

12 液体の拡散速度の研究

1 はじめに

アクリルの容器の中に水を満たし、そこに別の物質の水溶液を静かに滴下する。水を攪拌することなく放置しておいても、加えた溶液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、その様子を調べるため研究に取り組んだ。

2 研究の目的

今回の研究では、水中に拡散していく溶液の様子、特にその速度や濃度分布について調べることにした。そのため、次の4つの角度から研究を行った。

- (1) 拡散速度は温度とどのような関係にあるのだろうか。
- (2) 拡散速度は時間とともに変化するのか。
- (3) 拡散する溶液が透明な場合は、どのように調べたらよいのだろうか。
- (4) 拡散速度の物質による差はあるのか。

3 研究の方法

拡散速度についての実験では、透明なアクリル管に水を満たし、中央にあけた穴から着色溶液を滴下する方法を考えた。着色溶液が左右に広がる様子について、肉眼で確認できる溶液の先端部分に注目して観察した。また、拡散する溶液が透明な場合には、水の入った容器をプリズムにみたてて、側面からレーザー光を照射して偏角を調べ、各水深ごとの屈折率分布を測定することにした。

4 研究の結果

まず、私たちは拡散速度を調べるにあたって、実験装置を作成した。写真1のような内径8mm、全長40cmの透明なアクリル管に水を満たして水平に静置しておく。アクリル管の中央には直径3mmの穴があり、そこから、着色溶液を滴下して、左右に広がる様子を観察した。肉眼で確認できる着色溶液の先端部の位置を測定し、拡散速度の目

安にすることにした。しかし、この装置では、溶液を滴下した時の水に対する攪乱の影響が大きく、拡散による左右への広がりを測定するには適さないことがわかった。

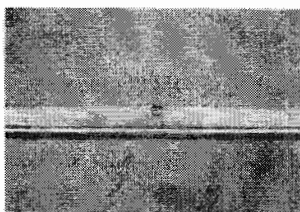


写真1 実験装置

そこで、装置を改良した。写真2のように、滴下する穴の部分に短いアクリル管を垂直に接続し、そこまで水を満たしておく。溶液はここから滴下した。

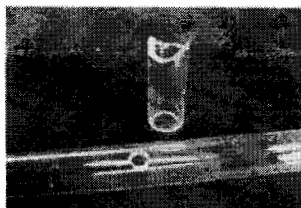


写真2 実験装置の改良

この装置では、写真3のように溶液は一旦上部で水と混ざり、その後徐々に下部へと移動していく。こうすれば、滴下したときの落下による水の攪乱や密度差による勾配の影響を少なくすることができる。

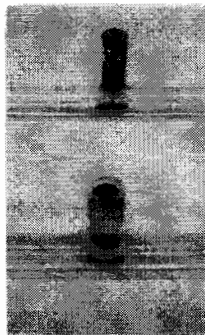


写真3 滴下直後

実験では色の付いた数種の溶液を同じ状況で拡散させて、共通する傾向を調べることにした。

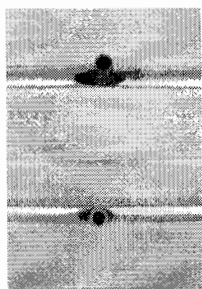


写真4 20秒後

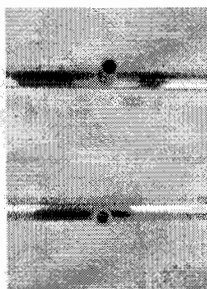


写真5 数分後

(1) 拡散速度と温度の関係について

図1は、アクリル管内の水温が30℃の場合と8.5℃の場合との比較である。8.5℃の場合は装置全体を氷水の中に入れて実験した。食紅で着色した溶液を拡散させ、肉眼で確認できる溶液先端部の位置に注目して測定し、時間との関係を調べた。グラフから水温が高温の場合の方が拡散速度が速いことが認められる。これは、温度が高いほど水中の分子運動が活発だからだと考えられる。

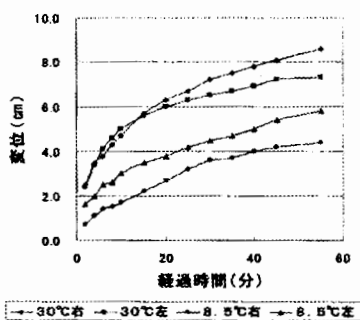


図1 水温による比較

(2) 拡散速度と時間との関係について

一定温度のもとで着色溶液が拡散する様子を、肉眼で確認できる溶液の先端部の位置に注目して測定し、時間との関係を調べた。溶液を滴下した時に水中に与える攪乱の影響を完全には除去できないので、測定時間をできるだけ長くにとって実験したいと考えた。そこで、アクリル管の全長を1mと長くしたものを作製して実験した(写真6)。

溶液に使用したものは黒インク、硫酸銅、緑の食紅、赤の食紅である。各溶液に共通に認められる傾向が、拡散速度と時間との関係であると思われる。

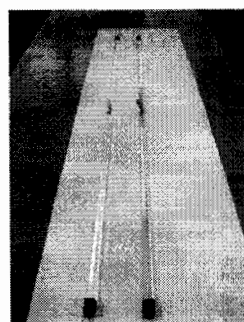


写真6 新型の実験装置

図2、及び図3は結果の一例である。グラフから、拡散速度は一定ではなく、時間と共に変化していることがわかる。

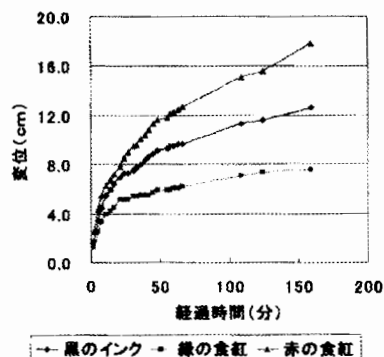


図2 変位と経過時間

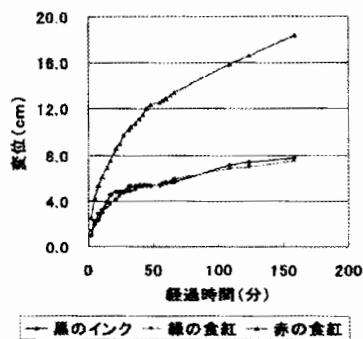


図3 変位と経過時間

またグラフの形から、私たちは拡散して溶液が移動する距離が経過時間の平方根に比例しているような印象を受けた。そこで、実験データにおいて変位の測定値を二乗した値を縦軸にプロットしたグラフをつくってみた。図4及び図5がそのグラフである。実験開始後50分を経過することからグラフが直線に近くなっている傾向が読みとれる。

したがって、変位の大きさは経過時間の平方根に比例していることがうかがえる。

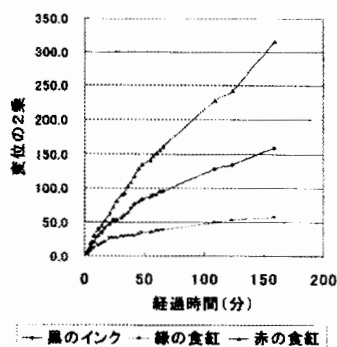


図4 変位の2乗と経過時間

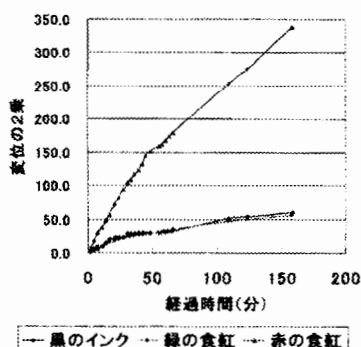


図5 変位の2乗と経過時間

文献を調べると、ブラウン運動する粒子の場合には、微粒子の平均移動距離が「温度や測定時間の平方根に比例する。」という「アインシュタインのブラウン運動に関する式」があることを知った。

$$X = \sqrt{\frac{RTt}{3\pi r\eta N}}$$

式中の記号は、微粒子の平均移動距離 X 、気体定数 R 、絶対温度 T 、経過時間 t 、アボガドロ定数 N 、粒子半径 r 、液体の粘性率 η である。私たちが使用しているのは必ずしもブラウン粒子ではないが、この式との関連についても調べていきたい。

(3) 拡散する溶液が透明な場合の測定方法

写真7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拡散していくが、溶液が無色透明なために拡散の様子を直接に観察することができない。そこで、私たちは

屈折率の変化に注目することにした。

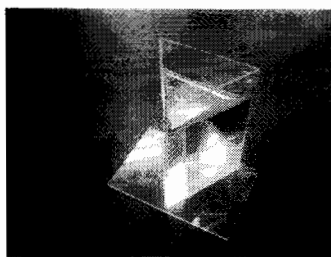


写真7 プリズム型水槽(頂角60°)

ショ糖が拡散した溶液は、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、液体の屈折率も深さとともに変化していると考えられる。そこで、溶液の屈折率の分布を調べることにした。この目的のため、私たちは平成15年度に静岡工業高校の自然科学部が理科研究論文集に掲載した屈折率の測定方法を参考にした。溶液を入れた三角柱の水槽をプリズムに見立て、側面からレーザー光を照射するという方法である。図6は、この測定方法の原理を示したものである。

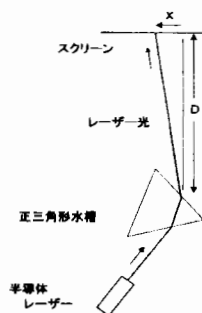


図6 実験装置の配置

各水深ごとにレーザー光の偏角を測定すれば、その値から各水深における溶液の屈折率を計算で求めることができる。三角柱型の水槽は、頂角が30°のものと60°のものの2種類を透明アクリル板で自作した。

図7は、ショ糖を沈めて20時間経過したときの結果である。グラフから、水深が浅くなるにしたがい、屈折率が小さ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。図8は、塩化ナトリウムを沈めて24時間経過したときの結果である。ショ糖の拡散の場合と同様の傾向が読みとれる。実験を比較してみると、水槽の頂角が60°の場合

の方が頂角 30° の水槽よりも測定精度がよいことも分かった。頂角が大きいほど、レーザー光の偏角が大きくなるからである。そこで頂角が 60° の水槽をもう1台製作し、以後は 60° の水槽を中心に、して実験を進めた。

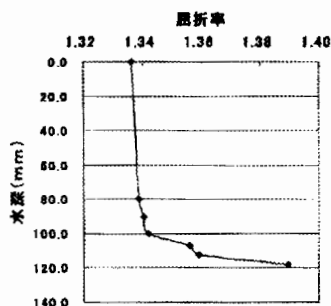


図7 水深と屈折率(ショ糖) [20時間後]

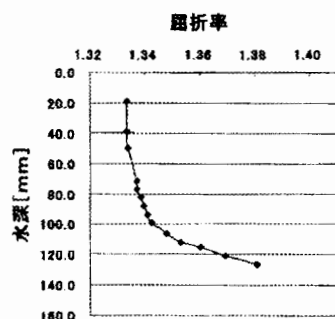


図8 水深と屈折率(NaCl) [24時間後]

図9は、塩化ナトリウムを沈めてから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。

溶液濃度と屈折率が単純な比例関係にあるわけではないと思われるが、透明溶液が時間経過と

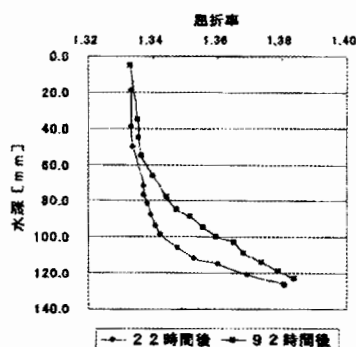


図9 経過時間と屈折率分布

ともに水面に向かって拡散していく状況を、屈折率分布から読みとることができた。

(4) 拡散速度の物質による差について

次に、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で差が見られるかどうかを調べた。図10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を比較したものである。

塩化ナトリウムの方が、高屈折率の領域が水面に速く近づいていることがわかる。

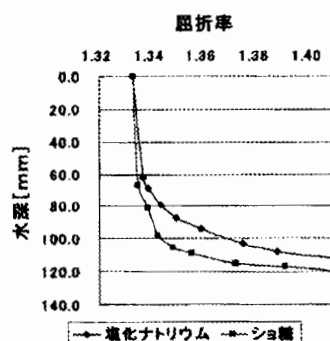


図10 物質による差[24時間後]

この違いは、拡散する物質における物質量の違いによるものと考えられる。塩化ナトリウムは、溶液中でイオンに電離しているが、ナトリウムイオン(物質量23)も塩化物イオン(物質量35.5)も、ショ糖分子(物質量342)に比べれば物質量が小さい値である。そのため、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速く移動する。その濃度分布の差が屈折率分布の差となって現れているものと考えられる。

物質量の違いによるものであることをはっきりと示すためには、各種の溶質を比較した実験をする必要がある。今後、継続して実験をしたいと考えている。

(5) 屈折率分布の水温による差

図11は、屈折率分布の水温による違いを調べた実験結果の一例である。実験は、水温による溶解度の変化が比較的少ない塩化ナトリウムで行った。常温で保管した水槽と、冷蔵庫に保管した水槽とで、屈折率分布に違いが出るかどうかを調べた。

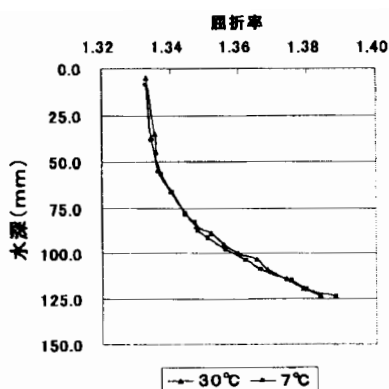


図11 水温と屈折率分布

私たちは、「水温が高いほど水面に向かって拡散しやすく、同じ水深に対して屈折率分布が早めに高い値を示すであろう。」という仮説を立てていた。しかし現在までのところ、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。測定精度や拡散させる方法の問題、あるいは塩化ナトリウムの吸熱反応の影響が関係するのかなど、多くの疑問が生まれた。これらは今後の研究課題にしたいと思う。

5 考察

- (1) 着色溶液の実験からは、拡散速度の大きさは温水の方が大きいことを確認できた。この理由は温度が高いほど水中の分子運動が活発であるからだと考えられる。
- (2) 各種の溶液を水中に拡散させてみたが、いずれも拡散速度は一定ではなく、時間とともに変化していることがわかった。
- (3) 溶液を滴下した際に水中に与えてしまう攪乱は、ごくわずかに見えても、その後の拡散の様子に少なからず影響を与えてしまうように思える。興味深いテーマなので、今後研究していきたい。
- (4) 変位の大きさが時間の平方根に比例しているような傾向が見られる。私たちが使用しているのは必ずしもブラウン粒子ではないが、アインシュタインのブラウン運動に関する式との関連について、今後も調べていきたい。
- (5) 透明な溶液が拡散する様子は、屈折率分布から調べることができた。時間の経過とともに、高屈折率の領域が水面へと近づいていく

ことも確認できた。

- (6) 水プリズムによる屈折率分布の測定では、各水深に対してレーザー光源の照射方向を正確に保つことが必要である。測定精度を向上させるいっそうの工夫が必要と考えている。
- (7) 「気体及び液体の拡散速度は、その分子量の平方根に比例する」というグレアムの法則が知られている。今後は物質量の差による比較実験にも取り組んで、この関係についても調べたい。
- (8) 水温の変化と屈折率分布の関係については実験データを増やしながら、継続的に取り組んでいきたい。

6 参考文献

- やさしいコロイドと界面の科学
 近藤 保、他 三共出版
 屈折率の連続分布と光の進路
 静工自然科学部
 平成15年度理科研究論文集
 屈折率 山口 重雄 共立出版