

	なかじま ゆうたろう
氏 名	中島 雄太郎
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 1 1 6 9 号
学位授与の日付	令和 7 年 3 月 21 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	電気的非中性 2 流体プラズマの回転運動とその平衡及び安定性に関する研究
審 査 委 員	(主査)教授 比村 治彦 教授 粟辻 安浩 准教授 三瓶明希夫

論文内容の要旨

現在、ブラックホール周辺で高速回転するペアプラズマの荷電分離による非常に非中性な状態の予測や、陽電子を用いたパルサー磁気圏の実験模擬、正準ヘリシティの輸送の計測実験、反物質の生成閉じ込め実験など、電気的に非中性なプラズマの考慮が必要な現象が精力的に研究されている。これらの場合、プラズマの流体としての運動は、イオン流体と電子流体からなるプラズマをそれぞれの電磁流体が独立のプラズマとして考える必要がある。本研究では、直線型プラズマ実験装置 BX-U を用いて、一様磁場中に電子プラズマおよびイオンプラズマを閉じ込めて、電気的に非中性で 2 流体プラズマ状態のプラズマ生成を試みる実験を行っている。しかしながら、2 流体の相互作用によって発現する 2 流体プラズマ現象の観測や、その物理モデルの導出はこれまでにまだ行われていなかった。そこで本論文では、これらの課題に取り組むために、2 流体プラズマ状態で生じる電磁流体の回転運動の観測、そのようなプラズマの回転平衡モデルの構築、及びその不安定性に関する研究をまとめている。本論文は全 5 章から構成されている。

第 1 章は、2 流体プラズマに関する研究の動向について述べ、特に近年の研究において電気的非中性プラズマという考え方が要請されている現状について述べている。

第 2 章は、細い金属線と高速度カメラを用いたプラズマの回転運動の観測結果について述べる。本観測の手法では、細い金属線を横切ったプラズマが MCP 付き蛍光盤に当たることで得られる蛍光画像から、プラズマが磁力線を横切る方向に回転運動を行う様子が観測される。このような電気的に非中性なプラズマの回転運動の観測は、電子ビームに対して行われていたが、純イオンプラズマや 2 流体プラズマに対しては、これまでに観測された例はなかった。本研究では、純イオンプラズマに対して本手法が適用可能であることを示し、次に電子プラズマとリチウムイオンプラズマに対しても同様の手法を適用して、プラズマの回転運動の観測実験を実施している。本実験の結果として、電子プラズマの存在によって、イオンプラズマの回転の向きが逆転する様子が観測されている。このようなプラズマの回転運動は、非中性プラズマ物理学の理論によって定性的に説明できることも示されている。

第 3 章は、非中性プラズマ物理学の差動回転理論を発展させて、電気的に非中性な 2 流体プラズマの剛体差動回転平衡モデルの導出を行っている。本平衡モデルでは、プラズマの電気的中性

条件がプラズマ内の全域に渡って破れていても、プラズマは剛体回転を行うことで力学的に平衡となるケースを初めて説明している。この理論では、有限のプラズマ温度と、プラズマの密度分布が考慮されている。プラズマ温度の値と密度分布の形は、BX-U 装置を用いた実験プロジェクトで実際に得られているデータから決められている。プラズマが有限温度を持つ場合、反磁性ドリフト $v_{di,de}$ が生じる。反磁性ドリフトは電荷の極性でその向きが変わるので、イオン密度が電子密度よりも低い場合、系は負の自己ポテンシャル ϕ を持つ。この中で、イオンプラズマと電子プラズマの回転速度 $v_{i,e}$ は、 $E \times B$ ドリフト項 v_ϕ と $v_{di,de}$ で決められる。密度分布がベル型分布となることで、それらドリフト項の和が、イオンプラズマと電子プラズマをそれぞれ剛体回転とする解が得られる。さらには、これら剛体回転では、イオンプラズマと電子プラズマが互いに逆方向に回転する反差動回転となっている。このような回転平衡を反差動剛体回転平衡と命名している。このような反差動剛体回転平衡の安定性について、角運動量を用いた安定性解析手法を用いて議論している。

第 4 章は、反差動剛体回転平衡の安定性について、統計量を用いた力学的安定性の解析と、PIC シミュレーションを用いた解析を詳述している。シミュレーションでは、二次元の粒子分布に対して三次元の熱速度を仮定する 2D3V の PIC コードを用いる。シミュレーションの初期条件として、平衡状態の密度分布から、それぞれ 10^6 個のイオンと電子の超粒子を配置し、10 ps ごとの超粒子の移動を計算し、プラズマが安定となるパラメータセットの条件を探査している。ここでは、シミュレーションが対象としている平衡解がプラズマの電磁流体モデルから導出されているのに対して、プラズマの時空間発展の導出が粒子的描像を基盤とした PIC シミュレーションから得ている。そこで、PIC シミュレーションによって導出される超粒子群の運動を、CIC 法によって速度ベクトル場の時間発展へと変換している。本シミュレーションにより、本平衡の安定性が示されている。

第 5 章では、以上の研究の結言が述べられている。

論文審査の結果の要旨

陽電子を用いたパルサー磁気圏の模擬、反物質生成など、電気的非中性なプラズマが関与する現象は近年盛んに研究されている。こうしたプラズマ現象は、イオン流体と電子流体から構成される 2 流体プラズマとして解析する必要があり、その解析には独自の物理モデルの構築が求められる。本研究では、直線型プラズマ装置 BX-U を用いて 2 流体プラズマ状態を生成し、2 流体の相互作用による回転運動や、それら流体の平衡状態の性質を解明することを目的としている。実験ではまず、イオンプラズマと電子プラズマを一様磁場中に閉じ込めて、細い金属線と蛍光板付マイクロチャンネルプレートを用いてプラズマの回転運動を可視化し、電子プラズマの存在がイオンプラズマの回転方向を反転させる現象を発見している。回転が反転する理由は、非中性プラズマ物理学の理論で定性的に理解できるが、その理論ではプラズマ密度分布やプラズマ温度が考慮されていない。したがって、それらを考慮した新しい平衡理論の構築が必要である。本研究では、その新しい平衡理論の導出に取り組んでおり、2 流体プラズマの反差動剛体回転平衡理論を構築している。この新しい平衡理論は、電子プラズマとイオンプラズマが逆方向に剛体回転する

という運動特性の存在を示しており、事前実験で観測された回転運動を説明することに成功している。

この反差動剛体回転平衡状態の安定性については、統計量を用いた力学的安定性の解析と、2D3V の PIC シミュレーションを用いて検証している。初期条件として、実験で観測された密度分布を反映させた超粒子の配置を行い、プラズマ形状の時空間発展のプラズマパラメータ依存性を解析している。これらシミュレーションの結果より、平衡解が安定となるパラメーター領域の存在が示されている。

本研究により、2 流体プラズマの回転運動とその動的平衡状態に関する理解が飛躍的に進展した。電気的非中性なプラズマの安定性や、運動特性に関する新たな知見は、実験室プラズマだけでなく、宇宙プラズマや反物質物理学への波及効果を有している。特に、電気的中性条件が破れているプラズマが安定な回転平衡状態を取りうるという結果は、プラズマ理工学分野の今後の実験および理論研究において重要な基盤となる。

本論文は、レフェリー制度が確立した以下の 2 編の国際学術論文を基礎としている。

[1] Y. Nakajima, H. Himura, and T. Okada, “Clear imaging of ion cloud rotation using a combination of a thin metal wire, a micro-channel plate attached to a phosphor screen, and a high-speed camera,” AIP Advances, **12**, 045015 (2022).

[2] Y. Nakajima, H. Himura, and A. Sanpei, “Counter differential rigid-rotation equilibrium of electrically non-neutral two-fluid plasma with finite pressure”, Journal of Plasma Physics, **87**, 905870415 (2021).

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。