

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287065

研究課題名(和文) 磁気カイラルメタ物質を用いた光に対する人工的ゲージ場の創成

研究課題名(英文) Creation of synthetic gauge fields for light using magnetochiral metamaterials

研究代表者

富田 知志 (Tomita, Satoshi)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教

研究者番号：90360594

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：磁性とカイラリティが共存した天然物質を超える人工構造物質(磁気カイラルメタ物質)を作製した。そしてマイクロ波測定による実験と光のベリー位相理論の両面から、光にとっての「磁場」など人工的ゲージ場の実現に迫った。単一メタ分子での増強及び巨大磁気カイラル効果を発見した。磁気カイラルメタ物質のマイクロ波透過パターンを測定した。カイラルメタ物質では円偏光の軌道分裂が観測され、シュテルン・ゲルラッハ実験の光版と解釈できた。高周波化を目指し、応力誘起自己巻き上げ法を用いてミクロンサイズの磁気カイラルメタ分子を作製し、磁化と強磁性共鳴を調べた。分光磁気光学エリプソメリーのマイクロ波帯への応用を試みた。

研究成果の概要(英文)：We studied electromagnetism in structured metamaterials with simultaneous time-reversal and space-inversion symmetry breaking by magnetism and chirality. Experimental direct observation of optical magnetochiral effects by a single metamolecule with magnetism and chirality was demonstrated at microwave frequencies. Numerical simulations reproduced well the experimental results and predicted the emergence of giant magnetochiral effects by combining resonances in the metamolecule. Microwave transmission patterns through magnetochiral and chiral metamaterials were measured. Toward a higher frequency, the metamolecule was miniaturized in the presence of ferromagnetic resonance in a cavity and coplanar waveguide. Application of generalized magneto-optical ellipsometry for microwaves was studied. This work paves the way to the realization of synthetic gauge fields for electromagnetic waves, and to development of meta-condensed-matter physics using metamaterials.

研究分野：メタ物質科学、光物性、固体物理学

キーワード：メタマテリアル 磁気光学効果 光学活性 磁気カイラル効果 人工的ゲージ場 非相反性 マイクロ波工学 ベリー位相

1. 研究開始当初の背景

(1) 電子は電荷を持つので、磁場によってその軌道は曲げられる。これはローレンツ力として良く知られている。一方、光子は電荷を持たないので、磁場による影響を受けない。しかし本研究では、従来は不可能とされてきた光に対するローレンツ力を実現することを目指した。言葉を替えると、光に対する「磁場のようなもの」を人工的に創り出すことが目的であった。その為には、光にとっての場である物質の中での電子の動きを制御してやれば良い。具体的には、本研究の研究分担者である澤田らによる一連の理論研究によれば、物質中で空間反転対称性と時間反転対称性を同時に破って、屈折率が光の進行方向に依存する磁気カイラル効果を起こせば良いことが分かっていた<引用文献>。ただし天然の物質では効果が小さく観測困難であるため、我々はメタ物質と呼ばれる人工構造物質を用いることを試みた。そして電子の動きを自在に制御し、巨大な磁気カイラル効果を実現し、マイクロ波に対する人工的なゲージ場を創成することを目指した。

(2) 波長よりも十分小さな構成要素からなる人工構造物質であるメタ物質は、それまでマイクロ波領域での負の屈折率や隠れ蓑などで良く知られていた。富田は、分担者として参加した JST-CREST で、ウイルスと金ナノ粒子複合体の光学活性を研究し、メタ物質におけるカイラル構造の可能性に魅せられた。更に計画研究の分担者として参加していた科研費・新学術研究「電磁メタマテリアル」で、無磁場下のカイラルメタ界面での光の非相対的な振る舞いを発見した。そして光学理論が専門の澤田との議論を通じて光学活性と磁気光学効果に関する考察を深め、共著の論文を執筆した。

(3) これと並行して富田と澤田の両者は、マイクロ波工学が専門の上田とも議論を進めていた。そしてマイクロ波の領域ならばカイラル構造や磁性体を自在に操り、光学活性や磁気光学効果など様々な光学現象を組み合わせることで増幅できることを学んだ。そこで富田、澤田、上田の三者は、理論的に予言されていた光に対する人工的ゲージ場の研究にターゲットを絞り議論を進めた。そして対称性の破れたメタ物質を用いて、光物性とマイクロ波工学の異分野融合研究を進めることで、新しい概念と新しい物理を生み出そうと試みた。このような研究は、国内はもとより海外でも未だ報告されていなかった。米国のグループがメタ物質での動的変調を用いた実効的磁場の実現の可能性を指摘していたが<引用文献>、これは我々の目指す静的な人工的ゲージ場とは似て非なるものであった。

(4) 対称性の破れは物理学の様々な分野で

本質的に重要である。物性物理では、空間反転対称性と時間反転対称性が同時に破れた物質として、マルチフェロイックス材料が知られている。マルチフェロイックス材料での磁気カイラル効果を用いれば、光に対する実効的なローレンツ力が実現できると考えられるが、そのような実験報告は無かった。よって本研究ではマイクロ波領域でのメタ物質を用いることで、構造の自由度を上げ、光と物質の相互作用を大きくすることで、光に対するローレンツ力を観測することを試みた。このような点から本研究は、マルチフェロイックス材料などを人工構造で模倣する新たな試みであると言えた。そしてその解釈と展開には、電子とのアナロジーを用いた光のベリー位相理論など光のゲージ理論による考察が不可欠であった。すなわち本研究は、磁性とカイラリティが共存するメタ物質での分光実験とゲージ理論を用いた考察とを緊密に連携させ、そこに潜む物理を明らかにし、新しいメタ物質科学を展開するという学術的特色を有していた。

(5) 本研究では光物性とマイクロ波工学という異分野間の境界領域に着目した。すなわち本研究のアイデアは、光物性や物性理論に端を発していた。そしてそのアイデアを実装し、具現化するために、マイクロ波工学の成熟した知識や技術を駆使した。つまり従来は相容れないと思われてきた異分野間を橋渡しすることで、これまで知られていても実現が困難であった現象を実現することを目指し、更にそれを足掛かりにして、これまで知られていなかった現象を見出し、新しい研究分野を開拓することを目指した。このような研究は、負の屈折率や隠れ蓑などを実現してきたメタ物質の研究では常道のように思われるが、実際は容易では無かった。何故ならば異分野間では専門用語のみならず研究に対する目的や姿勢、すなわち研究文化が大きく異なるためであった。よってこのような研究を行うためには、本研究の研究体制のように数年に渡り丁寧に議論を重ね、お互いの分野の特色を理解した研究者による実効的な研究グループが不可欠であった。

(6) 本研究でマイクロ波に対する人工的磁場を実現できた暁には、光の行路、すなわち光子の振る舞いを制御する新しい手段を我々は手にする。このような成果は光学など応用の観点からも大変興味深い。そのみならず本研究の根本には、例えばゲージ場など抽象的な概念を、目で見て、手で触れる大きさのモノで実現するという面白さが存在している。よって人工構造を用いて、天然の固体では観測困難な物理現象を増強し観測することは、基礎物理的な点からも意義深い。その結果、固体物理を越えた「メタ固体物理学」への扉が開かれる。

2. 研究の目的

本研究は、磁気カイラルメタ物質を用いて、光に対する人工的ゲージ場を創成することを目的とした。磁気カイラルメタ物質は、カイラル構造と磁性体を組み合わせた人工構造物質である。カイラル構造で空間反転対称性を破ると同時に、磁性体を用いて時間反転対称性を破ることで、屈折率が光の進行方向に依存する磁気カイラル効果を得る。その結果、マイクロ波に対するローレンツ力を実現する。つまりマイクロ波に対する「磁場のようなもの」を人工的に創成する。そして人工構造物質によって光を自在に操る新たな手法を探索する。さらに人工構造を用いて天然の物質を模倣するメタ固体物理学への扉を開く。

3. 研究の方法

(1) フェライトロッドと銅カイラル構造を組み合わせたフェリカイラルメタ分子を、研究代表者(富田)が奈良先端大で作製した。マイクロ波工学が専門の研究分担者(上田)が所属する京都工繊大で、メタ分子を WR90 導波路に挿入して電磁石で外部直流磁場を加え、ベクトルネットワークアナライザを用いて単一メタ分子のマイクロ波分光を行った。

(2) フェリカイラルメタ分子を用いて、奈良先端大で磁気カイラルメタ物質を構築した。具体的には均質な磁気カイラルメタ分子を、銅ワイヤと木ネジを用いて大量に作製し、発泡スチロール板に並べて埋め込んだ。マイクロ波に対する実効的な磁場によるローレンツ力を実現するためには、メタ物質の中で不均一性が不可欠であった。これには発泡スチロール板の間のスペーサーの厚さを変化させ、不均一磁気カイラルメタ物質を実現した。自由空間でのマイクロ波の透過角度の測定を行い、光ローレンツ力を探索した。ホーンアンテナでマイクロ波を照射し、マイクロ波が透過する角度を別のホーンアンテナで検出した。測定システムの構築と測定は、富田と上田が協力して京都工繊大で行った。

(3) 光ローレンツ力実験の対照実験として、カイラルメタ原子のみを発泡スチロールに埋め込んだカイラルメタ物質を作製し、スペーサーの間隔を変えながら積層することで、不均一カイラルメタ物質を作製し、自由空間でのそのマイクロ波透過パターンを調べた。

(4) 磁気カイラル効果の高周波化を目指し、研究協力者の大学院生(児玉)と共に、自己巻き上げ法を用いて強磁性金属によるマイクロサイズのカイラル構造(マイクロフェロカイラルメタ分子)を作製した。そして複数個、もしくは単一のマイクロフェロカイラルメタ分子の磁化測定、共振器強磁性共鳴測定、伝送線路強磁性共鳴測定などを通じて、メタ

分子の磁性を調べた。そして伝送線路に載せた単一のメタ分子からの磁気カイラル効果調べた。

(5) 実験結果を理論的に考察した。特に研究分担者(澤田)を中心に議論を進め、光のベリー位相理論を用いて光に対する人工的な磁場やベクトルポテンシャルに関する理解を深めた。そして「ベリー位相光学」として新しい学問分野を構築することを試みた。ベリー位相光学を深化させ、従来の固体物理学では困難であった課題に取り組んだ。様々な系とのアナロジーを駆使し、「メタ固体物理学」を展開することを試みた。特にカイラルメタ物質でのエッジモードについて実験と理論の両面から調べた。

(6) 磁気カイラル効果の起源を実験的に調べるためには、磁性体の磁気光学効果を表す磁気光学パラメータの周波数依存性を見積りが欠かせないことが、研究の過程で明らかになった。これには分光磁気光学エリプソメトリーが最も強力な方法であった。しかしながら我々は分光磁気光学エリプソメトリーの測定・解析手法を持ち合わせていなかった。そこで研究代表者は、スペインの nanoGUNE (ナノ研究センター)を訪問して共同研究を行い、分光磁気光学エリプソメトリーの手法を学んだ。そしてマイクロ波領域に適用することを試みた。

4. 研究成果

(1) 単一フェリカイラルメタ分子(図1)の導波管中でのマイクロ波分光を、試料構造や磁場、試料回転角などを細かく変化させた詳細な測定を行った。更に数値シミュレーションも行った。その結果、低磁場ではカイラル構造の共鳴周波数(10GHz 近辺)で磁気カイラル効果が観測された。表裏での屈折率差は、室温での 200mT の外部磁場下で 10^{-2} 程度であった。これは可視光域で天然物質を用いた場合と比較して、数桁大きい効果であった。[雑誌論文]

更に強磁場下では、カイラル構造の共鳴とフェライトの磁気共鳴が重なることで、更に一桁大きな増強磁気カイラル効果が観測できた(図2)。また数値計算の結果もこれを良く再現した。特筆すべきこととして、数値計算では、導波管内での特異なカイラル共鳴の

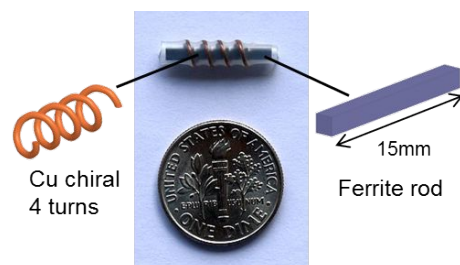


図1 フェリカイラルメタ分子

モードを用いることで、もう一桁大きな巨大磁気カイラル効果が発現することが予見された。このような成果は、非相反マジックミラーへの応用のみならず、メタ物質を用いた人工的ゲージ場の創成の観点からも重要な指針となった。[雑誌論文]

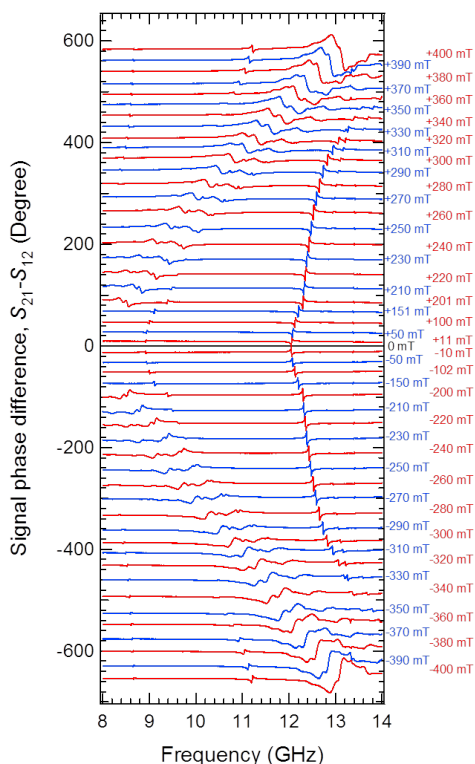


図2 導波管中の単一フェリカイラルメタ分子の室温、高磁場下での増強磁気カイラル効果の測定結果

(2) フェリカイラルメタ物質を用いて、不均一磁気カイラルメタ物質を構築し、光ローレンツカの実験を行った。磁化した不均一フェリカイラルメタ物質にマイクロ波を表から照射した場合と、裏から照射した場合のマイクロ波の透過パターンの差分を調べた。表裏、もしくは磁化の方向でパターンに差が出れば、光ローレンツカが発現していることを意味している。現在測定結果の解析中である。

(3) 光ローレンツカの対照実験として、空間反転対称性だけを破ったカイラルメタ原子のみで構築された、不均一カイラルメタ物質を作製し、自由空間でのマイクロ波透過パターンを調べた。その結果、左巻カイラルメタ物質と右巻カイラルメタ物質で、円偏光の透過パターンに差が現れた(図3)。この現象は、量子力学黎明期に電子スピンの存在を実験的に明らかにしたシュテルン・ゲルラッハ実験の光版と考えられる。つまり不均一なカイラルメタ物質が、マイクロ波にとって不均一磁場に対応する。この成果はメタ物質を

用いた新しい人工的ゲージ場の創成として大変興味深い。[論文投稿中]

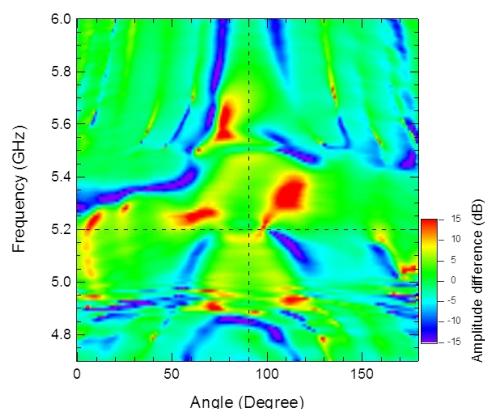


図3 不均一左/右カイラルメタ物質で測定したマイクロ波透過パターンの円偏光差分マップ

(4) 高周波化に向けた単一のマイクロフェロカイラルメタ分子の磁化測定、共振器強磁性共鳴測定、伝送線路強磁性共鳴測定などを行った(図4)。メタ分子での磁化の向き、及び有効磁化やダンピング定数など磁気特性を明らかにした[雑誌論文]。マイクロスケールのカイラル構造でも、磁化は磁場方向を向くことが明らかになり、磁気カイラル効果の発現が期待された。そして伝送線路に載せた単一メタ分子からの磁気カイラル効果を、数十GHzのミリ波帯で調べた。しかし今回の測定では磁気カイラル効果が観測されなかった。よって試料の微細化、測定系の高感度化を行う必要がある。ただしメタ分子の位置による非相反性、及び外部磁場に依存しない新たな磁気共鳴信号などが観測された。[論文投稿中]

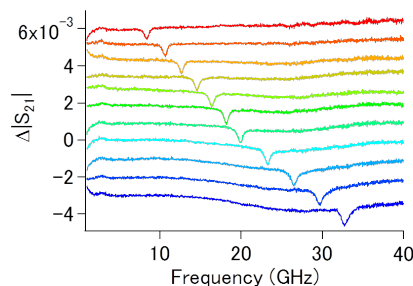


図4 単一マイクロフェロカイラルメタ分子で測定した伝送線路強磁性共鳴

(5) 以上の実験結果を理論的に検討し、光のベリー位相理論に対する理解を深めた。またメタ物質での非線形効果も詳細に検討した。これは歪プラズモニック結晶での光起電力のベリー曲率を用いた解釈や、プラズモニ

ックカイラルメタ表面での非線形効果によるテラヘルツ波発生などのアイデアにも反映された。[雑誌論文、]

また理論検討の結果、興味深いと言われた二次元カイラルメタ物質でのエッジガイドモードの実験及び計算を開始した。近接場磁場の空間分布をマッピングする予備実験では、カイラルメタ物質のエッジに磁場が局在することが明らかになった。[論文準備中]

(6) 可視光から近赤外域での分光磁気光学エリプソメトリーの測定原理、解析手法を学ぶため、モデル試料としてパーマロイ・銀・ピスマスの三層膜を測定した。その結果、パーマロイ対照試料に比べて、三層膜では特に近赤外域で磁気光学効果の増強が観測された(図5)。この増強は銀・ピスマス界面でのラシュバ効果が起源と考えられる。現在この手法のマイクロ波領域への応用を検討している。[雑誌論文]

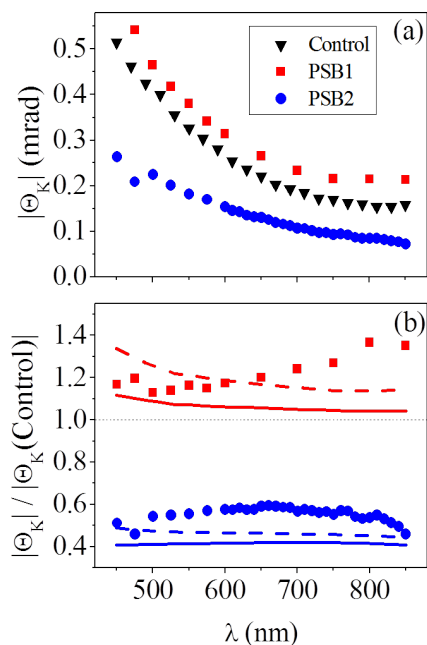


図5 パーマロイ・銀・ピスマス三層膜での増強磁気光学効果

< 引用文献 >

Sawada and Nagaosa, Physical Review Letters 95, 237402 (2005)

Fang et al., Nature Photonics 6, 782 (2012)

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7件)

Patricia Riego, Satoshi Tomita*, Kaoru Murakami, Toshiyuki Kodama,

Nobuyoshi Hosoi, Hisao Yanagi, Andreas Berger, "Enhanced magneto-optical Kerr effects in Py/Ag/Bi trilayers", **Journal of Physics D: Applied Physics**, Vol. 50, 19LT01, April 2017.

DOI: 10.1088/1361-6463/aa69f9

<http://hdl.handle.net/10061/11396>

Satoshi Tomita*, Hiroyuki Kurosawa, Kei Sawada, Tetsuya Ueda, "Enhanced magnetochiral effects at microwave frequencies by a single metamolecule", **Physical Review B**, Vol. 95, 085402, February 2017.

DOI: 10.1103/PhysRevB.95.085402

<http://hdl.handle.net/10061/11387>

Toshiyuki Kodama, Satoshi Tomita*, Takeshi Kato, Daiki Oshima, Satoshi Iwata, Satoshi Okamoto, Nobuaki Kikuchi, Osamu Kitakami, Nobuyoshi Hosoi, Hisao Yanagi, "Ferromagnetic Resonance of a Single Magnetochiral Metamolecule of Permalloy", **Physical Review Applied**, Vol. 6, 024016, August 2016.

DOI: 10.1103/PhysRevApplied.6.024016

<http://hdl.handle.net/10061/11109>

Hiroyuki Kurosawa, Kei Sawada, and Seigo Ohno, "Photon Drag Effect due to Berry Curvature", **Physical Review Letters**, Vol. 117, 083901, August 2016

DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.083901

Takahiro Matsui, Satoshi Tomita*, Motoki Asai, Yuzuru Tadokoro, Keisuke Takano, Makoto Nakajima, Masanori Hangyo, Hisao Yanagi, "Terahertz wave emission from plasmonic chiral metasurfaces", **Applied Physics A**, Vol. 122, Issue 3, Article 157, March 2016.

DOI: 10.1007/s00339-016-9657-y

<http://hdl.handle.net/10061/11111>

Toshiyuki Kodama, Satoshi Tomita*, Nobuyoshi Hosoi, Hisao Yanagi, "Fabrication and ferromagnetic resonance of cobalt chiral meta-molecule arrays", **Applied Physics A**, Vol. 122, Issue 1, Article 41, January 2016.

DOI: 10.1007/s00339-015-9564-7

<http://hdl.handle.net/10061/11110>

Satoshi Tomita*, Kei Sawada, Andrey Porokhnyuk, Tetsuya Ueda, "Direct Observation of Magnetochiral Effects through a Single Metamolecule in Microwave Regions", **Physical Review Letters**, Vol. 113, 235501, December 2014.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.235501

<http://hdl.handle.net/10061/9833>

[学会発表](計11件)

[招待講演] 児玉俊之、富田知志、細系信好、柳久雄、"磁気カイラルメタ分子の電磁気特性"(CK-2-6)、**2017年電子情報通信学会総合大会**、2017年3月22日、名城大学(愛知県名古屋市)

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"(17aC22-11)、**日本物理学会 第72回年次大会**、2017年3月17日、大阪大学・豊中キャンパス(大阪府豊中市)

[招待講演] Satoshi Tomita, "Metamaterials with broken symmetries", **International Symposium on Photonics and Electronics Science and Engineering**, 10 March 2017, Kyoto University, Kyoto, Japan

[招待講演] 富田知志、"時空の対称性が破れたメタマテリアルの電磁気応答"、**応用物理学会 量子エレクトロニクス研究会「光-物質相互制御~制御技術の進展と新しい物理の探求~」**、2016年12月10日、上智大学・軽井沢セミナーハウス(長野県北佐久郡)

Satoshi Tomita, Kei Sawada, Andrey Porokhnyuk, Tetsuya Ueda, "Magneto-chiral Effects at Microwave Frequencies by a Single Metamolecule", **9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials 2015)**, 7 September 2015, Oxford, United Kingdom

[招待講演] Satoshi Tomita, "Magneto-chiral Meta-materials at Microwave Frequencies", **2015 Vietnam Japan Microwave (VJMW2015)**, 11 August 2015, University of Science, VNU-HCM, Ho Chi Minh, Vietnam

[招待講演] 富田知志、"メタマテリアルで光を操る"(S29-1)、**平成27年電気学会全国大会 シンポジウム「光操作の限界を打ち破るメタマテリアル・プラズモニクスの微細加工、デバイス応用」**、2015年3月25日、東京都市大学・世田谷キャンパス(東京)

[招待講演] Kei Sawada, "Geometrical aspects of optical waves in phase space", **The 5th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals, and Plasmonics (META14)**, 23 May 2014, Singapore

[招待講演] Satoshi Tomita,

"Meta-molecules with chirality and magnetism", **2014 Thailand-Japan Microwave (TJMW2014)**, 28 November 2014, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand

[招待講演] Satoshi Tomita, "Microwave Responses of Meta-Molecules with Magnetism and Chirality"(3TL-E-2), **Moscow International Symposium on Magnetism 2014 (MISM-2014)**, 3 July 2014, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

[招待講演] Satoshi Tomita, "Meta-Molecules with Chirality and Magnetism", **International Conference on Computational and Experimental Engineering and Sciences 2014 (ICCES'14)**, 13 June 2014, Changwon, Korea

[図書](計1件)

澤田桂 他、メタマテリアルハンドブック 基礎編(翻訳)、1056ページ、2015年 講談社

[その他]

ホームページ等

http://mswebs.naist.jp/LABs/optics/tomita/jpn/index_j.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富田 知志 (TOMITA, Satoshi)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教

研究者番号：90360594

(2) 研究分担者

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

澤田 桂 (SAWADA, Kei)

理化学研究所・放射光科学総合研究センター・研究員
研究者番号：40462692

(3) 研究協力者

児玉 俊之 (KODAMA, Toshiyuki)