

### 3 3 屈折率を利用した液体の拡散の研究

#### 1. はじめに

静かな水の中に別の物質の水溶液を静かに滴下し放置すると、滴下した溶液は次第に周囲に広がっていく（写真1～3）。この現象を拡散という。私たちはこの現象に興味を持ち、昨年の春から研究に取り組んできた。

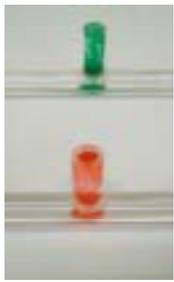


写真1  
(滴下直後)

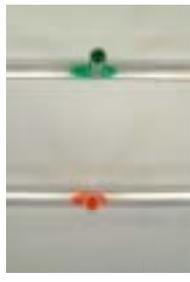


写真2  
(20秒後)

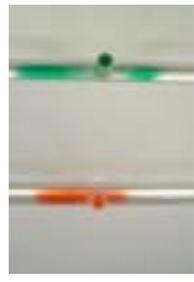


写真3  
(数分後)

昨年度の研究では、着色させた液体の拡散の実験から、

- (1) 拡散速度は液温が高いほど大きいこと
- (2) 拡散による変位の大きさは、経過時間の平方根に比例していること
- (3) 無色透明な溶質の拡散は、屈折率分布の測定をすることで解析できること

などが分かった。また、昨年度は主に食紅のような色のある液体を用いて拡散の実験を進めたが、その後の考察として

- (1) 測定精度の向上を目指すこと
  - (2) 無色透明な溶質の拡散に対する解析方法を工夫すること
  - (3) 水温に対する屈折率分布の差については、再実験が必要であること
  - (4) 溶質として各種のものを比較してみること
- などが課題として残った。

#### 2. 研究の目的

今回の研究では、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。拡散の様子が目視観測できないこの現象を解析するための有効な方法はないだろうかと考え、研究を進めた。研究の目的として、

- (1) 無色透明な溶質の拡散現象について解析する
- (2) 拡散速度と、水温との関係について調べる
- (3) 拡散速度と経過時間との関係について調べる
- (4) 各種の溶質で実験してみる
- (5) 新しい測定方法を考える

以上の5つの角度から研究を行った。

#### 3. 研究の方法

写真4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が、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。そこで昨年と同様にして、溶液の屈折率の分布を調べることにした。



写真4 三角柱型水槽

溶質が拡散した溶液は、深さに応じた濃度分布を形成しているはずである。そのため、屈折率も深さとともに変化していると考えられる。屈折率を測定するため、溶液を入れた透明な水槽の側面からレーザー光を照射する。そして各水深ごとにレーザー光の偏角を測定することで、溶液内部の屈折率分布を計算で求め、グラフ化することにした。解析には表計算ソフトを利用する。

図1は、溶液を入れた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。昨年度より実施している方法である。

図2はこの測定方法の原理を示したものである。私達はこの方法を「水プリズム法」と呼ぶことにした。

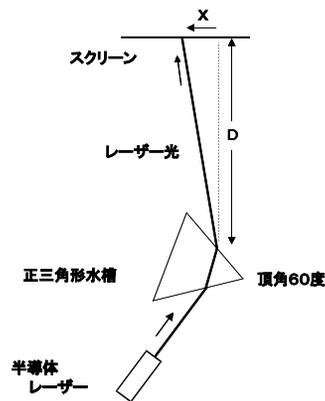


図1 水プリズム法

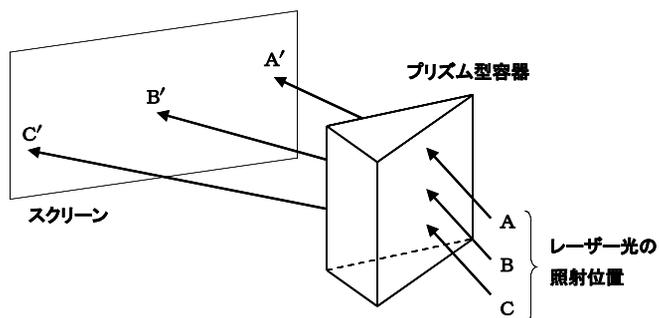


図2 測定の原理

光源として半導体レーザーを使用した。三角柱型の水槽は、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。各水深ごとにスクリーン上の光点の変位  $X$  の値を求めて、溶液の屈折率の計算をする。写真5は実験装置の外観である。右側にあるのが半導体レーザーである。中央に置かれているのが、プリズムに見立てた三角柱型水槽である。



写真5 実験装置の外観

#### 4. 研究の結果

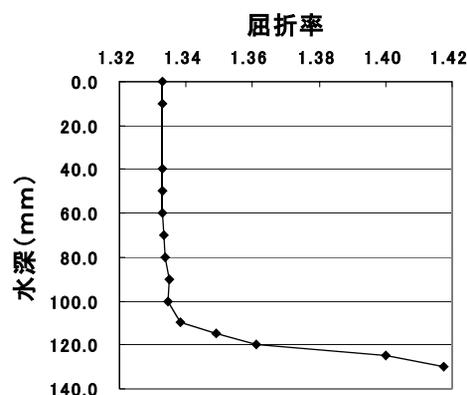
##### (1) 屈折率の上限値と溶液の飽和状態

水底に沈めた溶質の拡散が始まってから十分に時間が経過しても、まだ容器の底に溶質が溶け残っているような場合には、そのあたりでは溶液が飽和状態になっていると考えられる。このとき、屈折率もある値に近づくと予想される。私達は、溶液内の屈折率分布について、

**仮説1：溶液が飽和状態になっている場所に近づけば、屈折率もある値に収束する。それはレーザー光を用いて確認できる。**

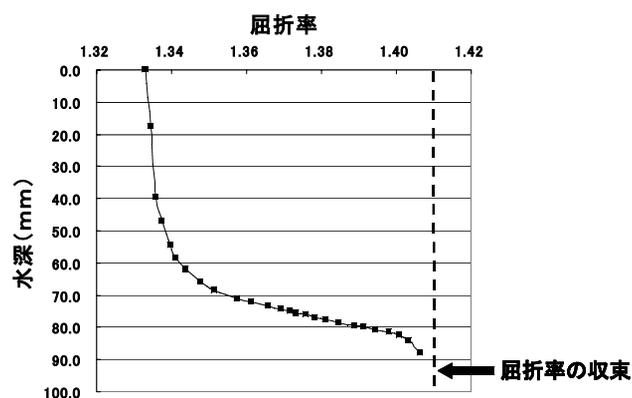
という仮説を立て、この予想のもとに実験を進めた。

グラフ1は、ショ糖を沈めて72時間経過したときの屈折率分布である。グラフから、水深が深くなるにしたがい、屈折率が大きくなっていくことが分かる。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。しかし、このグラフでは、屈折率の値が収束する傾向を読み取ることはできなかった。



グラフ1 ショ糖 (72時間経過後, 28°C)

グラフ2は、塩化ナトリウムを拡散させてから9時間後に測定したときのものである。グラフの傾きに注目してみると、最深部に近づくにつれて曲率が逆に変化している傾向が読み取れる。これは、屈折率がある一定の値に収束していくという仮説1を裏づけるものと考えられ、最深部が飽和状態に近いことが分かった。



グラフ2 塩化ナトリウム (9時間経過後, 14°C)

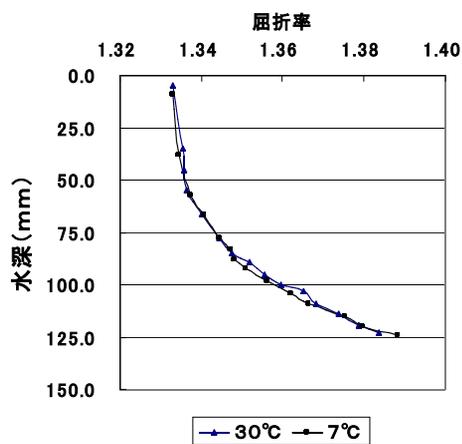
##### (2) 拡散速度と、水温との関係

分子の熱運動は、温度が高いほど激しくなることが知られている。そこで私達は、

**仮説2：液温が高いほど、拡散速度は速くなる。そのため、同じ水深に対して早めに高い屈折率を示す。**

という仮説を立てた。

昨年度は、この仮説を屈折率分布から裏付けるだけの結果を示すことはできなかった。例えば、グラフ3は昨年度の結果の一例である。拡散させる物質は、温度による溶解度変化が少ない塩化ナトリウムを使用した。拡散を始めてから92時間経過後のものである。このグラフからは液温が高い場合と低い場合とで、屈折率分布の差がはっきりせず、拡散速度の違いを読みとることはできなかった。



グラフ3 塩化ナトリウムの場合(昨年度の結果)

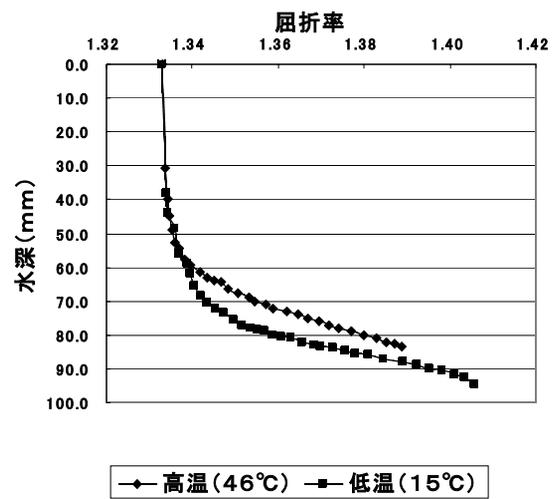
そこで、今回は実験精度を高める工夫を行った。まず、水槽の温度管理を正確にし、比較する温度もより高い水温で実験をした。そのため溶質を拡散させている間、三角柱型水槽は恒温槽(写真6)の中に入れておくようにした。

さらに、レーザー光の上げ下げに使用していた三脚を新しいものに変え、各水深に対するレーザー光の入射角が常に一定の角度で正確に照射できるようにした。

グラフ4は改良後の実験結果である。拡散を始めてから9時間経過後のものである。グラフ3と比較すると、水温の差に対する屈折率分布の違いが明確に現れている。水温が高い方が、同じ水深に対して早めに高い屈折率を示すことが分かった。こうして仮説2を裏付けることができた。



写真6 恒温槽



グラフ4 塩化ナトリウム(今回の結果)

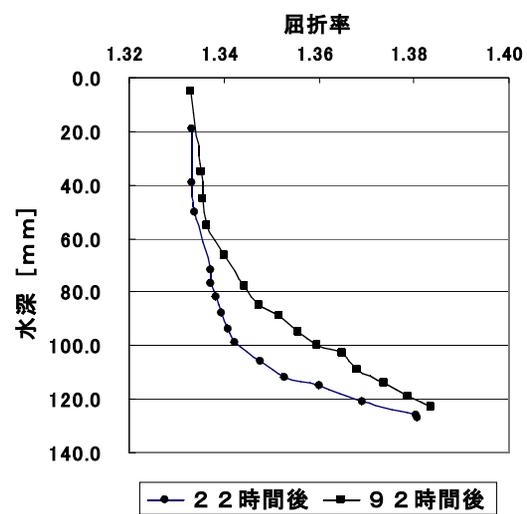
### (3) 拡散速度と経過時間との関係

水底に沈めた溶質は、拡散して次第に水面に移動していく。そこで、

**仮説3: 経過時間が長くなるほど、高屈折率を示す水深位置は液面に近づいていく。**

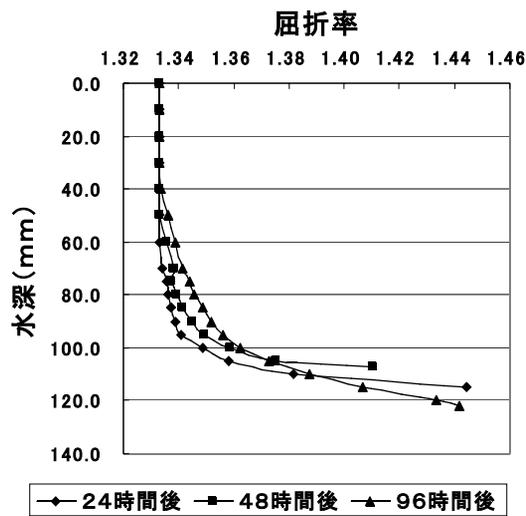
という仮説を立てた。

グラフ5は、昨年度に塩化ナトリウムで実験をした結果の一例である。拡散させてから22時間後と92時間後に測定した屈折率分布である。時間の経過とともに、屈折率の大きなところが水面に向かって近づいていることが読みとれる。



グラフ5 塩化ナトリウムの拡散(30℃)

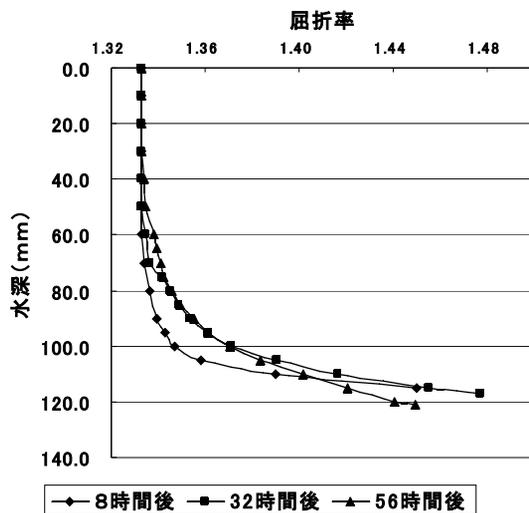
本年度は、水底から拡散させる溶質として「水ガラス」、及び「グリセリン」を使用してみた。どちらも無色透明な物質である。グラフ6は水ガラスを拡散させてからの屈折率分布を経過時間ごとに比較したものである。このグラフでも時間の経過とともに、屈折率の高い領域が水面に向かって近づいていることが読みとれる。こうして、仮説3を裏付けることができた。



グラフ6 水ガラスの拡散 (26℃)

ここで、私達は興味深い事実に気がついた。グラフ6において、96時間後の分布を示す曲線に注目してみると、水深100mmよりも深いところでは、同じ水深における屈折率の値が以前のものよりも小さくなっている。

これは、拡散を始めてから十分に時間が経過したため、最深部がもはや飽和状態ではなくなり、時間の経過とともに濃度が逆に下がってきていること、つまり薄まりつつあるからだと考えられる。



グラフ7 グリセリンの拡散 (27℃)

グラフ7は同様にグリセリンを水底から拡散させてみた場合の結果である。このグラフにおいても、56時間が経過した後の屈折率分布は、水ガラスと同じような傾向を示している。最深部がもはや飽和状態ではなく、時間の経過とともに濃度が低下しつつあることが分かる。こうして、目視観測ができない無色透明な溶質の拡散現象も、屈折率分布を測定することで、様々な解析が可能だということが分かった。

#### (4) 屈折率分布の新しい測定法の試み

最後に、本年度から取り組んでいる屈折率分布の新しい測定法について報告する。図3は、液体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した場合のものである。メスシリンダーを真上から見た図になる。照射したレーザー光はメスシリンダーを通過後に一度収束した後、後方にあるスクリーン上に向かって広がり、ある長さのラインを描く。

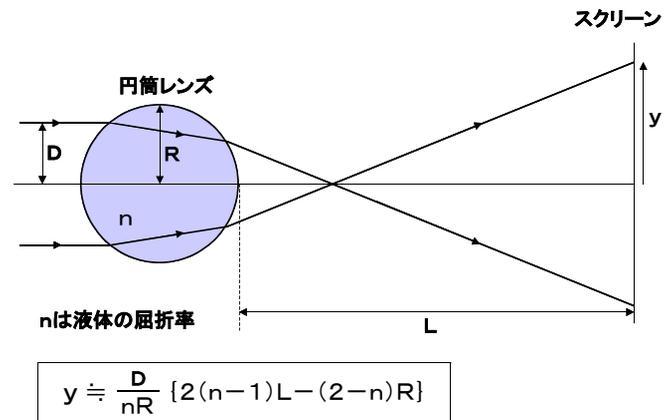


図3 円筒レンズに入射した光の進路

写真7は実験風景の一例である。後方のスクリーンに、明るく広がったラインが見える。

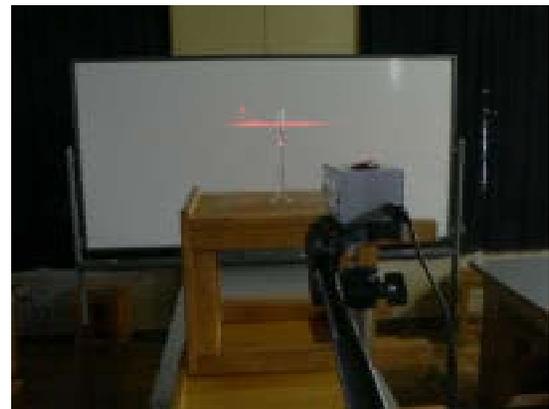


写真7 実験風景の一例

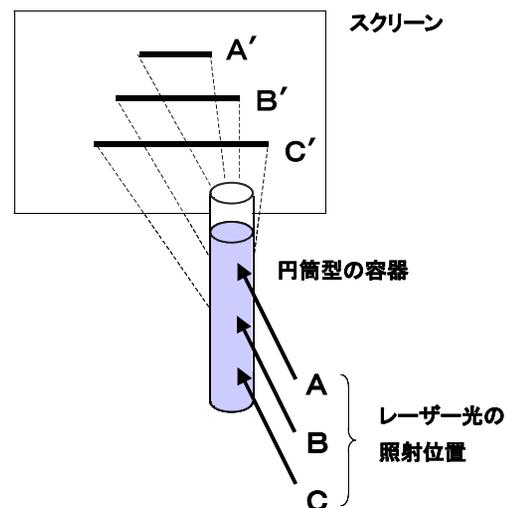
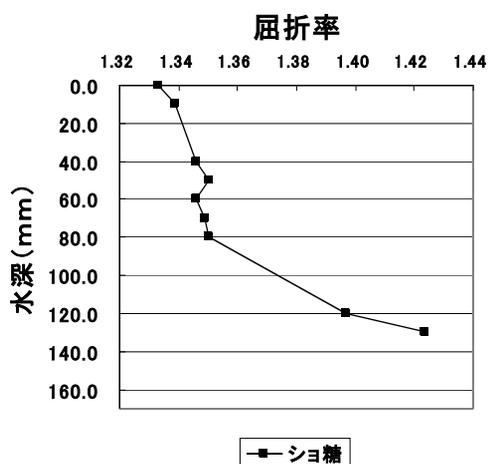


図4 円筒レンズ法の原理

図4は先ほどの図を立体的に図示したものであ

る。スクリーン上に広がるラインの長さは、各水深の屈折率により異なるため、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ことになる。私達は、この方法を「円筒レンズ法」と呼ぶことにした。水深が深くなるほど屈折率は高くなり、焦点距離は短くなるので、ラインの長さは長くなる。

グラフ 8 は、ショ糖を沈めておいたメスシリンダーを使って、円筒レンズ法で拡散による屈折率分布の様子を求めたグラフである。水温は 30℃ であり、拡散させてから 24 時間経過した後のものである。グラフ 8 から、拡散による濃度分布により、水深が深くなるにしたがい、屈折率が大きくなっていく様子が読みとれる。しかし、残念なことに現在までのところ、この円筒レンズ法による測定はまだ精度が悪く、水プリズム法と比較して誤差が大きいことが分かった。実際に計測を始めたばかりなので、解決すべき課題は多いのだが、試験管やメスシリンダーを円筒レンズに見立てるといった簡単な測定法で屈折率分布を求めることができるため、今後とも工夫を重ねて研究していきたいと考えている。



グラフ 8 「円筒レンズ法」で求めた屈折率分布 (ショ糖, 30℃)

## 5. 考察

今年度の研究を考察すると、次のとおりである。

- (1) 溶液が飽和状態になっている場所に近づけば、屈折率もある一定の値に収束していくことを、レーザー光を用いて確認することができた。
- (2) 液温が高いほど拡散速度は速くなることを屈折率分布から確認することができた。
- (3) 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。その様子を確認することができた。

- (4) 屈折率の値が逆に低下していく領域の存在を認めたことから、拡散することで溶質濃度が減少していく場所を推定できることが分かった。
- (5) 屈折率分布の測定は、無色透明な溶質の拡散現象を解析する手法として有効であることが分かった。
- (6) メスシリンダーを円筒型のレンズに見立てた新しい測定法 (円筒レンズ法) は、まだ誤差が大きい。誤差の原因としては、メスシリンダーの断面形状の真円からのずれ、レーザー光線幅の測定のしにくさ等、いくつかの要素が考えられる。これらを一つずつ解決しながら工夫をしていけば、屈折率分布の測定に利用できると思われる。
- (7) 今後は、屈折率と濃度の値との関係についても研究を進めていきたい。

## 6. 謝辞

今回の研究では、自然科学部物理班の 3 年生と理数科の 3 年生とが二人で、本研究の一部を理数科課題研究テーマとしても選び、実験に取り組んだ。そのため、自然科学部と課題研究との双方で、実験技術や測定上の工夫・データ等について、貴重な情報を互いに交換することができた。本論文では、グラフ 2 とグラフ 4 において、結果がより明白に現れている課題研究側での測定値を掲載させていただくことができた (参考文献 2)。ここに、深く感謝の意を表したい。

## 7. 参考文献

- (1) 液体の拡散速度の研究  
清水東高自然科学部  
県児童生徒理科研究発表論文集 2006 年版
- (2) 液体の拡散速度の研究  
～ 実験結果の再検証と実験精度の向上 ～  
遠藤道博, 横田純己  
清水東平成 18 年度理数科課題研究論文集
- (5) 屈折率の連続分布と光の進路  
静岡工業高自然科学部  
県児童生徒理科研究発表論文集 2004 年版