

2 屈折率の連続変化と光の進路

1 研究の動機

私達は平成10年度よりレーザー光を利用した光の実験をテーマに研究を続けている。今年の4月、私達は水中を進む光の進路について、大変面白い現象があることを知った。

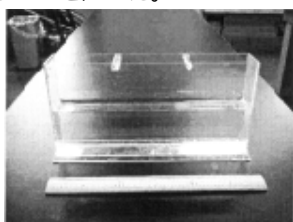


図1 ショ糖を沈めた水槽

図1のような横幅30cmほどの水槽の中に白砂糖つまりショ糖を大量に沈め、攪拌することなくそのままにしておく。24時間ほど後に、この水槽の顔面から水平にHe-Neレーザー光を照射すると、レーザー光は図2の写真のように、水中を直進せず、なめらかな曲線を描いて進んでいくのである。

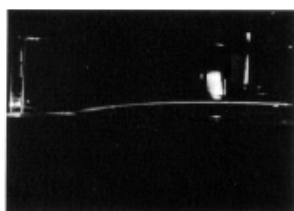


図2 なめらかに屈曲する光

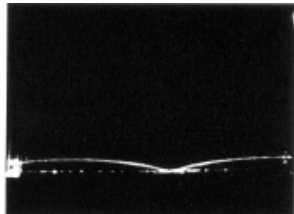


図3 2回目のループ

図3は水槽の底でレーザー光が反射し、2回目のループが観察されたときの写真である。これら的大変美しい現象を最初に見たときの印象は忘れない。この現象の理由は何か、ショ糖の他にも

この現象を起こすものはあるのか、そんな疑問が次々に浮かび研究に取り組んだ。

2 研究の目的

水中に拡散したショ糖のため、周囲の濃度や屈折率は変化していると考えられる。なぜならショ糖を沈めた溶液を攪拌して濃度を一様にしてしまうと、先ほどの現象が見られなくなるからである。溶液の屈折率が深さにより離散的な変化をしている場合、光線の進路は各境界面で図4のような屈折を繰り返すであろう。分布がさらに細かくなれば、図5のように屈折をするはずである。したがって、光線の進路がなめらかな曲線を描くということは、溶液内で屈折率の分布が連続的に変化しているからだと考えられる。

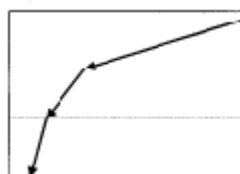


図4 屈折率分布 [1]

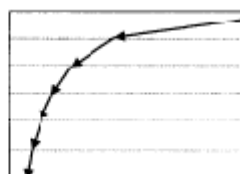


図5 屈折率分布 [2]

そこで私達は、「物質が自然に拡散してできた溶液の屈折率は、深さによって連続的に変化しており、深いところほど屈折率の値が大きくなっていく。そのために、光の進路がなめらかに曲がる(図6)」という仮説を立てた。この仮説を検証するため、溶液の屈折率を深さごとに測定し、光の進路と屈折率の変化との関係を考察することが研究の目的である。

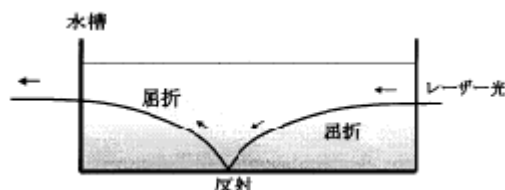


図6 屈折率分布が連続変化をする場合

3 研究の方法

光源として、He-Neレーザーを使用する。私達は、次の手順で研究を進めることにした。

- (1) 溶液中で光が、なめらかに曲がって進む現象は、ショ糖の他にも見られるか。
- (2) 溶液の屈折率を測定するにはどうすればよいか。
- (3) 溶液の屈折率を深さごとに測定できないか。
- (4) 光の進路と屈折率の変化との関係を考察。

4 研究の結果

(1) ショ糖以外の物質での実験

最初に、ショ糖以外の物質でもこの現象が起こるか試してみた。横幅30cmの水槽を用意して、汲み置きの水を深さ8cmまで入れる。そして中の水が攪拌されないように注意しながら、静かに実験用の物質を沈める。拡散させる物質はショ糖、塩化ナトリウム、そしてPVA入り洗濯糊を使ってみた。水槽の中の溶液を揺らさないように十分注意した。

8時間後及び24時間後に、水槽の側面からレーザー光を照射したところ、いずれも図2と同様な光のループを観測することができた。図7の写真は塩化ナトリウムの場合である。塩化ナトリウムの場合、容器の内壁に気泡が発生しやすく、光の観察がしづらいこともあった。洗濯糊では、底に沈めたものが一様な拡散をしないせいか、あまりなめらかな曲線にはならなかった。また、水槽の底に溶け残った物質があると、レーザー光が水底で乱反射してしまうために、2回目以降のループが観察しにくくなることも分かった。

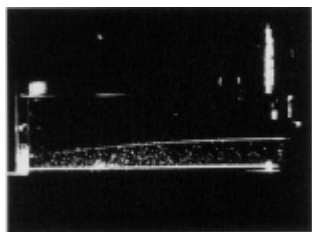


図7 塩化ナトリウムの場合

図8と図9は、同じ水溶液にレーザー光を水平に照射したとき、照射する位置を上下させた場合の様子を比較したものである。照射する位置を低くするほど、光の曲がり具合が大

きくなることが分かった。

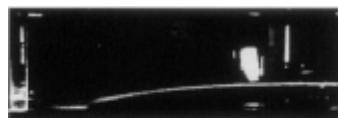


図8

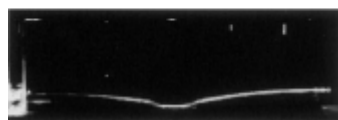


図9

こうして、同じような現象が起こる物質は身近にいろいろとあることを確認することができた。

(2) 一様な水溶液の屈折率の測定

次に、溶液の屈折率を測定する方法に取組んだ。初めは条件を簡単にして、濃度差のない一様な溶液を用意し、その溶液の屈折を測定する方法を考えた。

最初に試みたのは屈折角を測定する方法である。図10のように、溶液を入れた四角形の容器の内壁P点とQ点に印をつけ、R点とS点にはマチ針を刺す。マチ針を刺す位置は、容器の外側から覗いたときにP・Q・R・Sの4点がすべて重なって見える場所である。この4つの点を結べば、屈折して進む光の進路が求められる、その屈折角から溶液の屈折率を計算することができる。この方法は物理の授業で学習した「台形ガラスの屈折率測定」の実験を応用したものである。

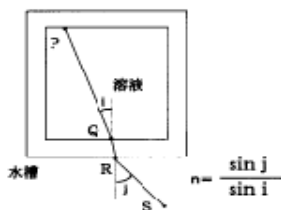


図10 屈折角を利用する方法

ところがこの方法では、測定誤差が大変に大きいことが分かった。例えば、空気に対する水の屈折率は1.33程度だが、私達が測定した結果では数%の相対誤差が出てしまった。ショ糖の飽和溶液と水道水とで、それぞれ屈折率を測定しても、その差を比較できないほど誤差が大きい。したがってこの方法では、屈折率を深さごとに測定する実験に利用することができない。

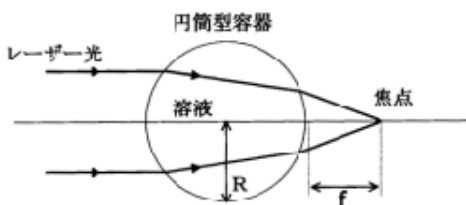


図11 焦点距離を利用する方法

第2方法として、溶液を入れた円筒型の容器をレンズに見立て、レーザー光を照射し、後方に光が焦点を結ぶ位置までの距離を測定することで、溶液の屈折率を計算する方法を試みた。図11は円筒型の容器を真上から眺めた場合の図である。容器の半径をR、光が焦点を結ぶ位置までの距離をfとすれば、内部の溶液の屈折率は

$$n = 2(R + f) / (R + 2f)$$

という式で求めることができる。容器として、メスシリンダーやビーカーなどが利用できる。大きなビーカーを使うほど測定しやすいため、1000mlのものを使用した。結果の一例を表1に示す。この方法で約ひと月ほど測定を試みたが、残念なことにこの方法も、半径と焦点距離の測定誤差が大きく影響することが分かった。

種類	半径R [mm]	焦点距離f [mm]	屈折率
水	56.1	57.2	1.33
水	56.2	55.7	1.34
ショ糖飽和水溶液	53.5	47.2	1.36
ショ糖飽和水溶液	53.5	45.8	1.37

表1 測定結果の一例

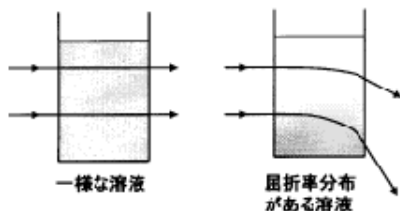


図12 側面から見た光の進路

さらに、この方法には大きな問題点があることも分かった。溶液の屈折率が深さによって変化している場合には、図12のようにレーザー光が溶液中を通過する途中で、下方に曲がってしまうのである。これでは、屈折率を

深さごとに測定する実験には利用できない。この点が実験上の大きな課題となった。

(3) 溶液の屈折率を深さごとに測定する

濃度差のある溶液の屈折率を深さごとに測定する実験方法として最初に採用したのは、次の方法である。図13の写真のようなプリズム型の容器を製作した。

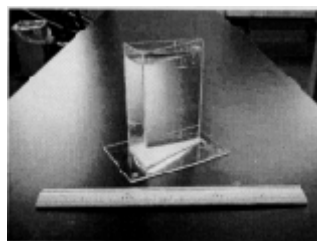


図13 製作したプリズム型容器

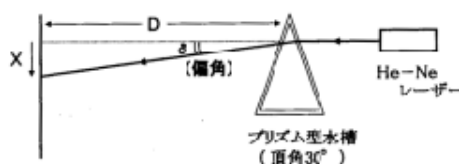


図14 偏角から屈折率を計算する

図14はこの容器を上から眺めたものである。He-Neレーザー光を照射して、その偏角の大きさから、内部の溶液の屈折率を求めることができる。この方法なら、スクリーンまでの距離Dを大きくするほど精度よく屈折率を測定できる。また、レーザー光がなるべく容器の隅に近いところを通過するように工夫することで光路を短くし、屈折率が深さによって変化している場合でも、レーザー光が溶液中を通過する途中で下方に曲がるという影響を小さくしている。容器の頂角αは30度と小さくした。この場合、光線の偏角δと溶液の屈折率nとの間には近似的に

$$\delta = \alpha (n - 1)$$

という関係式が成立する。図15のように光源を上下させ、各水深で屈折率を測定した。

一例として、この水槽にショ糖を90g沈め、24時間経過した後で、各深さでの屈折率を測定した結果を図16に示す。縦軸は水深を、横軸は空気に対する溶液の屈折率を示している。このグラフから、屈折率が深さによって連続

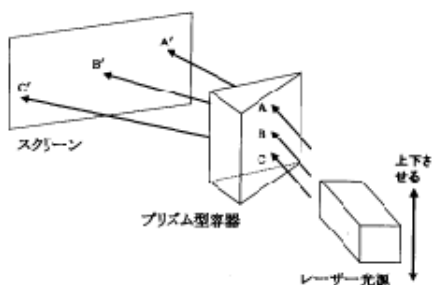


図15 屈折率を深さごとに測定

的に変化していること、さらに、深いところほど屈折率の値が大きくなっていることが確認できた。

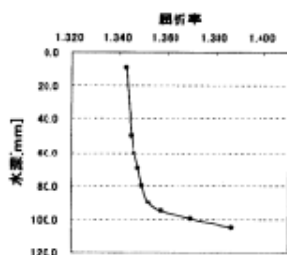


図16 ショ糖の水溶液（24時間後）

次に実験方法を改良して、プリズム型の代わりに90度の角度を持つ四角形の容器を使って測定する方法を考えた。図17の写真が、使用した容器である。図18はこの容器を上の方から眺めたものである。

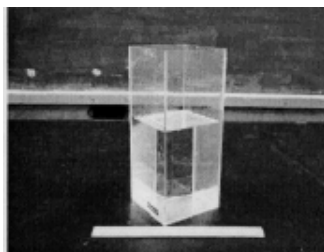


図17 四角形の容器

光線の偏角の大きさから溶液の屈折率を求めるという原理は先ほどと同じであるが、計算式は多少複雑になる。データ処理には表計算ソフトを活用した。四角形の容器を使う場合、光線の偏角が大きいため、より精度の高い測定ができるということが分かった。

図19は、深さ16cmの水を入れたこの容器にショ糖を沈めて、24時間後に水深と屈折率の

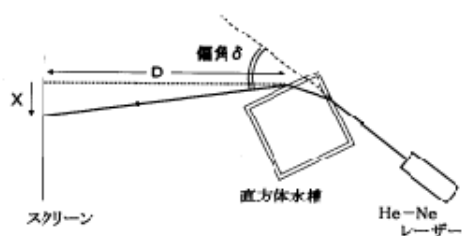


図18 測定の原理

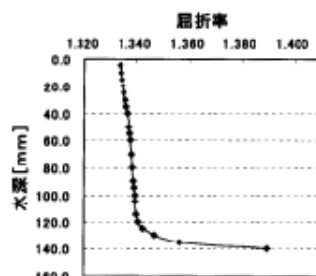


図19 ショ糖の水溶液（24時間後）

関係を測定した結果である。プリズム型容器の場合よりも精度がよいため、グラフもきれいなものが得られた。測定方法が確立したため、後はデータを蓄積することに専念した。

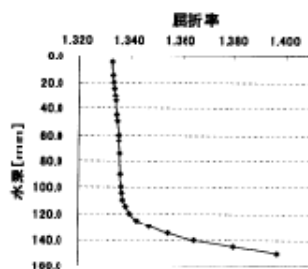


図20 塩化ナトリウムの水溶液（24時間後）

図20は、塩化ナトリウムを沈めて24時間経過した後の結果である。これらのグラフはいずれも、物質が自然に拡散してできた溶液の屈折率が、深さによって連続的に変化していること、そして深いところほど屈折率の値が大きくなっていることを示している。このため、溶液中を進む光の進路がなめらかに曲がることになる。こうして、最初に立てた仮説を実験で確認することができた。

ところでグラフをよく見ると、水深が深くなり、拡散する物質の源に近づくほど、屈折

率の値は急激に大きくなっている。つまり、屈折率が変化する割合が一定ではないということになる。この事実は、レーザー光が曲がる様子からも理解できる。

例えば前述した図8と図9の写真を比較すると、同じ水溶液にレーザー光を水平に照射したときに、照射する位置を低くするほど、レーザー光の曲がり具合が大きくなっていた。この理由は、水深が深いところほど、同じ深さだけ下がった場合に屈折率がより大きく増加するため、光が屈折する割合も大きくなるためだと解釈できる。

次に経過時間による屈折率分布の比較について分析した。図21はショ糖を水槽に沈め、8時間後と24時間後に屈折率を測定した結果を比較したものである。8時間後と比べて24時間後の場合には、屈折率が大きく変化しているまた、同じ屈折率の値を示す水深が上の方に移動してきていることも読み取れる。この2つの事実は、24時間後の方が、拡散するのに十分な時間があつたことで説明できる。

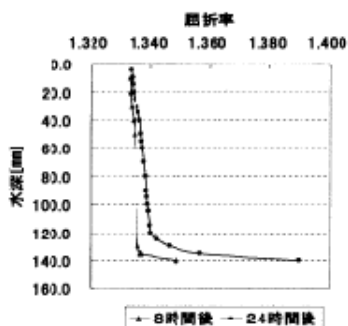


図21 経過時間による比較

分析をさらに進め、経過時間を同じにした場合に、ショ糖と塩化ナトリウムとグラフに差が見られるかどうか調べてみた。図22には、拡散が始まってから24時間後に測定した場合のグラフの一例を示してある。私達は、2つのグラフの傾きに注目した。塩化ナトリウムの方が、大きな傾きをしている。

この違いは、拡散する粒子の質量の違いによるものではないだろうか。塩化ナトリウムは、溶液中でイオンに分解している。ナトリウムイオンも塩化物イオンも、ショ糖分子に比べれば質量ははるかに小さい値である。そ

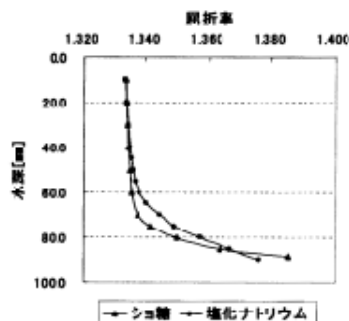


図22 拡散する物質による比較

のため、溶液中を拡散しやすいので、ショ糖分子に比べて水面に向かって移動しやすく、それがグラフの傾きの差となって現れていると考えられる。

5 考察

- (1) ショ糖の他、塩化ナトリウムでも光が溶液中をなめらかに曲がる現象を確認できた。
- (2) 溶液の屈折率を深さごとに測定し、水深と屈折率との関係をグラフ化することができた。グラフから、レーザー光が曲がって進む現象を理解することができた。
- (3) 物質が自然に拡散してできた溶液の屈折率は、深さによって連続的に変化しており、深いところほど屈折率の値が大きくなっていることが検証された。
- (4) 屈折率が変化する割合は一定ではなく、水深が深くなり拡散する物質の源に近づくほど、値が急激に大きくなることも分かった。
- (5) 経過時間を同じにした場合、ショ糖と塩化ナトリウムとでは屈折率分布に差が見られる。この違いは、質量の差による拡散のしやすさに関係しているものと考えられる。
- (6) 拡散という現象を、屈折率という視点から捉えることができた。無色透明な溶液に対する拡散現象も、屈折率分布から解析できることが分かった。
- (7) 今後は、屈折率の変化について、拡散する粒子の質量差からも調べてみたい。

6 参考文献

新訂「物理 B」 大日本図書
理化学辞典第4版 久保亮五 他編 岩波書店