

液晶偏光変調器を用いた旋光計測装置の開発

田中政之介^{*,**}・中島 吉則^{*}・雨宮 秀行^{*}・若山 俊隆^{***}・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

^{***}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

^{****}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

Optical Rotation Measurement System Using Double Liquid Crystal Modulator

Masanosuke TANAKA^{***}, Yoshinori NAKASHIMA^{*}, Hideyuki AMAMIYA^{*}, Toshitaka WAKAYAMA^{***}
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

^{***}Faculty of Health and Medical Care School of Biomedical Engineering, Saitama Medical University,
1397-1 Yamane, Hidaka 350-1241

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

A measurement of the optical rotation is the means to evaluate the optical characteristics of the saccharide and amino acid for a long time. Some principles of optical rotation measurement techniques are proposed by a rotating polarizer method, a Faraday cell method and an optical heterodyne method. However, these measurement methods have a disadvantage of a large sized caused by these operational parts, and these systems are complicate. The purpose of this research is to develop the azimuthal polarimeter that consists of liquid crystal polarized modulator. A nematic liquid crystal behaves as a variable retarder by controlling the applied voltage. The liquid crystal polarized modulator made of two types of nematic liquid crystal is powerful tool with some superior characteristics, miniature, high speed drive, and low consumption electricity. Three quartz control plates and saccharose were used as samples for the evaluation of the proposal method, and the result correspond with theoretical values.

Key words: optical rotation, liquid crystal modulator, optical activity, azimuthal polarimeter, optical rotation dispersion

1. はじめに

光学活性物質に直線偏光が入射すると、偏光面が回転する。この現象を旋光という。旋光計測は光学活性物質による偏光面の回転度合いを計測するものであり、光学活性物質を取り扱う製薬・医薬業界、香料・調味料などの食品業界、また製糖工業会といった幅広い分野において、光学異性体の光学純度の決定や、立体化学的研究における絶対配置の決定に利用されている^{1,2)}。古くは、糖類やアミノ酸などの濃度計測に利用され、食品化学の分野では清涼飲料水や果実類の糖濃度計測、日本酒などの醸造過程におけるグルコース濃度管理に使用されてきた。医療分野では、医

薬品の純度検定や麻薬検出などに用いられており、また現在では、蛋白質などに代表されるアミノ酸の分子構造を知る方法としても非常に有効となっている。さらに、大学や分析センターなどの研究機関では、新規光学活性物質の物性値のひとつとして旋光度が計測されている。一般的に利用されている旋光計測の手法には、回転偏光子法や回転検光子法³⁾がある。これらの手法では、光学活性物質によって生じた旋光度を、偏光子または検光子のいずれかを回転させることで得られる消光位置から求めている。しかし、これら回転偏光子・検光子法では、光学素子を回転させるためのモーター等の駆動部が必要となる。一方、ファ

ラデーセルに電流を流すと偏光面が回転する効果を利用した手法に、ファラデーセル法^{4,5)}がある。ファラデーセル法は、入射偏光を電気的に変調することによって光学活性物質の旋光度を補償するので、機械駆動部を必要とせず、また自動的に透過光強度の最小値を検出する方法であるため、非常に高分解能な計測を可能としている。しかし、電气的に偏光面を回転させるときに高電圧・電流が必要となり、取り扱いに注意が必要となっている。また、セルによる温度上昇なども問題となる。光の干渉を利用した光ヘテロダイン法⁶⁾による旋光計も提案されており、散乱物質を含む試料の旋光度を正確に計測することを可能にしている。しかし、光源周波数変調用に音響光学素子が必要となるため装置が複雑化・大型化し、高価となるなどの欠点がある。したがって、実用的な旋光計としては、小型で、駆動部がなく構成が単純、また低消費電力なものが望まれている。そこで本研究では、小型で高速駆動、低消費電力駆動である液晶可変位相子に着目し、2種類の液晶可変位相子で構成された液晶偏光変調器を用いた旋光計を提案している^{7,8)}。本手法では、液晶偏光変調器により入射光を偏光変調させ、得られた光強度をフーリエ解析することによって旋光度を解析する。ネマチック液晶セルは、液晶分子の構造から、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、電圧を印加することによりセルに対して垂直な電場を形成することで、液晶分子が向きを変え、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⁹⁾。配向方向が45°と0°の2種類の液晶可変位相子を組み合わせることで、印加する電圧に応じてさまざまな偏光状態を得ることができ、電圧制御による偏光変調が可能となる。液晶可変位相子の駆動はきわめて低電流で、また印加電圧も10V以下であるため、低消費電力である。本手法では、可動部を必要としないため、小型・軽量、静音、さらに磨耗などの故障原因を軽減できる旋光計の構築が期待できる。本報告では、液晶偏光変調器を用いた旋光計測装置の原理、およびシステムについて述べ、

構築したシステムの計測性能を評価した結果を示す。

2. 液晶偏光変調器を用いた旋光計測法

ネマチック液晶セルは、電圧を印加することによって、可変位相子として動作する。本計測手法では、2種類の液晶可変位相子で構成された液晶偏光変調器を用いて、光源からの光を偏光変調し、得られた光強度をフーリエ解析する。液晶偏光変調器を含んだ計測システムの概略図をFig. 1に示した。光源には、ハロゲンランプを使用している。光源からの光は、光ファイバーを介して直径200 μm の点光源とし、コリメートレンズによって平行光とする。干渉フィルターによって単色光とした光は、主軸方位0°の偏光子 $P(0^\circ)$ を通して直線偏光となり、配向方向が45°、0°の2種類の液晶可変位相子 $LC1$ 、 $LC2$ と恒温ブロックで構成された液晶偏光変調器にて偏光変調される。2種類の液晶可変位相子は、DA変換器からの矩形波の交流電圧によって駆動する。液晶可変位相子に交流電圧を使用するのは、直流電圧を長時間印加すると、液晶セル内部の不純物が片側に分極し焼きつけを起こすためである。今回の評価では、液晶可変位相子の駆動周波数を200Hzとした。偏光変調された光は、測定試料である光学活性物質 $T(\phi)$ 、主軸方位90°の検光子 $A(90^\circ)$ を通して、その光強度が受光器によって検出される。液晶可変位相子の駆動電圧および検出された光強度は、PC上で制御・解析される。液晶可変位相子には、波長589.3nm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)を使用した。評価に使用した液晶の物性値をTable 1に示

Table 1 Specification of the nematic liquid crystal.

MDA-00-4116	
Δn	0.2008
n_e	1.7000
n_o	1.4993
Viscosity	22
$\Delta\epsilon$	6.8
Maker	Merck

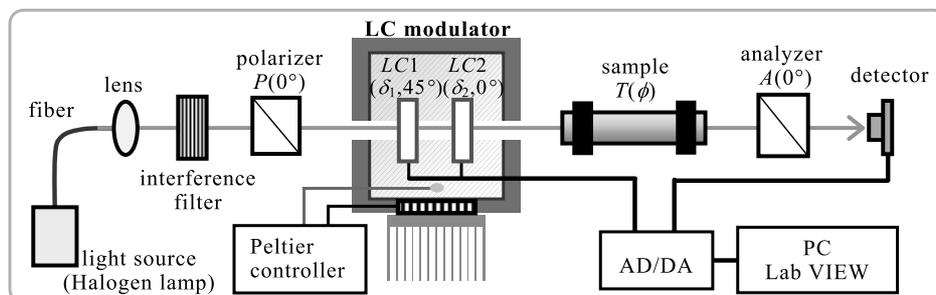


Fig. 1 Optical setup of the optical rotation measurement system using the liquid crystal modulator.

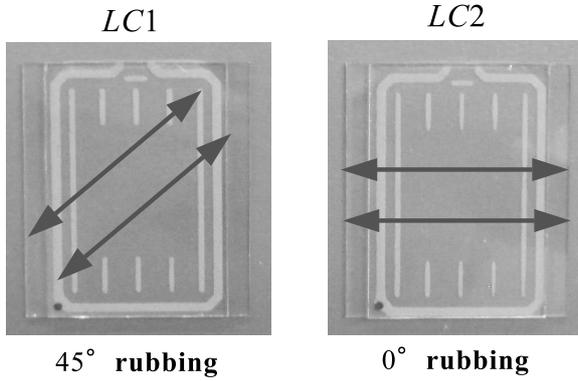


Fig. 2 Photographs of the nematic liquid crystals.

した。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。使用した液晶セルの写真を Fig. 2 に示した。液晶セルの両脇に電極面を形成している。また、光が透過する液晶セル中央の電極パターンは、1 cm 四方のシングルパターンである。液晶可変位相子の複屈折位相差は外部温度の影響を受けるため、熱容量 21 W の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、液晶偏光変調器内部の温度を 30±0.05°C で制御している。偏光子には、消光比 10000 : 1 のガラスフィルターを、また受光器には、Si フォトダイオードを使用した。

入射光のストークスベクトルを $S_{IN}=[1, 0, 0, 0]^T$ 、出射光のストークスベクトルを $S_{OUT}=[S_0, S_1, S_2, S_3]^T$ とした場合の、ストークスベクトルとミューラー行列の関係は、

$$S_{OUT}=A(90^\circ)\cdot T(\phi(\lambda))\cdot LC2(\delta_2(\lambda, V_2), 0^\circ)\cdot LC1(\delta_1(\lambda, V_1), 45^\circ)\cdot P(0^\circ)\cdot S_{IN}$$

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

$$\cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_1(\lambda, V_1) & 0 & -\sin \delta_1(\lambda, V_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \delta_1(\lambda, V_1) & 0 & \cos \delta_1(\lambda, V_1) \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

と表される。ここで、 I_0 は入射光強度を示す。λ は波長、 $\phi(\lambda)$ は測定試料の任意波長における旋光度を示す。 V_1 および V_2 はそれぞれの液晶可変位相子 LC1, LC2 への印加電圧であり、また $\delta_1(\lambda, V_1)$, $\delta_2(\lambda, V_2)$ 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している。

式 (1) の行列式から、受光器によって検出される光強度は、

$$I(\delta_1(\lambda, V_1), \delta_2(\lambda, V_2), \phi(\lambda)) = I_0/4 \times \{1 - \cos \delta_1(\lambda, V_1) \cdot \cos 2\phi + \sin \delta_1(\lambda, V_1) \cdot \sin \delta_2(\lambda, V_2) \cdot \sin 2\phi(\lambda)\} \quad (2)$$

と表される。

液晶可変位相子 LC1, LC2 それぞれの複屈折位相差を 1 : 3 の関係とすると、受光器にて検出される光強度は、

$$I(\delta(\lambda, V), \phi(\lambda)) = I_0/4 \times \{1 - \cos \delta(\lambda, V) \cdot \cos 2\phi(\lambda) + \cos 2\delta(\lambda, V) \cdot \sin 2\phi(\lambda) / 2 - \cos 4\delta(\lambda, V) \cdot \sin 2\phi(\lambda) / 2\} \quad (3)$$

となる。

式 (3) をフーリエ解析したときの、光強度のフーリエ

級数はそれぞれ、

$$a_1 = -\cos 2\phi(\lambda) \quad (4)$$

$$a_2 = \sin 2\phi(\lambda) / 2 \quad (5)$$

$$a_4 = -\sin 2\phi(\lambda) / 2 \quad (6)$$

と表される。

したがって、旋光度 $\phi(\lambda)$ は、得られたフーリエ級数を用いて、

$$\phi(\lambda) = \tan^{-1}[(a_4 - a_2) / a_1] / 2 \quad (7)$$

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、任意波長における旋光度を測定することができる。

3. 液晶偏光変調器

3.1 液晶可変位相子の複屈折位相差特性

液晶偏光変調器を構成する 2 種類の液晶可変位相子の、印加電圧に対する複屈折位相差の関係は、液晶偏光変調器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って求めることができる。ストークスパラメーター

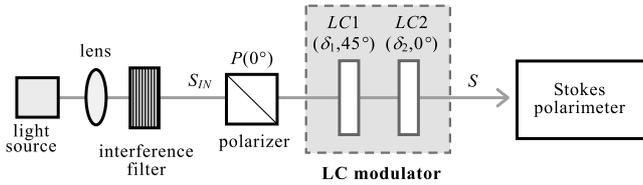


Fig. 3 Optical setup for the retardation measurement.

の計測には、位相子と偏光子を1:3の回転比率で回転させる二重回転ストークスポラリメータを用いた^{10,11)}。Fig. 3に、測定のための光学系を示した。この光学系のミューラー行列式は、

$$S_{OUT} = LC2(\delta_2(\lambda, V_2), 0^\circ) \cdot LC1(\delta_1(\lambda, V_1), 45^\circ) \cdot P(0^\circ) \cdot S_{IN}$$

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta_2(\lambda, V_2) & \sin \delta_2(\lambda, V_2) \\ 0 & 0 & \sin \delta_2(\lambda, V_2) & -\cos \delta_2(\lambda, V_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_1(\lambda, V_1) & 0 & -\sin \delta_1(\lambda, V_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \delta_1(\lambda, V_1) & 0 & \cos \delta_1(\lambda, V_1) \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{I_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ \cos \delta_1(\lambda, V_1) \\ \sin \delta_1(\lambda, V_1) \cdot \sin \delta_2(\lambda, V_2) \\ \sin \delta_1(\lambda, V_1) \cdot \cos \delta_2(\lambda, V_2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

と表すことができる。

得られたストークスパラメータを用いて、それぞれの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、

$$\delta_1(\lambda, V_1) = \tan^{-1}(\sqrt{S_2^2 + S_3^2} / S_1) \quad (9)$$

$$\delta_2(\lambda, V_2) = \tan^{-1}(S_2 / S_3) \quad (10)$$

と求めることができる。

この手法により、液晶偏光変調器を構成した状態で、2種類の液晶可変位相子の複屈折位相差特性を同時に求めることができる。Fig. 4には、配向方向が45°の液晶可変位相子の複屈折位相差特性を計測した結果を示した。横軸は液晶可変位相子への印加電圧 V_1 、縦軸は複屈折位相差 $\delta_1(\lambda, V_1)$ を示している。486 nm, 590 nm, 656 nm の3種類の干渉フィルターを用いて、それぞれの波長における複屈折位相差特性 $\delta_1(\lambda, V_1)$ を計測した結果である。液晶の応答速度の影響を考慮し、印加電圧を切り替えてから2秒経過後に複屈折位相差を測定した。このとき、LC2には一定の交流電圧を印加し、複屈折位相差 $\delta_2(\lambda, V_2)$ を一定に保つようにした。今回の測定では、LC2には5Vの交流電圧を

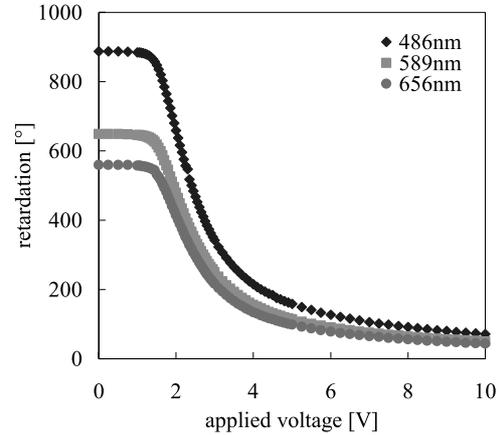


Fig. 4 Electro-optical characteristics of the liquid crystal retarder.

印加した。計測結果より、印加電圧によって、液晶可変位相子の複屈折位相差が連続的に変化することが確認できる。また、波長に依存して、複屈折位相差が異なることがわかる。閾値電圧は1.8Vであった。

3.2 液晶偏光変調器の動作

本計測手法では、2種類の液晶可変位相子の複屈折位相差を1:3の割合で変化させて偏光変調させている。偏光変調に使用する印加電圧は、あらかじめ測定した、それぞれの液晶可変位相子の複屈折位相差と印加電圧の関係から求めている。液晶偏光変調器による変調後の偏光状態を調べるために、変調後のストークスパラメータを測定した。測定にはFig. 3と同様の光学系を使用し、液晶可変位相子の複屈折位相差360°分を64分割して、それぞれの点でのストークスパラメータ S_1 , S_2 , S_3 を測定した。測定結果をFig. 5に示す。Fig. 5(a)にストークスパラメータ S_1 , (b)にストークスパラメータ S_2 , (c)にストークスパラメータ S_3 の結果をそれぞれ示した。また実線は、偏光変調による理論曲線を示している。測定結果から、それぞれのストークスパラメータにおいて測定値が理論曲線に一致した動作をしていることが確認でき、偏光変調が良好に行われていることがわかる。測定値と理論値との誤差は±0.15以内であった。Fig. 5(a)において、複屈折位相差11°付近、135°付近および253°付近で連続性が保たれていない様子が顕著にみられるが、この原因は、液晶可変位相子があつ作用の誤差だと考えられる。本手法では、液晶可変位相子の複屈折位相差360°分に相当する領域を使用している。この場合の駆動電圧はおよそ2.2V~10Vである。液晶可変位相子の複屈折位相差は10Vの駆動時に最小となり、最小値よりも小さい複屈折位相差を使用する場合には、360°進んだ2.2V付近からの駆動に切り替わる。この10Vから2.2Vへの電圧の切り替わりに

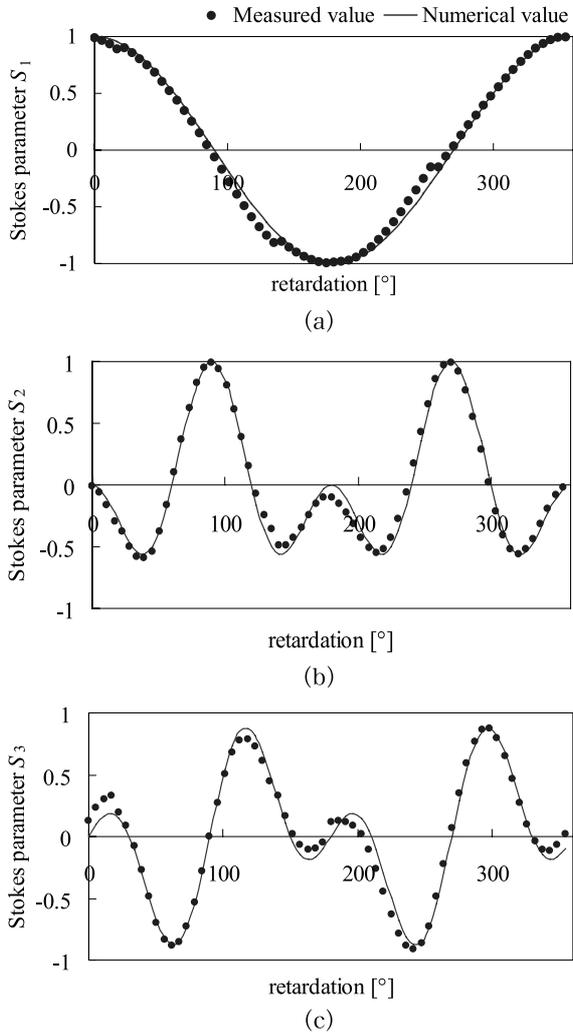


Fig. 5 Stokes parameters of the output light modulated by the liquid crystal modulator. (a) Stokes parameter S_1 , (b) Stokes parameter S_2 , (c) Stokes parameter S_3 .

において、多少の誤差が生じる。主軸方位 0° の偏光子、および配向方向 45° の液晶可変位相子に光を透過させ、液晶可変位相子に電圧を印加して駆動させていったときの出射光のストークスパラメーターを測定した結果を、ポアンカレ球表示として Fig. 6 に示した。ストークスパラメーター S_1 , S_2 , S_3 をそれぞれ x 軸, y 軸, z 軸として、測定点を球面状にプロットしている。Fig. 6 において、A 点と B 点は電圧が切り替わる点を示している。Fig. 6 から、A 点と B 点と同じ位置に重なっておらず、2 点で得られる偏光状態が多少異なっていることがわかる。液晶可変位相子に電圧を印加するにしたがって、偏光状態がポアンカレ球の経線方向に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。Fig. 5 でみられた液晶偏光変調器による変調特性の不連続性を生じないようにするために、旋光性を生じない液晶を選定することが望ましい。

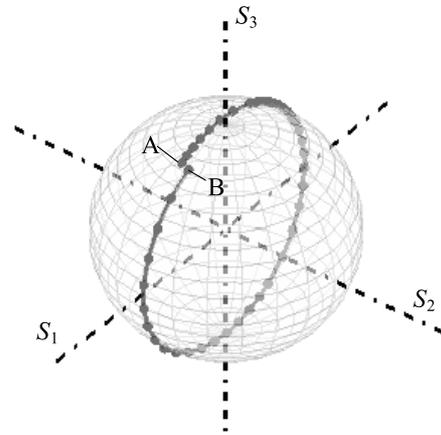


Fig. 6 Poincaré sphere representation of the polarized light through the liquid crystal retarder.

4. 液晶旋光計測装置の精度検定

4.1 標準水晶板を用いた旋光計の評価

光軸に対して垂直に切り出して作製された水晶板は、旋光計の校正用標準物質として使用されている¹²⁾。そこで、本計測装置の測定性能評価のために、厚さ 1.6 mm, 0.8 mm の 2 種類の右旋性の水晶板と、厚さ 0.9 mm の左旋性の水晶板と厚さ 0.5 mm の右旋性の水晶板の 2 枚を組み合わせたもの、合わせて 3 種類を用意した。右旋性の水晶は右回りの旋光度を、また左旋性の水晶は左回りの旋光度を示す。したがって、厚さ 1.6 mm, 0.8 mm の水晶板は右回りの旋光度を示す。また、厚さ 0.9 mm の右旋性の水晶板と厚さ 0.5 mm の左旋性の水晶板を組み合わせることで、右旋、左旋それぞれの旋光度の差分を得ることができる。厚さ 0.4 mm の右旋性の水晶板を用意するかわりに、これら 2 枚の水晶板を組み合わせることで、厚さ 0.4 mm 相当の右旋性水晶板とした。波長 589.44 nm, 20°C において、それぞれの水晶板の旋光度は 34.053° , 17.436° , 8.795° である。まず、 25°C 環境下で、波長 590 nm の干渉フィルターを用いてこれら 3 種類の水晶板を測定した。波長および温度の補正には、ICUMSA¹²⁾ にて規定されている以下の補正式を用い、計測値を波長 589.44 nm, 20°C における値に換算した。

$$[\alpha] = -0.1963657 + 7.262667/\lambda^2 + 0.1171867/\lambda^4 + 0.0019554/\lambda^6 \quad (11)$$

$$\alpha_{589.44}^t / \alpha_{589.44}^{20^\circ\text{C}} = 1.0 + 0.000144(t - 20) \quad (12)$$

式 (11) は、水晶板の比旋光分散を表す式である。 $[\alpha]$ は、波長 λ (μm) における水晶板の比旋光度 ($^\circ/\text{mm}$) を示す。また、式 (12) は温度補正を表す式である。 $\alpha_{589.44}^t$ は測定した旋光度を波長 589.44 nm に換算した値、 $\alpha_{589.44}^{20^\circ\text{C}}$ は 20°C , 波長 589.44 nm における旋光度、また t は測定温度を示している。まず、式 (11) により水晶板の測定波長で

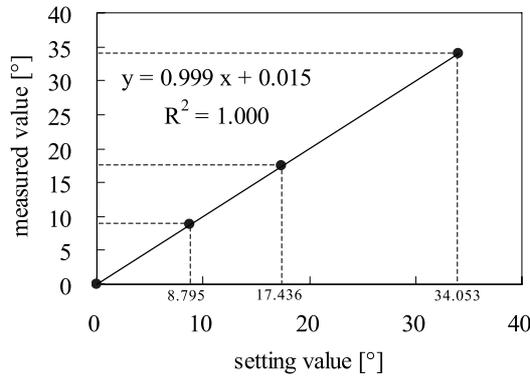


Fig. 7 Measured optical rotation of the standard quartz plates (589 nm).

の比旋光度を求めることができる。分光器にて干渉フィルターからの透過光の波長を測定したところ 590.5 nm を示したので、式 (11) より、水晶板の比旋光度は 21.642° となる。同様に、波長 589.44 nm での比旋光度 21.724° が得られる。これらの比率を用いて、測定値を波長 589.44 nm での旋光度に換算した。ひき続き式 (12) を用いて、 20°C のときの旋光度に換算した。

3 種類的水晶板の測定結果を Fig. 7 に示す。横軸は水晶板の旋光度設定値を、縦軸は測定値を温度 20°C 、波長 589.44 nm における旋光度に換算した値 $\alpha_{589.44}^{20^\circ\text{C}}$ を示している。設定値からの偏差は $\pm 0.04^\circ$ 以内におさまった。また実線は、測定値から仮定した近似直線、

$$y = 0.999x + 0.015 \quad (13)$$

である。Fig. 7 において、 R^2 は、エクセルの回帰分析から得られた決定係数（重相関係数の二乗）を表している。

この近似直線によって得られる値と比較し、測定値は偏差 $\pm 0.02^\circ$ 以内におさまり、良好な線形性が得られた。繰り返し測定における標準偏差は、30 点の計測点で 0.006° を得た。製薬・医薬業界や香料・調味料などの食品業界、また精糖業界における糖濃度管理に利用される旋光計は、主として計測精度が $\pm 0.01^\circ$ のものである。本手法により、既存の旋光計と同程度の計測精度を得ることができた。

続いて 486 nm、590 nm、656 nm の 3 種類の干渉フィルターを使用して、それぞれの水晶板の旋光度を測定し、旋光分散特性を評価した。Fig. 8 に、その測定結果を示した。横軸が波長、縦軸が旋光度である。また実線は、それぞれの水晶板の厚みを 1.6 mm、0.80 mm、0.40 mm に設定した場合の、波長分散の理論曲線を示している。測定結果より、測定値が理論曲線に一致していることがわかる。よって、旋光度波長分散特性についても、良好に計測できることを確認した。

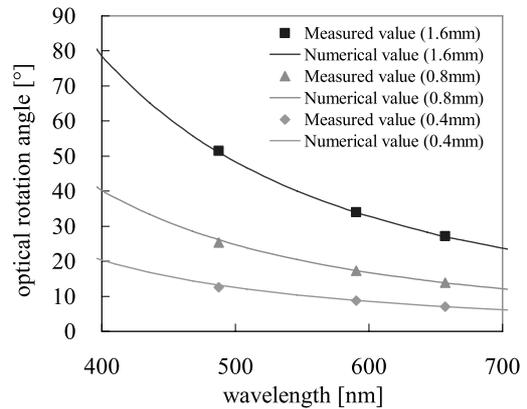


Fig. 8 Measurement results of the optical rotation dispersion characteristics.

Table 2 Each coefficients of conversion formula.

Coefficients		Coefficients	
α_1	156.35500	a	-0.075047659
α_2	61.649925	b	3.588221904585
α_3	18.206708	c	0.0519461783
α_4	7.1668107	d	-0.006515194377
α_5	-13.233339		
α_6	$-5.6889924 \times 10^{-2}$		
α_7	$-1.2237867 \times 10^{-1}$		
α_8	7.7938097×10^{-2}		

4.2 光学活性物質の旋光度測定

光学活性物質である蔗糖を用いて、濃度 2 g/100 ml、4 g/100 ml、6 g/100 ml、8 g/100 ml、10 g/100 ml の 5 種類の蔗糖水溶液を作製し、それぞれの旋光度を測定した。測定には 590 nm の干渉フィルターを使用し、 25°C の環境下で行った。また、蔗糖水溶液を入れる観測管には、長さ 100 mm のものを使用した。測定結果の波長および温度の補正は、ICUMSA¹²⁾にて規定されている以下の式を用い、計測値を波長 589.44 nm、 20°C における値に換算した。

$$\alpha_\lambda^t / \alpha_{546.2271}^t = 1 / (a + b \times \lambda^2 + c \times \lambda^4 + d \times \lambda^6) \quad (14)$$

$$\alpha_{546.2271}^t = \alpha_1 \times \omega + \alpha_2 \times \omega^2 + \alpha_3 \times \omega^3 + \alpha_4 \times \omega^4 + \alpha_5 \times \omega^5 + (\alpha_6 \times \omega + \alpha_7 \times \omega^2 + \alpha_8 \times \omega^3)(t - 20) \quad (15)$$

式 (14) は、蔗糖水溶液の旋光度分散比を表している。ここで、 λ は波長である。 α_λ^t は波長 λ 、温度 $t^\circ\text{C}$ における旋光度を表し、 $\alpha_{546.2271}^t$ は波長 546.2271 nm、温度 $t^\circ\text{C}$ における旋光度を表す。また、式 (15) は温度補正の式を表している。 ω は蔗糖 g / 溶液 g で表された質量分率を表し、 $a \sim d$ 、 $\alpha_1 \sim \alpha_8$ は各係数である。Table 2 に、それらの係数をまとめた。

まず、式 (14) によって、測定した波長での旋光度 α_λ^t を波長 546.2271 nm での旋光度 $\alpha_{546.2271}^t$ とする。続いて、式 (15) を用いて、波長 546.2271 nm での温度換算を行った。

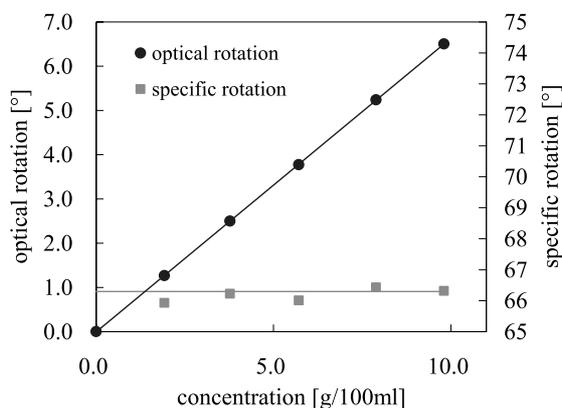


Fig. 9 Optical rotation of the saccharose.

波長 546.2271 nm での温度に対する旋光度の変化量は $-0.0029^{\circ}/^{\circ}\text{C}$ であり，測定温度 t から 20°C に換算した．最後に，式 (14) を用いて，波長 589.44 nm における旋光度に換算した．

また，比旋光度 $[\alpha_{\lambda}^t]$ は，測定した旋光度 α_{λ}^t と溶液の濃度 c (g/ml)，観測管の長さ l (mm) を用いて，

$$[\alpha_{\lambda}^t] = \alpha_{\lambda}^t / c \times l \quad (16)$$

より求められる．

波長 589.44 nm，温度 20°C での濃度と旋光度の測定結果を Fig. 9 に示した．横軸は水溶液濃度，縦軸は旋光度である．実線は，測定値から求めた近似直線である．測定結果より，水溶液濃度に対して線形的に旋光度が測定されていることがわかる．測定値から求めた近似直線と比較して，偏差が $\pm 0.02^{\circ}$ 以内におさまり，良好な線形性を示した．また，同図に，それぞれの測定点での比旋光度を算出した結果を記載した．実線は，蔗糖がもつ比旋光度 66.3° を表している．測定結果から算出した比旋光度もほぼ一定値を示し，平均値は 66.2° であり，理論値に一致した値を得た．

5. ま と め

本研究では，液晶偏光変調器を使用することにより，小型・軽量で低消費電力な旋光計の構築を行った．ネマチック液晶セルは液晶可変位相子として動作し，配向方向 45° ， 0° の 2 種類のネマチック液晶セルで構成した液晶偏光変調器により，さまざまな偏光状態が作成できる．本手法では，それぞれの液晶可変位相子の複屈折位相差を 1 : 3 の関係で駆動させて入射光を偏光変調させ，受光器にて

得られる光強度をフーリエ解析することで旋光度を求めている．液晶可変位相子には，波長 589.3 nm における屈折率差 Δn が 0.2，セルギャップ $5.5 \mu\text{m}$ のネマチック液晶セルを使用し，2.2 V ~ 10 V の間で駆動した．また，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，液晶偏光変調器の温度制御を行うことにより，外部温度による影響を抑制した．構築した計測装置の精度評価には，波長 589.44 nm， 20°C において旋光度 34.053° ， 17.436° ， 8.795° を示す 3 種類の標準水晶板を使用した．また，486 nm，590 nm，656 nm の 3 種類の干渉フィルターを用いて，旋光分散特性についても評価した．繰り返しによる標準偏差は 0.006° を示し，線形性は $\pm 0.02^{\circ}$ 以内におさまり，良好な結果を確認した．さらに，光学活性物質である蔗糖水溶液の旋光度，および比旋光度を求め，蔗糖水溶液の固有値に一致した値を得た．以上から，本手法によって，光学活性物質の旋光度が良好に測定できることを示すことができた．液晶偏光変調器を構成する液晶セルや各光学素子を小型化することで，小型で構成が単純，また低消費電力な旋光計の実現が期待できる．

文 献

- 1) 浅見真年：光学異性体 (現代化学, 1993) pp. 46-52.
- 2) 日本化学会：光学異性体の分離 (学会出版センター, 1989) pp. 212-238.
- 3) 千葉貴子，津島秀樹，井上正清，雨宮秀行：“自動旋光計 (検糖計) の新技術”，精糖技術研究会誌, **53** (2005) 1-7.
- 4) 佐藤勝昭：光と磁気 (改訂版) (朝倉書店, 2001) pp. 90-93.
- 5) 横田正幸，米山誠秀，山口一郎，芳野俊彦：“鉛ガラスファイバーファラデー変調器を用いた旋光計”，光学, **34** (2005) 97-102.
- 6) T. Mitsui and K. Sakurai：“Microdegree azimuth polarimeter using optical heterodyne detection,” Jpn. J. Appl. Phys., **35** (1996) 4844-4847.
- 7) 若山俊隆，津嶋秀樹，中島吉則，大谷幸利，梅田倫弘：“液晶旋光計”，第 52 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (2005) p. 1137.
- 8) 有松大志，若山俊隆，大谷幸利，梅田倫弘：“液晶旋光計の開発 (第 2 報) —耐環境性の向上—”，第 67 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集 (2006) p. 913.
- 9) 折原 宏：液晶の物理 (内田老鶴圃, 2004) pp. 127-135.
- 10) 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.
- 11) 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 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集 (2006) p. 914.
- 12) 精糖工業会輪講会監修：ICUMSA 砂糖関連分析法, SPS-1 (ICUMSA 日本部会, 2006) pp. 1-7.