

	いしかわ いっお
氏 名	石川 稜 威 男
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成10年11月11日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条2項
最 終 学 歴	昭和41年3月 山梨大学工学部電気工学科 卒業
学位論文題目	負イオンプラズマの生成と診断に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 佐藤 徳芳 東北大学教授 犬竹 正明 東北大学教授 畠山 力三 東北大学助教授 飯塚 哲

## 論 文 内 容 要 旨

負イオン、電子と正イオンとで準中性条件が満たされている負イオンプラズマでは、プラズマ密度に対する電子密度の割合(電子密度比)を比較的自由に變えることが出来るので、プラズマの基本的なパラメータである Debye 長を制御することが可能である。従って、プラズマ中を伝搬する波動の特性も制御することが可能であり、プラズマ物理学的に関心が持たれている。また、負イオンプラズマはガスレーザ、プラズマプロセス、核融合炉に入射する中性粒子ビーム生成用負イオン源、ダストプラズマや電離層などのプラズマで生じており、その研究対象が広がっている。荷電粒子の平均自由行程が装置長と同程度か長い、無衝突負イオンプラズマを生成する方法としては、接触電離プラズマ装置(Quiet machine、Q マシン)とアルカリ金属の塩化物を組み合わせる方法、プラズマ生成部をグリッドで囲い、その外側に拡散したプラズマと電気的負性気体を組み合わせる方法、そのグリッドの代わりに magnetic filter を使用する方法及び multicusp 型の装置と電気的負性気体を組み合わせる方法などが用いられている。しかし、これらの方法では、制御可能な電子密度比の範囲が狭い、多様なイオン種が生成される、または重い負イオンを生成することが困難であるなどの点で問題があった。また、負イオンプラズマの診断にはプローブ測定法や波動の伝搬特性を調べる方法などが用いられているが、それらの測定方法では近似的な取り扱いが行われていること、その適用範囲が不明確であること等の問題点があった。

そこで、電子密度比の値を1から零の間で自由に調節することが可能であり、正負イオン種はそれぞれ1種類で、かつ負イオンの質量が正イオンよりも大きな無衝突負イオンプラズマを生成すること、負イオンプラズマを定量的に診断するための測定方法を確立して診断を行い、生成した負イオンプラズマが所期の特性を有することを確認することを目標として本研究を行った。

上記の条件を満たす負イオンプラズマを生成するため、Q マシンに微量の六フッ化硫黄 ( $\text{SF}_6$ ) ガスを導入してプラズマ中の電子を付着させ、負イオンを形成する方法を開発した。Q マシンはアルカリ金属の接触電離で正イオンを生成し、熱電子と併せてプラズマを生成する。従って、運転時の圧力を低く保つことが可能であり、その電子温度は約 0.2 eV と低い。また、導入するガスとしては、人体や周囲の環境に悪影響を与えない、低エネルギー電子に対する付着衝突の断面積が大きい、質量の大きな負イオンが形成されること

などの条件を考慮して選択した。この方法では、加熱したアルカリ金属とハロゲン化合物である SF<sub>6</sub> を共存させることになるので、その安全性を確認することから研究を開始した。構成要素の物理化学的な性質や要素間の反応過程を調べ、電子と SF<sub>6</sub> ガスの衝突に関しては、電子衝突モデルと一次元流体モデルを導出して定量的な検討を行った。電子衝突モデルは電子の速度、その磁界に対する角度及びプラズマ生成電極から終端電極までの距離を微小なセルに分割し、既に調べられている SF<sub>6</sub> ガスの電子衝突断面積を使ってセル中の付着数を求める方法である。考慮した衝突過程は電子付着衝突、振動励起衝突及び運動量転移衝突であり、等方的に散乱した電子の流束密度の補正も考慮した。数値解析により、負イオン種は主に SF<sub>6</sub><sup>-</sup> であり、軽い F<sub>2</sub><sup>-</sup> や F<sup>-</sup> は生じないこと、振動励起衝突や運動量転移衝突は間接的ではあるが電子の付着率を高めること及び付着衝突を免れた電子の平均エネルギーの上昇は小さいことなどを示した。また、その解析結果と一次元流体モデルを使って SF<sub>6</sub> ガスの圧力と電子密度比の関係を求め、電子密度比は電子と負イオンの熱速度の比と電子の付着割合の積でほぼ決まることなどを明らかにした。

Q マシンで生成した負イオンプラズマをプローブ測定法で診断する際にはプラズマ中の負イオンの存在、プローブ表面に吸着するアルカリ金属及びプラズマを閉じ込めるために印加する磁界などの影響を考慮する必要がある。負イオンの影響については、プローブとプラズマの境界が正イオンシースとなることを前提とした解析が行われていた。しかし、本研究で生成したプラズマでは、負イオンの質量が正イオンよりも大きいので、電子密度比が小さくなると正イオンの流束密度が電子と負イオンの流束密度の和よりも大きくなり、負イオンシースとなることが考えられた。そこで、正イオンシースに加えて負イオンシースを考慮した解析を行い、それらの適用範囲を明らかにした。また、電子飽和電流と負イオン飽和電流の和を正イオン飽和電流で規格化した飽和電流比と電子密度比の関係を導出し、負イオンシースにおける飽和電流比は正イオンシースの結果を外挿した値よりも大きくなることを示した。なお、磁界の影響に関しては、飽和電流比から電子密度比を算出する際に使用するプローブの実効的な捕集面積を補正する方法を示した。アルカリ金属の影響については、表面に吸着した原子が電気双極子を形成して仕事関数が変わるため空間電位などの測定結果が変化すること、プローブ電流が二温度分布的な変化を示すことなどを示した。これらの検討結果を用いて負イオンプラズマの診断を行い、SF<sub>6</sub> ガスの圧力を高めると浮遊電位が空間電位に対して正となり、正イオンの流入を阻止する電位構造となること。従って、正イオンシースから負イオンシースへと移行することを示した。また、SF<sub>6</sub> ガスの圧力と電子温度の上昇率や電子密度比の関係を調べ、先の電子衝突モデルと一次元流体モデルの結果とほぼ一致することを確認した。

負イオンプラズマ中のイオン波の分散特性に関しては流体モデルと運動論的モデルを使って数値解析を行い、遅いイオン波と速いイオン波に分岐することを示した。遅いイオン波の位相速度は正イオンの温度  $T_+$  と負イオンの質量  $m_-$  に依存し、電子密度比に対してはほぼ一定であること、速いイオン波の位相速度は電子温度、正イオンの質量と電子密度比に依存し、電子密度比が低下すると速度が大きくなることなどを示した。イオン波の実験は、イオン波を励起する電極の構造、電極を取り付ける位置やバイアス電圧などを最適条件に保って行った。遅いイオン波は負イオンのサイクロトロン周波数よりも低い周波数領域で観測される波動であり、その位相速度は  $3.5 \times 10^{-4}$  cm/s と低速であること、その値は  $(T_+/m_-)^{1/2}$  にほぼ等しく、数値解析で予測されていた遅いイオン波であることを確認した。遅いイオン波についてはこれまで検出されていなかったが、その分散特性を実験的に確認することができた。速いイオン波に関しては、プラズマ生成電極の温度、アルカリ金属蒸気を発生させる炉の温度、磁界の強度などの Q マシンの制御パラメータを最

適条件に設定し、SF<sub>6</sub> ガスの圧力とイオン波の分散特性の関係を調べた。SF<sub>6</sub> ガスを導入する前や導入圧力が低い場合の分散特性はほぼ直線的であるのに対し、圧力を高めると正イオンサイクロトロン周波数とプラズマ周波数付近で分散性を示した。正イオンサイクロトロン周波数付近で認められる分散性は磁界に垂直な波数を考慮したときの解析結果とほぼ一致し、磁界に垂直な成分がない場合と較べてその位相速度は大きくなることが分かった。無衝突領域の実験では、磁界でプラズマを閉じ込めることが多いので、磁界がイオン波の分散特性に与える影響を考慮して電子密度比を求めることが必要である。

速いイオン波の分散特性から電子密度比を求め、電子衝突モデルと一次元流体モデルの解析結果及びプローブ測定の結果と比較したものを図1に示す。横軸はSF<sub>6</sub> ガスの圧力  $p$  とプラズマ生成電極からの距離  $z$  の積で示した。イオン波の分散特性から求めた電子密度比の値(黒四角)は、検出位置とイオン波の波長の関係から算出した値(白抜き菱形)、プローブ測定の結果(白抜き丸)や一次元流体モデルの結果(実線)とほぼ一致する。従って、本研究で定量的に検討した電子衝突モデルと一次元流体モデル及びプローブ測定法の取り扱いが妥当であることが確認された。また、図から明らかなように負イオンプラズマ中の電子密度比の最小値は  $1 \times 10^{-4}$  未満まで低減しており、SF<sub>6</sub> ガスの圧力を調節することによって電子密度比を4桁にわたって制御する事が可能であることが分かる。

本研究で開発した負イオンプラズマでは、SF<sub>6</sub> ガスの圧力が  $1 \times 10^{-3}$  Torr 未満の無衝突領域で電子密度比を1から  $1 \times 10^{-4}$  未満まで変化させることが可能である。また、負イオン種はほぼSF<sub>6</sub><sup>-</sup>であり、正イオン(K<sup>+</sup>)の質量の約3.7倍と重い。そのためSF<sub>6</sub> ガスの圧力を増すと、生成した負イオンプラズマの浮遊電位は空間電位に対して負から正へと変化する、シースの構造は正イオンシースから負イオンシースへと移行する。このように、負イオンプラズマを支配する粒子種を電子から正イオンに代えることが出来た。また、生成した負イオンプラズマを伝搬するイオン波に関しては、遅いモードを始めて観測したこと、電子密度比が小さな条件では、速いイオン波の分散特性に磁界に垂直な波数の影響が現れること、電子密度比を求める際にはイオン波の位相速度でなく、分散特性から導出すべきことなどを示した。

本研究で開発した負イオンプラズマではこれまでに、磁界に平行に伝搬する Trivelpiece-Gould モードの電子プラズマ波、速いモードの静電イオンサイクロトロン波やドリフト波の特性が調べられている。また、SF<sub>6</sub> ガスに替えてフラーレン C<sub>60</sub> を導入して負イオンプラズマを生成する方法も開発されている。これらの結果から明らかなように、本研究で開発した負イオンプラズマの生成方法と診断方法は質量の大きな負イオンを含むプラズマの研究に有効な手段となっており、実験室や宇宙空間におけるダストプラズマの計測にも有効である。従って、負イオンプラズマに関する今後の研究に寄与するところが大きいものと考えている。

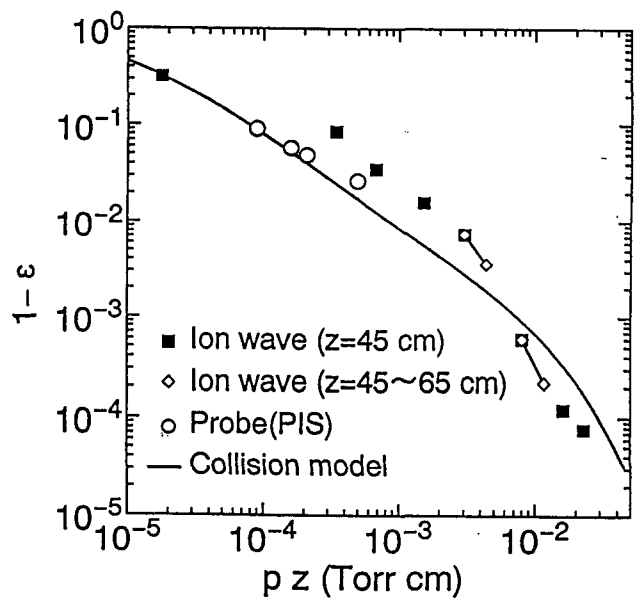


図1 電子密度比  $1 - \epsilon$  の  $p z$  依存.

## 審査結果の要旨

電子、負イオン、正イオンから成る負イオンプラズマは物理的に特異な性質を有するばかりでなく、核融合指向プラズマ、磁気圏・宇宙空間プラズマ、および材料・デバイスプロセス用プラズマの解明に欠かすことができないものとなってきている。本論文は、負イオンプラズマの実験的研究に必要な理想的な負イオンプラズマの生成法とその測定法について述べたもので、全文7章から成る。

第1章は緒論であり、負イオンプラズマの生成と診断の重要性を指摘し、本研究の目的と意義を述べている。

第2章では、独自の方法による負イオンプラズマ生成法と関連する素過程について述べている。接触電離で生成される、温度 0.2 eV 程度の電子とカリウム正イオンの磁化プラズマ中に、電子親和力の大きい六フッ化硫黄気体を導入することによって、電子、カリウム正イオン、および六フッ化硫黄負イオンから成る負イオンプラズマが生成される。放電によって生成される負イオンプラズマが一般に複雑な組成を持つのに比較して、著者の方法で得られる負イオンプラズマの組成は単純で、しかも負イオンの割合が六フッ化硫黄気体の導入量によって容易に制御でき、この方法は負イオンプラズマ生成法として極めて理想的なものである。

第3および4章では、生成された負イオンプラズマの探針法による測定について述べている。第3章で探針法の理論的な吟味を行い、測定結果を第4章で示している。電子の割合が百分の一程度までは探針で測定できるが、それ以下では探針測定による荷電粒子組成を確定できないことを明らかにするとともに、六フッ化硫黄への低温電子の付着による電子温度上昇を見出したことは注目に値する。

第5および6章では、プラズマ中を伝搬するイオン音波の位相速度が電子の割合に極めて敏感であることを利用して、負イオンプラズマの組成比決定を行っている。第5章で負イオンプラズマ中のイオン音波の分散関係を計算し、第6章で実験結果と比較している。イオン音波の位相速度の測定により、電子の割合が一万分の一以下でも、荷電粒子の組成比を決定できることを示し、探針では不可能な領域でのイオン音波による測定の有用性を明らかにしたことは重要な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、独創的手法により負イオンプラズマを生成し、その測定に探針およびイオン音波を用いて荷電粒子組成比を詳細に測定し、負イオンプラズマの生成法および測定法の確立に大きな寄与をなしたもので、電気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。