

メルトインクルージョンからマグマの情報を抽出する —マグマの脱ガス過程の解明をめざして—

齋藤元治¹⁾

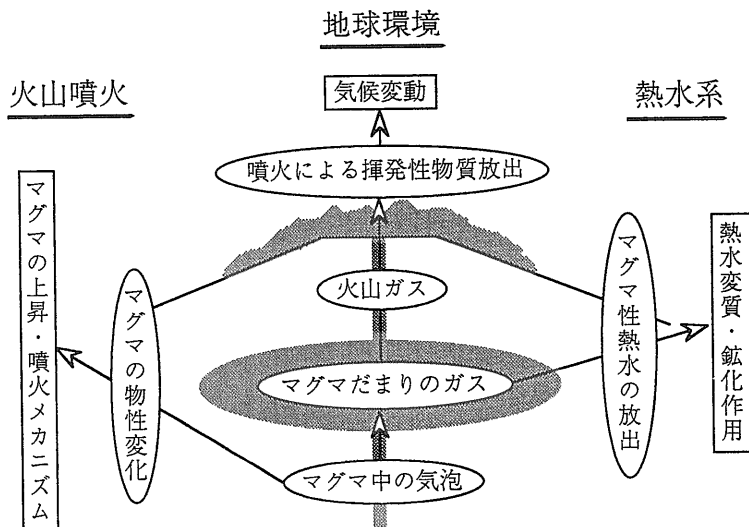
1. はじめに

マグマ中に揮発性物質はどの程度含まれているのだろうか。この単純な問いに対し、岩石学は長い間答えを出せずにいた。その最大の理由は、マグマの揮発性物質濃度を測定する場合に適した試料が見い出せなかったことにある。地表に噴出したマグマは噴火時の圧力低下により脱ガスしてしまっているため、火山岩の分析から直接噴火前のマグマの揮発性物質濃度を推定することはできない。

地下のマグマ中で斑晶が晶出する際に、斑晶中に周囲の珪酸塩メルトが捕獲されることがある。これをメルトインクルージョンと呼ぶ。このメルトは斑晶に閉じこめられているため、火山岩のような噴火時の脱ガスや外部からの二次的な汚染が生じない。

したがって、メルトインクルージョンの分析から噴火前のマグマの揮発性物質の濃度を知ることができる。メルトインクルージョンを用いたマグマ中の揮発性物質濃度の測定は1970年代に始まった。ごく最近になって、揮発性物質についてのデータが揃いだし、脱ガス過程などの議論が行われ始めた。

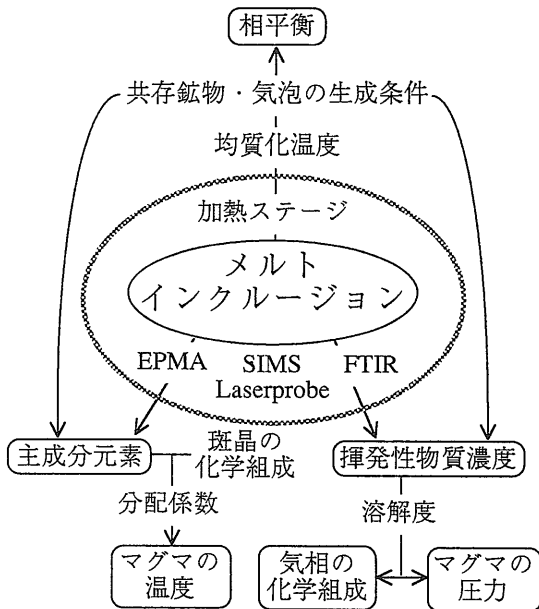
揮発性物質は、地表に噴出する際の減圧やマグマの固化によりマグマに溶存している状態から気相状態に変化する。マグマ中の気泡の存在は、マグマの物性を変化させるため、マグマの上昇や噴火過程に大きな影響を与えると考えられている(第1図)。また、マグマから放出されたガスは、火山ガスや熱水流体として地表や地殻上部に供給される。噴火の際に大量に放出される火山ガスは気候変動を引き起こす要因の一つと考えられている。地殻上部へ放出



第1図 マグマの脱ガスが火山・熱水系・地球環境へ及ぼす影響

1) 地質調査所 鉱物資源部

キーワード: マグマ, 揮発性物質, 脱ガス, メルトインクルージョン



第2図 メルトインクルージョンから得られるマグマの情報

された熱水流体は火山性熱水系を生じ、熱水性鉱床や地熱流体などの資源を供給している。したがって、マグマ内に気相が形成され放出される過程(脱ガス)を検討することは、火山活動、熱水系の進化、地球環境の種々の現象を理解する上で欠かせない。

本稿では、まずメルトインクルージョンから抽出できるマグマの情報について述べる。次に、マグマの揮発性物質濃度の変動に基づいて、マグマが地殻内を上昇する間の脱ガス過程について概説し、今後の展望について述べる。

2. メルトインクルージョンから得られるマグマの情報

メルトインクルージョンは斑晶の不均質な成長によって周囲のメルトが斑晶中に取り込まれたものである。斑晶中の元素の拡散速度は小さいため、メルトインクルージョンは斑晶に捕獲された時のマグマの情報を保持している。そのため、メルトインクルージョンの分析により、脱ガス前のマグマの揮発性物質濃度や斑晶生成時のメルトの化学組成などを推定できる(第2図)。これらの情報を、斑晶や気相との間の元素分配と合わせて検討することにより、斑晶生成時の温度や圧力などを知ることができる。

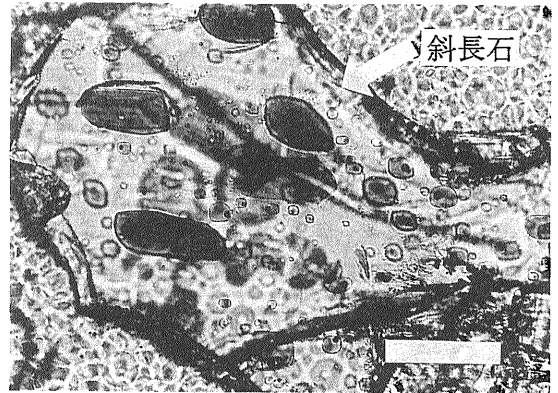


写真1 伊豆大島火山の1777年噴火の噴出物中の斜長石に含まれるガラス質のメルトインクルージョン。バーの長さは200 μm 。

晶出条件の異なるメルトインクルージョンの分析を行えば、マグマの温度・圧力・化学組成の変動ともなるマグマの揮発性物質の濃度変化について情報が得られ、マグマの経た脱ガス過程を推定できることになる。

斑晶が急冷されると、捕獲されたメルトはガラス質になる(写真1)。斑晶が晶出する際、マグマ中にメルトと共存している鉱物や気泡を同時に捕獲する場合がある。捕獲された鉱物や気泡とメルトとの間の元素分配は、斑晶晶出時の条件(温度・圧力・酸素 fugacity 等)を推定するための重要な情報源となる。逆に、斑晶が徐冷したり、割れたりした際にはメルトから鉱物や気泡が生ずる。これらの存在は、斑晶形成時の条件を反映しているわけではない。そのため、鏡下での観察や加熱ステージを用いた反応温度の検討により、メルトインクルージョン中の鉱物や気泡の成因をまず明らかにする必要がある。

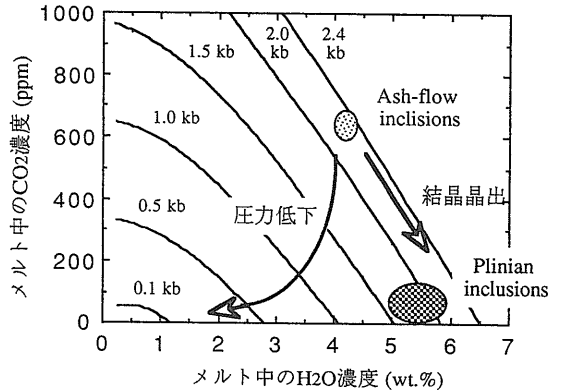
メルトインクルージョンは最も大きくても径数100 μm であるので、その分析には数10 μm 程度の微小部分を分析できる局所分析法が必要であり、これまで分析法の開発に努力が注がれてきた。現在、地質調査所においては主成分元素、硫黄および塩素の分析は波長分散型 EPMA (JEOL JCSA-733) を用いている。硫黄および塩素は微量成分なので検出感度を上げるため、試料電流値および照射時間を主成分元素の分析より大きくし、それぞれ50 nA, 400秒として測定を行っている。電子線照射量の増大による試料ガラスの損傷に対しては、ビーム

から得られた成層圏への硫黄の注入量は10 Mtであるのに対し、岩石学的手法では0.11 Mtと求められている。これらの硫黄放出量の推定値の差は2桁にもおよび、噴出したマグマの質量の見積もり誤差では説明できない。

この原因として、噴火前のマグマ中に硫黄がガスとして存在していたことが挙げられる(Westrich and Gerlach, 1992)。上記の岩石学的手法の場合、マグマ中の硫黄は全てメルトに溶存していると仮定している。しかし、噴火前のマグマだまりで硫黄を含む気相が存在していた場合、岩石学的手法では硫黄放出量を実際より過小に見積もることになる。このような例はピナツポ火山以外でも指摘されている。したがって、メルト中の揮発性物質のみならずマグマだまり内の気相の存在についても検討しなくてはならない。それ故、噴火以前のマグマの脱ガス過程を検討し、マグマだまり内の気相の化学組成や量について情報を得る必要がある。

3-3. マグマだまりの脱ガス過程

マグマだまり内での気相の形成は、結晶晶出によって起きる場合と、圧力低下によって起きる場合の二つのケースが主に考えられる(篠原・風早, 投稿中)。マグマが圧力一定のもとで結晶分化を起こす場合、結晶晶出とともにメルト中に揮発性物質が濃集し、その濃度が飽和溶解度を越えた時点で離溶が始まる。揮発性物質が一成分しかない場合は晶出が進んでも形成される気相の化学組成およびメルト中の揮発性物質濃度は一定のままである。しかし、マグマ中に揮発性物質が二成分以上あると、晶出とともに形成される気相の化学組成は変化し、同時にメルト中の各揮発性物質濃度も変化する。今、二成分としてH₂OとCO₂が溶存しているマグマの結晶晶出を考えてみる。第4図は、マグマ中に気相(H₂OおよびCO₂)が共存しているときのメルト中の各揮発性物質濃度と圧力の関係を示している。マグマだまり内で気相と共存するメルト中のH₂OおよびCO₂の濃度はマグマだまりの圧力を示す等圧線上にプロットされる。マグマ中で結晶晶出が進むと、気相中のH₂O/CO₂分圧比が高くなり、結果としてメルト中の揮発性物質濃度は等圧線上をメルト中のCO₂濃度が小さくなる(H₂O濃度が大きくなる)方向へ進む。



第4図 H₂O および CO₂ 混合ガス共存下でのメルト中の H₂O および CO₂ の濃度とマグマの圧力との関係。実線は等圧力線。矢印は結晶晶出や圧力低下による気相の形成にもなるメルト中の H₂O および CO₂ の濃度の変化を示している。分析値は Bishop Tuff の石英中のメルトインクルージョンの H₂O および CO₂ の濃度。Anderson et al. (1989) の図に加筆。

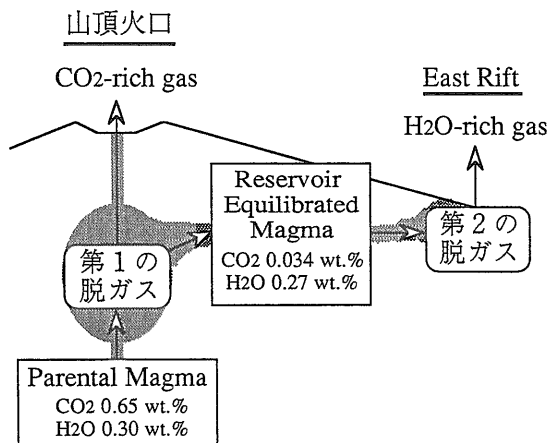
結晶晶出にもなるメルトの揮発性物質濃度の変化は、60万年前に600 km³の流紋岩質マグマを噴出したカリフォルニアの Bishop Tuff (ビショップ凝灰岩)のマグマだまりにみられる(Anderson et al., 1989)。この噴火はプリニアン噴火(大量の軽石や火山灰を火口から空高く噴出する噴火活動)で始まり火山灰を降下堆積させた後、ash-flow(火山灰流)の噴出に移行した。各噴出物中の石英に含まれるメルトインクルージョンの分析から、各噴火過程でのマグマの H₂O および CO₂ の濃度が得られている(第4図)。降下火山灰として噴出したマグマは H₂O 濃度が5-6 wt%, CO₂ 濃度が0-190 ppmであったのに対し、ash-flow のマグマの H₂O 濃度は4 wt%, CO₂ 濃度が600 ppm 程度になり、噴火過程による差がみられた。第4図に示すように、これらのマグマの H₂O および CO₂ の濃度の変動は、圧力一定(2-2.4 kb)の気相共存下でマグマが結晶晶出することで説明できる。Ash-flow のマグマの方が Plinian deposit(初期のプリニアン噴火の堆積物)よりも若干圧力が高いのは、後に噴出したマグマの方がより深部に位置していたことを示しているのかもしれない。したがって、Plinian deposit を形成したマグマはマグマだまり上部で結晶晶出による揮発性物質の分化が進んだマグマであり、マグマだまり下部の ash-flow のマグマではマグマだまり上部ほど

結晶晶出が進んでおらず、メルト中の CO₂ 濃度は高く H₂O 濃度は低かったと考えられる。ヘメス火山(ニューメキシコ)でも Bishop Tuff と同様に Plinian deposit のマグマの H₂O 濃度が、続いて起きた ash-flow のマグマの H₂O 濃度よりも大きい現象が確認されている。

圧力低下によって気相が生じた場合、結晶晶出とは異なり、メルト中の H₂O および CO₂ の濃度はどちらも減少する。Bishop Tuff の ash-flow を生じたマグマ(H₂O : 4 wt%, CO₂ : 600 ppm)が圧力低下により気相を形成した際のメルト中の H₂O および CO₂ の濃度変化を第4図に示してある。圧力低下の開始からしばらくは、H₂O 放出量が小さいためメルト中の H₂O 濃度はほとんど変わらず、CO₂ 濃度のみが大きく減少する。H₂O 濃度 4 wt% の分圧である 1 kb をすぎたあたりから H₂O 濃度が大きく低下する。また、圧力低下による離溶とともに気相の H₂O のモル分率は次第に大きくなる。

圧力低下による脱ガスは、キラウエア火山(ハワイ)のマグマにみられる。キラウエア火山では、山頂火口からは CO₂ に富む火山ガス、East Rift の噴気口からは H₂O に富む火山ガスが放出されているため、比較的高圧下での CO₂ の多い気相の形成と低圧下での H₂O に富む気相の形成という二段階の脱ガスモデルが提唱された(Gerlach and Graeber, 1985; Anderson and Brown, 1993 ; 第5図)。第1段階の脱ガスは、キラウエア火山に供給される未分化マグマ(Parental Magma)が山頂直下のマグマだまりまで上昇し、滞留する間に起きる。マグマだまりで第1段階の脱ガスを終えたマグマ(Reservoir Equilibrated Magma)は、地中を East Rift 方面に移動し、ここで第2の脱ガスが起こる。このモデルから推定された各段階での気相の化学組成やメルトの揮発性物質濃度の変化は、第4図の圧力低下にもなる揮発性物質の分化と同様であり、キラウエア火山のマグマが圧力低下により脱ガスしていることは明らかである。

このように火山ガスや晶出時期の異なるメルトインクルージョンの揮発性物質濃度の比較を行うことにより、マグマだまり内の脱ガス過程を知ることができる。



第5図 キラウエア火山のマグマの脱ガスモデル (Gerlach and Graeber, 1985).

3-4. マグマだまり注入前の脱ガス

マグマがマグマだまりに注入する以前にマグマ中に気相が存在していたことがキラウエア火山などで示されている。H₂O の場合、マグマに対する溶解度が大きいため、例えば、4 km の深さ(圧力 1 kb)で気相が生じるためには 3-4 wt% の H₂O が必要であり、H₂O の飽和は珪長質マグマに限られる。一方、CO₂ はマグマに対する溶解度が非常に小さいため、比較的深いところでも気相が形成することが考えられる。

キラウエア火山での脱ガスモデル(第5図)では、脱ガス前の未分化マグマは0.65 wt% の CO₂ を含んでいたと推定されている。メルトインクルージョンの分析からもキラウエア火山で CO₂ 含有量が0.3 wt% 以上のマグマの存在が指摘されている。この CO₂ 含有量はマグマへの溶解度を考えると20-40 km より浅いところでは既に CO₂ ガスがマグマ内に生じていることになる。マグマだまりで捕獲されたと考えられるメルトインクルージョンの CO₂ 濃度は多くても 800 ppm であることを考え合わせると、キラウエア火山での第1の脱ガスはマグマだまりまで上昇する前に既に始まっていると考えられる(Anderson and Brown, 1993)。マグマだまりに注入されたガスが、マグマだまりの脱ガスで生じたガスに加わってマグマだまりに滞留した場合、噴火とともに地表に放出される。したがって、噴火時の揮発性物質放出量を見積もるにはマグマだまり以前の脱ガスも考慮せねばならない。

マグマ生成後に CO₂ の飽和によって生じた気泡は、マグマ全体の密度を減少させ、マグマ上昇のための浮力を与える。マグマの上昇に伴い、圧力低下による CO₂ の離溶が促進され、またガス密度も比例的に減少するので、マグマ内の気泡存在度が大きくなり、マグマはさらに浮力を得る。例えば、伊豆大島火山の活動初期において、マグマが上昇・定置しマグマだまりを形成するためにはマグマ中の CO₂ の気泡による浮力が必要であり、マグマ中の CO₂ 含有量としては 0.3-0.4 wt% 程度が予想されている (Kazahaya and Shinohara, 1990)。このようにマグマの上昇メカニズムを解明するには、マグマ生成からマグマだまりまでの間のマグマの脱ガスについて検討しなくてはならない。しかし、未分化マグマの揮発性物質濃度についての情報は少なく、今後このようなマグマを代表するメルトインクルージョンの分析を行う必要がある。

4. ま と め

メルトインクルージョンは噴火前のマグマの情報を保存している言わばマグマの化石である。メルトインクルージョンの分析から、マグマの脱ガスはマグマの生成・上昇からマグマだまりでの滞留を経て噴火に至る各過程で起きている現象であることが判明した。また、火山噴火時に放出された揮発性物質の地球環境に与える影響やマグマだまりからの熱水の放出過程などもメルトインクルージョンを用いて

議論されている。さらにマグマの脱ガス過程を解明し定量的なモデルの構築を進めるには、マグマの揮発性物質濃度の時間空間変動を知るべく詳細なメルトインクルージョンの分析が必要である。特に未分化マグマの揮発性物質濃度は脱ガスの出発点であり、以後の脱ガス過程やマグマの上昇メカニズムに大きく影響するので重要である。

引用文献

- Anderson, A. T. Jr., Newman, S., Williams, S. N., Druitt, T. H., Skirius, C. and Stolper, E. (1989) : H₂O, CO₂, Cl, and gas in Plinian and ash-flow Bishop rhyolite, *Geology*, **17**, 221-225.
- Anderson, A. T. Jr. and Brown, G. G. (1993) : CO₂ contents and formation pressures of some Kilauean melt inclusions. *Amer. Mineral.*, **78**, 794-803.
- Devine, J. D., Sigurdsson, H., Davis, A. N. and Self, S. (1984) : Estimates of sulfur and chlorine yield to the atmosphere from volcanic eruptions and potential climatic effects. *J. Geophys. Res.*, **89**, 6309-6325.
- Gerlach, T. M. and Graeber, E. J. (1985) : Volatile budgets of Kilauea volcano. *Nature*, **313**, 273-277.
- Kazahaya, K. and Shinohara, H. (1990) : Importance of volatiles on activity model of Izu-Oshima volcano: Part 2. Eruption and post-eruption processes. *EOS* **71**, 958.
- Westrich, H. R. and Gerlach, T. M. (1992) : Magmatic gas source for the stratospheric SO₂ cloud from the June 15, 1991, eruption of Mount Pinatubo. *Geology*, **20**, 867-870.

SAITO Genji (1994) : Extraction of magmatic information from melt inclusions to investigate degassing process of magma.

〈受付：1993年12月17日〉