

トポロジーが拓く新たな可能性

# 光のトポロジカルエッジ状態

## Topological edge state of light

雨宮 智宏<sup>1</sup>, 岡田 祥<sup>1</sup>, 各務 響<sup>1\*</sup>, 西山 伸彦<sup>1</sup>, 胡 暁<sup>2</sup>

Tomohiro Amemiya<sup>1</sup>, Sho Okada<sup>1</sup>, Hibiki Kagami<sup>1\*</sup>, Nobuhiko Nishiyama<sup>1</sup>, Xiao Hu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 工学院電気電子系, 〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

<sup>1</sup> Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8552, Japan

<sup>2</sup> 物質材料研究機構 ナノアーキテクトニクス材料研究センター, 〒 305-0044 茨城県つくば市並木 1-1

<sup>2</sup> WPI-MANA, National Institute for Materials Science, Ibaraki 305-0044, Japan

\* Current address: NTT Device Technology Laboratories, Kanagawa-ken 243-0198, Japan

**Abstract** : Topological photonics brings the concept of mathematical topology into the field of optics, which allows us to systematically handle information derived from the topology of light, such as optical spin and orbital angular momentum. In this paper, we focus on topological edge states, the most important phenomenon in the field of topological photonics, and describe the specific behavior of an optical spin caused by the states.

**Keywords** : topological photonics, topological edge states, integrated optics

### はじめに

近年トポロジカル電子物性が大きく注目されており、トポロジーに保護された表面状態に伴う新規物性現象の発見、それに基づくデバイス開発への期待が高まっている<sup>1-4)</sup>。これに触発される形で、電子系のトポロジーを光学系にトランスした「トポロジカルフォトンクス」という分野が注目されつつあり、様々な研究機関から多くの報告がなされている<sup>5,6)</sup>。トポロジカルフォトンクス系では、ナノ周期構造における単位胞内と単位胞間の相互作用を同時に制御することで、数学的に性質の異なるフォニック構造を作り出すことを最大の特徴とする。これにより、単位胞間の相互作用を主とするフォニック結晶<sup>7-10)</sup>や単位胞内の相互作用を主とするメタマテリアル<sup>11-17)</sup>などに比べて、より柔軟なデバイス設計が可能となる。

トポロジカルフォトンクス系において最も良く知られた現象の1つは、トポロジーの異なる2つのフォニック構造の界面に生じるトポロジカルエッジ状態であり、これは特定のスピンの軌道角運動量を持った光の伝搬を許容する<sup>18-19)</sup>。光の“スピン”と“軌道角運動量”は、工学的な視点では“円偏光”と“光渦”と見なすことができ、互いに直交したモードには別々の情報を乗せることが可能である(円偏光は左右で2、光渦は螺旋の巻数だけ情報を割り当てることができる)。そのため、円偏光と光渦は光伝送容量の拡大化

に向けて重要な要素とされており<sup>20-22)</sup>、光回路内においてこれらを伝搬・維持できるトポロジカルフォトンクス技術の応用先は広いと考えられる<sup>23)</sup>。

### 光のトポロジカルエッジ状態

トポロジー (topology) とは数学の一分野である位相幾何学のことである。位相幾何学は言うなればゴムのように柔らかい図形を扱う学問体系である。これを以てすると、図 1a のようにカップとドーナツは同一の図形として認識される一方で、球とトーラスは

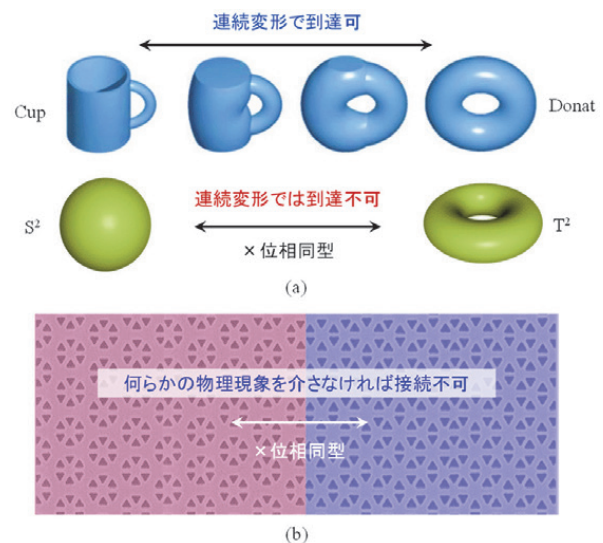


図 1 (a) 位相幾何学における同型の概念, (b) フォトニック構造における同型の概念

伸び縮みさせても一方から一方へ変形できないことから異なる図形として認識される。ここで、球とトーラスの性質を決めているのは“穴の数”であり、それが異なる図形は違うものであると見なされる（数学的に「トポロジーが異なる」と表現してもよい）。

トポロジカルフォトリクスは上記の概念を光分野に持ってきたものであるが、それだけだと漠然としすぎるため、ここでは簡単な例を交えてその概念に触れる。図 1b には、2つのフォトリック構造が示されており、これらは互いに極めて近い光学特性を有する。互いの光学特性が近いのであるから、これら2つを隣接させたとしても、普通はその光学特性は変化しないはずである。しかし、両者のトポロジーが異なる場合はその限りではない。先ほど述べたように、位相幾何学において“球”から“トーラス”には連続変形で移ることができないのと同様に、トポロジーが異なるフォトリック構造同士も、何らかの特殊な物理状態を介さなければ、連続的に移ることができない。その特殊な物理状態が、隣接界面に生じる「トポロジカルエッジ状態」である。このようにしてできあがったトポロジカルエッジ状態によって伝搬される光は、スピンと軌道角運動量（すなわち、円偏光と光渦）に対して、以下に示すような特徴的な性質が現れる。

- ① 光スピンに対する性質：トポロジカルエッジ状態によって伝搬される光は、左右円偏光に対して伝搬方向が一意に確定する。図 2a は、図 1b の中央に上部から右円偏光の平面波を入射した際に隣接界面を伝搬する光の  $H_y$  成分を示したものであるが、光は単一方向のみに伝搬していることが見て取れる（入射光を左円偏光にした場合は、逆の方向に進む）。
- ② 光軌道角運動量に対する性質：トポロジカルエッジ状態によって伝搬される光は局所的に渦を巻

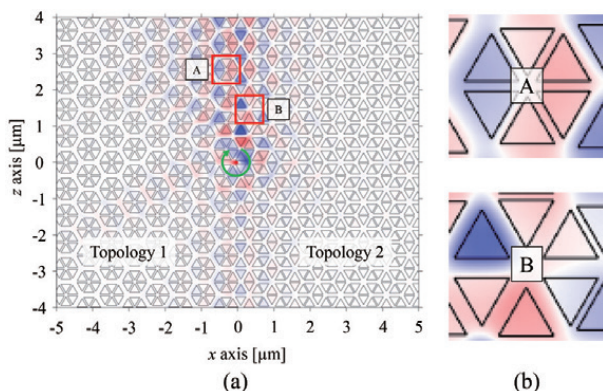


図 2 トポロジカルエッジ状態によって伝搬される光の性質 (a) 全域表示, (b) 局所表示。

く。図 2b に示すように、隣接界面を伝搬する光は、全域的に見るとエネルギーは特定方向に流れているが、局所的に見ると光が渦を巻いていることが見て取れる。

## トポロジーを観る

さて、トポロジーが異なるフォトリック構造の隣接界面には特殊な物理現象が生じることはわかっていただけだと思うが、そもそも、フォトリック構造において“トポロジーが異なる”という事象をどのように判別すればよいのだろうか。

フォトリック構造においては、波長以下の微細構造を一定の周期性を持たせて並べることで、構造内の光と物質の相互作用により、様々な光の操作が可能となる。ここで、光学特性を決定する重要な指標の1つがフォトリックバンドである。これは対象とする構造内における電磁波モードの分散関係をまとめたものであり、“トポロジーが異なる”という事象の判別にも重要な役割を担う。例えば、 $\mathbb{Z}_2$ トポロジー(2種類のトポロジカル相)が発現する特定のフォトリック構造では、バンドギャップのエッジ近傍(特に $\Gamma$ 点近傍)における電磁モードの挙動を見ることで、その性質を議論することができる<sup>19,22)</sup>。

では、具体的な実験例をとおして、実際にそれを見てみよう。図 3 に評価に用いた素子の走査電子顕微鏡画像を示す。本研究では、Si 膜厚 220 nm の SOI (silicon on insulator) 基板上に、 $C_{6v}$  対称性を有する三角ナノホールを蜂の巣格子状に配置した構造を採用した。本構造では、蜂の巣格子の中心からナノホール中心までの距離  $R$  及びナノホール一辺の長さ  $L$  を変化させることで、 $\mathbb{Z}_2$ トポロジーが発現することが数学的に証明されている<sup>24)</sup>。素子の作製については、SOI 基板上に ZEP520A を塗布した後、近接効果補正を導入した電子

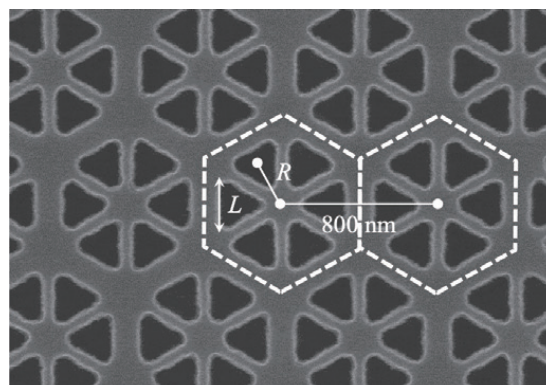


図 3  $\mathbb{Z}_2$ トポロジーが発現するフォトリック構造の走査電子顕微鏡画像



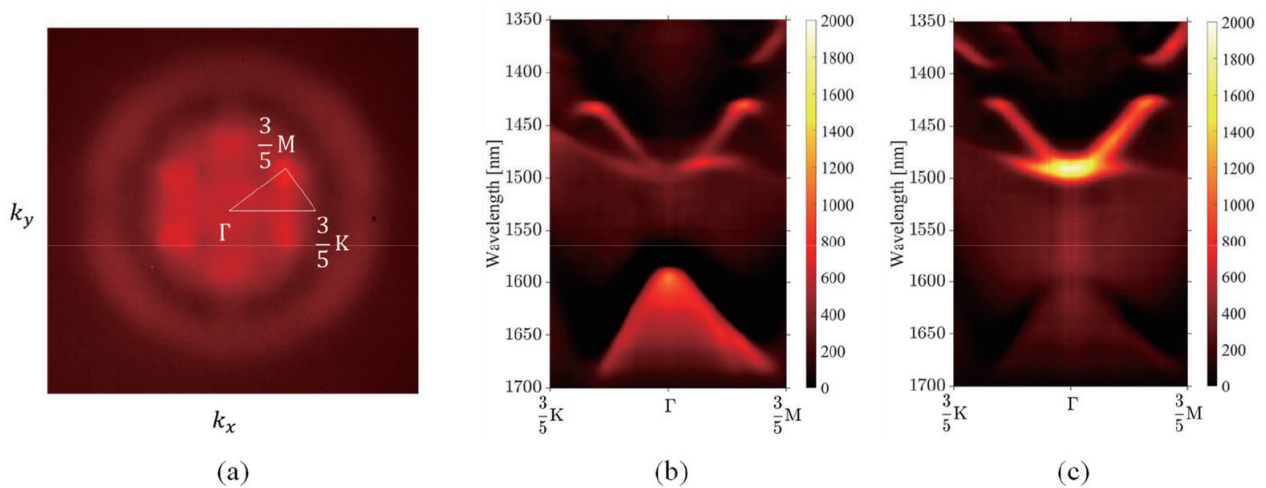


図4 (a) フォトニック構造からの散乱光のフーリエ画像<sup>22)</sup>, (b)(c) トポロジーの異なる2つの典型的なフォトニック構造におけるバンドの計測結果

ビーム露光によりデバイスパターンを形成した。その後、ZEP520A をマスクとして、 $\text{SF}_6\text{-C}_4\text{F}_8$  混合ガスを用いた誘導結合型反応性イオンエッチングにより、Si 層をエッチングした。

本研究では、作製した構造のフォトニックバンドを高速かつ広角域に測定するために、ハイパースペクトルフーリエ画像分光をベースとしたフォトニックバンド顕微鏡<sup>25)</sup>を用いた。まず、広帯域白色光源 (Bentham Ltd. WLS100, wavelength range : 300 ~ 2,500 nm) から  $\times 60$  対物レンズ (NA 0.9, Olympus Plan Fluorite Objective, UPLFLN60X) を介して素子に対して垂直に光を入射した。その後、素子から散乱してきた光のフーリエ画像を 4f 光学系を介して赤外カメラで観測した。赤外カメラの前には波長可変フィルタ (CRI, VariSpec LNIR, bandwidth : 6 nm) が配置されており、波長 850 ~ 1,800 nm の範囲における任意波長の回折パターンを得られるようにした。

本構成を用いて、フォトニックバンドを得る手順は以下に示すとおりである。なお、本研究では、高速性・汎用性を鑑みて、上記一連の動作をソフトウェア上で全自動に行えるようにしている。1) まず、波長可変フィルタの中心波長を変化させながら、素子からの散乱光のフーリエ画像を観測する。2) 次に、得られたフーリエ画像に対して、指定したパスに沿った強度情報を測定し、その情報を逆格子空間における特定エネルギーの強度分布に変換する。3) 最終的に、上記操作を全ての波長に対して行うことで、フォトニックバンドを取得する。

図4にトポロジーの異なる2つの典型的なフォトニック構造 [(R, L) = (230 nm, 250 nm), (290 nm, 250 nm)], 格子間隔は 800 nm で固定] に対する測定結果

を示す。図4aは素子からの散乱光のフーリエ画像を示しており、各波長においてフォトニックバンドに起因する明確な変化が見られた。図4aにおいて、蜂の巣格子に対応した $\Gamma$ -K-Mパスに沿った強度を測定することでフォトニックバンドを再構成した結果を図4b, cに示す。各結果ともに光帯域である1,550 nm近傍にバンドギャップを持つ一方、 $\Gamma$ 点付近における上下のバンドギャップエッジの強度が反転していることが見て取れた。本実験結果は、 $\Gamma$ 点において $p$ 波と $d$ 波の電磁モードが反転していることを示唆しており ( $p$ 波に比べて $d$ 波の電磁モードの反射強度は弱いため)、これを以て“トポロジーが異なる”という事象を観ることができる<sup>19,22)</sup>。

### トポロジカルエッジ状態によって伝搬される光スピン

先に述べたように、トポロジカルエッジ状態によって伝搬される光は、スピンと軌道角運動量に対して特徴的な性質を持つ。本節では、そのうちのスピン (円

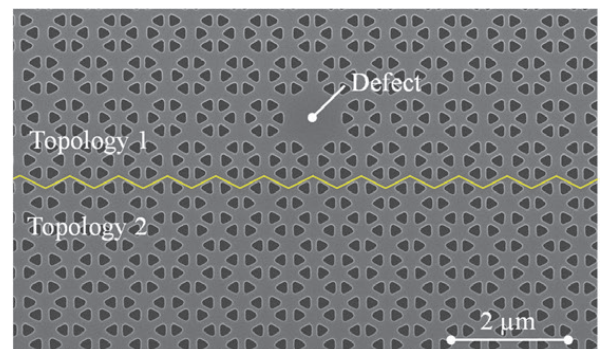


図5 トポロジカルエッジ状態の特性を観測するために用いた素子の走査電子顕微鏡画像

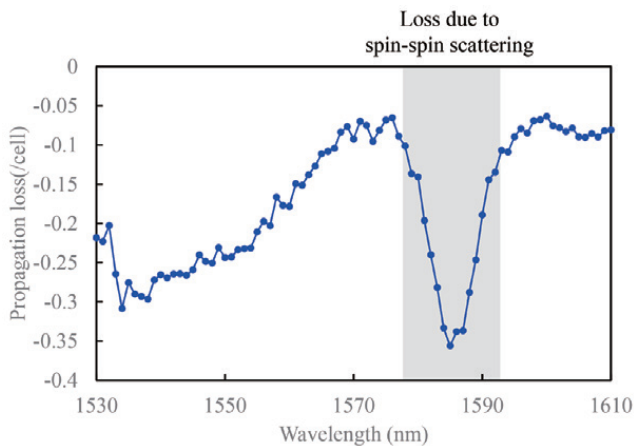


図6 欠陥構造のないトポロジカル伝送路の伝搬特性の波長依存性

偏光)に着目し、実際にトポロジーが異なる2つのフォトニック構造を隣接させることで、その界面を伝搬する光が特異な振る舞いを示すことを見よう。

本研究で用いた素子の走査電子顕微鏡画像を図5に示す。ここで、トポロジーの異なる2つのフォトニック構造は zig-zag 型の界面で接しており、界面において発現するエッジ状態によりトポロジカル伝送路が実現される。また、トポロジカル伝送路近傍の特定格子から三角ナノホールを取り除くことで、素子の垂直結合効率を向上させた(以降、欠陥構造と呼ぶ)。欠陥構造においては、蜂の巣格子が屈折率の高い誘電体で埋められることによって、その部分がキャビティとなり垂直入射光が強く閉じ込められると同時に、欠陥周囲のトポロジカルエッジ状態が崩れることによって閉じ込められた光が高効率にトポロジカル伝送路に結合される<sup>26)</sup>。

図6に欠陥構造のないトポロジカル伝送路の伝搬特性の波長依存性を示す。図4b, cで観測されたフォトニックバンドギャップ帯域において、低損失な伝搬(〜0.1 dB/cell)が得られるとともに、バンドギャップ中心に近い1580〜1590 nm近傍において、スピンスピン散乱に伴う伝搬損失の低下が確認された。以上の結果により、2つのフォトニック構造の隣接界面においてトポロジカルエッジ状態が発現しており、それによる光の伝搬が行われていることがわかる。

次に、欠陥構造を有するトポロジカル伝送路に垂直方向から光を入射することで、光スピンの特性を観測した。本実験では、波長可変レーザーから偏波保持ファイバーとコリメートレンズを介した後、偏光板とλ/4波長板を用いて左右両円偏光の平面波を生成し、対物レンズ(Olympus LCPLFLN20XLCD: NA 0.9)により素子上部から光を入射した。トポロジカル伝送路を伝搬後の光は、偏波保持ファイバーに出力後、スペクトラムアナライザー及びパワーモニターで伝搬特性を評価した。また、迷光を除去する目的から、出力側の偏波保持ファイバー内にインライン偏光子を挿入した。

素子に左右両円偏光を入射した際の各ポートからの出力強度の波長依存性を図7に示す。図7aは左右円偏光に対する同一ポートからの出力強度を観測したものであり、特定の円偏光を一意的に伝搬させるトポロジカルエッジ状態特有の現象が観測された(入射光が右円偏光の場合はport 1, 入射光が左円偏光の場合はport 2への出力が支配的)。この時、欠陥構造の動作波長帯である1550〜1580 nmにおいて、両portの出力強度比は最大で20 dB程度となった。また、図7bは左右円偏光に対して各々が支配的となるポート

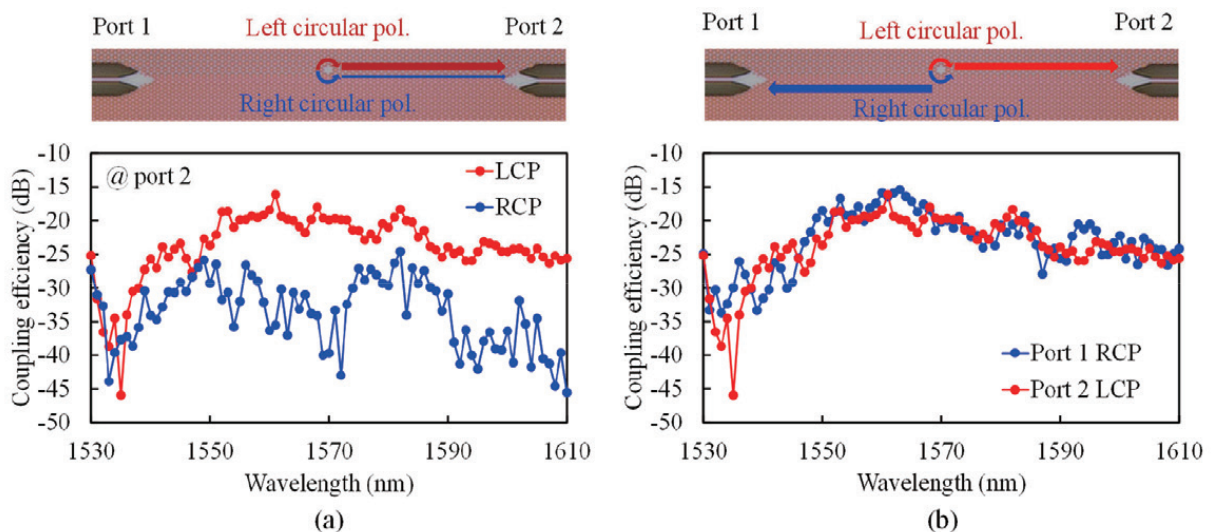


図7 左右両円偏光を入射した際の各ポートからの出力強度の波長依存性<sup>27)</sup>  
(a) 左右円偏光に対する同一ポートからの出力強度, (b) 左右円偏光に対する別ポートからの出力強度。

からの出力強度を観測したものである。両円偏光ともに各方向でほぼ同様の伝搬特性が得られており、トポロジカルエッジ状態の光スピンに対する性質を強く反映していると言える。

## おわりに

本稿では、トポロジーが異なる2つのフォトニック構造の隣接界面に生じるトポロジカルエッジ状態について解説した。既述のとおり、トポロジカルエッジ状態によって伝搬される光は、左右円偏光に対して伝搬方向が一意に確定するという特異な現象を示すが、左右円偏光を光子のアップスピン・ダウンスピンと見なすと、この現象はトポロジカル絶縁体における「スピン運動量ロッキング」のアナロジーとなっている。

トポロジカルフォトニクスは、数学・光学・固体物理学が融合した学際的分野であり、“様々な分野の視点から事象を眺める”というプロセスに重きをおいている。現象を直接的に観測するだけでなく、分野を超えた多角的な視点で議論することで、より多くのものが見えてくる。

## 謝辞

本稿で紹介した研究は、JST-CREST (JPMJCR18T4)、JST-ASTEP (JPMJTR22RG)、JSPS KAKENHI (#22H01520) の助成を受けて行った。

## 【参考文献】

- 1) Hasan M. Z. and Kane C. L.: “Colloquium: Topological insulators,” *Rev. Mod. Phys.*, 82 (2010) 3045-3067.
- 2) Qi, X.-L. and Zhang, S.-C.: “Topological insulators and superconductors,” *Rev. Mod. Phys.*, 83 (2011) 1057-1110.
- 3) Xiao, D., et al.: “Berry phase effects on electronic properties,” *Rev. Mod. Phys.*, 82 (2010) 1959-2007.
- 4) Weng, H., et al.: “Quantum anomalous Hall effect and related topological electronic states,” *Adv. Phys.*, 64 (2015) 227-282.
- 5) Wang, Z., et al.: “Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states,” *Nature*, 461 (2009) 772-775.
- 6) Ozawa, T., et al.: “Topological photonics,” *Rev. Mod. Phys.*, 91 (2019) 015006.
- 7) Joannopoulos, J., et al.: “Photonic crystals: putting a new twist on light,” *Nature*, 386 (1997) 143-149.

- 8) Baba, T.: “Slow light in photonic crystals,” *Nature photonics*, 2 (2008) 465-473.
- 9) Yasumoto, K., eds.: “Electromagnetic theory and applications for photonic crystals,” (CRC press, 2018).
- 10) Butt, M. A., et al.: “Recent advances in photonic crystal optical devices: A review,” *Opt. Laser Technol.*, 142 (2021) 107265.
- 11) Pendry, J. B., et al.: “Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 47 (1999) 2075-2084.
- 12) Shelby, R. A., et al.: “Experimental verification of a negative index of refraction,” *Science*, 292 (2001) 77-79.
- 13) Zheludev, N. I. and Kivshar, Y. S.: “From metamaterials to metadevices,” *Nat. Mater.*, 11 (2012) 917-924.
- 14) Staude, I. and Schilling, J.: “Metamaterial-inspired silicon nanophotonics,” *Nat. Photon.*, 11 (2017) 274-284.
- 15) Amemiya, T., et al.: “Metamaterial waveguide devices for integrated optics,” *Materials*, 10 (2017) 1037.
- 16) Amemiya, T., et al.: “Demonstration of slow-light effect in silicon-wire waveguides combined with metamaterials,” *Opt. Express*, 27 (2019) 15007-15017.
- 17) Yu, P., et al.: “Broadband metamaterial absorbers,” *Adv. Opt. Mater.*, 7 (2019) 1800995.
- 18) Kim, M., et al.: “Spin-valley locked topological edge states in a staggered chiral photonic crystal,” *New J. Phys.*, 22 (2020) 113022.
- 19) Parappurath, N., et al.: “Direct observation of topological edge states in silicon photonic crystals: Spin, dispersion, and chiral routing,” *Sci. Adv.*, 6 (2020) eaaw4137.
- 20) Huang, H., et al.: “100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength,” *Opt. Lett.*, 39 (2014) 197-200.
- 21) Amemiya, T., et al.: “Orbital angular momentum MUX/DEMUX module using vertically curved Si waveguide,” *Proc. OFC 2019* (2019) MIC.7.
- 22) Okada, S., et al.: “Discussion on fabrication accuracy of infrared topological photonic structures using hyperspectral Fourier image spectroscopy,” *J. Opt. Soc. Am. B*, 39 (2022) 2464-2469.
- 23) 雨宮智宏ら: “トポロジカルフォトニクスと光回路,” *電子情報通信学会論文誌 C*, J105-C, 9 (2022) 244-262.
- 24) Wu, L.-H. and Hu, X.: “Scheme for Achieving a Topological Photonic Crystal by Using Dielectric Material,” *Phys. Rev. Lett.*, 114 (2015) 223901.
- 25) Amemiya, T., et al.: “High-speed infrared photonic band microscope using hyperspectral Fourier image spectroscopy,” *Opt. Lett.*, 47 (2022) 2430-2433.
- 26) Kagami, H., et al.: “Highly efficient vertical coupling to topological waveguide with defect structure,” *Opt. Express*, 29 (2021) 32755-32763.
- 27) Okada, S., et al.: “Demonstration of a highly efficient topological vertical coupler,” under review.