

地球ダイナモの新しいシミュレーションコード開発とその応用

陰山 聡

神戸大学大学院 工学研究科

大野 暢亮

海洋研究開発機構 地球シミュレータセンター

1. はじめに

地球の内部は二層に分かれている。外側は岩石でできたマントル層、内側は主に鉄でできた核（コア）の層である。核自体も二層に分かれており、外側は外核、内側は内核と呼ばれる。外核は液体、内核は固体状態であることが地震波の観測から確認されている。

地球磁場の源は外核中の液体鉄である。この外核の液体鉄が対流運動するために、その運動エネルギーが MHD (Magnetohydrodynamics) ダイナモ作用によって磁場のエネルギーに変換されることで地球の双極子磁場が生まれている。

外核の液体鉄の流れを駆動している主な要因として熱対流が考えられているが、それ以外にも組成対流、歳差運動による流れなど様々な可能性が検討されており、未だ確定はしていない。現実にはこれらが複合して外核に流れを作り出しているのであろう。

双極子磁場の自発的な生成に加えて、地球磁場に関してもう一つ確認されている不思議な事実は、双極子モーメントの向き、即ち N 極と S 極の位置が短い時間に（非周期的に）突然反転するという現象である。最近 500 万年ほどの間では平均すれば 2, 30 万年に一度、地球の磁気的な南北は逆転してきた。一番最近の逆転は 78 万年前に起きた。今の双極子磁場もいつか逆転することは確実である。双極子磁場の自発的な生成とその逆転を理解することが地球ダイナモ研究の大きな目標である。

2. シミュレーションモデル

地球の外核を想定し、二つの同心球面に挟まれた球殻状の領域を考える。その中に電気伝導性流体（MHD 流体）が入っている。内側の球面（半径 $r = r_i$ ）は高温、外側の球面（半径 $r = r_o$ ）は低温に保たれている。球の中心方向に重力がはたらき、二つの球殻は同じ角速度 Ω で回転する。温度差が十分に大きければ（レイリー数 Ra が十分高ければ）内部の流体は熱対流運動し、MHD ダイナモ機構によって、対流の運動エネルギーが磁場のエネルギーに変換され、磁場が生成される。

比較的低い解像度で十分であればこの問題を数値的に解くのはそれほど難しいものではない。我々も含めて世界中のグループが地球ダイナモシミュレーションに挑戦し、双極子磁場の自発的な生成やその非周期的逆転現象を計算機の中で再現することに成功した。こうした研究を通じて、双極子磁場の自発的な生成とその逆転という現象は、マントルの影響など外部に複雑な要因を求める必要はなく、MHD 方程式に内在する性質であるということが示されたことは、計算科学としての地球ダイナモシミュレーション研究の大きな成果であると我々は考えている。

スーパーコンピュータの進歩に伴い、地球ダイナモシミュレーションも着実に進歩してきた。

その進歩の指標の一つとしてよく使われるのは、無次元量の一つであるエクマン数 $E_k = \nu / 2 \Omega r_o^2$ である。(νは動粘性率。) エクマン数 E_k は、運動方程式の中の粘性力とコリオリ力の比である。地球外核の E_k は $O(10^{-15})$ 程度と見積もられる。つまり外核は回転の影響を非常に強く受けた回転対流系である。これほど小さな無次元量を持つ系を直接数値シミュレーション (DNS) で解くのは現在のスーパーコンピュータでも難しい。エクマン数がνに比例することからもわかるように、エクマン数を小さくした計算を実行するには高い空間解像度が要求される。回転流体系に現れる境界層 (エクマン層) の厚さがエクマン数の平方根に比例することからもそれはわかる。

1990 年代に我々が地球ダイナモシミュレーション研究を始めたとき、計算で用いたエクマン数は $E_k = O(10^{-4})$ であった。それでも回転の効果が卓越する対流系や、MHD ダイナモ系の特徴は十分に再現することができた。そして、スーパーコンピュータの進歩と共にエクマン数を始めとする新たなパラメータを開拓することで、双極子磁場の自発的生成や、その逆転など、地球磁場の特徴的な性質を計算機の中で少なくとも定性的に再現することに成功した。

スーパーコンピュータの進歩と共に、地球ダイナモシミュレーションで使われるエクマン数はゆっくりとではあるが着実に小さくなっていった。地球ダイナモシミュレーション研究の世界は、最先端のスーパーコンピュータを駆使していかに小さなエクマン数を実現するかという競争という面もある。我々は 2003 年頃から、地球シミュレータを限界まで使った最高解像度の (即ち最小エクマン数の) 地球ダイナモシミュレーションを実行することを目標とし、研究を進めてきた。

解くべき基本方程式は規格化された圧縮性 MHD 方程式である。計算格子にはインヤン格子 [1] を用いた。格子サイズは $511 (r) \times 514 (\theta) \times 1538 (\phi) \times 2 (Yin/Yang)$ である。ここで r は半径を、 θ は余緯度 (赤道を中心に南北 45 度) を、 ϕ は経度 (270 度) を表す。この格子間隔は外核表面の赤道面上で約 11km に相当し、これは地球ダイナモシミュレーションでは世界最高解像度である。

プラントル数 Pr と磁気プラントル数 Pm はどちらも 1 とした。圧縮性流体のレイリー数 Ra は深さの関数である。ここでは $Ra(r_1) = 1.5 \times 10^{10}$ の結果を示す。これは対流の臨界レイリー数の 300 倍以上 1000 倍以下であることを数値的に確認した。エクマン数は $E_k = 2.3 \times 10^{-7}$ である。

速度場の境界条件は粘着、ベクトルポテンシャルに対しては、磁場が境界上で半径方向成分しか持たないように設定した。温度は境界上で固定、質量密度に対しては境界面上で連続の式を片側差分により解く。

初期条件は対流と磁場のない、熱伝導だけの (不安定) 平衡状態である。シミュレーション開始時に温度場とベクトルポテンシャル場にランダムな弱い攪乱を加える。二つの球面間の温度差が十分に大きければ (レイリー数が十分に高ければ) 熱対流運動が開始し、さらにその流れの運動エネルギーを消費して MHD ダイナモ作用により磁場が生成される。

磁場の成長と比較して対流場の時間発展は比較的早く、速度場が先に飽和する。その後、磁場が成長し、磁場のエネルギーが対流の運動エネルギーの約 4 倍になったところで磁場のエネルギーは飽和した。

3. 対流と磁場の構造

図1は対流が発生し、十分に飽和した後の渦度場の様子を示している。この図の可視化には次の章で説明する Armada を用いた。この図が示すように対流は薄いシート状のブルームの集まりになっている。赤道面上の流れの構造を詳しく見ると、経度方向に薄い構造をもったジェット状の上昇流と下降流が交互に並んでいる。ある時刻のスナップショットを見ると、ジェット状の流れが内核から離れるにつれて枝分かれする構造が見える。枝分かれの結果、経度方向のジェット流の幅は回転軸からの距離によらずほぼ一定になっている。この図の子午面断面が示すように渦度場（流れ場）は回転軸方向にほぼ一様になっている。この2次元性は強いコリオリ力の影響である。

一般に、回転球殻中の熱対流運動は円柱状の対流胞の集まりとして組織化されると考えられている。実際、エクマン数が 10^{-5} 以上の計算機シミュレーションでは円柱状の対流胞が生成される。一方、エクマン数が 10^{-6} になると対流が円柱状ではなく、ブルーム状になることは、隅田による水を使った回転（半）球殻対流の一連の実験によって示されていた。我々の計算機シミュレーションは彼らの実験結果を確認するものである。

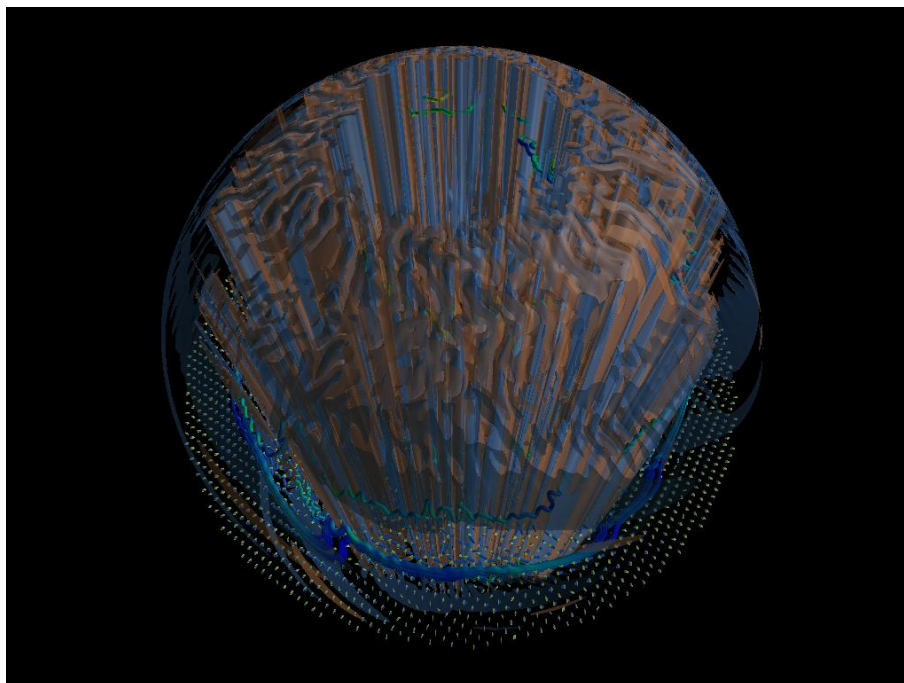


図1： シート状対流構造

エクマン数が 2.3×10^{-7} の対流構造は、これよりもエクマン数（粘性率）の高い回転球殻対流とは異なる構造を持つ。自転軸方向にまっすぐに伸びた薄いシート状のブルームが多数集まっている。

このシート状の対流構造はダイナモ効果をもつ。磁場のエネルギーが作られる場所を調べたところ、磁場が生成される場所は内核から上昇する細いブルームの中に局在することがわかった。そして磁場が生成される領域の周りを取り囲むようにして電流が螺旋状に流れている。このような螺旋型の電流構造は普遍的で、電流の場は螺旋構造の集合体として組織化されている。多数の点から出発させた電流場の力線、つまり電流線を描くと、電流場は多数の螺旋型の構造の集合体となっていることがわかった。この螺旋型電流のそれぞれの中心部分で、螺旋を貫くようにしてほぼまっすぐな磁力線が上昇ブルームの中に伸びている。その周囲の流れ場を詳しく見たところ、この磁力線はブルームの流体が内核近くで加熱され、浮力によって加速しながら

ら上昇するところで引き延ばされていることがわかった。つまり上昇プルームが磁力線を半径方向（回転軸から離れる方向）に引き延ばすことで磁場のエネルギーが生成されている。

4. 可視化手法

この高解像度ダイナモシミュレーションでは、大量のデータが生産されるので、ポストプロセスとして可視化を行うことは効率が悪い。そこで我々はインヤン格子で定義されたデータをレイキャスティングで直接可視化する並列可視化プログラム Armada を開発し[2]、本年度も引き続きその拡張をおこなった。Armada はグラフィックス関係のハードウェア（GPU）を一切使用せずに描画するので、HA8000 システムを含めたスーパーコンピュータ上でも動作する。このプログラムは並列化されており、並列化には、ノード間は MPI、ノード内は OpenMP を用いている。可視化機能は、スカラーデータの可視化には、等値面・カラースライス・ボリュームレンダリング、ベクトルデータの可視化には、流線・矢印表示が使用できる（図 2、図 3）。

Armada は一度の実行で、多数の可視化画像を生成するようにデザインされている。つまり、一度の実行で多数の視点、多数の可視化パラメータ（等値面レベル、流線の出発点など）による可視化画像を出力できる。例えば、等値面とスライスをそれぞれ 100 個の視点から描画することができる。また可視化機能も単独ではなく、等値面＋スライスなど組み合わせて使用することができる。

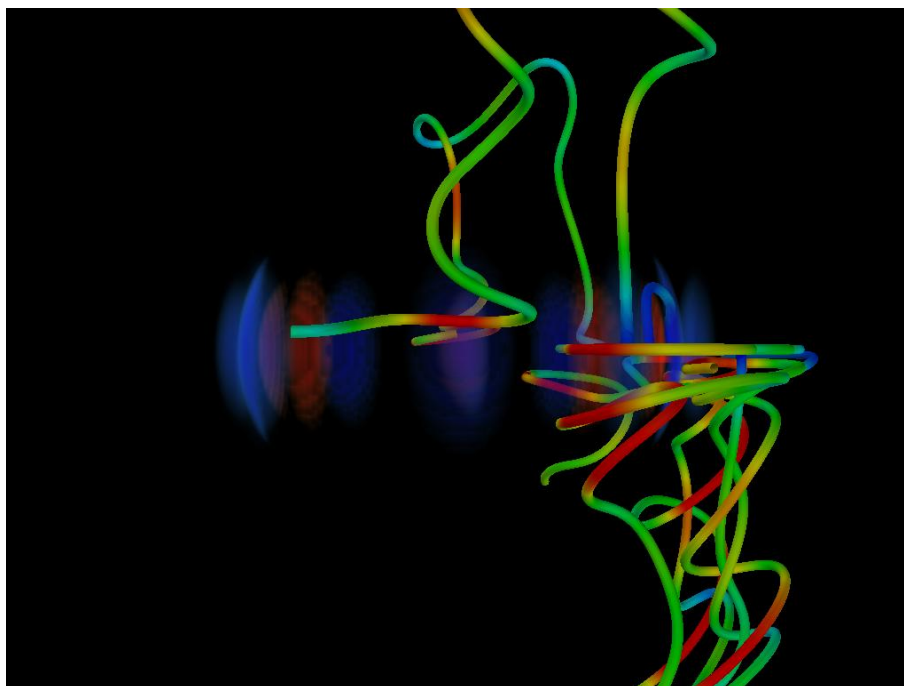


図 2： Armada で描いた流線と渦度のボリュームレンダリング

ボリュームレンダリングにより渦度の自転軸方向成分を可視化している。流線はその構造がわかりやすいようにチューブ状に表示している。この図はレイキャスティングアルゴリズムに基づくソフトウェアレンダリングによって HA8000 システム上で計算されたものである。

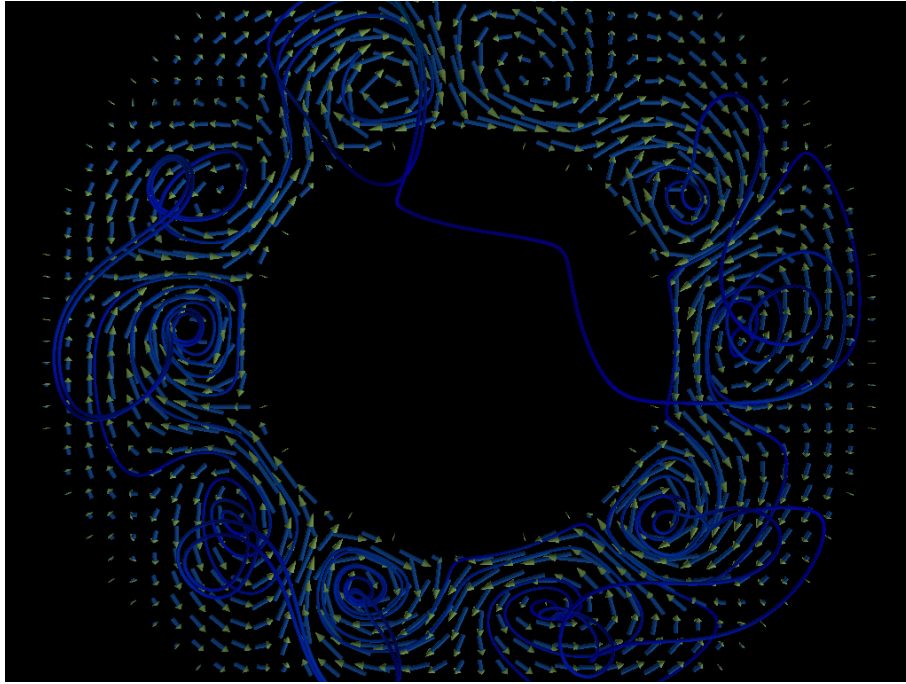


図 3： HA8000 上で Armada を用いて描いた流線と矢印による流れベクトル

矢印の向きと長さがそれぞれの位置における流れベクトルを示している。これらの矢印もポリゴンベースの (OpenGL を用いた) ものではなく、レイキャスティングで計算し、可視化したものである。

我々は、このプログラムで、大量の可視化画像を生成・出力し、解析する予定であるが、解析の途中では、いろいろな可視化手法を組み合わせる可視化した画像 (例えば、等値面とスライスを同時に描画した画像) が必要になることが考えられる。このプログラムには、既に述べたように可視化手法を組み合わせる機能もあるが、すべての組み合わせを出力するのは効率がよいとは言えない。そこで我々は、可視化画像と同時に Z 値をファイルに出力する機能を Armada に組み込んだ。これにより、描画済みの複数の画像を合成できるようになった。複数の画像が合成できるので、例えば、等値面、スライス、流線、それぞれ単独で可視化した画像があれば、それらを合成することにより、等値面+スライス、等値面+流線の画像が得られることを意味する。

Z 値とは、(色のついた) ピクセルの視点からの距離である。このデータがあると、複数の画像を前後の矛盾なく重ね合わせることができる。重ね合わせる方法は単純である。視点や視線方向が同じ画像を 2 枚重ね合わせるとき、それぞれの Z 値を比較して、近い方のピクセルの色を新たな画像のピクセルの色とすればよい。手前に物体があると、その後ろに何か物体があっても隠れて見えないということを意味する。これは、Z バッファ法あるいはデプスバッファ法と呼ばれ、コンピュータグラフィックスの世界で広く使われている手法である。2 枚の画像を重ね合わせた後、新たな画像の Z 値のデータを作れば、さらにその画像と別な画像と重ね合わせることも可能である。本プログラムでは、Z 値は 4 バイトの実数を用いている。また、Z 値のデータは、ランレングス・エンコーディングを用いて圧縮したあと出力する。ただし、この手法では、可視化画像に、ボリュームレンダリング等、半透明な可視化オブジェクトが含まれている場合は、合成できない。

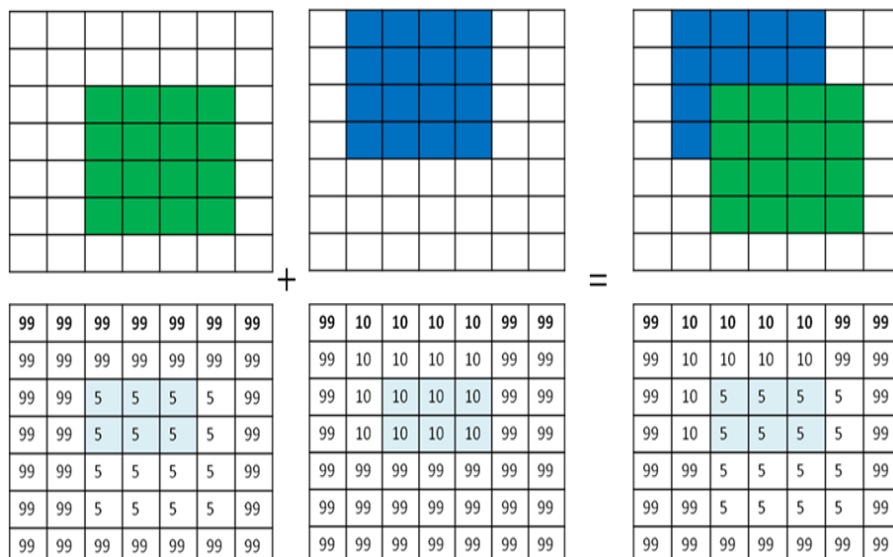


図4： Armada に組み込まれたソフトウェア的Zバッファ法

上はピクセルの色、下はZ値を表す。合成するさい、水色にした部分のZ値が、オブジェクトの前後関係を調べるために使用された。また、簡単のため、この図では、Z値の最大値は99とした。

5. まとめ

HA8000 システムで行った地球ダイナモシミュレーションとそのデータ可視化の概要を述べた。地球ダイナモシミュレーションは本質的に高解像度が要求される計算である。我々はインヤン格子を利用した高並列化ダイナモシミュレーションコードを開発している。地球ダイナモシミュレーションの難しさの一つはその可視化である。解像度が高いため、出力データサイズが大きく、また、計算される現象も複雑な空間構造をもっているため、ポストプロセスとしての可視化は効率的でない。そこで我々は計算しながら可視化を行う方法を模索しつつあり、そのための第一歩として、我々は並列計算機上で実行する並列レンダリング可視化プログラム Armada を開発している。

参 考 文 献

- [1] Akira Kageyama and Tetsuya Sato, “Yin-Yang Grid” : An Overset Grid in Spherical Geometry. Geochmi. Geophys. Geosyst. vol.5, doi:10.1029/2004GC000734 (2004)
- [2] 陰山聡、大野暢亮、HA8000 システムでの地球ダイナモシミュレーションと可視化、スーパーコンピューティングニュース Vol.11, No. Special Issue 2, pp.33-42 (2009)