

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22357

研究課題名（和文）プリニー式噴火に先立つ火道へのマグマ上昇現象の発生条件の解明

研究課題名（英文）Investigation into precursory magma migration into a shallow conduit

研究代表者

新谷 直己（Araya, Naoki）

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：80880103

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：大規模な噴火に先立ち、火道浅部へとマグマが上昇している現象「プレチャージ」が発見され、噴火の発生を支配する過程として注目を集めている。本研究では、プレチャージ現象が発見された桜島火山の歴史時代噴火において、噴火に至る一連のプロセスの時間関係を明らかにすることで、プレチャージ現象が最終的なトリガープロセスに関与している可能性を見出した。さらに、国内外の複数の火山においてプレチャージ現象が起きていたことが示唆され、本現象は大規模な噴火に先立ち普遍的に起こりうるプロセスの可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、近年新たに発見され、大規模噴火の発生を支配する過程として注目を集めているプレチャージ現象（噴火に先立つ火道浅部へのマグマ上昇）のタイミングを明らかにすることで、プレチャージ現象が最終的なトリガープロセスに関与している可能性を見出した。これは、噴火の発生予測においてプレチャージ現象の検知が重要であることを意味する。さらに、国内外の噴火事例においてもプレチャージ現象が起きていた可能性があり、普遍的な現象であることが示唆される。普遍性のある新たな現象の発見により、火山噴火メカニズムに関する研究の進展が見込まれるため、その学術的な意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：Recently, a noble process “pre-charge”, in which magma migrates into a shallow conduit prior to a large explosive eruption, has been found. This process attract attention because it could control the onset of a large explosive eruption. This study clarified the time sequence of magmatic processes leading to historical explosive eruptions at Sakurajima volcano where the pre-charge was discovered. We found that there was no mafic magma recharge and subsequent mixing, which is often considered as an eruption trigger, just prior to the eruptions. Therefore, the pre-charge could be involved in the final trigger process. It is suggested that the pre-charge could have occurred in some other arc volcanoes. Therefore, this process may be a universal process prior to large explosive eruptions.

研究分野：火山学

キーワード：火山噴火 マグマ 噴火メカニズム

1. 研究開始当初の背景

火山噴火の規模はマグマ溜まり条件（過剰圧や揮発性成分濃度など）に支配されると考えられてきた（例えば、Woods & Koyaguchi, 1994）。しかし、上記の条件が同じであっても一連の噴火の中で規模が変化する場合があることから（Castro & Gardner, 2008）、マグマ溜まり条件が噴火を支配する従来のイメージの見直しが必要である。そのブレイクスルーとして、火道におけるマグマの上昇過程が注目されている。近年、桜島火山で有史に発生したプリニー式噴火（大規模で爆発的な噴火）の解析から、噴火直前にマグマ溜まりから火道へとマグマが上昇している現象「プレチャージ」が発見された（図 1、Araya *et al.*, 2019）。この現象に伴ってマグマの上昇ダイナミクスを支配する火道の形状が変化し、火道深部の拡大によりマグマ噴出率が高まること（c.f., Costa *et al.*, 2009）が予想される。従って、プレチャージ現象が起きるか否かがその後の噴火の規模、すなわちプリニー式噴火の発生を支配している可能性があり、本現象の発生条件の解明はプリニー式噴火の発生メカニズムの理解に直結する。

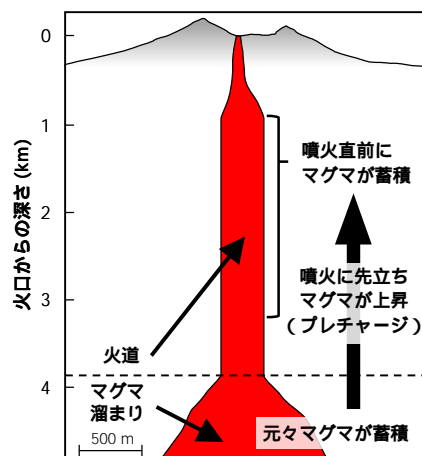


図 1. 桜島火山の浅部構造とプレチャージ現象の模式図

プレチャージ現象は新たに提案された概念であり、その報告事例はまだ桜島火山以外には存在しない。しかし、火山体の浅部構造が極めて詳細に観測されている鹿児島県の薩摩硫黄島火山やニカラグアの Masaya 火山では長径が数 100 m 規模の太い火道が見つかっており（Shinohara & Tanaka, 2012）、プレチャージ現象が普遍的な現象である可能性が示唆される。これらの火山はいずれもポストカルデラ火山であることと、内部構造が露出した古いカルデラ内では長径が数 100 m 規模の貫入岩体（固化前は火道）が普遍的に見られることから（Komuro *et al.*, 2006）、カルデラ特有の地質構造（例えば、カルデラ形成に伴う断層）が数 100 m 規模の太い火道の形成に影響を与えていることが示唆される。従って、本現象は桜島火山に特有の現象ではなく、ポストカルデラ火山では普遍的な現象の可能性があり、その発生メカニズムの解明や、噴火トリガメカニズムとの関係性の解明が必要である。

2. 研究の目的

噴出規模・地質背景が異なる噴火の比較対照により、プレチャージ現象の発生を支配している要因を検討する。そのために、地球物理学的な観測によりマグマ溜まり位置や火山体浅部構造が特定されている有珠火山、浅間火山、薩摩硫黄島において、有史の大規模噴火の噴出物の岩石学的な解析により噴火直前のマグマ蓄積深度を決定し、プレチャージ現象が起きていたか否かを明らかにする。そして、プレチャージ現象の有無と各噴火の火山・地質背景の関係を整理・比較検討し、プレチャージ現象の発生条件の理解を深める。

3. 研究の方法

(1) 電子線マイクロアナライザー（EPMA）を用いて、斜長石斑晶のリムと石基ガラスの化学組成を測定し、斜長石 - メルトの元素分配に基づいたメルト含水量計を適用した。珪酸塩メルトに対する水の飽和溶解度に基づき噴火直前の平衡圧力（= 深度）を精密に決定した。この深度が、物理観測で捉えられているマグマ溜まりよりも浅い場合にはプレチャージ現象が起きていたと判断し、同程度かそれよりも深い場合にはプレチャージ現象は起きていなかったと判断する。また、国内外の噴火事例について文献調査を行い、同様にプレチャージが起きていたかを調べる。

(2) 上記の研究は、新型コロナウイルスに伴う制限により、試料採集や学外施設での分析が計画通りに進まなかった。そこで、プレチャージ現象が確認された桜島火山の歴史時代噴火において、拡散速度が異なる複数の斑晶鉱物（斜長石、輝石、磁鉄鉱）の化学組成や累帯構造を調べることで、プレチャージ現象や、有力な噴火トリガメカニズムとされている新たなマグマの供給やそれに伴う混合が発生したタイミングの制約も行った。

4. 研究成果

(1) 浅間火山 1108 年噴火では、噴火直前のメルトの含水量は 2.1wt% と見積もられた。マグマが水に飽和していると仮定すると、飽和圧力は 43 MPa（深さに換算すると 1.8 km）となる。浅間火山における 1783 年噴火でも、同程度の値（40-80 MPa）が報告されている（多田ほか、2021）。これらは、物理観測により推定されているマグマ溜まり深度（山頂直下 6 km 以深；Aoki *et al.*, 2013）よりも浅い。2004 年の活動の際には、山頂から深さ 2km 程度の浅部に圧力源が推定されており（高木ほか、2005）、本研究で得られた歴史時代噴火におけるマグマの最終平衡

深度と矛盾しない。薩摩硫黄島火山の15世紀噴火の噴出物では、メルト含水量は1.3 wt% (飽和圧力16 MPa、深さに換算すると600 m)と見積もられ、地表から約3 km以深に存在すると推定されているマグマ溜まり (Kazahaya et al., 2002) よりも浅い。ミュオンによる火山体浅部構造の直接的な観測により、直径300 mの火道が火口直下約150 m以深に推定されており (Shinohara & Tanaka, 2012) 本研究で得られたマグマの最終平衡深度はこの火道領域に相当している。

これらのことより、浅間火山と薩摩硫黄島火山における歴史時代の大規模噴火では、深部のマグマ溜まりから地表に向けて直接噴出するのではなく、いったん浅部の圧力源・火道へとマグマが貫入して圧力平衡を達した後に噴火しており、プレチャージ現象が起きていたことを示唆している。また、文献調査により、Kelud火山 (インドネシア)、Bezymianny火山 (ロシア)、Cordón Caulle火山 (チリ) など国外の火山でも、プリニー式噴火を引き起こしたマグマは極浅部 (地表から2~4km程度) に蓄積していたことがわかった。特に、Bezymianny火山では、地震学的な観測から深部 (深さ約7~10km) にマグマ溜まりの存在が指摘されているものの、噴出物の化学組成・組織からは少なくとも噴火の約40日前には深さ1.5~3km程度に蓄積していたこと、角閃石の化学組成からはマグマ溜まりに相当する圧力条件で斑晶のコアが結晶化したこと、が明らかになっている (Shcherbakov et al., 2013)。このことは、プレチャージ現象の発生を強く示唆している。以上より、プレチャージ現象は桜島火山に特有ではなく、普遍的に起こる現象であることが示唆される。また、上記火山は、ポストカルデラ火山ではない火山も含まれているため、プレチャージ現象はポストカルデラ火山に限らない現象の可能性が高い。今後は、個々の火山のローカルな地質構造を踏まえてマグマの蓄積位置を検討することで、プレチャージ現象の発生を支配している要因を検討していく。

有珠火山1663年噴火では、メルト含水量は7.0 wt% (飽和圧力270 MPa、深さに換算すると11km)と見積もられた。地殻変動観測から推定されているマグマ溜まりの深さ (約10 km; 村上ほか, 2001) と概ね一致しており、プレチャージは起きていなかったと判断される。火山体の浅部 (地表から深さ数km程度) に貯蔵できるマグマはせいぜい 10^{-1} km³程度であるため、噴出量が1 km³以上の噴火ではプレチャージ現象とは異なるメカニズムが働いている可能性がある。有珠火山では、1663年噴火 (噴出量1.1 km³) 以降により規模の小さい噴火が1853年 (0.14km³) と1977年 (0.04km³) に起きている。今後は、これらの噴火についても調査をすることで、噴出規模とプレチャージの発生条件の関係を調べていく。

(2) 元素の拡散時間が長い斜長石や輝石では、程度の差はあるものの化学組成の累帯構造が普遍的に見られている。桜島火山の歴史時代噴火では、噴火の準備過程を通じて苦鉄質なマグマの供給・混合が起きていることから、これらの鉱物の累帯構造は異なるマグマの混合により生じた非平衡組織であり、元素の拡散時間が長いために組成累帯が完全に焼き鈍される前に噴出したと解釈される。輝石の逆累帯構造からそのタイミングを見積もったところ、噴火の数十年前以上前に起きていたことがわかった。一方で、元素の拡散時間の短い磁鉄鉱は、各噴火において鉱物間での組成バリエーションは見られるものの、個々の斑晶には化学組成の累帯構造がなく極めて均質であった。このことは、噴火の直前にマグマの物理化学条件 (温度、酸素分圧、メルト組成など) にバリエーションがあるものの、それらが乱されることなく噴火したことを意味している。すなわち、磁鉄鉱の累帯構造からも、マグマ供給・混合といったイベントが噴火の直前に起きていなかったことが示された。

熱力学ソフトを用いた計算により、マグマ混合だけではなく、プレチャージ現象に伴う減圧の場合でも十分に検出可能な累帯構造が磁鉄鉱に生じることが示された。そこで、元素拡散のモデル計算により、累帯構造をもった磁鉄鉱が均質になる時間を計算したところ、およそ数十日から100日程度と見積もられた。桜島火山の歴史時代噴火の中でも住民による詳細な記録が残っている大正噴火では、前兆現象は噴火の約半年前から開始していた。その時からプレチャージ現象、すなわち、浅部火道へのマグマの蓄積が開始していたと考えても矛盾はない。

噴火に先行したマグマプロセスの時系列は、はじめにマグマの供給・混合が起こり、十分に混合したマグマがプレチャージ現象に伴い火道浅部へと上昇・蓄積したと考えられる。プレチャージ現象に伴い、減圧脱水による発泡や結晶化による発泡が起こり、火道内の過剰圧が上昇する可能性がある。従って、プレチャージ現象が最終的なトリガープロセスに関与している可能性があり、その発生を検知することが噴火の発生を予測する上で極めて重要である。

< 引用文献 >

Aoki, Y., Takeo, M., Ohminato, T., Nagaoka, Y., Nishida, K. (2013) Magma pathway and its structural controls of Asama Volcano, Japan. In: Pyle, D.M., Mather, T.A., Biggs, J. (Eds.), Remote Sensing of Volcanoes and Volcanic Processes: Integrating Observation and Modelling. *Geological Society of London, Special Publication*, **380**, 67-84.

- Araya, N., Nakamura, M., Yasuda, A., Okumura, S., Sato, T., Iguchi, M., Miki, D. & Geshi, N. (2019) Shallow magma pre-charge during repeated Plinian eruptions at Sakurajima volcano. *Sci. Rep.*, **9**, 1979, doi:10.1038/541590-019-38494-x.
- Castro, J.M. & Gardner, J.E. (2008) Did magma ascent rate control the explosive-effusive transition at the Inyo volcanic chain, California? *Geology*, **36**, 279-282.
- Costa, A., Sparks, R. S. J., Macedonio, G. & Melnik, O. Effects of wall-rock elasticity on magma flow in dykes during explosive eruptions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **288**, 455-462 (2009).
- Kazahaya, K., Shinohara, H., Saito, G. (2002) Degassing process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan: supply of volatile components from a deep magma chamber. *Earth Planets Space*, **54**, 327-335
- Komuro, H., Aoyama, M. & Arayashiki, T. (2006) Collapse mechanism of the Paleogene Sakurajima cauldron, SW Japan. *Bull. Volcanol.*, **68**, 631-640.
- 村上亮・小沢慎三郎・西村卓也・多田堯 (2001) 2000年有珠山噴火にともなうマグマモデル：GPS連続観測を主とする地殻変動データによる推定. 国土地理院時報, **95**, 99-105.
- Shinohara, H. & Tanaka, H. K. M. (2012) Conduit magma convection of a rhyolitic magma: Constraints from cosmic-ray muon radiography of Iwodake, Satsuma-Iwojima volcano, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **349-350**, 87-97.
- 多田峻真・無盡真弓・中村美千彦・安井真也 (2021) マグマ混合によるマイクロライト結晶化抑制と爆発的噴火：浅間天明噴火での証拠. 日本火山学会 2021年秋季大会予稿集, 79.
- 高木朗充・福井敬一・藤原健治・上田義浩・飯島聖・山本哲也・坂井孝行・菅野智之・瀧山弘明 (2005) 地殻変動から推定される2004年浅間山噴火前後の浅部マグマ供給系. 火山, **50**, 363-375.
- Shcherbakov, V.D., Neill, O.K., Izbekov, P.E. & Plechov, P.Y. (2013) Phase equilibria constraints on pre-eruptive magma storage conditions for the 1956 eruption of Bezymianny Volcano, Kamchatka, Russia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **263**, 132-140.
- Woods, A.W. & Koyaguchi, T. (1994) Transitions between explosive and effusive eruptions of silicic magmas. *Nature*, **370**, 641-644.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Naoki Araya, Michihiko Nakamura, Atsushi Yasuda, Satoshi Okumura, Tomoki Sato, Daisuke Miki, Masato Iguchi, Nobuo Geshi |
| 2. 発表標題 Conduit pre-charge during repeated Plinian eruptions at Sakurajima volcano |
| 3. 学会等名 AGU fall meeting 2020 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Naoki Araya, Michihiko Nakamura, Keiko Matsumoto, Satoshi Okumura, Tomoki Sato |
| 2. 発表標題 Precursory processes and the final eruption trigger: the case of historical Plinian eruptions at Sakurajima volcano, Japan |
| 3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021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 |
|---------|---------|