

## 共存する2種のマグマ間の結晶移動による 微量元素組成変化モデル

西村光史\*

## Geochemical Modeling of Trace Element Behavior during Crystal Migration between Two Coexisting Magma Bodies

Koshi NISHIMURA\*

### Abstract

Recent petrological studies have suggested that crystal migration between two coexisting magma bodies (crystal—magma mixing) is a key process in explaining textural and compositional features of igneous rocks. However, the effect of the crystal—magma mixing on the chemical evolution path of magma remains poorly understood. The present study develops a mass-balance model for the crystal—magma mixing. The chemical path of the magma differs markedly from that predicted by conventional magma mixing model.

**Keywords:** crystal—magma mixing, magma mixing, trace element, geochemical model, magma chamber, crystal settling

### 1. はじめに

珪長質マグマと苦鉄質マグマの混合メカニズムの解明は火山学や岩石学における重要なテーマとなってきた。安山岩中にしばしば認められる鉍物の非平衡組織や非平衡化学組成は、珪長質マグマと苦鉄質マグマの混合の結果生じたと考えられてきた (Anderson, 1976; Sakuyama 1979, 1981)。このような解釈は近年の局所同位体分析技術を用いた鉍物の組成累帯構造の研究から裏付けられたと言える (Davidson et al., 2007)。しかし一方で、珪長質マグマと苦鉄質マグマは密度と粘性が大きく異なることから、マグマ溜まり内では混合しにくいことが示されてきた (Sparks et al., 1980; Campbell and Turner, 1985, 1986)。流体力学のアナログ実験や数値実験の結果によると、マグマ溜まり内で珪長質マグマと苦鉄質マグマが共存する場合、低密度高粘性の珪長質マグマの下に高密度低粘性の苦鉄質マグマ

\*) 東洋大学自然科学研究室 112-8606 文京区白山 5-28-20

Natural Science Laboratory, Toyo University, 5-28-20, Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606, Japan

が成層し、2層熱対流を起こすことが示唆される (Huppert and Sparks, 1988a,b)。実際に珧長質マグマ溜まりの底部には苦鉄質マグマが存在することがこれまで多くの火山噴出物や深成岩体で確認されている (Wöner and Schmincke, 1984; Tait, 1988; Wiebe, 1994; Wiebe and Adams, 1997; Wiebe et al., 1997)。

それでは珧長質マグマと苦鉄質マグマはいかにして混合するのであろうか。一つの有力なメカニズムとして、両マグマが火道内を上昇する際に機械的に混合が進む過程が考えられてきた。火道内のマグマ混合は流体力学のアナログ実験 (小屋口, 1986; Koyaguchi, 1987) や、露出した火道の岩石学的解析 (Wiebe and Ulrich, 1997; 高島ほか, 2010) から明らかにされつつある。一方、深成岩体の研究からは、珧長質マグマと苦鉄質マグマが、火道に限らず、深部のマグマ溜まり内においても、ある種の混合・混交を行う場合があることが示されてきた (吉倉・熱田, 2000)。

最近、西村ほか (2014) は小豆島の田ノ浦火成複合岩体を対象とした局所微量元素・同位体分析を行い、深部マグマ溜まりにおいて、珧長質マグマから晶出した結晶 (斜長石) が苦鉄質マグマ中に選択的に混入するプロセス (結晶—マグマ混合) が生じていたことを明らかにした。通常のマグマ混合とは異なり、液体同士 (珧長質メルトと苦鉄質メルト) は混合していない。苦鉄質マグマに取り込まれた斜長石は部分熔融組織を示し、一部は周囲のメルトと同化したと考えられる。この結晶—マグマ混合は従来のマグマ同士の混合とは異なる化学組成進化を引き起こすことが予想される。しかしながら、このような結晶—マグマ混合のケーススタディはこれまでほとんど例がなく、このプロセスがもたらす化学組成進化の理解が十分に進んでいるとはいえない。ここでは結晶—マグマ混合によるマグマの微量元素組成変化をより一般的に考察するため、質量保存則に基づく微量元素組成変化モデルを構築した。共存する2種のマグマの組成差、重量比、分配係数、結晶量等のパラメータがマグマ組成進化に与える影響を明らかにする。

## 2. モデル

低温低密度の珧長質マグマ溜まりの底部に高温高密度の苦鉄質マグマが貫入し、マグマ溜まりが2層熱対流をする条件を考える (図1)。珧長質マグマから晶出する結晶は両マグマのメルト (液) よりも高密度で、層境界を越えて苦鉄質マグマ中に沈降・混入すると仮定する。この場合の微量元素の挙動をモデル化する。ただし、苦鉄質メルトの密度は化学組成や圧力によって影響を受け、結晶の密度より大きくなる場合があることに留意が必要である。

対流する珧長質マグマ溜まりにおける結晶沈降の時間発展は熱力学を組み込んだ熱物質輸送モデル (西村, 2012) を用いて検討することが出来るが、ここでは結晶—マグマ混合による化学組成進化の特徴をつかむため、質量保存則のみを用いた単純なモデル化を行う。珧長質マグマ溜まり上部の母岩の熔融と同化 (Huppert and Sparks, 1988a,b) の効果は単純化のため無視する。

対流する珧長質マグマ溜まり内に浮遊結晶が均一に存在し、その一部が沈積により取り

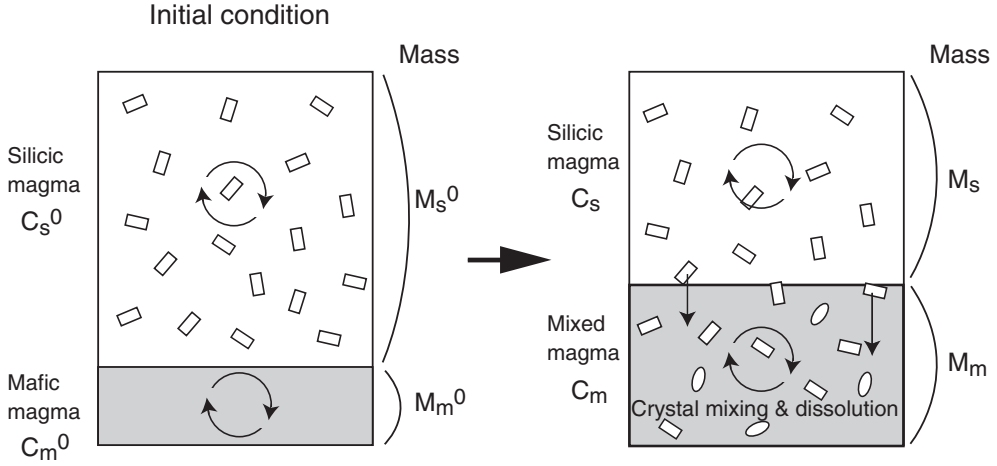


図1 結晶—マグマ混合モデル概念図

除かれる場合の微量元素の挙動は、質量保存則に基づく微分方程式系の解析解を用いて記述される (Nishimura, 2009)。浮遊結晶が組成累帯構造を形成する場合、浮遊結晶量（重量分率）を  $\phi$ 、元素の全岩分配係数（メルト中の濃度に対する結晶中の濃度比）を  $D$  とすると珪長質マグマの微量元素濃度  $C_s$  は、

$\phi D \neq 1$  かつ  $\phi \neq 0$  の時

$$C_s = \left[ f^{\frac{1-\phi}{\phi}} + \frac{(1-\phi)^D}{1-\phi D} \left( f^{D-1} - f^{\frac{1-\phi}{\phi}} \right) \right] C_s^0 \quad (1)$$

$\phi D = 1$  の時

$$C_s = \left[ 1 + (1-D) \left( 1 - \frac{1}{D} \right)^{D-1} \ln f \right] f^{D-1} C_s^0 \quad (2)$$

で表される (Nishimura, 2009)。ここで  $C_s^0$  は珪長質マグマ中の初期微量元素濃度、 $f$  は珪長質マグマの初期質量  $M_s^0$  に対する残存マグマの質量分率 ( $f = M_s / M_s^0$ ) である。珪長質マグマの浮遊結晶量  $\phi$  と元素分配係数  $D$  は一定であると仮定している。結晶—マグマ混合により生じる混合マグマの微量元素濃度  $C_m$  (図1) は成層マグマ溜まり全体のマスバランスより

$$C_m = \frac{C_s^0 + C_m^0 M_m^0 / M_s^0 - f C_s}{1 + M_m^0 / M_s^0 - f} \quad (3)$$

で表される。ここで  $M_m^0$  は苦鉄質マグマの初期質量である。初期条件で貫入する苦鉄質マグマは珪長質マグマよりも高温である。このため混合マグマに取り込まれた珪長質マグマ由来の結晶は全体的あるいは部分的に溶融し (西村ほか, 2014)、混合マグマのメルト (液) 組成に影響を与えると考えられる。ここで扱っている混合マグマの微量元素濃度  $C_m$

は結晶とメルトを合わせた全岩組成であるため、結晶の溶融の程度に影響を受けない。

### 3. 結果

上記の結晶—マグマ混合モデルを用いて、(1) 珧長質マグマの全岩分配係数  $D$ , (2) 2つのマグマの初期微量元素濃度比  $C_m^0/C_s^0$ , (3) 初期重量比  $M_m^0/M_s^0$ , (4) 珧長質マグマの浮遊結晶量  $\phi$ , の4つのパラメータが混合マグマの微量元素濃度変化に与える影響を明らかにする。図2-図5に結晶—マグマ混合による混合マグマの組成進化経路(赤の実線)および通常マグマ混合による混合マグマの組成進化経路(青の破線)を示す。横軸は珧長質マグマ溜まりの相対質量  $f$  で、結晶—マグマ混合が進むと減少する。図中には、 $C_m^0/C_s^0=0.3, 3$ ,  $M_m^0/M_s^0=0.2, 2$  の4組の結果が示されている。

珧長質マグマの全岩分配係数  $D$  は通常マグマ混合の組成進化経路には影響しないが、結晶—マグマ混合の組成進化経路に大きく影響する。 $\phi$ ,  $M_m^0/M_s^0$ ,  $C_m^0/C_s^0$  が同条件で  $D$  が異なる場合(図2と図3)を比較すると、マグマ混合の組成進化経路はどちらも同一となることがわかる(組成軸のスケールの違いに注意が必要である)。しかし結晶—マグマ混合の組成進化経路では、 $D$  が大きい固相濃集元素の場合( $D=10$ )、濃度が増加した後に減少するという特徴(図2)を示すのに対し、 $D$  が小さい液相濃集元素の場合( $D=0.1$ )、濃度が減少した後に増加するという特徴を示す(図3)。固相濃集元素の場合、結晶—マグマ混合の組成進化経路はマグマ混合の組成進化経路より高濃度側にあり、液相濃集元素の場合、結晶—マグマ混合の組成進化経路はマグマ混合の組成進化経路より低濃度側にある。

珧長質マグマに対する苦鉄質マグマの初期微量元素濃度比  $C_m^0/C_s^0$  は、マグマ混合、結晶—マグマ混合ともに、初期組成と最終組成を結ぶ線の傾きの正負を決める。なお、マグマ混合と結晶—マグマ混合の最終組成は同一となる。苦鉄質マグマよりも珧長質マグマの初期微量元素濃度が高い場合、すなわち  $C_m^0/C_s^0$  が1より小さい場合は初期組成より最終組成の方が高濃度となる(図2-図5の  $C_m^0/C_s^0=0.3$ )。反対に苦鉄質マグマよりも珧長質マグマの初期微量元素濃度が低い場合、すなわち  $C_m^0/C_s^0$  が1より大きい場合は初期組成より最終組成の方が低濃度となる(図2-図5の  $C_m^0/C_s^0=3$ )。

珧長質マグマに対する苦鉄質マグマの初期重量比  $M_m^0/M_s^0$  は結晶—マグマ混合プロセスでの組成変化幅に強く影響する。苦鉄質マグマよりも珧長質マグマの初期重量が大きい場合、すなわち  $M_m^0/M_s^0$  が1より小さい場合は、結晶—マグマ混合プロセスで苦鉄質マグマに混入する正味の結晶量が大きくなるため組成変化幅が大きくなる(図2-図5の  $M_m^0/M_s^0=0.2$ )。反対に苦鉄質マグマよりも珧長質マグマの初期重量が小さい場合、すなわち  $M_m^0/M_s^0$  が1より大きい場合は、結晶—マグマ混合プロセスで苦鉄質マグマに混入する正味の結晶量が小さくなるため組成変化幅が小さくなる(図2-図5の  $M_m^0/M_s^0=2$ )。通常マグマ混合においても同様に  $M_m^0/M_s^0$  が1より小さい場合は組成変化幅が大きくなり、 $M_m^0/M_s^0$  が1より大きい場合は組成変化幅が小さくなる(図2-図5)。

珧長質マグマの浮遊結晶量(重量分率)  $\phi$  は結晶—マグマ混合による固相濃集元素の組

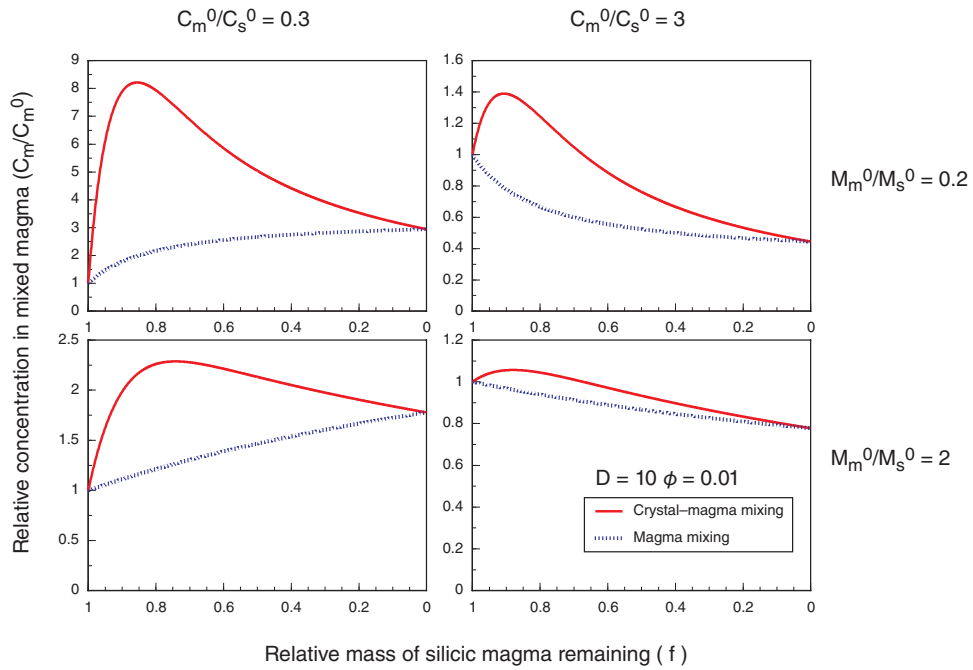


図2  $D=10$ ,  $\phi=0.01$  の場合の結晶—マグマ混合および単純なマグマ混合の組成進化経路

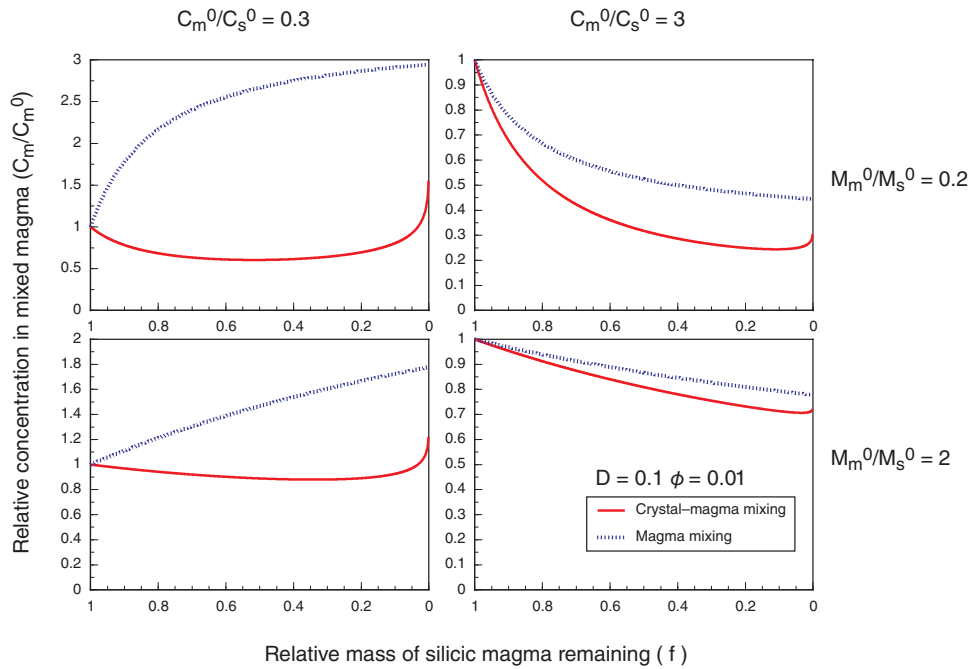


図3  $D=0.1$ ,  $\phi=0.01$  の場合の結晶—マグマ混合および単純なマグマ混合の組成進化経路

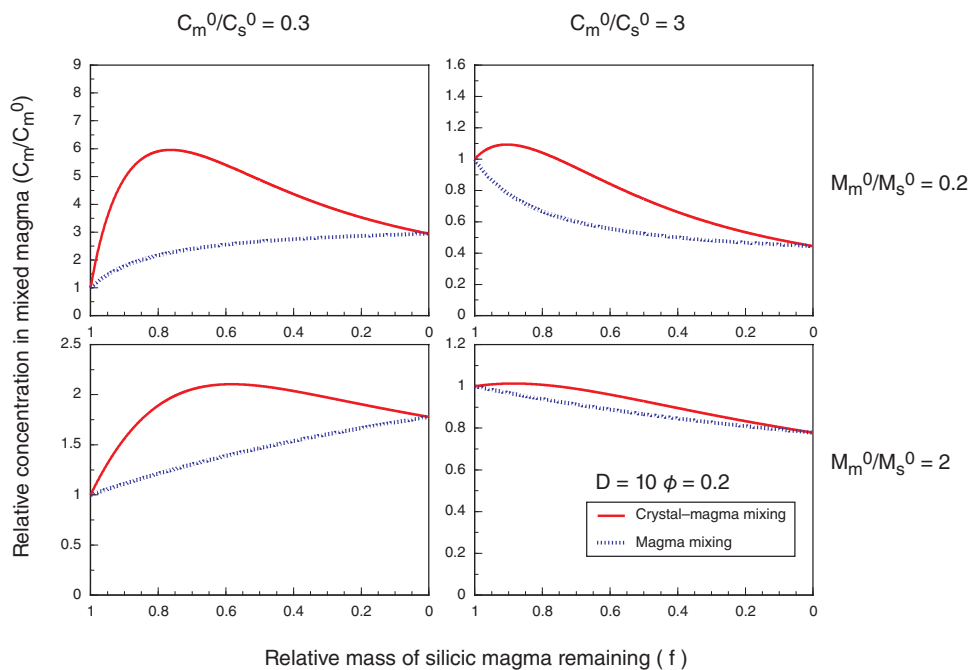


図4  $D=10, \phi=0.2$  の場合の結晶—マグマ混合および単純なマグマ混合の組成進化経路

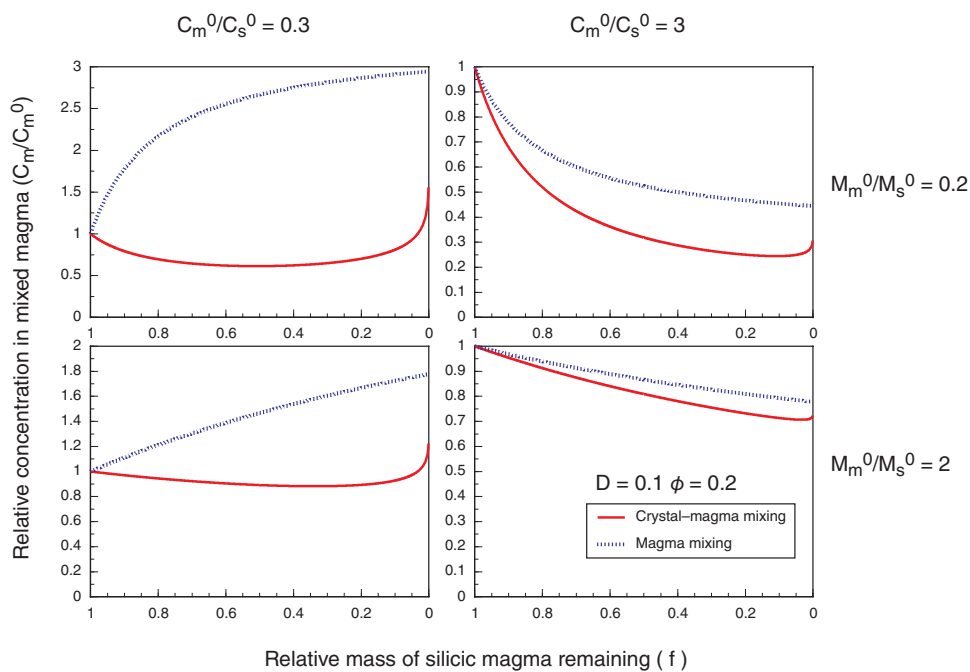


図5  $D=0.1, \phi=0.2$  の場合の結晶—マグマ混合および単純なマグマ混合の組成進化経路



成進化経路に大きく影響する (図 2、図 4)。珪長質マグマ中の浮遊結晶量が小さい場合 (1wt%)、混合マグマ中の固相濃集元素 ( $D=10$ ) は混合の初期に大きく増加する (図 2)。これに対し、珪長質マグマ中の浮遊結晶量が大きくなると (20wt%)、混合マグマ中の固相濃集元素 ( $D=10$ ) は混合の初期に同様に増加するものの、その増加の程度が抑制される (図 4)。このことは浮遊結晶量が増加することで、その結晶中の固相濃集元素濃度が下がることに起因する (Nishimura, 2009)。一方、混合マグマ中の液相濃集元素 ( $D=0.1$ ) の組成進化経路は珪長質マグマの浮遊結晶量にほとんど影響されない (図 3、図 5)。

#### 4. 天然の火成岩への適用

結晶—マグマ混合モデルを天然の火成岩に適用する場合は、いくつかの単純化に注意を払う必要がある。このモデルでは珪長質マグマの浮遊結晶量  $\phi$  と全岩分配係数  $D$  を一定と仮定しているが、実際にはどちらも変化する。とくに後者は結晶化が進むと鉱物組み合わせの変化を反映して大きく変化する。また、上記のモデル計算では  $f=0$  まで計算を行っている。すなわち珪長質マグマがなくなり、すべて混合マグマになるまで計算を行っていることになるが、実際には  $f$  がより大きい段階で結晶—マグマ混合は終了すると考えられる。これは苦鉄質 (混合) マグマが比較的早期に実効ソリダス (結晶量 50vol% 程度の温度) に達して固体として振る舞うようになるためである (Huppert and Sparks, 1988a)。また珪長質マグマも結晶量が増加すると結晶沈降速度が遅くなり (西村, 2012)、最終的には実効ソリダスに達して固体として振る舞うようになると考えられる。

上記の単純化は、しかしながら、組成進化の特徴をつかむためには極めて有効である。ここでは、単純化に注意を払いながら、モデルを天然の火成岩に適用する。香川県小豆島に露出する田ノ浦火成複合岩体の花崗岩中には枕状で細粒の苦鉄質岩 (包有岩) と中粒のトーナル岩 (基質部) からなる多数の複合岩脈が記載されている (吉倉・熱田, 2000; Ishihara et al., 2003)。複合岩脈の化学的特徴から、トーナル岩を構成するマグマは苦鉄質マグマと花崗岩質 (珪長質) マグマの単純な混合では説明できないことが記述されてきた (Ishihara et al., 2003)。最近、西村ほか (2014) は複合岩脈のトーナル岩は苦鉄質マグマと花崗岩マグマ由来の斜長石との結晶—マグマ混合で生じた可能性があることを示した。図 6 に花崗岩、苦鉄質岩、トーナル岩、花崗岩由来斜長石の Sr, Ba 組成 (西村ほか, 2014)、マグマ混合モデルおよび結晶—マグマ混合モデルにより計算した混合マグマの組成進化経路を示す。花崗岩マグマ中の浮遊結晶は斜長石のみと仮定し、斜長石 / 全岩濃度より求めた分配係数 ( $D^{\text{Sr}}=2.11$ ,  $D^{\text{Ba}}=0.37$ ) を全岩分配係数とした。

トーナル岩は苦鉄質岩や花崗岩よりも Ba に乏しく Sr に富む。苦鉄質マグマと花崗岩マグマの単純な混合ではそれら両単成分間の組成をもつマグマしか作り得ないので、トーナル岩は形成されない (図 6 破線)。一方、苦鉄質マグマに花崗岩マグマの斜長石が混入する結晶—マグマ混合が生じた場合は、トーナル岩が形成されうる (図 6 実線)。 $M_{\text{m}}^0/M_{\text{s}}^0$  値が小さいと組成変化幅が大きくなり (図 6 の  $M_{\text{m}}^0/M_{\text{s}}^0=0.1$ )、 $M_{\text{m}}^0/M_{\text{s}}^0$  値が大

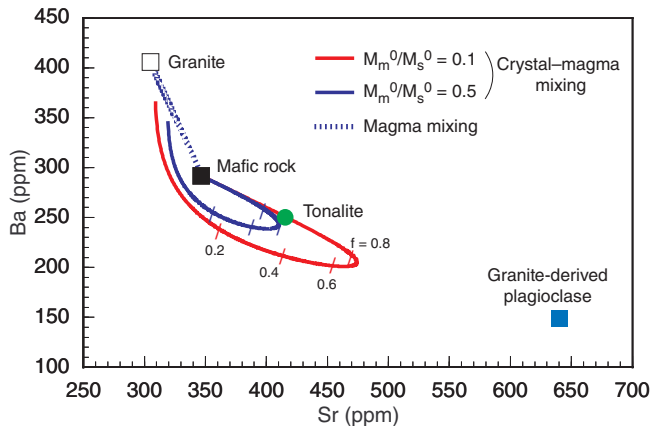


図6 小豆島田ノ浦半島における複合岩脈中の苦鉄質包有岩、トータル岩質基質部、ホスト花崗岩、花崗岩由来斜長石のSr, Ba組成（西村ほか, 2014）. 実線：結晶—マグマ混合の組成進化経路. 破線：単純マグマ混合の組成進化経路.

きいと組成変化幅が小さくなる（図6の $M_m^0/M_s^0=0.5$ ）。この関係から、トータル岩の組成を実現するには $M_m^0/M_s^0$ 値がおおよそ0.5以下でなければならないことがわかる。計算された結晶—マグマ混合の組成進化経路では、 $f=0.8$ 程度までSrが増加し、Baが減少するが、その後Srが減少し、Baが増加するようになる。ただし前述のように、結晶化が進むと斜長石以外の結晶も晶出し $D$ が大きく変化するため、 $f$ が小さくなると組成進化経路が現実的でなくなることには留意しなければならない。 $f$ が大きい間の組成進化経路はほぼ実際の経路を表すと考えることができる（図6のトータル岩組成付近）。本モデルの適用によって複合岩脈のトータル岩は苦鉄質マグマと花崗岩マグマ由来斜長石との結晶—マグマ混合で生じた可能性があることが裏付けられたことになる。

## 謝辞

京都大学地球熱学研究施設の柴田知之博士・芳川雅子博士、高知大学の吉倉紳一教授、産業技術総合研究所の昆慶明博士・高木哲一博士には本研究を進める上でのアイデアや有益なご助言を頂きました。以上の方に記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- Anderson., A. T. (1976) Magma mixing: Petrological process and volcanological tool. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **1**, 3-33.
- Campbell, I. H., Turner, J. S. (1985) Turbulent mixing between fluids with different viscosities. *Nature*, **313**, 3-42.
- Campbell, I. H., Turner, J. S. (1986) The influence of viscosity on fountains in magma chambers. *J. Petrol.*, **27**, 1-30.



- Davidson, J.P., Morgan, D.J., Charlier, B.L.A., Harlou, R., Hora, J.M. (2007) Microsampling and isotopic analysis of igneous rocks: implications for the study of magmatic systems. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **35**, 273-311.
- Huppert, H. E., Sparks, R. S. J. (1988a) The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. *J. Petrol.*, **29**, 599-624.
- Huppert, H. E., Sparks, R. S. J. (1988b) Melting the roof of a chamber containing a hot, turbulently convecting fluid. *J. Fluid Mech.*, **188**, 107-131.
- Ishihara S., Yoshikura, S., Sato, H., Satake, Y., Atsuta, S. (2003) Ilmenite-series pink and gray granitoids and felsic/mafic magma interaction across the late Cretaceous Inner Zone Batholith of SW Japan, *Geol. Surv. Japan, Interim-Report*, **28**, 41-60.
- 小屋口剛博 (1986) 苦鉄質マグマと珪長質マグマの混合機構—不均質なマグマの成因—, 火山第2集, **30**, 41-54.
- Koyaguchi, T. (1987) Magma mixing in a squeezed conduit. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **84**, 339-344.
- Nishimura, K. (2009) A trace-element geochemical model for imperfect fractional crystallization associated with the development of crystal zoning, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**, 2142-2149.
- 西村光史 (2012) 対流する珪長質マグマ溜まりにおける結晶沈降の加速と減速. 東洋大学紀要 自然科学篇, **56**, 19-30.
- 西村光史・柴田知之・吉倉紳一・芳川雅子・昆 慶明・高木哲一 (2014) 小豆島にみられる苦鉄質マグマと花崗岩由来結晶の混合・混交過程：局所微量元素・同位体分析からの制約, *MAGMA*, **96**, 印刷中
- Sakuyama, M. (1979) Evidence of magma mixing: petrological study of Shirouma Oike calc-alkaline andesite volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **5**, 179-208.
- Sakuyama, M. (1981) Petrological study of the Myoko and Kurohime volcanoes, Japan: crystallization sequence and evidence for magma mixing. *J. Petrol.*, **22**, 553-585.
- Sparks, R. S. J., Meyer, P., Sigurdsson, H. (1980) Density variations amongst mid-ocean ridge basalts: implications for magma mixing and the scarcity of primitive lavas. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **46**, 419-430.
- Tait, S. R. (1988) Samples from the crystallizing boundary layer of a zoned magma chamber. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **100**, 470-483.
- 高島紫野・和田稔隆・新正裕尚 (2010) 紀伊半島中部部, 宮ノ谷複合岩脈の産状から推定されるマグマ混合及びカルデラとの関係. 地質雑, **116**, 496-509.
- Wiebe, R. A. (1994) Silicic magma chambers as traps for basaltic magmas: the Cadillac Mountain intrusive complex, Mount Desert Island, Maine. *J. Geol.*, **102**, 423-437.
- Wiebe, R. A., Adams, S. D. (1997) Felsic enclave swarms in the Gouldsboro granite, coastal Maine: A record of eruption through the roof of a silicic magma chamber. *J. Geol.*, **105**, 617-627.
- Wiebe, R. A., Smith, D., Sturm, M., King, E. M., Seckler, M. S. (1997) Enclaves in the

- Cadillac Mountain granite (coastal Maine) : samples of hybrid magma from the base of the chamber. *J. Petrol.*, **38**, 393-423.
- Wiebe, R. A., Ulrich, R. (1997) Origin of composite dikes in the Gouldsboro granite, coastal Maine. *Lithos*, **40**, 157-178.
- Wöner, G., Schmincke, H.-U. (1984) Mineralogical and chemical zonation of the Laacher See tephra sequence (East Eifel, W. Germany). *J. Petrol.*, **25**, 805-835.
- 吉倉紳一・熱田真一 (2000) 花崗岩体に記録されたマグマ混交・混合現象. *月刊地球*, 号外 **30**, 140-145.