

## 三宅島 2000 年噴火: 噴出物中のガラス包有物組成の特徴と SO<sub>2</sub> 大量放出の要因

安田 敦\*・中田節也・藤井敏嗣  
東京大学地震研究所

## Composition of Melt Inclusions from 2000 Miyakejima Eruption and Implications for Vigorous SO<sub>2</sub> Emission

Atsushi Yasuda\*, Setsuya Nakada and Toshitsugu Fujii  
Earthquake Research Institute, University of Tokyo

### Abstract

Major-element, Cl, S analyses have been performed with electron microprobe on melt inclusions trapped in phenocryst plagioclase from Miyakejima volcano. Samples were collected from three different volcanic events to characterize their source magma; (1) submarine eruption on June 27, 2000, (2) summit eruption on August 18, 2000, (3) lateral fissure eruption in 1983. Chemical variation observed in melt inclusions from the summit eruption on August 18 can be explained by post-entrapment crystallization of host-plagioclase, and no evidence is recognized on the occurrence of magma-mixing. On the other hand, element concentrations of melt inclusions derived from the submarine eruption and the 1983 eruption suggest a common source having a supply signature of less-evolved magma into a differentiated magma. Among the three volcanic events, no significant difference in S concentration was observed. Sulfur concentrations in the melt inclusions vary more than 40%, possibly reflecting pre-entrapment degassing during the ascent of magma from a deeper magma chamber to a shallower one. These observations imply that both insufficient absorption of volcanic gas into groundwater and injection of voluminous volatile-saturated magma into the shallow magma chamber cause the current significant SO<sub>2</sub> emission.

**Key words:** Miyakejima volcano, melt inclusions, sulfur, source composition

### 1. はじめに

2000 年 6 月 26 日夕刻に山体直下の地震活動から始まった三宅島の火山活動は、震源の西方への移動とともに翌 27 日朝の島の西方海底で発生した小噴火を経て終息に向かったと思われた。しかし、7 月 4 日から再び島内での地震活動が活発化するとともに、7 月 8 日からは山頂部での水蒸気爆発とその噴出量の規模を遥かに越える巨大な陥没カルデラの形成が始まり、火山活動は新たな展開をみせた。陥没の進行は 8 月 18 日には噴煙高度が 10 km を越えるマグマ水蒸気噴火が山頂で発生したのを期に一段落をするが、8 月下旬からは日量数千から

数万トンもの SO<sub>2</sub> ガスの大量放出が始まった(中田・他, 2001)。1 年を経過した 2001 年 9 月現在、若干の放出量の低下は見られるものの今なお大量の SO<sub>2</sub> ガスの放出は継続しており、これまでに観測されたことのない事態が進行中である。

今回の三宅島 2000 年噴火の噴出物については、噴出物の特徴の経時変化や過去の三宅島火山活動の噴出物との比較研究がなされており、6 月 27 日の海底噴火噴出物と 8 月 18 日の山頂噴火噴出物では異なったマグマ系が噴火に関与している可能性が高いことなどがすでに指摘されている(中川・他, 2001)。また、SO<sub>2</sub> ガスの大量放

\*e-mail: yasuda@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

出の要因についても幾つかの考えが提出されている（風早・他，2001，中田・他，2001）が，議論に必要なデータがまだ十分ではなく，結論を得るには到っていない。

本稿では，噴出物の結晶中に閉じこめられたガラス包有物の組成分析結果を中心にして， $\text{SO}_2$  ガスの大量放出の原因を考察する。火道を上昇する際の結晶化や脱ガスの影響を受けるため噴出物の石基部分が噴火前のマグマの組成を代表しないのに対して，斑晶中に保持されたガラス包有物は，斑晶に捕らわれた時点のマグマの組成を比較的良く保持していると考えられ，マグマ溜まりの化学組成を推定する有力な材料となりうる（e.g., Roedder, 1984）。2000 年三宅島火山噴火の場合，斜長石斑晶中には多くのガラス包有物が含まれている。また，過去の噴火噴出物中の斜長石斑晶にもガラス包有物が含まれていることが多く，ガラス包有物の示す過去の噴火のマグマ溜まりとの比較を行いつつ，今回の噴火の特徴を明らかにするのに都合がよい。そこで，2000 年 6 月 27 日の海底噴火噴出物，2000 年 8 月 18 日の山頂噴火噴出物，1983 年山腹噴火噴出物の 3 つから採取した斑晶中のガラス包有物について，主元素と硫黄，塩素の濃度を電子線マイクロプローブ（EPMA）で分析した。

## 2. 分析方法

2000 年 6 月 27 日の海底噴火由来のスコリア（0627A），8 月 18 日の山頂噴火から得られた火山礫と火山灰（0818APa），1983 年の山腹噴火のスコリア（M83SA）の 3 種類を分析試料とした。これらの試料の鉱物構成や岩相についてはすでに報告を行っている（安田・他，2001）。タングステン乳鉢で試料を粗く粉碎したものの中から 1~2 mm の大きさを持つ斜長石斑晶のみをスライドガラスにマウントした。ガラス包有物の形状やガラス包有物内の気泡と微結晶の有無，石基との連結を光学顕微鏡で観察することによってガラス包有物の特徴をまず把握し，その後，試料を鏡面研磨して電子顕微鏡による観察および EPMA による組成分析を行った。斜長石の累帯構造におけるガラス包有物の位置が明瞭となるように，石基と平衡な組成の結晶リムを保持した斜長石結晶片についてのみ分析しており，その数は 6 月 27 日の試料は 29 個，8 月 18 日の試料は 17 個，1983 年の試料は 13 個である。各斑晶について数点から十数点のガラス包有物分析を行うとともに，周囲の斜長石組成の定量も行った。石基との連結があるガラス包有物や結晶化が見られるガラス包有物は分析から除外した。

電子線による観察と組成分析は東京大学地震研究所に設置されている走査型電子顕微鏡（JSM-5600LV）と

EPMA（JEOL-8800R）を用いた。EPMA による定量分析条件は，主元素である Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P と微量元素である S, Cl とともに加速電圧 15 kv，照射電流 12 nA，ビーム径 10  $\mu\text{m}$  である。

S は酸化還元状態によって分光ピーク位置が変化することが知られている（Carrol and Rutherford, 1988; Wallace and Carmichael, 1994）。今回の分析試料の場合，S 濃度が 500 ppm 以上のガラス包有物では  $\Delta\text{NNO} = +0.2 \sim 0.5$  程度の酸化還元状態であることがわかったので（安田・他，2001），濃度標準試料（ $\text{SrSO}_4$ ）のピーク位置から算出した  $\Delta\text{NNO} = 0.4$  の位置を分析試料におけるピーク測定位置とし，ピーク位置で 120 秒，バックグラウンドは +側 -側でそれぞれ 60 秒の測定を行った。Cl の分析は， $\text{NaCl}$  を濃度標準試料として，ピーク位置 60 秒，バックグラウンドは +側 -側でそれぞれ 30 秒の測定を行った。S と Cl を測定した場合でも，分析元素すべての測定にかかる時間は 5 分弱で，この時間内にビームダメージによるカウントの増減がないことを確認している。濃度計算は Bence and Albee 法（Bence and Albee, 1968）を用いた。

## 3. 結果と考察

### 3-1. ガラス包有物の形状・累帯内の位置と組成との関係

ガラス包有物は球状，俵型，平板状，脈状，不定形など様々なものが観察された。以下の議論では，ガラス包有物がすべて正の曲面におおわれている P-type（球状，俵型，封筒状）と一部が負の曲率を持つ N-type（脈状，不定形）という分類を用いる。ガラス包有物形成のモデル（Roedder, 1984）によれば，N-type のガラス包有物は時間の経過とともに P-type に変化すると考えられている。

試料の反射電子線像のいくつかを Fig. 1 に，ガラス包有物周辺の斜長石の組成を Fig. 2 に示す。0627A，0818APa，M83SA のいずれの斜長石斑晶も明確なリムをもち（An60-70），これは石基の微斜長石の組成と同じである。0818APa はその内側に An83-93 の 2 つの層をもつ。内側の層（Inner Layer: IL）は組成像からも明らかなようにかなり不均質で，An 値の低い部分に P-type あるいは N-type のガラス包有物を伴うことが多い。ガラス包有物は内側の層の An93 を越える領域にはほとんど観察されないが，まれに P-type のものが含まれることがある。外側の層（Outer Layer: OL）は斑晶によって組成は異なるけれども 1 つの斑晶内では比較的均一な An 値を持ち，IL に近い部分に P-type あるいは N-type のガ

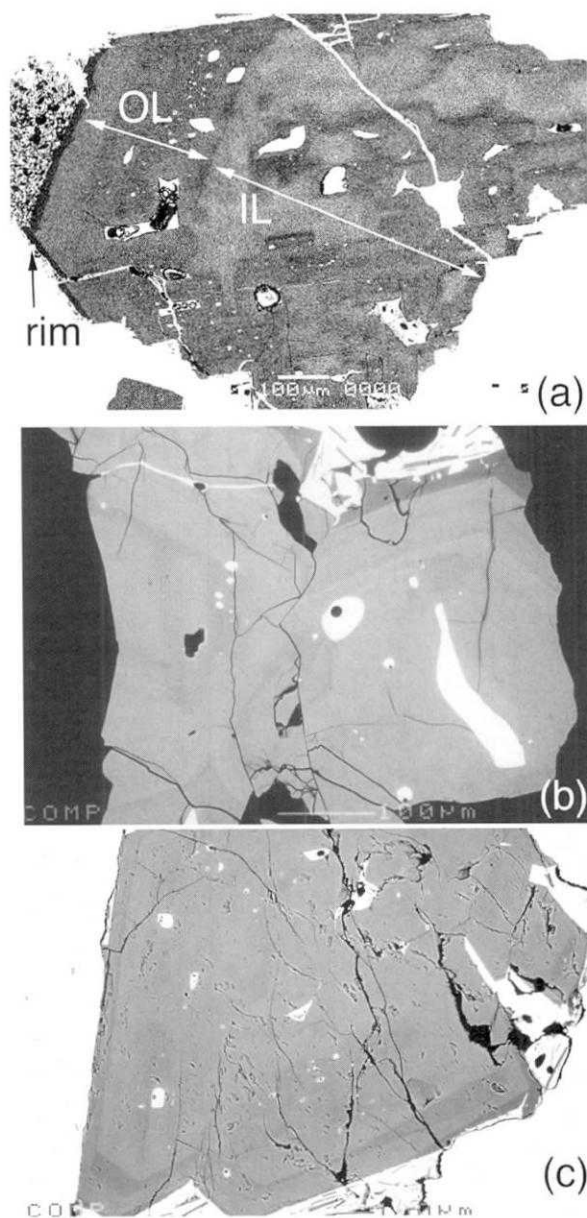


Fig. 1. Back-scattered electron images of melt inclusions in plagioclase. (a) 0818APa-45, (b) 0627A-c3, (c) M83SA-13.

ラス包有物を伴っている。リムに近い部分にガラス包有物はほとんど存在せず、準平衡状態で緩やかに結晶成長したと解釈できる。

0627A と M83SA も基本的には 0818APa と同様のガラス包有物の形状と斑晶内の分布を示すが、OL 部分がやや複雑で、逆累帯や複数の累帯構造が観察されるものがある。また、OL におけるガラス包有物近傍の斜長石の An 値にはやや低いものがある (An=80)。

次に形状・位置と組成との関係を見てみよう。0818APa についてガラス包有物の形状と斑晶内の位置につ

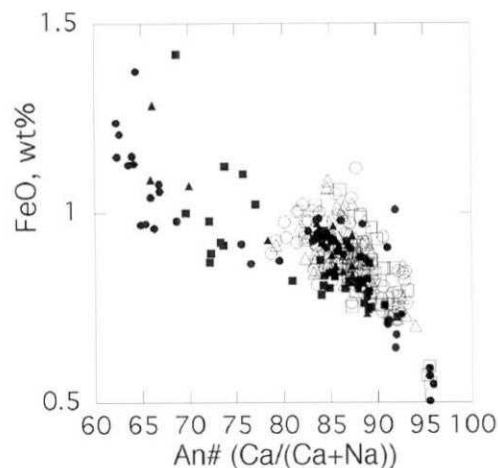


Fig. 2. Composition of host plagioclases. Open squares: adjacent to melt inclusions from 0818APa; open circles: adjacent to melt inclusions from 0627A; open triangles: adjacent to melt inclusions from M83SA; solid squares, solid circles, solid triangles are rim and non-adjacent parts of inclusions from 0818APa, 0627A, M83SA, respectively.

いて 4 つのグループ (OL/P-type, OL/N-type, IL/P-type, IL/N-type) に分けて組成の比較を行った結果を Fig. 3 に示す。それぞれのグループ内でのばらつきが大きく、4 グループ間に明瞭な組成差は見られない。1 つの斑晶内で OL/P-type, OL/N-type, IL/N-type が観察される試料 (0818APa-45) についても位置や形状による組成差は観察されない。このことは、斑晶組成の均質性の点からは IL と OL の 2 つの層に区分されたが、ガラス包有物の捕獲という観点からは一続きの事象によって IL と OL の 2 つの層が形成されたことを示唆している。

0627A と M83SA も 0818APa と同様に P-type と N-type という形状の差異による組成差はみられない。だが、0818APa よりも組成の変化幅は明らかに大きく、2 つの領域に分かれているように見える (Fig. 4)。OL に位置するガラス包有物は分化した組成のものしかみつからない。比較的小さなガラス包有物が多く、EPMA の分析点数が少ないためこの事象が有意かどうかはわからないが、未分化マグマが分化マグマと混合する際に斜長石の小さな結晶がいくつも合体して大きな斑晶となり、その後に分化マグマに組成が近い混合マグマ内で結晶成長を継続して、その際に OL 層の形成とガラス包有物の取り込みが行われたと考えれば説明がつく。

### 3-2. 8 月 18 日噴出物組成

ガラス包有物における MgO の組成変化幅は 30% 程度あるが、MgO の増加に伴って Cl や TiO<sub>2</sub> が同じ割合で増加するような組成分布が観察される (Fig. 3 (a),

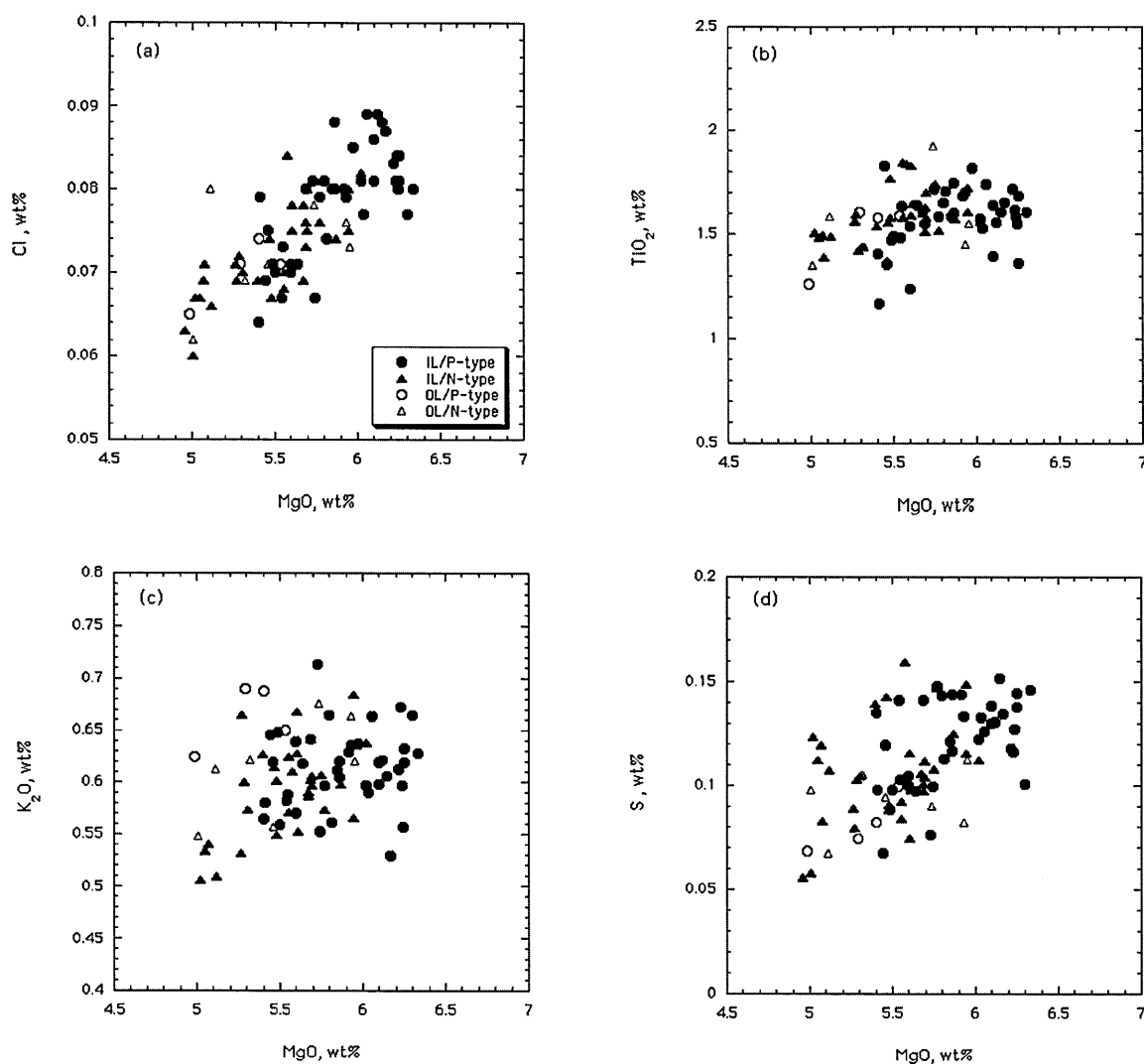


Fig. 3. Variation of the composition of melt inclusions from 0818APa.

(b)). ガラス包有物組成分布の軸線の延長上に斜長石組成が一致することから (Fig. 5), この組成の変化は, ガラス包有物として斜長石に捕獲された後, あるいは捕獲と同時進行的にホストの斜長石の壁部分が成長した効果であると考えられる.

次に全岩組成とガラス包有物組成の関係を見てみよう. Fig. 5 には 8 月 18 日噴火において島内 6 箇所から採取された 3 cm 大の火山礫の全岩組成, 歴史時代の噴火 (1535 年~1983 年) で得られた無斑晶岩石の全岩組成, ガラス包有物組成, ホスト斜長石組成を示している. 8 月 18 日噴出物の全岩分析値は過去の無斑晶質噴出物がなすトレンドとは隔たっており, 斜長石成分に富む組成をしている. また, 実際に 8 月 18 日の火山礫の鉱物のモード分析を行っても, 15~20% の斜長石斑晶が含まれていることが明らかになっている. この斜長石斑晶の由

来については, (1) マグマから結晶化したもの, (2) マグマが上昇経路で捕獲したもの, という 2 つの可能性がありえる. だが, (a) 斑晶中に捕獲されたガラス包有物組成が全岩分析値から斜長石斑晶組成の差し引いた側に分布していること, (b) ガラス包有物を持つ層の外側に緩やかな成長の特徴を持つ OL 層があり, さらにその外側に石基組成のリムが存在すること, の 2 つの理由から, 仮に斜長石の捕獲があったにせよ, それは浅部マグマ溜まり, あるいはそれ以深である. 深部マグマ溜まりから浅部マグマ溜まりへの上昇中に結晶の合体と成長がおきてガラス包有物の大部分の取り込みが起こり, その後, 浅部マグマ溜まりでの成長をへて形成された斑晶だと考えるのが妥当であろう.

8 月 18 日噴出物は, 島内 6 箇所から採取された試料の全岩組成にほとんど差がみられない. 何れも斑晶量は 15~

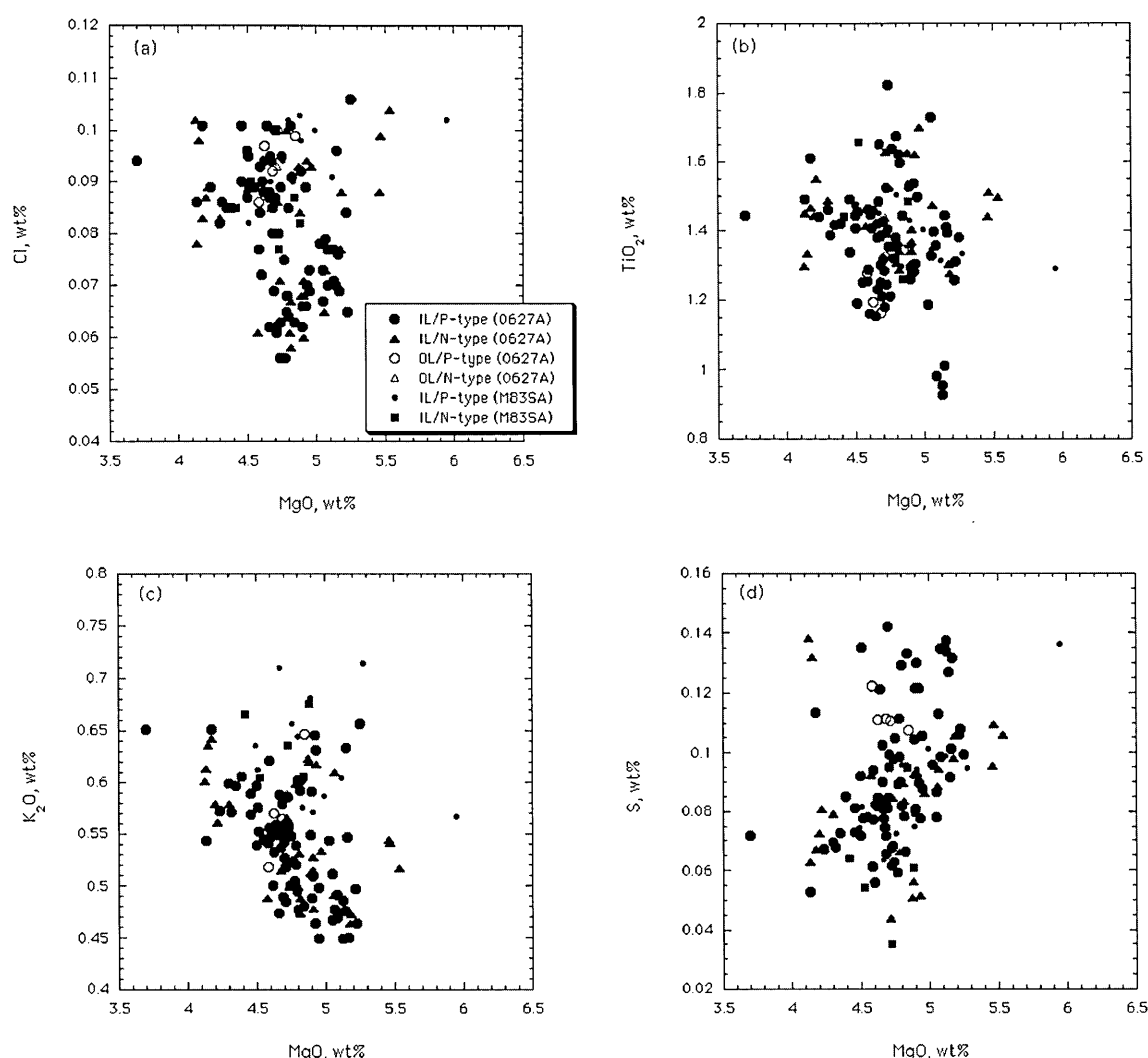


Fig. 4. Variation of the composition of melt inclusions from 0627A and M83SA.

20%で、そのほとんどは斜長石であり、若干量のかんらん石と単斜輝石の斑晶を伴う。斜長石斑晶を多く含む噴出物としては1940年の噴出物が知られているが、1940年の噴出物の場合は斜長石斑晶と共存するかんらん石斑晶の特徴から深成岩からの捕獲結晶であることが示されている(宮坂・中川, 1998)。一方、前述のように、8月18日噴出物の場合は、ガラス包有物組成の分析から、斜長石斑晶の大部分が捕獲結晶ではなくマグマから晶出したものであることが示唆されている。

8月18日噴出物のような岩石の成因としては2つの可能性が考えられる。一つは、全岩組成が示すようなAlやCa成分に富んだマグマが実際に存在して多量の斜長石を結晶化した可能性であり、もう一つは、マグマの移動や停滞の過程で結晶の選択的移動が起こり、マグマの噴出した部分に斜長石結晶が濃集していた可能性であ

る。

前者について考えてみよう。8月18日噴出物のような組成では、低圧下かつ低含水量の場合に斜長石がリキダス相として出現することが知られている(Fig. 6 (a))。だが、齊藤・他(2001)は斜長石ガラス包有物の含水量の測定からマグマの含水量を1.2~1.4 wt%という値を報告しており、さらに、斜長石斑晶の大部分を占める高いAn組成(An83-93)の斜長石を得るにはマグマ中に相当量(1.5 wt%程度以上)の水が含まれていることが必要とされるので(Fig. 6 (b))、果たして高An組成の斜長石をリキダス相として出現させるような条件が存在するか不明である。また、三宅島火山の歴史時代の噴出物とは異なったAlやCa成分に富んだマグマがどのような条件下で作られるのかを明らかにする必要もある。

次に、二番目の可能性(斜長石結晶の濃集)について

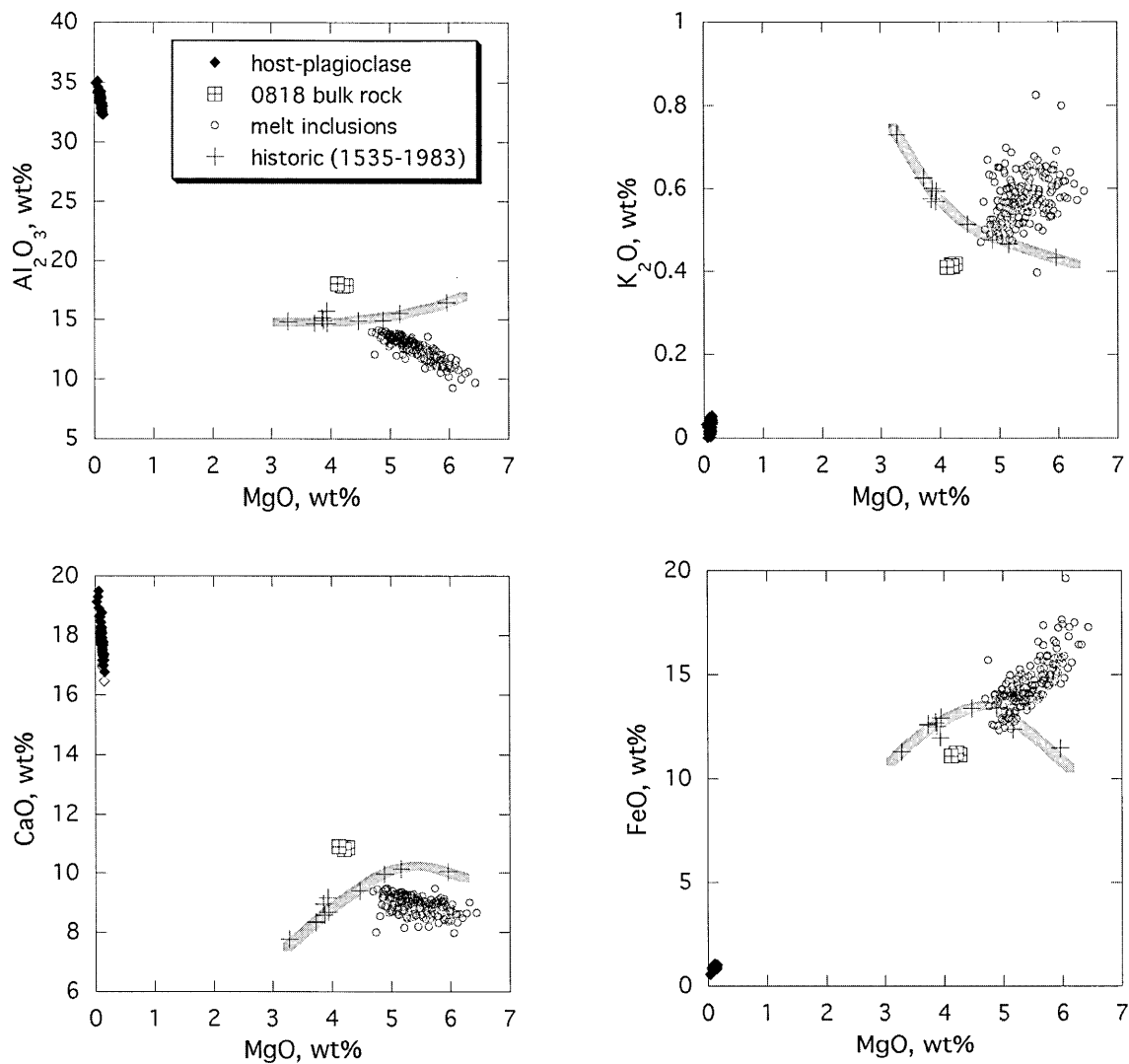


Fig. 5. Variation of the composition of melt inclusions are compared to bulk-rock composition. Thick curve represents phenocrysts is also shown. (a) 0818APa, (b) 0627A and M83SA.

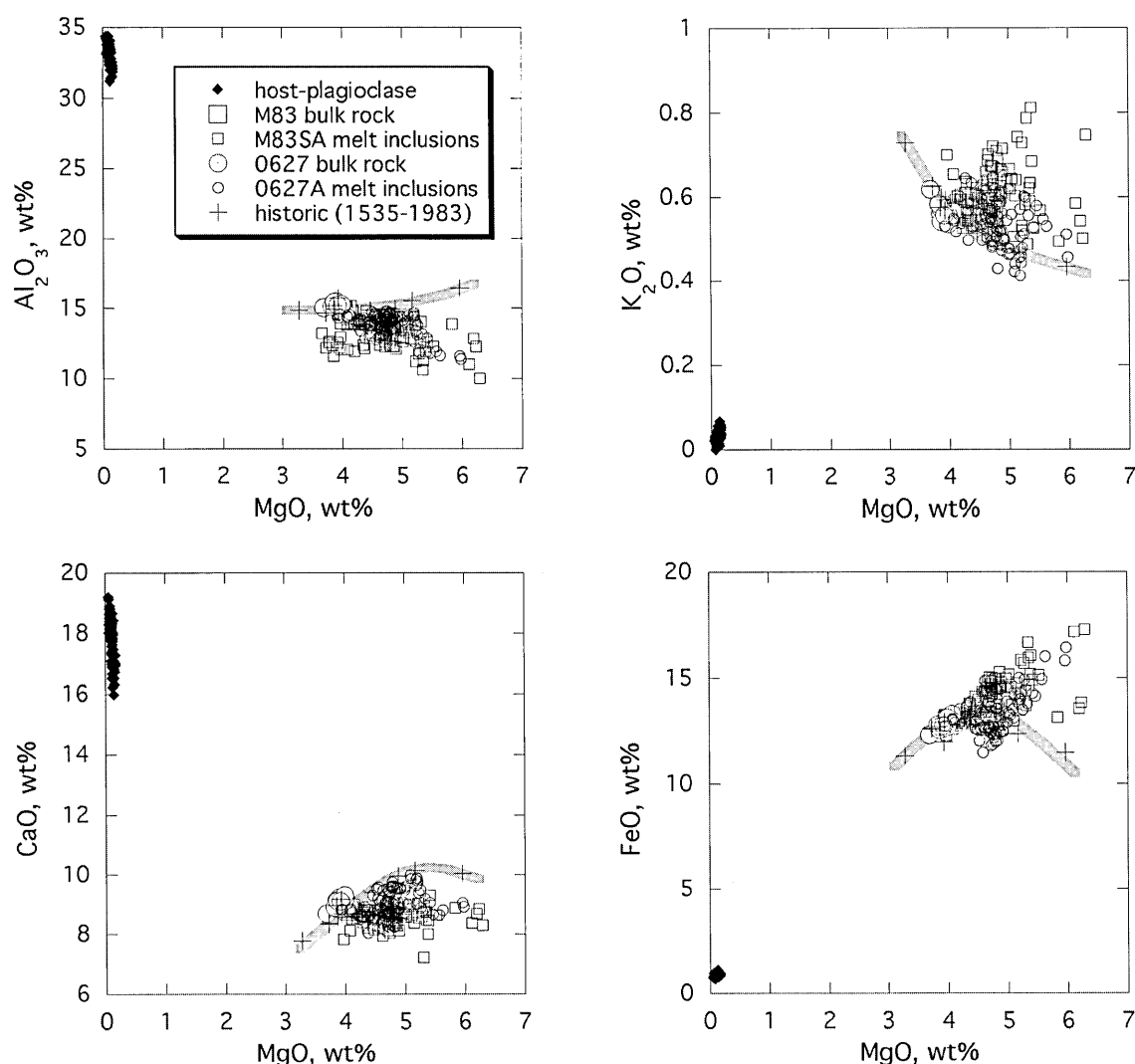
見てみよう。この考えの場合、マグマの組成自体は三宅島の歴史時代に活動してきたマグマと同じで良い。また、斜長石結晶はマグマ自身に予想される密度（2600～2700 kg/m<sup>3</sup>）に比較的近い密度を持つので、系の条件（圧力、含水量、組成）によっては、斜長石のみがマグマ溜まりの最上部に浮上して濃集することが起こりうる事が知られている。さらに、もし斜長石斑晶がガラス包有物を捕獲した段階でマグマが揮発性成分に飽和していれば、斑晶が気泡を捕獲して見かけ密度を低下させるので、浮上が起きる可能性がより高まる。実際、6月27日の噴出物では、マグマ溜まりでの結晶成長中に結晶と気泡とが共存していたものと解釈できるOL層部分を切るような気泡痕を持つ試料が得られており（Fig. 7）、類似した斜長石斑晶組成を有することから斑晶形成時のマグ

マの揮発性成分量や圧力環境が同様であったと示唆されている8月18日噴出物についても、気泡捕獲による斜長石の見かけ密度変化が起きた可能性がある。

現時点では斜長石結晶の濃集というモデルの方がもっともらしく思われるが、いずれにせよ、マグマ中の揮発性成分濃度の決定や斜長石固-液分配などの情報を用いた定量的な検討を、今後行っていくが必要であろう。浅部マグマ溜まりの温度・圧力環境や、マグマからの脱ガスメカニズムを決定する上で、8月18日噴出物の成因を明らかにすることはきわめて重要な課題となっている。

### 3-3. 6月27日および1983年噴出物組成

Fig. 5 (b) に示されているように大きな組成幅を持つ。これは8月18日噴出物に見られたような結晶壁の成長と、マグマの混合の2つを原因としていると考えら



the variation trend for the historic volcanic products of the Miyakejima volcano. Composition of host plagioclase

れる。Fig. 8 に組成変化の模式図を示す。まず、分化程度の低いマグマ 1 と分化マグマ 2 が混合している時に斜長石斑晶の形成が行われ、斜線領域の様々な組成のガラス包有物が捕獲される。その後、ガラス包有物を取りまく斜長石壁での結晶成長によって結果として組成変化がおり、マグマの混合線から遠ざかる方向に広がりを持つようになったと解釈するとともにもらしい。

### 3-4. 塩素濃度

0818APa の場合、分析試料中の Cl 濃度は 600~900 ppm であった。だが試料中の MgO 量の変動が上述のように斜長石の壁成長の影響とみなし、MgO=4.7 wt% を初期濃度と考えて濃度補正を行うと (安田・他, 2001) 補正後の濃度 Cl\* は 570~710 ppm となる。

一方 0627A と M83SA の場合は MgO-Cl 図で見た場

合に、Cl=600~800 ppm と 800~1100 ppm の 2 つの分布集団を示すようみえる。前者のグループは斜長石壁成長の影響の補正を行えば、0818APa の補正後の塩素濃度とほぼ一致する。後者のグループは補正後の濃度においても Cl\*=750~950 ppm と有意に高い。

三宅島の過去の火山噴出物の塩素濃度については平林・他 (1984) にまとめられている。それによれば、1983 年の溶岩が 600~840 ppm と比較的高い塩素濃度を示すのに対して、1940 年や 1962 年の溶岩は地表での脱ガスの影響の少ないであろう試料でも 510~670 ppm と低い塩素濃度を示す。火山活動の時期により塩素濃度が明確に異なるということは、塩素濃度は噴火に関与したマグマの特徴を示すのに有効な指標といえよう。したがって、0627A と M83SA でガラス包有物に塩素濃度の異な

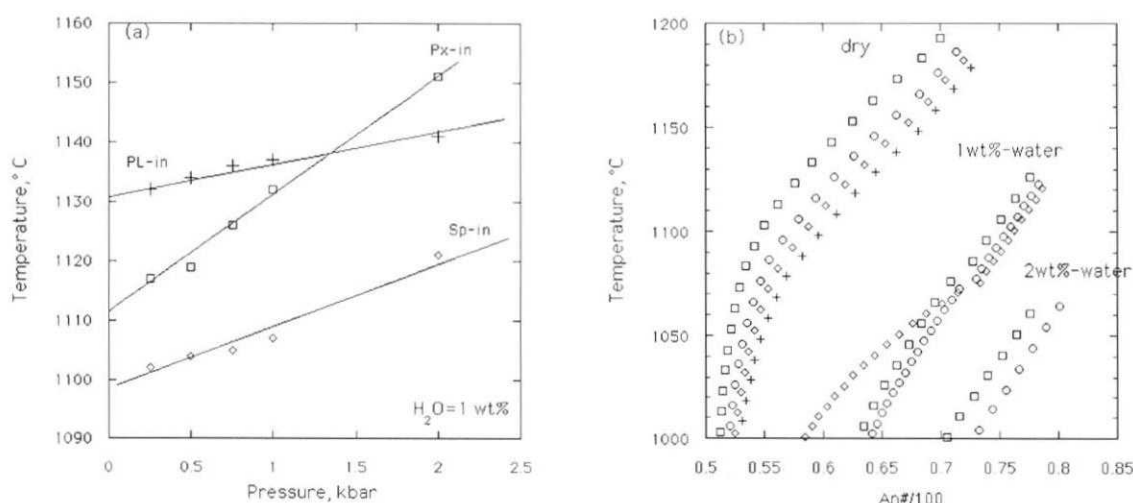


Fig. 6. Calculated phase diagram using MELTS (ver. 2.0.4, Ghiorso and Sack, 1995). (a) Melting phase relations of hydrous basalt ( $H_2O=1.0$  wt%). (b) Compositional variation of plagioclase with changing of dissolved water content. Cross: 1atm; diamond: 0.5 kbar; open circle: 1 kbar; square: 2 kbar.

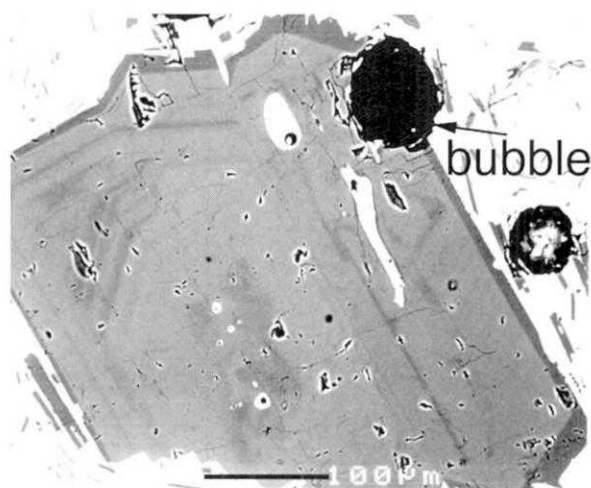


Fig. 7. Back-scattered electron image of a phenocryst plagioclase found in ejecta of submarine eruption on June 27. Crystal growth (arrow) seems to occur in a bubble-bearing condition.

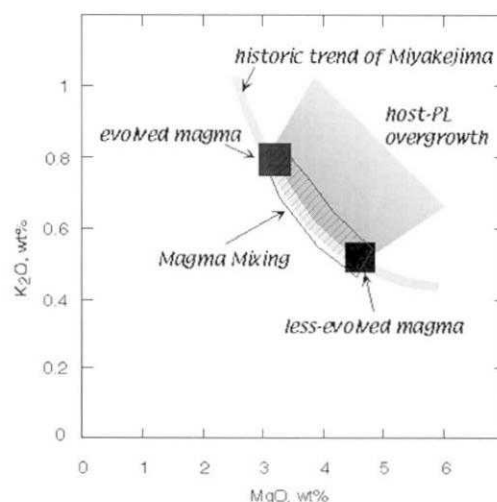


Fig. 8. Schematic drawing of the cause of compositional variation found in melt inclusions.

る2つのグループが存在することは、宮坂・中川(1998)に示されたマグマの混合、おそらくは、塩素濃度の高い浅部マグマ溜まりへ塩素濃度の低い深部マグマ溜まりからマグマが注入された結果であろう。

一方、0818APaの場合、塩素濃度の低い深部マグマ溜まりの特徴をそのまま保持しているものと考えられる。

### 3-5. 硫黄濃度

Fig. 3とFig. 4に示したように他の元素の変動幅と比較してSの濃度変化は大きい。これまでの主元素やClについての分析から、ガラス包有物は三宅島の歴史時

代噴出物の全岩トレンド上のマグマ組成を取り込んだ後、斜長石の結晶化の影響を受けて濃度変化をしたというモデルが成立することが確認できた。そこで、このモデルに立脚してSの濃度について検討を行おう。まず、ホスト斜長石の結晶化ではともに非調和元素である $K_2O/MgO$ 比は変化しないことを利用して、試料に観察された組成と歴史時代噴出物の全岩トレンドの隔たりから結晶化率を計算する。次に、この値を用いて測定S濃度を補正し、ガラス包有物の取り込み時におけるS濃度( $S^*$ )を算出する(安田・他, 2001)。



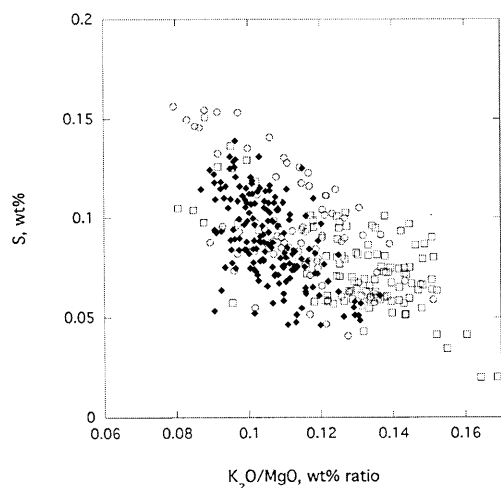


Fig. 9. S\* (wt%) and K<sub>2</sub>O/MgO (wt% ratio) of melt inclusions corrected for post-entrapment crystallization of host plagioclase. Open circle: 0627A; solid diamond: 0818APa; open square: M83SA.

結果を Fig. 9 に示す。K<sub>2</sub>O/MgO 比はマグマ溜まりの進化の指標と考えられる。三宅島の歴史時代噴出物の全岩トレンドの場合、最も未分化な試料の場合で K<sub>2</sub>O/MgO (wt%) 比が 0.07, 分化した試料で 0.17 程度の値を示す。また、6 月 27 日噴出物と 8 月 18 日噴出物の全岩分析の平均値ではそれぞれ 0.14 と 0.10 であった。

Fig. 9 で注目すべき点が 3 つある。1 つは一定の K<sub>2</sub>O/MgO 比においても S\* 濃度について 5 割程度の変動があるということである。これはガラス包有物捕獲時にすでにマグマ中に S 濃度の不均質が存在していたことをうかがわせる。噴火時の温度・圧力変化等の影響でガラス包有物捕獲後に脱ガスして S 濃度が大きく変化したということもありえるが、光学観察によってガラス包有物内の気泡体積分率がほぼ一定とわかっている IL/P-type のガラス包有物だけを選んで S 濃度の大きな変動が観察されており、この可能性は低い。マグマ混合をせず K<sub>2</sub>O/MgO 比の幅が小さい 0818APa の試料においても、S の変動が観察されることから、深部マグマたまりから浅部マグマ溜まりへのマグマ上昇の際にこの特徴は獲得されたものと思われる。

2 番目の点は、K<sub>2</sub>O/MgO 比の増加に伴って S\* の最高値が減少しているということである。これはマグマ溜まりに溶存可能な S 量が K<sub>2</sub>O/MgO 比の変化に伴って減少していることを意味する。マグマ中への S の溶解度については様々な支配因子 (組成, 酸素雰囲気, 温度, 圧力) があり (Katsura and Nagashima, 1974; Carroll and Rutherford, 1987; Haughton *et al.*, 1974), S 減少の原因はまだ特定できていない。だが、分析試料中に硫

化鉱物や硫酸塩鉱物は観察されていないこと、ガラス包有物がやや酸化的な酸素雰囲気を示すことから、S の変動は S の酸化物の脱ガスの形で行われたと考えられるのもっともらしい。

3 番目の注目点は、0818APa, 0627A, M83SA の間で、最高値を示す S\* 濃度について大きな差がみられないということである。これは深部から供給されたマグマ中の S 濃度が 1983 年の噴火と今回の噴火で違いがないということを示している。

### 3-6. SO<sub>2</sub> の大量放出の要因

大量の SO<sub>2</sub> ガス放出の原因は何であろうか? これまで、供給面からは (1) S を大量に含むマグマが上昇, (2) マグマ中に溶解している S をほとんど放出するような効率のよい脱ガス, (3) 大量のマグマからの S の部分的脱ガス, (4) 硫酸塩あるいは硫化物堆積物の分解による SO<sub>2</sub> ガスの放出, が検討されて、ガス放出を阻害する面からは、(5) カルデラ形成による地下水系の変化, が指摘されている (風早・他 (2001), 中田・他 (2001), 宇都・他 (2001), 安田・他 (2001))。例えば、宇都・他 (2001) や風早・他 (2001) では、ハワイで観測された S の脱ガス (例えば, Gerlach, 1986) に基づき、地下数百 m より浅い部分にまで拡張した火道内でのマグマ対流によって効率的な S の脱ガスが起こっているというモデルを提出している。

では今回の分析からどんなことが言えるだろうか。塩素濃度に顕著に見られたように、6 月 27 日の噴出物が分化程度の高いマグマと分化程度の低いマグマが混合したような特徴を示すのに対し、8 月 18 日の噴出物は分化程度が低いマグマの特徴しか示さない。6 月下旬に観測された震源の北西移動 (酒井・他, 2001) や重力測定結果から推測されるマグマの水平移動 (古屋・他, 2001) と上記のマグマの組成の差異を併せて考えると、深部マグマ溜まりから浅部マグマ溜まりへのマグマの注入がきっかけとなって 6 月 27 日の海底噴火が発生し、その後、浅部マグマ溜まりのマグマが北西に伸張したダイクに移動したあとの空間に、分化程度の低いマグマが上昇してきて、その一部が 8 月 18 日の噴火につながったと解釈できる。

次に、最も高い S 濃度を示すものについて 0627a, 0818APa, M83SA には大きな差が見られなかったことから、深部マグマ溜まりから浅部マグマ溜まりに注入されるマグマ中の初期 S 濃度には少なくとも 1983 年以来変化がないものと思われる。このことによって、2000 年噴火において大量に S を含むマグマが上昇したという可能性 (1) は否定される。

3 番目に、深部マグマ溜まりから浅部マグマ溜まりへのマグマの上昇に伴って 40~50% の S が脱ガスしている可能性が示された。上昇してきた分化程度が低いマグマの量は不明だが、観測されている  $\text{SO}_2$  ガスがマグマ由来であると仮定すれば、たとえ 100% の S が脱ガスしたとしてもこれまでに観測された  $\text{SO}_2$  放出量をまかなうためには  $1\text{km}^3$  をはるかに越える大量のマグマが必要である。マグマ溜まりの深度についても十分な制約を与えるに到っていないが、ガラス包有物の周囲の斜長石斑晶組成に関して 0627A, 0818APa, M83SA の 3 試料について差異が見られないことやガラス包有物の示す酸素雰囲気と同じである (安田・他, 2001) ことから、3 つの噴火について浅部マグマ溜まり深度に大きな違いがあったとは思えない。地震波の観測からは浅部マグマ溜まりの深度について、2~5 km という値が報告されている (酒井・他, 2001, 藤田・他, 2001)。このことは、マグマからの S の脱ガスが非常に浅い深度からしか起こらないというハワイでの観察事実 (Gerlach, 1986) と矛盾するように思われる。しかしながら、ハワイの場合マグマの含水量が 0.27 wt% と低く、ハワイの場合に水のマグマからの発泡・分離と併行して S の脱ガスが起こっていたことを考えると、含水量の多い三宅島のマグマの場合にはより深い深度から S の脱ガスが始まっていると考えることも可能である。また、S の溶解度は酸素雰囲気にも強く依存する (Katsura and Nagashima, 1974) ので、これらの点を考慮した定量的検討を進めていく必要がある。

4 番目は、S の地表での放出阻害因子の重要性である。1983 年の試料の観察から明らかなように、過去において供給されるマグマの S の初期含有量に大きな差はない。一方、三宅島の過去の火山活動では今回のような  $\text{SO}_2$  の大量放出は観察されていない。このことは、過去においては深部から分化程度の低いマグマの供給があっても、マグマ溜まりから放出された S は地下水系に吸収されて山体地下に固定されガスのまま地表に放出されなかったためと考えられる。実際、2000 年 7 月 8 日以来の噴出物には地下の熱水系の発達を示すと思われる粘土鉱物が含まれている。それとともに石膏などの硫酸塩鉱物も大量に観察されており、地下の熱水系で S 成分の固定があったことを示している (Appendix 参照)。一方、山頂からの  $\text{SO}_2$  ガスの放出が顕著になった 2000 年 9 月以降の火山灰試料からは粘土鉱物量は大きく減っており、カルデラの陥没によって地下水系が破壊されて S 成分の固定ができなくなったと考えられる。

本論では、山体内に過去の火山活動によって蓄積され

た硫酸塩あるいは硫化物堆積物の分解による  $\text{SO}_2$  ガスの放出の可能性についての評価は行っていない。観測されている  $\text{SO}_2$  放出量から上昇してきたマグマの総量を見積もって三宅島のマグマ供給系の具体像を得るためには、この評価を行うことがマグマからの  $\text{SO}_2$  脱ガス効率を調べるとともに重要であり、今後の課題となっている。

## 謝 辞

査読者 2 名からは、本原稿を改善するにあたっての有益なコメントをいただきました。深く感謝いたします。本研究の遂行にあたっては、科学研究費補助金 (基盤研究 A (12304033) 代表者: 中田節也, 基盤研究 B (12440146) 代表者: 藤井敏嗣) を使用しました。

## 引用文献

- Bence, A.E. and Albee, A.L., 1968, Empirical correction factors for electron microanalysis of silicates and oxides. *J. Geol.*, **76**, 382-403.
- Carroll, M.R. and Rutherford, M.J., 1987, The stability of igneous Anhydrite: experimental results and implications for sulfur behavior in the 1982 El Chichon trachy-andesite and other evolved magmas. *J. Petrol.*, **28**, 781-801.
- Carroll, M.R. and Rutherford, M.J., 1988, Sulfur speciation in hydrous experimental glasses of varying oxidation state: results from measured wavelength shifts of sulfur X-rays. *Am. Mineral.*, **73**, 845-849.
- 藤田英輔・鶴川元雄・山本英二・岡田義光・菊池昌江, 2001, 三宅島 2000 年噴火に伴う火山性地震・火山性微動, 地学雑誌, **110**, 191-203.
- 古屋正人・大久保修平・田中愛幸・孫 文科・渡辺秀文・及川純・前川徳光, 2001, 重力の時空間変化でとらえた三宅島 2000 年火山活動におけるカルデラ形成過程, 地学雑誌, **110**, 217-225.
- Gerlach, T.M., 1986, Exsolution of  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , and S during eruptive episodes at Kilauea volcano, Hawaii, *Jour. Geophys. Res.*, **91**, 12177-12185.
- Ghiorso, M.S., and Sack, R.O., 1995, Chemical mass transfer in magmatic processes. IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of Liquid-Solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **119**, 197-212.
- Haughton, D., Roeder, P.L. and Skinner, B.J., 1974, Solubility of sulfur in mafic magmas. *Econ. Geol.*, **69**, 451-467.
- 平林順一・小坂丈予・小沢竹二郎・吉田 稔, 1984, 1983 年三宅島噴火後の火山ガスの組成変化と火山昇華物, 火山, **29**, S308-318.
- Katsura, T. and Nagashima, S., 1974, Solubility of sulfur in some magmas at 1 atmosphere. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **38**, 517-531.
- 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 2000 年噴火における火山ガス-火山ガスの付着ガス成分および

- SO<sub>2</sub> 放出量から推測される脱ガス環境, 地学雑誌, **110**, 271-279.
- 宮坂瑞穂・中川光弘, 1998, 1940 年・1962 年噴出物の岩石学的研究から見た近年の伊豆諸島三宅島火山のマグマ供給系, 火山, **43**, 433-455.
- 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, 地学雑誌, **110**, 168-180.
- 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, 2001 年地球惑星関連合同大会予稿集, V0-023.
- Roedder, E., 1984, Fluid inclusions. *Rev. Mineral*, **12**, 644p.
- 酒井慎一・山田知朗・井出 哲・望月将志・塩原 肇・ト部卓・平田 直・篠原雅尚・金沢敏彦・西沢あづさ・藤江剛・三ヶ田 均, 2001, 地震活動からみた三宅島 2000 年噴火時のマグマの移動, 地学雑誌, **110**, 145-155.
- 齊藤元治・川辺禎久・宇都浩三・佐藤久夫・高田 亮・伊藤順一, 2001, 鉱物・ガラス包有物分析に基づく三宅島火山 2000 年 8 月 18 日噴火マグマの岩石学的特徴と揮発性成分濃度, 2001 年地球惑星関連合同大会予稿集, V0P-017.
- 宇都浩三・風早康平・齊藤元治・伊藤順一・高田 亮・川辺禎久・星住英夫・山本孝広・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—8 月 18 日噴出物および高濃度 SO<sub>2</sub> 火山ガスからの考察, 地学雑誌, **110**, 257-270.
- 安田 敦・中田節也・藤井敏嗣, 2001, 三宅島 2000 年噴火噴出物の melt inclusion に記録されたマグマの S 濃度と fO<sub>2</sub> 環境, 火山, **46**, 165-173.
- Wallace, P.J. and Carmichael, I.S.E., 1994, S speciation in submarine basaltic glasses as determined by measurements of SK<sub>a</sub> X-ray wavelength shifts. *Am. Mineral.*, **79**, 161-167.

(Received September 25, 2001)

(Accepted December 27, 2001)

## Appendix. 噴出物中の変質鉱物の経時変化

噴出物中の変質鉱物の種類や量の変化を調べるために、粉末 X 線回折分析を行った。分析試料は 2000 年 7 月 8 日から 9 月 12 日までと 2001 年 5 月 27 日の山頂噴火による火山灰である。110℃ で 2 時間乾燥した試料から 100 ミクロン以下の細粒部分のみを篩い分けしたものを分析試料とした。石膏などの水溶成分が失われるのを防ぐため、水篩による濃集処理は行っていない。火山豆石のように塊状の火山灰は、指で砕いてから篩いにかけた。Cu 管球-Ni フィルターの組み合わせで、40 kV・20 mA を印加し、 $2\theta=2$  度/1 min のスキャン速度で X 線回折線を得た。結果を Fig. A-1 に示す。

9 月以前の火山灰には、7 月 15 日の試料や 8 月 10 日の試料に明瞭にみられるように、スメクタイトやカオリンといった粘土鉱物がかなり含まれており、三宅島の地下に熱水系が発達していることをうかがわせる。また、石膏や焼石膏・硬石膏のピークも明瞭で、S が火山体地下で石膏鉱物の形で吸収・定着されていたことを示唆している。

一方、9 月以降の火山灰では粘土鉱物がほとんど見られなくなり、石膏量も減っている。

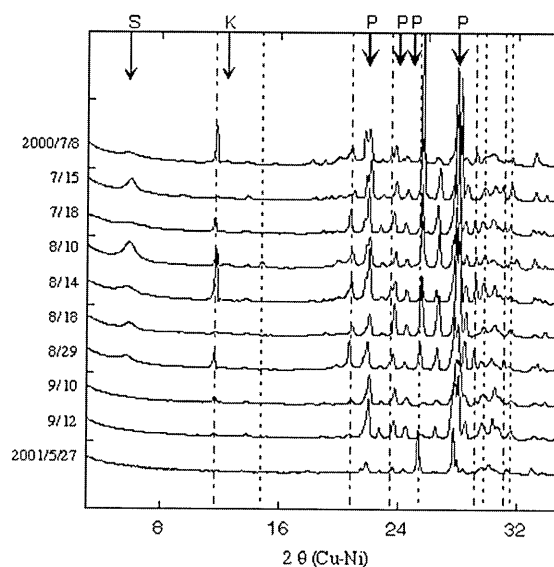


Fig. A-1. Label S represents the peak position of smectite, and labels K and P are kaolinite and plagioclase, respectively. Dot-dash lines and broken lines represent the peak position of Gypsum ( $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ) and Anhydrite+Bassanite ( $(\text{CaSO}_4, \text{CaSO}_4 + 0.5\text{H}_2\text{O})$ , respectively).