

水族館の展示水槽内における光の屈折透過について

山 本 和 夫

A Study on Refraction and Transmission of Ray in Exhibition Tanks of Aquaria

Kazuo YAMAMOTO

It is important that refraction and transmission of ray in exhibition tanks of aquaria are investigated and applied its fruits to their plan.

The skill of their plan has much influence on the effect of sight of them.

In this paper Author told phenomena of ray in exhibition tanks and matters to play much attention on designing them through the theory of geometrical optics.

1. はじめに

水族館は水生動物あるいは植物，とくに動物を生きたまま飼育展示して，一般公衆の観覧に供するとともに，理科教育やレクリエーションに役立たせ，あわせてこれら資料に関する調査研究を行なう施設であり，さらに自然の荒廃の著しい現在においては，自然保護の場所を提供するところとして重要な役目を有している。

水族館の中心的施設は云うまでもなく水族の展示水槽であり，その設計は水槽の本質を十分理解することから始められなければならない。展示水槽は，水槽内に生きた水族に適応した水中環境をつくり，これをいつまでも好条件のもとに維持管理するに便利なものであるとともに，観覧上効果的のものであることを必要とする。

水槽内の光の屈折，透過およびガラス面における光の反射は，水槽の観覧上の良否に影響するところが大きい。従ってこれらの光の現象を把握することは，水槽の設計に大切なことである。

本文は，幾何光学の理論をもとに，展示水槽内の光の現象を調べ，これを既設水槽において確かめつつ，水槽の設計上の留意点をまとめたものである。

2. 各種の展示水槽

水族館で用いられる主な展示水槽の特徴について説明する。

(a) 固定水槽（個水槽）

鉄筋コンクリート造の比較的大きな直方体の水槽で，前面のガラスを透して見る形式の水槽。

(b) 置水槽（卓上水槽）

側壁および底盤をガラスで作った直方体の小型水槽。

(c) 俯瞰水槽

上から水面を透して見るプール形式の水槽。

(d) テラリウム (Terrarium)

陸生動物を自然環境のもとで飼育観察する施設。水族館では、前面に池をつくり、これに沿って後方に陸地をこしらえ、植物を植えなどした環境のもとで、水生動物を飼育展示する。

(e) 柱状水槽

側壁面をガラスでつくった柱形の水槽。8角柱形および円筒形的水槽が多く用いられている。

(f) 天井水槽

観覧通路の直上に設けられたガラスを底盤とする水槽。下方から見上げて観賞する。

(g) 海洋水槽 (Oceanarium)

幅、奥行、高さとも大きな独立型の大水槽。水面上から俯瞰して見る形式のものと、側壁のガラスを透して見る形式のものがある。

3. 光の屈折透過などの理論

展示水槽に関連のある光の屈折・透過などについて述べる。

(a) 平行な透明板を透過する光線

図1は両面平行な透明板を1枚または2枚をならべた場合の透過光線の進路を示すものである。

(1)において、入射光線と透過光線の進路のずれ e は、

$$e = d(\sin i - \cos i \tan r)$$

(2)において

$$e = e_1 + e_2$$

$$= d_1(\sin i - \cos i \tan r_1) + d_2(\sin i - \cos i \tan r_2)$$

(b) 空気中から水面やガラス面を通して見た物体の虚像の位置

(i) 鉛直方向から見た場合

図2に示すいろいろの場合を表1にまとめて示す。ここに h' は P の虚像 P' の位置を第1境界面から測った距離である。また PP' は、 P と虚像 P' との間の距離で、表1によるとすべて $PP' > 0$ であり、虚像 P' は浮き上って見える。

(ii) 斜方向から見た場合

斜方向から水中の物体を見るときは、水面をより斜方向から見るほど、すなわち屈折光線が水面に近くなるほど、その虚像は水面に近づき浅いところにあるように見える。

(c) ガラス面から眼に入る光

ガラスの表側からの光の反射光線が、向う側からの透過光線よりも強いときは、手前の景色などがガラスの表面に映って向う側が見えにくい。またこの逆の場合は、ガラスの向う側がよく見える。

媒質

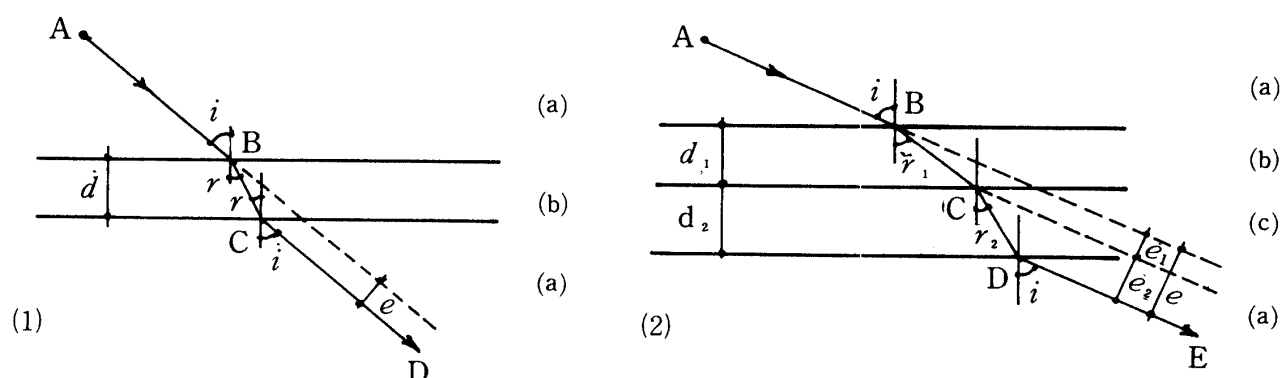


図1 平行透明板の入射光線に対する透過光線の進路

ガラスの表面での反射光線の量は、入射角が大きいほど大きくなる。入射角が 60° を越えると反射光線の量は急激に増してくる。

(d) 光の屈折率と臨角界

展示水槽に関係のある媒質の屈折率と臨角界とを表2および表3に示す。

複光は屈折により光の分散を生ずるが、全反射するときには分散は起らない。

表1 空気中から透明板を垂直に透して見た場合の虚像の距離

図面番号	透過する媒質	h'	PP'
図2(1)	空気→水	$\frac{h}{n_{aw}}$	$\left(1 - \frac{1}{n_{aw}}\right)h$
"(2)	空気→ガラス→空気	$h + \frac{d}{n_{ag}}$	$\left(1 - \frac{1}{n_{ag}}\right)d$
"(3)	空気→ガラス→水	$\frac{h}{n_{aw}} + \frac{d}{n_{ag}}$	$\left(1 - \frac{1}{n_{aw}}\right)h + \left(1 - \frac{1}{n_{ag}}\right)d$
"(4)	空気→ガラス→空気 →水	$\frac{h}{n_{aw}} + d_1 + \frac{d_2}{n_{ag}}$	$\left(1 - \frac{1}{n_{aw}}\right)h + \left(1 - \frac{1}{n_{ag}}\right)d_2$
"(5)	空気→ガラス→水 →ガラス→空気	$h + 2d_1\frac{1}{n_{ag}} + d_2\frac{n_{wg}}{n_{ag}}$	$2d_1\left(1 - \frac{1}{n_{ag}}\right) + d_2\left(1 - \frac{n_{wg}}{n_{ag}}\right)$

表2 屈折率

媒 質	屈 折 率
空気→水	$n_{aw} = 1.33$
	$= 1.331$ (赤色光)
	$= 1.334$ (黄色光)
	$= 1.344$ (紫色光)
空気→海水	$\ast n_{aw} = 1.3395$
空気→ガラス	$n_{ag} = 1.50$
水→ガラス	$n_{wg} = 1.13$
空気→アクリル樹脂	$n_{ap} = 1.49$
水→アクリル樹脂	$n_{wp} = 1.12$

注) \ast 普通海水, 塩分35%, 温度20°としての値

表3 臨界角

媒 質	臨 界 角
水→空気	$48^{\circ}36'$
ガラス→空気	$41^{\circ}50'$
ガラス→水	$62^{\circ}28'$

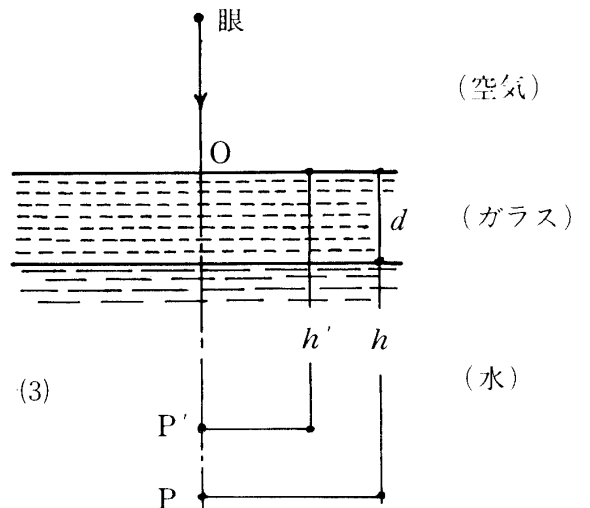
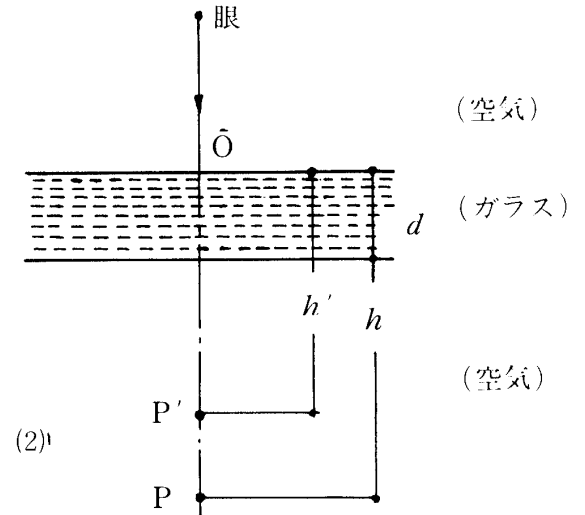
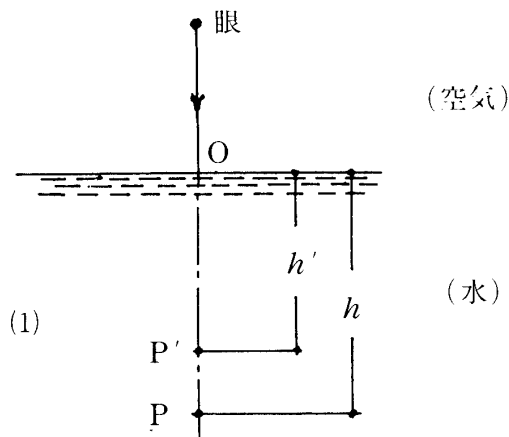
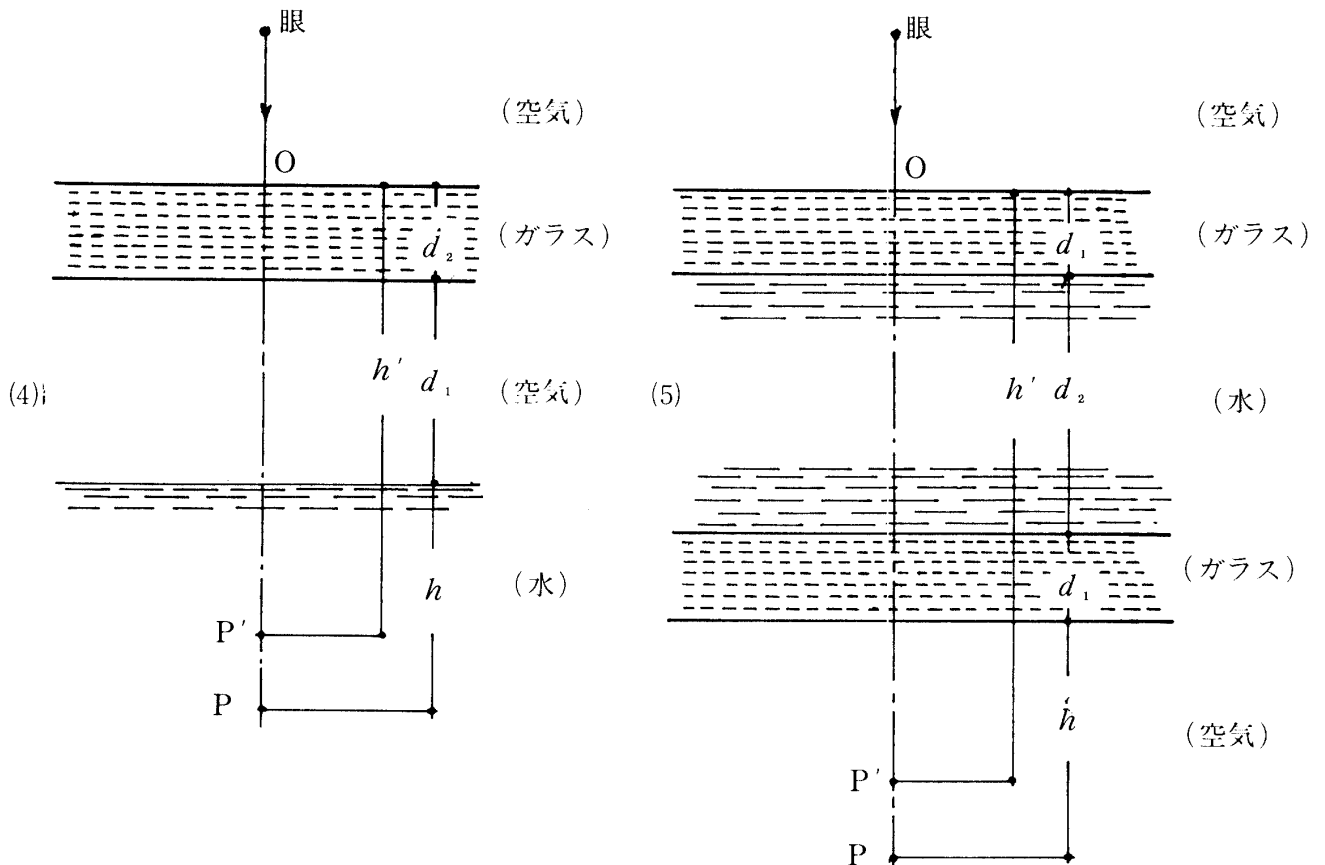


図2 鉛直方向から各種媒質を通して見た物体の虚像の位置



4. 展示水槽内の光の現象

前項の光の理論をもとにして、展示水槽内の屈折、透過光およびガラス表面の反射光などの光の現象を解明し、あわせて水槽の観覧効果をあげるための対策について述べてみる。

(1) ガラス面に人影その他が映る問題

水族館の入口近くや、他の明るい開口部からの強い光線を受ける位置にある展示水槽のガラス面は、反射光がきつく水槽内の観察に不利となる。これは観覧通路の明る過ぎる場合も同様である。水槽内は明るく、観覧通路は不快感を生じない程度に暗くしなければならない。既存水族館の観覧通路の照度は、最近の調査によれば、関東地方の代表的な3館では、8, 15, 16 luxであり、観客の感じ方は8 luxは少し暗く、15 luxは普通ということであった。また筆者の行なった南紀の水族館の調査では、40~60 lux という比較的大きな値もあった。

観覧通路の壁面には外光の入る窓を設けず床、壁、天井の色調には留意しなければならない。天井の照明器具は、展示水槽の前に立つ観客を直接照らし出さぬ位置に取付けるか、ときには脚元灯を取付けるのがよい。また小型の円形天窗から微光を観覧通路上に落して照明効果をあげている水族館もある。

水槽のガラス面を前傾させると、光る部分を上方にずらせる効果がある。この効果を求めてガラス面を前傾させている水族館がかなりある。前傾の角度は3°が多く、なかには5°、著しいものでは7°のものもある。一般に鉛直方向に対してガラス面を θ °前傾さすと、上方からの投射

光線に対する反射光線は、鉛直ガラス面に対するよりも $2\theta^\circ$ だけ下方に向く。

ガラス面が上方からの光線によって光り、水槽が見えにくくなる欠点を除くには、①水槽内を明るくする。②観覧側の上方に庇をつけてガラス面を暗くする。③ガラス面を前傾させる、などの手段が考えられる。

(2) 固定水槽（個水槽）の場合

図3は前面ガラスを通して上方の水面を見た場合である。これによると、水槽の鉛直ガラス面を下から $28^\circ 36'$ 以上の角度で水槽を見る場合は、水面の全反射により、裏の作業場は全く見えない。もし無理をして、ガラス面に顔を付け上方を見上げると、すなわち、 $28^\circ 36'$ 以内の角度で上方を見上げると、この部分の水面では全反射が起らず、水槽直上の蛍光灯の光が分散して眼に入る。

図4は、かどの展示水槽にみられるガラスが直角に取付けられた部分の光の屈折を示すものである。 $29^\circ 12'$ 以上の角度から見ると、直角方向のガラス面は鏡状を呈し、その外側にあるものは全く見えない。

図5(1)では、水槽中から光がガラス面に対して $41^\circ 5'$ 以内の角度をもって投射されると、この光は外側からは全く見えない。従って(2)のように水槽の側壁が後方に広がっている場合では、この側壁は全く見えない。しかし(3)の場合では、側壁の後方部は見える。もしこの角度を 45° にすると、(4)のようになる。一般に水槽を見る場合、ガラス面に対する角度が $29^\circ 10'$ 以内ということは稀なので、実際はこの側壁の傾斜を 45° につくっても見えない。

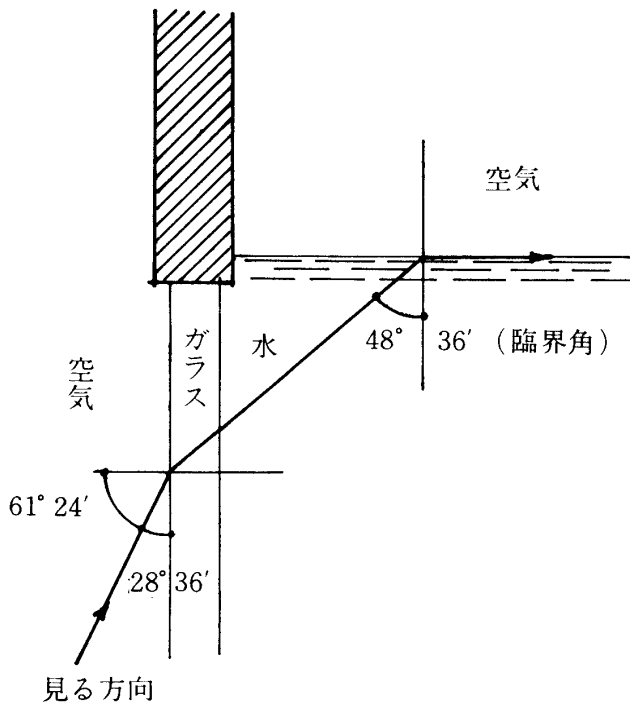


図3

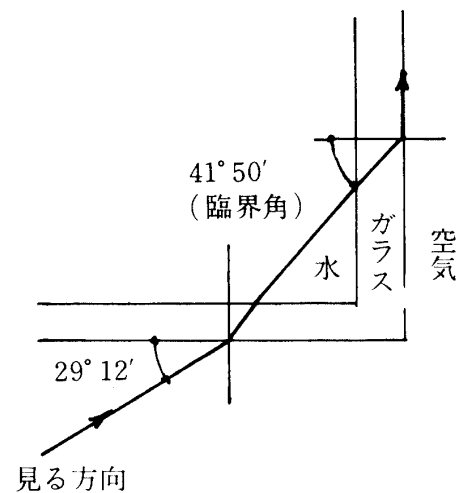


図4

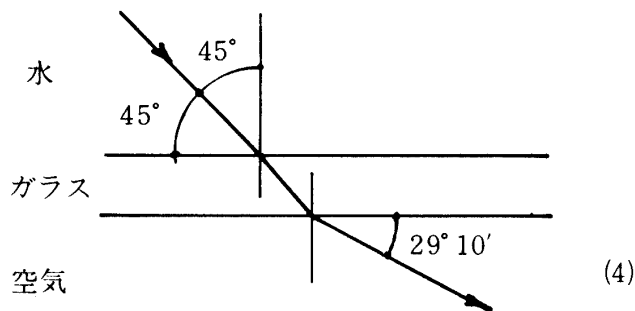
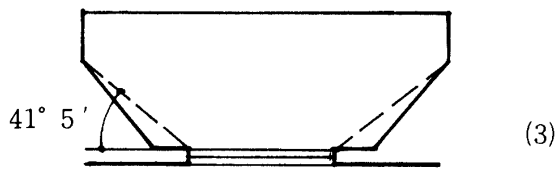
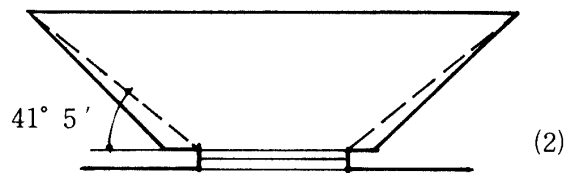
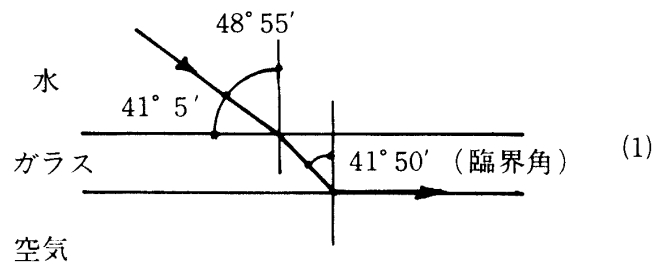


図 5

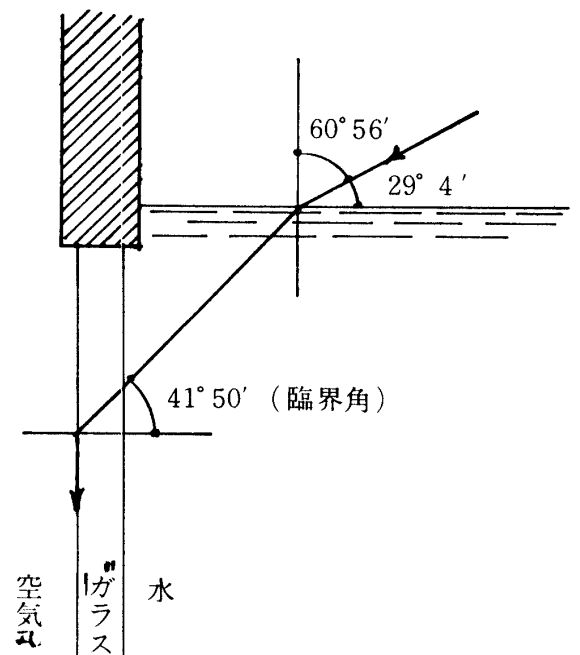
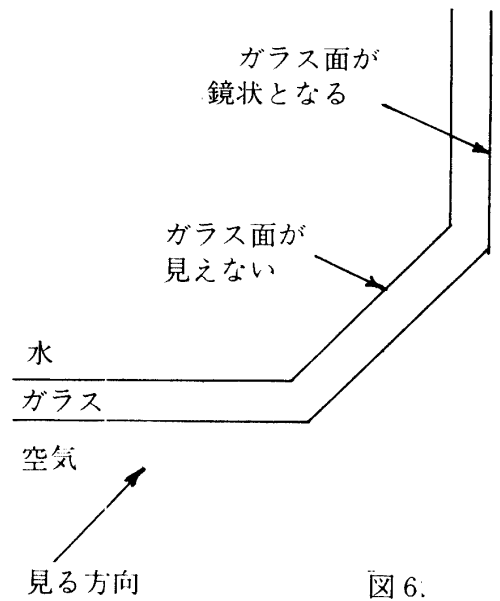


図 7'

図 6 の直交する 2 つのガラス面の先端を 45° 方向に斜に切った水槽では、普通この斜の壁面は見えない。

このかどの部分に凸面ガラスを用いた場合は、ガラスはレンズ効果を呈して水槽中の像を歪ませ、またガラス面の反射によって像を見えにくくする。一般に水槽のガラスが凸面に沿うて配置されるときは、ガラスは何枚かの平板をつないだ構造としなければならない。

図 7 は水槽の後方の作業場からガラス面を見た場合である。水面を $29^\circ 4'$ 以上の角度で見ると、ガラス面の外側の観客は見えない。

また、ガラスを通して水槽中を真正面から見ると、見掛けの距離 h' は表1(図2(3)の場合)により、

$$h' = \frac{h}{n_{aw}} + \frac{d}{n_{ag}} = 0.75h + 0.67d$$

となり、あとで述べる俯瞰水槽のように、ガラスがなくて直接水面を見る場合に比べて、 $0.67d$ だけ増す。ただし、ガラスの厚さ d は通常1.5~2.4cm程度なので、その値は小さく、これを省略して h' は大体 $0.75h(3/4 \cdot h)$ と考えられる。

作業場の窓から太陽の直射光線が水槽中に入射すると、水温の上昇とともに、水中の浮遊物が鮮明に見え、魚が動揺し、観覧上好ましくない。ある水族館では、裏方の窓からの冬の午後の低い入射光線が水槽だけにとどまらず、前面のガラスを透過して観覧通路まで出ていた。カーテンによる遮蔽手段があるが、裏方の窓の高さには注意を要する。

(3) 置水槽(卓上水槽)の場合

背面のガラスを通して光は透過する。また普通の無理のない角度で両側面のガラスを見ると、これらのガラス面は鏡面となる。

図8のように、水槽の中ほどまで水を入れたときは、

$$x = \frac{b}{a}(H - h)$$

で示す x の値以上に背面の高さを伸ばさないと裏の作業場が見える。水槽の直上に蛍光灯を取付けた格子組の天井や光天井を設けて、 x の寸法を小さくするのも対策の1つである。

眼の高さ h は、7才(小学1年)で104cm、13才(中学1年)で131cm、成人で154cmである(建築設計資料集成1 p.33)。眼を水槽に近づけ、 a の値をたとえば15cm程度に仮定してみると上式から x の値が求められる。

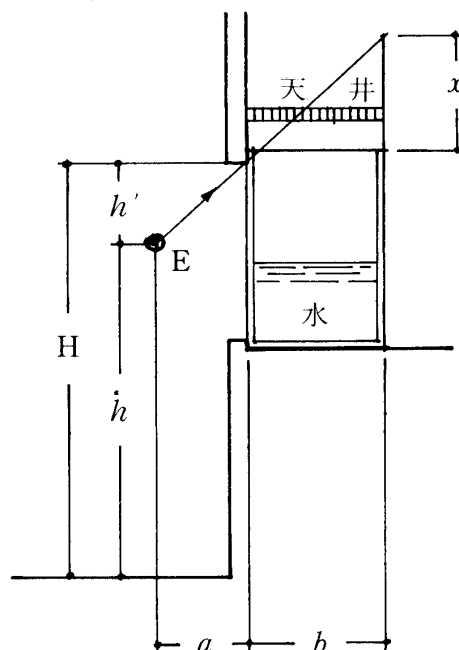


図8 中ほどまで水を入れた水槽

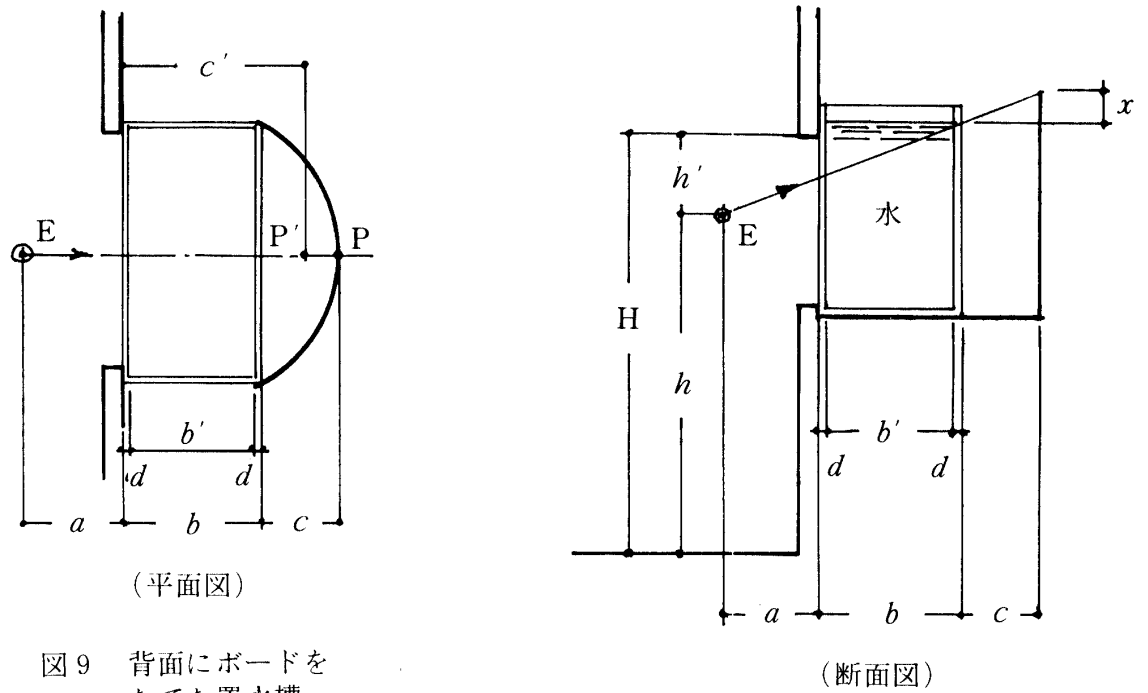


図9 背面にボードを
たてた置水槽

図9は置水槽の後方に湾曲したボードをたてたもので、正面のガラスを透して見ると錯覚によって水槽の奥行きがボード面までであるように奥深く見えるので、いくつかの水族館に採用されている。図8の場合と同じく、

$$x = \frac{c}{a+b}(H-h)$$

となり、 x の値以上背面のボードの高さを伸ばさねばならない。この場合、ボード上の中央の点 P の虚像 P' の正面ガラスからの距離 c' を求めてみると、

$$\begin{aligned} c' &= c + 2d \frac{1}{n_{ag}} + b' \frac{n_{wg}}{n_{ag}} \\ &= c + 0.67 \times 2d + 0.75b' \end{aligned}$$

また奥行き $b+c$ の固定水槽における P 点の虚像とガラス表面までの距離を c'' とすれば、

$$\begin{aligned} c'' &= \frac{b' + d + c}{n_{aw}} + \frac{d}{n_{ag}} \\ &= 0.75(b' + d + c) + 0.67d \end{aligned}$$

となるので、

$$c' - c'' = 0.25c - 0.08d > 0 \quad (\because c > d)$$

従って、湾曲ボードを取付けた場合は、この奥行きまで全部を水で満した固定水槽の場合よりも奥行きが深く見える。

(4) 俯瞰水槽の場合

俯瞰水槽を真上から見下すと、

$$h' = \frac{h}{n_{aw}} = \frac{3}{4}h$$

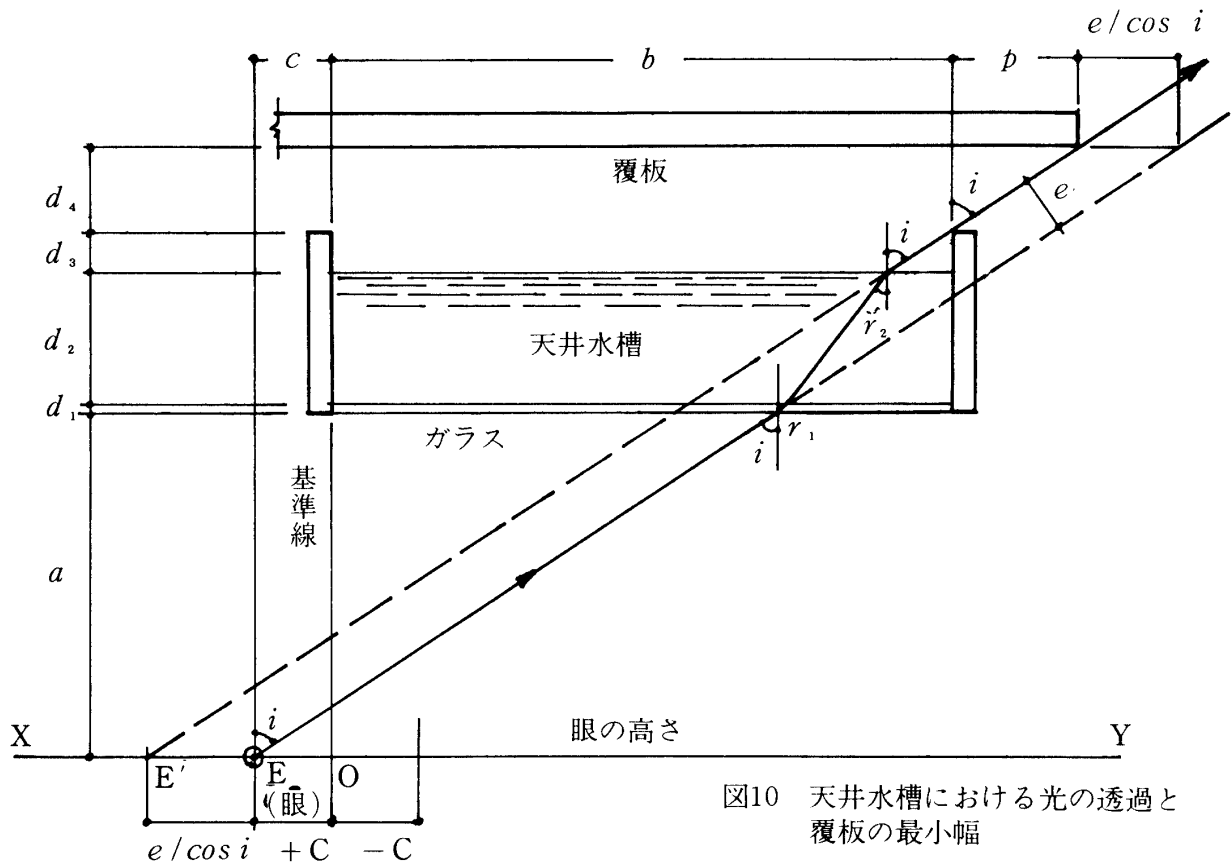


図10 天井水槽における光の透過と覆板の最小幅

従って、この場合は水中の物体の見掛けの距離 h' は実際の距離 h の $3/4$ となり浮上って見える。また、水面を斜方向から見ると、眼から遠い位置にある水底ほど浅く見える。

(5) 幅の広い水槽の場合

(4)と同じ理由で、幅の広い水槽の後壁を正面から見ると、後壁は中央より左右が前面に湾曲しているように見える。またガラス面に接近し過ぎると、屈折による短縮の程度が大きくなり、中央に対する左右の歪みがひどくなるので、観覧者はあまり水槽に接近し過ぎない方がよい。

(6) 天井水槽の場合

天井水槽では、下からの入射光線と、水面上への透過光線とが平行であり、かつ進路間にずれを生ずる。その状態は図10に示す通りである。天井水槽では全反射が起らないので、そのままの状態ではどの位置から水槽を見上げてても水槽上部の作業場が見える。これを防止するためには、水槽直上に覆板を取付けることが必要である。その長さは、図において水槽の長さ b よりも p 以上長くしておかねばならない。観客は水槽の下を自由に歩み、眼の位置はこれに応じで移動するが、眼の位置 E を水槽底面から鉛直方向下に a 、水槽内側左端の基準線から c だけ離れた位置にあるものとすれば、

$$p = \frac{b + c + \frac{e}{\cos i}}{a + d_1 + d_2 + d_3} d_4$$

a の値は実施例によると、1.2m程度である（天井高2.7m、観客の眼の高さ1.54mとして）。

また、

表4

i	$\tan i$	$\tan i - \tan r_1$	$\tan i - \tan r_2$
30°	0.5774	0.2239	0.1717
32°	0.6249	0.2474	0.1904
35°	0.7002	0.2863	0.2222
37°	0.7536	0.3159	0.2463
40°	0.8391	0.3650	0.2871
42°	0.9004	0.4010	0.3184
45°	1.0000	0.4653	0.3723
47°	1.0724	0.5139	0.4139
50°	1.1918	0.5976	0.4872
52°	1.2799	0.6627	0.5444
55°	1.4281	0.7762	0.6463
57°	1.5399	0.8654	0.7272
60°	1.7321	1.0249	0.8740

表5 i 角に対する p の必要最小値

i	$e/\cos i(\text{cm})$	$c(\text{cm})$	$p(\text{cm})$
30°	9.1	-133.8	11.5
32°	10.1	-126.1	12.5
35°	11.8	-114.0	14.0
37°	13.1	-105.6	15.1
40°	15.3	-92.1	16.8
42°	16.9	-82.7	18.0
45°	19.7	-67.3	20.0
47°	21.9	-55.9	21.5
50°	25.8	-37.8	23.9
52°	28.8	-24.8	25.6
55°	34.2	-3.7	28.6
57°	38.5	+12.5	30.8
60°	46.2	+39.8	34.6

当てて、遊泳する魚を下方から照らし出すなど水面の隠蔽にあらゆる手段を用いており、また後者では、覆板に薄い白布を用い、直上からこれを透して水槽内を強く照らし出す工夫がなされているが、この覆いについてはなお工夫の余地があるように思われる。たとえば、覆板全体を凹面として水槽面になるべく近づけ、間接照明によって曲面板を美しい色に照らし出すのも1つの改良手段かとも思われる。いずれにしても、光の透過を防ぐために覆板の余長 p を求めることが必要である。

(6) テラリウムの場合

図12のテラリウムでは、水面がガラスの中間にあり、前掲図8と同じように後の作業場が見えるので注意しなければならない。置水槽の場合にくらべて、水槽の奥行 b が大きいので作業場が見え易い。

(7) 角柱形水槽の場合

角柱形水槽のうち、よく用いられる8角柱状の水槽を図13に示す。 E の位置から真正面のガラスを透して水槽内を見ると、相隣るガラス面の接する1および2の鉛直線は湾曲して見える。また1-1面は光線の透過によって向う側がよく見え、1-2面も同様である。2-3面は鏡状を呈して水槽中の魚が映り、3-4面は見えない。

(8) 海洋水槽の場合

独立型の海洋水槽を側面ガラスを透して見る場合は、一般に手前のガラス窓と向う側のガラス窓とは平行である。この場合は、向う側のガラス面には全反射が起らず、入射光線と透過光

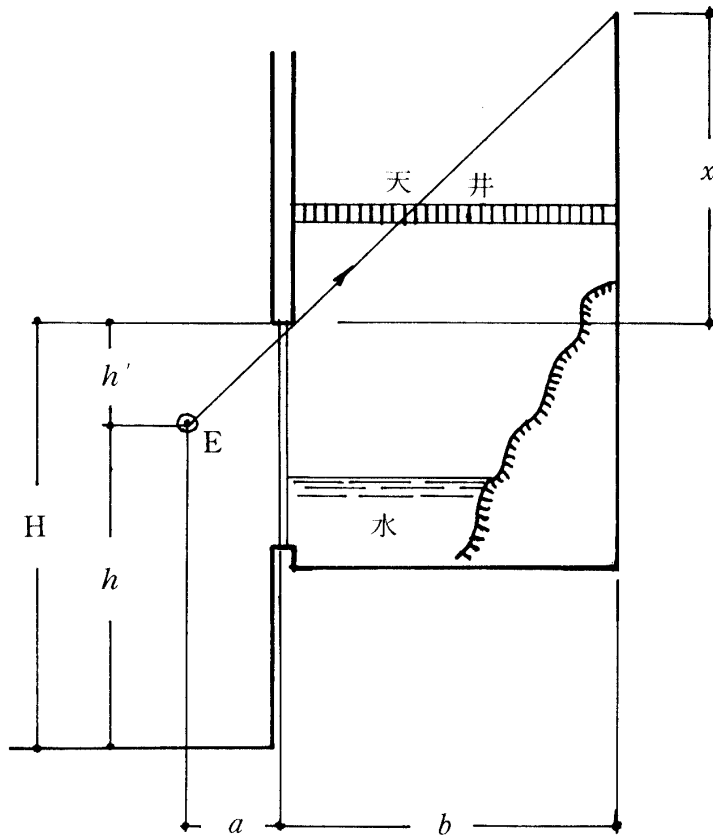


図12 テラリウム

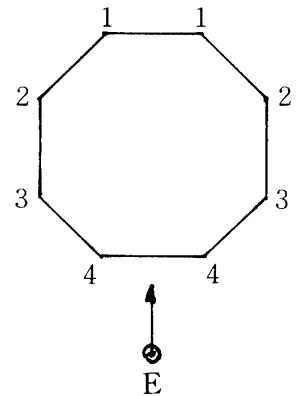


図13 8角柱状水槽

線の方法は平行、かつ進路にわずかながらずれを生ずる。

入射光線が反対側に透過すると、向う側の観客の姿や観覧通路の様子が映るので、このままでは聊か興ざめである。これは水の透明度が大きいほど著しい。対策としては、水槽の中央に岩礁などの目隠しをつくること、水槽中を明るくし、反対に観覧通路はできる限り暗くすることである。しかし、海洋水槽の周辺に沿って一方向に水の流れを起し、魚の回遊を見せる場合では、観客は魚の大群が回遊する壮観に眼を奪われ、また相対する2枚のガラス面の大部分が大魚群で覆われるので、実状はあまり向う側の人影が気にならぬようである。いずれにしてもこのタイプの海洋水槽では、光が向う側へ透過することを認識しておかねばならない。

また前掲の図6のように隅を45°に切った場合では、正面ガラスに対して直角の位置にあるガラス面は鏡状となり、手前の45°方向の隅切りのガラス面（コンクリート壁面でも同じ）は全く見えない。

5. むすび

幾何光学の理論をもとに、展示水槽内の光の現象を具体的に解明した。展示水槽のうちテラリウム、天井水槽、海洋水槽などには光に対して留意すべき点が多く、これらの水槽においてはどのような対策を講ずべきかを説明した。特に天井水槽の覆板には設計上一考を要する点があり、その大きさを求める式を示した。