

氏 名	やま ぎし おさむ 山 岸 統
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第74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	Linear Analyses of Ideal and Kinetic Pressure-Driven Instabilities in Helical Plasmas (ヘリカルプラズマにおける理想および運動論的圧力駆動型不安定性の線形解析)
論文調査委員	(主査) 教授 近藤克己 教授 佐野史道 教授 前川 孝

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、幾何形状が軸対称でないヘリカル系プラズマの圧力駆動型不安定性を、理想電磁流体力学(MHD)および運動論的MHDの観点から解析する手法を確立し、この不安定性が起こる物理的メカニズムと非軸対称性が及ぼす影響を解明することを目的とし、WKB近似による局所線形安定性解析とエネルギー原理に基づく三次元MHD安定性大域的解析コードによる数値解析を行った結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、研究の背景と目的を論じた後、第2章から第5章までの構成についてまとめている。ここではまず、ヘリカル系プラズマの理想圧力駆動型不安定性とそれに対する運動論的効果について紹介し、とくに局所安定性解析と大域的安定性解析、交換型不安定性とバルーニング不安定性との関係について論じている。さらに、本論文の研究で基礎となるMHD平衡と安定性に関する一般的性質が簡潔に紹介され、以降の章での議論の準備となっている。

第2章では、ヘリカル系プラズマにおける理想MHD安定性の局所解析の結果がまとめられている。最初に解析で用いる理想バルーニングモード方程式を、WKB近似(バルーニング表示)を用いて導出している。この方程式は磁力線方向一次元の常微分方程式であり、これを用いれば、三次元の複雑な形状を持つプラズマの圧力駆動型不安定性を一次元の固有値問題として局所的に解析することができる。ここでは、ヘリオトロンJ、LHDおよびCHS-qaの各装置のMHD平衡プラズマを例として実際の数値解析を行い、それぞれのプラズマの圧力駆動型不安定性の特徴を比較している。特に、ヘリカル系プラズマではトカマクのような軸対称プラズマでは存在しない非軸対称性の強いバルーニングモード(特定の磁束管に局在したバルーニングモード)が存在することを示し、その不安定性の物理機構が示されている。

第3章では、安全係数と磁気シアを変化させたヘリオトロンJプラズマのMHD平衡に対して局所安定性解析を行い、非軸対称性の強いバルーニングモードの安定性を調べている。その結果、安全係数を高くし、より深い磁気井戸を形成するとともに、安全係数の径方向微分が負となるように磁気シアを制御するとバルーニングモードを安定化できることを示している。また、この安定化のメカニズムの物理モデルを提示している。

第4章では、LHDおよびヘリオトロンJにおける理想圧力駆動型不安定性の大域的特性を、三次元MHD安定性グローバル解析コードCAS3Dによる大規模数値解析から論じている。最初にCAS3Dコードで用いられている物理的・数値的解析手法について説明している。次にLHDに対する計算から、計算で用いる摂動フーリエモードを適切に選択することの重要性を示すとともに、交換型不安定摂動の大域的なモード構造と性質について議論している。また、ヘリオトロンJに対しては非軸対称性の強いバルーニングモード不安定性の大域的性質を調べており、この不安定モードの摂動はトカマクにおけるバルーニングモードの構造とは異なり、特定の磁束管に局在し、磁力線に沿って広がった分布をしていることを示した。また、固有摂動の径方向構造、磁気面上でのモード構造、プラズマのポテンシャルエネルギーへの寄与に対して詳細な考察を行っている。さらに、局所安定性解析とグローバル安定性解析のそれぞれの結果の詳細な比較を行い、これらに強い相関があることを示し、バルーニングモード方程式による近似的解析手法の妥当性を裏付けている。

第5章では、圧力駆動型理想 MHD 安定性に対する運動論的效果について、ジャイロ運動論方程式から得られる運動論的バルーニングモード方程式を用いて局所解析した結果について論じている。とくにイオンのジャイロ半径が有限であることに起因する安定化効果（有限ラーマ半径効果）は短波長の摂動に対して強く効き、一方流体の圧縮性効果は長波長摂動の安定化に効果があるため、トロイダルモード数が20程度の波長を持つ摂動が一番危険となる可能性があることを示している。また、トカマクに対する解析結果との比較から、LHD プラズマでは、圧縮性による長波長摂動の安定化効果がトカマクよりも強いことが示される。これらの結果は、LHD 実験で得られた高ベータプラズマが、交換型不安定性の理想 MHD 安定限界ベータを超えていることと矛盾しない。

第6章では、得られた結果のまとめと今後の展望を述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、幾何形状が軸対称でないヘリカル系プラズマの圧力駆動型不安定性を、理想電磁流体力学（MHD）および運動論的 MHD の観点から解析する手法を確立し、この不安定性が起こる物理的メカニズムと非軸対称性が及ぼす影響を解明することを目的とし、WKB 近似による局所線形安定性解析とエネルギー原理に基づく三次元 MHD 安定性大域的解析コードによる数値解析を行った結果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) ヘリカル系プラズマに対し、磁力線方向一次元の理想 MHD 局所解析を行い、トカマクプラズマでは発生しない特定の磁束管のみに局在する圧力駆動型不安定モードの存在を示した。とくに本論文では、磁力線の局所的な捩れによる安定化因子と磁力線曲率による不安定化因子を詳細に調べることにより、この不安定モードが発生する物理的メカニズムを初めて明らかにした。
- (2) 上記の知見を活用し磁力線の回転変換とその捩れ（磁気シア）を制御することにより、特定の磁束管に局在する不安定モードを安定化できることを理論的に示し、その安定化機構を明らかにした。
- (3) 三次元 MHD 不安定性の大規模数値解析を行い、局所解析で予想された不安定モードが実際に大域的構造を持って存在することを示すとともに、局所解析と大域的解析の結果には密接な関係があることを世界で初めて示した。この結果は、ヘリカル系プラズマでは近似の妥当性に問題がある可能性が指摘されていた局所解析の有用性を示す非常に重要な結果と考えられる。
- (4) 運動論的效果を取り入れた局所解析により、理想 MHD モードに対する運動論的效果の影響を論じた。その結果、イオンのジャイロ半径が有限であることによる運動論的效果と圧縮性効果が、非軸対称性の強い不安定モードに大きな影響を与えることを初めて定量的に明らかにした。

以上のように、本論文は圧力駆動型不安定性の発生機構の一次元局所解析による解明と安定化のための方策の提案、三次元大域的解析による局所解析の有用性の裏付け、圧力駆動型不安定性に対する運動論的效果の定量的解析を理論的側面から行ったもので、これらの結果は、ヘリカル系プラズマの安定限界を調べ、より優れた先進的なプラズマ閉じ込め配位を研究していく上で重要かつ有用なものであると考えられ、学術上、エネルギー科学分野に大きく貢献する。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。