

データ同化システムASTIによるプラズマ制御手法の開発 Development of plasma control method using data assimilation system ASTI

森下侑哉¹, 村上定義¹, 横山雅之^{2,3}, 上野玄太^{3,4,5}
Yuya Morishita¹, Sadayoshi Murakami¹, Masayuki Yokoyama^{2,3}, Genta Ueno^{3,4,5}

京都大学¹, NIFS², 総研大³, 統計数理研究所⁴, データサイエンス共同利用基盤施設⁵
Kyoto University¹, NIFS², SOKENDAI³, The Institute of Statistical Mathematics⁴, The Joint Support-Center for Data Science⁵

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に対して、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[1,2]。本研究の目的は、データ同化と統合シミュレーションにより、核融合プラズマの高速かつ高精度な解析・制御を実現するシステムを構築することである。

データ同化とは、実際の観測値を用いてシミュレーションモデルを逐次的に最適化し、予測および解析精度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) [3]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を用いている。

ASTIを核融合プラズマの制御に利用するために、データ同化を利用した制御手法の開発を行なった。本制御手法は、目標状態の同化により最適な制御入力を推定するとともに、逐次的に得られる観測データを用いて、シミュレーションモデルの最適化を行う。この手法の有効性を検証するために、数値空間上でTASK3Dによる模擬プラズマの制御を行なった。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、電子およびイオンの乱流熱拡散モデル内の定数、ECH加熱パワーを取り、装置はLHDを

仮定した。この検証では、ECH加熱の入力を調整することで、プラズマ中心における電子温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。

図1は、0.5秒おきに観測（図中、黄色丸）が得られると仮定し、0.1秒おきに制御入力の推定を行なった場合の結果の一例である。ここで、模擬プラズマの乱流熱拡散係数は、制御開始時点のASTI内で仮定されているものの1.5倍としている。なお、ECH加熱パワーは0.5から5MWまでを0.5MW刻みで取れるものとした。模擬プラズマの電子温度の時間発展（図中、緑太線）が目標時系列（Z、図中赤破線）に高精度で追従できているのが分かる。また、電子およびイオンの乱流熱拡散モデル内の定数が観測を数回同化することで、1.5に最適化されることを確認した。本発表では、開発した制御手法の詳細を説明するとともに、ハイパーパラメータの調整や模擬プラズマの乱流熱拡散モデルが関数的に異なっている場合の結果などについても言及する。

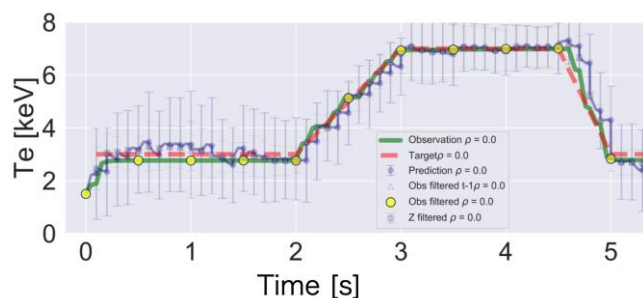


図1 ASTIによる模擬プラズマの制御の例

参考文献

- [1] Y. Morishita *et al.*, Nucl. Fusion **60**, 056001 (2020).
- [2] Y. Morishita *et al.*, Plasma and Fusion Research **16**, 2403016 (2021).
- [3] G. Evensen, Ocean Dyn. **53**, 343 (2003).