

審査の結果の要旨

氏名 横山 達也

本論文は「Data-driven study on abrupt termination events in fusion plasmas (核融合プラズマの突発的崩壊現象に関するデータ駆動型研究)」と題し、磁場閉じ込め核融合プラズマで見られる突発的な崩壊現象の予知モデルを実験データと機械学習の手法を用いて構築することによって、実際に崩壊を回避する運転を実証するとともに、現象の物理背景の説明につながることを示したものであり、全5章と Appendix の構成となっている。

第1章「Introduction」では、核融合エネルギーの実用化に向けて、炉心となるプラズマの高性能化が図られる一方、物理的な運転限界に近づくため、プラズマを維持できなくなる突発的崩壊現象が発生しやすくなることを指摘し、この現象は非線形かつ規模や要因が様々であることから、理論的なモデル化が困難であるとして、データ駆動型の研究に注目した背景と動機を説明している。具体的にはヘリカル型装置 LHD の高密度運転で観測される放射崩壊と、トカマク型装置 JT-60U の高圧力運転で観測されるディスラプションを対象とし、予知性能の向上と物理背景の理解の両方に取り組むため、スパースモデリングを用いることを述べている。

第2章「Machine learning techniques」では、本研究で用いた機械学習による解析手法を述べている。プラズマが安定な状態にあるか崩壊に近い状態にあるかを判別するために、線形サポートベクターマシン (SVM) を2値分類器として用いること、予めデータの対数をとることによって分類境界の方程式をべき乗形で表現し、物理現象を議論しやすくすることを提案している。さらに、入力パラメータの選択では、個別のパラメータの分布だけを考慮するのではなく、パラメータ同士を組み合わせた効果を考慮することから、全状態探索 (Exhaustive Search、ES) を用いた特徴抽出を採用した。これによって、考えられるすべての組み合わせについて、モデルの訓練と評価を行い、互いに比較することで、局所最適に陥ることなく、最適な特徴パラメータを選択できることを説明している。

第3章「Prediction and feature extraction of radiative collapse in stellarator-heliotron plasmas」では、LHD におけるプラズマ実験で観測される放射崩壊に関するデータセットを作成し、解析結果を議論している。プラズマ放電を特徴づける15の候補パラメータから、ESによって炭素と酸素イオンからの線スペクトル強度、電子密度、周辺部の電子温度の4個のパラメータの組み合わせを抽出した。この特徴パラメータを用いて SVM で求めた分類境界からの距離に基づき、放射崩壊の発生可能性を定量的に評価できることを示した。これによって運転可能な密度領域を表現できるとともに、崩壊可能性から発生の予知が可能となることを明らかにした。さらに、この崩壊可能性を実時間で計算できる制御系を構築し、崩壊の要因となる密度上昇と温度低下に対して、ガスによる燃料供給の遮断と電子サイクロトロン共鳴による追加熱の制御を行うことによって放射崩壊を避けながら高密度運転ができることを実証した。さらに、崩壊可能性の表現と照らし合わせて、粒子輸送や密度揺動に前兆現象が見られること、不純物イオンの輸送の非線形性が重要であることを指摘した。

第4章「Prediction and feature extraction of high-beta disruption in tokamak plasmas」で

は、JT-60Uにおける高圧力放電で観測されるディスラプションに関するデータセットを作成し、解析結果を議論している。14 の候補パラメータから、規格化ベータ値、楕円度、有理面でのイオン温度と磁気シアの 4 個のパラメータを抽出し、これらのパラメータを用いてディスラプション発生可能性を定量的に評価するとともに、安全な運転領域を示した。さらに、このモデルの普遍性を問うために、米国のトカマク型装置 DIII-D での実験と比較を行った。その結果、規格化ベータ値の代わりに有理面でのトロイダル回転速度が抽出されることを示し、普遍的な予知モデルの確立には、ディスラプションの要因として抵抗性壁モードの発生の有無、また有理面位置評価の違いを是正する必要があることを指摘した。

第 5 章「Conclusions」では、本論文で示した、突発的崩壊現象に関する実験に基づいたデータ駆動型研究の有効性をまとめている。

Appendix A では放射崩壊予知モデルの標本選択による高密度領域の外挿性評価事例を示した。

以上これを要するに、本論文は磁場閉じ込め核融合プラズマにおいて運転限界を規定する突発的崩壊現象の予知と制御および物理的説明に有効なモデルをデータ駆動型アプローチによって構築し、実証したものであり、先端エネルギー工学、特に核融合科学および情報科学などの分野への貢献が大きい。

よって本論文は博士（科学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上 2,152 字