

第5回火山噴火予知研究シンポジウム

平成19年5月29日～30日
東京大学 理学部 小柴ホール

主催

日本火山学会

地震火山噴火予知研究協議会火山分科会

目 次

噴火予知シンポジウムの開催にあたって	日本火山学会 会長	藤井敏嗣
1. 基調講演		
第7次噴火予知計画の現状の問題点 - 狙い, 成果と問題点 -	京都大学防災研究所	石原和弘
2. 第7次火山噴火予知計画の成果と課題		
2000 年三宅島の噴火活動 - 地球物理観測の視点から	防災科学技術研究所	鷗川元雄
2000 年三宅島の噴火活動 - 火山ガス研究の進歩	産業技術総合研究所	篠原宏志
2004 年浅間山の噴火活動 - 地球物理観測の視点から	東京大学地震研究所	武尾実
富士山の不思議はどこまで分かったか	東京大学地震研究所	渡辺秀文
防災対応を踏まえて区分した火山の新しいレベル	気象庁火山課長	横田崇
3. 火山噴火予知研究の展望 - 来るべき噴火に備えて		
今後桜島において予測される噴火とその予知戦略	京都大学防災研究所	井口正人
火山噴火モデルの構築に向けて	東北大学理学研究科	西村太志
噴火予知の高度化に向けて地殻変動観測は今後何をめざすべきか - 多項目観測の統合化と動的マグマ移動モデルへの挑戦 -	国土地理院	村上亮
これからの火山体構造探査	秋田大学工学資源学部	筒井智樹
コメント：噴火予知研究で電磁気観測をどう使うか	北海道大学理学研究院	橋本武志
コメント：構造探査と物質科学の狭間から	北海道大学理学研究院	大島弘光
掘削による噴火活動に関する知見の深化	東京大学地震研究所	中田節也
中長期の噴火予知への新たな挑戦 - 物質科学の視点から	北海道大学理学研究院	中川光弘
噴火に至るまでの現象の把握を目指して	東京大学地震研究所	森田裕一

4．火山噴火予知の高度化をめざして

基調講演： 噴火予知はどのような局面で社会の期待に応えきれていないか

京都大学理学研究科

鍵山恒臣

コメント：

行政が求める「高度な噴火予知情報」とは

鹿児島県危機管理局

中西茂

社会が求める「高度な火山噴火情報」とは

時事通信防災リスクマネジメント

WEB編集長

中川和之

わかりやすい火山情報の発表を目指して

気象庁火山対策官

北川貞之

「高度な火山噴火予知」には学術的に何が必要か

東京大学地震研究所

藤井敏嗣

火山噴火予知研究体制の問題点

東京工業大学理学研究科

平林順一

パネルディスカッション「火山噴火予知のさらなる高度化をめざして」

司会： 九州大学理学研究院

清水洋

パネリスト： 鍵山恒臣， 中西茂， 中川和之， 北川貞之， 藤井敏嗣， 平林順一

5．閉会の挨拶

京都大学防災研究所

石原和弘

噴火予知シンポジウムの開催にあたって

日本火山学会会長 藤井敏嗣

本年1月、「第7次火山噴火予知計画の進捗状況について」と題するレビューが科学技術・学術審議会・測地学分科会から発表されました。これは火山噴火予知の第6次計画の後半期と第7次計画の前半期の進捗状況をレビューしたものです。火山噴火予知計画を担ってきた大学や各研究機関、気象庁などに対するアンケート調査と、測地学分科会の火山部会委員からの意見を受けて、進捗状況の評価と今後の課題がまとめられています。その結論を非常に大まかに言えば、建議としてまとめられた6次計画、7次計画はそれぞれ当初の課題をおおむね達成しているが、社会が期待する実用的な火山噴火予知にはまだ程遠い段階にあるということになるでしょう。噴火予知の5要素といわれる時期、様式、規模、場所、継続時間の予知を実現するためにはもっと基礎的な研究を積み上げる必要があるという認識なのです。もちろん、理想的な予知技術の達成が得られない段階でも、予知研究の成果は火山災害の軽減に役立てることはできるという認識も述べられています。その場合には、各活火山について平常時からきちんとした観測を行って火山活動の状況を十分に把握していることが前提となっています。

わが国では、気象庁が独自の観測網で監視観測を行うと同時に、大学や国立研究機関の観測データを気象庁に集中するというやり方で火山活動の状況が把握され、防災に役立てられてきました。ところがこの間の国立研究機関の独立行政法人化や国立大学の大学法人化によって、それぞれの観測に資する予算や人員の減少が深刻化しつつあることが指摘されています。この結果、近い将来これらの機関から気象庁に提供されているデータの量や質を維持することが困難になるおそれもあるのです。つまり火山監視の一翼が衰退する可能性が高いのです。手遅れになる前に噴火予知体制の抜本的見直しを図らなければ、現在の火山監視能力のレベルを維持することすら困難となることがレビューでも警告されています。予知計画をめぐる状況が変化した現在、これまでのやり方を踏襲するだけでは予知研究を進展させ、火山災害を軽減することは困難です。体制の見直しもちろんですが、基礎研究の進め方にも変革が必要です。基礎研究の推進をお題目に掲げるだけでは不十分です。次の5年間にどこまで達成しようとするのか、その道筋を明確にすることも要請されます。

これまでも5年毎の火山噴火予知計画のレビューを受けて次の予知計画を策定する際には、学会会議のものと火山学研究連絡委員会と日本火山学会が共同で火山噴火予知シンポジウムを開催してきました。昨年度から学会会議の体制が変わったために、今回は日本火山学会と地震火山噴火予知協議会火山分科会が共催することになりました。これまでも、シンポジウムを通じて、多くの火山研究者や火山防災関係者の意見を予知計画に反映させてきましたが、今回は特に重要です。レビューでも指摘されているように、国立大学の法人化などを契機にわが国の火山噴火予知体制に大きな危機が到来しようとしています。このような危機を打開し、火山噴火予知研究の高度化と効果的な火山防災を実現するためには、どのような戦略で予知研究をすすめ、どのように予知体制を改善することが必要なのかを見極めることが重要です。したがって、火山噴火予知に関係するさまざまな分野・機関からの出席者による徹底的な討論が望まれます。このシンポジウムが次期計画の策定に向けてのブレインストーミングの機会となれば幸いです。多くの出席者による実りある議論が行われることを願っています。

第 1 部 基調講演

第7次火山噴火予知計画の現状の問題点 —狙い、成果と問題点—

京都大学防災研究所 石原和弘

現在の火山噴火予知に関する観測研究は、平成15年に科学技術・学術審議会から関係大臣に建議された「第7次火山噴火予知計画」(平成16～20年度)により推進されている。平成18年度に次期計画策定に向けて現計画の実施状況、過去5年間の成果及び今後の課題についてレビュー作業が開始され、レビュー結果は平成19年1月に測地学分科会から科学技術・学術審議会に報告された。現在、外部評価を受けていて、その結果も踏まえて次期計画の策定を行うことになる。

昭和48年の当初計画の建議では、()地下のマグマの動きを各種観測等により探知することが火山噴火予知につながる、()予知の実用化には、火山学全般の基礎研究の充実とともに、()その成果を実際の業務に取り入れるよう大学と気象庁の連携を緊密にする、という火山噴火予知に関する基本的な考えが示された。この認識は、第7次火山噴火予知計画まで引き継がれている。即ち、実施計画の3つの柱、(1)火山観測研究の強化、(2)火山噴火予知高度化のための基礎研究の推進、及び、(3)火山噴火予知体制の整備、に対応する。第7次計画のレビューをもとに、実施状況と成果、問題点を概観する。

1. 第7次計画の基本的方針

火山噴火予知の到達点について、適切な観測体制がとられた火山では、火山活動の高まりを把握し、噴火時期をある程度予測できるまでになっているが、噴火開始後の推移予測については依然として困難な状況にある、という認識に立ち、第7次計画では、監視観測や常時観測体制を、火山の活動度や防災の観点から順次強化整備する、噴火機構の理解や噴火ポテンシャル評価の定量化を図るために、基礎研究を幅広く推進する、関係機関の連携強化・関連観測データの一層の有効活

用、を基本方針としてあげた。

2. 実施状況と主な成果

(1) 火山観測研究の強化

火山活動を把握するための観測強化

気象庁が連続観測を実施している火山は5火山増え30火山となり、観測の多項目化も図られ、更に、大学等外部からの火山観測データの提供と地震の基盤的調査観測網のデータの活用により、陸上火山の監視の強化が着実に進展した。

国土地理院は、電子基準点を活用した全国の活火山周辺の地殻変動の連続監視を行うとともに、水準やGPSによる火山の地殻変動観測を実施、浅間山などいくつかの火山で火山活動に伴う変動をとらえた。

海上保安庁海洋情報部は、南方諸島と南西諸島の火山島と海底火山について、航空機による定期監視に加え、臨時監視を頻繁に繰り返し、伊豆鳥島の噴火を観測したほか、いくつかの火山で変色水を確認し、航行警報を発表に活用された。

実験観測の推進

大学では、集中総合観測と火山体構造探査を関連機関と協力して年次的に実施した。火山深部構造解明を目的とした長期間の自然地震観測が、富士山と浅間山で実施された。他方、大学では既設の連続観測施設を維持するとともにその高度化と効率化に努めているが、観測網の更新は進んでいない。

(2) 火山噴火予知高度化のための基礎研究の推進

広帯域地震計による観測や多項目観測がマグマ等火山流体の挙動の把握や噴火機構の理解に有効かつ不可欠であることがいくつかの火山で確認された。浅間山では、広帯域地震計、地殻変動連続観測、絶対重力連続観測、火山ガスなど多項目観測等により、噴火にいたる活動の変化、噴火直前の前駆変動や噴火

の発生過程が把握できることが確認され、火道内のマグマ頭位の変動が重力変化として把握されるなどの成果を得た。

雲仙普賢岳では火道と推定される場所を掘削し、物理検層データと採取試料の解析が行われた。マグマの発泡と結晶化が起こる深度が異なることや、上昇速度によって結晶化の仕方が異なることなどが示された。

人工地震探査により北海道駒ヶ岳など4火山で浅部速度構造が解明され、山体中央直下に高速度層の盛り上がりが確認された。また、いくつかの火山では、地震波速度構造と電気比抵抗構造の照合により火山地下の熱水の分布等の把握がなされた。人工地震と自然地震を併用した構造探査を行った富士山では20km深までの速度構造が明らかにされ、深部低周波地震発生域（約15km）付近のP波速度が小さく、S波速度との比も低いことが明らかになった。電気比抵抗構造からは20km以深が比抵抗が低く、低周波地震の震源域の下にマグマ溜りが存在すると推定される。

火山活動の長期予測に必要な火山活動史に関して、いくつかの火山で新たな知見が得られた。富士山ではボーリングを含む組織的な地質調査と噴火史解析などが行われた結果、既知の新富士、古富士、小御岳の3期の山体形成期に先立ち、安山岩を主体とする噴出物からなる山体を形成する活動期があったこと、過去2千年間の山腹噴火年代などが明らかになった。

人工衛星や航空機によるリモートセンシング技術が、地殻変動観測、地磁気観測、熱や火山ガスの測定に有効であることが示された。小型軽量の二酸化硫黄放出量測定装置が実用化され、広く火山の監視と観測研究に活用されるようになったことが特筆される。

（３）火山噴火予知体制の整備

気象庁は、火山監視・情報センターの運用を開始、火山活動度レベルを平成15年11月に5火山、更に平成17年2月に7火山に導入するなど火山活動の監視と情報発表など噴火予知体制の整備は進んでいる。

関係機関は、種々の機会に火山および火山

防災に関する教育啓蒙活動を行い、ハザードマップ作成や防災対策に関わる国や地方の会議等に火山専門家として参加し、予知計画の成果の社会への還元を実践している。

関係機関による火山地質図、火山基本図、火山土地条件図、数値地図等の整備も継続して実施され、あらたに火山性地震・微動についてのデータベースや「日本のハザードマップ集」が刊行されるなど、観測・研究・教育の基礎となる資料の整備も進められた。

2004年浅間山噴火や2006年桜島噴火では継続的な観測により活動状況を把握し、防災に寄与した。

３．全般的評価と問題点

火山監視・情報発表体制の強化が進展、火山噴火予知に関する観測研究の成果も順調にあがってきた。

富士山や浅間山の経験から、集中総合観測と火山体構造探査の連携や科学技術振興調整費など総合的な調査研究は、山体の構造や形成史、マグマ供給系や噴火機構の理解にとって重要な知見や情報をもたらすことが実証された。物理化学モデルに基づく定量的な火山噴火予知を目指すのであれば、このような総合的な調査研究は不可欠である。

独立行政法人や国立大学法人では、火山観測研究施設の整備、観測設備の更新等はほとんど実現せず、火山噴火予知研究に関わる教職員数も減少傾向にある。今後、観測施設設備の維持・強化が困難な状況が予想される。これらの機関の観測坑・井等を用いた高品位高精度の多項目観測が継続できない事態になれば、それらのデータや研究成果の提供も受けてなされてきた気象庁の火山監視や活動評価にも波及し、現在の噴火予知のレベル維持は困難になると懸念される。

火山情報は、国や自治体において、防災対策の基点として認識され、また位置付けられるなど期待が高い。その期待に応えるには、火山監視と観測研究の進展にとって不可欠な、基盤的な火山観測網とデータ流通体制の確立が望まれる。

第2部 第7次火山噴火予知計画の成果と課題

2000 年三宅島の噴火活動 - 地球物理観測の視点から

鵜川 元雄 防災科学技術研究所

The 2000 Miyakejima eruptive activity from view points of geophysical observations

Motoo Ukawa

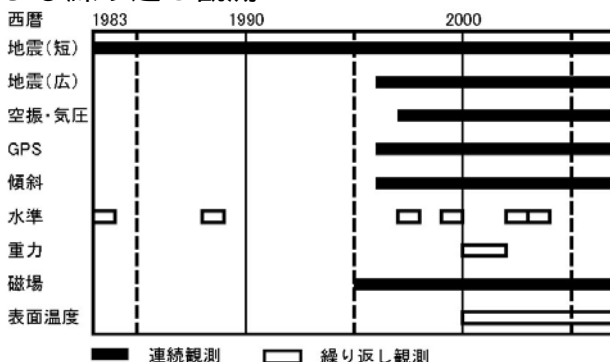
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

2000 年三宅島噴火では、火山活動の把握に地球物理観測が、それ以前の噴火で果たした以上に重要な役割を果たした。その一方で、地球物理観測をもとにした火山噴火予知の現在の水準を認識する機会にもなった。これまで重要な噴火を機に火山噴火予知が発展してきたことを考えると、2000 年三宅島噴火での経験は、今後の噴火予知の発展に大きく寄与することは間違いない。ここでは 2000 年三宅島噴火での地球物理観測の成果や今後の課題をいくつかの観点から検討する。

1. 三宅島で実施された多項目観測

2000 年三宅島噴火活動では、2000 年までに地震、地殻変動、電磁場等の連続的な観測が実施され、噴火の準備過程から活動低下に至る期間まで、変動を把握することができた。主な観測項目と観測期間を図 1 に示した。連続観測だけでなく、繰り返し観測も含めると、島という条件下にもかかわらず多項目観測が実現したことがわかる。火山噴火予知においては多項目観測による総合評価が重要とされてきたが、今回の三宅島噴火は多項目観測の意義を示す機会になった。

図 1 三宅島島内で実施された主な連続および繰り返し観測



2. 火山活動把握と活動推移の予測

地震や地殻変動等の連続データが揃った 1997 年以降について、地球物理観測による火山活動把握や予測の実績を概観する。

- (1) 噴火準備期 (2000 年 6 月 26 日以前)
GPS 観測からは三宅島の膨張、また全磁力にも 1997 年頃から変化が現れていたが、噴火の切迫性は認識できなかった。
- (2) 岩脈貫入期 (2000/6/26-27)
群発地震活動と傾斜変動により、マグマの上昇や移動を確信することができ、避難に直結する実時間の情報発信の根拠となった。
- (3) 山体収縮期 (2000/6/28-7/7)
大規模な収縮変動を把握することはできたが、カルデラ形成や噴火活動への発展を予測することはできなかった。
- (4) カルデラ形成期 (2000/7/8-8 月末)
傾斜ステップに代表される山頂火口とマグマ溜まりを結ぶ活動の把握はできたが、展開を予測できなかった。
- (5) 火山ガス放出期 (2000 年 9 月-2002 年)
多項目観測により火山活動が低下しつつあることを把握した。
- (6) 2003 年—現在
火山活動の低下とその変化が緩やかであることから、急激な活動の変化の可能性は小さいと予測している。

3. マグマシステムモデル化のための情報

GPS、傾斜変化、水準測量から弾性変形を引き起こした岩脈貫入や三宅島直下の膨張源及び収縮源が明らかになった。一方、地殻変動として現れにくい火道内の物質の挙動の推定において、重力や電磁場観測が成果をあげた。また地震観測はそれぞれの活動期において特徴的な地震や振動を観測し、モデルを作るうえでの基礎となっている。

三宅島の活動を理解するには、これらを総合してモデル化することが必要である。以下にモデル化の基礎となる主な情報を示す。

(1) 地殻変動源

GPS、傾斜変化、水準測量からいくつかの変動源が提唱された。これら 3 種類の観測データを総合的に解析して推定された結果を中心に主な地殻変動源を下記に示す。

島の南西部、深さ 8-10km の深部球状変動源とその直上の板状変動源。

1983-1999 : 膨張

2000/6/28-2000/9 : 収縮

2000/10-2003 : 深部は膨張

板状変動源は収縮

島の南西部に 2000/6/26-27 に貫入した岩脈群とその直下の板状収縮源。

火口直下浅部の膨張源 (2000/7/8 から 7/14 に膨張)。

カルデラ火口南部直下 (深さ 2-3km) の収縮源。2000/10 以降に収縮継続。

(2) 重力観測からのモデル化への主な情報

2000/7/6 までに山頂直下 (深さ 1.7km) に空洞が形成されていた。

2000 年 7 月下旬 - 8 月に火道内の密度減少。

2000/9 月-11 月に火口直下の火道にマグマが上昇した。

(3) 電磁場観測からのモデル化への主な情報

1996-1999 にかけて山頂カルデラ直下 0.7km に熱消磁域。

2000/6/26-27 に島の南西部に貫入した岩脈の上端の深さ (約 0.5km)。

2000/7/1-8/18 の期間に大きな変化。山頂陥没に前駆する現象や傾斜ステップの解釈に有効なデータ。

(4) 地震観測からのモデル化への主な情報

火山性地震の時空間分布

噴火や傾斜ステップに伴う長周期地震のメカニズム

間欠的な火山性微動や超長周期振動

4. カルデラ形成を含む動的な現象のモデル化

2000 年三宅島噴火を特徴づけたマグマの地下流出によるカルデラ形成過程のような動的な現象のモデル化には地殻変動、重力、

電磁場、地震波などを総合的に解析・評価することが重要である。モデル化は活動推移の定量的予測の根拠となるものであり、2000 年当時に実時間でなしえなかったものである。事後の研究成果によるモデル化の現状を次の 3 つの事象を対象に考察する。

2000/7/8 の噴火とそれに至る過程

2000/7/8 噴火から 7/14 噴火に至る期間

2000/7/8-2000/9 のカルデラ形成過程と噴火

5. 観測技術

三宅島噴火では、坑井式の傾斜計、GPS、SAR、広帯域地震観測等、1980 年代から 1990 年代にかけて開発、実用化された技術が成果を挙げた。また絶対重力観測や海底地震観測の有効性が示された。さらにリモートセンシング機器開発の契機にもなっている。

6. 今後の課題

(1) 三宅島の火山活動予測のために

三宅島の噴火活動は継続している。地殻変動は深部のマグマ溜りへのマグマの供給を示唆しているので、すでに次の噴火の準備期に入っているともいえる。今後の活動の推移を予測するために、次の手順が考えられる。

(a) マグマシステムのモデル化をさらに進め、モデルと数値シミュレーションにより、火山活動のシナリオを試作。

(c) 予想される活動を効果的に検出するための観測強化。

(d) 今後の観測をもとにモデルを修正。

(2) 三宅島での経験を今後の噴火予知に活かすために

2000 年三宅島噴火では、実時間で多量の観測データを総合的に解析し、モデル化することの重要性があらためて認識された。今後の総合的解析やモデル化の研究のために、2000 年三宅島噴火の観測データをテストデータとして、幅広く活用していくことが必要である。

上記において研究成果の出典(機関名や論文など)を省略したが、「第 7 次火山噴火予知計画の実施状況等のレビューについて」(平成 19 年 1 月 15 日)を参照していただくと幸いである。

2000 年三宅島の火山活動 火山ガス観測研究の進歩-

篠原宏志（産総研・地質調査総合センター）

Activities of Miyakejima Volcano after the 2000 Eruption: Advances of Volcanic Gas Monitoring Shinohara H. (GSJ, AIST)

1. はじめに

三宅島の火山活動は、2000 年 6 月末の地震活動の活発化に端を発し、海底噴火、新島・神津島海域での大規模マグマ貫入、雄山山頂の陥没を経て、8 月にマグマ水蒸気爆発が生じ、その後大規模な火山ガス放出が始まり、火山ガス放出量は 2000 年末には 1 日あたりの SO_2 放出量が 5 万 ton に達した。この放出量は、地球上の火山からの SO_2 放出総量（全球放出量）の日平均約 4 万 ton (Andres and Kasgnoc, 1998) を上回るほどの大規模な現象であった。9 月の全島避難指示後、噴火活動は次第に収まったが、山麓居住地域でも高濃度の火山ガスが検出されるようになり、居住環境の観点からも火山ガスの放出状況の把握と評価が必要とされた。そのため、火山ガス放出量や組成の観測手法の改良・開発が進められ、三宅島では数年間に渡る詳細な火山ガスデータが世界でも初めて得られ（図 1）その放出過程のモデルが進められた。本講演では、三宅島の 2000 年噴火以降の火山ガス放出現象とその定量化のための観測・研究の成果について紹介し、火山ガス観測の最近の進歩と今後の課題について述べる。

2. SO_2 放出量観測

火山ガス放出量の定量手法としては COSPEC を用いた SO_2 放出量の測定手法が基本的には確立していた。しかし、三宅島における大規模な火山ガス放出の定量化には、1) 通常想定されている以上の高濃度噴煙の定量化、2) ヘリコプターを用いた観測、3) 高頻度の観

測、などいくつかの問題の解決が必要であった。気象庁・大学・産総研は観測手法の改良を行いつつ観測の協力体制を気づくことにより、高精度高頻度の放出量の変動データ取得することに成功した。三宅島観測で築かれた SO_2 放出量観測における協力体制は、他の火山での観測へも拡張され、2004 年の浅間山噴火に際しても詳細な放出量変動データが得られるようになった。

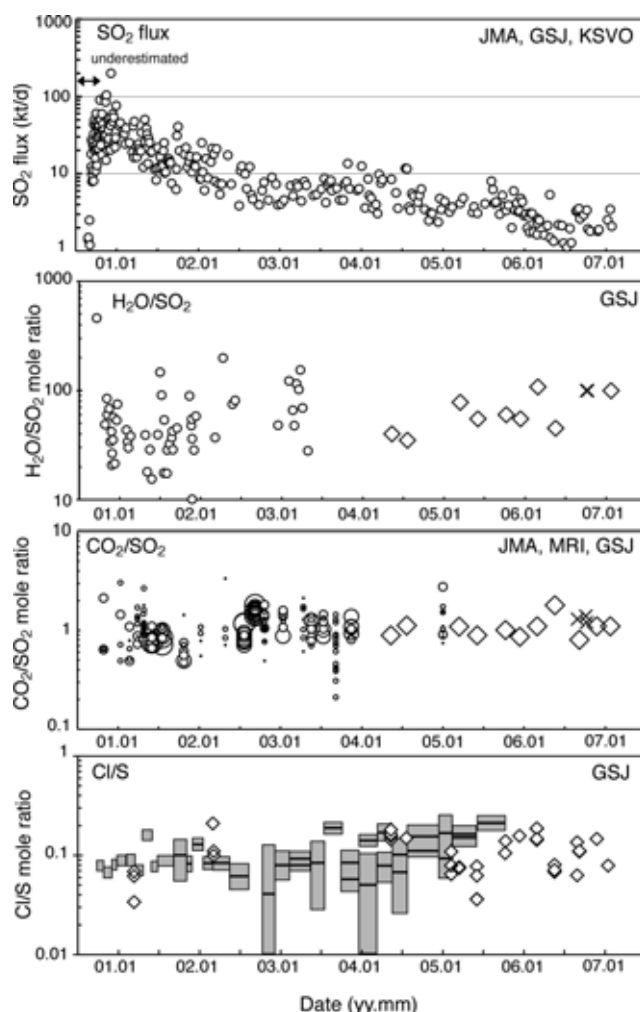


図 1 三宅島 SO_2 放出量と火山ガス組成変化

三宅島の大量火山ガス放出を定量化するために、従来の COSPEC による観測に加え、ASTER 衛星データや航空機搭載マルチスペクトルスキャナによる噴煙 SO_2 放出量定量手法の開発が進められた。また、COSPEC に代わる CCD 紫外分光計を用いた小型の観測装置 (COMPUSS) が開発された。COMPUSS は小型可搬であるため、噴煙を山頂部などの放出源近傍で測定することが可能であり、いままで定量困難であった小規模噴煙の測定が進められている。また、COMPUSS は吸収スペクトルデータを直接解析することが可能であるため、測定誤差の評価・精度向上が進められている。

3. 噴煙組成観測

従来の火山ガス組成の測定手法は、主に噴気ガスを対象としていたために、三宅島における大規模な噴煙活動の観測には応用困難であった。そのため、噴火当初は火山ガス組成の評価は、火山灰の付着成分分析による S/Cl/F 比の評価のみに留まっていた。しかし、大量火山ガス放出の評価の必要性から、赤外熱映像解析による H_2O 放出量評価手法やヘリコプター搭載型機器を用いた噴煙組成 (CO_2/SO_2) 測定手法が開発され、火山ガス組成変化の評価が可能となった。

ヘリコプター搭載型の噴煙組成観測手法の改良を行うことにより、小型可搬型の多成分ガスセンサーシステム (Multi-GAS) が開発され、噴煙組成の観測から火山ガス主成分組成を推定する手法が確立された。この手法により、噴気孔に接近不可能である活動的な火山においても火山ガス組成の観測が可能となり、国内外の火山において従来とは異なる質のデータが得られ、火山噴火・脱ガス過程の評価が進められている。

4. 脱ガス・マグマ供給系のモデル化

火山ガス放出の評価には、ガス放出量・組成データに加え、放出源であるマグマ中のガス組成のデータが不可欠である。三宅島においては2000年噴火噴出物中のメルト包有物の分析結果との比較から、火山ガスは低圧下で放出されていることが推定され、火道を通じて地下深部マグマ溜まりからマグマが地表近傍まで上昇し、脱ガスした後に再度マグマ溜まりへ沈降するマグマ対流脱ガスモデルが提唱された。2000年後半をピークに SO_2 放出量は次第に1/10以下まで減少したが、その間火山ガス組成はほぼ一定であり、脱ガス条件 (マグマ組成や脱ガス圧力など) が一定であることが推定された。そのためこの過程は、火道の狭窄による現象と推定された。

5. 今後の展望

三宅島の大量火山ガス放出を契機として、火山ガス観測手法の開発・改良および観測協力体制整備が進み、従来と比較すると観測頻度・精度および観測項目が格段に進歩し、それらを基に火山噴火・火山ガス放出機構に関する研究も進み、地震・地殻変動データとの比較も可能となった。しかし、2000年三宅島噴火でも2004年浅間山噴火でも噴火以前もしくは直前直後には観測が行われておらず、噴火開始過程などの評価に寄与できるデータが得られていない。また、観測を人力に頼っているため、地球物理観測と比較すると観測頻度が低く、同じ時間分解能での現象解析が未だ困難である。火山ガス放出量・組成の連続観測装置の開発・主な火山への設置を進めること今後必要と考えられる。噴火・脱ガス過程の評価には、火山ガスデータのみならずその放出源であるマグマ組成のデータが必要である。日本の多くの火山では噴出マグマはマグマ混合を経ている場合が多く、その定量的評価を進めることも必要である。

2004 年浅間山の噴火活動・地球物理観測の視点から

東京大学地震研究所 武尾 実

Geophysical research for the 2004 volcanic activity and the subsurface structure of Mt. Asama

Minoru Takeo (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

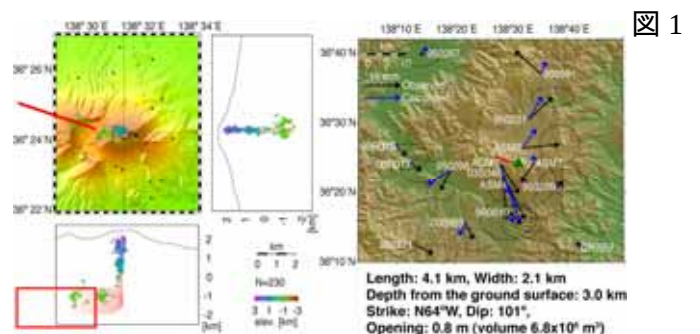
浅間山は爆発的な噴火をするわが国の代表的な火山である。天仁(1108年)と天明(1783年)の噴火では、大量の火山灰とスコリアを成層圏にあげ、山腹に火砕流を出して、広い範囲に多大の被害を生んだ。噴火活動が活発なことから古くから火山観測の対象になってきたが、地震観測網が展開され始めた1960年代以降、浅間山の活動は相対的に静穏な状態にある。しかし、1973年にマグマが直接関与する噴火がおき、高く上がった噴煙は関東地方の各県に降灰をもたらした。1980年代には観測網の整備も徐々に進み、火山性地震の震源も決められるようになった。しかし、その地震・地殻変動の観測システムは、マグマ供給系を解明するには未だ十分な精度を持つには至っていなかった。

火山体のマグマ供給系を解明することは、火山噴火のポテンシャル評価と噴火予測・被害軽減を進める上で重要な研究課題である。この研究課題は、種々の地球物理学的観測によりマグマの動きをとらえることや、火山体構造を明らかにすることで達成できる。しかし、マグマの動きに伴うシグナルは多くの場合極めて微弱であり、地震や地殻変動観測からマグマ供給系をとらえた研究は、世界的にもあまり例がない。

東京大学地震研究所では、2002 年以降、浅間山周辺での広帯域地震観測網、地殻変動観測網の整備を進めると同時に、気象庁の地震観測網とのデータ交換を進め、稠密な観測体制を構築してきた。

この時期の 2004 年 9 月 1 日午後 8 時に 21 年ぶりの中規模噴火が発生した。9 月 14 日から 18 日にかけての連続したストロンボリ噴火では約 130 k

m離れた東京でも降灰が観測され、9 月 23 日、29 日、10 月 10 日の中規模噴火と幾つかの小規模噴火を繰り返し 11 月 14 日の噴火を最後に現在に至っている。この 2004 年噴火活動前後の地震・地殻変動活動を新たに展開した稠密観測網のデータに基



づいて詳しく調べることにより、浅間山山体直下のマグマ供給系が明らかになった。図 1 に 2004 年 1 月から 2005 年 10 月の間に発生した地震の精密震源分布と、GPS 観測網で記録された浅間山周辺の地殻変動から求められた貫入ダイクの位置を示してある。これらの図から、海拔下約 1km の深さに火口直下から西側に延びる地震活動と火口直下海拔 1km からほぼ鉛直に立ち上がる地震活動が明瞭に確認できる。また、西側に連なる深部の活動は地殻変動で推定されるダイクの位置とも整合的で、これらの活動は浅間山直下のマグマ供給系を示し

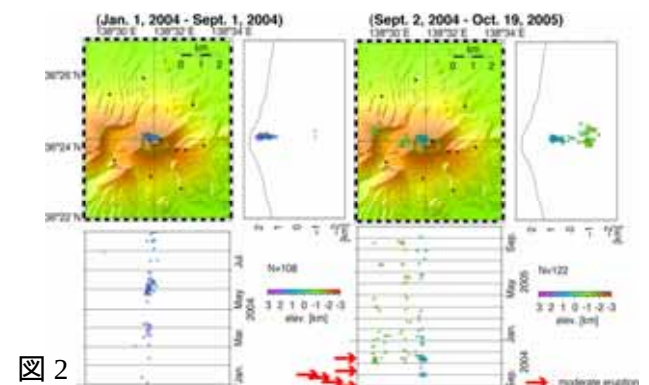


図 2

ている．噴火前と噴火後の震源分布の時間推移を見ると（図2），噴火前後で大きく変化していることがわかる．これらの活動と1996年以降の長期の地殻変動・地震活動の推移から，2004年の噴火前には海拔1km付近までゆっくりとマグマが上昇してきていたと推定される．最初の噴火の約1ヶ月前の7月下旬に発生した西側山麓下へのダイク貫入を契機に，火道最上部での温度上昇により，山頂で観測されていた特異な波形を持つ長周期地震が減少し始め，噴火数日前からは全く発生しなくなった．また，噴火の1日半前から火道最上部を破碎する群発地震活動が発生するなど，噴火の前兆を示す多くの現象が観測された．

さらに，この2004年の噴火活動では，絶対重力の観測から，火道上部でのマグマの昇降をとらえることに世界で初めて成功した（図3）．

また，一連の中規模噴火の際に火道内部で進行しているプロセスが，噴火に伴う爆発地震の波形解析により明らかになった．加圧された火道の蓋が噴火の際に取り去られ火道上部が急減圧し，それに引き続き発泡したマグマが上昇するプロセスが数秒から10秒程度の間に発生している（図4）．

上に述べた2004年噴火活動の研究により明らかになったマグマ供給系が地下構造とどの様

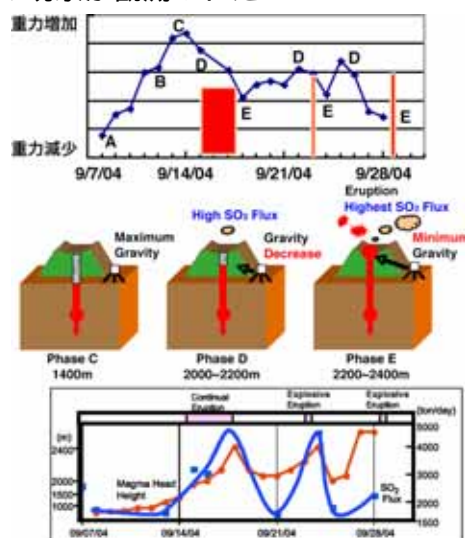


図3

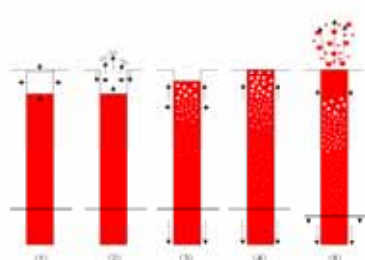


図4

に関係しているかを調べるために，2005年秋には

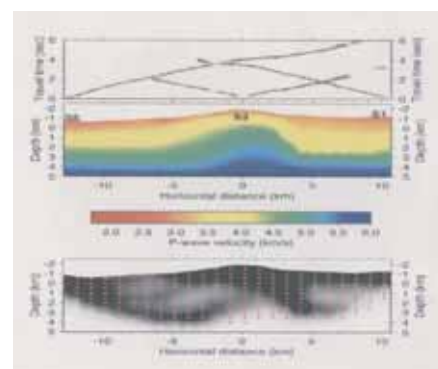


図5

源を用いた構造探査が実施された．構造探査南北測線の初期段階の結果を図5に示す．ダイク貫入領域で高速度域が盛り上がっていることが判る．また，鬼押し出しなどの溶岩流域では再帯磁により高磁化となっているが，山頂域では周囲に比べ弱磁化となっており，これは火山活動による熱消磁域をとらえたものと考えられる．多点MT・AMT法比抵抗探査の2次元構造解析の結果，山頂直下のマグマ上昇域に相当する領域が低比抵抗を示したのに加え、地殻変動データから推定されているダイク貫入域下およそ10kmに顕著な低比抵抗体が発見された（図6）．これは，ダイク貫入を引き起こしたマグマの供給源である可能性がある．

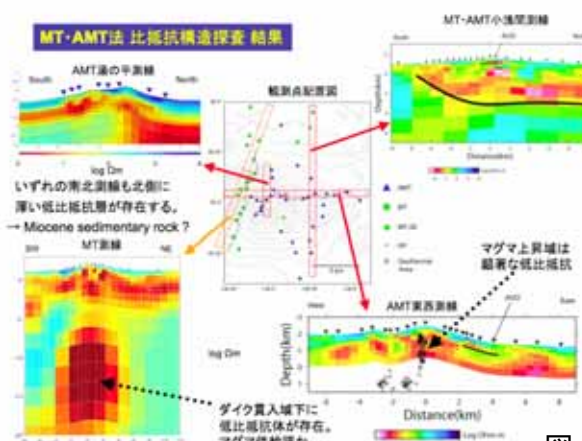


図6

この様に，浅間山においてはマグマ供給系と火山体構造の関連が次第に明らかに成りつつあり，これらの研究成果は今後の浅間山観測体制の整備や将来の噴火予測にとって極めて重要である．

富士山の不思議はどこまで分かったか

渡辺秀文・東京大学地震研究所

Progress of the recent research projects on Fuji volcano: its current status, subsurface structure and history

Hidefumi Watanabe, Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

1. はじめに

第6次火山噴火予知計画において、休止期間の長い火山の噴火ポテンシャル研究の対象とされていた富士山で、2000年11月に過去20年間の観測史上最大規模の深部低周波地震活動が発生し、その後2001年4月～5月にも活発化した。この事態を受けて、科学技術・学術審議会測地学分科会火山部会で当面の観測研究強化についての報告がなされた。その後、関係各機関の連携によって、報告に基づく富士山の観測体制の強化および様々な基礎研究が実施された。

富士山は日本最大の成層火山であるが、宝永噴火以降300年間静穏であったことや山体が大きいことなどのため、火山活動を的確に評価するための観測体制が不十分であり、噴火メカニズム解明のための基礎研究も十分に進んでいなかった。また、山体直下の深さ15km付近で発生する深部低周波地震の発生メカニズムやマグマ供給系との関連についても良く分かっていなかった。集中的に実施された観測研究や地質調査等の基礎的研究によって、活火山としての富士山の理解は格段に深まった。以下に、主要な成果と今後の課題について報告する。

2. 観測体制の強化と最近の活動状況

山頂から中腹にかけての地震観測網が強化され、山体浅部の微小な地震も検出可能となったが、この間活動は低調である。また、高品位データが得られる観測点が新たに設置され、M0程度までの低周波地震の震源決定ができるようになったが、深部低周波地震の活動が低調となり、メカニズム解明のための十分なデータは得られていない。しかし、活動活発化時のデータを用いて精密震源再決定を行った結果、分布は板状で、活動活発化の際に

は震源が移動していたことが分かった。また、2003年9月11日に発生したやや規模の大きい深部低周波地震の予備的解析により、深部低周波地震が粘性流体の上下移動とそれによって励起されたクラック振動によって発生したことを示唆する結果が得られた。

富士山頂から山麓にかけてGPS観測点が、中腹には孔井を用いた傾斜、歪、温度の高感度観測点が新設され、富士山の地殻変動検知能力が向上した。これまでの観測では特段の変化は観測されず、現時点では、富士山直下でマグマ蓄積が進行しているとしても大きなものではないことが確認された。また、富士山周辺の既存のGPS観測データを用いて1996～2000年間の平均変動速度を解析した結果、富士山周辺では歪の蓄積が小さく、富士山の下ではフィリピン海プレートと陸側プレートとが固着していないことが分かった。このことは、富士山周辺のテクトニクスや富士山腹の割れ目火口配列を支配する応力場を考える上で、重要な知見である。

3. 富士山周辺の地下構造とテクトニクス

富士山および周辺の地下構造を把握するため、人工地震と自然地震を用いた速度構造探査、重力・磁気探査および電磁気探査が実施された。人工地震探査の結果、山体直下の詳細な速度構造が得られ(図1)、震源決定を高精度化するための条件が整備された。富士山直下の地震波高速度層の盛り上がりの存在が明らかになり、繰り返し起こったマグマ貫入の結果であると解釈された。また、富士山の基盤は東側で浅く西側で深くなっており、富士山が異なるテクトニクス場の境界付近に位置していることが示唆された。

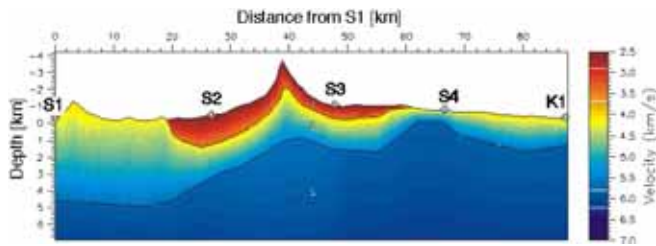


図 1

富士山周辺 70km 範囲にある関係機関の定常観測点および大学を中心とする集中観測により設置した臨時観測 28 点からなる稠密地震観測を 3 年 7 ヶ月の期間実施し、観測された自然地震データを用いて速度構造解析を行った (図 2)。

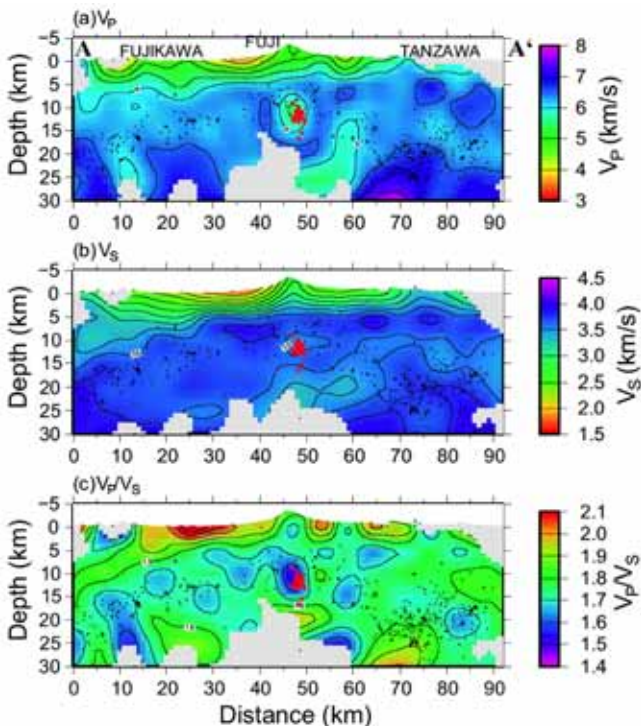


図 2

特に重要な成果として、1) 富士山直下でフィリピン海プレート上面が連続しており、プレートの断裂はなさそうである、2) 深部低周波地震の震源域は低 V_p 、低 V_s 、低 V_p/V_s であり、低周波地震の発生に超臨界状態の H_2O/CO_2 が関与しているらしい、3) 富士山直下の深さ 20km 以深は低 V_p 、低 V_s 、高 V_p/V_s であり、マグマ供給系の存在を示唆する、などの新知見が得られた。

電磁気探査等からは、富士山の地下数百 m には、地下水を多く含む層が広がっており、山頂火口の地下 500m 付近には熱水の上昇を示

唆する結果が得られた。さらに、富士山直下の 20km 以深に低比抵抗体が分布していることが分かった (図 3)。

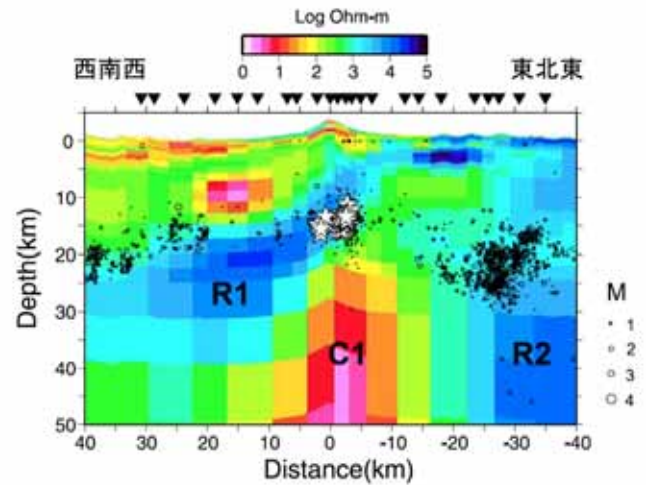


図 3

以上の構造探査結果を総合すると、深部低周波地震の発生領域は、フィリピン海プレートよりも深部に位置する地震波低速度 / 低電気比抵抗領域 (マグマ供給系) の上部に位置することが明らかとなった。

4. 富士山の山体構造と噴火履歴

富士山の長期間の噴火履歴および噴出物の組成変化をできるだけ連続的に調査するため、富士山北部及び東部におけるボーリング調査、南部と北部におけるトレンチ調査および火口壁断面での地表調査等が集中的に実施された。

その結果、富士火山直下に既知の小御岳火山とは異なる安山岩の古い山体 (先小御岳) が存在することが明らかとなった (図 4)。また、炭素同位体年代測定とテフラ層序の解析により、富士火山の噴火史がより定量的に再編成された。また、噴出物の化学組成の解析から、富士火山のマグマの組成変化は、浅部の安山岩質小マグマ溜りに深部から大量の玄武岩マグマが繰り返し注入・混合するという

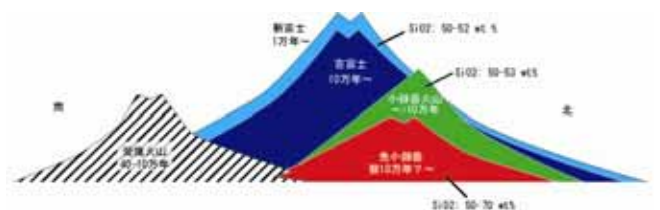


図 4

プロセスによって生じているという大局的なマグマ供給モデルが提案された。このモデルが正しければ、富士山では通常の玄武岩噴火に比べて爆発的な噴火を引き起こす潜在的要因が常に存在することになる。

5．今後の課題

これまでの観測調査研究の成果をふまえ、今後進めるべき研究課題として以下が重要である。

- ・富士山直下で繰り返し発生している深部低周波地震の発生メカニズム解明のためには、高品位波形データを蓄積し、活動度変化、震源移動、高感度地殻変動観測データとの対応関係を含めて詳細な解析を行う必要がある。

- ・1996～2000年の富士山周辺 GPD データの解析からは、富士山直下のプレートがデカップリングしていることが示唆されているが、「伊豆デタッチメント仮説」(Seno, 2005)等をも考慮し、今後詳細な検証を行う必要がある。

- ・富士山周辺の地下構造については、より広域および深い地震をも用いて、フィリピン海プレートのより詳細な形状を解明し、富士山直下の20km以深に存在が示唆されているマグマ供給系を上部マントルの深さまで解明することが特に重要である。

- ・長期の噴火履歴と基盤構造を解明するためには、これまで実施していない富士山南～西地域での1000m級ボーリング調査が必要である。

- ・長期的な噴火予測のためには、噴火の規模／間隔／様式変化の定量的な評価を行う必要がある。

- ・次期噴火予測へ向けては、これまでの噴火履歴の中で最後の宝永噴火をどう位置付けるかが重要である。

防災対応を踏まえて区分した火山の新しいレベル

横田 崇 ・ 気象庁地震火山部火山課

The new volcanic alert level divided on the basis of disaster measures

Takashi YOKOTA (Japan Meteorological Agency)

はじめに

気象庁は、火山災害を軽減するために、全国の活火山の活動を 24 時間体制で監視し、火山の活動状況や防災対応の必要性について、火山情報を用いて発表している。

このたび、噴火に伴う避難、避難準備、登山規制等の具体的防災対応を一層とりやすくなるよう、防災対応を踏まえて区分した新しいレベル（レベルの総称名については 6 月頃決定予定）を火山情報に導入することとしたので紹介する。

導入の経緯

気象庁は、従来から分かりやすい火山情報の提供に努めており、平成 15 年 11 月からは、火山活動の程度を数値で表した火山活動度レベルを運用してきた。

一方、平成 16 年の豪雨災害などの一連の災害を契機に、市町村長が避難準備情報や避難勧告等の発令の時期と対象地域を決める具体的な判断基準等についてあらかじめ検討しておくことの重要性が認識された。

この観点からみると、現行の火山活動度レベルは、主として噴火規模で区分しており、それぞれのレベルと具体的な防災対応との関連が必ずしも明確でなく、避難準備や避難勧告等を判断するには利用しにくいとの指摘があった。

このため、昨年 11 月に設置された内閣府の「火山情報等に対応した火山防災対策検討会」（座長：田中淳・東洋大学社会学部教授、事務局：内閣府（防災担当）、総務省消防庁、国土交通省砂防部、気象庁）において、火山情報等に対応した火山防災対策の確立を図るため、現行の火山活動度レベルの改善についても検討された。

その結果、今年 3 月 22 日には「噴火時等の避難体制に係る火山防災対策のあり方（仮称）骨子」がまとめられ、火山活動度レベルの改善内容も含めて公表された。

新しいレベルの内容

新しいレベルは、噴火に伴う避難、避難準備、登山規制等の具体的防災対応を一層とりやすくなるよう、防災対応を踏まえて区分したものである。

現行の火山活動度レベルからの主な改善点は以下のとおり。

- 主として噴火規模によって区分した現行の火山活動度レベルから、防災対応を踏まえて区分した新しいレベルに変更する。
- 各レベルにキーワード（「避難」、「避難準備」、「注意」、「火口周辺注意」、「平常」）を設定し、具体的な防災行動に結びつくようわかりやすく表現する。
- 現行の火山活動度レベルのレベル 0 とレベル 1 は、防災対応上の区分の必要性が少ないことから、新しいレベルではレベル 1 として統合する（レベルは 6 段階 → 5 段階）。
- 「火山活動度レベル」という名称についても、防災行動の判断に利用されるものであることを明らかにするため、改称する。

新しいレベルは、主に住民等の行動と登山者・入山者への対応を踏まえてレベルを区分している（図参照）。大きく分けて、レベル 3 以上が住民向け、レベル 3 以下が登山者・入山者向けとなっている。レベル 3 は、入山すると危険な状況にあり、住民にとっては避難・避難準備はまだ必要ないものの、今後の火山活動に注意しておいてほしいレベルであ

る。

新しいレベルの導入に向けて

新しいレベルを各山に導入する際には、各山の特徴に応じて、ハザードマップを基にした避難対象地域等の設定やレベルに応じた避難計画等の策定が必要である。これらは、地域における協議会等とともに共同して検討していくこととなる。

新しいレベルは、これらの準備が整った火山から順次導入していく。また、現行の火山

活動度レベルを導入している 12 火山についても、新しいレベルへの早急な切り替えに向けて、地元機関等と検討していく。

なお、新しいレベルの総称名については、6 月頃を目途に決定する予定である。

(参考) 現行の火山活動度レベル導入火山
吾妻山、草津白根山、浅間山、伊豆大島、九重山、阿蘇山、雲仙岳、霧島山(新燃岳・御鉢)、桜島、薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島

現行の火山活動度レベル

主として噴火規模により区分

「新しいレベル」

避難行動等の防災対応を踏まえて区分し、キーワードを設定

新しいレベルは、火山活動の状況について、噴火時等にとるべき防災対応を踏まえて区分したもので、この活用に当たっては以下の点に留意する必要がある。

- 火山の状況によっては、異常が観測されずに噴火する場合もあり、レベルの発表が必ずしも段階を追って順番通りになるとは限らない(下がるときも同様)。
- 各レベルで想定する火山活動の状況及び噴火時等の防災対応に係る対象地域や具体的な対応方法は、地域により異なる。
- 降雨時の土石流等レベル表の対象外の現象についても注意が必要であり、その場合には大雨情報等の情報にも注意する必要がある。

緊急火山情報	5	極めて大規模な噴火活動等 広域で警戒が必要
	4	中～大規模噴火活動等 火口から離れた地域にも影響の可能性があり、警戒が必要
臨時火山情報	3	小～中規模噴火活動等 火山活動に十分注意する必要がある
火山観測情報	2	やや活発な火山活動 火山活動の状態を見守っていく必要がある
	1	静穏な火山活動 噴火の兆候はない
	0	長期間火山の活動の兆候がない

緊急火山情報
臨時火山情報
火山観測情報



統合

レベル	説明		
	火山の状況	住民等の行動	登山者・入山者等への対応
レベル5 (避難)	居住地域に重大な被害を及ぼす噴火が発生、あるいは切迫している状態にある。	危険な居住地域からの避難等が必要(状況に応じて対象地域や方法を判断)	
レベル4 (避難準備)	居住地域に重大な被害を及ぼす噴火が発生すると予想される(可能性が高まってきている)。	警戒が必要な居住地域での避難の準備、災害時要援護者の避難等が必要(状況に応じて対象地域を判断)	
レベル3 (注意)	火山活動は活発。居住地域の近くまで重大な影響を及ぼす(この範囲に入った場合には生命に危険が及ぶ)噴火の発生、あるいは発生が予想される。	通常の生活(今後の火山活動の推移に注意)。状況に応じて災害時要援護者の避難準備等	登山・入山規制等危険な地域への立入規制等(状況に応じて規制範囲を判断)
レベル2 (火口周辺注意)	火山活動はやや活発。火口周辺に影響を及ぼす(この範囲に入った場合には生命に危険が及ぶ)噴火の発生、あるいは発生が予想される。	通常の生活	火口周辺への立入規制等(状況に応じて火口周辺の規制範囲を判断)
レベル1 (平常)	火山活動は静穏。火山活動の状態によって、火口内で火山灰の噴出等が見られる(この範囲に入った場合には生命に危険が及ぶ)。		特になし(状況に応じて火口内への立入規制等)

1: 住民等の行動と登山者・入山者等への対応には、代表的なものを記載。
2: 危険な居住地域、警戒が必要な居住地域とは、避難または避難準備の対象として地域防災計画等に定められた地域を示す。ただし、火山活動の状況によって具体的な対象地域はあらかじめ定められた地域とは異なることがある。
注: 表で記載している「火口」は、噴火が想定される火口あるいはそれらが出現する領域(火口出現領域)を意味する。伊豆東部火山群のように、あらかじめ噴火場所(地域)を特定できないものは、地震活動域を火口領域と想定して対応。

図 火山活動度レベルから「新しいレベル」へ

第3部 火山噴火予知研究の展望—来るべき噴火に備えて

今後桜島において予測される噴火とその予知戦略

井口 正人 (京大・防災研)

For Prediction of Near-Future Eruption at Sakurajima Volcano

Masato Iguchi (DPRI, Kyoto Univ.)

桜島の南岳山頂火口においては1955年以降50年以上にわたり、爆発的な噴火活動が繰り返されおり、爆発的噴火の発生回数は7800回以上に及ぶ。桜島の爆発的噴火活動の前兆現象としては、火山性地震の活動がA型からB型群発活動に推移することや、爆発の直前に火口周辺の地盤が隆起・膨張することが知られており、我が国においても最も実践的噴火予知が行われている火山とあってよいであろう。図1は爆発前後の傾斜変化を示したものである(Ishihara, 1990)。爆発の約1時間前から火口方向の地盤の隆起を示す傾斜変動が捉えられ、爆発が発生すると沈降を示す傾斜に反転している。桜島では隆起を示す傾斜が観測された時を「噴火準備状態」とし、さらにその隆起量に応じた3段階の警報を発するシステムが実用化されている(Kamo and Ishihara, 1989)。

火山噴火予知では発生時期、場所、規模、様式、推移(5要素と呼ばれる)の予測が必要であるとされている。図1では6時43分に爆発が発生している。仮に現在の時刻が6時30分であるとすると、この時点で確かに隆起を示す傾斜変動は捉えられているが、この隆起傾斜変動がいつまで続き、どれくらいの大きさになるのかということが分からない。このことは噴火の時期と規模の予知ができていないことを意味する。先

に述べた警報システムは気象庁の火山活動度のレベル化の原型といえよう。

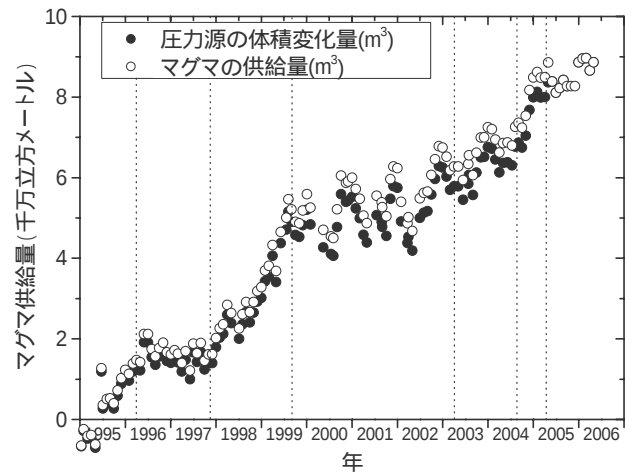


図2. GPS連続観測から推定された始良カルデラ下におけるマグマ蓄積量

前兆現象は観測されているが先に述べた意味での予知ができていない別の例を示す。図2はGPS連続観測によって得られた水平変位から推定した桜島北部にある始良カルデラ直下のマグマ溜まりでのマグマの蓄積量である。1974年以降の南岳噴火活動の活発化に伴い、停滞・沈降していた桜島の地盤の動きは1992、3年ごろを境に隆起・膨張に転じ、その後も間欠的にマグマが供給され、1995年以降では約1億 m^3 のマグマが蓄積された。桜島では1985年に452回の爆発が発生した後は徐々に爆発回数は減少し、2006年は11回にすぎなかった。このことから桜島は表面的には静穏となっているが、地下では次の噴火の準備段階となるマグマの蓄積を始めたと評価できる。しかし、マグマの蓄積がどれくらい進行すれば噴火に至るのかという、時期と規模の予知が現段階でできていないという問題に直面する。しかも噴火の規模によって様式も当然異なるので次の噴火の様式についても予知できていないことになる。火山噴火予知計画が開始されてから観測網の整備がすすみ、確かに前兆現象をとらえるという技術的なレベルは火山噴火予知計画開始以前と比べはるかに向上したが、いまだ予知というレベルには程遠いの

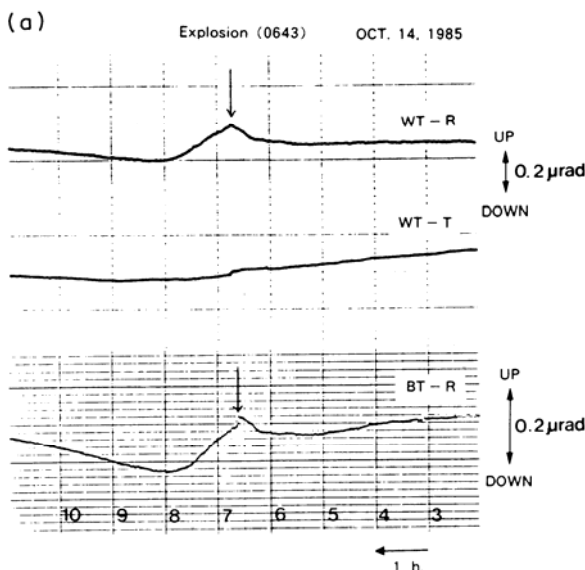


図1. 桜島南岳の山頂爆発に伴う傾斜変化 (Ishihara, 1990)。

が実情である。

桜島では2006年6月4日の11時前後から、昭和21年に溶岩を流出した火口(昭和火口)付近から、噴煙を放出し始めた。梅雨期であり、表面活動をすべて把握できたわけではないが、2週間程度噴火が繰り返されたものと推定される。噴煙柱の高度は1000m程度で噴火活動の規模は諏訪之瀬島において繰り返される小規模噴火と同程度で、南岳の山頂爆発に比較すると規模は小さく、また、顕著な地震活動や地盤変動は検出されていないことから本格的なマグマ活動ではないが、50年以上噴火活動が続いた南岳火口の外側において噴火活動が発生したことで今回の噴火活動は注目に値する。先に述べたようにマグマは始良カルデラ直下に蓄積されつつあり、いずれ噴火活動が活発化することはまちがいない。そこで、現段階で将来起こりうる活動について考えてみる。

A) 南岳山頂噴火活動の再激化

1955年に始まった山頂爆発活動も1960年にピークに至った後、爆発回数が急激に減少し終息に向かうかと思われたが、1972年10月2日の爆発を契機にそれ以前に増して活動が激化し、1970年代～1980年代には年間200～400回の爆発が発生した。

B) 昭和火口における再活動→火砕流の発生→溶岩流出

0.1km³オーダーのマグマが噴出する場合、昭和21年の溶岩流出に先行して、昭和14年には昭和火口において火砕流が2か月にわたって頻繁に発生した。

C) 文明、安永、大正噴火クラスの両山腹噴火

1km³をこえるマグマが噴出する場合、始良カルデラ周辺の水準測量によれば、年間1千万m³のマグマが供給されており、大正噴火により放出されたマグマの8割方はすでに回復している。

桜島の山頂爆発活動期には、始良カルデラ下のマグマ溜まりにマグマが供給、蓄積されたのち南岳直下のマグマ溜まりへ移動し、火道を上昇した後噴火に至ると考えられている。大正噴火でも、噴火そのものは南岳の両山腹で発生したが、地盤の沈降中心は始良カルデラにあり、始良カルデラのマグマ溜まりのマグマが噴出したと考えられている。いずれの場合でも始良カルデラのマグマ溜まりから桜島へマグマが移動しており、マグマの量が多ければ山腹噴火が発生し、それほど多くはないが定常的に移動する場合には山頂噴火活動が長期化するのではないかと予想される。図3は2000年以降

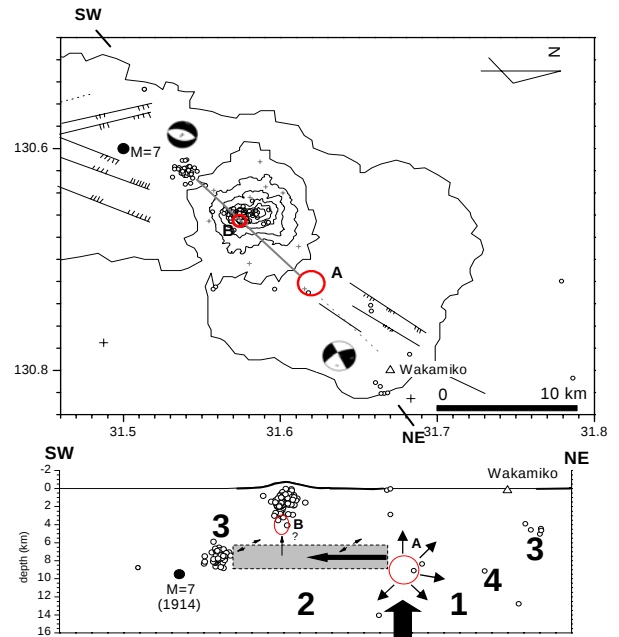


図3. 桜島の火山性地震活動から推定した始良カルデラ下のマグマ溜まりから桜島南西へのマグマの移動(Hidayati, 2007)。

の桜島周辺の地震活動から推定した始良カルデラから桜島へのマグマの移動を示したものである(Hidayati, 2007)。始良カルデラのマグマ溜まりから桜島のある南西方向に走行する開口割れ目を仮定し、マグマ溜まりに蓄積されたマグマは割れ目に沿って移動し、割れ目の先端でA型地震が発生するとした。まだ、実証されたものではないが、始良カルデラから桜島へのマグマの移動経路および移動量が把握できれば、次の噴火の規模および様式の予測が可能となる。そのためには、

- (1) 火山体造探査によってマグマの移動経路を推定する。
- (2) 推定された移動経路に沿ってGPS、傾斜計などの地盤変動観測機器を高密度に配置し、
- (3) リアルタイムデータ解析を行い、マグマの移動量を把握する。

ことが必要となる。2006年6月に発生した昭和火口における噴火活動を含め、今のところ大量のマグマが移動したと考えられる観測データは得られていないが、マグマの蓄積期に入った桜島の次の噴火を予知するためには、蓄積されたマグマ溜まりから桜島への移動・上昇を把握することが最も肝要と考える。

火山噴火モデル構築に向けて

西村太志・東北大学大学院理学研究科

Construction of scientific models to explain how we think some part of the volcanic eruptions and magma ascent

Takeshi Nishimura, Graduate School of Science, Tohoku University

1. はじめに

長年の火山噴火予知研究の実施により、火山性地震や微動の時空間変化、貫入ダイクや火山性圧力源の位置およびマグマの量をリアルタイムでモニターできるようになり、地震・地殻変動観測点を十分配置した火山では、新たなマグマ噴火の発生を見逃す可能性は非常に低い、と言って差し支えないレベルまで噴火予知の技術は進展した。そして、噴火時期や発生位置の予測成功例もあげられるようになった。これらの成果は、「火山噴火直前には地殻内部をマグマが上昇するため、地殻変動や地震が発生する」という噴火前には何らかの前兆があるという“モデル”をもとにして、長年の観測研究が進められ、その有効性が実証されたからであろう。

しかし、噴火するときとしないときの前兆現象の違いや、噴火予知の重要課題として以前から指摘されている規模や様式の予測については、このモデルは何ら答えられない。従って、次世代の高度な噴火予知方法を確立するためには、それらに対応するモデルが必要である。また、量（時間、噴出量等）を推定することを目指しているので、定量的なデータに裏付けされた、科学的モデルの構築が不可欠となる。

科学的モデルは、観測データを中心に帰納的に作られるものや、基礎的な理論を軸に演繹的に作られるものがあるだろう。火山現象は、一般的に、多様で、発生頻度もそう高く

はない。しかし、多くの火山で発現し、かつ多量のデータを調べられるブルカノ式噴火やストロンボリ式噴火などについては、比較的短期間に、定量的な観測量から噴火予測に役立つモデルを構築できるだろう。一方、休止期が長く、潜在的爆発力を有する火山の噴火予知は、発生頻度が小さいため観測データだけからのアプローチは難しい。このような低頻度の現象には、マグマ上昇や噴火現象の基礎法則を軸にした理論モデルを構築していくことが必要であろう。

本発表では、最近提案された新しい噴火モデルを紹介し、将来への展望を示したい。

2. 高精度データに基づく噴火モデル

火山噴火は、地殻内部のマグマの上昇に引き起こされるので、噴火前には山体膨脹（マグマ上昇）が起きるとというのが簡単なモデルであるが、最近、井口(2006)は、複数の火山の高精度のデータの解析結果を比較検討することで、ブルカノ式噴火に対して新しいモデルを構築した。彼は、諏訪之瀬島、スメル火山の火口近傍での地震・地殻変動の高精度観測のデータ解析を実施するとともに、桜島の定常観測のデータを合わせて、次のような新しい噴火の準備過程を提案している。まず、（１）マグマの上昇に伴い、爆発的噴火前には山体がゆっくりと膨脹する。（２）噴火発生の数秒から数十分前には、収縮に転じる。（３）深さ数百メートルから数キロメートルでの急

激な膨脹が起きる。(4) 1秒程度以内に火口蓋の開口を引き起こし、噴火が発生する(5) 引き続く火山灰の噴出によって、山体が収縮する。(1)と(2)のプロセスが準備過程であるが、今回(2)のプロセスがあること新たに明らかになった。

噴火予知の点でモデルをみれば、これまで(1)の膨脹期の発現のみで予測していたため、例えば桜島では、地殻変動が始まってから「いつ」起きるのかは数時間程度の誤差でしかわからなかった。しかし、この直前の収縮期を検知することで、新たに噴火発生の予測を数分前に行えることを示唆している。さらに、他の噴火予知の高度化に向けての重要な要素をも含んでいる。これまでのデータには、初期収縮期は、桜島で長く、諏訪之瀬島やスメル火山のような小規模なブルカノ式噴火で短い傾向があるらしい。異なる火山でのデータ等も蓄積し、より系統的なデータ解析をすることによって、収縮時間と規模や様式などの比例関係が見いだされれば、ブルカノ式噴火の規模の予測にも利用できる。

3. 理論モデルによる爆発性の予測例

基礎的な理論を予測モデルに結びつけたものとして、発表者自身の研究を例として示そう(Nishimura, GRL, 2006)。火山噴火がプリニー式のような爆発的噴火になるか、溶岩ドーム形成のような穏やかな非爆発的噴火になるか、といった噴火様式を予測するためのモデルである。火山の爆発性については、理論的・物質科学的な研究により、爆発的噴火は揮発性成分(水)を含むマグマが引き起こし、非爆発的噴火は途中で脱ガス(揮発性成分がマグマ外へ排出)したマグマによる、というモデルがあることはよく知られている。ただ、噴火前に火道内にあるマグマをサンプルして分析することはできないため、予知には利用できなかった。そこで、発表者は、マグマ内の気泡成長の基礎的な方程式(気泡メ

ルト間の運動方程式、メルト中水分子の拡散方程式等)に加え、周辺岩体との力学的相互作用と脱ガス過程を表現する方程式を導入することで、マグマ上昇のモデルを組み立て、数値計算を行った。その結果、揮発性成分を含むマグマは、地殻内を上昇するうちに気泡成長によってその体積が急速に増加していくのに対し、揮発性成分がマグマ外へ排出される非爆発的噴火では、体積増加がないことが明らかとなった。この違いは地殻変動の時間変化の違いとして表れる。図1に示すように、爆発的噴火前には時間的に急速に地殻変動が進行するのに対し、非爆発的噴火前は比較的緩やかな変動となる。

データ数は限られるが、世界各地で記録された爆発的噴火(メラピ山、セントヘレンズ山)や非爆発的噴火(メラピ山、セントヘレンズ山、モンスレー島、雲仙岳)に伴い観測された地殻変動データをみると、モデルの予測と定性的に一致している。従って、地殻変動の時間的な変化に着目することで、爆発性について予測できる可能性がある。

このような地殻変動の観測データは 1980

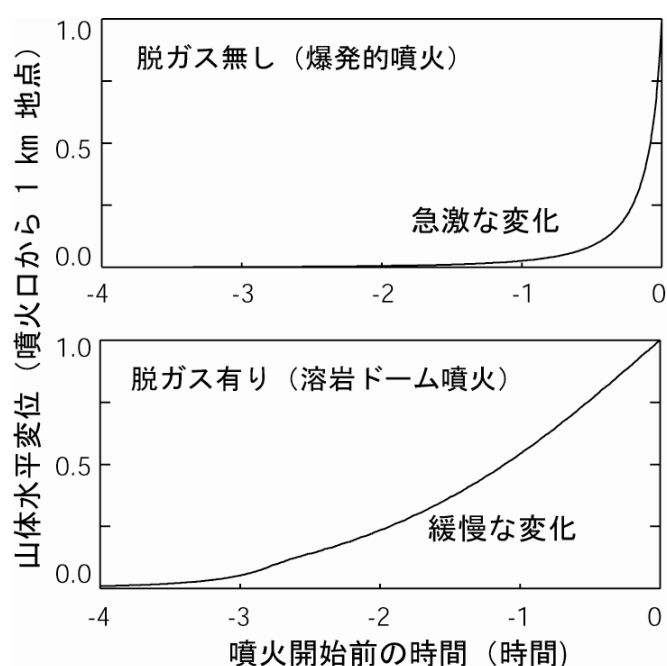


図1. モデルから予見される爆発的噴火と非爆発的噴火前の地殻変動。

年頃から論文として順次公表されていたが、地殻変動データと爆発性を議論した研究は、発表者の知る限り、以前にはなかった。これはデータ数が限られてしまっていたからと思われるが、今回、理論モデルからの予測を元に観測データを再び“みる”ことによって、地殻変動データと爆発性の相関がみえてきたといえよう。

4．観測と理論の融合 - 定量的噴火予知を目指して -

マグマ上昇や噴火の原動力は、マグマ内に含まれる揮発性物質である。この揮発性物質の挙動の素過程として、気泡形成や成長過程と周辺岩体との相互作用など、浅部マグマ上昇の基礎となるモデルの構築も行われている。爆発性を支配する脱ガス機構や、マグマ破碎過程など、火山爆発現象の「鍵」となる現象も、より現実的なモデルの構築に向けて精力的に理論的・実験的な研究が行われている。これらの素過程を理論・実験的に明らかにすることで、マグマ上昇過程の全体像が明らかとなり、噴火の正確な発生時期や噴火様式・規模などの予測を行う、つまり、定量的な火山噴火の予知を実現するための基礎的なモデルができあがるであろう。

また、火山現象は気液固相の相互作用を含

む複雑な現象であるので、理論・実験研究ばかりでなく、観測研究に基づく新しい発見や火山現象への境界条件の提供は重要である。特に、繰り返し噴火を発生する火山では、多数のデータが得られるので、観測量と理論モデルの定量的比較を通して揮発性物質挙動の素過程の理解を深めることができよう。例えば、先に示した井口モデルの(2)の収縮現象が(3)の急膨張を誘発しているメカニズムの解明は、火道内での揮発性物質の挙動の理解を進展させるだろう。また、マグマ溜まりや火道の位置や大きさの設定は、理論モデルに欠くことはできないが、まだ実測が無く、観測データからの詳細な時空間分布のデータが待たれる。

最後に、科学的モデルは実験や観測で検証されなくてはならないことを改めて強調したい。ブルカノ式噴火のような頻度の高い現象だけでなく、文明社会にとって驚異となるプリニー式噴火などの発生頻度の低い現象についても、できる限り高精度の観測データを積み重ねていかななくては、モデルの有効性を実証することはできない。

噴火予知の高度化に向けて地殻変動観測は今後何をめざすべきか

- 多項目観測の統合化と動的マグマ移動モデルへの挑戦 -

国土地理院 村上 亮

New Goals of Crustal Deformation Studies for Next Generation Eruption Prediction

- Unification of Multidisciplinary Observations for Dynamic Modeling of Magma Movement -

Makoto MURAKAMI, The Geographical Survey Institute

1. はじめに

GPS や衛星合成開口レーダーに代表される高精度地殻変動観測技術の火山観測への導入によって、マグマ移動に伴う地殻変動をより高精度にまた確実に捉えることが可能となった。全国を覆う GPS 連続観測網が構築され、その本格的運用は 1996 年から始まった。最近発生した多くの火山活動では、火山周辺に位置するこれらの観測点によって、噴火に伴う地殻変動や、噴火に至らないまでも地下でマグマが移動した証拠である微小な地殻変動が見事に補足され、最新の地殻変動測定技術の威力が発揮された。

これからも、地殻変動観測は、火山噴火予知の主要な構成要素でありつづけると考えられるが、本報告では、今次の火山噴火予知計画までに達成された地殻変動観測の成果を概観することによって、将来に積み残された課題を洗い出し、次期計画において目標とすべき達成点について考察する。

2. これまでに達成された成果：「うごけばわかる」の実現

測量その他の方法によって計測される火山活動に伴う地殻変動の知識が、火山活動を理解する上で極めて有用であることは古くから実証されてきた。1914 年桜島噴火に伴う地盤の沈降の分布パターンが、鹿児島湾を中心とした同心円状であることを発見し、沈降した容積と噴出物を積算した体積とが同程度であることから、鹿児島湾内に推定される沈降の中心はマグマ溜まりの位置を示すものであろうと推察した大森房吉の世界的な業績は (Omori, 1916)、火山学の黎明期から、地殻変動が

その進歩に重要な役割を果たしたことを象徴的に示す事例である。しかしながら、地殻変動を測定するための主要な手段である測量には、多大な労力と費用と時間が必要であり、火山活動に際してタイミングよく測定がなされる事例は極めて限られてきた。

火山噴火予知に地殻変動観測を活用する第一歩として、従来の当面の目標は、各種の火山活動に伴う地殻変動を漏れなく確実に補足することであった。この間の努力の着実な積み重ねによって、全国をカバーする GPS 観測網 (GEONET) が完成し、さらに関係機関の協力によって、活動的な火山の多くに、一層高い密度で山体に集中する GPS 連続観測点が設置されている。また、傾斜計や伸縮計などのリアルタイム連続観測装置が配備された火山も多数ある。さらに、現在では、合成開口レーダーを搭載した衛星が定期的に全世界を観測しており、活動を挟む 2 時期の観測の比較によって、面的な地殻変動分布を定期的に観測することも可能になった。これらの基盤的な観測の整備は一定のレベルに到達し、全国の主要な火山において地殻変動が発生した場合は、ほぼ見逃し無くそれを観測する基盤が整ったといえる。

最近の噴火に伴う観測事例をいくつか紹介する。2004 年浅間山噴火では、噴火の数ヶ月前から GPS によって山体の膨張が認識され、地下におけるマグマの活動度の高まりが推定されていた。また、この活動活発化以前にも、同様の膨張が繰り返し発生していたことが判明しており、噴煙や地震活動など火山活動度の活発化と呼応していることも既にわかっていた。また、噴火時には、マグマの

急激な上昇に伴う顕著な地殻変動が捉えられた。噴火後は、収縮性の変動に移行したため、地下の中・深部ではマグマの活性度が低下していることが推定され、活動の中長期的予測を行う際の重要な判断材料となった。

一方、2000年三宅島噴火では、地下の割れ目の形成と玄武岩質マグマの貫入現象が高速度で進行したため、数時間後にGPSの解析が終了し地殻変動が判明した時点では第一波の主要なマグマ移動は、終了していた。しかし、よりリアルタイム性の高い傾斜観測によって、マグマ移動に伴う地殻変動の進行が克明に捉えられていた。

また、過去に遡って実施されたJERS-1(1992-1998 稼動)衛星合成開口レーダの解析によって、1993-1995年にかけて、北海道のアトサヌプリ火山周辺で、20cmを超える膨張収縮が発生していたことが判明した。この活動当時、群発的な地震活動は検知されていたが、地下においてはマグマの移動も発生していたことが初めて明らかとなった。これが現在発生していたら、定常的なデータ解析がなされている「だいち」(2006~)によって同時進行形で地殻変動の推移が把握されていたであろう。

このように、従来の多くの地殻変動研究者が長い間熱望してきた、火山が「うごけば」、必ず「わかる」という目標はひとまず達成された。

3. 今後の挑戦

「うごきがわかる」、さらに「うごくぞとわかる」へ

火山噴火予知を科学的に行うための正攻法は、マグマ移動の発生を事前に客観的に予測する技術の確立である。長い間の目標であり、最近になって、やっと到達できた「うごけばわかる」という現状は、その重要な一步ではあるが、究極の目標に比べると、まだその間には大きな距離がある。

予測の実現に至る次の挑戦は、マグマの動きのメカニズムの詳細な理解である。現在の地殻変動観測は、マグマの動きを経時的に詳細に追跡することを可能とした。しかし、その運動を発生させ

ているメカニズムについては未知の部分が多く残っている。

幸い、火山観測の他の分野も飛躍的な進歩を遂げており、地震観測、地球電磁気観測、重力観測、地球科学的観測などもそれぞれ精度や空間的カバレッジなど従来に比べて格段の進歩を見せている。

従来から総合観測という形で継続的に取り組まれてきたことであるが、噴火など顕著なマグマ活動の機会を捉えて、各種の最先端の観測技術を集中的に投入し、マグマ移動の現象に各種の観測から様々な拘束条件を与え、マグマ移動を支配している物理的機構の詳細を明らかにしてゆくことが、今後の最も重要な課題であると考えられる。

4. もう一つのアプローチ

最近の比較的規模の大きな噴火である2000年有珠山噴火と三宅島噴火に際してGPSなどの地殻変動データは、噴火開始フェーズにおいてマグマ移動を明らかにする観点において存分に威力を発揮した。しかし、噴火活動の推移や終息の予測は、必ずしも順調に行われたわけではない。例えば、三宅島噴火では、6月末の噴火開始後、8月中には、急速な収縮がGPS等によって、検知された。その解釈から、マグマ溜まりから大量のマグマの流出の継続を収縮という地殻変動現象から認識していながら、カルデラの陥没などの可能性をその時点で予測することができなかった。今から振り返ると、世界の火山の噴火事例を現象の進行別に類型化データベース化して、何か火山現象が発生したら、その後に進展する可能性のある後続現象の候補を確率つきで提示する、エキスパートシステムが構築され実用に供されていれば、現象の進展と同時進行形で限られた時間的余裕のなかで行う実戦的な噴火予知活動に極めて有効であったと考えられる。最近、地震動予測の分野でも、確率つきシナリオツリーによるアプローチが検討されているが、火山噴火予知においてもこの分野の実用化が期待される。

これからの火山体構造探査

筒井智樹・秋田大学工学資源学部

Geophysical explorations in volcanology and the prediction project for the next decade

Tomoki Tsutsui, Akita University

1994年に第五次噴火予知計画の一環として火山体構造探査計画がスタートし、今日までの13年間に11火山を対象として主に人工地震を用いた構造探査が実施された。本講演ではこれまでに火山体構造探査計画で得られた成果について総括し、今後の方向性について提案する。

火山学において内部構造の研究は大変重要なテーマの一つである。火山活動にともなう様々な現象を正しく理解するためには、二つの観点から内部構造が重要な役割を果たしている。すなわちその現象が生み出される「場」の物理量、およびその現象が観測計器に到達するまでの「通過経路の応答」である。

火山の地下構造は各種火山学的現象の背景である。島弧に位置する火山のマグマの源は上部マントルの中を沈み込む海洋スラブ構成物質の部分熔融であるとされている。さらに、生成されたマグマが浮力により上昇すると、マグマの密度とその周囲の密度が等しくなり浮力がゼロになる場所でマグマが滞留する。発泡など何らかの理由で密度均衡が破れるか過剰圧が発生すると、滞留していたマグマは地殻の破壊強度が小さい場所を選んで地表に噴出し、火山を形成する。

また、火山の地下構造は火山学的現象に関する情報を伝える媒質でもある。爆発などの数秒以下のスケールでおきる火山現象の情報をもたらすものは爆発地震や火山性微動であるが、これらの発生位置決定を正しく行うためには正しい地震波速度構造をもちいる必要がある。さらにこれらの発生プロセス（力の

作用回数や継続時間、大きさなど）を正しく理解するためには地震波速度構造はもちろんのこと、地下のインピーダンスコントラストなどの条件も考慮して、観測された情報に加味されている伝播経路の応答を正しく取り除く必要がある。このように火山内部構造の解明は火山学の研究を推進してゆく上で重要な要素である。

さらに火山学の応用としての噴火予知においても、火山の内部構造の解明は重要不可欠な基礎研究である。数十年から数百年スケールの中長期噴火予測における噴火ポテンシャルの客観的評価にあたり、どれぐらいのマグマがどのぐらいの流量で供給され得るのか、またそれがどのレベルの密度境界で滞留する可能性があるのか、さらには滞留容量がどのぐらいあるのか、といった見積もりが必要である。さらに数年スケールの（短期）噴火予知における時期・場所・様式・規模・継続時間の評価においては、岩盤破壊強度分布、地下水の存在レベル、発泡による過剰圧、火山性流体およびマグマヘッドの移動速度、そしてマグマ供給量などの見積もりが必要である。

1994年から始まった火山体構造探査計画では噴火予知計画の一環として「マグマだまりの検出」を目標に行われてきた。以下ではこの計画を「構造探査計画」と称することにする。これまでに構造探査計画において対象となった火山は、霧島火山（1994・1996年）、雲仙火山（1995年）、磐梯火山（1997年）、阿蘇火山（1998年）、伊豆大島火山（1999年）、岩手火山（2000年）、有珠火山（2001年）、北

海道駒ヶ岳火山（2002 年）、富士火山（2003 年）、口永良部島火山（2004 年）、浅間火山（2005・2006 年）であった。構造探査計画では当初人工地震観測が重点的に実施されており、地震波速度構造の解明手法として走時トモグラフィが定着するとともに、反射法的解析の適用も試みられるようになった。これらの計画の実施で活火山内部の地震波速度構造が解明され、ほとんどの火山体の内部に高速度の「芯」が存在することが明らかにされた（霧島火山；西，1997・雲仙火山；Nishi, 2002・磐梯火山；Yamawaki et al, 2004・阿蘇火山；筒井・他, 2003・岩手火山；Tanaka et al., 2002・有珠火山；Onizawa et al., 2007・富士火山；及川・他, 2004・口永良部島火山；山本・他, 2005）ことに加えて、伝播速度場が精密化されたことで火山性地震の発生域の姿がより明瞭なものとして示され（岩手火山；Tanaka et al., 2002・磐梯火山；Yamawaki et al, 2004・有珠火山；Onizawa et al., 2007）、特に有珠火山では 2000 年噴火にともなうマグマの動きを精密に推定することに成功している。さらに活火山直下の反射面分布の解明により、マグマだまりとの関連の可能性がある反射面構造の指摘（霧島火山；三ヶ田, 1996）や、カルデラ火山の反射面構造の記述（阿蘇火山；Tsutsui and Sudo, 2004）、マグマだまりと火山生成の背景となるテクトニックな構造要素との関連性の指摘（富士火山；筒井・他, 投稿中）などがなされたことである。これらの一連の反射法解析結果は、マグマだまりを含む火山の深部構造に対するアプローチとして人工地震による反射波解析が有効であることを示しており、すくなくともマグマ溜まりの平面的な広がりが大きくても 2～3km 程度で扁平な形状として見えること、などの手がかりを与えている。さらに、地震波形相関関数探査法の導入（筒井・他, 2004）により、従来の探査手法が適用しにくかった火山体内部に対する反射断面を得ることも可能となった。また、後

年になり構造探査計画には自然地震観測（Nakamichi et al., 2004, 2007）や電磁気観測（橋本・他, 2005）も取り入れられるようになってきた。自然地震観測は透過深度と S 波伝播特性の解明の点で人工地震観測の弱点を補い、電磁気観測は地震学とは異なる物理量で構造を解明することにより、さらに総合的に火山構造を解明することをねらったものである。

構造探査計画の究極の目標は火山活動にともなう構造の時間変化、すなわち物質移動にともなう地下構造パラメータの時間変化をとらえることである。観測データから地下構造の時間変化の可能性を内田・他（2002）や Nishimura et al. (2005) などが報告しているが、噴火予知の高度化の観点からは、地中の物質移動による地下構造パラメータの変化の検出を定量的に行う必要がある。そのためには変化検出のリファレンスとなる構造モデルを構築しなければならない。リファレンスとなるモデル構造の応答特性と実際の構造の応答を反映した観測データとを比較し、そのずれの量から構造変化を定量する必要がある。したがってまず当面の大きな目標は総合的火山構造モデルの高度化である。

モデルを構築するためには、その根拠となる観測量が必要である。構造探査計画はそのための基礎研究と位置づけられる。人工地震探査で直接知ることができるのは地震波速度・弾性波インピーダンスコントラストなどの分布である。これまでに得られた 3 次元地震波速度構造は噴火に先立つ火山性地震の発生様式の認識の精密化をもたらし、噴火場所および時期の予測精度を向上させている。また、これまでの研究から反射波の存否によって密度境界深度の検出およびマグマ滞留規模の推定が可能であることも明らかになってきた。さらに電磁気探査によって地下の比抵抗分布から地下水の存在レベル、火山ガスの拡散などについても議論がなされるようになって

てきた（たとえば鍵山, 2007）。

一方，火山現象の本質は，地下から地表への相変化と化学変化を伴う物質の移動である。したがって浮力や過剰圧などのマグマ移動を引き起こす営力，空隙率や浸透率などに代表される移動のしやすさ，輸送容量，移動速度などの物質輸送パラメータが火山活動を直接支配するパラメータである。

噴火予知の観点から要請される総合的火山構造モデルを構築するためには，観測から得られた地震学的パラメータや電磁気学的パラメータを先述の物質輸送パラメータと結びつける必要がある。たとえば岩石の種類を特定すれば地震波速度は岩石の空隙率および空隙の飽和度と関係しているとされているが，地震波速度だけから岩石の種類や空隙率をただちに求めることは困難である。

これらのパラメータを物質輸送パラメータと結びつける方策として，物理検層という手段が存在している。物理検層は点であるが，人工地震探査をはじめとする探査は点を結ぶ線あるいは面である。人工地震探査などの地表からの探査と物理検層を組み合わせることによって，地下の物質輸送パラメータ分布を追跡することができる。これまでも伊豆大島火山，草津白根火山，富士火山で削孔とともに物理検層が行われている。今後行われる物理検層の仕様の決定の際には地表から行う物理探査も考慮される必要がある。

また，火山現象で特徴的なことは爆発現象である。爆発現象の理解は噴火様式の予測，噴火規模の予測につながる。地震学的手法でこの爆発現象の理解を深めるために，爆発が起きる場所から観測点までの伝播経路上の応答を正しく取りのぞく必要がある。これまでの研究では伝播経路上の応答は，震源決定などに使用される速度構造モデルをもとに理想化したものが使用されてきているケースが多いが，爆発プロセスの議論の分解能を時間的・空間的により高くするためには実際に即

した伝播経路上の応答を知る必要がある。構造探査による人工地震は人工的に震源パラメータがコントロールされ，メカニズムも既知の震源であることから，活動火口近傍などしかるべき場所で起こされた人工地震を人工地震用ネットワークのみならず既設のネットワークで三成分観測することによって，伝播経路の応答を実験的に知ることができる。実際にこのような観点から阿蘇火山，口永良部島火山では活動火口の近傍での発震が試みられている。

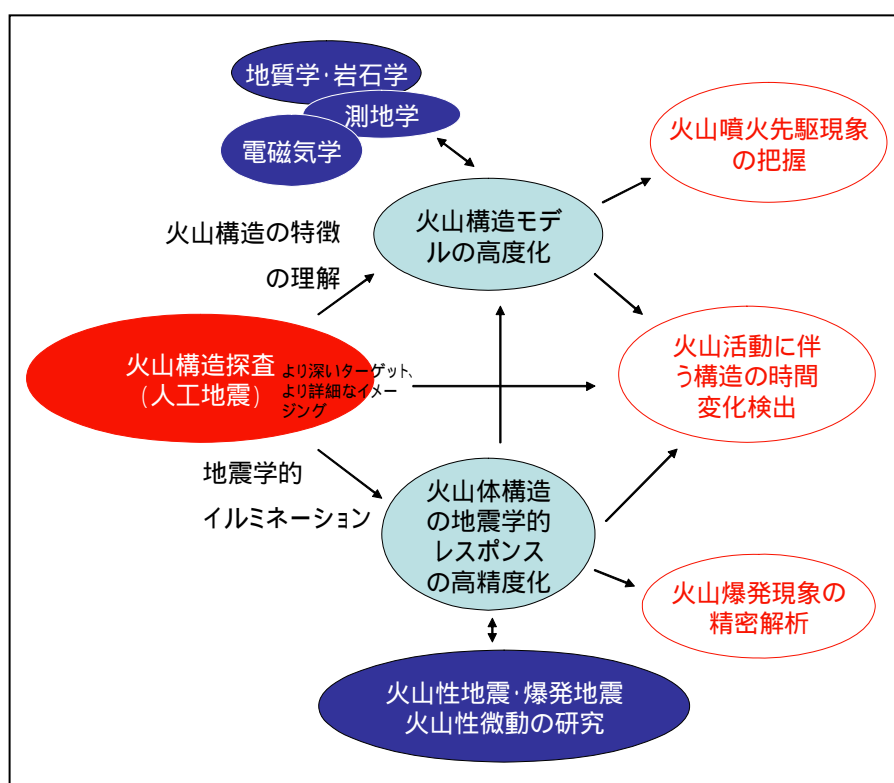
以上のように，今後の構造探査は1) 総合的火山構造モデルの高度化と，2) 火山体レスポンスの精密化を念頭においた基礎研究として推進することが必要であろうと考える。人工地震による構造探査における「より深く・より詳細に」という課題に対しては，反射波解析や走時トモグラフィーを用いることで一定の定性的成果が得られるようになってきた。これからの構造探査計画のキーワードは「定量化」である。すなわち，密度境界深度の検出の精密化，マグマ滞留規模の推定，マグマヘッド深度の検出，火山性流体の移動の捕捉，物理検層による物質輸送パラメータと構造パラメータの対比の必要などが主要な項目であろうと考える。

しかしながら今後も構造探査計画を推進するうえで考慮されなければならない問題が3つある。すなわち観測システム・測線計画・実施体制である。これらは独立に切り離して考えることができない問題である。初期の構造探査計画の構想にもとづいて導入された現行システムの老朽化が進んでおり，今後反射波解析を一層重点的に取り入れるのであれば観測システムを見直す必要がある。新しい観測システムでは，最適な探査手法の開発や火山体レスポンスの実験的取得の観点からも，三成分観測も可能で設置効率の良いシステムとしなければならない。さらに火山構造モデルの構築にあたり，探査測線の計画にあたっ

ては火山直下の構造のみならず，そのリファレンスとなる周囲の構造も考慮に入れる必要がある．また実施体制の点でも見直しが必要であると考える．すなわちこれまでの構造探査では，年度ごとの観測対象として一つの火山を選び，その火山を監視している機関がホストとなって構造探査を実施してきた．構造探査計画の初期の段階では火山構造の共通の特徴が明らかでなかったこともあり，試行錯誤の意味も含めてこのような方式が有効であったと考える．しかし一定の成果も見えてきた現在，これまでの一カ年一火山方式を継続することは妥当ではないかもしれない．これにはいくつかの背景的事実がある．構造探査計画の初期では各研究機関に 30 代前半の研究者が定職を得て配置されており一カ年一火山方式を実施することが可能であったが，大学法人化を含むこの 10 余年間の情勢の変化

により，体力気力ともに充実した 30 代の研究者が浮動化せざるを得なくなった現実ではこのような体制は望むべくもない．さらに火山に関する森羅万象をあつかう火山学研究の性格上，これまでの研究機関の体制は「よろずや」とならざるを得ず，その中で従来の形態の構造探査計画は大きな負担となっていたことは事実である．今後研究の高度化を目指すのであれば，これまでのように一つの機関があらゆる解析をこなす「よろずや」形式ではなく，火山という研究対象に立脚した視点をもつ「専門店」形式で構造探査にあたる必要があると考える．

これからは活動的でかつ背景となる基礎データが充実した 2 ～ 3 火山をテストフィールドとして，課題を絞り込んだうえで集中的に多項目の構造探査（あるいは地球物理学的計測）を実施する体制をとる必要があるろう．



噴火予知研究で電磁気観測をどう使うか

橋本 武志（北海道大学大学院理学研究院）

Comments: Electromagnetic Methods in the Eruption Prediction Research

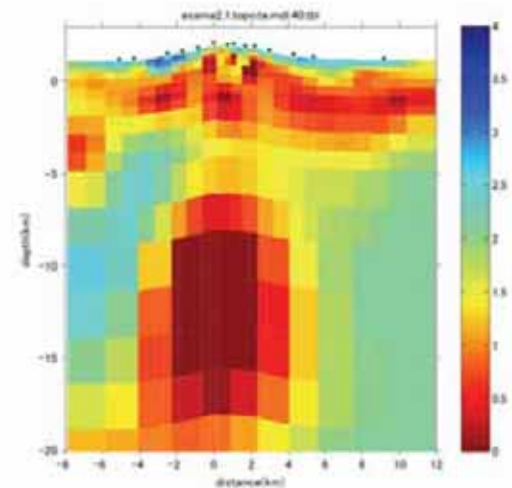
Takeshi Hashimoto (Faculty of Science, Graduate School of Science, Hokkaido University)

要旨 1990年代以降，比抵抗探査装置の改良と解析ツールの充実に伴い，火山体構造探査の一手法としてMT法やTDEM法が注目されるようになった．近年では，特にMT法2次元断面で，地震波速度構造との比較による議論も可能なレベルに達しつつある．一方で，過去の事例からも明らかのように，電磁気観測の強みは，火山の浅部活動による場の変化を鋭敏に捉えることにもある．この特性を活かせば，火山活動の短中期的推移予測に貢献できるだけでなく，流体の貫入や長周期微動など，浅部の熱・力学過程の解明にも貢献できる可能性がある．ここでは，電磁気的手法の現状を概観し，次期計画の方向性を考える材料としたい．

比抵抗探査 比抵抗探査は，最近の10年で方法論や解析ツールが充実してきたので，特に自然MT法についてはある程度ルーティン的に実施することが可能である．その意味で，事業ベースで成果を出していく目的には適している．場所にもよるが，比較的深いところ（～数10km）まで情報が得られることも特長である．我が国でこれまで行われている活火山のMT法探査としては，阿蘇山，有珠山，富士山，岩手山，樽前山，草津白根山・口永良部島・浅間山などがあり，その中には，マグマや熱水変質帯など噴火予知にとって重要な構造がイメージされた例もある．比抵抗断面の解釈については，浅部の解像度だけをとれば地震波速度構造や密度構造との比較や岩石学的モデルとの対応を真剣に考えてもよい時期に来ている一方で，手法そのものに内在する構造推定の曖昧さも依然として残されている．試錐探査との対比はその弱点を補う方策のひとつである．試錐探査は，浅部情報に強い電磁気観測とはマッチングがよく，物理観測と物質科学のコラボレーションの好材料となり得る芽がある．

CSMT法やTDEM法等に代表される人工ソース探査は，特定のフィールドをモニターする方法として有望である．固定した送受信系を使えば，マグマの移動や，脱ガスによる比抵抗の変化などを検知できる可能性がある．伊豆大島では86年噴火で既に実績があり，次の噴火に向けて新しいシステムも試行されている．ただし，こうした観測には，設備投資と主担当機関の継続的運用コストが必要となることは言うまでもない．

空中電磁法については，地表電流による磁場ソースを空中から測定するTDEMが実用段階に入りつつある．最大可探深度は，ソースの配置を適切に選べば1kmに達する．山岳地帯や離島などアクセスの困難な火山でも面的分布が把握できるので威力を発揮するだろう．



浅間山の南北2次元比抵抗断面 (Ogawa et al., 2006)

下部地殻・上部マントルまでを対象とした深部探査はこれまで火山噴火予知としては手薄だった部分で，指向すべき方向のひとつではあるが，海底観測とのジョイントが望ましく，乗り出すならそれなりに覚悟が必要であ

る．この課題はこれまで主として地震予知の枠組みで行われてきた経緯があり，活断層の深部構造や地震発生の駆動源となる地殻内流体の視点からの議論がある．なお，離島火山の場合には，そもそも海域観測がなければ，深い構造は得られないという問題も指摘しておきたい．

事業研究としての性格上，現場作業の一部外注化なども含めて，資金の効率的な運用と，従事者のエネルギーを企画・解析に集中させる工夫も必要であろう．軽量で長周期特性に優れたコイルの国内開発・現有外国製装置との互換化などは課題である．グループ所有の国内製装置は消費電力・記憶容量等の点でやや時代遅れで改良の余地はある．機器の国内調達が難しくなっているのは問題で，国内メーカーに対して必要なスペックを研究者の側から積極的に提案していく姿勢が必要と思われる．

現有機器の維持・修理費は，所有機関が自前で負担する額としては必ずしも無視できない．これまで以上に競争的環境におかれている大学法人の状況を考えると，全国連携事業として継続的に利用するならそれなりの予算措置は必要になる．

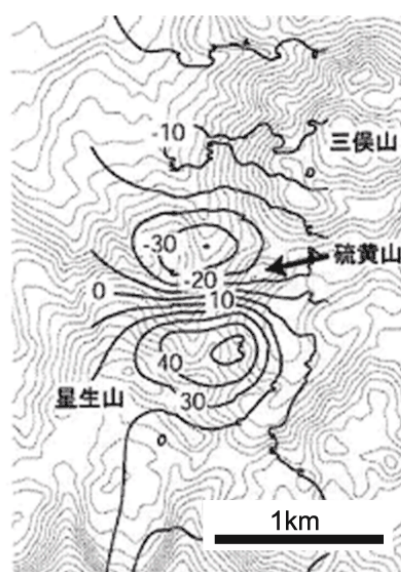
地磁気観測 地磁気変化によって，比較的浅部（多くの場合 1km 以浅）の温度状態をモニターすることができる．地磁気は，過去 50 年の経験からほとんどの活動的火山で有意な変化があることがわかっており，具体的成果につながる確実性が高い観測量といえる．

今後，噴火予知の高度化に関連して取り組むべき課題としては，成分観測による高分解能化で過渡現象（長周期微動・傾斜変動等との対応）を狙ったり，孔内型・地中埋設型システムの開発，放熱量や物質収支に関連した議論に結びつけるなどが考えられる．

我が国では，火山における磁気測量は地震観測や測地観測に次いで準標準的な観測項目

ともなりつつあるが，一方で電磁場のノイズ環境は悪化の一途を辿っている．現業機関（気象庁・国土地理院・海上保安庁）の基準観測所は，今やこうしたノイズの除去に不可欠な存在となっている．これらに準ずるベースライン・コントロール付の成分観測点が増えれば，リージョナルな永年変動磁場の正確な評価につながり，これまで検出が困難であった長年月にわたる火山性磁場変動（マグマの蓄積や噴火の準備過程に関連する可能性がある）を捉えることができるようになるかもしれない．地球電磁気学（主磁場研究）への成果還元も期待できる．

空中磁気測量もまた，方法論・解析ツールともに充実してきており，現在のやり方でも今後続けていくことは可能である．ただし，予知事業の中で構造探査として位置付けるなら，空中重力測量との連携などひと捻りが必要であろう．しかし，我々としては，空中磁気は時間変化検出手法としての可能性を重視している．現時点では改良の余地もあり，どの火山でも必ず有意義な結果が出せるとは限らないので，対象とするフィールドを選び，ある程度研究的なスタイルで取り組むことがブレークスルーの鍵になると思われる．



空中磁気測量によって検出された九重硫黄山の全磁力変化（宇津木・他，2006；気象研＋京都大の測量）．

コメント： 構造探査と物質科学の狭間から
大島弘光（北海道大学大学院理学研究院）

Comments: Seismic prospecting and physical properties of the stage for a volcanic eruption
Hiromitsu Oshima (Graduate School of Sciences, Hokkaido University)

1. はじめに マグマ溜まりや火道などマグマ供給系を把握するために人工地震を用いた火山体構造探査が1994年から開始された。この探査により活動的な火山において詳細な地震波速度構造の解明が進み、火山体中央部付近で基盤が盛り上がり、深度3～5kmの深さでP波速度6km/s層に到達するという多くの火山に共通した特徴が明らかになった。さらに最近では火山活動に伴う構造の時間変化も検出されるようになったが、マグマ供給系を明瞭に描き出しきれていない。

一方で、観測網の整備された火山では、地震や地殻変動などのデータに基づいて火道や圧力源がイメージされ、構造との関連が議論されるようになってきた。

ところで火山体構造探査にはマグマの存在領域を検証するという主目的のほか、相互に影響を及ぼし合いながらマグマが地表に向かって移動する場合・すなわちマグマ活動の舞台・を把握するという側面もある。

ここでは後者の観点から、有珠山を例に、

マグマ活動の舞台を探る試みを紹介し、火山体構造探査を前進させる鍵の一つとして、火山体構造試錐探査を提案する。

2. 有珠山のマグマ活動の舞台 有珠山は地熱・温泉資源に恵まれた洞爺・登別地域に位置し、1980年代にはボーリング調査を含む総合的な地熱調査が行われたほか、有珠山を取り囲んで温泉井が多く掘削されている。

これらの調査や孔井資料によると、有珠山は、洞爺湖北岸から内浦湾にむかって緩く傾斜した先新第三系を基盤として、火山砕屑岩を主体とした新第三系堆が厚く発達する積盆内にある。新第四系は下部更新統と、火山体構成員を除くと、局在して分布する。

これら地質構成員のうち、ボーリングコアや地表サンプルから求められた新第三系以深の密度やP波速度は、時代が古くなるほど大きくなる傾向を示すが、第四系の密度は岩相による変化が大きい。見かけ比抵抗は温泉貯留層となっている新第三系は小さい。一方、良

表1 有珠山地域の簡略化された地質系統と主な物性値

時代	層序	層厚(m)	密度(gr/cc)	P波速度(km/s)	見かけ比抵抗($\Omega \cdot m$)	透水係数($\times 10^{-3} \text{cm/s}$)	空隙率(%)
第四紀	昭和新山溶岩	50 ~ (300) (90)	2.32	3.9 ~ 4.0			
	降下火砕物						
	外輪山溶岩		2.78	3.9 ~ 4.0	50 ~ 300	39 ~ 920	
	洞爺軽石流堆積物			1.7 ~ 1.8	50 ~ 120	0.6 ~ 2.2	13 ~ 59
更新世	上長和層	18+			50 ~ 300	1.2 ~ 11	
	滝上溶結凝灰岩	60(180)	2.33	2.3 ~ 2.5	100		
	新規安山岩		2.27				
	柳原層	65			5 ~ 200	1.0 ~ 22	29 ~ 59
新第三紀	鮮新世 室蘭層/北湯沢層	(700)	2.07 ± 0.23	2.3 ~ 3.8	< 50	0.46 ~ 0.77	
	中新世 鹿の沢層/荘内川層	(700)	2.32 ± 0.12	3 ~ 4.2	< 30	0.003 ~ 0.09	5 ~ 53
	長流川層	(1600 ~ 1700)	2.55 ± 0.26	4.4 ~ 5.4	10 ~ 30	0.009 ~ 0.012	3 ~ 23
先新第三紀	基盤岩類		2.73	5.6 ~ 6	> 1000		

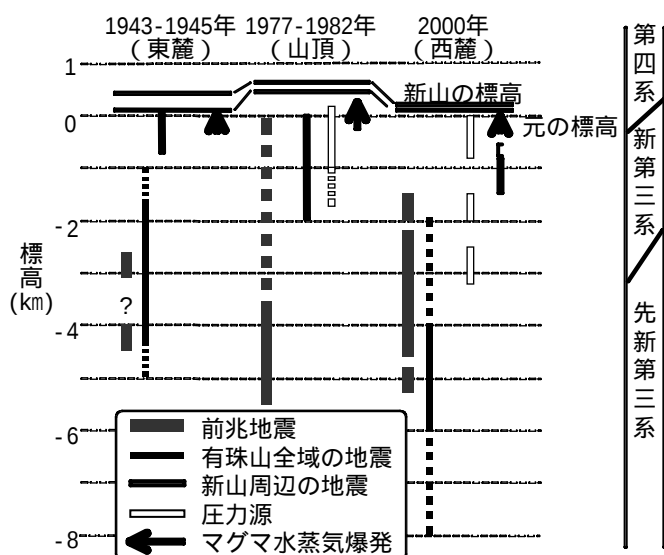


図1．有珠山の過去3回の噴火活動に伴う地震の発生深度，地殻変動から推定された圧力源の深さ，および水蒸気爆発の発生深度の比較．2000年噴火で推定されている圧力源は，最上位が2000年新山地域の地殻変動から，下位の2つは全山規模の地殻変動から推定されている．

い帯水層・地下水の採取できる地層・である下部更新統の比抵抗は，シルト・泥岩層で低くなっているものの，全体として高比抵抗を示す．透水係数は時代とともに全体として大きくなり，その変化は6乗のオーダーに達する．温泉貯留層である新第三系の透水性係数は小さく，孔明管長を考慮すると温泉貯留が亀裂に規制されている可能性が高い．また，低比抵抗層が必ずしも良い帯水層を意味しているわけではない．

ところで過去4回の有珠山の噴火活動には，激しい前兆地震活動，火口が開いた地域に新山の形成，新山の隆起から沈降という共通した特徴がある反面，違いもある．

その一つが前兆地震活動の継続時間である．しかし，過去3回の前兆地震の震源は2 km以深と，先第三系から下部新第三系内で発生し，大きな違いはなく（図1），2000年噴火で観測された先第三系上面に沿う顕著な震源移動を考え合わせると，前兆地震活動の継続時間は先新第三系上面以浅のマグマ貫入経路に支配されていることを伺わせる．

また活動域は北麓（1910年），東麓（1943-1945年），山頂（1977-82年）および西麓（2000

年）と移動したが，いずれも溶岩ドームや潜在ドームの分布する山頂火口原から北麓にかけてNE-SW方向の帯のなかである．低密度を示す上部新第三系は有珠山火口原の南側地域で発達し，北側には存在しないことから，この密度の違いがマグマ貫入を有珠山の北側に規制しているのかもしれない．

同様に新山形成に関係した圧力源は，地表直下の第四系から上部第三系内に推定されているが，全山規模の地殻変動を引き起こした圧力源は新第三系中部～下部に推定され，これも上昇マグマの停滞に密度が関係していることを示唆する．

過去3回の水蒸気，マグマ水蒸気爆発は，よい帯水層である第四系下部付近で発生している．この帯水層は透水層と不透水の互層からなり，水蒸気爆発の発生にマグマと地下水の接触により生じる過剰圧を保持しやすい透水層が重要な役割を果たしていると考えられる．

3. まとめにかえて－火山体構造試錐探査の提案－

有珠山の噴火活動を例に，マグマ活動の舞台を探る試みを紹介し，過去の噴火活動の間にある2～3の違いについて検討した．

マグマ活動の舞台は火山体内部というより基盤内にある．構造探査結果の解釈はもちろんマグマ活動を理解するためにも基盤に関する詳しい情報が必要不可欠である．このためには広域地質調査はもちろん，既存の孔井資料の収集・整理に加えてボーリング調査も必要であろう．1本のボーリングにより得られる情報は多い．水蒸気爆発などに関係する地下の水環境は掘削以外に知る手段はない．

これまでの予知研究で得られたマグマ供給系を検証し，さらにマグマ活動の舞台を把握し，モデルに基づく第三世代の噴火予知を確立するために火山体構造試錐探査に踏み出す必要がある．

掘削による噴火活動に関する知見の深化

中田節也（東京大学地震研究所）

Deepening knowledge on eruptive activity with scientific drilling

Setsuya Nakada (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

1. はじめに

火山の内部構造が深さ 1 km 以上にわたって露出することは稀であり、火山の内部構造や過去の噴出物の情報を得る上では、掘削が極めて有効な手段である。同時に、地上の物理探査や噴出物の性質から物質科学的に得られた地下構造などのモデルを検証する武器としても掘削は重要である。掘削は地下の試料を採取するだけでなく、物理検層を通して、掘削坑付近の物理化学的な性質を把握することができ、地上での観測データを解釈する上で貴重な情報を与える。さらに、掘削坑を利用した地球物理・化学観測は、マグマにより接近してより高精度のシグナルを得ることを可能とする。

2. 過去の火山体掘削の成果

掘削による新たな知見としては、例えば、岩手県の葛根田では現存のマグマ溜まりを掘り当て、マグマ溜まりの周囲での熱水系やそれに伴う地震活動の詳細な情報が得た。また、北海道森町の濁川カルデラではじょうご状の巨大な爆発火口があることが発見され、日本のカルデラ火山学に大きなインパクトを与えた（これは、島弧のカルデラがじょうご型爆裂火口であるとのやや短絡的な印象も植え付けた）。一方、阿蘇カルデラでは地下に平坦なカルデラ底が存在し、じょうご状ではなく陥没したカルデラであることが明らかにされた。さらに、八丈島、伊豆大島、雲仙岳などではいわゆる火山の底まで掘削され、土石流・泥流堆積物の上に火山が発達し始めたことが示された。富士山では地上に露出していない埋もれた火山があることが明らかになった。一方、雲仙岳では、約 10 年前に終わった噴火のマグマ通路（火道）に向けて掘削が行われ、火道でのマグマの脱ガス機構の検討が行われた（下記参照）。

3. 阿蘇カルデラと雲仙岳のケーススタディ

約 32 万年前から 4 回にわたる大規模な火砕流噴火によって陥没し形成された阿蘇カルデラの形成プロセスやカルデラ形成前後のマグマ活動史の理解は、将来の大規模噴火の長期的な予報に役立てることができる。掘削によって埋没した火砕流堆積物が見つかり、カルデラ陥没時の噴出量はこれまでの 1.4 倍以上（ 180km^3 以上）に修正された。カルデラを起こした噴出マグマはカルデラ形成前

に長期にわたって地下に蓄積したと考えられるが、ここではカルデラ陥没事件に引き続いて（1 万年以内）に大量（約 80km^3 ）の玄武岩マグマが噴火していたことが明らかになった。これは通常の活発な島弧火山における噴出率を上回り、カルデラ形成期前後には地下深部でのマグマ生成率が異常に高かった可能性を示した。

雲仙岳では難度の高い傾斜堀によって火道の試料を採取した。採取した溶岩の解析から、脱ガス効率の良さは母岩の特殊な物性に依存するのではなく、噴火中に火道自身を利用した脱ガスが起こったことが示された。このため、効率の良い脱ガス効率は、マグマがゆっくり上昇するために脱ガスが進むというモデルが要請された。すなわち、マグマの上昇速度が脱ガス効率を左右し、今後は、その原因が何であるかを探ることが鍵である。

上 2 例は、マグマ溜まりの大きさや形状、冷却・分化過程、および、そこへ深部マグマの流入過程など（マグマシステム）についての理解が不十分であることを示している。今後はこれらの「マグマシステム」を明らかにする研究が不可欠である。

4. 噴火予知研究としての掘削の重要性（噴火プロセス）

爆発規模を左右するのは火道上部での脱ガスのプロセスと地下水との反応の程度である。すなわち、火道での脱ガスは地下 1 km 以浅で効果的に起きる。脱ガスが効果的に起これば非爆発的な、不十分であれば爆発的な噴火になる。一方、上昇してくるマグマが地下水とのどう接触するかが、水蒸気爆発やマグマ水蒸気爆発を引き起こされるかどうかの重要な鍵である。さらに、噴火のシミュレーションを行う上においても、火道最上部の構造、地下水の分布様式などを含んだ物理パラメータを理解してことが重要である。

（火山体構造）

掘削の成果は、これまでは、どちらかといえば地質学的なものに帰されてきた。例えば、火山噴火予知研究ではこれまで火山体地震や電磁気による地下構造の探査が行われてきている。これまでの人工地震を使った屈折法解析では火山体の中央部には必ずと言っていいほど地震波高速度域の盛り上がりが見られた。この盛り上がりの実態について明瞭な答えが得られているのは雲仙岳のみ

中長期噴火予知への新たな挑戦 - 物質科学の視点から

中川光弘 (北海道大学理学研究院地球惑星システム科学分野)

Challenge for long- or middle-term eruption prediction – Application of material sciences for volcanic products

Mitsuhiro Nakagawa (Department of Earth and Planetary System Science, Hokkaido Univ.)

はじめに

近年、火山噴火の短期・直前予測は実用段階を迎えたと言える。しかしながら、数年から数十年あるいはそれ以上の長期にわたる噴火・活動予測は、ほとんど進歩が見られなかった。これまでの長期予測は、過去の噴火周期や規模をもとに、過去の噴火活動パターンが将来にも続くと仮定し将来を予測するという、確率論的なものである。将来予測のためには、過去の噴火周期や規模に加えて、個々の噴火はどのようなマグマプロセスでもたらされたものかなど、マグマの挙動に関する情報が不可欠である。火山下のマグマ供給系の物質科学的現況が明らかになれば、将来の噴火に関して、科学的あるいは論理的な議論ができるであろう。しかしながらこれらの岩石学と呼ばれる物質科学的手法が中長期噴火予測に適用されることはなかった。

我々は中長期噴火予測の手法を開発することを目的として、特に地質学的手法に物質科学的な火山噴出物の解析結果を組み合わせ、多くの火山で事例研究を行ってきた。その結果、噴火の周期性や規模の変遷、そしてマグマ供給系の構造やその中のマグマプロセスなどに、火山ごとでの普遍性や多様性が明らかになり、それを踏まえた上で各火山の長期的活動予測ができるようになってきた。

まず個々の火山について噴火史を再検討し、必要な場合には地質調査や年代測定を新たに行い、小規模噴火を含めた時間 - 噴出量積算図 (階段図) を作成する。そしてできるだけ長期の階段図からの、噴火活動期 - 静穏期の

パターン解析を行う。そして最新の活動期に関して、個々の噴火での推移を地質学的手法で復元し、それに基づいた組織的サンプル採取を行い、それらについて岩石学的に検討する。そしてマグマ供給系の構造と噴火プロセスを明らかにし、その時間変遷からその現況を推定する。これらの情報に加え、観測や記録による最近の表面活動と深部活動の評価を加味すれば、より現実的な中長期予測が可能になると考える。

本報告ではそれらの応用例として、南西北海道の 3 つの活火山 (樽前山, 有珠山, 北海道駒ヶ岳) で長期予測例を紹介するが、本要旨では紙面の都合により樽前山の例を述べる。**樽前山の階段図: 静穏期と噴火活動期の認識**

樽前火山では約 9000 年前から、数千年の休止期を挟みながら Ta-d 期、Ta-c 期 (2500 ~ 2000 年前) そして歴史時代期 (AD1667 ~) と 3 回の活動期を繰り返してきた。それぞれの活動期は、噴出量が数 km³ に達する大規模なプリニー式噴火で特徴づけられる。歴史時代活動期では、1667 年と 1739 年に大規模噴火が連発し、それに続いて 19 世紀からは中 ~ 小規模の噴火が散発している。新たな地質調査により、Ta-c 期においても、2 回の大規模噴火に引き続いて、中規模噴火が発生していることが明らかになった (古川ほか, 2006)。その結果、樽前火山の噴火活動期は、最初に大規模噴火が連発し、その後に中規模噴火が発生する特徴があり、活動期の間には数千年間の静穏期があったことが示された (図 1)。

マグマ供給系とその時間変遷

歴史時代の噴出物はデイサイト～安山岩質軽石、灰色軽石、スコリアそして縞状軽石であり、2 端成分マグマ混合の産物である。詳細な岩石学的検討により、以下のようなマグマ供給系の構造と時間変遷が明らかとなった。樽前火山のマグマ供給系は、1667 年噴火前は大量の低温マグマで満たされた浅所マグマ溜りと、深部の複数の玄武岩質マグマから構成されていたと考えられる。そして 1667 年の噴火で、深部の玄武岩質マグマが浅所マグマ溜りに注入され噴火に至り、その後に上部に低温マグマ、下部にそれと玄武岩質マグマの混合マグマが位置する成層マグマ溜まりが形成された。その後も、別の玄武岩質マグマが間歇的に成層マグマ溜まりに貫入し、1739 年そして 19 世紀の噴火が生じた。1667 年と 1739 年の大噴火では、噴出マグマの中では低温マグマが大部分を占めるが、19 世紀からの中～小規模噴火では低温マグマの比率は急激に減少して混合マグマが主体となる。成層マグマ溜まりからの噴火では、マグマの吸い出し深度は噴出率に規制され、噴出率が大きいくほどより深部のマグマも吸い出される。19 世紀からの噴火ではそれ以前と比べて噴出率は 1/100 程度まで低下し、吸出し深度は浅くなっていると考えられるのに、実際の噴出物では成層マグマ溜まりの下部にある、混合マグマが主体となって噴出している。このことから成層マグマ溜まりでは、1739 年噴火前と比べて、低温マグマの比率が著しく減少していることがわかる。

樽前山の中長期噴火予測

噴火履歴とマグマ供給系の時間変遷から、歴史時代活動期の現状について評価する。噴出量からは過去 2 回の活動期を超えるマグマを既に噴出していること、Ta-c 期の後半と同じく中小規模の噴火が起こっていること、そして最近 100 年間はマグマ噴火もなく水蒸気噴火の規模・頻度とも低下していることを考えると、現状は噴火活動期の後半を迎えてい

ると判断できる。マグマ供給系の変遷からも、噴出物の大半を占めてきた低温マグマが、19 世紀の噴火からは成層マグマ溜り内でほぼ消費され尽した状態にあり、現状は活動期後半と考えるのが妥当である。これらのことから、短～中期的には水蒸気噴火が散発する可能性は高いが、中～長期的には表面活動レベルは更に低下し活動静穏期に入ると考える。そして、次の噴火活動期に向けて低温マグマの蓄積が進行してゆくのであろう。

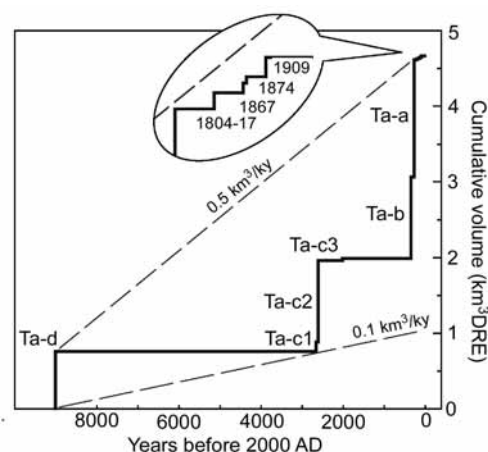


図 1. 樽前火山の階段図

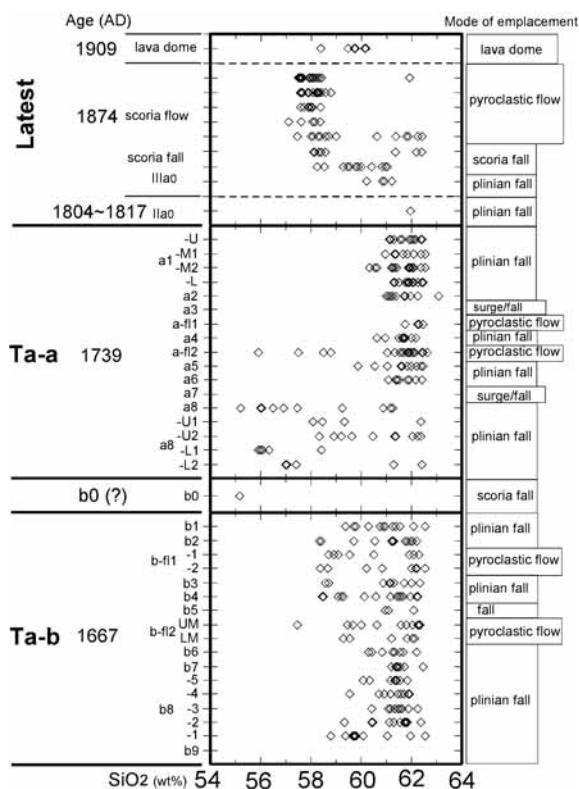


図 2 . 樽前火山歴史時代噴出物の全岩化学組成の時間変化

噴火にいたるまでの現象の把握を目指して

森田 裕一 (東京大学 地震研究所)

Research on precursory phenomena of volcanic eruptions

Yuichi MORITA (Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

これまでの火山物理学の研究では、噴火現象やそれに付随する現象の解明に多くの努力が注がれ、そこから判るマグマの移動、発泡、マグマ噴出などはそれなりに解明されてきた。一方、噴火前から噴火に至るまでの諸現象(「噴火準備過程」と総称される)は、長い時間にわたる現象であるため、観測が困難であり、系統的な研究の例はほとんどない。火山の噴火予知と言う観点に立つと、次に来るべき火山噴火の規模・様式を予測する上で噴火準備過程の解明は重要な情報を与える可能性が高く、噴火予知研究計画の発足以来つねにその重要性は認識されていたが、研究はそれほど進んでいない。

本講演では、近年設置した稠密な観測網のデータから噴火準備過程について最近判ってきたことを述べ、噴火前兆を捉えるには長期間の観測に基づく研究がいかに重要であることを述べる。

1. 見えてきた噴火準備過程

前回の1986年の噴火から20年が経過し、近年の噴火周期が36年~39年である伊豆大島では、同じ噴火周期であるとすれば約20年後に噴火が予想される。現在、伊豆大島では特に顕著な火山活動は見られないが、高精度な地震及び地殻変動の観測から、マグマ蓄積に起因する山体の膨張とそれに同期する地震活動の上昇が時々起こっていることがわかった(図1)。この現象は少なくとも1997年以降、現在も続いている。この山体膨張は定常的ではなく間欠的に発生しており、急速な膨張(図2左上)と緩慢な膨張(図2右上)の

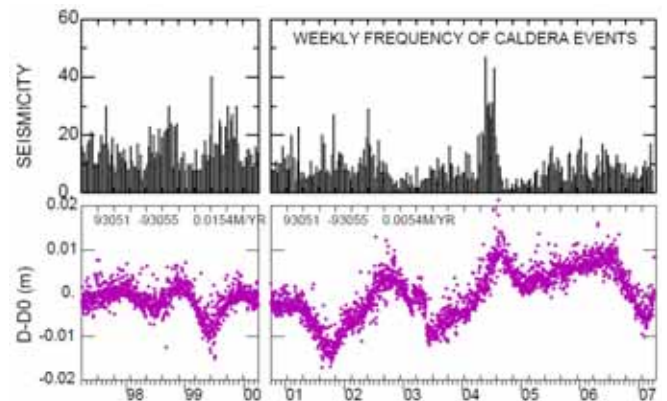


図1. 伊豆大島における地震活動度(上)とGPSによる南北基線長変化。地震活動度と基線長変化率とが比例している。GPSは国土地理院のデータによる。

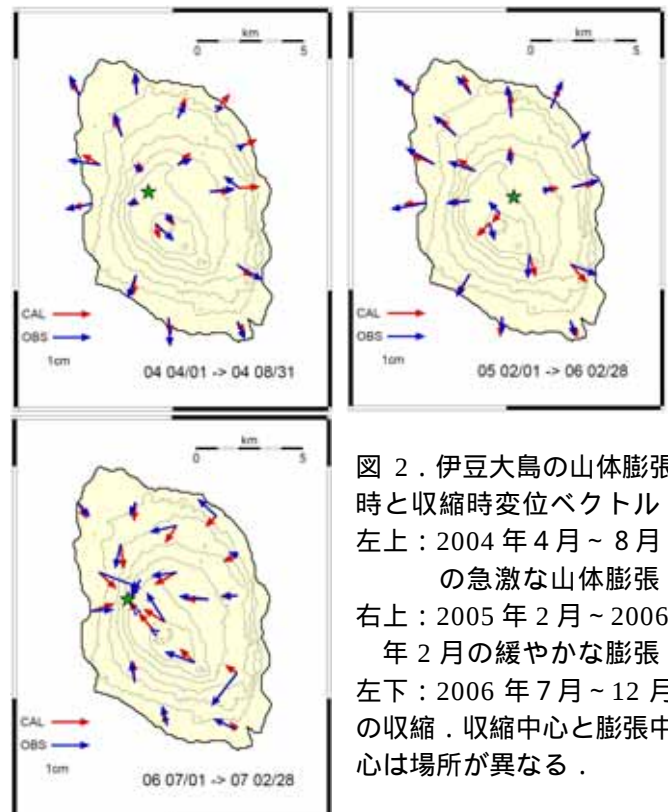


図2. 伊豆大島の山体膨張時と収縮時変位ベクトル。
左上: 2004年4月~8月の急激な山体膨張。
右上: 2005年2月~2006年2月の緩やかな膨張。
左下: 2006年7月~12月の収縮。収縮中心と膨張中心は場所が異なる。

2種類ある。また、膨張だけでなく山体収縮現象(図2左下)も起こっていることが明らかになった。

山体膨張時の地殻変動の空間分布、同期す

る地震の震源分布，人工地震による構造探査の結果を総合して考えると，ここで見られる山体膨張は，前回の山腹割れ目噴火で噴出したマグマの起源であるカルデラ内深さ約 4 km の場所にマグマが再充填している過程であることが判った．このマグマ蓄積は噴火に直接つながるのか否か，また，噴火に至るマグマ上昇とここで見られる深さ 4 km で停止するマグマ上昇に違いがあるのかと言うことは，噴火予測には極めて重要である．

2．噴火に至らないマグマ上昇の重要性

マグマは浮力によって上昇し，浮力中立深度で一旦停止する．このマグマの停留が上記のマグマ蓄積過程と考えられる．この浮力中立深度は，同じ場所，同じ活動様式においても異なることが明らかになってきた．例えば，伊豆半島東方沖の群発地震はマグマの貫入により発生しているが，1970 年代から続く群発地震活動の震源の深さは，中立深度が約 5km の活動と約 8km の活動の 2 つのグループに大別できる（図 3）．

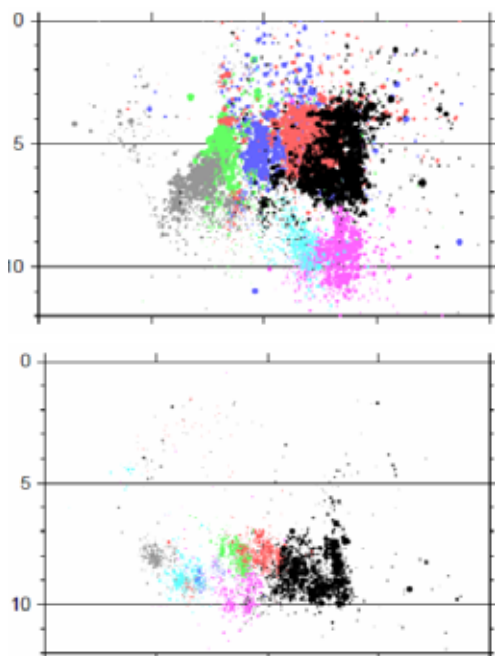


図 3．伊豆半島東方沖群発地震の震源分布の断面図

活動年毎に色分け．上：1990 年代，下：2000 年代．
1997 年，1998 年の群発地震活動では深さ 5km の浅部までマグマが移動する際に，過去に深

さ 8 km に蓄積されていたマグマの一部（分化して軽くなったもの）を引き連れて 5 km まで上昇していることが観測から明らかになった．海底噴火のあった 1989 年の活動でも同様であったと思われる．

古い活動で浅い場所に蓄積されたマグマが，時間の経過と共に結晶分化し，後から上昇してきたマグマに熱せられ，発泡等が起こって大きな浮力を得て噴火に至ることは，富士山，三宅島などでも知られている．伊豆大島の 1986 年噴火では山頂噴火，山腹割れ目噴火の両者が起こったが，山腹割れ目噴火のマグマの起源は，山頂噴火のマグマに比べて浅部で分化が進んだものであった．つまり，伊豆大島で現在観測されている間欠的なマグマの上昇と蓄積は将来の割れ目噴火の種となるマグマが生産されていることを意味し，すぐに噴火につながる活動ではないと思われる．

もし発泡度が高く密度の極めて小さいマグマが上昇してきた場合，途中で浮力中立を迎えることなく，直ちに噴火に至ることになるであろう．近代的な観測網が設立されてから一度も噴火を経験していない伊豆大島では，今のところ直接的に噴火に至るマグマ上昇とマグマ蓄積にとどまる上昇を区別する手掛かりがない．しかし，噴火に至らないマグマ蓄積現象についてもう少し明らかになれば，これまでとは異なる様式のマグマ上昇が発現した場合には，噴火の危険性を認識でき，現状より高度な噴火予知が実現できる．

3．まとめ

ここで示したように一見静穏に見える火山でも，噴火に至らないマグマの上昇と蓄積が間欠的に起こっていることが明らかになってきた．次回の噴火まで上述のような観測研究が継続できれば，マグマ蓄積過程，噴火直前現象についての知見が得られ，更に高度な噴火予知が可能になるであろう．このような観測研究の継続が極めて重要である．

4．最後に

これまでの講演を少しまとめてみよう．火山噴火は様々な過程から成り立っている．マグマの上昇は最初の上昇過程ではある深さに一旦留まり，そこで成分の分化や周辺岩石との混合により，軽いものが凝集して再度浅い場所に上昇する．階段を上るように一段一段上昇する．また，マグマの物性は火山ごとに異なり，更に同じ火山であってもマグマが到達した深度により，圧力・温度条件の変化や周辺岩石との混合により物性は変化して行く．その変化の大きさは，例えば粘性率など例えば 100 万倍以上変化し，単純に同じ圧力勾配であるとすれば，マグマの速度も 100 万倍異なることになる．噴火時刻の正確な予測や噴火推移の予測のためには，噴火過程を十分に理解するとともに，マグマの物性に対する知識もなければ不可能で，その道のりは遠い．

しかし，背後にある科学を理解せずに異常現象を見つけて噴火の危険性を「予想」することに満足していれば，高度な噴火予知は永遠に実現できないであろう．研究の進歩は常に蓄積によりなされるので，遠い道のりを諦めるのではなく，それを効率よく進むべき戦略が今強く求められている．現時点で断片的に判ってきた火山現象の姿を，系統的に研究することが強く求められるであろう．

これまでの火山噴火予知研究は，活動様式の違いに重きを置いて，フィールド中心，つまり個々の研究者はそれぞれ特定の火山を集中して研究を進める傾向が強かった．今後はこれを噴火過程で分類して，多くの研究者が力を合わせて研究を進める必要を感じる．

これまで述べたようにマグマは深部から上昇し，地表に達すれば噴火に至る．噴火すれば，溶岩や火砕流の流出により，社会に大きな被害を与える．このような火山の噴火過程を踏まえて，マグマの生成や周辺岩体との密度差が大きく現象を支配する噴火にいたるまでのマグマ上昇とマグマ蓄積過程【噴火準

備過程】の研究，マグマの急激な発泡や固体・液体・気体の混合により複雑な振る舞いを示す火山爆発や噴火の物理過程【火山爆発機構】の研究，一旦，開始した噴火のマグマ放出率や噴火特性の時間推移，および噴出物の定置様式など【火山噴火の推移と噴火様式】の研究，と言う切り口で全国の火山研究者が協力して共通の研究テーマを推進することが望ましい．このような観測研究・調査研究のためには，噴火前から噴火後までの長期にわたる均質な観測データや高度な調査が不可欠であることは言を待たない．

図 4 は，マグマの蓄積から噴火までを模式的に示した図である．マグマ蓄積，マグマ上昇，噴火現象，噴火様式などが科学的な知識を背景にして理解され，現実の火山活動で時々刻々上昇するマグマの動態が捉えられるようになるということが噴火予知研究の最終ゴールであろう．

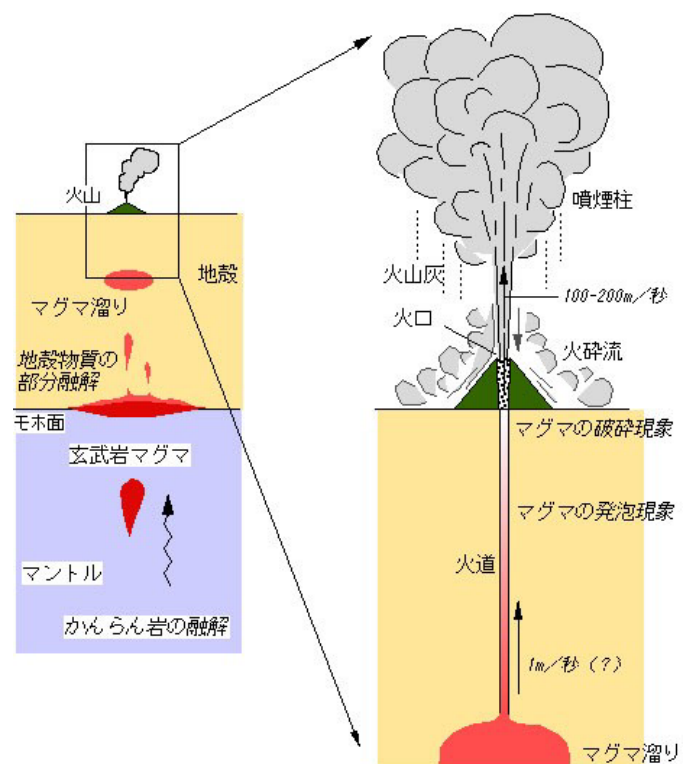


図 4．火山噴火の模式図．中田（2002）による．

第 4 部 火山噴火予知の高度化を目指して

噴火予知はどのような局面で社会の期待に応えきれていないか

鍵山 恒臣（京都大学理学研究科）

When has the prediction of volcanic eruption failed to satisfy the society's expectation?

Tsuneomi Kagiya (Graduate School of Science, Kyoto University)

火山噴火を事前に予測することは、近年の予知研究によって相当程度可能になってきた（石原, 1997; 浜口, 2003）。現段階では、ある程度の監視を行っていれば噴火を見逃すことはないと思われる。それと同時に、10 年ほど前までは、火山研究者が火山活動に異常を感じてもそれが情報として公表されるには時間を要したし、情報が出されても行政が対応することは少なかった。近年では、気象庁によって主要な活火山の活動情報が定期的に発表されるだけでなく、インターネット上でも公開されている。また、2000 年の有珠山や三宅島の噴火前には緊急火山情報が発表され、行政は事前に住民を避難させるまでになっている（浜口, 2003）。こうした状況を受けて、火山噴火予知に対する評価はきわめて高くなり、監視体制をより充実させて防災に活かす機運が高まりつつある。しかし他方で、監視体制を強化すれば事足りるという誤解も生じており、研究者は困惑している。現実の噴火予知はまだそういう状況ではなく、社会の期待に十分応えきれていないケースが数多く見られる。以下では、その実例を紹介し、討論のきっかけとしたい。

第 1 に明らかにしておくべきことは、有珠山や三宅島のような防災対応は他の多くの火山では容易ではないということである。2 つの火山とも、過去に火口近傍で有感地震が群発すると必ず噴火している。したがって、火山の活動情報に対して行政が防災対応をとるのは当然といってもいい状態であった。しかし、他の火山では、このような異常現象が起きても噴火しない例は多い。たとえば、岩手山では 1996 年以降にマグマの上昇を示す多

くの異常現象が検知され（浜口, 1999）、行政による防災対応もとられたが、噴火は発生しなかった。阿蘇山や樽前山では火口の噴気温度が数 100 を超える熱異常が発生していても噴火しないことがある。異常が発生しているのであれば噴火しなくともその事実を公表してほしいというのが、社会の要求であると我々は考えているが、一方で噴火しない例は数多く、噴火予知の的中率を最も落とす原因となっている。第 2 に、噴火が発生しても、どのような噴火となるのか、どのような時間的推移をとるのかを明示することが難しいことがある。たとえば、1990 年から始まった雲仙火山の噴火は、江戸時代の噴火を想定して研究者も行政も対応していたが、火砕流を主体とする 4000 年ぶりの規模の大きい噴火となり、規模や噴火様式の予測を誤ることになった（Nakada et al., 1999）。三宅島では、11 世紀以降繰り返し発生してきた山腹割れ目噴火とそれに付随する山頂噴火を想定した防災対応を行っていたが、3000 年ぶりにカルデラを生成する活動となり（中田・他, 2001）、対応が十分ではなかった。有珠山の噴火においても、行政への情報提供が円滑に行われたわけではなく、地震活動や地盤変動の推移によってマグマ活動の低下が推定されたが、過去の噴火活動と照らし合わせて「これで終わるわけではない」という印象を持つ研究者もいて、予知連が活動の低下を見解として示すまでに時間を要した。また、火砕流が発生するかどうかの判断を下すことは困難であった。第 3 のケースは、噴火の噂はあるが監視機関や研究者が明確に見通しを語ってくれない場合である。富士山はその典型であり、噴火の風説

に対して、「現在は噴火の発生を示唆する異常現象は観測されていない」とコメントできるが、数ヶ月後、数年後まで噴火しないとはコメントできない。そのために、噴火の風説は絶えないことになる。以上のように、噴火予知にはまだ多くの課題が残されていることがわかる。この課題を解決するにはどうすればよいか？以下では、若干の私見を示したい。

方策の第 1 は、既存の火山学的知見の範囲内で対応できることを実行することである。監視体制を整備し、活動情報を行政にリンクさせる仕組みをもっと多くの活火山において構築する必要がある。これは、最近の数年間で大きく改善されてきたが、アメリカやインドネシアなどと比較すると、その努力はまだ継続すべきである。

上記の努力によって、噴火の見逃しはほとんどなくなり、いきなり噴火に遭遇することはなくなるであろう。しかし、異常現象が発現した後に噴火する火山よりも噴火しない火山のほうが多いことや上記の問題を考えると、監視を充実させるだけでは十分ではない。方策の第 2 は、ありきたりではあるが、研究を推進することである。ただし、従来の噴火予知研究から視点を大きく変える必要がある。たとえば、第 1 ケースでは、いかに火山噴火が発生するかではなく、マグマの上昇停止と脱ガスに注目する必要がある。マグマの上昇をコントロールする要因は、まだ明らかではないが、火山体地下の密度構造やマグマ中の揮発性成分の脱ガスが重要と考えられる。たとえば、高密度の基盤を低密度の火山噴出物が覆っている場合、マグマはそこで浮力を失い上昇を停止する可能性がある。同様に、過去に地表に噴出することなく地下に滞留しているマグマも密度障壁となる可能性がある。また、マグマ中に含まれる揮発性成分が脱ガスするとマグマの発泡が抑制されるために見かけ密度は小さくならず上昇が抑制される可能性がある。マグマから散逸する火山ガス

は地下水に溶け込むと比抵抗が低下するので、電磁気探査によって火山ガスの散逸を検証する試みも行われている。第 2 のケースは、歴史時代（数百年）の噴火履歴を基に防災対応を準備したが数千年ぶりの現象が起きてしまった場合が多い。こうした事態を避けるには、もっと長期間にわたる火山活動の歴史を調査することが必要である。また、より根源的には、システムとしての火山の理解を深めることが重要である。第 3 のケースは、我々のこれまでの研究の視点を改める必要がある。我々は、これまでの噴火予知研究において、異常現象を捉えること、異常現象が捉えられた後の噴火に向かって進行する過程について理解を深めてきた。しかし、異常現象が発生するまでの過程についてはあまり多くを知らない。比較的噴火の頻度が高い桜島や伊豆大島では、地殻変動観測によって地下深部からマグマがほぼ定常的で供給されており、桜島で年間およそ 1000 万立方メートル（加茂・石原, 1980）伊豆大島で 800 万立方メートル程度（渡辺, 1998）であることが明らかにされている。しかし、休止期が数 100 年以上となる火山噴火では、噴火の準備過程はまだほとんど研究されていない。休止期の長い噴火は、規模が大きくなる一方で噴火の経験が世代を越えて伝承されないために大災害となることが多く、要注意である。富士山の宝永噴火では、地下に滞留していたデイサイトマグマに深部から供給された玄武岩マグマがぶつかって大きな噴火になったと考えられており、火山体地下にマグマが滞留する過程を知ることが休止期の長い火山の噴火準備過程を明らかにする道ではないかと考える。

監視体制の整備と研究は噴火予知の両輪である。加えてこの両輪は持続可能なものでなければならない。近年博士課程に進学する学生が激減している状態は、この両輪の将来に暗い影を落としてつつあることも指摘しておきたい。

パネルディスカッション

「火山噴火予知のさらなる高度化を目指して」

司会

九州大学理学院	教授	清水 洋
---------	----	------

パネリスト

京都大学理学研究科	教授	鍵山 恒臣
-----------	----	-------

鹿児島県危機管理局	次長	中西 茂
-----------	----	------

時事通信社 防災リスクマネジメント		
-------------------	--	--

WEB編集長	中川 和之
--------	-------

気象庁	火山対策官	北川 貞之
-----	-------	-------

東京大学地震研究所	教授	藤井 敏嗣
-----------	----	-------

東京工業大学理学研究科	教授	平林 順一
-------------	----	-------