

# 8. 光波

## 《a》 光の波長と色 (教科書 P.217 ~ 219、P.103 ~ 110)

### 電磁波の種類

名称	真空中の波長 [m]
超長波 (V L F)	$10^4 \sim$
長波 (L F)	$10^3 \sim 10^4$
中波 (M F)	$10^2 \sim 10^3$
短波 (H F)	$10^1 \sim 10^2$
超短波 (V H F)	$1 \sim 10^1$
極超短波 (U H F)	$10^{-1} \sim 1$
センチ波 (S H F)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$
ミリ波 (E H F)	$10^{-3} \sim 10^{-2}$
サブミリ波	$10^{-4} \sim 10^{-3}$
赤外線	$7.7 \times 10^{-7} \sim 10^{-4}$
<b>可視光線</b>	<b><math>3.8 \sim 7.7 \times 10^{-7}</math></b>
紫外線	$10^{-10} \sim 3.8 \times 10^{-7}$
X線	$\sim 10^{-10}$

ナノメートル  
1 nm =  $10^{-9}$  m

### 可視光線

感じる色	真空中の波長 [nm]
赤	640 ~ 770
橙	590 ~ 640
黄	550 ~ 590
緑	490 ~ 550
青	430 ~ 490
紫	380 ~ 430

可視光線の波長 (振動数) の違いは として視覚される

長波長 赤

短波長 青

可視光線の波長範囲

[nm] ~ [nm]

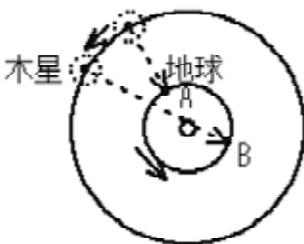
緑 : 約 500nm

注) 白色光はあらゆる波長の成分を含む混合光 スペクトルに分解できる。

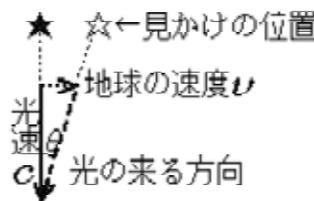
## 《b》 光の速さと光線の屈折 (教科書 P.212 ~ 216、問題集 P.103 ~ 110)

### 光の速さの測定

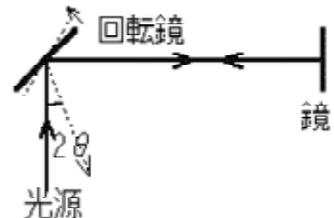
レーマーの測定(1675年)



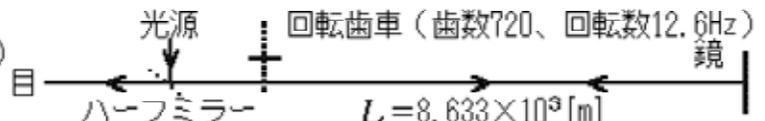
ブラッドリーの  
光行差の観測(1747年)



フーコーの回転鏡法(1850年)



フィゾーの歯車法(1849年)



**真空中の光速度**

$$c_0 = \quad \text{m/s}$$

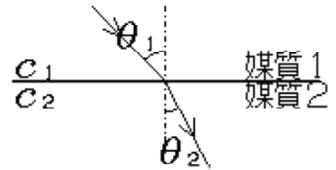
波長・振動数によらず一定

注) 物質中では光の速さは遅くなる。物質中の光速は、光の波長(振動数)や振動面の方向により異なることがある。 **分散・複屈折**

**光線の屈折** 一般の波と同様伝わる速さの異なる媒質の境界で光は屈折する。

屈折の法則

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_1}{c_2} = n_{12}$$



$n_{12}$  は媒質 1 に対する媒質 2 の相対屈折率

真空に対する屈折率(媒質 1 が真空)を**絶対屈折率**という。光の場合、絶対屈折率で物質の光学的性質を表すことが多く、単に**屈折率**といえば絶対屈折率をさす。

物質の絶対屈折率は必ず 1 以上である。

絶対屈折率の定義

$$n_1 = \frac{c_0}{c_1}, n_2 = \frac{c_0}{c_2}$$

変形

$$c_1 = \frac{c_0}{n_1}, c_2 = \frac{c_0}{n_2}$$

屈折の法則

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

代入      整理

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

スネルの法則

**全反射**  $n_1 > n_2$  のとき屈折角  $\theta_2$  が  $90^\circ$  になる入射角  $\theta_1$  を**臨界角**という。

臨界の条件

$$\theta_2 = 90^\circ$$

代入

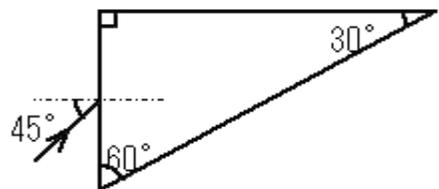
$$\sin \theta_1 = \frac{n_2}{n_1}$$

$\theta_1$ : 臨界角

スネルの法則

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

【問】屈折率  $\sqrt{2}$  のガラスでできた右図のようなプリズムに、矢印のように光線が入射するとき、その後の光線の進路を作図せよ。



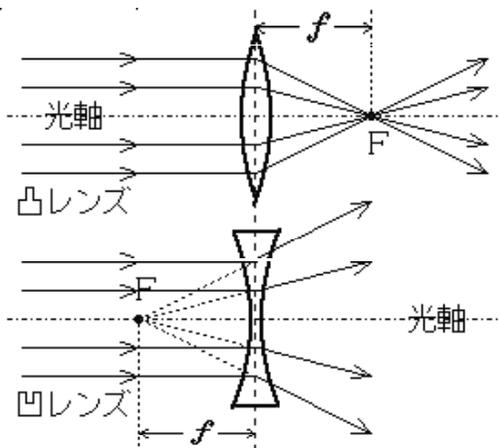
《c》 レンズ (教科書 P.224 ~ 228、問題集 P.103 ~ 110)

ガラスなど光を通す物質で球面を作るとレンズになる。レンズは屈折のはたらきで光を集めたり拡散させたりする。特に物体の「像」を作るはたらきがレンズの主な用途となっている。

レンズの中心と球の中心を通る直線を光軸という。光軸に平行な光線は凸レンズでは一点に集まり、凹レンズでは一点から放射されるように見える。この点Fをレンズ

の 、距離  $f$  をレンズの

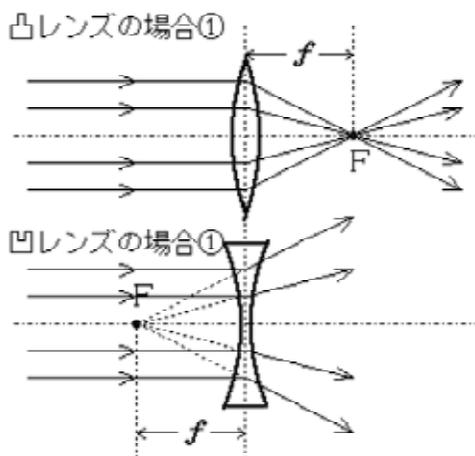
という。



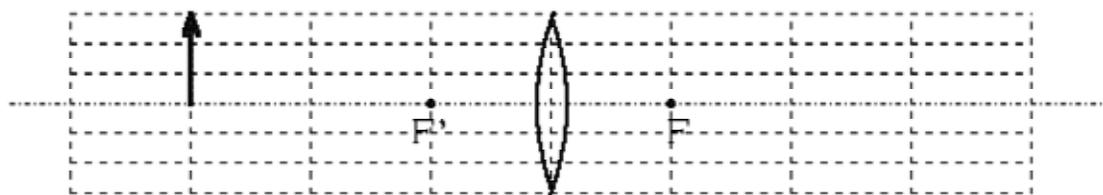
レンズの作図の原理

光軸に平行な光線はレンズ通過後焦点を通る。逆に、焦点を通過する光線はレンズ通過後光軸に平行に進む。凹レンズでは逆方向に延長して考える。

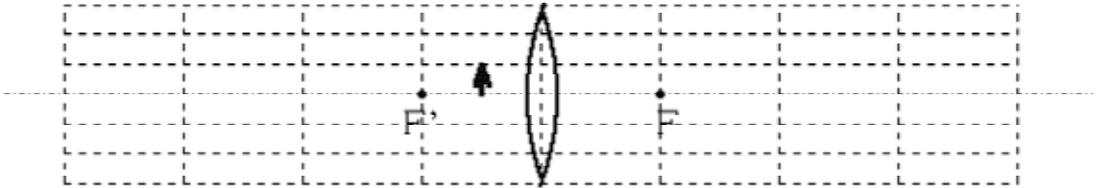
レンズの中心を通る光線はレンズを通過した後も方向を変えずに直進する



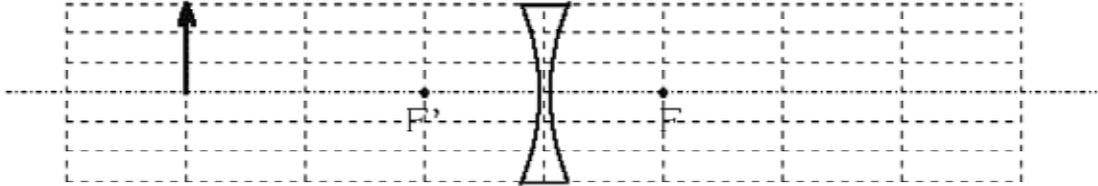
【作業1】凸レンズが実像を作る位置を作図で求めよ。



【作業2】凸レンズが虚像を作る位置を作図で求めよ。



【作業3】凹レンズが虚像を作る位置を作図で求めよ。



### レンズの式

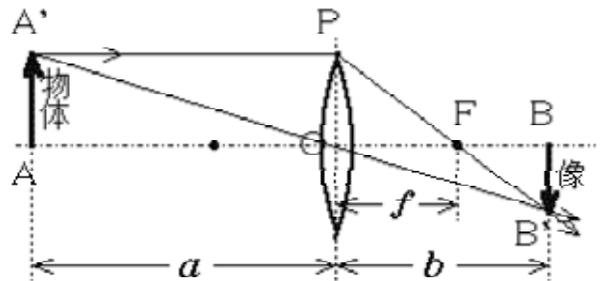
凸レンズが右のように像を結んでいるとき

$a$  物体とレンズの距離

$b$  像とレンズの距離

$f$  レンズの焦点距離

の間に成り立つ関係を求める。



AA'O    BB'Oより

$$AA' : BB' =$$

OPF    BB'Fより

$$OP : BB' =$$

AA' = OPを考慮して

比例式を解いて

両辺を  $abf$  で割って整理

注)  $b/a$  の値を **倍率** という。

**レンズの式**

**レンズの式の拡張** (これにより「レンズの式」はあらゆる場合に使える)

焦点距離  $f$  は、凸レンズで正、凹レンズで負とする。

$a$  は、レンズに向かって進む側で正、反対側に延長するとき負とする。

$b$  は、レンズを通った光線の側で正、反対側に延長するとき負とする。

《d》 光の回折と干渉 (教科書 P.229 ~ 237、問題集 P.111 ~ 117)

干渉の条件

二つの光源から出る光の位相がそろっているとき、光路(光がたどる経路)の差を  $l$ 、波長を  $\lambda$ 、 $m$  を任意の整数として

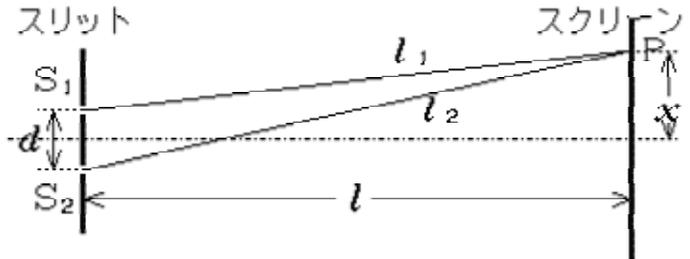
光が強め合う条件：光路差が半波長の偶数倍	$l =$
光が弱め合う条件：光路差が半波長の奇数倍	$l =$

注) 反射による位相の変化(山谷の逆転)に注意する。

屈折率 大 小 の境界は**自由端**反射      位相は変化しない  
 屈折率 小 大 の境界は**固定端**反射      位相は反転する(山・谷逆転)

ヤングの実験

二つのスリット  $S_1$ 、 $S_2$  から同位相の光が出ているとき、スクリーン上の明線、暗線の位置を求める。



$l_1 = S_1P$ 、 $l_2 = S_2P$  を  $d$ 、 $l$ 、 $x$  で表し、 $l = l_2 - l_1$  を求める。

三平方の定理より

$l_1^2 =$	$l_2^2 =$
-----------	-----------

両者の差をとって整理

$l_2^2 - l_1^2 =$
-------------------

因数分解の公式

$a^2 - b^2 = (a + b)(a - b)$  より

$(l_2 + l_1)(l_2 - l_1) =$
----------------------------

$l_1 + l_2 \approx 2l$  として

$l = l_2 - l_1$
-----------------

明線の条件

$l =$
-------

$x =$
-------

明線の位置

暗線の条件

$l =$
-------

$m$  は整数

$x =$
-------

暗線の位置

ヤングの実験における明線(暗線)の間隔

$x =$
-------

波長に比例  
スリット幅に反比例

## 回折格子 (グレーティング)

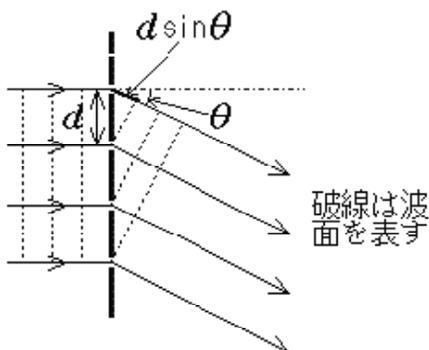
ガラスなどの表面に多数の細い溝を平行に刻んだものを回折格子という。刻まれた溝の部分はすりガラス状になって光をさえぎる。溝と溝の間の部分が多数のスリットの役割をする。

無数のスリットからの回折光が全て強め合うには

隣り合う光線の光路差が、波長 の

であればよい。

スリット間隔 ( **格子定数** )  $d$  のとき、光軸から角度  $\theta$  の方向で強め合う条件を考える。



干渉で強め合う条件

$$l =$$

隣り合う光線の光路差

代入

$$l =$$

回折格子の式

$$d \sin \theta =$$

$m = 0, 1, 2, \dots$  を次数という

この式を満たす角  $\theta$  の方向に明線が見える。

【問】波長  $\lambda$  が長くなると角度  $\theta$  はどうなるか。スペクトルの外側は赤か紫か。

【問】1 mm あたり 500 本の溝を刻んだ回折格子に、ある単色光をあてたところ、光軸からの角度が  $30^\circ$  の方向に 2 次の明線が見られた。

この回折格子の格子定数を求めよ。

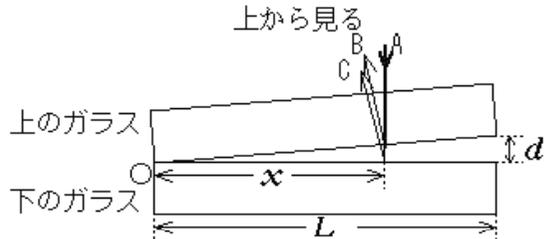
この単色光の波長を求めよ。それはおよそ何色か。

【問】500nm の光で 2 次の明線まで観測するためには、格子定数はいくら以上でなければならないか。

## くさび形薄膜による干渉

比較的厚いガラスにはさまれたくさび形の薄膜（例えば空気層）を考える。

上から光を当てて上からのぞくと、反射光 B と C が干渉して縞模様を作る。



入射光 A に対する反射時の位相の変化

B : 上のガラスの下面での反射光	屈折率大 小	
C : 下のガラスの上面での反射光	屈折率小 大	

その場所の空気層の厚みの約 2 倍が光線 B と C の光路差  $l$  であると考える。

接点 O から距離  $x$  の場所での光路差

$$l =$$

明線の条件

$$l =$$

代入

$$x =$$

明線の位置

暗線の条件

$$l =$$

$m = 0, 1, 2$

$$x =$$

暗線の位置

注) 反射時の位相変化を考慮して干渉の条件の明暗を入れ換える。

くさび形薄膜の明線（暗線）間隔

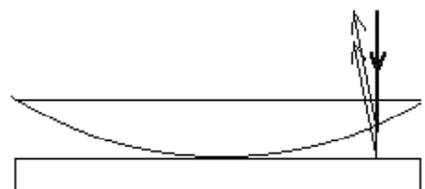
$$x =$$

【問】光を入射させる側から見たとき接点 O 付近は明るく見えるか暗く見えるか。

【問】光を上から当てて、下からのぞくときも干渉縞が見える。そのしくみを考えよ。上から見たときと下から見たときとで、明暗の条件はどう変わるか。

## 参考 ニュートンリング

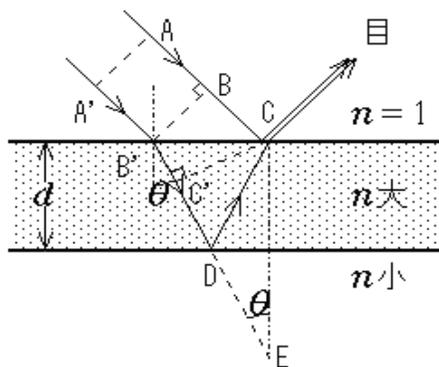
平面ガラスの上に、平凸レンズを重ねると両者の間にくさび形薄膜に似た薄い層ができ、同心円状の干渉縞が見える。



## 平行薄膜による干渉

シャボン玉や、水面に浮いた油膜のような屈折率の異なる薄膜があると、薄膜の上面と下面で反射した光が干渉を起こし、薄膜の面が色付いて見える。

AA'の波面がBB'を経てCC'へ進んだものとする、Cで直接反射した光と、屈折してDで反射した光では、経路C'DCの分だけ光路差を生じる。これを  $l$  とする。



空気中での波長を  $\lambda$ 、薄膜中での波長を  $\lambda'$  とする。

図で  $DC = DE$  ととると、 $C'DC = C'E$  だから

光路差  $l$  を薄膜の厚さ  $d$  で表す

$$l = C'E =$$

屈折率  $n$  の薄膜中の波長

$$=$$

強め合う

$$l =$$

弱め合う

$$l =$$

干渉の条件

代入

$$\cos =$$

$$\cos =$$

明

暗

点 C での反射は固定端反射  $m = 0, 1, 2$

【問】光が薄膜に垂直に入射する場合、反射して強め合う光の波長を表す式を、上の式をもとにして作れ。

【問】屈折率 1.50 の薄膜を、屈折率 1.40 のガラス表面にコーティングし、波長 300nm の光をガラス表面に垂直に入射させるとき、透過光が弱められる膜の厚みの最小値を求めよ。(干渉フィルターの原理)

【問】膜が薄くなければいけない理由は何か。厚いガラスはなぜ色付いて見えないのか考えてみよう。

**発展** ヤングの実験の光路差を求める近似計算

(図は p.11 参照)  
三平方の定理より

$$l_1^2 =$$

$$l_2^2 =$$

整理して

$$l_1 = l \left[ \quad \right]$$

$$l_2 = l \left[ \quad \right]$$

$(1+x)^n \approx 1+nx$   
による近似

$$l_1$$

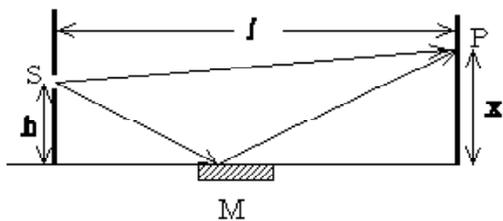
$$l_2$$

$$l = l_2 - l_1$$

この近似は  $x^2$  程度の精度で正しい。

**【問】(ロイドの鏡)**

光源 S から波長  $\lambda$  の可干渉な単色光が出ている。M は平面鏡である。スクリーン上で干渉縞の生じる範囲を図示せよ。また点 P で明線が観測される条件を式で表せ。



反射光の位相変化に注意

**発展** 光学距離

絶対屈折率  $n$  の物質中の距離  $l$  に対して、 $nl$  をその光学距離という。

真空中での波長 とすると、屈折率  $n$  の物質中での波長は

=

屈折率  $n$  の物質中の距離  $l$  に含まれる波の数は

$l /$  =

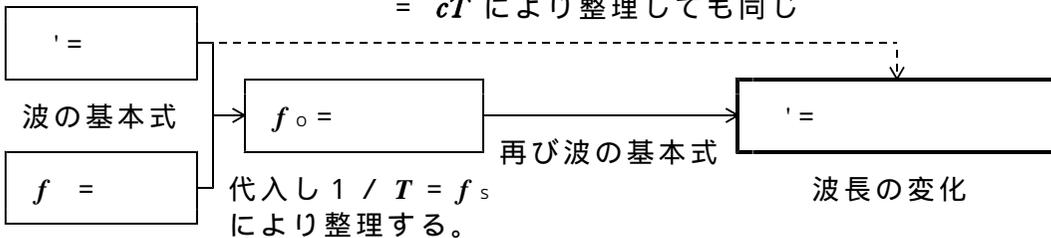
等しい光学距離の中に含まれる波の数は常に等しい。  
 光学距離は物質中での距離を真空中での長さに換算したものと解釈できる。

**発展** 光のドップラー効果

光源が  $u_s$  で動く場合 ( $u_o = 0$ )

観測者の受け取る光波の波長が変化する

=  $cT$  により整理しても同じ



観測者に近づく光源からの光は  くらくなる  
 遠ざかる光源からの光は  くなる

遠方の星雲からの光の**赤方偏移**      宇宙の膨張      ビッグバン宇宙説

「光速不変の原理」のため観測者が動く場合は音波と同じ考え方はできない。