

氏 名	かね こ とし ろう 金 子 俊 郎
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成9年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学位論文題目	電子サイクロトロン共鳴に伴うプラズマ電位形成
指 導 教 官	東北大学教授 佐藤 徳芳
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 佐藤 徳芳 東北大学教授 澤谷 邦男 東北大学教授 犬竹 正明 東北大学助教授 畠山 力三

論 文 内 容 要 旨

第1章 序論

プラズマにおける電位形成は、宇宙空間プラズマ、核融合指向プラズマ、材料プロセス用プラズマなど、プラズマが関与する多くの研究・開発分野で、荷電粒子の加速、プラズマの保持などに関連して、極めて重要な研究課題となってきた。

プラズマ中の電位形成機構の典型的なものとしては電気二重層があり、その強い非線形性、異常プラズマ抵抗の発生原因となることなどから現在でもなお強い関心が持たれ、世界各地の大学および研究所において様々な実験が行われている。この電気二重層の研究の発展として、異種プラズマ間、不均一磁場中および高周波電場を用いることによるプラズマ電位形成の研究が積極的に行われ、さらにこれらの不均一磁場や高周波電場を利用して電位分布を制御しようという研究が展開された。その代表的なものが核融合装置におけるプラズマ電位形成 (制御) であり、開放端系に属するミラー閉じ込め装置での端損失粒子を抑制するサーマルバリア付きタンデム型電位形成や、トカマクプラズマのダイバータ領域への適用を目的とした、磁場に沿ったエネルギーの輸送 (熱流) を制御する Thermal Dike と呼ばれる概念の導入などがその一例である。

このように、プラズマ空間電位の制御法の確立とプラズマの閉じ込めを決定する輸送現象を明らかにすることはプラズマの研究における基本的な要求であり、閉じ込め装置におけるさまざまな現象の理解およびプラズマ閉じ込めの改善につながるものとして重要である。しかし、これらの観点からプラズマ中の電位形成に関してこれまで行われてきた大型ミラー装置などでの実験では、磁力線方向の詳細な電位構造が明らかにされていないなど、その形成過程および機構が複雑で解明が困難であることが指摘されている。従って、これらのプラズマ電位形成の機構を解明することが現在の重要な課題となっている。

本論文においては、単純な不均一磁場中 (井戸型・収束型・発散型) に流入された完全電離無衝突プラズマ流に対してマイクロ波を入射し、局所 ECR 効果によって形成される電位構造を、マイクロ波入射パワー、ミラー比などのパラメータを変化させ測定した結果とそれに対する考察について報告している。これらの結果に基づき、単純な不均一磁場中での局所 ECR によるプラズマ電位形成の新たなシナリオを提示および実証することが本論文の目的である。

第2章 不均一磁場中での電子サイクロトロン共鳴加熱による電位形成のモデル

本章では、不均一磁場中プラズマにおける電子サイクロトロン共鳴 (ECR) に伴う電位形成のモデルを述べている。まず、井戸型および収束型磁場配位に流入されたプラズマ流を考える。このような磁場配位では、損失錐 (ロスコーン) の外側の粒子は磁場で閉じ込めることができるが、ロスコーン内の粒子は磁場で閉じ込めることができない。しかし、マイクロ波を入射し局所的に ECR により電子のみを磁場に垂直方向に加速すると、速度空間において磁力線方向となす角 (ピッチ角) が増加しロスコーンから飛び出すため、電子は磁場勾配で反射され弱磁場領域に捕捉される。このときイオンは、そのサイクロトロン周波数が電子に比べて極端に低く共鳴加速されないため、磁場勾配で反射されず通過していくものと考えられる。従って、プラズマ準中性条件を満たすためには、イオンを反射するための正の電位ピーク (プラグ電位) の形成が要請され、また井戸型磁場配位では磁気井戸での捕捉電子、収束型磁場配位では減速されることによる共鳴点付近での滞留電子によって負の電位くぼみ (バリア電位) の形成が期待される。また、本研究におけるミラー比ではイオンは磁場で捕捉できないため、プラグ電位の大きさは電子の反射される量に依存し、その上限はイオンのフローエネルギー程度になるものと考えられる。

次に、発散型磁場配位に流入されたプラズマ流を考える。このような磁場配位では、上述の場合とは逆に、ECR により磁場に垂直に加速された電子が弱磁場領域に流入すると、磁場勾配で平行方向の運動エネルギーが次第に増加する。このとき、イオンは共鳴加速されないため両者の間で荷電分離が生じ、これを補正するためにイオンを加速する電位降下が形成されることが考えられる。

第3章 実験装置および方法

本章では、本研究で使用した実験装置およびプラズマ生成源について述べている。さらに、プラズマパラメータの測定方法について説明している。

実験装置は、「*Q_T - UPGRADE MACHINE*」と呼ばれる円筒直線型装置を用いた。この装置は定常的に均一なプラズマを生成でき、電離に電界を用いないので比較的雑音の少ない静かなプラズマが得られ、プラズマ諸現象の基本的性質を調べるのに適している。

プラズマ生成源としては、オープンによって加熱気化されたカリウム蒸気を高真空中に排気された真空容器の中へビームの形で導入し、導入口付近 ($z = 160$ cm, z : 装置中央からの軸方向距離) に配置された高温金属板 (ホットプレート) との衝突で接触熱電離されたカリウムイオンとホットプレートから放出された熱電子からなる完全電離無衝突プラズマ流 ($n_e \approx 1 \times 10^9$ cm⁻³, $T_i < T_e \approx 0.2$ eV) を用いている。マイクロ波 ($\omega/2\pi = 6$ GHz) はクライストロンから矩型導波管 (TE₀₁ モード) で伝送されたあと、真空容器内で円形導波管 (TE₁₁ モード) に変換され、ホットプレートと対向の他端 ($z = -150$ cm) から磁場に平行に入射される。本実験では、通常は中性ガスを導入しない上述の完全電離無衝突プラズマを対象としているため、マイクロ波は不均一磁場中を伝搬し局所的に ECR を起こすので、中性ガスの電離による新たなプラズマ生成はなく、マイクロ波は電子の加熱のみに利用される。

また実験では、磁力線方向電位分布を中心に測定し、空間的に詳細な測定を行うことにより電位構造を明らかにしている。また、プラズマ流をパルス的に入射することによって電位構造の時間発展を詳細に測定し、電位形成過程を明らかにしている。

第4章 電子温度異方性に関する実験結果

電子サイクロトロン共鳴 (ECR) は本質的に電子を磁力線と垂直方向に加速する機構であるため、ECR 放電プラズマおよび ECR 加熱された各種プラズマにおいては、磁力線に対して平行方向と垂直方向の電子温度が異なる、すなわち電子温度異方性が存在するものと考えられる。この電子温度の異方性を実際に測定することは、ECR 加熱の本質を理解する上でも重要な課題である。そこで、本章ではこれまで行われてきた電子温度異方性の測定

法について検討し、簡便な測定法として磁化プラズマのイオン温度の異方性の測定のみにも有効であると考えられてきた遮蔽筒付き平板静電プローブ（イオンセンシティブプローブ）を電子に適用し、電子温度の異方性の測定を試みた結果について述べている。

その結果、マイクロ波を入射した場合に磁力線に平行方向の電子温度はほとんど上昇していないのに対して、磁力線に垂直方向の電子温度のみが急激に上昇していることが観測され、容易に電子温度の異方性を測定できることが判明した。従って遮蔽筒付き平板静電プローブは、簡便な測定法として特に基礎実験において有用性が高いと考えられる。これらの結果は、次章以降の不均一磁場中での ECRH に伴う電位形成に関する実験結果の理論的考察に適用できるものである。

第5章 電位形成に関する実験結果

本章では、各種不均一磁場配位中プラズマにおいて、ECR に伴うプラズマ電位形成の詳細な実験結果をまとめている。

まず、単純な井戸型および収束型磁場配位において、完全電離磁化プラズマ流にマイクロ波を入射し、局所 ECR 効果による電位形成を実験的に調べた結果、原理的には唯一点のみの ECRH で、共鳴点近傍でのバリア電位 ($\Delta\phi_d$) とその下流域でのプラグ電位 ($\Delta\phi_p$) が形成されることが明らかになった。バリア電位は、井戸型磁場配位の場合には局所 ECR 効果によって磁場勾配中で減速・反射された電子が磁気井戸領域に捕捉されることによって、収束型磁場配位の場合には局所 ECR 効果によって減速された電子が磁場勾配中に滞留することによって形成されることが考えられる。 $|\Delta\phi_d|$ の値は電子温度に相当する値 T_{e0}/e の数倍であり、プラズマ源から供給され続ける冷たい電子が ECR 領域に流入するのを防ぐ働き（バリア効果）も担っている。一方プラグ電位は、局所 ECR 効果により磁場勾配中で減速・反射される電子と局所 ECR 効果を受けずに磁場勾配を通過しようとするイオンに対するプラズマ準中性条件の要請により形成されることが考えられる。 $\Delta\phi_p$ の値はイオンのフローエネルギー相当であり、これによりほとんどのイオンは反射される（プラグ効果）。この観測された電位分布は、プラズマが共鳴点に到達した直後から形成されている。また、共鳴点を境に上流と下流で電子密度、電子温度に差が生じていることも観測された。収束型磁場配位での実験結果から、共鳴点が良い磁場曲率領域に位置する場合には、過渡的に形成されたプラグ・バリア電位は定常状態まで維持されるが、共鳴点が悪い曲率領域に位置する場合には、局所 ECR による悪い曲率領域でのプラズマ捕捉に伴う低周波不安定性によって半径方向へのプラズマ拡散が誘起されるため、過渡的に形成されたプラグ・バリア電位は次第に崩壊し定常的には維持されないことがわかった。これにより、井戸型磁場配位で過渡的に形成されたプラグ・バリア電位が定常的に維持されないことも説明することができる。マイクロ波入射パワー P_μ を増加させた場合、共鳴点近傍の電子温度と $\Delta\phi_p$ は同じように増大していくが、 $\Delta\phi_p$ は次第に飽和していくことが観測された。この $\Delta\phi_p$ の増大は、 P_μ の増加により磁力線に対して垂直方向の電子温度 $T_{e\perp}$ が増加し、磁場勾配で反射される電子数が増加することに起因していると考えられる。また、 $T_{e\perp}$ が十分に増加し反射される電子数が飽和すると、反射されるイオン数もそれ以上増加する必要がなくなるため、イオンを反射するために形成された $\Delta\phi_p$ も飽和していくと考えられる。このときの $\Delta\phi_p$ の値は、イオンのフローエネルギーに依存して決定されることが考えられる。ミラー比 R_m を変化させた場合、 $\Delta\phi_p$ は P_μ の場合と同様に R_m の増加とともに増加していくことが分かった。この場合も、 R_m が十分増加すると $\Delta\phi_p$ の増加は飽和し、その時の値はイオンのフローエネルギーで決定されることが明らかにされた。

発散型磁場配位中の局所 ECR 効果により、上述の $\Delta\phi_p$ の 1 桁以上も大きな定常的プラズマ電位降下が観測された。これは、局所 ECR によって垂直方向に加速された電子が磁場勾配で磁力線方向に加速される結果、プラズマ準中性条件の要請によりイオンを加速するような電位降下が形成されるためと考えられる。この電位降下により、イオンが磁力線方向に電位差 $|\Delta\phi|$ と同程度のエネルギーまで加速されることも観測されている。また、現象の時間発展を測定した結果、最初にフロント電子が高エネルギーにまで加速されることにより、平均電子エネルギー

ギー E_e とともに空間電位降下も急激に極値をとり、その後、後続するバルクプラズマの到達により、極値をとるときと比較して遅い時間スケールで定常状態に近づくことが明らかにされた。マイクロ波入射パワー P_μ を変化させた場合、 $|\Delta\phi|$ は P_μ とともに増加し、次第に飽和していくことが観測された。これは、共鳴点での ECR 加速が何らかの散逸機構が働き飽和していくことに起因していると考えられる。磁場発散度 R_m^{-1} を変化させた場合、 $|\Delta\phi|$ および下流域でのイオンエネルギー E_i は R_m^{-1} に比例して大きくなることを見いだされた。

第 6 章 考察および討論

本章では、不均一磁場配位中での局所 ECR により形成される電位構造について、第 5 章で得られた実験結果を第 2 章のモデルに基づいて考察している。また、マイクロ波入射に伴う局所 ECR 効果による電子加速についての定量的な考察も行っている。

さらに、電位形成のシナリオが本研究と異なる大型ミラー装置における実験結果との比較を行い、プラグ電位形成に対する規格化した電子温度の依存性がほぼ同じであることから、ECRH の加熱効率を含めなければプラグ電位の形成効率は大型ミラー装置とほぼ同じであると言及している。

第 7 章 結論

本章では、本研究で得られた成果を要約し、結論としている。本研究で得られた結果を総括すると、局所 ECR による不均一磁場配位中のプラズマ電位形成は、局所 ECR による選択的な電子の磁力線に水平方向の加速および減速に対して、プラズマ準中性条件の要請によって自己無撞着にイオンを加速および減速するような電位が形成されるという、極めて簡潔な機構で説明することができる。この原理は直接にサーマルバリア付きタンデム型の電位形成機構に適用でき、従来とは異なる電位形成シナリオを提示している。この成果は、タンデムミラー装置のプラズマ閉じ込め改善に対してだけでなく、トカマクダイバータでの熱輸送制御や宇宙空間プラズマでの粒子加速機構の解明などにも、大きな役割を果たすものと期待される。

審査結果の要旨

プラズマにおける電位形成は、宇宙空間プラズマ、核融合指向プラズマ、材料プロセス用プラズマなど、プラズマが関与する多くの研究・開発分野で、荷電粒子の加速、プラズマの保持などに関連して、極めて重要な研究課題となってきた。著者は、各種ミラー型磁界中において、プラズマの電子サイクロトロン共鳴 (ECR) に伴うプラズマ電位形成の基礎的研究を行い、比較的単純なモデルによって実験結果を説明し、新しい知見を得ている。本論文は、これらをまとめたもので、全文7章から成る。

第1章は、序論であり、プラズマ電位形成の重要性を指摘するとともに、これまでの研究を概観し、本研究の意義を明らかにしている。

第2章では、ミラー型不均一磁界中プラズマにおける ECR による電位形成のモデルを述べている。ECR によって、磁界と垂直方向に電子エネルギーが増加し、磁界配位に対応して、電子が反射、減速、または加速され、それに伴って、プラズマ電位が空間的に上昇または下降することを説明している。

第3章では、実験装置および方法を述べている。接触電離で生成される低温 (約 0.2eV) 無衝突プラズマを用いているのが特色である。第4章では、ECR に起因する電子温度の異方性を測定し、プラズマ電位形成に関わる有用な基礎データを得ている。

第5章では、各種ミラー型磁界中プラズマにおいて、ECR に伴うプラズマ電位形成の詳細な実験結果をまとめている。特に、プラズマが磁界方向へ流入する場合に、ECR 近傍に電位の谷が形成され、その前方に電位の上昇を観測しているが、この結果はプラズマ電位形成に新たな知見を加えるものであり、極めて重要な研究成果である。また、弱磁界方向へ向かうプラズマについては、ECR 点より下流で、急激な電位減少が現れ、電子温度の1~2桁程度相当のイオン加速が起こることを見出している。この結果は ECR によるイオン加速の研究に大きな貢献をなすものである。

第6章は考察および討論であり、実験結果を第2章のモデルに基づいて検討するとともに、大型ミラー装置におけるプラズマ電位形成の研究との比較を行い、新たな提案を行っている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、ミラー型磁界中プラズマの電子サイクロトロン共鳴に伴うプラズマ電位形成に関する基礎的研究を行い、磁界配位に対応するプラズマ電位の空間的構造および関連するプラズマ現象を詳細に調べ、幾つかの新たな知見を得たもので、電子工学およびプラズマ理工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。