

# IFERC-CSC 大型計算機利用報告書(プロジェクト枠)

2022 年度

研究課題名	Gyro- & Drift-Kinetic simulations for multi-species plasma transport in Tokamak and HELical plasmas
上記の頭文字	GDKTHEL

\* 申請時のタイトル、略称を記載してください

## 研究代表者 (PI):

研究代表者名	仲田資季
--------	------

### 1. 成果の概要 (200字程度)

本課題では、核融合炉の出力を直接的に決定する炉心プラズマの輸送現象を正確に評価するため、燃焼プラズマの輸送や分布の予測・制御に必須なプラズマの輸送特性と物理メカニズムを理解すべく、運動論的第一原理シミュレーション研究およびモデリング研究を進めている。2022年度は、多種イオン混合プラズマ中の乱流輸送に関する成果、および、数値最適化手法を用いた縮約乱流輸送モデルの構築に関する成果をまとめた5編の論文出版[Nakayama+, PPCF22 & Sci.Rep.23; Nakata+, PFR22a & PFR22b & PFR22c]に加え、3次元磁場配位における新古典・乱流輸送の大域計算の開発が大きく進展した。

### 2. 成果の詳細 (図、表等を含めて A4 で 2~3 ページ程度)

#### 多種イオン混合プラズマ乱流シミュレーションによる定常燃焼条件の探索

トカマク燃焼プラズマを構成する重水素(D)-三重水素(T)-ヘリウム灰(He)および実質量の電子(e)を同時に取り扱った gyro 運動論的 多種イオン混合プラズマ乱流シミュレーション(GKV)により、定常燃焼条件[Reiter, NF96]を満たす温度・密度勾配分布条件を探索した。その結果、燃料粒子の内向き乱流輸送と He 灰の外向き乱流輸送が両立する分布条件が同定されるとともに、Zonal Flow がこの条件の成立において不可欠な役割を果たすことが新たに明らかになった。

微視的不安定性に対する多種イオン混合効果を含む一連の解析結果は、Plasma and Fusion Research 誌において2編の論文として掲載された[Nakata+, PFR22a,b]。

## 乱流の非線形効果を組み入れた新たな縮約乱流輸送モデルの構築

乱流輸送はしばしば大規模な非線形ジャイロ運動論シミュレーションによって解析・予測されるが、燃焼プラズマでの定常燃焼状態[Nakata+, PFR22a,b]を閉じ込め時間スケールにわたって大域的に計算することは計算量の観点からも容易ではない。ジャイロ運動論に立脚した乱流輸送の評価を行いつつ、同時に、燃焼プラズマの様々な加熱・分布制御シナリオを探究できる連成大域輸送シミュレーションを構築するためには、非線形ジャイロ運動論計算を高速かつ高精度に再現する輸送モデルの構築が欠かせない。

そこで、ヘリカル系において考案された輸送モデリング[Nunami+ PoP13]をベースに、トカマク燃焼プラズマへ適用可能な新たな縮約乱流輸送モデル(現象論的要請を満たし、ジャイロ運動論計算を再現する数理モデル)を構築した。はじめに、トカマク系での多数のジャイロ運動論的 ITG 乱流計算のデータに対して数理最適化手法を応用することで、不安定性の臨界勾配近傍も含んだ広範なパラメータ領域で成立する乱流輸送係数 $\chi_i$ 、乱流振幅 $\bar{\mathcal{T}}$ 、ゾーナルフロー振幅 $\bar{\mathcal{Z}}$ の間の非線形関数関係を同定した (Fig.1 左)。これは磁場配位最適化モデルにも応用されている[Nakata+, PFR22c]。

さらに、この非線形関数関係の変数( $\bar{\mathcal{T}}$ ,  $\bar{\mathcal{Z}}$ )に対して、不安定性の線形成長率 $\gamma$ とゾーナルフローの減衰時間 $\tau_{ZF}$ を用いたモデル化を行った。その結果、非線形ジャイロ運動論計算に比べて計算量が約 1/1500 の線形計算のみから、高速・高精度に乱流輸送係数を評価することに成功した。この新たな縮約乱流輸送モデルは $\chi_i^{\text{model}}/\chi_i^{\text{GB}} \sim 0.5 - 20$ の広範な乱流輸送状態においても良好な予測精度を保持しており、従来モデルからも大幅に拡張されている(Fig.1 右)。

一連の成果をまとめた論文は PPCF 誌および Scientific Reports 誌に掲載され [Nakayama+, PPCF22 & Sci.Rep.23]、さらに、プラズマ・核融合学会年会と ITC31 会議で発表賞を受賞した。

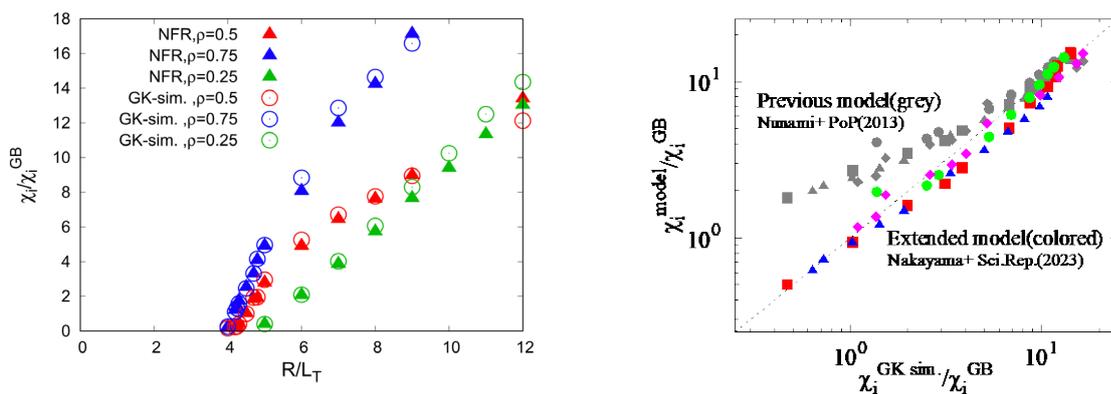


Fig.1 (左)ジャイロ運動論計算(○)での温度勾配( $R/L_T$ )依存性を再現する非線形関数関係 $F^{\text{NFR}}(\bar{\mathcal{T}}, \bar{\mathcal{Z}})$ (▲)。(右)線形計算の量のみで構成された縮約乱流輸送モデルの予測精度(colored symbol)。

## 時系列データを用いた輸送モデリング

固定した温度勾配下におけるジャイロ運動論シミュレーションの時系列データに対しても、上述の乱流輸送( $\chi_i$ )、乱流振幅(T)、ゾーナルフロー振幅(Z)の間の現象論的な関数関係が存在し得ることがわかってきている。これまでに、イオン温度勾配を変化させた ITG モード乱流輸送に対して関数形を、絶対誤差を用いた数値最適化によって求めている。ここでは、 $\chi_i$  に対する T や Z の時間発展の“遅れ”の効果を関数形に明示的に導入することで、さらなる関数形の改善を試みた。その結果、 $T \rightarrow Z \rightarrow \chi_i$  の順での遅れの効果を導入すると、数値最適化としては最も良い精度で輸送係数を再現できることが分かった。しかし、この順での遅れの効果の物理的説明には至っておらず、他のプラズマ条件での解析も含めて、さらなる解析を進めていく予定である。

## 新たな乱流輸送モデルを駆使した連成大域シミュレーションによる分布形成解析

上述の高速・高精度な乱流輸送モデルの考案・構築に関する研究が大きく進展したことにより、それらを駆使した連成計算型の大域乱流輸送シミュレーション解析が可能となった。

TRESS+GKV は、巨視的な分布発展を追跡する 1 次元輸送計算コード TRESS とジャイロ運動論的乱流計算コード GKV の連結を中核とした連成大域輸送シミュレーションコードであり、GDKTHEL プロジェクトなどにおいてそのフレームワークが開発されてきた。新古典・乱流輸送と加熱入力が釣り合う定常パワーバランス状態の探索に加えて、加熱計算や平衡計算とも容易に連結できることから、加熱や閉じ込め磁場の動的な変動による非定常な輸送や分布の応答の解明も可能となる。

ここでは、上で述べたゾーナルフロー効果を含む新しい縮約乱流輸送モデルを TRESS+GKV へと実装し、連成型の大域計算によって、外部加熱駆動の大域的 ITG 乱流輸送シミュレーションを実現することに成功した。縮約乱流輸送モデルでの輸送係数の評価に必要な GKV 線形計算は径方向に 9 点( $\rho=0.1, 0.2, \dots, 0.9$ )配置し、Akima 補間により大域的な輸送係数あるいは輸送流束分布を構成している。Fig. 2 では TRESS+GKV の連成シミュレーションによって得られたイオン温度分布(上段)および乱流輸送係数分布(中段)の時間発展が例示されている。これらに加えて、規格化ゾーナルフロー振幅  $\bar{z}/\bar{r}$  (下段)の時間発展も併せて予測できる点が、新しい縮約乱流輸送モデルを用いる利点のひとつである。また、動的な磁場変動に対する輸送や分布の応答解析にも取り組んでいる。

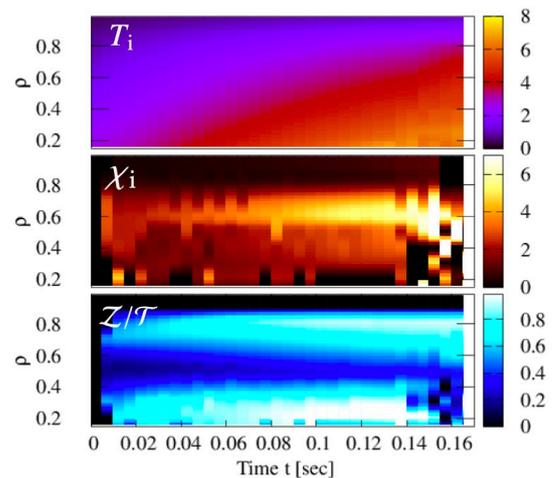


Fig.2 縮約乱流輸送モデルを用いた連成大域輸送シミュレーションの解析例

### 3 次元磁場プラズマにおける ITG 乱流の大域的ジャイロ運動論シミュレーション

LHD を始めとするヘリカル・ステラレータ装置のような 3 次元非軸対称磁場構造をもつプラズマにおいて乱流の非局所応答や径電場遷移などの大域的現象が観測され、その物理機構の解明が重要な課題となっている。その解析のためには第一原理であるジャイロ運動論に基づいて新古典及び乱流輸送やそれらの間の相互作用を自己無撞着に取り扱う第一原理モデルに基づくシミュレーションが必須の開発項目である。ここでは、2 次元軸対称磁場をもつトカマクプラズマを対象として開発された大域的 full-f ジャイロ運動論コードである GT5D をベースとして、3 次元磁場へと適用できるよう拡張を進めてきた。今年度は開発した 3 次元磁場版 GT5D によって得られた結果の妥当性検証を目的として、線形 ITG 乱流に対する解析、及び局所ジャイロ運動論コードとの比較を行った。

ここでは、Dommaschk モデルと呼ばれる解析的なモデルステラレータ磁場に対して線形 ITG 乱流シミュレーションを行った。用いた磁場は LHD に類似した楕円形の最外殻磁気面をもちトロイダル磁場周期数は 10、アスペクト比は 12 程度となっている。計算は背景のプラズマ分布を固定した  $\delta f$  シミュレーションとなっており、さらに無衝突プラズマを仮定し、プラズマパラメータは  $1/\rho^* \approx 150$ 、 $k_{\theta\rho_i} \approx 0.5$  となっており、イオン

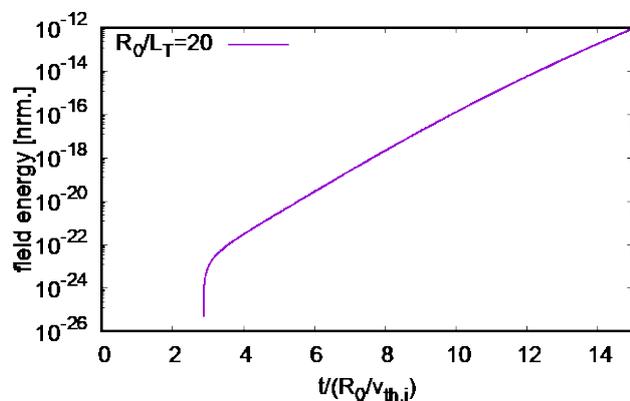


Fig.3: GT5D によって得られた、モデルステラレータにおける線形 ITG 乱流によるポテンシャルの時間発展。

温度勾配パラメータは  $R/L_{Ti} \approx 20$  としている。Fig.3 は乱流強度に対応するポテンシャルの時間発展を示す。図からポテンシャルがほぼ線形に成長しており、GT5D によって ITG の線形発展が得られることを確認できた。また、シミュレーション結果から評価された線形成長率や周波数が局所ジャイロ運動論シミュレーションの結果と概ね一致することも確認できている。今後、線形固有関数の分布形状や磁場構造との比較、大域的軌道効果の検証など詳細な解析を実施する。

### 3. 研究のキーワード

1.乱流輸送	2.新古典輸送	3.輸送モデリング	4.シミュレーション 手法	5.
--------	---------	-----------	------------------	----