

令和 6 年 5 月 2 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02001

研究課題名(和文) 巨大カルデラ形成噴火におけるマグマ蓄積プロセスの特異性の解明

研究課題名(英文) Specificity in magma preparation processes for large caldera-forming eruptions

研究代表者

栗谷 豪 (Kuritani, Takeshi)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：80397900

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：低頻度ながら、破局的な巨大カルデラ形成噴火はなぜ発生するのかという問題に関連して、膨大な珪長質マグマが準備される特異性やその要因を明らかにする目的で、国内の代表的なカルデラ火山(支笏・屈斜路・洞爺・始良・十和田)の噴出物を対象に、U-Th放射非平衡を軸とした物質科学的解析を行った。その結果、全てのカルデラにおいて、「噴火直前に蓄積された膨大な量の珪長質マグマは、40年以上前から存在した主要なマグマ(=長寿命珪長質マグマ系)と、新しい時期に断続的に生成した付加的なマグマから構成される」という、非常に興味深い共通点を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

破局的噴火の発生要因の理解は、地球科学の枠組みに収まらず、気候環境や防災面の観点から人類共通の課題でもある。巨大カルデラ形成噴火の研究における主な問題点は、(1) 膨大な量のマグマが生成・蓄積するメカニズムは何か？(2) 噴火を引き起こすメカニズムは何か？(3) 現在形成されつつある巨大マグマ溜りをどのように検知するか？という点であるが、本研究ではこのうち(1)に関わる、巨大カルデラ火山のマグマ系の発達過程を根源的に理解するための手がかりが得られたといえる。

研究成果の概要(英文)：Regarding the question of why catastrophic caldera-forming eruptions occur, petrological and geochemical analyses, including U-Th disequilibrium analyses, were conducted on eruptive products from some representative caldera volcanoes in Japan, with the aim of clarifying the uniqueness and factors behind the preparation of huge felsic magmas. As a result, an interesting commonality was found in all the studied caldera volcanoes: the voluminous felsic magmas responsible for the caldera-forming eruptions consisted of the main long-lived (>400 kyrs) felsic magmas and additional magmas that were generated intermittently in younger periods.

研究分野：火成岩岩石学・地球化学

キーワード：カルデラ 珪長質マグマ マグマ溜まり 火山岩 U-Th放射非平衡

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大規模なカルデラ形成を伴うような珪長質マグマの噴火は、地球上で最も破局的な自然現象の一つである。火山の噴火は大小様々な規模で発生するが、噴火時における噴出物の量などに基づいて定義される火山爆発指数 (VEI; volcanic explosivity index) として 0 から 8 まで分類されており、このうち VEI が 1 以下の小規模な噴火は地球上のどこかで日常的に発生している。その一方で VEI が 7 を超えるような巨大噴火の発生頻度は、数千年に一度程度である。

低頻度ながら、破局的な噴火はなぜ発生するのかという問題は、地球科学の枠組みに収まらず、気候環境や防災面の観点から人類共通の課題でもある (Self & Blake, 2008)。この問題のポイントは、低 VEI の噴火と比較して桁違いに膨大な量の珪長質マグマは、どのような特異的な条件が満たされることによって地殻内に蓄積されるに至ったのか、という点である (Miller & Wark, 2008)。マグマの蓄積量は「マグマの平均蓄積率×マグマの総蓄積時間」であるため、特異性の要因としては (1) マグマの蓄積率の高さ、(2) マグマの蓄積時間の長さ、が挙げられる。もし (1) の場合、珪長質マグマはマントルで生成した初生マグマが地殻内で分化したものか、もしくは初生的なマグマが熱源となり地殻物質を融かすことによって二次的に生成したものであるため、上述の特異性については初生マグマの生成率の一時的な増大など、マントル内の過程に要因を求める必要がある。一方で (2) の場合、非常に長期間にわたって地殻内に珪長質マグマが蓄積しつつある間になぜ噴火が起きなかったのかが問題となり、地殻内の過程に要因を求める必要がある。

この課題に関連する研究として、これまで巨大カルデラ形成噴火の噴出物に含まれるジルコン結晶を対象とした U - Th 系の放射性同位体に基づき、マグマ中における結晶の滞在時間 (= 結晶化年代 - 噴火年代) の推定が行われてきた (Costa, 2008; Storm et al., 2012; Rubin et al., 2017; Cheong et al., 2019)。しかしながら、結晶の滞在時間はマグマの蓄積時間に必ずしも対応するわけではないため、これらの研究が上述の問題に直接的な解を与えることは無かった。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究では全岩の U - Th 放射非平衡に着目することにより「巨大カルデラ形成噴火に関わる多量の珪長質マグマの生成には、どのような特異的な要因が必要なのか」という問いに、実証的に答えることを目指した。具体的には、国内 6 箇所の代表的なカルデラ火山において、噴出物を対象とした U - Th 放射非平衡法を軸とする物質科学的解析に基づき (1) 珪長質マグマが生成したプロセスやその履歴、(2) マグマ蓄積プロセスの時間スケール、(3) 膨大な量のマグマが蓄積されるに至った特異的な要因、を明らかにし、それらの情報を集約・整理することによって、国内のカルデラ火山についてのマグマ準備プロセスの時間スケールや特異性の特徴を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究で用いる U - Th 放射非平衡法は、現在から遡って約 40 万年前までのマグマプロセスに対応することができる。このため、国内の比較的若いカルデラ火山 (洞爺 (約 114 ka) 阿寒 (約 175 ka) 屈斜路 (約 120 ka) 支笏 (約 43 ka) 十和田 (約 25 ka) 始良 (約 30 ka)) を対象とした。本研究で実施したサブ課題 (A~D) は以下の通りである。

課題 A: U - Th 放射非平衡測定法の確立

全岩試料の分析では、まずは酸で溶液化した試料を誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) で測定して U/Th 比を決定する。そしてさらに複数のイオン交換樹脂を利用して溶液試料から Th を単離し、マルチコレクタ型 ICP-MS で測定して $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 比を測定する。本研究では特に、生データのキャリブレーション方法を工夫することによって $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 比の分析精度・確度の向上を目指す。

課題 B: 各カルデラ火山のマグマプロセスの解明

各火山において本質物質である軽石を採取し、主要・微量元素組成、Sr, Nd, Pb 同位体比を測定する。そしてそれらの物質科学的情報を基に、カルデラ噴火に伴う巨大な珪長質マグマの生成プロセス (苦鉄質マグマからの結晶分化作用 or 地殻物質の部分溶融) を明らかにする。

課題 C: マグマプロセスの時間スケールの推定

各カルデラ火山において、代表的な軽石試料の U-Th 放射非平衡を測定する。得られたデータは、珪長質マグマの生成過程（地殻の溶融 vs. 結晶分化作用）に応じて時間データへの変換を行う。結晶分化作用と同時に地殻物質の同化作用が起きていた場合には、両過程および Th の放射壊変を考慮した保存式を利用して時間スケールの推定を行う。

課題 D：マグマ準備過程の特異的要因についての検討

全 6 か所の研究対象について、上記の情報を集約・整理し、マグマの準備プロセスの時間スケールに関する共通点や特異性の特徴を明らかにする。

4. 研究成果

(1) U-Th 放射非平衡測定法の確立

$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 比の分析精度・確度の向上を図るため、マルチコレクタ型 ICP-MS 装置への RPQ フィルターの装着（ ^{230}Th への ^{232}Th のテーリング効果の低減）、脱溶媒システムの使用、複数の標準試料（アメリカ地質調査所の BHV0-2 と W-2）を使用したデータ補正の試み、などを行った。その結果、 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 比について 0.5% 程度の繰り返し再現性での測定が可能になり、またモニター試料として測定した BCR-2 の同位体比についても推奨値と一致していることが確認された。

確立した U-Th 放射非平衡分析法の火山岩試料への適用性を確認するため、白頭山 10 世紀噴火の噴出物（北海道大学の保管資料）について分析・解析を行った。その結果、火山岩の成分（トラカイト安山岩質、トラカイト質、コメンダイト（流紋岩）質）に対応して U-Th 放射非平衡データが系統的に変化していることが確認され、そして主要な珪長質マグマは 2 万年以上前から準備されていたことなどを明らかにした。この成果については、確立した分析法とともに Lithos 誌に掲載されるに至った。

(2) 支笏カルデラ

支笏カルデラについては、コロナ禍のために自らの試料が十分に採取できなかったため、北海道大学に保管されている試料を主に使用して化学分析およびデータ解析を行った。カルデラ噴火に主に関与したマグマ（主珪長質マグマ）は、D マグマ（デイサイト質）と R マグマ（流紋岩質）を端成分とする混合物であることが先行研究によって明らかにされていたが、U-Th 放射非平衡を測定した結果、R マグマについては放射平衡に到達している一方で、D マグマについては大きな放射非平衡を保持していることが分かった。このことから、R マグマは 40 万年前よりも古い時代に生成された一方で、D マグマについてはかなり新しい時代（恐らく噴火の少し前）に生成されたことが示唆された。また、D マグマの $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 比の多様性から、D マグマのマグマ生成率は約 $15 \text{ km}^3/\text{万年}$ と推定された。支笏火山の後カルデラ活動（風不死・樽前・恵庭火山）のマグマ噴出率（約 $20 \text{ km}^3/\text{万年}$ ）と比較してマグマ生成率は高くないことから、少なくとも支笏火山におけるカルデラ噴火の特異性は、珪長質マグマの生成率が高かったことではなく、長期間にわたってあまり活発な噴火活動が起きずにマグマの蓄積が継続したことにあったことが示された。

(3) 十和田カルデラ

十和田火山については、噴火エピソード Q から A（6.1 万年前～10 世紀）の噴出物試料を本研究で新たに採取し、岩石学的記載・基礎的化学分析（全岩の主要元素組成、微量元素組成、Sr-Nd-Pb 同位体比組成）、U-Th 放射非平衡分析を実施した。その結果、時代とともに大局的には $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は上昇、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比などは減少する傾向が見られたが、噴火エピソード L（八戸噴火（カルデラ噴火）；約 1.6 万年前）の直後、噴火エピソード K から F（約 1.5 万年前～1 万年前）にかけて、その傾向が乱されていることが確認された。このことから、カルデラ噴火によって地下の珪長質マグマ系がリセットされ、5 千年ほどの時間をかけながらマグマ系の再構築が行われていたことが示唆された。

(4) 始良カルデラ

始良火山については、約 9 万年前以降の先カルデラ活動および約 3 万年前のカルデラ噴火の噴出物試料を本研究で新たに採取し、岩石学的記載・基礎的化学分析（全岩の主要元素組成、微量元素組成、Sr-Nd-Pb 同位体比組成）、U-Th 放射非平衡分析を実施した。その結果、先行噴火・カルデラ噴火を含め、珪長質マグマの大部分が U-Th 放射平衡に到達しており、下部地殻におけるマグマ生成後、約 40 万年以上の時間が経過していることが明らかとなった。このことから、巨大カルデラ噴火を引き起こしたマグマが、下部地殻において巨大な長寿命珪長質マグマ系を構成していたことが示唆された。その一方で、カルデラ噴火の少し前（36-33 ka）に溶岩とし

て噴出した噴出物については、カルデラ噴火の主要なマグマと同様の主要元素組成であるにもかかわらず、U-Th 放射非平衡を示すことが確認された。このことから、40 万年前以降も付加的な珪長質マグマの生成が小規模ながら継続していたことが示された。これらの研究成果については、Lithos 誌に掲載されるに至った。

(5) その他

上記以外のカルデラ火山については、屈斜路カルデラ (KpIV; 120 ka) と洞爺カルデラ (114 ka) の噴出物について、U-Th 放射非平衡分析を行った。その結果、両カルデラに共通して、噴出物の大部分が放射平衡に到達していた一方で、一部の噴出物については有意な放射非平衡を保持していたことが明らかとなった。このことから、屈斜路カルデラと洞爺カルデラにおいても、上記の始良カルデラと同様、カルデラ形成噴火に主に関与したマグマは下部地殻において巨大な長寿命珪長質マグマ系を構成していたことが示唆された。また阿寒カルデラにおけるマグマ系を探る目的で、阿寒富士を対象とした詳細な物質科学的解析を行った。その結果をもとにマグマ供給系やマントルにおける初生マグマの生成条件の推定を行い、それら一連の成果は Journal of Volcanology and Geothermal Research 誌に掲載されるに至った。

(6) 巨大カルデラ形成噴火におけるマグマ系の特徴

本研究課題の主テーマである「巨大カルデラ形成噴火におけるマグマ蓄積プロセスの特異性」という観点で、上述の国内のカルデラ火山についての解析結果を総括すると、本研究で対象とした国内の全てのカルデラ (支笏・屈斜路・洞爺・始良・十和田) において、「噴火直前に蓄積された膨大な量の珪長質マグマは、40 万年以上前から存在した主要なマグマ (= 長寿命珪長質マグマ系) と、新しい時期に断続的に生成した付加的なマグマから構成される」という、非常に興味深い共通点を見出し、巨大カルデラ噴火に関わるマグマ系の発達過程を根源的に理解するための手がかりが得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kuritani, T., Nakagawa, M., Nishimoto, J., Yokoyama, T. and Miyamoto, T.	4. 巻 366-367
2. 論文標題 Magma plumbing system for the Millennium Eruption at Changbaishan volcano, China: constraints from whole-rock U-Th disequilibrium	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.lithos.2020.105564	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kuritani, T., Sato, E., Wada, K., Matsumoto, A., Nakagawa, M., Zhao, D., Shimizu, K. and Ushikubo, T.	4. 巻 417
2. 論文標題 Conditions of magma generation at the Me-akan volcano, northern Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 107323 ~ 107323
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jvolgeores.2021.107323	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kuritani, T., Shimizu, K., Ushikubo, T., Xia, Q.-K., Liu, J., Nakagawa, M., Taniuchi, H., Sato, E. and Doi, N.	4. 巻 11
2. 論文標題 Tracing the subducting Pacific slab to the mantle transition zone with hydrogen isotopes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-98307-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Kuritani, T.	4. 巻 450-451
2. 論文標題 Geochemical constraints on the evolution of the magmatic system leading to catastrophic eruptions at Aira Caldera, Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.lithos.2023.107208	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Oiwa, K., Kuritani, T., Nakagawa, M. and Yoshimura, S.	4. 巻 75
2. 論文標題 Pre-eruption magmatic processes and magma plumbing system at Hachijo-Nishiyama volcano, Izu-Bonin arc, Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-022-01761-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件(うち招待講演 1件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 栗谷豪・清水健二・牛久保孝行・Xia Qun-ke・Liu Jia・中川光弘・谷内元・佐藤鋭一・土井宣夫
2. 発表標題 斑晶メルト包有物の水素同位体比による沈み込む太平洋プレートの追跡
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大岩和暉・栗谷豪・中川光弘・吉村俊平
2. 発表標題 八丈島・西山火山における マグマ供給系とマグマプロセス
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 栗谷豪・中川光弘・松本亜希子
2. 発表標題 桜島の完新世噴出物のSr-Nd-Pb同位体比分析に基づくマグマ系の進化についての検討
3. 学会等名 日本火山学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋佳佑・栗谷豪・松本亜希子・中川光弘
2. 発表標題 有珠山1663年噴火における珪長質マグマの起源
3. 学会等名 日本火山学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河原花衣・松本未来・栗谷豪
2. 発表標題 利尻起源ワンコの沢軽石の物質科学的研究
3. 学会等名 日本火山学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森北那由多・栗谷豪
2. 発表標題 九州南部・米丸火山におけるマグマ生成条件
3. 学会等名 日本火山学会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------