

物 理

注 意

1. 問題は全部で22ページである。
2. 解答用紙に氏名・受験番号を忘れずに記入すること。(ただし、マーク・シートにはあらかじめ受験番号がプリントされている。)
3. 解答はすべて解答用紙に記入すること。
4. 問題冊子の余白は計算に利用してよい。
5. 解答用紙は必ず提出のこと。この問題冊子は提出する必要はない。

マーク・シート記入上の注意

1. 解答用紙(その1)はマーク・シートになっている。HBの黒鉛筆またはシャープペンシルを用いて記入すること。
2. 解答用紙にあらかじめプリントされた受験番号を確認すること。
3. 解答する記号の○を塗りつぶしなさい。○で囲んだり×をつけたりしてはいけない。

解答記入例(解答が1のとき)

1	●	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

4. 一度記入したマークを消す場合は、消しゴムでよく消すこと。×をつけても消したことになる。
5. 解答用紙をよごしたり、折り曲げたりしないこと。

1 なめらかな水平面(xy 平面)上の小球の運動に関する以下の設問について、空欄(1)~(6)に当てはまるもっとも適切な解答の記号を解答用紙(その1)の該当する解答欄にマークせよ。(問)の解答は解答用紙(その2)の該当する解答欄に記入せよ。なお、小球の運動は水平面上に限られ、小球が衝突する壁面およびブロックの面はなめらかであるとする。

(I) 図1—1のように、質量 m_A の小球Aが水平面上の原点Oに置かれて静止している。この小球Aは長さ r の糸とつながっており、糸の他端は y 軸上の点 $Q(0, r)$ に結ばれている。水平面の周囲は、図の様に壁1~4で囲まれており、壁1と3、および壁2と4はそれぞれ y 軸、および x 軸と平行に固定されている。

x 軸に沿ってその正の向きに速さ v で直進する質量 $m_B = 2m_A$ の小球Bが、時刻 $t = 0$ に小球Aと弾性衝突した。この衝突直後の小球Aおよび小球Bの速度の x 成分はそれぞれ $\frac{4}{3}v$ および $\frac{1}{3}v$ であり、従って小球Aおよび小球Bの速度の y 成分はそれぞれ (1) および (2) である。衝突時に小球Bから大きさ (3) の撃力を受けた小球Aは、その直後、点Qを中心とする半径 r の円軌道上を等速円運動し始めた。この時、小球Aが円軌道を一周し再び原点Oに戻るまでにかかる時間 T は、 v を用いて (4) で与えられる。一方、小球Aと衝突した小球Bはその後も引き続き水平面上を運動し、壁 (5) と弾性衝突した。壁 (5) と衝突した後、小球Bは時刻 $t = 2T$ に小球Aと2回目の衝突をした。小球Bが衝突した壁 (5) 上の点と原点Oとの間の距離は (6) である。

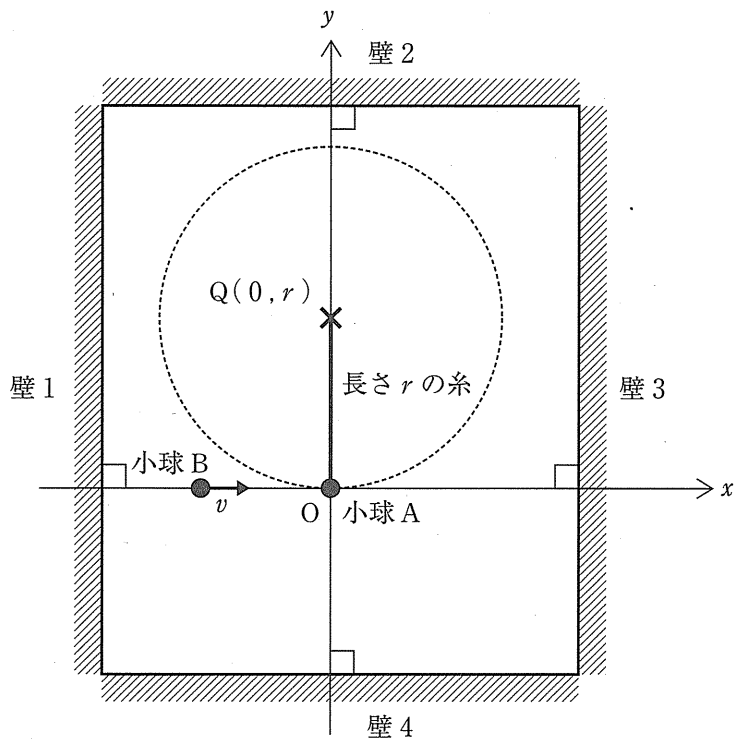


図 1-1

(1), (2)の解答群

- ① 0 ② v ③ $2v$ ④ $3v$ ⑤ $4v$
⑥ $\frac{1}{2}v$ ⑦ $\frac{1}{3}v$ ⑧ $\frac{1}{4}v$ ⑨ $\frac{1}{5}v$ ⑩ $\frac{2}{3}v$

(3)の解答群 選択肢に正解がないことが判明したため、全員正解とする。

- ① $\frac{1}{3}m_A v$ ② $\frac{2}{3}m_A v$ ③ $m_A v$ ④ $\frac{4}{3}m_A v$ ⑤ $\frac{5}{3}m_A v$
⑥ $2m_A v$ ⑦ $\frac{1}{4}m_A v$ ⑧ $\frac{2}{5}m_A v$ ⑨ $\frac{3}{5}m_A v$ ⑩ $\frac{4}{5}m_A v$

(4)の解答群

- ① $\frac{\pi r^2}{2v}$ ② $\frac{2\pi r}{3v}$ ③ $\frac{3\pi r}{4v}$ ④ $\frac{3\pi r^2}{5v}$ ⑤ $\frac{4r}{5v}$
⑥ $\frac{2\pi r^2}{v}$ ⑦ $\frac{5\pi r}{2v}$ ⑧ $\frac{\pi r}{v}$ ⑨ $\frac{\pi r}{2v}$ ⑩ $\frac{3\pi r}{2v}$

(5)の解答群

- ① 1 ② 2 ③ 3 ④ 4

(6)の解答群

- ① πr ② $2\pi r$ ③ $3\pi r$ ④ $4\pi r$ ⑤ $\frac{\pi r}{2}$
⑥ $\frac{\pi r}{3}$ ⑦ $\frac{\pi r}{4}$ ⑧ $\frac{\pi r}{5}$ ⑨ $\frac{\pi r}{6}$ ⑩ $\frac{\pi r}{8}$

(II) 図1-2のように、水平面上を x 軸に沿ってその正の向きに速さ v で進む質量 m_C の小球 C と、 y 軸に沿ってその正の向きに速さ V で進む質量 m_D の小球 D が、時刻 $t = 0$ に原点 O で衝突した。衝突後の小球 C の速度の x , y 成分は v'_x , v'_y , 小球 D の速度の x , y 成分は V'_x , V'_y とする。この時、衝突の前後における2個の小球の運動量の和の x 成分は $\boxed{\text{(7)}}$ の関係を満たし、 y 成分は $\boxed{\text{(8)}}$ の関係を満たす。

以下、この衝突において $m_C = 2m_D$ かつ $v = \frac{1}{3}V$ であった場合を考えよう。この場合、 $\boxed{\text{(7)}}$ の関係より $V = \boxed{\text{(9)}}$ が導き出され、 $\boxed{\text{(8)}}$ の関係より $V = \boxed{\text{(10)}}$ が導き出される。時刻 $t = 0$ での衝突後、時刻 $t = T'$ に小球 C は点 $P(0, \ell)$ (ただし $\ell > 0$) に到達し、同時に小球 D は図1-2中にある壁に到達した。なお、この壁は $x = 4\ell$ の直線に沿って固定されているとする。これより $v'_x = \boxed{\text{(11)}} \times \frac{\ell}{T'}$, $v'_y = \boxed{\text{(12)}} \times \frac{\ell}{T'}$, $V'_x = \boxed{\text{(13)}} \times \frac{\ell}{T'}$, および $V'_y = \boxed{\text{(14)}} \times \frac{\ell}{T'}$ となることがわかる。従って、小球同士の衝突後の小球 C および小球 D の速さはそれぞれ $\boxed{\text{(15)}} \times \frac{\ell}{T'}$ および $\boxed{\text{(16)}} \times \frac{\ell}{T'}$ と表すことができる。

(7), (8)の解答群

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| ① $3m_C v = m_C v'_x + 2m_D V'_x$ | ② $3m_C v = m_C v'_x + m_D V'_x$ |
| ③ $2m_C v = m_C v'_x + 3m_D V'_x$ | ④ $2m_C v = m_C v'_x + m_D V'_x$ |
| ⑤ $m_C v = m_C v'_x + m_D V'_x$ | ⑥ $3m_D V = m_C v'_y + 2m_D V'_y$ |
| ⑦ $3m_D V = m_C v'_y + m_D V'_y$ | ⑧ $2m_D V = m_C v'_y + 3m_D V'_y$ |
| ⑨ $2m_D V = m_C v'_y + m_D V'_y$ | ⑩ $m_D V = m_C v'_y + m_D V'_y$ |

(9), (10)の解答群

① $\frac{1}{2}v'_y + 3V'_y$

② $2v'_y + 2V'_y$

③ $2v'_y + V'_y$

④ $3v'_y + \frac{3}{2}V'_y$

⑤ $3v'_y + 2V'_y$

⑥ $2v'_x + V'_x$

⑦ $3v'_x + \frac{3}{2}V'_x$

⑧ $2v'_x + 3V'_x$

⑨ $\frac{3}{2}v'_x + 3V'_x$

⑩ $\frac{3}{2}v'_x + 2V'_x$

(11), (12), (13), (14), (15)の解答群

① 1

② 2

③ 3

④ 4

⑤ 5

⑥ 6

⑦ 7

⑧ 8

⑨ 9

⑩ 0

(16)の解答群

① $\sqrt{\frac{129}{13}}$

② $\sqrt{32}$

③ $\sqrt{\frac{8}{21}}$

④ $\sqrt{\frac{3}{5}}$

⑤ $\sqrt{8}$

⑥ 0

⑦ 2

⑧ 4

⑨ 6

⑩ 8

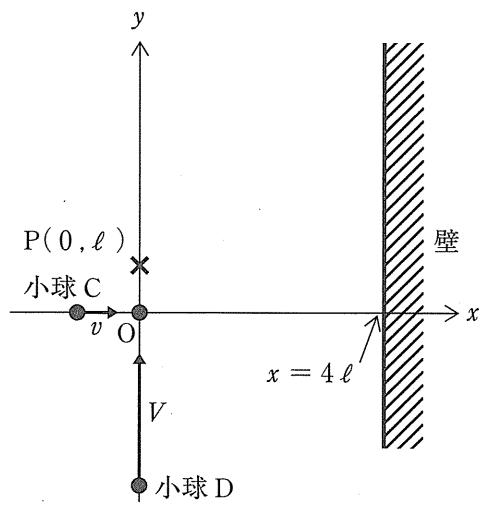


图 1—2

(問) 時刻 $t = T'$ に壁と弾性衝突した小球 D が、固定された小さなブロックの x 軸と平行な面で弾性衝突をした後、再び小球 C と衝突した。解答用紙(その2)の図 1-4 中にブロックを正しい位置に記入し、さらに、時刻 $t = 0$ の直後から小球 C と衝突するまでの小球 D の軌跡を書き込め。なお、図 1-3 は、図 1-2 の適当な位置にブロックおよび小球 D の軌跡を記入した一例である。

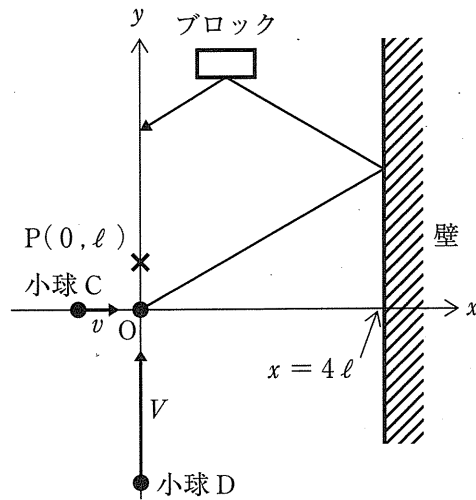


図 1-3

<余 白>

2

以下の文章を読み、空欄(17)～(21)に最も良くあてはまるものをそれぞれの解答群より選び、**解答用紙(その1)**の所定の解答欄をマークせよ。また、空欄(a)～(c)に最も良くあてはまる式、数値または語句を、**解答用紙(その2)**の所定の解答欄に記入せよ。空欄(d)～(h)については、それぞれの解答群から最も良くあてはまるものを選び、該当する記号を**解答用紙(その2)**の所定の解答欄に記入せよ。

図2—1のようなソレノイドを考える。ソレノイドの長さは l で、一様に N 回巻かれているものとする。ソレノイドの半径は l にくらべて十分小さいため、ソレノイドの端の影響は非常に小さく、ソレノイドの内部の磁束密度は一様であるものとする。ソレノイドの断面積を S とする。真空の透磁率を μ_0 とする。

このソレノイドに電源を接続して電流 $I (> 0)$ を図2—1のPからQの向きに流すことを考える。ソレノイドの起電力は、Pから測ったQに生じる電位として定める。ソレノイドの抵抗 R は $R = 0$ とする。

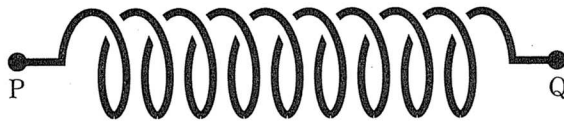


図2—1

(A) 微小時間 Δt のあいだに電流 I が変化した場合にソレノイドに生じる起電力 V を考える。電流の変化量を ΔI とすると、ソレノイドの自己インダクタンス L は関係式 $V =$ (17) から定義される。また、電流 I が流れているときに自己インダクタンス L のソレノイドに蓄えられているエネルギーは $E =$ (18) である。

図2—1の N 巻きのソレノイドを、一巻きコイルを N 個直列につないだものとして考える。一巻きコイルを貫く磁束を Φ とする。微小時間 Δt のあいだに生じる磁束の変化 $\Delta\Phi$ によって生じる起電力は $V_1 =$ (19) で与えられる。ソレノイドの端の影響が無視できるので、 N 巻きのソレノイド全体で生じる起電力は NV_1 で与えられる。

(17), (18), (19)の解答群

- ① IR ② $-\frac{\Delta I}{\Delta t}$ ③ $-\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ ④ $-L\frac{\Delta I}{\Delta t}$ ⑤ IL
⑥ $VI\Delta t$ ⑦ $N\Phi$ ⑧ $\frac{1}{2}LI^2$ ⑨ $\frac{1}{2}\frac{V^2}{L}$ ⑩ $\frac{1}{2}IV^2$

(B) このソレノイドにおける自己インダクタンス L を、起電力の計算を通じて ℓ , S , N などを用いて導いてみよう。電流 I が流れているソレノイドの内部に生じる磁束密度の大きさは $B = \mu_0 \times$ (20) である。したがって、各コイルを貫く磁束 Φ は I を用いて $\Phi = \mu_0 \times$ (21) と表される。微小時間 Δt のあいだに電流が ΔI だけ変化した場合、ソレノイドに生じる磁束の変化量は $\Delta\Phi = \mu_0 \times$ (a) である。これにより、ソレノイド全体には $V = -\mu_0 \times$ (b) の起電力が生じる。これを式(17)と比べることにより、このソレノイドの自己インダクタンスは $L = \mu_0 \times$ (c) で与えられることがわかる。

(20), (21)の解答群

- ① NI ② $NI\ell$ ③ $\frac{NI}{\ell}$ ④ SNI ⑤ $SNI\ell$
 ⑥ $\frac{SNI}{\ell}$ ⑦ N^2I ⑧ $\frac{N^2I}{\ell}$ ⑨ $\frac{NI}{\ell^2}$ ⑩ $\frac{SNI}{\ell^2}$

(C) このソレノイドに電流 I を流し全体が静止している状態からソレノイドの両端に力をかけたところ、微小時間 Δt のあいだにソレノイドの長さ ℓ が微小量 $\Delta\ell (> 0)$ だけ変化した。このときソレノイドが伸びると同時に電流の値を ΔI だけ変化させた。その結果、ソレノイド内部の磁束密度の大きさ B の値は変化しなかった。ただし、ソレノイド全体は一様に伸び、またソレノイドの面積 S は一定のままであったとする。

ここで隣り合う2つの一巻きコイルを考えると、これらのあいだには、同じ向きに流れる電流によって (d) が生じることがわかる。ソレノイド全体で考えると、ソレノイドの長さを $\Delta\ell$ だけ伸ばしたときに外力がした仕事を ΔW_a とすると、(e) である。

このときにソレノイドに生じる起電力 V を求めてみよう。式(17)ではソレノイドの形状が変化する場合を考慮していないので、式(19)以降に戻って計算する必要がある、これによって、(f) であることがわかる。微小時間 Δt のあいだに電源がソレノイドに対してした仕事 ΔW_b は (g) である。

これらより、微小時間 Δt のあいだのソレノイドに蓄えられている電気的なエネルギーの変化は、(h)。

(注意：以下の解答群から解答を選び、該当する記号を解答用紙(その2)に記入すること。)

(d), (e), (f), (g)の解答群

- | | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| (ア) 引力 | (イ) 斥力 | (ウ) 熱 | (エ) $\Delta W_a > 0$ |
| (オ) $\Delta W_a = 0$ | (カ) $\Delta W_a < 0$ | (キ) $\Delta W_b > 0$ | (ク) $\Delta W_b = 0$ |
| (ケ) $\Delta W_b < 0$ | (コ) $V > 0$ | (サ) $V = 0$ | (シ) $V < 0$ |

(h)の解答群

- (ア) ゼロである
- (イ) 電源がソレノイドに対してした仕事によって生じる
- (ウ) 外力がソレノイドに対してした仕事によって生じる
- (エ) ソレノイドの発熱によって失った熱エネルギーによって生じる

3

なめらかに動くことができる質量 M 、断面積 S のピストンがいくつか付いた円筒容器に、気体を閉じこめ、ピストンが鉛直方向に動くように円筒容器を立てる。円筒容器の内面には体積の無視できる加熱冷却装置がついており、シリンダー内の気体の温度は自由に変えることができる。以下の文章を読み、空欄(22)～(29)にあてはまるもっとも適切な式を解答群から選び、解答用紙(その1)の該当する記号をマークせよ。また、問のグラフを解答用紙(その3)に記せ。以下の設問では、気体は理想気体とし、大気圧を P_0 、重力加速度の大きさを g 、温度は絶対温度とする。気体と円筒容器およびピストンとの間に熱のやりとりはないものとする。

- (I) 図3-1のように気体が容器内に閉じ込められている。気体の温度は T_0 で、ピストンはシリンダー内上面から距離 l_0 の位置で静止している。このときの気体の圧力は である。気体の温度を T_0 から T_1 にあげると、ピストンは上面からの距離が の位置でつりあった。

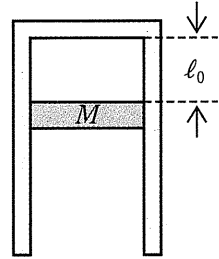


図3-1

(22)の解答群

- | | | |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| ① P_0 | ② $P_0 + Mg$ | ③ $P_0 + \frac{Mg}{S}$ |
| ④ $\frac{P_0 + Mg}{S}$ | ⑤ $P_0 + MgS$ | ⑥ $P_0 - Mg$ |
| ⑦ $P_0 - \frac{Mg}{S}$ | ⑧ $\frac{P_0 - Mg}{S}$ | ⑨ $P_0 - MgS$ |

(23)の解答群

- | | | |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| ① l_0 | ② $\frac{T_1 - T_0}{T_0} l_0$ | ③ $\frac{T_1 - T_0}{T_1} l_0$ |
| ④ $\frac{T_0}{T_1} l_0$ | ⑤ $\frac{T_1}{T_0} l_0$ | |

<余 白>

(II) 図3—2のように円筒容器にそれぞれ質量 M の2つのピストンA, Bを付けて、最初、ピストンBを固定したところ、ピストンAは上面から距離 l_1 、2つのピストン間の距離も l_1 となる位置でつりあった。ピストンによって閉じ込められた2つの領域C, D内の気体の温度は共に T_0 で、物質量はそれぞれ n_C, n_D とする。領域D内の気体の圧力は P_0 であった。このとき気体の物質量には $n_C =$ (24) n_D の関係が成り立つ。次に領域Dの気体の温度を T_0 に保ったまま、領域Cの気体の温度を T_C にしたところ、ピストンAが距離 d 上昇して静止した。このとき領域Dの気体の圧力 P_D は $P_D =$ (25) P_0 であった。この状態でピストンBの固定をはずしたところ、2つのピストンは静止したままだった。これより圧力 P_D がわかり、よって T_C が $T_C =$ (26) T_0 であったことがわかる。

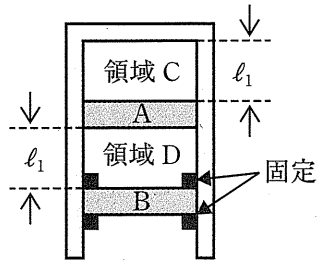


図3—2

(24)の解答群

- ① 1 ② $\frac{P_0}{P_0 + \frac{Mg}{S}}$ ③ $\frac{P_0 + \frac{Mg}{S}}{P_0}$ ④ $\frac{P_0 S}{P_0 + Mg}$
- ⑤ $\frac{P_0 + Mg}{P_0 S}$ ⑥ $\frac{P_0}{P_0 - \frac{Mg}{S}}$ ⑦ $\frac{P_0 - \frac{Mg}{S}}{P_0}$ ⑧ $\frac{P_0 S}{P_0 - Mg}$
- ⑨ $\frac{P_0 - Mg}{P_0 S}$ ⑩ $\frac{P_0 - \frac{Mg}{S}}{P_0 + \frac{Mg}{S}}$

(25)の解答群

① $\frac{\ell_1}{\ell_1 + d}$

② $\frac{\ell_1 + d}{\ell_1}$

③ $\frac{d}{\ell_1 + d}$

④ $\frac{\ell_1 + d}{d}$

⑤ $\frac{\ell_1 - d}{\ell_1 + d}$

⑥ $\left(\frac{\ell_1 - d}{\ell_1 + d}\right)^2$

⑦ $\left(\frac{\ell_1}{\ell_1 + d}\right)^2$

⑧ $\left(\frac{\ell_1 + d}{\ell_1}\right)^2$

⑨ $\left(\frac{d}{\ell_1 + d}\right)^2$

⑩ $\left(\frac{\ell_1 + d}{d}\right)^2$

(26)の解答群

① $\frac{\ell_1}{\ell_1 - d}$

② $\frac{\ell_1 - d}{\ell_1}$

③ $\frac{d}{\ell_1 - d}$

④ $\frac{\ell_1 - d}{d}$

⑤ $\frac{\ell_1 - d}{\ell_1 + d}$

⑥ $\left(\frac{\ell_1 - d}{\ell_1 + d}\right)^2$

⑦ $\left(\frac{\ell_1}{\ell_1 - d}\right)^2$

⑧ $\left(\frac{\ell_1 - d}{\ell_1}\right)^2$

⑨ $\left(\frac{d}{\ell_1 - d}\right)^2$

⑩ $\left(\frac{\ell_1 - d}{d}\right)^2$

(Ⅲ) 次に図3-3のように円筒容器にそれぞれ質量 M の2つのピストン E, F を付けて、ピストン F を棒に固定し、その固定した棒で、図のように静止させた。ピストン E は上面から距離 l_2 、ピストン E, F 間も距離が l_2 となる位置でつりあった(状態1)。ピストンによって閉じ込められた2つの領域 G, H 内の気体の温度は T_0 で、圧力と物質量はそれぞれ P_G, P_H, n_G, n_H であった。

まず、2つの領域 G, H 内の気体の温度 T_0 を一定に保ちながら、ピストン F を下方に動かすと、図3-4のようにピストン E の移動距離が l_2 となった(状態2)。このときピストン E, F 間の距離 l_H と l_2 との関係をもちいて表すと、 $l_H = \boxed{(27)} l_2$ であった。

次にピストン F を固定したまま円筒容器の下部に穴をあけた。ピストン E は上昇して図3-5のように、ピストン E が上面より l_2 の位置でつりあった(状態3)。状態2から状態3へ変化する過程において、領域 G 内の気体の状態は断熱変化するものとする。断熱変化では $PV^\gamma = \text{一定} (\gamma > 1)$ となることが知られている。これより状態1における領域 G 内の気体の圧力 P_G は、大気圧 P_0 をもちいて $P_G = \boxed{(28)}$ と表せ、状態3における領域 G 内の気体の温度 $T_G = \boxed{(29)} T_0$ となる。

問 状態1における領域 G の体積を $V_G = Sl_2$ とする。状態1から状態3への状態変化における $P-V$ 図を解答用紙(その3)の図3-6に描け。

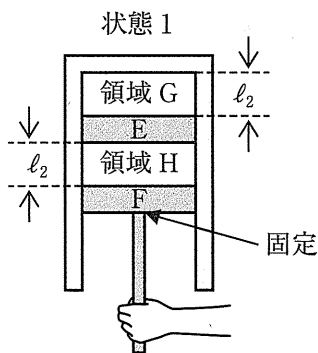


図3-3

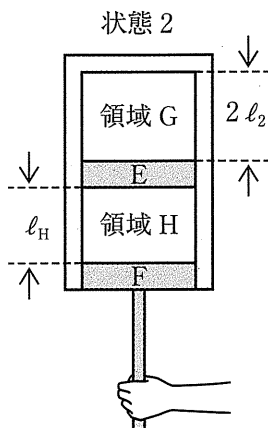


図3-4

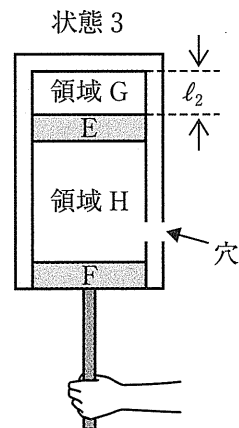


図3-5

(27)の解答群

$$\textcircled{1} \frac{P_G + \frac{Mg}{S}}{P_G}$$

$$\textcircled{2} \frac{P_G}{P_G + \frac{Mg}{S}}$$

$$\textcircled{3} \frac{P_G}{2P_G + \frac{Mg}{S}}$$

$$\textcircled{4} \frac{P_G - \frac{Mg}{S}}{2P_G + \frac{Mg}{S}}$$

$$\textcircled{5} \frac{P_G + \frac{Mg}{S}}{2P_G + \frac{Mg}{S}}$$

$$\textcircled{6} \frac{2P_G - \frac{Mg}{S}}{2P_G + \frac{Mg}{S}}$$

$$\textcircled{7} \frac{P_G}{\frac{P_G}{2} + \frac{Mg}{S}}$$

$$\textcircled{8} \frac{P_G - \frac{Mg}{S}}{\frac{P_G}{2} + \frac{Mg}{S}}$$

$$\textcircled{9} \frac{P_G + \frac{Mg}{S}}{\frac{P_G}{2} + \frac{Mg}{S}}$$

$$\textcircled{0} \frac{\frac{P_G}{2} - \frac{Mg}{S}}{\frac{P_G}{2} + \frac{Mg}{S}}$$

(28)の解答群

$$\textcircled{1} 2^{1-\gamma} \left(P_0 - \frac{Mg}{S} \right)$$

$$\textcircled{2} 2^{1-\gamma} \left(\frac{P_0 - Mg}{S} \right)$$

$$\textcircled{3} 2^{-\gamma} \left(P_0 - \frac{Mg}{S} \right)$$

$$\textcircled{4} 2^{-\gamma} \left(\frac{P_0 - Mg}{S} \right)$$

$$\textcircled{5} 2^{-\gamma} P_0$$

$$\textcircled{6} \left(\frac{5}{3} \right)^{1-\gamma} \left(P_0 - \frac{Mg}{S} \right)$$

$$\textcircled{7} \left(\frac{5}{3} \right)^{1-\gamma} \left(\frac{P_0 - Mg}{S} \right)$$

$$\textcircled{8} \left(\frac{5}{3} \right)^{-\gamma} \left(P_0 - \frac{Mg}{S} \right)$$

$$\textcircled{9} \left(\frac{5}{3} \right)^{-\gamma} \left(\frac{P_0 - Mg}{S} \right)$$

$$\textcircled{0} \left(\frac{5}{3} \right)^{-\gamma} P_0$$

(29)の解答群

$$\textcircled{1} 2^{1-\gamma}$$

$$\textcircled{2} 2^{-\gamma}$$

$$\textcircled{3} 2^{-1-\gamma}$$

$$\textcircled{4} 2^\gamma$$

$$\textcircled{5} 2^{\gamma-1}$$

$$\textcircled{6} \left(\frac{5}{3} \right)^{1-\gamma}$$

$$\textcircled{7} \left(\frac{5}{3} \right)^{-\gamma}$$

$$\textcircled{8} \left(\frac{5}{3} \right)^{-1-\gamma}$$

$$\textcircled{9} \left(\frac{5}{3} \right)^\gamma$$

$$\textcircled{0} \left(\frac{5}{3} \right)^{\gamma-1}$$

<余 白>

<余 白>

<余 白>

<余 白>

