

# 水槽の向こう側

柏陽高校 山本明利

## 水中で消えるカード

絵柄のあるカードをポリ袋に入れて鉛直に立てながらコップの水に差し入れていくと、水中に没した部分が鏡のように輝く光沢面になり、袋の中のカードが見えなくなる。光の屈折の性質を利用した科学あそびとしてポピュラーなものだ。



このとき袋の表面、厳密に言うと袋の内側の空気との境界面において全反射が起こっていると説明される。袋の表面にはコップの底の方面が映っており、袋の中からの光は遮断されているように見える。実際、コップの底にコインでも沈めれば、その反射像が鏡に映したように袋の表面に鏡像となって見える。

## 臨界の条件

ところで全反射というからには臨界角が存在するはずで、その角度や臨界付近でのふるまいはどうなるのか興味がわいたの

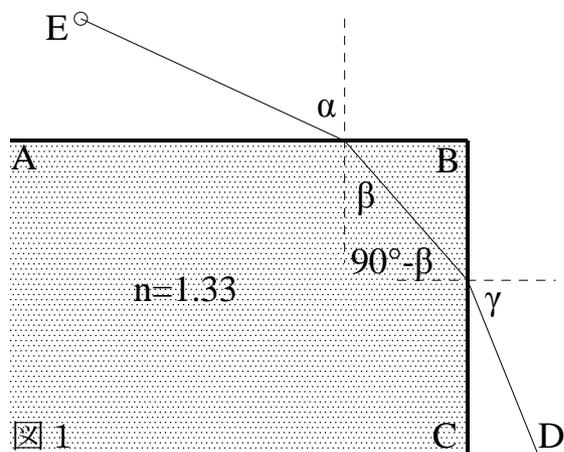


図1

で、実験を伴って簡単な考察を試みた。

問題は次のように単純化できる。図1でABが水面、BCがポリ袋の面、網掛け部分が水である。ここでの課題は水面上の点Eに視点をおいたとき、面BCの右側にある物体がどのように見えるかであるが、光線の矢印をあえて示さなかったのは、光線逆進の原理により、点Dから出た光がEに達すると考える代わりに、Eから出た光がたどる道を考えても幾何光学的な事情は同じだからである。

水の外側の空気の屈折率を1、水の屈折率を  $n=1.33$  とする。面ABと面BCでの屈折に関するスネルの法則はそれぞれ

$$1 \cdot \sin \alpha = n \sin \beta \quad \dots\dots ①$$

$$1 \cdot \sin \gamma = n \sin (90^\circ - \beta) \quad ②$$

と書ける。式①は  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$  に対して必ず  $\beta$  について解を持つので式②と①より

$$\begin{aligned} \sin \gamma &= n \cos \beta \\ &= \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \quad \dots\dots ③ \end{aligned}$$

が得られる。式③は

$$n^2 - \sin^2 \alpha > 1 \quad \dots\dots ④$$

のとき  $\gamma$  について解を持たない。すなわち面BCでは全反射が起こる。式④を解いて全反射が起きる条件を  $\alpha$  で表すと

$$\sin \alpha < \sqrt{n^2 - 1} \quad \dots\dots ⑤$$

となり  $n=1.33$  では

$$\sin \alpha < 0.877 \quad \text{すなわち} \quad \alpha < 61.3^\circ \quad \dots\dots ⑥$$

である。ちなみに  $\alpha = 61.3^\circ$  のとき  $\beta = 41.2^\circ$  でその余角  $90^\circ - \beta = 48.8^\circ$  は一般に言われる水の臨界角である。

この結果は水面上の視点Eから面BCの向こう側にある物体を見るには水面から  $30^\circ$  に満たない浅い角度(式⑥の  $\alpha$  の余角)で水面を見下ろす必要があり、冒頭の写真のように、コップの上からのぞき込むような視点では水中に没した袋の中味は全反射のために見ることができないことを意味する。この科学あそびが不透明なコップを用いて行われるのは式⑥の条件になるように視点を制限する目的があったのである。その意味ではコップの水は縁までなみ

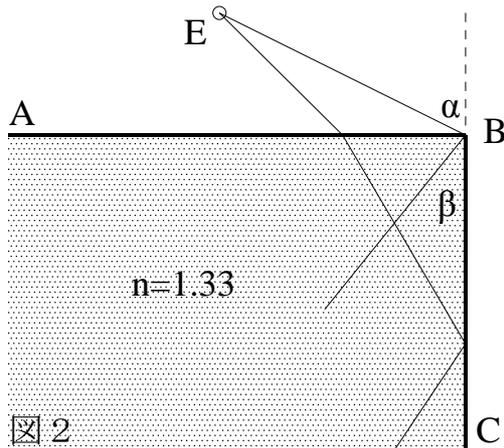


図2

なみと満たさず、八分目ぐらいにしておく方がよい。

視点 E が水面の端の点 B を見下ろすときの角  $\alpha$  の条件が式⑥を満たす角度であるとき、図2のように、視点 E から見える光はすべて水中から届くものとなり、面 BC を通して水の外（ポリ袋の中）を見ることはできない。光線逆進の原理を合わせて考えれば、全反射が起こる光路上を透過光がたどることはあり得ないからである。

### 透けて見える部分

次に視点 E を水面に近づけるか、A 側に移動して、図3のように PB 間において角  $\alpha$  が全反射の条件式⑥を満たさないものとしよう。点 Q が臨界の条件  $\gamma = 90^\circ$  となる点である。QC 間では全反射が起こっているのが見える。

このとき視点 E から見て PB 間には何が見えるのかを考察してみよう。この領域は全反射領域ではないので、透過率の違いはあるものの、BQ 間を通過してくる光がある。つまり向こう側が見えるわけだ。

点 E から逆に光を発した場合を考えれ

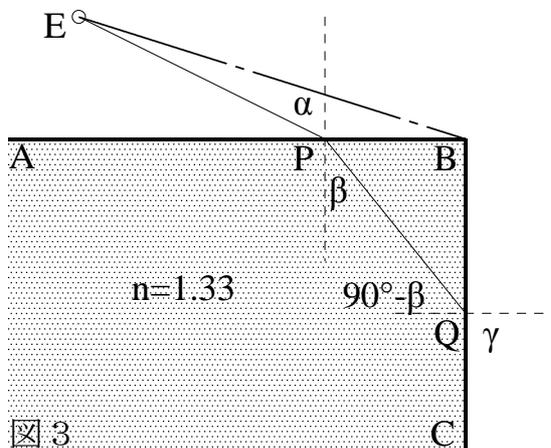


図3



ばわかるように、この際、面 BC の右側の全ての領域からの光が BQ 間の「窓」を通過して視点 E に届く。視点 E からは点 Q より下も含めて「向こう側」の光景が全部 PB 間に圧縮されて見えるのである。

一方この領域では、水中からくる光の面 BQ での反射も観察でき、さらに水面 PB での上方からの反射光も混じって見えることになる。上の写真は、やや大きめの水槽を用いて、BQ 間の観察をした様子である。当然ながら、水槽の側面からは、水中に没した部分のカードが明瞭に観察できる。

視点 E を全反射が起きる位置より若干下にとって、図3の水面 PB に相当する部分を注意深く観察してみよう。

下の写真は当該部分を拡大したものである。この写真の中程、水面 PB に相当する部分に大小4つのハートが見える。左の2個のハートはカードの水面上の部分が水面



に反射した鏡像である。右の2個のハートは水面下の部分の透過屈折像であり、縦方向につぶれて見えている。カードはおよそ三分の二が水中に没しているが、ここには水中部分の全体が縦に圧縮された状態で見えているのである。

よく見るとキングの顔も右向きと左向きがダブっていて、反射像と透過屈折像がおよそ半々に重なっていることがわかる。さらにポリ袋表面での反射も強くなってきているので、全体がかすんだように見える。

結局この領域には、水上部分の反射光、面 BC を透過してくる屈折光、面 BQ で反射してくる水中からの光、の3種類の光が重なって見えているのである。この状態から視点を上に移動していくと、まもなくポリ袋表面の光沢が増してきて透過屈折像は見えなくなる。全反射の状態に移行したのだ。

写真の水中部分が陰になっていることにも注目してほしい。上方からの照明なので、水面から入った光がポリ袋表面で全反射してしまい、ポリ袋内を照らさないためだ。カードの下端は水槽側面から入射屈折した光で照らされている。

## 水槽の向こう側

これまでの議論は水面を上方からのぞき込む位置関係を想定して行ってきたが、図1～3の縦横を入れ替えて、水槽を横から眺めて水面を見上げる状況でも同じ議論が成り立つ。

水族館の大水槽の前に立ち、水面を見上げるときには、水面はたいてい全反射を起こしていて空や天井を見ることができない。式⑥の条件を回避するためには、よほど顔をアクリルの窓に寄せてすれすれに見上げなければいけないからだ。

考えてみると水族館のディスプレイは暗い通路に明るい水槽の窓が開いているものが多い。水槽の照明は直接観客の顔を照らさないように水槽の手前側上部につけてある。このとき照明の光は式⑥を満たしていて、窓の内側で全反射して水槽内を照らしているのだろう。観客はまぶしい照明を直接見ることなく、水槽内の散乱光だけを鑑賞する。

図1～3はまた、直角な角をもつ水槽を上から俯瞰した図と考えてもよい。水槽の直角な角に近いところでプリズムを透かしてみるように水槽の向こう側を見る場合に相当する。



上の写真は箱根園水族館・淡水館の直方体の大型水槽の角の部分眺めたところである。カメラを手前のガラスに押しつけるようにして左手の直角な面の向こう側を撮影した。

画面の中央やや左に円形の虹の輪が見えていて、その輪の中にはひどくゆがんだ「向こう側の世界」が見えている。魚眼レンズのように屈折で圧縮された風景が見えているのである。この領域にはまた水槽内の世界も反射により重なって見えている。

この虹の輪がまさに臨界の境界で、その外側では全反射が起こっている。そこには画面右手の水槽内と、手前のガラスに平行に対面する向こう側のガラスを通した世界が鏡のように映し出されている。

境界が虹のように色分けされて見えるのは水の屈折率が光の波長により若干異なるからで、色ごとに臨界角が異なっていることの表れである。

(2012/10/13)