

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K17777

研究課題名（和文）動的バビネ反転可能な異方的メタ表面によるテラヘルツ波制御の新展開

研究課題名（英文）Novel developments of terahertz-wave control by anisotropic Babinet-invertible metasurfaces

研究代表者

中田 陽介（Nakata, Yosuke）

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：50745205

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：金属チェッカーボード構造の電磁応答特性は接点状態が接続か非接続かによって劇的に変化する。本研究ではチェッカーボード構造を異方的構造体と組み合わせ、新たなテラヘルツ波制御の開拓を目指した。まず、円偏光の回転方向を逆転させることが可能な1/4波長板を実現した。また、伝搬型デバイスや平面カイラルデバイスについてもチェッカーボード構造が有効に使えることを示した。こうしたデバイスの基礎になる双対性についても代数トポロジーや微分幾何の観点から統一的説明を与える理論的枠組みを構築した。さらに新たな展開として双対性とトポロジカル伝搬との関連についても調べ将来の研究への足掛かりを得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ波の状態を動的に変化させることを可能にするテラヘルツ変調器は高感度計測や高速通信などにとって必要不可欠である。本研究結果により、チェッカーボード構造がこうした動的デバイスにとって適した構造であることが明らかになった。特に今回実現した偏光変調デバイスはカイラリティセンシングなどへの応用が期待できる。さらに本研究ではチェッカーボード型デバイスの背後にある双対性についても理解を深めることができた。提案した考えの枠組みは物理学や工学にわたる幅広い領域で役立つものと考えている。

研究成果の概要（英文）：The electromagnetic response of a metallic checkerboard structure dramatically depends on whether the contact state is connected or unconnected. In this study, we combined the checkerboard structure with anisotropic structures to develop novel terahertz devices. First, we realized an active terahertz quarter-wavelength plate, which can reverse the direction of rotation of circularly polarized light. It is also shown that the checkerboard structures can be used effectively for propagating devices and planar chiral devices. To explain the duality behind these devices in a unified manner, a theoretical framework is developed from the perspective of algebraic topology and differential geometry. As a new development, we also investigated the relationship between duality and topological propagation and obtained a foothold for future research.

研究分野：メタマテリアル

キーワード：メタマテリアル メタ表面 テラヘルツ技術 バビネの原理 双対性 二酸化バナジウム 動的メタマテリアル トポロジー

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

波長が $300\ \mu\text{m}$ 程度の電磁波の周波数帯はテラヘルツ領域と呼ばれる。テラヘルツ領域には特有の巨大分子スペクトルが存在し、センシングの観点から注目されている。またテラヘルツ領域の広大なバンド幅を利用することで、超高速通信への応用も期待されている。このように注目を集めるテラヘルツ領域であるが、光周波数からもマイクロ波周波数からも到達が難しく、長らく未開拓領域とされてきた。近年、テラヘルツ技術の急速な発展にもないテラヘルツ領域にも徐々にアプローチすることが可能になってきている。

センシング・通信への展開を行うためには、テラヘルツ波の状態を変化させることができる動的デバイスの実現が必要不可欠である。しかしながら、テラヘルツ領域では従来のマイクロ波デバイスや光デバイスをそのまま使うことはできず、いまだ決定的なデバイスは実現されていない。このため新たなアイデアに基づくデバイス開発が必要とされている。

2. 研究の目的

本研究では偏光操作や伝搬方向の制御を可能にする動的テラヘルツデバイスの実現を目的に研究を進める。このために、方向に応じて異なる応答を示す異方的構造を活用し、その応答特性を高コントラストに切り替えることを目指す。また、こうした動的デバイスの背後にある物理をより深く理解するために、基礎理論の構築も同時に進める。

3. 研究の方法

テラヘルツ領域で高い応答特性を実現するためにメタ表面とよばれる人工表面を活用する。メタ表面の構成要素の幾何学的形状をうまく設計することで、構成材料の特性を超えた高い応答特性が実現できる。

単層の金属メタ表面に対して金属と空隙部分の入れ替える操作はバビネ反転と呼ばれる。チェッカーボード構造のような臨界構造では、接点の接続状態を接続・非接続間で変化させることにより動的にバビネ反転を実現できる。バビネ反転を引き起こすと、非常に高いコントラストで散乱特性を切り替えることが可能になる。本研究課題では異方的メタ表面に対するバビネ反転をテラヘルツ波の状態変調に応用し、高コントラストの変調を実現する。

4. 研究成果

(1) 高変調テラヘルツ動的 1/4 波長板の実現

電磁波の基本的な性質として偏光の自由度がある。電場の振動方向が直線状のものを直線偏光と呼び、円状のものを円偏光と呼ぶ。こうした偏光状態を動的に変調できると、高感度計測や偏光自由度を利用した通信などへの応用が可能になる。

電磁波の偏光状態に応じた異なる位相差を付与することができる素子を波長板と呼ぶ。特に直交 2 偏光に対して 4 分の 1 波長分の位相差をつける素子は 1/4 波長板と呼ばれ、直線偏光を円偏光に変換する際に用いられる。本研究では 1/4 波長板の偏光軸を動的に切り替え、出射テラヘルツ円偏光の回転方向を逆転させることを目指した。図 1(a)にこの機能の概略を示す。本デバイスでは異方的な応答を実現するために、チェッカーボード構造にダイポール型の構造が導入される。チェッカーボード構造の接点部分が OFF の時は、入射直線偏光が右回り円偏光に変換されるように構造が設計される。次に、接点部分を接続状態に変化させると、円偏光の回転方向が逆転する。実際に作製したデバイスの写真を図 1(b)に示す。本デバイスでは接点状態の切り替えを実現するために二酸化バナジウムが用いられている。二酸化バナジウムは約 65°C で絶縁体・金属転移を示す。この転移を外部ヒーターによって引き起こすことで接点状態の接続状態を非接続から接続状態に切り替えることができる。実際にテラヘルツ時間領域分光法により出射偏光の円偏光度を測定した結果を図 1(c)に示す。この図に示す通り、デバイスの温度を変化させることにより、 $0.617\ \text{THz}$ において円偏光度を 95 % から -94 % まで変化させることに成功した。本研究成果は *Physical Review Applied* 誌に報告された。

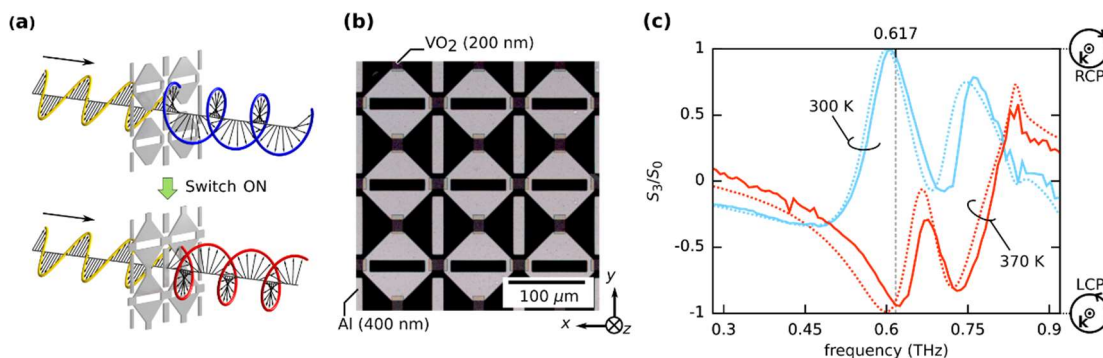


図 1: (a) 動的 1/4 波長板。チェッカーボードの接続状態を切り替えると出射円偏光の回転方向が逆転する。(b) 作製デバイスの顕微鏡写真。(c) 出射偏光の円偏光度。実線 (実験)、点線 (シミュレーション)。

(2) 動的波長板のブロードバンド化

(1)で報告したデバイスは高い変調度で円偏光の状態を切り替えることができるが、その動作帯域が狭帯域であるという欠点がある。チェッカーボード構造自体は非常にブロードな応答を示す特色を持っているが、ダイポール構造による狭帯域な応答との間でファノ干渉が起こる結果、応答帯域が狭くなっている。すなわち、(1)の設計ではチェッカーボード構造のブロードな応答を生かすことができていない。この問題を解決するために、チェッカーボード構造を異方的に変形した構造も新たに考案した。また、本デバイスでは電流注入により、外部ヒーターなしに転移を引き起こすための工夫も行った。図2に作製したデバイスの顕微鏡写真を示す。本デバイスを用いることにより、(1)で得られた帯域と比べ4.2倍広帯域な応答を実現することができた。本デバイスでは外部ヒーターが不要のため小型化も実現できている。本成果は *Metamaterials* 2019 で発表され、現在、投稿論文を準備中である。

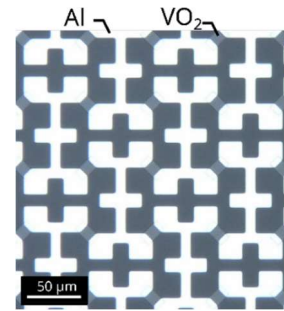


図 2: 変形チェッカーボード構造の顕微鏡写真

(3) バビネ反転による伝搬波制御

バビネ反転による散乱振幅の反転は高次の回折波に対しても成立する。このことを利用するとバビネ反転によって伝搬方向の制御が可能になる。このことを確かめるためにシミュレーションによる検討を行った。その結果、確かに回折波制御が可能であることがわかったが、特定方向の回折波の振幅を大きくする設計は難しいことがわかった。

(4) バビネ反転による平面カイラル応答反転

ねじのような3次元の構造物は空間反転操作によって巻き方向が反転する。反転で得られた構造は元の構造と等価でない。こうした空間反転に対して対称性が破れているものはカイラルと言われる。平面構造に対しても平面内に構造を不変にする鏡映反転軸が取れない場合、平面カイラルであると言われる。平面カイラル構造は相反ダイオード特性を示すことが知られている。我々はこれまでにバビネ反転によって平面カイラリティを切り替え可能であることを理論的に示してきた(文献①)。この研究をもとに実際にデバイスを作製し、平面カイラリティが切り替え可能なことをテラヘルツ領域で実験的にも確かめた。本成果に関する投稿論文を準備中である。

(5) 電磁現象における双対性と自己双対性の統一的理解

一見異なる物理系を非自明な形で結びつける双対性は物理学や工学にとって極めて重要な概念である。(1)と(2)で実現したデバイスもチェッカーボード構造に関連する双対性をうまく活用している。こうした双対性は電磁現象において、双対回路、ケラー・デクニ双対、バビネ双対など様々な形で現れる。これらの双対性が現れる周波数領域は直流から光周波数まで様々であり、これまで統一的に扱われてこなかった。そこで、代数的トポロジーや微分幾何学の観点からこれらの様々な双対性に統一的な理解を与えるフレームワークを構築した。

双対性に関連し、ある対象がそれ自身と双対であるようなときは自己双対性を持つといわれる。我々は上記のフレームワークを元に、周波数無依存応答、無反射応答、臨界応答といった様々な現象が自己双対性から導かれることも系統的に示した。本研究成果によって、電磁気学に現れる双対性の理解を一段と深めることができた。本研究成果は *Symmetry* 誌に発表された。

(6) トポロジカル伝搬現象への布石

最近、Fruchart らにより、双対性が非アーベルなトポロジカル伝搬現象を導く可能性があることが理論的に示された(文献②)。彼らの研究はトポロジカル現象と双対性の間に新たな関連がつけられることを意味しており極めて興味深い。我々も新たな展開として、こうした双対性とトポロジカル現象とのつながりを見つけるべく研究をはじめた。この布石として、まずトポロジカル現象の本質的な理解を進めることとした。このために、最も簡単な1次元周期系においてトポロジーがどのように表れてくるのかについて詳しく調べた。

結晶に対して乱れを導入するとその部分にタム状態やサウレス状態と呼ばれる局在モードが現れることはよく知られている。こうした局在モードは欠陥モードと呼ばれている。本研究では従来の欠陥モードが実はトポロジカルな起源をもつのではないかと考え、理論的検討を進めた。そこで結晶に欠陥を連続的に導入するような構造の変形を考察した。この考察において、上記の連続変形がサウレスポンピングと呼ばれる操作に対応付けられることに気が付いた。さらに、この知見をうまく用いることで、欠陥モードをトポロジカルに生成できることが明らかになった。最終的に、見出された欠陥モードのトポロジカル生成メカニズムをフォトニック結晶に対して実験的に実証することにも成功した。本研究成果は *Physical Review Letters* 誌に報告された。本研究により欠陥モードの持つトポロジカルな起源がはじめて明らかになった。本研究をさらに発展させ、現在も双対性とトポロジーの間のつながりを模索している。

<引用文献>

- ① Y. Urade *et al.*, *EPJ Appl. Metamat.* **4**, 2 (2017).
- ② M. Fruchart *et al.*, *Nature* **577**, 636 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Yosuke Nakata, Yoshitaka Ito, Yasunobu Nakamura, Ryuichi Shindou | 4. 巻 124 |
| 2. 論文標題 Topological Boundary Modes from Translational Deformations | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 73901 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.124.073901 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Yosuke Nakata, Yoshiro Urade, Toshihiro Nakanishi | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Geometric Structure behind Duality and Manifestation of Self-Duality from Electrical Circuits to Metamaterials | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Symmetry | 6. 最初と最後の頁 1336 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/sym11111336 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Yosuke Nakata, Kai Fukawa, Toshihiro Nakanishi, Yoshiro Urade, Kunio Okimura, Fumiaki Miyamaru | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Reconfigurable Terahertz Quarter-Wave Plate for Helicity Switching Based on Babinet Inversion of an Anisotropic Checkerboard Metasurface | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Applied | 6. 最初と最後の頁 44008 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.11.044008 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Takano Keisuke, Tanaka Yoku, Moreno Gabriel, Chahadih Abdallah, Ghaddar Abbas, Han Xiang-Lei, Vaurette Francois, Nakata Yosuke, Miyamaru Fumiaki, Nakajima Makoto, Hangyo Masanori, Akalin Tahsin | 4. 巻 122 |
| 2. 論文標題 Energy loss of terahertz electromagnetic waves by nano-sized connections in near-self-complementary metallic checkerboard patterns | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 63101 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.4997882 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

[学会発表] 計11件(うち招待講演 8件/うち国際学会 8件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yosuke Nakata, Yoshitaka Ito, Yasunobu Nakamura, Ryuichi Shindou |
| 2. 発表標題 Topological emergence of Tamm state by Thouless pumping |
| 3. 学会等名 The 4th A3 Metamaterials Forum (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Toshihiro Nakanishi, Yosuke Nakata, Yoshiro Urade, Kunio Okimura |
| 2. 発表標題 Broadband Helicity Switching for Terahertz Waves Using Anisotropically Deformed Checkerboard Metasurface with Vanadium Dioxide |
| 3. 学会等名 Metamaterials 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yosuke Nakata, Yoshitaka Ito, Yasunobu Nakamura, Ryuichi Shindou |
| 2. 発表標題 Tamm state generation by Thouless pumping |
| 3. 学会等名 NTTI 2019 and BEC 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yosuke Nakata, Yoshitaka Ito, Yasunobu Nakamura, Ryuichi Shindou |
| 2. 発表標題 Realization of Topological Tamm States by Thouless Pumping |
| 3. 学会等名 MORIS2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------|
| 1. 発表者名 中田陽介 |
| 2. 発表標題 欠陥モードのトポロジカルな起源 |
| 3. 学会等名 第25回 ILM勉強会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Urade, Y. Nakata, T. Nakanishi, and M. Kitano |
| 2. 発表標題 Novel Electromagnetic Absorption Characteristics of Metallic Checkerboard-Like Metasurfaces |
| 3. 学会等名 PIERS 2018 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yoshiro Urade, Yosuke Nakata, Toshihiro Nakanishi, and Masao Kitano |
| 2. 発表標題 Checkerboard symmetry in metallic metasurfaces |
| 3. 学会等名 The 8th CEMS Topical Research Camp on 'Symmetry and Topology' |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中田陽介 |
| 2. 発表標題 チェッカーボードメタ表面の臨界転移：基礎とテラヘルツ周波数における動的偏光制御への応用 |
| 3. 学会等名 メタマテリアル・メタサーフェスのための数理モデリング (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 府川海、中田陽介、中西俊博、浦出芳郎、宮丸文章 |
| 2. 発表標題 異方性メタ表面を用いた円偏光スイッチング素子の実現 |
| 3. 学会等名 テラヘルツ科学の最先端IV |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Nakata, Y. Urade, K. Fukawa, T. Nakanishi, K. Okimura, F. Miyamaru, M. W. Takeda, M. Kitano |
| 2. 発表標題 Terahertz polarization control using dynamic Babinet inversion of metallic checkerboards |
| 3. 学会等名 第8回電磁メタマテリアル講演会（招待講演）（国際学会） |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yosuke Nakata, Yoshitaka Ito, Yasunobu Nakamura, and Ryuichi Shindou |
| 2. 発表標題 Topological generation of Tamm states from Thouless pumping |
| 3. 学会等名 第9回電磁メタマテリアル講演会（招待講演）（国際学会） |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔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 |
|-------|------------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 中西 俊博 (Nakanishi Toshihiro) | | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------|------------------------------|-----------------------|----|
| 研究 協力 者 | 浦出 芳郎 (Urade Yoshiro) | | |