

ベクトルビームを用いた複屈折計測装置の構築

芦澤稜也*¹, 大久保進也*²

Construction of Birefringence Measurement System Using Vector Beam

ASHIZAWA Ryoya*¹ and OHKUBO Shinya*²

Abstract: Generally, in birefringence measurement, it takes a long time to measure because the polarizing element is mechanically rotated. In this study, a single-shot birefringence measurement system is constructed for purpose of shortening the birefringence measurement time. As a result, it has become possible to measure birefringence quantitatively in real time or at high speed. This enables more efficient development of optical material products developed using birefringence measurement.

Key Words: Polarization, Birefringence, Vector Beam

1. はじめに

複屈折計測は、光学材料の光学異方性を定量的に得るための重要な手法である。これにより、ディスプレイ用の光学ガラスやフィルムの評価を行うことで製品の品質向上につながる。しかしながら、一般的に複屈折計測には回転偏光子法や回転位相子法が用いられるが、偏光素子を機械的に回転させるため計測に時間が掛かる。そこで本研究では、実時間あるいは高速で複屈折を定量的に計測するための、ベクトルビームを用いた複屈折計測装置の構築を目的とする。

2. 偏光と複屈折

2. 1 偏光

光は電磁波の一種で、進行方向に対して垂直な方向に振動する横波である。太陽や電球から放出される自然光は、進行方向と垂直な面に対して 360° あらゆる方向に振動している。つまり光軸周りのあらゆる方向に振動面を持っている。これに対し、振動面が一つだけであるため特定の一方方向にしか振動しない光を偏光という。光の偏光状態によって直線偏光や円偏光と呼ばれる。自然光を直線偏光に変換する素子のことを偏光子と呼び、さらに直線偏光に 1/4 波長板を透過させることで、円偏光への変換を可能にする。このような偏光状態を直感的に表現する方法の一つにストークスパラメータがある。これは、光強度および各偏光成分を次のように 4 つ 1 組で表示するものである。

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 S_0 は光強度、 S_1 は水平垂直直線偏光成分、 S_2 は±45°直線偏光成分、 S_3 は左右円偏光成分をそれぞれ示す。

2. 2 複屈折

Fig.1に複屈折現象について示す。

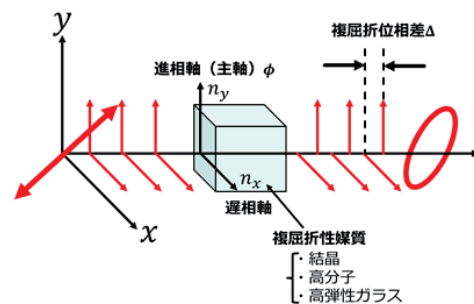


Fig. 1 Birefringence

偏光が直交方向で屈折率の異なる媒質に入射されたとき、直交方向の光ベクトルに位相差が生じることで出射した偏光の状態が変化する。このような媒質を複屈折性媒質といい、結晶や高分子、高弾性ガラスなどがこれに相当する。この場合に起こる位相差のことを複屈折位相差と呼ぶ。また、光が最も速く進む方位を進相軸あるいは主軸方位といい、最も遅く進む遅相軸とは常に直交関係にある。我々は、このような複屈折を定量的に計測するシステムを研究開発している。

3. 複屈折計測法

3. 1 従来の複屈折計測法における問題点

複屈折計測法には回転偏光子法、回転位相子法、セナルモ

*1 専攻科 : Advanced Engineering Course

*2 制御情報工学科 : Department of Control & Computer Engineering

ン法などがある[1,2]. いずれの方法も光学素子を機械的あるいは電的に偏光変調させることで試料の複屈折位相差と主軸方位を定量計測できる. しかしながら, 計測に時間が掛かるため, 高速で計測する必要があるガラスや光学薄膜の品質検査には向かない.

そこで本研究では, これを解消する手法として, 回転位相子法の原理を基とした複屈折装置の構築を行う.

3. 2 回転位相子法の原理

本研究で提案する手法の原理となる回転位相子法とは, 位相子 (波長板) Q_θ を機械的に回転させながら光強度変化を検出する方法である. Fig.2 に回転位相子法の計測装置を示す.

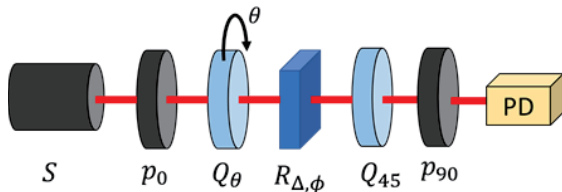


Fig. 2 Rotational retarder method

光源 S からの直線偏光は Q_θ を通過した後に複屈折性試料 $R_{\Delta,\phi}$ を通過後, 方位 45° の $1/4$ 波長板 Q_{45} および方位 90° の偏光子 P_{90} を通過後, 検出器 PD により光電変換される. Q_θ を回転させることで変化する光強度 $I(\theta)$ は, 各光学素子のミューラー行列を用いてストークスパラメータを算出することにより次のようになる.

$$I(\theta) = \frac{1}{4} \{ 1 + \sin \Delta \cos^2 \theta \sin 2\phi - \sin \Delta \cos 2\theta \sin 2\theta \cos \phi + \cos \Delta \sin 2\theta \} \quad (2)$$

この光強度変化をフーリエ変換することで得られるフーリエ係数は次のようになる.

$$\left. \begin{aligned} a_4 &= \frac{1}{8} \sin \Delta \sin 2\phi \\ b_2 &= \frac{1}{4} \cos \Delta \\ b_4 &= -\frac{1}{8} \sin \Delta \cos 2\phi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

これらより, 主軸方位 ϕ と複屈折位相差 Δ は次のように算出される.

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{a_4}{b_4} \right) \quad (4)$$

$$\Delta = \tan^{-1} \left(-\frac{2b_4}{b_2 \cdot \cos(2\phi)} \right) \quad (5)$$

本研究で構築する装置との比較のために, この回転位相子法を用い, 標準試料として任意の複屈折を与えることができるバビネ-ソレイユ補償子 (BSC) の Δ と, $1/4$ 波長板 (QWP) の ϕ を計測した. Δ の計測結果を Fig.3 に, ϕ の計測結果を

Fig.4 にそれぞれ示す.

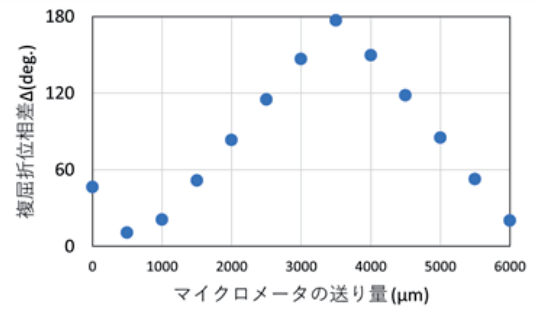


Fig. 3 Retardation (Δ) result of BSC

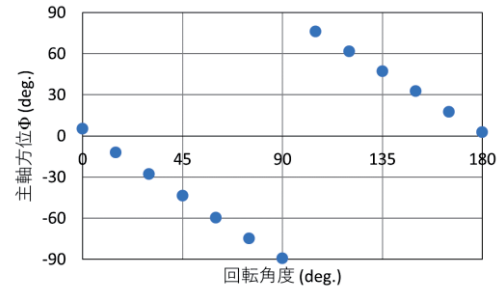


Fig. 4 Azimuth angle (ϕ) result of QWP

この結果, 位相差は $0 \sim 180^\circ$, 主軸は $-90 \sim +90^\circ$ の計測レンジがあることがわかった. しかしながら, Q_θ をステップモータにより機械的に回転するため時間が掛かり, 計測には $1 \sim 2$ 分程度の時間を要した. そのため, 計測時間の短縮化が望まれる.

そこで本研究では, この原理に基づき, 試料への入射光にベクトルビームを用いた複屈折計測装置を新たに構築する.

4. ベクトルビームを用いた複屈折計測装置

4. 1 軸対称な周期偏光分布を用いた計測

本研究では, 試料への入射光にベクトルビームを用いた複屈折計測装置を構築する. Fig.5 に装置構成を示す.

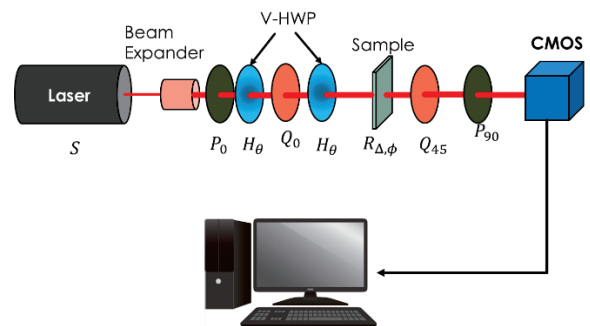


Fig. 5 Single-Shot Birefringence Measuring System

先ほどの回転位相子を, ビーム径内に分布する軸対称な周期偏光分布を持つベクトルビームに置き換え, その分布を CMOS カメラで撮像しコンピュータ解析することで複屈折計測を行う[3-6]. 本研究では, 位相子を 2 枚の光渦 $1/2$ 波長板 (V-HWP) で挟み込むことで, Fig.6 のようなベクトルビ

ームの発生を試みる。

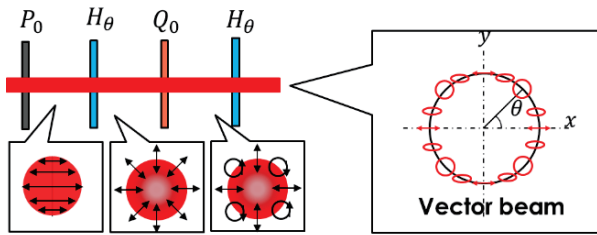
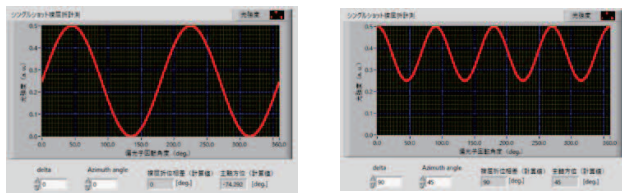


Fig.6 Vector beam

使用する V-HWP は、位相差を 180° と与えつつ、主軸方位分布が円周方向に一定間隔で変化するため、直交する偏光子の間に挟むと円周方向に光強度が周期的に変化する。2枚の V-HWP の間に Q_0 を挟み、そこに水平直線偏光を入射すると、出射する光の偏光状態はこのように円周方向に周期的に、直線、楕円、円を繰り返すベクトルビームとなる。これは回転位相子法における、位相子の機械的な回転で起こる偏光変化と全く同じ状態となる。位相差および主軸を変化させたときの、円周方向の光強度分布から複屈折が算出できるかどうか、シミュレーションした結果を Fig.7 に示す。



(a) $\Delta=0[\text{deg.}]$

(b) $\Delta=90[\text{deg.}]$

Fig.7 Simulation of retardation

この結果、従来の回転位相子法と同じ結果となった。以上、新たに構築した複屈折計測光学系を Fig.8 に示す。

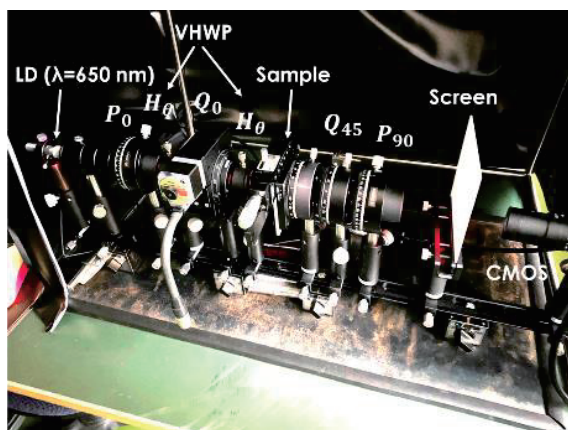


Fig.8 Optical setup

シングルショット複屈折装置の流れとしては、まず試料にベクトルビームを照射し、透過したビームスポット面内の強度分布を高精密 CMOS カメラにより撮像する。得られた光強度分布の画像を保存した後、それを数値化することで光強度分布を 2 次元配列に格納する。今回は画素数が $2592[\text{pix.}] \times 1944[\text{pix.}]$ なので、中心座標 $O(1296, 972)$ から半径

$r=250[\text{pix.}]$ の円周の光強度データを抽出し、これを横軸に中心角 θ 、縦軸に光強度 $I(\theta)$ のグラフとして座標変換すると Fig.9 のようになる。

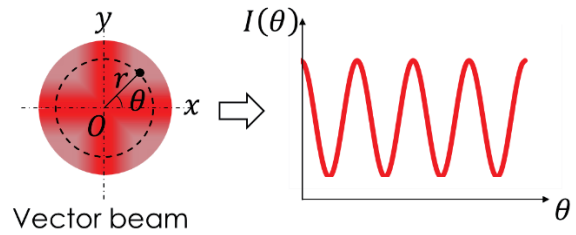


Fig.9 Coordinate transformation of light intensity distribution

計測原理としては回転位相子法と同じなので、データをフーリエ変換し、得られた各フーリエ係数から、式(4)、(5)を用いて試料の Δ と ϕ を算出する。このような画像取得から波形の解析、および複屈折の算出などを一括で行うため、計測および画像処理ソフトウェアを作成した。作成した計測ソフトウェアを Fig.10 に示す。

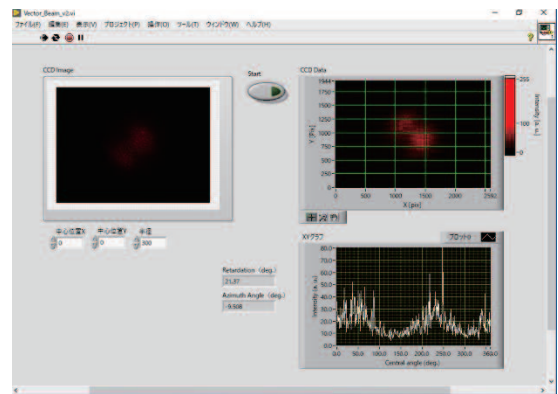


Fig.10 Measurement software

以上で構築した装置により、実際に複屈折計測を行い、従来の回転位相子法による計測との比較を行った。

4. 2 実験および考察

回転位相子法と同様に、BSC を用いた Δ の計測結果と、QWP を用いた ϕ の計測結果を Fig.11 と Fig.12 にそれぞれ示す。

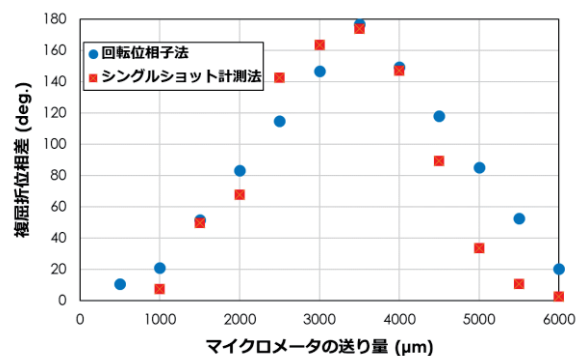


Fig. 11 Retardation (Δ) result of BSC

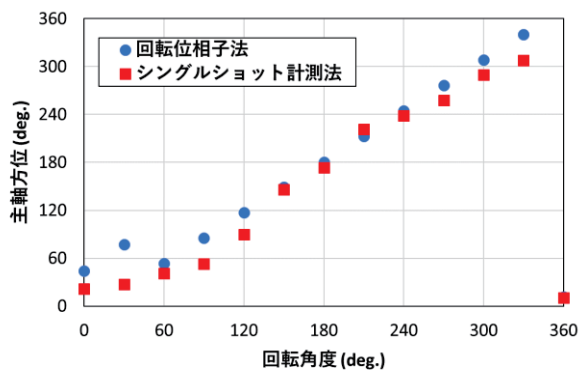


Fig. 12 Azimuth angle (ϕ) result of QWP

なお、比較のために前述の回転位相子法の結果を同グラフに重ねて記す。また、両手法を比較しやすいように Δ および ϕ の計測開始位置をシフトさせるなどして補正した。

計測の結果、 Δ 、 ϕ いずれも回転位相子法の結果とほぼ同様に増加・減少した。また、これまでの計測時間が1～2分だったのに対し、シングルショット計測法では画像処理の時間を含めて5秒程度と大幅に短縮された。しかしながら、 Δ 、 ϕ いずれの計測結果には最大で 10° 程度の誤差が生じた。これは、座標変換における中心位置のずれによるものと考えられる。これを改善する方法として、ビームプロファイラなどであらかじめ光強度分布を撮像し、ドーナツ状の光強度分布の中央部分を正確に確認しておくなどの対応が考えられる。また、CMOSカメラで得られた画像を多く取得しておき、それらのパターンについて機械学習などを用いて中心位置の判別をするなどの対応も考えられる。

5. おわりに

本研究では、高速で複屈折を計測するための、ベクトルビームを用いた複屈折計測装置の構築を行った。現時点では誤差が生じるものの、従来法よりも高速に計測することが可能になった。

今後はビームスポットの中心位置決めの確立により誤差の改善を目指し、さらに計測時間の短縮化を試みる。また、多波長によるシングルショット複屈折計測を試みる。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(20K04508)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] D. E. Aspnes, "Optimizing precision of rotating-analyzer ellipsometer," J. Opt. Soc. Am., 64, pp.639-646, 1974.
- [2] P. S. Hauge and F. H. Dill, "A rotating-compensator Fourier ellipsometers," Opt. Commun., 14, pp.431-437, 1975.
- [3] T. Wakayama, et. al., "Achromatic axially symmetric wave plate," Opt. Express, vol. 20, No. 28, pp.29260-29265, 2012.
- [4] T. Wakayama, K. Komaki, I. J. Vaughn, J. S. Tyoc, Y. Otani and T. Yoshizawa, "Evaluation of Mueller matrix of achromatic axially symmetric wave plate," Proc. of SPIE vol. 8873, 88730P1-7, 2013.
- [5] T. Wakayama, O. G. Rodríguez-Herrera, J. S. Tyo, Y. Otani, M. Yonemura and T. Yoshizawa, "Generation of achromatic, uniform-phase, radially polarized beams," Opt. Express, vol. 22, No. 3, pp. 3306-3315, 2014.
- [6] S. C. McEldowney, D. M. Shemo and R. A. Chipman, "Vortex retarders produced from photo-aligned liquid crystal polymers," Opt. Express, vol. 16, No. 10, pp. 7295-7308, 2008.