

氏 名 たつ の とも や
龍 野 智 哉
学位(専攻分野) 博 士 (エネルギー科学)
学 位 記 番 号 論エネ博第 24 号
学位授与の日付 平成 14 年 1 月 23 日
学位授与の要件 学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目 Ideal Magnetohydrodynamic Spectra of Static and Flowing Plasmas
(静止, および流れのあるプラズマにおける理想電磁流体力学的スペクトル)

論文調査委員 (主 査)
教 授 若 谷 誠 宏 教 授 近 藤 克 己 教 授 前 川 孝

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、磁気閉じ込めプラズマの基本的な問題である、静止平衡と流れのある平衡の安定性に関する電磁流体力学的 (MHD) スペクトルの数理物理学的解析と、その具体的な適用についての研究成果をまとめたものであり、序論と結論を含めて8章から成っている。

第1章では、本研究の位置付けと各章の研究内容をまとめている。

第2章では、MHD 方程式系の導入と MHD 安定性を判定するためのエネルギー原理、さらに静止平衡の場合の MHD スペクトルの特性を概説している。最後に、静止平衡の場合には線形 MHD 作用素はエルミートであるが、流れのある平衡の場合には、非エルミートになることを指摘している。

第3章では、ヘリカル系プラズマにおける非局所的な径方向構造を持つ圧力駆動型不安定について、回転変換分布と圧力分布およびベータ限界値の関係を固有値問題の数値解により明らかにした。特に、有理面で圧力分布が局所的に平坦化すると、サイダム条件から予想されるものとは全く異なる MHD スペクトル (固有値) と固有関数が得られること、ベータ限界値もサイダム条件に依存しないことを示した。

第4章では、スラブプラズマにおける表面アルベン波に注目し、理想 MHD モデルにより分散式を導出し、位相混合によるアルベン波の減衰率を計算している。スラブプラズマの両面に急峻な密度勾配がある場合に、減衰率が増大することを示した。この結果は、ヘリオトロン E プラズマへのベレット入射時に見られる磁気揺動の減衰率と矛盾しない。

第5章では、抵抗性壁モード (RWM) の物理機構を考察している。RWM は、プラズマを抵抗性の導体壁が囲んでいる時に、プラズマ電流により不安定になるモードである。抵抗性壁により不安定性の成長率は、壁がない場合に比べて下がるが、完全導体壁ではないので、安定化はできない。ここで、プラズマ流を考慮すると、抵抗性壁がプラズマ柱に近い場合には、その成長率が増大することを示した。さらに、RWM はケルビン・ヘルムホルツ不安定性と同じ機構により不安定になることも示した。

第6章では、インターチェンジモードに対するプラズマ流の効果をケルビンの方法により調べた結果をまとめている。ケルビンの方法は、線形に速度分布を持つ流れに限って正確な解析ができる。インターチェンジモードはシア一流の引き延ばし効果により最終的には安定化されることを示した。興味深いのは、磁力線方向の波数が有限の場合には、磁束関数の摂動は減衰するが、磁場摂動は一定振幅の振動を維持することである。磁力線方向に摂動が一定であるインターチェンジモードの場合には、非エルミート系の特徴である時間のべき乗に比例する成長が表われることを示している。

第7章では、流れのある平衡において、速度シアーによる不安定性としてよく知られたケルビン・ヘルムホルツ不安定性を記述するレーリー方程式を一般化して、非エルミート系の MHD スペクトルの特性をまとめている。興味ある現象として、離散的スペクトルに対応する周波数が連続スペクトルの中のある周波数に一致する場合には、共鳴が生じる。これにより、時間のべき乗に比例して成長する永年的な挙動が見られる。具体的な例として、シアーのある流れの中のダイオコトロン不安定性を指摘している。

最後に第8章では、本研究で得られた結果を総括し、今後の課題にも言及している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、磁気閉じ込めプラズマの基本的な問題である、静止平衡と流れのある平衡の安定性に関する電磁流体力学的(MHD)スペクトルの数理解析と、その具体的な適用についての研究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)ヘリカル系プラズマにおける非局所的な径方向構造を持つ圧力駆動型不安定性について、有界面で圧力分布が局所的に平坦化すると、サイダム条件から予想される結果とは異なるMHDスペクトル(固有値)と固有関数が得られることを示した。さらに、ベータ限界値もサイダム条件に依存しないことを明らかにした。
- (2)スラブプラズマにおける表面アルベン波に着目し、理想MHDモデルによる分散式を導出し、位相混合によるアルベン波の減衰率を求めた。減衰率はプラズマ表面近傍の密度勾配に依存し、急峻な分布に対して減衰率が增大することを示した。この結果は、ヘリオトロンEプラズマへのベレット入射時に見られる磁気揺動の減衰率に対応することを指摘した。
- (3)プラズマ柱が抵抗性導体壁で囲まれている場合に、プラズマ電流に起因する抵抗性壁モード(RWM)が不安定になる条件を明らかにした。さらにRWMが不安定になる物理機構はケルビン・ヘルムホルツ不安定性と同じであることを示した。
- (4)プラズマ流速が直線的に増大するような流れに対して、ケルビンの方法を適用することにより、インターチェンジモードはシア一流の引き延ばし効果により最終的には安定化されることを明らかにした。
- (5)ケルビン・ヘルムホルツ不安定性を記述するレーリー方程式を一般化して、非エルミート系のMHDスペクトルでは、離散的スペクトルに対応する周波数と連続スペクトルに属する周波数が一致する時、共鳴が生じ、これにより、時間のべき乗に比例して成長する挙動が見られることを示した。

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の圧力分布とMHDスペクトルの相関を明らかにするとともに、非エルミート系の流れのあるプラズマにおける安定性理論の構築を試みたものであり、得られた成果は、学術上、実際に寄与するところが少ない。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13年11月22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。