

|          |  |
|----------|--|
| 氏名       | 榊原 悟   |
| 学位（専攻分野） | 博士（工学）   |
| 学位記番号    | 総研大甲第133号  |
| 学位授与の日付  | 平成7年3月23日  |
| 学位授与の要件  | 数物科学研究科 核融合科学専攻<br>学位規則第4条第1項該当  |
| 学位論文題目   | Experimental Study of MHD Instabilities Based on<br>Magnetic Fluctuation Measurement in Low-Aspect-<br>Ratio Helical Plasmas |
| 論文審査委員   | 主査 教授 藤原正巳<br>教授 佐藤哲也<br>教授 本島 修<br>教授 松岡啓介<br>教授 若谷誠宏（京都大学）   |

## 論文内容の要旨

トロイダルプラズマの磁気流体的 (MHD) 不安定性については大きく分けてトロイダル電流をエネルギー源とする不安定性とプラズマの熱的エネルギー即ち圧力の空間的勾配が駆動する不安定性の2つのカテゴリーが考えられる。ヘリカル型装置では平衡配位を形成する際、原理的にプラズマ電流を必要としないことから、プラズマ圧力によって駆動される不安定性 (交換型モード、バルーニングモード) を中心に研究が進められている。これまでの様々なヘリカル系実験では、プラズマ全体を破壊させるような強いMHD不安定性は観測されていないが、部分的破壊である内部ディスラプションによって運転領域が制限される例はあり、また、これらの不安定性が閉じ込めに影響を与える可能性もあるため、ヘリカル型装置においてもやはりMHD不安定性は重要な問題となる。

励起される不安定性、及びその臨界ベータ値の性質は磁場配位 (回転変換分布、磁気シアー、磁気井戸等) によるところが大きい。ヘリオトロン/トルサトロン配位では一般に正の磁気シアがあるため交換型モードが最初に現われると考えられている。理想交換型モードに対しては正の磁気シアー、及び磁気井戸が安定化に寄与するが、抵抗性交換型モードには磁気井戸のみが安定化に働く。ヘリオトロン/トルサトロン配位の特徴として特にプラズマ周辺部が磁気丘配位となるため、ここに存在する有理面に生じる抵抗性交換型モードがわずかな圧力勾配によって不安定化されることが理論的に指摘されている。MHD不安定性を実験的に研究するには、磁場配位に自由度がある方が実験領域を幅広くとれ、また理論モデルの検証という点から好ましい。この点、外部からの磁場のみによって回転変換分布、磁気シア、磁気井戸などが制御可能であるヘリオトロン/トルサトロン型の装置は優れた特長を持つ。本研究で対象としているCHSはこの特長に合わせて低アスペクト比 ( $\sim 5$ ) という特徴があり、このため有限ベータによる効果が際立って現われる。本論文では広範な磁場配位にわたってプラズマ中で観測される磁気揺動をもとにMHD不安定性の同定、および特性の理解を図ることを目的としている。特に閉じ込め特性において注目されている磁気軸位置に対する依存性、有限ベータ効果などについて研究した。

真空磁場配位を固定し、ベータ値 (プラズマ圧力と磁場圧力の比) の上昇による磁気揺動の特性について調べた結果、コヒーレントな巨視的モードが  $m \leq 4$ ,  $n \leq 3$  の範囲で観測された。 $m/n = 2/1$  以外のモードは空間分解能の良いトムソン散乱測定など各種分布測定から得られるプラズマの力学的平衡状態を考察すると、本研究での実験条件では理想的MHDモードに対しては安定である。この事と  $\iota$  (磁力線回転変換角)  $> 0.5$  より外側領域は常に磁気丘であることから、 $m/n = 3/4, 2/3, 1/1, 2/2$  などの巨視的モードは抵抗性交換型不安定性であると考えられる。ベータ値が0.5%以上になるとこれらの  $m/n = 2/1$  以外のモードが現われ始めるのはベータ値の上昇に伴い、これらの共鳴面が存在する周辺領域での圧力勾配が大きくなることに対応している。 $m/n = 2/1$  モードについてはベータ値が1%程度より減衰し始め、1.4%では観測されなくなる。有限ベータ効果による平衡配位の変形により、プラズマ内部で安定化の現象が実際に起きていると考えられる。 $\iota = 1/2$  の有理面はベータ値上昇によっても磁気井戸とはならないが、磁気シアの上昇により理想モードは安定化される。このように  $m/n = 2/1$  モードに限っては所謂第2安定領域的な振る舞いを示すので、観測に受かっている  $m/n = 2/1$  モードは理想モードであると言

える。

ベータ値が1%以上でも磁気シアだけでは安定化されない抵抗性モードは不安定な筈であるが、これが他の $m/n=2/1$ 以外のモードのように観測されないのは共鳴面が比較的プラズマ内部にあること、飽和レベルが抵抗性モードは理想モードより低いことが考えられる。 $l=1$ の共鳴面での磁気井戸の高さ、圧力勾配はこのベータ値上昇に伴っていずれも増加するので不安定要因は悪化している。また抵抗性交換型モードの線形成長率は磁気レイノルズ数の $-1/3$ 乗に比例すると考えられているが、この実験条件における $l=1$ の共鳴面上では、ベータ値の上昇は密度の上昇に寄るところが大きく、この時プラズマの温度は下がっていく傾向があるので磁気レイノルズ数も下がっていく。このためやはり不安定要因は高ベータ時に大きいと予測されるにもかかわらず、 $m/n=1/1$ モードは実験ではベータ値1%である揺動レベルで飽和する。線形安定性からのみの議論ではこの実験結果を説明することはできず、今後非線形飽和に対する定量的研究が必要となる。

密度が上昇するにつれてインコヒーレントな乱流成分が観測され、磁気揺動中に占める低次モード数のコヒーレントモードの割合はベータ値の上昇につれて下がってくる。このインコヒーレントな成分を考慮しても全揺動レベルはあるベータ値から飽和する。これらのインコヒーレントな揺動はモード数 $m, n$ が少なくとも4以上であり、短波長の不安定性であることが判った。全ての特徴的な磁気面はベータ値の上昇に伴い磁気プローブに近づくので、実際にプラズマ中でもこの磁気揺動はあるレベルで飽和していると考えられる。まとめとして、CHSで中性粒子ビームにより生成加熱されたプラズマを対象に100kHz以下の磁気揺動測定を行った結果、コヒーレントなグローバルモードが $m \leq 4, n \leq 3$ の範囲で観測された。これらの揺動の磁場配位とプラズマパラメータへの依存性は、抵抗性あるいは理想交換型MHD不安定性の理論により説明できることが判った。これらのモードおよびバックグラウンドとして観測されるインコヒーレントなモードいずれもその揺動量はベータ値が1%以上で飽和する傾向がみられた。これはここで観測されている不安定性が閉じ込め性能を直接決めていないことや、磁気軸位置を変化させた時の振る舞いもこれを裏付けていることが本研究によって実験的に示された。なお、本論文ではプラズマ電流がMHD不安定性に与える影響についても調べられており、ヘリカル装置におけるビーム駆動電流あるいはブートストラップ電流の重要性を実験的に示した。

## 論文の審査結果の要旨

本学位論文は、トーラス状ヘリカル磁場装置に閉じ込められている高温プラズマの磁気流体(MHD)不安定性の特性、およびその制御について、主として磁気プローブを用いた磁気揺動の観測により行った実験的研究に関するものである。

ヘリカル系無電流プラズマでは本質的に電流ディスラプションの問題はないものの、高温、高密度のプラズマを効率良く閉じ込めるためにMHD安定性の確保は重要なテーマの一つであり、これについての機構を解明し、制御の可能性を探ることは核融合プラズマ閉じ込め研究の上で非常に重要である。

榊原君は本論文において、コンパクトヘリカルシステムと呼ばれる低アスペクト比トロイダルヘリカルプラズマの閉じ込め装置を用いて実験を行なっている。この装置は種々の方法で磁場配位の制御が行えるよう工夫されている。その特長を生かし、磁場配位をプラズマ自身の自発的機構と外部からの制御により非常に広範囲にわたって変化させ、そのMHD不安定性に対する影響について、特に低次のモードに着目して磁気揺動の観測を基に研究している。

得られた主な成果は以下の通りである。

(1) 有限圧力のプラズマと磁場との相互作用の結果、磁場構造が変形され、それがプラズマ自身の安定性に及ぼす効果に関して、プラズマ圧力と磁場圧力の比であるベータ値を平均で2%までの範囲で調べている。プラズマに現われる理想交換型モード不安定性の理論から予測されるベータ値限界に合致して不安定性が観測されること、またプラズマ圧力がさらに増加するに従い、磁場構造の変形による磁気シアの増加によってそれが安定化されることを明らかにした。

(2) 抵抗性交換型モードの特徴を持った揺動は完全に安定化されないものの、その磁場揺動レベルが飽和し、閉じ込めをグローバルに劣化させることはないという核融合プラズマの閉じ込めの研究に関しても重要な寄与をしている。

(3) 磁気流体不安定性の制御に関しては、2つの興味ある実験研究を行っている。外部垂直磁場の制御によりプラズマ中心に相当する磁気軸位置を移動させることで理想交換型モードの安定化が可能であることを実証している。さらに研究を進展させ、外部からトロイダルプラズマ電流を励起し、その電流による磁場配位の変化が及ぼすMHD不安定性への影響を実験的に調べている。その典型的な例として、中性粒子ビーム入射により加熱された低密度領域のプラズマに現われる間欠的なMHD振動が、外部からの制御印加されるわずかのオーミック電流による磁気シアの強化により安定化できることを明らかにしている。

本論文中では以上の様々な手法を用いる実験を遂行することによって平衡磁場配位とMHD安定性との関係を系統立てて実験的に研究し、多くの新しい知見を得ると同時に、既存の理論モデルと実験観測との比較も行なっている。本論文での成果はヘリカル型磁場装置に閉じ込められたプラズマのMHD不安定性の理解とその制御の試みという点から十分に評価され得るものであり、新たに理論研究を触発させる貴重な題材をも提供している。本論文はこれらの観点から、学位論文として相応しい学術内容を持っていると認められる。

榊原君に対する学位論文に関わる専門分野、基礎となる分野、および周辺分野につい

て口述により試験を行なった。プラズマの磁場閉じ込めの基礎、MHD理論、輸送現象などについての基礎的、専門的学識や、実験を行なっていく上での知識について満足すべき応答が得られた。また本論文は英語で書かれており、英語の学力についても十分であると認められた。