

## 波長依存性を考慮した二次元複屈折計測

若山 俊隆\*・高和 宏行\*\*・大谷 幸利\*・梅田 倫弘\*・吉澤 徹\*

\*東京農工大学工学部機械システム工学科 〒184-8588 小金井市中町 2-24-16

\*\*有限会社ユニオプト 〒431-0411 湖西市入出 350-1

### Two-Dimensional Birefringence Measurement with Wavelength Dependence

Toshitaka WAKAYAMA\*, Hiroyuki KOWA\*\*, Yukitoshi OTANI\*, Norihiro UMEDA\* and Toru YOSHIZAWA\*

\*Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, Nakacho 2-24-16, Koganei, Tokyo 184-8588

\*\*Uniopt Corporation, Ltd., Iride 421-1031, Kosai, Shizuoka 431-0411

This paper describes a measurement method for two-dimensional birefringence with wavelength dependence. The system consists of a white light source, parallel polarizers and a detector for spectroscopic polarized light. The detected intensity changes sinusoidal wave. Its period is shifted slightly because of birefringence with wavelength dependence. The retardation of a sample is analyzed from the frequency and phase information of the spectroscopic interferogram using Fast Fourier transform (FFT). In the experiment, an acousto-optic tunable filter is used to extract a specific wavelength component from the white-light source. A CCD camera is used to measure the intensity of transmitted light of a sample. This experiment demonstrates the two-dimensional birefringence distribution of a quartz plate. A detailed comparison reveals that the experimental results are in accordance with the theoretical analysis.

**Key words:** high-order birefringence measurement, spectroscopic interferogram, dispersion, acousto-optic tunable filter, fast Fourier transform (FFT)

### 1. はじめに

近年のオプトエレクトロニクスの発展に伴い、光学分野における射出成型品、高分子や結晶を用いた光学素子、液晶などの需要は急速に増加している。これに伴い、これらの材料の定量的な評価法のひとつに複屈折計測装置が注目されている。現在までに光ディスクやレンズなどの複屈折を計測する方法として、光ヘテロダイン干渉法<sup>1,2)</sup>、位相シフト法<sup>3)</sup>そしてフーリエ変換法<sup>4,5)</sup>を用いた研究が報告されている。これらの単色光を用いた偏光計測法は複屈折位相差の検出可能範囲が $-\pi \sim \pi$  radと制限される。しかしながら、高分子材料や結晶材料のもつ複屈折は波長依存性をもつものが多い。また、複屈折位相差は厚みの関数であるため、これらの材料の複屈折位相差は $2\pi$  radを超えることがある。このような材料のもつ複屈折を高次複屈折とする。このとき、従来の偏光計測法で得られる位相は

$2\pi$  radで折りたたまれることから、複屈折位相差の測定が困難であった。このような背景から $2\pi n$ の次数 $n$ を含んだ複屈折位相差の計測が望まれている。今までに高次複屈折の計測に関しては基準位相子を用いた方法<sup>6)</sup>や偏光の分光干渉による最大エントロピー法を用いた計測法<sup>7)</sup>が報告されているが、複屈折の波長依存性について評価はされていない。一方、高分子や結晶材料の波長依存性に関連する研究として白色光を用いた分光偏光計測<sup>8,9)</sup>が報告されているが高次複屈折を二次元分布でとらえた報告はない。

本論文では、波長依存性を考慮した二次元複屈折分布計測法について提案する。解析には高速フーリエ変換法を用いた。まず、マルチチャンネル分光器を用いた複屈折の一次元計測について述べたうえで、二次元計測を実現するために音響光学チューナブルフィルター (AOTF) を用いた二次元複屈折計測について報告する。これによって高次複

waka@uol.mech.tuat.ac.jp



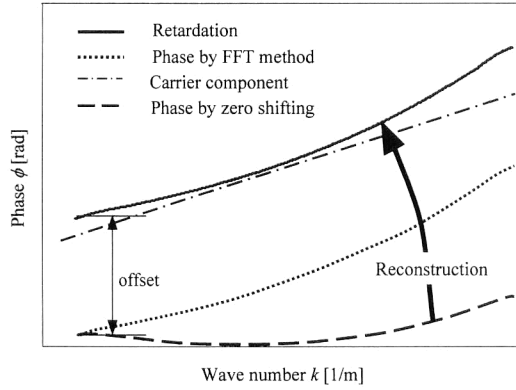


Fig. 2 Result of zero shifting on spectrum.

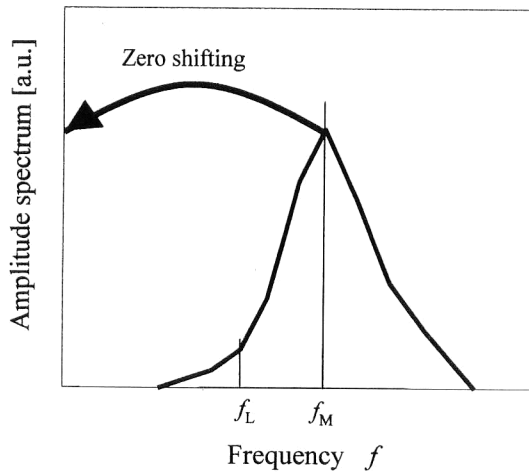


Fig. 3 The amplitude spectrum.

ここで、 $f$ 、 $\phi(k)$  は複屈折位相差のキャリア成分における変数、複屈折位相差のキャリアを取り除いた成分となる。フーリエ変換法において中心周波数を 0 次シフトすると式(10) の第 1 項のキャリア成分が失われる。複屈折位相差を求める場合、第 1 項のキャリア成分を復元する必要がある。Fig. 3 の中心周波数  $f_M$  を用いると次式のように複屈折位相差を示すことができる。

$$\Delta_l = 2\pi \cdot f_M \cdot \frac{k}{K_{\max} - K_{\min}} + \phi(k) \quad (11)$$

ここで、 $K_{\max}$ 、 $K_{\min}$  は走査される波数の最大値と最小値である。式(11) の第 1 項を周波数情報とし、第 2 項を位相情報とする。複屈折位相差は Fig. 2 のように周波数情報と位相情報から求めることができる。

### 3. 波長依存性を考慮した複屈折計測システム

#### 3.1 分光器を用いた複屈折の波長依存性測定

Fig. 1 に示した実験光学系の白色光源にはハロゲンランプを使用した。白色光は主軸方位を  $45^\circ$  回転させた偏光子

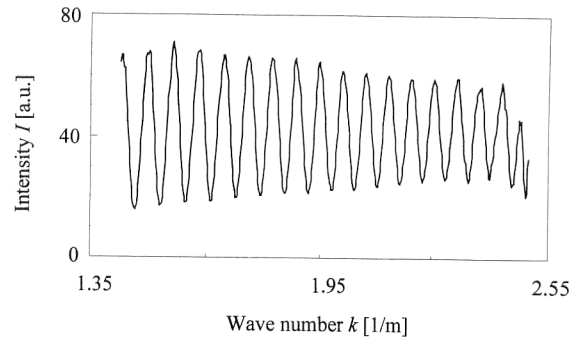


Fig. 4 Intensity by multi-channel spectrometer.

に入射した後、測定試料と検光子を透過させる。試料の複屈折の影響を受けて光強度の変化が生じる。光ファイバケーブルによって検出し、マルチチャンネル分光器 (Ocean Optics, Inc., S2000) で各波長における分光透過率強度を求める。

解析に FFT を用いるため、サンプリングデータは波数に対して等間隔でなければならない。マルチチャンネル分光器で得られるデータはチャンネルに対応した値となる。これを波数等間隔に変換するために二次元の最小二乗法で補間した。今回、波長 420~780 nm 間において 1024 点のデータを作成した。また、ハロゲンランプの分光特性は試料を挿入する前のデータを用いて規格化した。得られたデータは FFT を用いて計算し、周波数情報と位相情報から複屈折位相差を測定した。

水晶は高次複屈折をもち、複屈折の波長依存性が強いことが知られている。マルチチャンネル分光器を用いて水晶板の複屈折計測を試みた。ここで測定した試料は厚さ 1.53 mm、屈折率  $n_o=1.54425$ 、 $n_e=1.55336$ 、 $\delta n=0.00911$  (589 nm のとき) の水晶板<sup>10)</sup> を用いた。Fig. 4 にマルチチャンネル分光器によって得られた光強度を示す。分光透過率強度が波数に対して余弦状に変化することがわかる。ここで、透過光強度が極大値となる波数に注目すると、波数 1432765 1/m と 1501957 1/m の波数間隔  $\delta k=69192$  1/m で 1 周期であるのに対し、波数 2317585 1/m から 2378390 1/m の波数間隔  $\delta k=60805$  1/m で 1 周期となる。このように複屈折の波長依存性により、波数に対して透過光強度の周期的な変化が生じる。この位相の変化を FFT 法で解析する。複屈折位相差は周波数情報と位相情報を計算することで求められる。

今回は Fig. 3 のスペクトル  $f_L$  が透過光強度の走査範囲における最小値付近の周波数となると仮定した。 $f_L$  を用いて波数の最小値における複屈折位相差のオフセット分を計算する。 $f_L$  の検出には中心周波数の  $1/e^2$  を用いた。

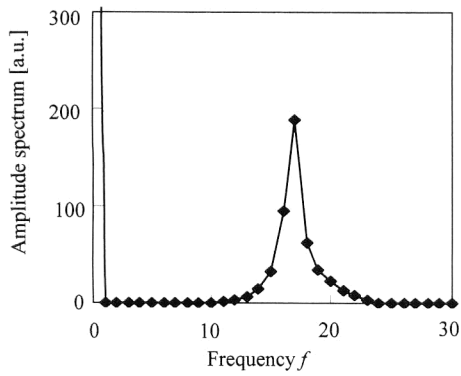


Fig. 5 The frequency information.

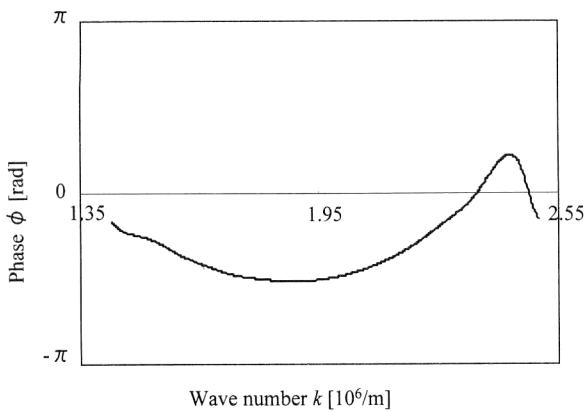


Fig. 6 The phase information.

FFT 法によって得られた振幅スペクトルを Fig. 5 に、位相を Fig. 6 に示した。Fig. 7 に複屈折位相差の波長依存性を示した。比較するために文献値における水晶の複屈折を式(9)に代入し、計算した結果とポリマーフィルムの結果を一緒に示した。これはポリカーボネート製で一軸延伸されたものである。1枚あたり厚さが  $60 \mu\text{m}$  で、複屈折位相差が波長  $550 \text{ nm}$  のときに  $2\pi \text{ rad}$  を与える。このフィルムを 17 枚積層させた試料の結果も一緒に示した。17 枚積層させたときの試料の厚さは  $1.02 \text{ mm}$  である。Fig. 8 は複屈折の波長依存性である。ここで、文献から任意の波長における水晶の複屈折と比較を行ったところ一致した値が得られた。水晶とポリマーでは、ポリマーのほうが複屈折の波長依存性が強いことが示されている。

### 3.2 音響光学素子を用いた二次元複屈折測定

一次元計測ではマルチチャンネル分光器を用いたが、二次元に拡張する場合、二次元の分光器を要する。本研究では Fig. 9 に示すように二次元分光器を用いる代わりに音響光学素子 (AOTF, Brimrose TEAFX40-65) を用いて光の波長を変化させ、その光を試料に照射する。白色光源にはハロゲンランプを使用した。白色光は光ファイバケー

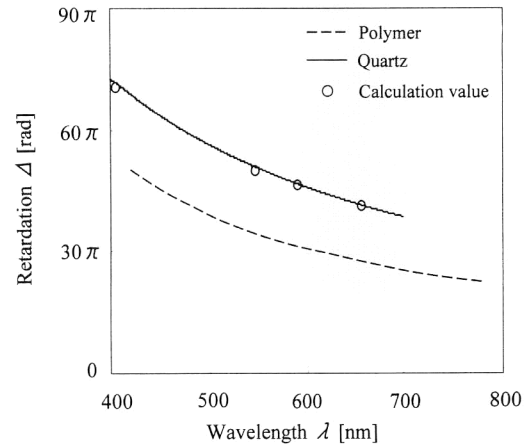


Fig. 7 The wavelength dependence of retardation by materials.

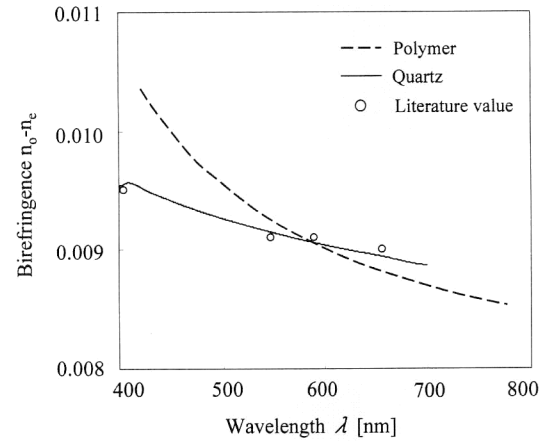


Fig. 8 The wavelength dependence of birefringence by materials.

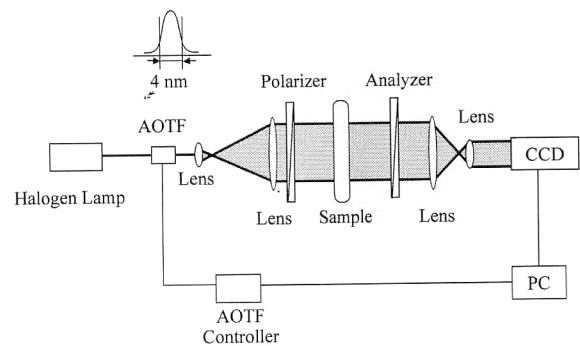


Fig. 9 Experimental setup for two-dimensional birefringence measurement.

ブルを透過した後、AOTFに入射される。AOTFは白色光の中から特定の波長を切り出すことができる。AOTFからの出射光はレンズ系を透過し、コリメートされる。主軸方位を  $45^\circ$  回転させた 1 対の偏光子の間に挿入された測定試料に入射される。試料の複屈折の影響をもった光は

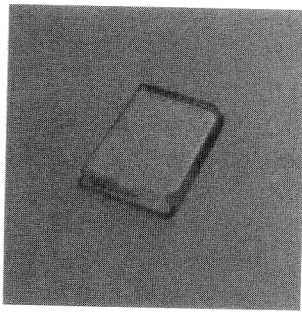


Fig. 10 Quartz plate.

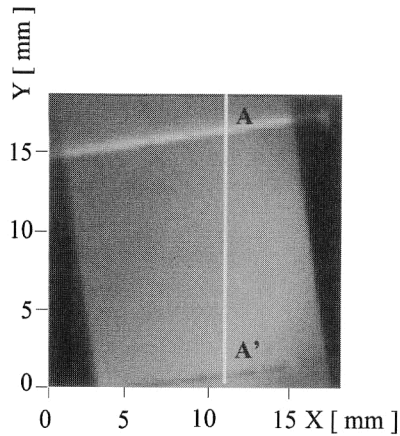


Fig. 11 Original image.

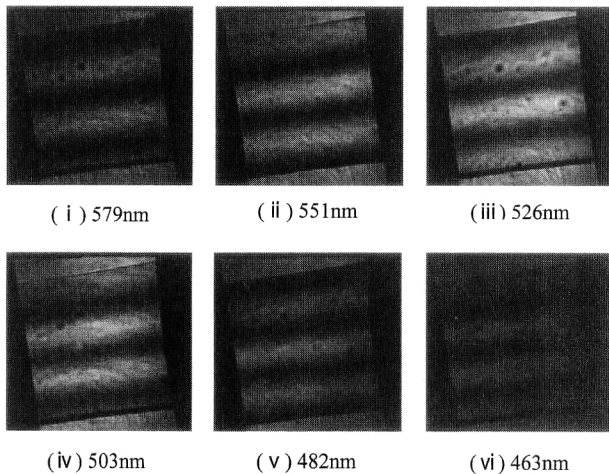


Fig. 12 Captured image by each wavelength.

512×512 画素の CCD (charge coupled device) カメラによって検出される。検出画像は微弱なため長時間露光が可能な画像ボードのフレームメモリーによって 512×256 画素、8 ビットの階調の画像データとしてコンピューターに取り込まれる。今回、試料に入射される光は波数が一定となるように AOTF に印加する電圧を制御した。

測定では AOTF の切り出す波長が 4 nm であることと、

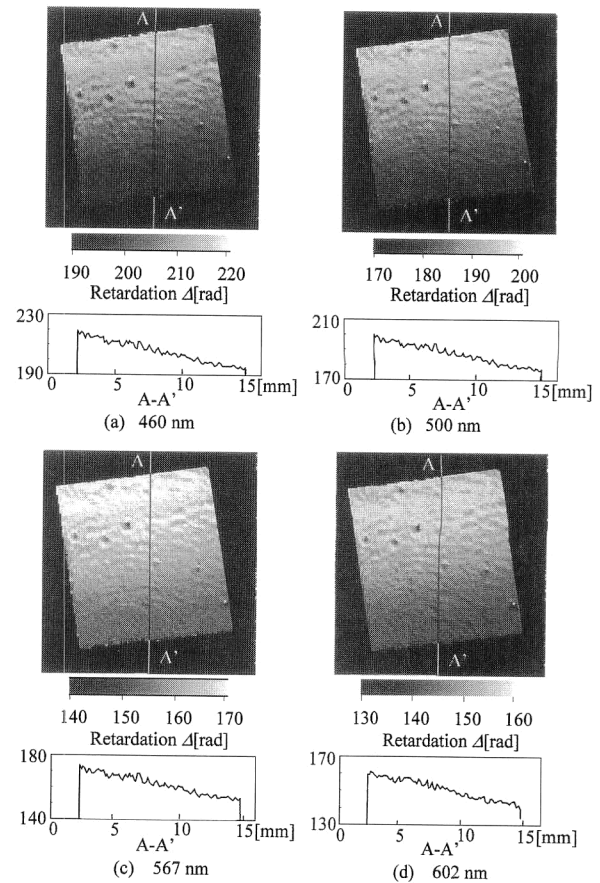


Fig. 13 2-D birefringence distribution of a quartz plate.

データ量による解析時間の問題から波長 460~610 nm を波数等間隔となるように 128 枚の画像を取得した。また、ハロゲンランプや CCD の分光特性による影響は試料を挿入する前のデータを用いて規格化した。解析には各画素において横軸に波数となる光強度のデータに変換した。また、最終的な解析範囲は 128×128 画素とした。

測定される試料に水晶板を用いた。水晶は厚さが y 軸に対してくさび形に変化するものを用いた。水晶の厚み最小値は 1.5 mm、最大値は 1.7 mm である。Fig. 10 にくさび形の水晶板の写真と Fig. 11 に解析のための原画像を示す。画像範囲は 1.8×1.8 mm である。Fig. 12 はそれぞれ波長が (i) 579 nm, (ii) 551 nm, (iii) 526 nm, (iv) 503 nm, (v) 482 nm, (vi) 463 nm における CCD カメラによって取り込まれた画像である。ここで、ハロゲンランプの分光特性において 450 nm 付近の波長が微弱であるため、波長 463 nm における画像のコントラストが低くなっている。Fig. 12 の水晶における x 軸方向の偏光干渉縞は試料の厚みの変化から複屈折位相差が変化することで光強度が変化していることがわかる。また、試料のもつ複屈折の波長依存性の影響から測定試料に照射される波長によって光強度の変化が生じている。光強度分布を各画素ごとに解析

することにより、複屈折位相差の波長依存特性が得られる。次に各画素ごとに得られた複屈折の波長依存性のデータを二次元に配列しなおす。これにより複屈折の波長依存性を二次元で表示することが可能となる。Fig. 13 にそれぞれ波長が (a) 460 nm, (b) 500 nm, (c) 567 nm, (d) 602 nm に対する水晶の二次元複屈折位相差分布と A-A' 断面における断面図を示した。複屈折位相差の大きさをグレイレベルで表示した。波長が長くなるにしたがって、くさび形的水晶の複屈折位相差は減少していることがみとれる。試料に用いたくさび形的水晶板が二次元面内で、水晶の厚さに対して線形的に複屈折位相差が変化していることがみとれる。水晶板の厚くなる試料上部にいくにつれて複屈折位相差が増加していることが二次元画像として見ることができる。ここで、式(9)を水晶の複屈折の文献値から計算すると、波長 567 nm のときに厚さ 1.5 mm で複屈折位相差は 151 rad, 厚さ 1.6 mm のときに複屈折位相差は 161 rad, 厚さ 1.7 mm のときに複屈折位相差は 172 rad となる。この結果は Fig. 13(c) の断面図とほぼ一致している。二次元複屈折位相差分布中の誤差要因として、光源むらが考えられる。この光源むらをなくすことでより精度よく二次元計測することが可能である。本手法を用いることによって、二次元で複屈折の波長依存性を計測することが可能となった。

#### 4. ま と め

複屈折の波長依存性と高次複屈折の二次元計測を可能とした。白色光を光源として1対の偏光子、測定試料そしてマルチチャンネル分光器という単純な構造から複屈折計測が可能となった。ここで、水晶の実験結果に対して文献値との比較を行ったところ一致した値が得られた。また、音響光学チューナブルフィルター (AOTF) を用いて各画素における光強度分布を解析することで、二次元複屈折を定量的に計測することが可能となった。

本研究の特徴として、

- (1) 複屈折計測が試料や光学系の機械的な駆動を必要としない
- (2) 従来の偏光計測では解析困難だった  $2\pi$  rad 以上の複屈折計測が測定可能
- (3) 複屈折の波長依存性の測定を可能としたことがある。

#### 文 献

- 1) N. Umeda and H. Kowa: "Measurement of the residual birefringence distribution in glass laser disk by transverse Zeeman laser," *Electron. Commun. Jpn.*, **74** (1991) 20-28.
- 2) Y. Otani, T. Yoshizawa and A. Tanahashi: "Magnetostatic field measurement by optical heterodyne method with magnetic fluids," *Opt. Eng.*, **33** (1994) 1069-1073.
- 3) Y. Otani, T. Shimada, T. Yoshizawa and N. Umeda: "Two-dimensional birefringence measurement using the phase shifting technique," *Opt. Eng.*, **33** (1994) 1604-1609.
- 4) M. Takeda: "Spatial-carrier fringe-pattern analysis and its applications to precision interferometry and profilometry: An overview," *Ind. Metrol.*, **1** (1990) 79-99.
- 5) K. Oka and T. Kato: "Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 1475-1477.
- 6) 高和宏行, ナム・ソフィア, 村田 章, 梅田倫弘: "高分子フィルムの複屈折率の高精度計測", 第46回応用物理学会講演会, 30a-X-8 (1999) p. 1265.
- 7) H. Kowa, K. Muraki, Y. Otani, N. Umeda and T. Yoshizawa: "High-order birefringence measurement using spectroscopic polarized light," *Proc. SPIE*, **4133** (2000) 134-137.
- 8) T. Wakayama, H. Kowa, Y. Otani, N. Umeda and T. Yoshizawa: "High-order birefringence and dispersion measurement using spectroscopic polarized light," *Proc. SPIE*, **4416** (2001) 23-26.
- 9) Y. Otuka and S. Tokuyama: "Measurements of key parameters for birefringence single-mode optical fibers by optical frequency-domain interferometry," *Opt. Rev.*, **8** (2001) 153-155.
- 10) 国立天文台編: 理化年表 (丸善, 2001) p. 521.