

氏 名	みや と なお あき 宮 戸 直 亮
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第45号
学位授与の日付	平成14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	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	Linear and Nonlinear Behavior of Resistive Drift-Alfvén Instabilities in Cylindrical Plasmas (円柱プラズマ中の抵抗性ドリフト-アルフベン不安定性の線形および非線形解析)
論文調査委員	(主査) 教授 若谷誠宏 教授 佐野史通 教授 前川孝

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、不均一磁化プラズマにおける普遍的な不安定性であるドリフト波と磁場揺動に起因するアルフベン波が結合して形成されるドリフト-アルフベン波が、プラズマ抵抗の効果により不安定になる場合の線形解析と非線形数値シミュレーションの結果をまとめたもので、5章からなっている。

第1章は序論で、核融合研究の意義を論じた後、ドリフト-アルフベン波の特性を述べている。特に、トカマクにおける閉じ込め改善モードとして知られているLモード(閉じ込めの悪い状態)からHモード(閉じ込めのよい状態)への遷移とドリフト-アルフベン波の安定性との相関を論じている。最後に、第2章から第5章までの構成についてまとめている。

第2章では、ドリフト-アルフベン波の非線形挙動を調べるための簡約化された2流体方程式系をBraginskii方程式系から導出している。この方程式系は流れ関数に対する渦方程式、磁束関数に対する一般化されたオームの法則、プラズマ密度に対する連続の式からなっている。これらの方程式を導くため、イオンは冷たい流体であり、また電子は等温であると仮定している。数値シミュレーションでは、非線形発展が飽和するために散逸効果が不可欠である。簡約化モデル方程式系では、拡散係数、プラズマ抵抗および粘性係数が使われている。後半では、本論文の主題であるドリフト-アルフベン波の物理的説明が示されている。さらに簡約化モデル方程式系を線形化して固有値問題として定式化している。

第3章では、抵抗性ドリフト-アルフベン波の線形解析の結果がまとめられている。最初に、局所近似を行って分散関係式を導き、これを用いてドリフト波とシア-アルフベン波の結合の強弱や固有周波数と成長率のプラズマパラメータ依存性を論じている。次に、円柱プラズマモデルを対象に、固有値問題をシューティング法を用いて解き、固有値と固有関数の特性を整理し、実験結果と比較している。軸方向プラズマ電流を考慮しない場合には、固有値問題の結果は局所近似による分数式の解とよく対応していることを示している。また、基礎実験装置におけるドリフト-アルフベン波の実験結果と対応することも示している。軸方向プラズマ電流を考慮すると、ポロイダルモード数とトロイダルモード数が同じであっても固有関数の径方向分布が異なるモードが存在し、プラズマ電流の増加とともに成長率の順序が入れ替わることを示している。また、プラズマ電流の増大は成長率の緩やかな増加をもたらすことも示している。この結果は実験結果と一致している。

第4章は、ドリフト-アルフベン波の非線形発展と飽和過程について、数値シミュレーションの結果をまとめている。不安定なドリフト-アルフベン波が飽和する機構は速度シアをもつポロイダル流の形成によることを明らかにしている。興味深い結果として、ポロイダル流速が低い間は、シア流によって不安定になる高調波成分が存在することを示している。次に、ポロイダルシア流がどのように形成されるかに注目し、電場揺動によるレイノルズ応力、磁場揺動によるマクスウェル応力、粘性効果のそれぞれの大きさを評価し、有理面近傍では、マクスウェル応力は常にレイノルズ応力を打消す傾向を持つことを明らかにしている。これは有限ベータ効果はポロイダル流の生成を抑制することを意味する。さらに成長率が低い場合には、レイノルズ応力、マクスウェル応力および粘性項の和がほぼゼロになって飽和状態になるが、成長率が大きくなると、この和は時間平均すると小さな量になって飽和することも示している。

第5章では、得られた結果のまとめと今後の展望を述べている。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、不均一磁化プラズマにおける普遍的な不安定性であるドリフト波と磁場揺動に起因するアルフベン波が結合して形成されるドリフト-アルフベン波が、プラズマ抵抗の効果により不安定になる場合の線形理論および非線形発展を、それぞれ固有値問題および数値シミュレーションにより調べた結果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1)理論モデルの確認のため、衝突性の円柱プラズマを用いた基礎実験におけるドリフト-アルフベン波の観測データと線形理論による固有値を比較し、よい一致が見られることを示した。
- (2)円柱プラズマにおける軸方向電流がドリフト-アルフベン波に与える影響を理論的に解析し、ポロイダルモード数とトロイダルモード数が同じであっても、固有関数の径方向分布が異なるモードが存在し、プラズマ電流の増大とともに成長率の順序が入れ替わることを示した。また、プラズマ電流の増大は最大成長率の緩やかな増大をもたらすことを示した。この結果は実験結果と対応することを確認している。
- (3)抵抗性ドリフト-アルフベン波はトカマクの周辺プラズマで不安定になり、温度上昇とともに成長率が下がる。一方、密度上昇に対しては、成長率の変化は小さいことを示した。さらに、数値シミュレーションにより、ドリフト-アルフベン波の成長とともに速度シアをもつポロイダル流が形成され、これが非線形成長を抑制し飽和状態に至ることを示した。したがって、シア流の強さと飽和レベルには相関があることを明らかにした。
- 4)ポロイダルシア流は、電場揺動によるレイノルズ応力、磁場揺動によるマクスウェル応力および粘性効果の間のバランスにより決まることを示した。特に有理面近傍では、マクスウェル応力は常にレイノルズ応力と逆向きに作用し、シア流の形成をさまたげることを明らかにした。

以上のように、本論文は磁場により閉じ込められたプラズマ中の電磁的ドリフト波として重要なドリフト-アルフベン波に関し、線形理論解析から非線形数値シミュレーションまで行った結果をまとめたものであり学術上、實際上寄与するところが少なくない。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14年2月1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。