

〔特別講演〕

スーパーコンピュータとバーチャルリアリティで探る地磁気の起源

Geodynamo Simulation and its Visualization by Virtual Reality Technology

陰山 聡・神戸大学 大学院システム情報学研究科 計算科学専攻

Akira KAGEYAMA, Department of Computational Science, Graduate School of System Informatics, Kobe University

Key Words: *Geomagnetic field, Geodynamo, Magnetohydrodynamics, Visualization, Virtual Reality, Immersive Display*

論文要旨

地球は巨大な発電機である。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 10 億アンペアの西向きリング状電流（即ち双極子磁場）を作り出している。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。

1. 地磁気

ある種の動物は、地磁気を感じる器官を持っているらしい。渡り鳥や、海中を長距離移動するサメやウミガメは地磁気を使った「ナビゲーションシステム」を生まれながら持っているようである。太陽や景色の見える渡り鳥はともかく、視界が悪い海の中を移動する海中生物にとって、地磁気が「見える」ことは大きな助けになっているに違いない。

動物や（コンパスを持っている）人間が地磁気を使って方向をすることができるのは、地磁気が双極子型になっているためである。この宇宙に磁気単極子が存在しない以上、双極子磁場は自然界で磁場が取り得る最も単純な磁場である。地磁気がこのような最もシンプルな形状を自分で作りだしているのは考えてみれば不思議なことである。

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実にありがたいことで、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（あるいは、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。

地磁気の特徴は二つある[8]。一つは上に書いたように、ほとんど純粋な双極子磁場であること（そしてその双極子モーメントの向きが地球の自転軸とほぼ平行になっていること）である。そしてもう一つは、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。地磁気の反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いる。一番最近の逆転は約 80 万年前に起きた。タイムマシンに乗って 80 万年前に行けば、コンパスの N 極の針は今とは反対に南を指すであろう。

地磁気の逆転がこれまで何千回となく繰り返し起きたことは間違いない。その証拠はたくさんあるが、最初に見つかった証拠は海洋プレートの記録である。海洋プレートの岩石に含まれる磁性体にそのプレートが生まれた時代の地磁気の向きが記録されているのである。プレートは海嶺と呼ばれる海底山脈で次々と（1 年に 10 センチメートルオーダーの速度で）生み出されているので、磁気テープと同じ原理で、海嶺からの距離に比例して古い時代の地磁気を読み

取ることができるのである。

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。MHD の応用分野として、電離ガスなどの電磁流体を磁場中で強制的に流すことで直接発電するという MHD 発電 (MHD ダイナモ) が知られている。地球外核で起きている現象も本質的にはこの MHD ダイナモである。そこで地磁気の起源を地球ダイナモと呼ぶ。外核の液体鉄の流れは外部から駆動されているわけではなく、システムが自分で生み出した流れ、つまり対流である。対流の駆動源は熱とそれ以外の要因が組み合わさっている。その詳細は未だに不明であるが、いずれにせよ外核内では、対流の運動エネルギーを消費して MHD ダイナモ機構を通じて電流が生み出されており、その電流が（西向きの）リング状に流れているために地球は双極子磁場を持つ。そのため北極が S 極になっている（つまりコンパスの N 極が北を指す）のである。

もしも地球外核の対流が今この瞬間に停止し、MHD ダイナモ機構が働かなくなると、地磁気は外核の電気抵抗によって減衰する。その自由減衰時間 τ を見積もってみると、外核の液体鉄の電気抵抗 η は $O(1) \text{ m}^2/\text{s}$ 、外核の半径 r_0 は $3.5 \times 10^6 \text{ m}$ なので、 $\tau = r_0^2 / \eta = O(10^{13}) \text{ s}$ となる。つまり、地球ダイナモがなければ地磁気は $O(10)$ 万年ほどで減衰してしまう。地球は、その 46 億年の長い歴史の中でかなり若い時代から磁場を持ち続けてきたことが様々な地球科学的なデータから確かとされているので、外核中の電流はこのオーム散逸に対抗するために常に作られ続けているはずである。

2. 地球ダイナモシミュレーション

地磁気の起源を解明するためには地球外核（半径 1200 km から 3500km）内での液体鉄の対流運動と磁場の時間発展、

つまり MHD 方程式を解けばよい。対流時間スケール（ターンオーバータイム）は 1000 年程度であると考えられており、一方、地球の自転は一日に一回転なので、外核の流体運動は自転の影響（回転系で見ればコリオリ力の大きさ）が極めて強い系である。

高速に回転する球殻容器内での MHD 方程式の時間発展を解析的に解くことはできないので、計算機シミュレーションをすることになるが、きちんと解こうとするとそのシミュレーション規模は極めて大きくなるを得ない。液体鉄の粘性率 ν は $O(10^{-7}) \text{ m}^2/\text{s}$ 、磁気拡散率 η は $O(1) \text{ m}^2/\text{s}$ なので、外核のサイズ $L=O(10^6) \text{ m}$ 、速度のスケール V を $O(10^{-4}) \text{ m/s}$ から $O(10^{-3}) \text{ m/s}$ とすると、レイノルズ数 Re は $r_0 V/\nu=O(10^9)$ 、磁気レイノルズ数 Rm は $r_0 V/\eta=O(10^2)$ である。レイノルズ数のこの高さから分かるとおり、地球外核の直接数値シミュレーション (DNS) は不可能である。

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はいくつか考えられるが、そのうちエクマン数 $E=\nu/2r_0^2\Omega$ を使えば、 $E=O(10^{-15})$ である。回転流体系に生じる境界層（エクマン層）の厚さ δ_E は E の平方根で評価されるので、 $\delta_E=O(10^{-1}) \text{ m}$ である。回転流体系の実験や数値計算は、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。その難しさの指標の一つがエクマン数の小ささである。地球ダイナモの数値シミュレーションについては、 Re の大きさだけでなく、 δ_E の薄さからもまた DNS の難しさが分かる。（エクマン層を分解するために十分な計算格子点をとる必要がある。）

従って、現在の計算機を使って地球外核全体を取り込んだグローバルな計算を行って何か意味のある結論を出すためには、何らかの乱流モデルを使って計算するしかない。しかし、問題は、高速回転 MHD 系の適切な乱流モデルが確立していないことである。回転 MHD 乱流の理論研究は進められているが、実験（あるいは観測）が出来ないためにその有効性や適用限界の確認ができない。このような状況の中でどの方向に研究を進めるかは、それぞれの研究者の個性が出る場所であるが、私の立場は、複雑な乱流モデルは使わず、一様一定の（現実の値よりもずっと大きな）粘性率を採用したグローバルな計算を行い、MHD ダイナモの物理的理解を着実に進めていく、というものである。当然 Re や Rm 、 E などの無次元数は現実のものとは大きく異なるが、まずはそのような穏やかなパラメータの下での MHD ダイナモをしっかり理解し、基礎を固めることが重要であると考えている。

3. シミュレーションモデル

地球ダイナモのシミュレーションは、世界中でいくつかのグループが挑戦しており、そのモデルも様々であるが、基本的な部分は同じである。以下では我々のシミュレーションモデルについて説明する[1]。

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_i ）は高温、外側の球面（半径 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、二つの球面は同じ角速度 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、電気抵抗が十分小さければ（磁気レイノルズ数 Rm が十分大きければ）MHD ダイナモ機構によって、磁場が生成される。生成された磁場が十分強くなると、流れ場 \mathbf{B} に働く磁場による力、つまりローレンツ力 $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ が流れに影響を与え、運動エネルギーと磁場のエネルギーが一定のレベルで安定する非線形飽和状態に達する。（ \mathbf{j} は電流密度。）このとき球殻内部で生成・維持されている磁場の一部は球殻外部にしみ出している。

外にしみ出しているこの磁場はポテンシャル磁場であり、一般には複雑な 3 次元形状を持つが、シミュレーションが地磁気を少なくとも定性的に再現したのであれば、そのポテンシャル磁場を球面調和関数展開すれば、数多くのモードのうち双極子成分が卓越したものになっているはずである。なお、ポテンシャル磁場のうち双極子磁場成分とそれ以外の（高い次数の）モードを比較すると、半径の関数としては双極子磁場成分が最も減衰しにくい。（つまりそれほど複雑な磁場も遠くから離れてみれば双極子磁場に見える。）しかし地磁気の場合、この効果を差し引いても双極子磁場が他のモードを圧倒しており、計算機シミュレーションでも、この卓越した双極子磁場の自発的生成と維持という性質は再現できなければいけない。

地磁気のもう一つの重要な性質、地磁気の逆転を再現するためには、さらに計算を続け、卓越した双極子磁場の磁気モーメントが突然向きを反転する現象を再現する必要がある。地球ダイナモシミュレーションの難しさは、高解像度計算が必要であるだけでなく、時間積分を長時間続けなければいけないという点にある。従ってスーパーコンピュータを限界近くまで使った大規模シミュレーションが必須である。

本格的な地球ダイナモシミュレーションは 1990 年代半ばから始まった。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。

1995 年に我々が行った計算では $E=O(10^{-4})$ であった[1]。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）なっていく、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[10]。

4. インヤン格子

地球ダイナモシミュレーションで用いられる空間離散化手法としては球面調和関数を基底関数としたスペクトル法が長年主流であったが、この手法は大規模な並列計算機には向かないので、近年では有限体積法や有限差分法などに基づく地球ダイナモシミュレーションコードが開発されている。

我々は当初から有限差分法を採用していた。はじめに我々が用いていた計算格子は通常球座標に基づく、いわゆる緯度経度格子であった。球座標の極は座標特異点となっているので、緯度経度格子を使った数値計算には主に二つの問題が存在する。一つは極の上の問題、もう一つは極の近くの問題である。

極の上は座標特異点（みかけの特異点）になっているため、MHD 方程式をそのまま差分化するわけにはいかない。そこで我々は、格子点を極の上に置かず半グリッドだけずらして置く方法と、ロピタルの定理を用いて基本方程式（今の場合は MHD 方程式）をみかけの特異点がない形に変形し、それを差分化する方法[1]を用いてこの問題を解決した。座標特異点は本当の特異点ではないので、ロピタルの定理を用いて正しい式にしておけば、数値計算上全く問題ではない。これは球座標に限らず円筒座標などでも同じである。

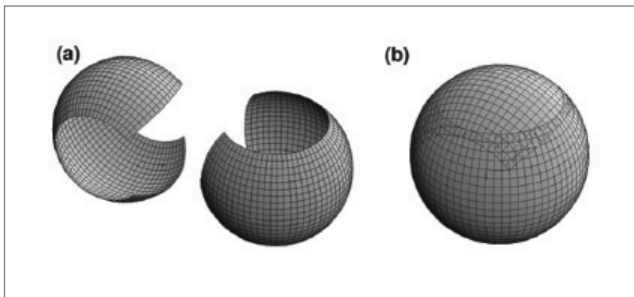
一方、極の近くの問題点は深刻である。極の近くでは経度方向の格子点間隔が極めて短くなるので、そのまま差分化した方程式を陽的に時間積分すると CFL 条件が極めて厳しくなり、非現実的なほど小さな時間ステップをとる必要がある。通常、この問題を回避するためには球面フィルターと呼ばれる一種のローパスフィルターが使われる。球面フィルターで落とすのは経度方向の波で、落とされる経度方向の波数

は緯度に依存し、極に近いほどより低い波数の波がフィルターで捨てられる。実空間で見れば、経度方向の実効的な格子間隔が緯度によらずほぼ一定になるようにフィルターが設定される。

我々は地球ダイナモシミュレーションにおいてロピタルの定理と球面フィルターを組み合わせた方法を用いていたが、このコードを地球シミュレータに移植したところ、球面フィルターのせいでコードの並列化率を上げ難いという問題が生じた。

球面フィルターの並列化は、技術的にはFFTの大規模並列化の問題であったので、がんばれば解決可能であったかもしれないが、そのフィルターを使って CFL 条件を回避するという方法は冷静になって考えてみればかなりの無駄をしていることに気づく。球面を北緯と南緯それぞれ 45 度の緯度を境に高緯度部分と低緯度部分に分けると、球座標の格子点のうち 84%の格子点が高緯度部分に集中し、残りのわずか 16%の格子点で低緯度部分を覆っていることがわかる。球面フィルター法を使ったシミュレーションをしている場合には、MHD 方程式など基本方程式を差分化した式の演算のうち 84%のステップが高緯度領域での計算に費やされ、しかもその結果の大部分の情報を球面フィルターで捨ててしまうという実にもったいないことをしているわけである。

そもそも上述した緯度経度格子の数値計算上の二つの問題（極の上の問題と極の近くの問題）は、どちらも球座標の高緯度部分に存在する問題点である。一方、低緯度部分の領域を見れば、これは数値計算向きの「タチの良い」格子系である。なぜならこれは直交格子であり、格子間隔はほぼ一定



であり、メトリックは球座標のものなので、単純かつよく知られているものだからである。

そこで、球座標のうち低緯度部分（赤道を挟んで北緯 45 度から南緯 45 度までの領域）の格子だけをうまく使って球面全体を覆う計算格子を考案「インヤン格子 (Yin-Yang 格子)」を考案した[7] (上図)。インヤン格子は、複数の要素格子（部分格子）を使って解くべき領域を覆う重合格子 (Overset grid あるいは Chimera grid) の一種である。要素格子同士は境界近くで部分的に重複している。それぞれの要素格子の境界条件はお互いに補間しあうことで設定する。球面上の重合格子には無限のバリエーションが考えられるが、そのうちもっとも単純なものは要素格子の数が最小、即ち二個のものであろう。そして、球面を二つの要素格子で覆う方法もまた無限にあり得るが、その中で最も単純なのは、その二つの要素格子が合同な場合であろう。球面を二つの合同な領域に分割する方法は無限にある。二つの要素に切り分けるので、その境界は球面上の閉じた一本の曲線になっているはずである。球面の合同二分割曲線の身近な例として野球の硬球の縫い目がある。硬球の表面は 2 枚の革を縫い合わせて作ってある。その縫い目に沿ってナイフを入れると 2 枚の革が全く同じ形をしていることがわかる。

重合格子手法では、要素格子同士の重なり合いを最初から仮定しているので野球のボールの革のようにおたがい同士ピッタリとはまるようにする必要はない。数値計算上もっとも都合により形状になるよう重なり合う部分を自由に設

定すればよい。そこで、通常の球座標のうち、緯度方向に赤道を挟んで南北 45 度ずつの領域を切り取り、経度方向には (360 度ではなく) 270 度で切り取った領域を考える。これは球座標の計算空間では長方形の領域であり、緯線と経線にそって格子点を配置すればカーチアンと同じである。これを一つの要素格子とし、まったく同じものをもう一つ用意して、実空間でひねって組み合わせれば球面全体を覆うことができる。これがインヤン格子である。一方の要素格子をイン格子、もう一方の格子をヤン格子と呼んでいる。イン格子とヤン格子が空間的に相補的に組み合わせることで球面全体を覆っているわけで、その形状も相補性のシンボルである陰陽 (Yin-Yang) の図形を思い起こさせることからこの名前を付けた。

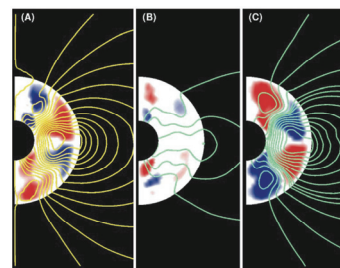
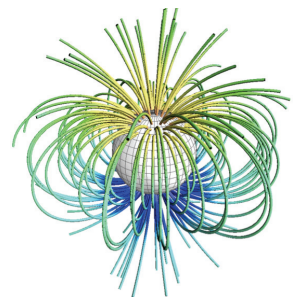
インヤン格子を使ったダイナモシミュレーションコードのベクトル化・並列化手法など技術的な詳細は文献[12]に記述した。ベクトル化は球殻の半径方向にかける。イン格子とヤン格子のそれぞれで水平方向（緯度・経度方向）に 2 次元領域分割化による並列化を行う。それぞれの要素格子で独自の MPI コミュニケータを構成することで MPI 通信を簡略化させる。イン格子、ヤン格子それぞれの水平方向の境界上でのデータは、通常の重合格子手法に従って相互補間で設定する。並列化手法は、ノード内・外ともに MPI である。

インヤン格子はもともと地球ダイナモシミュレーションのために考案したが、この格子はこれまでに、マントル対流、大気・海洋大循環コード、超新星爆発シミュレーション、可視化[13]などにも応用されている。

もしも読者が何らかの問題で、球ジオメトリでの数値計算を必要としており、既に球座標で計算するコードを持っている場合（そして極近くの格子点の集中に困っている場合）は、インヤン格子を試してみることをお勧めしたい。お持ちのコードのソルバが仮定している座標の定義域（緯度方向 180 度、経度方向 360 度）を単に小さくして緯度方向 90 度、経度方向 270 度だけを解くようにそのソルバを変更し、そのルーチンを 2 度 (インとヤン) call するにすればよい。

5. シミュレーション結果

我々は既に 15 年以上も地球ダイナモシミュレーション研究を行ってきた。はじめのころに得られた主な成果をまとめると、米国のグループとはほぼ同時に発表した世界最初の大規模 3 次元地球ダイナモシミュレーションの実施[1]、双極子磁場の自発的生成 (右図) とその物理機構の解明[2]、双極子磁場の逆転現象 (下図) の再現[3,6]などを挙げる事が出来る。



その後、地球シミュレータが使えるようになり、大規模な並列計算が可能となると同時にインヤン格子を使った新しい地球ダイナモシミュレーションコードを開発した。このコードは 2004 年のゴードン・ベル賞を受賞した[12]。これは毎年、世界最速のスーパーコンピュータアプリケーションソフトの開発に与えられ

る賞である。このコードのおかげで、我々は世界最小のエクマン数領域でのMHDダイナモを探求することが出来るようになった。その結果、外核中の対流が薄いシート形状のブルームからなること、生成される電流の3次元構造を詳しく見ると細かい螺旋状になっていること、螺旋状の電流の一部は綺麗なトーラス状（ドーナツ形状）になっていること、シート状の対流構造の外側には帯状の流れが形成されること、などがわかった。これらの詳細については我々の論文[10, 15, 17]をご覧ください。

6. バーチャルリアリティ可視化

地球ダイナモシミュレーションは計算規模が大きいので解析すべき出力データサイズが大きいだけでなく、その種類も磁場、流れ場、渦度場、電流場という少なくとも4つのベクトル場を含む。これら複数のベクトル場の3次元構造とその相互作用を可視化し、解析するには、従来の2次元的可視化手法では限界がある。そこで我々はこれまでずっとバーチャルリアリティ（VR）技術を応用した3次元・対話的可視化手法を自分達で工夫し、必要なソフトウェアを自作しながら解析を進めてきた。上で述べたトーラス状（ドーナツ状）の電流構造はこのVR可視化手法で（VR空間の中で）発見したもので、初めて見たときには実に驚いたものである。

様々な方式のあるVR装置の中で、我々のお気に入りにはCAVEと呼ばれるタイプのVR装置である。この装置のためのVR可視化ツールの開発を我々は10年以上続けており、その多くはVFIVEという名前のソフトウェアに集約している[4,5,9,11,14]。VFIVEは、Vector Field Interactive Visualization Environmentの略であり、その名前が示すようにベクトル場の解析が主な目的である。VFIVEの機能拡張は現在も続けていて、最近では流れに凍り付いたベクトル場の可視化機能を実装した[16]。

CAVEは1990年代前半に米国イリノイ大学シカゴ校で開発されたVR装置である。オリジナルのCAVE装置は、一辺が3メートルほど（10フィート）の立方体の部屋である。その部屋の壁面と床面にステレオ（立体）画像を投影し、3Dメガネをかけたユーザがその部屋に入ると、ほとんどの方向を見ても立体画像に取り囲まれる。ユーザの視点位置と方向は常に測られており、そこから見えるべき映像をリアルタイムで計算（射影）してスクリーンに投影されるので、ユーザはCAVEの床面を自由に歩き回ったり、しゃがみ込んだり、ジャンプしたりしても、常にその瞬間、その位置から見えるべき映像が見える。これをヘッドトラッキングという。このヘッドトラッキングによりCAVEでは極めて高い現実感と没入感が実現される。



神戸大学では2011年6月、日本最大のCAVE装置「 π -CAVE」を導入した。この装置が設置されているのは、神戸市のポートアイランド、神戸大学統合研究拠点である。その建物は、現在世界最速のスーパーコンピュータ「京コンピュ

ータ」のある理化学研究所計算科学研究機構のすぐ隣にある。 π -CAVEは直方体形状で、高さ3メートル、奥行き3メートル、幅7.8メートルである。この大きな空間に6台のステレオプロジェクターと光学式のモーションキャプチャ技術によるヘッドトラッキング技術によって高い没入感を持つVR空間を作り出すことができる。

VFIVEも含めてこれまで我々が開発してきたVR可視化プログラムがそのユーザとして想定していたのは、極端に言えば、ただ一人、そのシミュレーションを実行し、その出力データを解析しようとしている研究者本人であった。つまりVFIVEはもともと純粋にシミュレーションデータの解析を目的としたツールとして開発された。

ところが、VFIVEを様々なデータに適用しその活用範囲を広げていくにつれて、我々は、CAVEを用いた3次元可視化には、もうひとつの重要な役割があるということに痛感するようになった。それは、そのシミュレーションを行った研究者が他の人に自分の研究内容を伝えるため、つまりプレゼンテーション、あるいはコミュニケーションのための道具としての役割である。

CAVE装置の持つ高い没入感とヘッドトラッキングを伴う立体視のおかげで、この装置を使えば、本来難しいはずのシミュレーション内容を専門外の人にも分かりやすく直感的に伝えることができる。これはCAVE装置を体験したことのある人であれば、ほとんどの人が同意してくれるであろう。CAVEの持つ高いVR性能を活用すれば、シミュレーション研究者の研究対象を、それがどんなに高度な理論や大規模なシミュレーション計算の結果で構成されたものであれ、全くの素人が見てもあたかも目の前にそれが本当に浮かんでいるかのように錯覚するほどの現実感を持って「実体化」させることができる。

シミュレーション研究者が、研究対象を分かりやすく伝えるためにCAVE装置を活用するというのはごく自然なことであり、実際、多くの人がCAVE装置の開発された当初から行われていることである。そこに目新しさはない。しかし、スーパーコンピュータの進歩に伴い、以前とは比べものにならないほど複雑で3次元的に込み入った構造を持つデータが生産されるようになったこと、そしてグラフィックス関係のハードウェア性能と、様々なソフトウェアツールが発展・充実してきたため、以前には難しかった「分かりやすく伝えるため」の可視化が比較的容易に実装可能となってきたことから、我々は、CAVE装置を使って「分かりやすく伝えるためのVR可視化ソフトウェア」の開発にも最近取り組み始めたところである。

CAVEを分かりやすく伝えるための道具として使いこなす、さらには研究者自身の発見のための道具としても活用するために我々がまずはじめに取り組んだのは、アプリケーションランチャの機能である。これまでのCAVE装置では、複数のVR可視化アプリケーションがあるとき、それを立ち上げるためには毎回CAVEの部屋を出て計算機端末の前に行き、コマンドを入力する必要があった。これはまるでOSのないPCのようなものである。そこで我々はCAVEのVR空間に居ながらにして、任意のVR可視化アプリケーションを（3次元アイコンを手で触ることで）自由に立ち上げることを可能にする一種のVRアプリケーションランチャ「Multiverse」を開発した。Multiverseは一種のソフトウェアフレームワークであり、ランチャ機能を持つ専用のVR空間「World」が一つと、そこから呼び出される（それぞれ個別の）VR可視化空間「Universe」から構成される。

Multiverseの開発にあたっては、MPEG形式で保存された動画ファイルを読み込み、3次元空間で再現する機能、（CADソフト等で作成された）3Dモデルデータを読み込んでVR空間に表示する機能、スカラーデータを可視化するための3

次元ステレオ高速ボリュームレンダリング機能など新たなツールを開発し、組み込んだ。講演では Multiverse を通じて π -CAVE の中に仮想現実化された地球ダイナモシミュレーションデータ (左図) を動画で紹介する予定である。

7. まとめ

双極子磁場の自発的な生成とその逆転という地磁気の重要な性質は少なくとも定性的には計算機の中で再現することができた。ただし、それは直接数値計算ではなく、地球外核の物性に関する無次元パラメータのいくつかは現実のものとは大きく異なる値で計算せざるを得ないのが現状である。地球ダイナモシミュレーション研究の最終目標は『次の地磁気逆転はいつ起きるか』を予言することだと思う。だが、それが可能になるのはまだ当分先のことになりそうである。

謝辞

地球ダイナモシミュレーション研究は、佐藤哲也教授の御指導の下、博士論文の研究テーマとして始めたものである。その後、Marcia M. Ochi 博士、Jinghong Li 博士、宮腰剛弘博士との共同研究を通じて得られた成果についてここにまとめた。バーチャルリアリティ (VR) 可視化ソフト VFIVE は、大野暢亮博士との共同開発の成果である。VR ソフトフレームワーク Multiverse は、山浦優気君をはじめとする神戸大学の私の研究室の共同開発の成果である。

本研究の一部は、科研費 (23340128)、山田科学振興財団、大川情報通信基金の補助を受けた。

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 magnetohydrodynamics dynamo, Phys. Plasmas, in press.