

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)、沼波政倫^{2,3}、長谷川裕記^{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

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:

- PASMOコード[1]: OhHelpライブラリ[2]に対応した開放系境界条件の開発。
- p3bdコード[3]: 領域分割型分散並列化版コード(up3bd)の開発。

② モデル化研究

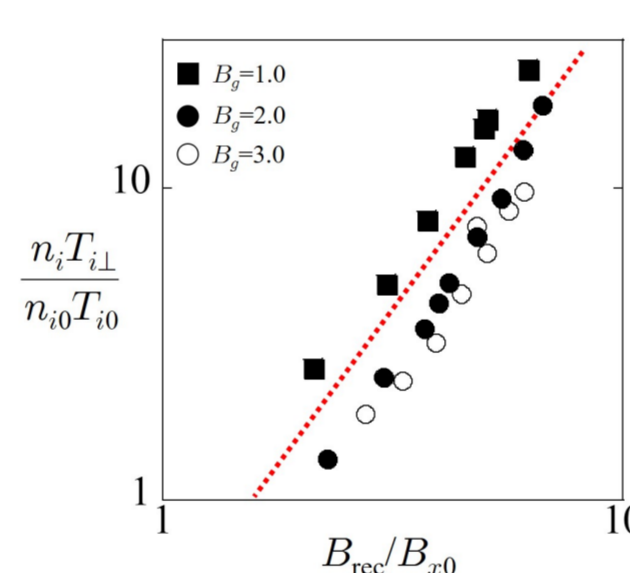
- MHDコードMUTSU/MINOS[4]の機能拡張(SGSモデル改良や交換型・テアリング不安定性の遷移現象の2Dシミュレーションへの応用)。
- 多階層モデルの開発: レイリーテイラー不安定性における階層性に着目し、後者の手法に基づいた多階層モデルの開発を推進。

③ その場可視化の研究・開発

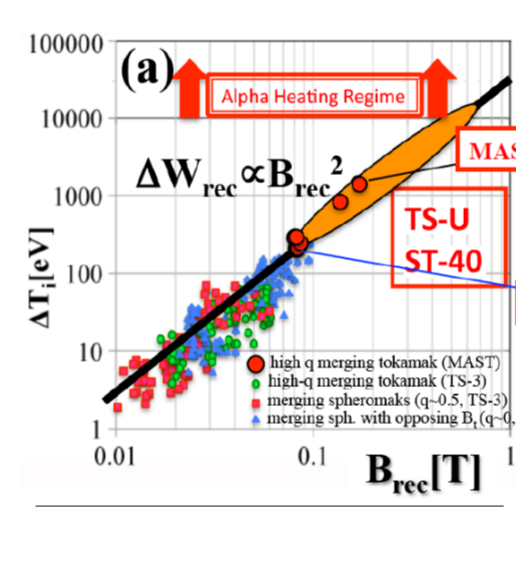
- VISMOライブラリ[5]: 没入型VR装置CAVE用及びPC用点群ビューアの充実を図り、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)での表示にも対応。カーテシアン座標版VISMOの可視化機能の拡充。

④ 物理課題の成果

STプラズマ合体におけるイオン加熱
リコネクション磁場依存性



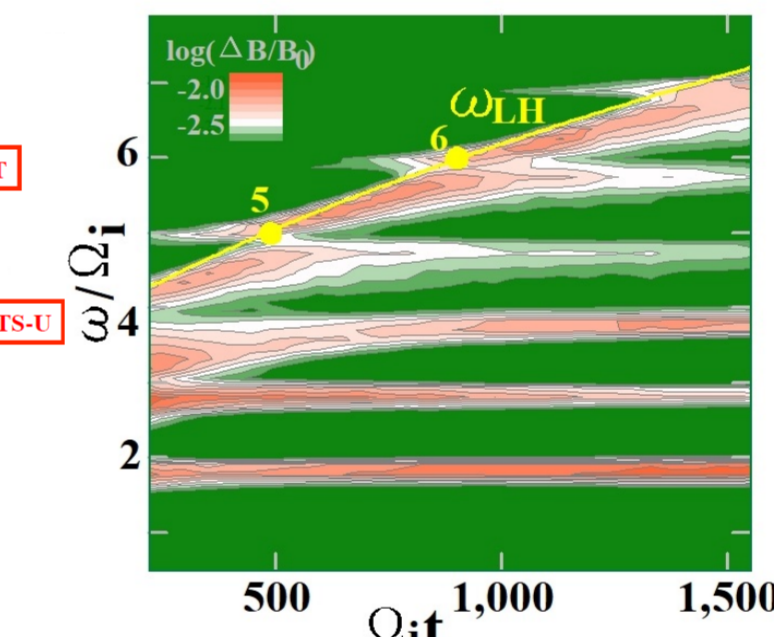
シミュレーション



実験

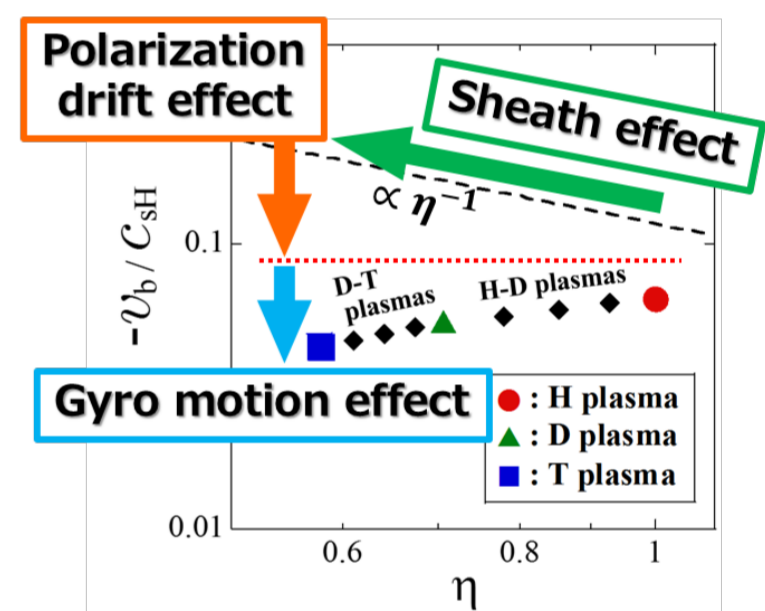
PASMOによる結果。B_{rec}² スケーリングがシミュレーションでも成立する。

高速イオンによる低域混成共鳴周波数帯の不安定性



周波数が階段状に変化。実験と同じ特徴を示した。

フィラメント現象における同位体効果



イオン質量増加によるシース効果と分極ドリフト効果は打ち消しあうが、イオン旋回運動効果により伝播速度が減少する。

4. 今年度の研究計画

① 粒子コードの研究・開発

- PASMOCコード: メモリへのランダムアクセスを抑制するためのアルゴリズム開発。
- p3bdコード: VISMO(粒子表示機能を含む)の導入。粒子軌道データ保存ルーチンの開発。
- 物理課題の研究

- 磁気再結合研究: リング状、弧状の特異な速度分布構造に起因する微視的不安定性や粒子衝突効果による、速度分布の緩和過程の探求。

- 周辺領域におけるプラズマ輸送の物理研究: 磁力線方向に局在して生成されたフィラメントの時空間ダイナミクス。

- 高速粒子による波動励起に関する研究: コードを拡張して、高速粒子の損失の効果。

② モデル化研究

- PICコードとの連携を目指して、流体モデルをイオン+電子の完全2流体モデルへの変更作業。イオンと電子を同時にシミュレーションするための数値的安定性などを考慮したコード開発。

③ その場可視化の研究・開発

- 四面体格子版VISMOの開発。

[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).