

令和 2 年 9 月 9 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06431

研究課題名（和文）超広帯域円偏波アンテナ技術の開発

研究課題名（英文）Development of Ultra-Wideband Circularly Polarized Antenna Technology

研究代表者

福迫 武（Fukusako, Takeshi）

熊本大学・大学院先端科学研究部（工）・教授

研究者番号：90295121

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、広帯域に亘って、軸比が3 dB 以下となる円偏波アンテナの作成のため、それをサポートするメタ表面の設計技術を開発する。円偏波を発生させる帯域の広帯域化において、今回はポライザーとしてのメタ表面の広帯域を考えた。単位セルは正方形の形状をしているが、メタ表面周辺の各辺は単位セルに対して45°傾いているひし形構造を採り入れ、x軸に関して45°の角度となる直線偏波を照射した。その結果、直線偏波を広帯域に亘って円偏波に変換できることが分かった。また、周囲を円形にすることも効果的であることが分かった。最後に円偏波アンテナの原理を応用した交差偏波への偏波変換器についても検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタ表面が広帯域な諸特性を得るために、重要な知見を得ることができた。特に、メタ表面の設計段階においては、単位セルと周期境界条件で囲み、等価的に無限のアレーとした場合を仮定するのが通常だが、実際には有限のアレーとなる。この場合、端部の影響が深刻であるが、その影響を緩和する方法として、長方形の単位セルに有限周囲の辺が45度となるひし形構造が有効であることが分かった。他、円形の周囲も有効であることも同時に確認できた。また、広帯域円偏波技術を応用したメタ表面偏波変換器も開発でき、今回の知見が応用できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we develop a meta-surface design technology for obtaining a circularly polarized antenna characteristics. In order to widen the band for generating circular polarization (CP), we considered a meta-surface wide band as a polariser to enhance the CP frequency range. The unit cell has a square shape, but each side of the meta surface has a rhombus structure that is inclined by 45° with respect to the unit cell, and irradiates linearly polarized light with an angle of 45° with respect to the x-axis. As a result, it was found that linearly polarized waves could be converted into circularly polarized waves over a wide band. It was also found to be effective to make the circumference circular. Finally, we also examined a cross-polarization polarization converter that applies the principle of a circularly polarized antenna.

研究分野：アンテナ工学

キーワード：アンテナ メタ表面 円偏波 広帯域特性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

メタ材料とは、使用する電波の波長よりも十分小さな単位素子からなる人工電磁波媒体である。それらの特性は、材料や単位素子の形状、サイズ等を調整することで、自然界の材料には見られない電気的特性を実現することができる。特に、平面上に2次元的に設けられたそのような構造はメタ表面と呼ばれ、よく知られた構造としては基板上に正方形の金属素子を周期的に並べ、直下の導体地板との間にスルーホールを設けたマッシュルーム構造が有名である。この構造は隣り合う素子間との間の結合を考慮すると並列共振器のアレー構造になるが、表面のインピーダンスが高く、AMC(Artificial Magnetic Conductor; 人工磁気導体)としての働きがあり、この特性は自然界にある材料だけではまず実現しない。このようなマッシュルーム構造は、スルーホールを外した場合でも磁気導体としては成立する。このようなAMCは、パッチアンテナのような平面アンテナに広帯域な特性を持たせることができる。

申請者のグループにおいては、2011年にAGS(Artificial Ground Structure: 人工グラウンド構造)を用いた広帯域円偏波パッチアンテナについて提案した(Nakamura, Fukusako, IEEE Trans AP, 2011)。AGSは、AMCとしての特性に加え、直線偏波を円偏波に変換するポライザとしての機能を併せ持つ機能的なメタ表面である。その後、詳しいメカニズムを2014年にIEEE Trans APで発表した。円偏波は、電界成分が回転しながら伝搬する偏波状態の電波であるが、直交する2つの電界成分を等振幅で90°の位相差をもって励振する。AGSの場合は、直交する2つの成分に180°の位相差を与えるが、45°の角度で入射する偏波の場合、x成分とy成分が同位相で0°とすると、反射波のx,y成分の位相は±90°となる。この反射波と、アンテナが直線偏波として直接放射する波との合成は、xy間に90°の位相差をもたらし、円偏波となる(図2(a))。

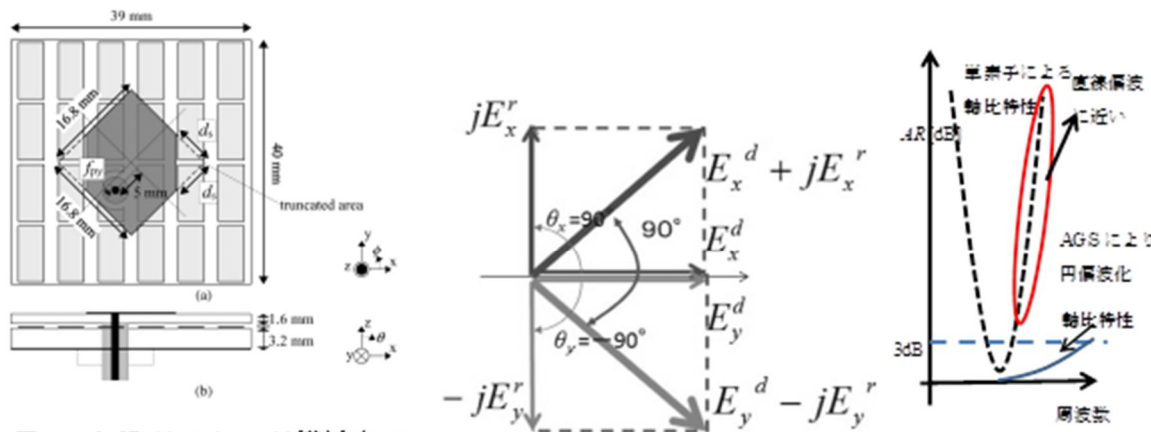


図1 人工グラウンド構造(AGS)を用いたパッチアンテナ

(a) ベクトル合成による説明

(b) 軸比特性による説明

よって、通常の狭帯域な円偏波アンテナとAGSとの組み合わせでは、円偏波アンテナの動作帯域では円偏波がそのまま放射されるが、帯域外では45°の角度の直線偏波に近いため、帯域外でも円偏波が放射される(図2(b))。よって、円偏波の帯域を広げる方法として、申請者のグループはAGSをポライザとして動作させて円偏波との組み合わせで帯域を拡大する技術を世間に先駆けて発表した。この2011年の論文は、これまで120回以上引用され、広帯域円偏波の分野の論文では必ず引用すべき論文となったようである。

一方、広帯域円偏波アンテナの研究は活発になっており、申請者の研究室でも広帯域かつ広角に円偏波を発生するアンテナを開発し、例えば2016年10月に発表した(Yamauchi

Fukusako IEICE Trans Comm.2016). これは UWB(Ultra Wideband:超広帯域無線)のハイバンドの帯域(7.25-10.25GHz)をカバーできるが、ローバンドまで含めたフルバンドをカバーできる UWB 用円偏波アンテナはまだ開発例がない。スパイラルアンテナがこの帯域をカバーできるが、UWB ではパルス信号を用いた超高速通信を最終的には行いたいため、分散性が大きいのが問題である。よって、共振系をベースとした分散性のない広帯域円偏波アンテナが求められる。多くの論文が広帯域円偏波アンテナについて発表しているが、背面板の無い大型のワイドスロットアンテナであっても、比帯域にして 40% 台程度であり、UWBフルバンドの 110%のカバーを目指した分散性のない円偏波アンテナの開発が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、広帯域に亘って、軸比が 3 dB 以下となる円偏波アンテナの作成のため、それをサポートするメタ表面の設計技術を開発する。そのための知見を得ることが目的である。本研究においては、UWBフルバンドをカバーできる円偏波アンテナの開発を目指す。但し、進行波のアンテナを使わないため、群遅延を帯域内で一定とし、かつアンテナゲインも一定とする。実際、110%もの帯域をカバーできるアンテナは、スパイラルアンテナがある。しかし、スパイラルアンテナは進行波であり、周波数に対して分散性がある。UWBを用いた高速通信はパルス信号であるため、分散性を抑える必要があり、そのためには、共振系のアンテナが必要である。目指すところは、110%の帯域にわたり軸比 3 dB 以下の円偏波の送受信ができるアンテナであり、アンテナゲインや群遅延は帯域内で一定である必要がある。さらに、可能な限り、広い角度内において円偏波の軸比を低くする。

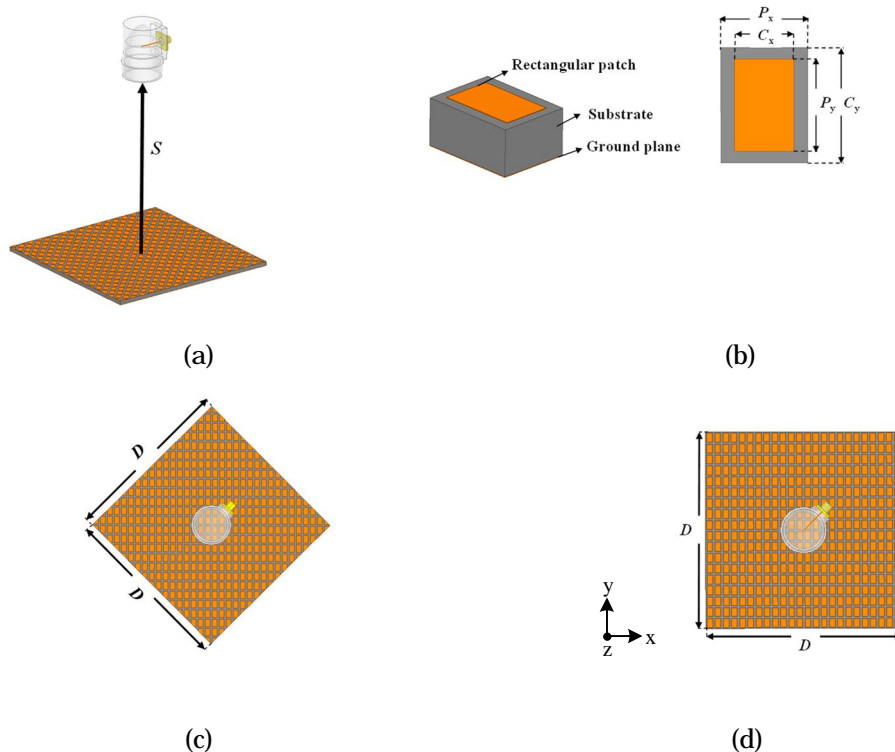


図2 ダイアモンド形をもつメタ表面構造。

3. 研究の方法

円偏波を発生させる帯域の広帯域化において、今回はポライザーとしてのメタ表面の広帯域を考えた。メタ表面は周期構造からなる平面型の素子であるが、大きさが有限である

ため、端部の影響を受けやすいことが分かった。今回のプロジェクト以前においても、方形の構造をもつメタ表面の角の素子を一部間引くことで、端部の影響が緩和できることが分かった。その知見を発展させ、新しい構造で端部の影響について深く考察することにした。

その一環として、図 2(a)-(c)のような構造を検討した。単位セルは正方形の形状をしているが、メタ表面周辺は正方形でありながらもその各辺は単位セルに対して 45° 傾いている。この構造をひし形構造と呼ぶことにしている。比較として図 2 (d)の正方形構造との比較を行った。双方の構造において、表面から 4 波長情報に導波管アンテナを設け、x 軸に関して 45° の角度となる直線偏波を照射している。また、メタ表面の構造パラメータを表 1 に示す。

表 1 メタ表面の構造パラメータ

| Parameter | Description | Electrical | Physical |
|-----------|---|-----------------|-----------|
| | | size | size (mm) |
| P_x | Width of unit-cell | $0.11\lambda_0$ | 4.1 |
| P_y | Length of unit-cell | $0.18\lambda_0$ | 6.4 |
| C_x | Width of rectangular unit cell | $0.17\lambda_0$ | 6.0 |
| C_y | Length of rectangular unit cell | $0.22\lambda_0$ | 8.0 |
| D | Diameter of the MS | $4\lambda_0$ | 144 |
| S | Distance between waveguide antenna and the MS | $4\lambda_0$ | 144 |

4. 研究成果

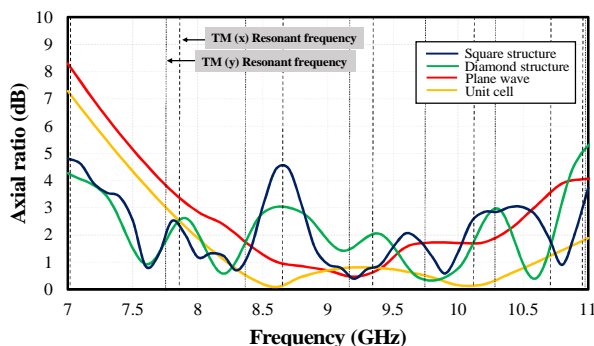


図 3 軸比特性 (z 方向)

図 3 に z 方向への軸比特性を示す。これらはシミュレーション結果であり、有限要素法に基づく Ansys 社の HFSS を使用している。軸比が 3 dB 以下となる帯域に注目すると、ひし形形状(Diamond structure)の場合は中心周波数に対する比帯域が 3.6% にも及ぶ。一方、無限構造の場合については、単位セルを周期境界条件で囲んだモデルについては、比較的反響が少ないが、これは共振が少ないためである。また、正方形構造(Square structure)においては共振が大きく、特に 8.7 GHz 付近では大きな共振が生じる。これは、正方形であることで、単位セル間の磁流に共振が起こりやすいためである。また、ひし形になると、単位セル間の磁流は、共振に関する端部間の距離に変化があり共振が起こりにくいと考えられる。

以上、今回の結果はメタ表面単独で 3.6% に亘り直線偏波から円偏波へ変換できることが分かった。この結果は、従来の 4.0% 程度の軸比の比帯域が限界だった円偏波アンテナの軸比を大

大きく伸ばすことができる。よって、従来の円偏波アンテナの帯域外においては直線偏波になるが、帯域外の直線偏波も円偏波にも変換できる。これによる従来の1点給電による円偏波アンテナの軸比を大きく改良できる可能性を見出すことができた。

今回は、円偏波アンテナへの搭載まで行うことが出来なかったが、可能性を見出した点は大きな進歩といえよう。

また、メタ表面の周囲に関しては、ひし形のみならず、円形にすることも効果的である。例えば、図4のような構造は図1の構造の周囲を円形にしたが、軸比の帯域を拡大することができた。この場合、低姿勢の場合でも40%以上の帯域で円偏波が放射できる。

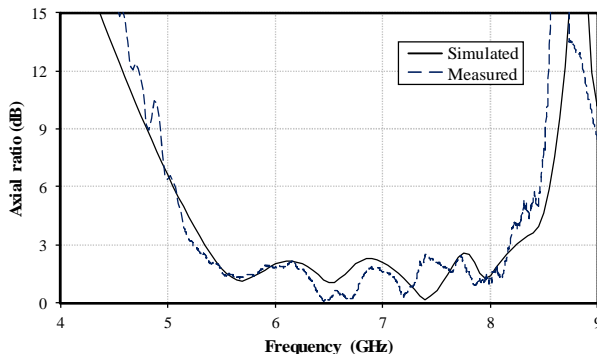
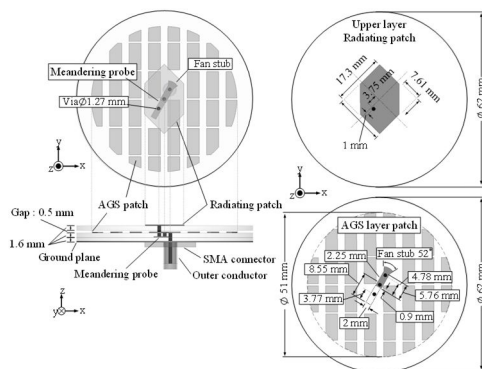


図4 周囲を円形としたメタ表面円偏波アンテナ 図5 軸比特性

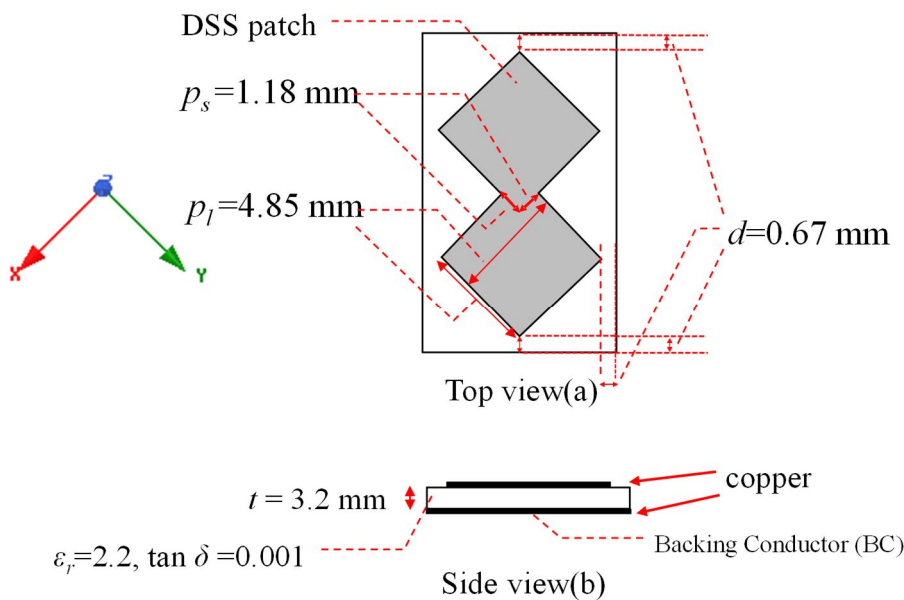


図6 偏波変換メタ表面

さらに、今回のプロジェクトに関連して、広帯域の偏波変換器も開発できることが分かった。図6はその単位セルであるが、原理は円偏波アンテナである。パッチの表面からは直線偏波の反射があるが、パッチの背面板との共振で円偏波が生成される。この原理は1点給電のパッチアンテナと同じ原理であり、この原理で反射された偏波は円偏波に近く、パッチ表面の直線偏波との合成で偏波が直交する。円偏波の広帯域化技術は本プロジェクトの本質的な目的であり、偏波変換器の広帯域化につながる。これは、レーダの反射器に使用すれば、送受信アンテナ共に同じセンスの円偏波の使用が可能になる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

| | |
|---|------------------|
| 1. 著者名 W. Chaihongsa, R. Kuse, K. Furuya, C. Phongcharoenpanich, T. Fukusako | 4. 巻 掲載決定 |
| 2. 論文標題 Broadband Linear to Circular Polarization Conversion Using Diamond-shaped Reflecting Metasurface | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IET Microwaves, Antennas & Propagation | 6. 最初と最後の頁 未定 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/iet-map.2019.0989 | 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 Y. Kai and T. Fukusako | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 Broadband Circularly Polarized Patch Antenna with Low Cross-Polarization Using Artificial Ground Structure | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Microwave and Optical Technology Letters | 6. 最初と最後の頁 840-845 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mop.31065 | 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 福迫 武 | 4. 巻 101-B |
| 2. 論文標題 DOI:10.14923/transcomj.2018API0002 | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 | 6. 最初と最後の頁 648-659 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2018API0002 | 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 T. Fukusako and R. Yamauchi | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 Wideband Waveguide Antenna using Stepped L-shaped Probe for Wide-Angle Circular Polarization Radiation | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 IEICE Communication Express | 6. 最初と最後の頁 542-547 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2017XBL0085 | 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 Y. Kai and T. Fukusako | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 Broadband Circularly Polarized Patch Antenna with Low Cross-Polarization Using Artificial Ground Structure | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Microwave and Optical Technology Letters | 6. 最初と最後の頁 840-845 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/mop.31065 | 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27件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 16件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 T. Noishiki, R. Kuse and T. Fukusako |
| 2. 発表標題 Broadband polarization converting metasurface with periodic bow-tie-shaped unit cells |
| 3. 学会等名 8th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Khanet Pookkapund, Arnon Sakonkanapong, Takeshi Fukusako, Chuwong Phongcharoenpanich |
| 2. 発表標題 A Broadband Circularly Polarized Microstrip Patch Antenna Using Circular Artificial Ground Structure |
| 3. 学会等名 映像情報メディア学会技術報告 (放送技術研究会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takeshi Fukusako, Warangkana Chaihongsa, Ryuji Kuse, Koichi Furuya, Chuwong Phongcharoenpanich |
| 2. 発表標題 Design of Broadband Reflecting Metasurface Polarizer |
| 3. 学会等名 電気関係学会九州支部連合大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Fukusako, T. Noishiki and R. Kuse |
| 2. 発表標題 Broadband Metasurface Polarization Converter with Bow-tie Unit Cells |
| 3. 学会等名 2019 IEEE Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC2019) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takeshi Fukusako, Ryuji Kuse, Warangkana Chaihongsa, Koichi Furuya and Chuwong Phongcharoenpanich |
| 2. 発表標題 Effect of Metasurface Edges on Wideband Characteristics |
| 3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takeshi Fukusako, Warangkana Chaihongsa, Ryuji Kuse, Koichi Furuya and Chuwong Phongcharoenpanich |
| 2. 発表標題 Wideband Design of Metasurface Polarizers Considering the Effect of Edges |
| 3. 学会等名 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Intergration Technology (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 T. Noishiki, R. Kuse and T. Fukusako |
| 2. 発表標題 Broadband polarization converting metasurface with periodic bow-tie-shaped unit cells |
| 3. 学会等名 8th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Fukusako, T. Noishiki and R. Kuse |
| 2. 発表標題 Broadband Metasurface Polarization Converter with Bow-tie Unit Cells |
| 3. 学会等名 2019 IEEE Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC2019) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 野一色崇志・福迫 武・久世竜司 |
| 2. 発表標題 広帯域直交偏波変換機能を有するボウタイ型メタ表面 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 野一色崇志・福迫 武・久世竜司 |
| 2. 発表標題 ボウタイ型メタ表面を用いた広帯域偏波変換の原理に関する検討 |
| 3. 学会等名 映像情報メディア学会 放送技術研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 T. Fukusako and R. Kuse |
| 2. 発表標題 Some Discussions on Broadband Circularly Polarized Patch Antennas Using Metasurface Structure |
| 3. 学会等名 2018 IEEE Conference on Antenna Measurement and Applications (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Fukusako, K. Furuya and R. Kuse |
| 2. 発表標題 Design Strategies on Broadband Circular Polarization Generation using Metasurface Structures |
| 3. 学会等名 2018 IEEE Antennas and Propagation in Wireless Communications (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 T. Fukusako, K. Furuya and R. Kuse |
| 2. 発表標題 Design of Metasurface in Compact Broadband System for Linear-to-Circular Polarization |
| 3. 学会等名 12th Asia-Pacific Engineering Research Forum on Microwaves and Electromagnetic Theory (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Fukusako, K. Furuya and R. Kuse |
| 2. 発表標題 An Overview of Metasurface Generating Circular Polarization in Broadband |
| 3. 学会等名 2018 Asian Workshop on Antennas and Propagation (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Warangkana Chaihongsa, Koichi Furuya, Takeshi Fukusako |
| 2. 発表標題 Broadband Reflecting Metasurface Polarizer", Progress In Electromagnetic Research Symposium |
| 3. 学会等名 Progress In Electromagnetic Research Symposium, (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takeshi Fukusako, Warangkana Chaihongsa, Ryuji Kuse, Koichi Furuya, Chuwong Phongcharoenpanich |
| 2. 発表標題 Broadband Reflecting Metasurface Polarizer |
| 3. 学会等名 電気関係学会九州支部連合大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 野一色崇志・福迫 武・久世竜司 |
| 2. 発表標題 ポウタイ型メタ表面を用いた広帯域偏波変換の原理に関する検討 |
| 3. 学会等名 映像情報メディア学会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 野一色崇志・福迫 武・久世竜司 |
| 2. 発表標題 広帯域直交偏波変換機能を有するポウタイ型メタ表面 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 T. Fukusako and Y. Kai |
| 2. 発表標題 Circularly Polarized Broadband Patch Antenna Using Artificial Ground Structure and Meandered Probe for low Cross-Polarization |
| 3. 学会等名 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI Radio Science Meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Furuya and T. Fukusako |
| 2. 発表標題 Broadband Linear to Circular Polarization Reflector Using Modified Metasurface |
| 3. 学会等名 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2017) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Lertsakwimarn and T. Fukusako |
| 2. 発表標題 A circularly Polarized and low-profile surface wave antennas with Bi-directional Beam Pattern |
| 3. 学会等名 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2017) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 T. Fukusako and Y. Kai |
| 2. 発表標題 Broadband Circularly Polarized Patch Antenna Using Meandered Probe and Artificial Ground Structure |
| 3. 学会等名 Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2017) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 野一色 崇志, 福迫 武 |
| 2. 発表標題 ポウタイ型のメタ・サーフェスによる偏波変換器 |
| 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 2017年 |

| |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名 古谷航一・福迫 武 |
| 2. 発表標題 広帯域偏波変換メタ表面に関する一検討 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 古谷航一・福迫 武 |
| 2. 発表標題 Broadband Linear to Circular Polarization Reflector Using Modified Metasurface for a Spherical Wave Incidence |
| 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 2017年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 古谷航一・福迫 武・久世竜司 |
| 2. 発表標題 コンパクトな広帯域偏波変換システムのメタ表面の設計 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 T. Fukusako |
| 2. 発表標題 An low-profile 4-multibeam antenna radiating parallel to ground plane |
| 3. 学会等名 2018 International Workshop on Antenna Technology (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|---------------------|-----------------|
| 1. 著者名 福迫 武 | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 コロナ社 | 5. 総ページ数 209 |
| 3. 書名 円偏波アンテナの基礎 | |

〔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 |
|-------|---|--|----|
| 研究協力者 | 漢字名該当なし 漢字名該当なし (Phongcharoenpanich Chuwong) | モンクット王工科大学ラカパン校・Faculty of Engineering・Associate Professor | |
| 研究協力者 | 古谷 航一 (Furuya Koichi) | 熊本大学・大学院 自然科学研究科・博士前期課程 (17401) | |
| 研究協力者 | 漢字名該当なし 漢字名該当なし (Chaihongsa Warangkana) | モンクット王工科大学ラカパン校・Faculty of Engineering・PhD Course | |
| 研究協力者 | 野一色 崇志 (Noishiki Takashi) | 熊本大学・大学院 先端科学教育部・博士前期課程 (17401) | |
| 研究協力者 | 漢字名該当なし 漢字名該当なし (Pookkapund Khanet) | モンクット王工科大学ラカパン校・Faculty of Engineering・PhD Course | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-----------|--|--|----|
| 研究 協力者 | 漢字名該当なし 漢字名該当なし (Sakonkanapong Arnon) | モンクット王工科大学ラカバン校・Faculty of Engineering・PhD Course | |
| 連携 研究者 | 久世 竜司 (Kuse Ryuji) (40808929) | 熊本大学・先端科学研究部・助教 (17401) | |