

氏 名 黒 田 徹

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第457号

学位授与の日付 平成12年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Gyrokinetic Analysis of Ion Temperature Gradient

Modes in Helical Systems

論 文 審 査 委 員 主 査 助 教 授 洲 鎌 英 雄

教 授 岡 本 正 雄

教 授 林 隆 也

教 授 小 森 彰 夫

教 授 若 谷 誠 宏 (京 都 大 学)

岸 本 泰 明 (日 本 原 子 力 研 究 所)

## 論文内容の要旨

The ion temperature gradient (ITG) mode is one of drift wave instabilities, which is considered to cause the anomalous transport of the ion thermal energy in high temperature plasmas. The purpose of this thesis is to clarify effects of magnetic configurations on the ITG mode based on the gyrokinetic model. The gyrokinetic equation for ions is used to consider kinetic effects such as finite gyroradii and wave-particle interactions. Also, the assumption of adiabatic electrons and the quasineutrality condition are used to obtain the dispersion relation. Phase mixing due to  $\nabla B$ -curvature drift motion is investigated in detail in the local approximation. Effects of magnetic configuration on nonlocal mode structure are studied in straight and toroidal helical systems.

In the local approximation, initial value problem of the ITG mode is solved. Due to the toroidal magnetic drift, the Laplace-transformed density and potential perturbations have a branch cut as well as poles on the complex-frequency plane. The inverse Laplace transform shows that the temporal evolution of the density and potential perturbations consists of the normal modes and the continuum mode, which correspond to contributions from the poles and the branch cut, respectively. The normal modes have exponential time dependence with the eigenfrequencies determined by the dispersion relation while the continuum mode shows power-law decay oscillation. For the stable case, the long-time asymptotic behavior of the potential and density perturbations is dominated by the continuum mode which decays slower than the normal modes.

Next, poloidal localization of the mode structure is studied by means of the ballooning representation. In the first place, the straight helical system is considered in order to focus on the helical ripples' effects. The magnetic shear is assumed to be negative and the poloidal period number  $L$  is taken as  $L = 2$ . Then, the helical ripples with a larger toroidal period number  $M$  reduce the growth rate of the ITG mode. This stabilizing effect is understood based on the structure of the eigenfunction along the field line as follows. As  $M$  increases, the connection length between the good and bad curvature regions becomes shorter and the eigenfunction enters the good curvature region, which leads to the stabilization. For large  $M$  ( $M \sim 10$ ), unstable ITG modes are driven only by the very large temperature gradients.

Finally, toroidal helical systems are considered, in which toroidicity and helical ripples exist simultaneously. Equilibrium plasma parameters are chosen in reference to the LHD experimental result ( $L = 2, M = 10$ ). Because of the toroidal destabilization, the critical temperature gradient in which ITG mode becomes unstable is smaller than for the straight helical system. Numerical results suggest the existence of unstable ITG modes in LHD. The good curvature region is generated even in the outer torus region due to the helical ripples, which results in the reduction of growth rate compared to the tokamak cases without helical ripples. Also, dependences of the ITG mode properties on various plasma equilibrium parameters such as the helical ripple intensity, safety factor, magnetic shear, ballooning angle, poloidal wavenumber, temperature and density gradients are investigated.

## 論文の審査結果の要旨

磁場閉じ込め核融合プラズマにおいて観測される粒子・熱輸送は衝突（古典・新古典）輸送理論の予測を遥かに上回り、異常輸送と呼ばれプラズマ中の様々な微視的不安定性が駆動する乱流揺動に起因するものと考えられている。本論文では、波・粒子相互作用や有限ラーマー半径効果等の運動論的效果を正確に取り扱うため、イオン・ジャイロ運動論的方程式に基づき、トロイダル系プラズマにおけるイオン異常熱輸送をもたらす原因とみられるイオン温度勾配不安定性（ITG）モードに関する理論的研究を行っている。これまでLHDに代表されるヘリカル系プラズマにおけるITGモードの特性は十分知られておらず、申請者は、簡単な局所近似を用いた解析から出発し、直線ヘリカル配位、トロイダル・ヘリカル配位へと順々に系統的に解析を発展させ、ITGモードに対する運動論的效果や複雑なヘリカル磁場配位の影響を明らかにした。

局所近似では、線形ITGモードの初期値問題を初めて正確に解き、揺動ポテンシャルの時間発展が、分散関係から決定される周波数と成長率を持つノーマル・モード（離散スペクトルを持つ）と時間のベキ乗で減衰するコンティニューム・モード（連続スペクトルを持つ）の和で表されるという興味深い結果を得た。

直線ヘリカル配位及びトロイダル・ヘリカル配位では、バルーニング表示を用いて、積分固有モード方程式を数値的に解くことにより、ITGモードの成長率・周波数・空間分布構造（固有関数）を求めた。直線ヘリカル配位における計算では、ヘリカル・リップルのトロイダル周期数  $M$  を増加させていくと、固有関数の磁力線方向振動の波長が減少し、成長率が減少していくことを見いだした。これは、 $M$  の増加とともに、良・悪曲率領域間の結合長が減少するため、固有関数が歪められ、良曲率領域の安定化をより強く受けるとともに、局所近似でも確認された磁力線方向波長によるランダウ減衰効果の増大によるものと理解された。また、 $M \gg 1$  の直線ヘリカル配位では、ITGモードが不安定となるための臨界温度勾配が非常に大きくなることも確かめられた。

トロイダル・ヘリカル配位では、直線ヘリカル配位よりも小さな温度勾配でもITGモードが不安定となることを示した。これは、トロイダル・ヘリカル両リップルが存在すると、大きな磁力線方向波長を持つ不安定モード構造が現れることによる。しかし、トカマク配位との詳細な比較を行うことにより、ヘリカル・リップルが良曲率領域の安定化効果を増すため、トロイダル・ヘリカル配位の方がトカマク配位に比べ、不安定ITGモードの成長率が減少し、臨界温度勾配は高くなるという結果を得た。また、積分方程式においても解析接続を正確に行うことにより、正・負両方の成長率と正確な臨界安定条件を計算している。さらに、具体的なLHD実験の平衡パラメーターを用いて計算を行い、ITGモードが不安定となり得ることを示し、より広いパラメーター領域での解析から、ITGモードに対する回転変換・磁気シア・リップル強度・密度-温度勾配・ポロイダル波長・磁力線ラベル等の効果を明らかにした。

以上のように、本論文は、ITGモードの運動論的解析を、基礎的な段階から物理的理解を深めながら系統的かつ詳細に行い、ヘリカル系におけるITGモードの特性を解明した。よって、博士論文としての価値を十分に有し、合格であると判断する。