

連成大域輸送シミュレーションのための縮約輸送モデルの構築

Construction of reduced model for the coupled global transport simulation

中山智成¹, 仲田資季^{1,2,3}, 本多充⁴, 成田絵美⁵, 沼波政倫^{2,6}, 松岡清吉^{1,2}
 Tomonari Nakayama¹, Motoki Nakata^{1,2,3}, Mitsuru Honda⁴, Emi Narita⁵,
 Masanori Nunami^{2,6}, Seikichi Matsuoka^{1,2}

総研大¹, 核融合研², JST さきがけ³, 京大⁴, 量研⁵, 名大⁶
 SOKENDAI¹, NIFS², JST Presto³, Kyoto Univ.⁴, QST⁵, Nagoya Univ.⁶

1 背景・目的

磁場閉じ込め核融合プラズマにおける乱流輸送・分布形成の予測・評価は重要な課題の一つである。我々は、これを予測するための連成大域輸送シミュレーションを構築している。これは、1次元大域輸送コード TRESS と、5次元局所的ジャイロ運動論コード GKV を組み合わせ、輸送方程式に基づいた分布形成とジャイロ運動論に基づいた輸送を自己無撞着に取り扱うことができるコードである。しかし、従来の連成大域輸送シミュレーションの乱流輸送モデルは準線形理論近似に基づくものに限定されており、ゾナルフロー (ZF) に代表される乱流の非線形効果が無視されていた。したがって、これを含んだ縮約輸送モデルが必要となる。また、大域的乱流輸送過程では、温度勾配などのゆらぎが大きいため、これらの広いパラメータ領域にわたって精度を保持する縮約輸送モデルが要求される。

本研究では、これまでの研究 [1] で構築した広範な物理パラメータで乱流輸送を再現する非線形関数関係 (NFR) を拡張し、連成大域輸送シミュレーションでの適用を想定した新たな縮約乱流輸送モデルを構築することを目的とする。

2 縮約乱流輸送モデル

先行研究で構築した NFR は GKV 非線形シミュレーションで得られる乱流熱輸送係数 $\bar{\chi}_i/\chi_i^{GB}$ と、乱流強度 \bar{T} と ZF 強度 \bar{z} の間の関係を与える。現象論的な考察と多次元数理最適化により、広範な半径領域・輸送レベルにおいて誤差 7.78% で $\bar{\chi}_i/\chi_i^{GB}$ を再現する NFR が構築された。これは、先行研究 [2] での誤差 15% より大きく改善された値であるとともに、適用可能なパラメータ範囲も広がっている。

縮約輸送モデルは、 \bar{T} と \bar{z} を線形シミュレーションで得られる量である不安定性成長率 γ と、ZF 応答関

数 \mathcal{R}_{k_x} により構築する。実際のモデリングでは、乱流と関係した量として、先行研究に倣い $\mathcal{L} \equiv \int dk_y \gamma/k_y^2$ を、一方で、ZF に関係した量として ZF 減衰時間 $\tau_{ZF} \equiv \int_0^{\tau_f} dt \mathcal{R}_{k_x}$ を用いる。先行研究では、ZF 減衰時間の勾配依存性は無視されていたが、本研究では ZF 応答関数の積分範囲 τ_f に最大不安定性成長率を組み込むことで取り入れた。

構築した縮約輸送モデルは、線形シミュレーションから得られる物理量のみから誤差 15.7% で $\bar{\chi}_i/\chi_i^{GB}$ を予測した (Fig. 1)。また、数理最適化で用いていないデータに対しても誤差 21.1% で予測し、実用可能なレベルでの予測精度を持っていることを確認した。この縮約輸送モデルは、半径領域 $0.25 \leq \rho \leq 0.75$ かつ、熱輸送レベル $0.4 \leq \bar{\chi}_i/\chi_i^{GB} \leq 17$ という広いパラメータ領域で再現精度を維持した。

講演では、多次元数理最適化の詳細および本縮約輸送モデルの連成大域輸送シミュレーションによるテスト計算の結果についても併せて報告する。

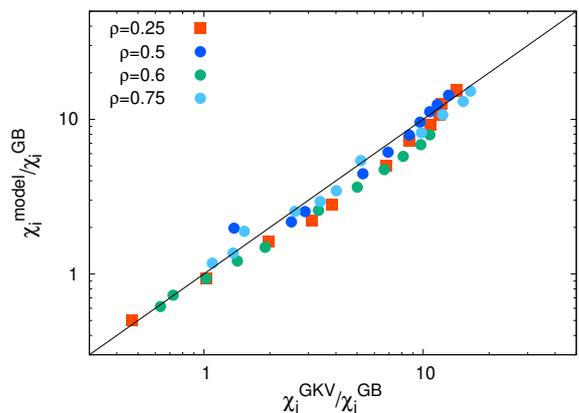


Fig. 1: 縮約輸送モデルによる乱流熱輸送の予測

References

- [1] T. Nakayama, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 64 075007(2022)
- [2] M. Nunami, et al., Phys. Plasmas 20, 092307 (2013)