

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 放出量から推測される脱ガス環境

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*

Volcanic Gas Study of the 2000 Miyakejima Volcanic Activity: Degassing Environment
Deduced from Adhered Gas Component on Ash and SO₂ Emission Rate

Kohei KAZAHAYA *, Jun-ichi HIRABAYASHI **, Hirokazu MORI ***, Masanobu ODAI ***,
Yasuhiro NAKAHORI ****, Kenji NOGAMI **, Setsuya NAKADA *****,
Hiroshi SHINOHARA * and Kozo UTO *

Abstract

To understand degassing processes during the 2000 Miyakejima volcanic activity, we applied the following two methods: 1) repeated analyses of adhered water-soluble gas component such as SO₄ and Cl ions on ashes produced at eruptions from July 8 and mid-September, and 2) SO₂ flux measurements by COSPEC since August 26.

The repetitive analyses of soluble component show remarkable change in Cl/S. Until August 18, the adhered SO₄ concentrations are quite high and Cl concentrations are always low with Cl/S of 0.01-0.05, indicating that a certain mass of groundwater existed in aquifers beneath the summit crater and Cl component selectively dissolved in the groundwater. Since August 29, chlorine concentrations became greater and Cl/S ratios were determined as 0.1-0.14 on August 29 and 0.5-1.5 in September, which coincided with the strong volcanic gas emissions which started in mid-August. Groundwater boiling and establishment of gas conduit are likely to occur to prevent HCl from being absorbed in the groundwater.

Sulfur dioxide emission rate has been monitored since August 26. The SO₂ flux increased in mid-September from thousands to tens of thousands tons a day. The average SO₂ flux after mid-September to the present is 48 kt/day. The highest flux was observed on December 7 to be 230

*産業技術総合研究所

**東京工業大学火山流体研究センター

***気象庁火山課

****気象庁三宅島測候所

*****東京大学地震研究所

* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

** Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

*** Volcano Section, Japan Meteorological Agency

**** Miyakejima Weather Station, Japan Meteorological Agency

***** Volcano Research Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

ktons/day. The mass rate of the magma degassing is estimated as 20 Mtons/day and the total volume of the degassed magma is calculated to be 1 km³ so far. The continuous magma degassing without eruptions occurs at a shallow environment by the convective transport of magma from a chamber to a magma head through conduits. A huge degassing rate is likely to be due to a large surface at the magma head, which would be made by a piston-cylinder type of collapse of the volcanic body.

Key words : Miyakejima , volcanic gas , SO₂ flux, adhered gas component , COSPEC

キーワード : 三宅島 , 火山ガス , SO₂ 放出量 , 付着ガス成分 , COSPEC

I . はじめに

2000年三宅島火山活動では、6月27日の海底噴火から始まり、7月8日に陥没し、7月9日に確認された山頂の陥没事件、そして、山頂における一連の小規模噴火と推移してきた。8月初旬までは、山頂火口内から火山ガスの放出はほとんどみられず、マグマ活動の推移を化学的につかむため、噴火時に放出された火山灰の可溶性付着成分の変化を観測した。8月中旬以降になって、陥没により生じた山頂火口内から噴煙が絶え間なく観測されはじめた。8月18日の噴火は、成層圏に噴煙が到達し、多くの噴石が島内に落下した。この噴火以降、山頂からの噴煙はその量的規模を増し、連続的になった。その後も噴火活動を続けるとともに、火山ガスの放出量は増加を続けた。

本論文では、火山ガスの組成を反映する火山灰の付着成分の繰り返し分析、および、COSPEC (相関スペクトロメータ: Resonance 社製) V型を用いた SO₂ 放出量の繰り返し観測結果について述べるとともに、それらの観測結果から推定されるマグマの脱ガス過程について考察を行う。なお、本論文は、現在進行中の三宅島火山活動における暫定的な速報の位置付けとし、未公表資料を多く含み、一部データは暫定値のまま公開する点に留意されたい。特に、COSPEC による SO₂ 放出量の観測値は、これまで前例がないほど高濃度の SO₂ を観測しており、キャリブレーションが完全ではない可能性がある。再解析が終了した時点で、改めて別稿にて報告する予定である。

II . 火山灰付着成分

一般に火山ガスの化学成分の組み合わせは、火山の活動度や温度に依存することが知られており (Saint-Claire Deville and Leblanc 1858 ; 田中館 , 1930 ; Iwasaki *et al.*, 1966) , 化学組成やその変化から揮発性成分がマグマから地表到達する間で起こる地下水との接触、地下でのイオウの生成やイオウからの二酸化硫黄や硫化水素の付加、有機堆積層の寄与の有無などの判断や火山活動の推移など多くの情報が得られる。また噴火に伴って放出される火山灰には火山ガス起源の塩化物イオンや硫酸イオンなどが付着しており、付着量は爆発発生場付近の液相の関与、火道の状態、噴火様式などを反映し、両成分の比 (Cl/S モル比) は噴火に関与した火山ガス組成を反映することが知られている (例えば、Hirabayashi *et al.*, 1982 ; 平林ほか , 1992) 。爆発の危険性や火山ガス噴出地点などの問題で直接火山ガスを採取することができない場合は、周辺に飛散した火山灰に付着する火山ガス成分を分析することによって噴火に関与した火山ガス組成比を推定することができ、火山灰の水溶性付着成分の測定は噴火様式や活動の推移を知る一種の遠隔観測法である。

三宅島の活動では、7月8日の陥没火口形成時に約16万トンの火山灰が放出され、その後も噴火時には数十万トンから数百万トンの火山灰が放出された。このうち多量の火山灰を放出したのは8

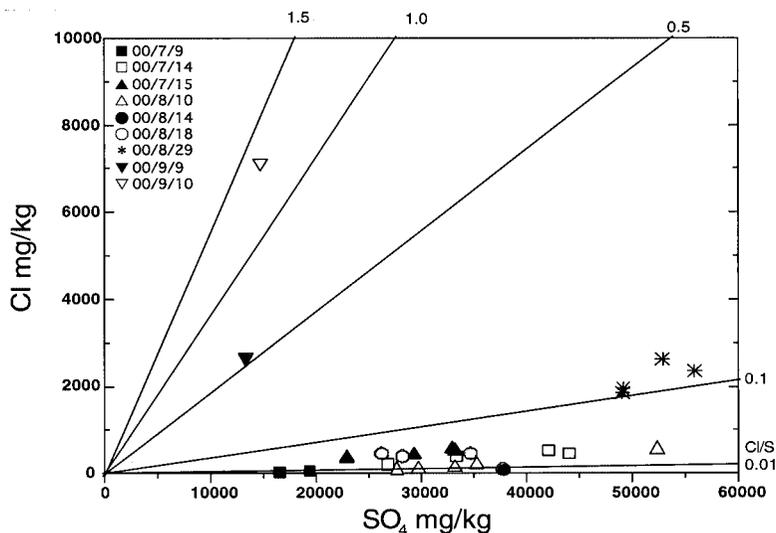


図 1 火山灰に付着した水溶性塩素イオンと硫酸イオンの量（平林ほか未公表資料）．実線は Cl/S モル比を示す．

Fig. 1 Adhered amounts of water-soluble chloride and sulfate ions on volcanic ashes from Miyakejima volcano. Solid lines show the Cl/S mole ratio (Hirabayashi, *et al.* unpublished data)

月 18 日と 29 日の噴火で、それぞれ 780 万トン、530 万トンの火山灰が放出された（火山灰放出量は、中田ほか未発表資料）。

火山灰に付着する火山ガス成分の分析に用いた試料は、いずれも噴火時あるいは噴火直後採取された降雨にさらされていない火山灰である。火山ガス成分の付着量は、火山灰約 1g を正確に秤取し、これに純水を約 50 ml 加え約 70 で一昼夜加温後、濾別して一定量としたのちイオンクロマトグラフ法で分析した。

7 月 8 日の陥没火口形成時に放出された火山灰に付着する塩化物イオンは 0.04 ~ 0.08 g/kg と少ないのに比べ、硫酸イオンは 16 ~ 19 g/kg と多量に付着していた。この傾向は 8 月 18 日までの噴火で放出された火山灰も同様で、この間の塩化物イオン付着量は 0.04 ~ 0.57 g/kg、硫酸イオン付着量は 16 ~ 52 g/kg である。また、Cl/S モル比は 0.01 ~ 0.05 と著しく小さい。しかし、8 月 29 日に放出された火山灰は、硫酸イオン付着量が 49 ~ 56 g/kg と大きく変わらないのに対して、塩化物イオンは 1.9 ~ 2.4g/kg と一桁多く付着しており、

Cl/S 比は 0.1 ~ 0.14 と大きくなった。このことは火山灰に付着する火山ガス成分が若干変化したことを示唆している。また、9 月 9 日以降の火山灰に付着する塩化物イオン量は 2.7 ~ 7.1 g/kg と増加した一方で、硫酸イオン付着量は 11 ~ 15 g/kg と減少し、Cl/S 比は 0.5 ~ 1.5 と著しく大きくなり、明らかに火山灰に付着する火山ガス組成が大きく変化したことを示している（図 1：平林ほか未公表資料）。

一般に、マグマ噴火で放出される火山灰には高温タイプの火山ガスが付着し、Cl/S 比は大きく、両成分の付着量が少ない。これに比べ水蒸気爆発で放出される火山灰には両成分の付着量は多く、成分比は小さい（例えば、松尾ほか、1977；Hirabayashi *et al.*, 1982；平林、1984；小坂ほか、1984；平林ほか、1992）ことが知られている。三宅島 2000 年噴火で放出された火山灰に付着する火山ガス成分および成分比の変化は、SO₂ の放出量の変化や地震活動の推移（気象庁資料）などを考慮すると、以下のように考えられる。

すなわち、8 月 18 日の噴火まではマグマから上

昇してきた火山ガスが爆発発生場付近より下でSO₂に較べて一桁溶解度の大きいHClの大部分が地下水等の液相に除去され、SO₂に富んだ火山ガスが爆発発生場より上部の液相に溶解移行して硫酸イオンを生成し、山体内に蓄積した。これが噴火で火山灰に付着して放出された。8月18日の噴火以降火口からのSO₂放出が徐々に顕著になり、また、地下で圧力が蓄積することがなくなったために地震活動が激減したことを考えれば、8月18日の噴火で地下の液相、特に爆発発生場より深い場所にある液相の影響が少なくなり、マグマと地表を結ぶ火山ガスの通路ができはじめといえる。このため8月29日噴火の火山灰には塩化物イオンの付着量が増えはじめた。その後、9月9日以降の噴火で放出された火山灰に付着する火山ガス組成がマグマから直接もたらされた高温タイプに変化したことや、SO₂放出量の増加などからも明らかかなように、9月中旬にはマグマと地表を結ぶ火山ガスの通路が確立され、地下の液相の影響がほとんどなくなったと考えられる。9月中旬以降のガス通路の確立は、9月中旬以降爆発が発生していないことや火口底の火山ガス噴出地点の温度が上昇したことなどからも支持される。

III. SO₂ 放出量

1) COSPEC 観測手法

SO₂ 放出量の観測には、COSPEC (Correlation Spectrometer) V 型 (Resonance 製) を用い、定点観測法とトラバース法の2種類の観測手法を用いた。COSPEC は、バックグラウンド (青空) の散乱紫外光を光源とし、SO₂ による 290-310 nm の波長域における吸収を利用して、SO₂ 濃度を測定する。COSPEC により、3 × 10° の視界内の光路上積算濃度が測定できる。COSPEC は、噴気活動のモニタリング手法として確立されており、各国の火山観測所において広く用いられている。Stoiber *et al.* (1986) が、世界の活火山から放出される SO₂ 放出量をまとめている。

定点観測法は、文字通り定点において、三脚に COSPEC を固定し、上空の噴煙を電動雲台などを用いてスキャンする方法である。噴煙のスキャン

は噴煙状況を見て行う。風になびいている場合は垂直スキャンし、そして、まっすぐ上に上昇している場合は噴煙を横切るように水平スキャンして、噴煙の断面の SO₂ 濃度を測定する。別の手法で求めた噴煙の移動速度と噴煙断面の SO₂ 濃度を用いて、SO₂ 放出量値を得ることができる。毎分 1 回ほどのスキャンが可能なので、SO₂ 放出量の連続観測に適しているが、最適な観測点の設置が必要なこと、および、背景に山々などがある場合は観測ができないなどの欠点がある。

一方、トラバース観測法は、COSPEC の集光筒を上に向けて、噴煙の下を自動車や航空機などでくぐることによりスキャンする方法である。ヘリコプターや航空機を用いた場合は、同時に風向・風速も測定できるので、大きな誤差のもととなる風速値が正確に測定できることから、放出量値の精度向上が見込まれる。観測に多額の経費がかかる難点があるが、この手法が世界のスタンダードとなっている。三宅島火山における観測は8月下旬に、定点観測法を用いて島内において観測を開始したが、9月1日以降は海上保安庁・自衛隊等の協力により、気象庁および地質調査所によってヘリコプターを用いたトラバース観測を行っている。

COSPEC 観測に付随する欠点としては、光源として自然のバックグラウンド紫外光を使うため、通常は十分に紫外光の強度が高い午前9時頃から午後3時頃までに観測が限られる点である。また、あまりに雲量が多い場合は、やはり紫外光の強度が弱くなり測定できない。さらに、三宅島の場合では噴煙そのものが巨大であるため、紫外光が噴煙を透過してこないという問題にも遭遇した。これは、観測原理からいって改善不能な問題である。三宅島火山からの SO₂ 放出量は、場合によっては過小評価している可能性があると思われる。

2) キャリブレーション

COSPEC を用いて SO₂ 濃度を測定する場合、既知の SO₂ 濃度のセルを用いてキャリブレーションを行っている。当初、SO₂ の線濃度 128 ppm と 426 ppm のセルを用いて観測を開始した。通常の火山ガス放出量観測でよく用いるセルである。

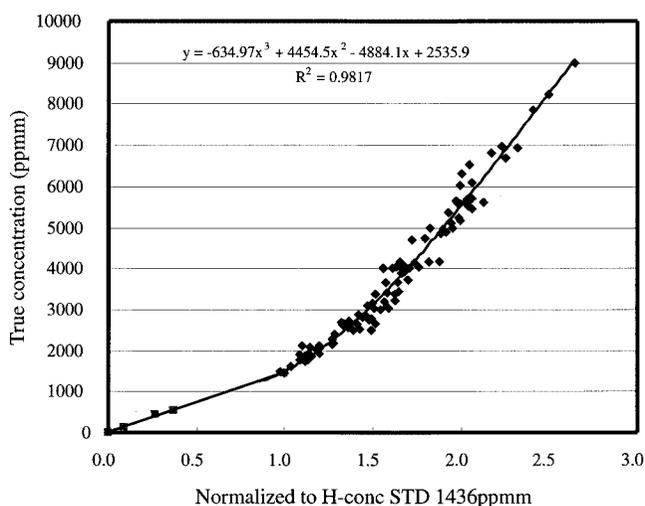


図 2 高濃度域における SO₂ 濃度のキャリブレーションカーブ (暫定値).

Fig. 2 Preliminary calibration curve for SO₂ concentration by COSPEC measurements at high concentration up to 9000 ppmm (Kazahaya *et al.*, unpublished data)

しかし、いざ観測を開始してみると、三宅島火山からの噴煙中の SO₂ 濃度はこれまで観測されたことのないほど、高濃度であることがわかった。9月中旬に標準セルを 526ppmm と 1436 ppmm の高濃度のものを用いるように変更した。しかし、三宅島の火山噴煙中の SO₂ 濃度は、1500 ppmm 以上になることが多かった。COSPEC は標準仕様では、SO₂ 濃度 1000 ppmm までしかサポートしていない。それ以上では、原理的にキャリブレーションの直線性がなくなるからである。我々 COSPEC 観測隊がチェックしたところ、実際には 1436 ppmm までは少なくとも直線性があることがわかった。しかし、標準セルはこれ以上の濃度のもがないため、観測で 1436 ppmm 以上の濃度を示した場合、実際、どの程度ずれているのかわからなかった。

10月初旬から、噴煙観測中に SO₂ シグナルが出てから標準セルをはさみ、高濃度域でどのような濃度値を示すのかを検討することによって、1436 ppmm 以上における直線性の検証を開始した。SO₂ 濃度が見かけ 2000 ppmm 以上になると、明らかに標準セルによるピークが小さくなることがわかった。これは、つまり見かけ濃度が 2000 ppmm

以上になると、実際の濃度と大きく食い違ってくることを示す。11月中旬までこのような実験を繰り返し、100 例ほどのデータを得た。そして、1436 ppmm 以上におけるキャリブレーションカーブを作成した(図 2)。高濃度になればなるほど見かけの濃度と大きくかけ離れていき、高濃度域では実際の SO₂ 濃度は見かけ濃度の実に 3 倍に達した。観測された SO₂ 濃度で最も高いものは 8000 ppmm に達した。

3) SO₂ 放出量の推移

2001年1月18日までの SO₂ 放出量の観測結果を図 3 に示す。図中には、参考のため、前述したキャリブレーションカーブを用いない場合についての結果も合わせて示した。三宅島で 8月26日に SO₂ の放出量観測を開始した当初は一日に数千トン規模であった。しかし、9月初旬までは完全なトラバース観測法は用いていないことから、噴煙の SO₂ 濃度を大幅に過小評価している可能性がある。9月中旬からは SO₂ 放出量は数万トン規模に達しており、その後、変動を伴いながら、三宅島は大量の SO₂ を放出し続けている。これまでで最大の火山ガス放出量を示したのは昨年 12月7日、実に日量 23 万トンに達した。図 3 からわかるように、

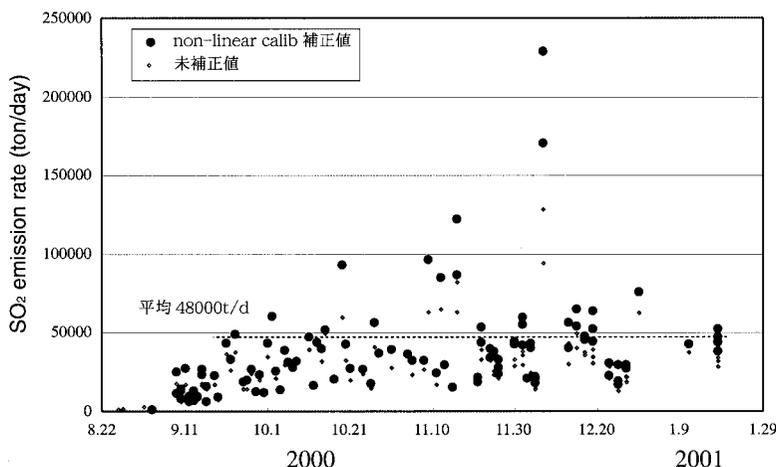


図 3 三宅島火山における COSPEC による SO₂ 放出量観測結果 (暫定値)。

Fig. 3 Time variation of SO₂ flux obtained by COSPEC at Miyakejima volcano (Kazahaya *et al.*, unpublished data)

SO₂ 放出量は一日の中でも大きく異なった値を示している。しかし、これは観測誤差ではなく、実際に大きな変動をしていると考えている。

9月中旬以降のSO₂放出量の平均値は日量48000トンである。最初に述べたが、これは世界でも例がないほど多量である。また、今のところSO₂放出量は減少する気配をみせていない。幸いにも、現在は北西の強い卓越風の影響により日本列島方面に火山ガスは来ていないが、今後も当面、大量のSO₂が放出され続けると考えて対処すべきである。2001年1月末現在でSO₂の放出総量は、約650万トンである。

15年前に噴火した伊豆大島では、1988年1月から1990年3月の約2年の期間で、28万トンのSO₂が放出された(表1)。したがって、今回の三宅島の活動では伊豆大島の活動時の20倍以上のSO₂をすでに放出していることになる。桜島では、現在も日量2000トン規模のSO₂が放出されているが、この活動が始まったのは今から46年前の1955年からである。これまでに放出されたSO₂の総量は、実に3300万トンに達する。イタリアのエトナ火山では、現在、日量約4000トンのSO₂放出が続いているが、この活動は少なくとも1000年間休みなく

続いていることがわかっている。SO₂の放出総量でみると15億トンになる。表1に示した事例からみれば、過去の経験則でガス放出活動の期間を類推することは不可能であるといえる。素過程に基づく脱ガス過程をモデル化し、検討していくことが不可欠である。

IV. 脱ガス過程

莫大な量のSO₂ガスが活火山から放出されているとわかってきたのは、最近30年のことである。COSPECによるSO₂放出量は1970年に初めて伊豆大島において行われた(大喜多・下鶴, 1975)。また、1980年からは人工衛星に搭載されたTOMSにより、火山噴火により成層圏に注入されたSO₂の量が観測されている(Bluth *et al.*, 1993)。SO₂の起源については、マグマ起源、熱水起源あるいは地殻内の硬石膏起源など様々な考え方が可能である。これまでも、活火山から放出されるSO₂はマグマの量に較べて過剰であることから、その起源あるいは過剰の原因は多くの火山化学者にとって重要な検討課題であった。

1991年のフィリピンのピナツボ火山の噴火では、一度に2000万トンのSO₂が成層圏に注入されたこ

表 1 非噴火時の定常的ガス放出における SO₂ およびマグマ起源の H₂O の放出量，脱ガスしたガス濃度および脱ガスマグマの量（風早・篠原，1996 を修正）

Table 1 Emission rates of SO₂ and magmatic H₂O, degassed concentrations and mass of degassed magma during quiescent degassing period (revised after Kazahaya and Shinohara, 1996)

Volcano	Degassing duration (y)	emission rate of SO ₂ or H ₂ O (t/d)	Degassed concentration of S or H ₂ O (wt%)	Production rate of degassed magma (Mt/d)*	Total mass of SO ₂ or H ₂ O emission (Mt)**	Total volume of degassed magma (km ³)**
Magma degassing estimated from SO ₂ basis						
Izu Oshima (1988 90)	2.2	350	0.027	0.65	0.28	0.26
Izu Oshima (1970 74)	3.8	430	0.027	0.87	0.6	
Sakurajima (1955 94+)	40	1000	0.048	1.0	15	6
Satsuma Iwojima(1994+)	> 1000	480	0.03	0.8	> 175	> 130
Usu (1978 1994+)	16	40	0.04	0.05	0.23	0.11
Stromboli (1994+)	> 5000	400	< 0.29	> 0.07	730	> 50
Etna (1994+)	> 1000	4000	0.3	0.67	> 1460	> 90
Magma degassing estimated from H ₂ O basis						
Izu Oshima (1988 90)	2.2	14000	1.0	1.4	11	0.4
Satsuma Iwojima(1994+)	> 1000	40000	3	0.5	>5100	>80

* Calculated by driving emission rates of SO₂ or H₂O with degassed concentration of S and H₂O.

** Calculated with degassing duration and production rate of degassed magma.

とが TOMS によりわかった(Bluth *et al.*, 1997)。このときは，マグマ中に含まれるメルトインクルージョンの SO₂ 濃度も低かったことから，SO₂ の起源に関して多くの研究が行われた。Gerlach *et al.* (1996) は，ピナツポ火山体内部にその存在が知られている地熱系の硫酸イオンが，SO₂ の起源になりうるかどうかの評価を行っている。熱力学的な検討の結果，SO₂ は通常の熱水条件下では硫酸イオンから発生せず，800 の高温化においても，その 99.9% は硫酸ナトリウムとして沈殿することを示した。Wallace and Gerlach (1994) は，メルトインクルージョンの H₂O および CO₂ 濃度からマグマ溜まりで飽和していると結論し，さらにメルトインクルージョンの SO₂ 濃度も用いて，気泡のガス組成および体積を推定した。ピナツポ噴火時に放出された過剰の SO₂ は，マグマ溜まり内に存在していた気泡中に含まれていたとしている。

Kazahaya *et al.* (1994) は，伊豆大島 1986 1990

活動において，非噴火時におけるマグマ起源の H₂O 放出量と SO₂ 放出量から，メルトインクルージョンの水と SO₂ 濃度を用いて脱ガスしたマグマの量を求めている。表 1 に示したように，伊豆大島および薩摩硫黄島において，マグマ起源の H₂O の放出量から求めた脱ガスマグマの量と SO₂ は放出量から求めたものはよく一致し，SO₂ がマグマ起源であることを示唆する。

三宅島 2000 年噴火に伴い大量放出されている火山ガスについては，直接，火山ガスの採取に成功していないことなどの制約から，SO₂ の起源に関し断定できない状況がある。しかしながら，SO₂ は熱水系から生成するのは非常に困難であり，仮に大量の anhydrite が地殻内に存在していたとしても，それを還元して大量の SO₂ を生成するには，下記の化学反応で示されるようにマグマ温度と還元剤 (FeO) がそれに見合うだけ必要である。



FeOは三宅島のマグマに約10%含まれているが、日量5万トンのSO₂を生成するには、11万トンの硬石膏が、毎日少なくとも120万トンのマグマに同化され、反応しなければならない。また、anhydriteをマグマに同化する過程にも現実には問題点が多くつきまとうため、モデル化は困難である。

今回の三宅島火山の脱ガス活動により放出されるSO₂がマグマ起源であるとした場合、マグマ中のSO₂濃度が約2500 ppm(かんらん石のメルトインクルージョンの分析値：斎藤、未公表)であることから、一日に50000トンのSO₂を放出させるに必要なマグマの量は2000万トンになる。脱ガス開始以来現在まで(2001年2月)に650万トンのSO₂が放出されているので、脱ガスしたマグマの総量は約30億トンあるいは約1 km³に達する。

現在、最も可能性の高い定常的な脱ガスモデルは、火道内マグマ対流によるマグマ溜まりの脱ガスモデルである(Kazahaya *et al.*, 1994)。このモデルは、マグマ起源の水が、その溶解度が非常に高いにもかかわらず、なぜ多くの火山から大量に放出されているのかについても、よく説明することができる。逆にこの過程が働かない場合は、非常に低圧(200気圧以下)な環境に一日数万トンの水を供給可能なマグマ溜まりが存在しないと説明できない。Stevenson and Blake(1998)は、Kazahaya *et al.*のモデルを実験的に検証している。そして、火道内マグマ対流の様式がマグマの粘性に依存することなどを示し、マグマ対流の理論を改良している。Stevenson and Blake(1998)の式を用いると、一日に2000万トンのマグマが対流するのに必要なマグマ火道の直径は9mである。直径1.6 kmの巨大な陥没火口を生成した三宅島火山において、実効値として9mのマグマ火道が存在すると考えることは非現実な話ではない。

では、9mよりも太いマグマ火道があれば、さらに高い放出量になるのであろうか？脱ガスの速度を決める要素のうち重要なものとして、マグマ対流を生じるための必要条件としての火道径と気泡がマグマから分離される速度のふたつがある。気泡がマグマから分離される過程が律速段階にな

る可能性が示唆されている(Shinohara *et al.*, 1995; 風早・篠原, 1996)。この過程は、マグマヘッドの表面積が大きいほど速くなる。すなわち、今回、巨大な火口がピストンシリンダー型の陥没により生じたことにより、大きな表面積をもつマグマヘッドが地下浅所に誕生したと考えれば、世界でも例がないほど大量に放出される火山ガスの量が説明できる。この場合、マグマ火道は必要条件として直径9m以上のものが存在していればよい。

この火道内マグマ対流による脱ガスは、地下深部のマグマ溜まりが脱ガスし終えるまで、あるいは、マグマ火道が別の原因により閉じられるまで続くと考えられる。したがって、三宅島のガス放出がいつまで続くのかについては、マグマ溜まりの大きさを知ることが重要になる。

V. ま と め

火山灰付着ガス成分の繰り返し分析およびCOSPECによるSO₂放出量の継続的観測結果から2000年三宅島火山噴火活動の推移は以下のようにまとめられる。

1) 2000年7月8日の最初の山頂火口陥没時の小噴火から8月18日の規模の大きな噴火までの間に採取された火山灰に含まれる付着ガス成分は、硫酸イオンが非常に多く、塩化物イオンが少ない傾向にあった。Cl/Sモル比は0.01~0.05と著しく小さい。これは、活動初期には地下水が大量に存在していたため、火山ガスのうちHClの大部分が選択的に地下水等の液相に除去された結果であると考えられる。

2) 8月18日の噴火により、マグマと地表を結ぶ火山ガスの通路ができはじめたため、それ以降の噴火の火山灰には塩化物イオンの付着量が増えはじめた。その後、9月9日以降の噴火で放出された火山灰に付着する火山ガス組成がマグマから直接もたらされた高温タイプに変化したことや、SO₂放出量の増加などから、9月中旬にはマグマと地表を結ぶ火山ガスの通路が確立され、地下水の影響がほとんどなくなったと考えられる。

3) 8月中旬から火山ガスは連続的に放出されるようになり、9月中旬以降は、世界にも例がない

ほど大量の SO₂ が放出されるようになった。2001 年 2 月現在までの一日の平均放出量は 48000 トンに達している。マグマ中の SO₂ 濃度などの分析値から、大量の SO₂ を放出させるに必要なマグマの量は日量 2000 万トンになる。脱ガス開始以来現在まで(2001 年 2 月)に 650 万トンの SO₂ が放出されているので、脱ガスしたマグマの総量は約 30 億トンあるいは約 1 km³ に達する。

4) 大量の SO₂ を放出させる過程として、大量の未脱ガスのマグマが火道を通して浅所に運ばれ、脱ガスにより密度を増し深部のマグマ溜まりに戻っている「火道内マグマ対流による脱ガス過程」が有力である。この火道内マグマ対流による脱ガスは、地下深部のマグマ溜まりが脱ガスし終るまで、あるいはマグマ火道が別の原因により閉じられるまで続くと考えられる。

謝 辞

ヘリコプターを用いた COSPEC による SO₂ の放出量観測は、気象庁火山課をはじめ、海上保安庁および防衛庁の協力なしには実行不可能であった。ここに記して、深く謝意を表します。

文 献

Bluth, G.J.S., Schnetzer, C.C., Kreuger, A.J. and Walter, L.S. (1993): The contribution of explosive volcanism to global atmospheric sulphur dioxide concentrations. *Nature*, 366, 327-329.

Bluth, G.J.S., Rose, W.I., Sprod, I.E. and Krueger, A.J. (1997): Stratospheric loading of sulfur from explosive volcanic eruptions. *J. Geol.*, 105, 671-683.

Gerlach, T.M., Westrich, H.R. and Symonds, R.B. (1996): Preeruption vapor in magma of the climactic Mount Pinatubo eruption: Source of the giant stratospheric sulfur dioxide cloud. In Newhall, C.G. and R.S. Punongbayan, R.S. eds.: *Fire and mud*. Univ. Washington Press, Seattle and London, 415-434.

平林順一(1984): 火山ガスの成分変化と火山活動. 東京工業大学学位論文, 185p.

Hirabayashi, J., Oosaka, J. and Ozawa, T. (1982):

Relationship between volcanic activity and chemical composition of volcanic gases. A case study on the Sakurajima volcano. *Geochem. J.*, 16, 11-21.

平林順一・大場 武・吉田 稔・野上健治・小坂文予・野津憲治・鍵山恒臣(1992): 雲仙岳火山活動と地球化学的観測. 雲仙岳溶岩流出の予知に関する観測研究報告書(代表太田一也), 99-111.

Iwasaki, I., Ozawa, T., Yoshida, M., Katsura, T., Iwasaki, B. and Kamada, M. (1966): Differentiation of magmatic emanation. *Bull. Tokyo Inst. Tech.*, 74, 1-57.

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. and Saito, G. (1994): Excessive degassing of Izu-Oshima volcano: Magma convection in a conduit. *Bull. Volcanol.*, 56, 207-216.

松尾禎士・日下部 実・千葉 仁・牛木久雄・小坂文予・平林順一・安孫子 勤・野津憲治・小沢竹二郎・荒牧重雄・佐藤和郎・林 保・佐藤 純・藤井直之(1977): 1977 年有珠山噴火直後の地下水, 温泉水および火山灰の地球化学的研究. 火山, 22, 201-220.

大喜多敏一・下鶴大輔(1975): 火山ガスのリモートセンシング 火山から放出される SO₂ の測定. 火山, 19, 151-157.

小坂文予・平林順一・小沢竹二郎(1984): 草津白根火山近年の活動と地球化学的調査・研究. 「火山ガス測定による噴火予測に関する基礎研究」科学研究費報告書(代表小坂文予), 96-112.

Saint-Claire Deville, C. and Leblanc, F. (1858): La composition chimique des gaz. *Ann. Chem. Phys.*, 3rd Ser., 52, 5-63.

Shinohara, H., Kazahaya, K. and Lowenstern, J.B. (1995): Volatile transport in a convecting magma column: Implications for porphyry Mo deposits formation. *Geology*, 23, 1091-1094.

Stevenson, D.S. and Blake, S. (1998): Modelling the dynamics and thermodynamics of volcanic degassing. *Bull. Volcanol.*, 60, 307-317.

Stoiber, R.E., Williams, S.N. and Huebert, B.J. (1986): Annual contribution of sulfur dioxide to the atmosphere by volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 33, 1-8.

田中館秀三(1930): 火山熱の利用(その一). 地震 2, 4, 7-13.

Wallace, P.J. and Gerlach, T.M. (1994): Magmatic vapor source for SO₂ released during volcanic eruptions: Evidence from Mount Pinatubo. *Science*, 265, 497-499.

(2001 年 1 月 31 日受付 2001 年 2 月 19 日受理)