

有限の圧力を持つ電氣的に非中性な 2 流体プラズマの 反差動剛体回転平衡解の導出

本学電気電子工学系 比村治彦教授、大学院生 中島雄太郎（工芸科学研究科前期課程電子システム工学専攻）らの研究グループは、電氣的に非中性な二流体プラズマ^{*1}における反差動剛体回転平衡を、非中性プラズマ^{*2}の理論を用いて、二次元平衡解として導出することに世界で初めて成功した。この平衡状態では、互いに逆方向に剛体回転するイオンプラズマおよび電子プラズマの速度場が、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト速度^{*3}ではなく、主として反磁性ドリフト速度^{*4}によって決まる。この研究は、近年、核融合エネルギー開発用の炉心プラズマなどで適用され始めている二流体プラズマモデルを、電氣的に中性ではないプラズマでも論じることができる端緒を与えた。

この研究成果は学術雑誌「Journal of Plasma Physics」に受理され、2021年8月末に掲載予定である。

ポイント

- ✓ 有限の温度を持ち、電氣的に非中性な二流体プラズマの反差動回転平衡解を世界で初めて導出し、実際の高温プラズマへの適用を可能にした。
- ✓ この平衡状態にあるイオンプラズマと電子プラズマは、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトではなく、主として反磁性ドリフトによって支配されることが明らかにされた。

研究の背景

最先端のプラズマ物理学では、一流体モデルに適さない現象の解析に対して、二流体プラズマモデルがよく用いられている。しかしながら、プラズマの電気的中性条件という仮定に対して素朴な疑問が生じる。電気的中性条件とは、イオン密度 n_i と電子密度 n_e がどこでも等しいという条件である。これは、二流体プラズマモデルに必要とされない。非中性プラズマ物理は、この疑問に一つの新しい切り口を与える。近年では、複数の非中性プラズマの相互作用を理論的または実験的に研究するプロジェクトもある。我々の研究グループでは、BX-U 装置^{*5} を用いて純リチウムイオン(Li⁺)プラズマと純電子プラズマを使用し、電気的に非中性な二流体プラズマの安定性や平衡というプラズマ物理学で未検証の問題を探求している。

n_i と n_e の異なる二流体プラズマには、本質的に自己電位 ϕ_s が存在する。したがって、二流体プラズマが磁場 \mathbf{B} の中に閉じ込められると、自己電場 $\mathbf{E} = -\nabla\phi_s$ と \mathbf{B} によって、静的ではなく常に動的な状態となる。Davidson は z 軸方向に一様な磁場 $\mathbf{B}_z = B_0\mathbf{e}_z$ によって円筒状に閉じ込められた二流体プラズマに対し、イオン温度 T_i 及び、電子温度 T_e が 0 eV であるという仮定の下で、二次元の差動回転平衡を導出した。この平衡はイオン及び電子プラズマが異なる角速度 ω_σ (ただし $\sigma = i, e$) で剛体回転する平衡状態である。この時の角速度は解析的に求めることができる。さらには、プラズマの運動が ϕ_s と \mathbf{B}_z によって決定されることから、回転方向は $\mathbf{E} \times \mathbf{B}_z$ の方向となる。しかしながら、二流体プラズマが有限の温度を持つ場合、二流体プラズマ中には圧力勾配 $\nabla p_\sigma = k_B T_\sigma \nabla n_\sigma$ によって反磁性ドリフトも生じるため、必ずしも $\mathbf{E} \times \mathbf{B}_z$ で決まるとは限らない。加えて、Davidson が導出した差動回転平衡は $T_i = T_e = 0$ eV とする単純化されたモデルから得られており、現実のプラズマのように有限の温度を考慮した平衡についてはこれまで考えられてこなかった。有限の温度の効果を考えることで、二流体プラズマの差動回転平衡についての研究を核融合プラズマなどの高温プラズマに対しても行うことが可能となる。

研究の内容

本研究では、図 1 に示されているような、 z 軸方向に無限に長い Li⁺ プラズマと電子プラズマから構成されているプラズマを考えている。このとき、有限の温度を持ち、電気的に非中性な二流体プラズマの差動回転平衡を数値計算によって導出している。プラズマは ∇p_σ 、 \mathbf{B}_z 、そして $\nabla\phi_s$ による力を受ける。これらの合力によって決まる流体方程式の定常解は、 $n_\sigma(r) = n_{\sigma 0} \exp(-\psi_\sigma / k_B T_\sigma)$ のボルツマン分布となる。ここで、 ψ_σ は有効ポテンシャルと呼ばれる物理量であり、プラズマの遠心力によるエネルギーと ϕ_s によって決まるポテンシャルである。また、 r はプラズマの回転軸からの径方向の座標を示している。 $n_\sigma(r)$ とポアソン方程式から、この差動回転平衡を決定づける $\phi_s(r)$ についての非線形微分方程式が与えられる。

我々は BX-U 実験装置における典型的なプラズマのパラメーターと境界条件を適用し、数値的にその非線型微分方程式を解くことで、 $\phi_s(r)$ の平衡解を導出した。さらには、得られた $\phi_s(r)$ から $n_\sigma(r)$ を求めることで、反磁性ドリフト $v_{d\sigma}$ と $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト v_ϕ の r 依存性を得た。 ω_σ の値をパラメーターとして計算を行うことにより、 ω_i と ω_e の回転方向が $v_{d\sigma}$ と同じ方向にあるときにのみ二流体プラズマの平衡解が得られるということが明らかになった。このとき、イオンプラズマと電子プラズマの方位角方向の速度 v_σ の r 依存性は、図 2 に示されるように、 $v_{d\sigma}$ に強く支配されている。つまり、この回転平衡状態においては、イオンプラズマと電子プラズマは互いに反対方向へと異なる速度で剛体回転を行っている。この結果は、Davidson によって導出された冷たいプラズマの差動回転平衡解とはまったく異なるものである。また、 \mathbf{E} をともなう磁化プラズマの回転方向は、常に $\mathbf{E} \times \mathbf{B}_z$ の向きとなるだろうという単純な見方に警笛を鳴らす結果である。

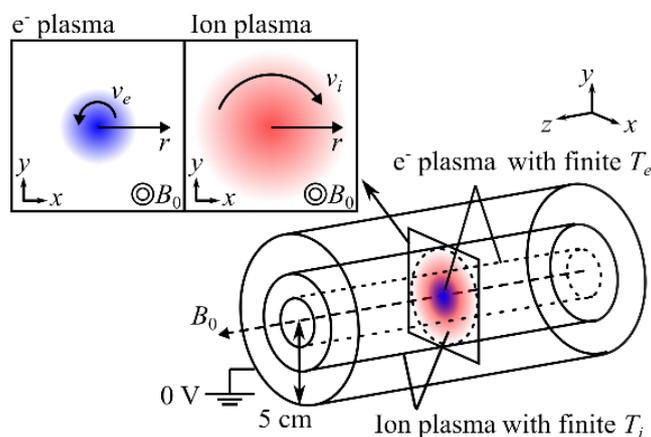


図 1 二流体プラズマの差動回転平衡状態の様子

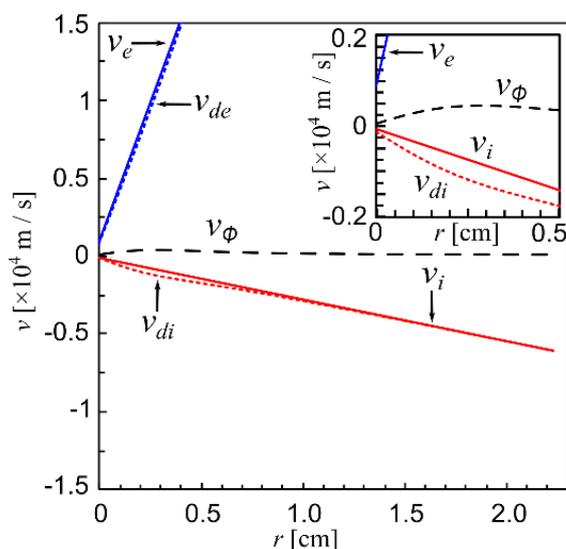


図 2 反差動剛体回転平衡の例

今後の展開

今後は、実験研究と数値計算の両方向への展開を考えている。実験では、本研究結果に対する検証を、BX-U装置を用いて行う。これにより、二流体プラズマモデルの適用妥当性を明らかにする。この研究は、高ベータプラズマの開発や、宇宙プラズマに対する二流体プラズマモデルの裏付けをとることに繋がる。数値計算では、 T_σ や n_σ という物理パラメーターに代入する値の桁数を大きく変えることで、核融合プラズマや宇宙プラズマなどのパラメーター領域での調査が挙げられる。これと並行して、PICコードを用いた差動回転平衡の安定性解析が挙げられる。これらの研究から得られる結果を総合的にまとめることによって、先端プラズマ物理学の未解決問題、二流体プラズマ系を開拓していくことができる。

用語解説

1. 二流体プラズマ

プラズマ中のイオン粒子群と電子群が互いに独立な流体として存在し、それぞれの流体方程式にしたがって運動している状態のプラズマを指す。プラズマがこのような二流体状態にあると仮定して作られている流体モデルを二流体プラズマモデルという。

2. 非中性プラズマ

非中性プラズマとは、単一種の荷電粒子群から構成されたプラズマを指す。粒子種の違いによって、純イオンプラズマや、純電子プラズマと呼ばれている。中性のプラズマと同じように、デバイ長などのプラズマパラメータが定められており、プラズマとみなすための条件も課されている。

3. $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト

磁場中をラーマ運動している荷電粒子の案内中心が、 \mathbf{E} と \mathbf{B} の外積によって計算される $\mathbf{E} \times \mathbf{B}/B^2$ の速度でドリフト運動する現象。このとき、ドリフトの方向は荷電粒子の電荷の符号によらないという性質がある。また、このドリフトは荷電粒子群によるプラズマでも等しく生じる。

4. 反磁性ドリフト

荷電粒子が $-\nabla p_\sigma$ と \mathbf{B} の外積によって計算される $-\nabla p \times \mathbf{B}/B^2$ の速度でドリフト運動する現象。 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトとは異なり、ドリフトの方向は荷電粒子の電荷の符号に依存し、 \mathbf{B} を弱める（反磁性）方向へドリフトする。

5. BX-U装置

本学電気電子工学系プラズマ基礎工学研究室（比村治彦教授）が所有する実験装置の一つで

あり直線型となっている。電子ビームとLi⁺ビームのソース、円筒型電極、そして、ソレノイドコイル磁場を用いて、二流体プラズマの生成や閉じ込め実験を行うことができる。

謝辞

本研究は、JSPS KAKENHI Grant No.20KK0063 及び 21H01056 の支援を受けて行った。

論文情報

- ・ タイトル
“Counter differential rigid-rotation equilibrium of electrically non-neutral two-fluid plasma with finite pressure”
- ・ 著者
Yutaro Nakajima, Haruhiko Himura, and Akio Sanpei
- ・ 掲載誌
Journal of Plasma Physics