

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05319

研究課題名（和文）双非等方物質からの電磁応答におけるトポロジカル効果

研究課題名（英文）Electromagnetic topological response from bi-anisotropic material

研究代表者

井上 純一（INOUE, Jun-ichi）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主幹研究員

研究者番号：90323427

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：双非等方物質の電磁場応答構成方程式に含まれる電気磁気テンソル，磁気電気テンソルとトポロジカル物質を特徴付ける因子との対応関係を考察した。マイクロ波工学での各種素子への展開を視野に入れた多くの知見と，物理分野におけるトポロジカル物性の視点の対応をつけ，両者の融合領域を見いだすための素地作りを試みた。

また，将来的な実験の準備段階において，コロネンナノファイバーのマイクロ秒領域での蠢動が，当初予期していなかった事象として得られたので，これに対する理論的解釈を与え，動的不安定性の発現として理解出来ることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は，従来異なる分野で行われていた類似の題材を，統一的な立場から捉え直し，共通言語や互いの対応付けを明確にすることで，両者の知見の相互乗り入れを可能にして，将来的な新規現象の開拓の素地を作ろうとするものであった。今回得られた結果は，両分野において有用であると考えられる。

また，分野横断型の研究は，準備に大きな労力を要求されることと，短期的な成果を得ることが難しい事から敬遠される傾向にあるが，この取り組みは，新たな研究シーズを見いだすために有効であると思われる。

研究成果の概要（英文）：A bi-anisotropic material is characterized by magnetoelectric and electromagnetic tensors, which are included in construction relation. Properties of these tensors have been independently discussed so far in microwave-engineering and in condensed-matter physics. Thus, there remain possibilities where knowledge of one can be transferred to the other and vice versa, resulting in feasible and novel effects. The present study tried to bridge the two subjects, and was found to be effective.

Also as serendipity, we propose dynamical instability to explain a newly discovered phenomenon, wiggling and jump of a coronene nanofiber, by an experimentalist during preliminary stage for future collaboration.

研究分野：物性理論

キーワード：物性理論 電磁波応答

1. 研究開始当初の背景

(1)物質の電磁場に対する応答は、マックスウェル方程式に加え、入力電場 \mathbf{E} とそれに対する応答である電束密度 \mathbf{D} 、磁束密度 \mathbf{B} とそれに対する磁場強度 \mathbf{H} が、それぞれ誘電率テンソル、透磁率テンソルを介した線形関係にあるとする、構成方程式で記述するのが標準的である。この構成方程式に、 \mathbf{D} 、および \mathbf{H} が、それぞれ \mathbf{B} 、および \mathbf{E} にも依存して、おのおの磁気電気テンソル、電気磁気テンソルを介した線形関係にあり、かつ、それぞれのテンソルが異方的であるような項を必要とする物質を、双非等方物質と呼ぶ。物性物理分野では、おもに可視領域での応答に興味があり、その領域では \mathbf{D} と \mathbf{H} を結ぶ磁気電気テンソル、 \mathbf{B} と \mathbf{E} を結ぶ電気磁気テンソルの各成分の大きさが微小である物質が多かったことから、マルチフェロイック物質や、トポロジカル物質が精力的に研究され始める前までには、双非等方物質が議論されることはまれであった。

(2)一方、マイクロ波工学やアンテナ工学の分野では、 \mathbf{E} と \mathbf{H} を入力、 \mathbf{D} と \mathbf{B} を応答とする線形応答系の研究に長い歴史を持ち、アイソレーターやジャイレーターといった素子応用の展開が図られてきた。これらは、物質単体で機能を発現させようと言うよりは、コンデンサやコイルといった線形素子を分布させることによって、システムとして発現させようとする試みであり、4端子理論の結果を利用して、出力を次の入力として接続を工夫することで、各種素子が提案されてきた。ここで、物理分野の扱いとは異なり、入力が \mathbf{E} と \mathbf{H} になっていることが、何を基本量とみなすかという分野の特徴の一端を表していると共に、異分野間での容易な比較を妨げる要因にもなっている。加えて、電磁気としては、周波数の違いによる区分であるが、物質の応答として微視的に寄与する要素が可視域では電氣的な励起、マイクロ波では磁氣的な励起であることから、2つの分野を横断的に捉えた研究は多くない。

2. 研究の目的

本研究は、異なる分野で発達してきた重要な概念の関係を統一的に捉え直し、一方の知見を他方に持ち込める素地を作る事を目的とする。特に、トポロジカル物質において発現する性質が、双非等方な構成方程式とどのような関係にあるのかを明らかにしたい。また、可視領域の電磁場応答が、形式的には4端子と見られる事を考え、将来的な展望を視野にいれ、実験可能性についても問い合わせるべく、実験研究者に接触をはかる。

3. 研究の方法

本研究は純粋な理論研究であり、研究対象はこれまで異なる分野で行われていた題材である。各分野間で独立に行われた議論の橋渡しを行おうとするものであるから、対応関係をとるために、各々の分野特有の概念、用語をはじめとする各種蓄積を十分に吟味し直すところから始める。そののち、対称性と保存則、相反性と非相反性、双対性などを思考の軸としながら、幾何学的、代数的、および解析的手法を用いる。また必要に応じて、代数/数値計算ソフトウェア (Mathematica, MATLAB など: 本科研費予算で購入) を援用する。また、将来的に備え、実験研究者とも接触を図っておく。

4. 研究成果

(1)双非等方な構成方程式に含まれるテンソルの成分は、各々 3×3 である行列が4つあるので、計36成分ある。この36成分は、歪み対称性などの違いを考慮することである程度分類ができ、 $36=20+15+1$ に分解して解釈することができる。さらに、エネルギー保存則、つまり系に散逸がないことを想定すると、誘電率テンソルと透磁率テンソルがエルミートであること、および電磁機気テンソルと磁気電気テンソルの互いの関係が得られる。ここで、散逸がないと仮定することは、現実の物質との対応を考えると作為的であるが、安易な緩和の導入は揺動散逸定理に抵触すること、おとび、その定理を尊重するには電磁場の揺らぎを取り込む必要があることが本研究を通じて承知するところとなった。この理由から、散逸の導入を見送ることとした。36成分の分解の最後の1がいわゆるトポロジカル物質でアキシオン電磁気応答を決める係数に相当することが分かった。しかし、この1という自由度は、テンソル36成分のどれか1つの成分に対応すると言うわけではなく、行列の対角和で与えられるものである。この自由度は時間反転に対する振る舞いから擬スカラーであることが分かるので、従って、時間反転対称性が破れているトポロジカル絶縁体での電磁場応答を発現させるために必要である事が確認された。

(2)申請者は、以前の研究で、スラブ型の時間反転対称性を破ったトポロジカル物質に対して、電磁場の透過光と反射光を干渉させることで、当該物質がトポロジカル絶縁体であるか否かの簡易な非接触判定方法を提案した。この物質群では、量子ホール効果を発現することが特徴の1つである事が知られている。提案では、量子ホール効果を発現するためには、物質の構成方程式がどのような構造であるべきか、という順序で考察を行い、その結果を用いて電磁場に対する応答を議論して、トポロジカル物質特有の干渉パターンを見いだした。本研究はそれと相補的であ

り、構成方程式の各種応答テンソルを議論することで、結果としてトポロジカル物質特有の現象が表現できることを見いだした。

(3) トポロジカル物質では、外部から陽な磁場をかける以外に、スピン軌道相互作用によって、実効的に物質内部に磁場が存在するような状況にあることが重要である。電子は、この実効的な磁場を感じて非自明な位相を獲得し、これに起因する性質を発現する。相対論によれば、磁場/電場がない場合でも、運動する座標系で見ると磁場/電場が表れることが知られている。これは電磁場の双対性のあらわれでもある。そこで、電気磁気テンソル、および磁気電気テンソルが元々はゼロである系であっても、運動する座標系に移れば、つまり物質を運動させれば実効的に磁場/電場が発生することで有限の電磁磁気テンソル、磁気電気テンソルが得られるのではないかと考えた。実際その通りの結果を得たが、これは既知であった。

(4) 電気磁気テンソル、磁気電気テンソルの存在がトポロジカル物質特有の現象を与えるために必要であることが分かったが、それだけでは十分ではないことが分かった。実際、電子系での時間反転対称性を破ったトポロジカル物質の代表的な模型であるハルデー模型では、空間的に非一様な実効磁場を想定している。そこから、電気磁気テンソル、磁気電気テンソルが異方性を持つだけでは不十分であり、空間依存性を持つ必要があると想像される。この見直しに対する一般的な証明、および条件出しは難易度が高いので、ハルデー模型に対応する効果を与える、電気磁気テンソル・磁気電気テンソルの空間依存性を決定することを試みた。しかし、その最中、全く同じ問題意識の論文が出版されたことを認識した[1]。(オンライン出版は2019年5月、本申請開始年度は2019年。この論文に気づいたのは2020年)。そこで、上述の高難易度の問題に移行したが、最終的な結論は、本申請終了時期までには残念ながら得られなかった。

(5) 当初予期していなかった事象が起きたことにより得られた新たな知見がある。電磁気における構成方程式はその形式的類似性から、4端子回路的見方が可能である、という見直しを持った。その視点で実験家と議論をし、具体的に有機ナノファイバーを用いた「リングと4端子系」の作成を依頼した際に思わぬ現象に遭遇した。それは、長さ100マイクロメートル、断面縦横100ナノメートル程度のコロネン分子からなる有機ナノファイバーを室温から窒素温度の範囲で温度変化させると、10マイクロ秒のオーダーで蠢動を示し、その後、跳躍することが光学顕微鏡下で発見された[図1にスナップショットを示す]。この結果を受け、現象に、物理の問題として合理的な説明を与え、かつ本質を捕まえていると思われる簡易なモデルで数理的な記述を試みた。その結果として、この現象は、構造相転移が引き金になる座屈現象として理解することが可能であり、また、時間依存性を含めた線形の偏微分方程式でその特徴をよく再現出来ることが明らかになった。構造相転移が特定の温度で発生し、それに伴ってファイバー内部に生じる応力が、系を急激にエネルギー的な不安定状態に陥らせることで、不安定性が指数関数的に増大して蠢動が生じると解釈できる。簡単な模型であるにもかかわらず、観測された特徴的時間スケールをよく再現する。この解析を通じて、本現象を動的不安定性の発現として理解できることを提案した。このほかにも、ナノファイバーの光学特性など、当初予期していなかった事象が起きたことにより得られた新たな知見として、リング干渉計でのダブルレット干渉パターンや、PICナノファイバーでのスペクトル線幅における束縛準位の影響などについても報告を行った。

<引用文献>

[1] S. Lannebere and M. G. Silveirinha, Nanophotonics 8, 1387-1397 (2019).

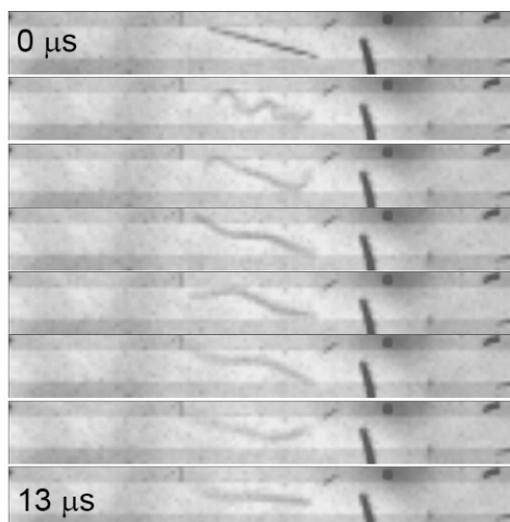


図1 蠢動の様子。中央がナノファイバー

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ken Takazawa, Jun-ichi Inoue, Kazutaka Mitsuishi, Yukihiro Yoshida, Hideo Kishida, Paul Tinnemans, Hans Engelkamp, Peter C. M. Christianen	4. 巻 11
2. 論文標題 Phase transition induced jumping, bending, and wriggling of single crystal nanofibers of coronene	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 scientific reports	6. 最初と最後の頁 3175/1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-82703-5	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 Ken Takazawa, Jun-ichi Inoue, Takashi Kuroda	4. 巻 125
2. 論文標題 Fabrication and Optical Properties of Fiber-Shaped Pseudoisocyanine J-Aggregates Grown Directly on a Glass Substrate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 26108-26115
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.jpcc.1c07303	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 Ken Takazawa, Jun-ichi Inoue	4. 巻 60
2. 論文標題 Resonance splitting in microring resonators constructed from organic nanofiber active waveguides.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 062004/1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac00ff	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0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------