研究論文 Received October 12, 2010; Accepted December 21, 2011

光学 **41**, 3（2012）149–157

液晶位相変調器を用いたストークス偏光計

田中政之介*・中島　吉則*・雨宮　秀行*・大谷　幸利**

*(株)アタゴ　〒173–0001 東京都板橋区本町 32–10
**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

Stokes Polarimeter by Double Liquid Crystal Phase Modulator

Masanosuke TANAKA*, Yoshinori NAKASHIMA*, Hideyuki AMAMIYA* and Yukitoshi OTANI**

*ATAGO CO., LTD., 32–10 Honcho, Itabashi-ku, Tokyo 173–0001
**Center for Optical Research and Education, Utsunomiya University, 7–1–2 Yoto, Utsunomiya 321–8585

Recently, a high accuracy measurement method of polarization state are required for many optical devices such as retardance films, polarization films and the other polarization devices. The purpose of this research is to establish the Stokes polarimeter by double liquid crystal phase modulators which are consisted of two types of nematic liquid crystal with different rubbing orientation. It is powerful tool with some superior characteristics with non-mechanical, miniature and low consumption electricity. By the Fourier analysis of modulated intensities, the Stokes parameters of incident light are calculated. Moreover, the proposal method enables the multi-wavelength measurement by calibrating the electro-optics characteristics of nematic liquid crystal in advance. A polarizer, a Babinet-Soleil compensator and a quarter-wave plate were used for the evaluation of the Stokes polarimeter. They are agreed within ± 0.04 of Stokes parameters.

Key words: Stokes parameters, birefringence, polarimeter, variable retarder, liquid crystal phase modulator

1. はじめに

近年，液晶ディスプレイにおいて高精細かつ高コントラスト，広視野角が求められており，ここでのキーデバイスである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，屈折率楕円体の制御が可能となっている．グラン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求められている．さらに，電圧制御によって，可変位相子としての機能をもつ液晶やファラデーセルといった能動素子も応用され，偏光素子の種類は非常に幅広い．

ここでは，これらの新規の光学材料の開発に伴う，偏光特性の高精度な定量評価法が求められている．偏光特性の定量的な評価法には，複屈折計測や楕円率計測がある[1]．また，光の偏光状態は，S_0, S_1, S_2, S_3 の4つのストークス・パラメーター，すなわち光の全強度 S_0，垂直偏光成分と水平偏光成分の差 S_1，45° と −45° 偏光成分の差 S_2，左右円偏光成分の差 S_3，で表すことができる．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，光学材料の偏光度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．また，われわれは，位相子と検光子による二重回転手法を用いた分光ストークス偏光計を提案してきた[5,6]．しかし，いずれの計測手法においても，偏光素子を回転させるためのモーター等の駆動部を必要としており，これに伴って装置が複雑化かつ大型化し，高価になるという欠点がある．

ネマチック液晶は，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舞うことが知られている．また，電圧を印加して液晶セルに対し垂直な電場を形成することで，任意の複屈折位相差が得られる可変位相子として動作する[7]．液晶可変位相子の駆動には交流電圧を使用するた

E-mail: tanaka.m@atago.net

め大電流を必要とせず，さらにポッケルスセルやカーセル，ファラデー変調器といった電気光学素子と比較してきわめて低電圧で駆動するため，液晶可変位相子は低消費電力で動作させることができる．この液晶可変位相子をストークス偏光計に応用することにより，機械駆動部がなく，小型で軽量な装置を構築することができる．機械駆動部が不要となるため静音であり，また機械駆動の装置と比較して，測定の高速化を実現することができる．さらには，磨耗などの故障原因を軽減できるといった利点もある．

液晶可変位相子を偏光モジュレーターとして，偏光イメージングシステムやミュラーポラリメーターに応用した例が，これまでにいくつか報告されている．液晶可変位相子を単体でモジュレーターとして利用する場合，可変なパラメーターが液晶可変位相子の複屈折位相差のみとなるため，測定試料の偏光特性を正確に求めるためには，波長板などの位相子との組み合わせが必要となっている[8,9]．一方，液晶可変位相子を2つ以上組み合わせると，さまざまな偏光状態を取り扱うことが可能となることから，複数の液晶可変位相子で構成されたモジュレーターを使用した偏光イメージングシステムやミュラーポラリメーターについても多数報告されている[10–14]．Meadowlark Optics 社製ポラリメーター LCPM-3000 のように，すでに製品化されているものもある[15]．しかし，これまでに報告されている計測法は共通して，装置を構成した後にモジュレーターのミュラー行列要素を求めるためのキャリブレーション工程が必要となっている．モジュレーターのキャリブレーションには，直線偏光や円偏光などのような基準となる偏光状態を入射させる必要があり，そのためのキャリブレーションサンプルとして，偏光子や波長板が利用される．しかし，波長板は，波長依存性があるため，測定波長に応じたものを準備しなければならない．また，多波長で測定する場合には，各波長に応じた複数の波長板を準備する必要があるなどの問題がある．液晶可変位相子や偏光子などの光学素子の主軸方位の調整も重要となる．F. Goudail らは，液晶可変位相子を動作させて得られる多点の光強度から，それぞれの素子の主軸方位を算出して，モジュレーターのミュラー行列要素を決定する手法を用いている[14]．この場合，主軸方位を最適な角度に調整するための機構が必要となる．

そこで，本研究では，配向方向が 0° と 45° の2種類の液晶可変位相子で液晶位相変調器を構成し，液晶位相変調器により測定対象光を位相変調させて得られる光強度をフーリエ解析することによって，測定対象光のストークス・パラメーターを求める解析アルゴリズムを提案する．2種類の液晶可変位相子の配向ラビングを 0° と 45° として製作することにより，素子の主軸方位を調整する工程を不要とし，組み立てを簡略化することができる．また，液晶位相変調器を用いて測定波長に対応した位相変調を行うことにより，波長板等の基準サンプルによる波長キャリブレーションを必要とせずに，多波長での計測を可能とする．

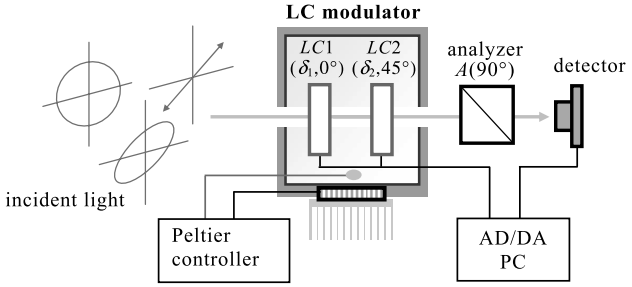


Fig. 1　Stokes polarimeter by liquid crystal phase modulator.

本報告では，液晶位相変調器を用いたストークス偏光計の計測原理および計測システムについて述べる．また，構築したストークス偏光計の性能を評価した結果について示す．

2.　液晶位相変調器を用いたストークス偏光計の計測原理

液晶位相変調器を用いたストークス偏光計の構成を Fig. 1 に示す．偏光状態が未知の入射光は，2種類の液晶可変位相子で構成された液晶位相変調器によって偏光変調され，主軸方位 90° の検光子を透過した後に，受光器によって光強度が検出される．液晶可変位相子 *LC*1，*LC*2 の配向方向はそれぞれ 0°，45° である．液晶可変位相子を駆動するための電圧，および検出された光強度はコンピューター（PC）にて処理される．液晶可変位相子は，ディジタル/アナログ（DA）変換器からの交流電圧によって駆動される．液晶可変位相子の複屈折位相差は環境温度に影響を受けるため，恒温ブロックに組み込んで断熱し，ペルティエ素子およびペルティエコントローラーを用いて，内部温度を 0.05℃ 以内で制御した．設定温度は 30℃ とした．実際に用いた液晶は，波長 589.3 nm において屈折率差 Δn が 0.2 のネマチック液晶（Merck 製：MDA-00-4116）である．また，ネマチック液晶を，22 mm×25 mm，セルギャップ 5.5 μm の形状のガラスセルに封入し，液晶セルとした．ガラス基板には平行にラビングが施され，セル内のネマチック液晶は，配向制御により平行配列となっている．セルの両脇には ITO 電極面が形成されている．また，光が透過する液晶セル中央の電極パターンは，10 mm 四方の1セ

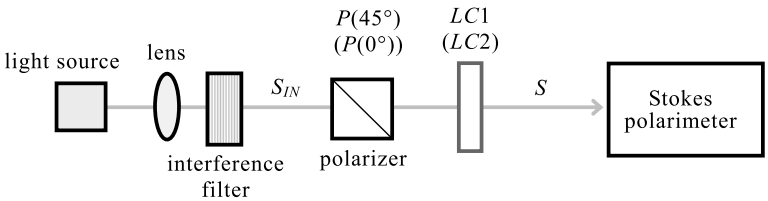


Fig. 2　Optical setup for phase evaluation.

グメント型である．受光器にはフォトセンサー（浜松ホトニクス：S1227-1010BR）を使用し，検光子にはグラントムソンプリズムを使用した．

入射光のストークスベクトルを $S=[S_0(\lambda), S_1(\lambda), S_2(\lambda), S_3(\lambda)]^{\mathrm{T}}$，出射光のストークスベクトルを S_{OUT} とすると，出射光のストークスベクトルとミュラー行列の関係は，

$$S_{\mathrm{OUT}}=A(90°)\cdot LC2(\delta_2(\lambda, V_2), 45°)\cdot LC1(\delta_1(\lambda, V_1), 0°)\cdot S \tag{1}$$

$$S_{\mathrm{OUT}}=\frac{1}{2}\cdot\begin{bmatrix}1 & -1 & 0 & 0\\ -1 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \cos\delta_2(\lambda, V_2) & 0 & -\sin\delta_2(\lambda, V_2)\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & \sin\delta_2(\lambda, V_2) & 0 & \cos\delta_2(\lambda, V_2)\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \cos\delta_1(\lambda, V_1) & \sin\delta_1(\lambda, V_1)\\ 0 & 0 & -\sin\delta_1(\lambda, V_1) & \cos\delta_1(\lambda, V_1)\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}S_0(\lambda)\\ S_1(\lambda)\\ S_2(\lambda)\\ S_3(\lambda)\end{bmatrix} \tag{2}$$

と表すことができる．ここで，λ は波長，V_1 および V_2 はそれぞれの液晶可変位相子 $LC1$，$LC2$ への印加電圧，$\delta_1(\lambda, V_1)$，$\delta_2(\lambda, V_2)$ は任意波長，印加電圧におけるそれぞれの液晶可変位相子 $LC1$，$LC2$ の複屈折位相差を示す．

式（2）のミュラー行列式から，受光器によって検出される光強度は，

$$I(\delta_1(\lambda, V_1), \delta_2(\lambda, V_2), S)= 1/2\times\{S_0(\lambda)-\cos\delta_2(\lambda, V_2)\cdot S_1(\lambda)+\sin\delta_2(\lambda, V_2)\cdot(-S_2(\lambda)\cdot\sin\delta_1(\lambda, V_1)+S_3(\lambda)\cdot\cos\delta_1(\lambda, V_1))\} \tag{3}$$

と表される．

液晶可変位相子 $LC1$，$LC2$ のそれぞれの複屈折位相差を 3:1 の関係で駆動させると，受光器にて検出される光強度は，

$$I(\delta(\lambda, V), S)=1/4\times\{2S_0(\lambda)-2\cos\delta(\lambda, V)\cdot S_1(\lambda)+\cos 4\delta(\lambda, V)\cdot S_2(\lambda)-\cos 2\delta(\lambda, V)\cdot S_2(\lambda)+\sin 4\delta(\lambda, V)\cdot S_3(\lambda)-\sin 2\delta(\lambda, V)\cdot S_3(\lambda)\} \tag{4}$$

と表される．

式（4）を複屈折位相差 δ に対してフーリエ解析したときの，光強度のフーリエ級数とストークス・パラメーターとの関係は，

$$a_0/2=S_0(\lambda)/2 \tag{5}$$
$$a_1=-S_1(\lambda)/2 \tag{6}$$
$$a_2=-S_2(\lambda)/4 \tag{7}$$
$$b_2=-S_3(\lambda)/4 \tag{8}$$
$$a_4=S_2(\lambda)/4 \tag{9}$$
$$b_4=S_3(\lambda)/4 \tag{10}$$

となる．

したがって，入射光のストークス・パラメーターは，

$$\begin{bmatrix}S_0(\lambda)\\ S_1(\lambda)\\ S_2(\lambda)\\ S_3(\lambda)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_0\\ -2a_1\\ 2(a_4-a_2)\\ 2(b_4-b_2)\end{bmatrix} \tag{11}$$

と求めることができる．

波長ごとに液晶可変位相子の複屈折位相差と印加電圧との関係をあらかじめ計測しておくことにより，任意波長でのストークス・パラメーターの測定が可能となる．

3.　液晶可変位相子の動作確認

ストークス偏光計を構築する前に，まずネマチック液晶セルの可変位相子としての動作を確認した．液晶可変位相子の印加電圧に対する複屈折位相差の関係は，液晶可変位相子から出射される光のストークス・パラメーターを解析することにより求めることができる．ストークス・パラメーターの計測は，位相子と検光子を 1:3 の回転比率で回転させる二重回転分光ストークス偏光計を用いた[6]．測定のための光学系を Fig. 2 に示す．光源からの光をレンズによって平行光とし，単色光を得るために 590 nm の干渉フィルターを設置した．フィルターの半値幅は 12 nm であ

る．光源にはハロゲンランプを使用した．また，偏光子にはグラントムソンプリズムを使用し，液晶可変位相子の前方に設置した．配向方位が 0° の液晶可変位相子 $LC1$ を評価する場合は偏光子の主軸方位を 45° に，45° の $LC2$ を評価する場合は偏光子の主軸方位を 0° に設定した．

入射光のストークスベクトルを $S_{\mathrm{IN}}=[1, 0, 0, 0]^{\mathrm{T}}$，液晶可変位相子を透過後のストークスベクトルを $S=[S_0(\lambda), S_1(\lambda), S_2(\lambda), S_3(\lambda)]^{\mathrm{T}}$ とすると，液晶可変位相子 $LC1$ の評価における光学系のミュラー行列式は，

$$S=LC1(\delta_1(\lambda, V_1), 0°)\cdot P(45°)\cdot S_{\mathrm{IN}} \tag{12}$$

$$\begin{bmatrix} S_0(\lambda) \\ S_1(\lambda) \\ S_2(\lambda) \\ S_3(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\delta_1(\lambda, V_1) & \sin\delta_1(\lambda, V_1) \\ 0 & 0 & -\sin\delta_1(\lambda, V_1) & \cos\delta_1(\lambda, V_1) \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{I_0}{2}\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \cos\delta_1(\lambda, V_1) \\ -\sin\delta_1(\lambda, V_1) \end{bmatrix} \tag{13}$$

で表される．ここで，I_0 は入射光強度を示す．

また，液晶可変位相子 $LC2$ の評価の場合，

$$S=LC2(\delta_2(\lambda, V_2), 45°)\cdot P(0°)\cdot S_{\mathrm{IN}} \tag{14}$$

$$\begin{bmatrix} S_0(\lambda) \\ S_1(\lambda) \\ S_2(\lambda) \\ S_3(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\delta_2(\lambda, V_2) & 0 & -\sin\delta_2(\lambda, V_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin\delta_2(\lambda, V_2) & 0 & \cos\delta_2(\lambda, V_2) \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{I_0}{2}\begin{bmatrix} 1 \\ \cos\delta_2(\lambda, V_2) \\ 0 \\ \sin\delta_2(\lambda, V_2) \end{bmatrix} \tag{15}$$

で表される．

得られたストークス・パラメーターから，それぞれの液晶可変位相子の複屈折位相差は，

$$\delta_1(\lambda, V_1)=\tan^{-1}\{-S_3(\lambda)/S_2(\lambda)\} \tag{16}$$

$$\delta_2(\lambda, V_2)=\tan^{-1}\{S_3(\lambda)/S_1(\lambda)\} \tag{17}$$

と求めることができる．

Fig. 3 に，ストークス・パラメーターから算出した，それぞれの液晶可変位相子の複屈折位相差特性を示す．横軸は印加電圧，縦軸は複屈折位相差を示している．Fig. 3 より，液晶可変位相子の複屈折位相差が，印加電圧に対して連続的に変化することが確認できる．$LC1$，$LC2$ とも同様の特性を示した．閾値電圧は 1.8 V であり，複屈折位相差は 0 V の印加電圧において最大 650° を示し，10 V の印加電圧では 53° を示した．

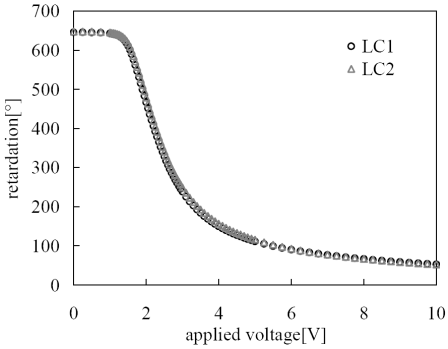


Fig. 3 Electro-optical characteristics of a nematic liquid crystal ($\lambda=590$ nm).

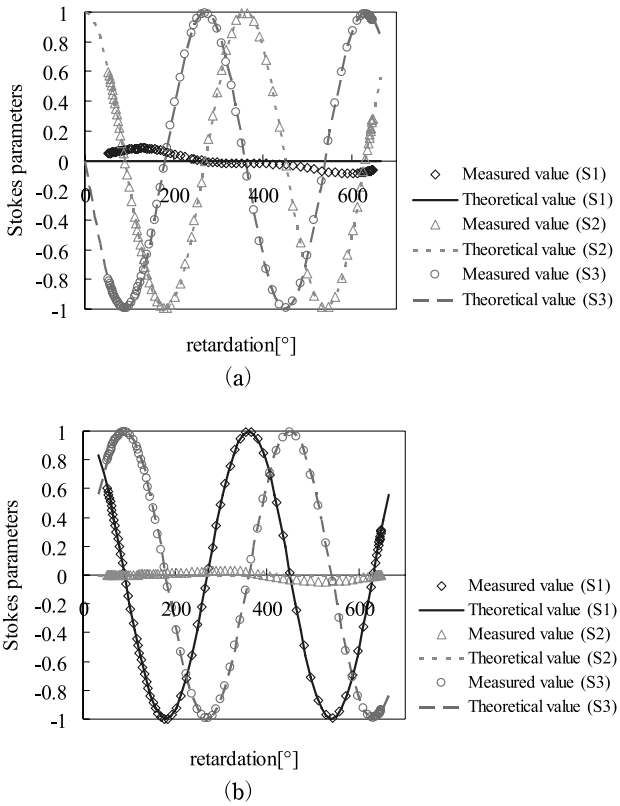


Fig. 4 Measured result of Stokes parameters after passed through the liquid crystal. (a) Measured result of $LC1$ ($\lambda=590$ nm), (b) measured result of $LC2$ ($\lambda=590$ nm).

Fig. 4 は，測定したストークス・パラメーター $S_1(\lambda)$，$S_2(\lambda)$，$S_3(\lambda)$ と複屈折位相差の関係を示している．縦軸が

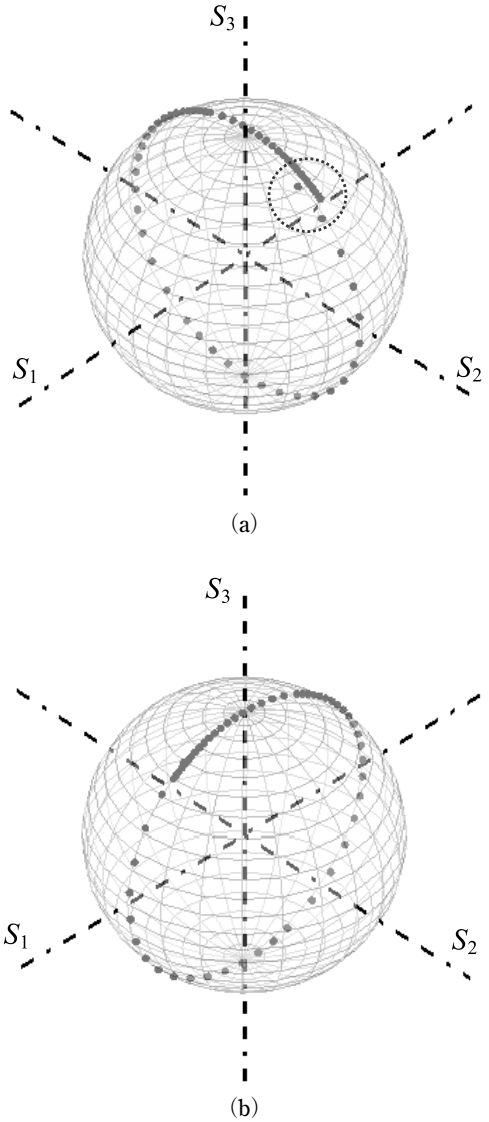


Fig. 5　Poincarè sphere representation of the polarized light through the liquid crystal retarder. (a) Representation of *LC*1 ($\lambda = 590$ nm), (b) representation of *LC*2 ($\lambda = 590$ nm).

ストークス・パラメーター，横軸が複屈折位相差であり，Fig. 4（a）は *LC*1 の測定結果を，Fig. 4（b）は *LC*2 の測定結果を示す．なお，得られたストークス・パラメーターは $S_0(\lambda)$ 成分で除することで規格化されている．実線，点線，破線はそれぞれ，シミュレーションによって求めたストークス・パラメーター $S_1(\lambda)$ 成分，$S_2(\lambda)$ 成分，$S_3(\lambda)$ 成分の理論曲線である．測定値が理論曲線に一致していることから，ネマチック液晶セルが可変位相子として動作することが確認できる．Fig. 4（a）において，ストークス・パラメーター $S_1(\lambda)$ 成分は理論値 0 に対して±0.08 以内の誤差を生じ，また Fig. 4（b）では，ストークス・パラメーター $S_2(\lambda)$ 成分は理論値 0 に対して±0.04 以内の誤差を生じた．ストークス偏光計の位相変調に使用する液晶可変位相子の複屈折位相差は，53° から 413° までの 360° 分である．そこで，この領域での液晶可変位相子の誤差について調べた．Fig. 5 に，複屈折位相差 53° から 413° において得られたそれぞれの液晶可変位相子のストークス・パラメーターを，ポアンカレ球で表示した結果を示す．Fig. 5（a）に *LC*1 の結果を，Fig. 5（b）に *LC*2 の結果を示している．Fig. 5 から，*LC*2 では測定点が連続的にポアンカレ球上を変化しているのに対し，*LC*1 では，ポアンカレ球を一周した時点で測定点の位置がずれていることがわかる．この点は複屈折位相差が 53° から 413° に切り替わる点であり，また同時に，液晶可変位相子に印加する電圧が大きく切り替わる点である．液晶可変位相子に印加する電圧を変化させることにより，偏光状態がポアンカレ球の経線方向に少しずつ移動していることから，電圧の印加に対して旋光が生じていると考えられる．旋光を生じる原因としては，液晶可変位相子を構成する上下のガラス基板の配向ラビングのずれによるツイストが挙げられる．ツイストを含んだ液晶セルのシミュレーションにおいても，同様の現象が生じることを確認している．偏光特性にずれが生じたこの点での測定値と理論値との差を求めた結果，*LC*1 では±0.04，*LC*2 では±0.005 程度であった．この液晶のツイストによる旋光は，ストークス偏光計の位相変調にも影響を与えると考えられる．

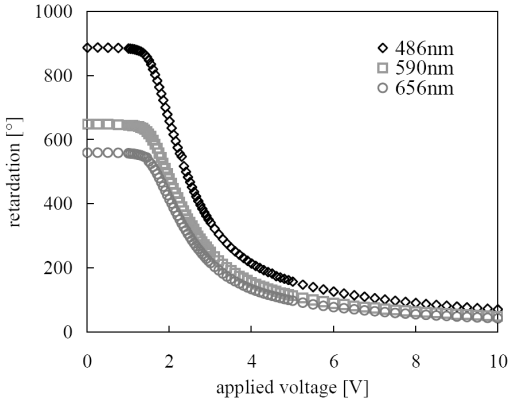


Fig. 6　Electro-optical characteristics of liquid crystal retarder at three types of wavelength.

Fig. 6 に，配向方向が 45° の液晶可変位相子を用いて，多波長で複屈折位相差特性を計測・比較した結果を示す．今回の評価には，波長 486 nm，590 nm，656 nm の 3 種類の干渉フィルターを用い，それぞれの波長における複屈折位相差特性を示した．いずれのフィルターも半値幅 12 nm である．Fig. 6 より，光源波長によって複屈折位相差特性が異なることが確認できる．今回の評価に使用した二重回転分光ストークス偏光計は，検出器に分光器を用いること

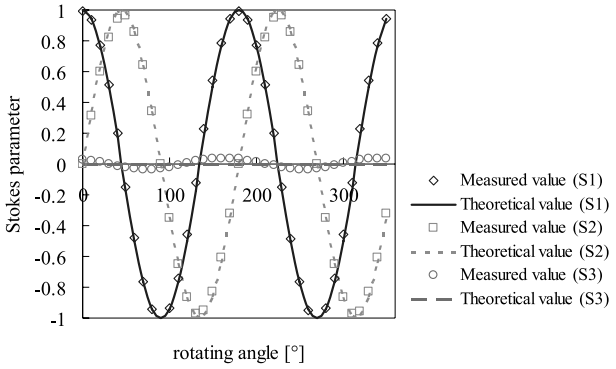


Fig. 7　Measured result of Stokes parameters of the rotated linearly polarized light（λ＝590 nm）.

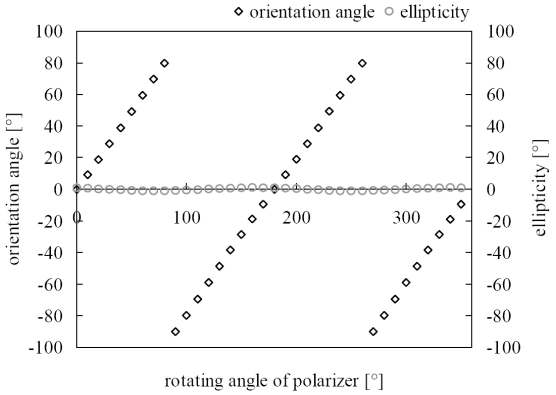


Fig. 8　Calculated result of orientation angle and ellipticity.

で，分光特性，すなわち各波長での複屈折位相差特性を容易に求めることができる．測定波長に応じた複屈折位相差特性をあらかじめ求めておくことで，幅広い測定波長に対応した計測が可能となる．

4.　液晶位相変調器を用いたストークス偏光計の精度検定

4. 1　偏光子の回転による評価

平行光を偏光子に入射させて直線偏光とした光を計測することにより，構築したストークス偏光計のストークス・パラメーター $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ 成分の測定精度を評価した．光源からの光は干渉フィルターを用いて 590 nm の単色光とした．偏光子にはグラントムソンプリズムを使用し，モーターに組み込んでストークス偏光計の前方に設置した．モーターにより，偏光子を 0° から 360° まで 10° ごとに回転させて出射偏光角度を変化させ，各回転角度におけるストークス・パラメーターを計測した．なお，偏光子の回転角度は，モーターにより 0.01° の精度で制御可能とした．液晶可変位相子の駆動周波数は 60 Hz とし，液晶位相変調器による変調点を 16 点としてストークス・パラメーターを計測した．また，液晶が安定するまでの時間を考慮し，光強度を取り込むまでの時間を 230 ms に設定した．このとき，1 回の計測時間は 8 秒であった．

Fig. 7 に，偏光子の回転角度に対するストークス・パラメーター $S_1(\lambda)$，$S_2(\lambda)$，$S_3(\lambda)$ の測定結果を示す．横軸は偏光子の回転角度，縦軸はストークス・パラメーターである．なお，ストークス・パラメーターの測定値は，S_0 成分で規格化されている．また，実線，点線，破線はそれぞれ，シミュレーションによって求めたストークス・パラメーター $S_1(\lambda)$ 成分，$S_2(\lambda)$ 成分，$S_3(\lambda)$ 成分の理論曲線である．得られた結果から，ストークス・パラメーター $S_1(\lambda)$，$S_2(\lambda)$ 成分は正弦的に変化し，ストークス・パラメーター $S_3(\lambda)$ 成分はほぼ 0 を示していることがわかる．ストークス・パラメーター $S_3(\lambda)$ 成分では，回転角度に対して±0.04 の周期的な誤差を生じた．これは，前項にて示した液晶可変位相子の旋光による影響であると考えられる．また，これは $LC1$ でみられたストークス・パラメーターの誤差の大きさ±0.04 に一致した．得られたストークス・パラメーターから，以下の式（18），（19）を用いて，楕円率角 $\chi(\lambda)$ および方位角 $\psi(\lambda)$ を算出した．

$$\chi(\lambda)=\sin^{-1}\{S_3(\lambda)/S_0(\lambda)\}/2 \quad -\pi/4\leq\chi\leq\pi/4 \qquad (18)$$

$$\psi(\lambda)=\tan^{-1}\{S_2(\lambda)/S_1(\lambda)\}/2 \quad 0\leq\psi\leq\pi \qquad (19)$$

Fig. 8 は，偏光子の回転角度に対する楕円率角 $\chi(\lambda)$ および方位角 $\psi(\lambda)$ を算出した結果である．Fig. 8 より，偏光子による出射偏光角度に対して，方位角 $\psi(\lambda)$ が線形性よく測定されていることがわかる．設定角度と算出した方位角 $\psi(\lambda)$ との偏差は±1.5° 以下を示した．また，楕円率角 $\chi(\lambda)$ は，理論値 0° に対して±1° 以内の偏差におさまる結果となった．各ストークス・パラメーターの繰り返しによる標準偏差は，30 回の測定で 0.0002 であった．

これまでの研究報告では，直線偏光を入射したときの測定精度は 0.5%以下，繰り返しによる標準偏差は 0.0016 が報告されている[10, 11]．また，市販されている Meadowlark Optics 社製ポラリメーター LCPM-3000 は，0.001 の分解能，測定精度は 1%であり，測定時間は 100 ms と非常に高速である[15]．これらと比較して，本手法では，繰り返し性についてはすぐれた性能を示した．しかし，絶対精度においては，液晶可変位相子の旋光による影響のため測定誤差が大きくなった．配向ラビングのずれの小さい液晶セルを選定することで，より精密な位相変調が可能となり，測定精度を向上させることができると考える．また，今回の液晶可変位相子の駆動には単純な矩形波を使用したため，計測時間が 8 秒にとどまったが，オーバードライブ等の駆動方法を検討することによって，計測時間をさらに短縮でき

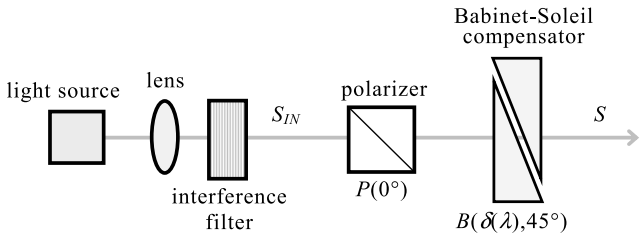


Fig. 9 Optical setup for retardation characteristics evaluation using a Babinet-Soleil compensator.

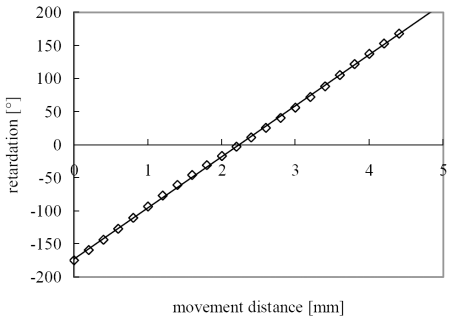


Fig. 10 Calculated result of retardation of Babinet-Soleil compensator.

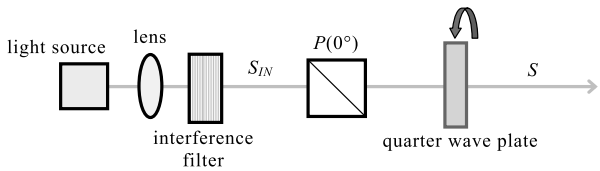


Fig. 11 Optical setup for evaluation using a quarter wave plate.

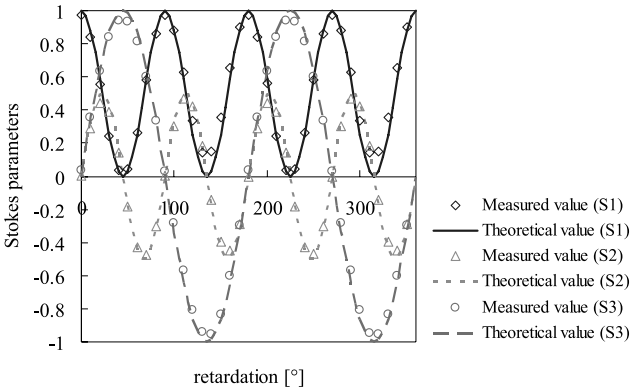


Fig. 12 Measured result of Stokes parameters after the rotating quarter wave plate.

ると考えられる．

4. 2 バビネソレイユ補償器を用いた複屈折位相差の計測

続いて，バビネソレイユ補償器を用いて複屈折位相差を評価した．Fig. 9 に示すように，偏光子とバビネソレイユ補償器をそれぞれ，主軸方位 0°，45° としてストークス偏光計の前方に設置した．レンズによって平行光とし，590 nm の干渉フィルターを通した光をバビネソレイユ補償器に入射し，ストークス偏光計にてストークス・パラメーターを測定した．バビネソレイユ補償器の複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ は，マイクロメーターを 0.2 mm ごとに移動させることにより変化させた．バビネソレイユ補償器透過後のストークスベクトルを $S=[S_0(\lambda), S_1(\lambda), S_2(\lambda), S_3(\lambda)]^{\mathrm{T}}$ とすると，ミュラー行列とストークスベクトルの関係は，

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

$$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}=\frac{1}{2}I_0\begin{bmatrix} 1 \\ \cos\delta(\lambda,V) \\ 0 \\ \sin\delta(\lambda,V) \end{bmatrix} \quad (20)$$

と表される．

式（20）より，複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ は，

$$\delta(\lambda)=\tan^{-1}\{S_3(\lambda)/S_1(\lambda)\} \quad (21)$$

と求めることができる．

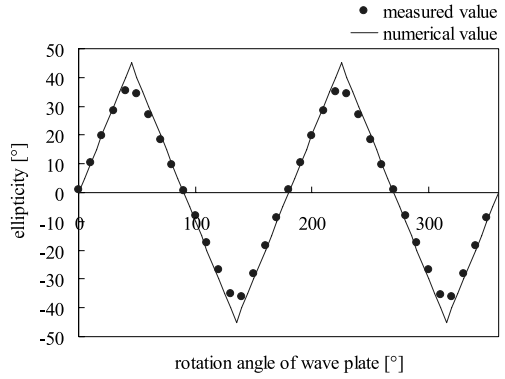
測定したストークス・パラメーターから，バビネソレイユ補償器の複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ を算出した結果を Fig. 10 に示す．横軸はバビネソレイユ補償器の移動量，縦軸は複屈折位相差を示している．実線は，求めた複屈折位相差から算出した近似直線である．Fig. 10 の結果から，バビネソレイユ補償器の移動量に応じて複屈折位相差 $\delta(\lambda)$ が線形的に増加することが確認できる．近似直線との偏差は，最大 ±3.5° を示した．バビネソレイユ補償器を用いた評価により，複屈折位相差の測定が可能であることを確認した．

5. 四分の一波長板の評価

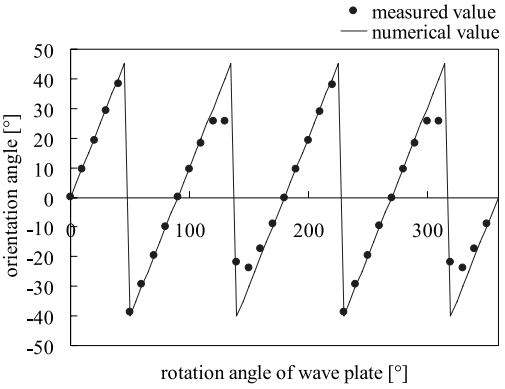
5. 1 四分の一波長板の主軸方位回転による評価

測定試料として四分の一波長板を使用し，四分の一波長板を回転させたときの，透過後の偏光特性をストークス偏光計により評価した．Fig. 11 に示すように，偏光子を主軸方位 0° として設置し，その後方に，モーターに組み込んだ四分の一波長板を設置した．これまでの評価と同様に，光源からの光をレンズによって平行光とし，干渉フィルターにより波長 590 nm の単色光として偏光子および四分の一波長板を透過させた．なお，四分の一波長板には設定波長 590 nm の水晶波長板を使用した．

Fig. 12 は，四分の一波長板を 0° から 360° まで 10° ごとに回転させたときの，各回転角度に対するストークス・パラメーター $S_1(\lambda)$，$S_2(\lambda)$，$S_3(\lambda)$ の測定結果である．な



(a)



(b)

Fig. 13 Evaluation result of orientation angle and ellipticity using a quarter wave plate. (a) Calculated result of ellipticity, (b) calculated result of orientation angle.

お，ストークス・パラメーターの測定値は，S_0成分で規格化されている．実線，点線，破線はそれぞれ，シミュレーションによって求めたストークス・パラメーター $S_1(\lambda)$ 成分，$S_2(\lambda)$ 成分，$S_3(\lambda)$ 成分の理論曲線である．Fig. 12 より，得られたストークス・パラメーターが，理論曲線にほぼ一致した結果を示していることがわかる．また，計測したストークス・パラメーターから，各回転角度における楕円率角 $\chi(\lambda)$ と方位角 $\psi(\lambda)$ を式（18）および（19）を用いて算出した．Fig. 13（a）は四分の一波長板の回転角度に対して楕円率角 $\chi(\lambda)$ を示した結果であり，また Fig. 13（b）は，四分の一波長板の回転角度に対して方位角 $\psi(\lambda)$ を示した結果である．実線は理論曲線である．四分の一波長板の回転角度に応じて，楕円率角 $\chi(\lambda)$ と方位角 $\psi(\lambda)$ が理論曲線に一致して変化することが確認でき，本手法により偏光特性の計測が可能であることを実証した．Fig. 13（a）より，楕円率角が，±45° 付近で理論値からはずれていることがわかる．また，方位角においても，±45° 付近で理論値からはずれる傾向を示すことが Fig. 13（b）から読み取れる．偏光状態が円偏光に近い場合に測定誤差が大きくなる傾向を示した．

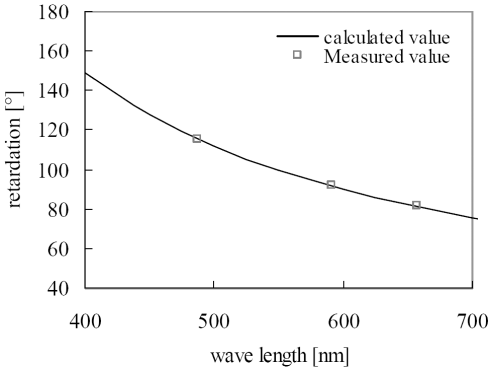


Fig. 14 Retardation dispersion characteristics using a quarter wave plate.

5. 2 波長分散特性の評価

本手法による波長分散特性の測定評価を行うために，486 nm，590 nm，656 nm の 3 種類の干渉フィルターを用いて，波長を変えたときのストークス・パラメーターの測定を行った．評価には四分の一波長板を使用し，Fig. 11 と同様に偏光子と四分の一波長板を配置して，主軸方位をそれぞれ 0°，45° に設定した．それぞれの波長において，四分の一波長板を透過後のストークス・パラメーターを測定し，得られたストークス・パラメーターから四分の一波長板の複屈折位相差を算出した．四分の一波長板の複屈折位相差は，4 章 2 節の式（20），（21）と同様の計算にて求めている．得られた結果を Fig. 14 に示す．縦軸は複屈折位相差，横軸は波長を示している．また，実線は，波長板の厚さを 1.65 μm に設定した場合の理論曲線である．Fig. 14 より，各波長での測定値が理論曲線によく一致していることがわかる．したがって，本手法により，波長分散特性の計測が可能であることについても確認できた．

6. ま と め

可変位相子として動作するネマチック液晶セルの駆動電圧は，10 V 以下と低電圧であり，また駆動には交流電圧を使用するため，電力をほとんど必要としない．この液晶可変位相子を変調器に応用することにより，機械駆動のない計測装置を構築することができる．また，変調器を小型化することができ，計測装置全体の小型化につながる．本報告では，配向方向が 0° と 45° の 2 種の液晶可変位相子によって液晶位相変調器を構成し，それぞれの液晶可変位相子の複屈折位相差を 3 : 1 の関係で駆動させた位相変調にて得られる光強度をフーリエ解析することで，入射光のストークス・パラメーターを求める計測アルゴリズムを提案した．本手法では，測定波長に応じた位相変調を行うこと

によって，装置構成後の波長板等による波長キャリブレーションを必要とせずに多波長での計測を行うことができる．また，ネマチック液晶セルを0° と45° の配向ラビングで製作することによって，主軸方位を調整する工程を不要とした．構築したストークス偏光計の精度評価には，偏光子，バビネソレイユ補償器を使用し，本計測手法によって入射光のストークス・パラメーターの計測が可能であることを実証した．また，波長486 nm，590 nm, 656 nmにおける四分の一波長板の複屈折位相差を測定し，複屈折分散特性の計測が可能であることについても確認した．繰り返しによる標準偏差は0.0002，計測時間は8秒であった．グラントムソンプリズムの回転による評価では±0.04の周期的な誤差を生じたが，これは，可変位相子として使用したネマチック液晶セルの配向ラビングのずれにより旋光が生じたためだと考えられる．測定精度を向上させるために，配向ラビング誤差の小さい液晶セルを選定し，さらに誤差の補正方法について検討していくことが今後の課題である．

文　　献

1）R. M. A. Azzam and N. Mbashara: *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. Aspens: “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. Aspens 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）安里直樹, 若山俊隆, 大谷幸利, 梅田倫弘：“二重回転型ストークス偏光計と円偏光フィルム評価への応用”第67回応用物理学会学術講演会講演予稿集（2006）p. 914.
7）折原　宏：液晶の物理（内田老鶴圃，2004）pp. 127–135.
8）J. M. Bueno: “Polarimetry using liquid-crystal variable retarders: Theory and calibration,” J. Opt. A, Pure Appl. Opt., **2**（2000）216–222.
9）S. Drobczyński and P. Kurzynowski: “Imaging polarimeter for linear birefringence measurements using a liquid crystal modulator,” Opt. Eng., **47**（2008）023603.
10）A. De Martino, Y.-K. Kim, E. Garcia-Caurel, B. Laude and B. Drevillon: “Optimized Mueller polarimeter with liquid crystals,” Opt. Lett., **28**（2003）616–618.
11）E. Garcia-Caurel, A. De Martino and B. Drévillon: “Spectroscopic Mueller polarimeter based on liquid crystal devices,” Thin Solid Films, **455/456**（2004）120–123.
12）B. Laude-Boulesteix, A. De Martino, B. Drevillon and L. Schwartz: “Mueller polarimetric imaging system with liquid crystals,” Appl. Opt., **43**（2004）2824–2832.
13）N. J. Pust and J. A. Shaw: “Dual field imaging polarimeter using liquid crystal variable retarders,” Appl. Opt., **45**（2004）5470–5478.
14）F. Goudail, P. Terrier, Y. Takakura, L. Bigue, F. Galland and V. Devlaminck: “Target detection with a liquid-crystal-based passive Stokes polarimeter,” Appl. Opt., **43**（2004）274–282.
15）T. F. Drouillard II, P. A. Searcy, S. R. Davis, R. J. Uberna, R. A. Herke, M. H. Anderson, S. D. Rommel, E. B. Anthony and V. B. Damiao: “Polarimetry using liquid crystal variable retarders,” Proc. SPIE, **5363**（2004）86–97.