

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03688

研究課題名（和文）光渦照射に由来する光電子を活用した磁気制御の理論

研究課題名（英文）Theory of magnetic control utilizing photoelectrons with optical vortex

研究代表者

余越 伸彦（Yokoshi, Nobuhiko）

大阪公立大学・大学院工学研究科 准教授

研究者番号：90409681

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：軌道角運動量をもつ光（光渦）はその特徴的な空間構造をもち、物質に照射すると通常とは異なる光学遷移を起こす。光渦ビームを照射された物質の光学遷移選択則を利用することで、物質中の伝導電子やスピン波などの励起状態を定性的に変化させられることを明らかにした。具体的には半導体量子井戸や単層遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD）、カイラル磁性体を対象として励起状態の分散関係における光渦照射の効果を明らかにした。これらの効果は全て光渦由来の新しいスピン-軌道相互作用の出現として理解することができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、光渦照射により新しいタイプのスピン-軌道相互作用を発生させ、それにより物質の磁気秩序を制御する可能性を示したものである。スピン-軌道相互作用はスピントロニクス技術の要であり、光渦のオン/オフで制御できる相互作用の存在は学術的に大きな意義があるものと考えられる。またこの試みは、光の軌道角運動量が物質内の伝導電子に新しい自由度をもたらすことを意味し、光渦照射により物質中の磁気を生成・変調することは学術的意義に止まらず、磁気デバイスの新しい情報処理技術の開発への社会的波及効果も持つと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Light with orbital angular momentum (optical vortex) has a characteristic spatial structure and causes unusual optical transitions when irradiated onto materials. By utilizing the optical transition selection rules of the materials irradiated by the optical vortex beam, we have revealed that we can qualitatively change the excited states such as conduction electrons and spin waves in the materials. Specifically, we have clarified the effects of optical vortex irradiation on the dispersion relations of excited states in semiconductor quantum wells, single-atomic layer transition metal dichalcogenides (TMDs), and chiral magnetic materials. All these effects can be understood as the emergence of new spin-orbit interactions originating from the optical vortex.

研究分野：工学

キーワード：スピントロニクス 光渦 半導体量子井戸 カイラル磁性体

### 1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスは、電子・磁気工学の発展と共に爆発的にその領域を広げてきた。その一方で光学もまた多くの分野と境界領域を広げている。そのような背景のもと、それらの融合領域である光スピントロニクスに大きな期待がかかるのは当然と言える。しかし、そこでは電子の軌道とスピンを同時に扱う一方、光についてはそのスピン(円偏光)のみを利用してきた。そこで光スピントロニクスの新たな自由度として光の軌道角運動量を考えることは必然である。1992年にAllenらが光渦ビームの運ぶ全角運動量を定式化して以来、光の軌道角運動量はその存在を広く認知されてきた。光の軌道角運動量には原理的な上限はなく、その影響を物質内の磁気状態に表出させることができれば、学術的意義にとどまらず、磁気デバイスの情報処理能力を格段に大きくする可能性を持つ。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、光の軌道角運動量が物質の磁気状態へ与える影響について明らかにすることであり、スピン密度やスピン流に注目することで軌道角運動量の影響について微視的視点から取り組む。軌道角運動量もつ光(光渦)はその特徴的な空間構造により、物質に照射すると通常とは異なるバンド間光学励起を起こす。光渦の空間構造を反映して変調されたバンド間光学遷移が顕著になれば、物質本来のスピン軌道相互作用が互いに干渉することで、励起された電子は光渦の渦度に依存するスピン依存散乱を受ける可能性がある。このような状況下における光電子の個別励起や、その影響を受けた集団励起(スピン波励起)の分散関係について明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究では、「光渦照射により誘起する新しいスピン-軌道相互作用」をキーワードに掲げ、複数の物質を対象にして光の軌道角運動量の効果を調べる。対象としたのは、極低温領域で伝導電子が入射光波長よりも長い平均自由行程が見込める、半導体量子井戸や単層遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)、カイラル磁性体を想定した。まずそれぞれの物質について、解析計算により光渦による光学遷移選択則の決定と、どのような光渦誘起の相互作用が起こりうるかを明らかにする。また、クラスタエレメントを利用した数値計算により、導出した相互作用が伝導電子や集団励起(スピン波)の分散関係に与える影響を計算する。光渦の周波数・強度・偏光に対する依存性を詳細に調べ、光の軌道角運動量が顕在化する状況を探る。

### 4. 研究成果

光渦としてLaguerre-Gaussian(LG)ビームを想定し、半導体GaAsの2次元量子井戸やMoS<sub>2</sub>など単層TMDに照射した場合について考える。まず、それぞれの物質についてLGビームによる光学遷移選択則を導出した。特に単層TMDについては、3回回転対称な結晶構造を反映し、選択則が渦度3ごとの周期性を持つことを明らかにした。このことは、結晶構造に起因する電子の角運動量と光の角運動量との交換が行われていることを示す。その後、得られた遷移選択則を取り入れた摂動計算により、伝導電子の有効Hamiltonianを導出した。その結果、半導体量子井戸ではRashba型やDresselhaus型の従来のスピン-軌道相互作用に加えて光渦由来のスピン-軌道相互作用が現れることを示した。また、この相互作用がスピンホール電流の源になる運動量空間におけるBerryの位相の性質を定性的に変調させることを明らかにした。単層TMDについては、光渦由来のスピン-軌道相互作用の影響が電子の有効質量テンソルに現れ、バレーホール効果を変調させることを示した。また単層TMDの大きさが伝導電子のスピン分布に与える影響を計算し、光渦のビームウエストに比べTMDが小さくなる場合では、光渦誘起のスピン-軌道相互作用の影響が弱くなることを明らかにした。

一方で、カイラル磁性体CrNb<sub>3</sub>S<sub>6</sub>にLGビームを照射し、伝導電子のdバンド内の励起を起こした場合について考えた。光励起を取り入れた摂動計算の結果、カイラル磁性体のらせん磁気構造の源とな

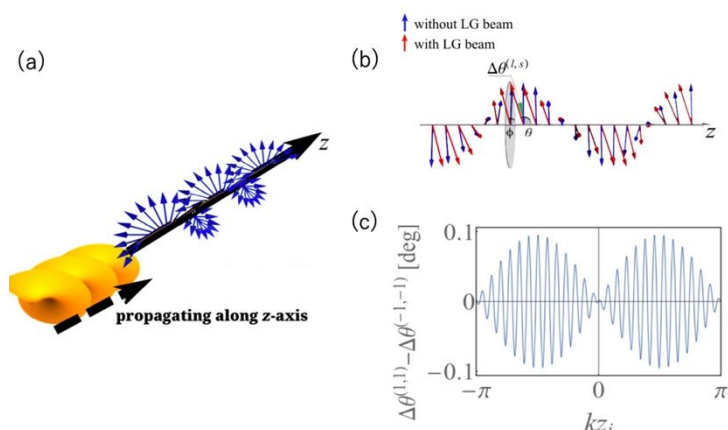


図 1 : (a) カイラル磁性体 CrNb<sub>3</sub>S<sub>6</sub> への光渦 (LG ビーム) 照射の模式図。(b) 光渦誘起相互作用による磁気構造の変調の模式図。(c) 渦度 1 と渦度 -1 の光渦をそれぞれ照射したときの、磁気構造変調の差。

る Dzyaloshinskii–Moriya (DM) 相互作用に加えて、光渦誘起の局在スピン間の相互作用が現れることを示した。この相互作用の出現には DM 相互作用と光渦励起の双方が必須であり、電子の運動と光渦励起の過程が干渉することが本質であることを示している。この光渦誘起の相互作用を取り入れ、局在スピンの安定配置を Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式の定常解を数値的に計算した。通常カイラル磁性体の局在

スピンは DM 相互作用により、らせん回転軸に垂直な面内において回転する。光渦誘起の相互作用はこれを回転軸の方向に倒す方向に働く。また渦度の正負で決まる光渦の回転方向と、DM 相互作用の向きで決まるカイラル磁性体の磁気秩序の回転方向が互いに揃っているか否かで光渦誘起の相互作用の効果には差が現れ、この相互作用が一種のキラル相互作用であることを明らかにした。さらに、その差は光渦の空間構造を反映することを示した。磁気秩序の変調については、その変調の度合いについて光渦の強度や局在スピンのギルバートダンピングの大きさに対する依存性を明らかにした。

引き続いて、変調されたカイラル磁性体の磁気構造に励起されるスピン波の分散関係を導出した。スピン波はスピン流とともにスピントロニクスにおける重要な情報・エネルギー伝達媒体である。導出した局在スピンの有効 Hamiltonian に Holstein–Primakoff 変換を施し、スピン波の分散関係を数値的に計算した。その結果、光渦誘起相互作用により低エネルギー領域に例外点が出現し、その間で分散関係に虚部が現れることを示した。これは、このエネルギー領域のスピン波が増幅と減衰を引き起こしながら伝搬することを示している。また波数ゼロの所にエネルギーギャップが出現しており、これは光渦照射の影響により局在スピン系の空間の対称性が落ちたことを反映している。

本研究では電子間相互作用の小さい半導体系と、電子スピン間の相互作用が支配的な磁性体の双方で、光渦照射がスピン伝導に定性的な影響を与えることを示した。光の軌道角運動量には無限の自由度が存在し、様々な光渦が実験的に次々と実現されている現状を鑑みると、光渦を利用した電子系・分子系における光スピントロニクスの分野の裾野は大きいと期待する。

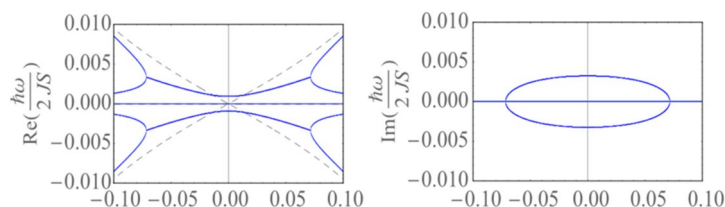


図 2: LG ビーム照射下の  $\text{CrNb}_3\text{S}_6$  におけるスピン波の分散関係 (右図は分散関係の実部、左図が虚部)。右図の点線は LG ビームを照射していないときの分散関係。

## 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 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yutaro Goto, Hajime Ishihara, and Nobuhiko Yokoshi	4. 巻 60
2. 論文標題 Dispersion relation of spin wave in chiral helimagnet under stationary optical vortex radiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 98001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac14a6	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 Yutaro Goto, Hajime Ishihara, Nobuhiko Yokoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Twisted light-induced spin-spin interaction in a chiral helimagnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1367-2630/abf613	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 S. Ishii, N Yokoshi and H. Ishihara	4. 巻 1220
2. 論文標題 Optical selection rule of monolayer transition metal dichalcogenide by an optical vortex	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12056
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1220/1/012056	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 伊関凌、余越伸彦
2. 発表標題 光渦照射下における単層TMDのスピンミクシング
3. 学会等名 日本物理学会・2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊関凌、石井翔大、石原一、余越伸彦
2. 発表標題 光渦照射下の単層TMDにおけるバレーホール電流
3. 学会等名 日本物理学会・2022年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 余越伸彦、後藤佑太郎、石原一
2. 発表標題 光の軌道角運動量が誘起するスピン軌道相互作用
3. 学会等名 研究会「光の軌道角運動量の発生機構と物質相互作用の理解」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 余越伸彦、石原一
2. 発表標題 GaAs量子井戸における光渦誘起スピン軌道相互作用の効果
3. 学会等名 日本物理学会・2020年春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石井翔大、石原一、余越伸彦
2. 発表標題 単層遷移金属ダイカルコゲナイドにおける光渦誘起の異方的なスピン密度分布
3. 学会等名 第30回光物性研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ishii, N. Yokoshi and H. Ishihara
2. 発表標題 Optical vortex-electron interaction in monolayer transition metal dichalcogenides
3. 学会等名 20th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井翔大、余越伸彦、石原一
2. 発表標題 単層遷移金属ダイカルコゲナイドにおける光渦照射時のスピン密度分布
3. 学会等名 日本物理学会・2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ishii, N. Yokoshi and H. Ishihara
2. 発表標題 Transition strength of a standing optical vortex beam in monolayer transition metal dichalcogenides
3. 学会等名 The 6th Optical Manipulation Conference (OMC '19) (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
---------------------------	-----------------------	----

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