

令和元年5月22日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K13591

研究課題名(和文) マグマだまりの固化過程と固化組織の因果関係

研究課題名(英文) Relationship between magma chamber solidification process and resulting texture

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：初期に熱対流が起きているマグマだまりが冷却、固化する過程、及び固化組織の因果関係を明らかにするために、部分溶融(固液が共存)状態が実現されるワックス水溶液を用いてモデル実験と解析を行った。実験の結果、部分溶融度が臨界値よりも大きくなると、冷却中に結晶を含むコールドブルームが剥離、沈降し、対流パターンが固化組織として保存されること、また固化フロントで顕著な過冷却が起きることが分かった。また結晶を含むマグマにおける脱ガス過程と空振励起の実験、解析を行った。その結果、マグマが含む結晶量が増えると、粘弾性により気泡の合体、破裂が促進され、気泡開口部において共鳴による空振が励起されることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固化したマグマだまりは深成岩、露頭として観察することができるが、その過程を直接見ることはできない。本研究で発見された現象は、従来の単純化された理論では殆ど取り入れられていない現象であり、理論への新しい課題を与えた。また実験では上部の冷たい熱境界層における粘性比が7桁以下になると結晶を含むコールドブルームが沈降することを示した。これは同様に冷却しているマントルにおいてプレートテクトニクスが機能する条件を実験的に調べる上での基礎となる。また実験に基づき空振波形を使って気泡体積、マグマのレオロジーが推定可能であることを阿蘇山のデータを使って示し、火山で観測されるデータへ応用する道筋を与えた。

研究成果の概要(英文)：We conducted laboratory experiments to understand the relationship between the solidification process and the resulting texture in the cooling magma chamber that is initially thermally convecting. For the experiments, we used a wax solution which becomes partially molten. We found that when the melt fraction is larger than critical, cold plumes containing suspended crystals detach from the upper thermal boundary layer and settle. We also find that a significant supercooling occurs at the solidification front. We also conducted model experiments on outgassing and air wave excitation in crystal bearing magma. We find that when the particle content increases, coalescence and bursting of the bubbles are enhanced, and that resonance occurs at the aperture of the ruptured bubble.

研究分野：固体地球惑星物理学

キーワード：マグマだまり 玄武岩質マグマ 冷却 固化 部分溶融 結晶沈降 脱ガス

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

天然においてマグマだまりや岩脈が冷却、固化する過程を直接観察することは困難である。私達がアクセスできるのは固化した後の露頭に限られる場合が殆どである。露頭観察から固化過程を制約するためには、「多成分系のメルトが冷却した時にどのような過程を経て固化組織が形成されるのか」を知らないといけない。物質が拡散のみで移動する小さなスケールにおける結晶成長はマグマを用いた室内実験で再現されている。しかし実際のマグマだまりでは対流が主要な熱と物質の輸送手段であり、さらに相変化、混相流が関わってきて複雑である。そこで1980年代後半から有効な研究手段としてモデル実験が行われてきた。これらの実験は熱対流が停止するまでの冷却過程 (Brandeis & Marsh, 1988)、部分溶融体 (マッシュ) 形成と組成対流のパターン (Tait et al. 1992)、熱と組成対流の競合 (Kaneko & Koyaguchi, 2000) など、この系特有の流体力学を明らかにしてきた。しかし完全に融けている状態から固化が完了するまでの全過程を調べたものは少なく、熱対流が起きている場における固化過程と固化組織の関係はまだ十分に分かっていない。私達はこの問題に挑むために、まずは固化が入っていない場合について、結晶層の重力不安定 (Michioka and Sumita, 2005, Shibano et al. 2012) の実験を行い、粒子が数個からなる粒子層がレイリー・テイラー型不安定を起こすこと、またその結果、メルトが浸透流よりも速い速度で上昇することを示した。次に熱対流しているマグマだまりが天井母岩を熱侵食する過程をモデル化した実験を行い (Shibano et al., 2013, 隅田他, 2014)、天井から落下する粒子サイズが臨界値以下ではマグマだまりが密度成層するため、熱浸食が間欠的に起きることを示した。さらに落下する結晶に粒径分布があると級化した層状堆積物が出来ることを示し、層状貫入岩体形成の新しいモデルとして提唱した。この実験ではワックスとビーズの混合物を用いて、部分溶融する母岩をモデル化した。次のステップとして、より現実的な部分溶融するワックスを用いて実験を行い、スラリー層 (部分溶融層の内、「液体的」なレオロジーを持つ層) が上部の境界層から剥離するか検証する着想を得た。また上記の実験の後に対流層を自然冷却させたところ、固化直前の対流パターンが固化組織として凍結されることが分かり、部分溶融するワックスを用いても対流パターンが凍結されるか、問題意識を得た。

2. 研究の目的

本研究では初期に完全に融解して熱対流している状態から、部分溶融状態を経て固化に至るマグマだまりをモデル化した実験を行い、マグマ組成 (リキダス-ソリダス温度差)、固化速度、温度勾配を変えた時に起き得る固化過程の違いをレジームダイアグラムとして整理し、固化過程と固化組織の対応付けを明らかにすることを目的とする。本研究の特色は岩石組織とマグマだまりの冷却過程をつなぐ点にある。実験では物理が十分に分かっていない結晶成長、部分溶融体のレオロジーについて、仮定を置かずに結果を得ることが出来、重要な素過程を判別する上で有効である。

3. 研究の方法

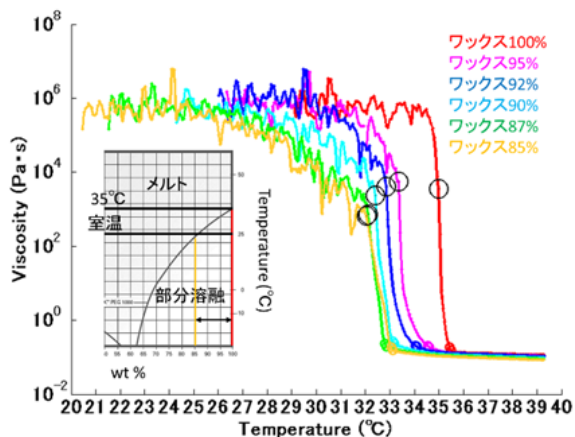
本研究では融解すると透明になる PEG1000 (ポリエチレングリコール: 高分子ワックス) 水溶液を用いる。PEG 水溶液は 2 成分共融系の相図を持ち、分子量に依存して幅広い融点 (35-65°C) を持つ。PEG1000 は室温付近で固化するため選定した。95wt% の PEG1000 のサンプルをリキダス (~32°C) から室温 (~25°C) まで冷却すると、部分溶融度が 1.0 から 0.39 へと大きく減少する。対して、これまでの固化実験で良く用いられてきた塩化アンモニウムは融点が高く (338°C)、その水溶液は常温付近では共融点近傍の組成でのみ液体となるため、部分溶融度を幅広く変えることが難しい。固化実験は Shibano et al (2013) で用いた実験セル (内寸: 80 x 80 x 10 mm) を改造して行う。感温液晶で温度場を可視化し、セル内部の温度構造を熱電対とサーミスターで測定し、セルの上板と下板の熱流量を測定する。セルの冷却方法は、Case A: 上部から空冷、Case B: 上部から氷で冷却、Case C: 下から空冷、の 3 通りで行う。ワックス組成は 85-100wt% の間の 6 通りで行い、その結果、室温における結晶体積分率が 0-100vol% の間の幅広い範囲の部分溶融体が形成する。

4. 研究成果

(1) PEG 水溶液を用いた冷却・固化実験

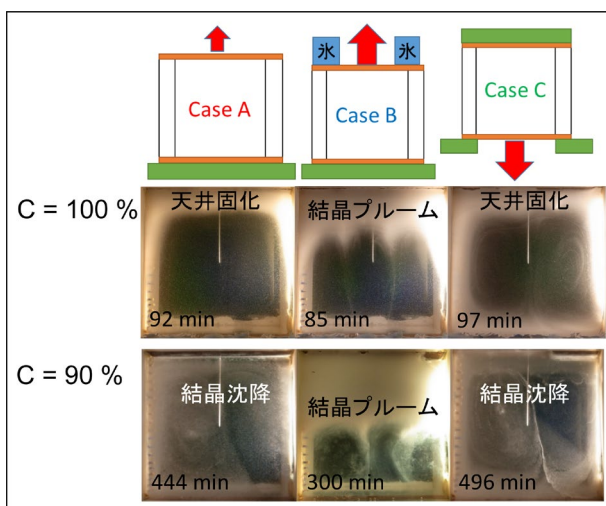
(i) PEG 水溶液のレオロジー測定

PEG 水溶液の貯蔵、損失弾性率とその温度依存性をレオメータを用いて測定した。損失弾性率から実効的な粘性率を求めた結果を右図に示す。固化が進行すると、貯蔵弾性率 > 損失弾性率となる。貯蔵弾性率と損失弾性率の大小関係が逆転する温度を○(右図)で示した。測定の結果、固化が起きると粘性率が6桁増大すること、また水分量が増加すると、粘性率の温度依存性が小さくなることが分かった。水分を含まないPEGは溶岩流のモデル実験用に幅広く使われており、粘性率の温度依存性も測定されている(Garel et al 2014)。PEG 水溶液の場合のレオロジーとその水分依存性は本研究で初めて得られた結果である。



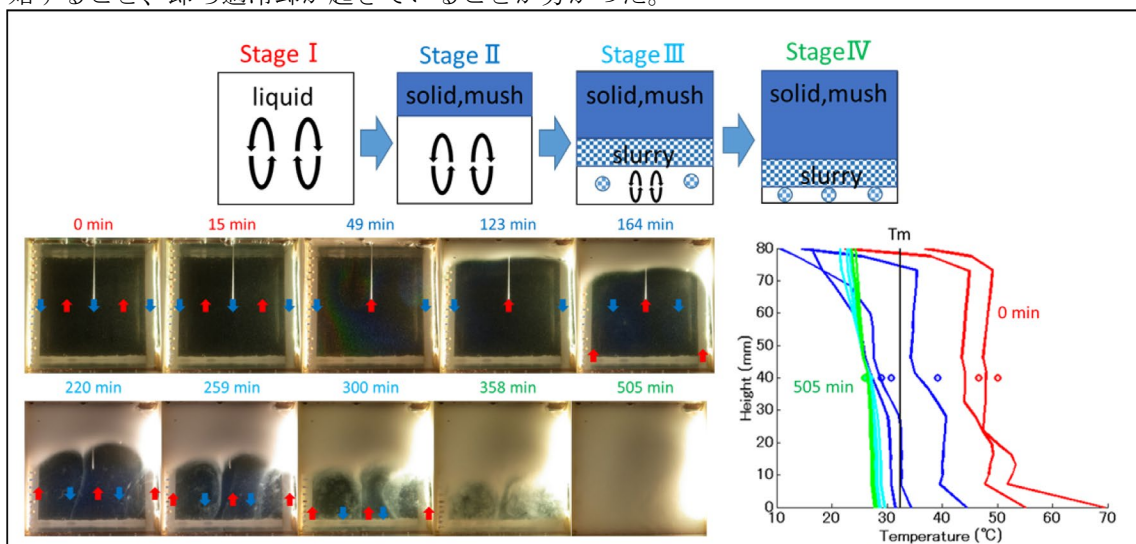
(ii) 部分溶融層の形成とその影響

右図はPEG1000水溶液のワックス組成が100 wt%、90 wt%の場合について、3通り(Case A-C)の冷却方法を用いて冷却、固化した場合の実験結果である。C = 90 wt%の場合は上部にスラリー層が形成、剥離して、結晶、ブルームの沈降が起きる。C = 100 wt%の場合は、スラリー層が薄いか、存在せず、上部から急冷する場合(case B)のみ結晶を含むブルームが沈降する。私が知る限り、これはPEG水溶液の組成、冷却方法を変えることにより、結晶沈降の様式が変わることを示した初めての結果である。



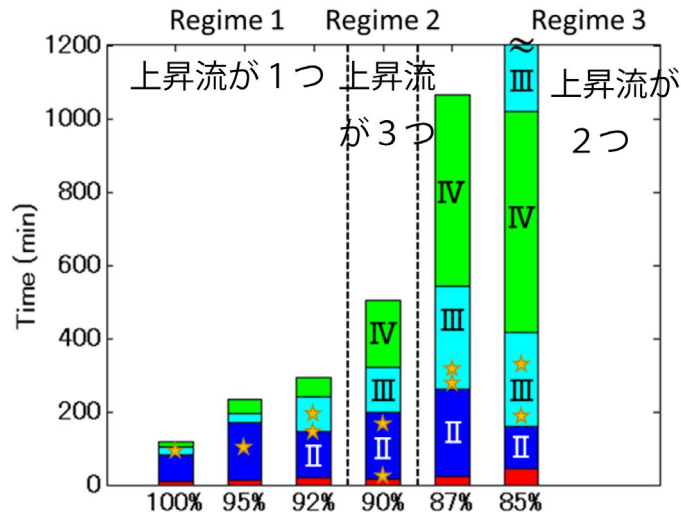
(iii) 固化過程の時間発展

下図はPEG水溶液のワックス組成が90 wt%の場合について、Case Bの方法で冷却、固化した時の冷却、固化過程の実験結果である。冷却、固化過程は4つのStageに区分することができ、Stage毎に文字、線の色を変えて表示している。冷却に伴い、下降域が3か所から2か所へと減少し、結晶を含むブルームが上部の境界層から剥離し、沈降する。実験ではセルの左側に熱電対列を設置し、鉛直温度構造を測定した。またセル中心部にサーミスターを設置し、その測定結果は○印で示されている。温度測定から固化はリキダス温度よりも低くなってから開始すること、即ち過冷却が起きていることが分かった。



(iv) レジームダイアグラム (Case B)

右図は Case B の場合について、冷却、固化の最終段階における上昇域の数で場合分けしたレジームダイアグラムである。PEG 水溶液が水分に富むとリキダス温度が低下し、固化に要する時間が長くなる。ワックスの水分が少ない場合 (Regime 1) はスラリー層が薄いため、結晶を含むプルームは発生しないか、または水平方向に移動せず、上昇域は中心部に 1 つ形成する。一方で PEG 水溶液の水分量が増えると (Regime 2, 3)、プルームが水平方向に移動して、中心付近で 1、2 カ所沈降する。従ってレジームダイアグラムは結晶を含むプルームの水平方向への移動の易動度に対応していると言える。本研究により、スラリー層の厚さが固化組織の支配要因の一つであることが分かった。



(v) 結晶を含むプルームの厚さスケール

本実験の対流パターンは粘性率が温度に強く依存する場合の熱対流のパターンと良く似ている。Stagnant Lid Convection (Solomatov, 1995) のスケーリング則を用いて上部の rheological sublayer の厚さを計算したところ、結晶を含むプルームサイズと同程度であることが分かった。しかし本実験は相変化を伴っているため、本スケーリング則では説明できない結果もある。今後の理論の拡張が必要とされる。

以上 (1) の研究成果は、金沢大学大学院、高橋大地君の修士論文 (2018 年 3 月) としてまとめられた。

(2) 結晶を含むマグマにおける気泡上昇と空振励起

固化した玄武岩質マグマには気泡がトラップされたり、集積した跡が見られる。本研究課題に関連して、結晶を含むマグマにおける気泡上昇と空振励起のモデル実験を行った。その結果、結晶量が増えると気泡の合体、破裂が促進されること、また気泡破裂時にヘルムホルツ共鳴が励起されやすくなることを示した。一般にマグマのレオロジーは空振の励起様式を支配すると考えられているが、過去のモデル実験ではゲルなどを用いていた。本研究では初めて粒子を含む流体を用いて、この関係を明らかにした。

以上 (2) の研究成果は、金沢大学大学院、橋本佳菜さんの修士論文 (2019 年 3 月) としてまとめられた。

(3) キラウエア火山、Lower East Rift Zone における空振観測

(2) に関連して、2018 年キラウエア火山の Lower East Rift Zone の噴火の最終段階 (7 月下旬~8 月上旬) に Fissure 8 の近接場で空振アレイを用いて、空振観測を行った。加えて、広帯域地震計による観測も約 3 時間行った。解析の結果、噴火活動が高まると空振スペクトルのパワーが低周波側に移動することが分かった。このようなスペクトルの変化は地震の観測では得られておらず、火道の浅い部分のダイナミクスを反映していると考えられる。

以上 (3) の観測結果を理解するためのモデル実験は現在、金沢大学における卒業研究として進めている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- [1] Hayashi, K. and I. Sumita, 2017, Low-velocity impact cratering experiments in granular slopes, *Icarus*, 291, 160-175, <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2017.03.027>
- [2] Yasuda, N., and I. Sumita, 2016, Effect of viscosity on the shaking-induced fluidization in a liquid-immersed granular medium, *Phys. Rev. E.*, 93, 022901
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.93.022901>
- [3] Sumita, I., and M. I. Bergman, 2015. Inner-Core Dynamics, in Schubert, G. (ed.) *Treatise on Geophysics* (second edition), Oxford: Elsevier Ltd.
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00143-3>

[学会発表] (計 17 件)

- [1] Sumita, I., Namiki, A., Patrick, M. Near field observation of 2018 eruption of Kilauea volcano at Fissure 8 Lower East Rift Zone, AGU Fall Meeting, 2018,
- [2] Hashimoto, K., Sumita, I., Excitation of acoustic waves by bubble rupture in a crystal-bearing magma: A laboratory investigation, JpGU 2018.
- [3] Hashimoto, K., Sumita, I., Model experiments of degassing process in a crystal-bearing magma, IAVCEI 2017, Portland USA.
- [4] Hashimoto, K., Sumita, I., Model experiments of degassing process in a crystal bearing magma, JpGU-AGU Joint Meeting, 2017.
- [5] 高橋、隅田、マグマだまりの固化全過程：モデル実験によるアプローチ、JpGU 2016.
- [6] Takahashi, D., Sumita, I., Experiments on the whole process of magma chamber solidification: preliminary results, Japan SEDI Symposium 2015, ERI Univ, Tokyo.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

[その他]

- 橋本佳菜、結晶を含むマグマにおける脱ガスと空振励起のメカニズム：流体実験による解明、金沢大学大学院自然科学研究科、修士論文、2019. 3
- 高橋大地、マグマだまりの固化全過程：モデル実験によるアプローチ、金沢大学大学院自然科学研究科、修士論文、2018. 3
- 研究室のホームページ <http://hakusan.s.kanazawa-u.ac.jp/~sumita/>
- 実験動画例 <https://www.youtube.com/user/geodynlab>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。