

氏 名	こ 小 もり 森 あき 彰 お 夫
授 与 学 位	工 学 博 士
学位 授与 年月日	昭和 53 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 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	曲がり磁場中のプラズマの実験的研究
指 導 教 官	東北大学教授 柴田 幸男
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 柴田 幸男 東北大学教授 八田 吉典 東北大学教授 安達 三郎 東北大学助教授 佐藤 徳芳

## 論 文 内 容 要 旨

### 序 論

将来のエネルギー資源の一つとして、近年、核融合による原子力エネルギーが脚光を浴びている。これは、燃料となる重水素が偏在することなく豊富に存在し、高濃度の放射性廃棄物に悩まされることもないと考えられているからである。

熱核融合反応を起すためには、高温、高密度のプラズマをある時間以上保持する必要があるが、この手段として、現在、磁場による閉込め方法が最も有望視されている。特にトコマクやステラレータなどのトーラス装置は、プラズマの電磁流体力学的な平衡が得られるところから、実証炉に繋がる装置として研究が進んでいる。本論文の目的は、これらのトーラス装置におけるプラズマの振舞を基礎物理の立場から研究することにある。具体的には、荷電粒子が曲がり磁場で受ける加速度がプラズマの平衡と不安定に及ぼす影響と、その抑制の問題とを扱った。

## 第1章 実験装置及び実験法

装置の概略を図1に示す。装置は直線部と曲がり部（セクター）から成り、単純曲がり磁場 $\vec{B}$ とヘリカル巻線（ $\ell = 2$ ，ピッチ  $31.4\text{ cm}$ ）による磁場 $\vec{B}_H$ とを備えている。無衝突カリウムプラズマ（直径  $2\text{ cm}$ ，密度  $10^8 \sim 10^9\text{ cm}^{-3}$ ，気圧  $\lesssim 3 \times 10^{-6}\text{ Torr}$ ）は，エレクトロンリッチの条件下で接触電離によって生成され，負の電圧が印加された終端板で終端されている。したがってイオンはホットプレート前面の電子鞘によって加速されており，この電子鞘を制御することによってプラズマ（イオン）の流速  $V_0$ （つまりプラズマが曲がり磁場中で受ける加速度）を変化させることができる。グリッドは，プラズマの空間電位よりも十分に大きな負の電圧を加えると，プラズマがこれを通りぬけられないことを利用して，実験空間内にプラズマを流し込んだり，止めたりするゲートとして用いている。プラズマパラメータとその摂動は，図1に  $P_{1,2,3}$  で示した3本のラングミュア探針を用いて測定した。

## 第2章 プラズマの閉込め

磁場が曲がると荷電粒子は遠心力と磁場の勾配に基づく等価的な力を受け，トロイダルドリフトと呼ばれる運動を始める。この運動はイオンと電子で逆方向に起り（荷電分離），電界を誘起して新たなドリフト運動（ $\vec{E} \times \vec{B}$ ドリフト）を起す。このため，単純な曲がり磁場中ではプラズマを保持しておくことができない。そこで本章では，単純な曲がり磁場に  $\ell = 2$  のヘリカル巻線による磁場を加え，プラズマを閉じ込めることを試みた。

しかし，定常実験の時には単純な曲がり磁場中でもプラズマはほとんどドリフトしないことが明らかとなった。これは，荷電分離で生じた電荷を短絡する短絡路が存在するからで，次の様に形成されることが実験的に見出された。まず，曲がり磁場中で荷電分離によって生じた電荷は，磁力線に沿った電子の速い運動のために，直線部を含めたプラズマ柱全体に均一に分布する。したがって，非常に良い導電体であるホットプレートとプラズマが接していれば，これを介して短絡路が形成されることになる。この機構は，図2に示した様なパルス実験によって明らかになった。図2で，プラズマがホットプレートから離れた後（ $t_3$ ），大きな  $\vec{E} \times \vec{B}$ ドリフトが認められる。

ホットプレートによってプラズマの平衡が保たれている時にヘリカル電流を流すと，プラズマの断面は変形し，その形は理論的に求められる磁気面の形と一致することが確かめられた。ヘリカル電流の値が非常に大きくなると，セパトリックスを含む磁気面がホットプレートの直径よりも内側に入り込み，プラズマの密度は急激に減少する。これは，閉じていない磁気面上の磁力線に沿ってプラズマの損失が起るからである。

上述の結果から，磁場によるプラズマ閉込めの研究は，パルス実験を行えば可能であることが分かる。そこで，まず単純曲がり磁場中でパルス実験を行い， $\vec{E} \times \vec{B}$ ドリフトの加速度はイオン

が曲がり磁場中で受ける加速度に等しいことを確かめた。次にヘリカル電流を流して実験を行い、磁場に大きな回転変換を与えればプラズマの閉込めをある程度改善できることを見出した。しかし、図3に示した様にプラズマ柱のドリフト運動を2次的に詳しく調べた結果、セクター内にプラズマを閉じ込めるには、磁場に回転変換を与えるだけでは不十分で、磁力線が中心軸の回りをセクター内で丁度一回転する必要があることが分かった。

本章の実験結果は、プラズマ端の境界条件を考慮した、無衝突プラズマに対する簡単な軌道論で全て説明できる。

### 第3章 プラズマの不安定性

本章では、プラズマの安定性に関する実験（定常）を行い、レーリー・テラー不安定とドリフト不安定の二つの不安定が曲がり磁場中に存在することを見出した。

レーリー・テラー不安定（RT）は、荷電粒子が曲がり磁場中で受ける加速度（つまり $V_0$ ）を増大させると、磁場の悪い曲率の領域で励起される〔図4(a)参照〕。また、この不安定はイオンのラーマー半径（ $r_L$ ）効果とヘリカル巻線の作るシャー（ $L_s$ ：局所シヤ長）によって制御できる〔図4(b), (c)参照〕。

理論的には、イオンの粘性項を含む二流体の式から、レーリー・テラー不安定に対する分散式を導びくことができる。不安定が励起される本質的な原因は、プラズマの閉込めの時と同じく、トロイダルドリフト運動とこれに伴う荷電分離である。ヘリカル巻線の作るシャーは、分散式の中では磁力線方向の波数（ $k_z$ ）に置き換えられ、磁力線に沿った電子の運動を引き起して荷電分離によって生じた波の電界を短絡させ、不安定を減衰させる。同様に、イオンのラーマー半径も波の電界を短絡し、不安定波を減衰させる働きをする。この理論（実線）と実験（丸印）との比較を図4(d), (e), (f)で行った。両者は良く一致している。

ドリフト波（DW）には曲がり磁場の効果は現れないが、この波はシャーの変化に対して興味ある振舞をすることが分かった。但し、シャーが非常に大きい場合には、この波も安定化される。この不安定波の振舞は、レーリー・テラー不安定の時と同じく、シャーによって $k_z$ が制御されると考えれば、無衝突ボルツマン方程式から求められるドリフト波の分散式で説明することができる。これを図5に示す。

## 総 括

各章ごとに得られた結果をまとめて述べてある。

図1 装置図

図2 短絡路に関するモデル図と実験結果

図3  $\vec{E} \times \vec{B}$ ドリフトの $t_s$ に対する依存性。 $t_s$ はセクター内で定義された回転変換角を表わし、時間はプラズマがホットプレートから離れた時を基準にしている。破線はセパトリックスを含む磁気面（理論）を示し、実線は $P_2$ で、一点鎖線は $P_3$ で測定したプラズマの等密度線を表わしている。

図4 レーリー・テラー不安定。磁場の悪い曲率領域で $P_2$ を用いて測定したもので、(a)(c)(d)(f)は $B = 2.25 \text{ kG}$ , (b)(c)(e)(f)では $V_0 = 1.57 \times 10^5 \text{ cm/S}$ , (a)(b)(d)(e)ではヘリカル電流が零である。

図5 ドリフト不安定。 $m$ は方位角方向のモード数（波数は $k_y$ ）,  $\omega^*$ は $k_y K T \kappa / e B$ ,  $s$ は $(k_y r_L)^2 / 2$ ,  $\kappa$ は小半径方向の密度勾配 $\kappa = -d(\ln n_0) / dx$ をそれぞれ表わしている。図の1, 2の数字は分散式の異なる枝を示している。

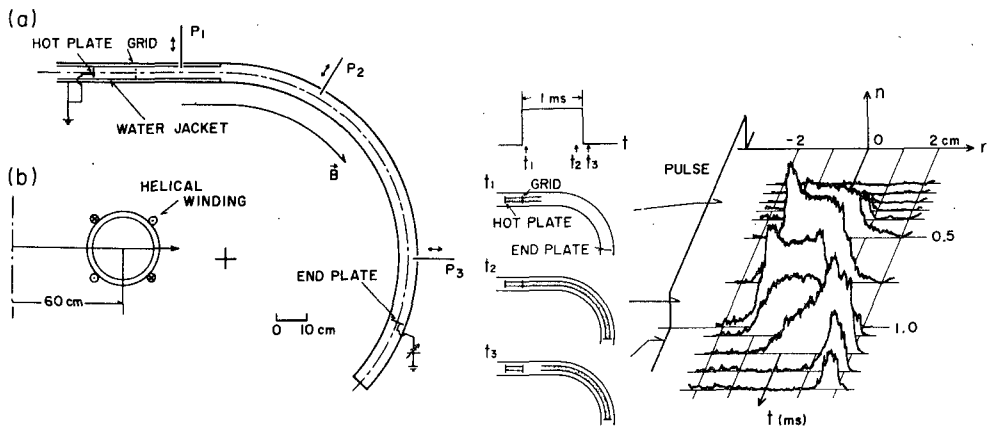
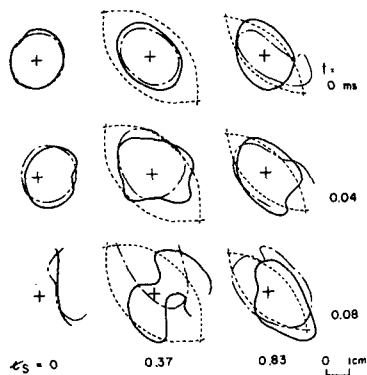
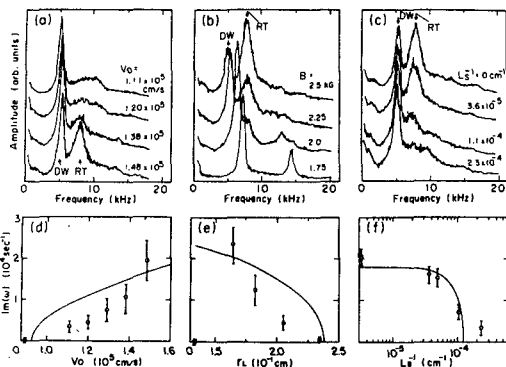


図1

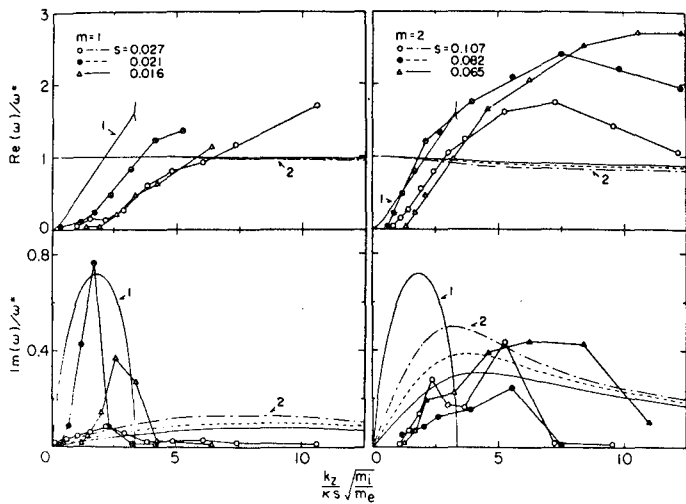
図2



⊠ 3



⊠ 4



⊠ 5

## 審査結果の要旨

制御核融合を実現するため、種々の形状の磁場によるプラズマ閉じ込め方法が提案されている。トラス形磁場配置による閉じ込めはそれらのうちでも最も効果的な方法とされ、多くの研究がなされてきた。しかし、いまだ数々の未知の現象があり、今後の研究にまっところが少なくない。本論文は、トラス形磁場配位中プラズマの基礎的性質を解明するため、トラスの一部である曲がり磁場を取り上げ、単純な曲がり磁場中プラズマの振舞い、特にプラズマのドリフトおよび不安定について詳細な測定を行い、理論的検討を行ったもので、序論、本文3章および総括よりなる。

第1章では実験装置および実験方法が述べられている。磁場は長さ60 cmの直線磁場に曲率半径60 cm、中心角約2.6 ラジアン of 曲がり磁場を接続したものである。プラズマはQマシーン（接触電離プラズマ発生装置）によって生成され、直線磁場部分から磁力線にそって導入される。測定にはプラズマ断面上を動くラングミュア探針が使用されている。磁場は最大2.5 kGであり、プラズマ密度は $10^8 \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$ である。また、ヘリカル巻線が設けられ、磁場に回転変換を与えることができる。

第2章では、まず定常状態でのプラズマの性質が述べられている。この場合は、プラズマがプラズマ源に接続されているため、曲がり磁場によるプラズマドリフトが現れない。これは磁力線にそって電子の運動が曲がり磁場によって発生する荷電分離をプラズマ源を通して中和するためである。過度プラズマについての実験は、プラズマがプラズマ源に接している間はプラズマドリフトが現れないが、プラズマ端がプラズマ源から離れると顕著なプラズマドリフトが現れることを示している。しかも同時に直線部分でもドリフトが観測された。これは曲がり部分の荷電分離が電子によって直線部分に伝達されるためであり、きわめて興味ある結果である。

第3章ではプラズマの不安定現象の測定およびその理論的吟味について述べている。観測された不安定はレーリー・テラー不安定とドリフト波不安定である。特に重要な結果は、レーリー・テラー不安定が曲がり磁場の外側に局在することを見出したことである。さらにプラズマの速度、イオンラーマー半径および磁場のシャーの影響が詳細に測定され、理論的予測と良く一致する結果が得られている。レーリー・テラー不安定が小さいシャーで消滅することが明らかにされたことはきわめて興味ある結果である。

以上要するに、本論文は曲がり磁場中プラズマの基本的性質を明確にし、曲がり磁場中のプラズマのドリフトおよび不安定に関する重要な知見を得たものであって、プラズマ工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。