

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 年度採択研究代表者

2022 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

## 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、あるいは、背景場として作用する構造の“かたち”や擾乱などに着目し、『かたち(幾何構造)・揺らぎ・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、それらを大域的に活性化・制御する新たな可能性が開拓される。

本研究では、乱流の物理に数理・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・流れ場が持つ機能の活性化に関する方法論を開拓する。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場に発現する大規模流動や渦構造、それらに付随する輸送の活性化機構の探索や解析を実現する理論・計算的手法の構築に取り組む。

2022年度は主に、(i)プラズマ乱流の非線形計算データと数理最適化を活用した縮約モデルの構築、および、(ii)物理計算と確率過程サンプリングの連成解析の検証に取り組んだ。(i)については、複数イオン種が混合した核融合プラズマ乱流に関する直接数値シミュレーション解析が進展し<sup>1)2)</sup>、そのような多量の非線形計算データに基づいた縮約モデルを考案した<sup>3)</sup>。縮約モデルの関数形は8個のパラメータを含んだ複雑なものであるが、本来は非線形計算を要する乱流輸送フラックスや大規模流動振幅を、線形計算のみから評価することが可能になった<sup>4)</sup>。(ii)については、パラメータ空間や解空間の大域構造(ランドスケープ)の探索を実現する、確率過程サンプリングと物理計算の連成解析の原理検証が進展した。ここでは一次元力学系を題材に取り上げ、多次元パラメータ空間におけるリャプノフ指数の構造が解析された。グリッドスキャンとの比較により、確率過程サンプリングがリャプノフ指数の多層構造を良好に捉えていることが確認された。

### 【代表的な原著論文情報】

- 1) M. Nakata, Microinstability and zonal-flow response in mixture plasmas with medium-Z and nonthermal impurity, *Plasma and Fusion Research*, vol. 17, 1203078, 2022
- 2) M. Nakata and M. Honda, Gyrokinetic turbulent transport simulations on steady burning condition in D-T-He plasmas, *Plasma and Fusion Research*, vol. 17, 1403083, 2022
- 3) 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*, vol. 64, 075007, 2022
- 4) T. Nakayama, M. Nakata, M. Honda, E. Narita, M. Nunami, and S. Matsuoka, A simplified model to estimate nonlinear turbulent transport by linear dynamics in plasma turbulence, *Scientific Reports*, vol. 13, 2319, 2023