

氏 名 齋藤 欣也

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1482 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 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 Interaction between Static Magnetic Islands and
Interchange Modes in Heliotron Plasmas

論文審査委員 主 査 教授 洲鎌 英雄
教授 市口 勝治
教授 渡邊 清政
教授 佐野 史道 京都大学
准教授 古川 勝 東京大学

論文内容の要旨

In the magnetic confinement of the fusion plasmas, a lot of efforts are paid to the control of the plasma behavior by means of static magnetic islands generated by an external magnetic field in these days. Thus, in this study, the nonlinear interaction between the static magnetic islands and the resistive interchange mode driven by a pressure gradient is analyzed in straight heliotron configurations by means of a numerical method based on the reduced magnetohydrodynamics (MHD) equations. Particularly, the interaction between the $(m,n)=(1,1)$ static island and the interchange mode with the same mode number is studied, where m and n are the poloidal and the toroidal mode numbers, respectively. The perturbations are assumed to have a single helicity for the investigation of the basic mechanism. For the comprehensive understanding of the interaction, two aspects of the interaction are studied by utilizing different MHD equilibria. One is the effect of the interchange mode on the change of the static island. The other is the effect of the static island on the growth of the interchange mode.

The former interaction aspect is studied with an equilibrium corresponding to nested magnetic surfaces. In this case, the static magnetic island is incorporated by setting a finite external poloidal flux at the plasma boundary. In the time evolution of the plasma, the interchange mode grows as in the case without the static magnetic islands. The island width is changed due to the nonlinear saturation of the interchange mode. The situation of the increase or decrease of the width depends on whether the diffusion of the equilibrium pressure in the direction parallel to the magnetic field is taken into account or not. In the case without of the diffusion of the equilibrium pressure, there exist two solutions corresponding to the increase and the decrease of the island width. In this case, in spite of the nonlinear interaction, the total poloidal flux is approximately given by the linear sum of the poloidal flux generated by the interchange mode without a static island and the external poloidal flux for the generation of the static island. Therefore, the island width is increased when the phase of these poloidal fluxes is the same, and the width is decreased when the phase is opposite. In the case with the diffusion of the equilibrium pressure, there exists only one solution corresponding to the increase of the width. This is due to the fact the parallel diffusion generates an inhomogeneous pressure term corresponding to the increase of the island width.

For the study of the latter interaction aspect, equilibria including static magnetic islands are necessary because the equilibrium pressure profile consistent with the magnetic islands affects the stability of the interchange mode. We have developed a numerical code (FLEC) to calculate the equilibria. The numerical scheme is composed of two steps. In the first step, the pressure which is constant along the magnetic field line is solved with the poloidal magnetic flux fixed. In the second step, the poloidal

magnetic flux which satisfies the force balance equation consistent with the reduced MHD equations is solved with the pressure fixed. These two steps are iterated until the island width is converged. The calculation with the code gives two kinds of equilibrium solutions. One is the equilibrium of which the pressure profile is flat at not only the O-point but also the X-point. In this case, the pressure gradient is continuous at the separatrix of the magnetic island. The other is the equilibrium of which the pressure profile is flat at the O-point and steep at the X-point. In this case, the pressure gradient is discontinuous at the separatrix. The finite beta has a contribution to increase the island width. The effect of the pressure diffusion perpendicular to the field line on the equilibrium with the flat structure at both O- and X-points is also examined. As the perpendicular diffusion is increased, the pressure gradient at the X-point is increased. At a sufficient large diffusion, a pressure profile with a steep gradient at the X-point and a flat region at the O-point is also obtained.

The latter interaction aspect is studied with these equilibria including the static islands. Since it is already known that the pressure profile with annular local flat structure around the resonant surface have a stabilizing contribution to the interchange mode, the effects of the static island on the interchange mode are studied for the equilibrium with the flat pressure profile at the O-point and the steep pressure gradient at the X-point. It is obtained that such structure of the pressure profile has a stabilizing contribution. The linear growth rate of the interchange mode is decreased and the nonlinear saturation level is reduced as the island width is increased. The mode is completely stabilized when the island width exceeds a threshold value. The threshold width is almost the same as the half width of the stream function in the unstable mode obtained without a static island, which is larger than that in the case with the annular flat region in the pressure profile. In the case that interchange modes are unstable in the equilibrium with the island width less than the threshold value, there are two cases of the increase and the decrease of the island width in the nonlinear saturation of interchange modes as obtained in the study for the former interaction aspect.

As a result, the present study makes the mechanism of the change of the static island width due to the nonlinear evolution of the interchange mode and the stabilization of the interchange mode due to the static island clear. This knowledge contributes to the future control of the stability and the confinement of the plasma with the external resonant magnetic perturbations in the heliotron devices.

博士論文の審査結果の要旨

近年、核融合研究において外部摂動磁場を用いたプラズマ閉じ込めの制御が大きな注目を集めている。国際熱核融合実験炉 (ITER) においては、摂動磁場を積極的に利用して圧力勾配制御を行うことが検討されており、また大型ヘリカル装置 (LHD) でも、外部から印加された摂動磁場によって静的磁気島を生成し、その挙動を調べる実験が精力的に行われている。プラズマ安定性に対する摂動磁場の影響を調べるため、本論文では、直線ヘリオトロン配位における静的磁気島と交換型モードの非線型相互作用が簡約化電磁流体力学的 (MHD) 方程式に基づいて数値的に解析された。交換型モードは、ヘリオトロンプラズマにおいて危険な不安定性の一つであるため、以前から研究が進められてきた経緯がある。しかし、静的磁気島と同時に存在し得るにもかかわらず、両者の相互作用については系統的な理論研究はなされてこなかった。本論文では、交換型モードと磁気島の相互作用の定量的な評価が可能なシミュレーション手法が開発された。この手法を2種類のMHD平衡に対して適用し、対象とする平衡によって異なる相互作用が引き起こされることを明らかにした。

一つは、静的磁気島が既に存在しているMHD平衡下の交換型モードの成長及び非線型飽和に対する解析である。この解析のために、磁気島を含んだ簡約化MHD方程式に対応する平衡を計算する数値計算コードを独自に開発している。このコードを用いて、磁気島内部では平坦であるがX点では有限の圧力勾配が存在する平衡解が存在することを明確に示し、有限ベータ効果により磁気島幅が増大することを新たに見出した。さらに、非線型MHD発展コードNORMに独自の改良を加え、磁気島を含む平衡下での交換型モードの成長及び非線型飽和を世界で初めて解析する手法を開発した。その手法を用いて、磁気島幅が増加するにつれて交換型モードの線形成長率が減少し、磁気島幅がある閾値を超えると完全に安定化できることを示した。この安定化の閾値は、0点で定義される磁気島幅を基準にとると、磁気島を考慮しない円環状圧力分布下での平坦化幅の安定化閾値に比べ、3倍程度広くなければならないことを明らかにした。また、完全に安定化されない場合においても、磁気島の存在によって揺動の非線型飽和レベルが低減することも明らかにした。LHD実験でも、外部摂動磁場を変化させずにプラズマを放電させた場合は、摂動磁場の増大に伴って交換型モードの揺動強度の低減が観測されており、本研究は、実験で観測された外部摂動磁場による不安定モードの安定化機構をシミュレーションによって解明し、安定化に必要な摂動磁場強度の定量的評価を可能にした。

もう一つは、磁気島のない交換型モードが不安定な平衡に対して外部から静的磁気島が印加された場合の交換型モードの非線形飽和に関する解析である。この場合、平坦部のない圧力分布を持つ平衡に静的磁気島と摂動を同時に与え、その時間発展を追跡している。その結果、磁気島が印加されても交換型モードは不安定であり、非線形飽和時には磁気島幅が真空時の予測幅より増加することが示された。この磁気島幅の増加には圧力の磁力線方向の拡散効果が重要であることが明らかにされており、この拡散効果を無視した場合には、磁気島幅が増加する場合だけでなく減少する場合も存在することも示された。LHD 実験では、ベータ値の急激な減少と真空の予測値よりも磁気島が増加する現象も観測されており、本成果を用いて、この磁気島増加現象を交換型モードが静的磁気島に与える効果として説明できることを提案した。

以上より、本研究は、静的磁気島及び交換型モードの相互作用に対する理解を促進し、外部摂動磁場を用いたプラズマ不安定性の制御に大いに貢献するものであると判断される。よって、本審査委員会は本論文が博士学位論文に値するものであると判定した。