



研究論文

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

陰山 聡, 大野 暢亮

海洋研究開発機構地球シミュレータセンター

(原稿受付: 2008年7月25日 / 原稿受理: 2008年10月2日)

CAVEと呼ばれる方式のバーチャルリアリティ装置を利用した3次元可視化ソフトウェアを開発した。このソフト「VFIVE」はプラズマ・核融合シミュレーション用の可視化ソフトウェアとして出発し、10年近くにわたる開発の結果、複雑な3次元構造を持つ一般的なスカラー・ベクトル場を解析するための汎用ツールとして実用上十分なレベルに達した。CAVE装置の持つ優れた対話性と没入感を可視化に応用するために開発したVFIVE独自の可視化機能を紹介する。また、最近主流になりつつあるPCクラスター型のCAVE装置へのVFIVEの移植についても報告する。

Keywords:

CAVE, Virtual Reality, Visualization, VFIVE

1. はじめに

複雑な構造とダイナミクスの解析が求められるプラズマ現象の計算機シミュレーションにおいては、新しい可視化技術の導入が常に求められている。プラズマのシミュレーション手法としては比較的単純なMHDシミュレーションでさえ、それが大規模計算の結果であれば特に効果的で効率的な可視化が研究の鍵となる。解析すべき3次元データがただ一種類のスカラーデータであれば（その分布がある程度複雑なものであっても）、市販の可視化ソフト等を使えば比較的容易にその構造が把握できる。スカラー場の可視化手法としては、等値面表示やボリュームレンダリングなど、効果的な可視化アルゴリズムが既に多数開発され、市販ソフトでは、それらの可視化手法をマウスとウィンドウシステムに基づく洗練されたグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）を通じて容易に適用できるからである。

スカラー場と比較すると、ベクトル場の可視化手法はそれほど豊富ではない。よく使われるのは流れに乗った粒子の動きを可視化する「パーティクルトレーサー」や、各位置におけるベクトルの向きに沿って曲線を積分する「力線表示」などである。

一般に、ベクトル場の可視化は難しいものであるが、3次元MHDシミュレーションデータを可視化しようとした場合、少なくとも速度場 $\mathbf{v}$ と磁場 $\mathbf{B}$ という二つのベクトル場を同時に解析する必要があるので、可視化はさらに難しくなる。しかも電流密度場 $\mathbf{j}$ や渦度場 $\boldsymbol{\omega}$ など、他のベクトル場の可視化も現象の理解には不可欠である場合が多い。それらを同時に解析し、相互関係を直感的に把握すること

は通常の可視化ソフトの手に余る。

3次元ベクトル場の可視化が難しい根本的な要因は、可視化手法の種類や洗練さに問題があるのではなく、むしろ表示装置やユーザーインターフェースに関する可視化ハードウェアの部分にあると我々は考える。

例えば、3次元磁場の数値がデータとして与えられたとき、PC上でのマウスに基づくGUIでは磁力線の出発点の3次元的な位置を正確に指定することは困難である。ここで「正確に指定する」というのは、出発点の3次元空間における座標値 (x, y, z) を数値的に指定するという意味ではない。（そのような機能は市販の可視化ソフトなどには組み込まれている。）例えば、3次元データの中で磁場のエネルギー密度が集中している二つの隣接領域があり、その中点での磁場を解析したい、という状況を想定しよう。3次元のシミュレーション空間中で「ココとココのちょうど真ん中」を磁力線の出発点として指定するためには、マウスを使った通常の2次元GUIは難しく、できたとしても効率が悪く、3次元データの可視化には空間情報、位置関係の直感的な把握と指定を可能にする新しい技術の導入が不可欠であり、その鍵が近年急速に発達しているバーチャルリアリティ（VR）技術であると我々は考える。

VRとは、コンピュータグラフィックスの手法を用いて計算機の中に構成した仮想的な世界を、立体画像投影装置を介して、あたかもそれが実在する世界であるかのように提示する技術である。仮想的な世界には、現実世界と同様にモノがあり、照明がある。光によってモノが照らされることで、その形や大きさ、質感を視覚を通じて把握することができる。ここまでは通常のコンピュータグラフィック

スと同様だが、VRでは画像が立体的に表示されることが大前提である。立体画像により奥行き方向の情報も把握できる。(視覚以外にも、聴覚や触覚などを用いるVRがあるが、可視化とは無関係なのでここではふれない[1].)

VRでは立体視に加えて対話性と没入感も重要な要素である。仮想世界が本当にそこに存在するかのように感じるためには、その世界が立体的に見えるだけでは不十分で、現実の世界と同様に、観察者がその世界とやりとりできなければいけない。つまり、仮想世界から観察者への一方通行ではなく、観察者が仮想世界のモノを動かしたり、変形させたり、新たにモノを作ったりすることができなければいけない。これが対話性である。

没入感とは、現実世界と同様に、観察者がその世界に入り込んでいるという感覚、自分がその世界の一部であるという実感である。この没入感を醸成する上で重要となるのは、広い視野角である。IMAXと呼ばれる大画面で動画を見ると、自分がその映像の世界に入り込んでいるような感覚を味わえる。全く同じ動画をパソコンのモニタ画面に映し出しても、同じような没入感は得られない。その違いは画像の視野角にある。一般に広い視野角で映像を見ると高い没入感が得られるが、それが立体映像であればなおさら高まる。

VR装置では、観察者の視点(頭の位置)をリアルタイムに検出する(ヘッドトラッキングと呼ばれる)技術が用いられる。観察者が仮想世界の中で(仮想的に、あるいは実際に)自分の体を動かすと、各瞬間、その位置から、その観察者が目を向けている方向に見えるべき映像が自動的に投影される。このヘッドトラッキングにより、さらに高い没入感が実現される。

上に述べたVR環境を実現するための様々なハードウェアシステムがこれまでに開発されてきた。その中でも最も高いクオリティをもつVRを実現するのがCAVE[2]と呼ばれる方式のVR装置である。CAVEシステムはイリノイ大学シカゴ校において開発され、1993年に発表された。その中心部は、一辺が10フィート(場合によっては3メートル)の大きな立方体の部屋である(図1)。部屋の正面、右、左の壁面、及び床は全てスクリーンになっている。壁面スクリーンには背後から、床に対しては天井からステレオブ



図1 標準的なCAVE装置の外観。3つの壁面と床面と立体画像が投影されるスクリーンになっている。これは地球シミュレータセンターのCAVE装置「BRAVE」の写真である。

ロジェクタで映像が投影される。これらの4つのスクリーンに投影された画像は滑らかに、ほとんど切れ間なくつながっている。体験者は立体眼鏡をつけ、後で説明するワンドと呼ばれる小さなコントローラを手を持ってこの部屋の中に立つ。立体映像の広い視野角が常に維持されているので、その没入感が高い。さらに立体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。その視点情報を元に、スクリーンに投影される画像をリアルタイムに調整するので、体験者がCAVEの部屋の中を自由に歩き回ったり、しゃがみこんだりしてもよい。

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、あるいはスクリーン同士の同期など、VRを実現する上で必要となる最も基本的な処理は、CAVEシステム用に開発されたCAVELibと呼ばれる基本ライブラリ(API)が自動的に処理する。

CAVEの特徴である高い没入感と現実感を生かす応用分野は数多く考えられるが、3次元データの可視化は最も中心的で重要な応用テーマであろう。実際、CAVE開発のそもそもの動機はサイエンティフィックビジュアライゼーションにあった[2]。

1993年に発表されて以来、CAVEは現在では世界中に広く普及し、国内だけでも20台以上のCAVE型VR装置が導入されている。その中でもプラズマ・核融合コミュニティは、CAVE装置の導入と活用に積極的で、既に1997年に核融合科学研究所で、サイエンティフィックビジュアライゼーション用のCAVEとしては日本で最初のCAVEシステムCompleXcopeが導入された。

我々はCompleXcopeの導入以来、そのアプリケーションプログラムの開発を行ってきた。最初に作ったCAVE用の大規模な可視化プログラムはVirtual LHDである[3](図2)。これは、MHD平衡コードから得られたデータに基づき、磁力線や粒子軌道などを表示させる機能を持ったソフトである。CompleXcopeの見学者に見せるデモプログラムとしても長年利用されている。

我々はVirtualLHDの後にもいくつかCAVE可視化ソフトを開発したが、異なる種類のシミュレーションデータ毎に一つ一つソフトの開発を続けているうちに、汎用プログラムの必要性を痛感するようになった。このような経緯から開発を始めたCAVE用3次元可視化ソフトがVFIVEである[4]。VFIVEは現在、地球シミュレータセンターのCAVE装置上で、開発が続けられている[5-7]。

現在ではCAVEで利用できる市販の可視化ソフト(AVS/Express, vGeo, EnSightなど)が存在するが、これらは一般に高価であるだけでなく、その多くは元々PCやグラフィックワークステーション(GWS)などの通常の2次元モニタ画面で使用することを想定した可視化ソフトをCAVEに移植したものであるため、CAVEの持つ立体的かつ対話的なユーザーインターフェース機能を十分に生かしていない。一方、VFIVEは当初からCAVEでの3次元・立体的な可視化をするためのプログラムとして開発し、VR用の基本APIとしては上述のCAVELibを、そして

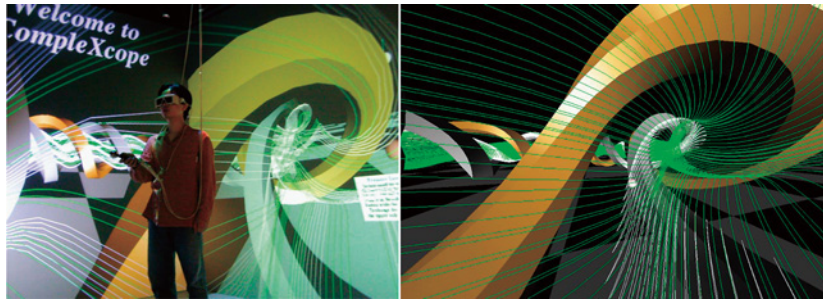


図2 我々が最初に開発した CAVE 装置用の可視化ソフトウェア「Virtual LHD」. MHD 平衡コードから得られた磁場データに基づき、対話的に磁力線の出発点を指定したり、粒子軌道追跡を開始したりすることができる。

コンピュータグラフィックス用の基本 API としては OpenGL というどちらも最も基本的なライブラリのみ用いているので、その移植と拡張が容易という利点がある。

自分たちのシミュレーションデータを可視化するために開発した VFIVE であったが、長年の開発によってその性能が向上するとともに CAVE ハードウェアが世界中に広がりつつある現在、VFIVE を広く世界中に公開する意義は十分にありと判断し、最近、基本的バージョンから順次公開を始めた[8]。

現在のところ地球シミュレータセンターの CAVE 装置は原則として一般には公開していないが、核融合科学研究所の CAVE 装置 CompleXscope も含めて VFIVE がインストールされた CAVE は後述するように国内に増えつつあるので、本論文の読者が VFIVE を使って自らのデータの解析する機会は増えている。また、VFIVE はシミュレーションデータの可視化用に開発されたソフトであるが、入力データとして一般的なファイル形式を設定しているので、シミュレーションデータに限らず観測データや実験データ、あるいは解析的に定義したデータなども表示し、解析することが可能である。

本論文の目的は、現在も開発中の VFIVE の最新の可視化機能を紹介すること、そして、最近行った PC クラスター型 CAVE 装置用の VFIVE の開発について報告することである。

2. 関連研究

我々は、スーパーコンピュータを用いた大規模な計算機シミュレーションからの出力データを、3 次元かつ対話的に可視化・解析するために、VR 技術のポテンシャルをフルに活用したいと考えている。この章では、VR を使ったサイエンティフィックビジュアライゼーションソフトの開発に関する先行研究について、我々の VFIVE との違いに重点をおきながら紹介する。

1993年に発表された Cosmic Explorer[9]は、宇宙構造形成シミュレーションの結果を BOOM と呼ばれる VR 装置で立体的・対話的に可視化するソフトである。あらかじめ用意しておいた異なる解像度のデータを表示時に切り替える機能や、解析する空間領域を対話的に選択する Region-of-Interest と呼ばれる機能が実装されていた。ただし、可視化の対象とするデータは宇宙構造形成シミュレーションに

限定されており、VFIVE のような汎用性はない。また、流体データの可視化ソフトではないので、流線やパーティクルトレーサーのような 3 次元のベクトル場を可視化する機能 (VFIVE が重点を置いている機能) は含まれていない。

CAVEVis[10]は、CAVE 用のサイエンティフィックビジュアライゼーションソフトとしては最も早く開発されたものの一つであり、1997年に発表された。大規模な CFD (Computational Fluid Dynamics, 数値流体力学) シミュレーションデータの可視化に重点を置いている点で、VFIVE に近いソフトである。基本的な可視化機能としてパーティクルトレーサー、等値面などが実装されている。その特徴は、CAVE での高速な可視化とアニメーションを実現するためにレンダリングプロセスや計算プロセスを別の計算機で分散処理するというデザインになっていることである。VFIVE も大規模なシミュレーションデータの可視化を目的としたソフトなので、パーティクルトレーサー、等値面、アニメーションなどの基本機能は CAVEVis と共通する。一方、VFIVE には後述する "Local Arrows" や "Spotlight Snow", ボリュームレンダリングなど、より豊富な可視化機能が実装されている。また、レンダリングや可視化アルゴリズムに関する計算処理等の計算を全て同じ CAVE のマシンで行う点で、VFIVE と CAVEVis は異なる。現行バージョンの VFIVE では 17GB 以上もの大規模なデータの可視化にも対応している。CAVEVis が扱える最大データサイズは不明であるが、開発時期を考慮すればこれほど大規模なデータには対応していなかったであろう。

CFD タイプのシミュレーションデータを CAVE で可視化するためのソフトウェアとして有名なものに CAVE5D がある。これは大気シミュレーションのコミュニティで使われていた Viz5D という可視化ソフトをベースに CAVE に移植したもので、等値面や断面、流れベクトルの表示機能などが実装されている。VFIVE は可視化機能の豊富さとユーザーインターフェースの点で CAVE5D よりも勝っていると考えているが、それは VFIVE が当初から CAVE での利用を考えてコーディングしたものであるのに対し、CAVE5D はパソコン等のモニタ画面上でのマウス=ウィンドウシステム (GUI) による 2 次元的なインターフェースに基づく可視化ソフトを移植したためであろう。例えば断面の位置 (スライスする場所) などの可視化パラメータを指定するのに CAVE 5D ではメニューパネルを使わなけれ

ばならないが、一方、VFIVEではCAVEの空間内で手を動かすことで直感的にスライス面を移動・指定することができる。また、CAVEの特性を生かした対話的なベクトル場の可視化手法を実装している点がVFIVEの特徴である。CAVE 5DはVR可視化の機能を充実させる方向には進まず、ネットワーク機能を組み込んだ遠隔協調環境を構築するためのベースとして発展しており、そのソフトはCAVE 6Dと呼ばれている。

3DIVE[11]はCAVEでのボリュームレンダリングを実現するソフトウェアである。その目的はX線CTやMRIなどで得られる3次元スカラー場としての医療データをCAVE内部で効率的に可視化するところにある。したがってVFIVEのようにベクトル場を可視化する機能は備えていない。なお、ボリュームレンダリングはスカラー場の可視化機能の一つとしてVFIVEにも実装されている。

シミュレーションデータの可視化プラットフォームとしてCAVEは極めて有効であるが、それはCFDタイプのシミュレーションに限らない。もう一つの有効な応用分野として分子動力学(MD)シミュレーションデータの可視化がある。CAVEの対話的なVR環境をうまく活用している可視化ソフトとしてMolDRIVE[12]がある。分子に働く力の強さと向きを仮想的な3次元バネの変形を通じてリアルに、そしてリアルタイムに表現する。CAVEの提供する高品質のVR環境をフル活用したいという意図が強く感じられる。この意味でVFIVEと目標を共有している貴重なVR可視化ソフトである。

プラズマ・核融合の分野とは直接には関係がないが、現在のVFIVEのユーザの多くが属する地球科学におけるCAVE可視化ソフトとして文献[13]と[14]がある。Linらのソフト[13]は石油産業での活用を想定し、3次元の地形や地震波データを対話的に可視化する機能を備えているが、VFIVEのような汎用性はない。文献[14]は、観測データの収集からその解析までの地球科学研究における一般的なワークフローをCAVEの中で行うという試みについて記した論文である。そのカバーする対象は、建物スケールの構造物から山や谷などの地形、さらには全地球スケールのデータまで幅広い。その重点は、あらかじめ定義されている3次元物体をCAVE空間中で高速に立体表示させるという点にある。一方、VFIVEでは、3次元数値データから様々な手法を通じて可視化物体を構成しつつ表示し、数値データに潜む情報を引き出そうとするのが目的である。

サイエンティフィックビジュアライゼーションへのCAVEの応用の面白い例として、Kalherらのソフト[15]がある。ここでは宇宙構造形成シミュレーションのデータからテレビで配信するほどの高品質なアニメーションを作成するにあたり、そのカメラ位置の軌道(カメラパス)の設定にCAVEを使っている。

3. VFIVEの機能とMHDデータへの応用

最新のVFIVEの様々な可視化機能を紹介するために、MHDシミュレーションデータの解析にVFIVEを利用した場合の可視化シナリオを一つの例として提示する。この

データは、地球のコア内部でのMHDダイナモ(地球ダイナモ)を地球シミュレータで計算した結果である。

立体視のための眼鏡をつけたユーザがCAVEの部屋の中に立つ(図3)。手には“ワンド”と呼ばれるコントローラ(3次元マウス)を持っている。ワンドの左ボタンを押すと、ワンドの先端から長い(仮想的な)レーザービームが放出され、同時にユーザの目の前、2メートルほどの空間に(仮想)メニューパネルが現われる(図4)。解析する対象となるベクトル場の名前が記されたメニューパネルをレーザービームで打ち抜くことで選択し、次にそのデータに適用する可視化手法をレーザービームで選択する。

ここではまず、可視化手法としてパーティクルトレーサーを選ぶ場合を想定する。“Particle Tracer”と表示されたメニューパネルを打ち抜く(図4)ことで、その可視化手法が選択される。選択後、ワンドについているボタンの一つを押すと、ワンドの先端から今度は短いビームが現われる(図5左上)。

このビームはワンドの向いている3次元的な方向を常に指すようにプログラムされており、ユーザが手に持ったワンドを素早く振り回してもビームは常に、まるで光のサーベルのようにその手の動きに追従する。このビームの先端はトレーサー粒子の出発点である。押し続けていたワンド

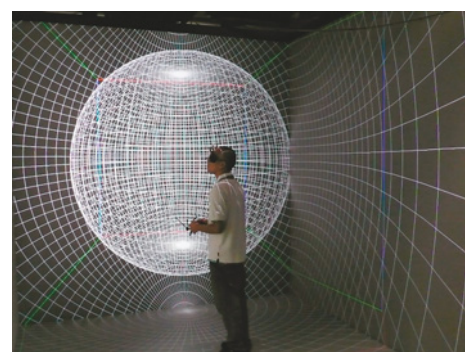


図3 CAVE用可視化ソフトウェアVFIVEプログラムを立ち上げた直後のスナップショット。ここで解析しようとしているデータは地球ダイナモの3次元MHDダイナモシミュレーションのデータである。シミュレーションの境界(二つの球面)がメッシュ状に表示されている。

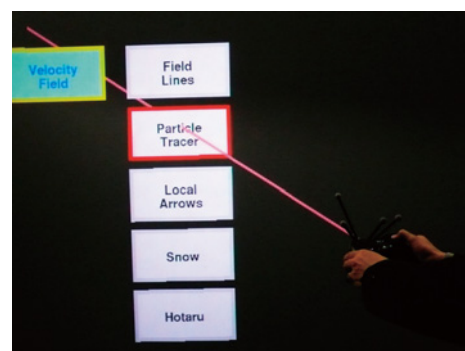


図4 VFIVEのインターフェース。仮想レーザービームと仮想メニューパネルを使って可視化する対象の場と適用する可視化手法を選択する。ここではトレーサー粒子による流れ場の可視化を選択している。

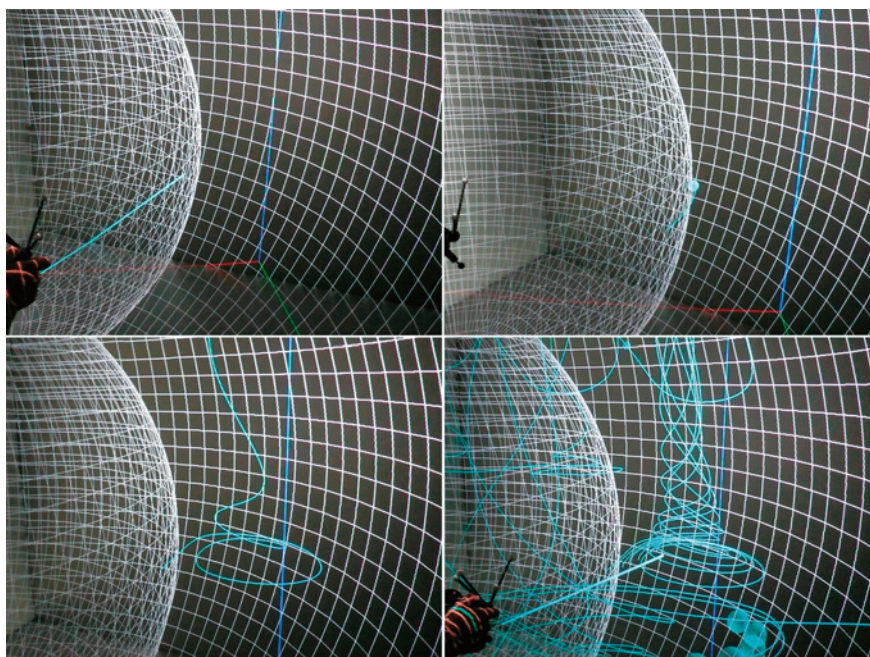


図5 VFIVEでトレーサー粒子を放出する様子。左上に示されているワンド（手に持ったコントローラ）の先端から出るビームの先端がトレーサー粒子の出発点を示す。トレーサー粒子が流れ場に従って動くにつれ、その後に流跡線が描かれる。

のボタンを離すと、ビームの先端にトレーサー粒子（半径約3センチの球）が現われ、すぐにこのトレーサー粒子は流れ場に沿って“飛んで”いく（図5右上）。この時、VFIVEの内部では、Runge-Kutta法で粒子の軌道を積分している。積分の各ステップで、粒子の中心点位置における速度ベクトルの値はデータが定義されている周囲の空間格子点上での速度ベクトルの値から補間して求めている。飛んでいく粒子はその後方に（飛行機雲のように）航跡曲線を常に残すようにしているので、たとえ粒子が高度に複雑な運動をしたとしても、その3次元的な軌道形状をCAVEの没入的立体視環境の下で正確に把握することができる（図5左下）。

VFIVEを利用する場合、ベクトル場の解析のためにトレーサー粒子を一つだけ放出することはむしろ稀で、手に持ったワンドを少しずつずらしながら、ワンドのボタンをカチカチと続けてクリックすることで、新しいトレーサー粒子を次々と放出させるのが普通である（図5右下）。こうすると、沢山のトレーサー粒子が始めは群となって目の前の空間を飛んでいくが、しばらくすると、出発点（初期条件）が微妙に異なるために、それぞれの粒子が異なる軌道を描き始め、次第に離れ離れになっていく様子を観察することができる。その中でどれか一つの粒子が、しばらく飛んでいった先で仮に興味深い運動の変化（例えば突然の加速）を見せた場合、その点の空間領域周辺には興味深い流れ構造が存在する可能性が高い。そこで、ユーザはCAVEの部屋の中で文字どおり「歩いて」その領域に近づき、手を延ばして狙いを定め、再び「カチカチ」とワンドボタンをクリックする。こうして別のトレーサー粒子群を放出することで、その周辺の流れ場構造を集中的に、詳細に観察できる。このように、VFIVEを用いたデータの解析はCAVEの持つ最大の特徴である対話性を十分に生かした可

視化操作を可能とするよう設計してある。ワンドの別のボタンをクリックすることで表示されているトレーサー粒子とその航跡曲線は消去される。

この"Particle Tracer"は速度場の可視化に便利な手法であるが、これと似た可視化手法として"Field Lines"がある。これは磁場でいえば磁力線を作る可視化手法である。"Particle Tracer"と"Field Lines"は、可視化手法として目的も機能も近い。"Field Lines"もワンドの先から出るビームの先端を出発点として曲線の積分が始まるが、"Field Lines"ではベクトル場に正方向と負方向の両方向に積分をしていく点と、積分にあたり、曲線の先端を示す球の移動速度が常に一定になるよう設定されている点が"Particle Tracer"と異なるだけである。

次にメニューから"Ortho Slicer"を選択し、断面図表示を見てみる（図6）。ここに示したデータは対流による渦度の自転軸方向成分の断面分布である。断面の位置（スライス面）をコントロールするにはワンドを上下に動かせばよい。ワンドのボタンを押せば、目の前に小さな「箱」が現れる（図6左）。この箱は、現在読み込んだデータ領域全体を示す。箱の中には現在選択されているスライス面の位置も表示されている（黄色のメッシュ）。ボタンを押しながら手を上下に動かすと箱の中のスライス面がそれについて上下に動き、ボタンを放した瞬間にスライス面の位置が確定し、その位置での断面図が表示される（図6右）。

次にメニューから"Isosurface"（等値面）を選択する。サブメニューパネルから先ほどと同じ物理量（渦度の自転軸方向成分）を選択すると、目の前に複数の円錐で構成された3次元物体が現れる（図7）。これは等値面のレベルを調節するためのインターフェースである。"Ortho Slicer"と同様にワンドを持った手を上下に動かすことで等値面の値を直感的に指定することができる。

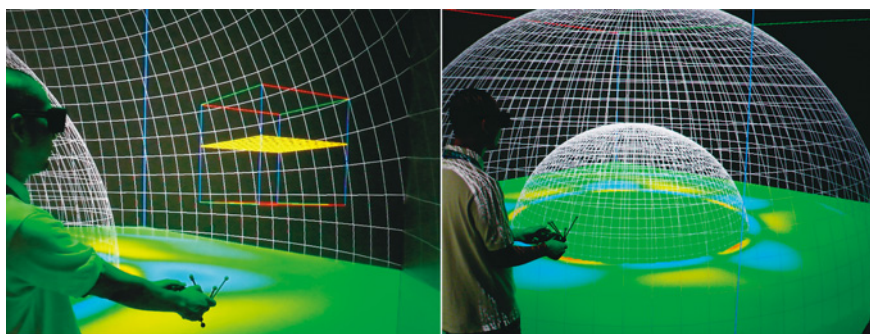


図6 VFIVEにおけるスカラー場の可視化手法の一つ“Ortho Slicer”(断面表示). 左の図中の黄色のメッシュ面を含む立方体は、スライス面を対話的にコントロールするためのユーザーインターフェースである。手に持ったワンドを上下に動かすにつれて黄色のメッシュが上下に動き、スライス面を決定する。



図7 VFIVEの等値面表示機能“Isosurface”. ピンク色の物体は地球ダイナモシミュレーションで得られた対流の渦度場のある成分の等値面である。この図の右の方に浮かんでいる青色と黄色の円錐(の集合)物体は、等値面のレベルをコントロールするためのユーザーインターフェースである。ワンドを上下に動かすと、黄色の物体がそれに従って上下する。その高さが等値面のレベルを決める。

ベクトル場を可視化する方法としてVFIVEには“Local Arrows”という名前の3次元的な矢印オブジェクトを表示させる機能が実装されている(図8)。これは、ワンドの先から出た短いビームの先端を中心に半径1メートルほどの球領域内部における(あらかじめメニューで指定した)ベクトル場を、3次元的な矢印オブジェクトで表現する手法である。矢印オブジェクトは合計数十個から数百個生成され、それぞれの矢印の向きと長さがその位置におけるベクトル場の強さと向きを表す。この可視化機能の特徴は、矢印群の位置がビームの先端の動きについて動き、各矢印がリアルタイムに伸縮・回転することである。図8では渦度の強い領域で赤道面付近の下から少しずつビームの先端を上動かして周囲の流れ場を観察している様子の連続写真である。解析しているベクトル場空間中の注目している領域、解析したい場所の近くでゆっくりと手を動かすと、場合によっては矢印達がクルクルと踊るようなダイナミックな動きを見せることもある。手を動かしながらその動きを観察することで複雑な3次元ベクトル場の構造も直感的に把握することができる。このような可視化手法はPC画面の2次元的な装置では実現できないVR可視化に特有のものと言えるであろう。

もう一つ、ベクトル場の特徴的な可視化手法として“Spotlight Snow”がある(図9)。これはワンドの先端から前

方に円錐状にスポットライトが放射されていると想定し、そのライトに照らされた領域内部に数百個から数千個のトレーサー粒子を表示させる手法である。雪の降る夜、街灯に照らされた雪片が風に舞う様子を見てこの可視化手法を思いついたことからこの名前をつけた。

ここまで述べたVFIVEの機能と可視化手法は基本的には以前からVFIVEに実装されていたものであるが、以下は最近VFIVEに付け加えた新しい可視化機能について述べる。

ボリュームレンダリング：等値面表示は3次元のスカラー場を可視化する方法として有力であるが、この手法は本質的にある特定の値の分布しか一度に表示できない。この欠点を補うスカラー場の可視化手法としてボリュームレンダリング[16]がある。ボリュームレンダリングとは、transfer functionと呼ばれる関数によってスカラー場の各点の値に色と透明度を対応させ、視線方向にその値を積分することで、半透明な(色つきの)気体が空間に漂っているかのように表示する手法である。我々は3次元テクスチャマッピング法と呼ばれる手法を使うことで、CAVE内でボリュームレンダリングを実現することに成功し、これをVFIVEに組み込んだ[7]。図10は渦度の軸方向成分(図6と図7で解析したのと同じ量)をボリュームレンダリングで可視化したものである。ボリュームレンダリングによって可視化された半透明の緑色から黄色の領域が渦度の強い領域を示す。なお、この図は、後述するPCクラスター版のVFIVEを使い、中央大学理工学部土木工学科榎山研究室に設置されたCAVE型VR装置(HoloStage)で可視化したスナップショットである。

LIC (Line Integral Convolution) 法：ベクトル場の可視化手法としてLIC法と呼ばれる手法がある[17]。これは、ある特定の面上に分布するベクトル場を、その面上に張り付いたパターン(縞模様)で表現する方法である。縞の走っている方向がベクトル場の向きを表す。ベクトル場の向きの分布を一目で把握することができるのがこの手法の特徴である。最も基本的なLIC法では、ベクトルの強さの分布を表現することはできないが、色を使うなどの工夫でそれも可能になる。また3次元的なLIC法も研究されているが、現在のVFIVEには最も基本的な2次元LIC法が実装されている(図11)。LIC法を適用する面はx, y, zの3

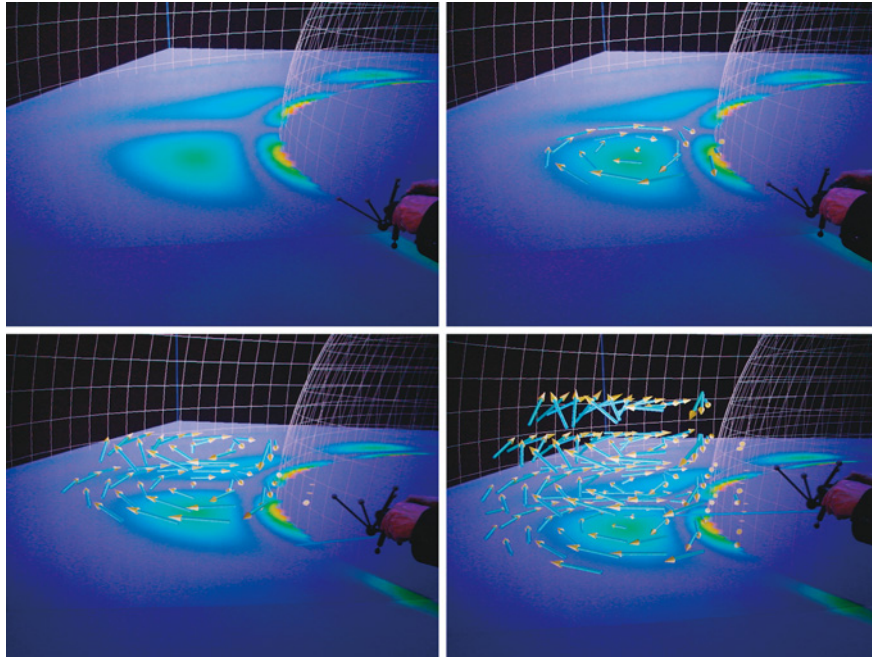


図8 VFIVEのベクトル場可視化機能“Local Arrows”. 多数の3次元矢印物体がワンドの先端から出る短いビームの先端を中心とした球領域に現れる。ワンドの向きを少しずつ変え、ビームの先端を動かすと、矢印群はそれについて動く。各矢印が、その瞬間、その場所における可視化対象として選んだベクトル場の向きと強さを表現する。

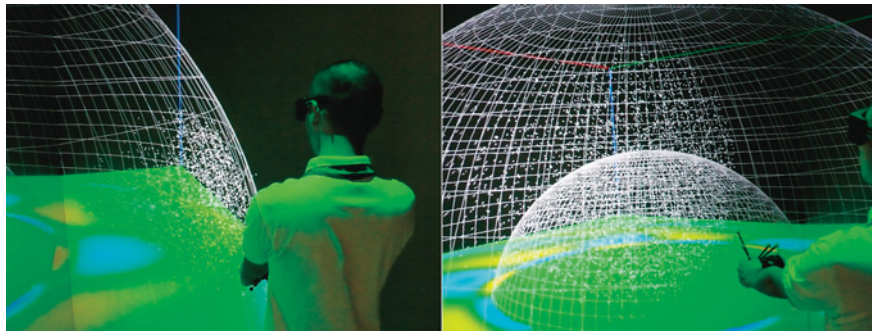


図9 VFIVEのベクトル場可視化機能“Spotlight Snow”. ワンドの先から円錐状に仮想的なスポットライトが放射され、その領域内部に多数のトレーサー粒子が飛ぶ様子を観察することで直感的に速度場の様子を把握することができる。スポットライトの向きは自由に変わることができる。

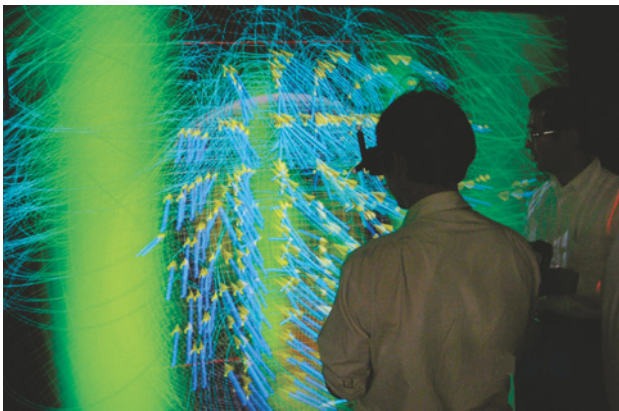


図10 VFIVEに実装されたボリュームレンダリング（緑色から黄色）。この可視化スナップショットでは“Local Arrows”と“Tracer Particles”も同時に使われている。なおこの写真は中央大学のCAVEシステム(HoloStage)で撮影したものである。

つの軸に垂直な任意の面を選ぶことができ、その位置は“Ortho Slicer”と同様なインターフェースにより、ワンドを使って直感的に指定することができる。

“Tracer Particle”や“Field Lines”の可視化を使っているときにしばしば問題となるのは、軌道や力線を示す曲線に太さがないために立体感が不足することである。この問題を解決するために我々は、曲線をチューブ状の3次元物体で表現する機能も選択できるようにした。図12はこの機能を使って、磁力線（ピンク色）と電流場の力線（電流線、水色）を表示したものである。この図ではチューブの色と太さは一定で、場の種類によって色が違うだけだが、各点の場の強さによって色や太さを変化させたチューブ表示機能も実装してある。

最後に可視化手法そのものではないが、可視化ソフトとしてのVFIVEの有用性を高める上で極めて重要な最近のVFIVEの改良点について簡単にまとめる。

上に述べた様々な可視化手法は、ある時刻のシミュレー

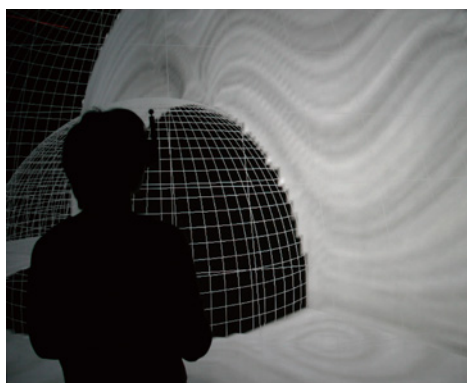


図11 VFIVE に実装された Line Integral Convolution (LIC) 法による流れ場の可視化。LIC 法を適用するスライス面の位置はワンドを動かすことでコントロールできる。

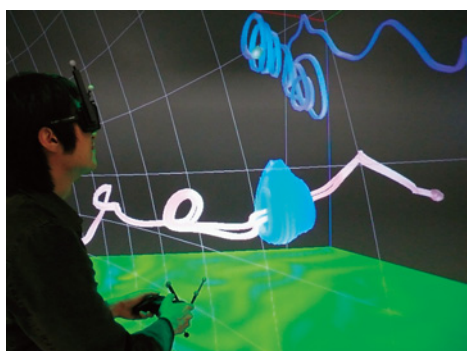


図12 チューブ状に表示された磁力線（ピンク色）と電流線（水色）。観察者はシミュレーション領域の内側球面（地球の内核）の内側に立って地球ダイナモデータを解析している。

ションデータを解析するためのものであったが、最近、我々は時間発展データを CAVE 空間内で解析する機能、即ちアニメーション機能を VFIVE に組み込んだ。

また、高解像度データのある特定の小領域を集中的に解析するための Level-of-Detail と呼ばれる機能も実装した。これについては現在論文を準備中である。

VFIVE に実装されている可視化手法の一部には計算コストの高い（つまり時間のかかる）ものがある。我々はそのような可視化のための演算処理を加速するために VFIVE に OpenMP を使った並列化を施した。このような並列化は CAVE で使う計算機に複数のプロセッサがある（実際上ほとんどの CAVE システムではそうなっている）場合に有効である。

4. PC クラスター型 CAVE システム用 VFIVE の開発

1993年に CAVE システムが発表されて以降、壁面と床面がスクリーンになった部屋の中にトラッキングシステムと結合された立体眼鏡をかけたユーザが立つという CAVE システムの構成に基本的には変わらないが、そこで使用されるプロジェクタや計算機の構成と性能はこの15年間に大きく変化した。当初の CAVE 装置では、単体の UNIX グラフィックワークステーション（GWS）をベースにしたシステム構成であったが、パーソナルコンピュータ（PC）の

CPU とグラフィック・プロセッシング・ユニット（GPU）の性能、そしてメモリ容量の向上から、現在では PC クラスターをベースにした CAVE システムが数の上では主流となっている。

我々はこれまで SGI 社製 GWS による単体 GWS 型の CAVE 装置の上で VFIVE の開発を行ってきた。そのため VFIVE は PC クラスター型の CAVE 装置には対応していなかったが、PC クラスター型 CAVE 装置が広く普及している現状から、PC クラスター型 CAVE 装置にも対応した VFIVE、即ち PC クラスター版 VFIVE の開発を行うことにした。なお、この章で報告する PC クラスター版 VFIVE の開発作業とテストは、大阪大学の CAVE システム "HOPE"[18]で行った。

HOPE は 4 面のスクリーンを持つ CAVE システムである。立体画像の構成には偏光方式が採用されている。スクリーンは、正面、右面、左面、床面の 4 面である。全てのスクリーンは正方形で、一辺の長さが 2.3 m である。スクリーン 1 面あたり合計 4 台のプロジェクターでステレオ画像を投影する。各スクリーンを上下二つの領域に分割し、一つの領域に 2 台のプロジェクターから右目用と左目用の偏光画像が投影される。

HOPE システムの計算クラスターは、合計 17 台の PC (HP Xw6400/CT5110) で構成される。OS は Windows XP、ネットワークは 10GbE である。17 台のうちの 1 台の PC はマスターノード、その他 16 台の PC がスレーブノードとしてレンダリング処理等を行なう。1 面のスクリーンに 4 つのノード（1 台のプロジェクタに一つのノード）が対応する。

PC クラスター型 CAVE 装置では、スクリーンに表示されるポリゴンのデータは全ノードが同じコピーを持つ。そのために、表示するポリゴンデータそのものをネットワークを経由して配布 (broadcast) するのが一つの使い方である。しかしながら我々が想定しているのは、CAVE 空間中に立つシミュレーション研究者（データを解析する者）がワンドを通じてリアルタイムに 3 次元シミュレーションデータと対話し、解析するような使い方である。例えば、VFIVE の "Particle Tracer" 機能を使う場合、解析者がワンドのボタンを押す毎に次々と新しいトレーサー粒子オブジェクトが生成される。それだけでなく、全トレーサー粒子の背後にはその粒子が流れ場に從って運動するにつれ、その航跡を示す曲線が目の前でどんどん延びていくのが観察できる。このような場合、時々刻々と変化するポリゴンデータを全ノードに配布するのは現実的ではなく、むしろ元の 3 次元シミュレーションデータをあらかじめ全ノードに配布しておいた方が効率的である。

HOPE システムには、マスターとスレーブの全ノードに CAVELib (Ver. 3.1.1) がインストールされている。PC クラスター型 CAVE 装置に対応したこの CAVELib はノード間の同期を自動的にとってくれる。さらに CAVELib にはアプリケーションで使うデータを他のノードに broadcast する関数も用意されている。一般的なクラスター型 CAVE システムでは、この関数を使ってマスターノードから他のノードにデータ配布するというのが一つの使い方であろう

が、我々がここで考えているような1 GBのオーダの大規模データを、アプリケーションを立ち上げる毎に broadcast することは時間がかかりすぎて現実的ではない。PC クラスター型の CAVE システムではノード数が多いほどレンダリングは高速になるが、大規模シミュレーションデータの解析に使用する場合には broadcast にかかる時間コストにも注意を払う必要がある。

さらに、シミュレーションデータの解析においては、あるデータを毎回違った観点から何度も繰り返して可視化・解析することが普通である。同じデータを数日から、場合によっては数週間以上もかけて解析することも珍しくない。このような場合、同じデータを対象として CAVE アプリケーションプログラムを何度も繰り返し起動するので、毎回 1 GB 以上の膨大なデータを時間をかけて broadcast することは明らかに非効率的である。そこで我々は解析対象の 3 次元データのコピーをあらかじめ各ノードのローカルな HDD に転送しておき、VFIVE の内部では broadcast はしないという方針を立てた。

我々が VFIVE の開発を始めた1990年代後半当時、CAVELib は PC クラスターには対応していなかった。しかし、その後のバージョンアップにより GWS 版 CAVE にも PC クラスター版 CAVE にも同時に対応できるようになった。そもそも PC クラスター型 CAVE 装置が普及し始めている最大の理由はその安さにあるが、この CAVELib は比較的高価なライブラリである。したがって、我々が PC クラスター用の VFIVE を開発するにあたり、CAVELib を全く使わないようにするというのはい一つの魅力的な可能性であった。つまり PC クラスター版の VFIVE には CAVELib ではなく、それと同等の機能を持つ、より安価、あるいは無料のライブラリを利用するという選択肢もあった。しかし、その場合には VFIVE のソースコードを大幅に改訂す

る必要がある。ところが現実導入された各地の PC クラスター型 CAVE 装置をみると、ほとんどのシステムにおいて CAVELib はインストールされていることがわかった。そこで我々は CAVELib を使い続けることにし、PC クラスター型 CAVE 用の VFIVE では、CAVE のアーキテクチャーの違いとオペレーティングシステム (OS) の違いを CAVELib に吸収させることで GWS 版 VFIVE のソースコードをほぼそのまま使って PC クラスター型 CAVE に移植することができた。

ソースコードレベルでの最も重要な注意点は、CAVE アプリケーションで用いる長さの単位の調整 (フィートかメートルか) の違いであった。これは単体 GWS 型 CAVE か PC クラスター型 CAVE かという問題というよりも、設定の異なる CAVE システム同士の互換性である。

その他、UNIX と Windows でのプログラム開発環境の違いで戸惑うところはあったが、ソースコードレベルではほんのわずかな修正で単体 GWS 版 VFIVE を PC クラスター型 CAVE に移植することに成功した。Linux 版の PC クラスターであれば、全く変更しなくて済む可能性がある。特に、VFIVE 中で呼び出している CAVELib 関係の関数は一切変更する必要がなかった。PC クラスター型 CAVE 用の VFIVE は既に、大阪大学サイバーメディアセンターの HOPE システム、中央大学理工学部情報工学科の ChuoCAVE システム、核融合研の (PC クラスター型にアップグレードした) CompleXcope システム、中央大学理工学部土木工学科の HoloStage に移植されている。図13に、これらの CAVE システムで稼働している PC クラスター型 CAVE 用の VFIVE のスナップショットを示した。

最後に大規模シミュレーションデータの可視化装置としての視点から見たときの GWS 型 CAVE システムと PC クラスター型 CAVE システムの違いについて述べる。我々が

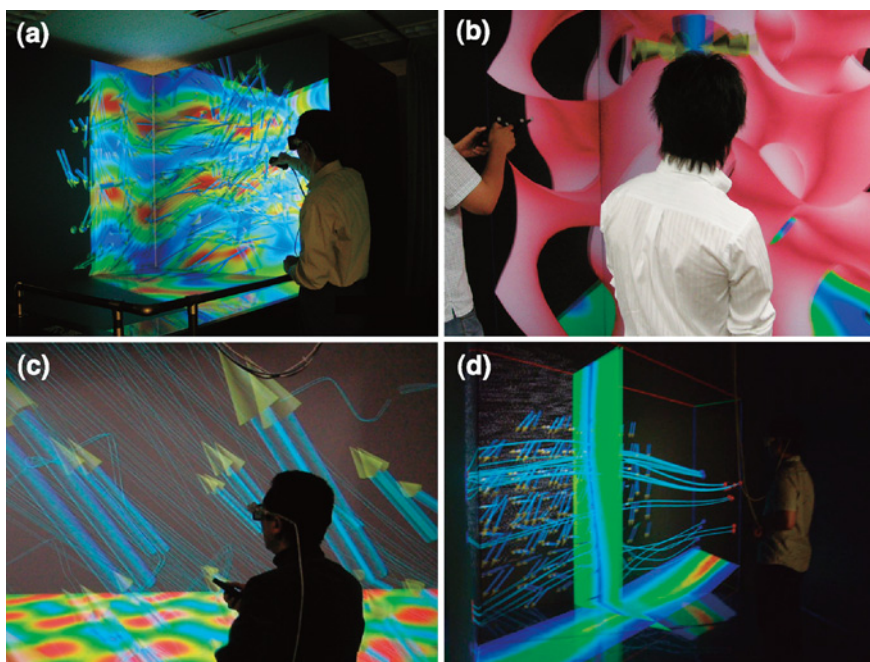


図13 PC クラスター型 CAVE 装置で稼働している VFIVE. (a)中央大学理工学部情報工学科の ChuoCAVE. (b)中央大学理工学部土木工学科の HoloStage. (c)大阪大学サイバーメディアセンターの HOPE. (d)核融合研の CompleXcope システム.

CAVEで解析したい大規模3次元シミュレーションデータは各1次元方向に、少ない場合でも500個程度の格子点がある。従って3次元では合計 $500^3 = 1.25 \times 10^8$ (125 M) 個程度の空間格子点がある。解析したい場が例えば温度場のような単一のスカラー場である場合、解析用の場の量は単精度浮動小数点数(4B)で表現されているのが普通なので、合計 $125 \text{ MB} \times 4 = 0.5 \text{ GB}$ 程度以上のデータが普通である。しかも(PCではなく)CAVEで解析しなければならないほど複雑な構造を持つシミュレーションデータは、単一のスカラーだけ解析するだけでは不十分である場合が普通であろう。圧縮性MHDシミュレーションの場合、解析すべき場の量は少なくとも、スカラー場が二つ(圧力と温度など)、ベクトル場が二つ(磁場と速度場)ある。ベクトル場一つあたり、3つの空間成分を持つので、合計でスカラー場8個分のデータ、つまり、上に挙げた 500^3 個の格子点での例を使えば、4GBのデータをメモリに置く必要がある。つまり各ノードが十分なサイズのメモリを持っている必要がある。これが大規模シミュレーションデータの可視化用の装置として見た場合のPCクラスター型CAVEに対する一つの条件となる。PCと比較して大きな共有メモリを持つことが可能な単体GWS型のCAVEシステムはこの点で未だ有利性があると言える。HPC(High Performance Computer)の性能は今後も指数関数的に増加し続けることが予想されるので、解析すべきシミュレーションデータのサイズも今後ますます増大するであろう。先端的な大規模シミュレーションの可視化用にPCクラスター型CAVE装置を利用する場合には、各PCノードのメモリサイズには十分注意を払う必要がある。また、たとえノードのメモリが十分にある場合でも、シミュレーションデータを全ノードに配る時間的コストが無視できない負担となる可能性が高い。この点も注意が必要である。

5. まとめ

本論文では、CAVE型VR装置用の汎用可視化ソフトウェアVFIVEの開発について報告した。我々はこのソフトの開発を10年近く続けており、可視化手法の種類と性能、そしてユーザビリティは、実用上ほぼ十分なレベルまで達したと考えている。CAVEは大型で高価な装置なので大学の研究室単位で導入することは難しいと考えられてきたが、小型で安価なPCベースのCAVEの登場によりその状況が変わりつつある。

VFIVEは本当に研究に役に立つツールであるということを強調しておきたい。実際、我々は最近、地球シミュレータで計算した世界最高解像度での地球ダイナモのMHDシミュレーションデータをVFIVEで解析し、予想もしなかった電流のトーラス状構造を発見した[19](図12にその一部が観察される)。VFIVEは無償ソフトとしてその

基本バージョンから順次、世界中に配布し始めたところである。プラズマ・核融合業界から生まれたこのソフトが、国内外の幅広い分野に今後広がっていくことを願っている。

謝 辞

PCクラスター型のCAVE装置へのVFIVEの移植にあたり、大阪大学サイバーメディアセンターのHOPEシステムを利用させていただいた。サイバーメディアセンターの清川博士、安福博士、野崎博士にはHOPEシステムの技術的な面で貴重なアドバイスをいただいた。また地球シミュレータセンターの川原慎太郎研究員にも技術的な援助を受けた。図13(d)は核融合研の大谷寛明博士に提供していただいた。中央大学理工学部情報工学科の牧野光則博士にはChuoCAVEシステムを使用させていただいた。中央大学理工学部土木工学科の檜山和男博士にはHoloStageシステムを使用させていただいた。本論文で使用したCAVEの写真の撮影の一部は、大学院生の鳥山雄司さんに協力していただいた。本研究は、科研費(17540404)と三菱財団助成金の補助を受けた。

参 考 文 献

- [1] Y. Tamura *et al.*, *Comput. Phys. Commun.* **142**, 227 (2001).
- [2] C. Cruz-Neira, D.J. Sandin and T.A. DeFanti. *Proc. SIGGRAPH '93*, 135 (1993).
- [3] A. Kageyama *et al.*, *Proc. ICNSP*, 138 (1998).
- [4] A. Kageyama *et al.*, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **138**, 665 (2000).
- [5] A. Kageyama and N. Ohno, *Proc. ISSS-7*, Kyoto, 133 (2005).
- [6] N. Ohno *et al.*, *J. Plasma Physics* **72**, 1069 (2006).
- [7] N. Ohno and A. Kageyama, *Phys. Earth Planet. Inter.* **163**, 305 (2007).
- [8] <http://www.jamstec.go.jp/esc/download/index.html>
- [9] D. Song and M.L. Norman. *Proc. Virtual Reality*, 75 (1993).
- [10] V. Jaswal. *Proc. Visualization '97*, 301 (1997).
- [11] M. Boyles and S. Fang. *J. Computer Science and Technology* **18**, 41 (2003).
- [12] M. Koutek, J. van Hees, F.H. Post, and A.F. Bakker. *Proc. Eighth Eurographics Workshop on Virtual Environments*, 53 (2002).
- [13] C.R. Lin and R.B. Loftin. *Proc. VRST '98*, 187 (1998).
- [14] O. Kreylos *et al.*, *Proc. VRCIA '06*, 155 (2006).
- [15] R. Kahler *et al.*, *Proc. IEEE Visualization*, 537 (2002).
- [16] R.A. Drebin *et al.*, *Proc. SIGGRAPH 88*, **22**, 65 (1988).
- [17] B. Cabral and L.C. Leedom. *Proc. SIGGRAPH '93*, 263 (1993).
- [18] 清川 清 他. 日本バーチャルリアリティ学会第12回大会論文集, 2C2-2 (2007).
- [19] A. Kageyama *et al.*, *Nature* **454**, 1106 (2008).