

令和元年6月25日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06948

研究課題名(和文) 原型炉制御に向けたデータ同化法による核融合燃焼プラズマフォーキャストコードの開発

研究課題名(英文) Development of forecast code of fusion burning plasma by data assimilation method for reactor control

研究代表者

小関 隆久 (Ozeki, Takahisa)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所 核融合炉システム研究開発部・次長(任常)

研究者番号：50354577

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉の制御においては、炉心となるプラズマの特性時間が短いことから、高速にプラズマ制御する必要がある。そのためには、制御可能な時間スケールで、近未来を正確に予測することが必要であるが、プラズマモデルの不確定さから正確なプラズマの予測が困難であった。本成果は、統計学的手法の一つであるカルマンフィルターを用いて、真値である実験で観測されたデータを逐次同化することにより、プラズマモデルを真値に修正する方法を導いた。プラズマ電子熱輸送係数の推定に、観測データである電子温度を同化するモデルを作成し、シミュレーションによってその実行可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合炉の炉心プラズマ制御は、核融合エネルギー開発における不可欠な課題であるが、その有効な手段は、まだ開発途上である。機械学習などの統計学的手法の応用が幅広い分野で進んでいる中、核融合分野においては、その応用が不十分であった。本成果は、統計学的手法の一つであるカルマンフィルターを用いて、真値である実験で観測されたデータを逐次同化することにより、プラズマモデル係数を修正する方法を提案し、実行可能性を示した。この成果は、核融合エネルギー開発分野における大きな成果であると同時に、広く一般的に、不確定な予測モデルへの観測データ同化による予測性能向上の可能性を示している。

研究成果の概要(英文)：In the thermonuclear fusion reactor, it is necessary to control the plasma at high speed because the characteristic time of the burning plasma is short. Therefore, it is necessary to accurately predict the near future in a controllable time scale, but the accurate prediction is difficult because of existing plasma models have the uncertainty. To solve this issue, a new method is derived, that is correcting the plasma model to a true value by sequentially assimilating the data observed in the true value experiment using a Kalman filter, which is one of the statistical methods. The model was created to assimilate experimental observation data into the transport coefficient of plasma electron thermal transport, and its feasibility was shown by simulation calculations.

研究分野：核融合プラズマ研究

キーワード：データ同化 シミュレーション カルマンフィルター 核融合炉 プラズマ 推定 ナビゲーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

核融合研究は、ITER による核融合燃焼実験を迎えつつあり、それを踏まえた原型炉を設計する段階に進みつつある。このとき、これまで精密化・高度化が行われてきた計測器は、取捨選択され、多チャンネルなどによる高精度機能を、最小化することが必要となり、これまでと逆のプロセスが求められている。これはまた、炉心プラズマの制御に必要な情報が減少することを意味し、言い換えると、時間的・空間的に均質でないプラズマの制御を、制御物理データ数と較べて計測情報（観測データ数）が十分小さい場合を想定することとなる。このため、従来の理論モデルに基づくシミュレーション予測の不確かさを補いつつ、真値である実験で観測されたデータを有効に取り込むことによって、より正確なプラズマ状態予測（フォーキャスト）する新たな方法の開発が必要な状況にあった。

### 2. 研究の目的

核融合炉の制御においては、炉心となるプラズマの特性時間が短いことから、高速にプラズマ制御する必要がある。そのためには、制御可能な時間スケールである近未来を正確に予測することが必要であるが、プラズマモデルの不確かさから正確なプラズマの予測が困難であった。本研究は、統計学的手法の一つであるカルマンフィルターを用いて、真値である実験で観測されたデータを逐次同化することにより、プラズマモデルを真値に修正する方法を導いた。プラズマ電子温度輸送の輸送係数を実験観測データを同化するモデルを作成し、シミュレーション計算によってその実行可能性を示す。

### 3. 研究の方法

核融合研究では、決定論的アプローチと確率論的アプローチの両方がシミュレーション研究で採用され、ターゲットモデルへの適応性が向上している。しかしながら、多くの場合、課された初期条件および仮定されたシステム制御パラメータは、実験結果を確実に再現または予測するためには不十分なのが実情である。シミュレーションコードを用いて燃焼プラズマを制御するため、さまざまなナビゲーションシステムですでに実現されているように、それらの状態を診断し、その情報を使用して予測を更新するのが有効な方法と考える。即ち、シミュレーション結果が最初に定義されたパラメータに決定論的に依存する通常の手順とは対照的に、システムパラメータがシミュレーション実行中に実験結果を再現するように自動的に調整される何らかのメカニズムを有することである。

この問題を解決する一つの有力な方法はデータ同化(Data Assimilation) [1-2]である。それは、観測されたデータを計算シミュレーションに組み込んでそれらの予測力を向上させる有用な方法であり、気象学や地球科学の分野で広く使われている。実際の実装は十分に確立された伝統的なカルマンフィルタ[3-4]からカルマンフィルタ逐次モンテカルロ法にまで及び、ほとんどの方法では、ベイジアンアプローチが採用されている。ここでは、システム状態（ $x$ ）を記述する変数、および測定データ（ $y$ ）が確率論的として扱われ、いくつかの確率分布で表される。測定から得られる情報を除いた、 $x$  の事前分布を $P(x)$ とする。データ  $y$  を観測した時に、 $y$  を条件とする  $x$  の事後分布は  $P(x|y) \propto P(x)P(y|x)$  で表すことができる。ここで、 $P(y|x)$  は尤度であり、システムモデルと観測データから求まる。

#### 3.1 定式化

本稿では、初期的な問題として、一次元電子熱拡散を解くためにカルマンフィルタを適用した結果について報告する。

ここでは、電子温度  $T$  だけを考え、電子密度はプラズマ半径  $r$  に沿って定常的で一様であり、その熱拡散率  $\chi$  は定常的であり、入力パワーは無いと仮定する。

拡散方程式は以下のように簡約化できる。

$$\frac{3}{2} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \chi \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

この方程式をフォワードオイラー法で離散化する。

$$\frac{3}{2} \frac{T_j^n - T_j^{n-1}}{\Delta t} = \left( \chi_j^{n-1} + \frac{\chi_{j+1}^{n-1} - \chi_{j-1}^{n-1}}{2\Delta r} \right) \frac{T_{j+1}^{n-1} - T_{j-1}^{n-1}}{2\Delta r} + \chi_j^{n-1} \frac{T_{j+1}^{n-1} - 2T_j^{n-1} + T_{j-1}^{n-1}}{(\Delta r)^2} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta t$  は時間ステップ、 $\Delta r$  は径方向グリッドサイズ、 $n$  と  $j$  はそれぞれ時間と径方向位置の



### 3.2 計算結果

求めた式を用いて、以下の条件でシミュレーションを行った。計算グリッドの数は、 $N = 5000$ 、 $J = 50$ 。真の $T$ 値の径方向分布はガウス分布で、中心値は $T_0^0 = 5$ 、固定する周辺値は $T_J^0 = 0.27$ 、システムノイズは $\sigma_T^{sys} = 0.1$ 。真の $\chi$ 値の径方向分布は定数 $\chi_j^0 = 0.4$ で、システムノイズは $\sigma_\chi^{sys} = 0.02$ である。(この場合、 $D_j^n$ と $-D_j^n$ は相殺され、 $F_n$ の右上部分は列ベクトル $(E_0^n, \dots, E_J^n, 0)^T$ に縮退し、温度 $T$ の観測ノイズは $\sigma_T^{obs} = 0.05$ である。初期推定値を $T_j^0 = 1$ および $\chi = 1$ に設定し、それらの標準偏差を $\sigma_T = 1$ および $\sigma_\chi = 10$ に設定する。前者のペアは $\mathbf{x}_{0|0}$ に、後者は $V_{0|0}$ に対応する。この場合、 $V_{0|0}$ は対角成分のみを持ち、最初は隣接する格子点間に相関が存在しないことを意味する。図1は、 $T$ が10個の径方向グリッドごとと4個の時間ステップごとに測定された場合のシミュレーション結果の一部を示す。

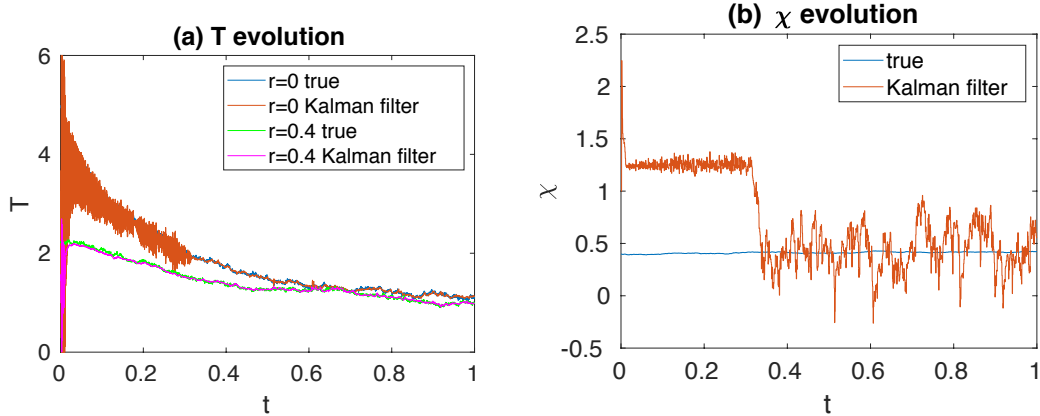


図1 (a) 真値とカルマンフィルタにより推定されたプラズマ電子温度  $T$  の時間変化。 $r = 0$ における推定値 (オレンジ線)、真値 (青線)。 $r = 0.4$ における推定値 (赤線)、真値 (緑線)。  
(b) 真値とカルマンフィルタにより推定された熱拡散率  $\chi$  の時間変化。推定値 (オレンジ線) は初期の大きな揺動 (burn-in time) の後、真値 (青線) に近い値を推定。

図1(a)に示すように、最初は、 $r = 0$ での温度 $T$ のカルマン推定値 (オレンジ線) はかなり変動しているが、その後、安定した後は真値 $T$  (青線) とほぼ同じ傾向をたどる。同様に、 $\chi$ のカルマン推定値は、 $t=0.35$  付近から真の値、即ち、 $\chi = 0.4$ に修正された (図1 (b))。この真値への修正時間 (burn-in time) において、 $V_{n|n}$ の対角成分は外側へ広がり、非対角成分が生じている。これ以降、カルマンフィルタは有効に機能していると考えられる。これはサンプリング分布が定常的なものに収束するのを待つために burn-in runs が必要とされるマルコフ連鎖モンテカルロ法における状況に類似している。

初期推定として平坦な $T$ 分布 ( $T = 1$ ) を仮定したが、観測された点でのカルマン推定値は、反復の非常に早い段階で真の値に向かって移動する (図1 (c))。そして十分なカルマン更新の後、ほぼ正しい $T$ 分布を再現できた (図1 (d))。burn-in time は、観測点数や測定頻度を増やすことで短縮することができた。また、どの様な途中経過をたどって最終的な収束状態へ至るかは初期設定によって異なった。

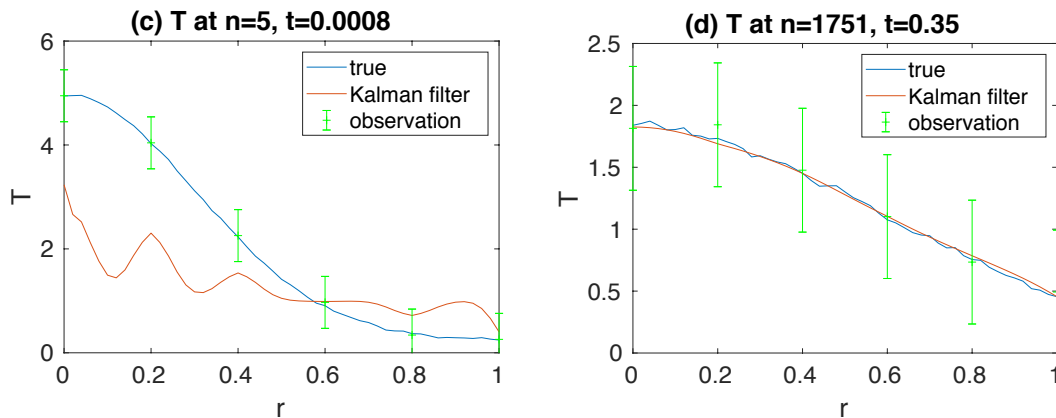


図1 (c) - (d)、図1(a)-(b)と同じ計算において、 $t=0.0008$  (図 (c)) 及び $t=0.35$  (図 (d)) における真値と観測ノイズ (エラーバー)、及びカルマンフィルタにより推定された電子温度  $T$  の径方向分布。

現実的なシミュレーションへの応用にはさらに詳細な検討が必要になるが、データ同化法は、信頼性の高い予測を行い、核融合研究における未知のモデルパラメータを推定するための有用なツールとなる事を確認できた。

#### 4. 研究成果

核融合炉における炉心プラズマ制御のため、観測されたプラズマデータをリアルタイムで逐次同化することにより、シミュレーションにおける不確定なプラズマモデルのパラメータを、観測値（真値）に向けて更新するプラズマ予測（フォーキャスト）モデルを導出した。当モデルに基づいた計算コードを開発し、逐次プラズマパラメータを観測値（真値）へ修正し、近未来をフォーキャストできる可能性を示した。

データ同化を行うシステムモデル( $\mathbf{x}_n = f(\mathbf{x}_{n-1}) + \mathbf{v}_n$ )は、プラズマ熱・粒子輸送方程式に基づく、プラズマ電子の熱輸送モデルとし、プラズマ電子温度の逐次観測データの観測モデルを作り、カルマンフィルターを用いたシミュレーションモデルを開発した。システムモデルにおける変数 $\mathbf{x}_n$ は時刻 $t_n$ におけるプラズマ電子温度 $T_e$ 及び熱拡散係数 $\chi_e$ の小半径方向の空間分布からなる行列とし、熱輸送係数の不確かさから、システムノイズ( $\mathbf{v}_n$ )を決めることとした。観測モデルを( $\mathbf{y}_n = H_n \mathbf{x}_n + \mathbf{w}_n$ )とした。 $\mathbf{y}_n$ は観測変数行列であり、 $\mathbf{w}_n$ は観測ノイズ。ここで、変数 $\mathbf{x}_n$ は、より少ない観測点 $\mathbf{y}_n$ で求められることに特徴がある。輸送方程式は非線形であるが、極近い未来を予測すると仮定して、線形化及び離散化を行い、逐次推定するモデルを導いた。異なる輸送モデルによって求めた電子温度を真値と仮定し、ノイズを加えて観測データとした。この観測データと上記推定モデルを用いて、データ同化のシミュレーションを行った。その結果、径方向計算空間点 50 に対して観測点 5 のモデルにおいて、440 回程度の繰り返し計算の後 ( $t=0.35$ ) に、不確定パラメータ $\chi_e$ がほぼ真値を推定することに成功した。この成果は、核融合炉プラズマのフォーキャストの実行可能性を示すものである。

#### 引用文献

- [1] 樋口知之、データ同化入門、朝倉書店、東京、2011;
- [2] K. Law, A. Stuart and K. Zygalakis, Data assimilation (Springer International Publishing, Basel, 2015)
- [3] R.E. Kalman, Trans. ASME, Ser. D: J. Basic Eng. **82**, 35 (1960) ;
- [4] R.E. Kalman and R.S. Bucy, Trans. ASME, Ser. D: J. Basic Eng. **83**, 95 (1961) .

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計0件)

当研究成果を論文にまとめ、Plasma Physics and Controlled Fusion (2019) に投稿準備中である。

〔学会発表〕 (計2件)

Plasma Conference 2017(姫路、平成 29 年 11 月 21-24 日)

「Data assimilation simulation of tokamak plasma」

第 1 2 回核融合エネルギー連合講演会(大津、平成 30 年 6 月 28-6 月 29 日)

「データ同化法による核融合プラズマフォーキャストに向けたシミュレーション」

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等 無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：林 伸彦

ローマ字氏名：HAYASI Nobuhiko

所属研究機関名：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

部局名：核融合エネルギー部門那珂核融合研究所先進プラズマ研究部

職名：グループリーダー

研究者番号 (8桁)：10354573

研究分担者氏名：内藤 磨

ローマ字氏名：NAITO Osamu

所属研究機関名：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

部局名：核融合エネルギー部門那珂核融合研究所先進プラズマ研究部

職名：上席研究員

研究者番号 (8桁)：30354575

### (2) 研究協力者 無し

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。