

## 物 理

I 以下の設問 A, B, C の文章を読み、空欄 1 ~ 17 に  
もっとも適切な式を記入せよ。

## I-A

図 1 のように、 $xy$  平面にあるなめらかな床の上に大きさの無視できる質量  $m$  の 3 つの小物体（小物体 1, 2, 3）を、それぞれ  $x$  軸上の点  $P(x_1, 0)$ ,  $Q(x_2, 0)$ ,  $R(x_3, 0)$  に固定し、小物体同士をばね定数  $k$ 、自然長  $l$  の軽いばね（ばね 1, 2）でつなぐ。このとき、2 つのばねはともに自然長に比べて伸びている。ばねはフックの法則が成立する範囲内で伸び縮みするものとし、また重力の影響は無視できるものとする。

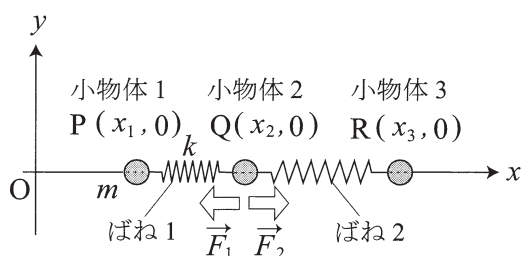


図 1

図 1 において、小物体 2 が両側のばね 1 とばね 2 から受ける弾性力の合力を求める。小物体 2 がばね 1 から受ける弾性力  $\vec{F}_1$  の  $x$  成分の大きさは、 $m, k, l, x_1, x_2, x_3$  の中から必要なものを用いて、1 と表せる。同様に、小物体 2 がばね 2 から受ける弾性力  $\vec{F}_2$  の  $x$  成分の大きさは 2 と表せる。これらより、小物体 2 が両側のばね 1 とばね 2 から受ける弾性力の合力  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2$  の  $x$  成分は

$$k(x_1 + x_3) - (\text{ 3 })$$

に等しい。

## I-B

図2のように、 $xy$  平面にあるなめらかな床の上に大きさの無視できる質量  $m$  の3つの小物体（小物体1, 2, 3）を、それぞれ点  $P(x_1, y_1)$ ,  $Q(0, y_2)$ ,  $R(x_3, y_3)$  に固定し、小物体同士をばね定数  $k$ , 自然長  $l$  の軽いばね（ばね1, 2）でつなぐ。このとき、2つのばねはともに自然長に比べて伸びている。O を原点、O' を  $y$  軸上の点としたとき、 $\angle OPQ$  と  $\angle O'RQ$  は直角であり、 $\angle POQ$  を  $\theta_1$  [rad]  $\left(0 < \theta_1 < \frac{\pi}{2}\right)$ ,  $\angle RO'Q$  を  $\theta_2$  [rad]  $\left(0 < \theta_2 < \frac{\pi}{2}\right)$  とする。ばねはフックの法則が成立する範囲内で伸び縮みするものとし、また重力の影響は無視できるものとする。

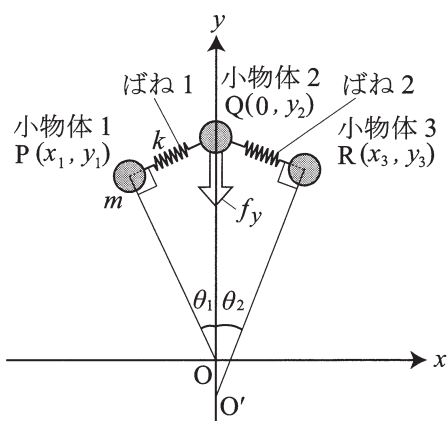


図2

図2において、小物体2が両側のばね1とばね2から受ける弾性力の合力の  $y$  成分  $f_y$  は、

$$f_y = k(y_1 + y_3) - (\boxed{4}) + kl(\boxed{5}) \quad (1)$$

と表せる。ただし、 $\boxed{5}$  は  $\theta_1$  と  $\theta_2$  を用いて表すものとする。2つのばねが自然長に比べて十分に長く伸びているとき、式(1)の右辺第三項は無視できるため、

$$f_y = k(y_1 + y_3) - (\boxed{4}) \quad (2)$$

と表せる。

### I-C

図 3(a) のように、上面と下面が薄いゴム膜で閉ざされた、半径に比べ十分に長い円筒状の薄膜が、一様な大気中に置かれている。薄膜は厚みが非常に薄い弾性をもつ物質から成り、長さ方向には伸び縮みしないが、円に沿った方向にのみ伸び縮みできるため、薄膜の半径は変化できる。円筒状の薄膜の内部に大気圧より高い圧力の単原子分子理想気体を封入したところ、薄膜の半径は気体の封入前に比べ増大し、静止した。長さ方向に垂直な断面（図 3(b)）に示しているように、外力を用いて円筒面を、気体の封入後に静止した薄膜の半径から半径方向外向きにわずかに引き伸ばし、静かに放した。その後、薄膜は円筒の形状を保ちながら長さを変えず半径のみ時間変化した。その際、大気圧は変化せず、薄膜および薄膜の内外の温度は常に一定であり、重力の影響は無視できるものとする。

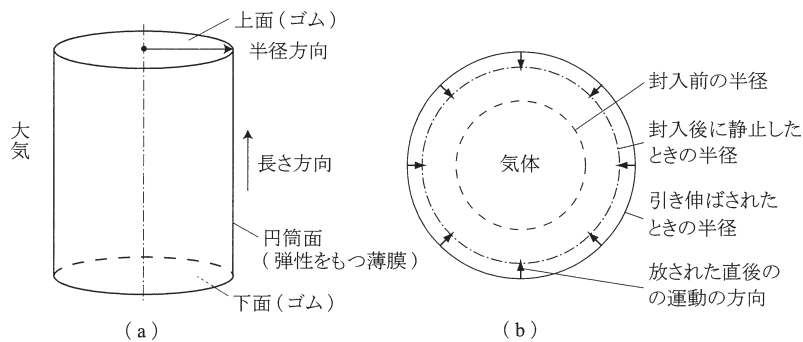


図 3

図 4 のように、長さ方向に垂直な平面内に薄膜の円の中心を原点  $O$  とする  $xy$  平面をとり、 $xy$  平面に垂直に  $z$  軸をとる。I-B の図 2 のように、ばね定数  $k$ 、自然長  $l$  をもつ軽いばねでつながれた小物体を用いて、単位長さをもつ薄膜の半径の時間変化を表すことを考える。まず、 $xy$  平面内において、半径  $r$  の薄膜の円周を  $N(> 3)$  等分する。中心角  $\theta = \frac{2\pi}{N}$  [rad] をもつ円弧を、 $z = -0.5$  から  $z = 0.5$  まで  $z$  軸方向に平行移動して得られる長さ 1 の円筒面の一部を  $N$  個考える。それらの中心に、一部分の質量  $m$  に等しい質量の小物体を 1 つずつ全部で  $N$  個配置し、これらの運動が単位長さの薄膜の半径  $r$  の時間変化を表すものとみなす。図 4 のように、円筒

面の一部分 CDEF を小物体 2, CDEF の両隣の円筒面の一部分を, それぞれ小物体 2 に軽いばねでつながれた小物体 1, 3 とみなす。小物体 2 は  $y$  軸上にあるため, 小物体 1 と小物体 3 の位置関係は  $y$  軸に関して対称である。面 CDEF と,  $xy$  平面内における半径  $r$  の円との交線である円弧 AB の中心角 ( $\angle AOB$ ) は  $\theta$  [rad] に等しい。また, 薄膜の外部の大気圧 (外圧) を  $p_{\text{out}}$ , 薄膜の内部の気体の圧力 (内圧) を  $p_{\text{in}}$  とする。これらの圧力は薄膜の円筒面に対して垂直な方向にはたらく。薄膜の半径  $r$  が時間変化しているときも外圧は変化せず一定であるが, 内圧は薄膜の半径  $r$  と共に変化する。ここで, 面 CDEF にはたらく圧力の合力は, 対応する小物体 2 にのみはたらくものとする。

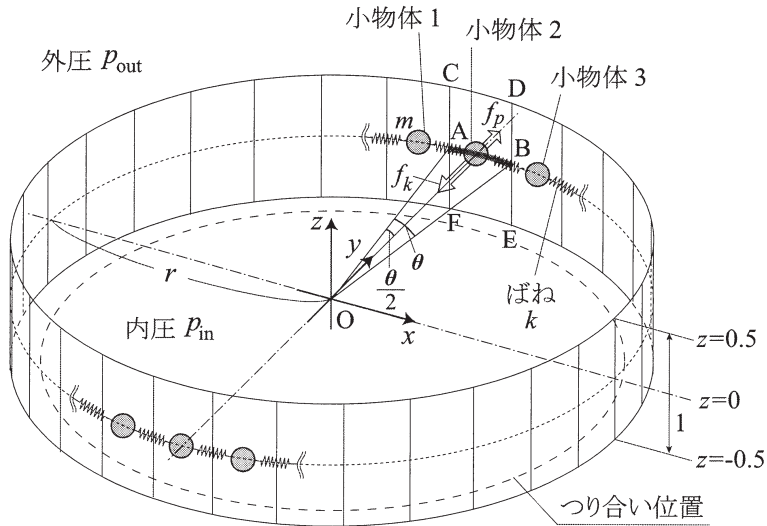


図 4

いま, 3つの小物体 1, 2, 3 に着目し, 小物体 2 の運動を考える。図 5 は図 4 の  $xy$  平面を示しているが, 小物体 2 が受ける力の  $y$  成分は, 小物体 2 につながれた 2 つのばねから受ける弾性力の  $y$  成分  $f_k$  と, 圧力による力の  $y$  成分  $f_p$  の和である。したがって, 小物体 2 の  $y$  軸方向の運動方程式は,

$$ma_y = f_k + f_p \quad (3)$$

と表せる。ここで、 $a_y$  は小物体 2 の加速度の  $y$  成分である。

まず、小物体 2 が受けるばねの弾性力の  $y$  成分  $f_k$  を求める。小物体 1, 2, 3 の  $y$  座標の値  $y_1, y_2, y_3$  はそれぞれ

$$y_1 = \boxed{6} \times \cos \theta, y_2 = \boxed{7}, y_3 = \boxed{6} \times \cos \theta$$

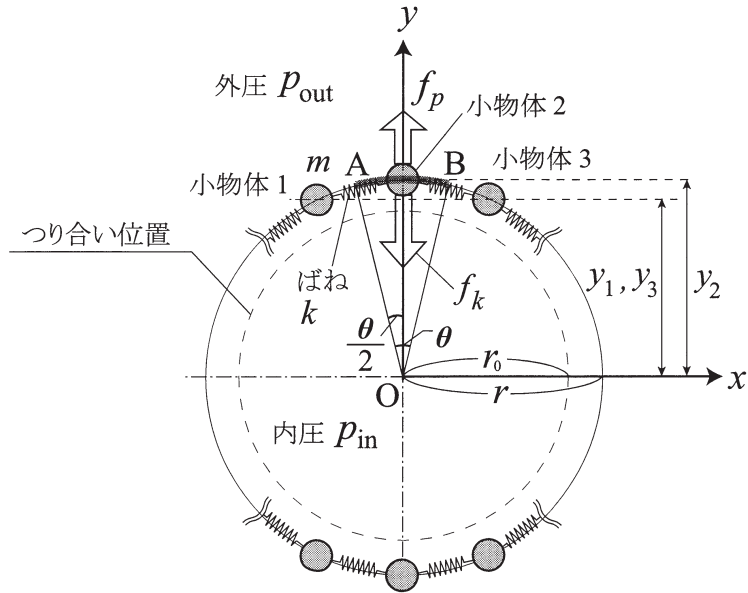


図 5

と表せる。 $f_k$  は、I-B で求めた式 (2) の右辺で表されるものと仮定すると、

$$f_k = \left( \boxed{8} \right) \times (1 - \cos \theta) \quad (4)$$

と表せる。ただし、 $\boxed{6}$ ,  $\boxed{7}$ ,  $\boxed{8}$  にはそれぞれ  $r, k$  の中から必要なものを用いて表すものとする。

次に、 $N$  が十分大きく、 $\theta$  が十分小さい場合を考える。このとき、面 CDEF にはたらく圧力による力の  $y$  成分は、内圧  $p_{in}$  と外圧  $p_{out}$  の差と面 CDEF の面積の積に等しい。したがって、 $f_p$  は、 $\boxed{9}$  に  $r, p_{in}$ , および  $p_{out}$

を用いて,

$$f_p = \left( \boxed{9} \right) \times \theta \quad (5)$$

と表せる。小物体 2 が内外の気体とばねから受ける力の合力がゼロであり、薄膜が静止したつり合いの状態における円の半径を  $r_0$ 、内圧を  $p_{\text{in}0}$  ( $p_{\text{in}0} > p_{\text{out}}$ ) とすると、ばね定数  $k$  は、関係式

$$\frac{k(1 - \cos \theta)}{m} = \left( \boxed{10} \right) \times \frac{\theta}{m} \quad (6)$$

を満たす。ただし、 $\boxed{10}$  は  $r_0$ ,  $p_{\text{in}0}$ ,  $p_{\text{out}}$  の中から必要なものを用いて表すものとする。また、半径  $r$  を  $r_0$  と、 $r_0$  からの微小な変化量  $\Delta r$  ( $|\Delta r| \ll r_0$ ) を用いて

$$r = r_0 + \Delta r \quad (7)$$

と表す。 $\alpha$  と  $n$  を実数としたとき、 $|\alpha|$  が 1 に比べて十分に小さいときに成り立つ近似式

$$(1 + \alpha)^n \doteq 1 + n\alpha$$

から、 $\frac{r_0}{r}$  は、 $r_0$  と  $\Delta r$  の中から必要なものを用いて、

$$\frac{r_0}{r} \doteq 1 - \frac{\Delta r}{\boxed{11}} \quad (8)$$

と表せる。ただし式 (8) において  $\left( \frac{\Delta r}{r_0} \right)^2$  は  $\left| \frac{\Delta r}{r_0} \right|$  に比べて十分に小さく無視できるものとする。薄膜の半径は十分ゆっくり変化するため、薄膜の内部に封入された単原子分子理想気体は等温変化し、単位長さあたりの薄膜に対して、内圧  $p_{\text{in}}$  と円の面積の積が一定という関係式が成り立つ。したがって、 $p_{\text{in}}$  は  $r_0$ ,  $r$ ,  $p_{\text{in}0}$  を用いて、

$$p_{\text{in}} = \boxed{12} \quad (9)$$

と表せる。式 (5) の  $f_p$  は、式中の  $p_{\text{in}}$  に式 (9) を代入し、式 (8) を用いて整理すると、

$$f_p = \left\{ \left( \boxed{13} \right) \times p_{\text{in}0} - \left( \boxed{14} \right) \times p_{\text{out}} \right\} \times \theta \quad (10)$$

と表せる。ただし、 $\boxed{13}$  は  $r_0$  と  $\Delta r$  を用い、 $\boxed{14}$  は  $r$  を用いて表すものとする。

以上より、式 (3) に式 (4) の  $f_k$  と式 (10) の  $f_p$  を代入して整理すると、つり合いの位置からの微小な変化量  $\Delta r$  についての運動方程式は、 $\boxed{15}$  には  $k$ 、 $\boxed{16}$  には  $p_{\text{in}0}$  と  $p_{\text{out}}$  を用いて、

$$ma_{\Delta r} = \left\{ \left( \boxed{15} \right) \times (1 - \cos \theta) + \left( \boxed{16} \right) \times \theta \right\} \Delta r \quad (11)$$

と表せる。ここで、 $a_{\Delta r}$  はつり合いの位置  $r_0$  から半径方向に座標軸をとり、円の中心から外向きを正の向きとしたときの小物体 2 の加速度を表す。

式 (11) は単位長さ 1 rad あたりの薄膜の質量に対応する  $\Delta m = \frac{m}{\theta}$  と  $\Delta r$  によらない定数  $\tilde{k}$  を用いて

$$\Delta m a_{\Delta r} = -\tilde{k} \Delta r \quad (12)$$

と表せ、単振動の運動方程式となる。したがって、薄膜は半径方向に単振動することが分かり、式 (12) で  $\tilde{k}$  がこの単振動のばね定数に相当する。式 (6) を用いると、 $\tilde{k}$  は、 $p_{\text{in}0}$  を用いて

$$\tilde{k} = \boxed{17} \quad (13)$$

と表せる。

II 以下の設問 A, B の文章を読み, 空欄  ~  にもっとも適切な式または数値, 空欄  ~  にもっとも適切な記号を記入せよ。

## II-A

J.J. トムソンは質量分析器を用いて, ネオンには同位体  $^{20}\text{Ne}$  と  $^{22}\text{Ne}$  が存在することを発見した。図 1 は J.J. トムソンの質量分析器の概念図である。原点  $O$  において, 電気量  $q$  [C] ( $q > 0$ ), 質量  $m$  [kg] の陽イオンを,  $x$  軸の正の向きに速さ  $v_0$  [m/s] で直方体の形状をもつ領域 A に入射させる。領域 A の  $x$  軸に沿った方向の長さは  $d$  [m],  $z$  軸 (紙面裏から表の向きを正の向きとする) に沿った長さは  $D$  [m] で,  $0 \leq x \leq d$  かつ  $0 \leq z \leq D$  の範囲において  $y$  軸の正の向きに, 強さ  $E$  [N/C] の一様な電場をかけたり, 磁束密度の大きさ  $B$  [N/A·m] の一様な磁場をかけたりすることができる。領域 A 以外の場所には電場も磁場もかかっていない。領域 A に入った陽イオンは, 領域 A の境界である  $x = d$  の位置に到達するまで常に領域 A 内を運動する。領域 A を出た後, 陽イオンは  $x = d + L$  [m] の位置にある感光フィルムまで直進し, フィルムを感光させる。重力の影響は無視できるものとする。

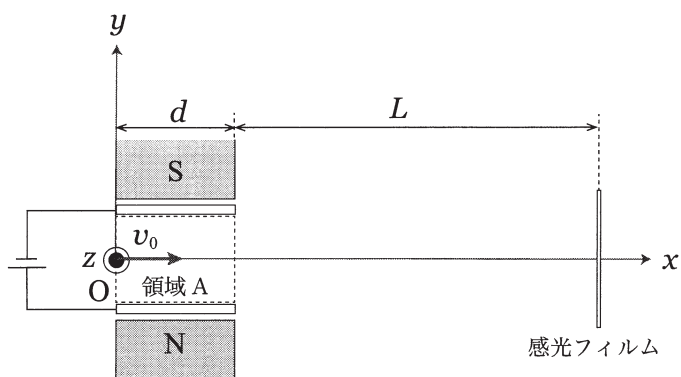


図 1

まず, 領域 A 全体に電場だけをかけた場合を考える。領域 A を通過中に陽イオンが受ける力の  $x$  成分は  [N],  $y$  成分は

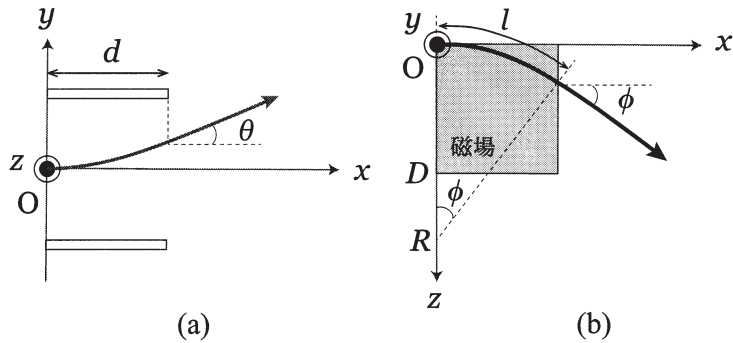


図 2

〔N〕,  $z$  成分は  〔N〕 と表せる。図 2 (a) に示すように,  $xy$  平面上で  $x = d$  の位置における陽イオンの速度と  $x$  軸のなす角を  $\theta$  [rad]  $\left(0 < \theta < \frac{\pi}{2}\right)$  とする。 $\tan \theta$  は,  $q, m, E, B, v_0, d$  の中から必要なものを用いて,

$$\tan \theta = \text{} \quad (1)$$

と表せる。

次に, 領域 A 全体に磁場だけをかけた場合を考える。このとき図 2 (b) に示すように, 磁場中で, 陽イオンは半径  $R$  [m] の円弧を描く。 $R$  は,  $q, m, E, B, v_0$  の中から必要なものを用いて表すと,  である。 $0 \leq x \leq d$  の範囲において, 陽イオンが  $xz$  平面内で描く円弧の長さを  $l$  [m] とする。 $x = d$  の位置における陽イオンの速度ベクトルと  $x$  軸のなす角を  $\phi$  [rad]  $\left(0 < \phi < \frac{\pi}{2}\right)$  とおくと, 円弧の中心角も  $\phi$  に等しい。 $\phi$  は,  $q, m, E, B, v_0, l$  の中から必要なものを用いて,

$$\phi = \text{} \quad (2)$$

と表せる。

最後に, 領域 A 全体に電場と磁場両方をかけた場合を考える。 $x = d$  の位置における陽イオンの速度の  $x$  成分を  $v_x$  [m/s],  $y$  成分を  $v_y$  [m/s],

$z$  成分を  $v_z$  [m/s] とし,  $\frac{v_y}{v_x} = \tan \theta'$ ,  $\frac{v_z}{v_x} = \tan \phi'$  となるよう,  $\theta'$  [rad]  $\left(0 < \theta' < \frac{\pi}{2}\right)$ ,  $\phi'$  [rad]  $\left(0 < \phi' < \frac{\pi}{2}\right)$  を定義する。

まず, 陽イオンが原点  $O$  を出発してから感光フィルムに到達するまでに  $z$  軸方向に進む距離を考える。領域  $A$  内において陽イオンの  $x$  軸方向と  $z$  軸方向の運動を考えると,  $y$  軸方向の運動に関わる電場から受ける力の効果は無視できる。したがって,  $y$  軸負の向きにみると,  $x = d$  の位置に到達するまでに, 陽イオンは  $xz$  平面内において半径  $R$  [m] で長さ  $l$  [m] の円弧を描くため,  $\phi' = \boxed{6}$  となる。このことから,  $x = d + L$  の位置にある感光フィルムにおける陽イオンの  $z$  座標は,  $\boxed{7}$  には  $l, L$  の中から,  $\boxed{8}$  には  $q, m, E, B, v_0$  の中から必要なものを用いて,

$$z = \boxed{7} \times \tan \phi' + \boxed{8} \times (1 - \cos \phi') \quad (3)$$

と表せる。

次に陽イオンが原点  $O$  を出発してから感光フィルムに到達するまでに  $y$  軸方向に進む距離を考える。 $y$  軸負の向きにみると, 陽イオンは  $xz$  平面内で等速円運動を行うようにみえるため, 領域  $A$  に入射してから  $x = d$  の位置に到達するまでの時間は  $\frac{l}{v_0}$  に等しい。この間, 陽イオンは  $y$  軸方向に等加速度運動を行うため,  $x = d + L$  の位置にある感光フィルムにおける陽イオンの  $y$  座標は,  $\boxed{9}$ ,  $\boxed{10}$  には  $q, m, E, v_0, L$  の中から必要なものを用いて,

$$y = \boxed{9} \times \frac{l}{\cos \phi'} + \boxed{10} \times l^2 \quad (4)$$

と表せる。

ここで  $d$  は  $L$  に比べ十分小さく,  $\theta', \phi'$  がそれぞれ十分小さい場合について考えると,  $\tan \phi' \cong \phi'$ ,  $\cos \phi' \cong 1$ ,  $l \cong d$  と近似でき, 式 (3) の右辺第 2 項と式 (4) の右辺第 2 項は無視できる。右辺第 2 項を無視した式 (3) および式 (4) から  $v_0$  を消去すると, 感光フィルムにおける陽イオンの  $y$  座標と  $z$  座標の関係は,  $\boxed{11}$  には  $q, m, E, B$  の中から必要なものを

用いると、

$$y = \frac{1}{dL} \times \boxed{11} \times z^2 \quad (5)$$

となり、この式は  $yz$  平面における放物線を表す。以上より、陽イオンは入射時の速さ  $v_0$  に応じて、感光フィルムにおけるこの放物線上のある 1 点に到達することが分かる。

図 1 に示した質量分析器を用いて、電氣量が電氣素量に等しい  $^{20}\text{Ne}$  の陽イオンを速さ  $v$  [m/s] で入射させると、感光フィルム上では、図 3 (a) および (b) の ■ の位置に像が得られた。実線は、式 (5) において  $q$  を電氣素量に、 $m$  を  $^{20}\text{Ne}$  の質量に置き換えることで得られる放物線を表す。続いて同じ装置に、電氣量が電氣素量に等しい  $^{20}\text{Ne}$  の陽イオンを速さ  $v'$  [m/s] (ただし  $v' > v$ ) で領域 A に入射させた。得られる像の位置を ○ で示したとき、図 3 (a) のアからクの中でもっとも適切なものは あ である。さらに同じ装置に電氣量が電氣素量に等しい  $^{22}\text{Ne}$  の陽イオンをさまざまな速さで領域 A に入射させた。感光フィルムで得られる像を結んでできる放物線を破線で表すと、図 3 (b) のケからシの中でもっとも適切なものは い である。

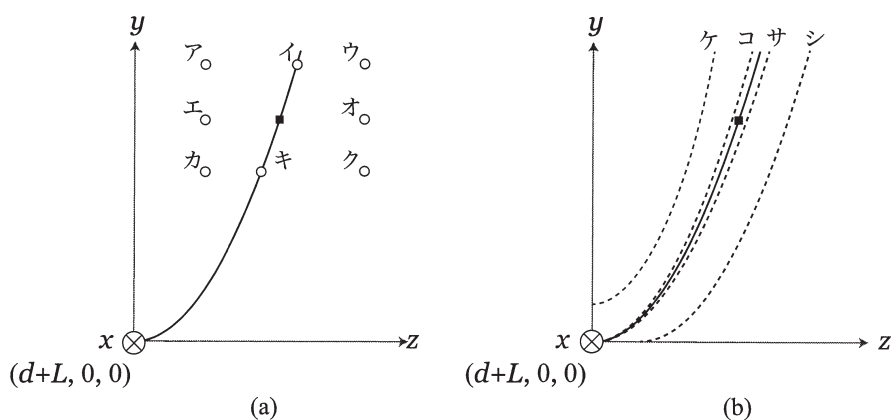


図 3

## II-B

J.J. トムソンの質量分析器の問題点は、同じ陽イオンであっても、領域 A へ入射する際の速さが異なると、感光フィルム上で異なる位置に像ができることである。そこで、J.J. トムソンの研究室に所属していたアストンは、J.J. トムソンの質量分析器を改良し、電場と磁場による陽イオンの曲がる方向を互いに逆にすることで、速さによる位置の違いをなくすことを試みた。図 4 がアストンの質量分析器の概念図である。

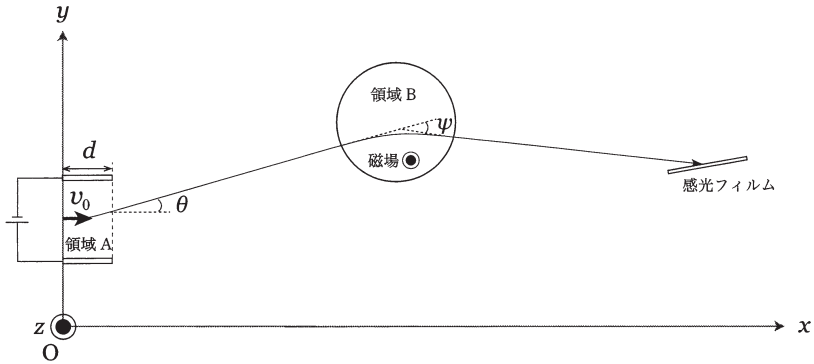


図 4

電気量  $q$ 、質量  $m$  の陽イオンが、 $x$  軸の正の向きに速さ  $v_0$  で直方体の形状をもつ領域 A に  $x = 0$  の位置で入射する。領域 A の  $x$  軸に沿った方向の長さは  $d$  である。領域 A 全体に大きさ  $E$  の一様な電場が  $y$  軸の正の向きにかけられているが、領域 A に磁場はかけられていない。領域 A に入った陽イオンは、領域 A の境界である  $x = d$  の位置に到達するまで常に領域 A 内を運動する。 $x = d$  の位置における陽イオンの速度ベクトルと  $x$  軸のなす角を  $\theta$  [rad]  $\left(0 < \theta < \frac{\pi}{2}\right)$  とすると、II-A と同様、 $\tan \theta$  は式 (1) で表せる。

領域 A を出た陽イオンは、 $xy$  平面上で円型の形状をもつ領域 B に入射する。図 4 のように領域 B 全体に一様な磁場が  $z$  軸の正の向きにかかっている。領域 B 中で陽イオンは磁場から力を受け、その飛跡は円弧を描く。円弧の半径は、領域 B の半径より十分大きい。領域 B に入射する直前と、領域 B を出た直後の陽イオンの速度ベクトルのなす角  $\psi$  [rad]  $\left(0 < \psi < \frac{\pi}{2}\right)$

は十分小さいものとする。領域 B から出た陽イオンは感光フィルムまで直進する。ただし、領域 A から領域 B に到達するまでの距離、および領域 B から感光フィルムに到達するまでの距離は、領域 B の半径と比べて、それぞれ十分長いものとする。また、領域 A と領域 B を除いた場所において電場と磁場はかけられていない。

以後  $\theta$  が十分小さい場合を考える。陽イオンが領域 A に入射する際の速さ  $v_0$  がわずかに変化し、 $v_0 + \Delta v_0$  になったとき、 $\theta$  は  $\theta + \Delta\theta$  に、 $\psi$  は  $\psi + \Delta\psi$  にそれぞれ変化した。 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\psi$  がどのように表せるかを考えよう。

まず  $\theta$  が十分小さいので、式 (1) において  $\tan \theta \simeq \theta$  と近似し、 $\theta = \boxed{4}$  と表す。 $\left| \frac{\Delta\theta}{\theta} \right|$  と  $\left| \frac{\Delta v_0}{v_0} \right|$  が 1 より十分小さく、 $\alpha$  と  $n$  が任意の実数で  $|\alpha|$  が 1 より十分小さいとき、 $(1 + \alpha)^n \simeq 1 + n\alpha$  が成り立つことから、 $\Delta\theta$  は  $v_0$ 、 $\Delta v_0$ 、 $\theta$  を用いて

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \boxed{12} \times \frac{\Delta v_0}{v_0} \quad (6)$$

と表せる。ここで  $\boxed{12}$  は定数である。すなわち、 $\Delta v_0 > 0$  とすると、 $v_0$  が  $v_0 + \Delta v_0$  に変化したとき、 $\Delta\theta$  の符号は  $\boxed{\text{う}}$  である。ただし  $\boxed{\text{う}}$  には、以下の選択肢から適切なもの (A もしくは B) を選べ。

A 正                      B 負

また  $\Delta\psi$  は  $v_0$ 、 $\Delta v_0$ 、 $\psi$  を用いて、次のような式で表せることが知られている。

$$\frac{\Delta\psi}{\psi} = a \times \frac{\Delta v_0}{v_0} \quad (7)$$

ここで、 $a$  は定数である。 $\Delta v_0 > 0$  のとき、速さ  $v_0$  で領域 A に入射した陽イオンと、速さ  $v_0 + \Delta v_0$  で領域 A に入射した陽イオンは、適切な場所に感光フィルムを配置すると、どちらも感光フィルム上のある 1 点に集まるようになった。このとき、 $a$  は  $\boxed{\text{え}}$  の値である。ただし  $\boxed{\text{え}}$  には、以下の選択肢から適切なもの (A もしくは B) を選べ。

A 正                      B 負

# 化 学

大問I～IIIに答えよ。（問題は化12ページまでである）

化学の問題は次ページから始まる

I 次の**実験 1**，**実験 2**に関する文章を読み，以下の設問(1)～(11)に答えよ。実験は全て1気圧，25℃の条件下で行い，pHを変化させたときの水溶液の体積，気体の溶解度は変わらないものとする。また，必要であれば次の値を使用せよ。 $\log_{10} 2 = 0.30$ ， $\log_{10} 3 = 0.48$ ，原子量 H: 1.0，C: 12，O: 16，S: 32，Fe: 56

**実験 1** 硫酸鉄(II)七水和物 2.78 g を，(ア)を用いて 100 mL の水溶液にした。さらに，この水溶液を 4 つの試験管 a～d に分けた。試験管 a にアンモニア水を加えると，(i) (イ)色の沈殿が生成した。試験管 b に過酸化水素水を加えると，(ウ)色の水溶液となり，さらにチオシアン酸カリウム水溶液を加えると(エ)色の水溶液になった。(ii) 試験管 c の pH を 2.0 に調整し，硫化水素を飽和するまで十分に吹き込んだところ，沈殿は生じなかった。試験管 d はしばらく静置していると，水溶液中に溶けている酸素により酸化され，(オ)色の水溶液となった。

(1) (ア)に入る最も適切な実験器具の名称を以下の番号から一つ選べ。

- ① コニカルビーカー    ② 三角フラスコ    ③ ビュレット  
④ ホールピペット    ⑤ メスシリンダー    ⑥ メスフラスコ

(2) (イ)～(オ)に入る最も適切な色を以下の番号からそれぞれ一つ選べ。ただし，同じ番号を複数回選んでもよい。

- ① 白            ② 血赤            ③ 淡桃            ④ 黄褐  
⑤ 緑白          ⑥ 青白            ⑦ 青紫            ⑧ 黒

(3) 下線部(i)の沈殿を化学式で記せ。

(4) 下線部(ii)の水溶液中に溶けている硫化物イオン  $S^{2-}$  の濃度を有効数字 2 桁で求めよ。硫化水素  $H_2S$  の 25℃における飽和水溶液中の濃度は  $[H_2S] = 0.10 \text{ mol/L}$  である。また， $H_2S$  は水に溶けて，それぞれ電離定数  $K_1$ ， $K_2$  にしたがって，以下のように電離する。



(5) 下線部(ii)で沈殿が生じなかった理由を計算過程とともに述べよ。ただし， $FeS$  の 25℃における溶解度積は  $K_{SP} = 6.0 \times 10^{-18} (\text{mol/L})^2$  とする。

- (6) 試験管 c の pH を少しずつ上げていくと、ある pH よりも大きくなったときに沈殿が生じ始めた。このときの pH の値を有効数字 2 桁で求めよ。

(次ページへ続く)

**実験 2** 100 mL の水に溶けている酸素  $O_2$  の濃度を調べる実験をした。まず、100 mL の水に塩化マンガン水溶液とヨウ化カリウムを含む水酸化ナトリウム水溶液を少量加えると、水酸化マンガン  $Mn(OH)_2$  の白色沈殿が生成した。しばらくすると、 $Mn(OH)_2$  は水に溶けているすべての酸素  $O_2$  と反応し、酸化水酸化マンガン  $MnO(OH)_2$  の褐色沈殿に変化した。さらに、(iii) この水溶液に少量の硫酸を加えると、すべての  $MnO(OH)_2$  が(カ)として働いてヨウ化カリウムと反応し、硫酸マンガン(II)と(キ)が生じた。そこで、(ク)を指示薬として、(iv)(キ)をチオ硫酸ナトリウム水溶液で滴定した。

- (7) (カ), (ク) に入る最も適切な語句を以下の番号からそれぞれ一つ選べ。
- ① ベネジクト液    ② 石灰水    ③ 硝酸銀水溶液    ④ フェノールフタレイン  
⑤ デンプン        ⑥ 還元剤    ⑦ 酸化剤        ⑧ 触媒
- (8) (キ) に入る物質名を書け。
- (9) 下線部(iii)の化学反応において、反応する  $MnO(OH)_2$  とヨウ化カリウムの物質量、および、生じる(キ)の物質量の比を簡単な整数比で表せ。
- (10) 下線部(iv)で起きた、(キ)とチオ硫酸ナトリウムの反応を化学反応式で書け。
- (11) 下線部(iv)の滴定では、0.020 mol/L のチオ硫酸ナトリウム水溶液を 6.0 mL 滴下した際に、終点に達した。100 mL の水に溶けている酸素  $O_2$  の濃度(mol/L)を有効数字 2 桁で求めよ。

II アセチレンの反応に関する問1, 2を読み, 以下の設問(1)~(8)について答えよ。ただし, 気体はいずれも理想気体として取り扱うものとする。

問1 図1のように, 容器A (容積  $V_0$  [L]) と容器B (容積  $5V_0$  [L]) は, コックのついた容積の無視できる連結管でつながれ, 常に温度  $T$  [K] で保たれている。容器A, B にはそれぞれ気体のアセチレン  $C_2H_2$  と水素  $H_2$  が入っており, 容器A, B 内の圧力は, それぞれ  $2P_0$  [Pa] と  $P_0$  [Pa] である。

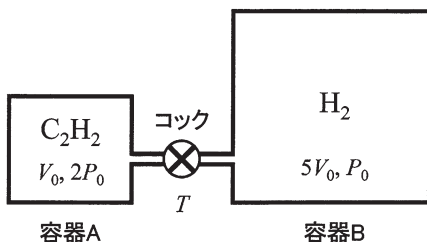


図1

- (1) 容器B内の水素  $H_2$  の物質量を  $n_0$  [mol] としたとき, 容器A内のアセチレン  $C_2H_2$  の物質量を  $n_0$  を用いて表せ。
- (2) コックを開けて容器A, B内の気体を混合した。水素とアセチレンが反応しないとしたとき, 容器内の水素の分圧  $P_{H_2}$  [Pa] と混合気体の全圧  $P_{all}$  [Pa] を, それぞれ  $P_0$  を用いて表せ。
- (3) 全圧と水素の分圧の比 ( $P_{H_2}/P_{all}$ ) の値は, その圧力比以外に何を表すか。“モル”という文字を用いて, 20文字以内で答えよ。
- (4) コックを開けた状態でNi触媒を加えたところ, アセチレンに水素が付加し, アセチレンはエチレン  $C_2H_4$  を経て, 全てエタン  $C_2H_6$  になった。このときの容器内の全圧  $P_{all}$  を,  $P_0$  を用いて表せ。ただし, 触媒の体積は無視できるものとする。

問2 図2のように体積が可変なシリンダー容器に気体のアセチレン  $\text{C}_2\text{H}_2$  2.00 mol と水素  $\text{H}_2$  3.00 mol を入れ、温度  $T$ 、圧力  $P_0$  で静置した。このときのアセチレンと水素の混合気体の体積を  $V$  [L] とする。この状態に Ni 触媒を加えて、温度  $T$ 、圧力  $P_0$  で静置したところ、水素は全て付加し、容器内はアセチレンとエチレンとエタンの混合気体になった。

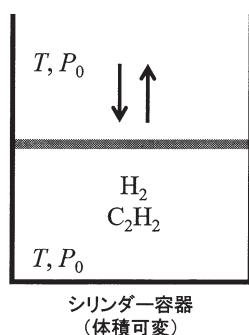


図2

- (5) 反応後の混合気体の体積は反応前の体積  $V$  の何パーセントになるか。有効数字2桁で求めよ。
- (6) このエチレンとエタンの生成において 472.6 kJ の発熱が観測された。このとき、反応後の容器内のアセチレン、エチレン、エタンの物質質量比を、簡単な整数比で表せ。ただし、反応エンタルピーは温度や圧力によって変わらないものとし、各物質の生成エンタルピーは表1のとおりとする。

表1 各物質の生成エンタルピー

| 物質                | $\text{C}_2\text{H}_2$ (気) | $\text{C}_2\text{H}_4$ (気) | $\text{C}_2\text{H}_6$ (気) | $\text{CO}_2$ (気) | $\text{H}_2\text{O}$ (液) |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------------|
| 生成エンタルピー (kJ/mol) | 226                        | 52.0                       | -84.0                      | -394              | -286                     |

- (7) 反応後の混合気体の半分をシリンダー容器から取り出し、取り出した混合気体を完全燃焼したところ、 $\text{H}_2\text{O}$ (液)と $\text{CO}_2$ (気)が生成した。
- (a) アセチレン 1 mol が完全燃焼するときのエンタルピー変化を、表 1 の値を用いて計算過程とともに示せ。
- (b) 取り出した混合気体の完全燃焼によって発生する熱量を、表 1 の値を用いて有効数字 3 桁で求めよ。
- (8) シリンダー容器に残った混合気体に水素を加えたところ、アセチレンとエチレンは全てエタンとなった。このとき発生する熱量を、表 1 の値を用いて有効数字 3 桁で求めよ。

(計算用紙)

(次ページへ続く)

III 次の文章を読み、以下の設問(1)～(10)に答えよ。ただし、原子量は  $H = 1.00$ ,  $C = 12.0$ ,  $O = 16.0$  とする。

炭素、水素、酸素からなる、化合物 **A** がある。化合物 **A** の分子量は、300 以上 400 以下であった。また、化合物 **A** には、カルボキシ基が 1 個とベンゼン環が 2 個含まれることも分かっていた。この化合物 **A** の構造を明らかにするために、次の実験 1～実験 5 を行った。

実験 1 化合物 **A** を 53.4 mg 取り、完全燃焼させたところ、二酸化炭素 132 mg と、水 27.0 mg が生じた。

実験 2 化合物 **A** に、十分な量の水酸化ナトリウム水溶液を加えて、完全に反応させたところ、化合物 **B** が生じた。また同時に、化合物 **C** の二ナトリウム塩、および、化合物 **D** の二ナトリウム塩も、それぞれ生じた。得られた溶液に、十分な量の塩酸を加えたところ、化合物 **B**、化合物 **C**、および、化合物 **D** が得られた。

実験 3 化合物 **B** の分子式は  $C_5H_{12}O$  であった。化合物 **B** は、金属ナトリウムと反応して水素が発生した。また、化合物 **B** には不斉炭素原子が 1 個あった。化合物 **B** を分子内脱水すると、シストランス異性体（幾何異性体）を含めて 3 種類の有機化合物が得られた。

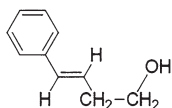
実験 4 化合物 **C** は、*p*-キシレンを酸化しても得られた。また、化合物 **C** と化合物 **E** を反応させると、ポリエチレンテレフタレートが得られた。

実験 5 化合物 **D** の分子量は 138 であった。化合物 **D** は無色の結晶で、融点は  $159^{\circ}\text{C}$  であった。化合物 **D** に塩化鉄 (III) 水溶液を加えると、赤紫色を呈した。化合物 **D** は、高温、高圧の条件のもと、ナトリウムフェノキシドを化合物 **F** と反応させて、これに希硫酸を作用させても得られた。

(1) 化合物 **A** の分子式を答えよ。

(2) 実験 2 について、化合物 **A** 1.0 mol を完全に反応させるには、理論上必要な水酸化ナトリウムは何 mol か。有効数字 2 桁で答えよ。

- (3) 下線部①について、分子式  $C_5H_{12}O$  の構造異性体のうち、分子内脱水はできないが、分子間脱水のみ可能な分子の構造式を書き方の例にならって書け。ただし、鏡像異性体は無視するものとする。



構造式の見方の例

- (4) 下線部①について、分子式  $C_5H_{12}O$  の構造異性体のうち、不斉炭素原子をもつ構造異性体は何種類あるか。数字で答えよ。ただし、鏡像異性体は無視するものとする。
- (5) 下線部②について、実験室において、金属ナトリウムの保管方法として正しいものを、次のア～カの中から一つ選べ。
- ア 金属ナトリウムは、エタノールで満たした試薬瓶の中で保管する。
- イ 金属ナトリウムは、蒸留水で満たした試薬瓶の中で保管する。
- ウ 金属ナトリウムは、氷酢酸で満たした試薬瓶の中で保管する。
- エ 金属ナトリウムは、石油エーテルで満たした試薬瓶の中で保管する。
- オ 金属ナトリウムは、水酸化ナトリウム水溶液で満たした試薬瓶の中で保管する。
- カ 金属ナトリウムは、塩酸で満たした試薬瓶の中で保管する。
- (6) 化合物 E の物質名を答えよ。
- (7) 実験 4 で得られた分子量  $4.80 \times 10^4$  のポリエチレンテレフタラートの 1 分子には、何個のエステル結合が含まれているか。有効数字 2 桁で答えよ。ただし、末端は無視するものとする。
- (8) 化合物 F の物質名を答えよ。

(次ページへ続く)

(9) 一般に化学実験を行う際に、次のア～クの中から正しいものを選び。ただし、一つとは限らない。

ア 保護メガネ（安全メガネ）、白衣を着用する。

イ 長い髪は束ねる。

ウ 化学反応を見るときは、容器の上から直接、覗き込む。

エ においを嗅ぐときは、容器を鼻に近づけて直接嗅ぐ。

オ 実験で余った試薬は、元の試薬瓶に入れて戻す。

カ 有毒な気体が発生する場合は、ドラフト（排気装置のある場所）で行う。

キ 化学実験で観察した事象は、重要だと思う事柄のみ、ノートに記録する。

ク 水酸化ナトリウムのような危険な薬品は、鍵のかかった専用の薬品棚で管理する。

(10) 化合物 A として可能性のある構造式を、設問(3)の書き方の例にならってすべて書け。ただし、鏡像異性体は無視するものとする。

化学の問題はここまで

# 生 物

解答は必ず別に配布する解答用紙に記入すること。

漢字の生物用語は、原則として正しい漢字を用いて解答すること。

I 次の文章を読んで下の問いに答えよ。

内分泌腺から分泌されたホルモンは、血液を介して、①特定の器官や細胞に情報を伝える。例えば、から分泌されたパラトルモンは、やに作用して血中の濃度を上昇させる。また、視床下部とそれにつながる脳下垂体は、さまざまなホルモンを分泌し、体内環境の調節中枢として働く。脳下垂体後葉から分泌されたは、に作用して体液の塩類濃度を低下させる。視床下部の神経分泌細胞から分泌されたは、脳下垂体前葉に作用し、甲状腺刺激ホルモンの分泌を促す。甲状腺刺激ホルモンは、甲状腺の細胞に発現している受容体に結合して、②脂溶性のホルモンであるチロキシンの合成と分泌を刺激する。一方、③このようにして分泌されたチロキシンは、上位のホルモンの分泌細胞に働き、合成や分泌の調節を行う。

体温は内分泌系と神経系の働きによってほぼ一定になるように調節されている。寒冷時には、視床下部が体温低下を感知すると、脳下垂体前葉からのホルモン分泌を刺激して、チロキシンや副腎皮質からのの分泌を促進する。さらに、交感神経系を介して副腎髄質からのアドレナリンの分泌を促進する。これらのホルモンは、や肝臓の代謝を促進することで産熱量を増やし、体温を上昇させる。さらに、副腎髄質からのアドレナリンは交感神経とともに、心臓の結節に作用し拍動を増加させる。交感神経は、皮膚のや血管に働いて体温を上昇させる。

問 1. 文章中の  ～  に入る最も適切な語句を、解答欄に記入せよ。

問 2. 下線部①のような器官を何というか。

問 3. 下線部②について、チロキシン以外の脂溶性ホルモンをひとつ答えよ。

問 4. 甲状腺刺激ホルモン受容体と甲状腺ホルモン受容体は、それぞれ細胞のどこにあるか。

問 5. チロキシンの血中濃度が低下した際に、下線部③のしくみによって、甲状腺刺激ホルモンの血中濃度にどのような変化が起きるか。その作用機構を含めて 60 字以内で答えよ。

問 6. 副腎髄質から分泌されたアドレナリンの心臓に対する作用について、交感神経の心臓に対する作用と比較して、作用が現れるまでの時間と作用が消失するまでの時間の違いを、25 字以内で答えよ。

問 7. 寒冷時に交感神経は皮膚の  と血管に働いてどのようにして体温を上昇させるか、25 字以内で答えよ。

## II 次の文章を読んで下の問いに答えよ。

呼吸では、酸素を用いた異化の反応によって、「生体のエネルギー通貨」とも例えられる ATP が生成される。一方で、ATP は、酸素を用いない異化の代謝系によっても生成される。その一例として、微生物がおこなう発酵があげられる。酵母のアルコール発酵では、まず 1 分子のグルコースが解糖系で 10 種類の酵素によって段階的に分解され、2 分子の [ア] になる。この過程で正味 [イ] 分子の ATP が生成される。[ア] は [ウ] 酵素の働きで二酸化炭素を失い、[エ] になる。[エ] は、解糖系で生じた [オ] を [カ] して、解糖が継続する。また、[エ] は [オ] によって [キ] されて、最終的にエタノールになる。酵母は酸素が少ない環境では発酵をおこなうが、酸素が豊富な環境では呼吸をおこない、発酵は抑制される。この現象は [ク] 効果と呼ばれている。一方で、乳酸菌はグルコースを最終的に乳酸に変換し、乳酸発酵をおこなって ATP を生成する。乳酸発酵では、解糖系で生成された [オ] によって [ア] が [キ] されて最終的に乳酸がつけられる。

動物の筋肉細胞では、貯蔵糖である [ケ] が分解されてグルコース 6-リン酸となり、これが呼吸基質として使われて ATP が生成される。しかし、酸素の供給が不十分な環境では、筋肉中のグルコースは、乳酸発酵と同様の過程で解糖系を介して分解され、ATP と乳酸が生じる。このように筋収縮のエネルギー源である ATP は呼吸の過程で生成されるが、これらのしくみだけでは、急激な筋収縮に対する ATP の供給が不十分である。筋肉には、高エネルギーリン酸結合をもつ [コ] が多量に含まれており、運動時に急速に ATP が必要な場合には、[コ] からリン酸が [サ] に受け渡され、ATP が合成される。一方、静止時には ATP からエネルギーとリン酸を得て、[シ] から [コ] が合成される。このように、[コ] は筋肉細胞内の重要なエネルギー貯蔵物質として機能している。

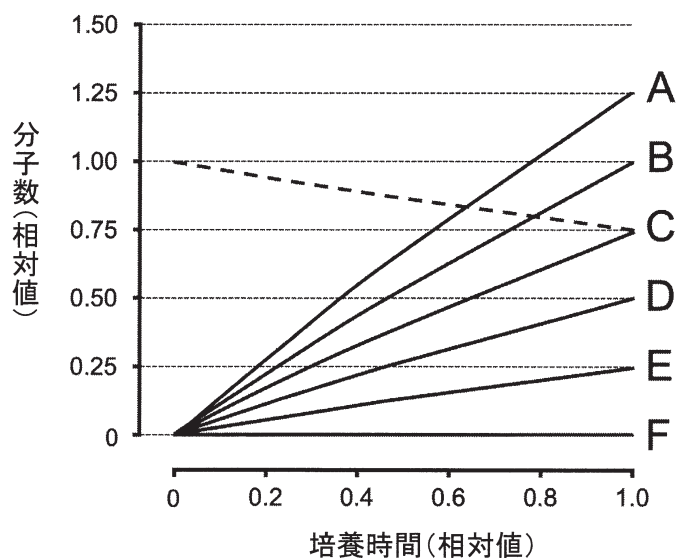
問 1. 文章中の  ～  に入る最も適切な語句または数字を解答欄に記入せよ。

問 2. 酵母と乳酸菌の細胞構造の主な違いを 25 字以内で述べよ。

問 3.  効果の生物学的意義を、酵母の ATP の獲得効率と糖の消費量の観点から 50 字以内で述べよ。

問 4. 酵母をグルコース水溶液に入れ、酸素が利用できない環境でアルコール発酵をおこなわせた。次のグラフ中の破線は、培養液中のグルコース量（分子数）と培養時間との関係を示したものである。

(1) 二酸化炭素量の変化、および (2) エタノール量の変化、を表したものは図中の実線 A～F のうちどれか。最も適切なものをそれぞれ記号で答えよ。



問 5. 次に、乳酸菌をグルコース水溶液に入れ、適切な条件のもとで乳酸発酵をおこなわせた。このときグルコース量の変化が、前問の図中の破線のようにであったとすると、(1)二酸化炭素量の変化、および (2)乳酸量の変化、を表したものは前問の図中の実線 A～F のうちどれか。最も適当なものをそれぞれ記号で答えよ。

問 6. 酸素が利用できる条件下で、酵母にグルコースを与えて培養した。このとき 0.32 g の酸素が消費され、0.77 g の二酸化炭素が発生した。酵母が利用できる基質はグルコースのみであり、原子量は  $C=12$ ,  $H=1$ ,  $O=16$  であるとする。次の小問について、小数第 3 位を四捨五入して第 2 位まで求めよ。

(1) このときアルコール発酵によって発生した二酸化炭素は何 g か。

(2) アルコール発酵と呼吸で消費したグルコースは合わせて何 g か。

### Ⅲ 次の文章を読んで下の問いに答えよ。

有性生殖では、生殖細胞がつくられ、親から子へ染色体が受け継がれる。生殖細胞のうち、卵や精子などのように合体して新しい個体をつくる細胞を  という。有性生殖では、 が形成される過程で、 が起こる。 は、第一分裂と第二分裂の2回の連続した分裂過程で構成される。母細胞に含まれる DNA 量を相対比で2とすると、第一分裂に先立って、間期の  期に DNA の  が起こり、第一分裂に入る時点での細胞あたりの DNA 量の相対値（比）は  になる。第一分裂の前期では、相同染色体どうしが平行に並んで接着し、 となる。その後、 は赤道面に移動して並び、相同染色体は分かれてそれぞれの極へ移動し、 分裂がおこって細胞が二分される。第二分裂では、染色体が再び凝縮し、それぞれの染色体が細胞の赤道面に並ぶと、染色体は分離してそれぞれの極へ移動する。その後、核膜が形成され、 分裂がおこる。これにより、1 個の母細胞から  個の  が生じ、それぞれの  の DNA 量は  になる。

モーガンらはキイロショウジョウバエの突然変異体の研究を通して、形質を決める遺伝子が染色体上にあることを明らかにした。キイロショウジョウバエの野生型は、赤眼、黄褐色の体色、長翅をもつ。野生型と異なる形質をもつ変異型の個体として、眼の色が白に変化した白眼をもつ個体、眼の色がセピア色に変化したセピア色眼をもつ個体、体色が黒色に変化した黒体色をもつ個体、および、小さい翅（痕跡翅）をもつ個体がある。いずれの変異型も、それぞれ異なる単一の遺伝子の突然変異により生じたものである。これらの形質をもつ変異型と野生型を用いて次の交配実験1～3を行った。

【交配実験 1】純系の野生型のオスと白眼のメスを交配し、雑種第 1 代（F1）を得た。得られた個体数を表 1 に示した。

表 1

|     | 赤眼オス | 赤眼メス | 白眼オス | 白眼メス |
|-----|------|------|------|------|
| 個体数 | 0    | 26   | 24   | 0    |

【交配実験 2】純系の野生型のオスと、セピア色眼と痕跡翅をもつ変異型のメスを交配して多数の F1 を得た。F1 の表現型は、すべて赤眼、長翅であった。F1 のオスと、セピア色眼と痕跡翅をもつ変異型のメスとを交配した。その結果、得られた個体数を表 2 に示した。

表 2

|     | 赤眼<br>/長翅 | セピア色眼<br>/長翅 | 赤眼<br>/痕跡翅 | セピア色眼<br>/痕跡翅 |
|-----|-----------|--------------|------------|---------------|
| 個体数 | 22        | 24           | 23         | 21            |

【交配実験 3】純系の野生型のオスと、黒体色と痕跡翅をもつ変異型のメスを交配して多数の F1 を得た。F1 の表現型は、すべて黄褐色の体色、長翅であった。F1 のオスと、黒体色と痕跡翅をもつ変異型のメスとを交配した。その結果、得られた個体数を表 3 に示した。

表 3

|     | 黄褐色<br>/長翅 | 黒体色<br>/長翅 | 黄褐色<br>/痕跡翅 | 黒体色<br>/痕跡翅 |
|-----|------------|------------|-------------|-------------|
| 個体数 | 42         | 9          | 9           | 41          |

問 1. 文章中の  ～  に入る最も適切な語句を答えよ。

問 2. 文章中の  ～  に入る最も適切な数字を答えよ。

問 3. 下線部を何というか。

問 4. 交配実験 1 で得られた F1 の結果から、F1 どうしを交配することで得られる雑種第 2 代 (F2) の赤眼オス, 赤眼メス, 白眼オス, 白眼メスの分離比はいくつになると推定されるか。次の①～⑤から選べ。

① 赤眼オス : 赤眼メス : 白眼オス : 白眼メス = 0 : 1 : 1 : 0

② 赤眼オス : 赤眼メス : 白眼オス : 白眼メス = 1 : 0 : 0 : 1

③ 赤眼オス : 赤眼メス : 白眼オス : 白眼メス = 1 : 1 : 1 : 1

④ 赤眼オス : 赤眼メス : 白眼オス : 白眼メス = 0 : 1 : 1 : 1

⑤ 赤眼オス : 赤眼メス : 白眼オス : 白眼メス = 1 : 1 : 1 : 0

問 5. 交配実験 1 の結果に関する次の小問に答えよ。

(1) 白眼のメスを生じなかった理由として考えられることを、15 字以内で述べよ。

(2) 赤眼のオスを生じなかった理由として考えられることを、15 字以内で述べよ。

問 6. 交配実験 2 において、F1 どうしを交配することで得られる F2 の赤眼/長翅、セピア色眼/長翅、赤眼/痕跡翅、セピア色眼/痕跡翅の分離比はいくつになると推定されるか。次の①～⑤から選べ。

赤眼/長翅 : セピア色眼/長翅 : 赤眼/痕跡翅 : セピア色眼/痕跡翅 =

① 1 : 1 : 1 : 1

② 3 : 0 : 0 : 1

③ 2 : 1 : 1 : 0

④ 9 : 3 : 3 : 1

⑤ 1 : 3 : 3 : 9

問 7. 交配実験 2 と交配実験 3 の結果から、セピア色眼、痕跡翅、黒体色の遺伝子の遺伝形式は ①顕性遺伝 か ②潜性遺伝 か。

それぞれ解答欄に①または②の番号で答えよ。

問 8. 交配実験 2 と交配実験 3 の結果から、同一染色体上に存在する遺伝子があることが示唆される。その組み合わせは、次の①～④のどれか。

① セピア色眼と痕跡翅

② セピア色眼と黒体色

③ 黒体色と痕跡翅

④ セピア色眼と痕跡翅と黒体色

問 9. 前問の同一染色体上にある遺伝子の表現型は、メンデルの独立の法則にあてはまらない分離比を示した。考えられる理由を、15 字以内で述べよ。