

jh210005-NAH

大谷寛明(核融合科学研究所)

# 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>、中島 浩<sup>5</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

粒子モデルを基礎としたシミュレーションコード群の整備

→ 総合的な研究基盤の構築

効率的なシミュレーションコードの開発、モデリング、可視化までをひとつのパッケージ

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

第一原理からその発生機構解明をめざし核融合プラズマの閉じ込め性能改善への寄与

## 2. 研究課題

① 粒子モデルを基礎としたシミュレーションコードの研究・開発

核融合プラズマ: 非一様な粒子分布 → 超並列に対応したアルゴリズム研究・開発

核融合プラズマにおける物理課題解決のためのシミュレーション実行

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:

- PASMOコード[1]、up3bdコード[3]: FX1000への移植・最適化を行った。コンパイルオプション -Qtを-Nlst=tへ変更するのみで、コンパイル・実行ができた。OpenMPIは富士通のライブラリを使用した。
- PASMO: Pusher・Gatherプロセスの最適化をすることで、FX100での実行と比べて1.26倍の性能向上、最適化前後で1.78倍の性能向上となった。
- up3bd: センターが用意したモジュール(FFTWと富士通OpenMP)へ切り替えた。FX100に比して2.5~3倍の性能向上となった。

② モデル化研究

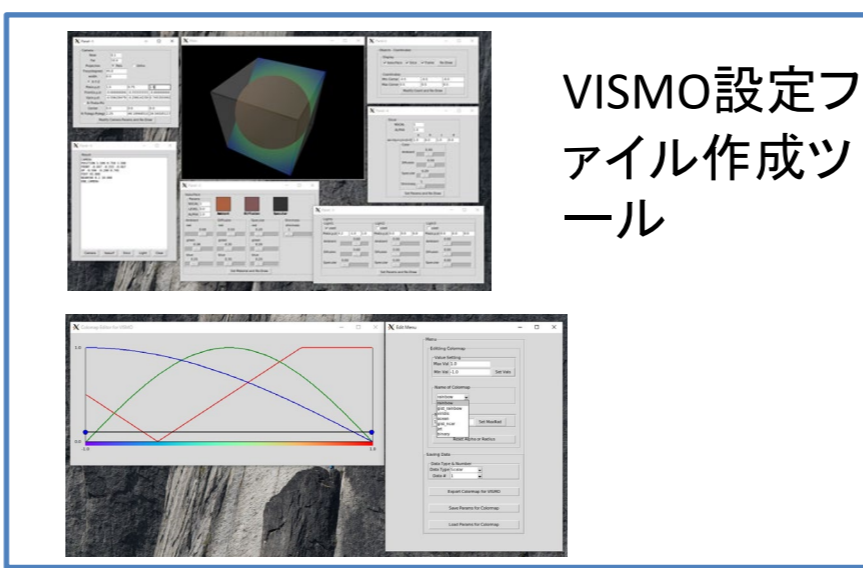
- 変数の持ち方の変更などコードをリファクタリングした。

③ その場可視化の研究・開発

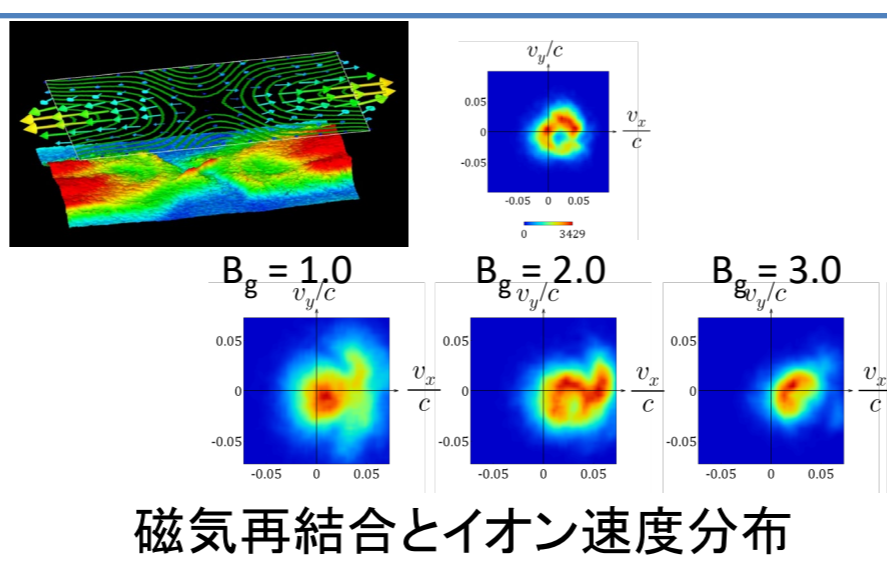
- VISMOライブラリ[5]: 名大情報基盤センターのご協力のもと、FX1000への移植を行った。また、CGの知識が必要なカメラ位置設定や等値面の色設定など、可視化パラメータを容易に設定するためのツールをPythonベースで開発した。

④ 物理課題研究の成果

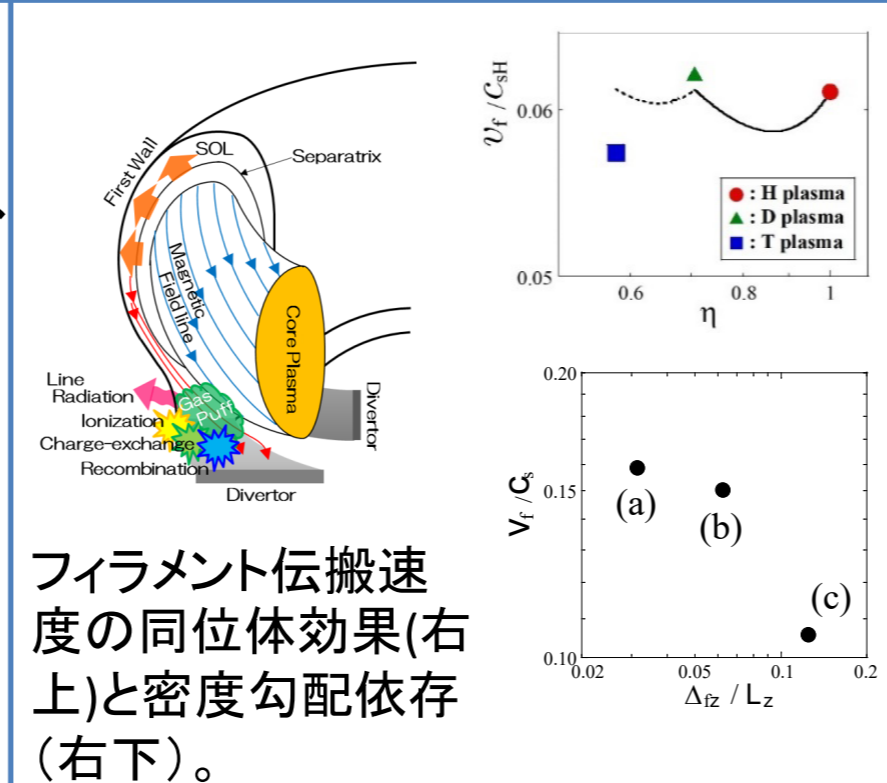
- 磁気再結合の研究: イオンの速度分布がMaxwell分布と異なる分布になり、その形状は縦磁場に依存する。円環速度分布の厚みによってMaxwell分布と区別できない分布になることが分かった。これまでの人工衛星や粒子シミュレーションで、疑似Maxwell分布が見逃されていた可能性がある。
- 周辺領域におけるプラズマ輸送の物理研究: プラズマフィラメントの径方向伝搬速度の同位体効果を調べ、重水素プラズマではシーズ効果と分極ドリフト効果を重畳させた速度理論値と一致した。三重水素プラズマでは、分極ドリフト効果もしくは粒子旋回運動効果により速度が理論値より遅くなった。フィラメントが磁力線方向に密度勾配を持つ場合、フィラメントの回転に伴い、勾配が小さいほど伝搬速度が減少した。
- 高速粒子による波動励起: 高速イオンによる不安定性の非線形発展を調べ、プラズマ密度の増加で、低域混成共鳴周波数 $\omega_{LH}$ は増加するが、高速イオンが励起する $\omega_{LH}$ 付近の波の振幅は減少することを示し、実験と定性的に一致した。低域混成波不安定性の非線形発展と背景の熱イオン加速について調べ、高速イオン注入効果で低域混成波の大振幅が維持され、熱イオン加速を引き起こすことが分かった。



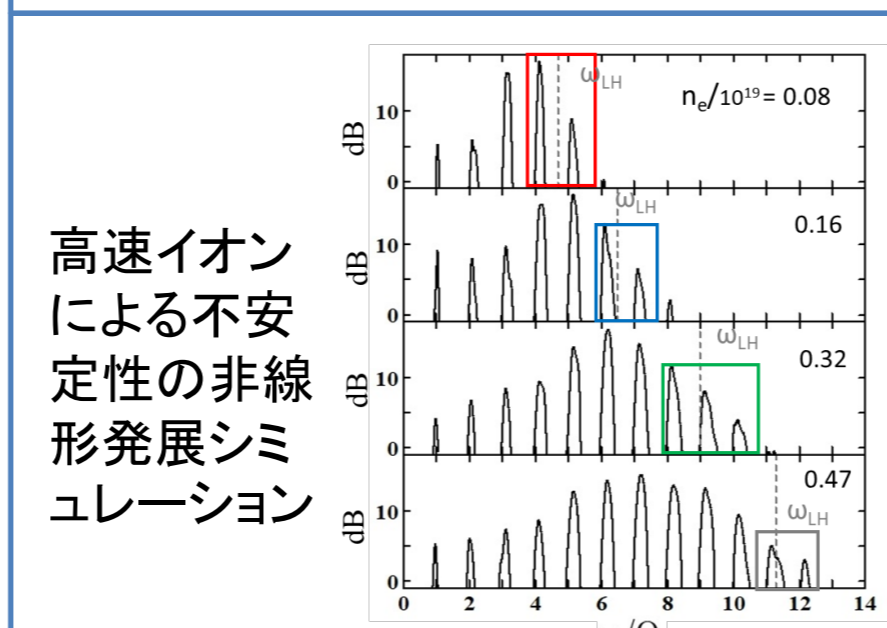
VISMO設定ファイル作成ツール



磁気再結合とイオン速度分布



フィラメント伝搬速度の同位体効果(右上)と密度勾配依存(右下)。



高速イオンによる不安定性の非線形発展シミュレーション

## 4. 今年度の研究計画

① 粒子コードの研究・開発

- PASMOコード: データ構造の変更などを検討して最適化を進める。
- up3bdコード: y方向の領域分割に対応した初期密度分布設定ルーチンの開発、初期分布設定サブルーチンへの設定オプションの追加を進める。
- 物理課題の研究
  - 磁気再結合研究: 多種の異常速度分布形成について、その形成条件をシミュレーションから明確にして、実験や観測への提言を行う。
  - 周辺領域におけるプラズマ輸送の物理研究: 様々な初期条件でのパラメータランから、普遍的な運動論的效果を調べる。
  - 高速粒子による波動励起に関する研究: 線形理論並びに実験と比較して、低域混成波が大振幅になる条件を明らかにするとともに、地球磁気圏で指摘されている低域混成波によるイオン加速について研究する。

② モデル化研究

- 運動論的スケールでの結果に差異がどの程度大きいスケールまで波及するかを調べるため、イオン・電子完全2流体シミュレーションコードの開発を進めるとともに、シミュレーション安定化のための技法について調査する。

③ その場可視化の研究・開発

- シミュレーションデータの統計量を可視化するための機能を開発・追加する。

[1] H.Ohtani & R.Horiuchi: Plasma Fusion Res. 4, 024 (2009).  
 [2] H.Nakashima, et al: Proc. Intl. Conf. Supercomputing, pp.90-99, June 2009.  
 [3] S.Ishiguro & H.Hasegawa: J. Plasma Physics 72, 1233 (2006).  
 [4] H.Miura et al: Phys. Plasmas 8, 4870 (2001).  
 [5] N.Ohno & H.Ohtani: Plasma Fusion Res. 9, 3401071 (2014).