

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340160

研究課題名(和文)実時間スケールの決定によるマグマダイナミクスの解明

研究課題名(英文)Elucidation of the dynamic magma system by precise time-scale evaluation

研究代表者

中村 栄三(Nakamura, Eizo)

岡山大学・地球物質科学研究センター・教授

研究者番号：80201672

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円、(間接経費) 4,560,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、火山活動におけるマグマダイナミクスに関する理解を推し進めるため、噴出物から絶対的な時間軸を取り出す手法の開発とその応用を試みた。研究の結果、マルチコレクションICP-MSを用いた新たなU-Th-Ra放射非平衡年代測定法を開発し、その応用として富士火山の噴出物の解析を実施した。また噴出年代を決定するため、新たなK-Ar年代測定法を確立し10万年を切る若い火山岩に対して精密に噴出年代を決定する方法を確立した。巨大珪長質噴火をマグマダイナミクスとして説明するモデルを構築し、公表した。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the dynamic magma system of volcanoes, we attempted to develop new age dating methods then applied them to natural volcanic ejecta. Consequently, we established new U-Th-Ra disequilibrium dating method by using multi collection ICP-MS, and determined the duration of magma supply sequences of Fuji volcano. Additionally, we examined new K-Ar dating combining the spiked and the unspiked sensitivity method to determine eruption ages less than 0.1 Myrs. This method could be successfully applied for lavas from Bratan volcano in Indonesia. The dynamic eruption model regarding supervolcanic eruptions driven by melt buoyancy was established.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：マグマダイナミクス U-Th-Ra 放射非平衡 表面電離型質量分析計 マルチコレクションICP-MS 富士火山 斑晶鉱物 K-Ar年代測定

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

1. 研究開始当初の背景

マグマは、地球・惑星深部の物理・化学的情報を、物質科学的に取り扱うことができる形で我々にもたらす重要な物質である。しかし、そのダイナミックなプロセス（分化・マグマ混合・地殻物質の混染等）を理解しなければ、それによって覆い隠された深部情報を正確に読み取ることは難しい。この問題意識に立ち、これまで多くの岩石学者、地球化学者、地球物理学者らが、マグマプロセスを定量的に理解するための研究を精力的に実施してきた。しかしこの課題の理解に必要な不可欠である、マグマ発生場から地表に到達する間のマグマプロセスの空間・時間スケールに関する定量的理解はいまだ十分とは言えない。ここで述べる空間スケールとは、マグマ発生場から滞留場への距離やマグマ溜まりの深さ、サイズ、形状に関するものに加え、マグマの発生・固液反応・移動・混合・結晶化といった各々の分化プロセス進行の領域を記述する基本的なパラメータである。この空間スケールとプロセスの絶対的時間スケールと組み合わせることで、その時間発展を記述し物理化学的理解を進めることが可能となるが、問題は、この空間スケールを直接正確に見積もることが極めて困難である点にある。例えば、「活動的な」火山のマグマ溜まりの深さ・位置に関しては、地球物理学的探査によって情報を得る努力が続けられているが、サイズ・形状といった三次元的構造を議論するには至っていない。ましてや「活動的でない」火山に対しては、この手法を適用するのは困難である。そこで本研究は、マグマプロセスにおける空間・時間スケールの密接なカップリングに着目し、先進的な地球化学的手法を応用した絶対的時間情報の抽出と、詳細な物質解析に基づくマ

グマプロセスの記述から、前述の空間スケールを演繹し、火山場におけるマグマダイナミクスモデル化を目指す新たな研究アプローチを選択する。これは、現在活動中の火山はもとより、過去のマグマ活動の解析にも応用可能な基本的手法であり、今後のマグマダイナミクス研究の基盤となることが大いに期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、数 10 万年から数年、場合によっては数時間程度のマグマプロセスに関する時間スケールを実際の噴出物から直接抽出する手法を確立し、それに基づいた空間スケール（マグマ溜まりのサイズ、形状、構造、プロセス進行の領域など）の定量化と、マグマプロセスのモデル化を試みる。これらは、(1)高感度表面電離型質量分析計（HS-TIMS）とマルチコレクション ICP-MS（MC-ICP-MS）を用いた U-Th-Ra 放射非平衡年代の高精度測定法の高度化、(2)定量的結晶成長カイネティクスに基づく新たな「時計」を開発し、火山岩斑晶中に記録された化学的情報を時間発展として読み解く手法の確立、(3)上記二つを組み合わせ、実際に天然試料の系統的解析を実施することによって、時間情報を基準としたマグマプロセスのモデル化を実施する。

まず、HS-TIMS および MC-ICP-MS を用いて、現在我々が実施している U-Th-Ra 非平衡年代の測定精度を、従来の 2 倍以上に向上させる。

3. 研究の方法

HR-SIMS による極微小領域分析技術の開発

研究代表者及び分担者等は、二次イオン質量分析計を用いて直径 5 μ m 前後の領域、

すなわちEPMAやEDXによる主要元素分析とほぼ同等の空間解像度での同位体・微量元素の測定法を確立する。この空間解像度の向上は、天然試料のより詳細な解析にとどまらず、マグマ非平衡結晶化実験の結果の解析に主要な役割を果たすため、必須の技術である。

HS-TIMS による Th・Ra の同位体測定技術の高度化

TIMS による分析は、確度の高い同位体比を決定できる最も有効な手法である。研究代表者らは HS-TIMS(Finnigan TRITON) を用い、これまで培った Th 分析法を応用して、同一試料量で、Th ($^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$)、Ra($^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$)の同位体測定精度を目標近くまで向上させ、 $^{238}\text{U}-^{230}\text{Th}$ 非平衡年代測定における年代の確度を従来の約 2 倍以上まで向上させる。

MC-ICP-MS による Th・U の同位体測定技術の高度化

イオン化効率の高い MC-ICP-MS を用いた Th-U 同位体測定技術を確立する。MC-ICP-MS では質量分別効果が一定でなく、絶対的な同位体比を決定できない。そのため未知試料測定の前後に同位体比既知の標準試料を測定し、そのずれの補正により未知試料の同位体比を計算する必要がある。したがって、さらなる分析精度・確度の向上には、前項で達成する HS-TIMS による高精度 Th・Ra 同位体比測定法に基づいた高精度標準試料が欠かせない。我々の特徴は、他の研究機関と異なり、確度の高いTIMS測定を基準にTh・Raの標準試料の作成が可能にある。これにより、MC-ICP-MSの能力を十二分に活かした高確度同位体分析が実施可能である。Raの分析に関しては、MC-ICP-MSと

HS-TIMSの双方を用いることで現状よりさらに高いRaの同位体比測定精度を達成し、より高精度の $^{230}\text{Th}-^{226}\text{Ra}$ 非平衡の測定、さらには従来のTIMSでは検出が困難な $^{232}\text{Th}-^{228}\text{Ra}$ 非平衡(30~0.5年)の測定へと発展させる。

研究代表者らは、富士山と同じ伊豆弧に属する三宅島火山について岩石学・地球化学的手法及びU-Th-Ra放射非平衡年代法を適用し、その噴火ステージがスラブからの断続的な流体放出のタイミング(~1000年オーダー)に依存しているという重要な知見を得ている。同様の観点から富士山火山を詳細に検討し、三宅島火山と比較を行うことで、島弧火成活動の基本マグマプロセスの解析を行う。富士火山の試料に関しては、新富士を中心に既に試料を採取しているが、古富士及び富士火山の前駆火山体と考えられる小御岳火山の試料を追加採取する必要があるため、野外調査を行う。

U-Th-Ra系列放射非平衡年代法の確立とその応用

MC-ICP-MSを用い、15万年~3000年に対応した年代測定を確立させ、 $^{238}\text{U}-^{230}\text{Th}$ 法(30万年~5000年)、 $^{235}\text{U}-^{231}\text{Pa}$ (15万年~3000年)、 $^{230}\text{Th}-^{226}\text{Ra}$ (8000年~100年)、 $^{232}\text{Th}-^{228}\text{Ra}$ (30~0.5年)という、30万年から0.5年の時間スケールを持つマグマプロセスに対応した、4種類の放射非平衡年代測定法天然試料に応用する。

U-Th非平衡年代測定・微小領域分析技術を実際に富士火山から系統的に採取された試料に適用し、おのこの形成場とマグマ形成から噴火に至るまでのプロセスに絶対的時間軸を入れていく。富士火山の活動は、数10万年前以前に活動を開始したと考えられる小御岳、約10万年からの古

富士火山、約1万年前から現在に至る新富士火山の活動に分けることが可能であるが、これらの活動をマグマプロセスの時間変化として記述し、その火成活動を理解しなければならない。本研究においては、既に採取済みの試料に加え、平成23年度に追加採取する試料を用いる。U-Th-Ra非平衡年代測定法を活用し、それら試料に記録されたマグマプロセスに時間的制約を与えたうえで、詳細な岩石学的記載・地球化学的分析結果をマグマ非平衡結晶化実験の結果をもとに解釈を試みる。これらの研究手法によって明らかとなるであろう、マグマの上昇速度、マグマ注入のタイミング、マグマの冷却速度などに関する制約条件を、物理学的モデリングや観測結果と合わせることで、富士火山のマグマシステム時空間発展モデルを構築する。さらに策定された富士山ハザードマップなど噴火災害に関する取り組みと、本研究によって明らかとなるマグマプロセスとその火山が位置する場との関係、また噴火の周期性や様式に関する考察によって、物質科学的な火山噴火予知の可能性をも検討する。

4. 研究成果

本研究は、基盤となる分析・解析技術の確立に重点を置いたうえで、富士火山噴出物の解析とマグマ溜りにおけるメルトダイナミクス of 物理モデルの構築を精力的に推進した。研究計画に上げた HR-SIMS による極微小領域分析、高感度表面電離型質量分析計による Th および Ra 同位体測定技術の高度化、そしてマルチコレクション ICP 質量分析計による同位体測定技術の高度化は、研究分担者である牧嶋を中心に、スーパーテクニシャンである T. Chekl 博士の協力を得てほぼ達成できたと考えて

いる。Th 同位体のマルチコレクション ICP 質量分析計による分析法の開発に取り組んだ結果、目標とする誤差~5%を切る年代測定法も確立した。富士火山噴出物については 35 試料について U-Th-Ra 放射非平衡年代決定、主要・微量元素測定および Sr、Nd 同位体組成の分析を行った。この結果をもとに富士火山マグマシステムに関するモデリングを進め、現在論文としての取りまとめを行っている。研究を推進するうえで、火山岩斑晶に記録された結晶成長の詳細な記載は不可欠であった。顕微ラマン分光装置カソードルミネッセンス検出器を備えたフィールドエミッション走査電子顕微鏡ならびにフィールドエミッション透過電子顕微鏡と組み合わせ、ミクロン~サブミクロン領域での結晶構造記載、組成変化記載を富士火山試料についても行い、記載岩石学的な側面からも有益な情報をえた。また当初研究計画にはなかったが、スパイクを用いない感度法による K-Ar 年代測定の高度化に取り組み、1 万年より若い火山噴出物についても~10%程度の誤差で年代測定が可能とした。これは U-Th-Ra 非平衡年代のアンカーとなる噴出年代を精密に決定することになり、本研究計画を遂行するうえで非常に大きな進展であった。

さらに本研究によって開発された U-Th-Ra 放射非平衡年代と試料の精密な段階的酸溶脱法を組み合わせ、1 万年を切る若い火山噴出物の年代測定を可能とする重要なブレイクスルーを成し遂げた。これについては現在研究分担者とともに論文を投稿中である。今後のさらなる研究展開を踏まえ、2 台の希ガス質量分析計を用いて、同位体希釈法と感度法を同一試料に適用し、Ar 同位体初生値の不確かさに起因する年代誤差を低減する新たな K-Ar 年代測定の

開発も開始し、本研究期間内には完了しなかったが、平成 26 年度中の実用化を目指している。これによって U-Th-Ra 非平衡年代（噴火からの相対年代）の基準となる噴出年代をさらに精密に決定することが可能となり、今後の火山学の発展にも大いに寄与するに違いない。また本研究の成果の一部として、巨大火山噴火のマグマダイナミクスに関する地球物理学的モデルに関して *Nature Geoscience* 誌に成果を公表した。これは、10~40MPa の過剰圧が岩脈（マグマの通り道）の進展に必要であり、これは、マグマ自体の浮力によってもたらされる。従来考えられてきた、マグマの再注入や気相の飽和（発泡）やテクトニックストレスを考慮しなくても、地球史に多大な影響を与えてきた巨大珪長質噴火を説明可能な画期的なモデルであり、高く評価されている。

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 3 件)

Feineman, M., Moriguti, T., Terui, S., Nakamura, E., Yokoyama, T., Sediment-enriched adakitic magmas from the Daisen volcanic field, Southwest Japan, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, 3009-3031, 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/ggge.20176>
Ryu, S., Kitagawa, H., Nakamura, E., Itaya, T., Watanabe, K., K-Ar analyses of the post-caldera lavas of Bratan volcano in Bali Island, Indonesia-Ar isotope mass fractionation to light isotope enrichment, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 264, 107-116, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.07.002>
Malfait, J.W., Seifert, R., Petitgirard, S., Perrillat, J., Mezouar, M., Ota, T., Nakamura, E., Philippe, L., Sanchez-Valle, C., Supervolcano eruptions driven by melt buoyancy in large silicic magma chambers, *Nature Geoscience*, 2014. <http://dx.doi.org/10.1038/NGEO2042>

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.misasa.okayama-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中村 栄三 (NAKAMURA EIZO)

岡山大学・地球物質科学研究センター・教授

研究者番号：80201672

(2)研究分担者

牧嶋 昭夫 (MAKISHIMA AKIO)

岡山大学・地球物質科学研究センター・教授

研究者番号：70219301

田中 亮吏 (TANAKA RYOUJI)

岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授

研究者番号：00379819

小林 桂 (KOBAYASHI KATSURA)

岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授

研究者番号：20325129