

ITG 乱流における臨界勾配近傍を含んだ非線形関数関係 Nonlinear functional relation covering near- and far-critical gradients in ITG turbulence

中山 智成¹, 仲田 資季^{1,2,4}, 本多 充³, 沼波 政倫^{1,2,5}, 松岡 清吉^{1,2}

T. Nakayama¹, M. Nakata^{1,2,4}, M. Honda³, M. Nunami^{1,2,5}, S. Matsuoka^{1,2},

総合研究大学院大学¹, 核融合科学研究所², 京都大学³, JST さきがけ⁴, 名古屋大学⁵
SOKENDAI¹, NIFS², Kyoto Univ.³, JST PRESTO⁴, Nagoya Univ.⁵

1 背景・目的

核融合プラズマの大域的な乱流輸送特性や温度・密度分布の評価・予測は重要な課題の1つである。これまでに、複数の縮約モデルを組み合わせてプラズマの立ち上げや輸送・加熱制御などを評価する統合輸送解析コード (TASK/TASK3D, TOPICS) による研究が行われてきた。統合輸送解析コードのみならず、磁場配位の最適化などにも縮約モデルは活用される。したがって、広範な物理パラメータ領域に対応した高精度な縮約モデルの構築が必要であり、特に乱流輸送モデルの構築に役立つ輸送流束・乱流振幅・ゾーナルフロー (ZF) 振幅の間の非線形関数関係を明らかにすることが不可欠となる。

本研究では、ジャイロ運動論乱流シミュレーション (GKV) と、その結果に基づく数値最適化によってこれらの非線形関数関係を明らかにし、イオン温度勾配 (ITG) 不安定性の臨界温度勾配近傍とそこから離れた領域まで包含した関数形を見出すことを目的とした。さらに、構築した非線形関数関係より、輸送の再現精度を向上させるための条件を考察した。

2 非線形関数関係の構築

GKV 非線形シミュレーションにより半径位置 $\rho = 0.5$ と $\rho = 0.75$ における輸送流束・乱流振幅・ZF 振幅のイオン温度勾配スキャンを実施した。ここで、磁場配位はトカマク平衡を用いており、イオン温度勾配 R/L_{Ti} は 4~12 の範囲でスキャンした。

本研究では、非線形関数関係 (NFR) として2つの関数形を定義した。それらは、輸送流束 χ_i/χ_i^{GB} 、乱流振幅 \mathcal{T} 、ZF 振幅 \mathcal{Z} を用いて、次のように定義される。

$$\frac{\chi_i^{\text{NFR1}}}{\chi_i^{\text{GB}}} = \frac{C_1 \mathcal{T}^\alpha}{1 + C_2 \mathcal{Z}^\beta / \mathcal{T}} \quad (1)$$

$$\frac{\chi_i^{\text{NFR2}}}{\chi_i^{\text{GB}}} = \frac{C_1 \mathcal{T}^\alpha}{1 + C_2 (\mathcal{Z}/\mathcal{T})^\beta} \quad (2)$$

ここで、 $(C_1, C_2, \alpha, \beta)$ はフィッティングパラメータで

ある。(1) は、先行研究 [1] を自然な形で拡張した関数形であり、(1) と (2) は分母に現れる ZF の輸送抑制関数における \mathcal{T} と \mathcal{Z} の強度比が異なっている。

これらのフィッティングパラメータは、(1) および (2) の GKV での値からの 2 乗残差 σ^2 を最小化する最適化問題の解として決定する。しかし、 σ は 4 次元で多峰性の関数であるため、初期値に依存した通常の勾配法では良い解を探すことが難しい。したがって、4 次元パラメータ空間を全てスキャンすることが望ましいが、それは計算コストが膨大であり現実的ではない。そこで、4 次元空間を 2 次元部分空間に緩和し 6 種類の数値探索を行なった。数値探索は、最急降下法とニュートン法の 2 つの勾配法を組み合わせた手法で最小の残差 σ を探すことで行なった。その結果、(1) および (2) の σ はそれぞれ 0.059 および 0.133 であった。これらは先行研究で見出されたもの ($\sigma = 0.16$) よりも精度が向上している。

一連のモデリングにより $\rho = 0.25 \sim 0.75$ 、 $R/L_{Ti} = 4 \sim 12$ において高精度に GKV シミュレーションによる熱輸送係数を再現する NFR を同定した (Fig.1)。NFR の高精度化の条件についてはポスター発表で詳しく述べる。

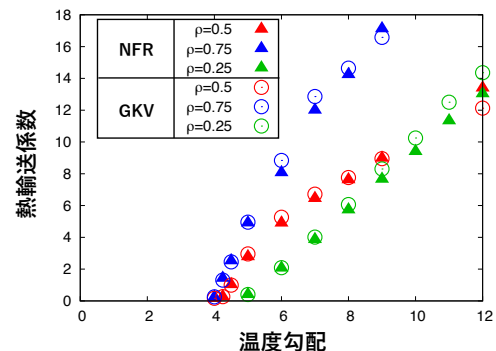


Fig. 1: 各温度勾配・半径位置における非線形関数関係による GKV 熱輸送係数の再現

References

- [1] M. Nunami, et al. , Phys. Plasmas 20, 092307 (2013).