

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：15501

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22109002

研究課題名（和文）周期構造を利用したマイクロ波メタマテリアルの開発と応用

研究課題名（英文）Fundamentals and Applications of Periodic Microwave Metamaterials

研究代表者

真田 篤志（Sanada, Atsushi）

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20264905

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 140,700,000円

研究成果の概要（和文）：周期構造を利用したマイクロ波メタマテリアルの開発および応用化研究を推進した。CRLH理論に基づき、マイクロ波メタマテリアルを実現する各種の新たな概念を提案した。また、数値解析技術および媒質評価技術をまとめ開発ツールとして整備した。同時に、マイクロ波帯においてデバイス・回路・アンテナ等への応用を開拓した。さらに、これら概念をテラヘルツ波・光波領域へ展開した。

研究成果の概要（英文）：Potentials of periodic metamaterials and their microwave applications are explored. Based on the CRLH theory, novel concepts for microwave metamaterials designs and implementations are presented. Simulation and evaluation techniques for periodic metamaterials are also newly developed. Possible microwave applications for devices, circuits, and antennas are presented in microwave frequency regions. In addition, the concepts are exported to Terahertz and optical wave regions.

研究分野：マイクロ波工学

キーワード：メタマテリアル マイクロ波 周期構造

1. 研究開始当初の背景

電氣的・磁氣的に強く結合させた単位素子を周期的に配列することで結合量を制御し、共振を用いずとも負の実効誘電率と負の実効透磁率とを同時に実現する新たな左手系メタマテリアルの構成法が提案されている。真田は、この非共振型の左手系メタマテリアルの開発者の一人として黎明期から携わり、これを CRLH (composite right/left-handed; 右手/左手系複合) 理論として一般化し完成させた。伝送線路を基とする CRLH メタマテリアル(図 1)は、当時主流であった分割リング共振器(SRR)等の単位素子単体の共鳴を利用した共振型のものに比べて本質的に広帯域かつ低損失な特性が得られるという特徴がある。また、回路的手法により単位素子の共鳴や要素間の結合を精度良くモデル化し定量的に取り扱う事ができるため、より高度なメタマテリアル設計が可能である。このため CRLH 理論は、現在学術的のみならず工学的にも急速に期待が高まりつつあり世界的にも普及しつつある。

これまで実現されている CRLH メタマテリアルは、平面回路プロセス等で実現できる 1次元および2次元構造のものがほとんどである。サブ波長イメージングや信号・電力伝送などの新規応用を開拓する上で極めて重要な課題であり現在世界的にも開発競争が激化している3次元左手系メタマテリアルなどへの展開が急がれている。このためにはメタマテリアルを扱うことのできる大規模な数値計算手法の開発や作製プロセスの開発などが課題である。

また、近年マイクロ波帯を中心とした電波領域において、通信および非通信の次世代電波応用システムが検討されている。これらのシステムには、単体で複数の機能を持つことや、状況に応じて再構成可能となる機能など、従来では必要とされなかった機能や性能が要求されている。これらの要求を満足するキーコンポーネントとして、CRLH 媒質の持つ特異性を利用したデバイスが注目されており、その実用化が期待されている。しかし、現状では、提案されている CRLH 媒質のほとんどが既存のプロセスで作製可能な単純な平面回路構成のものであり、実用システム毎の要求を満足する低損失性や広帯域性、小型・多機能性を生かす構造バリエーションはほとんどないのが現状である。また、非可逆性など更に進んだ特性を積極的に利用したものもほとんどない。さらにこれらを実現するための媒質設計手法、試作・評価手法、およびシミュレーション技法も、これまでは個別に実現されているのみであり一般的なものはない。

CRLH 理論は回路設計に親和性の高いマイクロ波領域において普及が進んでいるものの、テラヘルツ帯や光波領域においてはほとんど普及していない。これは本質的にはこの理論の限界によるものではなく、この領域に

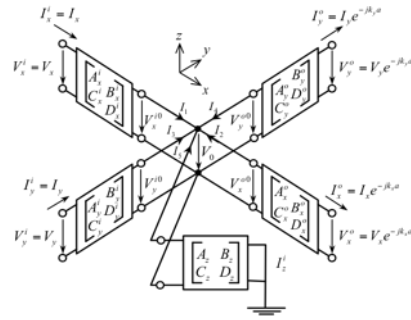


図1 伝送線路型CRLH媒質モデル (真田ら, 2004).

における回路設計に対する文化の違いによるものと考えられる。一方でテラヘルツ帯や光波領域では損失の低減や広帯域化が切に望まれており、この意味で CRLH 理論がこの領域で展開されればインパクトや波及効果は極めて大きいと考えられる。

2. 研究の目的

本計画研究では真田の提案する CRLH 理論を軸として、(1) メタマテリアルの多態性を生かした系統的な新規メタマテリアル構造提案、および(2) 次世代応用システムのキーコンポーネントとなるデバイス応用化研究を行うと共に、(3) CRLH 理論のテラヘルツ波帯および光波領域への展開を試みる。久保はマイクロ波領域において多くの CRLH 媒質構造を提案すると共に、その特性評価法を提案してきた日本で先駆的な研究者である。宇野は 90 年代より有限差分時間領域(FDTD)法による電磁界シミュレーションを手がけ、CRLH 媒質を含む異方性分散媒質の大規模数値解析法やデバイスモデリングの手法を確立している。また、堀井、上田は CRLH メタマテリアルの技術を軸にマイクロ波領域におけるデバイス応用を先行して研究を進めている。

3. 研究の方法

研究は、前記の 3 つの目標に対して以下の方法で行った。

(1) 新規メタマテリアルの理論と構造の開発

真田は CRLH 理論を元に 1次元から 3次元までの新規構造を提案し、構造と分散特性およびインピーダンスの基本伝送特性との関係の系統的な設計技術を開発する。宇野は数値計算・シミュレーション技法を基に大規模周期構造を取り扱うことのできるメタマテリアルシミュレータを開発する。久保は、サンプルの試作を進めるとともに、材料定数測定技術を基に、マイクロ波帯における高精度な実効誘電率および実効透磁率の評価システムを構築する。これらを組み合わせることで、媒質設計および最適化を行うと共に、3次元左手系媒質を実現し、その動作を実験的に検証する。また、負屈折率レンズを設計しサブ波長解像をおこなうスーパーレンズ動作を数値的に検討する。得られた成果を、非共

振型メタマテリアルの媒質設計技術, シミュレーション技術, 作製技術, 測定評価技術として完成する。また, 進捗に応じて適宜新たなメタマテリアルの開発を行い, 試作・実験によりその動作を検証する。

## (2) デバイス応用化研究

堀井は, 開発した積層型左手系メタマテリアル構造を基に, PCB プリント基板や LTCC 技術を用いて実装可能なマルチバンド設計を検討する。応用上重要となるレイヤー間の結合や, 焼成過程における収縮等の作製精度をふまえて, 小型化や低損失・広帯域化などの最適化媒質構造設計を行うとともに平面積層型メタマテリアル試作環境を構築する。上田は, 提案している誘電体を用いた左手系媒質や磁性材料を用いた非可逆左手系メタマテリアル構造を基に非可逆左手系デバイス設計およびデバイス応用化の検討を行う。得られた成果を, デバイス設計技術, シミュレーション技術, 特性測定評価技術として完成する。

## (3) テラヘルツ波・光波領域への概念の展開

CRLH 媒質構造をスケールダウンすることで, テラヘルツ波・光波領域での実現可能性を数値的および実験的に検討する。1THz 程度までの媒質を試作し, 特性評価を行うことで, テラヘルツ波帯や光波領域に向けた概念の展開の実証を試みる。また, マイクロ波帯のデバイスをテラヘルツ波・光波領域への展開を検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 新規メタマテリアルの理論と構造の開発

CRLH 媒質理論を基に新規の左手系媒質構造を提案した。以下に開発した主要な構造例を示す (図 2)。

#### ①新規メタマテリアル構造の開発

##### ・左手系導波管

低損失化を目指して, 導波管に容量性スタブを周期的に配列することで導波管伝送モードのカットオフ領域に左手系伝搬モードを実現した。

##### ・ダンベル型左手系媒質

自己組織化ナノロッドを想定したダンベル型の金属円筒の周期構造により左手系特性を実現した。

##### ・金属パターンを持つ誘電体柱型左手系媒質

表面に金属パターンを持つ誘電体角柱を周期配列することでスロット線路モードによる左手系媒質を開発した。負屈折率レンズを構成しこれが回折限界を超える解像度を実現した。

##### ・マッシュルーム型左手系媒質

誘電体基板あるいはシリコンウェハ上に集積可能なマッシュルーム型左手系媒質を開発した。

##### ・ディラックコーンメタ表面

2次元 CRLH 媒質により,  $\Gamma$ 点において1次

の分散特性を持つディラックコーンの人工的な構成に初めて成功した。周波数および入射角度に強い選択性を持つ巨大吸収特性および異常透過特性を実証した。

##### ・誘電体共振器による左手系媒質

低損失化を目指したカットオフ導波路中の誘電体球の TE モード共振を用いた左手系媒質を実現した。

・3次元左手系媒質 金属または誘電体を周期的に配列した等方性3次元左手系媒質を実現した。これを用いて3次元を屈折率レンズを構成し回折限界を超える解像動作を確認した。

さらに当初の計画にはなかったが, CRLH 媒質以外にもこれらの構造から派生した新たなメタマテリアルも開発した (図 3)。

##### ・Single negative (SNG) 異方性スラブ

金属スパイラル周期構造異方性スラブにより, 透磁率が負のみ (SNG) による負屈折を実現した。

##### ・3次元負誘電率 (ENG) 媒質

金属球と金属ワイヤによる3次元負誘電率 (ENG) 媒質を実現した。

##### ・透明マント媒質

変換電磁気学に基づき透磁率テンソルの非対角項を完全に制御した透明マント媒質を実現した。

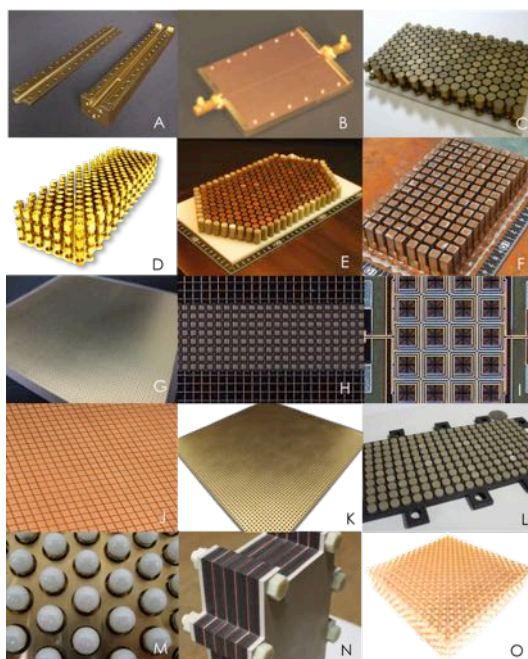


図2 開発した左手系メタマテリアル構造の例。(A/B: 左手系導波管, C/D: ダンベル型左手系媒質, E/F: 金属パターンを持つ誘電体柱型左手系媒質, G/H/I: マッシュルーム型左手系媒質, J/K: ディラックコーンメタ表面, L/M: 誘電体共振器による左手系媒質, N/O: 3次元左手系媒質)



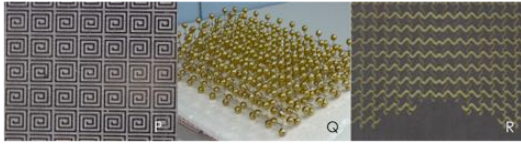


図3 派生したメタマテリアル構造の例。(P: SNG異方性スラブ, Q: 3次元ENG媒質, O: 透明マント)

②メタマテリアルシミュレータの開発

FDTD法に基づき周期構造に対する散乱界解析ソルバおよびFDFD法に基づく周期構造の分散特性ソルバを開発した(図4)。

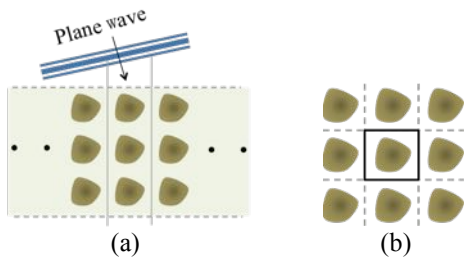


図4 開発したシミュレータ (a) 周期構造の散乱界解析ソルバ (FDTD法) (b) 周期構造の分散特性ソルバ (FDFD法)

③材料定数評価システムの構築

人工材料に対するマイクロ波帯から1.1THzまでの実効複素誘電率および実効複素透磁率の評価システムを構築した(図5)。

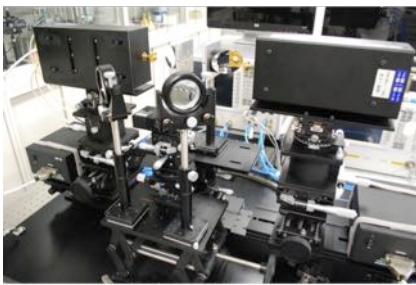


図5 開発した材料定数評価システム (750GHz-1.1THz)

(2) デバイス応用化研究

①積層型CRLH媒質とその応用

低温同時焼成セラミック(LTCC)技術で実装可能な積層型CRLH媒質を開発した。3~18GHzの超広帯域な伝送特性を実現した。これを用いてマイクロ波帯で動作するデバイス応用を開発した(図6)。

- ・超小型フォワード結合器
- ・Wilkinson電力分配器
- ・ノッチ特性つきUWBフィルタ
- ・広帯域インピーダンス整合器



図6 開発した積層型CRLH媒質と応用例。(S: LTCCにより実装したCRLH媒質, T: UWBフィルタ, U: ダイプレクサ)

②非相反メタマテリアルとその応用

磁性体を用いた非相反メタマテリアルを実現した。これを用いて次の様な画期的なデバイスを開発した(図7)。

- ・非相反CRLH線路
- ・非相反移相分散制御CRLH線路
- ・非相反CRLH進行波共振器
- ・ビームスクイント抑制高効率進行波共振器ビーム走査アンテナ

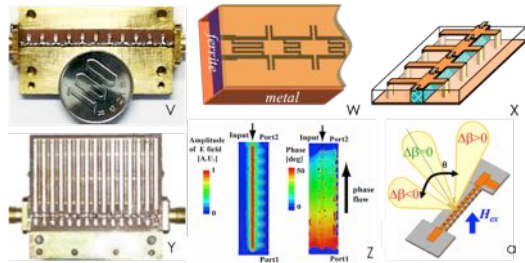


図7 非相反メタマテリアルの開発例。(S: 非相反CRLH線路, W: コプレーナ線路型非相反CRLH線路, X/Y: 非相反移相分散制御CRLH線路, Z: 非相反CRLH進行波共振器, a: ビームスクイント抑制高効率進行波共振器ビーム走査アンテナ)

③その他の応用

その他, CRLH線路を用いたアンテナを開発した(図8)。

- ・左手系導波管ビーム走査アンテナ
- ・電圧制御型偏波回転零次共振アンテナ



図8 その他のマイクロ波応用例 (W: ミリ波帯左手系導波管ビーム走査アンテナ, X: 電圧制御型偏波回転零次共振アンテナ)

④アクティブ媒質への展開

当初の計画以外にも, Negative Impedance Converter (NIC) を用いて等価リアクタンス

がフォスターの定理に従わないノン・フォスター素子を実現した。また微小アンテナの広帯域整合への応用可能性を示した (図 9)。



図9 ノンフォスター素子の開発例. (d: Linvill型NIC素子, e: エミッタフォロア型NIC素子, f: NIC素子を用いた小型アンテナの広帯域整合)

(3) テラヘルツ波・光波領域への概念の展開  
他班をはじめとする他機関との共同で半導体プロセスを用いてCRLH媒質をスケールダウンしたテラヘルツ波における負屈折率媒質, 赤外領域における負透磁率(MNG)媒質を実現するなど, 概念を展開した (図 10)。



図10 試作テラヘルツ・光領域メタマテリアル. (g/h: テラヘルツ帯CRLH媒質, i: 赤外領域負透磁率(MNG)媒質)

## 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 74 件)

- ① 金子卓也, 堀井康史, Linvill 型 Negative Impedance Converter を用いた小型アンテナ用 Non-Foster 整合回路の再現性とインピーダンス特性について, 電子情報通信学会和文論文誌 C, 2015, 査読有 (印刷中).
- ② (解説論文) 真田篤志, メタマテリアルの新展開, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, Vol.33, 夏号, pp.6-11, 2015, 査読有.
- ③ (解説論文) 宇野 亨, メタマテリアル設計解析のための電磁界解析法, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, Vol.33, 夏号, pp.12-19, 2015, 査読有.
- ④ S. Tomita, K. Sawada, A. Porokhnyuk, and T. Ueda, Direct observation of magnetochiral effects through a single metamolecule in microwave regions, Physical Review Letters, 113, 235501, 2014, 10.1103/PhysRevLett.113.235501, 査読有.
- ⑤ A. Porokhnyuk, T. Ueda, Y. Kado, and T. Itoh, "Phase-constant-nonreciprocal CRLH metamaterials based on coplanar waveguides,"

Journal of Applied Physics, 115, 17E519 (2014), 査読有.

- ⑥ (解説記事) 真田篤志, "座標変換とクロッキング," The Journal of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 96, No. 1, pp. 46-51, 2013, 査読有.
- ⑦ (招待論文) Toru Uno, Electromagnetic Modeling of Metamaterials, IEICE Trans. Commun., E96-B, no.10, pp.2340-2347, Oct. 2013, 査読有.
- ⑧ Hiroshi Kubo, Kazuhiro Nishibayashi, Tsunayuki Yamamoto, Atsushi Sanada, New Negative Refractive Index Material Composed of Dielectric Prisms with Metal Patterns, IEICE Transactions on Electronics, E-96C, 1273-1280, 2013, 査読有.
- ⑨ A. Porokhnyuk, T. Ueda, Y. Kado, and T. Itoh, Mode analysis of phase-constant nonreciprocity in ferrite-embedded CRLH metamaterials, IEICE Transactions on Electronics, E96-C, 1263-1272 (2013), 査読有.
- ⑩ Hiroaki Sakamoto, Toru Uno, Takuji Arima and Yujiro Kushiyama, "Classification of Degenerate and Non-degenerate Modes of Photonic Crystals in FDTD Analysis by Group Theory," IEICE Communication Express, 2, no.5, pp.211-216, May 2013, 査読有.

〔学会発表〕 (計 186 件)

- ① (Invited) Atsushi Sanada, Transmission Line Metamaterials for Transformation Electromagnetics, European Microwave Conference (EuMC) 2014, Rome, Italy, 5-10 October 2014.
- ② Yasushi Horii, Takuya Kaneko, Shogo Takagi, Masahiro Akiyama Theoretical study on bandwidth enhancement of negative impedance converters with an emitter follower circuit, Metamaterials 2014, Copenhagen, Denmark, August 25-30, 2014.
- ③ (Invited) Atsushi Sanada and Tsutomu Nagayama, Transmission Line Approach to 2D Full-Tensor Anisotropic Metamaterials for Transformation Electromagnetics, Proceedings of 2014 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Palm Beach, Aruba, 3-8 August 2014.
- ④ Takuya Kaneko, Yasushi Horii, A wideband low-loss negative group delay circuit based on negative impedance converters, 2014 USNC-URSI Radio Science Meeting, Memphis, USA, July 6-11, 2014.
- ⑤ (Invited) Atsushi Sanada, and Shotaro Nagai, Extremely High Absorption by Dirac Cone Mushroom Metasurfaces in Millimeter-Wave Regions, 5th International Conference on Metamaterials Photonic Crystals and Plasmons (META2014), Southwest, Singapore, May 20-23, 2014.
- ⑥ (Invited) T. Ueda, Design of nonreciprocal

metamaterials in the microwave region, META'14, the 5th International Conference, on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Nanyang Technological University, Southwest, Singapore, May 20-23, 2014.

⑦ (Invited) Takuji Arima and Toru Uno, Development of Broadband Negative Permeability Structure in Microwave Region, Asian Workshop on Antennas and Propagation, May 14-16, 2014, Kanazawa Theatre, Kanazawa

⑧ H. Kubo, R. Mashino, A. Sanada, and T. Yamamoto, Left-Handed Material Composed of Dielectric Spheres Put between Metal Cylinders, METAMATERIALS' 2013, Bordeaux, France 19 September 2013.

⑨ (Invited) Tsunayuki Yamamoto, Hiroshi Kubo, Atsushi Sanada, A Novel Theoretical Approach of Fishnet-type Material Composed of Multilayer Metallic Patterns by the Equivalent Circuit, 2013 URSI Commission B International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS2013), Int'l Conf. Center Hiroshima, Hiroshima, May 20-24, 2013

⑩ T. Ueda, T. Itoh, Beam scanning antennas based on pseudo traveling wave resonators, Proceedings of the 2013 URSI Commission B International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS 2013), Int'l Conf. Center Hiroshima, Hiroshima, May 23, 2013.

〔図書〕(計 6 件)

① Yasushi Horii, Computational Electromagnetics — Retrospective and Outlook, Chapter 3, Springer (2015), ISBN: 978-981-287-094-0.

② 現代電子情報通信選書「知識の森」マイクロ波伝送・回路デバイスの基礎, 橋本修監修, 電子情報通信学会編, 真田篤志, 他 19 名, オーム社, 2013 年 2 月, ISBN 978-4-274-21333-5.

③ 堀越智 編著, 萩行正憲・田中拓男・高野恵介・上田哲也 著, 「図解メタマテリアル—常識を超えた次世代材料—」, 第 4 章「マイクロ波メタマテリアル」, pp. 117-177, 日刊工業新聞社 (2013).

④ 石原照也・真田篤志・梶川浩太郎監修, メタマテリアル II, 第 2 章 pp. 16-26, シーエムシー出版 (2012), ISBN 978-4-7813-0354-3.

⑤ 上田哲也, メタマテリアル II, 第 8 章, pp. 77-88, シーエムシー出版 (2012), ISBN 978-4-7813-0354-3.

⑥ T. Ueda and T. Itoh, Passive RF Component Technology: Materials, Techniques, and Applications, Edited by G. Wang and B. Pan, Chapter 9, Composite right/left handed transmission lines and their RF applications, pp. 187-231, 2012.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 3 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: 国外

名称: 3 次元メタマテリアル

発明者: 上田哲也, 佐藤良明

権利者: 国立大学法人京都工芸繊維大学

種類: 特許

番号: PCT/JP2013/055710

出願年月日: 2013 年 3 月 1 日

国内外の別: 国外

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: 国外

○取得状況 (計 1 件)

名称: Three-dimensional left-handed metamaterial

発明者: Atsushi Sanada

権利者: Yamaguchi University

種類: 特許

番号: US 12/526,573

出願年月日: 2008 年 3 月 14 日

取得年月日: 2012 年 2 月 28 日

国内外の別: 国外

〔その他〕

真田研究室ホームページ

<http://www-ap.apsci.yamaguchi-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

真田 篤志 (SANADA, Atsushi)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 20264905

(2) 研究分担者

久保 洋 (KUBO, Hiroshi)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 50205126

堀井 康史 (HORII, Yasushi)

関西大学・総合情報学部・教授

研究者番号: 00268335

上田 哲也 (UEDA, Tetsuya)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・准教授

研究者番号: 90293985

宇野 亨 (UNO, Toru)

東京農工大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 80176718