

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01328

研究課題名（和文）異種誘電体層の電磁結合によるテラヘルツ波透過性制御とシートLAN通信への応用

研究課題名（英文）Control of terahertz wave transmission by electromagnetic coupling of dissimilar dielectric layers and its application to sheet LAN communications

研究代表者

枚田 明彦（Akihiko, Hirata）

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：40500674

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：異種機能性誘電体層の近接によるテラヘルツ波の透過性制御を可能にする技術を開発し、この透過性制御を利用したテラヘルツ帯超高速LANシート通信を実現した。中空導波管の上部の金属面の一部をメタマテリアル集積ガラス基板に置き換えることにより、導波管単体では低損失での伝送を実現し、ガラス基板に異種誘電体層を接触させた場合は、接触通信による10Gbps伝送が可能であることを実証した。石英基板上にサイズの異なる split ring resonator (SRR) を複数実装した試料の透過特性の評価、電磁界解析の実施により、隣接したサイズの異なるSRR間での磁気結合、電気結合のメカニズムを解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

異なる機能性誘電体層を近接した際の電磁カップリング現象を解明し、この電磁カップリングに関するモデル構築や設計論の確立ができれば、通信状況に応じて通過帯域を可変可能な適応フィルタや複数の異なる機能性誘電体層を積層した高屈折率レンズ・高Q値フィルタ・広帯域電波吸収体などの新学問分野を創造することができる。また、それらの成果は、LANシートの実現だけではなく、超高速データ転送用キオスク端末や、対となる機能性誘電体層を集積した受信アンテナを「物理的鍵」として、決められたペアとなる端末のみ接触通信を可能にするセキュリティ応用などの新たな応用を創造することが期待される。

研究成果の概要（英文）：We have developed a technology that enables control of terahertz wave transmission by proximity of different functional dielectric layers, and have realized terahertz band ultrahigh-speed LAN sheet communications using this transmission control. By replacing part of the metallic surface at the top of the hollow waveguide with a metamaterial-integrated glass substrate, we have achieved transmission with low loss in the waveguide alone and demonstrated that 10 Gbps transmission by contact communication is possible when the glass substrate is in contact with a different dielectric layer. The mechanisms of magnetic and electrical coupling between adjacent SRRs of different sizes were elucidated by evaluating the transmission characteristics of samples with multiple split ring resonators (SRRs) of different sizes mounted on a quartz substrate and by conducting electromagnetic field analysis.

研究分野：無線通信

キーワード：近接無線 テラヘルツ メタマテリアル

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、微小パターンを電波の波長より充分小さな距離で等間隔に配置することによって、電磁波に対して均質な媒質として振舞うメタマテリアルの研究が活性化している。既に、誘電体層上に規則的に微小金属パターンを配置することにより電波を急激に屈折させる反射板や、金属パターン形状を誘電体層上で分布させることで電波の集光を行う平面レンズ、など、機能を有する誘電体層の研究例が報告されている。これらの研究では、単一の微小パターンを使用して様々な機能を実現しているが、その電磁的な特性を変えることはできない。近年、ダイオードや MEMS などを微細パターンに実装することにより、その透過特性を変化させる研究例が報告されているが、透過特性を変化させるには電圧の印可が必要であった。また、微小金属パターンを極近接させた場合、プラズモン混成共振モードが発生して共振モードが分裂し、特定の周波数における透過特性が変化することが報告されているが、プラズモン混成共振モードによる透過性の変化は小さいため、無線システムへの適用は不可能であった。

我々は、既に異なる微小金属パターンを周期的に配置した2つの機能性誘電体層を近接させると、機能性誘電体層単体と比較してテラヘルツ信号の透過性を 33 dB 以上向上できることを実証した。但し、異なる微小金属パターンを周期的に配置した2つの機能性誘電体層を近接した場合の機能性誘電体層の共振モードが分裂するメカニズムや、同一の微小金属パターンを近接させた場合と比較して透過特性が大幅に向上する原因については、未解明であった。異なる微小金属パターンを周期的に配置した2つの機能性誘電体層を近接配置した際に生じる電磁カップリング現象を解明し、この電磁カップリングに関する設計論を確立できれば、テラヘルツ帯無線信号の透過特性を可変かつ自在に制御することができる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、異なる微小金属パターンを周期的に配置した2つの機能性誘電体層を近接配置した際に生じる電磁カップリング現象を解明し、異種機能性誘電体層の近接によるテラヘルツ波の透過性制御を可能とすることにより、この機能性誘電体層を利用したテラヘルツ帯超高速 LAN シート通信を実現することである。

異種機能性誘電体層の近接によるテラヘルツ波の透過性制御、および、この透過性制御を利用したテラヘルツ帯超高速 LAN シート通信の実現に向けて、下記の研究項目の実現を目指す。

- ① 接触エリアのみ透過率を向上することが可能な機能性誘電体層集積受信アンテナ
- ② 低損失でテラヘルツ信号を 2m 伝送可能な機能性誘電体層
- ③ 基板内マルチモード伝送を利用したテラヘルツ MIMO 通信システム

3. 研究の方法

本研究では誘電体層上に微小パターンを周期的に設け局所的に誘電率を制御することにより、機能性誘電体層内にテラヘルツ信号を閉じ込めて、一般的な機の長さである 2 m 程度低損失で伝送することを検討する。本構造によれば、異種機能性誘電体層を集積した受信アンテナを接触させたエリアのみ透過性が向上し、LAN シートー受信アンテナ間の通信が可能となる。伝送損失の低減を実現するため、中空導波管の上部の金属面の一部をメタマテリアル集積ガラス基板に置き換えることにより、導波管単体では低損失での伝送を実現し、ガラス基板に異種誘電体層を接触させた場合は、異種誘電体層に導波管内を伝搬する信号の一部を導波可能とする構造の実現を目指す。また、単位格子のサイズの異なるメタマテリアルを近接して配置した機能性誘電体層の通過特性を評価することにより、異なる機能性誘電体層を近接した際の電磁カップリング現象を解明し、この電磁カップリングに関するモデル構築や設計論の確立を目指す。

LAN シート通信では、使用する誘電体層幅は波長より大幅に大きくなるため、誘電体層内の伝送はマルチモードとなることを利用して、送受信に複数のアンテナを設置して MIMO 技術を適用することを検討する。

4. 研究成果

TaN の導電率の評価に、平面線路テストパターンを試作し、透過特性を VNA で評価し、その結果を電磁界シミュレーションの結果と一致するように TaN の導電率を 150,000S/m に決定した。基板材料については、THz-TDS でのエリプソメトリ法による評価などにより、石英基板の誘電率は 3.8、ガラス基板の誘電率は種類により 3.3~6.7 となることが明らかとなった。

石英基板上に抵抗体 TaN で作成した SRR を表面に実装した平面スロットアンテナを近接して配置し、その透過特性を VNA で評価した。SRR 石英基板を実装しないアンテナを 10mm の距離で近接した場合、 S_{21} は 115-135 GHz 間で 10 dB 以上変動した。一方、SRR 石英基板を実装したアンテナを同じ距離で近接した場合、115-135 GHz 間での S_{21} の変動は 3 dB 以下となり、平面アンテナ間の多重反射の抑制に成功した。平面スロットアンテナ表面への石英基板の実装により S_{21} は 125 GHz で -27 dB と低くなったため、スロット直上の石英基板上へのキャパシタ装荷ダイポールアンテナの形成により、 S_{21} は -23 dB となった (図 1、図 2)。

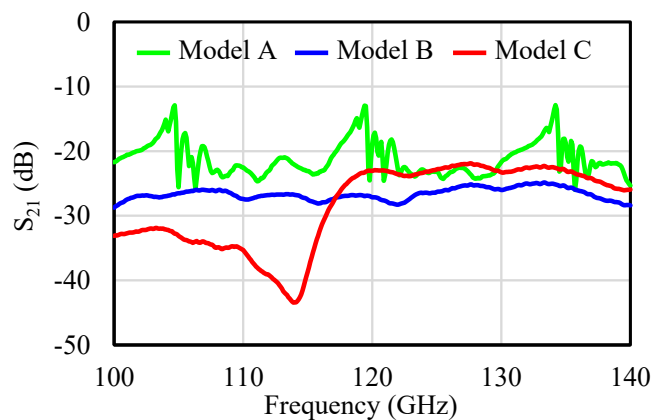


図 1 SRR 集積石英基板を実装した平面アンテナの透過特性。Model A : 石英基板無、Model B : TaN SRR 集積石英基板、Model C : TaN SRR 集積石英基板&キャパシタ装荷ダイポールアンテナ

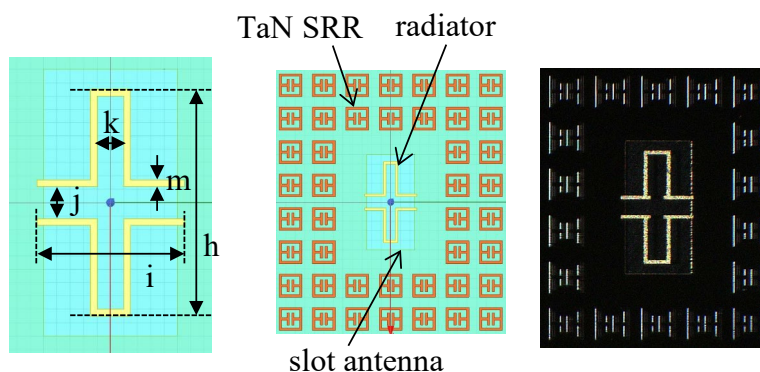


図 2 TaN SRR 集積石英基板&キャパシタ装荷ダイポールアンテナの模式図と写真

誘電体シートでの 125 GHz 帯信号伝送の低損失化を実現するべく、誘電体シートでのシングルモード伝送が可能な条件を検討した。誘電体シート幅を 4 mm 以下にすれば、図 3 に示すように、シングルモード伝送が可能になり、シート長 100 mm で 125 GHz の伝送損失を 7 dB に抑制するとともに、115-135 GHz 間での S_{21} の変動が 3 dB 以下となった。また、この誘電体シートに別の誘電体シートを接触させることにより、接触した誘電体シートに 1/20 の電波を伝送可能であることを VNA 計測により実証した。

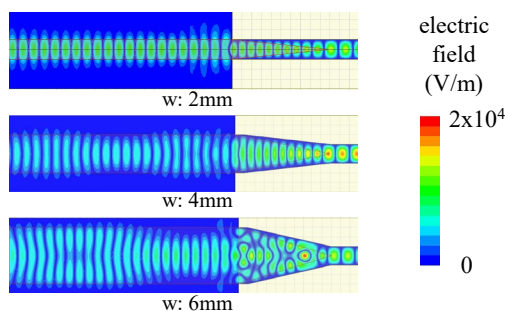


図 3 誘電体シート内の 125 GHz 帯信号の電界分布のシート幅依存性

導波管—誘電体シート変換部の開口部の形状を誘電体シートをはみ出して伝搬する信号を導

波管にガイドするピラミッド型開口部に変更することにより、変換部での損失を約 1.8 dB に低減した (図 4)。この結果、変換部込みの 1 m 誘電体シートの伝送損失が 9.8 dB@120 GHz と目標を達成する見込みを得た。

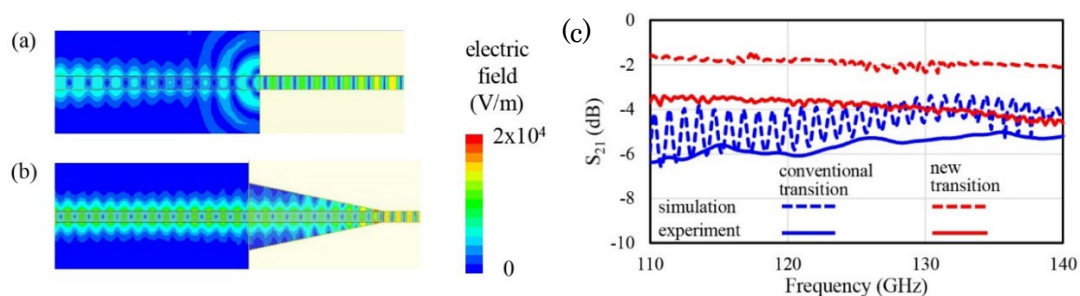


図 4 (a)従来のトランジション・モジュールと(b)ピラミッド型開口部を持つ新しいトランジション・モジュールの誘電体シート側面における電界分布のシミュレーション結果、(c) 従来のトランジション・モジュールとピラミッド型開口部を持つ新しいトランジション・モジュールの通過損失

また、異なる 2 つのサイズの SRR で構成される 300 GHz 帯 SRR デュアルバンドストップフィルタにおいて、隣接する SRR 間で強い電気結合を発生するサイズ、および、セル配置を明らかにした。特に、同じサイズの SRR を電界方向に平行に並べた場合、同じサイズの SRR 間の強い電気結合が、異なるサイズの SRR 間の磁気結合を引き起こし、ストップバンドは、低周波側に大きくシフトすることを明らかにした (図 5)。

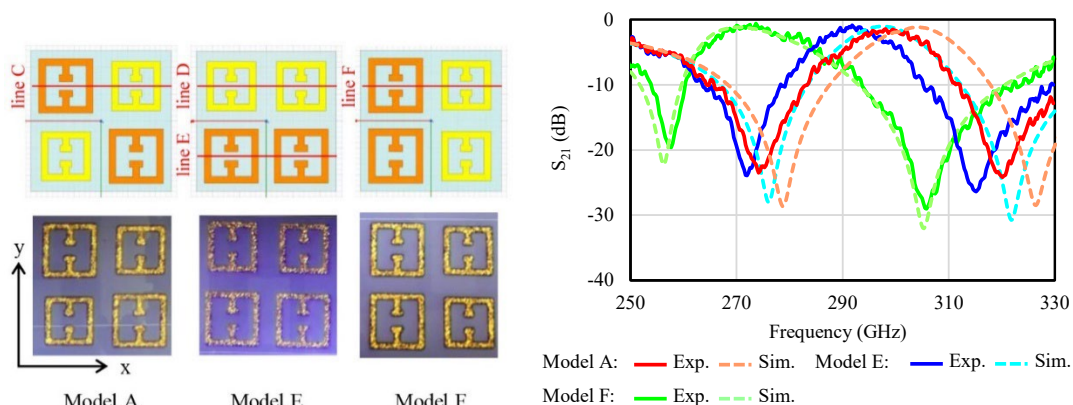


図 5 300 GHz 帯 SRR デュアルバンドストップフィルタの透過損失の配置依存性

次に、誘電体を媒体とする通信の多重伝送技術として、誘電体パイプの管壁に沿った OAM 多重伝送を検討した。複数の送信アンテナに入力する信号に位相回転を与えることで、パイプ壁に沿って伝搬するマイクロ波信号に OAM モードを発生可能であること (図 6 (a))、パイプ長が 1m の場合、37.5-43.5dB の範囲内の SINR が得られ、マイクロ波信号がパイプ内を伝搬するシステムに比べ、2.5 倍のシステム容量を達成することができた (図 6 (b))。

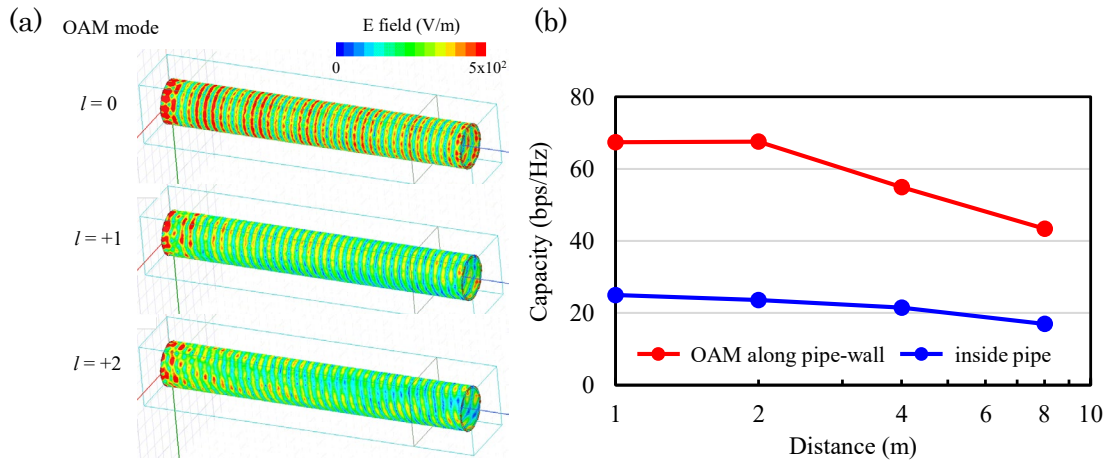


図6 (a) OAMモード数 l が 0, +1, +2 の場合の長さ 1m のパイプ表面における電界分布のシミュレーション結果、(b) OAM 多重伝送のシステム容量の伝送距離依存性

さらに、中空導波管の上部の一部を新たに設計した SRR 集積石英ガラス基板に置き換えた 120 GHz 帯伝送路を試作し、その通過損失を測定することにより、誘電体シート非接触時の通過損失を 125 GHz で -1.12 dB に抑えることが可能であることを示した。また、誘電体シート側にラインパターンを設けることにより、ガラス基板に誘電体シートを接触させた場合に、中空導波管—誘電体シートの通過損失を -11.04 dB に抑えることを実現した (図7)。この伝送路を使用してデータ伝送実験を実施し、伝送速度 10Gbps で 10^{-10} 以下のビット誤り率で通信が可能であることを示した (図8)。

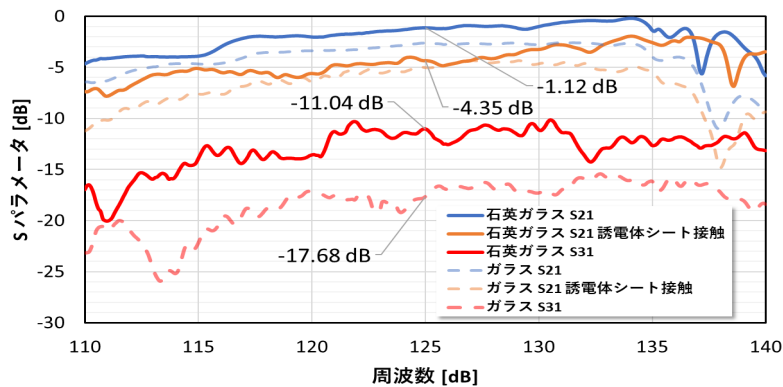


図7 中空導波管の上部の一部を新たに設計した SRR 集積石英ガラス基板の通過特性。S31 は石英ガラスに誘電体シートを接触した際に誘電体シートに伝送される信号の割合

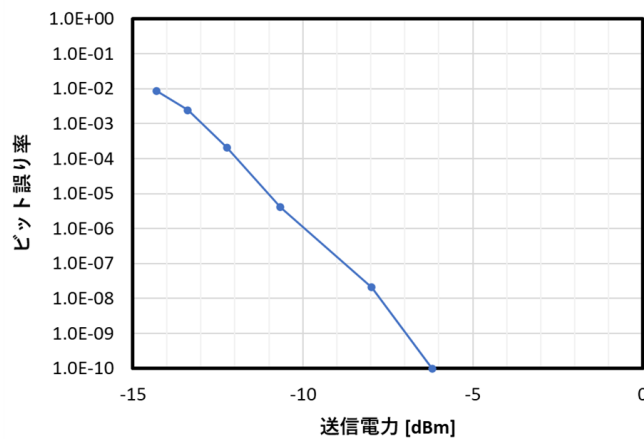


図8 石英ガラスに誘電体シートを接触した際に誘電体シートに接続された受信機で復調するデータ伝送系における 10 Gbps データ伝送時の BER 特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kumaki Tomohiro, Hirata Akihiko, Saijo Tubasa, Kawamoto Yuma, Nagatsuma Tadao, Kagaya Osamu	4. 巻 E107.C
2. 論文標題 10-Gbit/s Data Transmission using 120-GHz-Band Contactless Communication with SRR Integrated Glass Substrate	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2023ECP5024	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 HIRATA Akihiko	4. 巻 E107.C
2. 論文標題 300-GHz-Band Dual-Band Bandstop Filter Based on Two Different Sized Split Ring Resonators	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 107 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2023ECP5004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 HIRATA Akihiko, AKIYAMA Keisuke, KABE Shunsuke, MURATA Hiroshi, MIZUKAMI Masato	4. 巻 E107.B
2. 論文標題 Improvement of Channel Capacity of MIMO Communication Using Yagi-Uda Planar Antennas with a Propagation Path through a PVC Pipe Wall	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 197 ~ 205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.2023EBP3061	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 HIRATA Akihiko, SAIJO Tubasa, KAWAMOTO Yuma, NAGATSUMA Tadao, WATANABE Issei, SEKINE Norihiko, KASAMATSU Akifumi	4. 巻 E106.C
2. 論文標題 Evaluation of Transmission Characteristics of 120-GHz-Band Close-Proximity Wireless Links Using Split-Ring-Resonator Absorber Integrated Planar Slot Antenna	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 458 ~ 465
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2022ECP5065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Akihiko Hirata, Yuto Komori, Takumi Nishihara, Yuma Kawamoto, Tadao Nagatsuma
2. 発表標題 10-Gbit/s Close Proximity Communication in 120 GHz band Sheet LAN using Dielectric Sheet as Transmission Medium
3. 学会等名 2024 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 枚田 明彦、渡邊 一世、関根 徳彦、笠松 章史
2. 発表標題 120GHz帯SRRバンドストップフィルタの格子パタン接触による透過性制御のアライメント依存性
3. 学会等名 電子情報通信学会 マイクロ波テラヘルツ光電子技術研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 眞史, 枚田 明彦, 村田 博司, 水上 雅人,
2. 発表標題 PVC管壁を伝搬するマイクロ波を使用した配管検査ロボット用MIMO通信の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 マイクロ波研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 熊木 智大, 枚田 明彦, 加賀谷 修
2. 発表標題 誘電体基板を用いた120GHz帯低損失高速接触通信の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 マイクロ波テラヘルツ光電子技術研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 熊木智大, 枚田明彦
2. 発表標題 石英基板を用いた120GHz帯低損失高速接触通信の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木眞史, 枚田明彦, 村田博司, 水上雅人
2. 発表標題 PVC管壁を伝搬するマイクロ波を使用したOAMモードの検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akihiko Hirata
2. 発表標題 OAM Multiplexing of 5 GHz Band Microwave Signal Propagating Along PVC Pipe Walls for a Buried Pipe Inspection Robot
3. 学会等名 2023 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Suzuki, K. Fukazawa, A. Hirata, H. Murata and M. Mizukami
2. 発表標題 Study on MIMO Communication using Microwave Guided-Modes Propagating along PVC Pipe Wall
3. 学会等名 2022 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 枚田明彦、牛尾政貴、渡邊一世、関根徳彦、笠松章史
2. 発表標題 誘電体シートの接触による120GHz帯RF信号伝送の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 MWPThz研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akihiko Hirata, Issei Watanabe, Akifumi Kasamatsu, Norihiko Sekine
2. 発表標題 Suppression of Multiple Reflection by Metasurface Absorber in 120-GHz-band Close-Proximity Wireless Link
3. 学会等名 2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木眞史、深澤孝太、枚田明彦、村田博司、水上雅人
2. 発表標題 PVC管壁に沿って伝搬するマイクロ波を使用したMIMO通信の研究
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	廣川 二郎 (Jiro Hirokawa) (00228826)	東京工業大学・工学院・教授 (12608)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	永妻 忠夫 (Tadao Nagatsuma) (00452417)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関