

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
2021 年度採択研究者

2021 年度 年次報告書

仲田 資季

自然科学研究機構 核融合科学研究所
准教授

数理融合で拓く乱流場中の自発的秩序構造形成の活性化と輸送制御

§ 1. 研究成果の概要

複雑な乱流現象や輸送現象を自在に操ることは、流動・輸送の研究における重要課題である。流体に接する構造の“かたち”や擾乱などに着目し、『かたち(幾何構造)・流れ・乱れ・輸送(機能)』が相互に絡み合ったダイナミクスを解き明かすことで、それらを大域的に制御・活性化する新たな可能性が開拓される。

本研究では、乱流物理に数理・情報科学的手法を組み込んだ数理融合アプローチにより、乱流場・流れ場の解析や制御の新たな方法論を開拓する。磁場閉じ込めプラズマの乱流・輸送現象を題材に、幾何構造を持つ背景場のなかに置かれた乱流中の秩序的流れ場や渦構造、それらに付随する熱・物質輸送などの活性化機構の探索や解析を実現する理論・計数的手法の構築に取り組む。特に、プラズマを覆う捩れたトーラス磁場の幾何学的自由度を活用し、ゾーナルフローと呼ばれる秩序的流れ場の生成が増大するような磁場構造が探索される。

2021年度は主に、(i)プラズマ乱流の直接数値計算データからの縮約モデル構築、(ii)レプリカ交換マルコフ連鎖モンテカルロ(RXMC)サンプリング計算の実装と検証に取り組んだ。(i)については、磁場構造を探索するための目的関数の構築や検証が進展している。特に、これまでの目的関数に基づいて得られた局所最適解の磁場構造に対する乱流シミュレーション解析から、ゾーナルフロー生成が有意に増大し、乱流輸送は40%程度低減することが確認された。また、今後の目的関数の改良に資する乱流揺動解析やプラズマ実験・観測の共同研究も進展している¹⁻⁵⁾。(ii)については、RXMCサンプリング計算コードの構築が完了し、多峰性とスパース性を有する多次元関数に対して、極値分布といった関数構造の大域的な探索が検証された。また、400次元程度の多重積分についても良好な精度が確認されるとともに、少数自由度力学系との連成計算の構築も成された。

【代表的な原著論文情報】

- 1) F. Warmer, K Tanaka, P Xanthopoulos, M Nunami, M Nakata, et. al., “Impact of Magnetic Field Configuration on Heat Transport in Stellarators and Heliotrons”, *Physical review letters*, vol. 127, 225001, 5pp, 2021
- 2) Ryohtaroh T Ishikawa, Motoki Nakata, Yukio Katsukawa, Youhei Masada, Tino L Riethmüller, “Multi-scale deep learning for estimating horizontal velocity fields on the solar surface”, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 658, A142, 9pp, 2022
- 3) Gakushi Kawamura, Motoki Nakata, Yasuhiro Suzuki, Yuki Hayashi, Ryuichi Sakamoto, “Divertor Leg Control of a Quasi-Symmetry Stellarator with External Coils and its Consequences for Transport”, *Contributions to Plasma Physics*, e202100196, 10pp, 2022
- 4) J. Huang, M. Nakata, Y. Xu, A. Shimizu, M. Isobe, S. Okamura, H. F. Liu, X. Q. Wang, X. Zhang, H. Liu, J. Cheng, and C. J. Tang, “Identification of electrostatic microinstability maps in axisymmetric stellarator”, *Physics of Plasmas*, vol. 29, 052505, 7pp, 2022
- 5) T. Nakayama, M. Nakata, M. Honda, M. Nunami, and S. Matsuoka, “Nonlinear functional relation covering near- and far-marginal stability in ion temperature gradient driven turbulence”, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, in press, 2022