

横山 雅之  
YOKOYAMA Masayuki核融合研、総研大、 統計数理研究所（客員）  
NIFS, SOKENDAI, ISM (visiting prof.)

本講演では、講演者の視点でデータ駆動アプローチの大きな可能性を述べるが、プラズマ物理に基づく従来研究を否定するものではなく、それと相補的かつ研究の拡がりをもたらす考え方であることを特記しておきたい。また、海外でも多様な研究が行われているが、本講演では主に日本における取り組みへの言及から、新たな研究構想を提案したい。

核融合プラズマ研究において、プラズマ物理の基礎方程式やモデル、および、それらの複合でもデータを説明しきれていない、また、複雑すぎてリアルタイムでの予測や判断に活用することが困難と考えられる多様な問題が存在している。そのような問題に対して、**プラズマ物理を基盤とした研究軸と相補的に、現象にまつわるデータを基盤としたデータ駆動的視点の研究軸**が導入されている。例えば、プラズマ・核融合学会の小特集記事[1,2]や数々の論文としてまとめられ、また学会賞（[3~6]など）も授与されるなど注目を集めている。それらを網羅した講演はできないが、今後の核融合研究において重要度が増す「リアルタイムでの予測や判断に基づく制御」の観点で、有望と考える研究を数例紹介するとともに、それらを基盤とする研究構想として、「**データ駆動アプローチに基づく核融合プラズマ挙動の統合記述と制御ロジックの構築**」について述べたい。なお、本講演での「データ駆動」は、主に、「**データへの当てはめ**」を基本とする統計数理学の考え方を意図したものである。

まず、データ同化手法を活用した核融合研究の動向を紹介する。データ同化は、気象や海洋などの分野では日常的に用いられている手法であるが、近年、核融合プラズマの挙動解析への適用が急速に進んでいる[7,8]。例えば、プラズマ輸送に関する研究の場合、何らかの輸送モデルを用いたシミュレーションを行うことが従来であったが、

往々にして、放電全時間帯の温度変化（時系列変化）を再現するのは困難であった。一方、データ同化は、シミュレーション結果のアンサンブル（予測分布）と観測データの分布（計測誤差のほかに、モデルに取り込めていない諸々の事柄も確率分布の形式で導入）を用いて、モデルを最適化（データに当てはまるように「妥当化」）するものである。これにより、図1に示すように、放電全時間帯の温度変化を再現する輸送モデルを獲得することができる。最適化の過程で、元のモデルが修正を受けるわけであるが、その修正を定量的に把握することができるため、修正分を物理変数の関数として表すことを試したり、元のモデルに立ち戻って表現（物理変数への依存性）を再考したり、さらには、複数モデルの妥当度を比較したりと様々な研究の可能性を生み出すドライバーとしても活用できる。

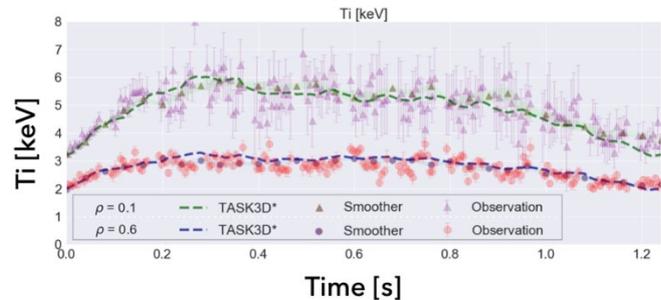


図1 データ同化の適用による放電全時間帯の温度変化の再現（点：計測、線：データ同化による評価値）。[8]の図を改編掲載

核融合分野は、データ同化手法の導入（輸入）を経て、その制御活用という視点でデータ同化研究コミュニティにも新展開をもたらしている。気象や海洋では、予測が重視されているが、我々は予測に加えて、対象を制御する必要がある[9]。従来のデータ同化の枠組みに、新たに「**制御変数**」を導入することで「**データ同化制御**」アルゴリズムを構築し、数値実験による検証[10]から実機での実証を目指している。

次に、ディスラプションや放射崩壊に関するデータ駆動的な研究を紹介する。ディスラプションや放射崩壊が「発生するか、しないか」という分類問題として捉え、スパースモデリングを活用した研究展開である（横山達也氏らの一連の研究[11~14など]）。蓄積されたデータ群に基づいて、分類への寄与度の高い変数群を選択（多くの変数を用いた全状態探索からF1-scoreとよばれる指標を活用）した上で、選ばれた変数を用いて発生尤度を評価することで分類するものである（図2：黒点線は、放射崩壊発生尤度50%）。冒頭に述べた「データへの当てはめ」の視点に基づく研究である。発生尤度は極めて簡単な表式であるため、即時判断やリアルタイム制御への親和性が高く、実際、この手法に基づいて、放射崩壊回避が実機で実証された。さらに、周辺プラズマのシミュレーションを用いて、選択された変数と物理背景との関係を探る挑戦が行われていることも特記したい[13]。この動向は、「データへの当てはめ」にとどまらず、プラズマ物理という学術基盤がある核融合研究が、データ駆動的な研究と分野知識との融合による新展開をもたらす優位性を持っていることを示すものである。

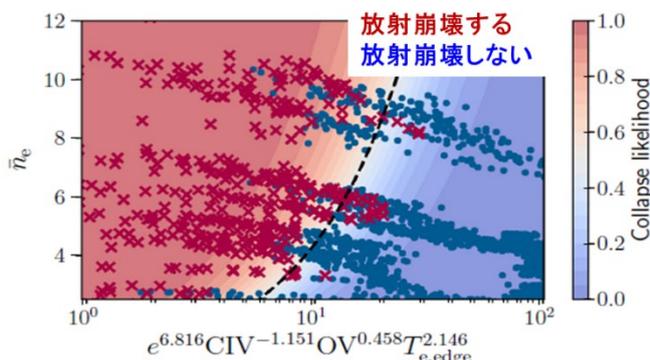


図 2 スパースモデリングの活用による放射崩壊の発生有無の分類例（[12]から改編掲載）

講演ではもう一つの事例（中性子発生率の回帰表現[15]と、それを用いた性能向上（=外挿性）の実証[16]）を示す予定である。データ駆動手法の外挿性研究の舞台（実機での検証機会）を有していることも、核融合研究の大きな強みである。

これらの「データ駆動的」現象記述とその実用性実証の積み上げは、リアルタイム性の高い予測・判断・制御ロジック構築の可能性を拓くものである。本講演の最後にそのような研究構想を提案する。本講演が、その構想の推進に不可欠な、多様な現象に関する研究を行っている核融合研究者や、データ駆動手法の開発・適用に関する学界・産業界の皆様との協働のきっかけになれば幸

いである。

[1] 浜口智志ほか、プラズマ・核融合学会誌小特集「プラズマ・インフォマティクス -データ駆動科学のプラズマへの応用」95 (2019) 535.

[2] 今寺賢治ほか、プラズマ・核融合学会誌小特集「磁場閉じ込め核融合プラズマにおけるデータ駆動アプローチによる物理モデリングの進展」97 (2021) 64.

[3] 若月琢馬「核融合炉の高性能化を目指した先進プラズマ制御手法の開発」吉川允二記念核融合エネルギー奨励賞(2019)など.

[4] 剣持尚輝「深層敵対的生成ネットワーク (GAN) を用いたイメージング計測におけるトモグラフィ法の開発」プラズマ・核融合学会 第25回技術進歩賞(2020).

[5] 横山達也ほか「データ駆動アプローチとシミュレーションを合わせた放射崩壊前駆現象の考察」日本物理学会学生優秀発表賞(2021) など.

[6] 森下侑哉ほか「データ同化を用いたLHDプラズマにおける輸送係数の評価」日本物理学会学生優秀発表賞 (2021) など.

[7] Y. Morishita et al., “Data assimilation system based on integrated transport simulation of Large Helical Device plasma”, Nuclear Fusion 60 (2020) 056001.

[8] Y. Morishita et al., “ASTI: Data assimilation system for particle and heat transport in toroidal plasmas”, Computer Physics Communications 274 (2022) 108287.

[9] 森下侑哉「核融合プラズマ解析・制御のためのデータ同化システムの開発」第12回データ同化ワークショップ (オンライン) 2022年2月17日.

[10] Y. Morishita et al., “A Data Assimilation Framework for Predictive Control and Its Application to Fusion Plasma Control”, submitted to Nature Computational Science, Jun. 2022.

[11] T. Yokoyama et al., “Prediction of high-beta disruptions in JT-60U based on sparse modeling using exhaustive search”, Fusion Engineering and Design 140 (2019) 67.

[12] T. Yokoyama et al., “Prediction of Radiative Collapse in Large Helical Device Using Feature Extraction by Exhaustive Search”, Journal of Fusion Energy 39 (2020) 500.

[13] T. Yokoyama et al., “Data-Driven Approach on the Mechanism of Radiative Collapse in the Large Helical Device”, Plasma and Fusion Research 16 (2021) 2402010.

[14] T. Yokoyama et al., “Data-Driven Control for Radiative Collapse Avoidance in Large Helical Device”, Plasma and Fusion Research 17 (2022) 2402042.

[15] K. Ogawa et al., “Regression Approach for Acquiring a Quantitative Guidance toward Updating the Deuterium-Deuterium Fusion Neutron Emission Rate in the Large Helical Device”, Plasma and Fusion Research

[16] K. Ogawa et al., “Extending the Total Neutron Emission Rate of Steady State Deuterium Large Helical Plasma Guided by a Data-driven Approach”, Fusion Engineering and Design, 167 (2021) 1202087.