

平成 26 年度 地球シミュレータ利用報告 研究成果概要

1. 課題名

先端的固体地球シミュレーションコードの開発

Development of Advanced Simulation Tools for Solid Earth Sciences

2. 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)

Mikito Furuichi

3. 課題の目的

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。

4. 今年度当初の研究計画

数値惑星に向けた数値手法開発としては、まず①熱進化を伴うコア形成計算の実現にむけて、非線形ソルバを実装した移流陰解法の 3 次元での実装とその性能評価を計画した。これにより、熱対流による表層形状の変化と静水圧のバランスに起因する激しい数値振動を抑える事が可能になると期待される。また②マグマだまりの結晶沈降の再現に向けてのコード開発を行い、課題となっていた粒子間の反発とメルトの運動の大きく異なる時間スケールの問題を部分的陰解法により解決し、その熱対流中の振る舞いを再現する事を計画した。一方で③スーパーアースのマントル対流のシミュレーションでは、昨年度出版した Letter 論文の内容を発展させ、特に粘性率の温度依存性を系統的に変化させた場合の対流の変化について調べ、スーパー・アースにおける表層環境について考察する事を計画した。また ACuTE 法に応力によるダメージを計算するルーチンを追加し、プレート運動を再現出来るモデル開発の続行を計画した。④地球ダイナモシミュレーションでは、次期地球シミュレータの稼働を控え、物性をさらに現実の地球に近づけた高解像度モデルのテスト計算を行う事を目指した。

5. 研究計画に沿った利用状況

①の開発においては 2 次元計算が主であったため 1 ノード計算であった。一方で、既に開発済みのコア形成コードを用いて、前年度に行った地球内部に持ち込まれるヘテロな環境の深さ依存性を調査を行った。主に、 128^3 のグリッドサイズで 8 ノード計算を行い、60 時間ほど必要な計算を

約 10 ケースにおいて計算を実行した。②粒子—流体混相流コードでは $100 \sim 1000$ 万粒子を $64^3 \sim 256^3$ のグリッドサイズにて 1-32 ノードの計算を行った。1 ケースあたり 1200 時間程度の計算時間が必要であった。③スーパーアースのマンテル対流計算を実施したところ、地球マンテル対流の計算よりもかなり多くの計算機資源を必要とすることが分かった。主な理由は、地球マンテル対流の計算よりも 1 ステップ当たりにかかる時間が長くなる事と、対流が定常に落ち着くまでの時間が著しく長くなるためである。この計算は世界的に見ても始まったばかりでありそれほど計算例が無く、我々の課題でも初めて取り組むものであり、事前の必要計算機資源の見積もりが難しかったが、結果的に当初予定よりもずっと多くの計算時間を必要とし、本年度の③④課題で利用可能だったノード時間のほとんどは当課題で使い切った。得られた成果は実りあるものになり、これまでに分かっていなかった、スーパーアースの表層運動にも示唆を与える新しい発見を行う事が出来た。④については③で述べた理由、及び、研究計画書で想定したノード時間よりも実際に利用可能なノード時間がかなり少なかったため、いくつかのテストランを実施するに留まった。総括すると上記の計算により、9 月あたりには残り 3000 時間程度になり、おおよその計算資源を使い果たした。

6. 今年度得られた成果、および達成度

<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、研究計画に記載した非線形ソルバとして Newton Krylov 型の解法を採用して移流陰解法に昨年度実装した。本年度はさらに、時間ステップ法として TRBDF2 法という 2 ステップで時間 2 次精度の方法を導入した。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。またマンテ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。得られた結果は論文発表を行った。

②また、マグマのシミュレーション手法においても進展があった。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昨年度開発した。本年度は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かをモデル上で検証する事に成功した。得られた結果は論文発表を行っている。

③スーパーアースのマンテ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)スーパーアースに相応しいレイリー数領域では、地球の場合よりもより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(マンテル厚さの数%)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。(何故こういう事が起こるのかについても解析により全て明らかにする事が出来たが、それはここに記述するには長くなりすぎるため省略する。またこれらの結果はスーパーアースの表層運動に対して重要な示唆を与えるが、その詳細についても同じ理由で省略する。これらを含め、結果は現在論文投稿中である。)

④については、以前より大きな解像度である $1200 \times 1000 \times 3000 \times 2$ 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= $2E-8$ 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。

<達成度>

(年度当初の研究計画を全て達成した場合を 100% / 複数の目標があった場合は、それぞれについて達成度を数値で記載)

- ①コア形成計算の達成度は約 50%である。課題としては 3 次元での移流陰解法が未実装なためである。
- ②のマグマ混相流計算の達成度は 80%であり概ね達成できたが、ノード時間が足りなかったため十分なパラメータスペースで計算ができなかった事が解題である。
- ③90%。スーパーアースのマントル対流については計算の実行は予定通りの進捗、結果については事前に全く予想していなかった多くの新しい事実を明らかにする事が出来た。ダメージを導入するモデルはまだ完成しておらず、引き続き開発を続行する。
- ④6.で述べた理由により、当課題にはほとんど資源を回せなかったため、達成度は約 20%である。

7. 計算機資源の利用状況

<計算機資源の利用状況>

(計画的に計算機資源を利用できているか、状況を記載)

前年度に使用した計算資源が確認できないため正確性に欠けるが、おおむね 9 月には割り当てられた計算時間を使い切り、内部での残りの資源を調整しながら 12 月を迎えた。

<チューニングによる成果>

(ベクトル化、並列化チューニング等、計算機資源を有効利用するために行ったこととその効果を記載)

各アプリケーションにおいてすでにベクトル化のチューニングは終わっている。例えばコア形成の計算では 8 ノード計算でピーク性能の約 14%を達成している。ダイナモシミュレーションでは概ね二十数%程度である。

<計画的に利用できていない場合、その理由>

特になし

8. 新聞、雑誌での掲載記事

特になし

課題名 先端的固体地球シミュレーションコードの開発

古市幹人、数理科学・先端技術研究分野

課題内容: 先端的数値シミュレーション技術を駆使したシミュレーションコードを開発することで、地球内部の不均質性の成因や、マグマの流動、地球磁場形成と表層環境の相関などの地球内部の問題に取り組む。

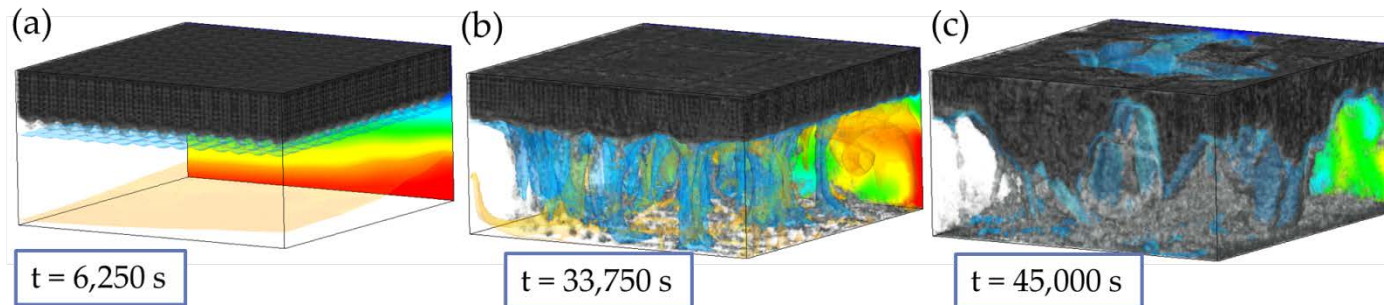
主な成果:

①自由境界表面を伴うストークス流れの熱対流は、コア形成を伴う初期惑星の熱進化を紐解く重要なカギ。そこで、JFNK型の非線形ソルバを移流陰解法に応用する事で、大きな時間幅で時間2次精度の計算を可能にした。

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の解明に、結晶粒子と高粘性な流体の混相物質をシミュレーションの実施が有効。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た混相シミュレーション手法を開発した。

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



上図: 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。

③スーパーアースのマントル対流シミュレーションにより、対流レジームダイアグラムを明らかにし以下の示唆を得た。(i) 地球よりもはるかに厚いプレートが形成されるため、プレート運動は難しそうである。(ii) プレートが形成されず、惑星内部と表層が一体の対流として運動する場合がある。

④これまでよりも高解像度でダイナモシミュレーションを実施した。