

### 1 3 拡散により生じた屈折率分布の研究

#### 1 はじめに

静かな水の中に別の物質を入れると、そのまま放置しておいても、その物質は次第に周囲に広がっていく。この現象を、拡散という。私たちはこの現象に興味を持ち、2年前から研究に取り組んできた。昨年度の研究では、塩化ナトリウムや水ガラスなどのように、水中に拡散していく溶質が無色透明な場合について重点的に研究を進めた。その結果、

- (1) 無色透明な溶質の拡散は屈折率分布の測定で解析できることがわかった。
- (2) 屈折率分布の測定から、液温や経過時間と拡散との関係について解析できた。
- (3) 屈折率分布を測定するための手法を工夫し、比較することができた。

以上のことが研究の成果としてあげられる。しかし、屈折率分布の測定方法については、装置の制作や精度などについて課題が残った。

#### 2 研究の目的

今年度の研究でも、水中に拡散していく溶質が無色透明な場合について重点をおくことにした。そして、拡散で生じた溶液内の屈折率分布そのものを研究テーマとした。その目的として、

- (1) 屈折率分布の新しい測定方法を開発し、測定を試みること
- (2) 拡散により生じた屈折率分布の様子を、各種の溶質で比較すること

以上の視点から研究を行なった。

#### 3 研究の方法

写真1の容器は、水を入れた水槽にショ糖を沈め、攪拌せずそのまま放置しておいたものである。時間の経過とともに、底に沈めたショ糖は水面に向かって拡散していく。

無色透明なため、拡散の様子を直接に観察することはできないが、この内部は溶質の濃度に応じて、屈折率分布が水深ごとに連続的に変化しているはずである。

図1は、屈折率分布の測定のために、私達が2年間にわたり実施してきた方法の原理である。これは、溶液を入れた透明な三角柱の水槽をプリズムに見たて、側面からレーザー光を照射するという方法である。溶液の内部は拡散の程度に応じた濃度分布を形成しているので、屈折率も水深ごとに連続的に変化している。レーザー光の偏角を各水深ごとに測定することで、溶液内部の屈折率分布を計算で求めることができる。私達はこの方法を「水プリズム法」と命名している。

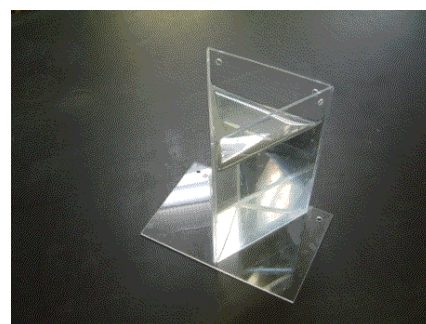


写真1 三角柱型の水槽

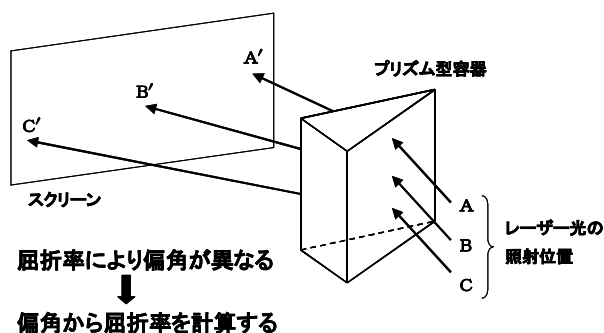


図1 水プリズム法

昨年度は図2のような新しい測定法も考え、利用した。溶液の入っている透明なメスシリンダーを円筒型のレンズに見立て、側面からレーザー光を照射するという方法である。レーザー光は、メスシリンダーを通過してから、水平方向に1度焦点を結んだ後、後方のスクリーンに向かって広がっていき、ある長さの明るいラインを描く。スクリーン上のラインの長さは、各水深の屈折率の違いにより異なるため、ラインの長さを測定することで屈折率を計算で求めることができる。私達は、この方法を「円筒レンズ法」と命名した。残念なことに、この方法は精度が悪く、測定には利用できないことがわかった。

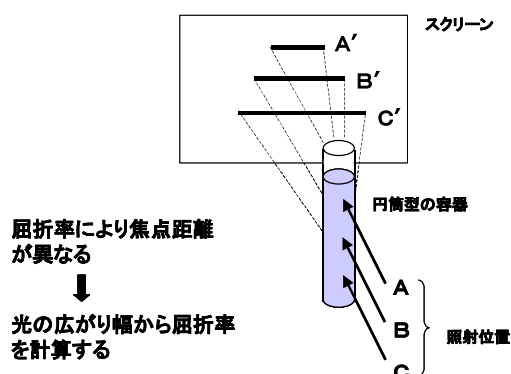


図2 円筒レンズ法

また、「水プリズム法」にも課題がある。それは、レーザー光源の位置を上げ下げする際に、光線の向きが微妙に左右にずれてしまうということである。そこで、本年度は、レーザー光源の位置を固定した状態で測定できるように工夫し、「水プリズム法」を改良した新しい測定方法を考えた。

図3に、その測定方法を示す。「水プリズム」の前にガラス棒を水平に設置する。ガラス棒は円筒レンズとしてはたらくし、通過したレーザー光は、ガラス棒の軸に垂直な向きに焦点を結んだ後、上下方向に広がる。広がったレーザー光は、「水プリズム」の各水深に対して、水平方向には等しい角度で入射する。

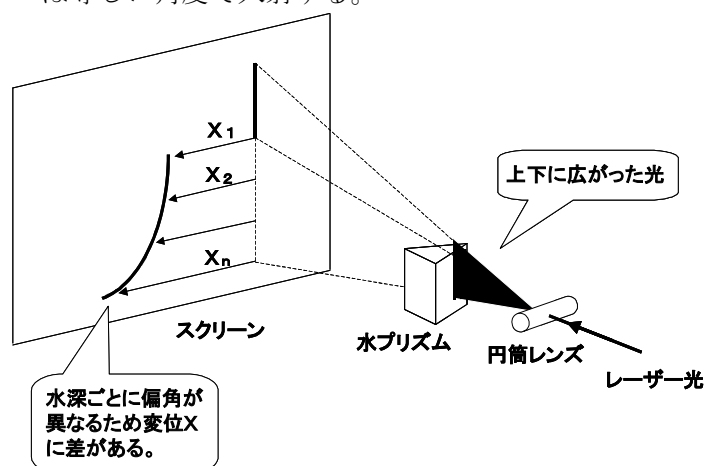


図3 新・水プリズム法



写真2 スクリーンに達した光

この方法なら、レーザー光源を上下に移動させる必要はなく、さらに水槽への入射角に対する水深毎の誤差も少なくなる。水槽の後方に置かれたスクリーン上には、各水深における偏角に応じてレーザー光が到達し、連続した光のラインが形成される。「新・水プリズム法」と命名したこの手法で、屈折率分布の測定を進めることにした。

スクリーンには各水深からの偏角に応じて、レーザー光が写真2のような図形を描く。水深が深いほど屈折率が高いことを一目で確認できるのも、今回の測定法の長所である。写真3は実験風景の一例である。プリズム型の透明水槽は、頂角が大きいほどレーザー光の偏角が大きく、測定精度がよいので、透明アクリル板で作成した頂角  $60^\circ$  の水槽で実験を進めた。写真4の右側の水槽が、今年度に新しく制作したものである。レーザー光は溶液中を通過するとき、屈折率が大きな下側へと進路が曲がる（図4）。この影響を少なくするためには、光が溶液中を通過する距離をできるだけ短くする必要がある。そこで本年度作成の水槽は、幅をできるだけ小さくした。



写真3 実験風景（新・水プリズム法）



写真4 昨年度の水槽との比較  
（右が本年度作成のもの）

なお、アクリル板が平行な板であれば、アクリル板の屈折率は光線の偏角に影響を与えないことが理論的に分かっている。したがって、水槽の材質に関係なく、内部の水溶液の屈折率を計算できる。

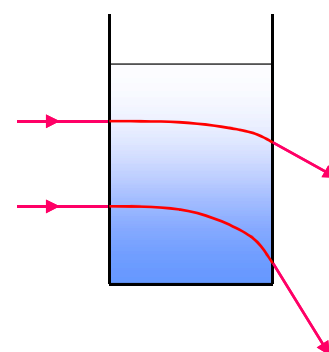
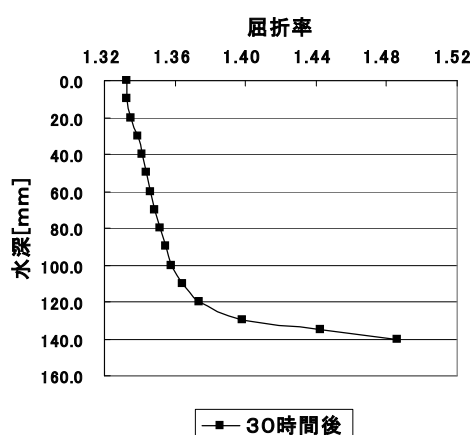


図4 光の進路の屈曲

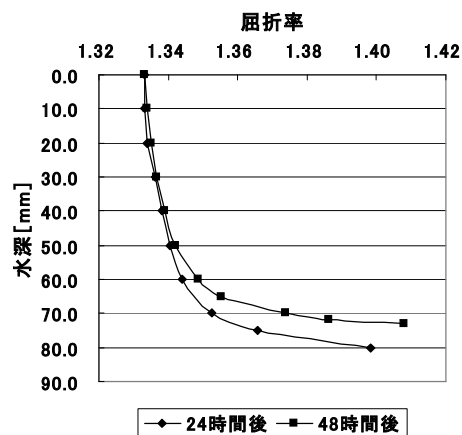
#### 4 研究結果

水底から拡散させる溶質は、昨年度と同様に「ショ糖」、「水ガラス」、「グリセリン」、「塩化ナトリウム」を使用した。いずれも無色透明な物質である。光源としてヘリウムネオン・レーザー光を使用した。

グラフ1は、水ガラスを水底に沈めて、静かに放置した場合の、30時間後の屈折率分布である。縦軸は水深を、横軸は溶液の屈折率をあらわしている。グラフから、水深が深くなるにしたがって、屈折率が大きくなっていくことが読みとれる。これは、水底から水面に向かって拡散していく溶質の濃度差によるものである。



グラフ1 水ガラス（液温 30℃）

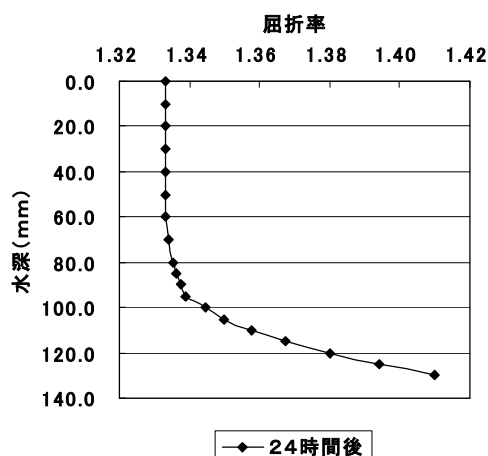


グラフ2 ショ糖（液温 30℃）

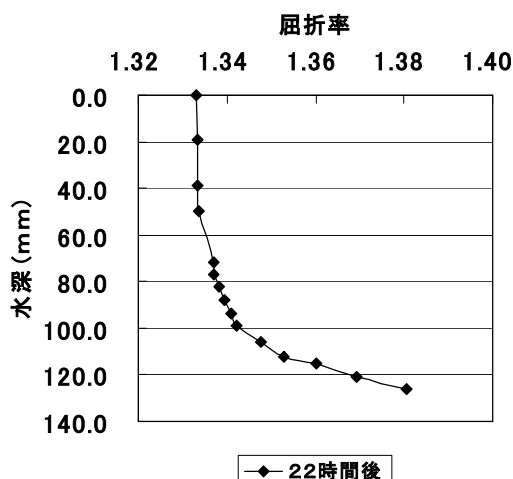
グラフ2は、ショ糖を水底から拡散させた場合の、24時間後と48時間後の溶液内の屈折率分布である。2つのグラフを比較すると、高屈折率を示す水深位置が、時間の経過とともに水面に

向かって近づいていることが分かる。このグラフから、濃度の高い領域が次第に水面へと移動していることがわかる。こうして、本年度の実験からも、昨年度の測定と同様の結果を得ることができた。

グラフ 3 は、塩化ナトリウムを水底から拡散させ、20 数時間経過した後の屈折率分布である。測定法の違いによる結果を比較するため、一昨年に「水プリズム法」で測定した結果のグラフの一例をグラフ 4 に示した。明らかに本年度の方（グラフ 3）が、測定値のばらつきの程度が少なく、グラフもなめらかであることがわかる。「新・水プリズム法」はレーザー光源の位置を移動させる必要がないために、各水深に対して常に安定した入射角度を維持できるので、誤差の少ない測定結果が得られることがわかった。



グラフ 3 塩化ナトリウム（新・水プリズム法）



グラフ 4 塩化ナトリウム（水プリズム法）

ここで、もう一度、先ほどの塩化ナトリウムの屈折率分布のグラフ 3 に注目したい。これは、水底より拡散させてから 24 時間経過した後のもので、水底には塩化ナトリウムがまだ溶け残っている。このグラフ 3 から、水底近くにおける溶液の屈折率の値は、1.41 を超えた値であることがわかる。この時点で、私達は屈折率の値について次の仮説を立てていた。すなわち、

**〔仮説〕 拡散させてから十分に時間が経過した後で、まだ水底に物質が溶け残っている場合には、水面から水底付近に近づくほど、溶液の屈折率はその物質の飽和溶液の屈折率に近づいていく。**

という仮説である。この仮説を確認するため、別に作成した塩化ナトリウムの飽和溶液で屈折率を測定し、比較することにした。さらに結果の再現性を確認するため、溶液の屈折率測定法も変えた。

新たな屈折率測定法として、回折格子によるレーザー光の干渉縞を利用した。図 5 は、この測定法の原理を示したものである。水槽の側面にはり付けた回折格子に、ヘリウムネオン・レーザーの光を照射する。水槽の反対側に生じる干渉縞の間隔を測定すれば、内部の液体の屈折率を計算で求めることができる。

水槽の側面に、1 ミリあたり 100 本の溝を刻んだガラス製の回折格子をはり付けた。水槽に、塩化ナトリウムの飽和溶液を入れ、この測定

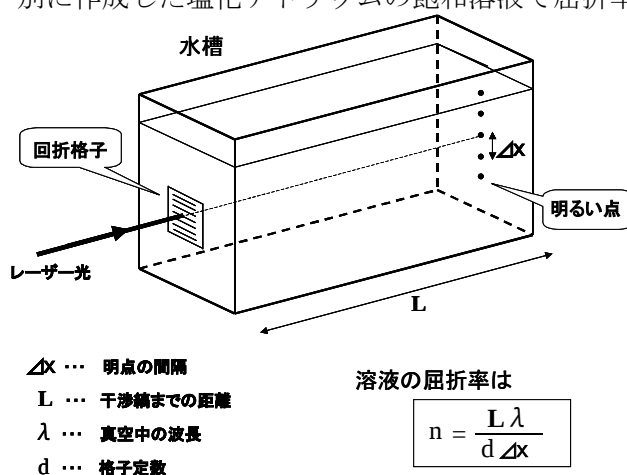


図 5 回折格子による屈折率測定法

法で屈折率を測定したところ、予想外の結果が得られた。塩化ナトリウムの飽和溶液に対して測定した屈折率の方が、わずかながら値が小さかった（表1）。すなわち、

|         | 溶け残り近傍     | 飽和水溶液      |
|---------|------------|------------|
| 塩化ナトリウム | $1.41 < n$ | $n = 1.40$ |

表1 屈折率  $n$  の測定結果（液温 30℃）

〔結果〕 水底に溶け残っている塩化ナトリウムの近傍の屈折率は、飽和溶液の屈折率よりも高い値を示す。

という傾向が見られたのである。

この結果に、私達は大変驚いた。仮説と結果とが異なっていた理由として最初に考えられるのは、実験誤差である。しかし、これまでに測定したデータを振り返ると、水深が浅いところにおける屈折率の測定値は、水の屈折率から大きく変化していない値が得られている。このため、測定方法の誤差だけが原因とは考えにくい。そこで私達は、もう一つの可能性として、「過飽和」が原因なのではないかと考え、新たに次の仮説を立てた。すなわち、

〔仮説〕 拡散させてから十分に時間が経過した後で、まだ水底に物質が溶け残っている場合には、溶け残っている物質近傍の溶液は過飽和の状態になっていることがある。このとき、屈折率は飽和状態になっているときよりも高い値を示す。

というものである。図6に、この概念図を示す。現在、溶質としてショ糖や塩化ナトリウムを使った実験を試みている。恒温槽を使い、液温のコントロールにも気をつけながら実験を進めているが、残念ながら仮説を裏付けるだけのデータを出すまでには至っていない。そのため、この仮説は今後さらに研究を継続しながら確かめていきたい。

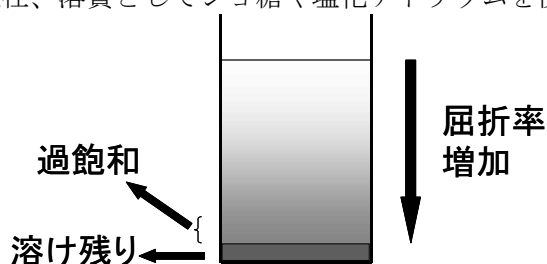


図6 過飽和の状態と屈折率分布

## 5 考察

今年度の研究を考察すると、次のようにまとめることができる。

- (1) 水底から溶質を拡散させると、時間の経過とともに、屈折率の高い領域が水底から水面へと移動していく。今年度の実験では、その様子をより正確に確認することができた。
- (2) 円筒レンズを利用した「新・水プリズム法」は、拡散の結果生じた溶液中の屈折率分布を測定するための有効な方法であることがわかった。
- (3) 回折格子による屈折率測定法では、溶液内部の光路長をある程度長くとらなければならない。しかし、光路長が長いと、水深による屈折率分布がある場合には、レーザー光が溶液中を通過するときに光の進路が曲がる効果が無視できなくなる。そのため、回折格子による屈折率測定法は、屈折率分布のない様な溶液の屈折率を測定するのであれば、手軽でかつ精度の高い測定法であるが、水深による屈折率分布の測定が目的の場合には適さないと考えられる。
- (4) 今後は、溶け残っている物質近傍の溶液が本当に過飽和の状態なのか、また、溶液の濃度と屈折率との関係についても研究していきたい。

## 6 参考文献

- |                      |           |                 |
|----------------------|-----------|-----------------|
| (1) 屈折率を利用した液体の拡散の研究 | 清水東高自然科学部 | 平成 18 年度理科研究論文集 |
| (2) 液体の拡散速度の研究       | 清水東高自然科学部 | 平成 17 年度理科研究論文集 |
| (3) 屈折率              | 山口 重雄     | 共立出版            |
| (4) 屈折率の連続分布と光の進路    | 静工高自然科学部  | 平成 15 年度理科研究論文集 |