

マグマ供給系の構造と噴火機構のモデル化

—物質科学研究からのアプローチ—

中 田 節 也*

Magma Supplying System and Modeling of Eruption Mechanism

—Approach from Material Science—

Setsuya NAKADA*

1. はじめに

物質科学的に火山噴火を予測する上で、初期噴出物の中に本質物質が有無を確認することと階段ダイアグラムの適用の重要性とその問題点を5年前の本シンポジウムにおいて強調した(中田, 1997)。また、その際、21世紀に取り組む課題として、放射非平衡を利用したマグマの地殻滞留時間の測定や脱ガスプロセスを解明するための手段として火道の掘削を挙げた。

その後、雌阿寒岳、駒ヶ岳、九重火山、有珠山、三宅島の噴火を迎え、先に挙げた2つのツールが噴火予測の即戦力としては問題が多いことが思い知らされた気がする。また、伊豆大島1986年噴火、普賢岳1990~95年噴火を初め、有珠山・三宅島2000年噴火では、それぞれの火山で直近の噴火とは全く異なる様式で噴火が推移し、それぞれの火山において直近の噴火事例のみをもって噴火の推移予測をすることがいかに危険であるかが明らかにされた。しかし、一方でこれらの噴火はそれぞれの火山で決して初めてのものではなく、何らかの形で、過去に起こった噴火に類似することも事実であった。このため、今の噴火予測技術をより実用化する上においては、有史の記録がある噴火だけではなく、その火山の生い立ちから噴火履歴を洗い直すなど、噴出物調査やその解析に基づく基礎研究の積み上げが必要であることがあらためて認識された。その際、単なる基礎研究の積み上げだけではなく、より定量的な結果に基づいた噴火予測のためのモデル化が重要であることは言うまでもない。ま

た、このモデル化に際しては、物質科学的側面だけではなく地球物理観測の結果も踏まえた総合的アプローチが不可欠である。本論では噴火予測に関する物質学的側面の現状をいくつか拾い上げ、マグマ供給系を理解する上で重要ないくつかの成果を示し、実現した火道掘削研究の紹介を簡単にする。

2. 地質岩石学的手法からの噴火予測の現状

噴火履歴の定量的解読によって経験則を見つけだし、それによって将来起こりうる噴火の開始時期、様式、噴出量についておおざっぱな予想をすることが可能にな

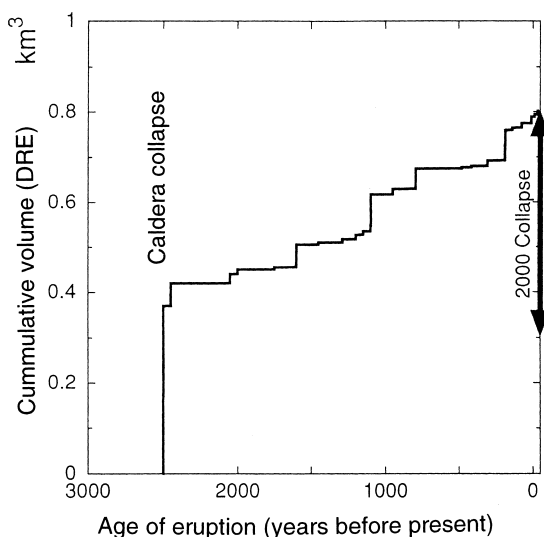


Fig. 1. Cumulative volume of eruption products (dense rock equivalent, DRE) plotted against the ages of eruptions (step diagram) of Miyakejima volcano (from Tsukui *et al.*, 2001). Caldera collapses occurred 2,500 years ago and in AD 2000.

* 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1
東京大学地震研究所火山噴火予測研究推進センター
Volcano Research Center, University of Tokyo, 1-1-1
Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan.
e-mail: nakada@eri.u-tokyo.ac.jp

る。特に、噴出時間と積算噴出量を示した階段ダイアグラムが重要視され、多くの地質研究者がその作成に精力を注いできた。しかし、階段ダイアグラムでは長期間にわたる平均的なマグマ生産率、あるいは噴出率を理解しやすいが、それに基づいて、迎える噴火の推移や継続時間などについての予測を行うのは現状では困難であると言わざるを得ない。例えば、潜在ドームの活動が繰り返して起こる有珠山のような噴火においては階段ダイアグラムすら作ることができない。また、三宅島 2000 年噴火のような地下での大量マグマの貫入イベントが起こる場合には、階段ダイアグラムを用いての活動評価はやはり困難である (Fig. 1)。現状では少なくとも 1 万年程度はさかのぼって、その火山が経てきた噴火を洗い出し、噴火様式にどれだけのスペクトルがあり、その頻度がどうであったのかをできるだけ定量的に捉えておくことが重要であろう。この意味では、現在、富士山で行われているハザードマップ作りで実施されている研究 (藤井, 本シンポジウムを参照) は、今後の噴火予知の物質科学的研究の難形であり、試金石になりうるものかもしれない。

噴火の初期に放出された、新しいマグマに由来する火山灰 (本質物質) からマグマの情報を読みとり、その後の噴火の推移予測に役立てることがいくつかの火山噴火で試みられた。噴出物の中に本質物質が存在し、それが時間とともに増加すれば、活動の活発化が予想されるからである。しかし、新たに開口したばかりの火口から放出される様々の岩片の中から、少ない量の本質物質を見極めるためには高度、かつ、総合的な地質岩石学的知識と英断が必要である。九重火山の 1995 年の噴火や有珠山の 2000 年の初期の噴火では本質物質が認められたが、その直後には、噴出物中の本質物質の量は減少するとともに噴火活動は沈静化に向かった。三宅島の 2000 年噴火では、噴出火山灰中に本質物質が存在すると主張する産総研研究者と、それは疑わしいとする地震研究者が議論を交わしている最中の 8 月 18 日に、それまでで最大規模の噴火が起き、火山弾やその破片が住宅地に達する所まで放出された (例えば、宇都・他, 2001) (Fig. 2)。この火山弾自身もその後の議論の対象になりはしたものの、この本質の可能性が高い物質の本格的噴出によってその後の噴火に対して厳戒態勢をとることになった。しかし、実際には 8 月 18 日のできごとが噴火活動としてはクライマックスであった。このように、本質物質から正確、かつ、迅速に地下のマグマの状態を理解するのは難しく、しかもタイムリーな予測はなかなか厳しい。

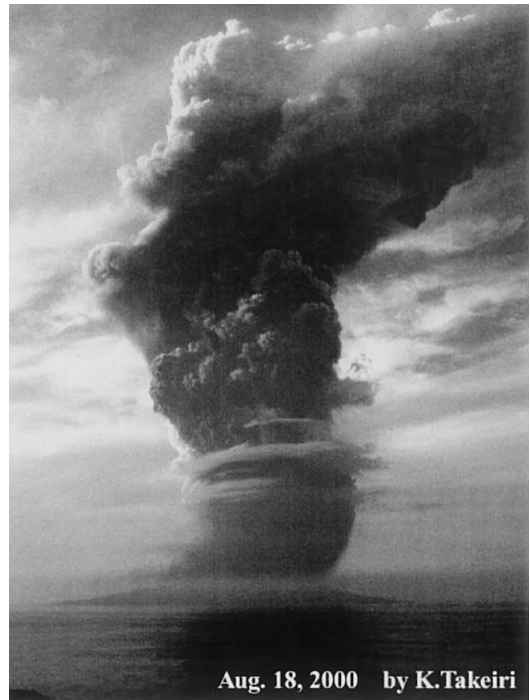


Fig. 2. The largest eruption in the Miyakejima 2000 eruption, whose ash cloud reached about 16 km above sea level. Taken from Mikurajima on the Aug. 18 evening. Courtesy of K. Takeiri.

3. 噴出物からみたマグマ供給系のモデル

これまで、噴出物の研究から地下のマグマ過程についていくつもモデルが提案されてきている。そのひとつに、噴出前に地下で組成の異なるマグマの混合が起こっており、それが間接的あるいは直接的な噴火の引き金になっているというモデルがある。もし混合前のマグマの状態やマグマ混合の瞬間を、地球物理学的な連続観測によって捉えることができたならば、噴火の中期的予測が可能になるかもしれない。

例えば、駒ヶ岳の 1929 年噴火の研究では、結晶質でお粥状 (クリスタルマッシュ) マグマ溜まりにより高温でより苦鉄質のマグマが注入し、それが噴火の熱的引き金となったと提案された (Takeuchi and Nakamura, 2001)。このようなお粥状マグマ溜まりに高温マグマが断続的に注入するモデルは熱的にも安定であるらしい (Koyaguchi and Kaneko, 2000)。雲仙普賢岳噴火でも同種のマグマ混合が起こったことが提案された (Nakamura, 1995 など)。雲仙火山では、最近約 300 年間の溶岩中の斑晶の同位体局所分析からは、ほとんどの斑晶が石基 (メルト) とは非平衡であり、かつ、約 300 年間同じ斑晶が含まれ続けることを示した (Nakai *et al.*, 2002)。

このことから、斑晶の多くが外来性であることが指摘され、長時間持続した母岩の部分溶融部がお粥状マグマ溜まりの実体である可能性が提案される。

一方、伊豆大島 1986 年噴火においては異なる組成のマグマが噴出し、岩石学的検討から複数のマグマポケットが存在したと提案された(荒牧・藤井, 1988)。その後の地震波の散乱を使った研究では、これに見合うように複数のマグマ溜まりが地下に存在することが示された(Mikada *et al.*, 1997)。また、三宅島 2000 年噴火でも 2 種類の本質物質が出現し、深度の異なるマグマ溜まりに由来するものと提案された(中川・他, 2001)。三宅島の GPS 観測によっては地下約 8 km にマグマの蓄積が起こっていることが示され(渡辺・他, 2000 未公表)、2000 年噴火では地下約 3 km 以深にマグマ溜まりがあることが地震学的に示された(酒井・他, 2000 未公表)。さらに、東宮(1995)は有珠山の 2000 年噴火の前に、4~5 km と 10 km の深さに異なるマグマ溜まりがあることを実験岩石学的に予想した。2000 年噴火では地殻変動や地震活動の解析から有珠山の下約 3 km と 10 km にそれぞれマグマ溜まりが存在し下部溜まりからのマグマの移動が噴火に先行したと解釈されている(渡辺, 2003 本シンポジウム)。

4. 噴火様式と脱ガス過程の複雑さ

噴火の推移予測が難しい原因のひとつには噴火プロセスの複雑さがある。例えば、プリニー式噴火と溶岩ドーム噴火の違いは、マグマが地下でもっている初期揮発性成分量の差には依存しないことがここ約 10 年に起こっ

た火山噴火の噴出物の研究からもより明らかになった。噴火様式の本質的な違いは上昇中におけるマグマの脱ガス効率であると結論することができる。

減圧に伴うマグマの発泡によって気泡が成長し、気泡同士が連結する。脱ガスは連結した気泡の隔壁の穴や隙間を通して効果的に起こると考えられている。このため、気泡の連結度とマグマの上昇に要する時間(上昇速度の逆数)のかけ合わせたようなものが脱ガス効率を決めていると単純化して考えることが可能である。一方、メルトの脱水が十分に進行するとメルトの粘性率が上昇する。このためメルトから気泡への揮発性成分の拡散による気泡成長率は低下するが、マグマの減圧による気泡の膨張によって気泡は成長しようとする。粘性率の上昇が気泡の膨張を妨げれば気泡中の圧力は増加し続ける。このため、脱ガスがより進行しながらも発泡したマグマの過剰圧が蓄積されて爆発的噴火を起こすことがありうることになる。このように一見矛盾することが起こり得、マグマの上昇速度が一義的にマグマの噴火様式を決めているとは言えないなど、脱ガス過程は複雑である。

Melnik and Sparks (1999) が行った火道をゆっくり上昇するマグマのモデル計算によると、火道最上部において過剰圧が最大になる場所がある。これは、減圧による気泡の成長、脱水によるマグマの物性変化、脱ガスによるマグマの圧密効果などを組み合わせた結果として生じるものである。天然の系ではこれに減圧による結晶作用が加わるため、火道浅部ではより効果的な過剰圧上昇が期待される(Sparks, 1997)。このような火口直下での過剰圧の上昇モデルは、火山体の浅部でおこる火山性地震

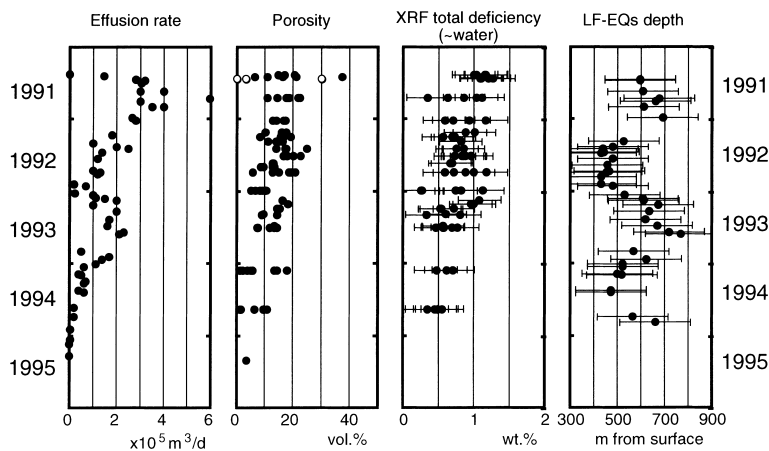


Fig. 3. Temporal changes in the depth of LF hypocenters, effusion rate and properties of lavas during the 1991–1995 eruption at Unzen. Although hypocenters contains vertical uncertainties up to 500 m, the temporal relationship does smaller uncertainties. Data from Kyushu Univ. Porosity was calculated from apparent specific gravity, assuming the specific gravity of non-vesiculated lava as 2.5. Water content was treated as deficiency of XRF analytical total from 100 wt%.

の巣や、地殻変動や小爆発の圧力源が浅部にあることなどを上手く説明することができる。普賢岳の溶岩ドーム噴火において観察された溶岩噴出量の時間変化の波、浅部低周波地震、初期のブルカノ式噴火や、噴出物に見られた岩石学的な特徴の系統的な変化 (Fig. 3) はこのような火道上部で起こるマグマのプロセスによって説明されうる可能性が高い (例えば, Nakada *et al.*, 1999)。

5. 火道掘削と脱ガス過程の研究

火山体深部への掘削は3次的に火山の構造を理解する上で、最も効果的で確実な方法である。掘削による火山体の本格的な調査は、これまで、地熱開発に伴うものを除いてほとんどやられてこなかった。1999年から6カ年計画で始まった雲仙火山の科学掘削研究 (科学技術振興調整費総合研究, 代表: 宇都浩三) では、雲仙火山の火山体およびマグマ発達史と火山性地溝の発達過程が解明されつつある。例えば、1) 雲仙火山の50万年間の歴史を通して地溝とマグマの活動がそれぞれ一定の速度で起きていたわけではないこと、2) 火山活動の中心域が時代と共に西部から東部に移動してきたこと、3) 雲仙火山の活動史の初期には玄武岩とデイサイトマグマが同時に活動していたこと、などが分かってきている。さらに、4) 雲仙火山の発達の初期には、現在の非爆発的な噴火活動とは異なり、軽石流を含む爆発的な噴火活動が起きていたことも明らかになった。すなわち、マグマの組成は角閃石・黒雲母を含むデイサイトと共通しほとんど変化していないにもかかわらず、噴火様式は火山体の発達とともにより溢流的なものに移行してきたことになる。この噴火様式の時代的進化の原因を探ることが山体から火道にかけての一連の掘削研究のゴールのひとつでもある。2002年度末からは、平成新山 (普賢岳溶岩ドーム) の火道上部に向けた掘削が開始される。この掘削によって、平成噴火で効果的な脱ガスがどのように起きたかの現場検証が行われる予定である (Fig. 4)。

6. おわりに

噴火機構を解き明かす上で火道やマグマ溜まりを標的にした掘削で得られる知見は多い。掘削研究は、脱ガスプロセス解明だけでなく、噴火経歴の解読や火山体構造を3次的に理解する上で今後不可欠な研究手段となると思われる。また、その掘削坑を利用したより深部での地球物理観測によって、地表のノイズを取り去ることができ、多点観測を行うことにより地下立体アレイを作り上げることができる。これによって、噴火の前兆や噴火中の現象をより精度よくとらえることができるようになり、噴火機構を理解する上で重要なものになると期待

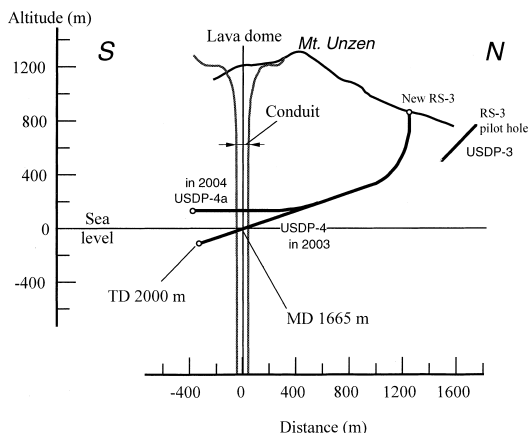


Fig. 4. Trajectory of conduit drilling of the Heisei Shinzan at Unzen. After Sakuma (2002).

される。

物質科学的アプローチの重要な研究として、ここで一部紹介した微小部分分析など、より精度を上げたマイクロ部分の分析技術を導入した岩石化学的研究と同時に、マグマの条件を再現した実験岩石学的研究が挙げられる。噴出物や火道に残っている溶岩から得られる組織などの岩石学的情報が、どのようなマグマ過程で作り出されたかを減圧と脱ガス速度をコントロールした条件で再現してみせること (例えば, Gardner *et al.*, 2000) は、今後の噴火予知の物質科学的な研究において極めて重要になるであろう。このような実験岩石学的な成果を、マグマの上昇過程を主にモニターできる地球物理学的観測とリンクすることによって、今まで以上の噴火機構のモデルが噴火のつど作成できるようになると期待される。

引用文献

- 荒牧重雄・藤井敏嗣 (1988) 伊豆大島火山 1986~1987 年噴火の岩石学的・地質学的モデル. 火山, 33, S297-S306.
- Eichelberger, J. C., Carrigan, C. R., Westrich, H. R. and Shannon, J. R. (1986) Non-explosive silicic volcanism. *Nature*, 323, 598-602.
- Gardner, J. E., Hilton, M. and Carroll, M. R. (2000) Bubble growth in highly viscous silicate melts during continuous decompression from high pressure. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64, 1473-1483.
- Koyaguchi, T. and Kaneko, K. (2000) Thermal evolution of silicic magma chambers after basalt replenishments. *Trans. Royal. Soc. Edinburgh Earth Sci.*, 91, 47-60.
- 中川光弘・宮坂瑞穂・中田節也 (2001) 伊豆諸島三宅島火山の岩石学的研究—西暦 2000 年噴火のマグマ供給システム—. 地球惑星科学関連合同大会予稿集, V0-23.
- Melnik, O. and Sparks, R. S. J. (1999) Nonlinear dynamics

- of lava extrusion. *Nature*, **402**, 37–41.
- Mikada, H., Watanabe, H. and Sakashita, S. (1997) Evidence for subsurface magma bodies beneath Izu-Oshima volcano inferred from a seismic scattering analysis and possible interpretation of the magma plumbing system of the 1986 eruptive activity. *Phys. Earth Planet. Int.*, **104**, 257–269.
- 中田節也 (1997) 噴火予測に関する地質学・岩石学的研究の問題と将来展望. *火山*, **42**, 111–114.
- 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.
- Nakada, S., Shimizu, H. and Ohta, K. (1999) Overview of the 1990–1995 eruption at Unzen Volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 1–22.
- Nakai, S., Maeda, Y. and Nakada, S. (2002) Common origin of plagioclase in the last three eruptions of Unzen volcano, Japan. In *Extended abstract, "Unzen Workshop 2002,"* 8–59.
- Nakamura, M. (1995) Continuous mixing of crystal mush and replenished magma in the ongoing Unzen eruption, *Geology*, **23**, 807–810.
- Sakuma, S. (2002) Planning the well for conduit drilling. In *Extended abstract, "Unzen Workshop 2002,"* 34–36.
- Sparks, R. S. J. (1997) Causes and consequences of pressurization in lava dome eruption. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **150**, 177–189.
- Takeuchi, S. and Nakamura, M. (2001) Role of precursory less-viscous mixed magma in the eruption of phenocryst-rich magma: evidence from the Hokkaido-Komagatake 1929 eruption. *Bull. Volcanol.*, **63**, 365–376.
- 津久井雅志・新堀賢志・川辺禎久・鈴木裕一 (2001) 三宅島火山の形成史. *地学雑*, **110**, 156–167.
- 東宮昭彦 (1995) 有珠火山は今後も噴火し続けるか. *岩波科学*, **65**, 692–697.
- 宇都浩三・風早康平・齋藤元治・伊東順一・高田 亮・川辺禎久・星住英夫・山元孝広・宮城磯治・東宮昭彦・佐藤久夫・濱崎聡志・篠原宏志 (2001) 三宅島火山 2000 年噴火の magma 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.