

濃度勾配を持つシヨ糖溶液の旋光度と屈折率

(平成 29 年度からの継続研究)

静岡県立清水東高等学校

自然科学部物理班 2 年 山梨怜央 他 11 名

1 研究目的

真水を入れた水槽の底にシヨ糖の飽和溶液を静かに注入し水面に向かってゆっくり拡散させると、濃度に応じて屈折率が連続的に変化する溶液ができる(写真 1)。この溶液越しに物体を覗くと蜃気楼に相当する 3 つの像が現れる(写真 2)。本校物理班では平成 16 年度からこの溶液の数々の特性について、主にこの溶液の屈折現象を中心に継続実験を行ってきた(参考文献 2~4)。

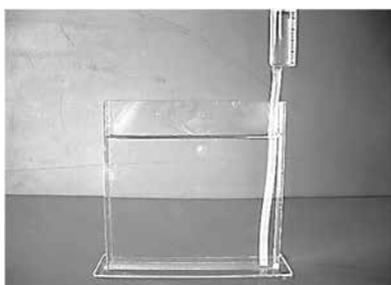


写真 1 溶液作成の様子



写真 2 3つの像

この中で、1つの溶液の中に濃度の勾配があることによって想定外の現象が起きることもわかった。例えば、濃度が一定の溶液の場合なら、屈折の法則から光を横から水平に入射すると屈折角も 0、つまりそのまま直進する(写真 3)。しかし、濃度勾配を持つ溶液に光線を水平に照射すると、光線が水底に向かって屈曲してしまう(写真 4)。

このことから、濃度勾配のある溶液では、一様な濃度の場合と異なり、溶液中での光線経路が長くなると同じ濃度状態でも屈折率は大きくなる。

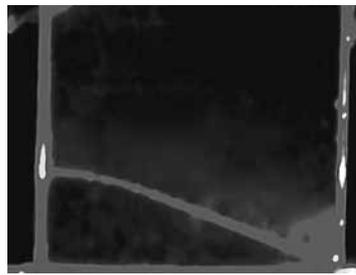
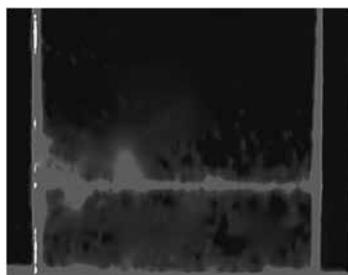
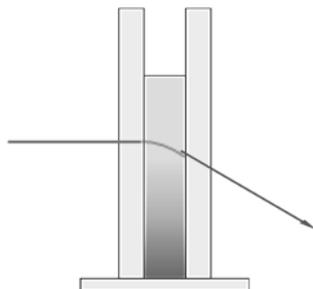


図 1 光の屈曲の模式図

写真 3, 4 光の屈曲の様子

(左：一定の濃度を持つ溶液 右：屈折率勾配を持つ溶液)

光はいろいろな方向に振動する横波の集合である。光が偏光板を通ると振動面が特定の方向に偏る。この光を偏光(図 2 ①)という。直線偏光させた光が旋光性物質を透過するとき、偏光面は回転する(図 2 ②)。この現象を旋光性という。偏光面の回転角 θ を旋光角とよび、光が溶液を進む距離に比例する。このため、旋光角 θ を光線が溶液中を進んだ距離で割り、溶液 1mmあたりの旋光角に直したものを旋光度と呼び、旋光性の度合いを示す値としている。

シヨ糖溶液にはこの旋光性という性質がある。一様な濃度のシヨ糖溶液の旋光度と濃度に相関があることは明らかになっている(参考文献1)ため、昨年度は以下のような仮説を立てた。

仮説①旋光度と屈折率のグラフには高い相関が見られる。

濃度勾配のある溶液の旋光度の測定では、測定する水槽の厚いと屈曲による影響が大きくなる恐れがある。しかし、実際の旋光角はとて小さく水槽が薄いと測定誤差が大きくなってしまいます。昨年度は「光てこ」の原理を用いて測定装置を作り、シヨ糖溶液の旋光度と屈折率との間に正の相関が認められるところまでまとめた。本年度は、以下の仮説②を加えた。

仮説②濃度勾配のあるシヨ糖溶液においては、溶液の厚さによって同じ濃度状態でも測定される旋光度にはずれが生じる。

この仮説を検証するため、以下の3点を目的として研究を行った。

- ① 実験装置に改善を加え、昨年度よりも旋光度測定の精度を高める。
- ② 昨年度旋光度の測定を行っていた厚さ 20mm の水槽に加え、厚さ 10mm の水槽についても旋光度を測定し、それぞれの水槽において得られる旋光度を比較する。
- ③ 今まで行ってきた屈折率も再測定し、旋光度との照合を行う。

2 研究の方法

(1) 旋光度の測定方法

旋光度を測定するために設定した装置を図3に示す。旋光度を測定するため2枚の偏光板A, Bを用いた。まず、濃度勾配を持つ溶液に入った水槽の前方に置いた偏光板Aを通してHe-Neレーザー光(波長 632.5nm)を水槽へ水平に照射する(図3①)。その光線を溶液と偏光板Bに通す。このとき、偏光板Bを回転させながら(図3②)センサーで透過光の強度を測定し(図3③)、透過光の強度が最も小さな値になった時の偏光板Bの回転角を測定した。偏光板Aと偏光板Bは、最初に溶液のない液面上で計測を行い透過光が最も小さい値になる状態を基準とする。この操作を各水深に対して行い、水深と旋光度の関係を記録する。

偏光板Bの回転角 θ の計測には昨年度より「光てこ」と呼ばれる測定方法を利用した。「光てこ」の原理を図4に示す。

偏光板Bの側面に鏡を固定し、その鏡に別の光源を当て実験室の壁面に当てる。鏡に向かう光線と

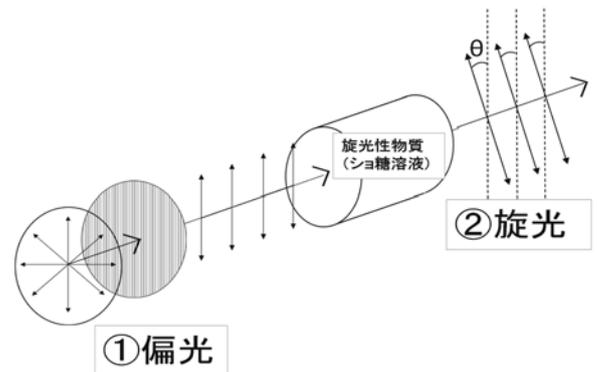


図2 旋光性

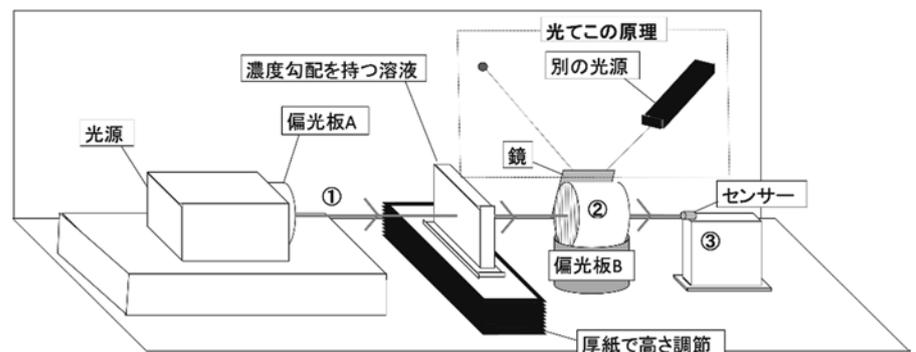


図3 実験装置の概要

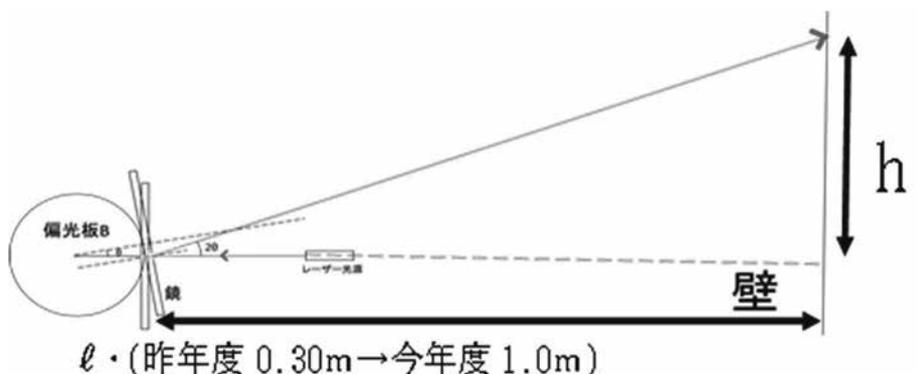


図4 「光てこ」の原理

反射光線のなす角は偏光板 B の回転角の 2 倍になり、反射光が壁面を移動した距離を測定することで実測旋光度を算出した(式 1)。

実験は、飽和溶液が拡散を始めてから 0 時間後、24 時間後、48 時間後、72 時間後、96 時間後に旋光度の測定を行った。

(2) 屈折率の測定方法

今回、旋光度と屈折率を比較するにあたって、屈折率の再計測を行った。測定には平成 16 年度から行ってきた「水プリズム法」を用いた(図 6)。溶液の入っている水槽の角に側面からレーザー光を照射すると、水深における屈折率に応じレーザー光の偏角が変化する。各水深でこの偏角を測定することで、屈折率を求める。なお、光源には旋光度を測定したときと同じ He-Ne レーザー光を用いた。

l = 鏡から壁までの距離(m)
 h = 基準線からの高さ(m)
 θ = 旋光角(rad)
 d = 旋光度(rad/m)
 a = 光線距離※溶液の厚さ(m)
 ※ θ は非常に小さい角であるため、 $\sin \theta \doteq \tan \theta \doteq \theta$ の近似を用いた。
 すなわち、 $\tan 2\theta = h/l$

式 1 旋光度の求め方

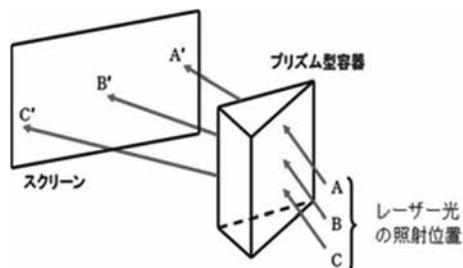


図 6 水プリズム法

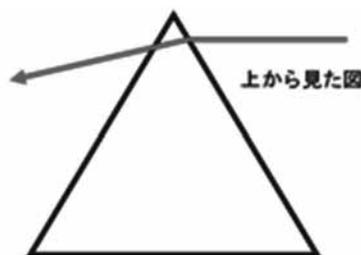


図 7 プリズム型水槽を上から見た図

このとき、プリズム型の水槽の角の出来る限り近くに光線を入射することで屈曲による影響を最小限にして測定を行った(図 7)。

3 結果

(1) 旋光度と屈折率の相関

図 8 に、24 時間から 96 時間における縦軸に屈折率、横軸に単位長さ当たりの旋光度を表し、旋光度は 20mm 水槽と 10mm 水槽それぞれに散布図を示す。

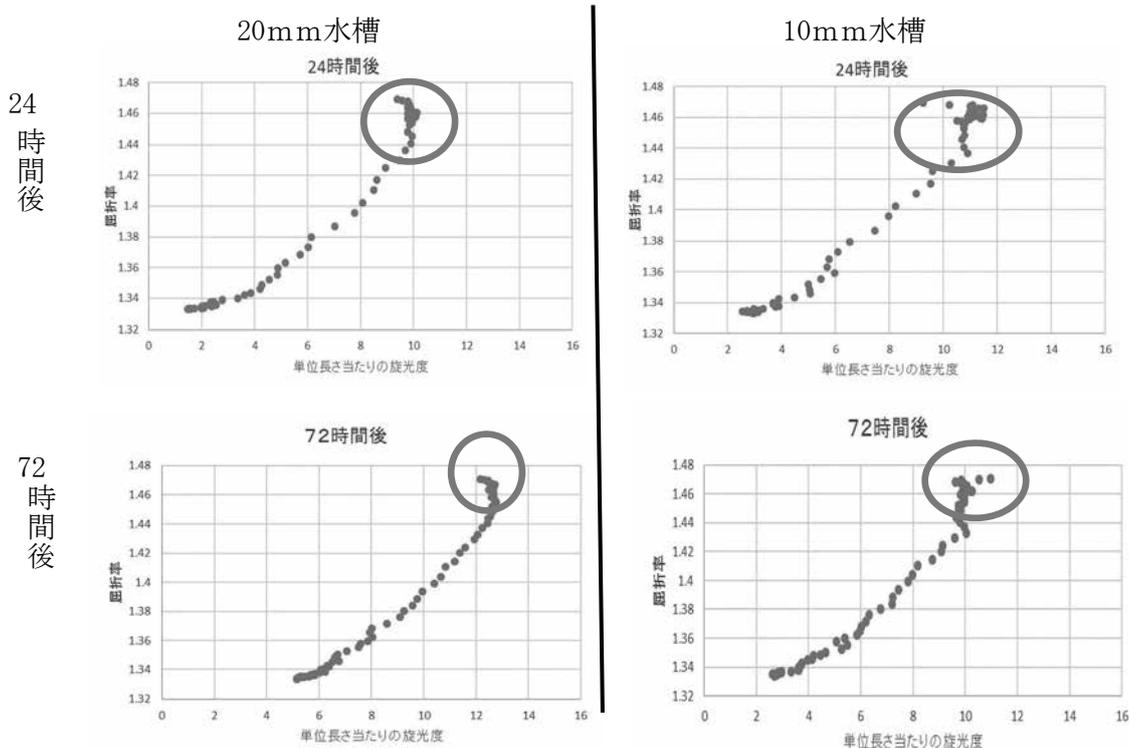


図 8 屈折率と旋光度との相関

(2) 厚さ 10mm水槽での記録と 20mm水槽での旋光度の比較

ア、一様な濃度のシヨ糖溶液の旋光度

予備実験として一様な濃度のシヨ糖溶液における旋光度を測定した。図9にその結果を示す。この数値は一回の実験で得られたもので、平均化はしていない。

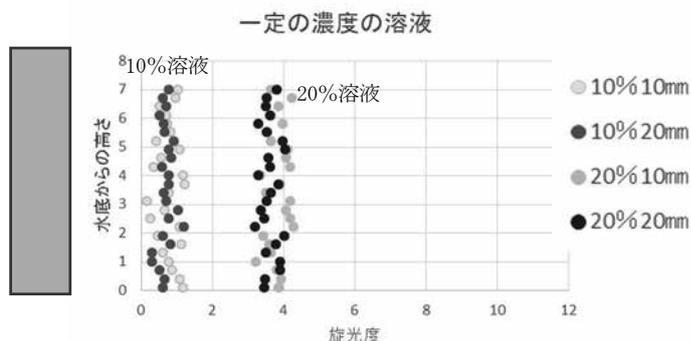


図9 一様な溶液における旋光度

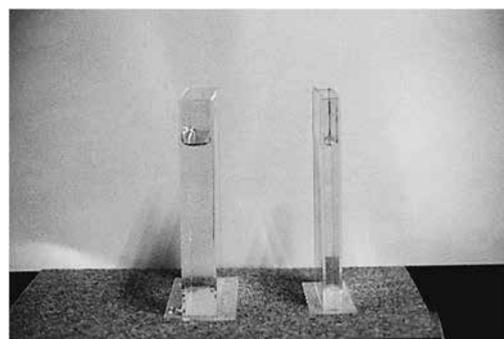


写真5 厚さ 20mmの水槽(左)と厚さの水槽(右)

イ、濃度勾配を持つ溶液の旋光度

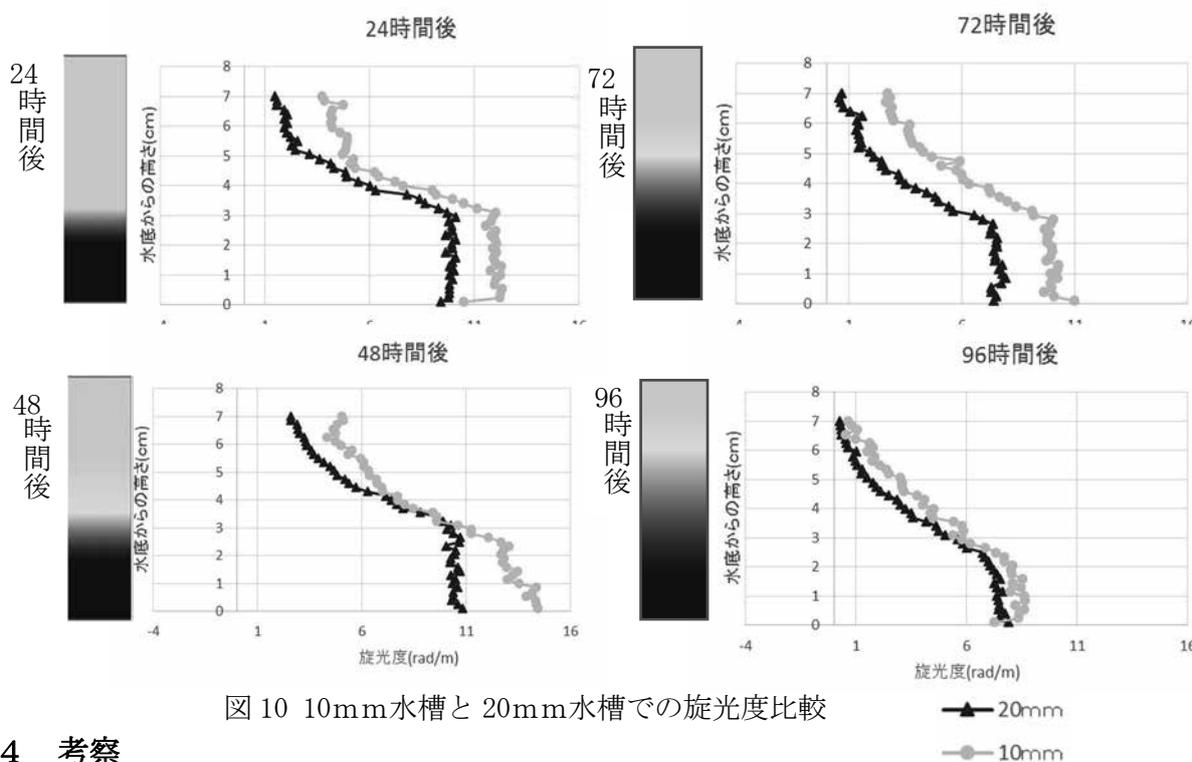


図10 10mm水槽と 20mm水槽での旋光度比較

4 考察

仮説1について、屈折率と旋光度との相関(図8)では、10mm水槽、20mm水槽いずれにしる、強い相関関係が求められた。しかし、旋光度は水深の深く屈折率が大きい部分でばらつきが見られ(図9○印箇所)、屈折率との相関も現れないことが多くなる。この原因は2つ考えられる。1つは時間経過によるシヨ糖の結晶の析出による旋光度の誤差、2つは屈曲現象による屈折率の測定限界である。

仮説2について、10mm水槽と20mm水槽での比較では、光線経路の小さい10mm水槽で得られたものの方がより正しい値を示していると考えられる。ただし、旋光角の値の小ささから、測定誤差の影響も大きい。この2つの水槽による結果から、私たちの仮説通り、濃度が一樣ならば水槽の厚さによらず旋光度もほぼ同じ値を示すが、一樣でないときは水槽の厚さによって測定される旋光度の値が変わることが確認された。しかし、その差について私たちは次のような二つの予想を立てていた。

- ① それまでの私たちの研究結果より、光線経路が長くなることで光は水底に向かって屈曲することが分かっている。光は入射位置よりも水底に近い部分、つまり濃度の高い部分を通るため、水

槽が厚くなれば測定される旋光度は大きくなる。

- ② 旋光度は旋光角を光線距離で割ることで算出している(式2)。この場合水槽の厚さを光線距離としているが、光線が曲がることで溶液中を通過する距離が延び(図11)、水槽の厚さより長くなってしまふ。光線距離が延びることで旋光角は大きくなるが、計算上の経路は実際の経路より小さいので、測定されるされる旋光度は大きくなる。

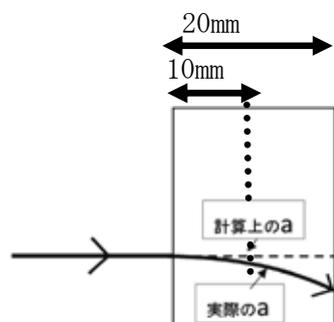


図11 光線距離の模式図(a=光線距離)

$$\begin{aligned} \text{旋光度 } d \text{ (rad/mm)} \\ = \text{旋光角 } \theta \text{ (rad)} \\ / \text{光線距離 } a \text{ (mm)} \end{aligned}$$

式2 旋光度 d の求め方

しかし、結果は、24、48、72、96 時間、いずれの時間帯においても、20mm水槽での旋光度は 10mm水槽での旋光度より小さくなるという、真逆の結果となった。

5 結論と今後の展望

屈折率の測定では溶液の厚さが小さくても水プリズム法により屈曲の影響を最小限に抑えて測定することができる、しかし、旋光度を測定するときには、その値の小ささからある程度の厚みのある水槽を用いて行う必要がある、と私たちは当初考えていた。

しかし、今回の実験結果から水槽の厚さが大きいと、屈曲の影響により屈折率は大きく算出されるが、旋光度は小さく算出されるということが明らかになった。濃度勾配のある溶液の旋光度で生じる差は、屈折で生じる差とは明らかに真逆のものである。今後私たちは、ショ糖溶液の濃度の勾配が光の通過に与える要因を、屈曲以外で考えていかななくてはならない。また、屈折率の測定方法についても濃度の高い部分についてはさらなる改良が必要であろう。

旋光度については温度が高くなると同じ濃度、同じ振動数の光でも若干小さくなることも知られている。今回の旋光度は、水槽のそれぞれの高さに対し何回か同時実測を繰り返して得られたデータを平均化することで示しているため、2つの水槽による比較はできると判断している。しかし、今後は実験室の温度管理も必要だと考えられる。今回の結果からだけでは判断できないが、経過時間 96 時間後で 10mmと 20mm水槽の旋光度の差が急に小さくなったようにもみられ、分子の拡散速度やショ糖の分子構造による影響も考慮に入れて検証を行っていきたい。

自然界にある物質の濃度はいつも同様とは限らない。濃度の勾配があることで生じる影響を理解し、考慮して測定することで、物体の状態を変化させずに中の状態を正確に測定できるシステムをつくることに繋がると考えている。

6 参考文献

- (1) 屈折率勾配を持つ溶液における旋光度の研究
清水東高自然科学部平成 29 年度理科研究論文
- (2) 屈折率勾配を持つ溶液の等価レンズと光線経路の明るさ
清水東高自然科学部平成 27 年度理科研究論文
- (3) 屈折率勾配を持つ溶液の結像作用の研究
清水東高自然科学部平成 26 年度理科研究論文
- (4) 光てこによる測定原理 小学館 日本大百科全書