2019年度　　〔試験時間　80分〕

D　3　物　理

この冊子は，物理の問題で1ページより35ページまであります。

〔注　意〕

(1) 試験開始の指示があるまで，この冊子を開いてはいけません。

(2) 監督者から受験番号等記入の指示があったら，解答用マークシートに受験番号と氏名を記入し，さらに受験番号をマークしてください。

(3) 解答は，所定の解答用マークシートにマークしたものだけが採点されます。

(4) 解答用マークシートについて

① 解答用マークシートは，絶対に折り曲げてはいけません。

② マークには黒鉛筆(ＨＢまたはＢ)を使用してください。
指定の黒鉛筆以外でマークした場合，採点できないことがあります。

③ 誤ってマークした場合は，消しゴムで丁寧に消し，消しくずを完全に取り除いたうえ，新たにマークしてください。

④ 解答欄のマークは，横1行について1箇所に限ります。
2箇所以上マークすると採点されません。
あいまいなマークは無効となるので，はっきりマークしてください。

⑤ 解答用マークシートに記載されている解答上の注意事項を，必ず読んでから解答してください。

(5) 試験開始の指示があったら，初めに問題冊子のページ数を確認してください。
ページの落丁・乱丁，印刷不鮮明等に気づいた場合は，手を挙げて監督者に知らせてください。

(6) 問題冊子は，試験終了後，持ち帰ってください。

（下書き用紙）

（下書き用紙）

1 次の問題の $\boxed{}$ の中に入れるべき最も適当なものをそれぞれの解答群の中から選び，その番号を解答用マークシートの指定された欄にマークしなさい。

(34 点)

以下では，長さ，質量，時間，および角度の単位をそれぞれ m，kg，s, rad とし，その他の物理量に対してはこれらを組み合わせた単位を使用する。例えば，速さの単位は m/s，角振動数の単位は rad/s である。

(1) 図 **1-1** のように，自然長 L，ばね定数 k の質量の無視できるばねの両端に，質量 $2m, m$ の小物体 A, B を固定し，ばねが自然長の状態で，なめらかで摩擦のない水平面上におく。図の右向きを正とする x 座標を設定する。小物体は x 軸に沿って運動し，ばねは常に x 軸に平行であるとする。小物体 A, B の座標をそれぞれ $x_{\mathrm{A}}, x_{\mathrm{B}}$，速度をそれぞれ $v_{\mathrm{A}}, v_{\mathrm{B}}$，加速度をそれぞれ $a_{\mathrm{A}}, a_{\mathrm{B}}$ とする。最初，小物体 A, B は $x_{\mathrm{A}} = L, x_{\mathrm{B}} = 0$ に静止している。

大きさ p の運動量を持つ 2 つの弾丸を，図のように同時に小物体 A, B に水平に打ち込んだところ（図 **1-1**），小物体と弾丸は一体となって運動を始めた。弾丸の質量は小物体のそれと比べて無視できるほど小さいとすると，小物体 A, B は大きさ p の運動量を得て運動を始めることになる。小物体 A, B のしたがう運動方程式は

$$2ma_{\mathrm{A}} = -k\,(x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{B}} - L),$$

$$ma_{\mathrm{B}} = -k\,(\boxed{\text{(ア)}})$$

と表される。これらの運動方程式から $a_{\mathrm{A}} - a_{\mathrm{B}} = -\boxed{\text{(イ)}}(x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{B}} - L)$ と求められる。すなわち，小物体 B から見た小物体 A の運動を単振動とみなすことができる。したがって，時刻 t において

$$x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{B}} - L = C_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1),$$

$$v_{\mathrm{A}} - v_{\mathrm{B}} = C_1 \omega_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1),$$

$$a_{\mathrm{A}} - a_{\mathrm{B}} = -C_1 \omega_1^2 \sin(\omega_1 t + \theta_1)$$

のように表される。弾丸が打ち込まれた瞬間の時刻を $t = 0$ とする。C_1 ($C_1 \geqq 0$) は単振動の振幅であり，θ_1 ($0 \leqq \theta_1 < 2\pi$) は $t = 0$ のときの位相であることから，

初期位相と呼ばれる量である。角振動数は $\omega_1 =$ $\boxed{\text{(ウ)}}$ と求められる。弾丸が打ち込まれた直後の小物体 A, B の速度は，m, p をもちいて $v_A =$ $\boxed{\text{(エ)}}$，$v_B =$ $\boxed{\text{(オ)}}$ と求められる。このときの $x_A - x_B - L$ と $v_A - v_B$ の値や符号などに着目することにより，初期位相 θ_1 は $\theta_1 =$ $\boxed{\text{(カ)}}$，単振動の振幅 C_1 は $C_1 =$ $\boxed{\text{(キ)}}$ と求められる。小物体 A, B の重心は $x_G = \dfrac{2mx_A + mx_B}{3m}$ と表される。打ち込まれた弾丸の運動量の総和はゼロであるので，重心は動かない。よって，小物体 A, B の座標は $x_A =$ $\boxed{\text{(ク)}}$, $x_B =$ $\boxed{\text{(ケ)}}$ のように求められる。

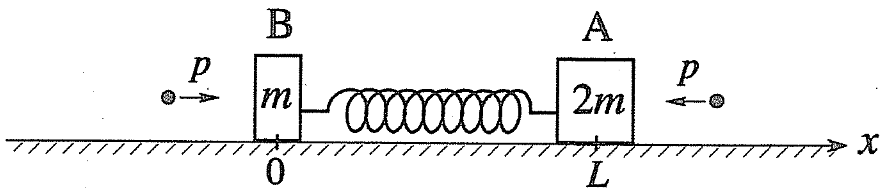


図 1-1

(ア) の解答群

⓪ $x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{B}}$　① $x_{\mathrm{B}} - x_{\mathrm{A}}$　② $x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{B}} + L$　③ $x_{\mathrm{B}} - x_{\mathrm{A}} + L$

④ $x_{\mathrm{B}} - L$　⑤ $x_{\mathrm{A}} - L$　⑥ $x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{B}} - L$　⑦ $x_{\mathrm{B}} - x_{\mathrm{A}} - L$

(イ) の解答群

⓪ $\dfrac{k}{2m}$　① $\dfrac{k}{m}$　② $\dfrac{3k}{2m}$　③ $\dfrac{2k}{m}$

④ $\dfrac{5k}{2m}$　⑤ $\dfrac{3k}{m}$　⑥ $\dfrac{7k}{2m}$　⑦ $\dfrac{4k}{m}$

(ウ) の解答群

⓪ $\dfrac{k}{2m}$　① $\dfrac{k}{m}$　② $\dfrac{3k}{2m}$　③ $\dfrac{2k}{m}$

④ $\sqrt{\dfrac{k}{2m}}$　⑤ $\sqrt{\dfrac{k}{m}}$　⑥ $\sqrt{\dfrac{3k}{2m}}$　⑦ $\sqrt{\dfrac{2k}{m}}$

(エ), (オ) の解答群

⓪ $\dfrac{p}{2m}$　① $-\dfrac{p}{2m}$　② $\dfrac{p}{m}$　③ $-\dfrac{p}{m}$

④ mp　⑤ $-mp$　⑥ $2mp$　⑦ $-2mp$

(カ) の解答群

⓪ 0　① $\dfrac{\pi}{4}$　② $\dfrac{\pi}{2}$　③ $\dfrac{3\pi}{4}$

④ π　⑤ $\dfrac{5\pi}{4}$　⑥ $\dfrac{3\pi}{2}$　⑦ $\dfrac{7\pi}{4}$

(キ) の解答群

⓪ $\dfrac{p}{m}$　① $\dfrac{3p}{2m}$　② $\dfrac{p}{\omega_1}$　③ $\dfrac{3p}{2\omega_1}$

④ $\dfrac{p}{2m\omega_1}$　⑤ $\dfrac{p}{m\omega_1}$　⑥ $\dfrac{3p}{2m\omega_1}$　⑦ $\dfrac{2p}{m\omega_1}$

(ク) の解答群

⓪ $\dfrac{L}{3} - \dfrac{p}{2m\omega_1}\sin\omega_1 t$　① $\dfrac{L}{3} + \dfrac{p}{2m\omega_1}\sin\omega_1 t$

② $L - \dfrac{p}{2m\omega_1}\sin\omega_1 t$　③ $L + \dfrac{p}{2m\omega_1}\sin\omega_1 t$

④ $L - \dfrac{3p}{2m\omega_1}\sin\omega_1 t$　⑤ $L + \dfrac{3p}{2m\omega_1}\sin\omega_1 t$

⑥ $L - \dfrac{p}{2\omega_1}\sin\omega_1 t$　⑦ $L - \dfrac{3p}{2\omega_1}\sin\omega_1 t$

(ケ) の解答群

⓪ $\dfrac{p}{3m\omega_1}\sin\omega_1 t$　① $\dfrac{p}{2m\omega_1}\sin\omega_1 t$　② $\dfrac{p}{m\omega_1}\sin\omega_1 t$

③ $-\dfrac{p}{3m\omega_1}\sin\omega_1 t$　④ $-\dfrac{p}{2m\omega_1}\sin\omega_1 t$　⑤ $-\dfrac{p}{m\omega_1}\sin\omega_1 t$

⑥ $\dfrac{p}{\omega_1}\sin\omega_1 t$　⑦ $\dfrac{3p}{\omega_1}\sin\omega_1 t$

(2) 二酸化炭素 CO_2 は，炭素 C を中央としてその両側に 2 つの酸素 O が直線状に結合した分子である。C と O が分子の結合軸に平行に振動する様子は，3 つの小物体を 2 本のばねでつないだ図 **1-2** のような装置によって考察することができる。質量 m の小物体 B と，その両側の質量 αm $(\alpha > 1)$ の小物体 A, C を自然長 L，ばね定数 k の質量の無視できるばねでつなぐ。図の右向きを正とする x 座標を設定する。小物体は x 軸に沿って運動し，ばねは常に x 軸に平行であるとする。小物体 A, B, C の位置座標をそれぞれ x_A, x_B, x_C，加速度をそれぞれ a_A, a_B, a_C とする。最初，バネは自然長の状態にあり，小物体 A, B, C は $x_A = L, x_B = 0, x_C = -L$ に静止している (図 **1-2(a)**)。小物体 A, C のしたがう運動方程式は，それぞれ

$$(\alpha m)a_A = -k(x_A - x_B - L),$$

$$(\alpha m)a_C = -k(\boxed{\text{(コ)}})$$

となる。次に，小物体 B のしたがう運動方程式を導く。小物体 A, B の間のばねの伸び $x_A - x_B - L$ が正のときには，小物体 B はこのばねから正の向きの力を受ける。また，小物体 B, C の間のばねの伸び $x_B - x_C - L$ が正のときには, 小物体 B はこのばねから負の向きの力を受ける。以上の考察から，小物体 B のしたがう運動方程式は

$$ma_B = -k(\boxed{\text{(サ)}})$$

と求められる。

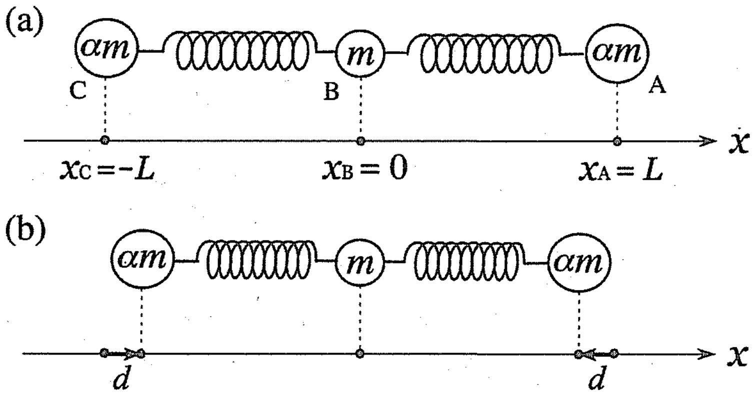


図 1-2

(コ) の解答群

⓪ $x_{\mathrm{B}}-x_{\mathrm{C}}$　① $x_{\mathrm{C}}-x_{\mathrm{B}}$　② $x_{\mathrm{B}}-x_{\mathrm{C}}+L$

③ $x_{\mathrm{C}}-x_{\mathrm{B}}+L$　④ $x_{\mathrm{B}}-L$　⑤ $x_{\mathrm{C}}-L$

⑥ $x_{\mathrm{B}}-x_{\mathrm{C}}-L$　⑦ $x_{\mathrm{C}}-x_{\mathrm{B}}-L$

(サ) の解答群

⓪ $2x_{\mathrm{B}}-x_{\mathrm{A}}-x_{\mathrm{C}}$　① $x_{\mathrm{A}}+x_{\mathrm{C}}-2x_{\mathrm{B}}$　② $2x_{\mathrm{A}}-x_{\mathrm{B}}-x_{\mathrm{C}}$

③ $2x_{\mathrm{B}}-x_{\mathrm{A}}-x_{\mathrm{C}}-L$　④ $x_{\mathrm{A}}-x_{\mathrm{C}}-2L$　⑤ $2x_{\mathrm{B}}-x_{\mathrm{A}}+x_{\mathrm{C}}$

⑥ $2x_{\mathrm{A}}-x_{\mathrm{B}}-x_{\mathrm{C}}-L$　⑦ $2L-x_{\mathrm{A}}+x_{\mathrm{C}}$

以上の 3 つの運動方程式より，次の 3 つの方程式

$$\alpha a_{\mathrm{A}} + a_{\mathrm{B}} + \alpha a_{\mathrm{C}} = 0,$$

$$a_{\mathrm{A}} - a_{\mathrm{C}} = -\boxed{\text{(シ)}}(x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{C}} - 2L),$$

$$2a_{\mathrm{B}} - a_{\mathrm{A}} - a_{\mathrm{C}} = -\boxed{\text{(ス)}}(2x_{\mathrm{B}} - x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{C}})$$

を導くことができる。1 番目の方程式は，小物体 A, B, C の重心が等速度運動（静止を含む）することを表している。そして，2 番目の方程式は，変数 $x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{C}} - 2L$ に関する単振動の方程式を表し，3 番目の方程式は，変数 $2x_{\mathrm{B}} - x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{C}}$ に関する単振動の方程式である。したがって，これらの変数 $x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{C}} - 2L$, $2x_{\mathrm{B}} - x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{C}}$ は周期的に振動し，時刻 t において

$$x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{C}} - 2L = C_2 \sin(\omega_2 t + \theta_2),$$

$$2x_{\mathrm{B}} - x_{\mathrm{A}} - x_{\mathrm{C}} = C_3 \sin(\omega_3 t + \theta_3)$$

のように表される。ここで，角振動数は $\omega_2 = \sqrt{\boxed{\text{(シ)}}}$，$\omega_3 = \sqrt{\boxed{\text{(ス)}}}$ であり，C_2, C_3 $(C_2, C_3 \geqq 0)$ はこれらの単振動の振幅，θ_2, θ_3 $(0 \leqq \theta_2 < 2\pi, 0 \leqq \theta_3 < 2\pi)$ は初期位相である。

図 **1-2(b)** のように，小物体 B は静止させたまま，両方のばねが自然長から d $(d > 0)$ だけ縮むように小物体 A, C をともにゆっくりと移動させる。そののち静かに手を離したところ（手を離した時刻を $t = 0$ とする），小物体 A, C は運動を始め，小物体 B は $x_{\mathrm{B}} = 0$ に静止し続けた。この初期条件のもとでは $C_2 \neq 0$, $C_3 = 0$ となり，この運動は対称伸縮振動と呼ばれる。初期位相と振幅を求めると，$\theta_2 = \boxed{\text{(セ)}}$，$C_2 = \boxed{\text{(ソ)}}$ となる。この対称伸縮振動の様子をあらわすグラフとして適切なものは $\boxed{\text{(タ)}}$ である。

ところで，別の条件のもとでは $C_2 = 0$, $C_3 \neq 0$ の振動を実現することができる（このような振動は反対称伸縮振動とよばれる）。重心が常に静止している場合の，この反対称伸縮振動の振動の様子をあらわすグラフとしてあてはまるものは $\boxed{\text{(チ)}}$ である。一般の初期条件の場合，運動は対称伸縮振動と反対称伸縮振動を重ね合わせたものとなる。

二酸化炭素 CO_2 では，対称伸縮振動と反対称伸縮振動の角振動数が実際に測定されている。炭素 C の原子量を 12，酸素 O の原子量を 16 として，今の装置に基づいて対称伸縮振動と反対称伸縮振動の角振動数の比を計算するとき，その比率は 1 : $\boxed{\text{（ツ）}}$ である。この計算結果は，実測から得られる振動数の比をよく再現する。

(シ),(ス) の解答群

⓪ $\dfrac{k}{m}$　① $\dfrac{k}{\alpha m}$　② $\dfrac{2k}{m}$　③ $\dfrac{2k}{\alpha m}$

④ $\dfrac{(\alpha+1)k}{m}$　⑤ $\dfrac{(\alpha+1)k}{\alpha m}$　⑥ $\dfrac{(2\alpha+1)k}{m}$　⑦ $\dfrac{(2\alpha+1)k}{\alpha m}$

(セ) の解答群

⓪ 0　① $\dfrac{\pi}{4}$　② $\dfrac{\pi}{2}$　③ $\dfrac{3\pi}{4}$

④ π　⑤ $\dfrac{5\pi}{4}$　⑥ $\dfrac{3\pi}{2}$　⑦ $\dfrac{7\pi}{4}$

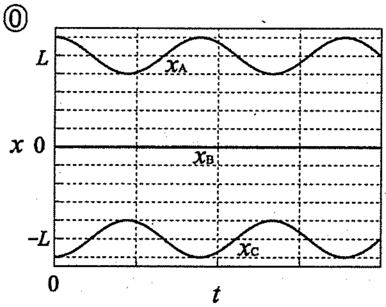
(ソ) の解答群

⓪ d　　① $L-d$　　② $2L-d$　　③ $L+d$

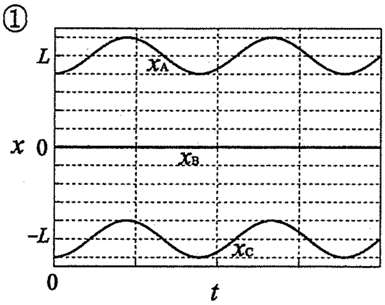
④ $2d$　　⑤ $L-2d$　　⑥ $2L-2d$　　⑦ $L+2d$

(タ) の解答群

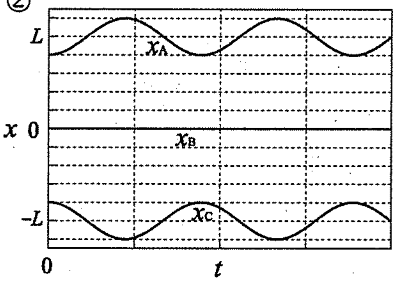
⓪



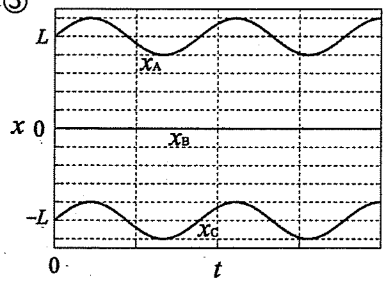
①



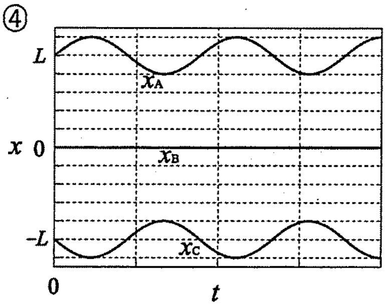
②



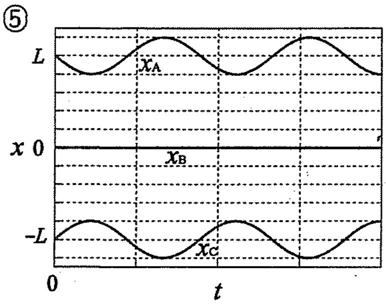
③



④

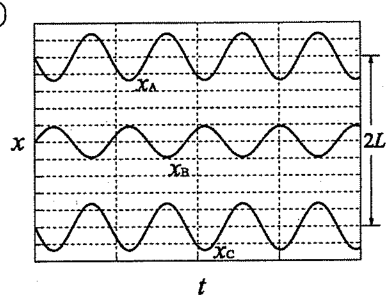


⑤

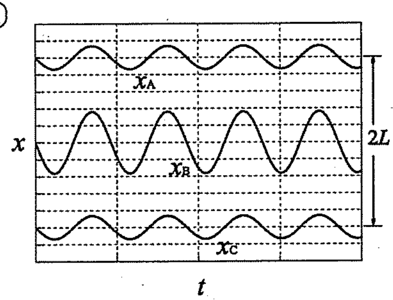


(チ) の解答群

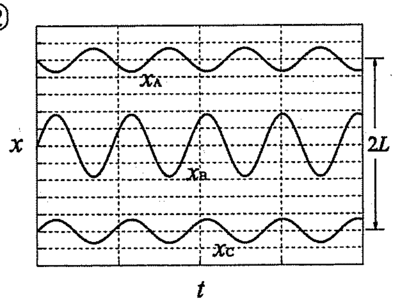
⓪



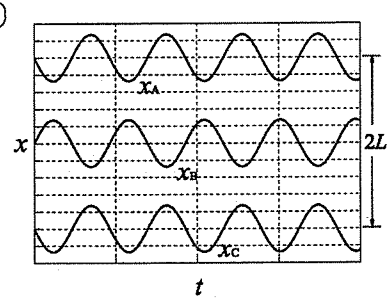
①



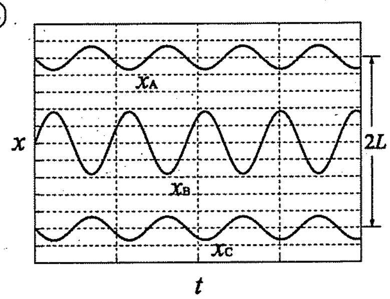
②



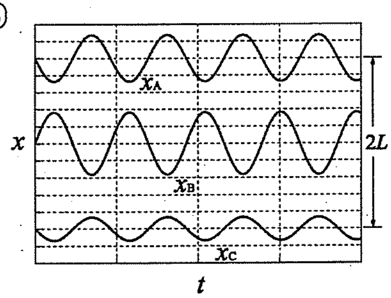
③



④



⑤



(ツ) の解答群

⓪ $\sqrt{\dfrac{1}{2}}$　① 1　② $\sqrt{\dfrac{5}{3}}$　③ $\sqrt{\dfrac{7}{3}}$　④ $\sqrt{3}$

⑤ $\sqrt{\dfrac{11}{3}}$　⑥ 2　⑦ 3　⑧ $\dfrac{11}{3}$

（下書き用紙）

2 次の問題の $\boxed{}$ の中に入れるべき最も適当なものをそれぞれの解答群の中から選び，その番号を解答用マークシートの指定された欄にマークしなさい。(同じ番号を何回用いてもよい。) (33 点)

以下では，長さ，質量，時間，電流の単位をそれぞれ m， kg， s， A とし，その他の物理量に対してはこれらを組み合わせた単位を使用する。例えば，電気量の単位 C は，電流と時間の単位を組み合わせて 1 C = 1 A·s と表すことができる。

なお，以下の問いは全て真空中にある xy 平面上の点電荷に関する問題であり，重力の影響は無視できるものとする。また，電位の基準は無限遠点にとるものとし，クーロンの法則の比例定数を k とする。

(1) 図 **2-1** に示すように，xy 平面上の原点 O に電気量 Q $(Q > 0)$ の点電荷を固定する。点 A $(a, 0)$ $(a > 0)$ における電場の大きさと電位はそれぞれ $\boxed{(ア)}$，$\boxed{(イ)}$ である。また，じゅうぶん遠くにある電気量 q $(q > 0)$ の点電荷に，力を加えゆっくり点 A まで移動させた。この点電荷を移動させる間に，加えた力がした仕事は $\boxed{(ウ)}$ である。

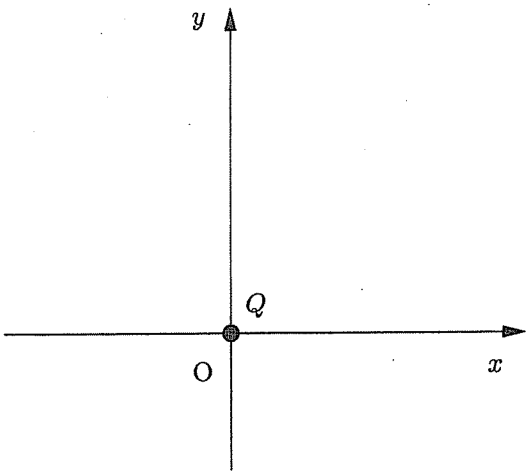


図 **2-1**

(ア)，(イ) の解答群

⓪ 0　① $k\dfrac{Q}{a}$　② $k\dfrac{a}{Q}$　③ $2k\dfrac{Q}{a}$　④ $k\dfrac{Q}{2a}$

⑤ $k\dfrac{Q}{a^2}$　⑥ $k\dfrac{Q^2}{a}$　⑦ $k\dfrac{a^2}{Q^2}$　⑧ $k\dfrac{Q^2}{a^2}$

(ウ) の解答群

⓪ $k\dfrac{Qq}{a}$　① $-k\dfrac{Qq}{a}$　② $k\dfrac{a}{Qq}$　③ $-k\dfrac{a}{Qq}$

④ $k\dfrac{Qq}{a^2}$　⑤ $-k\dfrac{Qq}{a^2}$　⑥ $k\dfrac{Q+q}{a}$　⑦ $-k\dfrac{Q+q}{a}$

⑧ $k\dfrac{Q+q}{a^2}$　⑨ $-k\dfrac{Q+q}{a^2}$

(2) 図 **2-2** に示すように，電気量 Q の 2 個の正の点電荷を点 A $(a, 0)$，点 B$(-a, 0)$ にそれぞれ固定する $(a > 0)$。このとき，原点 O での電場の x 軸方向と y 軸方向の成分は，それぞれ $\boxed{\text{(エ)}}$ ，$\boxed{\text{(オ)}}$ である。また原点での電位は $\boxed{\text{(カ)}}$ である。

この 2 個の点電荷がつくる電場内における，質量 m，電気量 q $(q > 0)$ をもつ粒子の運動について考える。以下の問いでは，この粒子が，一直線のレールの上を，なめらかに運動できるものとする。なお，レールは電気を通さない材料でできており，幅を無視することができ，じゅうぶんに長いものとする。また，$|\alpha|$ が 1 に比べてじゅうぶん小さいときに成り立つ近似式 $(1+\alpha)^n \fallingdotseq 1 + n\alpha$ (n は実数とする) を使ってよい。

まず，レールを y 軸上に設置し，この粒子をレール上にある原点 O に置いた。そして，粒子を y 軸の正の方向にわずかにずらして静かに手を離したところ，この 2 個の点電荷がつくる電場から力を受けて，粒子はレール上を動き出した。粒子が原点 O からじゅうぶん離れたところまで到達したとき，粒子の速さは $\boxed{\text{(キ)}}$ となった。

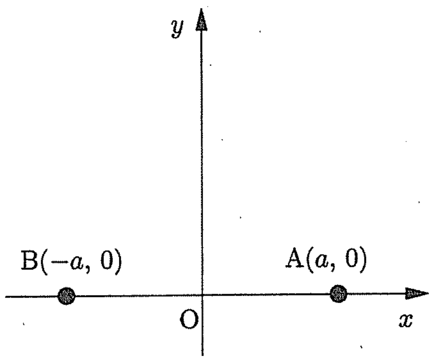


図 **2-2**

(エ)，(オ)，(カ) の解答群

⓪ 0　① $k\dfrac{Q}{a}$　② $k\dfrac{a}{Q}$　③ $2k\dfrac{Q}{a}$　④ $k\dfrac{Q}{2a}$

⑤ $k\dfrac{Q}{a^2}$　⑥ $k\dfrac{Q^2}{a}$　⑦ $k\dfrac{a^2}{Q^2}$　⑧ $k\dfrac{Q^2}{a^2}$

(キ) の解答群

⓪ 0　① $\sqrt{\dfrac{kQq}{ma}}$　② $\sqrt{\dfrac{ma}{kQq}}$　③ $\sqrt{\dfrac{2kQq}{ma}}$

④ $\sqrt{\dfrac{ma}{2kQq}}$　⑤ $\sqrt{\dfrac{kQq}{2ma}}$　⑥ $\sqrt{\dfrac{2ma}{kQq}}$　⑦ $2\sqrt{\dfrac{kQq}{ma}}$

⑧ $2\sqrt{\dfrac{ma}{kQq}}$　⑨ $\sqrt{\dfrac{2k(Q+q)}{ma}}$

次に，レールを x 軸上に設置しなおし，同じ粒子をレール上にある原点 O に置いた。そして，粒子を x 軸の正の方向に，a に比べてわずかな距離だけずらして静かに手を離したところ，粒子は x 軸に沿って原点 O に向かって動きだし，レール上で単振動した。この粒子が位置 $(x, 0)$ で受ける力の x 成分は $\boxed{\text{（ク）}}$ であり，粒子の振動の周期は $\boxed{\text{（ケ）}}$ である。

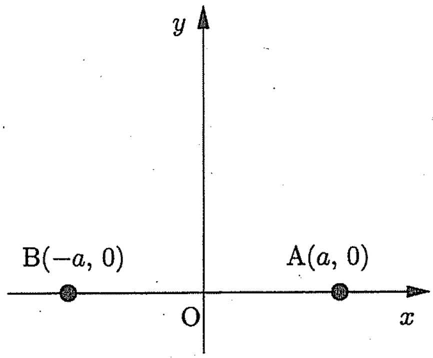


図 **2-2** (再掲)

(ク) の解答群

⓪ $-\dfrac{a^3}{kQq}x$　① $-\dfrac{kQq}{a^3}x$　② $-\dfrac{2kQq}{a^3}x$　③ $-\dfrac{4kQq}{a^3}x$

④ $-\dfrac{a^2}{kQq}x$　⑤ $-\dfrac{kQq}{a^2}x$　⑥ $-\dfrac{2kQq}{a^2}x$　⑦ $-\dfrac{4kQq}{a^2}x$

⑧ $-\dfrac{k(Q+q)}{a^2}x$　⑨ $-\dfrac{k(Q+q)}{a^3}x$

(ケ) の解答群

⓪ $2\pi\sqrt{\dfrac{a^3}{mkQq}}$　① $2\pi\sqrt{\dfrac{ma^3}{kQq}}$　② $2\pi\sqrt{\dfrac{ma^3}{2kQq}}$

③ $\pi\sqrt{\dfrac{ma^3}{kQq}}$　④ $2\pi\sqrt{\dfrac{a^2}{mkQq}}$　⑤ $2\pi\sqrt{\dfrac{ma^2}{kQq}}$

⑥ $2\pi\sqrt{\dfrac{ma^2}{2kQq}}$　⑦ $\pi\sqrt{\dfrac{ma^2}{kQq}}$　⑧ $2\pi\sqrt{\dfrac{ma^2}{k(Q+q)}}$

⑨ $2\pi\sqrt{\dfrac{ma^3}{k(Q+q)}}$

(3) 前問 **(2)** と同じレールを x 軸に沿った向きに設置した。図 **2-3** に示すように，レール上の点 A $(a, 0)$ に電気量 Q の点電荷を，点 B には電気量が未知の点電荷を固定したところ，レール上では点 P_1，P_2 の 2 カ所で電位が 0 となることが分かった。点 P_1 の x 座標が $x = \dfrac{3}{5}a$ であったとすると，点 B に固定した点電荷の電気量は Q を用いて $\boxed{\text{(コ)}}$ であり，点 P_2 の x 座標は $\boxed{\text{(サ)}}$ である。また，点 P_2 よりも x 軸上の正の方向に，電位が極小となる点 P_3 がある。点 P_3 の x 座標は $\boxed{\text{(シ)}}$ で，電位が $\boxed{\text{(ス)}}$ である。

次に，レール上の点 A と B に，電気量 Q と $\boxed{\text{(コ)}}$ の点電荷をそれぞれ固定した状態で，x 軸の正の向きのじゅうぶん遠くにあるレール上に，質量 m で電気量 q の正の電荷をもつ粒子を静かにおいた。すると，この粒子は x 軸に沿ってレール上を点 A に向かって動き始めた。この粒子が点 A に最も接近したときの x 座標は $\boxed{\text{(セ)}}$ である。また，接近するまでの間に，この粒子の速さが最大となる場所の x 座標は $\boxed{\text{(ソ)}}$ であり，速さの最大値は $\boxed{\text{(タ)}}$ である。

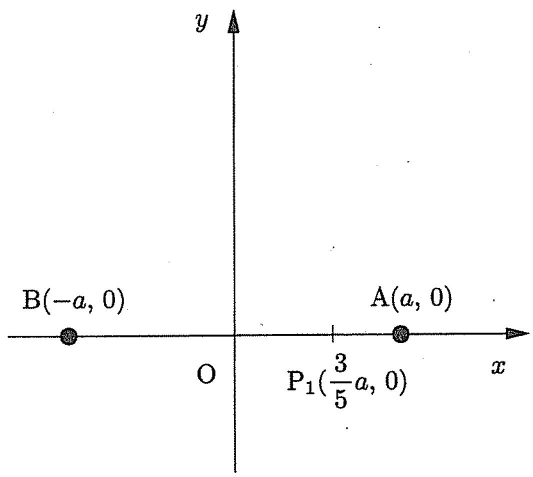


図 **2-3**

(コ) の解答群

⓪ Q　① $-Q$　② $2Q$　③ $-2Q$

④ $4Q$　⑤ $-4Q$　⑥ $\dfrac{Q}{2}$　⑦ $-\dfrac{Q}{2}$

⑧ $\dfrac{Q}{4}$　⑨ $-\dfrac{Q}{4}$

(サ)，(シ)，(セ)，(ソ) の解答群

⓪ $-3a$　① $-\dfrac{5}{3}a$　② $-a$　③ $-\dfrac{3}{5}a$

④ $\dfrac{a}{3}$　⑤ $\dfrac{a}{2}$　⑥ $\dfrac{3}{5}a$　⑦ $2a$

⑧ $3a$　⑨ $\dfrac{5}{3}a$

(ス) の解答群

⓪ $k\dfrac{Q}{a}$　① $-k\dfrac{Q}{a}$　② $2k\dfrac{Q}{a}$　③ $-2k\dfrac{Q}{a}$

④ $k\dfrac{Q}{2a}$　⑤ $-k\dfrac{Q}{2a}$　⑥ $k\dfrac{Q}{a^2}$　⑦ $-k\dfrac{Q}{a^2}$

(タ) の解答群

⓪ $2\sqrt{\dfrac{ma}{kQq}}$　① $\sqrt{\dfrac{2ma}{kQq}}$　② $\sqrt{\dfrac{ma}{kQq}}$　③ $2\sqrt{\dfrac{ma^2}{kQq}}$

④ $\sqrt{\dfrac{2ma^2}{kQq}}$　⑤ $\sqrt{\dfrac{ma^2}{kQq}}$　⑥ $2\sqrt{\dfrac{kQq}{ma}}$　⑦ $\sqrt{\dfrac{2kQq}{ma}}$

⑧ $\sqrt{\dfrac{kQq}{ma}}$　⑨ $\sqrt{\dfrac{kQq}{2ma}}$

3 次の問題の $\boxed{}$ の中に入れるべき最も適当なものをそれぞれの解答群の中から選び，その番号を解答用マークシートの指定された欄にマークしなさい。(同じ番号を何回用いてもよい。) (33 点)

以下では，長さ，質量，時間，温度，物質量の単位をそれぞれ m，kg，s，K，mol とし，そのほかの物理量に対してはこれらを組み合わせた単位を使用する。

図 **3-1** のように，断面積が S のシリンダーと水平方向にだけ動くことができるピストンからなる容器に理想気体が入っており，シリンダーの底とピストンの距離を x で表す。ピストンはなめらかに動き，シリンダーとピストンは断熱材でできている。シリンダー内の気体には，体積の無視できる熱交換器によって，正または負の熱量を与えることができ，気体の圧力や体積を保持したり変化させたりする際には，ピストンを介して気体に外力を加えることができる。なお，この理想気体の定積モル比熱は C_V [J/(mol·K)]，気体定数は R [J/(mol·K)] とする。

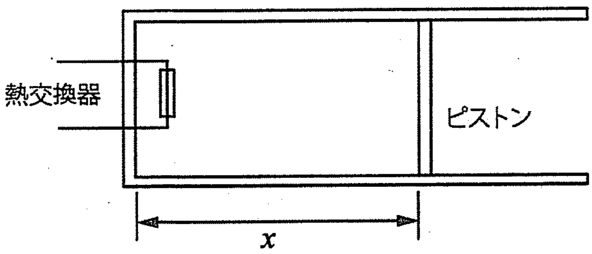


図 **3-1**

最初の状態（これを状態 a と呼ぶ）において，理想気体の圧力が P，シリンダーの底とピストンの距離は $x = L_1$，理想気体の温度は T であった。したがって，理想気体の物質量は $\boxed{\text{(ア)}}$ である。この状態 a から始めて，次のページに示す過程 1 ～ 4 の順に理想気体の状態を変化させた。

（ア） の解答群

⓪ $\dfrac{PSL_1}{2RT}$　① $\dfrac{PSL_1}{RT}$　② $\dfrac{3PSL_1}{2RT}$　③ $\dfrac{2PSL_1}{RT}$　④ $\dfrac{5PSL_1}{2RT}$

⑤ $\dfrac{RT}{2PSL_1}$　⑥ $\dfrac{RT}{PSL_1}$　⑦ $\dfrac{3RT}{2PSL_1}$　⑧ $\dfrac{2RT}{PSL_1}$　⑨ $\dfrac{5RT}{2PSL_1}$

【過程１】 状態 a に対して，理想気体を断熱的に圧力を $2P$ に増加させた。シリンダーの底とピストンの距離は $x = L_2$ となった。（過程１完了後の状態を状態 b と呼ぶ。）

【過程２】 状態 b に対して，理想気体の圧力を $2P$ に保ちながら，体積を増加させ，$x = L_3$ とした。（過程２完了後の状態を状態 c と呼ぶ。）

【過程３】 状態 c に対して，理想気体を断熱的に圧力を P に減少させた。シリンダーの底とピストンの距離は $x = L_4$ となった。（過程３完了後の状態を状態 d と呼ぶ。）

【過程４】 状態 d に対して，理想気体の圧力を P に保ちながら，体積を変化させ，$x = L_1$ とした。このとき，理想気体は状態 a に戻った。

過程１の間に理想気体が外部にした仕事を W_1，内部エネルギーの増加を ΔU_1 とすると，両者の大きさの間には，$\boxed{\text{(イ)}}$ という関係式が成り立つ。また，過程１終了後の状態 b での理想気体の温度は，$\boxed{\text{(ウ)}}$ であり，$\Delta U_1 = \boxed{\text{(エ)}}$ である。

過程２終了後の状態 c での理想気体の温度は，$\boxed{\text{(オ)}}$ であり，過程２の間に理想気体が外部にした仕事を W_2，内部エネルギーの増加を ΔU_2 とすると，$W_2 = \boxed{\text{(カ)}}$ であり，$\Delta U_2 = \boxed{\text{(キ)}}$ である。また，過程２の間に理想気体が吸収した熱量を Q_2 とすると，$\boxed{\text{(ク)}}$ の関係が成り立つ。

過程３終了後の状態 d での理想気体の温度は，$\boxed{\text{(ケ)}}$ であり，過程３の間に理想気体が外部にした仕事を W_3 とすると，$W_3 = \boxed{\text{(コ)}}$ である。

過程４の間に理想気体が吸収した熱量を Q_4 とすると $Q_4 = \boxed{\text{(サ)}}$ である。

（下書き用紙）

（イ） の解答群

⓪ $|\Delta U_1| > |W_1|$　　① $|\Delta U_1| = |W_1|$　　② $|\Delta U_1| < |W_1|$

（ウ） の解答群

⓪ T　　① $\dfrac{L_2T}{2L_1}$　　② $\dfrac{L_2T}{L_1}$　　③ $\dfrac{2L_2T}{L_1}$

④ $\dfrac{L_1T}{2L_2}$　　⑤ $\dfrac{L_1T}{L_2}$　　⑥ $\dfrac{2L_1T}{L_2}$

（エ） の解答群

⓪ $PS(L_2 - L_1)$　　① $\dfrac{C_V}{R}PS(L_2 - L_1)$

② $\dfrac{(C_V + R)}{R}PS(L_2 - L_1)$　　③ $PS(L_2 - 2L_1)$

④ $\dfrac{C_V}{R}PS(L_2 - 2L_1)$　　⑤ $\dfrac{(C_V + R)}{R}PS(L_2 - 2L_1)$

⑥ $PS(2L_2 - L_1)$　　⑦ $\dfrac{C_V}{R}PS(2L_2 - L_1)$

⑧ $\dfrac{(C_V + R)}{R}PS(2L_2 - L_1)$

（オ） の解答群

⓪ T　　① $\dfrac{L_3T}{2L_1}$　　② $\dfrac{L_3T}{L_1}$　　③ $\dfrac{2L_3T}{L_1}$

④ $\dfrac{L_1T}{2L_3}$　　⑤ $\dfrac{L_1T}{L_3}$　　⑥ $\dfrac{2L_1T}{L_3}$　　⑦ $\dfrac{L_2T}{2L_3}$

⑧ $\dfrac{L_2T}{L_3}$　　⑨ $\dfrac{2L_2T}{L_3}$

（カ），（キ） の解答群

⓪ $2PS(L_3 - L_2)$

① $\dfrac{2C_V}{R}PS(L_3 - L_2)$

② $\dfrac{2(C_V + R)}{R}PS(L_3 - L_2)$

③ $\dfrac{C_V}{R}PS(L_3 - L_2)$

④ $\dfrac{(C_V + R)}{R}PS(L_3 - L_2)$

⑤ $2PS(L_2 - L_3)$

⑥ $\dfrac{2C_V}{R}PS(L_2 - L_3)$

⑦ $\dfrac{2(C_V + R)}{R}PS(L_2 - L_3)$

⑧ $\dfrac{C_V}{R}PS(L_2 - L_3)$

⑨ $\dfrac{(C_V + R)}{R}PS(L_2 - L_3)$

（ク） の解答群

⓪ $Q_2 = W_2 + \Delta U_2$　① $Q_2 = W_2 - \Delta U_2$　② $Q_2 = -W_2 + \Delta U_2$

③ $Q_2 = -W_2 - \Delta U_2$

（ケ） の解答群

⓪ T　① $\dfrac{L_4T}{2L_1}$　② $\dfrac{L_4T}{L_1}$　③ $\dfrac{2L_4T}{L_1}$

④ $\dfrac{L_1T}{2L_4}$　⑤ $\dfrac{L_1T}{L_4}$　⑥ $\dfrac{2L_1T}{L_4}$　⑦ $\dfrac{L_3T}{2L_4}$

⑧ $\dfrac{L_3T}{L_4}$　⑨ $\dfrac{2L_3T}{L_4}$

（コ） の解答群

⓪ $PS(L_3 - L_4)$

① $\dfrac{C_V}{R} PS(L_3 - L_4)$

② $\dfrac{(C_V + R)}{R} PS(L_3 - L_4)$

③ $PS(L_3 - 2L_4)$

④ $\dfrac{C_V}{R} PS(L_3 - 2L_4)$

⑤ $\dfrac{(C_V + R)}{R} PS(L_3 - 2L_4)$

⑥ $PS(2L_3 - L_4)$

⑦ $\dfrac{C_V}{R} PS(2L_3 - L_4)$

⑧ $\dfrac{(C_V + R)}{R} PS(2L_3 - L_4)$

（サ） の解答群

⓪ $PS(L_1 - L_4)$

① $\dfrac{C_V}{R} PS(L_1 - L_4)$

② $\dfrac{(C_V + R)}{R} PS(L_1 - L_4)$

③ $PS(L_4 - L_1)$

④ $\dfrac{C_V}{R} PS(L_4 - L_1)$

⑤ $\dfrac{(C_V + R)}{R} PS(L_4 - L_1)$

（下書き用紙）

さて，以上の過程１～４を順に行うことは，ひとつのサイクルを運転したと考えることができる。このサイクルが外部にした仕事を W，このサイクルの熱効率を η とすると，Q_2，Q_4 の正負を考慮して，$\eta=$ $\boxed{\text{(シ)}}$ と表される。また，$W=Q_2+Q_4=$ $\boxed{\text{(ス)}}$ であるので，熱効率を，L_1, L_2, L_3, L_4 を用いて表すと，$\eta=$ $\boxed{\text{(セ)}}$ と表される。

さらに，過程１，３は断熱過程であるので，それぞれの過程でポアソンの関係が成り立つ。ポアソンの関係とは断熱過程において，気体の圧力を p，体積を V と表したときに，pV^γ という量が変化しないという関係である。（ここで，γ は定圧モル比熱の定積モル比熱に対する比である。）このことを考慮すると，$\dfrac{L_1}{L_2}=\dfrac{L_4}{L_3}=2^\alpha$ と表すことができて，$\alpha=$ $\boxed{\text{(ソ)}}$ である。熱効率は，$\eta=1-2^\beta$ と表すことができ，この β は，L_1, L_2, L_3, L_4 を用いずに γ を用いて，$\beta=$ $\boxed{\text{(タ)}}$ と表される。

（シ）の解答群

⓪ $\dfrac{W}{Q_2}$　① $\dfrac{W}{Q_4}$　② $\dfrac{W}{Q_2+Q_4}$　③ $\dfrac{W}{Q_2-Q_4}$

④ $-\dfrac{W}{Q_2}$　⑤ $-\dfrac{W}{Q_4}$　⑥ $-\dfrac{W}{Q_2+Q_4}$　⑦ $-\dfrac{W}{Q_2-Q_4}$

（ス）の解答群

⓪ $PS(L_1-2L_2+2L_3-L_4)$

① $\dfrac{C_V}{R}PS(L_1-2L_2+2L_3-L_4)$

② $\dfrac{C_V+R}{R}PS(L_1-2L_2+2L_3-L_4)$

③ $PS(-L_1+2L_2-2L_3+L_4)$

④ $\dfrac{C_V}{R}PS(-L_1+2L_2-2L_3+L_4)$

⑤ $\dfrac{C_V+R}{R}PS(-L_1+2L_2-2L_3+L_4)$

⑥ $PS(L_1-L_2+L_3-L_4)$

⑦ $PS(-L_1+L_2-L_3+L_4)$

（セ）の解答群

⓪ $1-\dfrac{L_4-L_1}{L_3-L_2}$　① $1-\dfrac{L_4-L_1}{2(L_3-L_2)}$　② $1-\dfrac{2(L_4-L_1)}{L_3-L_2}$

③ $1-\dfrac{L_1-L_4}{L_3-L_2}$　④ $1-\dfrac{L_1-L_4}{2(L_3-L_2)}$　⑤ $1-\dfrac{2(L_1-L_4)}{L_3-L_2}$

（ソ），（タ） の解答群

⓪ γ　　① $\dfrac{1}{\gamma}$　　② $-\gamma$　　③ $-\dfrac{1}{\gamma}$

④ $\dfrac{1-\gamma}{\gamma}$　　⑤ $\dfrac{1+\gamma}{\gamma}$　　⑥ $\dfrac{\gamma}{1-\gamma}$　　⑦ $\dfrac{\gamma}{1+\gamma}$

（下書き用紙）