2020年度　　〔試験時間　80分〕

L　3　物　理

この冊子は，物理の問題で1ページより45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。(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。)　(40 点)

以下では, 長さ, 質量, 時間の単位をそれぞれ m, kg, s 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, 力の単位 N は $kg \cdot m/s^2$ と表すことができる。

学校帰りに A 君は公園を通りかかった。そこで，子供達が大小 2 つのボールを弾ませて遊んでいるのを見かけた。小さなボールを大きなボールの上に乗せて地面に向けて落とし，大きなボールの上で弾んだ小さなボールが，まるでロケットの発射のように，勢いよく天高く飛び上がる様子に子供達は大歓声をあげていた。A 君は「上のボールを高く飛び上がらせるには，2 つのボールの質量や最初の位置をどのように選んだらよいのだろう？」と思い，家に戻って，この 2 つのボールの運動のモデル化を試みた。

さて，我々も A 君にならい，上のボールが勢いよくはね返るための条件を調べ，そして，実際にどのくらい飛び上がるのかを計算してみよう。**図 1-1** のように地面のある一点を原点 O とし，鉛直上方を正の向きとする y 軸を設定する。重力加速度の大きさは g とする。2 つの小球 a, b を考え，小球 a の質量を m とし，小球 b はその α 倍の質量 αm（ただし，$\alpha > 0$）を持つとする。最初，小球 a の y 座標は h，小球 b の y 座標はその β 倍の βh（ただし，$\beta > 1$）であったとする。以下，2 つの小球の運動は y 軸上に限られ，また，空気抵抗は無視できるものとする。なお，小球と地面の間，2 つの小球の間の衝突はともに弾性衝突とする。

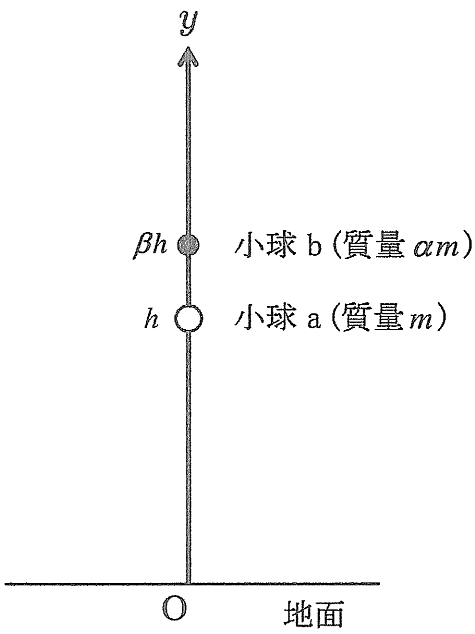


図 1-1

(1)　まず，時刻 $t=0$ で，小球aだけを $y=h$ から自由落下（初速度0で落下）させる。小球aが最初に地面に到達する時刻 t_1 は，$t_1=$ $\boxed{\textbf{(ア)}}$ である。小球aが時刻 t_1 で地面からはね返った直後の速度は $\boxed{\textbf{(イ)}}$ である。

小球aが地面ではね返ったのち，2度目に地面に到達する時刻は $\boxed{\textbf{(ウ)}}$ $\times t_1$ である。時刻が $t_1 \leqq t \leqq$ $\boxed{\textbf{(ウ)}}$ $\times t_1$ の範囲にあるとき，小球aの時刻 t における y 座標は $\boxed{\textbf{(エ)}}$ となる。

(ア) の解答群

⓪ $\sqrt{\dfrac{h}{2g}}$	① $\sqrt{\dfrac{g}{2h}}$	② $\sqrt{\dfrac{h}{g}}$	③ $\sqrt{\dfrac{g}{h}}$
④ $\sqrt{\dfrac{3h}{2g}}$	⑤ $\sqrt{\dfrac{3g}{2h}}$	⑥ $\sqrt{\dfrac{2h}{g}}$	⑦ $\sqrt{\dfrac{2g}{h}}$

(イ) の解答群

⓪ gt_1^2	① $-gt_1^2$	② $\dfrac{1}{2}gt_1^2$	③ $-\dfrac{1}{2}gt_1^2$
④ gt_1	⑤ $-gt_1$	⑥ $2gt_1$	⑦ $-2gt_1$

(ウ) の解答群

⓪ $\dfrac{3}{2}$	① 2	② $\dfrac{5}{2}$	③ 3
④ $\dfrac{7}{2}$	⑤ 4	⑥ $\dfrac{9}{2}$	⑦ 5

(エ) の解答群

⓪ $g(t-t_1)(t-2t_1)$	① $g(t-t_1)(2t_1-t)$	② $g(t-t_1)(t-3t_1)$
③ $g(t-t_1)(3t_1-t)$	④ $\dfrac{g}{2}(t-t_1)(t-2t_1)$	⑤ $\dfrac{g}{2}(t-t_1)(2t_1-t)$
⑥ $\dfrac{g}{2}(t-t_1)(t-3t_1)$	⑦ $\dfrac{g}{2}(t-t_1)(3t_1-t)$	

(2) 次に，時刻 $t=0$ で，小球 a（高さ h）と小球 b（高さ βh）を同時に自由落下させる。小球 a は，**小問 (1)** で求めた時刻 t_1 で地面ではね返ったのち，小球 b と衝突する。

(a) 小球 a と小球 b の衝突は，小球 a が 2 度目に地面ではね返る以前に起こると仮定し，2 つの小球の衝突時刻 t_2 を求めると，$t_2 = \left(\boxed{\textbf{（オ）}}\right) \times t_1$ が得られる。

$\beta = \beta_1$ のとき，小球 a が地面ではね返ったのち，位置 $y = h$ で小球 b と衝突したという。このとき，$\beta_1 = \boxed{\textbf{（カ）}}$ である。また，$\beta = \beta_2$ のとき，小球 a が地面に 2 度目に到達した瞬間に 2 つの小球が衝突したという。このとき，$\beta_2 = \boxed{\textbf{（キ）}}$ である。

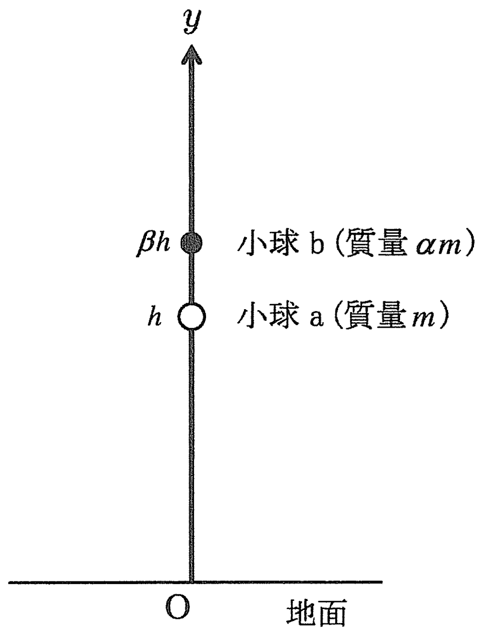


図 1-1（再掲）

(オ) の解答群

⓪ $\dfrac{1+\beta}{4}$	① $\dfrac{3+\beta}{4}$	② $\dfrac{1+\beta}{3}$	③ $\dfrac{2+\beta}{3}$
④ $\dfrac{3+\beta}{2}$	⑤ $\dfrac{5+\beta}{2}$	⑥ $2+\beta$	⑦ $3+\beta$

(カ), (キ) の解答群

⓪ 3	① 4	② 5	③ 6
④ 7	⑤ 8	⑥ 9	⑦ 10

(b) 時刻 t_2 での衝突の直後の小球 a の速度を V_{a}，小球 b の速度を V_{b} とおき，これらを求めていこう。まず，時刻 t_2 での衝突の直前における小球 a の速度は $\left(\boxed{\text{(ク)}}\right) \times gt_1$，小球 b の速度は $\boxed{\text{(ケ)}} \times gt_1$ である。2 つの小球の衝突は弾性衝突であるから

$$V_{\mathrm{b}} - V_{\mathrm{a}} = \left(\boxed{\text{(コ)}}\right) \times gt_1$$

が成り立つ。また，衝突の前後で 2 つの小球の運動量の和が保存されることから，

$$mV_{\mathrm{a}} + \alpha m V_{\mathrm{b}} = \boxed{\text{(サ)}} \times mgt_1$$

である。これら 2 つの条件より

$$V_{\mathrm{a}} = \left(\boxed{\text{(シ)}}\right) \times gt_1, \quad V_{\mathrm{b}} = \left(\boxed{\text{(ス)}}\right) \times gt_1$$

が得られる。

(ク) の解答群

⓪ $\dfrac{5-\beta}{4}$　① $\dfrac{3+\beta}{4}$　② $\dfrac{8-\beta}{4}$　③ $\dfrac{5+\beta}{4}$

④ $\dfrac{9-\beta}{2}$　⑤ $\dfrac{7+\beta}{2}$　⑥ $8-\beta$　⑦ $5+\beta$

(ケ) の解答群

⓪ $-\dfrac{5-\beta}{4}$　① $-\dfrac{3+\beta}{4}$　② $-\dfrac{8-\beta}{4}$　③ $-\dfrac{5+\beta}{4}$

④ $-\dfrac{9-\beta}{2}$　⑤ $-\dfrac{7+\beta}{2}$　⑥ $-(8-\beta)$　⑦ $-(5+\beta)$

(コ) の解答群

⓪ $\dfrac{1}{4}$　① 1　② 2　③ 3

④ $10-\beta$　⑤ $\dfrac{7-\beta}{3}$　⑥ $\dfrac{2+\beta}{4}$　⑦ $\dfrac{9-\beta}{4}$

(サ) の解答群

⓪ $\dfrac{3-5\alpha+\beta+\alpha\beta}{4}$　① $\dfrac{5-5\alpha-\beta-\alpha\beta}{4}$　② $\dfrac{8-3\alpha-\beta-\alpha\beta}{4}$

③ $\dfrac{9-7\alpha-\beta-\alpha\beta}{2}$　④ $\dfrac{3-20\alpha+\beta-4\alpha\beta}{4}$　⑤ $\dfrac{8-14\alpha-\beta-2\alpha\beta}{4}$

⑥ $\dfrac{5-3\alpha-\beta-\alpha\beta}{4}$　⑦ $\dfrac{5-18\alpha+\beta+2\alpha\beta}{4}$

（下書き用紙）

(シ), (ス) の解答群

⓪ $\dfrac{6-10\alpha-\beta-\alpha\beta}{8(1+\alpha)}$　　① $\dfrac{13-3\alpha-\beta-\alpha\beta}{4(1+\alpha)}$

② $\dfrac{-5-\alpha+6\beta+6\alpha\beta}{2(1+\alpha)}$　　③ $\dfrac{15-2\alpha+2\beta+4\alpha\beta}{4(1+2\alpha)}$

④ $\dfrac{-2-18\alpha-\beta-\alpha\beta}{8(1+\alpha)}$　　⑤ $\dfrac{5-11\alpha-\beta-\alpha\beta}{4(1+\alpha)}$

⑥ $\dfrac{-9-5\alpha+6\beta+6\alpha\beta}{2(1+\alpha)}$　　⑦ $\dfrac{11-10\alpha+2\beta+4\alpha\beta}{4(1+2\alpha)}$

(c)　小球 a の質量 m と最初の高さ h は固定したまま，小球 b の質量 αm と最初の高さ βh にふくまれる α，β を様々に変え，衝突直後の小球 b の速度 V_{b} を調べるという実験を行う。ただし，α，β の範囲は $\alpha > 0$，$1 < \beta \leqq \beta_1$ とする（ここで，$\beta_1 = \boxed{\text{(カ)}}$）。(b) の結果によると，$V_{\mathrm{b}}$ をなるべく大きくするには，小球 b の質量を $\boxed{\text{(セ)}}$ すればよく，また，小球 b の最初の位置を $\boxed{\text{(ソ)}}$。

実際の実験では，α の値は

$$\alpha = 2.0,\ 1.0,\ 0.1$$

の 3 点を，β の値は

$$\beta = \beta_1,\ \frac{\beta_1 + 1}{2},\ \frac{\beta_1 + 2}{3},\ \frac{\beta_1 + 39}{40}$$

の 4 点を用いて，これらを組み合わせた合計 $3 \times 4 = 12$ 点の実験点に対して測定を行なった。そして，V_{b} が最も大きくなる実験点を求め，その点に対して，小球 b の衝突直後の運動エネルギー $\frac{1}{2}\alpha m V_{\mathrm{b}}^2$ の，小球 b の最初の位置エネルギー $\alpha\beta mgh$ に対する比 $R = \frac{V_{\mathrm{b}}^2}{2\beta gh}$ の値を計算すると

$$R = \boxed{\text{(タ)}}$$

であることがわかった。なお，$\boxed{\text{(タ)}} \times \beta h$ は，小球 b が衝突した位置から最高到達点までの距離を表している。

(セ) の解答群

⓪ 大きく

① 小球 a と同じに

② 小さく

(ソ) の解答群

⓪ $\beta_1 h$ とすればよい

① $\dfrac{\beta_1+1}{2}h$ とすればよい

② $\dfrac{\beta_1+2}{3}h$ とすればよい

③ 小球 a の最初の位置 $y=h$ にできるだけ近づければよい

(タ) の解答群

⓪ 0.6　① 1.0　② 2.3　③ 3.5　④ 4.7　⑤ 6.2

⑥ 8.5　⑦ 9.8

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。)

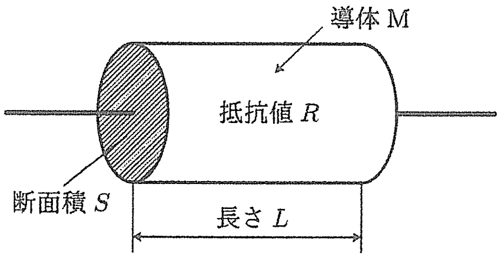
(30 点)

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，力の単位 N は $\mathrm{kg \cdot m/s^2}$ と表すことができる。温度の単位については，セルシウス度 °C とケルビン K を併用する。

(1) **図 2-1** のような，長さ L，断面積 S の導体 M の抵抗率 ρ を求めたい。この導体 M の抵抗値 R を測定するための回路として適切なものは $\boxed{\textbf{(ア)}}$ である。ただし，電流計の内部抵抗はゼロ，電圧計の内部抵抗は無限大であるとする。

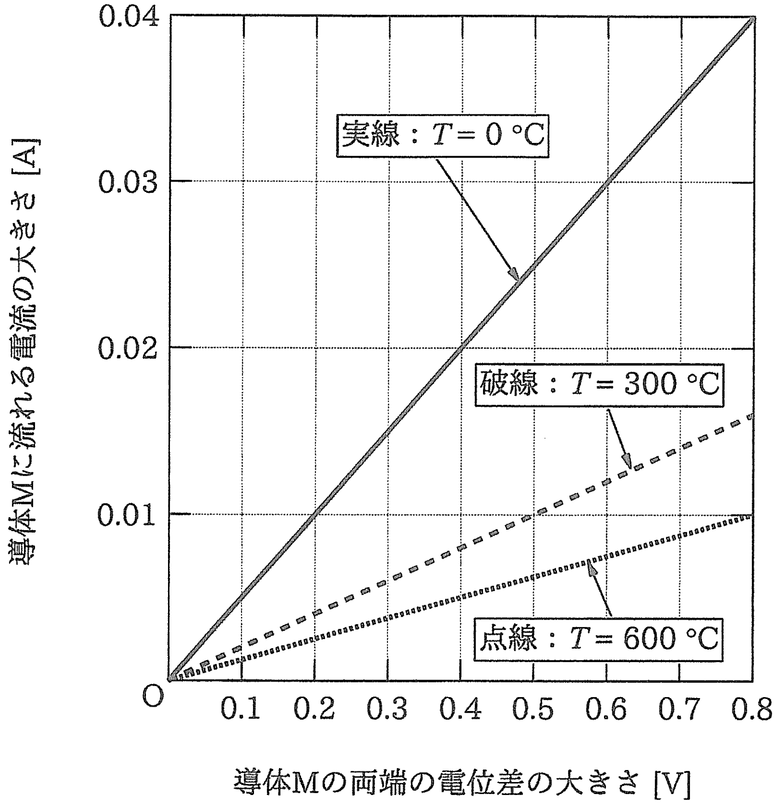
まず，導体 M の温度 T [°C] を $T = 0$ °C に保ち，直流電源の出力電圧を細かく変化させ，回路上の電流計と電圧計の値を読み取ることで電流電圧特性の測定を行った。**図 2-2** の実線のグラフは，その測定結果を示している。これより，$T = 0$ °C での導体 M の抵抗率 ρ_0 は $\rho_0 = \boxed{\textbf{(イ)}}$ $\Omega \cdot \mathrm{m}$ と求められる。ただし，$L = 0.4$ m，$S = 0.05$ $\mathrm{m^2}$ であるとし，これらの値は温度変化しないものとする。なお，抵抗率の単位 $\Omega \cdot \mathrm{m}$ は，m，kg，s，A などを用いて表すと $\boxed{\textbf{(ウ)}}$ である。また，導体 M の両端の電位差の大きさ V が $V = 0.4$ V であるとき，導体 M で消費される電力 P は $P = \boxed{\textbf{(エ)}}$ W である。この電力は単位時間あたりに生じるジュール熱と等しく，一般的には導体 M の温度を上昇させる効果をもつが，**図 2-2** のグラフの範囲ではジュール熱による温度上昇は無視できるとする。

次に，導体 M を外部熱源を用いて加熱し，導体 M の温度を変えて電流電圧特性の測定を行ったところ，$T = 300$ °C および $T = 600$ °C において，**図 2-2** の破線と点線の直線がそれぞれ得られた。導体 M の抵抗率の温度依存性は，温度 T [°C] を用いて $\rho_0(1 + \alpha T)$ と書けることが分かっており，導体 M の抵抗率の温度係数 α [1/K] は $\alpha = \boxed{\textbf{(オ)}}$ /K と求められる。



導体 M
抵抗値 R
断面積 S
長さ L

図 2-1



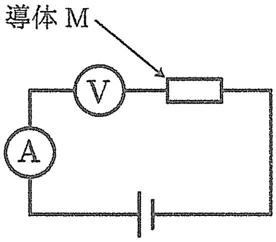
0.04
0.03
0.02
0.01
O
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
実線：$T = 0$ °C
破線：$T = 300$ °C
点線：$T = 600$ °C
導体Mに流れる電流の大きさ [A]
導体Mの両端の電位差の大きさ [V]

図 2-2

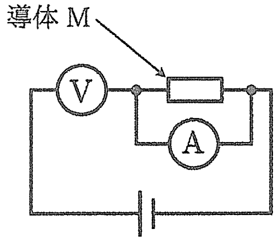
（下書き用紙）

(ア) の解答群

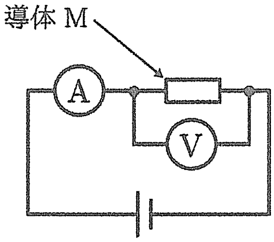
⓪



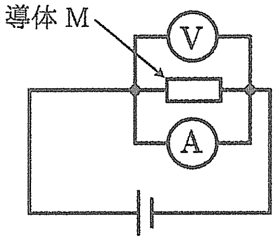
①



②



③



(イ), (エ), (オ) の解答群

⓪ 2.5　　① 2.0　　② 1.0　　③ 0.80

④ 0.25　　⑤ 0.10　　⑥ 8.0×10^{-2}　　⑦ 2.5×10^{-2}

⑧ 8.0×10^{-3}　　⑨ 5.0×10^{-3}

(ウ) の解答群

⓪ $\mathrm{kg/(m^2 \cdot s^2 \cdot A)}$　　① $\mathrm{m \cdot kg/(s^3 \cdot A)}$　　② $\mathrm{m \cdot kg/(s^3 \cdot A^2)}$

③ $\mathrm{m \cdot kg \cdot s/A}$　　④ $\mathrm{m^2 \cdot kg/(s \cdot A^2)}$　　⑤ $\mathrm{m^2 \cdot A^2/(kg \cdot s^3)}$

⑥ $\mathrm{m^3 \cdot kg/(s^3 \cdot A^2)}$　　⑦ $\mathrm{m^3 \cdot s^2/(kg \cdot A)}$

(2) 導体Mの温度を$T = 0$ °Cに戻したのち，直流電源の出力電圧をより大きな値に設定したところ，ジュール熱により導体Mの温度が上昇し，やがて温度が一定の定常状態となった。そこで，導体Mにかかる電圧を変化させ，各電圧値において定常状態となったときに導体Mに流れる電流を測定したところ，**図2-3**の電流電圧特性のグラフが得られた。このような非直線抵抗が観測された原因は，導体Mにかかる電圧に応じて導体Mの温度が変化し，導体Mの抵抗率が変化したためである。以下では，電流が流れていない状態の導体Mの温度を$T = 0$ °Cとし，電流が流れているときは，ジュール熱によって導体Mの温度が上昇し，導体Mは温度が一定の定常状態となっているとする。

直流電源の出力電圧を調整したところ，導体Mの温度が$T = 200$ °Cとなった。このとき，導体Mの抵抗率ρは$\rho = \boxed{\textbf{(カ)}}$ Ω·mであり，導体Mの両端の電位差の大きさVは$V = \boxed{\textbf{(キ)}}$ Vである。

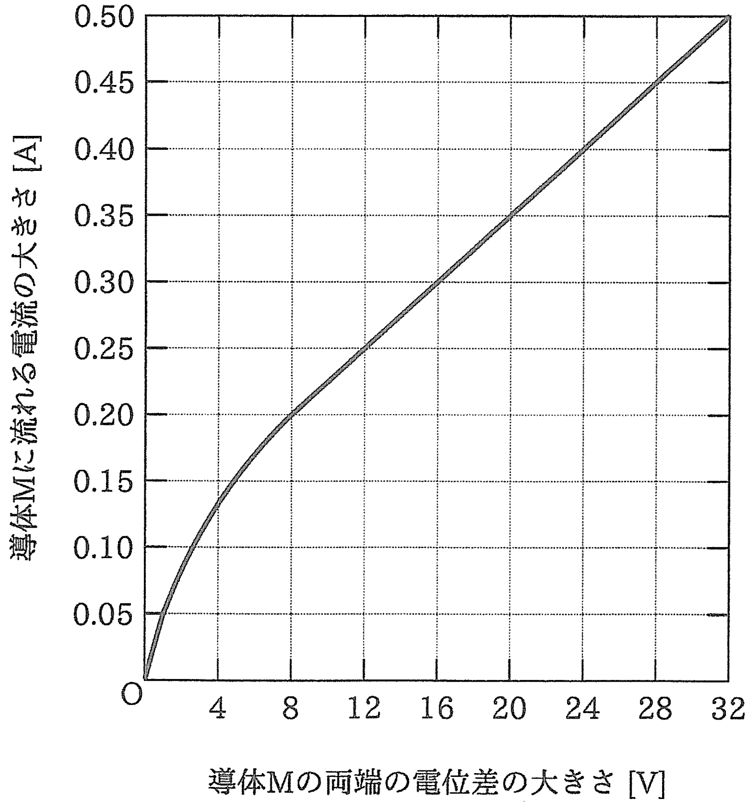

0.50
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
O
4
8
12
16
20
24
28
32
導体Mに流れる電流の大きさ [A]
導体Mの両端の電位差の大きさ [V]

図 2-3

（下書き用紙）

(カ) の解答群

⓪ 10　① 5.0　② 2.0　③ 1.0

④ 0.75　⑤ 0.50　⑥ 0.10　⑦ 7.5×10^{-2}

⑧ 5.0×10^{-2}　⑨ 2.0×10^{-2}

(キ) の解答群

⓪ 32　① 28　② 24　③ 20

④ 16　⑤ 12　⑥ 8.0　⑦ 4.0

(3) 導体 M を用いて**図 2-4** の回路を構成した。直流電源の出力電圧の大きさを E ($E > 0$) とし，電源の内部抵抗は無視できるとする。また，可変抵抗の抵抗値 R_1 は温度変化しないものとする。

導体 M に流れる電流の大きさを I とすると，導体 M の両端の電位差の大きさ V は $V =$ **(ク)** である。**図 2-3** のグラフを用いると，$E = 32$ V，$R_1 = 80$ Ω のとき，$V =$ **(ケ)** V と求められる。このとき，可変抵抗における電力 P_1 と導体 M における電力 P を比べると **(コ)** である。次に，$E = 24$ V として，R_1 の値を調整すると $P_1 = P$ となった。このとき $R_1 =$ **(サ)** Ω である。

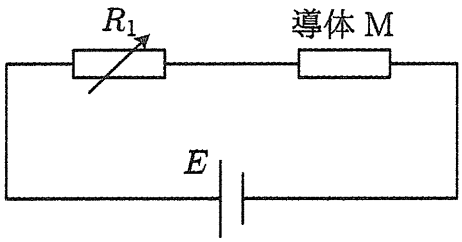


図 2-4

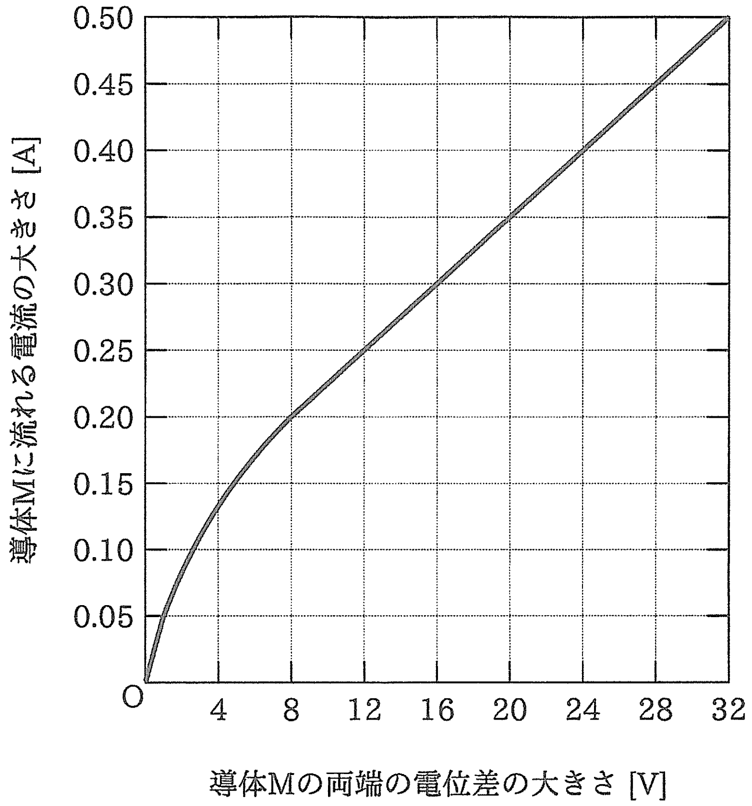

0.50
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
O
4
8
12
16
20
24
28
32
導体Mに流れる電流の大きさ [A]
導体Mの両端の電位差の大きさ [V]

図 2-3 （再掲）

（下書き用紙）

(ク) の解答群

⓪ E	① IR_1	② $E+IR_1$	③ $E-IR_1$
④ $-E+IR_1$	⑤ $E+\dfrac{I}{R_1}$	⑥ $E-\dfrac{I}{R_1}$	⑦ $-E+\dfrac{I}{R_1}$

(ケ) の解答群

⓪ 28	① 24	② 22	③ 20
④ 18	⑤ 16	⑥ 14	⑦ 12
⑧ 10	⑨ 8.0		

(コ) の解答群

⓪ $P_1 > P$　　① $P_1 = P$　　② $P_1 < P$

(サ) の解答群

⓪ 64	① 62	② 60	③ 57
④ 53	⑤ 48	⑥ 44	⑦ 40
⑧ 32	⑨ 24		

(4)　**図 2-4** の回路に，２つの抵抗および検流計を加え，**図 2-5** のようなホイートストンブリッジを構成した。なお，２つの抵抗の抵抗値は $R_2 = 40\ \Omega$，$R_3 = 80\ \Omega$ であり，抵抗値 R_2，R_3 はともに温度変化しないものとする。

可変抵抗の抵抗値 R_1 と直流電源の出力電圧の大きさ E $(E > 0)$ を変化させたところ，以下の設定 A および設定 B を含む様々な設定において検流計に流れる電流はゼロとなった。

- 設定 A：$E =$ **(シ)** V，$R_1 = 20\ \Omega$ としたとき。
- 設定 B：$E = 18$ V，$R_1 =$ **(ス)** Ω としたとき。

ここで，設定 A および設定 B における導体 M の温度をそれぞれ T_A [°C]，T_B [°C] とすると， **(セ)** である。

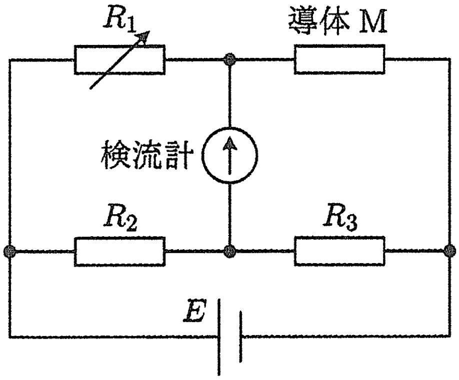


図 2-5

(シ) の解答群

⓪ 28	① 24	② 22	③ 20
④ 18	⑤ 16	⑥ 14	⑦ 12
⑧ 10	⑨ 8.0		

(ス) の解答群

⓪ 64	① 62	② 60	③ 57
④ 53	⑤ 48	⑥ 44	⑦ 40
⑧ 32	⑨ 24		

(セ) の解答群

⓪ $T_{\mathrm{A}} < T_{\mathrm{B}}$　　① $T_{\mathrm{A}} = T_{\mathrm{B}}$　　② $T_{\mathrm{A}} > T_{\mathrm{B}}$

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。)　(30 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，圧力の単位 Pa は $\mathrm{kg/(m \cdot s^2)}$ と表すことができる。また，気体定数を R （単位は $\mathrm{J/(mol \cdot K)}$ ）とする。

図 3-1 のように，容器の中に物質量 n の理想気体が入っている。ピストンは，容器内をなめらかに動くことができるものとする。容器の下部の板は，熱を通す透熱性のものと，熱を通さない断熱性のものとを，交互に入れ替えることができる。なお，板を入れ替えるのに必要な仕事は無視できるとし，そのときの気体の状態変化はないものとする。また，容器の側面の壁とピストンは，それぞれ断熱材でできており，外部と熱のやりとりはない。容器の下側には，熱源があり，下部の板を透熱性のものにすることにより，容器内の理想気体の温度を変えることができる。以下では，温度の異なる二つの熱源を用いる。なお，二つの熱源はじゅうぶんに大きく，また，二つの熱源を入れ替えるのに必要な仕事は無視できるものとする。

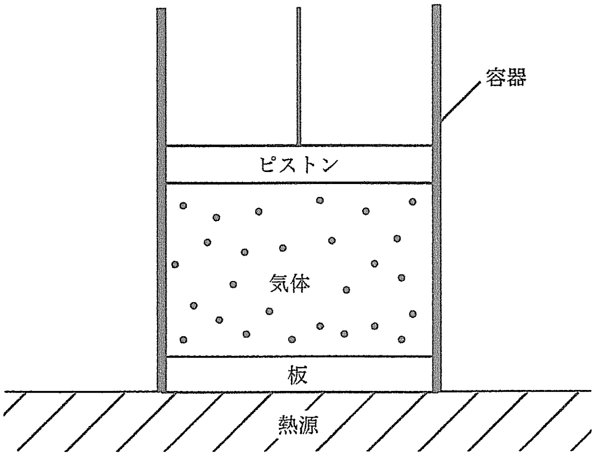
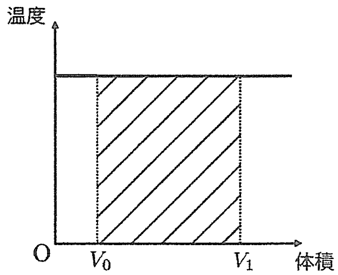


図 3-1

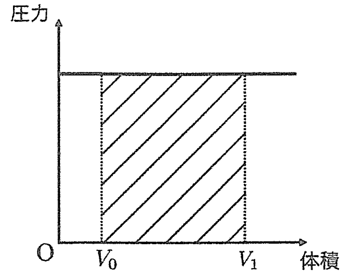
(1) **図 3-1** の下部の板を透熱性のものにして気体の温度 T を一定に保ち，体積を V_0 から V_1 $(0 < V_0 < V_1)$ へゆっくりと等温変化させたときの仕事，内部エネルギーの変化，熱量について考察する。この等温変化で容器の中の気体がした仕事は，図 $\boxed{\textbf{(ア)}}$ の斜線部分の面積で与えられる。この面積を計算すると，この等温変化で気体がした仕事は，$nRT\log\left(\dfrac{V_1}{V_0}\right)$ で与えられる。ここで，$\log x$ は x の自然対数である。また，この等温変化での気体の内部エネルギー変化を ΔU，受け取った熱量を Q とすると，$\boxed{\textbf{(イ)}}$ という関係が成立する。

(ア) の解答群

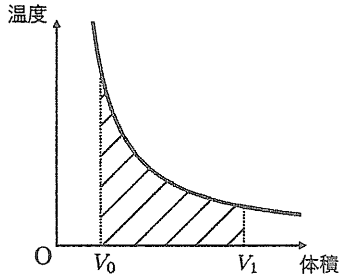
⓪



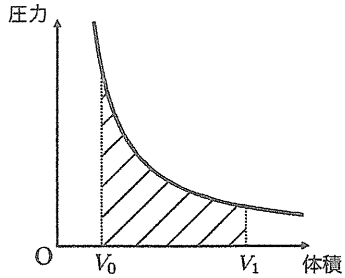
①



②



③



(イ) の解答群

⓪ $\Delta U = 0,\ Q = 0$　① $\Delta U = 0,\ Q > 0$　② $\Delta U = 0,\ Q < 0$

③ $\Delta U < 0,\ Q = 0$　④ $\Delta U < 0,\ Q > 0$　⑤ $\Delta U < 0,\ Q < 0$

⑥ $\Delta U > 0,\ Q = 0$　⑦ $\Delta U > 0,\ Q > 0$　⑧ $\Delta U > 0,\ Q < 0$

(2) 次に，**図 3-1** の熱源として，温度 T_H の高温熱源と温度 T_L $(< T_H)$ の低温熱源を用いた熱機関 E_0 を考える。この熱機関 E_0 では，気体の状態を**図 3-2** の $T - V$（温度と体積）図で表されるようなサイクルで変化させる。

最初，下部の板は透熱性のもので，高温熱源と接触させており，気体の温度と体積はそれぞれ T_H，V_A であった（状態 A）。まず，気体の温度 T_H を一定に保ち，気体を状態 A から体積が V_B $(> V_A)$ である状態 B へゆっくりと等温変化させた。この等温変化で気体がした仕事を $W_{A\to B}$ とすると，**小問 (1)** より，$W_{A\to B} = nRT_H \log\left(\dfrac{V_B}{V_A}\right)$ であり，気体が受け取った熱量 Q_H は $Q_H =$ $\boxed{\textbf{(ウ)}}$ である。次に，下部の板を断熱性のものにして熱源との接触を断ち，気体を状態 B から温度が T_L $(< T_H)$ である状態 C へゆっくりと断熱膨張させた。理想気体の断熱変化では，気体の温度 T と体積 V には，$TV^{\gamma-1} =$（一定）という関係が成立する。この関係をポアソンの式という。ここで，$\gamma\ (> 1)$ は定数である。状態 B から C へ断熱膨張したときの内部エネルギーの変化を $\Delta U_{B\to C}$ とすると，気体がした仕事は $\boxed{\textbf{(エ)}}$ となる。

次に，下部の板を再び透熱性のものにして低温熱源と接触させ，気体を状態 C から温度 T_L に保ちながらゆっくりと圧縮し，状態 D へ等温変化させた。この等温変化で低温熱源に放出した熱量を Q_L とし，気体がした仕事を $W_{C\to D}$ とすると $W_{C\to D} = nRT_L \log\left(\dfrac{V_D}{V_C}\right)$ で与えられる。さらに，下部の板を再び断熱性のものにして熱源との接触を断ち，気体を状態 D から最初の状態（状態 A）へゆっくりと断熱圧縮させた。

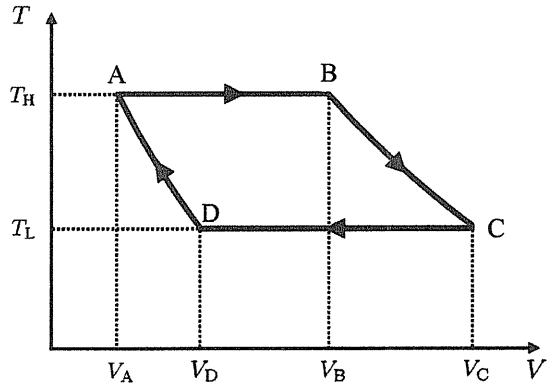


図 3-2

(ウ) の解答群

⓪ 0　　① $-W_{\mathrm{A}\to\mathrm{B}}$　　② $W_{\mathrm{A}\to\mathrm{B}}$　　③ $-2W_{\mathrm{A}\to\mathrm{B}}$

④ $2W_{\mathrm{A}\to\mathrm{B}}$

(エ) の解答群

⓪ 0　　① $-\Delta U_{\mathrm{B}\to\mathrm{C}}$　　② $\Delta U_{\mathrm{B}\to\mathrm{C}}$　　③ $-2\Delta U_{\mathrm{B}\to\mathrm{C}}$

④ $2\Delta U_{\mathrm{B}\to\mathrm{C}}$

状態 C と D の体積をそれぞれ V_C と V_D とし，ポアソンの式を用いると，$\dfrac{V_D}{V_C}=$ $\boxed{\textbf{(オ)}}$ となる。したがって，$W_{C\to D}$ は $W_{A\to B}$ を用いると，$W_{C\to D}=$ $\boxed{\textbf{(カ)}}$ と表すことができる。また，状態 D から A へ断熱変化したときに気体がした仕事は $\boxed{\textbf{(キ)}}$ となる。

したがって，熱機関 E_0 の 1 サイクルでは，高温熱源から熱量 Q_H を受け取り，低温熱源に熱量 Q_L を放出し，外部に仕事をしたことになる（**図 3-3**）。この 1 サイクルで外部にした仕事を W_0 とすると，$W_0=$ $\boxed{\textbf{(ク)}}$ となる。熱機関 E_0 の熱効率は，$\eta=\dfrac{W_0}{Q_H}$ と定義されるので，$\eta=$ $\boxed{\textbf{(ケ)}}$ となる。

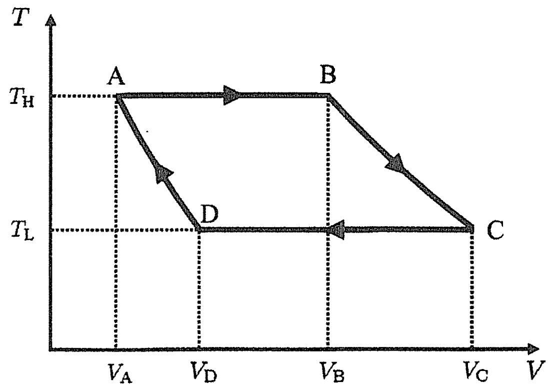


図 3-2 (再掲)

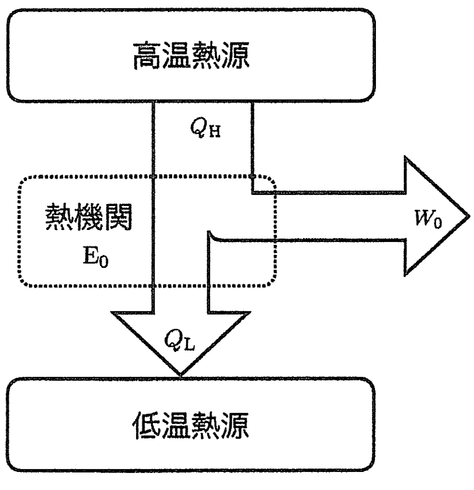


図 3-3

(オ) の解答群

⓪ $\left(\dfrac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}\right)^{\gamma}\dfrac{V_{\mathrm{A}}}{V_{\mathrm{B}}}$ ① $\left(\dfrac{T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{L}}}\right)^{\gamma}\dfrac{V_{\mathrm{A}}}{V_{\mathrm{B}}}$ ② $\left(\dfrac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}\right)^{\gamma}\dfrac{V_{\mathrm{B}}}{V_{\mathrm{A}}}$

③ $\left(\dfrac{T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{L}}}\right)^{\gamma}\dfrac{V_{\mathrm{B}}}{V_{\mathrm{A}}}$ ④ $\dfrac{V_{\mathrm{A}}}{V_{\mathrm{B}}}$ ⑤ $\dfrac{V_{\mathrm{B}}}{V_{\mathrm{A}}}$

⑥ $\left(\dfrac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}\dfrac{V_{\mathrm{A}}}{V_{\mathrm{B}}}$ ⑦ $\left(\dfrac{T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{L}}}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}\dfrac{V_{\mathrm{A}}}{V_{\mathrm{B}}}$ ⑧ $\left(\dfrac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}\dfrac{V_{\mathrm{B}}}{V_{\mathrm{A}}}$

⑨ $\left(\dfrac{T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{L}}}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}\dfrac{V_{\mathrm{B}}}{V_{\mathrm{A}}}$

(カ) の解答群

⓪ $-W_{\mathrm{A}\to\mathrm{B}}$ ① $W_{\mathrm{A}\to\mathrm{B}}$ ② $\dfrac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}W_{\mathrm{A}\to\mathrm{B}}$

③ $-\dfrac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}W_{\mathrm{A}\to\mathrm{B}}$ ④ $\dfrac{\gamma T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}W_{\mathrm{A}\to\mathrm{B}}$ ⑤ $-\dfrac{\gamma T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}W_{\mathrm{A}\to\mathrm{B}}$

⑥ $\dfrac{T_{\mathrm{L}}}{(\gamma-1)T_{\mathrm{H}}}W_{\mathrm{A}\to\mathrm{B}}$ ⑦ $-\dfrac{T_{\mathrm{L}}}{(\gamma-1)T_{\mathrm{H}}}W_{\mathrm{A}\to\mathrm{B}}$

(キ) の解答群

⓪ 0 ① $-\Delta U_{\mathrm{B}\to\mathrm{C}}$ ② $\Delta U_{\mathrm{B}\to\mathrm{C}}$ ③ $-2\Delta U_{\mathrm{B}\to\mathrm{C}}$

④ $2\Delta U_{\mathrm{B}\to\mathrm{C}}$

（下書き用紙）

(ク) の解答群

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

(ケ) の解答群

⓪ 0

① 1

② $\dfrac{T_{\mathrm{L}} - T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}}$

③ $\dfrac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}$

④ $\dfrac{T_{\mathrm{L}} - T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} \left(\dfrac{V_{\mathrm{A}}}{V_{\mathrm{B}}}\right)$

⑤ $\dfrac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}} \left(\dfrac{V_{\mathrm{A}}}{V_{\mathrm{B}}}\right)$

⑥ $\dfrac{T_{\mathrm{L}} - T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}} \left(\dfrac{V_{\mathrm{A}}}{V_{\mathrm{B}}}\right)^{\gamma}$

⑦ $\dfrac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}} \left(\dfrac{V_{\mathrm{A}}}{V_{\mathrm{B}}}\right)^{\gamma}$

⑧ $\gamma \dfrac{T_{\mathrm{L}} - T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}}$

⑨ $\gamma \dfrac{T_{\mathrm{H}} - T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}$

(3) 熱機関は，熱エネルギーを他のエネルギーへ変換する装置であり，**小問** (2) の熱機関 $\mathrm{E_0}$ 以外にも様々な熱機関がある。例えば，**小問** (2) の熱機関 $\mathrm{E_0}$ では，すべての状態変化はゆっくりと行われているが，一般的には，そうとは限らない。そこで，一般の熱機関の熱効率にどのような制限があるかを考察するため，熱機関 $\mathrm{E_0}$ と同様の温度 T_{H} と T_{L} の熱源を用いた別の熱機関 D の熱効率と熱機関 $\mathrm{E_0}$ の熱効率 η を比較する。以下，熱機関 D の熱効率を e とする。

(a) 熱機関 D の 1 サイクルでは，高温熱源から熱量 Q_{H} を受け取り，外部に仕事 W を行い，低温熱源に熱量 Q_{L}' を放出したとする。熱機関 D のサイクルでの状態変化はゆっくりではなく，容器の大きさも熱機関 $\mathrm{E_0}$ のものとは異なっている。このとき，1 サイクルで外部にした仕事 W は，熱機関 D の熱効率 e を用いて，$W = \boxed{\text{(コ)}}$ と表すことができる。

(b) **小問** (2) の逆サイクル，つまり，気体の状態を A → D → C → B → A の順にゆっくりと変化させるサイクルで表せられる熱機関（熱機関 $\mathrm{E_1}$）を考える。この逆サイクルは，経路の向きは異なるが，順サイクルと同じ経路をたどる（**図 3-4**）。したがって，熱機関 $\mathrm{E_1}$ での高温熱源や低温熱源との熱や仕事のやりとりは，符号は異なるが熱機関 $\mathrm{E_0}$ におけるそれらの大きさと同じである。つまり，熱機関 $\mathrm{E_1}$ の 1 サイクルでは，低温熱源から熱量 Q_{L} を受け取り，外から仕事 W_1 をされることにより，高温熱源へ熱量 Q_{H} を放出する（**図 3-5**）。このとき，W_1 を W_0 を用いて表すと $W_1 = \boxed{\text{(サ)}}$ となる。さらに，順サイクルで表せられる熱機関（熱機関 $\mathrm{E_0}$）の熱効率 η を用いて，仕事 W_1 は $W_1 = \boxed{\text{(シ)}}$ と表すことができる。

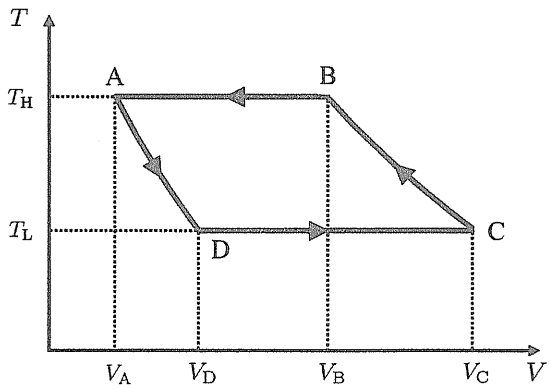


図 3-4

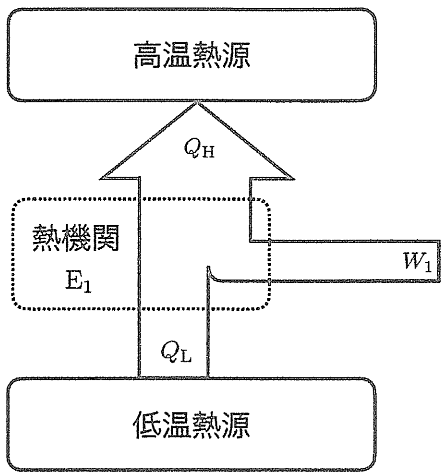


図 3-5

（下書き用紙）

(コ) の解答群

⓪ 0　① eQ_{H}　② $-eQ_{\mathrm{H}}$

③ eQ'_{L}　④ $-eQ'_{\mathrm{L}}$　⑤ $e(Q_{\mathrm{H}}-Q'_{\mathrm{L}})$

⑥ $-e(Q_{\mathrm{H}}-Q'_{\mathrm{L}})$

(サ) の解答群

⓪ W_0　① $-W_0$　② $\dfrac{T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{L}}}W_0$　③ $-\dfrac{T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{L}}}W_0$

④ $\dfrac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}W_0$　⑤ $-\dfrac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}W_0$

(シ) の解答群

⓪ ηQ_{H}　① $-\eta Q_{\mathrm{H}}$　② ηQ_{L}

③ $-\eta Q_{\mathrm{L}}$　④ $\eta(Q_{\mathrm{H}}-Q_{\mathrm{L}})$　⑤ $-\eta(Q_{\mathrm{H}}-Q_{\mathrm{L}})$

(c) 熱機関Dで1サイクルを行なったのち，熱機関 E_1 で1サイクルを行うことを考える。この二つのサイクルを組み合わせたものを一つの熱機関ととらえ，これを熱機関Fとよぶ（**図 3-6**）。熱機関Fでは，熱機関Dのサイクルで高温熱源から熱量 Q_H を受け取り，熱機関 E_1 のサイクルで高温熱源に熱量 Q_H を放出しているので，高温熱源との熱のやりとりの合計はゼロである。したがって，熱機関Fの1サイクルでは，低温熱源のみと熱のやりとりを行う。もし，$W - W_1 > 0$ であるならば，熱機関Fは，低温熱源のみから熱を吸収し，熱を放出することなしに外部に正の仕事をしたことになる。これは，与えられた熱のすべてを仕事に変換する熱機関は存在しないという熱力学第二法則と矛盾している。したがって，熱機関Dの熱効率 e と熱機関 E_0 の熱効率 η の間には，$\boxed{\text{(ス)}}$ という関係が必ず成立する。

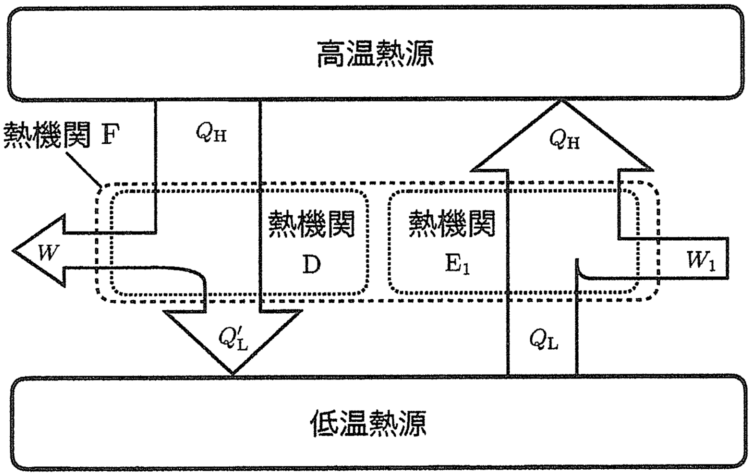


図 3-6

(ス) の解答群

⓪ $e = \eta$　　① $e \leqq \eta$　　② $e \geqq \eta$

③ $e = \dfrac{Q'_{\mathrm{L}}}{Q_{\mathrm{H}}}\eta$　　④ $e \leqq \dfrac{Q'_{\mathrm{L}}}{Q_{\mathrm{H}}}\eta$　　⑤ $e \geqq \dfrac{Q'_{\mathrm{L}}}{Q_{\mathrm{H}}}\eta$