

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02556

研究課題名（和文）電気磁気メタ表面を用いたベリー位相光学の展開

研究課題名（英文）Berry phase optics using magneto-electric metasurfaces

研究代表者

富田 知志 (Tomita, Satoshi)

東北大学・高度教養教育・学生支援機構・准教授

研究者番号：90360594

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：光に対して非相反的に振舞う位相勾配電気磁気メタ表面と位相勾配磁気カイラルメタ表面を、数値計算を用いて設計し、作製して、マイクロ波で測定した。また新たに着想された誘電体-磁性体ハイブリッドメタ分子が、大きな磁気カイラル効果を示すことを数値計算と実験から明らかにした。またクンマー曲面など代数幾何学との協奏を基に、ベリー位相光学の観点から複異方性メタ表面の理論検討を行った。更にカイラリティによる光学活性のトイモデルであるクーンモデルの詳細な再検討、拡張クーンモデルでの磁気カイラル効果の発現、場の理論を用いた光と物質の相互作用の理解と分類へと発展した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

位相勾配電気磁気メタ表面と位相勾配磁気カイラルメタ表面のマイクロ波応答を明らかにした。さらに誘電体-磁性体ハイブリッドメタ分子が、大きな磁気カイラル効果を示すことを明らかにしたことは学術的意義が大きい。のみならずこれらの成果は、第5世代移動体通信を担うマイクロ波に対する非相反素子への応用に活かすことができ、社会的意義も大きい。また代数幾何学と物理学の協奏を進め、クーンモデルの詳細な再検討を行い、拡張クーンモデルによる磁気カイラル効果の発現を示した。場の理論を用いた光と物質の相互作用の理解と分類を進めたことで、新しい光学現象の予測に繋がった。これは今後更に大きな学術的意義をもたらす可能性がある。

研究成果の概要（英文）：We performed numerical calculations and design, fabrication, and microwave measurements of phase-gradient magneto-electric (ME) metasurfaces and phase-gradient magneto-chiral (MCh) metasurfaces with a non-reciprocity. Additionally, we demonstrated experimentally and numerically that a newly conceived dielectric-magnetic hybrid metamolecule exhibits large MCh effects. Furthermore, based on the interplay with algebraic geometry, such as the Kummer surface, we conducted theoretical studies of the bianisotropic metasurfaces in terms of Berry phase optics. Moreover, we conducted a detailed re-examination of the Kuhn model, which serves as a toy model for optical activity due to chirality, and demonstrated that an extended Kuhn model shows the MCh effects. We also made a progress in understanding and classifying the interaction between light and matter using field theories.

研究分野：メタマテリアル科学

キーワード：メタマテリアル 幾何 場の理論 メタ表面 光学的電気磁気効果 磁気カイラル効果 光学活性 磁気光学効果 代数

## 1. 研究開始当初の背景

メタ物質(メタマテリアル)はサブ波長構造で構成され、天然物質では困難な物性を実現する人工構造物質である。これまで電磁波に対する負屈折率や透明マントなどのブレイクスルーを生み出してきた。これらの研究はマイクロ波領域から光領域へと展開され、最近では実用を意識した二次元構造のメタ表面が提案されている。特に光の位相を制御して一般化スネルの法則によって光を曲げることができる位相勾配メタ表面を用いた、平面光学素子(メタレンズ)が注目を集めている。しかしながらこれは、従来の天然物質でも実現可能なレンズを、メタ表面で実現したに過ぎず、位相勾配メタ表面でのみ可能な「キラアPLICATION」とは言い難い。

では、位相勾配メタ表面で初めて実現可能になる「キラアPLICATION」は何であろうか、というのが我々の問いであった。そのひとつの答えを我々は、磁性と組み合わせることで発現する電気磁気(magneto-electric: ME)効果を用いた非相反現象であると考えた。ME効果とは、入射偏光には依存せず、一方で入射(透過)方向には依存して透過や屈折など電磁応答が変化する現象(方向依存複屈折)である。これは非相反性とも呼ばれる。ME効果は、単結晶マルチフェロイクス物質を用いても実現できるが、その非相反性は小さく、また低温が必要な場合が多い。一方で、メタ表面による共鳴現象を用いるとME効果を室温で観測可能な程度まで増強できることが、最近の我々の研究から明らかになっていた。このMEメタ表面に位相勾配を導入すると、あたかも磁場中のローレンツ力が光に働いたかのように、非相反的に光を曲げることができる。この実証は応用的観点からも重要であり、赤外光領域での位相勾配MEメタ表面は、熱輻射制御が可能な動的調光窓(スマートウインドウ)の実現に繋がると考えた。

光にとって物質は「場」である。つまり我々が実現しようとしている位相勾配MEメタ表面は、光に磁場のような効果をもたらす要因となる人工ゲージ場と見なせる。電子系でのゲージ場はベリー位相理論で記述できる。ベリー位相とは、波動関数を周回変化させた時に元に戻らず残る位相である。これは波動関数が持つ微分・位相幾何学的な性質を反映した量である。電子と光のアナロジーに基づき、光に対しての「磁場」を生み出す人工ゲージ場もベリー位相の言葉で記述できるため、ベリー位相光学と総称した。位相勾配MEメタ表面をベリー位相光学で記述し解釈することは、現象の普遍的理解に繋がると期待されるが、実験が皆無のためどのように記述できるかは明らかでなかった。そこで本研究では理論と実験が手を携えて普遍的理解に到達することを目指した。その結果、他の現象や異分野への波及効果、例えば数学での代数幾何学を用いた新たな科学への発展が期待された。

光学と代数幾何学との関わりは1830年代に起源を持つ。二軸性結晶中の光の分散関係は特異点を持ち、偏光の向きに応じて円錐状の複屈折(円錐屈折)が起きることがハミルトンによって予言された。この分散曲面の特異性は、数学での曲面論として新分野を切り拓き、16個の特異点をもつクヌーサー曲面として一般化された。このような分散曲面は、ME効果をもつ複異方性媒質で現れると予言されているが、実験では実現されていなかった。また、ME効果は非相反な現象をもたらすため、複異方性媒質では非相反な円錐屈折が期待された。分散関係における特異点の存在は、ベリー位相光学でも本質的に重要であり、これまででない新たな光学素子を生み出すと期待された。さらに数学での、いわば形而上学的な研究対象が、光学によって具現化・可視化されるという点で、物理と数学にまたがる研究領域の展開が期待された。

誘電率や透磁率が時間変化するメタ物質(時変系メタ物質)では、磁性を使わず光にとっての人工ゲージ場が実現できる。しかし時変系には変調周波数に制限があり、これが高周波化を難しくしている。これに対して本研究では、空間的に変調された静的な位相勾配MEメタ表面を用いて人工ゲージ場を実現することを目指していた。これにより周波数が変わっても同じ原理で人工ゲージ場として機能するスケラビリティが可能になる。すなわちマイクロ波で実証した現象を、構造微細化により赤外領域まで高周波化することが容易となり、スマートウインドウの実現という更なる展開を可能とすると考えた。

## 2. 研究の目的

位相勾配MEメタ表面を作製し、マイクロ波に「磁場」のように働く人工ゲージ場を実現することを目的とする。それをベリー位相光学の枠組みで普遍的に理解し、特異点光学など光学と代数幾何学など数学との協奏に展開する。更に構造を微細化してスケラリングし、近赤外領域で熱制御が可能なスマートウインドウの実現に繋げる。

## 3. 研究の方法

マイクロ波領域での位相勾配MEメタ表面を実験と理論の両面から調べた。有限要素法(FEM)数値計算から、メタ表面の基本設計を黒澤が最適化した。そのうえで電気回路メタ物質の実験経験が豊富な中西と検討し、外部の基板加工業者に依頼してメタ表面を作製した。このメタ表面に対して、10GHz近傍のXバンドマイクロ波の非相反性や放射パターンを測定するために、上田と共に測定系の構築を行った。導波路と電磁石を組み合わせた測定系のみならず、送信アンテナからマイクロ波を垂直入射させ、メタ表面で屈折したマイクロ波の放射パターンを受信アンテナ

が回転しながら測定するシステムも構築した。このときアンテナでの偏光を回転、もしくは磁石の磁化の向きを反転したりするなどして、偏光に依存しない非相反なビームの屈折を確認できるように考えた。並行して黒澤がFEMで数値的に放射パターンをシミュレーションした。マイクロ波領域で複異方性をもつMEメタ表面を進展させ、クヌー曲面など代数幾何学との関連を澤田と共に考察した。静的メタ表面のスケラビリティを活かし、MEメタ表面の微細化、近赤外領域での非相反電磁応答の実現を検討した。

#### 4. 研究成果

位相勾配MEメタ表面の数値計算と設計を行った。10GHz付近に共鳴を持ち、先行研究の180倍近くの巨大なME効果が発現するメタ表面の基本設計を、黒澤がFEM数値計算から明らかにした。具体的には銅のリング共振器とフェライトディスクを組み合わせたメタ表面を設計し、数値計算を行った。試料は導波管や自由空間に配置することを想定した。フェライトディスクのサイズ、リング共振器のデザインや配置を様々に工夫することで最適化に成功した。

最適化したメタ表面を、基板加工業者に依頼して作製した。誘電体基板の表と裏に貼られた銅箔を加工することで、銅リング共振器を実装した。そこにフェライト磁石を配置し、黒澤と上田はマイクロ波測定を行った。MEメタ表面を導波管に挿入し、電磁石で250mTの磁場をかけて、10GHz帯(Xバンド)のマイクロ波の透過特性を、ベクトルネットワークアナライザを用いて測定した。表もしくは裏面から入射した際のSパラメータを測定し、その差分から非相反性を調べた。そして先行研究と同程度のマイクロ波位相差と強度差を確認することに成功した。試料の厚さを考慮すると、先行研究よりも数倍大きな非相反性が実現できていることが明らかになった。またMEメタ表面のみならず、それに類似した光の非相反現象である磁気カイラル(MCh)効果を示すメタ表面まで対象を拡げて探索的に実験した。その結果、10GHz帯のマイクロ波に対して大きな非相反性を示すMChメタ表面の実現を実験的に確認した。位相差をプラス180度からマイナス135度まで変化させるMChメタ分子を配列した位相差勾配MChメタ表面での放射パターンをFEMで数値計算し、磁化の向きを逆転させると放射方向が反転するという、光のローレンツ力の兆候を確認した。

また黒澤は、当初予期していなかった誘電体-磁性体ハイブリッドメタ分子が、MCh効果を示すことを明らかにした["Unity-order magnetochiral effects exhibited by a single metamolecule", Hiroyuki Kurosawa, Satoshi Tomita, Kei Sawada, Toshihiro Nakanishi, Tetsuya Ueda, *Optics Express* **30**, 37066-37075 (2022)]。FEM数値計算結果をもとに、磁性を持つフェライトロッドの周りに複数の誘電体キューブをらせん状に配置した試料を作製し、数GHzのマイクロ波領域で実験を行った。その結果、屈折率の実部の差が1に近い、unity-order MCh効果を実験的に見出した。これらの成果は、第5世代移動体通信を担うマイクロ波の非相反アイソレーター(マジックミラー)の実現に繋がるなど応用にも資することができる。

次に澤田はMEメタ表面など複異方性媒質の分散関係を表す方程式を、代数幾何学的に考察した。その結果、光の偏光方向に応じてビームが広がる円錐屈折という光学現象と、特異点解消という数学の手法との関係を明らかにした。これを元にベリー位相光学の観点から複異方性メタ表面の理論検討を行った。

また当初予期していなかったが、カイラリティによる光学活性の理論的なトイモデルであるクーンモデルに注目し詳細な再検討を行った。解析的な計算のみならず、FEM数値計算を用いて検討の妥当性を検討した。クーンモデルはバネで振動する質点を2組準備し、それを繋いだ系で光学活性を説明する。このクーンモデルを足掛かりにして、これまで知られているメタ物質やメタ表面での光学活性を分類することに成功した。更にクーンモデルにローレンツ力を導入する、もしくはクーンモデルと磁性体の相互作用を導入することによってMCh効果が発現することを明らかにした。そして議論を重ねる中で、カイラリティによる光学活性と磁性体による磁気光学効果の複合効果としてのMCh効果ではなく、純粹に方向依存複屈折だけを実現するという着想に至った。これは本研究を通じて新たに芽生えた大きな可能性であると言える。

更に澤田は場の理論を用いて、時間反転対称性と空間反転対称性の有無を元に、光と物質の相互作用の分類を開始した。これにより新しい光学現象の予測に関して、どの場合にどのような現象が現れるのかを余すところなく説明する土台が完成した。今後この分類に基づいて予測された光学現象を、実験的に観測することを計画している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 富田知志、澤田桂	4. 巻 49
2. 論文標題 複異方性をもつメタマテリアルと特異点光学	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 461-467
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kurosawa Hiroyuki, Tomita Satoshi, Sawada Kei, Nakanishi Toshihiro, Ueda Tetsuya	4. 巻 30
2. 論文標題 Unity-order magnetochiral effects exhibited by a single metamolecule	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 37066 ~ 37066
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.469675	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 富田知志、大西庸嵩、柳久雄、黒澤裕之
2. 発表標題 磁気カイラルメタ表面による赤外領域での非相反光学応答II
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富田知志
2. 発表標題 対称性が破れたメタマテリアルでの光学異方性
3. 学会等名 第241回 有機エレクトロニクス材料（JOEM）研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Tomita, Nobuaki Kikuchi, Masatoshi Hatayama, Satoshi Okamoto
2. 発表標題 Frequency-domain microwave spectroscopy of Co/Pt superlattice metamaterials
3. 学会等名 The 4th International Symposium for The Core Research Cluster for Spintronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Tomita
2. 発表標題 Metamaterials and metasurfaces with broken symmetries
3. 学会等名 The 45th Annual Conference on Magnetism in Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒澤裕之、富田知志、澤田桂、中西俊博、上田哲也
2. 発表標題 誘電体-磁性体ハイブリッドメタ分子による巨大磁気カイラル効果
3. 学会等名 2021年 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒澤裕之、富田知志、澤田桂、中西俊博、上田哲也
2. 発表標題 自発磁化をもつメタ分子による巨大磁気カイラル効果
3. 学会等名 2022年 第69回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoshi Tomita, Nobuaki Kikuchi, Satoshi Okamoto
2. 発表標題 Frequency-domain microwave spectroscopy of magnetic Co/Pt superlattice metamaterials
3. 学会等名 Metamaterials 2022 (The Sixteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒澤裕之、澤田桂、中西俊博、富田知志、上田哲也
2. 発表標題 磁気カイラルメタ分子の回路モデル
3. 学会等名 第83回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Satoshi Tomita, Tetsuya Ueda	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 12
3. 書名 "7.6 Non-reciprocal metamaterials based on magnetism" in Nanomagnetic Materials: Fabrication, Characterization and Application" Edited by Akinobu Yamaguchi Atsufumi Hirohata Bethanie Stadler	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	黒澤 裕之  (Kurosawa Hiroyuki)  (20708367)	京都工芸繊維大学・電気電子工学系・助教   (14303)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中西 俊博  (Nakanishi Toshihiro)  (30362461)	京都大学・工学研究科・講師    (14301)	
研究分担者	澤田 桂  (Sawada Kei)  (40462692)	国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学研究センター・ 研究員   (82401)	
研究分担者	上田 哲也  (Ueda Tetsuya)  (90293985)	京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授   (14303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関