

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400517

研究課題名(和文) 組織解析と局所化学分析を用いた同化作用の実態解明

研究課題名(英文) Assessing bulk assimilation in granitic xenoliths

研究代表者

川畑 博 (Kawabata, Hiroshi)

高知大学・教育研究部総合科学系複合領域科学部門・准教授

研究者番号：90392943

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：同化作用は、マグマの多様性をもたらすプロセスの1つとして知られる。本研究では、安山岩に含まれる花崗岩類ゼノリスを対象とし、組織観察と化学組成分析に基づいて同化作用の進行過程を調べた。その結果、ゼノリスの非平衡溶融と、それに続くゼノリス由来マグマ-ホスト安山岩マグマの混合を経て、同化作用が進むことが明らかとなった。また、相平衡関係と熱移動計算の結果を考慮することで、ゼノリス内の温度分布と部分溶融度、マグマ粘性、岩石組織、ガラス・鉱物化学組成、鉱物の分離・分散様式とを関連づけた。これにより、同化作用時に生じる熱化学変化と岩石学的変化を包括的に理解することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：Crustal assimilation is one of the important magmatic processes especially for arc magmas. This study examined the petrological and geochemical evolution during xenolith assimilation on sub-meter scale, using the xenolith-bearing Miocene Setouchi volcanic rocks. A suite of rock samples indicates that xenolith assimilation proceeds through disequilibrium melting of granitic xenoliths and subsequent mixing of xenolith-derived porphyritic magmas with host andesitic magmas. Combined use of phase relations and thermal conductivity of xenoliths allows us to comprehensively understand the thermochemical and petrological change during assimilation.

研究分野：岩石学

キーワード：同化作用 ゼノリス 花崗岩類 非平衡溶融 マグマ混合 瀬戸内火山岩

## 1. 研究開始当初の背景

地殻物質によるマグマの汚染(同化作用)は、マグマの多様性を生むプロセスの1つとして知られる。これまでに全岩化学組成(特に微量元素比や同位体比)を用いて、同化作用の影響を定量的に見積もる手法(Depaolo, 1982)や、同化作用に伴う熱移動・結晶量変化を熱力学的に解析する方法が確立されてきた(Spera & Bohron, 2002; Glazner, 2007)。さらにこうした手法を岩石試料に適用することで、深成岩体-壁岩近傍に分布する不均質な岩相(m~km スケール)が、同化作用によって形成されることが明らかになっている(Saito et al., 2007; Erdman et al., 2010; Diaz-Alvarado et al., 2011; Di Rocco et al. 2012)。

一方、同化作用はマグマに含まれる鉱物の多様性をもたらす点でも重要である。たとえば、壁岩由来鉱物がマグマ中に分散して融解や反応を起こすほか、マグマ-壁岩近傍で生じた混合メルトからの結晶晶出や、ホストマグマ由来結晶-壁岩由来の部分溶融メルト間の反応などを通して、多様な組織・組成をもった鉱物がマグマ内に生じうる。Clarke (2007)がレビューしたように、こうした鉱物の組織・組成に注目して、過去のマグマプロセスを読みとく努力も続けられてきた。しかしながらこれまでの研究では、同化作用後に生じたマグマだまり内での対流や、マグマ上昇時の機械的混合によって既にマグマ中に分散した鉱物を対象としている。つまり、これらは結晶の起源と密接な関係にあるオリジナルな位置情報を失っていると言える。そのため、鉱物の局所同位体比分析から地殻物質の影響度は明らかにできても、具体的にどこで、どのようなプロセスで結晶が成長したかは解釈に頼らざるをえない(例えば Erdmann et al. 2009; Lachey et al., 2012)。

鉱物の持つ情報からマグマプロセスを明らかにするためには、天然試料に注目し、位置情報と組織解析・局所化学分析を組み合わせ、鉱物の多様性を生む過程を明らかにすることが不可欠である。こうしたアプローチに適したサンプルは、パイロ変成作用を被った地殻物質由来ゼノリスであろう(例えば石川ほか, 1985; Kaczor et al., 1988)。本研究で対象とする瀬戸内火山岩には、花崗岩類をはじめとする地殻起源ゼノリスが含まれ、様々な程度に部分溶融を被っている。さらに、ゼノリス構成鉱物がマグマ中に分散し、ホストマグマと反応する様子は、Beard et al. (2005)が指摘した Reactive bulk assimilation に類似する。これらのサンプルに注目し、ゼノリス-マグマ境界に分布する鉱物の組織・組成多様性を、鉱物の位置と近傍メルト組成を用いて整理すれば、マグマ中に分散した鉱物の多様な起源を判別するための有効な指標を提案できるほか、部分溶融度やゼノクリスト分散程度の異なるゼノリスを用いて、ゼノクリストの分散開始条件や

メルト内での元素移動メカニズムを明らかにできると期待される。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、地殻起源ゼノリスを含む火山岩を対象として、マグマが地殻物質によって汚染されてゆく過程(bulk xenolith assimilation)をサブメートルスケールで明らかにすることである。特に鉱物の組織解析と局所分析を行い、メルト組成、鉱物の組成・組織、結晶量の変化を、部分溶融度とゼノリス-マグマ境界からの距離、ホストマグマとの混合度などの指標を用いて整理する。さらに、それをもとにしてゼノクリストの分散開始条件や分散様式、メルト内での元素移動メカニズムを明らかにする。得られた結果は、マグマ中に分散した鉱物の多様な起源を判別するための有効な指標となりうる。

## 3. 研究の方法

(1) 野外調査: 香川県観音寺市に位置する江甫草山(火山岩頸)、伊吹島を調査地域に設定し、地質層序の把握と産状の記載を行った。また、安山岩とそれに含まれる花崗岩類ゼノリスを採取した。全岩化学組成の類似性および、調査対象地域の地質層序を考慮すると、採取した花崗岩類ゼノリスは、つくも山周辺地域の地下約14 km以浅に分布する領家花崗岩類に由来すると考えられる。

(2) 室内分析: 採取サンプルについて岩石組織解析と化学組成分析を行った。特にゼノリスについては、部分溶融度やホストマグマとの混合度の異なるサンプルを選び、組織変化(ガラスの分布、鉱物の外形と組織)や鉱物組み合わせ、メルト量・結晶量の変化を記載した。また、主要なサンプルについて全岩化学組成分析を行うとともに、ガラス・鉱物の化学組成分析を行った。

(3) 熱伝導計算と rhyolite-MELTS(Gualda et al., 2012)を用いた相平衡計算を行い、ゼノリス周囲の温度分布状態の時間変化、部分溶融度、部分溶融ゼノリスやホストマグマの粘性変化を関連づけた。さらに、これらの結果と上記(1),(2)で得られた結果を統合することで、サブメートルスケールでの同化作用の進行過程を読み解いた。

## 4. 研究成果

Bulk xenolith assimilation はゼノリスの非平衡溶融と、それに続くゼノリス由来マグマ-ホスト安山岩マグマの混合を経て進むことがわかった。さらに、天然試料の解析結果と相平衡関係や熱移動計算の結果を用いて、ゼノリス内の温度分布と部分溶融度、マグマ粘性、岩石組織、ガラス・鉱物化学組成、鉱物の分離・分散様式とを関連づけた。これにより、同化作用時に生じる熱化学変化と岩石学的変化を包括的に理解することが可能

となった．以下に主な結果をまとめる．

(1) Bulk xenolith assimilation は2つのステージを経て進むことがわかった．それは、a) ゼノリスの非平衡溶融と、それに引き続く b) ゼノリス由来マグマ-ホスト安山岩マグマの混合である．モード量の系統的な変化から、上記 b) のマグマ混合は、ゼノリスの部分溶融度が約 50% を超えた段階で効果的に生じると推定される．なお、このときの端成分マグマ (無斑晶状安山岩マグマと、50 vol% の結晶を含むゼノリス由来マグマ) の粘性差は 2-3 桁程度と見積られる．

(2) 本研究で扱ったサンプルには、長くても数日程度の時間スケールで生じた同化作用が記録されていると判断できる．この結論は、ゼノリス-ホストマグマ間の熱移動を計算した結果に基づく．熱移動計算では、ホスト安山岩マグマの温度を 1100 程度とした．これは、安山岩の石基組成と相平衡状態関係をもとに見積もった値である．一方、ゼノリス初期温度の正確な見積りは困難だが、以下では最低温度として 50 を仮定した場合について述べる．ゼノリス-ホストマグマ境界温度を 1100 とした場合、マグマにとりこまれた直径 2 m のゼノリス (伊吹島で見られる安山岩中ゼノリスの最大径) の中心部が、ソリダス温度に達するまでに要する日数は約 3 日、部分溶融度 50% に達するまでに約 4 日を要する (球座標の一次元非定常拡散、熱拡散率は  $5.74 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ) ．ゼノリス初期温度がさらに高温であれば、より短い時間で上記の温度条件に到達することから、同化作用は数日以内の短期間に起こったと考えられる．

(3) ゼノリスの非平衡溶融に伴い、鉱物の分離・細分化様式が以下のように変化することがわかった．

15% から 25% 程度のガラスを含む、低部分溶融度ゼノリスでは、石英とその他の主要鉱物との相境界のみにメルトバンド (1 mm 厚以下) が発達する．一方、斜長石-アルカリ長石、長石-含水苦鉄質鉱物 (黒雲母または角閃石の仮像となっている) の境界にはメルトバンドは発達せず、境界部にガラスが小規模に点在するのみである．つまり、溶融初期段階において、石英のみが選択的に他の鉱物から完全に分離することを意味している．

部分溶融度がより大きく、35% から 65% のガラス量を含むサンプルでは、丸みを帯びたとけのこり鉱物がガラス中に分散し、全体としてマトリックス (ガラス) サポートを呈する．斜長石-アルカリ長石、長石-含水苦鉄質鉱物の境界では、依然としてメルトバンドが発達しないため、これらは接触状態を保ったままサイズを減ずる．こうしたサンプルで特筆すべき点は、墨流し模様を示すガラス (特にガラス量 60-65% 程度のサンプル) やジグソークラックの発達した鉱物が観察されることで

ある．このことは、ゼノリス由来の斑状マグマ (とけのこり鉱物 + 流紋岩質メルト) が流動できる状態にあり、差応力に起因する脆性破壊によって、結晶の細分化が進むことを示唆している．このときのマグマ粘性は歪速度によっても変化するが、少なくとも  $10^6 \text{ Pa s}$  から  $10^8 \text{ Pa s}$  以上 (歪速度が  $1 \text{ s}^{-1}$  以下の場合) であると推定される．

(4) ゼノリス内に見られるガラスは、近接鉱物に応じて色や化学組成が異なる．類似の特徴は、パイロ変成作用を被ったゼノリスや、花崗岩の非平衡溶融実験でも報告されている．

本研究で扱ったサンプルでは、無色透明ガラスが石英や長石の近傍に分布するのに対し、褐色ガラス (不透明な晶子がガラスに散在) が含水苦鉄質鉱物近傍に分布する．ガラス組成は Si と Al において不均質 (例えば  $\text{SiO}_2 = \text{約 } 8 \text{ wt\%}$ ) だが、K や Na は比較的均質である．また、石英近傍のガラスは、長石や含水苦鉄質鉱物近傍のそれに比べて Si に富み、Al に乏しい．こうした組成不均質性は珪酸塩メルト内における、Si と Al の遅い元素拡散速度を反映していると解釈できる．

前述したように、部分溶融度が 25% 以下の場合、メルトバンドが石英の周囲にのみ発達する．メルトバンドを横断する元素プロファイルが示すように、この段階では拡散が元素移動を主に担っている．それに対し、部分溶融度が 35% を超えると、メルトの流動が組織観察から示唆されることから、この段階では元素移動に果たす移流の役割が大きくなると想定される．

(5) ホスト安山岩と花崗岩類ゼノリス、さらに両者の境界に発達する混合部 (ゼノリス由来鉱物、安山岩由来斑晶とそれをうめる石基からなる) を対象に、ガラス・石基組成の面分析を行った．その結果、3つの組成変化トレンドが確認された．それは、安山岩の分化トレンド、ゼノリス内ガラスの示す拡散トレンド、混合部が示すミキシングトレンドである．このことは、同化作用が a) ゼノリスの非平衡溶融と、それに引き続く b) ゼノリス由来マグマ-ホスト安山岩マグマの混合を経て進行することを示す．

(6) ゼノリスの部分溶融に伴い、鉱物の組織と組成が系統的に変化することが明らかとなった．これらの鉱物はその後、ホストマグマと反応することで組織と組成がさらに改変していく．以下には、主要なゼノリス構成鉱物の組織・組成変化を述べる．

アルカリ長石 ( $\text{Or}_{60}$ ) は部分溶融に伴うメルトとの反応が進むにつれ、アノーソクレス、灰曹長石、さらには中性長石へと組成が大きく変化する．また、反応部分は顕著な sieve texture を呈する．それに対し、斜長石 ( $\text{An}_{25}$ ) は部分溶融時における組成・組織

変化が小さい。Or 成分に富む場合と An 成分に富む場合の 2 つの組成変化が認められ、全体として灰曹長石から中性長石の組成範囲を示す。このように、ゼノリスを構成するアルカリ長石と斜長石は、メルトとの反応を通して類似した組成をもつようになるが、その結果生じる組織は両者で大きく異なっている。また、部分溶融ゼノリス内では、反応で生じた長石の組成は中性長石 An<sub>50</sub>を超えないが、安山岩マグマとの混合を被ると曹灰長石組成に達する。

ゼノリスを構成していた含水苦鉄質鉍物（黒雲母や角閃石であったと思われる）は、いずれのサンプルでも完全に分解しており、斜方輝石（Mg#=70 程度）、磁鉄鉍、イルメナイト、斜長石、コーディエライトなどの細粒鉍物集合体として観察される。ゼノリスの溶融が進むにつれて集合体のサイズが減少し、鉍物組み合わせも磁鉄鉍 ± 斜方輝石と単純になる。

Beard et al. (2005) はゼノリス・ゼノクリストーホストマグマ間でおこる相互作用の重要性を指摘した。本研究をふまえると、ホストマグマと反応する鉍物は、ゼノリス構成鉍物そのものである必要はなく、部分溶融によって組成や組織が大きく変化した鉍物であってもよいことがわかる。そうした鉍物にはゼノリスの被った非平衡溶融の痕跡が同位体非平衡として保存されている可能性がある。これは、火成岩中に分散したゼノリス由来鉍物の履歴を読み解く上で注意すべき点であると言える。

(7) ゼノリスがホストマグマへ分散する過程として、大きく 2 つのシナリオが想定される。1 つめは、ゼノリスが部分溶融し、それによって生じた斑状マグマがホストマグマと混合する場合である（シナリオ A）。本研究のサンプルには主にこの過程が記録されている。2 つめは、ゼノリスがサブソリダス条件で分裂・細分化し、ゼノリス構成鉍物がホストマグマに分散する場合である（シナリオ B）。どちらのシナリオをとるかは、ゼノリスの温度履歴や、ゼノリス強度、マグマがゼノリスに与える差応力の大きさなどの条件に依存するだろう。

すでに同化作用を被ったサンプルから、上記に挙げた 2 つのシナリオを判別する場合、石英ゼノクリストに注目することが重要だと言える。石英が単独でホストマグマへ分散している場合は、シナリオ A を経た鉍物である可能性が高い。これは、部分溶融初期段階で石英のみが他の鉍物から完全に分離するためである。一方、石英が異種鉍物と接する場合は、シナリオ B が起こったと判断できる。

さらに、メルト量 50%程度まではゼノリスが 1 つの“物体”として振る舞うことを考慮すると、シナリオ A で同化作用が進んだ場合、サンプル中に観察されるゼノクリストと同程度か、もしくはそれ以上のゼノリス由来メ

ルトがホストマグマと混合したと推定できる。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 9 件)

川畑博 (2015) 電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM/EDX) を用いた珪酸塩鉍物の定量分析—スタンダードレス法の評価—。高知大学学術研究報告, 64, 181-192. 査読なし

Kimura, J.-I. & Kawabata, H. (2015) Ocean Basalt Simulator version 1 (OBS1): Trace element mass balance in adiabatic melting of a pyroxenite-bearing peridotite. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 16, 267-300. 査読あり

Hirahara, Y., Kimura, J.-I., Senda, R., Miyazaki, T., Kawabata, H., Takahashi, T., Chang, Q., Vaglarov, B. S., Sato, T. & Kodaira, S. (2015) Geochemical variations in Japan Sea back-arc basin basalts formed by high-temperature adiabatic melting of mantle metasomatized by sediment subduction components. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 16, 1324-1347. 査読あり

Miyazaki, T., Kimura, J.-I., Senda, R., Vaglarov, B.S., Chang, Q., Takahashi, T., Hirahara, Y., Hauff, F., Hayasaka, Y., Sano, S., Shimoda, G., Ishizuka, O., Kawabata, H., Hirano, N., Machida, S., Ishii, T., Tani, K. & Yoshida, T. (2015) Missing western half of the Pacific Plate: Geochemical nature of the Izanagi-Pacific Ridge interaction with a stationary boundary between the Indian and Pacific mantles. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 16, 3309-3332. 査読あり

Shuto, K., Nohara-Imanaka, R., Sato, M., Takahashi, T., Takazawa, E., Kawabata, H., Takanashi, K., Ban, M., Wantanabe, N. & Fujibayashi, N. (2015) Across-arc variations in geochemistry of Oligocene to Quaternary basalts from the NE Japan arc: Constraints on source composition, mantle melting and slab input composition" for publication. *Journal of Petrology*. 56, 2257-2294. 査読あり

Sato, K., Kawabata, H., Scholl, D.R.,

Hyodo, H., Takahashi, K., Suzuki, K. & Kumagai, H. (2016) 40Ar-39Ar dating and tectonic implications of volcanic rocks recovered at IODP Hole U1342A and D on Bowers Ridge, Bering Sea. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. v. 125-126, 214-226. 査読あり

Kimura, J.-I., Gill, J.B., van Keken, P.E., Skora, S., & Kawabata H. (2016) Origin of geochemical mantle components: Role of subduction filter. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 17, 3289-3325. 査読あり

Kiminami, K., Imaoka, T., Ogura, K., Kawabata, H., Ishizuka, H., & Mori, Y. (2017) Tectonic implications of Early Miocene OIB magmatism in a near-trench setting: The Outer Zone of SW Japan and the northernmost Ryukyu Islands. Journal of Asian Earth Sciences. 135, 291-302. 査読あり

Kimura, J.-I., Gill, J.B., van Keken, P.E., Kawabata H., & Skora, S. (2017) Origin of geochemical mantle components: Role of spreading ridges and thermal evolution of mantle. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 18, 697-734. 査読あり

〔学会発表〕(計3件)

小竹雄太・川畑博(2015)室戸岬ハンレイ岩体上部境界における砂岩の部分溶融。第15回日本地質学会四国支部講演会, 2015年12月5日・高知大学(高知県高知市)

小倉和樹・川畑博(2016)花崗岩ゼノリスの部分溶融と同化過程。日本地球惑星科学連合2016年大会, 2016年5月26日・幕張メッセ(千葉県千葉市)

川畑博・小倉和樹(2017)安山岩質マグマにとりこまれた花崗岩ゼノリスの非平衡溶融・同化過程。日本地球惑星科学連合2017年大会, 2017年5月22日・幕張メッセ(千葉県千葉市)

〔図書〕(計1件)

野田篤・植木岳雪・川畑博・松浦浩久・青矢睦月(2017)「観音寺地域の地質」地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)高知(13)第30号 NI-53-27-8, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, pp. 96(担当ページ P.10, 45-62, 82-85)。

(1)研究代表者

川畑 博(KAWABATA, Hiroshi)

高知大学・教育研究部総合科学系複合領域科学部門・准教授

研究者番号: 90392943