

1 屈折率勾配を持つ溶液が示すレンズ効果の研究

静岡県立清水東高等学校 自然科学部物理班

2 学年 加藤純大，渡邊信次郎，杉山大季，村田裕行，望月泰建，古川佳希，植松洸佑，
1 学年 荒井優花，池田亮太，竹内実喜子，竹森達也，伴野文香，広瀬奈緒子

1. はじめに

ショ糖の飽和溶液を、写真 1 のように真水を入れた水槽の底に静かに注入して放置すれば、時間経過とともに溶質であるショ糖は水面に向かって拡散し、やがて濃度に応じて屈折率が水面に向かって連続的に変化した溶液が形成される。このような溶液を「屈折率勾配を持つ溶液」と呼ぶ。私たち物理班は、このような溶液に現れる美しい光学現象について、平成 20 年度より研究に取り組んできた。この溶液を通して水槽背後の物体を覗くと、蜃気楼に相当する 3 個の像（写真 2）が観測される。物理班では、この像を上のものから順に像 A，像 B，像 C と名付けて解析を進めてきた。像 A と像 C は正立像であるが像 B だけは倒立像であること、さらに像 B だけは他の像に比べてぼやけて見えることも分かっていた。



写真 1 溶液の作成



写真 2 像

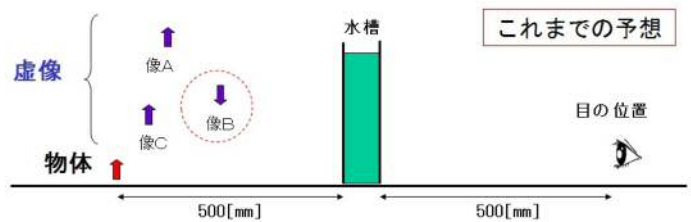


図 1 これまでの予想

平成 23 年度の研究では 3 個の像について解析を進め、各経過時間ごとの屈折率分布の実験式に光線追跡の理論を適用し、時間の経過とともに変化していく実際の像の様子を、理論的に追究した。

ところが平成 23 年の秋に、これまで予想もしていなかった発見をした。私達は写真 2 に見られるような 3 個の像をすべて「虚像」と考え、これまで像の様子を図 1 のように解釈していたのであるが、像の位置を詳細に調べた結果

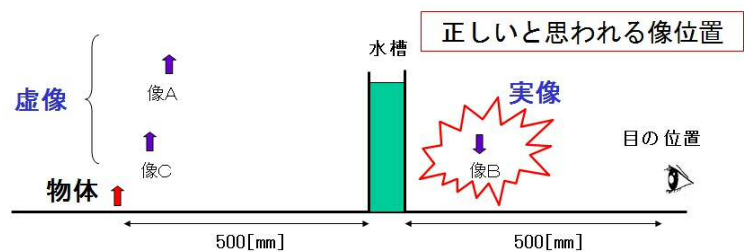


図 2 正しいと思われる像位置

から、中央に出現している像 B だけは水槽よりも観測者側に結像しているらしいと分かったのである。すなわち、出現する像の正確な配置は図 1 ではなく、図 2 のとおりであると考えられる。

2. 研究の目的

像 B が水槽よりも観測者側に結像していることが正しいければ、物体から発した光線は水槽よりも観測者側で一度収斂したのちに私達の目に入ることになる（図 3 を参照）。したがって、像 B は「実像」と解釈できる。そこで私達は、次の仮説を立てて研究に取り組むことにした。

仮説：屈折率勾配を持つ溶液は凸レンズのような光を集める作用を持ち、物体から発した光線の一部は水槽よりも観測者側で一度収斂したのちに観測者の目に届く。中央の像Bは、溶液のレンズ作用により結像した「倒立実像」である。

この仮説を確かめるため、屈折率勾配を持つ溶液を作成して、これまでに蓄積してきた実験方法と成果に新しい工夫も加え、次の点について研究を進めた。

- (1) 水溶液中の屈折率分布を一定時間ごとに測定し、時間経過による変化の特徴を調べる。
- (2) 屈折率勾配を持つ溶液が実際に「凸レンズ」のような集光作用を持つことを確かめる。
- (3) 水槽を通して物体を覗くときに出現する3つの像の位置を正確に測定するとともに、時間経過による像位置の変化についても調べる。

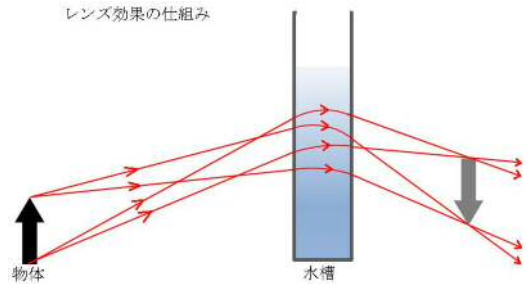


図3 実像のできる原理

3. 研究の方法

実験用の水槽は、先述の写真1のように、ゴムチューブをつけた注射器を使い、ショ糖の飽和溶液を水底に静かに注入して準備する。溶質は、水槽の底から水面に向かってゆっくりと拡散し、時間経過とともに濃度に応じて屈折率が水深ごとに連続的に変化した溶液ができあがる。

屈折率分布の測定の原理を図4に示す。水槽の角をプリズムに見立て、側面からレーザー光を照射する。各水深における屈折率に応じてレーザー光の偏角が変わるので、この偏角を各水深で測定し、内部の屈折率分布を計算で求めることができる。水槽側面が厚さの一定な平板であれば、側面の材質（アクリル）の屈折率が偏角に影響を与えることはない。

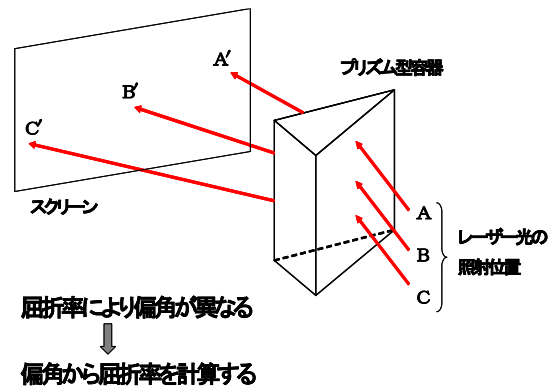
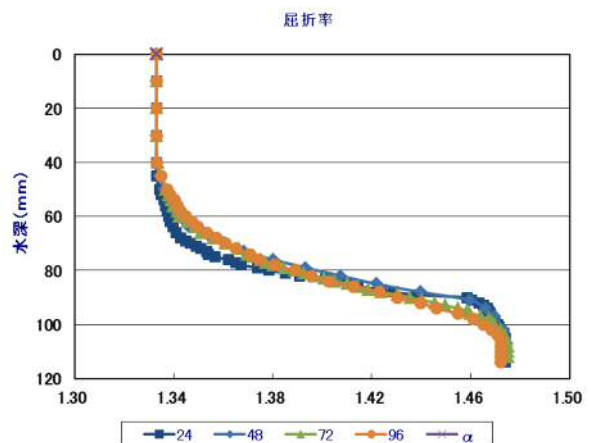


図4 水プリズム法

4. 研究の結果

(1) 溶液の屈折率分布の測定について

溶液の屈折率分布を測定した結果の一例をグラフ1に示す。縦軸は水深、横軸は屈折率である。屈折率分布の変化は24時間ごとに測定した。水深の変化に対する屈折率の変化が非常に大きくなる水深が存在していることが分かる。時間経過にともない拡散が進むため、屈折率の変化が次第に小さくな



グラフ1 屈折率分布の測定結果

時間経過にともない拡散が進むため、屈折率の変化が次第に小さくな

ることも読みとれる。測定は8回実施したが、いずれもグラフは同じ傾向を示すことがわかった。とくに本年度は、測定を行う場合における振動などの外乱を溶液にできるだけ与えないように細心の注意をして、水槽は理科室にある暗室に常時固定して実験をおこなった。

(2) 屈折率勾配を持つ溶液のレンズ作用の確認

仮説で述べたとおり、「屈折率勾配を持つ溶液」が凸レンズのような集光作用を持っているとすれば、物体から発した光線の一部は水槽を通過後、観測者側で収斂するはずである。そこで水槽の後方にスクリーンを置き、光源から発した平行光線が集光するかどうかを調べた。

上下に2色の色セロハンを張った光源から出た平行光を水槽に照射した(図5, 6)。その結果、水槽の反対側に設置したスクリーン上に、色が上下反転して集光することが確認された。さらに、光は水平方向には集光せず、スクリーン上に水平方向の線状に集光することもわかった(図7)。(水温は恒温槽で30°Cに保ちながら実験した。)

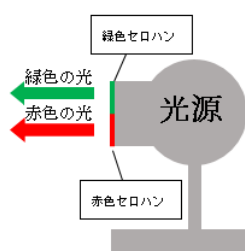


図5 光源

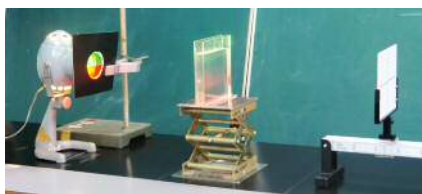


図6 実験風景

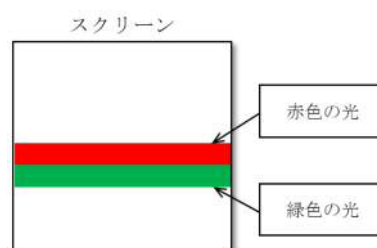


図7 集光の様子(模式図)

この結果から、溶液は鉛直方向(屈折率勾配を持つ方向)にのみ光を収斂させる作用を持つことが確かめられた(図8, 9)。以上の結果から、私たちの作成した溶液は、図10のような円筒型のレンズと同様の働きをしているものと考えられる。溶液内の屈折率分布のグラフからも明らかなように、水深の変化に対する屈折率の変化が非常に大きくなる水深が存在するため、ここを通過する光線は大きく屈曲し、水槽通過後に収斂する。また、水平方向には屈折率勾配を持たないので、溶液の集光作用は鉛直方向のみに働く。

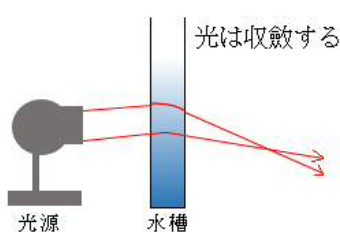


図8 鉛直方向には集光

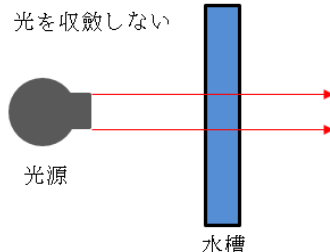


図9 水平方向には集光しない



図10 円筒レンズ

(3) 像の出現位置の測定

3個の像の位置を測定するため2つの方法を試みたが、ここではカメラの合焦位置を利用した方法について述べる。例えば像Bの位置を測定する場合には、最初にカメラで像Bにピントを合わせておく(図11上)。次に、ピントを固定したまま、今度は像Bが出現したと思われる場所の近傍に、比較用の板を置いて前後に動かす(図11中)。板にピントが合う位置を調べ、

そこから水槽までの距離を測定すれば、この距離が像Bまでの距離である（図11下）。像位置の時間変化も調べるため、この測定は24時間おきに実施した。

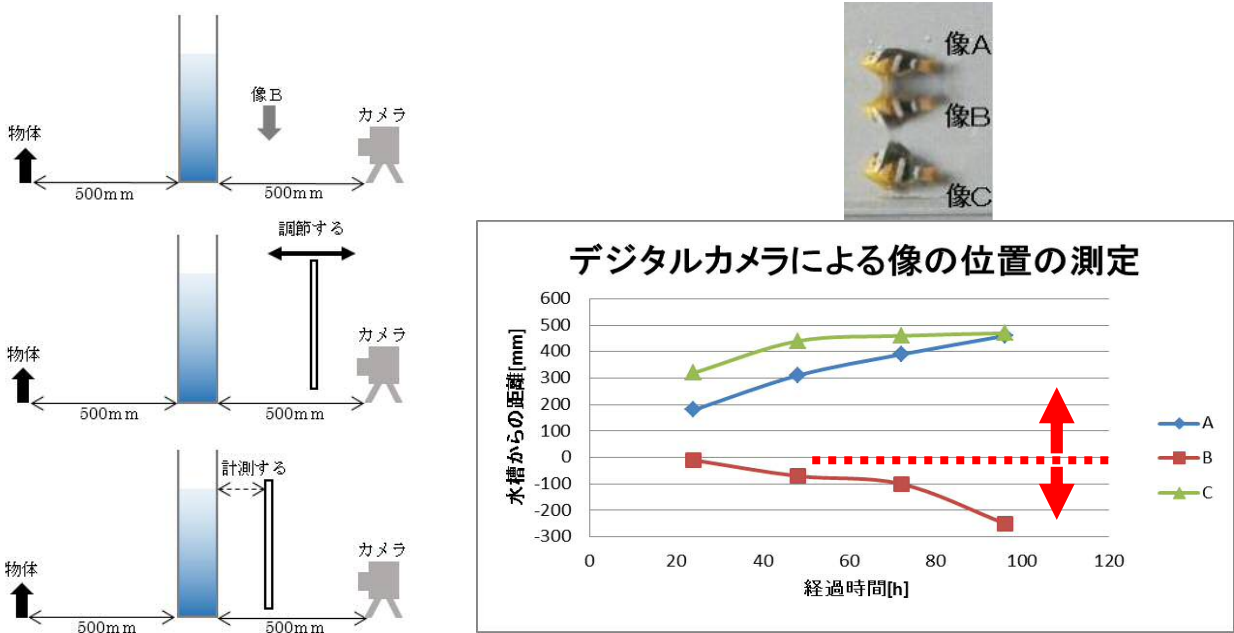


図11 像位置の測定方法

グラフ2 像A～Cの位置の測定結果

グラフ2は測定結果の一例である。縦軸は水槽からの距離、横軸は経過時間である。水槽の観測者側の面を原点とし、物体側を正の向きとして表示している。像AとCは、水槽よりも物体側に出現していた。さらに像AとCは時間経過に伴い、より物体側へと近づいていく傾向にあることも分かった。逆に、像Bの場合は水槽よりも観測者側に出現していた。さらに像Bは時間経過に伴い、観測者側に近づいてくる傾向があることが分かった。数回の測定を試みたが、いずれも同様の傾向を示すことが確かめられた。

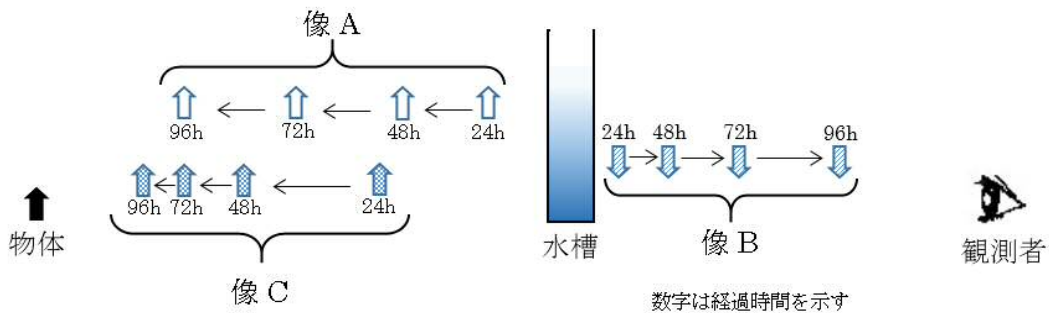


図12 時間経過に伴う像位置の変化

上の図12は、以上の結果をまとめたものである。時間経過に伴う像位置の変化は、拡散に伴う濃度分布の変化から説明できる。時間経過とともに、溶液内の上下方向の屈折率分布は、次第に屈折率勾配が小さくなる。そのため、光線が屈曲する程度も小さくなる。このことは、溶液が持つ凸レンズのような作用が小さくなることと同等である。焦点距離が長くなることに相当し、光の収斂する位置も溶液から遠ざかるのだと説明できる。

5. 考察

蜃気楼に相当する3個の像が観測される原理は次のようであると考えられる。像Aは水槽の比較的浅い水深を通過して観測者に到達する光により出現する(図13)。この水深はまだ真水に近く、屈折率勾配が小さいため、光の屈曲は緩やかであり、観測者側で光線は収斂しない。像Cの場合には、水槽の深い領域を通過して観測者に到達する光により出現する(図15)。この水深の屈折率は大きい、屈折率勾配は小さいために光の屈曲は緩やかであり、観測者側で光線は収斂しない。以上が、像Aも像Cも、観測者側で実像を結ぶことができない理由である。これに対して像Bは、「屈折率勾配の大きな水深」を通過して観測者に到達する光によって出現する(図14)。光線の屈曲が大きいため、水槽を通過した後で収斂する。その結果、倒立実像として観測者側で結像すると解釈できる。

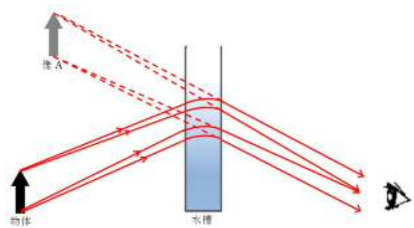


図13 像Aの原理

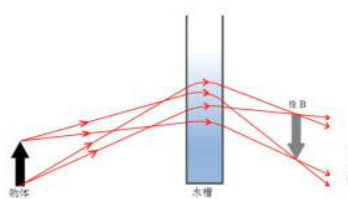


図14 像Bの原理

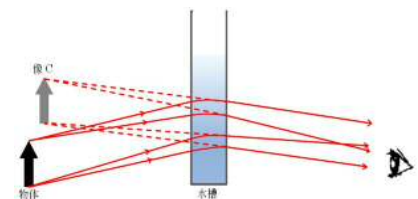


図15 像Cの原理

以上の結果から、屈折率勾配を持つ溶液は凸レンズのように光を集める作用を持つこと、中央の像Bは溶液のレンズ作用により結像した「倒立実像」であることが明らかになり、私たちの仮説は正しいことが分かった。ただし、水平方向には屈折率勾配を持たないので、溶液の集光作用は鉛直方向のみに働く。今回の研究では、屈折率分布の測定を行う際、実験装置を完全に固定することで、実験の精度がより高くなるようにした結果、時間経過とともに変化していく屈折率分布の様子を精度良く測定することに成功した。また、像位置の測定において、カメラによる焦点合わせを応用した方法では、パソコンによる画像の解析を行うことで精度の高いデータを得ることができ、非常に有効であることが分かった。

3個の像の位置は時間経過により変化していくことがわかった。これは屈折率勾配が次第に小さくなり、溶液全体が一樣な屈折率になっていくためである。像A、像Cは物体側へと近づいていき、像Bは観測者側へと近づいてくることもわかった。

6. 今後の課題

今後の課題として、3つの像の出現位置を光線追跡の理論をもとに計算すること、像の出現位置を測定する手法の精度を高めることなどが考えられる。

7. 参考文献

- (1) 溶液を通過した光線の経路変化 中村優人, 他
清水東高 理数科平成24年度課題研究論文
- (2) 屈折率勾配を持つ溶液に出現する虚像の時間変化と位置
清水東高 自然科学部平成23年度理科研究論文