

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04068

研究課題名(和文)円偏波用・干渉除去メタアンテナの創造と実験検証

研究課題名(英文)Creation and experimental verification of a circularly polarized anti-interference antenna

研究代表者

中野 久松(Nakano, Hisamatsu)

法政大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：00061234

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)：電波利用が増えるにつれて、干渉電波によって生ずる無線通信の劣化が深刻な問題となっている。この通信劣化は電波の出入り口であるアンテナを機能化することにより防げる。このような機能化されたアンテナを干渉除去アンテナ(Anti-Interference Antenna: AI-ANT)とよぶ。従来のAI-ANTは直線偏波用であり、円偏波用AI-ANTの例はアンテナ構成が難しいために極めて少ない。本研究では新たに円偏波用AI-ANTを創造する。本アンテナはメタマテリアルアトムを使用して創られ、薄型・平面構造体になっている点に特長があり、AI-MetaANTと名付けられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、新人工材料素子であるメタマテリアルアトムを使用し、薄型・平面構造となる様に、アンテナを創造している。AI-MetaANTとよばれる本アンテナを創造するために、円偏波放射メタマテリアルループを同心状に複数個配置し、干渉波除去についての電磁界特性を体系化する。この点に学術的意義がある。さらに、AI-MetaANTは円偏波を使用する移動体間通信や、衛星通信などに使用される点で社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：With progress in communications systems, the deterioration in the communication efficiency, which is caused by interference of malicious electromagnetic waves, becomes a serious issue. Fortunately, this deterioration is overcome if an antenna acting as an input/output of the communication system is electromagnetically functionalized. Such an antenna is called Anti-interference Antenna: AI-ANT. It is noted that there are some AI-ANTs that radiate a linearly polarized wave, however there are few circularly polarized AI-ANTs due to difficulties in the antenna fabrication. The purpose of this project is to overcome the fabrication difficulties and create a circularly polarized AI-ANT. It is emphasized that this antenna is made of metamaterial atoms and has a thin plane structure. The antenna is abbreviated as AI-MetaANT.

研究分野：電磁波工学

キーワード：アンテナ 円偏波 メタマテリアル 干渉波除去

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

従来の干渉除去アンテナは、リアクタンス素子を装着した多数の直線偏波放射素子から構成されている。到来する干渉波は、各放射素子に装着したリアクタンス素子の値を変えることによって除去される[引用文献 を参照]。したがって、使用する直線偏波放射素子の数が増えると、リアクタンス素子の数も増え、干渉除去機能の構築が難しくなるという欠点があった。

さらに付け加えるならば、干渉除去アンテナで用いる直線偏波放射素子は共振現象を利用するので、その高さは1/4波長程度になり低いとはいえない。このため本アンテナを自動車、列車、船舶などの移動体へ搭載した場合には、走行中にかなりの風圧を受ける。したがって、これら移動体への搭載には問題があり、利用範囲は限定的であった。

直線偏波放射素子を使用した通信では、「送信アンテナと受信アンテナの偏波面を同方向(平行)にしなければならない」という学術上の知見がある。例えば、飛翔体などの移動体に搭載された受信アンテナにおいては、送信アンテナに対して偏波面が時間とともに変わり、その結果、受信アンテナの受信効率は劣化する。これに加え干渉波が受信アンテナに入ると、受信効率は更に劣化する。他方、円偏波放射素子を使用した通信では、「送信アンテナと受信アンテナの偏波面を合わせる必要がない」ことが学術上から判明している。それにもかかわらず、これまでのところ、移動体に搭載しても風圧に耐え得る超薄・平面形状の円偏波用アンテナの研究例は極めて少ない状態にあった。さらに述べれば、干渉波を除去できる円偏波アンテナに関する研究は皆無に近い状態にあったと言える。

### 2. 研究の目的

前述の現状を打破するために、「超薄・平面構造を特長とした円偏波用・干渉除去アンテナを、新しい概念に基づいて実現し、その電磁界特性を体系化する」ことを目的とする。このアンテナはメタマテリアルループ(略してメタループ)で創られた円偏波放射体 A と円偏波放射体 B から成り、円偏波用・干渉除去メタアンテナ(AI-MetaANT)とよばれる。

### 3. 研究の方法

(1)放射の最小構成素子であるメタマテリアルアトム(メタアトム)を超薄・平面化し、この場合の分散特性(dispersion)を考察する[引用文献 と を参照]。

(2)上記の結果を用いて、大きさの異なる複数個のメタマテリアルループ(メタループ)を創り、超薄・平面構造条件下におけるアンテナ特性を電磁界解析によって究明する。さらに、これら複数個のメタループを互いに接続して1個の放射体とし(放射体 A とよぶ)、その円偏波放射特性を解明する。

(3)もう一つの放射体もメタループで創り(放射体 B とよぶ)、放射体 A を取り囲むように配置し、目的である円偏波用・干渉除去メタアンテナ(AI-MetaANT)とする。このとき放射体 B は放射体 A とは異なる円偏波放射位相を所有するように設計する。

(4)「放射体 B からの放射界を、放射体 A からの放射界に重畳し、アンテナ軸(アンテナ面に対して垂直方向)から偏向した放射ビームを生成する。このことにより干渉波を受信しないようにする。つまり干渉波を除去する」という新概念を具現化し、円偏波用・干渉除去メタアンテナの放射特性を体系化する。

### 4. 研究成果

本研究代表者の発表論文[引用文献 ]中の図面を使用して説明する。

#### (1)分散特性

図1に多数のC-タイプ・メタアトムから成るメタループアンテナを示す[引用文献 を参照]。ループ構成素子であるメタアトムの厚みは極めて薄く  $B = 1.6 \text{ mm}$  である。メタアトム周期長は  $p = 2(p_0 + \Delta g) = 10 \text{ mm}$  であり、ここに  $p_0 = 4 \text{ mm}$  は金属小辺長、 $\Delta g = 1 \text{ mm}$  は隣接する金属小辺間隙長である。間隙には容量素子  $2 C_Z = 1.4 \text{ pF}$  が挿入されている。メタアトム中心金属小辺は金属ピンによって、誘導素子  $L_Y = 2.7 \text{ nH}$  を経て、下部の金属導体に接続されている。金属小辺と下部金属導体間には誘電体が挿入されている。その比誘電率は  $\epsilon_r = 2.6$  となっている。以上の構造値をもつC-タイプ・メタアトムの周波数に対する分散特性を解析し、その結果を図2に示す。

#### (2)放射体 A

図3に複数個(3個)のメタループ群を示す。 $F_S, F_M, F_L$  は給電点であり、 $T_S, T_M, T_L$  はループの末端点である。解析は以下の事実を導いている。「3個のメタループアンテナを同位相で給電した場合の利得(同位相給電利得)は、1個のアンテナを給電した場合の利得(単体利得)と大差がない」。そこで図4に示すように3個のメタループを接続して一体化する。この時の一体化利得は、単体利得から増加している。ただし、増加した低周波における左旋円偏波利得と増加した高周波における右旋円偏波利得は同値ではない。次に同値にするために、図5に示すように、ループの一部をN-タイプのメタアトムで置き換える[引用文献 参照]。解析は、「N-タイプのメタアトムの個数

を最適化すると左旋円偏波利得と右旋円偏波利得が同値となる,つまり平衡化される」ことを明らかにしている. この場合の更なる解析は以下の知見を導いている.「左旋円偏波および右旋円偏波は方位面角度方向に 360 度の位相変化をひきおこす」. 以後, 一体化されたループアンテナを放射体 A とよぶ.

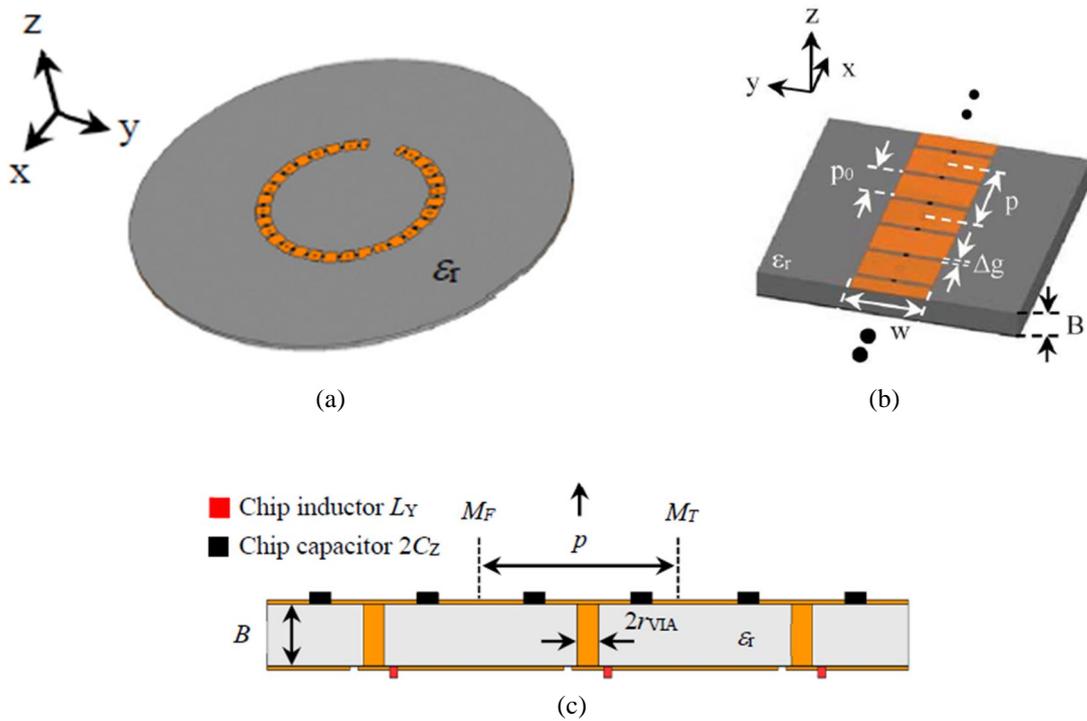


図 1. メタループアンテナ. (a) 俯瞰図. (b) C-タイプ・メタアトム. (c) 断面図.

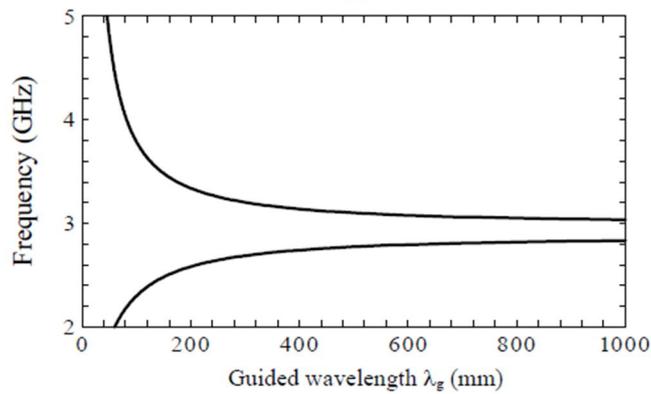


図 2. 分散特性.

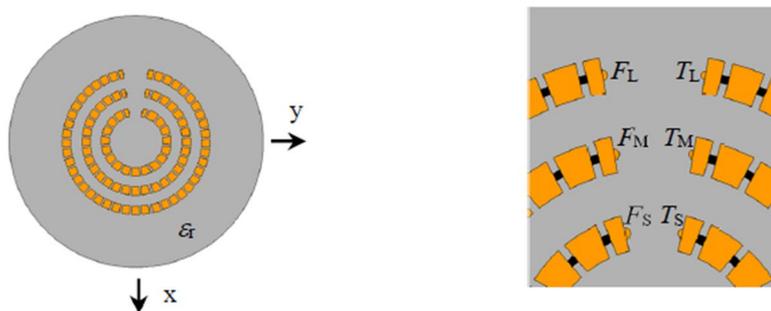


図 3. メタループ群. (a) 上面図. (b) 給電点と末端点.

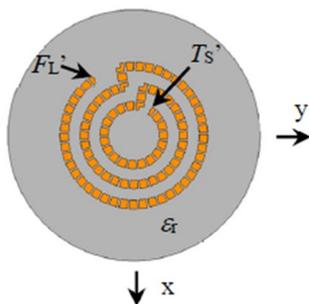


図 4. 放射体 A, ここに  $F_L'$  は給電点,  $T_S'$  は末端点.

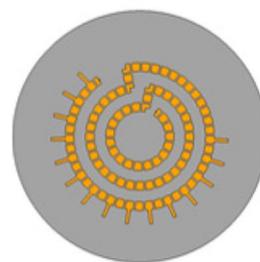


図 5. 平衡利得を有する放射体 A.

### (3)放射体 B

放射体 A より大きなメタループアンテナに注目する. その形状は図 1(a)の半径を大きくしたものであり, 放射体 B とよぶ. 放射体 B もまた放射体 A で用いられた C-タイプのメタアトムから構成されている. 本研究における干渉除去アンテナの創造に際しては, 後述するように, 放射体 B の内部に放射体 A を挿入する構造を採用している. そこで, 一般的な状況として, 『ある種の物体』が放射体 B の内部に置かれた場合のアンテナ特性を考察する. 図 6 に示すように, ここでは『ある種の物体』に無給電の金属リングを使用する. 無給電リングの外半径  $r_{RING}$  を固定し, 内半径  $r_{ring}$  を減少させて, つまり, リング幅  $w_{RING}$  を変えて, 円偏波利得への影響を考察する. 後に放射体 B の円周長は 2 導波長に選ばれるが, 本節では円偏波利得特性への影響を調査することに限定し, ループ円周を 1 導波長に選び, 解析時間を短くする[引用文献 を参照]. その解析結果は次の事実を明らかにしている. 「リング幅  $w_{RING}=0$  の時, すなわち, 形状が円形パッチになった時, 放射体 B の円偏波利得に変化が起こる. これは円形パッチが TM<sub>110</sub> モードで共振を起こしていることに起因する」. この知見によれば, 図 4 の放射体 A ではループとループの間に一定の隙間があるため, 幸運にも共振現象は起こらず, その結果, 放射体 B の円偏波利得への影響はない.

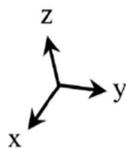


図 6. 放射体 B の中の無給電金属リング.

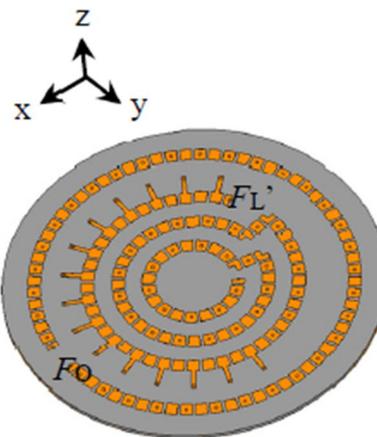


図 7. 干渉除去メタアンテナ.

放射体 B は放射体 A と同様, 円偏波放射の源はメタループ上の進行波電流である. 放射によって電流は減衰するから, その影響は電磁波放射時の軸比(Axial Ratio)に現れる. 本研究では, 減衰定数が軸比に及ぼす影響をも解析し, 3dB 以内の軸比が得られる状況とはどのようなものかを明らかにしている[引用文献 を参照].

以上の事前の考察に基づき, 放射体 B の周回長を 2 導波長に選び解析を続行する. 解析結果は以下の知見を導いている. 「低周波に於ける左旋円偏波および高周波に於ける右旋円偏波は, 両者とも, 方位面角度方向に 720 度の位相変化をひきおこす」. この位相変化は放射体 A の 2 倍になっている.

### (4)円偏波用・干渉除去メタアンテナ(AI-MetaANT) の実験実証

前記(1)-(3)の考察を基にして, 放射体 A と放射体 B を一体化する(複合アンテナ化). 図 7 参照. 放射体 A の給電点は  $F_L'$ , 放射体 B の給電点は  $F_0$  である. 両給電点における励振電圧振幅を同値とし, 励振電圧位相差を  $\Delta\Phi = \text{phase } \Phi_0 \text{ at point } F_0 - \text{phase } \Phi_L' \text{ at point } F_L'$  とする.

解析結果は、「放射パターンは、放射体 A と B との励振電圧位相差 $\Delta\phi$ に起因し、座標の z 軸から偏向し、かつ、z 軸の周りを回転する」ことを導いている。この知見は、図 8 に示すように実験結果によって確認される。さらに解析結果は、「 $\Delta\phi$ の変化に対し、円偏波放射強度の最大値の変動は少なく、安定している」ことを示している。

本アンテナの安定性は、給電点における電圧定在波比(VSWR)においても確認できる。VSWRの最大値は、低周波側と高周波側での動作周波数において、共に 2 を超えず良好である。実験結果は引用文献 の中で詳細に述べている。

ここまでは、放射体 A と放射体 B との複合アンテナを送信アンテナとして議論してきた。次に、本アンテナを受信アンテナとして使う場合を考える。いま、この受信アンテナに向かって、円偏波干渉波が送信アンテナ時の放射最小値側から到来したとしよう。この時、アンテナ受信理論に従えば、円偏波干渉波は受信されない。換言するならば、円偏波干渉電磁波が除去されたことになる。

本アンテナは励振電圧位相差によって放射最小値方向を任意に変えることができる。従って、円偏波干渉波がいかなる方向から到来しても、励振電圧位相差によって放射最小値方向を到来方向に合わせるができる。これにより円偏波干渉波は常に除去される。つまり、本アンテナは円偏波用・AI-MetaANT として作動する。

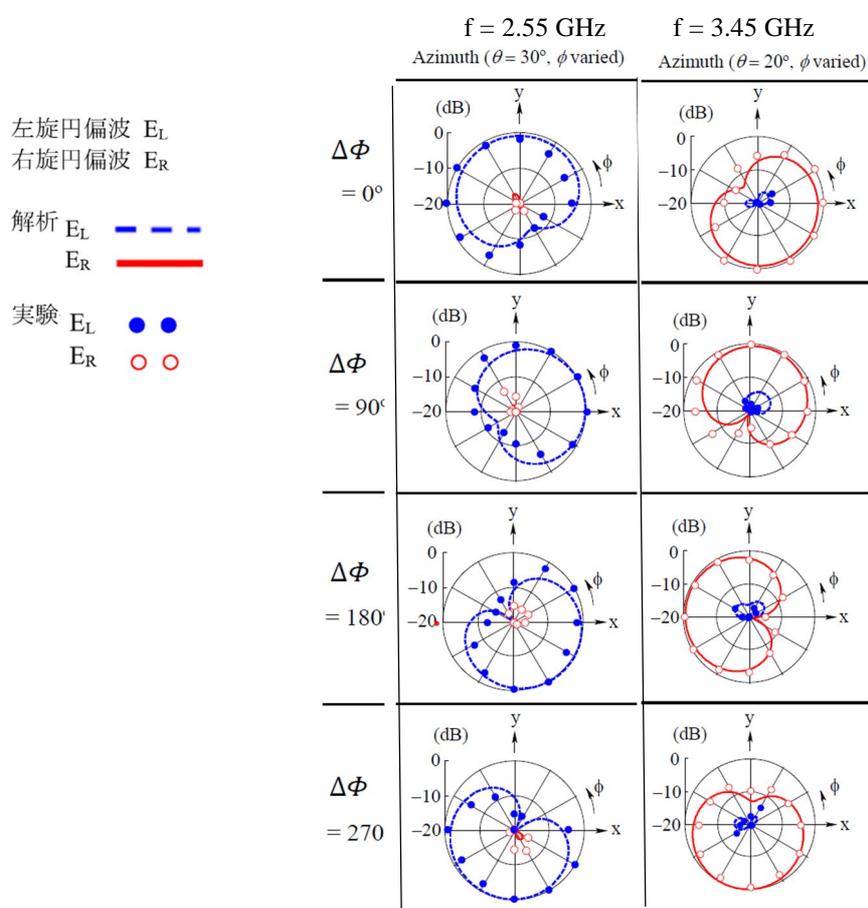


図 8. 円偏波用・干渉除去メタアンテナの放射パターン。

#### 引用文献

- R. F. Harrington, "Reactively controlled directive array," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-26, no. 3, pp. 390-395, May 1978.
- C. Caloz and T. Itoh, Electromagnetic Metamaterials, Wiley, NJ, 2006.
- H. Nakano, K. Sakata, and J. Yamauchi, "Linearly and circularly polarized radiation from metaline antennas," International Workshop on Antenna Technology, pp. 142-143, Cocoa Beach, FL, USA, March 2016.
- H. Nakano, T. Abe, and J. Yamauchi, "Compound metaloop antenna for circularly polarized beam steering," IEEE Access, vol. 9, pp. 79806-79815, May 2021.
- H. Nakano, T. Abe, A. Mehta, and J. Yamauchi, "Isolated gain enhancement for dual-band C-metaloop antennas using a coplanar compound method," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 71, no. 7, pp. 5616 - 5625, July 2023.
- H. Nakano, T. Abe, A. Mehta, and J. Yamauchi, "Theoretical consideration of axial ratio deterioration in CP loop-shaped antennas," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 22, no.5, pp. 1035-1039, May 2023.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 H. Nakano, T. Abe, A. Mehta, J. Yamauchi	4. 巻 22
2. 論文標題 Theoretical consideration of axial ratio deterioration in CP loop-shaped antennas	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters	6. 最初と最後の頁 1035-1039
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LAMP.2022.3231615	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 該当する
1. 著者名 H. Nakano, T. Abe, A. Mehta, J. Yamauchi	4. 巻 71
2. 論文標題 Isolated Gain Enhancement for Dual-Band C-Metalloop Antennas Using a Coplanar Compound Method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 5616-5625
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAP.2023.3267174	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 該当する
1. 著者名 H. Nakano, T. Abe, J. Yamauchi	4. 巻 71
2. 論文標題 Circularly polarized broadside beam radiated from a large, low-profile metaloop antenna	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 29-38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TAP.2022.3210263	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 Hisamatsu Nakano, Tomoki Abe, Junji Yamauchi	4. 巻 9
2. 論文標題 Compound metaloop antenna for circularly polarized beam steering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 79806-79815
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2021.3084285	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 H. Nakano, T. Abe, J. Yamauchi
2. 発表標題 Enlarged metaloop antenna
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Nakano, T. Abe, J. Yamauchi
2. 発表標題 Metaloop antenna with a conducting plate
3. 学会等名 2022 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Nakano, T. Abe, A. Mehta, J. Yamauchi
2. 発表標題 Radiation from an active ring region
3. 学会等名 2023 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------