

光渦を照射するだけで構造色を示すフォトニックリングを直接印刷！ －次世代プリンタブルエレクトロニクス技術の確立－

千葉大学分子キラリティー研究センターの尾松孝茂教授、桑折道済准教授、北海道大学大学院工学研究院の山根啓作准教授、大阪市立大学大学院理学研究科の柚山健一講師、大阪大学大学院基礎工学研究科の川野聡恭教授らの共同研究グループは、誘電体（絶縁体）のナノ微粒子が分散して存在する液膜に光渦^{注1}を照射することで、青から青緑の構造色^{注2}を示すフォトニック構造^{注3}のマイクロリングを印刷することに成功しました。さらに、金属のナノ微粒子が分散する液膜に光渦を照射することにより、単一の金属ナノ粒子を高精度（高解像度）で印刷できることも示しました。

これらの印刷技術は、マイクロリングレーザー、プラズモニックナノアンテナといった次世代の光通信や、バイオセンサーといったデバイス開発など、次世代プリンタブルエレクトロニクス技術の確立に繋がることが期待されます。また、光渦とナノ粒子の相互作用に基づくこれらの現象を応用することで、混合物中のナノ微粒子の種類（誘電体であるか金属であるか）に応じてナノ微粒子を空間的に分離する「光渦ナノ粒子ソーティング」という新しいナノ微粒子分離法が可能となります。（図1）

本研究成果は、2021年10月25日にドイツ学術誌「Nanophotonics」にてオンライン掲載されました。

■ 研究の背景

近年、電子デバイスのフレキシブル化、製造のオンデマンド化の需要の高まりに伴い、半導体・電子製品などを印刷（プリンティング）により製造するプリンタブルエレクトロニクス技術に注目が集まっています。レーザー誘起前方転写法^{注4}（Laser-induced forward-transfer: LIFT）は、単一レーザーパルスで液膜に照射して印刷したい物質（ドナー物質）を吐出させて転写するという印刷技術です。ノズルを使うノズルジェット印刷とは異なり、高濃度で高粘度なドナー物質でもノズルの目詰まりの心配がなく印刷できるため、次世代プリンタブルエレクトロニクスの印刷手法として期待されています。

しかし、LIFTは印刷できるドットの形状やドット内のドナー物質の空間分布を制御することは原理的に不可能でした。これらの課題を克服するため、光渦と呼ばれる特殊なレーザー光を用いた光渦レーザー誘起前方転写法（光渦LIFT）を考案しました。

■ 研究の成果

本研究では、誘電体ナノ微粒子分散液膜にナノ秒光渦パルスを照射することで、図2（右）（次ページ）に示すような

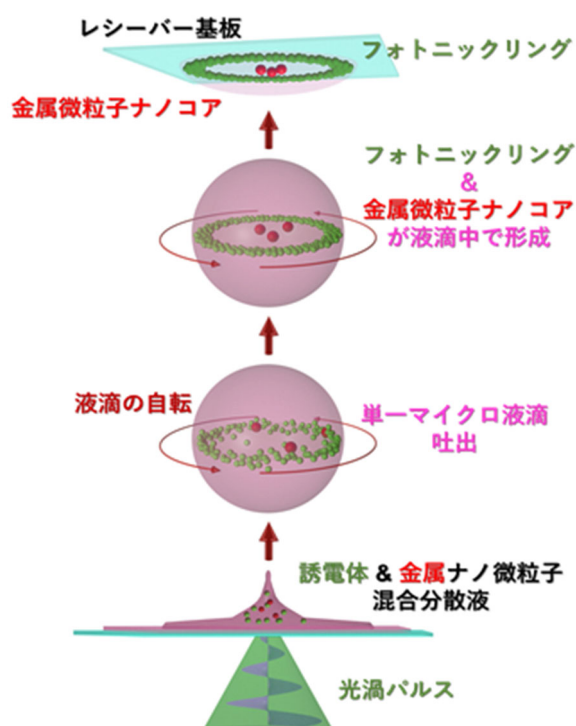


図1 光渦ナノ粒子ソーティングの概念図。

誘電体：レーザー吐出された液滴に対する光渦の軌道角運動量の効果でナノ微粒子が三次元的に最密充填されてフォトニック構造を有するマイクロリングが形成される。

金属：液滴の自転運動に加えて、金ナノ微粒子が光渦の光場から斥力（しりぞける力）を受けて液滴の中央部に捕捉され、ナノコアとして印刷される。

青から青緑の構造色を示す円環のマイクロリングの直接印刷に成功しました。この構造色は誘電体ナノ微粒子の三次元最密充填効果によるものです (P2「実験の詳細」参照)。

一方、従来のガウシアンビーム^{注5)}を用いたLIFTで転写されたドットは、図2(左)に示すように、いびつでドット中にナノ微粒子が不均一に分布しています。

このことは、光渦の軌道角運動量が液膜に作用して液滴が自転運動することで、真球に近い液滴が吐出されること、液滴中の誘電体ナノ微粒子が円環状に配列することを意味します。

さらに、金ナノ微粒子分散液に光渦LIFTを適用すると、光渦の位相特異点(光の暗点)に捕捉された単一金ナノ微粒子がナノコアとして印刷されることがわかりました。光を使いながら単一金属ナノ微粒子をサブマイクロンスケールの空間分解能で所望の位置に印刷できる画期的な技術です(図3)。

光渦LIFTが創るマイクロリングやナノコアは、マイクロリングレーザー、プラズモニックナノアンテナといった次世代の光通信やバイオセンサーなどのデバイス開発への展開が期待されます。さらに、将来的には、光渦を照射するだけで、複数のナノ微粒子が混合した溶液から誘電体ナノ粒子や金属ナノ粒子だけを選択的に空間分離して抽出できる(物質の誘電特性を識別できる)「光渦ナノ粒子ソーティング」への応用も可能です。

■ 実験の詳細

ガウシアンビーム

光渦

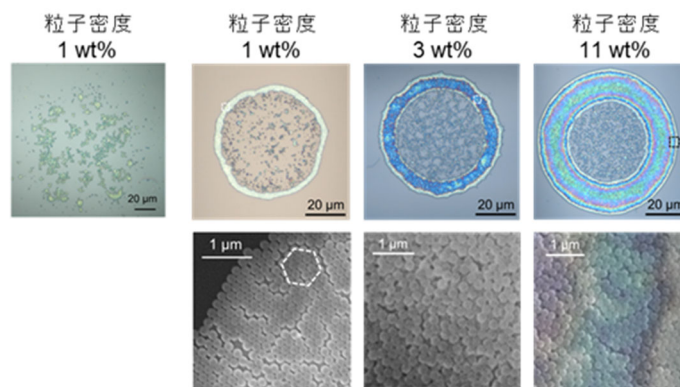


図2 (左) ガウシアンビームを用いた従来LIFTによって印刷されたドット。ナノ微粒子がランダムに分布している。(右) 光渦LIFTによって印刷されたマイクロリング。ナノ微粒子が細密充填されているため、ドナー液膜のナノ微粒子濃度を変えることで印刷されたリングを構成する層数が変わるとともに構造色が青から緑青に変化する。1wt%時は単一層なので構造色が現れない。

光渦

ガウシアンビーム

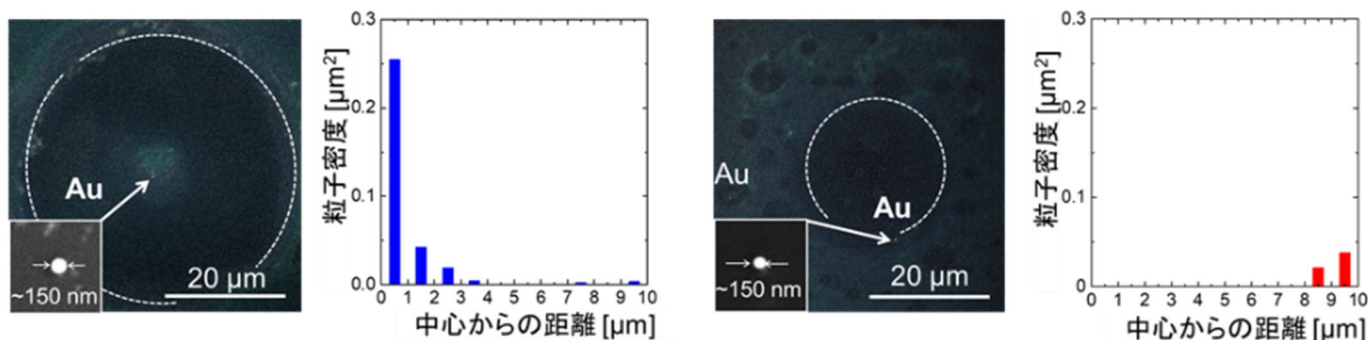


図3 (左) 光渦によって印刷された金属ナノコア。位相特異点(暗点)部に金属ナノ微粒子が集中している。(右) ガウシアンビーム照射によって印刷された金属ナノ粒子ドット。光が照射されていない部分に金属ナノ微粒子が印刷されてしまう。

螺旋位相板によって光渦に変換した波長 532 nm のナノ秒パルスレーザーをガラス基板上のドナーである誘電体ナノ微粒子分散液膜にビームスポットが 50 μm になるようにレンズで集光しました。単一パルス照射によって、液膜から単一液滴を吐出し、別のガラス基板上(レシーバー基板)にドットとして転写しました。

本実験で示された誘電体ナノ微粒子からなるマイクロリングがレシーバー基板上に印刷されます。これらの構造の形成には、光渦の軌道角運動量が大きく寄与しています。吐出された液滴が光渦の軌道角運動量によって自転運動しながら飛翔した結果、誘電体ナノ微粒子が液滴中で遠心力を受けてリング状に高密度充填されてマイクロリングを形成し、印刷されます。

ドナーが金ナノ微粒子の場合、液滴の自転運動に加えて、金ナノ微粒子が光渦の円環に対して斥け合うような力を受けます。その結果、液滴の中央部に捕捉されて、金ナノ微粒子はナノコアとして印刷されます。

■ 研究者のコメント（千葉大学分子キラリティー研究センター 教授 尾松孝茂）

本技術を活用すると、ナノ微粒子の濃度や光渦の角運動量の次数を変調するだけで様々な色調を発色させることができるので、色材を用いないカラー印刷が可能になります。また、レーザー色素などを含有したナノ微粒子をドナーに用いた場合、構造色に相当する様々な波長で発振するマイクロリングレーザーを印刷技術で形成できます。さらにマイクロリングは光の伝播速度を制御できる光ルーターなどにも応用できると思われます。金属ナノコアはバイオセンサーなどのデバイス応用などが期待できます。本技術は次世代プリンタブルフォトンクスに繋がるのが期待できます。

■ 用語解説

- 注 1) 光渦：**等位相面（同じ位相の場所を通り、かつ波の進行方向に対して垂直になるような面）である波面が螺旋状（螺旋波面）になっており、中央に光の暗点がある円環型の強度分布をもつ光を光渦と呼ぶ。光渦は、1 波長あたりの螺旋波面の巻き数 l （整数）に対して lh のトルク（軌道角運動量）を有する。
- 注 2) 構造色：**物体自身が持つ色ではなく、周期的な微細構造によって発現する色。微細構造により、特定の色のみを反射することで、タマムシのような光沢のある鮮やかな発色を示す。
- 注 3) フォトニック構造：**光の波長と同程度の周期でナノ微粒子が配列してできた構造。特定の周波数に対する選択的な回折(反射)が起こるため、層数あるいは層間隔に応じた構造色が現れる。
- 注 4) レーザー誘起前方転写法 (LIFT)：**透明基板上に形成したドナー液膜に対してレーザーパルスを照射して、前方にドナー液滴を飛翔させて転写する印刷技術。原理的に転写できる物質の粘度や濃度に制限がない。
- 注 5) ガウシアンビーム：**レーザーの最も基本的な横モードで、ヘルムホルツ方程式の近軸固有解として与えられる。ガウス分布状の強度分布を持つ。

■ 論文情報

- 著者：Haruki Kawaguchi, Kei Umesato, Kanta Takahashi, Keisaku Yamane, Ryuji Morita, Ken-ichi Yuyama, Satoyuki Kawano, Katsuhiko Miyamoto, Michinari Kohri and Takashige Omatsu
- 論文タイトル：“Generation of hexagonal close-packed ring-shaped structures using an optical vortex”
- 雑誌名：*Nanophotonics*
- DOI：<https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0437>

■ 研究プロジェクトについて

本研究は、科学研究費助成事業基盤研究 A および科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業（CREST）の一環として行われました。また、千葉大学分子キラリティー研究センター内における共同研究の成果です。

本件に関するお問い合わせ

〈研究に関すること〉

千葉大学大学院工学研究院物質科学コース 教授 / 千葉大学分子キラリティー研究センター センター長
尾松 孝茂（オマツ タカシゲ）

TEL：043-290-3477 FAX：043-290-3477 メール：omatsu@faculty.chiba-u.jp

〈報道担当〉

千葉大学広報室

TEL：043-290-2018 メール：koho-press@chiba-u.jp