

## 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 6 月 14 日現在

機関番号：37112  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22760658  
 研究課題名（和文） デジタルミリ波干渉計の開発による密度分布測定の高精細化の研究  
 研究課題名（英文） Development of digitally-controlled millimeter-wave interferometer for precise density distribution measurement  
 研究代表者  
 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

研究成果の概要（和文）：密度分布をより高精細に測定できる簡易なミリ波干渉計システムを提案した。本干渉計に必要な放射方向可変アンテナの開発を進め、70-78GHz の周波数変化で 25° の放射方向可変特性があることを確かめた。実験室において、プラズマを模擬した誘電体板に対して、開発されたアンテナを実装した干渉計システムを適用し、誘電体板の厚みと形状をイメージングできることを実証した。

研究成果の概要（英文）： We have proposed digitally controlled millimeter-wave interferometer for precise density distribution measurement. Firstly, we have developed the antenna, that can scan the probe beam in the azimuth plane. It was confirmed that the developed antenna has an ability to scan its beam injection angle within 25 degree by changing the input frequency from 70 to 78 GHz. The proposed interferometer was developed with the antenna, and applied to the dielectric plate for validation of the interferometer performance. As a result of the validation, the interferometer could clearly detect the cross sectional shape of the plate, as well as its thickness.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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、干渉計、密度分布計測、密度分布イメージング

## 1. 研究開始当初の背景

核融合炉を実現するには、高温高密度のプラズマを長時間閉じ込める必要がある。ヘルカル型やトカマク型の閉じ込め装置において、磁場形状の改善により高温高密度なプラズマを生成できるようになってきた。ところがプラズマの高性能化に伴い、各種不安定性

や乱流によるプラズマの輸送が顕著に現れるようになり、乱流輸送の低減が課題となっている。最近、運転条件の変更でプラズマの密度分布や磁場配位などを制御することで、輸送障壁を形成し乱流輸送を減少させる試みが行われている。より一層の低減には、プラズマパラメータの時間変化に伴う輸送現

象の変化に対応する必要があると考えられている。それには密度分布などを詳細かつリアルタイムで計測できる計測系を整備することが課題である。

従来の密度分布の測定法として、散乱法（トムソン散乱計測）、反射法（マイクロ波反射計）、透過法（サブミリ波干渉計）といった複数の原理に基づく計測法が広く用いられている。トムソン散乱計測は数密度計算が可能で、測定位置の分解能も良い。しかし時間分解能はミリ程度のため、計測結果のリアルタイム制御への適用は困難である。マイクロ波反射計は、カットオフ層からの反射波を計測するためサポートへのアクセスが良く時間分解も良いが、プラズマの中心を原理的に測定できない。サブミリ波干渉計は測定コードをプラズマの2次元断面に格子状に配置すると、トモグラフィ処理により電子密度の2次元分布が再構成可能である。しかし測定コード配置のためポートアクセスの問題がある。これらは全て測定位置を固定した観測であり、プラズマの定常的なモニタリングを対象としているからである。輸送障壁のような局所的構造を詳細に観測するには、測定位置をプラズマの形状に合わせて適宜変更できる新しい計測法が必要と考えられた。

## 2. 研究の目的

プラズマ諸量の分布はプラズマの閉込め性能と密接に関係している。現状、密度分布の測定法として、電磁波の散乱・反射・透過を用いた方法が広く使われているが、測定領域が固定されるため、運転条件により変わる重要な測定領域の変化に対応できない。そこで本研究では透過干渉計を基にした「デジタルミリ波干渉計」を提案する。本手法が実現すると、密度データの基になる干渉信号を全てソフトウェア上のデジタル信号処理で生成でき、測定領域の柔軟な変更が可能になる。「デジタルミリ波干渉計」の試作により高精度な密度分布測定法の開発を目指す。

## 3. 研究の方法

「デジタルミリ波干渉計」は以下のような動作原理である。70GHz-80GHz 帯のミリ波を高周波回路系で合成し、放射方向可変アンテナからプラズマへ出力する。アンテナに入力する周波数は、時間とともに掃引するか、または同時に多周波数の信号を入力するか選択できる。周波数が増えると、プラズマ中の測定箇所が変化するため、透過信号の位相を周波数を変化させながら検出することで、プラズマの密度分布を測定できる。同時に多周

波の信号を入力した場合は、受信信号をデジタル信号処理により周波数分解を行い、各周波数の信号の位相を検出することで高時間分解で密度分布の測定が可能となる。本研究では以下の3段階に分けて研究を進めた。

- ①放射方向可変アンテナを3次元電磁界シミュレータを用いて開発し、近傍界放射パターン計測システムで評価する。
- ②デジタル信号処理方法を確立する。特に複数の周波数を同時に計測に利用したときは、取得したデジタル信号に複数の信号が混在している。そのため、これらの信号を分解処理し、位相を検出できる信号処理方法をコンピュータシミュレーションで開発から検証を行う。
- ③デジタルミリ波干渉計の原理実証を実験室内で行う。計測対象はテフロン誘電体板である。

## 4. 研究成果

- ①図1に開発した放射方向可変アンテナである Image Non-Radiative Dielectric Guide (INRDG) アンテナの周波数を 68-80GHz まで変化させたときの放射パターンを示す。

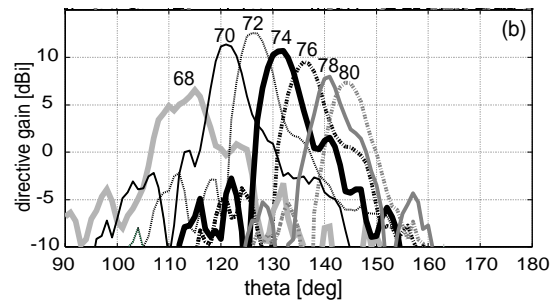


図1：放射方向アンテナの周波数変化時の放射角度変化特性

70-80GHz まで周波数を変化させることで、放射方向が 120° から 145° まで 25° 変化させることができるアンテナの開発に成功した。この放射パターンの変化は、シミュレーションや解析的に予想した値とほぼ一致した。

- ②デジタル信号処理は、テスト用信号源として 80 周波数の信号 (1-80MHz, 1MHz ステップ) をそれぞれ異なる振幅と位相で重畳し合成したものを使用した。デジタルバンドパスフィルタを調整したところ、3000 次の FIR フィルタであれば、単一の周波数の干渉計信号のみ抽出できることを示した。この次数により、干渉計の時間分解能を 1.5μ秒と見積もることができた。また、デジタルバンドパスフィルタの特性により、信号の振幅に対して 5 倍

大きなノイズに対しても本手法は有効に適用でき、位相を検出できることが分かった。③開発した INRDG アンテナを用いて簡易的な干渉計を図2のように構成し、原理実証実験を実験室で行った。干渉計信号の位相の検出はベクトルネットワークアナライザを用いた。

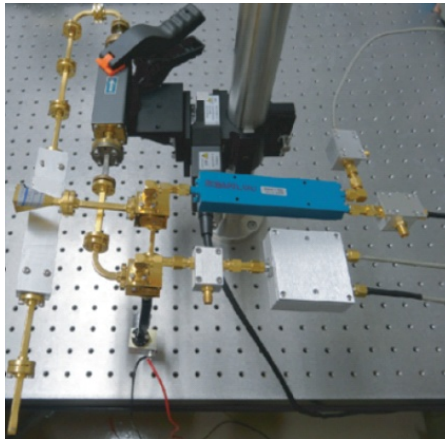


図2 デジタルミリ波干渉計の原理実証

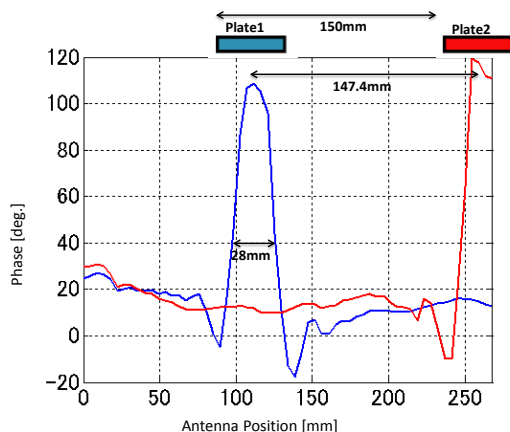


図3 デジタルミリ波干渉計測定結果 (誘電体板 誘電率 2.2、28mm 幅、3mm 厚)

図3は干渉計の測定結果を示す。横軸には周波数を変化させたことに対応するアジマス方向の計測位置を示し、縦軸は干渉信号の位相変化である。誘電体板の位置を変化させて2回干渉測定を行った。図の上部には実際に誘電体を配置した位置を示すが、位相の変化と誘電体板の位置は対応していることが分かる。また、位相変化から誘電体の厚みを推定したところ、10%以下の誤差で一致していることを確認した。

本結果から、プラズマ計測にも適用できるデジタルミリ波干渉計の原理実証を行うことができた。

## 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5件)

- ① Kogi, Y. et al., "Development of Antenna System and Simulation of Analysis Method for Digitally-Controlled Millimeter-Wave Interferometer", Transactions of Fusion Science and Technology, 査読有、in print (2013).
- ② Kogi, Y. et al., "Development of leaky-wave antenna for digitally controlled millimeter-wave interferometer" Review of Scientific Instruments, 査読有、83 (2012) 10E347
- ③ 出射浩、間瀬淳、川端一男、長山好夫、吉永智一、近木祐一郎、徳沢季彦、江尻晶、久保伸、田中謙治、西浦正樹、秋山毅志、Austine E. Max、北条仁士、"電磁波を用いたプラズマ診断の基礎と最新線"、プラズマ核融合学会誌、査読無、87, 2011, 339-344.
- ④ Ito Naoki, Mase Atsushi, Kogi Yuichiro, Seko Noriaki, Tamada Masao, Shimazu Hiroshi, Sakata Eiji, "Development of Millimeter-wave planar Antennas Using Low-Loss Materials", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有、Part 1 49, 2010, 106506
- ⑤ M. Yoshikawa, S. Negishi, Y. SHima, H. Hojo, A. Mase, Y. Kogi, and T. Imai, "Two dimensional density and its fluctuation measurements by using phase imaging method in GAMMA10", Review of Scientific Instruments, 査読有、81 (2010) 10D514

[学会発表] (計4件)

- ① 松川真吾、"デジタルミリ波干渉計の開発による密度分布測定の高精細化の研究"、プラズマ核融合学会、2012年11月30日、クローバープラザ (福岡県)
- ② Yuichiro Kogi, "Development of antenna system and simulation of analysis method for digitally-controlled millimeter-wave interferometer", Joint conference of 9th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS2012) and 3rd Internationala Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion (PMIF2012), 27/8/2012, Epocal Tsukuba (ibaraki)
- ③ Yuichiro Kogi, "Development of digitally-controlled millimeter-wave interferometer for precise electron density distribution measurement", 19th Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics, 8/5/2012, Monterey(USA)

- ④ 近木祐一郎、“詳細密度分布計測のためのデジタルミリ波干渉計の開発”、プラズマ核融合学会、2010年12月1日、北海道大学(北海道)

[その他]

ホームページ等

<http://www.fit.ac.jp/research/search/research/id/16>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし