

研究課題：燃焼プラズマに向けた連成大域輸送解析に関する研究

研究代表者：仲田資季（自然科学研究機構 核融合科学研究所）

量研機構担当者：成田絵美

研究協力者：中山智成（総研大）、本多充（京都大学）、松岡清吉(核融合研)、沼波政倫(核融合研)、吉田麻衣子（量研機構）

研究期間：令和3年度-令和4年度

## 1. 研究目的・意義

JT-60SA が完成を迎え、また、ITER の建設も進む中、燃焼プラズマの予測や定量解析を実現する理論・シミュレーション研究の機運と重要性がさらに高まっている。本共同研究では、『乱流輸送による圧力分布の変動→自発電流分布の変動→閉じ込め磁場の変動→乱流輸送への作用→（繰り返し）』という、燃焼プラズマ中の乱流輸送と閉じ込め磁場変動の動的な結合に着眼した、新しい連成大域輸送シミュレーションの構築を目指す。そして、その実現において欠くことができない、乱流輸送を高精度かつ高速に予測する数理モデルや深層学習モデルの開発・拡張に取り組みながら、JT-60SA や ITER に対する予測解析や JT-60U 実験データを活用した実証解析を進展させる。

本共同研究から多くの成果が創出され、核融合研究の基幹学術誌である Nuclear Fusion 誌などをはじめとして、科学技術全般を扱う Scientific Reports 誌を含む原著論文 11 件が出版・受理された。さらに、複数の学術表彰の受賞や招待講演の採択を受け、国内外からも高い評価を獲得している。

## 2. 研究成果

### ・乱流の非線形効果を組み入れた新たな縮約乱流輸送モデルの構築

乱流輸送はしばしば大規模な非線形ジャイロ運動論シミュレーションによって解析・予測されるが、燃焼プラズマでの定常燃焼状態[Nakata+, PFR22a,b]を閉じ込め時間スケールにわたって大域的に計算することは計算量の観点からも容易ではない。ジャイロ運動論に立脚した乱流輸送の評価を行いつつ、同時に、燃焼プラズマの様々な加熱・分布制御シナリオを探究できる連成大域輸送シミュレーションを構築するためには、非線形ジャイロ運動論計算を高速かつ高精度に再現する輸送モデルの構築が欠かせない。

本共同研究では、ヘリカル系において考案された輸送モデリング[Nunami+ PoP13]をベースに、トカマク燃焼プラズマへ適用可能な新たな縮約乱流輸送モデル(現象論的要請を満たし、ジャイロ運動論計算を再現する数理モデル)を構築した。はじめに、トカマク系での多数のジャイロ運動論的 ITG 乱流計算のデータに対して数理最適化手法を応用することで、不安定性の臨界勾配近傍も含んだ広範なパラメータ領域で成立する乱流輸送係数 $\chi_i$ 、乱流振幅 $\bar{T}$ 、ゾーナルフロー振幅 $\bar{Z}$ の間の非線形関数関係を同定した[Nakayama+, PPCF22](Fig.1 左)。これは磁場配位最適化モデルにも応用されている[Nakata+, PFR22c]。

さらに、この非線形関数関係の変数( $\bar{T}$ ,  $\bar{Z}$ )に対して、不安定性の線形成長率 $\gamma$ とゾーナルフローの減衰時間 $\tau_{ZF}$ を用いたモデル化を行った。その結果、非線形ジャイロ運動論計算に比べて計算量が圧倒的に少ない線形計算のみから、高速・高精度に乱流輸送係数を評価することに成功した[Nakayama+, Scientific Reports, in press]。この新たな縮約乱流輸送モデルは $\chi_i^{\text{model}}/\chi_i^{\text{GB}} \sim 0.5 - 20$ の広範な乱流輸送状態においても良好な予測精度を保持しており、従来モデルからも大幅に拡張されている(Fig.1 右)。

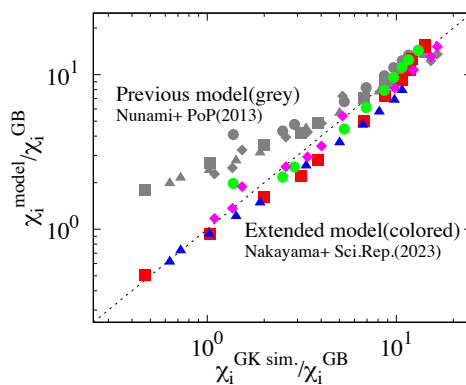
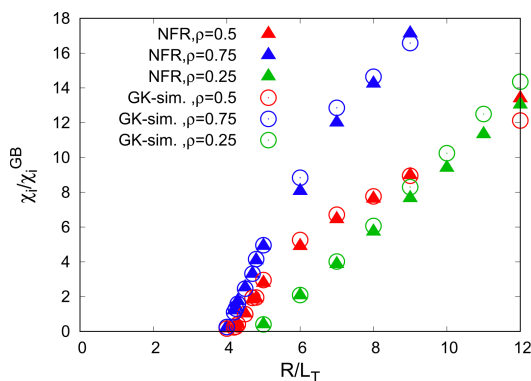


Fig.1 (左)ジャイロ運動論計算(○)での温度勾配(R/L<sub>T</sub>)依存性を再現する非線形関数関係 $F^{\text{NFR}}(\bar{T}, \bar{Z})$ (▲)。(右)線形計算の量のみで構成された縮約乱流輸送モデルの予測精度(colored symbol)。

・機械学習と実験データを活用した半経験的乱流輸送モデルの汎用性改善に向けた拡張

上述の数値モデルに加え、機械学習を活用した高速・高精度の輸送モデルもまた有用となる。輸送モデル DeKANIS は、ニューラルネットワーク(NN)モデルを利用して高速に乱流輸送流束を予測する。DeKANIS はジャイロ運動論コード GKW による数値計算データと JT-60 の実験データに基づいて構築されている。ジャイロ運動論計算を NN の訓練に用いることで、予測する乱流輸送流束の背景にある物理過程も併せて考察できるという特徴を有する。モデルの構築の一部に実験データを用いていることに起因する外挿性の制約があったが、訓練データがカバーする変数領域を大幅に拡張しつつ、乱流輸送を定量評価する乱流飽和モデルに衝突によるゾーナルフロー減衰の効果を導入することで、ITER 初期プラズマの温度分布の予測が可能になった[Fig.2(a)]。輸送コード GOTRESS+ に DeKANIS を導入した統合シミュレーション解析 [Narita+, CPP23] も実施されている。その際、DeKANIS が示す乱流熱流束の内訳から、拡散項 ( $R/L_{Te}$ ) と非拡散項 ( $C_N R/L_{Te}$ ) が支配的であり、これらの輸送過程が同程度に乱流輸送へ寄与することなども明らかにされた[Fig.2(b)]。

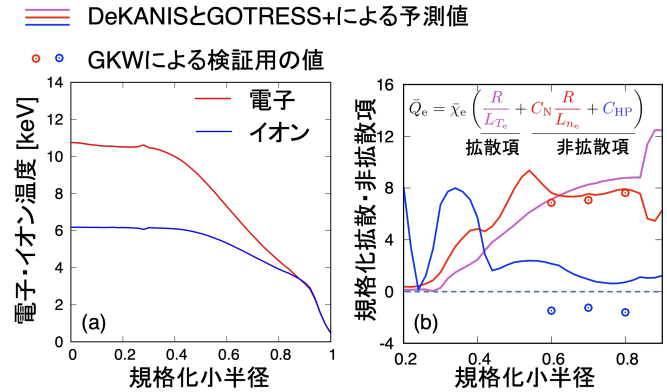


Fig.2 統合シミュレーションによる ITER 初期プラズマの(a)電子・イオン温度と(b)規格化拡散・非拡散項の規格化小半径方向分布の予測。(b)では、ジャイロ運動論コード GKW により結果の妥当性が検証されている。

・新たな乱流輸送モデルを駆使した連成大域シミュレーションによる分布形成解析

上述した高速・高精度な乱流輸送モデルの考案・構築に関する共同研究が大きく進展したことにより、それらを駆使した連成計算型の大域乱流輸送シミュレーション解析が可能となった。TRESS+GKV は、巨視的な分布発展を追跡する1次元輸送計算コード TRESS とジャイロ運動論的乱流計算コード GKV の連結を中核とした連成大域輸送シミュレーションコードであり、トカマク炉心プラズマ共同研究においてフレームワークが開発されてきた。新古典・乱流輸送と加熱入力が釣り合う定常パワーバランス状態の探索に加えて、加熱計算や平衡計算とも容易に連結できることから、加熱や閉じ込め磁場の動的な変動による非定常な輸送や分布の応答の解明も可能となる。

ここでは、上で述べたゾーナルフロー効果を含む新しい縮約乱流輸送モデルを TRESS+GKV へと実装し、外部加熱駆動の大域的 ITG 乱流輸送シミュレーションを行った。縮約乱流輸送モデルでの輸送係数の評価に必要な GKV 線形計算は径方向に 9 点 ( $\rho=0.1, 0.2, \dots, 0.9$ ) 配置し、Akima 補間により大域的な輸送係数あるいは輸送流束分布を構成している。Fig.3 では TRESS+GKV の連成シミュレーションによって得られたイオン温度分布(上段)および乱流輸送係数分布(中段)の時間発展が例示されている。これらに加えて、規格化ゾーナルフロー振幅  $\bar{z}/\bar{r}$ (下段)の時間発展も併せて予測できる点が、新しい縮約乱流輸送モデルを用いる利点のひとつである。また、動的な磁場変動に対する輸送や分布の応答解析にも取り組んでいる。

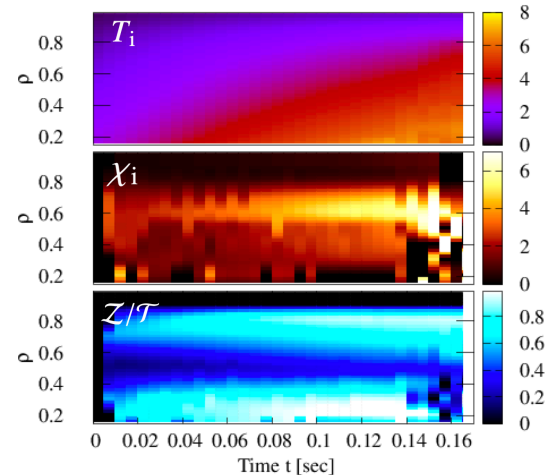


Fig.3 縮約乱流輸送モデルを用いた連成大域輸送シミュレーションの解析例

3. まとめと今後の課題

JT-60SA や ITER が稼働し始めるフェーズに入り、燃焼プラズマのさらなる物理解明と予測・制御の確立が重要な課題と位置づけられるなか、本共同研究の推進によって、乱流輸送の高速・高精度計算を実現する機械学習モデルや数値モデルに関する多くの成果が創出された。さらに、それらを駆使した新たな動的連成大域輸送シミュレーションの構築も大きく進展した。今後はさらなる拡張に取り組みながら、具体的な燃焼プラズマでの動的輸送特性や燃焼条件の定量解析へと共同研究を展開していく。

#### 4. 成果リスト

##### 原著論文

- [1] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, et al., "Quasilinear turbulent particle and heat transport modelling with a neural-network-based approach founded on gyrokinetic calculations and experimental data", Nuclear Fusion, 61, 116041 (2021)
- [2] O. Beeke, M. Barnes, M. Romanelli, M. Nakata, and M. Yoshida, "Impact of shaping on microstability in high-performance tokamak plasmas", Nuclear Fusion 61, 066020 (2021)
- [3] S. Matsuoka, H. Sugama and Y. Idomura, "Neoclassical transport simulations with an improved model collision operator", Physics of Plasmas 28, 064501 (2021)
- [4] M. Yoshida, G. Giruzzi, N. Aiba, J. F. Artaud et. al., " Plasma physics and control studies planned in JT-60SA for ITER and DEMO operations and risk mitigation", Plasma Physics and Controlled Fusion 64, 054004 (2022)
- [5] M. Nakata, "Microinstability and zonal-flow response in mixture plasmas with medium-Z and nonthermal impurity", Plasma and Fusion Research, vol. 17, 1203078 (2022)
- [6] M. Nakata and S. Matsuoka, "Impact of geodesic curvature on zonal-flow generation in magnetically confined plasmas", Plasma and Fusion Research, vol. 17, 1203077 (2022)
- [7] 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)
- [8] M. Nunami, S. Toda, M. Nakata, and H. Sugama, "Improved prediction scheme for ion heat turbulent transport", Physics of Plasmas, vol. 29, 102505, 2022
- [9] 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 64, 075007 (2022) ※表紙絵に採択
- [10] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, N. Hayashi, T. Nakayama, M. Yoshida, "Modification of a machine learning based semi-empirical turbulent transport model for its versatility", Contributions to Plasma Physics, e202200152 (2023)
- [11] T. Nakayama, M. Nakata, M. Honda, E. Narita, M. Nunami, and S. Matsuoka, "Nonlinear functional relation covering near- and far-marginal stability in ion temperature gradient driven turbulence", Scientific Reports 13, 2319 (2023)

##### 学会等での発表

- [1] 中山智成, 仲田資季, 本多充 他, “燃焼プラズマに向けたダイナミカル乱流シミュレーション”, 「レーザープラズマ・磁場閉じ込めプラズマの連携研究の新展開」 第一回研究会, 8/19-20 (2021)
- [2] 中山智成, 仲田資季, 本多充 他, “ITG 乱流における臨界勾配近傍を含んだ非線形関数関係”, 第 38 回プラズマ核融合学会年会, 11/22-25 (2021)
- [3] 仲田資季, “電子乱流輸送と渦構造に対する磁場構造効果”, プラズマシミュレータシンポジウム 2021, 9/16-17 (2021)
- [4] 成田絵美, 本多充, 仲田資季 他, “粒子・熱流束の実験値を考慮した準線形乱流輸送モデリング”, 日本物理学会第 76 回年次大会, オンライン, 3/12-15, 口頭発表 (2021)

- [5] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, et al., “Update on GKW”, 26<sup>th</sup> ITPA Transport & Confinement TG meeting, Remote, March 22th – 25th, oral presentation (2021)
- [6] 成田絵美, 本多充, “機械学習による核融合プラズマの輸送モデリング”, 第 38 回プラズマ・核融合学会年会, オンライン, 11/22-25, **招待講演** (2021)
- [7] 成田絵美, 本多充, 仲田資季 他, “機械学習を利用した半経験的乱流輸送モデルの汎用性改善に向けた拡張”, 日本物理学会第 77 回年次大会, オンライン, 3/15-19, 口頭発表 (2022)
- [8] 中山智成, 仲田資季, 本多充 他, “燃焼プラズマの動的・大域的輸送解析を見据えた縮約乱流輸送モデリング”, 第 11 回 IFERC-CSC 研究会, オンライン, 4/5 (2022)
- [9] T. Nakayama, M. Nakata, M. Honda et al., “Simplified transport modeling with turbulence and zonal-flow effects using gradient-based optimization techniques”, The 31<sup>st</sup> International Toki Conference on Plasma and Fusion Research, online, 11/8-11 (2022) **※受賞**
- [10] 中山智成, 仲田資季, 本多充 他, “連成大域輸送シミュレーションのための縮約輸送モデルの構築”, 第 39 回プラズマ核融合学会年会, 富山, 11/22-25 (2022) **※受賞**
- [11] 成田絵美, 本多充, 仲田資季 他, “機械学習を利用した半経験的乱流輸送モデルの拡張と汎用性の検証”, 第 39 回プラズマ・核融合学会年会, 富山, 11/22-25, 口頭発表 (2022) **※受賞**
- [12] 中山智成, 仲田資季, 本多充 他, “縮約輸送モデリングが可能にするプラズマ乱流の動的連成シミュレーション”, 統計数理研究所共同研究集会, 統計数理研究所, 2/20-21 (2023)
- [13] 中山智成, 仲田資季, 本多充 他, “縮約輸送モデルと動的連成計算を活用したトカマク大域乱流輸送解析”, 第 25 回 QST 若手科学者によるプラズマ研究会, 那珂研究所, 3/1-3 (2023)
- [14] 成田絵美, “磁場閉じ込め核融合プラズマのデータ駆動型研究の進展”, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 3/15-18, **招待講演** (2023)

## 受賞

- [1] 仲田資季, 本多充, 成田絵美, 吉田麻衣子, 沼波政倫, 松岡清吉 他, 令和 2 年度 JT-60 共同研究優秀賞「多種イオン混合プラズマの乱流輸送および分布形成に関する研究」(2021)
- [2] 沼波政倫, 松岡清吉, 仲田資季, 中山智成 他, 令和 2 年度核融合大型計算機利用研究優秀賞「Gyro- and drift-kinetic simulations for multi-species plasma transport in tokamak and helical plasmas」(2021)
- [3] T. Nakayama, The 31<sup>st</sup> International Toki Conference Best Student Presentation Award, “Simplified transport modeling with turbulence and zonal-flow effects using gradient-based optimization techniques” (2022)
- [4] 中山智成, 第 39 回プラズマ・核融合学会年 若手学会発表賞(学生会員部門), 「連成大域輸送シミュレーションのための縮約輸送モデルの構築」(2022)
- [5] 成田絵美, 第 27 回学術奨励賞(伊藤早苗特別賞)「機械学習を用いた核融合プラズマの輸送モデリング」(2022)
- [6] 成田絵美, 第 39 回プラズマ・核融合学会年会 若手学会発表賞(正会員部門), 「機械学習を利用した半経験的乱流輸送モデルの拡張と汎用性の検証」(2022)