

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05467

研究課題名(和文)トポロジカル界面を用いた新奇な量子波束の生成および制御に関する理論

研究課題名(英文) Theory on the generation and control of novel quantum wave packets via topological interfaces

研究代表者

小野田 勝 (Onoda, Masaru)

秋田大学・理工学研究科・教授

研究者番号：80425727

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：トポロジカル物質の表面/界面には、内部自由度と伝搬の自由度が強く結合した特殊な状態が現れる。その多様性の解析とそのような特徴の転写とも言える新奇な内部構造をもつ量子波束の伝播特性の解析を通じ、これらの物質の潜在力を探求した。例えば、平板型の弱いトポロジカル絶縁体の射影バンド構造に対し層数に関する偶奇効果を見だし、その表面状態の特性を明らかにした。また、先の多様性を反映した様々な伝導電子スピン流を用いることにより、環状配置のような場合でも、強磁性結合した局在スピン系にらせん磁性を誘起し得ることを示した。光子系について、トロイダル型渦構造をもつ光波束と周期構造中の光渦の伝播特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トポロジカル界面の多様性やそれを利用した新奇な量子波束の生成・制御を論じることは、トポロジカル物質の潜在力の探求に他ならず物性物理学上の意義がある。そのような波束の内部構造や伝播特性の解析は、量子情報通信や化学反応制御への応用を検討する上でも有用な情報を与える。また、表面状態の多様性の解析において一連の格子模型列を導入し、位相不変量からの示唆と解析解の構成法における判定条件との整合性を系統的に示している点は数理科学上の意義がある。

研究成果の概要(英文)：At the surfaces/interfaces of topological materials, we can find exotic states in which internal and propagation degrees of freedom are strongly coupled. We explored the potential of these materials through the analyses on the diversity of the exotic states and on the propagation characteristics of quantum wave packets with novel internal structures interpreted as transcriptions of such characteristics. For example, we characterized the surface states of a slab-shaped weak topological insulator through the discovery of an even-odd effect in the number of layers on its projected band structure. It was also shown that by using various conduction electron spin currents that reflect the above diversity, helical magnetism can be induced in ferromagnetically coupled localized spins even in the case like an annular arrangement. For photon systems, we clarified the propagation characteristics of optical wave packets with toroidal vortex structure and of optical vortices in periodic structures.

研究分野：物性理論

キーワード：トロイダル量子波束 ヘリカル表面状態 トポロジカル物質・媒質 格子模型列

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

固体結晶中の電子波など周期構造中の波動は系の周期性と整合するよう干渉することで分散関係にバンド構造を形成する。このことは、自由空間における平面波が構造による散乱を通じて互いに混成し、周期性と折り合いをつけるために新たな状態またはモードを再構成すると見る事もできる。一般に散乱・混成の過程は系に内在する要素(例えば相互作用)の対称性により支配されるため、再構成された状態もその影響を色濃く反映したものとなる。特にスピンなどの内部自由度と波動全体の伝搬の自由度が強く結合した系の場合、つまり広義のスピン軌道相互作用が強い場合、バンドを構成する各状態どうしがパラメータ空間において微分幾何学的もしくは位相幾何学的に非自明なつながり方をすることがある。特に位相幾何学的に非自明なバンドがバルクに形成されると、系の境界に局在した特殊な状態がバルク禁制帯中のギャップレス状態として生じる。固体中電子系に現れる代表的な例として2次元量子ホール系におけるカイラル端状態、2次元/3次元トポロジカル絶縁体(TI)におけるヘリカル端/表面状態(図1)などが知られている。また、バンド構造の形成に関する先の解釈と同様に、この現象も固体中電子系特有のものではなく、周期構造中の波動現象一般に共通の現象だと考えられる。フォトニック結晶などの周期構造中の電磁波に対しても量子ホール系やTIに類似した性質を持つ模型が提案され、前者に関しては研究開始当初の時点で実証もされている。これらの端/表面状態の特徴として、周期性の乱れ等により生じる散乱に対する堅牢性があげられる。電子系TIの場合、この特徴は波動の伝搬方向に依存してスピン状態が制限されてしまうことに起因している。

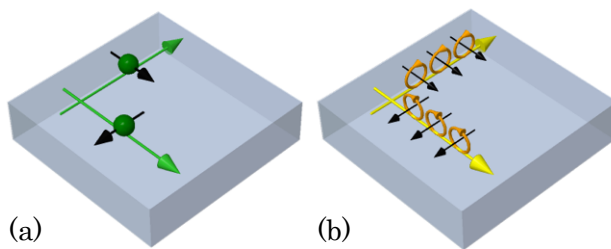


図1: (a)理想的なTIヘリカル表面状態の概念図。(b)理想的な光子系版ヘリカル表面状態の予想図。緑色/黄色の長い矢印は電子/光子の伝搬方向。黒色の短い矢印は(a)スピン偏極の方向/(b)渦構造(環状の矢印)による軌道角運動量の方向を表す。

研究代表者は過去の研究において、2次元TIヘリカル端状態を利用した電子スピン制御やスピントラップ効果について解析し、その過程で一様にスピン偏極した状態から戻されたスピン偏極をもつ電子波束(図2)が生成し得る事を示した。この結果をもとに、ヘリカル表面状態に対応する光子系における類似状態(図1)の考察を経て、本件におけるトロイダル型渦構造をもつ光波束(図3)の可能性を検討するに至った。一方、研究開始当初すでに、軌道角運動量をもつビームとして知られるラゲール・ガウスビームの応用研究が世界的な潮流として著しい発展を遂げていた。これらのビームを前述の光波束の原型(直線状ボルテックスによる渦構造をもつビーム)と解釈することにより、量子情報通信における量子ディジットや遠隔通信におけるモード分割多重化への展開も視野に入ることになる。ヘリカル表面状態の多様性とそれを利用した新奇な量子波束の可能性を論じることは、トポロジカル物質の潜在力の探求という意義に加え、応用上も意義あるものと考えた。

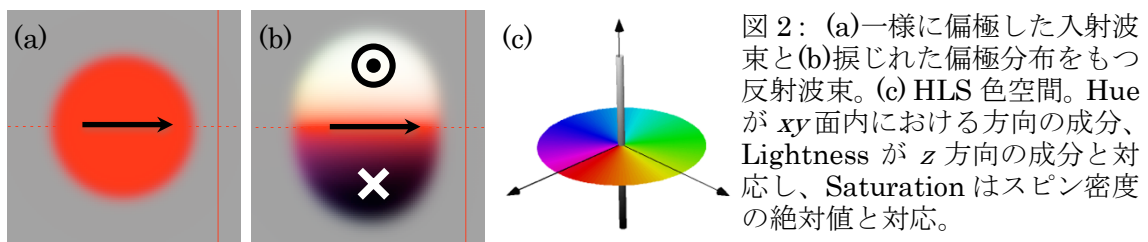


図2: (a)一様に偏極した入射波束と(b)戻された偏極分布をもつ反射波束。(c)HLS色空間。Hueがxy面内における方向の成分、Lightnessがz方向の成分と対応し、Saturationはスピン密度の絶対値と対応。

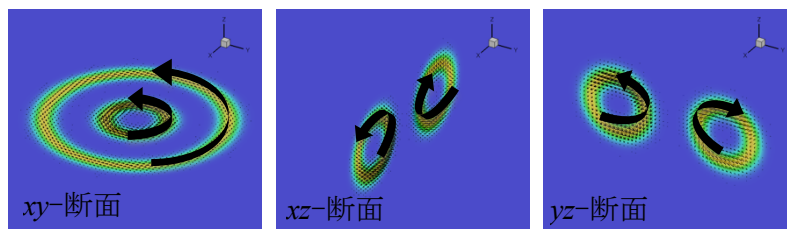


図3:z方向に伝搬するトロイダル型渦構造をもつ光波束のエネルギー密度の断面図。矢印はエネルギー流密度と「エネルギー密度×波束の平均速度」の差を表す。

2. 研究の目的

前述のとおりトポロジカル物質と通常物質(真空を含む)との境界には、伝播特性がスピンなどの内部自由度に強く依存した特殊な状態がバルク禁制帯中のギャップレス状態として現れることが確認されており、同様の機構に基づき光子系に対して設計された人工媒質においても類似の表面モードが発現することが知られている。本研究では、このような特殊な状態やモードを伴う表面/界面(研究課題名における「トポロジカル界面」)の多様性を調べ、その特徴を利用し

た量子波束の内部自由度（電子波束のスピンや光波束の渦など）の制御法を探索するとともに、位相幾何学的に非自明な内部構造（例えばトロイダル型渦構造など）をもつ量子波束の生成可能性と伝播特性の解明を通じてトポロジカル物質のもつ潜在力を探求する。また、これらの知見にもとづきトポロジカル表面/界面の応用につながるその他の関連現象についても探索する。

3. 研究の方法

本件は将来の課題として多重ボルテックス構造、特にトロイダル型渦構造をもつ光波束の生成シミュレーションを目指すものである。この目標を見据えつつ、光子系版 3 次元 TI 模型の電磁界シミュレーションへの実装が現時点では困難であることを踏まえ、以下の方針で研究を進めた。通常の絶縁体相に加え様々なトポロジカル絶縁体相を記述できる 3 次元格子模型の系列を構成し、解析的手法と数値的手法を併用して系統的に調べることにより、ヘリカル表面状態の多様性と期待する特徴を備えたヘリカル表面状態が生じる条件を明らかにする。このことはトポロジカル界面を用いたスピン制御およびトロイダル型スピン構造をもつ電子波束の可能性を論じる上でも必要となる。また、トロイダル型渦構造をもつ光波束の解を構成し、そのダイナミクスを解析することで、波形の安定性に加え位相幾何学的な特徴の安定性と変化の様相を明らかにする。以下、順に当該の格子模型列と光波束解の構成処方について述べる。その他、応用につながる現象の探索として定常スピン流下の局在スピン系のダイナミクスや誘電体周期構造境界に現れる光ヘリカル端モードの伝播特性に関する解析を行ったが、これらは副次的な内容であるため方法論の説明は割愛し、成果の要点についてのみ次節で触れる。

トポロジカル表面/界面を解析するための格子模型は、TI の基本的な特徴を備えつつも簡素な構造となるよう、仮想ゲージ場等を導入する前の基本構造を単純立方格子として構成した。これは将来的にこの模型をシミュレーションに実装することを想定しているためである。次にこれを 2 つの副格子 $A \cdot B$ に分け、後述の条件を満たす $SU(2)$ 行列 U_μ を用いてスピンの依存した最隣接（副格子間）の飛び移り H_n を設定し、副格子ごとに符号が反転した次最隣接の飛び移り H_{nn} と交代ポテンシャル V_s によりトポロジカル相転移を記述できるようにした。研究開始当初に導入した模型列は等方的なものであったが、 H_n および H_{nn} を一般化し異方性が大きい場合も扱えるよう拡張したバージョンを示す。

$$H = H_n + H_{nn} + V_s, \quad H_n = \sum_\mu t_\mu \left(\sum_{r \in A} c_{r+a_\mu}^\dagger U_\mu c_r - \sum_{r \in B} c_{r+a_\mu}^\dagger U_\mu^\dagger c_r \right) + \text{H.c.}$$

$$H_{nn} = \frac{1}{2} \sum_{\mu \neq \nu} t_{\mu\nu} \sum_r (-1)^r \left(c_{r+a_\mu+a_\nu}^\dagger c_r + c_{r-a_\mu+a_\nu}^\dagger c_r \right) + \text{H.c.}, \quad V_s = v_s \sum_r (-1)^r c_r^\dagger c_r$$

ここで $\{\mathbf{a}_\mu\}$ ($\mu = 1, 2, 3$) は基本格子ベクトル、 \mathbf{r} は格子点、 $(-1)^r = +1$ ($\mathbf{r} \in A$)/ -1 ($\mathbf{r} \in B$)、 $c_r^{(\dagger)}$ は消滅（生成）演算子。各副格子は構造上それぞれが面心立方格子となる。ただし、系の周期性と対称性はパラメータの取り方に依存するため、必ずしも面心立方格子のそれとは一致しない。なお、当初の模型列は H_n と H_{nn} がいずれも等方的な場合 ($t_1 = t_2 = t_3$, $t_{12} = t_{23} = t_{31}$) に相当する。 $SU(2)$ 行列 U_μ には当面、条件 $U_\mu^\dagger U_\nu + U_\nu^\dagger U_\mu = \delta_{\mu\nu}$ のみを課し、条件を満たす系列をまとめて扱うことで表面/界面状態への影響を系統的に調べることができる。ただし、表面/界面状態の詳細を調べる段階では具体的な形を導入する。

光波束の解析については以下の処方により解を構成し、構成処方の第 2 段階以降および構成した波束のダイナミクスについては数値計算により解析した。この方法では前提として、周波数固有状態の指標の一つに波数ベクトル \mathbf{k} をとることができ、 \mathbf{k} 以外の指標を α と表したとき固有値の組 $\{\omega_{\mathbf{k}\alpha}\}$ と固有状態からなる完全正規直交系 $\{\mathbf{e}_{\mathbf{k}\alpha}\}$ が得られていることが求められる。

- (1) 指標 α ごとに想定する渦構造をもつスカラー関数の組 $\{f_\alpha(\mathbf{r})\}$ を構成する。
- (2) $\{f_\alpha(\mathbf{r})\}$ のフーリエ変換 $\{\tilde{f}_{\mathbf{k}\alpha}\}$ を計算する。
- (3) 次式により波数空間における電磁場の解を構成する。 $\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{k}, t) = \sum_\alpha \tilde{f}_{\mathbf{k}\alpha} z_{\mathbf{k}\alpha} \mathbf{e}_{\mathbf{k}\alpha} \exp(-i\omega_{\mathbf{k}\alpha} t)$
ここで、 $\{z_{\mathbf{k}\alpha}\}$ は自由空間の場合にジョーンズ・ベクトルに帰着するパラメータ。
- (4) $\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{k}, t)$ を逆フーリエ変換した量の実部をとり、実空間における解 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ を得る。

一般的に前提条件を厳密に満足することは困難であるが、実用上はバンド計算の場合と同様、波束の中心波数や内部構造のスケールの逆数などに比べて十分大きい波数や指標まで $\{\mathbf{e}_{\mathbf{k}\alpha}\}$ を用意できれば、完全系ではなくとも正確な解析が行える。 $\{\mathbf{e}_{\mathbf{k}\alpha}\}$ を完全系として用意できる最も単純な例は自由空間である。その他にも、十分大きな 2 つの一樣等方媒質の平坦な界面や一樣等方な誘電体球形粒子の界面を含む系において、問題とする周波数領域/波長領域で誘電率や透磁率の分散が無視できる場合などが例としてあげられる。

4. 研究成果

研究開始年度に強い TI と導体との接合界面のモデル化に問題が生じることが判明したため、経験のあった二次元系の知見を活かせるよう方針を切り替え擬二次元系の境界を主たる対象とすることにした。手始めに平板形状の TI を考える場合に都合のよい弱い TI 相も記述できるように当初の 3 次元格子模型列の拡張し、相構造の確認を行なった。想定した相構造を記述可能で

あるか否か、バルク領域で成り立つ拡張された反転対称性を使った擬パリティ解析からの示唆と表面状態の解析解の構成の双方から確認し、それらの間の整合性を含めて検証を行った。当初の模型に関する知見として、有限厚の系に対しては極めて狭いパラメータ領域でしか表面状態解を構成できないが、半無限系に対しては広範囲のパラメータ領域で可能となることがわかってきた。そこで拡張模型についても半無限系の各種表面に対して解析解の構成を行った。以下に元の単純立方格子を基準とした(001)表面に対する解の存在条件を示す。

$$\sqrt{\frac{|m_k^{\text{off}}| - |t_3|}{|m_k^{\text{off}}| + |t_3|}} < \min \left(\left| -\frac{m_k^{\text{diag}}}{2\sqrt{|m_k^{\text{off}}|^2 - |t_3|^2}} \pm \sqrt{\frac{|m_k^{\text{diag}}|^2}{4(|m_k^{\text{off}}|^2 - |t_3|^2)} - 1} \right| \right)$$

$$m_k^{\text{diag}} = v_s + 4t_{12} \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}_1) \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}_2), \quad m_k^{\text{off}} = 2[t_{23} \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}_2) + t_{31} \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}_1)]$$

ここで \mathbf{a}_1 および \mathbf{a}_2 は元の単純立方格子の格子ベクトル。この条件より、表面内の次最隣接飛び移り t_{12} のみが有限で他がゼロ($t_{23}=t_{31}=0$)の場合、条件は恒等的に不成立となるが、表面に垂直な(100)面内の次最隣接飛び移り t_{23} のみが有限で他がゼロ($t_{12}=t_{31}=0$)の場合は解が存在し得ることが見て取れる。一方、バルクの擬パリティ解析からは、 t_{12}, t_{23}, t_{31} のいずれかのみゼロでない場合、その絶対値が $|v_s|/4$ より大きければ弱いTI相となることが示唆される。上式の存在条件は(001)表面に関する条件を考えているのでこのことと矛盾しない。また表面バンドの分散やスピン密度分布からギャップレスであることやヘリカル性も確認できている。さらに、有限厚の系に対して数値計算を行い、定量的な観点からも半無限系の解析解の妥当性を検証した。

次に、この格子模型列を用いて2種類の表面をもつ平板型の系を考え、いずれの表面にも平行な方向に周期的境界条件を課した場合について射影バンド構造と電荷・スピン密度分布を調べ、表面の組み合わせや平板の厚み方向の層数に対する依存性を明らかにした。バルクの擬パリティ解析からは $|v_s|/4 < |t_{12}|$, $t_{23}=t_{31}=0$ のとき弱いTI相となることが示唆され、解の存在条件からは(100)表面および(010)表面に表面状態が現れ得ることがわかる。(100)表面を側面にもつ平板状系の表面状態とその近傍の状態の分散関係を調べたところ、厚み方向の層数に関する明確な偶奇効果が見られた。図4にバンド・ギャップ(単位 $|t_{mn}|$)の層数依存性を示した。比較のため、強いTI相やバルクのバンド構造が各TI相と類似した絶縁体相の結果も示す。弱いTI相でも偶数層系では表面状態間の混成によりギャップが開き、特殊な表面状態を伴いつつも Z_2 指標の観点から通常の絶縁体に分類されていた系と類似の特徴が見られる。このことは後者も広義のTIと理解できる可能性を示唆しており、TIの概念の一般化を考える上で興味深い。

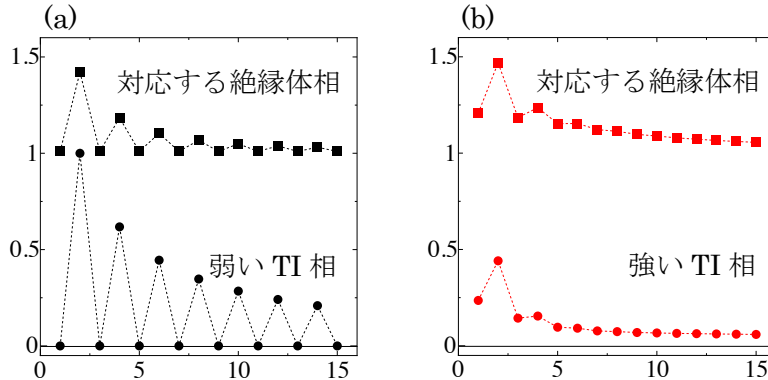


図4 : (a)弱いTI相および (b) 強いTI相におけるギャップの層数依存性

次に、トロイダル型渦構造をもつ光波束に関する成果について説明する。マクスウェル方程式の解として存在し得ること等は研究開始当初の試行計算からも予測していたが、解の構成において多重ボルテックスを導入するスカラー関数への依存性が十分に確認できていなかった。そこで当該関数を特徴付けるパラメータの組合せと導入の仕方を再検討し、波束の内部構造が波束の中心波長の数倍程度であれば幅広いパラメータ領域で安定な解が構成できることを示した(図5)。また、比較対象として既知の円偏光ガウス型波束と軌道角運動量をもつラゲール・ガウス型波束に対しても構成処方の妥当性を検証した。具体的には、2種類の一様等方媒質が平坦な界面を形成した系において、対象とする周波数・波数領域で分散が無視できる状況を想定し、前述の処方で構成した各種波束の構造と伝搬特性を解析した。以下にトロイダル型渦構造のために用意したスカラー関数を示す。

$$f_{\text{TWP}}(\mathbf{r}) = \mathcal{N} \left(\frac{z_{\text{line}}}{|z_{\text{line}}|} \right)^{m_{\text{line}}} \left(\frac{z_{\text{ring}}}{|z_{\text{ring}}|} \right)^{m_{\text{ring}}} \tanh \left(\frac{|z_{\text{line}}|}{\ell_v} \right) \tanh \left(\frac{|z_{\text{ring}}|}{\ell_v} \right) e^{\left\{ -\frac{1}{2\ell_v^2} (|z_{\text{ring}}| - \ell_r)^2 + i\mathbf{k}_c \cdot \mathbf{r} \right\}}$$

$$z_{\text{line}} = (\mathbf{e}_1 + i\mathbf{e}_2) \cdot \mathbf{r}, \quad z_{\text{ring}} = (|z_{\text{line}}| - \ell_R) + i\mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{r}$$

ここで \mathcal{N} は規格化因子、 m_{line} および m_{ring} はそれぞれ直線状ボルテックスと環状ボルテックスの渦度、 ℓ_R および ℓ_r は中空トーラス型のエネルギー分布を決めるパラメータ、 \mathbf{k}_c は中心波数、 $\{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3\}$ は $\mathbf{e}_3 = \mathbf{k}_c/|\mathbf{k}_c|$ としたときの波数空間における右手系基底である。

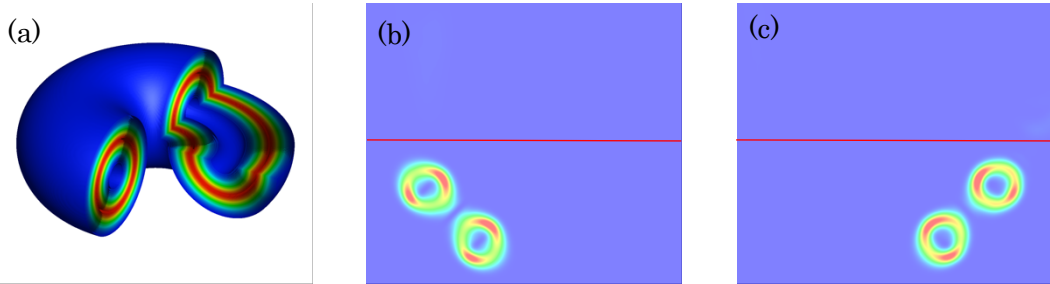


図 5 : (a) トロイダル型渦構造をもつ光波束のエネルギー分布の立体図。(b) および(c) は平坦な界面 (赤線) における全反射の前後 (順に(b)(c)) の断面図。

最後にトポロジカル表面/界面の応用につながる現象の探索について触れる。電子系については、伝導電子スピンを流用いた局在スピンの制御法を探索した。これは 2 次元 TI ヘリカル端状態からの類推より、3 次元 TI ヘリカル表面状態の特性を利用して多彩な伝導電子スピンの生成が可能である。直線状配列だけでなく環状配列の場合にも、伝導電子スピンの流れにより、らせん磁性が誘起され得ることや電流成分により巻き付き数を制御できることを示した (図 6)。周期構造中の光子系については、光ヘリカル端モードだけでなく、それらが混成してできたモードも渦構造を伴うことを見出し、そのような渦構造に由来する特異な伝播特性を探索した。L.-H. Wu と X. Hu らの提案によるトポロジカル・フォトニック結晶模型を用い、微小な反転対称性の破れが極めて非対称な伝播特性を生じることを示した (図 7)。

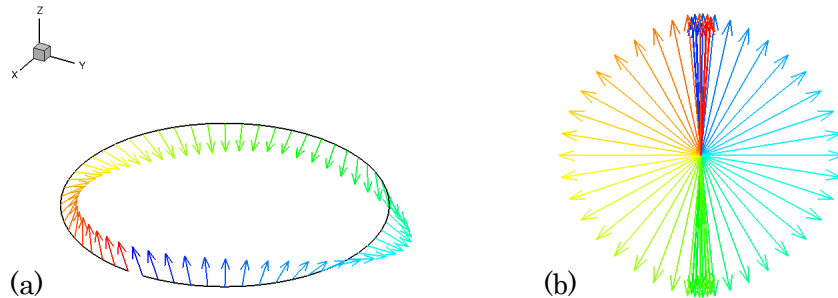


図 6 : 伝導電子スピンの流れ・偏極ともに x 方向の影響を受けた局在スピン環状配列の (a) 立体図と (b) 射影図 (図(a)の黒い円に垂直な面へ射影)。色相は配列上の位置に対応。

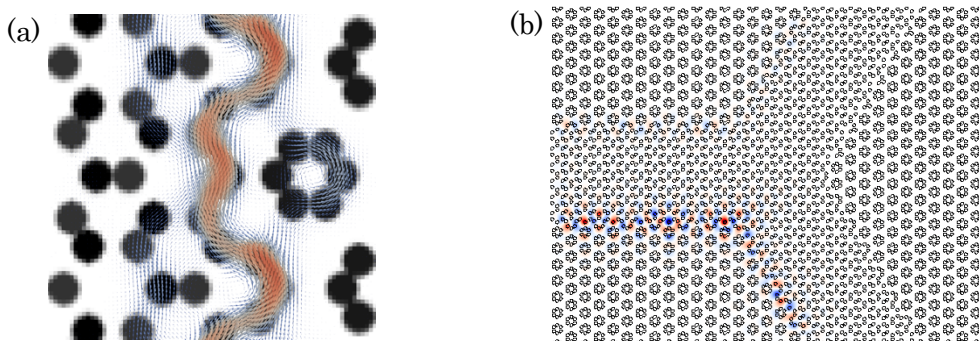


図 7 : (a) 光子系版 TI に相当するトポロジカル・フォトニック結晶 (左領域) と共通の周波数禁制帯をもつフォトニック結晶 (右領域) の境界に現れた光ヘリカル端モードのエネルギー流分布図。(b) 図(a)左領域の結晶を右領域の結晶で囲んだ Y 字型導波路の左端で励起を行った場合のシミュレーション結果。色は紙面に垂直方向の電場成分を表す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Masaru Onoda	4. 巻 9
2. 論文標題 Topological Photonic Media and the Possibility of Toroidal Electromagnetic Wavepackets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1468-1 ~ 1468-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app9071468	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 小野田勝	4. 巻 46
2. 論文標題 トポロジカル媒質を用いたトロイダル光渦の可能性とその伝搬特性	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 449-454
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 無
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14件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小野田勝
2. 発表標題 環状スピン鎖モデルにおける伝導電子スピン流誘起らせん磁性
3. 学会等名 2019年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野田勝
2. 発表標題 平板状トポロジカル絶縁体モデル列におけるヘリカル表面状態の試料構造依存性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 照井亨綺, 小野田勝
2. 発表標題 二次元トポロジカルフォトリック結晶模型における界面モードによる非対称伝搬の高効率化
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 遠藤大暉, 小野田勝
2. 発表標題 ダンピング項を伴う古典スピン・ダイナミクスへの球面中点法の応用
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土門慎太郎, 小野田勝
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体二重スピンフィルター模型におけるスピン干渉効果に対する入射角依存性
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小野田勝
2. 発表標題 局在スピン列/クラスター系に対する伝導電子スピン流の影響に関する数値解析
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菅野勇輝, 小野田勝
2. 発表標題 二次元トポロジカル・フォトリック結晶における界面モード群速度の選択的制御に関する理論解析
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小野田勝
2. 発表標題 拡張版トポロジカル絶縁体格子模型列における表面状態解析解の構成
3. 学会等名 平成28年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 泉澤悠介, 小野田勝
2. 発表標題 拡張版トポロジカル絶縁体格子模型列における表面状態の数値解析
3. 学会等名 平成28年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 土門慎太郎, 小野田勝
2. 発表標題 トポロジカル絶縁体スピンフィルターにおけるスピン干渉効果の応用に向けた理論解析
3. 学会等名 平成28年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 菅野勇輝, 種田敏大, 小野田勝
2. 発表標題 フォトリック結晶界面モード群速度の選択的制御に関する理論解析
3. 学会等名 平成28年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 泉澤悠介, 小野田勝
2. 発表標題 異方的3次元格子模型列における弱いトポロジカル絶縁体相の数値的検証
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小野田勝
2. 発表標題 異方的3次元格子模型列におけるヘリカル表面状態 解析解を用いた相構造の検証
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小野田勝
2. 発表標題 新奇な渦構造をもつ光波束の可能性と安定性に関する数値解析
3. 学会等名 第24回渦系物理国内会議
4. 発表年 2016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
--	---------------------------	-----------------------	----