

氏 名	佐 藤 雅 彦
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第69号
学位授与の日付	平成15年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学専攻
学位論文題目	Nonlinear MHD Phenomena of Cylindrical Tokamaks (円柱トカマクの非線形MHD現象)

論文調査委員	(主査) 教授 前川 孝	教授 近藤 克己	助教授 浜口 智志
--------	-----------------	----------	-----------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、トカマク型核融合プラズマの電磁流体力学(MHD)的安定性の観点から、近年大きな問題となっている、ダブルテアリングモード(DTM)、抵抗性壁モード(RWM)、および新古典テアリングモード(NTM)の3種類の不安定性に関して、その非線形時間発展を数値シミュレーションにより解析し、これらの不安定性と、トカマクにおけるプラズマ配位の関連を研究した成果をまとめたもので、6章からなっている。

第1章は序論で、定常核融合炉を実現するためには、電磁流体力学(MHD)不安定性を抑制することが重要であること、そして、本論文で研究を行った、ダブルテアリングモード(DTM)、抵抗性壁モード(RWM)、および新古典テアリングモード(NTM)が近年のトカマク実験で問題でありその安定化が重要であることを指摘している。

第2章はシミュレーションで用いる簡約化MHD方程式の導出について述べている。ここでは、プラズマの一流体近似であるMHD方程式を出発点とし、高アスペクト比等の近似のもとで、トカマクを記述するのに適した簡約化されたモデル方程式が導出される。この方程式が、第3章以下の数値シミュレーションで用いられる。

第3章は負磁気シア配位におけるダブルテアリングモードの非線形シミュレーションの結果を述べている。本論文では、 $(m, n)=(3, 1), (2, 1), (1, 1)$ モードに対してそれぞれ計算を行っている。ここで、 m はポロイダルモード数、 n はトロイダルモード数である。 $(m, n)=(3, 1)$ モードに対して、2つの共鳴面が十分に離れた平衡配位で非線形シミュレーションを行うと、磁気島同士の混合は見られず、それぞれの共鳴面上で磁気島が独立に飽和する状態が得られる。しかし、2つの共鳴面間の距離を小さくしていくと、磁気島の混合が起り、外側の共鳴面よりも内側全体の領域で磁力線再結合がおきするというフルリコネクションが生ずることが見出された。また、安全係数の最小値 q_{min} 付近が平坦であるような安全係数分布であると、フルリコネクションが起りやすいことを明らかにした。更に、 $(m, n)=(3, 1)$ モードよりも $(m, n)=(2, 1)$ モードの方がフルリコネクションを起こしやすいことも明らかにした。

第4章は抵抗性壁モードの非線形シミュレーションの結果について述べられている。これまでの理論的研究により、プラズマに回転を与えることで、抵抗性壁モードを安定化させることが可能であることが知られているが、これまでの理論的研究は線形理論によるものであった。本論文によりプラズマにポロイダル回転を与えたときの、抵抗性壁モードの非線形発展の様子を新たに明らかにした。抵抗壁がプラズマ表面に十分近いときは、ポロイダル回転のために抵抗性壁モードの線形成長率が小さく抑えられるが、非線形領域では、抵抗性壁モードがより不安定化され、成長率が大きくなる現象が計算機シミュレーションにより見出された。更に、その揺動レベルは、初期平衡で回転がなかったときと、ほぼ同じ飽和レベルになることも観測された。これはモードの共鳴面近傍においてマックスウェル応力が大きく働くことで、共鳴面上では、ポロイダル速度がほとんどなくなってしまうからであることを見出した。一方、抵抗壁をある程度プラズマ表面から離れた場合で計算を行うと、初期平衡のポロイダル回転を大きくしておけば、非線形領域でもポロイダル回転はあまり減速されず、揺動レベルの飽和値が著しく減少し、ポロイダル回転による安定化効果が非線形領域でもみられることを見出した。

第5章は新古典テアリングモードの非線形シミュレーションの結果について述べられている。これまでの新古典テアリングモードの研究は、通常のテアリングモードの非線形理論であるラザフォード理論に、ブートストラップ電流の補正項を加えた式を用いて解析されてきた。それによれば、新古典テアリングモードが成長するためには、ある大きさ以上の磁気島が必要であり、線形では安定であると認識されていた。しかし、本研究において、ベータ値が大きく、磁力線に平行方向の輸送係数が大きいときは、線形不安定になることが新たに分かった。さらに、非線形シミュレーションを行うと、この線形不安定な新古典テアリングモードは、線形成長を経て運動エネルギーの摂動成分が飽和し、ラザフォード領域に入ると、より不安定化されるのが特徴であることがわかった。この線形不安定なモードが現れるということは、ベータが大きく、磁力線に平行方向の輸送係数が大きいときは、新古典テアリングモードが不安定になるために必要な磁気島の閾値が、修正されたラザフォード方程式で記述できないことを示している。

第6章は結論で、本論文で行ったDTM, RWM, NTMの非線形シミュレーションによる結果の要約が総合的な観点から書かれている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、トカマク型核融合プラズマに関する電磁流体力学(MHD)の安定性の観点から、近年大きな問題となっている、ダブルテアリングモード、抵抗性壁モード、および新古典テアリングモードの3種類の不安定性に関して、その非線形時間発展を数値シミュレーションにより解析し、これらの不安定性とトカマクにおけるプラズマ平衡配位との関係を研究した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1) 負磁気シアトカマクで、安全係数 q の極小値 $q_{\min}$ が $0.9 < q_{\min} < 3$ をみたす場合において、 $(m, n) = (3, 1), (2, 1)$, および $(1, 1)$ のモード数を持つダブルテアリングモード(DTM)の線形成長率と二つの共鳴面間の距離、および磁気レイノルズ数 S の間の関係を明らかにした。更に、非線形シミュレーションによりDTMの非線形発展を追跡し、モード数 m が小さいほどより間隔の離れた共鳴面の間で磁束のフルリコネクションが起こることを見出した。

2) プラズマにポロイダル方向の剛体回転を与えた場合の抵抗性壁モード(RWM)の非線形シミュレーションを行った。抵抗壁がプラズマ表面に近すぎるときは、初期の線形成長率は低く抑えられるが、 $(2, 1)$ モードの発達とともにその共鳴面近傍においてプラズマのポロイダル回転が大きな制動を受け、その結果RWMは、初期にプラズマに剛体回転を与えなかった場合とほぼ同じ飽和レベルになることを見出した。一方、抵抗壁をある程度プラズマ表面から離れた場合は非線形領域でもポロイダル回転はあまり減速されず、磁気揺動の飽和レベルを低く抑え得ることを見出した。

3) トカマクプラズマの低衝突領域においてはブートストラップ電流により駆動される新古典テアリングモード(NTM)が不安定化する危険性がある。従来は、古典テアリングモード不安定性による初期磁気島が存在しない限りNTMの不安定化が起こらないと信じられていたが、ポロイダルベータ値が高く磁力線に平行方向の熱伝導係数が大きい場合には初期磁気島が無くてもNTMが不安定となることを見出した。更に、この場合のNTMは、線形成長の領域を経てラザフォード領域に入るとより不安定化されることを見出した。

これらの研究は、現代の大型トカマク放電において最も危険なMHD不安定性の理解を深め、また、その制御の方向性を示したものであり、核融合物理学およびエネルギー科学分野に大きく貢献するものである。よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年2月20日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。