

2024 年度年次報告書

複雑な流動・輸送現象の解明・予測・制御に向けた新しい流体科学

2023 年度採択研究代表者

前山 伸也

自然科学研究機構 核融合科学研究所

准教授

磁化プラズマ乱流のマルチスケール・マルチフィデリティモデリング

研究成果の概要

磁場閉じ込めプラズマ中の微視的不安定性が駆動する乱流輸送は、プラズマ閉じ込め性能を決定づける重要な研究課題である。本研究では、第一原理シミュレーションによって乱流輸送現象の物理的理解を深めるとともに、将来の核融合炉設計に資する乱流輸送モデルの開発に取り組んだ。

まず、乱流輸送のモデリングに関しては、低忠実度データと高忠実度データを統合するマルチフィデリティ(多忠実度)回帰手法の開発を進めている。本年度は、外挿的問題設定に対する予測性能の向上を図るため、ニューラルカーネルネットワークという短期変動と長期トレンドを同時に捉えることができるカーネル関数を実装した。これに加え、非線形自己回帰ガウス過程回帰を用いて低忠実度情報を効果的に活用することで、高忠実度データの外挿領域に対する予測性の向上を示した。また Mahalanobis 距離によるデータ分類により、予測困難なサンプルが学習分布外データ(外れ値)であることが示された。

次に、第一原理に基づくプラズマ乱流シミュレーションの高度化として、平衡シア流の効果を取り入れた回転フラックスチューブモデルを新たに開発した。本手法は、乱流揺動とスケール分離される装置スケールの平衡シア流を扱うもので、中性流体乱流におけるシアリングボックスに類似する構造を持つ。ただし、核融合プラズマにおけるトーラス磁場の持つ 2 重周期性により、系の微視的不安定性は時間周期的な演算子を持つ Floquet の一般化固有値問題として記述される。本手法は、平衡シア流による Floquet 固有モードを適切に表現できること、それにより従来手法に比べて少ない計算リソースで高精度なシミュレーションが実行可能となることを示した。

さらに、射影演算子法を用いた多変量時系列解析によるプラズマ乱流非線形相互作用の理解の深化や、マルチフィデリティ回帰パッケージの GPU 対応による計算性能の強化など、周辺技術の拡充も行った。

【代表的な原著論文情報】

- 1) S. Maeyama, M. Honda, E. Narita, S. Toda, “Multi-Fidelity Information Fusion for Turbulent Transport Modeling in Magnetic Fusion Plasma”, Scientific Reports, Vol. 14, 28242 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78394-3>
- 2) S. Maeyama, T.-H. Watanabe, M. Nakata, M. Nunami, Y. Asahi, A. Ishizawa, “Rotating flux-tube model for local gyrokinetic simulations with background flow and magnetic shears”, Journal of Computational Physics, Vol. 522, 113595 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2024.113595>