

# 蜃気楼で遊んでみよう

東京電機大学大学院 未来科学研究科 ロボットメカトロニクス学専攻  
吉田 圭太, 小暮 浩史, 嶋村 崇, 松澤 俊介

## 1 はじめに

蜃気楼といえば, 行けども行けども見つからない砂漠のオアシス, 海の向こうに揺らく街並みなど, 誰でも何らかのイメージを思い浮かべることができる. しかし, 逃げ水現象など, 身近なところでも蜃気楼は見られるにもかかわらず, 実際に見たことがあるかと問われると, あると答えられる人はなかなかいない. これは, 一般的に蜃気楼といえば, 上位蜃気楼と呼ばれる種類のイメージが強く, 蜃気楼についてあまりよく知られていないためである. そこで本実験では, 人工的に蜃気楼を作り出し, 蜃気楼とはどのようなものか, そしてその発生メカニズムについて紹介する.

## 2 蜃気楼とは

蜃気楼は, 大気中の空気密度の差によって光が屈折することで起こる現象である. 光は, 密度が均一なところではまっすぐに進むが, 密度に差が生じているところでは, より密度の高い方へと曲線を描いて進んでいく. 空気中では, 温度差により空気の密度に差が生じるため, これが原因で光が屈折し, 蜃気楼が発生する. 蜃気楼は, その見え方によって大きく 3 つに分類することができる.

### 上位蜃気楼

海上では, 温度の低い海水によって, 水面付近の空気が冷やされ, 上暖下冷となる. この状態のとき, 対象物が上に伸びた像か対象物の上に反転した像が出現する. 砂漠のオアシスなど遠くの景色が見えるのも, この上位蜃気楼によるものであり, 光が下方方向に屈折することによって, 本来届かない場所に光が届くことが原因である. 蜃気楼のイメージとしては最も有名である種類だが, 見られるところは限られており, 日本では 3 か所程度しかない.

### 下位蜃気楼

アスファルトや地面などによって, その付近の空気が熱せられると, 上冷下暖となる. この状態のとき, 対象物が下に伸びた像か対象物の下に反転した像が出現する. 物体とそれが接する地面との境が切れて浮かび上がったように見える浮島現象や遠くの道路に水があるかのように見える逃げ水現象などが, 下位蜃気楼によるものである. 最も目にしやすい種類の蜃気楼である.

### 側位蜃気楼

報告例が最も少ない種類の蜃気楼である. 空気の密度差が横に存在するときみられる現象で, 対象物の横に反転した像が出現する. 日本では, 熊本県八代海北部で報告されている.

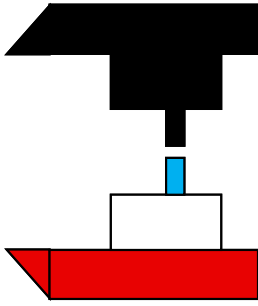


図 1: 上位層気楼

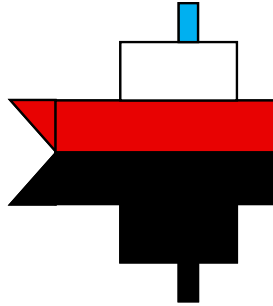


図 2: 下位層気楼

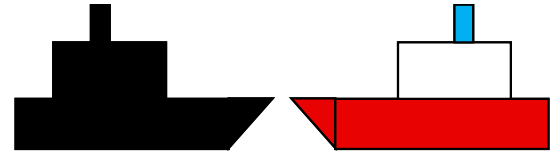


図 3: 側位層気楼

### 3 実験目的

本実験では、以下の目標を実現することを目指す。そのためにサブテーマを設け、それらを実現していくことで目標を達成することを目指す。

- 上位層気楼と下位層気楼を組み合わせるなど、まず現実では起こりえない状況を作り出し、どのような像が見られるかを観察する。
  - － 層気楼のメカニズムを視覚的に理解する。
  - － 身近な熱源を用いて、層気楼を再現する。
  - － 上位、側位、下位層気楼をすべて実現する。
  - － 曲率、層の厚さなど層気楼の特性を解析し、発生する像をコントロールする。

### 4 実験 1. 層気楼のメカニズムを知ろう

本章では、層気楼の発生の原因となる光の屈折に理解するための実験を行う。まずは、密度差で光が曲がるという現象を視覚的に確認する。透明な箱に水と砂糖を使って密度差を作り出し、レーザーポインタの光を通して光が屈折するかどうかを観察する。

#### 4.1 レーザーを屈折させる

虫かごの中に密度の違う 2 つの層をつくり、そこにレーザーを当てる。密度の違う層を通過するとレーザーは屈折するかどうかを、レーザーの軌跡を見ることで観察する。

##### 4.1.1 実験手順

1. 密度差を作り出すために砂糖水を作る。500[g] の水に 500[g] の砂糖を加え、濃度 50[%] の砂糖水を作る。再結晶化を防ぐために、お湯を使って透明になるまでかき混ぜる。さらに、光線を見やすくするためにコーヒーの素など、色がつくものを入れる。
2. 混ぜりにくくするために、水と砂糖水を冷やす。
3. よく冷えたら、虫かごに水、砂糖水の順で入れる。砂糖水を入れるときは混ぜるのを防ぐために、チューブなど水量が調節できるものを用いて、底面に這わせるようにゆっくりと注いでいく。
4. 虫かごにレーザーを当て、軌跡を観察する。

#### 4.1.2 実験結果

図4のような3つの層を持った．砂糖水を注ぐ過程で，まったく水と混ざらないようにすることは不可能であるため，水，濃度が低い砂糖水，50[%] 砂糖水の3つの層が出来る．



図 4: 3層の様子

これにレーザーを当て，軌跡を観察した．その結果を以下に示す．

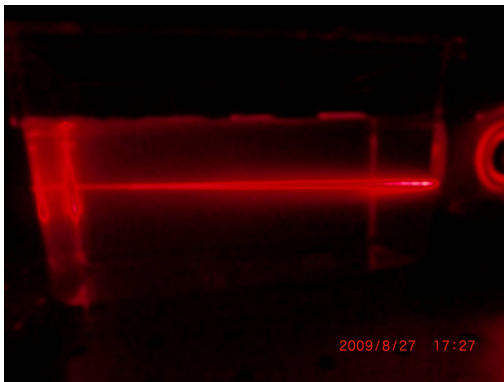


図 5: 水を通過したレーザーの様子

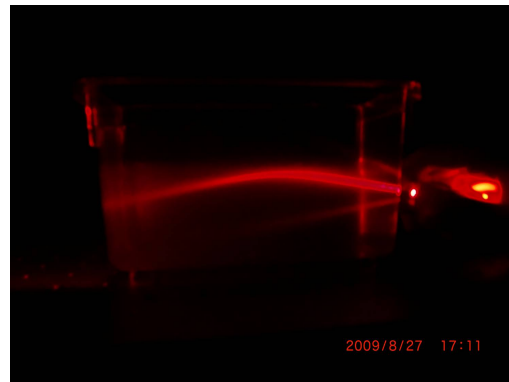


図 6: 層を通過したレーザーの様子

図6を見ると，レーザーが層の境で屈折し始め，密度の濃い層へと曲がっていく軌跡が観測できた．図5のように水のみをレーザーが通過した場合，屈折せず一直線の軌跡が観測できるため，密度の違いを作ることで，光は屈折することが確認できた．

## 4.2 擬似的に蜃気楼を再現する

### 4.2.1 実験内容

次に，虫カゴを利用して擬似的に蜃気楼を再現し，蜃気楼を見るためにはどの程度の密度差が必要かを見積もる実験を行う．

### 4.2.2 実験手順

1. 10[%] の砂糖水を用いて 5.1 と同一の手順で密度の違う 2 つの層を作り出す．ただし，今回は蜃気楼の像を観察するため，コーヒーは混ぜない．
2. 一晩置き，水溶液の浸潤を利用して少しずつ変化する層を作る．
3. 対象物や見る位置を移動して，虚像が見えるか観察する．
4. 虚像が見えなかった場合，砂糖水の濃度を 5[%] 増やして同様の実験を行う．

水のみを虫カゴに入れた場合，図8のように頭頂部のみが見える状態になる．これは，虫カゴの側面の傾斜によって，光が屈折したためである．この位置を初期状態とする．

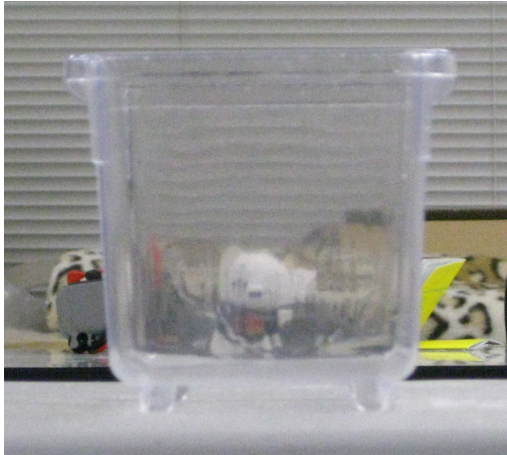


図 7: 何も入れていない状態

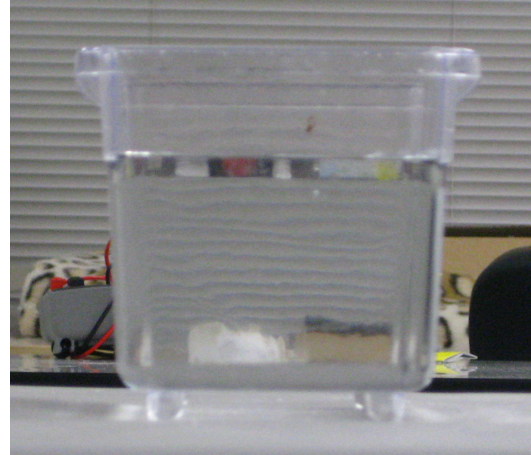


図 8: 水を入れた場合

#### 4.2.3 実験結果

10[%]の砂糖水では，像が伸びたり縮んだりといった現象は観測できたが，反転した虚像を観測することは出来なかった．しかし，15[%]の砂糖水では，図のような反転した虚像を観測することが出来た．

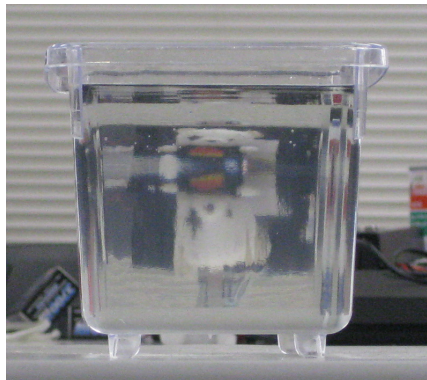


図 9: 砂糖水で層を作った状態

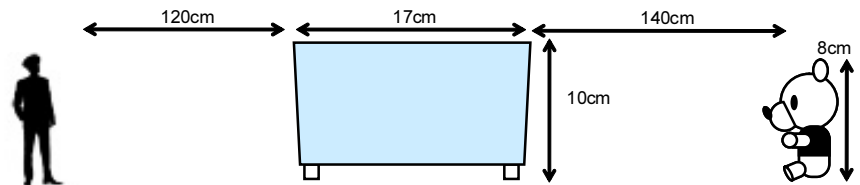


図 10: 観測位置

よって，反転する像を観測するためには，15[%]の砂糖水と同等の密度差を生じさせる必要であると推測できる．この結果をもとに，層気楼を見るために必要な温度差を求める．まず，体積と質量から砂糖水の密度を求める．ただし，水溶液の体積は計算することが出来ないため，実測値を用いている．水 85[g], 砂糖 15[g] で作った 15[%] の砂糖水の密度は

$$\frac{85 + 15}{95} = 1.052 \dots [g/mm^3] \quad (1)$$

となる．水の密度は約  $1.00 [g/mm^3]$  であるから，

$$\frac{1.05}{1.00} \times 100 = 105[\%] \quad (2)$$

よって層気楼を発生させるためには約5 [%] の密度差を発生させればよいことになる。次に、5 [%] の密度差を発生させるためには、空気では何度の温度差が必要かを求める。無視できる程度の湿度しか含まない乾燥空気の密度は、以下の式で求めることが出来る。

$$\rho = \frac{1.293}{1 + 0.00367t} \times \frac{P}{760} \quad (3)$$

$t$ : 温度 [ ]

$P$ : 圧力 [Torr]

まず常温時の密度を求める。常温時の気温を25[ ], 気圧を760[Torr] として密度を求めると、

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1.293}{1 + 0.00367 \times 25} \times \frac{760}{760} \\ &= 1.184[g/mm^3] \end{aligned} \quad (4)$$

となる。空気は温度が高くなるほど密度が低くなるため、常温の空気は密度の濃い層にあたる。よって、高温の空気の密度は常温よりも低くなるため、

$$\frac{1.184}{1.05} = 1.128[g/mm^3] \quad (5)$$

このときの空気の温度は、

$$\begin{aligned} t &= \frac{1.293}{0.00367 \times 1.128} \times \frac{760}{760} - \frac{1}{0.00367} \\ &= 40[ ] \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ただし、ここでは気圧を一定として算出している。気体はボイル・シャルルの法則から、温度が上がった場合、圧力か体積が増加しなければならない。この実験での空気の体積は、観察者から対象物までの間の空気の体積であるため、一定である。そのため、空気の温度が上がった場合、圧力も上昇しなければならない。(6) 式から圧力が上昇すれば、気温も上昇する。よって、層気楼を発生させるためには、算出した温度よりも高い温度が必要になると考えられる。

## 5 実験 2. 層気楼を再現しよう

本章では、実験 1 で得た結果をもとに何らかの熱源を用いて空気に温度差を作り出し、層気楼を再現することを目的とする。

通常、層気楼を観測するためには数メートル、数十メートルにわたって密度差のある層が発生している必要がある。これは、自然環境で生じる温度差では空気の密度差が小さく、層気楼を発生させるほど光を屈折させるためには、距離を必要とするためである。しかし、人工的にこのような状態を再現することは不可能である。

そこでホットプレートを利用して大きな温度差を発生させ、短い距離でも層気楼を観測できるほどの密度差を作り出す。

### 5.1 ホットプレートを用いた層気楼の実現

#### 5.1.1 実験内容

ホットプレートを 200[ ]まで加熱して上冷下暖の状態を作り出し、層気楼が発生しているかを観測する。同時にプレート上の温度を計測し、前章で示した層気楼を発生するために必要な密度差が生じているか検証する。

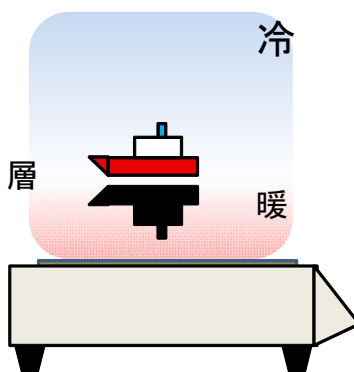


図 11: 観測目標

#### 5.1.2 実験結果

プレート上の温度分布の測定結果を表 1 に示す。

表 1: 200[ ]時のプレート上部の温度

プレートからの高さ [mm]	温度 [ ]
0(直上)	80
40	65
80	65
120	60

表より定常状態では、空気の温度はプレートより 12[cm] 上でも中心で 55[ ]、両端でも 40[ ] 前後となっており、1章で示した層気像を見るために必要であろう 40[ ] 以上に空気を暖めることができていることが分かる。また、プレート付近とその 4[cm] 上の地点での温度は 80[ ] と 65[ ] となっており、このときの密度差は

$$\begin{aligned}\rho_{80} &= \frac{1.293}{1 + 0.00367 \times 80} \times \frac{760}{760} \\ &= 1.000[\text{g}/\text{mm}^3] \\ \rho_{65} &= \frac{1.293}{1 + 0.00367 \times 65} \times \frac{760}{760} \\ &= 1.044[\text{g}/\text{mm}^3] \\ \frac{1.044}{1.000} \times 100 &= 104.4[\%]\end{aligned}\tag{7}$$

と、少なくとも像が伸びる程度の密度差は発生している。また、プレートの長さも 15[cm] と虫カゴよりも距離があるため、距離による違いもない。しかし、このときの対象物を観察すると、像は揺らいではいるものの、伸びたり反転したりといった現象は確認できなかった。その原因として考えられるのは、空気に来る層は不安定で密度差にばらつきがあるため、熱源の長さが足りなかったということである。水によって出来る層は、浸潤によってゆっくりと混ざり合っていくものの、基本的には揺らぐことなく一定の安定した層が形成されている。よって、どの地点でも一様な密度差が発生しており、光も一定の屈折率で曲がっていく。一方で、空気に来る層は非常に不安定であり、同じように熱せられていても場所によって密度差はまちまちである。特に今回のように上冷下暖となっている場合、暖められた空気は上昇していくため、プレートとその周りに対流が発生し、一様な密度差を持った層を形成することはさらに難しい。以上から、空気に来る層は一見して十分な密度差が発生しているようでも、一様に層が形成されていないため、層の距離が足りず層気像を起こすことが出来なかったのではないかと考えられる。

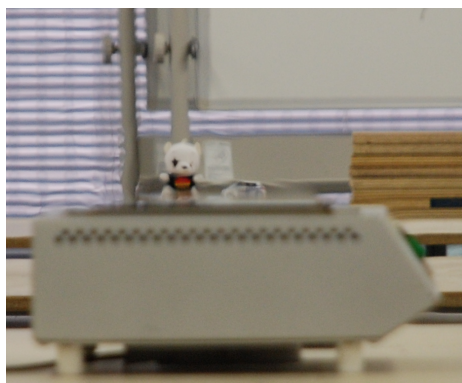


図 12: 200[ ] 時の像の様子

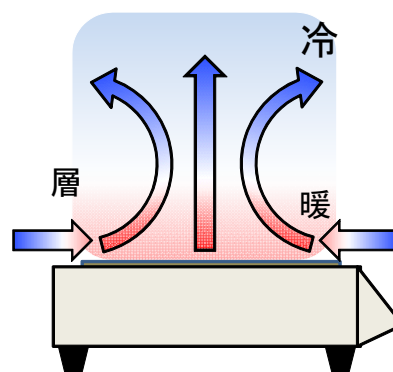


図 13: プレート上の空気の流れ

熱源はホットプレートを利用しているため、これ以上層の距離を延ばすことができない。そこで、より密度差を発生させられるような以下の処置を施した。

1. 熱源を 400[ ] に上げる
2. 上部に蓋を取り付け、蓋をドライアイスで冷やす。
3. 囲いを取り付け、層の揺らぎを抑える。

いずれも密度差を大きくすること，層が安定させることを目的として行った．しかし，これらの処置を行っても層気楼を確認することはできなかった．例えば，1. を行った際の空気の温度差は表 2 のようになった．これを用いて先ほどと同様に密度差を算出すると，

表 2: 400[ ] 時のプレート上部の温度

プレートからの高さ [mm]	温度 [ ]
0(直上)	115
40	85
80	65
120	60

$$\begin{aligned}
 \rho_{115} &= \frac{1.293}{1 + 0.00367 \times 115} \times \frac{760}{760} \\
 &= 1.000[g/mm^3] \\
 \rho_{85} &= \frac{1.293}{1 + 0.00367 \times 85} \times \frac{760}{760} \\
 &= 1.044[g/mm^3] \\
 \frac{1.044}{1.000} \times 100 &= 108.4[\%]
 \end{aligned} \tag{8}$$

と 200[ ] 時と比べて 2 倍程度の密度差が生じているため，密度差を大きくするという目的は達成できている．しかし，これほどの密度差を生じさせても層気楼を確認することはできなかった．よって，層気楼を発生させるためには，ホットプレートよりも長い熱源が必要である．



## 5.2 電熱コンロを用いた層気楼の実現

### 5.2.1 実験内容

前節の問題を解決するために、電熱コンロを用いて上暖下冷を実現する装置を製作する。上段を暖めることで、空気の対流を防ぐことができ層が安定しやすくなる。また、電熱コンロ×4を1列に並べてアルミ板を加熱し熱源の距離を伸ばす。

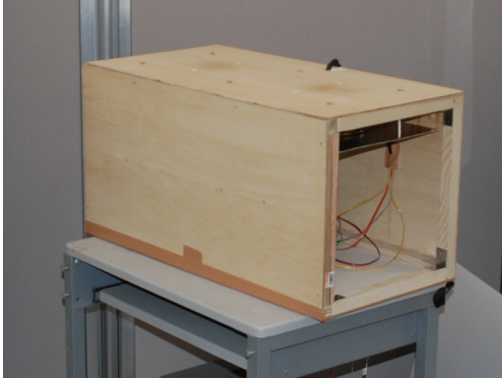


図 14: 実験装置

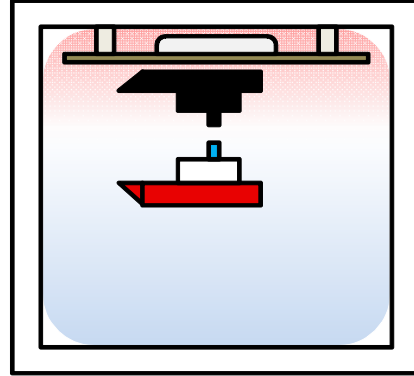


図 15: 観測目標

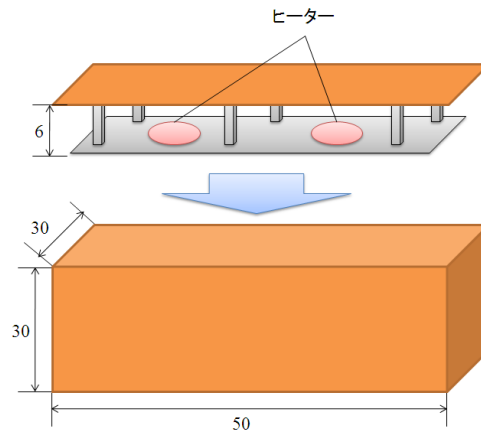


図 16: 実験装置の簡易構造図

### 5.2.2 実験結果

図 17 のように、実験装置、カメラ、対象物を設置し、 $a, b[\text{cm}]$  を変更して、距離による像の見え方の違いを観測した。実験結果を図 18 ~ 24 に示す。

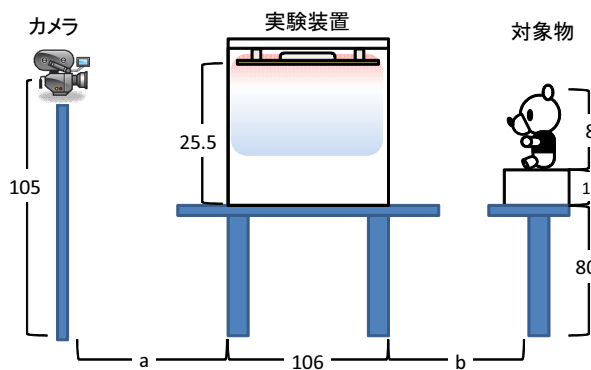


図 17: 実験条件



図 18:  $a=180, b=180$



図 19:  $a=340, b=340$

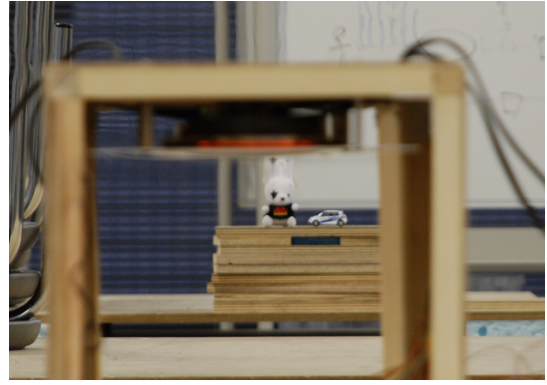


図 20:  $a=540, b=540$

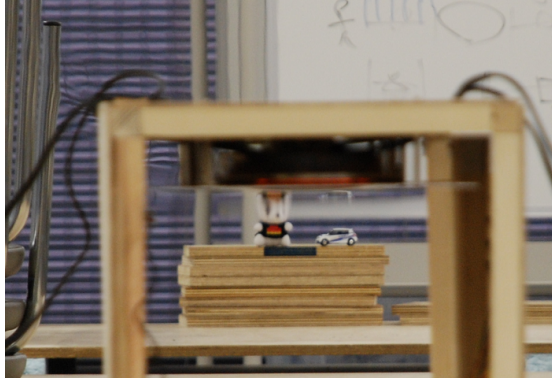


図 21:  $a=715, b=715$

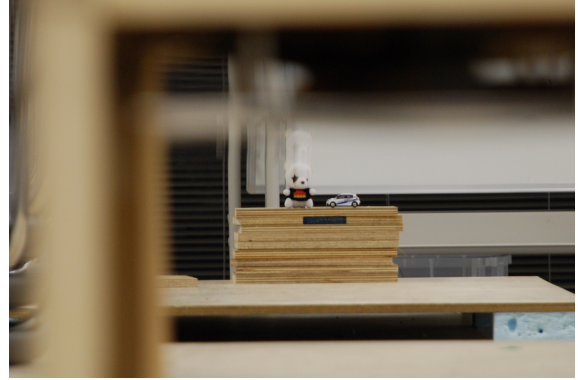


図 22:  $a=180, b=715$

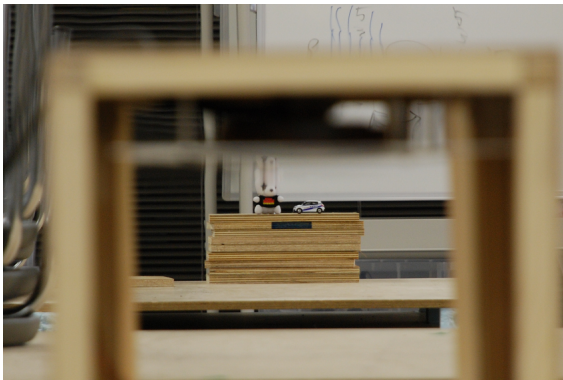


図 23:  $a=340, b=715$



図 24:  $a=540, b=715$

このときのアルミ板下の温度を表 3 に示す。

表 3: アルミ板下部の温度

アルミ板からの高さ [mm]	温度 [ ]
0(直下)	40
5	35
10	30
15	30

まず,  $a, b$  を同じ長さに設定し, 4 段階に分けて撮影した. 続いて,  $b=715[\text{cm}]$  で固定し,  $a$  を先ほどと同様に 4 段階に分けて撮影した. その結果をまず  $a=b$  で比較すると,  $180[\text{cm}]$  地点では像は観察できないが,  $340[\text{cm}]$  地点からぬいぐるみが伸び始めた.  $715[\text{cm}]$  地点ではミニカーの像も見られるようになり, ぬいぐるみは反転した像が見られるようになった. 次に,  $a$  を固定して比較すると,  $b$  が長くなるほど像が伸び,  $a \geq 540[\text{cm}], b=715[\text{cm}]$  のとき, 像が反転した. 最後に  $b$  を固定して比較すると,  $a=180[\text{cm}]$  地点でも伸びた像が確認でき,  $b=540[\text{cm}]$  地点からは, 反転した像が確認できた. これらの違いがみられたのは, 対象物からの反射光の実験装置内の密度差の層へ入射位置による違いが原因と考えられる.

まず図 27 のように,  $b$  の距離が変化すると, 層への光の入射位置は変化する. 入射位置が変化すれば, 実験装置が同一でも屈折する区間は変わるため, 実験装置から出るとき光の角度も変化する. そのため  $b$  が短くなると, アルミ板に接触せずに屈折できる光の高さが低くなり, 像の伸びが短くなる. よって,  $b$  が光が屈折するために必要な距離を持っていれば, 層気楼を観察することができる. 今回の実験であれば,  $b \geq 340[\text{cm}]$  であればよいことになる. 次に図 28 のように,  $a$  の距離が変化すると, カメラに対する入射角は変わらないが, 光の焦点が変化する. よって, 像のカメラから対象物までの距離が屈折して届いた光の焦点より外側であれば, 反転した像を観察できる. 内側であれば, 入射角に合わせて上下に伸びた像を観察することができる. よって, 光を屈折させることができれば,  $a$  の距離によって異なる像を観察することができる.

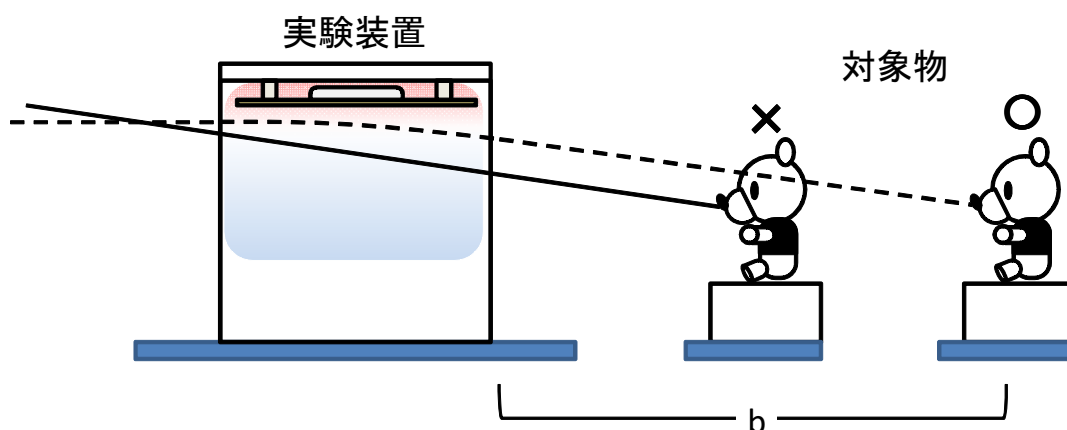


図 25:  $b$  の変化による光の屈折の違い

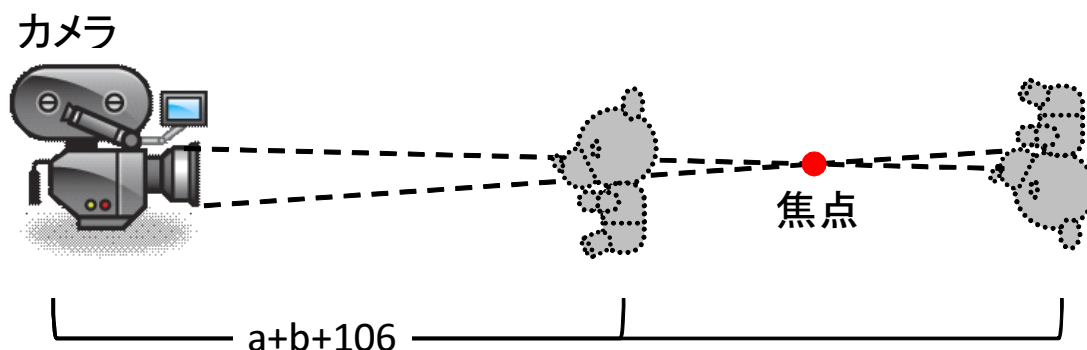


図 26:  $a$  の変化による観察できる像の違い

## 6 側位・下位層気楼の実現

### 6.1 実験内容

先ほどの実験装置を横に倒すことで側位層気楼，反転させることで下位層気楼を実現することはできないか実験し，状態を観察する．

### 6.2 実験結果

いずれの場合も層気楼を発生させることはできなかった．箱の内部を観察すると，暖かい空気は天井側に昇ってしまっており，鉄板付近で層を形成していなかった．ホットプレートの実験から，反対側をただ冷やしただけでは層を形成することはできないと考えられるため，さらに何らかの処置を施す必要がある．

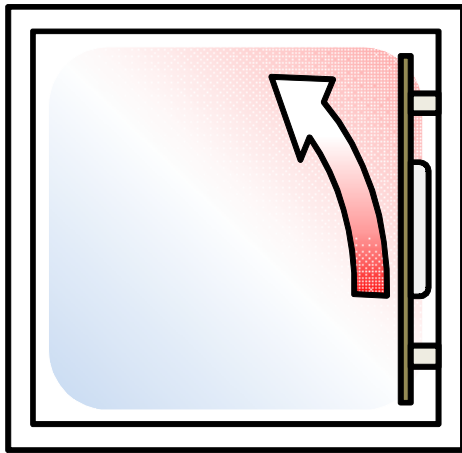


図 27: 側位層気楼の内部状態

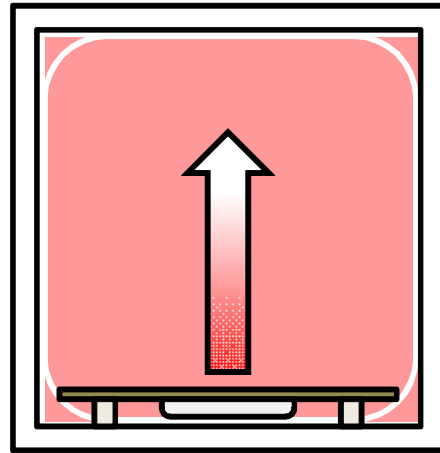


図 28: 下位層気楼の内部状態

### 6.2.1 曲率の算出

上位層気楼のみだぐ伸びた像を撮影することができたため、これを利用して温度変化による曲率を導出することを考える。ただし、正確な曲率を求めるためには、実験装置内の温度分布を立体的に計測する必要があるため、今回は2次関数に近似して求めることを考える。写真は図23を使用する。図23撮影時の実験条件は図29のとおりである。

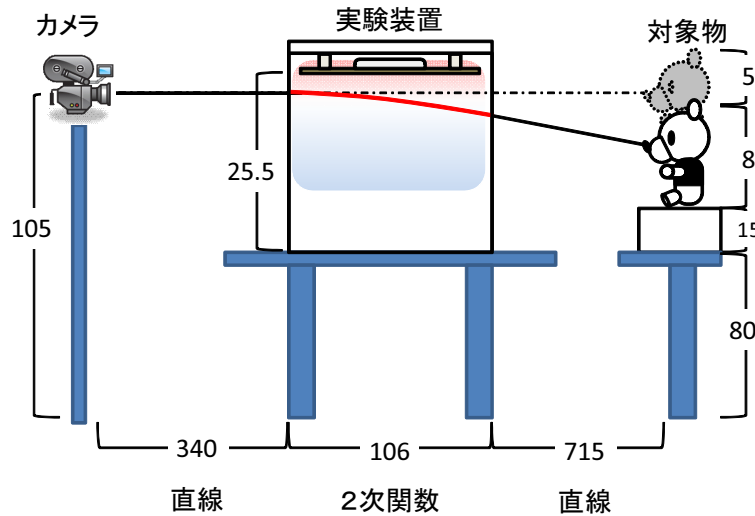


図 29: 図 23 撮影時の実験環境 [cm]

実験装置外は密度差がないため、光は直線に進む。しかし、実験装置内は上暖下冷となっているため密度差が生じ、光は上に凸の曲線を描いて進んでいく。この曲線を2次関数で近似し曲率を求める。この曲線を  $y = f(x)$  とおく。まず、 $x$  軸、 $y$  軸を定める。 $x$  軸は、ぬいぐるみの伸びた像の鼻先の高さが丁度カメラの高さと一致するのを利用して、この2点を結ぶ直線上を  $x$  軸に定める。次に  $y$  軸は、 $x$  軸と実験装置のカメラ側の端との交点を原点として下側を正にとる。このように取ることによって、曲線は原点を通る第一象限のグラフとして考えることができる。

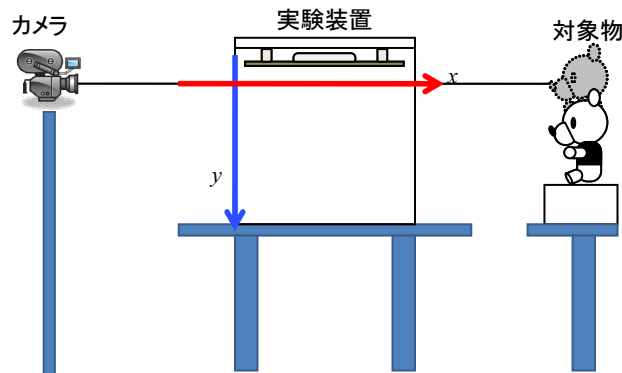


図 30: 軸の決定

次に、光と対象物側の実験装置の端との交点  $t_1$  を求める。 $t_1$  と光の出発点  $s$  とを結んだ直線は、実験装置内の2次関数曲線の接線と考えることができる。このとき、この接線と  $x$  軸との交点  $t_2$  から原点までの距離は、実験装置の長さの半分となるため、 $t_2$  を求めることができる。

$$t_2 = \frac{106}{2} = 53[cm] \quad (9)$$

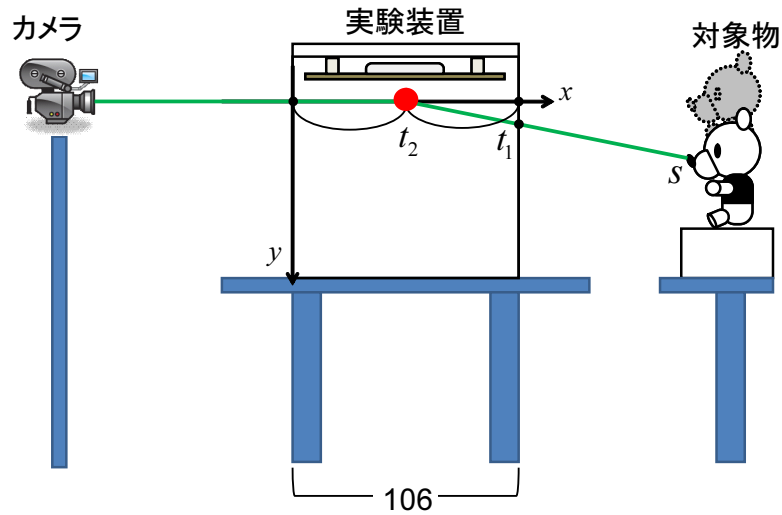


図 31:  $t_2$  の算出

次に  $t_2$  と  $s$  , 伸びた像の鼻先  $\hat{s}$  の 3 点で出来る三角形  $R_1$  と,  $t_2, t_1$  と  $t_1$  から  $x$  軸に垂直に伸ばした辺との交点  $t_3$  の 3 点で出来る三角形  $R_2$  が相似であることを利用して  $t_1$  を求める .

$$53 : 715 + 53 = t_1 : 5$$

$$t_1 = \frac{53 \cdot 5}{768} = 0.345[cm]$$
(10)

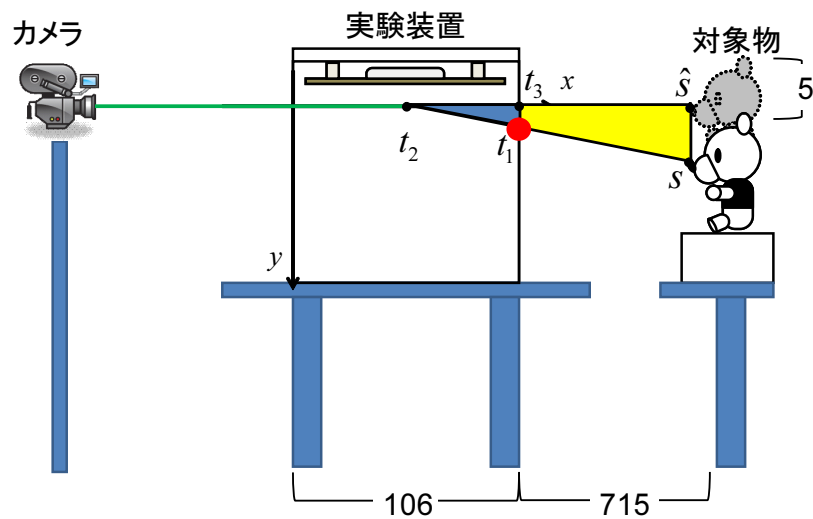


図 32:  $t_1$  の算出

最後に , 原点と  $t_1$  を通る 2 次関数  $y = f(x) = ax^2$  から曲率を求める .

$$0.345 = a \cdot 106^2$$

$$a = \frac{0.345}{11236} = 3.070$$
(11)

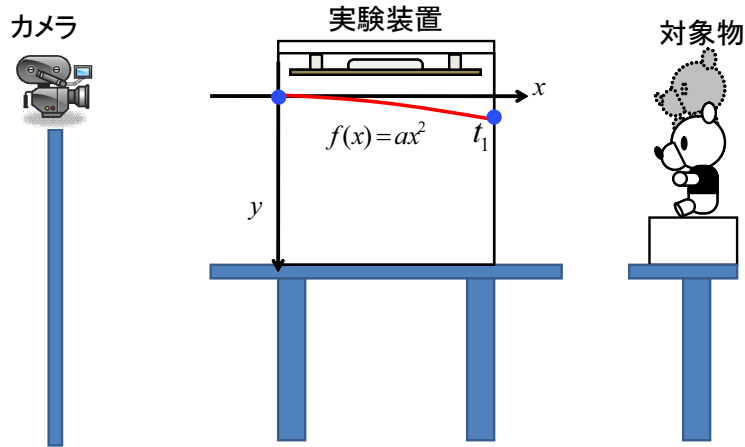


図 33: 曲率の算出

### 6.2.2 層の厚さの算出

次に、図 23 と  $a$  が等しく  $b$  が違う図 19 を用いて、層の厚さを求める。この 2 つの図は象の伸びた長さが異なっている。これは、図 27 で示しているとおり、層への光の入社位置による違いが原因と考えられるため、2 つの図を比較することで層の厚さを求める。この場合図 23 では実験装置を光が通過するとき、端から端まで層の中を進んでいるという前提が必要となるが、式 (10) より光が一番低い位置でもアルミ板から  $8.45[\text{mm}]$  とごくごくアルミ板に近い位置を通過しているため、この前提は満たしていると判断する。

層の算出には、5.2.3 で屈折率を算出するために利用した光と同じ鼻先から同じ方向に放たれた光であるとする。そのため、この光の進む直線  $l(x)$  は  $f(x)$  の  $t_1$  地点での接線の方程式の傾きと一致する。また、この光が層によって屈折するときの曲線を 2 次関数  $g(x)$  とおく。  $g(x)$  は  $f(x)$  に対して、 $x$  軸方向に  $p$ 、 $y$  軸方向に  $q$  だけ平行移動したものになる。

$$\begin{aligned}
 y &= 2 \cdot 3.070 \cdot 10^{-5} \cdot 106(x - 106) + 0.345 \\
 y &= 0.651 \cdot 10^{-2}(x - 106) + 0.345 \\
 l(x)_a &= 0.651 \cdot 10^{-2}
 \end{aligned} \tag{12}$$

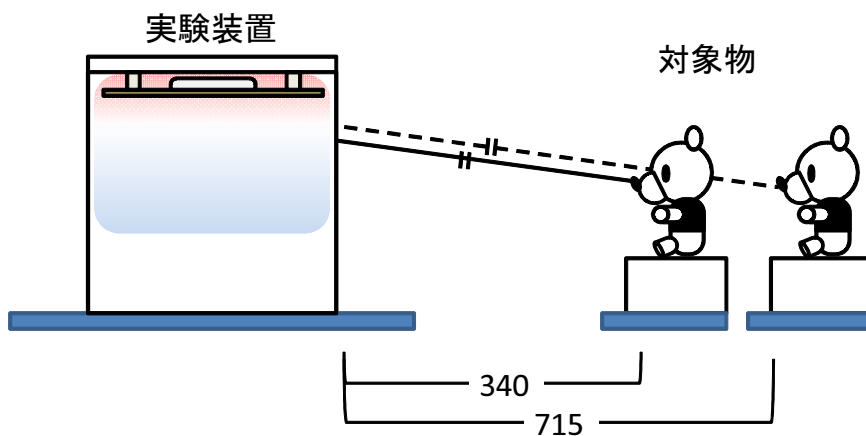


図 34: 光の進行方向の決定

次に，カメラと伸びた像の鼻先を結んだ直線  $h(x)$  と  $y$  軸との交点を図 32 と同様に相似を利用して求める．また同じ三角形を利用して， $t_4$ ， $s_2$  から  $h(x)$  を求める．

$$340 : 340+106 + 340 = t_4 : 105 - 100 - 3.2$$

$$t_4 = \frac{340 \cdot 1.8}{786} = 0.779[cm]$$
(13)

$$(446 - 0)(h(x) - 0.779) = (1.8 - 0.779)(x - 0)$$

$$446h(x) = 1.021x + 0.779 \cdot 446$$
(14)

$$h(x) = 0.229 \cdot 10^{-2}x + 0.779$$

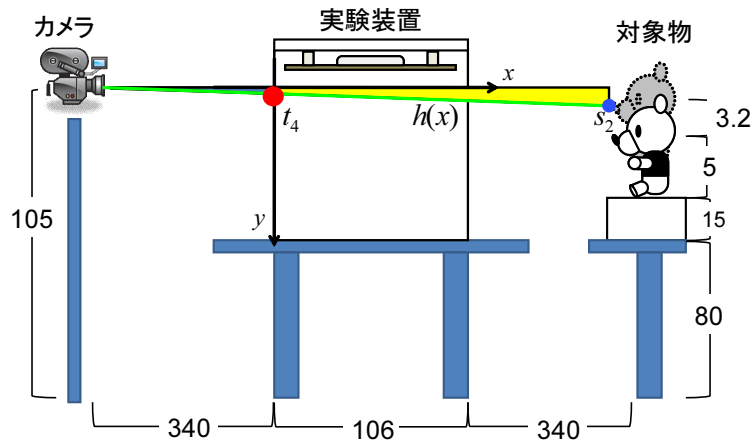


図 35:  $t_4$  との算出

次に  $g(x)$  を求める．式 (14) は  $g(x)$  の  $t_4$  を接点とした接線と考えることが出来る．このとき  $g(x) = 3.070 \cdot 10^{-5}(x - p)^2 + q$  とおくと，

$$h(x)' = 2 \cdot 3.070 \cdot 10^{-5}(0 - p)(x - 0) + 3.070 \cdot 10^{-5}(0 - p)^2 + q$$
(15)

$h(x)$  の各係数と比較すると，

$$-2 \cdot 3.070 \cdot 10^{-5}p = 0.229 \cdot 10^{-2}$$

$$-3.070 \cdot 10^{-5}p^2 + q = 0.779$$

$$p = -37.296$$

$$q = 0.822$$
(16)

よって，

$$g(x) = 3.070 \cdot 10^{-5}(x + 37.296)^2 + 0.822$$
(17)



最後に  $g(x)$  と  $l(x)$  の傾きが一致する点を求める．

$$2 \cdot 3.070 \cdot 10^{-5}(x + 37.296) = 0.651 \cdot 10^{-2}$$

$$x = 68.730 \tag{18}$$

$$g(68.730) = 3.070 \cdot 10^{-5}(68.730 + 37.296)^2 + 0.822 = 0.865$$

よって，層の厚さは  $8.65[\text{mm}]$  となる．

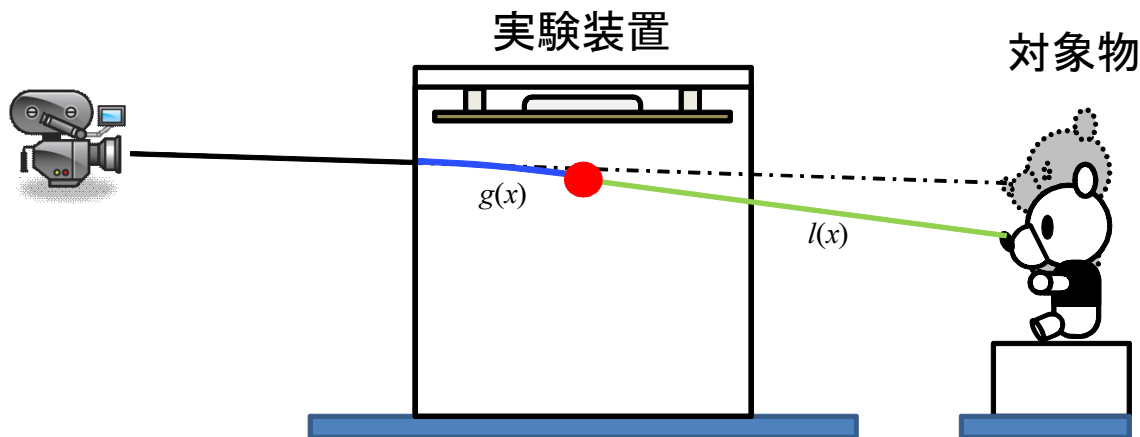


図 36: 層の厚さの算出

## 7 まとめ

層気楼の発生原理について調査し，そこから得られた情報を踏まえてまず，虫かごを用いて層気楼の基本原理解である密度差による光の屈折という現象を視覚的に理解する実験を行った．また，擬似的に層気楼を再現することで，層気楼を発生させるために必要な温度差を見積もった．この結果を用いて，ホットプレートによって層気楼を実現する実験を行った．しかし，見積もった温度差は実現できたものの，水と比べ空気で作った層は安定しないため，層気楼を発生させるには層の長さが足りず，層気楼を発生させることは出来なかった．そこで，これらの問題を解決するために，電熱コンロを用いて実験装置を製作した．電熱コンロ縦に並べてアルミ板を暖めることで長さを稼ぎ，かつ熱源を上設置することで層を安定させた結果，層気楼を発生させることが出来た．最後に，得られた像から2次関数に近似した屈折率と層の厚さを算出した．

これらの実験から，層気楼を見るために重要な要素は，層の距離，安定性の2つであることが分かった．まず層の距離については，ホットプレートの4倍の距離を持った実験装置で層気楼を観測できたことによる．熱源の位置が真逆であるため単純な比較はできないが，温度差が半分以下の実験装置で層気楼を観測できたことから，層の距離が重要であるということはいえる．この層の距離については，別の実験によって詳しく解明する必要があるだろう．次に層の安定性については，熱源を下部から上部に移し周りを囲うことで確保し，層気楼を観測することができた．しかし，側位・下位層気楼は暖かい空気をアルミ板の近くにとどめることができず，発生させることができなかった．また上位層気楼についても，層の厚さが  $1[\text{cm}]$  未満と薄く観測が困難であった．よって，より多くの空気を一定の場所に留め，層を安定させる方法を考える必要があるだろう．

今後の課題としては、まずこれらの問題を解決したい。次に屈折率と層の厚さが判明したため、これを利用して対象物を工夫することで任意の像を発生させたい。また実験機を改良して、側位・下位層気像をじつげんしたい。そして、最終的にはアルミ板の形状をコの字や半円に変形することで、異なる層気像を同時に発生させ、どのような像が確認できるかを検証したい。

## 謝辞

本実験は株式会社八光電機製作所熱の実験コンテストにおいて助成を賜りました。また、このような貴重な場を設けていただき、ここに深甚なる謝意を表します。本実験を行うにあたり、多大なご助力を与えて下さった本学の先生方、研究室員に対し深く感謝を申し上げます。