

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20988

研究課題名（和文）幾何位相を用いた螺旋ツイストフォトニック結晶ファイバによる任意光空間状態生成

研究課題名（英文）Creation of arbitrary spatial state of light based on helically twisted photonic crystal fiber using geometric phase

研究代表者

藤澤 剛（Fujisawa, Takeshi）

北海道大学・情報科学研究所・准教授

研究者番号：70557660

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）：らせん状にツイストするファイバ内で生じる幾何位相を用いて、任意の光起動角運動量（OAM）モードを発生させるファイバ構造を考案した。ツイストファイバ内での偏光可視化技術として、従来のビーム伝搬法に比べて、より簡易な偏光状態解析法である固有モード伝搬法を開発した。これを用いて、シングル、マルチモードツイストフォトニック結晶ファイバ（PCF）の偏光状態解析を行い、周期的なツイスト反転により、任意の偏光状態を作成できることを明らかにした。さらに、マルチモードPCF内の偏光状態の解析により、自発的縮退の破れ現象を発見し、任意の次数のOAM状態を生成可能な、空孔アシストリングコアファイバを考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光起動角運動量（OAM）モードは、将来の光通信の伝送容量の飛躍的増加や、光センシングの感度改善などに役立つと期待されているものであるが、その発生方法はバルクの位相版を用いるものが主流であり、OAMモード発生素子の大きさが大きくなってしまいうという問題点があった。本研究では、ツイストファイバ型のOAMモード発生素子を検討しており、通常ファイバに容易に接続可能なため、より使いやすく、損失の少ないOAM発生器を構成可能である。また、本研究で取り扱った幾何位相によるOAM光の発生の原理は、従来のグレーティングを用いる発生方法とはまったく異なり、独自のOAMモード発生素子を構成可能である。

研究成果の概要（英文）：A novel optical orbital angular momentum (OAM) mode generator based on helically twisted fibers are devised. Using a geometric phase existing in the helically twisted fiber, it is demonstrated that arbitrary spatial state of light can be generated. To visualize the spatial state in twisted fiber, an eigenmode propagation method is developed, which is simpler than conventional beam propagation method. By using this method, the analysis on spatial state in single- and multi-mode twisted photonic crystal fiber (PCF) is done. It is discovered that arbitrary spatial state can be generated by using periodically inverted twisting structure. Furthermore, we discover a novel phenomenon called “spontaneously broken degeneracy” (SBD) in twisted fibers, and by using SBD, we devise a novel air-hole assisted ring-core fiber, which can generate OAM modes with arbitrary order.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：ツイストフォトニック結晶ファイバ 光軌道角運動量 幾何位相

## 1. 研究開始当初の背景

光起動角運動量(OAM)を有する光波、トポロジカル光波は、光通信伝送容量の飛躍的拡大や、センシング感度の向上に役立つため、近年、盛んに研究が行われている。伝搬方向に螺旋状にねじれたファイバ、すなわちツイストファイバは、長周期グレーティング構造などを用いることにより、通常の線形偏光モードを、OAMを有するモードに変換可能であることから、ファイバ型OAM光発生素子に適用できる可能性があり、こちらも盛んに研究が行われている。特に、ファイバ断面中に周期的に空孔を配置したフォトニック結晶ファイバ(PCF)をツイストした、螺旋ツイストPCF内での光波の振る舞いに注目が高まっている。PCFでは、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たものであり、それをツイストしたものが螺旋ツイストPCFである。2012年、Science誌(vol. 337, pp. 446-449, July 2012)にて、ツイストPCF内で、通常の導波モードが、OAMを有するクラッドモードに変換されることが実験的に示されたことを契機に、その研究が加速している。螺旋ツイストPCFの研究は、その始まりが比較的新しく、また、その製造技術、解析技術の難しさのためか、これまで上記Science誌で論文発表を行ったドイツ、Max Planck Instituteのグループがほぼ独占的に発表を行ってきている。現状、どちらかと言えば実験研究が先行し、より深い物性の解明、また、そのデバイスへの応用については立ち遅れており、螺旋ツイスト導波路の汎用的理論設計基盤の構築が待たれている。

伝搬方向に断熱的にねじれた空間中を伝搬する光は、ねじれていない空間を伝搬する光に比べ、「幾何位相」と呼ばれる余分な位相変化(ベリー位相とも呼ばれる)を受ける。複屈折率(ここでは、x、y偏光の伝搬定数が異なることを指す)を有する導波路をツイストし、x、y偏光を入射すると、各偏光には逆向きの幾何位相が生じる(Nature Photonics, vol.10, p5711, 2016.)。PCFでは、コア周りの空孔の大きさを変えることで、通常の光ファイバに比べ簡易に複屈折コアを構成可能であり、幾何位相を容易に発生させられる。幾何位相の活用により偏光間の結合、トポロジカルチャージの発生など、多様な光空間状態制御を行うことができると考えられるが、幾何位相を活用したファイバ型トポロジカル素子に関する研究はほとんど行われていない。

## 2. 研究の目的

こ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内で発生する幾何位相を活用した、新原理に基づくファイバ型光空間状態制御素子を研究する。具体的に、申請者が開発した独自の螺旋ツイスト導波路ビーム伝搬解析技術を用いて、以下の項目について研究を行った：(1) シングルモード螺旋ツイストPCFによる任意偏光生成、(2) マルチモード螺旋ツイストPCFによる任意光空間状態生成、(3) 任意の次数のOAM光を発生可能な、新規ファイバ構造の考案、を行った。

## 3. 研究の方法

前项目的(1)については、申請者が開発した独自の螺旋ツイスト導波路ビーム伝搬解析技術を用いて、螺旋ツイストPCF内の光の偏光状態の解析を行い、幾何位相によって、円偏光成分を発生させられることを明らかにし、さらにその結果から、ツイストの方向を周期的に反転することにより、任意の偏光状態を生成可能であることをつきとめた。(2)については、マルチモードツイストPCF内の複雑な光空間状態の可視化、解析のための簡便な手法として、固有モード伝搬法を新規開発し、前記ビーム伝搬法と同等の結果を得られることを示した。それを用いて、マルチモードツイストPCFの解析を行い、特定の次数の高次モードの縮退が、ベクトル界分布を保ったまま破れる、自発的縮退の破れ現象を発見し、それを用いることで、その次数に対応するOAM光を発生可能なことを明らかにした。(3)について、(2)の発見をもとに、任意の次数のモードに対して、OAM光を発生可能な新規ファイバ構造(空孔アシストファイバ)を考案し、周期反転ツイスト構造により、任意の次数のOAM光生成が可能なことを明らかにした。

## 4. 研究成果

### (1) シングルモード螺旋ツイストPCFによる任意偏光生成

図1に示すような螺旋ツイストPCFを考える。シリカファイバ内に、三角格子状に配置した空孔の中心を取り除くことにより、光が導波するコアを考える。ここでは、x、y偏光の基本モードが存在するシングルモードPCFを考える。ツイストに伴う幾何位相を活用するために、同図に示すように、コア両脇の空孔の大きさを大きくすることにより、x、y偏光の縮退を解き、ツイストに伴う幾何位相を活用できるようにしている。

この螺旋ツイストPCFに、ツイストしていないPCFの基本モードを入射したときのストークスパラメータの伝搬距離依存性を図2左に示す。入射はx偏光の基本モードであり、この光のストークスパラメータは $S_1 = 1$ 、 $S_2 = 0$ 、 $S_3 = 0$ となる(y偏光では、 $S_1 = -1$ )。ツイストフ

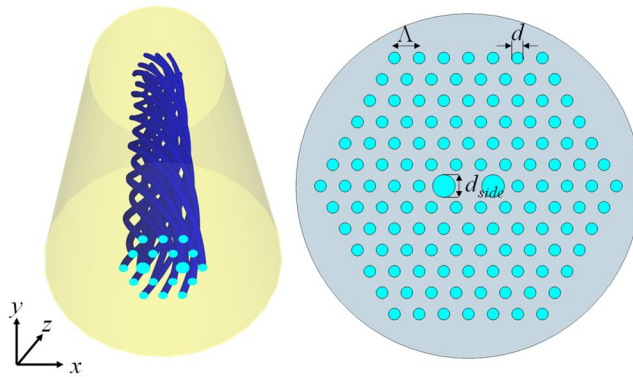


図1 (左) 複屈折螺旋ツイスト PCF と (右) その断面図

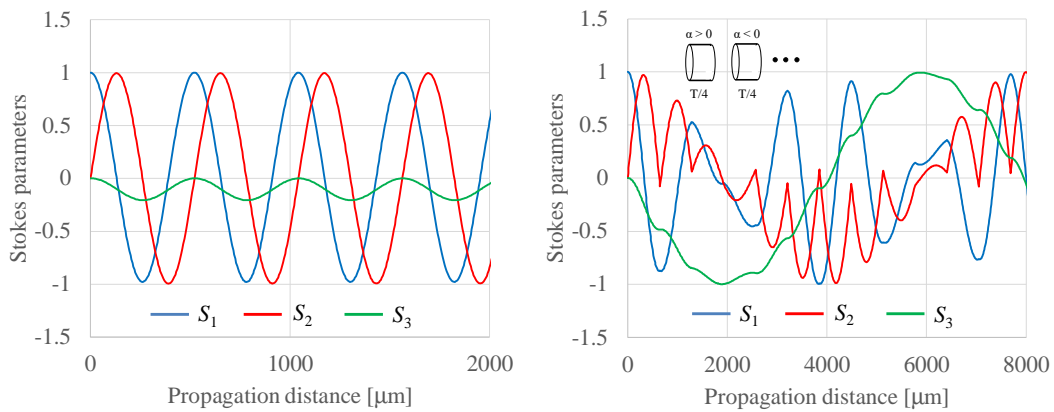


図2 (左) 一定ツイスト PCF、及び、(右) 周期反転ツイスト PCF 内のストークスパラメータの伝搬距離依存性

ファイバ中を伝搬するなかで、 $S_1$  と  $S_2$  が周期的に入れ替わっていることがわかる。 $S_2$  が  $\pm 1$  のとき、斜め 45 度直線偏光を示すので、ファイバのツイストに伴い、偏光の向きが回転していることがわかる。導波路に複屈折がない場合には、直線偏光がその向きを回転させながら伝搬して行くだけであるが、複屈折がある場合には、幾何位相により、 $x$ 、 $y$  偏光間に位相差が生じ、円偏光成分  $S_3$  が生じる。図 2 左から、周期的に  $S_3$  が生じていることがわかる。 $S_3$  が最大になるのはちょうど 90 度回転した角度であり、その後、180 度でまた 0 に戻る。この結果により、幾何位相により円偏光成分が生成できることが確かめられた。

$S_3$  成分を発生できるということは、ポアンカレ球上のあらゆる点 (任意偏光状態) を生成できる可能性があるが、図 2 左の場合の  $S_3$  の最大値はそう大きくない。そこで、 $S_3$  が最大となる角度で、ツイスト方向を反転させることを考えた。図 2 右の左上にその模式図を示す。図中、 $T$  はツイスト周期、回転率であり、4 分の 1 周期ごとに、回転率の正負を変える、つまりツイスト方向を反転する。このファイバに対する、PCF の基本モードを入射したときのストークスパラメータの伝搬距離依存性を図 2 右に示す。回転方向を周期的に反転することにより、幾何位相により生じた  $S_3$  成分が積み重なり  $\pm 1$  の間を往復していることがわかる。これはすなわち、ポアンカレ球上のあらゆる点の偏光状態が生成可能であることを示している。

(詳細は T. Fujisawa et al., Photonics Research, 2020 を参照)

## (2) マルチモード螺旋ツイスト PCF による任意光空間状態生成

(1)の結果より、ツイストファイバ中の幾何位相を用いることで、任意の偏光状態を生成可能であることを明らかにした。同様に、ファイバの高次モードに対しても、幾何位相を用いることで、偏光状態を変えることができると考えられる。ファイバの高次モードの場合、複雑なベクトル分布をもっていて、シングルモードの場合のように、単一の偏光状態で表すことはできないため、今後はより一般的に、光空間状態と記す。

ここでは図 3 左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  $\Lambda$  とする。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  $\text{HE}_{nl}$  モ

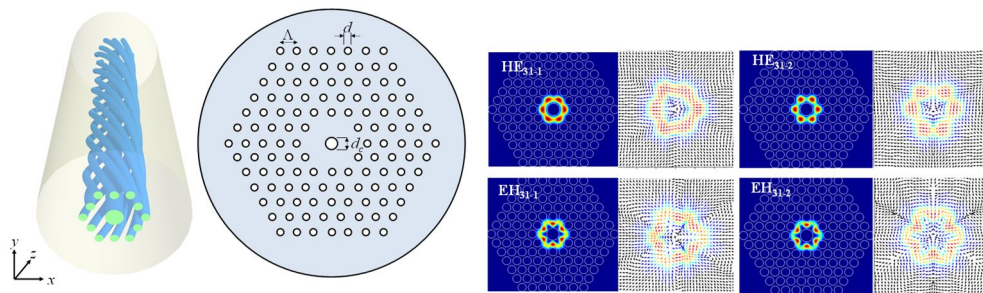


図3 (左) 螺旋ツイストリングコアマルチモード PCF、及び、  
(右) 自発的縮退の破れを有するモードの界分布

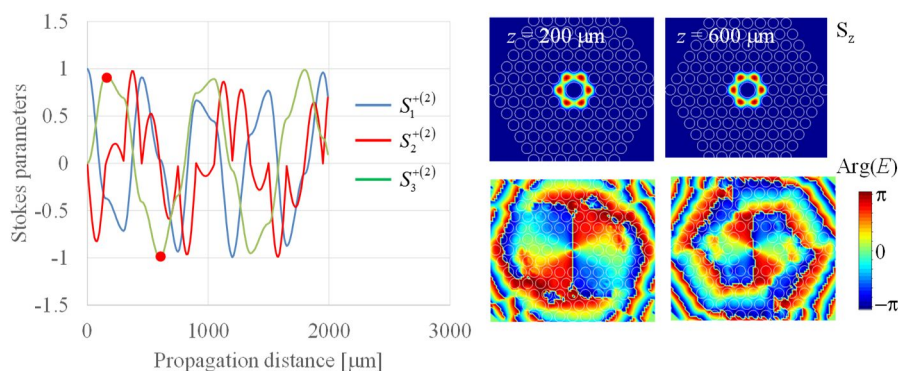


図4 (左) 高次ストークスパラメータの伝搬距離依存性と、  
(右) 左図赤点における電磁界、位相分布

ード、5組の  $EH_{nl}$  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 3 右に、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。

ある組み合わせのモードの縮退が破れているということは、ファイバがねじれていれば、そのモード間に幾何位相が発生するということでもある。そこで、(1)と同様に、 $S_3$  が最大となる距離で回転方向を周期的に反転するファイバ構造により、OAM 光を発生できるかどうかを検討した。その際、従来の計算負荷の高いビーム伝搬法ではなく、より簡便にマルチモードファイバの特性を評価可能な固有モード伝搬法を開発している。図 4 左に、周期反転したマルチモードツイスト PCF の高次ストークスパラメータの伝搬距離依存性を示す。入力モードは、 $HE_{31-1}$  モードである。シングルモードの場合と同様に、 $S_3$  成分が積み重なり、 $\pm 1$  の間を往復していることがわかる。同図右に、 $S_3 = +1, -1$  となる距離での電磁界分布、及び、位相分布を示す。OAM 光に特徴的な、周方向に周期的な位相分布が得られており、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る。

(詳細は T. Fujisawa et al., Optics Express 2021 を参照)

### (3) 任意の次数の OAM 光を生成可能な、空孔アシストファイバ

(2)の結果より、自発的縮退の破れ現象を用いれば、高次のファイバモードに対して幾何位相が生じ、その次数に対応する OAM 光を始めとした、任意光空間状態を生成できることがわかった。しかし、(2)のマルチモード PCF では、 $HE_{31}$ 、 $EH_{31}$  モードにのみ、自発的縮退の破れ現象が発生し、他の高次モードは縮退したままであり、特定の高次モードでしか OAM 光を生成できなかった。他の高次モードにも、自発的縮退の破れを生じさせるには、その物理的理由を解明しなければならない。ここで、(2)の場合に、自発的縮退の破れが生じているモードの周方向次数が 3 であることと、PCF のクラッドが周方向に 6 回対称構造であることから、自発的縮退の破れが生じる物理的理由は、クラッドの対称性にあると予想し、クラッドの対称性を変えることで任意の次数の高次モードに自発的縮退の破れを起こせるのではないかと考えた。

そこで、図 5 左に示すような空孔アシストツイストファイバを考案した。3 次元図の横に、二つの断面図を示しており、上段は、リングコア周囲に三角格子状の空孔を配置したもの( (2)のマルチモード PCF と同等)、下段は、空孔を正方格子状に配置したものである。これらのファイバモードを調査すると、三角格子状の空孔を配置した構造では、(2)と同様に、 $HE_{31}$ 、 $EH_{31}$  モー

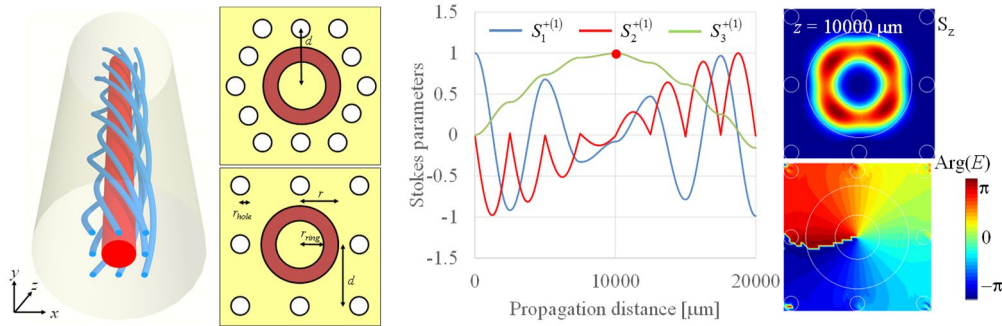


図5 (左) ツイスト空孔アシストファイバの構造図、(右) HE<sub>21-1</sub> モード入射の場合の高次ストークスパラメータの伝搬距離依存性と、赤点における電磁界、位相分布

ドにのみ、自発的縮退の破れ現象が発生した。それに対し、正方格子状に配置した構造では、HE<sub>21</sub>、EH<sub>21</sub>、HE<sub>41</sub> モードに自発的縮退の破れが生じた。よって、予想通り、クラッド構造の周方向次数に応じたモードに対して自発的縮退の破れが生じることが分かった。これを用いることで、任意の次数の高次モードに自発的縮退の破れを発生させ、周期反転ファイバ構造を用いることで、任意の次数のトポロジカルチャージを有する OAM 光を生成することが可能となる。図 5 右に、その 1 例として、正方格子状の空孔配置ファイバに対して、HE<sub>21</sub> モードを入射した場合の、高次ストークスパラメータの伝搬距離依存性、及び、同図赤点 (S<sub>3</sub> = +1) での電磁界分布、及び、位相分布を示す。(2)の場合と同様に、高次ポアンカレ球上の各種光空間状態が生成可能であることがわかる。また、位相分布より、HE<sub>21</sub> モードに対して得られる、トポロジカルチャージ 1 のトポロジカル光波が生成可能であることがわかる。(詳細は T. Fujisawa et al., Optics Express 2022 を参照)

< 引用文献 >

- 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).
- 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>.
- T. Fujisawa** and K. Saitoh, “Arbitrary higher-order optical spatial state generation by using spontaneously broken degeneracy modes in helically twisted ring-core hole assisted fibers,” *Optics Express*, vol. 30, no. 14, pp. 24565-24578, July 2022, DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.463607>.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Fujisawa Takeshi, Saitoh Kunimasa	4. 巻 30
2. 論文標題 Arbitrary higher-order optical spatial state generation by using spontaneously broken degeneracy modes in helically twisted ring-core hole assisted fibers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 24565 ~ 24565
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.463607	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 Fujisawa Takeshi, Saitoh Kunimasa	4. 巻 29
2. 論文標題 Arbitrary polarization and orbital angular momentum generation based on spontaneously broken degeneracy in helically twisted ring-core photonic crystal fibers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 31689 ~ 31689
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.432401	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 T. Fujisawa and K. Saitoh	4. 巻 8
2. 論文標題 Geometric-phase-induced arbitrary polarization and orbital angular momentum generation in helically twisted birefringent photonic crystal fiber	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Photonics Research	6. 最初と最後の頁 1278-1288
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/PRJ.393255	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 本間和志、佐藤孝憲、藤澤剛、寒河江悠途、坂本泰志、松井隆、中島和秀、齊藤晋聖
2. 発表標題 “ツイスト、及び、曲げを有する結合型マルチコアファイバを用いた群遅延広がり低減
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本間和志、藤澤剛、佐藤孝憲、齊藤晋聖
2. 発表標題 結合型マルチコアファイバにおけるツイスト及び曲げによるモード変換
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2020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
---------	---------