

核融合プラズマ制御を目指したデータ同化システムASTIの開発 Development of Data Assimilation System for Fusion Plasma Control

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

¹京大工, ²核融合研, ³統計数理研, ⁴総研大, ⁵DS施設
¹Kyoto Univ., ²NIFS, ³ISM, ⁴SOKENDAI, ⁵ROIS-DS

核融合プラズマ全体の挙動を解析・予測するために、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に影響することや、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により、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システムASTIの開発を進めている[1]。本研究の目的は、統合シミュレーションコードをベースとするデータ同化システムASTI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。一般的なデータ同化は、限られた観測情報から状態ベクトル（その系の状態を定義する変数の集まり）を推定するオブザーバーの技術であり、制御などの実システムへの能動的な働きかけは含まれていない。そのため、本研究では、観測の同化によるシステムモデル(TASK3D)の最適化と目標状態を実現する制御入力推定を統合したデータ同化フレームワークを新たに開発した。

開発したデータ同化フレームワークは、システムモデルが持つ不確実性を観測による逐次最適化により押さえ込むことができるため、不確実性の大きいシステムモデルでもモデル予測制御が実現できる。また、予測区間に被りがない並列性に優れた制御アルゴリズムを構築できるため、比較的計算コストの大きいシミュレーションモデルもシステムモデルとして採用できる可能性が高くなる。

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。この検証では、装置はLHDを仮定し、ECH加熱及び周辺の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及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（密度と温度）を用いて、乱流輸送モデルを最適化する。

図1は、0.6秒おきに観測が得られると仮定し、0.2秒おきに制御入力の推定を行なった場合の電子温度についての結果の一例である。ここで、模擬プラズマとシステムモデルで挙動が異なる様に、異なる乱流輸送モデルを用いている。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）を追従できているのが分かる。観測の同化によりシステムモデル内の乱流モデルが模擬プラズマのモデルに近づくことを確認した。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、数値実験の結果について言及する。

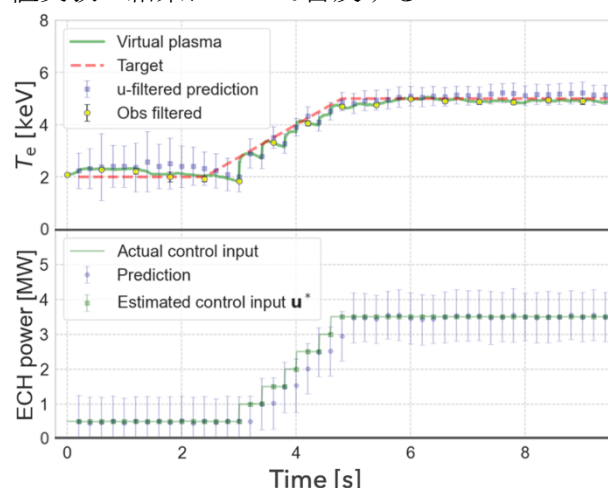


図1 制御数値実験の結果の例（電子温度）

- [1] Y. Morishita et al., *Comput. Phys. Commun.* **274**, 108287 (2022).