

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 30 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009 ～ 2012

課題番号：21246140

研究課題名（和文） マイクロ波イメージング反射計を用いた LHD でのプラズマ乱流計測

研究課題名（英文） Turbulence Diagnostics Using Microwave Imaging Reflectometry in LHD

研究代表者

長山 好夫 (NAGAYAMA YOSHIO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：10126138

研究成果の概要（和文）：

大型ヘリカル装置（LHD）において電子密度揺動が引き起こす反射面の観測のために世界初の三次元（3D）マイクロ波イメージング反射計（MIR）システムが開発された。これはプラズマに 4 周波数成分を持つマイクロ波を照射し、反射面での散乱波を結像光学系で二次元撮像素子（HMA）に結像するもので、周波数が半径方向（奥行き）に対応する。本システムを端部プラズマ高調波振動（EHO）の観測に適用したところ、磁力線に沿った細長い構造が観測された。今後この 3D MIR システムは乱流と閉じ込めを研究するための最も強力な計測になることが期待される。

研究成果の概要（英文）：

Three dimensional (3D) microwave imaging reflectometry (MIR) has been developed in the large helical device (LHD) to visualize fluctuating reflection surface due to the density fluctuation in the first time. The plasma is illuminated by the probe wave with 4 frequencies, which correspond to 4 radial positions, and the imaging optics makes the image of cut-off surface onto the 2D horn antenna mixer arrays (HMA). This system is applied to observe the edge harmonic oscillation (EHO), and a narrow structure along field lines is observed. The 3D MIR is expected to be one of the most powerful diagnostics to study turbulence and confinement.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	12,600,000	3,780,000	16,380,000
2010 年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2011 年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2012 年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
総計	34,100,000	10,230,000	44,330,000

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：プラズマ計測、マイクロ波、ミリ波、イメージング、乱流、電子密度揺動

## 1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマ閉じ込めでは乱流が主役を演じているとされているが、乱流の解明は

進んでいない。主な理由は乱流計測が困難なことである。乱流は複雑な現象であるから、画像として観測することが大事である。画像計測には時間的空間的に高分解能なイメー

ジグ計測器が要求される。乱流は静電不安定性が生成すると考えられ、静電揺動は電子密度揺動を引き起こすので電子密度揺動のイメージング計測器が有力である。しかしこれまでの電子密度揺動計測は視線方向の積分量であり、空間的分解能は良くなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、乱流計測するための時間的・空間的に高分解能な電子密度揺動のイメージング計測器を開発し、核融合プラズマ実験に適用することである。

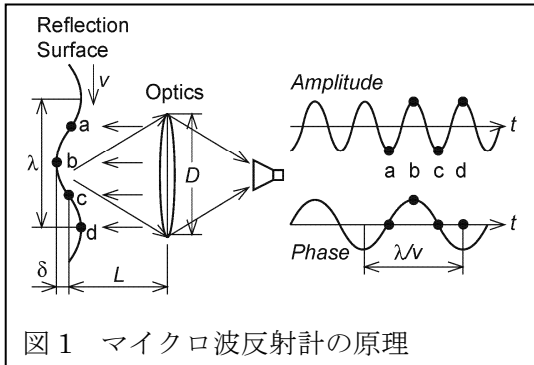


図1 マイクロ波反射計の原理

視線方向の積分をしない電子密度揺動計測器としてプラズマによる電磁波のカットオフ（反射）現象を利用するマイクロ波反射計がある。マイクロ波の電場が磁場に平行方向（Oモード）か垂直方向（Xモード）かで反射周波数が異なる。Oモードの反射周波数（ $f_{pe}$ ）は

$$f_{pe}[\text{GHz}] = 28.4 \left( n_e [10^{19} \text{m}^{-3}] \right)^{1/2} \quad \dots\dots(1)$$

であるのに対し、Xモードの反射周波数（ $f_R$ ）は、電子サイクロトロン周波数（ $f_{ce}$ ）

$$f_{ce}[\text{GHz}] \square 28 B [\text{T}] \quad \dots\dots\dots(2)$$

にも依存し、

$$f_R = \frac{1}{2} \left\{ f_{ce} + \left( f_{ce}^2 + 4f_{pe}^2 \right)^{1/2} \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで単位はカットオフ密度[ $10^{19} \text{m}^{-3}$ ]、周波数[GHz]である。このようにカットオフ周波数は電子密度に依存するので、電子密度が変化すると反射面が変動する。プラズマに波が立てば反射面も波打つ。図1に示すように、波が動けば、反射波の振幅も位相も変動する。

プラズマにマイクロ波を照射しその反射面の変動をマイクロ波カメラで観測することにより電子密度揺動を観測できる。本研究では、このようなマイクロ波の照射とカメラが一体となった「マイクロ波イメージング反射計（MIR: Microwave Imaging Reflectometry）」を開発し、乱流観測（電子密度揺動計測）に適用する。とくに、異なるマイクロ波周波数で同時計測することで、深

さ方向の異なる反射面の観測、すなわち、三次元計測を目指す。またLHDプラズマの電子密度分布は凹型である。カットオフ周波数が磁場にも依存するXモードならば、中心部の密度が周辺部より低いことが多いLHDでも中心部まで計測可能である。そこで、本研究ではXモードを利用する。

## 3. 研究の方法

三次元MIRの主なコンポーネントは、以下のようなものである。

- (1) マイクロ波生成器（RF、LO）
- (2) 結像光学系（L1～L4）
- (3) マイクロ波イメージング検出器
- (4) 受信機

一般的にマイクロ波検出器では、信号波（ $\omega_{RF}$ ）とLO波（ $\omega_{LO}$ ）を混合し、差である中間周波数（ $\omega_{IF} = \omega_{RF} - \omega_{LO}$ ）にダウンコンバートする。受信機では、中間周波数に搬送された信号の振幅信号（A）と位相信号（I、Q）を取り出す。ここで、Iは $\cos \phi$ にQは $\sin \phi$ に対応する。I、Q信号を得るには参照信号として中間周波数（IF）信号を必要とする。本研究では小型のSAWフィルタが使え、扱いやすい110MHzを共通の参照信号とする。そのために、マイクロ波生成器ではLO波をベースに4周波数および110MHzをアップコンバートして、4周波数マイクロ波を生成する。

図2に本研究で開発した3D MIR用マイクロ波発振器のブロックダイアグラムを示す。4つの異なる周波数それぞれに、低周波数の参照周波数および高周波数の基本周波数をアップコンバートし、6梯倍してマイクロ波にした後、方向性結合器で4周波数を混合し、パワーアンプで出力25dBmに増幅し、照射波（RF）として一つのアンテナからプラズマに照射する。また基本周波数を6梯倍して局部発振波（LO）とする。

結像光学系は幾何光学で基本設計した。FDTDシミュレーションと実機の試験はよく一致した。照射波（RF）は平行光（平面波）としてプラズマを照射し、プラズマで散乱されたマイクロ波は、球面波としてイメージング検出器（HMA）に結像する。LHDプラズマはねじれているために散乱波が結像光学系に戻ってこないことがある。そこで真空容器内に設置した対物鏡に駆動機構を取り付け、最適な角度設定にした。これにより10倍以上の散乱波強度を得た。

照射波と散乱波、あるいは散乱波とLO波を同軸上に並べるために、ビームスプリッタ（BS）を用いる。BSは透過率と反射率があらゆる偏光成分についても50%であることが理想である。当初誘電体板をBSとして用いたが、偏光による透過率の差が大きすぎて



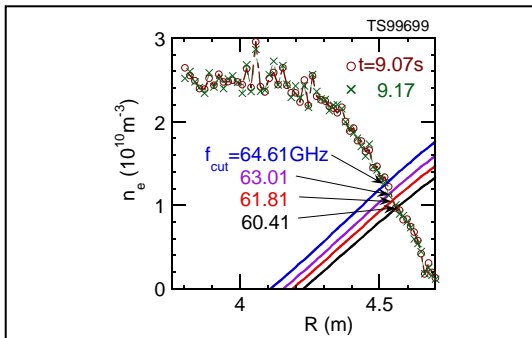


図 6 実験で用いたプラズマの電子密度分布と MIR のカットオフ密度

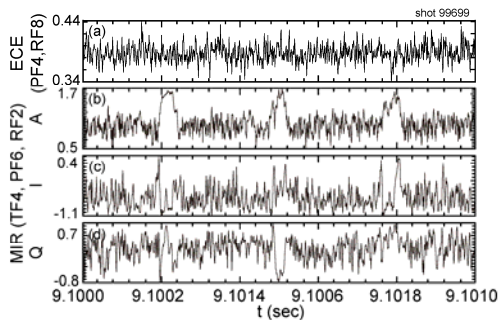


図 7 LHD のエッジプラズマのマイクロ波イメージング信号の例。(a) ECE, (b) MIR 振幅, (c) I 信号, (d) Q 信号。

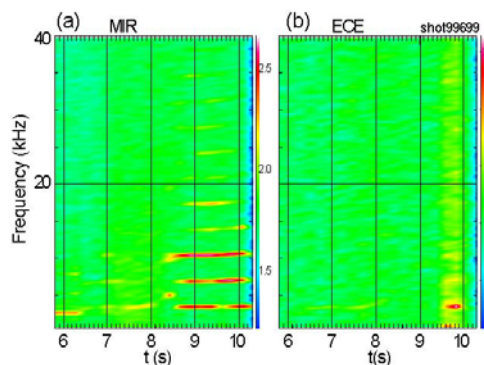


図 8 (a) MIR, (b) ECE の周波数スペクトル (図 6 の信号について)

#### 4. 研究成果

本研究で開発した三次元マイクロ波イメージング反射計 (3D MIR) を用いて LHD のエッジプラズマを撮像した。図 6 に実験で用いたプラズマの電子密度分布と MIR のカットオフ密度を示す。X モードのカットオフ密度 ( $n_{cut-off}$ ) は式(2),(3)より

$$n_{cut-off} = \frac{f_R^2 - f_R f_{ce}}{806.4} \dots\dots\dots(4)$$

となる。カットオフ密度は磁場に依存し、磁

場は半径 ( $R$ ) 方向に変化するため、カットオフ密度は斜めの線となる。このカットオフ密度の線と電子密度分布の線の交点が観測位置となる。本実験では  $R=4.5\sim 4.55\text{m}$  が観測位置であることがわかる。なお、プラズマの端は  $R=4.6\text{m}$  であるので、ほとんどプラズマ端部である。

LHD のエッジプラズマのマイクロ波イメージング信号の例を図 7 に示す。図 8 にこの信号のフーリエスペクトルを示す。3kHz の高調波が幾つもあることがわかる。これは、「端部プラズマ高調波振動 (EHO)」と呼ばれる現象と思われる。このプラズマの反射周波数毎の二次元 MIR 像を図 9 に示す。EHO は幅 5cm 程度の細長い帯状の構造であることがわかる。

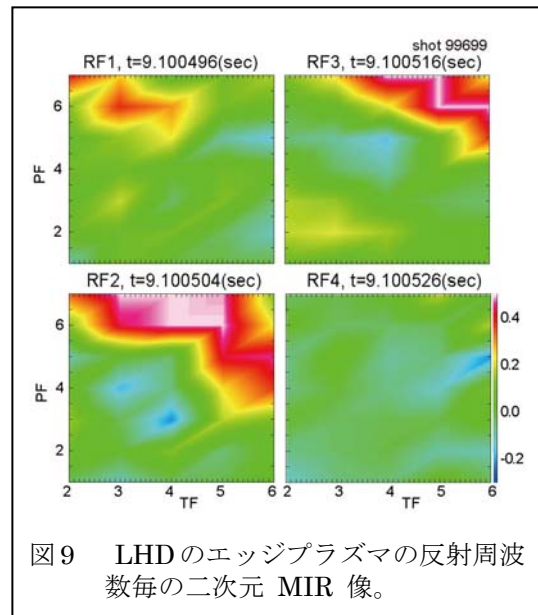


図 9 LHD のエッジプラズマの反射周波数毎の二次元 MIR 像。

本研究の最大の成果は、世界初の三次元マイクロ波イメージング反射計の開発に成功したことである。これは世界初の二次元マイクロ波撮像器 (HMA) の成功によるところが大きい。MIR を用いると、プラズマ中の密度揺動の空間構造を可視化できる。本研究では試しにプラズマ端部を見たところ、EHO と思われる現象を観測することが出来た。トカマクプラズマではプラズマ端部では ELM とよばれるパルス上の熱流束が発生する。ELM は核融合炉実現を阻害する問題であるが、LHD では見られない。その代わりに EHO が見られる。ELM 発生を阻害する EHO の研究は今後ますます重要になるとと思われる。このように、本研究により「揺動の可視化」が可能となり、プラズマ中の揺動現象の研究が新たな段階に入った。

#### 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 15 件)

1. Y. Nagayama et al., “Development of 3D microwave imaging reflectometry in LHD”, Review of Scientific Instruments, Vol.83, 10E305 (2012). (査読有)
2. Y. Nagayama et al., “Web Technology to Support LHD Experiment Management”, Fusion Engineering and Design, Vol.87, 2218 (2012). (査読有)
3. Y. Kogi et al., “Development of leaky-wave antenna for digitally controlled millimeter-wave interferometer”, Review of Scientific Instruments, Vol.83, 10E347 (2012). (査読有)
4. A. Mase et al., “Reflectometric measurement of plasma imaging and applications”, Journal of Instrumentation, Vol.7, No.1, C01089 (2012). (査読有)
5. 長山好夫 ほか, “LHD におけるマイクロ波イメージング計測の開発”, プラズマ・核融合学会誌, Vol.87, 359 (2011). (査読有)
6. 間瀬 淳 ほか, “電磁波を用いたプラズマ診断の基礎と最前線 2.電磁波を用いたプラズマ計測の基礎”, プラズマ・核融合学会誌, Vol.87, 315 (2011). (解説記事)
7. 長山好夫, 吉永智一, 近木祐一郎, “電磁波を用いたプラズマ診断の基礎と最前線 3. 先進計測技術・最近の進展 3.1 マイクロ波イメージング”, プラズマ・核融合学会誌, Vol.87, 339 (2011). (解説記事)
8. Z. B. Shi, Y. Nagayama et al., “Investigation of turbulence in reversed field pinch plasma by using microwave imaging reflectometry”, Physics of Plasmas, Vol. 18, 102315 (2011). (査読有)
9. K. Kawahata, Y. Nagayama et al., “Broadband Multichannel Radiometer for ECE Measurements on KSTAR”, Plasma and Fusion Research, Vol.6, 2402094 (2011). (査読有)
10. Z. B. Shi, Y. Nagayama et al., “Maximum Entropy Analysis of the 2D Density Turbulence Measured by MIR in TPE-RX”, Plasma and Fusion Research, Vol.5, S1019 (2010). (査読有)
11. T. Yoshinaga, Y. Nagayama et al., “Simultaneous projection and detection system of four different frequencies for microwave imaging reflectometry in Large Helical Device”, Review of Scientific Instruments. Vol.81, 10D915 (2010). (査読有)
12. T. Yoshinaga, Y. Nagayama et al., “Optics Design for Microwave Imaging Reflectometry in LHD”, Plasma and Fusion Research, Vol.5, 030 (2010). (査読有)
13. D. Kuwahara et al., “Upgrade of 2-D Antenna

Array for Microwave Imaging Reflectometry and ECE Imaging”, J. Plasma and Fusion Research SERIES, Vol.9, pp.125-130 (2010). (査読有)

14. Y. Kogi et al., “Calibration of electron cyclotron emission radiometer for KSTAR”, Review of Scientific Instruments, Vol.81, 10D916 (2010). (査読有)
15. D. Nagae and A. Mase, “Measurement of heart rate variability and stress evaluation by using microwave reflectometric sensing”, Review of Scientific Instruments, Vol.20, 094301 (2010). (査読有)

[学会発表] (計 24 件)

1. Y. Nagayama, “Development of 3D Microwave Imaging Reflectometry in LHD”, 19th Topical Conference High-Temperature Plasma Diagnostics Monterey, CA, USA, May 9, 2012. (Invited).
2. Y. Kogi, “Development of Digitally Controlled Millimeter-wave Interferometer for Precise Electron Density Distribution Measurement”, 19th Topical Conference High-Temperature Plasma Diagnostics Monterey, CA, USA, May 8, 2012.
3. Y. Nagayama, “Image Reconstruction and Data Acquisition”, 6th Japan-Korea Seminar for Plasma Diagnostics, Unipark of Jeju University, Jeju, Korea, August 23, 2012. (Tutorial)
4. Y. Nagayama, “Development of 3D microwave imaging reflectometry for turbulence measurements in LHD”, 22nd International Toki Conference, Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, November 22, 2012.
5. M. Emoto, “Calculation of Wavenumber Spectrum of MIR using Hopfield network model”, 22nd International Toki Conference, Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, November 22, 2012.
6. Y. Nagayama, “Development of 3D microwave imaging reflectometry in LHD”, 9th Australia-Japan Workshop on Plasma Diagnostics, Naka, Ibaraki, Japan, December 5, 2012.
7. 長山好夫, “三次元マイクロ波イメージング反射計 (MIR) を用いた LHD 端部プラズマ揺動観測”, プラズマ・核融合学会第 29 回年会, クローバープラザ (福岡県春日市), 2012 年 11 月 30 日
8. 桑原大介, “可変周波数マイクロ波イメージング反射計の開発”, プラズマ・核融合学会第 29 回年会, クローバープラザ (福岡県春日市), 2012 年 11 月 30 日
9. A. Mase, “Microwave Reflectometric Measurement of Heart-Rate Variability and

- Stress Evaluation”, The 2012 Asia-Pacific Microwave Conference, Kaohsiung, Taiwan, December 6, 2012.
10. Yoshio Nagayama, “Development of Microwave Imaging Reflectometry in LHD”, US-Japan Workshop on Millimeter Wave Technology and Fusion Plasma Fluctuation Diagnostics, UC Davis, Davis, CA, USA, January 15, 2013.
  11. Hayato Tsuchiya, “ECE System and Example of its Application in LHD”, US-Japan Workshop on Millimeter Wave Technology and Fusion Plasma Fluctuation Diagnostics, UC Davis, Davis, CA, USA, January 15, 2013.
  12. Y. Nagayama, “Web Technology to Support LHD Experiment Management”, 8th IAEA-TM on Control, Data Acquisition, and Remote Participation for Fusion Research, San Francisco, CA, USA, June 24, 2011
  13. Y. Nagayama, “Electron Density Fluctuation Measurement with 3-D Microwave Imaging Diagnostics in LHD”, 21<sup>st</sup> International Toki Conference, Ceratopia Toki, Toki-city, Gifu, Japan, November 28, 2011
  14. 長山好夫, “LHDにおけるマイクロ波イメージング計測の開発”, プラズマ・核融合学会第 28 回年会, 石川県立音楽堂 (金沢市), 2011 年 11 月 22 日
  15. 長山好夫, “LHDにおけるマイクロ波イメージングを用いた揺動観測”, プラズマ・核融合学会第 28 回年会, 石川県立音楽堂 (金沢市), 2011 年 11 月 22 日
  16. T. Yoshinaga, “Simultaneous projection and detection system of four different frequencies for microwave imaging reflectometry in Large Helical Device”, 18th topical conference on high temperature plasma diagnostics, Wildwood, NJ, USA, May 18, 2010.
  17. D. Kuwahara, “Development of electron cyclotron emission imaging system on Large Helical Device”, 18th topical conference on high temperature plasma diagnostics, Wildwood, NJ, USA, May 18, 2010.
  18. Y. Kogi, “Application of Electron Cyclotron Emission Radiometer on KSTAR Plasma”, 18th topical conference on high temperature plasma diagnostics, Wildwood, NJ, USA, May 18, 2010.
  19. Y. Nagayama, “Development of Microwave Imaging Reflectometry in LHD”, 20th International Toki Conference, Toki-City, Japan, December 7, 2010.
  20. D. Kuwahara, “Development of ECE Imaging Diagnostic system on LHD”, 20th International Toki Conference, Toki-City, Japan, December 7, 2010.
  21. T. Yoshinaga, “Development of Microwave Imaging Diagnostics System in LHD”, 20th International Toki Conference, Toki-City, Japan, December 7, 2010.
  22. 長山好夫, “LHDにおけるマイクロ波イメージング計測の開発”, プラズマ・核融合学会第 27 回年会, 北海道大学 (北海道札幌市), 2010 年 12 月 3 日 (招待講演)
  23. 吉永智一, “LHDにおけるマイクロ波イメージング反射計測”, プラズマ・核融合学会第 27 回年会, 北海道大学 (北海道札幌市), 2010 年 12 月 1 日
  24. 桑原大介, “LHDにおけるECEイメージング計測”, プラズマ・核融合学会第 27 回年会, 北海道大学 (北海道札幌市), 2010 年 12 月 1 日
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
長山 好夫 (NAGAYAMA YOSHIO)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号: 10126138
  - (2) 研究分担者  
山口聡一郎 (YAMAGUCHI SOICHIRO)  
関西大学・システム理工学部・准教授  
研究者番号: 30413991  
  
間瀬 淳 (MASE ATSUSHI)  
九州大学・産学連携センター特命教授  
研究者番号: 00023325  
  
近木 祐一郎 (KOGI YUICHIRO)  
福岡工業大学・工学部准教授  
研究者番号: 10398109
  - (3) 連携研究者  
土屋 隼人 (TSUCHIYA HAYATO)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号: 90509522  
  
江本 雅彦 (EMOTO MASAHIKO)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号: 40311211  
  
桑原 大介 (KUWAHARA DAISUKE)  
東京農工大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 60645688  
  
吉永 智一 (YOSHINAGA TOMOKAZU)  
防衛大学校・応用科学群・助教  
研究者番号: 30467899