

95

共振と共鳴

◎ 解説動画



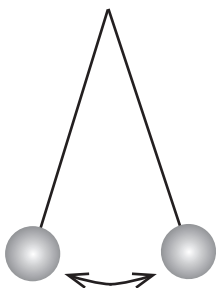
\ 押さえよ /



弦の共振は、弦の とおんさの が一致したときに生じる。

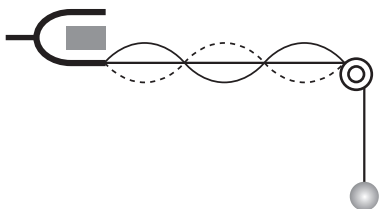
共振、共鳴とは何か？

物体には、その材質や形状によって決まる固有の振動数()があり、その振動を という。振り子をその固有振動数と同じ振動数でゆらすと、振り子の振動はしだいに大きくなっていく。このような現象を という。また、音がともなう共振を、特に という。



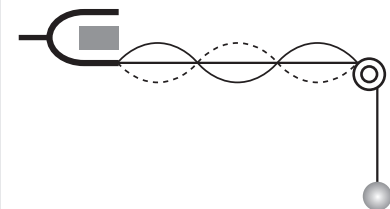
弦の共振について考えよう。

図のように、弦の一端を電磁おんさにつけ、滑車を経て他端におもりをつるす。電磁おんさを振動させても、弦の固有振動数と電磁おんさの振動数が一致していなければ、弦はほとんど 。ここで、電磁おんさの振動数を徐々に変えていくと、ときどき、弦が数区に分かれて大きく振動することがある。これは、弦の と電磁おんさの が一致して、弦に が生じているからである。



やってみよう /
Q

長さ 0.30m, 線密度 $1.0 \times 10^{-4} \text{ kg/m}$ の弦の一端を電磁おんさにつけ、滑車を経て他端に 5.0kg のおもりをつるす。電磁おんさを振動させたところ、弦には腹 3 個をもつ定常波が生じた。重力加速度の大きさを 9.8 m/s^2 とする。



つづき /
Q

(1) 弦を伝わる波の速さは何 m/s か。

解答

$$v = \quad = \quad =$$

$$=$$

..... 答

つづき /
Q

(2) 弦に生じる定常波の波長は何 m か。

解答

$$\lambda = \quad =$$

..... 答

つづき /
Q

(3) 電磁おんさの振動数は何 Hz か。

解答

弦に生じる定常波の振動数(固有振動数) f [Hz] は

$$f = \quad = \quad =$$

電磁おんさの振動数は, 　　だから

..... 答



\ 押さえよ /



気柱には、閉口端を , 開口端を とする が生じる。

📌 気柱には、どのような波が生じるのだろうか？

一端が閉じた管を という。閉管の縁を強く吹くと、その管に特有の音が出る。これは、開口端(管口)から閉口端(管底)に入射する音波と、閉口端で反射する音波とが干渉して管内に が生じ、これが管外の空気に伝わるからである。このとき、空気が振動できない閉口端は 端になるので定常波の になり、開口端は 端になるので定常波の になる。このような定常波の起こす振動が、管内の気柱の である。

POINT

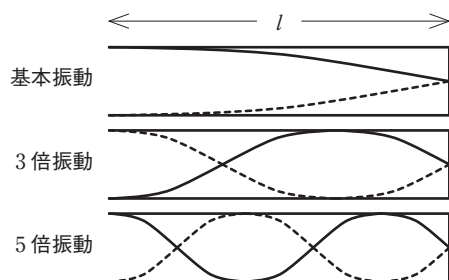


気柱には、閉口端を , 開口端を とする が生じる。

📌 閉管内の気柱の固有振動数を求めよう。

閉管に生じる定常波による振動のうちで、最も単純な形の振動を

という。基本振動の形 3 個分, 5 個分の振動をそれぞれ , という。



ここで、 n 倍振動の定常波の波長 λ_n は、閉管の長さ l を用いて表すと

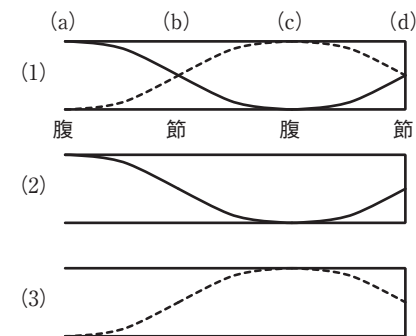
$$\lambda_n = \quad (n = 1, 3, 5, \dots)$$

となる。音速を V とすると、 n 倍振動の振動数 f_n は

$$f_n =$$

📌 気柱の密度と圧力の変化を考えよう。

右図(1)は、閉管に生じる の定常波を にしたものである。これを縦波に戻して考え、空気の変位を矢印で表すと、図(2), (3)のようになる。これにより、気柱の密度と圧力が激しく変化する位置は、定常波の であることがわかる。



97

気柱の振動②

◎ 解説動画



復習

気柱には、閉口端を ， 開口端を とする が生じる。

両端が開いた管を という。

📌 開管内の気柱の固有振動数を求めよう。

開管に生じる定常波による振動のうちで、最も単純な形の振動を という。基本振動の形2個分、3個分の振動をそれぞれ ， という。

ここで、 n 倍振動の定常波の波長 λ_n は、開管の長さ l を用いて表すと

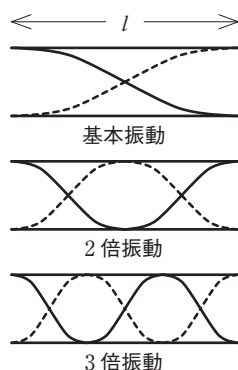
$$\lambda_n = \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

となる。音速を V とすると、 n 倍振動の振動数 f_n は

$$f_n =$$

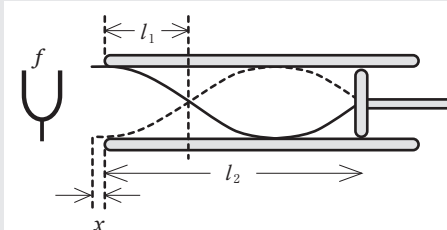
📌 そもそも、開口端で音波は反射するのか？

開口端付近では、管内の空気と管外の空気では振動の様子が変わり、媒質の境界面が生じるので、音波はここでも反射する。開口端付近の空気は振動しやすいので、音波は 端反射して、ここに定常波の をつくる。しかし、実際の腹の位置は、開口端よりも少し外側に出ている。この外側に出た長さ x を という。



やってみよう /
Q

右の図のように、閉管の管口付近で振動数 f のおんさを鳴らし、気柱を徐々に長くしていく。気柱の長さが l_1 と l_2 のときに共鳴が起こった。音波の波長と速さ、開口端補正をそれぞれ求めよ。



解答

音波の波長 λ は、閉管に生じている の波長に等しいので、

$$\text{波長 } \lambda = \dots \text{ 答}$$

波の基本式より

$$\text{速さ } V = = \dots \text{ 答}$$

開口端補正を x とすると、

$$x = = \dots \text{ 答}$$

98

音源が動くドップラー効果

◎ 解説動画



\ 押さえよ /



音源が動くドップラー効果

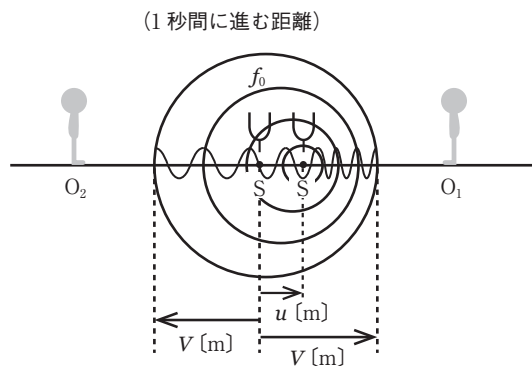
音源が進む前方 \Rightarrow 波長が なる音源が進む後方 \Rightarrow 波長が なる

📌 ドップラー効果とは何か？

緊急自動車のサイレンは、近づくときは止まっているときよりも 大きく聞こえ、遠ざかるときは 小く聞こえる。このように、音源や観測者が運動すると、観測者には音源の振動数と異なる振動数の音が聞こえる。このような現象を $\quad \quad \quad$ という。

📌 音源が動く場合のドップラー効果について考えよう。

振動数 f_0 [Hz] の音源 S が、静止している観測者 O_1 に向かって、速さ u [m/s] で進んでいる。音速を V [m/s] とする。



(1) ある瞬間に S から出た音波は、1秒間に半径 \quad [m] の位置まで広がる。

(2) 同じ1秒間に、 S は \quad [m] だけ O_1 に近づく。

(3) S からは1秒間に \quad 個の波が送り出されている。

(4) 1秒間に S から出た \quad 個の波は、 S が進む前方では、 \quad [m] の間につまった形で並ぶ。

(5) 1秒間に S から出た \quad 個の波は、 S が進む後方では、 \quad [m] の間に広がった形で並ぶ。

(6) S が進む前方では、音波の波長 λ_1 [m] は、

$$\lambda_1 =$$

(7) O_1 が聞く音波の振動数 f_1 [Hz] は、

$$f_1 = \quad =$$

問) 観測者 O_2 が S が進む後方で静止している。 O_2 が聞く音波の振動数 f_2 [Hz] を求めよ。

S が進む後方では、音波の波長 λ_2 [m] は

$$\lambda_2 =$$

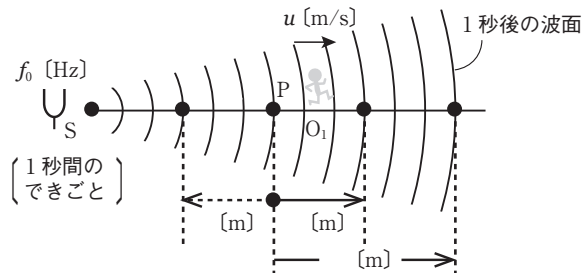
$$f_2 =$$

観測者が動くドップラー効果



が変化する。

📌 観測者が動く場合のドップラー効果について考えよう。



振動数 f_0 [Hz] の音源 S が静止し、観測者 O_1 が速さ u [m/s] で S から遠ざかっている。音速を V [m/s] とする。

- (1) ある瞬間に P の位置に達した音波は、1 秒間に P の先 [m] の位置まで達する。
- (2) 同じ 1 秒間に、P にいた観測者 O_1 は P の先 [m] の位置まで進む。
- (3) O_1 から見ると、音波はこの 1 秒間に [m] 進んだことになるので、 O_1 から見た見かけの音速は [m/s] となる。

- (4) S は静止しているので、音波の波長 λ_0 [m] は、

$\lambda_0 =$ のままである。

- (5) O_1 が聞く音波の振動数 f_1 [Hz] は,

$$f_1 = \quad =$$

問) 観測者 O_2 が、速さ u [m/s] で S に近づいている。 O_2 が聞く音波の振動数 f_2 [Hz] を求めよ。

O_2 から見た見かけの音速は, $[\text{m/s}]$

だから

$$f_2 = \quad =$$

100

音源・観測者がともに動く
ドップラー効果①

◎解説動画



\ 押さえよ /

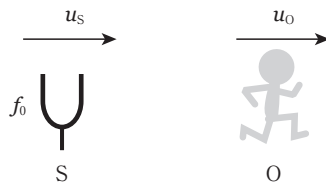


ドップラー効果の公式

$$f = \frac{V}{V - u_o} \cdot f_0 \quad ※$$

📌 音源と観測者が、ともに動く場合のドップラー効果について考えよう。

振動数 f_0 [Hz] の音源 S が、速さ u_s [m/s] で観測者 O に向かって運動し、観測者 O が S と同じ向きに速さ u_o [m/s] で運動している。音速を V [m/s] とする。



- (1) 音源が動いているので、 λ' が変化する。S から O に向かう音波の波長 λ' [m] は、

$$\lambda' =$$

- (2) 観測者が動いているので、 V' が変化する。O から見た音速 V' [m/s] は
- $$V' =$$

- (3) O は速さ V' [m/s] で進む波長 λ' [m] の音波を観測することになる。O が観測する音波の振動数 f' [Hz] は、

$$f' = \quad = \quad \dots ①$$

- 📌 S と O の運動の速さは変えずに、向きだけを逆にする。①式はどのように変化するか。



O に向かう音波の波長 $\lambda'' =$, O から見た音速 V''

$$O \text{ が観測する音波の振動数 } f'' = \quad = \quad \dots ②$$

- 📌 ドップラー効果の公式のつくりかたを学ぼう。

緊急自動車のサイレンなどの例から、私たちは経験上、観測者と音源が近づくように動けば、音は 聞こえ (振動数 f は なり)、遠ざかるように動けば、音は 聞こえる (振動数 f は なる) ことを知っている。このことを利用して、ドップラー効果の公式を簡単につくることができる。

POINT



ドップラー効果の公式

$$f = \frac{V}{V - u_o} \cdot f_0 \quad ※$$

101

音源・観測者がともに動く
ドップラー効果②

◎ 解説動画



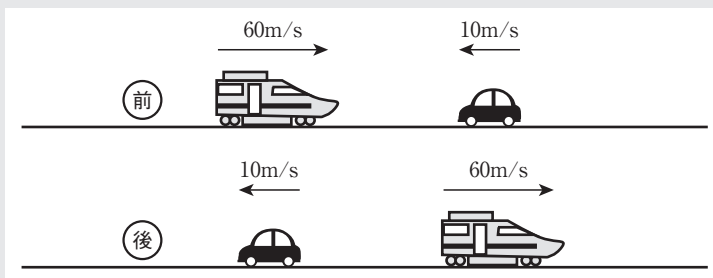
復習 ドップラー効果の公式

$$f = \frac{V}{V - v_o} \cdot f_0 \quad ※$$

やってみよう /

Q

新幹線が 1200Hz の警笛を鳴らしながら、60m/s の速さで直線の軌道を進んでいる。そのすぐわきの道を、自動車が 10m/s の速さですれ違った。自動車の運転手が、すれ違う前後に聞いた警笛の振動数は、それぞれ何 Hz か。音速を 340m/s とする。



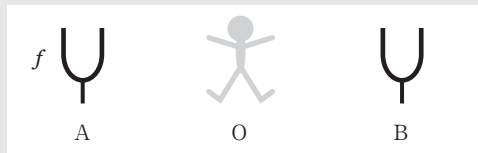
解答

$$\text{前} \quad f_1 = \quad = \quad \cdots \text{答}$$

$$\text{後} \quad f_2 = \quad = \quad \cdots \text{答}$$

つづき / Q

振動数 f [Hz] の音源 A, 観測者 O, 振動数が未知の音源 B が一直線上に静止している。A, B を同時に鳴らすと, O には毎秒 n 回のうなりが聞こえたが, B を O からある速さで遠ざけると, うなりが消えた。音速を V [m/s] とする。



つづき / Q

(1) B の振動数は何 Hz か。

解答

$$< \quad \text{だから} \quad = \quad f_B = \quad \cdots \text{答}$$

つづき / Q

(2) うなりが消えたとき, B の速さは何 m/s か。

解答

$$\begin{aligned} &= \\ &= \\ &= \quad u_B = \quad \cdots \text{答} \end{aligned}$$

つづき / Q

(3) 再び A, B を静止させ, O が A または B に向かってある速さで進んでもうなりが消える。O が進む向きと速さを求めよ。

解答

$$< \quad \text{なので, O は} \quad \text{に向かって進む。} \quad \cdots \text{答}$$

$$\begin{aligned} &= \\ &= \\ &= \\ &= \quad u_O = \quad \cdots \text{答} \end{aligned}$$

102

反射壁によるドップラー効果

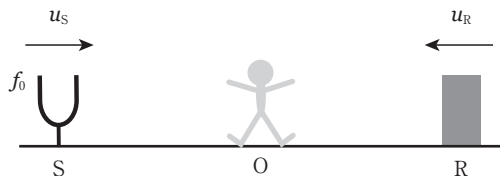
◎ 解説動画

\ 押さえよ /
→

反射壁によるドップラー効果

STEP1: 反射壁を , 受けとる振動数 f_R を求める。STEP2: 反射壁を振動数 f_R を発する , 観測者が受けとる振動数を求める。

振動数 f_0 [Hz] の音源 S は速さ u_S [m/s] で, 反射壁 R は速さ u_R [m/s] で, どちらも静止している観測者 O に近づいている。S, O, R は一直線上にあり, O は S からの直接音と R による反射音の両方を観測する。音速を V [m/s] とする。



⬇ 直接音の振動数 f_1 [Hz] を求めよう。

$$f_1 =$$

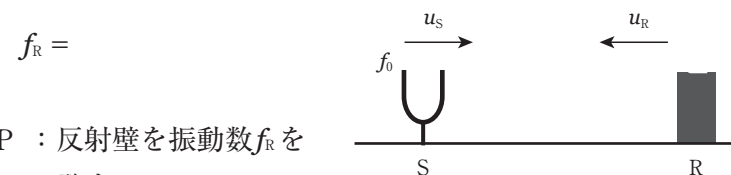
⬇ 反射音の振動数 f_2 [Hz] を求めよう。

POINT



反射壁によるドップラー効果は, で解いていく

STEP : 反射壁を , 受けとる振動数 f_R [Hz] を求める。



STEP : 反射壁を振動数 f_R を発する , 観測者が受けとる振動数を求める。



⬇ うなりの振動数 f [Hz] を求めよう。

$$f =$$

$=$

103

風があるときのドップラー効果

◎ 解説動画



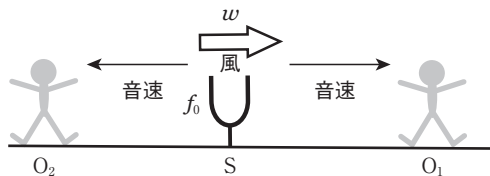
\ 押さえよ /



風があるときのドップラー効果の公式

風下に伝わる音速 $V \Rightarrow$ 風上に伝わる音速 $V \Rightarrow$

振動数 f_0 [Hz] の音源 S, 観測者 O_1 , O_2 が一直線上にあり, O_2 から O_1 の方へ w [m/s] で風が吹いている。無風のときの音速を V [m/s] とする。



⬇ 風が吹いている場合、音速はどうなるか？

風が吹いていると、音波を伝える媒質自体が動くので、音速は変化する。風下 (O_1 側) に伝わる音速は、 \quad [m/s] となり、風上 (O_2 側) に伝わる音速は、 \quad [m/s] となる。

POINT



風があるときのドップラー効果の公式

風下に伝わる音速 $V \Rightarrow$ 風上に伝わる音速 $V \Rightarrow$

O_1 , O_2 が速さ u [m/s] で、どちらも風と同じ向きに進み始めた。

⬇ O_1 , O_2 が観測する音波の振動数 f_1 , f_2 [Hz] は、それぞれいくらになるか求めよう。

$$f_1 =$$

$$f_2 =$$

104 音源が斜めに動くドップラー効果

◎ 解説動画



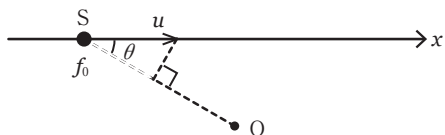
\ 押さえよ /



音源が斜めに動くドップラー効果
音源の速度は、音源と観測者を結ぶ方向への
で考えればよい。

振動数 f_0 [Hz] の音源 S が、 x 軸上を速さ u [m/s] で進み、 S の発する音波を静止している観測者 O が観測する。 SO と x 軸のなす角が θ となった瞬間に S から出た音波について考える。

音速を V [m/s] とする。



↓ O が観測する音波の振動数 f [Hz] を求めよう。

$f =$

POINT



音源が斜めに動くドップラー効果
音源の速度は、音源と観測者を結ぶ方向への で
考えればよい。

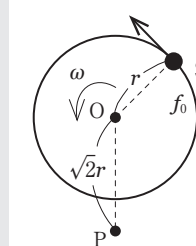
↓ $\theta = 90^\circ$ のとき、 O が観測する振動数 f [Hz] はいくらになるか？

$f =$ =

\ やって
みよう /

Q

振動数 f_0 [Hz] の音源 S が、点 O を中心として反時計回りに、半径 r [m]、角速度 ω [rad/s] で等速円運動をしている。 S から発せられる音波を、点 O から $\sqrt{2}r$ [m] 離れた点 P で観測する。音速を V [m/s] とする。



\ つづき /

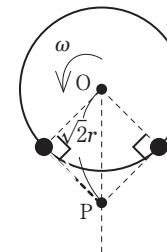
Q

(1) 点 P で観測される最も低い音の振動数 f_A [Hz] と最も高い音の振動数 f_B [Hz] をそれぞれ求めよ。

解答

$f_A =$ [Hz] …… 答

$f_B =$ [Hz] …… 答



\ つづき /

Q

(2) f_A を観測してから次に f_B を観測するまでの時間 t [s] を求めよ。

解答

$t =$ = = [s] …… 答

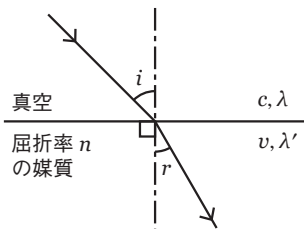
105

光の反射・屈折

◎解説動画


 \押さえよ/
→
(絶対)屈折率 n

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda}{\lambda'}$$

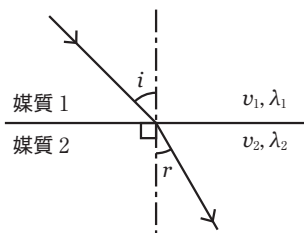


光は波なので、媒質の境界面では $\frac{1}{\lambda}$ や $\frac{1}{v}$ を起こす。

④ 相対屈折率について復習しよう。

光が入射角 i で媒質 1 から媒質 2 に入射し、境界面で屈折角 r の屈折を起こした。媒質 1, 2 における光の速さを v_1, v_2 、光の波長を λ_1, λ_2 とすると、媒質 1 に対する媒質 2 の屈折率(相対屈折率) n_{12} は、次のように表される。

$$n_{12} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

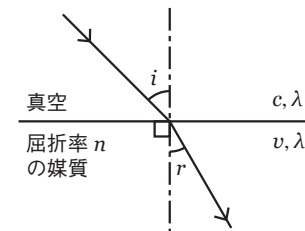


④ 絶対屈折率とは何か？

光が真空中からある媒質中へ入射するときの屈折率、つまり、真空に対するその媒質の屈折率を、

または単に n という。屈折率 n は、真空中での光の速さ c と媒質中での光の速さ v を用いて、次のように定義されている。

$$n = \frac{c}{v}$$



ここで、真空中での光の波長を λ 、屈折率 n の媒質中での波長を λ' 、入射角を i 、屈折角を r とすると、相対屈折率と同様に、次の屈折の法則が成り立つ。

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda}{\lambda'}$$

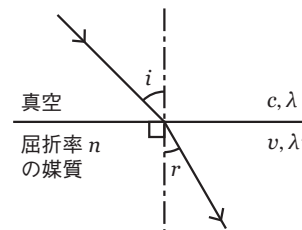
POINT

(絶対)屈折率 n

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda}{\lambda'}$$

よく使う関係式

$$v = \frac{c}{n}, \lambda' = \frac{\lambda}{n}$$



106

平行多重層における屈折

◎ 解説動画



\ 押さえよ /



平行多重層における屈折

$$= = = \dots$$

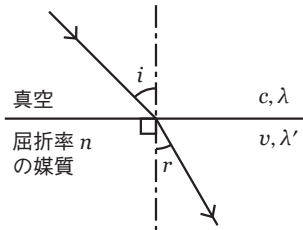
復習

(絶対)屈折率 n

$$n = = =$$

よく使う関係式

$$v = , \lambda' =$$

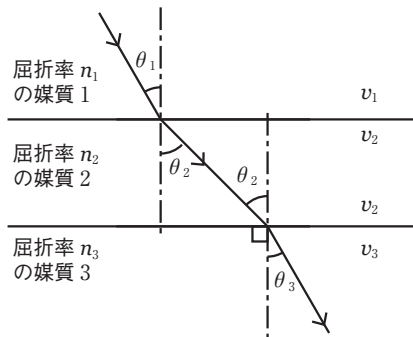


⬇ 平行多重層における屈折について考えよう。

光が入射角 θ_1 で媒質 1 から媒質 2 に入射し、境界面で屈折角 θ_2 の屈折を起こした。媒質 1, 2 における光の速さを v_1, v_2 とすると、媒質 1 に対する媒質 2 の屈折率 n_{12} は、

$$n_{12} = =$$

と表される。ここで、 v_1, v_2 を真空中での光速 c と、媒質 1, 2 の屈折率 n_1, n_2 で表すと、



$v_1 =$, $v_2 =$ となるから

$$n_{12} = = =$$

$$= \dots \textcircled{1}$$

同様にして、媒質 2 に対する媒質 3 の屈折率 n_{23} は、

$$n_{23} = = =$$

$$= \dots \textcircled{2}$$

①, ②式をまとめると、

$$= =$$

POINT



平行多重層における屈折

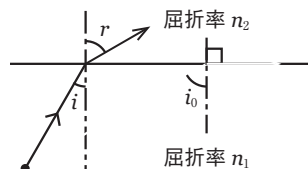
$$= = = \dots$$



\押さえよ/
→

全反射

臨界角 i_0 : 屈折率が n_2 に
なるときの入射角

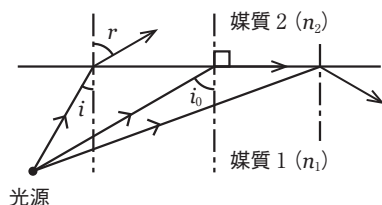


復習

平行多重層における屈折(屈折の法則)

$$= = = \dots$$

光が屈折率の大きい媒質 1 から屈折率の小さい媒質 2 へ入射する場合について考える。媒質 1, 2 の屈折率をそれぞれ $n_1, n_2 (n_1 > n_2)$ とする。屈折の法則より、入射角 i と屈折角 r の間には、次の関係が成り立つ。



$$=$$

$n_1 > n_2$ だから、上式より

$$<$$

となり、 $0^\circ \leq i \leq 90^\circ$, $0^\circ \leq r \leq 90^\circ$ なので

$$<$$

となる。ここで、入射角をしだいに大きくしていくと、やがて屈折角が 90° となるような入射角になる。このときの入射角を i_0 という。臨界角を i_0 とすると、屈折の法則より次の関係が成り立つ。

$$=$$

入射角が臨界角 i_0 以上になると、光はすべて反射し、屈折光はなくなる。これを **全反射** という。

POINT



全反射が起こるための条件

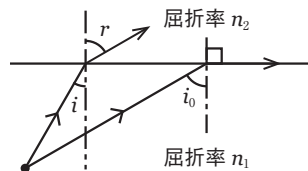
1. 光が屈折率の n_1 の媒質から n_2 の媒質へ進んでいる。
2. 入射角が i_0 以上である。



復習

全反射

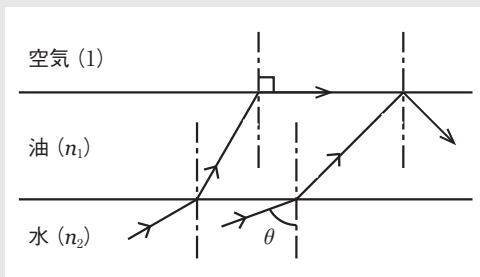
臨界角 i_0 : 屈折率が n_1 に
 なるときの入射角



やってみよう /

Q

水面上に厚さが一定の油の層が浮いている。水中から入射角 θ で油の層へ入射した光が、油と空気の境界面で全反射するための条件を求めよ。ただし、空気、油、水の屈折率をそれぞれ 1 , n_1 , n_2 とし、 $1 < n_2 < n_1$ であるとする。



解答

油から空気への入射角を i , 臨界角を i_0 とすると,

i_0 i より

$$\sin i_0 \leq \sin i \quad \cdots \textcircled{1}$$

油と空気の境界面における屈折の法則は、臨界角 i_0 を用いて

$$=$$

$$= \sin i_0 \quad \cdots \textcircled{2}$$

水と油の境界面における屈折の法則は、 θ , i を用いて,

$$=$$

$$= \sin i \quad \cdots \textcircled{3}$$

②, ③を①に代入して,

$$\sin i_0 \leq$$

$$\geq \quad \cdots \quad \text{答}$$

109

ヤングの干渉実験①

◎ 解説動画

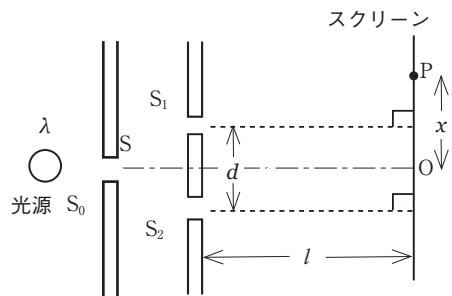


ヤングの干渉実験

明線条件： $=$ $=$ 暗線条件： $=$ $=$
($m = 0, 1, 2, \dots$)

復習

2つの波源から同位相で出る波の干渉

強めあう条件：経路差 $=$ $=$ 弱めあう条件：経路差 $=$ $=$
($m = 0, 1, 2, \dots$)

上の図で、 S_0 は光源、 S はスリット、 S_1 、 S_2 は S から等距離にある複スリットで間隔は d である。 S_1S_2 と平行で距離 l の位置にスクリーンを置く。 S_0 を出て S を通った波長 λ の光は、 S_1 、 S_2 を

で通過し、スクリーン上で する。スクリーン上の点 O は S_1 、 S_2 から等距離の点で、 OP 間の距離は x である。

⬇ 経路長 S_1P 、 S_2P を求めよう。

$$S_1P = \quad, \quad S_2P =$$

⬇ $y \ll 1$ のときに成り立つ近似式 $(1 \pm y)^n \doteq 1 \pm ny$ を用いて、経路差 $|S_2P - S_1P|$ を求めよう。

$$S_1P =$$

ここで、ヤングの干渉実験では $d \ll l$ 、 $x \ll l$ だから

となり、

$$S_1P \doteq \quad =$$

同様にして、

$$S_2P = \quad \doteq$$

よって、経路差 $|S_2P - S_1P|$ は、

$$|S_2P - S_1P| =$$

となる。

⬇ 点 P が明線、暗線となる条件を求めよう。

明線条件： $=$ $=$

暗線条件： $=$ $=$
($m = 0, 1, 2, \dots$)

110

ヤングの干渉実験②

◎ 解説動画



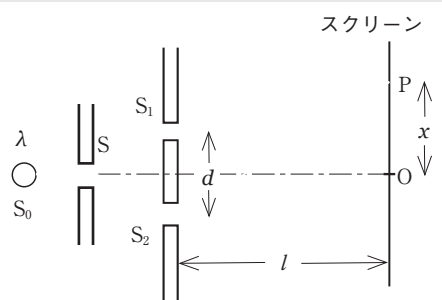
📌 可視光線とは何か？

人の目に明るさとして感じる光を 可視光線 という。可視光線の波長の範囲は、 可視光線 である。人は波長の違いを色の違いとして認識している。1つの波長からなる光を 単色光 とい、太陽光のようにいろいろな波長の光を含んだものを 白色光 とい。

やってみよう /

Q

右の図で、 S_0 は波長 λ の光源、 S_1, S_2 はスリット S から等距離にある複スリットで間隔は d である。 S_1, S_2 と平行で距離 l の位置にスクリーンを置く。スクリーン



上の点 O は、 S_1, S_2 から等距離の点で、 OP 間の距離は x である。

つづき /

Q

(1) 経路差 $|S_2P - S_1P|$ を式で表せ。

解答

..... 答

つづき /

Q

(2) 点 P が明線となる条件(明線条件)を $m = 0, 1, 2, \dots$ を用いて表せ。

解答

= ① 答

つづき /

Q

(3) 明線間隔 Δx を式で表せ。

解答

... ②

② - ① より

=

 $\Delta x = \dots ③$

..... 答

つづき /

Q

(4) 複スリットの間隔 d を小さくすると、明線間隔 Δx はどのようなになるか。

解答

③式より、 d を小さくすると

..... 答

つづき /

Q

(5) S_0 を白色光の光源に変えた。点 O と、そのとなりの明線はどのようなになるか。

解答

..... 答

111

光路長

◎ 解説動画



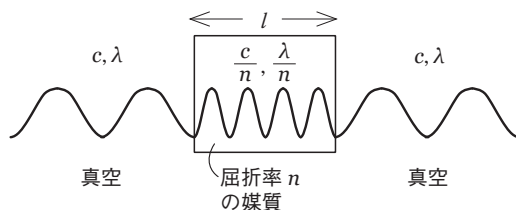
\ 押さえよ /



屈折率 n 、長さ l の媒質の光路長は、 nl である。光路長を用いる場合、真空中での光速 c 、波長 λ を使うことができる。

⬇ 光路長とは何か？

図のように、光の経路の途中に、長さ l 、屈折率 n の媒質がある場合を考えよう。光は真空中を速さ c 、波長 λ で進むが、媒



質中では、速さは c/n に波長は λ/n に変化してしまう。このまま干渉条件を考えようとすると式が複雑になってしまう。

そこで、このような場合に用いられるのが、光路長という考えかたである。

光が長さ l 、屈折率 n の媒質中を進むのに要する時間 t を考える。

媒質中での光速は c/n だから

$$t = \frac{l}{c/n} = \frac{nl}{c}$$

となる。この式から、距離が nl に伸びて、光速が c のままと考え

てもよいことがわかる。この nl を **光路長** または **光学距離** といい (光路長の差を **位相差** という)、光の経路中に媒質がある場合に用いられる。

次に、この媒質中での波の数 (波数) N について考える。媒質中

での光の波長は λ/n だから

$$N = \frac{l}{\lambda/n} = \frac{nl}{\lambda}$$

となる。この場合も、距離が nl に伸びて、光の波長は λ のままと考えることができる。

POINT



屈折率 n 、長さ l の媒質の光路長は、 nl である。光路長を用いる場合、真空中での光速 c 、波長 λ を使うことができる。

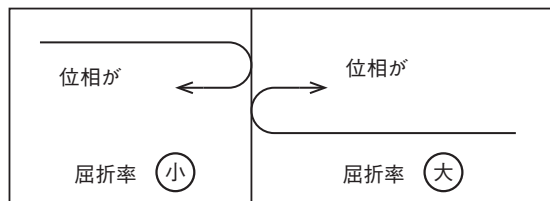
112

反射による位相の変化

◎ 解説動画

\ 押さえよ /
→

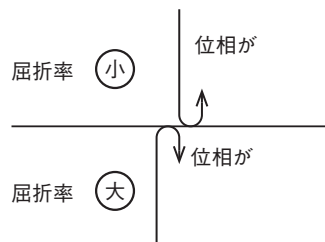
反射による位相の変化



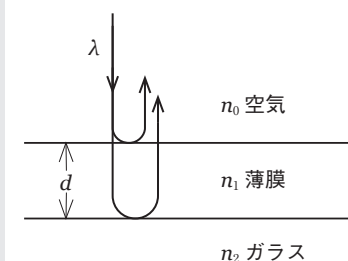
📌 光における固定端反射と自由端反射について学ぼう。

光は波なので、反射の際、固定端反射，または自由端反射をする。光が屈折率の小さい媒質から屈折率の大きい媒質へ入射し，その境界面で反射する場合，固定端反射し位相が逆。逆に，光が

屈折率の大きい媒質から屈折率の小さい媒質へ入射し，その境界面で反射する場合，自由端反射し位相は逆。

やっ
て
み
よう
/ Q

屈折率 n_2 のガラス板に，屈折率 n_1 ，厚さ d の反射防止のための薄膜をつける。屈折率 n_0 の空气中からガラス板に垂直に波長 λ の単色光を入射させる。ただし， $n_0 < n_1 < n_2$ とする。

\ っ
づ
き / Q

(1) 空気と薄膜の境界面での反射光と，薄膜とガラスの境界面での反射光とが干渉して弱めあうための条件を求めよ。

解答

 $(m=0, 1, 2, \dots)$ 答\ っ
づ
き / Q

(2) $n_1 = 1.4$ ， $\lambda = 5.6 \times 10^{-7} \text{m}$ とするとき，薄膜の厚さの最小値 d_{\min} を求めよ。

解答

上式において， のとき となるから，

=

 $d_{\min} =$

=

..... 答

113

薄膜干渉

◎ 解説動画


 \ 押さえよ /
→

薄膜干渉

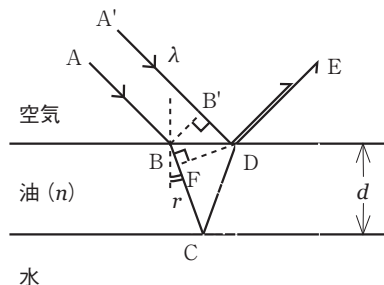
明線 =

暗線 =

$$(m = 1, 2, 3, \dots)$$

❶ 水面上に広がる油の薄膜は、
なぜ色づいて見えるのだから？

図のように、水面上に屈折率 n 、厚さ d の油の薄膜が広がっている。空気中から波長 λ の単色光が入射し、油の表面で反射する光 $A'DE$ と、油と水の境界面で反射する光 $ABCDE$ とが点 D で重なるものとする。FD は屈折波の $\lambda/2$ なので、2つの光は FD までは $\lambda/2$ である。2つの光に位相差をもたらず経路差は、



である。この経路差を屈折角 r を用いて表すと

になるが、これを光路差で表すと次のようになる。

ここで、空気の屈折率 $<$ 水の屈折率 $<$ 油の屈折率 n であるから、油の表面での反射は位相が π が、油と水の境界面での反射は位相が 0 。したがって、反射光が強めあって明るくなる条件は、

$$2nd \cos r = m\lambda \quad \dots \textcircled{1} \quad (m = 1, 2, \dots)$$

反射光が弱めあって暗くなる条件は、

$$2nd \cos r = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

となる。

POINT



薄膜干渉

明線 =

暗線 =

$$(m = 1, 2, 3, \dots)$$

入射する光が白色光の場合、①式において同じ次数 m の光について考えると、色()によって強めあう方向 が異なるので、油の薄膜の異なる場所が違った色に見える。


 \押さえよ/
→

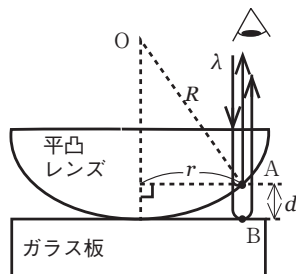
ニュートンリング

明輪 ⇒

暗輪 ⇒

$$(m = 0, 1, 2, \dots)$$

図のように、曲率半径 R の平凸レンズをガラス板の上にのせる。真上から波長 λ の光をあてて、上方より反射光を見ると、リング状の干渉じまが現れる。これを **ニュートンリング** という。この干渉じまは、平凸レンズの下面の点 A での反射光と、ガラス板の上面の点 B での反射光とが干渉して生じたものである。AB 間の距離を d 、明輪や暗輪の半径を r とすると、上の図より



$$r^2 =$$

ここで、 $d \ll R$ すなわち $d/R \ll 1$ であることを用いて、近似計算を行おう。

$x \ll 1$ のときに成り立つ近似式 $(1 \pm x)^n \doteq 1 \pm nx$ を使うと

$$r^2 = \quad \doteq \quad =$$

となる。点 A での反射光と点 B での反射光の経路差 は

$$=$$

となる。また、点 A での反射は位相が π が、点 B での反射は位相が 0 。したがって、2つの反射光が強めあって明輪となる条件は

$$= \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

弱めあって暗輪となる条件は

$$=$$

POINT



ニュートンリング

明輪 ⇒ =

暗輪 ⇒ =

$$(m = 0, 1, 2, \dots)$$

115

くさび形干渉

◎ 解説動画



\ 押さえよ /



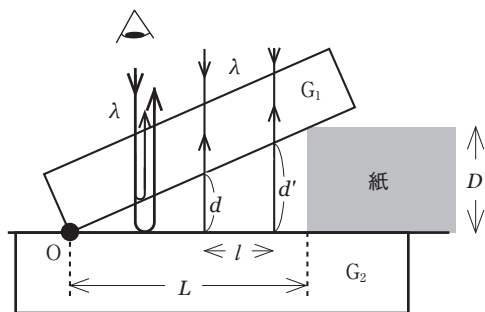
干渉条件のまとめ

光路差 = or 光路差 =

\ やって
みよう /

Q

2枚の平面ガラス G_1 , G_2 を重ね、その一端に薄い紙をはさむと、くさび形の空気層ができる。真上から波長 λ の光を当てて上方から見ると明暗のしま模様が現れる。

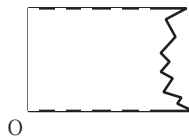


\ つづき /

Q

(1) G_1 を上方から見たときの干渉じまの様子をかけ。
ただし、下の図の左端が、 G_1 と G_2 の交線 O を表している。
干渉じまの暗線を太線で示すこと。

解答



..... 答

\ つづき /
Q

(2) 交線 O から数えて m 番目の明線位置での空気層の厚さを d とする。このときの干渉条件を式で表せ。

解答

= ① 答

\ つづき /
Q

(3) 交線 O から数えて $m+1$ 番目の明線位置での空気層の厚さを d' とする。このときの干渉条件を式で表せ。

解答

= ② 答

\ つづき /
Q

(4) 明線間隔を l , 交線 O から紙の先端までの距離を L としたとき、紙の厚さ D を l , L , λ を用いて表せ。

解答

図より = ③

で②－①より

これを③に代入して

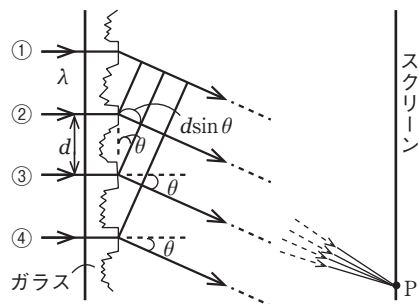
..... 答



\ 押さえよ /



回折格子

明線 \Rightarrow $d \sin \theta = m \lambda$ (m : 整数)

図のように、ガラスに多数の細い筋(1cm あたり数千本)を等間隔に引いたものを **回折格子** といい、筋と筋の間隔 d を **格子定数** という。筋の部分では、光は乱反射するため透過できない。そのため、筋と筋の間が多数のスリットとなり、光の **干渉** が起こる。

波長 λ の光が回折格子に垂直に入射し、入射方向に対し角度 θ の方向に進む回折光について考える。ここで、回折光はすべてスクリーン上の点 P に集まるが、 d はスクリーンまでの距離と比べると非常に小さいので、それぞれの光は平行に進んでいるとみなせる。

① 隣りあう光の経路差を求めよう。

経路差 = $d \sin \theta$

② 経路差が λ のとき、点 P はどうなるか？

③ 経路差が $m\lambda$ (m : 整数) のとき、点 P はどうなるか？

④ 点 P が明線となる条件を求めよう。

= $d \sin \theta = m \lambda$

POINT



回折格子

明線 \Rightarrow $d \sin \theta = m \lambda$ (m : 整数)

⑤ 回折格子による明線の特徴を考えよう。

117

凸レンズによる像

◎ 解説動画



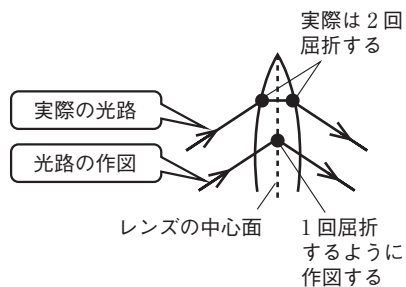
\ 押さえよ /



凸レンズを通る 3 光線

- ① 光軸に平行な光線は、を通る。
 ② レンズの中心を通る光線は、する。
 ③ レンズ前方の焦点を通る光線は、に進む。

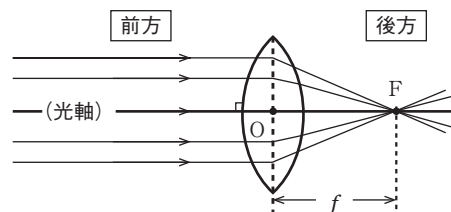
レンズには 2 種類あり、中央部分が厚いものを **凸レンズ**、薄いものを **凹レンズ** という。これから扱うレンズは、十分に薄いものと考え、光線をレンズの中心面で 1 回屈折するように作図することにする。



📌 凸レンズを通る光線について考えよう。

レンズの中心を通りレンズの面に垂直な直線を **光軸** という。光軸に平行な光線を凸レンズの前方から当てると、光線は光軸上の後方の点 **F** に集まる。

この点を **焦点** といい、レンズの中心 **O** から焦点までの距離 **f** を **焦点距離** という。



凸レンズによる像は、次の 3 光線のうち 2 光線を使って作図することができる。

POINT



凸レンズを通る 3 光線

- ① 光軸に平行な光線は、を通る。
 ② レンズの中心を通る光線は、する。
 ③ レンズ前方の焦点を通る光線は、に進む。

📌 凸レンズによる実像のできかたを考えよう。

物体からレンズまでの距離を **a**、レンズから像までの距離を **b**、レンズの焦点距離を **f** とすると、**a**、**b**、**f** の間には、次の関係が成り立つ。

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{A'B'}{AB} =$$

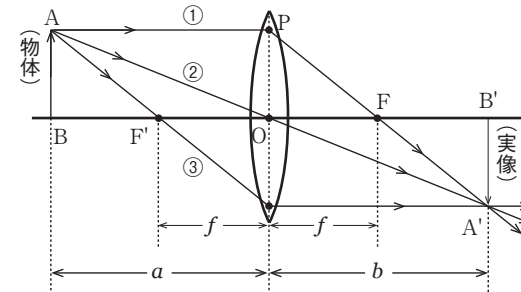
2 式より

$$=$$

$$=$$

$$=$$

$$=$$



118

凸レンズ・凹レンズによる像

◎ 解説動画



復習

凸レンズを通る 3 光線

- ① 光軸に平行な光線は、を通る。
- ② レンズの中心を通る光線は、する。
- ③ レンズ前方の焦点を通る光線は、に進む。

● 凸レンズによる虚像のできかたを考えよう。

物体を凸レンズ前方の焦点 F' よりレンズ側に置くと、レンズを通った光線は収束しないので、を結ばない。 この場合、レンズを通った光線は、 $A'B'$ をつくる。

図中の a , b , f の間には、次の関係が成り立つ。

$$\frac{A'B'}{AB} =$$

$$\frac{A'B'}{AB} =$$

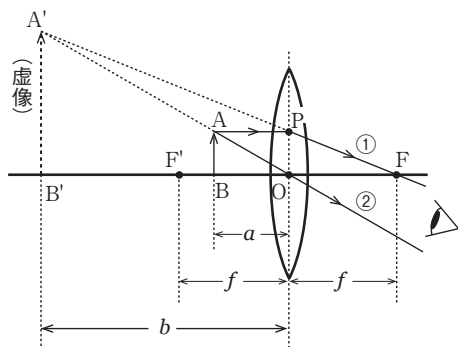
2 式より

=

=

=

=

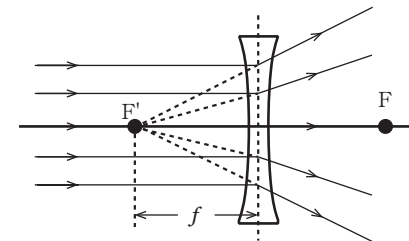


● 凹レンズを通る光線につ

いて考えよう。

光軸に平行な光線を凹レンズの前方から当てると、光線はレンズの前方の点 F' から出たかのように広がる。

この点を凹レンズの という。 凹レンズによる像は、次の 3 光線のうち 2 光線を使って作図することができる。



POINT



凹レンズを通る 3 光線

- ① 光軸に平行な光線は、から出たかのよ
- うに広がる。
- ② レンズの中心を通る光線は、する。
- ③ レンズ後方の焦点に向かう光線は、に進む。

● 凹レンズによる虚像のでき

かたを考えよう。

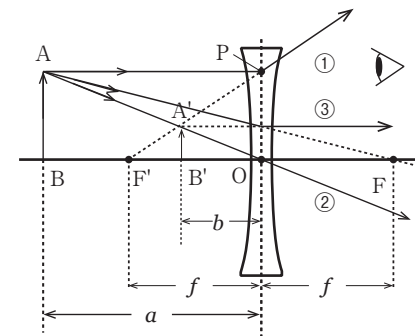
図中の a , b , f の間には、次の関係が成り立つ。

$$\frac{A'B'}{AB} =$$

$$\frac{A'B'}{AB} =$$

=

2 式より



119

写像公式

◎ 解説動画



\ 押さえよ /



写像公式 $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$, 倍率 $m = \frac{b}{a}$

a : レンズから () までの距離
実光源 , 虚光源

b : レンズから () までの距離
実像 () , 虚像 ()

f : レンズの 距離
凸レンズ , 凹レンズ

これまでに学習したレンズに関する距離の関係式は、すべて上の写像公式でまとめることができる。

\ やって
みよう /

(1) 焦点距離 12cm の凸レンズの光軸上に、大きさ 4.0cm の物体を置いた。物体をレンズの前方 20cm の位置と、レンズの前方 6.0cm の位置に置いた場合について、像のできる位置、像の大きさ、像の種類をそれぞれ求めよ。

解答

写像公式 $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ に数値を代入すると

また、像の大きさは

..... 答

写像公式 $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ に数値を代入すると

また、像の大きさは

..... 答

\ つづき /



(2) 焦点距離 18cm の凹レンズの光軸上に、大きさ 12cm の物体を置いた。物体をレンズの前方 6.0cm の位置に置いた場合について、像のできる位置、像の大きさ、像の種類をそれぞれ求めよ。

解答

写像公式 $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ に数値を代入すると

また、像の大きさは

..... 答

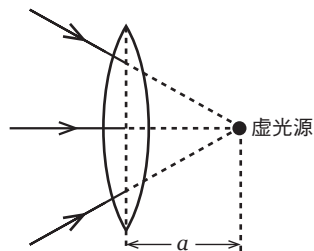
120

組み合わせレンズ

◎ 解説動画


 \ 押さえよ /
→

入射光線の延長線が収束している点を **虚光源** という。このとき、 a の値に () の符号をつけて写像公式に代入する。

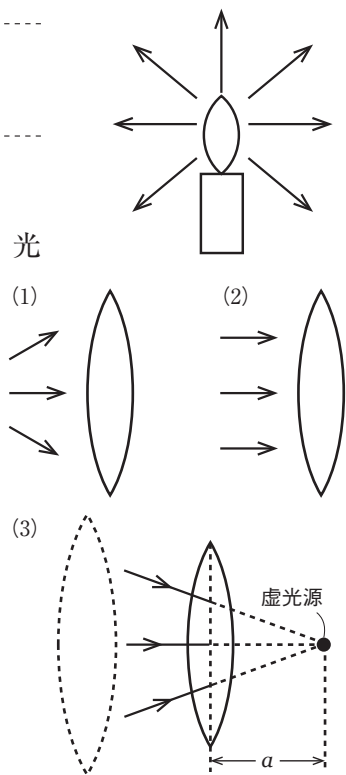


復習

写像公式

↓ 虚光源とは何か？

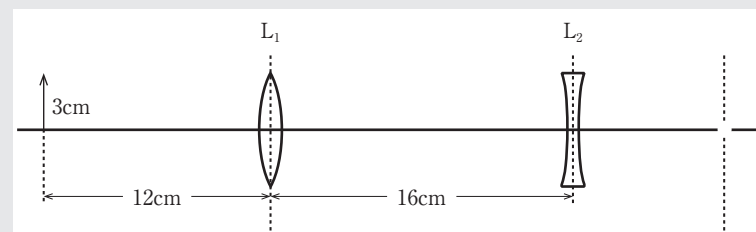
ふつうの光源()からの光は、光源を中心に拡散している。光源が無限遠にあったとしても、そこからの光は、 になる。したがって、レンズに入射する光は、通常(1)または(2)のようになる。しかし、レンズが複数個ある場合、(3)のように光がレンズに するように入射することがある。入射光線の延長線が収束している点を **虚光源** という。このような場合、 a の値に



() の符号をつけて写像公式に代入する。

 やって
みよう /
Q

焦点距離 8cm の凸レンズ L_1 と焦点距離 12cm の凹レンズ L_2 を、光軸を一致させて 16cm 離して置く。 L_1 の前方 12cm の光軸上に 3cm の物体を置くと、像のできる位置、像の大きさ、像の種類をそれぞれ求めよ。



解答