京都工芸繊維大学

氏　　名	おかだ　としかず **岡田　敏和**
学位(専攻分野)	博　士（工学）
学位記番号	博甲第 1114 号
学位授与の日付	令和 6 年 3 月 25 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	工芸科学研究科　電子システム工学専攻
学位論文題目	**非中性プラズマ閉じ込めに応用されたネストトラップの特性と電気的非中性な２流体プラズマの生成**
審査委員	(主査)教授　比村　治彦 教授　藤原　進 准教授　三瓶明希夫

論文内容の要旨

一様磁場中で正のポテンシャル井戸と負のポテンシャル井戸が入れ子になっているネストトラップは、正の荷電粒子と負の荷電粒子を同時に閉じ込める特長を持つ。このネストトラップの特長は、2 流体プラズマモデルにおける平衡状態の存在可否を検証する実験や、反水素生成に関する研究、電子-陽電子ペアプラズマに関する研究に適用可能であると考えられている。しかしながら、ネストトラップ中に閉じ込められた非中性プラズマを用いた 2 流体プラズマ実験に関して、現状では 2 流体プラズマであることを計測する手法は一切確立しておらず、それ故に 2 流体プラズマについての明確な実験結果は示されていない。さらに、ネストトラップに入射された荷電粒子ビームが回転運動を伴う非中性プラズマに緩和する過程で、ペニングトラップ中では観測されてこなかった予期せぬ不純物イオンが発生する。この現象は 2 流体プラズマ実験において予期せぬ実験誤差を生じる可能性がある。本論文では、これらの課題を解決するために、ネストトラップ内で生じる不純物イオンの発生とその抑制、2 流体プラズマ状態の生成可能性を示す重畳実験、そして閉じ込められたプラズマの分布の可視化手法についての実験結果をまとめている。

本論文は全 5 章から構成されている。

第 1 章は、本研究の学術的背景、実験で用いられたネストトラップを説明している。また、ネストトラップを用いた 2 流体プラズマ平衡状態の実験的解明における課題と研究目的を述べている。

第 2 章は、本研究で用いた直線型実験装置 BX-U を詳細に解説している。BX-U は、超高真空下でリチウムのみからなるイオンプラズマと、電子のみからなる電子プラズマをそれぞれ独立に生成するだけでなく、別々に閉じ込めることもできる。閉じ込められたそれら電気的に非中性なプラズマ（以下、「非中性プラズマ」と呼ぶ。）の 2 次元線積分密度分布を計測するために、マイクロチャネルプレート(MCP)、蛍光板、および、高速度カメラが用いられている。

第 3 章は、ネストトラップ中で予期せずに発生する不純物イオンが、ネストトラップのサイドウェル内で加速された電子による背景中性ガス群の電離が主たる原因であることを実証している。主たる不純物は、コンパクトイオンセパレータと四重極質量分析器を用いた分析の結果から、H_2^+ や N_2^+、H_2O^+といった、真空内に残留してよい分子イオンである。発生した不純物イオンは、ネ

ストトラップの正ポテンシャル井戸内に蓄積される。それら蓄積不純物イオンは、2 流体プラズマ平衡実験の際、イオン数の過大評価というエラーを生じさせるため、その発生は抑制されなければならない。実験結果は、サイドウェルの電位深さを浅くし、電子の入射エネルギーを小さくすること、さらに、電子をトラップする時間を短くすることが不純物イオン発生を抑制するキーポイントであることを定量的に解明している。

第 4 章は、ネストトラップを用いて 2 流体プラズマ平衡状態とその安定性の究明可能性を調べるために、電子プラズマとイオンプラズマをネストトラップの中で重畳するという世界初の実験について述べている。初期結果は、イオンプラズマおよび電子プラズマの巨視的構造がミリ秒オーダーの時間スケールで変化していく条件が存在することを示している。その時間スケールはこのプラズマで見積もられる電磁流体回転運動の特性時間よりも十分に長いので、2 流体平衡状態の存在可能性を示唆している。実験では、電子プラズマを正ポテンシャルウェル内に形成された負ポテンシャルウェル内に閉じ込めてイオンプラズマと重畳すると、イオンプラズマと電子プラズマの数密度比fが$f = 0.002$のときに、イオンプラズマの 2 次元粒子数分布が$t \geq 10$ ms で中空形状に変形する。さらに、ネストトラップの電位極性を反転させて、電子プラズマとイオンプラズマを重畳すると、$f = 0.15,\ 0.74$のようにfが大きく異なるそれぞれの場合で、電子プラズマの装置中心軸からのシフトや、2 つのバルクプラズマへの分裂という巨視的不安定性が発現する。このとき同時に、イオンプラズマも装置軸からシフトする。これらの結果は、ネストトラップ内にイオンプラズマ、あるいは電子プラズマのみを閉じ込めたときには全く発現しない。つまり、本実験は電子プラズマとイオンプラズマを重畳したときにのみ発現する巨視的不安定性の観測結果を初めて示している。

第 5 章は、ネストトラップ内に同時に閉じ込められた電子プラズマとイオンプラズマのような非発光のプラズマの空間・時間発展をシングルショットで、かつ、高時間分解能で可視化する手法を新たに考案し、複数の電子束のダイナミクスをシングルショット撮影することで、その手法の評価を行っている。シングルショット法の特徴は、従来のショットバイショットでの 2 次元分布の撮影とは異なり、プラズマダイナミクスを連続的に観測できることにある。この測定法では、最大 1,000,000 fps の高速度カメラと、残光時間が約 0.15 μs の蛍光体 P46 が塗布された蛍光板、直径 75 mm の MCP、そして、エッチングおよび拡散接合技術によって作製された開口率が 89% の微細金属メッシュを組み合わせた計測システムが構築されている。この計測システムを用いることで、ネストトラップから約 1.6%の高エネルギー電子を緻密に引き出すことでそれらの 2 次元粒子数分布を検出している。これより、ネストトラップ中で進行する複雑な渦ダイナミクス過程の空間・時間発展がシングルショットで可視化されることを初めて実証している。

論文審査の結果の要旨

一様磁場中で正のポテンシャル井戸と負のポテンシャル井戸が入れ子状の構造になっているネストトラップは、正の荷電粒子群と負の荷電粒子群を同時に閉じ込める特長を持つ。このネストトラップの特長は、2 流体プラズマモデルをベースとした 2 流体プラズマ平衡状態の存在可否の検証研究、反物質（特に、反水素）生成に関する研究、電子-陽電子のような質量が等しく電荷極

性が異なるペアプラズマに関する研究等の最先端物理学のフロントを切り拓く実験への適用可能性が広く検討されている。しかしながら、ネストトラップ中に閉じ込められた電気的中性条件が破れている電気的非中性のプラズマを用いた 2 流体プラズマ平衡状態の検証実験に関しては、現在までに 2 流体プラズマ平衡状態を実証する計測手法は一切確立していない。この理由により、2 流体プラズマ平衡状態をクリアーカットする実験結果はどこからも発表されていない。本研究では、ネストトラップに入射された指向性速度をもつ荷電粒子ビームから電磁流体回転運動を伴う非中性プラズマへと緩和する過程で、ペニングトラップ中では決して発現しないイオンの発生現象が観測される。このイオン発生現象は、例えば 2 流体プラズマ平衡実験においては不純物イオンとなるために、イオン粒子数や数密度に対して実験誤差を与えることになる。本研究は、この新奇現象の発生機構を確立するだけでなく、ネストトラップ内で生じる不純物イオンの抑制方法を定量的に示している。また、本研究は、電荷が正と負の非中性プラズマをネストトラップ中で重畳することで、2 流体プラズマ平衡状態の存在が否定されるパラメーターウィンドウ領域を示している。さらには、ネストトラップに閉じ込められたプラズマの渦を伴うダイナミクスの新規ワンショット可視化手法が実験的に確立されている。

これらの成果は、プラズマを構成するイオン群と電子群のダイナミクスを独立、かつ、精密に可視化することが可能であることを示している。本研究でついに解明された物理機構と新しいプラズマ渦の動力学を観察する手法は、先端プラズマ物理学や天文学でのフロントテーマを実験室プラズマで追及できることを示しているだけでなく、ネストトラップを用いたミクロ粒子運動からマクロ構造が形成される現象の理解を深める興味深い物理学的知見を提示していると認められる。

本論文は、レフェリー制度が確立した以下の 3 編の国際学術論文を基礎としている。

[1] T. Okada, H. Himura, S. Yamada, S. Nishio and A. Sanpei, “Observation of impurity ions during a plasma translation experiment in nested Penning traps,” Physics Letters A **460**, 128617 (2023).

[2] T. Okada, H. Himura, Y. Nakajima and A. Sanpei, “Confinement Experiments of Pure Ion and Electron Plasmas in a Nested Trap”, Plasma and Fusion Research **18**, 2401072 (2023).

[3] T. Okada, H. Himura, Y. Nakajima and A. Sanpei, “Single-shot fast cinematic imaging during merging process of multiple electron filaments in electrostatic potential well,” *accepted for publications in Review of Scientific Instruments* (2024).

以上から、本論文の内容には十分な新規性・独創性、および、理工学的意義がある。特に、プラズマ科学分野および天文分野に寄与する所が大きい。したがって博士論文として優秀であると認められる。