

# バレーフォトニック結晶を用いた光のスピンテクスチャの観測

吉見 拓展<sup>1</sup>、各務 響<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 岩本研究室

<sup>2</sup> 東京工業大学大学院工学院電気電子系電気電子コース 西山研究室

## 著者紹介

吉見 拓展

トポロジカルバレーフォトニック結晶を用いた集積光素子に関する研究に従事。本研究では、バレーフォトニック結晶の設計と作製、フォトニックバンド構造の測定と解析を担当した。

各務 響

トポロジカル光絶縁体を用いた集積光素子に関する研究に従事。本研究では、フォトニックバンド構造の測定と解析を担当した。

## 要旨

バレーフォトニック結晶 (VPhC) のフォトニックバンド構造を観測し、メロン、アンチメロンと呼ばれる光のトポロジカルスピンテクスチャの実験的観測に取り組んだ。Si スラブ VPhC の設計を行い、ライトラインの上で Dirac 型分散関係を有する構造を見出した。同構造を作製し、フォトニックバンド構造顕微鏡を用いて偏光分解バンド構造測定を行った。その結果、メロン、アンチメロンのスピンテクスチャを示唆する偏光分布を見出した。

## 研究背景・目的

トポロジカルフォトニクスは、光科学とトポロジーの知見を融合した分野として急速に進展しており、新たな光制御技術の開拓とその応用が期待されている[1]。なかでも、一方向光伝搬[2]や、曲げ損失の少ない光導波路[3]、一方向レーザー発振[4]といった革新的な光制御技術は、光集積回路を始めとする分野において魅力的な技術として注目される。

上記の現象が、主に波数空間におけるバンドトポロジーに着目したものであるのに対して、実空間のトポロジーに着目した光学現象も注目されている。実空間の偏光分布にトポロジカルチャージを有する光渦やベクトルビームは、光ピンセット[5]や光通信[6]、レーザー

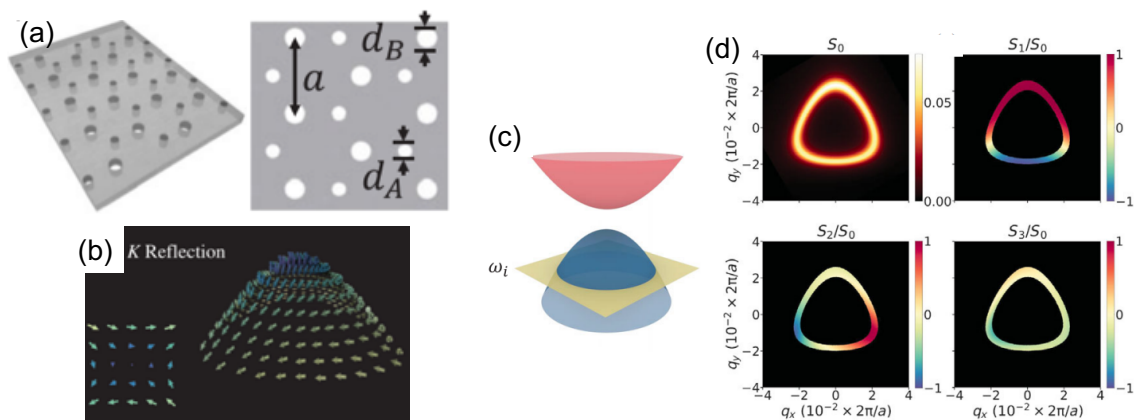


図 1 先行研究で提案されたメロンスピントクスチャ。(a) 対象とする VPhC スラブ。(b) K 点のバレー周りに存在するアンチメロン。(c) バンドにおいて周波数ごとに偏光状態を計算する概念図。(d) 等周波数面における偏光分布。[9]

加工[7]等への応用が期待されている。また、光スキルミオン等のトポロジカルなスピントクスチャを有する光は、固体内スキルミオンの励起等の応用が注目されている[8]。光とトポロジーのさらなる理解と応用に向けて、多様な光のトポロジカルスピントクスチャの探索と実現が期待される。

近年、メロン、アンチメロンと呼ばれる光のトポロジカルスピントクスチャが、バレーフォトニック結晶 (VPhC) のバンド構造中に存在することが数値計算により報告された[9]。同報告においては、図 1(a)に示すような SiC スラブからなるハニカム格子 PhC を用いる。ハニカム格子の副格子を非等価にすることで K 点に存在する Dirac 点の縮退を破り、バレー状のフォトニックバンドを形成する。形成されたバレー近傍のバンド構造において特徴的な偏光分布を有し、図 1 (b)に示すようなメロン、アンチメロン型のトポロジカルスピントクスチャを成すことが報告されている。特に、ライトライン上側の Dirac 点を用いることで、スラブ面外からの光入出力でバンド観測を可能としている。実験においては、図 1(c)に示すように各周波数においてバンドの偏光状態を観測し、図 1(d)のようなストークスパラメータの分布を計算することで、バンド内の偏光状態をストークスペクトルの分布として算出する方法が提案されている。

しかしながら、同スピントクスチャを実験的に観測するためには、半導体ナノ構造の設計と作製、およびバンド構造観測のための高度な光学実験が必要であり、これは未だ報告されていない。また、作製が容易な Si スラブ PhC は屈折率が SiC よりも高いため、ライトライン上側に上記の Dirac 点が存在するかどうかは明らかでない。実験に即した材料・パラメータに基づいて再度設計し、観測が期待できる構造を見出す必要がある。

本研究では、VPhC のバンド構造中に存在するメロン、アンチメロンの光スピントクスチャを実験的に観測することを目的とする。まずは、作製技術が確立された Si スラブ PhC を

用いて、同スピントクスチャの観測に適した構造の設計と作製を行う。次に、フォトニックバンド構造測定用に開発した顕微鏡[10]を用いて、VPhC のバンド構造を測定する。特に、偏光分解バンド測定を行うことで、バンド構造中の光スピントクスチャを明らかにし、メロン、アンチメロンの実験的観測を目指す。

## 結果・考察

### (1) VPhC の設計

先行研究では、SiC スラブの PhC を想定した構造が用いられていたが、本研究では我々のグループで成熟した作製技術を有する厚み 220 nm の Si スラブ PhC を採用する。先行研究とは材料・厚みが異なるため、実験的観測に向けた PhC の設計を行った。検討した PhC 構造のパラメータを表 1 に、そのフォトニックバンド図を図 2 に示す。バンド構造は、三次元平面波展開法により計算した。

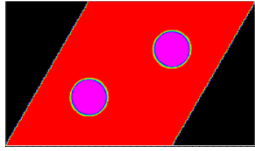
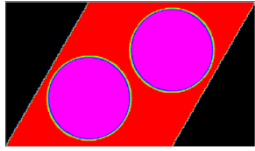
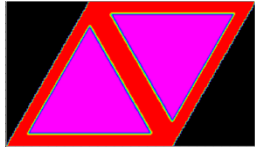
表 1(a)は、先行研究[9]で示されている構造パラメータを、厚み 220 nm の Si スラブ PhC に適用したものであり、直径  $0.22a$  の円形空気孔がハニカム格子状に配列された構造である。図 2(a)はそのフォトニックバンド構造であり、先行研究に比べてスラブの屈折率が高くなることで、従来着目していた Dirac 点がライトラインの下側に来ていることが分かる。この条件では、スラブ面外からの光照射によってバンドを観測することができず、今回の観測には適さない。

バンドの周波数を高くするには、空気孔を拡大して実効的な屈折率を小さくする必要がある。円形空気孔の直径を大きくした構造を表 1(b)に、そのバンド図を図 2(b)に示す。図 2(a)と比べて Dirac 点の周波数は高くなり、ライトラインとほぼ同じ周波数に移動していることがわかる。一方今回の実験では、スラブ面外から対物レンズを用いて光の入出力を行うため、観測できるバンドの周波数は対物レンズの NA に依存する。一般に  $NA < 1$  (本研究では  $NA = 0.9$ ) であるから、観測できる周波数はライトラインよりもさらに高くなる。図 2(b)のバンドの周波数では、 $NA = 0.9$  の対物レンズで集光することが可能な範囲(青い破線より上側)の外にあるため、今回の設計には適さない。

Dirac 点の周波数をさらに高くするためには、PhC における空気孔の割合をさらに上昇させる必要がある。しかしながら、円形空気孔の直径をさらに大きくすると、空気孔同士が繋がってしまい作製が困難になる。そこで本研究では、空気孔の形状を三角形にしたハニカム格子を採用し、空気孔の割合を大きくすることを試みた。その構造を表 1(c)に、バンド図を図 2(c)に示す。空気孔の割合がさらに上昇したことで、Dirac 点がライトラインの上側に位置していることが分かる。

以上の検討から、厚み 220 nm の Si スラブ VPhC を用いたスピントクスチャの観測に向けては、構造(c)をもとにした設計が望ましいことが分かる。観測においては、構造(c)からさらに副格子の二つの空気孔の大きさを非等価にして、Dirac 点の縮退を破った構造を用い

表1 検討した PhC 構造。(a) 先行研究の PhC を Si に置き換え、厚みを 220 nm に変更したものの。(b) (a)の構造から円形空気孔のサイズを拡大したものの。(c) 空気孔の形状を三角形に変更したものの。

Structure	(a)	(b)	(c)
Material	Si	Si	Si
Refractive index	3.48	3.48	3.48
Lattice	Honeycomb	Honeycomb	Honeycomb
Period $a$	1200 nm	1200 nm	1200 nm
Slab thickness	220 nm	220 nm	220 nm
Shape of the air hole	Circle	Circle	Triangle
Diameter/Side length	$0.22a$	$0.50a$	$1.4a/\sqrt{3}$
Unit cell			

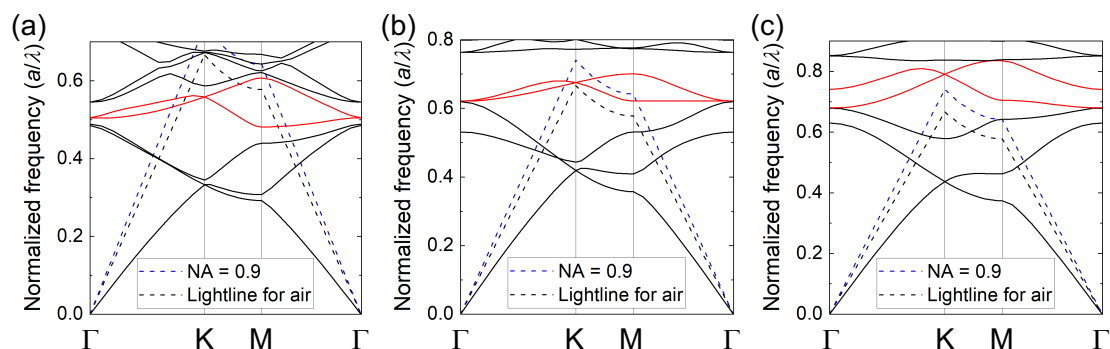


図2 検討した PhC 構造のバンド図。赤い曲線が、着目している Dirac 型分散関係をなすバンド。黒い曲線は他のバンドを示す。黒い破線は、空気界面におけるライトライン。青い破線は NA=0.9 の対物レンズに集光される領域の下端を示す。

る。実験においては、格子定数  $a = 1000$  nm、三角形空気孔の一辺を  $1.3a/\sqrt{3}$  と  $1.1a/\sqrt{3}$  とした構造を用いた。

## (2) VPhC の作製

(1)の設計に基づいて、Si スラブ VPhC を作製した。SOI 基板に対して、電子線描画と反応性イオンエッチングを用いた半導体ナノ加工プロセスを行った。作製した VPhC の走査

型電子顕微鏡像を図 3 に示す。設計通り、二つの異なる大きさの三角形空気孔を有するハニカム格子 PhC が作製されていることが確認できる。

なお、(1)においては解析の容易なエアブリッジ型 PhC を用いたが、実験においては SiO<sub>2</sub> の BOX 層を残した構造を採用した。これは、フォトニックバンド構造顕微鏡で観測する際に、約 100 μm 四方の PhC を用意する必要があり、大面積のエアブリッジ PhC を作製するためには余分なプロセスが必要となることによる。

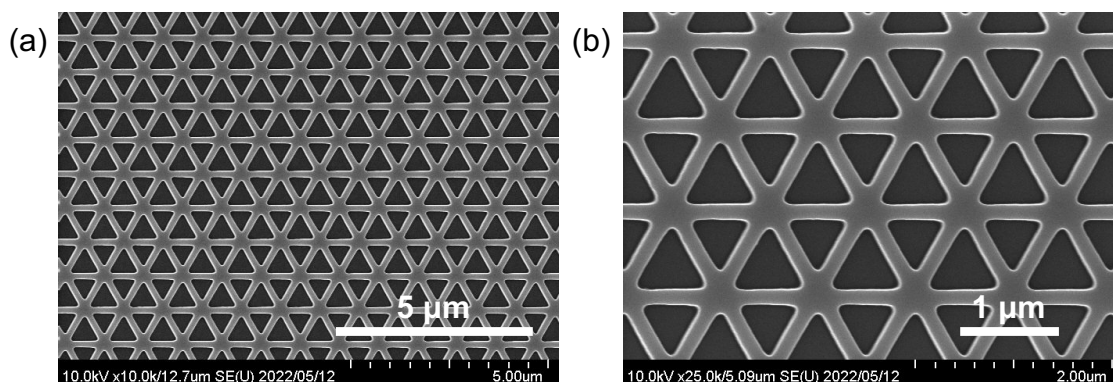


図 3 (a) 作製した VPhC の走査型電子顕微鏡像。(b) 拡大像。

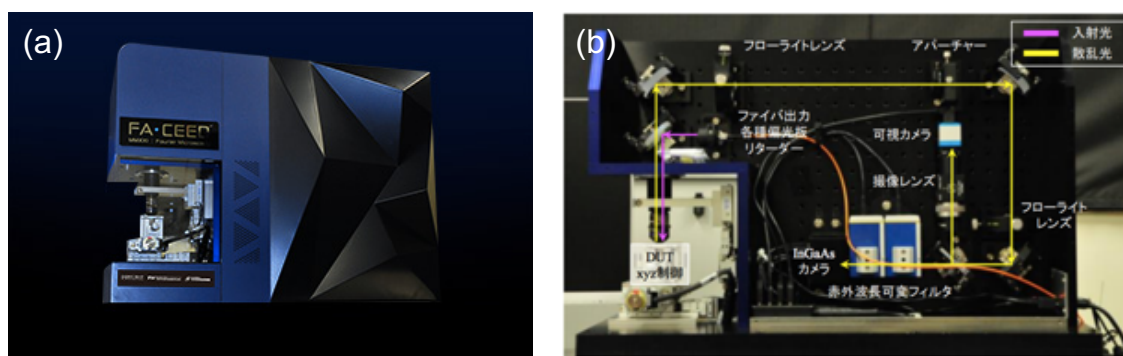


図 4 フォトニックバンド構造顕微鏡の(a)外観と(b)構造。[10]

### (3) フォトニックバンド構造の偏光分解測定

フォトニックバンド構造の測定では、東京工業大学西山研究室で開発したフォトニックバンド構造顕微鏡[10]を用いた。図 4 にその概要を示す。試料をステージにセットしたのち、対物レンズを介して白色光源の光を照射する。PhC 中の状態に結合後、放射された光は再度対物レンズを通り、波長可変フィルタで切り出されたのちに、近赤外 InGaAs カメラで遠方場分布がイメージングされる。フィルタの波長をスキャンすることで、950–1700 nm

の帯域のバンド構造を観測することが可能である。

本研究では、偏光分布を観測する必要があるため、顕微鏡に偏光素子を導入し、偏光分解フォトニックバンド測定を行った。導入した偏光素子は、四分の一波長板 (QWP)、二分の一波長板 (HWP)、直線偏光板 (LP) の三枚である。これらの角度を変えながら合計 4 通りのバンド図を測定することで、バンド上の各点の偏光状態 (ストークスパラメータ  $S_0 \sim S_3$  (付録参照)) を特定した。

#### (4) 偏光分布の解析

図 5 に、波長 1211 nm における波数空間の偏光分布を示す。(a) - (d) はそれぞれ  $S_0$ 、 $S_1/\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ 、 $S_2/\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ 、 $S_3/\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$  に対応する。(b) - (d) を  $\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$  で規格化しているのは、偏光度が 1 ではないことによる。図 5(d) に示した  $S_3$  分布では、K 方向と K' 方向において逆向きの円偏光が交互に並んでいることが確認できる (白い楕円で囲った部分)。これは、VPhC の偏光分布の傾向と一致しており、メロンまたはアンチメロンのスピントクスチャが存在することを示唆する結果となっている。

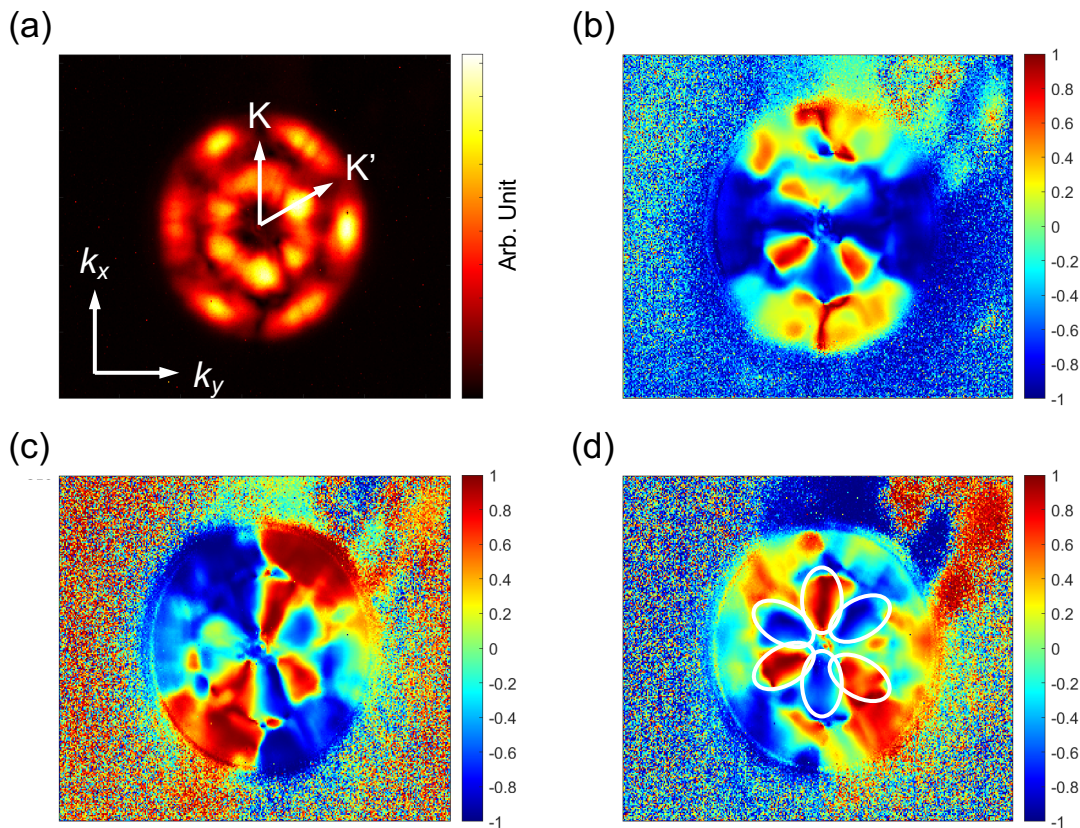


図 5 波長 1211 nm における波数空間の偏光分布。(a)  $S_0$ 、(b)  $S_1/\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ 、(c)  $S_2/\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ 、(d)  $S_3/\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ 。

また、図6に波長1293 nmにおける波数空間の偏光分布を示す。図6(a)に示す  $S_0$  分布では、K、K'方向において、強度が三角形状になっている部分が確認できる。これは、バレー部分を等周波数面で切った断面の形状と一致しており、バレー周辺のバンド構造が観測できていることが推測できる。さらに、図6(b)、(c)には、メロン、アンチメロンスピネクスタチャに見られる特徴的な分布が確認でき（白い円で示した部分）、同スピネクスタチャが存在することが伺えるデータとなっている。

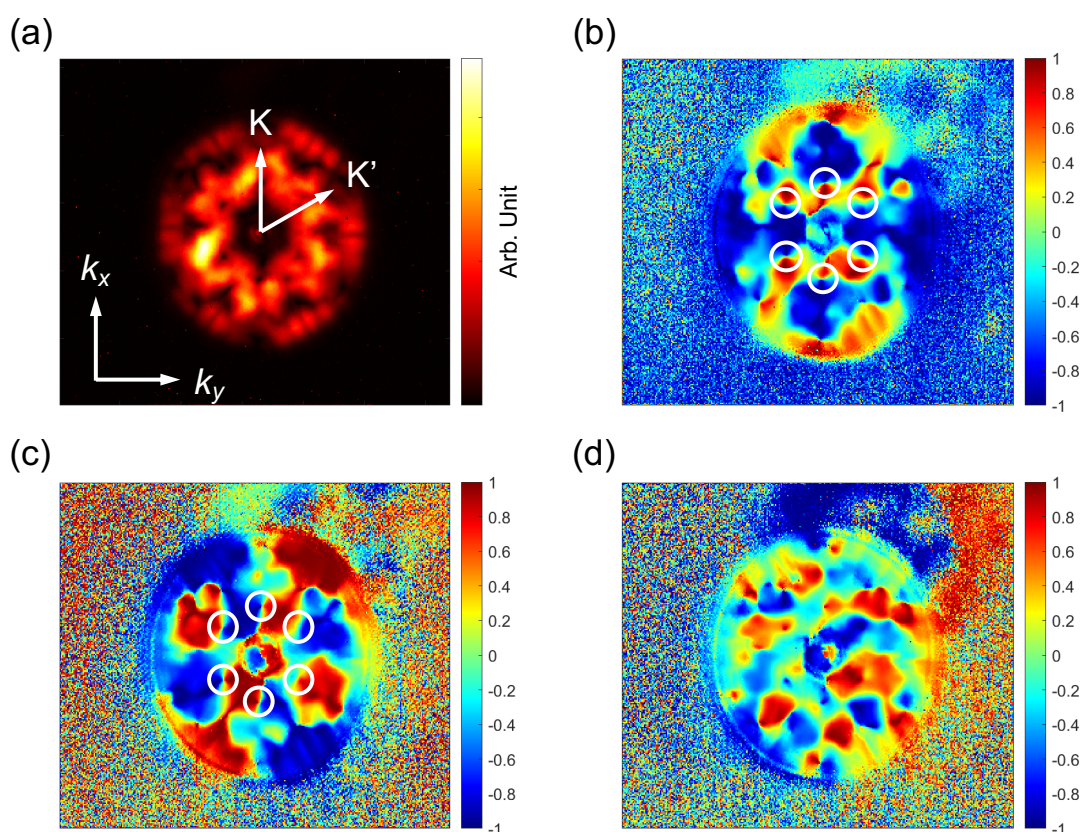


図6 波長1293 nmにおける波数空間の偏光分布。(a)  $S_0$ 、(b)  $S_1/\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ 、(c)  $S_2/\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ 、(d)  $S_3/\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ 。

## 結論・今後の展望

本研究では、VPhCのバンド構造中に存在する、メロン、アンチメロンスピネクスタチャの観測に取り組み、素子の設計と作製、偏光分解バンド測定を行った。SiスラブPhCにおいて、ライトラインの上側にDirac型分散関係を有する構造を計算により見出し、これに基づいてVPhCの設計を行った。作製したVPhCのバンド構造を、フォトリソグラフィで測定し、波数空間における偏光分布を算出した。その結果、メロン、アンチメロン

の存在を示唆する偏光分布を見出した。

今後はさらなる解析を進め、メロン、アンチメロンスピントクスチャの観測を実証することを目指す。

## 付録

### ・ストークスパラメータ

ストークスパラメータは、光の偏光状態を記述する方法の一つ。4つの実数  $S_0-S_3$  からなり、電場の複素振幅  $E_x, E_y$  を用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned} S_0 &= |E_x|^2 + |E_y|^2 \\ S_1 &= |E_x|^2 - |E_y|^2 \\ S_2 &= 2\text{Re}E_x^*E_y \\ S_3 &= 2\text{Im}E_x^*E_y \end{aligned}$$

$S_0$ は光強度を表す。また、完全に偏光している光に対しては $S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ 、無偏光の光に対しては $S_1 = S_2 = S_3 = 0$ となる。さらに、 $S_1 = \pm 1$ は縦、横方向の直線偏光、 $S_2 = \pm 1$ は斜め方向の直線偏光、 $S_3 = \pm 1$ は右回り、左回りの円偏光に対応する。詳細は、光学の教科書などを参照のこと[11]。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、指導教官である岩本教授と西山教授には多大なご支援とご指導をいただきました。深く感謝致します。また、副指導教員の近藤教授には、有益なアドバイスをいただきましたことを、深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] T. Ozawa *et al.*, Rev. Mod. Phys. **91**, 015006 (2019).
- [2] Z. Wang *et al.*, Nature **461**, 772 (2009).
- [3] M. I. Shalaev *et al.*, Nat. Nanotechnol. **14**, 31 (2019).
- [4] B. Bahari *et al.*, Science **358**, 636 (2017).
- [5] L. -G. Wang, Opt. Express **20**, 20814 (2012).
- [6] G. Milione *et al.*, Opt. Lett. **40**, 4887 (2015).
- [7] M. Kraus *et al.*, Opt. Express **18**, 22305 (2010).
- [8] S. Donati *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **113**, 14926 (2016).
- [9] C. Guo *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 106103 (2020).
- [10] T. Amemiya *et al.*, Opt. Lett. **47**, 2430 (2022).



[11] E. Hecht, Pearson Education Limited *Fifth Edition* (2016).