

論文内容の要旨

論文題目

Experimental Study on the Confinement of Electron Plasma and Formation of Flow of Neutral Plasma in an Internal Conductor System
(内部導体系における電子プラズマの閉じ込めと中性プラズマの流れ駆動に関する実験的研究)

氏名

齋藤晴彦

研究背景と目的

電磁場を用いた荷電粒子群の閉じ込めは、プラズマ物理学や原子物理学における広範な分野を支える基礎学術として重要な役割を果たしている。近年、流れを持つ磁化プラズマの研究において、プラズマ流の動圧の効果により極めて高い値を実現し得る平衡状態(double Beltrami state)が理論的に予測され、その実験的検証を目指す基礎研究が行われている。こうした研究に必要とされる流れを駆動する方法として、dipole 磁場中に閉じ込めた内部電場構造を持つプラズマのドリフト運動を利用する事が検討され、外部からの電子注入や電子損失によるプラズマの非中性化、あるいはバイアス電極を用いた内部電場形成に関する実験研究が進行中である。

また原子物理学、粒子線源技術等の分野における学際的な研究の進展に伴い、陽電子や反陽子等を含む新しい荷電粒子の閉じ込めに関する活発な研究開発が進められている。このような特異な粒子群の挙動は、純粋なプラズマ物理学の観点から興味深いだけでなく、反物質粒子を含む各種原子等の合成やその応用を目指す上でも、その特性を明らかにする事が必要とされている。こうした多様な荷電粒子の良好な閉じ込めを実現する事を目的として、単一種類粒子に留まらず、異なる符号を持つ荷電粒子群の同時閉じ込め配位の実現を目的とした研究が進められている。

トーラス系を用いた内部電場を持つプラズマの閉じ込め方式は、磁力線方向の静電ポテンシャルを使用しない、荷電粒子の安定な純磁場閉じ込めを実現する可能性を備えており、任意の非中性度を持つプラズマの閉じ込め配位の実現に向けた可能性が期待出来る。トーラス系における非中性プラズマ物理学の分野では、従来、純トロイダル磁場配位を用いた研究が行われてきたが、近年、トロイダル磁気面配位による非中性プラズマの閉じ込め方式が提案され、内部導体系やヘリカル系を用いた研究が開始されている。上述のような高速流を持つプラズマの平衡の探求や、あるいは各種荷電粒子の安定な閉じ込め等の応用を実現する上でも、内部電場を持つプラズマの良好な閉じ込め配位を確立し、その

基本的特性を実験的に明らかにする事は極めて重要である。

このような観点から、本論文では、内部導体型・トロイダル磁気面配位系である Proto-RT (Prototype-Ring Trap) 装置において、内部自己電場を持つプラズマの研究を行った。まず、トロイダル純電子プラズマを使用して、磁気面配位における非中性プラズマの閉じ込め特性を明らかにする実験研究を行った。この段階の研究は、高速流を持つプラズマの平衡状態の検証を目指す一つの段階であると共に、また様々な荷電粒子群の安定な閉じ込め実現に向けた基礎研究としても位置付けられる。その上で、これにより内部導体系の自己電場を持つプラズマの基本特性を明らかにした上で、電極及び電子入射を用いた水素プラズマのバイアス実験を行い、トロイダル磁気面配位における磁化プラズマ中の流れ駆動に関する基礎特性を明らかにする事を目指した。

研究結果

トロイダル電子プラズマ

純電子プラズマを使用した研究から、トロイダル磁気面配位においては、プラズマ内部の等ポテンシャル面と磁気面を近付ける電位制御を行う事により、閉じ込め時間が中性粒子との衝突による古典拡散時間に達する、非中性プラズマの良好な閉じ込めが得られる事が観測された。

本研究において使用した Proto-RT 装置は、磁気面配位を持つ閉じ込め装置であり、真空容器内部に dipole 磁場発生用の内部導体コイル、装置外部に垂直磁場コイル、中心軸内にトロイダル磁場コイルと、複数の磁場発生用コイルを備えている事が大きな特徴である。磁場配位に加えて、非中性プラズマの平衡と安定性には、自己/外部電場が重要な役割を果たす事が知られている。内部導体コイル上に設置した制御電極を用いて、トーラス電子プラズマの電位分布構造の最適化を行い、静電揺動の抑制と閉じ込めの改善実験を試みた。

計測装置として、ポテンシャル構造の測定を目的として、複数の emissive Langmuir プローブを多段アレイ化し、従来までの研究で使用されてきた cold probe による浮遊電位測定と比較して、より高精度での空間電位分布計測を行った。また、非接触で静電揺動の測定が可能である事からプラズマに与える擾乱の少ない wall プローブを使用し、閉じ込め時間やトラップされた電荷の評価を行った。こうして得られた電子プラズマの静電ポテンシャル(図1)によれば、電子銃からの入射後、電子は本来の軌道から拡散して、トーラス系における非中性プラズマに特徴的な、装置内部にシフトする電位分布構造を取り、内部導体を取り巻く閉じ込め領域内に広く分布している。また、内部導体上に設置した電極に負のバイアスを印加する事により、プラズマ内部の電位分布構造と磁気面構造を近付ける電位制御を行った。

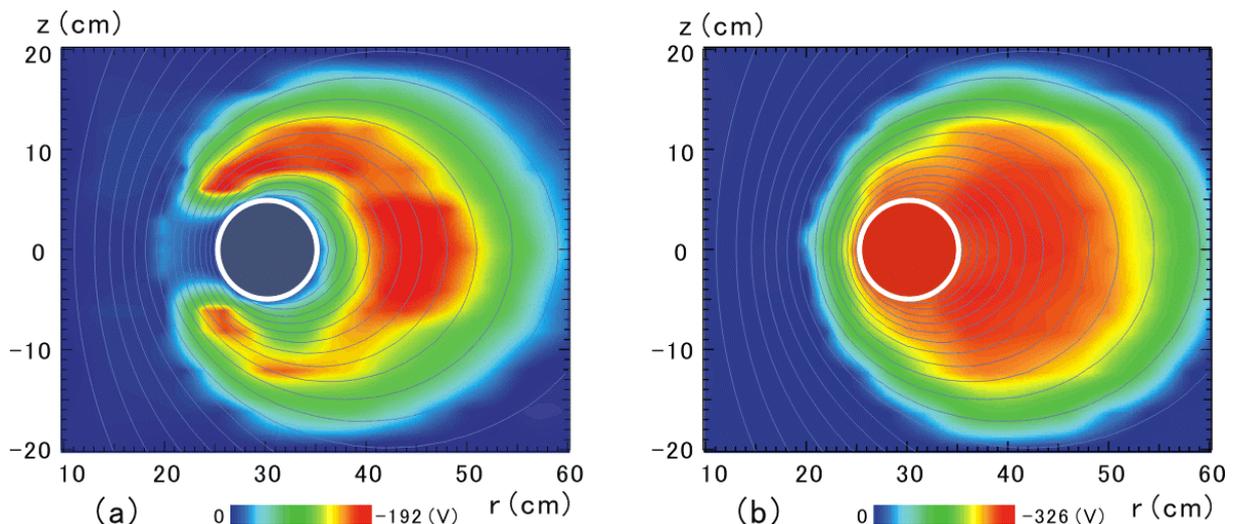


図1 Proto-RT のトロイダル電子プラズマの電位分布構造と磁気面。(a)非バイアス時と(b)バイアス時。

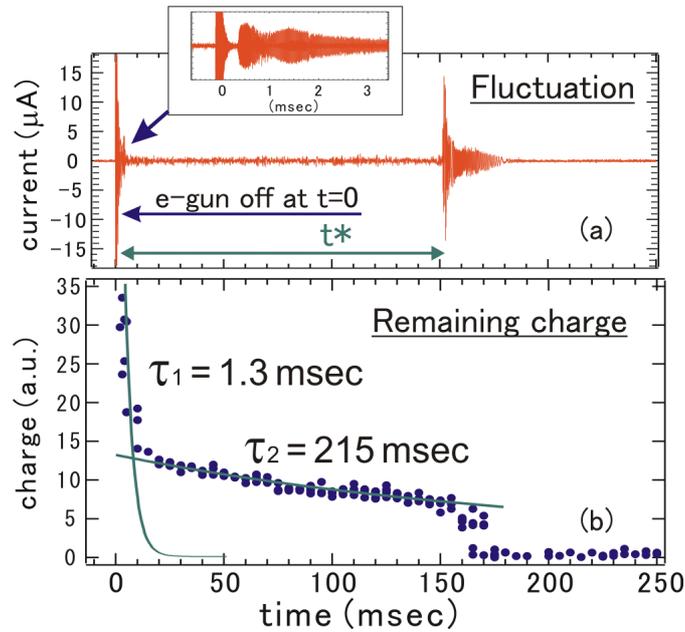


図2 (a)トロイダル電子プラズマの静電揺動波形と(b)wall probe 上の電荷の減衰.

Wall probe を使用した静電揺動計測(図2)によれば, プラズマに負バイアスを与える電位制御を行った際, 電子入射停止後に一部の電子プラズマが良好な閉じ込め特性を示す事が観測された. 揺動の外部電磁場依存性や伝播方向は, diocotron 振動モードと一致し, 揺動の周波数や wall probe を用いた電荷減衰計測によれば, 背景圧力 5×10^{-7} Torr, 磁場強度 100G 程度の dipole 磁場中において, 5×10^{-8} C 程度の電荷が 0.5 秒程度の閉じ込め時間を示した. 得られた電子プラズマの閉じ込め時間は, 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であり, また磁場強度や背景圧力に対する依存性も古典拡散の計算値とほぼ一致する傾向を示し, 中性衝突による拡散が閉じ込めの上限を与える, 良好な閉じ込め配位が実現されたものと考えられる. また, トロイダル磁場を追加する事で磁気シャーを与える事により, 電子入射中の電子プラズマの揺動が抑制される事を観測した.

中性プラズマ中の流れ駆動

13.56MHz RF(入力パワー ~ 200W)により生成された水素プラズマを用いて, プラズマ閉じ込め領域内部に配置したリング状の電極にDC電位を印加する事により, 内部導体系におけるプラズマのバイアスに対する応答を調べた. 図3に示す通り, 内部導体上に設置した電極にバイアス電圧を与える事により, プラズマの発光強度に変化が観測される. こうしたバイアスに応じたプラズマの空間電位分布構造を, 静電プローブを使用してポロイダル断面において二次元的に計測した. 径方向のプラズマ電流により規定される電極電流が最適化されるよう電極に負電位を与える事で, 内部の広い領域に径方向電場とトロイダル方向に流れ場を持つプラズマが生成された. これに対し, 電極に正電位を印加した時には, 電極付近に径方向電流の駆動が不可能な真空に近い領域が形成され, 径方向に駆動されるプラズマ電流は低下し, 結果としてプラズマ中に実効的な電場を保持する事は不可能であった. この場合, 電位降下は電極近傍の低電子密度層に集中して観測される. なお, 電極バイアス時の電流密度は, 実験パラメータにおける中性衝突による輸送係数からの計算値と比較的良く一致している.

ルーブアンテナ(誘導結合型)を使用してプラズマを生成した際, 適用したポロイダル磁場配位の磁気面とよく一致する等電位面がプラズマ内部に形成された(図4). 対応する径方向電場の大きさは最大で約 $3\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ であり, 対応する電磁場中での中性粒子との衝突周波数や磁化される条件の考慮, 及び慣性項を含めた水素イオンの軌道計算結果から, トロイダル方向にイオン音速を超えるプラズマ流速 ($10^5 - 10^6 \text{ms}^{-1}$) が駆動されたものと考えられる.

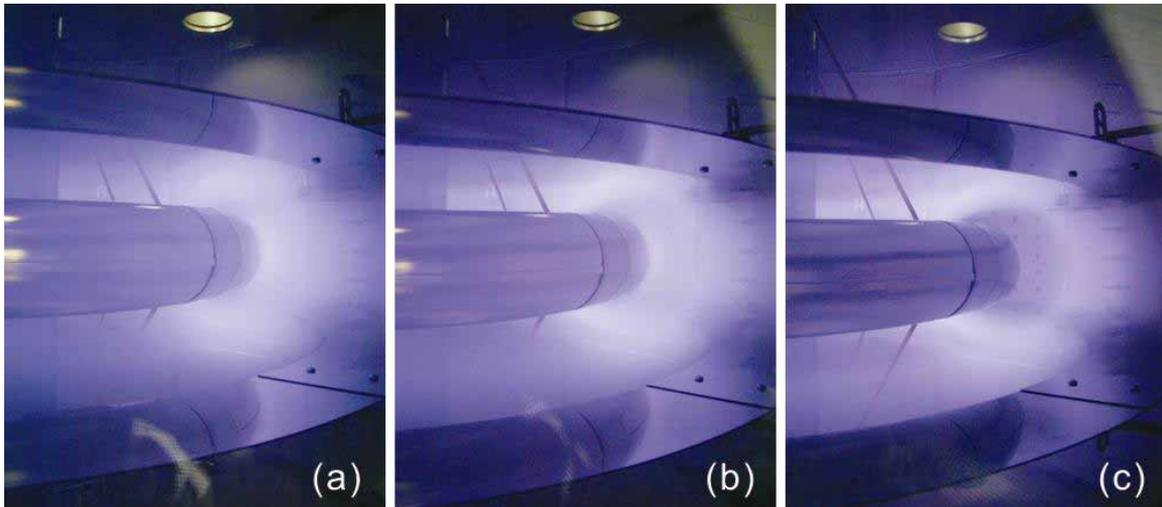


図3 中性プラズマへの電極バイアスの影響. (a) 負バイアス時, (b) 非バイアス時, (c) 正バイアス時.

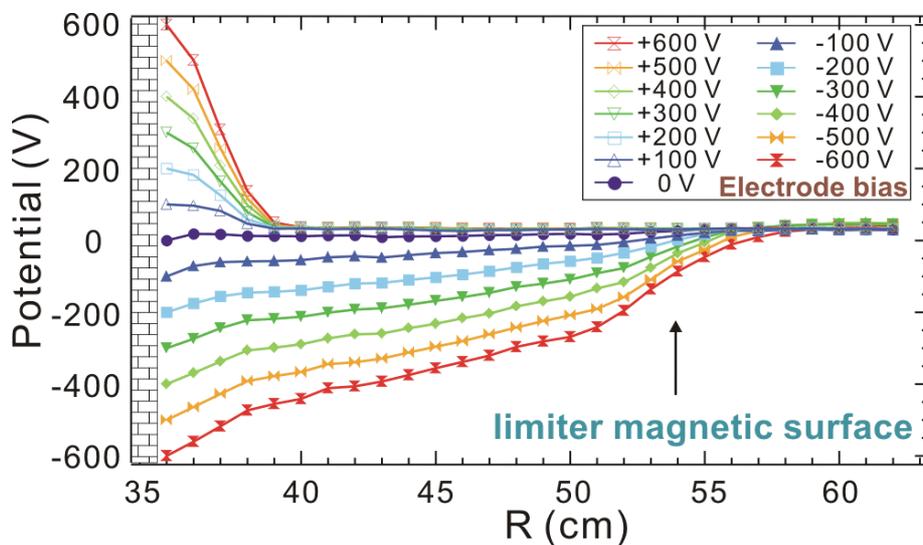


図4 各種バイアス電圧を加えた際の, 中性プラズマ中の径方向電位分布.

本研究を通して, 内部導体系におけるプラズマ中の電場 / 流れ場の生成及びその際に必要とされるプラズマの径方向電流等の基礎的な特性に関して実験的理解が得られたものと考えられるが, 現在の13.56MHz RF 実験ではプラズマ生成法や電源容量等の制約からプラズマは低密度(電子数密度 $\sim 10^{15} \text{m}^{-3}$)で, 静電的に取り扱える範囲に留まっている. 2流体効果の指標を与えるアルフベン速度は, 現在駆動されたトロイダル流と比較して非常に高速($\sim 7 \times 10^7 \text{ms}^{-1}$)であり, 流れがプラズマの平衡状態に与える影響の評価には至って居ない.

結論

本論文では, トロイダル磁気面配位における電場を持つプラズマの閉じ込め特性と内部電場構造に着目して, 内部導体型装置 Proto-RT において純電子プラズマと中性プラズマを用いた実験研究を行った. Dipole 磁場の磁気面とプラズマの等電位面を一致させる電極を用いたバイアス制御を行う事により, 磁気面配位において非中性プラズマの安定な閉じ込めを実現すると共に, 内部導体系における中性プラズマの電場形成に関して基礎的な理解が得られたものと考えられる.