

氏 名 武村 勇輝

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1580 号

学位授与の日付 平成25年3月22日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 ヘリカルプラズマにおける巨視的 MHD 不安定性特性  
に関する実験研究

論文審査委員 主 査 教授 山田 弘司  
教授 榊原 悟  
教授 市口 勝治  
教授 長崎 百伸 京都大学  
研究主幹 諫山 明彦  
日本原子力研究開発機構

## 論文内容の要旨

経済性の高い核融合炉実現のためには、より高いベータ値（プラズマ圧と磁気圧の比）を持つプラズマの生成が必要不可欠であるが、MHD 不安定性は到達ベータ値を制限し、プラズマの閉じ込め性能を劣化させる可能性があるため、不安定性の回避・抑制は高ベータプラズマの安定保持に向けた主要な課題である。外部コイルのみで閉じ込め磁場の形成が可能なヘリカル方式の磁場閉じ込め核融合炉では、プラズマ電流により駆動される不安定性により引き起こされる深刻なプラズマの破壊現象を避けることが可能となる一方、圧力駆動型不安定性による閉じ込めへの影響が高ベータヘリカル炉を実現する上で大きな問題となる。本論文は、大型ヘリカル装置（LHD）における実験を行い、圧力駆動型不安定性の一つである交換型モードの特性について調べたものである。

交換型モードについてはこれまで実験、理論の両側面から長きに渡り研究されており、近年の実験研究では、モードの飽和強度や発現領域に対するプラズマ特性値依存性や磁場配位依存性、さらに、プラズマ閉じ込めに与える影響等について明らかになりつつある。一方、線形成長から非線形緩和に至る交換型モードの成長過程に関する知見や、プラズマ閉じ込めに大きく影響を与える可能性があるモードの回転運動に関する実験的理解は未だ不十分であり、ヘリカル型核融合炉に外挿可能となる実験的知見が十分であるとは言えない。よって本研究では、プラズマ内外の揺動計測の解析を進め、交換型モードの成長過程における内部構造の変化および外部揺動との関係について調べた。また、MHD モードの回転に対する物理機構解明をめざし、プラズマ流との対比、および回転が閉じ込めに及ぼす影響等について調べた。

これらの課題について詳細な解析を進めるために、プラズマ内外揺動計測において得られたデータの解析手法を検討し、解析ツールの開発を進めた。真空容器壁に設置した三方向磁気プローブアレイとサドルループアレイを用いて磁場揺動の計測を行い、多チャンネル軟 X 線ダイオードアレイによりプラズマ内部の揺動計測を行った。外部磁場揺動計測からはモードの空間構造の同定を行い、三方向磁場成分の解析によりプラズマ内部における摂動電流構造を予測した。サドルループアレイは、長波長の揺動計測に加え、形成される磁気島の幅や空間位置を評価するために用いた。交換型モードによるプラズマの径方向変位は、軟 X 線ダイオードアレイ信号を解析することにより評価した。軟 X 線信号は線積分効果を含んでいるため、局所分布を得るためには、同効果を除去する手法について検討を進めた。交換型モードの回転については、磁場揺動計測より得られた回転周波数と、荷電交換分光計測により評価したプラズマ流との対比を行った。詳細な比較を行うために三次元 MHD 平衡をもとに幾何学的な構造の補正を行い、磁気面上のプラズマ流速の評価を行った。以下に研究結果の詳細を示す。LHD プラズマでは典型的に、定常プラズマにおいて発現した交換型モードは、線形成長した後に飽和する傾向にある。モードの成長時間は約 1 ms であった。成長過程におけるモードの径方向変位は共鳴面近傍に局在化しており、観

測結果は交換型モードの分布形状と一致することを示している。モードの成長に伴い、径方向変位は相似形の分布形状を保持したまま広がることがわかった。以上の傾向は、線型および非線型 MHD モデルによる理論予測と一致している。さらに広範なパラメータ領域において、モード飽和時における径方向変位の振幅と半値幅との対比を行った結果、振幅の増加に伴い半値幅も広がる傾向にあることを見出した。また、外部磁場揺動と径方向変位の振幅に対して強い相関があることがわかった。内部磁場揺動構造を推測するために、径方向分布が奇関数および偶関数となる摂動電流を仮定し、三方向の磁場揺動の強度比、位相差について実験結果との対比を行った。実験結果は奇関数型の内部摂動電流であることを示しており、交換型モードの非線形計算による予測と矛盾ないことを明らかにした。

次に、交換型モードの回転に関する研究結果について示す。典型的に観測されるモードは実験室系において電子反磁性方向に回転する傾向にあり、回転周波数は数十 krad/s 程度である。モードの回転が電子流、イオン流のどちらに駆動されるか調べるために、電子/イオン流を電場および磁場によるドリフト流と電子/イオン反磁性ドリフト流との和で定義し、モード回転との比較を行った。局所的な両ドリフトは、荷電交換分光計測やトムソン散乱計測による分布計測結果から評価し、三次元 MHD 平衡計算コードにより得られた磁気面から、磁気面上でのプラズマ流速の平均値を算出した。解析は数～数十 krad/s の広範な周波数領域で対比を行った結果、モードの回転は電子流と計測誤差の範囲内で方向、大きさとも一致しており、交換型モードの回転は電子流に駆動されていることを明らかにした。ヘリカル装置における新たな発見として、磁気シアの低減によりプラズマがより不安定な環境化に曝された場合、モードの回転が減速、停止した後、成長し、内部崩壊現象をもたらす現象を観測した。放電初期では、モードが励起した後には飽和し、電子反磁性方向に回転し続けるが、プラズマ電流を増加させ磁気シアが閾値を下回った時、モードの振幅が急増し、回転が低下し始める。その後、回転は完全に停止しモードは大きく成長し、プラズマ閉じ込めを 50%以上劣化させる。回転停止前の径方向変位を調べた結果、交換型モードの構造を持っていることがわかった。また、誤差磁場の影響について調べた結果、誤差磁場の有無によらず内部崩壊現象が起きる一方、回転停止後に成長する位置は誤差磁場の有無によって異なることが明らかにした。また、内部崩壊を齎すモードの成長率は、磁気レイノルズ数の増加と共に減少することがわかった。これは交換型モードの線形理論と定性的に一致している。

結論として、プラズマ内外計測により揺動の径方向変位、空間構造、プラズマ流速平均値の評価手法の検討を進め、解析ツールの開発を行い、交換型モードの性質について研究を行った。交換型モードの成長過程では、揺動の径方向変位は同じ分布形状を維持したまま飽和に至ること、揺動の振幅は磁場揺動と強い相関を持つことを明らかにした。モードの回転は電子流によって駆動されるが、より不安定となる環境下においては、モード回転が減速、停止後に成長し、プラズマの内部崩壊を起こす現象をヘリカル型装置においてはじめて観測した。また、内部崩壊を起こすモードの成長率は、磁気レイノルズ数に依存することを明らかにした。

## 博士論文の審査結果の要旨

本博士論文は、磁場閉じ込め核融合炉の経済性の指標であるベータ値（プラズマ圧力と閉じ込め磁気圧の比）の上昇を阻害する巨視的MHD不安定性の特性について、実験とデータ解析を行い、得られた結果について物理的考察を進めたものである。ベータ値が高い方が弱い磁場で核燃焼プラズマを閉じ込められることから経済的に望ましい。一方、ヘリカル型核融合炉では、このプラズマ圧力を自由エネルギー源として圧力駆動型のMHD不安定性が成長し、到達ベータ値を制限する要因となる可能性がある。従って、この不安定性の特性を解明することは、核融合炉開発において極めて重要な課題となるが、ヘリカル型磁場閉じ込めにおいては、この不安定性のモード構造の時間的发展や、その回転運動の物理特性については、これまで明確な知見が得られてこなかった。そこで、これらの点を明らかにするために、本論文では、大型ヘリカル装置（LHD）において観測される圧力駆動型の巨視的MHD不安定性の実験解析を行った。特に、X線揺動計測およびプラズマ外部に設置した磁気プローブによる三軸方向磁場揺動計測等を行い、新たに独自に開発した三次元MHD平衡を扱う実験解析ツール群を用いることによって、不安定性の揺動振幅の線形成長から非線形飽和に至る過程での空間モード構造の変化や、その回転運動と飽和現象との関係等の物理特性について以下のような新しい知見を得ることに成功している。

まず、不安定性の成長、飽和過程における空間モード構造を同定するために、多チャンネル軟X線揺動計測を行った。DC成分を取り除いて得られた揺動信号から、信号に含まれる線積分効果を除き、摂動変位の径方向（プラズマ断面の小半径）モード構造を抽出した。結果として、不安定性が発現、飽和に至る過程において、その摂動変位が径方向に一つのピークを持つ分布構造を変えずに成長することを示した。また、異なるプラズマ条件で得られたデータベースの統計的な解析から、飽和時の摂動変位のピーク値とその半値幅、及び摂動変位のピーク値と磁気プローブで計測した磁場揺動との間に、それぞれ相関があることを示した。また、共鳴面上の摂動電流の空間構造（径方向分布）を三方向磁場揺動信号により推測し、共鳴面を原点とした奇関数型の径方向分布を持つことを明らかにした。このように、軟X線計測、磁場揺動計測からそれぞれ不安定性の構造を推定することが初めて可能となった。次に、不安定性の構造の回転特性を調べるために、電場、電子温度、電子密度等の分布計測解析から評価したイオン流および電子流から予測される回転周波数と磁気プローブデータ解析から得られる不安定性のモード構造の回転周波数を、広範なプラズマパラメータ領域において比較を行った。イオン流、電子流の周波数を精度よく評価するために、それぞれが電場と磁場の相互作用によるドリフト流とイオン、電子反磁性ドリフト流で構成されると仮定し、三次元MHD平衡コードを用いて幾何学的補正を行った上で、磁気面上での平均的な流れを評価するという手法を開発した。結果として不安定性による揺動の回転が電子流による回転運動と定量的に一致し、不安定性のモード構造が電子流とともに回転していることを明らかにした。さらに、プラズマが線形MHD安定性理論において不安定となる領域に入った場合の揺動と回転についても着目した。この場合、不

安定性は大きく成長して内部崩壊を生じさせプラズマエネルギーを約50%以上損失させる。発現初期の揺動振幅強度の増大が、ある閾値を超えた時、回転運動が減速、停止し、その直後から内部崩壊を引き起こす急激な成長が生じることを、初めて観測した。このような回転停止現象は、揺動の増大による磁場構造の変形に伴う電子流速度の低下により引き起こされたと推測している。また、崩壊直前の揺動の径方向摂動変位解析の結果、原因となる不安定性が圧力駆動型の交換型不安定性の構造を有することを示した。本論文で得られた結果は、ヘリカル型磁場閉じ込めプラズマにおける圧力駆動型の交換型不安定性の物理特性に関する実験研究を大きく進展させる成果であると判断し、博士論文に値すると判定した。