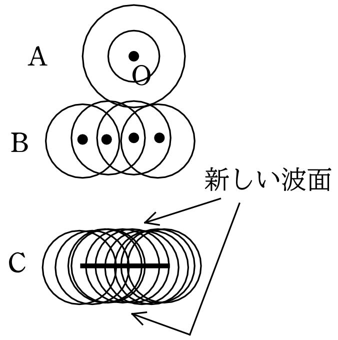
波の反射と屈折

１． ホイヘンスの原理

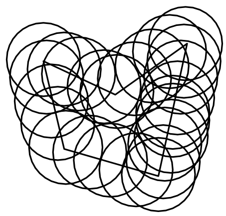
ある一点Oから出た波は、A図のように同心円状に広がっていく。

また、隣り合う複数の波源から出た波は、隣の波どおしが重なりB図のようになる。

連続する波面から出た波は各波の波面（**素元波**という）が重なり、C図のように新しい波面が形成される。この新しい波面は元の波面から出た素元波の山が重なり合うことによって生じる。その位置は元の波の波面上の各点から出た素元波の共通接線になっている。この線を**包絡線**という。



右図はある多角形を水平に水面に落としたときにその多角形の周辺に発生する素元波を数多く書いたものである。この素元波の共通接線が見える。これが、次の波面となる。



「ある波面から発生する素元波の共通接線が次の波面になる」

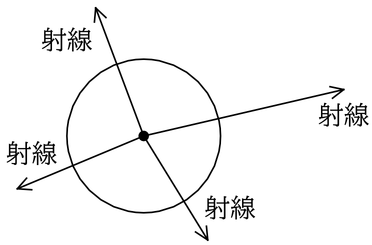
これを**ホイヘンスの原理**という。

波の進む方向を示したベクトルを射線という。素元波は同心円状に進むので、円の接線と射線は垂直の関係になる。すなわち、波面⊥射線である。また、同一は面上の点は同時に山になり同時に谷になる。つまり、同時に同位相となるのである。

これをまとめると、次のようになる。

「波面と射線は常に垂直になる。波を作図するときは波面•射線両方作図するように心がける。」

「同一波面上の点は常に同時に同位相となる。」



波面に関しての重要事項は次の3つである。

① **波面と射線は互いに直角である。**

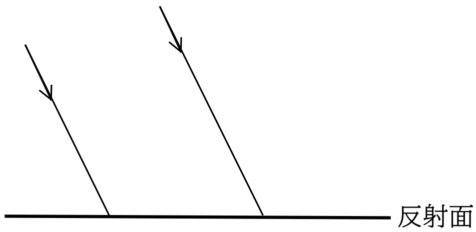
② **同一波面上の任意の点は常に同位相で振動する。（同時である。）**

③ **次の波面は素元波の共通接線となる。**

２． 波の反射

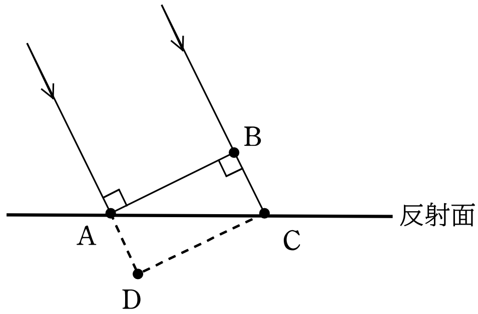
⑴ 作図

右図のように、反射面に斜めに波が入射した場合の反射後の波の進行方向を推定してみよう。

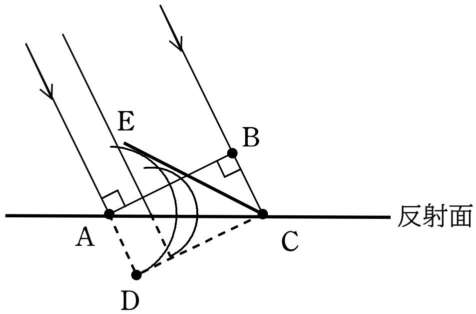


図に描かれているのは斜線であるから、波面を作図しなければならない。
射線⊥波面を用いて、まず作図する。
波面を作図したのが、次の図である。

共通波面上にあるA,B点は同時に同位相であるから、同時と考えてよい。
もし、反射面がなかったとすると、この波は、そのまま、波面CDまで進む。
しかし、AD間は反射面よりも先なので、波が進めない。このようなときにホイヘンスの原理を使い素元波を描くのである。右の波がBCと進む間に、Aから出た波が、BCと同じ距離、すなわち、Aを中心とする半径ADの円周上にきているはずである。この状態で次の波面を作図すればよいのであるが、気付かない場合は、さらに射線を追加して同じように、素元波を描けばよい。



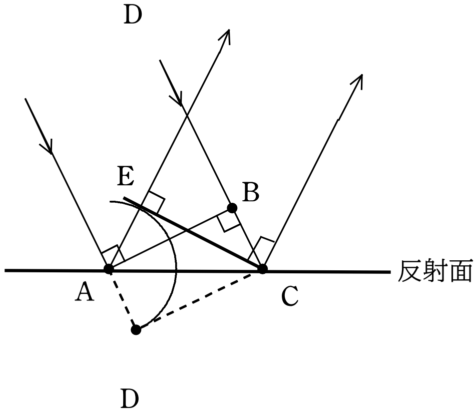
そうすると、共通接線CEが見えてくる。
共通接線と射線は垂直であるから、A、C点から共通接線に垂直になるように射線を作図すると良い。



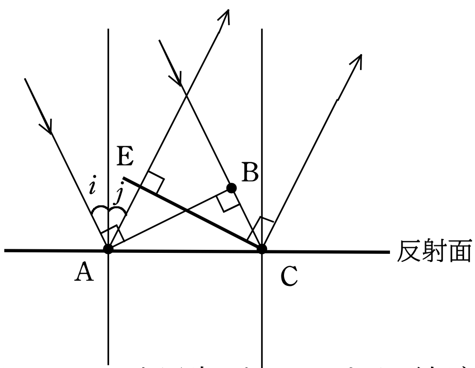
⑵ 反射の法則の証明

そのようにして作図したのが、右図である。それでは、これを用いて、反射の法則を導いてみよう。

反射の法則とは右下の図において、反射面に立てた垂線（法線）と入射時の射線とのなす角（**入射角**）i と、反射時の射線とのなす角（**反射角**）j が等しいという法則である。



このような図を見たときに、まず目をつけるのは、三角形の合同･相似あるいは直角三角形である。この図を見て、合同らしき三角形△CAEと△ACBが目に付く。



まず、合同証明をしてみよう。

＜証明＞

△CAEと△ACBで、

AC共通…①

∠CEA＝∠ABC＝90°…②

同一波面であるから、A、Bは同時であり、かつ、E、Cも同時である。つまり、波がA→Eへ進む時間とB→Cへ進む時間は等しいのである。また、どちらも同じ媒質中であるから、波の速さは同じである。よって、

AE＝BC…③

①②③より、△CAE≡△ACB

証明終わり

次に、角度i、jは三角形の外に出ている。三角形の外に出ているときは、その角度を計算に使うことができない。なるべくなら、三角形の中に入れる必要がある。

射線と波面が直角であるため、∠BAC＝i。△AECは直角三角形であるから∠ACE＝jといえる。どちらも合同な三角形であるから、$i=j$といえる。

「波が反射するとき、入射角と反射角は等しい」

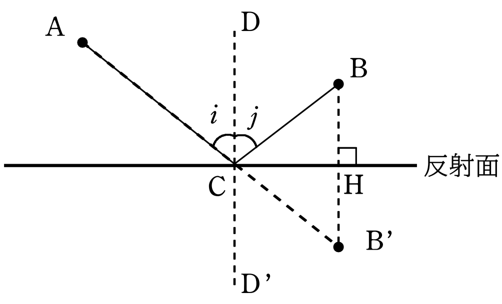
これを**反射の法則**という。

⑶　もうひとつの反射の法則

実際問題として、上の反射の法則よりもこれから述べる反射の性質の方が良く使われる。

Aから出た波は、反射面のどこで反射してBに届くか？

これを考えるとき、反射の法則だけでは解答しにくい。



今、点Bと反射面に対して対称な点をB’とする。線分AB’と反射面との交点をCとする。このとき、反射点がCとなる。

＜証明＞

点B,Cをつなぎ、反射面とBB’との交点をHとし、Cを通る反射面の法線DD’を引く。

∠ACD＝i、∠BCD＝jとする。

△CBH≡△CB’Hであるから、∠BCH＝∠B’CH

よって、∠B’CD’＝∠BCD＝j

対頂角なので∠B’CD’＝∠ACD＝i

∴　$i=j$

同様にしてこの逆（$i=j$　ならば　B’はBの対称点）も証明できる。

証明終わり

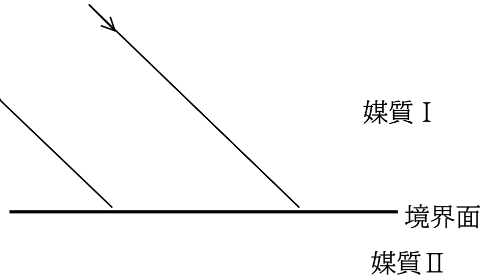
ここまでをまとめると次のようになる。

「反射がからむ問題は反射面との対称点を作図して考えよ。」

３． 波の屈折

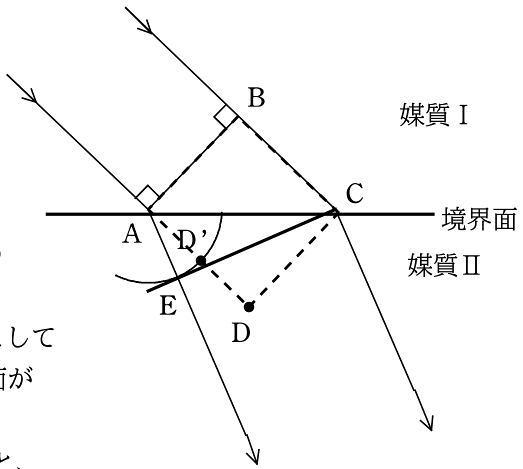
次に波の屈折について考えてみよう。

⑴ 屈折波の作図



媒質Ｉから、媒質Ⅱに波が入射する場合で作図しよう。媒質Ⅱにおける波の速さは媒質Ｉの半分であるとして作図することにする。

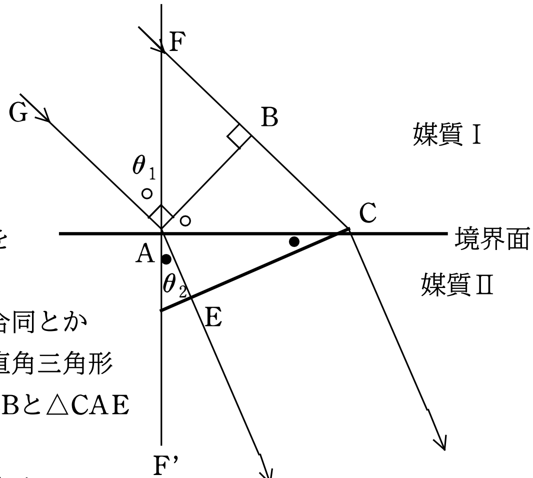
図の波は射線であるから、波面を射線と直角になるように作図する。ＡとＢは同一波面上の点であるので、同時に通過する。媒質Ⅱが媒質Ｉと同じ媒質ならば、次の波面はCDとなる。しかし、媒質Ⅱは媒質Ｉの半分の波の速さであるため、BからCに波が進む間にＡＤの半分のD’までしかいけない。よって、BからCに波が進む時間にＡを中心として半径D’の素元波の円周上に次の波面が存在するはずである。



点Cから、この円周に接線を引くと、この接線が素元波の共通接線、すなわち、次の波面となる。

⑵ 屈折の法則

媒質Ｉを伝わる波の速さをv_1、媒質Ⅱを伝わる波の速さをv_2とする。入射波が法線となす角（入射角）をθ_1、屈折波が法線となす角（屈折角）をθ_2とする。このとき、これらの値の関係を求めてみよう。



例のごとく、三角形に注目すると、合同とか相似らしき三角形は見つからないが、直角三角形が二つ存在しているのがわかる。△ACBと△CAEである。

まず、角度をこの三角形内部に移動する。

$\angle$BAC＝θ_1、$\angle$CAE＝θ_2　がいえる。

これらの直角三角形においてACは共通である。三角比を考えるためには辺の長さがあとひとつ分からねばならない。そこで、BCとＡＥに注目。

辺ＡＢと辺ECはどちらも波面であるから、ＡとB及びEとCはそれぞれ同時に波がやっ

てくる。よって、BCとAEを波が通過する時間は同じである。この時間をtとしよう。波の速さv_1、v_2を用いて、

BC$=v_1t$　　AE$=v_2t$

がいえる。

三角比を使うと、

$v_1t=\mathrm{AC}\sin\theta_1$・・・①　　$v_2t=\mathrm{AC}\sin\theta_2$…②

である。

①÷②を実行すると、

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}=\frac{v_1}{v_2}$$

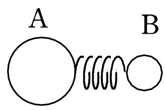
これが屈折の法則である。

(3)　屈折時の波長と振動数

波の速さが媒質によって異なる場合に屈折が起こることがわかったが、媒質が変わるときに波長や振動数はどうなるのであろうか。

＜振動数＞

媒質の境界線を意味する二つの媒質を右図のように大小二つの物体がばねでつながっているというイメージで考えることにしよう。Aが媒質Ⅰ、Bが媒質Ⅱとする（逆でも良い）。このとき、もし、Aが5回振動させたとしよう。Bはそれと対象に5回振動する。つまり、媒質の振動回数は媒質が違っても変わらないのである。よって、振動数は媒質が異なっても変わらないといえる。



「屈折しても振動数は変わらない。」

＜波長＞

屈折する波の振動数をfとし、媒質Ⅰでの波長をλ_1、媒質Ⅱでの波長をλ_2とすると、

$v=f\lambda$より、

$v_1=f\lambda_1$　　$v_2=f\lambda_2$

が成立する。

それぞれの式を割ると、

$$\frac{v_1}{v_2}=\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

が成立する。

(4)　屈折率について

ここまでの式をまとめ、この値をnとおくと、

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}=\frac{v_1}{v_2}=\frac{\lambda_1}{\lambda_2}=n$$

となる。このnを媒質Ⅰに対する媒質Ⅱの**屈折率**（相対屈折率）という。

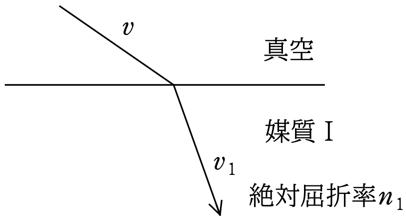
＜屈折率の意味＞

作図した例に戻ってみよう。媒質Ⅰから媒質Ⅱに波が入射すると、波の速さが$\frac{1}{2}$になるで作図した。上の式にこの場合の値を代入すると屈折率が2となる。つまり、波の速さが$\frac{1}{2}$なら、屈折率は2なのである。言い換えれば、屈折率nとは、違う媒質中に入ったとき波の速さが$\frac{1}{n}$になる場合をいうのである。これが屈折率の直接的な意味である。

「屈折率nの媒質とは、波の速さが$\frac{1}{n}$になる媒質のことである。」

(5)　光の場合の絶対屈折率について

この波が光である場合を考えてみよう。光の場合は真空中からある媒質に入射したときの屈折率を絶対屈折率と呼んでいる。この絶対屈折率と、相対屈折率との関係を求めてみよう。今媒質Ⅰの屈折率をn_1真空中の波の速さ（光速度）をvとする。光が真空中から入射するのであるから、



媒質Ⅰは波の速さが真空中の$\frac{v_1}{v}$倍になる。この逆数が互いの相対屈折率である。よって、

$$n_1 = \frac{v}{v_1}$$

同様にして媒質Ⅱの絶対屈折率をn_2、媒質Ⅱ中の光速度をv_2とすると、

$$n_2 = \frac{v}{v_2}$$

が成立する。まとめると、

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{v}{n_1}}{\frac{v}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

が成り立つ。

すべてをまとめると、屈折の法則は

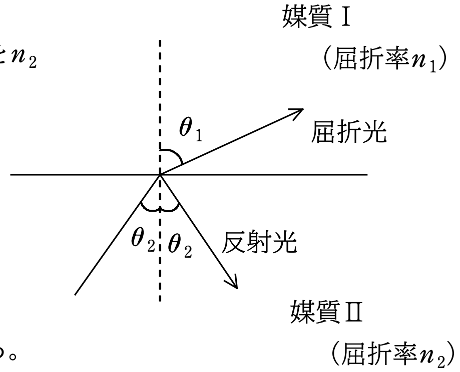
$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} = n$$

となる。

４．全反射

（1）　屈折率の大きい媒質から小さい媒質へ

屈折率の大きい媒質Ⅱから屈折率の小さい媒質Ⅰへの入射を考えてみよう。



媒質Ⅰの絶対屈折率をn_1、媒質Ⅱの絶対屈折率をn_2とすると、屈折の法則より

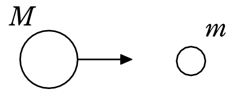
$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}=\frac{n_2}{n_1}$$

が成立している。$n_2>n_1$なので、$\theta_1>\theta_2$が成立することになる。右図のように光を入射させると、屈折角の方が大きくなる。

通常光は屈折すると同時に反射も存在している。

（2）反射と屈折の両方存在

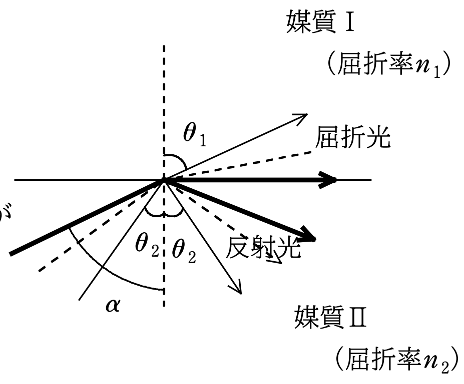
質量Mとmの二つの物体を媒質と考えてその弾性衝突を分析してみる。



質量Mの物体が静止している質量mの物体に衝突するとき、$M=m$ならば衝突後Mは静止し、mは動く、これは、物体Mの運動エネルギーがすべてmにわたったことを意味し、波動でいうならば、波のエネルギーが反射なしですべて伝わったことを意味している。$M=m$とは同じ媒質を意味する。わかりやすくいえば、「同じ媒質ならば波はそのまま伝わる。」である。

$M>m$とか$M<m$の場合は衝突後ともに速度を持つ。Mが持つエネルギーは異なる媒質中にエネルギーが伝わらなかったことを意味し、反射波の存在を示している。mが持つ運動エネルギーは、媒質を超えて伝わったエネルギーであるから、屈折波の存在を意味している。まとめると、**「同じ媒質でない限り反射波と屈折波は両方存在している。」**のである。ただし、どちらに何％のエネルギーが伝わっているかはそれぞれについて異なっている。

⑶　臨界角



破線のように入射角θ_2が大きくなれば、屈折角θ_1も大きくなる。

太線のように入射角θ_2をさらに大きくすると、屈折光が境界面上を伝わる状態が観察できる。すなわち屈折角が90°になることがある。この時の入射角を**臨界角**という。

臨界角をαとすると、屈折の法則は

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin\alpha}=\frac{n_2}{n_1}$$

となり、計算すると、

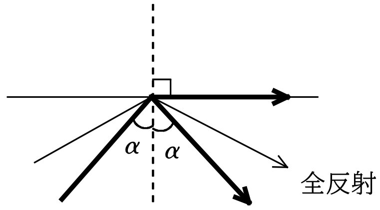
$$\sin\alpha = \frac{n_1}{n_2}$$

これが臨界角を計算する式である。

(3)　全反射

臨界角をαとすると、

$\dfrac{n_2}{n_1} = \dfrac{1}{\sin\alpha}$が成立するので、



屈折の法則は

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{1}{\sin\alpha}$$

変形して

$$\sin\theta_1 = \frac{\sin\theta_2}{\sin\alpha}$$

となる。ここで、$\theta_2 > \alpha$となる入射角で入射させると、$\sin\theta_2 > \sin\alpha$となるので、

$\sin\theta_1 > 1$となり、この式を満たす屈折角θ_1は存在しない。これは屈折できないことになり、入射光は反射光しかないことになる。入射したすべての光が反射することになり、これを**全反射**という。

全反射は反射の一種なので反射の法則が成立している。反射角は入射角と等しい。

(4)　全反射条件屈折条件

どのような条件を満たしている時屈折し、どのような条件を満たしている時、全反射するのだろうか、その条件を求めてみよう。

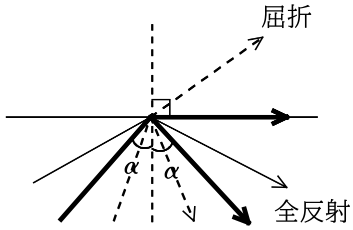
右図に置いて、破線が屈折を意味し、太線の入射角がαで細い実線が全反射である。図を見て次のことが分かる。

入射角をθとすると

屈折時　　$\alpha > \theta$

全反射時　　$\alpha < \theta$

である。



$\sin\alpha = \dfrac{n_1}{n_2}$より

屈折時は　$\sin\theta < \sin\alpha = \dfrac{n_1}{n_2}$　よって、　$\sin\theta < \dfrac{n_1}{n_2}$

全反射時は　$\sin\theta > \sin\alpha = \dfrac{n_1}{n_2}$　よって、　$\sin\theta > \dfrac{n_1}{n_2}$

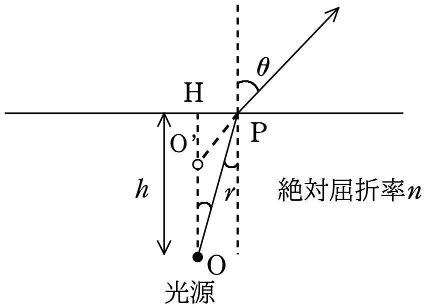
まとめると、

屈折条件　　$\sin\theta < \dfrac{n_1}{n_2}$

全反射条件　　$\sin\theta > \dfrac{n_1}{n_2}$

５． 水中の光源

絶対屈折率nの水の深さhの底に光源Oがある。
この光源を真上近くからみると、どれだけの
深さにあるように見えるか求めよ。



＜解説＞

　屈折後の光をそのまま逆に延長し鉛直線との交点をO’とし、入射角をr、屈折角をθ、光源の真上の点をHとする。

基本線

　三角形の外にある角度は使い道が少ないので

「角度は三角形内に移動する。」

　∠POH＝r、　∠PO’H＝θとなる。

　三角形の共通点で方程式を作るので

「複数の三角形の共通点に注目する。」

　△POHと△PO’Hの共通点はPHである。O’H＝xとおくと

　$PH = O'H\tan\theta = OH\tan r$

　である。

　よって、　$x\tan\theta = h\tan r$　…①

　屈折の法則より　$\dfrac{\sin\theta}{\sin r} = n$　…②

　①②より、xを求めればよい。

　ここで、真上近くから見ているので　$\theta \fallingdotseq 0$　$r \fallingdotseq 0$である。

△POHと△PO’Hは細長いので、

　「二等辺三角形と直角三角形と扇形は同じ」

と考えてよい。O’H＝O’P　OH＝OPとおける。

　よって、$\sin\theta = \tan\theta = \theta$、$\sin r = \tan r = r$が成りたつ。

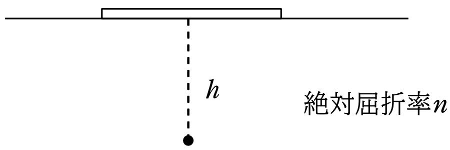
　②は　$\tan\theta = n\tan r$なので、

　①に代入すると

　$xn\tan r = h\tan r$　　　よって、　$x = \dfrac{h}{n}$

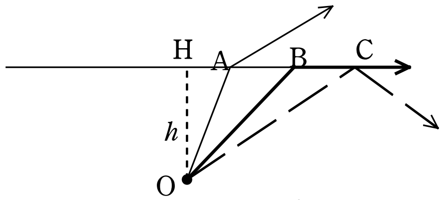
６． 水中の光源を隠す

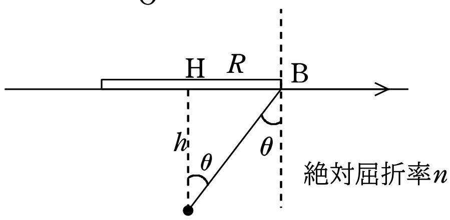
絶対屈折率nの水面下hの位置に光源がある。この光源を空気中のどの位置から見ても見えないようにするためには光源の真上にどれだけの半径の円盤を浮かせればよいか。



＜解説＞

光源Oからの光を色々と描いてみるとA点で屈折、B点で臨界、C点で全反射である。浮かべる円盤の半径がBHであれば、光が水面上に出ることはなくなる。よって、BHの距離を求めればよい。





屈折の法則は

$$\frac{1}{\sin\theta}=n \quad \text{より} \quad \sin\theta=\frac{1}{n}$$

入射角θは∠BOHと等しいので、

$R=h\tan\theta$

$$\cos\theta=\sqrt{1-\sin^2\theta}=\frac{\sqrt{n^2-1}}{n}$$

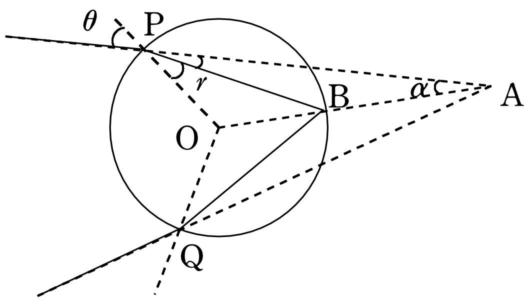
よって、

$$R=h\tan\theta=h\frac{\sin\theta}{\cos\theta}=\frac{h}{\sqrt{n^2-1}}$$

７． 虹の角度

空中の球状の水滴の表面Pに入射角θで入射した光が屈折角rで屈折し，Bで全反射し，Qで屈折したとする。

この光はAで反射したのと同じ経路を通る。水の屈折率をnとするとき，Aでの反射角αを求めてみよう。



∠OPB＝r，∠OPA＝θより

∠BPA＝$\theta-\alpha$

∠OBP＝∠BPA＋∠BAPより

$$r=\theta-r+\alpha \qquad \text{よって，} \quad r=\frac{\theta+\alpha}{2} \quad ...\ ①$$

屈折の法則より

$$\frac{\sin\theta}{\sin r}=n \qquad ...\ ②$$

①②より　rを消去すると，　$\sin\theta=n\sin\left(\frac{\alpha+\theta}{2}\right)$．．．③

反射光が強く見えるということはθが少し変化してもαの値が変化しないことを意味している。（αが変化すると光が広がるので強く見えない）

これは③の両辺をθで微分してもαは同じ値として成立することを意味している。③を微分すると，

$$\cos\theta = \frac{n}{2}\cos\frac{\alpha+\theta}{2} \quad ...④$$

③④をともに満たすαが求める角度になる。

$$\sin^2\frac{\alpha+\theta}{2} + \cos^2\frac{\alpha+\theta}{2} = \frac{\sin^2\theta}{n^2} + \frac{4\cos^2\theta}{n^2} = 1$$

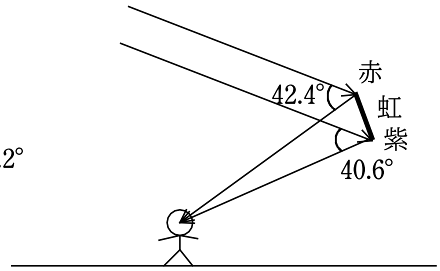
それを解くと　$\sin\theta = \sqrt{\dfrac{4-n^2}{3}}$

②より　$\sin r = \dfrac{1}{n}\sqrt{\dfrac{4-n^2}{3}}$

水の屈折率　$n=1.333$より，$\theta=59.4°$，$r=40.2°$

①より　$\alpha=2r-\theta=21.0°$

となる。



太陽光はこの角度の2倍で反射するので，

太陽を背にすると,正面より42度の角度で虹ができることになる。

虹の色が分かれるのは，波長によって屈折率が違うためである。

赤（650nm）で　$n=1.331$，紫（405nm）で$n=1.343$です。

この屈折率で角度を計算しなおすと，赤で42.4°，紫で40.6°となる。

８．電波と光

電磁波は、その波長によってその名称が異なっている。波長が0.1mmよりも長い電磁波を電波といい、それより0.1mmから0.78μmまでを赤外線といい。0.78μmから0.38μmまでを可視光線という。さらに波長の短いものを紫外線･X線･ガンマ線という。

(1)　電波

波長0.1mm以上の電磁波をいう。波長によって以下のように分類されている。

名称	波長範囲	記号	備考
中波	$100m$～$1km$	MF	国内ラジオ放送
短波	$10m$～$100m$	HF	海外向けラジオ放送
超短波	$1m$～$10m$	VHF	FMラジオ放送･VHFテレビ放送
極超短波	$10cm$～$1m$	UHF	UHFテレビ放送･無線通信
センチ波	$1cm$～$10cm$	SHF	衛星放送
ミリ波	$1mm$～$1cm$	EHF	
サブミリ波	$0.1mm$～$1mm$		

(2)　赤外線

波長0.1mm～0.78μmの電磁波を**赤外線**という。波長の長いものを遠赤外線、短いものを近赤外線という。この波長域は常温物体の電子が出す電磁波の波長と一致する。つまり、

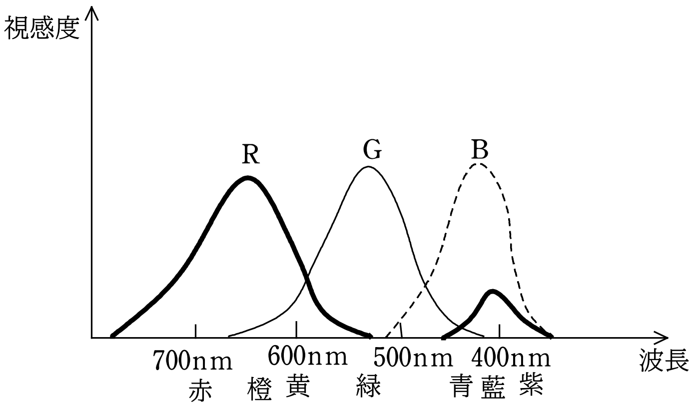
常温物体は赤外線を出していることになる。電子が赤外線を放出するということは、逆に言えば赤外線を吸収することでもあり、常温物体は赤外線を熱として吸収しやすい。そのために、赤外線のことを**熱線**ともいう。

赤外線は可視光線に比べ波長が長いために散乱されにくく、空気中の塵を透して遠くの景色をくっきりと見ることができる。そのために、遠方の観測をするときに良く使われる。

(3) 可視光線

可視光線は人が目で見ることのできる電磁波である。0.38μm～0.78μmの範囲の電磁波である。波長の長いほうから色によって認識され、赤橙黄緑青藍紫の順である。

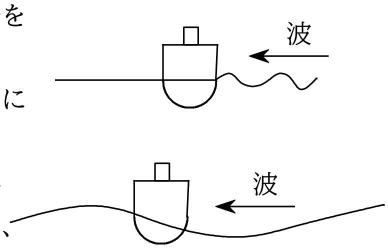
＜人が色を認識する仕組み＞



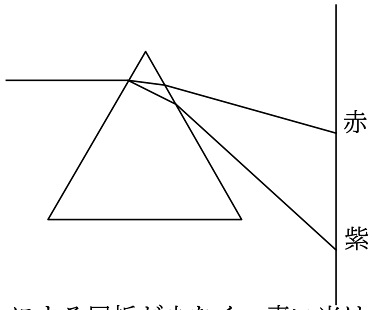
人の目の網膜上には光を感じる視細胞が4種類存在している。光の明暗にのみ反応する棒細胞、赤い光に反応するR細胞、緑の光に反応するG細胞、青い光に反応するB細胞である。

右に各細胞の視感度をグラフ化している。このグラフは個人差が大きいようである。これにより、780nmから650nmあたりまでは人は赤と認識し、580nmあたりを黄色と認識し500nmあたりを緑と認識することが分かる。

また、R細胞は400nm周辺でも少しだけ反応する性質を持っている。そのために、このあたりの振動数の光をB細胞との関連で紫に感じることができるのである。これが、光に三原色がある理由となる。



水面に浮かんでいる船に水面波がぶつかる場合を考えてみよう。船の大きさに対して波長が短い場合は、船によって波は跳ね返され、船の反対側に波が抜けることはほとんどない。これに対して、船よりも長い波長の波がやってきた場合は船を揺らして、波は船の反対側に抜ける。このことより、



波長の長い波は障害物の影響を受けにくく、波長の短い波は障害物の影響を受けやすいことが分かる。プリズムも光にとっては障害物である。波長の長い光はプリズムの影響を受けにくいので、プリズム中に入射しても光の速度はほとんど変わらず、屈折率が小さいことがわかる。これに対して、波長の短い光はプリズムの影響を強く受けプリズム中での光の速度が極端に小さくなり、屈折率も大きい。赤い光は波長が長いためにプリズムによる屈折が少なく、青い光は良く曲がるのである。白色光をプリズムに充てると上のような理由により波長ごとの色に分かれるこれを**分散**という。

止まれの信号が赤いのも自動車のテールランプが赤いのも霧や空気中の塵の影響を受けにくい赤い光が使われているのである。波長の短い光ほど障害物によってはじかれやすい。障害物によって光がはじかれる現象を**散乱**という。青い光は空気中の塵によって、散乱されやすく遠くに届きにくい。空が青いのは空気分子によって青い光が散乱されたためである。

（4）紫外線

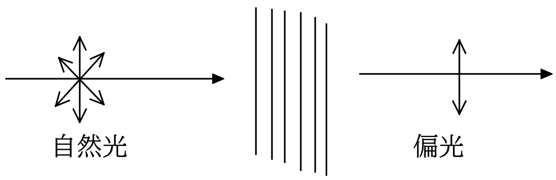
可視光線よりも波長の短い光を紫外線と呼んでいる。大体0.38μm～0.01μmまでの光である。紫外線以下の波長の電磁波は「光の波動性と粒子性」の項で述べるとおり粒子性が強くなるので、その項で説明するものとする。

９． 光について

⑴　偏光

電磁波は波の進行方向に対して電場･磁場が共に直角方向に振動する波であるから横波である。電磁波の電場･磁場の振動方向は進行方向に対して直角であり、かつ、電場と磁場が互いに直角であれば、電場･磁場の振動方向は水平でも鉛直でもあるいはその間の方向でもかまわないのである。波長の短い電磁波である光は通常すべての方向に振動しているのである。このような光を**自然光**という。

これに対して、電場が鉛直方向のみとか水平方向のみとかの一方向のみに振動している光を**偏光**という。電波の場合は**偏波**という。



自然光に偏光板と呼ばれているスリットの入った物体を用いることにより、そのスリット方向のみに振動する偏光に変えることができる。

⑶　電子の運動状態と電磁波

静止している電子は回りに電場を生じているが、この電場は時間がたっても変化しない。

そのために、電子の周りに磁場は発生していない。電子が等速運動をすると、周りの電場は電子の動きに沿って変化するために磁場が発生する。しかし、電子が等速運動をしているために、この発生した磁場の強さは一定である。磁場の強さが一定であるために、この磁場が電場を発生することはない。よって、この場合電磁波は発生しない。定常電流は電子が等速運動をしているために電磁波を発生しない。

電子が加速度運動をすると、電場が変化をするが、その変化の度合いも変化する。そのために、発生した磁場の強さが変化し、その磁場が新しく電場を生じる。その電場がまた磁場を発生するために、電磁波が発生することになる。

「電子が加速度運動をすると電磁波を発生する。」

といえる。この加速度が小さいと電磁波の波長が長く（振動が低い）、加速度が大きいと波長が短く（振動が激しい）なる。

⑶　物質の熱輻射

温度の高い物質中では電子は熱運動をしている。熱運動をしている電子が原子と衝突する瞬間に電子の速度変化（加速度運動）が生じている。電子はこの瞬間電磁波を放出することになる。通常温度ではこれは赤外線（遠赤外線）である。温度の高い物体は赤外線を放出することにより冷えているのである。物体の温度が低いと電子の熱運動速度が低くなるために加速度も低く、物体から放射される電磁波の波長は長くなる。それに対し温度が高くなるにつれ物体から放射される電磁波の波長は短くなり、1000℃ぐらいで可視光線（赤）を放射するようになる。つまり赤く光るようになる。さらに温度が高くなると青く光るようになる。その物体から放射される電磁波の波長を調べることによりその物体の温度を知ることができる。このようにして太陽の表面温度が約6000℃であることが分かるのである。

自由電子を持つ物体（金属）は電子がさまざまな速度で熱運動しているために、外部からのいろいろな光を吸収し、いろいろな波長の光を放出する。そのために金属は銀白色に輝くことになる。