

氏 名	なが さき かず のぶ 長 崎 百 伸
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 1243 号
学位授与の日付	平成 4 年 5 月 23 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	工学研究科電気工学第二専攻
学位論文題目	トロイダルプラズマにおける閉じ込め磁場構造及び磁気島の制御に関する理論的研究

論文調査委員 (主 査) 教授 大引得弘 教授 若谷誠宏 教授 板谷良平

論 文 内 容 の 要 旨

磁場によるプラズマ閉じ込め方式であるトカマクやヘリカル系装置を核融合炉として用いるには依然として多くの課題が残されているが、重要な物理課題として閉じ込め磁場配位の最適化や磁気島の抑制・制御がある。

本論文は、トーラス形状の磁気閉じ込め配位、特にヘリカル系に重点をおいて、磁気面の性質及び周辺領域の磁場構造とプラズマ分布について理論解析を行い、外部磁場によるプラズマ中の磁気島の制御性についてその解析結果をまとめたもので全 6 章より成っている。

第 1 章は緒論で、磁気閉じ込め配位に関する今までの研究を概観し、閉じ込め配位の評価が広い展望をもって行えていないこと、周辺領域における磁場分布やプラズマ分布を評価をすることはコアプラズマの閉じ込め改善に重要であること、そして外部制御に対するプラズマの応答性に関する研究の必要性を指摘している。

第 2 章では、ヘリカル系の真空磁場をトロイダル調和関数を用いて広範囲なパラメーターサーベイを行い、磁気面の取り得る範囲を調べている。一般にヘリカルコイルを仮定してピオ・サバル則で行う磁気面計算は計算時間がかかるが、この手法を用いると計算時間は短縮され、磁気面の広範囲なパラメーターサーベイが可能である。そこで、 $l=2$ ヘリカル系における磁気面の評価量がトロイダル磁場、垂直磁場、トロイダルピッチ数にどの様な依存性をもつのか詳細に調べている。最外殻磁気面によって囲まれる面積と回転変換は同時に最適化することはできないので、新しい評価関数を導入して磁気面の最適な配位を求めている。

第 3 章では、モデル磁場を用いてヘリカル系とトカマク周辺磁場の微細構造を調べている。構造を評価する際に、磁力線が壁に到達するまでに進む距離を接続長として定義する。接続長は最外殻磁気面 (OMS) の外側では有限な値となり、OMS から離れるにつれて急激に減少し、この減少傾向が対数的であることを見出ししている。そしてストカスティック領域における接続長を定式化している。また、トロイダル磁

場、垂直磁場、トロイダルピッチ数に対する依存性を調べている。ダイバータトカマクにおいても同様の計算を行い、SOL領域の接続長の分布を調べたところ、この場合も対数的性質があることを確認している。そして、セパトリス近傍の有理面に共鳴する摂動磁場を加えてSOL領域をストカスティックにしてもその性質は変わらないことを見い出している。これは種々の条件下のオペレーションにおいてダイバータ機能が働く理論的根拠の一つと考えられる。この接続長の解析結果を踏まえ、流体モデルを用いてヘリカル系のSOL領域でのプラズマの分布について解析を行っている。OMSでの温度や、SOL領域内の熱の流れる幅について入力パワーに対する依存性が得られ、SOL領域内のOMSに隣接する薄い層でコアプラズマから流出するパワーの大半がダイバータ板へ向かうことを見い出している。また、簡単なモデルを用いてリミターを挿入した場合のプラズマの分布について解析を行っている。その結果、熱伝導係数やパワーの大きさ、リミターの大きさ等で決まるある特徴的な長さの領域に熱の多くが集中することを見い出している。

第4章では、外部磁場によるプラズマ中の磁気島の制御について検討している。磁気島を消去しようとする場合、有理面に形成される電流分布、及びプラズマの流れは磁気島の影響を受ける。減衰過程は成長過程よりもゆっくりと発展し、非線形項が重要な役割を果たしておらず、時間発展の遅れが磁気島によるものであることを見い出している。磁気島のセパトリスX点での電流の時間発展を見ると成長過程の場合よりも、その値が抑制されている。磁気レイノルズ数を上げると、一般に成長過程では電流値は増大し、電流層の幅は狭くなるが、減衰過程では電流値は磁気レイノルズ数に依存しない一定の値に飽和し、電流層の幅もある値以上には狭くならないことを示している。

第5章では、制御する磁気島の近傍に隣接する磁気島の効果について解析している。成長過程では、隣接磁気島が近いと非線形相互作用によって2次磁気島が形成され、電流層は磁場の空間構造の影響を受ける。そして、隣接磁気島が近いほど制御する磁気島の時間発展が遅くなること、非線形項が単一磁気島のときほど重要でなくなることを見い出している。減衰過程の場合には、磁場はストカスティックになっており電流層が形成されるかどうかに興味あるところであるが、単一磁気島の場合とやや異なるものの電流層の形成が見られている。

第6章では、総括として以上の結果を要約した上で、本研究の将来への展望について述べている。

論文審査の結果の要旨

磁場によるプラズマ閉じ込め方式であるトカマクやヘリカル系装置の重要な物理課題として閉じ込め磁場配位の最適化や磁気島の抑制・制御があり、本論文は、トーラス形状の磁気閉じ込め配位、特にヘリカル系に重点をおいて、磁気面の性質及び周辺領域の磁場構造とプラズマ分布についての理論解析、及び、外部磁場によるプラズマ中の磁気島の制御性についての理論解析を行っており、得られた主な成果は以下の通りである。

1. ヘリカル系の真空磁場をトロイダル調和関数を用いて記述し、広範囲なパラメータサーベイを行って磁気面の存在し得る範囲とその特性を調べた。この手法を用いると計算時間は短縮され、磁気面の広範囲なパラメータサーベイが可能となった。 $l = 2$ ヘリカル系における磁気面の特性と磁気面量がトロ

イダル磁場，垂直磁場，トロイダルピッチ数にどのような依存性をもつのか詳細に調べた。また，プラズマ閉じ込め性能を知るために，新しい評価関数を導入して最適な磁気面の磁場配位を求めた。

2. モデル磁場を用いてヘリカル系とトカマクの周辺磁場の微細構造を調べた。磁力線の接続長は最外殻磁気面 (OMS) の外側では有限な値をとり，OMS から離れるにつれて急激に減少し，この減少傾向が対数的であることを見い出し，ストカスティック領域における接続長を定式化した。また，トロイダル磁場，垂直磁場，トロイダルピッチ数に対する依存性を調べた。この接続長の解析結果を踏まえ，流体モデルを用いてヘリカル系の SOL 領域でのプラズマの温度及び熱の分布について解析を行った。また，簡単なモデルを用いてリミターを挿入した場合のプラズマの温度及び熱の分布について解析を行った。

3. 外部磁場によるプラズマ中の磁気島の制御について検討した。磁気島の減衰過程は成長過程よりもゆっくりと時間発展することを示した。磁気島自身の形状が時間発展に重要であり，非線形項は成長過程の場合のように重要な役割を果たしていないことを見出した。この結果，磁気島が外部から制御できる見通しが得られた。

4. 制御する磁気島の近傍に隣接する磁気島の効果について数値シミュレーションを行った。成長過程では，隣接磁気島が近いほど制御する磁気島の時間発展が遅くなることを示した。これは，非線形相互作用によって電流層が磁場の空間構造の影響を受けたためであることを見出した。減衰過程の場合には，単一磁気島の場合とやや異なるものの電流層の形成が見られた。

以上，本論文は磁気面の性質及び周辺領域の磁場構造とプラズマ分布について理論解析を行い，また，外部磁場によるプラズマ中の磁気島の制御性について数値シミュレーションを行ったものであって，その成果は学術上，実際上貢献するところが少なくない。よって，京都大学博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。

また，平成 4 年 3 月 13 日，論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果，合格と認めた。