

最近の噴火活動と噴火予知（物質科学の立場から）

宇都浩三*

Recent Volcanic Activities and Prediction of Volcanic Eruptions: View from the Research on Eruption Products

Kozo UTO*

Recent progress on petrological and geochemical studies on eruption products is reviewed especially related to three major eruptions in the last decade, 1990-95 Unzen, 2000 Usu and 2000 Miyakejima. Detections of essential magmatic fragments in the early eruptive products were critical for the evaluation of the progress of ongoing eruptions. Mineralogical studies were useful not only to identify essential materials, but also to estimate the depth and temperature of magma chamber and magma ascending processes. Systematic studies on volatiles both in melt inclusions trapped in phenocrysts and in volcanic gas have enabled to construct the quantitative models of the dynamic processes of magma. Petrological and geochemical estimations of the depth of magmatic processes are now becoming to be combined with the geophysical observations, and will be used together to construct more dynamic magma models in the near future. Experimental petrology to determine precise physico-chemical conditions of magma and kinetics of crystallization and vesiculation will be the key studies in the future to assemble more quantitative information on magmatic activities and appropriately predict the change of ongoing volcanic activities.

1. はじめに

2000年有珠火山噴火に代表されるように、活動的火山における各種の観測網の整備により、噴火活動の直前予知がかなりの確率で可能になり、噴火開始前の住民の適切な避難が可能となってきた。一方、行政機関が避難住民の帰宅などを判断する上で重要な判断材料となる噴火開始後の活動推移予測は、未だ困難であり、今後の噴火予知研究の重要な柱になると考えられる。

地震、測地、電磁気などの各種の多面的な地球物理学的手法による火山観測は、火山噴火前のマグマの動きを察知し、噴火の直前予知に有用であり、最近の噴火において大きな成果が上がっている。一方、火山噴火により放出される固体および流体の噴出物に対して物質科学的観点から行う研究は、噴火前から地表に放出される揮発性成分を除き、噴火が開始した後に初めて研究者の手に

入るので、それから噴出物を岩石学的および地球化学的に分析・検討を開始することになる。そのため、火山ガスや温泉水などの流体成分のモニタリングを除き噴火の直前予知には直接的な貢献はしない。しかしながら、噴火開始後の火山活動推移の予測に力を発揮する。また、過去の噴出物に関する事例的検討は、直面する噴火のスタイル、規模、継続時間を事前に予測する上で重要であるばかりでなく、マグマの上昇によって起こりうる地殻変動の規模、パターンをモデリングする上で重要な境界条件を提出しうる。

火山噴火に関する物質科学的研究は、大きく以下の3つに分けられよう。

1. 噴火活動推移の予測
2. マグマの上昇・噴火過程のモデル化
3. 噴火活動史解明に基づく火山噴火の中長期的予測

これら3つの柱は独立したものでなく、噴火活動の推移予測には、噴出物の迅速な分析検討に加えて、その火山の過去の噴火履歴と過去噴火のマグマモデルを考慮して総合的に理解することが重要である。しかし、実際の物質科学研究を行う上では、どのような立場で研究を行うか意識しておく必要がある。例えば、噴火の推移予測のためには、火山ガスなどのリアルタイム分析、光学顕

* 〒305-8567 つくば市東1-1-1 つくば中央第7
産業技術総合研究所地球科学情報研究部門
Institute of Geoscience, AIST
Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi Tsukuba 305-8567,
Japan.
e-mail: k.uto@aist.go.jp

微鏡などによる噴出物の的確な識別、短時間で結果が出る簡便な化学分析などが重要であるのに対し、噴火モデル構築のためには、時間のかかる高精度あるいは微小領域化学分析や岩石実験など多面的な検討が重要である。さらに、過去の噴火史を正しく理解するためには、時間のかかる地質調査、高精度年代測定、さらにはトレンチ、ボーリング調査などが重要となる。

本総説では、雲仙、有珠、三宅島火山を例に物質科学の果たしてきた役割をレビューするとともに、今後の展望について述べる。なお、火山の“物質科学”とは、火山から放出された物質（固体・液体・気体）の科学的研究全般のことを指すが、本総説においては、固体、液体および気体からなる火山噴出物の岩石学および地球化学的物理学的研究およびそれら噴出物の分布を調査する地質学的研究について議論を行ない、噴出物の物性的な研究に関しては扱わない。

2. 雲仙火山 1990-95 年噴火と雲仙科学掘削

雲仙火山の 1990-95 年噴火は、様々な観点において、日本における火山噴火観測研究のランドマークである。5 年間の噴火活動は、水蒸気爆発、マグマ水蒸気爆発、溶岩ドーム成長、ドーム崩落型火砕流の発生へと、時間と共に噴火様式が刻々と変化したが、噴火推移予測を正確に行うために、目の前で起こっている噴火活動を正確に観測し、それに基づく的確な噴火モデルを構築することが迫られた。また、長期にわたる噴火活動に対して地球物理、地球化学、地質の様々な観点から精力的な噴火観測が行われ、その観測データに基づく噴火モデルとそれに基づく噴火推移予測が、継続中の噴火活動により検証されことになり、より確からしいモデルの提案につながった。さらに、研究分野を超えた噴火に対する総合的な理解が促進され、多くの観測事実を満足するモデルが提出された。火山噴火現象に対する多面的な観測研究は、噴火後の 1999 年に始まった科学掘削を中心としたマグマ上昇・噴火機構、火山形成史および火山体の三次元構造の解明に関する 6 年間の国際的総合研究である雲仙科学掘削プロジェクトへと引き継がれている。

雲仙火山の噴火は、1 年あまり前からの種々の前兆現象に引き続き、1990 年 11 月に普賢岳山頂での小規模な水蒸気爆発として開始した。小休止をはさみながら、翌 91 年 2 月にはコックスティルジェットを伴う黒色噴煙の活発な爆発へと移行した。Watanabe *et al.* (1999) は、放出された火山灰の顕微鏡観察と火山ガラスの屈折率測定を行い、90 年 11 月の小噴火は破碎された既存物質の放出を行う水蒸気爆発であったのに対し、91 年 2 月以降の噴火では、噴出物中にごく少量ながら新鮮な火山ガラ

ス片が含まれており、新しく上昇してきたマグマが地下水と接触して引き起こされたマグマ水蒸気爆発であったことを明らかにした。一方、平林 (1996) は、山頂火口群から放出される火山ガスの化学分析と火山灰に付着している溶存成分を継続的に化学分析し、1990 年 11 月の水蒸気噴火は、マグマから遊離した高温火山ガスが山頂下の地下水と接触して生じた水蒸気を原動力にすると推定した。以上のような噴火初期の噴出物の物質学的観測から、マグマの上昇が起こっていることが確認された。これは、地球物理学的な前兆現象の観測が、噴火開始後の物質学的研究へと引き継がれ、火山活動の正確な把握と予測につながった成功例といえよう。

マグマのさらなる上昇により、噴火開始の半年後に噴火様式は溶岩ドームの形成へと変化し、さらに溶岩ドームが火山の急斜面で崩落することで、崩落型火砕流が繰り返し発生した。溶岩ドームの出現後の噴出物の岩石組織、鉱物組成および全岩化学組成、さらに火山ガス組成は、明確な時間変化を示し、特に溶岩の噴出率と明確な相関関係が認められた (Nakada and Motomura, 1999; 中田・清水, 2000; 平林, 1996)。例えば、溶岩の噴出率とメルト中の結晶の割合とに逆相関が認められ、マグマの上昇速度が大きいかほど脱ガス結晶化の効率が小さい (Fig. 1)。また、溶岩の噴出率と低周波地震の震源深度の相関から、メルトの破壊により低周波地震が発生した可能性が指摘され、物質学的研究と地球物理学的研究をカップリングさせた定量的なマグマの上昇・脱ガスおよび噴火機構のモデルが提唱されている (Fig. 2) (Nakada *et al.*, 2002)。

様々な手段の噴火観測を用いてマグマの上昇・噴火の過程および機構のモデルが構築されたが、地下での火山現象をどこまで正しくモデル化しているかは検証のしようがない。特に、海拔 0 m まで上昇したマグマが電磁気学的に想定される帯水層と遭遇し微動を引き起こし、さらにマグマの発泡に伴う破碎により低周波地震が発生されたと考えられる。また、この深度において 91 年 6 月 11 日のブルカノ式爆発が起こったとも推定されている。これらの現象が確かに起こったかを検証することは、噴火の前兆現象を正しく理解し、より確実な噴火予知を行う上でも重要である。そのため、これら地球物理学的现象が起こった領域に穴を掘り、マグマが上昇してきたと推定される火道に到達して、火道および周辺の岩石を採取し周辺の物性を計測することが計画された (宇都・中田, 2000)。これが、雲仙科学掘削プロジェクトで計画している火道掘削であり、2003 年 1 月から約 2 年間をかけて実施される予定である。この火道掘削により、地球物理学的手段により推定された火道の位置、形状、帯水層

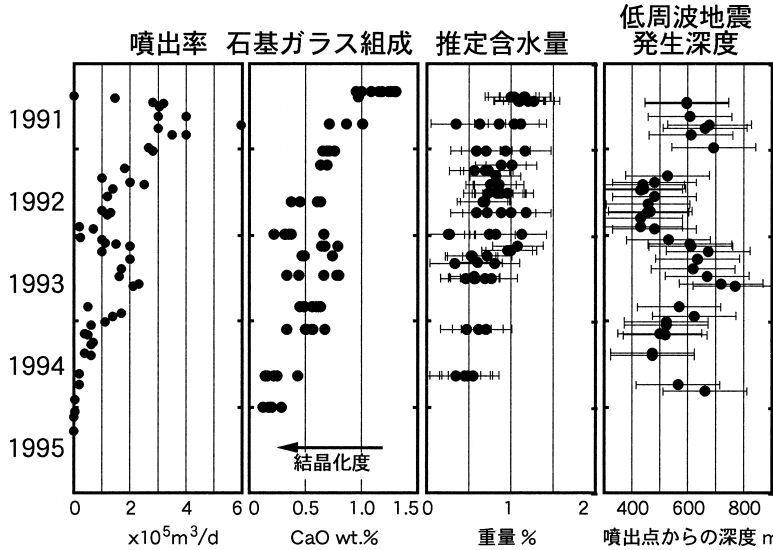


Fig. 1. Temporal change in effusion rate of lava and associated change of crystal fraction in groundmass (modified after Nakada *et al.*, 2002)

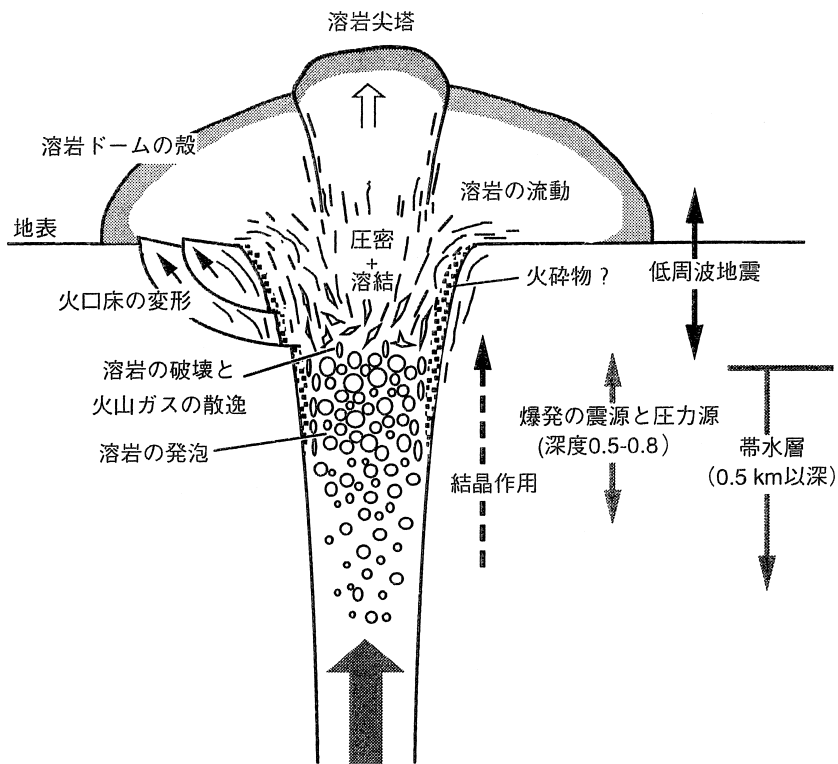


Fig. 2. Cartoon showing process occurring in the upper part of conduit and lava dome. (after Nakada and Shimizu, 2000).

の存在，微動および低周波地震源などが，物質科学的手段により検証されるという，新しい融合的な研究に発展するものと期待される（中田・他，2000）。

過去の噴出物の定量的理解による詳細な噴火履歴の研究は，噴火機構および過程の理解および予測に重要である。詳細な地質調査と精密な放射年代測定を組み合わせ

ることで、火山成長史の定量的解析が可能となる。しかし、古い噴出物は最近の噴出物により覆われてしまうことが多く、場合によっては完全に地下に埋没し、地表での地質調査では、火山の成長史の正確な理解が困難となる。雲仙科学掘削プロジェクトでは、雲仙火山山麓において2本の山体掘削を行い、雲仙地溝内に厚く埋積された過去の噴火堆積物を採取し、堆積学、岩石学、K-Arおよび¹⁴C年代測定、古地磁気学などの多面的な手法を用いて、雲仙火山の形成・噴火史、マグマの進化に関する研究を実施中である。その結果、雲仙火山は、従来考えられていたような溶岩流噴出および溶岩ドーム形成を主体として成長した火山ではなく、むしろ火砕流を繰り返し発生させて成長した火山であることが判明した(星住・他, 2002)。また、火砕流噴火も最近の数万年間はドーム崩落型(メラピ型)の火砕流が主であったが、20万年より以前は、爆発的な火砕流(プレー型)噴火が主体であったこと、さらに雲仙火山誕生直後の40-45万年前には軽石を伴う爆発的(スフリエール型)噴火が繰り返し起こったことが明らかとなった。掘削コアの解析は、現在進行中であり、数年のうちに、雲仙火山の成長史をより定量的に明らかにできると期待される。

3. 有珠火山 2000 年噴火

有珠火山は、1663年以降7回の噴火を行っており、1910年以降は約30年おきに噴火を繰り返してきた。これらの噴火は、デイサイト-流紋岩マグマの山頂での軽石噴火か山腹でのマグマ水蒸気爆発あるいは水蒸気爆発のいずれかであり、多くの噴火では溶岩ドームあるいは潜在ドームを形成した(曾屋・他, 1981)。これらの過去の噴火記録の解析から1977年噴火の次の噴火が二千数年頃に山頂あるいは山腹で起こると予想されていた。この予想から数年早い2000年3月31日に、地震活動および地殻変動などの顕著な前兆現象の後、西側山麓においてマグマ水蒸気爆発が開始した。山麓噴火では、1910年噴火のように多数の爆発火口があき、水蒸気爆発を長期間繰り返しながら潜在ドームが形成された例と、1943年噴火のように水蒸気爆発から次第にマグマ水蒸気爆発へと変化し、ついには昭和山溶岩ドームが出現した例があり、2000年噴火がどのような経過をたどるかを正確に見極めることは、防災上きわめて重要であった。

有珠火山2000年噴火では、3月31日の噴火において最大規模の噴煙柱が3200mの高さまで上がったが、翌日以降、噴煙高度、噴出量とも急激に低下した(中田, 2001; 高田・他, 2001)。3月31日の噴火では、噴煙は南西の風に倒されて火山灰は北東側に長く伸びるような分布を示し、65km離れた札幌市まで細かい火山灰が到達

した。その噴出量は、約12万トンと推定される(宝田・他, 2001)。洞爺湖畔には、湖上に降下した細かい気泡をもち多少角ばった外形を示す軽石が打ち寄せられた。これらの軽石と火山灰は、いくつかの研究室に持ち帰られ、迅速な肉眼および光学顕微鏡観察、EPMAによる構成鉱物の化学分析、XRFなどによる全岩化学分析などの検討が加えられた(東宮・他, 2001; 東宮・宮城, 2002; 鈴木・中田, 2001; 中川・他, 2000)。軽石は1977年のプリニー式噴火で放出された軽石に酷似した全岩化学組成を持ち、構成鉱物の組み合わせも化学組成も同様に1977年噴出物にかなり類似していた(東宮・他, 2001; 中川・他, 2000)。噴火地点周辺の地表には1977年噴出物が約30cm程度の厚さで堆積しており(曾屋・他, 1981)、これらの軽石は類質物質である可能性が当初議論された。しかし、軽石中の磁鉄鉱の化学組成に注目して過去の噴出物と比較検討が加えられた結果、2000年噴出物中の磁鉄鉱は1977年噴出物中のものに比べわずかにMg/Mn比に富むことが明らかとなった(東宮・他, 2001; 東宮・宮城, 2002)。また、東宮・宮城(2002)は、1977年、2000年両噴出物中の斜長石斑晶が、結晶の中心から外縁にかけては類似した累帯構造を持つのに、2000年斑晶は1977年斑晶に比べ外縁部が数十マイクロンほど厚いことに着目した。このことから、彼らは1663年以降1977年噴火までに約1 μ m/年の速度で成長した斜長石が、その後の23年間にほぼ同じ速度で結晶成長を続けたのちに噴出したと判断した(Fig. 3)。以上のような観察から、3月31日の噴火で放出された軽石は、1977年噴火の軽石が吹き飛ばされたのではなく、マグマ溜まりに残留した1977年マグマが、組成変化を続けて2000年に上昇して発泡固結した本質マグマ物質であると推定された。このことから、2000年3月31日の噴火は、微結晶を含み細かく発泡した本質物質が5割以上含まれるようなマグマ水蒸気爆発であったことが明らかとなった(東宮・他, 2001; 東宮・宮城, 2002)。このような噴出物は、4月2日以降の噴火からはほとんど含まれなくなった(嶋野・他, 2001)。噴火開始と共に、噴火地点周辺が急激に隆起をはじめ、地表に大きな変形を及ぼしたが、この急激な地殻変動は地表近くまでマグマが上昇してきたことによると判断する上で、3月31日噴出物の迅速で的確な観測の意義は大きい。また、本質物質が放出されなくなったことも、その後の噴火活動を予測する上で重要な情報であった。

本質マグマ物質の斑晶中のメルト包有物および石基ガラスの含水量の推定、石基マイクロライトの化学組成や軽石の発泡度などから、マグマの上昇、発泡、破砕過程が推定された(鈴木・中田, 2001; 東宮・他, 2001)。鈴

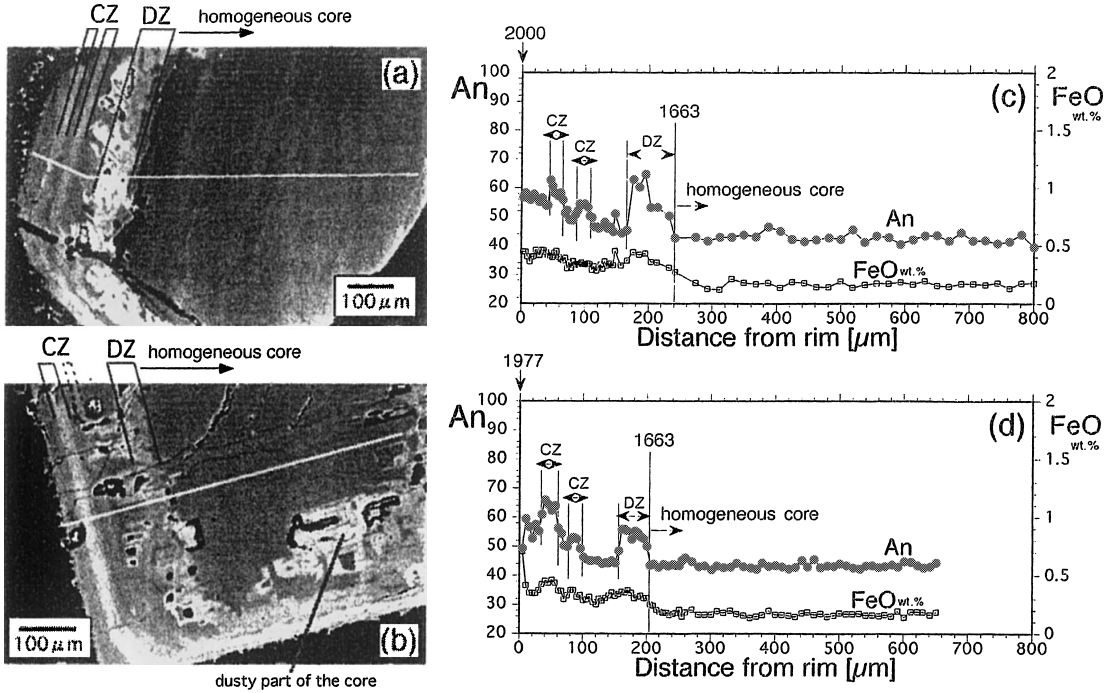


Fig. 3. Zoning profiles of plagioclase phenocrysts in 1977 and 2000 Usu eruptive magmas. (after Tomiya and Miyagi, 2002).

木・中田 (2001) によると、元々約 5 wt% の水を含んでいたマグマは、2 kb (6~7 km) で過飽和になり発泡を開始した。発泡度が 15~80% と多様なことから、地表下約 200 m に存在すると推定される帯水層に至るまでの間に様々な程度に減圧発泡しマイクロライトを成長させた。火山灰 (マイクロパミス) は帯水層で水冷破碎したが、よりサイズが大きく発泡度の高い軽石は地下水と接触しなかったと推定した。一方、東宮・他 (2001) は、石基ガラスの含水量が 2.5 ± 0.5 wt% であることに着目し、上昇マグマは帯水層に接触するより前の地下 1.5~3.5 km の深度で発泡による破碎を開始しており、地下水とは大きな表面積で接触したためマグマと水との効果的な熱交換が起こり、爆発的で継続的な噴火を引き起こし安定した噴煙柱が形成された (山元, 2001) と考えた (Fig. 4)。4 月 1 日以降は、地下水とマグマとの界面が安定化し、両者の効果的混合が起きにくくなったためと解釈される (山元, 2001; 中田, 2001)。

1944 年の昭和新山噴火では、水蒸気爆発からマグマ水蒸気爆発、溶岩ドームの出現と次第にマグマ物質の寄与が大きい噴火様式に変化した。Minakami *et al.* (1951) は噴出した火山灰全体を本質および異質物質の区別なく全岩化学分析し、化学組成が時間変化と共にマグマ物質に近づいたことを明らかにした。2000 年噴火において

(b) March 31 phreatomagmatic eruption (phreatoplinian eruption?)

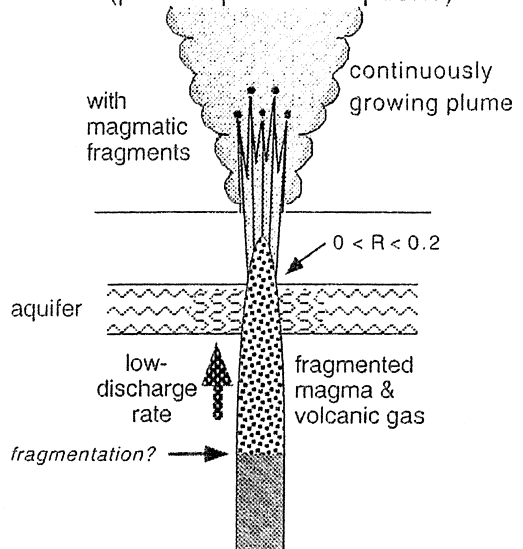


Fig. 4. Schematic description of phreatomagmatic eruption on March 31, 2000 of Usu volcano (after Tomiya *et al.*, 2001).

も、噴火様式の時間変化を迅速的確に把握するために、嶋野・他 (2001) は 3 月 31 日から 4 月 4 日までの火山灰

全量の蛍光 X 線全岩分析を行った。それによると、火山灰全体の全岩化学組成は直線的な組成変化トレンドを示し、軽石で代表されるマグマ組成と外輪山の玄武岩との 2 成分混合線によって形成される可能性があり、3 月 31 日、4 月 1 日、4 日、2 日の順に SiO₂ 組成に乏しくなる、すなわちマグマ成分から遠ざかる変化を示し、3 月 31 日噴火ではマグマ成分が 7 割あり、4 月 2,4 日では 4 割以下に減少したことを明らかにした。この結果は、火山灰を多量に含む黒色噴煙を高く放出するマグマ水蒸気爆発から泥水混じりのコックステール噴煙を間欠的に 500 m 程度上げる水蒸気爆発へと変化したこと（中田，2001；高田・他，2001）と調和的である。このような迅速に行える化学分析が噴火活動の推移予測を行う手法として有用であることが示された。

有珠火山の過去の噴出物については、詳細な岩石学的研究が行われており、それに基づきマグマ溜まりの深さ、マグマ進化などのモデルが 2000 年噴火時にはすでに存在していた（Tomiya and Takahashi, 1995；東宮，1997）。この岩石学モデルは、2000 年噴火による地震、地殻変動などの解釈を行う上で、重要な情報であり、このモデルの発展として、2000 年マグマの上昇モデルが 2000 年噴出物の岩石学的検討も加えて提唱された。また、今回の噴火の地震観測による震源域、地殻変動観測による圧力源の解釈を行う上で、重要なコンストレイントを与えた。東宮・宮城（2002）によれば、有珠火山の地下には 4 km と 10 km の位置に二つのマグマ溜まりが存在し、深部の流紋岩マグマ溜まりにはさらに深部から玄武岩質安山岩マグマが供給され、そこで混合したマグマがデイサイトマグマ溜まりに供給され、それを引き金に 1977 年噴火時に地表に供給されず残っていたマグマが上昇噴火した（Fig. 5）。

4. 三宅島火山 2000 年噴火

4-1 噴火の経緯

三宅島火山は、過去百年間、約 20 年間隔で山腹割れ目噴火を規則的に繰り返し発生しており、1983 年噴火から約 20 年が経過して再度の山腹割れ目噴火が起こる可能性が考えられていた。2000 年 6 月下旬に島の中心部から西側にかけて大きな地殻変動と地震活動がおこり、6 月 27 日には島の西側海底での小規模噴火が起こった（中田・他，2001）。地震や地殻変動の解析から、マグマは三宅島の西側に岩脈として移動し、海底噴火の後、西方海域に抜けたと推定された（酒井・他，2001 など）。これまでの噴火のパターンから考えて、今回の火山活動は終了したと考えられ始めた矢先の 7 月 8 日に山頂火口から小規模の水蒸気爆発が開始した。この時点から、三宅島

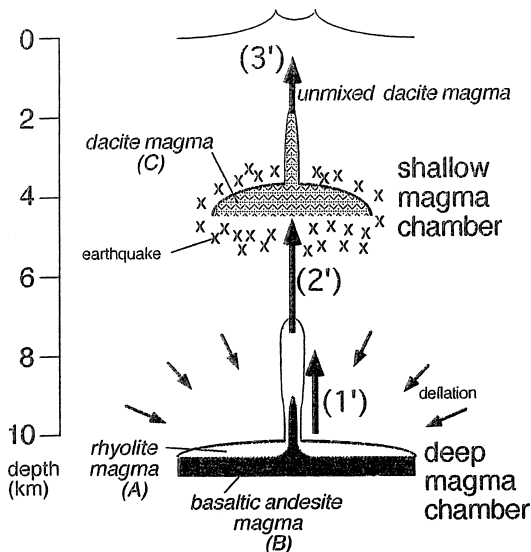


Fig. 5. Magma chamber model of Usu volcano (after Tomiya and Miyagi, 2002).

2000 年噴火は最近 100 年間の規則的な噴火パターンとは違う噴火活動へと推移し始めた。この噴火は、山頂火口の大規模陥没に比べ噴出物の量が遙かに少なかったこと、8 月下旬の最大の噴火後に高濃度 SO₂ を含む火山ガスが連続して長期間放出されているがマグマ物質は噴出しなくなった、という 2 点において極めて特異な噴火であるといえよう。

小規模水蒸気爆発で開始した山頂噴火活動は、その後、山頂火口が徐々に大きく陥没を開始し、それとともに次第に噴火の規模が大きくなった。8 月 18 日には 15000 m まで上昇する大規模な噴煙柱が上がり、人頭大の噴石が数 km も飛ぶような爆発に発展し、同 30 日には低温火砕流が発生した（中田・他，2001）。その後の火山活動は、マグマ起源高濃度 SO₂ ガスの長期間放出（Fig. 6）という世界でも例のない活動へと変化し（風早・他，2001）、火山灰の放出はきわめて限られたものとなった。三宅島 2000 年噴火における火山噴出物の研究の主目的は、8 月 18 日を中心とする噴火がマグマ物質を伴うマグマ水蒸気爆発であったのかそれとも陥没火口内に蓄積された高圧水蒸気の爆発であるかを判定し、噴火活動の推移を正しく予想すること、9 月以降の高濃度 SO₂ を含む大量火山ガスの起源および放出機構を明らかにし、どれくらい継続するかを予測することであった。

4-2 本質物質の寄与

山頂噴火活動の比較的初期の段階から新しいマグマ物質が含まれている可能性が指摘されたが、結晶度が高く既存の岩片である可能性もあり議論が分かれた。しか

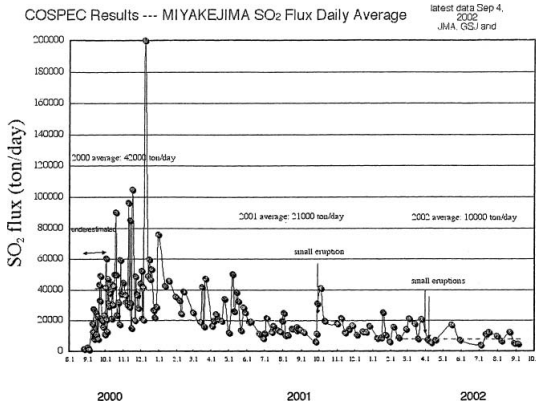


Fig. 6. Temporal variation of SO₂ flux obtained by COSPEC at Miyakejima volcano (after Kazahaya *et al.*, 2002).

し、8月18日噴出物について、詳細な形態分析、全岩化学分析、鉱物分析、メルト包有物分析、X線回折分析、同位体分析、さらには火山弾の残留磁化方位測定、赤変火山灰の温度推定など様々な観点からの検討が加えられ、マグマ物質であることが確認された（宇都・他, 2001; Geshi *et al.*, 2002）。宇都・他（2001）の議論を要約すると、表面に特徴的なしわをもつ丸みを帯びた直径約3~30 cmの“カリフラワー状”火山弾〜ラピリと角張った外形を持ち多孔質の黒色火山灰は、きわめて良く一致した全岩化学組成（SiO₂=51.5wt%, Al₂O₃=18 wt%）および鉱物組成を有し、同じマグマに由来すると考えられ、8月18日噴出物の約40%を占める。大型の火山弾は底面が平たくっており、着地時に塑性変形するほど柔らかかったと考えられ、またその下に堆積した火山灰を高温酸化により赤変させており、地表に落下時には内部はまだ高温状態を保っていたと推定される。宮城・東宮（2002）は、高温酸化した火山灰の酸化温度推定と熱伝導計算から着地時の内部温度は1000°C程度であったと推定した。下司・他（2002）によれば、8月13日の黒色火山灰は8月18日に噴出した本質物質と同じ化学組成をもつ玄武岩であるが、6月27日の海底側噴火の噴出物および7月14、15日の山頂噴火の黒色火山灰はSiO₂=54 wt%の玄武岩質安山岩であり、2000年噴火では2種類の異なる化学組成のマグマが活動した（Fig. 7）。後者のマグマは、1983年噴火のマグマから斑晶鉱物である斜長石、単斜輝石および磁鉄鉱を3.6 wt%取り去ることで形成可能であるが（下司・他, 2002）、8月18日のマグマは、歴史時代の三宅島噴出物とは明瞭に異なる化学組成を有している（宇都・他, 2001; 下司・他, 2002）。

2000年8月下旬において、噴出物中にマグマ物質が含

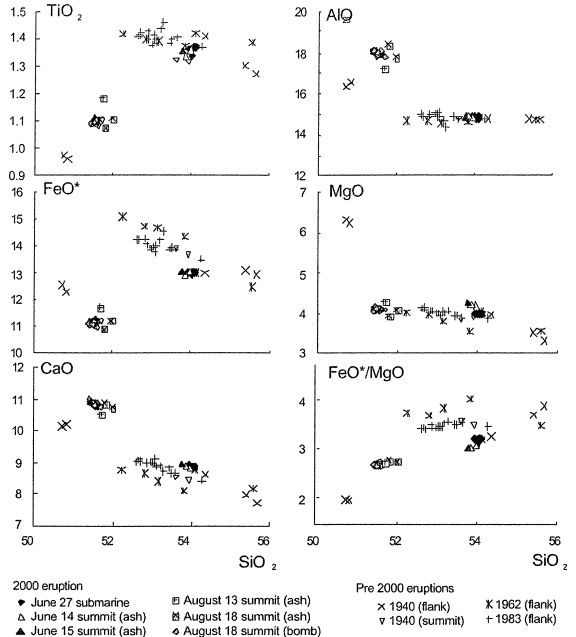


Fig. 7. Chemical compositions of 2000 Miyakejima eruption (after Geshi *et al.*, 2002).

まれているか否か、マグマヘッドはどの深度にあるかは、その後の噴火推移を判断する上で重要な議論であった。もし、マグマが地下深くにあり、山頂部において起こっている噴火が水蒸気爆発であれば、火山活動は徐々に収まるはずであった。この時点において、一連の噴出物の産状、分布、形態、粒度分布、化学組成、鉱物組成を迅速かつ正確に把握し、より合理的な解釈をすることが、噴火の推移予測をする上で重要であった。実際には、9月以降、新たにマグマ物質を含むような規模の大きいマグマ水蒸気爆発は起こらず、高濃度SO₂を含む火山ガスが大量にかつ長期間にわたり放出しつづけるという、予想を遙かに超える火山活動に推移する結果となった。しかし、このようなこれまで世界的に観測例のない火山現象を的確に把握するために、最近10年間における多面的なマグマ中揮発性成分元素の挙動に関する研究成果（風早・篠原, 1996; Saito *et al.*, 2001 など）が大きな威力を発揮した。

4-3 揮発性成分の研究（火山ガスとメルト包有物）

まず、連続的に放出される高濃度SO₂を含む大量の火山ガスの起源と放出機構を明らかにし山頂下で何が起こっているかを推測するためには、火山ガスの化学組成、放出量を正しく理解することが不可欠である。直径1.5 kmにまで拡大した山頂から連続的に放出される高濃度火山ガスを、火口で直接採取して化学組成を測定することは、容易なことではない。そこで、種々の手法を

用いて火山ガスの組成を推定する試みが行われた(風早・他, 2001; Kazahaya *et al.*, 2002; 篠原・他, 2001; 浦井, 2001). その方法は大きく分けて6種類ある: 1) COSPECによるSO₂のリモート観測, 2) 人工衛星搭載光学センサー(ASTER)によるSO₂のリモート観測, 3) 希薄噴煙中のSO₂/CO₂比測定, 4) アルカリ吸収液を用いたCl/S比測定, 5) 熱映像カメラを用いた噴煙中のH₂O量の推定, 7) 固形噴出物(火山灰)表面に付着した溶存成分の定量. 火山ガスの化学組成, 濃度の時間変化を知り, その成因を推定するこれらの研究は現在も続けられている. これまでの研究成果を要約すると以下のようになる. 放出された火山灰に付着していた溶存成分は, Cl/S比が8月18日のマグマ水蒸気噴火以前では低いのにに対し, それ以降では高くなる. これは, 8月18日以前は火山ガス中のClは地下水に吸収されていたのに対し, それ以降は火山ガスが地下水と接触せずに放出されるようになったことを示している. 9月以降に放出されるはじめた大量のSO₂を含む火山ガスは, SO₂/H₂O重量比が約0.1, CO₂/SO₂モル比が0.6~0.8, Cl/Sモル比が約0.1と2002年春現在までほぼ一定で推移している. この比は, マグマ起源火山ガスの値の範囲であり, 長期間放出されている火山ガスが, 山頂直下の浅部まで対流しているマグマに直接起因することを示している. SO₂の放出量は, 2000年9月初めは3000トン/日程度であったのに対し, 9月中旬以降急激に増え, 12月には23万トン/日を観測した. 2000年9~12月の平均放出量は, 42000トン/日であったが, 2001年に入りゆるやかに減少しつづけ, 2001年1~6月, 7~12月および2002年1~6月の平均量は27000トン/日, 16000トン/日, 11000トン/日であった. 2002年6月までの総放出量は15メガトンであり, 1991年のピナツポ火山噴火の際, 10km³のデイサイトマグマと共に放出された17メガトンとほぼ同量である(Kazahaya *et al.*, 2002). 斑晶鉱物中のメルト包有物から推定されるマグマのSO₂濃度は最大で0.15wt%であり, 15メガトンの放出量まかなうためには約2km³ものマグマが完全に脱ガスしたことに匹敵する. したがって, この量のマグマが地表には到達しないまま山頂火口下でSO₂を含む大量の火山ガスを放出したと推定された.

次に, 結晶中のマグマ包有物の揮発成分元素の化学分析により, 8月18日噴火の原動力であり, かつ大量の火山ガスの起源物質であるマグマの上昇, 脱ガスおよび結晶作用の過程が定量的に解析されつつある(Saito *et al.*, 2002). それによれば, 8月18日の本質物質中の斜長石およびかんらん石斑晶に含まれるメルト包有物の主成分化学組成は, 石基組成とほぼ同じであり, 結晶成長時に

取り込まれた揮発性成分を含むマグマの組成を閉じていると推定される. その中に含まれるH₂O, Cl, SおよびCO₂濃度を定量した結果, CO₂を除く各元素の濃度比は, 先に述べた地表で観測される火山ガスの濃度比に等しく, メルト包有物が火山ガスの起源となったマグマ物質を代表していると判断される(Fig. 8). 一方, CO₂のみは火山ガスから期待される量の10分の1以下であり, メルトが母結晶に取り込まれたときにはすでにCO₂は過飽和状態, すなわちCO₂に富む気泡がマグマ中に存在していたと判断される. H₂OおよびCO₂濃度から推定されるマグマの飽和圧力は23~60MPaであり, 結晶がメルトを取り込んだのは1~2kmの深度であったと推定される. 母結晶である斜長石のAn量とそれに含まれる包有物中のH₂OおよびS濃度には正の相関が認められ, 斑晶鉱物は1~2kmの深さでメルトからH₂OおよびSが脱ガスする状況で結晶化したと判断される. また, マグマには元々H₂Oが1.9wt%, CO₂が0.1wt%溶け込んでいたと推定され, そのマグマがCO₂に飽和した圧力は250MPa, すなわち約10kmの深度であったことになる.

4-4 三宅島噴火モデル

以上に述べたマグマ中の揮発性成分の研究から, 8月18日のマグマ水蒸気爆発およびその後の2km³以上ものマグマからの効果的な脱ガス現象を引き起こした, マグマの上昇に関して以下のようなモデルが提案された(Fig. 9)(Saito *et al.*, 2002; Kazahaya *et al.*, 2002). 5~10kmの深度で0~0.5Vol%の気泡を含むマグマ全体の密度は約2.6g/cm³であり, 周辺の地殻物質の密度構造より軽く, 自分の浮力で上昇した. 深さ3kmまで上昇し3vol%の気泡をもったマグマは密度が2.5g/cm³となり, 周辺の地殻物質とほぼ密度的に釣り合いマグマ溜まりを形成したと考えられる. それが, 2000年6月下旬以降のマグマの北西方向への移動とカルデラ陥没に伴うマグマ溜まりの上盤のピストン状の沈降により, 減圧発泡して上昇を再開した. 上昇の過程でH₂OおよびSの脱ガスおよび斑晶鉱物の結晶作用が促進される. マグマは山頂下約1km, すなわち海水準レベルまで上昇し, その周辺に存在する帯水層と接触してマグマ水蒸気爆発を発生させた. カルデラ陥没により大きな断面積をもつ火道が形成され, マグマ頂部の表面積が著しく大きくなり, しかもマグマおよび火山ガスの通路と帯水層の間が効果的に遮断されて両者が接触しなくなったため, マグマ物質を含む爆発的噴火はなくなり, 地下浅部(1~2km)でのマグマからの効果的な脱ガスが開始した. 浅部で脱ガスしたマグマは, 密度が大きくなるため下降し, 入れ替わりにマグマ溜まりからのCO₂気泡を含むマグマの上昇は

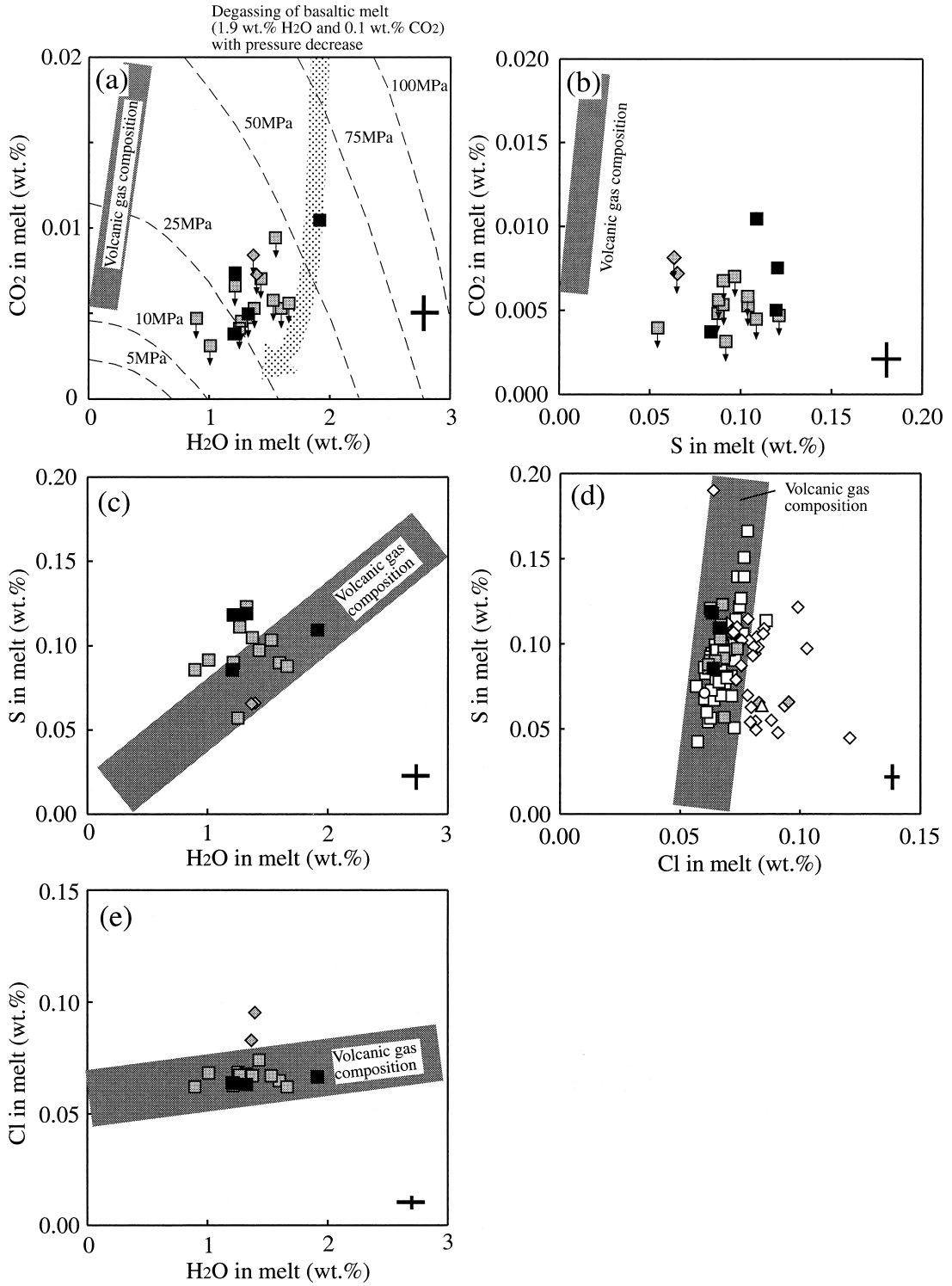


Fig. 8. Volatile composition of melt inclusions in olivine and plagioclase phenocrysts from eruptives of August 18, 2000 Miyakejima volcano (after Saito *et al.*, 2002).

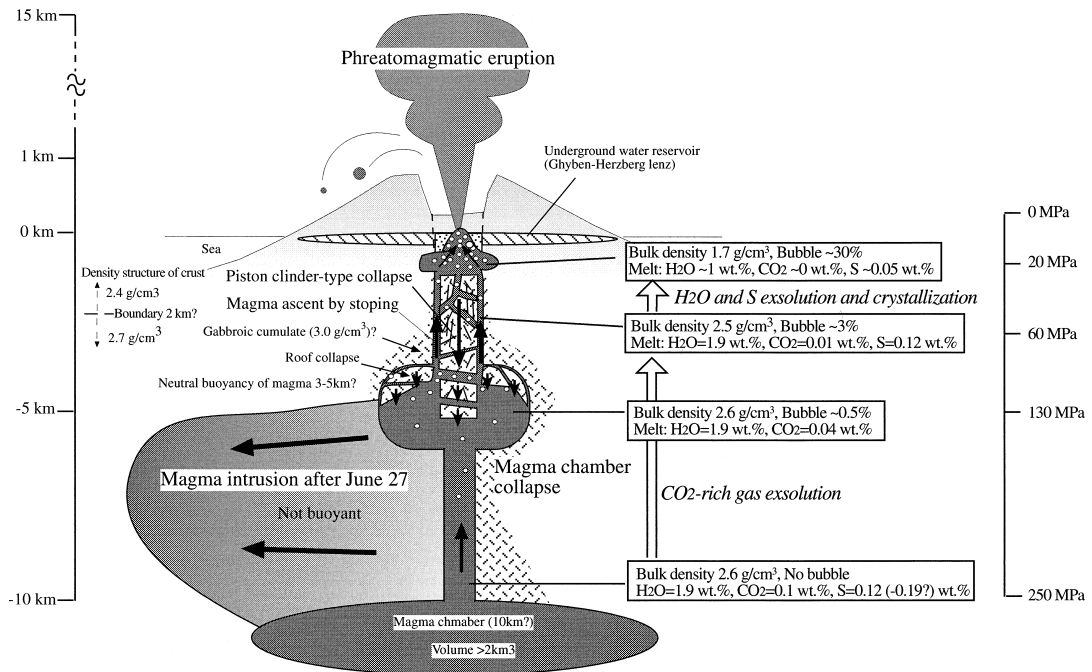


Fig. 9. Schematic magmatic process of Miyakejima volcano (after Saito *et al.*, 2002).

継続するため、効率的なマグマ対流システムが確立し、2年以上におよぶ大量の火山ガス放出が継続する結果となった。

5. 将来展望

これまでに述べたように、火山噴火の物質科学研究は、1990年以降の雲仙、有珠、三宅島の3噴火を経て大きく発展してきた。特に、揮発性成分元素の挙動解析からのマグマの上昇・脱ガス過程に関する定量的理解が飛躍的に進んだ。また、構成鉱物の化学分析に基づく珪長質マグマの挙動に関する定量解析が成果を上げている。一方で、苦鉄質マグマの挙動に関する岩石学的定量解析は、マグマの温度圧力を適切に見積もる手段が確立されておらず、大幅に遅れている。また、噴出物の詳細な岩石学的地球化学的検討と地表で観測される噴煙柱のダイナミクスとが有機的に連携しているとは言いがたい。さらにマグマ上昇噴火過程の理解、火山体の成長、噴火史およびマグマ発生、分化過程の定量的理解のために、微小領域化学分析、高精度年代測定、科学掘削、トレンチ、アナログ実験、数値シミュレーションなどの新手法が取り入れられるようになり、われわれの理解が飛躍的に伸びつつあるが、分野をまたいだ系統的で総合的な理解にはまだ結びついていないとは言いがたい。今後、重点的に推進すべき研究の柱について以下に概観する。

〈噴出物の迅速分析〉

噴火開始により噴出物を手に入れることで、物質科学的手法による議論が可能になるが、噴火活動は短時間で様式や規模が大きく変わることもあり、噴出物の迅速で正確な分析が重要になる。肉眼や実体顕微鏡などによる噴出物の形態分析は、重要な第1次情報であるが観察者の主観に左右される場合が多い。一方で、詳細な全岩化学分析や同位体分析、鉱物分析、電子顕微鏡観察などは、試料の前処理から分析結果の解釈まで時間がかかり、迅速性という点で問題がある。たとえば、噴出物のおおよそのSiO₂濃度を迅速に知りたい、あるいは放出された噴石および火山灰に混在する多種類の岩片の類似性の判別を簡便に行いたい、といったとき、非破壊手法による迅速な半定量分析が重要になると考える。これらの問題解決の一手法として、エネルギー分散型XRFを用いた非破壊分析が有効である。同装置は、通常の波長分散型XRFに比べて定量精度は劣るが、試料の形状を問わないこと、径0.5~1 mmの領域の半定量分析が可能なこと、分析時間が短いこと、装置の立ち上げから分析までの時間が短いこと、などの優れた長所を有している。伊藤・宇都(未公表資料)は、三宅島2000年8月18日と9月21~22日の火山灰を比較分析し、明瞭に区別できることを確認した。この手法を活用すれば、前述した有珠火山2000年噴出物に関する嶋野・他(2001)のような仕

事を、より簡便にかつ粒子単位で議論できるものと期待される。

〈揮発性成分の挙動の定量的理解〉

三宅島 2000 年マグマの上昇脱ガスモデルの構築に、揮発性成分元素の定量が大きな威力を發揮した。この分野の研究の今後の一層の発展により、マグマの上昇に関してより定量的な理解が進むと期待される。メルト包有物中の揮発性成分元素の定量は、現在のところ、 H_2O 、 CO_2 については両面研磨した試料を用いた FT-IR 分析か、高性能の 2 次イオン質量分析計を用いるなど、分析に多大な手間や大がかりな装置が必要であり、定量データの量産が進んでいない。また、 CO_2 など低い濃度での測定精度が十分でない。今後、精度の高いデータを多数の研究室で得る努力が必要であろう。

マグマ中の揮発性成分の挙動が定量的に推定されるようになった一方で、メルトへの揮発性成分の溶解度、拡散速度などの定量的な理解が未だ不十分であり、揮発性成分元素の定量が出来ても、そこからマグマの深度、上昇速度などの情報を定量的に解析出来るまでに至っていない。例えば、産業技術総合研究所の研究チームは、ハワイの水中溶岩の噴出深度と S 濃度の関係を元に、三宅島 2000 年マグマ中の高い S 濃度はマグマが浅所に上がってきていることを示す証拠であるという推定をしたが、三宅島とハワイとでマグマ中の S の融解度が同じといえるか、という疑問を呈せられ、明快な答えを出せなかった。これに対する答えを出すためには、三宅島マグマ中の揮発性成分元素の溶解度を、実験岩石学的に求めることが必要である。今後、実験岩石学によるマグマ中の揮発性成分元素の定量的な挙動の理解が必須である。

〈実験岩石学によるマグマ情報の定量化〉

マグマの挙動やマグマ溜まりの位置を岩石学的手段により推定することは、地球物理学的観測結果との相互比較において重要であり、有珠火山 2000 年噴火モデルを構築する上で重要な貢献を果たした（東宮・他，2001；東宮・宮城，2002）。一方、苦鉄質マグマの温度圧力を岩石学的手法により推定する手法は遅れており、定量的な議論は進んでいない。ましてや、反応速度論などに基づいてマグマの上昇速度を推定する手法も噴火予知の研究としてはほとんどない。たとえば、富士山の過去の噴出物からマグマ溜まりの深さやマグマの上昇速度などを推定できれば、将来の噴火において、どの深さからどれくらいの速度でマグマが上昇するかについて多少なりとも根拠のあるモデルを作ることができる。そうすれば、それに基づいて地殻変動シミュレーションを行い、噴火前にどれくらいの地殻変動がどの程度の範囲に起こるか

いった事前予測モデルを作成することが可能になる。このためには、実験岩石学的手法を取り入れた結晶-メルト間の元素分配、元素拡散、結晶と気泡の成長や核形成などに関する定量的な熱力学的および動力学的解析の推進が重要であろう。

〈噴出物と噴火ダイナミクスとのリンク〉

水蒸気爆発かマグマ水蒸気爆発かを定めるために、噴出物中のマグマ物質の存否を検討することは多少の時間がかかり、意見が分かれることが多い。一方、両者の爆発のダイナミクスは異なるので、噴出物の放出のされ方や噴煙柱の形成システムが異なる場合が多い。最近の噴火では、噴火の開始から詳細な映像記録が取られることが多いので、その噴火映像を用いて、爆発機構や噴煙柱の形成過程を定量的に解釈できれば、比較的短時間のうちに噴火機構について一定の判断をすることが可能であろう。今後、噴火のダイナミクスと物質科学とをカップリングさせた議論を行うことが重要になる。

〈噴火史の定量的理解〉

活動的火山の中長期的噴火活動予測のためには、定量的で精度の高い噴火履歴の解釈を行うことが不可欠である。そのための手段としては、各火山の過去の噴出物から、噴火の時代、規模、分布などを正確に復元する作業が行われる。この過程で、二つのことが常に問題になる。一つは、過去の噴出物の正確な年代測定、もうひとつは、新しい噴出物に覆われて断片的な分布しかしていない古い時代の噴出物の定量的理解である。

先史時代の噴火史を理解するには、理化学的な年代測定が必要であり、一般的に数万年より若い噴出物には ^{14}C 法、それより古い噴出物は K-Ar 法が有効である。 ^{14}C 法の場合、噴火時期を示す有機炭素がなければ利用出来ないという欠点があるが、近年の加速器 ^{14}C 法の進歩により、噴出物直下の土壌を用いた年代測定が急速に発展してきた。一方、K-Ar 法も ^{14}C 法とオーバーラップする 1~2 万年前の溶岩も年代測定可能になってきた。しかしながら、数千年から数万年にかけての噴火史を高い時間分解能で把握することが依然として困難であり、大多数の火山で十分な噴火史構築に至っていない。今後は、多数の火山に両手法を用いた年代測定を適用するとともに分析精度の向上をはかる必要がある。一方で、それ以外の手法を用いた年代推定する手法を開発する必要がある。近年、地球の磁場および地磁気強度の時間変化を利用し、過去の火山噴出物が記憶している地球磁場、地磁気強度と古地磁気の永年変化曲線を対比させて、噴火の年代推定をする試みがなされるようになった。この手法で過去 1~2 万年程度の噴火史の解釈が可能になることが期待される。

一方、新しい噴出物に隠された古い時代の噴出物の分布、噴出量および層序を正しく理解するためには、従来の地表調査だけでは不十分であり、掘削（ボーリング）あるいはトレンチなどの手法で、地下に埋もれた噴出物を掘り起こす必要がある。富士山や岩手山などで火山灰層のトレンチが噴火史の構築に威力を発揮している。また、雲仙岳、富士山での科学掘削では、地表には見られない未知の噴出物がどんどん見つかっている。今後、これらの活用が重要になる。掘削、トレンチには、噴火順序を明らかにしたまま過去の噴火史を復元できるメリットがあるが、これだけでは噴出物の面的な広がりを知ることはできない。そのためには、地震、電磁気などの地球物理学的三次元地下構造との対比を行い、面的に追跡する必要がある。そのための共同研究の進展が重要である。

謝 辞

噴火予知シンポジウムでの講演および本原稿の執筆のきっかけを与えて頂いた、九州大学地震火山研究センターの清水 洋教授、東京大学地震研究所の藤井敏剛教授、東京工業大学火山流体研究センターの平林順一教授に謝意を表します。また、共に雲仙科学掘削を推進し、噴火の物質科学的研究では常に議論の相手である東京大学地震研究所の中田節也教授、産業技術総合研究所にあって共に噴火およびマグマの研究を推進している風早康平、篠原宏志両氏に感謝します。また、本総説で議論した公表、未公表資料を快く見せて頂きご議論頂いた星住英夫、東宮明彦、斎藤元治の各氏にお礼申し上げます。

引用文献

- Geshi, N., Shimano, T., Chiba, T. and Nakada, S. (2002) Caldera collapse during the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan. *Bull. Volcanol.*, **64**, 55–68.
- 下司信夫・嶋野岳人・長井雅史・中田節也 (2002) 三宅島火山 2000 年噴火のマグマ供給系. *火山*, **47**, 419–434.
- 平林順一 (1996) 雲仙岳からの火山ガス放出量. *月刊「地球」*, 号外 No. 15, 151–155.
- 風早康平・篠原宏志 (1996) 活火山からの過剰な脱ガスについて—そのマグマ過程と機構—. *地質学論集*, **46**, 91–104.
- Kazahaya, K., Shinohara, H., Odai, M., Nakahori, Y., Mori, H., Iino, H., Uto, K. and Hirabayashi, J. (2002) Gigantic SO₂ emission from Miyakejima volcano, Japan, caused by the caldera collapse. *Geology*. (submitted).
- 風早康平・平林順一・森 博一・尾台正信・中堀康弘・野上健治・中田節也・篠原宏志・宇都浩三 (2001) 三宅島火山 2000 年噴火における火山ガス—火山灰の付着ガス成分および SO₂ 放出量から推定される脱ガス環境—. *地学雑*, **110**, 271–279.
- Minakami, T., Ishikawa, T. and Yagi, K. (1951) The 1944 eruption of Volcano Usu in Hokkaido, Japan. *Bull. Volcanol.*, **2**, 45–157.
- 宮城磯治・東宮昭彦 (2002) 色変化に基づく火山灰加熱温度の推定: 三宅島火山 2000 年 8 月 18 日火山弾の着地温度への適用. *火山*, **47**, 757–761.
- 中田節也 (2001) 有珠火山 2000 年噴火の推移. *震研彙報*, **76**, 203–214.
- Nakada, S. and Motomura, Y. (1999) Petrology of the 1991–1995 eruption at Unzen: effusion pulsation and groundmass crystallization. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 173–196.
- 中田節也・清水 洋 (2000) 雲仙普賢岳噴火と地下モデル. *月刊地球*, **22**, 258–263.
- 中田節也・星住英夫・清水 洋 (2000) 科学掘削によって期待される効果. *月刊地球*, **22**, 278–284.
- Nakada, S., Motomura, Y. and Shimizu, H. (2002) Aim of conduit drilling at Unzen volcano. Unzen Workshop 2002, 21–24.
- 中田節也・長井雅史・安田 敦・嶋野岳人・下司信夫・大野希一・秋政貴子・金子隆之・藤井敏嗣 (2001) 三宅島 2000 年噴火の経緯—山頂陥没口と噴出物の特徴—. *地学雑*, **110**, 168–180.
- 中川光弘・他 8 名 (2000) 有珠火山 2000 年噴火: 噴出物の時間変化と本質マグマ. *日本火山学会講演予稿集*, 190.
- Saito, G., Kazahaya, K., Shinohara, H., Stimac, J. and Kawanabe, Y. (2001) Variation of volatile concentration in a magma system of Satsuma-Iwojima volcano deduced from melt inclusion analyses. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **108**, 11–31.
- Saito, G., Uto, K., Kazahaya, K., Satoh, H., Kawanabe, Y. and Shinohara, H. (2002) Petrological characteristic and volatile content of magma of August 18, 2000 eruption of Miyakejima volcano: Magma ascent, phreatomagmatic eruption and magma degassing. *Bull. Volcanol.* (submitted).
- 酒井慎一・他 11 名 (2001) 地震活動から見た三宅島 2000 年噴火時のマグマの移動. *地学雑*, **110**, 145–155.
- 篠原宏志・福井敬一・風早康平・斎藤元治 (2001) 三宅島の脱ガス活動—火山ガス観測の意義—. *月刊地球*, **23**, 770–775.
- 嶋野岳人・中田節也・金子隆之 (2001) 火山灰の XRF 化学組成分析に基づく本質物質寄与の見積もり—有珠山 2000 年噴火を例として—. *震研彙報*, **76**, 247–251.
- 鈴木由希・中田節也 (2001) マグマ上昇過程における発泡と結晶作用のタイミング—有珠山 2000 年噴火, マグマ水蒸気爆発の例—. *震研彙報*, **76**, 253–268.
- 曾屋龍典・勝井義雄・新井田清信・堺 幾久子 (1981) 有珠火山地質図. No. 2, 地質調査所.
- 高田 亮・他 10 名 (2001) 有珠火山 2000 年噴火の噴煙変化速報 (4 月 6 日～13 日). *地調研報*, **52**, 199–206.
- 宝田晋治・他 25 名 (2001) 有珠火山噴火の降灰と火口近傍の状況. *地調研報*, **52**, 167–179.
- 東宮昭彦 (1997) 実験岩石学的手法で求めるマグマ溜まりの深さ. *月刊地球*, **19**, 720–724.

- Tomiya, A. and Takahashi, E. (1995) Reconstruction of an evolving magma chamber beneath Usu Volcano since the 1663 eruption. *J. Petrol.*, **36**, 617–636.
- 東宮昭彦・宮城磯治・星住英夫・山元孝広・川辺禎久・佐藤久夫 (2001) 有珠火山 2000 年 3 月 31 日噴火とその本質物. *地調研報*, **52**, 215–229.
- 東宮昭彦・宮城磯治 (2002) 有珠火山 2000 年 3 月 31 日噴火の噴出物とマグマプロセス. *火山*, **47**, 663–673.
- 宇都浩三・中田節也 (2000) 雲仙科学掘削プロジェクトの概要. *月刊地球*, **22**, 215–218.
- 宇都浩三・12 名 (2001) 三宅島火山 2000 年噴火のマグマ上昇モデル: 8 月 18 日噴出物および高濃度 SO₂ 火山ガスからの考察. *地学雑*, **110**, 257–270.
- 浦井 稔 (2001) 三宅島における ASTER による SO₂ 放出量の観測. *地球惑星科学関連学会合同大会予稿集*, 2001, V0-027.
- Watanabe, K., Danhara, T., Watanabe, K., Terai, K. and Yamashita, T. (1999) Juvenile volcanic glass erupted before the appearance of the 1991 lava dome, Unzen volcano, Kyushu, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 113–121.
- 山元孝広 (2001) 有珠火山 2000 年噴火でのマグマ水蒸気爆発と火砕流到達域予測. *地調研報*, **52**, 231–239.