

平成 21 年 4 月 28 日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2006～2008

課題番号：18686075

研究課題名（和文） 超短インパルスを用いた多帯域マイクロ波反射計測法の開発

研究課題名（英文） Development of multi-band microwave reflectometer system using an ultrashort pulse

研究代表者

徳沢 季彦（TOKUZAWA TOKIHIKO）

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教

研究者番号：90311208

研究成果の概要：核融合炉を目指した高温プラズマ中の電子密度の空間分布や揺動を計測することを目的として、超短インパルスを光源としたパルスレーダー計測法を開発を行った。本手法はプラズマに入射した電磁波がその波長に対応した電子密度層において反射する現象を利用し、超短インパルスから広帯域な周波数の電磁波を抽出して、広範囲な密度層の計測を行うというものである。実験では、大型ヘリカル装置に適用し、密度分布計測に成功した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2007 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	8,900,000	2,670,000	11,570,000

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、反射法、超短パルス、電子密度、磁場核融合、LHD

## 1. 研究開始当初の背景

核融合炉実現のための高温プラズマ閉じ込め研究においては、各種不安定性によって生じる異常拡散の抑制が長年の課題である。近年、輸送障壁の形成によるこの異常拡散の抑制に伴う閉じ込め改善が発見されるようになった。このような輸送障壁の研究のためには、その空間的に急峻な勾配を持つプラズマを高い空間及び時間分解能で計測する必要がある。しかしながら従来の密度計測手法では、空間分解能や時間分解能に問題があり、簡便にプラズマ中の局所的な位置での密度

分布構造やその揺らぎが計測できる新しい計測器の開発が求められていた。そこで近年素子技術が開発・発展してきたマイクロ波を用いた反射計測の適用を行った。

マイクロ波を用いた反射計測法では、プラズマと電磁波との相互作用であるカットオフ現象を用いる。したがって、空間分解能を向上させるためには周波数の異なるマイクロ波を多数入射する必要がある。すなわち、入射マイクロ波の広帯域化が必要であった。そこで、その一方法として超短パルスを持つ広帯域な周波数スペクトル成分を利用する

ことを考え、平成 12 年度より、超短インパルスを利用したマイクロ波反射計の開発を始めた。当初、パルス幅 25ps のインパルスから周波数成分としては 26~40GHz の kaバンドと呼ばれる一つの周波数帯域を利用した計測システムを大型ヘリカル装置(LHD)に適用し、プラズマ実験を行った。平成 17 年度において、従来使用していたものに比べパルス幅がより狭いインパルス発生器を新しく用いて、より広帯域のマイクロ波成分を活用することが可能となった。

そこで、これまで利用していた周波数帯域に異なる周波数帯域を新しく追加しプラズマ計測を行う場合、多帯域に及ぶ周波数成分を計測器の設置位置から対象であるプラズマまで低損失にビーム伝送する手法の開発が重要となってきた。また高空間分解を達成する上で、広帯域に亘るマイクロ波成分を弁別することによる信号チャンネルの増大が生じる。この多数の信号を処理するための新しい技術の開発も必要となった。

## 2. 研究の目的

新しいマイクロ波反射計のシステムを開発し、これを用いてプラズマの電子密度およびその揺動の空間構造を計測しプラズマ閉じ込めの研究を行うことが本研究の目的である。開発を行うマイクロ波反射計は上記したようにプラズマによる電磁波のカットオフ現象を利用した計測法であり、プラズマ中に入射したマイクロ波はその周波数に対応したカットオフ層において反射されるので、プラズマ内部の局所的な位置での計測ができる。周波数の異なる電磁波がプラズマ中から戻ってくるまでのそれぞれの飛行時間をレーダー計測することによりその対応するカットオフ層の位置を知り密度分布を再構成することができる。またプラズマの揺らぎはカットオフ層の変動を引き起こすため反射マイクロ波の飛行時間の変化量を計測することにより、密度揺動を計測することも可能である。

本研究では、超短インパルスを発振源とした計測システムを構築し、LHD に設置してプラズマ計測での実証を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、計測器システムを設計・構築することと、プラズマ計測での実証を行うこと、そしてプラズマ閉じ込め研究へ貢献することを行うため、以下のように年度毎に研究計画を立て研究を実施した。

(1)平成 18 年度は、まず実際のプラズマに適用する前にシステムの性能を確実に把握するための開発試験を行う。特に新しい開発要素である、広帯域ミリ波合成器を設計製作し、

その性能を調べる。その後信号レベルの確認などを行うため、LHD プラズマ実験に適用し、初期データを取得し、問題点を明確化して、次年度の開発研究につなげる。

(2)平成 19 年度は、システムの最適化を図るとともに、多チャンネル化を達成する。前年度の LHD 実験での性能評価を基に、増幅器のレベル調整やノイズの低減などを図り、システムを最適化させる。同時に、計測空間点を増やすために、多チャンネル化を行う。ただ、単純にチャンネル数を増加させることはシステムの部品点数の大幅な増加すなわちコストの増大を招くため、時分割多重通信の手法やスイッチング手法を取り入れて省コスト化を図る。

(3)平成 20 年度は、これまで開発を行ってきたシステムをさらに高空間分解能化させて、LHD プラズマ実験でルーティン的に稼働させて様々なプラズマを計測する。既に適用している周波数帯に隣接する周波数帯域にも計測チャンネルを追加し、より連続した計測が可能ないようにシステムを改良する。

(4)得られた研究成果については、随時、論文にまとめ発表するとともに国際会議等で発表を行い他研究者からの評価を受け、研究に反映させる。

## 4. 研究成果

超短電気インパルスを信号源として用いる事により、測定性能の大幅な向上を図る先駆的なプラズマ計測手法の開発を行った。

### (1)超短インパルス

時間幅の短い電気インパルスはそのフーリエ成分として非常に広い周波数成分を含んでおり、世界で初めて 18ps のインパルス(図 1)を信号源として、反射法を適用し、8-60GHz に亘る広帯域な周波数成分を高温プラズマ計測に用いる事に成功した。プラズマにインパルスを照射しているプローブ時間幅は極短く、カットオフ面の瞬時計測が可能となった。

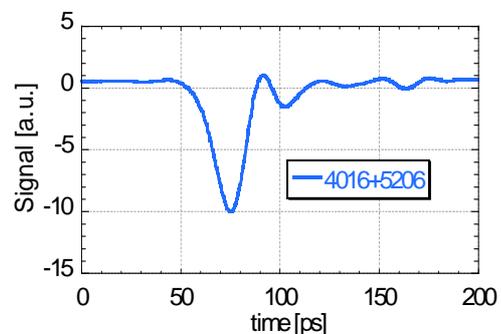


図 1：超短インパルス

(2)多チャンネル化多帯域化

電気インパルスから得られるマイクロ波信号成分のパワーを増大し大型装置へ適用するため、インパルスから周波数帯域毎にマイクロ波に変換しマイクロ波増幅器を用いて効率よく増幅した後、単一の導波路に結合する新型低損失多帯域マルチプレクサを開発し、従来の結合器より 10dB 以上の改善を得、広帯域化を達成した。この多帯域マルチプレクサは、多層膜メッシュフィルタ(図2)という新しいテラヘルツ波領域のコンポーネントをマイクロ波帯に初めて適応したものである。これを用いることで、低損失でのビーム伝送のための準光学的手法をマイク



図2：多層膜メッシュフィルタ

ロ波帯に導入することができた。また、パルスレーダー方式での飛行時間計測を行う場合に、空間分解能を決定する要素であるバンドパスフィルタの帯域幅を決定する手法を実験的最適化手法として確立した。これを基にフィルタバンクを用いた多チャンネルシステムを設計・製作した。この時、多チャンネル化に伴うシステム点数の増大を防ぐため、時分割多重通信とスイッチング技術(図3)を組合せて 1/4 のコストで空間点を増加させることを達成し、世界に類の無い多チャンネル多帯域システムを構築した。

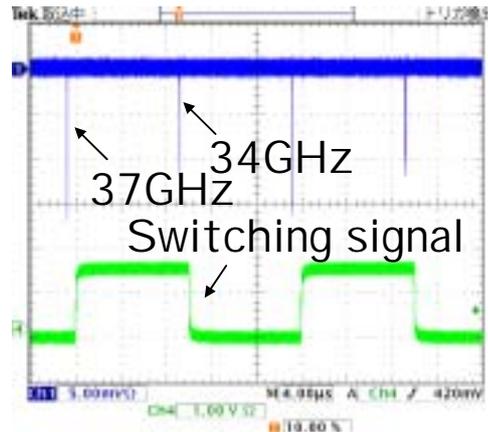


図3：スイッチングによる2信号混合

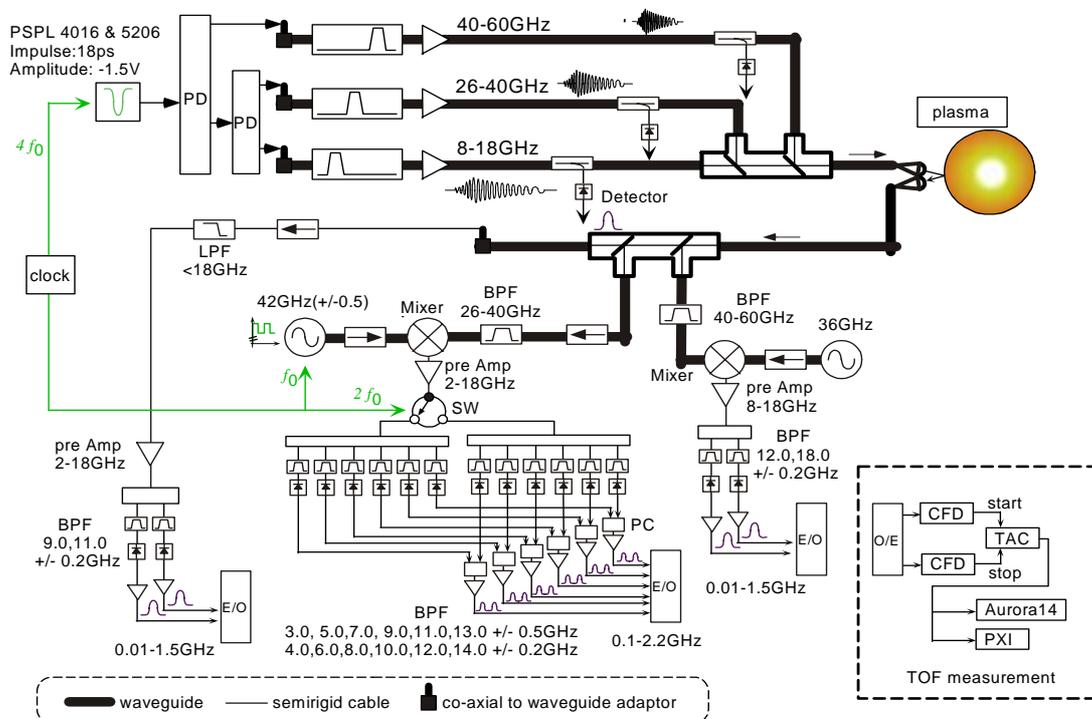


図4：超短インパルスを用いたマルチ (X, Ka, U) バンドマイクロ波反射計システム

### (3)超短インパルスレーダーシステム

構築した計測システムを図4に示す。パルス発生器から発振された超短インパルスは、大型プラズマの計測に用いるために出力を増大させる必要がある。パルス自体の電圧を増大させることには限界があるため、マイクロ波に変換しマイクロ波増幅器を用いて信号パワー増幅を行った。各バンドは、30～60dBの増幅を行った。これらを前項で記したマルチプレクサを用いて低損失伝送路である管径2インチの1本のコルゲート導波管に結合してプラズマまで伝送し、送信アンテナから入射した。プラズマ中の対応する反射層でカットオフを受けた反射信号を受信アンテナで受け、周波数帯毎に信号を検出した。反射信号はフィルタで周波数毎に弁別され検出器によって反射パルス信号となる。この反射パルス信号とプラズマ入射前の参照パルス信号との間の時間差の変化を求めるため、飛行時間計測を行い、プラズマ中のカットオフ層の位置を計測した。得られた各周波数の飛行時間から電子密度分布を再構成したものを図5に示す。このようにプラズマ密度の時間変化を広い範囲にわたって計測

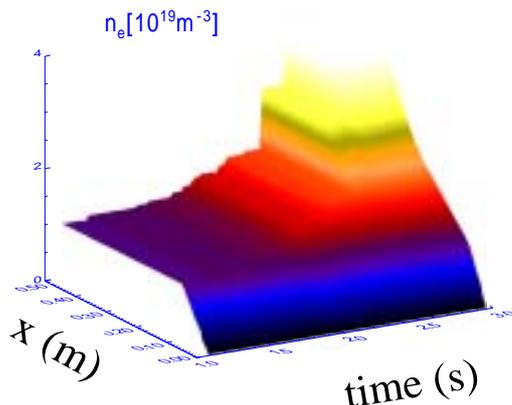


図5：電子密度分布の時間変化

ができるようになった。また、この計測した飛行時間計測は実時間データ収録装置を用いることにより、1時間を越える定常プラズマ実験においても、シームレスで計測が可能であり、LHDの定常プラズマ生成実験においてこれを確認した。これは、高サンプリングレートの要求がなく、また位相飛越なども発生しない本方式の特長の一つの実証である。その他、LHDプラズマ実験においては、局所磁気島構造形成、ペレット入射による輸送変化現象、プラズマ周辺に発生するELM振動、粒子源変調による粒子輸送研究など様々な物理現象の計測に成功し、プラズマ実験に貢献している。

このように、本研究によって、様々な改良を加えることができたことにより、従来のマ

イクロ波反射計による密度分布計測性能を大きく改善する方策を確立することができた。

### 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14件)

T. Tokuzawa, K. Kawahata, Y. Ito, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experimental Group; "Development of a Plasma Diagnostics System Using an Impulse Waveform Voltage"; Plasma and Fusion Research, Vol.3, pp.018-1-8, (2008).

T. Tokuzawa, A. Ejiri, K. Kawahata, K. Tanaka, Y. Ito; "V-band Frequency Hopping Microwave Reflectometer in LHD" Review of Scientific Instruments, vol.79, pp.10F109-1-4, (2008). [査読有]

T. Tokuzawa, A. Ejiri, K. Kawahata, and LHD Experimental Group; "Observation of Internal structure of energetic particle driven MHD modes in the Large Helical Device"; Plasma and Fusion Research, Vol.3, pp.S1064-1-5 (2008). [査読有]

Y.Yokota, A.Mase, Y.Kogi, H.Hojo, L.Bruskin, T.Tokuzawa, and K.Kawahata; "Simulation Study of Ultrashort-Pulse Reflectometry by Signal Record Analysis"; Plasma and Fusion Research, Vol.3, pp.008-1-3 (2008). [査読有]

N. Tamura, S. Inagaki, K. Ida, K. Tanaka, C. Michael, T. Tokuzawa et al.; (17名中6番目) "Core electron temperature rise due to Ar gas-puff in EC-heated LHD plasmas"; Journal of Physics: Conference Series, Vol. 123, pp.012023-1-7 (2008). [査読有]

K. Nakayama, M. Tomimoto, S. Okajima, K. Kawahata, K. Tanaka, T. Tokuzawa, T. Akiyama; "Development of Short-Wavelength Far-Infrared Lasers and Optical Elements for Plasma Diagnostics"; Plasma and Fusion Research, Vol. 2, pp.S1114-1-S1114-4 (2007). [査読有]

N.Tamura, S.Inagaki, K.Tanaka, C.Michael, T. Tokuzawa et al.; (16名中5番目), "Impact of Nonlocal Electron Heat Transport on the High Temperature Plasmas of LHD";

Nuclear Fusion, Vol.47, No.5, pp.449-455 (2007). [査読有]

T. Tokuzawa, K. Kawahata, K. Tanaka, and LHD Experimental Group; "Multichannel ultrashort pulsed radar Reflectometer on LHD"; Review of Scientific Instruments, Vol.77, No.10, pp.10E903-1-3 (2006). [査読有]

T. Tokuzawa, K. Kawahata, K. Tanaka, and LHD Experimental Group; "Electron Density Profile Measurement Using Ka-band Microwave Impulse Radar Reflectometer on LHD"; Nuclear Fusion, Vol.46, No.9 (2006) pp.S670-S676. [査読有]

T. Tokuzawa, K. Kawahata, K. Tanaka, and LHD Experimental Group; "Edge Density Profile Measurement by Using Ultrashort Pulsed Radar Reflectometer on LHD"; Journal of the Korean Physical Society, Vol.49, pp.S155-S159 (2006). [査読有]

S.Inagaki, N.Tamura, T.Tokuzawa, K.Ida *et al.*; (11名中3番目) "Abrupt Reduction of Core Electron Heat Transport in Response to Edge Cooling on the Large Helical Device"; Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol.48, No.5A, pp.A251-A257 (2006). [査読有]

M. Hoshino, R. Sakamoto, H. Yamada, T. Tokuzawa et al.; (9名中4番目); "Observation of the Effect of Energetic Ions on Pellet Ablation in the Large Helical Device"; Plasma and Fusion Research, Vol.1, pp.033-1-8 (2006). [査読有]

Y.Yokota, A.Mase, Y.Kogi, T. Tokuzawa, and K.Kawahata; "Reconstruction of Edge Density Profiles Using Ultrashort-Pulse Reflectometry in LHD"; Journal of Plasma and Fusion Research Vol.1, pp.040-1-2 (2006). [査読有]

A.Mase, Y.Yokota, K.Uchida, Y.Kogi, N.Ito, T. Tokuzawa et al.; (10名中6番目); "Remote Experiment of Ultrashort Pulse Reflectometry for LHD Plasmas"; Review of Scientific Instruments, Vol.77, No.10, pp.10E916-1-3 (2006). [査読有]

[学会発表](計16件)

T. Tokuzawa, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Tanaka, S. Inagaki, K. Kawahata, I.

Yamada, and LHD Experimental Group, "Particle Transport Study around Expanding Magnetic Island in the Large Helical Device", 14th International Congress on Plasma Physics, 2008年9月8-12日、福岡

T. Tokuzawa, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Tanaka, S. Inagaki, K. Kawahata, I. Yamada, and LHD Experimental Group, "Particle Transport Characteristics around Expanding Static Magnetic Island in the Large Helical Device", 35th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2008年6月9日-13日、ギリシャ・ヘロソニソス

T. Tokuzawa, A. Ejiri, K. Kawahata, K. Tanaka, Y. Ito, and LHD experimental Group, "V-band Frequency Hopping Microwave Reflectometer in LHD", 17th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, May 11-15, 2008年5月11-15日、米国・アルバカーキ

徳沢季彦、江尻晶、川端一男、西浦正樹、東井和夫、田中謙治、LHD実験グループ、"マイクロ波を用いた密度揺動の空間構造計測"、第7回核融合エネルギー連合講演会、平成20年6月19-21日、青森

T. Tokuzawa, K. Kawahata, and LHD experimental Group, "Impulse Radar Reflectometer for LHD plasma electron density profile measurements", 2008 International Workshop on Microwave Devices, Systems, and their Applications, 2008年3月24-25日、九州大学

T. Tokuzawa, K. Kawahata, and LHD experimental Group, "Multi-channel Ultrashort Pulsed Radar Reflectometer for LHD edge plasma Measurement", U.S.-Japan Workshop on Millimeter-Wave Plasma Diagnostics Feb. 25-27, 2008年2月25-27日、米国・デビビス

徳沢季彦、川端一男、伊藤康彦、田中謙治、山田一博、LHD実験グループ、"インパルスを用いたプラズマ計測法の開発"、第24回プラズマ・核融合学会年会、平成19年11月27-30日、姫路

T. Tokuzawa, K. Kawahata, "Terahertz reflectometer for high-dense plasma measurements", International 13th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, 2007年9月18-21日、高山

T. Tokuzawa, K. Kawahata, Y. Yokota, A. Mase, H. Hojo, M. Hangyo, M. Tani, and LHD experimental Group, "Recent Progress of Ultrashort Pulsed Radar Reflectometer for Density Profile Measurements on LHD", 8th International Reflectometry Workshop for fusion plasma diagnostics (IRW8) May. 2-4, 2007年5月2 - 4日、ロシア・サンクトペテルスブルグ

T. Tokuzawa and LHD experimental Group, "Microwave Reflectometer for Density Profile and Fluctuation Measurements on LHD", 2nd CUP Workshop on "Improvement of Core Plasma Property", 2007年3月14 - 15日、中国・合肥

徳沢季彦, 江尻晶 A, LHD実験グループ, "プラズマ中に励起された波動の空間構造計測", 物理学会2007年春季大会2007年3月18 - 21日、鹿児島大学

T. Tokuzawa, K. Kawahata, and LHD experimental Group, "Current Status of Broadband Pulsed Radar Reflectometer System on LHD for Density Profile Measurements", International Workshop on Microwave Devices, Systems, and their Applications 2006, 2006年12月12 - 13日、九州大学

T. Tokuzawa, K. Kawahata, M. Hangyo, and M. Tani, "Utilization of Terahertz Imaging Technology to High-Temperature Plasma Diagnostics", 16th International Toki Conference, 2006年12月5 - 8日、土岐

徳沢季彦, 川端一男, 萩行正憲, 谷正彦, "THz イメージング技術のプラズマ計測への適用", 第23回プラズマ核融合学会、2006年11月28日 - 12月1日、筑波大学

徳沢季彦, "インパルスを用いた核融合プラズマ電子密度計測", 地球惑星科学連合2006年大会、2006年5月14 - 18日、幕張

T. Tokuzawa, K. Kawahata, K. Tanaka, and LHD Experimental Group, "Multi-channel Ultrashort Pulsed Radar Reflectometer on LHD", 16th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics (HTPD2006), 2006年5月7 - 11日、米国・ウィリアムスバーグ

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

徳沢 季彦 (TOKUZAWA TOKIHIKO)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教

研究者番号：90311208

〔その他〕

ホームページ等

<http://http.lhd.nifs.ac.jp/>