

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	トカマク型核融合炉内磁性体壁を考慮した磁気計測補正法に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	小林孝行
Author(English)	Takayuki Kobayashi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11513号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:飯尾 俊二,小栗 慶之,林崎 規託,長谷川 純,筒井 広明
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11513号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

## 研究論文の概要

トカマク型装置においてプラズマの制御や平衡解析を行う上で必要不可欠な磁気計測は原型炉以降、放射線によるノイズや劣化からの保護のため、磁性体ブランケットの外側に設置させる必要があり、このことは位置・形状制御を困難にさせる。本研究では、磁性体を作る磁場構造を「磁化面電流」が作っているとみなし、プラズマの電流分布と同時に推定することによりプラズマの位置・形状を推定した。従来法と比べ、比透磁率は未知でよい場合、非線形磁場環境においても使用できる。本研究の成果として、軸対称の非線形磁場環境における一定の形状をしたモデルにおいて、位置に依存して線形に変化する、あるいは定数であるような単純な関数形を持つ面電流密度分布を仮定することで、面電流密度分布の推定に基づくプラズマの位置・形状の評価が可能であることを明らかにした。

第1章（序論）では、核融合炉についての概要に触れつつ、本研究で対象としている磁性体環境下における磁気計測が必要となる理由について概説した。トカマク型のプラズマにおいて炉心プラズマの制御や平衡解析を行う上で、磁気計測に基づく炉心プラズマの位置・断面形状の推定は必要不可欠なものであり、原型炉以降においてもこの使用は避けられない。しかし、絶縁用セラミックスへの中性子照射によりセンサに生じるノイズや絶縁劣化等の問題から、炉心プラズマに直接対向する場所ではなく、遮蔽材の外側にセンサを設置しなければならない。他方、炉内構造物の支持材として工業的生産性と大型構造への適用の観点から低放射化フェライト鋼の F82H などが使用の候補となっており、磁気計測のセンサがプラズマとの間に磁性材を挟む構造となるため、非線形かつ履歴現象をともなう磁性体の特性から磁気計測による実時間でのプラズマの位置・形状制御は困難になる。過去の研究として、多くのトカマク型核融合炉において2テスラ以上のトロイダル磁場に伴う磁性体の飽和現象を利用して、磁性体の計測器への影響を補正する研究はなされていたが、検討されているトカマク型核融合炉の中には球状トカマクのように磁性体が飽和しない程度の背景磁場となるものも存在するため、飽和しない磁性体に対しても有効な補正方法が必要となる。本研究はこのような背景のもと、磁性飽和を前提としないプラズマの位置・断面形状推定の補正方法を提案し、その効果について検証することを目的とした。

第2章（トカマクプラズマの計測・制御）では、まずトカマク型の装置で主に用いられる計測器について、その測定手法と計測される物理量について概説し、そののちに磁気計測からプラズマ位置・断面形状の推定を行う手法と、磁性体環境下においてその補正を行う方法について詳述した。磁性体はその外部に作る磁場は、外部に限ってその磁場を考える場合には、磁性体表面に磁化電流が流れているとすることで再構成することも可能である。また、原型炉において設置される磁性材を含む炉内構造物は、ブランケットの支持構造として用いられるため、離散的ではあるが非常に近接して回転対称形に近く設置される。このためこ

これらの磁性体は軸対称に設置されるものとして扱える可能性がある。これらのことを合わせると、磁性体を作る磁場構造は、巨視的に見て軸対称の「磁化面電流」が作っているとみなすことが可能となる。本研究では磁化面電流密度としていくつかの関数形を仮定するため、そのための面電流密度分布の離散化表現方法および推定手法について詳述した。

第3章（2次元軸対称系での線形モデル磁性体における数値的検証）では提案する手法の効果を、まず磁性体が一定の比透磁率を持つモデルを利用して検証した。トカマク型核融合炉を単純化して模擬した軸対称モデルによる有限要素法を用いて、磁性体が外部の電流寄与によって作る磁場、およびプラズマの位置・形状推定の補正に扱う値である「磁化面電流密度分布」を解析した。解析によって得られた磁場の分布を用いて、一般的なトカマク型のプラズマの磁気計測において用いられる磁束や磁束密度といった物理量を、計測器位置における模擬的な計測値として作成した。磁気計測によって得られる値は、磁性体のない環境であれば、トカマク型プラズマにおいてプラズマの解析手法の一つとして用いられてきたフィラメント電流近似法によって逆問題として解かれ、その位置・形状が推定されるが、磁性体環境下においては従来の手法では正しく解くことができない。このため、この補正を行う手段として従来の方法では扱われない物理量である磁化面電流密度分布を同時に推定し、位置形状を推定した。磁性体について扱う従来の方法としては、磁性体の持つ比透磁率を境界条件として用いることで、磁化面電流密度を計算し推定する手法があるが、この方法は比透磁率が一定かつ既知の値であることが条件となる。このため、磁性体環境下の位置・形状推定手法の検討においてはまず、比透磁率が一定である環境で有限要素法による解析を行い、それぞれの手法を用いて推定した値を比較し、提案手法においても従来の磁性体を扱う手法と同様に推定が可能であることを明らかにした。

第4章（2次元軸対称系での非線形モデル磁性体における数値的検証）では、第3章で一定の比透磁率を持つモデルについて行った検討を、比透磁率が非線形に変化するモデル上において同様に行った。原型炉などで使用が検討される F82H の非線形な比透磁率を数式でモデル化し、非線形磁場環境における有限要素法解析を行った。この解析による疑似計測値を用いて、一般的な境界条件を用いた推定と、磁化面電流密度を推定する手法とで比較を行い、提案方法においてのみ推定が可能であることを示し、本研究の有効性を確認した。さらに、トカマク型核融合炉を単純化して模擬した軸対称モデルを変化させ、同様に推定が有効であることを検証した。

第5章（結論）では、以上の検討から、軸対称の非線形磁場環境における一定の形状をしたモデルにおいて、位置に依存して線形に変化する、あるいは定数であるような単純な関数形を持つ面電流密度分布を仮定することで、面電流密度分布の推定に伴うプラズマの位置・形状の推定が可能であることを明らかにしたと総括し、結論とした。