サイエンティフィック・システム研究会　2011 年 8 月 25 日
SS 研 HPC フォーラム 2011

地磁気シミュレーションとバーチャルリアリティ可視化

陰山　聡
神戸大学　大学院システム情報学研究科

[アブストラクト]

地球の中心近くには 10 億アンペアもの電流がある。この電流は、地球内部のコアと呼ばれる領域にある液体金属が対流運動し、その流れが電磁誘導を通じて自発的に作り出している。つまり、地球は巨大な発電機であり、電磁石でもある。この電流がリング状に流れているために、地球は双極子磁場を持つ。コンパスが北を指すのはこのためである。さらにこのリング状電流は数十万年に一度、突然向きを反転させることが知られている。双極子磁場の自発的な生成と逆転というこのような地磁気の興味深い性質は、磁気流体力学（MHD, Magnetohydrodynamics）方程式の時間発展を数値的に解く、地球ダイナモシミュレーションと呼ばれる手法により計算機の中で再現されている。地球ダイナモシミュレーションの概要と、これまでに得られた成果、並列スーパーコンピュータを駆使した大規模計算を実現するためのシミュレーション技術的な工夫について述べ、さらに、その計算結果を 3 次元的に解析するために導入したバーチャルリアリティ技術、及びそれを応用した 3 次元的・対話的・没入的な可視化手法の開発についても紹介する。

[キーワード]

地磁気、地球ダイナモシミュレーション、磁気流体力学、データ可視化、バーチャルリアリティ

1. はじめに

渡り鳥など、ある種の動物は磁場を感じる器官を持っているらしい。地球の磁場（地磁気）を使って動物や、あるいは（コンパスを持っている）人間が方向を知ることが出来るのは、地磁気が双極子型になっているためである。地球上のどこにいてもコンパスの N 極の針が北をさすというのは考えてみればありがたいことで、もしも地磁気が双極子磁場ではなく、4 重極磁場や 8 重極磁場（あるは、その混合）だとしたらコンパスを持っていてもあまり役に立たないであろう。

磁場の形状が（自然界で磁場が取り得る最も単純な構造である）双極子型であるということに加えて、地磁気がもつもう一つの特徴は、その双極子磁場モーメントの向きが突然反転する「地磁気の逆転」と呼ばれる現象が起きることである。地磁気の逆転はこの数億年で見ると平均して数十万年に一度起きており、地球科学的な時間スケールで見れば決して珍しい現象ではない。

地磁気の起源は地球科学における最も古い問題の一つである。長い歴史をもつ地磁気の研究は最近 15 年ほどで大きく進歩した。それはスーパーコンピュータによる計算機シミュレーションという研究手段が登場したためである。

2. 地球ダイナモシミュレーション

地磁気が生まれている場所は、地球の中心部、コアと呼ばれる領域である。コアは内核と外核という 2 層に分かれており、内核は固体の鉄、外核は液体の鉄である。その外核の液体鉄が対流しており、その流れのエネルギーが電磁誘導を通じて磁場のエネルギーに変換されているのが地磁気である。液体金属の流れと磁場の時間発展は、磁気流体力学（Magnetohydrodynamics，MHD）で記述される。磁場中を電気伝導性の流体が流れることで起電力が生じ、その結果、電流が元の磁場を強めるように流れるような正のフィードバックループが自然に出来ている系を MHD ダイナモと呼ぶ。地磁気の起源は本質的にはこの MHD ダイナモである。これを地球ダイナモと呼ぶ。

本格的な地球ダイナモシミュレーションは 1995 年ころから始まった。それ以来、シミュレーションモデルは基本的には変わっておらず、その後の歴史は、計算の大規模化、高解像度化の歴史と言える。その発展はエクマ

ン数 E をどれだけ小さい値で計算できたかという点を一つの指標としてみることが出来る。エクマン数 $E=\nu / 2 r_o^2 \Omega$ は回転流体系における回転の強さを示す無次元パラメータの一つであり、地球の外核では $E= O(10^{-15})$ である。ここで ν は粘性率、r_o は外核半径、Ω は地球の自転角速度である。回転流体系の実験や数値計算では一般に回転が速くなればなるほど（エクマン数が小さくなればなるほど）難しくなる。

1995 年に我々が行った計算では $E=O(10^{-4})$ であった。その後、スーパーコンピュータの更新とシミュレーション技術上の工夫を重ねることで E の値は着実に進歩（小さく）なっていき、双極子磁場の自発的生成とその逆転現象を計算機の中で再現することに成功した。2008 年には地球シミュレータの 512 ノード（4096 プロセッサ）を使って、世界最小となる $E=O(10^{-7})$ の地球ダイナモシミュレーションに成功した。

この計算のために我々は『インヤン格子』という新しい球面格子を考案した。このインヤン格子上で MHD 方程式を差分法し、長時間積分を行った。プロダクトランに用いた計算格子のサイズは 511（半径方向） x 514（緯度 90 度方向 x 1538（経度 270 度方向） x 2（イン格子とヤン格子）である。これまで行った最も大規模なシミュレーションは、（初代）地球シミュレータの 512 ノード（4096 プロセッサ）を用いた、約 100 時間のジョブであり、その実行には実時間で半年近くかかった。だれも見たことのない低エクマン数領域を探索することができたおかげで、シート状対流構造や螺旋型、トーラス型電流構造、帯状流の形成など、興味深い現象を見いだすことが出来た。

講演では、地球ダイナモシミュレーションとインヤン格子、そして計算結果を解析するために我々が行った CAVE 型バーチャルリアリティ（VR）装置を利用した対話的可視化手法について紹介する。

[参考文献]

[1] A. Kageyama et al., Computer Simulation of a Magnetohydrodynamic Dynamo II, Phys. Plasmas, vol.2, pp.1421-1431 (1995)

[2] Akira Kageyama and Tetsuya Sato. Generation mechanism of a dipole field by a magnetohydrodynamic dynamo, Phys. Rev. E, 55:4617-4626 (1997)

[3] A. Kageyama, M. M. Ochi, T. Sato, Flip-Flop Transitions of the Magnetic Intensity and Polarity Reversals in the MHD Dynamo, Phys. Rev. Lett., Vol.82, p.5409-5412 (1999)

[4] A. Kageyama, Y. Tamura, T. Sato, Scientific Visualization in Physics Research by CompleXcope CAVE System, Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol.4, No.4, p.717-722 (1999)

[5] A. Kageyama, Y. Tamura, and T. Sato, Visualization of Vector Field by Virtual Reality, Progress of Theoretical Physics Supplement, Vol. 138, p.665-673 (2000)

[6] Jinghong Li, Tetsuya Sato, and Akira Kageyama. Repeated and sudden reversals of the dipole field generated by a spherical dynamo action, Science, vol.295, 1887--1890 (2002)

[7] Akira Kageyama and Tetsuya Sato, "Yin-Yang Grid": An Overset Grid in Spherical Geometry, Geochem. Geophys. Geosyst., vol.5, 10.1029/2004GC000734 (2004)

[8] 陰山 聡,『コンパスはなぜ北を指すのか?』, 岩波「科学」, vol.77, pp.532-538 (2007)

[9] N. Ohno, A. Kageyama, Scientific Visualization of Geophysical Simulation Data by the CAVE VR System with Volume Rendering, Phys. Earth Planet. Interiors, vol.163, pp.305-311 (2007)

[10] Akira Kageyama, Takehiro Miyagoshi, and Tetsuya Sato, Formation of current coils in geodynamo simulations, Nature, vol.454, pp.1106-1109 (2008)

[11] 陰山 聡, 大野 暢亮,『バーチャルリアリティを用いた対話的 3 次元可視化ソフトウェアの開発とその応用』, プラズマ核融合学会誌, vol.84, No.11, pp.834-843 (2008)

[12] A. Kageyama, M. Kameyama, S. Fujihara, M. Yoshida, M. Hyodo, Y. Tsuda, A 15.2 TFlops Simulation of Geodynamo on the Earth Simulator, Proc. ACM/IEEE Supercomputing SC'2004 conference, (2004), p.35-43

[13] Nobuaki Ohno, and Akira Kageyama, Visualization of Spherical Data by Yin-Yang Grid, Comput. Phys. Comm., vol.180, pp.1534-1538 (2009)

[14] Nobuaki Ohno, and Akira Kageyama, Region-of-Interest Visualization by CAVE VR System with Automatic Control of Level-of-Detail, Comput. Phys. Comm., vol.181, pp.720-725 (2010)

[15] Takehiro Miyagoshi, Akira Kageyama, and Tetsuya Sato, Zonal flow formation in the Earth's core, Nature, vol.463, pp.793-796 (2010)

[16] K. Murata and A. Kageyama, Virtual Reality Visualization of Frozen-in Vector Fields, Plasma Fusion Res., Special Issue, in press

[17] Takehiro Miyagoshi, Akira Kageyama, and Tetsuya Sato, Formation of sheet plumes, current coils, and helical magnetic fields in a spherical magentohydrodynamics dynamo, Phys. Plasmas, in press.