

那珂研究所核融合研究における可視化

鈴木喜雄^{1),2)}、鈴木昌栄²⁾、小関隆久²⁾、徳田伸二²⁾、岸本泰明²⁾、久米悦雄³⁾、
鈴木宜之⁴⁾、樋口高年⁵⁾

- 1) 科学技術振興事業団
- 2) 日本原子力研究所 那珂研究所
- 3) 日本原子力研究所 計算科学技術推進センター
- 4) (株)富士総合研究所 産業安全解析研究部
- 5) (株) 富士総合研究所 フロンティア・サイエンス室

日本原子力研究所那珂研究所では、太陽のエネルギー源である核融合の地上での実現を目指して、世界最大規模のトカマク型核融合実験装置 JT-60 の実験運転を中心とした研究開発を推進している。

核融合とは、水素のような軽い原子核どうしを衝突(融合)させ、ヘリウムなどのより重い原子核に変化させることである。例えば、重水素(D)と三重水素(T)による核融合反応ではDとTの原子核が融合しヘリウム(He)と中性子(n)ができるが、DとTの重さよりHeとnの重さの方が軽いため、アインシュタインの原理($E=mc^2$)より、その質量の差が非常に大きなエネルギーを生み出す。このエネルギー量は、核融合の燃料1gで石油8t分に相当する。

ところで、原子核は両方とも正の電荷を持っていることから、毎秒1千 km 以上もの非常に早いスピードでぶつけないと衝突(融合)しないため、1億度以上の温度に加熱することが必要となる。このような高温では、DやTなどは、原子が正の電荷を持つ原子核(イオン)と負の電荷を持つ電子に分かれて、両者が高速で不規則に運動しているプラズマと呼ばれる状態になっており、したがって、核融合反応を連続的に起こすためには、このプラズマを「たくさん(高い密度で)」、「長時間」、「一定の領域に」、閉じ込めておくことが必要となる。トカマク型核融合実験装置では、磁場のかごを用いてこの閉じ込めを実現しようとしている。

しかしながら、このような閉じ込めは、まだ理解されていないプラズマと磁場が引き起こす様々な複雑現象により十分には達成されていない。この複雑現象を理論的側面から理解するため、トカマク数値実験(NEXT= Numerical Experimental Tokamak)研究と呼ばれるスーパーコンピュータを用いた数値シミュレーション研究が、実験研究と並行して推進されている。ここで、プラズマを荷電粒子としてそのまま扱う粒子シミュレーションや、集団的振る舞いを調べるために電磁流体として扱う電磁流体シミュレーションなど、様々なシミュレーションが行われている。

その他、核融合実験装置の設計や、装置材料の研究など、様々な分野の研究が行われているが、核融合実現のためには、これら研究分野間のより密接な連携が今後さらに必要になると考えられる。そのためのプラットフォームのひとつとして画像処理による統合的解

析が位置付けられており、この統合表示方法のひとつとして VR の利用が位置付けられている。

那珂研究所においては、現時点では、シミュレーション研究、実験解析研究、設計研究の各研究における様々なデータを、それぞれ独立に VR 表示するという段階に留まっているが、昨年那珂研に設置されたスーパーコンピュータ(Origin3800 768GFlops)を用いた大規模数値シミュレーション結果の画像解析を、(VR を用いる用いないに関わらず)如何に高速行うかということや、那珂研から約 10km 離れたところに位置している東海研究所に設置されたスーパーコンピュータ(Vpp5000 614GFlops)で行ったシミュレーションの結果を如何に那珂研にいながらにして画像解析するかについての開発が行われてきた。

1)高速画像処理

シミュレーションの画像解析ソフトとして、EnsignGold と AVS/Express MPE が導入されている。EnsignGold は主に流体解析の機能を中心的に持っており、画像処理の各プロセス(データ読込、マッピング、レンダリングなど)を並列処理することが可能となっている。また、AVS/Express においては、データ読込モジュールに対して OpenMP を用いた並列化開発を KGT 社と共同で行った。これら並列処理の効率是十分であるとは言えないが、今後、より大規模化されるシミュレーションの画像解析を行うにはこのような概念に基づく画像処理が必須となると考えている。

2)遠隔画像解析

EnsignGold には、サーバ・クライアントと呼ばれる異なる 2 台の画像装置にデータ読込やレンダリングを自動的に割り振る機能が装備されており、これにより遠隔地で行ったシミュレーションの結果を手元の画像解析装置で表示することが可能である。AVS/Express においては、これを含むより多くの機能を有するモジュールを KGT 社と共同で開発した。これにより、同じシミュレーションデータに対して異なる場所で同時に画像を表示したり、これら画像に対して、その大きさや視点などの同期をとる機能も開発中で、遠隔地間での共同研究への利用が予定されている。

最後に、実際に VR を用いて表示されているいくつかの結果について示す。

1)コンパクトトラス(CT)入射による新燃料供給法のシミュレーション

核融合実験において燃焼した燃料を供給するための新手法としてコンパクトトラス(CT)と呼ばれる小型の磁場閉じ込めプラズマを外部から入射するという方法が考案され、実験が進行中であるが、その有効性はまだ十分理解されていない。そこで、シミュレーションを用いることにより、入射された CT とトカマクプラズマの相互作用の理解を目指している。

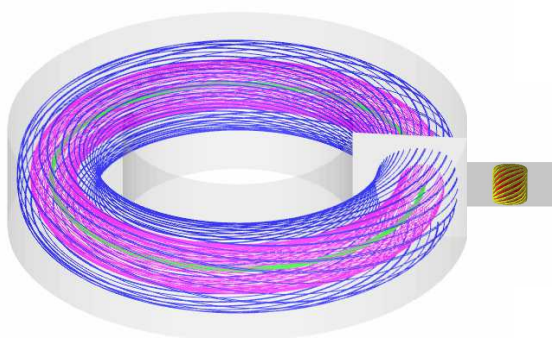


図 1.CT 入射シミュレーション。
プラズマを閉じ込めている装置磁場のかごと、外部から入射される CT。

2) 逃走電子シミュレーション

トカマクにおける不安定性の成長の結果、磁場が乱されることにより閉じ込められていたプラズマが外壁に向かって逃走する様子を示している。これにより、3 次元的逃走ルートの理解、外壁において破損が著しくなる場所の想定を目指している。可視化に対しては、AVS/Express のモジュール開発を富士総合研究所と共同で行った。特に、本開発の詳細について、後述の「開発ノート」にまとめている。

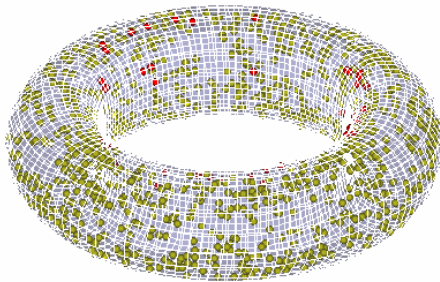


図 2. 逃走電子シミュレーション。
磁場のかごが乱されたときに外壁に向かって逃走する電子の様子。
赤色の部分が外壁に衝突した場所を示している。

3) 実験データをもとに再構築された平衡磁場配位による実験解析

実験データからプラズマの圧力分布と磁場配位を再構築することにより実験で起きている現象の理解を目指している。

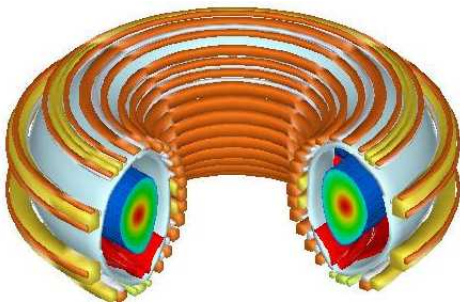


図 3. 装置コイル・外壁・再構築されたプラズマの平衡。
中央部の青・緑・赤色は磁場のかごの存在する場所ごとに色づけしている。

4) 国際協力熱核融合炉 (ITER) の CAD データによる設計研究

CAD による 2 次元的な設計から、実際にできあがる装置の 3 次元的イメージを得ると共に、設計ミスの予防に役立つことを目指している。

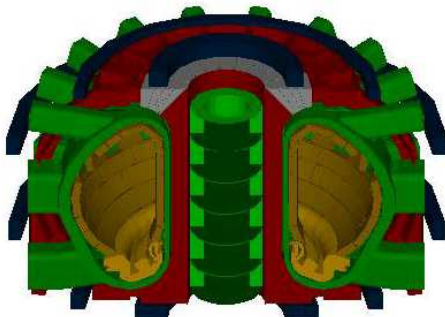


図 4. CAD データから作成された ITER。

今後は、これら各研究分野から得られるデータに対して生データのレベルで統合化することにより、各研究分野における相乗効果的な理解促進に役立つと共に、核融合研究の進展に役立っていくことが望まれる。

「開発ノート」

逃走電子シミュレーションの可視化に対して、富士総研と共同で行ったモジュール開発の詳細について記述する。おこなわれた作業は、既存の逃走電子シミュレーションコードと AVS/Express とのインターフェースの作成であり、逃走電子シミュレーション実時間計算表示システムが構築されている。ここで以下の 2 点が考慮されている。

- 1) VR 装置への表示とコンソール画面への表示が同一のソースプログラムにより実現されること。この実現のため、AVS/Express 上で可視化プログラムが構築されている。
- 2) 逃走電子シミュレーションコードとのインターフェースは、ファイルベースと通信ベースの 2 種類に対応していること。この実時間計算表示機能を実現するため、「可視化制御モジュール」が作成されている。

本システムの構成を図 5 に示す。

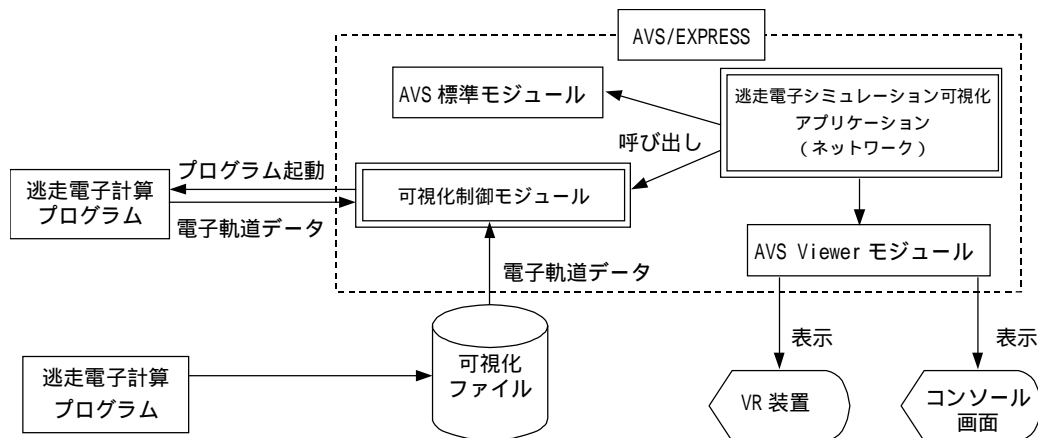


図 5. 逃走電子シミュレーション実時間計算表示システム構成

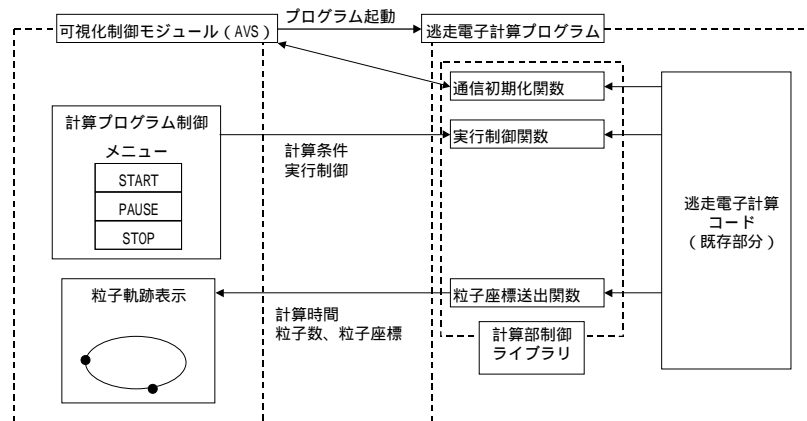


図 6. 可視化制御モジュールと逃走電子計算プログラムとのインターフェース

図 6 には、可視化制御モジュールと逃走電子計算プログラムとのインターフェースが示されている。ここで、可視化制御モジュール内では、モジュール起動時に逃走電子計算プログラムを起動し、可視化制御モジュールと計算コードとの通信インターフェースの初期

化を実施している。また、初期化終了後表示される計算プログラム制御メニューを使用し、計算の実行、停止、再実行等を行うことが可能である。

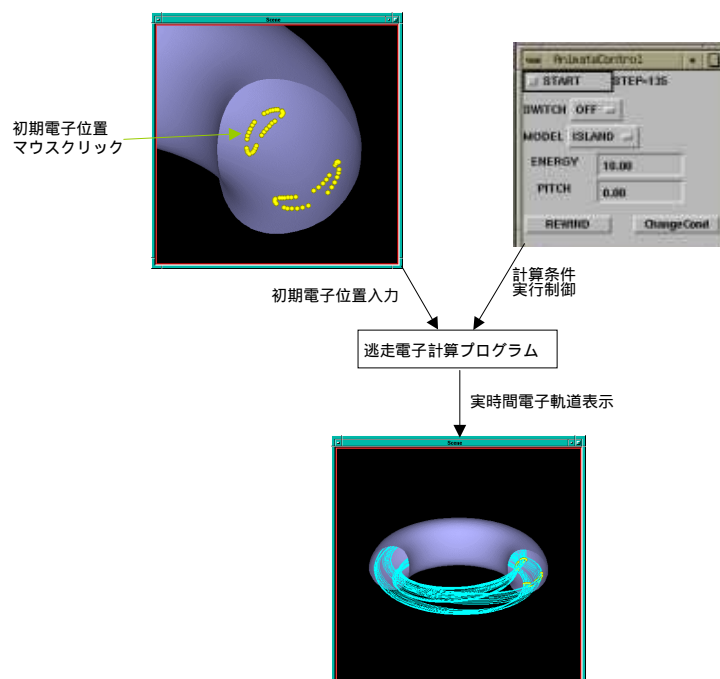


図 7. 実時間計算表示における入力メニューおよび実行例

図 7 には入力メニューおよび実行例を示しているが、マウスにより電子の選択・初期電子位置の変更を、メニュー画面により計算条件を変更することが可能となっている。