

核融合プラズマのデータ同化による解析・制御手法の開発

原子核工学専攻 量子制御工学研究室（村上研究室）

博士課程3年 森下侑哉

核融合プラズマと統合シミュレーション

次世代の発電方法として、磁場閉じ込め方式による核融合発電が有力視されています。この方式は、高温高密度状態のプラズマを磁場により炉心に閉じ込め、プラズマ内で起こる核融合反応により放出されるエネルギーを電気に変換する発電方式です。プラズマとは、気体が電離した状態のことであり、電子とイオンにより構成されます。核融合炉では、荷電粒子が磁力線に巻き付くように運動する性質を利用して、磁力線によって作られるトーラス形状の面（磁気面）でプラズマを閉じ込めます（図1上）。

核融合プラズマの中では、様々な時空間スケールの物理現象が混在しており、それらが互いに影響し合ってプラズマ全体の挙動が決定されます。こうした核融合プラズマの挙動を解析したり予測したりするためには、各物理現象を表現した要素コードを結合してプラズマ全体の挙動をシミュレーションする統合シミュレーションという技法が用いられます。核融合プラズマの解析や制御、炉の設計などを目的として世界各地で様々な統合シミュレーションコード（以下、統合コード）の開発が進められています。私たちの研究室でも TASK3D という統合コードの開発を行なっており、主に大型ヘリカル装置*（LHD）における実験の解析に用いられています[1]。図1下は、TASK3D の大まかな構造を示しており、様々な要素を考慮して、プラズマの密度分布や温度分布の時間発展をシミュレーションすることができます。しかしながら、統合シミュレーションに用いられる各要素コードは少なからず不確実な部分を持っており、これらを結合することによる相互作用も加わって、最終的な計算結果が不確実なものになってしまうことがあります。特に、電磁的な乱れによる流れ（乱流）はプラズマの挙動を大きく左右するにも関わらず、精度の高いモデルは未だに開発できていません。また、計算コストの観点からも、現状の統合コードを用いて核融合プラズマの予測制御を行うのは困難であると言わざるを得ません。

*岐阜県土岐市にある世界最大級のヘリカル型超伝導核融合実験装置

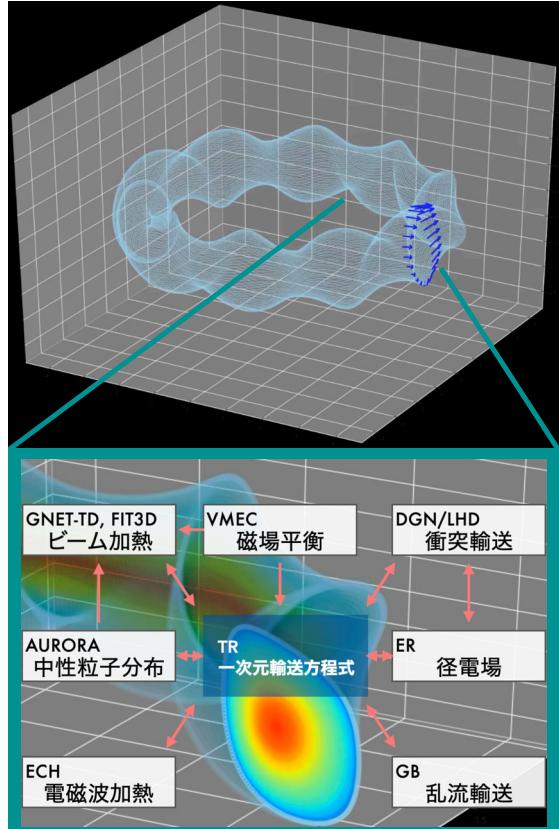


図1 磁気面の例（上）と統合シミュレーションコード TASK3D の構造（下）

データ同化システム ASTI の開発

私たちは、統合コードの持つ課題を解決し、核融合プラズマの挙動の高速かつ高精度な制御を実現するため、統合コード TASK3D とデータ同化の手法（アンサンブルカルマンフィルタ）を組み合わせたデ-

タ同化システム ASTI[2]の開発を行なっています。データ同化とは、実際の観測データを用いてシミュレーションモデルを最適化する統計的手法であり、数値空間と実空間とをつなぐ技術です。核融合プラズマに対するデータ同化システムのイメージを図2に示します。データ同化では、不確実性を考える変数（状態変数）の確率分布を考えます。シミュレーションモデルを用いた分布の時間発展の予測と、観測情報に基づいた分布の最適化（同化）の繰り返しにより、観測とシミュレーションの両方が持つ不確実性を互いに補い合うことができ、より正確な予測や解析が実現されます。

図3は、LHDにおける実験データに対してASTIによるデータ同化を適用した結果の例です。この例では、TASK3D内の13変数（密度、電子温度、イオン温度、乱流モデルパラメータなど）を状態変数として取り、密度、電子温度、イオン温度の観測データを40ミリ秒おきに同化しています。図3は、イオン温度について、単純なシミュレーション（TASK3D）とデータ同化による推定（ASTI）の結果を示しています。誤差バー付きの点が観測データであり、実線または破線が計算の結果です。ASTIによる推定値が実験を良く再現しているのが分かります。この背景では、状態変数に取ったモデルパラメータの最適化が行われており、シミュレーションモデルの内部まで最適化が行き届いています。そのため、ASTIは観測データを再現するモデルパラメータや非観測量を、様々な種類の観測データから時空間的に総合して推定できる解析システムでもあります。LHDにおける多くの実験データに対して、ASTIの高い予測・解析精度が確認されており、ASTIによる推定の妥当性と頑健性が示されました。

現在は、ASTIを用いて、LHDおよびJT-60U（トカマク型装置）における乱流輸送解析とモデル開発に取り組んでいます。また、ASTIを核融合プラズマの制御システムとして利用するため、制御を含んだ新たなデータ同化のフレームワークを開発すると共にLHDプラズマのリアルタイム制御実験を計画しています。ASTIは核融合プラズマに対する強力な解析・制御システムとなることが期待されます。

[1] S. Murakami et al., Plasma Phys. Control. Fusion **57**, 054009 (2015).

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

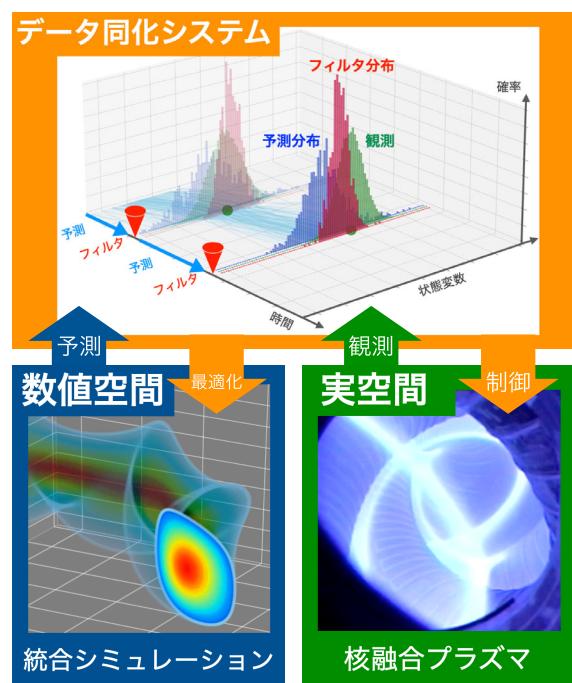


図2 データ同化システムのイメージ

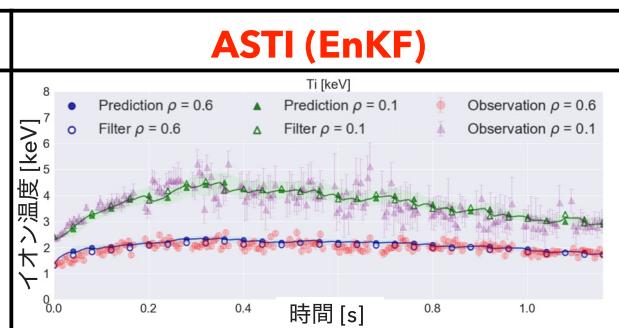
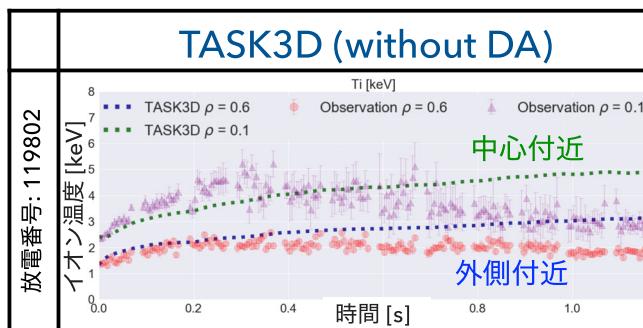


図3 TASK3Dによる通常のシミュレーションとASTIによるデータ同化の比較