



解説

核融合プラズマを体感する ー百見は一体感に如かずー

Experience the Fusion Plasma -to Experience is to Believe

石黒 静児, 大谷 寛明

ISHIGURO Seiji and OHTANI Hiroaki

核融合科学研究所, 総合研究大学院大学

(原稿受付: 2014年5月12日)

核融合プラズマの3次元シミュレーションなどの結果をそのまま3次元空間で解析, 体験することのできる核融合科学研究所のバーチャルリアリティ (VR) 装置 CompleXcope は1997年に導入され, 3次元空間中での複雑な磁力線構造の解析などに活用されてきた. 近年は実際のプラズマ磁場閉じ込め核融合実験装置形状をVR空間に表現して, ここに3次元シミュレーションにより得られたプラズマの物理量を重ね合わせ, 実験および装置設計に役立てる試み, 変動する電磁場中の3次元空間内での粒子軌道解析といった新しい利用法が発展してきている.

Keywords:

VR, plasma, fusion, visualization, CAVE, simulation

1. はじめに

私たちは周りの空間, あるいは物体のその奥行きなどを含む3次元構造を認識することができる. それでは, 実際にその場にはないで, あるいはまだ現実には存在しないがこれから作ろうとしている物や環境を, 正しく認識するための良い方法はないだろうか. それを実現するのがバーチャルリアリティ (VR) である.

VRは様々な方式が提案されているが, 本解説でとりあげるのは米国のイリノイ大学で開発され, 1993年に発表されたCAVE (Cave Automatic Virtual Environment) というシステムである[1]. CAVEは複数のスクリーンで囲まれた小部屋を作り, そのスクリーンに立体映像を投影する. 専用の眼鏡をかけてこの部屋に入った利用者は実際に現場に入ったかのような体験ができる.

1991年(平成元年)の核融合科学研究所創設と同時に発足した理論・シミュレーション研究センター(当時)では, 世界に先駆けて最先端の大規模3次元シミュレーション研究を行っていた. シミュレーション研究においては, 物理的なモデルに基づいて作成した計算コードをスーパーコンピュータで実行し, 様々な物理量に対応する数値データを得る. これらの数値データは密度や圧力といったスカラー量, 電場, 磁場といったベクトル量のように空間的に分布を持つ量から系の全エネルギーのように空間積分した量までを含む. 系の全エネルギーの時間発展を見るのは2次元グラフで十分であるが, 3次元空間の物理量を2次元面での表現しか使えないという条件下で解析する場合, 断面図を多数描いて3次元空間での構造を把握するという方法をとることになる.

実際, 1980年代のシミュレーション研究者は2次元グラ

フィック端末やプロッタを利用して多数の断面図を描くことで数値データを解析していた. この状況を一変させたのは1990年代に入って普及してきた3次元グラフィックワークステーションである. 3次元空間の格子点における数値データをワークステーションに取り込み, 利用者はマウスなどのデバイスを用いてそのデータを操作してディスプレイ上に物理量の等値面, 流線, 断面などを対話的に回転, 拡大縮小, 移動などしながら表示できる. この3次元グラフィックワークステーションによって3次元シミュレーション数値データの解析は格段に進歩した. しかしながら, この場合も3次元データを2次元面に写して解析することには変わりはなく, 研究者はその方法に限界を感じ, 3次元データをそのまま3次元空間で解析する手段を求めていた. そこに登場したのがCAVEである.

核融合科学研究所理論・シミュレーション研究センターでは, このCAVEによるバーチャルリアリティシステムを科学研究可視化目的としては日本で初めて導入し, 当時のシミュレーショングループの主要テーマである「複雑性」にちなんでCompleXcopeと名付け1997年に稼働開始した[2].

CompleXcope稼働後すぐに, 核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)に対応した数値解析コードによる平衡解の等圧力面, 磁力線の表示と共に, その中での荷電粒子の運動を追跡できるバーチャルLHDが開発された. さらに, 利用者がデータを用意するだけでVR可視化および解析を行えるVFIVEという汎用ソフトも開発されている[3,4]. それと同時に多方面の共同研究を進め, 医療応用として心臓などの人体内部のVR可視化[5], VRを用いて被験者に急激な落下などを体験させ脳波の変動を調べる研究

National Institute for Fusion Science, Toki, GIFU 509-5292, Japan

author's e-mail: ishiguro.seiji@nifs.ac.jp

なども行われている。

将来のより高度なVR利活用を構想し、VRと高速ネットワークを結合して多地点でVR空間を共有することによって共同研究を促進し新物質、製品の創成をめざす「広域仮想シミュレーション工場」の基盤技術に関する研究が通信放送機構（当時）のギガビットネットワーク利活用研究開発制度の採択課題となり、2000年度より3年間にわたり金沢大学およびNTTサイバースペース研究所との共同で遠隔地間でVR情報通信を行うための技術開発[6]などがなされている。

2. バーチャルリアリティの原理

バーチャルリアリティ（VR）の2つの重要な要素は立体視とトラッキングである。立体視は今や家庭でもおなじみとなった3Dテレビに用いられている仕組みである。私たちは物体を見るとき、右目と左目でわずかに違った像をとらえている。これは片目ずつ目を隠して物体を見るときと右目だけで見たときと左目だけで見たときとでわずかに像がずれることで確認することができる。さらに、同じことを近くの物体と遠方の物体と比較してみると、遠方の物体を見たときは近くの物体を見たときに比べてこのずれ方が小さいことがわかる。脳がその違いを処理して物体の3次元空間での位置関係を認識する。VRや3Dテレビでの右目と左目への異なった画像の供給は、利用者がかける眼鏡と装置本体が連動して実現している。本体側では右目用と左目用の画像を交互に切り替えながら表示する。一方、眼鏡はそのタイミングに合わせて右目側と左目側のレンズ部を開閉する。本体側からは赤外線などで左右切り替えのタイミングに合わせるための信号を送り、眼鏡はその信号を受けて動作する。ここで、レンズ部の開閉には液晶に電圧をかけて光の透過を制御する液晶シャッターが用いられている。

通常3Dテレビには備わっていないトラッキング機能は利用者の頭の位置、向きや利用者が操作する3次元コントローラーの位置や指示方向などを本体が追跡する機能である。核融合科学研究所への導入時は磁気センサーが用いられてきたが、最近では光学センサーの利用が一般的となっており、CompleXcopeにおいても最近の更新で光学センサーを用いたシステムに切り替えている。このシステムでは光学センサー（カメラ）をスクリーン上部に3カ所以上設置し、利用者の液晶シャッター眼鏡やワンドとよばれる3次元コントローラーの位置および角度を同定する。液晶シャッター眼鏡（図1）やワンド（図2）には視覚的に角度が同定できるようにターゲットがついている。

このトラッキング機能は3Dテレビとは異なる体験を利用者にもたらす。顔の向きを動かす、移動するといった利用者の動きに合わせて、スクリーンに映し出される像が変化するため、実際に作り出されたVR空間の中にいる感覚を得ることができる。また、科学利用の可視化という点から重要なのはワンドのトラッキング機能である。この機能により、利用者は3次元空間内の特定の場所を対話的に本体に伝え、ある特定の場所での物理量を表示する、指定した場所に物体を置くといった空間操作ができる。ここで、こ

のトラッキング機能実現には大きなコンピュータ資源を要していることは注意する必要がある。これは、3Dテレビでは右目用と左目用の画像のみを本体側であらかじめ用意しておけば十分であるが、VRでは本体側で3Dデータを保持しておき、操作者などの動きに応じてその都度右目用と左目用の画像を実時間で生成する必要があるからである。

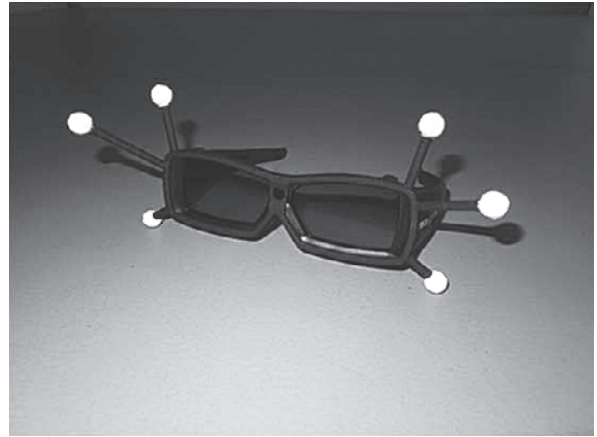


図1 液晶シャッター眼鏡。白い球のついた突起は光学センサーが眼鏡の位置、向きなどを感知するためのターゲット。



図2 ワンド。操作者はこのワンドを使ってVR空間内の移動、様々な操作などを行える。



図3 CompleXcopeの全景。利用者は液晶シャッター眼鏡を掛け、ワンドを持っている。前面、左右面、床面がスクリーンになっており、スクリーンは一辺約3メートル。

CompleXscopeの内部を図3に示す。利用者は液晶シャッター眼鏡をかけ、ワンドを持っている。スクリーンは正面、左右、床面の4面であり、正面および左右面はスクリーンの裏側から、床面は天井から独立したプロジェクターが照射している。光学センサーは正面のスクリーン上部に3カ所、左右の手前側上部にそれぞれ1カ所、合計5カ所に設置している。先に、光学センサーは最低3カ所必要と述べたが、利用者の陰になる場合の対応や、精度向上のために5カ所設置している。

数値データをCompleXscopeで表示する最も基本的な方法はC言語、OpenGL、およびCAVEライブラリを用いてプログラムを作成することである。OpenGLはUnixワークステーション、Linux、Windows、Mac OS Xなどで広く使われているOSやハードウェアに依存しない3次元グラフィックス処理のためのプログラミングインターフェイスであり、物体の座標、形状、光源の位置、色などを処理する。一方、CAVEライブラリはVR空間での立体表示、トラッキング、複数スクリーン間のつなぎなどを処理する。

この方法でプログラムを作成するのは一般利用者にとってはややハードルが高いことや多数のデータを処理する上で効率的でないことから、VFIVEという汎用可視化ツールが開発された[3,4]。利用者は可視化対象の数値データを入力データとして用意するだけで、後はメニュー形式でCompleXscopeに入ってデータ解析ができる。

3. バーチャルリアリティで触れる核融合プラズマ

プラズマ・核融合研究におけるVR活用事例としては、プラズマシミュレーションと実験装置の同時可視化、時系列シミュレーションデータのVR可視化、実験装置設計への利活用などが最近進展している。

3.1 シミュレーション結果と実験装置の同時可視化

大型ヘリカル装置(LHD)は回転対称性をもたず、3次元構造を有している。その中のプラズマの巨視的な構造も3次元性をもつことから、CompleXscopeの意義を理解する上で格好な対象といえる。バーチャルLHD[2]はヘリカル系プラズマの磁気島を含む平衡解を求めることができるHINTコード[7]により計算された、プラズマ圧力分布、磁場分布をCompleXscopeに表示するプログラムである。VR空間内に配置されたスクレーンに対話的に操作してプラズマ圧力等値面を表示する機能、ワンドで指定した点を起点として磁力線を描く機能、同様にワンドで指定した点を出発点として運動する荷電粒子の軌道を描く機能が備わっている。圧力等値面は、格子点上に与えられた圧力値から求め、それを表示する。磁力線は、同様に格子点上に与えられた磁場のベクトルデータから追跡して表示する。一方、粒子軌道はワンドで指定した初期位置とワンドの傾きによる初期ピッチ角から、格子点上の磁場データを用いドリフト近似に基づく運動方程式を数値的に実時間で解いて表示している。このため、利用者はトーラスを周回する粒子や局所的な磁場変化によって複雑な動きをする粒子が目の前で動いている様子を観察することができる。このバーチャルLHDはC言語、OpenGL、およびCAVEライブラリを

用いて作成されている。なお、VR空間は先に挙げた物理に関わる要素以外ではコイルの表示などの簡素な構成となっている。

VR利用を多方面に展開し、装置設計支援などの応用ソフト開発を進める中で、LHDそのものを表現してその中で自由に動き回ることができればという考えからLHD真空容器内部を写実的に表現するプログラムが作成された。この写実的LHD可視化プログラムにおいてはVirtoolsというソフトウェアが基本的な操作系を担い、LHDの真空容器および周辺装置のCADデータに基づいた装置形状を表し、真空容器内部にポリゴンを張り込むことによりステンレスタイルの質感や光の反射を再現している。内部にはCADデータに基づいて構成したダイバータ板やイオンサイクロトロン加熱アンテナなどの機器も実際のLHD内部と同様に配置されている。

この2つのLHD関連VR可視化プログラム、バーチャルLHDと写実的LHDのプログラムを合成して、実際の真空容器内での磁力線、プラズマ、粒子の運動などを表示できれば装置構造と物理量の関連の理解に役立つのではという考えは、これらのプログラムがそろった当初からあった。

複数のソフトウェアが生成する3D情報、たとえば3DCADによる構造体と3D流体シミュレーションによる等圧力面を表示するには、2つの方法が考えられる。第一は2つのデータを一つのVR可視化可能なソフトウェアに読み込ませて表示するという方法である。一例としてあげるとCADデータはフィルターにより変換し、流体の圧力分布はシミュレーションの際に対応フォーマットで出力し、VR表示に対応した汎用的ソフトウェアに入力して一つにまとめて表示する[8]。ただし、この方法はデータ変換を伴うため、適当な変換フィルターを用意する必要がある、扱えるソフトウェアが限定される、個別ソフトウェア固有の表現が反映されない、といった問題がある。第二は、可視化処理を施したデータをそのまま合成する方法である。これは、OpenGLを用いて作成された複数の3次元画像データをキャプチャーし、それらを合成して一つの画像データとしてVR空間に表示する方法である[9,10]。この方法の利点は、多様な目的のために開発された固有の形式をもつ3次元データを取り扱うソフトウェアのデータをその固有なデータ形式にとらわれずにVR可視化できることにある。

バーチャルLHDと写実的LHD可視化の同時可視化は、写実的LHD可視化のOpenGL画像をキャプチャーして、バーチャルLHDに重ねることにより実現した。このため、バーチャルLHDの操作系をそのまま利用できるようになっている[11,12]。

この同時可視化を最初に実現して以降、バーチャルLHDにはいくつかの改良が施されている。プラズマ圧力、磁場データなどを得るために用いられているプラズマ平衡コードHINTは、実験プロファイルなどへの対応を容易にするなどの改良が施され、HINT2へと進化している[13,14]。HINTコードでは、各磁場コイルはフィラメントと仮定してシミュレーション領域の外に設置しているのに対して、

HINT2コードでは、コイル電流をシミュレーション領域内に設置しているため、実際の実験で用いられる非軸対称な磁場配位における平衡プラズマを評価することができる。HINTとHINT2では異なる座標系を用いているので、データの座標変換を行うインターフェースを作成してバーチャルLHDでHINT2コードによるプラズマ平衡解をVR可視化した。また、HINT2コードによるプラズマ平衡解では、トロイダル電流の効果の自己無撞着な取り扱い、コイル電流をシミュレーション領域に含めてのフルトラス配位としての取り扱いができる。このため、コアプラズマのフラックス磁気面から、周辺領域やダイバータ領域における磁気島構造やストカスティック領域のエルゴディック構造が計算可能である。このような磁場構造を同定するためにバーチャルLHDにPoincaré断面を表示する機能を追加した。これは、磁力線の流線を計算した後、断面と流線の交点を点として断面上に写像する機能である。ここで、流線の情報メモリ上に保存してから交点を計算している。

このHINT2データを利用したバーチャルLHDと写実的LHDを同時可視化したLHD真空容器内を観測している様子を図4に示す。利用者の視野全体に立体映像が表示され、真空容器内に実際にいったかのような没入感を得ることができるばかりでなく、トラッキング機能とワンド操作によって真空容器内を自由に動きながら、様々な角度からシミュレーション結果を解析できる。図中には1本の磁力線(緑)とプラズマの等圧力面(赤)が表示されている。正面のスクリーンには閉構造ダイバータが映し出され、左面のスクリーンにはイオンサイクロトロン加熱アンテナと作業中の人物が表示されている。

図5には、2本の磁力線(赤と緑)とポアンカレ断面(青)が表示されている。ポアンカレ断面には緑線が表示された磁力線とその磁力線の出発点からわずかに位置を変えた5本の磁力線の交点が描かれている。磁力線の出発点をVR空間の中で様々に変化させながら対応する磁力線構造を観測し、その構造の同定をポアンカレ断面を使って行うことができる。図5上ではフラックス面(緑)と磁気島(赤)という磁場構造が同定され、図5下ではストカスティック構造をもつ磁力線のポアンカレ断面が表示されて



図4 LHD真空容器内にHINT2コードによるプラズマ平衡のデータをVR可視化した様子。

いる。

このような同時VR可視化が可能になったことで、VR可視化の活用方法に広がりが生じた。(1)真空容器の可視化では内部にのみポリゴンを貼り付けてあるので、真空容器外側から内部を観測することができる。このため、図6のようにポートの外側からシミュレーション結果を観測することができる。これにより、実験観測装置を実際の装置に設置する前に、ポートから視野をVR装置で確認することができる。特にVR装置のトラッキング機能により視線方向をわずかながら変化させながら視野の確認ができることは意義深い。(2)プラズマ周辺部やダイバータ領域の詳細な磁場データを使って、ダイバータ板上の磁場のストライクポイント分布を観測できるようになる。(3)バーチャルLHDは荷電粒子の軌道を表示することができる。様々な初期位置とピッチ角をワンドによって指定してト

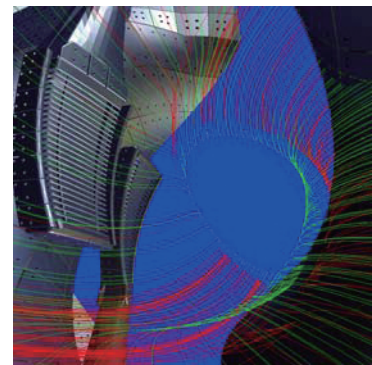
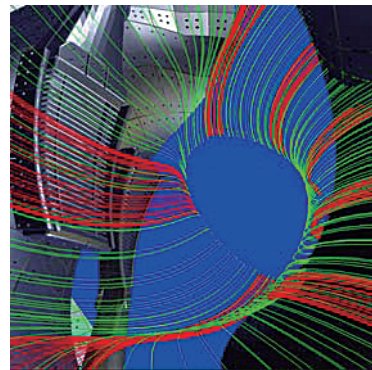


図5 磁力線とポアンカレマップ。2本の磁力線をそれぞれ赤線と緑線に表示している。青の面にポアンカレ断面が映し出されている。左のアンテナはHASアンテナである。



図6 外側ポートから真空容器内を覗いている様子。

ラス方向に周回する粒子やリップルに捕捉されバウンスする粒子を観測できる。この機能を用いて、壁やダイバータ板に衝突する粒子の衝突位置を初期位置として粒子の運動方程式の時間積分を逆の時間方向に行い、衝突する粒子の起源を調べることも可能である。ただし、周辺やダイバータ領域では、ドリフト近似を用いずに粒子軌道を計算する必要がある。

3.2 時系列シミュレーションデータの可視化

プラズマの流体モデルによるシミュレーションでは電磁場といったベクトル場や圧力といったスカラー場の時間発展を計算しており、粒子シミュレーションではそのような場と同時に粒子の軌道を解いている。スカラー場の解析では等高線図や等値面を用いてその構造を把握することが多く、平面に投影して表示する2次元ディスプレイを用いても構造の理解は比較的容易である。しかし、平面への投影では奥行き方向の情報が失われるため、ベクトル場や粒子軌道の理解は困難となり、3次元空間へ表示することの意義は非常に大きい。ベクトル場やスカラー場のシミュレーション結果を解析するため、CAVE型VR装置を活用した汎用可視化ソフトウェアVFIVEが開発されてきた[3, 4, 15-17]。VFIVEはスカラー場とベクトル場を基本的な可視化表現法としてVR空間内に表示する機能を有する(等値面、カラー等高表示、ポリウムレンダリング、流線、矢印など)。利用者は複数の流線を表示したり、空間全体に一樣に矢印を配置したりすることによってベクトル場の構造を把握することができる。また、複数の物理量を同時に可視化することで、それらの3次元的な相関関係を直感的に把握することができる。

磁気リコネクションのように、粒子の非ジャイロ的運動が重要な役割を果たす現象がある[18, 19]。この粒子の非ジャイロ的運動を理解する上で、軌道を3次元的に解析することは重要である。そこで、VFIVEにテスト粒子の軌道を計算・表示する機能を追加した[20]。粒子シミュレーションなどで得られた電磁場のデータをVFIVEが読み込み、スナップショットとしての電磁場データのもと、テスト粒子の運動方程式を蛙飛び法で時間積分する。ここでは、グリッド上に定義された電磁場から3次の内挿を使って粒子に働く力を計算している。初期位置はワンドを使ってVR空間中に指定し、初速度はシミュレーション結果の粒子平均速度を用いて与える。

プラズマシミュレーションでは物理系の時間発展を追跡しているので、様々な物理量の時系列データが得られる。従来のVFIVEでは、シミュレーション時系列データからある時刻のデータを選び出して解析していた。しかしながら、実際のプラズマ粒子は時々刻々と変化する電磁場の下で運動するので、そのような状況での粒子運動解析は不可欠である。このような解析のため、プラズマ粒子シミュレーションの時系列データを順次読み込んでアニメーションとしてVR空間に表示する機能を追加した[21]。このアニメーション機能を利用するための手順は以下の通りである。(1)電磁場、粒子平均速度、温度などシミュレーションの時系列データをハードディスクドライブに保存する。こ

こで、時系列データを保存する時間間隔は解析したい現象を特徴づける時間スケールよりは十分に小さくする必要があるのである。(2)VR空間の中でVFIVEのメニュー画面を使って、可視化する物理量とその可視化表現を選択する。テスト粒子の軌道解析をする場合はその初期位置を決定する。(3)アニメーション機能を始める。(4)VFIVEは現時刻と次時刻のデータセットを読みこむ。(5)VFIVEは、2つの時刻の時系列電磁場データから粒子の運動方程式を解く時刻の電磁場データを1次の内挿で求めてから、粒子の運動方程式を解き、その位置をメモリに保存する。粒子軌道以外の可視化も行っている場合、可視化のパラメータ(等値面の値や流線の初期位置など)を維持しながら時系列データの可視化を実行する。可視化で生成されたポリゴンデータが保存される。(6)手順(4)に戻り最後のデータを読み込むまで手順を繰り返す。(7)すべての時刻のデータの可視化を終えると、VFIVEは保存したポリゴンデータを順次VR空間に表示する。このVFIVEのアニメーション機能を利用して電磁場や粒子分布などの時間変化と粒子軌道の時間発展を同時にVR空間内で解析することができる。

VFIVEのアニメーション機能を使って、磁気リコネクションの粒子シミュレーションデータを解析している例を図7に示す。図7(a)では、磁力線の流線(青)や磁場のリコネクション成分のカラー等高線図、イオンの温度分布、テスト粒子の初期配位を終えて、最初の時刻の時系列データの可視化の状況を確認している。図7(b)がVFIVEのメニュー画面であり、ワンドを使ってメニューの選択を行っている。図7(c)と(d)では、VFIVEが時系列データを順次読み込みながら、図7(a)で設定した可視化パラメータのもとで、各時刻のポリゴンデータを生成している。ハードディスクドライブからデータを読み込んでいるので、この作業にはやや時間が必要である。すべての時系列データのポリゴンが生成されたら、図7(e)のように、アニメーションで表示される可視化データをあらゆる角度から観察することができる。このアニメーションは任意の時刻で一時停止させることも可能である。

3.3 実験装置設計への活用

VRを使った可視化はコンピュータを使って行うので、実際の実験装置ではまだ設置されていない装置を事前にVRを使って可視化することが可能である。真空容器内部のVR可視化では、内側のすべての閉構造ダイバータを実際のLHDに設置されるより前にVR空間内に設置し、閉構造ダイバータに関する研究・設計をしている実験研究者や技術者に公開した(図8)。実際LHDにまだ設置されていないダイバータ部の確認、ダイバータに開けられた穴やアンテナ設置部の穴から真空容器内部を観測しての視野の確認などにおいて有効性が確かめられた。また、プラズマ加熱の研究者やダストの研究者は、アンテナの設置の様子やダストの観測結果に対する視野の確認などを行っている。シミュレーション結果と装置データのVR可視化などを活用しての、実験研究者や装置設計者との共同研究の進展が期待される。

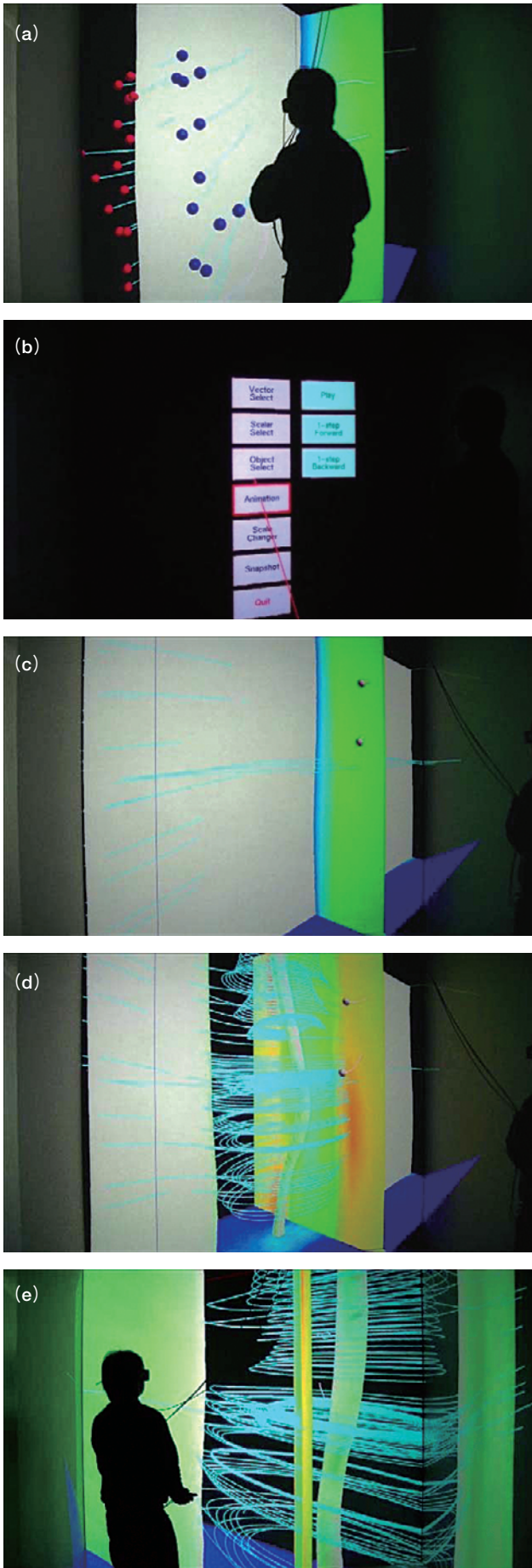


図7 変動する電磁場中での粒子軌道の可視化.



図8 実験研究者や技術者とVRにてLHD内部の構造物について議論している様子.

4. まとめと今後の展望

本解説では、VRのプラズマ・核融合研究への適用に関する最近の研究について解説した。当初、3次元シミュレーション結果の可視化、解析のために核融合科学研究に導入されたVRシステムCompleXcopeにおいては、様々な機能拡張を経て、現在は、実験装置内部とシミュレーション結果を一つのVR空間に表示し解析することが可能となっている。また、最近の進展として、粒子運動等の表示も従来以上に現実に即した取り扱いができるようになってきていることがあげられる。VRシステムでは実時間で3Dデータから画像を生成する必要があるため、画像を生成するコンピュータの負荷は非常に大きい。CompleXcope導入時は、多数の運動する粒子を同時に表示することは困難であった。現在では、コンピュータの能力が増強されてきていることや、技法研究が進んできたことから、多数粒子のVR空間可視化が現実化しつつある。その技法の一つにデータ圧縮があり、プラズマ粒子シミュレーションにより得られた粒子座標の時系列データを効率的に圧縮する技術が提案され、今後、VR可視化への適用が検討されている。また、最近では、一部ではあるが3次元実験データの取得が可能となってきており、そのVR可視化の試みも始まっている。一例としてはLHD内部のダスト挙動の解析がある。このような粒子の挙動をVR空間内で立体的に解析することは、グラフィックワークステーションなどによる2次元平面上での解析に比べて大きな利点がある。それは、粒子のような点の集合の立体的な位置関係を把握するのは、造形物のようにかたちのある物体の位置関係を把握するより困難だからである。こういった観点から、今後、粒子系のVR可視化への期待は大きい。


謝辞

CompleXcopeの導入およびその発展に貢献された多くの方々、特に、導入当時理論・シミュレーション研究センター長であった、核融合科学研究所佐藤哲也名誉教授、ソフトウェア構築および機能拡張に貢献された神戸大学陰山聡教授、甲南大学田村祐一教授、兵庫県立大学大野暢亮教授の各氏に感謝します。本解説で述べた研究成果は自然科学研究機構分野間連携事業「磁場閉じ込めプラズマ中の乱流、磁気島および磁力線の研究」の「プラズマシミュレ-

シヨンの3D可視化」, 核融合科学研究所数値実験研究プロジェクト, 核融合科学研究所一般共同研究 (NIFS09KDAN 004) の援助を受けています。


参考文献

[1] C. Cruz-Neira *et al.*, Proc. SIGGRAPH'93, 135 (1993).
 [2] A. Kageyama *et al.*, Proc. ICNSP, 138 (1998).
 [3] A. Kageyama *et al.*, Trans. Virtual Reality Soc. Jpn 4, 717 (1999).
 [4] A. Kageyama *et al.*, Prog. Theor. Phys. Suppl. 138, 665 (2000).
 [5] 博田達治 他：形態科学 6, 67 (2003).
 [6] Y. Tamura *et al.*, J. Plasma Phys. 72, 1065 (2006).
 [7] K. Harafuji *et al.*, J. Comp. Phys. 81, 169 (1989).
 [8] H. Ohtani *et al.*, Plasma Fusion Res. 5, S2109 (2010).
 [9] H. Miyachi *et al.*, IEEE Comp. Soc., 530, (2005).
 [10] H. Miyachi *et al.*, IEEE Comp. Soc., 536, (2007).
 [11] H. Ohtani *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. 39, 2472 (2011).
 [12] H. Ohtani *et al.*, Plasma Fusion Res. 6, 2406027, (2011).
 [13] T. Hayashi *et al.*, Contrib. Plasma Phys. 42, 309 (2002).
 [14] Y. Suzuki *et al.*, Nucl. Fusion 46, L19 (2006).
 [15] N. Ohno *et al.*, J. Plasma Phys. 72,1069 (2006).
 [16] N. Ohno *et al.*, Earth Planet. Interiors 163, 305 (2007).
 [17] 陰山 聡, 大野暢亮：プラズマ・核融合学会誌 84, 834 (2008).
 [18] W. Horton and T. Tajima, J. Geophys. Res. 96, 15811 (1991).
 [19] R. Horiuchi and T. Sato. Phys. Plasmas 4, 277 (1997).
 [20] H. Ohtani and R. Horiuchi, Plasma Fusion Res. 3, 054 (2008).
 [21] N. Ohno and H. Ohtani, Plasma Fusion Res. 7, 1401001 (2012).



いし ぐろ せい じ
石黒 静 児

自然科学研究機構核融合科学研究所ヘリカル研究部基礎物理シミュレーション研究系研究主幹, 教授. 専門はシミュレーション科学. 最近は, 多階層シミュレーション技法, VR可視化, 自己無撞着なプラズマ粒子シミュレーションによる核融合プラズマの基礎物理過程の研究等に携わる.



おお たに ひろ あき
大谷 寛 明

核融合科学研究所ヘリカル研究部基礎物理シミュレーション研究系, 准教授. 研究分野はプラズマ物理・シミュレーション科学. 粒子シミュレーションを使った磁気リコネクション研究やバーチャルリアリティ装置を使った可視化研究を行っています. 野球部に入部した息子とのキャッチボールで息子の球がだんだん速くなって怖くなってきました. グローブをはめている左手も赤く腫れてしまいました. いつまでキャッチボールの相手をしてもらえるのか, 心配です.