

地殻内マグマシステムにおけるCOH流体フラクシングの反応輸送機構

Reactive transport modelling of COH fluid fluxing in crustal magmatic systems

吉村 俊平^{1*}, 中村美千彦¹

Shumpei Yoshimura^{1*}, Michihiko Nakamura¹

¹東北大・理・地球惑星物質科学

¹Dept. Earth Science, Tohoku University

<研究背景>

火山噴出物に含まれる揮発性成分の考察から、噴火の最中や準備段階のマグマにおいて大規模な流体（超臨界流体とガス）の移動が起きていることが示唆されている。例えば、火砕性黒曜石や斑晶鉱物中のメルト包有物には、しばしば親マグマの単純な脱ガスでは説明できないほど二酸化炭素に富むサンプルがみつかり、その成因を説明する上で、深部由来の二酸化炭素に富む流体が水に富むマグマ内を流れつつ反応するフラクシング（またはフラッシング）が必要とされてきた（e.g., Rust et al., 2004; Spilliaert et al., 2006）。また、マグマ溜まりの底部に玄武岩質マグマが注入し、二酸化炭素に富む流体を放出・浸透させる現象も一般的に起こりうると考えられる。非平衡な流体がマグマに注入される際には、メルトと流体との揮発性成分の交換が起こる。このとき、端成分溶解度および拡散係数が二酸化炭素と水で大きく異なることから拡散流束も異なり、気泡は流体組成に応じて成長または溶解を起こすと考えられる。たとえば二酸化炭素に富む深部由来の流体が、浅部に滞留していた水に富むマグマに気泡として注入された場合には、水に富む気泡は溶解し、二酸化炭素に富む気泡は成長する。また、気泡分率は全体としては増加するため、これがマグマ溜まり底部などで起こるとバルク密度を低下させて重力不安定を作り出し、噴火を引き起こす可能性もある（Yoshimura and Nakamura, submitted）。しかし、流体の輸送様式や組成の時間変化といったフラクシングの具体的なメカニズムはほとんどわかっていない。そこで本研究では、反応輸送モデルを構築し、二酸化炭素フラクシングの基本的な性質を調べた。

<モデル>

底部圧力300MPaの水に富むメルト柱（高さ=10,000mに相当）の底から二酸化炭素に富む流体を注入し、メルトと反応しながら一定速度で上昇する様子をシミュレートした。支配方程式は、水および二酸化炭素それぞれに対する質量保存式およびメルト-流体間の交換反応式である。交換反応は、メルトと流体が各深さで化学平衡であるケースと、拡散によって交換をするケースの2パターンで試みた。平衡交換の場合は、揮発性成分の組成は溶解度則によって一意に決定される。拡散交換の場合は、反応の進行具合には成分ごとに異なる拡散速度が反映され、さらにそれは拡散と移流の時間スケールの比率（Damkohler数）によって決定される。メルト柱の揮発性成分初期濃度は、300MPaの底部メルトを起源とする閉鎖系脱ガスのトレンドを与えた。これは、二酸化炭素流体のフラッシングを受ける前の初期状態としてしばしば想定される濃度分布である。

<結果と考察>

フラクシングが進行すると、メルトは二酸化炭素を溶解させつつ、大量の水（数重量パーセント）を放出した。一方、流体はその水で薄められ、上昇とともにその質量を増加させつつ水に富む組成へと変化した。しかし時間の経過とともにシステム全体は再平衡に近づくため、希釈の程度も徐々に減少した。（流体／メルト）質量比と時間をさまざまに変化させて数値実験を行った結果、平衡交換（1）を仮定したケースでは、再平衡化の程度はおおまかには両者の積、すなわち、（流れた全流体／メルト）質量比によって決まることがわかった。また、再平衡化達成の条件は、この値が初期条件に依存したある一定の値を越えることであることもわかった。たとえば初期条件として、 $X_{H_2O}=0.8$ の流体と平衡な親マグマが脱ガスしたトレンドをもち、そこに $X_{H_2O}=0.3$ の流体が注入された場合、（全流体／メルト）比が0.08に達すると再平衡化した。拡散交換（2）を導入したケースでは、再平衡化反応にあたり、メルトは各深さで不飽和となった。これは、水の拡散係数が二酸化炭素の拡散係数に比べて1桁ほど早いため、水がすばやく流体へ出て行くのに対し、二酸化炭素はゆっくりとしかメルトに溶け込まないために起きたと説明される。また、水のDamkohler数が100を超えると交換反応が十分に行われ、変化のトレンドは平衡交換（1）のケースと限りなく等しくなった。

<応用例>

シチリアのエトナ火山では、2002-2004年の噴出物のメルト包有物は単純な脱ガスで説明されるのに対し、2006-2007年のものは過度に二酸化炭素に富んでいる（Collins et al., 2009）。これは、この2～5年間の間にフラクシングを受けた結果であるとし、この間に再平衡化が達成されたと仮定すると、再平衡化達成の条件から流体の移動速度を見積もることができる。その結果、 $5.1-13 \times 10^{-4}$ m/sと計算された。更に、この移動が静岩圧で駆動されるダルシー流であると仮定すると、マグマの見かけ浸透率を計算することもでき、 $3.0-7.6 \times 10^{-13}$ m²となった。この値は天然の軽石、発泡溶岩などの浸透率と同程度である。

キーワード: マグマ, COH流体, 反応輸送, フラクシング

Keywords: magma, COH fluids, reactive transport, fluxing