

分光偏光変調器を用いた複屈折および旋光同時計測法

加藤 波里*・若山 俊隆**・大谷 幸利*†

* 東京農工大学大学院工学府機械システム工学科 〒184-8588 小金井市中町2-24-16

** 埼玉医科大学保健医療学部医用生体工学科 〒350-1241 日高市山根1397-1

Simultaneous Measurement Method of Birefringence and Optical Rotation Using Spectroscopic-Polarized Modulator

Bari KATO*, Toshitaka WAKAYAMA** and Yukitoshi OTANI*†

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

** Faculty of Health and Medical Care, Saitama Medical University, 1397-1 Yamane, Hidaka 350-1241

Recently, functional polymers are attracted attention in various areas of material research. They have birefringence caused by orientation of the molecules and optical rotation caused by helical structures. This paper aims to measure birefringence and optical rotation simultaneously to evaluate functional polymer. A white light and two pairs of spectroscopic-polarization modulators (SPEM) and a spectrometer are employed in this polarimeter. A detected intensity along wave number by a spectrometer is altered by Fourier transform and four peaks along optical path difference appear. Eight elements in the Mueller matrix along wave number are measured from these amplitudes and phases. The birefringence dispersion and optical rotation dispersion are measured from the measured elements by a simply modeled sample which is combined of a retarder and a rotator. As a result, the validity of this measurement results are confirmed experimentally.

Key words: polarization, birefringence dispersion, optical rotation dispersion, spectroscopic-polarized modulator

1. はじめに

近年、生体内に存在するコラーゲンや生分解性プラスチックの材料であるポリ乳酸などの機能性高分子が注目を集めている。これらは分子の配向による複屈折と螺旋高分子による旋光をもつ。このため、複屈折と旋光という偏光パラメータからの機能性高分子の評価が求められている。さらに、この機能性高分子を延伸過程などでインライン評価する必要がある。本稿は、複屈折と旋光情報をワンショットで計測することを目的とする。古くから、2枚の偏光板の間に試料を挟み、試料のもつ波長分散により、波数に対して正弦状の波であるチャンネルドスペクトルを発生させる手法が提案されている¹⁾。その後、岡らによって、チャンネルドスペクトルを用いたストークス・パラメータの新たな計測法が提案された²⁾。ここでは、光学系を駆動せず

にワンショットでの波長領域における偏光状態の計測が可能となった。それに対し、筆者らはサンプルのもつ複屈折の波長分散を計測する手法を提案した^{3,4)}。検出される光強度分布がチャンネルドスペクトルとして波数に対して正弦状となるため、フーリエ解析により複屈折分散計測を可能としている。しかしながら、筆者らの複屈折分散計測法では複屈折情報しか検出することができず、旋光性も同時にもつ材料を計測した場合、複屈折の測定誤差の要因となる問題があった。そこで今回、まず、ワンショットでミューラー行列の16個の要素のうち8個を求めておき、ここから複屈折と旋光の混在した物質から複屈折および旋光を分離する手法を提案する。このため、新たに分光偏光変調器 (spectroscopic-polarized modulator, SPEM) を開発した。複屈折および旋光の同時計測に必要な変調を行うた

†E-mail: otani@cc.tuat.ac.jp

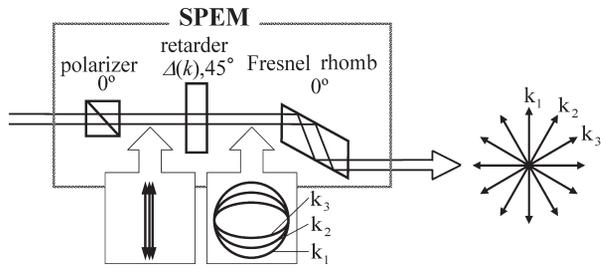


Fig. 1 Principle of spectroscopic-polarized modulator (SPEM).

め、光学系にはこの SPEM を 2 つ用いる。SPEM とサンプルにより波数に対して変調された光強度を解析し、サンプルの偏光特性を表すミューラー行列の 16 の要素のうち 8 つを計測する。サンプルを、位相子と旋光子を一体化させたモデルと仮定し、波長ごとの主軸方位、複屈折位相差、および旋光角を同時に求める。今回は、位相子として並列膜型歪み標準器、旋光子として水晶製標準旋光試験片を用いて本計測法の有効性を確認した。

2. 複屈折および旋光計測の原理

2.1 分光偏光変調器

複屈折および旋光を分光器の一度の検出で同時に計測する場合、波数に対して偏光変調する必要がある。Fig. 1 のように、分光偏光変調器 (SPEM) は、偏光子 (グラントムソンプリズム)、複屈折位相差 $\Delta(k)$ (633 nm で 7.25λ) の水晶製の位相子、アクロマート 1/4 波長板 (フレネルロム・プリズム) からなる。白色光源から出射されるランダム偏光は、偏光子を透過すると直線偏光となる。主軸方位 45 度、複屈折位相差 $\Delta(k)$ の位相子により、主軸方位が一定で波数ごとに楕円率の異なる楕円偏光となる。主軸方位 0 度のアクロマート 1/4 波長板により波数ごとに主軸方位の異なる直線偏光となる。つまり、分光偏光変調器は、波数ごとの直線偏光の主軸方位を波数に沿って変化させる偏光変調器である。位相子の複屈折位相差 $\Delta(k)$ を変化させることで、波数に対する角度変調量を自由に調節可能である。

Fig. 2 は、SPEM からの出射光の楕円率と楕円主軸方

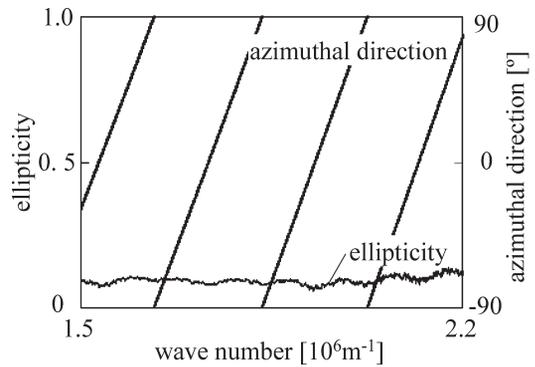


Fig. 2 Ellipticity and azimuthal direction.

位を回転検光子法により計測した結果である。検出器として分光器を用いた。分光器の測定波長域は、400 nm ~ 710 nm (波数域は $1.5 \sim 2.5 \times 10^3 / \text{nm}$)、波長分解能は 0.35 nm である。Fig. 2 の縦軸は楕円率、楕円主軸方位、横軸は波長を示す。楕円率はゼロに近い値を示していることから、ほぼ直線偏光とみなせる。直線偏光の主軸方位は、波長の変化に伴って回転している。楕円率の誤差の主要因は、フレネルロム・プリズムの複屈折位相差の誤差および分光器内の回折格子が部分偏光子となるために生じる計測誤差である。この楕円率計測では、SPEM の楕円率評価において用いた回転検光子法によって部分偏光子となる誤差が混在すると考えられる。これに対して実際の計測においては、フレネルロム・プリズムの複屈折位相差の誤差のみを考慮すればよい。フレネルロム・プリズムの複屈折位相差の誤差の影響は小さいとして、今回は較正を行わずに計測した。これより、波数ごとの直線偏光の主軸方位を波数に沿って変化させる SPEM の有効性を確認できた。

2.2 SPEM を用いた複屈折、旋光、および二色性同時計測法

複屈折と旋光のワンショットでの同時計測を実現するため、Fig. 3 のように 2 つの SPEM を用いて複屈折と旋光計測する。ストークスペクトルとミューラー行列を用い、分光器により得られる波数ごとの光強度を解析する。偏光子を透過する前のストークスペクトルを $S_{in}(k) = I_0(k)[1000]^T$ とし、偏光子、アクロマート 1/4 波長板、サンプル、検光

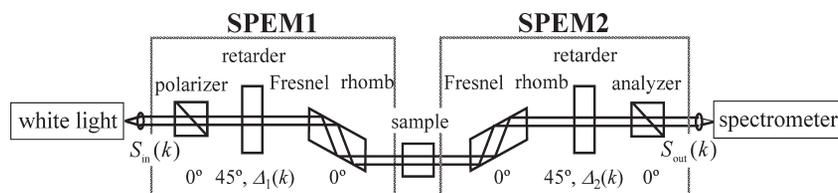


Fig. 3 Measurement system of birefringence and optical rotation.

子のそれぞれのミューラー行列を M_P , M_Q , M_{sample} , M_A ,
複屈折位相差 $\Delta_1(k)$, $\Delta_2(k)$ の2つの位相子のミューラー行

列を M_{J1} , M_{J2} とする。このとき検光子を透過する光のス
トークスベクトル $S_{\text{out}}(k)$ は、

$$\begin{aligned}
 S_{\text{out}}(k) &= M_A \cdot M_{J2(k)} \cdot M_Q \cdot M_{\text{sample}}(k) \cdot M_Q \cdot M_{J1(k)} \cdot M_P \cdot S_{\text{in}}(k) \\
 &= I(k) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta_2(k) & 0 & -\sin \Delta_2(k) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \Delta_2(k) & 0 & \cos \Delta_2(k) \end{bmatrix} \\
 &\quad \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \\
 &\quad \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta_1(k) & 0 & -\sin \Delta_1(k) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \Delta_1(k) & 0 & \cos \Delta_1(k) \end{bmatrix} \\
 &\quad \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} / 4 \\
 &= I_0(k) \cdot \begin{bmatrix} 2+A(k)\cos\theta_A(k)+B(k)\cos\theta_B(k)+C(k)\cos\theta_C(k)+D(k)\cos\theta_D(k) \\ 2+A(k)\cos\theta_A(k)+B(k)\cos\theta_B(k)+C(k)\cos\theta_C(k)+D(k)\cos\theta_D(k) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} / 8 \quad (1)
 \end{aligned}$$

となる。

ただし、 $A(k)$, $B(k)$, $C(k)$, $D(k)$, $\theta_A(k)$, $\theta_B(k)$,
 $\theta_C(k)$, $\theta_D(k)$ はそれぞれ、

$$\begin{cases}
 A(k) = (m_{01}^2 + m_{02}^2)^{1/2} \\
 \theta_A(k) = \Delta_1(k) - \tan^{-1}(m_{02}/m_{01}) \\
 B(k) = (m_{10}^2 + m_{20}^2)^{1/2} \\
 \theta_B(k) = \Delta_1(k) - \tan^{-1}(m_{20}/m_{10}) \\
 C(k) = \{(m_{11} + m_{22})^2 + (m_{12} - m_{21})^2\}^{1/2} \\
 \theta_C(k) = -\Delta_1(k) + \Delta_2(k) + \tan^{-1}\{(m_{12} - m_{21}) / (m_{11} + m_{22})\} \\
 D(k) = \{(m_{11} - m_{22})^2 + (m_{12} + m_{21})^2\}^{1/2} \\
 \theta_D(k) = \Delta_1(k) + \Delta_2(k) - \tan^{-1}\{(m_{12} + m_{21}) / (m_{11} - m_{22})\}
 \end{cases} \quad (2)$$

である。

ここで、 $M_{\text{sample}}(k)$ の $i+1$ 行 $j+1$ 列目の要素を m_{ij} と
表す。 m_{00} を1と仮定するとき、検出される光強度は、ス
トークスベクトル S_{out} の1行目より、

$$\begin{aligned}
 I(k) &= I_0(k) \{2 + A(k)\cos\theta_A(k) + B(k)\cos\theta_B(k) \\
 &\quad + C(k)\cos\theta_C(k) + D(k)\cos\theta_D(k)\} / 8 \quad (3)
 \end{aligned}$$

となる。

これより、光強度はバイアス成分と周波数の異なる4つ

の波を含んでいることがわかる。検出された波数に対して
光強度をフーリエ変換し、フーリエスペクトルを検出した
後、周波数ごとに分離する。それぞれの振幅成分 $A(k)$,
 $B(k)$, $C(k)$, $D(k)$ と周波数成分 $\theta_A(k)$, $\theta_B(k)$, $\theta_C(k)$,
 $\theta_D(k)$ を求めた結果、サンプルのミューラー行列の8つの要
素 m_{01} , m_{02} , m_{10} , m_{20} , m_{11} , m_{12} , m_{21} , m_{22} を、

$$\begin{cases}
 m_{01} = A(k)\cos\{\Delta_1(k) - \theta_A(k)\} \\
 m_{02} = A(k)\sin\{\Delta_1(k) - \theta_A(k)\} \\
 m_{10} = B(k)\cos\{\Delta_2(k) - \theta_B(k)\} \\
 m_{20} = B(k)\sin\{\Delta_2(k) - \theta_B(k)\} \\
 m_{11} = C(k)\cos\{\Delta_1(k) - \Delta_2(k) - \theta_C(k)\} \\
 \quad + D(k)\cos\{\Delta_1(k) + \Delta_2(k) - \theta_D(k)\} \\
 m_{12} = C(k)\sin\{\Delta_1(k) - \Delta_2(k) - \theta_C(k)\} \\
 \quad + D(k)\sin\{\Delta_1(k) + \Delta_2(k) - \theta_D(k)\} \\
 m_{21} = -C(k)\sin\{\Delta_1(k) - \Delta_2(k) - \theta_C(k)\} \\
 \quad + D(k)\sin\{\Delta_1(k) + \Delta_2(k) - \theta_D(k)\} \\
 m_{22} = C(k)\cos\{\Delta_1(k) - \Delta_2(k) - \theta_C(k)\} \\
 \quad - D(k)\cos\{\Delta_1(k) + \Delta_2(k) - \theta_D(k)\}
 \end{cases} \quad (4)$$

と求めることができる。

m_{01} , m_{02} , m_{10} , m_{20} がサンプルの二色性を示し、 m_{11} ,
 m_{12} , m_{21} , m_{22} がサンプルの複屈折と旋光を示している。

ここで用いる $\Delta_1(k)$, $\Delta_2(k)$, $\Delta_1(k) + \Delta_2(k)$, $\Delta_1(k) - \Delta_2(k)$ を求める。複屈折位相差 $\Delta_2(k)$ の位相子の主軸方位を 0 度, また -22.5 度に設定すると, サンプルがない状態で検出されるそれぞれの波数ごとの光強度は,

$$I(k) = I_0(k) [1 + \cos\{\Delta_1(k) - \Delta_2(k)\}] / 4 \quad (5)$$

$$I(k) = I_0(k) [2 + \cos\Delta_2(k) + \cos\{\Delta_1(k) + \Delta_2(k)\}] / 8 \quad (6)$$

となる。

これら 2 つの波数ごとの光強度のフーリエ解析により, 周波数成分である $\Delta_2(k)$, $\Delta_1(k) - \Delta_2(k)$, $\Delta_1(k) + \Delta_2(k)$ を求める。また $\Delta_1(k)$ は, 式 (6) の 2 つの波の位相成分の差として,

$$\Delta_1(k) = \{\Delta_1(k) + \Delta_2(k)\} - \Delta_2(k) \quad (7)$$

と導出できる。

これより, サンプルの二色性を示すミューラー行列要素である, m_{01} , m_{02} , m_{10} , m_{20} の 4 つから, サンプルの二色性 $d(k)$ を,

$$d(k) = \{(m_{01}^2 + m_{02}^2)^{-1} + (m_{10}^2 + m_{20}^2)^{-1}\} / 2 \quad (8)$$

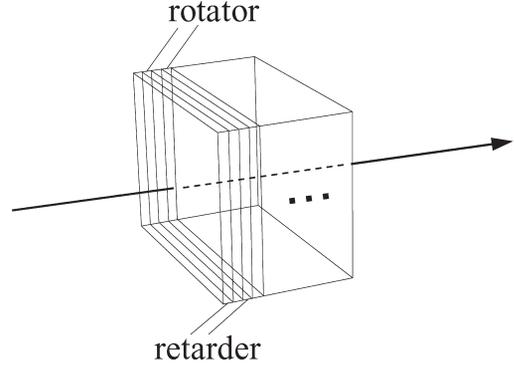


Fig. 4 Combined model of retarders and rotators.

と求めることができる。

本来, 複屈折と旋光の混在した物質を透過する光は, その 2 つの作用を同時に受けるので, Fig. 4 のように位相子と旋光子が交互に重なる多層モデルとしてとらえることができる⁵⁾. 多層モデルをミューラー行列により表現するとき, まず位相子と旋光子の 2 層から構成される物質のミューラー行列 $M_{n=1}$ は, 位相子のミューラー行列 M_{ret} と旋光子のミューラー行列 M_{rot} を用いて,

$$\begin{aligned} M_{n=1} &= M_{\text{ret}} \cdot M_{\text{rot}} = M_{\text{rot}} \cdot M_{\text{ret}} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\delta \sin 2\phi \\ 0 & 0 & 1 & \delta \cos 2\phi \\ 0 & \delta \sin 2\phi & -\delta \cos 2\phi & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2\psi & 0 \\ 0 & 2\psi & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2\psi & 0 \\ 0 & 2\psi & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\delta \sin 2\phi \\ 0 & 0 & 1 & \delta \cos 2\phi \\ 0 & \delta \sin 2\phi & -\delta \cos 2\phi & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2\psi & -\delta \sin 2\phi \\ 0 & 2\psi & 1 & \delta \cos 2\phi \\ 0 & \delta \sin 2\phi & -\delta \cos 2\phi & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

と表すことができる。ここでは, 複屈折位相差 δ と旋光角 ψ を微小とし, $\sin \delta = \delta$, $\sin \psi = \psi$, $\cos \delta = \cos \psi = 1$ の近似を用いている。

多層モデルのミューラー行列 $M_{n=N}$ は, 2 層モデルを N 組張り合わせた行列として,

$$M_{n=N} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{N(N-1)}{2} \delta \sin^2 2\phi & -2N\psi & -N\delta \sin 2\phi \\ 0 & 2N\psi & 1 + \frac{N(N-1)}{2} \delta \sin^2 2\phi & N\delta \cos 2\phi \\ 0 & N\delta \sin 2\phi & -N\delta \cos 2\phi & 1 + \frac{N(N-1)}{2} \delta - N(N-1) \delta \sin^2 2\phi \end{bmatrix} \quad (10)$$

と表現できる。

今回のミュラー行列の8つの要素の計測結果から、このモデルを用いて複屈折位相差と主軸方位を分離することができないため、この多層モデルを単純化し、複屈折、旋光の順に偏光状態の変化が生じると仮定することで、Fig. 5

のように位相子と旋光子を一体化させた2層モデルとして考えた⁶⁾。

位相子と旋光子を一体化させた2層モデルのミュラー行列は、位相子のミュラー行列 $M_{\text{ret.}}$ と旋光子のミュラー行列 $M_{\text{rot.}}$ を用いて、

$$\begin{aligned}
 M_{\text{sample}} &= M_{\text{rot.}} \cdot M_{\text{ret.}} = \begin{bmatrix} 1 & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\psi & -\sin 2\psi & 0 \\ 0 & \sin 2\psi & \cos 2\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \delta) \sin^2 2\phi & (1 - \cos \delta) \sin 2\phi \cos 2\phi & -\sin \delta \sin 2\phi \\ 0 & (1 - \cos \delta) \sin 2\phi \cos 2\phi & 1 - (1 - \cos \delta) \cos^2 2\phi & \sin \delta \cos 2\phi \\ 0 & \sin \delta \sin 2\phi & -\sin \delta \cos 2\phi & \cos \delta \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right)\cos 2\psi + \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)\cos(2\psi - 4\phi) & \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right)\sin 2\psi - \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)\sin(2\psi - 4\phi) & -\sin \delta \sin 2\phi \\ 0 & -\cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right)\sin 2\psi - \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)\sin(2\psi - 4\phi) & \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right)\cos 2\psi - \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)\cos(2\psi - 4\phi) & \sin \delta \cos 2\phi \\ 0 & \sin \delta \sin 2\phi & -\sin \delta \cos 2\phi & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (11)
 \end{aligned}$$

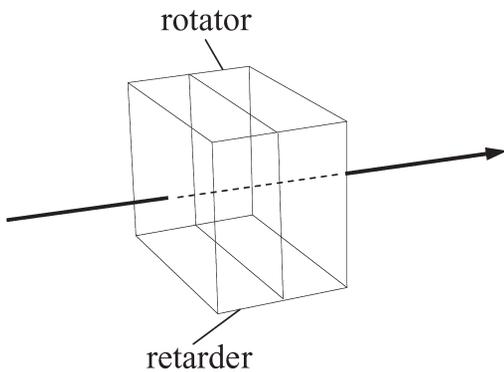


Fig. 5 Combined model of a retarder and a rotator.

と計算できる。

得られたミュラー行列の8つの要素のうち、サンプルの複屈折と旋光を示す m_{11} , m_{12} , m_{21} , m_{22} の4つを用いて、サンプルの複屈折位相差 $\delta(k)$ と主軸方位 $\phi(k)$, および旋光角 $\psi(k)$ を、

$$\left. \begin{aligned}
 \delta(k) &= \tan^{-1} \left\{ \frac{[(m_{11} + m_{22})^2 + (m_{12} - m_{21})^2]}{[(m_{11} - m_{22})^2 + (m_{12} + m_{21})^2]} \right\}^{1/2} \\
 \phi(k) &= \tan^{-1} \left\{ \frac{(m_{12} + m_{21})}{(m_{11} - m_{22})} \right\} / 4 \\
 &\quad + \tan^{-1} \left\{ \frac{(m_{12} - m_{21})}{(m_{11} + m_{22})} \right\} / 4 \\
 \psi(k) &= \tan^{-1} \left\{ \frac{(m_{12} - m_{21})}{(m_{11} + m_{22})} \right\} / 2
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

と求めることができる。

3. 複屈折および旋光計測実験

3.1 ミュラー行列計測結果

実際に Fig. 3 に示す光学系で実験を行った。SPEM1 では波長 633 nm での複屈折位相差が 30.25λ , SPEM2 では 100.5λ の水晶製の位相子を用いた。分光器の測定波長域は、400 nm~710 nm (波数域は $1.5 \sim 2.5 \times 10^3/\text{nm}$), 波長分解能は 0.35 nm である。分光器により得られた波長ごとの光強度を用いて、波数に対して等間隔な 1024 点の光強度に変換した。

最大の透過光量を示す場合の光強度を基準とするとき、サンプルを設置しない状態で検出される波数ごとの光強度は、2つの SPEM により変調され、Fig. 6 (a) のようになる。横軸は波数、縦軸は光強度を表すが次元の CCD を用いているため階調である。位相子として並列膜型歪み標準器、旋光子として水晶製旋光標準試験片をサンプルとして設置した状態で検出される波数ごとの光強度は、2つの SPEM およびサンプルの複屈折と旋光、および二色性により変調され、Fig. 6 (b) のような光強度として分光器で検出される。検出された光強度を波数に対してフーリエ解析し、光強度の変化からサンプルの複屈折と旋光を求めた。

Fig. 7 はサンプルを設置した状態で検出された Fig. 6 (b) の光強度にハニング窓を適用し、高速フーリエ変換した際

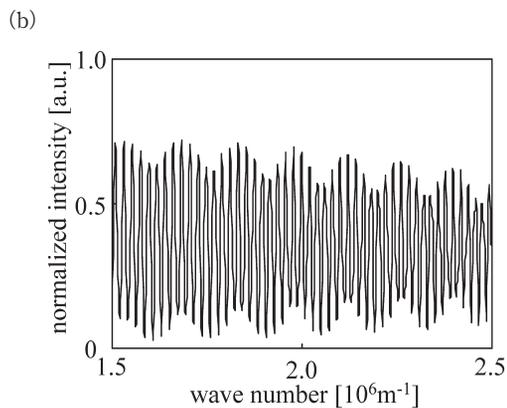
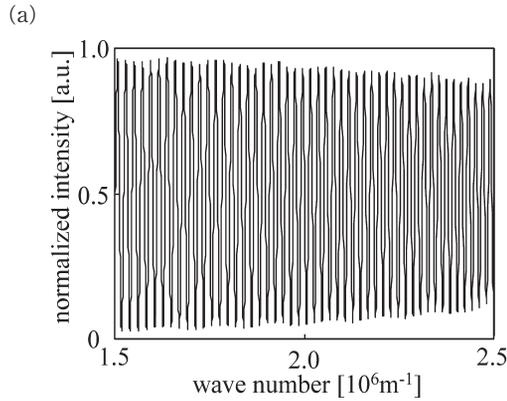


Fig. 6 Intensity distribution at the spectrometer. (a) Without sample, (b) with sample.

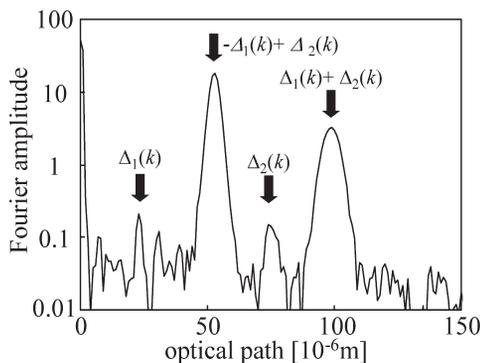


Fig. 7 Fourier spectrum of detected intensity at the spectrometer.

のフーリエスペクトルを示す。縦軸はフーリエ振幅、横軸は光学距離である。検出される波数ごとの光強度に含まれる周波数の異なる4つの波が、4つのピークとして現れている。このピーク的位置は、用いる位相子のそれぞれの複屈折位相差 $\Delta_1(k)$, $\Delta_2(k)$ とその和と差である $\Delta_1(k) + \Delta_2(k)$, $\Delta_1(k) - \Delta_2(k)$ により決定されるため、あらかじめピーク位置を予測できる。複屈折位相差 $\Delta_1(k)$, $\Delta_2(k)$ のピーク位置をもつ波は二色性を表し、複屈折位相差 $\Delta_1(k) +$

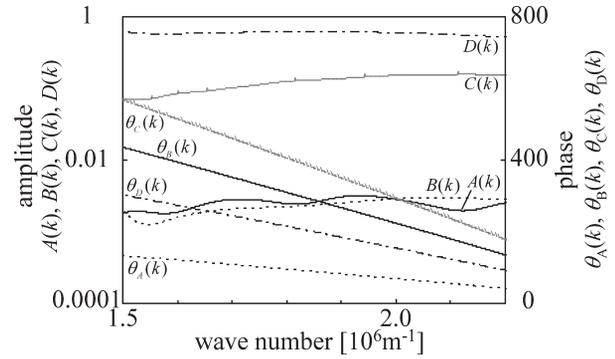


Fig. 8 Fourier amplitudes and phases.

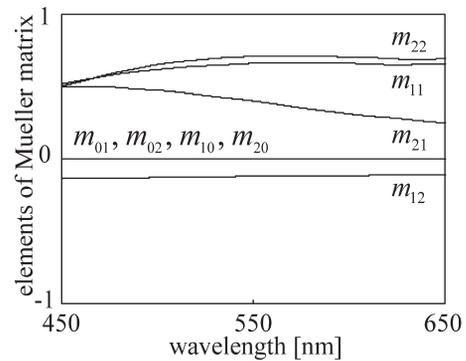


Fig. 9 Measurement results of elements of Mueller matrix.

$\Delta_2(k)$, $\Delta_1(k) - \Delta_2(k)$ のピーク位置をもつ波は複屈折および旋光を表す。使用したサンプルの二色性が小さいため、二色性を表すフーリエスペクトルの振幅が小さく、誤差に埋もれた結果となっている。4つのそれぞれのピークの最大値をとる点を中心に抽出した21点のデータに対してハニング窓を適用し、逆フーリエ変換を行う。Fig. 8に、逆フーリエ変換により得られるそれぞれの振幅成分 $A(k)$, $B(k)$, $C(k)$, $D(k)$ と周波数成分 $\theta_A(k)$, $\theta_B(k)$, $\theta_C(k)$, $\theta_D(k)$ を示す。振幅の小さい二色性を表すフーリエスペクトルから導き出される振幅成分 $A(k)$, $B(k)$ は波数に対して乱れた結果となった。この結果から、Fig. 9のようにサンプルのミュラー行列要素, m_{01} , m_{02} , m_{10} , m_{12} , m_{13} , m_{20} , m_{21} , m_{22} を求めることができる。

3.2 複屈折および旋光の計測結果

Fig. 8で求められたミュラー行列の8つの要素の計測結果から複屈折と旋光を計測する。まず、位相子、旋光子を個々にサンプルとし、その後、位相子と旋光子を組み合わせてサンプルとして計測した。複屈折位相差の計測範囲は、0度および180度付近の誤差を考え、10度~170度までとした。

位相子としてバビネ・ソレイユ補償器を用いて精度検定

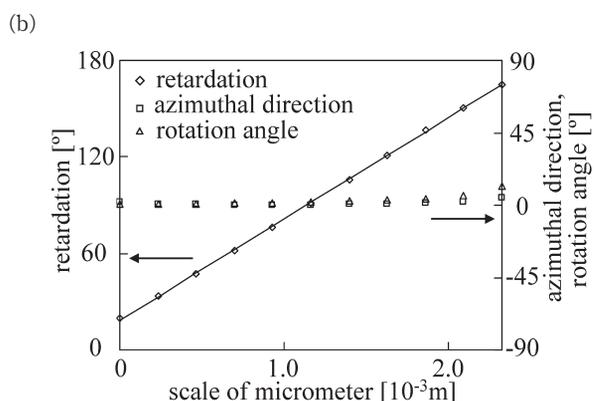
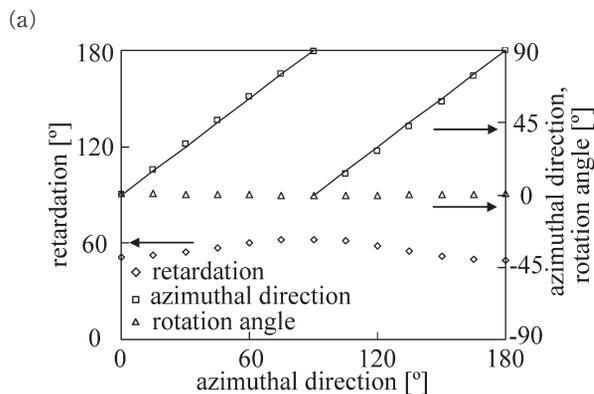


Fig. 10 Measurement results of birefringence and optical rotation. (a) Along magnitude of azimuthal direction, (b) along magnitude of retardation.

を行った結果を Fig. 10 に示す。複屈折位相差を一定にした状態で、主軸方位を変化させた結果を Fig. 10 (a) に、主軸方位を一定にした状態で、複屈折位相差を変化させた結果を Fig. 10 (b) に示す。Fig. 10 (a) では主軸方位の標準偏差が 1.2 度、Fig. 10 (b) では複屈折位相差の標準偏差が 0.7 度と得られた。550 nm における繰り返し精度は、主軸方位が ± 0.3 度、複屈折位相差が ± 0.1 度となった。

旋光子として、波長 589.3 nm で 0.01 度の精度が補償された (株) アタゴ製の水晶製旋光標準試験片として、8.67 度の試料 A と 34.7 度の試料 B を用いて旋光角を計測した結果を Fig. 11 に示す。589.3 nm での設計値からの誤差の標準偏差は、A では 0.2 度、B では 0.5 度となった。550 nm における繰り返し精度は ± 0.1 度となった。

次に、光ヘテログイン法による複屈折計測システムにより、波長 632.8 nm で 0.01 度の精度が補償された東芝硝子 (株) 製の並列膜型歪み標準器と水晶製旋光標準試験片を組み合わせてひとつのサンプルとし、複屈折および旋光を計測した結果を Fig. 12 に示す。並列膜型歪み標準器の波長 632.8 nm での複屈折位相差の誤差の標準偏差が 2.6 度、主軸方位の誤差の標準偏差が 0.8 度で得られ、旋光標

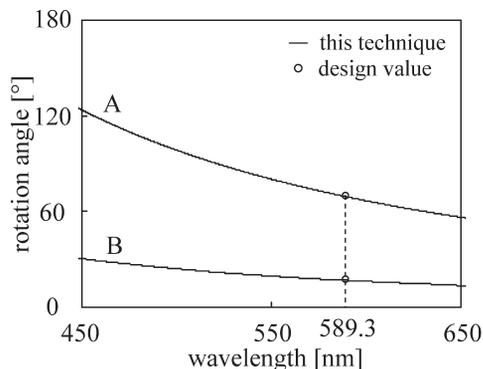


Fig. 11 Simultaneous measurement results of optical rotation.

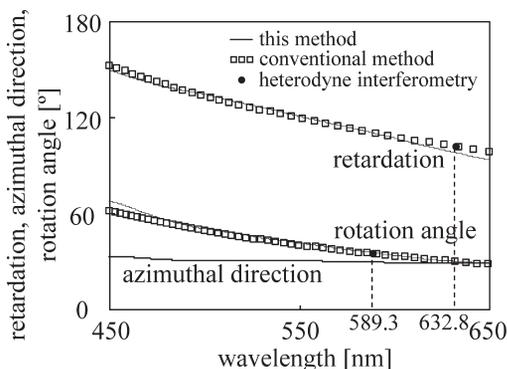


Fig. 12 Simultaneous measurement results of birefringence dispersion and optical rotation dispersion.

準試験片の旋光角の誤差の標準偏差は波長 589.3 nm で 0.9 度であった。波長ごとの複屈折位相差は、 ± 1 度の精度が補償されたワンショット複屈折分散計測法による計測結果と同様の傾向を示した。また、波長ごとの旋光角はコーシーの分散式により算出した波長分散と同様の傾向を示した。波長依存性のない主軸方位の波長に対する変化量は、短波長側の乱れにより 4 度となった。

以上の計測で生じた誤差は、用いた 2 つのフレネルロム・プリズムの複屈折位相差がそれぞれ 87.5 度、88 度であることが要因となっていることから、今後誤差補正が必要である。

4. ま と め

波数ごとの直線偏光の主軸方位を波数に沿って変化させる分光偏光変調器 (SPEM) を開発した。回転検光子法により SPEM からの出射偏光状態を計測し、SPEM の有効性を確認した。そして、SPEM を 2 つ用いて、複屈折と旋光が混在したサンプルの複屈折および旋光を同時に計測する手法を提案した。分光器により得られた波数ごとの光強度をフーリエ解析し、サンプルの波長ごとの複屈折、旋

光、および二色性を含む8個のミューラー行列要素を得る。この結果より、サンプルの波長ごとの複屈折、旋光、および二色性を求めることができる。

実際に、位相子としてバビネ・ソレイユ補償器を、旋光子として(株)アタゴ製の旋光標準試験片、波長589.3 nmで8.67度の試料Aと34.7度の試料Bを個々にサンプルとして計測した。さらに並列膜型歪み標準器と旋光標準試験片を組み合わせてひとつのサンプルとして計測し、複屈折位相差、主軸方位、および旋光角の波長分散を得た。並列膜型歪み標準器の波長632.8 nmでの複屈折位相差の誤差の標準偏差が2.6度、主軸方位の誤差の標準偏差が0.8度と得られ、旋光標準試験片の旋光角の誤差の標準偏差は波長589.3 nmで0.9度と得られた。波長依存性のない主軸方位の波長に対する変化量は4度となった。複屈折の波長分散はワンショット複屈折分散計測法を、旋光の波長分

散はコーシーの分散式を用いて比較し、同様の傾向を確認することができた。これより、本計測法による波長ごとの複屈折および旋光同時計測の有効性を示すことができた。

文 献

- 1) R. W. Ditchburn: *Light* (Dover, New York, 1991) pp. 141-142.
- 2) K. Oka: "Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 1475-1477.
- 3) T. Wakayama, Y. Otani and N. Umeda: "High-order birefringence and dispersion measurement using spectroscopic of polarized light," *Proc. SPIE*, **4416** (2001) 23-26.
- 4) T. Wakayama, Y. Otani and N. Umeda: "Real-time measurement for birefringence dispersion using double retarder," *Proc. SPIE*, **5888** (2005) 588807-1-588807-6.
- 5) 鶴田匡夫：応用光学II（培風館，2007）pp. 174-182.
- 6) H. Kowa, K. Muraki and M. Tsukiji: "Simultaneous measurement of linear and circular birefringence with heterodyne interferometry," *Proc. SPIE*, **2873** (1996) 29-32.