

数値実験炉研究プロジェクト 2022年度研究成果

数値実験炉研究プロジェクト 研究総主幹 洲鎌英雄

- (1) 数値実験炉構築に向けたシミュレーションコードの開発と整備
→ 理論検証・実験検証
- (2) 核融合プラズマの物理機構解明と理論体系化
- (3) シミュレーション科学および核融合プラズマに関する支援研究の推進
- (4) 国内・国際共同研究、プロジェクト間連携の推進

タスクグループ

プラズマ流体平衡・安定性

プラズマ壁相互作用

高エネルギー粒子

統合輸送シミュレーション

新古典・乱流輸送シミュレーション

多階層複合物理

周辺プラズマ輸送

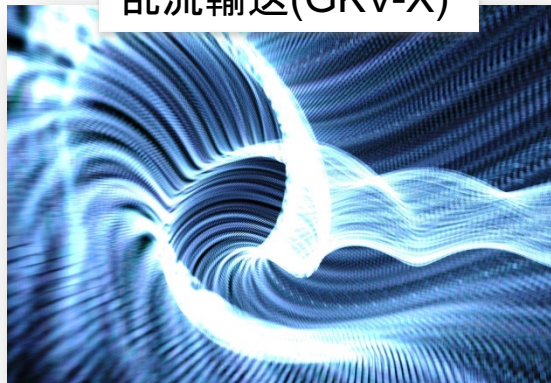
シミュレーション科学基盤



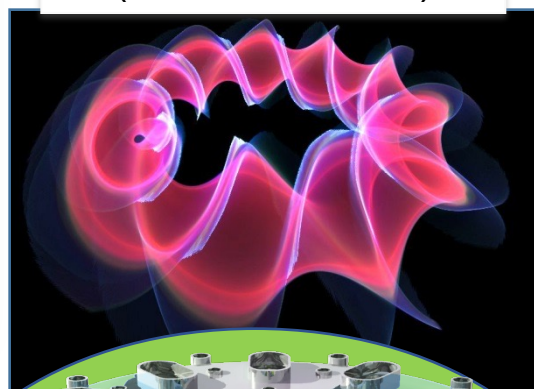
数値実験炉構築に向けたシミュレーション コードの開発・高精度化→実験検証



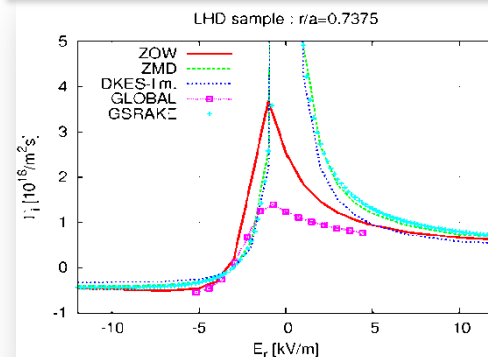
乱流輸送(GKV-X)



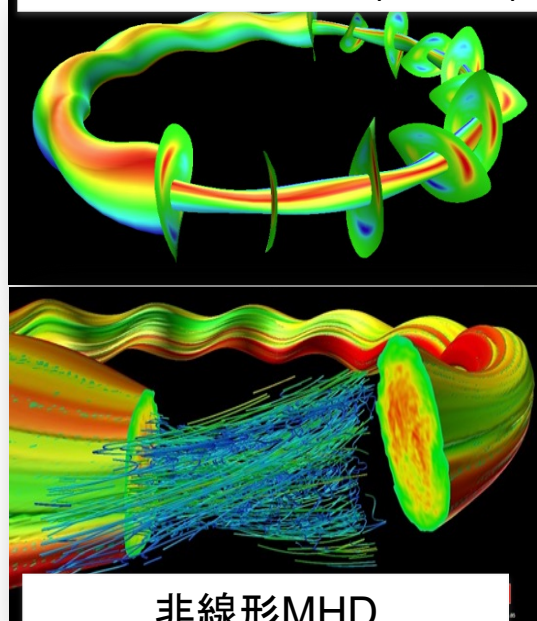
周辺プラズマ輸送
(EMC3-EIRENE)



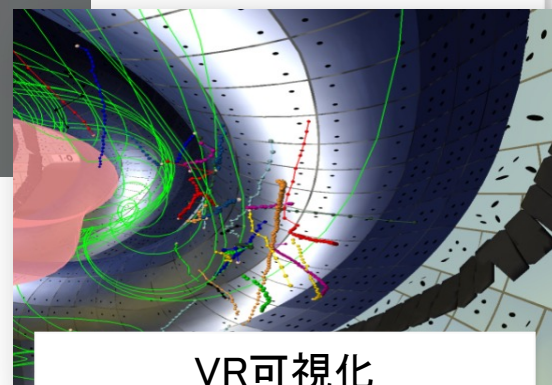
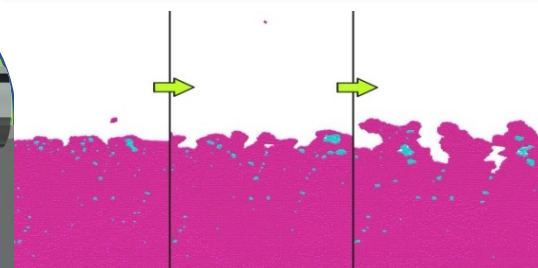
新古典輸送(FORTEC-3D)



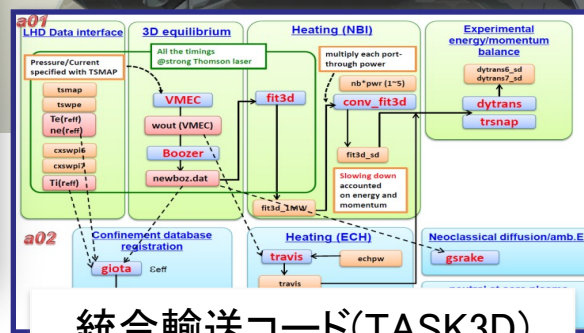
高エネルギー粒子(MEGA)



プラズマ壁相互作用(MD-MC)



非線形MHD
(MINOS,MIPS,NORM)



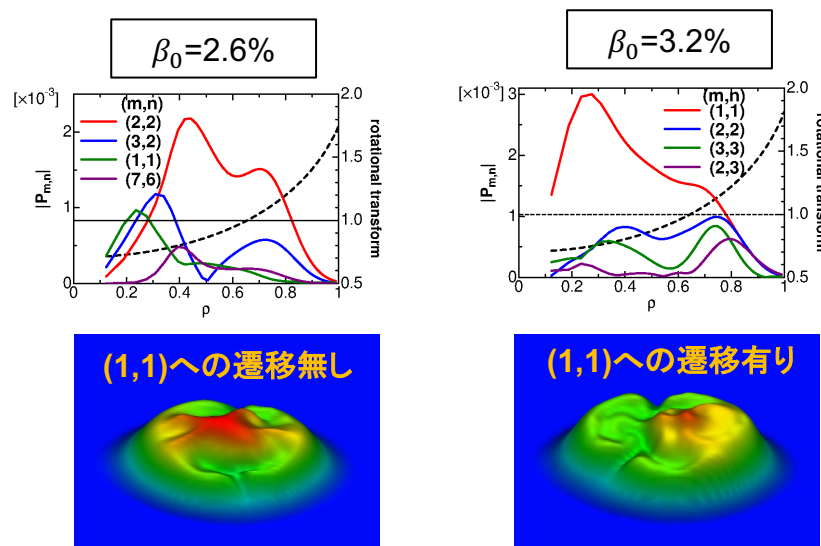
統合輸送コード(TASK3D)

プラズマ流体平衡・安定性解析

数値実験炉構築に向けた数値手法・計算コードの開発、整備、統合化

・LHDプラズマの摂動の挙動を非線形MHDシミュレーションコードMIPSを用いて解析した。

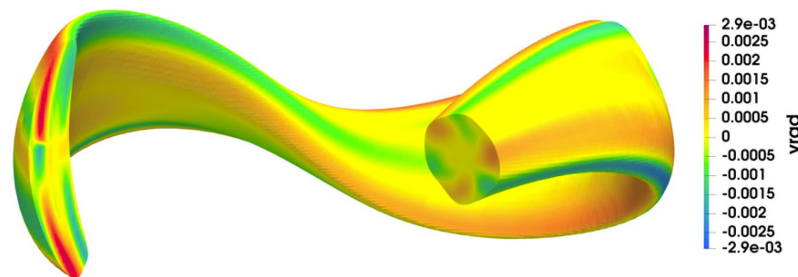
・アスペクト比が大きい配位では、ベータ値がある程度大きくなると、無電流平衡でも高(m,n)の交換型モードから(1,1)の非共鳴モードへの非線形遷移が生じる。この遷移は、1番目と2番目の支配的なモードの線形成長率及び摂動圧力の大きさが近接している場合に生じている。



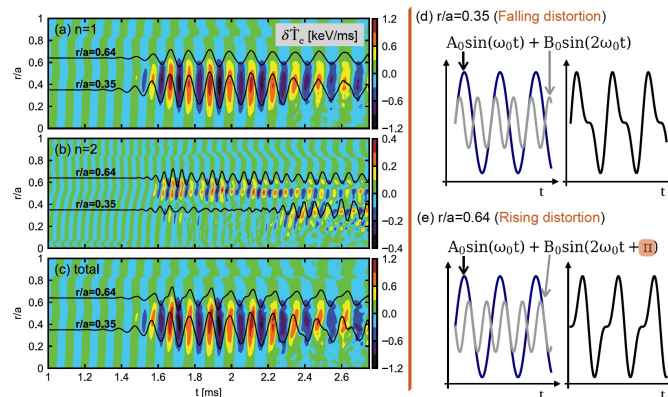
非線形発展後の摂動圧力の支配的なFourier成分と鳥観図

高エネルギー粒子

1. 西南交通大学との共同研究によりCFQSにおけるアルフベン固有モード (AE) のシミュレーションを実行し、非軸対称磁場配位での高エネルギー粒子とAEの共鳴条件を明らかにした。
2. 軸外れフィッシュボーンモード (OFM) のシミュレーションを実行し、MHD非線形高調波に起因した振動波形歪みの形成過程を解明した。



CFQSにおけるAEの空間分布 [H. Wang+, NF (2022)]



[H. Li+,
ITC31
(2022)]

MHD非線形高調波に起因したOFMの振動波形歪み

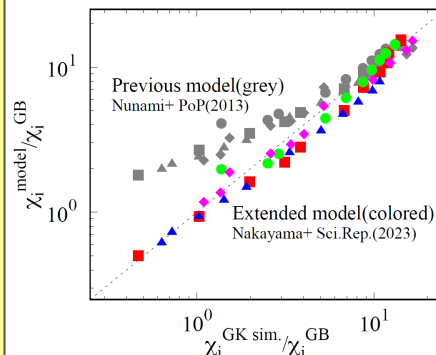
新古典・乱流輸送シミュレーション

(1) 数値実験炉構築に向けた数値手法・計算コードの開発、整備、統合化

1. 大域的full-fジャイロ運動論シミュレーションコードGT5Dを用いて、モデルステラレータ配位における線形ITG解析を実施
2. プラズマ乱流に対する多重場特異値分解を考案し、乱流輸送および非線形エネルギー伝達解析の研究が進展
3. ジャイロ運動論シミュレーションの時系列データに基づく乱流輸送モデル関数形を乱流や帯状流の時間遅れの効果を取り入れて拡張し、モデル関数の非線形計算結果再現性が、さらに向上
4. 実験室プラズマにおけるジャイロ運動論解析による不安定性の研究が進展
5. δf シミュレーションから直接的に新古典輸送係数を評価する手法を開発 (K. Fujita and S. Satake, Phys. Plasmas Early Career Collection 2022に選出)

(2) 磁場閉じ込めプラズマの平衡、輸送、不安定性、非線形発展及び関連する基礎物理に関するシミュレーション研究

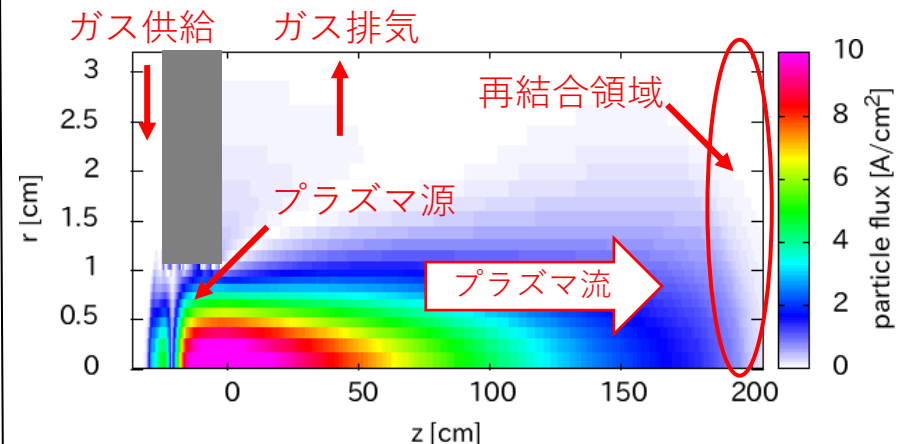
1. 大規模なジャイロ運動論計算結果を高速かつ高精度に予測することができる新たな縮約乱流輸送モデルの構築が進展 [Nakayama, Nakata et al., Sci. Rep. (2023), webプレスリリース予定]
2. 不純物イオンに対する背景プラズマの揺らぎの効果についてモデリングが進展



新たな縮約乱流輸送モデルの構築

周辺プラズマ輸送グループ

1. EMC3-EIRENEコードによる、直線装置（名大）の放電制御ガス吸排気条件の定量的再現に成功. [河村, 連合講演会2022, 8P25]
2. 同装置の重水素非接触放電を定性的に再現する輸送モデルの開発に成功（下図）.
[G. Kawamura, ITC2022, P2-2F11]
1. PICコードを用い、球状ダスト粒子表面のトリチウム粒子束分布計算および粒子束変化の要因分析モデルを開発. [G. Niu, G. Kawamura et al., NME 31 (2022) 101169]
2. PICコードを用い、KSTERのダイバータタイル間隙の熱流束分布予測モデルを開発. [Q. Xu, G. Kawamura et al., NME 34 (2023) 101390]



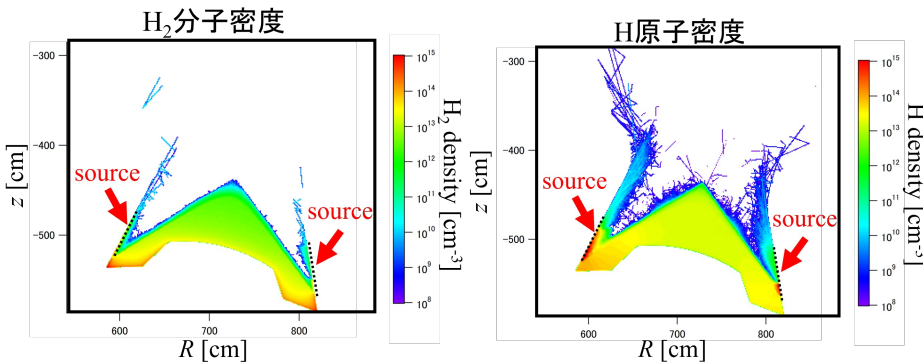
図： 磁場に平行な（装置の軸方向の）粒子束分布。ターゲット板（右端）で $\text{Te} < 1\text{eV}$ の再結合プラズマとなり、粒子束が急激に減少。計測との定量的な比較が今後の課題。

PWIシミュレーション

コアプラズマから周辺プラズマ・プラズマ対向壁までを含むシミュレーションコード群や使用する物理モデル群の整備・拡張・高精度化及び統合化のための研究

- 分子動力学に基づく水素リサイクリングモデルを用いて、原型炉へのダイバータ周辺部での水素原子・分子密度を求めた。
- 具体的には、SONICコード + 中性粒子輸送コード + タングステン分子動力学コードを組み合わせた。

分子動力学に基づく水素リサイクリングモデルの原型炉への適用



原型炉を想定して、SONIC + 中性粒子輸送コード + MDコードを用いて計算を行った。

[中村・斎藤他、JJAP 61, SA1005 (2022)]

[斎藤他、第39回プラ核学会年会富山 S1-6 (口頭発表)]

統合輸送シミュレーション

LHD重水素実験対応統合輸送解析スイート TASK3D-a (ver 5)

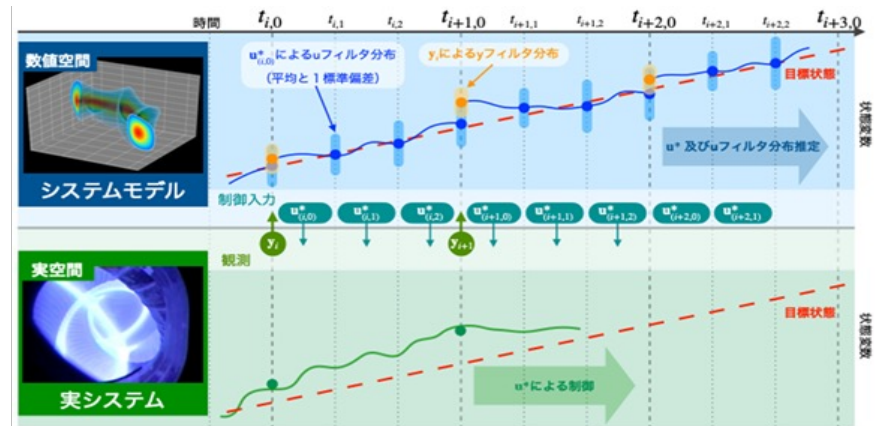
- NBIシャインスルー：解析ツールの実験検証 (ITPA-EP発表：QST 隅田ら)
- ICRHモジュール整備 (NIFS 關ら)

(2) データ同化フレームワーク



観測情報の同化による統合シミュレーションの最適化と目標状態を作り出すために必要な制御入力の推定を統合した新たなデータ同化フレームワークDACSを開発⇒LHDプラズマのリアルタイム制御実証 (京大、統計数理研究所、核融合研共同研究)

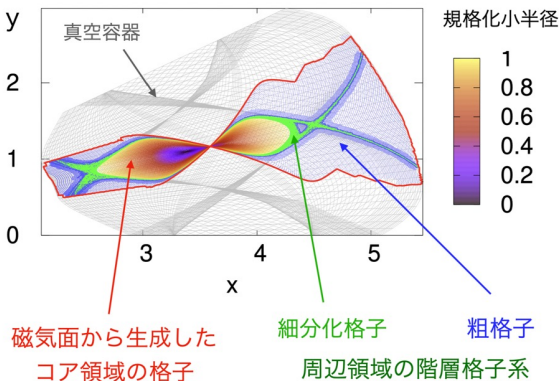
森下侑哉 (京大：学振特別研究員、D3)
核融合エネルギー連合講演会 若手優秀発表賞
「統計数理」特集号 (2023.6) 掲載決定済み
IAEA-FEC国内審査中



多階層複合物理

(1) 数値実験炉構築に向けた数値手法・計算コードの開発、整備、統合化

1. **ジャイロ運動論モデルのヘリカル核融合炉周辺領域への適用**：ダイバータ近傍での静電場計算に向けて、最適化格子の生成手法や粒子-格子間の補間手法を開発し、ジャイロ運動論PICコードに実装。



最適化曲面上に生成した非構造格子の鳥瞰図（トラス上面から）。磁気面から生成した格子とその外側の階層格子からなる。

(2) 磁場閉じ込めプラズマの平衡、輸送、不安定性、非線形発展に関する素過程研究

1. **フィラメント形成過程の大規模粒子シミュレーション**：初期に密度勾配のみを与えたプラズマからフィラメント状構造が生じ、径方向に輸送される過程を再現。
2. **磁気再結合での三日月型速度分布**：磁気再結合の粒子シミュレーションにより、速度空間でイオンの3次元三日月構造を見出し、その形成理論を解明。

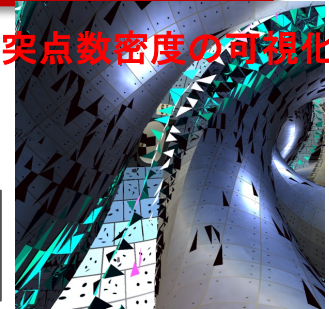
シミュレーション科学基盤

2022年度成果

(1) VR装置の利活用

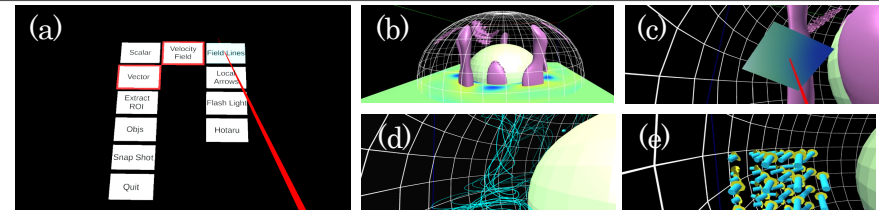
トリトンとプラズマ対向壁との衝突点分布のVR可視化した。

衝突点数密度の可視化



(2) VOIRの開発（兵庫県立大との共同研究）

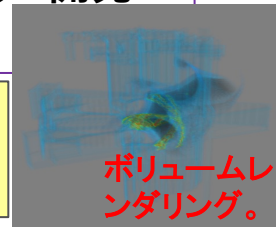
HMD版対話的可視化ソフトウェアVOIRを開発した。



(a) メニュー機能、(b) 等値面とスライス、(c) ローカルスライス、(d) 流線、(e) ローカルアローズ

(3) プラズマ領域の可視化手法の開発（京大との共同研究）

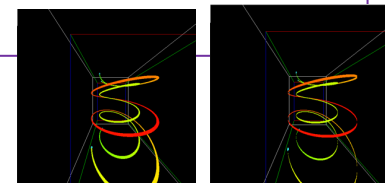
プラズマ形状と核融合炉の内部構造体と干渉する部分をより効率的に確認できる表現法を開発した。



ボリュームレンダリング。

(4) VFIVEの機能拡張開発（JAMSTEC、兵庫県立大との共同研究）

周辺プラズマにおけるプラズマ輸送の研究を進めるため、可視化ソフトウェアVFIVEの機能拡張を進めた。



チューブ表示とリボン表示