

マイクロ波コム反射計を用いた LHD プラズマにおける交換型不安定性の構造研究

曾我 良太（指導教員：渡邊 清政）

1. 緒言

将来の核融合炉において核融合反応を持続的に起こすためには、高温高密度プラズマを安定的に閉じ込める必要があるが、MHD 不安定性の発生によりプラズマの性能が劣化することが知られている。ここで、MHD とはプラズマ中の電子とイオンを一つの流体として取り扱い、その力学的性質を調べる学問である。MHD 不安定性とは、プラズマの圧力勾配や電流勾配が原因となりプラズマ中の揺動が成長し、磁場容器が変形することでプラズマが四散し、安定的にプラズマを閉じ込められなくなる現象である。特に LHD では、交換型不安定性の発生が問題となっている。交換型不安定性とはプラズマ圧力の不均一性が原因となり発生する不安定性であり、不安定性が発生した際、プラズマの等密度面が磁気面の周りで交互に入れ替わることから、このように呼ばれている[1]。交換型不安定性は圧力勾配が大きいほど揺動の成長が大きくなる。つまり、プラズマ圧力と印加磁気圧の比であるベータ値が大きいほど交換型不安定性が発生しやすくなる。線形シミュレーションでは、平均ベータ値が 5% のプラズマにおける交換型不安定性発生時のプラズマの等密度面の径方向変位量 ξ_r の径方向分布は共鳴面近傍 $\rho \sim 1$ で図 1 のように局在化すると予測されている。径方向変位量の絶対値や径方向の半値幅は MHD 不安定性による閉じ込め性能の劣化度と強い関連があると推定されており、シミュレーション予測の検証と合わせて、実際のプラズマ実験において径方向変位量を計測することは非常に重要となる。

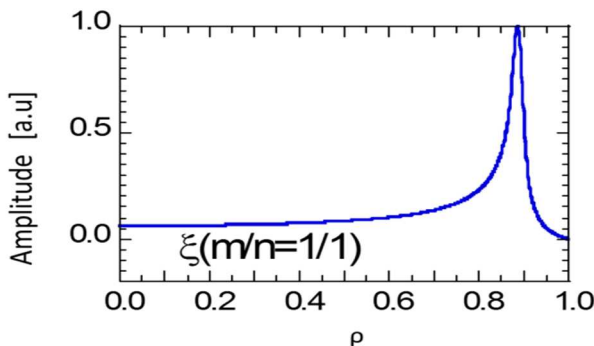


図 1: シミュレーションにより予想された ξ_r の径方向分布。

LHD における揺動計測装置は磁気計測器や電子サイクロトロン放射計測器(ECE)、軟 X 線計測器(SX)などがあるが、計測領域が運転磁場やプラズマ温度に制限されることや、空

間分解能が悪いことなどの短所が存在する。そこで本研究では、計測領域が運転磁場やプラズマ温度に制限されず、局所計測が可能なマイクロ波コム反射計を改良し、LHD においてプラズマ実験を行った。

2. マイクロ波コム反射計

マイクロ波と呼ばれる周波数が数 10GHz 帯の電磁波は、周波数に応じてある密度以上のプラズマ中を伝搬出来ず反射する(カットオフ)という性質を持つ。この性質を利用し、プラズマ中にマイクロ波を入射し、その反射信号を検出することによりプラズマの等密度面の動きを得るのがマイクロ波反射計である。マイクロ波コム反射計は、入力変調周波数に対して高次通倍の周波数成分を出力するコム発振器を反射計に適用したものである。図 2 に 1GHz の入力に対するコム発振器の出力周波数スペクトルを示す。これにより、様々な周波数のマイクロ波をプラズマ中に同時に入射させることが可能となる。各周波数に対応するカットオフ密度から跳ね返ってくる反射波と入射波の位相差から、等密度面(磁気面)の変位の振幅の空間分布の時間変化を計測することが可能である。カットオフ位置はプラズマの電子密度にのみ依存するため、計測領域が運転磁場やプラズマ温度に制限されることがなく、局所計測が可能である。さらに、発振する周波数間隔を小さく設定することで高い空間分解能を実現することが出来る。

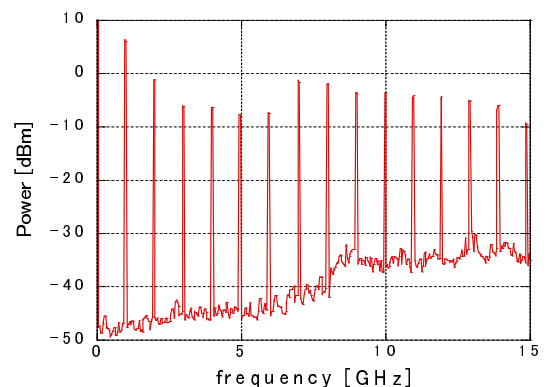


図 2: 1GHz の入力に対するコム発振器の出力周波数スペクトル。

既設反射計システムは Ka バンド(26~40GHz)の発振周波数帯のみであったが、今回、U バンド(40~60GHz)の周波数帯に対応したシステムを開発し追加した。図 3 に $4.5 \times (1 - \rho^8) \times 10^{19} m^{-3}$ の密度分布の場合の対応するカットオフ周波

数を示す。また、図中にはシミュレーションで交換型不安定性が発生すると予測された $\rho=0.8\sim0.9$ の範囲を赤枠で示した。これを見ると、Uバンドの周波数帯に対応したシステムを追加することで、交換型不安定性が発生する領域での計測に対応できることが分かる。

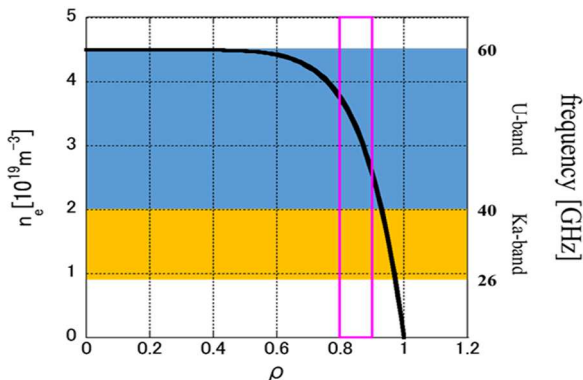


図 3. $n_e = 4.5 \times (1 - \rho^8) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の密度分布と対応するカットオフ周波数、赤枠は交換型不安定性が発生すると予測された範囲。

計測器の分解能は、時間分解能が $1 \mu\text{s}$ 、計測点の間隔は $n_e = 4.5 \times (1 - \rho^8) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の密度分布を持つプラズマの場合、最小で横長断面長径に対して 0.2% であり、変位振幅の分解能は 0.2 mm である。交換型不安定性による密度揺動は数 kHz の周波数帯であり、図 1 より分布の半値半幅は横長断面長径に対して 5% 程度である。よって、これらの分解能は交換型不安定性を計測するに十分な性能である。

3. LHD プラズマ実験の結果と考察

本研究では、開発した計測器を核融合科学研究所の LHD に設置しプラズマ実験を行い、得た計測データに対し複数の解析手法を試行し、解析手法を確立した。図 4(b) はマイクロ波コム反射計の計測信号のスペクトログラム、(c) は磁気計測器によって求めた高いコヒーレンスを持つ周波数成分をトロイダル、ポロイダル方向のモード構造毎に示したものである。図 4(a) に示すように放電番号 129946 の放電の $t=4.8\sim10\text{s}$ において約 2kHz の揺動が計測された。この揺動は図 4(c) に示すように $m/n=1/1$ のモード構造 ($b_{\theta 11}/B_T \sim 0.001\%$) を持っており交換型不安定性による揺動であると考えられる。図 5 に $t=9.35\sim9.37\text{s}$ におけるプラズマの等密度面の径方向変位量 ξ_r の径方向分布を示す。これを見ると $r_{\text{eff}}/a_{99} \sim 0.95$ を中心に半値幅として、プラズマ小半径に対して約 15% の広がりを持っていることが分かる。また構造の中心は $\iota = 1$ の共鳴有理面近傍に存在する。この時間におけるベータ値は $\beta \sim 1\%$ であり、そのときの交換型不安定性に伴う等密度面の

径方向変位量は最大で約 1.8mm であった。軟 X 線計測器において計測可能な ξ_r の最小値は約 10mm であり、本計測器において計測された ξ_r は、これの約 $1/5$ の値である。

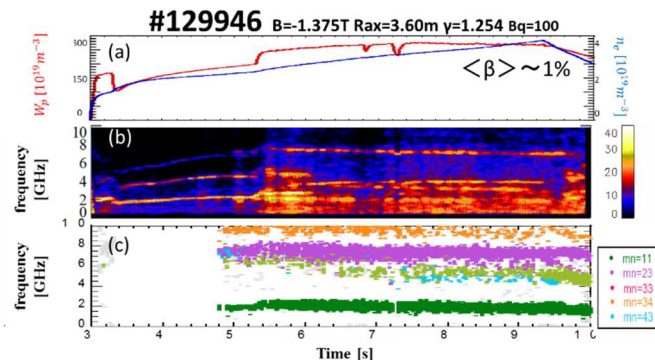


図 4 : #129946 における (a) 電子密度と電子温度 (b) マイクロ波コム反射計信号のスペクトログラム (c) 磁気計測器によって求めた各周波数成分のモード数。

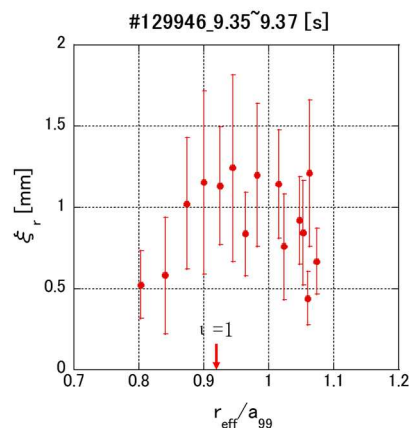


図 5 : #129946 放電における $t=9.35\sim9.37 \text{ [s]}$ の ξ_r の径方向分布。 r_{eff} は実効的小半径位置、 a_{99} はプラズマ小半径。

4. 結言

プラズマの電子密度揺動の分布計測が可能なマイクロ波コム反射計の開発・改良を行い、LHD プラズマ実験に適用した。 $\beta \sim 1\%$ の時の交換型不安定性による密度揺動を計測し、その ξ_r の径方向分布は $\iota = 1$ の近傍に存在しプラズマ小半径に対して約 15% の広がりを持つこと、また ξ_r は最大で約 1.8mm であり、この値は軟 X 線計測で計測可能な値に対して約 $1/5$ の値であることなどを明らかにした。

参考文献

[1] 宮本健郎、プラズマ物理・核融合、東京大学出版会
発表実績

- 第 70 回日本物理学会 (東京 2015 年 3 月)
- 17th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (Sapporo, Sep. 2015)
- 第 32 回プラズマ・核融合学会 (名古屋 2015 年 11 月)

投稿論文

- R. Soga, *et al.*, Journal of Instrumentation (accepted)
他、共著論文 1 件