(2019年度)

物　理　問　題　(90分)

(この問題冊子は11ページ，３問である。)

受験についての注意

1. 試験監督者の指示があるまで，問題冊子を開いてはならない。
2. 試験開始前に，試験監督者から指示があったら，解答用紙の右上の番号が自分の受験番号と一致することを確認し，所定の欄に氏名を記入すること。次に，解答用紙の右側のミシン目にそって，きれいに折り曲げてから，受験番号と氏名が書かれた切片を切り離し，机上に置くこと。
3. 試験監督者から試験開始の指示があったら，この問題冊子が，上に記したページ数どおりそろっていることを確かめること。
4. 筆記具は，**ＨかＦかＨＢの黒鉛筆またはシャープペンシル**に限る。万年筆・ボールペンなどを使用してはならない。時計に組み込まれたアラーム機能，計算機能，辞書機能を使用してはならない。また，スマートウォッチなどのウェアラブル端末を使用してはならない。
5. **解答は，解答用紙の各問の選択肢の中から正解と思うものを選んで，そのマーク欄をぬりつぶすこと。**
6. マークをするとき，マーク欄からはみ出したり，白い部分を残したり，文字や番号，○や×をつけたりしてはならない。また，マーク箇所以外の部分には何も書いてはならない。
7. 訂正する場合は，消しゴムでていねいに消すこと。**消しくずはきれいに取り除くこと。**
8. 解答用紙を折り曲げたり，破ったりしてはならない。
9. 試験監督者の許可なく試験時間中に退場してはならない。
10. 解答用紙を持ち帰ってはならない。
11. 問題冊子，計算用紙は必ず持ち帰ること。

$\boxed{1}$ 質量 m の小さなおもりと，質量 $2m$ で高さ h の台を使って次の実験を行う。台の斜面PQが水平な床となす角は30°であり，おもりと台，および，台と床の間はなめらかである。また，重力加速度は g とする。

最初に，図1のようにおもりを斜面の上に置いてそっと手を離すと同時に台を左向きの加速度 α で運動させると，おもりは斜面上に静止したまま斜面と一体となって加速度 α で運動した。これを台から見ると，おもりには $m\alpha$ の慣性力が右方向に働いてつりあいの状態にある。これから，$\alpha =$〔 1 〕$\times g$ であり，おもりが斜面から受けている垂直抗力は〔 2 〕$\times mg$ であることがわかる。

次に，図2のように静止した台の上端Pにそっとおもりを置くと，おもりが斜面上を滑ると同時に台は床の上を滑った。おもりが斜面上を運動しているとき，台は右方向に加速度〔 3 〕$\times g$ で運動し，台から見たおもりの加速度は斜面を下る方向に〔 4 〕$\times g$ である。また，台が床から受ける垂直抗力は〔 5 〕$\times mg$ であり，おもりが斜面から受ける垂直抗力は〔 6 〕$\times mg$ である。

最後に，図3のように静止した台の上端Pにそっとおもりを置くと同時に，台を右方向に $F = \sqrt{3}mg$ の力で引いた。すると，おもりが斜面上を滑ると同時に台は床の上を滑った。おもりが斜面上を運動しているとき，台は右方向に加速度〔 7 〕$\times g$ で運動し，台から見たおもりの加速度は斜面を下る方向に〔 8 〕$\times g$ である。また，台が床から受ける垂直抗力は〔 9 〕$\times mg$ であり，おもりが斜面から受ける垂直抗力は〔 10 〕$\times mg$ である。この実験で，おもりは動き始めてから〔 11 〕$\times \sqrt{\dfrac{h}{g}}$ の時間で斜面の下端Qに到達する。そのとき，台の床に対する速さは〔 12 〕$\times \sqrt{gh}$，台から見たおもりの速さは〔 13 〕$\times \sqrt{gh}$ になっている。また，台が動いた距離は〔 14 〕$\times h$，床に対して横方向におもりが動いた距離は〔 15 〕$\times h$ になっており，台を引いた力 F が行った仕事は〔 16 〕$\times mgh$ である。F を少しずつ大きくして同じ実験を繰り返すことにより，F が〔 17 〕$\times mg$ を超えると，台が動き始めると同時におもりは斜面から離れることがわかる。

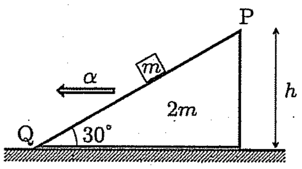


図 1

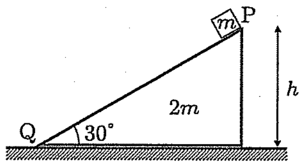


図 2

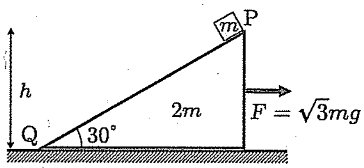


図 3

〔 1 〕～〔 17 〕の選択肢

a) $\frac{1}{2}$	b) $\frac{3}{2}$	c) $\frac{5}{2}$	d) $\frac{1}{3}$	e) $\frac{2}{3}$	f) $\frac{4}{3}$
g) $\frac{5}{3}$	h) $\frac{7}{3}$	i) $\frac{8}{3}$	j) $\sqrt{2}$	k) $\frac{\sqrt{2}}{3}$	l) $\sqrt{3}$
m) $2\sqrt{3}$	n) $\frac{\sqrt{3}}{3}$	o) $\frac{2\sqrt{3}}{3}$	p) $\frac{4\sqrt{3}}{3}$	q) $\frac{5\sqrt{3}}{3}$	r) $\frac{\sqrt{3}}{6}$
s) $\frac{5\sqrt{3}}{6}$	t) $\frac{\sqrt{3}}{9}$	u) $\frac{2\sqrt{3}}{9}$	v) $\frac{4\sqrt{3}}{9}$	w) $\frac{5\sqrt{3}}{9}$	x) $\sqrt{6}$
y) $\frac{\sqrt{6}}{3}$	z) $\frac{2\sqrt{6}}{3}$				

2 図1のように，磁束密度 B の一様な磁場が紙面の裏から表方向に存在する領域IとIIにおいて，質量 m，電荷 $q\ (>0)$ の荷電粒子を使った実験を行う。領域IとIIは十分に広く，その間の向かい合った面には荷電粒子が自由に通過できる薄い極板IとIIがある。極板につながれた電源は，荷電粒子が領域IとIIの間を通過する方向によって極板間の電場の方向を切り替えて，極板間では荷電粒子を電圧 V で常に加速するようになっている。2枚の極板の間隔は十分狭く，荷電粒子がその間隔を通過するのに要する時間は無視してよい。また，実験装置全体は真空中にあり，重力の影響は無視できる。

最初に図1のように，磁束密度 B を一定に保ったまま荷電粒子を加速してみよう。時刻 $t=0$ に図1の点 P_0 にそっと置かれた荷電粒子は電圧 V で加速され，速さ〔 1 〕×〔 2 〕で点 P_1 から領域IIに入る。領域IIの中で荷電粒子は半径〔 3 〕×〔 4 〕の半円を〔 5 〕×〔 6 〕の時間をかけて描き，点 Q_1 で領域IIを出る。その後，荷電粒子は領域IとIIの間で再び電圧 V で加速され，速さ〔 7 〕×〔 2 〕で点 Q_2 から領域Iに入る。その後，荷電粒子は領域Iの中で半径〔 8 〕×〔 4 〕の半円を〔 9 〕×〔 6 〕の時間をかけて描き，点 P_2 で領域Iを出る。この運動を続けて荷電粒子が n 回（n は偶数）加速された後では，領域I内で点 Q_n から点 P_n まで運動する速さは〔 10 〕×〔 2 〕であり，その運動の軌跡は半径〔 11 〕×〔 4 〕の半円である。このように磁束密度 B を一定に保ったまま荷電粒子を加速するとき，極板IのIIに対する電位を時刻 t の関数として表している図は〔 12 〕である。

次に図2のように，荷電粒子の加速に伴って磁束密度 B を変化させることにより，荷電粒子が一定の半径 R の円周を描きながら運動するようにしてみよう。まず，時刻 $t=0$ に点Pにそっと置かれた荷電粒子は電圧 V で加速され，点P′で領域IIに入る。このとき，磁束密度 B を〔 13 〕×〔 14 〕にしておくことで，荷電粒子は領域IIの中で〔 15 〕×〔 16 〕の時間をかけて半径 R の半円を描き，点Qで領域IIを出る。その後，領域IとIIの間で再び電圧 V で加速されてから点Q′で領域Iに入る。このとき，磁束密度 B を

〔　17　〕×〔　14　〕に変化させておくことにより，荷電粒子は領域Iの中で〔　18　〕×〔　16　〕の時間をかけて半径 R の半円を描き，点Pで領域Iを出る。この運動を続けて荷電粒子が n 回（n は偶数）加速された後では，磁束密度 B を〔　19　〕×〔　14　〕にしておくことにより，荷電粒子は領域I内で点Q′から点Pまで半径 R の半円を〔　20　〕×〔　16　〕の時間をかけて描くことになる。このように磁束密度 B を変化させながら一定の半径 R の円周を描くように荷電粒子を加速するとき，極板IのIIに対する電位を時刻 t の関数として表している図は〔　21　〕である。

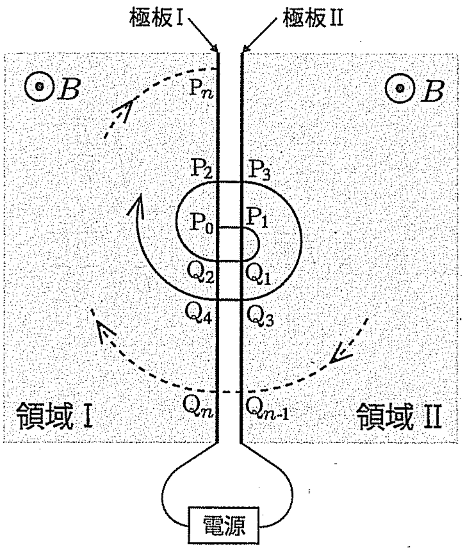


図1

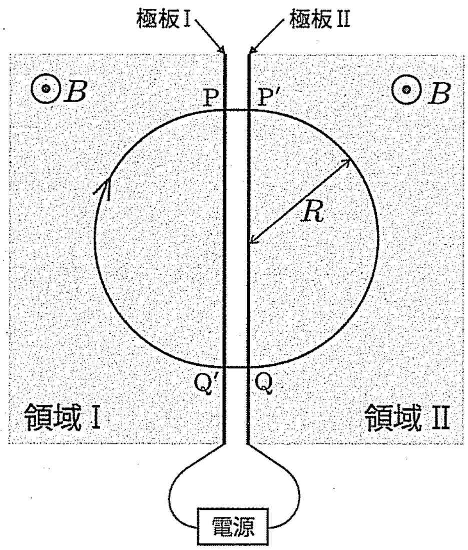


図2

〔 1 〕, 〔 3 〕, 〔 5 〕, 〔 7 〕～〔 9 〕, 〔 13 〕, 〔 15 〕, 〔 17 〕, 〔 18 〕の選択肢

a) 1 b) 2 c) 4 d) $\dfrac{1}{2}$ e) $\dfrac{1}{4}$ f) $\sqrt{2}$

g) $2\sqrt{2}$ h) $\dfrac{1}{\sqrt{2}}$ i) $\dfrac{1}{2\sqrt{2}}$ j) π k) 2π l) $\dfrac{\pi}{2}$

m) $\sqrt{2}\pi$ n) $\dfrac{\pi}{\sqrt{2}}$

〔 2 〕, 〔 4 〕, 〔 6 〕の選択肢

a) $\dfrac{m}{qV}$ b) $\sqrt{\dfrac{m}{qV}}$ c) $\dfrac{qV}{m}$ d) $\sqrt{\dfrac{qV}{m}}$

e) $\dfrac{m}{qB}$ f) $\sqrt{\dfrac{m}{qB}}$ g) $\dfrac{qB}{m}$ h) $\sqrt{\dfrac{qB}{m}}$

i) $B\sqrt{\dfrac{q}{mV}}$ j) $\dfrac{1}{B}\sqrt{\dfrac{q}{mV}}$ k) $B\sqrt{\dfrac{mV}{q}}$ l) $\dfrac{1}{B}\sqrt{\dfrac{mV}{q}}$

〔 10 〕, 〔 11 〕, 〔 19 〕, 〔 20 〕の選択肢

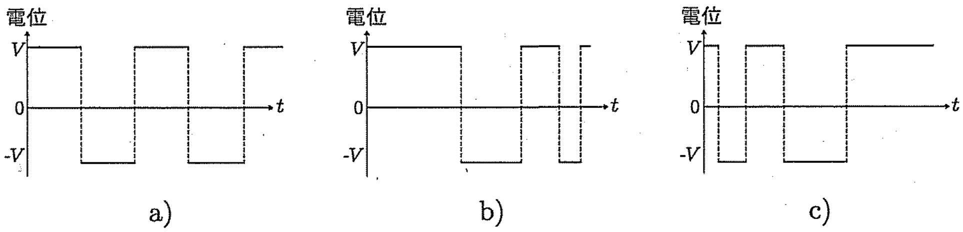
a) n b) $2n$ c) $\dfrac{n}{2}$ d) $\sqrt{n}$ e) $\sqrt{2n}$ f) $\sqrt{\dfrac{n}{2}}$

g) $\dfrac{1}{n}$ h) $\dfrac{2}{n}$ i) $\dfrac{1}{2n}$ j) $\dfrac{1}{\sqrt{n}}$ k) $\dfrac{1}{\sqrt{2n}}$ l) $\sqrt{\dfrac{2}{n}}$

m) $n\pi$ n) $2n\pi$ o) $\dfrac{n\pi}{2}$ p) $\sqrt{n}\pi$ q) $\sqrt{2n}\pi$ r) $\sqrt{\dfrac{n}{2}}\pi$

s) $\dfrac{\pi}{n}$ t) $\dfrac{2\pi}{n}$ u) $\dfrac{\pi}{2n}$ v) $\dfrac{\pi}{\sqrt{n}}$ w) $\dfrac{\pi}{\sqrt{2n}}$ x) $\sqrt{\dfrac{2}{n}}\pi$

〔　12　〕,〔　21　〕の選択肢



〔　14　〕,〔　16　〕の選択肢

a) $R\sqrt{\dfrac{qV}{m}}$　b) $\dfrac{1}{R}\sqrt{\dfrac{qV}{m}}$　c) $R\sqrt{\dfrac{m}{qV}}$　d) $\dfrac{1}{R}\sqrt{\dfrac{m}{qV}}$

e) $R\sqrt{\dfrac{mV}{q}}$　f) $\dfrac{1}{R}\sqrt{\dfrac{mV}{q}}$　g) $R\sqrt{\dfrac{q}{mV}}$　h) $\dfrac{1}{R}\sqrt{\dfrac{q}{mV}}$

3 図1のように，水平面上に置かれた高さ $4l$ のシリンダーがある。シリンダーの中には高さ $3l$ のところに小さなストッパーがあり，その上になめらかに動くことのできる軽くて薄いピストンが静止している。シリンダーとピストンで囲まれた空間には単原子分子理想気体が1モル封入されており，シリンダー内の小さな熱交換器で加熱や冷却が可能である。シリンダーとピストンは断熱材でできており，気体定数を R とする。また，必要であれば，a と b の絶対値が共に1より十分小さいとき，$(1+a)(1+b) \fallingdotseq 1+a+b$，としてよい。

図1の状態ではシリンダー内の気体の圧力は外気圧 p_0 に等しく，温度は T_0 であり，この状態をAとする。

1. まず，気体を状態Aに保ったまま，ピストン上にシリンダーの上端まで水を注いだ（図2）。この状態で熱交換器を使って気体をゆっくりと加熱すると，温度が $2T_0$ になったところでピストンが上昇を始めた。この瞬間の状態をBとすると，状態Bでの気体の圧力は〔　1　〕$\times p_0$ である。また，状態変化A→Bで気体が吸収した熱量は〔　2　〕$\times RT_0$ であり，これは気体の内部エネルギーの変化に等しい。

2. 状態Bから熱交換器を使ってピストンをゆっくりと上昇させると，ピストン上の水がシリンダー上部から少しずつ外部へ流れ出た。ピストンが l だけ上昇し，水が全てシリンダーの外に流れ出た状態をCとすると，状態Cでの気体の圧力は〔　3　〕$\times p_0$，温度は〔　4　〕$\times T_0$ になっている。この状態変化B→Cで気体が外部に対して行った仕事は，外気が受け取った仕事〔　5　〕$\times RT_0$ と，水が位置エネルギーとして受け取った〔　6　〕$\times RT_0$ の和である。また，状態変化B→Cでの気体の内部エネルギーは〔　7　〕$\times RT_0$ だけ減少しているので，全体として気体は(〔　7　〕−〔　5　〕−〔　6　〕) $\times RT_0$ だけの熱量を熱交換器に放出したことがわかる。

3. 状態Cから熱交換器でゆっくりと気体を冷却して状態Aに戻した。この状態変化C→Aで気体が受け取った仕事は〔　8　〕$\times RT_0$ であり，内

部エネルギーは〔　9　〕× RT_0 だけ減少している。これから，気体が熱交換器に放出した熱量は〔　10　〕× RT_0 であることがわかる。

4. 最後に，2. で考えた状態変化 B→C の過程を詳しく調べてみよう。ピストンが x だけ上昇した瞬間（図 3）での気体の圧力は〔　11　〕× p_0，温度は〔　12　〕× T_0 になっている。この状態からピストンが微小な高さ Δx だけ上昇する過程での気体の圧力変化は〔　13　〕× $p_0 \times \dfrac{\Delta x}{l}$，温度変化は〔　14　〕× $T_0 \times \dfrac{\Delta x}{l}$ である。この結果から，気体の状態変化 A→B→C→A を，p を気体の圧力，V を気体の体積として p-V 図に表したのは〔　15　〕であることがわかる。

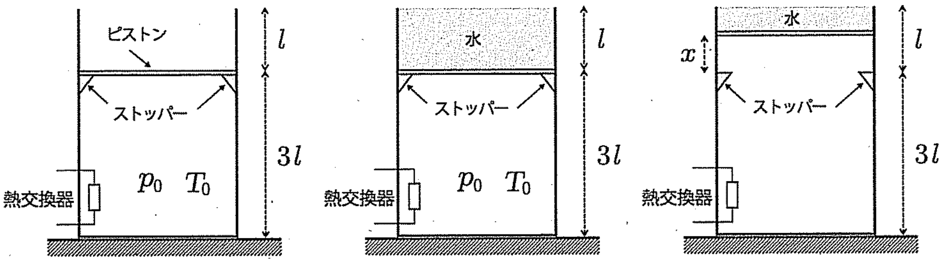


図 1　　図 2　　図 3

〔　1　〕～〔　10　〕の選択肢

a) 0　b) 1　c) 2　d) 3　e) 4　f) $\frac{1}{2}$　g) $\frac{3}{2}$

h) $\frac{5}{2}$　i) $\frac{7}{2}$　j) $\frac{1}{3}$　k) $\frac{2}{3}$　l) $\frac{4}{3}$　m) $\frac{5}{3}$　n) $\frac{7}{3}$

o) $\frac{1}{4}$　p) $\frac{3}{4}$　q) $\frac{5}{4}$　r) $\frac{7}{4}$　s) $\frac{1}{5}$　t) $\frac{3}{5}$　u) $\frac{6}{5}$

v) $\frac{7}{5}$　w) $\frac{1}{6}$　x) $\frac{5}{6}$　y) $\frac{7}{6}$

〔 11 〕～〔 14 〕の選択肢

a) 1 b) -1 c) 2 d) -2

e) $\dfrac{1}{3}+\dfrac{2x}{3l}$ f) $\dfrac{1}{3}-\dfrac{2x}{3l}$ g) $-\dfrac{1}{3}+\dfrac{2x}{3l}$ h) $-\dfrac{1}{3}-\dfrac{2x}{3l}$

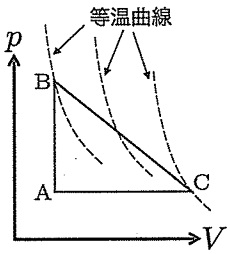
i) $\dfrac{2}{3}+\dfrac{x}{3l}$ j) $\dfrac{2}{3}-\dfrac{x}{3l}$ k) $-\dfrac{2}{3}+\dfrac{x}{3l}$ l) $-\dfrac{2}{3}-\dfrac{x}{3l}$

m) $1-\dfrac{x}{l}$ n) $2-\dfrac{x}{l}$ o) $1+\dfrac{x}{3l}$ p) $2+\dfrac{x}{3l}$

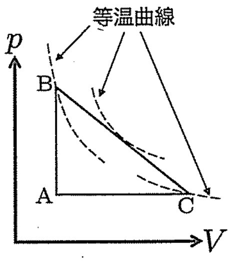
q) $\left(1-\dfrac{x}{l}\right)\left(1+\dfrac{x}{3l}\right)$ r) $\left(1-\dfrac{x}{l}\right)\left(2+\dfrac{x}{3l}\right)$

s) $\left(2-\dfrac{x}{l}\right)\left(1+\dfrac{x}{3l}\right)$ t) $\left(2-\dfrac{x}{l}\right)\left(2+\dfrac{x}{3l}\right)$

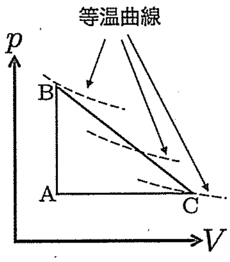
〔　15　〕の選択肢



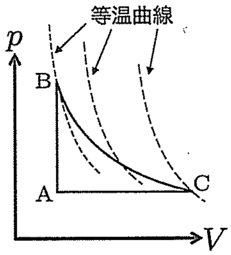
a)



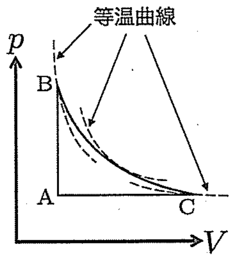
b)



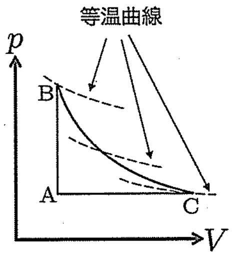
c)



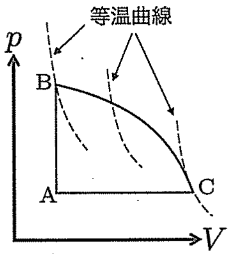
d)



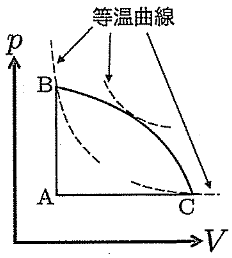
e)



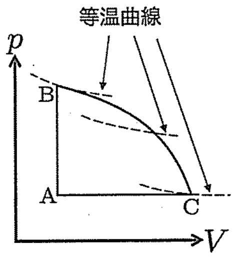
f)



g)



h)



i)