

論文内容の要旨

論文題目 A study of coherent and turbulent fluctuations
in the edge region of JFT-2M tokamak plasma

(JFT-2M トカマクプラズマ周辺部の
コヒーレント及び乱流的揺動に関する研究)

氏名 永島 芳彦

①研究背景と目的

磁場閉じ込めプラズマの揺動成分（力学的平衡の時間スケールよりも速く、かつ系の大きさに比べて細かい構造を持つ成分）は、プラズマの安定性・閉じ込め性能及び構造形成に対して重要な役割を担うことが理論的に指摘されている。例えば、乱流輸送が顕著なプラズマにおいて、乱流のエネルギー移送により自発的に励起される速度シア（径電場の勾配により生じる）が輸送を抑制するというモデルがあり、高閉じ込めモード（H-mode）の物理を説明する有力候補となっている。また、急峻な圧力勾配に駆動される自発電流により電流密度分布が変化し、その結果電磁流体的不安定性を励起し閉じ込めを劣化させるというモデルがある。これは H-mode で起こる周辺局在モード（ELM）という間欠的なエネルギー損失の機構を説明するものとして注目されている。さらに、ELM の発生しない H-mode 中にコヒーレントな揺動がしばしば観測されており、その揺動がプラズマの散逸に寄与して圧力勾配の上昇を抑制し、ELM の発生を制限している可能性もある。これらのモデルの実験的検証には、高時間空間分解能で揺動存在領域を測定する必要がある。一方、時間空間分解に優れたプローブによる測定は、プラズマへの影響、プローブの損傷の問題のため、限定的なものが多い。本学位論文の目的は、高速駆動プローブを用いてできる限り広い（空間）領域で揺動の特性を調べることであり、さらに他の計測手法を用いて、揺動の同定、揺動による構造形成の解明を行うことである。

②実験手法

本学位論文の実験は、日本原子力研究所の中型トカマク装置 JFT-2M にて行われ、トカマクプラズマの周辺部を対象に、主として三種の測定器（高速駆動プローブ、反射計、高速磁気プローブ

ブ)を用いて揺動の性質を調べた。これらの測定器のうち、高速駆動プローブは学位申請者の手によって設計・製作され、JFT-2M 装置へ設置された。この先端部にはモリブデン製の電極が4つ設置され、静電プローブとして使用した。また、圧縮空気を動力として最大 300mm のストロークを 500msec 程度で往復させることができ、1つのプラズマショット中にプラズマ周辺部の空間分布が測定できる。実際の測定では、主に1つの電極の印可電圧を掃引することによって電子温度測定を行い、残り3つの電極を浮遊電位揺動計測に用いた。

③実験結果

本学位論文では主に2種のテーマを議論する。一つ目は、プラズマ電流によるオーミック加熱(OH)放電中の、グローバルなエネルギー閉じ込めの変化を対象とし、変化が起こった時間帯の前後での周辺構造の変化、コヒーレントな揺動(ある狭い周波数領域で高い振幅を持つ揺動)と乱流的な広帯域揺動の振る舞いを研究した。二つ目は、中性粒子入射(NBI)による追加熱を行い高閉じ込めモード(H-mode)に遷移した放電を対象とし、コヒーレントな揺動の性質・空間構造の研究を行った。

(ア) OH 放電における 10kHz 付近の揺動と他の周波数間の非線形結合

グローバルなエネルギー閉じ込めの変化が起こった時間帯で、周辺構造と揺動の振る舞いの変化を静電プローブを用いて調べた。最外殻磁気面(LCFS)より 2cm 外側の磁気面を境に、電子圧力の増大が見られる(図1)。一方、負の径電場は変化前後で観測されるが、LCFS 近傍でプラズマ電位が上昇しており、電場のシア構造がわずかに変化している。電子温度揺動の寄与を無視して求めた、揺動による粒子束は、エネルギーの閉じ込め変化後に増大している。この時、浮遊電位揺動には 10kHz のコヒーレントな揺動が見られる。ほぼ同じ放電条件で、浮遊電位の負レベルの値が小さい別の放電では、10kHz の揺動は観測されていない。この揺動についてトロイダル方向とポロイダル方向の相関と位相を計算したところ、4mm 離れた位置で相関はほぼ1で、位相のずれも極めて小さいことが判明した。また、10kHz の揺動に関して、浮遊電位揺動とイオン飽和電流の揺動レベル(規格化した揺動振幅)を比較したところ、浮遊電位揺動のレベルが2~3倍ほどイオン飽和電流揺動レベルよりも

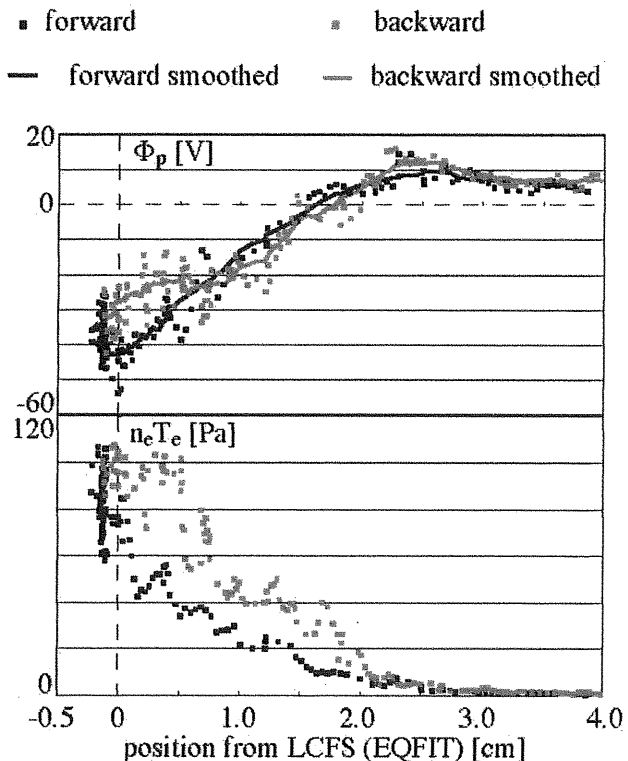


図1 グローバルなエネルギー閉じ込めの変化前(黒)と後(赤)の電位(Φ_p)・電子圧力($n_e T_e$)分布

高く、かつ浮遊電位揺動がコヒーレントであるのに対してイオン飽和電流揺動はコヒーレントでなかった。10kHz 揺動のこれらの性質は、Geodesic Acoustic Mode (GAM) という電位揺動と同じものである。GAM は磁力線にそった方向の圧力揺動もしくは速度揺動が非一様性を持つことによって励起される。GAM の角周波数 ω はイオン音速/プラズマ主半径で記述されるが、イオン温度が電子温度の三倍程度であると考えると実験値とほぼ一致する。さらに、GAM は密度揺動レベルが小さくても電位揺動レベルとしては観測可能な大きさになる。乱流のレイノルズ応力によってポロイダル流の生成が予測されているが、その非一様性が GAM の発生に関与することは十分考えられる。また揺動がコヒーレントであることから、波数空間と周波数空間に一定の対応関係があると仮定することができ、電位揺動と生成された流れの間の非線形結合が周波数空間での解析で観測される可能性がある。そこで浮遊電位揺動に関して、バイコヒーレンス解析（三波の非線形結合の度合いを示す）を行った結果、

0 及び 10kHz と他の周波数の間に有意な非線形相互作用があることが判明した。例えば、10kHz 近傍のバイコヒーレンスは、ノイズレベルが 0.04 であるのに対して非線形相互作用がある領域では 0.1 程度の有為な値を持つ。10kHz 揺動が GAM とすればこの実験結果は、10kHz 揺動が乱流のエネルギー輸送の変調に起因していることを示している。揺動の厳密な同定を行うためには波の分散関係を計測しなければならず、それは今後の課題である。

(イ) H-mode におけるコヒーレント揺動の性質

JFT-2M において、大きな ELM の存在しない H-mode 放電中に 2 種の特徴的なコヒーレントな揺動が観測されている。静電プローブ・反射層の異なる 2 チャンネルの反射計・高速磁気プローブの 3 種の測定器を用いて、揺動のタイプ（密度、磁場、電位）や空間構造を調べた。2 種の揺

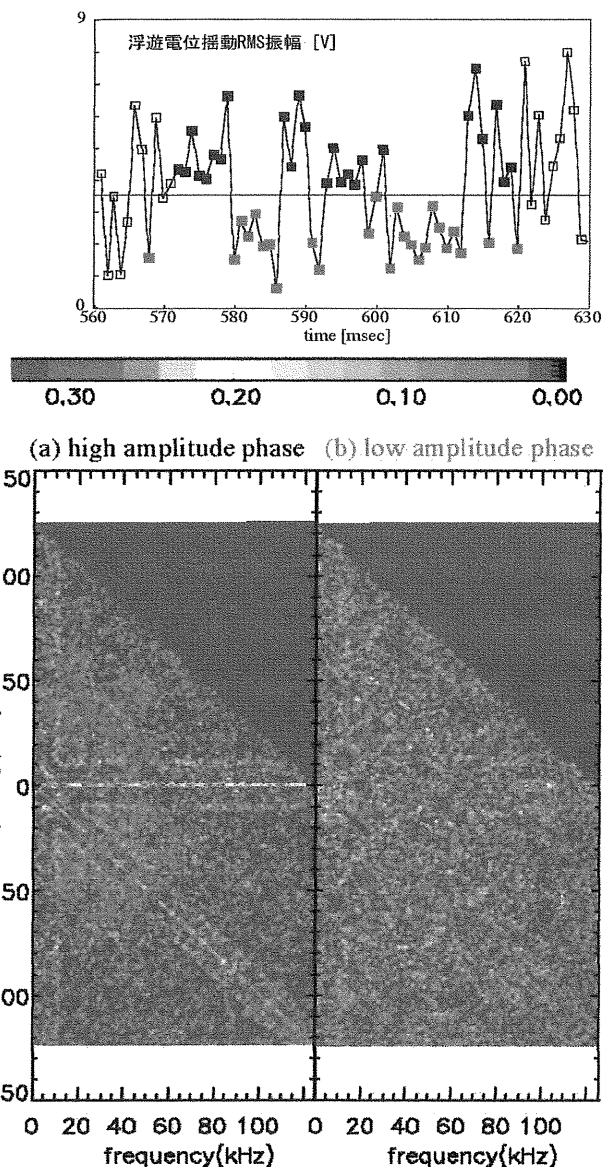


図2 (上) 10kHz 揺動の振幅。(下) 浮遊電位揺動のバイコヒーレンス。左下が 10kHz 揺動の振幅が大きい時間帯 (上の図の黒点) で、右下が 10kHz 揺動の振幅が小さい時間帯 (上の図の赤点)

動の内の一つは JFT-2M の高リサイクリング定常 (HRS) H-mode 中に観測されている 300kHz 程度の磁気揺動であり、もう一つは D_α 輻射強度の非常に小さい時間帯で観測されている 80kHz 程度の密度揺動である。300kHz の揺動は最外殻磁気面の外側の広い領域で浮遊電位揺動として観測され、その減衰長は 2cm 程度である。一方相関解析によって、300kHz 揺動が反射計で計測した密度揺動にも存在することを明らかにし、低密度側のチャンネルで相関が検出されるものの高密度側のチャンネルでは相関が観測されない場合があることが判明した。このことは、300kHz の揺動がプラズマの内側深くに浸透していないことを示している。周辺部に局在した MHD 揺動としては、高いモード数を持つバルーニングモード等が考えられるが、別のトカマク装置 (Alcator C-Mod) でも類似の放電でバルーニングモードが観測されている。後者の 80kHz の揺動は、高速磁気プローブでは観測できず、静電プローブでは強い電場のある領域においてのみ浮遊電位とイオン飽和電流に観測された。浮遊電位の揺動レベルはイオン飽和電流の揺動レベルに対して 4 倍ほど大きく、このことから、80kHz の揺動が静電波と仮定した場合ドリフト波ではないと考えられる。候補としては GAM が考えられるが、周波数が GAM としては高い値である。これらの揺動は、今後より詳細な計測によって種類を同定する必要がある。

④まとめと結論

本学位論文では、実験的に以下の点を明らかにした。1つ目は、OH 放電において 10kHz のコヒーレントな揺動を観測しそれが乱流揺動と非線形結合を持つことを明らかにした。この揺動は閉じ込め改善時に生成される帯状流と密接な関係にあると思われ、今後さらに詳細な分散関係の特定を行うことで閉じ込め改善過程の物理解明に貢献できると期待される。この結果より、仮定を含んだ議論だがレイノルズ応力によるコヒーレントな流れ構造が実際に生成されうると結論付けられる。2つ目は、H-mode で観測されたコヒーレントな磁場揺動と密度揺動の性質について明らかにした。磁場揺動が周辺部に存在することが示唆された点や、密度揺動がある磁気面より内部でのみ存在しうるとは今後のモードの同定に貢献しうる貴重な成果と考えられる。この結果より 2 種のコヒーレント揺動の種類について同定に貢献できたと結論付けられる。

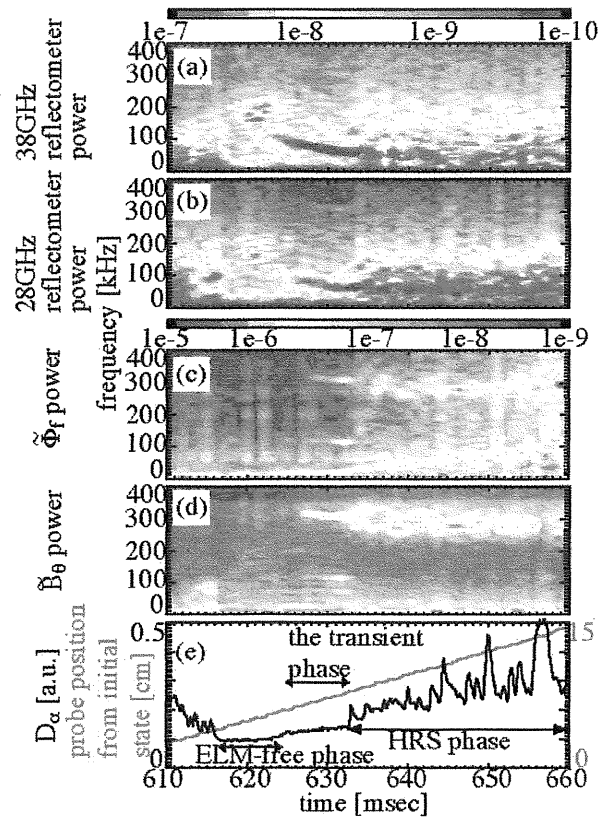


図3 H-mode プラズマで計測された(a)カットオフ密度 $1.8 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の反射計 (b)カットオフ密度 $1.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ の反射計 (c) 浮遊電位 (d) 磁気揺動のパワースペクトル (e) D_α 発光強度とプローブの位置