

縮約モデリングが可能にするプラズマ乱流輸送の分布形成予測

Dynamically coupled simulation for global turbulent transport enabled by reduced modeling

中山 智成¹, 仲田 資季^{1,2,3}, 本多 充⁴, 成田 絵美⁴, 沼波 政倫^{2,5}, 松岡 清吉^{1,2}
T. Nakayama¹, M. Nakata^{1,2,3}, M. Honda⁴, E. Narita⁴, M. Nunami^{2,5}, S. Matsuoka^{1,2}

総研大¹, 核融合研², 理研 iTHEMS³, 京都大⁴, 名古屋大⁵
SOKENDAI¹, NIFS², RIKEN iTHEMS³, Kyoto Univ.⁴, Nagoya Univ.⁵

1 背景・目的

高性能なプラズマの実現のために、乱流輸送・分布形成の定量的な評価と予測は急務な課題である。特に、ITER や原型炉における燃焼プラズマにおいて、限られた回数で効率よく実験を行うためにもシミュレーションによる予測はさらに重要となる。従来は統合輸送解析コード (TASK/TASK3D[1] 等) による解析や、full- f ジャイロ運動論シミュレーション (GT5D[2] 等) によって予測が行われてきた。統合コードにおいては、簡約化されたモデルを組み合わせた高速な分布予測が可能であり、さまざまなプラズマの解析や、実験に対するリアルタイム解析を実行可能であるが、簡約化されたモデルを用いているために、正確に乱流輸送を評価することはできない。一方で、full- f ジャイロ運動論シミュレーションは、乱流輸送と分布形成の相互作用を第一原理的に解くことが可能であり、雪崩現象や径電場などの核融合プラズマの大域的効果を含むシミュレーションが可能である。しかし、これは莫大な計算量を必要とするため、背景磁場や加熱分布の変動効果を入れた解析は難しい。

核融合燃焼プラズマにおいて、乱流輸送によって変動する圧力分布が自発電流を通して閉じ込め磁場を変化させ、それが乱流輸送に作用するという、従来は無視されていた動的な相互作用ループの存在が予想される。また、外部加熱および自己加熱によってプラズマが吸収する熱量の分布はプラズマ自体の圧力分布に強く依存するため、これと圧力分布・乱流輸送は動的に相互作用することが予想される。乱流輸送に対するこれらの“動的な”相互作用を含んだ研究は、ITER や DEMO などの燃焼を見据えた高性能プラズマ実験において重要となることが予想されるが、従来のシミュレーションモデルでは計算量の制限や、モデルの制限からなされていない。そこで、本研究は局所乱流シミュレーションと大域輸送ソルバーを組み合わせることで、核融合燃焼プラズマの動的な乱

流輸送解析を可能にする新たな動的連成シミュレーション (AGITO: Alterable Gyrokinetics-Integrated Transport cO-simulation) を開発した。これは、トラスプラズマの半径方向に局所乱流シミュレーションを分散配置し、大域的な圧力分布計算と連成させる計算手法によって、半径方向に稠密なメッシュを設ける従来研究手法よりも計算量を削減し、閉じ込め磁場・加熱分布との動的な相互作用という新たな物理過程の解析を実現を目指す。

2 縮約モデリング

AGITO コードは、非線形局所ジャイロ運動論シミュレーションによる乱流輸送の評価との直接連成により厳密な輸送解析も可能であるが、これは多くの計算量を要する。そこで、軽量・高速に乱流輸送を評価可能な縮約輸送モデルが構築されたならば、それらを組み合わせた柔軟な大域輸送解析が新たに実現される。縮約輸送モデルは、高精度な非線形シミュレーションで得られる物理量である乱流輸送、乱流強度、ゾーナルフロー (ZF) 強度の間の非線形関数関係 (NFR) を同定したのちに、乱流強度および、ZF 強度をより少ない計算量の線形シミュレーションで得られる物理量である不安定性成長率と ZF 応答を用いてさらにモデル化することで構築される。

NFR は、乱流と ZF の非線形効果を含む形で輸送フラックスに対する非線形な関係を表す関数である。これは乱流輸送の理解において有用であることに加え、NFR をベースに構築された縮約輸送モデルは、乱流輸送現象の非線形な描像および物理的解釈性を保持したものとなる。本研究では、NFR の関数形として乱流輸送に関する現象論的な要請を満たす数理モデルを考案し、数理モデルに現れるパラメータを、非線形シミュレーション結果に対する 2 乗誤差を最小化する多次元数理最適化問題の解として決定した。数理最適化手法には初期値部分空間をヘッシアンに基づくハイブリッド探索により広域探索する準大域的な最適化計算を実

施した。これにより先行研究 [3] よりも精度を向上させつつ適用範囲が拡張された NFR が構築された [4]。また、NFR における ZF 影響率の部分で低輸送領域における ZF の寄与率が輸送の増大に伴い急峻に減衰する振る舞いを再現することが NFR 自体の精度向上に対して重要であることが示された。

縮約輸送モデリングは、[4] で得たモデルに含まれる乱流強度と ZF 強度を線形シミュレーションで得られる量でさらにモデル化することで構築される。乱流、ZF に関係する量としてそれぞれ、混合長理論推定と、ZF 減衰時間を用いる。新規点として、NFR の構築で用いた数理最適化手法を適用した点に加え、ZF 強度の温度勾配依存性を組み入れた点がある。特に、後者は乱流と ZF の相関時間を考慮することで、先行研究で無視されていた ZF 強度の温度勾配依存性を定性的に捉えることが可能となった。これにより、本研究で構築された縮約輸送モデルは、先行研究の再現精度を維持しつつ、適用可能範囲が向上している [5]。

3 動的連成シミュレーション:AGITO

縮約輸送モデルの構築により、比較的軽量の線形計算で非線形計算から得られる乱流流束を評価することが可能となり、AGITO コードによる大域輸送解析が実現する。これは、局所乱流シミュレーションと大域輸送ソルバーという複数のシミュレーションを MPMD(Multiple Program Multiple Data) 方式で並列化した連成型のシミュレーションを行っている。その概念図を Fig. 1 に示す。連成シミュレーションは、異なるスケールの支配方程式を同時に解く手法であり、時空間スケールが離れたダイナミクスを系統的に取り扱うことができる。また、MPMD 方式はさらに他の計算コードや縮約モデルを連結させることも容易であり、将来的には磁場の平衡計算コードやプラズマの吸熱を計算するコードなどとも柔軟に連結することが可能である。連成型の輸送シミュレーションの先行研究として、TRINITY[6] が挙げられるが、本シミュレーションコードは先行研究で無視されていた磁場や加熱の動的な変動を含んだ大域輸送解析に対応している。

AGITO コードのフレームワーク開発により、従来の乱流輸送シミュレーション研究では考慮されていなかった加熱の時間的な変動や、それらと乱流輸送との相互作用を含めた解析が可能となった (Fig. 2)。この解析は、燃焼プラズマで予想される動的な加熱の解析を先行するものであり、時間変動する加熱に対する乱流輸送と分布形成の基礎的な挙動を調査するために実施した。縮約輸送モデルを用いることにより、ZF の

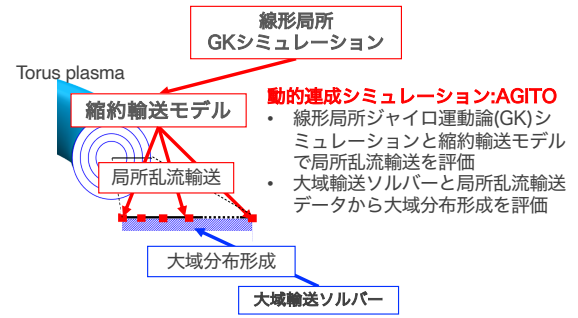


Fig. 1: AGITO コード概念図

乱流に対する相対強度についての時間発展も考慮することが可能となっており、ZF の相対強度が強い磁気軸側の領域では乱流輸送がほとんど生じないことが確認された。乱流輸送は加熱に対応し周期的に変動しているが、温度分布には周期性が見られなかった。乱流輸送の時間的な変動の振幅は、温度分布が定常に近づくにつれて減衰していくことが確認された。また、加熱分布の周期変動に対して乱流輸送の周期変動は遅れが生じていることが明らかにされた。さらに、AGITO コードは閉じ込め磁場のメトリックに対する周期変動も含めて計算が可能であり、本講演ではその解析結果も含めて報告する。

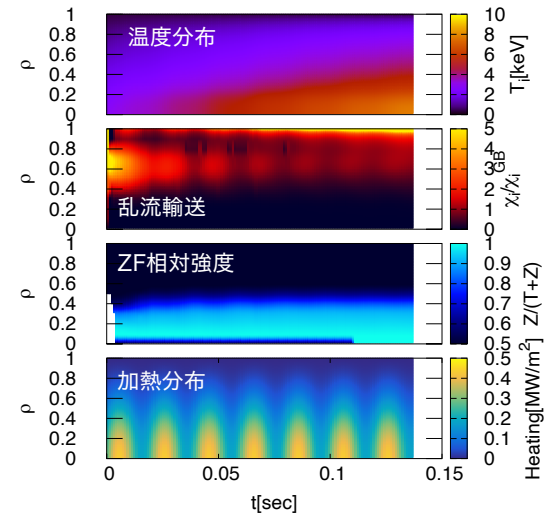


Fig. 2: AGITO による加熱が動的に変化するケースの大域輸送解析

References

- [1] TASK <https://bps.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/>.
- [2] Y. Idomura Comput. Phys. Commun. 179 391–403(2008)
- [3] M. Nunami, et al. ,Phys. Plasmas 20, 092307 (2013)
- [4] T. Nakayama, et al. ,Plasma Phys. Control. Fusion 64 075007(2022)
- [5] T. Nakayama, et al. ,Sci. Rep. 13, Article number: 2319 (2023)
- [6] M. Barnes et al. , Phys. Plasmas 17, 056109 (2010)