

データ駆動手法による核融合プラズマの熱輸送モデリングの試み

自然科学研究機構 核融合科学研究所、総合研究大学院大学（総研大） 横山 雅之

Masayuki YOKOYAMA

National Institute for Fusion Science, National Institutes of Natural Sciences

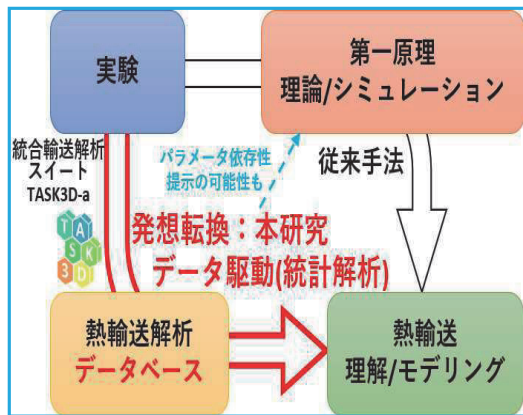
SOKENDAI

1. 概要

核融合プラズマは、広範な時空間スケールにおける現象が複雑に絡み合った複雑性の究極とも言える媒質である。高周波加熱、輸送現象、電磁流体力学的不安定性など、様々な物理に対して、それぞれの第一原理的手法による研究は大幅な進展、精緻化を遂げているが、残念ながら、核融合プラズマ全体の挙動を全て解明した、とは言えない状況である。

そこで、核融合プラズマの温度勾配形成（熱輸送現象の結果）を考えたときに、「実際に使える」熱輸送モデルを導出するため、第一原理に基づく従来の研究から発想を大きく転換して、大規模データ（多数の実験データ、多数の熱輸送解析データ）に向き合った手法を提唱、試行、実践している。複雑極まりない物理過程は、「出来上がりの温度勾配に全て集約されている」という考え方である。図1に示すように、従来の「第一原理」や「物理的解明」とは一線を画す方向性ではあるが、「データ駆動」、「機械学習」や、多種多様なデータを基盤とした統計、数理科学分野の研究と核融合研究との連携の接点となる創造的な研究である。（連携を模索するため、本研究会に参加、発表させていただいた次第である。）

核融合科学研究所にある世界最大級の核融合実験装置、大型ヘリカル装置（LHD）[1]の実験解析用統合熱輸送解析スイート（TASK3D-a）[2]の開発・運用を先導してきた発表者ならではの発想である。具体的には、統計解析手法に基づいて、広範囲のパラメータにわたって有効かつ簡便な「使える」熱輸送モデルを提示する。さらに、得られた熱輸送モデルの実験検証を行い、その妥当性を検証する。

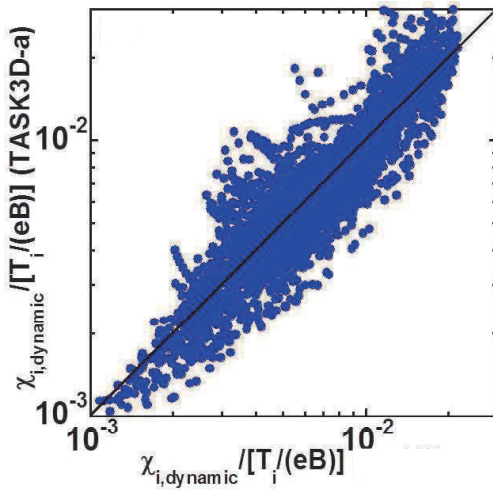


【図1】核融合プラズマの熱輸送モデリング研究における本研究の考え方

2. 試行研究の状況と今後の展望

可能性を裏付ける試行研究として、LHDにおける高イオン温度放電のイオン熱輸送係数の回帰式導出を行った例[3]を紹介した。31ショット（イオン温度は2~7 keV（1 keV~11600度）と広い範囲）に対して、TASK3D-aによる熱輸送解析を行い、およそ3000のイオン熱輸送係数解析デー

データベースを整備した。このデータベースに対して、無次元パラメータ（規格化イオン衝突周波数、規格化イオン旋回半径、電子温度とイオン温度の比）を用いて統計回帰解析を行い、ある回帰式を得た（ご興味のある方は上記論文をご参照ください）。図2に、回帰値（横軸）と TASK3D-a 解析結果（縦軸）との比較を示す。この図から、両者の差異（=対角線からのずれ）はあるが、これだけ多くのケースに対して、一定（この場合、約4割）の相対誤差の範囲内で、径方向分布を含めて熱輸送係数を説明しうる手法は、これまで世界的にも存在していなかった。回帰式一つで済むのがこの手法の斬新な点である。この試行研究の結果は、この着想に基づく研究手法の可能性を十分に示していると考える。この実績に基づいて、統計回帰の精度向上、変数選択の妥当化（赤池情報量規準の活用）、物理的解釈の試みを継続している。統計的に得られた回帰式と物理的解釈の接点が最も大変であるが、合理的な解釈ができれば、この手法の認知度も高まるものと期待している。



【図2】イオン熱輸送係数の回帰値（横軸）と TASK3D-a 解析結果（縦軸）との比較（参考文献[3]の図を引用）

参考文献

- [1] Y. Takeiri et al., Nuclear Fusion 57 (2017) 102023.
- [2] M. Yokoyama et al., Nuclear Fusion 57 (2017) 126016.
- [3] M. Yokoyama, Plasma and Fusion Research 9 (2014) 1302137.