

氏名	よし ぬま みき ろう 吉 沼 幹 朗		
授与学位	博士 (工学)		
学位授与年月日	平成12年3月23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) 電気・通信工学専攻		
学位論文題目	プラズマ中の径方向電位分布制御と低周波不安定性の研究		
指導教官	東北大学教授 犬竹 正明		
論文審査委員	主査 東北大学教授 犬竹 正明	東北大学教授 佐藤 徳芳	
	東北大学教授 畠山 力三	東北大学助教授 安藤 晃	

## 論文要旨

### 第1章 はじめに

プラズマ中の低周波揺動は、核融合プラズマの閉じ込めを劣化させる大きな要因と考えられている。最近、トカマクなどの各種磁場閉じ込め装置で閉じ込め性能が大きく改善される実験モードが見出された。このモードでは、密度揺動が抑制されると共に、円柱状プラズマの周方向回転流のシアが増大することが観測されている。さらに、回転流速の測定データから解析的に推定される電場あるいはそのシア（径方向変化）が大きくなることが報告されている。しかし、大型装置における磁場配位の複雑さや高温プラズマの電位分布計測の困難さから、不安定揺動に対する電場あるいは電場シアのそれぞれの効果はいまだ明らかにされていない。特に、電場及び電場シアを同時に制御し、それらの低周波揺動に対する影響に注目した実験報告例はこれまでにない。そこで、電場と電場シアの両方を制御すること、揺動の種類を明確に識別することを目指す必要がある。

そこで本研究では、径方向電場の制御及び測定が比較的容易でかつ単純な構造を持つ小型の装置においてプラズマ中の径方向の電位分布を制御し、そのとき観測される低周波揺動振る舞いを詳細に調べ、低周波揺動に対する電場および電場シアの効果を明らかにすることを目的としている。

### 第2章 実験装置

実験は Q<sub>T</sub>-Upgrade Machine において行った。本装置は長さ約 450cm、内直径約 20cm の円筒直線型装置である。真空容器は電氣的に接地されており、背景真空度は  $5 \times 10^{-6}$  Torr 以下に保たれている。アルゴンガスを作動ガスとした電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 放電によって実験対象のプラズマを生成した。ECR 放電は無電極放電であるため、電極を用いた電位分布制御実験に適している。磁場配位はプラズマの生成を行うために 2 つの ECR 点が存在する配位とした生成領域と、現象の理解を容易にするためにほぼ一様な配位とした実験領域とで構成した。測定は実験領域中に径方向から挿入した静電プローブで行った。生成領域と実験領域との間に設置したリミターによって実験領域でのプラズマ直径を約 9cm に制限した。これにより、密度勾配の急峻な位置を真空容器壁から離し、その位

置での真空容器壁の影響を小さくすることで電位分布制御を行いやすく、また現象の理解を容易にした。プラズマ中の径方向電位分布制御は装置端に設置した分割型エンドプレートによって行った。分割型エンドプレートは径の異なる 10 枚の同心リング状電極で構成されており、それぞれの電極に独立にバイアス電圧を印加することで径方向電場を制御できる。マイクロ波の入射電力が 200 W、生成領域でのアルゴンガス圧が  $5 \times 10^{-5}$  Torr のときに、電子密度  $n_e \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度  $T_e \sim 7 \text{ eV}$  のプラズマが生成され、主にそれを実験対象とした。

### 第 3 章 実験結果

#### 3.1 径方向電位分布制御

10 分割型エンドプレートの各電極へのバイアス電圧を微細に制御することによって様々な径方向電位分布を形成した。測定した電位分布を 6 次の多項式で近似することにより、径方向電場および径方向電場による  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフト回転周波数シア（以後、電場シアと呼ぶ）を算出し電場および電場シアの制御範囲を示した。また、電場および電場シアを制御した時の電位分布形状を提示した。10 分割型エンドプレートを用いることで、密度勾配を大きく変化させずに電場のみならず電場シアにも注目した電位分布制御ができたことを示した。

#### 3.2 低周波密度揺動の観測

径方向電位分布制御にともない観測される低周波密度揺動の周波数スペクトルを観測した。電場を変化させた場合、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトのドップラーシフトを受けて観測周波数が変化する経過が明確に観測された。電場シアを変化させた場合、シアが強い領域においてフルートモードが強く観測された。また、揺動強度は電場および電場シアのどちらにも依存して変化した。

#### 3.3 揺動の識別

観測された低周波密度揺動のモードの識別の信頼性を高めるために、観測されている低周波密度揺動の性質の違いを調べた。

観測周波数の径方向電場依存性を測定することによって、それぞれの揺動が  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトのドップラーシフトを受けていることが明確になった。フルートモードではプラズマ内部の電位分布を放物近似することによって得られた電場、すなわち空間的に広い範囲での平均電場が支配的に周波数を決めていることが分かった。一方、ドリフトモードでは揺動が観測される位置での局所的な電場が支配的に周波数を決めていることが分かった。このことは、ドリフトモードおよびフルートモードの揺動の空間的な分布に大きく関係していることが予想される。

観測周波数の電子温度依存性を測定することによって、ドリフトモードの周波数が電子温度に比例する傾向があるのに対し、フルートモードの周波数は電子温度に依存しないという明確な違いを観測できた。これらの振舞いはそれぞれのモードの性質と矛盾しないため、本実験における揺動同定の信

頼性があがった。

ドリフトモードおよびフルートモードの揺動が空間的にどのように分布しているかを確認するために、揺動の周波数スペクトルの径方向分布を測定した。その結果、ドリフトモードはブロードな周波数スペクトルとなり、密度勾配が急峻である径方向位置に局在していることが分かった。一方、フルートモードはコヒーレントな周波数スペクトルとなり、空間的に広い範囲で分布していることが分かった。このことは、観測周波数の電場依存性によって予想されたことと矛盾しない。

これらの実験を通して、観測されている2種類の揺動を明確に分離することができ、それらがプラズマ中の典型的な低周波揺動であるフルートモードとドリフトモードであることを高い信頼性で同定できた。

### 3.4 揺動強度の電場および電場シア依存性

フルートモードおよびドリフトモードの揺動強度を電場と電場シアの2次元マップ上に等高線表示した。

フルートモードは、電場シアの強い所でのみ励起された。また、電場依存性としては、電場が零の所で最大となっており、電場が正および負に強くなるとその強度は減少する。

ドリフトモードは、電場が少し負の領域において最大となり、電場を負の方向、および正の方向に変化させることで揺動強度が減少した。また、電場シアの増加にともない、最初は揺動強度が増大するが、さらに大きな電場シアが形成されると揺動強度が減少した。

## 第4章 検討

### 4.1 フルートモードの電場および電場シア依存性

フルートモードには、磁場曲率に起因する交換不安定性、プラズマ中の電場による  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフト回転により駆動される回転駆動不安定性、プラズマの流れの速度にシアが存在する時に駆動されるケルビン・ヘルムホルツ不安定性、不均一電場中において電子およびイオンの  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフト速度が異なることにより駆動される不安定性などが報告されている。本研究で観測されたフルートモードがどの種の不安定性であるかを検討した。その結果、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフト回転周波数のシア（電場シア）が増大することにより不安定化されるケルビン・ヘルムホルツ型の不安定性であると結論された。この不安定性は、電場シアの特性長がイオンのラーマ半径程度より小さくなると発生することがわかった。

### 4.2 ドリフトモードの電場および電場シア依存性

ドリフトモードは少し負の電場の領域で不安定になる。すなわち、背景粒子の  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフト回転流からドリフトモードがエネルギーを受け取ることにより不安定化されるものと考えられる。その電場から正および負のどちらの方向に電場を変化させても抑制される傾向が観測された。この電場依存性は、Chaudhry *et al.* [J. Phys. Soc. Jpn. 57 (1998) 3043.]によって報告されている理論に一致す

る傾向である。一方、電場シア依存性として、電場シアを増加させると揺動強度が増大し、さらにシアを増大させると強度が減少するという傾向が観測された。揺動強度が最大となるシアの大きさは、ほぼイオン反磁性ドリフト周波数シア程度の大きさであることから、背景のイオンの流れのシアが関係していると考察した。すなわち、電場シアとイオン反磁性ドリフト周波数のシアが打ち消し合うことにより、イオンの周方向の流れのシアが弱められることと関連があることが示唆された。

#### 4.3 トカマク装置における L-H 遷移との比較

各種磁場閉じ込め装置において H モード遷移現象に代表される閉じ込め改善モードが観測され、その時に強い電場シアやプラズマの回転速度シアにより輸送障壁が形成されるとの予想がなされている。この節では、JFT-2M トカマクで観測されている L モードおよび H モードプラズマにおける推定電場と電場シアの値が、本研究で得られた電場および電場シアのマッピングのどの領域に位置しているのかを検討した。その結果、粒子輸送障壁の位置では、H モードプラズマでの電場シアは零に近いことが分かった。しかし、イオンの反磁性ドリフト周波数のシアが非常に高く、このため揺動が抑制されるものと考えられる。

#### 4.4 ドリフトモードの電場曲率依存性

ドリフトモードの揺動抑制には径方向電場のシアではなく、径方向電場の正の曲率（径方向電場の 2 階微分）が効果があるという報告がある。本実験で観測されたドリフトモードが電場曲率に対し、このような依存性を示すか否かを確認した。その結果、正の電場曲率の領域においてドリフトモードが抑制されるという効果は観測されなかった。

### 第 5 章 まとめ

核融合プラズマ閉じ込め特性に密接に関連する低周波揺動に対する電場および電場シアの効果を解明することを目的として、空間電位分布を微細に制御し、それと同時にプラズマ中の典型的な低周波揺動であるフルートモードとドリフトモードを観測した。それらの低周波密度揺動の強度変化を電場と電場シアの 2 次元マップ上に等高線表示した。このような報告は今までに行われていない。

観測されたフルートモードは、電場シアによって励起されるケルビン・ヘルムホルツ型の不安定性で、電場シアの特性長がイオンのラーマ半径程度以下のときに不安定になる。

ドリフトモードの揺動強度は、電子反磁性ドリフト周波数と  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフト周波数の方向が一致する弱い負の電場の領域で最大となり、さらに正および負の方向へ電場を変化させることにより抑制される。ドリフトモードの揺動強度の電場シア依存性の実験結果から、揺動の抑制には電場によるイオンドリフトのみならずイオンの反磁性ドリフトのシアも考慮に入れた実効的なイオン回転流のシアが重要であることが示唆された。

## 審査結果の要旨

プラズマ中の低周波不安定揺動は、核融合プラズマの閉じ込めを劣化させる大きな要因と考えられている。最近、トカマクなどの各種磁場閉じ込め装置で閉じ込め性能が大きく改善される実験モードが見出された。このモードでは、密度揺動が抑制されると共に、円柱状プラズマの周方向回転流のシアが増大することが観測されている。さらに、回転流速の測定データから解析的に推定される電場あるいは電場の径方向変化（電場シア）が大きくなることが報告されている。しかし、大型装置における磁場配位の複雑さや高温プラズマの電位分布計測の困難さから、不安定揺動に対する電場あるいは電場シアのそれぞれの効果はいまだ明らかにされていない。著者は、電位分布の制御と測定が容易な小型直線磁場装置を用いて、低周波揺動に対する電場および電場シアの効果に関する実験的研究を行っている。本論文はこの成果をまとめたもので、全文5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景及び目的を述べている。

第2章では、本研究で用いたマイクロ波生成プラズマ実験装置およびプラズマ中の径方向電位分布を制御するために装置の端部に設置された10分割同心円状エンドプレートについて述べている。

第3章では、エンドプレートに印加するバイアス電圧を微細に制御することにより数多くの電位分布を実現し、それぞれの分布に対して低周波揺動の周波数スペクトル強度を測定した結果について述べている。これらの系統的な実験データの解析から、揺動はプラズマ中の典型的な不安定性であるフルートモードとドリフトモードであると同定している。また、これら二つのモードの揺動強度を、電場と電場シアの2次元マップ上に等高線表示することに初めて成功した。これは核融合装置の閉じ込め改善機構の解明にとって極めて有効な結果である。

第4章では、観測されたフルートモードが、電場シアの増大によって駆動されるケルビン・ヘルムホルツ型の不安定性であり、電場の正負にかかわらず、その増大により揺動が抑制されることを明らかにしている。また、ドリフトモードについては、やはり電場の増大により揺動が抑制されるが、例えば、径方向電場を弱い負の値に固定して電場シアを増大させた場合には、いったん揺動強度が増大していくが、さらにシアを増大させると逆に減少するなど、電場と電場シアの両方に大きく依存していることを明らかにしている。さらに、この依存性は反磁性ドリフトを考慮に入れた実効的なイオン回転流のシアにより説明できること、従って、実際のトカマク装置での閉じ込め改善には電場および実効的なイオン回転流シアの両方が重要であることを世界で初めて指摘した。これらは高く評価できる。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、電場と電場シアに対するプラズマ中低周波不安定揺動の依存性を実験的に明らかにしたもので、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。