

2024年度

# 理 科

RA

【 物 理 】

3月12日(火) 理 学 部 (物理学科, 生物科学科, 創造理学コース)  
【後期日程】 工 学 部  
農 学 部 9 : 40 ~ 11 : 00

## 注 意 事 項

### 試験開始前

- 1 監督者の指示があるまで、問題冊子、解答用紙に手を触れてはいけません。
- 2 監督者の指示に従い、出願時に選択した科目の問題冊子、解答用紙であるかどうかを確かめ、全部の解答用紙（3枚）に受験番号を記入しなさい。
- 3 出願時に選択した科目と解答した科目が異なる場合は採点されません。

### 試験開始後

- 4 この問題冊子は、7ページあります。はじめに、問題冊子、解答用紙を確かめ、枚数の不足や、印刷の不鮮明なもの、ページの落丁・乱丁があった場合は、手をあげて監督者に申し出なさい。
- 5 解答はすべて解答用紙に記入しなさい。
- 6 問題は、声を出して読んではいけません。
- 7 各問ごとの配点は、比率(%)で表示してあります。

### 試験終了後

- 8 問題冊子は、必ず持ち帰りなさい。

1

図1のように小球がばねによって発射され、天井に衝突した後に床に落下するという一連の運動を考える。小球の大きさや空気抵抗は無視できるとする。小球の質量を  $m$  とし、重力加速度の大きさを  $g$  とし、以下の問いに答えよ。(配点 34%)

問 1 はじめに小球は質量  $M$  の板の上ののっていた。板はばね定数  $k$  のばねの上端につながれており、ばねの下端は床 A に固定されている。また、図1のようにこれらの小球・板・ばねは鉛直方向に固定して立てられた円筒の中にある。小球および板と円筒との間の摩擦、板の大きさ、円筒の内径、ばねの質量は無視できるとする。

- (1) つり合いの位置はばねの自然長の位置から長さ  $L_0$  だけ縮んだところであった。 $L_0$  を  $m, M, k, g$  で表せ。
- (2) 小球の上から力を加えてばねの自然長の位置から長さ  $l$  だけばねを縮め ( $l > L_0$ )、その後で静かに力を除いた。すると、小球は板と接触したまま鉛直方向上向きに運動し始めた。図2のように鉛直方向下向きを正方向とし、ばねの自然長の位置を原点  $O$  とする座標軸をとったときの、小球と板の位置を  $x$  とする。また、小球と板の(鉛直方向下向きを正とする)加速度を  $a$ 、小球が板から受ける垂直抗力の大きさを  $N$  とする。 $x > 0$  のとき、小球および板それぞれについての鉛直方向の運動方程式を  $m, M, k, g, x, a, N$  で表せ。
- (3) (2)で求めた2つの運動方程式から  $a$  を消去し、 $N$  を  $m, M, k, x$  で表せ。
- (4) しばらくすると、小球はばねの自然長の位置で板から離れて発射された。板から離れる瞬間の小球の速さ(速度の大きさ)を  $v_0$  とする。 $v_0$  を  $m, M, k, g, l$  で表せ。ただし、 $l$  は十分大きく、小球は必ず板から離れるものとする。

問 2 発射された小球は鉛直上方に運動し、図1のように傾斜角  $\theta$  [rad] ( $0 < \theta < \frac{\pi}{4}$ ) の天井に非弾性衝突して水平方向右向きにはね返った。小球が衝突した位置はばねの自然長の位置から鉛直方向に高さ  $h$  だけ離れたところにある。ただし、 $l$  は十分大きく(したがって  $v_0$  も十分大きく)、小球は必ず天井に衝突するものとする。また、天井はなめらかであり、天井に平行な方向の小球の速度の成分は衝突の前後で変わらないとする。

- (1) 天井に衝突する直前の小球の速さを  $v_1$  とする。 $v_1$  を  $v_0, g, h$  で表せ。
- (2) 天井に衝突した直後の小球の速さを  $v_2$  とする。 $v_2$  を  $v_1, \theta$  で表せ。
- (3) 小球と天井との間の反発係数(はね返り係数)  $e$  を  $\theta$  で表せ。

問 3 天井で水平方向にはね返った小球はその後、図1のように床 B に落下した。床 B は天井で小球が衝突した位置から高さ  $H$  だけ離れたところにある。

- (1) 床 B に衝突する直前の小球の速さ  $v_3$  を  $v_2, g, H$  で表せ。
- (2) 図1のように、小球の発射地点と落下地点の間の水平方向の距離を  $d$  とする。 $d$  を  $v_2, g, H$  で表せ。

問 4 いま  $l = \frac{h}{3}$  を初期条件として小球に一連の運動をさせたところ、 $d = D$ であった。さらに  $l = \frac{2h}{3}$  を初期条件として小球に一連の運動をさせたところ、 $d = \sqrt{5}D$ であった。このとき、 $h$  を  $m, M, k, g$  で表せ。

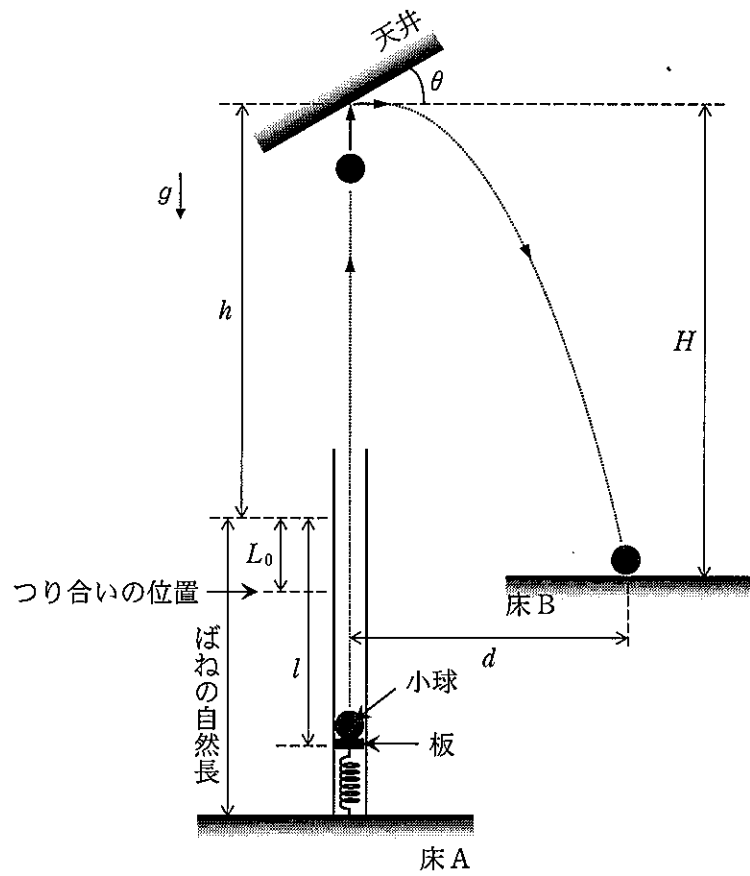


図 1

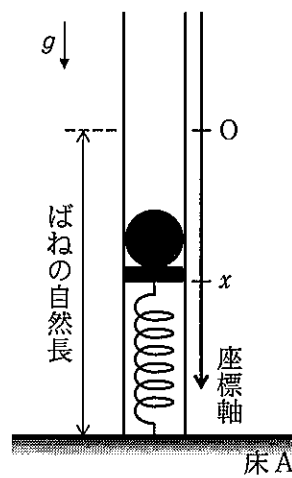


図 2

2 図1のように、鉛直上向きに一樣な磁束密度の大きさが  $B$  の磁場がある。この磁場内の水平面に電気抵抗が無視できる金属レールを間隔  $L$  で平行に並べ、起電力  $E$  の電池と抵抗値が  $R$  の抵抗を接続した。そしてレール上に電気抵抗が無視できる質量  $m$  の金属棒をおいた。金属棒はレールに対してつねに直交し、レールは十分長く、金属棒がレールから離れることはないとする。レールと金属棒の摩擦力や、この回路を流れる電流が作る磁場は無視できるものとする。重力加速度の大きさを  $g$  とし、以下の文章中の空欄  から  に入る数式を示せ。ただし、解答には問題文中の記号  $F$  及び  $\Delta t$  を用いないこと。また、 については、{}内の①、②から適切なものを1つ選ぶこと。(配点 33%)

問 1 (1) 金属棒を静かに離したところ、金属棒は水平方向  {①右向き(電池に近づく向き)、②左向き(電池から遠ざかる向き)} に動き出した。その後、金属棒は徐々に速度を増加させ、ある瞬間の金属棒の速さが  $v$  であった。このとき金属棒に流れる電流の大きさは  であり、金属棒に加わる力の水平方向の大きさを  $F$  とすると、 $F =$   である。また、金属棒が速さ  $v$  の瞬間からある短い時間  $\Delta t$  の間に抵抗で生じるジュール熱の総量は、 $\Delta t$  が小さいため、この間の電流が一定と考えると   $\times \Delta t$  となる。この間に金属棒には大きさ  $Fv\Delta t$  の仕事加わるので、電池は大きさ   $\times \Delta t$  のエネルギーを失う。

(2) しばらくすると、金属棒の速度は一定となった。このときの金属棒の速さは  である。また、この一定速度の運動中に電池が失うエネルギーの大きさは、単位時間あたり  である。

問 2 金属棒をレールから外し、図2のようにレールを平行に保ったまま、水平面に対して角度  $\theta$  [rad] ( $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ ) だけ傾けて固定した。金属棒をレールにおき、静かに離したところ、金属棒がレールを下りはじめた。このことから金属棒の質量  $m$  は、 $m >$   を満たす。その後、金属棒は徐々に速度を増加させ、ある瞬間の金属棒の速さが  $V$  であった。このとき金属棒の加速度の大きさは  である。また、この瞬間からある短い時間  $\Delta t$  の間に、金属棒は距離  $V\Delta t$  進むので、この間に金属棒が失う位置エネルギーの大きさは   $\times \Delta t$  である。そしてこの間に電池が失うエネルギーの大きさは   $\times \Delta t$  となる。ただし、問1(1)と同様に  $\Delta t$  は十分小さいとした。

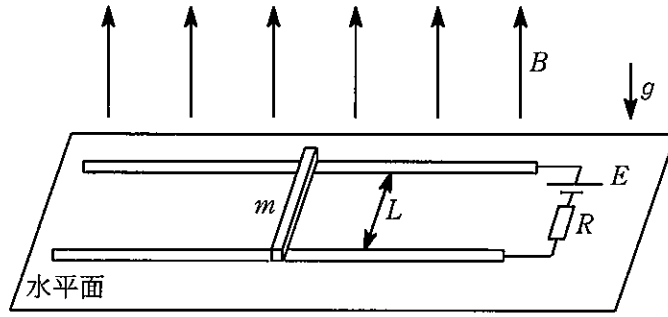


图 1

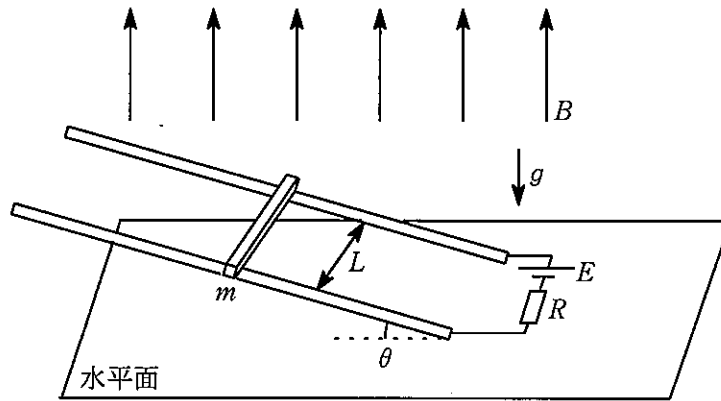


图 2

- 3 なめらかに動くピストンがとりつけられたシリンダー内に1モルの単原子分子理想気体が密閉されている(図1)。シリンダー内の気体は熱交換器を通じてのみ外部と熱のやりとりができる。熱交換器を作動したり停止したりすることにエネルギーや仕事は必要ない。気体定数を  $R$  とする。文中で温度とは絶対温度のことである。(配点 33%)

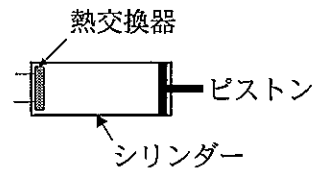


図1

- 問1 図2はシリンダー内の気体の圧力  $P$  と体積  $V$  の関係を表す  $P$ - $V$  グラフである。初めの状態1で気体の温度は  $T_1$ 、体積は  $V_1$ 、圧力は  $P_1$  であった。熱交換器を作動させながらピストンを動かす、状態1から同じ温度  $T_1$  である状態2まで、以下の3つの異なる過程  $a$ 、 $b$ 、 $c$  で十分ゆっくりと変化させる。ただし状態2で気体の体積は  $V_2$ 、圧力は  $P_2$  であり  $V_2 > V_1$  とする。

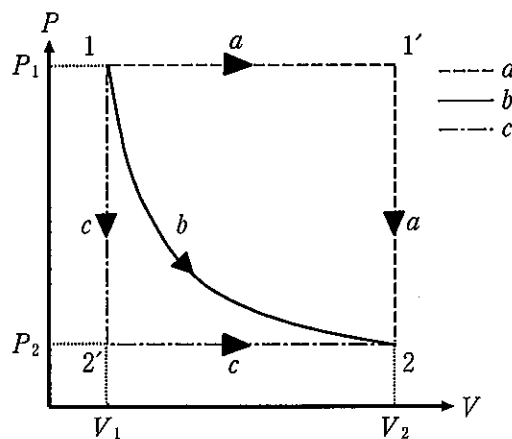


図2

- 過程  $a$  : 気体の圧力を  $P_1$  に保ったまま、体積を増やし、体積  $V_2$  である状態  $1'$  まで変化させ、つぎに体積を  $V_2$  に保ったまま、気体の圧力を  $P_2$  まで減らして状態2にする過程。
- 過程  $b$  : 気体の温度を  $T_1$  に保ったまま、体積を増やし、状態1から状態2にする過程。
- 過程  $c$  : 気体の体積を  $V_1$  に保ったまま、気体の圧力を減らし、圧力  $P_2$  である状態  $2'$  まで変化させ、つぎに圧力を  $P_2$  に保ったまま、体積を  $V_2$  まで増やし状態2にする過程。

以下  $V_2 = V_1x$ , ただし  $x > 1$  とする。

- (1)  $P_2$  を  $P_1$  と  $x$  を用いて表せ。
- (2) 過程  $a$  の間に気体が外にする仕事  $W_a$  を  $R, T_1$  および  $x$  を用いて表せ。
- (3) 過程  $c$  の間に気体が外にする仕事  $W_c$  を  $R, T_1$  および  $x$  を用いて表せ。
- (4) 過程  $b$  の間に気体が外にする仕事  $W_b$  は  $R, T_1$  および  $x$  を用いて  $RT_1f(x)$  と表せる。

$W_a, W_b, W_c$  の間に成り立つ大小関係を利用して,  $f(x)$  の満たす不等式を  $x$  を用いて  $\boxed{\text{あ}} < \boxed{\text{い}} < \boxed{\text{う}}$  の形に表せ。ただし(あ), (い), (う)のいずれかは  $f(x)$  であり, 記号  $W_a, W_b, W_c$  をそのまま用いてはいけない。

問 2 つぎの過程  $d$  を考える。

過程  $d$ : 熱交換器を切り, 外部と熱のやり取りがないようにして, 状態 1 から気体の体積が  $V_2$ , 圧力が  $P_3$ , 温度が  $T_3$  である状態 3 までゆっくりと変化させ, 状態 3 に達したのち, ふたたび熱交換器を作動させる。

このとき  $P_2 > P_3$  であることが知られている。以下  $P_2 < P_3$  であり, かつ  $P-V$  グラフが図 3, 4 のようであるとすると熱力学の基本的な法則に矛盾してしまうことを示そう。

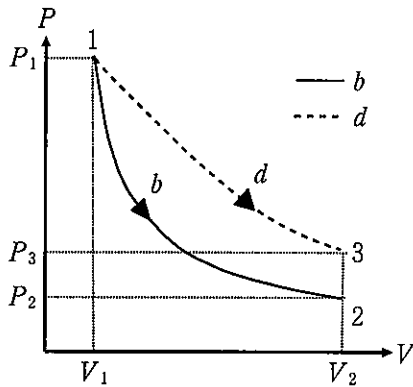


図 3

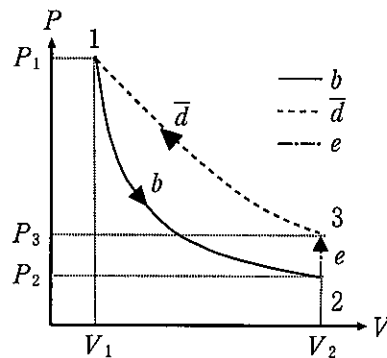


図 4

問1の過程 $b$ に加えて、次の過程 $\bar{d}$ および過程 $e$ を考える(図4)。

過程 $\bar{d}$ ：過程 $d$ の逆の過程。熱交換器を切り、外部と熱のやり取りがないようにして、状態3から状態1までゆっくりと変化させ、状態1に達したのち、ふたたび熱交換器を作動させる。

過程 $e$ ：熱交換器を作動させたまま、気体を状態2から状態3まで体積を $V_2$ に保ってゆっくりと変化させる。

(1) 以下の量を問1の $f(x)$ 、 $T_1$ 、 $R$ および上の $T_3$ を用いて表せ。

- (a) 状態1から状態2まで過程 $b$ で気体を変化させる。このときの気体の内部エネルギーの変化 $U_{12}$ および気体が受け取る熱 $Q_{12}$ 。
- (b) 状態2から状態3まで過程 $e$ で気体を変化させる。このときの気体の内部エネルギーの変化 $U_{23}$ および気体が受け取る熱 $Q_{23}$ 。
- (c) 状態3から状態1まで過程 $\bar{d}$ で気体を変化させる。このときの気体の内部エネルギーの変化 $U_{31}$ および気体が受け取る熱 $Q_{31}$ 。

(2) 下の文章の(ア)~(オ)に等号または不等号を入れて文章を完成させよ。

過程 $b$ 、 $e$ 、 $\bar{d}$ を用いて、状態1→状態2→状態3→状態1の1サイクルを考える(図4)。このとき内部エネルギーの変化 $\Delta U = U_{12} + U_{23} + U_{31}$ は $\Delta U$  (ア) 0である。 $P_2 < P_3$ とすると $T_1$  (イ)  $T_3$ であり、これより $U_{23}$  (ウ) 0であることが言える。これと(1)の結果より、1サイクルで外から気体に加わる熱 $\Delta Q = Q_{12} + Q_{23} + Q_{31}$ は $\Delta Q$  (エ) 0となる。1サイクルで気体が外にする仕事 $\Delta W$ は、 $P_2 < P_3$ とすると、 $P$ - $V$ グラフよりわかるように $\Delta W$  (オ) 0である。

(3) (2)を用いて $P_2 < P_3$ とすると矛盾がおきることを説明せよ。文字数は特に制限しないが解答欄におさまるように簡潔に記述せよ。必要ならば式や図を用いてもよい。



正解・解答例

<p>教科・科目名</p>	<p>物理（後期日程試験：令和6年度）1/3</p>	<p>問題番号</p>	<p>RA</p>
<p>対象学部・ 学科(課程)等</p>	<p>理学部（物理学科、生物科学科、創造理学コース）、工学部、農学部</p>		
<p style="text-align: center;">1</p>	<p>問1 (1) <math>L_0 = \frac{(m+M)g}{k}</math></p> <p>(2) 小球の運動方程式： <math>ma = mg - N</math></p> <p>板の運動方程式： <math>Ma = Mg + N - kx</math></p> <p>(3) <math>N = \frac{mkx}{m+M}</math></p> <p>(4) <math>v_0 = \sqrt{\frac{kl^2}{m+M} - 2gl}</math></p> <p>問2 (1) <math>v_1 = \sqrt{v_0^2 - 2gh}</math></p> <p>(2) <math>v_2 = v_1 \tan \theta</math></p> <p>(3) <math>e = \tan^2 \theta</math></p> <p>問3 (1) <math>v_3 = \sqrt{v_2^2 + 2gH}</math></p> <p>(2) <math>d = v_2 \sqrt{\frac{2H}{g}}</math></p> <p>問4</p> <p><math>h = \frac{90(m+M)g}{k}</math></p>		

## 正解・解答例

教科・科目名	物理（後期日程試験：令和6年度）2/3	問題番号	RA
対象学部・ 学科（課程）等	理学部（物理学科、生物科学科、創造理学コース）、工学部、農学部		
<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 20px; height: 20px; line-height: 20px;">2</span>	<p>問1 (1)</p> <p style="margin-left: 40px;">ア      ②左向き（電池から遠ざかる向き）</p> <p style="margin-left: 40px;">イ      <math>\frac{1}{R}(E - vBL)</math></p> <p style="margin-left: 40px;">ウ      <math>\frac{BL}{R}(E - vBL)</math></p> <p style="margin-left: 40px;">エ      <math>\frac{1}{R}(E - vBL)^2</math></p> <p style="margin-left: 40px;">オ      <math>\frac{E}{R}(E - vBL)</math></p> <p style="margin-left: 40px;">(2)</p> <p style="margin-left: 40px;">カ      <math>\frac{E}{BL}</math></p> <p style="margin-left: 40px;">キ      0</p> <p>問2</p> <p style="margin-left: 40px;">ク      <math>\frac{BLE}{Rg \tan \theta}</math></p> <p style="margin-left: 40px;">ケ      <math>g \sin \theta - \frac{BL}{mR}(E + VBL \cos \theta) \cos \theta</math></p> <p style="margin-left: 40px;">コ      <math>mgV \sin \theta</math></p> <p style="margin-left: 40px;">サ      <math>\frac{E}{R}(E + VBL \cos \theta)</math></p>		

## 正解・解答例

教科・科目名	物理（後期日程試験：令和6年度）3/3	問題番号	RA
対象学部・ 学科(課程)等	理学部（物理学科、生物科学科、創造理学コース）、工学部、農学部		
3	<p>問1 (1) <math>P_2 = \frac{P_1}{x}</math>  (2) <math>W_a = (x-1)RT_1</math>  (3) <math>W_c = \frac{x-1}{x}RT_1</math>  (4) <math>\frac{x-1}{x} &lt; f(x) &lt; x-1</math></p> <p>問2 (1) (a) <math>U_{12} = 0, Q_{12} = f(x)RT_1</math>  (b) <math>U_{23} = \frac{3}{2}R(T_3 - T_1), Q_{23} = \frac{3}{2}R(T_3 - T_1)</math>  (c) <math>U_{31} = \frac{3}{2}R(T_1 - T_3), Q_{31} = 0</math></p> <p>(2) (ア) =  (イ) &lt;  (ウ) &gt;  (エ) &gt;  (オ) &lt;</p> <p>(3) 熱力学の第1法則より <math>\Delta Q = \Delta U + \Delta W</math> である。(2)より <math>\Delta U = 0</math>なので <math>\Delta Q = \Delta W</math>が成立しなければならないが、<math>P_2 &lt; P_3</math>とすると(2)より<math>\Delta Q</math>は正で<math>\Delta W</math>は負になるので矛盾である。</p>		

採点・評価基準（具体的基準）

教科・科目名	物理（後期日程試験：令和6年度）	問題番号	RA
対象学部・ 学科（課程）等	理学部（物理学科、生物科学科、創造理学コース）、工学部、農学部		
出題のねらい	<p>1 小球やばねの運動に関する力学の基礎的な内容の理解を問う問題である。</p> <p>2 電流と磁場の関係と、電気回路におけるエネルギー保存則が理解できているかを問う問題である。</p> <p>3 理想気体に関する P-V グラフを通じて、状態方程式や第一法則など熱力学に関する基本的な知識を問う。</p>		
採点基準 (点数は 200 点 満点の場合)	<p>1 配点 34% (68 点) 問 1(1) 8 点     (2) 小球の運動方程式 6 点         板の運動方程式 6 点     (3) 6 点 (4) 6 点 問 2 (1) 6 点 (2) 6 点 (3) 6 点 問 3 (1) 6 点 (2) 6 点 問 4 6 点</p> <p>2 配点 33% (66 点) 問 1 (1) ア 6 点, イ 6 点, ウ 6 点, エ 6 点, オ 6 点     (2) カ 6 点, キ 6 点 問 2 ク 6 点, ケ 6 点, コ 6 点, サ 6 点</p> <p>3 配点 33% (66 点) 問 1 (1) 8 点 (2) 8 点 (3) 8 点 (4) 8 点 問 2 (1) (a) 6 点 (b) 6 点 (c) 6 点     (2) (ア) 2 点 (イ) 2 点 (ウ) 2 点 (エ) 2 点 (オ) 2 点     (3) 6 点</p>		