

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：82670

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820150

研究課題名(和文)フラクタル構造を有するチップレスセンサタグの開発

研究課題名(英文)Development of Chipless Sensor Tag Comprising Fractal Structure

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・開発本部開発第一部電気電子技術グループ・研究員

研究者番号：90707134

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：RFIDはリーダーとタグが通信を行う技術であり、近年開発・研究が進められている。中でもタグに集積回路を持たないチップスタグを利用した技術はメンテナンスフリー、安価などの多くの利点を持ち注目されている。本研究ではチップスタグの通信容量が小さい、通信距離が短いという問題点を解決するために、フラクタル構造に着目し、反射型および透過型の新しいチップスタグを提案した。提案タグは高い反射係数、Q値をもつことがわかった。また、チップスタグ技術を利用した環境センシングのひとつとして温度センサタグの開発を行い、パッシブRFIDとチップレスRFIDの結合技術を用いたセンサタグを提案した。

研究成果の概要(英文)：Radio Frequency Identification (RFID) is a technology in which a reader and a tag communicate. Chipless tags without integrated circuits are rapidly developed because they have many advantages such as maintenance-free and low price. In this research, in order to solve the problem that the communication capacity of the chipless tag is small and the communication distance is short, we focused on the fractal structure and proposed a new chipless tag of reflection type and transmission type. The proposed tag has high reflection coefficient and quality value. In addition, we developed a temperature sensor tag as one of environmental sensing using chipless tag technology, and proposed a sensor tag using hybridization of passive RFID and chipless RFID.

研究分野：工学

キーワード：RFID チップレスRFID 電磁界解析 最適設計 センサタグ

1. 研究開始当初の背景

(1) **Radio Frequency Identification (RFID)**はリーダとタグが電磁誘導または電磁波を用いて通信を行うものであり、大きく注目されている[1]。RFIDは2つの通信方式をもち、電磁誘導を用いる電磁誘導型とUHF帯の電磁波を用いる電波型に分けられる。また、タグの種類も複数あり、タグにバッテリーをもつアクティブ型、リーダから送信される電力でタグを起動させるパッシブ型、タグに振動発電や太陽発電などを搭載したセミパッシブ型などが挙げられる。電磁誘導型RFIDは鉄道乗車券などに広く使われているが、通信距離が数cmと短距離での利用に限られている。電波型パッシブRFIDは物流管理やバーコードの代替品として一部利用されてきている。近年、金属のみで構成され、集積回路やバッテリーをもたないチップレスタグを用いたRFID技術が提案され、重要な研究課題となりつつある[2]。チップレスタグは集積回路・バッテリーをもたないため、完全なメンテナンスフリー、安価など多くの利点をもつ。しかし、通信容量が小さい、わずかな形状変化により電気的特性が大きく変化し、形状変化に対する頑健性が小さいなど、多くの研究課題が残されている。

(2) 近年、トンネルや橋、電線などのインフラ設備の事故が多発しており、インフラ設備の温度や歪などを常時監視できる環境センシングの要求が高まってきている。環境センシングのためには、センサ、センシング情報を通信するための無線設備が必要となり、ZigBeeなどに代表される金距離無線通信技術を利用して、センサの情報をサーバなどに集約している。しかし、ZigBeeなどは集積回路やバッテリーを必要とし、メンテナンスが必要となる。そこで、チップレスタグを利用したRFID技術を用いた環境センシング技術の開発が求められている。

2. 研究の目的

(1) 本研究ではチップレスタグの通信容量が小さい、形状変化に対する頑健性が小さいという問題を解決するために、フラクタル構造を有するチップレスタグを提案し、その形状の最適設計を行う。フラクタル構造は複数の形状を集積化できるため、通信容量の増加が期待できる。また、フラクタル構造では形状変化により電気的特性が変化しづらいため、頑健性の向上が期待できる。電磁界解析と生物の進化を模した進化型計算手法を組み合わせた最適設計法[3]により、従来になり形状を発見し、複数の設計変数を考慮した最適設計を行う。

(2) チップレスタグを利用した温度センサおよび歪センサを開発し、環境センシングに利用できることを確認する。

3. 研究の方法

(1)反射型チップレスタグの最適設計

従来のチップレスタグは相似形状の複数の散乱体をもち、それぞれの散乱体の共振周波数の電磁波を反射することにより、タグのデータをリーダに返信している。本研究では自己相似フラクタルラインを用いたものとオンオフ法によるトポロジー最適化を用いたものを提案し、その有効性を示す。

①自己相似フラクタルラインタグのパラメータ最適化

図1に自己相似フラクタルラインの一例を示す。自己相似フラクタルラインは1)ループ形状、非接続の形状をもつ、2)高Q値の散乱波をもつ、3)Generatorに依存した形状を生成できるという利点をもつ。

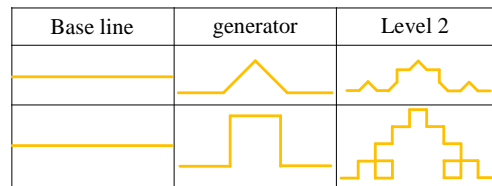


図1 Base line, Generator, 自己相似フラクタルラインの例

本研究ではタグとリーダ間の通信距離を最大化するために、チップレスタグからの散乱波を最大化することを目的として最適化を行う。以下に最適化問題の目的関数を示す。

$$E_s(f, \mathbf{x}) / E_i(f, \mathbf{x}) + wQ(f, \mathbf{x}) \rightarrow \max \quad (1)$$

ここで、 $f$ は周波数、 $\mathbf{x}$ は自己相似フラクタルラインタグの設計変数、 $E_i$ と $E_s$ は入射波と散乱波の振幅、 $w$ は重み係数、 $Q$ はQ値であ

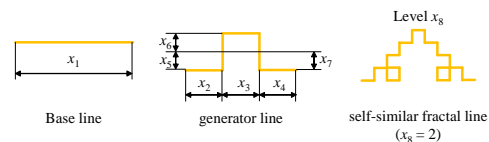


図2 設計変数と最適化例

る。設計変数 $\mathbf{x}$ を図2に示す。本最適化では $f=1.5\text{GHz}$ 、 $w=1.0$ としている。自己相似フラクタルラインは以下の手順で生成され、マイクロ遺伝的アルゴリズム( $\mu\text{-GA}$ )で $\mathbf{x}$ を最適化される。1)Base lineの長さを $x_1$ とする。2)Generator lineを小さいセグメントに分割する。本研究では分割数は3とする。3)それぞれのGenerator lineのセグメントの長さを $x_2 \sim x_4$ に従い、決定する。4) $x_5 \sim x_7$ に従い各セグメントを垂直方向に変位させる。5)各セグメントの両端を接続する。6) $x_8$ 回Base lineにGeneratorを作用させ、自己相似フラクタルラインを構成する。

②反射型チップレスタグのトポロジー最適化

トポロジー最適化は位相構造も含めて最適化可能な手法であり、一般的なパラメータ

最適化と比較して高い自由度をもつ。しかし、最適化により得られる形状は非常に複雑であるという欠点がある。そこで本研究ではトポロジー最適化の一つであるオンオフ法に移動平均フィルタを導入し、形状最適化を行った。

チップレスタグは図 3(a)に示すように誘電体と金属のパッチから構成される。本研究ではチップレスタグをオンオフ法で表現するために、図 3(b)に示すようにパッチ形状を格子状のセルに分割し、各セルがオンであれば金属、オフの場合は無とする。さらに、各セルに移動平均フィルタを導入し、平滑化を行う。本研究では図 4 に示すに  $N_5$  の値を

$$N_5 = \left[ 0.5 + \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 N_i \right] \quad (2)$$

として計算し、 $N_5=1$  の場合はオン、0 の場合はオフとする。ここで、 $N_i = \{0,1\}$  である。本最適化では  $y_1=2$  mm,  $y_2=60$  mm,  $y_3=30$  mm とし、誘電体の厚さは 1.5 mm, 比誘電率は 4.2 としている。また、最適化の目的関数は式(1)と同様とし、各セルのオンとオフを  $\mu$ -GA により最適化を行った。

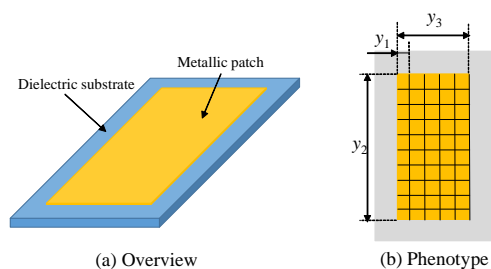


図 3 チップレスタグの外観とオンオフ法による表現

$N_1$	$N_2$	$N_3$
$N_4$	$N_5$	$N_6$
$N_7$	$N_8$	$N_9$

図 4 移動平均フィルタ

#### (2) 透過型チップレスタグの最適設計

本研究では新たに透過型のチップレスタグを提案する。透過型チップレスタグは図 5 に示すように誘電体の上に相似状のスリットを設けた金属パッチを配置した形状をし

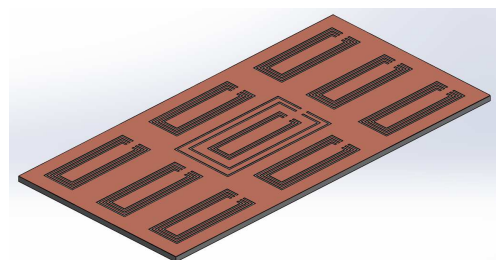


図 5 透過型チップレスタグの一例

ている。透過型チップレスタグに電磁波を入射するとスリットに共振する周波数のみ透過し、それ以外の周波数は金属パッチにより反射される。本研究では長方形型と C 型のスリットを設けた 2 種類の透過型チップレスタグの特性解析を FDTD 法によりおこなった。

#### (3) パッシブ型およびチップレス型 RFID の連成技術を用いた温度センサタグの開発

UHF 帯パッシブ RFID とチップレス RFID を用いた温度センサを提案する。UHF 帯パッシブ RFID を用いた温度センサはリーダから送信された電波によりタグの IC チップを起動し、クロックの生成、温度センサの読取などを行うため、長距離通信が難しいなどの問題があった。そこでチップレス RFID の技術を応用することにより、IC チップによりクロックなどを生成する必要がない温度センサを提案し、FDTD 法と SPICE の連成解析により、その有効性の確認を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 反射型チップレスタグの最適設計

3. (1) で述べた反射型チップレスタグの最適設計結果を以下に示す。

##### ① 自己相似フラクタルラインタグのパラメータ最適化

3.(1)において述べられた、FDTD 法と  $\mu$ -GA の連成手法により形状最適化された自己相似フラクタルラインを図 6(a)に、その反射係数を図 6(b)に示す。この結果から、最適化された自己相似フラクタルラインは周波数 1.5GHz において、約 0.4 の反射係数をもつことが分かった。1.5GHz の半波長のラインと比較すると、反射係数は約 0.18 であり、長さは 100 mm であることから小型で、反射係数の大きい形状が得られていることが分

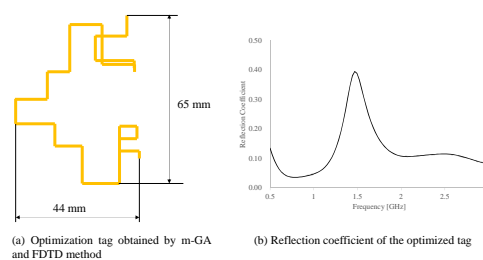


図 6 自己相似フラクタルラインの最適化結果

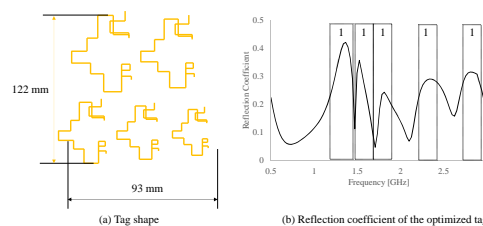


図 7 5 bit の最適化された自己相似フラクタルラインタグ

かる。

図 7(a)に最適化された自己相似フラクタルラインを用いた 5 bit のチップレスタグの外観を示す。図 7(b)に 5bit タグに 0.5 から 3 GHz の平面波を入射した場合の散乱波を示す。1 から 3GHz において、反射係数の大きい 5 周波が表れ、各大きさの自己相似フラクタルラインの共振周波数で反射係数が大きくなることが分かった。このことから、122 mm×93mm の大きさで 5bit (水平, 垂直偏波利用で 10 bit) のチップレスタグが構成できることが分かった。

## ②反射型チップレスタグのトポロジー最適化

図 8 および図 9 に移動平均フィルタを導入したトポロジー最適化により得られたチップレスタグの形状, 反射係数を示す。60 mm×30 mm の金属パッチの Q 値と反射係数は 4.7 と 0.26 であり、最適化により得られたタグは金属パッチと比較して高い目的関数をもつことが分かる。

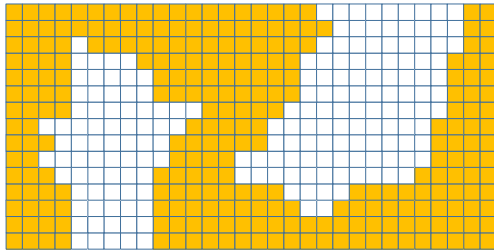


図 8 チップレスタグのトポロジー最適化形状

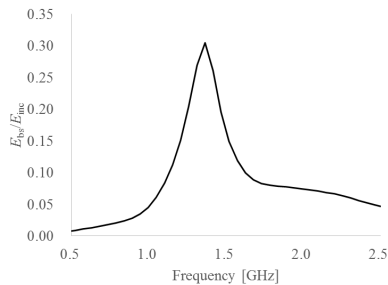


図 9 トポロジー最適化により得られたタグからの反射係数

図 10 に最適化により得られたタグ形状を用いた 5 bit のチップレスタグの外観を示す。図 11 に 0.5 GHz から 2.5GHz の平面波を 5 bit チップレスタグに入射した場合の反射係数を示す。図 10, 11 から各大きさのタグでそれぞれ異なる共振周波数を持ち、各共振周波数で反射係数が大きくなることが分かった。チップレスタグの大きさは 156 mm×90 mm であり、1 GHz から 2.2GHz の間に 5 bit の共振周波数をもたせることが分かった。前述の自己相似フラクタルラインと比較するとより高 Q 値で反射係数の大きいチップレスタグを構成することが分かった。

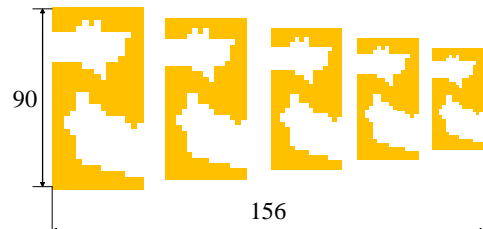


図 10 5 bit チップレスタグのトポロジー最適化形状

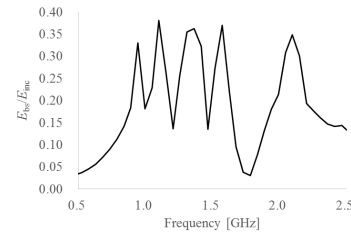


図 11 トポロジー最適化により得られた 5 bit タグからの反射係数

## (2)透過型チップレスタグの最適設計

本研究で新たに提案する 1 bit の透過型チップレスタグの外観を図 12 に示す。提案チップレスタグは 50 mm×100 mm×1.6 mm の基板上に 16 mm×34 mm の長方形のスリットを設けたものおよびそのスリットの一部を金属とした構造をしており、それぞれを長方形型および C 型モデルと呼ぶ。基板の誘電率は 4.2 としている。図 12 に透過型チップレスタグと長方形および C 型の透過型チップレスタグの Radar Cross Section (RCS) を示す。RCS は電波の照射を受けたに入射波方向に反射する割合を示すものである。図 11 から透過型と反射型の Q 値を比較すると、透過型チップレスタグは非常に高い Q 値を持つことがわかる。また、透過型タグの長方形型と C 型を

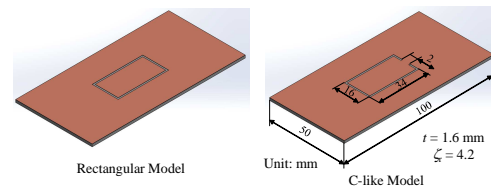


図 11 透過型チップレスタグの外観

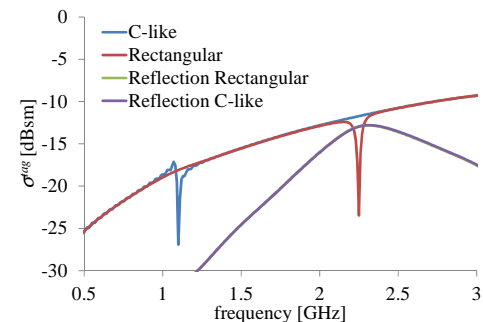


図 12 透過型チップレスタグの RCS

比較するとC型のタグのほうが低い共振周波数を持つことがわかる。したがって、C型の形状のほうが小型化に適していることがわかった。

C型のスリットの金属部の長さ  $x$  を変化させた場合の RCS を図 13 に示す。図 13 より  $x$  を長くした場合、共振周波数が高くなることがわかった。

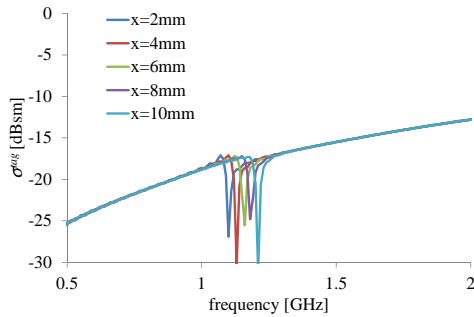


図 13 金属部を変化させた場合の C 型チップレスタグの RCS

図 14 に 5 bit のスリットを設けた C 型チップレスタグ (00000) を、図 15 に各大きさのスリットをもうけたタグ (10111), (11011), (11101), (11110) 示す。括弧内の数字は書くタグのデータである。5bit のタグでは相似状に大きさを変更したスリットをフラクタル構造を有するように設けている。図 16 に図 14, 15 の各タグの RCS を示す。図 16 より大きさを変えたスリットを設けることにより、それぞれの共振周波数で電磁波を透過していることがわかる。また、(00000) の RCS とほかの RCS の共振周波数を比較すると、スリットのサイズは等しいが共振周波数が異なっていることから、複数のスリットを設けると、共振周波数に影響があることがわかった。

各 bit で共振周波数は等しい必要があるため、複数のスリットを設けた場合はスリット

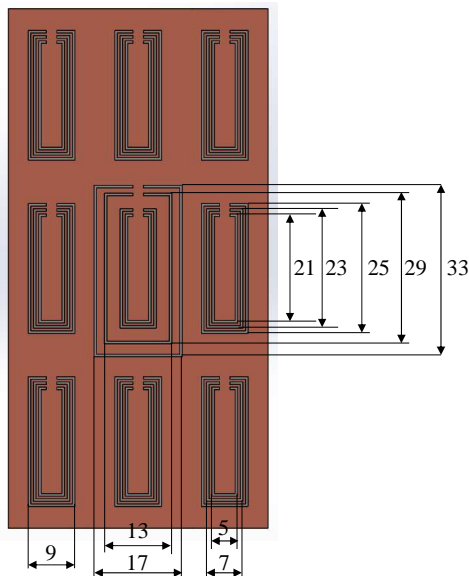


図 14 C 型チップレス 5 bit タグ (00000)

の金属部の長さを変更することで、共振周波数の調整を行った。その結果を図 17 に示す。図 13 の結果を元に、スリットの金属部の長さを変えることにより各 bit をあらわす共振周波数を一致させることができことがわかった。

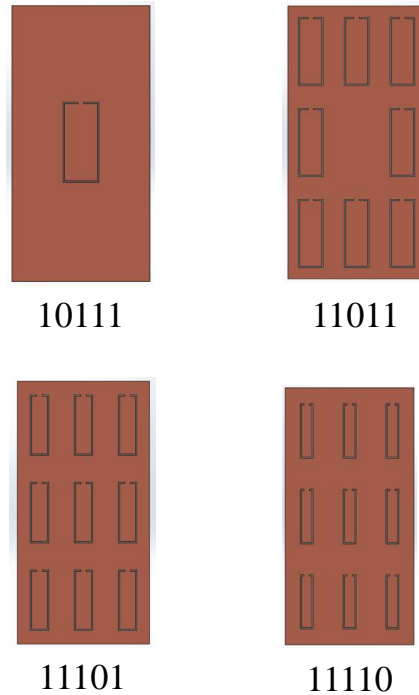


図 15 C 型チップレス 5 bit タグ

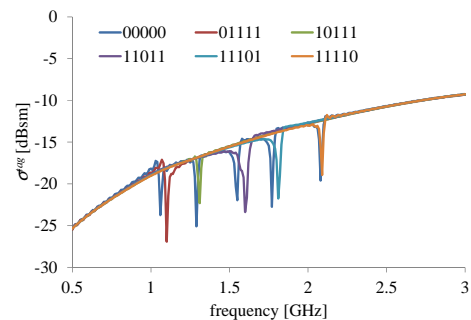


図 16 C 型チップレス 5 bit タグの RCS

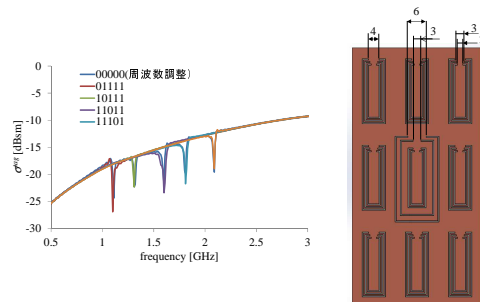


図 17 周波数を調整した C 型チップレス 5 bit タグの RCS

(3) パッシブ型およびチップレス型 RFID の連成技術を用いた温度センサタグの開発

図 18 に UHF 帯パッシブ RFID およびチップレス RFID を用いた温度センサタグの原理を示す。提案センサタグは二つのアンテナをもち、二つの周波数で共振する構造をしている。UHF 帯パッシブ RFID タグ用アンテナには図 18 の青線のように一定周期でオンオフを繰り返す電磁波を入射する。その電磁波を整流し、コンデンサ  $C$  に電荷を蓄積し、オフ時に放電する。温度により抵抗値が変わるサーミスタ  $R_c$  の大きさにより、放電時間が変わり、チップレスタグのスイッチが ON の時間も変化する。この ON の時間の変化を読み取ることで温度を読み取る。

図 19 に左図にパッシブ RFID タグとチップレスタグ形状を示す。パッシブタグは 1 GHz、チップレスタグは 2 GHz で共振するように設計している。図 19 の右図に温度変化によるチップレスタグの ON 時間の変化を示す。温度が上昇することによりサーミスタの抵抗値が減少し、チップレスタグの ON 時間が減少していることがわかった。

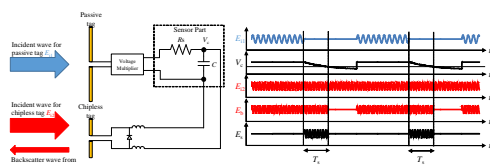


図 18 UHF 帯パッシブおよびチップレス RFID を用いた温度センサタグの原理

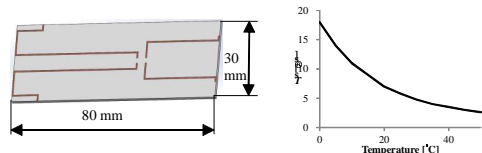


図 19 パッシブおよびチップレスタグのアンテナ形状とチップレスタグの ON 時間

#### <引用文献>

- [1] R. Want, "An introduction to RFID technology," IEEE Pervasive computing, 2006
- [2] W. Dullaert, etc, "Improved Detection Scheme for Chipless RFIDs using Prolate Spheroidal Wave Function-based Noise Filtering," IEEE Antennas and Wireless Propagation, Vol. 10, pp. 472-475, 2011
- [3] Y. Watanabe, etc, "Shape Optimization of Double Antenna for Long Range Passive UHF-Band RFID," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, No. 5, pp. 1673-1676, 2013

#### 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 2 件)

- ① Y. Watanabe, "Topology Optimization of Tag Structures for Chipless RFID," International Symposium Antennas and Propagation, 2015.
- ② Y. Watanabe and H. Igarashi, "Shape Optimization of Chipless RFID Tags Comprising Fractal Structures," International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 52, No. 1-2, pp. 609-616, 2016

[学会発表] (計 5 件)

- ①平成 27 年電気学会全国大会
- ② The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics
- ③International Symposium on Antennas and Propagation 2015
- ④17th International IGTE Symposium
- ⑤2017 年電子情報通信学会総合大会

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡部 雄太 (WATANABE, Yuta)

東京都立産業技術研究センター・開発本部・

開発第一部・副主任研究員

研究者番号 : 90707134