

氏名	あ く つ たく 阿 久 津 拓
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2716 号
学位授与の日付	平 成 18 年 9 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	工 学 研 究 科 原 子 核 工 学 専 攻
学位論文題目	トカマクにおける巨視的不安定性の波動光学的手法を用いた数値解析に関する研究
論文調査委員	(主 査) 教 授 福 山 淳 教 授 山 本 克 治 助 教 授 村 上 定 義

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、トカマクプラズマにおける巨視的不安定性を解析する手法として、波動光学に基づく手法を提案し、その有効性を実証した結果をまとめたものであって、7章からなっている。

第1章は序論であり、核融合エネルギーの実用化を目指した磁気閉じ込め核融合研究におけるプラズマの巨視的安定性解析の重要性ならびに波動光学的手法による安定性解析の必要性について述べている。

第2章では、トカマクプラズマにおける巨視的線形安定性理論の概要を述べると共に、これまで利用されてきた線形安定性数値解析コードの特徴と問題点をまとめている。

第3章では、トカマクプラズマにおける巨視的不安定性を解析するために、新たに開発した線形安定性解析コード TASK/WA の特徴を述べている。トカマクプラズマの平衡配位から導かれる磁気面座標、マクスウェル方程式の径方向依存性を解くための有限要素法、電磁界を求めるための境界条件、さらに固有モードの周波数および成長率を求める手法について説明している。特に誘電率テンソルを含めたマクスウェル方程式の微分階数と有限要素法における補関数の次数の関係について詳細に検討し、誘電率テンソルが径方向微分を含まない場合には、正確な解を求めるために電界の補関数の次数を成分毎に変化させる必要があるのに対して、誘電率テンソルが径方向の2階微分を含む場合には、マクスウェル方程式の微分次数が揃うため、プラズマ中のすべての電界成分を同じ次数の補関数を用いて記述しても正確な解が得られることを明らかにするとともに、数値計算により確かめている。

第4章では、プラズマの巨視的不安定性を解析するために必要な電気伝導率テンソルを、抵抗性電磁流体近似を用いて解析的に求めている。抵抗性電磁流体近似において従来求められていた電気伝導率テンソルは均一プラズマを仮定していた。ここでは、不均一プラズマにおいて圧力勾配によって駆動される流れを厳密に考慮に入れるとともに、プラズマ形状を取り入れた磁気面座標を用いて、電気伝導率テンソルの新しい表式を導いている。得られた表式は、非圧縮性プラズマの場合には1階微分まででよく近似できるのに対して、圧縮性プラズマの場合には、磁力線方向の運動のために2階微分まで取り入れる必要があることが示された。

第5章では、プラズマ中の基本的な固有モードに対して TASK/WA コードによる数値解析を行い、その有効性を確かめている。まず、円柱導波管内の真空電磁界を計算し、その固有周波数が解析解とよく一致することを確認している。次に、前章で導いた電気伝導率テンソルから誘電率テンソルを求め、抵抗性電磁流体近似における円柱プラズマの固有モードを計算し、磁気音波の速波、ねじれアルヴェン波、磁気音波の遅波に対する固有モードの周波数スペクトルが求められ、電磁流体方程式を直接解く従来の解析結果とよく一致することを示している。

さらに圧力勾配によって駆動される内部キンクモードの成長率を計算し、電気抵抗率が小さい場合には理想電磁流体近似の成長率に漸近し、電気抵抗率が大きい場合にはティアリングモードの成長率に近づくことを示している。最後に、プラズマの非圧縮性を仮定してトカマク平衡配位における固有モードを計算し、磁気音波の速波とねじれアルヴェン波に対する周

波数スペクトルが従来の解析結果とよく一致することを確かめている。このように、円柱プラズマおよびトカマクプラズマにおける巨視的モードの固有周波数や成長率が、波動光学的手法によって精度よく計算できることを初めて示している。

第6章では、プラズマを囲む壁の有限な抵抗率のために電流駆動型外部キンクモードが不安定化されることによって生じる抵抗性壁モードの線形安定性を解析している。まず、円柱プラズマにおける抵抗性壁モードの分散関係を解析的に導いている。得られた分散関係は、従来の近似式に比べてより正確であり、成長率がポロイダルアルヴェン周波数に比べて十分小さくなくても、また導体壁の厚さが十分薄くなくても、適用することができる。次に、TASK/WAコードによって抵抗性壁モードの成長率を計算し、分散関係から求められた成長率と比較している。プラズマ電流が一様に流れ安全係数が一定の場合と安全係数の空間分布を考慮に入れた場合の両方について、壁半径依存性、プラズマ抵抗率依存性、比透磁率依存性、壁厚さ依存性を調べている。数値解析結果は、分散関係から求められた成長率とよく一致し、従来の解析コードの結果とも10%の誤差の範囲内で一致することを確認している。抵抗性壁モードの成長率は、壁半径が大きくなるにつれて徐々に増大し、理想電磁流体モードが不安定になる限界に近づくと急激に増大する。壁の抵抗性拡散時間によって規格化された成長率は、壁の比透磁率とともに増大し、壁が厚くなるとその増加率も大きくなる。さらに、プラズマのトロイダル回転を取り入れた数値解析を行い、従来の解析結果を再現するとともに、パラメータ依存性を調べている。その結果、回転速度が増大するにつれて成長率は一旦増加するが、やがては安定化に寄与すること、安定化効果はプラズマ周辺部の抵抗率とともに大きくなること、壁半径が大きくなり不安定な場合には安定化効果のみが現れること、比透磁率は安定化に寄与すること等を明らかにしている。これらの結果は、抵抗性壁モードの特性を明らかにするとともに、より現実的なプラズマ配位に対するTASK/WAコードの有用性を示している。

第7章では、得られた解析結果のまとめと今後の課題を述べている。

#### 論文審査の結果の要旨

本論文は、磁気閉じ込めプラズマにおける巨視的不安定性を解析する手法として、プラズマの線形応答を記述する誘電率テンソルを含む波動方程式を数値的に解く波動光学的手法を導入し、その有効性を検証するとともに、電流駆動型抵抗性壁モードの線形安定性を解析した研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 磁気閉じ込めプラズマのプラズマ形状を考慮に入れた磁気面座標系を用いて、マクスウェル方程式を境界値問題として有限要素法により解く数値解析コードTASK/WAを作成した。そして流れのある抵抗性MHD方程式から新たに導いた誘電率テンソルを用いることにより、巨視的MHD固有モードの周波数ならびに成長率を計算できることを示した。
2. 有限要素法における補関数の適合性について考察を行い、プラズマの圧縮性が無視できる場合には電界の補関数の次数を成分毎に変化させる必要があるが、圧縮性を取り入れた場合にはマクスウェル方程式の微分次数が揃うため、プラズマ中のすべての電界成分を同次の補関数で近似できることを明らかにした。
3. TASK/WAコードを用いて、円柱プラズマにおける固有モードスペクトルならびに電流駆動型外部キンクモード、圧力駆動型内部キンクモード、ティアリングモード、抵抗性壁モードの成長率をそれぞれ計算し、抵抗性MHD方程式を直接解く従来の手法による解析結果とよく一致することを確認した。
4. 円柱プラズマにおける電流駆動型抵抗性壁モードの分散関係を新たに解析的に導出し、従来用いられていた分散関係に比べて適用範囲が大幅に広がることを数値解析により確かめた。
5. 抵抗性壁モードの線形安定性について数値解析を行い、壁の強磁性体効果が成長率を増加させることを定量的に示すと同時に、プラズマのトロイダル回転速度が成長率に及ぼす影響を詳細に解析し、そのパラメータ依存性を明らかにした。

以上のように、本論文はプラズマの巨視的不安定性を解析する新しい手法を提案・実証するとともに、抵抗性壁モードに適用してその安定性を詳細に解析しており、学術上、実際に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成18年8月4日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。