

2023 年度年次報告書

独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成

2019 年度採択研究代表者

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ソジェット技術

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)

山根 啓作 (北海道大学 大学院工学研究院 准教授)

柚山 健一 (大阪公立大学 大学院理学研究科 講師)

## 研究成果の概要

液膜に角運動量を持つ光渦を照射すると、液膜が自転する連続的な流れへと構造化する。この現象をスピンジェット現象と呼ぶ。光渦が誘導するスピンジェット現象を活用したレーザー前方転写法(光渦レーザー誘起前方転写法)は、通常のインクジェット法では困難な高粘度液膜の高精細印刷を可能にする。

令和5年度は、プリンタブルエレクトロニクスの標準試料である金ナノインク(金微粒子直径 $\sim 150\text{nm}$ 、粘度  $10\sim 100\text{mPa}\cdot\text{s}$ )を液膜に用いた。単一パルス光渦を液膜に照射すると、 $1\text{pL}$ 以下の単一液滴が吐出・飛翔して、ガラス基板の上にドットとして印刷された。ドット直径は集光レンズのNAにほぼ反比例し、最小ドット径は $\sim 7\mu\text{m}$ であった。この値は、インクジェット技術で形成できる最小ドット径の $1/3$ に相当する。また、光渦を円偏光にすると、ドットの真円度と位置合わせ精度が顕著に向上することが分かった。現時点でのドットの位置合わせ精度は $\sim 5\mu\text{m}$ である。また、印刷されたドットは熱処理なしでも $10^{-7}\Omega\cdot\text{m}$ の高い電気伝導性を示した。この現象は、光渦照射によって生成されたキャビテーションバブルの急速な収縮に伴う $\text{MPa}$ を超える負のキャビテーション圧によるものだと判明した。

また、フェライトナノ微粒子分散磁性インクをドナーとして、光渦レーザー誘起前方転写法でガラス基板に印刷すると、ドットの中央部のフェライトナノ微粒子が焼結して、スピネル構造を持つ単結晶になっていることが分かった。さらに、ローダミンBを添加した1,5-ペンタンジオール( $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ )を印刷して、Whispering Gallery Mode (WGM)で発振するレーザーアレイ素子の開発に成功した。最終評価に向けて、スピンジェット現象を理論的に解明するため、独自に開発したナノ秒間隔スナップショット撮像法で光渦照射時に起こるキャビテーション現象の可視化を行うとともに、ピコ秒パルスのダブルパルス照射によるジェット形成過程の計測、さらには、キャビテーション現象を取り入れた数値解析を行っている。

### 【代表的な原著論文情報】

- 1) R. Wei, H. Kawaguchi, K. Sato, S. Kai, K. Yamane, R. Morita, K.-I. Yuyama, S. Kawano, K. Miyamoto, N. Aoki, T. Omatsu, "High-definition direct-print of metallic microdots with optical vortex induced forward transfer," APL Photonics (in press).
- 2) Y. Yoneda, A. S. Rao, Y. Fujimoto, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Direct generation of Bessel beams from a  $\text{Pr}^{3+}$ : WPFGB fiber laser," Optics Express 32(6), 9011-9018 (2024).
- 3) K.-I. Yuyama, H. Kawaguchi, R. Wei, T. Omatsu, "Fabrication of an array of hemispherical micro-lasers using optical vortex laser-induced forward transfer," ACS Photonics 10(11), 4045–4051 (2023).
- 4) Q. Sheng, A. Wang, J. Geng, S. Fu, Y. Ma, W. Shi, J. Yao, T. Omatsu, D. Spence, "Ultra-high-order Laguerre-Gaussian field generated directly from a laser cavity with spherical aberration," Laser and Photonics Reviews 17(8), 2300369 (2023).
- 5) A. Tomita, A. Vallés, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Creation of galaxy-shaped vortex relief structures in azo-polymers with petal-like beams," Optics Express 31(17), 27868-27879 (2023).
- 6) W. R. Kerridge-Johns, A. S. Rao, Y. Fujimoto, T. Omatsu, "Red, orange, and dual wavelength vortex emission from  $\text{Pr}^{3+}$ : WPFGB fibre laser using a microscope slide output coupler," Optics

Express 31(10), 16607-16614 (2023).

- 7) Y. Zhou, T. Yusufu, Y. Ma, T. Omatsu, "Generation of tunable, non-integer OAM states from an optical parametric laser oscillator," Applied Physics Letters 122(12), 121106 (2023).