

令和 5 年 6 月 3 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03800

研究課題名（和文）地震動はマグマからの脱ガスと減圧発泡を促進するか？：実験による検証

研究課題名（英文）Does seismic shaking enhance outgassing and decompressional vesiculation? An experimental approach

研究代表者

隅田 育郎 (Sumita, Ikuro)

金沢大学・地球社会基盤学系・准教授

研究者番号：90334747

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：粒子を含む液体（結晶を含むマグマのモデル）からの(i)脱ガス、(ii)振動下における間隙流体圧の発生、をモデル化する2つの実験を行い、以下の結果を得た。(i)粒子の体積分率が $\phi = 0.4$ かつ気泡の体積が臨界値以上の場合には気泡の上部が液面から頭を出した直後に気泡が破裂し、気泡の開口部において共鳴する音が発生することを発見した。これは粒子を含む流体が十分に速い速度で引っ張られて、膜が破壊するためだと説明できる。(ii)振動により間隙流体圧が変化しない、正、負、振動する、の4通りに場合分けした。そして、これらの現象が発現する振動の加速度、振動周期、粒径条件を制約し、物理的な解釈を与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マグマはしばしば結晶（粒子）を含む。粒子の体積分率が増えると(a)流体的な性質から固体的な性質へと変わり、(b)間隙流体圧が上昇する場合から低下する場合へと変わる。これらの現象は火山噴火の様式に関係すると考えられているが、その詳細は分かっていない。本研究では(a)について、気泡体積が変わると破裂の仕方、空振波形が顕著に変わることを発見した。この結果は空振から、気泡体積が制約でき得ることを示す。(b)については間隙流体圧の変化の様式を、振動加速度、粒径の関数として整理した。これは間隙水圧の指標となる地下水位の変化から、未知パラメータを制約する上で基礎となる。

研究成果の概要（英文）：We conducted experiments using suspensions (a model of crystal-bearing magma) on (i) outgassing, (ii) pore-pressure generation under shaking and obtained the following results. (i) We discovered that when the particle volumetric packing fraction ( $\phi$ ) is  $\phi = 0.4$  and the bubble volume is larger than critical, the bubble bursts as soon as it protrudes above the surface, and a resonance occurs in the bubble aperture. This phenomenon is interpreted as a consequence of bubble film being stretched faster than the critical velocity, such that the film failed brittly. (ii) We classified the resulting phenomena into 4 types, according to the style in which the pore-water pressure changes: no change, rise, fall, oscillation. We mapped the results as a function of shaking acceleration, particle packing fraction and particle diameter, and provided a physical explanation for the results.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：地震 マグマ 結晶 粒子体積分率 レオロジー 空振 加速度 粒径

## 1. 研究開始当初の背景

本研究の開始当初において、大きな地震が火山活動、間欠泉活動、地下水位変動を誘発することは観測事実として良く知られていた(例: Manga & Brodsky, 2006)。しかし、その物理過程は十分に分かっていなかった。また観測からマグマのレオロジーや火山噴火様式を支配するパラメータ(上昇する気泡(スラグ)のサイズ、間隙流体圧など)を制約する方法も確立されていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では大きな地震による振動が(A)結晶を含むマグマを液状化し、脱ガスを促進する、(B)マッシュ状のマグマを膨張させて負圧が発生して減圧発泡を起こす、という2つの素過程に着目した。これらの過程は複雑でパラメータも多い。そこで、単純化したモデル実験により、これらの現象が起きる条件を明らかにすることを目的とした。そして実験に基づき、観測から未知パラメータを制約する方法を提案することを目指した。

## 3. 研究の方法

まず、以下(A)、(B)それぞれについて、実験方法を説明する。

(A)を調べるために、まず粒子体積分率( $\phi$ )が $\phi=0-0.5$ のサスペンションを作成し、その粘性率、粘弾性、降伏応力が $\phi$ の関数としてどのように変わるかを調べた。そして単一気泡(体積 $V$ )をこれらのサスペンションに注入し、その上昇速度を測定した。 $\phi=0, 0.3, 0.4$ のサスペンションについては、気泡の破裂過程、そして破裂の結果、励起される空振を測定し、その波形解析を行った。実験結果は $\phi-V$ のパラメータスペース上で整理した(2019年金沢大学修論, Hashimoto and Sumita (2021))。振動の影響は(B)でまとめて調べた。

(B)を調べるために、水で飽和した粉粒体(粒径 $d$ )を振動台上で水平、鉛直方向に振動させ(無次元加速度 $\Gamma$ 、周波数は主として20 Hz)、底部における全圧と間隙水圧の両方を測定する実験を以下の順番で行った。

(a)水で飽和した粉粒体を準2次元の直方体容器に入れ、水平、鉛直方向に振動させる実験を行い、起きる現象を無次元加速度 $\Gamma$ 、無次元粒径(ストークス数)の関数として整理した(2019年金沢大学卒論)。

(b)乾いた粉粒体を円筒型容器に入れ、無次元加速度 $\Gamma$ を変えて鉛直振動させ、底面における全圧測定を行った。振動に伴う粉粒体の跳躍過程の数値モデリングを行った(2021年金沢大学卒論)。

(c)(b)の円筒型容器の底面において全圧と間隙水圧の同時測定が出来るように装置を改良した。そして水で飽和した粉粒体を容器に入れ、 $\Gamma$ と $\phi$ をパラメータとして水平振動実験を行い、間隙水圧が変化しない、正圧、負圧、となる条件をマッピングした(2022年金沢大学卒論)。

(d)(c)の実験装置にさらにマイクロフォンを設置した。そして粒径 $d$ を3通り変えた水平振動実験を行い、無次元粒径( $R$ )を使って、間隙水圧が変化しない、正圧、負圧、振動する条件をマッピングした(2023年金沢大学卒論)。

次に本課題に関連して本研究期間中に行った研究について説明する。

(A)の実験に関連して、ハワイ島、キラウエア火山の2018年噴火の野外調査と空振観測を行った。野外調査は米国地質調査所の方々に同行して行った(Patrick et al., 2019)。(B)の実験に関連して、全圧と間隙水圧の同時測定を行うきっかけとなった地すべりのモデル実験の成果を論文として公表した(Shibuya and Sumita, 2022)。

## 4. 研究成果

(A)の成果はHashimoto and Sumita (2021)にまとめて公表した。以下に主要な内容を記す。

**FIG. 1**に実験装置と可変パラメータを記した。 $\phi=0, 0.3, 0.4$ のサスペンションを角柱セルに入れ、下部からシリンジを使って体積 $V$ の気泡を注入すると、気泡は上昇し、液表面で破裂する。破裂過程は高速カメラで撮影し、破裂の結果、励起される音はマイクロフォンで記録する。実験は $\phi, V$ の組み合わせを変えて行った。加えて $\phi=0.4$ の場合については、液面の高さ(角柱セル上端からの距離 $L$ )を変えて気柱共鳴の同時励起を調べる実験を行った。

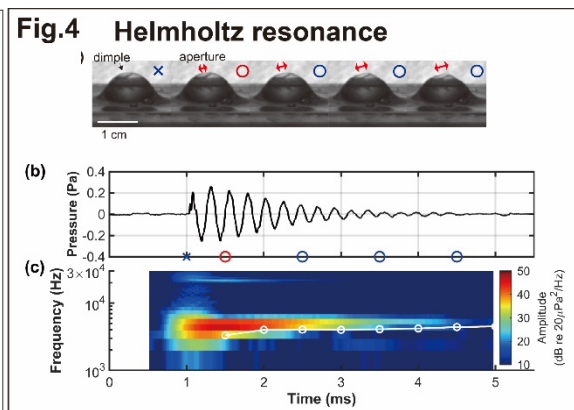
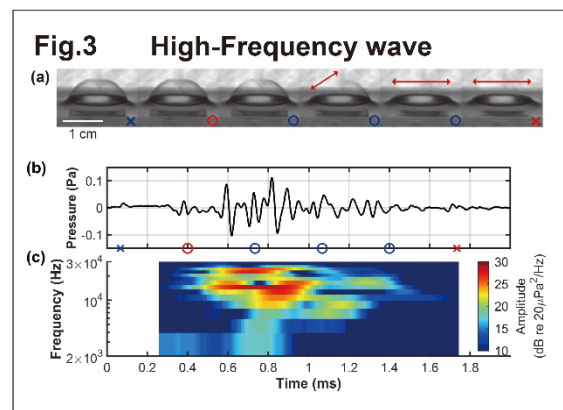
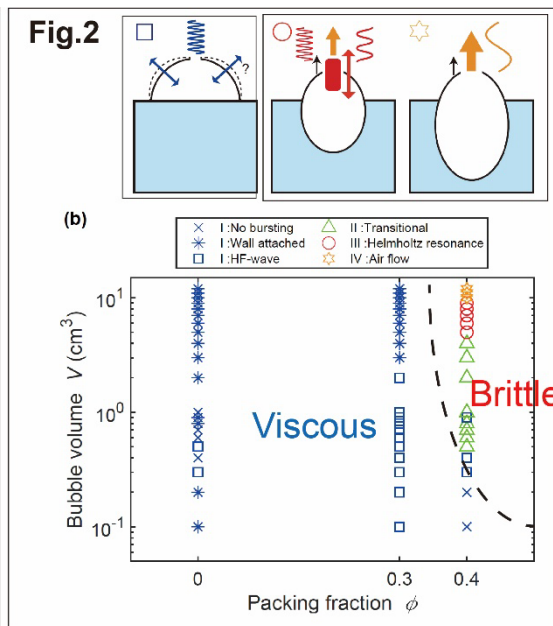
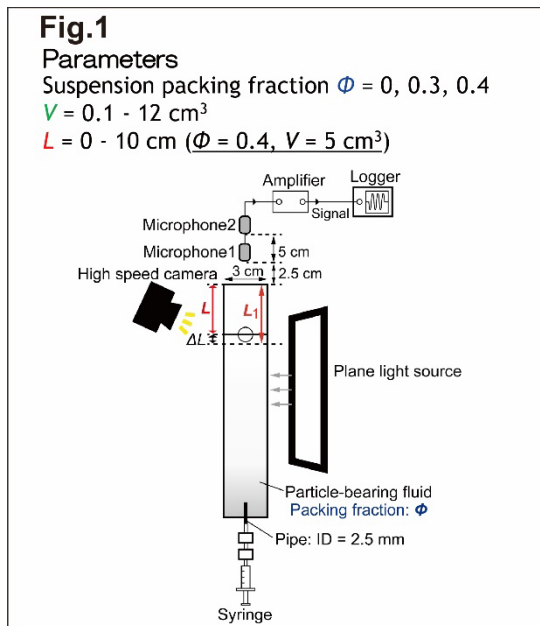
**FIG. 2**に実験結果を横軸に $\phi$ 、縦軸に $V$ のパラメータスペース上で整理した。 $\phi$ と共に粘性率が増大し、粘弾性、降伏応力が出現する。即ち、「粘性流体的」(fluid-like, viscous)なレオロジーから「脆性固体的」(solid-like, brittle)なレオロジーへと遷移する。気泡の破裂様式は以下の2通りに場合分けされた。

**HF-wave型**:  $\phi=0, 0.3$ 、及び $\phi=0.4$ かつ $V$ が臨界値以下の場合、気泡は液面まで上昇し、半球を形成した後に速やかに破裂し、高周波数の音波(High-Frequency wave)を励起する(**FIG. 2**の□に対応)。一例として $\phi=0.3, V=0.6 \text{ cm}^3$ の場合の結果を**FIG. 3**に示した。この場合の特徴的な周波数は、気泡内部の空気の圧縮性を復元力とする膜振動モデルで良く説明される。

**ヘルムホルツ共鳴型**:  $\phi=0.4$ で $V$ が臨界値以上の場合、気泡の上半分が液面から頭を出した時点で破裂が起きる。気泡膜は□の場合と比較して、ゆっくりと開く(**FIG. 2**の○、☆に対応)。

特に○で示した場合は、減衰振動を示す音波が励起され、その一例として  $\phi=0.4$ ,  $V=0.6 \text{ cm}^3$  の場合の結果を **FIG. 4** に示した。この場合の特徴的な周波数は、気泡の開口部のネックにおける空気の振動（ヘルムホルツ共鳴）で良く説明される。

HF-wave 型からヘルムホルツ共鳴型への遷移(**FIG. 3** の点線)は次のように説明される。レオロジー測定に基づき、 $\phi=0.4$  のサスペンションのレオロジーは最も単純にはマックスウェル粘弾性で近似できる。マックスウェル粘弾性体は速い速度で変形した場合は固体的な挙動をし、破壊に至る。定性的には気泡の体積  $V$  が大きくなると、変形の歪速度が大きくなるため、気泡が頭を出した時点で、引き伸ばされて薄くなった気泡膜が破壊したと解釈できる。定量的には、粘弾性の緩和時間と気泡膜の変形時間の比を示す無次元数（デボラ数  $De$ ）を用いて評価することができる。 $De$  が臨界値 ( $De_c$ ) より大きい場合 ( $De > De_c$ ) は、緩和時間に比して変形時間が十分に短いので、固体的に脆性破壊が起きる。本実験について  $De_c$  を計算したところ、 $De_c \sim 10^{-3}$  のオーダーとなり、結晶を含む高粘性マグマのレオロジー測定から分かっている  $De_c$  の値と同オーダーであることが分かった。以上の実験結果は、火山で観測される空振波形を使って、マグマのレオロジー、または上昇して破裂する気泡（スラグ）の体積が制約できることを示している。



(B) の主要な成果は研究期間後半に行った卒業研究 (2 名) にまとめられた。

円筒型容器に水で飽和した粉粒体 (粒径  $0.05 \text{ mm}$ ) を入れ、水平方向に  $20 \text{ Hz}$  で振動させ、底面において間隙水圧と全圧を同時測定する実験を  $\phi$  と振動の加速度 (無次元加速度  $\Gamma$ ) を変えて行った。ここで  $10$  秒間振動を行った後、 $180$  秒停止し、圧密させる過程を繰り返した。この振動と圧密の過程を繰り返すと、粉粒体がより密になり、 $\phi$  は増大していく。実験結果は  $\phi$  と  $\Gamma$  のパラメータスペースで整理した。その結果、 $\phi < 0.60$  (かつ  $\Gamma > 1$ ) では間隙水圧が正圧になったが、 $0.60 < \phi < 0.62$  (かつ  $\Gamma > 1$ ) では負圧となった。密に詰まった粉粒体の変形されると空隙が広がり (ダイヤランシーが起きる)、負圧が発生することが知られている。本実験では振動下において負圧が発生する  $\phi$ ,  $\Gamma$  条件を制約したという意義がある (金沢大学 2022 年卒論)。

次に同じ実験系を用いて、粒径依存性 ( $d=0.1 \text{ mm}, 0.4 \text{ mm}, 1 \text{ mm}$ ) を調べた。粒径を大きくすると、間隙水圧の緩和が速くなる一方で粒子の慣性が大きくなり、結果的に間隙水圧がどのように変わるかは明らかではない。Iverson and LaHusen (1989) は粉粒体をせん断した時の間隙水圧の変動を測定し、結果をせん断時間と間隙水圧の緩和時間との比 (無次元数  $R$ ) を使って解釈した。

本実験ではRを振動実験に適用し、 $R \sim 1$ をはさむように $R = 0.01-10$ の範囲、 $\phi = 0.62 \pm 0.1$ で行った。その結果、粗粒の $R \sim 0.1-10$  (かつ $\Gamma > 1$ ) の場合では振動下において間隙水圧は発生せず、慣性起源の粉粒体対流も見られなかった。粉粒体対流には壁面の効果が重要なので、円筒型の容器ではこの効果は小さかった可能性がある。一方で細粒の $R \sim 0.1-1$  (かつ $\Gamma \sim 0.1-1$ ) では間隙水圧が正に、より細粒の $R \sim 0.001-0.1$  (かつ $\Gamma \sim 0.1-1$ ) では間隙水圧が負になり、さらに間隙水圧が振動する伴う場合があることが分かった。このように  $R-\Gamma$  の組み合わせで間隙水圧の変化が多様であることが判明したが、その支配物理はまだ分かっていない。本実験では、加えてハイドロフォンを使って、粉粒体同士の衝突起源の音波の測定を行った。その結果、間隙水圧が正になると、音波の励起が抑制されることが分かった(金沢大学 2023 年卒論)。

以上より、間隙水圧の発生条件を $\phi$ 、粒径(無次元数R)、加速度(無次元数 $\Gamma$ )の3つのパラメータを変えて明らかにした。地震に伴い地下水位が上昇、下降、振動、ないし変化しないことが知られており、本実験結果はこれらの起源を制約する基礎となる。従って、低粘性流体の場合に限られるが、マグマにおいて減圧(負圧)が起きる振動条件を知る、という当初の問いに対しては、部分的に答えを与えることができた。

## 引用文献

Hashimoto, K. and I. Sumita, 2021, Excitation of airwaves by bubble bursting in suspensions : regime transitions and implications for basaltic volcanic eruptions, *Earth, Planets and Space*, **73**, 143

Iverson, R. M., and R. G. LaHusen, 1989, Dynamic pore-pressure fluctuations in rapidly shearing granular materials, *Science*, **246**, 796-799.

Manga, M. and E. Brodsky, 2006, Seismic triggering of eruptions in the far field : Volcanoes and Geysers, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **34**, 263-291.

Patrick, M. R., Dietterich, H. R., Lyons, J. J., Diefenbach, A. K., Parcheta, C., Anderson, K. R., Namiki, A., Sumita, I., Shiro, B., J.P. Kauhikaua, 2019, Cyclic lava effusion during the 2018 eruption of Kilauea Volcano, *Science*, **366**, eaay9070

Shibuya, F. and I. Sumita, 2022, Experiments on seepage-triggered cliff landslides using cohesive wet sand, *Prog. Earth Planet. Sci.*, **9**:43

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Shibuya, F. and I. Sumita	4. 巻 9
2. 論文標題 Experiments on seepage-triggered cliff landslides using cohesive wet sand	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-022-00501-7	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 -

1. 著者名 Hashimoto, K. and I. Sumita	4. 巻 73
2. 論文標題 Excitation of airwaves by bubble bursting in suspensions : regime transitions and implications for basaltic volcanic eruptions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 143
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-021-01472-71	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 -

1. 著者名 M. R. Patrick, H. R. Dietterich, J. J. Lyons, A. K. Diefenbach, C. Parcheta, K. R. Anderson, A. Namiki, I. Sumita, B. Shiro, J. P. Kauahikaua	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 田村、隅田
2. 発表標題 爆発クレーターの3次元モデル実験：予察の結果
3. 学会等名 JpGU 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sumita, I., Shibuya, F.
2. 発表標題 Experiments on seepage-triggered cliff landslides using cohesive wet sand
3. 学会等名 JpGU 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sumita, I., Hashimoto, K.
2. 発表標題 Bubble bursting and sound generation in suspensions
3. 学会等名 American Physical Society, Divison of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sumita, I., Hashimoto, K.
2. 発表標題 Excitation of airwave by a bubble bursting in suspensions : regime transitions and implications for basaltic volcanic eruptions
3. 学会等名 AGU fall meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sumita, I., Hashimoto, K.
2. 発表標題 Excitation of airwave by a bubble bursting in particle-bearing fluids : regime transitions and implications for basaltic volcanic eruptions
3. 学会等名 JpGU - AGU joint meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hashimoto, K., Sumita, I
2. 発表標題 Excitation of acoustic waves by bubble rupture in a crystal-bearing magma: A laboratory investigation
3. 学会等名 JpGU 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sumita, I., Namiki, A., Patrick, M.
2. 発表標題 Near field observation of 2018 eruption of Kilauea volcano at Fissure 8 Lower East Rift Zone
3. 学会等名 AGU 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室のホームページ <a href="https://sites.google.com/view/geodynlab">https://sites.google.com/view/geodynlab</a>
---

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			
米国	USGS			