

氏名	阿部東彦 あべはるひこ
学位の種類	理学博士
学位記番号	理博第227号
学位授与の日付	昭和47年1月24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	理学研究科物理学専攻
学位論文題目	<b>Low Frequency Instability in Plasmas Produced by Local Electron Cyclotron Resonance</b> (局所的電子サイクロトロン共鳴により作られたプラズマにおける低周波不安定性)
論文調査委員	(主査) 教授 田中茂利 教授 巽友正 教授 富田和久

### 論文内容の要旨

静磁場中にあるプラズマには種々の不安定が励起されることはよく知られている。特に実験室プラズマではプラズマとその外部の真空磁場領域との間の境界近傍に必ずプラズマの密度、あるいは温度の空間的勾配がある。この様なプラズマの圧力勾配によるドリフトが主役をなすような一種の微視的不安定性、いわゆるドリフト波不安定性が特に注目されている。これらの不安定性は異常拡散と関連があり、磁場を横切る荷電粒子の損失が異常に大きくなる原因の一つと考えられるからである。

ドリフト波不安定性は外部静磁場と直角方向への荷電粒子の圧力勾配によるドリフト速度と一致する位相速度を持つ静電的な低周波振動、いわゆるドリフト波を伴うことを特徴とし、無衝突ドリフト波と衝突ドリフト波とがある。申請者の研究は後者の波に関するものである。

従来のドリフト波の実験的研究は主に熱電離によって作られたセシウムプラズマを用いて行なわれた。このプラズマは静かであるが電子とイオンとは等温度で、且つ低温度(～2,000度K)である。通常の直流放電プラズマでは雑音が多くて、この波の研究は困難である。申請者は不均一な静磁場と高周波電磁場とを組合わせて、局所的な電子サイクロトロン共鳴を行なうという特殊な方法によってプラズマを発生させ、静磁場に沿って流出させたプラズマについて実験を行なった。このプラズマは軸方向に直流電場がないため静かであり、ドリフト波の実験には適していることがわかった。このプラズマは電子温度が数万度の弱電離プラズマであり、電子の中性粒子との衝突周波数がかかなり大きく、ドリフト波は衝突型となる。

このプラズマ中に自然に励起される低周波振動を探針のイオン飽和電流のゆらぎとして検出し、スペクトル分析器を用いてその振動の諸性質を詳しく調べた。概要は(1)振動の周波数は4～9kHzでイオンサイクロトロン周波数(約30kHz)より充分低い。(2)第13次の高調波迄観測され、その強度は次数が高い程小さくなる。(3)振動数は磁場の強さに逆比例する。(4)振幅は半径方向に変化して最大値をとるが、その位置は電子の密度勾配が最大になる位置と一致する。(5)振動の基本波はイオンの反磁性方向にm=1モード

で回転している。(6)密度波はポテンシャル波より約90度進んで回転している。(7)振動はプラズマの軸方向には定在波を作っている。(8)プラズマの長さを短くすると周波数、振幅共に減少し、その分散特性は後進波のそれを示す。(9)更に短いプラズマ柱に対しては安定化される。(10)中性ガス圧と共に振動数は増加し、振幅は減少の傾向にある。

上記の実験結果はこのプラズマのパラメーターに対して衝突ドリフト波の満たすべき諸性質と一致することを申請者は示した。先に述べたように申請者の取扱った局所的サイクロトロン共鳴によって作られた電子温度の高いプラズマにおけるドリフト波は、今迄のセシウムプラズマのそれとは異なった特徴を示す。特に電子密度、直流ポテンシャルの半径方向の変化が大きいためこの電場による $E \times B$ のプラズマの廻転によるドップラー効果が大きな影響を与えることを示した。この効果を考慮すれば、ドリフト波の伝播はプラズマの廻転が小さいセシウムプラズマの場合とは異なって、イオンのドリフト方向になること、波の分散曲線が後進波型になること、及び振動数が中性ガスの圧力と共に増加することなどの実験結果を説明することが出来ることを示した。

さらに或る実験条件のもとではドリフト波の分数調波及びその高調波が励起されることを申請者は見出した。この現象を理論的に説明することに成功してはいないがこれは今迄に報告されていないドリフト波の新しい非線型効果であると考えられる。

#### 論文審査の結果の要旨

静磁場中にある静かなプラズマでは古典的な衝突拡散によって荷電粒子は磁場を横切って拡散して行く筈である。しかし実験室プラズマでの荷電粒子は古典的な拡散に比べ異常に早い拡散を引きおこす、いわゆる異常拡散によることが多い。この異常拡散或いはボーム拡散はプラズマの磁場による閉じ込めにとって重大な問題であり、プラズマ物理学の重要な研究課題の一つになっている。この異常拡散は有限なプラズマに必然的に存在するプラズマの圧力勾配によるドリフト波不安定性と密接な関連があると考えられ多くの実験が行なわれているが、現象が複雑多岐にわたる故にドリフト波不安定性そのものにも不明な点が多い。従来のドリフト波の実験的研究は主に熱電離によって作られたセシウムプラズマを用いて行なわれて来た。このプラズマでは電子とイオンとは等温度で2,000度K程度の低い温度である。

申請者は局所的電子サイクロトロン共鳴法という新しいプラズマ発生法によってテストプラズマを発生させ、このプラズマ内に励起されたドリフト波不安定性の実験的研究を行なったものである。このプラズマは電子温度が数万度、イオンのそれが室温という弱電離プラズマであり、等温度であるセシウムプラズマとは異っており、従ってそこに現われるドリフト波も異った特徴をもち、興味ある結果を得ている。ここでは電子と中性粒子との衝突周波数がドリフト波のそれよりも大きくて現われる波は衝突ドリフト波であることが明らかにされた。

申請者はこの電子サイクロトロン共鳴法で作ったプラズマに自然に励起されるイオンサイクロトロン周波数よりも低い低周波振動の諸特性を詳細に調べて、これが衝突型のドリフト波として説明され得ることを示した。この波の振幅と密度との空間的分布の相関、周波数の磁場依存性、密度波とポテンシャル波との位相関係などはセシウムプラズマにおけるドリフト波と同じ特性を持つ。

しかるに一方振動の基本波 ( $m=1$  モード) は電子の反磁性方向ではなくて、イオンの反磁性方向に廻転すること、ならびに振動数は磁場方向の波数が大きくなるに従って減少するという、いわゆる後進波型の分散特性をもつ。これらはセシウムプラズマでのドリフト波と全く異なる性質を示しているが、ECR プラズマにおけるドリフト波不安定性として解釈出来ることを申請者は示した。即ち、このプラズマでは電子温度が高いために半径方向の静的ポテンシャル分布が急峻であり、半径方向に強い直流電場が作られ、その電場と静磁場による  $E \times B$  の力のためプラズマは廻転する。この廻転によるドップラー効果が大きい故にドリフト波はイオンの反磁性方向に廻転することになり、又、分散曲線は後進波型のそれを示すことになる。実際に半径方向の直流電場を測定して、ドップラー効果の大きさを求め、それによる補正を行えばドリフト波の諸量が大凡満足出来ることが示された。また、興味ある結果の一つはプラズマ柱の長さによるドリフト波の安定化効果を示したことである。衝突ドリフト波では電子の中性粒子との衝突が電子密度の変動と摂動電位とが同相であるという条件を破り、それが荷電分離による電場の消滅を妨げる作用をもつ故に不安定性を導くことになる。それ故、プラズマ柱を短くして電子の平均自由行程の程度にすると荷電分離による電場が直ちにこの電子により打消されて了うのでドリフト波は安定化される。このことは従来セシウムプラズマの実験などでは他の効果 (例えばイオンのランダウ減衰) のために見出し得なかった興味ある結果である。

更に或る条件のもとではドリフト波の分数調波及びその高調波が励起されるというドリフト波の新しい非線型現象も見出している。

参考論文 3, 4 及び 7 は局所的サイクロトロン共鳴によって電子ビームを磁場の弱い方向に加速或いは逆に磁場の強い方向に飛んでくる電子ビームを反転追いかえすことの効果が磁場、高周波電波の形、その強さによってどう変わるかについて実験したもので、これらの研究は ECR プラズマ生成の基礎となっているものである。

これを要するに、申請者の論文は、プラズマの圧力勾配に基因するドリフト波不安定性の機構を解明し、新知見を提供してプラズマ物理学の分野に重要な寄与をなしたものである。

よって、本論文は理学博士の学位論文として価値あるものと認める。