

【 227 】

氏名	毛 利 明 博 もう り あき ひろ
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工 博 第 101 号
学位授与の日付	昭 和 41 年 6 月 21 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 応 用 物 理 学 専 攻
学位論文題目	<b>Study of Ion Cyclotron Heating of Plasma</b> (プラズマのイオンサイクロトロン加熱に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 林 重 憲 教 授 大 谷 泰 之 教 授 阪 口 忠 雄

論 文 内 容 の 要 旨

本論文はプラズマ加熱の有効な方法の一つと考えられているイオンサイクロトロン加熱を主題にして、解析によりこの加熱機構の物理的意義を求め、また、この方法の有効性を実験的にも検討したものであって、9章よりなっている。

第1章において、一つの中心軸をもち、軸方向および軸の周りに周期的な分布をもつ高周波電極と高周波コイルの作る電磁界を変位電流が無視出来る近似内で一般的に求めるとともに、この一般的分布の特例として、ヘリカル型、線カスプ型等色々な高周波電磁界の型が見出されることを示している。

第2章では、第1章で求めたヘリカル型とピケットフェンス型の高周波電界と軸に平行な静磁界中におかれた希薄なプラズマに関して、そのイオンの運動、高周波電力吸収、その他協同現象を粒子的見地より解析して、両型の電界ともイオンサイクロトロン共鳴加熱に有効であることを示している。一方濃いプラズマの場合には、イオンのラーマー運動と同じ向きの電界の偏向成分はイオン電流の反作用でシールドされるが、逆偏向成分は大きな変化無しにプラズマ中へ浸透することを示している。またプラズマのイオンの速度分布がシフトしたマクスウェル分布のときの電力吸収を各場合について求め、このずれが大きくなりイオンがビーム状になった場合には、共鳴吸収の最大となる状態はドップラー効果でサイクロトロン共鳴点よりずれることを見出している。このドップラー効果の現われ方は上述の二つの型では異なる。

第3章では、イオンサイクロトロン波を非軸対称モードまで一般化して解析し、その分散式とプラズマ内部のイオンおよび電子の運動を求め、非軸対称イオンサイクロトロン波の内部構造を明らかにするとともに、イオンビームの演じる効果の説明も行なっている。この分散式が従来の軸対称モードと同じ形であることより、非軸対称モードのイオンサイクロトロン波のサイクロトロン減衰が期待されるとし、このモードによるプラズマ加熱を提案している。

第4章においては、イオンと他種の粒子との間の運動量輸送がイオンサイクロトロン共鳴吸収曲線の拡がりに及ぼす効果をイオンと中性原子間の場合を例に挙げ、これについて円筒状境界を考慮した解析を行

なっている。弱電離ガス中のイオンのサイクロトロン共鳴吸収曲線の半値巾を実測することよりイオンの運動量に関する衝突周波数を知ることが出来ることを示して、従来求めにくかった低エネルギーのイオンの中性ガス原子との衝突周波数の測定方法を提案している。

第5章は第4章の解析の実証実験を行なった結果を述べている。そして実際にイオンサイクロトロン共鳴吸収曲線の拡がり中性ガスの圧力に依存することを示し、ヘリウムイオン  $\text{He}^+$  のヘリウムガス中およびプロトン  $\text{H}^+$  の水素ガス中の運動量輸送に関する衝突周波数を実際に求めている。

第6章は波型磁界の一つであるヘリオトロン磁界をプラズマの閉じ込め磁界としてもつレーストラック型プラズマ発生機「ヘリオトロンB」を用いたジュール加熱の実験を述べ、イオンサイクロトロン加熱の対象とするプラズマの基礎資料を得ている。ヘリオトロン磁界中でのジュール加熱電流は放電管軸附近に集中していることよりヘリオトロン磁界の  $B=0$  線がプラズマの直径制限をすることに効果のあることを示している。また平衡条件を満すように磁界の補正をして不純物スペクトルの強度とアウトガスが共に減少することを確かめている。そしてこの装置で電子温度およびイオン温度がそれぞれ  $5 \times 10^5 \text{K}$  と  $1 \times 10^5 \text{K}$  のプラズマが得られることを示した。

第7章では、ジュール加熱でヘリオトロン磁界中に作られたプラズマを対象にして、軸対称イオンサイクロトロン波の励起と単粒子的イオンサイクロトロン共鳴による高周波電力吸収の実験を述べている。プロトンサイクロトロン波は効率80%以上で励起でき、このサイクロトロン波による吸収の最大となる周波数が理論通りサイクロトロン周波数より低いところにあることを確かめ、このずれより分散式を用いてプラズマ密度を推定している。単粒子的サイクロトロン共鳴は  $\text{He}^{++}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{D}^+$  のイオンについてそれぞれ観測しており、この吸収の山もそのイオンのサイクロトロン周波数からずれている。著者はこのずれは第2章で示しているイオンのビームのドップラー効果であると推定している。この考えよりビーム速度を算出して、それが  $\text{H}^{++}$  の場合  $10^7 \text{cm/sec}$  に達するとし、これが金属放電管を使用したためのジュール加速電界の集中に帰因するものと推断している。

第8章では、大電力高周波電力でのイオンサイクロトロン加熱の実験結果を述べている。加熱の結果、イオン温度はスペクトル線のドップラー巾より測定して  $1 \times 10^5 \text{K}$  より  $4 \times 10^5 \text{K}$  程度に上昇したが、電子温度はジュール加熱で得た温度と変化がないことを示している。

第9章では、ヘリカル型電界によるイオンサイクロトロン共鳴加熱の実験を行なった結果を述べている。100 KW 程度の高周波電力を用いて加熱した結果、出来たプラズマの電子温度は最大  $7 \times 10^5 \text{K}$  に達し、4 msec の時間  $5.5 \times 10^5 \text{K}$  を維持した。このことより、この型の電界もプラズマの加熱に有効であると結論している。

## 論文審査の結果の要旨

イオンサイクロトロン共鳴加熱は高温プラズマの加熱の一段として注目されているが、本論文はこれを理論的ならびに実験的に検討したものである。

まず、加熱するための高周波コイルを一般的に取扱い、出来る電磁界の分布のうちイオンサイクロトロン共鳴に適当なものを取上げ、次にこの分布の電磁界によるプラズマのイオンサイクロトロン加熱を粒子

的見地より討検し、プラズマ内のイオンの挙動を解析してこれらの高周波電磁界によるイオンサイクロトロン加熱の機構を明らかにした。イオンがビーム的になった場合にドップラー効果が現われることを予測し、これをプラズマ発生装置「ヘリオトロンB」を用いて実験的に実証した。また、見出した電磁界の分布の一つであるヘリカル型電界によるプラズマ加熱を試み、 $7 \times 10^6 \text{K}$  というかなり高い電子温度のプラズマを発生させている。

濃い密度のプラズマのイオンサイクロトロン加熱にはイオンサイクロトロン波の減衰を応用しなければならないが、本論文ではイオンサイクロトロン波について非軸対称モードまで拡張した解析を行っている。また実験的にも、ヘリオトロンBを用いて軸対称モードの励起を観測し、加熱によるイオン温度の上昇を測定し加熱作用を確認した。

従来よりイオンの中性ガス分子あるいは原子との衝突断面積は計算によっても実験によっても決定が困難であったが、原理的にイオンサイクロトロン共鳴吸収曲線の広がりより求まることを明らかにし、実験的にも成功している。この方法はその後 Malone 等により確立された。

以上のようにイオンサイクロトロン共鳴現象がプラズマの加熱に効果的に利用出来ることを解析的にも実験的にも確認し、プラズマ物性の一つの測定手段となり得ることを明らかにしたことは学術上ならびに工学上貢献するところが少なくない。よって本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。