

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 (海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野)

1. 緒論

本課題では数値手法開発に明るい研究者が集まり、主にマントル・コア・マグマのダイナミクスの諸課題において特徴的な、しかし既存のアプローチでは扱いが困難な幾何形状、時空間解像度、そして物性に起因する数値的悪条件といった問題を克服するための先進的な手法開発を行っている。そして、既存にはない固体地球の大規模シミュレーション研究を実施するものである。また、マグマ対流や津波における堆積層形成、マントルの熱化学進化、コア形成時の内部構造変化、ダイナモ形成における内核の役割といった個々の問題の解決を目指すとともに、それらを統一的な数値モデルの下で記述する数値惑星シミュレーションの実現をグランドチャレンジとする。

本年度は、粒子法における動的負荷分散並列化手法開発、ならびに本課題で開発したマントル対流コードを用いたスーパー・アースのマントル対流の解明において、大きな進捗があったため、本稿で紹介する。

2. 粒子法における動的負荷分散技術開発

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics Method) や DEM (Discrete Element Method) に代表される近接粒子相互作用の粒子法は大変形や混相流問題の扱いに強く、地球科学を含め多くの分野で活用されている。本課題でもマグマの結晶粒子を伴う混相流ダイナミクスを解明するために、高粘性流体の Stokes 流コードに DEM を結合させた Stokes-DEM 法を開発した[1]。しかしながら現状、既存のコードでの SPH、DEM の大規模並列計算は困難である。なぜなら、計算実行中に粒子分布が変化する事で、計算コスト不均質性も激しく変化し並列化効率を妨げるためである。一方、未だにこの問題の決定的な解決手法は確立されていない。そこで我々は、計算中に並列空間領域分割を変更する動的負荷分散技術の開発に取り組んだ。

2.1 手法

開発の元となるのは既に論文発表等を行った SPH コード[2]であり、ノード内は OpenMP、ノード間は MPI による Hybrid 並列を実施している。SPH では近接粒子のみと相互作用するため、近傍粒子検索に有利なセル領域による並列化を用い、領域分割法にはスライスグリッド法を採用した。直交系において x 方向に $(I=1,2,3,\dots,N_x)$ の列要素に一次元領域分割をまず行い、 y 方向には各列で各々異なる分割を $(J=1,2,3,\dots,N_y)$ 行う (図 1)。各要素はのりしろ領域 (halo) を持ち、毎ステップその領域の粒子群は MPI 通信により整合性を保つ。本研究では、このようにして定義される 2 次元領域要素を動的に変更して MPI プロセス毎に負荷を均質にする事を試みる。そこで我々は各プロセスで計測した実行時間に疑似ニュートン法を適応した動的負荷分散技術を開発した。我々の手法は既往研究のプロセス毎の粒子数を基準にする手法と比較して、境界壁粒子などの粒子毎に異なる計算負荷の扱いに有利であり、また近似ではあるが Jacobian を見積もることで、ノード数が増えた時に問題となる主に通信性能に起因する非線形な計算コストの振る舞いを考慮するのに適している。

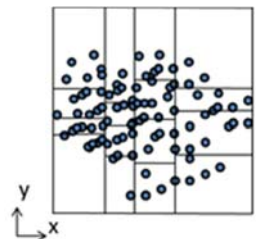


図 1. スライスグリッド領域分割

2.2 結果

SPH による水塊問題を解きベンチマークテストを行った。壁粒子の上にお椀状に配置された水粒子の問題を、初期条件では粒子数を均質にするように空間領域分割を行い、その後、実行時間が均質になるように負荷分散を実施した。1024 ノードを用いた計算での初期

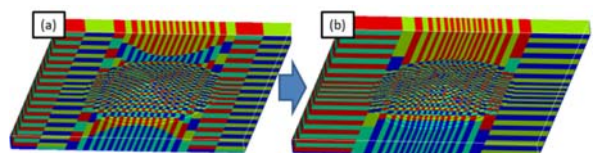


図 2. (a)初期分割(b)実行時間バランス後

分割では (図 2 (a))、壁粒子と水粒子の計算コストが異なるために各ノードの実行時間のばらつきが 57%であったものが、バランス最適化後には 37%

(図 2 (b)) になり、実行時間では 13%の削減が達成された。

さらに並列化性能を測定する事で (図 3) 現 ES の上限近い 1936 ノードにおいても約 55%の並列化効率

が達成され、提案する手法が ES の性能を十分に活用できることが示せた。

これらの手法開発により SPH と DEM、さらにそれらの結合コードで、近接粒子相互作用計算として世界最高規模である億単位粒子数の大規模計算を ES 上で可能にした(図 4)。

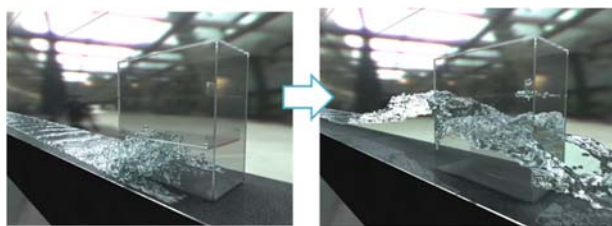


図 4. 1 億粒子の SPH シミュレーション結果

3. 系外惑星スーパー・アースのマンテル対流シミュレーション

地球内部においてマンテルは対流しており、プレートテクトニクスや地球磁場形成にも大きな影響を与えている。そのためマンテル対流は地球のハビタブル環境を維持する上で大きな役割を果たすと考えられる。

地球のような、ハビタブル環境を維持可能なマンテル対流は、どんな惑星でも比較的容易に実現されるのであろうか？ このような問題意識のもと、本課題で開発したマンテル対流解法 ACuTE 法を用いて我々は近年注目を集めているスーパー・アースについて、そのマンテル対流を 2 次元数値シミュレーションにより調べている。

3.1 主な成果

モデルでは最大クラスのスーパー・アース (地球の質量の約 10 倍) について調べている。

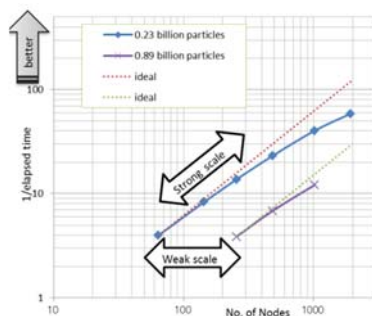


図 3. スケーリング

マンテル対流の様相には、表層と内部が一体となって対流するパターンと、表層が非常に固くなりプレートが形成されるパターン (Stagnant Lid regime, SL) が存在する事が知られている。それらは主にマンテル内部の粘性率コントラスト r によって決まる。本研究では r を 10^2 - 10^7 と幅広く変化させてマンテル対流の様相を調べた。また、レイリー数 Ra は、地球の場合約 10^7 - 10^8 ほどであるが、スーパー・アースの場合この値はかなり大きくなると考えられるため、既往研究では殆ど調べられなかった事のない、 $Ra=10^{10}$ までの高レイリー数領域まで調査を行った。

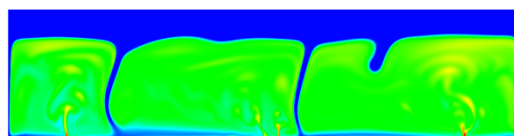


図 5. 結果の一例。色はポテンシャル温度で赤に向かって値が大きい。

得られた結果の要点のみ述べると、①スーパー・アースのように強い断熱圧縮効果がある場合、それが無い場合に比べて、コア-マンテル境界からの熱い上昇ブルームは弱められ、惑星表面からの冷たい下降ブルームは強くなる (図 5)。②結果、対流の熱輸送効率はかなり小さくなり厚いプレートが形成される (図 5 で表層の青い部分)。また③SL 型対流に移行するのに必要な粘性率コントラストの値が、地球マンテル対流モデルで使われている断熱圧縮なしのモデルの結果と異なり、 Ra の値に依存する。

本研究課題で得られた成果については、昨年度の論文出版[3]に続き、本年度も、計算結果がハビタブル性にどのような影響をもたらすかについての考察を含めて論文出版[4]を行った。本論文は掲載号の表紙に採用され、科学オンラインジャーナル「Science News」より取材を受けるなど注目を集めた。

参考文献

- [1] Furuichi and Nishiura, G-cubed (2014), DOI: 10.1002/2014GC005281
- [2] Nishiura et. al., Comp.Phys.Comm.,194, 18-32 (2015),
- [3] Miyagoshi et. al., ApJL, vol.780, L8 (2014)
- [4] Miyagoshi et. al., JGR-Planets, vol.120, Issue.7, 1267-1278 (2015)