

光波の角運動量と物質科学

尾松孝茂

千葉大学大学院融合科学研究科, JST-CREST

Materials science by utilizing angular momentum of light

Takashige OMATSU^{1,2}

Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University

Abstract

Optical vortices, carrying an annular intensity profile and orbital angular momentum owing to a spiral wavefront, have a potential to be applied to various fields such as optical manipulation, super resolution microscopy, and optical telecommunication. Recently, we and our co-workers have discovered that optical vortices can force materials to form chiral nano-structures owing to angular momentum transfer. In this presentation, I address a recent progress of chiral nano-structures fabrication based on angular momentum transfer from the optical vortices to materials.

1. はじめに

レーザー共振器の固有モードであるエルミート・ガウスビームとは異なる螺旋波面を持つ光波を総称して光渦と呼ぶ。1992年 L. Allen らは「代表的な光渦の一つであるラゲール・ガウスビームは偏光に依存しない角運動量(軌道角運動量)を示す」ことを発表した。今から 20 年前のことである。その後、多くの研究者が指摘してきたように光渦の示す軌道角運動量は物性研究に応用できる潜在的可能性がある。しかしながら、光渦に関する研究は、主として空間伝播などに関する理論がほとんどである。特に、軌道角運動量の応用研究は微粒子トラッピングを除くと皆無であった。近年、われわれは光渦に変換されたパル

スレーザーを金属に照射すると、ナノ空間における金属の構造を螺旋状に変形できることを発見した。このプロセスをわれわれは光渦レーザーアブレーションと呼んでいる。この現象は、光渦を照射した際に発生する溶融もしくは蒸散した金属微粒子(金属クラスター)が光渦の角運動量を受取ることを実験的に示した初めての実験結果であると同時に、光波の角運動量がナノスケールにおける物質の構造や物性を決定することを示すものである。

本講演では、円偏光に由来するスピン角運動量を含めた光波の角運動量とナノ物質の相互作用に焦点を当てて最新の研究成果を紹介する。

2. 光渦と全角運動量

光渦の代表的なものにヘルムホルツ方程式の近軸固有解であるラゲール・ガウスビームがある。ラゲール・ガウスビームは、円筒座標系における方位方向の周期的境界条件から現れる量子数 m (トポロジカルチャージ) と動径方向の量子数 p で一般に特徴づけられ、ビームウエストの位置における電場 $E(r, \phi)$ は

$$E(r, \phi) \propto \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0} \right)^{|m|} L_p^{|m|} \left(\frac{2r^2}{\omega_0^2} \right) \exp \left(-\frac{r^2}{\omega_0^2} + im\phi \right)$$

で与えられる。ここで、 ω_0 は光のビームウエストサイズ、 r 、 ϕ はそれぞれ円筒座標系の動径と方位角度である。ラゲール・ガウスビームの特徴である軌道角運動量を決めるのは方位方向のトポロジカルチャージ m であり、動径方向の量子数 p は 0 であることが多い。

光の角運動量はビーム断面内における方位方向のポインティングベクトルから導き出されるので、角運動量密度の空間分布 $j_{m,s}(r)$ は次の式で与えられる。

$$j_{m,s}(r) = \varepsilon_0 \left\{ \alpha m I_m - \frac{1}{2} \alpha s r \frac{\partial I_m}{\partial r} \right\}$$

ここで、 s は円偏光に由来するスピン角運動量を表す量子数 (0, ± 1)、 ε_0 は真空中の誘電率、 I_m は m 次ラゲール・ガウスビームの強度分布となる。したがって、

$$j_{m,s}(r) \propto \frac{\omega}{|m|!} \left(m - |m|s + s \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0} \right)^2 \right) \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_0} \right)^{2|m|} \exp \left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2} \right)$$

という式が最終的に得られる。

1 光子あたりの全角運動量 $j\hbar$ は、この式を空間積分することで求められ、結果として $m\hbar + s\hbar$ となる。

3. 光渦によるナノ構造制御

実験光学系を簡単に紹介する。すべての実験は室温でかつ大気雰囲気中で行い、真空系は使用していない。光源には Q スイッチ Nd:YAG レーザー (波長 1064nm、パルス幅 20ns) を使用した。レーザー光を石英の螺旋位相板 (方位方向に 2π の位相が与えられるように厚みが $\lambda/16$ ずつ変調されている分割位相板) でガウスビームから光渦へ変換し、さらに 1/4 波長板を用いて円偏光に変換する。また、螺旋位相板を複数枚重ねることで全角運動量 $j\hbar$ を $-3\hbar \sim 3\hbar$ の範囲で変調できる。この光渦を対物レンズで金属 (タンタル) ターゲット上へ集光する。金属面でのレーザーの集光径は $65\mu\text{m}$ 、レーザーパルスエネルギーは $0.1 \sim 1\text{mJ}$ である。加工されたターゲット表面を観測した走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像をいくつか紹介する。これらは、同一の場所に 4 パルスを重ねて照射している。

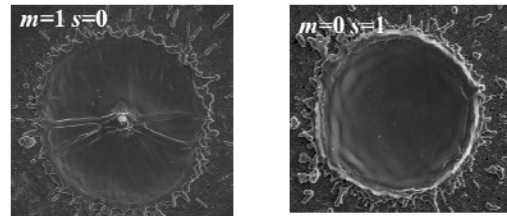


図 1 光渦レーザー照射によってできたナノ構造体の電子顕微鏡画像。軌道角運動量が 0 の場合、スピン角運動量があってもナノ構造体はできない。

光渦を照射した場合、加工痕中央部に小さな針状構造体ができる(図 1)。針状構造体の高さは $10\mu\text{m}$ を超え、金属ターゲットの表面から突き出している。また、針状構造体の先端直径は $<70\text{nm}$ であり、レーザー波長のわずか $<1/15$ に相当する。最も興味深いのは、針状構造体の側面が螺旋を巻いている点である(図 2)。

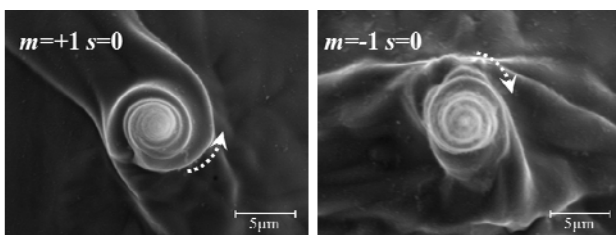


図 2 軌道角運動量の符号によるナノ構造体のカイラリティー制御。

螺旋の向きは m の符号によって決まり、螺旋の単位高さ当たりの巻数(ここでは螺旋周波数と定義している)は j の大きさを大きくしていくと増加する。また、 m 、 s が違っていても j の大きさが同じであれば、螺旋周波数は同じになる(図 3、図 4)。一方、円偏光ガウスビームでは、このような構造体は何も形成されない。

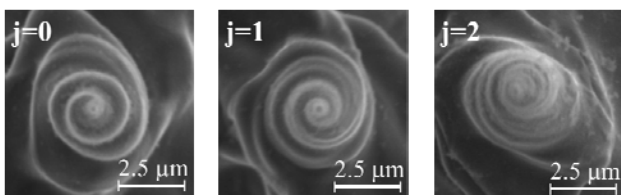


図 3 全角運動量 j をパラメータにして観測されたナノ構造体。 j が大きくなるにつれて螺旋の巻数が密になる。(螺旋周波数が高くなる。)

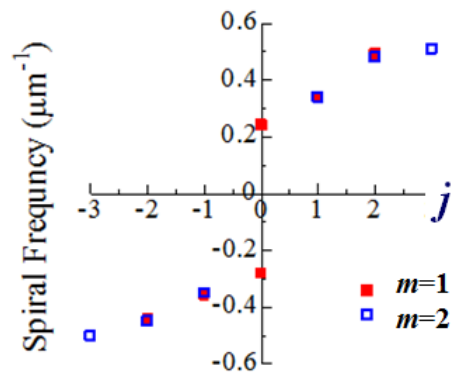


図 4 ナノ構造体の螺旋周波数と光波の全角運動量との関係。

これらの実験事実は、物質に転写された光波の軌道角運動量が、物質を針状ナノ構造体へと変形することを意味する確かなエビデンスである。このようにしてできた構造体をわれわれはカイラルナノ構造体と呼んでいる。

対物レンズの NA を大きくしてレーザー光の集光径を小さくしていくと、カイラルナノ構造体の先端直径は小さくなり、 $\text{NA}=0.18$ で最短直径は 36nm になった(図 5)。

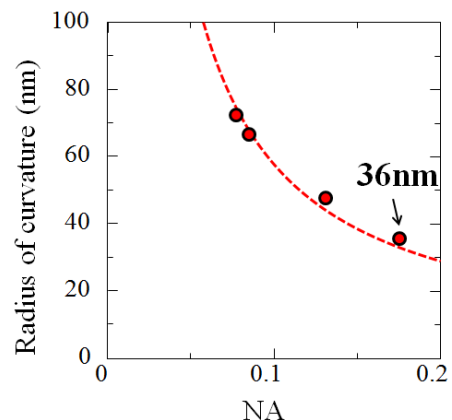


図 5 カイラルナノ構造体の直径と集光レンズの NA の関係。

また、照射するパルス数を増やしていくごとにカイラル金属ナノニードルの高さは高くなり、8パルス以上になるとほぼ飽和する。

カイラルナノ構造体と金属基板間の抵抗値は $50\text{m}\Omega$ 以下で基板の物性値とほとんど変わらない金属特性を示す。さらに、エネルギー分散型 X 線分析(EDX, Energy dispersive X-ray spectrometry)の結果から、カイラルナノ構造体の組成と金属基板の組成は同じであることも分かった。

カイラルナノ構造体の形成は、タルタルの他、シリコンや銅でも確認されている。

4. まとめ

Allen が軌道角運動量の存在を提唱してから早 20 年が経過する。当初、光波の偏光に依存しない角運動量という新しい概念に対する学術的な興味が先行していた感は否めない。ここ数年、レーザー技術や空間変調器などのデバイス技術が大きく進展し、光波の角運動量が自在に制御できるようになってきた。

その結果、光波の角運動量に関する研究は単なる学術的興味から応用研究へと展開する兆しが見えてきた。そのひとつがカイラルナノ構造体の創成である。この現象は、光波の角運動量がナノ物質に転写すること、さらに、光波の角運動量によってナノ物質の構造や物性が制御できることを示す最初の研究成果と言

える。

カイラルナノ構造体は潜在的に様々な分野への応用が期待できる。例えば、2次元のアレイ状に配列すれば、旋光性を持つ人工材料(カイラルメタマテリアル)やバイオ MEMS が創成できる可能性がある。また、電界放射型電極、マイクロマシンのためのナノネジ、太陽電池など機能性デバイスの表面加工にも応用できるかもしれない。

謝辞

有意義な研究討議をさせて頂いた北海道大学の森田隆二教授、実験の一部を担当頂いた千葉大学の宮本克彦准教授、時実 悠博士研究員に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) L. Allen, M.W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, J. P. Woerdman, Phys. Rev. A **45**, 8185 (1992).
- 2) A. T. O'Neil, I. MacVicar, L. Allen, M. J. Padgett, Phys. Rev. Lett. **88**, 053601 (2002).
- 3) M. Padgett, J. Courtial, L. Allen, Phys. Today **57**, 35 (2004).
- 4) T. Omatsu, K. Chujo, K. Miyamoto, M. Okida, K. Nakamura, N. Aoki, R. Morita, Opt. Express, **18**, 17967 (2010).
- 5) K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, T. Omatsu, Nano Lett. **12**, 3645 (2012).
- 6) K. Toyoda, F. Takahashi, S. Takizawa, Y. Tokizane, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, Phys. Rev. Lett., **110**, 143603 (2013).