

# 社会人のための楽しい物理入門

## 第3章：波動・音波・光波（2）

*HENLOU*

2009年9月24日

# 目次

3.6	光の反射と屈折	3
3.6.1	絶対屈折率	3
3.6.2	光の反射と屈折	3
	屈折光線の逆進	3
	累屈折	4
	全反射と臨界角	4
3.6.3	フェルマーの原理	5
	光路長	5
	フェルマーの原理とスネルの法則	5
3.6.4	像の浮き上がり	6
3.7	光の干渉と回折	7
3.7.1	光の反射と位相の変化	7
3.7.2	薄膜による光の干渉	7
	光の干渉条件	7
	ニュートン・リング	8
3.7.3	グリマルディの実験	9
3.7.4	2つの細隙で回折した光の干渉	10
3.8	光の偏り(偏光)	11
3.8.1	反射による偏光	11
3.9	光のドップラー効果	12

### 3.6 光の反射と屈折

光はホイヘンスの予想と異なって横波で、これは X 線や  $\gamma$  線などの電磁波の一種です。電磁波は空間の電場と磁場の変化によって形成された波で、この周期的な変動が空間に横波となって伝播していきます。つまり、空間そのものがエネルギーを持って振動する現象なので波を伝える媒質が何もない真空中でも伝わっていきます。(エーテルの存在は不要)。真空中の光速は通常  $c$  と書かれます。 $c = 2.9979 \times 10^8 \text{m/s}$  で、1 秒間に地球を 7 周半回転する速さですね。電磁波についての詳しいお話は電磁気学のセクションのところでできますので、ここではこれ以上立ち入らないことにします。

#### 3.6.1 絶対屈折率

光速<sup>1</sup>はアインシュタインの特殊相対性理論より不変<sup>2</sup>とされており、光速は不変だから真空以外の物質の中でも光速は真空中を伝播する速さと同じだと誤解されているムキもおられますが、真空以外の物質中では、光速は真空中より遅くなります<sup>3</sup>。屈折率は(??)で示されたように各媒質中の波の速さの比でした。物質の屈折率を  $n$  とし、物質中での光速を  $c'$  とすると

$$n = \frac{c}{c'} (> 1) \tag{3.6.1}$$

で定義される値を絶対屈折率といいます。つまり、真空に対する物質の屈折率ですね。真空の絶対屈折率は 1 なので、物質の絶対屈折率は通常 1 より大きくなります。媒質  $1$ 、 $2$  の絶対屈折率をそれぞれ  $n_1, n_2$  とすると、 $1$  に対する  $2$  の屈折率  $n_{12}$  は

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} \tag{3.6.2}$$

となります。この証明は項の「累屈折」のところでやります。

#### 3.6.2 光の反射と屈折

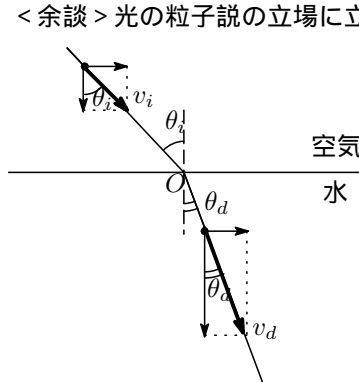
##### 屈折光線の逆進

媒質  $1$  から  $2$  へ入射する場合、入射角を  $\theta_i$ 、屈折角を  $\theta_d$  とすると、媒質  $2$  に対する媒質  $1$  の屈折率  $n_{12}$  は  $n_{12} = \sin \theta_i / \sin \theta_d$  で与えられました。逆に、媒質  $1$  に対する媒質  $2$  の屈折率を  $n_{21}$  とすると

$$\begin{cases} n_{12} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_d} \\ n_{21} = \frac{\sin \theta_d}{\sin \theta_i} \end{cases} \rightarrow n_{21} = \frac{1}{n_{12}} \tag{3.6.3}$$

となります。

<余談> 光の粒子説の立場に立つと。。。



光の粒子説では、光の粒子が空気と水の境界に近付くと水の方が密度が大きいので水面から下向きの引力を受ける。この結果、水面に垂直な方向の速度は変化を受けるが、平行な方向の速度は変化しないので

$$v_i \sin \theta_1 = v_d \sin \theta_d \text{ より}$$

$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_d} = \frac{v_d}{v_i}$$

となるが、これは実験結果と食い違う！

(2009.11.24 追記)

<sup>1</sup> 真空中の光速を通常  $c$  と書きますが、

<sup>2</sup> 光速度は等速度運動する座標系(慣性座標系)から見ても一定。

<sup>3</sup> これは光の電磁場と媒質が相互作用するのでそれらに引っぱられて光速は遅くなるというイメージですね。

### 累屈折

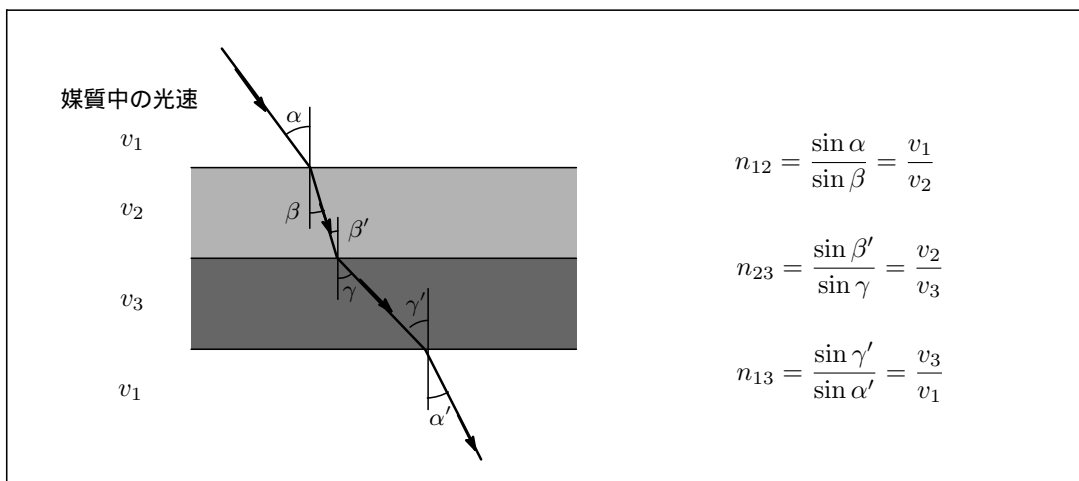
ここでは、次々と異なる媒質に光が伝播していく場合の累屈折について考えていきます。媒質 ~ における光速をそれぞれ  $v_1, v_2, v_3$  とすると (??) より

$$\begin{cases} n_{12} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} \\ n_{23} = \frac{\sin \beta'}{\sin \gamma} = \frac{v_2}{v_3} \\ n_{23} = \frac{\sin \gamma'}{\sin \alpha'} = \frac{v_2}{v_1} \end{cases} \longrightarrow n_{12} \cdot n_{23} \cdot n_{31} = 1 \quad (3.6.4)$$

また、図より  $\beta = \beta', \gamma = \gamma'$  なので

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \times \frac{\sin \beta'}{\sin \gamma} \times \frac{\sin \gamma'}{\sin \alpha'} = 1 \longrightarrow \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = 1 \quad \therefore \alpha = \alpha' \quad (3.6.5)$$

となることが分かります。



さて、上図で媒質 を真空とすると  $n_{23}, n_{31}$  は (3.6.3) より絶対屈折率  $1/n_2, n_1$  となるので、(3.6.3) より

$$n_{12} \cdot \frac{1}{n_2} \cdot n_1 = 1 \longrightarrow n_{12} = \frac{n_2}{n_1}$$

これで (3.6.2) が証明されます。

### 全反射と臨界角

全反射は、屈折率の大きい媒質から小さい媒質へ光が入射する場合に起こります。全反射は起きる最も小さな入射角を臨界角といい  $\theta_c$  で表しました。  $n_1$  を媒質 の絶対屈折率、  $n_2$  を媒質 の絶対屈折率とすると、臨界角  $\theta_c$  は次式で与えられます。

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right), \quad \text{ただし}^4 \quad \frac{n_2}{n_1} < 1 \quad (3.6.6)$$

この式からも分かるように、  $n_1 < n_2$  の場合には全反射は起こりません。ちなみに、密媒質から疎媒質に光が入射する、例えば水 空気やガラス 空気の臨界角は次の通りです。

$$\begin{pmatrix} \text{水} & \text{空気} & \theta_c = 48.5^\circ \\ \text{ガラス} & \text{空気} & \theta_c = 42^\circ \end{pmatrix} \quad (3.6.7)$$

<sup>4</sup>  $\sin^{-1} x, \quad |x| \leq 1$

### 3.6.3 フェルマーの原理

光の反射。屈折の法則はホイヘンスの原理で説明できますが、1661年にフェルマー<sup>5</sup>は「二点間を結ぶ光の経路は、その所要時間を最小にするものである」、つまり「光は最短光路を通る」という原理を発見しました。真空中では最短光路は文字通り一直線ですが、屈折率の異なる媒質中を通るとき、境界面で光の道筋が曲がり、最短光路は一直線ではなくなりますね<sup>6</sup>。

真空中の光速を  $c$ 、任意の媒質中の光速を  $v$  とすると (3.6.1) より

$$v = \frac{c}{n} \quad (3.6.8)$$

$n$  は媒質の絶対屈折率です。フェルマーの原理を使えば、ホイヘンスの原理を使わなくても屈折の法則を導くことができます。以下に、そのことを調べていきます。

#### 光路長

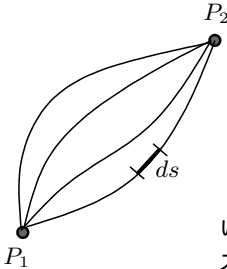
さて、ここで光路長という概念を導入します。普通、長さといえば幾何学的な距離を意味しますね。これに対して光路長というのは、同じ時間をかけて光が進む路（みち）の長さ のことで、光が進む実際の“幾何学的な距離”が等しくなくても、光が同じ時間をかけてその距離を進むのであれば、それらの光路長は等しいということになります。いま、ある媒質中の2点  $P_1, P_2$  をとって、その間の微小な幾何学的な距離を  $ds$  とします。光の速さは  $v$  ですから  $ds$  を進むに要する時間を  $dt$  とすると  $dt = ds/v$  で与えられます。光が  $P_1$  から  $P_2$  へ達するに要する時間を  $T$  とすると、これ微小時間を足し合わせればよい（積分）ので

$$T = \int_{P_1}^{P_2} \frac{ds}{v} = (1/c) \int_{P_1}^{P_2} n ds \quad (3.6.9)$$

と書けます。上の式の  $\int_{P_1}^{P_2} n ds$  は距離の次元を持ち、光路長とか光学的距離と呼ばれます。

#### フェルマーの原理とスネルの法則

フェルマーの原理は「光は光路長が最小となるような道を通る」というもので、光路長は  $\int_{P_1}^{P_2} n ds$  で与えられますから、この値が最小値をとる光路が実際に光が通る路ということになります。



<フェルマーの原理>

光線が  $P_1$  から  $P_2$  まで行く時間を  $T$  とすると  
実際には光線は  $\delta T = 0$  となる路を通る。

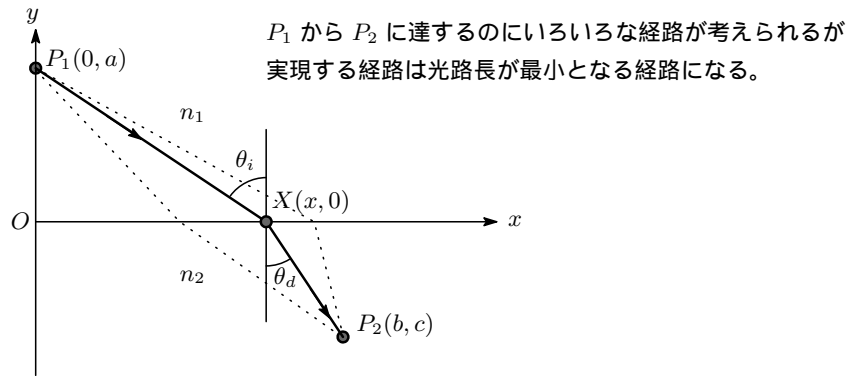
$$\delta T = \delta \int_{P_1}^{P_2} (1/v) ds = (1/c) \delta \int_{P_1}^{P_2} n ds = 0$$

いろいろな経路が考えられるが  $\delta T = 0$  となる経路（その経路よりちょっとでもズレると  $\delta T \neq 0$ ）が実際の光の経路になります。

では、具体的にどうして求めるのかということですが、数学的には変分法という手法を使います。これにより屈折の法則が導かれますが、ここでは変分法の詳細には触れず直接的に屈折の法則を導出することにします。

<sup>5</sup> Pierre de Fermat : 1601-1665 年 フランスの数学者、法律家。“  $n$  が 2 より大きい自然数であれば  $x^n + y^n = z^n$  を満たす自然数  $x, y, z$  は存在しない ”というフェルマーの定理で有名。ちなみに約 350 年後の 1995 年 5 月イギリスの数学者ワイルズによりその正しさが証明された。日本の数学者谷山・志村の貢献が大きい。

<sup>6</sup> このように光を波動として捉えるのではなく幾何学的な線として捉えるのを幾何光学といいます。



媒質 , の屈折率をそれぞれ  $n_1, n_2$  とします。経路  $P_1 \rightarrow OX \rightarrow P_2$  の光路長を  $L$  とすると

$$L = n_1 \sqrt{x^2 + a^2} + n_2 \sqrt{(b-x)^2 + c^2}$$

与えられます。経路をわずかにずらすことは点  $X$  の位置をずらすことにあたるので、 $x$  を変化させたとき  $L$  が極値（最小値）となる条件を求めればよいことになります。それは  $L$  を  $x$  で微分したものが 0 という条件となるので

$$\frac{dL}{dx} = \frac{n_1 x}{\sqrt{x^2 + a^2}} - \frac{n_2 (b-x)}{\sqrt{(b-x)^2 + c^2}} = 0$$

図より

$$\begin{cases} \sin \theta_i = \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} \\ \sin \theta_d = \frac{b-x}{\sqrt{(b-x)^2 + c^2}} \end{cases}$$

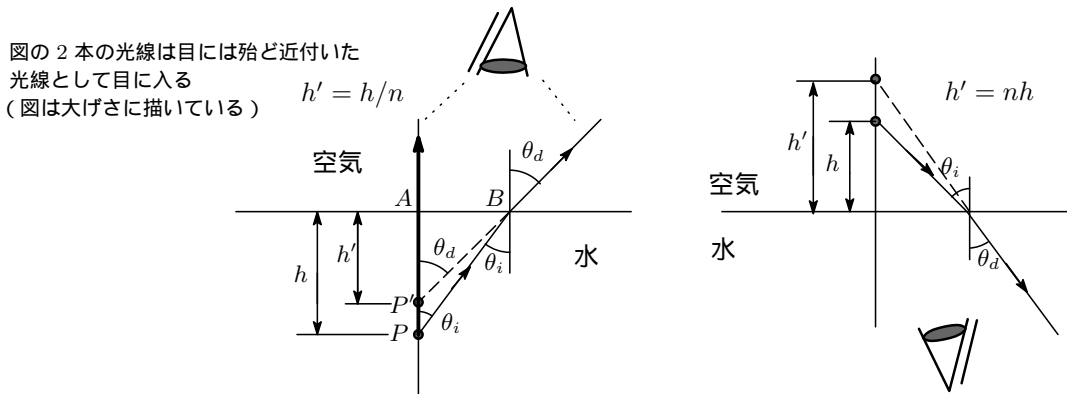
なので、上式を整理すると

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_d \rightarrow \frac{n_2}{n_1} = n_{12} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_d}$$

となり、屈折の法則（スネルの法則）が得られます。

### 3.6.4 像の浮き上がり

水を入れたコップの中に割り箸を入れると水中の割り箸が浮き上がって見えますね。ここではこの現象を考えます。



水中の深さ  $h$  にある物体を空气中から水面に垂直な方向から見た場合、物体は  $h'$  に浮き上がって見えます。ではどれだけ浮き上がって見えるかを求めます。空気から水の屈折率を  $n$  とすると、水から空気へ

の屈折率は (3.6.3) より  $1/n$  となります。スネルの法則より

$$\frac{1}{n} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_d} = \frac{\overline{AB}/\overline{BP}}{\overline{AB}/\overline{BP'}} = \frac{\overline{BP'}}{\overline{BP}}$$

真上から見た場合は  $\theta_d, \theta_i$  とも殆ど 0 に等しいので

$$\frac{1}{n} = \frac{\overline{BP'}}{\overline{BP}} \doteq \frac{\overline{AP'}}{\overline{AP}} = \frac{h'}{h} \quad \therefore h' = \frac{h}{n}$$

となります。空気 水の屈折率は  $n = 1.33$  なので  $h' = h/1.33 \doteq 0.75h$  と約 25% 程浮き上がって見えることとなります。一方、水中から空気中を見れば（魚の目のように）実際の高さ  $h$  の  $n$  倍、つまり  $h' = nh$  の高さに見えることとなります。

### 3.7 光の干渉と回折

#### 3.7.1 光の反射と位相の変化

光が屈折率  $n_1$  の媒質 から屈折率  $n_2$  の媒質 へ入射し、その境界面で反射または屈折するとき、反射光の位相は次のように変化します。尚、屈折光の位相は変化しません。

- $\left\{ \begin{array}{l} n_1 > n_2 \text{ の時} \quad \dots \quad \text{反射光の位相は変化しない。} \\ n_1 < n_2 \text{ の時} \quad \dots \quad \text{反射光の位相は} \pi [\text{rad}] \text{ だけ変化する。言いかえると半波長ずれる。} \end{array} \right.$

光は 屈折率の小さい媒質中では振動しやすく、屈折率の大きな媒質中では振動しにくい という性質を持っています。セクション??の「定在波」のところで

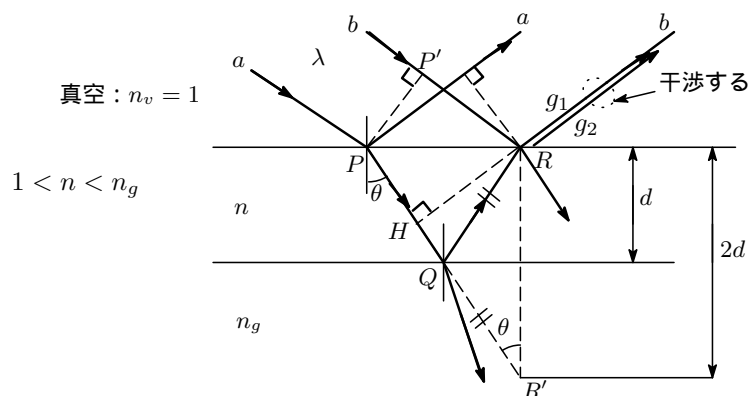
- $\left\{ \begin{array}{l} \text{自由端} \quad \dots \quad \text{反射波の位相は変化しない。} \\ \text{固定端} \quad \dots \quad \text{反射波の位相は} \pi [\text{rad}] \text{ だけ変化する。言いかえると半波長ずれる。} \end{array} \right.$

というのがありましたが、これとのアナロジーで見ると面白いですね。

#### 3.7.2 薄膜による光の干渉

光の干渉条件

真空中におかれた屈折率  $n_g$  のガラスの表面に厚さ  $d$ 、屈折率  $n$  の薄膜がコーティングされています。ただし屈折率は  $1 < n < n_g$  の関係にあるものとします（真空の屈折率  $n_v = 1$ ）。真空中での光の波長を  $\lambda$  として、薄膜に入射した光は図に示すように一部は境界面で反射し、一部は進入していきます。薄膜とガラスの境界点  $Q$  で反射された光はガラスと真空の境界点  $R$  で一部は反射し、一部は真空中に進み ( $g_2$ )、 $b$  の反射光  $g_1$  と干渉します。



入射光  $a$  が薄膜中の点  $H$  に達したとき, 入射光  $b$  は薄膜の境界点  $R$  に達します。そうすると出射光  $g_2$  は光路  $\overline{HQ} + \overline{QR} = \overline{H'Q} + \overline{QR'} = \overline{HR'}$  分余計に旅をしていることになります。光源の同じ点から出る 2 つの光線の通る経路の長さの差を光路差といいます。今の場合, 光路差はこの余計な旅の光路長でそれを  $\Delta$  とすると

$$\Delta = n\overline{HR'} = 2nd \cos \theta \quad (3.7.1)$$

となります。  $1 < n < n_g$  より, 光  $a$  が点  $Q$  で, また光  $b$  が点  $R$  で反射するとき, 共に位相が  $\pi$  ずれますから, 反射光が干渉して明るくあるいは暗くなる条件は  $m$  を正の整数として

$$\begin{cases} 2nd \cos \theta = m\lambda & (m = 1, 2, 3, \dots) & \dots \text{ 明るくなる} \\ 2nd \cos \theta + \frac{1}{2}\lambda = m\lambda \rightarrow 2nd \cos \theta = (m - \frac{1}{2})\lambda & \dots \text{ 暗くなる} \end{cases} \quad (3.7.2)$$

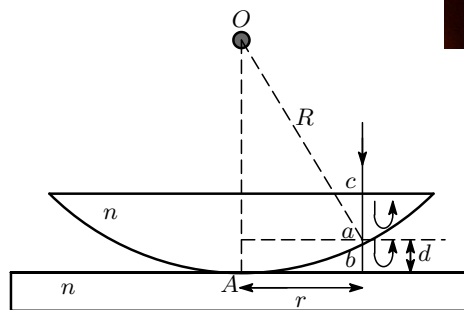
となります。

メモ 3 : 空気 ( $n_a$ ) 石鹸膜 ( $n_s$ ) 空気 ( $n_a$ ) という場合は  $n_a < n_s$  なので空気と石鹸膜の境界面での反射光の位相は  $\pi$  ずれますが, 石鹸膜 空気の境界面の反射光の位相は変化しません。したがって光路長  $\Delta$  が波長の整数倍となれば  $g_1, g_2$  は互いに打ち消しあって暗くなり, 一方, 半波長の端数があれば重なり合って明るくなります。

$$\begin{cases} 2nd \cos \theta = m\lambda & (m = 1, 2, 3, \dots) & \dots \text{ 暗くなる} \\ 2nd \cos \theta = (m - \frac{1}{2})\lambda & \dots \text{ 明るくなる} \end{cases} \quad (3.7.3)$$

### ニュートン・リング

半径  $R$  の球面をもつ平凸レンズと板ガラスを重ね, 真上から単色光を当て上から眺めると同心円状の縞模様が見えます。この縞模様をニュートン・リングといいます<sup>7</sup>。縞模様はレンズ下面で反射した光  $a$  と板ガラスの上面で反射した光  $b$  の干渉の結果生じます<sup>8</sup>。凸レンズの半径  $R$  (曲率半径) はニュートンリングの半径を測定することから求められます。



レンズと板ガラスの間隔  $d$  は

$$d = R - \sqrt{R^2 - r^2} = R - R\sqrt{1 - (r/R)^2} \doteq R - R\left(1 - \frac{r^2}{2R^2}\right) = \frac{r^2}{2R}$$

となります。ただし  $|x| \ll 1 \rightarrow (1+x)^\alpha \doteq 1 + \alpha x$  の近似式を使いました。したがって光  $b$  と  $c$  の光路差は

$$2d = \frac{r^2}{R}$$

<sup>7</sup> ニュートン (Isaac Newton : 1642- 1727, 英国) は明暗がガラス間の間隔によって周期的に決まることを見出しましたが, 彼は光の粒子説を主張していたのでこの現象の説明に非常に苦慮したとのこと。

<sup>8</sup> 写真はココ



となります。光がレンズの下面で反射する (a) とき位相のずれはないですが、ガラス表面で反射する (b) ときには位相は  $\pi$  ずれますね。したがって明るく (明リング) / 暗く (暗リング) なる条件は  $m$  を正の整数として

$$\begin{cases} \text{明リング} \cdots \frac{r^2}{R} = \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda & (m = 1, 2, 3, \dots) \\ \text{暗リング} \cdots \frac{r^2}{R} = m\lambda \end{cases} \quad (3.7.4)$$

中心から  $m$  番目の暗リングの半径を  $r_m$  とすると

$$r_{m+n}^2 - r_m^2 = (m+n)\lambda R - m\lambda R = n\lambda R$$

となつて、これから凸レンズの半径  $R$  は

$$R = \frac{r_{m+n}^2 - r_m^2}{n\lambda} \quad (3.7.5)$$

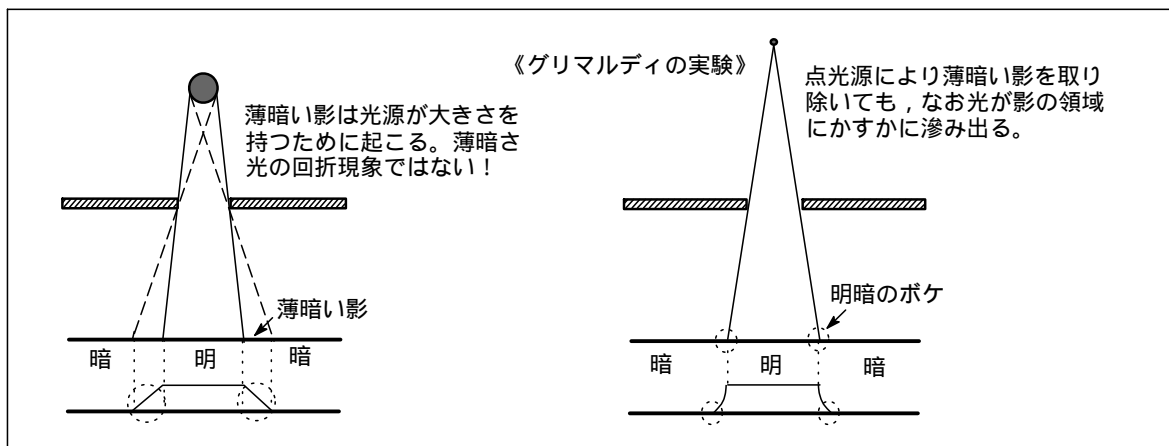
ニュートン・リングはレンズの曲率半径の測定やガラス表面が完全な平面になっているかなどの検査に利用されています。

【註1】  $a$  と  $b$  の光の干渉を考えましたが、レンズ表面  $c$  の影響は考えなくてよいのか？との疑問をもたれるかも知れません。簡単に説明をしておく、 $b$  と  $c$  の光路差は非常に小さいが、 $a$  と  $b$  の光路差はそれに比べると非常に大きい。ガラス表面は必ずしも滑らかでなく、それによる乱反射が生じます。 $b$  と  $c$  では光路差が小さいので乱反射の影響は小さく鮮明な干渉像を観察できますが、 $a$  と  $b$  では光路差が大きいので乱反射の影響を受け、仮に干渉したとしても像がぼやけて見えることとなります。これらのことから  $a$  と  $b$  の光の干渉だけを考えればよいというわけです。

【註2】 入射光線が単色光でなくいろいろな波長の光が混じっていると、場所によって異なる色がついて見えます。

### 3.7.3 グリマルディの実験

今まで、“光は波動”ということ暗黙の前提としてきましたが、歴史的には既に触れたように粒子説と波動説との間で約1世紀にわたり長い論争が続いていました。物体に光を当てると、物体の影の輪郭の境界部 (明と暗の境界部) がぼんやりして見えることはよく経験することだと思います。このぼんやりして見えることが光の回折現象によると思いがちですが、じつは光源が有限の大きさを持つために起こっている現象なんです。



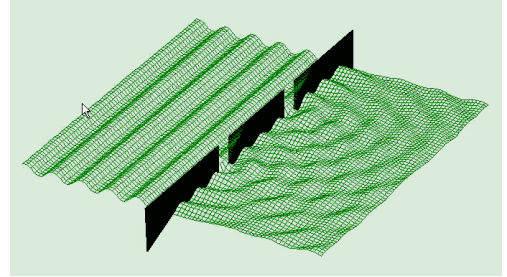
ホイヘンスの波動説が出る約20年前の1665年、グリマルディ<sup>9</sup>は点光源を使った実験をおこない、光が影の領域にわずかににじみ出る (光の回折) ことを観察しています。その後、ヤングやフレネル、フラ

<sup>9</sup> 1618-1663年 オランダの物理学者

ウンフォークーらの実験により，光にも回折という波に共通した性質のあることが分かり，光の粒子説から波動説へと大きくパラダイムシフトしていくことになります<sup>10</sup>。

### 3.7.4 2つの細隙で回折した光の干渉

光の干渉を観察するヤング<sup>11</sup>が考案した2つのスリットを用いる実験で，ヤングの実験と呼ばれます。右の図は2つのスリットを持つ衝立に平面波が入射し，スリットを通過して回折した波が互いに干渉する状況のイメージ図です<sup>12</sup>。



さて，わずかな距離を隔てた2つのスリット  $S_1, S_2$  をもつ衝立に，各スリットから等距離にある波源から球面波を照射します。 $S_1, S_2$  に到達する光は常に位相が等しいので，ホイヘンスの原理により， $S_1, S_2$  は同位相，同波長の球面波を送り出す干渉性の波源となります。前方に衝立と平行にスクリーンを置くと，右図 (b) のような明暗の変化（干渉縞）が現れますが，この縞の位置を求めてみます。

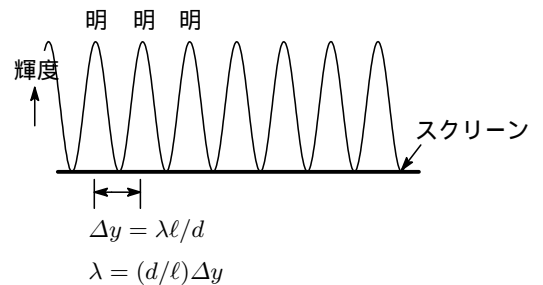
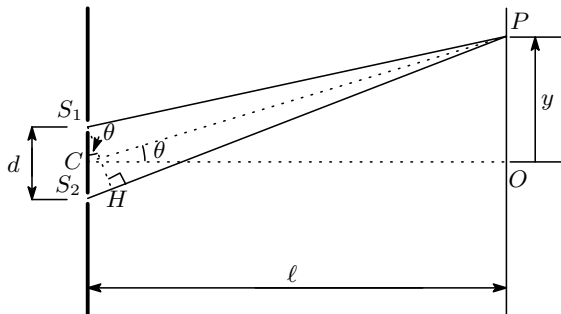
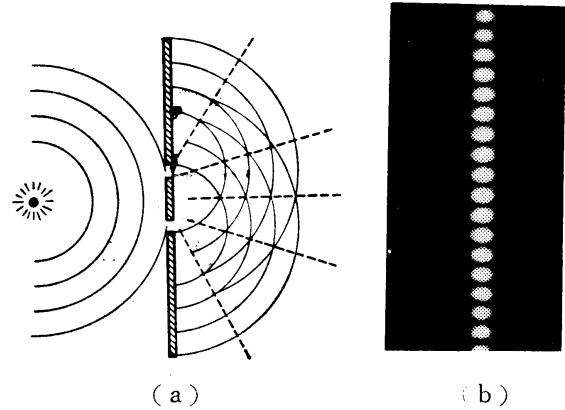
スクリーン上の点  $P$  のスリット  $S_1, S_2$  からの光路差は

$$\overline{S_2P} - \overline{S_1P} = \overline{S_2H} = d \sin \theta$$

衝立からスクリーンまでの距離  $\ell$  は2つのスリットの間隔  $d$  に比べて十分大きいとし， $\ell \gg y$  の範囲だけを考えます。そうすると  $\theta$  は微小角となり， $\sin \theta \simeq \tan \theta$  と近似できるので

$$d \sin \theta \simeq d \tan \theta = d \frac{y}{\ell}$$

この光路差<sup>13</sup>が波長  $\lambda$  の整数倍のところは光が強め合って明るくなり，半波長の端数があれば消しあって暗くなります。



$$\begin{cases} \text{明: } d \frac{y}{\ell} = m \lambda & \rightarrow y = m \cdot \frac{\lambda \ell}{d} & (m = \pm 1, \pm 2, \dots) \\ \text{暗: } d \frac{y}{\ell} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda & \rightarrow y = \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\lambda \ell}{d} & (m = \pm 1, \pm 2, \dots) \end{cases} \quad (3.7.6)$$

<sup>10</sup> 光の本性はなかなか掴みにくく，現代物理学の量子力学によれば，光は粒子であると同時に波動であるということになっています。

<sup>11</sup> Thomas Young : 1773-1829 年 英国の物理学者

<sup>12</sup> 回折格子のアニメーション。

<sup>13</sup>  $S_2$  から送り出された波と  $S_1$  から送り出された波を比較すると点  $P$  に達するとき  $2\pi \overline{S_2H} / \lambda$  だけの位相の遅れがあります。

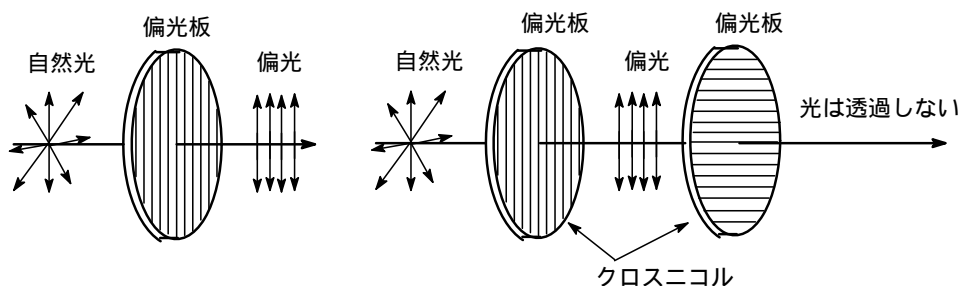
干渉縞のピッチを  $\Delta y$  とすると  $\Delta y = \lambda(\ell/d)$  となります。  $\lambda, \ell$  が一定の場合，スリットの間隔  $d$  を十分大きくしていくと干渉縞は見えなくなっていきます。の測定より光の波長を求めることができます。

### 3.8 光の偏り（偏光）

光は電磁波の一種で横波であることは既に述べました。横波である光の振動が1方向へ<sup>かたよ</sup>偏ったものを偏光といいます。光源を出たままの光は自然光といい，自然光は光の進行方向に垂直な平面上のどの方向にも一様に振動しています。自然光に対して，偏光は光の進行方向に垂直な平面上の特定の方向にのみに偏って振動する光<sup>14</sup>です。ちなみに，音波は縦波で，光のように偏りの現象はありません。

#### 3.8.1 反射による偏光

ガラスや水に自然光があたると，その表面で一部分の光は反射し，他の大部分の光は屈折して入ります。反射光の一部の光は偏光し，その振動面は入射面に垂直となります<sup>15</sup>。また，屈折光も偏光を含み，その振動面は入射面に平行となります。



いま，入射角  $\theta$ ，屈折角を  $\phi$  とします。反射光に含まれる偏光の割合は入射角 ( $\theta$ ) に関係し，反射光が完全に偏光状態になるときの入射角を偏光角といいます。偏光角  $\theta$  は屈折角  $\phi$  と  $\theta = \pi/2 - \phi$  の関係があり，1815 年英国の物理学者ブルースター<sup>16</sup>により

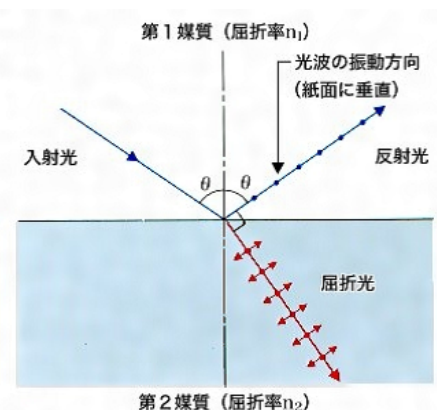
「偏光角の正接 ( $\tan$ ) はその物質の屈折率  $n$  に等しい」

ことが発見されました。これをブルースターの法則 (Brewster's law) といいます。

媒質 に対する媒質 の相対屈折率を  $n$  とすると， $\theta = \pi/2 - \phi$  のとき，

$$n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta}{\sin \phi} = \frac{\sin \theta}{\sin (\frac{\pi}{2} - \theta)} = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \tan \theta$$

となります。屈折率が 1.54 のガラスに屈折率 1 の空気から光が入射する場合のブルースター角は約 57 度となります。尚，ブルースター角での反射光は完全偏光となりますが，屈折光が全部偏光しているわけではないことに留意ください。



<sup>14</sup> 詳しくはこの偏光を直線偏光とか平面偏光と呼んでいます。

<sup>15</sup> ポラロイドサングラスをかけると水面のギラツキが抑えられ，水中の様子が見やすくなりますね。これは反射の偏光をカットしていることによります。

<sup>16</sup> David Brewster 1781-1868 英国の物理学者

### 3.9 光のドップラー効果

光源と観測者が相対的に運動しているときは、音波と同様にドップラー効果が起こります。光速を  $c$  として、相対速度が  $0$  のときの光の波長を  $\lambda$ 、相対速度を  $v$  ( $\ll c$ ) のときの波長を  $\lambda'$  とすると

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{近付きつつあるとき} \quad \lambda' = \left(1 - \frac{v}{c}\right) \lambda \rightarrow \nu' = \left(\frac{c}{c+v}\right) \nu \\ \text{遠ざかりつつあるとき} \quad \lambda' = \left(1 + \frac{v}{c}\right) \lambda \rightarrow \nu' = \left(\frac{c}{c-v}\right) \nu \end{array} \right. \quad (3.9.1)$$

となつて、波長の差  $\Delta\lambda = (v/c)\lambda$  だけ近付く場合は短く、逆に遠ざかる場合は長くなります。ただし、相対速度が光速  $c$  に近付くと相対論的なドップラー効果の式となります。

$$\nu' = \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} \nu \quad (3.9.2)$$

ただし、光源が観測者にちかづくときは  $v < 0$ 。非相対論的ドップラー効果の式は相対論的ドップラー効果の式の近似式となっていることが分かります。これは各自で確認してください

by *KENZO*

(2009.09.24 了)