

氏 名	ビアワーゲ BIERWAGE	アンドレアス ANDREAS	ハンスヨルゲビッチ HANSJOERGEWITSCH
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)		
学位記番号	エネ博第 120 号		
学位授与の日付	平成 17 年 9 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	エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻		
学位論文題目	Dynamics of Resistive Kink and Coupled Tearing Modes in a Tokamak Plasma with Multiple Resonant Surfaces (多重共鳴面を持つトカマクプラズマでの抵抗性キンクおよび結合)		
論文調査委員	(主 査) 教授 岸 本 泰 明	教授 佐 野 史 道	助教授 中 村 祐 司

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、高性能のトカマク型核融合プラズマの実現を目的に、その阻害要因の一つである抵抗性キンクモードおよび多重ティアリングモード等の多重共鳴面を持つ電磁流体力学 (MHD) 的モードの線形理論に基づく安定性解析および非線形相互作用を研究した成果をまとめたものであり、8 章からなっている。

第 1 章は序論で、本論文の中心課題である、多重 (2 重および 3 重) の共鳴面を持つトカマクプラズマ中でのキンクモードおよび多重ティアリングモードについての物理概念を説明するとともに、それらを記述する理論モデルを紹介している。また、これまでなされた様々な実験結果に基づいて、本研究で対象とする MHD モードがトカマクのディスラプション現象や輸送現象に及ぼす影響に関して分析を行い、本研究の位置づけと解析手法を提起している。

第 2 章では、トカマクプラズマ中でのキンクモードおよび多重ティアリングモードの解析を行うために必要な MHD 方程式に関して、主に理論的な観点から考察を行い、本研究課題を遂行するための適切な方程式系として抵抗性の簡約 MHD 方程式を選択した理論的背景に関して論じるとともに、線形安定性解析および非線形シミュレーションの数値計算手法に関して論じている。また、次章以降の解析で用いる 2 重及び 3 重の共鳴面を持つ磁場形状やプラズマ分布、および非線形シミュレーションを行う際に用いる初期条件等に関して述べている。

第 3 章と 4 章では、第 2 章で定義した抵抗性簡約 MHD 方程式系に基づいて、2 重および 3 重の共鳴面を持つキンクモードおよび多重ティアリングモードの線形安定性解析を行い、幅広いポロイダルモード数 (m) に対して線形成長率を求めている。その結果、共鳴面間の幅がプラズマ半径に比べて十分狭い磁場構造の場合、これらの MHD モードは $m=10$ 近辺の高いモード数に最大値を持つ幅広い不安定スペクトルを持つことを示した。これにより、 $m=1$ のキンクモードが内部ディスラプション現象をもたらす主要な原因と考えられていた従来の描像と異なり、より高いモード数を持った多重ティアリングモードがトカマクの非線形 MHD 挙動に重要な役割を果たす可能性があることが論じられている。また、プラズマの抵抗値や粘性値に対する不安定スペクトルの依存性を与える解析的な表式を導き、広いパラメータ空間における多重ティアリングモードの特性を導いている。

第 5 章と 6 章では、3 章と 4 章で得られたキンクモードおよび多重ティアリングモードの線形不安定性に関する知見に基づき、抵抗性の簡約 MHD コードを用いて線形不安定性のスペクトルに対応する幅広いモード数を考慮した非線形シミュレーションを行っている。その結果、 $m=1$ のキンクモードは高モード数の多重ティアリングモードの急速な成長の影響を受けて、それが単独で成長する場合の成長率を大きく上回り、非線形加速を受けることを示している。これまでの研究から、キンクモードの成長率がプラズマ抵抗から予測される値に比べてしばしば高い値を示すことから当該分野の話題の一つとなっていたが、本シミュレーションで見出した成長率の加速はその物理モデルの一つになる可能性がある結論付けている。さらに準定常状態に達するまでの長時間のシミュレーションを行い、キンクモードの挙動は、高いポロイダルモード数を持つ多重ティアリングモードがミクロスケールの磁気乱流状態に移行し、それがキンクモードの運動を妨げる結果、低いレベ

ルで飽和して振動を繰り返す場合、および、発生する磁気乱流に抗してキンクモードが高いレベルまで成長し、従来型の内部ディスラプション現象を誘発する場合の二つに分類されることを示している。また、どちらの状態に移行するかは磁気乱流の構造や強度に依存すると結論付けている。

第7章では、第5章と第6章の結果に基づいて、4種類の質的に異なった初期擾乱の分布対して非線形シミュレーションを行い、初期条件に対するキンクモードおよび多重ティアリングモードの非線形挙動の関係について論じている。その結果、キンクモードおよび多重ティアリングモードは、幅広いポロイダルモード数に対する不安定スペクトルの影響を受けて、その初期値に依存して異なった挙動を示すことを示した。これらの結果は、ディスラプションをはじめとした多重共鳴面を有するトカマクプラズマの非線形MHD過程は、背景となるプラズマの乱流状態やペレット入射やコンパクトトロイド入射等の外部要因によるプラズマ擾乱等の影響を受けることを示しており、これらを正確に予測するには初期条件を正確に把握することが不可欠であると結論付けている。

第8章は、線形解析と非線形シミュレーションに関して、得られた主要な結論と今後の課題について述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、高性能のトカマク型核融合プラズマの実現を目的に、その阻害要因の一つである抵抗性キンクモードおよび多重ティアリングモード等の多重共鳴面を持つ電磁流体力学(MHD)的モードの線形理論に基づく安定性解析および非線形相互作用を研究した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- 1) プラズマ中に多重共鳴面が存在する場合のキンクモードと多重ティアリングモードの線形理論による安定性解析および非線形シミュレーションによる解析を行い、幅広いポロイダルモード数(m)に対して線形成長率を求めた結果、共鳴面間の幅がプラズマ半径に比べて十分狭い場合、これらのMHDモードは $m=10$ 近辺の高いモード数に最大値を持つ幅広い不安定スペクトルを持つことを見出した。この結果、 $m=1$ のキンクモードが内部ディスラプション現象の主要な原因と考えていた従来の描像と異なり、キンクモードに加えて高いモード数の多重ティアリングモードがディスラプション現象に重要な影響を及ぼすことを示した。
- 2) 上記1)で得られた知見に基づいて抵抗性の簡約MHDコードを用いて非線形シミュレーションを実施した。その結果、巨視的な構造を持つキンクモードは高モード数の多重ティアリングモードの急速な成長の影響を受けて、それが単独で成長する場合の成長率を大きく上回り、非線形加速を受けることを見出した。これまでの研究から、キンクモードの成長率がしばしば予測を上回って高い値を示すことが知られていたが、この成果はこの未解明の現象を説明する可能性を示している。
- 3) さらに準定常状態に達するまでの長時間シミュレーションを行った。その結果、キンクモードの挙動は、多重ティアリングモードがミクロスケールの磁気乱流状態に移行し、それがキンクモードの運動を妨げるため低いレベルで飽和して振動を繰り返す場合、および、発生する磁気乱流に抗してキンクモードが高いレベルまで成長し、従来型の内部ディスラプションを誘発する場合の二つに分類されることを見出した。また、どちらの状態に移行するかは磁気乱流の構造や大きさに依存することを示した。また、これらの非線形MHD挙動は、初期の小振幅のプラズマ擾乱の影響を強く受けることを示した。

以上の研究は、ディスラプション現象をはじめ、核融合プラズマの多彩な非線形MHD現象を正確に予測するためには、より微細な空間構造を持つ揺らぎや乱流の存在が重要な役割を果たすことを示すものであり、今後の核融合プラズマにおけるMHD研究の方向性に重要な指針を与えるものである。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年8月10日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。