

〔Ⅰ〕 次の文の (a) ～ (c) に入れるのに最も適当な式を解答欄に記入しなさい。また、(1) ～ (15) に入れるのに最も適当なものを各問の文末の解答群から選び、その記号をマークしなさい。ただし、同じものを2回以上用いてもよい。

図1のようになめらかで水平な床面上に原点をおき、水平右向きを正として x 軸、鉛直上向きを正として y 軸をとる。この床面に、傾き $\theta (0 < \theta < \frac{\pi}{2})$ のなめらかな斜面をもつ質量 M の三角台 A を置く。三角台 A の斜面上に質量 m の物体 B が置かれ、物体 B と三角台 A 上の固定された棒とは伸縮しない軽い糸でつながれている。糸と斜面は平行である。重力加速度の大きさは g とする。物体 B の大きさは無視でき、三角台 A は水平方向にのみ運動できる。三角台 A および物体 B の回転と空気抵抗は考えないものとする。棒と糸の質量は無視できるものとし、これらの空気抵抗は考えないものとする。

- (i) 三角台 A と物体 B が静止しているとき、物体 B には垂直抗力、糸の張力および重力がはたらく。力のつり合いから物体 B が受ける垂直抗力の大きさは (1) であり、糸の張力の大きさは (2) である。

次に、三角台 A を大きさが a の加速度で x 軸正の向きに移動させたとき、物体 B は斜面上で静止したままであった。斜面上の観測者から物体 B を観察すると物体 B には垂直抗力、糸の張力、重力に加えて慣性力がはたらく。この慣性力の大きさ F は、 $F =$ (a) である。垂直抗力の大きさを N 、張力の大きさを T とし、物体 B にはたらく力のつり合いの式を考えると、斜面に垂直な方向で

$$N + F \times (\text{ (3) }) - \text{ (1) } = 0 \quad \cdots \cdots \text{①}$$

であり、斜面に平行な方向で

$$T + F \times (\text{ (4) }) - \text{ (2) } = 0 \quad \cdots \cdots \text{②}$$

である。

ここで、加速度の大きさ a を徐々に大きくすると式①にしたがって N が変化し、 a がある大きさを超えたときに物体 B が斜面から離れた。このときの加速

度の大きさは (b) であり、張力の大きさを m , g , θ で表すと (5) となる。

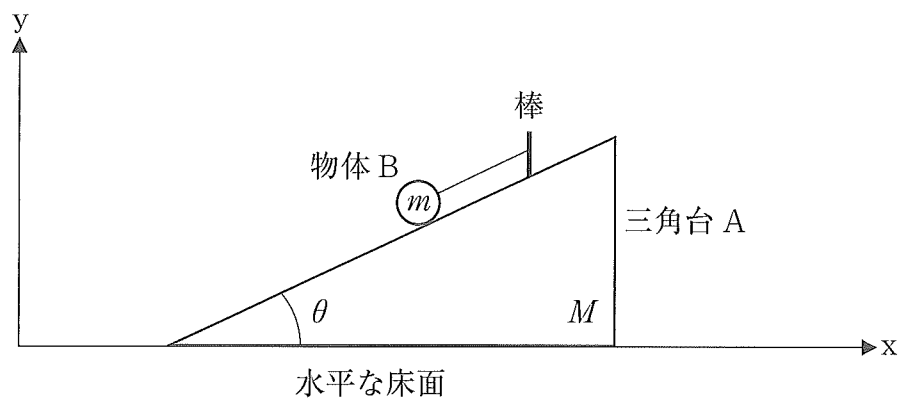


図 1

〔解答群〕

- | | | |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| (ア) $\sin \theta$ | (イ) $\cos \theta$ | (ウ) $\tan \theta$ |
| (エ) $-\sin \theta$ | (オ) $-\cos \theta$ | (カ) $-\tan \theta$ |
| (キ) $mg \sin \theta$ | (ク) $mg \cos \theta$ | (ケ) $mg \tan \theta$ |
| (コ) $\frac{1}{\sin \theta}$ | (カ) $\frac{1}{\cos \theta}$ | (シ) $\frac{1}{\tan \theta}$ |
| (ズ) $-\frac{1}{\sin \theta}$ | (セ) $-\frac{1}{\cos \theta}$ | (ソ) $-\frac{1}{\tan \theta}$ |
| (タ) $\frac{mg}{\sin \theta}$ | (チ) $\frac{mg}{\cos \theta}$ | (ツ) $\frac{mg}{\tan \theta}$ |

- (ii) 三角台 A と物体 B が静止している状態で糸を静かに切ると、物体 B は斜面を回転せずにすべりおりる。切断した糸は三角台 A および物体 B の運動に影響しないものとする。三角台 A が動けない場合と動ける場合について、物体 B の加速度を考えよう。

まず、図 2 のようにストッパーによって三角台 A が動かない場合を考える。この場合、物体 B の加速度の x 成分は $-g \times \boxed{(6)}$ であり、その y 成分は $-g \times \boxed{(7)}$ である。

次に、図 3 のようにストッパーがなく三角台 A がなめらかな水平な床面上を動く場合を考える。三角台 A の加速度の x 成分を a_A 、物体 B の加速度の x 成分を a_x 、y 成分を a_y とする。物体 B には重力と大きさが N_1 の垂直抗力がはたらく。この垂直抗力の反作用が三角台 A にはたらき、三角台 A にはこの他に床から受ける大きさが N_2 の垂直抗力と重力がはたらく。ここで三角台 A は床面上を離れないので y 軸方向の力のつり合いの式は、 $N_2 = N_1 \times (\boxed{(8)}) + Mg$ となる。物体 B の x 軸方向の運動方程式は

$$ma_x = N_1 \times (\boxed{(9)}) \quad \cdots \cdots \textcircled{3}$$

であり、y 軸方向の運動方程式は

$$ma_y = N_1 \times (\boxed{(10)}) - mg \quad \cdots \cdots \textcircled{4}$$

である。三角台 A の x 軸方向の運動方程式は

$$Ma_A = N_1 \times (\boxed{(11)}) \quad \cdots \cdots \textcircled{5}$$

である。

ここで、x 軸方向に運動する三角台 A の速度を v_A 、物体 B の速度の x 成分を v_x 、y 成分を v_y とする。三角台 A に対する物体 B の相対速度の x 成分を v'_x 、y 成分を v'_y とすると $v'_x = \boxed{(12)}$ 、 $v'_y = v_y$ と表せる。物体 B は三角台 A の斜面上を運動するので、

$$\frac{v'_y}{v'_x} = \tan \theta \quad \cdots \cdots \textcircled{6}$$

が成り立つ。三角台 A の初速度と物体 B の初速度はともにゼロであるから、糸を切り離れた直後から時間 t だけ経過した後の速度は $v_A = a_A t$ 、 $v_x = a_x t$ 、 $v_y = a_y t$ と表せる。これらの式と式⑥から加速度 a_A 、 a_x 、 a_y と角度 θ の関係が

$$\boxed{(c)} = \tan \theta \quad \cdots \cdots \textcircled{7}$$

と求まる。式③～⑦から N_1 が求まるので、 a_x 、 a_y を m 、 M 、 g 、 θ で表せる。

物体 B の加速度の x 成分および y 成分はそれぞれ、

$$a_x = -g \times \boxed{(6)} \times \boxed{(13)} \quad \dots\dots ⑧$$

$$a_y = -g \times \boxed{(7)} \times \boxed{(14)} \quad \dots\dots ⑨$$

となる。

最後に、静止状態から糸を静かに切った場合に物体 B が斜面をすべりおりに要する時間について考えよう。式⑨より、三角台 A が動ける場合に物体 B が斜面をすべりおりに要する時間は、三角台 A を固定した場合に物体 B が同じ高さからすべりおりる場合に比べて $\boxed{(15)}$ 。

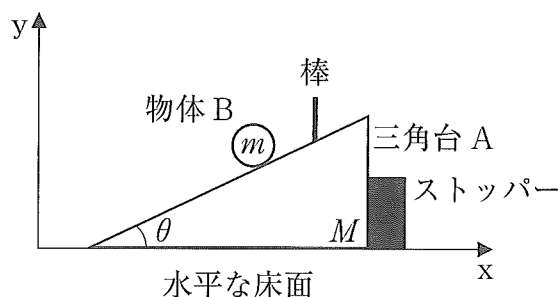


図 2

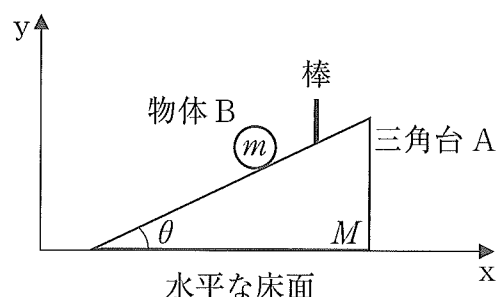


図 3

〔解答群〕

(ア) $\sin \theta$ (イ) $-\sin \theta$ (ウ) $\cos \theta$ (エ) $-\cos \theta$

(オ) $\sin^2 \theta$ (カ) $\cos^2 \theta$ (キ) $\sin \theta \cos \theta$

(ク) $v_x - v_A$ (ケ) $v_A - v_x$ (コ) $v_x + v_A$

(サ) $\frac{m}{M + m \sin^2 \theta}$ (シ) $\frac{M}{M + m \sin^2 \theta}$ (ス) $\frac{M + m}{M + m \sin^2 \theta}$

(セ) 短くなる (ソ) 長くなる (タ) 変わらない

〔Ⅱ〕 次の文の (a) ～ (c) に入れるのに最も適当な式を解答欄に記入しなさい。また、(1) ～ (16) に入れるのに最も適当なものを各問の文末の解答群から選び、その記号をマークしなさい。ただし、同じものを2回以上用いてもよい。なお、(6)*, (12)* については各問の文末の〔解答群*〕から、(7)**, (8)** については各問の文末の〔解答群**〕から最も適当なものを選びなさい。

- (i) 真空中に置いた点電荷がつくる電場(電界)について、真空中におけるクーロンの法則の比例定数を k とし、以下の問いに答えよ。

まず、図1のように xy 平面の原点 O に電気量 $2q$ (ただし、 $q > 0$) をもつ点電荷を置いた場合について考える。このとき、 x 軸上の点 $(x, 0)$ (ただし、 $x > 0$) における電場の強さ E_1 は $E_1 =$ (a) である。また、この点電荷が x 軸上の点 $A\left(\frac{d}{2}, 0\right)$ (ただし、 $d > 0$) につくる電場の強さを E_a 、点 $B(2d, 0)$ につくる電場の強さを E_b とすると、 $\frac{E_b}{E_a} =$ (1) である。

次に、図2のように電気量 q をもつ点電荷を点 $(0, d)$ と点 $(0, -d)$ に固定した場合について考える。以降、それぞれの点電荷を Q_1, Q_2 と呼ぶ。 Q_1 と Q_2 のそれぞれが x 軸上の点 $(x, 0)$ につくる電場の強さは等しく (b) である。一方、 Q_1 と Q_2 のそれぞれが x 軸上につくる電場の向きは異なり、それらの電場が重ね合わさると (2) は強まり、(3) は打ち消し合う。したがって、 Q_1 と Q_2 によって点 $(x, 0)$ に生じた電場を重ね合わせた合成電場の強さ E_2 は $E_2 =$ (b) $\times$ (4) となる。また、点 $A\left(\frac{d}{2}, 0\right)$ に生じる合成電場の強さを E_A 、点 $B(2d, 0)$ に生じる合成電場の強さを E_B とすると、 $\frac{E_B}{E_A} =$ (5) である。

$\frac{E_b}{E_a}$ と $\frac{E_B}{E_A}$ を比べると、 $\frac{E_B}{E_A}$ が1により近く、図2の場合のほうが x に対する電場の変化の割合が小さい。これは2つの点電荷による合成電場である E_2 が、(b) $\times$ (4) のように変化し、特に Q_1 と Q_2 のそれぞれが x 軸上につくる電場の (2) と関係する (4) が、 x 軸上で (6)* こと

が理由の1つである。

x が大きくなるにつれて E_2 は E_1 に近づくので、 E_1 と E_2 の大小関係に注意すれば x 軸上における E_1 と E_2 の変化を表すグラフの概形は (7)** のようになる。

最後に、 Q_1 と Q_2 による電位について考える。無限遠での電位を0とすると、点 $(x, 0)$ での電位 V は $V =$ (c) となる。また、 xy 平面上における等電位線の図は (8)** のように表せる。

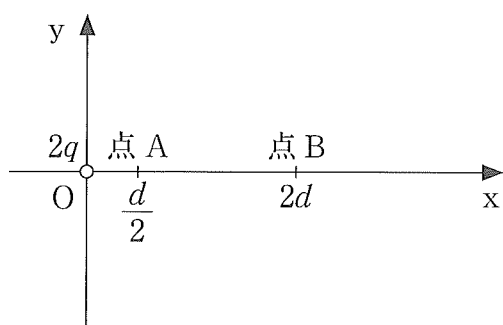


図 1

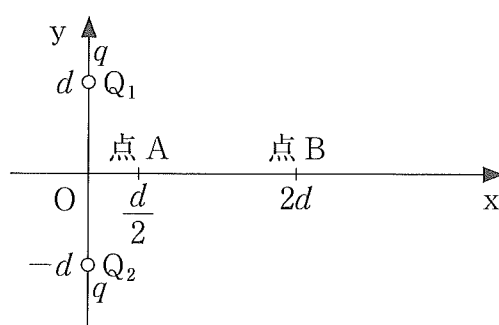


図 2

〔解答群〕

(ア) $\frac{1}{32}$

(イ) $\frac{1}{16}$

(ウ) $\frac{1}{8}$

(エ) $\frac{1}{5}$

(オ) $\frac{1}{4}$

(カ) $\frac{1}{\sqrt{5}}$

(キ) $\frac{1}{2}$

(ク) $\frac{1}{\sqrt{2}}$

(ケ) 1

(コ) $\frac{x}{\sqrt{x^2 + d^2}}$

(サ) $\frac{d}{\sqrt{x^2 + d^2}}$

(シ) $\frac{2x}{\sqrt{x^2 + d^2}}$

(ス) $\frac{2d}{\sqrt{x^2 + d^2}}$

(セ) x 成分

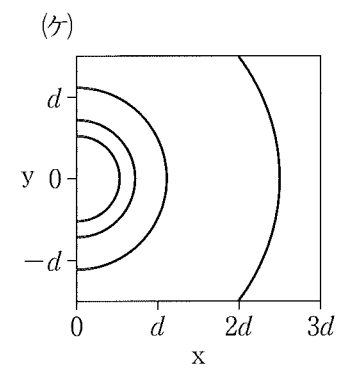
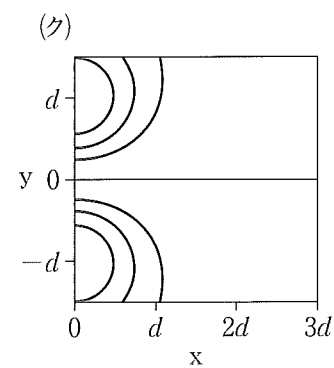
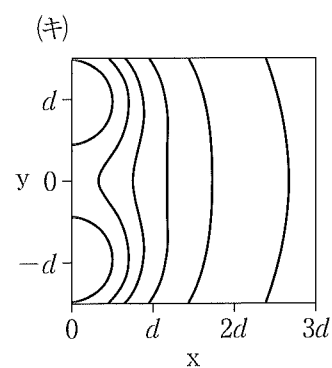
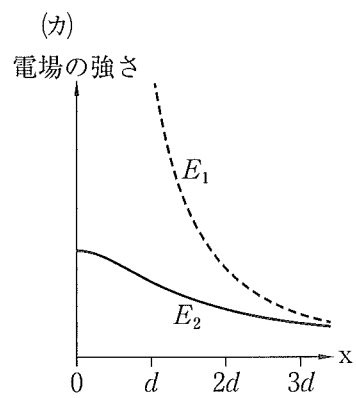
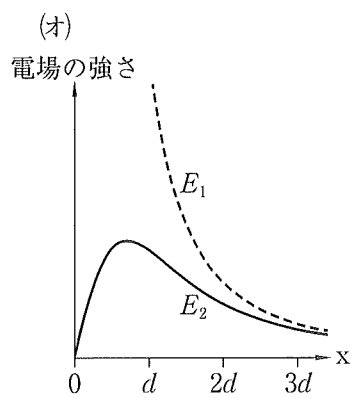
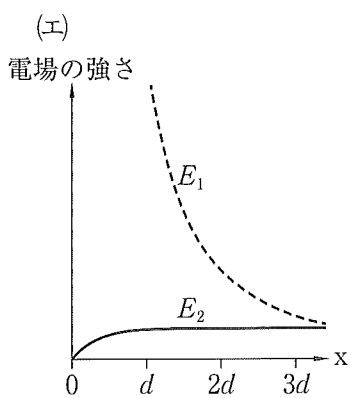
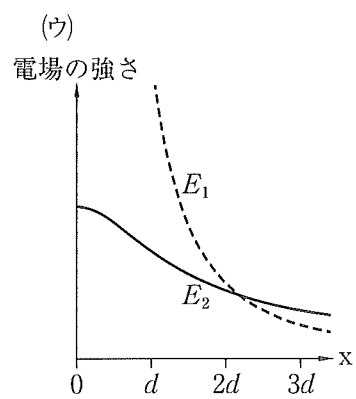
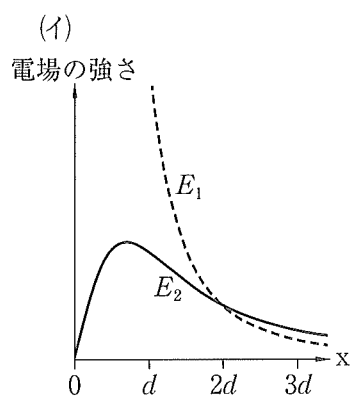
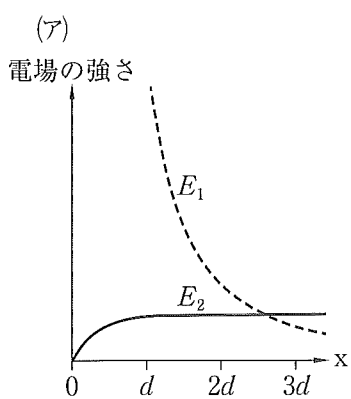
(ソ) y 成分

(解答群*と解答群**は次ページにあります)

〔解答群*〕

- (ア) 一定である
- (イ) 原点から離れるほど減少する
- (ウ) 原点から離れるほど増加する

〔解答群**〕



(ii) ケイ素(Si)の結晶に代表される半導体は、導体と不導体(絶縁体)の間の抵抗率を持つ物質である。ここでは半導体について考えてみよう。

(A) Siは4個の価電子を持つが、Siの結晶に5個の価電子をもつリン(P)をわずかに加えると (9)。一方、Siに価電子が3個のホウ素(B)をわずかに加えると (10)。このような不純物を添加した半導体を、不純物半導体と呼ぶ。

[解答群]

- (ア) 電子がキャリアとなり、抵抗率が小さくなる
- (イ) 正孔(ホール)がキャリアとなり、抵抗率が小さくなる
- (ウ) 電子がキャリアとなり、抵抗率が大きくなる
- (エ) 正孔(ホール)がキャリアとなり、抵抗率が大きくなる

(B) Siの結晶にリンまたはホウ素のいずれかをわずかに加えた試料における、キャリアの電気量の正負や、単位体積当たりのキャリアの数を測定結果から求めることを考える。図3に示すように、直方体試料(幅 w 、高さ h 、長さ L)の各面に垂直に x 軸、 y 軸、 z 軸をとる。また、 $z=0$ と $z=w$ において z 軸と垂直な面をそれぞれ面P、面Qとする。この試料に対して x 軸正の向きに大きさ I の電流を流し、 y 軸正の向きに磁束密度の大きさが B の様な磁場(磁界)を加える。試料中のキャリアは電子か正孔(ホール)のいずれかであるため、キャリア1個あたりの電気量の大きさは電気素量 e に等しい(ただし、 $e > 0$)。キャリアの平均の速さを v とすると、キャリアは磁場から大きさ (11) のローレンツ力を受ける。電流 I が x 軸正の向きに流れることから、ローレンツ力を受けたキャリアは、 (12)* に集まる。その結果、 z 軸に沿って電場が生じる。キャリアはこの電場と磁場から力を受けるが、やがてこれらの力が釣り合うと x 軸に沿って平均の速さ v で直進し始める。このとき、 z 軸に沿って生じた電場の強さを E とすると、

$E = \boxed{(13)}$ という関係が導かれる。ここで、試料中の単位体積当たりのキャリアの数を n とすると、キャリアの平均の速さ v は $v = \boxed{(14)} \times I$ と表せるため、面 P と面 Q の間の電位差 V_H は $V_H = \boxed{(15)} \times I$ となる。ホール効果と呼ばれるこの現象を利用し、 V_H を測定することで n を知ることができる。また、キャリアの電気量の正負によって z 軸に沿って生じる電場の向きが異なるため、面 P と面 Q のどちらの電位が高いかを測定することでキャリアの電気量の正負を決定することもできる。いま面 P の電位が面 Q の電位より高かったとすると、この半導体試料中のキャリアは $\boxed{(16)}$ であることがわかる。

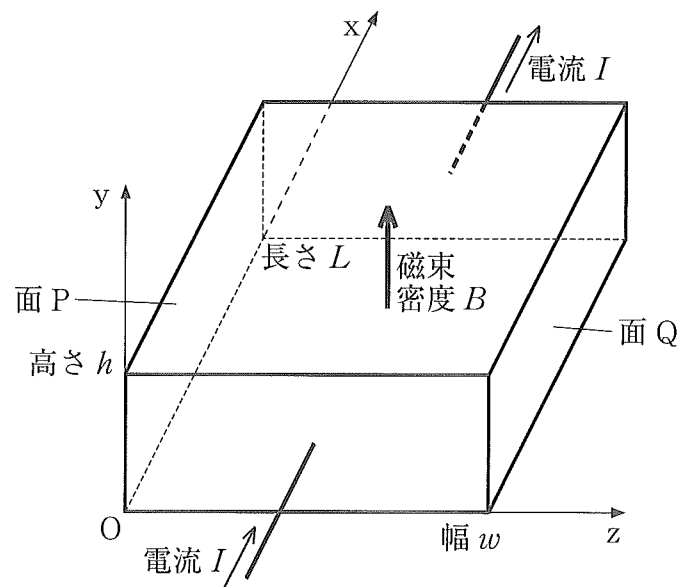


図 3

(解答群と解答群*は次ページにあります)

〔解答群〕

- | | | | |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| (ア) evB | (イ) $\frac{eB}{v}$ | (ウ) vB | (エ) $\frac{1}{enwh}$ |
| (オ) $\frac{1}{enh}$ | (カ) $\frac{1}{enw}$ | (キ) $\frac{B}{enwh}$ | (ク) $\frac{B}{enh}$ |
| (ケ) $\frac{B}{enw}$ | (コ) $\frac{vB}{enwh}$ | (サ) $\frac{vB}{enh}$ | (シ) $\frac{vB}{enw}$ |
| (ス) $\frac{1}{enhB}$ | (セ) $\frac{1}{enwB}$ | (ソ) $\frac{1}{enwhB}$ | (タ) 電子 |
| (チ) 正孔 | | | |

〔解答群*〕

- (ア) キャリアが電子の場合は面 P に, キャリアが正孔の場合は面 Q
- (イ) キャリアが電子の場合は面 Q に, キャリアが正孔の場合は面 P
- (ウ) キャリアの電気量の正負に関わらず面 P
- (エ) キャリアの電気量の正負に関わらず面 Q

〔Ⅲ〕 次の文の (a) ～ (c) に入れるのに最も適当な語句，数を解答欄に記入しなさい。また，(1) ～ (16) に入れるのに最も適当なものを各問の文末の解答群から選び，その記号をマークしなさい。ただし，同じものを2回以上用いてもよい。なお，(12)* については，文末の〔解答群*〕から，最も適当なものを選びなさい。

- (i) 波の伝わり方について以下の設問に答えなさい。図1のように，波面を無数の波源の集まりであるとみなす。波面(AB)の各波源から球面波が出る。これらを素元波と呼び，波の進む前方の素元波に共通に接する面が，次の瞬間の波面(CD)になる。これを (a) の原理という。この原理を用いて波の屈折を説明しよう。

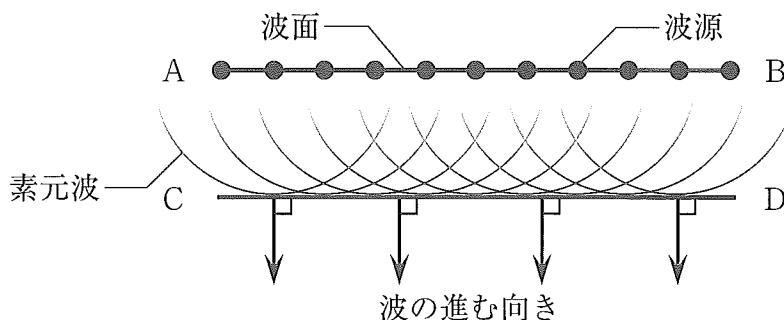


図1 素元波と波面

図2のように媒質1と媒質2が平面の境界で接しており，媒質1中の波の速さを v_1 ，媒質2中の波の速さを v_2 とする。平面波が境界に入射角 i で媒質2に入射する瞬間の波面を AB とする。波面の一端 B が D に達するのにかかる時間が t のとき，BD の長さは (1) となる。この間に，波面の一端 A から出た素元波は A を中心とし，半径が (2) の円(円 O)の周上まで進んでいる。このとき，屈折波の波面は，AD 上の A に近いほうから順々に出た素元波に共通に接する面であるから，D から円 O に引いた接線 DC に相当する。したがって，屈折角を r とすると，次の式が成立する。

$$\begin{aligned} AD \times \text{(3)} &= BD = \text{(1)} , \\ AD \times \text{(4)} &= AC = \text{(2)} 。 \end{aligned}$$

これらより，入射角，屈折角および両媒質の中の波の速さをを用いた屈折の法則は，

$$\frac{\boxed{(3)}}{\boxed{(4)}} = \boxed{(5)} = n_{12}$$

となる。ここで， n_{12} を媒質 1 に対する媒質 2 の相対屈折率という。

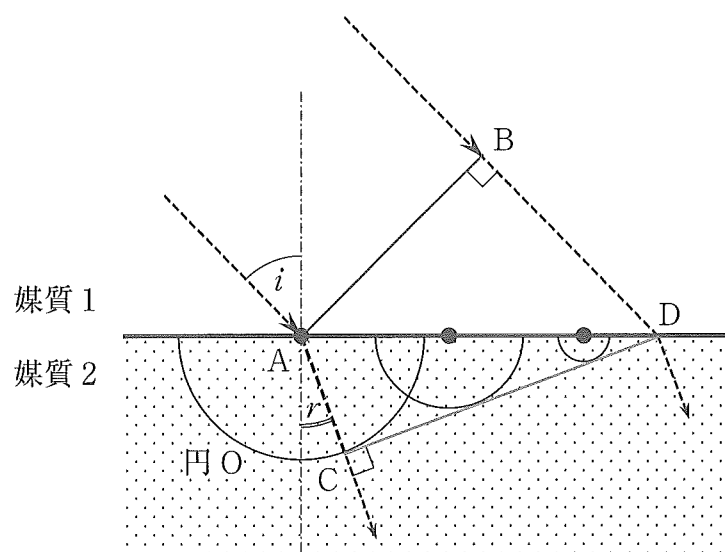


図 2 波の屈折

〔解答群〕

- | | | | |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|
| (ア) v_1 | (イ) v_2 | (ウ) $\frac{v_1}{t}$ | (エ) $\frac{v_2}{t}$ |
| (オ) $\frac{t}{v_1}$ | (カ) $\frac{t}{v_2}$ | (キ) $v_1 t$ | (ク) $v_2 t$ |
| (ケ) $\frac{v_1}{v_2}$ | (コ) $\frac{v_2}{v_1}$ | (サ) $v_1 v_2$ | (シ) $\frac{1}{v_1 v_2}$ |
| (ス) $\sin i$ | (セ) $\sin r$ | (ソ) $\cos i$ | (タ) $\cos r$ |

- (ii) シャボン玉や水面上の油膜などの薄膜は、さまざまな色に色づいて見える。
 これは、光の干渉によって生じる現象である。ここでは、波長 380 nm ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$) から 770 nm の光を可視光線とし、真空中の光の速さを c とする。

- (A) 図3のように単色光が媒質1から厚さ d の媒質2に垂直に入射する。媒質1と媒質2の境界面をPとし、媒質2と媒質3の境界面をQとする。境界面Pで反射した光①と境界面Qで反射した光②が媒質1において弱め合う条件を求めよう。これはカメラのレンズなどの反射光を減らすための反射防止膜の原理となる。媒質1、媒質2および媒質3における光の速さは、それぞれ v_1 、 v_2 および v_3 である。単色光の振動数を f とすると、真空中の波長は (6) である。光が屈折率の大きい媒質から入射し、屈折率の小さな媒質との境界面で反射する場合、自由端での反射に相当する。一方、屈折率の小さな媒質から入射し、屈折率の大きな媒質との境界面で反射する場合、固定端での反射に相当する。

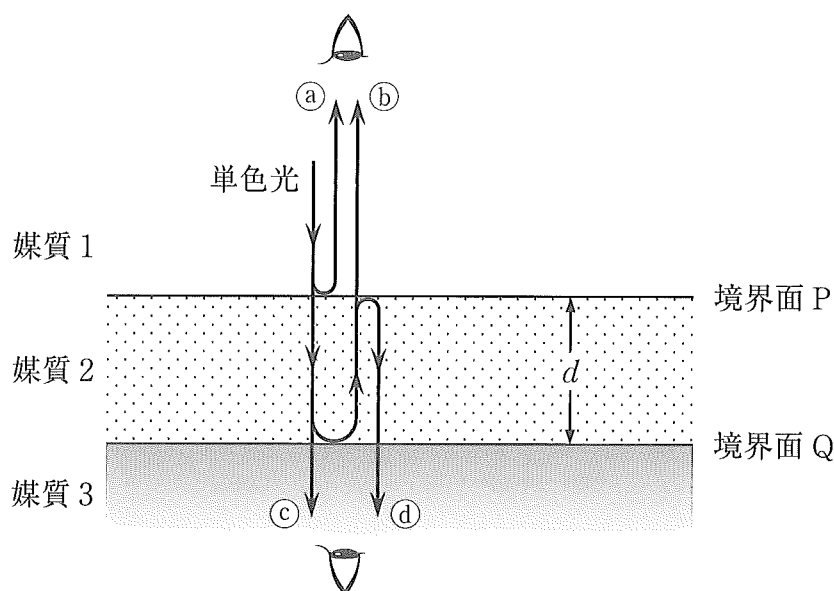


図3 薄膜における光の干渉

各媒質の光の速さは $v_1 > v_2 > v_3$ の関係があるとする。光が境界面Pで反射するとき、光の位相は (7)。境界面Qで反射するとき、光の位相

は (8)。また、境界面 P や境界面 Q を透過するとき、光の位相は (9)。境界面 P で反射した光㉔と、境界面 Q で反射した光㉕の光路差(経路の光学距離の差)は (10) であるから、媒質 1 においてそれらが弱め合う条件は、 m ($m = 0, 1, 2, \dots$)を用いると、

$$\text{(10)} = \text{(11)} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad \dots\dots\text{①}$$

となる。ここで、媒質 2 が反射防止膜としてはたらくための媒質 2 の厚みを式①を用いて求めよう。媒質 1 は絶対屈折率 1.00 の空気とし、媒質 2 を絶対屈折率 1.35 のフッ化マグネシウム(MgF_2)とする。媒質 3 を絶対屈折率 1.50 のガラスとしたとき、真空中の波長 540 nm の光に対する反射防止膜(媒質 2)の最小の厚みを有効数字 3 桁で求めると (b) [nm]となる。この条件のもとでは、媒質 2 から媒質 3 へ反射せずに透過した光㉖と、境界面 Q と境界面 P で 1 回ずつ反射して媒質 3 へ透過した光㉗の位相のずれが (12)*。

[解答群]

- | | | | |
|---|---|---|---|
| (ア) cf | (イ) $\frac{f}{c}$ | (ウ) $\frac{c}{f}$ | (エ) $2d$ |
| (オ) $2cd$ | (カ) $2v_1d$ | (キ) $2v_2d$ | (ク) $\frac{2v_1d}{c}$ |
| (ケ) $\frac{2v_2d}{c}$ | (コ) $\frac{2cd}{v_1}$ | (サ) $\frac{2cd}{v_2}$ | (シ) $m\frac{c}{f}$ |
| (ス) $m\frac{v_1}{f}$ | (セ) $m\frac{v_2}{f}$ | (ソ) $m\frac{f}{c}$ | (タ) $m\frac{f}{v_1}$ |
| (チ) $m\frac{f}{v_2}$ | (ツ) $\left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{c}{f}$ | (テ) $\left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{v_1}{f}$ | (ト) $\left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{v_2}{f}$ |
| (ナ) $\left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{f}{c}$ | (ニ) $\left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{f}{v_1}$ | (ノ) $\left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{f}{v_2}$ | |
| (ネ) 変化しない (ハ) π だけ変化する | | | |

[解答群*]

- | | |
|---------------------------------|--------------------------------|
| (ア) ないため強め合っている | (イ) $\frac{\pi}{2}$ のため強め合っている |
| (ウ) $\frac{3\pi}{4}$ のため弱め合っている | (エ) π のため弱め合っている |

(B) 図4のように振動数 f の単色光が、媒質1から厚さ d の媒質2に向けて角度 i で入射すると屈折角 r で媒質2中を進んだ。媒質1、媒質2および媒質3における光の速さは、それぞれ v_1 、 v_2 および v_3 である。各媒質の光の速さは $v_1 > v_2$ と $v_2 < v_3$ の関係がある。境界面Qで反射した光と境界面Pで反射した光の媒質1における干渉を考える。境界面Qで反射する光の位相は (13)。Aから観測点Fにいたる光学距離($AC + CE + ED + DF$)と、BからFにいたる光学距離($BD + DF$)の差が光路差となる。ACとBDの光学距離は同じであるから、Dの境界面Qに対する対称点D'を考えると、光路差は (14) である。したがって、媒質1においてこれらが強め合う条件は、 m ($m = 0, 1, 2, \dots$)を用いると、

$$\text{span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">(14)} = \text{span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">(15)} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad \dots\dots \text{span style="border: 1px solid black; padding: 0 5px;">(2)}$$

となる。ここで、式②を用いて強め合う光の波長を求めてみよう。媒質1を絶対屈折率1.00の空気とし、媒質2を厚みが350 nm、絶対屈折率が $\sqrt{2}$ のガラスとする。媒質3は絶対屈折率1.30の水とする。光が入射角 $i = 45^\circ$ で境界面Pに入射したとき、強め合う可視光の波長を有効数字3桁で求めると (c) [nm]となる。必要であれば、 $\sqrt{2} = 1.414$ 、 $\sqrt{3} = 1.732$ を用いなさい。単色光の代わりに白色光を用いて入射角を 45° から大きくしていくと強め合う光の色は、(c) [nm]の色から (16) 変化する。

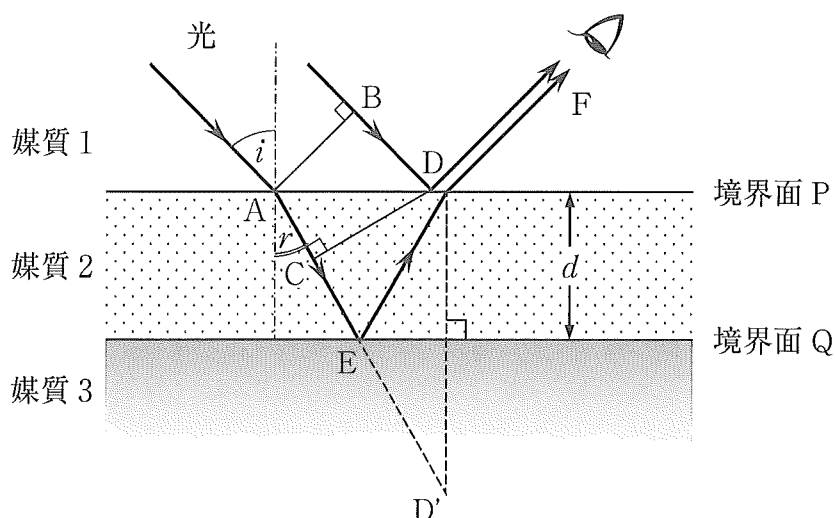


図4 薄膜に斜めに入射した光の干渉

〔解答群〕

- | | | | |
|--|--|--|--|
| (ア) $2cd \cos r$ | (イ) $2v_1 d \cos r$ | (ウ) $2v_2 d \cos r$ | (エ) $\frac{2v_1 d \cos r}{c}$ |
| (オ) $\frac{2v_2 d \cos r}{c}$ | (カ) $\frac{2cd \cos r}{v_1}$ | (キ) $\frac{2cd \cos r}{v_2}$ | (ク) $2cd \sin r$ |
| (ケ) $2v_1 d \sin r$ | (コ) $2v_2 d \sin r$ | (サ) $\frac{2v_1 d \sin r}{c}$ | (シ) $\frac{2v_2 d \sin r}{c}$ |
| (ス) $\frac{2cd \sin r}{v_1}$ | (セ) $\frac{2cd \sin r}{v_2}$ | (ソ) $m \frac{c}{f}$ | (タ) $m \frac{v_1}{f}$ |
| (チ) $m \frac{v_2}{f}$ | (ツ) $m \frac{f}{c}$ | (テ) $m \frac{f}{v_1}$ | (ト) $m \frac{f}{v_2}$ |
| (ナ) $\left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{c}{f}$ | (ニ) $\left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{v_1}{f}$ | (ハ) $\left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{v_2}{f}$ | (ヘ) $\left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{f}{c}$ |
| (ノ) $\left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{f}{v_1}$ | (ハ) $\left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{f}{v_2}$ | | |
| (ヒ) 変化しない | (フ) π だけ変化する | | |
| (ヘ) 橙, 赤の順に | (ホ) 緑, 青の順に | | |

(以上)