

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：37112

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820439

研究課題名(和文) デジタルミリ波干渉計の開発と非軸対称プラズマの高精度密度分布計測方法の研究

研究課題名(英文) Development of numerically-controlled millimeter-wave interferometer for precise profile measurement of non-axisymmetric plasma

研究代表者

近木 祐一郎 (Kogi, Yuichiro)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：10398109

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：核融合発電を達成する上で、プラズマ閉じ込めの改善が課題となっており、そのためのプラズマの電子密度分布の詳細計測が求められている。本研究では漏れ波アンテナの採用による多チャンネルミリ波干渉計測器を開発し、プラズマを模擬した誘電体を対象に原理実証実験を実験室内で進めた。誘電体形状や位置の測定結果は、位置はあっているものの形状はぼやけていた。そこで測定結果をシャープにするため、ミリ波のビーム強度の分布を測定し、それと遺伝的アルゴリズムを用いることにより、より実際の形状推定に成功した。

研究成果の概要(英文)：Further improvement of plasma confinement is one of the issues for the fusion reactor. For this reason, development of electron density profile measurement device is important. We have developed the millimeter-wave interferometer with several hundred of measurement channel by employing a leaky-wave antenna. We simulative applied this system to a dielectric rod in the lab to evaluate system spatial resolution. In the measurement results, measured and actual rod positions are in good agreement, however, measured profile is blurred. We have employed the genetic algorithm (GA) to sharpen the profile. We confirmed that estimated profile by the GA is good agreement with the actual rod-shape.

研究分野：プラズマ計測

キーワード：電子密度分布計測 ミリ波干渉計

1. 研究開始当初の背景

核融合炉の実現には、高温高密度のプラズマを長時間閉じ込める必要がある。近年、閉じ込め研究の進展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が、各種不安定性や乱流、プラズマ諸量の空間分布に起因するプラズマ閉じ込めの劣化は依然として重要な課題となっている。近年の実験において、周辺プラズマのダイバータ等による不純物等の分布制御により、短時間に空間を隔てた中心部領域全体のプラズマ性能の向上が観測されている。またプラズマ電流分布制御によって局所的に輸送障壁が形成されると同時に中心領域全体のプラズマ性能が向上する現象も観測されている。これらの観測結果は、プラズマの周辺と中心領域に渡る長スケールの相関を有する何らかの輸送構造がプラズマの閉じ込めに影響を与えていることを示唆している。このような局所的な分布形状がプラズマ全体の分布形状を決定する機構がある中で、プラズマの性能をさらに向上させるには、局所的なプラズマ諸量の分布を測定するだけではなく、同時に中心から周辺に渡る広い領域を測定できる広域高空間分解計測器を用いて、閉じ込め磁場配位や粒子供給、プラズマ中の電流などの分布を適切にフィードバック制御する必要がある。また、プラズマ分布の時間変化は、磁気流体力学不安定性(MHD)等のスケールの場合、数十マイクロ秒オーダーのため、プラズマ制御のためには分布の変化を測定できる時間分解能が高い計測器が必要である。

2. 研究の目的

上述のように核融合プラズマ実験におけるプラズマ各種諸量の空間分布の計測・制御は、高性能プラズマ生成のために不可欠である。特にプラズマ輸送の研究では、プラズマの中心領域から周辺領域に渡る詳細な分布計測が必要であるが、現状の各種分布計測方法では計測領域や精度の面で必ずしも十分とはいえない。そこで本研究は、代表者が提案している電子密度分布計測器「デジタルミリ波干渉計」を開発および発展させること、筑波大学プラズマ研究センターGAMMA10のセントラルセル部のプラズマに本計測器を適用することで、高精度かつ広範囲な密度分布計測システムの確立を図ることを目的としている。

3. 研究の方法

デジタルミリ波干渉計の測定装置図を図1に示す。プラズマ内に縦に複数の測定コードを配置し、干渉法によりコード上の電子線積分密度に比例する位相変化を観測する。Image Non Radiative Guide Antenna (INRDGA)に複数のミリ波帯の周波数を持つ信号を入力すると、INRDGAの分散性に

り、周波数に応じた方向に電波が照射される。それによって複数の測定コードを配置している。パラボラミラーはプラズマをはさむように設置され、それぞれの焦点に送受信アンテナを配置する。送受信回路系は1つであり、簡易に複数チャンネルの測定が可能となっている。

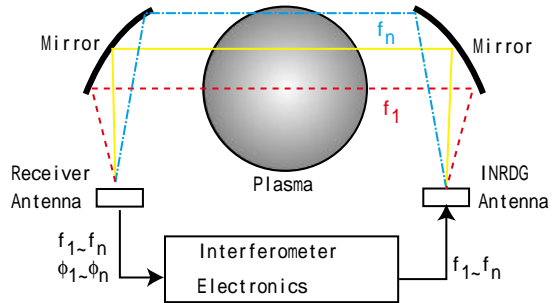


図1: デジタルミリ波干渉計装置図

研究開発の方法は、福工大の実験室で行う検証実験と、筑波大学プラズマ研究センターのプラズマ閉じ込め装置GAMMA10での適用実験に分かれる。「デジタルミリ波干渉計」の原理実証実験では、プラズマの替わりとして誘電体スラブを用いて1系統の干渉計の適用を行い、誘電体スラブの厚みと計測結果の位相変化量が各測定チャンネルで対応していることを確認する。また誘電体スラブを時間を隔てて複数の方向から観測し、トモグラフィやイタレーションなどの方法を用いて高精度な電子数密度分布再構成のためのソフトウェア構築を行う。

4. 研究成果

実験室内での原理実証実験では、板状の発泡スチロールを図2のようにパラボラミラーの中心に配置し、発泡スチロールの有無による位相変化を周波数毎に観測した。また、発泡スチロールの位置を position1 ~ position3 まで変え、さらに誘電体の厚みを1倍から3倍まで変えて、同様の測定を行った。

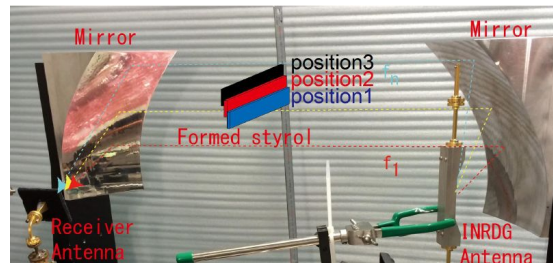


図2: 誘電体スラブ配置とパラボラミラー

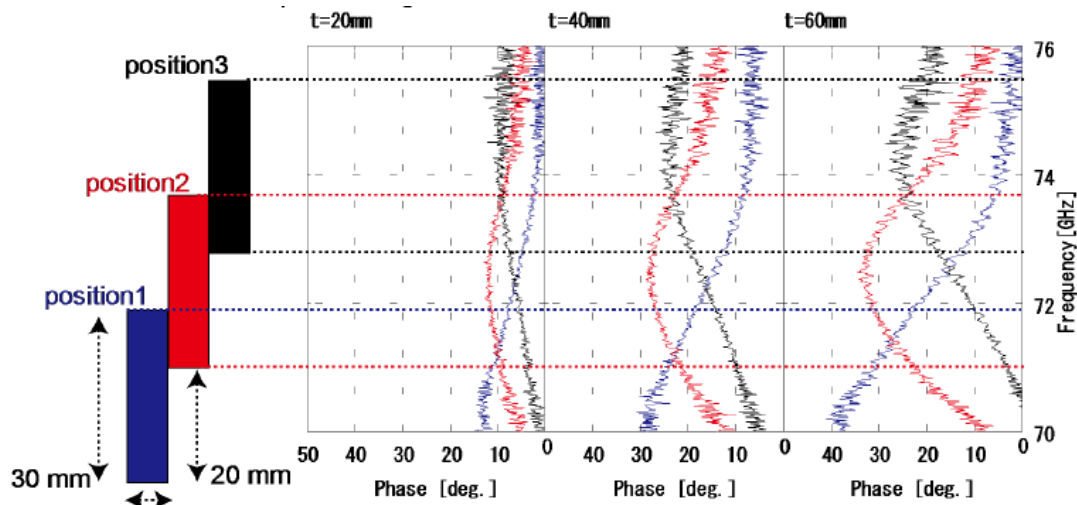


図 3：誘電体の高さ方向に変化させた位置（左図）と、位相変化の周波数分布の関係（左図から右図に、誘電体の厚みが 20mm, 40mm, 60mm と変化する。） position1, 2, 3 の測定結果は青、赤、黒で表示した。

図 3 に測定結果を示す。誘電体の大きさは、 $W=200\text{mm}$, $H=30\text{mm}$, $D=(20, 40, 60)\text{mm}$ で、position が変わる毎に 10mm 上方に設置した。高い周波数ほど測定コードが上方に配置されるため、測定される周波数分布は、高さ方向に分解した誘電体の形状を表している。図のように、position が高くなると誘電体の位置を表す位相のピークが低い周波数側から高い周波数側にシフトする現象が見られる。また、誘電体の厚さを増やすに伴い、位相量も増えていることが確かめられた。しかし方形の誘電体形状に対して、観測された周波数分布はどれもなめらかな曲線であり、予想通り、分布を詳細に観測できていないことが分かった。そこで、誘電体スラブ設置位置におけるビームの伝搬方向に直交した面内の放射強度パターン(dB 表示)測定結果を図 4 (a:70GHz) と図 4(b:77GHz) に示す。方形状の実線はこの面内に投影したパラボラミラーを表している。周波数が 70GHz から 77GHz に上がると、ビーム強度が大きな位置が約 50mm 高くなることわかる。(図は高さ方向の上下が反転していることに注意する)ビームのスポットサイズは約 30mm 程度あり、1 つの周波数成分を持つビームでさえ誘電体スラブの高さより大きいため、測定される形状がぼけてしまうことが分かる。

解析的には各周波数毎の位相の測定値は、各場所の規格化された放射パターン強度分布とその分布に対応する位置の位相変化の真値の積の総積分量に対応するはずである。そこで、測定された放射パターン強度分布と位相分布から、真の位相分布の推定を遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて推定することを試みた。GA では位相の推定値と測定値を対応付けることができる伝達関数をモデル化し観測方程式を用いて推定値と測定値の誤差を評価する。伝達関数は、放射パターンの測定値を用いてモデル化した。ランダムに位

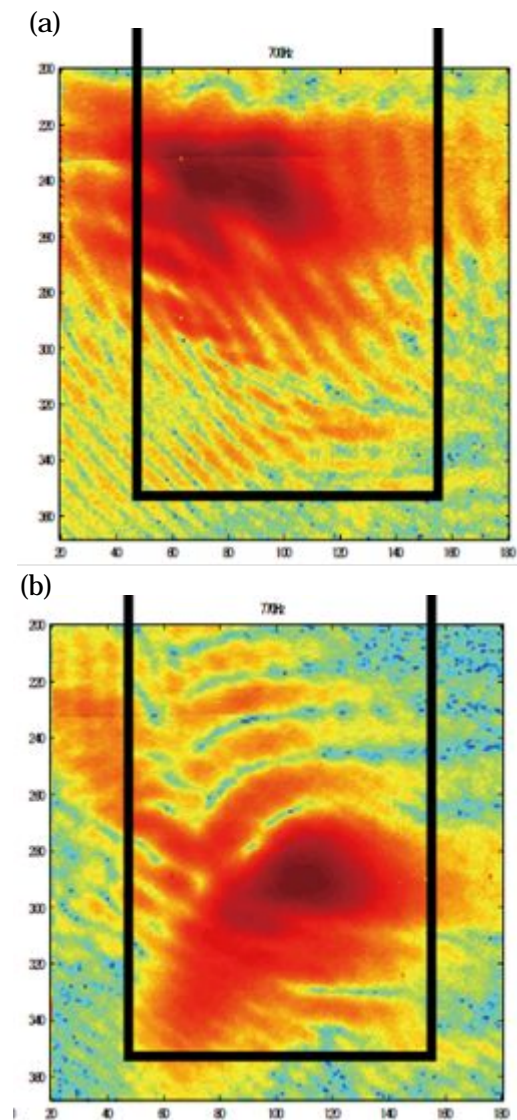


図 4：測定面 (W-H 面) における放射パターン(a:70GHz, b:77GHz)。実線はミラーの位置を表す。赤が放射強度が高い部分を示す。dB 表示。

相分布の推定値を変化させたものを10パターン以上作成し、誤差の評価が最も良かったパターンを次世代のパターンの雛形として、イタレーションにより徐々に誤差の評価を高めてゆくのがGAの手法である。

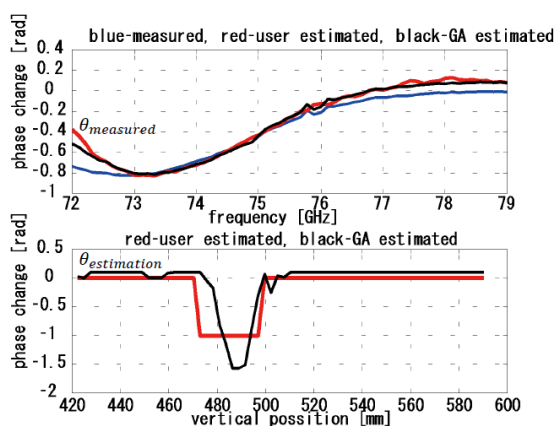


図5: GA法による真の位相分布の推定
 上図: 位相の測定値(青) GAの推定値(黒)と矩形の真値の分布(赤)を観測方程式で演算した結果
 下図: 誘電体スラブの位相分布の真値(赤)と、GAの推定値(黒)

図5にGAを適用した結果を示す。上図は観測値、下図は状態推定値(真値)を表し、下図の値に対して観測方程式を適用すると上図の値が得られる関係となっている。上下図の赤線は、矩形で表される真の状態推定値(下図)を観測方程式を通して推定される観測値に変換したもの(上図)を表している。同様に黒線は、GAが推定した状態推定値と観測結果である。また、上図青線は実際の測定結果を表している。

観測結果を表すグラフにおいて、72GHz付近の低周波領域を除いて3つ曲線は良く一致していて、GAが適切に働いていることが分かる。状態推定値を表すグラフにおいて、GAが推定した位相分布は測定結果と比較しシャープになり、より実際の形状に近づいている。GAが推定した誘電体スラブの高さは約22mmであり、真値(30mm)より低くなっている。これは観測結果を表すグラフにおいて、低周波領域などGAの観測結果が真値による結果より実際の測定値に近いことから、72-73GHz付近および76GHz以上の領域において観測方程式のモデルが現実のものとの違いがあることを示唆している。

以上のようにGAはデジタルミリ波干渉計により得られた形状分布を、より局所性に優れた形状分布に推定することが可能であり、学会などでも高い評価を受けた。一方、モデル化の誤差に起因する数10%の推定値の誤差はモデルの最適化により低減可能ではあるが、GAの処理はリアルタイム処理に適していないことから、より高速の状態値推定ア

ルゴリズムを開発していく必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Y. Kogi, T. Higashi, S. Matsukawa, A. Mase, J. Kohagura, Y. Nagayama, K. Kawahata, D. Kuwahara and M. Yoshikawa, Validation experiment of a numerically processed millimeter-wave interferometer in a laboratory, Review of Scientific Instruments, 査読有, 85,11D411 (2014)
 DOI: 10.1063/1.4893430

近木祐一郎, 東哲矢, 電子密度分布測定のためのミリ波干渉計の開発と実験室における動作検証実証, 福岡工業大学総合研究機構エレクトロニクス研究所所報, 査読有, 第31巻(2014), 7-10, ISSN 0911-050X

Yuichiro Kogi, Shingo Matsukawa, Masayuki Yoshikawa, Atsushi Mase, Yoshio Nagayama, and Kazuo Kawahata, DEVELOPMENT OF ANTENNA SYSTEM AND SIMULATION OF ANALYSIS METHOD FOR DIGITALLY-CONTROLLED MILLIMETER-WAVE INTERFEROMETER", Transactions of Fusion Science and Technology, 査読有, 63,1T,172-175 (2013)

〔学会発表〕(計2件)

近木祐一郎, 東哲矢, 間瀬 淳, 小波蔵 純子, 長山好夫, 川端一男, 桑原大介, 伊藤直樹, 吉川正志電子密度分布計測のための数値処理型ミリ波干渉計の開発と実験室におけるトモグラフィー検証実験, PLASMA CONFERENCE 2014 2014.11.18-11.21 朱鷺メッセ(新潟県, 新潟市)

Yuichiro Kogi, Shingo Matsukawa, Masayuki Yoshikawa, Atsushi Mase, Yoshio Nagayama, and Kazuo Kawahata, Development of Numerically Processed Millimeter-wave Interferometer for Density Distribution Measurement, 20th Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics, June 1-5, 2014, Atlanta, GA, USA

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・教授
 研究者番号: 10398109