

---

次世代超薄膜の均一性を補償する  
革新的なシングルショット位相・偏光同時イメージング  
Innovative single-shot simultaneous imaging of phase and polarization  
for compensating uniformity in next-generation ultrathin films.

---

M22助自90

代表研究者 若山 俊隆 埼玉医科大学 保健医療学部 臨床工学科 教授  
*Toshitaka Wakayama Professor, Faculty of Health and Medical Care, School of Clinical Engineering, Saitama Medical University*

共同研究者 東口 武史 宇都宮大学 工学部 教授  
*Takeshi Higashiguchi Professor, Faculty of Engineering, Utsunomiya University*

共同研究者 相澤 康平 埼玉医科大学 保健医療学部 助教  
*Kohei Aizawa Assistant Professor, Faculty of Health and Medical Care, Saitama Medical University*

In recent years, materials for next-generation smart transparent displays, flexible smartphones, and post-5G have become thinner. In the management of their products, simultaneous and precise detection of the amount of strain, such as birefringence, in addition to material thickness uniformity has been required. However, no technology has been proposed to simultaneously detect them. The objective of our study is to develop a special lens fabrication method to control polarization and phase simultaneously. Firstly, we investigated the diameter of the lens effective for the measurement and its birefringence distribution. Here, we found unique optical property that the retardance was  $90^\circ$  and the orientation axis was axial-symmetrically distributed around the lens. The key to our research for simultaneous measurement of polarization and phase lies in the spatial division of polarization and phase. Since spatial control of birefringence is achieved around the special lens, the polarization state of the incident light can be determined through a polarizer. On the other hand, the special lens itself can also detect the phase of light from its focusing spot by introducing the Shack-Hartmann wavefront sensor method. We have incorporated a new sensor with a simple optical system comprising a CMOS camera, a polarizing film, and a specialized lens array. To prepare a beam with simultaneously changing polarization and phase, we generated a polarization vortex using an optical element called a vortex retarder, and conducted single-shot imaging of its polarization state and phase distribution. As a result, our strategy enables simultaneous determination for the polarization and phase distribution of radially polarized light with both spatially varying polarization and the optical vortex component. Our results promise us to simultaneously determine the thickness-derived phase and strain-derived birefringence of thin-walled materials, which was the subject of this study.

## 研究目的

近年、次世代スマート透明ディスプレイ、フレキシブルスマートフォン、ポスト5G向けの材料は薄肉化している。これらの製品管理においては、材料の厚さの均一性に加えて、ひずみ量(複屈折)を同時にかつ精密に検出することが望まれている。しかしながら、これらを同時に検出する技術は現在までに提案されていない。このような研究背景から製品の厚みとひずみ量は別々の装置で計測し、管理しているのが現状である。厚さの管理は、一般的に干渉計測を使った方法が導入され、ひずみ量の管理には複屈折計測が利用されている。特に近年では微細周期構造を用いたマイクロ偏光子アレイによる偏光カメラが市販されており、複屈折計測が容易になってきた。しかしながら、学術論文ベースでも複屈折計測とその厚みを管理できるような計測システムは開発されていない。申請者らはこれまでに可視光全領域における偏光制御と高精度検出を同時達成し、研究を続ける中で、偏光と位相を同時に制御できる特殊なレンズの作製方法を見出した。この技術を導入することで、本研究は、超薄膜材料の厚さとひずみ(複屈折)を高感度に同時検出し、次世代薄膜材料の一様性(均質性)をユニークなイメージング法で補償することを目的とする。

## 概要

近年、次世代スマート透明ディスプレイ、フレキシブルスマートフォン、ポスト5G向けの材料は薄肉化している。これらの製品管理においては、材料の厚さの均一性に加えて、ひずみ量(複屈折)を同時にかつ精密に検出することが望まれている。しかしながら、これらを同時に検出する技術は現在までに提案されてい

ない。このような背景から製品の厚みの管理とひずみ量は別々の装置で計測し、管理しているのが現状である。厚さの管理は干渉計測を使った方法が導入され、ひずみ量の管理には複屈折計測が利用されている。特に近年では微細周期構造を用いたマイクロ偏光子アレイによる偏光カメラが市販されており、複屈折計測が容易になってきた。しかしながら、学術論文ベースでも複屈折計測とその厚みを管理できるようなデバイスは開発されていない。申請者らはこれまでに可視光全領域における偏光制御と高精度検出を同時達成し、研究を続ける中で、偏光と位相を同時に制御できる特殊なレンズの作製方法を見出した。本研究は、この技術を導入することで、超薄膜材料の厚さとひずみ(複屈折)を高感度に同時検出を目指す。この技術によって、次世代薄膜材料の一様性(均質性)をユニークなイメージング法で補償することを目的とする。

本研究を実施するにあたり、偏光と位相を同時に制御できる特殊なレンズは自作した。このとき、計測に有効なレンズの直径とその複屈折分布を調査した。複屈折位相差はおおよそ $90^\circ$ 、主軸方位はレンズの周辺で軸対称に分布することが明らかになった。この特殊レンズをアレイ状に配列するためにステッピングモータで制御できる光学系を作製した。レンズアレイにする上では単なる正方形の形状を取る場合と、一列おきに交互に配列する方式、そして、同心円状で配列する方法などいくつかの形式でレンズアレイを配列することができるようになった。偏光と位相を同時計測する本研究のキーは、偏光と位相の空間分割にある。特殊レンズの周辺は複屈折の空間的な制御が達成できているため、偏光子を介せば、入射光の偏光状態を決定することができる。その一方で、特殊レンズそのものは、シャックハルトマ

ン波面センサー方式を導入することで、その集光スポットから光の位相も検出することができる。これが本研究の基本的原理である。この原理を実験実証するために、CMOSカメラと偏光フィルム、そして特殊レンズアレイからなる簡単な光学系を配置した。まずは、偏光計測を行うために、入射偏光をさまざまに変化させて、その偏光状態を計測した。その結果、計測精度は楕円率で0.05、主軸方位は数度とあまり精度は良くなかったが計測が可能となった。この原因としては、計測に必要な複屈折位相差は $90^\circ$  を目標に特殊レンズを加工したが、これがうまく生成できなかったことにあった。これを補正すべく、我々は逆問題を解くことで、楕円率で0.01、主軸方位で $0.1^\circ$  の精度でキャリブレーションを実現した。続けて、光の位相を検出する実験を行った。当初はこちらも $20\lambda$ 程度の検出分解能しか得られなかったが、位相検出に集光スポットの重心計算を導入することで大きくその分解能が変化し、 $0.2\lambda$ 程度まで位相検出が可能となった。これらの検証実験は偏光と位相を別々に制御して計測実験を行ってきたので、次は、偏光と位相を同時に制御したビームを用いて偏光と位相が同時に検出できるかを調査した。ここでは、偏光と位相が同時に変化するビームを用意する必要があったので、渦波長板として知られるVortex retarderと呼ばれる光学素子やSLMと呼ばれる空間位相変調器を用いて偏光渦を生成し、その偏光状態と位相分布をシングルショット撮影した。その結果、空間的に偏光が放射状に変化しているラジアル偏光の偏光分布とその位相面が螺旋状に変化する光渦成分を上述した精度で決定することが可能となった。このような基礎実験の成果から本研究の課題であった薄肉材料の厚さに由来する位相とひずみ由来の複屈折を同時に決定することが可能

となった。

本研究で明らかになった偏光と位相の同時計測方法は薄肉材料の評価に留まらず、天文学観察から工業製品の評価、高エネルギーレーザーのビーム特性分析、そして、医療応用と幅広い分野への応用が期待される。

## 本 文

近年、次世代スマート透明ディスプレイ、フレキシブルスマートフォン、ポスト5G向けの光学材料の薄肉化が進められている。これらを製品管理する際には、材料の厚さの均一性と共に、複屈折に伴うひずみ量を同時にかつ精密に計測することが望まれている。しかし、これらを同時に検出する技術は現在までに提案されていない。そのため、光学材料の厚みとひずみ量は別々の装置で計測し、管理しているのが現状である。光学材料の厚さは、干渉計測を使った方法が導入され、ひずみ量は複屈折計測が利用されている。特に近年では微細周期構造を用いたマイクロ偏光子アレイによる偏光カメラが市販されており、複屈折計測が容易になってきた。この方法を用いると、干渉計測もシングルショットでイメージングが可能である。しかしながら、偏光カメラを用いているため、偏光と位相を分離して検出することは困難である。学術論文ベースでも偏光と位相を同時に計測できる例は皆無に等しい。現在までに、微細周期構造からなるメタサーフェイスを用いた方法で偏光と位相を同時に計測するイメージング法が提案されている<sup>[1]</sup>が、メタサーフェイスの構造上、使用できる波長が近赤外領域に限定されている。このような技術的な問題から可視光領域での偏光と位相の同時計測法が望まれている。申請者らはこれまでに可視光全領域、近赤外から中赤外領域、そして、テラヘルツ領域における偏光制御と高精度

偏光検出を同時達成してきた<sup>[2-5]</sup>。さらに、研究を続ける中で、偏光と位相を同時に制御できる特殊なレンズの作製方法を見出した。この特殊なレンズを偏光と位相の同時計測に応用することを着想し、本研究は、超薄膜材料の厚さと複屈折由来のひずみを高感度に同時検出することを目的とする。本研究の最終ゴールは、この技術によって、次世代薄膜材料の一様性(均質性)をユニークなイメージング法で補償することを目指すものである。

本研究を実施するにあたり、偏光と位相を同時に制御できる特殊なレンズは自作した(図1)。作製方法の詳細は省略するが、このとき、計測に有効なレンズの直径とその複屈折分布を調査した。出力と生成時間によってマイクロレンズのサイズが変化している。現状では100 $\mu\text{m}$ 程度の直径が最小になったが、さらに小さくすることも十分可能である。

また、このレンズを詳しく観察すると、レンズの4時と10時方向に暗黒領域が見つかった。これは偏光顕微鏡をクロスニコルの状態にして観察した結果であるため、暗黒部分は光が透過していないことを意味する。その一方で、1時と7時の方向では光が強く透過していることから、このレンズ周辺では複屈折が軸対称に変化していることが明らかになった。複屈折計測から詳しく複屈折位相差を計測してみると、図2に示すように複屈折位相差は $100^\circ \pm 40$ と

なった。一方、主軸方位はレンズの周辺で軸対称に分布した。この結果だけをみると複屈折位相差と主軸方位が線形に変化していないので、これらを補正する必要があることがわかる。この点は後述する。

上記までに特殊マイクロレンズによって複屈折制御ができることが明らかになったので、この特殊レンズをアレイ状に配列するためにステッピングモータで制御できる光学系を作製した。レンズアレイにする上では単なる正方形の形状を取る場合と、一列おきに交互に配列する方式、そして、同心円状で配列する方法などいくつかの形式でレンズアレイを配列することができるようになった。用途に合わせてこれらを変えることも本方法のメリットと言える。今回は、試しに20 $\times$ 20画素の特殊マイクロレンズアレイを作製した。作製したマイクロレンズアレイを図3に示す。今回のマ

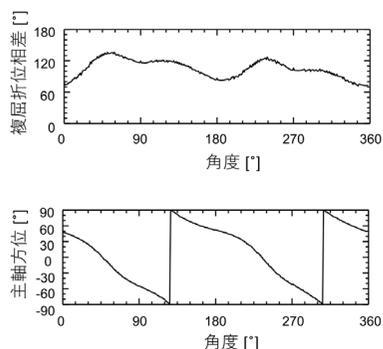


図2 周方向の複屈折位相差と主軸方位の変化

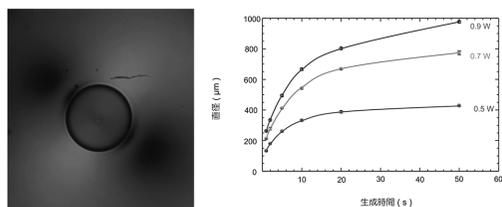


図1 作製したマイクロレンズとそのマイクロレンズの特性  
(左) 作製したマイクロレンズを偏光顕微鏡で観察した結果、(右) マイクロレンズを生成するのに要した出力と作製時間とその直径の依存性

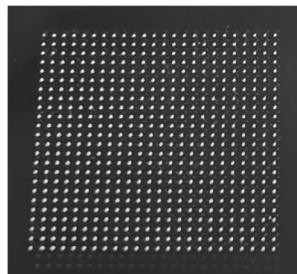


図3 特殊マイクロレンズアレイ

マイクロレンズの直径は基礎実験のため、 $620\mu\text{m}$ の大きさを採用した。空間的に $1.5\text{mm}$ 毎にマイクロレンズを正方形に配列させた。

偏光と位相を同時計測する本研究のキーは、偏光と位相の空間分割にある。特殊レンズの周辺は、複屈折の空間的な制御が達成できているため、シート状の偏光子を介せば、サンプルによって変化した入射光の偏光状態を決定することができる。さらに、特殊レンズそのものは、シャックハルトマン波面センサーの役割を果たすことから、その集光スポットの位置から光の位相も検出することができる。これが本研究の基本的原理である。

この原理を実験実証するために、図4(a)に示すような光学系を作製した。これは、CMOSカメラと偏光フィルム、そして特殊レンズアレイからなる簡単な光学系からなる。CMOSカメラで撮像される画像にはマイクロレンズが映し出される。マイクロレンズの1つに注目すると、そのレンズ周辺は、図2に示したような偏光変化が軸対称に行われるので、図4(b)に示したような画像が検出される。角度 $\theta$ に対して光強度をプロットすると、入射光の偏光によって光強度プロファイルが変化する(図4(c)に)ので、これを偏光計測することで、偏光状態を表すストークスパラメータ $s_0\sim s_3$ が全て求まる。これはいわば、時間的に偏光変調している回転1/4

波長板法と同じ役割を果たす。この光強度変化は、入射光を円偏光にすることで複屈折位相差と主軸方位を同時に検出することができることを意味している。さらに、図4(d)に示したように、位相を同時に検出するにはレンズの瞳の集光スポットの変化を観察すれば良い。サンプルを挿入前の集光スポットを基準状態として、その位置を記録する。サンプル挿入後、その屈折率や厚みの変化によって位相が変化するので、集光スポットの変化を観察すると、サンプル挿入前後で集光スポットが変化する。これを位相変化として独立に捉えることが可能になる。偏光変化も位相変化もレンズの周囲と集光位置と空間分割されており、それぞれは干渉しないため、独立に検出することが可能である。このような偏光と位相の変化を特殊マイクロレンズ毎に行うことで偏光と位相を同時に検出できる。本実験で利用した特殊マイクロレンズアレイの直径の大きさは、 $620\text{mm}$ であり、 $1.5\text{mm}$ 毎に特殊マイクロレンズを作製した。そのため、特殊マイクロレンズアレイは $30\text{mm}$ 角となった。今回使用したCMOSカメラは $11\text{mm}$ 角であったため、実際に使用できる特殊マイクロレンズアレイは $7\times 7$ 個となった。これらをCMOSカメラに組み込むことで、新たなセンサーを開発した。

この原理を実証するために、まずは、偏光

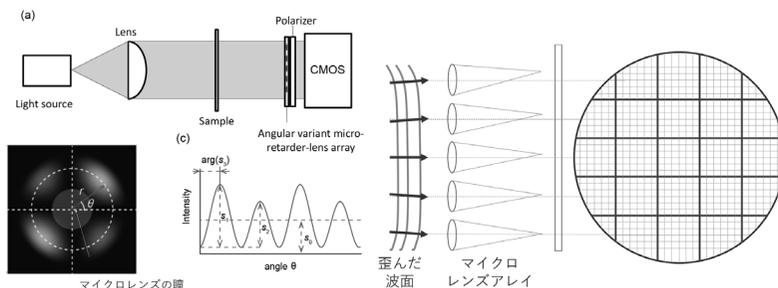


図4 偏光と位相の同時計測の光学系

(a) 実験光学系、(b) 1個のマイクロレンズ周辺の偏光パターン、(c) レンズ周辺の光強度変化、(d) 位相検出方法

を事前に制御できている偏光を偏光解析した。入射偏光をさまざまに変化させて、その偏光状態を計測した。その結果、計測精度は楕円率で0.05、主軸方位は数度とあまり精度は良くなかったが、偏光計測が可能であることを実証した。精度がイマイチであった原因としては、計測に必要な複屈折位相差は $90^\circ$ を目標に特殊レンズを加工したが、図2に示したように、これがうまく制御できなかつたことに起因している。精密な特殊レンズの作製を行うこともできるが、この基盤光学材料の波長依存性などの影響も懸念されるので、本研究では、これらを補正することに注力した。解析アルゴリズムの詳細は割愛するが、我々は逆問題を解くことで、楕円率で0.01、主軸方位で $0.1^\circ$ の精度でキャリブレーションを成功させた。続いて、光の位相を検出する実験を行った。当初はこちらも $20\lambda$ 程度の検出分解能しか得られなかったが、位相検出に集光スポットの重心計算を導入することで大きくその分解能が変化し、 $0.2\lambda$ 程度まで位相検出が可能となった。ここでは、位相分解能計測実験にスライドガラ

スを $0.01^\circ$ 毎に変化させながら、光路長をわずかに増加させる実験を行うことで、位相変化を決定することに注目した。ここではnmオーダーの非常に小さな光路長差を高感度に検出することができることを証明した。

上述したように、偏光と位相を独立して制御し、それらの検出がどこまで可能かを丁寧に実験実証した。次は、偏光と位相が同時に制御されたビームを用いて、これらを同時に決定できるかを検証した。これらの検証実験には偏光と位相が同時に制御できていることが重要である。偏光と位相が同時に制御できるビームを用意する必要があったので、渦波長板として知られるVortex retarderと呼ばれる光学素子やSLMと呼ばれる空間位相変調器を用いて偏光渦を生成し、その偏光状態と位相分布をシングルショット撮影した。図5は、偏光と位相が同時に制御されたビームの計測結果を表している。ここで、図5(a)-(c)は、位相がフラットなラジアル偏光、図5(d)-(f)は、偏光が均一な円偏光になっている光渦を計測した結果を表している。その中でも、図5(a),(d)は偏

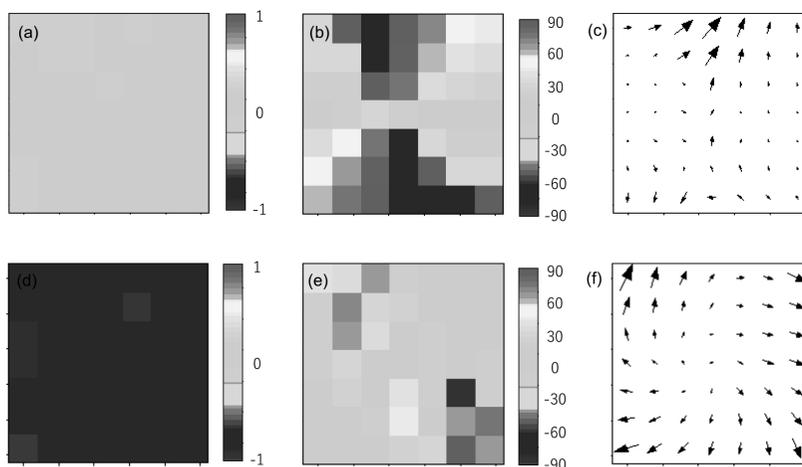


図5 偏光と位相が同時に制御されたビームの計測結果

(a) - (c) 位相がフラットなラジアル偏光、(d) - (f) 偏光が均一な円偏光になっている光渦を計測した結果。(a),(d)は偏光を表す楕円率、(b),(e)はその主軸方位、(c),(f)は集光位置の変化を表している。

光を表す楕円率、図5(b),(e)はその主軸方位、図5(c),(f)は集光位置の変化を表している。上段は、位相がフラットなラジアル偏光になるようにビームを調整しているの、楕円率は直線偏光を示す緑色で表されており、その主軸方位は方向によって滑らかに変化している。0°方向は0°、45°方向は45°と角度によって偏光が放射状に変化している。そして、その位相分布は、サンプル挿入前後の集光位置の変化をベクトルマップで表示しており、その形状は馬鞍型になっており、渦は発生していないことがわかる。一方で、左回りの円偏光の軌道角運動量が1になる右回りのvortex phaseをもった光渦を発生させると、その偏光状態を表す楕円率は面内でほぼ-1となって、左回り円偏光を表している。この際的主軸方位は円偏光であるために空間的にバラバラになってしまうので、図5(e)のような分布になることは、問題がない。(円偏光の主軸方向はわずかな変化で大きく変化するため。)一方で、その位相分布はサンプル挿入前後で渦の巻き方が右回りの渦となった。以上に示された偏光と位相の同時計測を空間マップで計測することを実証することに成功した。

以上の結果から、空間的に偏光が放射状に変化しているラジアル偏光の偏光分布とその位相面が螺旋状に変化する光渦成分を上述した精度で決定することが可能となった。このような基礎実験の成果は、本研究の課題であった薄肉材料の厚さに由来する位相とひずみ由来の複屈折を同時に決定することを意味している。現状では、次世代スマート透明ディスプレイ、フレキシブルスマートフォン、ポスト5G向けの光学材料を入手することができなかったため、これらに対応する計測システムに昇華することはできていないが、原理上は開発ができたことになる。偏光と位相をそれぞれnmオー

ダーの計測分解能で検出でき、そして、それらが縦弾性においても検出することができるようになってきているので、新たな薄肉光学材料の評価方法としては非常に興味深いシステムになっていると思う。この技術はCMOSセンサーに組み込むことができるし、その他の機械的および電気的な偏光変調システムを必要としないことに特徴もある。これらのシステムは現状では空間分解能が高くなってしまっているが、さらに特殊マイクロレンズを集積化することで、とても興味深いツールになると思われる。しかしながら、現在のところ、薄肉光学材料の屈折率と厚さの同時計測には至っていないので、これらの分離はできない。偏光計測で得られる複屈折位相差の情報においても複屈折と厚さを分離することはできない。従来技術にあるエリプソメトリーの技術のようにコーシーの屈折率分散フィッティングを導入することで、厚さのパラメータも推定できるようになってくると考えられる。

本研究で明らかになった偏光と位相の同時計測方法は、本研究テーマに示した薄肉材料の評価に留まらず、その他の分野への貢献も期待されることを考察する。現在、高エネルギーレーザーの中でもレーザーの偏光と位相の空間分布を観察することはとても重要である。しかしながら、上述したように偏光と位相の同時計測はこれまで行われていなかった。ビーム特性のシングルショット分析はレーザーの本質を調査することになるのでとても有用な技術になると期待される。

最後に、公益社団法人 村田学術振興財団より研究助成いただいたおかげで、研究を前進させることができましたことを深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] T. Onuma and Y. Otani, “A development of two-dimensional birefringence distribution measurement system with a sampling rate of 1.3 MHz,” *Opt. Commun.* **315**, 69-73 (2014).
- [2] Z. Yang, Z. Wang, Y. Wang, X. Feng, M. Zhao, Z. Wan, L. Zhu, J. Liu, Y. Huang, J. Xia, and M. Wegener, “Generalized Hartmann-Shack array of dielectric metalens sub-arrays for polarimetric beam profiling,” *Nat. Commun.* **9**, 4607 (2018).
- [3] T. Wakayama, T. Higashiguchi, H. Oikawa, K. Sakaue, M. Washio, M. Yonemura, T. Yoshizawa, J. S. Tyo, and Y. Otani, “Determination of the polarization states of an arbitrary polarized terahertz beam: Vectorial vortex analysis,” *Sci. Rep.* **5**, 9416 (2015).
- [4] M. Shoji, T. Wakayama, H. Ishida, H. Kowa, K. Sakaue, T. Miura, and T. Higashiguchi, “Single-shot multispectral birefringence mapping by supercontinuum vector beams,” *Appl. Opt.* **59**, 7131-7138 (2020).
- [5] T. Wakayama, H. Oikawa, A. Sasanuma, G. Arai, Y. Fujii, T.-H. Dinh, T. Higashiguchi, K. Sakaue, M. Washio, T. Miura, A. Takahashi, D. Nakamura, T. Okada, M. Yonemura and Y. Otani, “Generation of radially polarized high energy mid-infrared optical vortex by use of a passive axially symmetric ZnSe waveplate,” *Appl. Phys. Lett.* **107**, 081112, (2015).

## 今後の研究の見通し

本研究によって偏光と位相の同時計測が可能な光学系およびその計測方法、そして、キャリブレーション法までが確立した。アレイ化に関してはさらにさまざまな形態をとることで便利な計測ツールになると考えられる。さらに、一つのレンズのサイズをさらに小さくすることで、空間分解能を向上することも十分可能である。これらの要素技術の向上と共に、医学分野への応用が期待される。

## 本助成金による主な発表論文、著書名

- 1) T. Wakayama, A. Zama, Y. Higuchi, K. Aizawa, and T. Higashiguchi, Demonstration of polarization-sensitive wavefront sensor by an angular variant micro-retarder-lens array,” *Proceedings of The 12th Advanced Lasers and Photon Sources Conference, ALPSP1-23* (2023).
- 2) 座間あかね, 樋口裕大, 相澤康平, 東口武史, 若山俊隆, “偏光制御マイクロレンズアレイによる偏光と位相の同時計測,” *Optics & Photonics Japan2022* (2022).