

科学研究費補助金研究成果報告書

平成22年 3月 2日現在

研究種目：特定領域研究（公募研究）
研究期間：2005～2005
課題番号：17044002
研究課題名（和文） 高周波波動およびマイクロ波反射計を用いた高波数TAE計測模擬実験
研究課題名（英文） Measurement of RF wave simulating high wavenumber TAE modes using microwave reflectometry
研究代表者
江尻 晶 (EJIRI AKIRA)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号：30249966

研究成果の概要（和文）：結像光学系マイクロ波反射計を設計・製作した。ビームの半値全幅は約30mmであり、理論計算と一致した。製作した反射計を用いて、高周波入射時の密度分布の変化、高周波による密度振動を測定し、高周波電場を評価した。得られた電場は、波動コードによる予測と矛盾しない。また、高周波によって引き起こされるパラメトリック崩壊において、反射計信号の生成波動パワーが駆動波動パワーの二乗に比例することを見出し、非線形な過程であることを確認した。分布測定時に問題となる周波数校正法において干渉波形のマッチングを用いる新たな手法を開発した。また、一般的な測定配位における反射計の応答理論を展開し、その応用として新たな信号復元法を開発した。

研究成果の概要（英文）：A microwave reflectometer with imaging optics was designed and fabricated. The FWHM of the beam width is about 30 mm, agreeing with the theoretical estimation. Using the microwave reflectometer, density profile evolutions during the RF (21 MHz) injection were measured. In addition, the RF induced density fluctuation level and the RF electric field were obtained. The strength of the RF electric field is consistent with the prediction of a wave simulation code. The RF injection often generates another wave through parametric decay instabilities. It was found that the generated wave amplitude is a nonlinear function of the launched wave amplitude. A new relative frequency calibration method was developed. Theory of the reflectometer was developed, and a new complex amplitude reconstruction method was proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|------|-----------|
| 2005年度 | 2,900,000 | 0 | 2,900,000 |
| 2006年度 | 0 | 0 | 0 |
| 2007年度 | 0 | 0 | 0 |
| 2008年度 | 0 | 0 | 0 |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,900,000 | 0 | 2,900,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：マイクロ波反射計、高周波波動、密度分布測定、密度揺動測定

科学研究費補助金研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

(1) 燃焼プラズマにおいて、核反応で生成されたアルファ粒子は、MHD 不安定性であるトロイダルアルフベン固有モード(TAE)を励起する可能性がある。TAE は、アルファ粒子の損失を引き起こす。損失による閉じ込めの劣化、Q値の減少、損失粒子による第一壁の損傷は、避けなければならず、TAE が発生した場合には、これを確実に検出する必要がある。

(2) マイクロ波反射計は、プラズマコア部へのアクセスが容易なことから、さまざまな閉じ込め装置で用いられるとともに、ITER では Group2 の計測に分類され、開発研究がすすめられている。一方で、マイクロ波反射計は主として、密度分布測定として期待されており、定量的な(密度)揺動計測としての実績は十分ではなかった。

2. 研究の目的

(1) 本課題では、イメージング(結像)光学系を採用したマイクロ波反射計を設計・製作し、TST-2 球状トカマクプラズマを測定する。イメージング光学系を用いることによって観測領域である入射・反射マイクロ波のビームサイズを小さくできる。TAE を加熱用高次高調波(HHFW)が作る密度振動で模擬し、これを測定対象とする。具体的には、イメージング光学系によってどの程度までビームサイズを小さくできるかを確認するとともに、高周波数領域での位相検出が可能であるかどうかの見極め、燃焼プラズマにおけるマイクロ波反射計の可能性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 結像光学系マイクロ波反射計の開発

計測器であるマイクロ波反射計を設計製作した。できる限りプラズマ中でのビーム幅を狭くし空間分解能を高くするために結像光学系を採用した設計を行い、製作した。製作した反射計のビーム幅の測定と理論計算を比較し、性能を確認した。

(2) 密度分布測定

反射計のマイクロ波源の周波数を掃引して、密度分布測定を行い、高周波波動(21 MHz)入射の影響を確認した。周波数掃引時の周波数の相対校正法を開発し、高精度な測定を行った。

(3) 高周波密度振動の検出

高周波(21 MHz)の引き起こす密度振動を定量的に測定し、高周波の電場振幅を評価し、波動コードの予測と比較した。

(4) 複素振幅復元手法の開発

一般的な測定配位における反射計の応答を解析的に導き、理想的な配位における複素

振幅の復元方法を開発した。

4. 研究成果

(1) 結像光学系マイクロ波反射計の開発

マイクロ波反射計において、ビームスポットサイズをできるだけ小さくして、揺動の影響を抑えることがSN比の高い測定をするために必要である。そこで、できるだけ大きなポート(窓)を用いて、送受信ビームを絞ることができる反射計を設計・製作した。具体的には、26-40 GHz 帯に於いて、キルヒホッフ積分を用いた回折光学設計を行い、プラズマ中のカットオフ面近傍でビームのスポットサイズが最小になるような設計を行い、製作した。光学系はスカラーホーンアンテナ、第一凹面鏡、第二凹面鏡、真空窓(有効径 200)から構成される。大気中で第二凹面鏡から 500 mm の所での送信ビームサイズを測定したところ、水平方向半値全幅 80 mm、鉛直方向半値全幅 30 mm であり、これは、上述した設計と一致する(図1)。受信光学系も対称に構成されており、送受信の総合ビーム幅は、20 mm 程度と予想される。

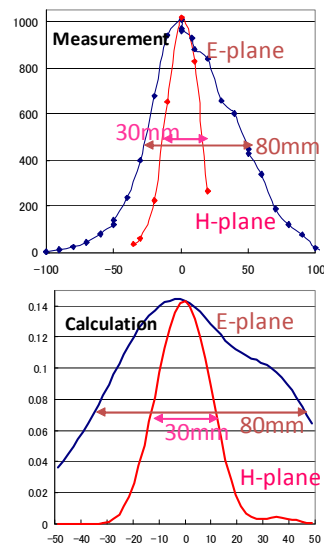


図1 送信ビーム分布。

発振器として、周波数固定の Gunn 発振器(25.9, 27.4 GHz)と周波数掃引が可能(

24-40 GHz)な電圧制御発振器(VCO)が使用可能である。前者は密度揺動測定、後者は密度分布測定に用いられる。受信波は、IQ デモジュレータ(DC-500 MHz)、DC アンプ(DC-100 MHz)を用いて複素振幅に変換される。これにより、高周波の直接測定が可能となった(図2)。

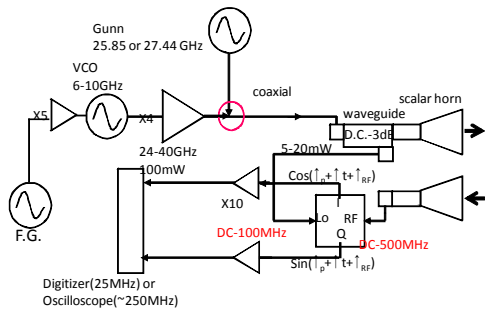


図2 反射計の構成

(2) 密度分布測定

高周波(21 MHz)入射中のプラズマ周辺部での密度分布の変化をマイクロ波反射計で測定した。図3は、初期密度が低く、入射高周波によるパラメトリック崩壊不安定性が起きるようなプラズマでの密度分布である。高周波入射中に密度が増えているのが分かる。

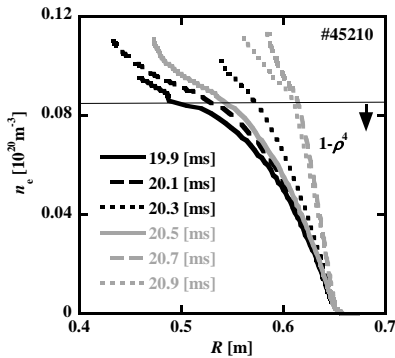


図3 高周波入射時の密度分布の変化

一般に、周波数掃引型反射計では、プラズマの揺動の影響を避けるために高速で周波数掃引を行う必要がある。一方で、密度は、位相の周波数依存性から計算されるため、周波数の測定精度を確保する必要がある。しかしながら、高速掃引では、回路、発振器の有限な応答時間のために、周波数と制御電圧の関係が低速掃引と異なる。そこで、高速掃引時の周波数の相対校正を行う手法として波形マッチング法を開発した。これは、真空入射時の干渉波形を利用する方法である。図4に低速掃引時と高速掃引時とでの干渉波形を比較する。横軸は掃引周期で規格化した。これらの波形の時間方向へのずれを時間軸フィッティングで求めてやることによって、周波数の変化(相対校正)を精度よく求めることが可能となった。この結果、掃引周期は最短で20 μsとすることが可能となった。

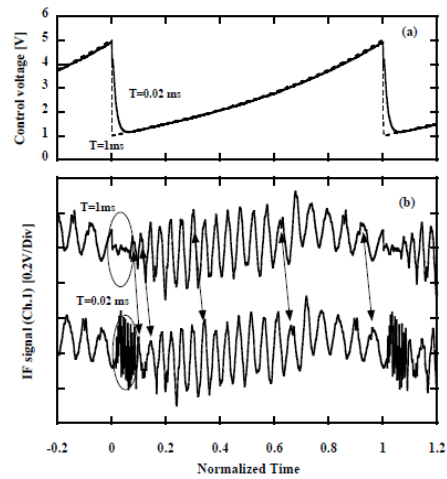


図4 規格化時間に対する発振周波数制御掃引信号と低速・高速掃引時の干渉信号

(3) 高周波密度振動の検出

周波数固定 Gunn 発振器を用いて、高周波入射中の位相揺動を測定した。図5に、ある時間帯の複素振幅(Cosine, Sine成分)を示す。入射周波数である21 MHzの成分のみを20倍に拡大して示した(図中の点線および赤線)。拡大した成分は、遅い円弧上の軌道で、円弧に沿う成分、すなわち角度振動が大きく、振幅振動が小さいことがわかる。このことから21 MHzの位相振動成分が正しく測定できていることがわかる。測定された位相の振幅と先述した分布測定とを併せて、密度振動の振幅で0.3 %rmsとなった。さらに入射した波動(速波)の分散関係を用いると、入射高周波のポロイダル電場はおよそ0.2 kV/m rmsとなる。この値は波動コード(TORIC)の計算結果と矛盾しない。

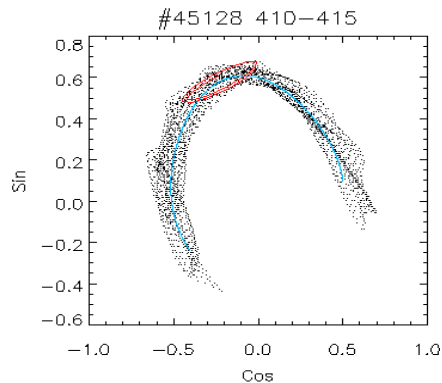


図5 高周波入射中の複素振幅の振舞い。

ある条件では、入射高周波はパラメトリック崩壊不安定性を通して、同じ速波と思われる波動を生成する。図6は、駆動源となる入射波動による反射計信号のパワーと生成された波動による反射計信号のパワーの変動の様子を示したもので、色の違いは異なる放電条件を示す。生成波動は、駆動波動の二乗に比例し、非線形な関係を持つことが示された。また、異なる放電条件でも同じ関係式で表されることが特徴である。

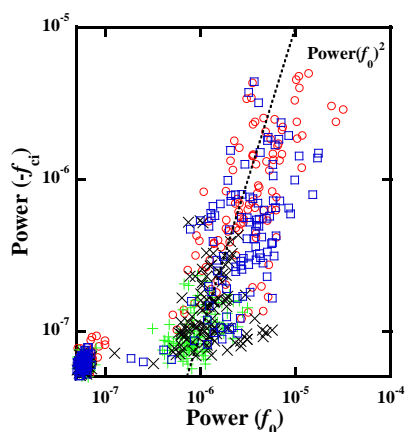


図6 駆動波動(21 MHz)と生成された波動(19 MHz)のパワーの関係。

(4) 複素振幅復元手法の開発

マイクロ波反射計は、プラズマ中のわずかな揺らぎに対しても大きな感度を持つが、応答が非線形かつ複雑で、しばしば、正しい位相測定が困難となる。また、応答はアンテナの指向性・位置、プラズマの幾何学的形状を含む測定配位の影響を受け、一般化することが困難と考えられてきた。しかしながら、送受信ビームパターンがガウシンビームで近似できる場合には、測定配位の影響を一般化して取り込んだ応答関数を求められることが分かった。これらを用いて、反射計応答のさまざまな側面を解析的に明らかにした。また、理論の応用として、測定配位が理想的な場合の複素振幅を復元する手法を開発した。図6に、模擬信号での複素振幅の復元の例を示す。左側が複素振幅の様子を示し、右側に振幅のヒストグラムを示す。上から、理想波形、通常波形、位相補正、位相補正+振幅補正を示す。理想波形では、プラズマ中の揺動は複素振幅の位相に反映され、振幅は一定である。通常波形では、さまざまな効果により、振幅は大きく変動し、時折、複素振幅は原点近傍にまで変動する。このような状況では正しい位相測定(揺動測定)が困難となる。この波形に対して、測定配置に依存する反射計の応答を求めて補正を行う。位相に対する補

正、振幅に対する補正を行うことによって、振幅変動が抑制されているのが分かる。

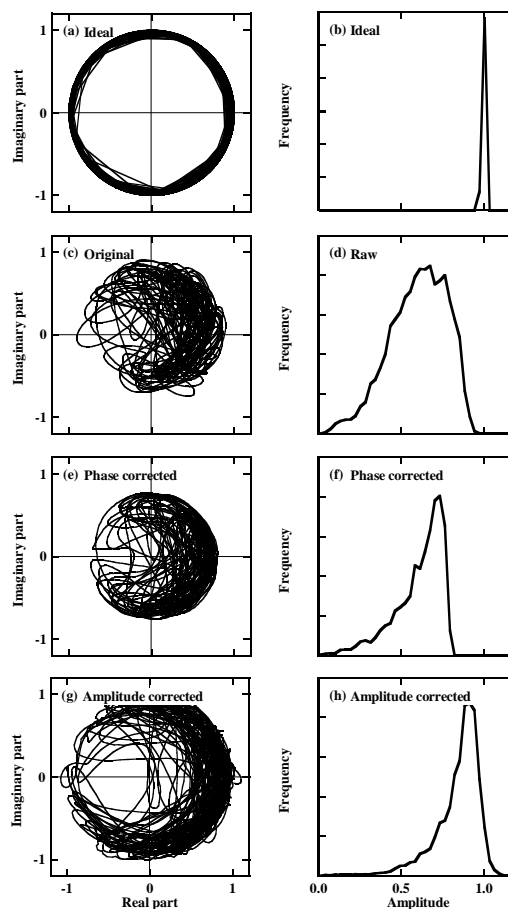


図7 上から、理想波形、通常波形、位相補正波形、位相・振幅補正の結果を示す。右図は、振幅のヒストグラムを示す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① "Parametric decay instability during high harmonic fast wave heating experiments on the TST-2 spherical tokamak", T. Oosako, Y. Takase, A. Ejiri, Y. Nagashima, (他 19 名) Nucl. Fusion **49**, 065020 (2009) 査読有
- ② "Heterodyne detection system of frequency hopping microwave reflectometer for Alfvén eigenmode measurements in LHD", T. Tokuzawa, A. Ejiri, K. Kawahata, and LHD Experimental Group; Plasma Device and Operations **17**, 126 (2009)

- 査読有
- ③ "The Response of microwave reflectometry under generalized configuration", A. Ejiri, T Yamada, Y Adachi, O Watanabe and Y. Takase, Plasma Phys. Contr. Fusion 50 No. 6, 065003 (2008) 査読有
 - ④ "Observation of Internal structure of energetic particle driven MHD modes in the Large Helical Device", T. Tokuzawa, A. Ejiri, K. Kawahata, and LHD Experimental Group, Plasma Fusion Res. 3, S1064 (2008) 査読有
 - ⑤ "V-band frequency hopping microwave reflectometer in LHD", T. Tokuzawa, A. Ejiri, K. Kawahata, K. Tanaka and Y. Ito, Rev. Sci. Instrum 79, 10F109 (2008) 査読有
 - ⑥ "Reflectometry for Density Fluctuation and Profile Measurements in TST-2", T. Yamada, A. Ejiri, Y. Shimada, T. Oosako, J. Tsujimura, Y. Takase (他 8 名) Plasma Fusion Res. 2, S1037 (2007) 査読有
 - ⑦ "Relative Frequency Calibration for Fast Frequency Sweep Microwave Reflectometry", A. Ejiri, Y. Shimada, T. Yamada, T. Oosako, Y. Takase and H. Kasahara, Plasma Fusion Research 2, 040 (2007) 査読有
 - ⑧ "Direct measurement of density oscillation induced by a radio-frequency wave", T. Yamada, A. Ejiri, Y. Shimada, T. Oosako, J. Tsujimura, Y. Takase and H. Kasahara, Rev. Sci. Instrum. 78, 083502 (2007) 査読有
 - ⑨ "Homodyne reflectometer for neutral beam injection interlock on large helical device", K. Tanaka, A. Ejiri, Y. Ito, K. Kawahata, T. Tokuzawa, M. Osakabe, and Y. Takeiri, Rev. Sci. Instrum. 77, 10E912 (2006) 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① "Parametric Decay Instability During High Harmonic Fast Wave Heating Experiments on the TST-2 Spherical Tokamak", Y. Takase, A. Ejiri, Y. Nagashima, T. (他 22 名), 22nd IAEA Fusion Energy Conference, Geneva, Switzerland, Oct 13-18, 2008 (EX/P6-27)
- ② "High Harmonic Fast Wave Experiments on TST-2 and UTST", T. Oosako, (他 24 名中 22 番、23 番), US-J and Korea-Japan RF plasma physic WS, Gifu, Japan, Mar. 16-18, 2009

"Measurements of rf wave by microwave reflectometry on the TST-2 spherical tokamak", A. Ejiri, U.S.-Japan WS on Millimeter-Wave Plasma Diagnostics, UC Davis, USA, Feb. 25-27, 2008

③ "TST-2 球状トカマクにおける反射計を用いた高周波波動の研究", 江尻晶, 山田琢磨, 島田善行, 大迫琢也, 辻村次郎, 高瀬雄一 (他 12 名), 日本物理学会第 62 回年次大会(鹿児島)2007 年 3 月 19 日-21 日 20pQA-10

④ "Design optimization of microwave reflectometry using Kirchhoff integral", A. Ejiri, T. Yamada, Y. Adachi, O. Watanabe, Y. Takase, 13th Int. Symposium Laser-Aided Plasma Diagnostics, Takayama, Japan, Sep 18-21, 2007, NIFS-PROC-68(2007)-PI-09 p66

⑤ "Reflectometry for Density Fluctuation and Profile Measurements in TST-2", T. Yamada, A. Ejiri (他 12 名), 16th International Toki Conference on Advanced Imaging and Plasma Diagnostics, Toki, Japan, Dec. 5-8, 2006

[図書] (計 1 件)

① 江尻晶、コロナ社、プラズマ診断の基礎と応用(プラズマ・核融合学会編)、pp. 345-351, (2006)

[その他] (計 1 件)

ホームページ

<http://fusion.k.u-tokyo.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江尻 晶 (EJIRI AKIRA)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：30249966

(2) 研究分担者

高瀬 雄一 (TAKASE YUICHI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：70292828