

氏 名 相羽 信行

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 842 号

学位授与の日付 平成 17 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Theory and Computational Method for the Stability
Analysis of External MHD Modes in Toroidal Plasmas

論文審査員 主査 助教授 藤堂 泰
教授 岡本 正雄
助教授 市口 勝治
助教授 渡邊 清政
主任研究員 徳田 伸二（日本原子力研究所）
教授 吉田 善章（東京大学）

論文内容の要旨

The theory and analytical model for the stability analysis of magnetohydrodynamic (MHD) modes based on the two-dimensional Newcomb equation are extended for the analysis of external MHD modes both with low- n and with high- n toroidal mode numbers. In this model, since the appropriate weight function and the boundary conditions at rational surfaces are introduced to solve the eigenvalue problem associated with the Newcomb equation, the spectrum of this eigenvalue problem contains only discrete eigenvalues. This feature enables us to reveal explicitly whether plasma is stable or unstable.

In this dissertation, the analytical model is first applied to the development of a new method that analyzes the stability of a low- n external MHD mode in a matrix form, and hence this new method is called the stability matrix method. A numerical code (MARG2D-SM) is developed according to the stability matrix method, and the validity of the code is confirmed by several benchmark tests. The code clarifies the spectral structure of $n=1$ ideal external kink modes, which are stable or unstable. The spectral gaps induced by the poloidal coupling are also investigated. The stability matrix method reveals the effect of *stable* ideal internal modes (fixed boundary modes) on the stability of ideal external modes (free boundary modes). With this effect, the mode structure of an ideal external mode changes from a surface mode structure to a global mode structure as a beta value increases, and an external mode destabilizes when an internal mode approaches to their marginal stability; a beta value is a ratio of the plasma pressure to the magnetic pressure. This effect explains how a safety factor profile in the core region of high beta tokamak plasma affects the stability of an ideal external mode.

The model based on the Newcomb equation has an advantage that the marginal stability can be identified only with a short computation time. Such an advantage is demonstrated to be powerful in the study on the aspect ratio dependence of the $n=1$ ideal external MHD mode stability.

For high- n external MHD modes, the analytical method based on the Newcomb equation is extended in the vacuum region; the vacuum energy integral is calculated by using the vector potential method. The MARG2D code, which solves numerically the eigenvalue problem associated with the two-dimensional Newcomb equation, is adapted to this new model, and the validity of this extension is confirmed by benchmark tests. This extended MARG2D code is developed as a parallel computing code, and enables the fast stability analysis of high- n modes like a peeling mode, an edge ballooning mode, and a couple of them called a peeling-ballooning mode.

論文の審査結果の要旨

MHD(Magnetohydrodynamics, 磁気流体力学)理論はプラズマの巨視的挙動を記述するものである。核融合プラズマ保持の長時間化および磁気圧に対するプラズマ圧力比の高性能化に伴い、抵抗性壁モードや周辺局在化モードなどの外部 MHD モードに関する正確かつ迅速な解析が求められている。外部 MHD モードはプラズマ-真空境界におけるプラズマ変位が重要な不安定性である。

Newcomb 方程式はプラズマ変位による MHD ポテンシャルエネルギーに関する Euler 方程式である。Newcomb 方程式を磁気有理面における適切な重みづけとともに随伴固有値問題に拡張し、その固有値の正負によって安定性を判定する解析手法が S. Tokuda により提案されている。この手法は臨界安定状態近傍における正確かつ迅速な安定性解析を可能にするものである。ERATO などの既存のコードによる MHD 安定性解析は、アルヴェン連続スペクトルの存在により臨界安定状態近傍における正確な解析が難しく、かつ近似的にもその臨界点を求めるためには長時間計算が必要である。

本論文は、随伴固有値問題による解析手法を発展させ、境界でのプラズマ変位を用いて解析する安定性行列法及び真空領域をプラズマ領域と同等の方程式で記述して解析するベクトルポテンシャル法について、理論定式化並びにコード開発を行い、トロイダルプラズマにおける外部 MHD モード安定性を解析した。安定性行列法は低トロイダルモード数の外部モード解析に適した手法であり、外部モードに対する内部モードの効果の解明に有効である。ベクトルポテンシャル法は高トロイダルモード数外部モードを高い精度で解析することができる。

本論文で解明された主な外部 MHD モードの課題を以下に挙げる。

1. 安定性行列法を用いた解析により、有限アスペクト比に起因するギャップが安定スペクトルに存在し、プラズマ圧力が高いほどギャップ幅が広がることが示された。
2. 内部 MHD モードが臨界安定状態に近い条件下における、外部モードに対する内部モードの影響を、安定性行列法を用いて数値的及び解析的に明らかにした。この条件下においては、外部モードも内部モードと同様の大域的構造を持つため、プラズマ中心領域における安全係数分布が外部モード安定性に影響を与える。
3. 外部 MHD モードに対するアスペクト比の効果も、安定性行列法を用いて解析し、トロイダルモード数 1 の外部モードがアスペクト比を小さくすると安定化されることを解明した。
4. ベクトルポテンシャル法を用いて高トロイダルモード数外部モードを解析し、ピーリングモードと周辺バルーニングモードと呼ばれる 2 種類の外部モードが結合した構造が現れることを示した。

本論文において開発された解析コード MARG2D は MPI (Message Passing Interface) と ScaLAPACK ライブラリを用いて並列計算機に最適化されている。高トロイダルモード数外部モード安定性解析において、128 プロセッサを用いた場合でも 2 プロセッサを用いた場合と比較して 50%以上の十分な計算効率が保たれていることが確認されている。この結果は将来の核融合プラズマ実験における抵抗性壁モードの実時間解析を期待させるものである。

以上のように、本論文は核融合研究の中心課題の一つである MHD 安定性に関して高度な理論定式化と先端的な計算コード開発を行い、精密な解析によってその物理的理解を深めた。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。