

課題：先端的固体地球シミュレーションコードの開発

課題責任者：古市 幹人（海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野）

課題目的：

本課題では線形・非線形ソルバ、格子・離散化手法等の先端的な数値シミュレーション技術を駆使した、マントル・マグマ・コア等のダイナミクスのシミュレーションコードを開発することで、地球内部進化の未解決問題に取り組む。具体的には地球内部の不均質性の成因や、マグマだまりの流動・分化プロセス、地球磁場形成と表層環境の相関などのテーマがターゲットとなる。これまで

に独自の手法として球面格子「インヤン格子」、マントル対流の新解法「ACuTE法」、さらに、局所的粘性差にロバストなストークス流の解法「SSDDソルバー」といった手法を開発した。本年度も引き続き新しい手法開発を行い、かつ個々の課題においての地球内部ダイナミクスの解明に取り組む。

今年度得られた成果：

①コア形成を伴う初期惑星の熱進化を紐解く上で、自由境界表面を伴うストークス流れの熱対流は重要なカギとなる現象である。しかしながら、従来の時間一次精度の陽解法では時間幅の制約が厳しく、そのような現象を数値的に再現できていなかった。そこで、Newton Krylov 型の非線形ソルバを用いた移流陰解法を開発し、時間幅に対する数値振動に由来する制限を緩和する事を行った。また、時間積分を高次化するために 2 ステップ積分である TRBDF2 法というを導入した。このことにより陽解法に比べて大きな時間幅で時間 2 次精度の計算を可能にした。またマントル対流などで多用される Marker in cell (MIC) の手法に本フレームワークを適応するための工夫として、非線形ソルバ内の移流項の評価に部分的にオイラー法を用いる Semi-Implicit 法を考案した。新しく考案した手法は従来の MIC の陰解法と比較して計算コストを 20% 程度に圧縮する事が可能な事が分かった。

M. Furuichi and D. A. May, Implicit solution of the material transport in Stokes flow simulation: toward thermal convection simulation surrounded by free surface, *Comput. Phys. Comm.* (2015) doi:10.1016/j.cpc.2015.02.011

②マグマダイナミクスを解明するには、結晶粒子と高粘性な流体で構成されるマッシュ状の混相物質をシミュレーションすることが有効である。しかしながら、既存の数値解法では数値振動の問題があり、そのような計算は不可能であった。そこで、粒子運動の一部を流体に陰的にカップリングさせて数値的安定性を改善した混相シミュレーション手法を開発した。またその検証テストとして熱をカップリングさせた計算を行い、下部から温められたマグマだまりの天井が、結晶含有率によっていかに崩落するのかをモデル上で検証する事に成功した。(Fig. 1)

M. Furuichi and D. Nishiura, Robust coupled fluid-particle simulation scheme in Stokes-flow regime: toward the geodynamic simulation including granular media, *Geochem. Geophys. Geosyst.* (2014) DOI: 10.1002/2014GC005281

③スーパーアースのマントル対流シミュレーションにおいては、(i) その強い圧縮性のため対流の熱輸送効率がかかなり小さくなる事、(ii) 惑星表面にプレート (stagnant lid) が形成されるのに必要な粘性の温度依存性の強さが、地球の場合と異なりレイリー数が上がるにつれて上昇する事、(iii) スーパーアースに対応しいレイリー数領域では、地球の場合よりも大きい

依存性を仮定しないと stagnant lid が形成されない事、(iv) stagnant lid が形成された場合、地球の場合のプレートの厚さ (マントル厚さの数 %) よりもずっと厚いプレート (同 20% 程度) が形成される事、等が分かった。これらはこれまで全く知られていなかった成果である。(Fig. 2)

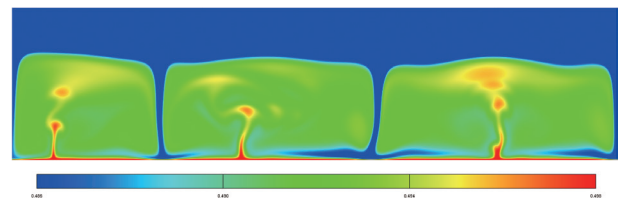


Fig.2 スーパーアースのマントル対流シミュレーションの一例。レイリー数 $1E9$ 、温度依存による粘性率コントラスト $1E6$ の場合の計算結果。色はポテンシャル温度を表し、青が小さく、赤が高い事を示す。惑星表面に、地球の場合よりもかなり厚いリソスフェアが形成されている事が分かる。またコールドブルームに比べ、ホットブルームの活動がかかなり弱い事も分かる。

Takehiro Miyagoshi, Masanori Kameyama, and Masaki Ogawa, Thermal convection and the convective regime diagram in super-Earths, *Journal of Geophysical research - Planets*, under review

④インヤン格子を用いたダイナモシミュレーションについては、以前より大きな解像度である $1200*1000*3000*2$ という解像度でテスト計算を行ったが、目標とするパラメータ (エクマン数 $\approx 2E-8$ 程度) の計算にはこれでは解像度が不足する事が分かった。今後はこの解像度以上の計算を検討する必要がある。

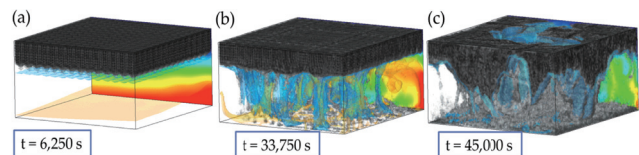


Fig.1 高密度粒子とメルトの混合層 (体積分率 41%程度) の熱対流中の崩落 (マグマだまり上部の崩落)。最初は境界付近の粒子群が熱対流に巻き込まれながらまばら沈降し一定時間後に大崩落する。

Furuichi and Nishiura, *G-cubed* (2014).