

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 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760319

研究課題名（和文）

マイクロ波CTの開発

研究課題名（英文）

Development of Microwave Computer Tomography

研究代表者

山口 聡一郎 (YAMAGUCHI SOUICHIRO)

関西大学・システム理工学部・助教

研究者番号：30413991

研究成果の概要（和文）：

乳がん医療診断や建築物非破壊検査への応用に向けて、携帯端末や無線通信技術を利用したマイクロ波の計算機トモグラフィー(マイクロ波 CT)装置を研究開発した。携帯電話用の安価な電子部品を流用して送受信アンテナとマイクロ波回路を製作し、乳がん模型によるマイクロ波 CT の模擬計測実験において計算機シミュレーション結果との良い一致が得られた。また、短時間の計算で断層像を得るために、パルスレーダーや高速並列計算の技術が導入された。

研究成果の概要（英文）：

Microwave Computer Tomography (CT) for medical diagnostics and nondestructive inspection is developed by using technologies of mobile phone and wireless communication devices. Antennas and main-circuits are made of low-priced electrical devices for mobile phone. Experimental data of a breast cancer model quantitatively agrees with FDTD simulation. A radar pulse technique and High Performance Computing (HPC) are installed to the microwave system in order to reduce calculation time of CT reconstruction.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：マイクロ波 CT, イメージング, 画像診断

1. 研究開始当初の背景

近年ミリ波・マイクロ波を用いた 2 次元・3 次元の画像診断法の研究開発が始まり、その計測方法や解析手法について新しい提案がなされている。プラズマ物理の基礎研究においてもその研究開発が大きく進展してい

る。中でもアメリカ・カリフォルニア州立大学デービス校のルーマン氏とプリンストンプラズマ物理研究所のパーク氏の研究グループが最も目覚ましい成果を挙げている。彼らは電子サイクロトロン輻射イメージング (ECEI) 装置を開発し、これをドイツの

TEXTOR トカマクに設置して、高温プラズマの電子温度分布の2次元断層像を観測することに成功した。[H. Park, et al, Phys. Rev. Lett. 96, 195003 (2006)]。彼らはアメリカの球状トカマク装置 NSTX や韓国の KSTAR トカマク、国際熱核融合実験炉 ITER における3次元のマイクロ波イメージング計測の開発にも取り組んでおり、プラズマ物理における新しい発見が期待されている。日本国内では、九州大学 間瀬研による ECE イメージングや極短パルス反射計(USRM)、自然科学研究機構 核融合科学研究所のマイクロ波イメージング反射計(MIR)などの計測手法が開発されており、基礎研究および産業応用化の両方に向けた取り組みがなされている。

申請者は過去3年間、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)において核融合プラズマの基礎研究のため、マイクロ波イメージング反射計(MIR)という新しい画像診断システムを立ち上げた。現在もその共同研究を継続しており、今秋から2次元断層像を奥行き方向に連続スキャンして3次元像を可視化する新しいシステムが稼働を始めた。申請者は、こうした基礎科学の研究現場から生まれた新しい計測技術を社会に還元し、医療診断・産業応用に役立つ優れた画像診断装置を開発したいと考える。

マイクロ波は誘電率が異なる境界面において強く反射されるという特徴を持つ。プラズマ計測の場合、電子密度や閉じ込め磁場によってプラズマの誘電率が異なる特性を利用して、電子密度乱流の反射計測を行っている。ガン組織は周辺の正常細胞に比べて誘電率が異なるという特性を持つ。もし、人体へのマイクロ波照射において最適な周波数をうまく選び、マイクロ波イメージング反射計を用いてガン組織を観測すれば、その患部の大きさと位置を詳しく観測できることがと推察される。そこで、申請者は、プラズマ計測のイメージング反射計の画像診断技術をガン組織の画像診断に応用することを考案した。

2. 研究の目的

申請者は、平成 19-20 年度の科研費 若手研究(B)に採用され、高感度の2次元検出器アレイおよび位相計測モジュールを手作りの内製によって開発した。これを用いて大型ヘリカル装置や逆磁場ピンチプラズマにおいて電子密度揺動の2次元挙動を初めて観測した。そこで今回、この計測技術に新しく計算機トモグラフィ法(CT法)を組み込んで、反射計測型の計算機トモグラフィ法という新しい3次元画像診断法を開発し、従来の反射計やCT法では観測が困難であったミリサイズの非常に小さい空間構造を3次元で観測できる。

計算機トモグラフィ法(CT法)は本来、X線や直進する粒子ビームを用いた透過型の計測に利用される画像診断法である。CT法は、少ない測定チャンネル数から測定対象物の断層像を非破壊測定できるのが最大の長所である。その反面、X線やビームが通った経路の吸収・発光量の線積分値がデータとして得られるだけなので、測定対象物の空間構造(吸収・発光分布)を直接的には反映しない計測、すなわち、間接計測であるのが弱点である。また、数学的手法による画像近似法を用いて像再生するため、測定対象物の微細構造をうまく測れない(画像近似によって微細構造がぼやけてしまう)という弱点を持つ。一方、マイクロ波イメージング反射計は、誘電率が異なる境界面(照射波の反射面)に対して鋭敏に反応し、空間構造を直接的かつ高感度に測定できる長所を持つ。しかし、測定対象物の空間構造を解析する解析手法についてはまだ十分に確立されていないのが現状である。そこで申請者は、「①対象物からの反射波の位相散乱を計測して反射面の空間構造を推定する解析手法」と、「②その解析結果を初期値として有限差分時間領域法を用いて反射面の微細構造を同定する解析手法」の2つを開発する。この新しい解析手法とマイクロ波イメージング反射計を組み合わせるとマイクロ波CT法を開発し、数ミリサイズという非常に高い空間分解能をもった3次元画像診断を開発する。

こうしたマイクロ波CT法に新しい画像計測手法は、医療診断のほかにも様々な産業・基礎研究分野での利用が期待される。例えば、X線CTによるコンクリート非破壊検査の場合、透過計測であるため、これまではトンネルや巨大橋梁の橋脚、超高層ビルの構造柱、原子力発電所の基礎土台や分厚い壁面などは物理的に計測不可能である。けれども、マイクロ波CT法であれば、こうした構造物を容易に測ることができ、非常に多くの場面で活躍する。

また、この技術の開発がさらに高周波数のテラヘルツ光を用いたイメージング技術への発展につながる。申請者はコンパクト・高出力のテラヘルツ光源も開発しており、上記のマイクロ波CT法を転用して、細胞組織を生かしたまま、リアルタイムの画像診断が可能になり、医学・生命科学系の基礎研究に役立つ新しい画像診断法が開発される

3. 研究の方法

関西大学において、マイクロストリップ線路の技術を用いて高周波回路とマイクロ波送受信アンテナを製作し、反射計測型の計算機トモグラフィ法のための新しい解析コードを開発する。

初年度(平成 21 年度)は、ハードウェアの

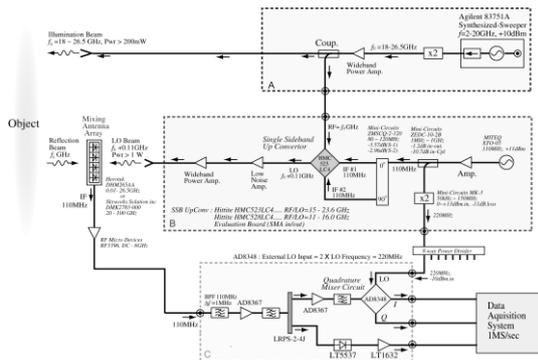


図 1. マイクロ波 CT 装置の回路設計図

製作として 2 次元検出器アレイ、周波数掃引型の照射回路、位相計測回路、結像光学系を製作し、デジタイザ(A/D 変換器)、データ収集システムを準備する。2 次元検出器アレイとして、高周波回路用のプリント基板を用いて高感度の平面八木アンテナ素子を開発する。これは前述の逆磁場ピンチ装置 TPE-RX のプラズマ実験用の 2 次元検出器アレイ(帯域 18 - 26.5GHz)と同様の手法で製作する。また、産業応用化を念頭において総務省の周波数利用区分に対応するため、低周波数 8.5 - 13GHz の周波数掃引に対応する平面八木宇田アンテナ素子も新たに設計する。周波数掃引型の照射回路は、手持ちの電圧制御周波数発振器(VCO)と周波数変調回路(SSB)を流用するが、VCO 発振器の出力が SSB 回路の必要パワーに満たないので、広帯域の RF パワーアンプを新たに 2 個購入する。位相計測回路と結像光学系は、逆磁場ピンチ装置 TPE-RX のプラズマ実験に用いたシステムをマイクロ波 CT 用に最適化した改良版を新たに製作する。デジタイザ(A/D 変換器)およびデータ収集システムは、非常に効果であるため、共同研究先の核融合科学研究所から Compact - PXI または CAMAC システムを短期間だけ借用してシステムの実証実験に対処する。

平成 22 年度は、反射計測型の計算機トモグラフィの解析コードを作成する。申請者は過去にトカマクプラズマ用の 3 次元軟 X 線 CT システムの解析手法の開発に従事した経験があるので、大同工業大学の岩間教授の協力を得て、反射計測型の計算機トモグラフィの解析手法を考案する。

平成 23 年度は、模擬測定データから計算機トモグラフィ法を用いてデータ解析および画像化する計算コードを作成する。C 言語を用いて Windows, Linux ベースの GUI ソフトウェアを作成し、測定対象のサンプル、あるいは、実際のガン組織や鉄筋コンクリートのサンプルを用いてシステムの実証実験を行う。

4. 研究成果

平成 21 年度はマイクロ波 CT のハードウェア開発を進め、システム全体の 6 割が完成した。平面波照射用コルゲートホーンアンテナが完成した。本体の長さ 355mm×外径 φ160mm, アルミ合金製で中心周波数 10GHz として設計した。円錐ホーンアンテナの内側に深い溝構造を与えると交差偏波が抑制されて平面波が放射される。平面波を利用すると断層像再生のデータ解析過程が簡略化され、実用段階における解析時間を大幅に短縮される。コルゲート構造は機械加工が大変難しいため、核融合研の西村輝樹氏と共同開発を行い、サイズが異なる中心孔付き薄円板を多数積層することで技術的課題を解決した。周波数変調回路が完成した。この回路は、超高温プラズマ実験(産総研 TPE-RX)のマイクロ波イメージングで動作実績のある高周波回路を流用した。電圧制御発振器と周波数変調素子を組み合わせ 8.5~13.5GHz 帯を自在に周波数変調し、測定対象物の空間構造(特に深さ方向の空間情報)を探る。32 チャンネルのデータ収録システムを構築した。自動回転ステージ(測定対象物を精密に角度スキャンする)と 1U ラックマウント解析サーバーを小テーブルに収納し、データ収録ソフトウェア LabVIEW を用いてこれらを統合制御する。解析サーバー上の GUI を通じて、照射周波数制御・測定対象物の角度スキャン・反射波のデータ収録・断層像再生に至る一連の診断過程を一貫して行うことができるようになった。16 個の角錐ホーンアンテナ(E 面)からなる受信器アンテナアレイの開発を進めている。現在 4 チャンネルが完成し、動作試験において反射強度と位相信号を計測することができた。マイクロ波 CT の解析方法とそのコーディングについて共同研究会を 3 回開催した。CT 法アルゴリズムを専門とする岩間教授(大同大学)・寺西准教授(広島工業大学)と共に、ボルン近似法を用いてグリーン関数行列の非線形方程式を解くことにより、複素誘電率分布関数(測定対象物の断層像)を求める解析手法を考案した。

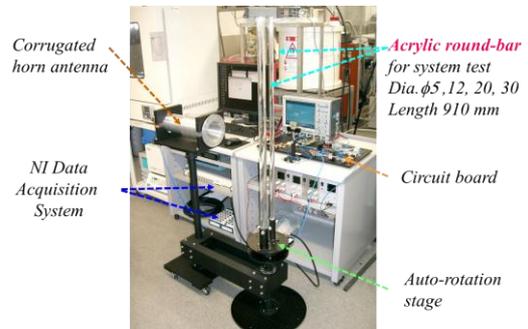


図 2. マイクロ波 CT システムの全体写真

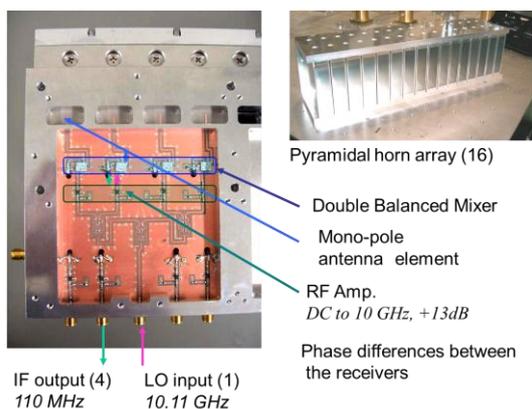


図 3. 角錐ホーンアンテナアレイの内部回路

平成 22 年度はマイクロ波 CT のハードウェア開発を進めて CT システム全体が完成した。平面波照射コルゲートホーンアンテナ用の角度掃引式光学ベース、および、被測定対象物用の自動回転ステージが完成した。また、直交復調 IC を利用した位相計測モジュールをシステム本体に組み込み、周波数変調による位相測定の実験確認が完了した。CT 装置の最適化と CT 解析コード開発に向けて C 言語プログラミングを用いた FDTD 法(有限差分時間領域法)によるマイクロ波の伝搬・散乱の計算機シミュレーションを行った。被測定対象物(アクリル誘電体、乳がん模型)の大きさについて数ミリの差を判別できる空間分解能を得るには 5 度以下の刻み角度で被測定対象物を周囲から測定する必要があること、また、反射強度のみを測定する既存の方法では空間分解能は 0.2λ 程度(実際の乳がん検出に換算すると 3~5mm)が測定限界になることが予想され、精密な位相測定による空間分解能の向上が必要であることを確認した。固有インピーダンス整合のため被測定対象物と検出器の間に高誘電率の整合液を充填させる方法を試みた。高誘電率グリセリン中においてマイクロ波の送受信試験(直線偏波・円偏波)を行ったところ、液中における伝送損失が非常に大きく実用性の観点も含めて、本研究のマイクロ波 CT では空中伝送、あるいは、肌にインピーダンス整合クリームを薄く塗付して検出器素子を密着させる方法を採用することにした。また、パルス照射型マイクロ波 CT 装置の開発に着手した。パルス計測装置は非常に高価で導入が困難であるが、Comb Generator という特殊な半導体素子を用いると安価な任意信号発生器を使ってマイクロ波パルスを容易に発振できることが判り、パルス発振回路(パルス時間幅 330psec)を設計した。これに対応できる広帯域円偏波アンテナ(帯域 2~20GHz)の試作品も完成した。

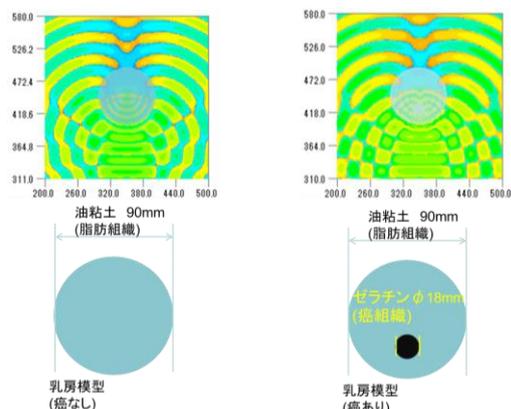


図 4. 乳癌模型のシミュレーション結果

平成 23 年度はアクリル誘電体と乳がん模型を被測定対象物として連続型マイクロ波 CT システムによる測定実験を行った。乳がん模型を内製し、実物の乳房組織および癌組織の比誘電率に近い安価な素材を選定して、その電気定数を実測して確認した。10 GHz 帯のマイクロ波を被測定対象物に照射し、反射・散乱・回折による合成波を測定対象物の周囲で観測した。観測波形から振幅分布および位相分布が得られ、FDTD 法(有限差分時間領域法)による電磁波伝搬シミュレーションとの比較を行ったところ、実測された振幅・位相分布とシミュレーション結果が非常に良く一致しており、携帯電話の通信技術に応用した安価な CT システムが実際の CT 実験において正確に動作することを確認した。次に、実測データから画像解析を高速に行うために GPGPU ワークステーションを導入した。既存の解析技術の場合、24 台の PC クラスタで並列計算しても 3 次元マイクロ波 CT 像を得るまでに 1 ヶ月の計算時間を要する。本研究では近年飛躍的な進化を遂げる GPGPU(一般目的画像処理演算素子)による高速コンピューティング技術を導入し、実際の医療現場において実用的な時間内でマイクロ波 CT 像再生するべく GPGPU(448 コア)と CPU(12 コア)を並列処理に組み込む高速計算コードの開発に着手した。CT 像解析では 3 次元の電磁波伝搬シミュレーションと非線形方程式(大規模な複素行列解析)を解くために膨大な計算時間を要するが、その両方に対して並列計算を可能にする既存コードがないので、本研究内で開発している。現在ところ、被測定対象物の CT 像(複素誘電率分布)の情報を含む散乱波解を離散化して行列方程式に直し、コーディングする段階に進んでいる。今後は FDTD 法による電磁波伝搬シミュレーションを使って本コーディングの動作検証を行う予定である。

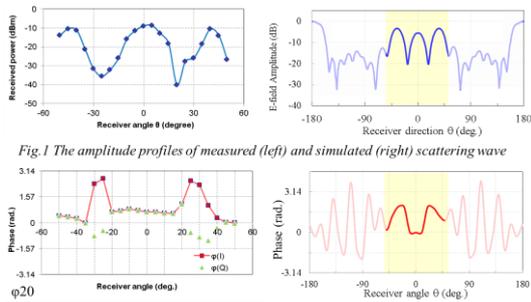


図5. マイクロ波 CT 装置による乳癌模型の計測結果(右)とシミュレーション結果(左)。上段が振幅分布, 下段が位相分布を示す。

また, パルスレーダー方式による3次元マイクロ波 CT システムの試作機が完成した。本年度予算でパルス波の時間波形を観測できるサンプリングスコープを導入し, パルス波の送受信回路(パルス時間幅 100psec, 最大出力 10mW)が完成した。本システム専用の円偏波送受信アンテナを製作し, パルスの空中伝送実験および誘電球・金属球を用いたパルス反射実験を行った。現在のところ, アンテナ素子が持つ強い周波数依存性によって反射パルスに著しい波形歪みが生じており, パルスの飛行時間をまだ正確に測定できていない。今後はアンテナ素子開発によって周波数特性を改善し, 観測された受信波形から反射波形と直達波を分離して正確なパルス飛行時間を算出できる信号処理を進めることによってパルスレーダー方式の3次元 CT 像解析実験を行う予定である。

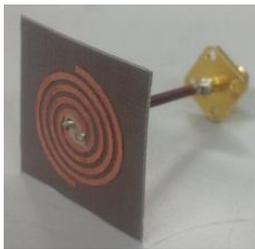


図6. パルス型3次元マイクロ波 CT 用の広帯域スパイラルアンテナ素子

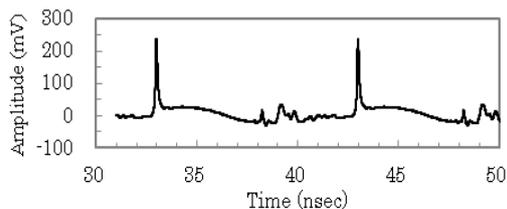


図7. 100psec パルス発振器の出力電圧波形

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

① Reflectometric measurement of plasma imaging and applications

Journal of Instrumentation (IOP Publishing for SISSA), C01089-1 ~ C01089-20 (2012)

A. Mase, N. Ito, M. Oda, Y. Komada, D. Nagae, D. Zhang, Y. Kogi, S. Tobimatsu, T. Maruyama, H. Shimazu, E. Sakata, F. Sakai, D. Kuwahara, T. Yoshinaga, T. Tokuzawa, Y. Nagayama, K. Kawahata, S. Yamaguchi, S. Tsuji-Iio, C. W. Domier, N. C. Luhmann, Jr., H. K. Park, G. Yun, W. Lee, S. Padhi and K. W. Kim 査読無

② Microwave Computer Tomography with Plane Wave Illumination

KJMW2011 Proceedings CD-ROM (2011)

Soichiro Yamaguchi, Naoya Kitade, Masora Kishimoto, Atsushi Kawabata, Makoto Asakawa, Teruki Nishimura, Daisuke Kuwahara and Yoshio Nagayama 査読無

③ Microwave reflectometric measurement of biological signals

Proc. Electromagnetic Compatibility Symposium, pp. 57-63 (2011)

A. Mase, N. Ito, Y. Komada, M. Oda, D. Nagae, D. Zhang, Y. Kogi, S. Tobimatsu, T. Maruyama, Y. Nagayama, D. Kuwahara, T. Yoshinaga, S. Yamaguchi, T. Tokuzawa, K. Kawahata, S. Padhi 査読無

④ Investigation of turbulence in reversed field pinch plasma by using microwave imaging reflectometry

Phys. Plasmas 18, 102315-1 ~ 102315-4 (2011)

Z. B. Shi, Y. Nagayama, S. Yamaguchi, Y. Hamada, Y. Hirano, S. Kiyama, H. Koguchi, C. A. Michael, H. Sakakita, and K. Yambe 査読有

⑤ Recent Progress on Microwave Imaging Technology and New Physics Results

Plasma Fusion Res. Vol. 6, 2106042-1 ~ 2106042-8 (2011)

B. Tobias, N. C. Luhmann, Jr., C. W. Domier, X. Kong, T. Liang, S. Che, R. Nazikian, L. Chen, G. Yun, W. Lee, H. K. Park, I.G.J. Classen, J. E. Boom, A. J.H. Donne, M. A. V. Zeeland, R. Boivin, Y. Nagayama, T. Yoshinaga, D. Kuwahara, S. Yamaguchi, Y. Kogi, A. Mase and T. L. Munsat 査読有

⑥ LHD におけるマイクロ波イメージング計測の開発

J. Plasma Fusion Res., Vol. 87, No.6 pp.359-370 (2011)

長山好夫, 吉永智一, 桑原大介, 山口聡一郎, 濱田泰司, 伊藤直樹, 伊藤康彦, 近木祐一郎, 間瀬淳, 石中兵, 杉戸正治, 土屋隼人, 飯尾俊二, LHD 実験グループ 査読有

⑦Development of electron cyclotron emission imaging system on Large Helical Device
Review of Scientific Instruments, vol 81,
p. 10D919 -1 ~ -3(2010)

D. Kuwahara, S. Iio, Y. Nagayama, T. Yoshinaga, H. Tsuchiya, S. Sugito, S. Yamaguchi, Y. Kogi, K. Akaki, A. Mase 査読有

⑧Upgrade of 2-D Antenna Array for Microwave Imaging Reflectometry and ECE Imaging
J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 9 p.125-130 (2010)

Daisuke KUWAHARA, Shunji TSUJI-IIO, Yoshio NAGAYAMA, Tomokazu YOSHINAGA, Zhongbing SHI, Soichiro YAMAGUCHI, Masaharu SUGITO, Yuichiro KOGI, Atsushi MASE 査読有

⑨ Optics Design for Microwave Imaging Reflectometry in LHD

Plasma Fusion Res. 5, 030-1 ~ 030-3 (2010).

Tomokazu YOSHINAGA, Yoshio NAGAYAMA, Daisuke KUWAHARA, Hayato TSUCHIYA, Soichiro YAMAGUCHI, Yuichiro KOGI, Shunji TSUJI-IIO, Hitoshi HOJO and Atsushi MASE 査読有

⑩Developments of Electron Cyclotron Emission Spectroscopy and Microwave Reflectometer on LHD

Fusion Science and Technology, vol.58 p.364-374 (2010)

T. TOKUZAWA, K. KAWAHATA, Y. NAGAYAMA, K. TANAKA, Y. ITO, S. HIROKURA, T. YOSHINAGA, H. TSUCHIYA, S. SUDO, A. KOMORI, and LHD EXPERIMENT GROUP

S. INAGAKI, P.C. de VRIES, A. MASE, Y. KOGI, and Y. YOKOTA, H. HOJO, A. EJIRI, S. YAMAGUCHI, D. KUWAHARA, Z. SHI 査読有

⑪ Development of 2-D antenna array for microwave imaging reflectometry in LHD
Plasma Fusion Res. SERIES, vol.8 p.0649-0654 (2009)

Daisuke KUWAHARA, Shunji TSUJI_IIO, Yoshio NAGAYAMA, Tomokazu YOSHINAGA, Zhongbing SHI, Soichiro YAMAGUCHI, Masaharu SUGITO, Yuichiro KOGI 査読有

[学会発表] (計 3 件)

① Microwave Computer Tomography with Plane Wave Illumination

Soichiro Yamaguchi, Naoya Kitade, Masora Kishimoto, Atsushi Kawabata, Makoto Asakawa, Teruki Nishimura, Daisuke Kuwahara and Yoshio Nagayama

2011 Korea-Japan Microwave Conference (国際会議 KJMW2011)

福岡県福岡市 九州大学医学部 百年講堂
2011年11月11日 Bio-medical Applications, Imaging & Radars

口頭発表(英語)FR1-5-2

② 準平面波を用いたマイクロ波 CT 装置の散乱波シミュレーション

岸本真空, 山口聡一郎, 浅川誠

第 23 回 電気学会 電子・情報・システム部門大会

東京工業大学 大岡山キャンパス 本館 H116

2011年09月21日(水)

若手研究者によるポスターセッション P-1

③ 半球型三次元マイクロ波 CT 用の広帯域送受信アンテナの開発

川畑淳史, 山口聡一郎, 長山好夫, 浅川誠

第 23 回 電気学会 電子・情報・システム部門大会

東京工業大学 大岡山キャンパス 本館 H116

2011年09月21日(水)

若手研究者によるポスターセッション P-1

[その他] (計 2 件)

①招待講演

LHD におけるマイクロ波イメージング計測の開発

長山好夫, 吉永智一, 桑原大介, 山口聡一郎

Plasma Conference 2011

石川県立音楽堂 2011年11月22日(火)

②学会賞受賞

一般社団法人 プラズマ・核融合学会

平成 23 年度 第 16 回 技術進歩賞

LHD におけるマイクロ波イメージング計測の開発

長山好夫, 吉永智一, 桑原大介, 山口聡一郎

<http://www.jspf.or.jp/membership/award/23prize.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 聡一郎 (YAMAGUCHI SOICHIRO)

関西大学・システム理工学部・助教

研究者番号: 30413991