

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：82108

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：22109001

研究課題名（和文）電磁メタマテリアルの研究推進

研究課題名（英文）Promotion of the electromagnetic metamaterials research

研究代表者

迫田 和彰（Sakoda, Kazuaki）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・先端フォトニクス材料ユニット・ユニット長

研究者番号：90250513

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 27,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本新学術領域の総括班では、各種の研究会の企画やWeb上での情報発信などを通じて、研究グループ間、および、国内外との連携強化に努めた。研究グループ間の連携強化については、全体会合の実施、ホームページ上での情報発信、試料評価技術の標準化、理論小グループ活動などを通じて、それぞれの得意分野に関する相互理解を進め、数多くの共同研究を実現した。国内外との連携強化については、日本学術振興会産学協力研究委員会活動（メタマテリアル第187委員会）、メタマテリアル講演会と日韓メタマテリアルフォーラムの定期的な開催、国際会議における特別セッションの主催などを通じて共同研究を促進した。

研究成果の概要（英文）：The managing group of this Innovative Area endeavored to strengthen the collaboration among its research groups and with domestic and overseas institutions by organizing various meetings and providing research information. Regarding the internal collaboration, we promoted the mutual understandings of the superiority of each group and materialized many collaborative researches by holding regular all-member meetings, providing research information on the web, standardizing specimen's evaluation methods, and organizing the theory subgroup. As for the domestic and overseas collaborations, we promoted them through the University-Industry Research Cooperation program (the 187th Committee on Metamaterials) organized by Japan Society for the Promotion of Science, by regularly holding the Metamaterials Lecture Meetings and Korea-Japan Metamaterials Forums, and by organizing special sessions at many international conferences.

研究分野：光物性物理学

キーワード：メタマテリアル 光波 テラヘルツ波 マイクロ波

1. 研究開始当初の背景

欧米で先行していたメタマテリアル研究は一言でいえば、Pendry や Veselago 流の「負の屈折率」の実現とそれを利用した特異な光学現象の考案に主眼を置いていた。これは、メタマテリアル研究とともに発達した、現代的な「巨視的電磁場理論」に裏付けられていると一般には考えられていたが、その基礎にはなお未解明な部分が残っており、誤りであるとする理論研究もあった。また、正確な数値解析によれば、実証されたと見なされている透明マントなどの新現象において、かなりの強度の散乱波が生じることが分かっており、実用性は乏しい。さらに言えば、任意の屈折率分布を仮定した数値解析を行って、新しい光学現象を予言したとする理論研究が洪水のように報告されていたが、荒唐無稽でもあり、我々はこのような研究とは一線を画す必要があった。

これに対して、例えばマイクロ波領域の研究について言えば、メタマテリアルの特徴である「左手系電磁波」は、メタマテリアルの登場以前に「後進波」の名称ですでに知られていた。特に、真田らを中心とする我が国の研究者によって CRLH 伝送線路理論が構築され、「負の屈折」に相当するような新現象がいち早く実証されたことは特筆に値する。気体プラズマを利用した動的メタマテリアルの研究も世界に例がない。光領域では低損失なメタマテリアルの設計法と 2 光子還元法の開発、テラヘルツ領域では高度なテラヘルツ技術の開発と金属微細構造体への応用などの実績があった。

そこで、本新学術領域研究では、負の屈折率の実現と応用には一定の注意を払うものの、それぞれが得意とする要素技術に立脚した、信頼性の高い試料作製と明快な理論的基礎に裏付けられた新現象の実証を通して、将来の実用化につながる研究成果の達成を主眼とした。

2. 研究の目的

このように、マイクロ波、テラヘルツ波、光波の各分野において、日本国内でも独創的な研究が進展しつつある状況であったが、分野毎に実験手法や解析手法が異なり、研究成果を発表する学会や学術誌も異なることから、分野間での研究情報の共有や共同研究の体制はいたって貧弱な状況であった。これを改善することによって、研究の格段の加速や新しい概念の創出、魅力的な研究テーマの発掘等が大いに期待された。

そこで、本新学術領域の総括班では、各種の研究会の企画や Web 上での情報発信などを通じて、研究グループ間の連携強化、および、国内外との連携強化に資する領域運営を目的とした。

3. 研究の方法

研究グループ間の連携強化については、領

域全体会合の開催、特性評価技術の標準化、および、理論小グループ活動を実施した。国内外との連携強化については、日本学術振興会産学協力研究委員会活動、メタマテリアル講演会と日韓メタマテリアルフォーラムの開催、国際会議におけるシンポジウム開催、および、具体的な共同研究の推進を行った。これら会合の多くでポスターセッションを開催し、ポスドクや大学院生などの研究発表の場を設けて、若手研究者の育成にも努めた。

また、ニュースレターの発行（ウェブ上）や領域のホームページによる広報活動を通じて、研究成果の社会への発信や領域内部での情報共有にも努めた。ホームページや会議の運営については事務員を雇用することはせず、必要な時期だけにアウトソーシングすることで経済的に実施した。会議の開催場所についても多くの場合、大学の施設を利用するなどして経費の節減に努めた。

4. 研究成果

(1) 研究グループ間の連携強化

まず、新学術領域の全グループが参加する全体会合を 2~3 回/年の頻度で開催して、各グループの研究成果や進捗状況の報告を行い、相互の情報共有に努めた。また、領域ホームページでの「自己紹介」や「研究紹介」を通じて情報共有を促進した。さらに、「評価技術の標準化」を目標として、すでに評価技術を確立しているグループに試料を送って特性を評価してもらい、自身の評価結果と照合することで評価技術の向上に努めた。また、各グループに所属している理論研究者を集めて理論小グループを組織し、この新学術領域研究を通して格段に進んだ光ディラックコーンやトポロジカル光波状態の理論に関する研究会を開催した。

このような活動を通して相互の得意分野に関する理解が進み、数多くの共同研究が実現した。

(2) 国内外との連携強化

以下のような施策を実施した。

日本学術振興会産学協力研究委員会活動（メタマテリアル第 187 委員会、委員長：石原照也、計画研究工班代表）：メタマテリアルの設計、機能、評価、作製、および、応用を目的として、平成 24 年 10 月から 5 年間（第 1 期）の活動を継続している。委員の内訳は学界 13 名、産業界 17 名、総数 30 名で、学界委員の大半が本新学術領域のメンバーである。この委員会を通して、企業との連携やメタマテリアルの応用分野の情報収集などを図ってきた。

メタマテリアル講演会の開催：研究成果の社会への発信と普及、および、企業連携の促進などを目的として、学振 187 委員会と共催してこれまでに 6 回実施した（実質的には石原委員長を中心に本新学術研究のメンバーで実施）。

第 1 回 2011 年 3 月 11 日、東京大学本郷

- キャンパス工学部二号館
 第2回 2012年3月9日、東京大学本郷
 キャンパス工学部二号館
 第3回 2013年2月21日、東京大学本郷
 キャンパス工学部二号館
 第4回 2014年3月7日、東京大学本郷
 キャンパス伊藤国際ホール
 第5回 2015年3月6日、東京大学駒場
 キャンパス コンベンションホール
 第6回 2016年3月4日、東京大学本郷
 キャンパス伊藤謝恩ホール

講演内容は、新学術領域メンバーによるチュートリアル講演と招待講演者(国内、および、海外)による研究成果の平易な解説を主体とした。チュートリアル講演中心であったことから、参加者はこの分野の専門研究者よりも、一般の企業関係者、大学関係者、学生などが主体であった。参加者数については、各回とも会場定員(約300名)に達する事前登録があり、たいへん活況であった。

招待講演者のうち、海外の研究者を記すと

- 伊藤龍男 (UCLA)
- D. R. Smith (Duke 大学)
- A. Grbic (Michigan 大学)
- V. M. Shalaev (Purdue 大学)
- C. Caloz (École Polytechnique de Montréal)
- Samhyeon Lee (Yonsei University)
- N. Engheta (Pennsylvania 大学)
- N. Zheludev (Southampton 大学)
- G Eleftheriades (Toronto 大学)

であり、この分野の第一級の研究者ばかりである。このような機会を利用して、海外の最新の研究動向について情報を得るとともに、個人的な面識を得て新しい共同研究などを模索した。

日韓メタマテリアルフォーラムの開催：韓国においてもメタマテリアルへの関心が高まり、上記の S. Lee 教授(延世大学)をはじめ、第一級の研究者がこの分野の研究で成果を上げている。そこで、韓国側は梨花女子大学の J. W. Wu 教授、日本側は領域代表者の萩行教授が発起人となって、2011年から日韓メタマテリアルフォーラムを毎年開催して、研究成果の紹介や情報交換の機会とした。

- 第1回 2011年7月7日 - 9日、梨花女子大学(ソウル)
 第2回 2012年6月28日 - 30日、つくば国際会議場(つくば)
 第3回 2013年6月26日 - 28日、梨花女子大学(ソウル)
 第4回 2014年12月22日 - 24日、大阪大学(豊中)
 第5回 2015年6月29日 - 7月1日、ソウル大学(ソウル)(開催予定)

日韓メタマテリアルフォーラムでは若手研究者(大学院生を含む)の育成にも注力し、ポスター発表のための出張旅費を総括班予

算から支出するなどして、研究発表を奨励した。

シンポジウム・特別セッションの開催：国内外の学会開催に合わせるなどして、メタマテリアルに関するシンポジウムや特別セッションを企画し、実施した。代表的なものを3つだけ記す。

- ワークショップ「メタマテリアルアンテナ」, Microwave Workshop and Exhibition 2014, パシフィコ横浜(横浜市)、2014年12月12日
- オーガナイズドセッション「電磁メタマテリアルのアンテナ・マイクロ波応用」, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会/マイクロ波研究会、東京工業大学、2014年9月18-19日
- 特別セッション「Photonic Dirac Cone and Topological Photonic States」, META 2014、南洋理工大学(シンガポール)、2014年5月23日

具体的な共同研究の実施：従来からの連携に加えて、上記の会合などを端緒として、新学術領域メンバー以外との共同研究による効率的な研究実施にも心がけた。共同研究の具体例を3つ記す。

- ナノホールアレイ構造によるビーム走査：研究計画カ班 和歌山大学 豊田中研
- プラズモニックナノロッドアレイによるメタ表面：研究計画カ班 ノースウェスタン大学
- CRLH 理論の展開と応用：計画研究ア班 - モントリオール工科大学 UCLA

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計11件)

真田篤志, “右手/左手系複合マイクロ波メタマテリアル”, レーザー研究, 査読有, 44巻, 2016年, 32-37

迫田和彰, “光ディラックコーンの原理と応用”, レーザー研究, 査読有, 44巻, 2016年, 21-26

田中拓男, “3次元機能光メタマテリアルとその加工法”, レーザー研究, 査読有, 44巻, 2016年, 15-20

石原照也, “序論：メタマテリアルが実現する不思議な世界”, レーザー研究, 査読有, 44巻, 2016年, 5-9

迫田和彰, “屈折率って何? - 現代の巨視的電磁場問題 - ”, Keyword: メタマテリアル”, 日本物理学会誌, 査読有, 70巻, 2015年, 812-813

萩行正憲, “テラヘルツ領域のメタマテリアル”, 化学と工業, 査読有, 65巻, 2013年, 442 - 444

萩行正憲, “電磁メタマテリアル”, 未来材料, 査読無, 1月号, 2013年, 58 - 64

萩行正憲, “テラヘルツ波応用を加速するためのメタマテリアルを応用した研究開発テーマの発掘”, 研究開発リーダー, 査読無,

10 卷, 2013 年, 23 - 26

M. Kitano, “Coupled-resonator-based metamaterials”, IEICE Electron. Express, 査読有, 9 巻, 2012 年, 51-64

萩行正憲, “テラヘルツ波メタマテリアル”, マテリアルインテグレーション, 査読無, 24 巻, 2011 年, 13-20

萩行正憲, “テラヘルツ波メタマテリアル”, OPTRONICS, 査読無, 12 月号, 2011 年, 63-67

〔学会発表〕(計 18 件)

T. Tanaka, “Manipulating light with metasurfaces”, 第 5 回日韓メタマテリアルフォーラム(招待講演), 2015 年 6 月 29 日 ~ 7 月 1 日, ソウル大学(韓国・ソウル)

K. Sakoda, “Dirac cones in photonic crystal slabs”, 第 5 回日韓メタマテリアルフォーラム(招待講演), 2015 年 6 月 29 日 ~ 7 月 1 日, ソウル大学(韓国・ソウル)

K. Sakoda, “Artificial Dirac cones and effective mass engineering”, 第 4 回日韓メタマテリアルフォーラム(招待講演), 2014 年 12 月 22 日 ~ 24 日, 大阪大学(豊中)

T. Ishihara and M. Akbari, “Linear and nonlinear optical properties of nanoporous gold”, 第 4 回日韓メタマテリアルフォーラム(招待講演), 2014 年 12 月 22 日 ~ 24 日, 大阪大学(豊中)

K. Sakoda, “Method for detecting photonic Dirac cones in optical frequencies”, Meta 2014(招待講演), 2014 年 5 月 13 日, シンガポール

K. Sakoda, “Mode-symmetry requirement for creating photonic Dirac cones in the Brillouin-zone center”, PIERS 2013(招待講演), 2013 年 8 月 17 日, スtockホルム(スウェーデン)

T. Ishihara and M. Akbari, “Optical rectification in nano-porous gold”, 第 3 回日韓メタマテリアルフォーラム(招待講演), 2013 年 6 月 26 日 ~ 28 日, 梨花女子大学(韓国・ソウル)

A. Sanada and T. Nagayama, “Transmission line approach for invisibility cloak designs”, 第 3 回日韓メタマテリアルフォーラム(招待講演), 2013 年 6 月 26 日 ~ 28 日, 梨花女子大学(韓国・ソウル)

T. Nakanishi, T. Ohtani, Y. Tamanaya, and M. Kitano, “Coherent trap of electromagnetic waves in a metamaterial”, 第 3 回日韓メタマテリアルフォーラム(招待講演), 2013 年 6 月 26 日 ~ 28 日, 梨花女子大学(韓国・ソウル)

M. Hangyo, D. Li, Y. Tokuda, and K. Takano, “Versatile properties of 1D metal gratings and cut-through metal slit arrays”, 第 3 回日韓メタマテリアルフォーラム(招待講演), 2013 年 6 月 26 日 ~ 28 日, 梨花女子大学(韓国・ソウル)

T. Nakanishi, Y. Tamayama, and M. Kitano, “Enhancement of second harmonic generation in coupled-resonator-based metamaterials”, 第 2 回日韓メタマテリアルフォーラム(招待講演), 2012 年 6 月 28 日 ~ 30 日, つくば市

W. Kubo and T. Tanaka, “Plasmonic nanostructures fabricated by nanocoating lithography”, 第 2 回日韓メタマテリアルフォーラム(招待講演), 2012 年 6 月 28 日 ~ 30 日, つくば市

K. Takano, H. Suo, T. Nishida, F. Miyamaru, H. Sasaki, S. Ohno, T. Ishihara, and M. Hangyo, “Terahertz radiation from meta-atom-loaded photoconductive antennas”, 第 2 回日韓メタマテリアルフォーラム(招待講演), 2012 年 6 月 28 日 ~ 30 日, つくば市

T. Tanaka, “Self-organized assembling techniques for optical metamaterials”, 第 2 回日韓メタマテリアルフォーラム(招待講演), 2012 年 6 月 28 日 ~ 30 日, つくば市

T. Tanaka, “Three-dimensional plasmonic metamaterials”, Int. Symp. on Advanced Nanodevices and Nanotech. (招待講演), 2011 年 12 月 04 日 ~ 2011 年 12 月 09 日, Hawaii, USA

A. Sanada, “Composite right/left-handed waveguide and its application to V-band beam steering leaky-wave antennas”, 2011 Int. Symp. on Antennas and Propagation (招待講演), 2011 年 10 月 25 日 ~ 2011 年 10 月 28 日, Jeju, Korea

M. Hangyo, “Fabrication and characterization of THz metamaterials”, 36th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and THz Waves (招待講演), 2011 年 10 月 02 日 ~ 2011 年 10 月 07 日, Houston, USA

M. Hangyo, “Terahertz technology and metamaterials”, Photonica 2011(招待講演), 2011 年 08 月 29 日 ~ 2011 年 09 月 02 日, Belgrade, Serbia

〔図書〕(計 4 件)

萩行正憲, 石原照也, 真田篤志 監訳, メタマテリアルハンドブック 応用編, 講談社, 2015 年, 776 ページ

萩行正憲, 石原照也, 真田篤志 監訳, メタマテリアルハンドブック 基礎編, 講談社, 2015 年, 1007 ページ

堀越智, 萩行正憲, 田中拓男, 高野恵介, 上田哲也, 図解 メタマテリアル, 日刊工業新聞, 2013 年, 176 ページ

高野恵介, 宮丸文章, 萩行正憲, メタマテリアル II, シーエムシー出版, 2012 年, 15 ページ

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.metamate.net/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平成 26 年 10 月まで
萩行 正憲 (HANGYO, Masanori)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授
研究者番号：10144429

平成 26 年 10 月以降
迫田 和彰 (SAKODA, Kazuaki)
物質・材料研究機構・先端フォトニクス材料ユニット・ユニット長
研究者番号：90250513

(2) 研究分担者

真田 篤志 (SANADA, Atsushi)
山口大学・理工学研究科・教授
研究者番号：20264905

田中 拓男 (TANAKA, Takuo)
理化学研究所・主任研究員研究室等・准主任研究員
研究者番号：40283733

石原 照也 (ISHIHARA, Teruya)
東北大学・理学研究科・教授
研究者番号：60168250

北野 正雄 (KITANO, Masao)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号：70115830