

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289120

研究課題名(和文)非相反メタマテリアルによる電磁波ビーム制御

研究課題名(英文)Electromagnetic wave beam controlled by nonreciprocal metamaterials

研究代表者

上田 哲也(Ueda, Tetsuya)

京都工芸繊維大学・その他部局等・教授

研究者番号：90293985

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電磁メタマテリアルの次世代無線通信技術、センシング技術への応用を目的として、非相反メタマテリアルからなる擬似進行波共振アンテナの円偏波放射を提案し、偏波回転方向切り替えが可能であることを実験で実証した。また、非相反性の増大を目的として、コプレーナ線路の利用、あるいは誘導性スタブの非対称挿入と線路曲がりの組み合わせによる非相反性増大化を提案し実証した。さらに、周波数によりビーム方向が変化するビームスクイント低減技術として、周波数分散のない非相反性をもつメタマテリアル線路を提案し、実証した。

研究成果の概要(英文)：In this work, we first proposed circularly polarized radiation from pseudo-traveling wave resonance antennas based on nonreciprocal metamaterials, and demonstrated it with polarization rotation direction switched by the applied dc magnetic field in the experiment. Second, combination of curvature of lines and asymmetric insertion of inductive stubs has been proposed and demonstrated to enhance the nonreciprocity. Third, design techniques of dispersion-less nonreciprocity in the metamaterials have been established and demonstrated to reduce beam squint to be solved in beam scanning antennas.

研究分野：電磁メタマテリアル

キーワード：メタマテリアル 非相反回路 負屈折率 円偏波 ビーム走査 アンテナ

1. 研究開始当初の背景

次世代無線通信用のアンテナには、高い指向性と、簡易で高速にビーム走査可能な機能が求められている。レーダ応用など従来の高指向性ビーム走査アンテナとしては、フェーズドアレーアンテナが用いられてきたが、複数のアンテナ素子と位相制御のための移相器とから構成されており、高指向性を得るために大規模の素子数を必要とする。一般にフェーズドアレーアンテナは高機能ではあるが、非常に高価となるため、家電製品など量産品への普及は困難とされている。一方で、構成の単純な漏れ波アンテナをビーム走査アンテナとして用いることも考えられるが、線路終端での反射は不要なサイドローブを形成するので、インピーダンス整合を取る必要があり、一般に共振構造を用いたアンテナに比べて放射効率が低い。

最近、我々は、従来にない新しい動作原理に基づく伝送線路共振器およびビーム走査アンテナへの応用を提案し、実験的に動作確認を行った。本研究で取り扱う擬似進行波共振器では、共振器を構成する伝送線路に非相反性線路を用いて、順方向伝搬では正屈折率でフォワード波、逆方向伝搬では負屈折率でバックワード波が主モードとして伝搬するような非相反メタマテリアルから構成されている。このとき、順方向伝搬では、入力側から離れるにつれて波の位相は遅れるが、線路終端で反射し、折り返して逆方向に伝搬する場合、バックワード波となるので、逆方向伝搬での位相勾配が順方向伝搬での位相勾配と同じであれば、波動が一往復しても元の位置で必ず位相差が0となることから、共振器の長さに関係なく共振条件が自動的に満たされ、この共振器の共振周波数は共振器サイズに依存しない特長を持つ。さらに電磁界分布は、振幅分布がほぼ一様で、位相分布は直線的に変化する進行波共振器のそれと同じ特長がある従って、この進行波共振器をアンテナに応用すると、単純に共振器サイズを大きくするだけで放射ビームの指向性は高められ、放射ビーム方向は、その共振器内の電磁界分布の位相勾配により、ブロードサイドから傾いた方向に形成される。我々は、これまでに外部印加直流磁界を変えることにより、同共振器アンテナのビーム走査が可能であることを実験的に確認した。このアンテナは共振器構造を採用しているので、動作帯域は狭いものの、従来の漏れ波アンテナに比べて放射効率が非常に高い特長がある。これに対して、電磁界分布に位相勾配のない共振器として0次共振器がある。最近、この0次共振器の両端反射条件の一般化を行い、反射特性を電子的に制御することにより、直線偏波のみであるが、主偏波を所望の方向に回転できることを実験的に実証した。しかしながら、非相反メタマテリアルを用いたビーム走査アンテナにおいて、偏波回転機能を併せ持たせることは、いまだ実現されていない。

2. 研究の目的

非相反メタマテリアルからなる擬似進行波共振器は、ファブリペロ共振器と同様に有限サイズの線路長手方向の両端に設置された一対の反射器間で電磁波が多重反射することにより共振するが、共振器に用いられる線路の非相反性により共振器内に定在波が立たず、電磁界分布の振幅はほぼ一様、縦方向に位相勾配が現れる。しかもこの擬似進行波共振器は、動作周波数を固定し共振状態を維持しながら、電磁界分布の位相勾配を自由に定めることができる特徴を有する。これまでに、この擬似進行波共振器のもつ電磁界分布の可変位相勾配を、電磁波ビーム走査に応用することにより、小型で放射高効率に放射する漏れ波アンテナが考案されている。

これまで、擬似進行波共振器の応用としてビーム走査アンテナが提案されているものの、直線偏波のみの動作であった。そこで、本研究では、擬似進行波共振器を用いて偏波操作として円偏波放射の実現を図る。

一方、これまでの非相反メタマテリアルは非相反性が小さい問題があった。擬似進行波共振器をビーム走査アンテナに応用する場合、ビーム走査角は線路の非相反性の大きさに依存するため、非相反性が小さいと、ビーム走査角が制約を受けることになる。また、円偏波アンテナへ応用する場合、非相反性を大きくすることにより、アンテナサイズの小型化が期待できる。以上のように、メタマテリアルの非相反性の増大化は、アンテナへの応用を考える場合、重要な意味を持つ。また、近接場のエバネッセント波を用いて、ビーム走査するためには、大きな波数ベクトルを必要とする。これまで非相反メタマテリアルにおいては、非相反性が小さく、速波(漏れ波)領域内での動作に限定され、導波領域での動作が実現されていない。そこで本研究では、非相反性の増大化を最重要課題の一つとしている。

また、一般の漏れ波アンテナにおいては、放射ビームの方向がアンテナを構成する線路の実効屈折率により与えられるので、線路の周波数分散により、動作周波数の変化に伴ってビーム方向が変動してしまうビームスキントの問題が生じる。本研究で取り扱う擬似進行波共振器から構成される共振タイプのビーム走査アンテナの場合、ビーム角は線路の実効屈折率そのものではなく、非相反性の大きさによって与えられるため、ビームスキントは、非相反性の周波数分散に大きく依存する。これまでに構成された非相反メタマテリアルの場合、フェライト基板マイクロストリップ線路に誘導性スタブを非対称に挿入することにより構成されているが、非相反性の周波数分散の影響が残されている。本研究では、ビーム走査アンテナへの応用の観点だけでなく、非相反性をより高度に制御するための基盤技術として、非相反性の増大化だけでなく、非相反性の周波数分散設計を

も可能とする非相反性設計理論の確立を目標の一つとしている。

3. 研究の方法

1) 偏波制御アンテナへの応用—円偏波回転方向切り替えアンテナ

直交する電流要素に対して位相差を ± 90 度となるように設計することにより、円偏波アンテナを構成することができる。そこで、電磁界分布に位相勾配を与えることのできる擬似進行波共振器を用いて、直交する電流要素が互いに 90 度の位相差を持つような線路構造を用いて円偏波アンテナを構成する。具体的には、擬似進行波共振器を円形状に構成し、周回で 360 度位相変化するよう位相勾配を調整することにより、円偏波条件を満たすよう設定した。次に、印加磁界の向きを反転させることにより、非相反性の符号を反転させ、偏波回転方向の切り替えが可能なアンテナを提案する。

2) 非相反性の増大

(i) CPW 構造による非相反性の増大

非相反性が大きくなるメタマテリアル構造として、コプレーナ線路 (CPW) を利用した構造を提案する。コプレーナ線路を用いて右手/左手系複合線路を構成し、さらにその面を支える基板として横方向直流磁界印加フェライト基板および誘電体基板からなる両面基板構造を採用している。このとき、伝搬方向を切り替えると、電磁界分布が磁性体基板側もしくは誘電体基板のどちらか一方に局所的に集中するが、フェライト基板側に集中する場合に放射が顕著となり、透過係数の大きさの非相反性が顕著となる問題があった。そこで、本研究では、フェライト基板側からの放射を抑制するために矩形金属壁で構造を覆い、透過係数の大きさに現れる非相反性を大幅に低減し、移送特性に現れる非相反性が大きくなる構造を提案する。

(ii) 線路の曲がりによる非相反性の増大

従来のマイクロストリップ線路からなる非相反メタマテリアルにおいて、非相反性を増大化させる技術は、主に垂直磁化フェライト基板マイクロストリップ線路の両側にスタブを非対称に挿入することによってもたらされる幾何学的構造の非対称性を利用したものであった。これに対して、線路の曲がり自体が構造の非対称性をもたらす。そこで、曲率を有する線路の非相反性の定式化を行った。さらに、線路の曲がりだけでなく、スタブの非対称な挿入を積極的に組み合わせることにより、非相反性のさらなる増大を試みる。フェライトからなる半円リングを用いて、曲率を有するメタマテリアル線路を構成し、誘導性スタブの挿入法を検討する。

3) 非相反性の周波数分散制御

磁気共鳴周波数の上側周波数帯で動作させる場合、誘導性スタブによる非相反性は、動作周波数の逆数に比例するため、周波数分散が顕著となり、ビーム走査アンテナへの応用を考えると、周波数の変化によりビーム方向がふらつく問題があった。そこで、周波数分散を抑制するため、容量性スタブを積極的に利用することにより、周波数分散をゼロにできることを提案する。具体的には、誘電率を負にするために挿入する誘導性スタブは周波数分散が大きく、非相反性に影響がないように対称となるよう線路の両側から挿入し、一方、動作周波数に比例するアドミタンスを持つ容量性スタブを非対称構造にすることにより、周波数に比例する非相反を作り出し、周波数分散のない非相反メタマテリアル構造を提案する。

4. 研究成果

1) 回転方向切替可能な小型で高効率放射の指向性円偏波アンテナ

図 1 (a) に、提案する円形擬似進行波共振アンテナのモデル図を示す。また、図 1 (b) (c) において、基板に対して垂直方向 $\pm z$ 方向に直流磁界を印加した場合の放射パターンをそれぞれ示す。黒の点線が右円偏波、赤の実線は左円偏波を示す。図 1 (b) (c) を比較すると、直流磁界の向きを反転させることにより、放射ビームが、右円偏波から左円偏波に切り替えられていることが実験的に確かめられている [1] [4] 。

2) 非相反性の増大

(i) CPW 構造による非相反性の増大

非相反性増大を実現するためにコプレーナ線路 (CPW) 構造からなる非相反メタマテリアルを提案した。透過係数の大きさには非相反性がほとんど現れていないのに対して、位相特性を表す分散曲線において、非相反性が顕著に現れることが確認できる [9] 。

(ii) 線路の曲がりによる非相反性の増大

上記の擬似進行波共振器の円偏波アンテナへの応用を考えた際に、線路の曲がりによる非相反性への影響を検討しておらず、誘導性スタブは全てリング外側に設置された (図 1 参照)。これに対して、理論的な考察を行った結果、リングの外側でなく逆に内側に誘導性スタブ挿入した場合の方が、線路の曲がりの効果と、スタブ挿入との組み合わせにより、非相反性が強め合って増加することが分かった。図 2 に、フェライト半円リングからなる非相反メタマテリアル線路の概略図および試作回路写真、および数値計算結果と実験結果の比較を示す。その結果、数値計算および実験結果はよく一致しており、理論による推定を良く実証していることが確かめられ

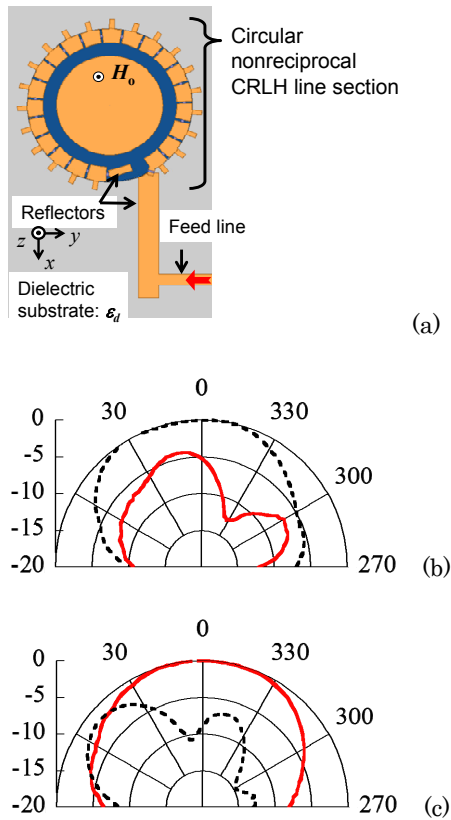


図1 円偏波アンテナへの応用

た [13].

3) 非相反性の周波数分散制御
 非相反性の周波数分散が0となるメタマテリアル線路構造および、試作回路、伝送特性から抽出された分散曲線を図3に示す. 図3(b)より非相反性が動作周波数にほぼ比例していることが確認された[10]. このことからビーム走査アンテナへ応用する場合ビーム方向が動作周波数に関係なく同一方向を向くことが期待される.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 13 件)

[1] A. Porokhnyuk, T. Ueda, Y. Kado, and T. Itoh, "Beam antenna with circular polarization rotation switching based on passive components," Proc. of 44th European Microw. Conf., pp. 327-330, Oct. 2014.
 [2] K. Enomoto, T. Ueda, T. Itoh, "Enhancement of phase nonreciprocity in microstrip-line-based composite right/left-handed metamaterials," Proc. of 2014 Asia-Pacific Microwave Conf., pp. 140-142, Nov. 2014.
 [3] S. Tomita, K. Sawada, A. Porokhnyuk, and T. Ueda, "Direct observation of magnetochiral effects through a single metamolecule in microwave regions," Physical Review Letters, vol. 113, 235501, 3 Dec. 2014.

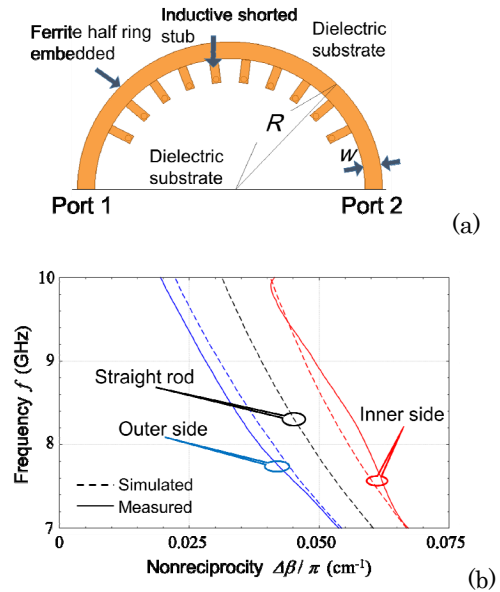


図2 MSLの曲がりによる非相反増大

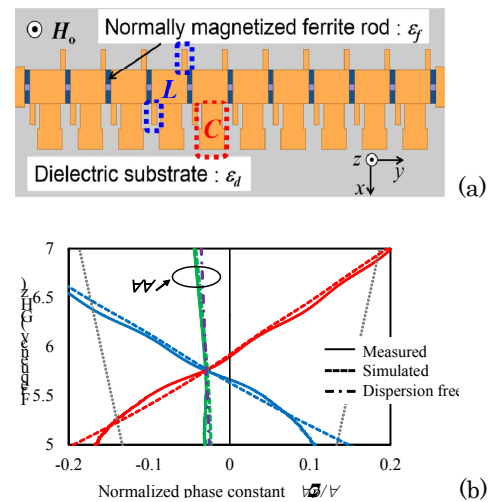


図3 非相反性分散ゼロのメタマテリアル

[4] K. Ninomiya, T. Ueda, A. Porokhnyuk, T. Itoh, "Demonstration of circularly-polarized leaky-wave antenna based on pseudo-traveling wave resonance," Proc. of the 45th European Microwave Conf., pp. 450-453, Sept. 2015.
 [5] K. Ninomiya, T. Ueda, T. Itoh, "Circularly-polarized antenna using an L-shaped pseudo-traveling wave resonator," Proceedings of the 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 1738-1739, July 2015.
 [6] 上田哲也, "非相反メタマテリアルと漏れ波ビーム走査アンテナの高効率化," 「月刊 EMC」, 科学情報出版, no. 322, pp. 33-43, Feb. 2015.
 [7] 上田哲也, 「非相反メタマテリアルと擬似進行波共振」光アライアンス, 日本工業出版, vol. 26, no. 12, pp. 12-15, Dec. 2015.
 [8] 富田知志, 澤田桂, 上田哲也, 「時空の対

- 称性が同時に破れたメタ物質の電磁気応答—マイクロ波領域での磁気カイラルメタ分子を入口として—, 固体物理, vol. 51, no. 8, pp. 31-41, Aug. 2016.
- [9] 上田哲也, ポロフニユク アンドレイ, 伊藤龍男, “非相反右手/左手系複合メタマテリアル,” レーザ研究, レーザ学会誌, vol. 44, no. 1, pp. 47-51, Jan. 2016.
- [10] T. Ueda, K. Ninomiya, K. Yoshida, T. Itoh, “Design of dispersion-free phase-shifting nonreciprocity in composite right/left handed metamaterials,” IEEE MTT-S Int. Microw. Symposium Dig., pp. 1-4, May 2016.
- [11] S. Tomita, H. Kurosawa, K. Sawada, T. Ueda, “Enhanced magnetochiral effects at microwave frequencies by a single metamolecule” Physical Review B, vol. 95, 085402, 2017.
- [12] Y. Kubo, T. Ueda, T. Itoh, “Zeroth-order resonator with tunable reflectors based on nonreciprocal CRLH metamaterials,” Proceedings of the 2017 IEEE International Conf. on Computational Electromagnetics, pp. 257-258, March 2017.
- [13] T. Ueda, J. Yamauchi, Y. Kubo, T. Itoh, “Enhancement of phase-shifting nonreciprocity in microstrip-line-based metamaterials with curvatures,” IEEE MTT-S Int. Microw. Sym. Dig., pp. 1-4, June 2017
- [学会発表] (計 28 件)
- [14] 榎本康平, 上田哲也, 伊藤龍男, “右手/左手系複合伝送線路の非相反位相特性増大に関する検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, BCS-1-5, 徳島大学, Sept. 24, 2014.
- [15] Andrey Porokhnyuk, Tetsuya Ueda, Yu Tsukamoto, Satoshi Tomita, Kei Sawada, “Consideration of resonance in helical chiral meta-molecule,” 電子情報通信学会ソ大会, C-2-48, 徳島大学, Sept. 24, 2014.
- [16] 上田哲也, “[依頼講演] 非相反 CRLH メタマテリアルとアンテナへの応用,” 電子情報通信学会マイクロ波研究会, 信学技報, vol. 114, no. 219, MW2014-89, pp. 27-30, 東工大大岡山, Sept. 19, 2014.
- [17] 上田哲也, (招待講演) “メタマテリアル擬似進行波共振アンテナ,” MWE 2014 Microwave Workshop Digest, WS10-03, pp. 1-4, Dec. 12, 2014.
- [18] T. Ueda, “Design of Nonreciprocal Metamaterials in the Microwave Region,” (招待講演) META’14, the 5th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Singapore, May 20-23, 2014.
- [19] K. Enomoto, T. Ueda, T. Itoh, “Enhanced phase nonreciprocity in CRLH transmission lines,” Korea-Japan Microw. Workshop, pp. 43-44, Suwon, Korea, Dec. 4-5, 2014.
- [20] K. Ninomiya, A. Porokhnyuk, T. Ueda, T. Itoh, “Circularly-polarized leaky wave radiation from pseudo traveling wave resonator,” Korea-Japan Metamaterials Forum, pp. 76-77, Osaka, Dec. 2014.
- [21] A. Porokhnyuk, T. Ueda, T. Itoh, “Strong phase nonreciprocity in coplanar-waveguide-based CRLH structure,” Korea-Japan Metamaterials Forum, P23, pp. 78-79, Osaka, Japan, Dec. 22-24, 2014.
- [22] 二宮敬佑, ポロフニユク・アンドレイ, 上田哲也, 伊藤龍男, “擬似進行波共振器からの円偏波放射の実験的検討,” 電子情報通信学会総合大会, C-2-48, p. 68, 立命館大南草津, Mar. 2015.
- [23] ポロフニユク・アンドレイ, 上田哲也, 門勇一, 伊藤龍男, “コプレーナ線路による非相反CRLHメタマテリアルの実験的検討,” 電子情報通信学会総合大会, C-2-49, p.69, 立命館大南草津, Mar. 2015.
- [24] 富田知志, 澤田桂, 永井翔太郎, 上田哲也, 真田篤志, “カイラルメタ原子を用いた光のシュテルン・ゲルラッハ実験,” 日本物理学会講演概要集, vol. 70, 第 70 回年次大会, 21pCN-3, p. 1456, 早稲田大, Mar. 2015.
- [25] 上田哲也, (招待講演) “誘電体および磁性体を用いたマイクロ波メタマテリアルとその評価技術,” 日本学術振興会メタマテリアル第 187 委員会 平成 27 年度第 1 回研究会, 機械振興会館, June 2015.
- [26] 久本伸之, 上田哲也, 富田知志, 澤田桂, “2 次元カイラルメタマテリアル構造における電磁波伝搬,” 電子情報通信学会総合大会総合大会, C-2-32, 九州大学伊都キャンパス, Mar. 2016.
- [27] 二宮敬佑, 上田哲也, 伊藤龍男, “擬似進行波共振器からの水平面無指向放射,” 電子情報通信学会総合大会, C-2-72, 九州大学伊都キャンパス Mar. 2016.
- [28] 吉田和弘, 二宮敬佑, 上田哲也, 伊藤龍男, “CRLH メタマテリアルの非相反性分散制御,” 電子情報通信学会, C-2-35, 九州大学伊都キャンパス, Mar. 2016.
- [29] 黒澤裕之, 富田知志, 澤田桂, 上田哲也, “高磁場下でのメタ分子による磁気カイラル効果,” 日本物理学会講演概要集, vol. 71, 第 71 回年次大会, 22aBP-9, 東北学院大学, Mar 2016.
- [30] 上田哲也, “非相反 CRLH メタマテリアルとアンテナ応用,” 輻射科学研究会, RS16-02, 京都大学 吉田 June 7, 2016.
- [31] T. Ueda and T. Itoh, (招待講演) “Dispersion engineering of nonreciprocal metamaterials and their applications to leaky wave antennas,” 2016 Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC 2016), S-B4-3, pp. 522-523, Grand Hilton Seoul Hotel, Seoul, Korea, Aug. 21-25, 2016.
- [32] T. Ueda, (招待講演) “Recent Progress on

Dispersion Control of Nonreciprocal CRLH Metamaterials,” The First A3 Metamaterials Forum, pp. 43-44, Katahira-Sakura Hall, Katahira Campus, Tohoku University, Sendai, July 5-7, 2016.

- [33] 久保雄暉, 二宮敬祐, 上田哲也, 伊藤龍男, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-2-49, 北海道大学, Sep. 2016.
- [34] 上田哲也, 「非相反メタマテリアルとその応用」第 909 回紫翠会講演, 梅田関西電力ビル, 2016 年 10 月 26 日.
- [35] 吉田和弘, 上田哲也, 伊藤龍男, 「マイクロストリップ線路からなる」CRLH メタマテリアルにおける非相反性の増大」電子情報通信学会 マイクロ波研究会技術研究報告, MW2016-148, vol. 116, no. 363, pp. 89-94, Dec. 2016.
- [36] 山内淳司, 上田哲也, 久保雄暉, 二宮敬祐, 伊藤龍男, 「メタマテリアル伝送線路の曲がりによる非相反性の増大」電子情報通信学会総合大会総合大会, C-2-69, 名城大学天白, Mar. 2017.
- [37] 久保雄暉, 上田哲也, 原 誠, 高橋康夫, 「UHF 帯における非相反メタマテリアルを用いた擬似進行波共振アンテナからの漏れ波放射」電子情報通信学会総合大会, C-2-69, 名城大学天白, Mar. 2017.
- [38] 久本伸之, 上田哲也, 澤田桂, 富田知志, 「2 次元カイラルメタマテリアルに沿って伝搬する電磁波の非対称電磁界分布の観測」日本物理学会講演概要集, vol. 72, 第 72 回年次大会, 17aC22-10, 大阪大学豊中キャンパス, Mar 2017.
- [39] 富田知志, 澤田桂, 永井翔太郎, 真田篤志, 久本伸之, 上田哲也, 「不均一カイラルメタ物質を用いたマイクロ波のシュテルン・ゲルラッハ実験」, 日本物理学会講演概要集, 第 72 回年次大会, 17aC22-11, 阪大豊中, Mar 2017.
- [40] 上田哲也, (招待講演)「誘電体/磁性体からなる電磁メタマテリアルとその応用」, Wireless Technology Park, 東京ビックサイト 2017 年 5 月 24 日.
- [41] T. Ueda, (招待講演) “Design of Phase-Shifting Nonreciprocity in Metamaterials,” The 2nd A3 Metamaterials Forum, I9, p. 20, Fudan University, Shanghai, China, June 2017.

〔図書〕(計 2 件)

- [42] (翻訳) 上田哲也, 澤田桂, その他「メタマテリアル ハンドブック 基礎編」, 講談社, 2015 年 11 月.
- [43] (翻訳) 上田哲也, 澤田桂, その他「メタマテリアル ハンドブック 応用編」, 講談社, 2015 年 11 月.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 3 件)

名称: 非相反メタマテリアル伝送線路装置及

びアンテナ装置

発明者: 上田哲也, 吉田和弘

権利者: 国立大学法人 京都工芸繊維大学

番号: 特願 2016-031167

出願年月日: 平成 28 年 2 月 2 日

国内外の別: 国内

名称: アンテナ装置

発明者: 上田哲也, 二宮敬祐, 榎本康平

権利者: 国立大学法人 京都工芸繊維大学

番号: 特願 2016-032626

出願年月日: 平成 28 年 2 月 2 日

国内外の別: 国内

名称: 非相反メタマテリアル伝送線路装置及びアンテナ装置

発明者: 上田哲也, 二宮敬祐

権利者: 国立大学法人 京都工芸繊維大学

番号: 特願 2016-071058

出願年月日: 平成 28 年 3 月 3 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.hyokadb.jim.kit.ac.jp/profile/ja.b3ba40709f764a8b320e6d3c65e2190d.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田哲也 (UEDA, Tetsuya)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授

研究者番号: 90293985

(2) 研究分担者

澤田桂 (SAWADA, Kei)

理化学研究所・放射光学科学総合研究センター・研究員

研究者番号: 40462692

(3) 連携研究者

富田知志 (TOMITA, Satoshi)

奈良先端科学技術大学院大学・物理創成科学研究科・助教

研究者番号: 90360594

(4) 研究協力者

伊藤龍男 (ITOH, Tatsuo)

Electrical Engineering Department, UCLA

ポロフニユク アンドレイ

(POROKHNYUK, Andrey)