

講演番号 10-NA19

## MHD ダイナモシミュレーション

陰山 聡 (神戸大学)

概要 天体磁場の起源 (ダイナモ) 解明を目指し、磁気流体力学 (MHD) に基づく以下の3つの研究を進めた。(a) 液体金属の熱対流実験を想定し、実際の実験に対応した形状の下で、外部磁場と回転の効果を含めた MHD 熱対流を解くコードと専用の可視化ツールを新たに開発した。これにより、水平外部磁場下での対流ロール中の流れが興味深いらせん型流線構造を持つことを見出した。(b) これまでに開発したインヤン格子に基づく球殻地球ダイナモシミュレーションコードの改良と最適化を進めた。(c) 大規模な MHD ダイナモシミュレーションの出力結果を解析するために、バーチャルリアリティ技術を用いたダイナモ磁場の新しい3次元可視化手法の開発を行った。これは、流れ場に凍り付いた磁力線をバーチャルリアリティ空間の中で対話的に可視化・解析するものである。

### 1. 研究の目的と意義

地球やその他の惑星、太陽など、多くの天体はそれぞれ固有の磁場を持つ。これら天体磁場は、それぞれの天体内部にある電気伝導性の流体 (液体金属やプラズマ) が対流運動し、その対流の運動エネルギーを磁場のエネルギーに変換することで生成・維持されている。電気伝導性の流体は磁気流体力学 (Magnetohydrodynamics) によって記述され、その基本方程式は MHD 方程式と呼ばれる。MHD 流体が対流をエネルギー源として自分自身で発電し、磁場を生み出すこの物理機構は MHD ダイナモと呼ばれる。MHD ダイナモを理解するために、MHD 方程式を数値的に解く MHD シミュレーションが有力な研究手段となっている。

地球磁場は一種の磁気シールドとして宇宙から来る高エネルギー荷電粒子から地表の生物を守っている。また太陽風という高速プラズマ流や、太陽からときおり放射される高エネルギー粒子から地球の大気を守るといった役割も果たしている。このように地球磁気は、地球環境にとって重要な役割を果たしているが、未来永劫安定した存在ではなく、短い時間スケールでは数年から数十年で、数十万年のスケールで見れば南北の地磁気極性が反転するほどの大規模な時間変動を持つことがわかっている。従って、地球磁場の詳しい生成機構を理解することは、地球環境の長期的な変動予測

にとって必要不可欠である。また、太陽の磁場も MHD ダイナモ機構を通じて太陽内部の対流運動によって生成されており、その磁場が太陽表面に湧き上がり、太陽フレアなどの大規模な爆発現象を引き起こす結果、高エネルギー粒子の放出などによって文明社会に直接的な影響を与えている。従って太陽磁場の起源解明も、よく知られた太陽の11年(22年)周期の謎を解くという純粋に科学的興味に加えて、社会的な重要性が高い。

我々はこれまで主に地球磁場の生成機構を理解するための MHD シミュレーションを地球シミュレータを用いて行ってきた。大規模な並列シミュレーションの結果、コイル状電流や帯状流など、新しい MHD 構造の発見に成功した。これらの構造をさらに深く理解するためには、これまで以上に大規模な計算が必要とされており、地球シミュレータの計算能力では不十分となっている。

本研究の最終的な目的は、将来の大規模・長時間シミュレーションを見据えて、我々の地球ダイナモシミュレーションコードを、T2K オープンスパコン (東大) システムに移植し、最適化すること、および、シミュレーションモデルの改良や、可視化手法の開発など関連する要素技術を開発することである。

本研究のような大規模3次元 MHD シミュレーションでは、磁場と流れ場という二つのベクトル場

と、その相互作用を同時に可視化・解析する必要があるため、通常の可視化方法では不十分である。そこで我々は、バーチャルリアリティ技術に応用した先進的な可視化技術も積極的に導入する。

いが、その詳細を理解するためにはまだまだ基礎研究が必要である。その意味で、海洋研究開発機

## 2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

- (1) 共同研究を実施した大学名  
東京大学
- (2) 共同研究分野  
超大規模数値計算系応用分野
- (3) 当公募型共同研究ならではの事項など  
共同研究者として東京大学情報基盤センターの片桐孝洋博士に入ってください、コードのチューニングに関する様々なアドバイスをいただくことができた。本年度は我々の準備不足もあって、チューニング効果そのものに関しては大きな成果を得ることができなかったが、チューニングの専門家に、初歩的なことも含めて「共同研究者モード」で遠慮無く尋ねることが出来たのは大変ありがたいことであった。これはこのような公募型共同研究ならではのことであったと思う。

## 3. 研究成果の詳細

本年度は、主に以下の3つのテーマについて研究を進めた。(1)回転系の熱対流 MHD シミュレーション、(2)球殻インヤン MHD ダイナモコードの最適化、(3)バーチャルリアリティ技術を利用したダイナモ機構の可視化手法の開発。以下ではそれぞれに項目について報告する。

### 3-1 回転系の熱対流 MHD シミュレーション

自然界の MHD ダイナモシステムはほとんど全てが乱流状態にあると考えられる。だが MHD 系、特に強い回転（自転）の影響の下にある乱流については未解明な点が多い。マイクロなスケールの乱流が、マクロなスケールの磁場と流れ場の構造と時間発展に大きな影響を与えていることは間違いな

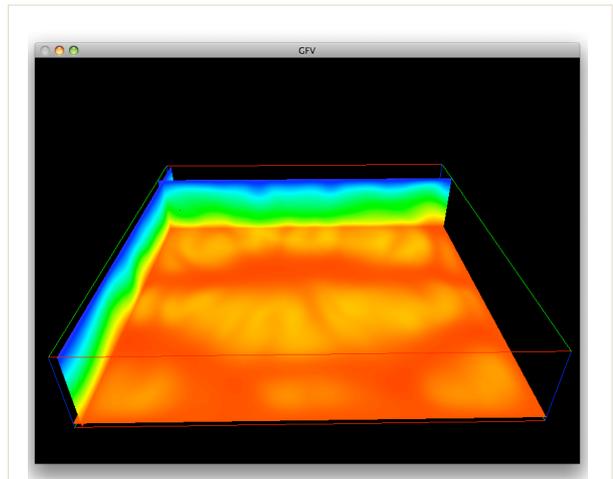


図1：液体金属熱対流実験に対応する箱型ジオメトリでの MHD 熱対流シミュレーション

構の柳澤等が進めている液体金属のガリウムを使った MHD 熱対流の実験は極めて重要なプロジェクトであり、既に興味深い成果が出ている (Phys. Rev. E, 2010)。我々はこのガリウム対流実験に対応する MHD シミュレーションコードを新たに開発し、今年度は外部から印加された磁場の影響の下での MHD 対流、および、系の回転が対流に与える影響について詳細に調べた。以下では外部磁場の影響について報告する。

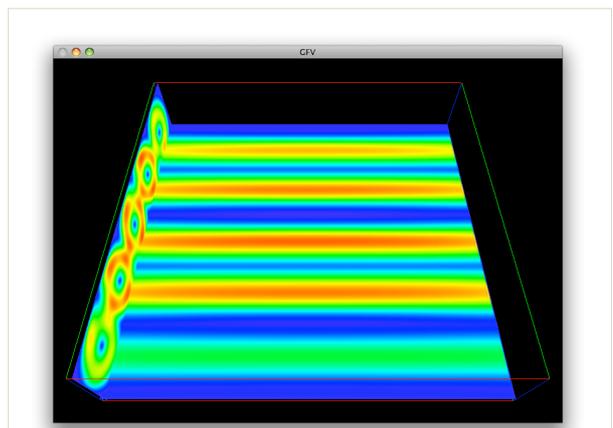


図2：水平方向の外部磁場に平行にそった対流ロール。色は対流速の強さを示す。

シミュレーションモデルは以下のとおりである。直方体の領域（正方形底面、垂直・水平の長

さ比 1:5) を考え、その中に MHD 流体があるとする (図1参照)。方程式は圧縮性の MHD 方程式を解く。ただし、流速のマッハ数は最大 1% 程度なので圧縮性の影響は無視できる。底面は高温、上面は低温にそれぞれ固定する温度の境界条件をとる。速度は境界面上でゼロとする。外部磁場は水平方向に印加されている。磁場は境界面上で垂直成分

可視化をする目的で、我々は専用の可視化ツール GFV を開発した。GFV は、図1及び図2に示したようなスカラー場の断面表示だけでなく、図3に示したような流れ場、磁場のベクトル矢印表示機能や、パーティクルトレーサー機能を実装した (図4)。

この GFV を使った可視化解析を通じて我々は、対流ロール中の流れ場に興味深い構造を発見した。それは、流線がらせん形を描くという性質である。図4の流線にもその一部が見えている。このらせん形流線構造は、一本の対流ロールの長軸方向に二つ並んで形成されそれぞれの流線を十分長時間追跡するとトーラス状の曲面構造が現れる (図5)。

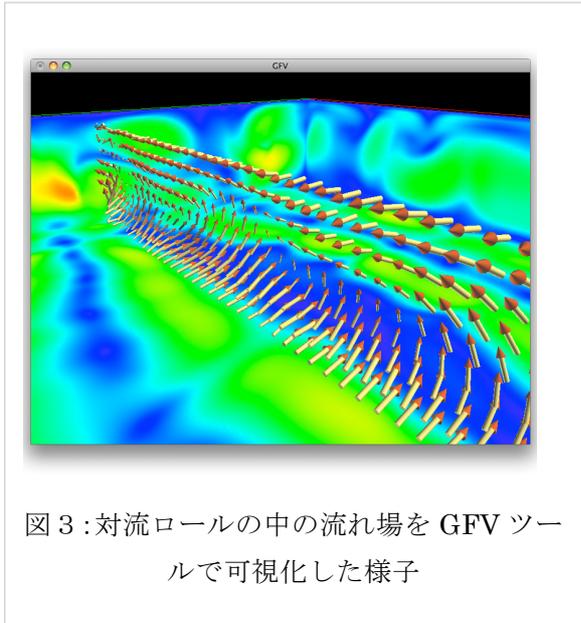


図3 : 対流ロールの中の流れ場を GFV ツールで可視化した様子

のみをとると仮定する。

柳澤らのガリウム実験では外部磁場と平行な方向にそろった複数の対流ロールが観測された。対応するレイリー数で計算した我々のシミュレーションでも同様に複数の対流ロールが作られた。

このガリウム対流シミュレーションのデータ

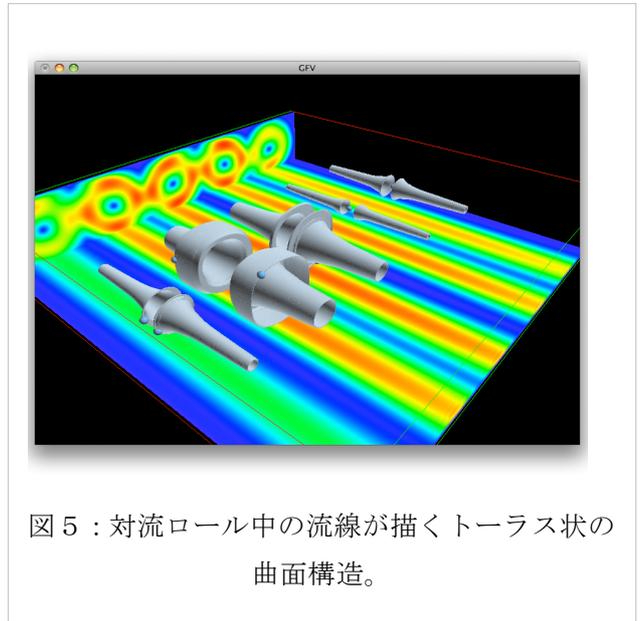


図5 : 対流ロール中の流線が描くトーラス状の曲面構造。

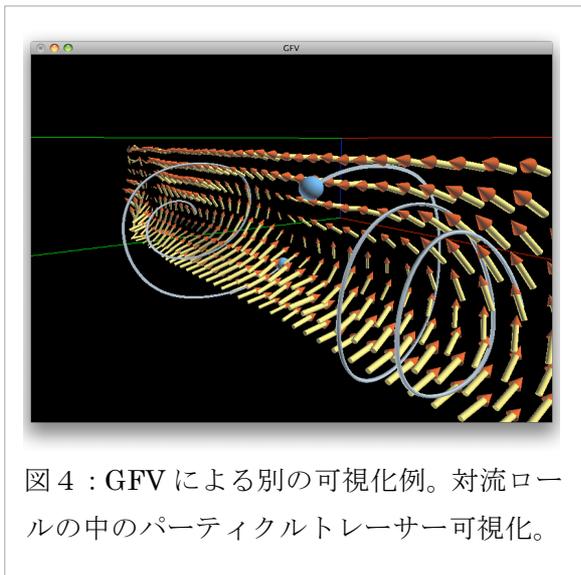


図4 : GFV による別の可視化例。対流ロールの中のパーティクルトレーサー可視化。

### 3-2 球殻インヤン MHD ダイナモコードの最適化

インヤン格子に基づいた球殻地球ダイナモコードの最適化の準備的な研究を進めた。まず、コンパイラオプションと各種オプションについて調べた。試したのは、日立製 Fortran コンパイラ、Intel Fortran Compiler 11.0、PGI Fortran コンパイラ、gFortran の 4 種である。このうち最も速かったのは、Intel 製コンパイラであった。日立製コンパイラに比べ、20%ほど高速であった。

インヤン球殻 MHD ダイナモコードでは、Fortran90 の system\_clock 関数を使った自作の timer module による計時機能が組み込まれている。この timer module を用いてプログラム実行時は常

にある程度のプロファイリングを行うようにしているが、通信部分と計算部分を区別したより詳細なプロファイリングを行うために、プロファイリングツール gprof を使用して解析した。コンパイラは gprof と相性の良い Intel Fortran Compiler を使用し、オプションは `-pg -O3` を利用した。8 ノード 1 ノードあたり 16 コアの flat MPI で実行した。この解析によって計算時間が最もかかっている部分、いわゆるホットスポットは、MHD 方程式のソルバ部分、および Runge-Kutta 法による時間積分ルーチンであることを確認した。

次に、MHD 方程式のソルバ部分の想定されるキャッシュヒット率をシミュレータ (cachegrind) で計測しながら、ループ分割や、多重 do ループ中のループの入れ替え、足し算の順番の交換など、いくつかの簡単な最適化を行い、その効果を測定した。これらによって最高 7% ほどの高速化が得られたが、これは期待したほどではなく、キャッシュチューニングは今後の大きな課題である。

### 3-3 バーチャルリアリティ技術を利用したダイナモ機構の可視化手法の開発

MHD ダイナモシミュレーションにおける課題の一つは、シミュレーションデータの可視化である。MHD におけるもっとも重要な基本物理量は、流れ場と磁場であり、どちらもベクトル場である。一般にベクトル量の可視化は難しいものであるが、MHD ダイナモ機構を理解する上では、この二つのベクトル場の構造を同時に理解するだけでは十分ではなく、各位置での二つのベクトル場の関係（相互作用）を正確に把握する必要がある。つまり、MHD ダイナモの研究では、3 次元ベクトル場の効果的な可視化手法の確立が鍵となる。

我々は、シミュレーションコードの開発と並行いして、バーチャルリアリティ技術を応用した MHD データの 3 次元可視化手法の開発も進めている。特に、3 次元シミュレーションデータに文字通り没入して解析することを可能にする、いわゆる没入型 (CAVE 型) のバーチャルリアリティ装置を活用することに注力している。最新のバーチャルリア

リティ技術を駆使すれば、複雑な構造と相互作用を持つ MHD ダイナモデータも十分効率的に可視化・解析できると考えている。

本年度我々は、流れ場に凍り付いた磁力線の可視化手法を開発した。天体ダイナモの MHD システムでは磁気レイノルズ数が高いので、磁力線は流れ場に凍り付いていると考えることが出来る (アルフベンの定理)。これはオイラー流体において、渦度の力線、即ち渦糸が、流れに凍り付いているのと同じ現象である (ヘルムホルツの定理)。

我々は磁力線が流れに凍り付く、というこの著しい性質を活用したバーチャルリアリティ可視化

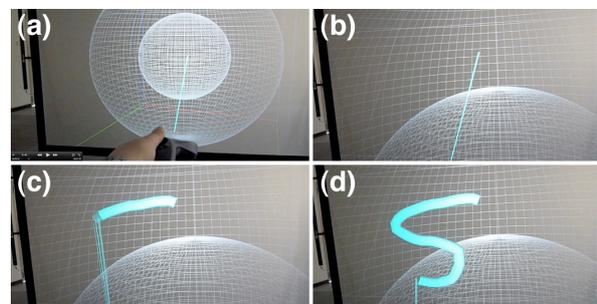


図6：流れに凍り付いた磁力線を可視化するために開発した、バーチャルリアリティ可視化ソフトウェア。手を動かすことで初期条件の磁力線を 3 次元的に描く。

手法を開発した。これは可視化のアルゴリズムとしてはいわゆる time line 法と等価であるが、通常の time line 法と異なるのは、バーチャルリアリティ技術により、実際に自分の手を動かすことで、追跡する磁力線 (time line) の初期条件を 3 次元空間中に自由に指定することが出来るという点である。いわば 3 次元「お絵描き」としてのこの操作が終わると、その曲線が初期の磁力線となり、流れに凍り付いた運動を 3 次元的に追跡・表示する (図 6、図 7)。

## 4. これまでの進捗状況と今後の展望

上で述べたとおり、我々は MHD ダイナモの物理機構解明を目指し、(1) 乱流モデルの組み込みを目指した準備的なシミュレーション研究、(2) インヤ

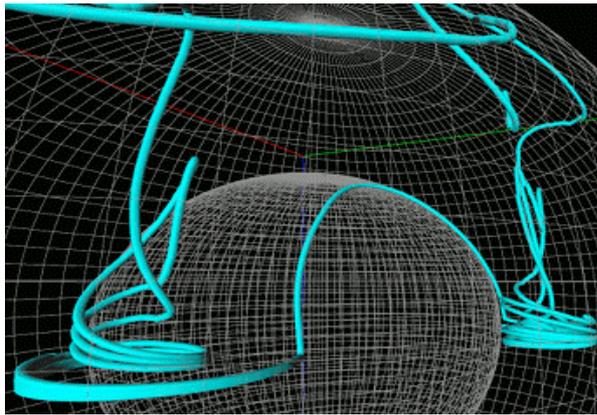


図7：流れに凍り付いた磁力線が地球の外核中の流れによって引き伸ばされ、磁場が増幅された様子を示す図。実際には立体表示される。

ン格子を用いた球殻シミュレーションコードの最適化、(3)シミュレーション結果の可視化解析のためのバーチャルリアリティ可視化手法の開発、という3つのテーマを並行して進めてきた。それぞれの進捗について現状をまとめると、(1)と(3)に関しては順調であるが、(2)に関しては、当初の予定よりも進捗が遅い。そこで、今年度の残り時間は、(2)に重点を置いて進める予定である。

## 5. 研究成果リスト

### (1) 学術論文 (投稿中のものは「投稿中」と明記)

- Region-of-interest visualization by CAVE VR system with automatic control of level-of-detail, N. Ohno and A. Kageyama, *Comput. Phys. Comm.*, 181, 720-725, 2010
- Zonal flow formation in the Earth's core, T. Miyagoshi and A. Kageyama, *Nature*, 463, 793-796, 2010
- Virtual Reality Visualization of Frozen-in Vector Fields, K. Murata and A. Kageyama, *Plasma Fusion Research, Special Issue on ITC-20*, 投稿中
- Formation of sheet plumes, current coils and helical magnetic fields, T.

Miyagoshi and A. Kageyama, *Phys. Plasmas*, 投稿中

- VR Jugglerによる3次元可視化, 目野大輔, 陰山 聡, 『スーパーコンピューティング ニュース』, 2010年1月号掲載予定
- Impact of magnetohydrodynamic turbulence on thermal wind balance in the Sun, Y. Masada, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters*, L181, 2010
- Solar-Type Magnetic Reconnection Model for Magnetar Giant Flares, Y. Masada, S. Nagataki, K. Shibata, & T. Terasawa, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 62, 1093-1102, 2010
- Stability of MRI turbulent Accretion Disks, H.R. Takahashi & Y. Masada, ArXiv10114643 (Accepted for publication in *Astrophysical Journal*, in press

### (2) 国際会議プロシーディングス

- Development of an Interactive Visualization System using VR Technology for Flow Simulation, T. Yamazaki, K. Kashiya, A. Kageyama, N. Ohno, H. Miyachi, *Proc. 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, 25, 435-442, 2010
- PRE-PROCESSING FOR 3-D FINITE ELEMENT SIMULATIONS, K. Kashiya, T. Yamazaki, T. Miyawaki, K. Hayashida, N. Ohno, A. Kageyama, K. Terada, *Proc. 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, 25, 367-374, 2010

### (3) 国際会議発表

- Tracer Line Visualization of MHD Simulation Data with Virtual Reality,

Akira Kageyama, 20th International Toki  
Conference, Invited Talk, Dec. 7-10,  
2010, Toki, Japan

(4) 国内会議発表

- ・ MHD Simulations and Visualizations Motivated by Geophysical Interest, Akira Kageyama, Mini-Workshop on Solar Interior Physics, 2010.08.05
- ・ 低エクマン数シミュレーション、陰山 聡、太陽天体ダイナモ研究会 名大太陽地球環境研究所研究集会・国立天文台研究集会 2010年09月28日
- ・ 流れに凍り付いた磁力線の VR 可視化、陰山聡、村田歌織、地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 第 128 回総会、2010.10.31
- ・ 液体金属熱対流のシミュレーションと可視化、陰山聡、古田敦哉、地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 第 128 回総会、2010.10.31
- ・ 液体金属熱対流シミュレーションとその可視化、古田敦哉、陰山 聡、第 38 回可視化情報シンポジウム、2010.07.20-21
- ・ 宇宙天気モデリング用球データ可視化ソフトウェア、吉田真人、陰山 聡、第 38 回可視化情報シンポジウム、2010.07.20-21
- ・ トレーサー曲線法による流れ場の VR 可視化、村田歌織、陰山 聡、第 38 回可視化情報シンポジウム、2010.07.20-21
- ・ 液体金属熱対流シミュレーションとその可視化、古田敦哉、陰山聡、可視化情報学会全国講演会、2010.10.07-08
- ・

(5) その他（特許，プレス発表，著書等）

なし