

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：82670

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14993

研究課題名（和文）ミリ波帯チップレスRFIDを用いたセンサタグの開発

研究課題名（英文）Development of sensor tag using millimeter wave band chipless RFID

研究代表者

渡部 雄太（Watanabe, Yuta）

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・開発本部情報システム技術部通信技術グループ・主任研究員

研究者番号：90707134

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではミリ波帯チップレスRFIDタグのデータ容量の増加、通信距離の拡大のために電磁界解析と遺伝的アルゴリズムを組み合わせた最適設計手法を用いてタグ形状の最適化を行った。その結果、最適化により得られたミリ波帯チップレスRFIDタグは共振時に-25 dBsm以上のRCSと15以上のQ値をもつことが分かった。

また、最適化により得られたミリ波帯チップレスRFIDタグを用いたひずみセンサタグを提案した。提案したひずみセンサタグはひずみによる共振周波数の変化を利用し、0.2 mmから0.6 mmのひずみを探知できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したミリ波帯チップレスRFIDタグを用いたセンサタグはリーダから集積回路・バッテリーをもちリーダと通信が可能であるため、非接触通信可能、メンテナンスフリーという利点をもつ。提案センサタグはこの特徴を生かし、近年問題となっているトンネルや鉄橋などの数十年に渡る監視や地滑りなどの災害監視などに利用でき、安全・安心な社会に貢献できる技術であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the tag shape was optimized using an optimal design method that combines electromagnetic field analysis and genetic algorithms to increase the data capacity and communication distance of millimeter-wave band chipless RFID tags. As a result, it was found that the optimized millimeter-wave band chipless RFID tag has an RCS of more than -25 dBsm and a Q-value of more than 15 at resonance.

We also proposed a strain sensor tag using the optimized millimeter-wave band chipless RFID tag. The proposed strain sensor tag can detect strain from 0.2 mm to 0.6 mm by utilizing the change in resonance frequency due to strain.

研究分野：通信

キーワード：RFID チップレスRFID センサタグ 電磁界解析 進化型計算手法

1. 研究開始当初の背景

Internet of Things (IoT) 技術の発展により、センサタグを利用した環境センシングはトンネルや鉄橋などの社会インフラの監視、地滑りなどの自然災害の事前検知といった安全・安心な社会への応用が期待されている (I. F. Akyildiz et al, Computer Networks, 2002)。センサタグとしては IoT に用いられている Radio Frequency Identification (RFID) や Low Power Wide Area (LPWA) などが用いられている。

RFID は複数の RFID タグとリーダ/ライタから構成され、RFID タグのデータを非接触でリーダ/ライタが読み書きすることができるため、物品管理や鉄道乗車券など幅広く利用されてきている。RFID はリーダ/ライタと RFID タグの通信に電磁誘導を利用するものと、電波を利用するものがあり、電磁誘導を利用するものは 13.56 MHz、電波を利用するものは 920 MHz 帯の電磁波を利用している。また、RFID は RFID タグがバッテリーをもつアクティブ RFID とリーダ/ライタから送信される電波により RFID タグが動作するパッシブ RFID に分けられる。また、パッシブ RFID の中でもタグに集積回路を用いずに金属の形状により反射波の共振周波数を変えることによりタグのデータを表現するチップレス RFID タグは集積回路なしで製造できるため、非常に廉価、メンテナンスフリーという利点をもち (S. Preradovic, et al, IEEE Microwave Magazine, 2010)、長期間使われる社会インフラの監視などへの応用が期待されている。

図 1 にチップレス RFID の動作の概要を示す。チップレス RFID はほかの RFID と同様に RFID タグのデータをリーダが読み取る。チップレス RFID タグは集積回路などをもたず、図 1 に示すように金属の散乱体から構成され、多くは相似形状を複数配置した構造をしている。チップレス RFID では、以下の手順でタグのデータを読み取る。

1. リーダから広帯域の周波数成分をもつ電磁波をチップレス RFID タグに送信する。
2. チップレス RFID タグは散乱体の形状に応じた共振周波数の電磁波を強く反射する。(図 1 の Tag data 1111 の場合は 4 つの共振周波数、Tag data 1001 の場合は 2 つの共振周波数をもつ散乱波となる。)
3. リーダはチップレス RFID タグから反射された後方散乱波を受信し、大きさと共振周波数からタグのデータを読み取る。

このようにチップレス RFID では広帯域の周波数の電磁波を利用するため、リーダからチャープ信号のような周波数を変化させた電磁波、またはインパルス信号のようなパルス幅の短い電磁波をチップレス RFID タグに送信する。チップレス RFID タグのデータは後方散乱波の共振周波数の数であるため、データ容量が小さい、広帯域の周波数の電磁波を利用するという欠点がある。

申請者は 28GHz 帯、79 GHz 帯の電磁波を利用するミリ波帯チップレス RFID タグの開発を行った (電気通信財団研究助成 H30 年度)。しかし、ミリ波帯チップレス RFID タグは UHF 帯と比較して、小型化できることが分かったが、高い Q 値を得るために構造が複雑となり、最適な形状や製造誤差などに対するロバスト性が得られていない。また、通信距離も UHF 帯と比較して数十 cm と減少しており、十分な性能が得られないことが分かった。

本研究テーマにおける問題は小型・大容量、簡易で反射係数の大きな構造を両立するミリ波帯チップレス RFID タグの設計・構造が確立されていないということ、そしてミリ波帯において温度や歪の変化がチップレス RFID タグの共振周波数に与える影響の調査がなされていないということである。本研究ではこの問題を解決するために FDTD 法などに代表される電磁界解析手法と進化型計算手法を組み合わせた手法により、ミリ波帯チップレス RFID タグの最適設計を行い、さらに環境の変化による共振周波数の変化を用いたセンサタグを構築する。

2. 研究の目的

本研究の目的は小型・大容量・簡易な形状を両立するミリ波帯チップレス RFID タグの最適設計を行うこと、ミリ波帯において温度や歪などの環境データの変化によるチップレス RFID タグの共振周波数などの特性の変化を明らかにすること、そして、それぞれの成果を用いてミリ波帯チップレス RFID を用いたセンサタグを開発することである。本研究はミリ波帯チップレス RFID タグの高度化とセンサタグへの応用に分けられ、それぞれの目的は以下のとおりである。

2. 1. ミリ波帯チップレス RFID タグの高度化

本研究ではチップレス RFID タグの通信容量が小さい、通信距離が短いといった問題を解決するために、ミリ波帯の電磁波を利用したチップレス RFID タグを提案し、形状の最適設計を

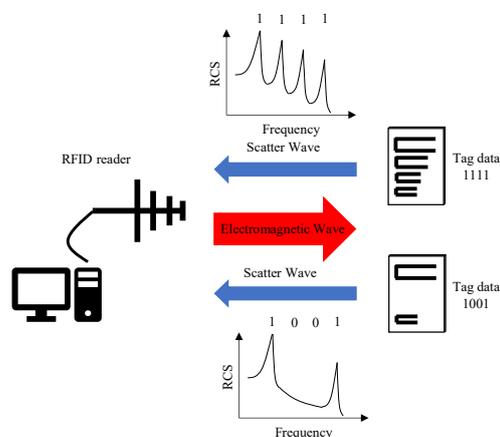


図 1 チップレス RFID タグの通信概要

行う。ミリ波帯では広い周波数帯が利用できる可能性が高く、さらに共振を用いているタグ形状は小型できる。形状最適化のために、電磁界解析と生物の進化を模擬した進化型計算手法を組み合わせた最適設計により、複数の設計変数を考慮した最適化を行い、チップレス RFID タグの共振周波数の RCS の大きさと Q 値を最大化する。

2. 2. センサタグへの応用

最適化により得られたチップレス RFID タグ形状を利用したセンサタグ形状を提案する。また、さらに形状最適化を行うことによりセンサタグとしての精度を高めることを目的としている。

3. 研究の方法

3. 1. ミリ波帯チップレス RFID タグの高度化

3. 1. 1. C型チップレス RFID タグの形状最適化

ミリ波帯チップレス RFID タグとして図2に示すようなC型チップレス RFID タグの形状最適化を行う。C型チップレス RFID タグは横幅 x 、高さ y_2 、線幅 y_1 の形状とし、散乱体部は銅としている。28 GHz 帯の場合はテフロン基板を用いて作成することを想定し、散乱体背面に比誘電率 3.66、誘電正接 0.0037、厚さ 0.25 mm の誘電体基板を装荷している。最適化では共振周波数時の RCS の大きさを最大化、Q 値を最大化、面積を最小化することとし、目的関数は式(1)のとおりである。

$$\frac{W_1}{\sigma(f)} + \frac{W_2}{Q(f)} + W_3 S \rightarrow \min \quad (1)$$

ここで f は共振周波数、 σ は RCS の大きさ、 Q は Q 値、 S はチップレス RFID タグの面積、 W_1 、 W_2 、 W_3 は重み係数である。本最適化では $f=28$ GHz、79 GHz として、 $W_1=W_2=20$ 、 $f=28$ GHz のときは $W_3=0.1$ 、 $f=79$ GHz のときは $W_3=0.05$ としている。 σ および Q は FDTD 法により求め、マイクロ遺伝的アルゴリズム (μ -GA) により形状最適化を行った。

3. 1. 2. RCS の最大化

28 GHz 帯、79 GHz 帯の高周波帯では UHF 帯と比較して、電磁波の減衰が大きくチップレス RFID タグの共振時の RCS の大きさをさらに増加させる必要がある。そこで、本研究では形状最適化により得られたチップレス RFID タグを複数配置することにより、RCS のさらなる増加を行った。

3. 2. センサタグへの応用

3. 2. 1. ひずみセンサタグの提案

ひずみセンサタグとして図3に示すようなC型チップレス RFID タグを二つ組み合わせた新しいタグ形状を提案する。ひずみセンサタグはひずみにより図3の l が変化し、RCS の共振周波数が変化する。この共振周波数の変化からひずみを読み取る。ひずみセンサタグの l を変化させ、FDTD 法により RCS を計算した。

3. 3. 2. ひずみセンサタグの形状最適化

79 GHz 帯のひずみセンサタグは2つのC型チップレス RFID タグの影響で共振周波数が変化することが分かったため、RCS の最大化、共振周波数の最適化、ひずみによる共振周波数の変化の最大化のために図4に示す設計パラメータの形状最適化を実施した。最適化の目的関数は式(2)のとおりである。

$$W_1 \frac{|f_{\min} - f_{l=0.6}|}{f_{\min}} + W_2 \frac{|f_{\max} - f_{l=0.2}|}{f_{\max}} + W_3 S + \frac{W_4}{\sigma} \rightarrow \min \quad (2)$$

ここで、 $f_{\min}=77$ GHz、 $f_{\max}=81$ GHz、 $f_{l=0.6}$ は $l=0.6$ mm の時の周波数、 $f_{l=0.2}$ は $l=0.2$ mm の時の周波数、 S はタグの面積、 σ は共振時のタグの RCS の大きさである。また、 $W_1=W_2=W_3=0.25$ 、 $W_4=20$ としている。式(2)第1項および第2項によりひずみセンサとして利用する周波数を 77

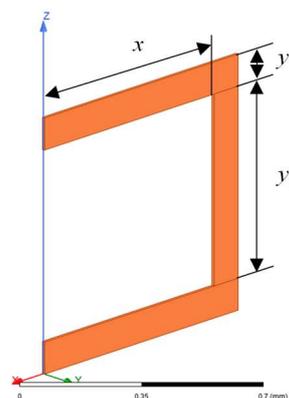


図2 C型チップレス RFID タグの外観と設計パラメータ

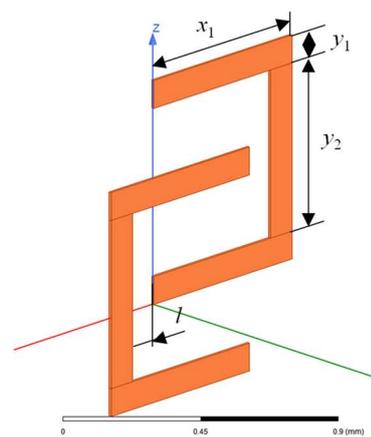


図3 提案ひずみセンサタグ

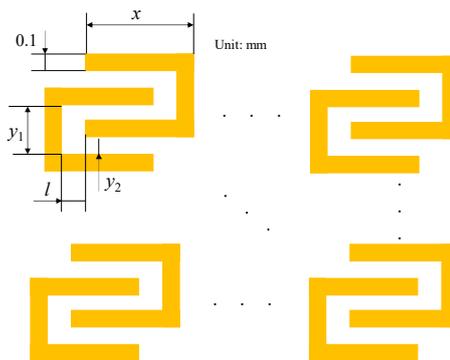


図4 79 GHz 帯ひずみセンサタグの形状最適化モデル

GHz から 81 GHz に制限し、第 4 項で RCS を最大化している。

4. 研究成果

4. 1. ミリ波帯チップレス RFID タグの高度化

28 GHz 帯と 79 GHz 帯の C 型チップレス RFID タグの形状を FDTD 法と μ -GA を組み合わせた最適化手法により形状最適化を実施した。

4. 1. 1. C 型チップレス RFID タグの形状最適化

図 2 に示した 28 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグの最適化結果を図 5 に示す。横幅 1.55 mm、縦幅 0.2 mm、線幅 0.2 mm の最適化形状の RCS は 28 GHz において共振をもつことが分かった。図 6 に最適化 28 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグの横幅を 1.3 mm ~ 1.6 mm まで変化させたときの RCS を示す。1.3 mm では約 34 GHz、1.6 mm では約 27.5 GHz で共振し、横幅が短くなるほど共振周波数が高くなることが分かった。また、横幅 1.55 mm の時の RCS は -50 dBsm となり、通信できる距離が短いことが分かった。

図 2 に示した 79 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグの最適化結果を図 7 に示す。横幅 0.65 mm、縦幅 0.6 mm、線幅 0.1 mm の最適化形状の RCS は 79 GHz において共振をもつことが分かった。図 8 に最適化 79 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグの横幅を 0.6 mm ~ 0.8 mm まで変化させたときの RCS を示す。0.6 mm では約 83 GHz、0.8 mm では約 68 GHz で共振し、28 GHz 帯の時と同様に横幅が短くなるほど共振周波数が高くなることが分かった。また、横幅 0.65 mm の時の RCS は -50 dBsm となり、28 GHz 帯と同様に通信できる距離が短いことが分かった。また、79 GHz 帯の最適化 C 型チップレス RFID タグの共振は 28 GHz 帯と比較して Q 値が小さくなることが分かった。

4. 1. 2. RCS の最大化

RCS を増加させ、通信距離を増加させるために図 5 に示す 28 GHz 帯最適化 C 型チップレス RFID タグを 60 個配置したタグの RCS を FDTD 法を用いて解析した。60 個配置した C 型チップレスタグは約 28 GHz で共振をもち、RCS の大きさは -22 dBsm となることが分かった。図 9 に試作した横幅 1.5 mm の 28 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグを示す。大きさは縦 55 mm、横 90 mm として、 32×32 個の最適化 28 GHz 帯

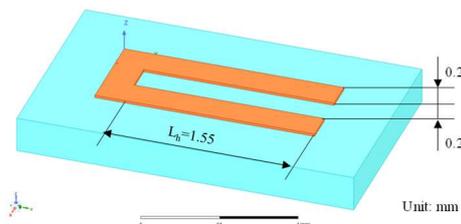


図 5 最適化 28 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグ

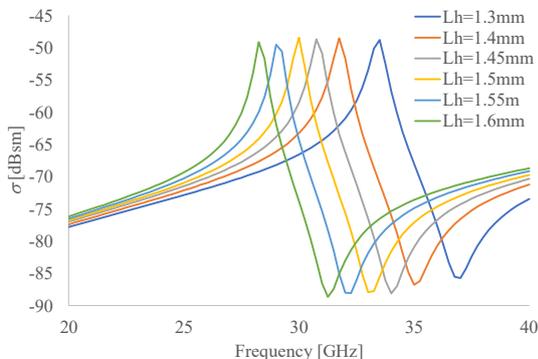


図 6 最適化 28 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグの RCS

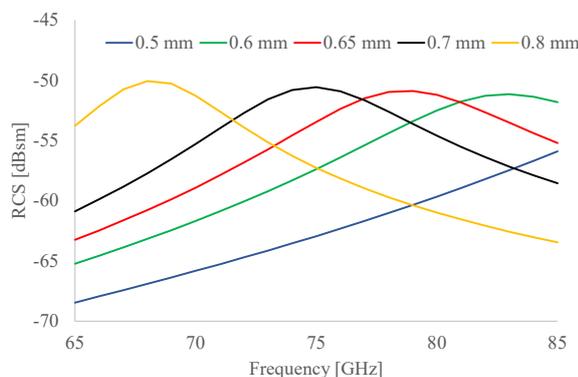


図 7 最適化 79 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグの RCS

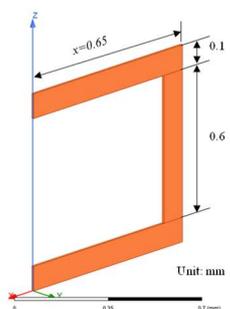


図 8 最適化 79 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグ

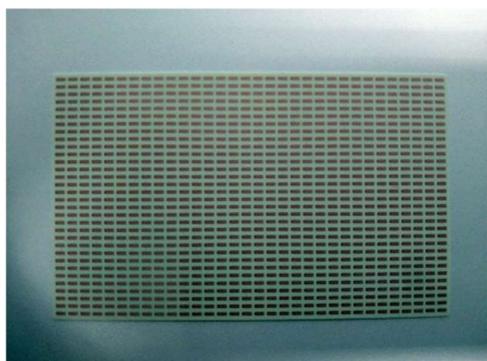


図 10 試作最適化 28 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグ

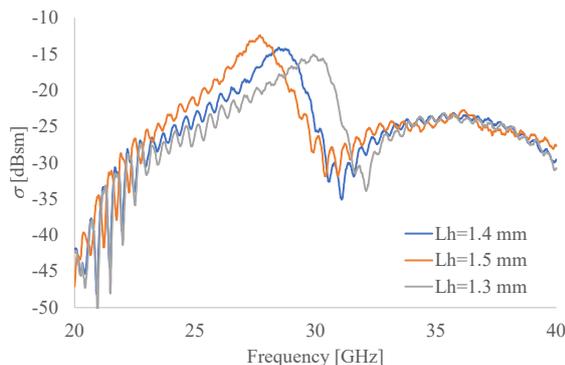


図 9 試作最適化 28 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグの RCS

C型チップレス RFID タグを配置している。図 10 に横幅を 1.3 mm, 1.4 mm, 1.5 mm とした場合の試作チップレス RFID タグの RCS を示す。横幅 1.3 mm のときの共振周波数は 30 GHz、1.5 mm のときの共振周波数は 27.5 GHz となることが分かった。

4. 2. センサタグへの応用

4. 2. 1. ひずみセンサタグの提案

図 11 に最適化 28 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグを 2 つ組み合わせさせたセンサタグを示す。タグ間の距離 l がひずみにより変化するとして、0.2 mm から 0.6 mm まで変化させたときの共振周波数を図 12 に示す。 $l = 0.2$ mm のときは約 33 GHz、0.6 mm のときは FDTD 法により求めた結果の場合には 32.4 GHz、実験結果は 32 GHz となることが分かった。実験結果の共振周波数がシミュレーション結果より低い理由としては、誘電体基板の比誘電率が低いためであると考えられる。

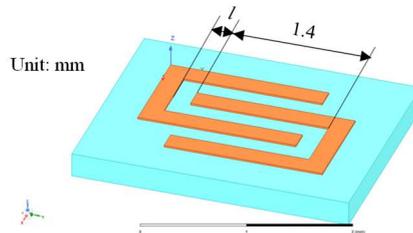


図 11 28 GHz 帯ひずみセンサタグ

最適化 79 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグを 2 つ組み合わせさせたひずみセンサタグを構成する。28 GHz 帯と同様に、距離 l 離して設置した形状としている。79 GHz 帯ひずみセンサタグの RCS はチップレス RFID タグ間の距離 l を 0.2 mm から 0.6 mm まで変化させることにより共振周波数が 85 GHz から 84 GHz まで変化することが分かった。最適化 79 GHz 帯 C 型チップレス RFID タグを 2 つ近傍に配置することにより、共振周波数が変化することが分かった。また、79 GHz 帯では 0.2 mm から 0.6 mm のひずみにより 1 GHz の共振周波数が変化することが分かった。

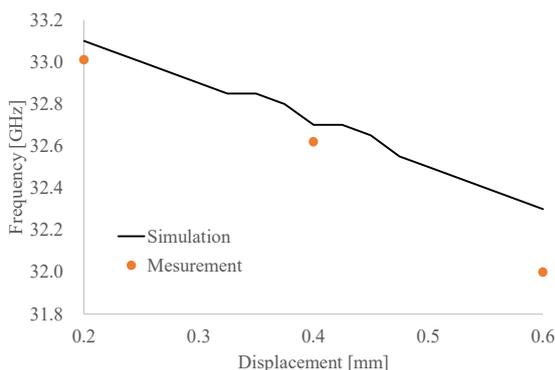


図 12 28 GHz 帯ひずみセンサタグのセンシング結果

4. 2. 2. ひずみセンサタグの形状最適化

図 4 に示すようにチップレス RFID タグを複数設置し、さらなる形状最適化を行うことで、RCS の大きさの最大化し、0.2 mm~0.6 mm のひずみで 77 GHz から 81 GHz の共振周波数をもつ形状を求めた。最適化により得られた 79 GHz 帯ひずみセンサタグを図 13 に示す。また、最適化設計パラメータを表 1 に示す。最適化ひずみセンサタグは横に 5 個、縦に 8 個並べた形状をしており、一つのひずみセンサは従来のものより横幅が長く、縦幅が短くなることが分かった。図 14 に最適化 79 GHz 帯ひずみセンサタグと従来のひずみセンサタグのひずみに対する共振周波数の変化を示す。図 14 より最適化により得られたセンサタグは 81.8 GHz~77 GHz で共振することが分かった。

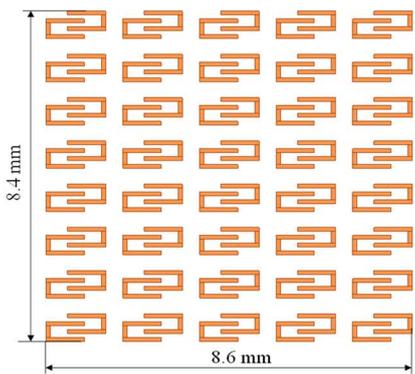


図 13 最適化 79 GHz 帯ひずみセンサタグ

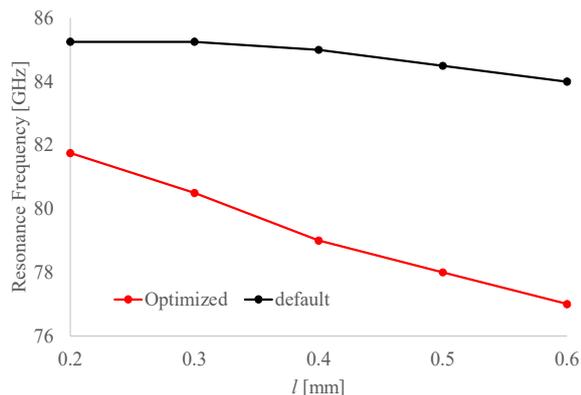


図 14 最適化 79 GHz 帯ひずみセンサタグのセンシング結果

表 1 最適化パラメータ

parameter	optimized value
x	0.9 mm
x_n	5
x_d	0.4 mm
y_1	0.3 mm
y_2	0.1 mm
y_n	8
y_d	0.4 mm

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yuta Watanabe
2. 発表標題 Analysis of Strain Sensor using Millimeter Wave Chipless RFID Tag
3. 学会等名 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Watanabe
2. 発表標題 Phase Shifter Circuit Composed of Branch Line and Rat-race Coupler for Orbital Angular Momentum Wave
3. 学会等名 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Watanabe
2. 発表標題 Millimeter Wave Band Slit Type Chipless RFID Tag
3. 学会等名 The 38th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡部雄太
2. 発表標題 チップレスRFIDを用いたセンサタグの開発
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------