

氏名	稲垣 秦一郎
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博 1 2 0 7 号
学位授与の日付	令和 8 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 電子システム工学専攻
学位論文題目	X線計測を用いた三次元プラズマ診断手法の開発とトーラスプラズマの三次元構造形成現象の観測に関する研究
審査委員	(主査) 教授 三瓶 明希夫 教授 比村 治彦 教授 栗辻 安浩

論文内容の要旨

本研究では、磁場閉じ込めトーラスプラズマにおいて自発的に形成される三次元構造を観測するため、プラズマから放射される制動放射 X 線の画像計測を逆磁場ピンチ (RFP) プラズマに適用し、プラズマ内部に形成される三次元構造の実験的観測を行った。

トーラスプラズマのうち、トカマク配位や RFP 配位は、外部コイルで印加されるトロイダル磁場とプラズマ電流によるポロイダル磁場によってプラズマを閉じ込める。平衡状態においては圧力勾配とローレンツ力が釣り合い、圧力・電流・磁場はトロイダル方向に対して軸対称的な分布を示す。しかし、電流分布や圧力分布に起因して MHD 不安定性が励起され、有理面付近で成長した不安定性は磁気島などの特定の空間周期を持つ三次元構造を形成する。これらの現象のなかには、比較的長時間安定に存在し、閉じ込め特性に顕著な影響を与えるものもある。本研究ではそのうち RFP プラズマにおけるヘリカル構造の自発的・維持形成現象に着目した。ヘリカル構造の形成・維持には電流密度分布や有限のプラズマ抵抗、プラズマ回転など複数の要因が関与しており、支配的な物理過程や発生するパラメータ領域に関する統一的理解は得られていない。トーラスプラズマの自己組織化現象の理解には、従来のようにプラズマパラメータを多点で計測するだけでは不十分であり、空間構造そのものを三次元的に捉えて他の計測結果と統合的に評価することが求められる。

本論文では、制動放射 X 線の画像計測に基づく三次元プラズマ診断手法を新たに提案するとともに、RFP プラズマにおける三次元構造の実験的観測の結果および構造形成現象の磁場配位依存性についてまとめている。

本論文は以下の 9 章から構成されている。

第 1 章は、本研究の学術的背景および研究目的と方法について説明している。

第 2 章は、トーラスプラズマにおける基本的理論および、対象とする物理現象である RFP プラズマにおけるヘリカル構造形成現象について説明している。また本研究で用いたプラズマから放射される X 線についての理論を述べている。

第 3 章は、本研究で使用したトーラス型プラズマ装置 RELAX と実験で用いた X 線計測機器の詳細を述べている。

第4章ではX線画像計測を用いた三次元プラズマ診断手法である三次元トモグラフィ法の詳細を説明している。本研究では、限定された視野のもとでX線の三次元放射強度分布を推定する手法として、新たにピンホールアレイを用いたX線画像計測装置および、ピンホールモデルとFourier-Bessel級数展開、正則化最小二乗法を組み合わせた三次元トモグラフィ法を提案している。

第5章は、数値実験による三次元トモグラフィ法の妥当性を検証した結果を述べている。ノイズ量を変化させた入力データに対しX線放射強度分布を推定した結果、視野内部で三次元再構成が可能であることが示されている。また、正則化手法によりトロイダル方向の周期性を推定することが可能であることも確認された。

第6章は、トーラス型プラズマ装置RELAXにおけるX線画像計測の初期実験について示している。取得したX線画像データからX線放射強度分布を推定した結果、プラズマの中心部に非軸対称な構造が存在し、プラズマ周辺で計測される磁場揺動と整合することが明らかになった。

第7章では、プラズマ周辺の磁場揺動とX線放射強度分布の時間発展を比較した結果について述べられている。X線の全強度と磁場揺動の相関を解析した結果5-25 kHzで両者に相関がみとめられた。またX線画像が磁場揺動の位相に伴って変化することも確認された。三次元再構成の結果、規格化小半径 $r/a \sim 0.3-0.5$ の領域にピークを持つX線放射強度分布が推定された。これらの結果は、磁気島形成とそれに伴う密度・温度変動がX線放射強度の揺動に寄与している可能性を示唆している。

第8章では非軸対称なX線放射強度揺動と磁場揺動との関係をより詳細に調べるため、フォトダイオードアレイによるX線放射強度の径方向分布計測を実施した結果について述べている。実験は磁場配位の異なる2つの放電条件に対して実施し、X線揺動と磁場揺動の相関の有無が磁場配位に依存することが明らかとなった。さらに、非軸対称なX線放射強度分布は $q=0.25$ の有理面付近で生じていることを示した。これらの結果は大域的な磁場構造がMHD不安定性の成長・抑制に影響することを示唆する。

第9章は本研究の結論および今後の展望を述べている。

論文審査の結果の要旨

磁場閉じ込めトーラスプラズマにおいて自発的に形成される三次元構造を対象として、制動放射X線の画像計測を用いた三次元プラズマ診断手法の開発と、逆磁場ピンチ(RFP)プラズマにおける構造形成現象の実験的観測結果が報告された。トーラスプラズマでは、MHD不安定性により磁気島などの非軸対称三次元構造が形成され、閉じ込め特性に大きな影響を及ぼすが、これらを三次元的に直接観測する手法は十分に確立されていなかった。これに対し、本研究では、マルチピンホールカメラによるX線画像計測と、Fourier-Bessel級数展開および正則化最小二乗法を組み合わせた三次元トモグラフィ法が提案され、数値実験により、視野が制限された条件下においても三次元放射強度分布を推定することが可能であると示された。さらに、RELAX装置におけるRFPプラズマ実験への適用により、プラズマ中心部に非軸対称なX線放射強度分布が存在することが明らかにされ、プラズマの周辺で計測される磁場揺動と整合することが示された。

X線強度揺動と磁場揺動の間には5–25 kHz帯域で相関が認められ、規格化小半径 $r/a \approx 0.3\text{--}0.5$ 付近に放射強度の高い領域が存在することが確認された。また、フォトダイオードアレイを用いた径方向X線放射強度分布の詳細な計測により、磁場配位の違いによってX線揺動と磁場揺動の相関特性が変化し、特に浅い反転条件では有理面近傍にX線揺動と磁場揺動の相関が高い領域が局在することが明らかになった。これらの観測結果は、X線揺動が磁気島形成に伴う密度・温度の変動に起因しており、また大域的な磁場構造が有理面での不安定性の成長・抑制に影響していることを示唆している。

これらの成果は、制動放射X線画像計測と三次元トモグラフィ法を組み合わせることで、限られた観測条件下においてもトーラスプラズマ内部の非軸対称三次元構造を実験的に捉え得ることを示している。特に、RFPプラズマにおけるX線放射構造と磁場揺動との対応関係や、磁場配位に依存した構造形成特性を明らかにした点は、自己組織化現象やMHD不安定性の理解を進展させる重要な知見であり、今後のトーラスプラズマ研究に有用な診断手法と物理的基盤を提供するものと評価される。

本論文は、レフェリー制度が確立した以下の3編の国際学術論文を基礎としている。

[1] [S. Inagaki](#), A. Sanpei, and H. Himura, “Multiple-pinhole camera for monitoring three-dimensional plasma shape”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **1036**, 166857, (2022)

[2] [S. Inagaki](#), A. Sanpei, T. Inoue, and H. Himura, “Initial Experimental Results of Three-Dimensional Plasma Structure Reconstructed from Seven Independent X-Ray Images on RELAX”, Plasma and Fusion Research, **18**, 1202010, (2023)

[3] [S. Inagaki](#), A. Sanpei, T. Inoue, N. Kojima, R. Takaoka, T. Sasaki, and H. Himura, “First Experimental Monitoring of the Three-Dimensional Structure of Toroidal Plasmas Using Multiple Soft X-Ray Imaging Techniques”, Plasma and Fusion Research, **18**, 2402046, (2023)

以上から、本論文の内容には十分な新規性・独創性、および、理工学的意義がある。特に、プラズマ科学分野および天文分野に寄与する所が大きい。したがって博士論文として優秀であると認められる。