

令和 3 年 4 月 26 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04128

研究課題名（和文）2Dフォトニックレフレクタによる超高利得マルチビーム光アンテナ

研究課題名（英文）Ultra-high gain multi-beam scanning antenna by 2D photonic reflector

研究代表者

新井 宏之（Arai, Hiroyuki）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：00193053

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：現在導入が進められている5Gの次世代システムでは、超高速の無線通信が必要とされる。このために、光を用いた無線通信システムの実現を目指して、鋭い光ビームを光速に走査することで、通信エリアを作り出す新たな光アンテナの開発を行った。集積化に適した構造により、光無線が主流となる室内環境で超高速通信が実現できるシステム構成を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光を利用した無線通信では、送受信の位置を固定することで、非常に鋭いビームによる情報のやり取りを実現してきた。本研究では、この鋭いビームを面状に走査することが可能な新たな光アンテナを提案し、どこにいても光無線通信ができるシステムが実現するための検討を行い、その具体的な光無線システムの構成について明らかにし、5Gの次世代システムを実現するための基盤技術を確立した。

研究成果の概要（英文）：For the beyond 5G system, ultra high speed data transmission should be developed. This research presents the design of beam scanning area of optical multi-beam antenna for indoor wireless system. Large propagation loss in optical spectrum is compensated by high directivity beam scanning antennas. Assuming indoor use, a base station antenna at the ceiling center should illuminate coverage area uniformly by changing the beam width in orthogonal planes independently. This coverage area design is given by scanning a fan-shaped beam by high gain leaky wave antenna. We also present the design procedure based on the link budget in optical antenna system.

研究分野：電磁波工学

キーワード：光アンテナ マルチビームアンテナ 走査ビームアンテナ ワッフル導波路 フォトニックレフレクタ
ワッフルアイロン導波路 シリコンフォトニクス 6Gシステム

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) 通信容量の増加について

光ファイバによる近年の伝送容量の増加は著しく、2015年の伝送容量は2.15Pbpsに達したが[1]、携帯電話では、1993年に導入されたデジタル方式で数kbpsであったデータ伝送速度は急速に上昇し、現在の第4世代では低速移動時に1Gbps、さらに、2020年から導入される第5世代では10Gbps以上を目標としている。しかし、2020年には2010年と比較して1000倍以上の通信量が必要となり、さらに1TBps以上の無線データ伝送の実現にはテラヘルツ以上の周波数が必要である。なお、マッシュMIMOにおいて、100素子の受信アンテナで伝送容量は1kbps/s/Hzまで増加するのでミリ波帯での実現可能性はあるが、端末機器への膨大な数のアンテナ実装は容易ではない。そこで、超高利得アンテナで高いSN環境を提供できる光無線通信が必要となる。

(2) 光無線実現の課題

光無線通信には光ファイバ回線のバックホール用のFree Space Opticsがあり、雨等による減衰が問題だが最大で10Gbpsの伝送容量が得られている。近距離通信用の赤外線通信では、Giga-IRとして1Gbpsで3mの伝送を目指している。また、LEDを用いた可視光通信の伝送速度は数Mbps~100Mbpsで、1Gbpsへの拡張が期待されているが、光ビーム走査アンテナはセンサーレーダーやディスプレイ用途の取り組みが中心で、無線通信を目的とした高利得光アンテナは衛星間通信以外に組み込みがないのが現状である。上記の背景のもと、無線でのテラビットのデータ伝送速度を目指すための、超高利得ビーム走査アンテナをどのように実現するのか研究の背景である。

2. 研究の目的

(1) 高利得ビーム走査アンテナの課題

本研究では、超高利得光アンテナのビームの操作と切替えによって近距離光無線通信の基地局アンテナを実現すること、また、シリコンフォトニクス技術と整合性の良いアンテナ構造を用いて試作・評価を行いシステム設計の基盤データを得ることである。無線通信ではデータ伝送容量を増加させるには通信回線のSN比を大きくすることが不可欠で、そのために超高利得アンテナが求められる。しかし、高利得アンテナはビーム幅が狭くカバーできる領域が限られるので、数多くの方向を向くマルチビームが電氣的に走査するビームを用いる必要がある。

(2) シリコンフォトニクスによる漏れ波アンテナの実現

このためには、同時に多数のビームを形成できるマルチビームと簡単な給電回路による走査ビームアンテナ双方の利点を取り入れ、超高利得のビーム走査を可能とする新たな光アンテナ構造が必要となる。これを実現するために、申請者の新たに提案によるシリコンフォトニクス技術で試作したアンテナと光ビーム走査の評価法の技術を発展させ、マイクロ波・ミリ波帯で広く用いられるパラボラアンテナに代表されるリフレクタ構造を光漏れ波導波路の励振に導入することである。金属材料が光を完全反射させることが難しいためシリコンフォトニクスを用いた制作法との親和性の良いフォトニック結晶構造を導入した新たな2次元リフレクタを用いることが新たな取り組みである。

3. 研究の方法

(1) 高利得ビーム走査アンテナと給電系の開発

本研究では第6世代の移動体通信として期待される超高速通信を実現するために、多数のビーム形成可能なマルチビームと、簡単な給電回路による走査ビームアンテナ双方の利点を取り入れ、超高利得でマルチビーム走査を可能とする新たな光アンテナ構造を見出すことである。これまでの基礎的な研究成果によってワッフル導波路のパラメータ設定によってビーム走査角を広範囲に設計できることを明らかにしている。そこで、アンテナ利得を最大化するためには導波路の幅方向の励振分布を一様にする必要があるため、導波路の給電系をどう実現するかが大きな課題であったので、本研究では、世界で初めてフォトニック結晶で構成されたオフセット二次元構造レフレクタを提案し設計・試作を行った。この給電構造はパラボラアンテナの技術を光領域に展開し、金属材料によらない反射体をシリコンフォトニクスに適したフォトニック結晶技術を応用することで実現した全く新しい構造の超高利得走査ビームアンテナ用給電系である。次に、光漏れ波アンテナのさらなる利得向上を目的とした導波路として摂動量を微細に設定可能なワッフルアイロン導波路を提案し、その特性の評価を行った。

(2) 室内伝搬環境でのセル構成とマルチビーム走査アンテナの設計

マルチビーム走査を行うために必要な室内伝搬環境について、実用的な通信条件を設定した回線設計により、超高速通信を行うために必要なセルの構成法を検討した。マルチビーム形成法としては、フォトニックリフレクタを拡張した多焦点を有するリフレクタ構造を新たに提案し、波長走査によるビーム走査軸と直交する方向に複数のビームを形成できる給電構造を新たに見出した。高利得ビーム走査が可能なワッフルアイロン導波路と多焦点給電に対応するフォトニックリフレクタを組み合わせることにより、超高利得マルチビーム走査を可能とする光アンテナの実現性の可能性を明らかにした。

4. 研究成果

(1) 小型高効率給電回路の開発

高利得マルチビーム走査アンテナの実現に向けて、従来グレーティング導波路の励振に用いられているテーパ導波路を小型化することを目的として、図 1 に示すテーパアレーを導入することで、その長さを 1/2 まで短縮することを実現した。さらなる小型化のために、平面型のオフセットパラボラを、シリコンフォトニクスのプロセスに適したバンドギャップ構造を用いたフォトニックリフレクタを新たに開発することで、従来型のテーパ導波路の 1/10 まで小型化することを実現した。

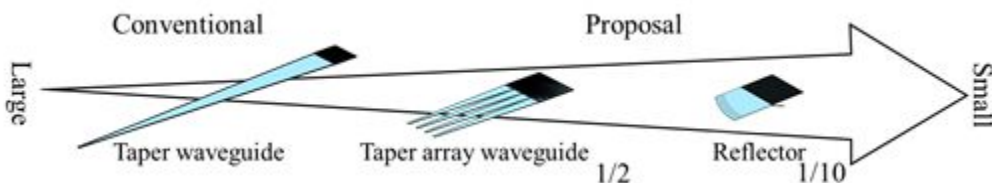


図 1 給電回路の小型化

(2) 高利得ビーム走査アンテナの開発

高利得アンテナを漏れ波構造で実現するためには、導波路に与える摂動量を精密に制御する必要がある。このためには、グレーティング導波路の溝の深さを細かく調整する必要があるが、シリコンフォトニクスによるプロセスでは、シリコン導波路の溝を導波路の進行方向に対して変化させることが難しい。この課題を解決するために、本研究では、溝の深さを一定としながら、導波路の摂動量を精密に制御することを可能とする図 2 に示すワッフル導波路と、ワッフルアイロン導波路を新たに開発することで、従来型のグレーティング導波路に対して、指向性利得を大幅に増加することを可能とした。

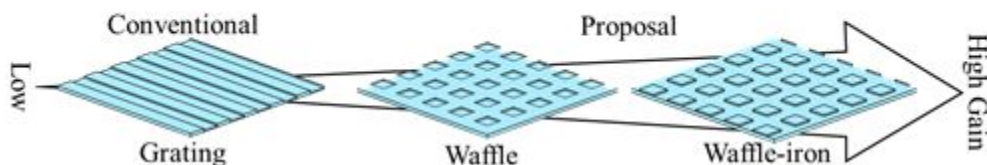


図 2 ワッフル・ワッフルアイロン導波路

本研究で開発したフォトニックレフレクタとワッフルアイロン導波路により、図 3 に示す高利得ビーム走査アンテナの試作を行った。

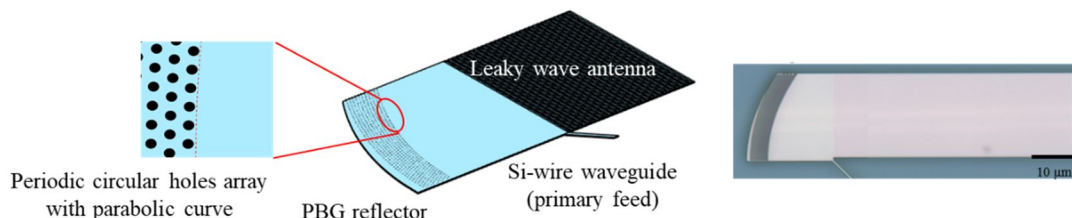


図 3 フォトニックレフレクタを用いた漏れ波アンテナ

従来のグレーティング導波路を改良した、ワッフル、およびワッフルアイロン導波路について、設計および試作を行い、その指向性利得を測定した結果を図4に示す。この結果では、導波路長を同一にして利得を測定しており、ワッフルアイロン導波路は3dB以上利得が向上しており、その効果が確認された。なお、利得測定では本研究で新たに開発した位相情報をビームチルト角から推定する手法を用いている。

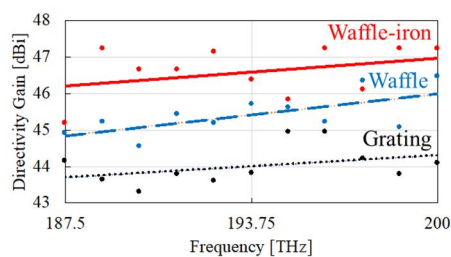


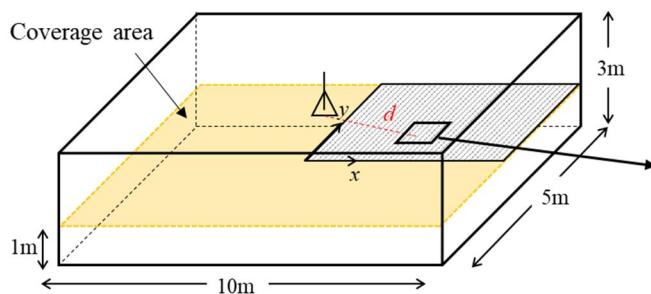
図4 漏れ波アンテナの利得特性

(3) 室内伝搬環境を考慮した基地局設計

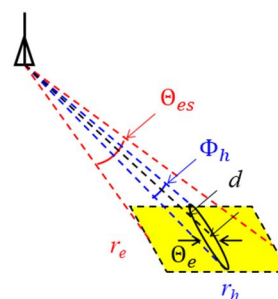
データ端末を利用する割合の80%が室内環境であることを考慮し[2]，6Gで最も重要となる室内伝搬環境において、マルチビーム走査を行うための実用的な通信条件を設定した回線設計に基づいて超高速通信を行うために必要なセルの構成法について明らかにした。

マルチビーム形成法としては、フォトニックリフレクタを拡張した多焦点を有するリフレクタ構造を新たに提案し、波長走査によるビーム操作軸と直交する方向に複数のビームを形成できる給電構造を新たに見出した。高利得ビーム操作が可能なワッフルアイロン導波路と多焦点給電に対応するフォトニックリフレクタを組み合わせることにより、超高利得マルチビーム走査を可能とする光アンテナの実現性の可能性を明らかにした。

さらに、図5に示すような室内伝搬環境において、室内を1m×1mの単位セルに分割し、その領域を楕円状ビームをスキャンすることでカバーする新たな方式を見出し、室内領域を効率よく高利得アンテナのマルチビーム走査によりカバーすることが可能であることを明らかにした。



(a) 室内伝搬環境モデル



(b) ビーム形状と走査範囲

以上示したように、本研究では高利得の光マルチビーム走査について給電系の小型化とシリコンフォトニクスに適した新たな漏れ波導波路を開発することにより、室内環境での超高速無線通信を可能とするアンテナシステムを実現する見通しを得た。今後は無線装置との一体化を目指した取り組みが課題である。

引用文献

- [1] www.nict.go.jp/press/2015/10/01-1.html
- [2] K. Davit and H. Berndt, "6G Vision and Requirements," IEEE Vehicular Technology Magazine, pp. 72-80, Sept. 2018

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 1件）

| | |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 1. 著者名 Yosuke Hinakura, Hiroyuki Arai, and Toshihiko Baba | 4. 巻 Vol. E103.C, No.11 |
| 2. 論文標題 Development of a 64 Gbps Si Photonic Crystal Modulator | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics | 6. 最初と最後の頁 635-644 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.20190CP0004 | 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 Shunichi Kaneoka, Wataru Iida, Hiroshi Hashiguchi, Toshihiko Baba, and Hiroyuki Arai | 4. 巻 Volume 18, Issue 1 |
| 2. 論文標題 Optical High-Gain Leaky-Wave Antenna Using a Waffle-Iron Waveguide | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Electronics Express | 6. 最初と最後の頁 20200411 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/elex.17.20200411 | 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 - |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. 著者名 Hiroshi Hashiguchi, Toshihiro Baba, Hiroyuki Arai | 4. 巻 vol.37, Issue 9 |
| 2. 論文標題 Optical Beam Expander With Parabolic Photonic Bandgap Reflector for Efficient Excitation of Optical Leaky Wave Antenna | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology | 6. 最初と最後の頁 2094-2099 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JLT.2019.2898210 | 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23件（うち招待講演 6件／うち国際学会 15件）

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Shunichi Kaneoka, Wataru Iida, Hiroshi Hashiguchi, Toshihiko Baba and Hiroyuki Arai |
| 2. 発表標題 Experimental Evaluation on Optical Leaky Waveguide Antenna by Waffle Iron Structure. |
| 3. 学会等名 IEEE International Workshop on Electromagnetics (iWEM2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Hiroyuki Arai |
| 2. 発表標題 Multi-beam Optical Leaky Wave Antenna by Photonic Reflector with Multi-Feeder. |
| 3. 学会等名 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Hiroyuki Arai |
| 2. 発表標題 The design of multi-beam scanning area for optical short range indoor communication system |
| 3. 学会等名 2020 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2020) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Shunichi Kaneoka, Wataru Iida, Toshihiko Baba and Hiroyuki Arai |
| 2. 発表標題 Optical High-Gain Leaky-Wave Antenna by Using a Waffle-Iron Waveguide |
| 3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Satoshi Sugaya, Hiroyuki Arai and Wataru Iida |
| 2. 発表標題 Gain Enhancement of Optical Leaky wave Antenna Excited by Photonic Bandgap Parabolic reflector with Thin Glass Layer |
| 3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-------------------------|
| 1. 発表者名 新井宏之 |
| 2. 発表標題 6Gに向けた光無線通信 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 飯田 渉、新井宏之 |
| 2. 発表標題 ミリ波におけるスルーホール反射鏡を用いた平面波励振 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|------------------------------------------|
| 1. 発表者名 菅谷聡志、飯田 渉、新井宏之 |
| 2. 発表標題 パラボラ型反射鏡を使用した光漏れ波アンテナの利得向上の検討 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Hiroyuki Arai, Hiroshi Hashiguchi, |
| 2. 発表標題 Optical Antenna for Short Range Tera-bps Wireless Communication |
| 3. 学会等名 The sixth IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IEEE IWS 2019) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Hiroyuki Arai |
| 2. 発表標題 Optical antenna systems for 6G |
| 3. 学会等名 The Electromagnetic Materials and Technologies for the Future (EM-MTF2019) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Hiroyuki Arai |
| 2. 発表標題 Optical antenna systems for beyond 5G |
| 3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2019) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Shunichi Kaneoka, Hiroyuki Arai |
| 2. 発表標題 Terminal antenna for indoor optical wireless communication |
| 3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Hiroyuki Arai |
| 2. 発表標題 High Gain Optical Beam Scanning Antenna and Its Measurement |
| 3. 学会等名 2019 Asia Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE 2019) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Wataru Iida, Hiroyuki Arai |
| 2. 発表標題 Characterization of Grating, Waffle, and Waffle-Iron Waveguides |
| 3. 学会等名 2019 Philippines-Japan Workshop on Wireless, Radio, and Antenna Technologies (PJWWRAT 2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 金岡舜一、新井宏之 |
| 2. 発表標題 室内光無線通信に適する端末アンテナの検討 |
| 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 2019年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 金岡舜一、橋口 弘、新井宏之、馬場俊彦 |
| 2. 発表標題 ワッフルアイロン構造を装荷した光アンテナの性能評価 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|------------------------------------------|
| 1. 発表者名 飯田 渉、新井宏之 |
| 2. 発表標題 グレーティング, ワッフル, ワッフルアイロン導波路の評価 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Hiroshi Hashiguchi, Toshihiko Baba, and Hiroyuki Arai |
| 2. 発表標題 A Optical Leaky Waveguide Excitation by Offset Parabolic Reflector using Photonic Bandgap |
| 3. 学会等名 2018 IEEE AP-S Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Hashiguchi Hiroshi, Toshihiko Baba and Hiroyuki Arai |
| 2. 発表標題 High Gain Optical Leaky Wave Antenna by Photonic Bandgap |
| 3. 学会等名 2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics (iWEM2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Hashiguchi Hiroshi, Toshihiko Baba, and Hiroyuki Arai |
| 2. 発表標題 An Optical Leaky Wave Antenna Excited by Parabolic Reflector |
| 3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Hiroyuki Arai, Hiroshi Hashiguchi, Toshihiko Baba |
| 2. 発表標題 Size Reduction of Optical Leaky Wave High Gain Antenna by Photonic Reflector |
| 3. 学会等名 The 13th European Conference on Antennas & Propagation 2019(Eucap2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 橋口 弘・馬場俊彦・新井宏之 |
| 2. 発表標題 光漏れ波アンテナの高利得化に関する研究 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|-------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 橋口 弘・馬場俊彦・新井宏之 |
| 2. 発表標題 高利得光漏れ波アンテナの基地局としての運用及びデータ伝送実験に関する検討 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会 |
| 4. 発表年 2019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 |
|---------|---------|
| | |