

氏 名	うちだ もり ひさ 内 田 盛 久
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2224 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	工 学 研 究 科 原 子 核 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	二流体モデルによるトカマクプラズマの乱流輸送解析

論文調査委員	(主 査) 教 授 福 山 淳	教 授 芹 澤 昭 示	助教授 功 刀 資 彰
--------	--------------------	-------------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、トカマク型核融合炉においてプラズマ閉じ込め性能を支配する乱流輸送現象の解明を目指して、圧力勾配に起因する微視的不安定性とその非線形飽和条件から評価される乱流輸送係数に関する理論的および数値的研究の成果をまとめたものであり、以下の5章で構成されている。

第1章は序論であり、まずトカマク型磁気プラズマ閉じ込め装置における閉じ込め研究の背景を述べ、その閉じ込め性能を支配する乱流輸送現象および輸送障壁形成について概説するとともに、従来の理論的研究の問題点を指摘し、最後に本論文の目的と構成について記述している。

第2章は電流拡散性バルーニングモードに対する運動論的效果について論じている。トカマクプラズマにおけるバルーニングモードおよび乱流電流拡散によって駆動される電流拡散性バルーニングモードについて説明した後、イオン有限ラーモア半径効果およびドリフト運動効果を取り入れた簡約MHD方程式を導入している。そして主要な非線形相互作用項に対して平均場近似を行うことにより、非線形効果が輸送係数の形で繰り込まれた方程式系を導き、さらにバルーニング変換を用いて1次元問題に帰着し、固有値方程式を新たに導出している。そして乱流電流拡散による非線形励起と乱流粘性および乱流熱拡散による非線形減衰とが釣り合う臨界安定条件を用いて固有値方程式を解き、輸送係数を求めている。その結果、有限ラーモア半径効果によって電子とイオンの輸送係数に差が生じ、電子の輸送係数が大きく増大することを明らかにしている。またドリフト周波数が大きくなるにつれて乱流輸送の寄与が3段階に変化し、輸送係数の値も不連続に変動することを明らかにしている。これらの結果は、電子の乱流輸送における電流拡散性バルーニングモードの重要性を示している。

第3章はイオン温度勾配モードの線形安定性に対する圧縮性およびトロイダル速度シアの効果を論じている。イオン温度の強い勾配によって不安定化されるイオン温度勾配モードをイオン流体モデルを用いて記述し、圧縮性およびトロイダル速度シアを新たに取り入れた固有値方程式を導出している。そして、この新たに導かれた方程式の数値解析を行うことにより、イオンの圧縮性は安定化に、平行流れ速度シアは不安定化にそれぞれ寄与することを導いている。さらに平行流れ速度の2次シアは、その符号が磁気シアの符号と同じ場合には不安定化に、異なる場合は安定化に寄与することを明らかにし、トロイダル速度分布の制御による閉じ込め改善を提案している。

第4章は簡約二流体モデルを用いた乱流輸送解析を論じている。従来個別に解析が進められてきた静電的なイオン温度勾配モードと電磁的なバルーニングモードを同時に記述するため、二流体方程式から出発して簡約二流体モデルを新たに導出している。このモデルでは、これまでの多くの解析で仮定されていた電流拡散性バルーニングモードにおける非圧縮性やイオン温度勾配モードにおいて電子がボルツマン分布であること等の制約がなく、より一般的な解析が可能となっている。

まず、スラブプラズマにおける線形解析を行い、従来のイオン温度勾配モードを記述できることを示し、次にトロイダルプラズマにおいても、トロイダル・イオン温度勾配モードの運動論的解析結果を電子がボルツマン分布であるとする従来の解析よりもより正確に再現することを示している。そして圧力勾配が大きくなると、電磁的な性質を強くもつモードが新た

に現れることを明らかにし、このモードをドリフトアルベン・バルーニングモード (DABM) と名付けている。

さらに非線形輸送係数を取り入れて数値解析を行い、磁気シアおよび圧力勾配に対する依存性に加えて、圧縮性、粘性、ドリフト周波数等に対する依存性を詳細に考察している。その結果、従来の電流拡散性バルーニングモードは DABM において有限ドリフト周波数効果を見逃した極限であること、圧縮性および有限ドリフト周波数効果が乱流輸送係数を大きく増大させること、電子の平行粘性やイオンの垂直粘性に比べてイオンの平行粘性が乱流輸送に大きく寄与していること等を明らかにしている。そして圧力勾配が小さい場合には、DABM による輸送係数は電流拡散性バルーニングモードによる輸送係数よりも 1 桁以上大きく、実験において観測されている値と同程度となることを示すとともに、その磁気シア依存性および圧力勾配依存性は電流拡散性バルーニングモードに類似しており、内部輸送障壁の形成に必要な磁気シアの減少に伴う輸送係数の低下を再現している。圧力勾配が大きい場合には、電磁的なモードが支配的になり、静電的なモードよりも輸送係数は増大する。そして、長波長モードが安定化されにくくなるため、圧力勾配とともに輸送係数が急激に増大することを明らかにしている。これらの結果は得られた乱流輸送モデルが実験結果と比較して妥当であることを示している。

第 5 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、トカマク型核融合炉の閉じ込め性能を支配する乱流輸送現象に関して、従来個別に解析されていたプラズマ中の微視的不安定性を統一的に記述する手法を提案し、乱流輸送係数を理論的および数値的に評価した結果をまとめたものであり、主な成果は次の通りである。

(1) 乱流電流拡散によって駆動される電流拡散性バルーニングモードについて、新たに有限ラーモア半径効果と有限ドリフト周波数効果を取り入れて輸送係数の評価を行った。その結果、有限ラーモア半径効果によって電子とイオンの輸送係数に差が生じ、電子の輸送係数が大きく増加することを初めて明らかにした。さらにドリフト周波数の増大とともに飽和振幅に対する乱流輸送の寄与が 3 段階に変化し、輸送係数の値が不連続に変動することを示した。

(2) イオン温度の強い勾配によって不安定化されるイオン温度勾配モードについて、新たに圧縮性と流れ速度シアの効果をとり入れ、線形安定性に対する影響を解析した。その結果、イオンの圧縮性は安定化に、平行流れ速度シアは不安定化にそれぞれ寄与することを明らかにした。さらに平行流れ速度の 2 次シアは、その符号が磁気シアの符号と同じ場合には不安定化に、異なる場合は安定化に寄与することを初めて示し、トロイダル速度分布の制御による閉じ込め改善を提案した。

(3) トカマクプラズマにおいて乱流輸送を引き起こす微視的不安定性として、電流拡散性バルーニングモードとイオン温度勾配モードが提案されている。従来個別に解析されていたこれら 2 つのモードを統一的に記述するために、簡約 2 流体モデルを新たに提案し、詳細な数値解析を行って乱流輸送係数の評価を行った。まず圧力勾配が小さい場合には、静電的なイオン温度勾配モードが励起され、電子温度勾配がイオン温度勾配モードの安定化に大きく寄与することを初めて明らかにした。圧力勾配が大きくなると、電磁的性質をもつドリフトアルベン・バルーニングモードに移行し、輸送係数が増大することを示した。従来の電流拡散性バルーニングモードは電磁的モードの非圧縮極限であり、圧縮性の存在によって電磁モードがより不安定化し、輸送係数が 1 桁以上増大することを初めて明らかにした。得られた輸送係数の値は、実験で観測されている輸送係数と同程度であり、磁気シア等のパラメータに対する依存性も実験結果と比較して妥当であることを確かめた。

以上要するに、本論文は、トカマクプラズマにおける乱流輸送現象に関して、従来の静電的および電磁的解析を統合する新しいモデルを提案し、乱流輸送の性質を詳細に解析するとともに、実験結果と比較してその妥当性を確かめたものであり、その成果は学術上、実際に寄与するところが少なくない。よって、本論文は、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 15 年 1 月 22 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。