

ツイストフォトニック結晶ファイバ中の幾何位相による トポロジカル光波発生

所属： 北海道大学 大学院情報科学研究院 メディアネットワーク部門

助成対象者：藤澤剛

概要

螺旋ツイストフォトニック結晶ファイバ（ツイスト PCF）を用いた、トポロジカル光波の発生方法についての理論研究を行った。ツイスト PCF における光の伝搬を簡易に取り扱うための固有モード伝搬法を開発し、その複雑な偏光状態の簡易解析法を確立した。それを用いて、リング状のコアを有する PCF の光学特性を解析し、特定の周方向次数を有するモードの縮退が解ける現象を発見し（自発的縮退の破れ）、それに伴って生じるツイスト PCF 中での幾何位相を用いて、新原理によるトポロジカル光波が生成可能なことをつきとめた。

abstract

Theoretical research on the generation of topological light using helically twisted photonic crystal fibers (twisted PCFs) is investigated. Simple theoretical method (eigenmode propagation method) for analyzing the evolution of the light in the twisted PCFs is developed to analyze the complex behavior of the polarization states. The modal characteristics of twisted PCFs with ring-like core is investigated and it is found that the degeneracy of mode set with specific azimuthal order is lifted (spontaneously broken degeneracy), and a geometric phase associated with the spontaneously broken degeneracy, can generate a topological light in the twisted PCFs

研究内容

1. 研究背景と目的

光の偏光状態や OAM 光の発生などの光の空間状態制御は、近年、非常に大きな注目を集めている。光ファイバ通信の分野では、空間多重技術の究極の形態として、OAM を有する光信号を多重化することによる大容量伝送技術が議論されており、また、光センシングの分野では、従来の直線偏光ではなく、楕円偏光を試料に当てることによるセンシング効果の増強などが盛んに研究されている。光空間状態制御デバイスは、これらの技術実現のために必須の素子であり、各種の材料や、デバイス形態に関して研究が行われている。例えば、OAM 光の発生には、位相板を用いた空間光学技術が広く用いられているが、系全体の大きさが大きく、光ファイバ通信との整合性は良くない。

そのような中、螺旋ツイストフォトニック結晶ファイバ（ツイスト PCF）が大きな注目を集めている。[1]において、光軌道角運動量（OAM、トポロジカルチャージなどと呼ばれる）を有するモードの励起が報告され、その物性解明に関する研究が進められている。ツイスト PCF は、図 1 に示すように、ファイバ断面中に周期的に配置した空孔によりクラッドを形成し、一部の空孔を抜くことで、その部分の屈折率がクラッドに比べて高くなり、光が導波するコアとし、さらに、図のように一定周期のツイストを加えたものである。ツイスト PCF は、偏波、モード、OAM など、全ての光空間状態を自由自在に操ることのできる可能性を秘めている。特に、ファイバ断面内で OAM を有する、「トポロジカル光波」の発生方法は、通信、センシング等に大きな応用可能性をもつ。しかし、その理論的取り扱い、構造の複雑さも相まって難しく、現状、実験研究と、その結果を定性的に説明するための簡易な理論検討が先行し、ツイスト PCF を用いた高効率光空間状態制御デバイスの創出や、ツイスト PCF が有するポテンシャルを使い切るための理論設計基盤の構築が遅れている。

それに対し申請者は、ツイスト PCF の理論設計基盤構築の一助とするべく、任意のツイストファイバ断面形状に適用可能な、独自のビーム伝搬シミュレーション技術（ビーム伝搬法）を開発し、ツイスト PCF の透過強度スペクトルに関する実験結果を定量的に説明することに成功した[2]。これを用いて、これまで、ツイストファイバ内の光空間状態変化の物理解明、ツイスト PCF を用いた光空間状態制御デバイスの検討を行ってきており、特に最近、ツイスト PCF 中を伝搬する光波に付加される「幾何位相」（後述）の存在と、それを用いた偏光制御可能性を初めて指摘した[3]。しかし、独自開発したビーム伝搬法の計算

負荷が高いことなどから、幾何位相を用いた、ツイスト PCF 型トポロジカル光波発生素子の設計法や、その物理にまでは踏み込めていなかった。

そのような状況のもと、本研究では、任意の断面形状を有するツイスト PCF による、幾何位相を利用したファイバ型トポロジカル光波発生素子の研究を行った。具体的に、ビーム伝搬法 [2] よりも簡易な、ツイスト PCF 内偏光状態解析技術として、固有モード伝搬法 (EPM: Eigenmode propagation method) を開発した。この手法により、従来のビーム伝搬法よりもより簡易に、そして安定にツイスト PCF 内の偏光状態の解析、可視化が可能となった。そしてそれを用いて、多様な断面コア構造によるトポロジカル光波発生の可能性を探った。具体的に、リング状コアを有するツイスト PCF において、特定の周方向次数を有するモードの縮退が解けることを発見し、それに伴い生じる幾何位相を用いて、効率的なトポロジカル光波が発生できることを明らかにした。

2. 研究結果

ここでは図 1 に示すようなツイスト PCF を考える。シリカガラス中に、三角格子状に配列された直径 d の空孔によりクラッドを形成し、中心部の空孔をなくすことで光が導波するコアとする。一般に OAM 光を伝送するファイバではリング状のコアが用いられることを踏まえ、図のように、中心部の空孔は残し、第 2 リングの空孔をなくすリングコアの PCF を考える。ここに、中心空孔の直径を d_c 、空孔の格子定数を Λ とする。

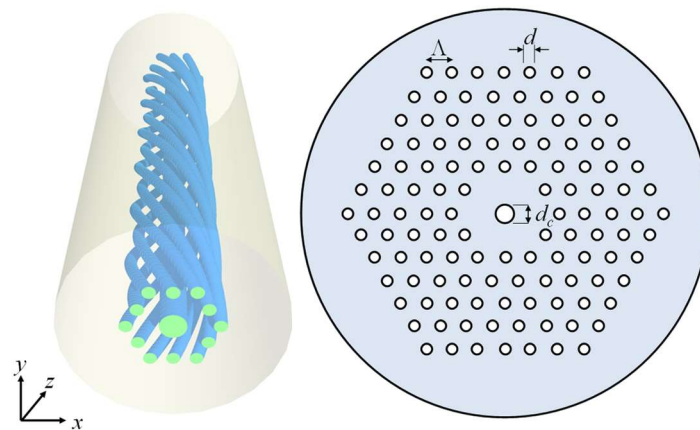


図 1 ツイスト PCF の構造図

2-1. 固有モード伝搬法

研究代表者は、図 1 に示すようなツイスト導波路中のビーム伝搬を取り扱うための数値計算技術を独自開発してきたが、その計算コストが大きいことと、後に示す、ツイスト反転

構造を取り扱う際に、数値的な不安定性が現れるなど問題があった。そこでより簡易で安定な伝搬解析技術として、EPMを開発した。EPMではまず、対象とするツイストPCFのツイストモードを求める。それに対し、ある非ツイストモードを、ツイストファイバ内に入射する際、ツイストモードと非ツイストモードの間の、変換行列を計算し、対角化することで、ツイストファイバ内のビーム伝搬解析を行う技術である。数学的詳細はページ数の都合上掲載できないため、本助成に関わる成果物の論文を参照されたい。

2-2. ツイストリングコアPCFにおけるトポロジカル光波発生

ここでは、図1のようなリングコアPCFを考え、その構造パラメータを、 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $d = 1.6 \mu\text{m}$, $d_c = 1.6 \sim 2.8 \mu\text{m}$ とし、考える光の波長は $1.55 \mu\text{m}$ とした。この構造に対して、5組の HE_{n1} モード、5組の EH_{n1} モード、そしてTE、TMモードが存在する。ここに、 n, l は周、径方向次数である。通常の光ファイバであれば、全てのHE、EHモードは2重に縮退しており、例えば、 HE_{31-1} , HE_{31-2} などと表す。これらのモードの中で、 HE_{31} 、 EH_{31} モードのみ、その縮退が破れていることを発見した。図2左に、リングコアツイストPCFの非ツイストモードである HE_{31} 、 EH_{31} モードの強度分布、ベクトル分布を示す。本来、これらのモードは2重に縮退しているが、そのベクトル分布を保ったまま、その実効屈折率が異なっており、この現象を以後、「自発的縮退のやぶれ」(SBD: Spontaneously broken degeneracy)と呼ぶ。図2右に、縮退の破れた HE_{31} 、 EH_{31} モードの実効屈折率差の中心空孔直径 d_c 依存性を示す。縮退している場合には、実効屈折率差は $< 10^{-7}$ 程度となるが、それよりも4桁大きい複屈折が生じていることがわかる。

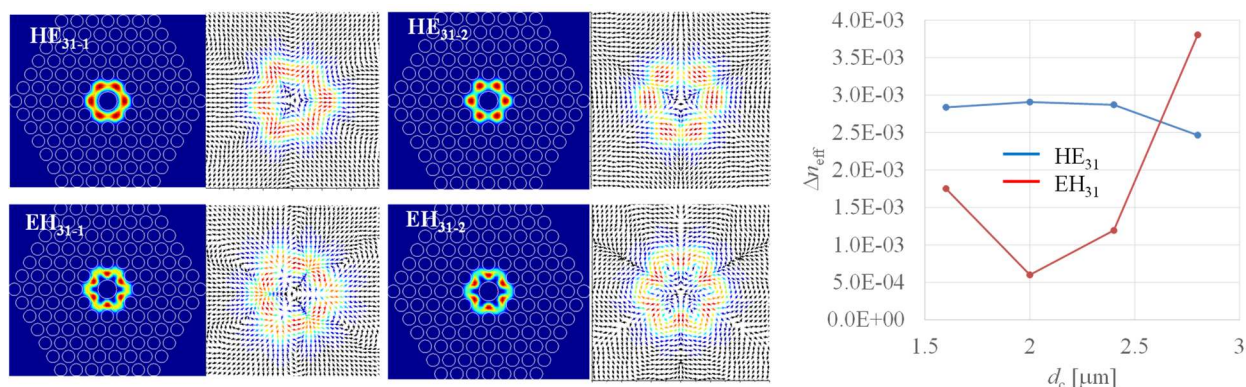


図2 (左) HE_{31} 、 EH_{31} モードの強度分布、ベクトル分布 (右) 実効屈折率差の d_c 依存性
モード間に複屈折が生じるということは、そのファイバをツイストしたときに、右円偏光、左円偏光それぞれに、符号の異なる幾何位相が生じるということでもある[1]。例えば、

HE_{31-1} モードをツイスト PCF に入射すると、左右円偏光成分、 $HE_{31-1}+jHE_{31-2}$ 、 $HE_{31-1}-jHE_{31-2}$ が等量励振される。もし、この二つのモードが縮退していれば、何も生じないが、複屈折がある場合には、二つのモード間で位相遅れが生じ、入射した HE_{31-1} モードは、左右円偏光のどちらかに変換しうる。この左右円偏光は、それぞれ、回転方向の異なるトポロジカル光波となっているため、SBD による幾何位相を用いて、トポロジカル光波を発生可能と考えられる。

図 3 左に、 HE_{31-1} モードを入射した場合の、EPM により算出した、ツイスト PCF におけるストークスパラメータの伝搬距離依存性を示す。ここに、 $d_c = 2.4 \mu\text{m}$ 、回転率 $\alpha = 3.14 \text{ rad/mm}$ としている。図から周期的に円偏光成分 S_3 が励振されていることがわかる。同図右にはビーム伝搬法により算出した、距離 $150 \mu\text{m}$ (赤丸) における強度分布と位相分布を示す。位相分布より、トポロジカルチャージが 2 のトポロジカル光波が生成されていることがわかる。

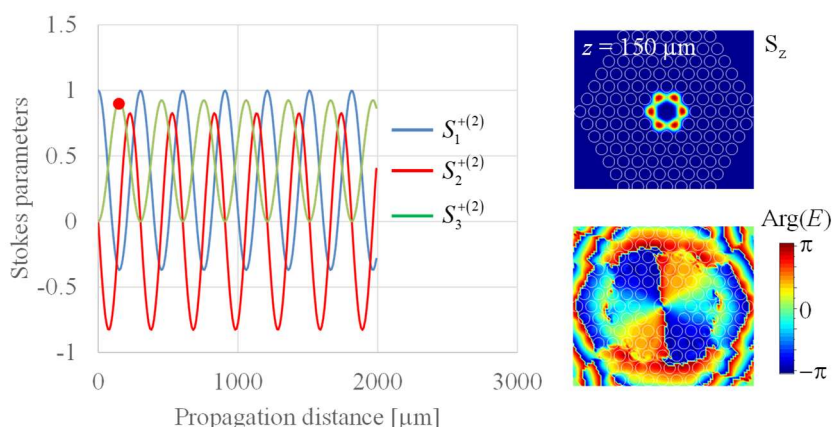


図 3 (左) ストークスパラメータの伝搬距離依存性 (右) 距離 $150 \mu\text{m}$ における強度分布と位相分布

図 3 より、ツイスト PCF 内の幾何位相を用いて、トポロジカル光波が発生可能であることがわかったが、そのストークスパラメータは完全に 1 となっておらず、完全なトポロジカル光波の生成はできていない。そこで、より高品質なトポロジカル光波を発生させる方法として、周期的なツイスト反転構造を検討した。図 3 において、円偏光成分が最大となる距離 $150 \mu\text{m}$ において、ツイスト方向を反転することで幾何位相を積み重ねることができる。図 4 左に、ツイスト反転ファイバのストークスパラメータの伝搬距離依存性を示す。複雑な偏光状態を示すが、円偏光成分 S_3 を見ると、幾何位相の積み重ねにより、 ± 1 の間を往復していることがわかる。同図右に、 $S_3 = 1, -1$ となる、距離 $200, 600 \mu\text{m}$ にお

ける強度分布と位相分布を示す。より高品質な、トポロジカルチャージ 2 のトポロジカル光波が生成されているのがわかり、また、位相の回転方向を反転したトポロジカル光波を生成できることもわかる。

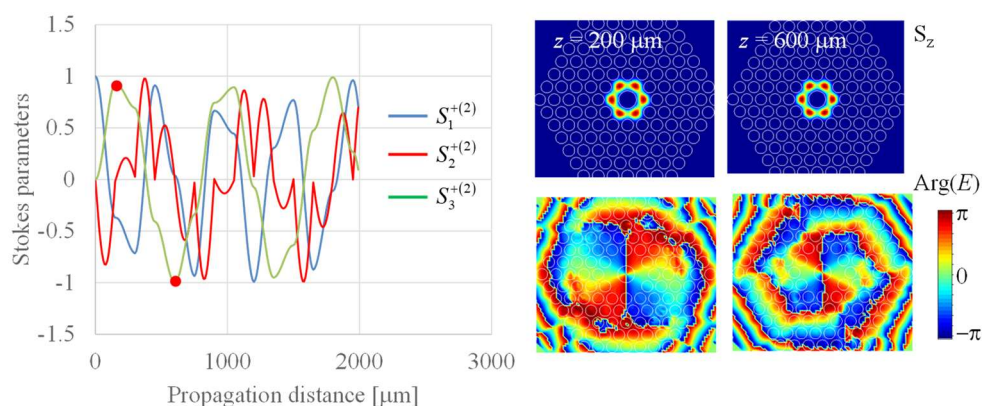


図 4 ツイスト反転ファイバにおける、(左) ストークスパラメータの伝搬距離依存性 (右) 距離 200、600 μm における強度分布と位相分布

引用文献

- [1] G.K.L. Wong, et al., *Science*, vol. 337, pp. 446, July 2012.
- [2] T. Fujisawa, T. Sato, and K. Saitoh, “Full-vector finite-element beam propagation method for helicoidal waveguides and its application to twisted photonic crystal fiber,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 14, pp. 2894-2901, July 2017.
- [3] T. Fujisawa, and K. Saitoh, “Geometric-phase-induced arbitrary polarization and orbital angular momentum generation in helically twisted birefringent photonic crystal fiber,” *Photonics Research*, vol. 8, no. 8, pp.1278-1288, Aug. 2020, DOI: [10.1364/PRJ.393255](https://doi.org/10.1364/PRJ.393255).

本助成に関わる成果物

[論文発表]

T. Fujisawa and K. Saitoh, “Arbitrary polarization and orbital angular momentum generation based on spontaneously broken degeneracy in helically twisted ring-core photonic crystal fiber,” *Optics Express*, vol. 29, no. 20, pp. 31689-31705, Sep. 2021, DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.432401>.