



Title	ヘリオトロンプラズマにおける抵抗性交換型不安定性と磁気島との相互作用に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	上田, 亮介
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11569号
Issue Date	2014-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/57209
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Ryosuke_Ueda_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 上田 亮介

学 位 論 文 題 名

ヘリオトロンプラズマにおける抵抗性交換型不安定性と磁気島との相互作用に関する研究
(Interaction between resistive interchange instability and magnetic island in heliotron plasma)

経済的な核融合炉の実現には、プラズマ圧力と磁気圧の比、すなわちベータ値を高くする必要がある。プラズマは磁力線によって形成される磁気面を入れ子状構造にすることで閉じ込める。高ベータ化に伴いプラズマ圧力およびその勾配が増加するため、圧力勾配を駆動力源とする不安定性が現れ、閉じ込め性能を低下させる。特に有理面と呼ばれる磁気面では不安定性が励起しやすく、この面を挟んでプラズマが入れ替わるように不安定性が成長する(交換型不安定性)。プラズマが抵抗率を有する場合は磁場が持つ安定化効果が弱まるため、より不安定になりやすい(抵抗性交換型不安定性)。また、抵抗率があると磁力線の再結合が起こり、磁気島と呼ばれる磁場構造が生じ得る。この磁気島が磁気面構造を乱すため、閉じ込め性能が劣化する可能性がある。一方で、磁気島は局所的ではあるが小半径方向の圧力勾配を平坦化させるため不安定度を弱める面もあり、磁気島が閉じ込め性能に及ぼす影響は単純ではない。

ヘリオトロンプラズマ型実験装置の代表である大型ヘリカル装置 (LHD、核融合研究所) では核融合炉相当の高ベータ値を達成している。LHD 実験では、抵抗性交換型不安定性由来と考えられる長波長の磁場揺動が観測されており、磁気島と不安定性との相互作用についての理解は閉じ込め性能の向上にむけて重要な意義を持つ。本研究では不安定性が磁気島形成に及ぼす影響と、磁気島が不安定性に与える影響を明らかにすることを目的とした。

本論文の第 1 章では、ヘリオトロンプラズマ型装置のプラズマで問題となる抵抗性交換型不安定性に関する研究背景と先行研究成果について述べるとともに、本研究の目的と概要を述べた。

第 2 章では、不安定性が磁気島形成に及ぼす影響についての研究成果を述べた。LHD 実験では、計測精度の向上により様々なベータ値や抵抗率の値に対する計測データが広範に集まっており、多数の実験結果に対する系統的な理論解釈が必要である。磁気島形成に関しては、従来、非線形解析が行われてきたが、数値計算に多大な計算資源が必要なため、このような広範なパラメータ領域の解析には適さない。そこで本研究では、磁気島形成に対する線形解析手法を考案した。

非圧縮、低ベータプラズマを仮定した簡約化方程式系を線形化し、抵抗性交換型不安定性の長波長成分のみを対象とした固有値解析を行った。不安定性の成長率を示す固有値と、圧力、径方向変位、径方向磁場などの揺動分布を示す固有関数を得た。本研究で用いた手法では複数の固有値、固有関数が得られる。成長率の最も高い第 1 固有関数だけでなく、これまで注目されずにいた 2 番目に成長率が高い第 2 固有関数についても解析した。

交換型不安定性の第 1、第 2 固有関数を解析した結果、それぞれの径方向磁場の径方向分布は有理面を挟んで奇構造、偶構造となる揺動分布を持つことを見出した。これまで交換型不安定性では、径方向磁場の径方向分布は奇構造となるが故に、大きな磁気島を形成しないと考えられていた。これに対し著者は、偶構造を持つ第 2 固有関数は第 1 固有関数と比べて成長率に大差がなく、交換型不安定性が大きな磁気島を形成し得ることを初めて示した。著者は新たに、磁気島幅の 2

乗と径方向変位との比で表される独創的な特性指標「アイランド指標」を考案した。磁気島幅と径方向変位という異なる物理量を組み合わせることで、非線形解析によらない磁気島形成の解析を可能とした。これにより、幅広い範囲のベータ値や抵抗率の値で、抵抗性交換型不安定性の第2固有関数が大きな磁気島を形成する可能性があることを明らかにした。

第3章では、磁気島が不安定性に与える影響を調べるため、既存の解析手法の改良と安定性解析を行った。ここでは磁気島に起因する平衡状態の圧力分布や磁場配位の3次元構造が不安定性の揺動分布構造を歪める効果を考慮するため、3次元安定性解析手法を用いた。現在広く用いられている固有値問題型の安定性解析手法では、入れ子状の磁気面を仮定している。この仮定は磁気島の存在と矛盾するため、本研究ではこの仮定を用いない3次元実座標系に基づく平衡計算コードを用いた。さらに2次以上の摂動量を見捨てる線形近似を施した時間発展型手法を選択した。時間発展型手法の初期摂動分布の与え方を改良し、特定の波長を持つ不安定性の解析を可能とした。これらの手法を用いてLHDにおける磁気島を持つ平衡に対する安定性解析の結果、磁気島が圧力勾配を局所的に平坦化し、小半径方向の圧力勾配の平均値が減少している場合でも、外部コイルにより印加した磁気島はLHD実験で観測された長波長成分を持つ不安定性の成長率やその揺動構造にほとんど影響を与えないことを明らかにした。

第4章では、不安定性が磁気島形成に及ぼす影響と、磁気島が不安定性に与える影響を総括し、磁気島と交換型不安定性の相互作用について結言を述べた。

以上を要約すれば、これまで小さな磁気島しか形成しないと考えられてきた抵抗性交換型不安定性の第2固有関数が大きな磁気島を形成し得ることを明らかにした。新たに磁気島形成に関する特性指標を考案することで、LHD実験での磁気島幅を幅広いパラメータ領域において推定可能とした。外部コイルによって印加された磁気島はLHD実験で観測された不安定性の長波長成分にほとんど影響を与えないことを明らかにした。