

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）（令和3（2021）採択分）

研究期間：2021～2023

課題番号：21KK0055

研究課題名（和文）Catastrophic caldera forming eruption revealed by petrological and experimental study of lubrication of crystal-mush

研究課題名（英文）Catastrophic caldera forming eruption revealed by petrological and experimental study of lubrication of crystal-mush

研究代表者

奥村 聡（Okumura, Satoshi）

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40532213

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,600,000円

研究成果の概要（和文）：カルデラ噴火ではしばしば流動性を失った高結晶量マグマ（クリスタルマッシュ）が噴出する。本研究はマグマ中に存在する気泡がクリスタルマッシュを流動化させ、その結果地表へマグマが上昇可能になるという説を検証することを目的とした。減圧発泡実験を行った結果、減圧率が高い場合に気泡がマグマ流動化を引き起こす一方で、減圧率が小さい場合や段階的に減圧が進む場合には形成された気泡がマグマから分離してしまい流動化しないことが分かった。これらの実験的結果と実際のカルデラ噴火の条件（減圧履歴や減圧速度）を組み合わせて考察すると、カルデラ噴火においては気泡がクリスタルマッシュを流動化することが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カルデラ噴火は発生頻度は高く無いが、一旦発生すればその地表環境への影響は非常に大きい。本研究では、カルデラ噴火を引き起こすクリスタルマッシュの噴出原因を明らかにする研究を進めた。これまで明らかにされていなかったクリスタルマッシュ中での気泡形成を詳細に調べた結果、クリスタルマッシュが流動化するためにはマグマが急激に減圧される必要があることが分かった。さらに、実際のカルデラ噴火ではそのような急激な減圧が達成されている可能性が示され、クリスタルマッシュを噴出するカルデラ噴火の発生原因は急激な減圧と気泡形成である可能性が提案された。

研究成果の概要（英文）： This study aims to evaluate the idea that bubbles in magma lubricate crystal mash and make it possible to ascend to the surface. We performed decompression experiments to investigate bubble formation processes and their roles on magma lubrication. Based on these experiments, we found that bubbles induce magma lubrication when the decompression rate is high, while bubbles segregate when the decompression rate is low. In addition, the bubble segregation occurred when the decompression proceeds stepwise even if the decompression rate is high. By comparing these experimental results with actual caldera forming eruption conditions (decompression history and rate), it is inferred that bubble segregation does not occur during caldera-forming eruptions and hence the formation of gas bubbles cause the lubrication of crystal mush.

研究分野：火山学

キーワード：カルデラ噴火 クリスタルマッシュ 発泡 流動化 減圧実験

## 1. 研究開始当初の背景

地殻内に形成された巨大なマグマだまりから大量のマグマが地表へ噴出する爆発的噴火が発生すると、その火山周辺は高熱の火砕流で焼き尽くされ、また大量の火山灰・火山ガスが地表へ放出されるため地球全体で地表環境が変動する。このような噴火は、大量のマグマを急速に噴出することでカルデラと呼ばれる陥没構造を形成することから、カルデラ噴火と呼ばれる。過去に発生したと考えられている 1000 km<sup>3</sup> 以上のマグマを噴出するような巨大カルデラ噴火を我々人類は未だ体験していないが、次の噴火の準備が今も着々と進んでいるはずであり、カルデラ噴火の発生メカニズムを理解し可能な範囲で噴火を予測することは重要である。

これまでインドネシアのトバ湖周辺で発生した巨大カルデラ噴火の地質学的発見（例えば、van Bemmelen, 1949）以降、世界中で多くの巨大カルデラ噴火が報告されている。それに伴いカルデラ噴火の発生メカニズムの研究も進んだ。この過程で生じたカルデラ噴火発生の第一の謎は、如何に大量のマグマを生成するのかという点である。一見、マントル・地殻内で生成したマグマを集積させていけば巨大なマグマだまりが形成できそうであるが、実際にはそれだけでは説明できない。冷たい地殻内では結晶分化が進み、マグマ密度は低下し必然的に上昇の駆動力を得る。またマグマが集積する過程で、マグマだまりに過剰圧が発生してしまう。そのため何か特別なメカニズムを考えない限り、マグマだまりが巨大化する前にマグマは噴火してしまい、巨大なマグマだまりの形成とカルデラ噴火を説明できない。つまり、噴火を抑制し、マグマだまりを成長させるメカニズムが必要である。Jellinek and DePaolo (2003)はこの問題に対して先駆的なアイデアを提案した。つまり、この問題を地殻の粘弾性変形の効果を考慮することで説明した。この考えでは、噴火に至るマグマだまりの過剰圧は、マグマだまり周辺の母岩の変形によって解消されることで噴火が抑制される。さらに、マグマだまりへのマグマ供給率が「ちょうど良ければ」、マグマだまりは成長を続ける。供給率が高すぎると過剰圧が発生することで小規模な噴火が高頻度で発生し、供給率が低すぎると地殻内でマグマだまりが冷却固化してしまう。この考えが提案された後、多くの研究によりモデルが精密化されてきた（例えば、Caricchi et al., 2011）。

大量のマグマを含むマグマだまりの形成の理解が進むにつれて、別の問題が明らかになってきた。それは、長期間、冷たい地殻内にマグマだまりが存在することで生じる多量の結晶のカルデラ噴火への影響である。巨大化するマグマだまりには、ちょうど良い頻度で温かいマグマが供給されると考えられている。マグマが供給されると一時的にマグマだまりの温度は上昇するが、すぐに冷却されマグマ中の結晶度が上昇する（例えば、Cooper and Kent, 2014）。この過程が繰り返されることで、マグマだまりは冷却固化せずに成長を続ける。そして、実際の巨大カルデラ噴火の噴出物中にも 50 体積%を超えるような多量の結晶が含まれることが多い（例えば、Bachmann et al., 2002）。しかし、このような多量の結晶を含むマグマ（クリスタルマッシュ）は、流動性を失うため地表へ上昇し噴出できないと考えられてきた（Marsh, 1981）。この流動性を失ったマグマの上昇、噴出のメカニズムは未解明であり、世界中の研究者がそのメカニズムを解明すべく研究を進めている最中である（例えば、Bergantz et al., 2015）。

## 2. 研究の目的

応募者らは、マグマの結晶化が進みクリスタルマッシュが形成される過程で必然的に形成される気泡に注目し、その気泡こそがクリスタルマッシュを流動化するメカニズムであるという仮説を立てた。つまり、気泡形成が結晶同士の相互作用を弱める働きをし、結果として流動化を促進するという考えである。圧縮性があり粘性の効かない気泡が流動化を促した場合、その後続く極めて爆発的な噴火と流動性の高い火砕流の発生を説明する事もでき、本アイデアはカルデラ噴火を総合的に説明できるアイデアである。

本研究の目的は、室内実験により気泡形成がクリスタルマッシュの流動化を起こすのが否か検討し、また実際のカルデラ噴火噴出物を解析し実験結果と比較することで流動化が実際に起こり得るのか調べることである。

## 3. 研究の方法

本研究では二つの研究を行った。一つ目は、高結晶量のマグマ中で気泡が形成する過程を実験的に再現し、流動化が起こり得るのか否かを調べる研究である。そのために、マグマ物質とアナログ物質を用いた減圧発泡実験を行った。二つ目の研究では、実際のカルデラ噴火で噴出したクリスタルマッシュを岩石学的に調べ、上記実験結果と組み合わせることで実際の火山噴火において流動化が起こりえるのか検討した。

### (1) 減圧発泡実験

まず初めに、流紋岩メルトと結晶（コランダム）を50vol%ずつ含んだマグマの減圧発泡実験を行った。実験には水熱合成装置を用いて、減圧を精密にコントロールするためにシリンジポンプを用いた。実験は800、100MPaの温度圧力条件から、様々な速度、パターンで上記試料を減圧し、回収した試料の組織をX線CTで観察した。また、発泡過程をその場観察するために、水あめに50vol%のプラスチックビーズを混ぜた試料を用いた減圧実験も行った。2枚のアクリルプレート間に試料を挟み、Oリングなどを用いることで密封したうえで真空ポンプを用いて減圧した。

(2) カルデラ噴火の噴出物解析

斑晶を50vol%以上含む Puripica Chico ignimbrite（ボリビア）中の軽石の岩石学的検討を行った。軽石試料中の鉱物組成、メルト包有物、石基ガラス組成などをEPMAで分析、その結果を用いて主にマグマ含水量、温度などマグマ粘性に関するパラメータの推定を行った。本試料は共同研究者である Shanaka de Silva 教授（オレゴン州立大学）から寄与されたものである。また、これまでに報告されている別のクリスタルマッシュについてもレビューを行い、上記のパラメータを得た。

#### 4. 研究成果

以下に本研究で得られた主な成果をまとめる。

- (1) 50vol%の結晶を含むマグマの減圧発泡実験から、高結晶量マグマ中では気泡が保持される場合と、分離してしまう場合があることが分かった。つまり、平均的な減圧速度が高い場合には気泡はマグマ中に保持され、減圧速度が遅い場合には分離する。平均的な減圧率が同じであっても、減圧履歴中のある期間で高い減圧率を経験した場合には、保持する傾向があることも分かった。この気泡保持と分離の分岐は、気泡形成と結晶が形成するフレームワークとの相互作用に支配されると考えられる。この分岐メカニズムを詳しく理解するために、アナログ物質を用いたその場観察実験を行った。その結果、減圧速度が遅い場合には、気泡は結晶フレームワークの隙間へ浸透しながら成長できる一方で、減圧速度が大きい場合には既存気泡の成長よりも新しい気泡核形成・成長が支配的になることが分かった。つまり、気泡保持と分離の分岐は、減圧速度などに依存した気泡成長のカイネティクスに支配されているとことが分かった。
- (2) 本研究や過去の岩石学的研究で得られたマグマだまり深度や粘性などと(1)の成果を組み合わせ、クリスタルマッシュが流動化するか否かを検討した。実際のカルデラ噴火ではマグマの噴出は段階的であり、これはマグマの減圧率や履歴が複雑であることを示唆している。ピナツポ1991年噴火などの例を参考に、マグマの平均的減圧率などを推定した。その結果、カルデラ形成噴火では気泡は分離せず、結晶フレームワークを破壊することで流動化することが示された。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Kobayashi Masaki, Okumura Satoshi, Sasaki Osamu, de Silva Shanaka L.	4. 巻 439
2. 論文標題 The role of decompression history in gas bubble formation in crystal-rich silicic magma: Gas retention versus segregation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 107844 ~ 107844
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jvolgeores.2023.107844	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

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 小林 昌樹、奥村 聡、星野 真人、上杉 健太郎、佐々木 理
2. 発表標題 高結晶度マグマからの気相・メルトの分離プロセス：マグマ溜まり内での 段階的減圧のケース
3. 学会等名 JpGU2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Araya, Michihiko Nakamura, Keiko Matsumoto, Satoshi Okumura
2. 発表標題 Did mafic recharges trigger the historical Plinian eruptions at Sakurajima volcano?
3. 学会等名 IAVCEI2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kobayashi Masaki, Okumura Satoshi, Sasaki Osamu, de Silva Shanaka L.
2. 発表標題 The role of decompression history in gas bubble formation in crystal-rich silicic magma: Gas retention versus segregation
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林昌樹・奥村聡・並木敦子
2. 発表標題 固気液三相流体中における気泡成長ダイナミクス：アナログ実験からのアプローチ
3. 学会等名 日本火山学会2023年秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平田陸斗・奥村聡・宮本毅
2. 発表標題 プリニー式噴火から火砕流噴火への推移メカニズム：十和田火山915年噴火の例
3. 学会等名 日本火山学会2023年秋季大会
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
研究分担者	並木 敦子 (Namiki Atsuko)  (20450653)	名古屋大学・環境学研究科・准教授  (13901)	
研究分担者	新谷 直己 (Araya Naoki)  (80880103)	東北大学・理学研究科・助教  (11301)	

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			
米国	オレゴン州立大学			