

氏名	いどむら やす ひろ 井戸村 泰 宏
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第19号
学位授与の日付	平成12年5月23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	Gyrokinetic theory of micro-instabilities in negative shear tokamaks (負磁気シアートカマクにおける微視的不安定性のジャイロ運動論)

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、高温プラズマの磁気閉じ込めにおける未解決の重要な課題であるドリフト波乱流とそれによる異常輸送現象を、ジャイロ運動論に基づく線形理論、およびジャイロ運動論粒子シミュレーションにより研究した結果をまとめたもので、6章からなっている。

第1章は、序論であり、トカマクプラズマにおける異常輸送の研究の歴史を簡単にまとめた後、イオン温度勾配 (Ion Temperature Gradient: ITG) ドリフトモードおよび電子温度勾配 (Electron Temperature Gradient: ETG) ドリフトモードの重要性を指摘している。最後に本論文の構成を示し、特に負磁気シアートカマクにおける内部輸送障壁 (Internal Transport Barrier: ITB) 領域に注目することを述べている。

第2章では、無衝突プラズマの理論の基礎であるヴラソフ-マックスウェル方程式系からジャイロ運動論方程式系の導出を行っている。ジャイロ運動論オーダリングを示した後、非正準リー変換を用いた厳密な導出法を示している。特に、高エネルギー電子に対して、軌道平均モデルを用いれば、計算時間を節約できると同時に、電子が関与する物理を正しく取り扱えることを示している。最後に、ジャイロ運動論はエネルギー保存則を保持することも示している。

第3章では、トカマクプラズマにおける ITG モードの線形安定性を解析するための手法と得られた結果をまとめている。まず、正磁気シアーと負磁気シアーに対する磁場モデルを示した後、線形安定性に対して有限ラーモア半径効果とランダウ減衰を正しく考慮するために、積分方程式を用いた固有値問題を定式化し、これを数値的に解くための計算コードを開発している。積分方程式を用いた分散式に対して、長波長近似を行うとウェーバー型固有値方程式が得られ、この解の性質から不安定な ITG モードの挙動を予測できることを論じている。計算コードにより、負磁気シアー配位では、有理面が q_{\min} (安全係数 q の最小値) に一致する共鳴モード、 q_{\min} 面の両側に2枚の有理面がある共鳴モード、および非共鳴モードが不安定になることを示している。これらの結果は解析的予測と対応することも示している。特に、2枚の有理面を持つ共鳴モードは、 q_{\min} 面では磁気シアーがないことから、短波長領域まで不安定となり、異常輸送に対する寄与が大きいことを述べている。

第4章では、負磁気シアートカマクにおける ETG モードの、線形安定性を解析した結果をまとめている。積分方程式を用いた分散式から得られるウェーバー型固有値方程式のポテンシャルが、デバイ長が電子のラーモア半径より大きい場合には影響を受け、ITG モードとはモード局在化の条件が変わることを示している。計算コードにより、ITG モードと同様に、 q_{\min} 面が有理面に対応する共鳴モード、2枚の有理面がある共鳴モード、および非共鳴モードが不安定になることを示している。ETG モードの場合には、非共鳴モードの成長率が最も大きく、不安定な波数領域が広いので、電子の異常輸送への寄与が大きいことを述べている。また、短波長領域で、ITG モードと ETG モードが同時に不安定になることも示している。

第5章では、ジャイロ運動論粒子シミュレーションコードを開発し、ETG 乱流に適用し、電子の異常輸送を評価した結果をまとめている。ETG モードの中で、負磁気シアー配位で最も成長率の大きい非共鳴モードに注目し、2.5次元シミュ

レーションを行い、非線形挙動を調べている。その結果、乱流スペクトルの逆カスケード過程によりポロイダル方向の帯状流 (zonal flow) が形成されることが示されている。帯状流の形成を詳しく調べた結果、磁気シアアの弱い q_{\min} 面近傍では、帯状流がケルビン・ヘルムホルツ不安定性を励起して、帯状流そのものが壊れることが分かった。一方、磁気シアアが有限の領域では、ケルビン・ヘルムホルツ不安定性は抑制され帯状流が安定に保持され、乱流レベルが低減することも確認された。さらに、 q_{\min} 面近傍での電子の異常輸送のレベルは、負磁気シアープラズマの輸送解析の結果に対応している。これは、負磁気シアートカマクでは ITB 形成に ETG 乱流が重要な役割をすることを示唆している。また、ETG 乱流により形成された帯状流は容易に ITG モードを安定化することも示され、イオン温度の ITB が形成され易いことに対応していることを論じている。

第6章の結論では、本論文で得られた成果を要約し、今後の課題について展望している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、高温プラズマの磁気閉じ込めにおける未解決の重要な課題であるドリフト波乱流とそれによる異常輸送現象を、ジャイロ運動論に基づく線形理論、およびジャイロ運動論粒子シミュレーションにより調べた結果をまとめたもので、得られた主な成果は次の通りである。

1. ドリフト波乱流の周波数領域と波数領域に注目して、ヴラソフ・マックスウェル方程式系からジャイロ運動論方程式系を非正準リー変換を用いて導出した。さらに、これまでは断熱的に取り扱われていた高エネルギー電子に対し、軌道平均法を導入してジャイロ運動論の定式化を行った。

2. ジャイロ運動論方程式系を線形化し、トカマク配位のイオン温度勾配 (Ion Temperature Gradient: ITG) モードと電子温度勾配 (Electron Temperature Gradient: ETG) モードの線形安定性を調べるために、積分方程式による固有値問題を解くための計算コードを作成した。

3. 負磁気シアートカマク配位における ITG モードと ETG モードの線形安定性をウェーバー型固有値方程式の解析解により統一的に説明できることを示した。その結果、ITG モードには、有理面が1枚と2枚の共鳴モード、および非共鳴モードが存在し、なかでも有理面が2枚の共鳴モードの成長率が大きく不安定領域が広いことを示した。また、ETG モードに対して、デバイ長が電子のラーモア半径より長い場合には、デバイ遮蔽効果が ETG モードの線形安定性において重要になることを見出した。その結果、ITG モードと同様に、有理面が1枚と2枚の共鳴モード、および非共鳴モードが存在するが、非共鳴 ETG モードの成長率が最も大きく不安定領域もより広いことを示した。

4. ETG モードの非線形発展を調べるためのジャイロ運動論粒子コードを開発し、これを負磁気シアア配位のスラブプラズマに適用し、ETG 乱流では、揺動エネルギースペクトルが非等方的に逆カスケードする結果、帯状流 (zonal flow) が形成されることを示した。また、帯状流の領域では ETG 乱流が抑制され、異常輸送も減少すること、一方、磁気シアアが弱い領域では、帯状流がケルビン・ヘルムホルツ不安定性により破壊されるために、異常輸送のレベルが下がらないことも示した。このシミュレーションにより、ドリフト波乱流による異常輸送は、帯状流の形成による乱流レベルの抑制とケルビン・ヘルムホルツ不安定性による帯状流の破壊の競合により決まるという描像が得られ、さらに磁気シアアの役割が明確になった。

以上、本論文は、負磁気シアートカマクにおける異常輸送に関して有益な知見を得るとともに、ジャイロ運動論粒子シミュレーションの高度化に貢献するものであり、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12年3月8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。