

氏 名 山口 太樹

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 929 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 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 磁気計測による 3 次元配位の MHD 平衡量同定

論文審査委員 主 査 教授 山田 弘司
助教授 渡邊 清政
教授 川端 一男
教授 中島 徳嘉
研究主席 三浦 幸俊（日本原子力研究
開発機構）

論文内容の要旨

核融合を目指して、高温プラズマを磁場で閉じ込める実験では、プラズマ中に流れる電流、蓄積エネルギー、 β 値（プラズマと磁場の圧力比）といったプラズマの磁気流体力学 (Magnetohydrodynamics:MHD) 上の平衡量を同定する為に磁気計測器が広く用いられている。軸対称磁場を持つトカマク装置においては磁気面形状、トロイダル電流分布、磁気軸位置、最外殻磁気面の位置といった詳細な平衡分布の同定手法が確立しており不安定性研究、輸送研究、平衡制御に活用され、不安定回避や閉じ込め改善に大きな役割を果たしている。対称性の破れた3次元磁場配位を特徴としてヘリカル装置においても、MHD 平衡量同定の精度向上と高度化によって各種パラメータの到達値の更新、飛躍的な安定性や輸送研究の進展に繋がる事が容易に想像できる。

本論文はヘリカル装置において磁気計測器による平衡量同定の高度化を目指した研究についての研究成果を記述している。従来、ヘリカル装置における磁気計測器による平衡同定の研究は

- ・ 等方圧力
- ・ 無電流（またはトロイダル電流分布を仮定）
- ・ きれいに閉じた入れ子状の磁気面

を仮定した手法を用いていた。しかし実験では高エネルギー粒子による非等方圧力、複雑なトロイダル電流分布、高 β における磁気面の乱れが予想される。本論文ではこれらを考慮することにより、同定する平衡量の高精度化や、従来計測が困難であった平衡量の同定を行う「平衡量同定手法の高度化」の確立を目的としている。具体的には前述の3項目に対応して

- ・ 圧力非等方度の同定
- ・ 大きな正味トロイダル電流がある場合の磁気計測の精度向上
- ・ 有限 β 効果による磁気面の乱れを考慮した平衡計算を用いた磁気計測の精度向上

の3項目について取り組んでいる。

磁気計測器信号から平衡量を同定する際には3次元 MHD 平衡解析コードと、その結果から磁気計測器信号を評価する磁気計測器信号解析コードが必要である。従来、磁気計測器による平衡同定の研究には3次元 MHD 平衡解析コード(自由境界 VMEC)と磁気計測器信号解析コード(DIAGNO)が用いられてきた。自由境界 VMEC は等方圧力、及びきれいに閉じた入れ子状の磁気面を仮定しており、DIAGNO は磁気ポテンシャルの構築を通してプラズマ外の磁束を評価するコードで、トロイダル電流が磁気計測器に与える影響をフィラメント近似している。本論文において「圧力非等方度の同定」に関して、自由境界 VMEC と DIAGNO、中性粒子入射による高エネルギー粒子の速度緩和評価コード FIT による同定手法を提案している。「大きな正味トロイダル電流がある場合の磁気計測の精度向上」、

「有限 β 効果による磁気面の乱れを考慮した平衡計算を用いた磁気計測の精度向上」に関しては本研究において新規開発した JDIA コードと平衡コードを組み合わせた手法を用いている。JDIA は平衡コードによって得られたプラズマ中の電流 (Pfirsch-Shulüter (PS) 電流, 反磁性電流, トロイダル電流) から磁気計測器信号を直接評価するコードである。さらにこのコードと磁気面の存在を仮定しない 3 次元 MHD 平衡コード HINT との組み合わせを行っている。これによって磁気面の乱れを考慮できるとともに、トロイダル電流分布が磁気計測器に与える影響を精度良く評価できる。この JDIA は将来的に、現在海外の理論研究者と共同開発中の“非等方圧力を取り扱うことのできる固定境界 VMEC”との組み合わせも可能なものである。

以下に、本論文の骨子となる 3 項目の平衡量同定の高度化について述べる。

1) 圧力非等方度の同定

反磁性電流は磁力線に垂直方向の圧力 (P_{\perp}) に依存し、PS 電流は磁力線に垂直、平行の両方向の圧力 ($P_{\parallel}+P_{\perp}$) に依存する。この 2 種類の電流を独立に計測できれば原理的には圧力非等方度に関する情報を得ることが出来る。環状プラズマのポロイダル断面を囲む反磁性ループは反磁性電流に敏感であり、プラズマの上下に設けたサドルループは PS 電流に敏感である。単純には (サドルループ磁束 / 反磁性ループ磁束) が $(P_{\parallel}+P_{\perp})/P_{\perp}$ の情報を含むが、圧力非等方度に関係ない情報も含んでいる。等方圧力を仮定した平衡コード自由境界 VMEC と DIAGNO による解析によれば、反磁性ループ磁束は β 値に対して線形の関係であり、また圧力分布に鈍感である。一方、サドルループは β 値に対して非線形の関係であり、また圧力分布に敏感である。この特性の違いは (サドルループ磁束 / 反磁性ループ磁束) の中に圧力非等方度に関係ない情報として取り込まれている。これらの効果を補正し、“圧力非等方度のみに依存する指標”を抽出する為に、実験で計測された電子温度分布、電子密度分布、及び自由境界 VMEC と DIAGNO を用いる手法 (FIT と組み合わせはじめて非等方同定法となるのでその記述が必要) を提案している。本手法の妥当性を示す為に中性粒子ビーム加熱による高エネルギー粒子圧力の数値計算コードとの比較検証を行った。また磁気計測より抽出した“圧力非等方度のみに依存する指標”から非等方度 W_{\parallel}/W_{\perp} を同定する為の較正係数の導出を行った。これにより磁気計測による圧力非等方度の定量評価を可能とした。本手法の平衡研究への適用結果として、圧力非等方度が LHD の磁気軸などの平衡に及ぼす影響について評価することに成功した。

2) 大きな正味トロイダル電流がある場合の反磁性計測の精度向上

閉じ込め磁場が回転変換を持つことにより正味のトロイダル成分をもつプラズマ電流はポロイダル方向成分を持ち、トロイダル磁束を生成する。大きなトロイダル電流が発生する実験においては反磁性ループによる蓄積エネルギー、 β 値計測の精度を高めるためにはこの磁束を正確に評価する必要がある。自由境界 VMEC と JDIA、及び MSE (Motional Stark Effect) 計測から得られるトロイ

ダル電流分布を基に反磁性ループ磁束に含まれるトロイダル電流の寄与を精度良く補正する手法を提案している。本手法の妥当性の検証として高エネルギー粒子圧力，熱化圧力の変化量が小さくトロイダル電流の変化が大きい実験に本手法を適用し、実験で観測された反磁性ループ磁束の振る舞いを再現した。

3) 乱れた磁気面を考慮した平衡コードを用いた平衡量同定精度向上

従来、入れ子状の磁気面を仮定した自由境界 VMEC と DIAGNO が磁気計測器による平衡量同定に用いられてきたが、平衡量同定精度向上を目的として、乱れた磁気面を考慮した平衡コード HINT と JDIA を新手法として提案している。新旧手法の比較の結果、反磁性ループにおける磁束の差は約 5 % と小さいがサドルループにおける差は約 30 % と大きな差が示された。サドルループの新旧手法による磁束と実験で得られたサドルループ磁束を比較し、新手法に近い結果となり平衡量同定，及び平衡再構築に向けた新手法の妥当性を示した。

論文の審査結果の要旨

山口太樹君の論文は3次元環状磁場閉じ込めプラズマにおける磁気計測器を用いた MHD 平衡量の同定手法の高度化に関するものである。高温プラズマ実験において MHD 平衡量の同定は、その物理特性を理解するうえで基礎となる重要課題である。特に、プラズマ形状がトロイダル角毎に異なる断面形状をもつ3次元プラズマにおいては、精度の高い議論には簡便な解析は許されず、緻密な手法が要求される。

出願者はプラズマの外部に設置されたコイルによる磁気計測と3次元 MHD 平衡および磁場計算を組み合わせることによって、圧力非等方度の定量化、および MHD 平衡量へ磁気面の乱れとトロイダルプラズマ電流の常磁性が及ぼす効果について論じている。磁気計測器は MHD 平衡量、特に空間構造を積分したスカラー量を求める際、大きな威力を発揮する。これを用いた MHD 平衡に関わる物理量の測定は核融合研究の黎明期から多くの研究成果が積み重ねられてきた。しかし、出願者が取り組んだ上記の課題は3次元 MHD 平衡計算の通常の仮定を越えた扱いを必要とし、精密な議論が十分になされていなかった。

出願者は、上記の課題に対して精度の高い平衡量同定手法の提案とその実証を行った。内容は新しい知見を拓くものである。その具体的な成果は以下に挙げられる。

- (1) 3次元配位を対象として入れ子状の磁気面の存在を前提としない MHD 平衡コード(HINT)に基づく磁気計測器の新しい較正手法を考案した。磁気面の乱れをも扱うことのできる3次元 MHD 平衡コード自体は既存のもの応用であるが、この計算結果と磁気計測信号とを連結させる磁気計測解析コード JDIA は出願者の独自の開発によるものである。大型ヘリカル装置(LHD)で得られた体積平均ベータ値が 1%前後の放電に対して、この手法を適用し、得られた MHD 平衡が磁気面の存在を仮定した解析よりも電子圧力分布計測結果をよりよく説明できることを示した。
- (2) 磁気計測と平衡・磁場コード計算だけで議論を閉じさせることなく、トロイダル電流と回転変換の分布や電子温度・密度分布等の実験データ、高速イオンの速度分布緩和評価コードによる解析との組み合わせおよび比較を行った。これらに基づいて圧力の非等方度と正味トロイダル電流の反磁性測定への影響について精細な評価方法を提案した。
- (3) この手法を用いて LHD で得られた高温プラズマを対象とした実験解析を行った。正味トロイダル電流を持つプラズマにおける反磁性ベータ値の補正に適用し、計測精度を高めた。電流 100kA/T 当たり体積平均ベータ値として約 0.7%に相当する誤差を解消させることを示した。さらに中性粒子入射加熱によって磁力線方向の高速イオンが存在する条件における圧力非等方度の定量評価を進めた。シャフラノフシフトと圧力非等方度の関係を調べ、磁力線に平行方向の圧力成分がシャフラノフシフトに強い影響を与えることを実験的に示すと共に、平行方向の圧力とシャフラノフシフトの定量的な関係式を導出した。

これらは、3次元環状磁場閉じ込めプラズマの MHD 平衡および高速イオンに関するモデル構築と磁気計測以外の分布計測情報が十分ではなかったため、これまで定量的な検証が進んでいなかった研究対象である。本論文で論じられた成果は、MHD 平衡量評価の高度化に寄与するものと評価できる。さらに出願者が開発した磁気計測器信号解析コード JDIA は MHD 平衡計算が与えるプラズマ中の電流から直接磁気計測器が検出すべき磁束を評価できる。このため、汎用性が高く、本論文で利用した MHD 平衡コード以外への応用も容易であり、今後開発が望まれる圧

力非等方度やプラズマ流の効果を考慮したより高度な MHD 平衡コードと組み合わせた応用も期待される。

これらにより、審査委員会は提出論文が博士論文としての十分な価値があると認め、合格であると判断した。