

三宅島の地下では何が起きているか？ －噴火機構の解明に向けて－

篠原宏志（地質情報研究部門マグマ活動研究グループ）

1. はじめに

近年の地震・地殻変動観測網の充実と解析手法の進歩により、マグマが新たな通路を形成して上昇する場合には、マグマの上昇・蓄積過程が詳細に検知・定量化することが可能となってきた。しかし、火山噴火はマグマが新たに通路を作り上昇する場合に起きるとは限らない。マグマ通路が既に存在している場合やマグマ上昇が受動的に起きている場合などには、マグマの移動は地震や地殻変動には現れにくく、活動推移の解釈は困難となる。特に火山噴火は他の地質災害と比較して、現象の多様性に富むと共に長期にわたり異なる現象が推移する場合があるなど複雑である。地質学的手法で、過去の噴火活動推移が明らかかな場合には、それらを参考に活動推移を解釈することも非常に有効である。しかし、我々は全ての現象を経験しているわけではなく、また火山は同様の活動を常に繰り返す保証もない。そのため、活動の進行状況を様々な手法により把握し、現在進行中の現象の的確な解釈を行うことが災害の軽減に必要となる。

2000年以降に三宅島で起き、現在も継続している一連の火山活動は、複雑なマグマ移動に加え、世界でも観測例がない予想外の現象が複数重なり、活動推移の解釈も困難を極めた。三宅島では大学、気象庁、防災科技研、国土地理院、産総研など関係各機関の協力により、地震、地殻変動、重力、マグマの岩石学的検討や火山ガスなど様々な調査観測が実施された。本講演では、種々の観測結果に基づき明らかになってきた三宅島の火山活動・火山ガス放出過程の概要を解説すると共に、火山活動推移把握・予測を行うためには、火山現象・マグマ移動過程の物理化学的モデル構築が不可欠であることを紹介する。

2. 三宅島噴火経緯

2000年に始まった三宅島の火山活動は1) 巨大マグマ岩脈貫入、2) 噴火を伴わない陥没カルデラ形成、3) 陥没に伴うマグマ上昇、4) カルデラ形成に伴う大量火山ガス放出、などいずれも観測事例のほとんどない現象の連続であった(図1)。2000年の火山活動は6月26日の地震活動に始まり、6月27日の三宅島南西沖での海底噴火に至る。この一連の活動は、三宅島の近年の噴火が短時間に終息する割れ目噴火であったことと調和的であり、当初はこれで噴火活動は終息したと考えられていた。しかし、地震活動・地殻変動は三宅島から北西に移動継続し、最終的には全長30 km、深さ方向の幅約10 km、厚さ1~5 m、体積1 km³の巨大マグマ岩脈を形成するに至る(Nishimura et al., 2001; Furuya et al., 2003)。巨大岩脈形成過程では、M6クラスの地震が5回発生するなど世界でも類を見ない激しい群発地震が生じている。この巨大岩脈の形成と平行して三宅島では7~8月にかけて山頂で陥没カルデラが生ずる。陥没カルデラは三宅島直下のマグマ溜まりから大量のマグマが流出したことによりマグマ溜まりが減圧したため生じたと考えられている(Geshi et al., 2002)。山頂陥没は水蒸気爆発、マグマ水蒸気爆発の繰り返しと共に進行した(Nakada et al., 2005)。マグマは陥没に伴い割れ目が形成されたために上昇したと考えられる(宇都ほか, 2001)。噴火活動はカルデラ陥没の停止と共に終息したが、それ以降大量の火山ガス放出が始まった。

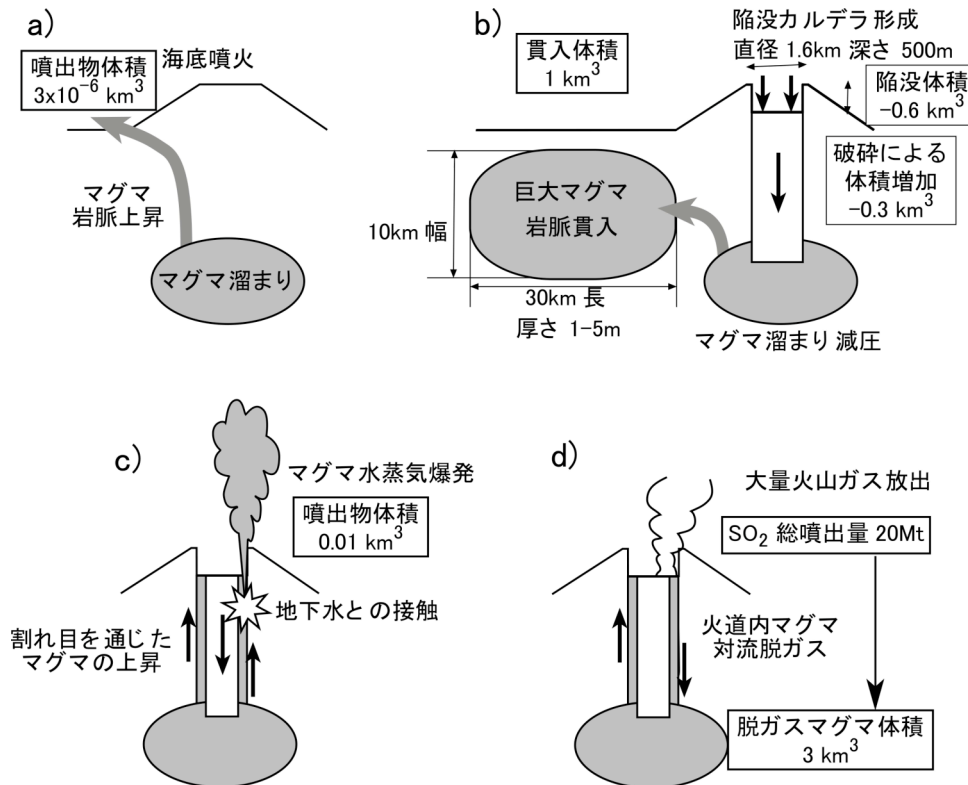


図1. 2000年に始まった三宅島火山の活動推移模式図. a) 岩脈状マグマが上昇し、海底噴火に至る. b) 三宅島直下のマグマ溜まりからマグマが流出し、三宅島と神津島の上に巨大岩脈を形成する. マグマ溜まりの減圧により、直上がピストン状に陥没し山頂にカルデラを形成する. c) 陥没に伴い形成される割れ目系を通じてマグマが上昇する. 地表近傍で地下水と接触しマグマ水蒸気爆発が発生する. d) マグマ溜まりと地表近傍をつなぐマグマ火道内で脱ガスによるマグマ対流が生じ、大量火山ガス放出が継続する.

以上のように、地震、地殻変動、重力などの観測や噴出物の岩石学的解析に基づき、マグマの移動や噴火過程が明らかになってきた。このような火山活動の推移を的確に把握・理解することは、避難や復旧などの防災計画を検討する上で必要である。しかし、観測結果の様々な解釈もそろった今でこそ、種々の観測結果や解釈の総括により、地下でのマグマの動きなどを定量的に描き出すことが可能になってきたが、全体像が明らかでなかった当時、過去の事例のなかった現象を予測・解釈することは容易ではなかった。また、火山活動の推移は理解されているものの、その支配要因は未解明の部分が多く、活動推移予測を行うためには未だ解明すべき点が多い。

3. 大量脱ガス過程

噴火活動は2000年9月以降顕著になった三宅島での大量火山ガス放出は、火山活動としても重要であったが、有毒なSO₂ガスが高濃度滞留する事による居住環境の悪化という事態も引き起こした。9月2日に噴火を避けるために発せられた島外避難指示勧告は、火山ガスによる健康被害を避けるためにその後4年半にわたり継続された。そのため、火山ガス放出状況の把握と将来予測は、火山ガス健康被害への対策上も重要となり、気象庁・大学・産総研などによる種々の火山ガス観測が実施された(図2)。

火山ガス放出量は2000年末にSO₂放出量にして日量数万トンに達し、その後徐々に減少したが (Kazahaya et al., 2004), 2007年現在でも日量数千トンの放出が続いている。マグマ中の硫黄濃度が約0.1wt.%であるため、日量数万トンのSO₂を放出するためには毎日数千万トンのマグマが必要である (Saito et al., 2005)。このような大量の火山ガス放出は、火道内マグマ対流脱ガスにより生じていると解釈されている。マグマは地表近くまで上昇減圧されることにより火山ガスを放出する。

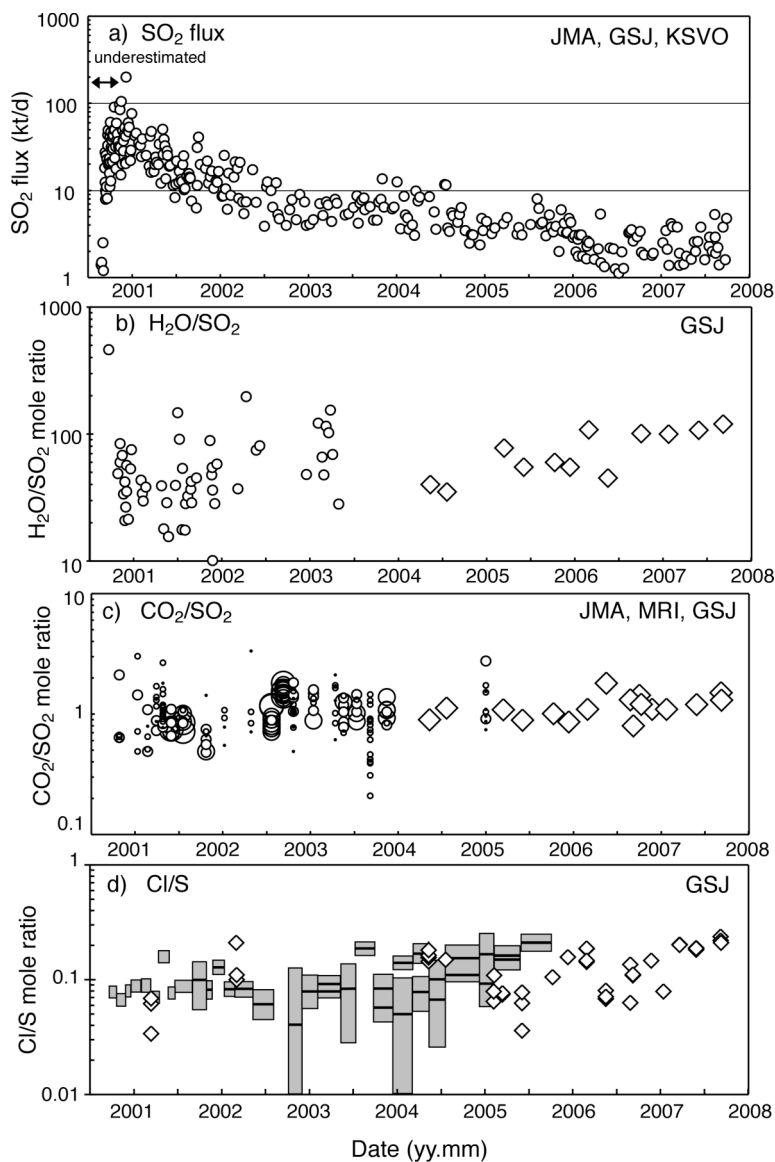


図2. 三宅島火山ガス放出量, 火山ガス組成観測結果 (第108回火山噴火予知連絡会, 産業技術総合研究所資料). a) SO₂ 放出量. 2000年9月前後は噴煙に火山灰が含まれていたため測定値は過少見積もりであると考えられる. b) 火山ガス中 H₂O/SO₂ 比. 丸は赤外線画像解析による H₂O 放出量推定値と SO₂ 放出量の比. 菱形はマルチセンサー (Multi-GAS) による測定値. c) 火山ガス中 CO₂/SO₂ 比. 丸はヘリ観測による測定値. 丸の大きさは測定値の信頼性を表す (大きい方が信頼性が高い). 菱形はマルチセンサー (Multi-GAS) による測定値. d) 火山ガス中 Cl/S 比. 四角はアルカリ吸収液法による. 四角は測定値の幅, 太線は中間値を示す. 菱形はアルカリフィルター法による測定値.

マグマは脱ガス(火山ガス放出)により密度が増大するため火道内を沈降し、新たなマグマの上昇を引き起こす。この連続的なマグマの入れ替わりにより、深部マグマ溜まりから火山ガスが供給される。三宅島ではカルデラ形成に伴い生じた規模の大きな割れ目系を通じてマグマが上昇してきたため、大量の火山ガスの連続放出が生じたと解釈された(Kazahaya et al., 2004)。2000年末から2007年にかけて、SO₂放出量は10分の1以下に減少したが、それと比較して火山ガス組成はほぼ一定であった(Shinohara et al., 2003)。そのため、火山ガス放出量の減少は、マグマ対流火道の狭窄によるマグマ対流速度の減少によるもので、供給されるマグマの組成や脱ガス圧力(深度)などには変化がないと推定された。火道内マグマ対流脱ガスモデルにより、大量火山ガス放出やその減衰過程は理解されたが、将来の変化をモデルから直接予測することは実現していない。三宅島に見られるような継続的な火山ガス放出は世界でもいくつかの火山で生じているが、その停止過程が観測された例はほとんどなく停止過程のモデル化は今後の課題である。

4. まとめと今後の展望

2000年三宅島の噴火とその後の大量火山ガス放出現象を例に、火山活動推移予測のためには、噴火・マグマ移動の物理化学モデルの構築が不可欠であることを紹介した。噴火現象は多様であるため、様々な観測結果をもってしても地下で進行中の現象が自明ではない場合が多い。そのため、各種観測や調査分析結果を総合解釈可能な噴火・マグマ移動過程の物理化学的モデルを構築することが現在進行中の噴火の推移を理解するために必要である。噴火・マグマ移動過程のモデル構築は理学的な研究であるが、その理学的研究そのものが災害の軽減に直結しているところに、噴火予知研究のおもしろさと難しさがある。

火山現象は複雑多様であり、その全体の変化をシミュレーションにより再現・予測することは未だ実現していない。しかし、個別の過程などの物理化学的なモデルの構築により活動推移の予測実現に少しずつでも近づくことが必要である。そのための試みのひとつとして、産総研では伊豆大島をモデルフィールドとして熱水系発達シミュレーションによる噴火前駆現象のモデル化を現在進めている。伊豆大島も三宅島同様過去に周期的に噴火している火山であり、前回の1986年噴火以降20年経過した現在、次の噴火への備えを必要としている。前回の1986年の噴火では、噴火の数年前から地磁気強度、地下電気比抵抗や噴気などに変化が観測されている。これらの前駆現象は、マグマの貫入や火山ガスの上昇に伴って生じたと推定されているが、それらの定量的なモデル化はまだ行われていない。地下の電磁気学的構造や熱移動は地下水の分布や移動に大きく依存している。そのため、マグマの貫入などによる熱水系の発達過程を数値シミュレーションにより再現することにより、過去の前駆現象の解釈を行うと共に、予測される変動を考慮した観測計画を構築することにより、前駆現象の的確な把握を目指している。

実際の観測結果との比較検証可能な熱水発達シミュレーションを実現するためには、伊豆大島の地殻構造、特に浸透率分布などを考慮したモデル化が必要である。地殻構造は不均質であり、その不均質性により熱水系発達の時間変化やその現象が現れる場所などが異なる。そのために、今までに自然電位分布や比抵抗構造などの構造探査を実施し、地質構造モデルを考慮して熱水系構造モデルの構築を進めている。この実際の伊豆大島の地殻構造モデルに基づき時間的・空間的に不均質な熱水系の発達過程のシミュレーションを実施することにより、観測値との直接比較可能なより現実的なモデル化が進められると期待している。

これらの種々の物理化学的モデルと地質学的手法により推定される過去の事例に基づく経験的な噴火シナリオは、火山活動推移や各種観測結果を解釈し現在進行中の現象の的確な把握し活動推移予測を実現するための両輪となるであろう。

文 献

- Furuya, M., Okubo, S., Kimata, F., Miyajima, R., Meilano, I., Sun, W., Tanaka, Y. and Miyazaki, T. (2003) Mass budget of the magma flow in the 2000 volcano-seismic activity at Izu-islands, Japan. *Earth Planets Space*, vol. 55, p. 375.
- Geshi, N., Shimano, T., Chiba, T. and Nakada, S. (2002) Caldera collapse during the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan. *Bull. Volcanol.*, vol. 64, p. 55-68.
- Kazahaya, K., Shinohara H., Uto K., Odai M., Nakahori Y., Mori H., Iino H., Miyashita M., and Hirabayashi J. (2004) Gigantic SO₂ emission from Miyakejima volcano, Japan, caused by caldera collapse. *Geology*, vol. 32, no.5, p. 425-428.
- Nakada, S., Nagai, M., Kaneko, T., Nozawa, A. and Suzuki-Kamata, K. (2005) Chronology and products of the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan. *Bull. Volcanol.*, vol. 67, p. 205-218.
- Nishimura, T., Ozawa, S., Murakami, M., Sagiya, T., Tada, T., Kaidzu, M. and Ukawa M. (2001) Crustal deformation caused by magma migration in the northern Izu-Islands, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 28, p. 3745-3748.
- Saito, G., Uto, K., Kazahaya, K., Shinohara, H., Kawanabe, Y. and Satoh, H. (2005) Petrological characteristics and volatile content of magma from the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan. *Bull. Volcanol.*, vol. 67, p. 268-280.
- Shinohara, H., Kazahaya, K., Saito, G., Fukui, K. and Odai, M. (2003) Variation of CO₂/SO₂ ratio in volcanic plumes of Miyakejima: Stable degassing deduced from heliborne measurements. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 30, no. 23, 10.1029 /2002GL016105.
- 宇都浩三・風早康平・斎藤元治・伊藤順一・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 年噴火のマグマ上昇モデル. *地学雑誌*, vol. 110, p. 257-270.