

4. 屈折率勾配を持つ溶液が示す凸レンズの作用

静岡県立清水東高等学校自然科学部物理班

2 年 竹森達也 他 11 名

1 はじめに

真水を入れた水槽の底にショ糖の飽和溶液を注入して放置すると、溶質であるショ糖が拡散し、やがて濃度に応じて屈折率が鉛直方向に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（水深の変化に対する屈折率の変化を屈折率勾配と定義する）。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 1）が観測される。この像を上のものから順に像 A、像 B、像 C と名付け、平成 20 年度より解析を進めてきた。



写真 1 3つの像

昨年度の研究で、像 B は凸レンズが結ぶ実像と同様の性質を示すことがわかった。溶液は鉛直方向にのみ屈折率勾配があるため、光を上下方向に収斂させる。したがって像 B は水槽が図 1 のような円筒型レンズと同等の作用を持つことにより、光が鉛直方向に収斂して出現していることがわかった。

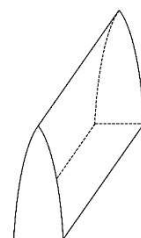


図 1 円筒型レンズ

2 研究の目的

本年度私たちは、像 A、C についても像 B と同様に、それぞれに対応する強さの凸レンズの作用により出現していると予想し、以下の仮説を立てて研究に取り組むことにした。

仮説：像 A と像 C も、溶液を凸レンズとみなすことで統一的に説明できる。像 A と像 C は、浅い水深部と深い水深部が、それぞれ弱い凸レンズとして作用して出現した「正立虚像」である。

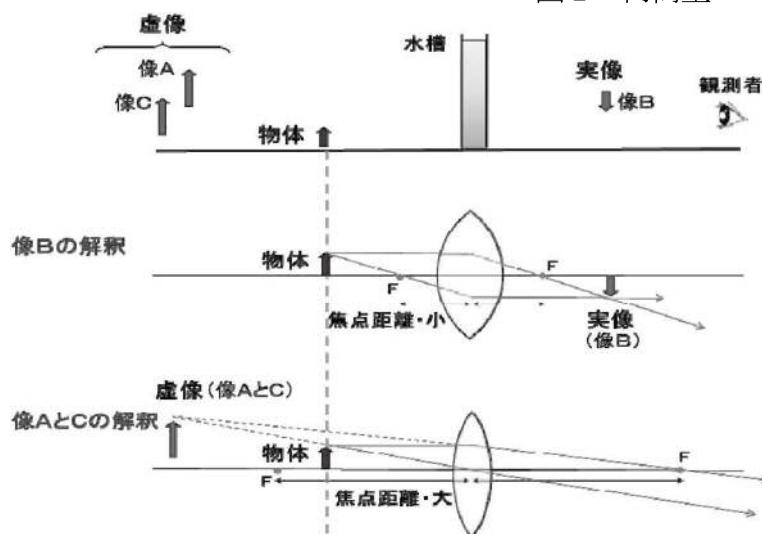


図 2 像位置の仮説

3 屈折率分布の測定

(1) 測定方法

図 3 は、屈折率分布の測定の原理である。水槽の角をプリズムにみたくて、側面からレーザー光を照射するという方法で、新・水プリズム法と名付けている。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ため、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。

測定は溶液を作成してから、24 時間ごとに最大 96 時間後まで測定を行う作業を 1 セットとして、今年度は 7 セット測定した。

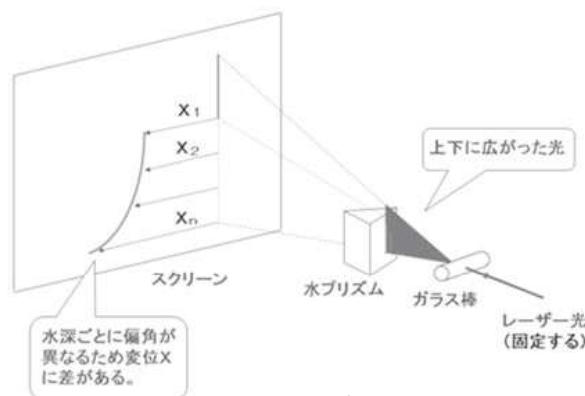
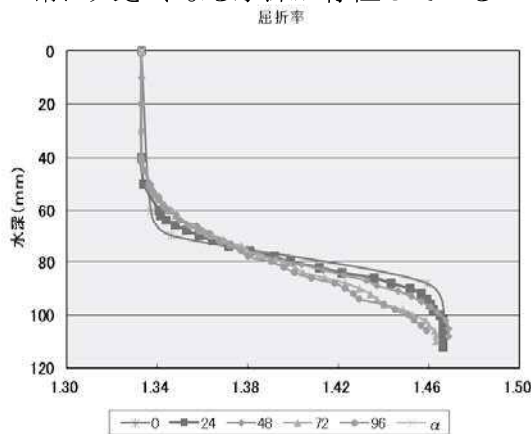


図 3 新・水プリズム法

(2) 測定結果と考察

グラフ 1 はこの測定結果の一例である。縦軸は水深、横軸は屈折率を表す。屈折率勾配が非常に大きくなる水深が存在していることが読み取れる。



グラフ 1 各水深における屈折率分布

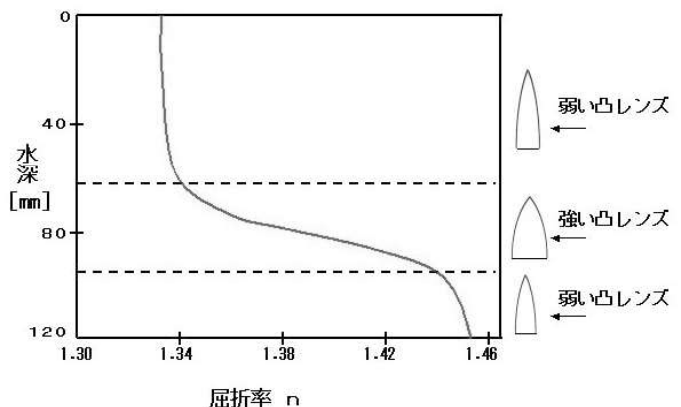


図 4 各水深におけるレンズ作用の強さ

ア 屈折率勾配が大きな水深を通過する光は、溶液を通過する際大きく屈曲する。そのため、屈折率勾配の大きな水深を通過することは、強い凸レンズを通過することに対応する。

イ 焦点より遠方に物体がある場合、凸レンズは実像を結び、焦点より内側に物体がある場合、凸レンズは虚像を出現させる。

ア、イより像Aは屈折率勾配が小さな浅い水深を光が通過し、弱いレンズが対応すると考えられる。像Bは屈折率勾配の大きな水深を光が通過し、強いレンズが対応すると考えられる。像Cは屈折率勾配の小さな深い水深を光が通過し、弱いレンズが対応すると考えられる。(図 4)

4 像の出現位置の測定

(1) 測定方法

今年度も、昨年度と同様にカメラの合焦位置を利用して像の出現位置を測定した。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にピントを合わせる。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。板にピントが合う位置から水槽までの距離を測定すれば、この距離が像Bまでの距離となる。(図 5)

本年度は写真 2 のような 5 mm、10 mm、15 mm の 3 種類の厚さを持つ水槽 (以降、三段水槽と呼ぶ) を用いて測定を行い、水槽の厚さによって、像の出現位置がどのように変わるのかも調べた。24 時間ごとに測定を行い、時間経過による像の出現位置の変化についても調べた。測定は溶液を作成してから 3 種類の厚さについて、それぞれ 24 時間後から最大 96 時間後まで測定を行う作業を 1 セットとして、これを 10 セット行った。

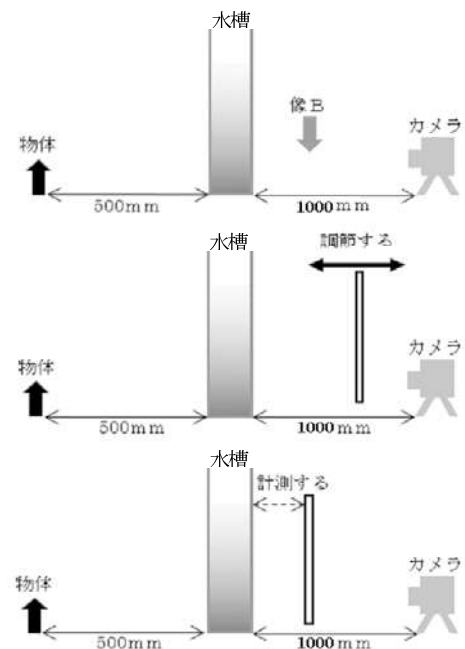


図 5 像位置の測定方法

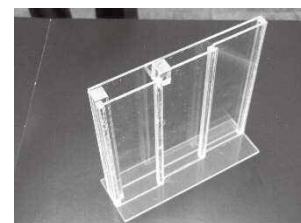


写真 2 三段水槽 (自作)

(2) 水槽の厚さによる像の出現位置の変化について

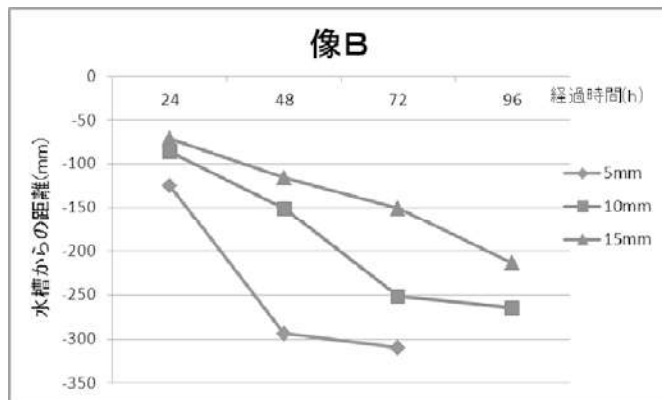
ア 予想

水槽の厚さは凸レンズの強さに相当すると考えられるため、水槽が厚いほど、実像である像Bは水槽の近くに出現し、虚像である像A、Cは物体の遠くに出現すると予想される。

イ 測定結果

像Bの出現位置の測定結果の平均をまとめたものがグラフ2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いる。予想通り、水槽が厚くなるほど、像Bの出現位置は物体側に近づいた。しかし、像A、Cについては予想に反して観測者側に近づくことも分かった。

昨年度は像Cが水槽と物体の間に現れるという結果が出たが、本年度、測定方法を改良した結果、像Cは物体よりも遠くに出現することが分かった。しかし、像Cは水槽と物体の間に出現する場合もある。さらに像Aは水槽と物体の間に出現している。通常の凸レンズによって出現する虚像の位置は物体の後方なので、本実験による虚像の出現位置は仮説と一致しなかった。



グラフ2 厚さによる像Bの位置変化

ウ 考察

水槽の厚さと像の出現位置の関係、及び各水深における屈折率勾配に対応する凸レンズの強さと像の出現位置の関係は、ともに像Bに関しては一致した。像Aに関しては、その出現位置は水槽と物体の間であり、仮説に反したが、水槽が厚くなるとともに、物体から遠ざかるという位置変化の点では予想と一致していた。像Cに関しては、出現位置が物体より遠くであり、凸レンズによって出現する虚像の、物体とレンズとの間にある位置関係と一致していたが、水槽が厚くなるとともに物体に近づくという予想とは一致しなかった。

また、像Aと一部の像Cは、凸レンズによって現れる虚像の位置と異なった。像Cの出現位置の変化が予想と反した理由は、今のところわかっていない。

(3) 経過時間による出現位置の変化について

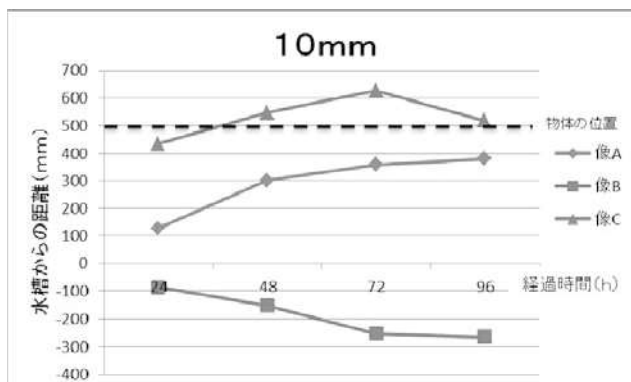
ア 予想

実験(1)より、時間経過とともに屈折率勾配は小さくなる。これは凸レンズにおいて、焦点距離が長くなることに相当するので、時間経過とともに像Bは観測者側へ近づき、像A、Cは物体に近づくと予想される。

イ 測定結果

各像が出現する位置の測定結果の平均を求めた結果の一例をグラフ3に示した。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示す。

像Aは水槽と物体の間に出現し、時間経過とともに物体側へと近づいた。



グラフ3 水槽の厚みが10mmの場合

像Bは水槽よりも手前側に出現し、時間経過とともに観測者側へと近づいた。像Cは物体より遠くに出現し、時間経過とともに物体より遠ざかったが、ある時間からは物体に近づいた。

この結果をまとめたものが図6である。

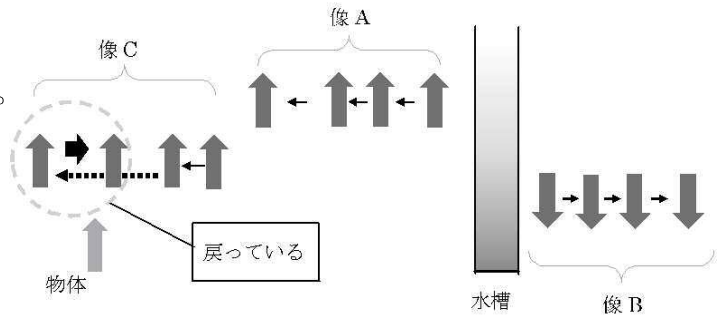


図6 結果からのモデル図

ウ 考察

像Bの経過時間と出現位置の関係については仮説通りであった。

像Aの出現位置は仮説に反した結果であった。ただ、時間経過とともに、物体に近づくことは一致していた。

像Cの出現位置は凸レンズによって出現する虚像の位置と同じであったが、像Cの時間経過による出現位置の変化は予想と一致しなかった。

今回、同じ実験において10セット測定を行ったことで、測定結果についてある程度の傾向を読み取ることはできたが、誤差が目立った。これは、カメラで像にピントを合わせる際に起きる、測定者ごとの個人差や気温による拡散速度の変化を原因とする誤差によるものだと考えられる。また、像Cが水槽と物体の間に出現しているという測定結果もあった。

像Cの出現位置が一度水槽側から遠ざかり、その後に戻る理由を（3、屈折率勾配の測定）の屈折率勾配のグラフをもとに考察した。図7の点線部で示した水深の上、下は、拡散が進むにつれて、屈折率勾配が一度小さくなってから再び小さくなることがわかった。

このことが、像Cの出現位置が一定の方向に変化しない原因ではないかと考え、像Cを出現させる光が通過する水深の屈折率勾配について時間経過とともに増減しているか調べることにした。

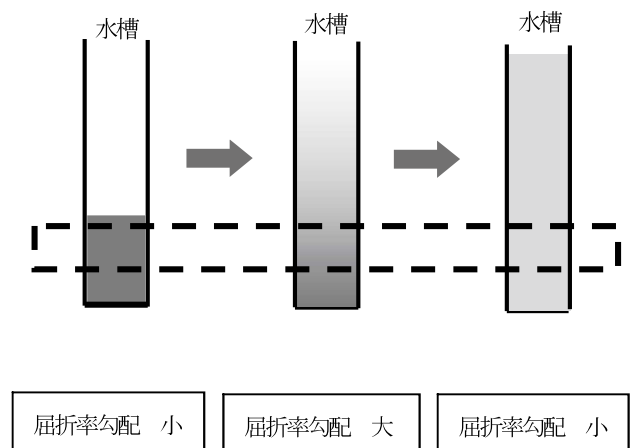


図7 下層の屈折率勾配の変化

5 像を出現させる光が通過する水深の測定と屈折率分布の変化

(1) 方法

（3、屈折率分布の測定）の屈折率－水深のグラフ1において、屈折率勾配は式1のように定義した。事前に測定した結果から、像Cを出現させる光が通過する水深の最小値と最大値を経過時間ごとにそれぞれ α 、 β と定義する。細かい値の屈折率を読み取るため、式2のような実験式を用いた。

この実験式において、A～Eの定数は実験結果のグラフ1に近いグラフになるように求めた。

$$\frac{n(\beta) - n(\alpha)}{\beta - \alpha}$$

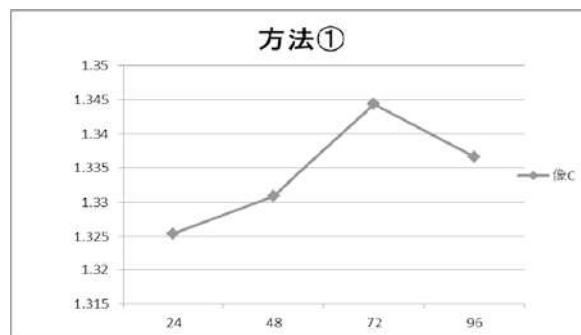
式1 屈折率勾配

$$n(y) = \frac{D}{A + B \times e^{C(E-y)}} + 1.33$$

式2 水深 y に対する屈折率 n (y)

結果はグラフ4のようになった。グラフの縦軸は屈折率、横軸は経過時間を表す。

グラフ4 屈折率勾配の変化



(2) 考察

屈折率勾配が大きくなると、虚像の出現位置はレンズから遠くなる。4. (3) (経過時間による像位置の変化) の結果から、像Cの出現位置の変化は、物体の後ろへ遠のいてから、観測者側へ近づいていることが分かっている。グラフ4では、像Cを出現させる光が通る水深では、時間経過とともに屈折率勾配が一度大きくなってから小さくなっていることが読み取れた。

以上より、像Cの経過時間による出現位置の変化は、水槽による凸レンズの作用で説明できたとと言える。

6 全体の考察

- (1) 屈折率勾配を持つ溶液の入った水槽を厚くするほど、水槽内で光はより大きく屈曲する。予想通り厚い水槽ほど強い凸レンズ（焦点距離の短い凸レンズ）のように作用することが確認できた。
- (2) 像Bの位置は、時間が経過するごとに、次第に弱い凸レンズ（焦点距離の長い凸レンズ）によって現れる像位置に相当する場所に移動していくことがわかった。
- (3) 像Bは屈折率勾配の大きな水深中央部が、強い凸レンズ（焦点距離の短い凸レンズ）として作用することで結像した「倒立実像」であることがわかった。
- (4) 像Aと像Cは、浅い水深部と深い水深部とが、それぞれ弱い凸レンズとして作用することで出現した「正立虚像」であると予想したが、実験の結果は予想と異なる場合も多く仮説を実証できるまでには至らなかった。
- (5) 像Cの位置は、時間経過とともに物体から一度遠のき、その後再び近づいた。これは、深い水深部において屈折率勾配が一度大きくなり、その後再び小さくなるという増減の変化で説明できることがわかった。
- (6) 私たちが作成した「屈折率勾配を持つ溶液」は、水深に応じて強さの異なる3種類の凸レンズのように振る舞う性質を持つことが分かった。出現する3個の像について、凸レンズの作用として統一的に解釈できる可能性があると考えられる。

7 参考文献

- (1) 溶質が拡散した溶液中を通過する光線の経路追跡 加藤純大, 他
清水東高平成25年度理数科課題研究論文集
- (2) 屈折率勾配を持つ溶液が示すレンズ効果の研究
清水東高自然科学部 平成24年度理科研究論文集