

物 理

- I 次の文章を読み、あ ～ き に適切な数式あるいは数値を解答欄に記入せよ。また、ア ～ オ には指定された選択肢からもっとも適切なものを一つ選び、解答欄にマークせよ。イ と ウ , エ と オ には同じ選択肢をマークしてもよい。

図のように、水平方向に x 軸、鉛直方向に y 軸をとる。座標原点を O とする。長さ L の伸縮しない軽い棒の片端にジョイントがつけられており、棒はジョイントを中心に xy 面内で自由に回転することができるようにぶら下げられている。棒の別の端には質量 m の小球 A が固定されている。重力加速度の大きさを g とする。空気抵抗や摩擦は無視できるものとする。

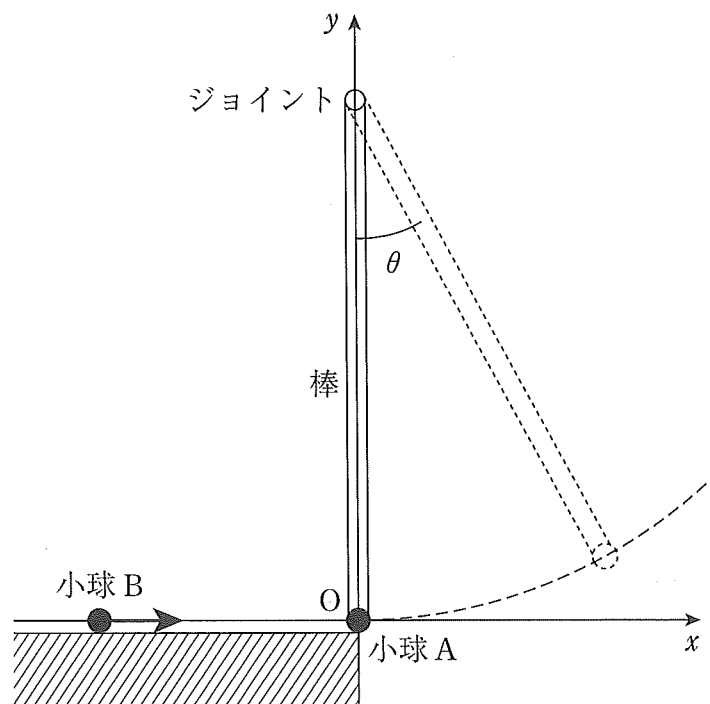
- 〔1〕 点 O に静止していた小球 A に、左から同じ質量 m の小球 B が x 軸上を進んできて衝突した。この衝突は完全弾性衝突であり、衝突する直前の小球 B の速さは v_0 であった。衝突直後の小球 A の速さは あ , 小球 B の速さは い と表せる。

- 〔2〕 衝突後、小球 A は xy 面内で棒のジョイントを中心とする半径 L の円運動を開始する。

- (a) 小球 A の速さは棒と鉛直線のなす角度 θ ア , $\theta = 60^\circ$ となったときに小球 A は一瞬静止し、その後、逆向きに動き始めた。この場合、小球 B の衝突前の速さ v_0 は、棒の長さ L と $v_0 =$ イ という関係にある。
- (b) 小球 B の速さ v_0 を徐々に大きくしながら衝突実験を繰り返し行ったところ、 v_0 が ウ を超えると、小球 A は途中で止まらず、円周を一周した。

〔3〕 今度は、小球 B をある速さ v_1 で衝突させたところ、小球 A は円運動を開始したが、 $\theta = \alpha$ ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) となったときに小球 A の固定が突然外れ、小球 A は棒からはなれて飛んでいった。固定が外れた時刻を $t = 0$ とする。

- (a) 時刻 $t = 0$ における小球 A の速さ v は、 v_1, α, L, g を用いて $v =$ う と表せる。その後、小球は x 軸方向には エ と同じ運動をし、 y 軸方向には オ と同じ運動をする。
- (b) 固定が外れてから、小球 A の高さが最大となる時刻 t_1 は、 v, α, g を用いて え と表せる。時刻 t_1 における小球 A の x 座標は、 v, α, L, g を用いて お と表せる。
- (c) 固定が外れたときの高さに小球 A が再び落ちてくる時刻 t_2 は、 v, α, g を用いて か と表せる。時刻 t_2 における小球 A の x 座標は、 v, α, L, g を用いて き と表せる。



図

ア に対する選択肢

- ① が大きくなるとともに減少し ② に関わらず一定であり
③ が大きくなるとともに増加し

イ , ウ に対する選択肢

- ① $\frac{\sqrt{gL}}{2}$ ② $\sqrt{\frac{gL}{3}}$ ③ $\sqrt{\frac{gL}{2}}$ ④ $\sqrt{gL}$ ⑤ $\sqrt{2gL}$
⑥ $\sqrt{3gL}$ ⑦ $2\sqrt{gL}$ ⑧ $\sqrt{5gL}$ ⑨ $\sqrt{6gL}$ ⑩ $\sqrt{7gL}$
⑪ $2\sqrt{2gL}$

エ , オ に対する選択肢

- ① 単振動 ② ブラウン運動 ③ 等速直線運動
④ 等速円運動 ⑤ 等加速度直線運動 ⑥ 回転運動

- II 次の文章を読み、あ ～ き に適切な数式あるいは数値を解答欄に記入せよ。また、ア ～ サ には指定された選択肢からもっとも適切なものを一つ選び、解答欄にマークせよ。あ ～ き の解答欄に記入する数式は、文字定数として V, d, S, ϵ_0 のみを用いること。ウ ～ キ, ケ ～ サ の選択肢には同じものを選んでもよい。真空の誘電率を ϵ_0 とする。

図1のように、真空中に、面積 S の2枚の薄い導体板 A と B が、距離 d だけ隔てて平行で向かい合わせに配置されている。導体板の法線方向に x 軸を取り、最初、導体板 A は $x = 0$ の位置に、導体板 B は $x = d$ の位置にある。導体板は左面と右面を区別して取り扱う。また、導体板の端の効果は考えないものとし、電場は x 軸に平行であるとする。図中では右向きを正とし、符号も含めて正しく解答すること。

- 〔1〕 真空中に置かれた電気量 Q (ただし、 $Q > 0$) の電荷から出る電気力線の総数は ア 本である。たとえば、十分に広い平面に電気量 Q の電荷が一樣に分布するときには、片側に ア の半数の電気力線が出て行き、反対側には残りの電気力線が出て行く。電場の強さは単位面積あたりの電気力線の本数で与えられる。

- 〔2〕 図1において、導体板 A の左面と右面に存在する電気量をそれぞれ Q_1 および Q_2 、導体板 B の左面と右面に存在する電気量をそれぞれ Q_3 および Q_4 とする。このときの電場を〔1〕の考え方を使って考えてみよう。電場の重ね合わせより、導体板 A の左側の電場は イ $\times$ (ウ) と表される。導体板 A の内部の電場は イ $\times$ (エ) と表される。導体板 A と B の間の領域 ($0 < x < d$) の電場は、イ $\times$ (オ) と表される。導体板 B の内部の電場は イ $\times$ (カ) と表される。導体板 B の右側の電場は イ $\times$ (キ) と表される。

次に、導体板 A, B の電荷をすべて放電してから、図 2 に示すように、2 枚の導体板に導線、スイッチ、起電力 V の電池を接続した。導体板 A は電池の正極側に、導体板 B は電池の負極側に接続した。最初、導体板 A, B に電荷は存在せず、スイッチは開いているものとする。スイッチを閉じ、十分に長い時間が経過した後にスイッチを開いた。

〔3〕 導体板 A と B の間の領域内 ($0 < x < d$) の電場は あ である。導体板 A の左面と右面に存在する電気量をそれぞれ q_1 および q_2 、導体板 B の左面と右面に存在する電気量をそれぞれ q_3 および q_4 とすると、スイッチを閉じる前に電荷は存在していなかったので、電荷の保存則より、 $q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = 0$ であり、〔1〕の考え方を使って考察すると、 $q_1 =$ い $, q_2 =$ う であることがわかる。導体板 A が導体板 B から受ける力は、電気量 q_1 と q_2 の電荷が電気量 q_3 と q_4 の電荷によって $0 < x < d$ の領域に作られる電場の中で受ける力の合力に等しく、え である。導体板 A に外力を加えて、導体板 B と平行を保ったままゆっくりと右側に動かし、導体板 B に接触させた。このとき、外力がした合計の仕事は お である。

導体板 A を $x = 0$ の位置に戻し、図 3 に示すように、2 枚の導体板間の中央に、比誘電率が 4 であり導体板と同じ面積で厚さ $\frac{d}{3}$ の誘電体 C を、導体板と平行にして入れた。ただし、誘電体 C は最初、帯電していなかった。その後、スイッチを閉じて十分に長い時間が経過してからスイッチを開いた。

〔4〕 導体板 B の電位を 0 とした場合の電位と位置の関係を示すグラフは ク のようになる。導体板 A と誘電体 C の間の領域 ($0 < x < \frac{d}{3}$) の電場は ケ $\times$ あ、誘電体 C の内部 ($\frac{d}{3} < x < \frac{2d}{3}$) の電場は コ $\times$ あ である。誘電体 C の左面 ($x = \frac{d}{3}$) に存在する電気量は サ $\times$ う である。導体板 A が、導体板 B と誘電体 C から受ける力の合力は か であり、導体板 A, B, 誘電体 C からなるコンデンサーに蓄えられている静電エネルギーは き である。

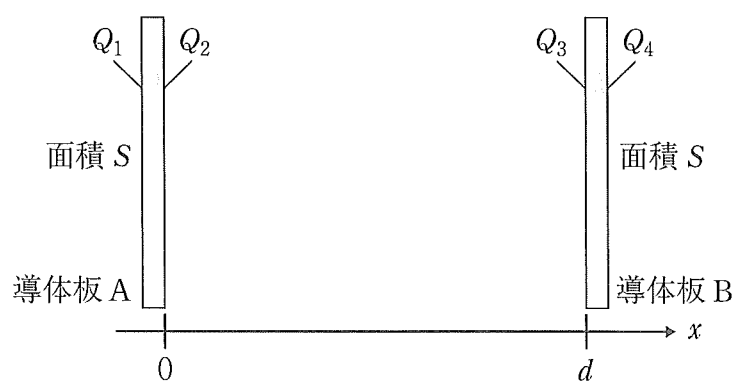


図 1

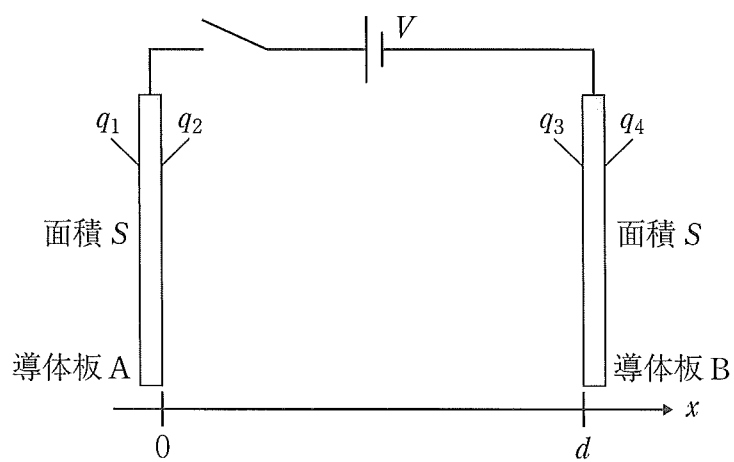


図 2

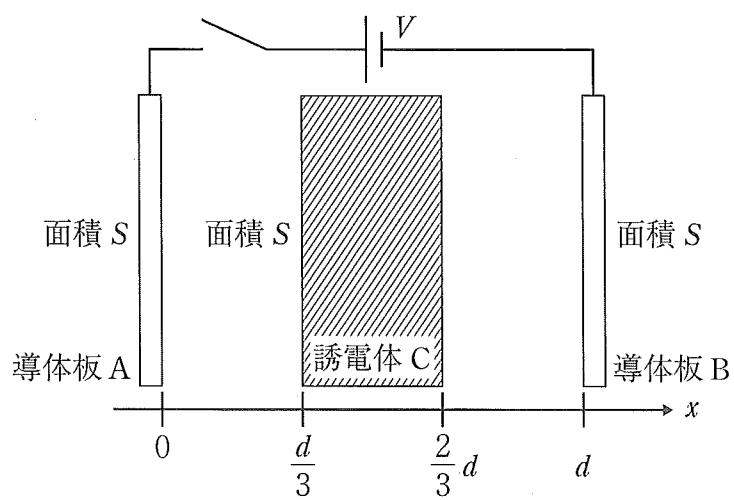


図 3

ア に対する選択肢

- | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| ① Q | ② $\frac{\varepsilon_0}{2} Q$ | ③ $\varepsilon_0 Q$ | ④ $2\pi\varepsilon_0 Q$ |
| ⑤ $\frac{Q}{\varepsilon_0}$ | ⑥ $\frac{Q}{2\varepsilon_0}$ | ⑦ $\frac{Q}{2\pi\varepsilon_0}$ | ⑧ $\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}$ |

イ に対する選択肢

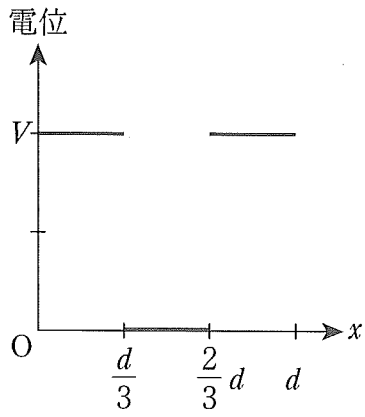
- | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| ① $\frac{\varepsilon_0 S}{d}$ | ② $\frac{d}{\varepsilon_0 S}$ | ③ ε_0 | ④ $\frac{\varepsilon_0}{2\pi}$ |
| ⑤ $\frac{1}{\varepsilon_0 S}$ | ⑥ $\frac{1}{2\varepsilon_0 S}$ | ⑦ $\frac{S}{4\pi\varepsilon_0}$ | ⑧ $4\pi\varepsilon_0 S$ |

ウ , エ , オ , カ , キ に対する選択肢

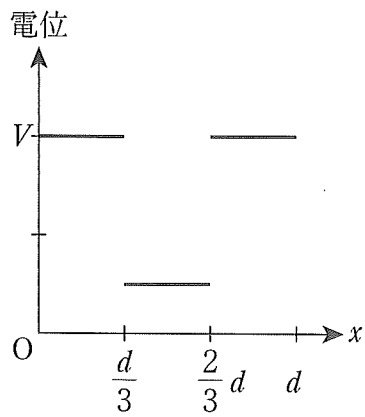
- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| ① $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$ | ② $Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4$ |
| ③ $Q_1 + Q_2 - Q_3 + Q_4$ | ④ $Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4$ |
| ⑤ $Q_1 - Q_2 + Q_3 + Q_4$ | ⑥ $Q_1 - Q_2 + Q_3 - Q_4$ |
| ⑦ $Q_1 - Q_2 - Q_3 + Q_4$ | ⑧ $Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4$ |
| ⑨ $-Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4$ | ⑩ $-Q_1 + Q_2 - Q_3 + Q_4$ |
| ⑪ $-Q_1 + Q_2 - Q_3 - Q_4$ | ⑫ $-Q_1 - Q_2 + Q_3 + Q_4$ |
| ⑬ $-Q_1 - Q_2 + Q_3 - Q_4$ | ⑭ $-Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4$ |

ク に対する選択肢

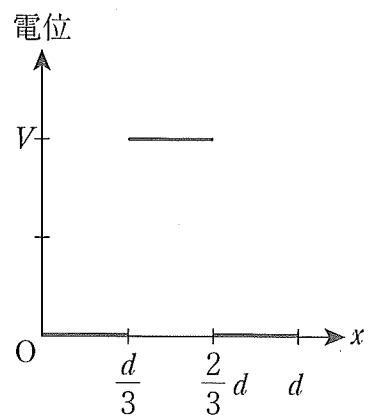
①



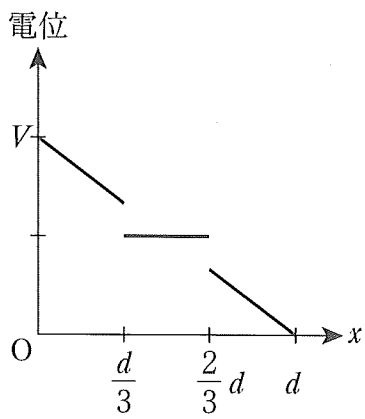
②



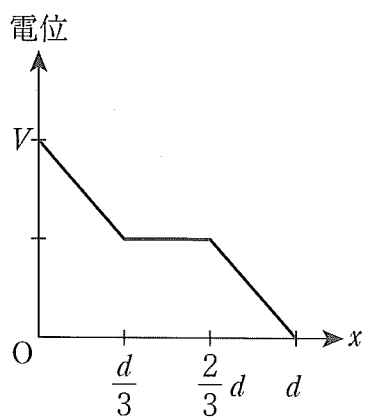
③



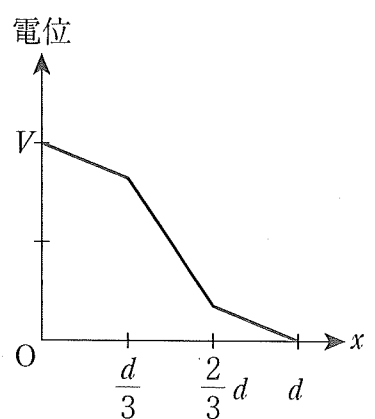
④



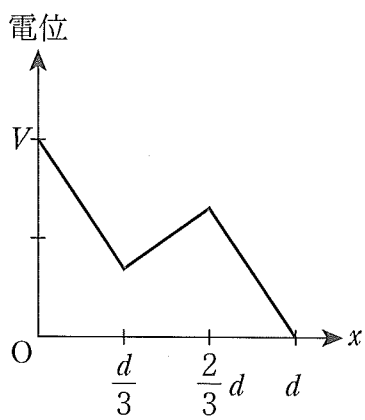
⑤



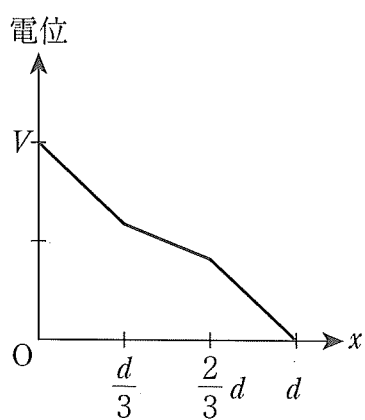
⑥



⑦



⑧



ケ

 ,

コ

 ,

サ

 に対する選択肢

- | | | | | | |
|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
| ① -16 | ② -9 | ③ -4 | ④ -3 | ⑤ $-\frac{16}{9}$ | ⑥ $-\frac{4}{3}$ |
| ⑦ -1 | ⑧ $-\frac{4}{9}$ | ⑨ $-\frac{1}{3}$ | ⑩ $-\frac{1}{4}$ | ⑪ $-\frac{3}{16}$ | ⑫ 0 |
| ⑬ $\frac{3}{16}$ | ⑭ $\frac{1}{4}$ | ⑮ $\frac{1}{3}$ | ⑯ $\frac{4}{9}$ | ⑰ 1 | ⑱ $\frac{4}{3}$ |
| ⑲ $\frac{16}{9}$ | ⑳ 3 | ㉑ 4 | ㉒ 9 | ㉓ 16 | |

- Ⅲ 次の文章を読み、あ ～ く に適切な数式あるいは数値を解答欄に記入せよ。また、ア ～ カ には指定された選択肢からもっとも適切なものを一つ選び、解答欄にマークせよ。あ , え ～ か の解答欄に記入する数式は、文字定数として m, g, L のみを用いること。また、い , う , き , く の解答欄には、数値を記入すること。

図1に示すように、高さ $2L$ の断熱性の素材でできたシリンダーが水平な台の上に固定されている。質量 m 、面積 S の厚さが無視できるピストンによって、シリンダー内部は領域 A と領域 B に分割されている。ピストンは、シリンダー内部の上面に一端が固定された質量と体積の無視できる自然長 L 、ばね定数 k のばねでつるされており、水平を保ったまま、なめらかに上下することができる。領域 A と領域 B のシリンダー側面には、気体の注入口があり、断熱性の栓で閉じることができる。領域 A には、体積の無視できるヒーターが設置されている。図のように、シリンダー内部の下面を原点とし、鉛直上向きに z 軸を導入する。重力加速度の大きさは g 、気体定数は R とする。気体以外の器具の熱容量は無視でき、温度は絶対温度で表すものとする。

領域 A と領域 B の注入口が閉じられ、いずれの領域も真空であるとき、ピストンは $z = \frac{L}{2}$ の位置で静止していた。これより、ばね定数 k は $k =$ あ を満たすことがわかる。以下では、このばね定数は温度によって変化しないものとする。

- 〔1〕 領域 A の注入口より、物質質量 n の単原子分子理想気体を注入した後、しばらくすると、ピストンは図2に示すように、 $z = \frac{2}{3}L$ の位置で静止していた。このときの領域 A の気体の圧力は p_0 、温度は T_0 であり、領域 B は真空であった。ピストンに働く力のつり合いを考えると、圧力 p_0 は ア である。ここで、ヒーターを用いて領域 A の気体を一定時間加熱すると、ピストンは上昇し、図3に示すように、 $z = L$ の位置まで移動したのち、静止した。このときの領域 A の気体の圧力は p_1 、温度は T_1 であった。ピストンに働く力のつり合いを考えると、圧力 p_1 は い $\times p_0$ であり、ボイル・シャルルの法則より、温度 T_1 は う $\times T_0$ である。また、この加熱過程において領域 A

の気体がした仕事は え であり、気体の内部エネルギーの変化は お である。熱力学第一法則より、この過程において領域 A の気体が受け取った熱量は え + お である。

〔2〕 次に、図 4 に示すように、領域 A の気体が圧力 p_1 、温度 T_1 の状態にあるときに、断熱性の素材でできた体積の無視できる留め具でピストンを $z = L$ の位置で固定した。その後、図 5 に示すように、領域 A の気体と同じ単原子分子理想気体を同じ物質質量だけ、温度を $\frac{3}{4} T_1$ に保った状態で領域 B に注入し、すみやかに注入口を閉じるとともに、ピストンの留め具を静かにはずした。ピストンは移動をはじめ、領域 A と領域 B の気体はピストンを介しての熱のやりとりを行い、しばらくすると、図 6 に示すように、どちらの気体の温度も T_f となり、ピストンは $z = L_f$ の位置で静止した。

この L_f と T_f を以下にしたがって求めてみよう。気体の温度が T_f で、ピストンが $z = L_f$ の位置で静止しているとき、領域 A の気体の圧力を p_A 、領域 B の気体の圧力を p_B とすると、ピストンに働く力のつり合い式は、ばね定数 k を用いて、イ となる。図 6 の領域 A の気体と領域 B の気体に対して理想気体の状態方程式を用い、ばね定数が $k =$ あ であること、および、図 3 の領域 A の気体の状態方程式より得られる関係式 $nRT_1 =$ か を用いると、 $T_f =$ ウ $\times T_1$ となる。一方、領域 B に気体を注入した後、ピストンが $z = L_f$ の位置で静止するまでの過程において、領域 A と領域 B の気体がされた仕事の総和は エ であり、領域 A と領域 B の気体の内部エネルギー変化の総和は オ である。この過程では、気体と外部の熱のやりとりは行われていないので、熱力学第一法則より、エ $=$ オ となる。これより、 $T_f =$ (カ) $\times T_1$ となる。以上より、ウ $=$ カ であるので、 L_f が満たすべき方程式として、 $32L_f^3 -$ き $\times LL_f^2 +$ く $\times L^2L_f + 21L^3 = 0$ が得られる。これを解くことにより、ピストンの位置 $z = L_f$ と気体の温度 T_f は、 $L_f = \frac{3}{4} L$ 、および、 $T_f = \frac{15}{16} T_1$ と求めることができる。

ア に対する選択肢

- ① $\frac{3mg}{S}$ ② $\frac{3mg}{2S}$ ③ $\frac{3mg}{4S}$ ④ $\frac{3mg}{5S}$ ⑤ $\frac{2mg}{S}$ ⑥ $\frac{2mg}{3S}$
⑦ $\frac{2mg}{5S}$ ⑧ $\frac{2mg}{7S}$ ⑨ $\frac{mg}{S}$ ⑩ $\frac{mg}{2S}$ ⑪ $\frac{mg}{3S}$ ⑫ $\frac{mg}{4S}$

イ に対する選択肢

- ① $p_A S + p_B S + k(L - L_f) - mg = 0$
② $p_A S + p_B S - k(L - L_f) - mg = 0$
③ $p_A S + p_B S + k(L - L_f) + mg = 0$
④ $p_A S + p_B S - k(L - L_f) + mg = 0$
⑤ $p_A S + p_B S - k(L - L_f) - 2mg = 0$
⑥ $p_A S - p_B S - k(L - L_f) - 2mg = 0$
⑦ $p_A S - p_B S + k(L - L_f) - mg = 0$
⑧ $p_A S - p_B S - k(L - L_f) - mg = 0$
⑨ $p_A S - p_B S + k(L - L_f) + mg = 0$
⑩ $p_A S - p_B S - k(L - L_f) + mg = 0$

ウ に対する選択肢

$$\textcircled{1} \quad \frac{L_f(2L - L_f)(4L_f - L)}{2L^2(L + L_f)}$$

$$\textcircled{2} \quad \frac{L_f(2L - L_f)(3L_f - L)}{2L^2(L + L_f)}$$

$$\textcircled{3} \quad \frac{L_f(2L - L_f)(2L_f - L)}{2L^2(L + L_f)}$$

$$\textcircled{4} \quad \frac{L_f(4L - L_f)(2L_f - L)}{2L^2(L + L_f)}$$

$$\textcircled{5} \quad \frac{L_f(3L - L_f)(2L_f - L)}{2L^2(L + L_f)}$$

$$\textcircled{6} \quad \frac{L_f(2L - L_f)(2L_f - L)}{2L^2(3L + L_f)}$$

$$\textcircled{7} \quad \frac{L_f(2L - L_f)(4L_f - L)}{2L^2(L - L_f)}$$

$$\textcircled{8} \quad \frac{L_f(2L - L_f)(3L_f - L)}{2L^2(L - L_f)}$$

$$\textcircled{9} \quad \frac{L_f(2L - L_f)(2L_f - L)}{2L^2(L - L_f)}$$

$$\textcircled{10} \quad \frac{L_f(4L - L_f)(2L_f - L)}{2L^2(L - L_f)}$$

$$\textcircled{11} \quad \frac{L_f(3L - L_f)(2L_f - L)}{2L^2(L - L_f)}$$

$$\textcircled{12} \quad \frac{L_f(2L - L_f)(2L_f - L)}{2L^2(3L - L_f)}$$

エ に対する選択肢

$$\textcircled{1} \quad mg(L_f - L) - \frac{1}{2}k(L - L_f)^2$$

$$\textcircled{2} \quad mg(L_f - L) - \frac{1}{2}k(L + L_f)^2$$

$$\textcircled{3} \quad mg(L_f - L) + \frac{1}{2}k(L - L_f)^2$$

$$\textcircled{4} \quad mg(L_f - L) + \frac{1}{2}k(L + L_f)^2$$

$$\textcircled{5} \quad mg(L_f - L) - \frac{3}{2}k(L - L_f)^2$$

$$\textcircled{6} \quad mg(L - L_f) - \frac{1}{2}k(L - L_f)^2$$

$$\textcircled{7} \quad mg(L - L_f) - \frac{1}{2}k(L + L_f)^2$$

$$\textcircled{8} \quad mg(L - L_f) + \frac{1}{2}k(L - L_f)^2$$

$$\textcircled{9} \quad mg(L - L_f) + \frac{1}{2}k(L + L_f)^2$$

$$\textcircled{10} \quad mg(L - L_f) - \frac{3}{2}k(L - L_f)^2$$

オ に対する選択肢

- ① $\frac{3}{2} nR \left(T_f - \frac{7}{4} T_1 \right)$ ② $\frac{3}{2} nR \left(T_f - \frac{5}{4} T_1 \right)$ ③ $\frac{3}{2} nR \left(T_f - \frac{3}{4} T_1 \right)$
④ $\frac{3}{2} nR \left(2T_f - \frac{7}{4} T_1 \right)$ ⑤ $\frac{3}{2} nR \left(2T_f - \frac{5}{4} T_1 \right)$ ⑥ $\frac{3}{2} nR \left(2T_f - \frac{3}{4} T_1 \right)$
⑦ $\frac{5}{2} nR \left(T_f - \frac{7}{4} T_1 \right)$ ⑧ $\frac{5}{2} nR \left(T_f - \frac{5}{4} T_1 \right)$ ⑨ $\frac{5}{2} nR \left(T_f - \frac{3}{4} T_1 \right)$
⑩ $\frac{5}{2} nR \left(2T_f - \frac{7}{4} T_1 \right)$ ⑪ $\frac{5}{2} nR \left(2T_f - \frac{5}{4} T_1 \right)$ ⑫ $\frac{5}{2} nR \left(2T_f - \frac{3}{4} T_1 \right)$

カ に対する選択肢

- ① $\frac{L_f(2L - L_f)}{L^2} + \frac{7}{8}$ ② $\frac{L_f(L - 2L_f)}{L^2} + \frac{7}{8}$ ③ $\frac{L_f(L - L_f)}{L^2} + \frac{7}{8}$
④ $\frac{L_f(2L - L_f)}{2L^2} + \frac{7}{8}$ ⑤ $\frac{L_f(L - 2L_f)}{2L^2} + \frac{7}{8}$ ⑥ $\frac{L_f(L - L_f)}{2L^2} + \frac{7}{8}$
⑦ $\frac{L_f(2L - L_f)}{3L^2} + \frac{7}{8}$ ⑧ $\frac{L_f(L - 2L_f)}{3L^2} + \frac{7}{8}$ ⑨ $\frac{L_f(L - L_f)}{3L^2} + \frac{7}{8}$
⑩ $\frac{L_f(2L - L_f)}{4L^2} + \frac{7}{8}$ ⑪ $\frac{L_f(L - 2L_f)}{4L^2} + \frac{7}{8}$ ⑫ $\frac{L_f(L - L_f)}{4L^2} + \frac{7}{8}$

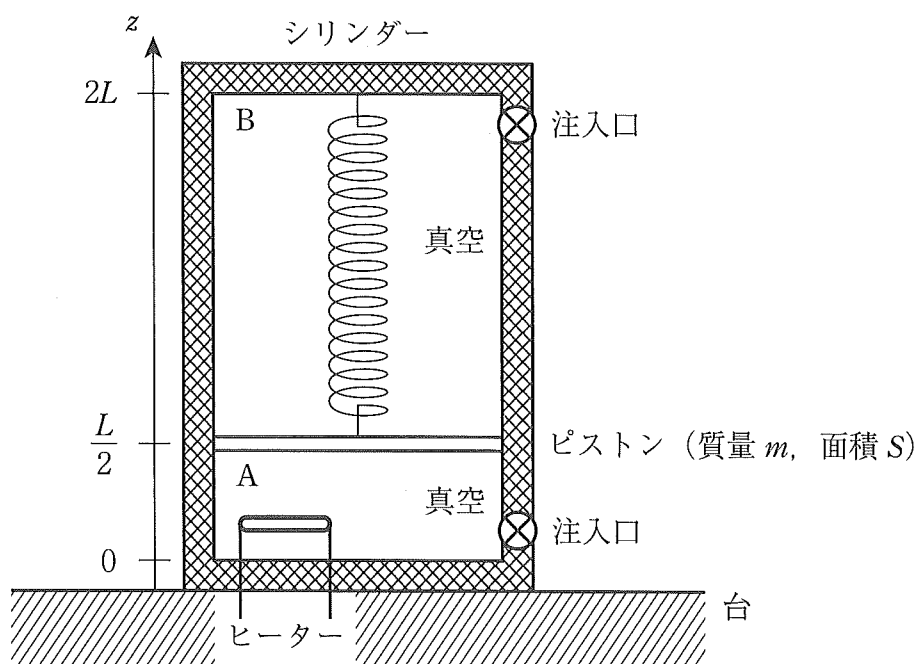


図 1

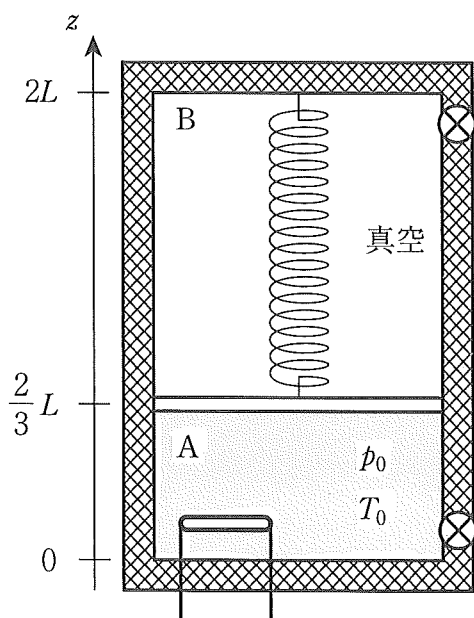


図 2

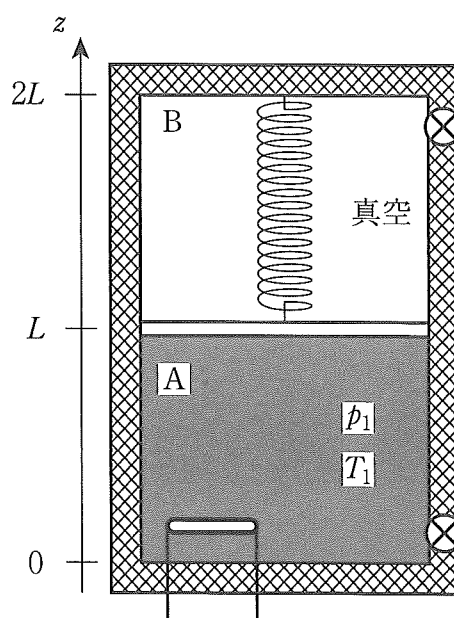


図 3

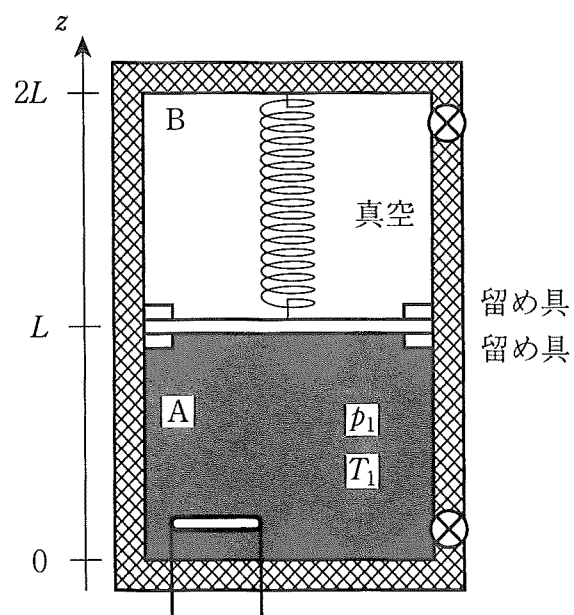


図 4

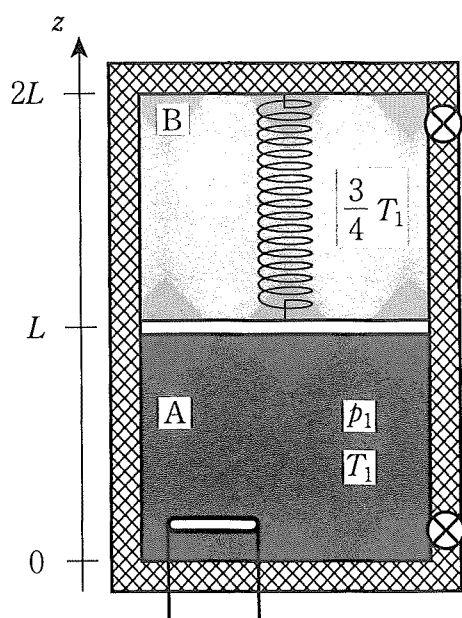


図 5

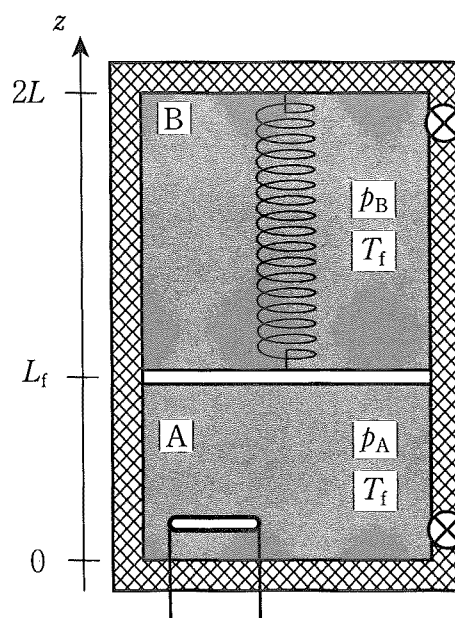


図 6