

大型ヘリカル装置における 新古典輸送データベースの構築と解析

学位論文内容の要旨

トラス型磁場閉じ込め核融合方式では、トカマク型とヘリカル型が主流となっている。トカマク型に比べ、ヘリカル型の核融合装置はプラズマ内部電流を必要とせず、定常運転が可能という利点がある。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(Large Helical Device: LHD)は世界最大のヘリカル型核融合装置であり、2本のヘリカルコイルと位置制御用の複数の垂直磁場コイルを持ち、コイル電流の調整により比較的自由にプラズマの位置形状を変えることができる。

プラズマ中の荷電粒子は磁力線を中心とした回転運動を行っており、この過程でクーロン衝突が起これば「古典拡散」と呼ばれる回転運動の半径分の拡散が生じる。さらに磁力線に沿った粒子の運動は磁場の強弱によって反射される周期運動となり、この過程で生じる拡散は「新古典拡散」と呼ばれる。またこの粒子軌道とクーロン2体衝突だけで説明できない、より大きな拡散を「異常拡散」と呼ぶ。LHDの磁場は、トラス性に起因する磁場の強弱(リップル)の他に、ヘリカルコイルによるヘリカルリップル成分があり、これらの磁場成分によって捕捉された粒子が新古典拡散を起こす。特にLHDでは、温度の高い低衝突周波数領域で、ヘリカルリップルに捕捉された粒子が新古典拡散を増大させる。この捕捉粒子が引き起こす拡散係数の増加は、衝突周波数 ν に反比例するため($1/\nu$ 領域)、高温プラズマにおいては新古典拡散が異常拡散程度まで大きくなり、核融合プラズマの閉じ込め性能を劣化させる原因となる。そのためヘリカル型核融合炉の検討には、新古典輸送の正確な把握が不可欠となる。一方で、プラズマの磁気軸の位置が粒子閉じこめ特性やプラズマの平衡・安定性を大きく左右する。本論文では、LHDで実験が為されている磁気軸位置 $R_{axis}=3.75\text{m}$ の標準配位と磁気軸位置 $R_{axis}=3.60\text{m}$ の内寄せ配位を中心に、様々な磁場配位について新古典輸送解析し、実験との比較を行なった。

本研究では、モンテカルロ法を利用して、粒子のドリフト方程式を解くことで粒子軌道を追跡し、拡散係数を計算するコード「DCOM」を開発した。DCOMは単一エネルギー粒子のピッチ角散乱による局所的な拡散係数を算出する。これまで、実験データ解析や新古典輸送の理論解析には、線形化されたフォッカープランク方程式を数値的に解くDKESコードが使用されてきた。しかし、DKESコードは、低衝突周波数領域で磁場のフーリエモード数が増加すると計算が収束しないという問題があった。本研究で開発したDCOM

では収束性の問題が存在しないため、DKES では不可能だった低衝突周波数領域での拡散や、より高い次数の磁場のフーリエモードを考慮しての拡散係数の計算が可能になった。プラズマ中に径方向電場がある場合について DCOM を用いて計算した結果、標準配位、内寄せ配位ともに電場の印可に伴い、 $1/\nu$ 領域で拡散係数が減少することを確認した。これは DKES の結果とも良く一致しており、DCOM の計算結果の信頼性を確認した。

プラズマ中に径方向電場のない場合について、DCOM を用いて拡散係数を計算した。その結果、 $1/\nu$ 領域において、標準配位に比べ、内寄せ磁場配位では粒子閉じこめの改善がみられた。この原因は、ヘリカルリップルの強度を示すパラメータ ε_{eff} の減少にあることを示した。解析的近似解で算出された ε_{eff} に比べ、標準配位では DCOM で算出した ε_{eff} が大きく、内寄せ配位では逆に小さくなることを示した。また、内寄せ配位では $1/\nu$ 領域だけでなく、衝突周波数がより高いプラトー領域でも拡散係数が減少していることを示した。これは磁場のヘリカルリップルとトーラス性の複合成分が、内寄せ配位で減少するためであることを明らかにした。

DCOM で算出される拡散係数は単一エネルギー粒子のものであり、粒子輸送係数、熱輸送係数等を評価する場合には熱粒子のエネルギー分布に関して積分を行う必要である。また、多数の粒子を長時間追跡するため、DCOM による計算時間が膨大となる。LHD の新古典輸送係数は、多くのパラメータの関数であり、また、衝突周波数の大きさにより、 $1/\nu$ 領域、プラトー領域等、性質が大きく異なるため、非線形性が極めて強い。そこで本研究では、LHD の標準磁場配位、内寄せ磁場配位それぞれについて、衝突周波数 ν 、径方向電場 E_r 、小半径位置 ρ を入力、拡散係数 D を出力とする、中間層 1 層の階層型ニューラルネットワーク (NNW) を利用した輸送係数内挿コードを開発し、LHD の新古典輸送係数のデータベース化を図った。従来なされていた、衝突周波数領域に応じて用意した解析的近似解の内挿または単純な線形補間などの手法では十分な精度が得られないのに対し、NNW データベースから出力される拡散係数の誤差は DCOM 計算結果の統計誤差とほぼ同等の平均 6% 程度であり、大きな問題とはならない。完成した NNW データベースは、衝突周波数によって決まる各領域間の拡散係数を適切に内挿していることを確認した。

上記のデータベースを利用することで、任意の ν 、 E_r 、 ρ に関して拡散係数 D を即座に得ることが可能になった。本研究では、このデータベースを利用した、両極性電場や粒子束、熱伝導度を算出するコードを開発した。このコードを用いて、LHD の実験結果の新古典輸送解析を行った。その結果、プラズマ中心部における径電場については、実験結果と良い一致が見られること、また、周辺部における径電場は、新古典輸送だけでは、説明できないことを明らかにした。

以上を要約すると、本研究では、モンテカルロ法を用いた拡散係数計算コード DCOM、NNW を利用してデータベースを構築するコード、このデータベースを利用して各種の新古典輸送係数を算出するコードを開発した。これらのコードの活用により、任意の条件に対する様々な新古典輸送係数を瞬時にかつ高精度で算出することが可能になり、実験結果との比較検討が容易となった。またこれらのコードを用いた解析により LHD における新古典輸送の重要性を明らかにした。これらの成果は LHD をはじめとするヘリカル型核融合装置における研究に大きく寄与する。

学位論文審査の要旨

主査	教授	板垣正文
副査	教授	榎戸武揚
副査	教授	日野友明
副査	助教授	村上定義 (京都大学)
副査	助教授	及川俊一

学位論文題名

大型ヘリカル装置における 新古典輸送データベースの構築と解析

トーラス型磁場閉じ込め核融合方式として主流となっているトカマク型に比べ、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD: Large Helical Device)に代表されるヘリカル型核融合装置はプラズマ内部電流を必要とせず、定常運転が可能という利点がある。プラズマの閉じ込めを阻害する荷電粒子の拡散現象は、クーロン 2 体衝突による「古典拡散」、古典拡散にトーラス性による磁場の強弱の影響を加えた「新古典拡散」、さらにこれらでは説明できない、より大きな「異常拡散」に分類される。ヘリカル型装置では、トーラス性による磁場の強弱にヘリカルコイルによる磁場強弱(ヘリカルリップル成分)が加わる。このヘリカルリップル成分によって捕捉された粒子が新古典拡散の増大を引き起こすため、新古典輸送の正確な把握はヘリカル型装置では特に重要となる。

著者は、上記の拡散係数の増加が衝突周波数 ν に反比例($1/\nu$ 領域)するため、高温プラズマの新古典拡散は異常拡散程度まで大きくなること等に着目し、詳細な解析を行った。そのため、粒子のドリフト運動方程式をモンテカルロ法で解いて粒子軌道を追跡して拡散係数を計算するコードDCOMを新たに開発した。DCOMは単一エネルギー粒子のピッチ角散乱による局所的な拡散係数を算出する。これまで、実験データ解析や新古典輸送の理論解析には、線形化されたフォッカープランク方程式を数值的に解くDKESコードが使用されてきたが、低衝突周波数領域で磁場のフーリエモード数が増加すると計算が収束しないという問題があった。DCOMでは収束性の問題が存在せず、DKESでは不可能だった低衝突周波数領域での拡散や、より高い次数の磁場のフーリエモードを考慮した拡散係数の計算が可能となった。

LHDのプラズマは、磁気軸の位置が粒子閉じ込め特性やプラズマの平衡・安定性を大きく左右する。著者は、LHDで実験されている磁気軸位置 $R_{\text{axis}}=3.75\text{m}$ の標準磁場配位と磁気軸位置 $R_{\text{axis}}=3.60\text{m}$ の内寄せ磁場配位を中心に、様々な磁場配位について新古典輸送解析を行い、実験と比較した。まず、プラズマ中に径方向電場がある場合についてDCOM

を用いて計算し、標準配位、内寄せ配位ともに電場の印加に伴い、 $1/\nu$ 領域で拡散係数が減少することを確認した。これは DKES の結果とも良く一致しており、DCOM の計算結果の信頼性を確認した。

さらに著者は、プラズマ中に径方向電場のない場合について、DCOM を用いて拡散係数を計算した。その結果、 $1/\nu$ 領域において、標準磁場配位に比べ、内寄せ磁場配位では粒子閉じ込めの改善を確認した。この原因は、ヘリカルリップルの強度を示すパラメータである実効的ヘリカルリップルの減少にあることを示した。標準磁場配位では DCOM で算出した実効的ヘリカルリップルが大きく、内寄せ配位では逆に小さくなることを示した。また、内寄せ配位では $1/\nu$ 領域だけでなく、衝突周波数がより高いプラトー領域でも拡散係数が減少していることを示した。これには、トーラス性とヘリカル性の二つを併せ持つ磁場のフーリエモード成分が寄与していることを明らかにした。

DCOM で算出される拡散係数は単一エネルギー粒子のものであり、粒子拡散係数、熱拡散係数等を評価する場合にはプラズマの速度分布に関して積分を行なう必要がある。また、多数の粒子を長時間追跡するため、DCOM は膨大な計算時間を要する。LHD の新古典輸送係数は多くのパラメータを持つ関数であり、また衝突周波数の大きさにより $1/\nu$ 領域、プラトー領域等、性質が大きく異なるため、非線形性が極めて強い。そこで著者は、LHD の標準磁場配位と内寄せ磁場配位について、衝突周波数、径方向電場、小半径位置を入力とし、拡散係数を出力とする、中間層 1 層の階層型ニューラルネットワークを利用した輸送係数内挿コードを開発し、新古典輸送係数のデータベース化を図った。従来の衝突周波数領域に応じた解析的近似解の内挿または単純な線形補間などの手法では十分な精度が得られないのに対し、ニューラルネットワーク・データベースから出力される拡散係数の誤差は DCOM 計算結果の統計誤差とほぼ同等の平均 6% 程度である。完成したニューラルネットワーク・データベースは、衝突周波数によって決まる各領域間の拡散係数を適切に内挿していることを確認した。

すなわち、上記データベースにより任意の衝突周波数、径方向電場、小半径位置を入力するのみで拡散係数を即座に得ることを可能とさせた。さらに、このデータベースを利用した両極性電場や粒子束、熱伝導度の算出を基にして、LHD の実験結果に対して一連の新古典輸送解析を行った。その結果、LHD の実験で観測された電子内部輸送障壁の形成に新古典輸送が重要な役割を果たしていること、また周辺部における径電場は新古典輸送だけでは説明できないことを明らかにした。

これを要するに、著者は、モンテカルロ法を用いた新しい拡散係数計算コード DCOM を開発するとともに、ニューラルネットワークを利用したデータベースを構築し、任意の条件に対する新古典輸送係数を瞬時かつ正確に算出可能とし、実験結果との詳細な比較検討を容易なものとさせた。このことは LHD をはじめとするヘリカル型核融合装置におけるプラズマ閉じ込め研究、さらには核融合プラズマ工学の発展に寄与するところ大である。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。