

データ同化に基づいた核融合プラズマの予測制御手法の開発とその実証 Development and demonstration of predictive control method for fusion plasma based on data assimilation

森下侑哉¹, 村上定義¹, 横山雅之^{2,4}, 上野玄太^{3,4,5}, 釧持尚輝^{2,4}, 舟場久芳², 山田一博^{2,4},
奴賀秀男², 關良輔², 長壁正樹^{2,4}

Y. Morishita¹, S. Murakami¹, M. Yokoyama^{2,4}, G. Ueno^{3,4,5}, N. Kenmochi^{2,4}, et al.

¹京都大学, ²核融合研, ³統計数理研, ⁴総研大, ⁵DS施設

¹Kyoto University, ²NIFS, ³ISM, ⁴SOKENDAI, ⁵ROIS-DS

様々な時空間スケールの現象が混在する複雑系の制御は、系を近似するモデル（システムモデル）が大きな不確実性を持つことや、観測情報が限られることから挑戦的な課題となっている。核融合プラズマにおいても同様であり、乱流をはじめとする複雑な流動現象に加え、加熱、燃料供給、不純物、中性粒子などの多くの要素が複雑に絡み合うため、挙動予測に大きな不確実性が伴っている状況である。将来の核融合炉の運転には、こうした核融合プラズマの予測・制御が必須となるが、現状のモデルでは困難であると言わざるを得ない。また、系の状態を十分に把握できるだけの観測情報が手に入る可能性は低く、大きな不確実性下での予測制御を強いられることになる。

こうした挙動予測の不確実性を定量化し、観測情報によって不確実性を低減させる手法として、データ同化がある。その主要な枠組みの一つである逐次ベイズフィルタは、状態ベクトル（系の状態を定義するシミュレーション内の変数群）の不確実性を確率分布（状態分布）として定量化し、物理モデルに従ってその時間発展を計算するとともにベイズの定理に基づいて観測情報を状態分布に反映させていく手法である。このデータを状態分布に同化させる操作は、フィルタと呼ばれる。データ同化を用いることで、システムモデルの挙動が実際の系の挙動に近づくように、数値空間における系の状態やモデルパラメータを最適化することができる。多くの場合、状態分布の表現には、状態ベクトルの値が異なる多数のシミュレーション（アンサンブルメンバー）を用いたアンサンブル近似が用いられる。発表者らは、このアンサンブル近似による逐次ベイズフィルタの枠組みにシステムモデルとして統合シミュレー

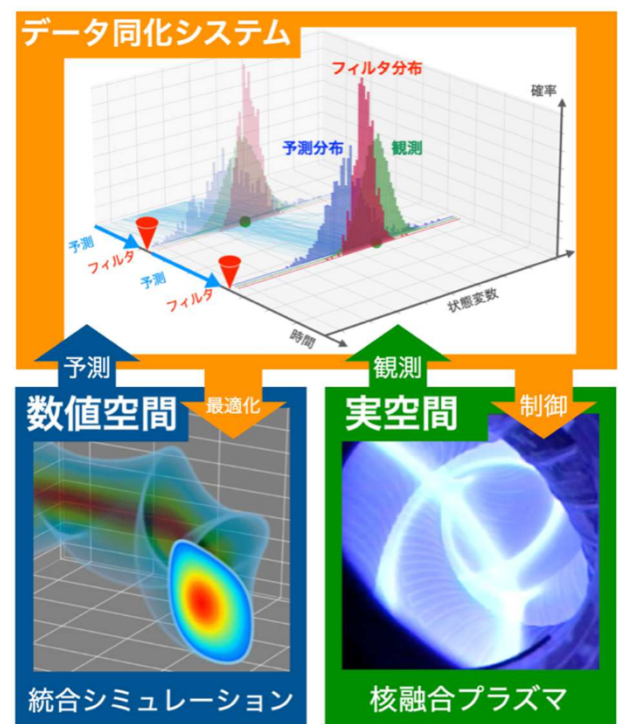


図1：データ同化システム

ションコードTASK 3 Dを組み込んだデータ同化システムASTI[1]を開発し、LHDでのNBI放電における乱流モデル推定等を行ってきた。図1は、データ同化システムの概念図である。

一般にデータ同化は、観測情報を用いてシミュレーションの持つ不確実性を抑え、システムモデルの解析能力および予測能力を向上させるために用いられる。しかしながら、核融合プラズマでの最終的な目的は解析や予測ではなく、不確実性を抑え込んだ上でのプラズマの制御にある。そこで本研究では、逐次ベイズフィルタの考えを発展させることで、制御推定を含んだ新たなデータ同化の枠組みDACS[2]の開発

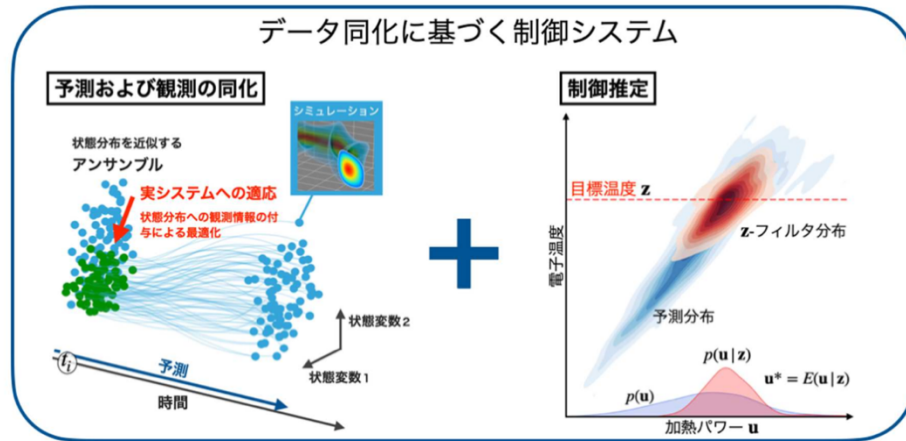


図2：データ同化に基づく適応予測制御システム

を行った。DACSは、状態分布の予測とその予測に基づいた制御推定を行うためのフィルタおよび観測情報を同化するためのフィルタにより構成される（図2参照）。観測用のフィルタによりシステムモデルを実システムへ適応させながら、不確実性を抑えた状態で制御推定を行うため、DACSにより適応モデル予測制御を実現することができる。

このDACSに基づいてASTIを制御システムへと拡張し、LHDでの温度・密度制御を想定した数値実験（TASK3Dによる仮想プラズマの制御）を行うことで制御能力の検証やハイパーパラメータの調整を行った。さらに、実際にLHDにおいて、ECHシステムおよび実時間トムソン散乱計測システムとASTI用の計算機（SX-Aurora TSUBASA, 16VE）を接続することで制御システムを構築した。ASTI用の計算機は、最大128並列で計算が可能であり、256個のアンサンブルメンバーを用いてデータ同化を行うことができる。

データ同化に基づいた適応モデル予測制御を実証するために、ECHパワーを調整することで中心電子温度を目標温度に到達させ、維持する制御実験を行った。この実験では、電子温度および密度の径方向分布がリアルタイムで0.3秒おきに状態分布に同化され、目標温度4keVに対して0.1秒おきにECHパワーの推定が行われる。状態ベクトルに、乱流熱拡散係数（Gyro-Bohmモデル）を調整するための因子を入れておくことで、観測情報に基づいて逐次的に熱拡散係数を調整した。図3は、制御実験（#186502）時の温度分布および電子の熱拡散係数分布である。4keVに向けてパワーを調整しているaおよびcの時点では、モデルが熱拡散係数を過大評価しており、電子温度は予測よりも高くなっている。しかしながら、観測の同化により熱拡

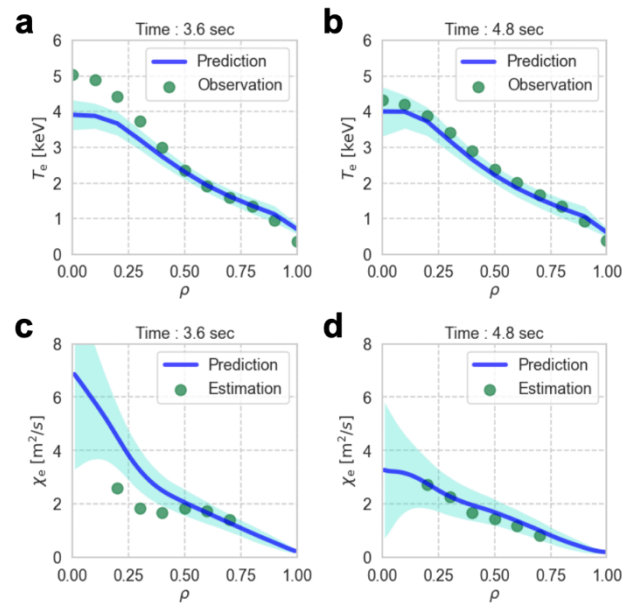


図3：LHDにおける電子温度制御実験の結果

散係数の最適化が進むと、b, dのように予測の精度が高まり、温度自体も目標の4keVに近づいているのが分かる。この単純な制御実験を通して、データ同化に基づく適応予測制御を実証することができた。今後は、温度・密度の同時制御や空間分布制御などのより高度な制御問題に対する適用を計画している。

本講演では、データ同化に基づいた適応予測制御手法の詳細やLHDでの実証実験、今後の実験に向けた数値的な検証について述べる。

参考文献

- [1]Y. Morishita et al., Computer Physics Communications 274, 108287 (2022).
- [2]Y. Morishita et al., J. Computational Science 72, 102079 (2023).