

## 核融合プラズマに対するデータ同化システム開発の進展 Progress in the development of data assimilation system for fusion plasmas

森下侑哉<sup>1</sup>, 村上定義<sup>1</sup>, 横山雅之<sup>2,3</sup>, 上野玄太<sup>3,4,5</sup>  
Yuya Morishita<sup>1</sup>, Sadayoshi Murakami<sup>1</sup>, Masayuki Yokoyama<sup>2,3</sup>, Genta Ueno<sup>3,4,5</sup>

京都大学<sup>1</sup>, NIFS<sup>2</sup>, 総研大<sup>3</sup>, 統計数理研究所<sup>4</sup>, データサイエンス共同利用基盤施設<sup>5</sup>  
Kyoto University<sup>1</sup>, NIFS<sup>2</sup>, SOKENDAI<sup>3</sup>, The Institute of Statistical Mathematics<sup>4</sup>, The Joint Support-Center for Data Science<sup>5</sup>

核融合プラズマ全体の挙動を解析、予測、制御するために、統合シミュレーションコードの開発が世界的に進められている。しかしながら、各要素コードの持つ不確実性が相互作用することや、プラズマ乱流輸送等で精度の高いモデルが確立されていないことから、統合シミュレーションコードによる解析や予測は大きな不確実性を持っている。このような不確実性の問題を解決し、核融合プラズマの高速かつ高精度な解析・制御システムを構築するため、本研究ではデータ同化の手法と統合輸送シミュレーションを組み合わせたデータ同化システムASTIの開発を進めている[1]。

データ同化とは、実際の観測値を用いて、システムを記述するモデルの予測および解析能力を高める統計的最適化手法である。ASTIでは、データ同化手法として逐次ベイズフィルタに基づく手法（アンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）およびアンサンブルカルマン smoother（EnKS）[2]）を用いている。このデータ同化の枠組みにおけるシステムモデルとして、ヘリカルプラズマに対する統合輸送シミュレーションコード、TASK3D[3]を用いている。

本発表では、核融合プラズマに対するデータ同化システムの開発について、特にASTIの制御システムとしての側面に重点を置いて言及する。一般的なデータ同化は、限られた観測情報から状態変数を推定するオブザーバーの技術であり、制御推定といった実システムへの能動的な働きかけを含んでいない。そこで本研究では、ASTIの基盤となるデータ同化のフレームワーク（逐次ベイズフィルタ）を、制御を含む形へと拡張した（DACSFフレームワーク）。このフレームワークにより、観測を用いてシステムモデルの不確実性を抑えつつ、目標状態を実現する制御入力を推定することができる（図1参照）。この手法の有効性を検証するために、数値空

間でTASK3Dによる模擬プラズマの制御を行った。状態ベクトル（その系の状態を定義する変数の集まりであり、最適化の対象）として、電子温度、イオン温度、密度、電子およびイオンの乱流拡散モデル内の定数、ECH加熱パワー、周辺の中性粒子密度を取り、装置はLHDを仮定した。この検証では、ECH加熱および中性粒子密度を調整することで、プラズマ中心における電子温度および密度を目標状態の時系列に追従させることを考える。また、逐次的に得られる観測を用いて、乱流熱拡散係数のモデルを最適化する。

本発表では、数値実験の結果を示すとともに、制御精度のハイパーパラメータ依存性やモデルの適応限界についても言及する。また、実際にLHDを制御する実験を計画しており、実時間を超える速度での計算を実現するために行なった工夫と過去の実験データを用いたモデルパラメータの最適化についても言及する。

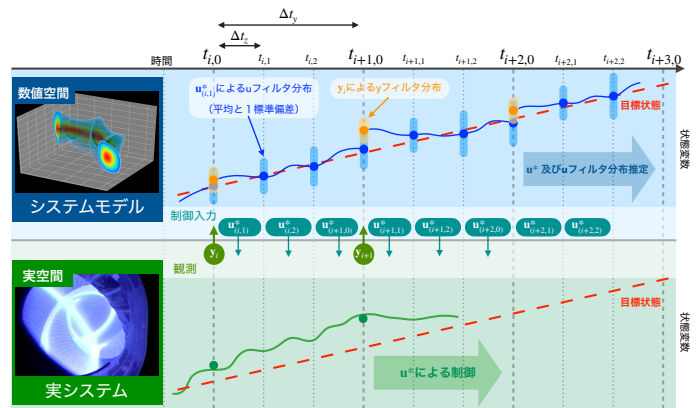


図1 データ同化システムによる制御

### 参考文献

- [1] Y. Morishita *et al.*, Computer Physics communications **274**, 108287 (2022).
- [2] G. Evensen, Ocean Dyn. **53**, 343 (2003).
- [3] S. Murakami *et al.*, Plasma Physics and Controlled Fusion **57**, 054009 (2015).