平成24年度　〔試験時間　80分〕

Ｎ３　物理　Ｎ４　化学　Ｎ５　生物

この冊子は，物理，化学および生物の問題を１冊にまとめてあります。

物理学科は物理指定

応用生物科学科と経営工学科は，物理・化学・生物のいずれかを選択

物理の問題は，　１ページより21ページまであります。
化学の問題は，22ページより34ページまであります。
生物の問題は，35ページより58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及び氏名を記入し，さらに受験番号・志望学科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)　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。

◇M36(528—534)

物　　理

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。(同じ番号を何回用いてもよい。)　(40 点)

摩擦を無視できる水平な床の上に，それぞれ質量 m [kg]，$M(>m)$ [kg] の物体がのっている。物体は，質量と太さの無視できる長さ ℓ [m] のひもで結ばれている。**図 1** に示すようにはじめに両物体を密着させておき，質量 m の物体は静止させたままで，質量 M の物体に図中の矢印で示す向きを正とする初速度 V_0 [m/s] $(V_0 > 0)$ を与えて動かした。物体間の距離が ℓ になるとひもに張力が生じるので，質量 m の物体は動き出し，質量 M の物体の速度は減少した。また，張力が作用したときのひものびは無視できるほど小さく，物体は直線運動のみを行う。

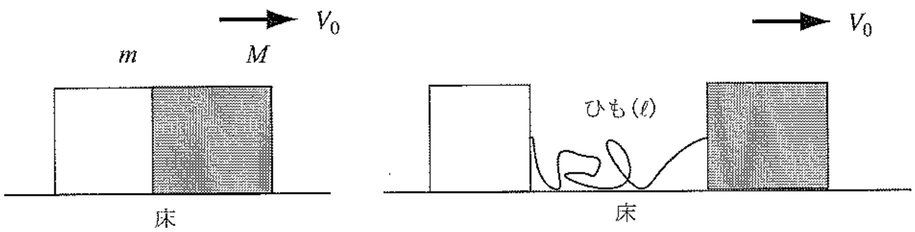


図 1

右のページは白紙です。

(1) ひもの張力は短い時間だけ作用し，このとき質量 M の物体が受けた力積の大きさを ΔP [N·s] とする。ひもの張力が作用したあとの質量 m [kg] の物体の速度を $v^{(1)}$ [m/s]，質量 M [kg] の物体の速度を $V^{(1)}$ [m/s] とすると，質量 M [kg] の物体の運動量は，$MV^{(1)} = \boxed{(ア)} \times V_0 + \left(\boxed{(イ)}\right)$ と表せる。同様に，質量 m の物体の運動量は，$mv^{(1)} = \boxed{(ウ)}$ となる。したがって，物体にひもの張力が作用する前後の運動量の和の間には，関係，$mv^{(1)} + MV^{(1)} = \boxed{(エ)} \times V_0$ が成り立つ。ひもの張力が作用する前後で物体の運動エネルギーの和は変化しなかった。このとき，物体の速度は，$V^{(1)} = \boxed{(オ)} \times V_0$，$v^{(1)} = \boxed{(カ)} \times V_0$ と求められる。したがって，ひもの張力が作用する前および後の質量 M の物体の相対速度 (基準は質量 m の物体) をそれぞれ V_r [m/s]，V_r' [m/s] とすると，$V_\mathrm{r}' = \boxed{(キ)} \times V_\mathrm{r}$ となり，この関係は，ひもの張力が物体間に作用するときには今後も成り立つ。ひもの張力は短い時間だけ作用するので，ひもは再びゆるんだ状態となり，やがて物体同士は衝突する。質量 M の物体がはじめに動き出した時刻を $t = 0$ s とし，一回目の衝突が起きた時刻を t_0 [s] とすると，$t_0 = \boxed{(ク)}$ である。このとき，物体の衝突ははねかえり係数（反発係数）$e (0 < e < 1)$ の非弾性衝突であった。質量 M, m の物体の衝突後の速度 $V^{(2)}$ [m/s]，$v^{(2)}$ [m/s] は，$V^{(2)} = \boxed{(ケ)} \times V_0$，$v^{(2)} = \boxed{(コ)} \times V_0$ と求められる。また，衝突後の運動エネルギーの和は，衝突前の運動エネルギーの和に比べて $\boxed{(サ)} \times V_0^2$ [J] だけ減少した。

右のページは白紙です。

(ア)，(エ) の解答群

0 $-M$　　1 $-\frac{M}{2}$　　2 0　　3 $\frac{M}{2}$　　4 M

(イ)，(ウ) の解答群

0 $-\Delta P$　　1 $-\frac{\Delta P}{2}$　　2 $\frac{\Delta P}{2}$　　3 ΔP

(オ)，(カ) の解答群

0 $\frac{m-M}{M+m}$　　1 $\frac{M-m}{M+m}$　　2 $\frac{M}{2(M+m)}$

3 $\frac{m}{2(M+m)}$　　4 $\frac{M}{M+m}$　　5 $\frac{m}{M+m}$

6 $\frac{2M}{M+m}$　　7 $\frac{2m}{M+m}$

(キ) の解答群

0 -1　　1 $-\frac{m}{M+m}$　　2 $-\frac{M}{M+m}$　　3 $-\frac{m}{M}$　　4 1

(ク) の解答群

0 $\frac{\ell}{2V_0}$　　1 $\frac{\ell}{V_0}$　　2 $\frac{3\ell}{2V_0}$　　3 $\frac{2\ell}{V_0}$　　4 $\frac{3\ell}{V_0}$

(ケ)，(コ) の解答群

0 $\frac{(1+e)m}{M+m}$　　1 $\frac{M+em}{M+m}$　　2 $\frac{M-em}{M+m}$

3 $\frac{(1+e)M}{M+m}$　　4 $\frac{(1-e)M}{M+m}$　　5 $\frac{(e-1)m}{M+m}$

6 $\frac{eM+m}{M+m}$　　7 $\frac{eM-m}{M+m}$　　8 $\frac{(e-1)M}{M+m}$

9 $\frac{(1-e)M}{e(M+m)}$　　10 $\frac{(e-1)M}{e(M+m)}$

(サ) の解答群

0 $\frac{2(1-e)mM^2}{(M+m)^2}$　　1 $\frac{2(1+e)mM^2}{e(M+m)^2}$　　2 $\frac{(1-e)^2Mm}{M+m}$

3 $\frac{(1-e^2)Mm}{2(M+m)}$　　4 $\frac{(1-e^2)Mm}{e(M+m)}$

左のページは白紙です。

(2) 衝突の後, 物体同士は離れていき, 物体間の距離が ℓ になると再びひもの張力が作用して物体の速度は変化した。二回目にひもの張力が作用した後には, 質量 M, m の物体の速度 $V^{(3)}$ [m/s], $v^{(3)}$ [m/s] はそれぞれ, $V^{(3)} = \boxed{\text{(シ)}} \times V_0$, $v^{(3)} = \boxed{\text{(ス)}} \times V_0$ と求められる。その後, 物体同士は再び近づくので二回目の衝突が起き, 質量 M の物体の衝突後の速度は, $V^{(4)} = \boxed{\text{(セ)}} \times V_0$ [m/s], 質量 m の物体の衝突後の速度は, $v^{(4)} = \boxed{\text{(ソ)}} \times V_0$ [m/s] と求められる。一回目の衝突が起きてから二回目の衝突が起きるまでの時間を t_1 [s] とすると, $t_1 = \boxed{\text{(タ)}}$ と求められる。このように, ひもの張力の作用とその後の衝突を繰り返しながら物体は移動する。ひもの張力の作用が $n(=1,2,\ldots)$ 回繰り返された後の質量 M の物体の速度は, $V^{(2n-1)} = \boxed{\text{(チ)}} \times V_0$ [m/s], 質量 m の物体の速度は, $v^{(2n-1)} = \boxed{\text{(ツ)}} \times V_0$ [m/s] と求められる。$n \to \infty$ の極限では, 質量 M, m の物体の速度はそれぞれ, $V^{(\infty)} = \boxed{\text{(テ)}} \times V_0$ [m/s], $v^{(\infty)} = \boxed{\text{(ト)}} \times V_0$ [m/s] となる。

右のページは白紙です。

(シ)，(ス) の解答群

0 $\frac{(1+e)m}{M+m}$　　1 $\frac{M+em}{M+m}$　　2 $\frac{M-em}{M+m}$

3 $\frac{(1+e)M}{M+m}$　　4 $\frac{(1-e)M}{M+m}$　　5 $\frac{(e-1)m}{M+m}$

6 $\frac{eM+m}{M+m}$　　7 $\frac{eM-m}{M+m}$　　8 $\frac{(e-1)M}{M+m}$

9 $\frac{(1-e)M}{e(M+m)}$　　10 $\frac{(e-1)M}{e(M+m)}$

(セ)，(ソ) の解答群

0 $\frac{(1+e^2)m}{M+m}$　　1 $\frac{M+e^2m}{M+m}$　　2 $\frac{M-e^2m}{M+m}$

3 $\frac{(1+e^2)M}{M+m}$　　4 $\frac{(1-e^2)m}{M+m}$　　5 $\frac{(1-e^2)M}{M+m}$

6 $\frac{(1-e)^2m}{M+m}$　　7 $\frac{(1-e)^2M}{M+m}$

(タ) の解答群

0 $\frac{\ell}{2eV_0}$　　1 $\frac{\ell}{eV_0}$　　2 $\frac{2\ell}{eV_0}$　　3 $\frac{5\ell}{2eV_0}$　　4 $\frac{3\ell}{eV_0}$

(チ)，(ツ) の解答群

0 $\frac{(1-e^{n-1})m}{M}$　　1 $\frac{(1+e^{n-1})M}{M+m}$　　2 $\frac{(1-e^{n-1})m}{2(M+m)}$

3 $\frac{M+(1-e^{n-1})m}{M+m}$　　4 $\frac{M-e^{n-1}m}{M+m}$　　5 $\frac{(1-e^{n-1})m}{M+m}$

6 $\frac{(1-e^{n-1})M}{M+m}$　　7 $\frac{[1+(1-e)^{n-1}]m}{M+m}$　　8 $\frac{[1+(1-e)^{n-1}]M}{M+m}$

(テ)，(ト) の解答群

0 1　　1 $\frac{m}{M}$　　2 $\frac{m}{2(M+m)}$

3 $\frac{m}{M+m}$　　4 $\frac{M}{2(M+m)}$　　5 $\frac{M}{M+m}$

左のページは白紙です。

$\boxed{2}$ 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。答えが数値となる場合は最も近い数値を選ぶこと。)　(30点)

真空中に導線を配置して電流を流す。その電流が周囲の空間にどのような磁場を形成するか，磁気力に関するクーロンの法則とフレミングの左手の法則に基づいて考察していこう。

(1)　まず，磁気力に関するクーロンの法則について確認しておこう。クーロンは2本の長い棒磁石を用いて2つの磁極の間に働く磁気力を調べ，その方向は磁極を結ぶ直線に沿っており，同種の磁極間では斥力，異種の磁極間では引力となること，大きさは2つの磁極の磁気量 (磁極の強さ) の大きさの積に比例し，磁極間の距離の2乗に反比例することを見出した。すなわち，**図2-1**のように磁気量 q_{m1} [Wb] の磁極と磁気量 q_{m2} [Wb] の磁極が距離 r [m] だけ隔てて置かれたとすると，その間に働く磁気力の大きさは $\dfrac{1}{4\pi\mu_0}\dfrac{|q_{\mathrm{m1}}q_{\mathrm{m2}}|}{r^2}$ [N] と表される。ただし，$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N/A^2 は真空の透磁率である。また，ある場所に磁気量 q_{m} [Wb] の磁極を置いたとき，その磁極が $\vec{F}$ [N] の力を受けたとすると，その場所の磁場 $\vec{H}$ [A/m] は $\vec{H} = \dfrac{\vec{F}}{q_{\mathrm{m}}}$ である。ただし，磁気量 q_{m} の符号は，その磁極がN極ならば正，S極ならば負とする。

長い棒磁石の一方の磁極 (磁気量は 1.0×10^{-3} Wb) が点Oに固定されているとする。点Oから 5.0×10^{-1} m 離れた点Pに磁気量 -2.0×10^{-3} Wb の磁極を置いたとき，この磁極が点Oの磁極から受ける力の向きは $\boxed{\text{(ア)}}$，大きさは $\boxed{\text{(イ)}}$ N である。したがって，点Oに置いた磁極が点Pに形成した磁場の向きは $\boxed{\text{(ウ)}}$，大きさは $\boxed{\text{(エ)}}$ A/m と求められる。

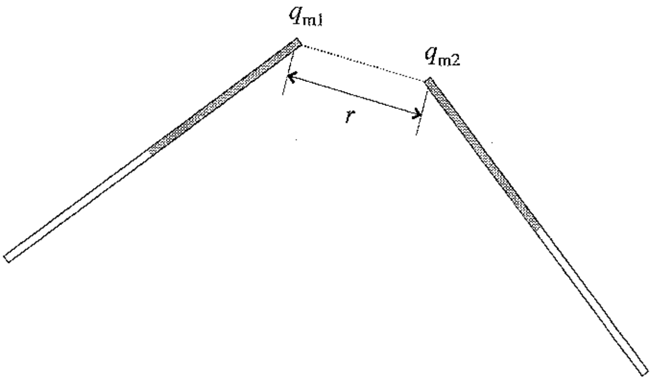


図 2-1

(ア)，(ウ) の解答群

0 $\overrightarrow{OP}$ の向き　　1 $\overrightarrow{PO}$ の向き

(イ)，(エ) の解答群

0 5.1×10^{-1}　　1 2.5×10^{-1}　　2 1.6　　3 6.4

4 1.3×10^{2}　　5 2.5×10^{2}　　6 5.1×10^{2}　　7 8.0×10^{2}

8 1.6×10^{3}　　9 3.2×10^{3}

(2) 次に，フレミングの左手の法則を利用し，電流の流れる導線が磁場から受ける力を計算してみよう。導線は直線で 2.0×10^{1} A の電流が流れているとし，**図 2-2** のようにその電流の向きに x 軸をとる。また，**図 2-2** の紙面表から裏に向かって y 軸をとり，上に向って z 軸をとる。空間的に一様な大きさ 5.0×10^{3} A/m の静磁場を，**図 2-2** に示すように，z 軸から x 軸の正の向きに $\frac{\pi}{6}$ rad だけ傾いた方向にかける。導線の長さ 1.0×10^{-1} m の部分が受ける力を $\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$ [N] とすると，$F_x =$ $\boxed{\text{(オ)}}$ N, $F_y =$ $\boxed{\text{(カ)}}$ N, $F_z =$ $\boxed{\text{(キ)}}$ N である。なお，必要ならば $\sqrt{2} \fallingdotseq 1.41$, $\sqrt{3} \fallingdotseq 1.73$, $\sqrt{5} \fallingdotseq 2.24$, $\sqrt{7} \fallingdotseq 2.65$ であることを用いよ。

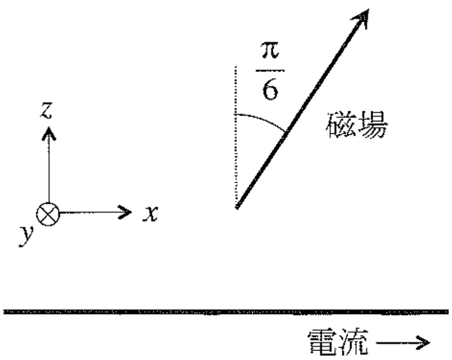


図 2-2

(オ), (カ), (キ) の解答群

0 0	1 6.0×10^{-3}	2 1.1×10^{-2}	3 5.0×10^{3}
4 8.7×10^{3}	5 -6.0×10^{-3}	6 -1.1×10^{-2}	7 -5.0×10^{3}
8 -8.7×10^{3}			

(3)　導線を流れる電流が周囲に作る磁場について考えよう。電流の強さを I [A] とする。**図 2-3** に示すように導線を細かく分けたとし，そのうちの点 Q のところにある微小部分 $\Delta\vec{s}$ [m] (向きは導線の点 Q における電流の向き，大きさは導線の微小部分の長さに等しいベクトル) に着目する。点 Q から見て位置ベクトル $\vec{r}$ [m] の点 P に磁気量 q_{m} [Wb] の N 極 ($q_{\mathrm{m}} > 0$) を置く。ただし，$\Delta\vec{s}$ と $\vec{r}$ の間の角度を θ [rad] ($0 \leqq \theta \leqq \pi$) とする。また，$\Delta\vec{s}$ の向きに x 軸をとり，$\Delta\vec{s}$ と $\vec{r}$ の作る面を xz 面とする。(**図 2-3** は，$\Delta\vec{s}$ と $\vec{r}$ の作る平面が紙面と一致するように描かれている。) y 軸は紙面表から裏に向かう向きにとる。

小問 **(1)** で考察したように，点 P に置いた磁極は点 Q に磁場を作る。その磁場を $\vec{H}_0$ [A/m] とすると，$\vec{H}_0$ の向きは $\boxed{\text{(ク)}}$ で，大きさは $\boxed{\text{(ケ)}}$ $\times q_{\mathrm{m}}$ [A/m] となる。導線の微小部分 $\Delta\vec{s}$ がこの磁場から受ける力を $\vec{F}_0$ [N] とする。フレミングの左手の法則により，$\vec{F}_0$ の向きは $\boxed{\text{(コ)}}$，大きさは $\boxed{\text{(サ)}}$ $\times I q_{\mathrm{m}} |\Delta\vec{s}|$ [N] である。作用反作用の法則により，点 P の磁極は導線の微小部分 $\Delta\vec{s}$ [m] より力 $\vec{F} = -\vec{F}_0$ [N] を受ける。力 $\vec{F}$ は，導線の微小部分 $\Delta\vec{s}$ が点 P に磁場 $\Delta\vec{H}$ [A/m] を作ったためと考えることができる。$\Delta\vec{H}$ の向きは $\boxed{\text{(シ)}}$，大きさは $\boxed{\text{(ス)}}$ $\times I |\Delta\vec{s}|$ [A/m] である。導線を構成する全ての微小部分が点 P に作る磁場を合成すると，この導線を流れる電流が点 P につくる磁場が得られることになる。

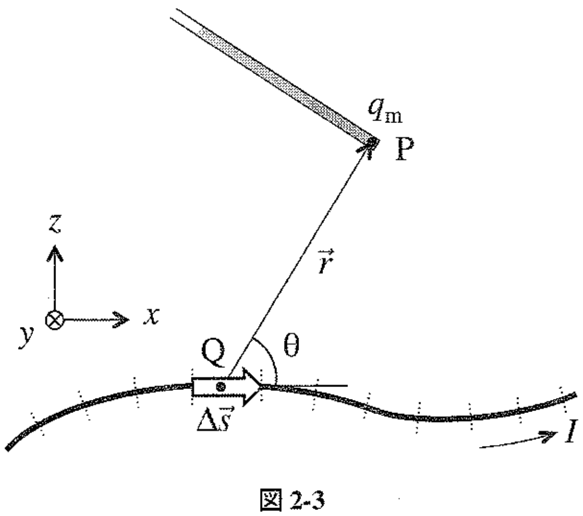


図 2-3

(ク)，(コ)，(シ) の解答群

0 $\vec{r}$ と同じ向き

1 $\vec{r}$ と逆の向き

2 $\Delta\vec{s}$ と同じ向き (x 軸の正の向き)

3 $\Delta\vec{s}$ と逆の向き (x 軸の負の向き)

4 y 軸の正の向き

5 y 軸の負の向き

6 z 軸の正の向き

7 z 軸の負の向き

(ケ)，(サ)，(ス) の解答群

0 0	1 $\dfrac{1}{4\pi\lvert\vec{r}\rvert^2}$	2 $\dfrac{\sin\theta}{4\pi\lvert\vec{r}\rvert^2}$	3 $\dfrac{\lvert\cos\theta\rvert}{4\pi\lvert\vec{r}\rvert^2}$
4 $\dfrac{1}{4\pi\mu_0\lvert\vec{r}\rvert^2}$	5 $\dfrac{\sin\theta}{4\pi\mu_0\lvert\vec{r}\rvert^2}$	6 $\dfrac{\lvert\cos\theta\rvert}{4\pi\mu_0\lvert\vec{r}\rvert^2}$	7 $\dfrac{\mu_0}{4\pi\lvert\vec{r}\rvert^2}$
8 $\dfrac{\mu_0\sin\theta}{4\pi\lvert\vec{r}\rvert^2}$	9 $\dfrac{\mu_0\lvert\cos\theta\rvert}{4\pi\lvert\vec{r}\rvert^2}$		

(4) 小問 (3) の結果を利用して，無限に長い直線電流 I[A] の周囲にできる磁場 $\vec{H}$ [A/m] について調べよう。

図 2-4 のように電流の向きに x 軸をとる。直線電流から距離 R [m] の点を P とし，点 P から直線電流におろした垂線の足の位置を点 O，$\overrightarrow{\mathrm{OP}}$ の向きに z 軸をとる。導線上の点 Q (x[m], 0, 0) のところの，導線の微小部分 $\Delta\vec{s} = (\Delta x\,[\mathrm{m}], 0, 0)$ に着目する。これが点 P に作る磁場の向きは $\boxed{\text{(セ)}}$，大きさ ΔH [A/m] は $\angle\mathrm{OPQ} = \phi$ [rad] として $\Delta H = \boxed{\text{(ソ)}} \times \Delta x$ と書くことができる。**図 2-4** に示されているように点 Q の微小部分を点 P から見込む角度を $\Delta\phi$ [rad] とおくと，その微小部分の長さは $\Delta x \fallingdotseq \dfrac{R}{\cos^2\phi}\Delta\phi$ と書き表すことができる。これを用いると $\Delta H \fallingdotseq \boxed{\text{(ソ)}} \times \dfrac{R}{\cos^2\phi}\Delta\phi$ が得られる。

直線電流の全体が点 P に作る磁場 $\vec{H}$ [A/m] の大きさを $|\vec{H}| = \dfrac{a}{4\pi}IR^n$ と書いたとき，指数 n の値は $\boxed{\text{(タ)}}$ であり，数係数 a の値は $\boxed{\text{(チ)}}$ のグラフの斜線部分の面積に等しい。

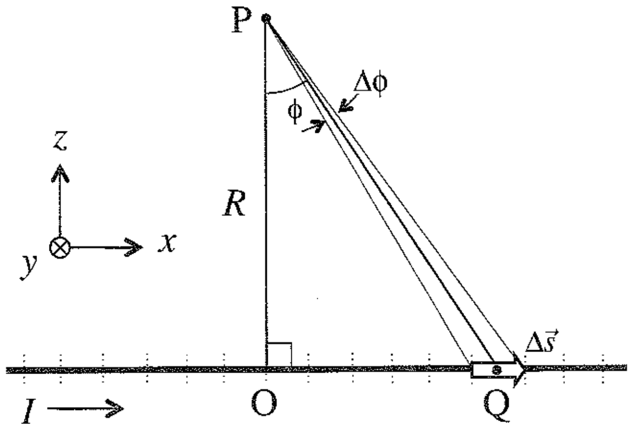


図 2-4

(セ) の解答群

0　x 軸の正の向き　　1　x 軸の負の向き　　2　y 軸の正の向き

3　y 軸の負の向き　　4　z 軸の正の向き　　5　z 軸の負の向き

(ソ) の解答群

0　$\dfrac{I\cos^2\phi}{4\pi R^2}$　　1　$\dfrac{I\cos^3\phi}{4\pi R^2}$　　2　$\dfrac{I\tan^2\phi}{4\pi R^2}$　　3　$\dfrac{I\cos\phi\tan^2\phi}{4\pi R^2}$

4　$\dfrac{I\cos\phi\sin^2\phi}{4\pi R^2}$　　5　$\dfrac{I\cos^2\phi}{4\pi R}$　　6　$\dfrac{I\cos^3\phi}{4\pi R}$　　7　$\dfrac{I\tan^2\phi}{4\pi R}$

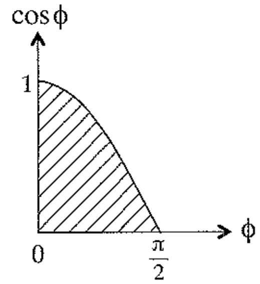
8　$\dfrac{I\cos\phi\tan^2\phi}{4\pi R}$　　9　$\dfrac{I\cos\phi\sin^2\phi}{4\pi R}$

(タ) の解答群

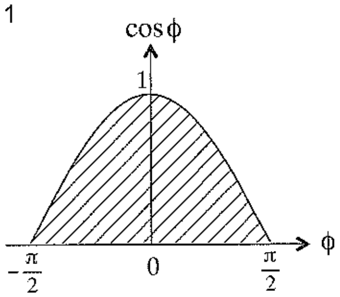
0　-3　　1　-2　　2　-1　　3　0　　4　1　　5　2　　6　3

(チ) の解答群

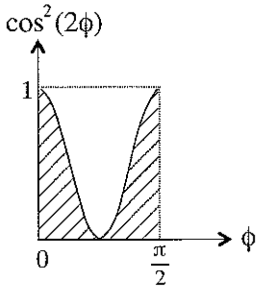
0



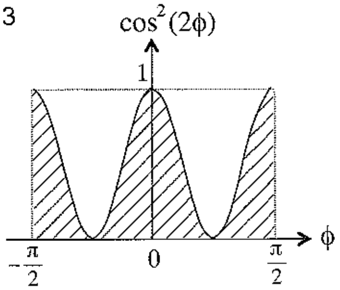
1



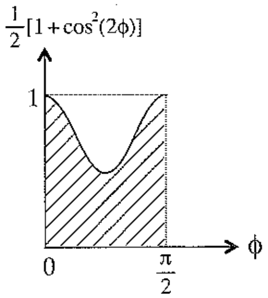
2



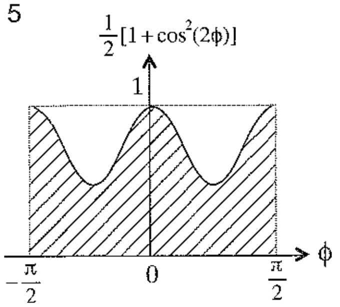
3



4



5



左のページは白紙です。

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。答えが数値となる場合は最も近い数値を選ぶこと。) (30点)

物理の授業で低温から高温に熱を汲み上げる装置「ヒートポンプ」の話を聞いてきたA君は，帰宅後，部屋のエアコン (ヒートポンプ型暖房機) のカタログを見て,「このエアコン，暖房能力は 2.8 kW なんだけど消費電力は 0.5 kW なんだって。一見増えたように見えるエネルギーは，実は戸外の空気から汲み上げているんだって言っていたな。」とつぶやいた。先生は「先週の授業で，カルノーサイクルと呼ばれる状態変化を利用した熱機関について説明したよね。これを逆向きに運転した逆カルノーサイクルはヒートポンプとして使うことができるんだ。逆カルノーサイクルを利用したヒートポンプ型暖房機の性能の計算は来週までの宿題にしておこう。」と言い，授業を終えたのだった。A君は，まずカルノーサイクルを復習し，それから逆カルノーサイクルでの計算に取り組むことにした。

我々も以下の設問で，カルノーサイクル，及び逆カルノーサイクルと呼ばれるサイクル (循環過程) を考察し，そしてヒートポンプ型暖房機の性能について調べてみよう。なお，以下で必要ならば，xy 平面上で関数 $y=\dfrac{1}{x}$ と x 軸，及び2本の直線 $x=a, x=b$ $(0<a<b)$ で囲まれる部分の面積が $\log\dfrac{b}{a}$ で与えられることを利用せよ。

右のページは白紙です。

(1) **図 3-1** のように側面は断熱壁，底面は透熱壁 (熱を通すことのできる壁) でできたシリンダーに熱を通さないピストンをつけ，その中に 1 モルの単原子分子理想気体を入れる。そのほか，熱を通さない台 S と，熱容量が大きく気体と熱のやりとりをしても温度が変化しないような温度 T_H [K] の高熱源 (台 H)，温度 T_L [K] ($T_L < T_H$) の低熱源 (台 L) を用意する。なお，ピストンは滑らかに動かすことができるものとする。

上記の装置を用いて**図 3-2** の $P-V$ (圧力と体積) 図で表される循環過程 (カルノーサイクル) を作る。まず，ピストンを固定しシリンダーを台 H に置く。しばらくすると気体は温度 T_H [K] の熱平衡状態に至るが，その状態を状態 A と呼ぶ。そして，状態 A からピストンをゆっくりと引いて等温膨張させ状態 B に移る。ただし，状態 B の体積は状態 A の体積の α 倍 ($\alpha > 1$) とする。過程 A→B の途中で気体の体積が V [m^3] であるとき，気体の圧力 P [Pa] は，気体定数を R [J/(mol·K)] として，$P=$ $\boxed{\text{(ア)}}$ と表すことができる。過程 A→B で気体が外部に対してした仕事は $\boxed{\text{(イ)}}$ [J] である。次に，シリンダーを台 S に置き，ピストンをゆっくりと引いて状態 B から断熱膨張させ，温度 T_L [K] の状態 C に移る。過程 B→C で気体がした仕事は $\boxed{\text{(ウ)}}$ [J] である。次に，シリンダーを台 L に置き，ピストンをゆっくりと押して状態 C から等温圧縮させ，状態 D に移る。ただし，状態 D の体積は状態 C の体積の $\frac{1}{\alpha}$ 倍とする。過程 C→D で気体がした仕事は $\boxed{\text{(エ)}}$ [J] である。最後に，シリンダーを再び台 S に置き，ピストンをゆっくりと押して状態 D から断熱圧縮させ，温度を T_H [K] まで上げると状態 A に戻ることになる。過程 D→A で気体がした仕事は $\boxed{\text{(オ)}}$ [J] である。

以上より，気体が外部にした仕事の 1 サイクルにわたる総和は $\boxed{\text{(カ)}}$ [J] となる。高熱源 (台 H) から気体が吸収した熱量は $\boxed{\text{(キ)}}$ [J] であるから，このカルノーサイクルの熱効率は $\boxed{\text{(ク)}}$ と求められる。

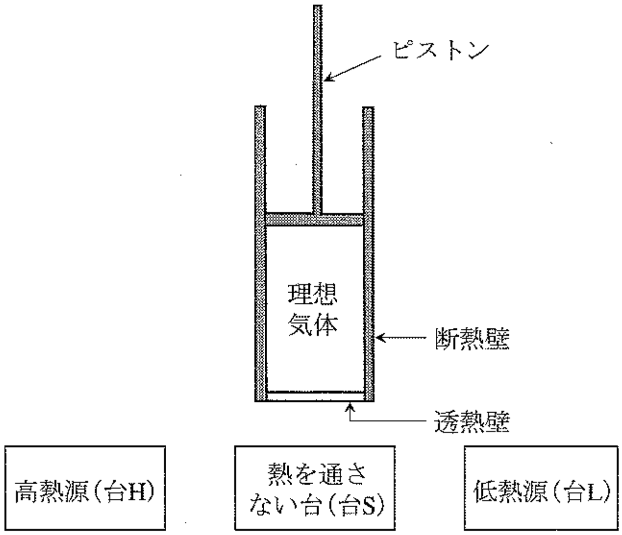


図 3-1

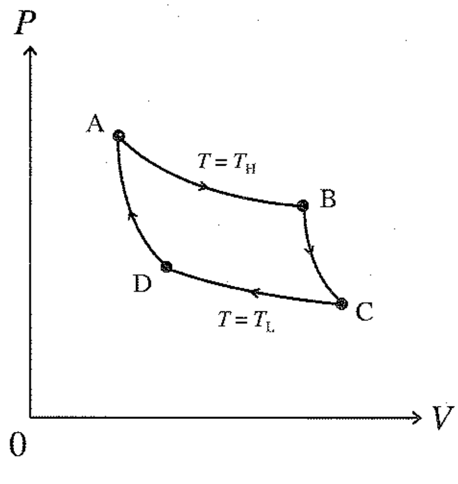


図 3-2

(ア) の解答群

0 $\dfrac{3RT_L}{2}$　　1 $\dfrac{3RT_H}{2}$　　2 $\dfrac{5RT_L}{2}$　　3 $\dfrac{5RT_H}{2}$

4 $\dfrac{RT_L}{2V}$　　5 $\dfrac{RT_H}{2V}$　　6 $\dfrac{RT_L}{V}$　　7 $\dfrac{RT_H}{V}$

(イ), (ウ), (エ), (オ), (カ), (キ) の解答群

0 $RT_H \log\alpha$　　1 $RT_L \log\alpha$

2 $R(T_H - T_L)\log\alpha$　　3 $\dfrac{3R}{2}(T_H - T_L)$

4 $\dfrac{3R}{2}(T_H - T_L)\left(1 + \dfrac{2}{3}\log\alpha\right)$　　5 $-RT_H \log\alpha$

6 $-RT_L \log\alpha$　　7 $-R(T_H - T_L)\log\alpha$

8 $-\dfrac{3R}{2}(T_H - T_L)$　　9 $-\dfrac{3R}{2}(T_H - T_L)\left(1 + \dfrac{2}{3}\log\alpha\right)$

(ク) の解答群

0 0　　1 1　　2 $\dfrac{T_L}{T_H - T_L}$　　3 $\dfrac{T_H}{T_H - T_L}$

4 $\dfrac{T_H - T_L}{T_L}$　　5 $\dfrac{T_H - T_L}{T_H}$

左のページは白紙です。

(2) 小問 (1) のカルノーサイクルを逆向きに運転した循環過程 (逆カルノーサイクル) について考える。**図 3-3** はその $P-V$ 図である。まず，ピストンを固定しシリンダーを台 H にのせて得られる熱平衡状態を状態 A とする。次に，シリンダーを台 S に置き，ピストンをゆっくりと引いて断熱膨張させて温度 T_L [K] の状態 D に至る。次に，シリンダーを台 L に置き，ピストンをゆっくりと引いて等温膨張させて状態 C (その体積は状態 D の α 倍) に至る。過程 D→C で気体は低熱源から熱を吸収する。低熱源から吸収する熱は $Q_L = \boxed{\text{(ケ)}}$ [J] である。次に，シリンダーを台 S に置き，ピストンをゆっくりと押して断熱圧縮させて温度 T_H [K] の状態 B に至る。最後に，シリンダーを台 H に置き，ピストンをゆっくりと押して等温圧縮させて状態 A (その体積は状態 B の $\frac{1}{\alpha}$ 倍) に戻る。過程 B→A で気体は高熱源へ熱を放出する。高熱源に放出する熱は $Q_H = \boxed{\text{(コ)}}$ [J] である。1 サイクルの状態変化で外部から気体に対してなされた仕事の総和 W [J] は，熱力学第一法則より，Q_L と Q_H を用いて $W = \boxed{\text{(サ)}}$ と書ける。

ヒートポンプ型暖房機の性能の指標として，$\frac{Q_H}{W}$ で定義されるエネルギー消費効率がしばし用いられる。(熱機関における熱効率とは定義が異なることに注意せよ。) この逆カルノーサイクルのエネルギー消費効率は $\boxed{\text{(シ)}}$ となる。

逆カルノーサイクルを暖房機として使うとき，低熱源は戸外，高熱源を室内と考えれば良い。戸外の温度が 1 ℃，室内の温度が 21 ℃として，エネルギー消費効率の値を求めてみると $\boxed{\text{(ス)}}$ が得られる。

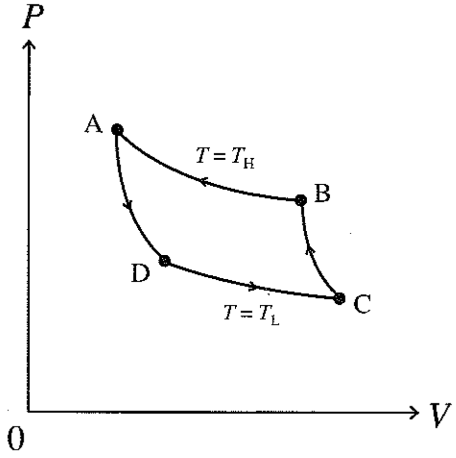


図 3-3

(ケ), (コ) の解答群

0 $RT_{\mathrm{H}}\log\alpha$　　1 $RT_{\mathrm{L}}\log\alpha$　　2 $R(T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}})\log\alpha$

3 $\frac{3R}{2}(T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}})$　　4 $-RT_{\mathrm{H}}\log\alpha$　　5 $-RT_{\mathrm{L}}\log\alpha$

6 $-R(T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}})\log\alpha$　　7 $-\frac{3R}{2}(T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}})$

(サ) の解答群

0 $Q_{\mathrm{L}}-Q_{\mathrm{H}}$　　1 $Q_{\mathrm{H}}-Q_{\mathrm{L}}$　　2 $Q_{\mathrm{H}}+Q_{\mathrm{L}}$　　3 $\frac{1}{2}(Q_{\mathrm{L}}-Q_{\mathrm{H}})$

4 $\frac{1}{2}(Q_{\mathrm{H}}-Q_{\mathrm{L}})$　　5 $\frac{1}{2}(Q_{\mathrm{H}}+Q_{\mathrm{L}})$

(シ) の解答群

0 0　　1 1　　2 $\frac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}}}$　　3 $\frac{T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}}}$

4 $\frac{T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}}$　　5 $\frac{T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}$

(ス) の解答群

0 0.00　　1 6.80×10^{-2}　　2 7.30×10^{-2}　　3 9.52×10^{-1}

4 1.00　　5 1.05　　6 5.60　　7 8.35

8 1.37×10^{1}　　9 1.47×10^{1}

左のページは白紙です。