

ジャイロ運動論シミュレーションの乱流、ゾーナルフロー、熱輸送係数の関数
関係に対する遅延効果

Time-delay effects in functional relations among gyrokinetic
simulation-generated time series data of turbulence, zonal flows,
and transport coefficients

藤井洸太郎¹, 沼波政倫^{1,2}

Kotaro Fujii¹, Masanori Nunami^{1,2},

名古屋大学¹, 核融合科学研究所²

Nagoya University¹, National Institute for Fusion Science²

1 本文

乱流輸送の物理的な理解と制御は磁場閉じ込め核融合の研究において重要な課題の一つである。乱流輸送を定量的に評価するためにジャイロ運動論に基づくシミュレーションが用いられるが、高い計算コストが難点となっている。そこで、低コストで輸送レベルを得るために輸送モデルの研究が盛んに行われている。

先行研究 [1, 2] では現象論的な観点からジャイロ運動論シミュレーションによって得られる乱流、ゾーナルフロー、熱輸送係数の時間平均に対する関数関係が提案されている。

我々は様々な温度勾配に対し、GKV コード [3] を用いて非線形なジャイロ運動論シミュレーションを行い、乱流強度、ゾーナルフロー強度、輸送係数で張られるパラメータ空間 $(\mathcal{T}, \mathcal{Z}, \tilde{\chi}_i)$ 上に時系列データが次式で表される構造を形成することを報告した [4]。

$$\tilde{\chi}_i^{\text{Model}}(t) = \frac{C_1 \mathcal{T}(t)^\alpha}{1 + C_2 \sqrt{\mathcal{Z}(t)/\mathcal{T}(t)}}. \quad (1)$$

ただし、 $\tilde{\chi}_i$ は規格化されたイオン熱輸送係数を表しており、フィッティングパラメーター (C_1, C_2, α) は非線形最適化によって決定される。また、得られた関数関係 (1) では時間平均量を用いる元の関数関係よりも高い再現精度が得られることを確認した。

乱流とゾーナルフローの関係はしばしば捕食者-被食者関係を用いて議論される [5]。一方で、我々の関数モデルではその関係性が反映されていない。そこで、 $\tilde{\chi}_i$ と \mathcal{T}, \mathcal{Z} の間の時間遅れ $\Delta t_{\mathcal{T}}, \Delta t_{\mathcal{Z}}$ を関数関係に導入した。

$$\tilde{\chi}_i^{\text{Model}}(t, \Delta t_{\mathcal{T}}, \Delta t_{\mathcal{Z}}) = \frac{C_1 \mathcal{T}(t - \Delta t_{\mathcal{T}})^\alpha}{1 + C_2 \sqrt{\mathcal{Z}(t - \Delta t_{\mathcal{Z}})/\mathcal{T}(t - \Delta t_{\mathcal{T}})}}. \quad (2)$$

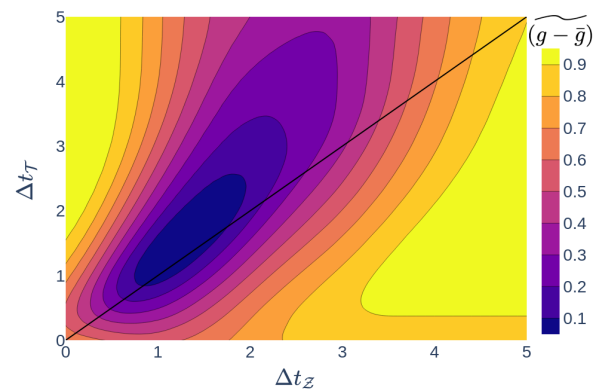


Fig. 1: 規格化されたフィッティングエラーのコンター。 \bar{g} は $\Delta t_{\mathcal{Z}}$ に対する平均であり、黒色の直線は $\Delta t_{\mathcal{T}} = \Delta t_{\mathcal{Z}}$ を示している。

図 1 は $R_0/L_{T_i} = 15.0$ でのフィッティングエラーのコンターマップを示しており、 $\Delta t_{\mathcal{T}} > \Delta t_{\mathcal{Z}}$ に最小値が存在する。従って、 \mathcal{T}, \mathcal{Z} の捕食者-被食者関係が我々の関数モデルを改善することが期待される。

References

- [1] M. Nunami, *et al.*, Phys. Plasmas **20**, 092307 (2013).
- [2] T. Nakayama et al., Plasma Phys. Control. Fusion **64**, 075007 (2022)
- [3] T. -H. Watanabe and H. Sugama, Nucl. Fusion **46**, 24 (2006).
- [4] K. Fujii and M. Nunami, Plasma Fusion Res. **17**, 2403030 (2022)
- [5] P. H. Diamond et al., Plasma Phys. Control. Fusion **47**, R35 (2005)