

光学第 47 巻第 4 号(2018 年 4 月)「進展する光スピントロニクス」 p.162  
に最終版は掲載済み

## 光渦レーザーによる超高速ナノスピン構造制御

佐藤正寛<sup>1</sup>, 藤田浩之<sup>2</sup>

<sup>1</sup>茨城大学 理学部 〒310-8512 茨城県水戸市文京 2-1-1

<sup>2</sup>東京大学 物性研究所 〒277-8581 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

## Ultrafast control of nano spin structures with twisted lasers

Masahiro Sato<sup>1</sup> and Hiroyuki Fujita<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Ibaraki University, 2-1-1 Bunkyo, Mito, Ibaraki 310-8512 Japan

<sup>2</sup>The Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwa-no-ha, Kashiwa 277-8581 Japan

E-mail: masahiro.sato.phys@vc.ibaraki.ac.jp

## Synopsis

Optical vortex (vortex beam), the laser carrying an orbital angular momentum, is being one of the hottest topics in the field of optics. In this short article, we review our recent theoretical proposal for the application of vortex beams to magnetism. Based on the numerical calculation with Landau-Lifshitz-Gilbert equation, we analyze spin dynamics in magnets under vortex beam. We show that topological magnetic defects such as skyrmions and skyrmioniums can be systematically created in an ultrafast way, by applying sufficiently-focusing high-frequency (X-ray, ultraviolet, visible) or low-frequency (Terahertz) vortex beams to a class of chiral magnets. Moreover, we predict that Terahertz-beam driven magnetic resonance induces a scalar spin chirality and it suggests that the vortex beam can generate a transient topological Hall effect in itinerant magnets, in principle.

**Key words:** optical vortex, topological magnetic defects, ultrafast spintronics

## 和文要旨

光渦レーザー，すなわち軌道角運動量をもつレーザービームの応用が精力的に研究されている。本稿では，最近我々が理論的に提案した光渦によるナノスピン構造の高速制御方法について紹介する。我々は，高周波数(X線，紫外，可視光)と低周波数(テラヘルツ)の光渦を磁性体に照射した際のスピンドYNAMICSを Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式の数値解析により調べた。その結果，高及び低周波数光渦を巧くカイラル磁性体に照射することで，スキルミオンやスキルミオニウムなどのトポロジカル磁気欠陥をナノ秒からピコ秒オーダーで系統的に生成できることを明らかにした。更に，テラヘルツ光渦による磁気共鳴により渦状の波面を持ったスピン波を励起させるとスカラースピンカイラリティが生成することも数値的に示した。これはテラヘルツ光渦が誘起するホール効果が原理的に実現可能であることを示唆している。

## はじめに

光渦レーザーとは軌道角運動量をもつレーザーであり、1992年にAllenらによって明示的にその存在が予言された<sup>1)</sup>。それ以来、多様な光渦の生成方法や応用方法が精力的に研究されている。現在では、X線からテラヘルツ(Terahertz: THz)の広い周波数帯の光渦が生成可能であり、その強度や集光の限界も次々更新されている。光渦の応用では、光渦の軌道角運動量の情報を何らかの意味で物質に転写(プリント)することが強く意識されている。例えば、光渦をマイクロメートル( $\mu\text{m}$ )スケールの微粒子に照射して微粒子を回転させる(光子の角運動量の力学的角運動量への転写)方法が確立している。

この他にも多様な光渦による物質制御法が実現又は提案されているが、その多くは $\mu\text{m}$ 以上の物質の制御に焦点を当てている。そこで我々は最近、光渦を巧く磁性体に照射することで、よりミクロな対象である電子スピンのダイナミクスを高速制御する方法を理論的に考察している<sup>2,3)</sup>。これは、これまでの光渦の軌道角運動量をマクロ物質へ転写する方法のマイクロ版の提案と言える。我々は、磁性体に光渦を照射した際のスピンドイナミクスをLandau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式に基づく数値解析法により詳細に調べ、光渦による数種の超高速ナノスピン構造制御方法を提案している。本稿では、これらの新しい方法について解説し、光渦の電子物性研究における潜在能力を伝えたい。

## 1. 光渦とは

まず、光渦(ラゲール・ガウシアンビーム)の定義を簡単に説明する。一般に光渦は、円筒座標系( $r, \phi, z$ )で記述したマックスウェル方程式において円筒軸( $z$ 軸)方向に伝搬する振動電磁場解<sup>1,4)</sup>として定義される。振動部分を除いて、集光面( $z=0$ )における電場又は磁場は

$$\mathbf{E}(r, \phi, z=0) \propto \mathbf{e}_{\text{pl}} \left(\frac{r}{w}\right)^{|m|} L_p^{|m|} \left(\frac{2r^2}{w^2}\right) e^{im\phi} e^{-r^2/w^2}$$

の実部と虚部で与えられる。ここで $\mathbf{e}_{\text{pl}}$ は偏光ベクトル、ウェスト $w$ は光渦の集光面での広がり、 $L_p^{|m|}$ は一般化ラゲール関数で $p+1$ が動径 $r$ 方向の節の数に対応する。指数 $e^{im\phi}$ が $z$ 軸周りの軌道角運動量を表しており、その値は $hm$ である。 $m=0$ が標準的なガウシアンビームに対応する。一方有限の $m$ を持つ光渦では、原子の軌道角運動量を持つ電子軌道と同じように位相 $\phi$ の特異性を避ける為に、中心 $r=0$ で電磁場強度がゼロになる。それ故、集光面での光渦の電磁場強度 $|\mathbf{E}|^2$ 分布は図1(a)のようにリング構造を持つ。また軌道角運動量に起因して、集光面での電磁場のスナップショットは図1(b)のような角度 $\phi$ 依存性をもつ。このリング状の強度分布と電磁場の $\phi$ 方向の非一様性が光渦レーザーの大きな特徴である。これまでの光物性理論研究では主に空間的に一様な平面波による物質の応答が考えられてきた。光渦の物質への照射では、その空間分布を利用した新しい光誘起現象が期待される。

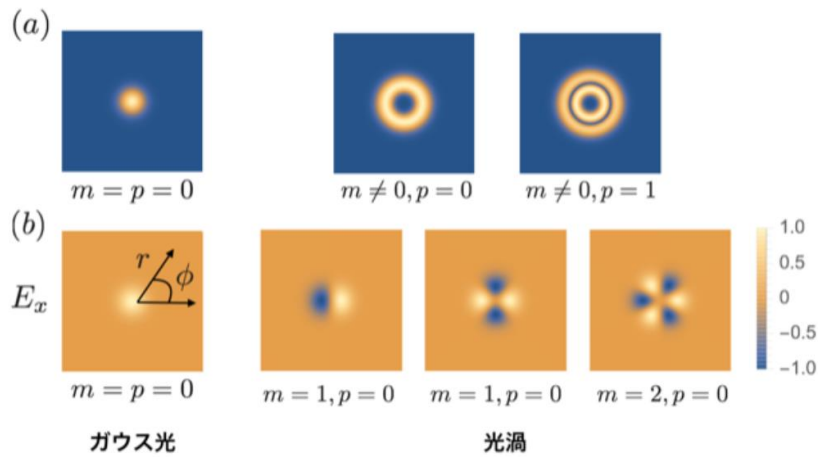


図 1 : (a)光渦レーザーの集光面における電場(または磁場)強度 $|E|^2$ 分布. 有限の  $m$  をもつ光渦では, 中心で強度がゼロになるリング状の強度分布が実現する. (b)直線偏光光渦レーザーの集光面における電場(または磁場) $x$ 成分のスナップショット. 軌道角運動量  $m$  が増加するごとに角度  $\phi$  方向の符号変化の回数も増加する.

## 2. 磁性体とトポロジカル磁気欠陥

続いて, 光渦の照射対象である磁性体について解説する. 多彩な磁性体の中で, 本稿では, 基本的な強磁性体とカイラル磁性体に焦点を当てる. カイラル磁性体とは空間反転対称性が破れたカイラルな結晶構造をもつ磁性体であり, この系ではしばしば隣接スピンの外積で定義されるジャロシンスキー守谷(DM)相互作用  $\mathbf{D}_{rr'} \cdot \mathbf{S}_r \times \mathbf{S}_{r'}$  が現れる ( $\mathbf{D}_{rr'}$  は DM ベクトルという). 本稿では, 強磁性体のモデルとして標準的な交換相互作用  $J_{rr'} \mathbf{S}_r \cdot \mathbf{S}_{r'}$  を持つ正方格子強磁性ハイゼンベルグ模型を採用し, 一方カイラル磁性体のモデルとして, この交換相互作用に加えて, 正方格子の 2 方向のボンド上に DM 相互作用を導入した模型<sup>5)</sup>を考える. これは B20 化合物磁性体薄膜<sup>5)</sup>などの有効模型として知られている.

さて, カイラル強磁性体の物性と光渦との相性について議論しよう. 磁場中のカイラル磁性体模型の基底状態では, 低磁場, 中間磁場, 高磁場域で各々ヘリカル秩序相, スキルミオン結晶相, 強磁性相(図 2(a))が実現する<sup>5)</sup>. この相構造は B20 化合物のそれと良く合致する. スキルミオン結晶相では, スキルミオンと呼ばれる磁気欠陥(図 2(b))が三角格子を組んだ磁気構造が実現する. 図 2 のスキルミオンやスキルミオニウムはトポロジカル欠陥の典型例であり, これらはスキルミオン結晶相において一旦生成されると消滅しにくく長寿命を持つことが知られている. それ故, これらの磁気欠陥を新しい情報処理に利用する試みが活発に議論されている.

これら磁気欠陥と光渦の強度分布の形状との類似性から、光渦を利用した磁気欠陥の高速生成が期待できる。しかし、これを実現するには以下の問題を解決する必要がある。スキルミオンの典型的な大きさは 10-1000 ナノメートルであるが、この大きさに相当する回折限界(～波長)をもつ光渦は可視光より高周波数帯に対応する。一方、磁性体中のスピン集団運動の典型的な時間スケールはギガ Hz から THz であり、これは可視光の周波数( $10^{15}$ Hz 以上)より格段に遅い。つまり、磁気欠陥サイズ程度に集光された光渦の電磁場振動は電子スピンの感じ取れないほど高速なのである。我々は、この時空スケールの問題を解決し光渦で磁気欠陥を生成制御する方法を提案している<sup>2,3)</sup>。

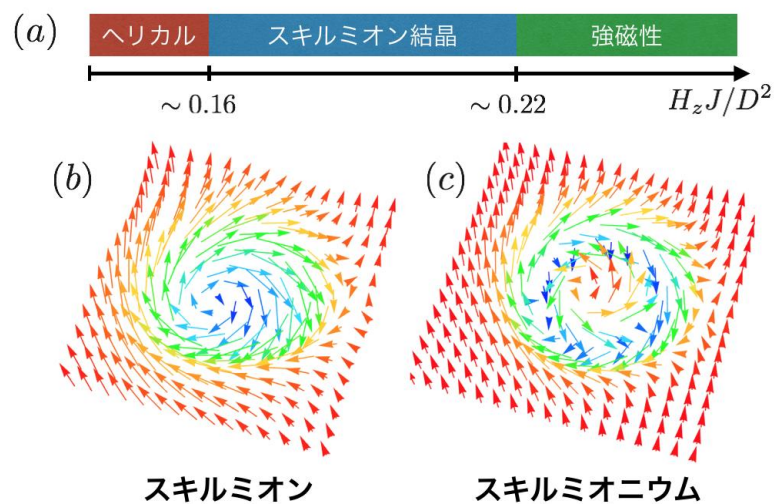


図 2 : (a) 正方格子カイラル強磁性体モデルの磁場  $H_z$  中基底状態相図。2 次元薄膜磁性体における磁気欠陥である (b) スキルミオンと (c) スキルミオニウムの構造。矢印は各位置の磁性イオンの電子スピンの向きを表す。

### 3. 高周波数帯光渦の熱効果

本節では、磁気欠陥サイズに集光できる高周波数(X線, 紫外線, 可視光)光渦による磁性制御法について議論する<sup>2)</sup>。前節で述べたように、高周波数電磁場振動に電子スピン集団の運動は追従できない。しかし、高周波数光渦は物質中のスピン以外の自由度(電子遷移など)と直接結合し、その結果、物質はピコ秒程度で加熱される<sup>6)</sup>。電子スピンはこの熱を感じ取ることができる。そこで我々は、十分集光された高周波数光渦をカイラル磁性体に照射した際に、光渦の電磁場強度に比例してリング状の温度上昇が発生すると仮定し、その高速加熱効果により発生するスピンダイナミクスを LLG 方程式に基づき解析した。光渦を照射した際の磁気欠陥生成過程の時間発展の様子を図 3 に示している。この図は、光渦の

強度とサイズを巧く調整すれば、スキルミオン、スキルミオニウム、2重以上のリング構造を持つ磁気欠陥群を系統的にナノ～ピコ秒で生成できることを示している。この加熱効果による超高速磁気欠陥生成方法は、カイラル強磁性体以外にも、カイラル反強磁性体や金属及び絶縁体などの広いクラスの磁性体に適用できる<sup>2)</sup>点を強調したい。

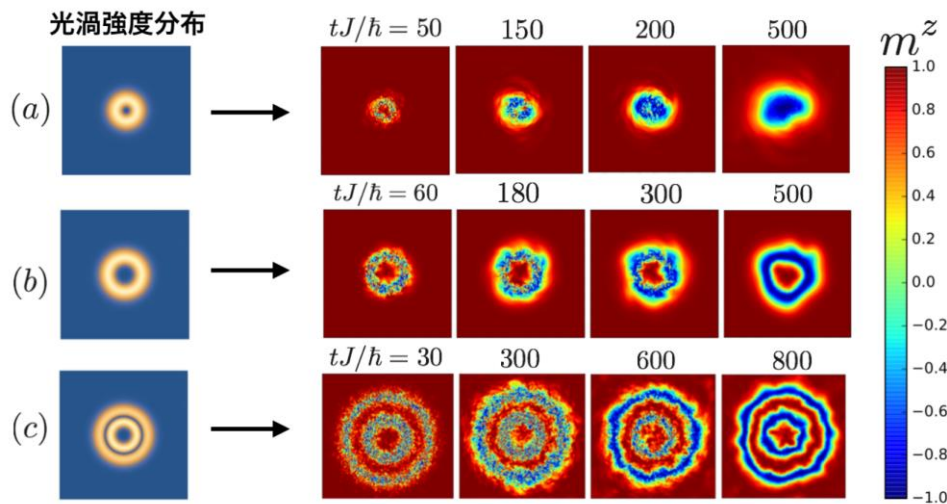


図 3：高周波数光渦をスキルミオン結晶領域で実現する準安定強磁性状態に照射した際の加熱効果によるスピンの時間発展( $tJ/\hbar=1$  が約 0.1-1 ピコ秒). (a)ウエスト  $w$  の小さな単一リング光渦, (b)適度な  $w$  の単一リング光渦, (b)2重リング光渦を照射すると、各々、スキルミオン、スキルミオニウム(リング状の欠陥)、2重リング状の欠陥が生成される。 $m^z$  が紙面に垂直方向の磁化を表している。

#### 4. テラヘルツ光渦と磁性体の結合

前節と異なり、スピン集団運動の時間スケールで振動する THz 光渦による磁性制御を考えよう<sup>3)</sup>。このとき、光渦と磁性体は直接結合し、前節より豊かな磁気現象が期待される。まず単純な静磁場中の2次元強磁性ハイゼンベルグ模型において磁気共鳴周波数に等しい周波数の THz 光渦パルスを印加したときのダイナミクスを LLG 方程式で解析すると、波面が渦を巻いたスピン波が誘起され、光渦の軌道角運動量の符号に対応して正負のスカラースピнкаイラリティ $\chi_s$ (隣接3スピンのスカラー3重積)が発生することを明らかにした。金属磁性体では $\chi_s$ を持つ磁気構造がホール効果を誘導する<sup>7)</sup>ことが知られており、我々の結果は光渦誘起ホール効果が原理的に可能であることを示唆している。

続いて、カイラル磁性体に THz 光渦を照射する状況を考えよう。2節で述べたように、通常の THz 波の回折限界はスキルミオンのサイズより桁違いに大きく、光渦の空間異方性を電子スピン達が感じることは難しい。しかし、最近のプラズモニクスや近接場光技術の



急速な発展により，THz 光渦が数  $10\ \mu\text{m}$  程度まで集光可能<sup>8)</sup>となりつつあり，THz 光渦と磁気欠陥のサイズが接近してきている．そこで我々は，THz 光渦をスキルミオンサイズまで集光できると仮定し，光渦の電磁場の効果を LLG 方程式に基づき解析した．高強度 THz 光渦ハーフサイクルパルスをカイラル強磁性体模型に照射した際の典型的なスピンの時間発展が図 4 である．カイラル磁性体の DM ベクトルと光渦の軌道角運動量  $\hbar m$  の相対関係に依存して，量子数  $m$  を持つ光渦により  $\text{sgn}(m)(m+1)$  個のスキルミオンが高速生成される．これはまさに光渦の軌道角運動量が磁性体にプリントされる現象といえる．

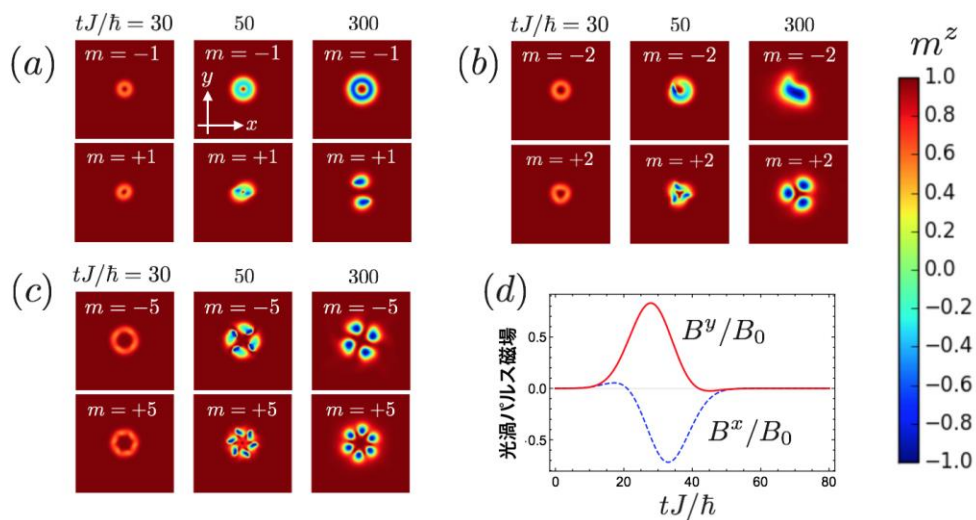


図 4：カイラル強磁性体の準安定強磁性状態に様々な軌道角運動量  $\hbar m$  を持つ THz 光渦ハーフサイクルパルス(d)を照射した際のスピンの時間発展．小さな円状の欠陥がスキルミオン 1 個に対応する． $m = -1$  の場合だけスキルミオンでなくリング状のスキルミオニウムが発生する．

## 5. まとめと展望

本稿では，我々が最近提案した光渦によるナノスピン構造の高速制御方法—光渦の熱効果(3 節)と THz 光渦による磁性制御(4 節)—について解説した．光渦は言うまでもなく通常のガウス光より情報を持つレーザーである．この光渦を含めて空間構造を持つレーザーによるスピントロニクス研究は始まったばかりであり，広大な研究開拓領域を提供している．実際，我々は最近，空間変調を持つ THz 円偏光によるスピン流生成法<sup>9)</sup>や光渦の親戚にあたる偏光渦ビーム<sup>4)</sup>による電子物性制御法を考察している．今後も光渦や空間構造をもつレーザーを利用した質的に新しい電子物性及びスピントロニクス研究の進展が期待される．

## 文 献

- 1) L. Allen, *et al*, Phys. Rev. A, **45** (1992) 8185.
- 2) H. Fujita and M. Sato, Phys. Rev. B, **95** (2017) 054421.
- 3) H. Fujita and M. Sato, Phys. Rev. B, **96** (2017) 060407(R).
- 4) 戸田泰則, 物性研究・電子版 (2015年2月号) 041205.
- 5) S. Seki and M. Mochizuki, *Skyrmions in Magnetic Materials* (Springer, Berlin, 2016).
- 6) A. Kirilyuk, A. V. Kimel, and T. Rasing, Rev. Mod. Phys. **82** (2010) 2731.
- 7) Y. Taguchi, *et al*, Science, **291** (2001) 2573.
- 8) T. Arikawa, S. Morimoto, and K. Tanaka, Opt. Express, **25** (2017) 13728.
- 9) M. Sato, S. Takayoshi, and T. Oka, Phys. Rev. Lett., **117** (2016) 147202.