

粒子-粘性流体複合体の流れで励起される振動現象

東京大学地震研究所 高嶋晋一郎 栗田敬

1 はじめに

火山体の深部では、断層運動で起こる地震に比べて低周波成分の卓越した極めて特異な地震（低周波地震）や微動が発生している。火山の爆発に先行して発生している場合が多く、火山噴火予知の観点からも近年注目されている。この低周波地震や微動は断層運動で記述できないことや、地震発生場では流体相（マグマ）の存在が示唆されることから、その発生には流体が関与していると考えられている。このタイプの地震には単純なスペクトルピークを持ち規則的な振動として見なせるものがあり、これは低周波地震や微動の基本的な性質と考えられて、その発生メカニズムが議論されてきた。これまでに流体の共鳴に基づく振動発生モデルが数多く提案されている。流体を含む領域に圧力の擾乱が加わると、その擾乱の中で共鳴周波数に対応する振動が強められ、低周波地震・微動として観測されるというモデルである（e.g., Chouet, 1996）。共鳴周波数は、基本的には流体を含む入れ物のサイズと流体の音速で決まり、低周波振動は大きなサイズ・低い流体音速のときに実現する。

一方、粉体工学の分野では、粒状体の流れで振動が生じることがこれまでに数多く報告されている。例えば、長いパイプの中に小さな粒子を流し込むと、適当な流量では粒子密度の濃い部分と薄い部分が現れて波として伝わる（e.g., Aider et al., 1997）。このような粒子密度の振動現象は圧力の振動として観測されうるものである。

火山体深部のマグマはメルトと、メルトから析出した結晶や発泡した気泡という力学的性質の大きく異なる物質からなる多相混合流体がその特徴である。したがって、粒状体で見られる振動現象が、低周波地震や微動を発生させるプロセスになっているかもしれない。しかし、これまでに扱われてきた粒状体の流体相はその殆どが空気であり、マグマの系のメルトとは圧縮性、粘性率が大きく異なる。本研究では、マグマ系のアナログ物質として、粘性流体と粒子の複合体を用いた流動実験を行い、特に圧力振動の形成に注目してこの系の特徴を調べた。

2 実験方法

円筒状のパイプ（直径6 cm）にポリスチレン系の粒子（直径約0.5 mm、比重約1.05）とグリセリン水溶液（比重約1.2）を混ぜて入れる（粒子割合約50%）。このパイプの一端をグリセリン水溶液の入ったタンクと接続し、他端には細いチューブ（直径約2.2 mm）を取り付ける。タンクからグリセリン水溶液をパイプ内に流しこみ、細いチューブの脇に設置したビデオカメラで流れの様子を撮影する。パイプには圧力センサーを取り付け、内部での圧力変動を測定する。圧力差はタンク内の液面の位置

を制御して調節する。

3 結果

(1) 流動状態

流動の状態には浸透流と、サスペンション流という2つのモードの存在が観察された。圧力差と流体粘性率を変えて流れの発生条件を調べると、圧力差が小さいときは浸透流が実現し、圧力差を上げていくに従い、浸透流とサスペンション流が交互に現れる状態、さらにサスペンション流の状態に移行した(図1)。サスペンション流になるにはある大きさ以上の圧力差が必要なことから、この挙動は固液複合体の降伏強度的な性質によって支配されていることがわかる。

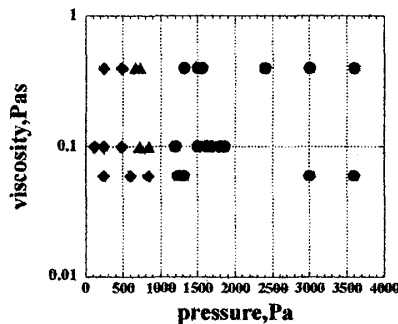


図1：浸透流とサスペンション流の発生条件。丸印、三角印、ダイヤモンド印はそれぞれサスペンション流、サスペンション流と浸透流の混合状態、浸透流に対応する。

(2) 圧力変化

浸透流状態では、液体がチューブから落ちる間隔で圧力が規則的に振動する。サスペンション流状態では、液体が落ちる間隔より長い周期での圧力振動が現れる。サスペンション流では圧力増加に伴い、圧力振動が規則的なものから不規則なものへ移行する(図2)。浸透流とサスペンション流の遷移状態では、両者の特徴が交互に現れた変動を示す。振幅の大きさを比較すると、サスペンション流状態で、浸透流とサスペンション流の境界に近いときに最も大きな振幅を持つ。また、このときの圧力振動は規則的である。

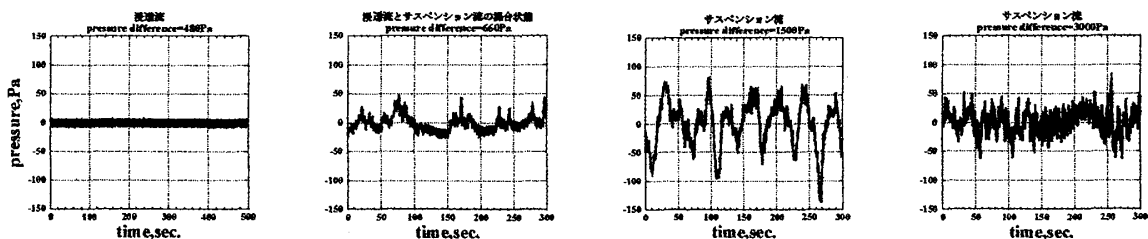


図2：各流動状態における圧力の時間変化。流体粘性率は0.4Pasである。

(3) サスペンション流の液体割合

規則的圧力振動を示すサスペンション流に関して、その液体割合は圧力振動に伴って変化する。液体割合が多い状態のときに、圧力が小さな値になり、圧力変化と液体割合変化の間に強い相関が見られる (図3)。

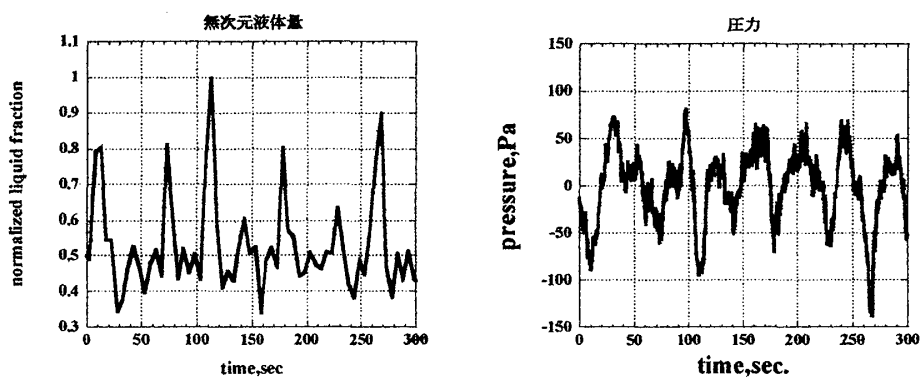


図3：圧力振動に対応する液体割合の時間変化。圧力差は1500Pa、流体粘性率は0.4Pasである。

(4) 振動周波数

サスペンション流で見られる規則的振動の特徴的周波数を、流体の粘性率と圧力差を変えて調べると、粘性率の減少・圧力差の増加とともに周波数が増加する。また、周波数は流量に比例する (図4)。

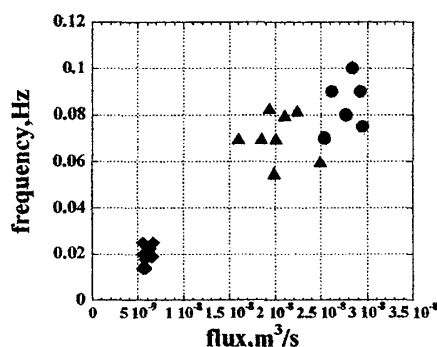


図4：特徴的周波数と流量の関係。丸印、三角印、ダイヤモンド印はそれぞれ流体粘性率が0.06Pas, 0.1Pas, 0.4Pasである。

4 議論

(1) 振動発生メカニズム

サスペンション流での規則的振動の発生メカニズムを液体割合の観点から考える。液体割合の多いサスペンションがチューブの入り口に到達すると、サスペンションの粘性率が低いので、低圧でチューブの中に入って流れることができる。一方、液体割合が少ないサスペンションの場合、粘性率が高

いのでサスペンションをチューブ内に流し込むのに高い圧力が必要となる。液体割合の多い領域と少ない領域が交互に存在するサスペンションがチューブの入り口に到達することで、圧力の規則的な振動が生じたと考えられる。

(2) 液体割合変動形成メカニズム

圧力振動を生む液体割合変動形成メカニズムとして次のようなプロセスが考えられる。流れの途中に通路の狭い領域が存在すると、そこに流れが集中することで非一様な変形場が生じる。そこにサスペンションが遭遇すると、その非一様な変形場により粒子が集まり液体と分離する。集まっていく粒子群はフレームワークを形成し、圧力を支えるようになる。液体はそのフレーム内を浸透流として流れ、下流側に液体割合の多い領域を形成する。またフレームの形成により流れのコンダクタンスが悪くなり、後続流体からの圧力は徐々に増加する。圧力が閾値を超えるとフレームが壊れ、サスペンション流が復活し、圧力が下がる。このプロセスの繰り返りで、液体割合の変動が生じる。このような構造の不均質とレオロジーの相互作用により、自発的に液体割合の変動が形成されることが考えられる。

(3) 実験室から地球への外挿

振動周波数と流量をそれぞれ、粒子拡散時間とポアズイユ流の流量で無次元化すると、狭い領域にデータポイントが集まる(図5)。この結果に地球の条件を当てはめると、低周波地震や微動の特徴的な周波数(0.01~1 Hz)になる。これは、この系で見られた振動現象が火山体深部で起きる低周波地震や微動の発生メカニズムである可能性を示唆する。

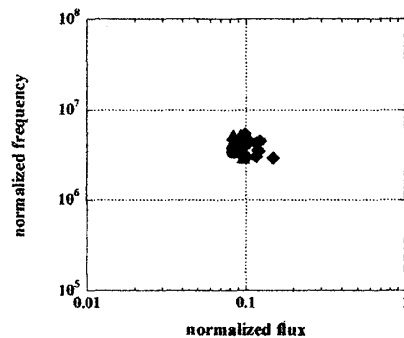


図5：無次元化した特長的周波数と流量の関係。丸印、三角印、ダイヤモンド印はそれぞれ流体粘性率が0.06Pas, 0.1Pas, 0.4Pasである。

参考文献

Aider, J.-L., N. Sommer, T. Raafat, and J.-P. Hulin, *Phys. Rev. E*, **59**, (1999), 778.

Chouet, B. A., *Nature* **380**, (1996), 309.