

開放的マグマ系における物質保存則：微量元素の挙動

Material conservation law in an open magma system: behavior of trace elements

小澤 一仁 [1]

Kazuhito Ozawa [1]

[1] 岡山大・固地センター

[1] ISEI

マグマの発生・進化を岩石の化学組成情報から読みとることを目的として、今まで提案されているほとんど全ての融解・結晶化モデルを包含する開放的マグマ・固相反応系の物質保存則を微量成分について定式化した。全ての相に関して開放的であるとしているために、固相に系を固定することで、開放的融解における固相の進化を、液相に系を固定することで、固相中を移動する液組成の変化やマグマ溜まりのような開放的マグマバッチの進化等を取り扱える。さらに、このアプローチは、固相・液相反応を一般的に取り扱っているために、融解後の結晶化や融解後に交換反応のみが起きるような多様な液相・固相反応の多ステージの問題も容易に取り扱える。

マグマの生成や進化に関わった岩石、あるいはマグマの固結物である火山岩から、マグマの生成条件やその進化のメカニズムを探ろうとする時に、岩石や構成鉱物の主要・微量元素組成、および同位体組成は重要な鍵である。これら化学成分の挙動は、物質、エネルギー、そして運動量の保存則に従っている。一方、天然の岩石の情報は断片的であり、また、化学組成から情報を読みとるのに不可欠なものは物質保存則である。従って、エネルギー保存や運動量保存則を問題とする前に、我々は、化学組成の情報から全ての可能な過程を網羅できているのかを定量的に明らかにする必要がある。この基礎となる物質保存則に基づいて、融解や結晶化について、多くの閉鎖または開放系モデルがいままで提案され、それに基づいて岩石の化学組成が評価されてきた。これらのモデルは、問題としているのがマグマと固相（さらに気相）よりなる反応系である以上、一つの式に集約されるべきものである。ここでは、微量成分について行ったそのような定式化を提案し、その広い適用範囲と応用性を示したい。

マグマの起源が、始源的カンラン岩というある特定の岩石の上部マントルにおける融解とそれに付随するメルトと溶け残り固相の、（地球史から見て）短期間の反応を伴ったり伴わなかったりする相対運動のみでは説明できないことは、同位体の多様性が教えるところである。一方、マグマ溜まりが開放的なマグマ進化の場であることは、多くの研究から明らかである。つまり、マグマの生成・進化は、多少なりとも開放的な過程を経て行われるのであって、我々はどのくらい開放的なのか、どのようなメカニズムで開放的なのか等を定量的に明確にする必要である。一方、自然現象を開放系と見なすことは、そこで起きている過程を支配する物理・化学的因子の増加を意味し、開放的とするだけで観察が不十分などのような観察事実も説明可能となってしまう危険性をはらんでいる。ここで、要求されるのは、できる限り一般的でありながら、一般化によるパラメータの増加をできるだけ押さえつつも、観察データの密度に対応した「自然」を十分に再現できる適切なモデリングである。

開放的マグマ系の物質保存則は、基本的には小澤(1997)に基づいている。まず重要な点は、系内で連続的に起きているであろう固相・液相間での反応進行度、物質の系への流入量、および系外への流出量を初期の全システム量等の基準量で規格化したものを、問題としているマグマ過程の進行に対する速度で表現し、それらがある範囲内では一定と見なせるとした事である。これらの反応速度や流入速度等を用いて、系内では常に平衡が成立していることを前提とし、液（あるいは特定の固相）の微量元素組成をその過程の進行度の関数として求めた。この定式化は、バッチ過程であるか開放的な過程であるのか、あるいは、結晶作用であるのか融解作用であるのかを問わず適用可能である。

このモデルでは、全ての相に関して開放的であるとしているために、例えば、固相が主体となっている融解過程では、初期固相に系を固定すると液相が相対運動して出入りすることになり、逆に液相に系を固定することで、固相が出入りする事になる。つまり、この視点は物質保存のラグランジュ的な取扱であり、実際に3次元の物質座標による物質保存則から1次元定常の制約を課すことでここで得た式を導くことができる。いくつか例を挙げてみると、固相に系を固定することで、開放的融解における粒間液の化学組成の変化を表す式が得られる。逆に、液相に系を固定することで、固相中を移動する液組成の変化、（部分ゾーン融解過程）やマグマ溜まりのような開放的マグマバッチの微量元素の組成変化等を取り扱える。マグマ溜まりについては、均質結晶分化作用、マグマの注入、およびマグマの噴火の同時進行や、同化作用と結晶分化作用の同時進行（AFC）等の取扱が可能である。

さらに、このアプローチでは、固相・液相反応を一般的に取り扱っているために、反応が正の方向（たとえば融解）から途中で負の方向（結晶化）に変わる場合や、融解後に固液間での実質の物質移動のない交換反応のみが起きるような場合など、多様な液相・固相反応の多ステージの問題も容易に取り扱える。例を挙げてみると、

Ozawa & Shimizu (1995) の開放的融解モデルは、メルト流入を許したバッチ融解、メルト流入と分離が同時に進行しかつ系に粒間液が存在している開放的融解、そして融解終了後に粒間液が分離をしながら結晶化していく過程という三つの連続したステージからなるモデルである。

ここで提案する開放的マグマ系の微量元素の保存則は、岩石学的データと地球化学分析の質と量の向上によって、今後重要性が増す定量的取扱にとって非常に有用である。