

# 核融合プラズマ研究のための超並列粒子シミュレーションコード開発とその可視化



参加者: 大野暢亮<sup>1</sup>(副代表)、宇佐見俊介<sup>2</sup>(副代表)、長谷川裕記<sup>2,3</sup>、森高外征雄<sup>2,3</sup>、沼波政倫<sup>2,3</sup>、樋田美栄子<sup>2</sup>、三浦英昭<sup>2</sup>、石黒静児<sup>2,3</sup>、堀内利得<sup>2</sup>、臼井英之<sup>4</sup>、三宅洋平<sup>4</sup>、深沢圭一郎<sup>5</sup>、片桐孝洋<sup>6</sup>、田光江<sup>7</sup>、小川智也<sup>8</sup>

<sup>1</sup>兵庫県立大、<sup>2</sup>核融合研、<sup>3</sup>総研大、<sup>4</sup>神戸大、<sup>5</sup>京大、<sup>6</sup>名大、<sup>7</sup>情報通信研、<sup>8</sup>北里大

## 1. 研究目的

### 核融合プラズマのシミュレーション研究

- 粒子モデル: 荷電粒子の運動方程式とMaxwell方程式(微視的物理)
- 膨大な粒子を計算する必要
  - 困難な巨視的時空間スケールでの粒子シミュレーション

### リアル粒子シミュレーションへ

- 実験や観測に即したシミュレーションモデルの構築・導入
- プラズマの再結合や衝突のような素過程の導入
- 実際のイオン・電子質量比 $m_i/m_e$ でのシミュレーション実行
- コードや素過程モデルの最適化・高速化

トラス系プラズマにおけるディスラプション現象のように微視的物理が装置全体に影響を与えるような現象の解明

## 2. 研究課題

### ①リアル粒子シミュレーションコードの研究・開発

実質量比 $m_i/m_e$ でのシミュレーション実行を目指してコードの最適化・高速化  
素過程モデルの組み込み・最適化・高速化

### ②巨視的シミュレーションに活用するための第一原理に基づく微視的現象のモデル化研究

たとえ超並列化した粒子コードでも装置全体などのグローバルな系を扱うことは現在・近未来のスーパーコンピュータでも不可能  
→ 粒子シミュレーションで得られた知見から微視的現象を表すようにモデル化  
→ 経験的モデルより予測性の高い巨視的シミュレーションの実現

### ③大規模粒子データの解析を行う「その場可視化」の研究・開発(VISMO開発)

ストレージ制限など→すべての計算データ保存は不可能  
困難なポストプロセス(解析用マシンのメモリ不足→全データの可視化解析等が困難)  
→ 「その場可視化」の研究・開発: 計算実行とともに可視化作業を行う。

### ④核融合プラズマにおける物理課題の基礎的研究

磁気再結合、プラズマ輸送、高速粒子による波動励起

## 3. 昨年度の成果

### ①粒子コードの研究・開発:

- up3bdコード[1]: 2次元領域分割化コード開発及びVISMOの挙動も含めた検証を行った。粒子データのノード間転送: 2次元同時に転送するよりも1次元ずつ転送のほうが計算速度が優れていることを確認した(2次元転送は1次元ずつ転送の1.19倍である)。粒子存否判定プロセスの最適化: ①冗長計算の削除、②ループ分割、③粒子データ配列のスレッド並列用次元の要素数の変更によって、as isの計算時間に比して0.229倍の計算時間となった。
- PASMOコード[2]: up3bdコードで採用されている最適化を適用した。従前は、スレッド並列用の次元を設定して、全粒子による足しこみ終了後、スレッド並列の次元に対する累積計算したが、スレッド並列用の次元をなくし、OpenMPのreduction指示節を用いる足しこみに変更した。1.2%の性能向上を得た。
- XGCコード[3]: ジャイロ運動論に基づくPICコード。ヘリカル核融合炉特有の複雑な周辺磁場構造に対応するための要素手法の開発。非構造格子の形成で外部コイル形状に合わせた2次元曲面を数値最適化で生成する方法を開発した。ジャイロ運動論ポアソン方程式を任意の磁場構造に対して計算する反復解法を開発した。

### ②モデル化研究

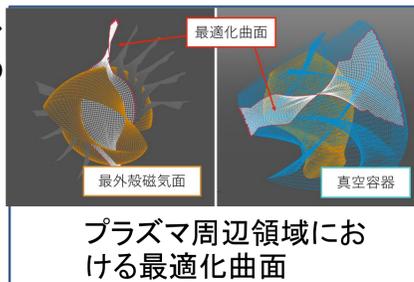
- イオン・電子完全2流体モデルの開発及びシミュレーション安定化のための技法調査。粒子コードとのハイブリット化を目指して、PIC部分のコード開発も進めた。

### ③その場可視化の研究・開発

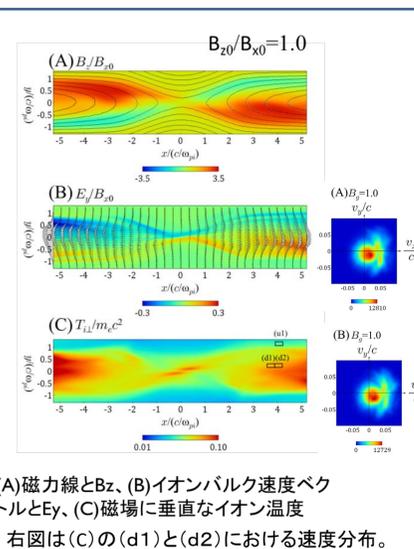
- VISMOライブラリ[4]: ライブラリを公開した。シミュレーション実行中に統計量をグラフ化する機能を作成した。

### ④物理課題研究の成果

- 磁気再結合の研究: 粒子シミュレーションにより、疑似マクスウェル速度分布が幅を持つリング型速度分布の1種であることを明らかにした。それに基づいて幅を持つリング型速度分布を正確に表す関数を導出し、その関数式から、形状が疑似マクスウェル速度分布となる条件を定量的に求めた。
- 周辺領域におけるプラズマ輸送の物理研究: 終端板に対して斜めの磁力線、及び、プロブを設定する機能を用いてプロダクトランを行い、終端板の傾斜の効果について解析を進めた。その結果、傾斜が強くなるにつれて、伝播速度が速くなることわかった。
- 高速粒子による波動励起: 低域混成波不安定性について高速粒子を注入し続ける開放系シミュレーションを行い、高速粒子の注入効果によって、幅広い波数の低域混成波が励起し、イオンの加速を促進することを明らかにした。



プラズマ周辺領域における最適化曲面



(A) 磁力線と $B_z$ 、(B) イオンバルク速度ベクトルと $E_y$ 、(C) 磁場に垂直なイオン温度  
右図は(C)の(d1)と(d2)における速度分布。

## 4. 今年度の研究計画

### ①粒子コードの研究・開発

素過程モデル(Takizukaモデル、Nambuモデル、Null collision法など)を導入し、FX1000での最適化を行う。

### ②モデル化研究

研究課題①と比較対照するためのイオン・電子2流体モデルコードの開発を行う。完成したコードのアウトラインを基にシミュレーションコードの開発と最適化を進める。本研究課題の主要目的である、現実に即した $m_i/m_e$ でシミュレーションを行うためには、空間解像度及び時間発展を非常に微細にする必要がある一方、これは大きな領域・巨視的運動を扱うことができる流体モデルの長所を損なう結果になる。これを克服するため、陰解法など手法・数値モデルについて検討を進める。

### ③その場可視化の研究・開発

VISMOでのメモリ消費によっては、ノード内メモリが少ない計算機では大規模なシミュレーションができなくなるという課題がある。VISMOでのメモリ使用を最適化して、SIMD化やソフトウェアパイプラインによるFX1000での更なる最適化・高速化を目指す。

### ④物理課題の研究

2021年度に、磁気再結合における疑似マクスウェル分布形成条件の定量的解析、フィラメント伝播における終端板傾斜効果の解析、高速粒子による波動励起で低域混成共鳴周波数付近の波の飽和レベルの解析を進めた。これらの解析には更なる定量的解析やその定式化が必要であり、2022年度は更なるパラメータランを行い、線形理論や実験結果と比較して、発生条件等の理論化を進める。

[1] H. Hasegawa & S. Ishiguro: Proceedings of the 40th JSST Annu. Int. Conf. on Sim. Tech., 152 (2021).  
 [2] H. Ohtani & R. Horiuchi: Plasma Fusion Res. **4**, 024 (2009).  
 [3] C.S. Chang et al.: Physics of Plasmas **15**, 062510 (2008).  
 [3] H. Miura et al: Phys. Plasmas **8**, 4870 (2001).  
 [4] N. Ohno & H. Ohtani: Plasma Fusion Res. **9**, 3401071 (2014).  
<https://vizlab.sakura.ne.jp/ja/vismo.html>