

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：32685

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400457

研究課題名(和文) マグマの流れが生み出す時空間のリズム：非ニュートン流体がもたらす非線形振動現象

研究課題名(英文) Rhythm of magma transport in deformable porous media

## 研究代表者

熊谷 一郎 (Kumagai, Ichiro)

明星大学・理工学部・准教授

研究者番号：50597680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：変形可能な透明ゲルビーズを用いて固液混合マグマのアナログ物質を作成し、その非ニュートン流体のレオロジー特性の計測やマグマの流れを模擬した対流実験を行った。実験では、密度の異なる流体を一定流量注入したり、一定熱流量で流体を加熱したりすることでブルーム(対流)を作成した。その結果、ニュートン流体を用いた実験では見られなかった流れの局在化や間欠性が自発的に生じることを示した。これらの知見によって、火山活動の時空間分布(間欠性や局在化)に関する観測結果を説明できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Fluid experiments on buoyancy-driven flows in deformable gel beads layer were conducted to understand the dynamics of magma transport in a partially molten region. As an analogue material of partially molten media, a mixture of transparent hydro gel beads and viscous fluids was used. Our experimental results indicate that the intermittent nature of the volcanic activity is inherent to magma transport in a partially molten zone, which explains the spatio-temporal patterns of volcanic activity.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：火山 地震 流体 レオロジー マグマ ブルーム

### 1. 研究開始当初の背景

火山活動の源であるマグマは、それが存在する温度圧力条件において部分熔融状態にあり、地表へ到達するまでの輸送過程に応じて火山活動の時空間パターンに多様性が生じると考えられている。部分熔融体は、固体と液体の混合物で構成されており、その流れの挙動は流体の粘性、固体フレームのレオロジー特性、固液の割合、密度差に起因する圧力差等、様々な因子によって支配されるため、現象の理解は非常に難しい。1960年代以降、マグマの輸送現象を理解するため、ニュートン流体中のブルームに関する流体力学的な研究が数多くなされたが、火山活動の間欠性や火山の分布などに関する観測事実を上手く説明することができなかった。このような状況において、火山現象に観るリズムやパターンに潜む物理の理解が国内外で強く望まれていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、マグマ輸送に伴う火山活動のリズムや空間的なパターン形成に潜む物理の本質に迫るため、マグマを模擬した固液混合流体（非ニュートン流体）を用いた対流実験とレオロジー計測を行う。

### 3. 研究の方法

マグマを模擬した非ニュートン流体（変形可能な透明 porous media + 粘性流体）を作成し、ひずみ速度依存性や降伏応力などのレオロジー計測を行う。またそれら模擬マグマを用い、火山活動の間欠性や空間的なパターン形成がどのようにして生まれるのかについて明らかにするための対流実験を行う。実験では、Buoyancy flux や固液混合物の液相割合などを変化させ、流れの振る舞いを明らかにする。流れの定量可視化のために、PIV や LIF などの可視化技術を用い、定量的な速度場や温度場などの計測を行う。

### 4. 研究成果

実験に適した吸水性高分子ゲル（透明度が高く、作成が容易）の選定を行い、マグマを模擬した固液混合流体を作成した。それらを透明なアクリル水槽に入れ、温度や組成の異なる流体を注入することでブルームを作成し、その流れの振る舞いを理解するための実験を行った。

実験では、流れを駆動するために、

- (1) 密度の異なる粘性流体の一定流量注入、
- (2) 水槽の底に取り付けた熱源による加熱の2つの方法を行った。

前者の実験においては、図1に示すような3次元水槽を作成し、流体の粘性や注入流量、そしてゲル粒子のサイズなどを変化させた。実験を行う前に、ゲル粒子層および注入流体のレオロジー特性を計測した。本研究で使

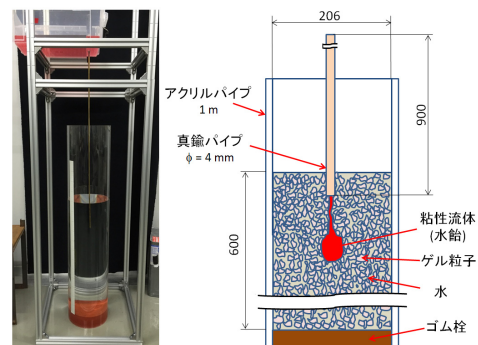


図1 ゲル粒子層中のブルーム実験装置概要 (大河原・緒方・熊谷)。

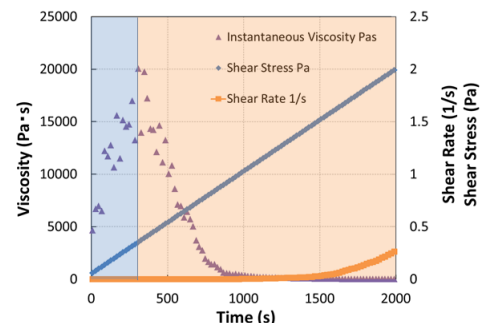
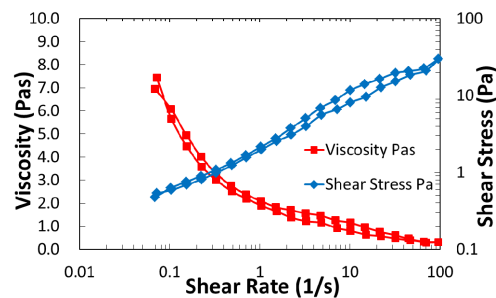


図2 実験で使ったゲル-液体混合物のレオロジー計測の例 (大河原・栗田・熊谷)。上図：実効粘度の歪速度依存性。下図：降伏応力の計測結果。

つ (図2)。実験では、これらの非ニュートン流体の特性によって、ニュートン流体では得られなかった「マグマだまり」の形成やダイクのようなクラック形成が観られ、より現実的な現象を得ることができた。

また、図3に示すように、ブルーム頭部の後流部分に、間欠的な流れが自発的に形成される現象も見出した。自発的な脈動現象では、流体を溜める過程と放出される過程が交互に起きる。これらは、ゲル混合層の降伏応力と Shear thinning のレオロジー特性が現象の鍵を握っており、ゲル混合層の降伏応力を超えたときに流動化が生じる。

実験パラメータが多いため、未だ整理しきれず、定性的な理解にとどまっているが、現在も、定量的な理解のために、実験画像の解析等を継続している。

後者の熱対流の実験 (図4a) では、初期の浸透流からチャネリングの形成 (図4b)、そして流動化による全層対流 (図4c) に至る時間発展の流れ現象が得られた。全層対流

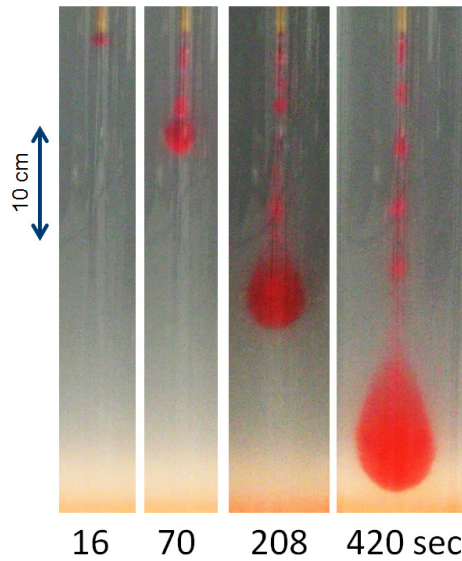


図3 プルームの後流に形成される自発的な間欠流れの例 (大河原・緒方・熊谷)。注入流体：実効粘度  $\mu=2410$  mPa.s, 密度 $\rho=1.365$  g/cm<sup>3</sup>, 流量  $Q_0=0.06$  ml/s)

においては、流れは非定常であり、自発的な脈動現象が得られた。こうした現象は、熱源からの熱流量やゲル粒子と間隙流体の割合などに大きく依存する。

以上、実験で得られた特徴的な流動現象について、国内外の学会で発表してきた (伝熱シンポジウム, AGU 2014, ICR 2016 など)。

また本研究に関連して、混相流のレオロジーの理解のために、気泡および固体粒子の割合が多い場合における流体のレオロジー計測に関する実験結果をまとめ、その成果を Flow Measurement and Instrumentation に発表した (図5)。

さらに、混相流のレオロジー計測手法として、超音波流速分布計 (UVP) を用いた新しい回転レオメータ (実効粘度計測法) を提案した (Experiments in Fluids)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

① Murai, Y., Shiratori, T., Kumagai, I., Ruehs, P., Fischer, P., Effective viscosity measurement of interfacial bubble and particle layers at high volume fraction, Flow Measurement and Instrumentation (査読有), 41, 121-128 (2015).

② Tasaka, Y., Kimura, T., Murai, Y., Estimating the effective viscosity of bubble suspensions in oscillatory shear flows by means of ultrasonic spinning rheometry, Experiments in Fluids (査読有), 56, 1867, doi 10.1007/s00348-014-1867-5 (2015).

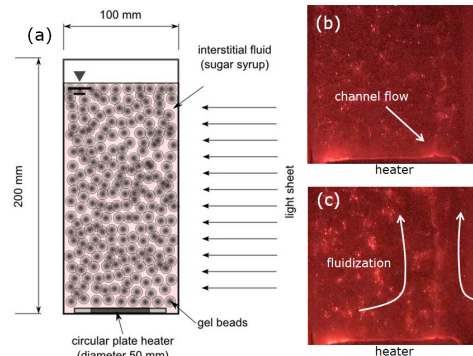


図4 ゲル粒子層を用いた熱対流実験 (a)実験装置概要 (b)実験初期には、均質な浸透流から流れが局在化したチャネル流が形成され、(c)その後、全層で流動化現象が起こり、間欠的なブルームが形成。

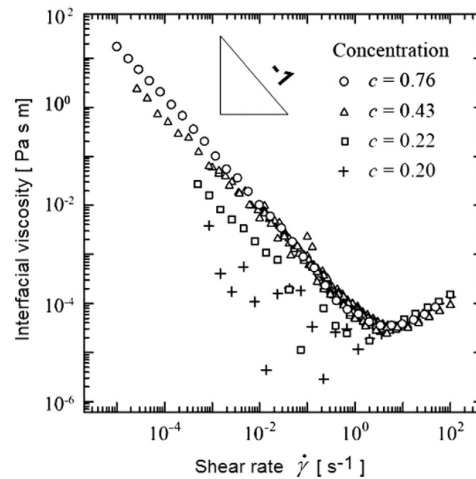


図5 粒子数密度と粘度の歪速度依存性 (Fig.10 in Murai, Shiratori, Kumagai, Ruehs, P., Fischer, Flow Measurement and Instrumentation 41, 121-128 (2015)).

[学会発表] (計 14 件)

① Kumagai, I., Davaille, A., Kurita, K., Buoyancy-Driven Flows in a Deformable-Gel Beads Layer: Spatio-Temporal Pattern of Magma Transport, ICR2016, Kyoto, Japan (2016).

② Kumagai, I., Kurita, K., Davaille, A., Spatio-temporal behavior of mantle plumes viewed from laboratory experiments, Symposium to honor the memory of Prof. Claude Froidevaux (招待講演), Laboratoire de Geologie, ENS, Paris, France (2016).

③ Kumagai, I., Davaille, A., Kurita, K., Flow behavior of thermo-chemical plumes in viscous fluids, The first Pacific Rim Thermal Engineering Conference 2016,

Hawaii, USA (2016).

④ 熊谷一郎, マントル内部の不均質性が生み出す多様なプルームの姿, 第14回関西伝熱セミナー(招待講演), 滋賀県大津市 (2015).

⑤ Kumagai, I., Effect of heater size on transient behavior of a thermally buoyant plume in a high-Prandtl number fluid, ASME-JSME-KSME Joint Fluid Engineering Conference 2015, Seoul, Korea (2015).

⑥ Kumagai, I., Kurita, K., Buoyancy-driven flows in deformable porous media, EGU General Assembly 2015, Vienna, Austria (2015)

⑦ Kumagai, I., Hirai, K., Ogata, M., Davaille, A., Kurita, K., Magma transport in deformable porous media, AOGS 11<sup>th</sup> Annual Meeting, Sapporo, Japan (2014).

⑧ 熊谷一郎, 実験室のプルームが語るマントル内部の熱物質輸送、日本機械学会 熱工学部門 熱工学コンファレンス 2014 プレコンファレンスワークショップ (招待講演)、東京(2014).

⑨ Kumagai, I., Tasaka, Y., Murai, Y., Buoyancy-driven plumes in heterogeneous fluids, The 5th symposium on AECOR5, Zurich, Switzerland (2014).

⑩ Kumagai, I., Yamagishi, Y., Davaille, A., The role of heat source for spatio-temporal variations of mantle plumes, American Geophysical Union Fall Meeting 2014, San Francisco, USA (2014).

⑪ 平井健太, 熊谷一郎, 緒方正幸, 村井祐一, 栗田敬, ゲル粒子を含む非ニュートン流体中の密度噴流の挙動, 日本機械学会流体工学部門講演会, 九州大学 (2013).

⑫ Murai, Y., Shiratori, T., Aikawa, Y., Kimura, T., Kumagai, I., Ruehs, P., Fischer, P., Effective viscosity of high-concentrated dispersion measured by interfacial rheometry, The 8<sup>th</sup> International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, Guangzhou, China (2013).

⑬ Tasaka, Y., Igaki, K., Kumagai, I., Murai, Y., Simultaneous measurements of velocity and temperature fields modified by a thermal blob injecting into a liquid metal layer, ICJWSF 2013, Nagoya, Japan (2013).

⑭ Kumagai, I., Kurita, K., Murai, Y., Davaille, A., Rhythm of magma transport in deformable porous media, IAVCEI, Kagoshima, Japan (2013).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

熊谷 一郎 (KUMAGAI, Ichiro)  
明星大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 50597680

### (2) 研究分担者

村井 祐一 (MURAI, Yuichi)  
北海道大学・工学研究院・教授  
研究者番号: 80273001

### (3) 研究分担者

田坂 裕司 (TASAKA, Yuji)  
北海道大学・工学研究院・准教授  
研究者番号: 00419946