

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610138

研究課題名(和文)火山性微動の起源：流れ誘起振動の新仮説

研究課題名(英文)Origin of volcanic tremor: A new hypothesis of flow-induced vibration

研究代表者

桜庭 中 (Sakuraba, Ataru)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：50345261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：火山性微動が、地下の流路をマグマが流れるときに発生する「流れ誘起振動」に起因する、という仮説を多角的に検証する試みをおこなった。水槽にゲル媒質を充填し、鉛直方向に板状の流路をつくって粘性流体を流す実験をおこなったが、期待される振動は発生しなかった。断面が楕円形の流路について、流れ誘起振動の線形安定解析をおこなった。その結果、ダイクのような有限幅の板状の流路の場合、板の横幅と同程度の波長のレイリー波がもっとも不安定化することが示唆された。これを実際のマグマの流れにあてはめると、ダイクなどの流路の幅に上限があることと、発生する火山性微動の周期に上限があることが関係している可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：An attempt is made to experimentally and numerically verify a hypothesis that volcanic tremor is originated from flow-induced vibration of an underground magma conduit. A tank filled with a gel medium that includes a vertical plate-like conduit is prepared and a flow of a viscous fluid is maintained through the conduit; but no self-oscillation is observed. Linear stability analysis is made for a flow through a cylindrical conduit with an elliptic cross section. It is shown that a Rayleigh wave of which a wavelength is as long as the major axis of the ellipse can be destabilized at a significantly slow flow speed. This suggests that there might be a relation between the facts that a natural dike has an upper limit in its width and that there is an upper limit in oscillation period of volcanic tremor.

研究分野：地球内部ダイナミクス

キーワード：境界要素法 弾性体力学 流体力学 線形安定解析 火山性微動 流れ誘起振動 マグマ

1. 研究開始当初の背景

火山活動に伴って観測される地震のうち、長時間（数分から数日）にわたって振動が続き、ちょうど地球の自由振動のように周波数スペクトルにいくつかのピークが立ち、かつ基本振動の周期が比較的長い（1秒前後）ものをとくに「火山性微動（トレマー）」と呼ぶ。これは多くの火山で普遍的に観測される現象であり、地下のマグマ（または広く火山流体）のなんらかの動きを反映していると考えられている。火山性微動の起源を知ることは、マグマの挙動や噴火プロセスの理解だけでなく、噴火予測や火山活動の監視に役立つという点においても重要である[1]。

火山性微動の発生メカニズムには未知の点が多い。マグマの物性やその供給系にはかなりのバラエティがある一方、観測される微動には共通点が多いことは、とくに不思議な点のひとつである。火山ごとに（あるいは同じ火山でも時間の経過ごとに）特有の発生メカニズムがあるけれども結果として同じような特徴をもつ地震が観測されるのか、または何か普遍的な発震機構があるのか、火山性微動の起源をつきとめることは、火山物理学上の未解決問題のひとつと言える。

火山性微動の発生機構に関してこれまで提唱されてきたモデルのひとつに、地下の流体の流れが岩盤の「流れ誘起振動」を引き起こすというモデルがある。流れ誘起振動とは、弾性体の固有振動がその周囲の流体の流れによって励起されるもので、一種の自励振動に分類される（たとえば飛行機の翼のフラッター）。定常な流れのもとで無限小振幅の振動が成長する、典型的な不安定（分岐）現象でもある。流れそのものに周期性があるような、単純な共鳴振動ではない。

流れ誘起振動にもとづく過去のモデルにはいくつかの不完全な点があった。たとえば流体と弾性体の運動に関してかなり荒い近似を施していたり、平板状の流路（クラック）の開閉に対応する対称モードのみしか扱っていなかったりなど[2]。そこで代表者は、無限弾性体に埋めこまれた平面ポアズイユ流の線形安定性を基礎方程式に立ち戻って議論し、クラックの屈曲に対応する反対称変形モードがより不安定になりうることを発見した。これが本当だとすれば、自励振動を起こす臨界流速が、これまで考えられていた値よりも著しく小さくなり、流れ誘起振動モデルの重要性、妥当性が増すことになる。

2. 研究の目的

本研究ではひとつの仮説を立て、その妥当性を多角的に検証することを目的とする。その仮説とは、「われわれが観測するところの火山性微動とは、マグマが地下の流路を一定速度で流れるときに発生する流れ誘起振動が地上に染み出したものにほかならない」という

ものである。具体的には、これまで理論的にしか予測されていない、低流速での流れ誘起振動が本当に起こるのかどうかをアナログ実験で実証すること、そして流れや振動の基礎物理法則にできる限り即し、恣意的な仮定（たとえば流路が特殊な形状をしているなど）をおかずに、この自励振動システムの特性を理解することが目標である。

3. 研究の方法

大きく2つの方法をとる。ひとつは室内実験によってこの振動システムをモデル化し、自励振動を実際に観察すること、もうひとつは理論的な理解を深めるための数値計算である。

(1) 数値計算

平面ポアズイユ流モデルをさらに深く研究すること、およびこのモデルでは扱えなかった、流路サイズの有限性の影響をモデルにとり入れること、の2つを主眼とする。とくに後者に関しては、無限に長い流路ではあるが流路の断面が有限である場合、さらに流れ方向にもサイズが有限である場合など、モデルの高度化にはいくつかの段階がある。また線形安定計算のみならず、非線形振動のモデル化も重要である。

(2) 室内実験

弾性体中に流路を作成し、そこに粘性流体を流して、実際に流れ誘起振動が起こるかどうかを検証する。アクリル水槽（水平サイズ 45 cm 四方）にジェランガム溶液を流し込んでゲルの層（高さは 12~20 cm）を作成した。板状の鉛直流路を、ゲルを貫くように成形した（厚さは 0.4~0.5 cm で幅は 5~10 cm）。水槽の底にホースをとりつけ、鉛直上向きにプルラン溶液を流し、成形した流路を通してゲルの上方に自然に溜まるようにした（図 1）。ゲル媒質は横波速度が遅い（1.7~2.2 m/s に調整）ため、流路のサイズを小さくしつつ、かつ臨界流速を抑えることができる。また透明なゲルの光弾性を利用し、水槽の側面をとおして光学的に流路の変形の様子をビデオカメラで撮影し、振動を測定する。流速を制御することで、自励振動が起きる臨界流速を決定する。作業流体としてはプルラン溶液（粘性率 0.25 Pa·s）をもちいた。

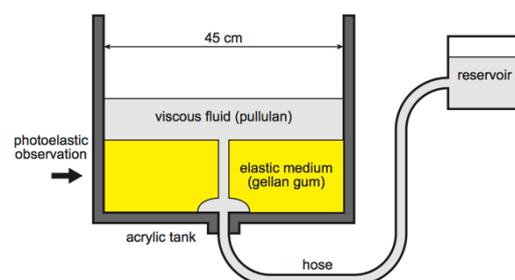


図 1. 実験装置の概略。

4. 研究成果

(1) 数値計算

① 平面ポアズイユ流モデルを再考した。流体を非圧縮と仮定してモデルを単純にすることで、ポアズイユ流の速度分布が放物線型から少しでもずれると反対称モードの臨界流速が急激に下るといふ系の特性を、より明瞭に再現することに成功した(図2a)。ポアズイユ流が壁に及ぼす粘性摩擦が、反対称モードを特徴づけるレイリー波の粒子運動(楕円形を描く)に対して常に正の仕事をするために不安定が起こる、と解釈した。対称モードについては、クラック波が不安定化するものまでこれまで解釈されていた。しかし実際は、不安定が起こる波長領域(図2bの矢印より長波長の領域)では、有限の粘性のため、クラック波は純粋な減衰モードとしてしか存在できないことから、伝搬波としてのクラック波とは無関係であること、そして不安定化する波長に上限があり、ゆえに臨界流速に下限があることが明らかになった。

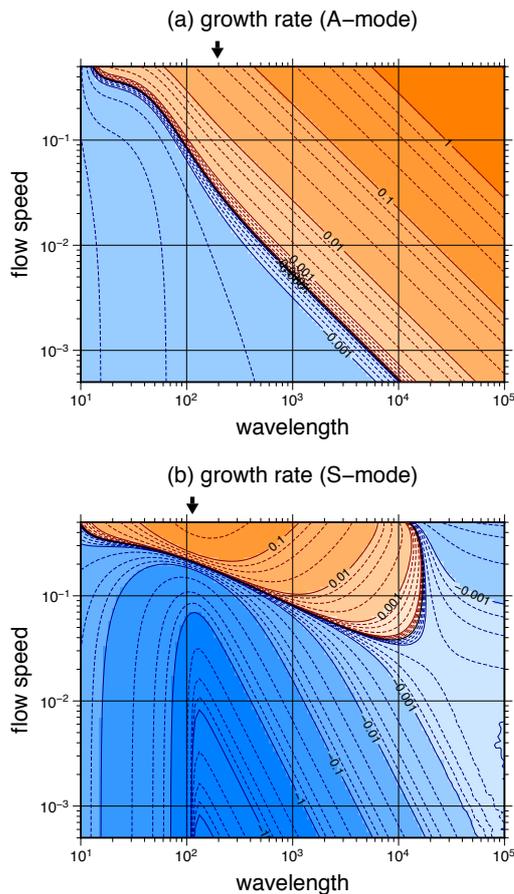


図2. 平面ポアズイユ流モデルの線形成長率を、流体層の半分で規格化した波長を横軸に、弾性体の横波速度で規格化した流速を縦軸にとってコンターで示した。オレンジ色が不安定領域。(a) 反対称モードと(b) 対称モードとを比べると、前者のほうがより不安定である。矢印は理論で予測される安定曲線の屈曲の位置を示す。

② 臨界流速がもっと低下する可能性を探るべく、流体層に沿って弾性波速度の遅い層(低速度層)が接しているモデルを考えた。実際のマグマの流路(ダイクなど)の場合、高温のマグマによって熱せられた周囲の岩盤の地震波速度は低下する傾向にあると考えられるため、このような低速度層モデルを考察することは意義があろう。計算の結果、レイリー波の高次モードが不安定化することがわかった。すなわち低速度層の厚さに対応する共鳴波長で線形成長率が增大する(図3)。ただしこの共鳴ピークにおける成長率の値はほとんどゼロに近く、これが振動の非線形成長に発展するかどうかは、この結果からは言えない。

③ 断面が楕円形の無限長流路の流れ誘起振動モデルを考察した。楕円の長軸と短軸の比を変えることで、円筒流路のハーゲン・ポ

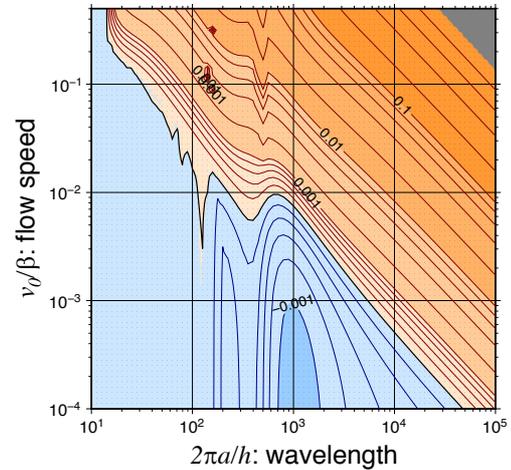


図3. 流体層に接して、流体層の50倍の厚さで横波速度が半分の「低速度層」がある場合の反対称モードの不安定領域図(その他のパラメータは図2と同じ)。低速度層の厚さで決まる共鳴波長のところで成長率が大きくなる。

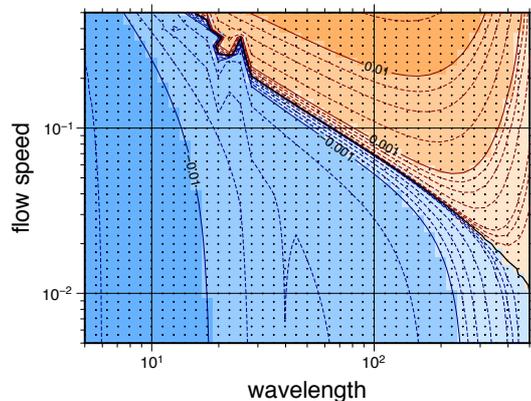


図4. 長軸/短軸比が64の楕円断面をもつ流路に対する線形安定解析の結果。波長は短軸の半分で規格化している。

アズイユ流から、平面ポアズイユ流まで、統一的に記述することができる。境界要素法に基づく定式化をおこない、流体運動にストークス近似をもちいた場合について、流れ誘起振動の線形解析をおこなうことに成功した。この近似がよく成り立つのは、流路幅がほとんど不変に保たれる、屈曲変形モードの場合のみであり、クラックの開閉を伴うようなモード(たとえば図 2b に対応するようなモード)は解析できなかった。計算の結果、レイリー波の波長が長軸と同程度になると、もはや固有モードが表面波としての性質を失い、線形成長率が限りなくゼロに近づくことがわかった。図 4 は長軸が 128 の場合の計算例であるが、波長が長軸の 4 倍程度になると、急激に線形成長率が小さくなる。したがって実際のダイクのようなマグマ流路の流れ誘起振動を考えると、反対称モードといえども臨界流速には下限があり、それはダイクの幅で決まることが示唆された。また板のねじれを伴うような対称性をもつ固有モードも存在するが、その成長率は図 4 に示される値よりも小さいことがわかった。

④ さらに高度なモデル(非線形振動のシミュレーションなど)は扱うことができなかった。

(2) 室内実験

流路サイズやゲル媒質の物性等を変えて実験をおこなったが(図 5 参照)、理論計算から期待されるような自励振動現象は見出されなかった。

実験計画を立てるにあたり、平面ポアズイユ

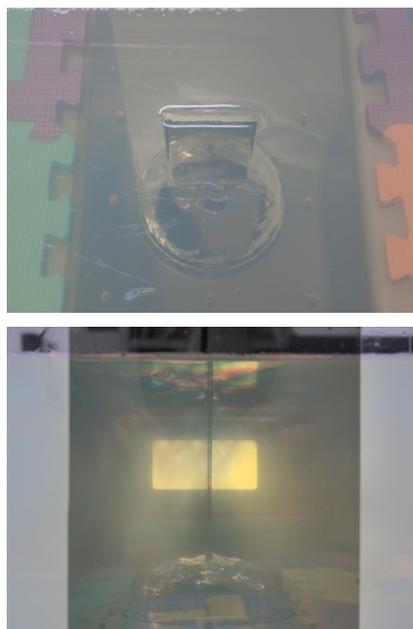


図 5. (上) 板状の鉛直流路を斜め上から見る。(下) 流路を真横から見る。ゲルの光弾性を利用して、流路の変形のみならず、周囲のゲルの応力場を観察できると考えられる。

ユ流の線形安定解析結果をもとに、必要な流速を見積もった。しかしすでに述べたとおり、不安定化するレイリー波の波長には上限があり、それは板状の流路の場合、板の横幅で決まる。当初、そのことに理解が及んでいなかったため、臨界流速を遅く見積もってしまった。したがって実験における流速が臨界値に達していなかったことが考えられる。

また大きな流速(流量)を維持するためにポンプを導入したが、高い圧力差をゲルに与えると、ゲルの強度を超えて破壊してしまう事例を経験した。今回もちいたジェランガムが本当に適切であったかどうか、反省が必要である。研究期間終了後も実験を継続するにあたって、もっと適切な媒質を探索する必要がある。

また理論計算によると、ポアズイユ流の速度分布が完全に 2 次関数的であるときには、反対称モードの不安定解が特異になって、臨界流速が対称モード並みに大きくなってしまっていることがわかっている。流れ分布を 2 次関数からずらすためには、粘性率の温度依存性、流体の非ニュートン性、流路断面の非一様性などが必要であろうと考えているが、このことと今回の実験で振動が再現されなかったこととの関係は不明である。

(3) 仮説の妥当性について

室内実験で振動を再現することができなかったため、理論的に予想されるレイリー波の不安定化メカニズムが本当に起こるかどうかを明言することはできない。仮に起こったとすると、不安定化するレイリー波の波長は流路の幅で決定されることが本研究でわかった。一般にマグマ流路としてのダイク(またはシル)の厚さは 1 m のオーダーで、幅は数 100 m のオーダーである。ダイク幅の 3~4 倍がレイリー波の波長の上限であるから、それはせいぜい 2~3 km を超えることはないだろう。このことは、もしレイリー波速度が 3 km/s であれば、火山性微動の周期の上限が 1 秒程度になることを意味する。これは観測事実と整合的である。つぎに不安定を起こすのに必要なマグマ流速をなるべく低く抑えるためには、ダイクの厚さに比べてなるべく波長を長くとることが必要である。マグマ流速が数 m/s を超えないと考えると、ダイクの幅は 1 m 以下であることが望ましいことになる。

<引用文献>

- [1] Konstantinou, K. I. and V. Schlindwein, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 119, 161-187, 2002.
- [2] Balmforth, N. J., R. V. Craster and A. C. Rust, *J. Fluid. Mech.* 527, 353-377, 2005.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Ataru Sakuraba and Hatsuki Yamauchi, Linear stability of plane Poiseuille flow in an infinite elastic medium and volcanic tremors, Earth, Planets and Space, vol. 66, Issue 1, Article 19, 2014, doi: 10.1186/1880-5981-66-19 (査読有り)

[学会発表] (計 5 件)

- ① Ataru Sakuraba, Free oscillations of a fluid-filled cavity in an infinite elastic medium, American Geophysical Union Fall Meeting, 2016年12月16日, サンフランシスコ (米国)
- ② Ataru Sakuraba, Surface waves and flow-induced oscillations along an underground elliptic cylinder filled with a viscous fluid, American Geophysical Union Fall Meeting, 2015年12月18日, サンフランシスコ (米国)
- ③ 桜庭 中, 流体の流れによる低周波微動の発生, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015年5月25日, 幕張メッセ (千葉県・千葉市)
- ④ Ataru Sakuraba, A possible origin of volcanic tremor, American Geophysical Union Fall Meeting, 2014年12月15日, サンフランシスコ (米国)
- ⑤ Ataru Sakuraba, A flow-induced volcanic tremor, Asia Oceania Geosciences Society 2014, 2014年7月31日, ロイトン札幌ホテル (北海道・札幌市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桜庭 中 (SAKURABA, Ataru)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号: 50345261

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし