

京都大学	博士 (工学)	氏名	森 下 侑 哉
論文題目	Development of Data Assimilation System for Toroidal Plasmas (トロイダルプラズマに対するデータ同化システムの開発)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、核融合プラズマの高精度な解析・制御を実現するため、統合シミュレーションコードとデータ同化手法を組み合わせたデータ同化システム ASTI(Assimilation System for Toroidal plasma Integrated simulation)の開発を行い、核融合プラズマの解析・制御を行った研究成果をまとめたものであって、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、核融合反応、トロイダル型磁場によるプラズマ閉じ込め、統合輸送シミュレーション、データ同化手法について概説し、本研究の目的と構成について述べている。</p> <p>第2章では、本研究に用いたデータ同化システム ASTI コードについて説明した後、データ同化手法や核融合プラズマにおけるシステムモデルについて説明している。具体的には、データ同化手法として用いられているアンサンブルカルマンフィルター (EnKF)、システムモデルである統合輸送シミュレーションコード TASK3D、高速 NBI 加熱解析コード FIT3D-RC などについて説明している。データ同化は、観測データを用いてシステムモデルの挙動を実システムに近づける統計的手法であり、状態変数(最適化の対象となる変数)の確率分布を考え、観測情報をそこに同化していく形で最適化を行っている。FIT3D-RC は、ビームイオン発生過程と減速過程の2つの物理過程で構成されている。ビームイオン発生過程の計算では、高コストなモンテカルロ計算コードで評価した、様々なプラズマに対するビームイオンの発生分布をガウス過程回帰により回帰したサロゲートモデルを用いる。また、減速過程では、フォッカープランク方程式の簡約解を用いて、順次ビームイオンを減速させながら、加熱量および熱化する粒子量を計算する。FIT3D-RC の計算速度は、実時間と同程度であり、従来のコードと比べ大幅に計算時間を短縮した。また、FIT3D-RC は従来のコードによる計算結果を高精度で再現できるため、精度を保ったままでの計算コストの削減に成功している。</p> <p>第3章では、EnKF によるデータ同化手法を用いて、大型ヘリカル装置 (LHD) における実験時系列データ(密度、電子温度、イオン温度分布)を TASK3D による熱輸送シミュレーションに同化する計算を行った結果について述べている。ここで対象とする放電は、中性粒子ビームをプラズマに入射し、発生する高速イオンによりプラズマを加熱する中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱による放電とした。結果として、主に乱流熱拡散係数に内在する不確実性を考慮しながら、温度の観測時系列データを時空間的に高精度に再現することができ、核融合分野におけるデータ同化の有効性を示すことができた。同時に、観測データを再現するために必要な乱流熱拡散係数の時空間分布も推定でき、解析システムとしての有用性を示すことができた。次に、ASTI の推定精度を高めるため、解析に特化したデータ同化手法であるアンサンブルカルマン smoother (EnKS) を ASTI に実装した。EnKF は、システム状態の逐次的な予測に用いることを前提としており、最適化時点よりも過去の観測情報しか状態変数の推定に反映されない。一方で、EnKS は時系列データを取得し終えた後に用いるデータ同化手法であり、観測時系列データ全てを用いて状態変数の推定を行うことができる。そのため、EnKS による推定は EnKF による推定より時空間的な整合性が高いと言える。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	森 下 侑 哉
<p>EnKS による推定能力を検証するため、統合コードで生成した人工的な観測時系列データから、用いた乱流熱拡散係数の時空間分布を推定するテストを実施し、ASTI に実装した EnKS の高い推定能力を実証した。</p> <p>第 4 章では、ASTI 開発の最終的な目標である核融合プラズマの予測制御についてデータ同化を応用して実現するため開発した新たなデータ同化フレームワーク DACS (Data Assimilation and Control System) について説明している。将来の核融合炉の運転には、プラズマを常に監視し、加熱等を制御するシステムが必要となり、この制御には、シミュレーションによる挙動予測に基づいて制御を決定することが必要になる。しかしながら、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。これに対し、新たに開発したデータ同化フレームワーク DACS は、データ同化システムから実システム(核融合炉)への働きかけを含んでいる。この DACS は、観測情報によるシステムモデルの更新と目標状態を実現する制御入力の推定とを統合したデータ同化のフレームワークであり、逐次的な観測によりシステムモデルを最適な状態に保ちながら、制御入力を推定することができる。制御の分野では適応モデル予測制御に該当し、また、デジタルツインを実現する一手法となり得る。DACs は、時間的な計算区間に重ならない(一回の予測計算のみの)制御アルゴリズムを構築することが可能となるように配慮し開発されている。そのため、一般に計算コストが高い複雑系のシミュレーションコードでも予測制御のシステムモデルに採用することができ、幅広い制御問題に対応することができる。</p> <p>第 5 章では、ASTI の制御システムとしての能力を検証するため、仮想プラズマを制御する数値実験を行った結果について述べている。これまで解析システムとして開発してきた ASTI に、DACs フレームワークに基づく制御アルゴリズムを実装し、制御システムとしての機能を追加した。ここでは、仮想プラズマは LHD を想定し、TASK3D を用いて数値空間上に生成した。この仮想プラズマの中心における電子温度および電子密度を制御対象とし、電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) の入射パワーとプラズマ周辺の中性粒子密度を ASTI により制御した。また、600 ミリ秒おきに電子温度と密度の分布情報が観測できると仮定し、観測の同化を行なった。この数値実験の結果、ASTI 内のシステムモデルの不確実性を観測の同化により抑え込みながら、仮想プラズマの挙動を高精度で目標状態時系列に近づけることができ、ASTI の制御能力が実証された。また、この数値実験を通して、制御性能のハイパーパラメータ依存性やシステムモデルと実システムの挙動の差による制御精度の変化を明らかにした。</p> <p>第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

氏名	森下 侑哉
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合プラズマの高精度な解析・制御を実現するため、統合シミュレーションコードとデータ同化手法を組み合わせたデータ同化システム ASTI(Assimilation System for Toroidal plasma Integrated simulation)の開発を行い、核融合プラズマの解析・制御を行った研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 代表的なデータ同化手法である逐次ベイズフィルタの枠組みに統合シミュレーションコード TASK3D を組み込むことで解析システムとしてのデータ同化システム ASTI を構築した。次に、大型ヘリカル装置 (LHD) における実験時系列データを TASK3D による熱輸送シミュレーションに同化する計算を行った。その結果、主に乱流熱拡散係数に内在する不確実性を考慮しながら、温度の観測時系列データを時空間的に高精度に再現することができ、データ同化の有効性を示すことができた。

2. ガウス過程回帰によるビームイオン分布の評価と解析解を用いた減速計算を組み合わせることで実時間レベルでの計算が可能なシミュレーションコード FIT3D-RC を開発した。ビームイオン発生過程の計算では、様々なプラズマに対するビームイオンの発生分布をガウス過程回帰により回帰したサロゲートモデルを用いている。結果として FIT3D-RC の計算速度は、実時間と同程度となり、従来のコードと比較して大幅に計算時間を短縮している。また、FIT3D-RC は従来のコードによる計算結果を高精度で再現しており、精度を維持しながら計算コストの削減を可能にした。

3. 核融合プラズマのモデル予測制御を実現するため、これまで解析システムとして開発してきた ASTI に、制御推定を含んだ新たなデータ同化フレームワーク DACS (Data Assimilation and Control System) に基づく制御アルゴリズムを実装し、制御システムとしての機能を追加した。さらに、ASTI の制御システムとしての能力を検証するため、仮想プラズマを制御する数値実験を行い、世界で初めて核融合プラズマに対する本格的なデータ同化手法を用いた ASTI の制御能力を実証した。

以上のように、データ同化システム等を用いて核融合プラズマの解析・制御を行っており、核融合プラズマの輸送解析や将来の核融合炉のプラズマ制御に大きく寄与するものである。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 5 年 2 月 16 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。