

機械学習を利用した半経験乱流輸送モデルの拡張と汎用性の検証 Improvement in a machine learning based semi-empirical turbulent transport model and verification of its versatility

成田絵美¹, 本多充², 仲田資季^{3,4}, 吉田麻衣子¹, 林伸彦¹, 中山智成⁴
E. Narita¹, M. Honda², M. Nakata^{3,4}, M. Yoshida¹, N. Hayashi¹, T. Nakayama⁴,
量研¹, 京大², 核融合研³, 総研大⁴
QST¹, Kyoto Univ², NIFS³, SOKENDAI⁴

トカマク装置における輸送は乱流が支配的であるため、乱流が駆動する粒子・熱流束の正確な算出がプラズマの性能予測に欠かせない。ジャイロ運動論やジャイロ流体に基づく乱流輸送モデルは様々な装置の実験結果を良く再現してきたが、精緻化による計算コストの増大により、密度や温度の予測に数時間から数日という長時間を要し、多数回の試行は困難であった。そこで、計算の高速化のためニューラルネットワーク (NN) を利用した輸送モデルが国内外で開発され、実用レベルに達している。多くの NN モデルは、既存の乱流輸送モデルの入出力関係を学習しているが、本研究で開発を進めているモデル DeKANIS[1] はジャイロ運動論コードによる数値計算データと JT-60U の実験データの両方を学習している。ジャイロ運動論コードを学習データの構築に用いることで、予測する粒子・熱流束の背景にある輸送過程を調べられるという、他の NN モデルにはない特徴を有する。実験データを用いているために外挿性の制約があったが、二つの拡張を実施し、ITER の予測計算への適用を実現した。

まず、学習データがカバーする変数領域を拡張した。これまで JT-60U のプラズマの変数を用いてジャイロ運動論コード GWK による計算を行い学習データを構築してきたが、JET のプラズマに対しても同様の計算を実施し、学習データを増加させた。JET のプラズマの導入により、特に電子とイオンの温度比 T_e/T_i の範囲が拡大し、 $T_e/T_i > 1$ の場合でもジャイロ運動論コードによる計算結果を再現できるようになった。さらに、以前は規格化小半径 ρ が 0.65 以内のデータを学習していたが、 $\rho = 0.85$ まで学習データを拡張した。

次に、乱流飽和モデルを変更した。DeKANIS は乱流飽和レベルを JT-60U の実験データに基づき構築した比例則で決定している。以前の比例則は帯状流の効果を無衝突仮定のもとで導出される残留帯状流レベルで表現していたが、衝突による影響を含めることで生じる帯状流の乱流抑制効果の低下を考慮できるよう変

更した。これまでは比例則の導出に用いていない JET の粒子拡散係数を過小評価していたが、この変更により過小評価が解消された。

二つの拡張を施した DeKANIS を統合モデル GOTRESS+[2] に導入し、ITER の Pre-Fusion Power Operation 1 (PFPO-1) フェイズで計画されている電子サイクロトロン加熱の実験を想定して温度分布の予測計算を行った。この統合シミュレーションではプラズマコア部と周辺部を矛盾なく解いており、 $\rho = 0.85$ よりも内側の乱流輸送係数を DeKANIS で与えている。得られた温度は電子の方が高い (図 1(a))。学習データの拡張によって、 $T_e/T_i > 1$ のプラズマを周辺部と結合させながら予測することが可能になった。また、広く用いられている乱流輸送モデル TGLF による予測結果と近い温度である [3]。図 1(b) に示すように、DeKANIS は温度分布と同時に電子熱流束を構成する拡散・非拡散項を予測する。非拡散項 $C_N R/L_{ne}$ と C_{HP} の結果の妥当性は GWK との比較で検証できる。 C_{HP} は GWK の計算結果と乖離があるものの、他項と比べると小さい値であるため、電子熱流束は拡散項 R/L_{Te} と非拡散項 $C_N R/L_{ne}$ に支配されており、これらの寄与は同程度であると言える。

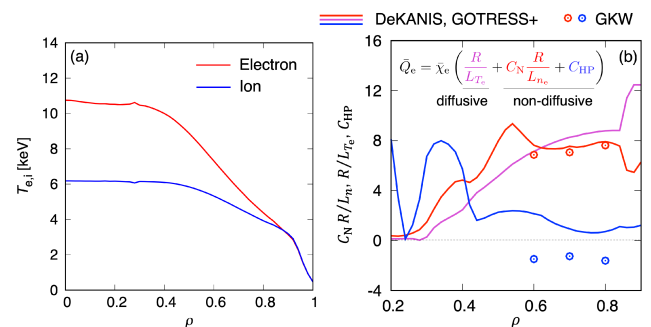


図 1: DeKANIS を導入した GOTRESS+ で予測した ITER PFPO-1 プラズマの (a) 温度と (b) 電子熱流束の拡散・非拡散項の分布及び検証用の GWK の結果。

- [1] E. Narita *et al* 2021 Nucl. Fusion **61** 116041.
- [2] M. Honda *et al* 2021 Nucl. Fusion **61** 116029.
- [3] A. Loarte *et al* 2021 Nucl. Fusion **61** 076012.