2020 年度入学試験問題（前期日程）

物　理

出題意図及び正答

＊すべての解答について，数学的に等価な問題は正答とします。

問題 $\boxed{1}$

出題意図

運動する小球とそれに作用する力およびエネルギー保存則に関する基礎的な理解を問うている。回転運動をしている物体に作用する向心力と運動方程式，およびそれらに関する運動を正しく理解できるかどうか調べる。

<table>
<tr><td rowspan="2">(a)</td><td>(i)</td><td colspan="5">$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv_A^2 + mgr$</td></tr>
<tr><td>(ii)</td><td colspan="5">$v_1 = 2\sqrt{gr}$</td></tr>
<tr><td rowspan="4">(b)</td><td>(i)</td><td colspan="5">$h = r(1 - \cos\theta)$</td></tr>
<tr><td>(ii)</td><td colspan="5">$v = \sqrt{v_2^2 - 2gr(1 - \cos\theta)}$</td></tr>
<tr><td>(iii)</td><td colspan="5">$N = m\frac{v_2^2}{r} - 2mg + 3mg\cos\theta$</td></tr>
<tr><td>(iv)</td><td colspan="5">$v_3 = \sqrt{5gr}$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">(c)</td><td>(i)</td><td colspan="5">$d_{\mathrm{Q}} = \sqrt{\frac{2rv_2^2}{g} - 8r^2}$</td></tr>
<tr><td>(ii)</td><td colspan="5">$d_{\min} = \sqrt{2}r$)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">(d)</td><td>(ア)</td><td>○</td><td>(イ)</td><td>×</td><td>(ウ)</td><td>×</td></tr>
<tr><td>(エ)</td><td>○</td><td>(オ)</td><td>○</td><td>(カ)</td><td>×</td></tr>
</table>

問題 $\boxed{2}$

出題意図

直線往復運動ならびに円運動する音源のドップラー効果に関する問題である。一定の振動数の音を出し，一定の速さで移動する音源の位置や移動方向によって変化する音の周波数を，波の個数や音の観測時間を交えて正しく理解しているかを問うている。

(a)	(ア)	$\dfrac{r}{V}$	(イ)	$\dfrac{v_{\mathrm{s}}r}{V}$
	(ウ)	$\dfrac{r}{V}f_0$	(エ)	$\left(1+\dfrac{v_{\mathrm{s}}}{V}\right)r$
	(オ)	$\dfrac{V+v_{\mathrm{s}}}{f_0}$	(カ)	$\dfrac{V}{V+v_{\mathrm{s}}}f_0$
	(キ)	$\left(\dfrac{3}{V}+\dfrac{2}{v_{\mathrm{s}}}\right)r$	(ク)	$2\left(\frac{1}{V}+\frac{1}{v_{\mathrm{s}}}\right)r$
	(ケ)	$\dfrac{2r}{v_{\mathrm{s}}}f_0$	(コ)	$2\left(-\frac{1}{V}+\frac{1}{v_{\mathrm{s}}}\right)r$
	(サ)	$\dfrac{V}{V-v_{\mathrm{s}}}f_0$	(シ)	(あ)
(b)	(ス)	f_0	(セ)	小さく
	(ソ)	f_0	(タ)	大きく
	(チ)	$\dfrac{5\pi}{3}$	(ツ)	$\dfrac{V}{V-v_{\mathrm{s}}}f_0$

問題 3

出題意図

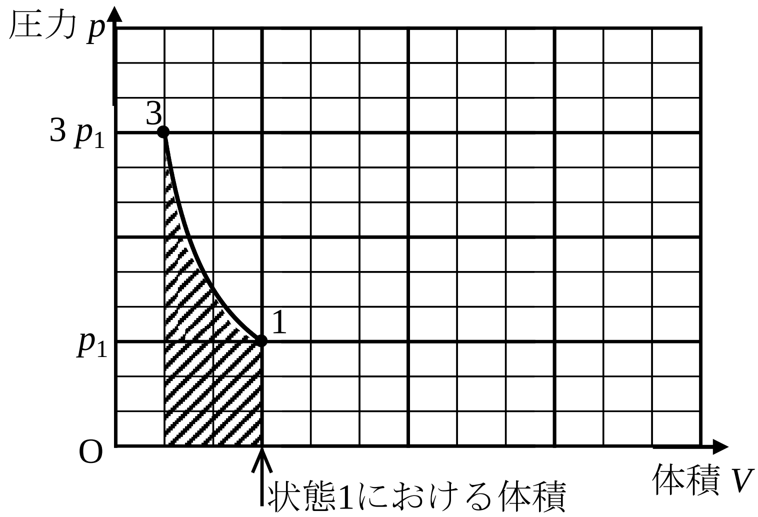
　コンデンサーの静電容量とコンデンサー内の電界といったコンデンサーの性質の理解に加え、直列接続したコンデンサーとコイルに抵抗が並列接続した回路を用いることで、直流でのコンデンサーとコイルの働きだけでなく、交流での直列共振といった電気回路のふるまいを理解しているかを問うている。

(a)		$C_1 = \varepsilon\dfrac{ab}{2d}$	$C_2 = \varepsilon\dfrac{ab}{d}$	
(b)	(i)	$E_1 = \dfrac{V_C}{4d}$	$E_2 = 0$	$E_3 = \dfrac{V_C}{d}$
		$E_4 = 0$	$E_5 = \dfrac{V_C}{4d}$	
	(ii)	$C = \dfrac{2\varepsilon ab}{d}$		
(c)		$I_R = \dfrac{V}{r+R}$	$I_L = 0$	$V_C = \dfrac{VR}{r+R}$
(d)		(ア) $\left\lvert\omega L - \dfrac{1}{\omega C}\right\rvert$	(イ) 0	(ウ) $\dfrac{\sqrt{2}V}{r}$
		(エ) 大きく	(オ) 進む	(カ) 大きく
		(キ) 遅れる		

問題 $\boxed{4}$

出題意図

　気体の状態変化，気体とピストンの力のつり合い，および熱力学第一法則を理解しているかを問うている。また，グラフを描く能力と計算の能力を試している。

(a)	(i)	$T_2 = 3T_1$	(ii)	$\Delta U_{12} = 3nRT_1$
	(iii)	$W_{12} = 0$	(iv)	$Q_{12} = 3nRT_1$
	(v)	$Q_{12} = 3.00 \times 10^2$ [J]		$F = 3.00 \times 10^3$ [N]
(b)	(i)	$V_3 = \dfrac{nRT_1}{3p_1}$	(ii)	$\Delta U_{13} = 0$
	(iii) (iv)			
(c)	ア，エ，キ			

前期日程

2020年度入学試験問題

物　理

注　意　事　項

1．　この問題冊子は，試験開始の合図があるまで開いてはいけません。

2．　解答用紙は問題冊子とは別になっています。解答はすべての解答用紙の指定されたところに記入しなさい。それ以外の場所に記入された解答は，採点の対象となりません。解答用紙は4枚あります。

3．　本学の受験番号をすべての解答用紙の指定されたところへ正しく記入しなさい。氏名を書いてはいけません。

4．　この問題冊子は，表紙を含めて16ページあります。問題は4ページから11ページにあります。ページの落丁・乱丁及び解答用紙の汚れ等に気付いた場合は，監督者に申し出なさい。

5．　問題冊子の余白等は適宜利用しても構いませんが，どのページも切り離してはいけません。

6．　この問題冊子は持ち帰りなさい。

1 図1に示す動かない物体のなめらかな内面を考える。図2は図1の物体の鉛直断面図である。内面の鉛直断面は原点Oを中心とする半径 r [m]の円の一部で，点A, B, Cはその円周上にあり，点Aは点Oと同じ高さ，点Bは最下点，点Cは最高点である。CA間は開いている。点Bに質量 m [kg]の小球を置き，円の接線方向に初速度を与える。小球の運動は図2の鉛直断面内で起こるものとする。以下の問いに答えよ。ただし，重力加速度の大きさを g [m/s²]とする。空気抵抗は無視してよい。

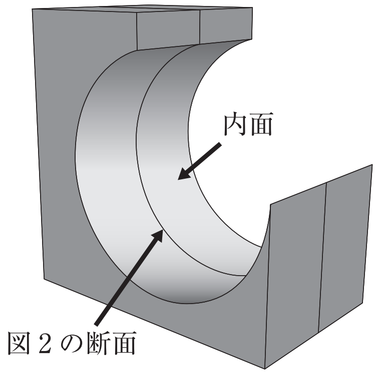


図1

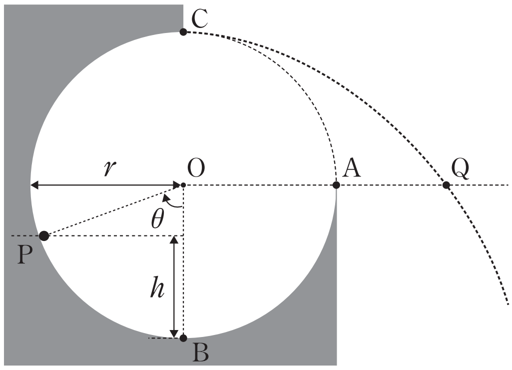


図2

(a) 点Bで図2の右向きに速さ v_0[m/s]を小球に与えたとき，小球は反時計回りに点Bから点Aまで円周に沿って運動し，点Aから速さ v_A[m/s]で飛び出した。

(i) 点Bにおいて初速を与えられたときと，点Aを通過するときの小球の力学的エネルギー保存則の式を r, m, g, v_0, v_A のうち必要なものを用いて書け。ただし，点Bの高さを重力による位置エネルギーの基準とする。

(ii) v_0 が v_1[m/s]のとき，点Aから飛び出した小球の最高点が点Cと同じ高さであった。v_1 を r, m, g のうち必要なものを用いて書け。

(b) 点Bで図2の左向きに速さ v_2[m/s]を小球に与え，小球が時計回りに円周に沿って運動するときを考える。運動している小球の位置を点Pとし，線分OPと線分OBのなす角を θ [rad]で表し，時計回りを正とする。

(i) 点Pの点Bからの鉛直方向の高さ h[m]を r, m, g, θ のうち必要なものを用いて書け。

(ii) 点Pにおける小球の速さ v[m/s]を r, m, g, v_2, θ のうち必要なものを用いて書け。

(iii) 点Pにおいて小球が内面から受ける垂直抗力 N[N]を r, m, g, v_2, θ のうち必要なものを用いて書け。ただし，等速でない円運動をする小球が受ける遠心力は，その瞬間の速さで等速円運動する場合の遠心力と等しいとする。

(iv) v_2 を徐々に大きくし，その値が v_3[m/s]になったときに，はじめて点Cに到達した。v_3 を r, m, g のうち必要なものを用いて書け。

(c) 点 B で図 2 の左向きに速さ v_2 を与えられた小球は，時計回りに点 B から点 C まで円周に沿って運動し，点 C で円周から離れ空中に飛び出した。小球は点 C から飛び出したあと，OA を通る直線を通過した。その通過点を点 Q とする。

(i) OQ 間の距離 d_Q[m]を r，m，g，v_2 のうち必要なものを用いて書け。

(ii) この d_Q の最小値 d_{min}[m]を r，m，g のうち必要なものを用いて書け。

(d) 点 B で図 2 の左向きの速さを小球に与えた場合について，以下の記述の中で正しいものには○を，誤りには×を記入せよ。ただし，記号は問(a)から問(c)で求めたものとする。

(ア) 点 B での速さが v_3 より大きい場合，点 B と点 Q を通過する小球の力学的エネルギーが保存される。

(イ) 点 B での速さが v_1 である場合，小球の最高点は点 C と同じ高さになる。

(ウ) 点 B での速さが v_1 である場合，小球の最高点での速さは 0 になる。

(エ) 小球が円周に沿って運動をしているとき，小球が内面から受ける垂直抗力が小球にする仕事は 0 である。

(オ) 点 C から小球が飛び出した場合，小球は内面上に落下することはない。

(カ) 点 B での速さが v_3 より小さい場合，小球は必ず内面上に落下する。

2 一定の振動数f_0[Hz]の音を出している音源が，一定の速さv_s[m/s]で，図1のようにx軸上のAC間を直線往復運動している場合と，図2のように原点Oを中心とした半径r[m]のx–y平面上の円周ABCD上を反時計回りに等速円運動している場合を考える。観測者のいる点Pは図1，図2ともに原点Oからx軸正の方向に$2r$[m]離れた場所である。音速をV[m/s]とし，v_sはVに比べて小さいものとする。以下の文中の［(ア)］から［(ツ)］を適切な式，または語句で埋めよ。式はf_0，v_s，r，Vのうち必要な記号を用いて表せ。［(シ)］は図3の(あ)〜(え)の中から適切なグラフを選び，［(セ)］，［(タ)］は四角で囲まれた語句のうち適するものを書け。

(a) まず，図1の直線往復運動している場合を考える。図4のように，音源は$t=0$[s]に点Aで点Cに向かって折り返し，$t=t_0$[s]に点Cで再び点Aに向かって折り返す。

$t=0$の瞬間に音源から出た音は，音源が点Cに達する前に点Pにいる観測者に$t=t_a$[s]に届いた。このとき$t_a=$［(ア)］[s]である。$t=0$から$t=t_a$の間に音源は［(イ)］[m]進み，1波長分の音波を1個の波と考えると，この間に音源が出す波は［(ウ)］個で，$t=t_a$における観測者と音源との間の距離［(エ)］[m]に入っている。よって，この音の波長は［(オ)］[m]となり，観測者の聞く音の振動数は［(カ)］[Hz]となる。一方，$t=t_0$に音源から出た音が観測者に届く時刻は［(キ)］[s]であり，時刻$t=t_a$から時刻$t=$［(キ)］までの時間は［(ク)］[s]となる。これは音源が点Aから点Cまでに動いている間に出た音を観測者が聞いている時間である。点Aから点Cまで動いている間に音源は［(ケ)］個の波を出すので，観測者が聞く音の振動数は［(カ)］となる。同様に，音源が点Cから点Aに向かって動く間に出た音を観測者が聞く時間は［(コ)］[s]であり，その音の振動数は［(サ)］[Hz]となる。ここで，音源が動く速さを$v_s=\dfrac{V}{5}$[m/s]とし，観測者が聞く音の最大振動数をf_{max}[Hz]，最小振動数をf_{min}[Hz]とすると，観測者が聞く音の振動数f[Hz]の時間変化のグラフは［(シ)］となる。

(b) 次に，図2の等速円運動している場合を考える。音源の位置を点Qとし，$\angle POQ=\theta$[rad]とする。ただし，θは反時計回りを正の向きとする。

点Aで音源から出る音を観測者が聞くと，その振動数は［(ス)］[Hz]となる。その後，点Aから点Cに動く過程で音源が出す音を観測者が聞くと，その振動数は点Aで出る音より［(セ) 大きく，小さく］なる。点Cで音源から出る音を観測者が聞くと，その振動数は［(ソ)］[Hz]である。さらに，点Cから点Aに動く過程で音源から出る音を観測者が聞くと，その振動数は点Aで音源から出る音より［(タ) 大きく，小さく］なる。観測者が聞く音の振動数は$\theta=$［(チ)］[rad]の瞬間に音源から出るときに最大となり，その振動数は［(ツ)］[Hz]である。ただし，［(チ)］は$0\leqq\theta<2\pi$で答えよ。

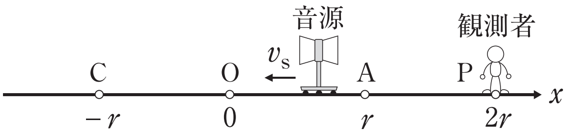

音源
観測者
C
O
v_s
A
P
x
$-r$
0
r
$2r$

図 1

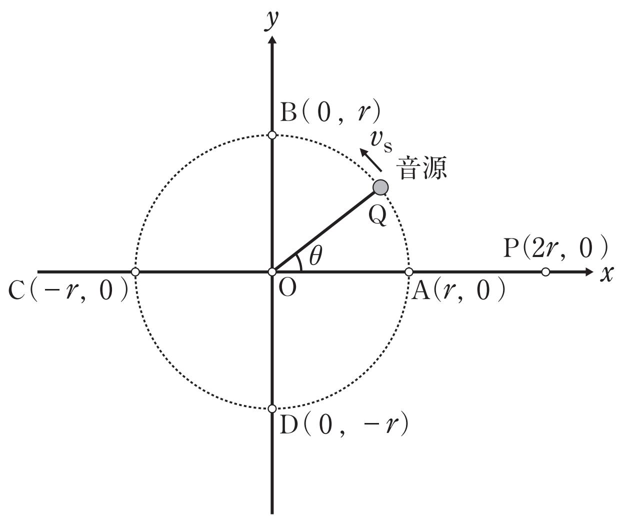

y
B(0, r)
v_s
音源
Q
θ
P($2r$, 0)
x
C($-r$, 0)
O
A(r, 0)
D(0, $-r$)

図 2

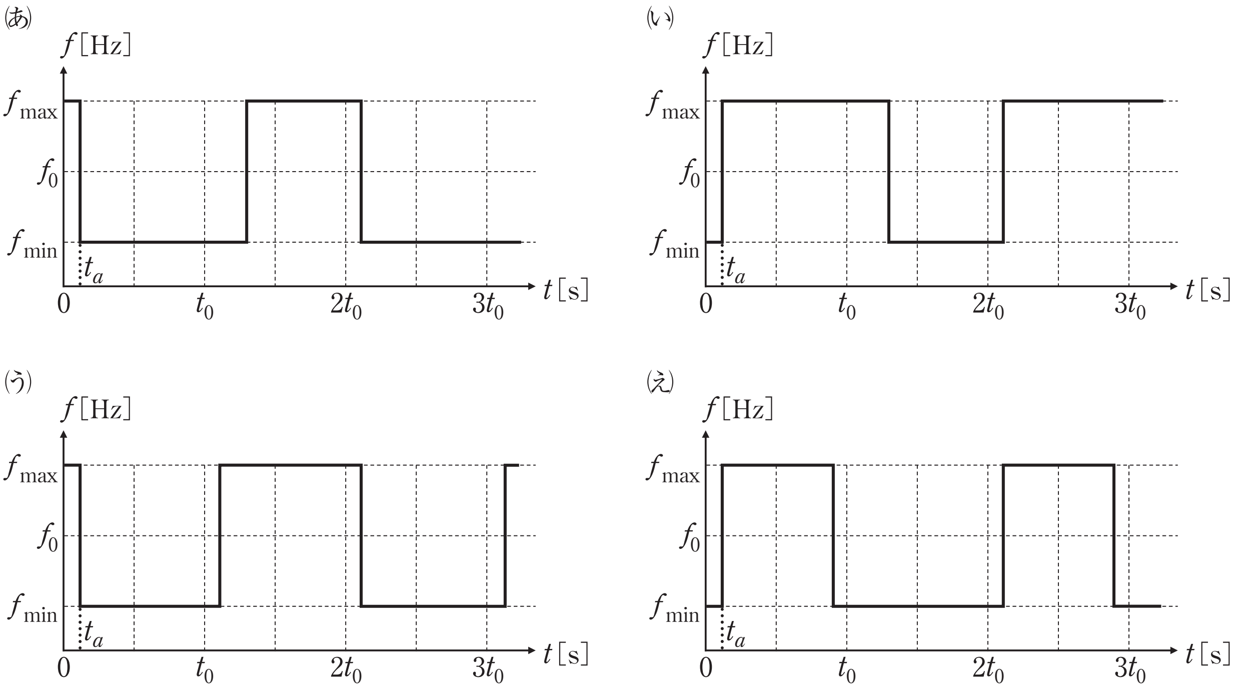

(あ)
(い)
(う)
(え)
f[Hz]
f_{max}
f_0
f_{min}
t_a
0
t_0
$2t_0$
$3t_0$
t[s]

図 3

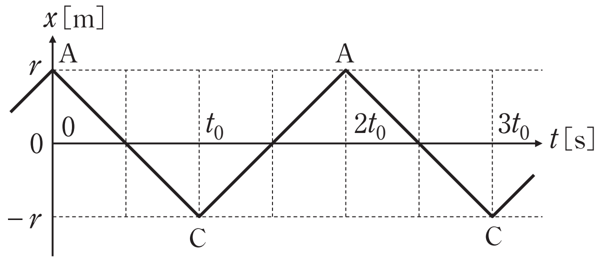

x[m]
A
r
0
t_0
$2t_0$
$3t_0$
t[s]
$-r$
C

図 4

3 図1の回路は，電気容量 C[F]のコンデンサーC，抵抗値 R[Ω]の抵抗R，自己インダクタンス L[H]のコイルL，内部抵抗 r[Ω]をもつ電圧 V[V]の直流電源，電圧の実効値が V[V]で角周波数 ω[rad/s]の交流電源，およびスイッチで構成されている。交流電源の内部には図の破線中に示されているように r[Ω]の抵抗があるものとする。導線やスイッチの抵抗は無視できる。図中のA, B, D, E, Fは回路上の接続点を表している。

(a) まず，図2のような平行板コンデンサー C_1, C_2 を考える。コンデンサー C_1 の極板1，2は直方体で，幅 $2a$[m]，奥行き b[m]，厚さ d[m]である。コンデンサー C_2 の極板3，4も直方体で，幅 $4a$[m]，奥行き b[m]，厚さ d[m]である。コンデンサー C_1, C_2 とも極板間距離は $4d$[m]であり，極板間距離は極板の幅と奥行きに比べてじゅうぶん小さい。それぞれの極板間は誘電率 ε[F/m]の空気で満たされている。コンデンサー C_1, C_2 の電気容量 C_1[F], C_2[F]をそれぞれ求めよ。答えは a, b, d, ε のうち必要な記号を用いて表せ。

(b) 次に，図3のように，コンデンサー C_1, C_2 を動かして幅方向に a[m]重なった状態にし，極板1と3，極板2と4を接続した。奥行き方向にずれはない。この状態のコンデンサーが図1のコンデンサーCである。

(i) D−E間に直流電圧 V_C[V]が加わっている場合に，図3の領域Ⅰ，Ⅱ，Ⅲにわけた極板間の電界の強さ E_1 から E_5 を a, b, d, ε, V_C のうち必要な記号を用いて表せ。ただし，E_1 は領域Ⅰの極板1−2間の電界，E_2 は領域Ⅱの極板1−3間の電界，E_3 は領域Ⅱの極板3−2間の電界，E_4 は領域Ⅱの極板2−4間の電界，E_5 は領域Ⅲの極板3−4間の電界の強さとする。点Dの電位は点Eの電位より高く，電界はDからE方向を正とし，各極板の端の周辺部分の影響は無視できる。

(ii) コンデンサーCの合成電気容量 C[F]を a, b, d, ε のうち必要な記号を用いて表せ。

(c) 図1のスイッチをA側に接続して直流電圧を加え，じゅうぶん時間が経過した。抵抗Rを流れる電流 I_R[A]とコイルLを流れる電流 I_L[A]，およびコンデンサーCに加わる電圧 V_C[V]を求めよ。答えは C, R, L, V, r のうち必要な記号を用いて表せ。

(d) コンデンサーに充電された電荷を完全に放電したのち，スイッチをB側に接続した。交流電圧の角周波数 ω[rad/s]を変化させるときの以下の説明文を完成させよ。ただし，$\boxed{\text{(ア)}}$ から $\boxed{\text{(ウ)}}$ の解答は C, R, L, V, r, ω のうち必要な記号を用いて表せ。$\boxed{\text{(エ)}}$ から $\boxed{\text{(キ)}}$ は四角で囲まれた語句のうち適するものを書け。

コンデンサーとコイルが直列接続された部分(D−E−F間)の合成インピーダンス Z は $\boxed{\text{(ア)}}$ [Ω]である。角周波数 $\omega = \omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$ のとき Z は $\boxed{\text{(イ)}}$ [Ω]となり，D−E−F間を流れる電流の最大値は $\boxed{\text{(ウ)}}$ [A]となる。また，$\omega < \omega_0$ のとき，Z の大きさは $\boxed{\text{(イ)}}$ よりも $\boxed{\text{(エ) 大きく，小さく}}$ なり，D−E−F間を流れる電流の位相は抵抗Rを流れる電流よりも $\dfrac{\pi}{2}$ $\boxed{\text{(オ) 進む，遅れる}}$。$\omega > \omega_0$ のときは，Z の大きさは $\boxed{\text{(イ)}}$ よりも $\boxed{\text{(カ) 大きく，小さく}}$ なり，電流の位相は抵抗Rを流れる電流よりも $\dfrac{\pi}{2}$ $\boxed{\text{(キ) 進む，遅れる}}$。

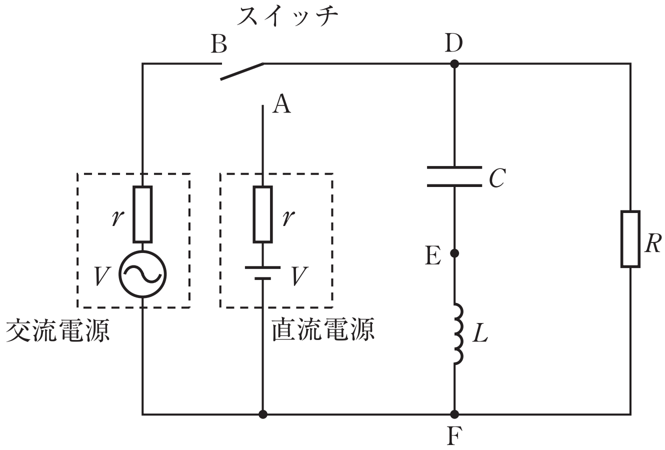

スイッチ
B
D
A
C
r
r
R
V
V
E
交流電源
直流電源
L
F

図 1

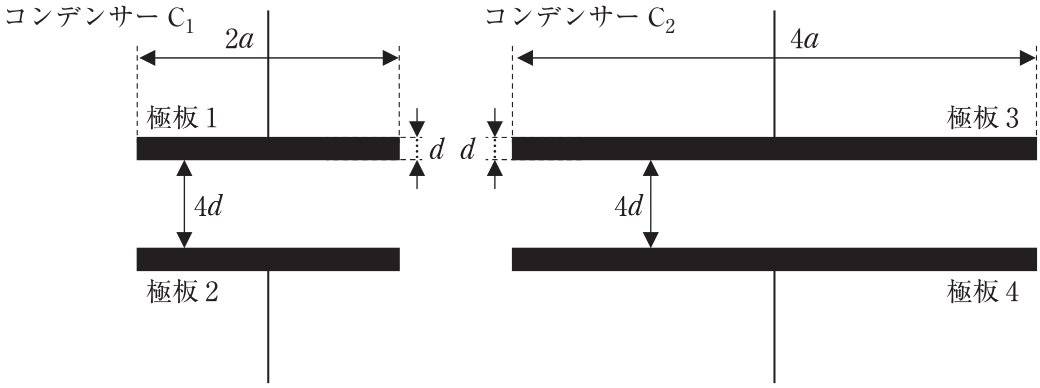

コンデンサー C_1
コンデンサー C_2
$2a$
$4a$
極板 1
極板 3
d
d
$4d$
$4d$
極板 2
極板 4

図 2

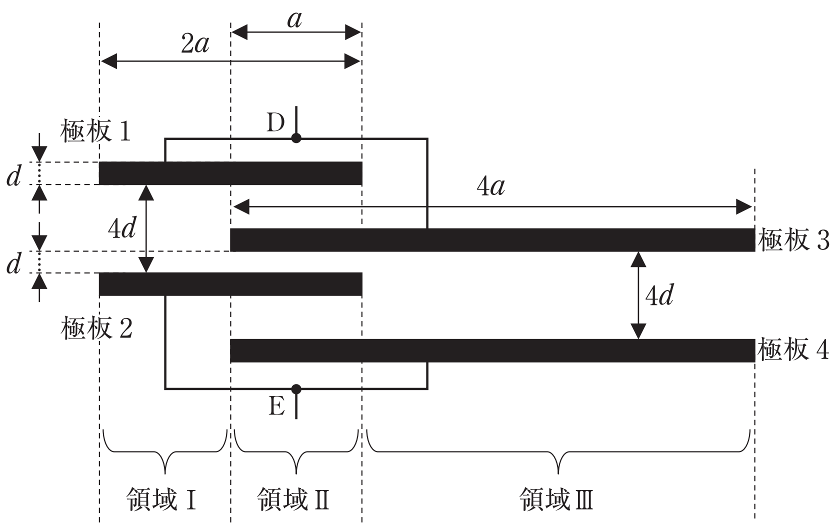

a
$2a$
極板 1
D
d
$4a$
$4d$
極板 3
d
$4d$
極板 2
極板 4
E
領域 I
領域 II
領域 III

図 3

4 図1のように，水平な床の上に固定されたシリンダーとピストンからなる断熱容器内に，単原子分子理想気体が n[mol]入っている。ピストンは水平方向になめらかに動く。容器は中に温度調節器を備えており，内部の気体の温度を精密に調節することができる。容器と温度調節器の熱容量は小さく無視できる。はじめ，容器内の気体の圧力は p_1[Pa]，温度は T_1[K]であり，ピストンは静止している。この状態を状態1とする。状態1から容器内の気体の圧力を $3p_1$[Pa]まで高めることを試みる。気体定数を R[J/(mol・K)]とする。以下の問いに答えよ。答えは，特に指示がない場合は n，p_1，T_1，R のうち必要な記号を用いて書け。問(a)(v)，問(b)(iii)，(iv)および問(c)では設問の指示に従え。

(a) 状態1からピストンを固定して，温度調節器で容器内の気体をゆっくりと加熱し，容器内の気体の圧力が $3p_1$ になった瞬間に加熱をやめる。この状態を状態2とする。

(i) 状態2における容器内の気体の温度 T_2[K]を求めよ。

(ii) 状態1から状態2に変化する間の容器内の気体の内部エネルギーの変化 $\varDelta U_{12}$[J]を求めよ。

(iii) 状態1から状態2に変化する間にピストンが容器内の気体にする仕事 W_{12}[J]を求めよ。

(iv) 状態1から状態2に変化させるために要する熱量 Q_{12}[J]を求めよ。

(v) 状態1における容器内の気体の圧力，温度，体積をそれぞれ 1.00×10^5 Pa，3.00×10^2 K，1.00×10^{-3} m^3 とし，シリンダーの断面積を 1.00×10^2 cm^2 とする。状態1から状態2に変化させるために要する熱量 Q_{12}[J]と，状態2において容器内の気体がピストンを押す力の大きさ F[N]をそれぞれ求めよ。

(b) 状態1から温度調節器で容器内の気体の温度を T_1 で一定に保ちながら，ピストンをゆっくりと図1の左方向に動かし，容器内の気体の圧力が $3p_1$ になった瞬間にピストンをとめる。この状態を状態3とする。

(i) 状態3における容器内の気体の体積 V_3[m^3]を求めよ。

(ii) 状態1から状態3に変化する間の容器内の気体の内部エネルギーの変化 $\varDelta U_{13}$[J]を求めよ。

(iii) 状態1から状態3に変化する間の容器内の気体の圧力 p[Pa]と体積 V[m^3]の関係を解答欄の図中に示せ。状態1と状態3の位置を黒点と状態の番号で示し，変化の経路をなめらかな線で示せ。

(iv) 状態1から状態3に変化する間に，ピストンが容器内の気体にする仕事の大きさに相当する面積を解答欄の図中に斜線で示せ。

(c)　状態 1 から温度調節器を使わずに気体が断熱された状態で，ピストンをゆっくりと図 1 の左方向に動かし，容器内の気体の圧力が $3p_1$ になった瞬間にピストンをとめる。この状態を状態 4 とする。状態 4，問(a)の状態 2 および問(b)の状態 3 に関する以下の(ア)〜(キ)の記述のうち正しいものを全て選べ。

(ア)　状態 2 における容器内の気体の温度は状態 4 よりも高い。

(イ)　状態 3 における容器内の気体の温度は状態 4 よりも高い。

(ウ)　状態 3 における容器内の気体の体積は状態 4 よりも大きい。

(エ)　状態 2 における容器内の気体の内部エネルギーは状態 4 よりも大きい。

(オ)　状態 3 における容器内の気体の内部エネルギーは状態 4 と等しい。

(カ)　状態 2 において容器内の気体がピストンを押す力の大きさは状態 4 よりも大きい。

(キ)　状態 3 において容器内の気体がピストンを押す力の大きさは状態 4 と等しい。

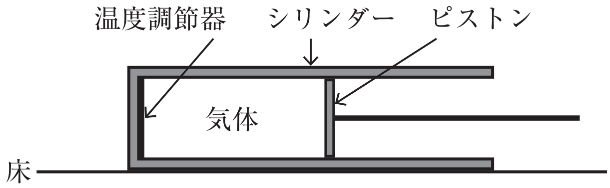


図 1