

|             |   |
|-------------|---|
| 氏 名         | おんち たくみ<br><b>恩地 拓己</b>                                   |
| 学位(専攻分野)    | 博 士 ( 学 術 )   |
| 学 位 記 番 号   | 博 甲 第 5 5 7 号   |
| 学位授与の日付     | 平成 22 年 3 月 25 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 設計工学専攻  |
| 学 位 論 文 題 目 | <b>低アスペクト比 RFP プラズマにおけるヘリカル構造の画像計測に関する研究</b>              |
| 審 査 委 員     | (主査)教授 政宗貞男<br>教授 播磨 弘<br>教授 裏 升吾<br>准教授 比村治彦<br>准教授 栗辻安浩 |

## 論文内容の要旨

乱流状態の高温プラズマ中に形成される巨視的な構造の研究に光学的画像計測が活用されている。本研究は、核融合プラズマ閉じ込め方式の一つである逆磁場ピンチ(**Reversed Field Pinch, RFP**)においてプラズマ中に自発的に形成されるヘリカル構造の画像計測に関するものである。

第 1 章では **RFP** のプラズマ閉じ込め原理を概観した後、特にヘリカル構造へのプラズマの自発的遷移現象とプラズマ性能改善に関する近年の研究の流れおよび今後の研究課題を整理して、アスペクト比（トーラスプラズマの大半径と小半径の比）が極限的に低い（低アスペクト比）**RFP** 研究における画像計測の意義づけを行っている。**RFP** はトーラスの大円周方向に外部から印加する弱いトロイダル磁場と、トロイダル方向に誘導起電力を与えて流す大きなプラズマ電流がつくるトーラス小円周方向のポロイダル磁場との重ね合わせでプラズマを閉じ込める方式である。近年の **RFP** 研究の進展により、軸対称性を有するプラズマにおいて内部が自発的にヘリカル変形する現象が見出され、さらにヘリカル変形した領域内部でプラズマ性能が向上することが明らかになりつつある。この自発的なヘリカル変形過程の物理機構の解明とプラズマ性能改善への応用が重要な研究課題となっている。本研究は、低アスペクト比 **RFP** プラズマで実現されたヘリカル構造の画像計測に関するものであることを述べている。

第2章では研究の対象とした実験装置（**RELAX**）と本研究に関連する計測装置の概略を説明した後、これまでのプラズマ内部磁場分布および周辺部の磁場揺動測定から、**RELAX**プラズマ内部がヘリカル変形する放電領域が存在することを述べている。次にこの放電領域に注目してトーラスプラズマの接線方向から高速カメラを用いて行った画像計測の結果を述べている。すなわち、低アスペクト比**RFP**プラズマの可視光領域の画像をトーラスの接線方向から高速カメラ

(80,000fps) で撮影し、放電期間中の単一の**MHD**不安定性が大きく成長する時間帯にフィラメント状の発光領域が出現することを見出している。特に、2-3本のフィラメント状の発光から単一ヘリックス状の発光に至る時間発展、およびこの単一ヘリックスが回転する様子を**RFP**プラズマにおいて世界で初めて観測したこと、このヘリックスのピッチが、それが観測された場所におけるプラズマ閉じ込め磁場の磁力線のピッチと一致することを述べている。プラズマ内部のヘリカ

ル形状可視光発光領域の存在は電子密度および電子温度にも同様のヘリカル構造が存在する可能性を示唆しており、単一のMHD不安定性の成長に伴う磁気島構造計測の動機づけを与えている。

第3章では、可視光よりも短波長（高エネルギー）領域における画像計測のために開発した軟X線（SXR）画像計測システムについて述べている。プラズマ中で熱運動する電子による制動放射光はRELAXにおいてはSXR領域になる。プラズマ中の等圧面は磁気面と一致するので、密度と温度の関数であるSXR放射強度は磁気面で一定となる。従って、プラズマから放射されるSXR放射強度の画像計測（2次元計測）を行うことにより、磁気面構造に関する情報を得ることができる。汎用SXR画像計測装置は存在しななので、申請者はピンホールカメラの原理を利用したSXR画像計測システムを設計・製作してその動作特性を調べている。SXR領域に感度の高いマイクロチャンネルプレート（MCP）と残光時間が短い（ $\sim 0.2\mu\text{s}$ ）蛍光板を組み合わせる撮像素子とし、蛍光板にパルス幅 $5\mu\text{s}$ の高電圧パルスを加えて時間分解能を与えている。発光画像の撮影にはイメージンテンシファイア付きCCDカメラを用いている。種々のSXR放射強度分布に対してSXR2次元画像のシミュレーション解析を行い、プラズマ内部の磁気面構造、特に磁気島構造の同定に対する計測システムの感度解析を行っている。

第4章では、開発した計測システムをRELAXに設置してSXR画像計測を行った結果を述べている。周辺磁場揺動との同時測定を行い、単一のMHD不安定性が大きく成長する期間中のSXR画像に、特徴的な単一ヘリックス構造を見出している。プラズマ中の磁気面とMHD不安定性にともなって成長する磁気島構造をモデル化して、実験結果の2次元SXR画像を再現する磁気面構造を決定するという解析法を採用している。その結果、規格化幅が0.56、内部のSXR放射強度がバックグラウンドの3倍程度の磁気島構造を仮定したSXR放射強度分布が実験画像を最もよく再現することを見出している。この場合のSXR放射強度の等高線は、大規模にヘリカル変形したホットコア領域が存在することを示している。さらに申請者は、AXUVフォトダイオードアレイを用いたマルチコードSXR放射測定システムを製作して、ある特定のポロイダル断面内でSXR放射強度分布の時間変化を測定している。その断面内でSXR強度分布に周期的な振動を観測しており、SXR放射強度の強いヘリカルホットコアを有するヘリカル構造がトロイダル方向に回転していることを示唆する結果を得ている。

第5章では結論として、低アスペクト RFP プラズマ実験装置 RELAX における画像計測システムを開発し、RELAX プラズマの内部に形成されるヘリカル構造を可視光および軟 X 線領域で観測したこと、および、この構造が単一の MHD 不安定性に伴い成長した磁気島の内部に形成される電子密度、電子温度が周囲よりも高い領域（ヘリカルホットコア）の存在を示すことを述べている。本研究で開発した画像計測システムにより、低アスペクト比 RFP の特徴の1つを明らかにし、低アスペクト比 RFP をはじめとする高温プラズマの性能改善研究に画像計測が有用であることを示している。

## 論文審査の結果の要旨

本申請論文は、高効率核融合炉心プラズマとして大きな可能性をもつ逆磁場ピンチ（RFP）において、プラズマの自己組織化の結果形成されるヘリカル構造の画像計測に関する研究をまとめたものである。RFP では閉じ込めに適した磁場分布をプラズマが自己形成するため、弱い外部磁

場で高い圧力のプラズマを閉じ込めることが可能である。一方で自己形成過程における巨視的 (MHD) 不安定性のために磁気面が壊れて磁力線がカオス的になりやすい (磁気カオス) 傾向があるため、プラズマの性能改善のために磁気カオスの抑制が重要な研究課題である。近年の RFP 研究の進展により、プラズマ中に成長する MHD 不安定性が単一モードであれば、磁気カオスを避けてプラズマ性能の改善が可能であることが示されつつある。RFP のアスペクト比を極限まで低くすれば、そのような単一モードの成長で特徴づけられる RFP 配位を実現しやすくなる可能性を指摘する理論もあり、その実験的検証が強く求められている。申請者は、自身で開発した画像計測システムを使って、低アスペクト比 RFP の特徴の 1 つであるヘリカル構造を視覚的に捉えるという重要な成果をあげている。

低アスペクト比 RFP 実験装置 RELAX では、プラズマ表面のトロイダル磁場がほぼ 0 となる領域で、単一の MHD 不安定性が成長する傾向が特に強いことが、磁場計測からわかっている。この不安定性の成長に付随するプラズマのヘリカル変形の物理過程を理解するために、変形を直接観測することが重要であった。本研究で申請者はまずトーラス形状の RFP プラズマの接線方向から高速カメラによる画像計測を行い、低アスペクト比 RFP プラズマ中で複数のヘリックス構造が単一ヘリックス構造に発展する過程を観測することに世界で初めて成功している。これは低アスペクト比御 RFP 装置の特徴を視覚的に捉えた重要な成果である。次にこのヘリックス構造とプラズマパラメータとの関係を調べるために、プラズマからの制動放射軟 X 線 (軟 X 線, SXR) の画像計測を行っている。自作の SXR 画像計測システムにより撮影した SXR 画像の解析から、プラズマ中心付近に密度、温度が周辺部よりも高いヘリカル状の領域 (ヘリカルホットコア) が形成されることを示している。さらに、SXR 分布の時間発展測定により、ヘリカルホットコアの回転を示唆する結果を得ている。これらの可視光および SXR 領域の画像計測により得られた結果は、低アスペクト比 RFP において、単一 MHD 不安定性が成長した結果、中心部でプラズマ性能が改善されてヘリカルホットコアが形成されること視覚的に捉えたものである。ヘリカルコア形成の物理機構を考察する上で重要な基礎データを与えるものであり、学術的に重要な成果である。申請論文の内容は査読制度のある学術雑誌に掲載または投稿中の以下の 3 編の学術論文にまとめられている。

1. T.Onchi, A.Sanpei, R.Ikezoe, H.Himura, S.Masamune, “Application of Soft-X Ray Imaging System to the STE-2 RFP”, Plasma and Fusion research, 2, pp. S1063-1-S1063-4 (2007).
2. T.Onchi, N.Nishino, R.Ikezoe, A.Sanpei, H.Himura, S.Masamune, “Observation of Simple Helical Structure in Low Aspect Ratio RFP Using Fast Camera”, Plasma and Fusion Research, 3, 005-1 - 00655-2 (2008).
3. T.Onchi, R.Ikezoe, K.Oki, A.Sanpei, H.Himura, S.Masamune, “Sensitivity analysis for 3-D structural diagnostics of magnetic surfaces from soft-X ray imaging”, submitted to Rev. Sci. Instrum., 2010.