

氏 名	おおき けんすけ 大木 健輔
学位(専攻分野)	博 士 (学 術)
学 位 記 番 号	博 甲 第 631 号
学位授与の日付	平成 24 年 3 月 26 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	低アスペクト比 RFP プラズマにおける準シングルヘリシティ状態の磁場計測による特性評価
審 査 委 員	(主査)教授 政宗貞男 教授 林 康明 教授 播磨 弘 准教授 比村治彦 兵庫県立大学大学院工学研究科教授 *永田正義

論文内容の要旨

本論文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 (RFP) のアスペクト比 (トーラスプラズマの大半径と小半径の比) を極限的に低くした場合に, 準シングルヘリシティ (Quasi Single Helicity, QSH) 状態と呼ばれるヘリカルに変形した RFP 磁場配位が自発的に形成されやすいことを実験的に示すとともに, そのプラズマの QSH 状態の特性をプラズマエッジ (端) と内部の磁場測定と解析によって明らかにしたものである.

第1章では, 核融合を目的とした磁場閉じ込め装置の概略を述べ, 代表的な閉じ込め方式であるトカマクと, 本研究の対象であるRFPの磁場配位の類似点と相違点を述べた後に, RFPの特長を整理して, 核融合研究におけるその位置を明確にしている. 特にRFPプラズマ中の巨視的 (MHD) 不安定性の基本的性質とプラズマ閉じ込めの関係, 最近10年間のRFP研究の進展と今後の重要な研究課題を整理して, 低アスペクト比RFP研究の意義づけを行っている.

第2章では本研究を進めるために必要となる理論を整理するとともに, QSHに関するこれまでの理論的・実験的研究を整理して本研究の背景を述べている. RFPにおけるQSH 状態は, ポロイダルモード数 $m=1$, 様々なトロイダルモード数 n をもつ摂動のうち, 単一モードのみが成長してプラズマがヘリカルに変形し, このヘリカル変形した領域の内部で閉じ込めが改善する状態である. 極端な場合にはRFX-mod装置 (イタリア) で最初に発見された3次元立体磁気軸をもつ単一ヘリカル軸RFP状態 (Single Helical Axis, SHAx) となる. RFX-modでの発見とほぼ同時期に, 低アスペクト比RFP装置RELAXでは, プラズマ内部の磁気測定により SHAx と本質的に同じ磁場構造であるヘリカルオーミックRFP平衡状態が, 申請者により発見された. これらの発見を契機として, RFPにおける3次元配位への緩和 (自己組織化) 現象が広く注目されるようになった.

第3章では, 研究の対象となった実験装置 (RELAX) と本研究に関連する計測装置の概要を説明している. RELAXではプラズマ電流 $I_p < 100\text{kA}$, 電子温度 $T_e < 100\text{eV}$, 電子密度 $n_e \sim 10^{19}\text{m}^{-3}$, 放電持続時間 $\sim 2\text{ ms}$ の低アスペクト比 ($A=2$) RFPプラズマが生成されている. このような高温プラズマを対象とした主な計測器の概略を述べるとともに, 本研究で用いた磁場計測装置の詳細を述べている.

第4章では、RELAXにおける低アスペクト比RFPプラズマのQSHの特性を、磁場計測結果の様々な解析により明らかにしている。

プラズマエッジの磁場測定と解析により、トロイダルモードスペクトル広がりの平均値と QSH で主要となる n が、他の中、高アスペクト比 RFP 装置よりも低くなり、理論の予測と一致することが示されている。QSH の発生率、持続時間、モードの振幅などの磁場反転パラメータ F （プラズマ断面平均トロイダル磁場に対するプラズマエッジでのトロイダル磁場の比）への依存性を解析し、それらが浅い反転または非反転領域 ($|F| << 1$) で高い値となることを明らかにしている。また主要モードの n が F の値に依存することも明らかにしている。これは F の値によって最も内側のモード有理面 ($q=m/n$) の n の値が変化することにより、最も成長率の大きいモードの n が変化することに対応すると結論している。

RELAX の真空容器は 2 分割されているが、次にそのフランジ部分のプロイダル抵抗が増加するように改造を行った後の QSH の特性を詳しく解析している。この改造はトロイダル磁場（特に反転磁場）の軸対称性を改善することを目的としたものである。トロイダル磁場の軸対称性の改善にともなって、 $n=4$ の QSH の発生率および持続時間が改善されることを定量的に明らかにしている。

さらに、プラズマ内部の磁場分布を測定して、QSH に対応する理論的モデルの 1 つであるヘリカルオーミック平衡配位と比較して、磁場分布がよく一致することを見出している。RELAX の QSH 状態は、トロイダル方向に固定された位置では内部磁場の大規模な振動として観測されるが、その振動成分が、ヘリカルオーミック配位の非軸対称（ヘリカル対称）固有関数の理論計算結果と一致し、軸対称なプラズマの内部でヘリカル変形した部分が回転する構造が実現されていることを見出している。内部磁場分布の非振動部分（平衡成分）を用いた平衡解析によって、最も内側のモード共鳴面に共鳴するのは $m=1/n=4$ モードであることも確認している。これは、エッジの磁場揺動測定から判断される QSH が $m=1/n=4$ モードであることと対応している。平衡解析より低アスペクト比 RFP 平衡では最も内側のモード共鳴面と隣接共鳴面の距離が長くなることを示し、低アスペクト比 RFP において QSH が実現しやすいのはこのためであるとの結論を導いている。

以上、本研究では低アスペクト比 RFP における準シングルヘリシティ状態を、磁場揺動測定を主な手段として計測し、MHD 平衡と安定性の理論を用いた解析によってその特性を評価している。本研究によって QSH に対する低アスペクト比化の効果が実験的に初めて明らかになり、低アスペクト比 RFP 配位で新しい閉じ込め改善領域を見出せる可能性が示された。

論文審査の結果の要旨

本博士申請論文は核融合プラズマの基礎研究に関するものであり、アスペクト比が特に低い逆磁場ピンチ（RFP）プラズマ生成が可能な実験装置 RELAX において、自発的にヘリカル形状に変形した準シングルヘリシティ（QSH）状態の RFP プラズマの特性を磁気計測により詳細に調べ、その評価を行っている。

RFP 磁場配位においてはプロイダルモード数 $m=1$ 、様々なトロイダルモード数 n をもつ摂動が

不安定になり成長しうるが、QSH状態では、単一モードのみが成長してプラズマがヘリカルに変形し、このヘリカル変形した領域の内部でプラズマ閉じ込めの改善が実現する。ヘリカル変形が極端な場合には、RFX-mod装置（イタリア）で最初に発見された、3次元立体磁気軸をもつ单一ヘリカル軸RFP状態（Single Helical Axis, SHAx）となる。RFX-modでの発見とほぼ同時期に、低アスペクト比RFP装置RELAXでは、プラズマ内部の磁気測定により、SHAxと本質的に同じ磁場構造であるヘリカルオーミックRFP平衡状態が申請者により発見された。これらの発見を契機として、軸対称RFPにおける3次元配位への緩和（自己組織化）現象が広く注目されるようになった。申請者は磁気測定結果に基づいてQSH状態の特性とその評価研究を展開した。まず、QSH状態における内部磁場分布が軸対称平衡解と $m=1$ ヘリカル対称平衡解の重ね合せとよく一致し、ヘリカルオーミックRFP平衡配位が実現していることを実証した。また低アスペクト比RFPではQSHにおける主要トロイダルモード数 n が低くなること、QSHの発生率、持続時間、モード振幅が浅い反転または非反転領域で高い値となること、QSHの主要トロイダルモード数 n が反転の深さに依存すること、を見出した。さらに、RFP実験装置の改造を行い、特にトロイダル磁場の軸対称性の改善によってQSH状態の発生率および持続時間が改善されることを定量的に明らかにした。これらは低アスペクト比RFPの実験的研究として先駆的な内容であり、今後のプラズマ性能改善に寄与する重要な成果である。

申請論文の各章の内容は、査読制度が確立された以下の学術雑誌に掲載（2編）または投稿中（1編）である。既発表論文のうち1編は申請者が筆頭著者である。

1. K. Oki, R. Ikezoe, T. Onchi, A. Sanpei, H. Himura, S. Masamune, R. Paccagnella, "Observation of Large-Scale Profile Change of Magnetic Field in Low-Aspect Ratio Reversed Field Pinch", J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 77 (No. 7), 075005-1 – 075005-2 (2008).
2. R. Ikezoe, K. Oki, T. Onchi, Y. Konishi, M. Sugihara, S. Fujita, A. Sanpei, H. Himura, S. Masamune, "Extended operational regimes and MHD behavior in a low-aspect-ratio reversed field pinch RELAX", Plasma Phys. Control. Fusion Vol. 53 (No. 2), 025003-1 – 025003-10 (2011).
3. K. Oki, D. Fukahori, K. Deguchi, S. Nakaki, A. Sanpei, H. Himura, S. Masamune, R. Paccagnella, "Characterization of Quasi-Single-Helicity States in a Low-Aspect-Ratio RFP", submitted to Plasma and Fusion Res., 2012.

以上のように本論文の内容は十分な新規性と独創性を有しており、核融合エネルギー科学における学術的価値も高く、博士論文として優秀であることを審査委員全員が一致して認めた。