

ROIS 戦略的研究プロジェクト 成果報告会

研究課題名：

プラズマ物理と相補的なプラズマデータに対する統計数理モデリング

Statistical and mathematical modeling for plasma physics and complementary plasma data

研究カテゴリー

- 未来投資(新分野・新領域開拓)
- 異分野融合(複合分野・多機関との共同研究推進)
- 地球規模課題・社会課題(喫緊の課題への対応)

2025年4月25日

研究代表者

所属 統計数理研究所

氏名 三分一 史和

◆ 背景と研究目的

核融合研究の対象であるプラズマは、非常に高い温度勾配(億度/mのオーダー)を持ち、さまざまな物理現象が複雑に絡み合う非常に非線形な環境である。これまでの研究で、プラズマ加熱、波動、電磁流体力学的な不安定性、乱流状態などの基本的な理解は進んできた。これらの知識を基に、異なる物理現象の相互作用や複雑な挙動を統合的に理解し、制御することが、次世代のエネルギー源として期待される核融合発電の実現には不可欠である。日本を含む世界各国は、この目標に向けて国際熱核融合実験炉(ITER)プロジェクトなどの国際協力を進めている。しかし、プラズマの基本的な物理にはまだ解明されていない問題が多く残っている。たとえば、プラズマ中の電流が突然消失し、プラズマが消える「ディスラプション」という現象の予防は、核融合炉を現実のものにするための大きな挑戦の一つである。

核融合プラズマは、その複雑さのため、挙動を予測し、制御することは困難である。本研究では、多くの実験データやシミュレーション結果から直接パターンや法則を見つけ出すデータ駆動(Data driven)アプローチと、プラズマ物理の法則に基づいた数学的モデルを使ってプラズマの挙動を予測するモデル駆動(Model driven)アプローチの両方を用いることで、プラズマの複雑な挙動を理解し、制御する方法を探る。特に、プラント制御などで成功を収めている統計数理的手法を活用することが有望とされている。

さらに、プラズマのダイナミクスに寄与する物理量が観測されていない可能性があるため、本研究では、観測されていない物理量を仮想的に考慮した予測を行うことを目的とする。また、統合シミュレーションによる核融合プラズマのデジタルツインとデータ同化の手法を組み合わせた適応予測制御システムの開発を行い、実時間での計測情報を用いてデジタルツインを実体に近づけることにより、精度が高い状態でのプラズマ制御を目指す。

核融合プラズマ実験には非常に多くの制御パラメータが存在し、プラズマのパフォーマンスが最大となるパラメータを知るには多くの実験が必要である。しかし、少ない実験データから最適値を推定することが求められており、そのためにさまざまな数理統計的手法の適用が考えられる。さらに、そのような数理統計的アプローチを活性化させるためにはデータの公開が必要であり、学术界や産業界への貢献を目指すとともに、統計数理コミュニティ(統数研・DS施設等)と核融合コミュニティ(核融合研・各大学等)との協調的発展を目指す。

◆ 国内外の類似・競合する研究との関係

本プロジェクトは、核融合プラズマの現象を理解し、制御するための包括的な研究を目指している。核融合研究は、次世代のエネルギー源として世界中で注目され、多くの国々が大規模なプロジェクトを進めている。特に国際熱核融合実験炉(ITER)計画は、世界的な取り組みであり、多くの技術的課題が研究されている。しかし、プラズマの非線形で複雑な性質は、理解と制御の両方で大きな課題をもたらしている。

従来の研究アプローチでは主にモデル駆動アプローチが用いられていたが、このプロジェクトではデータ駆動アプローチも組み合わせることで、プラズマのより複雑な性質を理解し、効果的な制御方法の開発を目指している。具体的には、リアルタイムでのモデリング、プラズマ乱流データの解析手法、第一原理計算・実験・モデリングを統合する学際的研究を推進する。このアプローチは、プラズマ物理の基礎研究だけでなく、核融合炉の実用化に向けた応用研究にも大きな影響を与える可能性がある。

また、核融合プラズマに対するデータ同化の研究は、簡易なものを除けば国内外で本研究のみである。さらに、デジタルツイン構築・解析・制御が一体となったデータ同化システムの開発も、この分野で本研究が唯一のものである。核融合プラズマ実験で得られる時系列データは株価変動や前震、津波の発生に似ているが、同時多点で多様な情報を含む質の高い大量のデータという特徴を持つ。

国内外の類似・競合する研究と比較して、本プロジェクトの特徴は、統計数理学とデータ科学の手法を積極的に取り入れ、プラズマ物理学の問題に新たな視点を提供する点である。これにより、ディスラプションなど未解明の現象への理解が進み、効果的な制御方法の開発が期待される。また、統計数理と核融合コミュニティの協働により、モデリングの成功・失敗事例を共有し、研究の加速が期待される。

さらに、本プロジェクトで取り組む非線形解析や異常値検出、予測の手法は、神経科学や地震学などの分野にも応用可能である。こうした分野では、複雑で予測が難しい現象を解析することが大きな挑戦であるが、本プロジェクトの技術によって新しい発見や進歩が期待される。以上のように、本プロジェクトは独自のアプローチで核融合研究の新たな地平を開き、国内外の類似・競合研究との差別化を図っている。

◆ 本研究の意義

本研究の意義は、超高温プラズマに関する既存の支配方程式や物理モデル、またはそれらの複合手法が、実験観測データを十分に説明しきれない現状を改善することにある。要素還元論では、各要素の挙動を理解していても全体の挙動を予測することが難しく、第一原理計算も計算精度や計算量の制約から完全な予測が難しい。こうした限界を補完するため、センサーデータを用いてモデル選択を行うといった統計数理的アプローチにより、未知のシステムの制御を実現している事例に着目した。

本研究で開発するデジタルツインに基づいた制御システムは、直接計測していない物理量も考慮に入れた制御が可能であり、計測可能な量が限られる状況でも高度な制御を実現できる。この技術は、将来の核融合炉制御の基盤となることが期待され、また最適なプラズマ核融合炉設計に貢献することが見込まれる。加えて、流体、宇宙、複雑系など、類似する時系列データを持つ分野での数値統計的アプローチの活性化にも資するものと考えられる。

こうした「データへの当てはめ」や「確率論的思考」といった統計数理の手法を核融合研究に融合させ、「統計数理核融合学」を創成する。これは、「人工物であるプラズマ」を題材として、自然科学の要素還元思考を補完する統計数理的アプローチを実践し、要素還元論と第一原理計算の限界を超えた新たな研究領域の開拓を目指すものである。

<p>1) 研究の概要</p>	<p>本研究は、従来の核融合研究と一線を画す点として、統計数理とデータ科学の手法を統合することにより、プラズマの複雑な挙動をリアルタイムで予測・制御するアプローチを採用している。従来の研究は主にプラズマ物理のモデル駆動型アプローチに依存してきたが、本研究では実験やシミュレーションの膨大なデータを活用し、データ駆動型のパターン認識や異常検知技術も積極的に取り入れている。</p> <p>特に、本研究ではディスラプション(プラズマの突然の崩壊)といった未解明の現象の予測と制御に注力しており、従来の方法では難しかった不安定現象に対して新たな視点を提供する。また、統計数理とプラズマ物理の知見を融合し、核融合研究コミュニティと統計数理コミュニティの協力を促進することで、プラズマの不安定な挙動に関する理解が深化するとともに、学際的な革新が期待される。さらに、このアプローチは他分野(神経科学や地震学など)でも活用可能であり、広範な学術的・産業的インパクトが見込まれる。</p>																																
<p>2) 実施計画・実績</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>2022年度</th> <th>2023年度</th> <th>2024年度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"></td> <td>FS (Feasibility Study) ★5月 FS採択審査会</td> <td>本研究 ★2月 FS評価審査会(本研究採択)</td> <td>★11月 2年目成果報告会</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td></td> <td>★ 1年目実績評価</td> <td>★ 最終成果報告</td> </tr> <tr> <td>費用 (千円)</td> <td>予算</td> <td>1000</td> <td>2850</td> <td>2400</td> </tr> <tr> <td></td> <td>執行</td> <td>874</td> <td>2850</td> <td>2400</td> </tr> <tr> <td>実施者 (所属機関)</td> <td colspan="4"> 代表者: 三分一史和^{a)} 共同研究者: 矢野恵佑^{a)}, 奥野彰文^{a)}, 横山雅之^{a,b)}, 前山伸也^{b)}, 稲垣滋^{c)}, 森下侑哉^{c)} 本武陽一^{d)}, 佐々木真^{e)}, a) 統数研, b) 核融合研, c) 京大, d) 一橋大, e) 日大 (紙幅の都合上, 主要メンバーのみ記載) </td> </tr> </tbody> </table>					2022年度	2023年度	2024年度			FS (Feasibility Study) ★5月 FS採択審査会	本研究 ★2月 FS評価審査会(本研究採択)	★11月 2年目成果報告会				★ 1年目実績評価	★ 最終成果報告	費用 (千円)	予算	1000	2850	2400		執行	874	2850	2400	実施者 (所属機関)	代表者: 三分一史和 ^{a)} 共同研究者: 矢野恵佑 ^{a)} , 奥野彰文 ^{a)} , 横山雅之 ^{a,b)} , 前山伸也 ^{b)} , 稲垣滋 ^{c)} , 森下侑哉 ^{c)} 本武陽一 ^{d)} , 佐々木真 ^{e)} , a) 統数研, b) 核融合研, c) 京大, d) 一橋大, e) 日大 (紙幅の都合上, 主要メンバーのみ記載)			
		2022年度	2023年度	2024年度																													
		FS (Feasibility Study) ★5月 FS採択審査会	本研究 ★2月 FS評価審査会(本研究採択)	★11月 2年目成果報告会																													
			★ 1年目実績評価	★ 最終成果報告																													
費用 (千円)	予算	1000	2850	2400																													
	執行	874	2850	2400																													
実施者 (所属機関)	代表者: 三分一史和 ^{a)} 共同研究者: 矢野恵佑 ^{a)} , 奥野彰文 ^{a)} , 横山雅之 ^{a,b)} , 前山伸也 ^{b)} , 稲垣滋 ^{c)} , 森下侑哉 ^{c)} 本武陽一 ^{d)} , 佐々木真 ^{e)} , a) 統数研, b) 核融合研, c) 京大, d) 一橋大, e) 日大 (紙幅の都合上, 主要メンバーのみ記載)																																
<p>3) 研究成果の概要</p>	<p>核融合プラズマの解析において、特異値分解とクラスタリングを用いて乱流の空間的・時間的モードを解析し、複雑な乱流の挙動を階層的にグループ化する手法を確立した。また、直線プラズマ装置PANTAにおける突発的粒子輸送の統計則を調べ、圧力条件によってイベントのサイズ分布が異なることを確認し、予測可能性のある現象が存在することを示した。さらに、空間フーリエモード間の因果関係を定量分析し、圧力条件によるモード間の結合強度の変化を可視化した。これらの成果により、プラズマ乱流のパターン形成のメカニズムに関する知見が得られた。</p> <p>加えて、機械学習によるハミルトニアン推定を用いて、乱流と帯状流の相互作用モデルの検証を行い、核融合炉での乱流制御に向けた理解を深めた。データ同化を用いた予測制御システムの開発においては、LHD(大型ヘリカル装置)での電子温度制御実験を通じてリアルタイム制御の実証に成功し、核融合炉の安定運転を支える技術の可能性を示した。さらに、京都大学のヘリオトロンJ装置の実験データをオープンデータベース化し、研究コミュニティにおけるデータ共有の促進を図った。</p>																																

氏名	所属機関
三分一史和	統計数理研究所・学際統計数理研究系
矢野恵佑	統計数理研究所・統計基盤数理研究系
田中未来	統計数理研究所・統計基盤数理研究系
奥野彰文	統計数理研究所・統計基盤数理研究系
上野玄太	データサイエンス共同利用基盤施設 (DS施設)
今泉允聡	東京大学大学院・総合文化研究科・広域科学専攻
本武陽一	一橋大学大学院・ソーシャル・データサイエンス研究科
横山雅之	核融合科学研究所・六ヶ所研究センター
仲田資季	駒澤大学 総合教育研究部 自然科学部門
山口裕之	核融合科学研究所・研究部
釘持尚輝	核融合科学研究所・研究部
徳永晋介	QST六ヶ所フュージョンエネルギー研究所・核融合炉システム研究開発部
杉山翔太	QST六ヶ所フュージョンエネルギー研究所・核融合炉システム研究開発部
前山伸也	核融合科学研究所・研究部
佐々木真	日本大学・生産工学部
稲垣滋	京都大学・エネルギー理工学研究所
小林進二	京都大学・エネルギー理工学研究所
村上定義	京都大学大学院工学研究科・原子核工学専攻
森下侑哉	京都大学大学院工学研究科・原子核工学専攻
西澤 敬之	九州大学 応用力学研究所・核融合力学部門
小林達哉	核融合科学研究所・研究部
徳田 悟	九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所

22名