

尾松孝茂

千葉大学大学院工学研究院
教授

光渦が拓く超解像スピンジェット技術

§ 1. 研究成果の概要

偏光に依存しない螺旋波面(光波面の捩じれ)に由来する軌道角運動量と円環状空間強度分布を持つ光波を総称して光渦と呼ぶ。光渦の軌道角運動量の大きさは螺旋波面の螺旋度(1 波長中に螺旋を巻く回数)を示す量子数(l)で与えられる。光渦の軌道角運動量が微粒子に転写されると、微粒子は軌道角運動量の大きさと向きに従って公転運動する。最も一般的な光渦は円筒座標系の近軸固有解であるラゲールガウスビームである。

われわれは、水の 1000 倍以上の粘度(蜂蜜程度の粘度)を示す高粘度液膜に光渦を照射すると、液膜が超解像スピンジェット、すなわち、自転しながら光渦の中心に向かって集まり、極細の連続的な物質の流れへと構造化することを発見した。超解像スピンジェットは軌道角運動量の向きに沿って選択的に自転しながら、数 mm もの長距離を飛散することなく飛翔する。この現象をスピンジェット現象と呼ぶ。スピンジェット現象は、光渦の軌道角運動量が液膜に転写されることで液膜の自転が起こり、液膜の直線飛翔が長距離にわたり安定化することで起こると考えられる。

高粘度液膜に光渦(波長 532 nm、パルス幅 2 ns、集光ビーム径 200 μm)を照射して、液膜がマイクロメートルスケールのスピンジェットとなり飛翔するダイナミクスを高速カメラ(500ns/フレーム)で観測するとともに、体積に換算して数 p ℓ の高粘度液滴の吐出、数 10 μm 径の高粘度液滴ドットのパターンニングに成功した(図 1)。この研究成果を光渦誘導前方質量転写法(Optical Vortex Laser-

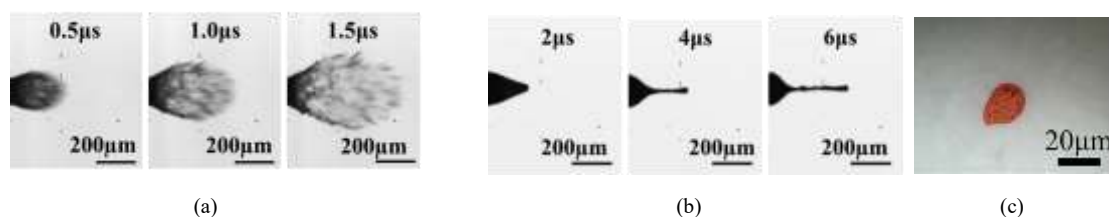


図 1 (a)通常のガウスビームを照射すると、液膜は粉碎されて飛散する。(b)光渦は液膜をスピンジェットに変形する。(c)スピンジェットから吐出された液滴によるレーザー基板に形成されたドット。

Induced Forward Transfer, OV-LIFT)と名付け、学術雑誌 Optics Express に論文発表した(尾松・川野)。

また、次世代半導体材料として注目されているペロブスカイト化合物の前駆体溶液の微小液滴を OV-LIFT によって、レーザー基板に転写した。その結果、直径 $<100\ \mu\text{m}$ のペロブスカイト結晶をレーザー基板上にパターンニングすることに成功した(図 2)(尾松・柚山)。

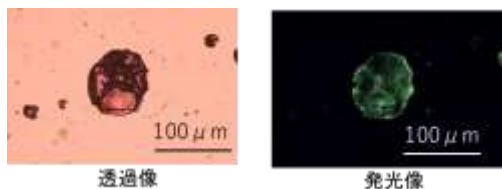


図2 OV-LIFTでパターンニングしたMAPbBr₃微結晶。

この他、OV-LIFT の学理解明に向けて、光渦で捕捉したマイクロ流路内のナノ微粒子挙動を解析した。その結果、トラップされる微粒子の個数によって公転速度に差が現れることが明らかになった。この現象は、流体力学的抵抗力で説明できる。平行して、物理連成シミュレーション

ソフトウェア COMSOL を駆使して、物質中で起こる流体力学応答を解析する基盤を構築した(川野)。さらに、パルス繰返し周波数可変超短パルスファイバーレーザーを開発し、パルス繰返し周波数が、100-400 kHz の範囲で $>1\ \mu\text{J}$ のパルスエネルギーを達成した(山根)。

【代表的な原著論文】

1. Ryosuke Nakamura, Haruki Kawaguchi, Muneaki Iwata, Akihiro Kaneko, Ryo Nagura, Satoyuki Kawano, Kohei Toyoda, Katsuhiko Miyamoto, and Takashige Omatsu, “Optical vortex-induced forward mass transfer: manifestation of helical trajectory of optical vortex,” *Opt. Express*, vol. 27, No. 26, pp. 38019-38027, 2019.
2. Tetsuro Tsuji, Ryoji Nakatsuka, Kichitaro Nakajima, Kentaro Doi, and Satoyuki Kawano, “Effect of hydrodynamic inter-particle interaction on the orbital motion of dielectric nanoparticles driven by an optical vortex,” *Nanoscale*, vol. 12, pp. 6673-6690, 2020.

§ 2. 研究実施体制

(1) 尾松グループ

- ① 研究代表者:尾松 孝茂 (千葉大学大学院工学研究院 教授)
- ② 研究項目
 - ・波長可変光渦光源の開発
 - ・スピンジェット現象の可視化
 - ・OV-LIFT 技術の確立、新奇デバイスの創成
 - ・二次元系物質などの最先端物質を駆使した OV-LIFT

(2) 山根グループ

- ① 主たる共同研究者:山根 啓作 (北海道大学大学院工学研究院 教授)
- ② 研究項目
 - ・スピンジェット現象制御のための高機能極限光渦光源の開発
 - ・超高速単一ショット時間分解イメージング装置の開発

(3) 川野グループ

- ① 主たる共同研究者:川野 聡恭 (大阪大学大学院基礎工学研究科 教授)
- ② 研究項目
 - ・スピンジェット現象の流体力学的解明
 - ・スピンジェット現象に立脚した OV-LIFT を MEMS 化する方法論の提案

(4) 柚山グループ

- ① 主たる共同研究者:柚山 健一 (北海道大学電子科学研究所 助教)
- ② 研究項目
 - ・ペロブスカイト単結晶などを任意の場所で成長させる方法論の提案
 - ・ペロブスカイト結晶などのヘテロ・グラデーション構造を作製する方法論の提案