ゲル粒子層を流れるプルームが作る非線形のリズム Plume's rhythm: nonlinear oscillation of the flow in deformable gel beads

○正 熊谷一郎 (明星大) 正 村井祐一 (北大) 正 田坂裕司 (北大)
学 渡村友昭 (北大) 栗田敬 (東大)

Ichiro KUMAGAI, Meisei University, 2-1-1 Hodokubo, Hino, Tokyo, 191-8506

Yuichi MURAI, Yuji TASAKA, Tomoaki WATAMURA, Hokkaido University, N13W8, Sapporo, 060-8628

Kei KURITA, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo, 113-0032

We have conducted laboratory experiments on spatio-temporal evolution of laminar plumes in a deformable gel beads layer. A thin experimental tank is filled with the mixture of deformable gel beads and a sugar syrup solution as the interstitial fluid. The buoyant plumes are generated by injection of a viscous fluid from a thin slit. When we injected a buoyant fluid, a gravitational instability like Rayleigh-Taylor instability occurs. Then the flow is localized and buoyant plumes are generated. The plume flow is relatively continuous at the source region, however, flow instability occurs along the plume axis and the pulsating flow is developed.

Key Words: Multiphase flow, Gel beads, Plume, Instability, Nonlinear wave

1. 諸言

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（たとえば間欠性など）に多様性が生じると考えられている。部分熔融体は、固体（結晶）と液体（メルト）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。

一般に、複成火山の活動は連続的ではなく、数年から数百年といったタイムスケールの休止期を経て再活動をする。これまでマグマの輸送に関する研究において、ニュートン流体を用いたプルーム実験が数多く存在するが、給源で与えた浮力が連続的である場合には、その後の流れも連続的となり（図1）観測で得られるような流れの脈動性は生まれない。一方、火山の空間分布においても、観測と実験とが合わない事実がある。ニュートン流体を用いた高 Rayleigh 数の熱対流実験においては、プルームは熱境界層不安定によってランダムに発生する。したがって、マグマの通り道のような空間的な流れの局在化はおこらない。

Fig. 1 Continuous pipe flow of a thermal plume in a Newtonian fluid. Heat flux of a circular plate heater is constant. Compositional and temperature fields are visualized by LIF and TLCs with a laser light sheet.

そこで著者らは最近、部分熔融体のアナログ物質として変形可能な透明ゲルビーズと粘性流体の混合物を用いた流体

実験を行い、連続的な流れから不連続な流れに発展する現象を得た⁽¹⁾。本講演では、そこで得られた脈動現象に関する実験結果について報告する。

Fig. 2 Experimental setup.

Fig. 3 Deformable gel beads (hydrogel, left) and mixture of gel beads and interstitial fluid in an experimental tank (right). Scales are 10 mm⁽¹⁾.

2. 実験装置および方法

図2に実験装置の概略を示す。18×20×2cm³の薄型の透明アクリル水槽に、透明な高分子ゲル粒子（ポリアクリルアミドゲル、比重1程度、せん断弾性率 1.2×10^4 Pa）を満ちし、ゲル粒子の間隙には水飴と水の混合流体（密度 1.4 g/cm^3 、粘性 $2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ）を満ちした。図3左は使用したゲル粒子の画像で、直径は約5-10mm程度である。ゲル粒子を水槽に入れると、自重によってそれ自体が変形するため、間隙流体の割合は、ガラスビーズなどの変形しない球形粒子を最密充填した際の空隙率（約26%）よりも小さくなり、図3右の状態で約15%となる。実験ではゲル層の上部に5mmのスリットを設置し、水槽上部から食紅で着色した高粘性の流体（密度 1.41 g/cm^3 、粘性 $11 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ）を流し込んだ。実験装置の背後からバックライトを照射し、市販のビデオカメラを用いて水槽正面か

ら流れ現象を撮影した。

3. 結果および考察

マグマなどの部分溶融体（結晶とメルトの混合物）では、その発生時には、結晶の間隙にある液体（メルト）の割合が数%～十数%程度であると考えられている。過去の研究の多くは、ガラスビーズを用いた実験を行っているが、ガラスビーズは変形しないため、流れの脈動現象は起こらず、連続的な浸透流になる⁽¹⁾。しかしながら本実験では、変形可能なゲル粒子を用いているため、時間とともに発展する流れの局在化現象や脈動現象が得られた⁽¹⁾。図4にその実験結果の一例を示す。

組成の異なる（密度の大きい）流体層をゲル粒子層の上部に流し込むと、重力不安定が生じ、ブルームが形成される。

図4の上の図は、ある時刻($t=t_1$)におけるスナップショットを示し（マグマとの対応付けで、図の上下を逆さにしてある）、下の3つの縦長の図は、A-A'、B-B'、C-C'断面における時空間画像マップである。図4で見られるように、水平方向に2か所の局在化した流れが形成される（矢印は流れの方向を示す）。こうした流れはガラスビーズを用いた実験では得られない。また、鉛直方向にも流し込んだ流体の局在化が起こる。図4の下の時空間画像から、密度の異なる流体層（図のsourceの部分）の近傍A-A'断面では連続的であった流れが、B-B'では間隙流体（着色の部分）の局在化がおこり、C-C'において流れは間欠的になっていく。

Fig. 4 Spatio-temporal slice of the experimental images on Rayleigh-Taylor instability in a deformable gel beads layer⁽¹⁾.

図5は図4の時空間画像で見られた脈動現象について、FFT解析した結果である。まず、図4下の時空間画像には、2本の脈動現象が可視化されているが、ここでは右側の脈動現象について画像を切り出した（横幅 100pix, 長さ 1024pix）。それを gray scale に変換した後、水平方向に平均化し、1次元の画像（横幅 1pix, 長さ 1024pix）を作成した。その後、白

黒を反転させ、1次元の時系列データを作成した。ここで得られた時系列データ（色の濃さの変化）は、スリットから流し込んだ流体の局在化の程度と間隙流体の割合に依存している。図5aから、給源に近い領域では（A-A'断面）、色の濃さに緩やかな変動がみられる。一方、給源から離れたC-C'断面においては、流れが発展することで流体の局在化が起こり、短周期の脈動が得られていることがわかる。図5bは、図5aのA-A'およびC-C'に関する時系列データをFFT解析した結果である。A-A'においては、長周期の振動とその高調波成分が認められる。一方、流れが発達したC-C'においては、A-A'で見られた低周波成分が弱まり、多数の高周波成分が現れている。現在、何故このような波動成分が現れるのか、その原因は不明であるが、今後バースペクトル解析などをおとして、波の非線形性について詳細に調べていく予定である。

Fig. 5 (a) Time series data of pulsating flows obtained from the images in Fig.4. (b) Power spectrum of pulsating flows in a deformable gel beads layer.

4. まとめ

部分溶融体などの固液混合物質の流れを理解するため、変形可能なゲル粒子を満たした薄型容器の上部から、より密度の大きな粘性流体を流し、その後の流れの時空間発展について調べるための可視化実験を行った。その結果、水平方向に局在化した流れが形成され、また鉛直方向にも流れの脈動現象が得られることが明らかになった。

実験で得られた画像から脈動現象の時空間発展について調べ、また間隙流体の割合に相当する時系列データを用いてFFT解析を行った。給源に近い領域で見られた流れの長周期変動は、給源から離れるにしたがって弱まり、高周波の脈動現象が多数出現することが明らかになった。

引用文献

- (1)熊谷一郎・村井祐一・栗田敬, 変形可能なゲル粒子用いた浸透流実験にみる振動現象, 機論 (B編), 77-784 (2011), 2236-2245.