

論文審査の結果の要旨

氏名 齋藤 晴彦

プラズマ物理学や原子物理学の分野において、電磁場を用いた荷電粒子閉じ込めに関する研究が進められている。従来の概念では、プラズマとは総体として電氣的に中性な電離気体を意味するものとされ、大きな内部電場をもつプラズマに関する研究は希少であった。しかし近年、高電離イオンや反物質などの荷電粒子を閉じ込める研究や、大きな内部電場によって高速の流れが生まれる現象に関する研究が盛んになり、電氣的非中性のプラズマが注目されている。非中性プラズマの閉じ込めは、ペニングトラップに代表される開放磁場系装置でおこなわれてきたが、東京大学ではトーラス磁気面配位においてプラズマと閉じ込めるという独自の方法が研究されている。本論文は、このトーラス系において、外部電場を印加して積極的な電場制御をおこなった研究成果をまとめたものである。磁気面の構造とプラズマ内部の等電位面の構造との関係を精密に分析し、両者を近接させることでプラズマ閉じ込め特性が飛躍的に向上することなどが示されている。本論文は、以下のように構成されている。

第1章は緒論にあてられ、さまざまな荷電粒子の閉じ込め方式と、その物理的な原理について概観し、これらの中でトーラス磁気面配位における非中性プラズマ閉じ込めの特徴と物理的な研究課題がまとめられている。

第2章では、トーラス磁気面配位プラズマ閉じ込め装置である Proto-RT 実験装置における閉じ込め電磁場制御やプラズマ生成方法、測定法に関する概要が述べられている。純電子プラズマ(第3章)の生成に関しては、使用した電子銃の構造や駆動用電子回路について、また中性プラズマの非中性化(第4章)に関しては、高周波発振器による RF 放電プラズマについて記述されている。計測器については、電子プラズマおよび中性プラズマ中の空間電位分布計測に使用した静電プローブと、鏡像電荷を利用した揺動測定の方法及び各測定器の使用条件などが記述されている。

第3章では、トーラス磁気面配位を生成できるトロイダル内部導体系において、電子銃によって純電子プラズマを生成した実験結果がまとめられている。内部導体コイル上に設置した電極にバイアス電圧を与え、プラズマ中の電場を制御している。その際のプラズマ内電位構造をポロイダル断面における2次元分布として計測することにより、等電位面と磁気面の関係を分析している。さらに、静電揺動の計測からトロイダル電子プラズマの閉じ込め時間の評価が行われている。電極に負バイアスを与え、プラズマ内部の等電位面とダイポール磁場の磁気面を接近させる最適化を行うことにより、トロイダル電子プラズマの閉じ込め時間が長くなることが示されている。閉じ込められた電荷量の、磁場強度や中性ガス圧力等のパラメタに対する依存性を調べ、電子プラズマの閉じ込め時間が残留中性ガスとの衝突による古典的な拡散時間と同程度に達したと結論している。残留ガス圧力 5×10^{-7} Torr、磁場強度 100G (ダイポール磁場) の条件下で、 5×10^8 C 程度の電荷を閉じ込め、0.5 秒程度の閉じ込め時間を実証している。さらに、トロイダル磁場を印加して磁気シャワーを与えることにより、電子プラズマのダイオコトロン周波数帯の静電揺動が抑制されたことが示されている。

第4章では、電極による電場印加および電子入射によって中性プラズマ中に電場を生成する実験の結果が述べられている。高周波放電によって生成した水素プラズマに対して、内部導体上のリング状電極に負電位を印加することにより、プラズマ閉じ込め領域内部の広い範囲で径方向(磁気面を横切る方向)の電場が生成されたこと、逆に正電位を印加した場合には電極近傍のプラズマが排除され、その隙間領域に電場が集中することが記述されている。この違いはイオンの供給機構の違いとして説明されている。プラズマ中に生成された電場と磁場強度などのパラメタとの関係を分析し、イオンの運動はローレンツ力と中性衝突が支配的であること、トロイダル方向のプラズマ流速が $E \times B$ ドリフト速度で与えられること、流れに対する粘性は中性粒子衝突による古典的な粘性の領域であることが結論されている。得られた流速は 2×10^5 m/s 程度であり、イオン音速の5倍程度の超音速流が駆動されたとしている。

第5章は、本論文のまとめにあてられている。

以上を要するに、本論文はトーラス磁気面配位に閉じ込められた内部電場をもつプラズマの物理的特性に関して実験的に研究したものであり、外部電場によるプラズマ内電場の制御の有効性、プラズマ閉じ込め特性を決定する要因などについての詳細な分析がまとめられている。この成果は、高速流をもつプラズマの核融合への応用、宇宙・天体现象の解明、また種々の荷電粒子を閉じ込めるトラップなどに応用することができ、プラズマ工学に資するところが大きい。

なお、本論文の第3章及び第4章は、吉田善章、比村治彦、森川惇二、深尾正之、中島千博、若林英紀、渡邊将の各氏との共同研究であるが、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。