解答はすべて別紙の解答用紙に記入しなさい

〔Ⅰ〕 図1のような水平面からの傾き角が30° の斜面がある．斜面上の水平線 AB の上に点 P をとり，点 P から AB に垂直で斜面に沿う下向きの直線上に点 Q をとる．線分 AP，線分 PQ の長さを a とする．斜面上を運動する小物体について以下の問〔A〕，〔B〕に答えよ．ただし，小物体は常に斜面上を滑りながら運動しているとし，重力加速度の大きさを g とする．また，問〔B〕（3）〜（5）以外では斜面はなめらかであるとする．

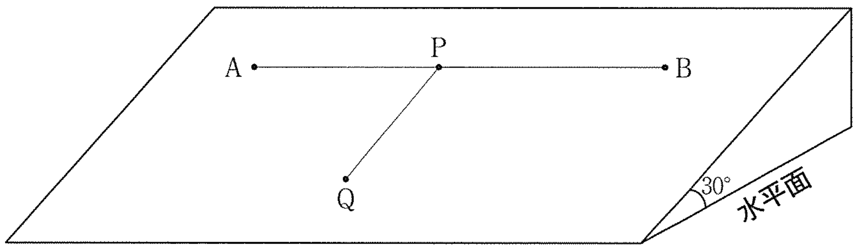

図１

〔A〕 以下の問（1），（2）に答えよ．

（1） 点 Q から点 P に向かって質量 m の小物体を，斜面に沿ってある初速度で投げ出したところ，P を折り返し点として再び Q に戻ってきた．この初速度の大きさはいくらか．

（2） 点 A から P に向かって質量 m の小物体を，斜面に沿ってある初速度で投げ出したところ，その後，小物体は Q を通過した．この初速度の大きさはいくらか．また，小物体が Q を通過するときの速さを求めよ．

〔B〕 つぎに，図２のように長さ a の軽い糸の一端に質量 m の小物体をとりつけ，糸の他端を点Ｐに固定した．糸をたるまないようにして点Ａにある小物体から静かに手を放すと，小物体は斜面上で半径 a の円弧を描いて動き始めた．その円弧上に点Ｒと点Ｓをとって，$\angle \mathrm{QPR}=30^\circ$ および $\angle \mathrm{SPQ}=60^\circ$ とする．以下の問（１）～（５）に答えよ．

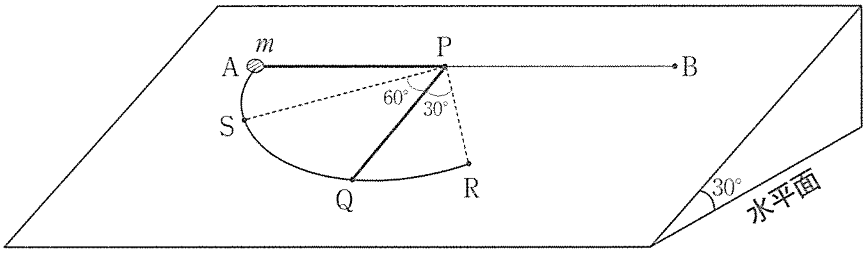

図２

（１） 小物体がＲを通過するとき，その速さはいくらか．

（２） 小物体がＲを通過するとき，糸の張力の大きさはいくらか．

（３） 斜面と小物体の間に摩擦力がはたらく場合を考える．点Ａで静かに手を放すと小物体は滑り始めた．斜面を滑りながら小物体は円弧AQRを描いて運動しＲで止まった．斜面と小物体の間の動摩擦係数はいくらか．

（４） 糸をたるまないようにして，小物体を点Ｓにおいて静かに手を放すと，小物体はＳに静止したままであった．問（３）も考慮すると，斜面と小物体の間の静止摩擦係数 μ はどの範囲になければならないか

（５） 問（４）の状態でさらに，長さ a の別の軽い糸の一端に質量 $\dfrac{3}{2}m$ の小物体をとりつけ糸の他端を点Ｐに固定した．この小物体を点Ａにおいて静かに手を放すと円弧を描いて滑り始め，点Ｓに静止していた質量 m の小物体に衝突した．衝突後，質量 m の小物体は円弧SQRを描いて運動し再び点Ｒで止まった．両物体の間の反発係数はいくらか．ただし斜面と小物体の間の動摩擦係数は２つの小物体に対して同じであったとする．

〔Ⅱ〕図1のように，紙面を xy 平面として，$x > 0$ の領域にのみ，一様で定常な磁束密度 B の磁場が紙面の裏から表に向かって垂直につらぬいている．磁場の向き（紙面の裏から表）を z 軸の正の向きとして，以下の問〔A〕，〔B〕に答えよ．

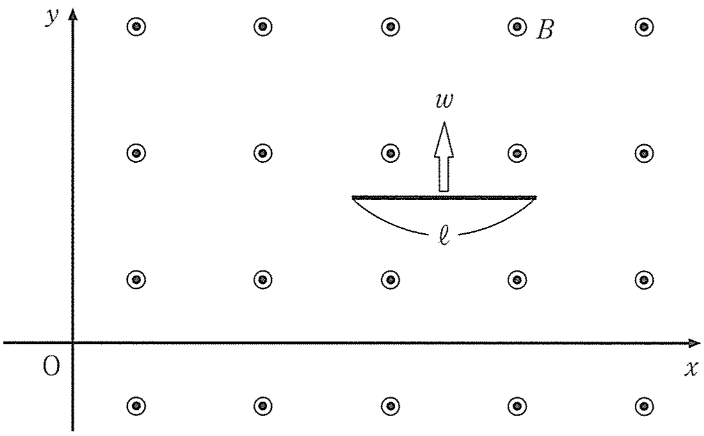

図1

〔A〕 以下の問（1）～（4）に答えよ．ただし，（1），（2）については，文章を読んで空欄ア～カに適する数式または語句を解答欄に記入せよ．なお，解答欄に選択肢があるイでは，選択肢の中から適当なものを一つ選び，丸で囲め．

（1） 磁場のある領域（$x > 0$）に，x 軸と平行な長さ ℓ の導体棒を用意する．この導体棒を y 軸の正の向きに一定の速さ w で移動させると，棒の両端に大きさ［ア］の電位差が生じる．
この現象を，原点Oに静止した観測者は次のように理解することができる．
導体内の自由電子（質量 m，負の電気量 $-e$）の速度の y 成分は，平均値 w をもつ．よって，導体内の自由電子は，平均として，x 軸の［イ］の向きに，大きさ［ウ］のローレンツ力を受けて移動し始め，導体棒の両端間に電荷の偏りを生じる．この電荷の偏りがつくる静電場が自由電子におよぼす力とローレンツ力とがつり合うと自由電子の移動が止まり，電荷の偏りと電位差の大きさが定まる．

（2） 磁場のある領域を荷電粒子P（質量 m，正の電気量 q）が運動している．磁場の向き（z 軸の正の向き）と速さ v をもつPの速度とがなす角を θ とすると，Pが磁場から受ける力の大きさは［エ］で与えられ，力の向きは，［オ］と［カ］の両方に垂直で，［オ］の向きから［カ］の向きへと右ねじを回したときにねじが進む向きと一致する．

（３） ローレンツ力のみを受ける荷電粒子の速さは一定となる．その理由を書け．

（４） 問（２），（３）より，一様で定常な磁場と直交する初速度をもつＰは等速円運動する．Ｐの初速度の大きさを v_0 として，円運動の半径と周期とを，m，q，v_0，B のうち必要なものを用いて，それぞれ表せ．

〔B〕 十分に長い可動式の壁を x 軸上に置いた．問〔A〕(4) で求めた円軌道の半径を R として，磁場のない領域（$x<0$）の xy 平面上の直線 $y=R$ に沿って，荷電粒子 P（質量 m，正の電気量 q）を x 軸の正の向きに速さ v_0 で発射した（図２）．磁場領域に P が侵入すると同時に，x 軸上に置いた壁を y 軸の正の向きに一定の速さ w で移動させると，図３のように，壁が $y=\frac{R}{2}$ まで移動したとき，壁に P が衝突した．原点 O に静止した観測者から見たとき，P にはローレンツ力のみがはたらくとして，以下の問 (1)〜(4) に答えよ．

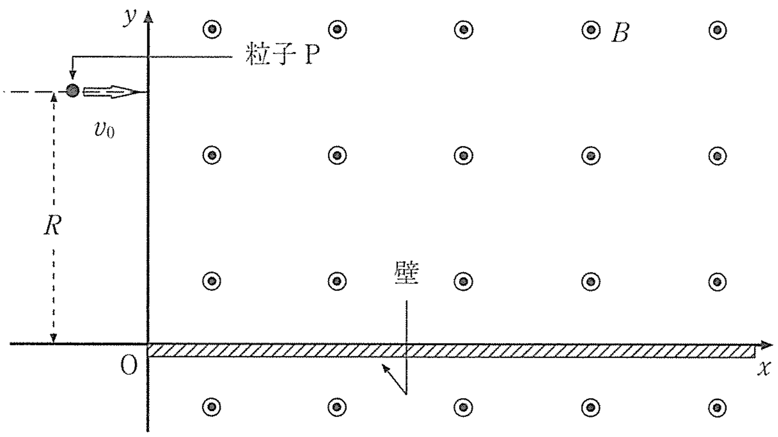

図２

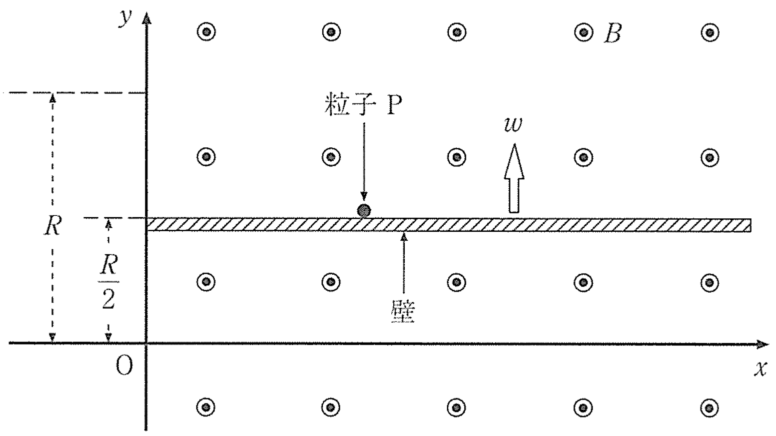

図３

(1) 壁と P の衝突直前における，壁に対する P の相対速度を求めよ．

磁場のある領域に入射した後の P の運動を，壁とともに動く別の観測者 W の立場で考察する．

（2） 問〔A〕（3）より，原点に静止した観測者から見たPの運動エネルギーは一定である．一方，Wから見たPの運動エネルギーは変化する．磁場のある領域にPが侵入した直後から壁に衝突する直前までの間に，この運動エネルギーがいくら変化するか求めよ．

問（2）の結果は，Wから見たPには，原点に静止した観測者が観測するローレンツ力とは異なる力もはたらくことを示す．そこで，導体棒の有無によらない次の仮説を立ててみよう．

仮説 「磁場中を運動する観測者Wは，導体棒の有無によらず，新たな電場（誘導電場）を観測する．この誘導電場は，x 軸と平行で壁とともに動く仮想的な導体棒を想像することで知ることができる．問〔A〕（1）で述べたように，仮想的な導体棒の内部には電荷の偏りが生じる．誘導電場の強さは，その電荷の偏りがつくる静電場の強さに等しい．また，誘導電場の向きは，静電場の向きと逆向きである．」

この仮説にしたがうと，問〔A〕（1）で考えた導体棒に生じた電荷の偏りを，導体棒とともに動く観測者の立場でも理解することができる．この観測者から見た導体棒内部の自由電子にはローレンツ力がはたらかないが，誘導電場がその代わりを果たすからである．

（3） Wが観測する誘導電場の強さと向きを求めよ．

（4） 問（3）の結果を用いて磁場のある領域にPが侵入した直後から，壁に衝突するまでに，この誘導電場がPになす仕事を求めよ．

〔Ⅲ〕以下の問〔A〕,〔B〕に答えよ.

〔A〕 図1のように一様な厚さの媒質1があり，その下に媒質2がある．媒質1の上は真空になっている．真空中から光を斜めに入射させ，右側で反射光を観察する．真空と媒質1の境界面を境界面a，媒質1と2の境界面を境界面bと呼ぶことにする．図1は入射光を含んで境界面に垂直な平面内での光の経路を表す．経路1に沿った光は点Aで媒質1に入り，媒質1の中を進んだのち，点Bで一部が反射し，境界面a上の点Cで再び真空中に出てくる．経路2に沿った光は点Cで反射する．真空中での経路1および2が境界面aとなす角をα，媒質1中での経路1が境界面aとなす角をβとする（図1参照）．経路1に沿った光の一部はさらに媒質2中を進むが，このとき経路1が境界面bとなす角をγとする．ただし，$\alpha<\beta$，$\alpha<\gamma$であるとし，真空中での光の振動数をf，波長をλとする．（図には$\beta>\gamma$の場合が描かれているが，以下では$\beta<\gamma$の場合も考える．）

点Aから経路2におろした垂線の足をA′とすると，点AとA′における波の位相は同位相である．また，線分ACの長さをℓとする．以下の問（1）～（7）に答えよ．

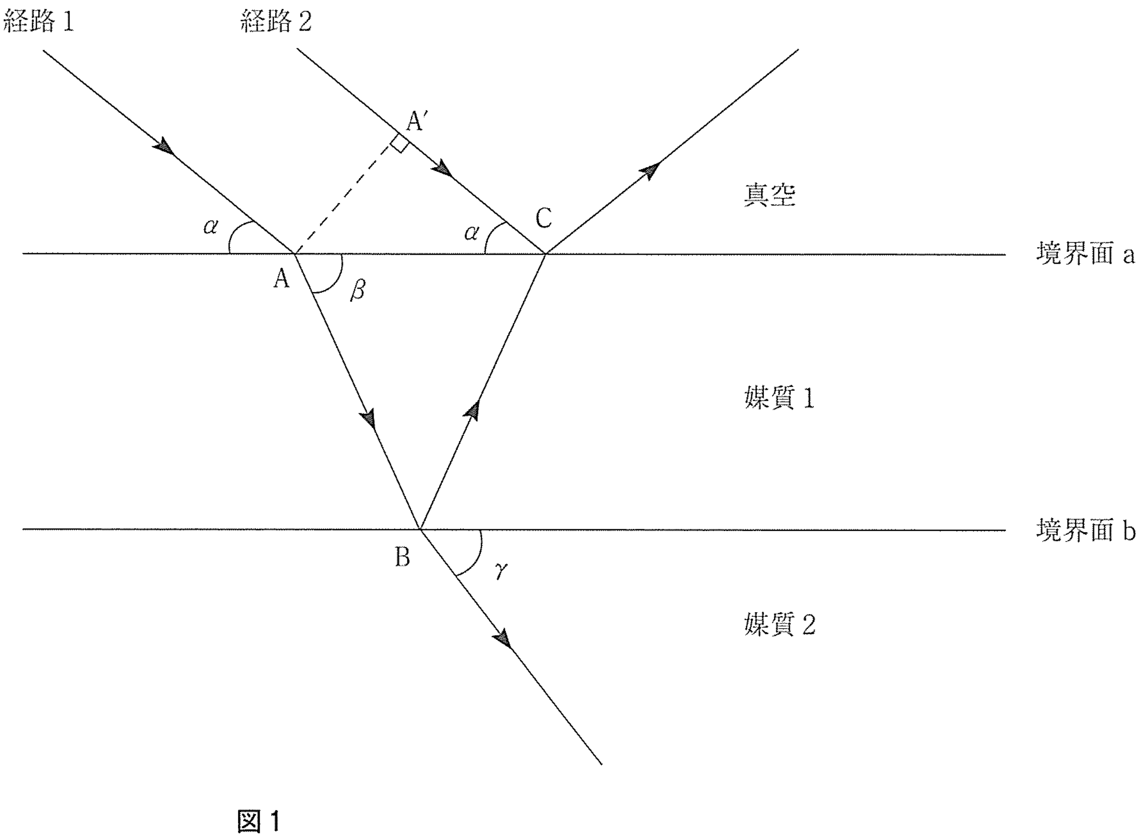

図1

（1） 光が経路2に沿って A′ から C まで進むのにかかる時間はいくらか.

光が経路1に沿って，問（1）と同じ時間かかって点 A から経路 AB 上のある点 C′ まで進んだ.

（2） 経路 AC′ の長さはいくらか.

（3） 媒質1中での光の振動数と波長はいくらか.

（4） 媒質2中での光の振動数と波長はいくらか.

経路1に沿って進んで点 B で反射した光の一部と，経路2に沿った光が点 C で出あい，位相差に依存して強めあったり弱めあったりする．以下ではこの条件について考える． 2つの光の位相差をもたらす経路差は，C′B + BC である.

ここでつぎのことに注意しよう．屈折率の大きい媒質側から入射した光が屈折率の小さい媒質との境界面で反射するときの位相は変化しない．一方，屈折率の小さい媒質側から入射した光が屈折率の大きい媒質との境界面で反射するとき，その位相は半波長分だけ変化する.

（5） 2つの光が点 C において強めあうために経路差 C′B + BC が満たすべき条件は

$\beta < \gamma$ の場合は C′B + BC = $\boxed{\text{ア}}$

$\beta > \gamma$ の場合は C′B + BC = $\boxed{\text{イ}}$

である.

空欄ア，イに適する数式を解答欄に記入せよ．ただし，0または正の整数を表す変数として m を用いよ.

次に，図2のように媒質1から真空に向かって経路3に沿って進む光が点Dにおいて反射する場合を考え，境界面aと媒質1中の経路3のなす角をθとする．

（6） θの値を$\dfrac{\pi}{2}$から徐々に小さくしていったとき，ある角度θ_0以下では，点Dにおいて光が全反射を起こした．$\cos\theta_0$の値をα，β，γ，f，λのうち適切なものを用いて表せ．

さらに，図2のように媒質2から媒質1に向かって経路4に沿って進む光が，点Eにおいて入射する場合を考え，境界面bと媒質2中の経路4のなす角をϕとする．

（7） ϕの値を$\dfrac{\pi}{2}$から徐々に小さくしていったとき，ある角度ϕ_0以下では，光が点Eを通過して媒質1内を進み，境界面a上の点Fにおいて全反射を起こした．$\cos\phi_0$の値をα，β，γ，f，λのうち適切なものを用いて表せ．ただし，$\beta > \gamma$とする．

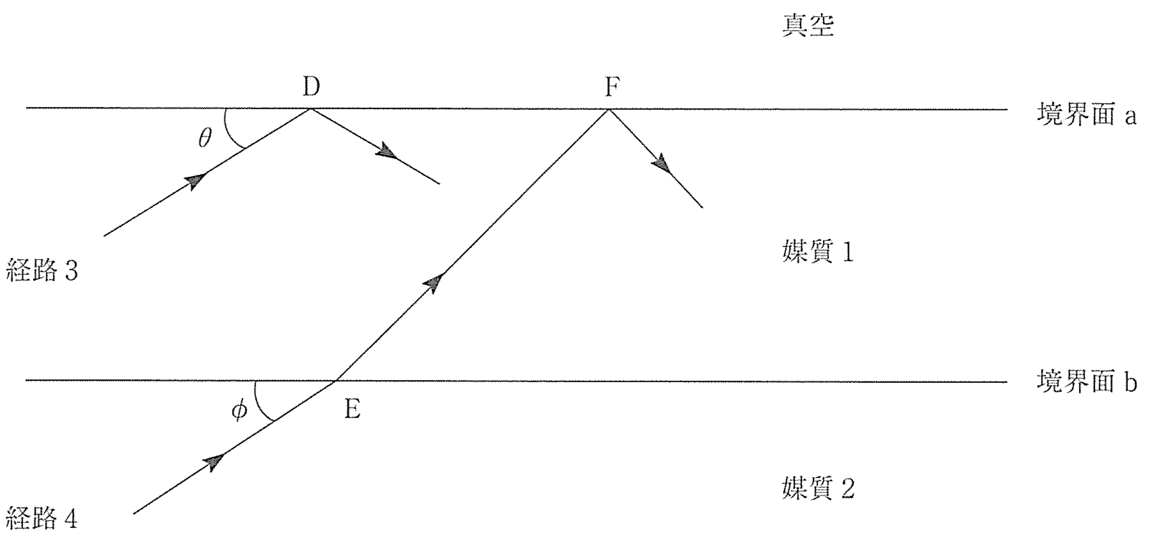

図2

〔B〕 図3のように時刻ゼロで原点Oから出発した音源が一定の振動数の音波を出しながらx軸に沿って正の方向に一定の速さで動き，ある時刻に点O′に達した．この時刻において，空気の最も密な部分を連ねてできる波面が図の円で表されている．また，時刻ゼロで音源の出した音波は空気の最も密な状態から始まり，音源が点O′に達したときも最も密な状態であるとする．ただし，風はないものとし，音波の速さを360 m/sとする．また，図の点線の間隔を1 mとする．以下の問（1）〜（4）に答えよ．

（1） 図3の円CおよびC′は，それぞれ音源がどの位置にあったときにつくり出された波面か．x座標のみの値を答えよ．

（2） もし仮にこの音源が，原点Oに静止したまま，同じ振動数の音波を出したとすると，点Aに静止している観測者が聞く音の波長と振動数はいくらか．

（3） 図3のように音源が一定の速さで動いている場合，点AおよびBに静止している観測者が聞く音の振動数はそれぞれいくらか．ただし，音源は点AとBの間にあるとする．

（4） 音源の速さはいくらか．

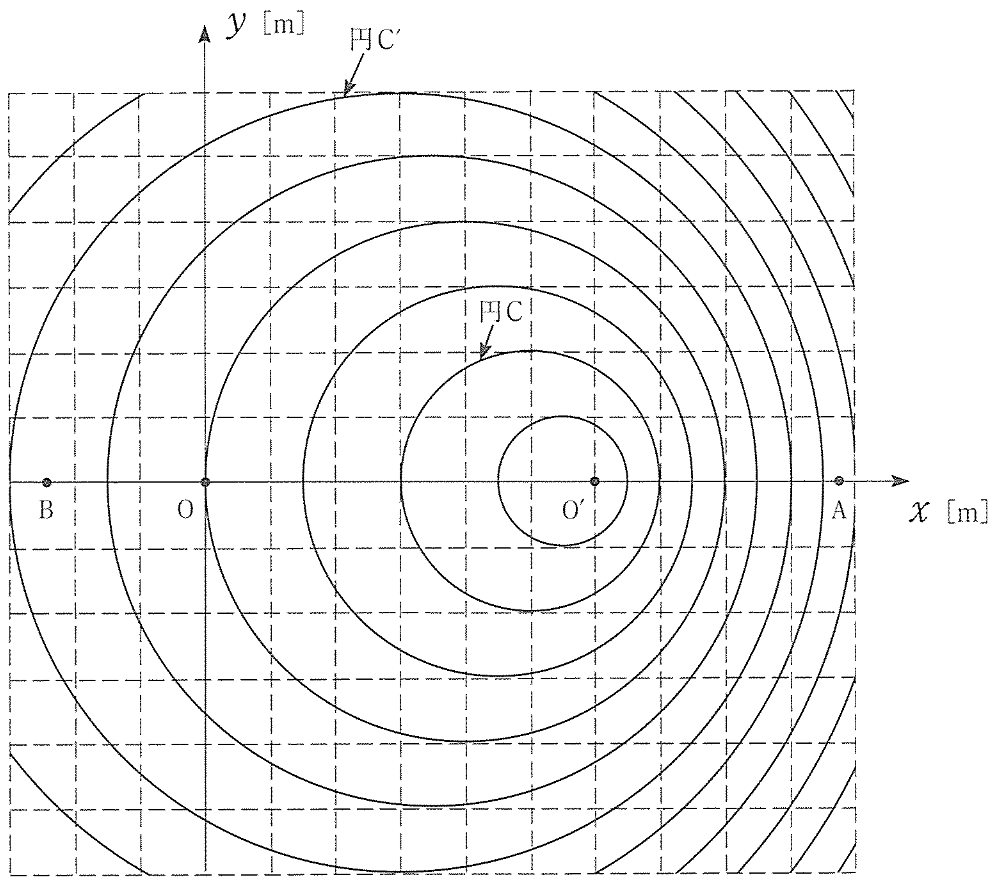

図3