# 2011 年 度 入 学 試 験 問 題

# 物　　　理

（試験時間　13：15～14：45　90 分）

1．この問題は，入学願書提出時に選択した科目の問題です。科目名を確認のうえ，解答してください。

2．解答用紙は，記述解答用紙とマーク解答用紙の 2 種類がありますので注意してください。

3．解答は，必ず解答欄に記入してください。なお，解答欄以外に書くと無効となりますので注意してください。

4．解答は，ＨＢの鉛筆またはシャープペンシルを使用し，訂正する場合は，プラスチック製の消しゴムを使用してください。特に，マーク解答用紙には鉛筆のあとや消しくずを残さないでください。また，折りまげたり，汚したりしないでください。記述解答用紙の下敷きにマーク解答用紙を使用することは絶対にさけてください。

5．解答用紙には，受験番号と氏名を必ず記入してください。

6．マーク解答用紙の受験番号および受験番号のマーク記入は，電算処理上非常に重要なので，誤記のないよう特に注意してください。

I　次の文章の空欄にあてはまる数式または文章を解答群の中から選び，マークシートの所定の場所にマークしなさい。(34点)

電場（電界）や磁場（磁界）から力を受けている荷電粒子の運動を考える。3つの長方形の領域Ⅰ，Ⅱ，Ⅲが図1のように並んでいる。領域Ⅰの幅を $d$ とする。領域Ⅰでは磁場は0で，紙面内で図の右または左方向（長方形の底辺に平行）に均一な電場 $E$ をかけることができる。電場が右向きの場合に $E$ を正とする。領域ⅡとⅢでは電場は0で，紙面に垂直に均一で一定な磁束密度 $B$ の磁場がかかっている。記号 $\otimes$ は $B$ が紙面の表から裏に向いていることを表している。

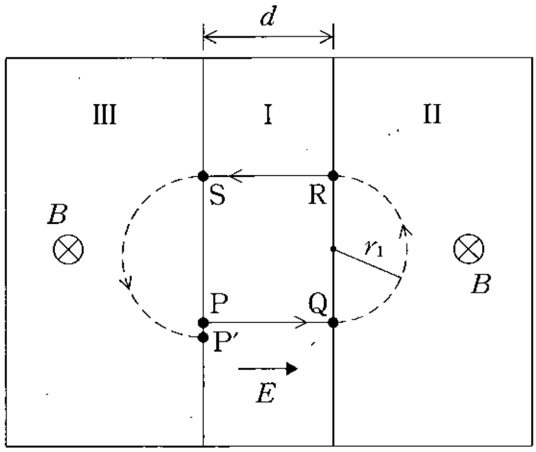


図1

質量 $m$，正の電荷 $q\,(q>0)$ を持つ粒子の運動を考える。ただし，粒子の質量は十分小さく，重力の影響を受けないものとする。また，粒子の運動は図1のように紙面内のみで行われるものとする。粒子は初めは点Pで静止していたとする。時刻 $t=0$ 以降に領域Ⅰで右向きの電場 $E=E_1\,(E_1>0)$ をかけ続けると，粒子はこの電場で加速され，時刻 $t_1$ に点Qに達し，速さは $v_1$ になる。点Pにおける粒子の電気力による位置エネルギー $U$ を0とおく。点Qに達した時の粒子の位置エネルギー $U_1$ の値は $\boxed{\quad(1)\quad}$ と表される。点Qでの粒子の運動エネルギーを $T_1$ とすると，$T_1$ と $U_1$ はエネルギーの保存により，$\boxed{\quad(2)\quad}$ という関係を満たす。この式から粒子の

点Qでの速さが求まり，$v_1 =$ $\boxed{(3)}$ となる。

粒子が領域IIに入ると，磁場からローレンツ力を受け，その大きさは $F =$ $\boxed{(4)}$ である。領域IIで粒子は等速円運動を行う。その回転半径を $r_1$ とすると，向心加速度の大きさ $a$ は，$a =$ $\boxed{(5)}$ である。ローレンツ力が向心力の役割を果たすことを用いて $r_1$ が求まり，$r_1 =$ $\boxed{(6)}$ となる。粒子が領域II内を運動してRに達する時刻を $t_2$ とする。粒子が半周してQからRに達するのに要する時間を $s_1$ とする。粒子は速さ $v_1$ で距離 $\pi r_1$ を走るので，$s_1 =$ $\boxed{(7)}$ となる。粒子が領域IIの中を半周する間にローレンツ力が行う仕事の値は $\boxed{(8)}$ である。

次に，粒子が点Rに達した時刻 $t_2$ 以降に領域Iで左向きの電場 $E = -E_1 (E_1 > 0)$ をかけ続ける。粒子はこの電場でさらに加速され，点Sに達する。その時刻を $t_3$，粒子の速さを $v_2$ とする。点Sで粒子が持つ運動エネルギー $T_2$ は $\boxed{(9)}$ に等しい。粒子は領域IIIでローレンツ力を受けて等速円運動を行う。粒子が領域III内を半周してSからP′に達するのに要する時間を $s_2$ とする。粒子が領域Iを通過する時間が領域IIや領域IIIを通過する時間に比べて十分短く無視できるとすると，粒子が1周してP′に戻るまでの時間 $s$ は $s_1 + s_2$ で与えられ，$s =$ $\boxed{(10)}$ である。この時間 $s$ は磁束密度 $B$ と比電荷 $q/m$ によって決まり，粒子の速さ $v_1$，$v_2$ によらないという著しい特徴がある。

さらに，上と同じ装置で質量 $m$，負の電荷 $-q\,(q > 0)$ を持つ粒子を加速させることを考える。粒子が点Pから動き出して，上の場合と同じ軌道を運動するためには，電場の向きと磁場の向きを上の場合と比べて，$\boxed{(11)}$ にすればよい。

2008年にノーベル物理学賞を共同受賞した小林・益川両氏は素粒子のミクロな世界における新しい理論を提唱し，その予言が見事に実験で検証された。素粒子の実験は主に粒子加速器という大型の実験装置を使って行われる。この問題で扱った荷電粒子の電場による加速と磁場による回転運動が加速器に応用されている。

[解　答　群]

(1)に対するもの

(a) $-\frac{qE_1}{d}$　(b) $qdE_1$　(c) $-qdE_1$

(d) $qE_1$　(e) $\frac{qE_1}{d}$　(f) $-qE_1$

(2)に対するもの

(a) $T_1 - qU_1 = 0$　(b) $T_1 + 2U_1 = 0$　(c) $T_1 + qU_1 = 0$

(d) $2T_1 + U_1 = 0$　(e) $T_1 - U_1 = 0$　(f) $T_1 + U_1 = 0$

(3)に対するもの

(a) $\sqrt{\frac{2qdE_1}{m}}$　(b) $\sqrt{\frac{qdE_1}{m}}$　(c) $\sqrt{\frac{2qE_1}{m}}$

(d) $\sqrt{qdE_1 m}$　(e) $\sqrt{2qdE_1 m}$　(f) $\sqrt{\frac{2qE_1}{dm}}$

(4)に対するもの

(a) $\frac{qB}{v_1}$　(b) $v_1 B$　(c) $qv_1^2 B$

(d) $qB$　(e) $qv_1 B$　(f) $q\frac{v_1}{r_1}B$

(5)に対するもの

(a) $\frac{r_1}{v_1^2}$　(b) $\frac{v_1^2}{r_1}$　(c) $r_1 v_1^2$

(d) $\frac{v_1}{r_1^2}$　(e) $\frac{v_1}{r_1}$　(f) $r_1^2 v_1$

(6)に対するもの

(a) $\frac{qB}{mv_1^2}$　(b) $\frac{qB}{mv_1}$　(c) $\frac{m}{qB}$

(d) $\frac{mv_1}{qB}$　(e) $\frac{mv_1}{B}$　(f) $\frac{v_1}{qB}$

(7)に対するもの

(a) $\dfrac{B}{\pi m}$　(b) $\dfrac{qB}{m}$　(c) $\dfrac{m}{qB}$

(d) $\dfrac{qB}{\pi m}$　(e) $\dfrac{\pi m}{B}$　(f) $\dfrac{\pi m}{qB}$

(8)に対するもの

(a) $\pi r_1 v_1 B$　(b) $\pi r_1 q v_1 B$　(c) $\pi v_1^2$

(d) $0$　(e) $\dfrac{1}{2}\pi r_1 m v_1^2$　(f) $\pi r_1 q B$

(9)に対するもの

(a) $qdE_1$　(b) $2qdE_1$　(c) $\dfrac{2qE_1}{d}$

(d) $qE_1$　(e) $\dfrac{qE_1}{d}$　(f) $2dE_1$

(10)に対するもの

(a) $\dfrac{2\pi m}{qB}$　(b) $\dfrac{m}{qB}$　(c) $\dfrac{2\pi qB}{m}$

(d) $\dfrac{qB}{2\pi m}$　(e) $\dfrac{qB}{m}$　(f) $\dfrac{m}{2\pi qB}$

(11)に対するもの

(a) 電場は逆向き，磁場は同じ向き　(b) 電場は同じ向き，磁場も同じ向き

(c) 電場は逆向き，磁場も逆向き　(d) 電場は同じ向き，磁場は逆向き

II　次の文章の空欄にあてはまる数式または数値をそれぞれ記述解答用紙の所定の場所に記入しなさい。(33点)

台車に乗った太郎くんがボールのやりとりをする。やりとり後に太郎くんと台車はどのような運動をするのか，A，B，Cの3通りを考えてみよう。台車と太郎くんはどの場合においても，初めは共に静止しているとする。台車と太郎くんは一体と考えてよく，台車と太郎くんの質量の総和を $M$ とする。ボールは大きさの無視できる質量 $m$ の物体として取り扱う。また，台車と地面の間の摩擦は無視し，水平右向きを力，速度，および変位の正の向きとする。

A．左から速度 $v(v>0)$ で水平に向かってきたボールが，同じ姿勢を保ったままの太郎くんの頭に当たって跳ね返り，水平逆向き（左向き）に飛んでいった場合を考えよう（図1）。太郎くんとボールとの衝突は弾性衝突とみなす。衝突後にボールの速度は $-v'(v'>0)$ となり，台車の速度は $V'(V'>0)$ になったとする。反発係数（はねかえり係数）は $v$，$v'$，$V'$ を用いて $\boxed{(1)}$ と表すことができ，衝突が弾性衝突であることから，この数値は $\boxed{(2)}$ となっているはずである。また運動量保存の法則により，$m$，$v$，$v'$，$M$，$V'$ の関係式を $\boxed{(3)}$ と書くことができる。よって衝突後の台車の速度 $V'$ は，$m$，$v$，$M$ を用いて $\boxed{(4)}$ と表される。この衝突では力学的エネルギーが保存されている。

B．次に，左から速度 $v(v>0)$ で水平に向かってきたボールを太郎くんがキャッチした場合を考えよう（図2）。キャッチした後の台車の速度は，$m$，$v$，$M$ を用いて $\boxed{(5)}$ と表される。このとき力学的エネルギーの総和はキャッチ前に比べて減少しており，その減少量は $m$，$v$，$M$ を用いて $\boxed{(6)}$ と表される。この減少したエネルギーは熱や変形，音などのエネルギーに変わっていると考えられる。

C．最後に，太郎くんが水平左向きにボールを投げた場合を考えよう（図3）。投球後，地上で静止している人から見てボールは速度 $-v(v>0)$ で運動した。太郎くんはボールを構えてから手放すまでの短い時間 $\Delta t$ の間に，ボールに一定の力を水

平左向きに加えていたと考えよう。この力を $-F(F>0)$ とすると，力積 $-F\Delta t$ は，$m$，$v$ を用いて $\boxed{\quad (7) \quad}$ と書ける。太郎くんがボールに力を加えているとき，太郎くんもまたボールから右向きの力を受けている。この力を $F'(F'>0)$ とすると，$F$ と $F'$ との関係は $\boxed{\quad (8) \quad}$ と表される。投球後の台車の速度を $V''(V''>0)$ とすると，太郎くんと台車がボールから受ける力積 $F'\Delta t$ は，$M$，$V''$ を用いて $\boxed{\quad (9) \quad}$ と書ける。(7)，(8)，(9)より，投球前後で運動量が保存されていることがわかる。このことを用いると投球後の台車の速度 $V''$ は，$m$，$v$，$M$ を用いて $\boxed{\quad (10) \quad}$ と表される。一方，投球後の力学的エネルギーの総和を求めてみると，投球前の値に比べて増えていることがわかる。この増加分を $m$，$v$，$M$ を用いて表すと $\boxed{\quad (11) \quad}$ となる。この場合投球は，ともに静止していた質量 $m$ と $M$ の物体の「分裂」と考えられる。上の考察によって，分裂を起こすためには，力学的エネルギーを増やす必要があることが示された。この力学的エネルギーに追加された分は，太郎くんの体内のエネルギーが変換されたものである。体内のエネルギーまでを考慮に入れると，エネルギー全体は保存されているはずである。

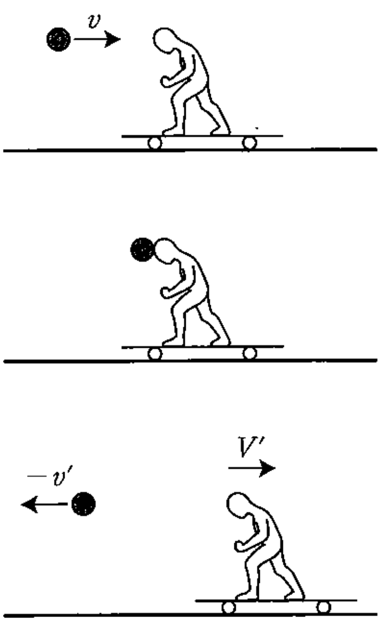

図 1

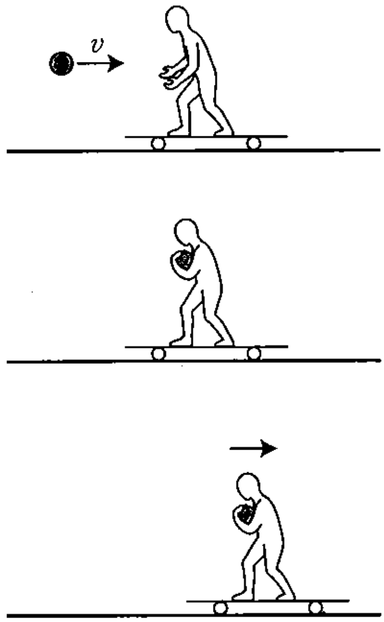

図 2

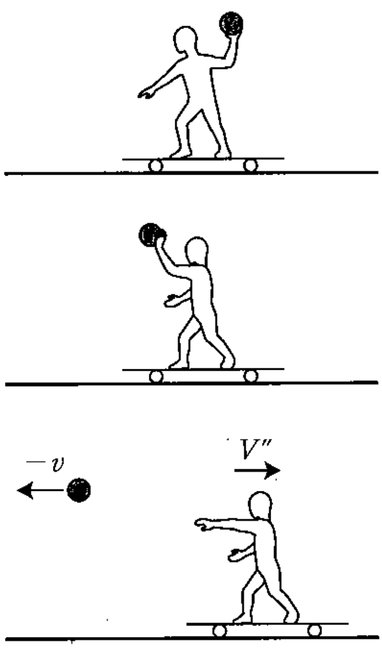

図 3

III　次の文章の空欄にあてはまる数式，数値または語句をそれぞれ記述解答用紙の所定の場所に記入しなさい。(33 点)

図 1 のように台車の両端に 2 つのスピーカー A，B が向い合せに置いてある。天井からは小型のマイク M がつるされている。マイクは固定されているが，台車は図の左右方向に動くことができる。台車の中心の位置を $x$[m] で表し，台車の中心がマイクの位置にある場合を $x = 0$，右向きを $x$ の正の向きとする。2 つのスピーカーからは周波数 $f$[Hz] の正弦波型の音が出ている。マイクとスピーカーの距離は音の波長に比べて十分長いとする。

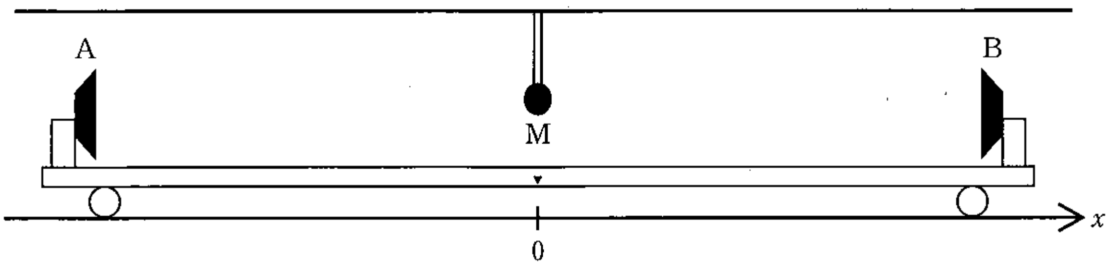


図 1

最初に，台車の位置を少しずつ変えながら，台車を停止させた状態でマイクの位置での音の強さを記録した。すると図 2 のように，台車の位置を変えると，音の強弱が長さ $a$[m] ごとに周期的に変化することがわかった。これは 2 つの音波が $\boxed{\quad(1)\quad}$ し，2 つのスピーカーからの距離の差が波長の整数倍に等しいときに波が強めあうことが原因である。この考えをもとに，音の波長 $\lambda$[m] を $a$ で表すと $\lambda = \boxed{\quad(2)\quad}$ となる。また，$f = 6000$ Hz で実験したところ，$a = 2.8 \times 10^{-2}$ m であった。これより音速 $c$[m/s] を有効数字 2 桁で求めると，$c = \boxed{\quad(3)\quad}$ [m/s] となる。

次に，台車を一定の速度 $v$[m/s] ($v > 0$) で動かすと，マイクの位置での音の強さが時間に対して周期的に変化することがわかった。この現象について波介くんと奈美子さんは別々の立場から考察してみた。

波介くんは，台車が速度 $v$ で動く状況を，台車が動かずにマイクが速度 $-v$ で動く状況に置き換えて，マイクが図 2 の音の強い場所と弱い場所を交互に通過すること

がこの現象の原因と考えた。台車が距離 $a$ 進むのにかかる時間 $T$ [s] が音の強弱の変化の周期になるので，$a$ および $T$ を用いて速度 $v$ を表すと $v =$ $\boxed{\quad (4) \quad}$ となる。この考えをもとに，$f$，$c$，$v$ を用いて $T$ を表すと，$T =$ $\boxed{\quad (5) \quad}$ となる。しかし，実際には台車の方が動いているため，この考え方がどこまで正しいかを検証する必要がある。

奈美子さんは，音源の運動により観測する音の周波数が変化する $\boxed{\quad (6) \quad}$ という現象と関係があると考えてみた。台車が速度 $v$ で運動する場合，スピーカーAからマイクに届く音の周波数 $f_A$ [Hz]，スピーカーBから届く音の周波数 $f_B$ [Hz] をそれぞれ $v$，$c$，$f$ で表すと，$f_A =$ $\boxed{\quad (7) \quad}$，$f_B =$ $\boxed{\quad (8) \quad}$ となり，それぞれの周波数に違いが出るはずである。さらに奈美子さんは，わずかに周波数が異なる音が同時に鳴っている場合，周期的に音の強弱が変わる $\boxed{\quad (9) \quad}$ という現象が起きること，その周期 $T'$ [s] は $(f_A - f_B)T' = 1$ という関係を満たすことを思い出した。この考え方をもとに，(7)，(8)の計算結果を用いて $T'$ を $v$，$c$，$f$ で表すと $T' =$ $\boxed{\quad (10) \quad}$ となることがわかった。

波介くんは，奈美子さんが求めた周期 $T'$ と，自分が求めた周期 $T$ を比較してみた。その結果，台車が動く速さが $\boxed{\quad (11) \quad}$ に比べて十分遅ければ，$T$ は $T'$ とほとんど一致することに気づいた。

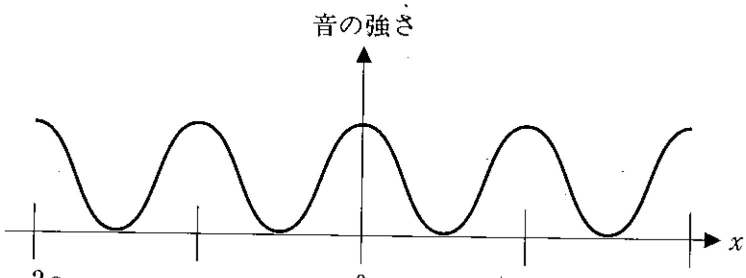


図2