤の隆起沈降量と溶岩噴出量とを比較することにより、深部からのマグマ供給率が推定された。また、隆起沈降の分布、震源分布、地震の発震機構、地震波の減衰などを

総合することにより、山頂火口の西山麓地下に複数のマグマ溜りが存在することが指摘された。溶岩ドームの成長と崩壊によって火砕流が頻発したが、その発生状況、流動機構、堆積量等が様々な方法によって観察研究された。火砕流災害に対応するために、関係機関の協力によって、実用的な火山監視体制が構築され、情報の発信と防災関係機関への助言を行った。

九重山(平成7年(1995~))では、平成7年(1995)10月の噴火以降、地震、地殻変動、重力、熱、火山ガス等の観測を実施中である。火山ガス、湧水、噴出物の化学組成及び同位体組成から、活動推移の把握と噴火様式の推定がなされた。また、トレンチと古文書による調査が行われ、過去約4000年間の活動履歴が明らかにされた。九重山の熱構造についての研究が噴火前に行われていたことが、噴火活動の仕組みを考察するのに大変役立った。

北海道駒ヶ岳(平成8年(1996))が平成8年(1996)3月5日に54年ぶりに少量の火山灰を噴出した。噴火の7年前の平成2年(1990)ころから、山頂火口亀裂を横断する光波測量と、山麓から中腹までの水準測量によって山体の膨張が観測され、噴火に伴い膨張量の2割程度の収縮が観測された。

(2) 達成度と課題

常時観測が実施されている火山においては、何等かの前兆現象を捉え、いくつかの火山で噴火前に観測の強化や情報提供を行った例がある。このように、噴火の短期的予測については、貴重な実績を積みつつある。また、噴火前後のマグマの挙動も、それぞれの火山活動の特徴に応じて多項目、高密度、高精度な観測を行うことにより、定性的には把握できることがわかった。中長期的な予測については、過去の噴火履歴にもとづく予想がなされているのみで、観測データに基いた予測は、桜島のように長期の地殻変動観測データのある火山以外では現在のところ困難である。この点に関連して、伊豆大島、三宅島、雲仙岳で噴火前後の静穏期におけるマグマの蓄積を示唆する山体膨張が確認されたことは、重要な知見となった。

噴火の様式と規模については、現在のところ、過去の噴火活動の地質学的な調査などにもとづいて予測する以外困難である。

噴火の推移や終息の予測については、有珠山の新山隆起活動や雲仙岳の溶岩ドーム形成活動のようにある程度可能な場合もあるが、一般には極めて困難である。現在のところ、過去の活動事例を参照するしかない。活動の現状把握にもとづく短期的な推移予測はこれまでもある程度なされてきたが、定性的なレベルを超えていない。

火山活動にともなう諸現象の発生機構については、多項目観測、高密度観測、高精度観測等によって理解が進んできているが、今後は目的を明確にした実験的な観測を重視すべきである。

現在のところ困難な噴火の中長期予測や様式、規模、推移の予測に向けて、マグマ溜りと火道系、マグマの供給様式、噴火の開始と終息の条件などについての定量的な理解を格段に向上させることが不可欠である。そのための方策として、火山体の詳細な構造探査、山体膨張の有無を調べるための計画的な測量、マグマの挙動を定量的に把握するための手法の開発、マグマ溜り内での揮発成分濃度を含む物理化学的状態を把握する手法の開発、状態の進化を予測するための理論的実験的研究等が重要であろう。

これまでの主要な火山噴火活動に対しては、伊豆大島と雲仙岳の噴火に対する火山噴火予知連絡会の活動状況の表にも見られるように、異常現象が観測されてから活動の終息まで、総合的な観測結果に基づく現状把握と短期的な推移予測がある程度なされてきたと言える。今後は、さらに正確で定量的な情報を出せるよう努力する必要がある。

IV. 総括的評価

1. 火山噴火予知計画を通じての総括的評価

火山噴火予知計画は、火山噴火の仕組みと火山の構造の解明に加えて個々の火山の活動度の現状把握を基礎に、火山噴火予知の実用化を目標にして推進されてきた。計画策定の基本方針として、全国の活火山を火山噴火予知の推進と活動度の把握の見地から分類し、それぞれの火山の特性に応じた観測研究や監視観測を実施すると共に、新しい予知手法の開発など幅広い基礎研究を実施してきた。

第1次計画が始まった昭和49年(1974)から今日までの22年間に、「活動的で特に重点的に観測研究を行うべき火山」と指定された13火山では、すべての火山で噴火が発生した。また、「活動的火山及び潜在的爆発活力を有する火山」に属する23火山の中では10火山で、「その他の火山」では1火山で噴火があった。これらの結果は、我が国の火山の活動度の現状把握が基本的に妥当なものであったことを示すものである。

火山観測体制は年次的に整備されて、観測機能は予知計画発足以前に比べて格段に拡充・強化された。国立大学の観測体制は、第1次計画の開始時には、3火山28観測点(臨時観測点を含む)であったが、第5次計画中の平成8年度(1996)までに、29火山235観測点に拡充されるとともに、観測坑道や観測井の設置によりS/N比が改善され、観測データの高品位化が図られた。また、観測内容も地震観測を中心とした5項目から、地球電磁気、火山ガス、GPS等を含む12項目に増加した。一方、気象庁にあっては、16火山、24観測点、4項目の観測体制から、21火山、81観測点、8項目に拡充された。また、防災科学技術研究所の火山観測点は、火山予知計画発足後に整備が始まり、現在、5火山の17観測点で3項目の観測を実施している。この結果、「活動的で特に重点的に観測研究を行うべき火山」では、観測の高密度化、多項目化、高精度化が進み、いくつかの火山では微細な前兆現象をほぼ確実に検出する事が可能になった。例えば、桜島では、地殻変動のリアルタイム・データをもとに、山頂噴火に関して3種類の警告を発する直前予知システムの開発に成功している。また、伊豆大島等では、次の噴火に向けてマグマの蓄積を示す山体膨張が検出され、中期的予知の展望が開けつつある。このように観測体制を拡充・強化するとその効果は確実に現れる事が明らかになった。

しかし、一方で、観測体制が極めて弱体な火山も多く、そのような火山では活動の異常が出現しても把握できない状況にある。一般に、噴火頻度の低いこれらの火山についても、数百年の静穏期を経て噴火する場合もあり、普段から監視観測を行う必要がある。今後の監視観測体制の整備を計画する際に検討すべき課題である。また、海底火山においても、常時観測が極めて困難であるので、常時監視のための観測手法と監視システムの開発について検討する必要がある。火山噴火予知要素のうち、噴火の規模、様式及び推移の予測は、噴火機構やマグマ供給系に関して未解明の点が多いために、観測体制が整備された火山であっても現状では困難である。

火山噴火予知計画の開始以来、マグマの挙動を様々な手法で探知する予知手法の開発や各種の基礎研究は着実に成果を出してきた。電磁気的手法では、火山体浅部の熱的状态の変化に伴う電気抵抗の異常や地磁気変化を明瞭に検出することができた。また、遠隔操作の自航式ブイなどによる海底音波探査手法では、火山の誕生に伴う海底噴火前後の地形変化の記録に成功した。これは学問的にも世界に誇れる観測成果である。火山ガスの化学組成や同位体成分の繰り返し観測から、火山活動に対応する成分が特定され、いくつかの火山では連続観測に組み込まれた。また、噴出物の準リアルタイム分析手法が確立され噴火の推移の予測に役立つデータが得られるようになった。このように予知手法の開発や基礎的研究の成果は年次計画の経過と共に着実に現れてきた。予知計画の実用化に欠かすことのできない火山活動基礎資料も着実に蓄積されてきた。大縮尺精密火山基本図は、これまで23火山で作成された。特に、長期間活動が継続した雲仙岳では、数か月毎に改訂版が出され、マグマ噴出率の算定に利用されるなど防災面で果たした役割は大きい。その他、火山地質図が新たに作成されたが、まだ、充分ではない。これらの基礎資料は、火山噴火の長期予測に役立つと共に、個々の火山の特性を把握する基礎データとなり、ハザード・マップの作成に有効活用され地域防災計画の策定に寄与している。

人工地震による火山体構造探査については、第1次計画の段階から基礎研究としての重要性が指摘されてきたが、実施上の技術的問題が克服できず本格的な実験に着手できない状態が続いた。第

5次計画では、この課題を新しい柱と位置づけ、新たに火山専用の小型高性能のデータ・ロガーを開発し、数百台からなる稠密地震観測を山岳地域でも可能にした。これまで3回の探査実験が行われ、火山地域の速度構造や減衰構造が明らかにされつつある。火山直下に想定されているマグマ溜まりの検出やその形状の解明は今後の課題である。実施上の最大の問題点が解決されたので、計画の推進とともに予知に有効な成果が得られることが期待される。

我が国の火山噴火予知計画では、関係機関と大学がそれぞれの機能を分担し火山噴火予知の実用化を目指してきた。特定火山を総合的に調査する集中総合観測は火山噴火予知計画の中でもユニークな共同観測研究であり、第1次計画以来、噴火前後の火山活動の基礎データの収集で実績を積んできた。火山噴火予知連絡会は、関係機関、大学による多種の観測データを集約・分析し、火山活動の現状を的確に把握するため、定期的な情報交換や総合判断などを行ってきた。これらの判断結果は、気象庁から火山情報として関係行政機関に提供され、火山防災の面で貢献してきた。近年、火山噴火予知に対する社会の期待はますます強くなってきているが、現状の情報では必ずしも社会の期待に答えていない面もあり、火山情報のあり方は今後の検討課題である。

今後、観測データについては、研究機関、研究者間による相互利用に向けてデータの標準化を含めた検討を行う必要がある。火山活動は広域テクトニクスと関連を有しているので、火山噴火予知は地震予知と密接な連携をもって行われることが望まれる。

気象庁に新たに火山課が設置された。また、その他関係機関に於いても火山噴火予知に対応した部署が新設・増設され、火山噴火予知体制が徐々に整備されてきたことは評価される。大学においても3つの火山観測施設が設置され、2つの研究所が全国共同利用の研究所に改組されて火山噴火予知部門が強化されるなど、研究体制の整備が図られた。

火山噴火予知の実用化を実現するためには、火山の内部状態と噴火機構を詳細に知る必要がある。火山噴火予知計画は、この目標を目指して20有余年にわたって着実に発展してきた。しかし、学問的にも、技術的にも解決すべき課題が多々残されており、引き続き観測研究や基礎研究の推進を図ることが重要である。また、これらの研究を推進するためには、自己点検のほか外部評価のシステムを定着させる必要がある。

火山噴火予知計画の研究成果は、1600編以上の論文、調査報告として出版されている。これらは国内の火山噴火予知研究やハザードマップ作成など防災面に活用されてきた。火山噴火予知研究の成果は、一方で、火山学や関連分野で広く国際的にも活用されるべきものであることも自明である。しかし、和文で書かれた論文等は外国の研究者の目に触れる機会が少ない。また、重要な発見的観測結果が紀要や調査報告に終わっている例も多い。査読付き国際誌及び国内誌に公表されたものは、それぞれ約190編と330編にとどまっている。

今後、研究成果の公表は、国際的な視野に立って、火山学及び火山噴火予知研究に貢献すべく、一層の努力をはらう必要がある。

2. 世界の中での日本の火山噴火予知の位置付け

インドネシア、米国、日本などの火山国では火山観測網を整備し、それぞれ独自の的方法論に従い火山噴火予知研究や火山防災計画に取り組んでいる。従って、火山防災や火山噴火予知に対する考え方や運用には差異がある。我が国の火山噴火予知計画を諸外国の例と単純に比較することは難しいが、我が国の主要な活火山の観測・監視体制は、概して諸外国より1歩進んでいる。しかし、火山防災体制については諸外国の例に学ぶべき点も多い。活火山が最も多いインドネシアでは、火山近傍の住民の生命を守るという観点から73の火山に火山観測所が設置され、観測と監視が一元的に運用される体制が組まれている。火山噴火災害の軽減計画が実施に移された1980年以降は、被害者数を激減させることに成功した。一方、米国は、米国地質調査所(USGS)のもとで火山観測研究と火山災害軽減対策が一元的に運用され、国内ばかりでなく、国外の火山の災害軽減にも組織的に取り組んでいる。また、海底噴火に関しては、米国海洋気象庁(NOAA)が海底ハイドロホンアレイを用いて北太平洋海域の海底火山活動の観測研究を行っている。

我が国では、第4次計画以降の年次計画に国際協力の一項が追加された。海外の火山観測所と共同観測を実施し多様な噴火の現場経験を積むことによって火山噴火予知研究の向上を目指すという積極的な試みもインドネシア等で実施された。また、カメルーン・ニオス湖の火山ガス災害やザイール・ニラゴンゴ火山の溶岩湖活動に際しては、国連等の要請を受け海外で緊急の火山活動の調

査・監視を行い国際協力の面で寄与した例もある。

しかし、米国の火山防災に於ける国際貢献と比較すると、我が国は組織的な対応において不十分な面がある。平成2年(1990)から10年間は「国際防災の十年」(IDNDR, International Decade for Natural Disaster Reduction)と位置づけられており、海外の火山災害軽減計画に積極的に参加し国際貢献をすることは、国際社会にしめる役割が大きくなった我が国に課せられた今日的課題である。国際協力事業団(JICA)を通じて発展途上国向けに実施している火山学・火山砂防工学の研修課程は、この目的に沿った事業として国際的にも評価されている。また、諸外国の噴火事例に接し多様な経験を積むことは、我が国の予知研究に寄与するところが少なくない。

3. 火山噴火予知の観測成果の社会への還元

火山噴火予知計画には、その成果を住民や関係行政機関に還元し、火山災害の軽減に貢献することが期待されている。このためには、予知の確度を高めるとともに、予知の現状について分かり易い火山情報を提供する必要がある。気象庁から発表された火山情報や火山噴火予知連絡会の見解、更には現地の研究者の助言に基づき行政機関が住民の避難を実施した主な火山噴火は、火山噴火予知計画開始以来5回を数え、不測の災害を未然に防止することに役立ってきた。しかし、最近、社会的に影響のある噴火が相次ぎ、火山情報に対する社会的要求にも変化が起きつつある。これに対応するために火山噴火予知連絡会は、情報の定量化の可能性やどのような情報をいかに出すべきかの検討を始めている。他方、噴火活動の推移予測は防災対策を立案する際最も必要な情報を提供するものであるが、今日の火山噴火予知の基礎知識では正確な予測は困難であるが、しかし、噴火の実態を速やかに把握する事によって、災害の軽減に寄与することが大切である。

噴火が発生した時に予想される災害の種類、規模、地域などを示した火山災害危険予測図(いわゆるハザード・マップ)は、伊豆大島や北海道駒ヶ岳等の活火山で作成・公表され、住民の火山防災意識の向上に役立っている。しかし、火山災害危険予測図が刊行された火山はわずか12火山にとどまっている。

航空機に対する火山灰情報や船舶に対する海底噴火情報も社会に貢献している火山情報である。特に、我が国に飛来してくる航空機の便数が増大し、かつ、機体が大型化した今日では、噴煙情報の重要性は以前に比べて増している。

4. 今後の展望

火山噴火予知計画では、一貫して観測体制の拡充・強化が行われ観測基盤の量的拡大と質的向上が図られてきた。その結果、観測の高密度化、多項目化、高精度化が活動的火山で順次実行に移され、観測データの量、質とも飛躍的に向上した。この過程で、火山の特性に対応した観測が実施されれば、噴火の短期的な前兆現象の把握が可能であることがいくつかの火山で確認された。これは火山噴火予知計画の大きな成果であり、火山噴火予知の実用化に展望を開くものとして評価される。この成果を、多くの活火山で確かめ一般化を図るとともに、今後引き続き活火山の観測体制の整備を行うことが必要である。

基礎的な観測研究を積み重ねて予知に有効な観測や手法が見いだされた場合、それを監視観測に実践的に応用する努力が一方で求められる。しかし、基礎的な観測成果が監視観測の現場に十分に反映されてきたとは必ずしも言えない。火山活動の高まりに対応した観測は、しばしば学術的な理解を飛躍的に進める契機になるが、現状では、大学の観測所は監視観測的な役割のかなりの部分を担っている。その負担のために本来の観測研究に専念することが妨げられている。21世紀に向けた火山噴火予知の質的な向上のためには、マグマの上昇・噴出過程やそれに付随する現象の物理・化学的理解を大幅に進める必要があり、基礎的な研究の推進が強く望まれる。第1次火山噴火予知計画の建議に述べられているように、監視観測と基礎的観測研究の役割分担を明確にする必要性が改めて切実な問題となっている。大学は基礎研究にその重点を移し、特定課題に焦点をあてた研究を実施することで、その役割を担うべきである。気象庁等は、大学及び関係機関とより密接な連携・協力を保ちつつ、常時監視観測の機能の向上に取り組む必要がある。また、他の関係機関は、それぞれの実施項目に関してより一層の向上を図る必要がある。

火山噴火予知の実用化には、火山噴火機構と前兆現象の出現するメカニズムを解明し、さらには、個々の火山活動の現状を詳細に知ることが不可欠である。このためには、火山の静的な構造を把握

するだけでは不十分であり、今後は、マグマや火山ガスなどの流体の動きや地下の状態変化を含めた火山体の動的構造を把握し、時間軸をパラメータに入れた4次元の火山体構造を解明することが重要である。その目的に向けて、第5次計画より開始された構造探査を質的、量的に拡充・強化し、推進することが求められる。また、流体の挙動が観測量にどのように反映するかを理解するために、流動特性を考慮に入れたシミュレーション等も併せて行う必要がある。

従来の火山噴火予知計画では、長期予測の位置づけが不十分で組織的な取り組みが実行に移されなかった。正確な長期予測は、防災計画の立案にも有効な情報を提供する。長期予測の推進には、活動的火山の噴火史の正確な把握とともに、噴火ポテンシャルの評価の研究が必要である。このためには、今後、系統的な現場調査と新しい年代測定手法の導入を積極的に推進する必要がある。

将来の火山噴火予知の展開を図るためには、人的支援体制を含めた研究観測体制の一層の充実強化が求められる。火山学を志望する大学院生、若手研究者の育成に努めるとともに、他分野からの流入も視野に入れて研究者層を厚くする方策を考える必要がある。