

令和 6 年 5 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2023

課題番号：17KK0092

研究課題名（和文）玄武岩質マグマからの脱ガス：観測と実験に基づくモデルの構築

研究課題名（英文）Constructing a model of outgassing from basaltic magma based on observations and experiments

研究代表者

並木 敦子（Namiki, Atsuko）

名古屋大学・環境学研究科・准教授

研究者番号：20450653

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,300,000円

渡航期間： 7ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究は3つのパートからなる。（1）ハワイ島における噴火の観測、（2）Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO)における気泡を含む溶岩流の実験、（3）GFZ-Potsdamとの共同研究で、マグマ上昇の開始の研究である。

（1）は2018年にハワイへ渡航し、この年に起こったLower East Rift Zoneの噴火を観察した。（2）は2019年にLDEOを訪問し、気泡を含む溶岩流の実験を行った。（1）で観察した溶岩流の気泡の体積分率が高かった為、この状況を模した実験とした。（3）については、この分野の基礎的な概念をまとめたレビュー論文を共著で執筆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

（1）これまであまり理解の進んでいなかった玄武岩質熔岩の破碎プロセスを観測・物質科学的観察・及び理論的見積もりから明らかにした。これにより玄武岩質熔岩の爆発的噴火において重要なプロセスの理解への道が開けた。2018年ハワイ島の噴火は日本でも度々報道された規模の大きい噴火であった。この噴火の観測に参加し、学術的価値の高い論文を執筆できた事が社会的な意義だといえる。

（2）溶岩流における気泡の効果を明らかにした事に学術的な意義がある。

（3）噴火が始まる条件は噴火予測において最も重要な知見である。この問題に関する総説を執筆した事は学術的にも社会的にも大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：This study consists of the following three parts. (1) observations of the 2018 lower East Rift Zone eruption of Kilauea Volcano, Hawaii, (2) experiments on lava flows containing bubbles at the Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO), and (3) a study of the onset of magma rise.

For (1), I visited Hawaii in 2018 and had the rare opportunity to observe the Lower East Rift Zone eruption that occurred that year. Based on infrared images of lava fountains observed during this eruption, we estimated that fragmentation is caused by a temperature drop due to the rapid expansion of volcanic gases, which cools the magma surface. For (2), I visited the LDEO in 2019 and conducted experiments on lava flows containing bubbles. The lava observed in (1) had a high volume fraction of bubbles, and the experiment was designed to simulate this situation. For (3), we co-authored a review paper summarizing the basic concepts in this field.

研究分野：火山学

キーワード：マグマ 気泡 熔岩 結晶 ハワイ キラウエア火山

1. 研究開始当初の背景

玄武岩質マグマは、地球内部のマントルが部分熔融して最初に発生する地球上で最も普遍的に存在する重要なマグマである。この玄武岩質マグマの噴火メカニズムを明らかにする事は火山学上、必須である。マグマは周囲の地殻物質と比較して特段に軽い訳ではない。よってマグマが地表に到達する為にはマグマの密度を下げる必要がある。元々マグマに溶け込んでいた火山ガスはマグマの上昇に伴う減圧によりマグマに溶け込めなくなり、マグマ中に気泡を作る。この気泡がマグマの実効的な密度を下げてマグマは地殻中を上昇する。また、圧縮性のある気泡が急減圧に伴い膨張する事で、圧縮性のないマグマが爆発的に噴火する。よって、噴火を理解する為にはマグマ中の気泡の振る舞いを理解する事が不可欠である。特に、噴火前に気泡がマグマから分離（脱ガス）すれば噴火が抑制される可能性がある。よって脱ガスメカニズムの理解が重要である。

ここで、玄武岩質マグマの特徴は粘性率が低い事である。粘性率の高いシリシクマグマでは浸透流により脱ガスすると考えられている。一方、玄武岩質マグマ中の気泡はマグマ中を浮力により上昇すると考えられるが、実際にどのように脱ガスが起きているのか自明ではない。本研究を計画した2018年以前の時点では、ハワイ島キラウエア火山山頂のハレマウマウクレーターには熔岩湖が存在していた。よって、玄武岩質マグマからの脱ガスを理解するために実際に玄武岩の熔岩湖で起きている気泡の分離過程を観測し、そのメカニズムを明らかにする事を目的としていた。よって、当初の予定ではアメリカ地質調査所・ハワイ火山観測所（HVO）を訪れ Dr. Matthew Patrick と共同してこの熔岩湖を観測するつもりであった。また、この観測を元にコロンビア大学 ラモントードハティ地球観測所(LDEO)の Prof. Einat Lev と共同で熔岩湖の模擬実験を行う予定であった。

しかし、キラウエア火山の噴火は2018年春に大きな転機を迎えた。山頂の熔岩湖の熔岩レベルが低下して消滅し、最終的にはカルデラが形成された。また、Lower East Rift Zone (LERZ) の噴火が始まり近年まれにみる大規模な熔岩流が住宅街から海までの地域を埋めた。よって、当初の目的を大きく変更し、LERZ の噴火の観測を行う事とした。

一方で、火山噴火が始まるきっかけを理解する事も噴火メカニズムの解明に必要である。地下のマグマの移動は目に見えず、理解する事は難しい。低粘性の玄武岩質マグマは地殻内を移動しやすいと考えられ、この点でも玄武岩質マグマに着目した。1つの切り口として、地震による誘発噴火に着目する方法がある。どの程度揺すられると噴火に至るのかがわかれば、噴火の開始条件の理解につながる。よって、GFZ Potsdam を訪れて Dr. Eleonora Rivalta と地震による誘発噴火のモデル実験を行う予定であった。実際、2020年3月に渡航したものの、新型コロナウイルスの影響により緊急帰国する事になった。その後、しばらくの間、再渡航の見通しが立たなかった為、噴火が始まるきっかけに関するレビュー論文を書く事とした。

2. 研究の目的・方法・成果

本研究は3つのパートにわかれている為、以下、それぞれについて目的・方法・成果を記述する。

a) ハワイ島キラウエア火山 LERZ において観測された熔岩噴泉に見る破碎

研究の目的： 噴火に伴いマグマがバラバラに破碎すると、細かい破片は遠くまで運ばれる。また、細かい破片が人体に入ると有害である。よって、マグマがどのように、どんなサイズまで破碎するかを知る事は重要な問題である。粘性率の高いシリシクマグマは速い変形により固体的に破碎する事が知られている。一方、粘性率の低い玄武岩質マグマは慣性で引き伸ばされて千切れるか、表面張力できまる液滴になる可能性が指摘されている (e.g., Houghton, B. & Gonnermann, 2008)。



図1 2018年ハワイ島キラウエア火山の噴火でみられた溶岩噴泉。

2018年のハワイ・キラウエア火山の LERZ の噴火は、低粘度マグマがどのように破碎されるかを研究する新たな機会を提供した。2018年5月末に、8番目の火口 Fissure 8 (Ahu 'ailā 'au) において玄武岩質マグマの熔岩噴泉が観測された (図1)。熔岩噴泉からの噴出物のほとんどは、純粋に流体力学的なプロセスによって生成されたスパッタとして落下しスコリア丘の一部になるか熔岩流とし流れた。しかし、時により細かい破片が形成され、上昇流に乗って遠方まで運ばれた。本研究ではこの細かい破片の形成プロセスを明らかにする事を目的とした。

研究の方法:まず、火砕物のサイズを測定する為に赤外観測を行った。これにより得られた画像から空中の火砕物のサイズ分布を計測した。また、火砕物を実際に採取し、これの特徴を記述すると共に、X線CTにより内部構造を観察した。

研究の成果:赤外画像を解析した結果、熔岩噴泉により作られる破片は、多くの場合には特徴的なサイズがみられた。一方で、時によってはサイズ分布がべき乗分布を示す事が分かった。サイズ分布がべき乗分布になる時はより細かい破片が形成され、熔岩噴泉による上昇流に取り込まれて遠方まで運ばれる様子が観察された。この上昇流に乗って運ばれた火砕物を観察した所、内部に多くの気泡を含む、レティキュライトと呼ばれる発泡度が高く密度の低い火砕物であった。この構造は、マグマ中に火山ガスが多い時に噴出したマグマである事を示す。表面には気泡が引き伸ばされた跡が記録されており、急冷却を受けたことがわかる。これらの観察事実を考慮し、破砕のプロセスを以下のように推測した。

まず、火山ガスを多く含んだ熔岩噴泉の一部が引き伸ばされて火砕物を作る。この時、破断面から高圧の火山ガスが放出される。断熱膨張した火山ガスの温度は下がり、火砕物の表面を急冷する。火砕物の表面は固化するが内部はまだ温度が高く、マグマに溶けている火山ガスが気泡に向かって拡散する。気泡は膨らもうとするが、周囲が固化している為膨らめず、火砕物内部は増圧する。この圧力が火砕物の破壊強度を超えると2次的な破砕が起こる。このプロセスが繰り返し起こる事で細かい破片が形成されたと考えられる。この成果は *Nature Geoscience* に掲載された。

b) 気泡を含む熔岩流の実験



図 2 観測した溶岩流。

目的:2018年のハワイ島キラウエア火山の噴火では、上述の熔岩噴泉からも火山ガスを作るマグマ中の気泡の重要性が明らかになったが、熔岩流の流量の増減についても火山ガスを作るマグマ中の気泡の重要性が明らかになった(図2, Patrick et al., 2019)。一方で、熔岩流の実験は数多くあるが、気泡や結晶が入った懸濁液の系はあまり研究されていない。そこで、気泡と結晶を含む熔岩流のモデル実験を行う事とした。

方法:実験はLDEOのProf. Levの実験室においてProf. Levと彼女の学生らと協力して行った。融けた熔岩の模擬物質として水あめを用い、これに気泡と結晶に見立てたプラスチックビーズを加えた。気泡は重曹とクエン酸の化学反応により二酸化炭素の気泡を加えた。このマグマの模擬物質を斜面に流して観察した。流れる様子はビデオカメラで収録し、Optical flowを用いて速度場を計算した。

成果:まずは熔岩流の長さの時間変化を測定した。熔岩流の長さは時間のべき乗で伸びる事、熔岩の粘弾性的性質により、べきが変わる事が知られている。気泡と結晶が入った系において、流れ始めは粘弾性的性質を示したものの、時間経過の後にニュートン流体的振る舞いをする様子が観察された。計算した速度分布は、液が多いところで速度が速い事がわかった。また、熔岩流を下から観察した結果、熔岩流の底には気泡が無い事がわかった。これらの結果から熔岩流内において、気泡は重力により浮上して分離する事、下面に溜まった液がニュートン流体的な振る舞いをする事がわかった。この重力による気泡の分離は熔岩流の流れ方を特徴づけると考えられる。この成果は *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* に掲載された。

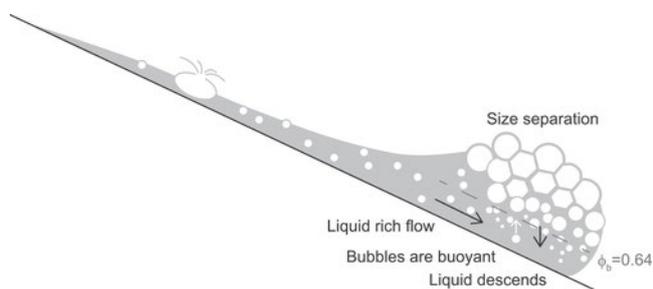


図 3 溶岩流内で起きると考えられる重力による分離 (Namiki et al., 2022, JGR, Fig.9)。

c) 噴火が開始する原因に関する総説

将来の火山災害を軽減するためには、噴火が間近に迫っていることを予測する必要がある、そのためには火山活動を開始するプロセスを理解する必要がある。そこで、マグマが地殻内にあるマグマ溜まりから地表に到達するまでの過程を経て火山噴火に至るプロセスについて検討した。マグマが十分に高温で、柔らかく地表に到達するのに十分なエネルギーがある場合のみ、火山は

噴火する。火山が噴火に近い状態の時のみ、地震などの外的要因により噴火が起きる事がある。マグマは地殻の中を上昇する過程において、途中停止する事も良くある。これらの事象について議論した結果は **Nature Reviews** に掲載された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Namiki Atsuko, Lev Einat, Birnbaum Janine, Baur Jasper | 4. 巻 127 |
| 2. 論文標題 An Experimental Model of Unconfined Bubbly Lava Flows: Importance of Localized Bubble Distribution | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth | 6. 最初と最後の頁 e2022JB024139 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2022JB024139 | 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 Caricchi Luca, Townsend Meredith, Rivalta Eleonora, Namiki Atsuko | 4. 巻 2 |
| 2. 論文標題 The build-up and triggers of volcanic eruptions | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Nature Reviews Earth & Environment | 6. 最初と最後の頁 458 ~ 476 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s43017-021-00174-8 | 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 該当する |
| 1. 著者名 Namiki Atsuko, Patrick Matthew R., Manga Michael, Houghton Bruce F. | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Brittle fragmentation by rapid gas separation in a Hawaiian fountain | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Nature Geoscience | 6. 最初と最後の頁 242 ~ 247 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41561-021-00709-0 | 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 該当する |
| 1. 著者名 Patrick M. R., Dietterich H. R., Lyons J. J., Diefenbach A. K., Parcheta C., Anderson K. R., Namiki A., Sumita I., Shiro B., Kauahikaua J. P. | 4. 巻 366 |
| 2. 論文標題 Cyclic lava effusion during the 2018 eruption of Kilauea Volcano | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Science | 6. 最初と最後の頁 eaay9070 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/science.aay9070 | 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 該当する |

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Atsuko Namiki |
| 2. 発表標題 Cratering experiments on a granular material with a size distribution |
| 3. 学会等名 Atmospheres, Oceans, Earths -- Unifying perspectives on geophysical and environmental multiphase flows (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---------------------------|
| 1. 発表者名 並木敦子 |
| 2. 発表標題 気泡を含む溶岩流のモデル実験 |
| 3. 学会等名 日本流体力学会 年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 A. Namiki, M. R. Patrick, M. Manga, B. F. Houghton |
| 2. 発表標題 Brittle Fragmentation by Rapid Gas Separation in a Hawaiian Fountain |
| 3. 学会等名 AGU fall meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 A Namiki, E Lev, J Birnbaum |
| 2. 発表標題 An Experimental Model of Unconfined Bubbly Lava Flows |
| 3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 A. Namiki |
| 2. 発表標題 Possible Fragmentation in a Lava Fountain at the Temperature Lower Than the Glass Transition |
| 3. 学会等名 Goldschmidt 2020 (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 並木敦子 |
| 2. 発表標題 2018年ハワイ島キラウエア火山噴火の概要とLERZの溶岩流 |
| 3. 学会等名 日本火山学会秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Atsuko Namiki and Yukie Tanaka |
| 2. 発表標題 Oscillatory Rheology Measurements of Particle and Bubble Bearing Fluids: Solid Like Behavior of a Crystal Rich Basaltic Magma |
| 3. 学会等名 AGU fall meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| https://www.eps.nagoya-u.ac.jp/~namiki/ https://home.hiroshima-u.ac.jp/namiki/ |
|--|

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 |
|--|---------------------------------------|---|----|
| | パトリック マット (Patrick Matthew) | 米国地質調査所・HVO・Research Geologist | |
| | レヴ アイナット (Lev Einat) | コロンビア大学・LDE0・Associate Professor | |
| | リヴァルタ エレオノラ (Rivalta Eleonora) | G F Z・Physics of Earthquakes and Volcanoes・Group Leader | |

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 |
|---------|---------|

| | | | | |
|----------|----------------------|--|--|--|
| アメリカ合衆国 | US Geological Survey | | | |
| アメリカ合衆国 | Columbia University | | | |
| ドイツ連邦共和国 | GFZ Potsdam | | | |