

磁力線追跡機能を組み込んだ地球ダイナモシミュレーション

Geodynamo simulation with embedded visualization of magnetic field lines

研究代表者 神戸大学 陰山 聡	Kobe Univ. Akira KAGEYAMA
共同研究者 東京大学 櫻庭 中	Univ. Tokyo Ataru SAKURABA
共同研究者 核融合科学研究所 三浦 英昭	NIFS Hideaki MIURA
共同研究者 兵庫県立大学 大野 暢亮	Univ. of Hyogo Nobuaki OHNO
共同研究者 国立環境研究所 堀 久美子	NIES Kumiko HORI

To analyze magnetic field generation process in geodynamo simulation, a new visualization method based on the modern virtual reality (VR) technology is developed. In this method, a frozen-in “tracer line” is transported by the simulated flow of the Earth’s outer core. One can specify the initial curve of the three-dimensional magnetic field line, that is to be frozen-in the flow, by simply moving one’s hand in a VR space, drawing a 3-dimensional curve in the space. The initial field line is then released to the flow. The field line goes through the stretching, twisting, and folding processes by the flow. Observing its deformation processes in VR space in 3-D, one can intuitively understand the flow's structure as well as the field line stretching process. In addition to the simple tracer line, wheel-like objects are put on each field to help visualizing local stretching component and axial vorticity along the field line. A computer program is developed for the implementation of this VR tracer line method for CAVE-type immersive VR systems and its capacity for the dynamo analysis is confirmed.

はじめに

地球磁場には二つの謎がある。一つは、その形状がなぜ双極子磁場なのか(つまりコンパスはなぜ北を指すのか)ということ。そしてもう一つは、その南北の磁極が時折逆転

するのはなぜか、ということである。スーパーコンピュータを用いた大規模な磁気流体力学 (MHD) シミュレーションにより、地球磁場のこの二つの重要な性質は計算機内部で少なくとも定性的には再現できるようになった。しかし、その詳しい物理機構は未だに不明である。現在求められているのは、古典的な磁力線描像に基づく磁場増幅過程の物理的・幾何学的な理解である。

地球磁場の源は地球外核の液体金属（液体鉄）の流れにある。電磁誘導を通じて流れのエネルギーが磁場のエネルギーに変換され、磁力線が引き延ばされることで、地球磁場は生成・維持されている。磁気流体力学 (MHD) システムとしての地球外核は、磁気レイノルズ数が十分に高いので、磁力線の動きや変形には物理的に明確な意味がある。我々は最近、世界最高解像度となる大規模な地球ダイナモシミュレーションを実行し、高回転、低粘性率という条件の下での新しい地球ダイナモの領域を見いだした (Kageyama et al., 2008, Nature; Miyagoshi et al., 2010, Nature)。そこで見いだされた複雑な流れ場が磁力線をいかに変形し、引き延ばしていくかという物理過程を 3 次元的に観察することで地球ダイナモの物理機構の理解を進めることがこの研究の目的である。

ダイナモ磁力線の追跡手法

流れの可視化手法としてよく使われるトレーサー粒子法は、0 次元の物体、即ち点が流れの中に置かれるのに対して、本研究ではそれを拡張し、1 次元の物体、即ち曲線が流れの中におく。この曲線をここでは、トレーサー曲線と呼ぶ。トレーサー曲線を可視化することで、理想 MHD 流体中の磁力線のように、流れ場に凍り付いたベクトル場の時間発展を知ることができる。

トレーサー曲線の時間発展は本質的に 3 次元的な現象なので、初期磁力線の形状が単純だとしても、流れ場が複雑であれば、その流れによって移流される（運ばれる）トレーサー曲線は急速に変形され、3 次元的に複雑な形状を持つようになる。3 次元空間中に描かれた複雑な一本の曲線の形状を正確に把握することは、通常の技術では難しい。

トレーサー曲線法を流れ場の有効な可視化手法として活用できるようにするためのもう 1 つの技術的課題は、初期条件（曲線）の指定方法である。解析しようとする流れ場が単純なものであれば一本のトレーサー曲線をわずか 1 回放出し、その変形と運動を（3 次元的に）観察することで十分な情報が得られるかもしれない。だが流れ場が複雑になると、トレーサー曲線を放出する“実験”を初期条件（初期曲線）の位置や形状を、多様かつ自由に指定して繰り返し試行することが簡単にできることが望ましい。空間中で手や指を 3 次元的に動かすことで自由に初期曲線の座標が指定できるのが理想的である。

上に述べた 2 つの技術的課題“3 次元表示”と“3 次元ユーザーインターフェース”を

本研究ではバーチャルリアリティ技術を応用することで解決した。

バーチャルリアリティ技術の活用

様々な方式の VR システムの中で、CAVE、あるいは没入型ディスプレイ方式と呼ばれるタイプの VR 装置は最も高い没入感と現実感を提示することが知られている。本研究では主に神戸大学に設置された CAVE システム『 π -CAVE』(Fig.1) を利用した。

CAVE の中心部分は、大きな立方体の部屋である。その正面、左右の壁面、床が全てスクリーンとなっている。そこにステレオプロジェクタで立体映像を投影する。体験者は、立体眼鏡をつけ、ワンドと呼ばれるコントローラを持ってその部屋の中に立つ。眼鏡にはヘッドトラッキングシステムが装着されており、体験者の目の位置と視線の方向がリアルタイムで検出されているため、その情報をもとにスクリーンに投影される画像がリアルタイムに調整される。つまり体験者が CAVE の中を歩き回ってもそれに伴って見ている画像が変化する。この処理は、CAVELib が行っている。CAVELib とは、ヘッドトラッキングやそれに基づくリアルタイムの投影画像の調整など、VR を実現する上で必要となる最も基本的な処理をする基本ライブラリ(API) である。本研究では CAVELib と、OpenGL を利用してプログラムを開発した。

利用者は、ワンドを使って、スクリーン上の任意の場所に曲線を描いて、トレーサー曲線の初期位置を決定する。ボタンを押している間に、ワンドの先から出たビームの先の座標を取得し、そのビームの指す座標が前に取得した点から一定の距離より離れると新しい点として座標が保存される。このよ

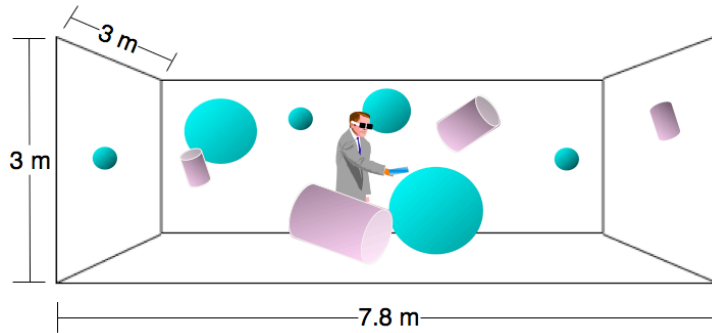


Fig. 1: An immersive virtual reality system installed at Kobe Univ, π -CAVE.

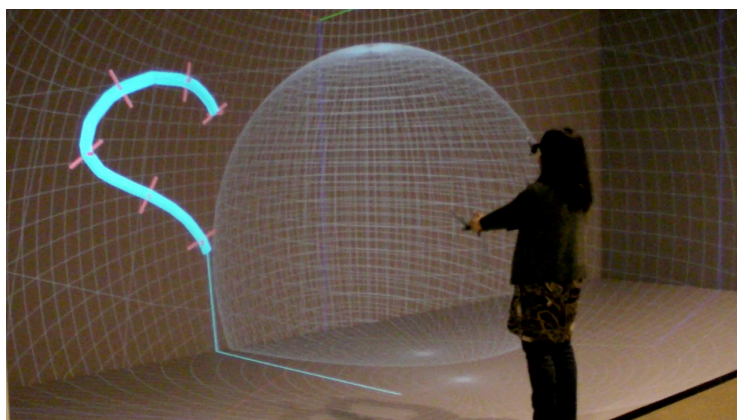


Fig. 2: Drawing step of the initial curve of a magnetic field line in virtual reality space.

うに点をボタンを押している間に決め、それらをつないだものが初期磁力線となる(Fig.2 参照)。そして、シミュレーションによって得られた流れ場に基づいてこの磁力線（トレーサー曲線）を移流させる。速度の時間積分にはルンゲ・クッタ法を用いる。入力データの読み込み、空間補間、時間積分は我々が以前開発した汎用 VR 可視化環境である VFIVE を活用した。

単純なトレーサー曲線法では、局所的な引き伸ばし成分が分かりづらいという問題と、その周囲の渦度情報（つまり曲線をしぼるような成分）がまったく分からないという問題があった。そこで、これらの問題点を解決する機能も追加した。

まず、引き伸ばしが起こっている部分の色を変更することで局所的な引き伸ばしの可視化を実現した。トレーサー曲線は多数の点列の連結で構成している。トレーサー曲線が引き伸ばされた時、つまり隣り合う点同士の距離がある一定の間隔よりも長くなったとき、その中点に線形補間で、点を挿入する。その補間時に挿入した点と、それに隣接する点の色を変更することで、局所的な引き伸ばしを表した。また、変化した色は、一定時間の経過とともに徐々に元の色へと戻っていくようにした。

トレーサー曲線を捻るような流れ成分を可視化する目的で、トレーサー曲線上の渦度情報を表示する機能を開発した。トレーサー曲線のまわりに、渦度のトレーサー曲線の軸方向成分に対応して回る 4 本のスポークを表示するというものである。トレーサー曲線に垂直に表示した 4 本のスポークの角速度として表現する。また、トレーサー曲線に向かって集まる流れ成分、あるいはトレーサー曲線から発散する流れ成分を可視化するため、トレーサー曲線軸方向に垂直な流れの発散に対応して大きさが変化するリングを表示することにした (Fig. 3)。

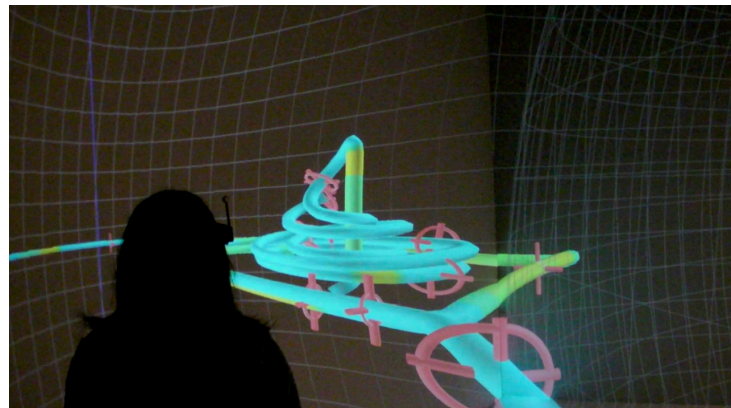


Fig. 3: Advected magnetic field line with wheels.

まとめ

地球磁場の増幅メカニズムを理解するために、流れ場に凍り付いた磁力線の描像を活かした新しい可視化手法を開発した。それは没入型バーチャルリアリティ技術を応用した対話的かつ 3 次元的な可視化手法である。これにより流れ場の構造やそこに凍り付いた磁力線の

引き延ばし、曲げ、ねじれのプロセスを直感的に把握することが可能となった。

研究発表

口頭発表

- ・ A. Kageyama: 20th Intern. Toki Conf. (ITC20), Invited Talk, Toki, (2011)
- ・ 陰山 聡: 日本地球惑星科学連合 2011 年度連合大会 情報地球惑星科学 幕張メッセ (2011)
- ・ 陰山 聡: 地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS)第 128 回総会 沖縄 (2011)
- ・ A. Kageyama Mini-Workshop on Solar Interior Physics, 東京天文台 (2011)
- ・ 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
- ・ 陰山 聡: 計算力学講演会 (岡山) 特別講演 (2011), 論文集 (5 pages)
- ・ A. Kageyama: Inter. Conf. Num. Sim. Plasmas (2011)
- ・ A. Kageyama: Proc., Inter. Symp. Disaster Sim. (DS' 11) (2011)
- ・ A. Kageyama: International Symposium for Space Simulations (ISSS-10), Invited talk, Banff (2011)
- ・ A. Kageyama: Intern. Union Geodesy & Geophys. (IUGG), Invited talk, Melbourne (2011)
- ・ 陰山 聡: SS 研 HPC フォーラム (東京), 招待講演, 東京, (2011)
- ・ 陰山 聡: 第 21 回インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN 2011), 特別講演, 神戸 (2011)
- ・ A. Kageyama, International workshop on scientific visualization, Shiran-Kaikan Bekkan, Kyoto (2012)
- ・ 陰山 聡: 平成 23 年度 神戸大学 実験・実習技術研究会 特別講演, 神戸 (2012)

誌上発表

- ・ N. Ohno and A. Kageyama, Region-of-interest visualization by CAVE VR system with automatic control of level-of-detail, Comput. Phys. Comm., 181, 720-725, 2010
- ・ 陰山聡, 大野暢亮, 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, スーパーコンピューティングニュース, vol.12, pp.57-62 (2010)
- ・ Zonal flow formation in the Earth's core, T. Miyagoshi and A. Kageyama,

Nature, 463, 793-796, 2010

- K. Kashiyaama, T. Yamazaki, T. Miyawaki, K. Hayashida, N. Ohno, A. Kageyama, K. Terada, PRE-PROCESSING FOR 3-D FINITE ELEMENT SIMULATIONS, 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, pp. 367-374 (2010)
- T. Yamazaki, K. Kashiyaama, A. Kageyama, N. Ohno, H. Miyachi, Development of an Interactive Visualization System using VR Technology for Flow Simulation, 10th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, pp.435-442 (2010)
- H. Ohtani, A. Kageyama, Y. Tamura, and S. Ishiguro, Integrated Visualization of Simulation Results and Experimental Devices in Virtual-Reality Space and device data, Plasma FusionRes., vol.6, 2406027, (2011)
- Formation of sheet plumes, current coils and helical magnetic fields, T. Miyagoshi and A. Kageyama, Phys. Plasmas, vol.18, 072901 (2011)
- K. Murata and A. Kageyama: Plasma & Fusion Res., vol.6 (2011) 2406023 (5 pages).
- 山浦優気 他: 第 16 回バーチャルリアリティ学会大会論文集 (2011) (4 pages)
- A. Kageyama et al., Proc. International Conference on Modeling and Simulation Technology (JSST2011), pp.286-290, Tokyo (2010)
- 目野大輔, 陰山聡: スーパーコンピューティングニュース, vol.13, pp.34-47 (2011)
- K. Kashiyaama, Y. Tasuku, A. Kageyama, and N. Ohno, Development of Pre- and Post-Processing Systems Based on Virtual Reality for 3-D Flow Simulations, Proc. 11th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, pp.315-322 (2011)
- H. Ohtani, Y. Tamura, A. Kageyama, and S. Ishiguro, Scientific Visualization of Plasma Simulation Results and Device Data in Virtual-Reality, IEEE Transactions on Plasma Science, vol.39, pp. 2472-2473 (2011)
- R. Horiuchi, S. Usami, H. Ohtani, M. Den, and A. Kageyama, Effective resistivity model for collisionless driven reconnection and its role in a multi-hierarchy system, submitted