

マグマ中の揮発性成分を知る : メルト包有物からのアプローチ

著者	池端 慶
雑誌名	静岡地学
巻	95
ページ	1-4
発行年	2007-06-22
出版者	静岡県地学会
URL	http://doi.org/10.14945/00024801

マグマ中の揮発性成分を知る —メルト包有物からのアプローチ—

池 端 慶

1. はじめに

マグマ中には H_2O , CO_2 , S, Cl, Fなどの揮発性成分が溶存している。揮発性成分は火山の噴火、火山ガス、鉱床成因、熱水変質などと密接に関係するので、その種類、量、挙動は、これらの現象の理解に非常に重要である。では、マグマ中の揮発性成分を知るためにはどのような試料を分析すれば良いであろうか。地表に噴出したマグマは、マグマの上昇に伴う圧力低下により脱ガスの影響を強く受けているため、噴出岩の分析から直接、噴火前のマグマ中の揮発性成分濃度を知ることはできない。火山岩の斑晶に取り込まれ急冷されたメルト包有物（メルトインクルージョン、ガラス包有物などの呼び方もある）は、マグマ中で成長する斑晶に取り込まれたマグマが固化した、いわば「マグマの化石」である。結晶内部に閉じ込められているため、圧力低下に伴う脱ガスの影響をほとんど受けていない。そのため、噴出前のマグマ中の揮発性成分を保存している最も良い試料であると考えられている。また、メルト包有物は、噴出岩のような結晶分別の影響を受けていない、初生的なマグマの情報を保持している事がある。さらに、結晶の内部にあるため、風化や変質の影響を受けにくく、古い火山噴出物の組成分析にも適していることが多い。斑晶中のメルト包有物の分析は、このように利点が多いため、近年精力的に研究されている。筆者は、伊豆大島火山のいくつかの噴出物の斑晶鉱物中に含まれているメルト包有物を研究している（池端, 2007）。本稿では、メルト包有物の一般的な特徴、形成メカニズム、分析方法について述べる。

2. メルト包有物の特徴

(1) 産状：メルト包有物は、火山岩に含まれる一般的な斑晶鉱物（かんらん石、輝石、長石、角閃石など）中に普通にみられる。形状は球状、楕円状、平板状、脈状などがあり、大きさは径1マイクロメートル以下のものから最大でも数百マイクロメートルと非常に小さいものである。分析に適しているメルト包有物は、斑晶に完全に捕獲されていて包有物内部に結晶化がみられない清澄なガラス状のものである（図1）。石基との連結が見られたり、結晶化が見られたりするメルト包有物はメルト包有物が形成された時

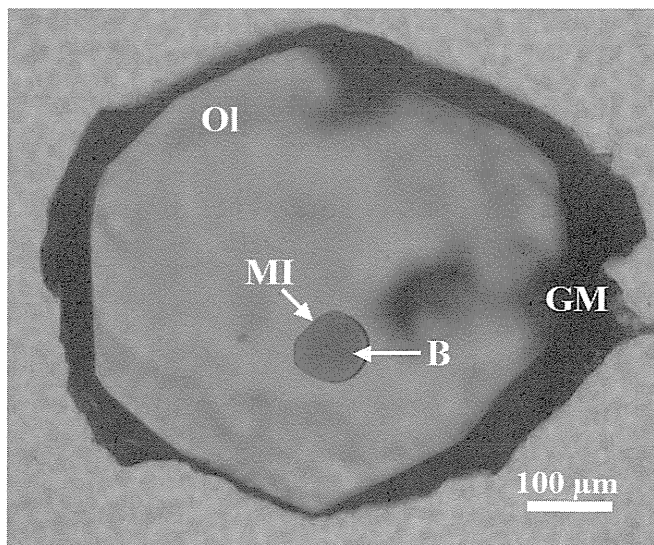


図1. 伊豆大島産かんらん石(OI)の斑晶中に完全に捕獲された、分析に適したメルト包有物(MI). メルト包有物中には収縮気泡(B)がみられる.GM=石基.

点の組成を保持していない可能性が高い。結晶化はメルト包有物の周囲のホスト斑晶が内部に向かって成長することが多いが、含水鉱物、硫化物、硫酸塩鉱物などを除く、火山岩に一般的にみられる鉱物には揮発性成分は含まれないので、メルトの体積の減少によってメルト包有物中の揮発性成分濃度は本来のものより高くなる。結晶化が著しいと溶解度を越えた揮発性成分は気泡として出現することもある。斑晶が何らかの原因で割れてメルト包有物が外部と通じると、急減圧されるために、メルト

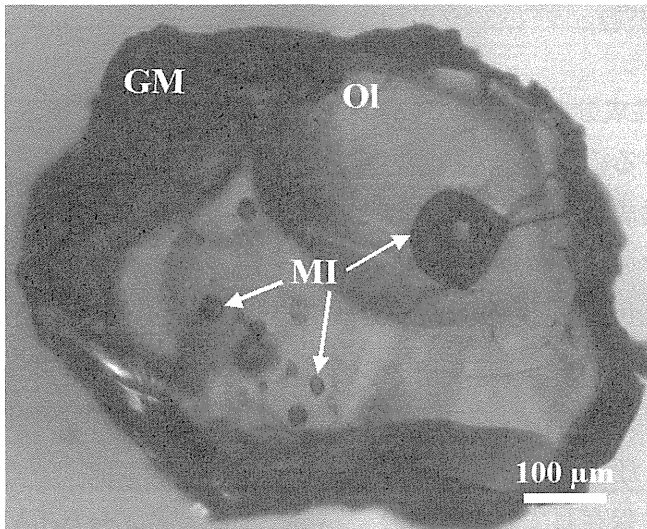


図2. 多数のメルト包有物(MI)を含むかんらん石斑晶(OI) (伊豆大島産)。右の大きなメルト包有物は、かんらん石に亀裂が生じたために石基(GM)とつながり、急減圧により、メルトに溶存していた揮発性成分の発泡がみられる。

包有物中に溶存した揮発性成分が発泡することがある(図2)。当然、このような発泡がみられるメルト包有物中の揮発性成分濃度は本来のものより低くなる。メルト包有物中の主要、微量元素が結晶化した鉱物に選択的に入る場合は、これらの元素はメルト包有物中から取り除かれ、メルト包有物形成時の組成からは変化しているので注意が必要である。

清澄なガラスとなっているメルト包有物は、スコリア、パミス、火山弾などの急冷された火山噴出物中の斑晶に多くみられる。溶岩中の斑晶にみられるメルト包有物は徐冷のためにメルト包有物中に結晶化が起きていることが多く、メルト包有物の分析には適さない。

メルト包有物の内部には、しばしば気泡がみられる。メルト包有物の体積に対し気泡の体積が比較的大きな場合は、脱ガスにより気泡が存在するマグマを捕獲した場合や、上述のような結晶化に伴い溶解度を越えた揮発性成分が出現した場合である。メルト包有物の体積に対し気泡の体積が非常に小さく(数vol%以下)、内部がほぼ真空の気泡は、収縮気泡(shrinkage bubble)と呼ばれている(Roedder, 1984)。これは、メルトの熱収縮率が斑晶の熱収縮率よりも大きいため、温度低下に伴い形成される。したがって、この収縮気泡は、メルト中に揮発性成分を全く含まない場合でも形成されうる。

以上のように、メルト包有物には様々な産状があり、対象となるメルト包有物が分析に適切か十分に吟味する必要がある。適切なメルト包有物を分析することで、メルト包有物形成時のマグマの組成、温度、圧力、酸素雰囲気などの様々な有益な情報を得ることができる。

(2) メルト包有物の形成メカニズム：マグマ(メルト)が斑晶に捕獲される場合は大きく分けて2つある。一つ目は、マグマが火道上昇時に圧力低下とともに水が脱ガスしてリキダス温度が上昇した時に斑晶が急成長する場合である。斑晶の稜部分が急成長することによりマグマを包み込んだり、いくつかの斑晶が合体して結晶間にマグマを捕獲したりして、包有物が形成される。マグマ溜り内に温度の不均質がある場合も、同様に斑晶が急成長してマグマを捕獲する場合がある。二つ目は、組成や温度の異なるマグマが混合した場合である。この時、マグマと斑晶とが非平衡なために、結晶のある部分が融解して筒状の穴ができマグマを閉じ込めることによって包有物が形成される。斑晶に捕獲さ

れた時のメルト包有物の形状は、脈状や板状をしていることが多いが、時間の経過とともに界面エネルギーを小さくするように数個に分裂したり、楕円状や球状に変化したりする。メルト包有物形成メカニズムや形状変化については、実はまだ不明な点が多く、現在これらを解明する実験などが進められている。

3. 分析方法

試料はタングステン鉢や粉碎機等により破碎して、磁気分離装置や重液を用いて特定の結晶を集める。双眼実体顕微鏡でメルト包有物の形状やメルト包有物中の気泡とホスト結晶の結晶化の状態等をよく観察し、分析に適したメルト包有物を含む結晶をエポキシ系樹脂等でマウントした後、鏡面研磨をして組成分析を行う。メルト包有物は微細であるので、分析には局所分析が必要である。主要元素、S, Cl, Fの組成定量分析は、電子線マイクロプローブを使用して行う。マグマ中でSは、還元的な環境下では S^{2-} 、酸化的な環境下では $SO_4^{2-}(S^{6+})$ として溶存している。Sの標準試料は、閃亜鉛鉱 $\{ZnS(S^{2-})\}$ や重晶石 $\{BaSO_4(S^{6+})\}$ 、天青石 $\{SrSO_4(S^{6+})\}$ を用いる。 S^{6+} から S^{2-} への価数変化による $S(K\alpha)$ のピーク位置の変化から試料の S^{6+}/S_{total} 比を求め(Carroll and Rutherford, 1988), Wallace and Carmichael (1994)の S^{6+}/S_{total} 比と ΔNNO との関係式からマグマの酸素雰囲気を知ることも可能である。Clの標準試料としては岩塩(NaCl)や塩素燐灰石 $\{Ca_5Cl(PO_4)_3\}$ 、Fの標準試料は螢石(CaF_2)を用いることが多い。マグマ中では H_2O は、 H_2O 分子、あるいは水酸基(OH)の形で溶存している。 CO_2 は玄武岩質マグマ中では炭酸基(CO_3^{2-})として、流紋岩質マグマ中では CO_2 分子の形で溶解していることが知られている。メルト包有物中の H_2O 、 CO_2 の測定は、メルト包有物を両面研磨して顕微赤外分析計を使用して行う。赤外線は H_2O 分子や CO_2 分子に照射すると、これらの分子をつくっている原子間の振動エネルギーに相当する赤外線を吸収する。この吸収の度合いは吸光度(A)と呼ばれ、この吸光度と試料の厚さ(d) (マイクロメータ等で測定)と溶存する H_2O 、 CO_2 の濃度(C)にはランベルト・ベールの法則、 $A = \epsilon$ (吸光係数) $\cdot C \cdot d$ が成り立つので、この法則を使い、メルト包有物中に溶存している H_2O 、 CO_2 の濃度を知ることが可能である。図3には、実際に玄武岩質ガラスを顕微赤外分析計で分析した時に得られた赤外スペクトル($1,000-4,000\text{ cm}^{-1}$)を示した。

最近では、 H_2O 、 CO_2 、S、Cl、Fの定量や同位体分析に二次イオン質量分析計を使用することも多い。メルト包有物の微量元素や、その元素の同位体の測定にはレーザーアブレーション誘導結合プラズマ分析装置や二次イオン質量分析計を使用する。メルト包有物の内部にみられる気泡中の揮発性成分の定性、定量分析には顕微赤外分析計や顕微ラマン分析計が用いられる。

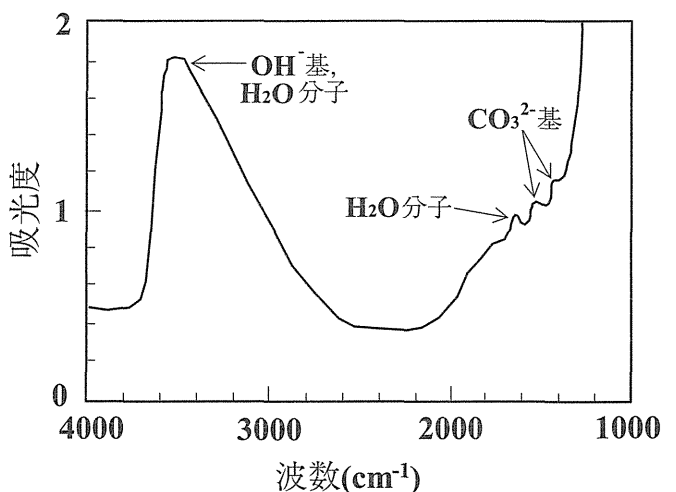


図3. 玄武岩質ガラスの赤外スペクトル(波数 $1,000-4,000\text{ cm}^{-1}$).

4. おわりに

斑晶鉱物に取り込まれたマグマが固化したメルト包有物は、脱ガスの影響や結晶分別作用の影響を受ける以前のマグマの組成の情報を保持しており、これらの研究には最適な試料である。メルト包有物の大きさは微細であるが、近年の局所分析機器の飛躍的な進歩により、メルト包有物の主要、微量、揮発性元素組成の情報を比較的容易に、直接得ることができるようになりつつある。しかし、闇雲にメルト包有物を測定しても有益な情報は得られない。どのようなプロセスで形成されたメルト包有物なのか、メルト包有物形成時の組成を保持している試料か等を十分吟味する必要である。尚、マグマ中の揮発性成分に関する研究の詳細は、Carroll and Holloway (1994)やWallace (2005)にまとめられているので参考にされたい。

引用文献

- 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. *American Mineralogist*, 73, 845-849.
- Carroll, M. R. and Holloway, J. R. (1994) : Volatiles in Magmas. *Reviews in Mineralogy*, 30, Mineralogical Society of America, 517p.
- 池端 慶 (2007) : メルト包有物からみた伊豆大島マグマ中の水,硫黄,塩素含有量. *月刊地球*, 29, 48-52.
- Roedder, E. (1984) : Fluid Inclusions. *Reviews in Mineralogy*, 12, Mineralogical Society of America, 644p.
- Wallace, P. J. and Carmichael, I. S. E. (1994) : S speciation in submarine basaltic glasses as determined by measurements of SK α X-ray wavelength shifts. *American Mineralogist*, 79, 161-167.
- 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.