

# 光の屈折2題

## 脚は伸びるか？ — 蜃気楼の原理は？



コップのストローと逃げ水と



工学博士 西尾 宣明

元・東京ガス(株) 基礎技術研究所

### 脚は伸びて見えるか？

**与太郎** こないだスーパー銭湯に行ってきたんだけど、たまに大きな湯船で手足を伸ばすっていうのは気持ちいいもんですね。

**大家** そうですね。うちも二人とも温泉好きだから結構よく行ってますよ。

ゴミ焼却炉の熱でお湯を沸かしてるから安いし、プールで泳いだり、水中ウォーキングなどもできますしね。

何より、ジェットバスやサウナなどいろんな風呂があるのがいいですね。

**与太郎** 大家さんも結構行ってるんだ。

体の芯から温まれるのもいいですね。家の風呂じゃ家族で交代だからそうはいきませんからね。

ところで、丸い大きな湯船があるでしょう？ ちょうど肩までの深さでゆっくり足が伸ばせる…。

**大家** ああ。与太郎さんが「表面波」を発見した湯船ですね（NDT99号「表面波談義」参照）。また何か発見しましたか？

**与太郎** 発見なんてものじゃないけど——ほら、湯船の底にタイルの碁盤目のような線があるでしょう？ あれが遠くに行くと曲がって見えて、しかもうんと遠くになって行くように見えるでしょう？ その時、伸ば

した足もなんだか足が伸びたように見えるんだけど、あれは本当に伸びてるんですか？ それともただの錯覚なんですかね。

**大家** ああ、あれは面白いですね。私もちょっと不思議な感じがしたので色々考えましたよ。

しかし、結局のところ目の錯覚だという結論になりました。

**与太郎** そうですか。しかし不思議ですね。どう見ても足が伸びるようにしか見えませんよ。

**大家** 確かに、遠くにある足の先がぐっと小さくなって、しかも底の床と一緒にうんと浅くなるように見えますね。空気中と違って遠近法が極端に効いてくるので、錯覚してしまうのが自然ですよ。

**与太郎** そうかなあ。錯覚だってどうしてわかるんですか？

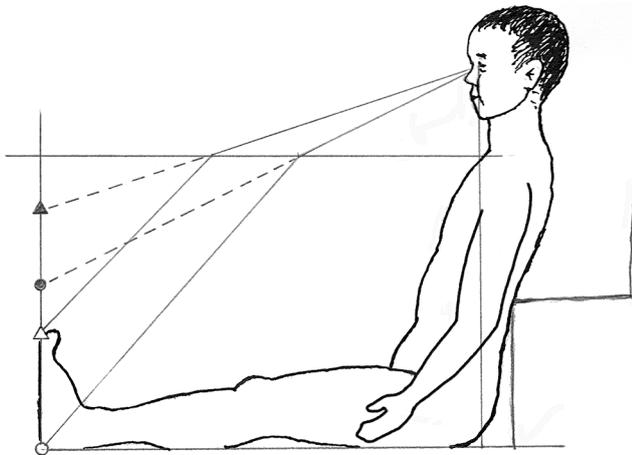
**大家** 床の線をずっと追っていけばわかりますよ。

湯船の一番向こう側の垂直の面におつかるころは高さは短く見えるけれども、湯船の縁よりも遠くまで食い込んではいないでしょう？

**与太郎** ああ、そうか。そこまでは確かめていなかったなあ。今度行ったらよく確かめて見ますよ。

**大家** 別に目で確かめなくても光の屈折の仕方を調べればわかりますよ。

人間の体の寸法と水の深さをこの図のようになって



風呂での光の屈折

いると考えますね。だいたい私の体がこんなものです。

水の屈折率は $n = 1.33$ ですから、それで足の踵のところ（○印）と足の先（△印）のところからの光がどんな経路を辿って目に飛び込んでくるかを調べてみると、おおよそ図に描いたような経路になります。

これらの光がどこから来たかは目に入って来た方向をまっすぐ逆に辿って破線の方向からやって来たことを認識するわけです。つまり、●印と▲印からやって来たように見えるということです。

●印と▲印の間隔は元の足の大きさよりもずいぶん小さくなっていますね。そのために足の先が遠くに伸びたように錯覚してしまうわけです。

### 目は三角測量をする

**与太郎** あれ？ 大家さんは●と▲を元の白丸と三角からまっすぐ上に伸ばした線の上で書きましたね。

実際はこの線も遠くの方に傾くんじゃないんですか？

**大家** さっき湯船の底が遠くなるようになるのは錯覚だと言ったばかりじゃないですか。

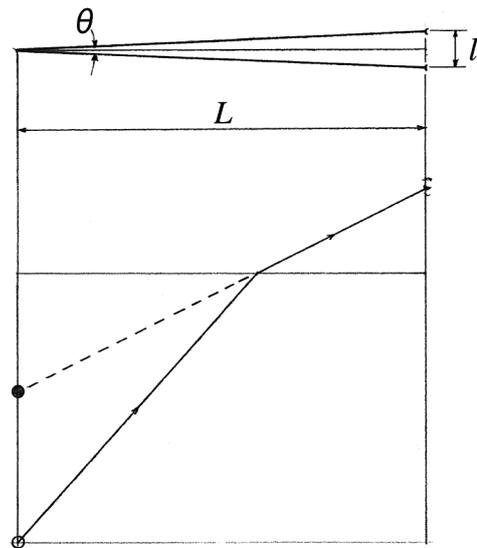
それでも納得できないとすれば、右目と左目で三角測量をしていることがわかる必要がありますね。

さっきの図で屈折する光の折れ線を描いたのは仮に左目が見たものだとしますね。じゃあ、右目が見た光の折れ線はどうなりますか？

**与太郎** 右目で見ても左目で見ても大して変わらないんじゃないですか？ 両目がそんなに大きく離れているわけでもないから。

**大家** そうですね。対象物からの光が目に入る経路は屈折した光が一番短い時間で目に届くような経路になります。そうすると対象物と目を含む垂直の面の中で屈折した光が一番早いことになります。

その面は右目と左目に対してそれぞれあって、上から見ると対象物のところで交わるV字の形になっています。



目の三角測量

交わる角度の大小で、我々是对象物が自分から近くにあるか遠くにあるかを判断しているわけです。

これは立派な三角測量なんですね。

**与太郎** 三角測量って、道路工事かなんかの人が白と黒の目盛のついた尺っていうんですか？ 二メートルぐらいの物差しを立って、遠くから望遠鏡で覗いてるアレですか？

**大家** 他にも色々な測り方があるんですが、一番基礎になるのが三角測量ですね。

私も本当の名前を知りませんが、尺の目盛の上で例えば二メートル離れた点を決めて、それを望遠鏡で見るとその点に応じて望遠鏡の上下の角度が決まりますね。その角度を $\theta$ （シータ）とすれば、望遠鏡と尺の間の距離を $L$ 、尺の上の目盛の間隔を $l$ としたとき——ここでは $l = 2$ メートルとしておきましたが—— $L$ と $l$ とシータの間には次の関係があります。

$$l = L \theta$$

という簡単な関係です。

さっきの図と比較すれば目の間の距離が1で、二つの面が交わる点—これは○の位置から立ち上がった垂直の線ということになります—そこまでの距離がLということになります。

**与太郎** 三角測量っていうからサイン・コサイン・タンジェントなんか使ってるのかと思ったらそうでもないんですね。

**大家** 実際には使っているんですよ。

この例だって厳密には

$$l = 2L \sin \frac{\theta}{2}$$

なのですが、Lがlに比べてうんと大きい時にはシータがうんと小さくなるので、

$$\begin{aligned} \sin \theta &\cong L \theta \\ \cos \theta &\cong 1 \end{aligned}$$

などと近似しても問題ないんです。

**与太郎** ああ、そうなんだ。確かに50メートル先の2メートルじゃ望遠鏡の動く角度はうんと小さいですね。

**大家** ただし、シータは円の半回りの180度を円周率 $\pi$ と置き換えた「ラジアン」で測ったものだからね。360度式度数の約6分の1になりますから注意しなければなりませんよ。

**与太郎** そうか。そう言えば、電気でも位相角などをラジアンで測るようになってきましたね。SI単位でそう決まったんでしょう？

**大家** そうですね。与太郎さんももうお馴染みだったんだ。

ところで、二つの垂直面が交わってできる直線はやはり垂直になるから、さっき言ったように白丸から立ち上がった直線はやはり垂直で、●も▲もその直線上にあるというわけです。

つまり、屈折して目に入った足までの距離は元の足までの距離と変わらないわけです。

**与太郎** そうか、遠くへ行くように見えるのはただの錯覚なんだ。

**大家** 今はちょっと難しい説明をしましたが、手とり早いのは湯船に入る段々のところの手摺ですよ。

あれが湯船から立ち上がる場所は垂直になっていますね。水に入っても折れ曲がっては見えませんか？ 屈折のために短くは見えますがね。

**与太郎** あ、そうか。垂直のものはたとえ短く見えて

も垂直なことには変わりがないんだ。

でも—あれ？ コップの中に入れたストローは折れ曲がって見えますよね。（冒頭のカットを参照）

**大家** それは斜めに入れた時のことです。ストローを垂直に立てるとコップの中でも垂直でしょう？

さっきの湯船の手すりと同じことですよ。

**与太郎** いけねえ！そうか。聞いたばかりの事をもう忘れていたんだ。

## 蜃気楼談義

**大家** 光の屈折といえば、もう一つ面白そうなものに蜃気楼がありますね。

与太郎さんは見たことがありますか？

**与太郎** わたしは見たことがないですね。でも富山湾の蜃気楼って有名ですね。時々テレビや新聞にも出てくるので、面白いなあとは思いますがね。

大家さんは見たことがありますか？

**大家** 私は蜃気楼の一種の逃げ水というのは何回も見たとありますがよ。

天気が良くて暑い夏の日、家族を乗せてドライブした時によく見かけましたが、最近は車で遠出ということもしないのでそういう経験にはご無沙汰ですね。

**与太郎** 蜃気楼ってどんな時に見えるんですか？

富山湾の場合は立山連峰から雪解けの水が流れてくるために湾の中の水が冷たくなるからだって聞いたんだけど、それでいいんですか？

**大家** 私もウィキペディアなどで調べて見ましたが、だいたいそんな考えで良いらしいですね。ただ、なぜそうなるかを物理的にきちんと説明した例はほとんど見当たりませんね。例えばこんな説明です。

「温度の低い海面等によって下方の空気が冷やされ密度が高くなると、元となる物体の上方に蜃気楼が出現する。水平線（地平線）の下に隠れて見えない風景や船などが見える場合があり、通常ニュースなどで取り上げられる蜃気楼は、この上位蜃気楼を意味する場合が多い」と、こんな具合です。

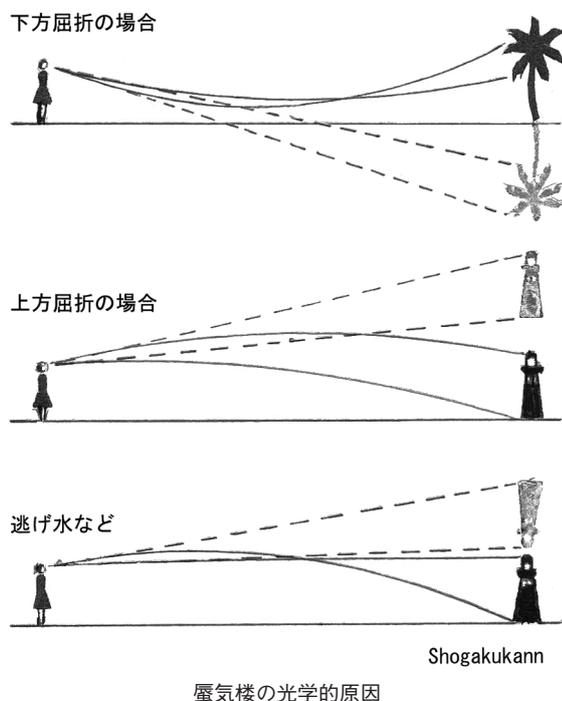
こんな風に突然「上位蜃気楼」という言葉が出てきて面食らうんですが、一番初めに辛うじてこんな説明があるので、注意して読めば何となくわからないでもないですね。こんな具合です。

「蜃気楼は、密度の異なる大気の中で光が屈折し、

地上や水上の物体が浮き上がって見えたり、逆さまに見えたりする現象。光は通常直進するが、密度の異なる空気があるとより密度の高い冷たい空気の方へ進む性質がある。」とね。

**与太郎** いやあ、そんな説明を読んだって、さっぱり理屈が分かったことにはなりませんよ。

**大 家** そうですね。私も今の文章を読んだだけでは、地上の温度分布がどうなる時に蜃気楼がどんな形に変わるのかが良く分からなくてイライラしてしまいますよ。特に、上位蜃気楼や下位蜃気楼を絵に示したのなど、却ってわかりにくいですね。



この絵は蜃気楼の光学的原因という題がついていますが、一番上と一番下の図なんか対象物の上側からの光、あるいは下側からの光だけが大きく曲げられるのか、その理屈がなんにも説明されていないですよ。

**与太郎** そうですね。それにしても光がこんなに大きく曲がるものですか？

**大 家** そうですね。実際の蜃気楼は何キロメートルも先のがひっくり返って見えとか、普通なら水平線の下にあって見えないものが浮かび上がって見えたりしますが、その距離を考えると光はほとんど曲がらないで、微妙なところで対象物の上側からの光が下側からの光と上下入れ替わって目に飛び込んでくる—

—そういうことが起きているんだと思うんです。

ところが空気の温度と光の速さの関係を測るのはなかなか難しいものと見えて、理科年表を当たっても0℃、1気圧での空気の屈折率が1.000292とあるだけで、温度が変わった時の値などは出ていないのが実際のところですね。

だから、さっき例を引いたように、空気が冷たいために密度が高くなると、光は遅くなって屈折を受ける。という程度の説明しかできないんでしょうね。

屈折率で言えば、常温での1.000292が低温の中では1.00033くらいになるという具合に、屈折率の変化もせいぜい0.00003程度のわずかな変化でしょうから、蜃気楼ができる条件にしてもあまりはっきりとは言えないのが本当かもしれませんよ。

**与太郎** それにしても、もう少しわかりやすく説明できないもんですかね。

### 逃げ水が起きるのは

**大 家** 蜃気楼は夢中になって研究するほど面白いものじゃないんじゃないですかねえ。

たまたま色々な蜃気楼を観察したことのある人にとっても、せいぜい色々なタイプの蜃気楼を分類する程度で、大気中の逆転層と、その出来方にどんな関係があるかを追求するには基礎になる屈折率のデータが不足で、それを深く突き詰めようとしてもあまり面白いものじゃないのかもしれないよ。

**与太郎** そういうものですか。つまり、学問として研究するには面白いもんじゃないってことですかねえ。

**大 家** そうなことですね。でも、逃げ水現象の場合だったら、私でもなんとか説明できると思いますよ。

**与太郎** その逃げ水の場合だけでも教えてくださいよ。

そうでないと、どうも胸がすっきりしませんよ。

**大 家** 胸がすっきりしないのは私も同じですよ。

さっきも言ったように、逃げ水は道路がガンガン日光を受けて、道路に接している空気の層もうんと熱くなっているときに起きます。

さっきの話で出てきたように、空気の温度が低いと空気の密度が高くなるのでその中での光の速さは遅くなります。密度の高い分空気の分子が光の通り道の邪魔になって、光はほんの少しだけでもジグザグと曲がりながら空気分子の間を通り抜けていくんですね。

熱く熱せられた空気は膨張して反対に密度が小さくなります。そうすると光はどんな風になりますか？

**与太郎** 空気の分子と分子の間が広がるんで、光はあんまり邪魔されずに通り抜けるんでしょう？

**大家** そうですね。

ところで、光の速度が遅い媒体から速い媒体の方に入射する時のスネルの屈折の式を考えると、入射角がある角度より大きくなると屈折角が90度になってしまいます。つまり、光の速度が速い方の媒体の中には光が入って行けないということになってしまいます。

そうすると光は全部反射して元の媒体の方に戻ってしまいます。

**与太郎** それは路面の上の熱い空気の中にはその上の

空気からの光は入って行けないということですか

**大家** そうということです。熱い空気の層が鏡のように空からの光を跳ね返すんです（冒頭のカットを参照）。

その部分では光る水たまりがあるように見えるんですね。その水たまりは我々が近づけば逃げていく。

面白いのは、その水たまりのところを走っていく前の車があると、逆様になった車の後ろ姿も水たまりに反射して車と一緒に走っていくんですね。

**与太郎** へえー、面白そうだなあ。うんと熱くて晴れた日に逃げ水を探しに高速道路を走ってみようかな。

**大家** それも面白そうですね。ただ、最近路面が熱くならないように舗装を工夫したりしているから、逃げ水に会う機会は少なくなっているかもしれませんね。



非開削工法の普及を目指し設計をお手伝いする画期的サイト

## バナー広告掲載のご案内

『工法ナビ』へのバナー広告掲載をご希望の方はNo-Dig Today編集室またはJSTT事務局までお問い合わせください。

### 広告のお申し込み・お問合せ

No-Dig Today 編集室

(株)LSプランニング

Tel 03-5621-7850 Fax 03-5621-7851

JSTT事務局

Tel 03-5639-9970

Fax 03-5639-9975

### ■ 工法ナビ バナー広告掲載料金

掲載場所	掲載期間	掲載料金
TOPスペース	6ヶ月	60,000円
	上半期（4月1日～9月30日） 下半期（10月1日～3月31日）	18,000円
技術区分内スペース		

※広告掲載料金は1掲載当たりの金額です。（消費税別）