

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560454

研究課題名(和文)非相反性進行波共振器からなるビーム走査アンテナに関する研究

研究課題名(英文)Study on beam-scanning antennas based on nonreciprocal traveling-wave resonators

研究代表者

上田 哲也(Ueda, Tetsuya)

京都工芸繊維大学・工学科学研究科・准教授

研究者番号：90293985

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：表裏で屈折率が正負入れ替わる特異な電磁気学的性質をもつ人工構造体「非相反メタマテリアル」を用いたアンテナ応用技術に関する研究である。このメタマテリアルを伝送線路共振器に適用すると、従来にない新しい機能を有する擬似進行波共振器が構成可能となる。例えば、共振周波数を一定に保ちながら共振器サイズを自由に変わることができ、また共振器内の電磁界分布において、振幅は至る所で一定なのに対して、位相は直線的に変化する進行波タイプの特徴をもつ。構造体の非相反性を変化させることにより、共振器の位相勾配が変えられることを利用して、小型で高効率なビーム走査漏れ波アンテナが構成できることを数値計算および実験で確認した。

研究成果の概要(英文)：This work is devoted to an application of "nonreciprocal metamaterials" to antenna technologies. Nonreciprocal metamaterials are artificial electromagnetic structures that can realize a situation where the refractive index simultaneously takes positive and negative values, selection of which depends on a direction of electromagnetic wave propagation in the microwave region. By applying the structures to the transmission-line resonators, new functional resonators can be realized. They have unique and fascinating characteristics in that the resonator's size can be changed with the operational frequency fixed, and that the field profile along the resonators shows the uniform amplitude and linearly-varying phase distribution. Tunable phase gradient controlled by the nonreciprocity is implemented into compact and high-efficient beam scanning leaky wave antennas. We experimentally demonstrate the beam scanning and investigated the other antenna characteristics.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 通信・ネットワーク工学

キーワード：メタマテリアル 非相反回路 ビーム走査アンテナ 偏波回転 負屈折率 進行波共振器

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。このようにアンテナ素子数の増加とともに制御システムの負荷は非常に高くなり、ビーム制御のために高い消費電力を要することとなる。また、受信状況に応じてアンテナの偏波特性を自由に変えられる機能を持たせる場合でも、ビーム走査と同様、各アンテナ素子の制御が必要で、素子数の多いアンテナの場合、制御システムへの負荷が大きくなる。

一方で、簡易に構成可能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ため、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問題がある。

2. 研究の目的

最近、我々は、メタマテリアルの概念を用いて従来にない新しい動作原理に基づく伝送線路共振器を提案した。従来の伝送線路共振器は、有限長の伝送線路内で、伝搬方向に関係なく位相の変化が同じであり、波動が線路を一往復することにより全位相差が 2π rad の整数倍となることを共振条件とする。電磁界分布は定在波により、正弦的に空間変化し、腹・節が現れ、共振周波数は共振器サイズによって決まる。これに対して、本提案の共振器では、共振器を構成する伝送線路に、非相反メタマテリアル構造を用いて、順方向伝搬では正の屈折率を示すフォワード波、逆方向伝搬では負の屈折率を示すバックワード波が主モードとして伝搬するよう構成されている。その結果、順方向伝搬では、波の位相は入力側から離れるにつれて遅れる分布をなすが、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、位相勾配が順方向の場合と同じになる条件が成立すれば、波動が一往復しても元の位置で位相差が自動的に0となることから、共振器の長さに関係なく共振条件が常に満たされ、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。さらにこの非相反伝送線路共振器内の電磁界分布は、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になる特長がある。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れば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。この位相勾配は、非相反

線路の非相反性によって決まるが、例えば非相反性線路が磁性体によって構成される場合、非相反性は外部印加直流磁界や磁化の大きさに依存する。従って、外部印加磁界を変化させることで、非相反性の程度が変化し、その結果一元的なビーム走査が可能となる。

3. 研究の方法

本研究では、非相反性進行波共振器からなるビーム走査アンテナの基本的動作の解明を目的として、期間中に次のテーマを実施した。

(1) 線路の幾何学的構造と伝搬特性の関係

フェライト棒を含む非相反移相右手/左手系複合線路の幾何学的構造と伝搬特性、特に非相反移相特性を定量的に取り扱うために、電磁界の固有モード解析および伝送線路理論の組み合わせにより、伝搬モードを詳しく調べた。また、非相反性の定式化を試みた。

(2) 等価回路モデルと電磁界シミュレーションの比較検討

非相反移相右手/左手系複合線路に沿って伝搬する主モードを簡単な等価回路モデルにより記述した。同モデルの有効性を示すため、元の電磁界シミュレーションの数値結果と比較検討を行った。

(3) 伝送線路の試作・測定および計算結果との比較検討

上記で得られたフェライト棒を含む非相反移相右手/左手系複合線路を製作し、伝送特性を測定する。数値計算結果との比較検討を行った。

(4) 進行波型共振器の設計

上記の方法で求められた非相反移相右手/左手系伝送線路と終端反射器を組み合わせ、進行波型共振器を設計した。ここでは共振器の基本特性として、共振器を構成する単位セルの総数を変えた場合の共振周波数およびQ値などの変化を調べた。

(5) アンテナの設計

上記の方法で求められた進行波型共振器を用いてアンテナの設計を行った。共振器への給電方法としては、既に提案している方法として反射器の一端から励振する方法を採用した。

(6) アンテナを構成する単位セル数と動作帯域幅、指向性、利得の関係の解明

アンテナを構成する線路に含まれる単位セル数を変えることにより、動作帯域幅、指向性、放射利得に対してどのように影響を与えるのか、数値解析および実験的に検討した。

(7) 非相反性のチューニングおよび放射ビームの走査角の関係の解明

進行波共振器の位相勾配を変える主な方法

として、外部印加磁界を変化させた。共振器をアンテナとして用いる場合、走査可能な放射角の大きさを数値計算および実験的に検討した。

(8) 主偏波回転の電子制御

進行波共振器の両端条件を変えることにより、共振状態を連続的に変化させることができる。従来の境界条件は、両端開放および両端短絡のみであったが、この2つの共振状態を混成させ、中間の状態を取ることができている。共振器の境界条件を電子的に変化させることにより、放射ビームの主偏波を連続的に回転させることができることを実験的に確認した。

(9) 非相反性の電圧制御

非相反性の大きさを電圧制御により実現することを試みる。ここで取り扱う線路の非相反性は、磁性体材料の持つジャイロ回転異方性と導波路構造の非対称性との組み合わせにより発現するが、永久磁石を機械的に移動させたり、電磁石に流れる電流制御など従来の方法では、消費電力を低減することが困難である。そこで低消費電力化を推進する上で、非可逆性を形成する要因の一つである構造の非対称性を、電圧制御により実現する方法を提案し、ここではアイデアの有効性を実証するための実験を行った。

4. 研究成果

本研究を実施した結果、研究期間内において明らかにした点は、以下のとおりである。

(1) 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ける非相反性の定式化：これまで、線路の非相反性は、対象構造の複雑さから、数値シミュレーションに頼っていた。これに対して、本研究では、解析的な手法を用いて非相反性の定式化を行った。まず、単位セルを、非対称スタブの挿入された非相反領域と、スタブの挿入されていない相反領域とに分け、それぞれの領域で、固有伝搬モードを電磁界の境界問題として求める。さらに伝送線路理論を用いて各領域のF行列を直列接続し、全体構造に対する分散関係式を導出した。この式を摂動法で近似することにより、非相反性の定式化を行った。一般に、非相反性は、時間反転対称性の破れを表すフェライト材料の使用と、さらに空間反転対称性の破れを表す構造の非対称性を与えることにより発現するが、導出した非相反の定式では、これら2つの要素が積の形で陽に表されており、物理的解釈を明確に与えてくれる式となっている。また、電磁界シミュレーションより求められる非可逆性の周波数依存性を良く記述していることがわかった。

(2) アンテナサイズと指向性、動作帯域幅、および放射利得の周波数特性の関係：

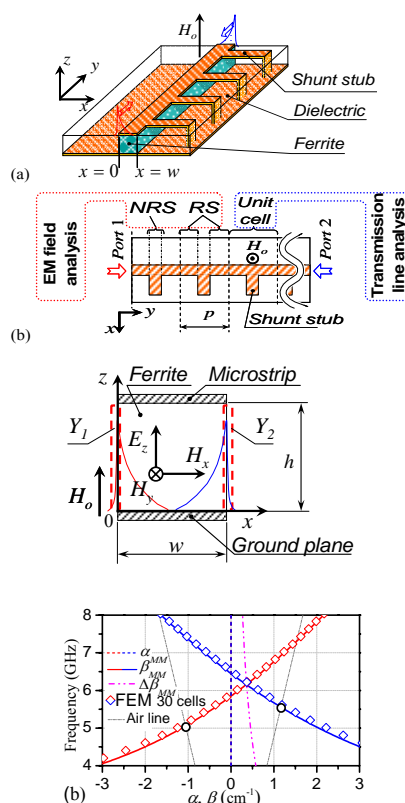


図1 非相反メタマテリアルの等価回路モデルと位相非相反性の定式化

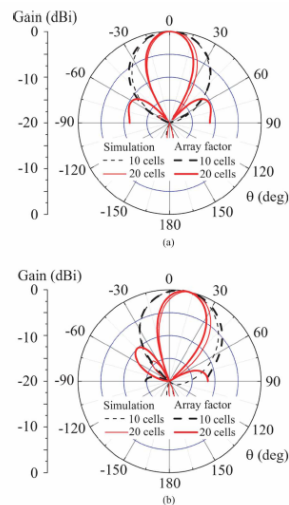


図2 アンテナサイズと指向性

アンテナサイズを変えることによる指向性利得の変化を、分散曲線から求められる位相定数と減衰定数を用いて共振状態におけるアレーファクタを定式化して数値的に評価を行った。その結果、数値シミュレーションより求められる放射パターンと良く一致することがわかった。

(3) 外部印加磁界による非相反性の大きさのチューニングおよび放射ビームの走査角の関係：共振器を構成する線路の非相反性の大きさと放射ビームの走査角をについて、数値計算

および実験により比較検討を行った。その結果両者は良く一致し、 ± 30 度のビーム走査が可能であることが確認された。

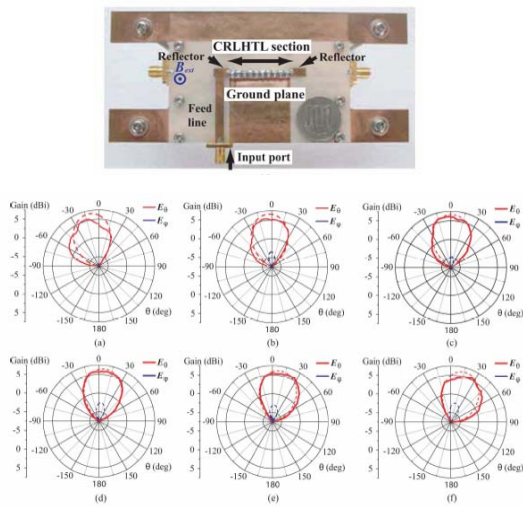


図3 外部直流磁界によるビーム走査

(4) 0次共振アンテナの主偏波回転制御を実験的に確認：

擬似進行波共振器は、ビーム走査と偏波回転機能を同時に併せ持ち、それぞれ線路の非相反性制御と、共振のための両端反射条件を独立に変えることにより実現できる。ここでは、擬似進行波共振器の主偏波回転機能に注目し、電圧制御できるかどうかを実験的に確認した。その結果、両端に挿入した反射器内にバラクターダイオードを用いて、印加電圧の大きさを変えることにより、0次共振の共振状態が動的に直列共振から並列共振まで連続的に変えられること、またそれを用いることにより、放射波の主偏波方向が連続的に約60度回転できることを実験的に確認した。

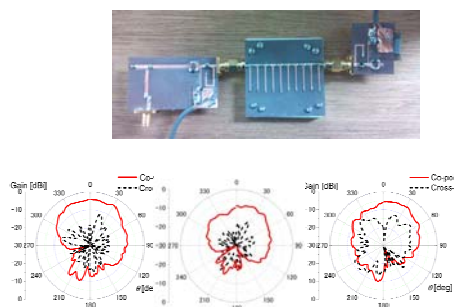


図4 印加バイアスによる主偏波方向回転制御

(5) 構造の非対称制御による非相反操作：

従来の磁界同調ではなく、可変素子の電圧制御による方法の実現可能性を探求することを目的として、垂直磁化フェライトロッドが埋め込まれたマイクロストリップ線路において、導波路構造の非対称性と非相反性の関

係を理論的、実験的に調べた。線路の非相反性は、回転異方性の程度を決める磁化の大きさと、導波路構造の非対称性の組合せにより発現する。本研究では、導波路構造の非対称性と伝搬特性の非相反性の関係を調べた。具体的には、垂直磁化フェライトロッドが基板に埋め込まれたマイクロストリップ線路の両側側面に、電気長の異なるスタブを挿入し、総インダクタンスを変えずに、2つの電気長の組み合わせを変えた。その結果、構造の非対称性を変えることにより、透過係数の位相に見られる非相反性の程度が変えられることを数値計算および実験により確認した。

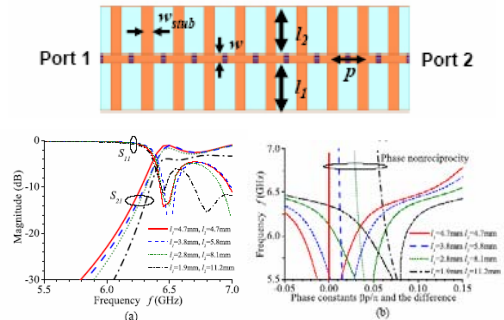


図5 マイクロストリップ線路両側面のインピーダンス壁と非相反性

(6) 共振器アンテナのビームスクイント低減技術：

従来の漏れ波アンテナの場合、周波数を変えることによりビーム方向が変わってしまうビームスクイントの問題がある。これに対して、本提案の擬似進行波共振アンテナの場合、帯域は大きく取れないが、ビームスクイントを理論的に0とすることが可能である。成果(1)の結果を用いて、マイクロストリップ線路の両側にスタブの挿入されたダブルスタブ構造を採用し、非相反性の分散設計を行った。その結果、ビームスクイントが0となる条件を満足する線路が構成できることを数値計算および実験により確認した。

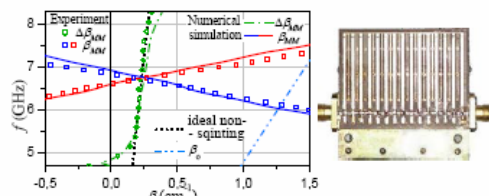


Fig. 3. Dispersion diagram.

Fig. 4. Experimental model

図6 ビームスクイントが0となる非相反線路の分散設計

以上得られた成果のうち、(1)の成果は、学術論文誌 IEICE Trans. on Electronics の2013年10月号に、(2)および(3)の成果は学術論文誌 IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques の2012年10月号に

掲載された。(4)は、2013年の国際会議論文誌 Proceedings of the 43rd European Microwave Conference に、(5)は2012年の国際会議論文誌 Proceedings of the 42nd European Microwave Conference に、(6)は2013年の国際会議論文 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest に掲載されている。

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 10 件)

- ① A. Porokhnyku, T. Ueda, Y. Kado, and T. Itoh, "Mode analysis of phase-constant nonreciprocity in ferrite-embedded CRLH metamaterials," IEICE Trans. on Electronics (査読有), vol. E96-C, no. 10, pp. 1263-1272, 2013. DOI: 10.1587/transele.E96.C.1263
 - ② A. Porokhnyuk, T. Ueda, Y. Kado, T. Itoh, "Design of nonreciprocal CRLH metamaterial for non-squinting leaky-wave antenna," 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (査読有), TH1H-1, pp. 1-3, 2013. DOI: 10.1109/MWSYM.2013.6697450
 - ③ J. Fukuda, T. Ueda, Y. Kado, T. Itoh, "Polarization-rotating zeroth-order-resonator antenna with voltage-controlled reflectors at both ends," Proc. of the 43rd European Microwave Conference (査読有), pp. 1071-1074, 2013. IEEE Xplore
 - ④ A. Porokhnyuk, T. Ueda, Y. Kado, T. Itoh, "Nonreciprocal metamaterial for non-squinting leaky-wave antenna with enhanced beam steering," Proc. of the 2013 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (査読有), pp. 2289-2290, 2013. DOI: 10.1109/APS.2013.6711803
 - ⑤ T. Ueda and T. Itoh, "Nonreciprocal CRLH metamaterials and their applications to beam-scanning antennas," Proc. of the 2013 Asia-Pacific Microwave Conference, W1C-1, pp. 31-33, 2013. IEEE Xplore
 - ⑥ T. Ueda, T. Itoh, "Beam scanning antennas based on pseudo traveling wave resonators," Proc. of the 2013
- URSI Commision B International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS 2013), 23AM1A-4, pp. 338-340, 2013. IEEE Xplore
- ⑦ A. Porokhnyu, T. Ueda, Y. Kado, T. Itoh, "Eigenmode analysis of transmission line-based phase-nonreciprocal meta-materials," Proc. of the 2013 URSI Commision B International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS 2013), 21AM1D-02, pp. 71-73, 2013. IEEE Xplore
 - ⑧ T. Ueda, S. Yamamoto, Y. Kado, and T. Itoh, "Pseudo-traveling wave resonator with magnetically tunable phase gradient of fields and its applications to beam steering antennas," IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques (査読有), vol. 60, no. 10, pp. 3043-3054, 2012. DOI: 10.1109/TMTT.2012.2207737
 - ⑨ A. Porokhnyuk, T. Ueda, Y. Kado, T. Itoh, "Mode analysis of nonreciprocal metamaterials using a combination of field theory and transmission line model," 2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest(査読有), WE4J-5, pp. 1-3, 2012. DOI: 10.1109/MWSYM.2012.6259405
 - ⑩ T. Ueda, J. Fukuda, Y. Kado, T. Itoh, "Nonreciprocal phase-shift CRLH transmission lines using geometrical asymmetry with periodically inserted double shunt stubs," Proc. of the 42nd European Microwave Conference (査読有), EuMC30-1, pp. 570-573, 2012. IEEE Xplore
- [学会発表] (計 13 件)
- ① 上田哲也, "マイクロ波領域のメタマテリアルとその応用" 産業技術総合研究所主催「光・マイクロ波・ミリ波技術研究会 第2回セミナー」(招待講演), 京都リサーチパーク, 2014年2月19日.
 - ② T. Ueda, "Nonreciprocal CRLH metamaterials and their applications" Technical Seminar Organized by IEEE MTT/AP Chapter, IEICE and School of EEE, NTU, (招待講演), Nanyang Technological University, Singapore, 2014年1月22日.
 - ③ 上田哲也, "非可逆メタマテリアルとそ

の応用,” Microwave Workshop and Exhibition 2013 (招待講演) WS05-02, パシフィコ横浜, 横浜, 2013年11月27日.

- ④ 福田純子, 上田哲也, 門勇一, 伊藤龍男, “電圧制御された終端条件を持つ0次共振器アンテナに関する実験,” 第42回電磁界理論シンポジウム, 星野リゾート青森屋, 三沢, 青森, 2013年11月15日.
- ⑤ 上田哲也, “非相反メタマテリアルとその応用,” 電子情報通信学会 アンテナ・伝播研究会, ヴェルクよこすか, 横須賀 2013年8月29日.
- ⑥ 福田純子, 上田哲也, 門勇一, 伊藤龍男, “電圧制御された終端を持つ0次共振器の実験,” 電子情報通信学会 マイクロ波研究会, 稚内総合文化センター, 北海道, 2013年7月19日.
- ⑦ Andrey Porokhnyuk, 上田哲也, 門勇一, 伊藤龍男, “擬似進行波共振器アンテナにおけるビームスクイントの消去法,” 電子情報通信学会総合大会, C-2-47, 岐阜大学, March 2013.
- ⑧ 福田純子, 上田哲也, 門勇一, 伊藤龍男, “0次共振器の電圧制御に関する実験,” 電子情報通信学会総合大会, C-2-80, 岐阜大学, March 2013.
- ⑨ 福田純子, 上田哲也, 門勇一, 伊藤龍男, “CRLH線路のスタブ長による非可逆位相制御に関する実験,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, C-2-44, 富山大学五福キャンパス, Sept. 2012.
- ⑩ 上田哲也, “非相反メタマテリアルとアンテナへの応用,” (シンポジウム企画講演) BI-2「通信環境の制御に関わるメタマテリアルの要素技術」, 電子情報通信学会総合大会, 通信, BI-2-5, pp. 1-2, 岡山大学, March 2012.
- ⑪ Andrey Porokhnyuk, Tetsuya Ueda, Yuichi Kado, Tatsuo Itoh, “Analysis of phase nonreciprocity in ferrite-based transmission line metamaterials,” 電子情報通信学会総合大会, エレクトロニクス, C-2-86, 岡山大学, March 2012.
- ⑫ 山本慎太郎, 上田哲也, 門勇一, 伊藤龍男, “擬似進行波共振器アンテナのビーム走査に関する実験,” 電子情報通信学会総合大会, エレクトロニクス, C-2-83, 岡山大学, March 2012.
- ⑬ 山本慎太郎, 上田哲也, 門勇一, 伊藤龍

男, “ビーム走査進行波共振器アンテナの偏波特性,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, エレクトロニクス, CS-2-3, p. S-21, Sept. 2011.

[図書] (計3件)

- ① 堀越智, 萩行正憲・田中拓男・高野恵介・上田哲也, 日刊工業新聞社, 「図解メタマテリアル—常識を超えた次世代材料—」, 第4章担当 「マイクロ波メタマテリアル」, pp. 117-177, 2013.
- ② T. Ueda and T. Itoh, Artech House, Composite right/left handed transmission lines and their RF applications, Chapter 9, in “Passive RF Component Technology: Materials, Techniques, and Applications,” edited by G. Wang and B. Pan, pp. 187-231, 2012
- ③ 上田哲也, シーエムシー出版, “磁性体による非相反メタマテリアル,” 石原照也・真田篤志・梶川浩太郎監修「メタマテリアルII」第8章 pp. 77-88, 2012

[産業財産権]

○出願状況 (計 2件)

名称: 非可逆伝送線路装置
発明者: 上田哲也・岸本紘幸
権利者: 国立大学法人京都工芸繊維大学
種類: 特許
番号: PCT/JP2012/054632
出願年月日: 2012年2月24日
国内外の別: 外国

名称: マイクロ波共振器
発明者: 上田哲也・拜田剛輝・山本慎太郎
権利者: 国立大学法人京都工芸繊維大学
種類: 特許
番号: PCT/JP2011/67284
出願年月日: 2011年7月28日
国内外の別: 外国

[その他]

ホームページ等
<http://www.cis.kit.ac.jp/~ueda/>

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・工学科学研究科・
准教授
研究者番号: 90293985