

インヤン格子と多重格子法を用いた3次元球殻マントル対流シミュレーションコードの開発

Multigrid-based Simulation Code for Mantle Convection in Spherical Shell Using Yin-Yang Grid

亀山 真典 [1]; 陰山 聡 [2]

Masanori Kameyama[1]; Akira Kageyama[2]

[1] 地球シミュレータセンター; [2] 海洋機構

[1] ESC/JAMSTEC; [2] JAMSTEC

<http://www.es.jamstec.go.jp/esc/research/Solid/members/kameyama/>

3次元球殻領域内でのマントル対流の大規模シミュレーションを実現するにあたっては、球ジオメトリの効果的な離散化、及びマントル対流の流れ場の求解に要する膨大な計算コストの低減、の2つが大きな課題である。各々の課題を克服するために我々は独自のシミュレーション技術を開発し、その有効性を示してきた。そして今回、これらの技術を融合させることによって、新たな3次元球殻マントル対流シミュレーションプログラムを構築した。

このプログラムの第1の特徴は、球ジオメトリでの離散化にインヤン格子を用いていることである。インヤン格子とは球面上のカメラ格子の一種であり、二つの合同な要素格子を組み合わせることで球面全体を覆う。インヤン格子で用いる要素格子とは、通常の球座標格子における低緯度領域の一部(赤道のまわりの南北45度ずつと経度方向に270度)を切り取ったものである。要素格子に球座標系での極域が含まれないことから、インヤン格子には座標特異点がなく、格子間隔の極端な不均一さもない。特に後者は、時間刻みを規定するクーラン条件の緩和を通して、大規模かつ高分解能な時間発展シミュレーションの効率化に大きく寄与する。加えてインヤン格子は直交系であるため計算速度が速く、ベクトル・並列計算に適していることも大きな利点である。

第2の特徴は、マントル対流の流れ場の求解の高度化を図ったことである。マントル対流の数値シミュレーションでは一般に、高粘性かつ粘性率の空間変化の大きい非圧縮流体の定常流れ場を解く部分に計算時間の9割以上が消費されており、この部分の計算コストを低減することが極めて重要である。ここでは、ACuTE法と多重格子法を組み合わせる方法を採用する。ACuTE法とは擬似圧縮性法と局所時間刻み法を組み合わせた反復解法であり、運動量と質量の保存則を同時に満たす速度場と圧力場を逐次的に求めていく。この方法は(i)マトリックスを構成する必要がないため使用メモリ量が少ない、(ii)多重格子法との親和性が高い、(iii)ベクトル化・並列化が容易である、という優れた特徴を持っている。一方、多重格子法とは楕円形偏微分方程式の境界値問題を解く上で理論的に最高速の方法としてよく知られている。多重格子法を使った国産の球殻マントル対流プログラムは他に例がないことから、我々のプログラムは国内最速のものといつてよいであろう。また多重格子法計算では大規模並列実行時における演算効率の低下が原理的に不可避ではあるものの、格子レベルに応じて領域分割パターンを変更することで性能の劣化をある程度抑制することができる。なおこれらの技術はモデルの形状によらず適用が可能であり、既に我々が開発した大規模3次元箱型マントル対流シミュレーションの基盤技術として実績があるものである。

これらの手法を用いて、食い違い格子を用いた有限体積法に基づく3次元球殻領域内でのマントル対流プログラムを構築した。小規模なモデルを用いて低レイリー数(Ra)の定常熱対流シミュレーションを行い、過去のシミュレーション研究の結果と比較したところ、粘性率が一定の場合だけでなく温度に依存する場合でも精度のよい解が得られていることを確認した。今後はより大規模な計算を可能にするためのプログラムの最適化、及び高Raかつ粘性率の空間変化が強い場合の計算を行い、より現実的なマントル対流問題への適用可能性を広げていく。