2021（R3）年度　東京工業大学　入学試験　物理解説

$\boxed{1}$(50点)　　　　120分

＜解答＞

[A](a)

小球 B，C は x 軸に関して対称に動くので，小球 A は x 軸方向にのみ動く。この運動において，運動量保存の法則が成り立つ。

衝突直前の小球 C の x 軸方向の運動 は小球 B と同じ，y 軸方向は逆向きである。
また小球 A の速さは V_x で，小球 B，C の x 軸方向の速さと同じである。
小球 A が動き出した直後と衝突直前の x 軸方向の運動量保存の法則により，

$$mV_0 = mV_x \times 3,\ \therefore\ V_x = \frac{V_0}{3} \quad （答）$$

(b)

小球 A の運動開始直後と小球 B とC の衝突直前の運動エネルギー保存の法則により

$$\frac{1}{2}mV_0{}^2 = \frac{1}{2}mV_x{}^2 + \frac{1}{2}m(V_x{}^2+V_y{}^2)+\frac{1}{2}m\{V_x{}^2+(-V_y)^2\} = \frac{1}{2}m\{3V_x{}^2 + 2V_y{}^2\}$$

(a)より，$3V_x{}^2 = \frac{1}{3}V_0{}^2$ だから，$V_y{}^2 = \frac{1}{3}V_0{}^2$

小球 B は y 軸負方向に運動しているので，$V_y = -\frac{V_0}{\sqrt{3}}$　（答）

(c)

小球 A とともに動く観測者から見たとき，小球 A の運動開始後，小球 B は半径 L の円運動を始めるので，小球 B の糸の張力は円運動の向心力に等しい。小球 A の運動開始の直後，小球 B の速さは x 軸方向に $-V_0$ だから，向心力は $\frac{mV_0{}^2}{L}$，

したがって小球 B につながれた糸の張力は $T = \frac{mV_0{}^2}{L}$　（答）

(d)

小球 B とCが衝突する直前，小球 A，B，C は一体として x 軸方向に運動しているので，その加速度を a とすれば，
A は 2 本の糸によって引っ張られるので，その運動方程式は，$ma = -2T'$　①

小球 B は，A から見ると円運動している。すなわち，A とともに動く観測系では，B は慣性力 $-ma$ と糸の張力 T' とが x 軸方向に働いて円運動していることになる。

したがって，その円運動の運動方程式は $\frac{mV_y{}^2}{L} = T' - ma$　②

①，② から a を消去して，$T' = \frac{mV_y{}^2}{3L} = \frac{m}{3L}\left(\frac{-V_0}{\sqrt{3}}\right)^2 = \frac{mV_0{}^2}{9L}$　（答）

[B](e)

質量 $3m$ の物体に大きさ F の力を加えたことになるから，運動方程式は $3ma_1 = F$

したがって，$a_1 = \frac{F}{3m}$　（答）

(f)

実験 1 において，小球 A は初速 0，加速度 a_1 の等加速度運動をするから，

時刻 t_2 における A の速さ $v = a_1 t_2 = \dfrac{Ft_2}{3m}$　③

実験 2 で小球 B と C が衝突する直前のそれぞれの速さは w，その x 軸方向成分は $w\cos 30° = \dfrac{\sqrt{3}\,w}{2}$，その瞬間の小球 A の速さも x 軸方向に $\dfrac{\sqrt{3}\,w}{2}$ である。

実験 2 で小球 A が F によって動き出す瞬間と時刻 t_2 における運動量の変化はこの間の力積に等しいから，$3m \times \dfrac{\sqrt{3}\,w}{2} = Ft_2$　④

③，④ から $w = \dfrac{2\sqrt{3}}{3}v$　（答）

(g)

実験 1 において力 F が距離 x_1 作用して，質量 m の小球 3 個が速さ v を得たのだから，力学的エネルギーの保存の法則により，

$\dfrac{1}{2}(3m)v^2 = Fx_1$　⑤

実験 2 において 力 F が距離 x_2 作用して，質量 m の小球 2 個が速さ w，小球 1 個が速さ $\dfrac{\sqrt{3}\,w}{2}$ を得たのだから，力学的エネルギーの保存の法則により，

$\dfrac{1}{2}(2m)w^2 + \dfrac{1}{2}m\left(\dfrac{\sqrt{3}}{2}w\right)^2 = Fx_2$　⑥

⑤，⑥ から，$\dfrac{x_2}{x_1} = \dfrac{11w^2}{12v^2} = \dfrac{11}{12} \times \dfrac{4}{3} = \dfrac{11}{9}$　（答）

(h)

実験 2 における小球 A の運動方程式は，糸の張力を T_2 として

$ma_2 = F - 2T_2\cos\theta$　⑦

小球 B は A とともに動く観測系では円運動をしているので，円周方向の速さを v_B として，円運動の方程式は，慣性力 ma_2 を考慮して

$\dfrac{m}{L}(v_B)^2 = T_2 - ma_2\cos\theta$　⑧

⑦，⑧ から T_2 を消去して，$a_2 = \dfrac{F - \dfrac{2m{v_B}^2}{L}}{m(1+2\cos^2\theta)}$

$t = 0$ のとき，$\theta = \theta_2 > 0$，$v_B = 0$ として，$a_2 = \dfrac{F}{m(1+2\cos^2\theta_2)} > \dfrac{F}{3m} = a_1$

$t = t_2$ のとき，$\theta = 0$，$v_B = w\sin 30° = \dfrac{w}{2}$ として，

$a_2 = \dfrac{F - \dfrac{mw^2}{2L}}{3m} < \dfrac{F}{3m} = a_1$

$t = 0$ で $a_2 > a_1$，$t = t_2$ で $a_2 < a_1$ となるグラフは （ア）（答）

＜解説＞

[A](a)

衝突直前の小球BとCの速さの x 軸方向成分と小球Aの速さは同じ V_x であることに注意する。

(b)

小球BとCの運動は x 軸に関して対称であることに注意する。

(c)

小球AとB，AとCの距離は不変だから，Aが x 軸方向に運動すると，小球BとCは円運動を始める。小球Aとともに動く観測系では，Aの運動開始直後のB，Cの速さは x 軸方向に $-V_0$ である。糸の方向と直角だから，円周方向の速さとなり，円運動の向心力は $\dfrac{m(-V_0)^2}{L}$ となる。

(d)

小球B，Cが衝突する直前の小球Bの速度の y 成分 V_y が円周方向の速さであることに注意する。

[B](e)

力 F によって，3個の小球が一体として運動する。

(f)

力 F は x 軸方向の運動量変化をもたらすことに注目する。Fx は力 F が距離 x 作用して行った仕事であることに注意する。

(h)

上記の解答では運動方程式によって適当なグラフを求めた。しかし運動方程式が意味するところを定性的に理解して選択できれば，時間がかからない。

$t=0$，すなわち力 F を加えて小球A，B，Cの運動を開始させるとき，糸は x 軸に対して θ_2 傾いているから，小球B，Cを引く糸の張力は小さくてすむだろう。すると，実験1に較べて，x 軸方向の速さは増加しやすくなる，つまり加速度は大きくなると推定できる。

$t=t_2$，すなわち小球B，Cが衝突直前のとき，両球は円運動によって円周方向の速さをもっているから，糸の張力は実験1に較べて大きくなる。すなわち x 軸方向の速さは増加しにくくなる，つまり加速度は小さくなると推定できる。かくして（ア)を選択できる。

$\boxed{2}$(50点)

＜解答＞

[A](a)

$$C_e=\frac{\varepsilon_0 a^2}{3d}\quad（答）$$

問題図2のコンデンサーは図1のように，コンデンサー C_1，C_2，C_3 の直列接続と

みることができる。したがって,

$$\frac{1}{C_i}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}\text{,ここで}C_1=C_3=\frac{\varepsilon_0 a^2}{d},\quad C_2=\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 a^2}{d}=\varepsilon_r C_1$$

$$\frac{1}{C_i}=\frac{1}{C_1}\left(\frac{2\varepsilon_r+1}{\varepsilon_r}\right)=\frac{1}{3C_e}\left(\frac{2\varepsilon_r+1}{\varepsilon_r}\right),\quad C_i=\frac{\varepsilon_r}{2\varepsilon_r+1}\times 3C_e=\left(\frac{\varepsilon_r}{2\varepsilon_r+1}\right)\frac{\varepsilon_0 a^2}{d}\qquad\text{(答)}$$

(b)

$$3dE_A=V_0,\quad \therefore E_A=\frac{V_0}{3d}$$

問題図2の上側極板と誘電体上面の電荷は,図1からわかるように,等しいから,

$$C_1 dE_B=C_2 dE_C,\quad \therefore\ C_1E_B=C_2E_C,\quad E_C=\frac{C_1}{C_2}E_B=\frac{E_B}{\varepsilon_r}<E_B$$

また,問題図2の下側電極と誘電体下面の間の電場は E_B に等しいから,

$$dE_B+dE_C+dE_B=V_0=3dE_A,\quad 2E_B+\frac{E_B}{\varepsilon_r}=3E_A,\quad \therefore E_A=\frac{1}{3}\left(2+\frac{1}{\varepsilon_r}\right)E_B<E_B$$

$$\frac{E_A}{E_C}=\frac{1}{3}(2\varepsilon_r+1),\quad \varepsilon_r>1\text{だから},\ 1<\frac{E_A}{E_C},\quad \therefore E_C<E_A$$

したがって,$E_C<E_A<E_B$　(答)

[B]

(c)　ア $\dfrac{S-S_i(x)}{S}$　イ $\dfrac{a^2}{2}-x^2$　ウ $\dfrac{1}{2}(C_i+C_e)$　エ C_e　オ $\dfrac{C_i-C_e}{a^2}$

誘電体が挿入されていない部分の面積は $(S-S_i(x))$

したがって,誘電体が挿入されていない部分の電気容量は $\dfrac{S-S_i(x)}{S}\times C_e$

極板間の電気容量は誘電体が挿入されている部分の電気容量と挿入されていない部分の電気容量の並列接続だから,

$$C(x)=\frac{S_i(x)}{S}C_i+\frac{S-S_i(x)}{S}\times C_e=\frac{S_i(x)}{S}C_i+\boxed{\text{ア}}\times C_e$$

$|x|\leqq\dfrac{a}{2}$ のとき

誘電体が挿入されている部分の面積は$S_i(x)=\boxed{\text{イ}}=\left(\dfrac{a}{\sqrt{2}}\right)^2-|x|^2=\dfrac{a^2}{2}-x^2$

誘電体が挿入されていない部分の面積は $S-S_i(x)=a^2-\left(\dfrac{a^2}{2}-|x|^2\right)=\dfrac{a^2}{2}+|x|^2$

$$C(x)=\left\{\frac{1}{2}-\left(\frac{|x|}{a}\right)^2\right\}C_i+\left\{\frac{1}{2}+\left(\frac{|x|}{a}\right)^2\right\}C_e=\frac{1}{2}(C_i+C_e)-\frac{C_i-C_e}{a^2}x^2=C_1-bx^2$$

$$C_1=\frac{1}{2}(C_i+C_e),\quad b=\frac{C_i-C_e}{a^2}$$

$\dfrac{a}{2}<|x|\leqq a$ のとき

誘電体が挿入されている部分の面積は $S_i(x)=(a-|x|)^2$

誘電体が挿入されていない部分の面積は $a^2-(a-|x|)^2=2a|x|-|x|^2$

$$C(x)=\frac{(a-|x|)^2}{a^2}C_i+\frac{a^2-(a-|x|)^2}{a^2}C_e=\frac{(a-|x|)^2}{a^2}C_i+\frac{-(a-|x|)^2}{a^2}C_e+C_e$$

$$=C_e+\frac{C_i-C_e}{a^2}(a-|x|)^2=C_2+b(a-|x|)^2$$

$a<|x|$ のとき

誘電体は極板中には挿入されていないから $S_i(x)=0$，$C(x)=C_2=C_e$

以上によって，$C_1=\boxed{ウ}=\frac{1}{2}(C_i+C_e)$， $C_2=\boxed{エ}=C_e$

$$b=\boxed{オ}=\frac{C_i-C_e}{a^2}=\frac{1}{a^2}\{C_i-C_e\}=\frac{1}{a^2}\left\{\left(\frac{\varepsilon_r}{2\varepsilon_r+1}\right)\frac{\varepsilon_0a^2}{d}-\frac{\varepsilon_0a^2}{3d}\right\}=\frac{(\varepsilon_r-1)\varepsilon_0}{3d(2\varepsilon_r+1)}$$

(d)

$x=0$ のとき，$U_1(0)=\frac{1}{2}C(0)V_0{}^2$，$Q_0=C(0)V_0=C_1V_0$

x を変化させても，スイッチは開いているので，Q_0 は変化しない。

$U_1(x)=\frac{1}{2}Q_0V(x)$，$V(x)=\frac{Q_0}{C(x)}$，$\therefore U_1(x)=\frac{1}{2}\frac{Q_0{}^2}{C(x)}=\frac{(C_1V_0)^2}{2(C_1-bx^2)}$　（答）

(e)

スイッチが閉じているので $V(x)=V_0$，$Q(x)=C(x)V_0$，(b) の結果を用いて，

$U_2(x)=\frac{1}{2}Q(x)V(x)=\frac{1}{2}C(x)V_0{}^2=\frac{1}{2}(C_1-bx^2)V_0{}^2$　（答）

(f)

誘電体を動かす外力がする仕事 $W(x)$

コンデンサーの電荷が移動することによる電源が行う仕事 $\{Q(x)-Q(0)\}V_0$

コンデンサーの静電エネルギーの変化 $\Delta U_2(x)=U_2(x)-U_2(0)=\frac{1}{2}\{C(x)-C(0)\}V_0{}^2$

（静電エネルギーの変化）＝（外力がする仕事）＋（電源がする仕事）

すなわち，$\Delta U_2(x)=W(x)+\{Q(x)-Q(0)\}V_0$

また，この過程でコンデンサーへの印加電圧は V_0 のままだから，

$$W(x)=\Delta U_2(x)-\{Q(x)-Q(0)\}V_0=\frac{1}{2}\{C(x)-C(0)\}V_0{}^2-\{Q(x)-Q(0)\}V_0$$

$$=\frac{1}{2}\{C(x)-C(0)\}V_0{}^2-\{C(x)V_0-C(0)V_0\}V_0$$

$$=-\frac{1}{2}\{C(x)-C(0)\}V_0{}^2=\frac{1}{2}bx^2V_0{}^2$$　（答）

(g)

誘電体に働く力を $F(x)$ とすれば，$F(x)$ とは逆方向の微小変位がする微小仕事

$\Delta W(x)$は，$\Delta W(x)=\{-F(x)\}\Delta x$，したがって $F(x)=-\frac{d}{dx}\{W(x)\}=-bV_0{}^2x$　（答）

$k=bV_0{}^2$ とすれば，$F=-kx$ となって，x は単振動することがわかる。

単振動の公式により ω を角振動数とすれば $m\omega^2=k$，$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}$，

したがって振動の周期は，(c) の b を用いて

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}=\frac{2\pi}{V_0}\sqrt{\frac{m}{b}}=\frac{2\pi}{V_0}\sqrt{\frac{3dm(2\varepsilon_r+1)}{(\varepsilon_r-1)\varepsilon_o}}$$ （答）

(h)

$x=\frac{3a}{4}$ のとき，コンデンサーがもっているエネルギーは

静電エネルギー $U_2\left(\frac{3a}{4}\right)=\frac{1}{2}C\left(\frac{3a}{4}\right){V_0}^2=\frac{1}{2}\left\{C_2+\frac{ba^2}{16}\right\}{V_0}^2=\frac{1}{2}\left\{C_e+\frac{ba^2}{16}\right\}{V_0}^2$

$$=\frac{1}{32}(C_i+15C_e){V_0}^2$$

$x=0$ のとき，コンデンサーがもっているエネルギーは

誘電体の運動エネルギー $\frac{1}{2}m{v_1}^2$

静電エネルギー $U_2(0)=\frac{1}{2}C(0){V_0}^2=\frac{1}{2}C_1{V_0}^2=\frac{1}{4}(C_i+C_e){V_0}^2$

エネルギー保存により，両位置におけるエネルギーは等しいから

$\frac{1}{32}(C_i+15C_e){V_0}^2=\frac{1}{2}m{v_1}^2+\frac{1}{4}(C_i+C_e){V_0}^2$，整理して，$\varepsilon_r=10$として，

$${v_1}^2=\frac{7}{16m}(C_i-C_e){V_0}^2=\frac{7}{16m}\frac{a^2(\varepsilon_r-1)\varepsilon_0}{3d(2\varepsilon_r+1)}{V_0}^2$$

$$=\frac{7}{16m}\frac{a^2(10-1)\varepsilon_0}{3d(2\times10+1)}{V_0}^2=\frac{a^2\varepsilon_0{V_0}^2}{16dm},\quad\therefore v_1=\frac{aV_0}{4}\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{dm}}$$ （答）

＜解説＞

[A] (a)

問題図２のコンデンサーは図１のように，コンデンサー C_1，C_2，C_3 の直列接続とみることができる。すると，コンデンサーの直列接続における合成容量の公式を使える。

(b)

図２のような図で問題図１と問題図２の場合を考察すると解りやすいだろう。

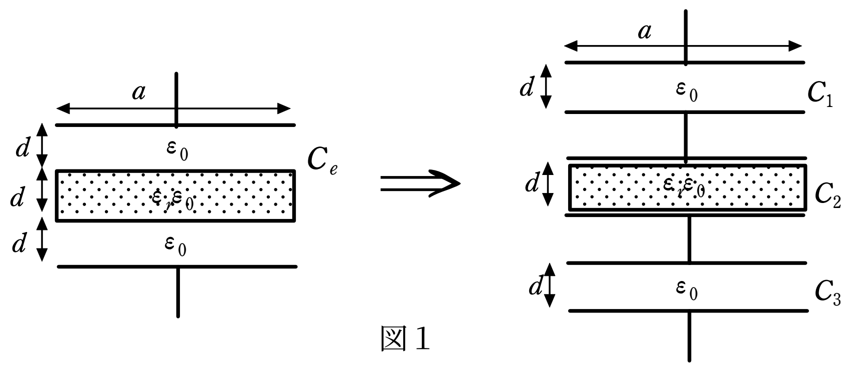

図１

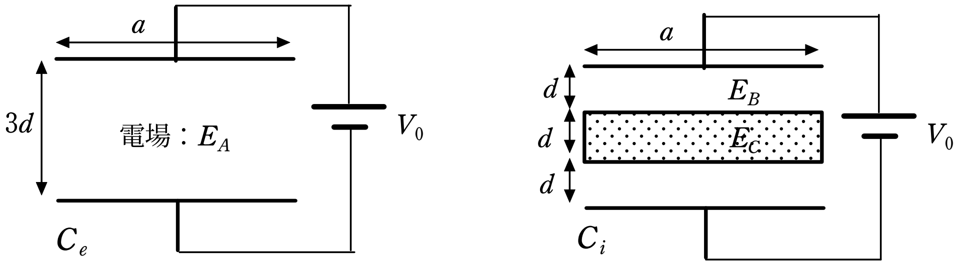

図２

[B] (c)

誘電体の上下面形状が辺長 $\dfrac{a}{\sqrt{2}}$ の正方形で，その頂点が

$(x\,,0)$，$\left(x+\dfrac{a}{\sqrt{2}},\dfrac{a}{\sqrt{2}}\right)$，$\left(x+\dfrac{a}{\sqrt{2}},\dfrac{-a}{\sqrt{2}}\right)$，$(x+a,0)$にある場合の取り扱いである。

誘電体が挿入されている部分の面積 $S_i(x)$ を求めて，電気容量 $C_i(x)$，$C(x)$ を求める。

誘電体が挿入されている部分の電気容量 $\dfrac{S_i(x)}{S}C_i$，挿入されていない部分の電気容量

$\dfrac{S-S_i(x)}{S}C_e$ の並列接続 $C(x)=\dfrac{S_i(x)}{S}C_i+\dfrac{S-S_i(x)}{S}C_e$ として計算する。

(d)

スイッチが開いているので，コンデンサーの電荷は変化しない。コンデンサーの電気容量は x によって変化し，両端電圧も変化するので，静電エネルギーは x の関数として変化する。

(e)

コンデンサーの電気容量はxによって変化するが，スイッチが閉じているので，両端電圧は電源電圧 V_0 と等しく，変化しない。したがって，コンデンサーの電気量が変化し，静電エネルギーは x の関数として変化する。

(f)

誘電体を$x=0$から位置 x まで動かすとき，コンデンサーの電気量が減少し，静電エネルギーが減少するので，外力を加えて仕事をしなければならない。ここでは，

（静電エネルギーの変化）＝（外力がする仕事）＋（電源が行う仕事）

が考察の前提として与えられているので，これを踏まえて考える。

しかし，考えてみるとコンデンサーに蓄積されていた電気量が直流電源に戻る（逆流する）という過程を含む。これが実態として，どのような物理的現象なのか，高校物理では教えられていない。形式的には電源が行う仕事が負になる。これを実態としてどのように理解すれば良いのか，解らない。

(g)

$W(x)=\dfrac{1}{2}bx^2{V_0}^2=\dfrac{1}{2}kx^2$，$k=b{V_0}^2$ とおけば，これは伸び x，ばね定数 k のばねに蓄積される弾性エネルギーと同じ式になる。すなわち誘電体の変位 x は単振動をすることが推定される。

ここでも，「誘電体には x 方向の復元力が作用し，誘電体は振動した」とあるから，

これを前提に考察すればよい。

(h)

(g) で誘電体が単振動することを導いたので，これを利用して考察する問題と捉えると，難しくなる。(f) でエネルギー保存の関係が前提とされているので，ここでは単純に $x=\dfrac{3a}{4}$ と $x=0$ とにおける系のエネルギー保存の関係から v_1 を求めれば良い。

$\boxed{3}$ (50点)

＜解答＞

[A] (a) $32T_0$

筒形容器に単原子分子理想気体が$2n$モル閉じ込められていたとする。

状態 A のシリンダー内の気体の状態方程式 $P_0(LS)=nRT_0$

状態 B のシリンダー内の気体の状態方程式 $32P_0(LS)=32nRT_0=nR(32T_0)=nRT_B$

$\therefore T_B=32T_0$ （答）

(b) $\dfrac{93}{2}P_0LS$

熱力学の第 1 法則よりシリンダー内の気体の内部エネルギーの変化は $\Delta U=Q+W$,

ここで Q は気体が吸収した熱量，W は気体がされた仕事で，ここでは $W=0$

$\Delta U=\dfrac{3}{2}nR\Delta T=\dfrac{3}{2}nR(32T_0-T_0)=\dfrac{93}{2}nRT_0=\dfrac{93}{2}P_0LS=Q$ （答）

(c)

状態 B から状態 C への変化において，$P_CV_C{}^{\gamma}=P_BV_B{}^{\gamma}$

ここで，$P_B=32P_0$，$V_B=LS$，$P_C=P_0$，$V_C=xS$

$P_0(xS)^{\gamma}=32P_0(LS)^{\gamma}$，$x^{\gamma}=32L^{\gamma}$，$\gamma=\dfrac{5}{3}$とすると，$x=8L$ （答）

(d)

熱力学の第 1 法則より，$\Delta U=\dfrac{3}{2}nR\Delta T=\dfrac{3}{2}nR(T_C-T_B)=Q+W$

状態Bから状態 C への変化は断熱膨張だから $Q=0$，したがって，

$W=\Delta U=\dfrac{3}{2}nR\Delta T=\dfrac{3}{2}nR(T_C-T_B)$

$nRT_C=P_CV_C=8P_0LS$，$nRT_B=P_BV_B=32P_0LS$

したがって，$W=\dfrac{3}{2}\times(8-32)P_0LS=-36P_0LS$

状態 B から状態 C の過程でシリンダー内の気体が外部にした仕事は $36P_0LS$ （答）

(e)

状態 A と筒形容器内の気体の状態は同じ。

状態 D ではシリンダー内と筒形容器内の気体の状態は同じだから，その状態方程式は

$P_DV_D=P_D(8+1)\mathrm{LS}=2nRT_D$

この状態変化では，気体の内部エネルギーは変化しないから，

$$\frac{3}{2}nRT_C+\frac{3}{2}nRT_A=\frac{3}{2}\times 2nRT_D,\quad \therefore T_C+T_A=2T_D$$

したがって $T_D=\dfrac{T_C+T_A}{2}=\dfrac{T_B/4+T_0}{2}=\dfrac{32T_0/4+T_0}{2}=\dfrac{9}{2}T_0$　（答）

$P_D(8+1)LS=2nRT_D=9nRT_0,\quad \therefore P_D=\dfrac{nRT_0}{LS}=P_0$　（答）

(f)

状態 A において，筒形容器内とシリンダー内の気体は同じnモルで $n=\dfrac{P_0LS}{RT_0}$

状態 Dでは，筒形容器とシリンダーの間のコックは開いているので，両者の気体の量は容積に比例する。したがって，

筒形容器内の気体のモル数は $\dfrac{1}{9}\times 2n$，シリンダー内の気体のモル数は $\dfrac{8}{9}\times 2n$

筒形容器からシリンダーへ移動した気体のモル数は $n-\dfrac{2}{9}n=\dfrac{7}{9}n=\dfrac{7P_0LS}{9RT_0}$　（答）

(g)

熱を吸収して状態 D からAに戻った過程において，熱力学の第 1 法則により，
筒型容器内とシリンダー内の全気体について，$\varDelta U=Q+W$,
ここで $\varDelta U$ は気体の内部エネルギーの変化，Q は気体が吸収した熱量，W は気体になされた仕事

$$\varDelta U=\frac{3}{2}\times 2nR(T_A-T_D)=3nR\left(T_0-\frac{9}{2}T_0\right)=-\frac{21}{2}nRT_0=-\frac{21}{2}P_0LS$$

$$W=P_0\times(8-1)LS=7P_0LS$$

したがって，$Q=\varDelta U-W=-\dfrac{21}{2}P_0LS-7P_0LS=-\dfrac{35}{2}P_0LS$

したがって，気体から温度調節器が吸収した熱量は $\dfrac{35}{2}P_0LS$　（答）

(h)

熱効率 $\eta=\dfrac{Q_{in}-Q_{out}}{Q_{in}}=1-\dfrac{Q_{out}}{Q_{in}}$,

状態Aから状態Bへの変化において(b)より，$Q_{in}=\dfrac{93}{2}P_0LS$

状態Dから状態Aへの変化において(g)より，$Q_{out}=\dfrac{35}{2}P_0LS$

したがって，$\eta=1-\dfrac{Q_{out}}{Q_{in}}=1-\dfrac{35}{93}=\dfrac{58}{93}$　（答）

＜解説＞

気体の状態変化に関する問題で，熱力学の第 1 法則を理解して活用すれば，大きな困難なく解ける問題である。ただ筒形容器とシリンダーとがコックの開閉によって，同じ状態になったり，別の状態変化をしたりするので，混乱なく変化の過程を捉えることが必要である。

(a)

最初，筒形容器内には単原子分子理想気体が$2n$モル閉じ込められたいたと考えると以下の考察がやりやすくなる。コックを開いて，放置したとき，ピストンが $x=L$ で静止したので，シリンダー内と筒形容器内の気体の量が同じ n モルとなるからである。

(b)

状態AからBへの変化は定積変化である。

(d)

状態 B から状態 C において，シリンダーの長さが $(8L-L)=7L$ だけ伸びたから，シリンダー内の気体が外部にした仕事は $7P_0LS$ などとしてはならない。大気に対する仕事だけでなく，「ピストンに加える外力」と問題文の記載があるように，外力を加えている実物（例えば手）に対して仕事をしている。

(e)

ピストンを固定して，コックを開いて放置して状態 C から状態 D に移行させたので，筒形容器内とシリンダー内の気体の温度，圧力は同じになっているので，「装置内の気体」という表現がされている。

(f)

筒形容器内とシリンダー内の気体の温度，圧力は同じなので，気体の量はそれぞれの体積に比例する。

＜総評＞

東工大の物理の問題は考察対象の物理現象が複雑で問題文が長く，使用される物理記号が多い。解答に至るまでの思考過程が長かったり，着想が必要だったりして，計算も複雑なものになる。難問といえるだろう。

解答に着手するとき，先ずは全文を一通り読み込み，考察の対象とする物理装置と事象、，問題内容を迅速に大雑把に把握する。その上で順次，設問に解答していくこと。問題の全貌を把握しておけば，考察や解答の方針を立てやすく，前問と後問との関係性などが解り，迅速で正しい解答に繋がる。

力と運動，電磁気，気体• 熱の３分野からの問題である。第３問は，波動（音波，光波など）分野と気体• 熱分野のいずれかだが，昨年に続き今年も気体• 熱分野からの出題であった。

$\boxed{1}$

面白い力学の問題である。糸で繋がれた物体の運動を考察する問題がベースになっている。[A] では，与えられた初期状態において A が等速運動を始めると，B，C がどのような運動をするかを明らかにしなければならない。ありがたいことに，これについて問題文に「小球 A から見ると，小球 B とC は小球 A を中心とする円運動をした」と記載されている。確かにその通りと理解する必要がある。その上で，各設問を考えていく。

運動方程式から設問の答えを導くことができれば良いが，ここでは，運動の過程ではなく，運動の開始直後と衝突直前の状態を問題にしているので，運動量保存の法則やエネルギー保存の法則を利用して考察すれば良い，と考えたい。運動方程式にこだわると，難しくなってしまう。(d) では，衝突する直前の x 軸方向の運動を運動方程式で記述できる。

[B] では，実験 1 は単に糸で繋がれた物体の運動だから，(e) はスムーズに解答したい。Ft が力積で運動量変化，Fx が仕事で力学的エネルギーの変化を示すことから，運動量保存の法則，エネルギー保存の法則を上手に利用する。

全体として難易度は高く A。

$\boxed{2}$

誘電体が挿入されているコンデンサー関する問題。誘電体が単振動することに関わる考察をする。誘電体が動くことによって，電気容量が変化し，直流電源との間で電荷の授受が生じる。ここで二つの疑問が生じる。一つは，コンデンサーの充電におけるジュール熱の発生である。

教科書では，コンデンサーの静電エネルギーが電池のした仕事の$\dfrac{1}{2}$と説明されている。電池のした仕事の$\dfrac{1}{2}$は回路の抵抗によるジュール熱として消費されてしまう。これは，物理的にはコンデンサーの充電過程がコンデンサーと直列の抵抗の存在を前提としている（そうでないと充電電流が無限大近くになってしまう）ことから明らかである。すると，この問題で前提としているエネルギー保存が成立しないという問題に逢着する。

しかし [B] の記載のように，「極板，スイッチ，導線の抵抗および電源の内部抵抗･･･無視できるものとする」なので，解説 (f) に記載したようにエネルギー保存則を前提として考察することになる。しかし，本来（電池のした仕事）＝（静電エネルギー）＋（抵抗によるジュール熱）の関係があるので，ここでは誘電体の運動エネルギーを実態とは異なるものとして扱うことになる。

もう一つは電池のする仕事が負になる場合である。誘電体の位置 $x = 0$ のとき，電気容量が最大になるので，コンデンサーの電気量が最大になる。誘電体が動いて，コンデンサーの容量が減少するに従い，電気量が減少するということは，電流が電池に戻り電池のする仕事が負になるものとして扱うことになる。この事象の実態はどのようなものかが解らない。

このように，本問には基本的な疑問を抱かざるをえない。問題設定通り解答すれば良いといえばそれまでだが，よく勉強した受験生ほど，戸惑いを感じるのではないだろうか。

このことに関して，有識者のご意見を期待する。

全体としての難易度は B。

$\boxed{3}$

一方が形状固定の筒形容器，他方はピストンによって長さの変わるシリンダーという二つの容器を開閉コック付きの管で接続した装置を考える。コックの開閉，ピストンの固定開放，ヒータによる加熱，温度調節器による熱の吸収などの操作による装置内の気体の状態変化を考察する問題。

個々の変化の過程は難しいものではなく，熱力学の第 1 法則を活用すれば解ける問題だが，操作の状況を注意深く踏まえないと，紛らわしくなって誤答にいたる。

全体としての難易度は B。

240915