

研究課題：多種イオン混合プラズマの乱流輸送及び分布形成に関する研究

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：沼波政倫（核融合研）、井戸村泰宏（原子力機構）、本多充（京都大学）、吉田麻衣子（量研）、浦野創（量研）、松岡清吉（核融合研）

研究期間：平成30年度-令和2年度

1. 研究目的・意義

磁場閉じ込めプラズマ中の乱流輸送機構の解明や輸送特性の定量評価・予測には、乱流場と輸送フラックスの無撞着な計算が可能である運動論的シミュレーションが有効であり、既存の実験結果に対する理論的理解を与えるのみならず、JT-60SA や ITER の閉じ込め性能や分布特性の予測においても重要な役割を担っている。本共同研究ではこれまでのトカマク炉心プラズマ共同研究の研究成果を基盤として、燃焼プラズマにおいて本質的となる複数粒子種の粒子・熱輸送特性および定常分布予測に関する研究へと発展させる。乱流輸送コードの拡張やモデリングを進めるとともに、水素同位体イオンや不純物イオンが熱・粒子・運動量輸送特性に与える影響を JT-60U 等の実験データや JT-60SA の平衡データに基づいて解析する。これらにより、トカマク燃焼プラズマの輸送・分布特性に対する予測性能の検証や解析基盤の整備を進め、乱流輸送コードとしての完成度と国際的競争力の向上を目指す。

2. 研究成果と進捗状況

・連成計算による大域的乱流輸送コード TRESS+GKV の拡張

第一原理的な大域シミュレーションモデルと局所解析モデルを補間する新たな輸送解析の枠組みとして、多数の局所 GKV 計算による磁気面ごとの輸送フラックス評価と 1 次元輸送計算による背景分布の時間発展追跡を結合させた連成輸送解析コード TRESS+GKV を開発している。GKV による大規模直接連成計算のみならず、最適化計算手法や機械学習アルゴリズムを活用した輸送ソルバー側の高速計算や、ジャイロ運動論と実験データに基づく縮約乱流輸送モデルなどを解析精度・目的に応じて柔軟に組み合わせて計算を実行できることが TRESS+GKV の最大の特徴である。

従来の TRESS+GKV は、SPMD(Single Program Multiple Data)形式と呼ばれる、コード間の結合度が高い並列化方式が採用されていた。しかし、TRESS(Transport Equation Stable Solver) や GKV に加え、平衡解析などの新たな計算コードをさらに結合させる場合には柔軟性に欠ける。そこで本研究では MPMD (Multiple Program Multiple Data)形式と呼ばれる拡張性に優れた並列化方式への拡張を進め、各々の計算コードの主たる構造を維持したまま連成計算として結合させることが可能となった。これにより、TRESS や GKV といった個々のソルバーの拡張にも円滑に対応できるようになり、さらには、電流拡散ソルバーなどの他の計算コードといった多数の結合も容易に行える。今後は、後述する縮約乱流輸送モデルや機械学習援用輸送モデルとの組み合わせなどによって複数粒子種の分布形成シミュレーションを展開していく。

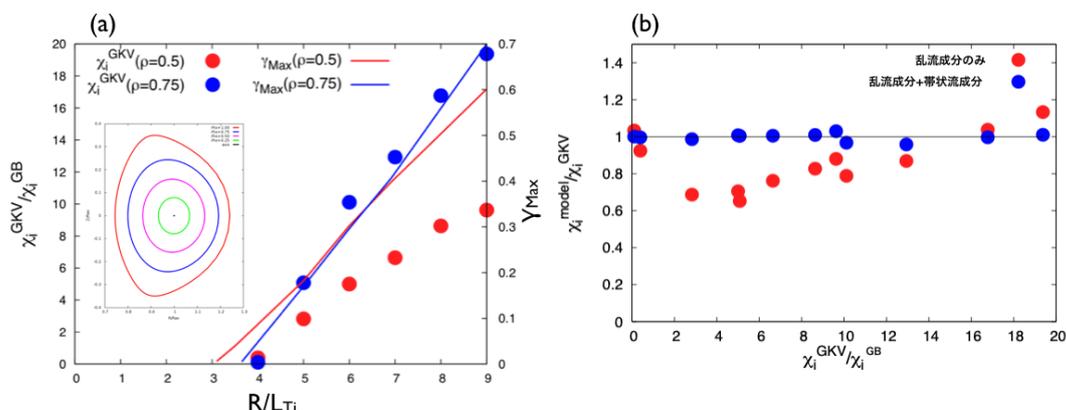


Fig.1 (a)乱流輸送係数のイオン温度勾配依存性に関するデータおよび(b)縮約乱流輸送モデルの再現精度

・JT-60U に対する局所ジャイロ運動論シミュレーションに基づいた乱流輸送モデリング

並列計算手法の拡張に加え、乱流の非線形効果が組み込まれた縮約乱流輸送モデルの構築と精度検証に関する研究が進展している。大型ヘリカル装置(LHD)に対して成された先行研究(M. Nunami et al., PoP2013)での手法を踏襲しつつ、パラメータ数やモデルの関数形に関するより幅広い検討を重ね、ITER/JT-60SA などのトカマク磁場配位に対する縮約乱流輸送モデルを構築した。JT-60U 平衡データを用いたジャイロ運動論乱流シミュレーションを実行し、半径位置や分布パラメータが異なる 12 ケースの乱流熱輸送係数、乱流振幅、ゾーナルフロー振幅のデータが取得された(Fig.1(a))。これらのシミュレーションデータを、現象論的に定められた非線形関数へフィッティングすることで縮約乱流輸送モデルが構成される。ここでは、乱流振幅とゾーナルフロー振幅について 2 種類の定義、そして 2 種類の関数形について比較を行い、ジャイロ運動論乱流シミュレーションの結果に対する再現精度を検証した。モデルに現れる 4 つのフィッティング係数は 4 次元の非線形数理計画問題として数値的に探索され、統計的再現誤差 1.9% ($\sigma=0.0187$) の良好な再現精度を与える関数形と係数が同定された(Fig.1(b))。一連の解析から、ゾーナルフローによる乱流抑制効果の考慮が再現精度の向上にとって不可欠であることも確認された。

現象論的考察に基づくモデリングに加え、深層学習を援用した乱流輸送モデリングも進展している。JT-60U 実験データとジャイロ運動論乱流シミュレーションデータを活用することで、乱流輸送過程における拡散と対流を区別しながら、高速に乱流粒子輸送を予測するモデル DeKANIS[7]を開発した。DeKANIS はさらに拡張され、現在は複数粒子種の粒子輸送と熱輸送を同時に予測することができる。乱流輸送の大きさの決定には、実験データに基づく半経験的手法や混合長理論に基づく手法が用いられている。それぞれの相補的な特徴を活かすことで、JT-60U の実験データのみならず、JET に対しても粒子・熱輸送の実験値を精度よく再現することが確認されている。DeKANIS は統合コード TOPICS にも導入された。密度と温度を矛盾なく安定して評価するために、DeKANIS が流束の予測に用いているニューラルネットワークの学習セットの拡充を行うとともに、学習手法の改良・最適化を実施した。Fig.2 に示すように、半経験モデル・混合長理論モデル共に、密度・温度の同時評価を実現した。計算時間はシングルコアで約 3 時間であり、並列計算で数日を要する TGLF などの従来の乱流輸送モデルと比べて非常に高速である。

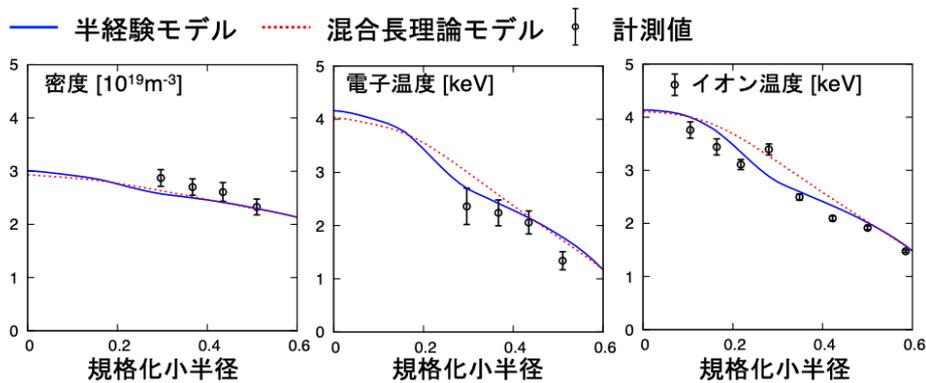


Fig. 2 JT-60U のプラズマに対して、乱流輸送モデル DeKANIS を用いて評価した密度・電子温度・イオン温度の半径方向分布

3. まとめと今後の課題

ITER/JT-60SA に代表される燃焼プラズマにおいて本質的となる複数粒子種の粒子・熱輸送特性および大域的な分布予測に関する共同研究を推進した。JT-60U などの実験データ・平衡データを用いたジャイロ運動論乱流シミュレーション解析、それらに基づいた粒子・熱輸送モデリング、さらには連成大域輸送解析コードの開発・拡張が大きく進展した。さらに、full-f 大域的ジャイロ運動論シミュレーションなどによる水素同位体効果や不純物輸送、周辺プラズマ輸送に関する研究成果も得られている。今後はこれらの知見を連成大域計算へと統合化し、高精度の乱流輸送モデルに基づいた燃焼プラズマ大域輸送解析によって定常燃焼条件などの定量検証に関する研究を展開する。

4. 成果リスト

- [1] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, et al., “Density profile prediction using the neural-network-based particle transport model”, 20th ITPA Transport & Confinement TG meeting, Daejeon, Apr. 9-11th, oral presentation (2018)
- [2] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, et al., “Dependence of density peaking on particle pinch in JT-60U H-mode plasmas”, 21st ITPA Transport & Confinement TG meeting, St. Paul-lez-Durance, Sep. 17-20th, oral presentation (2018)
- [3] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, et al., “Gyrokinetic Modeling of Turbulent Particle Fluxes towards Efficient Predictions of Density Profiles”, IAEA-FEC2018 Proceedings, TH/P6-9 (2018)
- [4] 成田絵美、本多充、仲田資季 他、“核融合プラズマにおける高速な分布予測のための機械学習を用いた輸送モデリング”、第35回プラズマ・核融合学会年会、大阪大学、12/3-6、シンポジウム講演 (2018)
- [5] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, et al., “Gyrokinetic modelling of turbulent particle transport based on experimental analyses of JT-60U plasmas towards efficient prediction of density profiles”, submitted to Nucl. Fusion
- [6] M. Yoshida, G. R. McKee, A. M. Garofalo, et al., “Magnetic shear effect on plasma transport in ECH injected DIII-D plasma”, 60th APS-DPP, Portland, Nov. 5-9th, poster presentation (2018)
- [7] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, et al., “Neural-network-based semi-empirical turbulent particle transport modelling founded on gyrokinetic analyses of JT-60U plasmas”, Nucl. Fusion, 59, 106018 (2019)
- [8] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, et al., “Neural-network-based multi-channel turbulent transport modeling applicable to JT-60SA relevant plasmas”, International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, Shanghai, Oct. 9-11th, poster, (2019)
- [9] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, et al., “Quasilinear turbulent transport modeling with semi-empirical and mixing-length-like saturation rules”, Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Hefei, Nov. 4-8th, Oral and poster (2019), Poster prize を受賞
- [10] Y. Idomura, “Isotope and Plasma Size Scaling in Ion Temperature Gradient Driven Turbulence”, Phys. Plasmas 26, 120703 (2019, featured article).
- [11] M. Honda et al., “Machine-learning assisted steady-state profile predictions using global optimization techniques”, Physics of Plasmas 26 102307 (2019)
- [12] M. Honda, “Fast computation of the steady-state transport solver GOTRESS assisted by a deep neural network modeling”, 2nd International Conference on Data Driven Plasma Science, poster
- [13] M. Honda, “Integrated code framework for operation scenario development with the global-optimizer-based iterative solver GOTRESS”, 46th EPS Conference on Plasma Physics, poster
- [14] 仲田資季, “Global turbulent transport simulation using a coupled code TRESS+GKV”, 第17回核燃焼プラズマ統合コード研究会, oral
- [15] 中山智成, 「ゾーナルフロー効果を含んだ連成大域輸送シミュレーション」、第37回プラズマ・核融合学会年会、オンライン、12/1-4、ポスター発表 (2020)

- [16] 仲田資季、“超高温プラズマにおける乱流輸送抑制機構の解明と閉じ込め改善の研究”、令和2年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞
- [17] 仲田資季、“磁場閉じ込めプラズマの乱流・輸送および同位体質量効果に関する研究”、日本物理学会 第14回若手奨励賞
- [16] E. Narita, M. Honda, M. Nakata, et al., “Update on GKW neural network based JT-60U data”, 24th ITPA Transport & Confinement TG meeting, Remote, June 29th – July 3th, oral presentation (2020)
- [17] 成田絵美、本多充、仲田資季 他、“乱流飽和則の開発によるニューラルネットワーク輸送モデリング”、日本物理学会 2020 秋季大会、オンライン、9/8-11、口頭発表 (2020)
- [18] M. Honda and E. Narita, “Development of a Surrogate Turbulent Transport Model and Its Usefulness in Transport Simulations”, Plasma and Fusion Research 16 2403002 (2021)
- [19] C. Kawai, Y. Idomura, Y. Ogawa, H. Yamada, “Self-organization of zonal flows and isotropic eddies in toroidal electron temperature gradient driven turbulence”, Physics of Plasmas, Vol. 27, 082302 (2020).
- [20] M. Yoshida, G. R. McKee, C. C. Petty, B. A. Grierson, M. Nakata, C. Rost, T. L. Rhodes, D. R. Ernst, and A. M. Garofalo, “Magnetic shear effect on plasma transport at Te/Ti~1 through electron cyclotron heating in DIII-D plasmas”, Nucl. Fusion 61, 016013 (2021)
- [21] Y. Idomura, K. Obrejan, Y. Asahi, and M. Honda, "Dynamics of enhanced neoclassical particle transport of tracer impurity ions in ion temperature gradient driven turbulence", Physics of Plasmas, Vol. 28, 012501 (2021).
- [22] O. Beeke, M. Barnes, M. Romanelli, M. Nakata, and M. Yoshida, "Impact of plasma shaping on tokamak microinstability", Nucl. Fusion, submitted