



国際火山噴火史情報研究-II  
-噴火史とその関連研究-

## メルト包有物からみた 阿蘇火山における 玄武岩質マグマの 揮発性成分含有量

川口 允 孝  
長谷中 利 昭  
安 田 敦  
外 西 奈津美  
森 康

Volatiles in basaltic magma beneath Aso  
inferred from melt inclusions

Masataka Kawaguchi • Toshiaki Hasenaka •  
Atsushi Yasuda • Natsumi Hokanishi • Mori  
Yasushi

かわぐち まさたか : 熊本大学大学院自然科学研究科  
はせなか としあき : くまもと水循環・減災研究教育  
センター  
やすだ あつし : 東京大学地震研究所  
ほかにし なつみ : 東京大学地震研究所  
もり やすし : 北九州市立自然史・歴史博物館

阿蘇中央火口丘群北西部において完新世に活動した火山のスコリアを採取し斑晶メルト包有物を分析した結果、阿蘇火山における今までの報告値よりも高いS含有量をもつマグマが見つかった。また石基ガラスとメルト包有物、斑晶鉱物組成の比較から浅部マグマ溜まりへの高Sマグマの供給が示唆された。

### 1. はじめに

マグマに含まれる揮発性成分 ( $H_2O$ ,  $CO_2$ , S, Cl) は噴火の原動力となるため、その量を正確に見積もることは重要である。マグマ中の揮発性成分はそのほとんどが噴火によって火山ガスとして放出されてしまうが、斑晶に捕獲されたメルト包有物 (Melt inclusion: MI) を分析することで見積もることができる。MI はマグマ中で斑晶が成長する際、斑晶中に周囲のメルトが捕獲されたもので、当時の揮発性成分を保持していることが期待される<sup>[1]</sup>。MI は地殻中におけるマグマ進化の段階的な情報を持っているため、地殻におけるマグマプロセスについて重要な情報を与えてくれる。また結晶分化やマグマ混合といった複雑な地殻プロセスを経験した試料においてもより初生的なメルトの情報を引き出すことができるという利点がある<sup>[2][3]</sup>。これまで多くの火山でメルト包有物を利用してマグマの上昇や脱ガス、混合といったマグマプロセスの詳細が明らかにされてきた<sup>[4][5][6][7]</sup>。

阿蘇火山においてカルデラ形成後に活動した玄武岩質～玄武岩質安山岩マグマには共通して周縁部または内部の汚濁帯をもつ斜長石斑晶、単斜輝石の反応縁をもった斜方輝石斑晶といった非平衡な斑晶の存在が認められ<sup>[8]</sup>、マグマ混合の可能性が示唆される<sup>[9][10]</sup>。従ってMIに注目することで、混合したそれぞれのマグマに由来する斑晶を区別することができるはずである。そこで玄武岩質マグマ中の各斑晶を浅部由来と深部由来に区別し、それぞれのマグマ溜りの情報を得る目的で、全岩および斑晶鉱物、MIの化学組成(主成分元素、 $H_2O$ , Cl, S)を測定した。

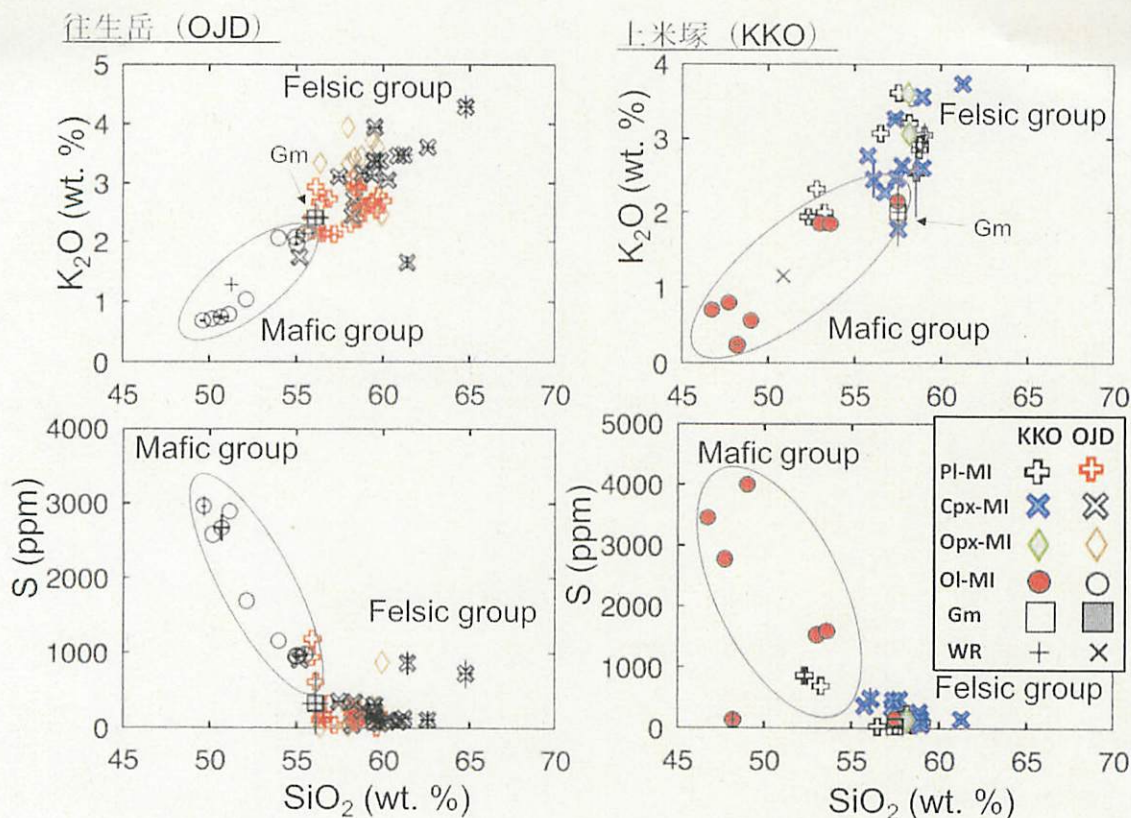


図1 往生岳火山、上米塚火山の斑晶メルト包有物(MI)、石基ガラス(Gm)および全岩(WR)の化学組成。Pl: 斜長石、Cpx: 単斜輝石、Ol: かんらん石、Opx: 斜方輝石。Groupについては本文参照。

## 2. 試料および分析手法

分析試料には中央火口丘群北西部において完新世に活動した火山である往生岳、上米塚のスコリアを用いた。分析試料の斑晶鉱物組み合わせはともに斜長石、単斜輝石、かんらん石、斜方輝石、不透明鉱物である。斑晶メルト包有物はあらかじめ外部と連結したクラックや娘結晶の有無を確認し、均質なものを分析に用いた。

全岩化学組成分析には北九州市立自然史・歴史博物館の蛍光X線分析装置を使用し、分析手順はMori and Mashima (2005)<sup>[11]</sup>に従った。石基や鉱物、メルト包有物の微小領域分析には東京大学地

震研究所のEPMAおよび熊本大学理学部地球環境科学教室のSEM-EDSを使用した。含水量の測定には東京大学地震研究所の真空型顕微赤外FT-IR分光光度計システムを使用し反射分光法で行った<sup>[12][13]</sup>。

## 3. 分析結果

### 1) 斑晶鉱物化学組成

往生岳、上米塚スコリアの鉱物化学組成について、Felsic groupの斜長石、単斜輝石には逆累帯しているものが存在する。斜長石斑晶のコアは、バイモーダルな組成を示す(An<sub>60</sub>-An<sub>65</sub>, An<sub>85</sub>-An<sub>87</sub>)。また斜方輝石斑晶はかんらん石や単斜輝

石の反応縁をもつ。

## 2) メルト包有物の組成

MI および、石基ガラスの組成を全岩化学組成と共に図1に示す。往生岳、上米塚の斑晶 MI は組成によって Mafic group と Felsic group の2つに分けられる。前者はマフィックで主にかんらん石に捕獲されている。後者はフェルシックで斜長石、単斜輝石、斜方輝石に捕獲されている。石基ガラスは Mafic group と Felsic group の中間にプロットされる。また揮発性成分含有量にも違いが見られ、Felsic group の MI が S に乏しい (S ~ 1000 ppm) のに対し、Mafic group の MI は高い S 含有量をもつ (S ~ 4000 ppm)。S 含有量はホストかんらん石の Mg# が大きいほど高い傾向がある。含水量については Felsic group では往生岳スコリアが最も高く (最大 3 wt.%)、上米塚スコリアでは低含水量 (1 wt.% 未満) という違いがある。Mafic group の含水量は検出限界未満がほとんどである (最大 0.8 wt.%)。

## 4. 揮発性成分の脱ガス評価

横軸に  $K_2O$ 、縦軸に Volatiles/ $K_2O$  をとった図 (図2) を示す。結晶分化の過程において、 $K_2O$  と揮発性成分 ( $H_2O$ , S, Cl) はともに不適合元素として振舞うことが多いので、その比は変化しないことが予想される。また今回メルト捕獲後の結晶成長 (overgrowth) を考慮した補正は行っていないが、その程度にも影響されない。しかしメルトからの脱ガスによって揮発性成分が取り去られるとその比は小さくなることになる。図2において Mafic group の MI は Felsic group の MI と比べて高い

Volatiles/ $K_2O$  値をもつことから、Mafic group の MI が初生的に高い揮発性成分濃度を有していたことがわかる (Mafic group の含水量については後述する)。中部・東北日本では斑晶メルト包有物の研究から火山フロント直下に供給される高 S マフィックマグマが発見されており<sup>[14][15]</sup>、初生マグマは揮発性成分に富むことがわかってきている<sup>[16]</sup>。S が低圧下では気相により多く分配される傾向が

あることを考慮すると<sup>[17]</sup>、Felsic group に比べてより未分化な組成をもち、かつ高い揮発性成分量を保持している Mafic group の MI はより深部で捕獲されたメルトである可能性が高い。Felsic group のホスト斑晶に反応縁をもつものや逆累帯したものが存在することは、すでに斜長石、単斜輝石、斜方輝石を晶出していた浅部のマグマ溜りへのかんらん石を斑晶にもつ深部起源高 S 玄武岩質マグマの注入によって説明できる。

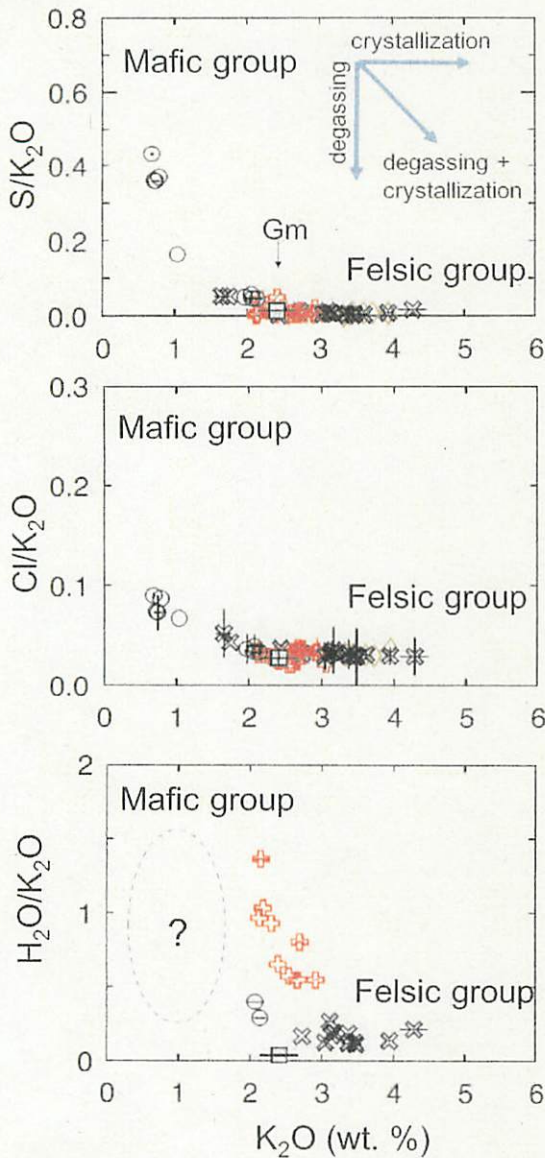
今回得られた未分化なメルトの S 含有量は、阿蘇火山でこれまでに分析された試料よりも高い<sup>[18]</sup>。一般的に  $SiO_2$  に乏しい組成のマグマほど高濃度の S を含む傾向がある<sup>[19]</sup>。また酸化的環境 (FMQ+1 以上) ではより多くの S がメルトに溶け込めることが知られている<sup>[20][21][22]</sup>。しかし S の溶解度については組成、温度、圧力など多くの支配因子が存在するので<sup>[23][24]</sup>、高い S 含有量の要因について現時点ではこれ以上の議論はできない。今後さらに S に富む MI がかんらん石に捕獲された温度・圧力の決定や、 $fO_2$  環境の推定を行う必要がある。

## 5. Mafic group の含水量

マグマに溶存する  $H_2O$  はマグマの相平衡関係や物性に大きな影響を与える<sup>[25]</sup>。そのため地殻中のマグマプロセスを理解する上で初生マグマがどれだけの  $H_2O$  を持っていたのかというのは非常に重要な問題である。またメルト包有物の分析によって得られたマグマ溜りの揮発性成分量と火山ガスの観測データから、脱ガスしたマグマの体積収縮量を見積もるといった試みもなされている<sup>[26]</sup>。揮発性成分の量比はこれらの見積もりに大きな影響を与えるため、高い S 含有量の Mafic group のメルトがどれだけの  $H_2O$  量をもつのが重要になってくる。

Mafic group の MI が  $H_2O$  に富んでいたのかどうかを評価するために、かんらん石の MI から得られた最も未分化なメルト組成を用いて、初期含水量 1 wt.% および 6 wt.% の条件で、pMELTS<sup>[27]</sup>での相平衡計算を行った。 $fO_2$  は FMQ+1 を仮定し、

OJD



KKO

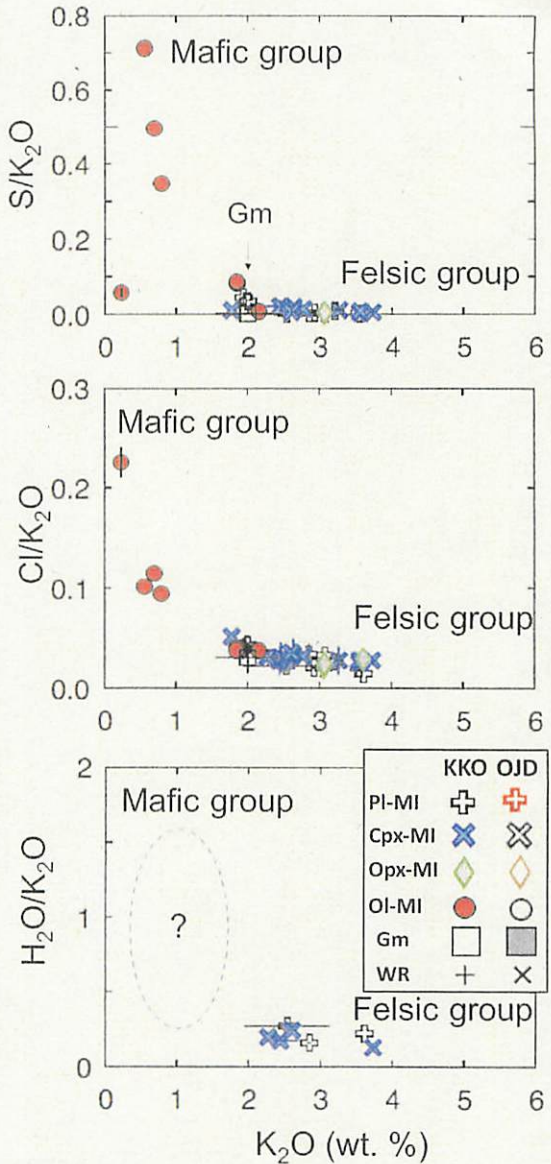


図2 メルト包有物のK<sub>2</sub>O含有量とVolatiles/K<sub>2</sub>O比の関係。略号は図1と同様。

温度は 1300°Cから 900°Cまで、圧力は 3kba から 100bar までの平衡結晶化条件で計算を行った。かんらん石、単斜輝石、斜長石が最初に品出する温度・圧力を図3に示す。斜方輝石は全ての場合に

において最も低温な条件で品出することを確認したのでここでは省略した。図3から初期含水量が異なれば各鉱物の品出順序が大きく異なることがわかる。特に斜長石の品出開始温度が同じ圧力条件

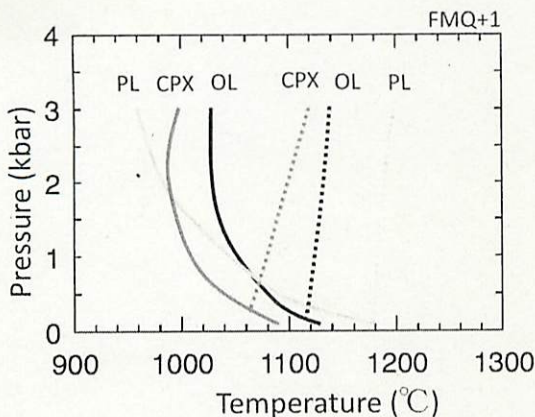


図3 カンラン石, 斜長石, 単斜輝石のリキダス温度の含水量依存性. pMELTS (Ghiorso *et al.*, 2002) で相平衡計算を行い, 各鉱物が最初に晶出する温度・圧力を示した. 実線は 6 wt. %, 点線は 1 wt. % の初期含水量を与えた場合.  $fO_2$  は FMQ+1 を仮定. Pl: 斜長石, Cpx: 単斜輝石, Ol: かんらん石.

において大きく異なる. これは斜長石のリキダス温度の含水量依存性がかんらん石に比べて大きいことに起因する. つまり同様の組成においても, 含水量の違いによって最初に晶出する鉱物がかんらん石になるか, 斜長石になるかが異なる.

分析試料のかんらん石は斜長石に比べて高い揮発性成分をもつメルトを捕獲しており, またかんらん石斑晶中に斜長石が包有されることはない. このことは最初に晶出する鉱物がかんらん石であることを意味している. 定性的ではあるが結晶化し始めた温度・圧力条件下において, マグマは比較的  $H_2O$  に富んでいたと考えられる. しかしながら今回測定したかんらん石の MI のほとんどで  $H_2O$  の赤外吸収ピークが認められなかった. これは観察事実および MELTS の計算結果とは矛盾する結果である. これを説明できる一つの可能性として, 元素拡散による  $H_2O$ -loss が考えられる<sup>[28]</sup>. 初生含水量については今後さらに検討が必要である.

## 6. おわりに

往生岳スコリア, 上米塚スコリアの斑晶 MI の組成. 特に S 含有量に対応して, 斑晶鉱物を浅部

由来と深部由来に区別することができた. かんらん石に捕獲された未分化な組成をもつメルトほど S が高い傾向にある. 最も未分化な MI の組成を用いた MELTS による相平衡計算の結果, S に富んだマグマはかんらん石に捕獲された段階で比較的  $H_2O$  にも富んでいたと考えられる. また浅部由来斑晶にみられる非平衡組織は, S に富んだ深部由来玄武岩マグマが浅部マグマ溜りに注入したことによって説明できる.

謝辞: 福岡大学の奥野充教授をはじめ国際火山噴火史情報研究所の皆様には研究集会への参加や本稿執筆の機会をいただきました. 熊本大学の西山忠男教授, 磯部博志教授には理学部地球環境科学教室の SEM-EDS の使用を許可していただきました. 本研究は, 東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助を受けました. また日本学術振興会の科学研究費補助金・基盤研究 (C) 課題番号: 25400491 (代表: 長谷中) および西日本技術開発 (株) の奨学寄付金の一部を使用しました. 以上の方々に深く感謝いたします.

## 参考文献

- [1] Anderson, A. T. (1973): The before-eruption water content of some high-alumina magmas. *Bulletin of Volcanology*, 37, 530-552.
- [2] 太田靖・宮城磯治・山口珠美 (2007): 島弧初生マグマを求めて-メルト包有物の含水量 (島弧初生マグマは本当に水に乏しいか-). *月刊地球*, 29, 16-21.
- [3] Johnson, E. R., Wallace, P. J., Delgado Granados, H., Manea, V. C., Kent, A. J., Bindeman, I. N. and Donegan, C. S. (2009): Subduction-related volatile recycling and magma generation beneath Central Mexico: insights from melt inclusions, oxygen isotopes and geodynamic models. *Journal of Petrology*, 50, 1729-1764.
- [4] 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. *Bulletin of Volcanology*, 67, 268-280.
- [5] Saito, G., Morishita, Y. and Shinohara, H. (2010): Magma plumbing system of the 2000 eruption of Miyakejima volcano, Japan, deduced from volatile and

major component contents of olivine hosted melt inclusions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B11).

[6] 宮坂瑞穂・中川光弘・吉本充宏・小林哲夫・奥野充 (2013) : 桜島火山におけるマグマ供給系の変化-始良カルデラ形成噴火以降のテフラ噴出物からの解析-。「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」2013年度報告書, 95-104.

[7] 安田敦・吉本充宏・藤井敏嗣 (2015) : 始良火砕噴火のマグマ溜まり深度. *火山*, 60, 381-397.

[8] 三好雅也・長谷中利昭・佐野貴司 (2005) : 阿蘇カルデラ形成後に活動した多様なマグマとそれらの成因関係について. *火山*, 50, 269-283.

[9] Sakuyama, M. (1984) : Magma mixing and magma plumbing systems in island arcs. *Bulletin Volcanologique*, 47, 685-703.

[10] Tsuchiyama, A. (1985) : Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside-albite-anorthite, and origin of dusty plagioclase in andesites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89, 1-16.

[11] Mori, Y. and Mashima, H. (2005) : X-ray fluorescence analysis of major and trace elements in silicate rocks using 1:5 dilution glass beads. *Bulletin of Kitakyushu Museum of Natural History and Human History, Series A*, 3, 1-12.

[12] 安田敦 (2011) : 顕微 FT-IR 反射分光法による斑晶ガラス包有物の含水量測定. *火山*, 56, 41-49.

[13] Yasuda, A. (2014) : A new technique using FT-IR micro-reflectance spectroscopy for measurement of water concentrations in melt inclusions. *Earth, Planets and Space*, 66, 1-10.

[14] 山口佳昭・原田英男・太田靖 (2003) : 浅間および妙高火山のマフィック端端成分マグマ: 斑晶メルト包有物の組成とイオウ含有量. *火山学会, 予稿集*, B25.

[15] 山口佳昭 (2010) : 鳥弧の初生マグマにおける早期のイオウ析出分別-斑晶メルト包有物中の硫化物-. *日本鉱物化学会, 要旨集*, S1-09.

[16] Zellmer, G. F., Edmonds, M., and Straub, S. M. (2015) : Volatiles in subduction zone magmatism. *Geological Society, London, Special Publications*, 410, 1-17.

[17] Wallace, P. J. and Edmonds, M. (2011) : The sulfur budget in magmas: evidence from melt inclusions, submarine glasses, and volcanic gas emissions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 73, 215-246.

[18] 田村智弥・長谷中利昭・Wallace, P.・安田敦・森康 (2015) : 九州の火山フロントにおけるマグマ生成プロセス: メルト包有物からのアプローチ (総特集 九州の火山地質学 (1)). *月刊地球*, 37, 106-112.

[19] Shinohara, H. (2008) : Excess degassing from volca-

noes and its role on eruptive and intrusive activity. *Reviews of Geophysics*, 46.

[20] Wallace, P. J. (2005) : Volatiles in subduction zone magmas: concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 140, 217-240.

[21] Jugo, P. J., Luth, R. W. and Richards, J. P. (2005) : An experimental study of the sulfur content in basaltic melts saturated with immiscible sulfide or sulfate liquids at 1300°C and 1-0 GPa. *Journal of Petrology*, 46, 783-798.

[22] Jugo, P. J., Wilke, M. and Botcharnikov, R. E. (2010) : Sulfur K-edge XANES analysis of natural and synthetic basaltic glasses: Implications for S speciation and S content as function of oxygen fugacity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 5926-5938.

[23] Wallace, P. and Carmichael, I. S. (1992) : Sulfur in basaltic magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 1863-1874.

[24] Mavrogenes, J. A. and O'Neill, H. S. C. (1999) : The relative effects of pressure, temperature and oxygen fugacity on the solubility of sulfide in mafic magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 1173-1180.

[25] 栗谷豪 (2007) : 水とマグマ. *地学雑誌*, 116, 133-153.

[26] Kazahaya, R., Aoki, Y. and Shinohara, H. (2015) : Budget of shallow magma plumbing system at Asama Volcano, Japan, revealed by ground deformation and volcanic gas studies. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 2961-2973.

[27] Ghiorso, M. S., Hirschmann, M. M., Reiners, P. W. and Kress, V. C. (2002) : The pMELTS: A revision of MELTS for improved calculation of phase relations and major element partitioning related to partial melting of the mantle to 3 GPa. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3, 1-35.

[28] Danyushevsky, L. V., McNeill, A. W. and Sobolev, A. V. (2002) : Experimental and petrological studies of melt inclusions in phenocrysts from mantle-derived magmas: an overview of techniques, advantages and complications. *Chemical Geology*, 183, 5-24.

