

# マイケルソン干渉計を用いた液体の屈折率簡易測定

諏訪 友紀<sup>脚注1</sup>

宇藤 茂憲

福岡教育大学 教育学部

## Simple measurement of aqueous solution refractive index using Michelson interferometer

Yuhki SUWA

Shigenori UTOH

Department of Physics, University of Teacher Education Fukuoka

キーワード：マイケルソン干渉計，液体の屈折率，楔型液体セル，YAGレーザー，フォトダイオード，A/Dコンバーター，VBAプログラム，シヨ糖溶液の屈折率

### 概要

マイケルソン干渉計による干渉実験は干渉縞を比較的容易に観察することが可能で、 $10^{-6}$  m オーダの光路差を変化させながら干渉縞の明暗反転現象がダイナミックに測定できるので、実験を通して干渉の物理的イメージを得やすい光学実験である。<sup>1)</sup> また、物理史におけるこの実験の果たした歴史的役割を考えると、物理的興味<sup>2)</sup> が更に深まる実験でもある。このため、マイケルソン干渉計は大学での物理学実験において、具体的には、光源として使用するレーザー光の波長<sup>1,3)</sup> をもとめたり、また気体の屈折率<sup>3)</sup> やその圧力依存性<sup>4)</sup> をもとめるなど、波動光学実験の基礎として実施されている。気体と比べて屈折率の大きな液体の屈折率をマイケルソン干渉計を用いて測定するため、液体用セルを製作し、パーソナルコンピュータ（以下、パソコン）によるデータ収集および干渉縞の明暗反転回数をカウントする測定システムを製作して、学生実験としての液体の屈折率の簡易測定を試みたので報告する。<sup>補足1</sup>

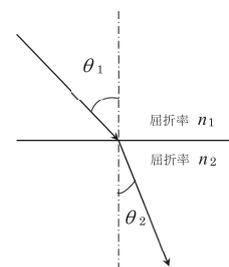
### 1. はじめに

屈折率の一般的な測定法は、(i)幾何光学的方法<sup>脚注2</sup>と(ii)波動光学的方法<sup>脚注3</sup>とに大まかに区分することができる。<sup>5)</sup> 後者は更に、(ii-1)フィクスト・パス法と(ii-2)バリエブル・パス法の2つに分類でき、例えば学生実験では、(ii-1)は一定の長さの経路を真空にしたときの光路長と気体で満たしたときの光路長の光路差を測定しておこなう方法であり、マイケルソン干渉計を用いた気体の屈折率測定はこれに属する（「2-1. マイケルソン干渉の原理」の項を参照）。(ii-2)はマイクロメータを用いて光路の長さを変化させ、この変化を光路差として測定するもので、マイケルソン干渉計の光源に用いるレーザー光の波長測定などはこの方法に相当する。<sup>3)</sup> 一般的に、液体は気体に比べて屈折率が大きく、例えば、光源波長が約 540 nm で、20°C の水の屈折

脚注1：現在、広島市立五日市南小学校 常勤講師

脚注2：最小偏角法や臨界角法（例、アッペ屈折計）がこれに対応するもので、その原理はスネルの法則  $n_{12} = n_2/n_1 = \sin\theta_1/\sin\theta_2$  に基づく。<sup>5)</sup> 但し、 $n_{12}$ ：屈折率、 $\theta_1$ ：入射角、 $\theta_2$ ：屈折角（右図参照）である。

脚注3：原理は屈折率の定義  $n_{12} = (c/n_1)/(c/n_2) = c/v$  に基づく。<sup>5)</sup> 但し、例えば、 $c$ ：真空中（屈折率  $n_1 = 1.0000$ ）の光の速度、 $v$ ：物質中（屈折率  $n_2$ ）の光の速度である。



率は  $n_{\text{water}}=1.3345$ ,  $15^{\circ}\text{C}$  の空気は  $n_{\text{air}}=1.00027$  であり,<sup>6)</sup>  $(n_{\text{water}}-n_{\text{vac}})/(n_{\text{air}}-n_{\text{vac}})\cong 10^3$  となる。ここで,  $n_{\text{vac}}$  は真空の屈折率 (=1.000)。このため, マイケルソン干渉計を用いて液体の屈折率の測定を試みる場合, マイクロメータで光路差を変化させる(ii-2)のバリエブル・パス法を適用できるように液体用セルの設計に工夫をおこなえば, 測定は比較的容易になると考えられる。市販のマイケルソン干渉計を用いて, その基本セットのパーツの構成を変更し, 液体用セルとフォトダイオード・A/D コンバータ・パソコンで液体の屈折率測定システム(込, 明暗反転カウンター)を製作して測定精度を評価した。実験の具体例として, ショ糖溶液の屈折率簡易測定をおこなって実験値の正確さ等を検討した。

## 2. マイケルソン干渉の原理と液体の屈折率測定の実験条件

### 2-1. マイケルソン干渉の原理

写真1に示すように, マイケルソン干渉計の基本構成は, (α)入射光を透過光と反射光に強度比1:1で分離するハーフミラー, (β)マイクロメータで最小単位0.1 μmで位置制御可能な微動ミラー, および(γ)光軸調整付固定ミラーである。但し, マイケルソン干渉計として市販品の島津理化製(株)MJ-15を用いた。

レーザー光束を凸レンズ(焦点距離  $f=25\text{ mm}$ )で集光させた後, 円錐状にレーザー束を広げて, 写真1の「 $\rightarrow$ 」の方向からハーフミラーへ照射して, 「 $\rightarrow$ 」で示す2本の経路IとIIに光束を分離する。微動ミラー(β)で反射する経路Iと固定ミラー(γ)で反射する経路IIの各光束は, 再度ハーフミラーを透過または反射し, 「 $\rightarrow$ 」方向に進行してスクリーン上に至る。標準的なマイケルソン干渉計の光路の概念図を図1に示している。マイケルソン干渉計の特徴である明暗反転現象は次のように概説できる。図1に各経路での光束の最外部を(a)と(b), および(c)と(d)で示しているが, 光軸合わせが適切になされていれば, 例えば, (a)と(b)[或いは, (c)と(d)]のスクリーン上での輝点は同心円上に位置(写真2)し, レーザからスクリーンに至る光路長およびスクリーン上の位相は同じである。故に, (a)と(d)[或いは, (b)と(c)]のスクリーン上での位相差

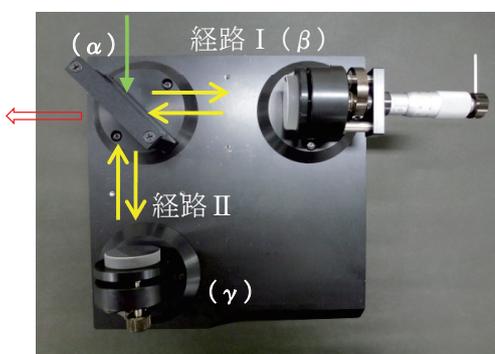


写真1 標準的な測定(例, 光源レーザーの波長測定)におけるマイケルソン干渉計の光学系。写真1を90°左回転させると図1と一致する。(α)ハーフミラー, (β)微動ミラー, (γ)光軸調整付固定ミラー

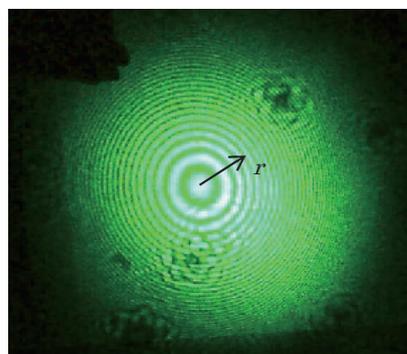


写真2 マイケルソン干渉計で測定した明暗干渉縞。同心円中心からの矢印とその長さrについては本文参照。

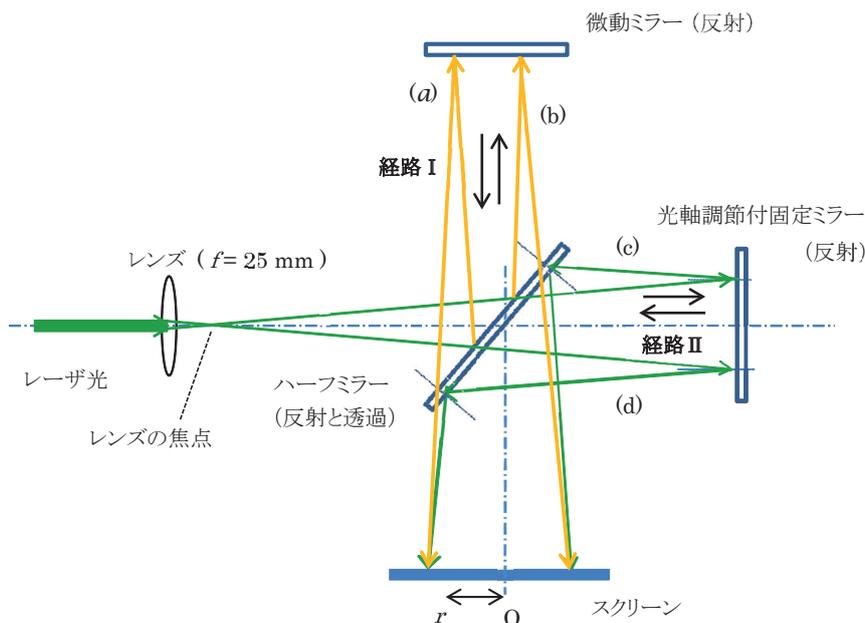


図1 マイケルソン干渉計の標準的使用(例, 光源に用いるレーザー波長の測定)での光路の概念図。図の矢印(a)(b)(c)(d)はスクリーン上で最外部の円に至る光路を示している。

により、干渉強度の「明」、或いは「暗」が決まる。スクリーン上のこの円の内側にあり円の中心から半径  $r$  の円形状に分布するレーザ光は、経路Ⅰでは同じ光路長と位相を有し、これが経路Ⅱからの光と干渉するので、「明」或いは「暗」の干渉縞を生じる。例えば、レーザ光の波長測定では写真1の(β)のマイクロメータでミラーを微小移動させることで、スクリーン上の円の中心から  $r$  の位置における光の干渉条件が変化するので干渉強度の「明」から「暗」の反転現象がダイナミックに生じることとなる。この干渉縞の「明」から「暗」の反転回数(「明」→「暗」→「明」、或いは「暗」→「明」→「暗」)を観察することで、光源として使用するレーザ光の波長  $\lambda$  をもめることができる。微動ミラーを光軸に沿って  $\Delta d$  変化させると、「明」から「暗」の反転回数が  $m$  回 ( $m=1, 2, 3 \dots$ ) であれば、

$$m\lambda = 2\Delta d n_{air} \quad (1)$$

で示せるので、レーザの波長は、

$$\lambda = 2\Delta d n_{air} / m \quad (2)$$

である。但し、 $n_{air}$  : 空気の屈折率である。また、光軸の経路上にある気体の屈折率  $n_{gas}$  を求める場合、経路上の長さ  $L$  [例えば、写真3の(δ)に示す真空容器内の光軸に沿った長さ] の部分の真空容器内の気体を真空引きにすると、光路差は

$$\Delta t = 2L(n_{gas} - n_{vac}) \quad (3)$$

となる。このとき、干渉縞の反転回数が  $m$  回であったとすれば、 $\Delta t = m\lambda$  より、

$$n_{gas} = 1 + m\lambda / (2L) \quad (4)$$

で気体の屈折率を求めることができる。

マイケルソン干渉計光学系の液体の屈折率簡易測定における各パーツの構成を写真4に示す。(α)ハーフミラー、(β)光軸調整付固定ミラー、(γ)光軸調整付固定ミラー、(δ)マイクロメータで位置制御するパーツで構成した。但し、(δ)は前出の微動ミラーに補助パーツ [写真5(a)] を取り付けて使用した。これはマイクロメータの微小移動させる機能は使うが、ミラーは使用しない。楔型に液体用セル [写真5(b)、図2] を工作し、

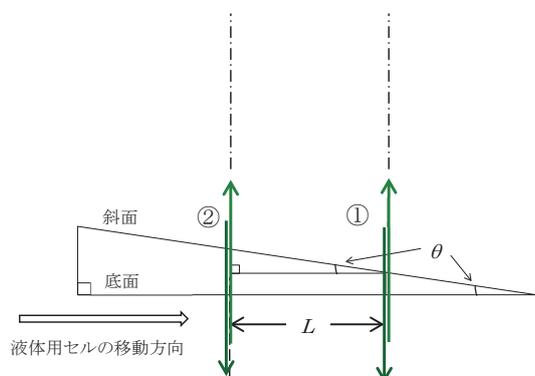


図2 楔型液体用セルとレーザ光路の断面図。一点破線は移動前後のマイケルソン干渉計光学系の光軸を示す。 $\theta$ : 楔型液体用セルの頂角、 $L$ : 測定前後での液体用セルの移動距離、①: 測定開始時のレーザ光の経路、②: 測定終了時のレーザ光の経路。

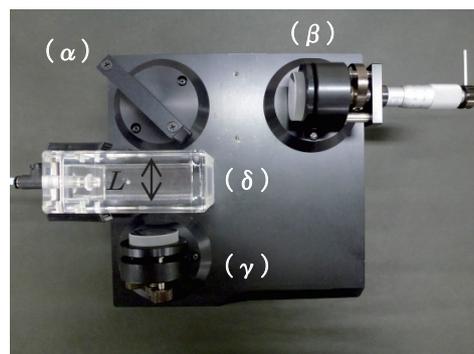


写真3 気体の屈折率測定時のマイケルソン干渉計の光学系。(α)ハーフミラー、(β)微動ミラー、(γ)光軸調整付固定ミラー、(δ)真空容器、 $L$ は真空容器内のレーザ光路長を示す。

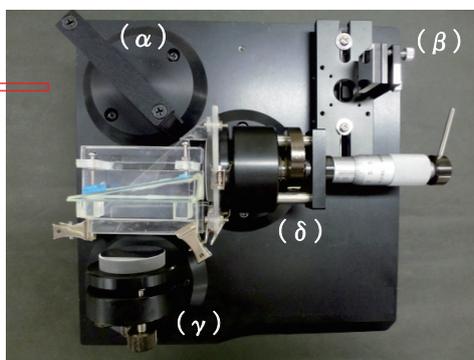


写真4 液体の屈折率測定時のマイケルソン干渉計の光学系。(α)ハーフミラー、(β)光軸調整付固定ミラー、(γ)光軸調整付固定ミラー、(δ)微動ミラーのマイクロメータを利用して液体用セルを光軸に対して垂直方向に移動させる器具。矢印はスクリーンの方向を示す。

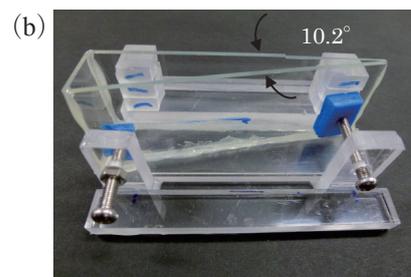


写真5 (a)楔型液体用セルを載せる補助具を取付けた微動ミラー、(b)頂角  $10.2^\circ$  の楔型液体用セル

光軸に対して垂直方向に移動させて測定する。図2は楔型液体用セルを上部からみた断面図である。白抜き矢印はマイクロメータで液体用セルを徐々に移動させる方向を示し、移動させる距離は図2に示す①から②に至る長さ  $L$  である。図2の相対する2つの方向の矢印は、セルを移動させる前と後における液体用セルに入射するレーザー光の進路を模式的に示している。空気中から楔型液体用セルの底面にレーザー光が垂直に入射し、同斜面からレーザー光が透過して( $\gamma$ )の固定ミラーで反射した後、再度、楔型液体用セルをレーザー光は通過する。液体を満たした楔型液体用セルの微小移動で生じる光路差は、レーザー光が液体用セルを往復することより、

$$\Delta l = 2L \tan \theta (n_{liq} - n_{air}) \quad (5)$$

で示せる。但し、 $n_{liq}$  : 液体の屈折率である。この光路差は、干渉縞明暗反転回数  $m$  とレーザーの波長  $\lambda$  を用いて、 $\Delta l = m\lambda$  と示せるので、 $m\lambda = 2L \tan \theta (n_{liq} - n_{air})$  より、

$$n_{liq} = m\lambda / (2L \tan \theta) + n_{air} \quad (6)$$

となり、液体の屈折率を簡易的に求めることができる。<sup>補足2</sup>

## 2-2. 液体の屈折率測定の実験条件

液体測定に適した液体用セルの形状と本測定システムでの実験条件を決めるため、「楔型セルの頂角  $\theta(^{\circ})$ 」と「セル移動距離  $L$ 」および「光源波長  $\lambda$ 」をパラメータとして(6)式でもとまる水の屈折率の計算値  $n_{cal}$  と公表値  $n_{pub}$  との差  $p = (n_{cal} - n_{pub}) \times 100 / n_{pub} (\%)$  の絶対値をもとめて、各パラメータの違いで生じる実験の精度を検討した。表1の番号1から21の計算結果を図3(a)(b)(c)(d)(e)に示している。ここで、各図の横軸は明暗反転回数、縦軸は差  $p(\%)$  の絶対値を示している。

液体用セルの頂角を  $1.0^{\circ}$ 、 $5.8^{\circ}$ 、 $10.2^{\circ}$  とし、<sup>脚注4</sup> 液体用セルの移動距離 (図2の  $L$ ) を  $1.50 \times 10^{-4}$  m に固定し、波長  $\lambda = 546$  nm (緑色) を光源として計算した。水の屈折率として公表されている値を得るのに必要な明暗反転の最適な回数  $m_0$  およびその前後の反転回数  $m_0 \pm 1$  を(6)式に代入して計算で得た水の屈折率、および公表値との差  $p(\%)$  の絶対値を表1の番号1から9に示している。表1<sup>脚注5</sup> に示すように、セルを  $1.50 \times 10^{-4}$  m 移動させる場合、例えば、楔型液体用セルの頂角が  $1.0^{\circ}$  程度では、移動させた前後での光路差が光源の波長に比べて数倍程度であるため、精度の良い測定はできない。公表値の屈折率を得るための最適な明暗反転回数は  $m_0 = 3$  であり、この値から  $\pm 1$  ずれると、差  $p(\%)$  の絶対値は約6%から10%となる。楔型液体用セルの頂角を  $5.8^{\circ}$  および  $10.2^{\circ}$  で液体用セルを設計すると、後者の方が明暗反転数の最適な値  $m_0$  から  $\pm 1$  回のずれで得られる屈折率の値は公表値と比較して、その差  $p(\%)$  の絶対値が小さいことが分かる。図3(a)(b)(c)の各グラフに示すように公表値に近い屈折率を得るための明暗反転回数の最適な値  $m_0$  の前後  $\pm 1$  で生じる差  $p(\%)$  の絶対値は、これら3つの頂角で比較すると楔型セルの頂角が  $10.2^{\circ}$  であるときが小さく、精度良く測定できると判断した。ここで、設計する楔型セルの頂角の

表1 楔型液体用セルの頂角  $\theta(^{\circ})$  および各実験条件と測定精度の関係

番号	波長 $\lambda$ (nm)	明暗反転数	頂角度 ( $^{\circ}$ )	頂角度 (rad)	移動距離 (m)	屈折率 (air)	屈折率 (liq) 計算値	公表値	差 $p$ (%)
1	5.46E-07	4.0	1.0	0.01745	0.00015	1.000278	1.41735	1.3345	6.21
2	5.46E-07	3.0	1.0	0.01745	0.00015	1.000278	1.31308	1.3345	1.61
3	5.46E-07	2.0	1.0	0.01745	0.00015	1.000278	1.20881	1.3345	9.42
4	5.46E-07	20.0	5.8	0.10123	0.00015	1.000278	1.35863	1.3345	1.81
5	5.46E-07	19.0	5.8	0.10123	0.00015	1.000278	1.34071	1.3345	0.47
6	5.46E-07	18.0	5.8	0.10123	0.00015	1.000278	1.32279	1.3345	0.88
7	5.46E-07	34.0	10.2	0.17802	0.00015	1.000278	1.34419	1.3345	0.73
8	5.46E-07	33.0	10.2	0.17802	0.00015	1.000278	1.33408	1.3345	0.03
9	5.46E-07	32.0	10.2	0.17802	0.00015	1.000278	1.32396	1.3345	0.79
10	5.46E-07	67.0	10.2	0.17802	0.00030	1.000278	1.33914	1.3345	0.35
11	5.46E-07	66.0	10.2	0.17802	0.00030	1.000278	1.33408	1.3345	0.03
12	5.46E-07	65.0	10.2	0.17802	0.00030	1.000278	1.32902	1.3345	0.41
13	4.04E-07	93.0	10.2	0.17802	0.00030	1.000283	1.34831	1.3428	0.41
14	4.04E-07	92.0	10.2	0.17802	0.00030	1.000283	1.34457	1.3428	0.13
15	4.04E-07	91.0	10.2	0.17802	0.00030	1.000283	1.34083	1.3428	0.15
16	5.46E-07	67.0	10.2	0.17802	0.00030	1.000278	1.33914	1.3345	0.35
17	5.46E-07	66.0	10.2	0.17802	0.00030	1.000278	1.33408	1.3345	0.03
18	5.46E-07	65.0	10.2	0.17802	0.00030	1.000278	1.32902	1.3345	0.41
19	6.56E-07	55.0	10.2	0.17802	0.00030	1.000276	1.33448	1.3311	0.25
20	6.56E-07	54.0	10.2	0.17802	0.00030	1.000276	1.32841	1.3311	0.20
21	6.56E-07	53.0	10.2	0.17802	0.00030	1.000276	1.32233	1.3311	0.66

脚注4：手作りのため、製作した楔型セルの頂角は小数点以下を伴う半端な値となった。

脚注5：光源波長  $\lambda = 404$  nm,  $\lambda = 546$  nm および  $\lambda = 656$  nm での空気 ( $15^{\circ}\text{C}$ ) および水 ( $20^{\circ}\text{C}$ ) の各屈折率は理科年表<sup>6)</sup>の値を用いた。

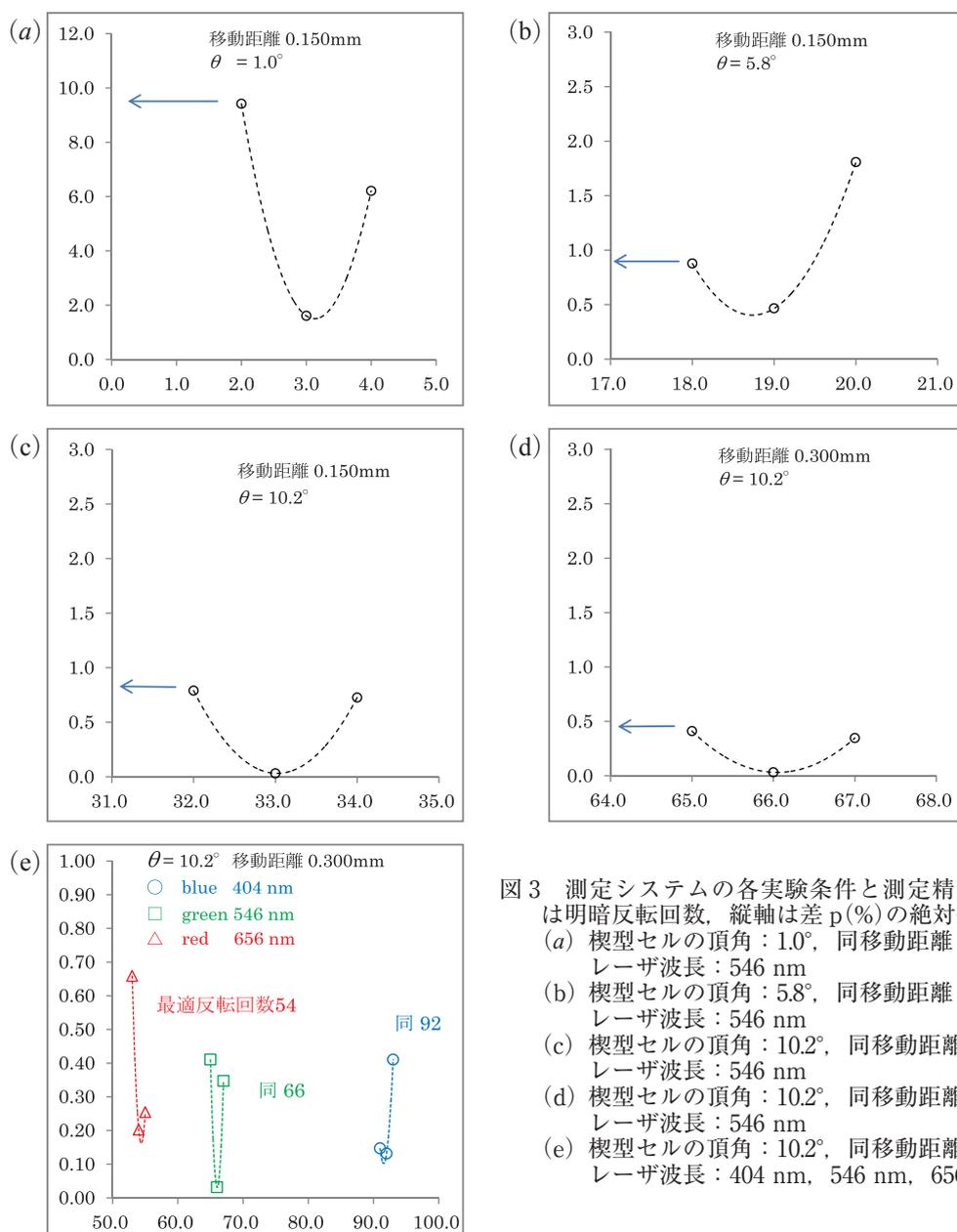


図3 測定システムの各実験条件と測定精度との関係。横軸は明暗反転回数、縦軸は差  $p(\%)$  の絶対値を示す。  
 (a) 楔型セルの頂角： $1.0^\circ$ ，同移動距離： $1.50 \times 10^{-4}$  m，レーザー波長：546 nm  
 (b) 楔型セルの頂角： $5.8^\circ$ ，同移動距離： $1.50 \times 10^{-4}$  m，レーザー波長：546 nm  
 (c) 楔型セルの頂角： $10.2^\circ$ ，同移動距離： $1.50 \times 10^{-4}$  m，レーザー波長：546 nm  
 (d) 楔型セルの頂角： $10.2^\circ$ ，同移動距離： $3.00 \times 10^{-4}$  m，レーザー波長：546 nm  
 (e) 楔型セルの頂角： $10.2^\circ$ ，同移動距離： $3.00 \times 10^{-4}$  m，レーザー波長：404 nm，546 nm，656 nm

値には上限があり、今回用いたマイケルソン干渉計の各パーツの幾何学的条件から、例えば、セルの頂角を約  $20^\circ$  まで増加させると固定ミラー部での光軸調整ができなくなり、測定が不可となった。尚、写真 5(b) の液体用セルはガラスとアクリルの板で製作した。

次に、セルの頂角を  $10.2^\circ$  として、マイクロメータによる楔型液体用セルの移動距離  $L$  を  $1.50 \times 10^{-4}$  m (表 1 の番号 7, 8, 9) の 2 倍の  $3.00 \times 10^{-4}$  m (表 1 の番号 10, 11, 12) として計算した結果を図 3(d) に示している。 $1.50 \times 10^{-4}$  m の場合と比べて、公表値に近い屈折率を得る明暗反転回数の最適な値  $m_0$  の前後  $\pm 1$  で得る差  $p(\%)$  の絶対値は更に小さくなるのが分かる [図 3(c) と (d)]。

楔型液体セルの頂角を  $10.2^\circ$  とし、移動距離  $L$  を  $3.00 \times 10^{-4}$  m として光源の波長を変えた場合、表 1 の番号 13 から 21 に各計算値を、また図 3(e) に測定精度を表すグラフを示している。光源の波長の違いで、明暗反転回数に顕著な違いが生じ、また同心円干渉縞の間隔が異なることで、フォトダイオードに取付けるスリット幅などを変えなければならないが、各波長  $\lambda$  で公表値に近い屈折率を得るための明暗反転回数  $m_0(\lambda)$  の前後  $\pm 1$  での差  $p(\%)$  の絶対値は各波長ともに概ね同程度であり、どの光源を用いても測定精度はほとんど変わらない。しかし、「3. 実験システムの構成」で示す 12 ビット A/D コンバータのパソコンへのデー

タ転送時間，およびレーザの出力等を考慮して，光源に緑色レーザ（波長 532.40 nm）を使用することとした。

以上より，楔型液体用セルを頂角  $10.2^\circ$  で製作し，マイクロメータを用いた楔型液体セルの移動距離を  $3.00 \times 10^{-4}$  m として，YAG レーザ（ $\lambda=532.40$  nm，緑色）を用いて液体の屈折率測定システムを製作した。

### 3. 測定システムの構成

製作した測定システムは，(A)光源，(B)マイケルソン干渉計の光学系，(C)干渉光検出部とパソコンへのデータ転送部，(D)測定プログラムと解析ワークシート，の各部から構成した（写真 6）。

#### 3-1. (A)光源と(B)マイケルソン干渉計の光学系について

YAG レーザ [出力約 80 mW,  $\lambda=532.40$  nm(緑)] を光源として用いた。レーザ光束を凸レンズ ( $f=25$  mm) で集光させた後，円錐状に広げて，写真 6 の⑧スクリーン上の同心円状干渉縞の最外部の直径が 20 cm 程度（写真 2）になるようにシステムの幾何学的条件を整えた。凸レンズを通過したレーザ光は(B)のマイケルソン干渉計 [島津理化 (株) MJ-15] の光学系へ入射する。レーザ光の波長測定，気体の屈折率を測定する場合，写真 1 に示すハーフミラー，マイクロメータ付微動ミラー，光軸調整付固定ミラーがマイケルソン干渉計の基本パーツ<sup>1,3)</sup> となるが，液体の屈折率の簡易測定では固定ミラーの追加およびパーツの組み合わせを変えて構成し，またマイクロメータ付微動ミラーに取付けた補助具に液体用セルを載せて，このセルの微小移動をおこなった（写真 4）。液体用セルを光軸に対して垂直に移動させるために用いたマイクロメータは，1 回転 50.0 目盛でセルを 0.000050 m 押し出すことができる。

#### 3-2. (C)干渉光検出部とパソコンへのデータ転送部について

フォトダイオード（浜松ホトニクス製 S7565：感度ピーク波長=560 nm，写真 7）を用いて図 4 に示す回路を構成した。10 k $\Omega$  に掛かる電圧で干渉光の強度を検出し，12 ビット AD コンバーター（Crossbow Ltd. 製 LabJack U3HV-LJ）経由でパソコンにデータを取り込んだ。この AD コンバーターの分解能は，測定電圧幅が  $\pm 10$  V（2 信号で測定が可能）の場合には約 5 mV であり，+0.004 V から +2.44 V の電圧幅で測定（2 信号で測定が可能）する場合は 600  $\mu$ V である。実験は 600  $\mu$ V の分解能でおこなった。スクリーン上の明暗干渉縞の手前に写真 7 に示すセンサーを設置して干渉強度を測定した。尚，スクリーン上の干渉縞の明暗間隔に合わせるため，スリット（黒模造紙で製作）をフォトダイオード受光部に取り付けた（写真 7）。データ取込みと解析プログラムは，汎用表計算ソフト（Microsoft, Excel）付属の Visual Basic for Application（以下，VBA）で作成した。取り込んだデータの値を Excel ワークシートのセルに表示し，グラフで示しながら測定した場合，1 秒あたりの測定数は約 60 counts（以下，60 c/sec）で

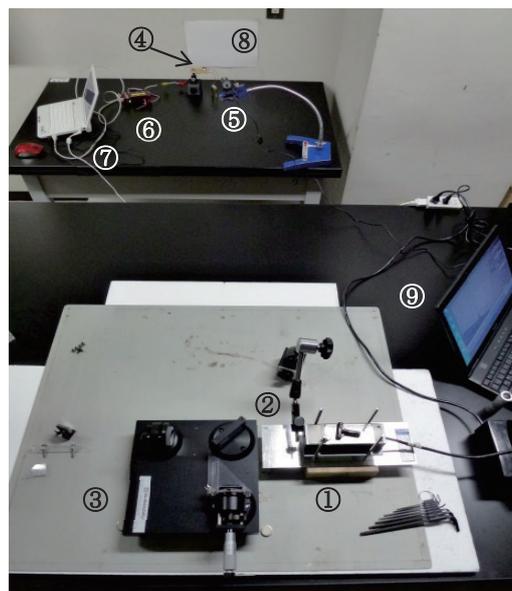


写真 6 マイケルソン干渉計を用いた光源波長測定時の器具配置。

① YAG レーザ，② 凸レンズ ( $f=25$  mm)，③ マイケルソン干渉計光学系，④ 光検出器，⑤ CCD カメラ，⑥ A/D コンバータ，⑦ データ収集・解析用パソコン，⑧ スクリーン，⑨ CCD カメラ用パソコン

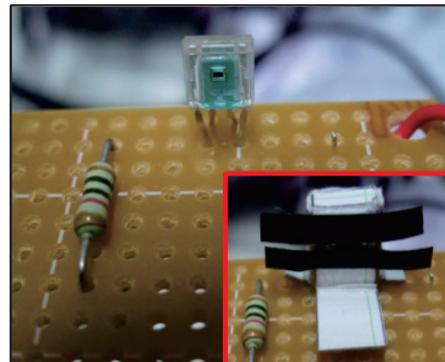


写真 7 光強度を検出するセンサー（図 4 の回路参照）。写真 6 の④を拡大した。手前枠内の写真はセンサーにスリットを取り付けたもの。

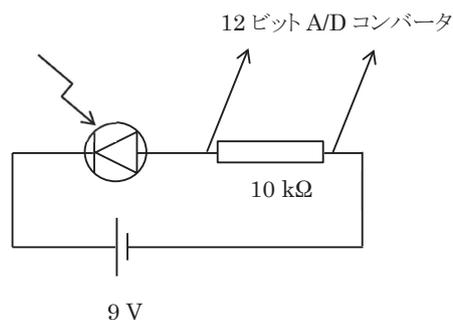


図 4 光強度検出部の回路

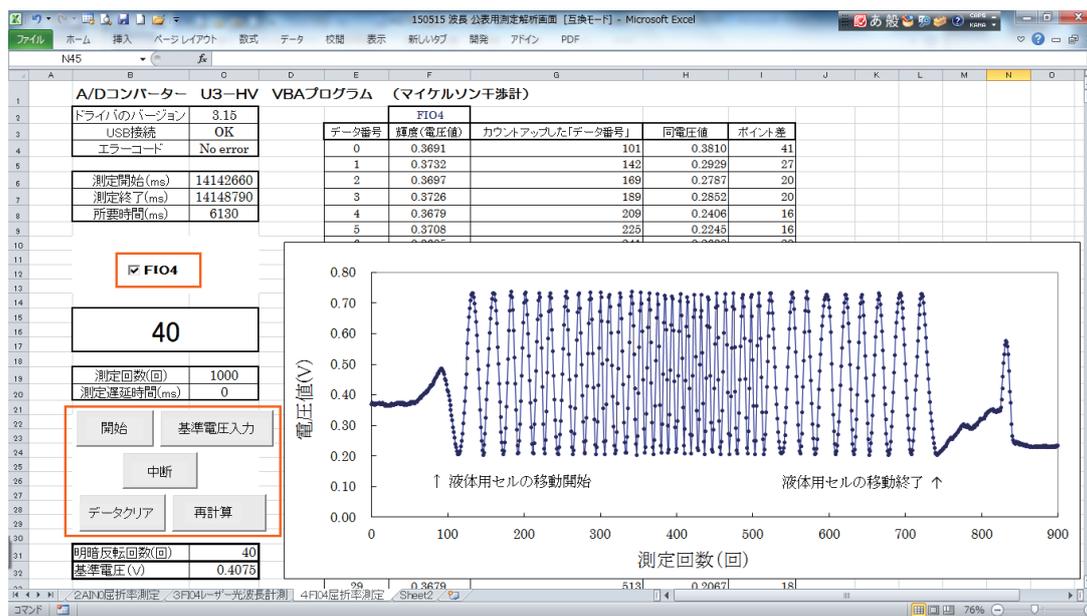


図5 汎用表計算ソフト VBA で作成したデータ収集制御および明暗反転回数カウントの画面。画面に液体用セルの移動開始時および移動終了時を矢印で示している。

あった。一方、これらを測定中は無表示とし、測定終了後に一括表示する方式では 150 c/sec となった。明暗反転回数の値を精度良く得るため、後者で測定をおこなった。

### 3-3. (D)測定プログラムと解析ワークシートについて

「データ収集」および「干渉縞明暗反転回数カウント」の汎用表計算ソフトの操作画面を図5に示す。「開始」, 「中断」, 「データクリア」, 「基準電圧入力」, 「再計算」の5つのコマンドボタンを操作して、データ収集と干渉縞の明暗反転回数のカウントをおこなった。A/Dコンバーター経由でパソコンに取り込んだ干渉縞の輝度(電圧値)はワークシートF列のセルに格納(測定中は無表示)される。図5は測定終了後のワークシート画面である。明暗反転としてカウントアップした「データ番号」と「電圧値」をG列とH列に表示し、I列にはi番目にカウントした「データ番号」とi+1番目の「データ番号」の差を“ポイント差”として示している。マイクロメータを手動で操作して液体用セルを微小移動させるため、測定中の明暗反転の速さを一様にするのは難しいが、明暗反転をカウントしたデータ番号の間隔をI列に示すことで、誤カウントの発生の有無を確認できるようにした。測定の中断は「中断」ボタンで実行し、またF列、G列、H列、I列のデータ消去は「データクリア」ボタンでおこなう。ADコンバーター端子の接続ミス、或いは測定範囲(本測定では、+0.004V~+2.44V)外の電圧値を検出した場合は、測定を停止してエラーメッセージを表示させた。

```

Range("B6") = timeGetTime0 ' 測定開始時刻
datacounter = Range("B19") ' 繰り返し回数
n = 0
i = 4
p = 0
kizyunn = Cells(32, 3)

Do
DoEvents
Application.ScreenUpdating = False
Cells(i, 4) = n
If CheckBox1 = True Then
lngError = eGet(lngHandle, LJ_ioGET_AIN, 4, F104, 0) ' データ収集
If lngError <= 0 Then Err.Raise lngError
If F104 > 2.44 Or F104 < 0.004 Then Call tyuudann
Cells(i, 6).value = F104
Range("F3").value = F104
End If

i = i + 1
n = n + 1
If n > 4 Then
a1 = Cells(i - 4, 6)
b1 = Cells(i - 3, 6)
c1 = Cells(i - 2, 6)
d1 = Cells(i - 1, 6)
e1 = Cells(i, 6)
x1 = (a1 + b1 + c1 + d1) / 4
x2 = (b1 + c1 + d1 + e1) / 4
If x1 > kizyunn Then
If x2 < kizyunn Then
p = p + 1
Else
p = p
End If
Else
p = p
End If
Else
p = p
End If

Cells(35, 2).value = p

Loop Until n > datacounter

Range("B7") = timeGetTime0 ' 測定終了開始時刻
    
```

図6 明暗反転数カウントとデータ収集のVBAプログラムの一部。\*印は「明暗反転数カウント」のプログラムの主要部を示す。

表2 汎用表計算ソフトの屈折率解析ワークシート

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	水屈折率計算															
2	単位はmで入力すること!															
3	実験番号	m (回)	λ (m)	セル底長 (m)	セル高 (m)	θ (radian)	θ (degree)	L <sub>1</sub> (m)	L <sub>2</sub> (m)	(L <sub>2</sub> -L <sub>1</sub> )tanθ (m)	m・λ(m)	屈折率(実験値)	n (water)	n (air)	差p (%)	
4	1	20	5.32E-07	0.0737	0.0075	0.1014	5.81	0.00100	0.00115	1.526E-05	0.00001064	1.3488	1.3345	1.000273	-4.27	
5	2	19	5.32E-07	0.0737	0.0075	0.1014	5.81	0.00100	0.00115	1.526E-05	0.00001011	1.3314	1.3345	1.000273	0.94	
6																
7						=ATAN(E5/D5)	=F5*180/FI0			=(I5-H5)*TAN(F5)			=K5/J5/2+N5			=(M5-L5)*100/M5
8											=B5*C5					

計測した電圧値が基準電圧値より大きな電圧値から小さな電圧値に変化する過程で基準電圧値を通過する場合、干渉縞が「明」「暗」「明」に変化したとみなして明暗反転が1回生じたと判断し、反転回数1とカウントするように設定した。この明暗反転回数をカウントするプログラムの一部を図6に示す。プログラムでは、連続するデータ  $a1, b1, c1, d1, e1$  の平均値  $x1 = (a1+b1+c1+d1)/4$  と  $x2 = (b1+c1+d1+e1)/4$  を、「明暗反転の基準電圧(kizyunn)」と比較して、 $x1 > kizyunn$  と  $x2 < kizyunn$  を同時に満たせば、反転カウントを1つカウントアップする(図6の※印)。カウントの基準となる「明暗反転の基準電圧」の初期設定は全測定電圧値の平均としているが、雑音レベルの信号を避けて「再計算」するときには、図5のセル32行C列に数値を入力しておこなう。測定データで実行した反転回数総数をセル31行C列に表示する。

測定プログラムで得た明暗反転回数の値を用いて液体の屈折率を求めるExcel解析ワークシートを表2に示す。ここで、 $\theta$ : 楔型液体セルの頂角(写真5)、 $L=L_2-L_1$ : マイクロメータで移動する距離、 $(L_2-L_1)\tan\theta$ : 光路差、 $\lambda$ : 入射光の波長、 $m$ : 明暗反転回数である。(6)式より液体の屈折率を簡易的に導出する。

#### 4. 液体の屈折率測定の手順

- (1) マイケルソン干渉計の各パーツを写真4のように構成する。光軸調整付固定ミラーを( $\beta$ )の位置に固定する。楔型液体用セルを光軸に対して垂直方向に移動できるように、液体用セルを載せる補助具[写真5(a)]をマイクロメータ付微動ミラーに取り付けて( $\delta$ )の位置に固定する。
- (2) 凸レンズを光学系から外して、ハーフミラー経由でレーザー光を固定ミラー( $\gamma$ )の中心部分に照射する。固定ミラー( $\beta$ )への入射光と反射光が重なるようにレーザー光源の位置を調整する。このとき、遮蔽物で固定ミラー( $\gamma$ )からの反射光を遮断し、固定ミラー( $\beta$ )からのレーザー光線だけが見えるようにする。次に、固定ミラー( $\gamma$ )の遮蔽物を外し、( $\gamma$ )の光軸調整付固定ミラーの光軸調節用の2本のネジで( $\beta$ )および( $\gamma$ )の固定ミラーを反射してスクリーンに映し出される2輝点を一致させる。シヨ糖溶液を入れた液体用セルを( $\delta$ )の補助具に載せた後、再度、( $\gamma$ )の光軸調整付固定ミラーの光軸調節用の2本のネジでスクリーンの2輝点を一致させる。この手順を経て、スクリーン上に同心円状明暗干渉縞が鮮明に現れるように、レーザー光源出力部分の光軸上に凸レンズを設置する。
- (3) 移動台のマイクロメータの目盛( $L_1$ )を始めに1.0000 mmとする。測定プログラムを開始した後、マイクロメータを回転させて楔型液体用セルを移動させる。このとき、測定時間に対応する測定ポイント数をあらかじめプログラムで設定しておく。測定終了後、マイクロメータの目盛( $L_2$ )を記録する。グラフ表示したデータで「基準電圧値」を確認して入力し、「再計算」ボタンで明暗反転回数を求める。
- (4) 解析(液体屈折率)用ワークシートに測定した明暗反転回数を入力して屈折率をもとめる。

#### 5. シヨ糖溶液の屈折率測定の結果

重量% (以下, wt.%) 濃度のシヨ糖溶液を0.0 wt.% から70.0 wt.% までの10.0 wt.% 刻みで作り、本測定システムで各wt.%濃度での屈折率をもとめた。各wt.%濃度で5回測定し、その平均値を干渉縞明暗反転回数とした(図7)。wt.%濃度の違いによるシヨ糖溶液の屈折率の測定結果を表3に示す。各wt.%濃度でのシヨ糖溶液屈折率のグラフを図8(a)(b)(c)に示す。測定したときのシヨ糖溶液の温度

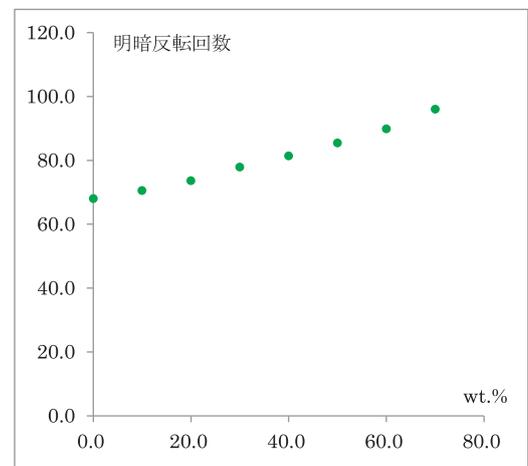


図7 横軸はシヨ糖溶液 wt.% 濃度、縦軸は明暗反転回数の平均値を示す

表3 各シヨ糖溶液 wt.% 濃度の屈折率。明暗反転回数は5回の平均値である。

シヨ糖濃度 wt%	m(回)	$\lambda$ (m)	セル底長 (m)	セル高 (m)	$\theta$ (rad)	$\theta$ (deg)	$L_1$ (m)	$L_2$ (m)	$(L_2-L_1)\tan\theta$ (m)	$m\cdot\lambda$ (m)	屈折率(実験値)	n (air)
0.0	68.0	5.32E-07	0.074	0.0132	0.17855	10.23	0.00100	0.00130	5.4141E-05	3.6176E-05	1.3344	1.000273
10.0	70.5	5.32E-07	0.074	0.0132	0.17855	10.23	0.00100	0.00130	5.4141E-05	3.7506E-05	1.3466	1.000273
20.0	73.6	5.32E-07	0.074	0.0132	0.17855	10.23	0.00100	0.00130	5.4141E-05	3.9155E-05	1.3619	1.000273
30.0	77.8	5.32E-07	0.074	0.0132	0.17855	10.23	0.00100	0.00130	5.4141E-05	4.1407E-05	1.3827	1.000273
40.0	81.3	5.32E-07	0.074	0.0132	0.17855	10.23	0.00100	0.00130	5.4141E-05	4.3269E-05	1.3999	1.000273
50.0	85.4	5.32E-07	0.074	0.0132	0.17855	10.23	0.00100	0.00130	5.4141E-05	4.5433E-05	1.4199	1.000273
60.0	89.8	5.32E-07	0.074	0.0132	0.17855	10.23	0.00100	0.00130	5.4141E-05	4.7774E-05	1.4415	1.000273
70.0	96.0	5.32E-07	0.074	0.0132	0.17855	10.23	0.00100	0.00130	5.4141E-05	5.1072E-05	1.4719	1.000273

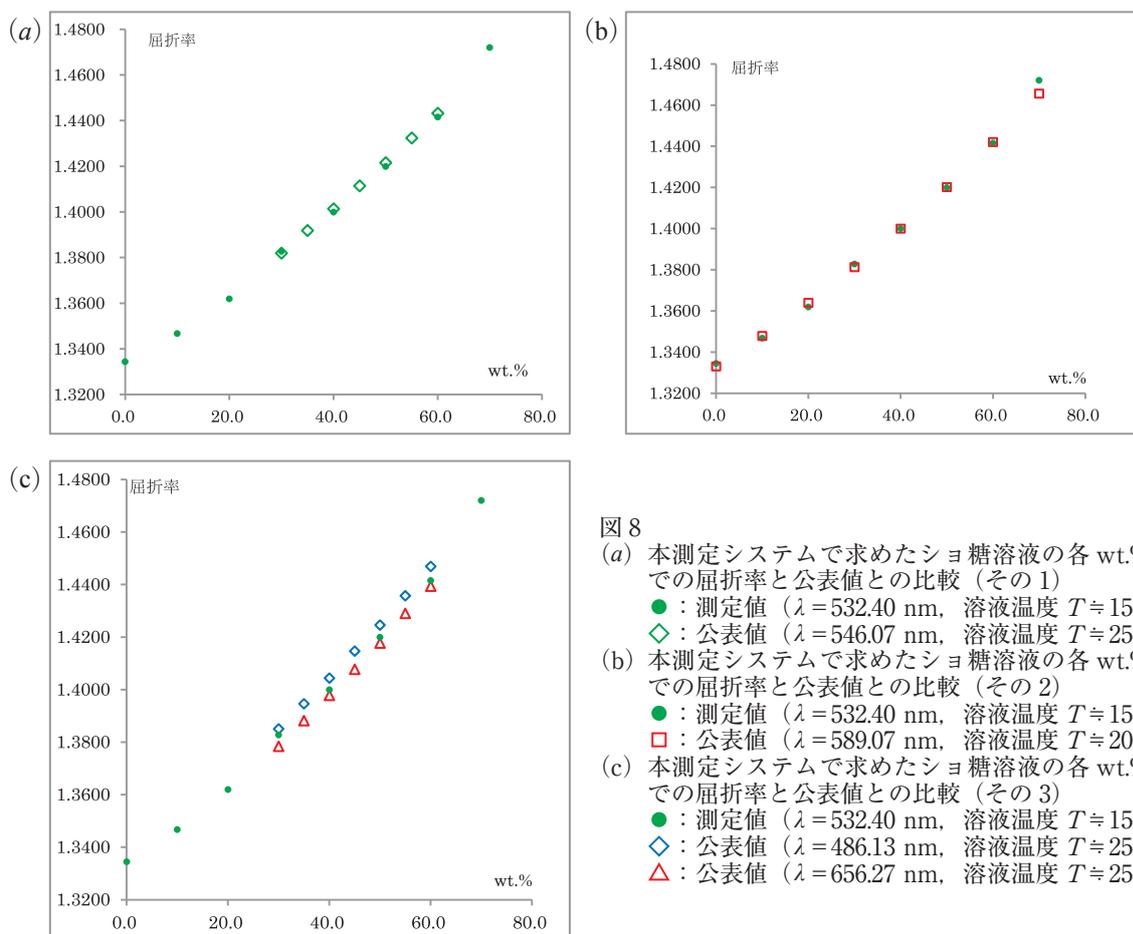


図8  
 (a) 本測定システムで求めたシヨ糖溶液の各 wt.% 濃度での屈折率と公表値との比較 (その1)  
 ● : 測定値 ( $\lambda=532.40$  nm, 溶液温度  $T\approx 15^\circ\text{C}$ ),  
 ◇ : 公表値 ( $\lambda=546.07$  nm, 溶液温度  $T\approx 25^\circ\text{C}$ )  
 (b) 本測定システムで求めたシヨ糖溶液の各 wt.% 濃度での屈折率と公表値との比較 (その2)  
 ● : 測定値 ( $\lambda=532.40$  nm, 溶液温度  $T\approx 15^\circ\text{C}$ ),  
 □ : 公表値 ( $\lambda=589.07$  nm, 溶液温度  $T\approx 20^\circ\text{C}$ )  
 (c) 本測定システムで求めたシヨ糖溶液の各 wt.% 濃度での屈折率と公表値との比較 (その3)  
 ● : 測定値 ( $\lambda=532.40$  nm, 溶液温度  $T\approx 15^\circ\text{C}$ ),  
 ◇ : 公表値 ( $\lambda=486.13$  nm, 溶液温度  $T\approx 25^\circ\text{C}$ ),  
 △ : 公表値 ( $\lambda=656.27$  nm, 溶液温度  $T\approx 25^\circ\text{C}$ )

は約 15°C であった。測定した屈折率の値の正確さを検討するため、市販の屈折率測定機器で測定された公表データ、或いは校正表と比較した。比較に用いたデータは、図 8(a)では光源波長  $\lambda=546.07$  nm でシヨ糖溶液温度は  $T=25^\circ\text{C}$  (比較データ 1)<sup>7)</sup>、図 8(b)では  $\lambda=589$  nm で  $T=20^\circ\text{C}$  (比較データ 2)<sup>8)</sup> である。本測定システムでの実験条件は  $\lambda=532.40$  nm で  $T\approx 15^\circ\text{C}$  である。シヨ糖溶液に関するデータは、例えば工業規格などにより光源波長や測定時の温度 (20°C) が規定されているので、本システムで測定したときの溶液温度 15°C でのデータを探すことは困難であった。本測定システムで求めたときの実験条件と完全に一致するデータではないが、測定した屈折率の値と比較データ 1 および比較データ 2 との差 p(%) を表 4 に示している。比較データ 1 では各 wt.% 濃度でほぼ 0.12 % 未満の差 p(%) であった。比較データ 2 では 0.0 wt.% から 60.0 wt.% の屈折率の値は 0.14 % 未満の差 p(%) であり、70.0 wt.% では 0.44 % の差 p(%) となった。70.0 wt.% の濃度では、溶液温度を上げた後に 15°C に自然冷却したため、結晶が析出した可能性は残る。また、70.0 wt.% の濃度のシヨ糖溶液で生じるマイケルソン干渉縞のゆがみ<sup>脚注6</sup>が顕著に出現するので、本測定システムで用いたフォトセンサーを設置する位置によっても明暗反転回数の値に違いが生じ、差 p(%) を

脚注 6 : 液体用セル内でシヨ糖溶液の wt.% 濃度が常に均一になるような仕組みを液体用セルは兼備していないので、測定中に溶液濃度のムラが生じ、同心円干渉縞の歪みがシヨ糖濃度 60 wt.% や 70 wt.% で生じた。

増減させる原因となる。図8(c)に、光源波長 $\lambda=486.13$  nm(青色),  $\lambda=656.27$  nm(赤色)で測定された値と、本システムで測定した値 [ $\lambda=532.40$  nm(緑色)] を wt.% 濃度別に比較したグラフを示す。<sup>7)</sup> 但し、溶液温度に10℃程度の差がある。シヨ糖溶液の屈折率の波長依存を考慮すると、本測定システムで計測した緑色光源からの屈折率は青色光源と赤色光源で求められている公表値に挟まれた範囲内で収まっているので、この比較検討からも本測定システムで得た屈折率は妥当なものと判断した。溶液温度や光源波長が厳密には同一ではないが、シヨ糖溶液を用いて実験したデータと公表されている値との比較から判断して、市販の高価な精密屈折率測定機器とほぼ同程度の屈折率の値を得ることができた。本測定システムを用いた実験に設定の手間や時間は掛かるが、液体の屈折率を測定する学生実験には十分に使用出来るものと判断した。

表4 本測定システムで得た屈折率と公表値との差 p(%) : ①は本文の(比較データ1)を参照, ②は本文の(比較データ2)を参照。

シヨ糖濃度 wt.%	屈折率(実験値)	①のデータ	①との差p(%)	②のデータ	②との差p(%)
0.0	1.3344	—	—	1.3330	0.10
10.0	1.3466	—	—	1.3478	-0.09
20.0	1.3619	—	—	1.3638	-0.14
30.0	1.3827	1.3819	0.05	1.3811	0.11
40.0	1.3999	1.4013	-0.10	1.3999	0.00
50.0	1.4199	1.4215	-0.12	1.4201	-0.02
60.0	1.4415	1.4432	-0.12	1.4419	-0.03
70.0	1.4719	—	—	1.4655	0.44

## 6. まとめ

実験のシステム制御およびデータ解析するプログラムを、小・中・高等学校での教育現場で活用されている汎用表計算ソフトで構成し、廉価なフォトダイオードや A/D コンバータを用いることでパソコンへのデータ収集を比較的容易に実施できる学生実験を製作した。特に、VBA の使用は、教育現場における ICT (Information and Communication Technology) 教育活動に連動するもので、データ収集や解析プログラムの理解を促し、迅速なデータ処理およびデータの視覚化によって良質なデータを短時間で得ることを可能とする。実験例として、0.0 wt.% から 70.0 wt.% 濃度のシヨ糖溶液を用いた測定をおこない、市販の屈折率測定器で測定された公表値と比べて、比較的精度良く各濃度の屈折率を得ることができた。実験器具の設置や調整に手間や時間は掛かるが、干渉実験をダイナミックに観察でき、波動光学を効果的に提示できる学生実験として本測定システムを用いている。

教育学部の学生実験での学びが、工夫次第で教育現場における ICT 活用の実験器具製作へと展開可能な素養の習得になるように受講生の理解を促し、教育学部の学生実験におけるこの種の ICT を活用する取り組みが、将来の理系人材として児童・生徒を育める教育者の育成に繋がることを期待したい。

## 7. 参考文献

- 例えば、学生実験を対象とすれば、  
「物理光学」吉原 邦夫 著、共立出版  
「理工学基礎講座1 光学概論Ⅱ」辻内 順平 著、朝倉書店 など  
例えば、一般書だと、  
「光学の原理Ⅱ」Max Born and Emil Wolf, 草川 徹 訳、東海大学出版会  
「先端光技術シリーズ 光学入門—光の性質を知ろう—」大津 元一、田所 利康 著、朝倉書店 など
- 例えば、  
「近代数学新書16 相対性理論」矢野 健太郎 著、至文堂  
「物理的相対性理論」ヤーノシー著、宮原 将平、宮原 恒星 訳、講談社 など
- 例えば、島津理化 マイケルソン干渉計取扱説明書 など
- 例えば、島内みどり、有馬貢、佐々木治、物理教育、第31巻第2号(1983) pp.69～73 など
- 例えば、  
日本工業規格サイト、<http://kikakurui.com/k0/K0062-1992-01.html>  
産業技術総合研究所編、[https://www.nmij.jp/~nmijclub/fluidp/docimgs/kayukawa\\_061219.pdf](https://www.nmij.jp/~nmijclub/fluidp/docimgs/kayukawa_061219.pdf)  
島津製作所サイト、<http://www.shimadzu.co.jp/opt/guide2/02.html>  
京都電子工業株式会社サイト、<https://www.nmij.jp/~nmijclub/fluidp/docimgs/6-o.pdf>
- 自然科学研究機構国立天文台編、平成27年度版理科年表、物99(461)、丸善出版社
- 島津製作所サイト、<http://www.shimadzu.co.jp/opt/products/ref/ref-app05.html>
- JCSS(独)製品評価技術基盤機構認定センター、<http://www.nite.go.jp/data/000001509.pdf>

附記：本論文は、福岡教育大学紀要第65号、第3分冊(2016) pp.23～32に記載されたものを、リポジット編集の査読を経て新たに掲載されるものである。

補足1：液体の屈折率測定に関して、次のような論文を挙げるができる。

(A) マイケルソン干渉光学系を用いて、光学系の移動反射鏡を液体に浸けた状態で測定する方法として、

- ・Bernold Richerzhagen, Applied Optics, vol.35 No.10 (1996) pp.1650
- ・Satya R. Kachiraju and Don A. Gregory, Optics & Laser Technology, vol.44 (2012) pp.2361 など

(B) 同光学系を用いて液体を入れた長方形セルを回転させて測定する方法として、

- ・M Musso, R Aschauer, A Asenbaum, C. Vasiss, and E Wilhelm, Meas. Sci. Technol., vol.11 (2000) pp.1714
- ・B. Abbas and M. Alshikh Kahalil, Acta Physical Polonica A, vol.129 (2016) pp.59 など

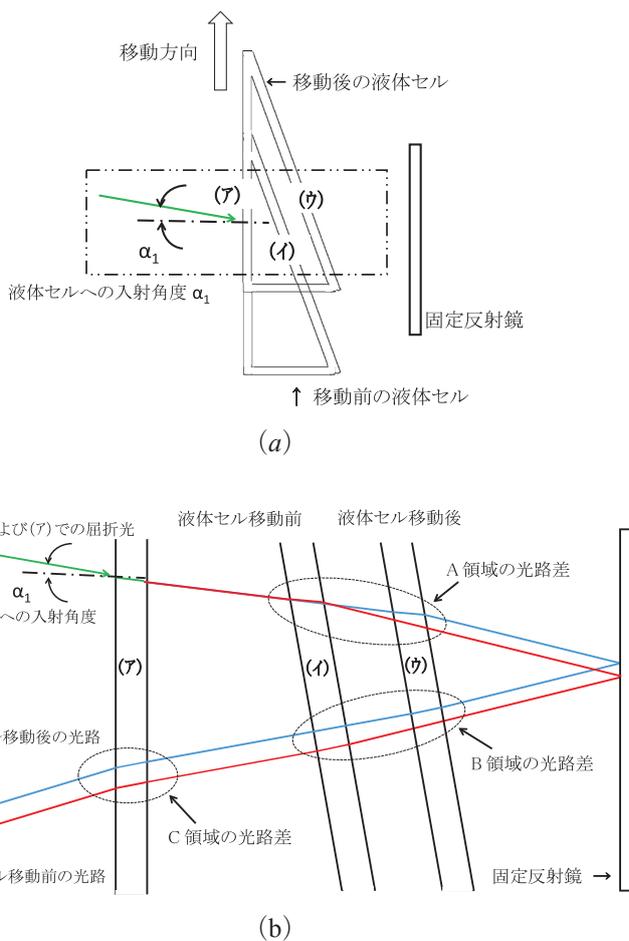
(C) その他の方法では、

- ・M. V. R. K. Murty and R. P. Shukla, Laser Systems & Diagnostics, vol. 18 No.2 (1979) pp.177
- ・Thormas H. Barns, Kenji Matsumoto, Tomoaki Eiji, Kyofumi Matsuda, and Noatake Ooyama, Applied Optics, vol.30 No.7 (1991) pp.745 など

である。研究レベルの装置を用いてデータ収集や処理をおこなっている。

本報告はこれらに示されている方法とは異なり、教育用市販品のマイケルソン干渉計光学系に改良を加え、ガラス製楔型液体用セルを移動させて測定するバリエブル・パス法で液体の屈折率をもとめた。フォトダイオードとA/Dコンバータおよび汎用表計算ソフトを使用して同心円干渉縞の明暗反転回数をもとめ、近似式(6)で液体の屈折率を簡便に得た。液体用セルを光が通過する際の屈折を考慮して光路差を厳密にもとめて数値計算するデータ解析へと、学生実験の展開をおこなっている。

補足2：本報告で提示したマイケルソン干渉計を用いた液体の屈折率の簡易測定では、近似式(5)と(6)に基づいてデータ処理をおこなった。しかし、液体用セルにレーザー光が通過する際、“空気→ガラス→液体”、或いは“液体→ガラス→空気”の各境界面で屈折が生じるため、液体用セルの移動前後における光路差の厳密な計算は近似式(5)では示していない。参考図1(a)(b)に示すように、液体用セルの移動前後におけるA、BおよびCの各領域における屈折を考慮して算出した光路差の式[以下、“屈折光路式”と記載。複雑な多数項を有する式となるので表記はここでは省略する]から、屈折率をより正確にもとめることができる。近似式(6)でデータ解析できる実験は、スクリーン上の同心円干渉縞中心部にセンサーを設置した場合に対応する。しかし、フォトダイオードをスクリーン上の同心円干渉縞中心から約3.5 cmの位置に設置して測定をおこなった本報告のデータは、“屈折光路式”に基づいて正確にデータ解析をおこなうと、システムの幾何学的条件から判断して、参考図1に示す $\alpha_1 \doteq 1^\circ$ の入射角で光が液体用セル

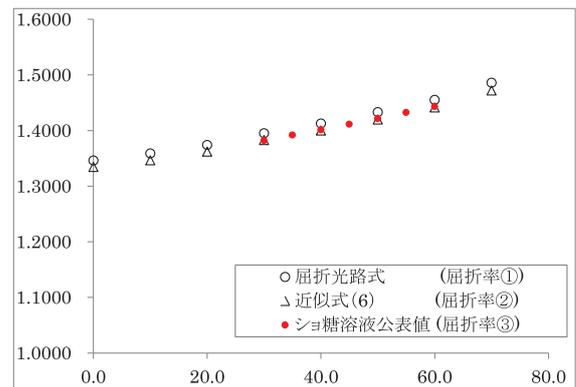


参考図1 (a) 移動前後の液体用セルを重ねて示した。(ア)(イ)(ウ)は液体用セルのガラス部を示す。2点破線で囲った部分を拡大したのが(b)である。A、B、Cの各領域の液体セル移動前後の光路差に屈折を考慮するのが“屈折光路式”である。

参考表1 各解析でもとめたシヨ糖溶液の濃度別屈折率

濃度 (wt.%)	反転回数 (実験)	屈折率① ← 屈折光路式より	屈折率② ← 近似式(6)より	屈折率③ ← 公表値	①と③の差 p (%)	②と③の差 p (%)
0.0	68.0	1.3463	1.3344			
10.0	70.5	1.3588	1.3466			
20.0	73.6	1.3742	1.3619			
30.0	77.8	1.3952	1.3827	1.38193	0.96	0.06
35.0				1.39181		
40.0	81.3	1.4127	1.3999	1.40125	0.82	-0.10
45.0				1.41133		
50.0	85.4	1.4331	1.4199	1.42149	0.82	-0.11
55.0				1.43237		
60.0	89.8	1.4551	1.4415	1.44321	0.82	-0.12
70.0	96.0	1.4860	1.4719			

に入射するときに相当する。測定した反転回数を基に“屈折光路式”で数値計算をおこなうと、参考表1および参考図2の屈折率の値を得ることができる。ここで、“屈折光路式”による解析結果の方が近似式(6)のそれよりも公表値<sup>7)</sup>との差が大きくなっている。前者は約1%未満、後者は約0.2%未満である。この差の違いは、市販品のマイケルソン干渉光学系に固定反射鏡を追加設置するときの幾何学的な不完全さ、或いは同光学系とスクリーンの設置（例、本文図1のスクリーンと一点破線の直交関係）における幾何学的な不完全さなどの学生実験による不手際によって、このような結果になったと推測している。



参考図2 横軸はシヨ糖濃度 (wt.%), 縦軸は屈折率を示す。