

トカマクプラズマにおける捕捉電子およびイオン温度勾配モードでの
乱流輸送の定量化研究

Quantitative research of turbulent transport for trapped electron
and ion temperature gradient modes in tokamak plasmas

登田慎一郎^{1,2}, 沼波政倫^{1,3}, 糟谷直宏⁴

TODA Shinichiro^{1,2}, NUNAMI Masanori^{1,3}, KASUYA Naohiro⁴

核融合研¹, 総研大², 名大理³, 九大応力研⁴

NIFS¹, The Graduate University for Advanced Studies²,

Graduate School of Science, Nagoya Univ.³, RIAM, Kyushu Univ.⁴

この研究の目的は、トロイダルプラズマにおける乱流輸送を定量的に評価することである。電磁ジャイロ運動論シミュレーションを用いて、微視的なプラズマ不安定性を研究する。線形計算により、不安定性の種類を調べ、不安定性励起の条件を評価する。不安定性の飽和レベルは、非線形シミュレーションから乱流輸送値を求める。統合コード TASK を用いて、九州大学応用力学研究所の PLATO において予測されたプラズマ分布と磁場配置を例として、ジャイロ運動論解析を実施した。本研究では、フラックスチューブコードである GKV コード [1] を使用する。半径方向の点 $\rho (= r/a) = 0.65$ における、規格化された電子とイオンの半径はそれぞれ $\rho_e^* = 3.9 \times 10^{-4}$, $\rho_i^* = 6.5 \times 10^{-3}$ であり、規格化衝突周波数は $\nu_e^* = 0.21$, $\nu_i^* = 8.7$ (a は小半径) であった。衝突モデル演算子 [2] を用いたジャイロ運動論的解析を行った。まず、線形ジャイロ運動論的シミュレーションにより、 $\rho = 0.47, 0.65, 0.81$ の径方向の点で、不安定性の種類と不安定性が発生する条件を検討する。衝突演算子 [2] (“S”) を用いて得られたシミュレーションの結果を Lenard-Bernstein 衝突演算子 (“LB”) によるものと比較する。本研究で予測された不安定性は、特徴的なプラズマ周波数がイオンと電子のバウンス周波数の間にあり、密度勾配が大きくなることにより起こる捕捉電子モード (TEM) である [3, 4]。図 1 は $\rho = 0.65$ での、線形成長率のポロイダル依存性を示す。ここで、 γ , R , v_{te} , k_y , ρ_e は、それぞれ線形成長率、大半径、電子熱速度、ポロイダル波数、電子回旋半径である。実線は S 衝突演算子の場合の、波線は LB 衝突演算子の場合の線形成長率を表す。丸印は TEM を示し、三角印はイオン温度勾配不安定性 (ITG) を示す。S 衝突演算子の場合、ポロイダル波数が増えるにつれて、電子反磁性ドリフト運動方向からイオン反磁性ドリフト運動方向に変化する。LB 衝突演算子の場合、ITG は見られない。また、角運動量のポロイダル波数依存性において、捕捉電子モードからイオン温度勾配モードへの遷移などの現象が得られた。次に、非線形シミュレーションにより、静電ポテ

ンシャル揺らぎの時間発展が示される。今後、捕捉電子モードが不安定な場合、非線形ジャイロ運動論的シミュレーションの結果を再現する乱流輸送モデルを構築する予定である。これらのモデルは、線形成長率と帯状流の減衰時間に関連する量の関数である。このモデルは、線形解析の結果から乱流輸送レベルを予測するもので、動的輸送シミュレーションの計算コストを大幅に削減することができた [5]。

- [1] T. -H. Watanabe and H. Sugama, *Nucl. Fusion* **46**, 24 (2006)
- [2] H. Sugama, T. -H. Watanabe and M. Nunami, *Phys. Plasmas* **16**, 112503 (2009)
- [3] B. B. Kadomtsev and O. P. Pogutse, *Reviews of Plasma Physics*, edited by M. Leontovich (consultants Bureau, New York, 1970), Vol. 5
- [4] B. Coppi and G. Rewoldt, *Phys. Lett.* **49A**, 36 (1974)
- [5] S. Toda, M. Nunami and H. Sugama, *Plasma Phys. Control. Fusion* **64**, 085001 (2022)

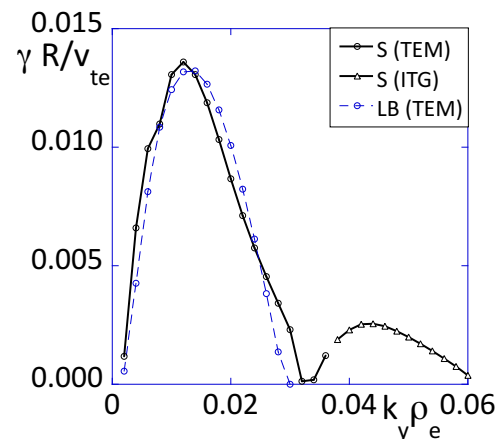


図 1: 線形成長率のポロイダル波数依存性