

氏 名 若林 英紀

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 930 号

学位授与の日付 平成 18 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 ヘリカル系における非中性プラズマの生成と空間電位の
磁気面上不均一分布

論文審査委員	主査	教授	濱田 泰司
		教授	松岡 啓介
		教授	山田 弘司
		教授	際本 泰士（京都大学）
		助教授	比村 治彦（京都工芸繊維大学）
		教授	伊藤 公孝（核融合科学研究所）

博士論文要旨

論文題目

「ヘリカル系における非中性プラズマの生成と 空間電位の磁気面上不均一分布」

若林 英紀

非中性プラズマは高エネルギー、高密度粒子の閉じ込めや異種粒子の同時閉じ込めなど、宇宙物理から先進的核融合炉にいたるまで広い範囲への応用が期待される基礎学理である。また、非中性プラズマは本質的に自己電場を有し、それと外部磁場との相互作用により $E \times B$ ドリフト流を必ず伴うため、近年核融合プラズマなどにおいて注目されている「流れのあるプラズマ」の視野を広げるものとしても期待されている。

非中性プラズマを閉じ込める方式には、磁場と電場を外部から印加する直線型、非中性プラズマの自己電場によるドリフトを実効的な回転変換として利用する純トロイダル型、そして磁気面を利用する磁気シア型などがある。その中でも、トーラス磁気面配位における非中性プラズマの生成は、任意の非中性度のプラズマを閉じ込めることができるなどの利点があるため、上記の応用への第一歩として近年注目されている方式である。磁気面配位には大きく分けて内部導体系（軸対称系）と外部導体系（非軸対称系・ヘリカル系）がある。本研究では、核融合科学研究所のコンパクトヘリカル装置（CHS）中に非中性プラズマを生成し、その特性を調べた。

閉じた磁気面内に電子プラズマを生成する際には、粒子の入射方法が一つの重要な研究テーマとなる。そこで、本研究ではヘリカル磁場配位の外縁部に存在するストカスティック領域に注目し、その領域に電子を注入することにより磁気面内部への侵入を引き起こす方法を試みた。

実験セットアップは以下の通りである。導電性セラミック素材である LaB_6 を熱陰極とし、平行平板型の電極を持つ電子銃を、ヘリカル磁場の最外殻磁気面外側にあるストカスティック領域内に挿入する。熱陰極に $\sim 28\text{A}$ の電流を流して熱電子を生成し、電極間に印加した $\sim 1\text{kV}$ の電位差により加速して、電子ビームとして空間内に射出する。CHS 装置の磁場強度は最大 900G を用いており、内部の真空度は $5 \times 10^{-8}\text{Torr}$ 程度、磁気面内にプラズマの存在しない真空磁気面配位に対して電子ビームを注入する。一方、磁気面内に侵入した電子の電流や空間電位分布等はプローブにより測定する。プローブは Th-W のコイル型フィラメントを先端の電極とし、電極と電源を結ぶ導入線はコルツの絶縁鞘で包まれている。このプローブのフィラメントを交流電流により加熱し、高インピーダンス ($100\text{M}\Omega$) の抵抗を接続するとエミッシブプローブとして使用できる。また、フィラメントを加熱せず、バイアス電圧を印加した状態でプローブに流入する電流を測定すると、シングルプローブとしての使用が可能である。

上述のプローブを用いて磁気面内部における電流分布を測定した結果、ビームの射出を開始してから $100\mu\text{s}$ 以下程度の時間で磁気面深部まで電子が到達していることが確認された。上述の真空度においては、これは中性衝突などの時間スケールよりも有意に短い。また、CHS 磁場配位をシミュレートした電子の軌道計算を行ったところ、 1kV 程度の運動エネルギーを有する電子がストカスティックから磁気面内

部へ侵入するような軌道が存在しないことも確認している。そのため、この侵入現象は単なる単一荷電粒子の軌道運動では説明がつかず、何らかの無衝突侵入機構が働いて磁気面外部から内部への電子輸送が引き起こされたものと考えられる。また、入射電流を増加させると、それに伴い内部に生成される非中性プラズマの密度は増加する。しかし、その密度には上限があり、その上限は主に電子の加速エネルギーにより決定されることがわかった。内部に生成された非中性プラズマの密度は磁気面全体の平均で $10^{12}\sim 10^{13}\text{m}^{-3}$ 程度、空間電位の最大値は 1kV 程度である。

上述の侵入現象により磁気面内部に生成された非中性プラズマの特性を調べるため、空間電位の分布をエミッシブプローブで測定した。基本的に、空間電位は磁気面内部へ行くほど大きく、加速電圧と同程度となり、外縁部では小さい。これは電子注入により磁気面内に径方向電場（～ポロイダル方向の流れ）が生成されたことを直接的に示している。

また、プローブ駆動機構のストロークを伸ばし、プローブが磁気面を貫通する形で、各磁気面上の2点で空間電位を測定することにより、磁気面上で空間電位が一定になっていないという結果を見出した。具体的には、加速電圧が 1kV のとき、磁気面上で最大 200V 程度の電位差が生じる。

磁気面と等電位面のずれ（＝磁力線に平行な方向の電場の存在）は、核融合プラズマなどの中性かつ高密度な状態では極めて考えにくい。しかし、以下の考察により、有限温度、低密度な非中性プラズマではそのようなずれが生じうるということがわかる。まず、単一荷電粒子群などの非中性プラズマが温度を持たない場合、磁気面のような有限領域に閉じ込めると互いに反発し、系全体の静電エネルギーを最小にする静電平衡の状態に達する。この状態で磁気面上の電場は0である。しかし、非中性プラズマが有限の温度を有すると、熱運動によって静電平衡の状態から外れて電荷が再分布するため、磁力線に沿った方向の電場が発生することになる。これは自己電場による斥力と圧力勾配による力の平衡状態であり、このように、分布を偏在化させる自己斥力という効果が存在するのが、非中性プラズマの大きな特色であると言える。

以上のとおり、本研究ではヘリカル磁気面内に非中性プラズマを生成し、その特性を調べた結果、有限温度の非中性プラズマならではの「磁気面と等電位面のずれ」という状態が存在することを実証した。これは粒子閉じ込めの観点から言えば、粒子のドリフト面と磁気面のずれにより閉じ込め悪化に繋がるものである。磁気面配位において非中性プラズマの長時間閉じ込めを試みる際には、有限温度の効果や、プラズマと壁との配置（＝鏡像電荷の影響を左右する）等に関して十分に注意する必要がある。

論文審査結果の要旨

若林英紀君の学位論文は、ヘリカル型磁場配位の最外殻磁気面の近傍から電子を入射することによりヘリカル磁場中に非中性プラズマを生成すると共に、生成されたプラズマ中の電位や電子密度の空間分布を測定し、その物理的な特性を実験的に調べたものである。

非中性プラズマは、強い自己電場が期待されるため、核融合研究において注目されている「流れのあるプラズマ」の研究対象として近年興味を集めている。また、非中性プラズマの物理は、ビーム物理、加速器、原子核物理などにおける多様な荷電粒子系の物理現象の理解に寄与している。従来、非中性プラズマの研究は、直線型装置や単純トロイダル装置において行われ、閉じた磁気面を持つ磁場配位における研究はこれまでにない。荷電の違う粒子群の同時閉じ込めや高エネルギー粒子の閉じ込めを調べるためには、閉じた磁気面を持つ磁場配位が望ましい。このため、回転変換及び磁気シアを有するトロイダルヘリカル装置である核融合科学研究所のコンパクトヘリカルシステム (CHS) 装置において実験を行った。

実験には、電子銃、異なるトロイダル位置に設置された 2 本のプローブが用いられた。電子銃は、陰極と陽極の電極がいずれも平板で、それらが平行に設置された平行平板型と呼ばれる形式のものである。この型の電子銃を磁場中に挿入した際に、放出された電子ビームが CHS 装置の磁場と極板間の電場により $E \times B$ ドリフトを行うため、電子ビームの動特性が磁場に対するピッチ角に依存する。若林君は、実験、計算の両面においてこの点を調べ、CHS の複雑で強い磁場中における電子銃の特性に留意して実験を行った。また、プローブはエミッシブプローブとシングルプローブの 2 種類を用いた。これらのプローブの原理や実際の低密度非中性プラズマ中における適用について考察し、測定を行った。

閉じた磁気面の外から荷電粒子を入射し磁気面内に荷電粒子を蓄積することは、ロスコーンを利用した入射を除くと単一荷電粒子の運動では不可能と考えられている。電子銃の加速電圧と入射電流、磁場強度、電子銃の位置をパラメータとして、主として磁場のストカスティック領域に電子ビームを射出し実験を行った。電子が磁気面内に蓄積されたか否かを調べるために、プローブをトロイダル断面内で掃引し、電子の粒子束や空間電位の分布を計測した。その結果、電子が磁気面を横切り $100\mu\text{s}$ 程度の時間スケールで磁気軸近傍にまで到達していることが確認された。さらに閉じた磁気面内部に電子銃を置いた場合も中心部に効率よく電子が侵入することが見出された。中性粒子との衝突などの時間スケールとの比較により、この電子侵入現象が無衝突過程であると推定された。また、磁気面内部に生成された非中性プラズマの空間電位や密度が、ビームの入射電流値に対して顕著な非線形性を示すことも明らかにされた。これは電子の侵入現象が射出された領域の電子密度の上昇と不均一電位の形成と密接に関連するもので、単一電子の軌道運動では説明できない非線形現象である。それを裏付けるため、CHS の真空磁場の下での電子軌道を詳細に計算した。これにより、ストカスティック領域で射出された電子がストカスティック領域中に $10\mu\text{s}$ 程度滞在しうること、そして本実験の幾何学的配位のもとでは単一粒子の軌道は最外殻磁気面を横切らないことが示された。このように自己生成された電位により、閉じた磁気面を横切り磁気軸付近へ到達できることは初めて見出された現象である。電子入射終了後の空間電位は $100\mu\text{s}$ 以下の速い減衰のあと、数 ms 程度の長い時定数をもって減衰し、また、その減衰の時定数が磁場強度や磁場配位などの物理パラメータ

に顕著な依存性を示すことが示された。この観測結果は、磁気面を持つトロイダルヘリカル磁場配位における非中性プラズマの閉じ込め研究の端緒を開くものであり、今後の展開にとって貴重なデータを提供した。

次に、最外殻磁気面内への電子入射により磁気面内部に生成された非中性プラズマについて、2種類のプローブを用い、空間電位および電子密度、電子温度の空間分布を詳細に測定した。プローブのストロークは十分に長く、磁気面を貫通することが可能なため、各磁気面上のそれぞれ異なる2点においての計測が行われた。この計測により、空間電位や電子密度が同一磁気面上で異なり、温度はほぼ同一磁気面上で同じという結果が見出された。この結果は、デバイ遮蔽長が装置の特性長と同程度であることから矛盾しない。また高温の極限を仮定した非中性プラズマの空間電位分布を2次元系において計算し、磁気面と真空容器との位置関係によっては、真空容器の壁面に析出する鏡像電荷が磁気面上の電位変動の原因となりうることも併せて示した。計測された等電位面と磁気面の不一致は、粒子のドリフト面の磁気面からのずれを引き起こし電子の内部への導入に寄与していると考えられる。自己生成された電場によるドリフトと考えられる物理機構により閉じた磁気面が $100\mu\text{s}$ 以下の速い時定数で外部とつながり、電子源であるビームが遮断された後、電子は速い減衰の後、数 ms の時定数で減衰するというこの結果は、世界で初めての発見であり、今後の非中性プラズマ保持研究に大きなインパクトを与えた点で評価出来る。

以上の通り、若林君の論文は、電子入射による非中性プラズマの生成およびその物理的な特性に関する研究を、磁気面を持つトロイダルヘリカル磁場配位において、世界に先駆けて行ったものである。ここで示された成果は、核融合科学研究の発展に大いに資するものであり学術的価値は高い。よって、博士（理学）学位を授与するに値すると判断した。