

1 J11 正弦波の波形 [香川大]

図1のように、 $x$  軸の正の向きに一定の速さ  $v$  で正弦波が進む。この波の波長を  $\lambda$ 、振幅を  $A$  とする。このとき、媒質の各点は単振動をする。いま、時刻  $t=0$  に、媒質の各点について図1のような変位が観測できたとして、次の問いに答えよ。

- (1) (a) 位置  $i$  における媒質の振動の周期を答えよ。
- (b) 位置  $i$  における媒質の変位  $y$  と時刻  $t$  の関係を図2に示せ。
- (c) 位置  $c$  における媒質の速度  $u$  と時刻  $t$  の関係を図3に示せ。ただし、媒質の速さの最大値を  $U$  としてよい。
- (2) 図1に示した波に対して振幅、波長がともに2倍の正弦波が  $x$  軸の正の向きに一定の速さ  $v$  で進むとき、
  - (a) 媒質の振動の周期は、図1の波の何倍か答えよ。
  - (b) 媒質の速さの最大値は、図1の波の何倍か答えよ。
- (3) 図1は、媒質の変位を  $y$  軸へ移して、縦波を横波のように表しているものとする。このとき、時刻  $t=0$  において、図中の位置  $a$  から  $i$  のうち最も密な点をすべて挙げよ。

次に、図4のように、波長  $\lambda$ 、振幅  $A$  の正弦波(図4中の実線の波)が  $x$  軸の正の向きに一定の速さ  $v$  で進むとともに、同じ速さ  $v$  で  $x$  軸の負の向きに進む同じ波長で同じ振幅の正弦波(図4中の破線の波)がある場合を考える。実線の波の進む速さと波形は図1の波と同じである。ただし、図4の状態を時刻  $t=0$  とする。また、図中の位置  $a$  から  $i$  は等間隔にとられている。

- (4) (a) 時刻  $t=0$  における合成波を図4に示せ。
- (b) 図中の位置  $a$  から  $i$  のうち、時刻  $t=0$  における媒質の速さが最も大きな点をすべて答えよ。ただし、すべての点で速さが0である場合は、「すべてゼロ」と答えよ。
- (5) (a) 位置  $d$  での媒質の振動の周期は、図1の波の何倍か答えよ。
- (b) 位置  $d$  での媒質の変位の最大値は、図1の波の振幅の何倍か答えよ。
- (c) 位置  $g$  での媒質の速さの最大値は、図1の波の媒質の速さの最大値の何倍か答えよ。

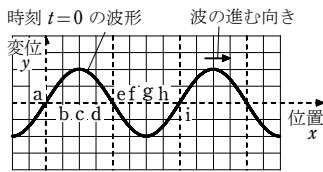


図1

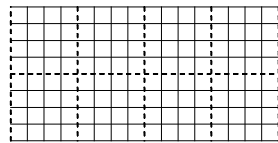


図2

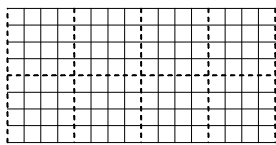


図3

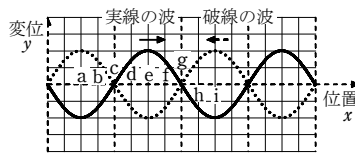


図4

2 J12 音波の性質 [2012 東京工業大]

図1上図のように原点  $O$  にスピーカーを置き、一定の振幅で、一定の振動数  $f$  の音波を  $x$  軸の正の向きに連続的に発生させる。空気の圧力変化に反応する小さなマイクロホンを複数用いて、 $x$  軸上 ( $x>0$ ) の各点で圧力  $p$  の時間変化を測定する。

ある時刻において、 $x$  軸上 ( $x>0$ ) の点  $P$  付近の空気の圧力  $p$  を  $x$  の関数として調べたところ、図1下図のグラフのようになった。ここで距離  $OP$  は音波の波長よりも十分長く、また音波が存在しないときの大気圧を  $p_0$  とする。圧力  $p$  が最大値をとる  $x=x_0$  から、次に最大値をとる  $x=x_8$  までの  $x$  の区間を8等分し、 $x_1, x_2, \dots, x_7$  と順に  $x$  座標を定める。

- (1)  $x_1$  から  $x_8$  までの各位置の中で、 $x$  軸の正の向きに空気が最も大きく変位している位置、および  $x$  軸の正の向きに空気が最も速く動いている位置はそれぞれどれか。

次に点  $P$  で空気の圧力  $p$  の時間変化を調べたところ、図2のグラフのようになった。圧力  $p$  が最大値をとる時刻  $t=t_0$  から、次に最大値をとる時刻  $t=t_8$  までの1周期を8等分し、 $t_1, t_2, \dots, t_7$  と順に時刻を定める。

- (2)  $t_1$  から  $t_8$  までの各時刻の中で、 $x$  軸の正の向きに空気が最も大きく変位しているのはどの時刻か。

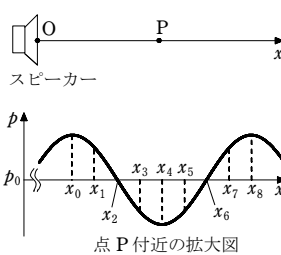


図1

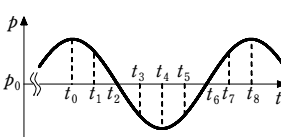


図2

図3のように、原点  $O$  から見て点  $P$  より遠い側の位置に、 $x$  軸に対して垂直に反射板を置くと、圧力が時間とともに変わらず常に  $p_0$  となる点が  $x$  軸上に等間隔に並んだ。

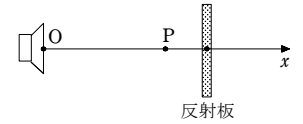


図3

- (3) これらの隣接する点の間隔  $d$  はいくらか。なお、音波の速さを  $c$  とする。
- (4) (3) の状態から気温が上昇したところ、(3) で求めた  $d$  は増加した。その理由を説明せよ。

3 J13 弦の振動 [2013 秋田大]

次の文章中の(ア)、(イ)は①~③のうちから正しいものを1つ選び、ウ~カは数式で、キは整数で埋めよ。

- (1) 図1のように、スピーカーの振動部分に糸の1点  $A$  を接触させ、他端は滑車を通しておもりをつるす。AB間の糸の長さは  $3L$  [m]、糸の部分は水平で、張力を一定に保っている。スピーカーにより生じた波は糸を伝わり、滑車で(ア ① 回折、② 反射、③ 屈折)する。その糸を伝わる波は、AB間で逆向きに進む波と重なりあつて(イ ① 干渉、② 分散、③ 静止)し、ABの両端を節とする定常波ができる。糸ABが基本振動をしたときの定常波の波長  $\lambda$  は、 $L$  を用いて表すと、  
 $\lambda = \text{ウ}$  [m]

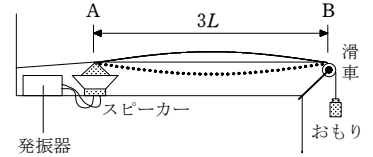


図1

- となる。このとき、糸 AB に伝わる波の速さを  $V$  [m/s] とすると、基本振動の周期  $T$  は、 $L$  と  $V$  を用いて、  
 $T = \text{エ}$  [s]
- である。

- (2) 次に、図2のように、異なる太さをもつ糸をつなぎ、AB間に固定したコマの点  $P$  と糸のつなぎ目を接触させる。糸の長さは  $AP$  間が  $L$  [m]、 $PB$  間が  $2L$  [m] で、糸を伝わる波の速さは  $AP$  間で  $V$  [m/s]、 $PB$  間では  $\frac{V}{2}$  [m/s] である。発振器の振動数を適当に設定したら、 $AP$  間に2つの腹のある定常波ができた。

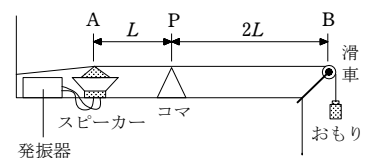


図2

- 糸  $AP$  と糸  $PB$  は発振器の振動数と同じ振動数で振動するため、その振動数  $f$  は、 $V$  と  $L$  を用いて、  
 $f = \text{オ}$  [Hz]
- となる。また、糸  $PB$  にできる定常波の波長  $\lambda'$  は、 $L$  を用いて、  
 $\lambda' = \text{カ}$  [m]
- と表せるので、糸  $PB$  にできる定常波の腹の数は キ 個である。

4 13気柱の共鳴[2013 金沢大]

図1のように、両端が開いた長さ  $L$  [m] の管がある。振動数を変化させることのできる音源を用いて、この管内の気柱に音波を共鳴させる実験を行う。ただし、開口端と定常波の腹との位置の差は無視できるものとする。音の速さを  $V$  [m/s] として、次の問いに答えよ。

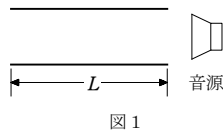


図1

- 管内の気柱には音源と同じ振動数で基本振動の定常波が生じた。定常波の波長と振動数を求めよ。
- 音源の振動数をしだいに上げていったところ、ある振動数で再び共鳴が起こった。このときの音源の発する音波の波長を求めよ。
- (2)の振動数よりも短い波長の音を発する音源を新たに用意し、(2)の音源と同時に鳴らすと、毎秒  $F$  回のうなりが生じた。新しく用意した音源の振動数を求めよ。

図2のように管の左側からピストンを挿入し一端の閉じた管(閉管)をつくる。音源の振動数を(2)の値に保ったまま、閉管の長さ  $l$  [m] を変えることにより、共鳴が起こる位置をさがした。

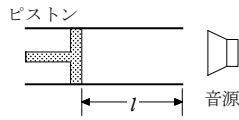


図2

- 共鳴が起こるピストンの位置は何箇所あるか。その数を答えよ。
- 共鳴が起こるピストンの位置の中で、最大となる閉管の長さを求めよ。  
次に、音源をある振動数  $f$  [Hz] で鳴らすと、閉管に共鳴が起こるピストンの位置が3箇所あった。
- 共鳴が起こったピストンの位置の中で最も長い閉管の長さ  $l_0$  [m] を、 $f, V$  を用いて表せ。

図3のように音源を速さ  $v$  [m/s] で閉管に近づけた。閉管の位置で聞こえる音波の振動数を、 $f, V, v$  を用いて表せ。

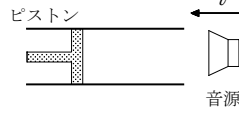


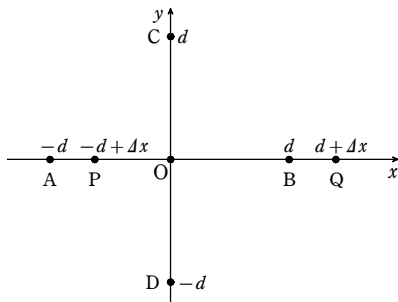
図3

- (7)の音源を用いると(6)の閉管の長さ  $l_0$  では共鳴が起こらなくなった。同じ節の数の共鳴を起こすために、 $l_0$  から閉管の長さを変化させる。変化量の最小値を気柱が短くなる向きを正として、 $f, v$  を用いて表せ。

5 13水面波の干渉[2013 東京理科大]

次の文の [ア] ~ [ウ] の中に入れるべき正しい答えを指定の解答群の中から選べ。

水面上の1点を周期的に振動させると、その点を波源とする水面波が広がる。複数の点を同時に振動させたとき、水面波の重ねあわせ(合成波)について考える。この問題で考える波は波長  $\lambda$  [m] の横波で、一定の速度で伝わる。波源で発生する波の振幅はすべて等しい。波が広がるときの振幅の減衰は無視する。



図のように、広い水面上に原点  $O$  と  $xy$  平面を設定する。 $x$  軸上の点  $A, B$ 、 $y$  軸上の点  $C, D$  は、すべて原点  $O$  から等距離  $d$  [m] にある。距離  $d$  [m] は波長  $\lambda$  [m] に比べて十分に長い。点  $A, B$  から  $x$  軸の正の向きに  $dx$  [m] ( $0 < dx < d$ ) だけ離れた位置を、それぞれ  $P, Q$  とする。

- $P, Q$  から同じ振動状態(同位相)の波を発生させる。原点  $O$  において  $P, Q$  を波源とする2つの波が弱めあい、原点  $O$  が合成波の節となる条件を考える。この条件を満たす  $dx$  の最小値は [ア] [m] である。

原点  $O$  において  $P, Q$  を波源とする2つの波が強めあい、原点  $O$  が合成波の腹となる条件を考える。この条件を満たす  $dx$  の最小値は [イ] [m] である。

- $C, D, P, Q$  から同じ振動状態(同位相)の波を発生させる。原点  $O$  において合成波の振幅が0となる条件を考える。この条件を満たす  $dx$  の最小値は [ウ] [m] である。ただし、波の重ねあわせの原理や波の独立性は、3つ以上の波の場合でも成り立つ。

[ア] ~ [ウ] の解答群

- ①  $\frac{1}{4}\lambda$    ②  $\frac{1}{2}\lambda$    ③  $\frac{3}{4}\lambda$    ④  $\lambda$   
 ⑤  $\frac{3}{2}\lambda$    ⑥  $2\lambda$    ⑦  $3\lambda$    ⑧  $4\lambda$

6 05ホイヘンスの原理[2005 東京農工大]

以下の [ ] に適切な文字式を入れて文章を完成せよ。また、[ ] についてはグラフをかけ。

波の速さが異なる2つの媒質の境界に、斜めに正弦波を入射させる場合を考える。媒質1から媒質2へ向かって、入射角  $i$  で波を入射させる。媒質1中での波の速さを  $v_1$  [m/s]、媒質2中での波の速さを  $v_2$  [m/s]

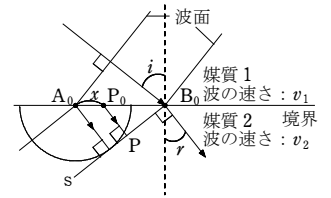


図1

とし、 $v_1 > v_2$  の関係を満たすものとする。時刻  $t=0$  における波面を図1に示す。波面とは、振動の状態が同じ点(同位相の点)をつないだ面である。図1中の点  $A_0$ 、点  $B_0$  は  $t=0$  において入射波の変位が最大となる点をつないだ波面が境界と接する点であり、この2つの波面の間隔が波の1波長に相当する。点  $A_0$  を通る波面上の点の、任意の時刻  $t$  における変位は、波の周期を  $T$  [s]、振幅を  $A$  [m] として  $A \cos \frac{2\pi}{T} t$  [m] と表される。また、点  $A_0, B_0$  間の距離  $d$  は  $d =$  [ア] [m] と表される(以下の解答では文字  $d$  も用いてよい)。

媒質2中における波面は、ホイヘンスの原理により説明することができる。 $t=0$  において点  $A_0$  に達した入射波の波面が、点  $B_0$  に達する時刻は  $t =$  [イ] [s] であり、その間に点  $A_0$  から媒質2中に出た素元波は [ウ] [m] 進んでいる。このときの素元波の波面を図1中の半円で示す。点  $B_0$  を通り、この素元波の波面に接する面を  $s$  とする。ここで、線分  $A_0B_0$  上で点  $A_0$  から  $x$  [m] 離れた点を  $P_0$  とする。 $t=0$  において点  $A_0$  に達した波面は時刻  $t=0$  から  $T \times$  [エ] [s] 遅れて点  $P_0$  に到達する。また、点  $P_0$  からの素元波が面  $s$  に最初に到達する点を  $P$  とすると、素元波が点  $P_0$  から点  $P$  に伝わるのに必要な時間は  $T \times$  [オ] [s] である。したがって、 $t=0$  で点  $A_0$  を通る波面が点  $P_0$  を経由して点  $P$  に到達するまでに [カ] [s] 経過する。すなわち、 $A \cos \frac{2\pi}{T} t$  で表される変位が点  $P_0$  を経由して点  $P$  に到達したときに、その変位は、任意の時刻  $t$  において、 $B \times$  [キ] [m] と表される。ただし、点  $P$  での振幅を  $B$  [m] とした。面  $s$  上の各点は同位相で振動するため、面  $s$  が波面となり、媒質2中において波は波面  $s$  に垂直な方向(角  $r$  方向)に進む。このとき、角  $r$  は角  $i$  と  $v_1 \sin r =$  [ク] の関係を満たす。以上のように、媒質2中での波の進む方向がホイヘンスの原理から求められることが示された。

ところで、媒質の境界からはたえず素元波が発生している。それらのうち点  $A_0$  および1波長前方の点  $B_0$  から時刻  $t=0$  に発生した素元波が、 $T$  [s] 後に形成した波面をそれぞれ図2中に半円で示す。2つの半円に接する面  $s'$  が波面となるかどうか考えよう。点  $A_0$  から  $x$  [m] 離れた点  $P_0$  からの素元波が最初に面  $s'$  に到達する点を  $P'$  とする。先ほどと同様にして、媒質1中で波面が点  $A_0$  から点  $P_0$  まで伝わる時間に点  $P_0$  からの素元波が点  $P'$  まで伝わる時間を加えると [ケ] [s] となる。これは、点  $A_0$  の変位が(ケ)で求めた時間の後の点  $P'$  での変位に等しいことを意味する。したがって点  $P'$  での変位の時間変化は、振幅を  $C$  [m] とし  $C \times$  [コ] [m] と表される。時刻  $t=T$  において、点  $P'$  における変位を求め、これを  $x$  の関数としてグラフに表すと、[サ] となる ( $x=0 \sim d$  の範囲で図示せよ)。このグラフから、線分  $A_0B_0$  上の各点からの素元波は面  $s'$  上において位相が同一になっていないことがわかる。したがって面  $s'$  は波面ではない。

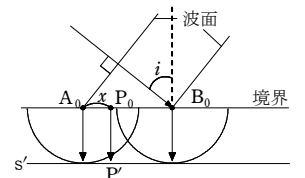
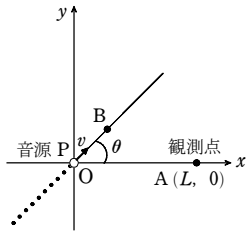


図2

7 15斜め方向のドップラー効果 [2015 千葉大]

音源と観測者が同じ  $xy$  平面内において、音源のみが  $xy$  平面内で動く場合のドップラー効果を考えよう。

図のように、原点  $O$  を通り  $x$  軸から角度  $\theta$  ( $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ) だけ傾いた直線上を、音源  $P$  が図の右上の向きに一定の速さ  $v$  で移動している。時刻  $t=0$  で原点  $O$  を通過した瞬間から、音源が一定の振動数  $f$  の音を出し続けた。この音を  $x$  軸上の点  $A(L, 0)$  (ただし  $L > 0$ ) で観測したところ、観測された音の振動数  $f_m$  は  $f$  とは異なっていた。この現象について、次の問いに答えよ。ただし、音の速さを  $V$  とし、 $v$  は  $V$  より小さいものとする。



(1) 点  $A$  で初めて観測された音の振動数  $f_{m0}$  について記した次の文中の空欄 [ア] ~ [オ] に入る式を答えよ。なお、解答には  $f, v, V, L, \theta$ , ならびに次の文中で定義される  $\Delta t$  のうち必要な記号を用いよ。

時刻  $t=0$  で音源  $P$  が原点  $O$  を通過してから短い時間  $\Delta t$  の間に、音源が発する波の数  $n$  は、[ア] となる。原点  $O$  で出た音が点  $A$  に届く時刻  $t_1$  は [イ] である。

一方、時刻  $t=\Delta t$  での音源の位置を点  $B$  とすると、点  $B$  の座標は [ウ], [エ] となる。よって、点  $B$  で出た音が点  $A$  に届く時刻  $t_2$  は  $\Delta t +$  [オ] である。

したがって、点  $A$  では時間  $\Delta t' (= t_2 - t_1)$  の間に  $n$  個の波が届く。この  $\Delta t'$  の短い時間内では、観測される音の振動数  $f_{m0}$  は一定とみなせるので、観測される音の振動数  $f_{m0}$  は  $\frac{n}{\Delta t'}$  となる。 $\Delta t'$  は  $\Delta t$  と異なるので、 $f_{m0}$  は  $f$  と異なる値となる。

(2) 点  $A$  で初めて観測された音の振動数  $f_{m0}$  を、 $f, v, V, \theta$  を用いて表せ。ただし、 $\Delta t$  は十分小さいので  $(\Delta t)^2$  の項は無視してよい。さらに、必要な場合には、 $|x|$  が 1 に比べて十分小さいときの近似式  $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{1}{2}x$  を用いよ。

(3) 音源  $P$  が移動するに従って、音源  $P$  からみた観測点の方向は変わっていく。このとき、点  $A$  で観測される音の振動数  $f_m$  は、音が初めて観測されたときの値  $f_{m0}$  から、時間とともにどのように変化するか。次の ①~⑤ のうちから、1 つ選んで記号で答えよ。

- ① 減少し続ける
- ② 増加し続ける
- ③ 一定で変化しない
- ④ 最初は増加し、その後は減少し続ける
- ⑤ 最初は減少し、その後は増加し続ける

8 15回転する音源のドップラー効果 [2015 東京理科大]

次の文の [ ] の中に入る最も適当な答えを、それぞれの解答群の中から選べ。必要なら、同じ番号をくり返し用いよ。

図 1 のようにブザー 1 とブザー 2 が距離  $d$  (m) 離れた点  $A$  と点  $B$  に置いてある。これらのブザーから同じ振動数  $f$  (Hz) で位相を一致させた球面波の音が発せられている。線分  $AB$  と平行で距離  $L$  (m) 離れたレール上を移動できる可動式のマイクが音波を観測している。2 つのブザーとレールは同一平面上にある。線分  $AB$  の垂直二等分線がレールと交わる所を原点  $O$  とし、図 1 のようにレール上に  $x$  軸をとる。ブザーおよびマイクの大きさはないものとする。次の問いに答えよ。

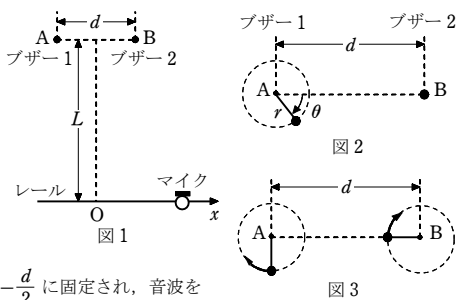
(1) マイクが図 1 のように位置  $x$  (m) にある場合、ブザー 1 とマイクの距離  $S_1$  (m) は  $S_1 =$  [ア] である。またブザー 2 とマイクの距離  $S_2$  (m) は  $S_2 =$  [イ] である。

(2)  $d$  (m) と  $x$  (m) は  $L$  (m) に比べて十分小さいとすると、距離の差  $(S_1 - S_2)$  (m) は [ウ] である。ここで  $|a|$  が 1 に比べて十分小さいとき  $(1+a)^n \approx 1 + na$  の近似式を用いよ。

(3) 音の速さを  $V$  (m/s) とすると、音の波長は  $\lambda =$  [エ] である。

(4) マイクを移動させて音が強めあう位置  $x$  (m) を調べると  $x = n \times$  [オ] であった。ここで  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  である。

次に図 2 のようにブザー 2 の音を停止させ、音を発するブザー 1 にひもを結びつけ、点  $A$  を中心に半径  $r$  (m) の円周上を大きさ  $\omega$  (rad/s) の角速度で時計回りに等速円運動させた。円運動する面は、2 つのブザーとマイクがなす平面上である。マイクはレール上の  $x = -\frac{d}{2}$  に固定され、音波を



観測している。ここで  $r$  (m) は  $L$  (m) に比べて十分小さいとする。図 2 のように線分  $AB$  からひもが時計回りになす角度を  $\theta$  とする。

(5) マイクが観測する振動数の最大値と最小値をそれぞれ  $f_{\max}$  (Hz),  $f_{\min}$  (Hz) とすれ

ば、 $f_{\max} =$  [カ]  $\times f$ ,  $f_{\min} =$  [キ]  $\times f$  である。振動数の最大値と最小値を観測するときのブザーの位置はそれぞれ [ク] と [ケ] であり、最大値と最小値は時間間隔 [コ] [s] で観測される。

マイクを原点  $O$  に移動させ、ブザー 2 の音を再び発生させる。その音の位相はブザー 1 に一致している。ブザー 2 も点  $B$  を中心に半径  $r$  (m) の円周上を角速度  $\omega$  (rad/s) で時計回りに等速円運動させているが、その回転は図 3 のようにブザー 1 よりも  $\frac{1}{4}$  周分だけ先に進んでいる。ブザー 2 の回転面も、2 つのブザーとマイクがなす平面上である。

(6) 2 つのブザーから発生したそれぞれの音の振動数の時間変化を示す図は [サ] である。

(7) ブザー 1 と 2 が図 3 のような位置で発生した音がマイクに到達したとき、ブザー 1 と 2 からの音の振動数の差は [シ]  $\times f$  (Hz) である。

[ア], [イ] の解答群

- ① 0
- ②  $L$
- ③  $\sqrt{L^2 + (x+d)^2}$
- ④  $\sqrt{L^2 - (x+d)^2}$
- ⑤  $\sqrt{L^2 + (x-d)^2}$
- ⑥  $\sqrt{L^2 - (x-d)^2}$
- ⑦  $\sqrt{\frac{L^2}{4} + (x+d)^2}$
- ⑧  $\sqrt{\frac{L^2}{4} - (x+d)^2}$
- ⑨  $\sqrt{\frac{L^2}{4} + (x-d)^2}$
- ⑩  $\sqrt{\frac{L^2}{4} - (x-d)^2}$
- ⑪  $\sqrt{L^2 + (\frac{x}{2} + d)^2}$
- ⑫  $\sqrt{L^2 - (\frac{x}{2} + d)^2}$
- ⑬  $\sqrt{L^2 + (\frac{x}{2} - d)^2}$
- ⑭  $\sqrt{L^2 - (\frac{x}{2} - d)^2}$
- ⑮  $\sqrt{L^2 + (x + \frac{d}{2})^2}$
- ⑯  $\sqrt{L^2 - (x + \frac{d}{2})^2}$
- ⑰  $\sqrt{L^2 + (x - \frac{d}{2})^2}$
- ⑱  $\sqrt{L^2 - (x - \frac{d}{2})^2}$

[ウ] の解答群

- ① 0
- ②  $d$
- ③  $L$
- ④  $x$
- ⑤  $\frac{dL}{x}$
- ⑥  $\frac{dL}{2x}$
- ⑦  $\frac{xL}{d}$
- ⑧  $\frac{2xL}{d}$
- ⑨  $\frac{xd}{2L}$
- ⑩  $\frac{xd}{L}$

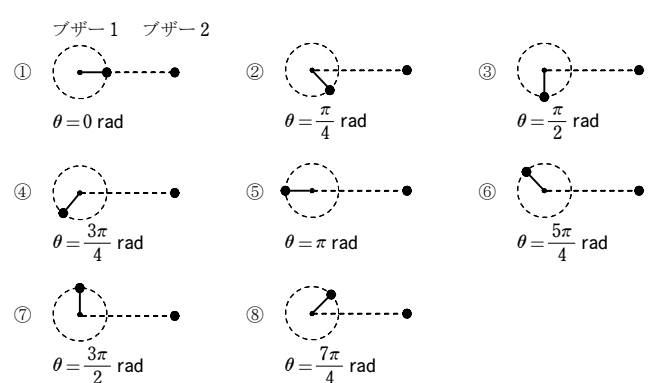
[エ], [オ] の解答群

- ① 0
- ②  $\frac{V}{4f}$
- ③  $\frac{V}{2f}$
- ④  $\frac{V}{f}$
- ⑤  $\frac{2V}{f}$
- ⑥  $\frac{Vx}{4fL}$
- ⑦  $\frac{Vx}{2fL}$
- ⑧  $\frac{Vx}{fL}$
- ⑨  $\frac{2Vx}{fL}$
- ⑩  $\frac{VL}{4fd}$
- ⑪  $\frac{VL}{2fd}$
- ⑫  $\frac{VL}{fd}$
- ⑬  $\frac{2VL}{fd}$
- ⑭  $\frac{Vd}{4fL}$
- ⑮  $\frac{Vd}{2fL}$
- ⑯  $\frac{Vd}{fL}$
- ⑰  $\frac{2Vd}{fL}$

[カ], [キ], [シ] の解答群

- ①  $\frac{V}{V - r\omega}$
- ②  $\frac{V}{V + r\omega}$
- ③  $\frac{V - r\omega}{V}$
- ④  $\frac{V + r\omega}{V}$
- ⑤  $\frac{V - r\omega}{V + r\omega}$
- ⑥  $\frac{V + r\omega}{V - r\omega}$
- ⑦  $\frac{r\omega}{V - r\omega}$
- ⑧  $\frac{r\omega}{V + r\omega}$
- ⑨  $\frac{2r\omega}{V - r\omega}$
- ⑩  $\frac{2r\omega}{V + r\omega}$

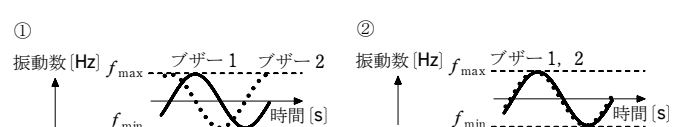
[ク], [ケ] の解答群

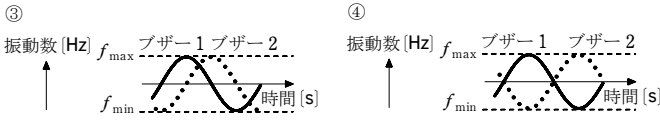


[コ] の解答群

- ①  $\frac{d}{2V}$
- ②  $\frac{d}{V}$
- ③  $\frac{2d}{V}$
- ④  $\frac{1}{4\omega}$
- ⑤  $\frac{1}{2\omega}$
- ⑥  $\frac{1}{\omega}$
- ⑦  $\frac{2}{\omega}$
- ⑧  $\frac{\pi}{2\omega}$
- ⑨  $\frac{\pi}{\omega}$
- ⑩  $\frac{2\pi}{\omega}$

[サ] の解答群

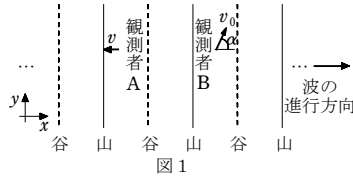




9 11平面波の反射・屈折・回折 [2011 北海道大]

以下の文章中の「ア」～「ケ」に適切な数式または等式を入れ、「a」と「b」には、図3の選択肢から適切な向きを選び記号で答えよ。

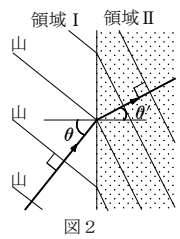
(1) 図1は、波長  $\lambda_1$  [m]、周期  $T_1$  [s] の水面波を上から見たものである。この波は、 $y$  軸に平行な山と谷の波面をもつ平面波として  $+x$  方向に進んでいる。その上空に観測者がいて、波を見ていた。



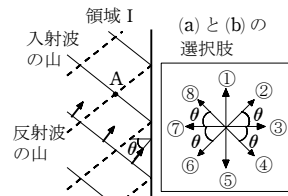
観測者 A が  $-x$  方向に速さ  $v$  [m/s] で進んでいた。波の速さが「ア」[m/s] なので、観測者 A が波の山の上から次の山の上に来るまでにかかる時間(観測者 A から見た周期)は「イ」[s] となる。

次に、観測者 B が  $+x$  方向から反時計回りに角度  $\alpha$  ( $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ ) の向きに速さ  $v_0$  で進んだところ、観測者 B から波が止まって見えた。このときの速さは  $v_0 =$ 「ウ」[m/s] である。

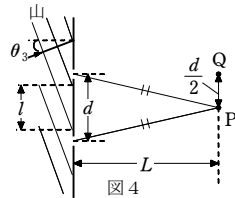
(2) 図2のように、水深の異なる領域 I と II が直線を境界として接している。領域 I を進んでいた波長  $\lambda_2$  [m]、速さ  $c$  [m/s] の平面波が、境界に入射角  $\theta$  で入射し、屈折した。領域 II における波の速さが  $c'$  [m/s] であるとき、その波長は「エ」[m] となる。屈折角  $\theta'$  は関係式「オ」により決まる。



次に図3のように、境界を平らな壁とし、同じ入射角  $\theta$  の波を反射させた。このとき、反射波は入射波と同じ速さで「a」の向きに進む。したがって、入射波と反射波の山の波面が交差する点 A は、「b」の向きに動く。



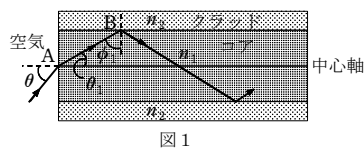
(3) 図4のように、2つのスリットをもつ平らな壁に、波長  $\lambda_3$  [m] の水面波が入射角  $\theta_3$  で入射した。波は各スリットから壁の右側に球面波として広がった。各スリットの幅は狭く、以下では幅を無視する。なお、2つのスリットの間隔は  $d$  [m] で、壁の両側で波の速さは等しいものとする。



壁の右側で2つのスリットから等しい距離にある点 P を考える。壁に達した入射波の隣りあう山と山の壁にそった距離  $l$  [m] が「カ」[m] であることから、点 P で2つの球面波が弱めあうためには、 $m$  を 0 以上の整数として、スリットの間隔を  $d =$ 「キ」[m] とする必要がある。このとき、図のように、壁と平行で点 P を通る直線上にあり、点 P からの距離が  $\frac{d}{2}$  の点を Q とすると、点 Q では波が弱めあっていた。線分 PQ 上に波が弱めあう点があるが、点 P と Q 以外に  $n$  個あるとき、点 P と壁の距離  $L$  [m] と  $d$ 、 $\lambda_3$ 、 $n$  の間の関係は「ク」となる。これより、 $L =$ 「ケ」[m] と求めることができる。

10 09光ファイバー中の光線 [2009 静岡大]

光通信に用いられる光ファイバーは屈折率の異なる2種類のガラス繊維の物質でできている。図1は光ファイバーの中心軸を含む断面の一部を表している。光ファイバーの内側部分の円柱状ガラスはコア、外側部分の円筒状



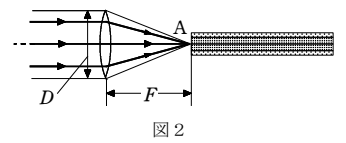
ガラスはクラッドとよばれ、コアとクラッドの中心軸は一致しており、コアの屈折率はクラッドの屈折率よりも大きい。空気中からコアとの界面に入射しコア内に入った光線が、コアとクラッドの界面に到達したとき、その界面で全反射すれば光線は光ファイバーからもれることなく長距離を進むことができる。ここでは、図1で示すように、光ファイバーの中心軸を含む断面内を左から右へ進む単色の可視光について考える。次の問いに答えよ。ただし、空気中を進む単色の可視光の速さを  $c$  [m/s]、空気の屈折率を 1、コアの屈折率を  $n_1$ 、クラッドの屈折率を  $n_2$  とし ( $n_1 > n_2 > 1$ )、光ファイバーの端面

は中心軸に対して垂直とする。

- (1) コア内を進む光線の速さ [m/s] を  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $c$  の中から必要な記号を用いて表せ。
- (2) 図1のように空気中を進んできた光線が、コアとの界面上で光ファイバーの中心軸上にある点 A に、光ファイバーの中心軸に対して入射角  $\theta$  [rad] ( $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ ) で入射し、屈折角  $\theta_1$  [rad] でコア内に入った。このとき、 $\theta$  と  $\theta_1$  の間に成りたつ関係式を  $\sin \theta$ 、 $\sin \theta_1$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  の中から必要な記号を用いて表せ。
- (3) 図1のように、コア内を進む光線がコアとクラッドの界面上の点 B に到達したものとす。クラッドへの入射角を  $\phi_1$  [rad] とすると、この光線が全反射するためには  $\sin \phi_1$  がある値より大きくなる必要があった。この関係を  $\sin \phi_1$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  の間に成りたつ不等式で表せ。
- (4) 図1のように、空気中を進んできた光線が、コアとの界面上で光ファイバーの中心軸上にある点 A に、光ファイバーの中心軸に対して入射角  $\theta$  ( $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ ) で入射し、コア内に入った。この光線がコアとクラッドとの界面で全反射をくり返しなが進むためには、 $\sin \theta$  はある値より小さくなる必要がある。その関係を  $\sin \theta$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  の間に成りたつ不等式で表せ。

(5) (4)で、 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$  の入射角でコア内に進むすべての光線がコアとクラッドとの界面で全反射をくり返しなが進むための条件を  $n_1$ 、 $n_2$  の間に成りたつ不等式で表せ。

(6) (5)で求めた条件が成りたない場合について考える。このとき、表面が球面の薄い凸レンズを用いて、空気中を光ファイバーの中心軸に平行に進む光線を光ファイバーのコア内に効率よく入射させたい。図2のように、直径  $D$  [m]、焦点距離  $F$  [m] の凸レンズを光ファイバーの端面に平行に置く。凸レンズの中心は光ファイバーの中心軸の延長線上にあり、凸レンズと光ファイバーの端面との距離が  $F$  に等しくなっている。空気中から、光ファイバーの中心軸に平行に進み凸レンズを通過するすべての光線は、コアとの界面上で光ファイバーの中心軸上にある点 A に集まる。点 A に集まり、コア内に入ったすべての光線が光ファイバーからもれることなく進むためには、レンズの直径  $D$  はある値より小さくなる必要がある。その値 [m] を  $F$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  で表せ。ただし、レンズの厚さは  $F$  の値に対して十分小さいとする。



11 14 組合せレンズ [2014 立教大]

点光源から発せられた光がレンズを通して結像する位置について考える。レンズを通る光線は以下の性質をもっている。

- (1) 光軸に平行な光線はレンズを通過後、焦点を通る。
- (2) レンズの中心を通る光線は、そのまま直進する。
- (3) レンズの焦点を通過してレンズに到達する光は、レンズを通過後、光軸に平行に進む。

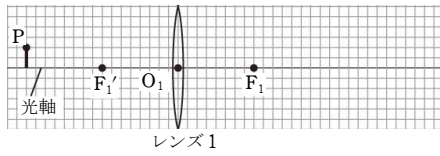


図 1

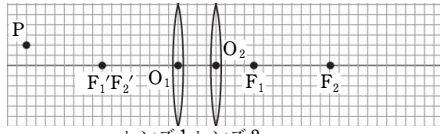


図 2

焦点距離 4 cm のレンズ 1 がある。図 1 のようにレンズ 1 の左側には点光源 P が、レンズ 1 の中心から光軸方向に 8 cm、光軸からの高さ 1 cm の所に置かれている。レンズ 1 の中心の位置を  $O_1$ 、左側の焦点を  $F_1'$ 、右側の焦点を  $F_1$  とする。点光源 P の実像  $P_1'$  は、光軸方向にレンズ 1 の右側  $\square$  ア cm、光軸からの距離  $\square$  イ cm の位置にある。

次に、図 2 のようにレンズ 1 の右側 2 cm の位置  $O_2$  に焦点距離 6 cm のレンズ 2 を設置した。レンズ 2 の左側の焦点を  $F_2'$ 、右側の焦点を  $F_2$  とする。このときの点光源 P の実像の位置  $P_2'$  を考える。

P から発せられ  $F_1'$  を通る光線は、レンズ 1 を通った後 (3) の性質から光軸に平行に進み、レンズ 2 を通った後 (1) の性質からレンズ 2 の焦点  $F_2$  を通る。この光線を光線 1 とする。

レンズの (2) の性質から、レンズ 2 を設置する前に  $O_2$  を通る光線は、レンズ 2 を設置してもレンズ 2 を通るときに直進して  $P_1'$  を通る。この光線を光線 2 とする。

光線 1 と光線 2 の交点が、点光源 P の実像  $P_2'$  の位置でありレンズ 2 の右側  $\square$  ウ cm、光軸からの距離  $\square$  エ cm の位置にある。

文中の空所  $\square$  ア ~  $\square$  エ に当てはまる数値を、それぞれ対応する ① ~ ⑥ から 1 つずつ選べ。

- |             |     |        |       |     |       |      |
|-------------|-----|--------|-------|-----|-------|------|
| $\square$ ア | ① 2 | ② 4    | ③ 6   | ④ 8 | ⑤ 12  | ⑥ 16 |
| $\square$ イ | ① 0 | ② 0.25 | ③ 0.5 | ④ 1 | ⑤ 1.5 | ⑥ 2  |
| $\square$ ウ | ① 1 | ② 2    | ③ 3   | ④ 4 | ⑤ 8   | ⑥ 12 |
| $\square$ エ | ① 0 | ② 0.25 | ③ 0.5 | ④ 1 | ⑤ 2   | ⑥ 3  |

12 08 ヤングの実験 [2008 千葉大]

図 1 のように、紙面に垂直な 2 つの十分細かいスリット P、Q をもつスリット板とスクリーンを、空气中に距離  $L$  だけ離して平行に置き、スリット板の左から、波長  $\lambda$  の位相のそろった平行な単色光をスリット板に垂直に入射した。すると、P、Q から出てくる光が

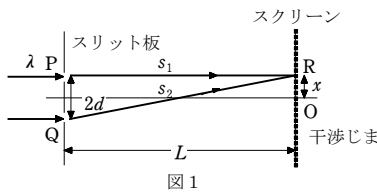


図 1

干渉して、スクリーン上には等間隔な明暗のしまが観測された。次の問いに答えよ。ただし、P、Q の間隔を  $2d$  とし、PQ の垂直二等分線がスクリーンと交わる点を O とする。 $d$  は  $L$  より十分小さい。また、空気の屈折率を 1 とする。

- (1) 点 O から紙面にそって上向きに距離  $x$  だけ離れたスクリーン上の点 R では、P、Q から出た光が強めあい、明線が観測された。 $x$  は  $L$  より十分小さい。

(a) P から R までの距離を  $s_1$ 、Q から R までの距離を  $s_2$  とする。 $s_1$ 、 $s_2$  それぞれを、 $L$ 、 $y_1$ 、 $y_2$  のうちから必要な記号を用いて表せ。ただし、 $y_1 = \frac{x-d}{L}$ 、

$$y_2 = \frac{x+d}{L} \text{ とする。}$$

(b) 距離の差  $s_2 - s_1$  を、 $L$ 、 $d$ 、 $x$  を用いて表せ。ただし、 $y$  が 1 より十分小さいとき、 $\sqrt{1+y^2} \approx 1 + \frac{y^2}{2}$  と近似できることを用いること。

(c) スクリーン上の点 O 付近にできる隣りあう明線と明線の間隔  $D$  を、 $L$ 、 $d$ 、 $\lambda$  を用いて表せ。

(2) 図 2 のように、スリット Q の前に、表面が平らで反射がない厚さ  $l$ 、屈折率  $n$  (ただし  $n > 1$ ) の透明なガラス板を、スリット板に平行に入れた。このとき、スクリーンで観測される明暗のしまの位置はガラス板を入れる前と同じであった。ガラス板の厚

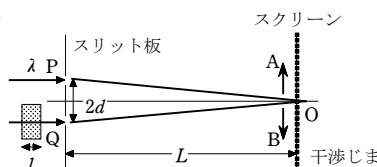


図 2

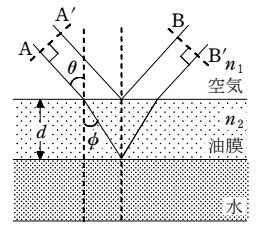
さ  $l$  を、 $n$ 、 $\lambda$  を用いて表せ。必要なら、整数を表す記号として  $m$  を用いてよい。

- (3) (2) の結果だけでは、ガラス板の厚さ  $l$  を一意的に決められない。そこで、厚さ  $l$  を求めるために、入射光の波長を少しずつ大きくしていった。波長が  $\lambda$  のとき、点 O では明線が観測された。入射光の波長が大きくなるにつれて、点 O のところで観測された明線はスクリーンにそって少しずつ動き、点 O で観測される光はしだいに暗くなった。さらに入射光の波長を大きくしていくと、点 O で観測される光は明るくなり始め、波長が  $\lambda + \Delta\lambda$  になったところで、点 O でふたたび明線が観測された。ここでは、ガラス板の屈折率は波長によらないとする。

- (a) 波長が大きくなるにつれて、点 O のところで観測される明線が動いた向きは、図 2 に示す矢印 A、B のどちらか答えよ。また、その理由を簡潔に述べよ。
- (b) 波長が  $\lambda + \Delta\lambda$  になったときに点 O 付近にできる隣りあう明線と明線の間隔  $D'$  を、 $L$ 、 $d$ 、 $\lambda$ 、 $\Delta\lambda$  を用いて表せ。
- (c) ガラス板の厚さ  $l$  を、 $n$ 、 $\lambda$ 、 $\Delta\lambda$  を用いて表せ。

13 15 薄膜による干渉 [2015 立教大]

図のように、水の上に均一な厚さ  $d$  の油膜がある。光が油膜に入射角  $\theta$  で入射したところ、油膜表面で反射した光と、油膜と水の境界で反射した光が干渉して強めあつた。なお、油膜表面の反射では光の位相が反転し、油膜と水の境界での反射は位相が反転しないとする。空気の絶対屈折率を  $n_1$ 、油膜の絶対屈折率を  $n_2$  とする。



空気と油膜の境界での入射角  $\theta$  と屈折角  $\phi$  とは、

$\square$  ア の関係がある。また、油膜中での波長  $\lambda_2$  は、空気中での波長を  $\lambda_1$  とすると  $\lambda_2 = \square$  イ で与えられる。

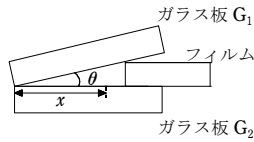
油膜の表面で反射した光と油膜と水の境界で反射した光の間には、波の位相の差ができる。ここで、2 つの光線を考える。2 つの光線の波面は、破線 AA' を横切るときは位相がそろっていたとする。波の 1 周期の位相を  $2\pi$  とすると、2 つの光線の波面が破線 BB' を横切るとき位相差は  $\square$  ウ である。油膜表面で反射した光と、油膜と水の境界で反射した光が干渉して強めあうのは、 $N$  を整数として位相差が  $2\pi N$  のときである。ここでは  $N=0$  であることがわかっているとすると、光の空気中での波長  $\lambda_1$  は  $\square$  エ である。

文中の  $\square$  ア ~  $\square$  エ に当てはまる数式として最も適当なものを、それぞれ対応する ① ~ ⑥ から 1 つずつ選べ。

- |             |  |  |   |
|-------------|--|--|---|
| $\square$ ア | ① $\frac{\cos \theta}{\cos \phi} = \frac{n_2}{n_1}$                                    | ② $\frac{\cos \theta}{\cos \phi} = \frac{n_1}{n_2}$                                    | ③ $\frac{\sin \theta}{\sin \phi} = \frac{n_2}{n_1}$ |
|             | ④ $\frac{\sin \theta}{\sin \phi} = \frac{n_1}{n_2}$                                    | ⑤ $\frac{\tan \theta}{\tan \phi} = \frac{n_2}{n_1}$                                    | ⑥ $\frac{\tan \theta}{\tan \phi} = \frac{n_1}{n_2}$ |
| $\square$ イ | ① $\frac{n_1}{n_2} \lambda_1$  | ② $\frac{n_2}{n_1} \lambda_1$  | ③ $\frac{n_1^2}{n_2^2} \lambda_1$                   |
|             | ④ $\frac{n_2^2}{n_1^2} \lambda_1$  | ⑤ $\frac{n_1^3}{n_2^3} \lambda_1$  | ⑥ $\frac{n_2^3}{n_1^3} \lambda_1$                   |
| $\square$ ウ | ① $\pi \frac{2d \cos \theta}{\lambda_2}$   | ② $\pi \frac{2d \sin \theta}{\lambda_2}$   | ③ $2\pi \frac{2d \cos \phi}{\lambda_2}$             |
|             | ④ $2\pi \frac{2d \sin \phi}{\lambda_2}$  | ⑤ $2\pi \frac{2d \cos \phi}{\lambda_2} - \pi$  | ⑥ $2\pi \frac{2d \sin \phi}{\lambda_2} - \pi$       |
| $\square$ エ | ① $2d \left\{ \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 - \sin^2 \theta \right\}^{\frac{1}{2}}$ | ② $2d \left\{ \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 - \cos^2 \theta \right\}^{\frac{1}{2}}$ |   |
|             | ③ $4d \left\{ \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 - \sin^2 \theta \right\}^{\frac{1}{2}}$ | ④ $4d \left\{ \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 - \cos^2 \theta \right\}^{\frac{1}{2}}$ |   |
|             | ⑤ $4d \left\{ \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 - \sin^2 \theta \right\}^{\frac{1}{2}}$ | ⑥ $2d \left\{ \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 - \cos^2 \theta \right\}^{\frac{1}{2}}$ |   |

[14]08くさび形領域による光の干渉[2008 神戸大]

図のように空気中で2枚の厚い平面ガラス板  $G_1$ ,  $G_2$  を重ねて一端に薄いフィルムをはさむと、くさび状のすき間ができる。2枚のガラス板のなす角度を  $\theta$  とする。次の問い(1)~(4)に答えよ。



- 2枚のガラス板の上方から波長  $\lambda$  の単色光を当てて上方から見ると、明暗のしま模様を観測された。くさびの頂点から  $x$  の位置でガラス板  $G_1$  の下面で反射する光と、ガラス板  $G_2$  の上面で反射する光の光路差を求めよ。また、2つの反射光が強めあう条件を求めよ。
- 2枚のガラス板のなす角度が  $\theta = 5.0 \times 10^{-4}$  rad, 光の波長が  $6.3 \times 10^{-7}$  m のとき、しま模様の明るい線の間隔を求めよ。ただし、 $\theta$  が非常に小さいので  $\tan \theta \approx \sin \theta \approx \theta$  の関係を用いてよい。有効数字は2桁とする。
- 次に、2枚のガラス板の下方から光を当てて上方から見ると、明暗が逆転した。その理由について説明せよ。
- (1)で2枚のガラス板の間のくさび状のすき間を水で満たすと明るい線の間隔はどうか答えよ。また、その理由を説明せよ。

[15]J05回折格子[首都大学東京]

図1のように、間隔  $d$  で多数のスリットが並んだ回折格子がある。光源から出た平行光線をこの回折格子に垂直に入射させ、図2に示すように、 $L$  だけ離れた位置に置かれたスクリーンにあたる光を観察する。スクリーン上で、回折格子の正面にあたる点  $O$  の座標を  $x=0$  とし、図のように  $x$  軸の正の向きを定める。回折格子を透過した光の、入射光に対する角度を  $\theta$  とする。角度  $\theta$  は十分小さいとし、 $\sin \theta \approx \theta$ ,  $\tan \theta \approx \theta$  という近似を用いて、以下の問いに答えよ。また、解答には整数を表す記号として  $m$  を用いてよい。

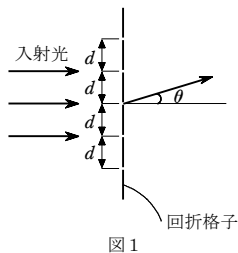


図1

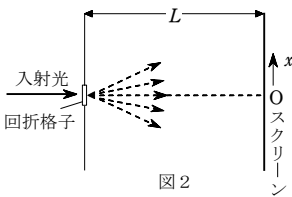


図2

- 波長  $\lambda$  の単色光を回折格子に入射したところ、スクリーン上に明るい縞(しま)が何本か見えた。このとき、回折格子の隣りあうスリットから明るい縞までの、光の経路差が満たすべき条件式を書け。
- (1)の状態、スクリーン上に見える明るい縞の  $x$  座標を求めよ。
- 光源からは波長  $\lambda$  の単色光が出ている状態で、回折格子とスクリーンを含む長さ  $L$  の領域全体を、屈折率  $n$  の媒質で満たした。このときのスクリーン上の明るい縞の  $x$  座標を求めよ。

次に以下のような実験を大気中で行った。用いた回折格子は1.0 cm 当たり 1000 本のスリットをもち、 $L=1.0$  m の位置にスクリーンが置かれている。

- 回折格子に波長が  $3.8 \times 10^{-7}$  m と  $7.6 \times 10^{-7}$  m の2つの単色光を同時に入射する。 $0 \text{ cm} \leq x \leq 20 \text{ cm}$  の範囲に見えるすべての明るい縞のだいたいの位置を、図3に示せ。

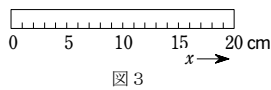


図3

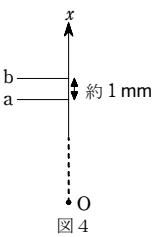
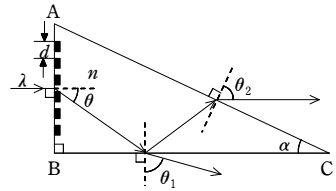


図4

[16]95光の回折と屈折[1995 早稲田大]

次の文中の空欄に当てはまる答えを記せ。ただし、(カ)~(ク)および(コ)~(シ)の答えは対応する番号のみを記入せよ。

図のような断面をもつ頂角  $\alpha$  のくさび形のガラスがある。側面  $AB$  には格子定数  $d$  の回折格子がとりつけられている。回折格子のすじは紙面に垂直で、総本数は十分に多いものとする。  
はじめに、空気中の波長が  $\lambda$  の単色光の平面波を、側面  $AB$  に垂直



に入射させたところ、下方に回折される光のうち回折角がもっとも小さい1次の回折光は図の矢印のように進んだ。このガラスの空気に対する相対屈折率は、光の波長が増大するとともに小さくなるが、いま考えている波長  $\lambda$  においては  $n$  であるとする。この単色光がガラス中を進むときの波長は [ア] であるから、1次の回折光の回折角  $\theta$  が満足する関係式は、 $\sin \theta =$  [イ] となる。この1次の回折光が、図のように底面  $BC$  で一部が反射し一部が屈折をするとき、屈折光の屈折角  $\theta_1$  が満足する関係式は、 $n$ ,  $d$ ,  $\lambda$  を用いて  $\sin \theta_1 =$  [ウ] のように表すことができる。一方、反射光は斜面  $AC$  に到達し、一部は屈折して空気中に出ていく。その光の屈折角を  $\theta_2$  とすると、 $n$ ,  $\alpha$ ,  $\theta$  を用いて  $\sin \theta_2 =$  [エ] となる。

ここで、回折格子の格子定数を変化させたとき、底面  $BC$  での入射角がちょうど臨界角となり、底面  $BC$  から屈折光が空気中に出なくなった。このときの格子定数を  $n$ ,  $\lambda$  を用いて表すと [オ] である。この状態、今度は波長を変化させると、 $\lambda$  より [カ] ① 長い ② 短い 波長の光は、底面  $BC$  で全反射する。その理由は、

変化後の波長に対しては、側面  $AB$  での回折角が [キ] ① 増加し ② 変化せず ③ 減少し、また、底面  $BC$  における臨界角は [ク] ① 増加する ② 変化しない ③ 減少する からである。

いま、頂角  $\alpha$  をうまく選んだところ、斜面  $AC$  から空気中に出ていく光が、側面  $AB$  に入射した光と同じ方向に進むようになった。このときの入射光の波長を  $\lambda$ , 格子定数を  $d$ , ガラスの屈折率を  $n$  とおき、斜面  $AC$  の傾きを  $n$ ,  $d$ ,  $\lambda$  を用いて表すと、  
$$\tan \alpha =$$
 [ケ] (1)

となる。ここで、この状態から格子定数と屈折率を変化させて、斜面  $AC$  から出てくる屈折光の進行方向の変化を観察してみよう。まず格子定数だけを大きくすると、屈折光の向きは [コ] ① 上向きに変化する。 ② 変化しない。 ③ 下向きに変化する。 また、

屈折率だけを大きくすると、屈折光の向きは [サ] ① 上向きに変化する。 ② 変化しない。 ③ 下向きに変化する。 これにして(1)式の条件を満足する状態から、光の波長をわずかに長くすると、斜面  $AC$  からの屈折光の向きは、

[シ] ① 上向きに変化する。 ② 変化しない。 ③ 下向きに変化する。