

蜃気楼を操ろう

～下位蜃気楼・側方蜃気楼への挑戦～

高橋海音 小松楓 小松未旺 佐藤那哉
佐藤祐晟 菅宣仁 染川琴音
指導教員：小西弘麿

1 はじめに

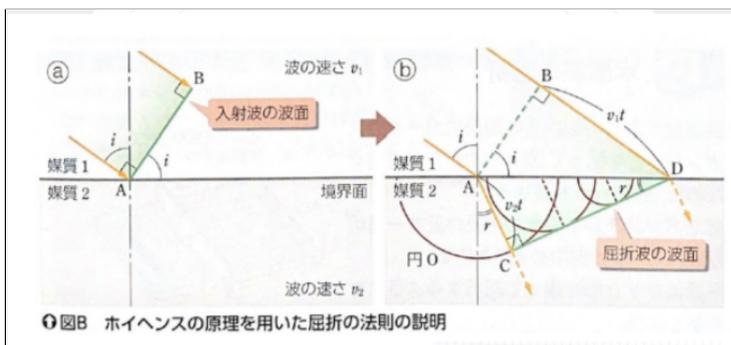
私達は「陽炎」から蜃気楼に興味をもち、インターネットで調査を行った。その結果、気体での下位・側方蜃気楼の再現が難しいことがわかった。そこで私達は三種類の蜃気楼を気体を用いて再現し、その結果をもとにシミュレーションも活用して自在に蜃気楼を作り出せるようにすることを最終目標とする。

2 蜃気楼の基礎知識

○蜃気楼とは

蜃気楼とは温度の異なる大気の密度差によって光が屈折し、遠方の物体の見え方が変わる現象であり、上位蜃気楼・下位蜃気楼・側方蜃気楼の三種類がある。

図1 ○ホイヘンスの原理に基づく光の屈折



教科書では速度と進行方向の関係についてホイヘンスの原理を用いて詳しく説明されている。(図1)

それによると
$$\frac{v_1 t}{v_2 t} = \frac{AD \sin i}{AD \sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$
 が成り立つ。

光の速さは空気の密度の違いにより変化する。

これらの空気の密度差による進む速さの違いとホイヘンスの原理に基づく、温度の低い方に屈折することがわかる。

光が屈折することで物体のある方向とは異なる方向に像が見えるようになる。入ってきた光の延長線上に像ができる。これが蜃気楼である。

図2 ○上位蜃気楼の見え方

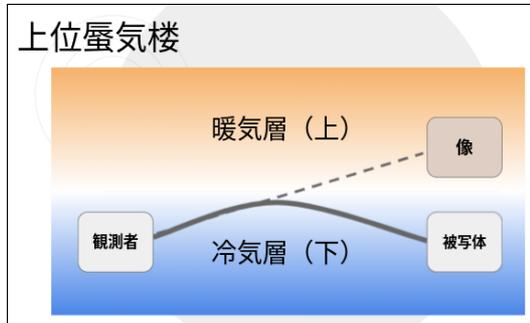


図3 ○自然界の蜃気楼（反転）



上位蜃気楼は上に暖气層、下に冷氣層がある状態になったときに発生する。(図2) 上位蜃気楼では被写体が上にのびるような像と、上に反転するような像が観測される。自然界で観測される有名なものには富山の春の蜃気楼や浮島現象などがある。

図4 ○下位蜃気楼の見え方

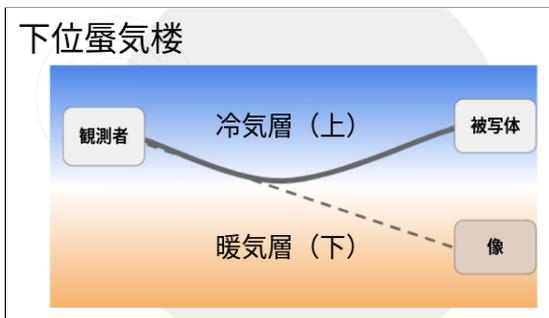


図5 ○逃げ水現象

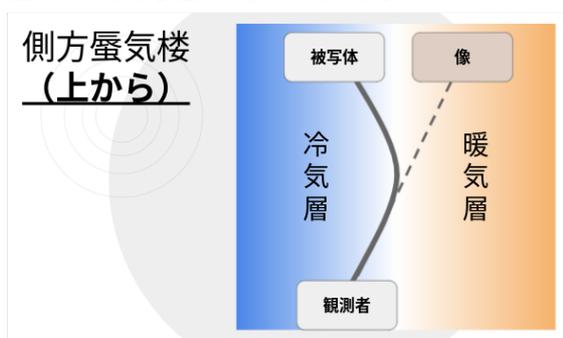


下位蜃気楼は下に暖气層、上に冷氣層がある状態になったときに発生する。(図4)

下位蜃気楼では被写体が下に反転するような像が観測される。

下位蜃気楼は自然界で最も多く観測される蜃気楼であり、例としてアスファルトが熱せられることで起こる逃げ水現象などが挙げられる。

図6 ○側方蜃気楼の見え方



側方蜃気楼は暖气層と冷氣層が左右に別れたとき発生する。(図6)

側方蜃気楼では横に複製されたような像が観測される。

自然界で観測されることは殆どないが暑い日に石垣の側面などに見られたという報告がごく少数だがある。

3 先行研究から

【わかったこと】

- ・ 上位曇気楼は液体では容易に再現できるが、気体での再現はあまりされていない
- ・ 下位・側方曇気楼は液体、気体ともにあまり再現されていない

これらのことから、三種類の曇気楼を気体を用いて再現することに決めた。

【分析】

気体での再現に失敗している東京電機大学の実験[5.]では空気の層ができる部分を木枠で囲んで実験していたことから、暖気が充満し空気の層が形成されなかったのではないかと推察される。

そこで私達の研究では囲いを用いずに実験を行うことにした。

4 シミュレーション

実験と並行して、測定した装置付近の空気の温度勾配のデータを利用して光の進み方を図にするシミュレーションを作成した。シミュレーションを行うスプレッドシートの作成手順は以下のとおりである。

加熱部分から距離を1mmずつ離れたときの温度を測定した。

図7

ア板からの高さ	①	②	→		平均温度	屈折率	Δθ
1	114.8	103.7		1	109.25	1.00020632	-0.00003242
2	114.3	103		2	108.65	1.00020665	-0.00015541

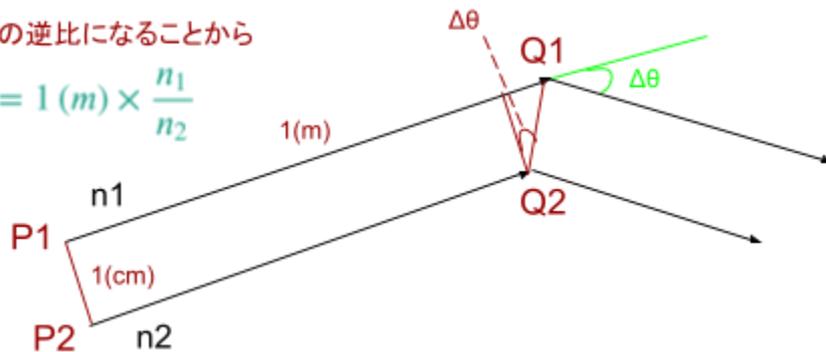
次に、測定した装置付近の温度(t)をもとに、文献[4.]を参考に以下の式を用いて屈折率(n)を算出する。

$$n = (1 + 0.0789) \div (273.15 + t)$$

(出典：StoneとZimmermann)

光速は屈折率の逆比になることから

$$P_2 Q_2 = 1(m) \times \frac{n_1}{n_2}$$



次に、ホイヘンスの原理による光の屈折から以下の式を用いて光の進行方向の変化(Δθ)を求める。

$$\Delta\theta = \frac{P_1 Q_1 - P_2 Q_2}{P_1 P_2} = \frac{1(m)}{1(cm)} \left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right) n_1 = 100 \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2} \right) (rad)$$

最後に、求めた屈折率、Δθを用いて以下のような計算を行う。赤丸部分（観測者の目の高さ）と光が目に入る角度間隔の数値は変更でき、数値を変更することで目に届くはずの

光がどこから来ているかを逆算することができる。x、yの部分のデータをグラフにすることで光路図を描くことができるようになっている。

x	y1	y2	y3	y4	y5	y6	y7	y8	y9	y10	θ1	θ2	θ3	θ4	θ5	θ6	θ7	θ8	θ9	θ10
1	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	-0.013	-0.0113	-0.0087	-0.0061	-0.0034	-0.0006	0.0017	0.0043	0.0069	0.0095
2	29.988	29.988	29.991	29.993	29.996	29.999	30.001	30.004	30.006	30.009	-0.013	-0.0113	-0.0087	-0.0061	-0.0034	-0.0006	0.0017	0.0043	0.0069	0.0095

青地の部分 例) $R7 = +R6 + \tan(AB6)$

緑地の部分 例)

$AB7 = IF(AND(R7 < 20, R7 > 1), +AB6 - VLOOKUP(R7, \$F\$8 : \$I\$27, 4), +AB6)$

5 実験と結果

【実験1】

最初の実験としてまず気体を用いて蜃気楼を作ってみるという目的のもと、魚津埋没林博物館広報誌「うもれ木」[1.]及び文献[2.]を参考に装置（図8）を作成し、実験を行った。

図8 ○模式図

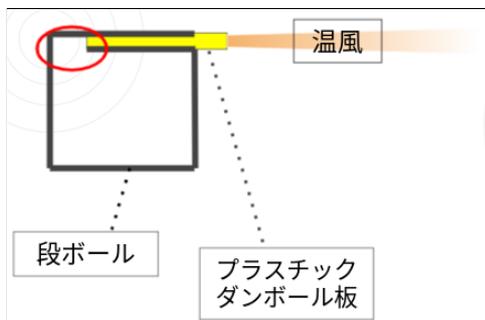


図9 ○実験における位置関係



温風の層を通して被写体を見ることで人工的に蜃気楼を観察することができるとあった。

【結果】

図10 ○ぬいぐるみ

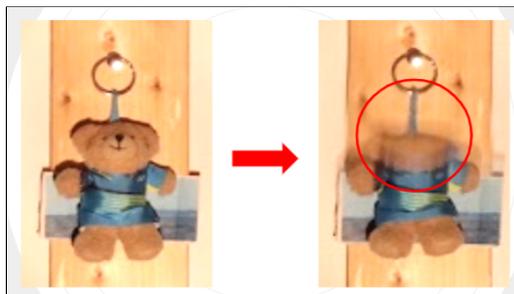


図11 ○方眼紙

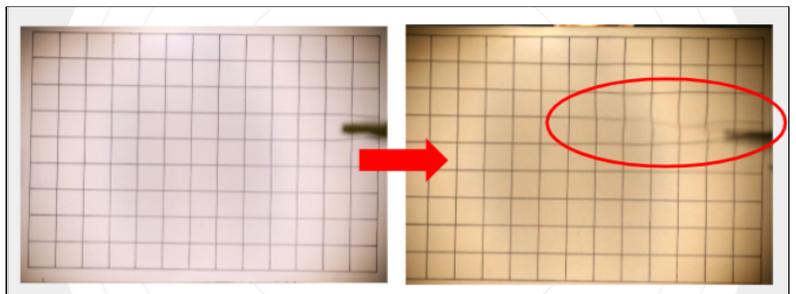
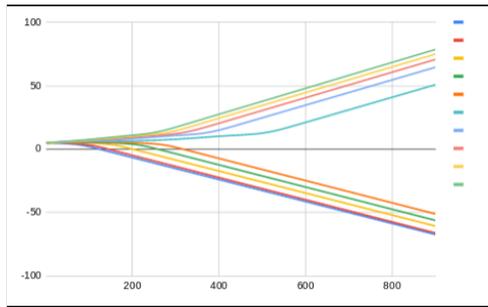


図12 ○シミュレーション



ぬいぐるみの頭部が縮んだ像 (図10) と方眼紙の上下が縮んだ像 (図11) が観察された。温度の測定結果をもとにシミュレーションを行った結果が図12である。このシミュレーションと写真から、温風の層の上側の境界面では下位蜃気楼が、下側の境界面では上位蜃気楼が同時に発生し、縮むような像が観測されたと考えられる。

【実験1から】

同時に発生している二種類の蜃気楼を一種類ずつ観測するために次の実験に移った。

【実験2】

この実験では、木下正博氏の修士論文「富山湾における蜃気楼の研究とその教材化」[3.]を参考にし、すぐに入手可能なものを使用して実験を行った。

【実験2-1 上位蜃気楼】

図13 ○模式図

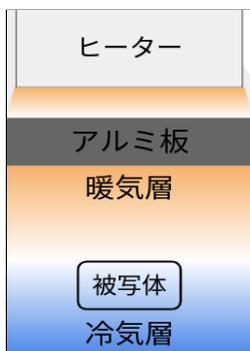
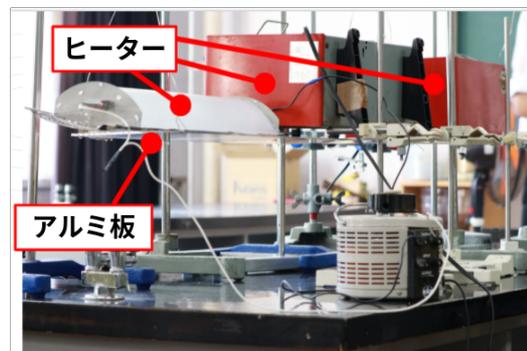


図14 ○装置写真



別の先行研究を参考に、アルミ板とヒーター（電気ストーブ）を用いて装置（図11・12）を作成し、上位蜃気楼を観測するための実験を行った。

【結果】

図15 ○像（伸び）

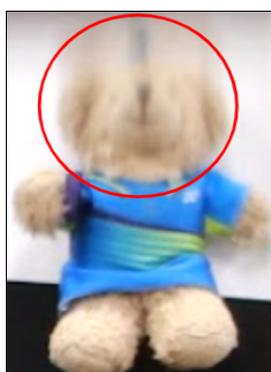
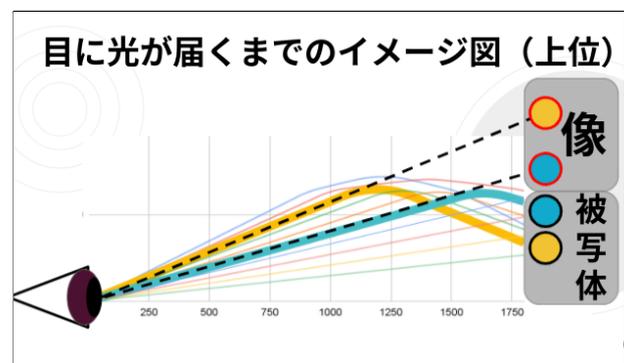


図16 ○像（反転）



図17 ○シミュレーション



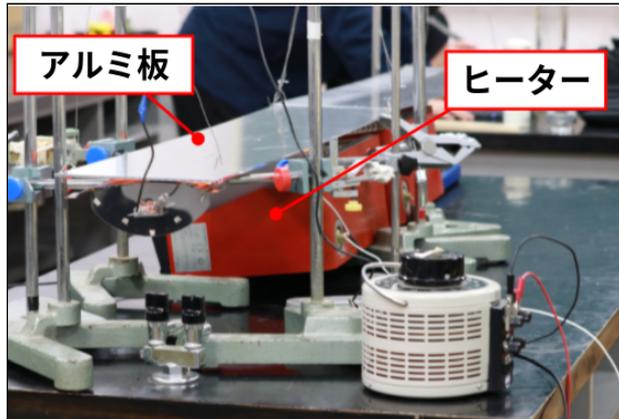
結果、上に伸びた像（図15）と上に反転した像（図16）が観察された。
 これらの結果をもとにシミュレーションを行った結果が図17の通りである。
 シミュレーションから確かに上に反転していることがわかる。

【実験2-2】

図18 ○模式図



図19 ○装置写真



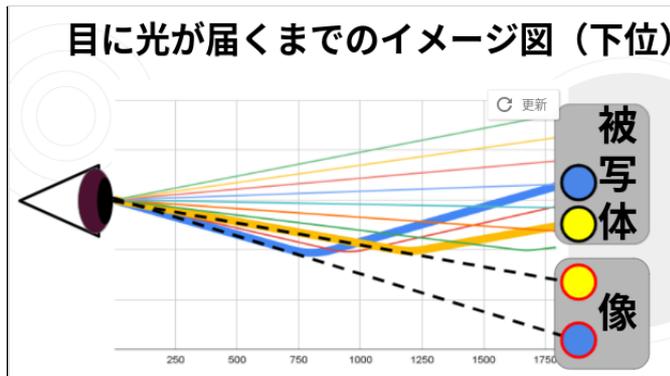
次に、下位曇気楼を観察するために先程の装置の配置を変更して実験を行った。

【結果】

図20 ○像



図21 ○シミュレーション



結果、下に反転した像が観察された。（図20）

温度測定の結果をもとにシミュレーションを行った結果が図21である。

シミュレーションから得られた光路図と実際の写真を比較すると確かに像のでき方がほとんど一致した。

【実験2-3】

図22 ○模式図

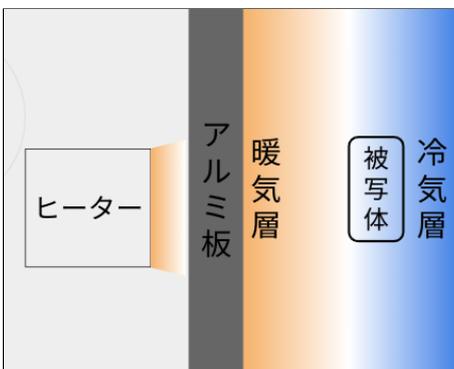
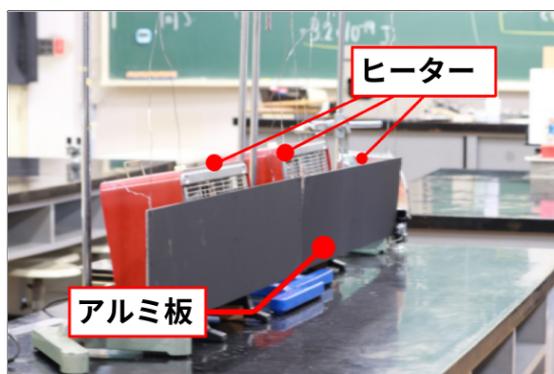


図23 ○装置写真



次に側方曇気楼を観察するために先程の装置の配置を変更して実験を行った。

【結果】

図24 ◦像

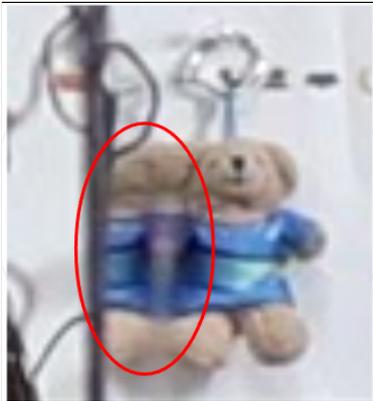
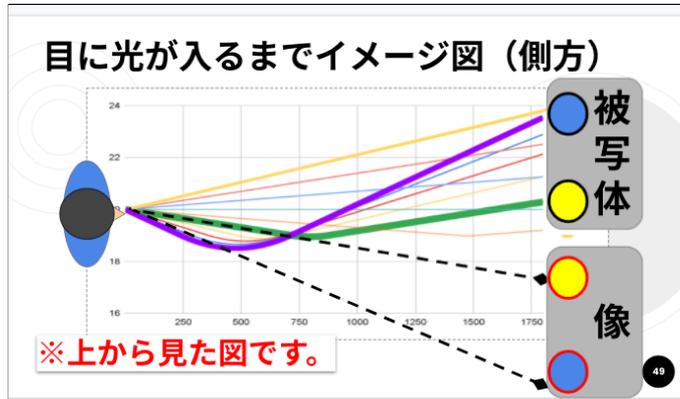


図25 ◦シミュレーション



結果、横に複製されたような像が観察された。(図24)

温度の測定結果をもとにシミュレーションを行った結果が図25の通りである。

シミュレーションから得られた光路図と実際の写真を比較すると確かに像のでき方がほとんど一致した。

【実験2から】

実験2では電気ストーブを用いているため、長さがアルミ板と合っておらず、また、直接加熱されている部分と加熱されていない部分で温度差が大きかった。そこで装置全体を均一加熱し、また、三種類の曇気楼を組み合わせて新たな曇気楼を作り出すために、新たな装置を作成し次の実験に移った。

【実験3】

図26 ◦固定装置模式図

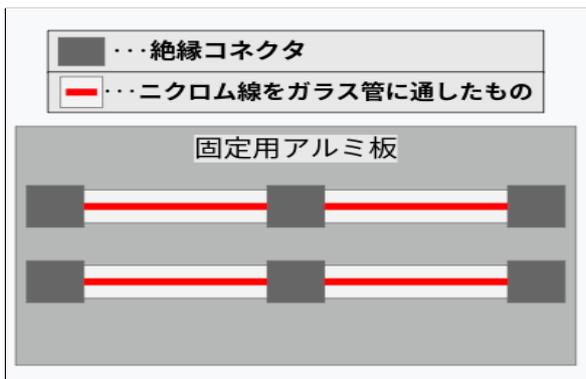


図27 ◦固定装置写真



図28 ◦装置完成形模式図

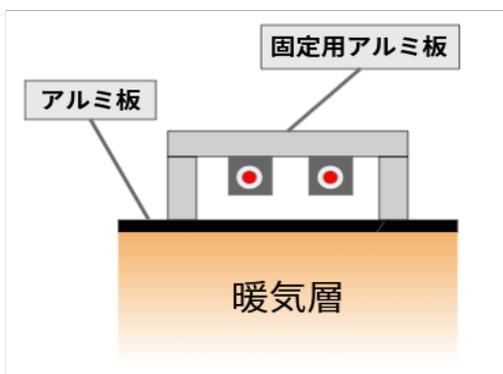
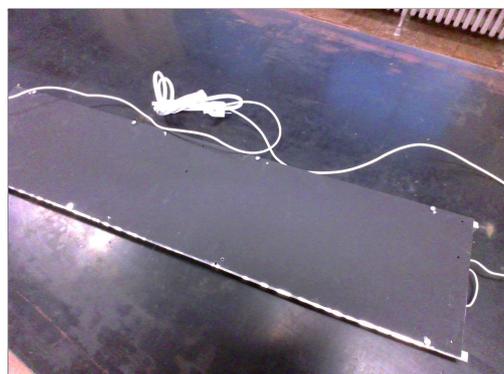


図29 ◦装置完成形写真



石英ガラス管にニクロム線を通したものを固定用アルミ板に取り付け（図26・27）、これを加熱用アルミ板（長辺90.2cm,短辺20cm）に固定することで熱が均一になる装置（図28・29）を作成し実験を行った。

この装置を用いることで均一な温度勾配の空気層ができ、実験とシミュレーションの条件が合わせやすくなる。また、配置の仕方を様々に変えることで三種類の蜃気楼を組み合わせ、水平方向の温度勾配と鉛直方向の温度勾配をつくることで新たな蜃気楼が作れるようになるといったメリットが見込まれる。

[結果]

この実験では十分に時間を取ることができず、蜃気楼を再現できることが確認できた以外の成果はまだ得られていない。今後さらなる実験に取り組んでいく。

6 今後の課題

今後の課題としては、アルミ板の配置を変えて実験を行うこと、シミュレーションを用いて蜃気楼の発生条件と下位・側方蜃気楼が一種類しか発生しない理由の解明を行うことが挙げられる。

また、最終目標の蜃気楼ができる条件を明らかにし、逆算して任意の像を作り出すことの達成に向け、これからも研究を続けていく。

7 引用・参考文献

▶1. 魚津埋没林博物館 石須秀知 （2012）「ダンボールでつくる蜃気楼」
[http://japan-mirage.org/wp-content/uploads/kenkyu/2012\(H24\)/2012-08.pdf](http://japan-mirage.org/wp-content/uploads/kenkyu/2012(H24)/2012-08.pdf)

▶2. 魚津埋没林博物館 「うもれ木 36号」
石須秀知 （2012）「ダンボールの簡単工作で蜃気楼を作ろう」
<https://www.city.uozu.toyama.jp/nekkolnd/news/umoregi-pdf/036.pdf>

▶3. 富山大学大学院教育学研究科 木下正博 （2000）
「富山湾における蜃気楼の研究とその教材化」
http://japan-mirage.org/kinoshita_hp/link/kenkyu/shyushironbun.pdf

▶4. 琵琶湖地域環境教育研究会 松井一幸 （2016） 「琵琶湖の蜃気楼」
https://biwakodas.sakura.ne.jp/mirage/20160608_LakeBiwaMirage.pdf

▶5. 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科
吉田圭太 小暮浩史 嶋村崇 松澤俊介 （2009）
「蜃気楼で遊んでみよう」
https://www.hakko.co.jp/contest/report03/06_20091218.pdf