



プロジェクトレビュー

3. 基礎物理シミュレーション研究と可視化技術の進展

3. Progress in Simulation Study of Fundamental Physics and Visualization Technology

3.2 可視化技術

3.2 Visualization Technology

大谷寛明^{1,2)}, 石黒静児^{1,2)}, 宮澤順一^{1,2)}, 大野暢亮³⁾, 陰山 聡⁴⁾, 三浦英昭¹⁾, 森高外征雄^{1,2)}, 田村祐一⁵⁾, 北澤修太⁶⁾, 片桐孝洋⁶⁾, 大島聡史⁶⁾, 永井 亨⁶⁾, 沼波政倫^{1,2)}, 名倉成輝³⁾, 川原慎太郎⁷⁾, 胡 昆祁⁸⁾, 小山田耕二⁸⁾, 後藤拓也¹⁾, 嘉無木 昇⁹⁾, 高丸尚教⁹⁾, PETROSKY Tomio¹⁰⁾, 田中 智¹¹⁾

OHTANI Hiroaki^{1,2)}, ISHIGURO Seiji^{1,2)}, MIYAZAWA Junichi^{1,2)}, OHNO Nobuaki³⁾, KAGEYAMA Akira⁴⁾, MIURA Hideaki¹⁾, MORITAKA Toseo^{1,2)}, TAMURA Yuichi⁵⁾, KITAZAWA Shuta⁶⁾, KATAGIRI Takahiro⁶⁾, OHSHIMA Satoshi⁶⁾, NAGAI Toru⁶⁾, NUNAMI Masanori^{1,2)}, NAGURA Shigeki³⁾, KAWAHARA Shintaro⁷⁾, HU Kunqi⁸⁾, KOYAMADA Koji⁸⁾, GOTO Takuya¹⁾, KAMUKI Noboru⁹⁾, TAKAMARU Hisanori⁹⁾, PETROSKY Tomio¹⁰⁾ and TANAKA Satoshi¹¹⁾

¹⁾自然科学研究機構核融合科学研究所, ²⁾総合研究大学院大学, ³⁾兵庫県立大学, ⁴⁾神戸大学, ⁵⁾甲南大学, ⁶⁾名古屋大学, ⁷⁾海洋研究開発機構, ⁸⁾京都大学, ⁹⁾中部大学, ¹⁰⁾テキサス大学オースティン校, ¹¹⁾大阪府立大学

(原稿受付: 2020年8月17日)

1997年に没入型 (CAVE型) バーチャルリアリティ (VR) 装置 CompleXcope を導入して以来, 核融合科学研究所ではシミュレーション結果の解析や医療データの可視化, 心理学での VR 装置の活用など, 様々な研究分野での VR 可視化研究を進めてきた. 最近では実験観測データと実験装置・シミュレーションデータの同時 VR 可視化や将来の核融合炉の CAD データの VR 可視化などの研究を進めている. 本節では, 共同研究の下で核融合科学研究所で進められている可視化研究について紹介する.

Keywords:

visualization, virtual-reality, simulation data, CAD data

3.2.1 核融合科学研究所のバーチャルリアリティ可視化装置及びソフトウェア

核融合科学研究所 (核融合研) では, 時間的にも空間的にも複雑な形や動きを示すプラズマのシミュレーション結果を調べたり, バーチャルリアリティ (VR) 空間で再現した実験装置の中にシミュレーション結果を同時に映し出すことによって装置開発に寄与したり, また, 実験観測データを 3次元空間で解析を進めたり, 将来の核融合炉の組み立て・メンテナンス作業を VR 空間で検討して設計研究に寄与したりするため, CAVE型 VR 装置 CompleXcope をはじめとする VR 装置を使った可視化手法の研究を推進している [1, 2].

プラズマシミュレータの性能向上に伴う出力データ量の爆発的な増加が予想されたので, より大規模となるシミュレーションデータを VR 空間に円滑に表示して 3次元的に解析・研究するため, CompleXcope では処理能力の高い二

系統のコンピュータシステムを導入している. これらは分散メモリシステムとなる PC クラスタと大きな共有メモリをもつ Linux 機があり, 目的に応じて排他的な利用が可能となっている. PC クラスタは Windows ベースであるため一般的なソフトウェアを活用した表示に優れているが, 分散システムであるため巨大なシミュレーションデータの表示には不向きである. 他方, Linux 機では大きな共有メモリを使って巨大なシミュレーションデータを表示することに優れている. VR 可視化を行いたいデータの性質に合わせて, それぞれのコンピュータシステムの特色を生かした可視化を行っている. 表 1 に現在, 運用している CompleXcope のコンピュータシステムのスペックをまとめた. また, 平成28年12月には CompleXcope で利用するプロジェクトを Christie Mirage WU7KM に更新した. 表 2 にそのスペックをまとめる.

平成28年にはヘッドマウントディスプレイ (HMD) とい

表1 CompleXcope用コンピュータシステム。

	Linux	PC クラス
導入年度	令和元年度	平成28年度
筐体	HP Z8 G4	HP Z840×2
OS	Red Hat Enterprise Linux 7.7	Windows10 Pro (64bit)
CPU	インテル Xeon(R) Gold 6128 プロセッサ (3.4 GHz, 6 コア)×2	インテル(R) Xeon(R) E5-2637v4 プロセッサ (3.50 GHz, 4 コア)×2/1 筐体
メモリ	384 GB	128 GB / 1 筐体
記憶媒体	1 TB SSD×2	2 TB HDD×2/1 筐体
グラフィックカード	NVIDIA RTX 6000×2	NVIDIA Quadro P6000×2/1 筐体

表2 CompleXcope用プロジェクタ。

	Christie Mirage WU7KM
投影方式	DLP 方式
パネル解像度	WUXGA (1920×1200 ピクセル)
光出力(最大)	センタールーメン: 6,930 (2 灯時)/3,465 (1 灯時) ANSI ルーメン: 6,300 (2 灯時)/3,150 (1 灯時)
コントラスト比	最大 10,000:1/650:1
対応走査周波数	(水平) 15.75 kHz~120 kHz(垂直) 23.97 Hz~150 Hz

う頭にかぶるタイプの VR 装置がメーカー各社から一斉に販売された。それらは高品質な VR を体験できる上、それまでと比べ格段に安価であったため、瞬く間に市場に出回った。核融合研においてもこの安価な HMD (Oculus Rift [3] 及び HTC VIVE [4], Windows Mixed Reality Headsets (WindowsMR) [5]) を導入して、その利活用のための研究を推進している。HMD と CompleXcope との違いは、HMD は基本的に一人用であるのに対し、CompleXcope は立体映像が投影された大きなスクリーンで部屋を囲っているため、多人数で一緒にひとつの VR 空間に入ることができるので、同時にひとつのモノを見ながら議論を行うことができる。大学共同利用機関として共同研究を進めるため、今後も CompleXcope による VR 可視化研究を推進していきたいと考えている。

その一方で、HMD は広く社会に普及していることから、CompleXcope と HMD の双方で研究成果を活用できるような環境整備も進めている。この環境整備における問題点は、異なる可視化デバイスには異なる可視化開発環境があり、デバイスに合わせてその都度、開発をやり直さねばならないことである。この点を解決する方法の一つとして、全ての場合に利用可能な汎用的開発環境を用意するため、ゲーム開発エンジン Unity [6] を活用した可視化研究を進めている。Unity では直接 HMD に表示することが可能である。他方、CAVE 型 VR 装置である CompleXcope に Unity で開発した可視化ソフトウェアを表示するためのミドルウェア MiddleVR [7] を導入している。このように Unity を中心とした可視化ソフトウェア開発環境を整えている。

ソフトウェア面では、3 次元的に表現されたプラズマを VR 空間で立体的に解析することを目的として、シミュレーションデータの解析で活用される AVS/Express の VR 対応版である AVS/Express MPE [8] を導入している。また、将来のヘリカル型原型炉の設計研究へ貢献することを目的として、3 次元 CAD データの評価検証支援ツール VirDSE [9] を導入している。本ソフトウェアを用いること

により、CAD ソフトウェアのデータを直接読み込んで CompleXcope に投影して、VR 空間内で部品の組付けや干渉判定、作業検証などを行うことができる。異なる可視化ソフトウェアの描画命令をキャプチャして、それらを重畳表示するソフトウェア EasyVR/FusionVR [10] の導入により、シミュレーションデータの可視化結果と、3 次元 CAD データから写實的に表現された実験装置とを CompleXcope 上に同時に表現することができる。VR 装置を用いた立体表示は、実験観測ポートからの視野の確認やプラズマと実験装置の空間的な相対関係の確認など、炉設計支援において重要な役割を果たすものである [11, 12]。

これらの環境を活用することにより、共同研究を推進すると共に、社会への発信を進めている。以下では、この 5 年間で共同研究の下で進められた核融合研における可視化研究について紹介する。

3.2.2 CAD データの VR 可視化

核融合研では、将来の核融合発電炉を実現するために、その原型となる「ヘリカル型原型炉」の設計研究を進めている [13]。原型炉では多くの機器が取り付けられ、とても複雑な構造になる見込みである。そのため、原型炉設計では建設時の組み立て工程や稼働開始後のメンテナンス手順などを考慮する必要がある。この時、部品の取り付けや取り外し、移動に利用するロボットアームの設計、また、それを動かす手順も検討する必要がある。これら原型炉そのものとロボットアーム、そのまわりのメンテナンス作業を行う場所をまとめた総合的な設計研究が進められている [14]。このような検討では、これまで設計用のソフトウェアを使って、通常のパソコンのディスプレイのような 2 次元ディスプレイに表示された情報を基に行ってきた。しかし、この方法では、本来 3 次元の情報を 2 次元に投影するために奥行き情報が失われてしまい、部品の立体構造や 3 次元的位置関係の把握は難しくなる。そのため、部品やロボットアームの動きを検討しながら検討結果を設計に反映することは大変難しく、この問題を解決できる新たなシステムの開発が求められていた。そこで、本研究では、CompleXcope で VirDSE を使ってロボットアームを含めたヘリカル型原型炉の設計データを 3 次元 VR 空間に投影して、炉内部品の位置関係やロボットアームの動きについて、3 次元で確認できるシステムを構築した [15]。このシステムでは、まず、原型炉の設計データを VR 空間に投影し、自分自身が原型炉の中に立ったり、歩いて視点を変え

たりするなどして、部品の位置関係をあらゆる方向から確認できるようにした(図1)。次に、ロボットアームを含めたデータを投影し、ロボットアームによる部品の取り付け・取り外しや移動を確認できるようにし(図1)、さらに、自分自身の「手」をVR空間の中に投影することで、VR空間内の「手」で部品をつかんで動かしたりすることもできるようにした(図2)。

3.2.3 In-situ 可視化

In-situ 可視化を行うための可視化ライブラリ VISMO の開発[16]を進めている。

スーパーコンピュータの発達に伴いシミュレーション規模の著しい増大が進んでいる。しかし、ハードディスク使用量制限のため全てのシミュレーションデータを保存することはできず、また、ローカルの可視化解析マシンでの解析もローカルマシンのスペックの制限があるためデータを間引くといったことが行われている。そこで、シミュレーションの生データを保存する代わりに、可視化データを保存するという In-situ 可視化の研究が進められている。In-situ 可視化はシミュレーションの実行とともにデータの可視化を行う方法である。VISMO の可視化手法はソフトウェアレンダリングであり、開発言語はシミュレーション研究者になじみの深い Fortran2003 を使用している。可視

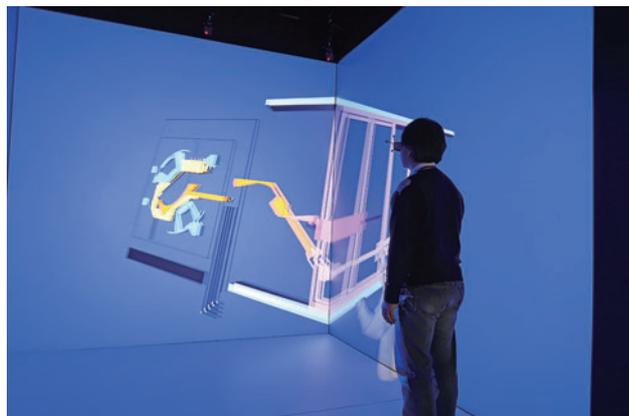


図1 ヘリカル型核融合エネルギー原型炉の設計データをバーチャリアリティ装置 CompeXscope に投影して、ロボットアームによる炉内部品の取り付けを確認している様子。



図2 ヘリカル型核融合エネルギー原型炉のVR可視化。パーツを仮想的な「手」でつかみ、つかんだパーツが別のパーツと接触したため赤く表示されている。

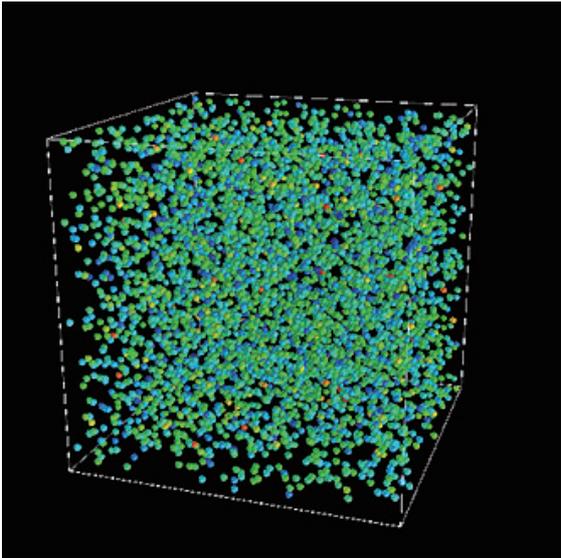
化手法として、粒子(色や半径の変更が可能)・等値面・スライス・流線・矢印がある(図3)。これまでに VISMO はプラズマ粒子シミュレーションコード PASMO[17] や、MHDシミュレーションコード[18]、量子乱流シミュレーションコード[19]に実装された。MHDシミュレーションコード及び量子乱流シミュレーションコードへの実装では VISMO で描かれた図がそのまま論文に採用されている。図3は PASMO コードに VISMO を実装して描いた図である。

3.2.4 Unity を用いた可視化

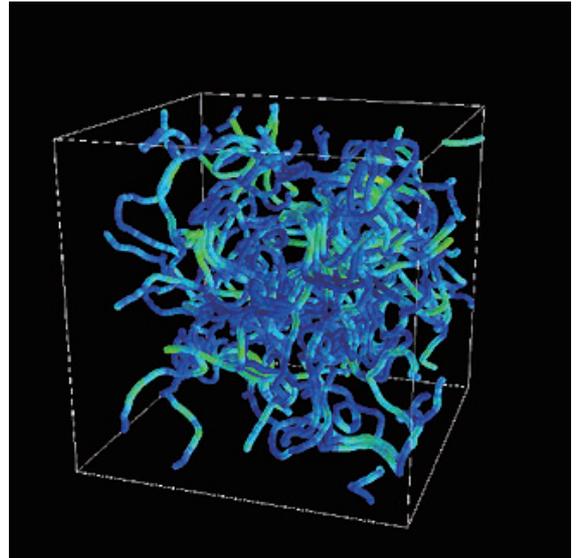
Unity は汎用ゲーム開発エンジンのひとつで、Android などで動作するゲームの開発で幅広く使われている。使いやすいインターフェースやC#による開発環境を備え、Windows, MacOS, iOS, Android, WebGL などの様々なプラットフォームで実行可能な実行ファイルを出力することができる。豊富なアセットも公開されているため、開発をより容易にしている。また、PCの画面上だけでなく、Oculus Rift や HTC VIVE, WindowsMR などのHMDや、zSpace[20]といった多様なVR装置に出力することも可能である。CAVEを採用している CompeXscope においても MiddleVR というミドルウェアを介することで、Unity で作成したアプリケーションを表示することができる。CADデータのobjファイル、fbxファイルなどをUnityは直接インポートできるので、これまでより容易にCADデータからVRコンテンツを作成できるようになった。図4は、LHD周りのNBI装置や真空排気装置、ベルジャー、ヘリカルコイルやポロイダルコイル(図には表示されていない)をUnityに取り込んだ様子を表している。これまでに開発してきた真空容器内部のVRコンテンツを組み合わせることも行い、LHD周りの装置から真空容器内まで(ヘリカルコイルやポロイダルコイルも含む)を表示するVRコンテンツを作成することができた(図5)。さらに、このLHD装置のコンテンツは FusionVR を介して Virtual LHD[21]と同時に表示することも可能である。Virtual LHD は核融合研で開発されたVR可視化ソフトウェアで、この同時VR可視化により、HINT[22, 23]による平衡プラズマデータ(磁力線, 等圧面, ドリフト粒子軌道)を真空容器内に表示することができる[24, 25]。

この他にも、LHD 実験で得られた不純物放射光の強度データをUnityを使ってiPadなどのデバイスで可視化するシステムを開発した[26]。実験で得られている発光分布強度のデータは構造化されていないため、直交格子に再構成することで高速に可視化をすることが可能となり、リアルタイムでの視点変更などが可能となった。システムではハンドヘルドデバイスで強度分布データを表示して、スライドボタンを使って描画パラメータを変更することができる。

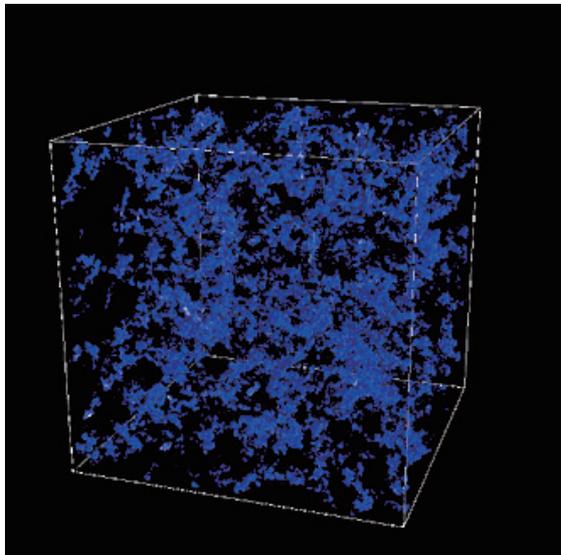
また、GKVシミュレーションによるプラズマ乱流シミュレーションデータ[27, 28]をHMDでVR可視化する研究を進めている。シミュレーションで得られたフィールドデータから AVS/Express で描画して ply ファイルを出力して、



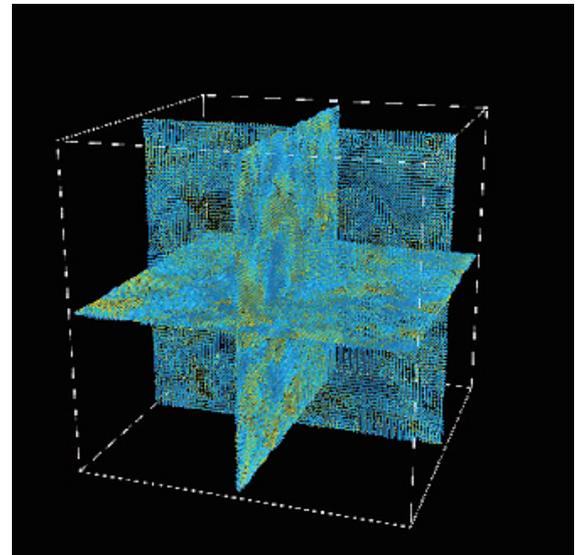
(a) 粒子. 色は粒子速度を表す. 半径を物理量に合わせて変更も可能.



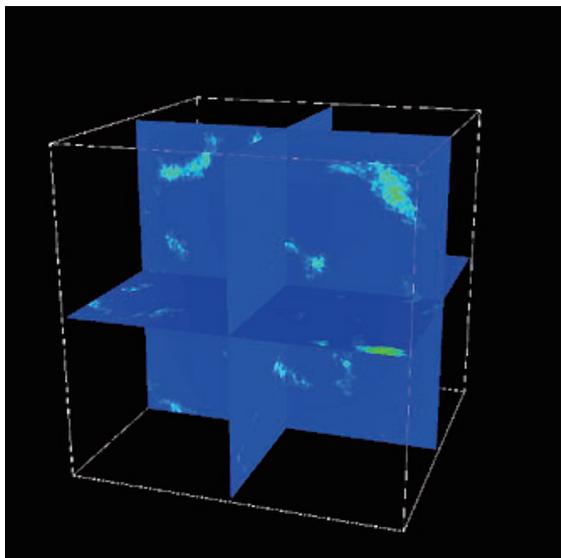
(d) 流線.



(b) 等値面.



(e) 矢印.



(c) スライス.

図3 VISMOによる可視化.

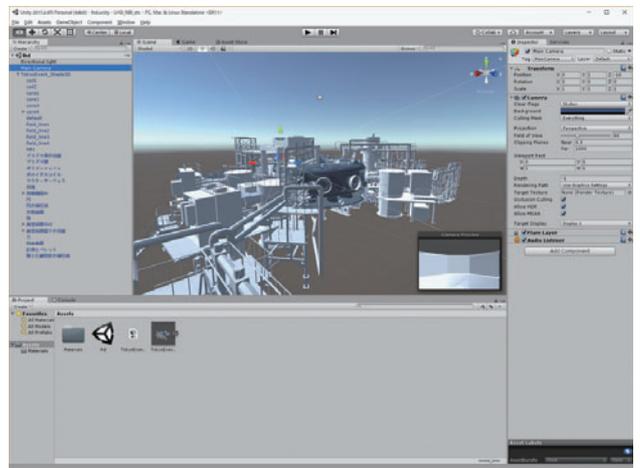
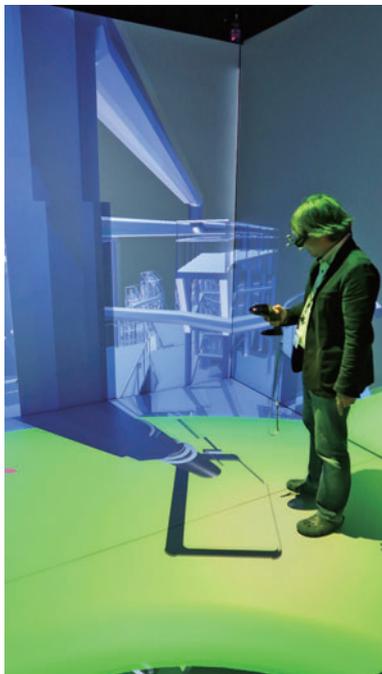


図4 Unityのインターフェース.

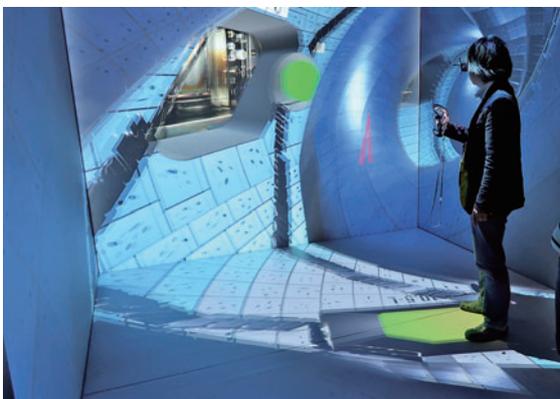
Blenderを使ってUnityに対応したfbxファイルヘデータ変換を行う。Unityを使って、WindowsMRのモーションコントローラによるモデル操作を実装して、両手の相対的な動きによって対象の移動、回転、拡大縮小や片手の操作によってVR空間内を移動することができる。



(a)LHD 真空容器の外.



(b)LHD 真空容器の上部.



(c)LHD 真空容器内部.

図5 LHD 周りから真空容器内のVR可視化。写真には表示されていないが、ヘリカルコイルやポロイダルコイルも設置されている。

可視化のプロセスでは、その目的によって利用する表示装置が異なるだけでなく、可視化のためのソフトウェアもシステム構成に合わせた専用のものとなることが多い。Unity やミドルウェアを用いることにより、既存のソフトウェア資産を生かしつつ、CompleXscope のような大型のVR装置からHMDのような可搬性のあるVR装置までに幅広く対応可能な可視化コンテンツの開発ができるようになった。このことは、共同研究だけではなく、社会への情報発信をこれまで以上に進めていくための強力な推進力となる。

3.2.5 HMD を用いた VR 可視化

前節で述べたように、Unityを導入することでHMDでのVR表示を容易に導入することができるようになった。Unity を用いて開発したLHD 真空容器のコンテンツを、MiddleVRを介してCompleXscopeで表示することを紹介したが、同コンテンツをHMD (Oculus Rift) でも実行できるようにした。Oculus Touchによるフリスルーも可能である。図6はUnity上でLHD 真空容器コンテンツを稼働させている様子で、図中央の2つの図のうち、右図がHMDに表示されている画像である。

その一方で、これまでに開発されてきたCAVE用の可視化アプリケーションをHMDでも活用したいと考えた場合、HMDベンダーの提供するプログラミング言語用開発キット (SDK) や、Unity用プラグインを用いて、それらをHMD用に移植または再開発しなければならない、非常に多くの工数が必要となる。Virtual LHDはCAVE装置用SDKであるCAVELibを用いて開発されており、HMD用CAVELib互換ライブラリCLCL[29]を用いることにより、この問題を解決できるのではないかと考えた。そこで、Virtual LHDへのCLCLの導入を進め、HMDでも動作させることに成功した。図7はCLCLを使って移植されたVirtual LHDがPC上で実行されている様子を示す。Oculus Touchを使ってCAVEと同じ操作性で操作ができる。

3.2.6 磁力線データの可視化

核融合炉の設計研究では、3次元CADを使って設計を行っている。その設計の過程で、VMEC[30,31]で計算された平衡プラズマでのMGTRC[32]による磁力線追跡データからポアンカレマップを求めて、炉構造体の断面図に重

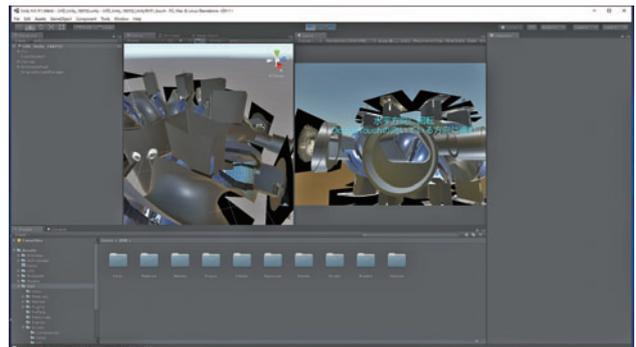


図6 LHD 真空容器コンテンツのHMDへの移植.

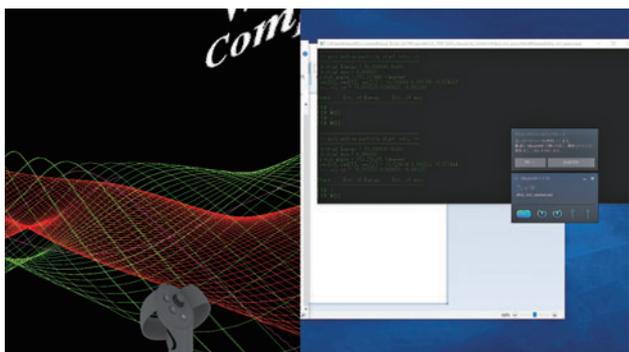


図7 Virtual LHDのHMDへの移植. 本図左側は、HMD内におけるVirtual LHDの実行中の様子をPC画面上にプレビュー表示したものである。

ねながら炉構造体とプラズマとの接触判定を行っている。この際、断面図を1度ずつ区切りながら行っているが、この判定法により十分な精度が得られるか明確ではない上、炉構造体の構造を変更するたびにこの作業を進めるのは大変効率が悪い。そこで、粒子のラーマー半径を考慮しながら、追跡された磁力線データからそれらを包む包絡面を求め、プラズマが存在する最外面を3次元で求める研究を進めている[33]。この3次元最外面が求まれば、3次元CADデータと直接に接触判定を行うことができ、炉設計の効率が上がることが期待される。

3.2.7 FFHR CADデータの構造解析

核融合科学研究所核融合工学研究プロジェクトで進められている将来のヘリカル型核融合発電所の設計研究で、新型ヘリカルブランケットCARDISTRY-Bが提案された[14]。これはユニットが基本的に板で構成され、垂直もしくは大半径外側方向への移送のみで各ユニットを取り外すことができる画期的な構造となっている。この提案とともに、ロボットを使ったユニットの脱着・交換・輸送作業がCADソフトウェアを使ったアニメーション機能で検討されている。しかし、この検討ではユニットの構造解析や機構解析はなされていない。そこで、CADソフトウェアCATIA[34]を使った構造解析や機構解析を進めている。当初、SketchUP[35]を使って設計が行われていたため、CATIAで読み込みができなかった。現在、Fusion360[36]を使って設計が行われ(図8)[37]、CATIAによる構造解析が行われた。その結果、自重のみの負荷で完全に变形するユニットや、構造的に耐えられる限界のユニット、十分に耐えられるユニットがあり、また、設計データの問題でメッシュ分割できず、解析不能なユニットがあることがわかった。これらの結果は炉設計にフィードバックされた。

3.2.8 可視化研究の応用

可視化研究の応用として、アインシュタイン方程式の解析を進めた。

一般相対論に基づく宇宙モデルにはいくつかのモデルがあるが、そのうちの一つである空間一様・非等方宇宙モデルについて解析を行ったところ、これまでに研究されてきた力学系のカオスとは全く異なる特異な構造を持つカオス

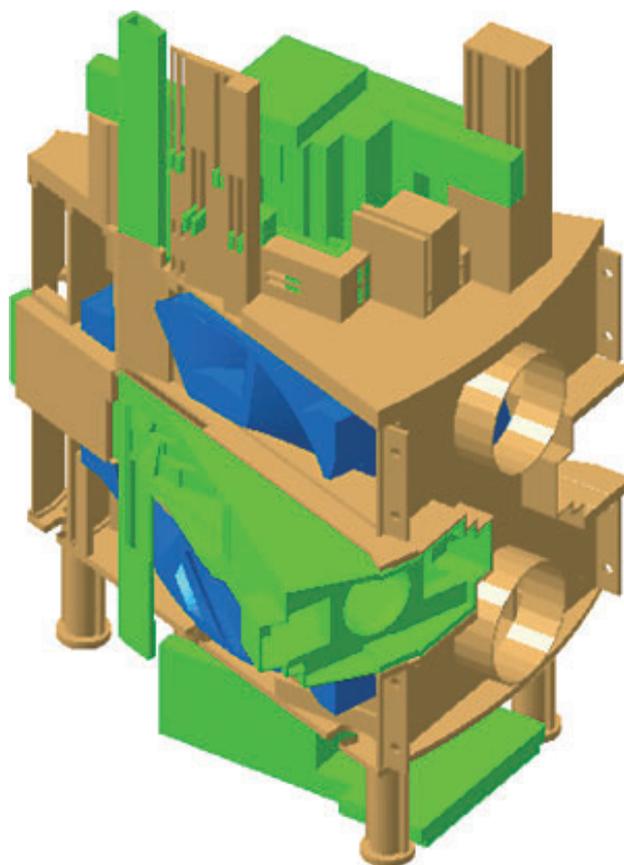


図8 FFHRのCADデータ。

が発生することを大阪府立大学大学院生の竹内雄哉君が見出した。膨張 - 収縮を繰り返している間は、適当に用意した断面に運動が繰り返し戻ってくるのでポアンカレマップが定義でき、そのマップが作る構造からカオスの判定が可能である。実際に、そのような膨張 - 収縮を繰り返す軌跡の集団(分布)はポアンカレマップで引き伸ばしと折りたたみを繰り返し、カオス系特有の構造を成す。

このように、多くのカオス研究ではそのカオス性を調べる手段として軌道のポアンカレマップを作成して議論する。しかし、この方法では軌道が作る構造の断面のみが解析可能であり、構造の全体像を把握することは困難であった。また、より観測事実に近い、膨張を続ける進化だけを集めた状態分布の発展では、上記の描像による繰り返し運動が存在しないので、ポアンカレマップを定義できない。そこで、アインシュタイン方程式で得られた軌道データについて4次元位相空間から3次元位相空間への射影を行い、3次元空間での軌道の可視化を行ったところ、集団を成す個々の軌跡が螺旋状に、回転しながら発展していることがわかった(図9)。したがって、この回転を繰り返し運動とみなすことで、ポアンカレマップのようなもの(正確にはバーコフ座標を用いたマップで、ピリヤード問題などに使われる)を考えることができ、この場合にもカオスを可視化できる可能性がでてきた。

この可視化研究による螺旋構造の発見は、当該研究分野に対して新たな研究の視点を与え、更なる研究の進展をもたらした。

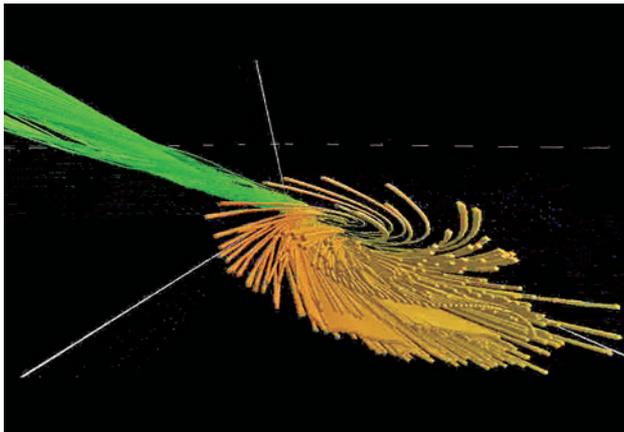


図9 アインシュタイン方程式から得られた軌道の解析結果。4次元位相空間から空間2次元・速度1次元の3次元位相空間への射影を行い、軌道を流線で表現したアニメーションの一面である。

参考文献

- [1] C. Cruz-Neira *et al.*, Proc. of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 135 (1993).
- [2] 石黒静児, 大谷寛明: プラズマ・核融合学会誌 **90**, 325 (2014).
- [3] Oculus Rift: <https://www.oculus.com/>
- [4] HTC VIVE: <https://www.vive.com/>
- [5] Windows Mixed Reality Headsets: <https://www.microsoft.com/en-us/windows/windows-mixed-reality-devices>
- [6] Unity: <https://unity.com/>
- [7] MiddleVR: <https://www.middlevr.com/2/>
- [8] AVS/Express MPE: <https://www.cybernet.co.jp/avs/products/mpe/>
- [9] VirDSE: <http://www.aec.co.jp/solution/mm/products/virdse/>
- [10] EasyVR / FusionVR: <https://www.fiatlux.co.jp/product/virtual/easyvr/>
- [11] H. Ohtani *et al.*, Plasma Fusion Res. **6**, 2406027 (2011).
- [12] H. Ohtani *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **56**, 692 (2016).
- [13] A. Sagara *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 2114 (2014).
- [14] J. Miyazawa *et al.*, Plasma Fusion Res. **12**, 1405017 (2017).
- [15] H. Ohtani and S. Ishiguro, Proc. of the 36th JSSST Annual International Conference on Simulation Technology, 194 (2017).
- [16] N. Ohno and H. Ohtani, Plasma Fusion Res. **9**, 3401071 (2015).
- [17] H. Ohtani and R. Horiuchi, Plasma Fusion Res. **4**, 024 (2009).
- [18] H. Miura, Fluids **4**, 4010046 (2019).
- [19] K. Yoshida *et al.*, J. Low Temperature Phys. **196**, 211 (2019).
- [20] zSpace: <https://jp.zspace.com/>
- [21] A. Kageyama *et al.*, Proc. ICNSP, 138 (1998).
- [22] K. Harafuji *et al.*, J. Comput. Phys. **81**, 169 (1989).
- [23] Y. Suzuki *et al.*, Nucl. Fusion **46**, L19 (2016).
- [24] H. Ohtani *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. **39**, 2472 (2011).
- [25] H. Ohtani *et al.*, Plasma Fusion Res. **6**, 2406027 (2011).
- [26] Y. Tamura *et al.*, Plasma Fusion Res. **14**, 3406084 (2019).
- [27] T.-H. Watanabe and H. Sugama, Nucl. Fusion **46**, 24 (2006).
- [28] M. Nunami *et al.*, Phys. Plasmas, **19**, 042504 (2012).
- [29] S. Kawahara and A. Kageyama, J. Adv. Simulat. Sci. Eng. **6**, 234 (2019).
- [30] S.P. Hirshman and J.C. Whitson, Phys. Fluids **26**, 3553 (1983).
- [31] S.P. Hirshman and P. Merkel, Comp. Phys. Comm. **43**, 143 (1986).
- [32] MGTRC: <https://github.com/yasuhiro-suzuki/MGTRC>
- [33] K. Hu *et al.*, J. Adv. Simulat. Sci. Eng. **7**, 151 (2020).
- [34] CATIA: <https://www.3ds.com/ja/products-services/catia/>
- [35] SketchUP: <https://www.sketchup.com/>
- [36] Fusion360: <https://www.autodesk.co.jp/products/fusion-360/overview>
- [37] J. Miyazawa *et al.*, Plasma Fusion Res. **14**, 1405163 (2019).