

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

宮腰 剛広*¹, 柳澤 孝寿*²

*¹ 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, *² 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

キーワード: 応力履歴依存粘性, マントル対流, 3次元球殻, プレート運動, プラントル数依存性, 乱流

1. イントロダクション

地球型岩石惑星の内部は、大きく分けてマントル（岩石）と核（液体・固体金属）という構造から成っている。これら各々が持つ特徴には様々な違いがあるが、特に顕著なものの一つが、プラントル数 Pr （動粘性係数の熱拡散係数に対する比）である。マントルの Pr の典型的な値は $0(10^{24})$ 程度であり、1 よりもはるかに大きい。一方、核においてはそれは1 よりも小さな値を取る。また、マントル内部を移動する水やマグマなどは、これら両者の中間的な値を取る。このように、地球惑星内部のダイナミクスを考える上では、幅広い範囲の Pr を取る流体が現れる。

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、マントルや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、固体地球惑星科学分野のみならずより一般の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。また室内実験が可能な系については数値シミュレーションデータと共に室内実験データも提供する事で、より利用者にとって有用なデータとなる事を想定している。

本年度は主に、プレート運動を伴うマントル対流モデル（高 Pr ）、及び低から中 Pr での乱流的な対流での大規模構造、に注力して計算を行ってきた。また高 Pr の問題として、本プロジェクトメンバー（宮腰）は現在発見が著しい系外惑星スーパー・アース（地球よりも大きな岩石惑星）のマントル対流のモデルに、地球シミュレータ（ES）を用いて長年取り組んできたが[1-4]、本年度それらの成果をさらに発展させる成果が本プロジェクトメンバー（亀山）より発表された[5]。これは[1-4]では2次元箱型の取り扱いであったモデルを、2次元円柱型モデルに拡張したものである。その結果、特に深部対流の様相が、箱型モデルとは異なり、深部対流が活発化し易くなる事を示した。

次節より、本年度の成果の主なものを書す。

2. 応力履歴依存粘性を導入したマントル対流の3次元球殻モデル

地球型岩石惑星の表面から深部にかけて、マントルという構造がある。主な成分は岩石であり、地球の場合全体的積の8割を占め、地球内部活動の主体となっている。マン

トルは高プラントル数の流体であり、対流運動をしているが、それはプレート運動を駆動し、（例えば水や炭素の循環を通じて）地球の表層環境にも大きな影響を与えている。

このようなわけで、マントル対流の特徴と進化の理解は、地球においてはその熱史と地球環境の変遷を理解する上で必要不可欠なピースの一つであり、太陽系外も含む他の惑星においては、その惑星のハビタビリティを考える上で同様に必要不可欠な要素の一つである。また上記のように、それらを調べるに当たっては、マントル対流に伴うプレート運動を精確に解く事が必要であり、本プロジェクトでは、プレート運動を精確に取り扱えるマントル対流モデルの構築を目標としている

ところで地球上では、ほぼ同じ応力が掛かっているにもかかわらず、プレートが割れている所とそうでない所が存在している。強い応力が掛かって割れたプレートは、応力が下がっても直ちに固着して元の状態に戻るわけではない。すなわち、プレートの状態は、その瞬間の応力の強さだけで決まるわけではなく、過去に破壊を受けたかどうかという応力履歴に依存している。

このようなプレート運動を扱う上で、これまでよく使われてきたのはシンプルな降伏応力モデルであるが、それには大きな弱点があった。降伏応力モデルでは破壊強度という、ある一つの値をある瞬間に超えているかどうかで、プレートが割れたかどうかを判断する。しかしながらプレート下のマントル対流は動的に変化しているため掛かる応力は常に変動しており、破壊強度の周辺ではプレート境界が生じたり閉じたりといった不安定な解になりやすい。またプレートが沈み込んでいる途中で応力が下がれば、その瞬間の値でのみ破壊が生じているかそうでないかを判定するので、沈み込む途中で海溝が閉じてしまうといった事も起こりうる。これらの特徴は、地球上で見られる、数億年以上に亘って非常に安定したプレート運動とは異なっている。

より精確にプレート運動を扱うために、応力履歴依存粘性を導入したモデルが提案されている[6]。これは、過去に破壊を受けていないプレートはある破壊強度で割れるが、その強度以下に応力が低下してもプレートは直ちには固着せず、それよりもずっと低いプレートカップリング強度まで下がった時に初めて固着する、というモデルである。我々は本モデルを用いて、世界で初となる応力

履歴依存粘性を導入した3次元マントル対流モデルを開発してESで計算を行い、2020年に論文を出版した[7]。プレート境界のみに集中するプレート変形や長期間安定な剛体運動など、地球上のプレート運動の特徴を良く捉えた結果を得ることができ、またその帰結としてプレート運動に関連する未解決問題の一つ（海嶺からの距離に応じた地熱流量分布。ある距離から地熱流量がほぼ一定になる。熱伝導による冷却のみでプレートが厚くなっていくとするとこうはならない）に対しても説明の一つを与えることが出来た（安定な運動によるプレート直下の二次対流により熱流量が下がらない）。

上記は箱型モデルの結果であった。箱型モデルでは、プレートが端から端まで沈み込む数億年～十億年程度の振る舞いを見るには良いと思われる。しかしながら海溝の位置がほぼ計算境界で決まってしまう為、地球史（40億年～）に亘るプレート運動の変遷や沈み込みによる内部構造の変化を見るには不適切である。また対流に影響を与える表層と核-マントル境界の面積差も考慮されていない。種々の観測結果などと詳細な比較を行うには、球殻モデルでの結果が必要不可欠である。

本年度は、応力履歴依存粘性モデルの3次元球殻版モジュールの開発と実装、及びそれを用いての計算を行った。鍵となるパラメータは、粘性の温度依存性の強さ（ある大きさ以上ないと固いプレートが発達しない）及び応力破壊により無傷の部分に比べてどれだけ粘性率が下がるかの量（プレート運動のレジームに入るには、この低下量がプレート直下のアセノスフェアと同等程度になる必要がある）である。どちらも大きくなるほど、計算が困難になる。

図1及び2に、計算結果の一例を示す。このケースでは内部熱源による加熱で対流が発生している。図1では、低温物質の沈み込みと核-マントル境界への滞留が生じており、対流が十分に発達している事が分かる。この結果では、表面とその直下のアセノスフェアの温度の違いによる粘性率比は $0(10^4)$ 程度であり、実際の地球にほぼ近いパラメータが実現出来ている。

図2は、応力によって表層物質が変形を受けている部分である。ちょうど地球のプレートのように、変形を受けている部分が細い筋となり、変形境界によって（実際のプレートのように）表面がいくつかの領域に区分されている事が分かる。しかしながら、本計算では応力破壊による粘性低下が無傷の部分と比較して1/20であり、まだ剛体的なプレート運動は再現できていない。そのレジームに入るにはさらに小さくする必要がある。現在の所はweak plate regimeと呼ばれるレジームであるが、箱型モデルでもこのレジームを経由して剛体的なプレート運動レジームが実現された。その意味では本年度は、箱型モデルでの計算の中途までは達成出来たとと言える。

球殻モデルでは、箱型モデルと比較して解の収束に大きく時間がかかるようになる。通常のマントル対流モデルではその一番の要因は粘性の温度依存の強さであるが、本モデルでは応力履歴依存粘性により追加で非常に大き

な計算負荷がかかる。そのため本計算も（[7]と同じく）世界で他に類の無い計算であり、ESの充分な活用により可能なテーマである。研究の進展によりプレート運動に対する理解が著しく進むと期待される。

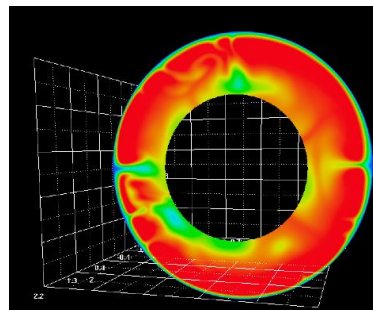


図1. マントルの温度分布。赤は高温領域、緑—青は低温領域を表す。

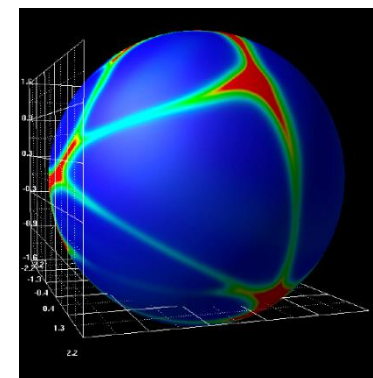


図2. 地球表面において、応力により破壊を受けた部分の図示。青に比べて、緑—赤はより破壊を受けている部分を表す。

3. 対流に見られる大規模構造のPrによる差異

我々は低プラントル流体でのレイリー・ベナール対流で実現するパターンの理解を目的として、室内実験と数値シミュレーションを組み合わせて、中程度のアスペクト比（水平スケール/層厚）をもつ容器内での熱対流の研究を進めてきた。実験では、室温で液体であるガリウム合金($Pr = 0.03$)を用いて、超音波による複数の計測線を設定することにより、容器内で実現している対流パターンを描き出すことに成功した。そしてESでの高解像度の3次元数値シミュレーションにより、実験の結果を再現することに成功するとともに、更にパターンの特徴を詳細に調べた。それによると、各位置での時間変動から乱流状態にあると言える高いレイリー数(Ra)の状態でも、セル状の形態を示す大規模な構造が存在する。そしてこの大規模構造は準周期的な振動を繰り返しており、そのダイナミックな構造を明らかにした[8]。

振動する乱流構造というのは、空気や水($Pr = 0.7-7$)の対流ではアスペクト比が1程度と小さい円筒容器などについて知られているが、より大きな容器については知られていなかった。振動する構造の発見という我々の結果に基づき、乱流的な対流のPr依存性を調べる一環とし

て本年度は、アスペクト比5の形状についてどのPrまで振動する大規模構造が存在するのかを調べた。実験では実現できるPrが限られるため、数値シミュレーションを中心に幅広くPrへの依存性を調べた。

現象のPr依存性を調べるにあたり、対流の様相はPrとRaの双方に依存するので、Raが一定のままでは比較するのは適切ではない。振動する大規模セル構造が見られたPr = 0.03かつRa = 1.2×10^5 での対流を基準として、実現された流れ場全体での平均流速と層厚そして動粘性率から見積るレイノルズ数(Re)が 1×10^8 程度の状態同士を比較する。これはほぼ $Ra \propto Pr^{1.5}$ という関係で、高いPrほど高いRaを設定することになる。図3ではガリウム合金に対応するPr = 0.03について、ある瞬間における渦構造をQ3Dの等値面で左に、やや高めの等温面を右に示す。多数の細かい渦に埋め尽くされた乱流状態にあるが、その一方で温度では大規模セル構造が見られ準周期的な振動をする。この例では中心付近と四隅が大規模流の上昇域、各辺の中央付近がその下降域である。

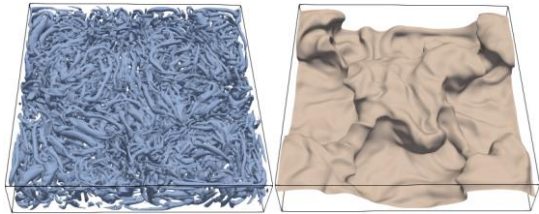


図3 Pr = 0.03でのQ3Dの等値面(左)と等温面(右)

続いてPrおよびRaを段階的に上げていき、このような振動する大規模セル構造がどのPrまで存在するかを調べたところ、Pr = 0.25までは同様な構造が見られた。空気に対応するPr = 0.7について、ある瞬間の渦構造と温度場を同様に図4に示す。これは $Ra = 1.6 \times 10^7$ という条件であり、やはり多数の渦に埋め尽くされた乱流状態にあるが、温度で見ると大規模構造は図3とは異なりセル的ではなく、いびつなロール的である。そして準周期的な振動は見られず、大規模構造は周期性の不明瞭なゆっくりとした変化を続ける。つまりPr = 0.7では既に、大規模構造はPr = 0.03とは大きく異なる特徴を示す。さらにPrを大きくした7(水に対応)では、温度で見ると多数のキノコ状のブルームが顕著であり、大規模構造はそれらの集団運動として認識されるロール的なものであったが、ここでも準周期的な振動は見られなかった。

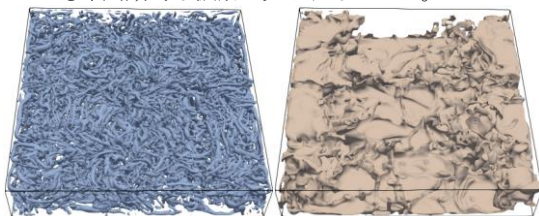


図4 Pr = 0.7でのQ3Dの等値面(左)と等温面(右)

大規模構造のPrによるこうした振る舞いの差異は、速度および温度の境界層厚さの関係から議論できる。速度の境界層と温度の境界層との厚さの比はだまかには $Pr^{1/2}$

で表され、 $Pr < 1$ では温度境界層の方が厚いものに対して $Pr > 1$ ではその逆の関係になる。そして今の場合、 $Pr < 0.25$ という領域までPrが小さくなると、その特徴が大規模構造の振動として反映されるようになると考えられる。つまり低Prの熱対流ではその大きな熱拡散性のため、高Raにおいても温度境界層はある程度の厚みをもっている。それに対応して対流構造が自然に示す水平スケールも大きくなり、アスペクト比が中程度での系では依然として系全体の水平スケールを感じている。これが低Prにおいて全体が同期した変動、つまり準周期的な振動をする理由であろう。ここで解明した大規模流が示す準周期性は低Prに特有の興味深い挙動であり、地球の外核でのメカニズムにも重要な示唆を与えるものと考えている。

文献

- [1] T. Miyagoshi, C. Tachinami, M. Kameyama, & M. Ogawa, "On the vigor of mantle convection in super-Earths", *Astrophysical Journal Letters*, 780, L8 (2014)
- [2] T. Miyagoshi, M. Kameyama, & M. Ogawa, "Thermal convection and the convective regime diagram in super-Earths", *Journal of Geophysical Research - Planets*, 120, 1267-1278 (2015)
- [3] T. Miyagoshi, M. Kameyama, & M. Ogawa, "Extremely long transition phase of thermal convection in the mantle of massive super-Earths", *Earth, Planets and Space*, 69, 46 (2017)
- [4] T. Miyagoshi, M. Kameyama, & M. Ogawa, "Effects of adiabatic compression on thermal convection in super-Earths of various sizes", *Earth, Planets and Space*, 70, 200 (2018)
- [5] M. Kameyama, "Numerical experiments on thermal convection of highly compressible fluids with variable viscosity and thermal conductivity in two-dimensional cylindrical geometry: Implications for mantle convection of super-Earths", *Geophysical Journal International*, 231, 1457-1469 (2022)
- [6] M. Ogawa, "Plate-like regime of a numerically modeled thermal convection in a fluid with temperature-, pressure-, and stress-history-dependent viscosity", *Journal of Geophysical Research*, 108(B2):2067 (2003)
- [7] 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)
- [8] M. Akashi, T. Yanagisawa, A. Sakuraba, F. Schindler, S. Horn, T. Vogt, and S. Eckert, "Jump rope vortex flow in liquid metal Rayleigh-Bénard convection in a cuboid container of aspect ratio $\Gamma = 5$," *Journal of Fluid Mechanics*, 932, A27 (2022)