

二重回転分光ストークスポラリメーターの開発と液晶セルの特性評価

田中政之介***・中 條 充**・大谷 幸利***

*(株)アタゴ 〒173-0001 東京都板橋区本町 32-10

**東京農工大学工学府機械システム工学専攻 〒184-8588 小金井市中町 2-24-16

***宇都宮大学オプティクス教育研究センター 〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2

Spectroscopic Stokes Polarimeter with Dual Rotating Retarder and Analyzer for LCD Evaluation

Masanosuke TANAKA***, Makoto CHUJO** and Yukitoshi OTANI***

*ATAGO CO., LTD., 32-10 Honcho, Itabashi-ku, Tokyo 173-0001

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

***Center for Optical Research and Education, Utsunomiya University, 7-1-2 Yoto, Utsunomiya 321-8585

In light of recent requirements for high accuracy measurement methods of polarization state for any optical devices such as phase difference film, a polarization film and other polarization devices, we have been working on developing a measurement system with some nematic liquid crystals used as variable retarders. In this measurement set up it is requisite to be able to analyze the characteristics of the liquid crystal with high accuracy. This report proposes a solution by a dual rotating spectroscopic Stokes polarimeter. The optical system consists of a retarder and an analyzer rotating at a ratio of one to three. A retardation of the compensator can be calibrated over whole visible light wavelength range. This calibration enables the measurement of the Stokes parameters dispersion characteristics over the same wavelength range by one time measurement. A Glan-Thompson prism and a Babinet compensator are used for the evaluation of obtained Stokes parameters.

Key words: Stokes parameter, birefringence, dual rotating retarder and analyzer, spectroscopic polarimeter

1. はじめに

近年、液晶ディスプレイでは、高精細かつ高コントラスト、高視野角化が進められ、位相差フィルムや偏光フィルムなどの高分子フィルムの開発が進められている。また、最近では、二軸延伸フィルムやディスコチック液晶を用いたフィルムが登場しており、屈折率楕円体の制御が可能となっている。گران・トムソンプリズムやニコルプリズムなどの光学ガラスの偏光素子においても、その偏光特性の精度検証が必要とされる。さらに、電圧制御によって、可変リターダー素子としての機能をもつ液晶セルやファラデーセルといった能動素子も利用されており、偏光素子の種類は非常に幅広い。われわれの研究室においても、ネマ

チック液晶セルを可変リターダー素子として使用した計測装置の構築に取り組んでおり、これら新規の光学材料の偏光特性を定量的かつ高精度に評価する手法が求められる。偏光特性を定量的に評価する手法には複屈折計測やエリブソメトリー¹⁾がある。また、偏光特性は、ストークスパラメーター S_0 , S_1 , S_2 , S_3 の4つのパラメーターで表されることが知られている。すなわち、 S_0 は光の全強度、 S_1 は垂直偏光成分と水平偏光成分の差、 S_2 は 45° と -45° 偏光成分の差、 S_3 は左右円偏光成分の差である。光学材料を透過した光のストークスパラメーターを解析することによって、偏光度合いや複屈折位相差などといった偏光特性を解析することができる²⁾。ストークスパラメーターの従

来の計測手法としては、回転検光子法³⁾や回転位相子法⁴⁾が挙げられる。回転検光子法は、検光子を回転させて角度に対する光強度を検出することによってストークスパラメーターを算出する手法であり、装置構成が簡単でアクロマティックであるという特徴をもつ。しかし、ストークスパラメーター S_3 が測定されず、また測定試料の複屈折位相差が 0° と 180° 付近の場合、楕円率角が余弦関数で与えられるため精度が悪くなる。一方、回転位相子法は、位相子を回転させてストークスパラメーターを算出する手法であり、位相子の正確な複屈折位相差が得られていれば、すべてのストークスパラメーターが算出できる。しかし、位相子が波長分散をもつため、装置に組み込む前にあらかじめ正確な複屈折波長分散特性を計測しておかなければならないという問題があった。また、回転機構を用いる場合、光強度を検出するディテクターが偏光感度をもつと正しい値が得られない。Aspnes と Hauge⁵⁾ は、回転位相子・回転検光子・固定検光子の構成とし、回転位相子と回転検光子の回転角を $2:3$ や $2:5$ などの回転比とすることで、この問題を解決した。これに対して、本手法は、回転位相子・回転検光子の2素子のみ構成とし、 $1:3$ の回転比率で同期させる二重回転分光ストークスポラリメーターを提案する。位相子と検光子の回転比率を $1:3$ とすることにより、ストークスパラメーターの計測とリターダー（位相子）の複屈折波長分散の自己キャリブレーションを同時に行うことができ、一度の計測で幅広い波長領域でストーク

スパラメーターの計測が可能である。また、リターダーと偏光子の光検出部分に光ファイバーを用いることによって、偏光無依存の検出系とこの系の新しい解析アルゴリズムを提案することで、受光系の偏光子を減らすことを可能とした。本報告では、開発した二重回転分光ストークスポラリメーターの原理・構成、および精度検定を行った結果について述べるとともに、本計測装置を用いてネマチック液晶セルの特性評価を行った結果について述べる。

2. 二重回転分光ストークスポラリメーターの原理および構成

二重回転分光ストークスポラリメーターの計測システムの構成を Fig. 1 に示す。光源、リターダーとしての四分の一水晶波長板、検光子、検出器で構成されている。測定試料を通過した光は、リターダー、検光子の二重回転機構によって偏光変調され、レンズ、光ファイバー、受光器を介して光強度が検出される。リターダーと検光子は、 $1:3$ の回転比率で回転させている。Fig. 1 において、 $\delta(\lambda)$ はリターダーのもつ複屈折位相差を示し、また ϕ はリターダーおよび検光子の回転角度を示している。

測定試料を通過後のストークスベクトル $S = [S_0(\lambda), S_1(\lambda), S_2(\lambda), S_3(\lambda)]^T$ を用いて、リターダーと検光子の二重回転によるミュラー行列とストークスベクトルの関係は、

$$S_{\text{out}} = A(\phi) \cdot R(\phi, \delta(\lambda)) \cdot S$$

$$S_{\text{out}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 6\phi & \sin 6\phi & 0 \\ \cos 6\phi & \cos^2 6\phi & \cos 6\phi \sin 6\phi & 0 \\ \sin 6\phi & \cos 6\phi \sin 6\phi & \sin^2 6\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \delta(\lambda)) \sin^2 2\phi & (1 - \cos \delta(\lambda)) \sin 2\phi \cos 2\phi & -\sin \delta(\lambda) \sin 2\phi \\ 0 & (1 - \cos \delta(\lambda)) \sin 2\phi \cos 2\phi & 1 - (1 - \cos \delta(\lambda)) \cos^2 2\phi & \sin \delta(\lambda) \cos 2\phi \\ 0 & \sin \delta(\lambda) \sin 2\phi & -\sin \delta(\lambda) \cos 2\phi & \cos \delta(\lambda) \end{bmatrix} \cdot I_0 \begin{bmatrix} S_0(\lambda) \\ S_1(\lambda) \\ S_2(\lambda) \\ S_3(\lambda) \end{bmatrix} \quad (1)$$

と表される。ここで、 λ は波長、 I_0 はリターダーに入射する前の光強度を示す。

式 (1) より、リターダーと検光子の二重回転によって得られる光強度 I_ϕ は、

$$I_\phi = I_0/2 \cdot [S_0(\lambda) + \sin^2(\delta(\lambda)/2) \cdot S_1(\lambda) \cdot \cos 2\phi + \cos^2(\delta(\lambda)/2) \cdot S_1(\lambda) \cdot \cos 6\phi - \sin^2(\delta(\lambda)/2) \cdot S_2(\lambda) \cdot \sin 2\phi + \sin \delta(\lambda) \cdot S_3(\lambda) \cdot \sin 4\phi + \cos^2(\delta(\lambda)/2) \cdot S_2(\lambda) \cdot \sin 6\phi] \quad (2)$$

と表すことができる。

式 (2) で得られた光強度 I_ϕ をフーリエ解析したとき

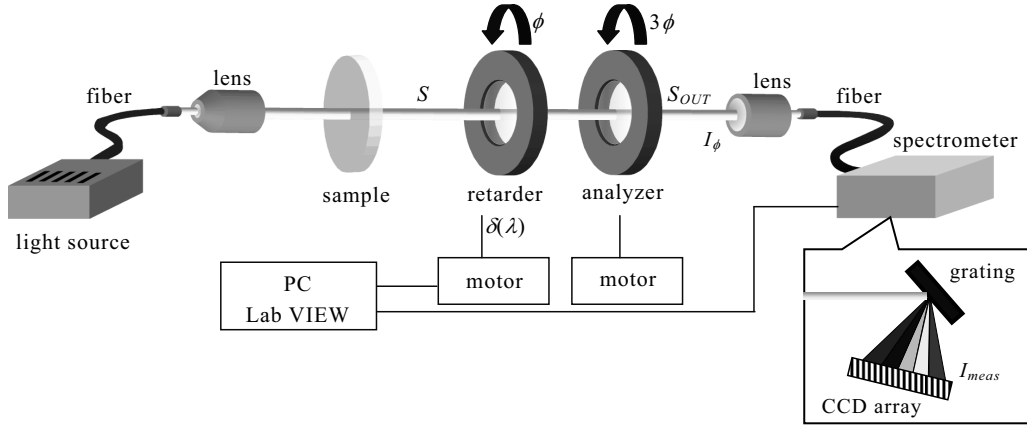


Fig. 1 Optical setup of the spectroscopic Stokes polarimeter with the dual rotating retarder and analyzer.

のフーリエ級数はそれぞれ、

$$a_0(\lambda)/2 = I_0/2 \cdot S_0(\lambda) \quad (3)$$

$$a_2(\lambda) = I_0/2 \cdot \sin^2\{\delta(\lambda)/2\} \cdot S_1(\lambda) \quad (4)$$

$$b_2(\lambda) = -I_0/2 \cdot \sin^2\{\delta(\lambda)/2\} \cdot S_2(\lambda) \quad (5)$$

$$b_4(\lambda) = I_0/2 \cdot \sin\delta(\lambda) \cdot S_3(\lambda) \quad (6)$$

$$a_6(\lambda) = I_0/2 \cdot \cos^2\{\delta(\lambda)/2\} \cdot S_1(\lambda) \quad (7)$$

$$b_6(\lambda) = I_0/2 \cdot \cos^2\{\delta(\lambda)/2\} \cdot S_2(\lambda) \quad (8)$$

で表される。

したがって、求めるストークスパラメーターは、光強度 I_ϕ のフーリエ級数を用いて、それぞれ

$$S_0(\lambda) = a_0(\lambda)/I_0 \quad (9)$$

$$S_1(\lambda) = 2 \cdot \{a_2(\lambda) + a_6(\lambda)\}/I_0 \quad (10)$$

$$S_2(\lambda) = 2 \cdot \{b_6(\lambda) - b_2(\lambda)\}/I_0 \quad (11)$$

$$S_3(\lambda) = 2 \cdot b_4(\lambda) \cdot \{1/\sin\delta(\lambda)\}/I_0 \quad (12)$$

となる。

リターダーとしての四分の一波長板の複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ は波長分散をもっている。本手法では、ストークスパラメーターの計測と同時に、リターダーの複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ の波長キャリブレーションが可能である。上記式 (4), (5), (7), (8) を整理することによって、ストークスパラメーターの $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ が除去され、リターダーの複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ を以下の式で算出することができる。

$$\delta(\lambda) = 2 \cdot \tan^{-1} \left[\sqrt{\{a_2(\lambda) - b_2(\lambda)\} / \{a_6(\lambda) + b_6(\lambda)\}} \right] \quad (13)$$

式 (13) で得られたリターダーの波長ごとの複屈折位相差値 $\delta(\lambda)$ を、 $S_3(\lambda)$ の式 (12) に反映させることで、ストークスパラメーターの波長分散特性を得ることができる。なお、式 (13) において、分子もしくは分母が 0 となる条件、すなわち入射光が円偏光および $S_1 = -S_2$ の場合には、リターダーの複屈折位相差が求められない。この場

合、例えば、偏光子を用いて入射光を直線偏光とし、波長に対するリターダーの複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ をあらかじめ実験的に算出しておくことで、測定時に反映させることができる。

式 (2) で得られた光強度 I_ϕ は検光子を透過後の光強度であり、最終的に検出される光強度は、コリメートレンズや光ファイバー、分光器中のグレーティング等による付加的な偏光特性の影響を受けて検出される。特にグレーティングは、部分偏光子としての特性をもち、変調後の光強度 I_ϕ に大きな影響を与える。入射光の正確なストークスパラメーターを得るためには、コリメートレンズ、光ファイバー、グレーティングの偏光特性による影響を波長ごとに補正する必要がある。コリメートレンズ、光ファイバー、グレーティング等は固定の因子であるため、それぞれの偏光特性は固定である。したがって、それらを合成した偏光特性も固定として考えることができ、合成のミュラー行列 P_g として次式のように定義できる。

$$P_g = \begin{bmatrix} m_{00}(\lambda) & m_{01}(\lambda) & m_{02}(\lambda) & m_{03}(\lambda) \\ m_{10}(\lambda) & m_{11}(\lambda) & m_{12}(\lambda) & m_{13}(\lambda) \\ m_{20}(\lambda) & m_{21}(\lambda) & m_{22}(\lambda) & m_{23}(\lambda) \\ m_{30}(\lambda) & m_{31}(\lambda) & m_{32}(\lambda) & m_{33}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (14)$$

全体のミュラー行列は、ミュラー行列 P_g を加えて、以下のように表される。

$$S_{out} = P_g \cdot A(\phi) \cdot R(\phi, \delta(\lambda)) \cdot S \quad (15)$$

式 (15) を計算することによって、最終的に検出される光強度 I_{meas} は、

$$I_{meas} = (m_{00}(\lambda) + m_{01}(\lambda) \cdot \cos 6\phi + m_{02}(\lambda) \cdot \sin 6\phi) \cdot I_\phi \quad (16)$$

とまとめることができ、二重回転後に得られた光強度 I_ϕ と、固定因子による偏光成分を含む項とを分離したかたちで表すことができる。

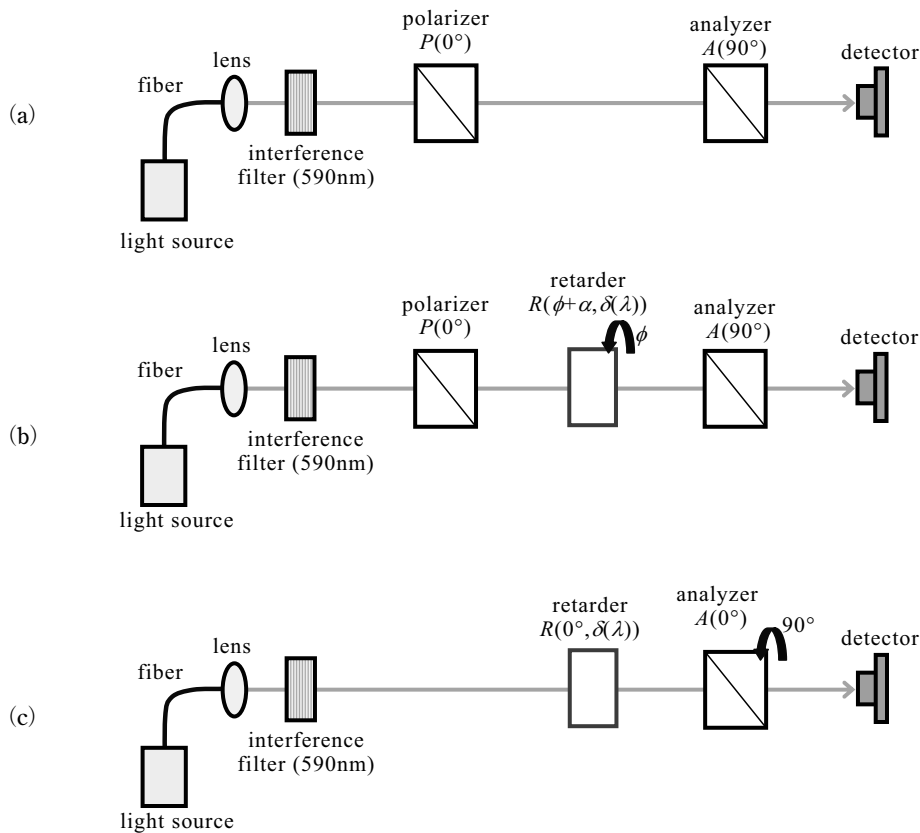


Fig. 2 Adjustment procedure of the principal angle of each polarization components.

また、非偏光を入射した場合に検出器によって得られる光強度 I_{null} は、

$$I_{\text{null}} = I_0/2 \cdot (m_{00}(\lambda) + m_{01}(\lambda) \cdot \cos 6\phi + m_{02}(\lambda) \cdot \sin 6\phi) \quad (17)$$

と表される。

式 (16), (17) より、

$$I_{\phi} = I_0/2 \cdot (I_{\text{meas}}/I_{\text{null}}) \quad (18)$$

となり、光強度 I_{ϕ} は、あらかじめ非偏光を入射したときに計測される光強度 I_{null} を波長ごとに求めておき、分光器によって検出された光強度 I_{meas} を I_{null} で除して求められる。これにより、付加的な偏光特性による影響を補正できる。

実験装置の光源にはハロゲンランプ、検光子にはグラン・トムソン偏光子、リターダーには波長 590.0 nm において $\lambda/4$ 板となるように設計された水晶波長板を使用した。光源からの光は、光ファイバーを通してレンズにより平行光とした。また、受光器には、フォトセンサーもしくは小型分光器を使用した。グラン・トムソン偏光子、リターダーはそれぞれモーターユニットに組み込まれ、コンピューターによって回転精度 0.01° で制御した。

ストークスパラメーターおよびリターダーの複屈折位相

差の1回分の測定値は、回転角度 ϕ を 12° 、すなわちリターダーを 12° ずつ、検光子を 36° ずつ回転させて位置決めしたときのそれぞれの光強度を測定し、 360° 分の測定点 30 点から求めた。

3. 主軸方位の調整

リターダー、検光子の主軸方位の誤差は測定精度に影響を与えるため、正確な調整が必要である。以下に、主軸方位の調整手順を示した。なお、実際の調整には、波長 590 nm の干渉フィルターによって単色光とした光を使用し、光強度の検出にはフォトセンサー（浜松ホトニクス：S1227-1010BR）を使用した。まず、Fig. 2 (a) のように偏光子を方位 0° で設置、検光子を回転させて消光点を検出し、クロスニコルの状態（方位 90° ）とした。続いて、Fig. 2 (b) のように偏光子と検光子との間にリターダーを設置し、リターダーを回転させて得られる光強度からリターダーの主軸方位を求めた。リターダーの角度誤差を α とすると、光学系のミューラー行列とストークスベクトルの関係は、

$$S_{\text{out}} = A(90^\circ) \cdot R(\phi + \alpha, \delta(\lambda)) \cdot P(0^\circ) \cdot S_{\text{in}}$$

$$S_{\text{out}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \delta(\lambda)) \sin^2 2(\phi + \alpha) & (1 - \cos \delta(\lambda)) \sin 2(\phi + \alpha) \cos 2(\phi + \alpha) & -\sin \delta(\lambda) \sin 2(\phi + \alpha) \\ 0 & (1 - \cos \delta(\lambda)) \sin 2(\phi + \alpha) \cos 2(\phi + \alpha) & 1 - (1 - \cos \delta(\lambda)) \cos^2 2(\phi + \alpha) & \sin \delta(\lambda) \cos 2(\phi + \alpha) \\ 0 & \sin \delta(\lambda) \sin 2(\phi + \alpha) & -\sin \delta(\lambda) \cos 2(\phi + \alpha) & \cos \delta(\lambda) \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

と表すことができる。ここで、 ϕ は位相子の回転角度である。

検出器によって得られる光強度 I_R は、

$$I_R = I_0/8 \cdot (1 - \cos \delta(\lambda)) \cdot \{1 - (\cos 4\phi \cdot \cos 4\alpha - \sin 4\phi \cdot \sin 4\alpha)\} \quad (20)$$

となる。

式 (20) で示された光強度 I_R をフーリエ解析したときのフーリエ級数は、それぞれ

$$a_0/2 = I_0/8 \cdot \{1 - \cos \delta(\lambda)\} \quad (21)$$

$$a_4 = -I_0/8 \cdot (1 - \cos \delta(\lambda)) \cdot \cos 4\alpha \quad (22)$$

$$b_4 = I_0/8 \cdot (1 - \cos \delta(\lambda)) \cdot \sin 4\alpha \quad (23)$$

と表される。

式 (22), (23) より、リターダラーの角度誤差 α は、

$$\alpha = 1/4 \cdot \tan^{-1}(-b_4/a_4) \quad (24)$$

で求められる。

最後に、Fig. 2 (c) に示すように検光子を 0° に回転させ、偏光子を除去することによって目的とする設定位置とすることができる。この手法により、リターダラーと検光子の方位を 0.01° 以内で調整した。

4. 精度検証

4.1 リターダラーの波長キャリブレーション検証

式 (13) で示したリターダラーの複屈折位相差の波長キャリブレーションについて評価を行った。評価に使用したリターダラーは水晶波長板 ($\lambda/4$ 板: 590.0 nm) である。Fig. 3 に、主軸方位 0° に設置したグラン・トムソン偏光子により直線偏光とした光を入射したときの測定結果を示した。横軸が波長、縦軸がリターダラーの複屈折位相差である。波長 590 nm における複屈折位相差の測定値は 88.2° を示し

た。また、同図に、コーシーの分散式から求めた理論曲線を実線で示した。理論曲線は、光軸に対して垂直方向のカット面とした厚さ $16.13 \mu\text{m}$ の水晶を使用した場合の条件から求めたものである。Fig. 3 より、計測結果が理論曲線によく一致することが確認できた。

4.2 グラン・トムソン偏光子によるストークスパラメーター $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ の評価

続いて、グラン・トムソン偏光子を用いて入射光を直線偏光とすることで、ストークスパラメーター $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ の精度検定を行った。グラン・トムソン偏光子の主軸方位を 0° , 45° に設定して入射し、得られたストークスパラメーター $S_0(\lambda)$, $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$, $S_3(\lambda)$ から楕円率角と方位角を算出した結果を Fig. 4, Fig. 5 に示す。Fig. 4 は入射偏光状態が 0° の場合の楕円率角 $\chi(\lambda)$ および方位角 $\psi(\lambda)$ の波長分散特性を示し、また Fig. 5 は、入射偏光状態が 45° の場合の楕円率角 $\chi(\lambda)$ および方位角 $\psi(\lambda)$ の波長分散特性を示す。なお、楕円率角 $\chi(\lambda)$ および方位角 $\psi(\lambda)$ はそれ

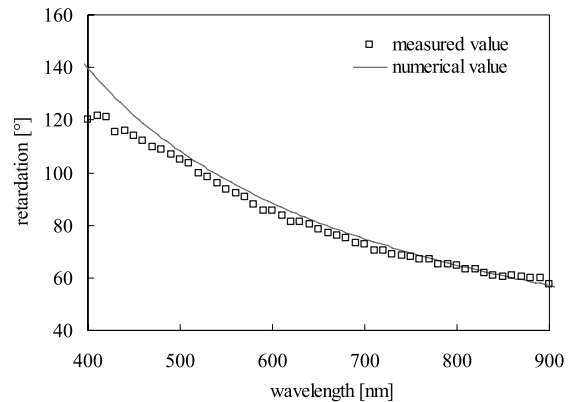
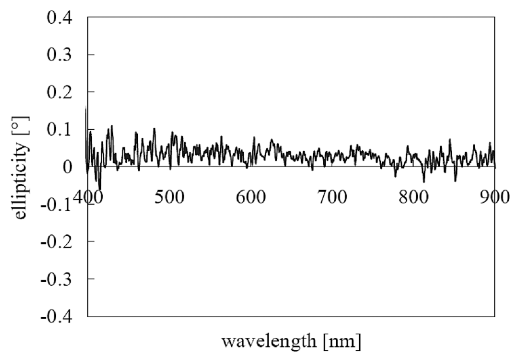
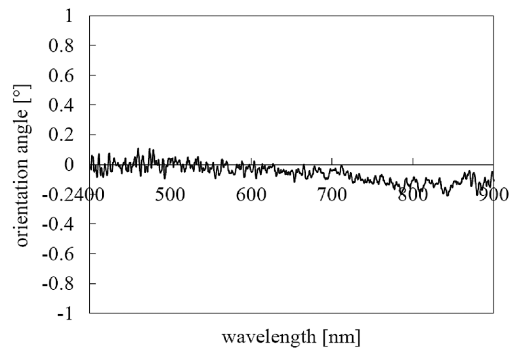


Fig. 3 Birefringence dispersion of the quarter wave plate.

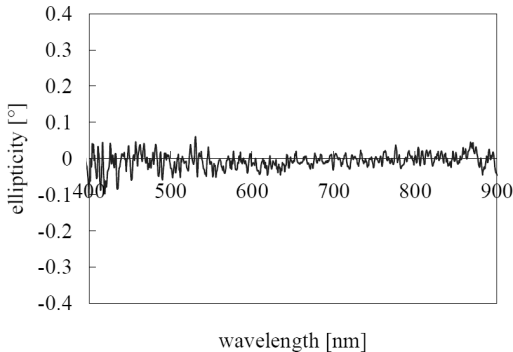


(a)

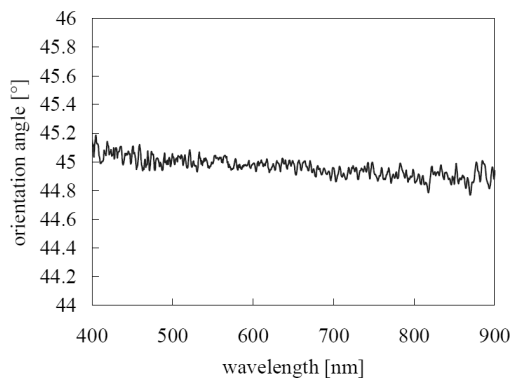


(b)

Fig. 4 Dispersion characteristics of the 0° linearly polarized light. (a) Ellipticity of the polarization, (b) orientation angle of the polarization.

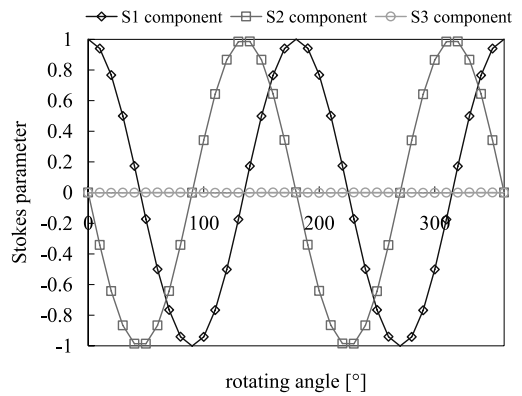


(a)

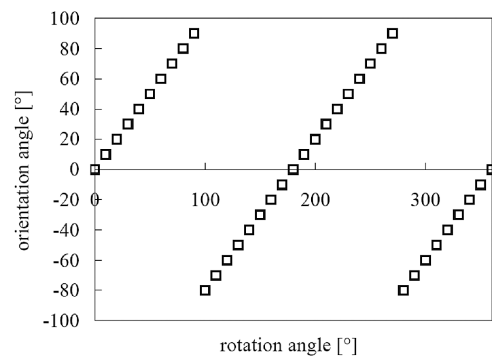


(b)

Fig. 5 Dispersion characteristics of the 45° linearly polarized light. (a) Ellipticity of the polarization, (b) orientation angle of the polarization.



(a)



(b)

Fig. 6 Accuracy check of the rotation of the linearly polarized light. (a) Measured values of the Stokes parameters, (b) orientation angle of the polarization.

ぞれ、以下の式を用いて算出した。

$$\chi(\lambda) = \sin^{-1}\{S_3(\lambda)/S_0(\lambda)\}/2 \quad -\pi/4 \leq \chi \leq \pi/4 \quad (25)$$

$$\psi(\lambda) = \tan^{-1}\{S_2(\lambda)/S_1(\lambda)\}/2 \quad 0 \leq \psi \leq \pi \quad (26)$$

Fig. 4, 5 より、計測波長領域で楕円率角 $\chi(\lambda)$ は $\pm 0.1^\circ$ 以内におさまリ、直線偏光となることを確認した。また、方位角 $\psi(\lambda)$ においても、設定した入射偏光角度に対し誤差 0.2° 以内を示した。波長 590 nm における繰り返し精度は、20 回の測定で標準偏差 0.0005 以内におさまった。Fig. 6 には、グラン・トムソン偏光子を 0° から 360° まで 10° ごとに回転させて入射偏光状態を変化させたときのストークスパラメーター、および方位角を評価した結果を示した。偏光子の回転角度に対するストークスパラメーター $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$, $S_3(\lambda)$ の測定結果を Fig. 6 (a) に、また偏光子の回転角度に対する方位角 $\psi(\lambda)$ を Fig. 6 (b) に示す。なお、グラン・トムソン偏光子の回転精度はモーターにより 0.01° で制御し、また得られたストークスパラメーターは $S_0(\lambda)$ で除することで規格化している。Fig. 6 (a) か

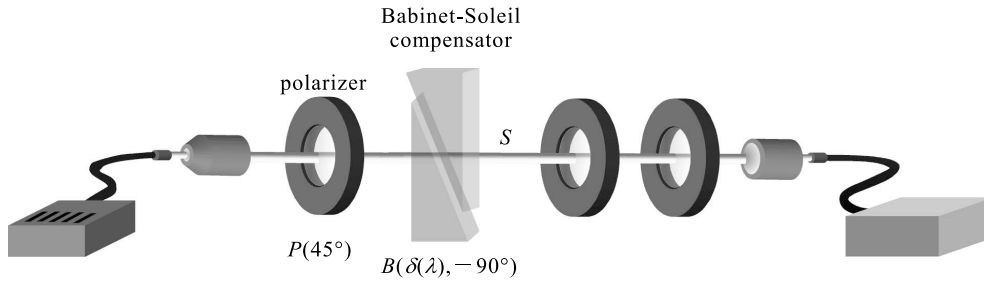


Fig. 7 Evaluation of the retardation characteristics using a Babinet-Soleil compensator.

ら、ストークスパラメーター $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ は正弦的に変化し、ストークスパラメーター $S_3(\lambda)$ は 0 であることがわかる。Fig. 6 (b) では、グラン・トムソン偏光子の回転角度に対して、方位角 $\psi(\lambda)$ が直線的に変化していることが確認できる。グラン・トムソン偏光子の設定角度と算出した方位角 $\psi(\lambda)$ との差の標準偏差は 0.013° を示した。式 (15) から、方位角 $\psi(\lambda)$ はストークスパラメーター $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ より算出され、またストークスパラメーター $S_3(\lambda)$ が 0 を示したことから、ストークスパラメーター $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ の計測が正常になされることを確認した。

4.3 バビネ・ソレイユ補償器によるストークスパラメーター $S_3(\lambda)$ の評価

所望の複屈折位相差を設定できるバビネ・ソレイユ補償器を用いて、ストークスパラメーター $S_3(\lambda)$ の精度検定を行った。Fig. 7 に示すように、リターダの前に偏光子とバビネ・ソレイユ補償器をそれぞれ主軸方位 45° , -90° で設置し、バビネ・ソレイユ補償器の複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ を変化させて入射光のストークスパラメーターを計測した。バビネ・ソレイユ補償器を透過後のストークスベクトルを $S = [S_0(\lambda), S_1(\lambda), S_2(\lambda), S_3(\lambda)]^T$ とすると、ミュラー行列とストークスベクトルの関係は

$$S = \begin{bmatrix} S_0(\lambda) \\ S_1(\lambda) \\ S_2(\lambda) \\ S_3(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta(\lambda) & \sin \delta(\lambda) \\ 0 & 0 & -\sin \delta(\lambda) & \cos \delta(\lambda) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \cos \delta(\lambda) \\ -\sin \delta(\lambda) \end{bmatrix} \quad (27)$$

で表される。

得られたストークスパラメーターより、バビネ・ソレイユ補償器の複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ を

$$\delta(\lambda) = \tan^{-1}\{-S_3(\lambda)/S_2(\lambda)\} \quad (28)$$

によって求めることができる。

マイクロメーターを 0.2 mm ずつ移動させてバビネ・ソ

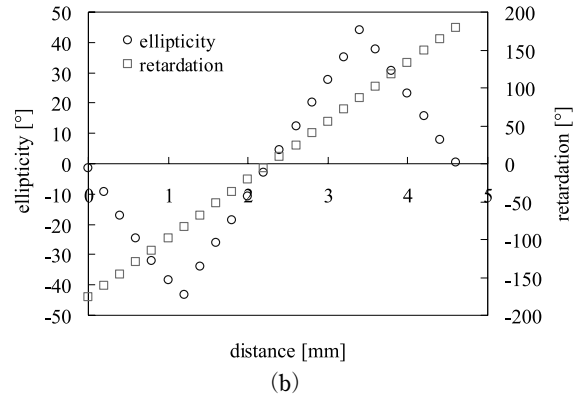
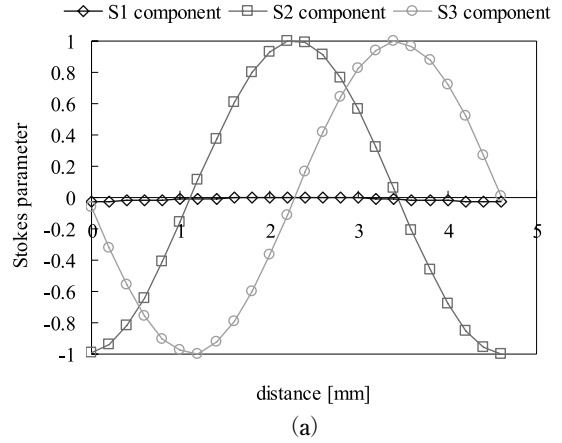


Fig. 8 Accuracy check using a Babinet-Soleil compensator. (a) Measured values of the Stokes parameters, (b) measured values of the ellipticity and the retardation.

レイユ補償器の複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ を変化させ、それぞれの移動量でのストークスパラメーター $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$, $S_3(\lambda)$ を測定し、また得られたストークスパラメーターから複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ と楕円率角 $\chi(\lambda)$ を算出した。波長 λ を 590 nm に限定した場合の測定結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 (a) はバビネ・ソレイユ補償器の移動量に対するストークスパラメーター $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$, $S_3(\lambda)$ の測定結果を、また Fig. 8 (b) は、バビネ・ソレイユ補償器の移動量に対する複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ と楕円率角 $\chi(\lambda)$ の算出結果を示している。なお、バビネ・ソレイユ補償器の駆動分解能は 0.01

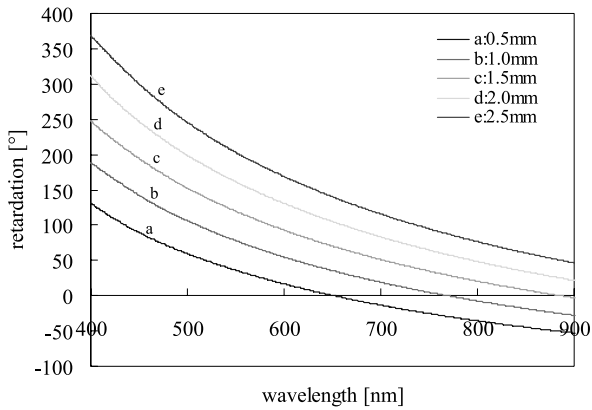


Fig. 9 Retardation dispersion characteristics of the Babinet-Soleil compensator.

mm であり、得られたストークスパラメーターは $S_0(\lambda)$ で除することで規格化している。Fig. 8 (a) から、ストークスパラメーター $S_2(\lambda)$, $S_3(\lambda)$ は正弦的に変化し、ストークスパラメーター $S_1(\lambda)$ はほぼ 0 であることがわかる。Fig. 8 (b) からは、バビネ・ソレイユ補償器の移動量に対して複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ が比例的に変化していることが読み取れ、さらに楕円率角 $\chi(\lambda)$ が直線的に変化していることがわかる。バビネ・ソレイユ補償器を用いた評価により、ストークスパラメーター $S_3(\lambda)$ の計測を確認することができた。

最後に、バビネ・ソレイユ補償器を用いて複屈折位相差を変化させたときの波長分散特性を測定した。マイクロメーターにより、バビネ・ソレイユ補償器の移動量を 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm に設定した場合の測定結果を Fig. 9 に示す。横軸が波長 (λ)、縦軸が複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ である。Fig. 9 から、波長 400~900 nm で複屈折位相差の波長分散特性が得られていることがわかる。また、バビネ・ソレイユ補償器のマイクロメーターの移動量に呼応して、複屈折位相差の大きさが比例的に変化していることが確認できる。

5. 液晶の評価

ネマチック液晶セルは、その分子構造から一軸性複屈折を示す異方性誘電体として振る舞うことが知られている。また、液晶セルに電圧を印加することによってセルに対し垂直な電場を形成すると、液晶分子が向きを変え複屈折位相差を変化させることができる⁶⁾。そこで、本計測手法を用いて、ネマチック液晶セルの特性評価を行った。評価には、屈折率差 Δ_n が 0.16 のネマチック液晶 (MLC-14700-100) を、セルギャップ $4 \mu\text{m}$ 、両面のガラス基板の配向方向を 45° としたセルに封入した液晶セルを使用した。ガラ

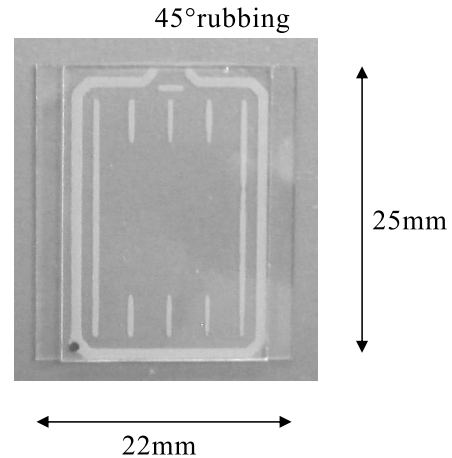


Fig. 10 Photograph of the nematic liquid crystal cell.

ス基板の内側には、ITO 膜による 1 cm 四方の透明電極のパターンが形成され、液晶セルの両端から電極面を取り出す。セル内のネマチック液晶は、配向制御によってホモジニアス分子配列となっており、電極部より交流電圧を印加することで電場に沿って傾くスプレー変形が起こり、ホメオトロピック配列状態へ変化する。これにより、全体として正の一軸性結晶としての振る舞いを示す。実際に使用した液晶セルの写真を Fig. 10 に示した。主軸方位 0° のグラン・トムソン偏光子を設置して光源からの光を水平直線偏光とし、配向方向が水平方向に対して 45° となるように設置された液晶セルを透過させる。液晶セルに電圧を印加し、そのときの出射光の偏光状態を評価した。液晶セルは $30^\circ\text{C} \pm 0.05^\circ\text{C}$ の恒温状態に保持した。液晶セルから出射される光のストークスベクトルは、

$$S = LC(45^\circ, \Delta(\lambda)) \cdot P(0^\circ) \cdot S_{IN}$$

$$\begin{bmatrix} S_0(\lambda) \\ S_1(\lambda) \\ S_2(\lambda) \\ S_3(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta(\lambda) & 0 & -\sin \Delta(\lambda) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \Delta(\lambda) & 0 & \cos \Delta(\lambda) \end{bmatrix}$$

$$\cdot \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{I_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ \cos \Delta(\lambda) \\ 0 \\ \sin \Delta(\lambda) \end{bmatrix} \quad (29)$$

で表すことができる。ここで、 $\Delta(\lambda)$ は液晶の複屈折位相差である。

液晶の複屈折位相差 $\Delta(\lambda)$ は、ストークスパラメーター

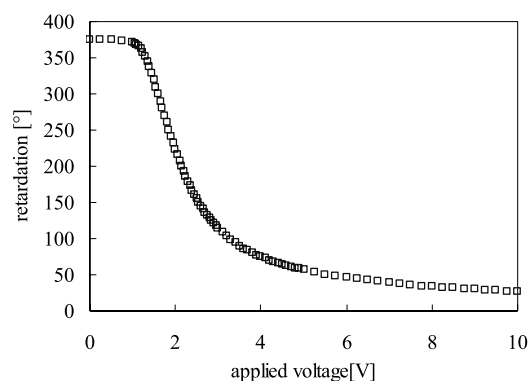


Fig. 11 Electro-optical characteristics of the nematic liquid crystal cell.

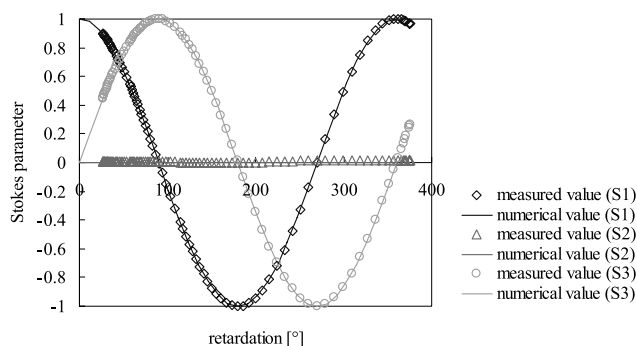


Fig. 12 Measured values of Stokes parameters of the nematic liquid crystal cell.

$S_1(\lambda)$ と $S_3(\lambda)$ から,

$$\Delta(\lambda) = \tan^{-1}\{S_3(\lambda)/S_1(\lambda)\} \quad (30)$$

で求めることができる。

Fig. 11 に、波長 590 nm において、液晶セルに 0~10 V まで電圧を印加したときの複屈折位相差特性を示した。横軸が液晶セルへの印加電圧 V、縦軸が複屈折位相差 $\Delta(\lambda)$ であり、液晶セルへの印加電圧に対する複屈折位相差 $\Delta(\lambda)$ の変化が確認できる。液晶セルの閾値電圧は 1.8 V であった。また、Fig. 12 は、液晶セルに電圧を印加して複屈折位相差を変化させていったときのストークスパラメータの計測結果である。なお、得られたストークスパラメータは $S_0(\lambda)$ で除することで規格化している。実線は、理想的な可変リターダー素子の場合の理論曲線である。Fig. 12 から、計測結果が理論曲線に一致し、ストークスパラメータ $S_1(\lambda)$, $S_3(\lambda)$ は正弦的に変化し、また

$S_2(\lambda)$ は 0 を示す結果を得た。これにより、ネマチック液晶セルの可変リターダー素子としての動作を確認した。

6. ま と め

本研究では、位相差フィルムや偏光フィルムなどの高分子フィルム、グラン・トムソンプリズムやニコルプリズムといった光学材料、さらにはファラデーセルや液晶リターダーなどといった能動素子の偏光特性を定量的に評価する手法として、位相子と検光子を 1:3 の回転比率で同期させる二重回転分光ストークスポラリメーターを提案した。本手法では、リターダー（位相子）の複屈折波長分散の自己キャリブレーションを可能としており、これにより、一度の計測で幅広い波長領域でストークスパラメータを計測することができる。また、リターダーと偏光子の光検出部分に光ファイバーを用い、偏光無依存の検出系とこの系の新しい解析アルゴリズムを提案することで、受光系の偏光子を減らすことを可能とした。本手法の精度検証には、グラン・トムソン偏光子、およびバビネ・ソレイユ補償器を用い、 $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$, $S_3(\lambda)$ それぞれのストークスパラメータを評価した。検証の結果、400~900 nm の波長領域で良好な結果を得た。また、本計測手法を用いてネマチック液晶セルの複屈折位相差特性を評価し、ネマチック液晶セルが可変リターダー素子として動作することを確認した。

偏光フィルムや液晶などの光学素子の複屈折性や旋光性は、波長分散特性を有しているため、波長ごとの評価が必要となる。本手法は、光学素子の波長ごとの偏光特性を精度よく計測する手法として、非常に有効であるといえる。

文 献

- 1) R. M. A. Azzam and N. M. Bashara: *Ellipsometry and Polarized Light* (North-Holland, Amsterdam, 1987) pp.257-260.
- 2) 応用物理学会光学懇話会：結晶光学（森北出版, 1975）pp.137-140.
- 3) D. E. Aspnes: "Optimizing precision of rotating-analyzer ellipsometer," *J. Opt. Soc. Am.*, **64** (1974) 639-646.
- 4) P. S. Hauge and F. H. Dill: "A rotating-compensator Fourier ellipsometers," *Opt. Commun.*, **14** (1975) 431-437.
- 5) D. E. Aspnes and P. S. Hauge: "Rotating-compensator/analyzer fixed-analyzer ellipsometer: Analysis and comparison to other automatic ellipsometers," *J. Opt. Soc. Am.*, **66** (1976) 949-954.
- 6) 折原 宏：液晶の物理（内田老鶴圃, 2004）pp.127-135.