

jh230006

Joint Usage / Research Center for Interdisciplinary Large-scale Information Infrastructures

大谷寛明(核融合科学研究所)

プラズマ学際科学のためのリアル粒子シミュレーションの研究開発と応用



参加者: 宇佐見俊介¹(副代表)、長谷川裕記^{1,2}、森高外征雄^{1,2}、沼波政倫^{1,2}、樋田美栄子^{1,2}、三浦英昭¹、石黒静児^{1,2}、堀内利得^{1,2}、小谷翼³、大野暢亮⁴、川原慎太郎⁵、臼井英之⁶、三宅洋平⁶、田光江⁷、小川智也⁸、深沢圭一郎³、片桐孝洋⁹、滝沢寛之¹⁰
¹核融合研、²総研大、³京大、⁴兵庫県立大、⁵JAMSTEC、⁶神戸大、⁷情報通信研、⁸北里大、⁹名大、¹⁰東北大

1. 研究目的

プラズマ: 宇宙の典型的な物質状態(地球惑星科学、宇宙科学、核融合科学、材料プロセス工学など様々な分野で研究対象)→多様な現象
各分野でのプラズマパラメータは異なる→プラズマパラメータを特徴的なスケールで規格化

→共通の現象として議論 学際的な研究(例: プラズマ実験と太陽風-地球磁気圏-電離層でのプラズマ現象のアナロジー)

プラズマ科学: 膨大な数の荷電粒子の集団から構成される巨視的な系であるプラズマにおいて生起される多様な複雑現象が研究対象

粒子シミュレーション(1960年代初期に最初に考案されたシミュレーションモデルの一つ)。荷電粒子と電磁場のダイナミクスを自己無撞着に解く。

利点: 粒子運動という微視的ダイナミクスの追跡+粒子-波相互作用や粒子運動論的効果の正確な追跡

難点: メモリ量や計算速度の制限→実験装置サイズのような巨視的な系全体の計算が非常に困難(イオン・電子のスケール差: 時間で 10^3 、空間で 10^2 程度)

最適化の困難→粒子に働く力の計算や電荷密度・電流密度の計算でメモリへのランダムアクセス発生。

並列化の困難→均等な領域分割による並列化で偏った粒子密度分布が発生すると、並列負荷分散に偏りが発生

素過程の物理モデル(粒子間衝突や荷電交換、イオン再結合)は粒子間相互作用なので、粒子数 N に対して計算コストが N^2

プラズマ実験や太陽・地球磁気圏プラズマを模擬する境界条件や実験装置のジオメトリや境界条件の設定

実験や観測に即したシミュレーションモデルを構築・導入して、シミュレーションを実行する「リアル粒子シミュレーション」コードのための研究・開発

2. 研究課題

○イオン・電子質量比を実際の値でシミュレーション

○素過程の物理現象を含むシミュレーション

○実験や観測など、現実に即した境界条件やジオメトリを含むシミュレーション

→コードの最適化や高速化、並列化に対応したアルゴリズムの研究・開発、素過程モデルの最適化・高速化・並列化

○開発したコードの研究対象: プラズマ物理における微視的ダイナミクスの研究

高速粒子が励起する波動現象、ヘリカル系核融合炉に向けたジャイロ運動論研究、周辺プラズマにおけるプラズマ輸送現象、磁気再結合現象

3. 今年度の研究計画

up3bd コードへの素過程実装:

Coulomb衝突(Nambu法)と原子分子過程(Null Collision法)を用いる1次元PIC-MCCコード(PAMCADE)の名大不老Type-I(FX1000)への移植
→同手法の up3bd コードへの実装を検討

up3bd コードの各システムへの移植:

up3bd コードの東北大AOBA-B、並びに、京大Camphor3への移植

PASMOコードの素過程実装

Coulomb衝突(Takizuka法)の導入

核融合炉周辺領域の弱電離プラズマの模擬

核融合炉周辺領域の弱電離プラズマを模擬する上で重要となる電離・再結合過程のモデル化、およびシミュレーションコードへの実装

高速粒子が励起する波動現象

低域混成波ならびにその高調波の非線形励起機構

磁場強度、プラズマ密度、高速イオンの速さなどが異なるシミュレーションを実行して、低域混成波の高調波が生成される条件を調べる。

低域混成波の非線形発展に重要な影響を及ぼす高速イオンの速度分布の崩壊・再構築に関して、その物理機構とパラメータ依存性を解析する。

低域混成波の非線形発展における高速イオン質量に対する依存性

高速イオンの種類は、核融合プラズマでは水素同位体とヘリウム、宇宙プラズマでは水素、ヘリウム、酸素など様々なものがある。線形理論によると高速イオンの質量が大きくなると低域混成波は励起されにくくなるが、非線形発展については十分に調べられていない。電磁粒子シミュレーションを用いて研究する。

ジャイロ運動論研究

静電場構造と熱負荷

非構造格子生成手法やポアソン方程式の反復解法を活用し、ヘリカル核融合炉特有の周辺磁場構造における静電場構造と、それが核融合炉への熱負荷に対して与える影響を調べる。

プラズマ輸送現象の研究

素過程と輸送現象

・粒子衝突、中性粒子との素過程(非接触プラズマ過程)が、径方向プラズマ輸送現象に与える影響を解析する。

・密度勾配が駆動する不安定性によるフィラメント形成過程、イオン加熱過程などの研究を進める。

・核融合周辺プラズマは絶えずコアからエネルギーが供給され、その足元には中性粒子が多く含まれる非接触領域が存在するという点で、太陽風-地球磁気圏-電離層結合系と類似しており、そのアナロジーの議論により実験室プラズマとスペースプラズマとの学際的展開をめざす。

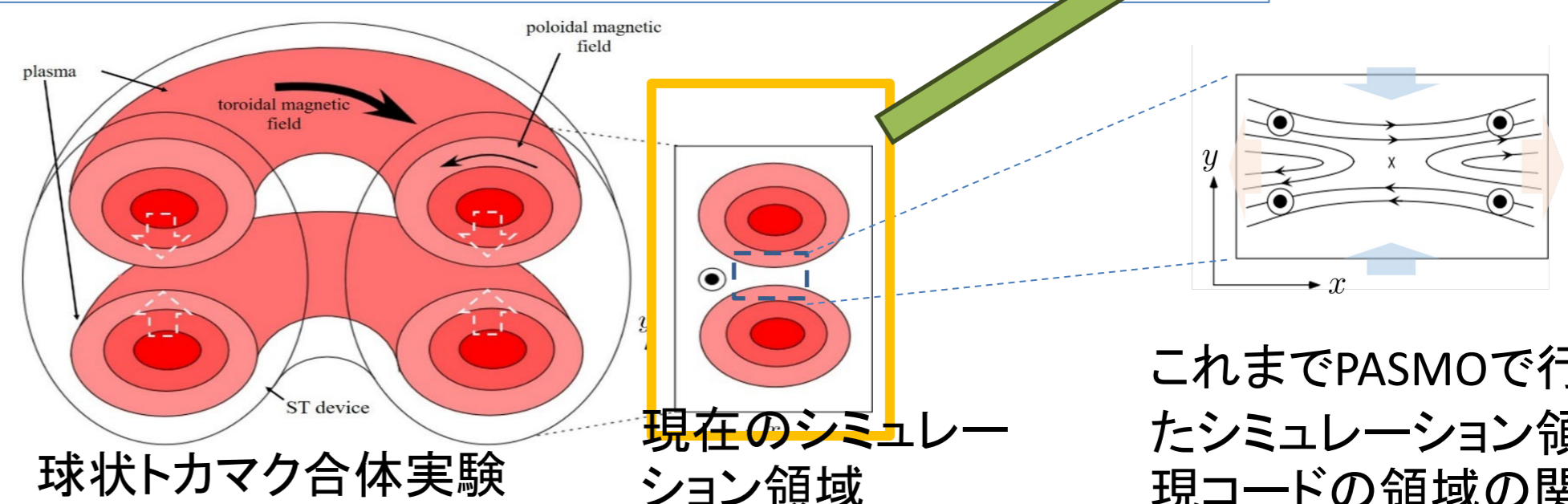
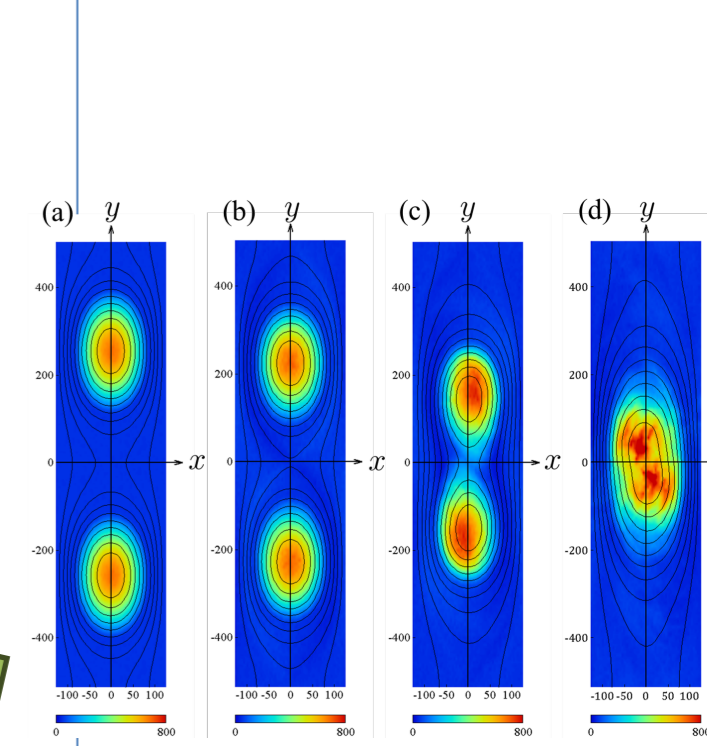
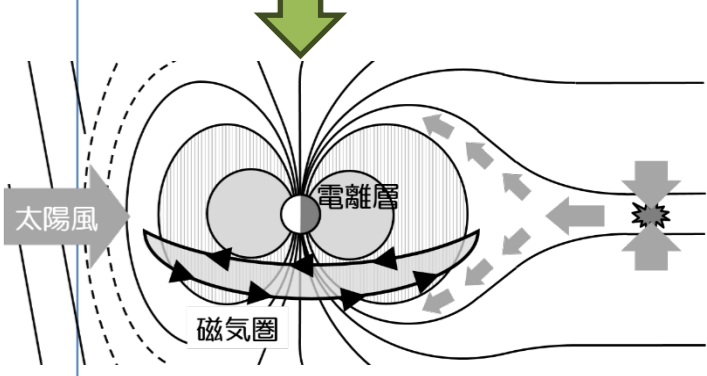
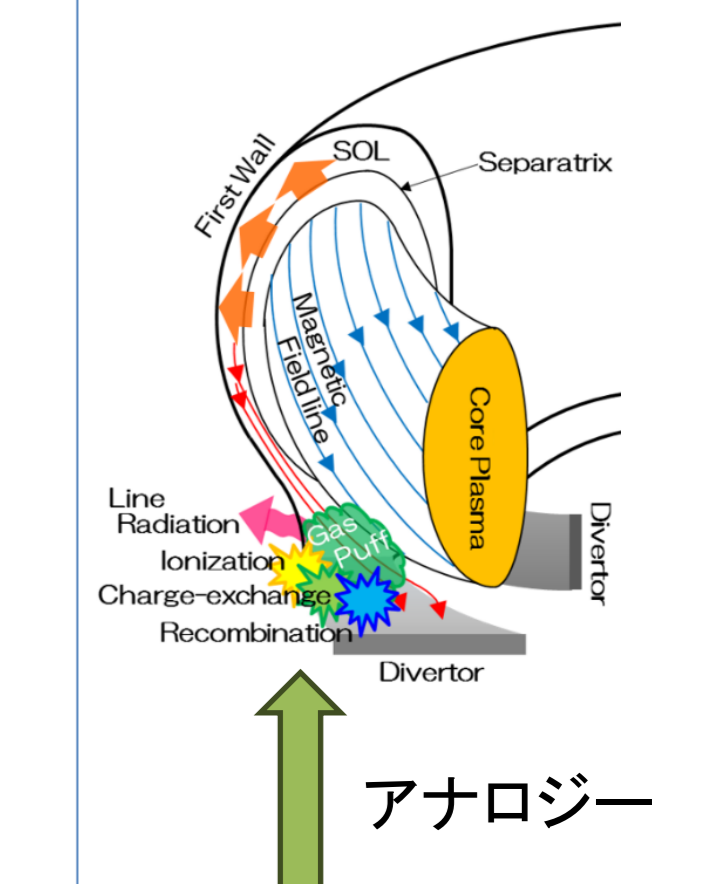
磁気再結合現象

球状トカマクのプラズマ合体実験の粒子シミュレーション

・PASMOコードをもとに合体の断面(下図の黄色い枠で囲んだ図)を模擬するシミュレーションを実施する。

・球状トカマクが合体する様子を再現する粒子シミュレーションを実施し、実験の結果と比較する。

・イオン速度分布などを詳しく解析して、加熱機構を探求する。リングの一部分のような形状の分布関数が見えており、PASMOによる磁気再結合の成果を適用できる可能性が高い。



これまでPASMOで行っていたシミュレーション領域と、現コードの領域の関係