

令和 6 年 4 月 3 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18981

研究課題名（和文）光渦の螺旋性による3次元メタ螺旋構造の創成

研究課題名（英文）3 dimensional helical metastructures fabricated by optical vortex

研究代表者

尾松 孝茂 (Omatsu, Takashige)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30241938

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：セルに封入した光硬化樹脂を紫外光照射でプレ重合して樹脂の粘度を極限まで高め、一光子吸収過程で試料セル両端に螺旋ファイバーを固着した。この螺旋ファイバーにガウスビームを入射すると、光渦モードが発生することを明らかにした。螺旋ファイバー中の光伝播をLPモード近似を用いて解析した結果、ガウスモードと光渦モード間のエネルギー交換は、約110 $\mu\text{m}$ 間隔の周期的な捺じり構造が存在しないと起こらないことが分かった。この結果は、実験的に観測された透過光の回転数から評価できる捺じり周期100-120 $\mu\text{m}$ とほぼ一致する。したがって、螺旋ファイバー内部には周期的な屈折率の捺じり構造が形成されていることが予想される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

キラリティーは物質科学における普遍的テーマである。光渦は、螺旋波面に由来する軌道角運動量と螺旋波面の向きで決まるキラリティーを持つ光である。光渦を物質に照射すると軌道角運動量が作用してキラリな量移動が起こり、物質表面にサブミクロンスケールの螺旋構造ができることを研究代表者は世界で初めて発見した。しかしながら、これまでの螺旋構造に関する事例のすべては、物質表面に限定されていた。物質内部の構造を力学的に捺じって螺旋構造を形成した本研究成果は、人工生体シ組織シミュレーター、光を非損失で一方方向伝播させることができるトポロジカル光デバイスなど、メタ螺旋構造を有する素子として展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：An optical vortex induced self-written helical microfiber with a micron-scale diameter and a millimeter-scale length via OAM transfer effects has been successfully demonstrated. Such self-written helical fiber enables potentially the delivery or mode conversion of optical vortices as an eigen mode.

A homemade continuous-wave green laser was used, and its output was converted into a first-order Bessel beam by a spiral phase plate and an Axicon lens. The generated Bessel beam was focused on a cell containing a cure resin by an objective lens. The rotation of the transmitted light occurred, manifesting the self-trapping effects of the optical vortex with the formation of a fiber owing to OAM transfer effects. Interestingly, the vortex mode with an annular spatial form was generated from the fabricated fiber by the injection of Gaussian beam, manifesting that the fabricated helical fiber acts as a waveguide for mode coupling between the Gaussian and the vortex modes.

研究分野：量子光工学・応用光学

キーワード：光渦 軌道角運動量 光重合 キラリティー

## 1. 研究開始当初の背景

### 《研究背景》

キラリティー(物質の立体構造がその鏡像と空間的に重ならない性質)は物質科学における普遍的テーマである。広く存在する螺旋はキラリティーを持つ構造(秩序)の一つである。光渦とは、螺旋波面に由来する軌道角運動量と螺旋波面の向きで決まるキラリティーを持つ光である(図1参照)。光渦の軌道角運動量の大きさは1波長あたりの波面の捩じれ回数(トポロジカルチャージ)  $\ell(\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$  で定義され、原理的には、トポロジカルチャージ  $\ell$  は無限に大きな値にできる。

「光渦を物質(金属・半導体・有機薄膜など)に照射すると軌道角運動量が作用してキラルな質量移動が起こり、物質表面にサブミクロンスケールの螺旋構造ができること」を研究代表者は世界で初めて発見した(図2)。

光渦の軌道角運動量が誘導する光力学的効果である「光渦を物質に照射すると物質表面に螺旋構造ができる」という現象を利用すれば、あらゆる物質の表面を室温大気雰囲気中で螺旋構造に加工できる。しかしながら、これまでの螺旋構造に関する事例のすべては、物質表面あるいは物質同士の界面に限定されていた。したがって、現象が発見されてから10年近く経過するにもかかわらず、物質内部に光渦による3次元のキラル構造を形成した事例はない。

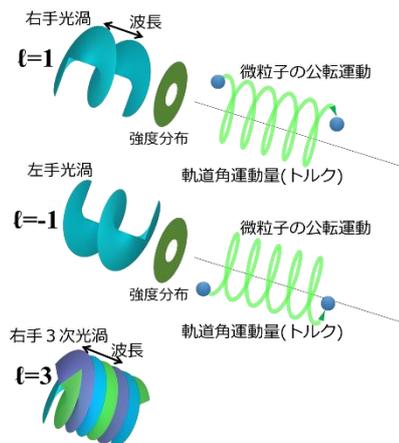


図1 光渦と軌道角運動量。

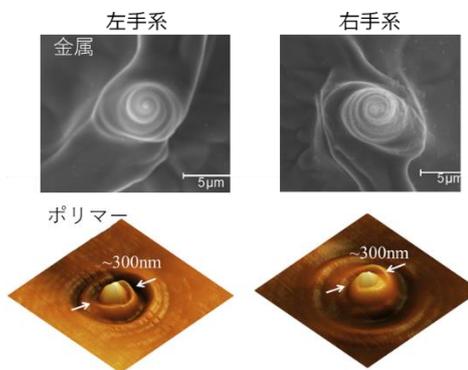


図2 光渦が創る螺旋構造。

## 2. 研究の目的

本研究は、「光渦の軌道角運動量がどのようなメカニズムで物質の螺旋構造を創るのか?」その素過程の全貌の解明に挑戦する。そして、物質内部に螺旋構造を有し、螺旋構造に由来する新奇機能を発現するメタ螺旋構造を創成する。

## 3. 研究の方法

当初の計画では、多光子吸収励起で光重合する物質、特に、再生医療や創薬向けハイドロゲルとして注目を集めている生体適合性材料(Photo-crosslinked poly (ethylene glycol) diacrylate, PEGDA)を対象としていた。しかしながら、市販の光硬化樹脂でも表面処理さえすれば、細胞固着のための足場材料になりうるということが分かったため、ノーランド社製 NOA63 を試料として用いた。フェムト秒レーザーを集光すると、局所的な多光子励起による①ラジカル生成(<1ps)、②ラジカルとモノマーのラジカル反応(10~100ps)、③架橋反応(10~100ns)など、が時系列に起こる。ラジカル生成の段階でレーザー光はすでになくなってしまうため、多光子過程を介した電子遷移に軌道角運動量が直接作用しない限り、光渦の軌道角運動量は物質には転写しない。そのため、キラル構造が形成されない。

そこで、実験には、架橋反応より長い連続的なレーザー照射が可能な CW グリーンレーザー(532nm)とラジカル反応時間より短時間のレーザー照射が可能なフェムト秒レーザー(~800nm, 50fs, 80MHz)を用いて1光子吸収および2光子吸収で光重合を誘起した。

レーザー光を光硬化樹脂中に強く集光すると、重合した樹脂に光が閉じ込められて、さらに光重合を誘導し、樹脂が成長してファイバーになる光誘起ファイバー形成現象が報告されている。この現象は、重合した樹脂の屈折率が未露光の樹脂の屈折率に比べて高いために起こる空間ソリトン効果である。この現象に注目するとともに、光誘起ファイバー形成現象における光閉じ込め効果をより効率よく誘起するため、螺旋位相板とアキシコンレンズを用いてレーザー光を非回折ビームである1次ベッセルビーム(トポロジカルチャージ1)に変換して実験を行った。

## 4. 研究成果

まず、フェムト秒レーザー(~800nm, 50fs, 80MHz)を光源に用いた。光硬化性樹脂が封入されているガラスセルに集光入射したベッセルビームの透過光を観察すると、光重合が始まると同時に透過光の円筒対照性が崩れ、位相特異点である暗点が回転しはじめ、双峰的なツインモードに変換される。その後、ファイバーは2本に分岐し、互いに螺旋を描きながら成長した(図3)。ファイバー長は300µm~350µmであった。また、2光子吸収過程では、光強度の高い領域のみで光重

合が起こるため、多重リング構造を有するベッセルビームでも、シングルコアのファイバーが形成された。レーザーパワーは 300mW に固定して実験を行った。このことからフェムト秒レーザーのように架橋反応より短時間しか発光しないレーザーでは、物質内部に螺旋構造を創れない。

次に、グリーン CW レーザー(波長: 532 nm, レーザーパワー: <2 W)をベッセルビームに変換し、光硬化性樹脂が封入されているガラスセル(セルの光学長 1.5mm)に集光した。この際、セルの入射面および出射面にファイバーを固着するため、セルに封入した光硬化樹脂を紫外光照射でプレ重合することであらかじめ樹脂の粘度を極限まで高めた。その結果、ファイバーがセル両端に固着された。また、ファイバーからの出射光を観察すると、光重合が始まると同時に位相特異点が回転し始め、~12 回程度回転した時点で回転が停止した。その際の透過光はガウスモードに変換していた。ファイバーをセル側面から低倍率の光学顕微鏡で観測してもファイバーには明瞭な螺旋構造は見えなかった(図 4)。そこで、内部構造を観測するためファイバーに微弱なガウスビームを入射し、導波特性を解析した。ファイバーに入射したレーザー光はファイバーを導波し出射される。その際、出射光は中央部に暗点を持つ光渦モードに変換されていることが明らかになった。光渦モードのトポロジカルチャージを干渉計測により同定すると -1 であることが分かった(図 5)。

この事実は、直線にはしか見えないファイバーの内部に屈折率の螺旋構造が存在し、ガウスモードを -1 次光渦モードに変換したことを示唆する。さらに、ファイバーを形成した 1 次ベッセルビームが最終的にガウスモードに変換されることと矛盾しない。

ファイバー中の光伝播を LP モード近似を用いて解析した結果、このようなガウスモードと  $\pm 1$  次光渦モード間のエネルギー交換は、~110 $\mu\text{m}$  間隔の周期的な捩じり構造が存在しないと起こらない(図 6)。この結果は、実験的に観測された透過光の回転数から評価できる捩じり周期~120 $\mu\text{m}$  とほぼ一致する。したがって、ファイバー内部には周期的な屈折率の捩じり構造が形成されていることは間違いない。

この研究成果は、物質内部に螺旋構造を持つメタ螺旋構造の実現可能性を示唆するものであり、潜在的に広範な分野での応用が期待できる。例えば、筋肉などの生体組織は螺旋構造を持つものが多い。人工生体組織のシミュレーターに应用展開できる可能性がある。また、ファイバーそのものはガウスモード・光渦モード間のモード変換器としてトポロジカル光デバイスの基本要素となりうる。さらに、レーザー色素や量子ドットなどの発光体を含有させることで光渦レーザーなどのデバイス展開も可能である。

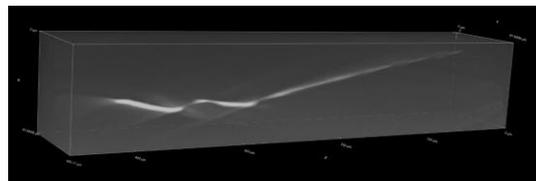


図 3 フェムト秒光渦レーザーで形成されたファイバー。分岐しながら捩じれていることが分かる。

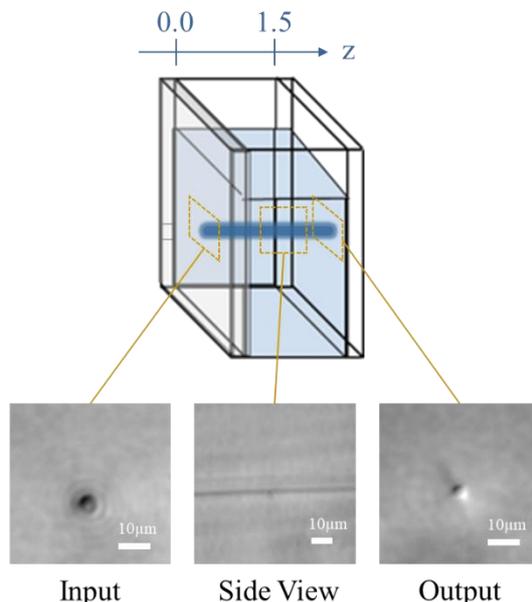


図 4 CW グリーン光渦レーザーで形成されたファイバー。光学顕微鏡像では螺旋構造は見えない。

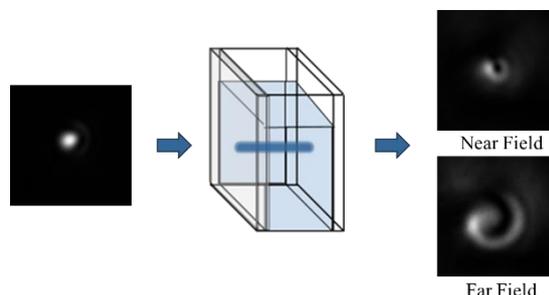


図 5 ファイバーからの出射光の近視野像および遠視野像。近視野像で見える暗点は遠視野では渦状の干渉縞になることから出射光の波面は螺旋構造になっていることが判定できる。

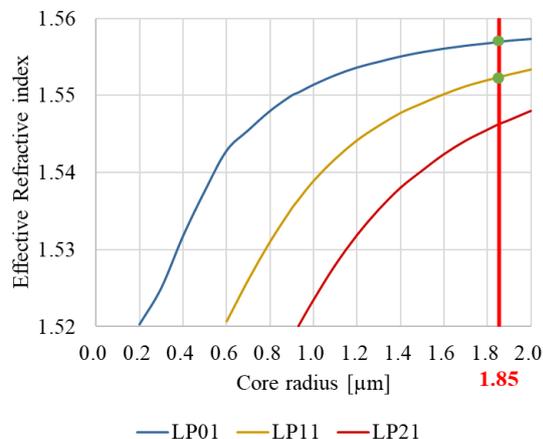


図 6 ファイバー中の伝播モード分散曲線。LP01 はガウスモード、LP11 は光渦モードに対応する。両者の実効屈折率差から求めた捩じり周期は 110 $\mu\text{m}$  になる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Omatsu Takashige, Miyamoto Katsuhiko, Yuyama Ken-Ichi, Yamane Keisaku, Morita Ryuji	4. 巻 52
2. 論文標題 Laser-induced forward-transfer with light possessing orbital angular momentum	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews	6. 最初と最後の頁 100535 ~ 100535
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jphotochemrev.2022.100535	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kerridge-Johns William R., Srinivasa Rao A., Fujimoto Yasushi, Omatsu Takashige	4. 巻 31
2. 論文標題 Red, orange, and dual wavelength vortex emission from Pr:WPFGF fiber laser using a microscope slide output coupler	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 16607 ~ 16607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/oe.491867	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yoneda Yuto, Srinivasa Rao A., Fujimoto Yasushi, Miyamoto Katsuhiko, Omatsu Takashige	4. 巻 32
2. 論文標題 Direct generation of multicolor Bessel beams from a Pr3+: WPFG fiber laser	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 9011 ~ 9011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.520672	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Wei Rong, Kawaguchi Haruki, Sato Kaito, Kai Sayaka, Yamane Keisaku, Morita Ryuji, Yuyama Ken-ichi, Kawano Satoyuki, Miyamoto Katsuhiko, Aoki Nobuyuki, Omatsu Takashige	4. 巻 9
2. 論文標題 High-definition direct-print of metallic microdots with optical vortex induced forward transfer	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 36108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0187189	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuyama Ken-ichi, Kawaguchi Haruki, Wei Rong, Omatsu Takashige	4. 巻 10
2. 論文標題 Fabrication of an Array of Hemispherical Microlasers Using Optical Vortex Laser-Induced Forward Transfer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 4045 ~ 4051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.3c01005	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomita Arata, Valles Adam, Miyamoto Katsuhiko, Omatsu Takashige	4. 巻 31
2. 論文標題 Creation of galaxy-shaped vortex relief structures in azo-polymers with petal-like beams	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 27868 ~ 27868
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.489095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sheng Quan, Wang Aihua, Geng Jingni, Fu Shijie, Ma Yuanyuan, Shi Wei, Yao Jianquan, Omatsu Takashige, Spence David	4. 巻 17
2. 論文標題 Ultra High Order Laguerre-Gaussian Field Generated Directly From a Laser Cavity with Spherical Aberration	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Laser & Photonics Reviews	6. 最初と最後の頁 2300369
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/lpor.202300369	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 尾松孝茂
2. 発表標題 光渦レーザーの開発と物質科学への展開
3. 学会等名 レーザー総研成果報告会, 泰山賞受賞記念講演 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	インペリアルカレッジ			