

(2020年度)

# 物 理 問 題 (90分)

(この問題冊子は10ページ, 3問である。)

## 受験についての注意

1. 試験監督者の指示があるまで, 問題冊子を開いてはならない。
2. 試験開始前に, 試験監督者から指示があったら, 解答用紙の右上の番号が自分の受験番号と一致することを確認し, 所定の欄に氏名を記入すること。次に, 解答用紙の右側のミシン目にそって, きれいに折り曲げてから, 受験番号と氏名が書かれた切片を切り離し, 机上に置くこと。
3. 試験監督者から試験開始の指示があったら, この問題冊子が, 上に記したページ数どおりそろっていることを確かめること。
4. 筆記具は, HかFかHBの黒鉛筆またはシャープペンシルに限る。万年筆・ボールペンなどを使用してはならない。時計に組み込まれたアラーム機能, 計算機能, 辞書機能を使用してはならない。また, スマートウォッチなどのウェアラブル端末を使用してはならない。
5. 解答は, 解答用紙の各問の選択肢の中から正解と思うものを選んで, そのマーク欄をぬりつぶすこと。
6. マークをするとき, マーク欄からはみ出したり, 白い部分を残したり, 文字や番号, ○や×をつけたりしてはならない。また, マーク箇所以外の部分には何も書いてはならない。
7. 訂正する場合は, 消しゴムでていねいに消すこと。消しきらずはきれいに取り除くこと。
8. 解答用紙を折り曲げたり, 破ったりしてはならない。
9. 試験監督者の許可なく試験時間中に退場してはならない。
10. 解答用紙を持ち帰ってはならない。
11. 問題冊子, 計算用紙は必ず持ち帰ること。
12. この問題冊子の余白を計算用紙として使用してよい。

1 軽いばねの一端 Q に質量  $m$  の小さなおもりを取り付け、もう一端 P を持って鉛直につるしたところ、ばねは自然長から  $l$  だけ伸びて静止した。これより、このばねのばね定数は  $\frac{mg}{l}$  と表せる。ただし、 $g$  は重力加速度である。このおもりとばねを使って水平な床の上で次の実験を行う。

最初に、床がなめらかな場合を考える。

- まず、図 1 のようにばねの左端 P の位置を床に対して固定し、ばねが自然長の状態でのおもりの位置を原点 O として、おもりの位置を  $x$  座標で表す。原点 O に置かれたおもりに対して右向きに速さ  $v_0$  を与えたところ、おもりは  $x = 0$  を中心とする振幅  $l$ 、角振動数  $\sqrt{\frac{g}{l}}$  の単振動を行った。これより、 $v_0 = [ 1 ] \times \sqrt{gl}$  と表せる。
- 次に、図 1 におけるばねの左端 P の固定をはずし、図 2 のようにばねの左端 P とともに動く座標軸  $y$  を使っておもりの位置を観測する。始めの状態ではばねは自然長であり、このときの床に対して静止していたおもりの位置を  $y = 0$  とする。図 2 のように左端 P を床に対して左向きに一定の速さ  $v_0$  で引き始めると、 $y = 0$  で静止していたおもりが  $y$  軸正方向に速さ  $v_0$  で進み出すのが観測される。その後、 $y$  座標で表したおもりの運動は、中心が  $y = [ 2 ] \times l$ 、振幅が  $[ 3 ] \times l$ 、角振動数が  $\sqrt{\frac{g}{l}}$  の単振動であった。

次に、床とおもりの間に静止摩擦係数  $\mu$ 、動摩擦係数  $\mu' (< \mu)$  の摩擦力が働く場合を考える。

- 図 1 のようにばねの左端 P を固定し、1. と同じようにおもりの位置を  $x$  座標で表す。原点 O に静止しているおもりに対して右向きの速さ  $v_0$  を与えたところ、その後のおもりの右向きの運動は、中心が  $x = [ 4 ] \times l$ 、振幅が  $[ 5 ] \times l$ 、角振動数が  $[ 6 ] \times \sqrt{\frac{g}{l}}$  の単振動の一部分とみなせ、おもりは右方向に  $x_{\max} = ([ 4 ] + [ 5 ]) \times l$  まで進んだ。おもりは  $x_{\max}$  で運動方向を左向きに変え、その後の運動は、中心が  $x = [ 7 ] \times l$ 、振幅が  $[ 8 ] \times l$ 、角振動数が  $[ 6 ] \times \sqrt{\frac{g}{l}}$

の単振動の一部とみなせる。この運動でおもりは左方向に  $x_{\min} = ([7] - [8]) \times l$  まで進んで静止した。

この実験で、おもりが  $x_{\max}$  ではなく  $x_{\min}$  で静止したことは、 $|[9]| \leq \mu < [10]$  を意味している。

4. 2.と同じように、ばねの左端Pを一定の速さ  $v_0$  で引きながら、おもりの位置を座標軸  $y$  を使って観測する。ばねの左端Pを引き始めると、おもりが  $y$  軸正方向に速さ  $v_0$  で進み出すのが観測される。その後、おもりは  $y = [11] \times l$  で減速を始めるが、その  $y$  軸正方向の運動は、中心が  $y = [12] \times l$ 、振幅が  $[13] \times l$ 、角振動数が  $[6] \times \sqrt{\frac{g}{l}}$  の単振動の一部とみなせ、おもりは  $y$  軸正方向に  $y_{\max} = ([12] + [13]) \times l$  まで進んだ。

おもりは  $y_{\max}$  において、 $y$  軸上での運動方向を負方向に変えたが、その後の運動は、中心が  $y = [14] \times l$ 、振幅が  $[15] \times l$ 、角振動数が  $[6] \times \sqrt{\frac{g}{l}}$  の単振動の一部とみなせ、おもりは  $y$  軸負方向に  $y_{\min} = ([14] - [15]) \times l$  まで進んだ。

おもりは  $y_{\min}$  において、 $y$  軸上での運動方向を正方向に変えた後、しばらくして  $y = [16] \times l$  で加速度が0になった。おもりはそのまま  $y = [17] \times l$  まで  $y$  軸上を正方向に速さ  $[18] \times \sqrt{gl}$  の等速運動を行った後、次の運動を始めた。

この実験で、ばねの左端Pを引き始めてから十分長い時間にわたって左端Pからの観測を続けると  $[19]$ 。

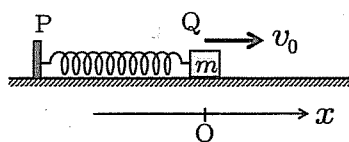


図 1

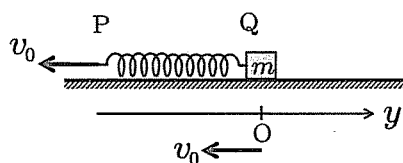


図 2

[ 1 ] ~ [ 18 ] の選択肢

- |  |  |                                       |
|--|--|---------------------------------------|
| a) 0                                   | b) 1                                   | c) $\mu$                              |
| d) $-\mu$                              | e) $\mu'$                              | f) $-\mu'$                            |
| g) $2\mu'$                             | h) $-2\mu'$                            | i) $\mu + \mu'$                       |
| j) $-\mu - \mu'$                       | k) $\mu - \mu'$                        | l) $-\mu + \mu'$                      |
| m) $\mu + 2\mu'$                       | n) $-\mu - 2\mu'$                      | o) $\mu - 2\mu'$                      |
| p) $-\mu + 2\mu'$                      | q) $\sqrt{\mu'^2 + 1}$                 | r) $\sqrt{\mu'^2 + 1} + \mu'$         |
| s) $\sqrt{\mu'^2 + 1} - \mu'$          | t) $\sqrt{\mu'^2 + 1} - 2\mu'$         | u) $\sqrt{\mu'^2 + 1} - 3\mu'$        |
| v) $\sqrt{(\mu - \mu')^2 + 1}$         | w) $\sqrt{(\mu - \mu')^2 + 1} + \mu'$  | x) $\sqrt{(\mu - \mu')^2 + 1} - \mu'$ |
| y) $\sqrt{(\mu - \mu')^2 + 1} - 2\mu'$ | z) $\sqrt{(\mu - \mu')^2 + 1} - 3\mu'$ |                                       |

[ 19 ] の選択肢

- a) おもりは振動を繰り返しながら次第に振幅を小さくさせていき、最終的に、おもりは一定の速さ  $v_0$  で運動していた
- b) おもりは振動を繰り返しながら次第に振動の振幅を大きくさせていった
- c) おもりは  $y_{\max}$  と  $y_{\min}$  を変化させずにいつまでも同じ振幅での振動を繰り返していた

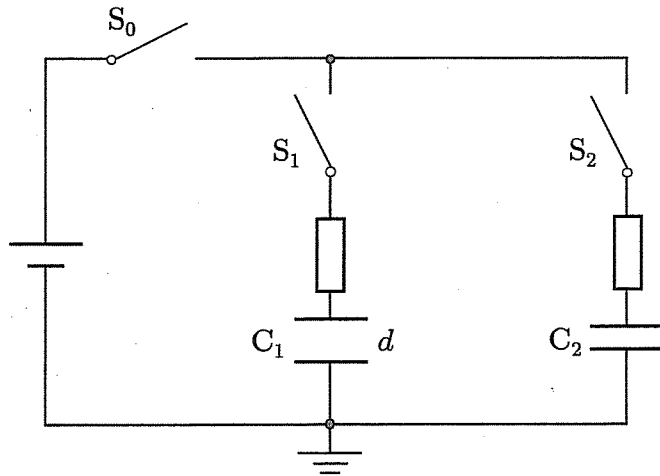
以下余白

次頁へ続く

2 図のように、内部抵抗の無視できる電池、スイッチ  $S_0, S_1, S_2$ 、および2つの平行板コンデンサー  $C_1, C_2$  と抵抗からなる回路がある。コンデンサー  $C_1, C_2$  の極板の形状は全て同じで面積は  $S$  である。コンデンサー  $C_1$  の極板間の距離は  $d$  に固定されており、コンデンサー  $C_2$  の極板間の距離は変えることができる。最初、全てのスイッチは開いており、コンデンサー  $C_1, C_2$  には電荷は蓄えられておらず、それらの極板間は真空である。真空の誘電率を  $\epsilon_0$  とする。

1. スイッチ  $S_2$  を開いたまま、スイッチ  $S_0$  および  $S_1$  を閉じて十分な時間が経過すると、コンデンサー  $C_1$  に電気量  $Q$  が充電された。このとき、コンデンサー  $C_1$  の極板間の電位差は  $[ 1 ] \times [ 2 ]$ 、コンデンサー  $C_1$  に蓄えられた静電エネルギーは  $[ 3 ] \times [ 4 ]$  であり、この過程で電池が供給したエネルギーは  $[ 5 ] \times [ 4 ]$  なので、抵抗で消費されたエネルギーは  $( [ 5 ] - [ 3 ] ) \times [ 4 ]$  である。
2. 次に、1. の状態でコンデンサー  $C_2$  の極板間の距離を  $\frac{d}{3}$  に固定する。その状態で、スイッチ  $S_0$  を開いた後、スイッチ  $S_1$  は閉じたままにして  $S_2$  を閉じた。十分な時間が経過した後、コンデンサー  $C_1$  から  $C_2$  に移動した電気量は  $[ 6 ] \times Q$  であり、コンデンサー  $C_1, C_2$  に蓄えられた静電エネルギーの合計は  $[ 7 ] \times [ 4 ]$  である。この過程で抵抗で消費されたエネルギーは  $[ 8 ] \times [ 4 ]$  である。
3. 次に、2. の状態でコンデンサー  $C_2$  の極板間の距離を  $\frac{d}{3}$  から  $2d$  にゆっくりと広げた。このとき、コンデンサー  $C_1, C_2$  に蓄えられている静電エネルギーの合計は  $[ 9 ] \times [ 4 ]$  であり、極板を動かすために外から加えられた仕事は  $[ 10 ] \times [ 4 ]$  である。この過程で抵抗で消費されたエネルギーは  $[ 11 ] \times [ 4 ]$  である。
4. 次に、3. の状態でスイッチ  $S_0$  を閉じて十分に時間が経過した後、コンデンサー  $C_1, C_2$  に蓄えられている静電エネルギーの合計は  $[ 12 ] \times [ 4 ]$  となっている。この過程で電池が供給したエネルギーは  $[ 13 ] \times [ 4 ]$  であり、抵抗で消費されたエネルギーは  $[ 14 ] \times [ 4 ]$  である。

5. 最後に、4. の状態でコンデンサー  $C_1$ ,  $C_2$  を完全に放電し、スイッチ  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  を全て開いている状態に戻した。この状態でスイッチ  $S_1$ ,  $S_2$  を閉じてから  $S_0$  を閉じて、十分な時間が経過した後、コンデンサー  $C_1$ ,  $C_2$  に蓄えられた静電エネルギーの合計は [ 15 ]  $\times$  [ 4 ] である。この過程で電池から供給されたエネルギーは [ 16 ]  $\times$  [ 4 ] であり、抵抗で消費されたエネルギーは [ 17 ]  $\times$  [ 4 ] である。



[ 1 ], [ 3 ], [ 5 ] ~ [ 17 ] の選択肢

- |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                   |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| a) 0              | b) 1              | c) 2              | d) $\frac{1}{2}$  | e) $\frac{3}{2}$  | f) $\frac{1}{3}$ | g) $\frac{2}{3}$  |
| h) $\frac{4}{3}$  | i) $\frac{5}{3}$  | j) $\frac{1}{4}$  | k) $\frac{3}{4}$  | l) $\frac{5}{4}$  | m) $\frac{7}{4}$ | n) $\frac{1}{6}$  |
| o) $\frac{5}{6}$  | p) $\frac{7}{6}$  | q) $\frac{1}{8}$  | r) $\frac{3}{8}$  | s) $\frac{5}{8}$  | t) $\frac{7}{8}$ | u) $\frac{1}{12}$ |
| v) $\frac{5}{12}$ | w) $\frac{7}{12}$ | x) $\frac{1}{24}$ | y) $\frac{5}{24}$ | z) $\frac{7}{24}$ |                  |                   |

[ 2 ], [ 4 ] の選択肢

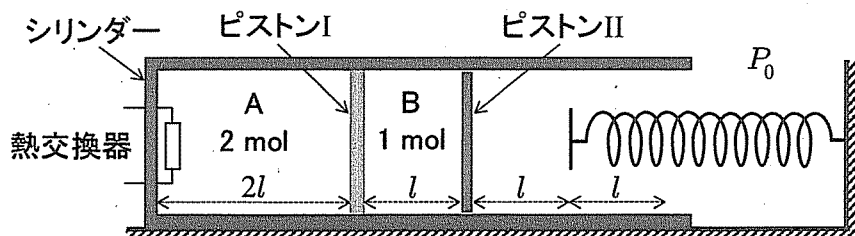
- |                               |                               |                                 |                                 |                                       |                                       |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| a) $\frac{\epsilon_0 S}{d}$   | b) $\frac{d}{\epsilon_0 S}$   | c) $\frac{\epsilon_0 S}{Q}$     | d) $\frac{Q}{\epsilon_0 S}$     | e) $\frac{\epsilon_0 S}{Qd}$          | f) $\frac{Qd}{\epsilon_0 S}$          |
| g) $\frac{\epsilon_0 S}{Q^2}$ | h) $\frac{Q^2}{\epsilon_0 S}$ | i) $\frac{\epsilon_0 S}{Q^2 d}$ | j) $\frac{Q^2 d}{\epsilon_0 S}$ | k) $\frac{\epsilon_0^2 S^2}{Q^2 d^2}$ | l) $\frac{Q^2 d^2}{\epsilon_0^2 S^2}$ |

3 図のように、なめらかに動くことのできるピストン I, II を備えたシリンダーが床に固定されている。シリンダーおよびピストン II は断熱材でできているが、ピストン I は熱を通す。ピストン II の右側には、右端を固定された自然長のばねがあり、その左端はピストン II と  $l$  だけ離れている。ピストン I の左側の空間には単原子分子理想気体 A が 2 mol, ピストン I, II にはさまれた空間には、単原子分子理想気体 B が 1 mol 封入されている。始めの状態では、気体 A, B の温度は共に  $T_0$  であり、その圧力は共に大気圧  $P_0$  に等しい。また、気体 A, B が封入されている空間のシリンダー方向の長さはそれぞれ  $2l, l$  である。気体 A は熱交換器により加熱または冷却することができる。気体定数を  $R$  とする。

1. 上で説明した状態を 1 とする。この状態 1 での気体 A および B の体積は、それぞれ、 $[ 1 ] \times \frac{RT_0}{P_0}$ ,  $[ 2 ] \times \frac{RT_0}{P_0}$  である。
2. 状態 1 で熱交換器により気体を加熱したところ、2 つのピストンは共にゆっくりと動き、ピストン II が  $l$  だけ右に移動してばねに接触した。この瞬間の状態を 2 とする。状態 2 では、気体 A の体積は  $[ 3 ] \times \frac{RT_0}{P_0}$ , 温度は  $[ 4 ] \times T_0$  である。また、この状態変化  $1 \rightarrow 2$  の過程で気体 A と B が全体として外部に対してした仕事は  $[ 5 ] \times RT_0$ , 熱交換器が気体に供給した熱量は  $[ 6 ] \times RT_0$  である。
3. 状態 2 からさらに気体を一定時間加熱したところ、2 つのピストンはゆっくりと移動し、ピストン II がばねを自然長から  $l$  だけ縮めた位置で停止した。そのときの気体 A, B の温度は共に  $3T_0$  であった。この状態を 3 とすると、状態変化  $2 \rightarrow 3$  の過程で、ばねには  $[ 7 ] \times RT_0$  の力学的エネルギーが蓄えられ、気体 A と B は全体として外部に対し  $[ 8 ] \times RT_0$  の仕事をし、熱交換器からは気体に  $[ 9 ] \times RT_0$  の熱量が供給された。また、ばねの縮んだ長さを横軸に、気体 A, B の圧力を縦軸として状態変化  $2 \rightarrow 3$  の過程を表しているグラフは  $[ 10 ]$  であり、縦軸を気体 A, B の温度とした場合のグラフは  $[ 11 ]$  であることがわかる。



4. 状態3でピストンIを留め金により固定した後、熱交換器により気体を冷却すると、ピストンIIがゆっくりと左に動いた。ピストンIIが $l$ だけ左方向に移動し、ばねが自然長になった瞬間の状態を4とする。この状態4での気体Bの体積は〔 12 〕 $\times \frac{RT_0}{P_0}$ 、温度は〔 13 〕 $\times T_0$ である。この状態変化3 $\rightarrow$ 4の過程で、気体Bが外部から受け取った仕事は〔 14 〕 $\times RT_0$ 、気体Bから気体Aに移動した熱量は〔 15 〕 $\times RT_0$ 、熱交換器が気体から奪った熱量は〔 16 〕 $\times RT_0$ である。



〔 1 〕 ~ 〔 9 〕, 〔 12 〕 ~ 〔 16 〕 の選択肢

- |                    |                     |                    |                    |                    |                    |
|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| a) 1               | b) 2                | c) 3               | d) $\frac{1}{2}$   | e) $\frac{3}{2}$   | f) $\frac{5}{2}$   |
| g) $\frac{7}{2}$   | h) $\frac{9}{2}$    | i) $\frac{1}{3}$   | j) $\frac{2}{3}$   | k) $\frac{4}{3}$   | l) $\frac{5}{3}$   |
| m) $\frac{7}{3}$   | n) $\frac{8}{3}$    | o) $\frac{2}{5}$   | p) $\frac{3}{5}$   | q) $\frac{4}{5}$   | r) $\frac{6}{5}$   |
| s) $\frac{7}{5}$   | t) $\frac{9}{5}$    | u) $\frac{33}{10}$ | v) $\frac{49}{10}$ | w) $\frac{53}{10}$ | x) $\frac{59}{10}$ |
| y) $\frac{89}{10}$ | z) $\frac{119}{10}$ |                    |                    |                    |                    |

[ 10 ], [ 11 ] の選択肢

