

氏 名 KHAN Riaz

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 984 号

学位授与の日付 平成 18 年 9 月 29 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 Simulation study on nonlinear dynamics of ballooning  
modes in a spherical tokamak

論文審査委員 主 査 助教授 藤堂 泰  
教授 中島 徳嘉  
教授 岡村 昇一  
助教授 三浦 英昭  
教授 花田 和明（九州大学）

## Abstract

The ballooning mode is a magnetohydrodynamic (MHD) instability that is excited in finite beta plasmas. The energy source of the ballooning mode originates from the pressure gradient in a locally unfavorable magnetic curvature region, typically, in the outboard of the torus. The proximity of the measured edge pressure gradient in H-mode to the critical gradient for ideal ballooning instability has led to the proposal that these instabilities might have a role in triggering edge localized modes (ELMs). New nonlinear theoretical models describe ELMs in terms of filaments that erupt from the plasma. This is supported by strong experimental evidence from the MAST tokamak [Kirk, PRL 92, 245002 (2004)] that the ELM does indeed exhibit a mode structure predicted by the nonlinear ballooning mode theory. This thesis presents the nonlinear dynamics of the ballooning mode and its relation with ELMs by means of numerical simulations in spherical tokamak (ST) devices in the framework of MHD model and the drift model. Our simulation reproduces the characteristic features of ELM crash phase.

The nonlinear simulations using MHD model are executed in a three dimensional full toroidal geometry. The initial MHD equilibrium for the simulation is given as an axisymmetric numerical MHD equilibrium, which is obtained by solving the Grad-Shafranov equation on the poloidal cross-section. The profiles are selected to be moderately broad in the core region following the conventional experiments. During the linear analysis, the intermediate- $n$  modes (i.e.,  $n = 5-9$ ) have larger growth rates than others, where  $n$  is the toroidal mode number. It is shown that these intermediate- $n$  modes have a ballooning mode nature in that the mode structures are poloidally localized in the bad curvature region, and have a wide envelope consisting of several poloidal components. In the nonlinear phase, the MHD ballooning modes evolve into a nonlinear structure that results in the formation of a number of hot plasma filaments, elongated along a magnetic field line, but localized about it. These filaments extend out into the scrape-off layer on the outboard side but remain connected back into the pedestal region on the inboard side. This filamentary structure is correspondent to the convection motion of the plasma flows, which forms a twin-vortex flow pattern in such a way that the plasma moves in outward direction, pushing the core plasma from inside to outside of the torus. When the balloon structure is initially formed at the plasma surface, the magnetic

field lines on both sides of the separatrix are pushed against each other by such perpendicular flows due to the spouting-out and the perfect conductor conserving the poloidal flux. Under this situation, the reconnection of the field lines can effectively occur by the driven reconnection mechanism. Once such reconnection occurs, the plasma rapidly flows out through the reconnected field lines due to the parallel pressure gradient, leading to the filamentary structure. After the internal free energy is partially lost by such convective processes, the system ceases to develop and reaches a relaxed state. These results are compared qualitatively with the experimental observation of the ELMs in MAST and NSTX experiments. Good agreement is found in the following characteristics formation of filaments separating from the core, non-uniform growth of filaments due to toroidal mode coupling, time scale of ELM crash, triggering by the ideal ballooning mode, presence of intermediate- $n$  precursors and loss of plasma through convective process.

Moreover the finite Larmor radius (FLR) effect is also addressed using the simplified drift model, where the ion diamagnetic drift effect is included in the advection term of the equation of motion. This modification has been found to suppress the higher- $n$  components linearly, since the mode growth is suppressed by the sheared rotation flows. However, it has been also found that the filament separation from the core can take place universally for FLR as well as the MHD case.

## 論文審査結果の要旨

本論文は球状トカマクにおけるバルーニングモードの非線形発展を計算機シミュレーションによって研究し、その結果を実験で観測される Edge Localized Mode (ELM) と比較したものである。バルーニングモードは環状プラズマの圧力勾配に起因する磁気流体(MHD)不安定性である。核融合プラズマでは H モードと呼ばれる閉じ込め改善状態への遷移現象が観測されている。ELM は H モードにおいて周辺プラズマ領域で間欠的に発生する、熱と粒子がプラズマ外部へ排出される現象である。ELM はプラズマ閉じ込めを劣化させるが、一方でその不純物制御への利用が検討されている。ELM は核融合プラズマの重要な研究課題であり、その物理機構の解明が待たれている。

本論文では、球状トカマク MAST の実験観測を対象としたシミュレーション結果が報告されている。シミュレーションに用いられた物理モデルは標準的な MHD モデルとそれにイオン反磁性ドリフト流の効果を加えた簡約ドリフトモデルである。本論文は、第 1 章と第 2 章で研究の背景とシミュレーションモデルについてそれぞれ説明し、第 3 章で標準 MHD モデルに基づく以下のシミュレーション結果を報告している。

1. 複数の不安定性モードが成長し、線形成長段階においてはトロイダルモード数 5-9 のモードが最も不安定である。これらの不安定モードが理想バルーニングモードであることを、悪い磁場曲率領域に局在する揺動分布の解析、不安定性成長率の電気抵抗依存性が弱いことの検証、およびエネルギー原理に基づく不安定性駆動項の解析によって確認した。
2. 非線形段階においては、成長した複数の不安定モードの非線形結合によって、磁力線に沿った数本のフィラメントが形成される。このフィラメントはプラズマ本体の上部および底部とつながったまま、悪い磁場曲率領域でプラズマ本体から分離する。
3. プラズマ本体から分離したフィラメント中の磁力線は、プラズマ外部の開いた磁力線と再結合する。その結果、フィラメントに含まれていた熱と粒子がプラズマ外部へ損失する。

第 4 章では簡約ドリフトモデルを用いたシミュレーション結果が報告されている。仮想的にイオン反磁性ドリフト流の効果を変化させてシミュレーションの妥当性を確認している。また、解析に用いたプラズマパラメータでは、標準 MHD シミュレーション結果との違いは小さく、標準 MHD モデルを使用することの妥当性が示されている。第 3 章と第 4 章では、重要なシミュレーションデータが明瞭に可視化されており、シミュレーション結果の理解を深める上で役立っている。第 5 章ではシミュレーション結果と球状トカマクで観測される ELM の比較がなされている。本論文で述べられたシミュレーション結果は、フィラメントの形成、中トロイダルモード数の前兆現象、対流的なプラズマ輸送とその時間スケール、などの実験で観測された ELM の特徴とよく一致している。第 6 章は全体のまとめにあてられている。

シミュレーション結果と実験結果の定性的な一致は、本研究によって解明された、バルーニングモードの非線形結合によるフィラメント形成と磁気再結合による熱・粒子損失が、ELM の有力な物理機構であることを示唆している。本論文は核融合研究の重要課題の一つであるバルーニングモードの非線形発展に関して、計算機シミュレーションと可視化によ

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、合格であると判定する。