

幅広いプラントル数における対流と固体地球惑星科学への応用

課題責任者

宮腰 剛広

海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 数理科学・先端技術研究開発センター

著者

柳澤 孝寿*1, 宮腰 剛広*2

*1海洋研究開発機構 海域地震火山部門 火山・地球内部研究センター, *2海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 数理科学・先端技術研究開発センター

キーワード：狭い空間での対流, 高粘性流体, パターン遷移, 振動対流, 熱輸送

1. イントロダクション

地球型岩石惑星の内部は、大きく分けて地殻（低密度の岩石）、マントル（高密度の岩石）、そして核（液体・固体の金属）という構造から成る。各々が持つ物性には様々な違いがあるが、特に顕著なのが流動特性を支配するPrandtl数（ $Pr = \text{動粘性係数}/\text{熱拡散係数}$ ）である。マントルを構成する岩石は長い時間スケールでは流動しており、その Pr は1よりはるかに大きい。核においては熔融状態にある鉄合金が対流して地磁気を作り出しているが、その Pr は1よりも小さい。地殻中では岩石に多数存在する割れ目や亀裂中での水やマグマの移動が熱輸送や物質分化を促進しているが、これらの流体の Pr は中間的な値をもつ。このように内部ダイナミクスを考える上では、幅広い Pr での流動現象の理解が不可欠である。

本課題では、このような幅広い Pr による流体现象を調べることで、地殻・マントル・核それぞれにおける地球惑星科学的な問題に挑戦すると共に、そのデータ提供を通じて海洋研究開発機構付加価値情報創生部門の中期計画の一つ「四次元仮想地球」への貢献を目的としている。これらは流体の幅広い特徴をカバーするものであり、固体地球惑星科学の分野を越えてより一般的な流体现象の基礎データとしても活用されることを念頭に置いている。また数値シミュレーションデータと共に室内実験データを提供することで、より利用者にとって有用なデータセットとなることを目指している。今年度の進展から2つを以下に紹介する。

2. 狭い空間での熱対流

固体壁で囲まれた空間での熱浮力による対流、すなわち「狭い空間での熱対流」は、岩石中のクラックと熱水循環、岩脈の形成や割れ目噴火でのマグマの挙動など、地殻中での数多くの現象に共通して重要となる概念である。物理モデルを構築するための単純化した設定として、上下端では温度がそれぞれ一定、側壁では断熱という条件で、3次元矩形形状の壁は全て固着条件の熱対流を考える。奥行き方向が極端に狭い場合はHele-Shaw cellと呼ばれる。一方でそこまで狭くない場合の対流は2次元性と3次元性が絡み合った複雑なパターンとなるため理論では扱いにくく、その挙動の理解は十分ではない。我々は中途半端に狭い空間での

対流の挙動を数値シミュレーションと室内実験により調査した[1]。数値シミュレーションには高 Pr の極限であるマントル対流を解くために開発したコード[2]を用いた。実験では水に増粘剤を添加して $Pr \sim 150$ の高粘性流体とし、トレーサー粒子のParticle Image Velocimetry (PIV)により面的な速度場を求めた。

流体層の高さ L_z を1とし、水平 x の方向には十分な長さ $L_x=4$ をとり、狭い水平 y の方向の長さ L_y を0.12とする。対流を駆動する浮力の大きさの指標となるRayleigh数(Ra)を上げていくと、実現するパターンは「構造の次元性」と「時間変動の有無」に着目することで以下の5つのレジームに分類できる。それらは、(i)定常で準2次元的な流れ、(ii) x 方向両端の壁近傍に振動するコーナーロールを伴う準2次元的な流れ、(iii)同じく振動するコーナーロールを伴うが3次元性の発現、(iv)定常だが3次元性のある流れ、そして(v)間欠的なブルーム運動となる3次元流れ、である。図1に実験（上）とシミュレーション（下）の結果を比較して示す。狭い y 方向中央での鉛直断面における流速場を矢印と渦度（青-赤）で示している。パターンのみならず流速レベルについてもよい一致が見られる。他のレジームでも我々のシミュレーションは実験と整合的であることが確かめられた。以下、シミュレーション結果に基づいて議論を進める。

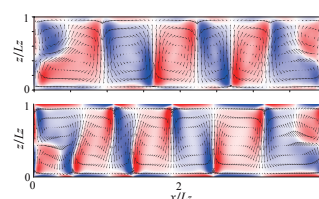


図1 振動するコーナーロールを伴う準2次元的な流れ ($Ra \sim 1 \times 10^6$)。上：実験、下：シミュレーション。

構造が準2次元的还是3次元性をもつかということを見るため、図2では3次元的に2枚の等温面を表示する。青-赤の色は温度である。左が(ii)の振動するコーナーロールを伴う準2次元的な流れであり、等温面は y 方向にはフラットである。ここでは表示していないが、 y -断面で流速を見ると y 方向成分を持たないPoiseuille流的な分布をしている。右は(iv)の定常だが3次元性のあ

る流れであり、こちらの等温面はy方向にも構造をもち、yz断面での流速を見るとy方向成分もあり Poiseuille流からの顕著なずれがある。

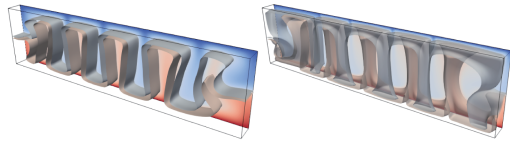


図2 対流パターンの立体的な構造を等温面で表示。
左: $Ra = 6 \times 10^5$, 右: $Ra = 1 \times 10^7$ 。

Ra の上昇とともに定常から振動という(i)-(ii)の遷移は理解しやすい一方で、再び定常流が現れる(iv)-(v)の遷移は過去に[3]で報告されてはいたもののそのメカニズムは不明で不思議な現象と考えられていた。我々はこの研究で、空間は狭いながらも高い Ra で発現する3次元性により、壁近傍での上昇流と下降流が奥行き方向に行き違う(図2右)ために定常流が実現される、ということを明らかにした。

次に系の熱輸送量および流速の Ra への依存性について紹介する。熱輸送量は熱伝導のみの場合との比であるNusselt数で、流速は閉じられた空間全体でのroot mean square流速で示す。rms流速はxyzの各方向成分とトータルの流速について計算した。

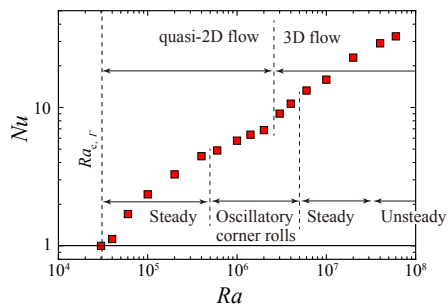


図3 Nu の Ra への依存性、および対流のレジーム。

図3は Ra と Nu の関係である。奥行き方向に狭く壁の拘束が強く効くため、対流が発生する臨界の Ra は水平方向に無限に広い場合の理論値(~ 1700)から大幅に上昇していて、 $Ra \sim 3 \times 10^4$ で対流が起こる。 Ra とともに Nu は増加するが、グラフから明らかなようにそれは1つの関係式では表現されず、途中の遷移を反映して複雑である。グラフの上側には「構造の次元性」による分類を、下側には「時間変動の有無」による分類を記入している。 Nu が増加する傾きは、準2次元から3次元へと遷移する Ra で大きくなる。図4では Ra とrms流速の関係を示す。トータルの流速 U_{rms} と比較してy方向の流速 v_{rms} は、特に $Ra < 3 \times 10^6$ では極端に小さいことが見てとれる。この Ra の領域は準2次元でPoiseuille流的なレジームと対応している。より高 Ra 側では3次元性が顕著になっていく。

ここでは高 Pr での対流について紹介した。中程度から低 Pr の流体についての調査も、コードの拡張および新たな実験手法の開発により数値シミュレーションと室内実験の両面から進めている。次年度には Pr の範囲全体を通した理解が完成する見込みである。

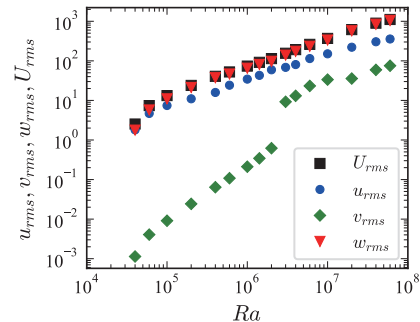


図4 xyz各方向のrms流速と全rms流速。

3. 応力履歴依存粘性を用いた球殻マントル対流

地球のプレートでは同じ強さの応力が掛かっている、割れている所とそうでない所が存在している。一旦割れたプレートはかなり応力が低下しないと再固着しない。すなわちプレート運動の再現には、その瞬間に掛かっている応力だけでなく、過去にどのような応力を受けてきたかという履歴を考慮する必要がある。

我々の研究グループではこのような応力履歴依存粘性を導入したマントル対流モデルの計算で世界をリードしており、今年度はその球殻モデルの計算に重点的に取り組んだ。本モデルでも今年度は大きな進展があり、プレート境界の自発的形成とそれに伴うプレートの剛体的運動の再現に成功し、さらに箱型モデル[4]と同程度の安定的なプレート運動の時間積分(12億年程度)を達成した。メッシュ数だけでも箱型モデルの6倍であり、収束時間そのものも基本的に長く掛かっているが、今年度ほぼ予定通り計算を進めることが出来た。最初の報告論文を次年度に出版予定である。

文献

- [1] T. Yanagisawa, S. Takano, D. Noto, M. Kameyama, & Y. Tasaka, “Quasi-steady transitions in confined convection”, J. Fluid Mech., 1000, A44, 2024.
- [2] M. Kameyama, A. Kageyama, & T. Sato, “Multigrid iterative algorithm using pseudo-compressibility for three-dimensional mantle convection with strongly variable viscosity”, J. Comput. Phys., 206(1), pp.162-181, 2005.
- [3] J. N. Koster, P. Ehrhard, & U. Müller, “Nonsteady end effects in Hele-Shaw cells”, Phys. Rev. Lett., 56(17), pp.1802-1804, 1986.
- [4] T. Miyagoshi, M. Kameyama, & M. Ogawa, “Tectonic plates in 3D mantle convection model with stress-history-dependent rheology”, Earth, Planets and Space, 72, 70, 2020.