

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¹(副代表)、宇佐見俊介²(副代表)、長谷川裕記^{2,3}、森高外征雄^{2,3}、沼波政倫^{2,3}、樋田美栄子²、三浦英昭²、石黒静児^{2,3}、堀内利得²、臼井英之⁴、三宅洋平⁴、中島 浩⁵、深沢圭一郎⁵、片桐孝洋⁶、田 光江⁷、小川智也⁸

¹兵庫県立大、²核融合研、³総研大、⁴神戸大、⁵京大、⁶名大、⁷情報通信研、⁸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(パラメータ化)

→ 巨視的モデルに組み込む

→ 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研究

3. 昨年度の成果

① 粒子コードの研究・開発:

• PASMOCODE[1]: PusherとGatherプロセスでのSIMD化やソフトウェアパイプライン有効化のアルゴリズム開発やSort処理の自動化。実行時間を53.9%まで削減。

• p3bdコード[3]: VISMOの実装。粒子吸収境界の開発・検証。Z方向に局在するプロボも初期設定が可能に。

② モデル化研究

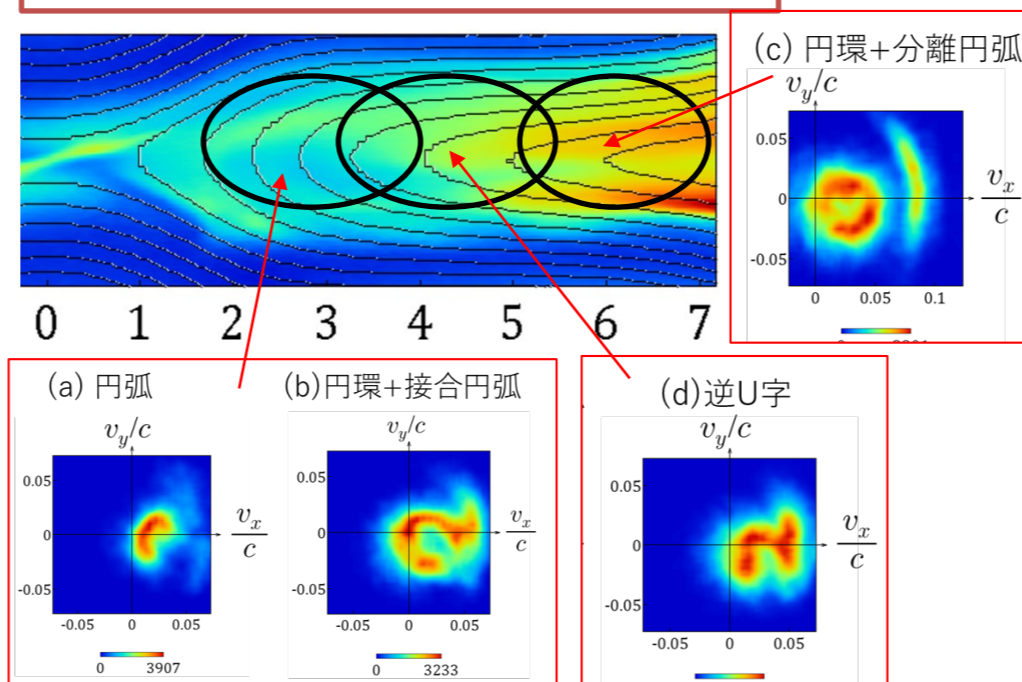
• AMR機能のために記述が複雑になったコードをリファクタリングした。

③ その場可視化の研究・開発

• VISMOライブラリ[5]: 四面体格子版の開発を進め、等値面・スライス・ボリュームレンダリング・矢印表示の実装を終えた。

④ 物理課題の成果

STプラズマ合体におけるイオン実効的加熱: 特異な速度分布構造



イオン運動: ジャイロ運動+EXBドリフト
実行温度 単純な円環と比較して
(a)と(d): 低下。(b)と(c): 上昇

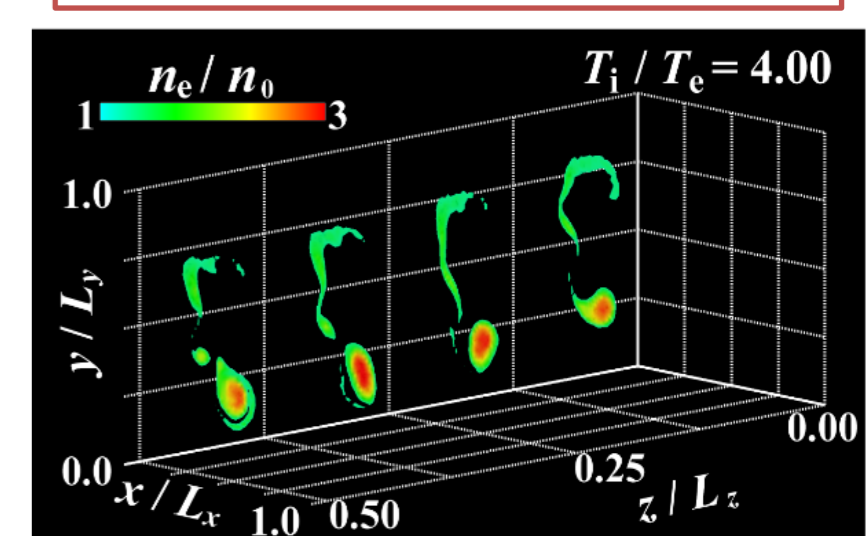
高速イオンによる低域混成不安定性の非線形発展

LHDにおける垂直NBIIに伴う低域混成共鳴周波数帯の電磁波放射(Saito 2018)は、磁場に垂直方向の速度空間でリング状の分布を持つ高速イオンによる不安定性に起因すると考えられる(Toida 2018)

高速粒子の継続注入の効果

低域混成波が大振幅を維持し、熱イオンに影響を与え続ける。

境界領域プラズマにおける素過程の物理解明



高Tiのとき、ポロイダル対称性の崩れが発生。

磁力線方向の電位構造が、このポロイダル対称性の崩れに影響を及ぼす。径方向輸送の解明には磁力線方向の依存性も重要

4. 今年度の研究計画

① 粒子コードの研究・開発

• PASMOCODE、up3bdコード: 名大「不老(FX1000)」での最適化を行う。PASMOCODEを参考に、up3bdコードの多次元領域分割化を検討する。

② 物理課題の研究

• 磁気再結合研究: リング状のイオン速度分布による実効的加熱について探求する。特に、実効的加熱が起こる条件に不明確な点が残っているので、多数のパラメータランを実行して、定量的な加熱条件を導く。

• 周辺領域におけるプラズマ輸送の物理研究: 終端板への磁場の入射角度が斜めになる系にも対応するようにコードの改良を進め、フィラメント発生過程やフィラメントの密度勾配に起因する不安定性などについて研究を実施する。

• 高速粒子による波動励起に関する研究: 高速粒子の注入と損失の効果を取り入れたシミュレーションを行って、波の飽和と減衰の機構を解析する。特に、低域混成周波数付近の波に注目して、実験と比較し、それらの波の発生条件を調べる。

③ 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、差分法によるイオン・電子完全2流体シミュレーションコードの開発を行う。

④ その場可視化の研究・開発

• CGの知識がないシミュレーション研究者でも、VISMOの設定ファイルを容易に記述するためのツール開発を進める。

[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).