物理

◆機械工学科　◆機械システム工学科
◆電気電子工学科
◆建築学科／建築専攻（Ⅰ型）　◆建築学科／インテリアデザイン専攻（Ⅰ型）
◆建築学科／土木・環境専攻（Ⅰ型）
◆建築学科／かおりデザイン専攻（Ⅰ型）
◆情報システム学科／コンピュータサイエンス専攻
◆情報システム学科／情報ネットワーク専攻
◆情報デザイン学科／メディアデザイン専攻（Ⅰ型）
◆情報デザイン学科／プロダクトデザイン専攻（Ⅰ型）
◆総合情報学科／経営情報コース（Ⅰ型）
◆総合情報学科／スポーツ情報コース（Ⅰ型）

［Ⅰ］　次の問いの $\boxed{}$ の中の答えを，それぞれの解答群の中から１つずつ選べ。解答群の中の番号は，同じものを何度使ってもよい。ベクトルの大きさがゼロの場合，向きの解答は「なし」を選べ。

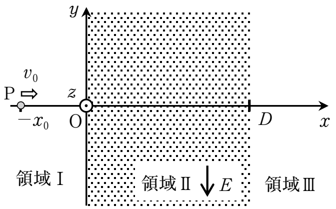


図１

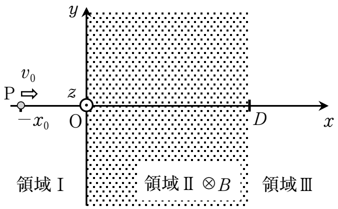


図２

図１や図２のように，真空の空間内に xyz 軸をとる。z 軸は紙面に垂直で裏から表に向かう向き（⊙）である。$x<0$ の領域Ⅰと $x>D$ の領域Ⅲには電場（電界）も磁場（磁界）も存在しない。$0 \leqq x \leqq D$ の領域Ⅱにのみ電場や磁場を加える。x 軸上の座標（$-x_0, 0, 0$）の位置（$x_0>0$）に正の電荷 q をもつ質量 m の荷電粒子Ｐを置き，x 軸の正の向きに速さ v_0 で発射し，その後の運動を考える。重力の影響は無視できる。

まず図１の場合を考える。領域Ⅱには，y 軸の負の向きに大きさが E の一様な電場のみを加える。

（1）領域Ⅰを運動する粒子Ｐが受ける力は，大きさが $\boxed{ア}$ で向きは $\boxed{イ}$ である。したがって $x=0$ を通過する瞬間の粒子Ｐの速さは $\boxed{ウ}$ である。

（2）領域Ⅱを運動する粒子Ｐが受ける力は，大きさが $\boxed{エ}$ で向きは $\boxed{オ}$ である。粒子Ｐに生じる加速度は，大きさが $\boxed{カ}$ で向きは $\boxed{キ}$ である。粒子Ｐが領域Ⅱを通過するのに要する時間は $\boxed{ク}$ であるので，領域Ⅱと領域Ⅲの境界を通過する瞬間の粒子Ｐの速さは $\boxed{ケ}$ である。

（3）領域Ⅱと領域Ⅲの境界を通過する瞬間の粒子Ｐの座標を（$D, y_1, 0$）とする。領域Ⅱの電位の基準を $y=0$ にとると，$y=y_1$ の位置の電位は $\boxed{コ}$ となり，座標（$D, y_1, 0$）で粒子Ｐがもつ静電エネルギーは $\boxed{サ}$ となる。力学的エネルギー保存則を用いると，$y_1 = \boxed{シ}$ と求まる。

次に図２の場合を考える。領域Ⅱには，z 軸の負の向き（⊗）に磁束密度の大きさが B の一様な磁場のみを加える。あらためて荷電粒子Ｐを座標（$-x_0, 0, 0$）の位置から x 軸の正の向きに速さ v_0 で発射する。領域Ⅰの運動は図１の場合と同じである。

（4）領域Ⅰから領域Ⅱに入った直後に粒子Ｐが受ける力は，大きさが $\boxed{ス}$ で向きは $\boxed{セ}$ である。領域Ⅱで粒子Ｐは等速円運動を行い，その半径は $\boxed{ソ}$ となる。したがって，発射の速さが $v_0 < \boxed{タ}$ の場合は粒子Ｐは領域Ⅲに飛び出すことはできない。

さらに領域Ⅱに，y 軸の負の向きの大きさが E の一様な電場と，z 軸の負の向きの磁束密度の大きさが B の一様な磁場を，共に加える場合を考える。あらためて荷電粒子Ｐを座標（$-x_0, 0, 0$）の位置から x 軸の正の向きに速さ v_0 で発射する。

（5）領域Ⅱ内の粒子Ｐの運動が等速直線運動となるためには，電場と磁場を $E = \boxed{チ} \times B$ の関係を満たすような大きさで加えればよい。

解答群

$\boxed{ア}$，$\boxed{ウ}$，$\boxed{エ}$

①　E　②　v_0　③　q　④　v_0E　⑤　qE
⑥　qv_0　⑦　qv_0E　⑧　$\dfrac{qE}{v_0}$　⑨　$\dfrac{1}{2}qE^2$　⓪　0

$\boxed{イ}$，$\boxed{オ}$，$\boxed{キ}$，$\boxed{セ}$

①　x 軸の正の向き　②　x 軸の負の向き　③　y 軸の正の向き　④　y 軸の負の向き
⑤　z 軸の正の向き　⑥　z 軸の負の向き　⑦　なし

$\boxed{カ}$，$\boxed{ク}$

①　mD　②　mE　③　mv_0　④　v_0D　⑤　qE
⑥　$\dfrac{E}{m}$　⑦　$\dfrac{v_0}{m}$　⑧　$\dfrac{qE}{m}$　⑨　$\dfrac{D}{v_0}$　⓪　$\dfrac{v_0}{D}$

$\boxed{ケ}$

①　v_0　②　$\dfrac{qED}{mv_0}$　③　$v_0+\dfrac{qED}{mv_0}$
④　$v_0^2+\left(\dfrac{qED}{mv_0}\right)^2$　⑤　$\sqrt{v_0+\dfrac{qED}{mv_0}}$　⑥　$\sqrt{v_0^2+\left(\dfrac{qED}{mv_0}\right)^2}$

$\boxed{コ}$，$\boxed{サ}$

①　ED　②　$-ED$　③　qED　④　$-qED$　⑤　Ey_1
⑥　$-Ey_1$　⑦　qEy_1　⑧　$-qEy_1$　⑨　$E\sqrt{D^2+y_1^2}$　⓪　0

$\boxed{シ}$

①　D　②　$-D$　③　$\dfrac{qED}{mv_0}$　④　$-\dfrac{qED}{mv_0}$　⑤　$\dfrac{qED^2}{2mv_0^2}$
⑥　$-\dfrac{qED^2}{2mv_0^2}$　⑦　$\sqrt{D^2+\left(\dfrac{qED^2}{2mv_0^2}\right)}$　⑧　$-\sqrt{D^2+\left(\dfrac{qED^2}{2mv_0^2}\right)}$

$\boxed{\text{ス}}$，$\boxed{\text{チ}}$

① B　② v_0　③ q　④ v_0B　⑤ qv_0

⑥ qB　⑦ qv_0B　⑧ $\dfrac{qB}{v_0}$　⑨ $\dfrac{1}{2}qB^2$　⓪ 0

$\boxed{\text{ソ}}$　① D　② $\dfrac{D}{2}$　③ $\dfrac{qv_0}{mB}$　④ $\dfrac{qB}{mv_0}$　⑤ $\dfrac{mB}{qv_0}$　⑥ $\dfrac{mv_0}{qB}$

$\boxed{\text{タ}}$　① qB　② BD　③ qD　④ $\dfrac{1}{qB}$　⑤ $\dfrac{qBD}{m}$　⑥ $\dfrac{qB}{mD}$

［Ⅱ］ 次の問いの$\boxed{}$の中の答えを，それぞれの解答群の中から１つずつ選べ。解答群の中の番号は，同じものを何度使ってもよい。

ピストン付きの容器に単原子分子からなる理想気体が入っている。この理想気体の物質量（モル数）をnとし，気体定数をRとする。以下で気体と言えば，この理想気体を指す。

図は気体の圧力pを縦軸とし，体積Vを横軸としたグラフ（$p-V$グラフ）である。気体の状態を点Aから点Bへ実線に沿ってゆっくりと変化させる過程をA→Bと書く。気体の状態は，図の点Aから出発し，A→B→C→D→Aという過程（サイクル）をへて，再びAに達した。ここで，過程B→C，D→Aはどちらも断熱過程（気体と外部の間に熱の出入りが無い過程）であった。状態Aでの気体の圧力，体積，温度をそれぞれp_A，V_A，T_Aとし，状態Bでの気体の体積，温度をそれぞれV_B，T_Bとし，状態Cでの気体の圧力，体積，温度をそれぞれp_C，V_C，T_Cとし，状態Dでの気体の圧力，温度をそれぞれp_D，T_Dとする（$p_A > p_C > p_D$，$V_A < V_B < V_C$）。

（1） p_A，V_A，T_Aの間に$\boxed{\text{ア}}$が成り立つ。

（2） 温度T_AとT_B，T_CとT_Dの間にそれぞれ$\boxed{\text{イ}}$が成り立つ。

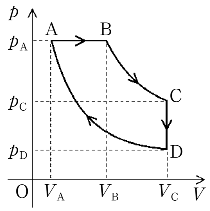
（3） 過程A→Bの間で，気体の内部エネルギーUの変化量は$\Delta U = \boxed{\text{ウ}}$となる。また，この間に外部（ピストン）が気体にした仕事は，$W_1 = \boxed{\text{エ}}$となる。外部が気体に加えた熱量をQ_1とすると，熱力学の第１法則より$\Delta U = \boxed{\text{オ}}$が成り立つため，$Q_1 = \boxed{\text{カ}}$となる。

（4） 過程B→Cの間に，外部が気体にした仕事をW_2とし，外部が気体に加えた熱量をQ_2とすると，熱力学の第１法則より$W_2 = \boxed{\text{キ}}$が得られる。また，$\boxed{\text{ク}}$より$\boxed{\text{ケ}}$が成り立つ。

（5） 過程C→Dの間に，外部が気体にした仕事をW_3とし，外部が気体に加えた熱量をQ_3とすると，$W_3 = \boxed{\text{コ}}$，$Q_3 = \boxed{\text{サ}}$が得られる。

（6） 図の点A，B，C，Dのうちで，気体の温度が最も高い状態は$\boxed{\text{シ}}$であり，最も低い状態は$\boxed{\text{ス}}$である。

（7） 気体の状態をA→B→C→D→Aと一周させる間に気体が外部にした正味の仕事をWとし，気体が外部から吸収した熱量をQ，外部へ放出した熱量をQ'とすると，$W = Q - Q'$が成り立つ。このとき$\eta = \dfrac{W}{Q}$を熱効率という。熱効率ηを計算すると，$\eta = 1 - \boxed{\text{セ}}$が得られる。



解答群

$\boxed{\text{ア}}$
① $np_A = RV_AT_A$　② $nV_A = Rp_AT_A$　③ $nT_A = Rp_AV_A$
④ $p_AV_A = nRT_A$　⑤ $p_AT_A = nRV_A$　⑥ $V_AT_A = nRp_A$

$\boxed{\text{イ}}$
① $T_A < T_B$，$T_C < T_D$　② $T_A < T_B$，$T_C = T_D$　③ $T_A < T_B$，$T_C > T_D$
④ $T_A = T_B$，$T_C < T_D$　⑤ $T_A = T_B$，$T_C = T_D$　⑥ $T_A = T_B$，$T_C > T_D$
⑦ $T_A > T_B$，$T_C < T_D$　⑧ $T_A > T_B$，$T_C = T_D$　⑨ $T_A > T_B$，$T_C > T_D$

$\boxed{\text{ウ}}$，$\boxed{\text{カ}}$
① $nR(T_A+T_B)$　② $nR(T_A-T_B)$　③ $nR(T_B-T_A)$
④ $\dfrac{1}{2}nR(T_A+T_B)$　⑤ $\dfrac{1}{2}nR(T_B-T_A)$　⑥ $\dfrac{3}{2}nR(T_A-T_B)$
⑦ $\dfrac{3}{2}nR(T_B-T_A)$　⑧ $\dfrac{5}{2}nR(T_A-T_B)$　⑨ $\dfrac{5}{2}nR(T_B-T_A)$　⓪ 0

$\boxed{\text{エ}}$
① $p_A(T_A+T_B)$　② $p_A(T_A-T_B)$　③ $p_A(T_B-T_A)$
④ $p_A(V_A+V_B)$　⑤ $p_A(V_A-V_B)$　⑥ $p_A(V_B-V_A)$
⑦ $nR(V_A+V_B)$　⑧ $nR(V_A-V_B)$　⑨ $nR(V_B-V_A)$　⓪ 0

$\boxed{\text{オ}}$
① W_1+Q_1　② W_1-Q_1　③ $-W_1+Q_1$　④ $-W_1-Q_1$　⑤ W_1Q_1

$\boxed{\text{キ}}$
① p_CV_C　② $p_AV_B+p_CV_C$　③ $p_AV_B-p_CV_C$
④ $p_CV_C-p_AV_B$　⑤ $\dfrac{1}{2}(p_AV_B+p_CV_C)$　⑥ $\dfrac{1}{2}nR(T_C-T_B)$
⑦ $\dfrac{1}{2}nR(T_B-T_C)$　⑧ $\dfrac{3}{2}nR(T_C-T_B)$　⑨ $\dfrac{3}{2}nR(T_B-T_C)$　⓪ 0

$\boxed{\text{ク}}$
① $Q_2 > 0$　② $Q_2 < 0$　③ $W_2 > 0$　④ $W_2 = 0$　⑤ $W_2 < 0$

$\boxed{\text{ケ}}$
① $T_B < T_C$　② $T_B = T_C$　③ $T_B > T_C$
④ $T_B < 0$，$T_C > 0$　⑤ $T_B > 0$，$T_C < 0$

$\boxed{\text{コ}}$，$\boxed{\text{サ}}$　① $V_{\mathrm{C}}(p_{\mathrm{D}}-p_{\mathrm{C}})$　② $V_{\mathrm{C}}(p_{\mathrm{C}}-p_{\mathrm{D}})$　③ $V_{\mathrm{C}}(p_{\mathrm{C}}+p_{\mathrm{D}})$

④ $\dfrac{1}{2}V_{\mathrm{C}}(p_{\mathrm{C}}+p_{\mathrm{D}})$　⑤ $\dfrac{1}{2}nR(T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{D}})$　⑥ $\dfrac{3}{2}nR(T_{\mathrm{D}}-T_{\mathrm{C}})$

⑦ $\dfrac{3}{2}nR(T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{D}})$　⑧ $\dfrac{5}{2}nR(T_{\mathrm{D}}-T_{\mathrm{C}})$　⑨ $\dfrac{5}{2}nR(T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{D}})$　⓪ 0

$\boxed{\text{シ}}$，$\boxed{\text{ス}}$　① A　② B　③ C　④ D　⑤ A，B

⑥ A，C　⑦ A，D　⑧ B，C　⑨ B，D　⓪ C，D

$\boxed{\text{セ}}$　① $\dfrac{T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{A}}}{T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{D}}}$　② $\dfrac{T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{D}}}{T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{A}}}$　③ $\dfrac{T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{B}}}{T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{A}}}$　④ $\dfrac{T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{B}}}{T_{\mathrm{D}}-T_{\mathrm{A}}}$

⑤ $\dfrac{3(T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{A}})}{5(T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{D}})}$　⑥ $\dfrac{3(T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{D}})}{5(T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{A}})}$　⑦ $\dfrac{3(T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{B}})}{5(T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{A}})}$

⑧ $\dfrac{5(T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{A}})}{3(T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{D}})}$　⑨ $\dfrac{5(T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{D}})}{3(T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{A}})}$　⓪ $\dfrac{5(T_{\mathrm{B}}-T_{\mathrm{A}})}{3(T_{\mathrm{C}}-T_{\mathrm{B}})}$

［Ⅲ］　図１のように，十分に長い滑らかな斜面上に帯電した小物体Ｐをおき，水平向きの一様な電場（電界）$\vec{E}$ を加える。斜面とＰの間に電気力は働かない。重力加速度の大きさは g，Ｐの電荷は $-Q\ (Q>0)$，質量は m である。また，図１の斜面の傾き角 θ は，$\sin\theta=12/13$，$\cos\theta=5/13$ となる角である。以下の問いの答えに角 θ の三角関数を使う場合は，これらの値を代入せよ。

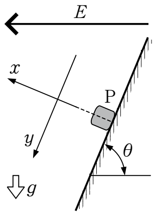


図１

(1) 小物体Ｐに働く重力 $\vec{G}$，垂直抗力 $\vec{N}$，電気力 $\vec{F}$ の大きさ G，N，F を，Q，g，m と電場の大きさ E の中から必要なものを使って答えよ。

電場の大きさを E_0 にすると，小物体Ｐを斜面上に静止させることができた。この静止状態を考える。

(2) E_0 を，Q，g，m の中から必要なものを使って答えよ。

(3) 図２にはＰが黒点で描いてある。図２の補助線のうち同心円の半径は，小さい方から $0.2mg$，$0.4mg$，$0.6mg$ … と，$0.2mg$ ずつ大きくなっていく。解答用紙の図２に，Ｐに働く重力 $\vec{G}$，垂直抗力 $\vec{N}$，電気力 $\vec{F}$ を表す矢印を（はっきり分かるように濃く）描け。なお，どの矢印がどの力か分かるように，記号 $\vec{G}$，$\vec{N}$，$\vec{F}$ も図２に記入すること。（参考：N の計算で必要なら，$5^2+12^2=13^2$ が参考になる。）

続いて，電場の向きは図１のままで，大きさを以下の式(＊)で与えられる $E(t)$ として，時間変化させる。ただし，E_0 は問(2)で求めた電場の大きさ，b は正の定数である。

$$E(t)=E_0 f(t)\quad\text{かつ}\quad f(t)=\begin{cases}-bt+1 & :0\leqq t<1/b\ \text{の場合}\\ bt-1 & :1/b\leqq t<2/b\ \text{の場合}\\ 1 & :2/b\leqq t\ \text{の場合}\end{cases}\qquad(*)$$

なお，図１のように x 軸を斜面に直交して上向き，y 軸を斜面に沿って下向きにとる。また，時刻 $t=0$ で小物体Ｐは斜面上で $y=0$ の位置に静止していたとする。

(4) Ｐに働く全ての力の和（合力）$\vec{T}(t)=(T_x(t),\ T_y(t))$ の x 成分 $T_x(t)$ と y 成分 $T_y(t)$ を，Q，g，m，$E(t)$ の中から必要なものを使って答えよ。

(5) 時刻 0 から $3/b$ の間で，$T_y(t)$ の時間変化を表すグラフを（はっきり分かるように濃く）解答用紙の図３に描け。ただし，図３中で $A=\dfrac{6}{13}mg$ とする。また，この問いでは，式(＊)の E_0 に問(2)の答えを代入せよ。

(6) 合力 $\vec{T}(t)$ によってＰに与えられる「時刻 0 から t の間の力積」は，「時刻 0 から t の間に $T_y(t)$ のグラフと t 軸で囲む面積」に等しい。時刻 0 から $3/b$ の間での，Ｐの運動量の変化量 $\Delta\vec{p}$ の y 成分 Δp_y を Q，g，m，b の中から必要なものを使って答えよ。なお，この問いでは，式(＊)の E_0 に問(2)の答えを代入せよ。

(7) Ｐの加速度 $\vec{a}(t)=(a_x(t),\ a_y(t))$ の x 成分 $a_x(t)$ と y 成分 $a_y(t)$ を，Q，g，m，$E(t)$ の中から必要なものを使って答えよ。

(8) 図４には，Ｐが黒点で描いてある。時刻 0 から $2/b$ の間の加速度 $\vec{a}(t)$ の向きを表す矢印を，解答用紙の図４に描け。

(9) 時刻 $2/b$ 以降，Ｐは等速直線運動をする。その理由を説明せよ。

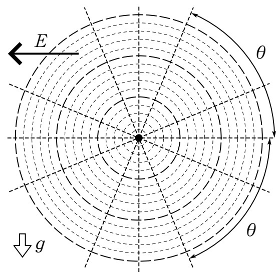


図２

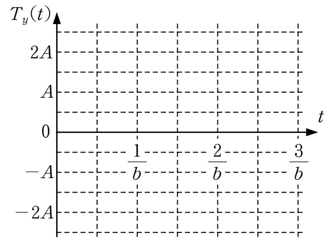


図３

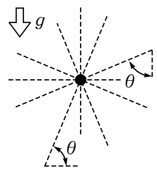


図４