

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	西岡 賢二
論文題目	Neoclassical transport and flow analysis in Heliotron J plasmas (ヘリオトロンJプラズマにおける新古典輸送・フロー研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、核融合炉の実現を目指し高温プラズマの磁場閉じ込め研究を行っている L=1 ヘリカル軸ヘリオトロン型装置、ヘリオトロン J に対して、プラズマの閉じ込め特性に重要な影響を及ぼす新古典輸送、とくに磁力線に平行方向の運動量バランスに起因する輸送の物理機構を明らかにすることを目的とし、モーメント法に基づき複数種イオン、径電場、外部入力運動量源の効果を含む精度の高い新古典輸送解析を行った結果をまとめたもので、6 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論で、核融合プラズマにおける輸送現象の重要性とその中で新古典輸送の果たす役割を述べている。また、ヘリオトロン J プラズマを含むヘリカル系プラズマにおける新古典輸送理論の概要を示し、とくに磁力線に平行方向の輸送現象と密接な関係がある新古典粘性・フローや新古典輸送にともないプラズマ中で自発的に流れるブーツストラップ電流がプラズマの閉じ込め特性に及ぼす影響について論じている。</p> <p>第 2 章では、本論文での解析に用いた新古典輸送理論について詳しく説明している。新古典輸送はプラズマを構成する荷電粒子に対する速度分布関数の局所マクスウェル分布からの「ズレ」に起因するため、この分布関数の振舞いを記述するドリフト運動論方程式とその速度空間積分である流体方程式を示している。また、分布関数をフローなどの速度モーメントを係数とする多項式展開することで、異粒子種間衝突における運動量保存を満たす輸送行列を求める手法であるモーメント法について紹介している。さらに、モーメント法による計算の中で分布関数の高次の「ズレ」を求めるために用いた、ドリフト運動論方程式の数値計算コードについて説明している。</p> <p>第 3 章では、モーメント法による解析に必要な、任意の衝突周波数と径電場に対する単一エネルギー粘性係数の導出について論じている。プラズマ中の荷電粒子は、局所マクスウェル分布に近い速度分布を持ち、荷電粒子のエネルギーに対応した幅広い衝突周波数領域に粒子が存在する。モーメント法ではそれらの粒子に対してエネルギー積分を行う必要があるが、適切なドリフト運動方程式の数値解が得られるには条件があり、任意の衝突周波数を持つ粒子に対して正確な数値解を求めることはできない。本論文では数値解と解析解を接続することで、モーメント法による新古典輸送行列の計算に必要な、精度の高い単一エネルギー粘性係数を得ることができることを示している。</p> <p>第 4 章では、モーメント法に基づき、中性粒子ビーム入射加熱プラズマにおける</p>			

磁力線に平行方向のフローについて論じている。この解析のため、第3章で得られた単一エネルギー粘性係数を用いて、複数種イオン、径電場、外部入力運動量源の効果を自己無撞着に含むように拡張された新古典輸送行列解析法を新たに構築している。この新しい解析法を用いて、バルクイオンと炭素不純物を含むヘリオトロンJプラズマの新古典平行粘性・フローを、中性粒子ビーム入射によりプラズマ中に生成した高速イオンに起因する外部入力運動量源を考慮して解析している。実験においてはバルクイオンのフローを直接計測するのは困難なため、荷電交換分光計測から得られた炭素不純物の磁力線に平行方向のフローとの比較を行っている。高速イオンに起因する外部入力運動量源が存在する場合、これによるトルクがヘリオトロンJプラズマのフローに支配的であることが示されている。また、実験・理論解析の精度の範囲内で、バンピー磁場成分依存性など実験と矛盾しない結果が得られている。

第5章ではこの解析法を用いて、ヘリオトロンJで観測された新古典輸送に起因する自発電流であるブートストラップ電流の解析を行い、径電場による径方向の輸送の減少や不純物による電子衝突周波数の増加がブートストラップ電流を減少させることを理論的に示し、低衝突周波数領域では複数種イオンの存在が及ぼす影響が重要となる可能性を示唆するとともに、今後の新たな実験課題を提起している。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、 $L=1$ ヘリカル軸ヘリオトロン型装置ヘリオトロン J における新古典輸送、とくに磁力線に平行方向の運動量バランスに起因する輸送の物理機構を明らかにすることを目的とし、複数種イオン、径電場、外部入力運動量源の効果を含む精度の高い新古典輸送解析を行った結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- 1) プラズマ中の荷電粒子は、局所マクスウェル分布に近い速度分布を持ち、幅広い衝突周波数領域に粒子が存在するため、すべての粒子に対して必ずしも適切なドリフト運動方程式の数値解が得られるとは限らない。本論文では数値解と解析解を接続することで、以下の新古典輸送行列の計算に必要な精度の高いドリフト運動方程式の解を得ることを可能にした。
- 2) 上記で得られた解を用いて、モーメント法に基づき複数種イオン、径電場、外部入力運動量源の効果を含む自己無撞着に含むように拡張された新古典輸送行列解析法を新たに構築した。
- 3) この新古典輸送行列解析法を用いて、バルクイオンと炭素不純物を含むヘリオトロン J プラズマの新古典平行粘性・フロー解析を行った。実験においてはバルクイオンのフローを直接計測するのは困難なため、荷電交換分光計測から得られた炭素不純物の磁力線に平行方向のフローとの比較を行った。これにより、実験・理論解析の精度の範囲内で、バンピー磁場成分依存性など実験と矛盾しない結果を得た。新古典輸送解析により実験で観測された不純物イオン・フローと矛盾しない結果を得たことは、これまでにない大きな成果である。
- 4) さらにこの解析法を用いて、ヘリオトロン J で観測された新古典輸送に起因する自発電流であるブートストラップ電流の解析を行い、径電場による径方向の輸送の減少や不純物による電子衝突周波数の増加がブートストラップ電流を減少させることを理論的に予測した。これらの知見は今後の新たな実験課題を提起するものである。

以上の研究は、核融合プラズマで重要と考えられている非軸対称プラズマ中の新古典平行フロー、粘性、ブートストラップ解析に大きく寄与するものであり、核融合研究の進展に貢献するものである。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年8月28日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降