

桜島火山大正噴火の準備過程 —磁鉄鉱化学組成からの制約—

中村美千彦*・田村翔**・伊藤嘉紀*・奥村聡*
井口正人・味喜大介

* 東北大学大学院理学研究科

** 兵庫教育大学大学院学校教育研究科

要 旨

桜島火山大正噴火に至るマグマ溜まりの噴火準備過程を調べるため、軽石噴出物に含まれる磁鉄鉱斑晶および斜長石内の磁鉄鉱包有物の鉱物化学組成分析を行った。包有物は斑晶よりも、低温側により幅広い組成分布を示す。これは、マグマ溜まりの温度が苦鉄質マグマの段階的な注入によって徐々に上昇していたことを示唆する。また個々の磁鉄鉱斑晶は組成が均質で顕著な累帯構造を示さない一方で、斑晶間の組成のばらつきは累帯構造の組成幅よりも大きい。このように斑晶組成が均質だが不揃いであることは、噴火前のマグマ溜まりには温度や化学組成の不均質構造が存在して、それが噴火直前の数年間の時期には、先駆的な噴火やマグマの注入などで大規模に擾乱されることが無かったことを意味する。大正噴火軽石の磁鉄鉱斑晶は、結晶の稜部で僅かな溶解組織を示すことから、高温マグマの注入が引き金となり、ごく短時間で噴火に至った可能性を検討する必要がある。

キーワード：桜島火山，大正噴火，磁鉄鉱，マグマ混合，累帯構造，拡散

1. はじめに

桜島火山では継続的な山体の膨張が続いており、マグマの蓄積量が増大していることから、次期の本格的噴火活動に焦点を当てた研究の必要性が高まっている。歴史時代以降、桜島は少なくとも3回の大規模噴火（文明・安永・大正）を繰り返し発生しており（小林，1982），噴火メカニズムを理解するための天然の実験室として学術的にも希有のフィールドである。これまでの研究によって、桜島火山噴出物の化学組成は歴史時代の噴火の度にだんだん苦鉄質に変化していることが報告されている（柳，1991；Yanagi, 1991；宇都ら，2005）。さらに、噴出物にマグマ混合の記載岩石学的な証拠が見られることから、少なくとも大局的には、マグマ溜まりへの苦鉄質マグマの供給が続いていると考えられる。マグマ混合現象と火山噴火の開始条件との関係については、後述のようにこれまで多様なモデルが提案されている。我々はこれらの点を考慮し、上記3回の歴史時代噴火のうち直近の爆発的大規模噴火である大正噴火に

焦点をあてて、マグマ溜まりへの深部からのマグマの注入過程と噴火との関係について岩石学的な検討を行っている。本稿では、研究の背景について簡単にまとめたのち、途中経過を報告する。

2. 噴火開始条件とマグマ混合の役割

一般に大陸地殻上部では岩石の密度が低下し、マグマは密度中立の状態になってマグマ溜まりが形成される。噴火が開始するには、地表に向けてマグマがマグマ溜まりからさらに上昇を開始する何らかの仕組みが必要である。揮発性成分を多く含む島弧マグマの場合、圧力低下や、冷却による結晶化によってマグマが揮発性成分に飽和し、発泡を開始することに上昇の駆動力が求められる場合が多い。

2.1 マグマ混合の役割

噴火の開始条件に対するマグマ混合の役割については古くから研究が行われている。マグマ溜まりにマグマが注入されるとき、①珪長質なマグマに比較的

苦鉄質なマグマが注入される場合と、その逆に②苦鉄質なマグマに比較的珪長質なマグマが注入される場合の二通りがあり得る。これまでの研究の多くは①に関するものである。

苦鉄質マグマの注入が噴火を引き起こすメカニズムとしては、主に次の三つが提案されている。いずれのモデルでも、苦鉄質マグマは珪長質なマグマよりも密度が大きく、マグマ溜まりに注入されると、底部に溜まって成層マグマ溜まりを形成することが想定されている。(1) 高温の苦鉄質マグマが上部の低温の珪長質マグマによって冷却され、発泡して成層マグマ溜まりが密度逆転を起こした後に上昇を開始する (Huppert et al., 1982)。(2) 珪長質マグマが下部の苦鉄質マグマによって加熱され、熱対流を開始する。対流によってマグマ溜まり上部に運ばれたマグマが圧力の低下によって発泡し、上昇を開始する (Sparks et al., 1977)。(3) 低温の珪長質マグマが高結晶度であり、下部の苦鉄質マグマによって加熱されて融解度が上昇し、密度と粘性の低い混合マグマが形成されて上昇を開始する (Pallister et al., 1992; Takeuchi and Nakamura, 2001; Takeuchi, 2004)。一方、低密度の珪長質マグマが注入される②の場合、マグマは速やかにマグマ溜まりの上部まで上昇すると同時にマグマ溜まり内にあった高密度マグマは深部の火道にドレインバックして、マグマ溜まりが減圧し不安定化するモデルが考えられている (Eichelberger et al., 2000; de Silva et al., 2008)。

桜島火山のマグマ供給系では、単調に苦鉄質に向かってきた歴史時代のマグマ組成の変化傾向から単純に考えれば、これまではケース①が起こっていた可能性がある。しかし、噴火ダイナミクスに関しては、(1)~(3)のモデルにあるように、マグマの化学組成そのものよりも、密度の大小関係が重要となる点に注意が必要である。浅部地殻のマグマ溜まりに滞留する安山岩〜デイサイト質のマグマは、下部から注入される高温の玄武岩質マグマに比べてしばしば結晶量が多い。また近年、玄武岩質マグマは、かなり高濃度（数wt%以上）の水を含んでいるらしいことが明らかになりつつある（水はメルトの密度を効果的に引き下げる）。そのため、大正噴火以降の噴出物に見られるように、両端成分マグマの全岩組成が接近していて、珪長質側のマグマ溜まりの方が高結晶度になっている場合、新たに注入されたマグマの方が苦鉄質であっても、相対的には低密度となり、②で想定されているようなマグマの深部へのドレインバックやマグマ溜まりの不安定化が起こる可能性も考えられることは認識しておく必要がある。実際、北海道駒ヶ岳1929年プリニー式噴火では、全岩SiO₂量60%の安山岩質マグマに 53~55%の玄武

岩質安山岩質マグマが注入されたと考えられるが、厳密な密度評価によれば、両者の密度は誤差の範囲内で差がないことが示されている (Takeuchi and Nakamura, 2001)。

さて、マグマ溜まりにマグマが供給されても、直ちにマグマ混合が起こるとは限らない。特に、新たに入るマグマの方が高密度の場合、注入と同時にマグマ溜まりの底部に広がって成層構造を形成し、上層の低密度マグマとは大規模な機械的な混合を起こさないと考えられる。珪長質と苦鉄質のマグマがそれぞれ上・下に成層している密度成層マグマ溜まりでは、大規模なマグマ混合は噴火の際に火道内で初めて開始し、マグマが火道内を上昇する限られた時間内で終了することになる (Koyaguchi, 1985)。つまり、マグマ混合が噴出急冷前の短い時間で起こったとしても、マグマ溜まりへのマグマの注入が噴火の直前に起こった場合と、注入自体はそれより先行していて成層マグマ溜まりが事前に形成されており、そこから噴火する際に初めて火道内で混合した場合との両方の可能性があり得る。

2.2 桜島におけるマグマ混合

火山活動研究センターの観測によれば、1995年以来、始良カルデラ中央部の深さ11 kmに推定されるマグマ溜まりは継続的にほぼ一定の割合で膨張を続けている (井口ら, 2008)。また歴史時代噴出物の岩石化学的研究 (宇都ら, 2005)によれば、桜島火山のマグマは安永噴火以降、時間を追うごとに苦鉄質に向かっていく。これら二つの事実を最も単純に解釈すると、始良カルデラ下のマグマ溜まりには玄武岩質マグマが継続的に供給されていると推定することができる。現在観測されるマグマの供給と、過去の噴出物に見られるマグマ混合とはどのような関係にあるのかを明らかにすることは、本研究の最終的な目標の一つである。地球物理学的な観測と岩石学的手法による噴出物の研究とを対応づけるために、本研究では、元素拡散による組成の均質化が速い磁鉄鉱を用いて、時間スケールの入った情報を噴出物から引き出すというアプローチをとった。

3. 桜島火山の歴史時代噴火噴出物の記載岩石学的特徴と解析の方針

既に述べたように、桜島火山の文明・安永・大正および昭和の噴火の噴出物には、いずれもマグマ混合の記載岩石学的な特徴が見られる。Yanagi (1991)は、これらの噴出物の岩石学的研究を行い、マグマ混合が起こっていること、苦鉄質端成分マグマの混合比が時代とともに増加していることを示した。そ

の根拠は、(1) 全岩化学組成が SiO_2 変化図において直線のトレンドを形成し、文明、安永、大正、昭和の順に塩基性へ向かうこと (2) 斜長石斑晶組成がバイモダルな頻度分布を示し、かつアノーサイト成分の高い斑晶の割合が噴火の順に増加していること (3) 同様に斜方輝石組成もバイモダルな頻度分布を示し、エンスタタイト成分の高い斑晶の割合が噴火の順を追って増加していること (4) 斑晶鉱物に融食構造や逆累帯構造が認められること、などである。

斜長石の部分溶解組織や逆累帯構造は、斜長石固溶体を構成する $\text{NaSi}-\text{CaAl}$ ペアの格子拡散が非常に遅いため、一度形成されると数千年の時間スケールでは消えることはない。つまり、一度でもより高温で未分化なマグマとの混合を経験すれば、低温側のマグマに含まれていた斜長石斑晶にこのような組織が残ることになるし、一つの斑晶内に複数の逆累帯や部分溶解組織が見いだされれば、その結晶は複数の温度上昇イベントを経験したと考えられる。また輝石の累帯構造は主に Mg 値 ($\text{Mg} / \text{Mg} + \text{Fe}$ mol%) の不均質によって形成され、 $\text{Mg}-\text{Fe}$ 相互拡散の速さは、安山岩質マグマの温度では、ごく大雑把に言えば、数百年程度の時間スケールで均質化が進行する程度である (e.g., Tomiya and Takahashi, 2005)。これは、桜島の歴史時代の三回の大噴火の間隔に近いので、たとえば一つ前の大噴火時に混合を起こしたマグマの一部がマグマ溜まり内に残っていた場合には、適度に焼き鈍された逆累帯構造が見られる可能性がある。

本報告では、特に磁鉄鉱の化学組成に注目する。上記の珪酸塩鉱物内の元素拡散係数に比べて、磁鉄鉱内の $\text{Fe}^{2+}\text{Ti}-2\text{Fe}^{3+}$ の相互拡散係数 D (Freer and Hauptman, 1978) は大きいため、短時間で組成の均質化が進行することが特徴である。安山岩質マグマの温度では、100ミクロンの拡散距離 (Dt)^{1/2} を満たす時間スケール t は数ヶ月程度と計算される。従って、磁鉄鉱に累帯構造が記録されている場合には、そのマグマが噴出急冷する比較的直前に、マグマ混合などの温度やマグマ組成が急変するイベントがあったことを示している。逆に言えば、磁鉄鉱斑晶の累帯構造は、数十年程度あればほぼ完全に均質にリセットされる。マグマがゆっくりと分化してゆく場合には、顕著な正累帯構造は形成されずにマグマの化学組成や温度の変化に追従して行く。すなわち、磁鉄鉱の化学組成を調べることで、噴火前の数年間におけるマグマの物理化学的条件の変化を捉えることができる。

他の斑晶内に包有物として取り込まれた磁鉄鉱結晶では、内部の累帯構造は元素拡散によって消滅し

ても、外界との元素のやりとりは、メルトと接している場合に比べて事実上無視できるほど遅くなる (取り込まれるホストの結晶内の鉄やチタンの元素拡散に律速される)。従って、包有物磁鉄鉱の化学組成を分析すれば、そのマグマが過去にどのような物理化学的条件を経験してきたのか、またその幅はどれくらいかを知ることができる。磁鉄鉱は、幅広い組成・温度範囲のマグマに出現し、チタン鉄鉱と共存する場合には、両者の分配平衡から温度と酸素分圧を求めることができるのも便利である (e.g., Spencer and Lindsley, 1981)。

4. サンプリング地点と分析方法

試料採取は、以下の地点で行った。大正噴火の軽石は、小林 (1999) の地点 8 (湯平山麓、北緯 $31^{\circ}35'50''$ ・東経 $130^{\circ}37'50''$)、昭和溶岩は黒神地区の北緯 $31^{\circ}35'04''$ ・東経 $130^{\circ}40'55''$ 地点、安永溶岩は第一有村川西岸の北緯 $31^{\circ}33'14''$ ・東経 $130^{\circ}39'43''$ 地点、文明溶岩は宇土および持木地区の海岸沿い (それぞれ北緯 $31^{\circ}35'54''$ 、東経 $130^{\circ}42'34''$; 北緯 $31^{\circ}31'16''$ ・東経 $130^{\circ}37'34''$) である。

磁鉄鉱斑晶の組成分析および反射電子像撮影は、波長分散型EPMA (JEOL JXA-8800M) を用い、加速電圧15 kVで行った。定量点分析のプロンプ電流値は15 nA、カウント時間はピーク20秒・バックグラウンド10秒で、ZAF法により補正を行った。また線分析はステージスキャンにより、電流値20 nA, dwell time 300 msで行った。包有物磁鉄鉱の化学組成分析は、エネルギー分散型EPMA (JEOL JSM5410 & Oxford Link-ISIS) を用い、加速電圧15 kV, ビーム電流1nA, 実カウント時間100秒で行った。

5. 結果

5.1 磁鉄鉱斑晶の記載的特徴

大正軽石に含まれる典型的な磁鉄鉱斑晶の反射電子像とチタン濃度の線分析の結果をFig. 1に示す。磁鉄鉱斑晶は、しばしば結晶の稜部が僅かに溶解し、薄片・研磨面上では角が取れた形状を示す。これは大正軽石に含まれる磁鉄鉱に特徴的である。斑晶は大きさ100~200 μm 程度のものが多く、時に磁鉄鉱の包有物を含む。Fig. 1に見られるように、磁鉄鉱は石基に接している場合には溶解または分解反応を起こした組織を示す。

5.2 磁鉄鉱斑晶の化学組成と累帯構造

大正軽石の磁鉄鉱斑晶の化学組成は均質であり、Fig. 1(b) に示すように、顕著な累帯構造は見られな

い。磁鉄鈹斑晶の中心部と周縁部（結晶表面から約10 μm 内側）のウルボスピネル成分（Usp）をFig. 2に示す。大正軽石の磁鉄鈹斑晶の過半数はUsp値で0.005以下の範囲で均質であり、0.01を超える累帯構造を示すものは希である。その一方、斑晶中心部の化学組成自体は幅広く、Usp値0.356から0.373まで0.017のレンジを持つ。すなわち、個々の磁鉄鈹斑晶は均質だが、マグマ全体としては不均質であったことになる。このような傾向は、大正噴火噴出物に限らず、他の歴史時代噴火のマグマでも顕著に見られる。

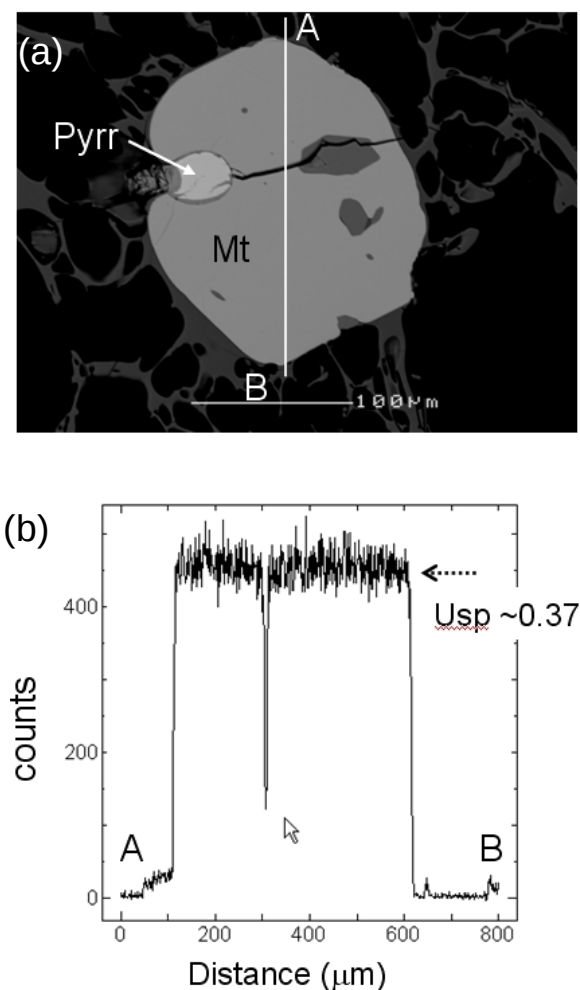


Fig. 1 (a) Backscattered electron image of representative magnetite phenocryst ("Mt") in the pumice of Taisho eruption. "Pyrr" represents pyrrhotite inclusion. (b) Line profile of the titanium $K\alpha$ X-ray count along the traverse A-B in (a). The magnetite phenocryst has a homogeneous Ti concentration corresponding to the ulvöspinel content (Usp) of 0.37. See text for the detailed analytical conditions.

Fig. 2には、昭和溶岩・安永溶岩・文明溶岩に含まれる磁鉄鈹斑晶組成を同時に示した。文明東側溶岩を除き、大正軽石を含む大部分のデータは1:1の直線上に乗り、Uspで0.015を超えるような顕著な組成累帯は希である。一方で、斑晶中心部の組成レンジは、昭和・安永・文明でそれぞれUsp 0.069, 0.090, 0.074に達する。

ここに示す中で唯一の例外は文明東側溶岩で、明確な累帯構造を示す磁鉄鈹斑晶が多く、結晶周縁部の方が中心部よりも最大で約0.06 Usp値が高い。これは噴火直前のマグマ混合による温度やメルトの化学組成の変化、または噴火時のマグマ上昇による圧力低下・含水量低下のいずれかに応答して、新しい平衡組成の磁鉄鈹が成長する時間的猶予があったことを示す。

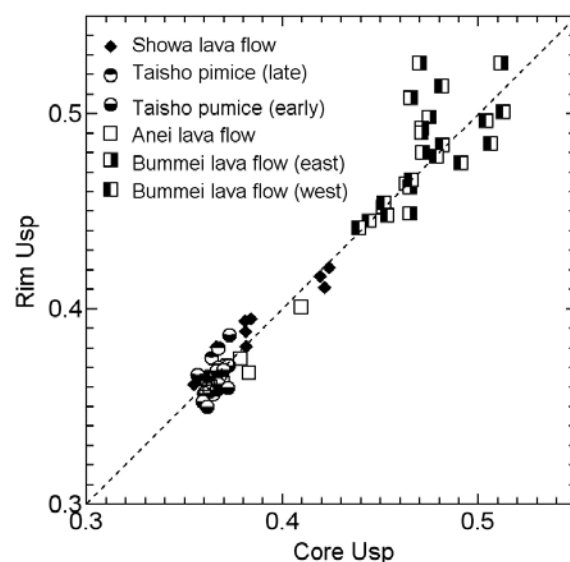


Fig. 2 Core and rim compositions of the magnetite phenocrysts in the pumices of Taisho eruption and lava flows of the three historical eruptions.

5.3 包有物磁鉄鈹の化学組成

他の斑晶に包有されてメルトとの接触が断たれた包有物は、その後のメルト組成や温度・圧力の変化によって化学組成が改変されにくい。磁鉄鈹の場合、斜長石のように磁鉄鈹の主要構成元素（Fe, Ti）を微量しか固溶しない鈹物に包有された包有物は特に、組成の改変を受けにくいと考えられる。そのため、包有物磁鉄鈹の組成は、噴火に至るまでの間にマグマ溜まりが経てきた物理化学的条件をスナップショットとして凍結していると見ることができる。Fig. 3には、大正軽石の斜長石斑晶に含まれる包有物磁鉄鈹のUsp値を、同時にEDS分析した斑晶中心部組成とともに示す。包有物磁鉄鈹は、Usp 0.30~0.47の組成幅を持ち、Fig.3およびFig.2に示した大正軽石の斑晶

よりも、有意に大きい。このことは、磁鉄鉱斑晶の組成が、その速い拡散速度によって最終的なマグマ溜まりの条件にほぼリセットされているのに対し、包有物の組成は、噴火に至るまでの間にマグマ溜まりが経てきた状態を記録していると考えられる。

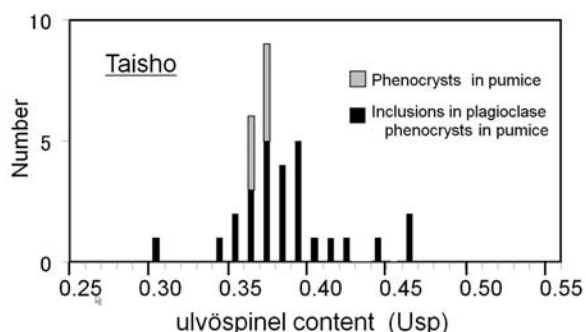


Fig. 3 Frequency distribution of the magnetite inclusions in plagioclase phenocrysts and core compositions of the magnetite phenocrysts in the Taisho pumices.

6. 考察

6.1 磁鉄鉱化学組成の温度依存性

磁鉄鉱斑晶は、チタン鉄鉱斑晶と共存する場合には、両者の交換分配平衡によってその固溶体組成が決定される。平衡定数は温度と酸素分圧の関数である。700～1000℃程度のマグマ温度で、酸素分圧と温度の関係がNi-NiO緩衝と同じ傾きを持つ場合、磁鉄鉱のウルボスピネル成分は、温度の上昇とともに僅かに増加し、その傾向は低温ほど大きい (Spencer and Lindsley, 1981)。しかし大正噴火のマグマのようにチタン鉄鉱と共存しない場合には、磁鉄鉱組成は温度と酸素分圧の他にメルトの化学組成にも依存し、分配係数は明らかになっていない。

Ghiorso and Sack (1991) のコンパイルによれば、安山岩～流紋岩質のマグマの酸素分圧は、温度が100℃上昇するごとに2～3 log units上昇する。Toplis and Corgne (2002) の実験結果を用いると、玄武岩質メルトと平衡にある磁鉄鉱組成は、一定温度 (1068℃) で酸素分圧が2～3 log units上昇すると、ウルボスピネル成分は0.45～0.8と大きく低下することがわかる。この低下幅は、チタン鉄鉱が存在する場合 (Spencer and Lindsley, 1981) よりも大きい。また、大正軽石よりも分化した組成を持つ安永溶岩の磁鉄鉱斑晶と比べても、Usp値は低下している。よって、大正噴火のマグマ条件では、磁鉄鉱のUsp値は、高温・苦鉄質になると低下する可能性が高い。より厳密で定量的な理解には、酸素分圧とともに、温度とメルト組成の効果を評価した分配実験が必要である。

6.2 マグマ溜まりへのマグマ注入と噴火開始条件

Fig. 3において、包有物磁鉄鉱は、斑晶磁鉄鉱よりも高いUsp側に広い組成分布を示す。5.1の考察をあてはめると、この結果は、噴火の準備過程の間に大正噴火のマグマ溜まりの温度が徐々に上昇していったこと、すなわち、高温・苦鉄質なマグマの注入が繰り返し起こっていたこと、しかしそれらの個々の注入は、噴火には直接は結びつかなかったことを示唆する。大正噴火が最終的にはマグマの注入によってトリガーされた可能性はあるが、噴火の発生には、過剰圧やマグマの揮発性成分量などの“注入される側のマグマ溜まりの条件”が整うことが必要であったと考えられる。

6.3 マグマ溜まりの不均質性

磁鉄鉱斑晶が均質でありながら、かつ個々の斑晶間に有意な組成差があることから、大正噴火では (昭和・安永・文明噴火も同様、ただし文明西側溶岩は冷却までに十分な時間があり、逆累帯構造が形成されていると考えられる)、マグマ溜まり内に、磁鉄鉱組成に反映される物理化学条件 (温度・化学組成・酸素分圧など) の不均質構造が形成されていたと推定される。このことは、大正噴火の準備過程で、繰り返し苦鉄質マグマの注入が起こっていたというモデルと調和的である。さらに、磁鉄鉱に累帯構造がほとんど存在していないということは、マグマ溜まりの大規模な攪拌など、全体の温度構造が乱されるような先駆的なイベントは、噴火前の数年間 (磁鉄鉱の拡散時間) には起こらなかったことを示す。それよりも十分に昔にそのようなイベントが発生したかどうかは、もし発生したとしても累帯構造が均質化してしまうため、判断できない。逆に、噴火時のマグマ注入のような、極めて短時間での擾乱は、磁鉄鉱の組成変化として記録されるのが間に合わず、結晶の単純溶解など、もっと高速な化学反応の組織から判断することになる。

6.4 噴火時のマグマ混合

Fig. 1(a) に示したように、大正軽石噴出物の磁鉄鉱斑晶の多くは、稜部が僅かに溶けて角の取れた外形をしていることが特徴である。磁鉄鉱の溶解速度は明らかになっていないが、メルト中の元素拡散が律速すると仮定すれば、溶解にかかった時間は数時間以下程度のごく短い時間と予想される。このことは、噴火の直前に、磁鉄鉱斑晶を含んでいたマグマが、より高温で未分化なマグマと混合を起こした可能性を示す。2.2に述べたように、これが噴火直前のマグマ溜まりへのマグマ注入によるものなのか、長

期間存在していた成層マグマ溜まりから噴火した際の火道内混合によるものかは、慎重に検討する必要がある。

ほぼ同時に高温で未分化なマグマとの混合があった可能性がある。

謝 辞

本研究は、平成20年度一般共同研究20G-07の一部として行ったものである。火山活動研究センターのスタッフおよび防災研究所担当事務の方々にはフィールド調査や事務手続きでお世話になった。また黒神町の奥山産業採石場の方々には、度重なる露頭調査にあたって便宜をはかっていただいた。ここに記して感謝申し上げる。

参考文献

6.5 苦鉄質マグマからのガス供給の可能性

大正軽石に含まれる磁鉄鉱は、メルトと接した部分では溶解や反応の組織を示し、最終的に噴出したマグマの中では非平衡であったと考えられる (Fig. 1(a))。Hattori (1993) は、1991年のピナツポ火山噴火の噴出物中に不安定化した硫化鉱物を発見して、浅部の珪長質なマグマ溜まりが、深部の苦鉄質マグマから供給されたSO₂に富むガスによって酸化された結論づけた (硫化鉱物は酸化的なマグマと非平衡)。また近年では、島弧火山のように、苦鉄質マグマが深部に存在することが多いマグマ供給系で、浅部のH₂Oに富むマグマが、CO₂に富んだガス (超臨界流体) のfluxing (flashing) を受けていると考えられる例が多く報告されるようになった (e.g., Blundy et al., 2010)。高温な苦鉄質マグマ起源のCO₂に富む流体は、同時にSO₂にも富んでいることが予想されるため、桜島のマグマ供給系においてもこのような流体の輸送が起こっているかどうか、検討を行う必要がある。高温で酸化的なマグマとの混合によっても、磁鉄鉱の不安定化は起こり得る。もしfluxingが起こったとすると、温度やメルト組成の大きな変化を伴わずに酸素分圧のみが上昇することになるので、磁鉄鉱組成の解釈にも影響を与える。

7. まとめ

桜島火山大正噴火の軽石に含まれる磁鉄鉱の化学組成を分析し、大正噴火に至るマグマ溜まりの準備過程について、以下の知見を得た。

1. 斜長石に含まれる包有物磁鉄鉱の組成幅は、斑晶よりも高Usp側に幅広い。このことから、マグマ溜まりは噴火に至るまでの期間に繰り返し高温・苦鉄質なマグマ溜まりの注入を受けたと考えられる。
2. 磁鉄鉱斑晶はほとんど累帯構造を示さず、一方個々の斑晶間には、一つの斑晶内の累帯構造よりも大きな幅の組成のばらつきが存在する。これはマグマ溜まりに温度とメルト組成の不均質構造が存在していて、それが噴火前の数年間には擾乱されることがないまま、噴火が開始したためと解釈される。このような、斑晶が均質だが不揃いである傾向は、昭和・安永・文明の各マグマにも見られる。
3. 磁鉄鉱斑晶は僅かに溶解しており、噴火と

- 井口正人・高山鐵朗・山崎友也・多田光宏・鈴木敦夫・植木貞人・太田雄策・中尾 茂 (2008) : GPS観測から明らかになった桜島のマグマ活動, 京都大学防災研究所年報, 第51号B, pp. 241-246.
- 宇都浩三・味喜大介・Nguyen, H.・周藤正史・福島大輔・石原和弘 (2005) : 桜島火山マグマ化学組成の時間変化, 京都大学防災研究所年報, 第48号B, pp. 341-347.
- 小林哲夫 (1982) : 桜島火山の地質—これまでの研究の成果と今後の課題, 火山, 第27巻, 4号, pp. 277-29.
- 小林哲夫 (1999) : 桜島火山, 高橋正樹・小林哲夫編: フィールドガイド日本の火山⑤, 九州の火山, 築地書館, pp. 104-121.
- 柳 哮 (1991) : 桜島火山のマグマ溜り系の構成と機能, 火山, 第36巻, 2号, pp. 311-317.
- Blundy, J., Cashman, K.V., Rust, A. and Witham, F. (2009): A case for CO₂-rich arc magmas, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 290, No. 3-4, pp. 289-301.
- de Silva, S., Salas, G. and Schubring, S. (2008): Triggering explosive eruptions—The case for silicic magma recharge at Huaynaputina, southern Peru, *Geology*, Vol. 36, No. 5, pp. 387-390.
- Eichelberger, J.C., Chertkoff, D.G., Dreher, S.T., and Nye, C.J. (2000): Magmas in collision: Rethinking chemical zonation in silicic magmas, *Geology*, Vol. 28, No. 7, pp. 603-606.
- Freer, R. and Hauptman, Z. (1978): An experimental study of magnetite-titanomagnetite interdiffusion. *Phys. Earth Planet. Inter.* Vol. 16, No. 3, pp. 223-231.
- Ghiorso, M.S. and Sack, R.O. (1991): Fe-Ti oxide geothermometry: thermodynamic formulation and the estimation of intensive variables in silicic magmas, *Contrib. Mineral. Petrol.*, Vol. 108, No. 4., pp. 485-510.

- Hattori, K. (1993): High-sulfur magma, a product of fluid discharge from underlying mafic magma: Evidence from Mount Pinatubo, Philippines, *Geology*, Vol. 21, No. 12, pp. 1083-1086.
- Huppert, H.E., Sparks, R.S.J. and Turner, J.S. (1982): Effects of volatiles on mixing in calc-alkaline magma systems, *Nature*, 297, No. 7280, pp. 554-557.
- Koyaguchi, T. (1985): Magma mixing in a conduit. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 25, No. 3-4, pp. 365-369.
- Pallister, J.S., Hoblitt, R.P., and Reyes, A.G. (1992): A basalt trigger for the 1991 eruptions of Pinatubo volcano? *Nature*, Vol. 356, No. 6368, pp. 426-428.
- Sparks, R.S.J., Sigurdsson, H. and Wilson, L. (1977): Magma mixing: a mechanism for triggering acid explosive eruptions, *Nature*, 267, No. pp. 315-318.
- Spencer, K.J. and Lindsley, D.H. (1981): A solution model for coexisting iron-titanium oxides, *Amer. Mineral.*, Volume 66, No. 11-12, pp. 1189-1201.
- Takeuchi, S. (2004): Precursory dike propagation control of viscous magma eruptions, *Geology*, Vol. 32, No. 11, pp.1001-1004.
- 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.*, Vol. 63, No. 6., pp. 365-376.
- Tomiya, A. and Takahashi, E. (2005): Evolution of the magma chamber beneath Usu Volcano since 1663 – a natural laboratory for observing changing phenocryst compositions and textures, *Jour. Petrol.*, Vol. 46, No. 12, 2395-2426.
- Toplis, M.J. and Corgne, A. (2002): An experimental study of element partitioning between magnetite, clinopyroxene and iron-bearing silicate liquids with particular emphasis on vanadium, *Contrib. Mineral. Petrol.*, Vol. 144, No. 1, pp.22-37.
- Yanagi, T. (1991): Petrochemical evidence for coupled magma chambers beneath the Sakurajima volcano, Kyushu, Japan, *Geochem. Jour.*, Vol. 25, No. 1., pp. 17-30.

Incubation Processes for the Taisho Eruption of Sakurajima Volcano — Constraints from the Mineral Chemistry of Magnetite —

Michihiko NAKAMURA*, Sho TAMURA**, Yoshinori ITO*, Satoshi OKUMURA*,
Masato IGUCHI and Daisuke MIKI

* Graduate School of Science, Tohoku University

** Graduate School of Education, Hyogo University of Teacher Education

Synopsis

In order to examine incubation processes for the Taisho eruption of Sakurajima Volcano, chemical compositions of phenocrystic magnetite and magnetite inclusions in plagioclase phenocrysts were investigated. Compared to the phenocrysts, the inclusions have a wider compositional variation corresponding to the lower temperature. This suggests that magma chamber temperature had increased gradually by repeated injection of hotter magmas. Each magnetite phenocryst was homogeneous in composition, whereas the phenocrysts have significant compositional variation, which is larger than the zoning within each phenocryst. This shows that the pre-eruptive magma chamber was heterogeneous, and this heterogeneity was stable for a few years prior to the eruption, without perturbations by large-scale precursor eruptions or magma injections. The edges and corners of the magnetite phenocrysts show slightly dissolving texture, suggesting that injection of hotter magma immediately led to the eruption.

Keywords: Sakurajima Volcano, Taisho eruption, magnetite, magma mixing, zoning profile, diffusion