

核融合プラズマの磁気島振動におけるベイズ的データ駆動モデル選択

日大生産工(学部) ○高橋 康太郎 日大生産工 佐々木 真
核融合科学研究所 小林 達哉 一橋大学 本武 陽一

1. 背景

将来の核融合炉の実現には、ダイバータと呼ばれる機器への熱負荷制御が重要課題の一つである。この課題を解決するダイバータデタッチメント運転は有効な手法であるが、しばしば自励的な振動を引き起こし、安定運転の妨げとなる。この振動は、磁気島の幅とブートストラップ電流の捕食者-被食者の相互作用が原因であると提唱されている¹⁾。しかし、このモデルは一つの仮説に過ぎず、実験では定性的な説明は出来ているが、定量的な予測が出来るには至っていない。そのため、仮説に囚われずデータ駆動的に観測データを最もよく説明する最適なモデルを導出することが、この現象を理解する上で重要である。

2. 手法

本研究では、観測データからシステムの支配方程式を同定するため、ベイズ的スパース同定の手法²⁾を用いる。このアプローチの核心はモデルのベイズ自由エネルギーを最小化することにある。まず、候補となる多数の物理項（線形項、非線形項、交差項など）を組み合わせ、膨大な数の候補モデル群を構築する。各モデルに対しベイズ推定の枠組みでパラメータ（係数）をフィッティングし、そのモデル尤度とモデルの複雑さのバランスを評価する指標としてベイズ自由エネルギーを算出する。この指標は、データへの適合度が高いモデルを評価する一方で、不要な項を持つ複雑なモデルにはペナルティを与える性質を持つ。本研究では、この性質を利用して物理仮説に基づいたベースモデルを定義し、それに追加項を加える形でモデル候補群を生成する。その上で、ベイズ自由エネルギーを最小化するモデルを探索することにより、統計的に最も確からしく、かつ物理的に解釈可能な支配方程式を客観的に同定する。

3. 結果

本研究では、核融合プラズマの安定性を左右する「自励振動」という現象の仕組みを解き明かすため、観測された実験データだけを頼りに、その動きを支配する数式（支配方程式）を発見することを試みる。分析には、振動の中心的な役割を担う磁気島幅と、プラズマ内部で自然に発生するブートストラップ電流のデータを用いる。さらに、

振動と関連が深いと考えられるプラズマ周辺部の状態を表す放射と、プラズマが壁に接触する度合いを示すイオン飽和電流の計4種類の時系列データを手がかりとする。これらの物理量の時間発展をFig.1に示す。

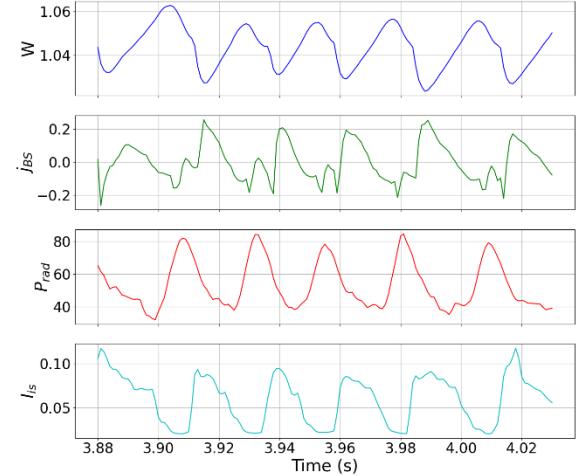


Fig.1 各物理量の時間発展。上から磁気島幅、ブートストラップ電流、放射、イオン飽和電流を示す。

この探索では、物理モデル（修正ラザフォード方程式および捕食者-被食者モデル）¹⁾をベースモデルとして常に含め、それらに加える追加の物理項を候補項ライブラリから磁気島幅とブートストラップ電流で同時に最適化するアプローチを採用した。今回使用したモデル式を示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} = & C_1 + \frac{C_2}{W^2} + C_3 \frac{j_{BS}}{W} \\ & + \sum_{l=-1}^2 C j_{BS}^l W^l + \sum_{l=-1}^2 C j_{BS}^l P_{rad}^l + \sum_{l=-1}^2 C j_{BS}^l I_{is}^l \\ & + \sum_{l=-1}^2 C W^l P_{rad}^l + \sum_{l=-1}^2 C W^l I_{is}^l + \sum_{l=-1}^2 C P_{rad}^l I_{is}^l, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial j_{BS}}{\partial t} = & \gamma - \alpha j_{BS} - \beta W j_{BS} \\ & + \sum_{l=-1}^2 C j_{BS}^l W^l + \sum_{l=-1}^2 C j_{BS}^l P_{rad}^l + \sum_{l=-1}^2 C j_{BS}^l I_{is}^l \\ & + \sum_{l=-1}^2 C W^l P_{rad}^l + \sum_{l=-1}^2 C W^l I_{is}^l + \sum_{l=-1}^2 C P_{rad}^l I_{is}^l, \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)、(2)において、第3項までが修正ラザフォード方程式および捕食者-被食者モデルを示し、追加で以降の項を選択する。全モデル探索の結果において、性能の良い上位20モデルの自由エネルギーの値をFig.2に、同定された最適モデルの構造をFig.3に示す。

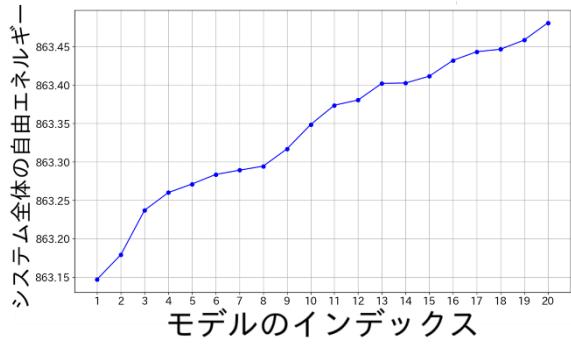


Fig.2 上位モデルの自由エネルギーの値

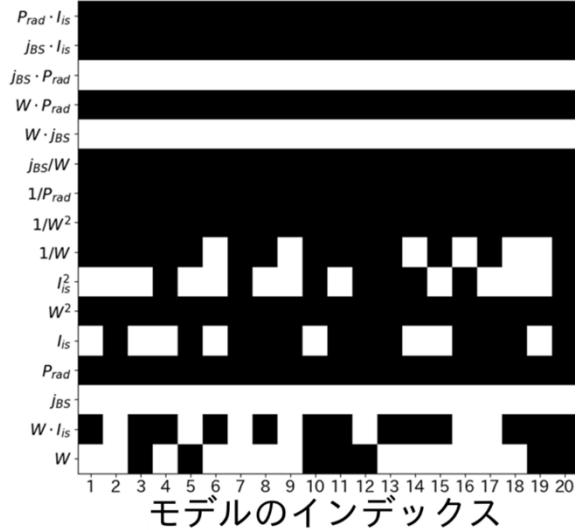


Fig.3 磁気島幅方程式の上位モデルの構造

Fig.2は、探索された全モデルシステムのうち、システム全体の自由エネルギーが小さい上位20モデルを示したものである。各モデルで自由エネルギーの差があることから、本手法によって候補の中から最も確からしい支配法則を見出したことがわかる。Fig.3は、Fig.2で示された上位20モデルにおいて磁気島幅の方程式がどの物理項（黒：選択）で構成されているかを示すブロック図であり、最適モデルにおいて磁気島幅の式においては各モデルで異なる選択であるのに対し、ブートストラップ電流の式では上位20モデル全てにおいて放射の線形項と逆数項、イオン飽和電流の線形項と非線形項、ブートストラップ電流と放射、イオン飽和電流との交差項が捕食者-被食者モデルの項に加えて選

択された。最終的に、この選択された最適モデルを用いてシミュレーションを行った結果をFig.4に示す。

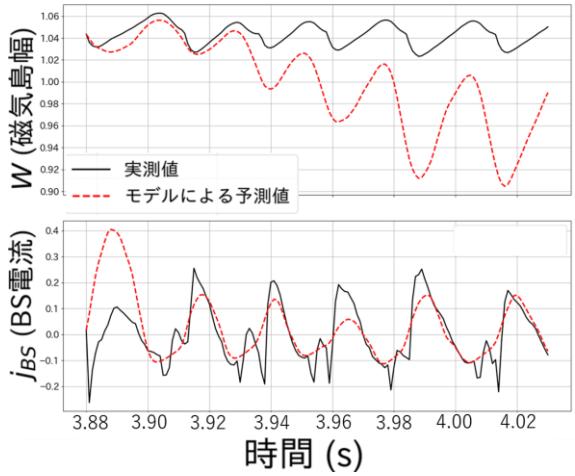


Fig.4 最適モデルでのシミュレーション結果

ブートストラップ電流については、実測値と同様の周波数を持つ振動がある程度再現され、磁気島幅についても振動の周波数はよく再現できているものの、シミュレーション波形は振幅が増幅しつつ、その中心値が時間とともに低下するという不安定な挙動を示した。この減衰効果を表す候補項を探査しモデルに組み込むことが今後の課題として考えられる。

4. まとめ

ベイズ的スパース同定の手法を用い、核融合プラズマにおける自励振動の支配方程式を探査した。導出された最適モデルは、振動の根幹であるブートストラップ電流の周期性を高い精度で再現することに成功した一方で、磁気島幅の振幅については、不安定な挙動を示した。この結果は、現実のプラズマに存在し、振幅を飽和させる物理的なダンピング効果が、現在のモデルの候補項では十分に表現できていないことを示唆している。

参考文献

- [1] T. Kobayashi, et al., Phys. Rev. Lett. 128, 085001 (2022).
- [2] Y. Mototake, et al., Scientific Reports 10, 1 (2020).
- [3] G. Motojima, et al., Nucl. Fusion 64, 086016 (2024).
- [4] M. Sasaki, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 67, 025002 (2025).