

令和 5 年度
前期日程
理科問題

〔注意〕

1. 問題冊子及び解答用冊子は、試験開始の合図があるまで開いてはいけない。
2. 問題冊子は、物理、化学、生物の順序で1冊にまとめてある。

問題は $\left\{ \begin{array}{l} \text{物理} \quad 2 \text{ ページから } 16 \text{ ページ} \\ \text{化学} \quad 17 \text{ ページから } 27 \text{ ページ} \\ \text{生物} \quad 28 \text{ ページから } 43 \text{ ページ} \end{array} \right\}$ にある。

ページの脱落があれば直ちに申し出ること。

3. 解答用紙は、物理 3 枚、化学 5 枚、生物 4 枚が一緒に折り込まれている。受験する科目の解答用紙をミシン目に従って切り離すこと。
4. 受験番号は、受験する科目の解答用紙の受験番号欄（1 枚につき 2 か所）に 1 枚ずつ正確に記入すること。
5. 解答は、1 ページの「理科の解答についての注意」の指示に従い、解答用紙の指定されたところに記入すること。
6. 問題冊子の余白は、適宜下書きに使用してもよい。
7. 配付した解答用紙は持ち帰ってはいけない。
8. 問題冊子は持ち帰ること。

「理科の解答についての注意」

理学部志願者

- 数学科，化学科，生物科学科生物科学コースを志望する者は，物理，化学，生物の3科目のうちから2科目を選んで解答すること。
- 物理学科を志望する者は，物理を必須科目とし，そのほかに化学または生物のうちから1科目を選んで解答すること(計2科目)。
- 生物科学科生命理学コースを志望する者は，物理と化学の2科目を解答すること。

医学部医学科・医学部保健学科(放射線技術科学専攻・検査技術科学専攻)・歯学部・薬学部志願者

物理，化学，生物の3科目のうちから2科目を選んで解答すること。

医学部保健学科(看護学専攻)志願者

物理，化学，生物の3科目のうちから1科目を選んで解答すること。

工学部・基礎工学部志願者

物理を必須科目とし，そのほかに化学または生物のうちから1科目を選んで解答すること(計2科目)。

物理問題

(解答はすべて物理解答用紙に記入すること)

[1] 小球の運動や衝突について考える。地点 O に xy 平面の原点を、水平方向に x 軸を、鉛直上向きに y 軸をとり、小球の運動は xy 平面に限られるものとする。なお、小球の大きさは無視できるほど小さく、小球の回転は考えないものとし、空気抵抗も無視する。重力加速度の大きさは g であり、その向きは鉛直下向きである。

I. 質量 m の小球 A を投げた時の様子を観察する。図1のように、地点 O から仰角 θ [rad] の方向に速さ v_0 で小球を投げた。ただし、 $0 < v_0$ 、 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ とする。

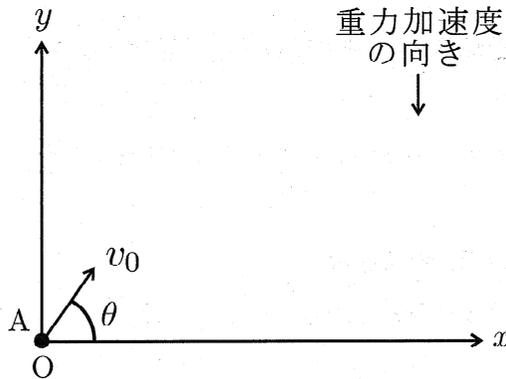


図 1

- 問 1 小球 A が達する最高点の高さを、 m 、 v_0 、 θ 、 g のうち必要なものを用いて表せ。
- 問 2 小球 A を投げた後、しばらくして小球 A は地面 ($y = 0$) に落下した。落下地点と地点 O の間の水平距離を、 m 、 v_0 、 θ 、 g のうち必要なものを用いて表せ。
- 問 3 初速度の大きさ v_0 を一定にしたままで、仰角 θ を変えて小球 A を投げる。地点 O から最も遠くに落下する場合の仰角 θ [rad] を求めよ。

問 4 落下した小球 A は地面に衝突してはね返り、地面との衝突を繰り返した。地面はなめらかな面で、小球 A と地面の衝突は非弾性衝突であり、反発係数を e とする。小球 A が地面に n 回目に衝突した地点と地点 O の間の水平距離を、 m, v_0, θ, g, e, n のうち必要なものを用いて表せ。

II. 図 2 のように、地点 O に xy 平面の原点を、水平方向に x 軸を、鉛直上向きに y 軸をとる。質量 M の小球 B は、地点 O で静止していた質量 m の小球 A に衝突する。衝突直前の小球 B の速度は $\vec{V}_0 = (V_0, 0)$ であったが、衝突直後に小球 A の速度は $\vec{v} = (v \cos \theta, v \sin \theta)$ となり、小球 B の速度は $\vec{V} = (V \cos \phi, -V \sin \phi)$ となったとする。ただし、 $0 < V_0, 0 < v, 0 < V$ とする。また、図 2 のように、 θ [rad] は \vec{v} と x 軸のなす角度であり、 ϕ [rad] は \vec{V} と x 軸のなす角度である。 $0 < \theta < \frac{\pi}{2}, 0 < \phi < \pi$ とする。なお、小球 A と小球 B の衝突は弾性衝突である。

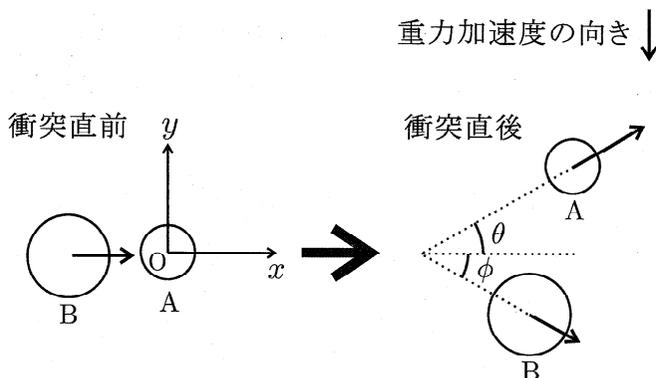


図 2

問 5 衝突によってはね上げられた直後の小球 A の速さ v を m, M, V_0, θ のうち必要なものを用いて表せ。

問 6 小球 A がはね上げられた後、しばらくして小球 A は $y = 0$ まで落下した。落下地点と地点 O の間の水平距離 L を m, M, V_0, θ, g のうち必要なものを用いて表せ。

問 7 距離 L が最も大きくなる場合を考えたい。 $m, M, V_0, g, d, \Delta d$ のうち必要なものを用いて、以下の空欄に入るべき数式を解答欄に記せ。

$Z = L^2$ とおくと、 L の値が最大になる時に Z の値も最大となる。 $\cos^2\theta = d$ ($0 < \theta < \frac{\pi}{2}$) とおけば、十分に小さい d の変化である Δd に対して、 Z の変化 $\Delta Z = Z(d + \Delta d) - Z(d)$ は、 $(\Delta d)^n$ ($n > 1$) の項を無視すると、 (a) と書ける。 Z の値が最大となる場合、 d の変化 $\Delta d \neq 0$ に対して $\Delta Z = 0$ となるので、 L の値が最大になる $\cos\theta$ の値は (b) となる。

III. II. では、小球 A と小球 B を合わせた 2 物体の重心 G の位置は、時間とともに移動する。 II. の小球 A と小球 B の衝突を、重心 G とともに移動する観測者 P から観察する。なお、小球 A と小球 B の質量はそれぞれ m と M である。

問 8 観測者 P から見た小球 A と小球 B の運動を求めたい。 $m, M, V_0, \Delta t$ のうち必要なものを用いて、以下の空欄に入るべき数式を解答欄に記せ。

II. の座標系では、小球 A と小球 B の座標をそれぞれ (x_A, y_A) と (x_B, y_B) とすれば、2 物体の重心 G の座標は

$$(x_G, y_G) = \left(\frac{m x_A + M x_B}{m + M}, \frac{m y_A + M y_B}{m + M} \right)$$

と表される。衝突直前に小球 A は地点 O に静止しており、小球 B は水平方向 (x 軸の正の向き) に速さ V_0 を持っていたので、微小時間 Δt の間における重心 G の座標の変化量は $(\Delta x_G, \Delta y_G) = (\text{ (c) }, 0)$ と表される。ゆえに、重心 G の速度は $\left(\frac{\Delta x_G}{\Delta t}, \frac{\Delta y_G}{\Delta t} \right) = (\text{ (d) }, 0)$ となる。よって、衝突直前において、重心 G とともに移動する観測者 P から見た小球 A の速度は $(\text{ (e) }, 0)$ であり、小球 B の速度は $(\text{ (f) }, 0)$ となる。

問 9 衝突直後に、観測者 P から見た小球 A の速度は $\vec{v}' = (v' \cos\theta', v' \sin\theta')$ となり、小球 B の速度は $\vec{V}' = (V' \cos\phi', -V' \sin\phi')$ となった。 θ' [rad] は \vec{v}' と x 軸のなす角度であり、 ϕ' [rad] は \vec{V}' と x 軸のなす角度である。ただし、 $0 < \theta' < \pi$, $0 < \phi' < \pi$ とする。衝突直後における小球 A の速さ v' 、小球 B の速さ V' 、 $\sin(\theta' + \phi')$ を m, M, V_0 のうち必要なものを用いて表せ。

問 10 小球 B の質量 M が小球 A の質量 m より大きい場合、II. の座標系で見た小球 B の角度 ϕ には上限がある。 m, M, V_0 のうち必要なものを用いて、 $\tan\phi$ の上限値を表せ。

〔2〕 図1のように、真空中に半径がそれぞれ R_A および R_B の一巻きの円形コイル A および B が同一面内に中心をそろえて置かれており、コイル A には平行板コンデンサーと起電力 V の直流電源が、コイル B には抵抗値 r の抵抗が、それぞれ接続されている。コンデンサーは、辺の長さが a , b の長方形の極板 A および極板 B で構成され、極板間の距離は d であり、極板間は真空である。ここで、 d は a, b に比べて十分小さく、極板端部の電界の効果は無視できるとする。また、コイル A および B の電気抵抗も無視できるとする。ここでは、コンデンサー、直流電源、抵抗のサイズはコイルの半径に比べて十分小さく、コイルは円形コイルとみなして磁界を計算してよい。以下では、真空の誘電率および透磁率をそれぞれ ϵ_0 および μ_0 とする。

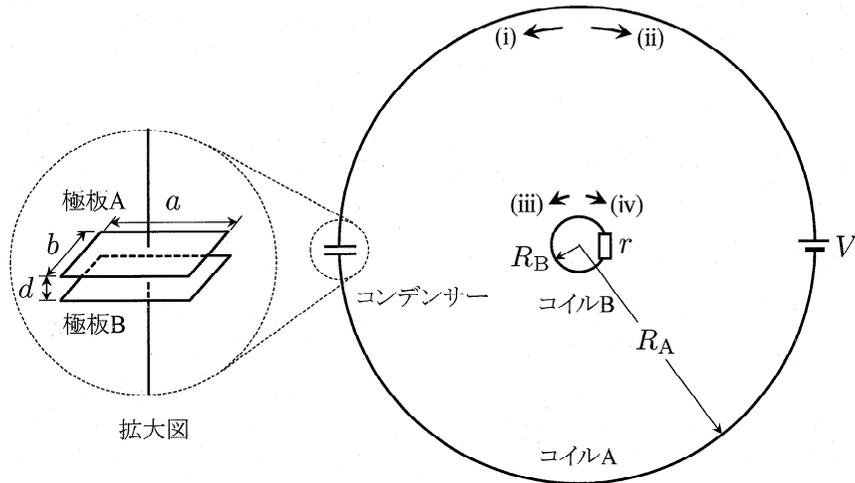


図 1

I. いま、図1中のコンデンサーの極板内に、図2のように、辺の長さが a , b , d の直方体の誘電体を挿入する。誘電体の挿入長を図2に示すように s とする。誘電体を $s = 0$ の地点から、初速度が0、加速度の大きさが $p (> 0)$ で等加速度運動させるとコイル B に電流が流れた。誘電体の挿入長が $s = 0$ のときの時刻を $t = 0$ とする。以下の問に答えよ。ここで、コイル A の自己誘導による逆起電力は小さく無視できるとし、また、コイル B に流れる電流が作る磁界も弱く無視できるとする。なお、誘電体の比誘電率は $\epsilon_r (> 1)$ であり、誘電体端部の電界の効果は無視できるとする。

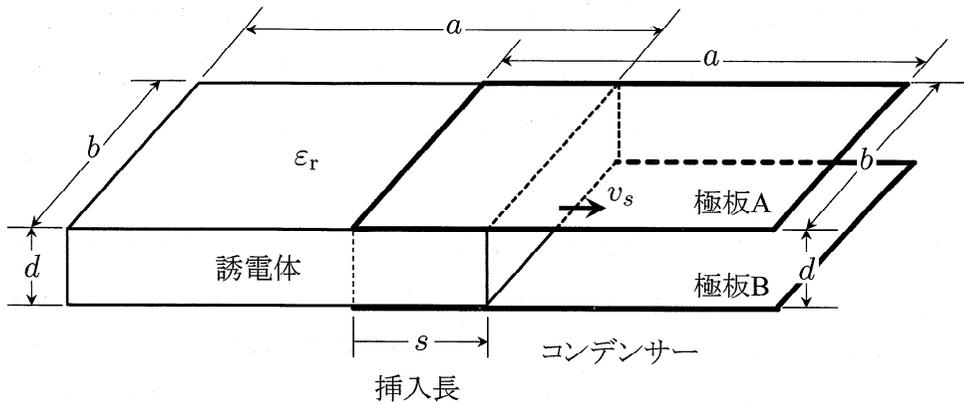


図 2

- 問 1 誘電体の挿入長が s ($0 \leq s < a$) のときにコンデンサーに蓄えられている電気量を $a, b, d, s, \epsilon_r, \epsilon_0, V$ のうち必要なものを用いて表せ。
- 問 2 いま、時刻 t から微小時間 Δt の間に、誘電体の挿入長が s から $s + v_s \Delta t$ に変化したと近似して、この間にコイル A に流れる電流の大きさ I_A を $v_s, a, b, d, \epsilon_r, \epsilon_0, V$ のうち必要なものを用いて表せ。ここで、 $v_s (> 0)$ は挿入長が s のときの誘電体の速度である。また、その電流の向きを図 1 中の記号 (i) または (ii) により示せ。
- 問 3 時刻 t において電流 I_A がコイルの中心につくる磁界の強さを R_A, I_A, μ_0 のうち必要なものを用いて表せ。またその向きは、図 1 において (ア) 紙面表から裏の向き、あるいは (イ) 紙面裏から表の向き、のうちのどちらであるか。(ア) または (イ) の記号で示せ。
- 問 4 時刻 t から微小時間 Δt の間に誘電体の速度が v_s から $v_s + p \Delta t$ になったとして、この間にコイル B に流れる電流 I_B の大きさを $r, R_A, R_B, a, b, d, p, \epsilon_r, \epsilon_0, \mu_0, V$ のうち必要なものを用いて表せ。また、その電流の向きを図 1 中の記号 (iii) または (iv) により示せ。ただし、コイル B の半径 R_B はコイル A の半径 R_A に比べて十分小さく、コイル B の内部の磁界は一様で中心の値に等しいとせよ。

問 5 誘電体を挿入し始めた直後にコイル B に流れる電流の大きさを I_{B0} として、誘電体の挿入長が 0 から a まで変化する間に抵抗 r で消費されるエネルギーを r, I_{B0}, a, p のうち必要なものを用いて表せ。

II. 次に、コンデンサーに挿入した誘電体を取り除いたうえで、図 1 のコンデンサーに対して図 3 のように、極板 A の辺 a_1a_2 と極板 B の辺 b_1b_2 の位置を固定したまま辺 a_3a_4 と辺 b_3b_4 を上下に等しく広げる変形を与えたところ、コイル B に電流が流れた。辺 a_3a_4 と辺 b_3b_4 の距離が $d + \Delta d$ である瞬間について、次の問いに答えよ。ここで、 $\Delta d (\neq 0)$ は d に比べて十分小さいとする。以下では、図 3 のように頂点 a_1 と頂点 b_1 の中点を原点とし、 x 軸を頂点 a_4 と頂点 b_4 の中点の方向にとる。また、 Δd は小さいため、極板間距離を広げた後も極板の x 方向の長さは a で近似できるものとする。

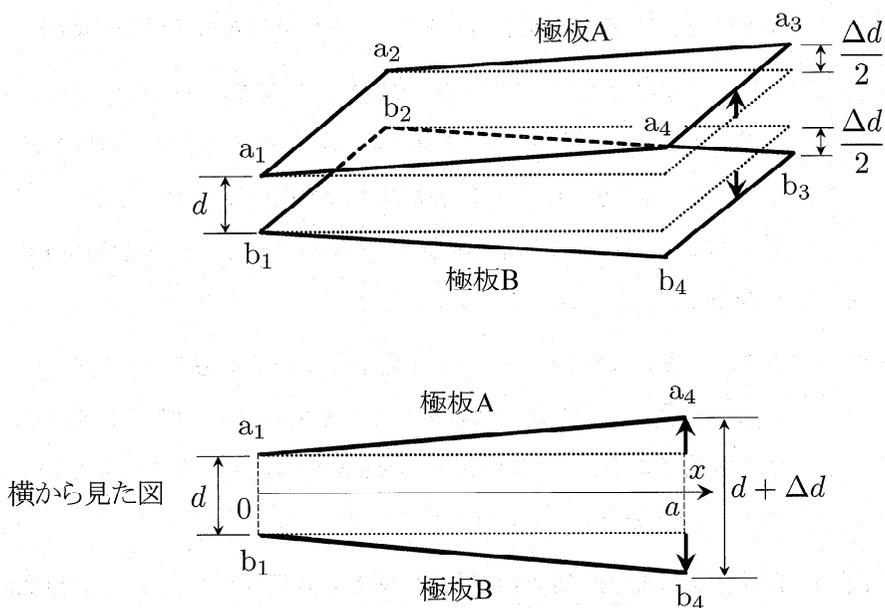


図 3

問 6 このときの、このコンデンサーの電気容量を、図4のように極板を n 個の微小区間に等分割してできた、電気容量が C_k の微小平行板コンデンサーを合成した電気容量であると考えよう。ただし k は 1 から n までの整数である。次の文章の空欄に入れるべき数式を解答欄に記せ。

極板 AB 間の距離は図5に示す x の 1 次関数で表される。原点側から数えて k 番目の微小平行板コンデンサーの極板間の距離が $x = \frac{a}{n}(k-1)$ における極板 AB 間の距離であるとすれば、この極板間の距離は d , Δd , n , k を用いて (a) と表される。したがって、微小平行板コンデンサーの合成容量は a , b , d , Δd , n , k , ε_0 を用いて $\sum_{k=1}^n$ (b) と表される。いま、分割数 n が十分大きいときの微小平行板コンデンサーの合成容量は、次の近似を適用すれば a , b , d , Δd , ε_0 を用いて (c) と表される。

n が十分大きく、かつ δ が 1 に比べて十分小さい場合:

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{1 + \delta \frac{k-1}{n}} \approx 1 - \frac{\delta}{2}$$

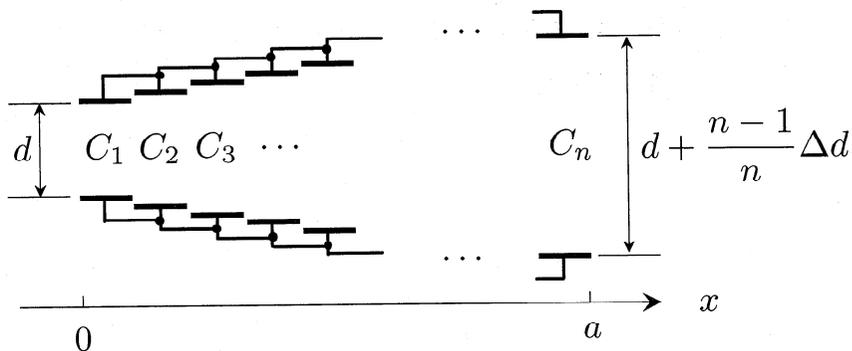


図 4

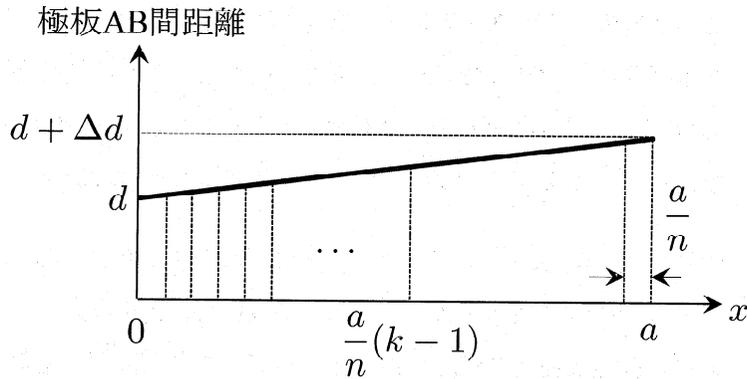


図 5

- 問 7 図 1 のように直流電源とコンデンサーはつながっている。位置 x における極板 A 上の単位面積あたりの電気量を $x, a, d, \Delta d, \epsilon_0, V$ のうち必要なものを用いて表せ。
- 問 8 横軸を x 、縦軸を極板 A 上の単位面積あたりの電気量 σ として、変形前と変形後の σ の分布をグラフに描くとどのようなになるか。図 6 中の (あ) から (こ) の中から最も適切なものを選べ。ただし、図中の σ_0 は極板を広げる前の極板 A 上の単位面積あたりの電気量である。
- 問 9 辺 a_3a_4 と辺 b_3b_4 を上下に等しく広げる際、それぞれの辺の初速度を 0、加速度の大きさを $\frac{q}{2}$ で一定とする。極板を広げ始めた直後にコイル B に流れる電流の大きさを $r, R_A, R_B, a, b, d, q, \epsilon_0, \mu_0, V$ のうち必要なものを用いて表せ。

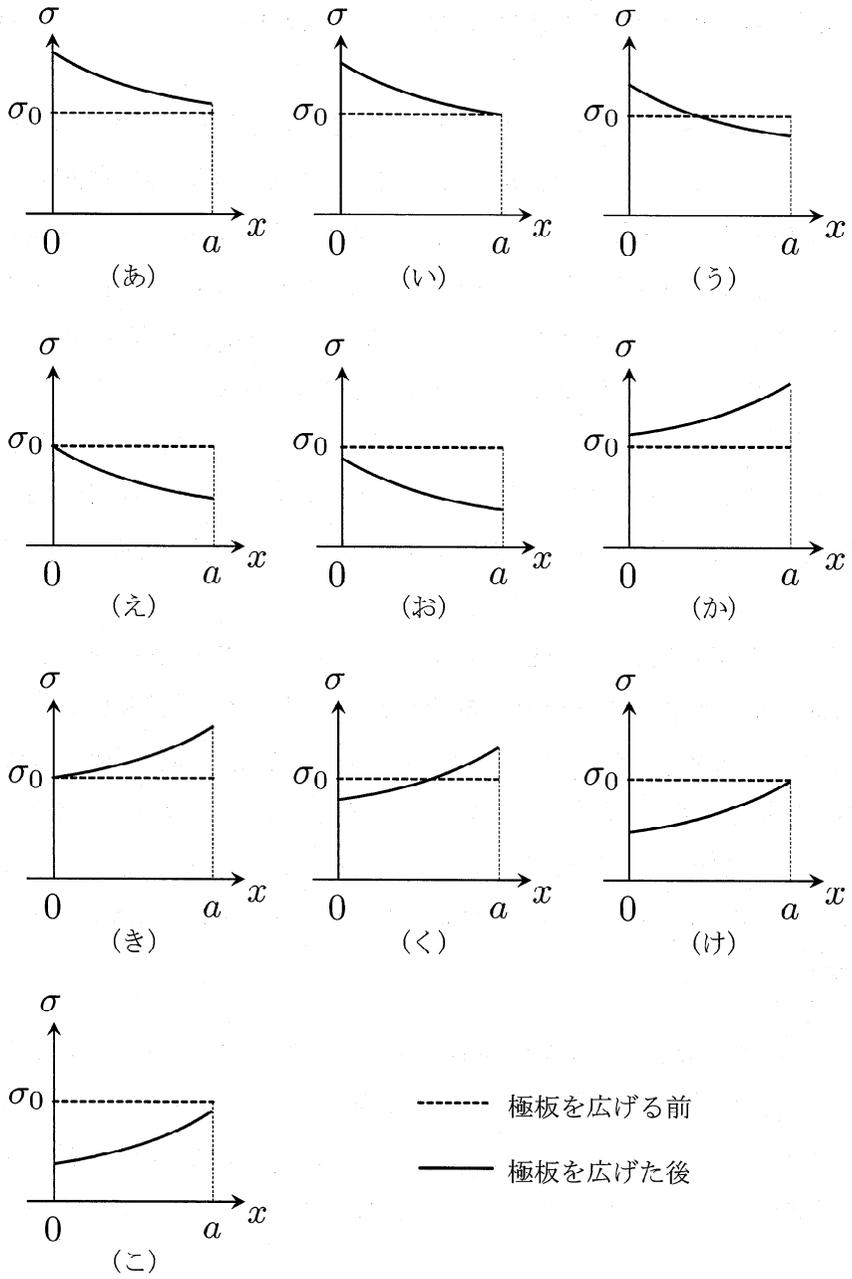


図 6

[3] 以下のAとBの両方の問題に解答せよ。なおAとBは独立した内容の問題である。

A. 図1のように熱を通さない物質でできた2つの風船をつなぎ合わせた気球がある。一方の風船には単原子分子理想気体である気体A, もう一方の風船には二原子分子理想気体である気体Bが入っている。風船はそれぞれ密閉されていて気体A, Bは混合しない。風船の材質は力を伴わずに伸び縮みできるので, 風船内の気体の圧力は大気圧と常に一致しているとする。2つの風船の接続部には遠隔制御できるヒーター, 冷却器, 断熱板がある。断熱板を開いているときは, 気体A, Bは互いに熱を交換できる。断熱板を開いた状態でヒーターや冷却器を用いると, 両気体の温度を一致させたまま温度をゆっくりと変化させることができる。気球を構成する物質のうち, 気体A, B以外の部分の質量, 体積, 熱容量は考慮しなくてよい。温度はすべて絶対温度とする。

気体A, Bの物質質量, モル質量, 定積モル比熱, 定圧モル比熱を表1に示す。 R は気体定数, モル質量は1モルあたりの質量である。大気はモル質量が M の理想気体であるとする。地面からの高度が高くなるほど大気の圧力や密度は小さくなるが, 気体A, Bの状態を計算する場合には気球の中心高度に対応する大気圧を気体の圧力として用い, 各風船内で圧力や密度が一様であるとしてよい。風の影響はないものとする。地上の大気の圧力は p_0 , 温度は T_0 であった。重力加速度の大きさを g とし, 高度によらず一定とする。

I. 最初, 図1のように気球は地面に着地しており, 気体A, Bの温度は大気温度 T_0 と同じであった。断熱板を開いた状態でヒーターを用いて気体A, Bを同時に温めたところ, 温度が T_1 になったときに気球が地面を離れて浮き始めた。以下の間に $n, M, M_A, M_B, p_0, T_0, R, g$ のうち必要なものを用いて答えよ。

問1 気球が浮き始めたとき, 気球に働いている単位体積あたりの浮力の大きさを求めよ。

問2 T_1 を求めよ。

問3 温度が T_0 から T_1 になるまでにヒーターが気体A, Bに与えた熱量の合計を求めよ。

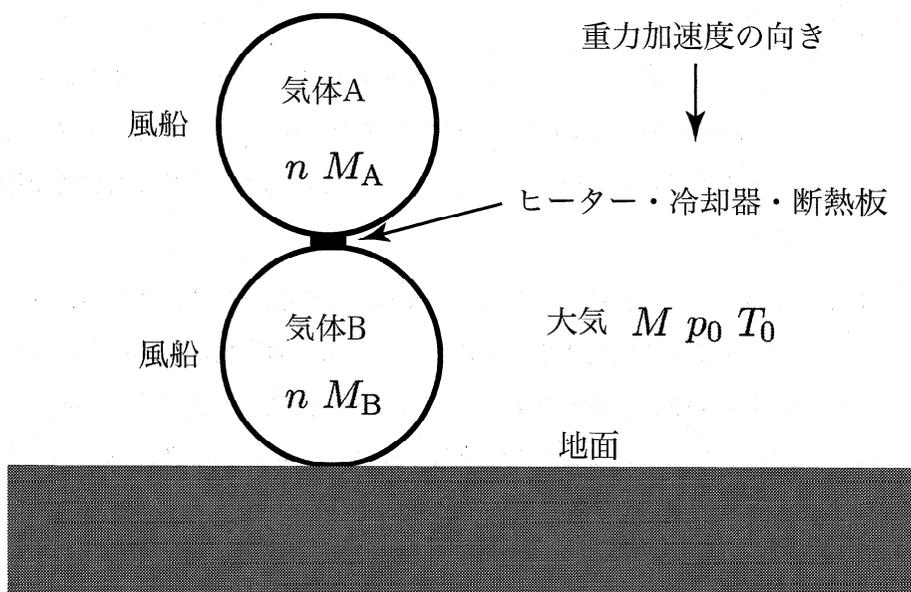


図 1

表 1 風船内の気体に関する量

気体	物質質量	モル質量	定積モル比熱	定圧モル比熱
気体 A (単原子分子理想気体)	n	M_A	$\frac{3}{2}R$	$\frac{5}{2}R$
気体 B (二原子分子理想気体)	n	M_B	$\frac{5}{2}R$	$\frac{7}{2}R$

II. つぎに、気球が上昇していかないようにひもで地面に固定した。気体 A, B の温度が T_2 となるまで温めた時点でヒーターを停止し、断熱板を閉じて気体 A, B の熱交換を遮断した。気球からひもを外したところ、気球は上空にゆっくりと上がっていき、ある高度で静止した。静止した気球の中心高度の大気圧は地上の大気圧の a 倍であった。 a の大きさの範囲は $0 < a < 1$ である。上空で静止したときの気体 A の温度を T_A 、気体 B の温度を T_B とする。

問 4 T_A と T_B を n , M , M_A , M_B , a , p_0 , T_2 , R , g のうち必要なものを用いて表せ。なお、気体 A, B の圧力変化は十分ゆっくりであるので、理想気体の断熱膨張過程では圧力 (p) と体積 (V) が「 $pV^\gamma = \text{一定}$ 」の関係を満たすことを使用してよい。ここで γ は定圧モル比熱を定積モル比熱で割った値である。

問 5 つづいて、上空で静止している気球の断熱板を開き、気体 A, B の温度が一致するまで熱交換を進めたところ、気球の高度が変わった。冷却器で両気体を冷やして温度を T_3 にすると、断熱板を開く前と同じ中心高度に戻って静止した。 T_3 を n , M , M_A , M_B , a , p_0 , T_A , T_B , R , g のうち必要なものを用いて表せ。ただし、 T_2 を用いないこと。

B. 一様で流れがない大気中を速さ V で伝わる音を考える。音は大気中に静止した音源から、等方的に球面波として発せられる。観測者と音源の大きさは無視できるとし、音の伝わり方は音源により乱されないとする。図 2 の点 S で音源が振動数 f_0 の音を発している。この音の振動数を、観測者が点 S から距離 d だけ離れた点 O を中心とする半径 r ($> d$) の円軌道上で、図 2 のように反時計回りに角速度 ω で等速円運動しながら観測する。このとき観測者が観測する音の振動数は、観測者と音源を結ぶ直線方向の速度成分を用いて求めることができる。観測者の位置を点 P 、 $\angle POS$ の角度を θ とする。観測者が、時刻 $t = 0$ に $\theta = 0$ の点を通過してから、この円を一周する間について以下の問に答えよ。音源からの音は $t = 0$ で既に観測者に届いているとする。観測者の速さは音速より十分遅いとする。なお、観測者の加速度は十分小さいとし、音の振動数を計算する際は、その時点での観測者の速度を一定として計算せよ。また、角度の単位はラジアンとする。

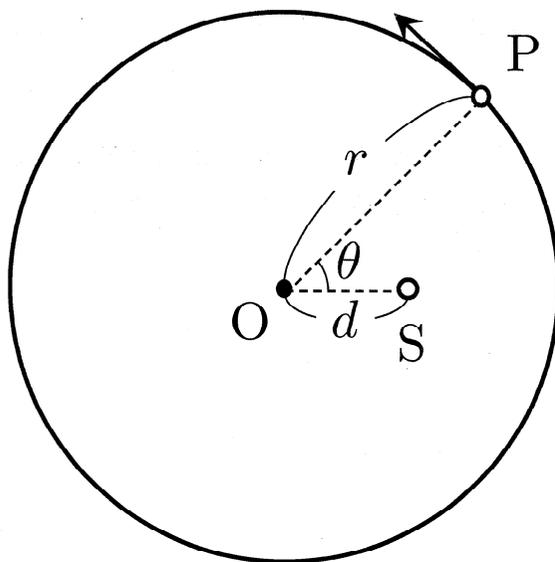


図 2

問 6 観測者が $t = 0$ に f_0 の振動数を観測したのち、ふたたび f_0 の振動数を観測する最初の時刻を、 V , f_0 , d , ω , r のうち必要なものを用いて表せ。

問 7 観測者が観測する音の振動数を求めるには、観測者の速度の SP 方向 (S から P に向う方向) の成分 v_{SP} が必要である。角度 θ の位置における観測者の v_{SP} を V , f_0 , d , ω , r , θ のうち必要なものを用いて表せ。

ヒント： v_{SP} は観測者の速度ベクトル \vec{v} と、SP 方向を表すベクトル \vec{SP} とその大きさ $|\vec{SP}|$ を用いて、 $\vec{v} \cdot \frac{\vec{SP}}{|\vec{SP}|}$ のように内積を使って求めることができる。

問 8 問 7 の v_{SP} の大きさを計算すると、 $\cos \theta = \frac{d}{r}$ となる θ において最大となることがわかった。このことを用い、次の文章の と に入るべき数式を、 V , f_0 , d , ω , r のうち必要なものを用いて解答欄に記せ。

観測者が最小の振動数を観測したときの v_{SP} の大きさは、 と表される。したがって、観測者が観測する最小の振動数は と表される。

問 9 観測者が観測する最大の振動数を、 V , f_0 , d , ω , r のうち必要なものを用いて表せ。

問 10 $r = 2d$ であるとき、観測者が最小の振動数を観測してから次に最大の振動数を観測するまでにかかる時間を、 V , f_0 , d , ω のうち必要なものを用いて表せ。

化学問題

(解答はすべて化学解答用紙に記入すること)

【注意】

1. 必要があれば次の数値を用いよ。

Hの原子量 = 1.0

Cの原子量 = 12

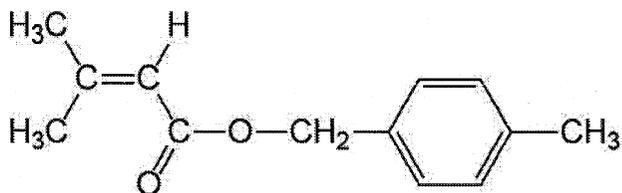
Nの原子量 = 14

Oの原子量 = 16

Brの原子量 = 80

2. 特にことわらない限り、構造式は下の例にならって示すこと。

(例)



[1] 以下の文章を読み、問1～問4に答えよ。なお、[X]は分子もしくはイオンXのモル濃度を表す。

濃度 C [mol/L] の酢酸水溶液中で $\text{CH}_3\text{COOH} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+$ の平衡がなりたっているとき、水のイオン積 $K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-]$ と酢酸の電離定数

$$K_a = \frac{[\text{H}^+][\text{CH}_3\text{COO}^-]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]}$$

を用いて、 $[\text{H}^+]$ を表すことができる。陽イオンと陰イオンの電荷のつりあいの条件が

$$[\text{H}^+] = \boxed{\text{ア}} + \boxed{\text{イ}}$$

を満たすこと、および、濃度 C が

$$C = \boxed{\text{ウ}} + \boxed{\text{エ}}$$

で表されることを考慮すれば、 $[\text{H}^+]$ 以外の分子やイオンの濃度を消去することにより、 $[\text{H}^+]$ に関する三次方程式

$$[\text{H}^+]^3 + (\boxed{\text{オ}})[\text{H}^+]^2 + (\boxed{\text{カ}})[\text{H}^+] + (\boxed{\text{キ}}) = 0$$

が得られる。この方程式の解 $[\text{H}^+]$ を用い、酢酸の電離定数 $K_a = 1.6 \times 10^{-5}$ mol/L、水のイオン積 $K_w = 1.0 \times 10^{-14}$ (mol/L)²として、酢酸水溶液の pH の濃度変化曲線の一部を図1に描いた。

なお、濃度 C が高いときには、水の電離の影響を無視できるので $K_w = 0$ の近似が許され、三次方程式を二次方程式

$$[\text{H}^+]^2 + K_a[\text{H}^+] - K_a C = 0$$

へと変形することができる。この方程式の解 $[\text{H}^+]$ は、高濃度の極限において $\sqrt{K_a C}$ で近似できる。

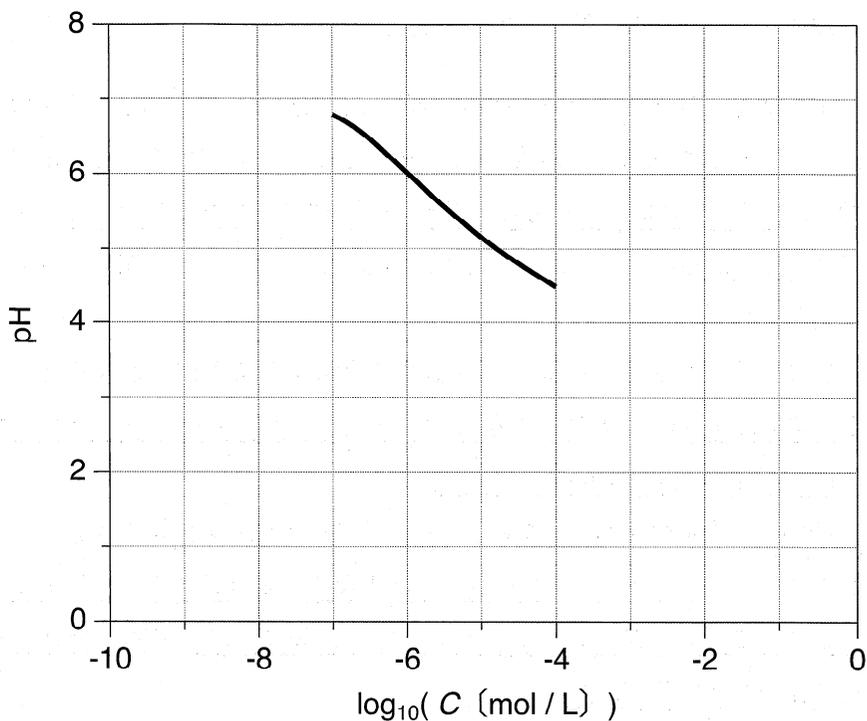


図 1

問 1 空欄 ~ にあてはまる分子やイオンのモル濃度を答えよ。

問 2 空欄 ~ を K_a , K_w , ならびに C を用いて表せ。

問 3 酢酸水溶液の pH は、濃度 C が低い領域ではほぼ一定値をとる。その理由を記せ。さらに、 $C \leq 10^{-8}$ mol/L の範囲における pH の濃度変化を、解答用紙の図 1 に実線で書き込め。

問 4 酢酸水溶液の pH は、濃度 C が高い極限で $\log_{10}(C[\text{mol/L}])$ の一次関数となる。まず、 $C = 1.0$ mol/L の酢酸水溶液の pH を計算し、小数点以下 1 桁まで答えよ。次に、 $C \geq 10^{-3}$ mol/L の範囲で pH の濃度変化を、解答用紙の図 1 に実線で書き込め。必要があれば $\log_{10} 2 = 0.3$ の近似値を用いよ。

〔2〕 以下の文章を読み、問1～問6に答えよ。

滑らかなピストンがついた体積が可変の容器(図1)に、同じ物質量のメタノールとヘリウムを封入し、温度 $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、圧力を $1.0 \times 10^5\text{ Pa}$ とした。まず、温度を $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ に保ったまま、内容を $1.4 \times 10^5\text{ Pa}$ に加圧した。このとき、気体の体積は 7.0 L となった。以下のすべての操作は、 $1.4 \times 10^5\text{ Pa}$ の圧力一定の条件のもとで行った。

次に、内容を $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の一定速度で昇温するように加熱すると、昇温開始から時間 $\Delta t[\text{min}]$ が経過した時点で、メタノールはすべて気体となった。さらに同じ昇温速度で $\Delta t[\text{min}]$ 加熱した。

続いて、内容物が漏出しないように、固体の触媒と乾燥剤を入れ、 $201\text{ }^{\circ}\text{C}$ に加熱すると、メタノールの 80% が、以下の反応によりジメチルエーテルと水に変化した。ここで、ジメチルエーテルはすべて気体の状態で存在したが、水は乾燥剤によりすべて取り除かれた。



なお、すべての気体は理想気体とみなすことができ、ヘリウムは常に気体で存在し、液相への溶解は無視できる。また、メタノールの蒸気圧曲線を図2に示す。

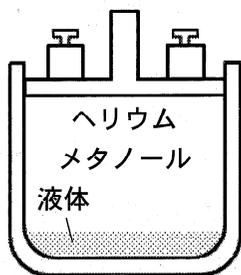


図1

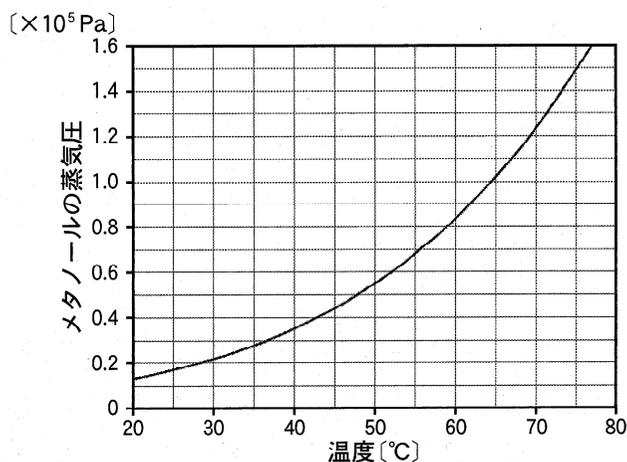


図2

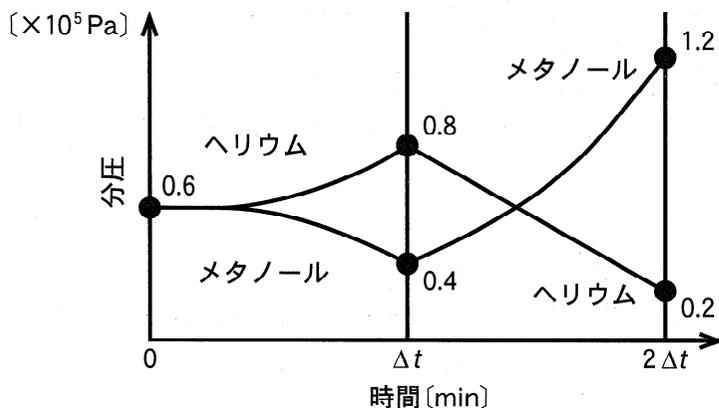
問 1 下線部①の操作のとき、加圧後のヘリウムの分圧は加圧前のヘリウムの分圧の何倍になるか、有効数字 2 桁で答えよ。

問 2 下線部①の操作後、容器内のメタノールの全物質量に対する気体のメタノールの物質量の割合を有効数字 1 桁で求めよ。

問 3 下線部②の時間 Δt (min) を有効数字 1 桁で求めよ。解答欄には計算過程も記せ。

問 4 下線部②について、以下の例にならって、メタノールとヘリウムの分圧の時間変化を解答欄に略図で記せ。ただし、時間 0, Δt , $2\Delta t$ のときの各成分の分圧の値を記入すること。

(例)



問 5 下線部③の反応後のジメチルエーテルの分圧を有効数字 2 桁で求めよ。解答欄には計算過程も記せ。

問 6 下線部③の反応後の気体の体積を有効数字 2 桁で求めよ。解答欄には計算過程も記せ。

〔3〕 以下の文章を読み、問1～問10に答えよ。

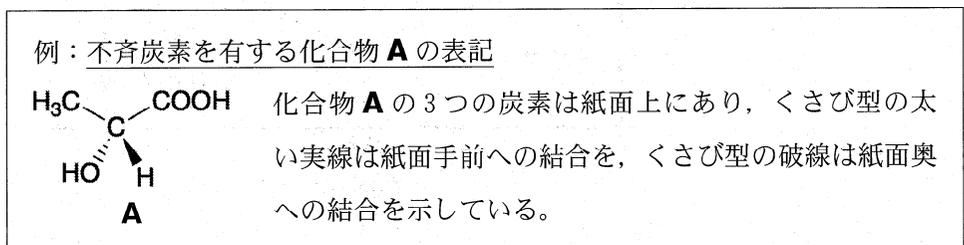
石油精製により得られるナフサの熱分解や改質等で製造される低分子量のアルケンや芳香族化合物は、工業的に重要な多くの化学製品の合成原料であり、それらの反応を知ることは重要である。

問1 下線部①のナフサとは何かを、灯油や軽油との物理的性質の違いについて言及しつつ簡潔に説明せよ。

アルケンの反応

環状構造を含まない炭素数4以下の炭化水素のうちで、過剰の臭素の存在下において、臭素の付加により分子量が160だけ増加するアルケンがすべてここにある。これらのアルケンを用いて、硫酸を触媒にして水と反応させて生成物を得た。得られた生成物はすべてナトリウムと反応し、水素とナトリウムアルコキッドが生じた。また、硫酸触媒による水との反応における主生成物に着目した場合、いくつかのアルケンから同じ生成物が得られた。

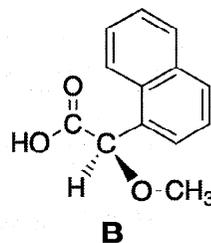
なお、不斉炭素原子を有する化合物の立体構造は以下の例にならって表現する。



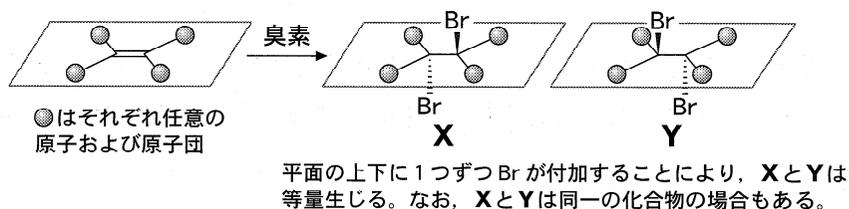
問2 下線部④の生成物は、鏡像異性体の等量混合物である。この混合物を構成するそれぞれの異性体の構造式を、上の枠内に示す例にならって、くさび型の線を用いて書け。

問3 下線部④の生成物を与えたすべてのアルケンの構造式を書け。

問 4 下線部④の生成物は鏡像異性体の混合物である。鏡像異性体は、融点・密度やふつうの化学反応性などの性質が同じで、通常の操作では分離することができない。しかし、下線部④の生成物を右に示す化合物 **B** を用いてエステルに変換すると、通常の操作で分離することができた。その理由を示せ。



問 5 下線部②の反応は、下図に示すような形式で進行することが知られている。すなわち、アルケンのつくる平面の上下に1つずつ Br が付加した形の生成物を与える(下図参照)。



下線部④の生成物を与えたすべてのアルケン为原料として、それぞれのアルケンに対して下線部②に示す臭素の付加反応を行ったところ、単一の化合物を与える場合と、鏡像異性体の混合物を与える場合があった。単一の化合物を与えた原料のアルケンの構造式を書け。

芳香族化合物の反応

ベンゼンは FeBr_3 の存在下において臭素とともに加熱すると臭素化されるが、アルケンの臭素化とは異なり付加反応は進行せず、異なる形式で反応が進行する⑤。また、ベンゼンに濃硝酸と濃硫酸を混合して反応させるとニトロベンゼンが生成する。ニトロベンゼンにスズ(Sn)と濃塩酸を加えて反応させると、アニリン塩酸塩が生じる⑥。

フェノールは工業的には、ベンゼンと下線部②のアルケンの1つを酸触媒で反応させ、さらに酸化反応等を経て合成される。ベンゼンと異なり、フェノールは FeBr_3 を加えなくとも臭素との反応が速く進み、無色針状結晶が沈殿する⑧。ま

た、フェノールは硫酸を加えなくとも室温で速やかに希硝酸と反応しニトロ化された生成物を与え、混酸(濃硝酸：濃硫酸 = 1 : 3 体積比)と反応させるとピクリン酸(2,4,6-トリニトロフェノール)が生じる。

問 6 下線部⑤に関して、ベンゼンにおいて進行する臭素化は、 反応という反応形式に分類される。 に当てはまる漢字 2 字を答えよ。またベンゼンでは、アルケンとは異なり付加反応が進行しない理由を説明せよ。

問 7 下線部⑥の反応と下線部③の反応は、どちらも酸化還元反応に分類することができる。その観点から、下線部⑥の反応に関わる化合物のうちで、下線部③の反応のナトリウムアルコキシドに対応する物質の分子式を書け。

問 8 下線部⑦の反応では、ベンゼンの酸化物であるフェノールと同時に、アルケンの酸化物も生成する。原料のアルケンとその酸化生成物の構造式を書け。

問 9 下線部⑧、⑨のように、フェノールはベンゼンとは反応性が異なる。以下に示すその反応性に関する説明文の空欄 ア ~ ウ には、「正」または「負」の語句が当てはまる。解答欄の適切な方を丸で囲め。

説明文：

フェノールのヒドロキシ基は、酸素の電気陰性度を考慮するとベンゼン環に ア 電荷をもたらす。反対に、酸素上の非共有電子対の効果によりベンゼン環に イ 電荷をもたらす働きが知られている。フェノールの反応性においては、後者の効果が大きい。一方、ベンゼンにはこのヒドロキシ基の効果が無く反応性が低いため、反応を進行させるためには、臭素や硝酸の反応性を高める必要がある。FeBr₃ と硫酸には、ベンゼンの臭素化やニトロ化において、臭素や硝酸に ウ 電荷を帯びさせる作用がある。

問10 フェノール 1.88 g を原料とした下線部⑩の反応において、得られたピクリン酸の物質量は、原料のフェノールの物質量に対して 55 % であった。得られたピクリン酸の質量を有効数字 2 桁で答えよ。

〔4〕 以下の文章を読み、問1～問8に答えよ。構造式を書く場合には、図1と図2の構造式にならうこと(炭素原子に番号を付けなくてよい)。

グルコースやフルクトースは単糖類である。水溶液中でグルコースは、六員環の環状構造の α -グルコース、 β -グルコースと鎖状構造のグルコースの3種類の異性体が平衡状態で存在する(図1)。ガラス容器中でアンモニア性硝酸銀水溶液①にグルコースを加えて温めると銀鏡が生じる(銀鏡反応)。

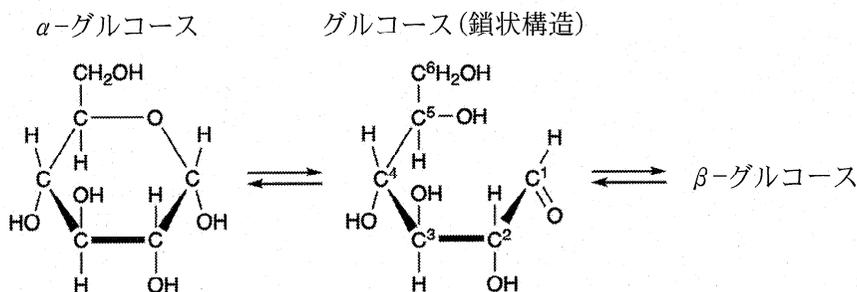


図1 水溶液中のグルコース分子の構造変換(鎖状構造にのみ炭素原子の番号が示されている)

フルクトースはグルコースの構造異性体であり、水溶液中では六員環の環状構造、鎖状構造のほか、五員環の環状構造も存在する(図2)。

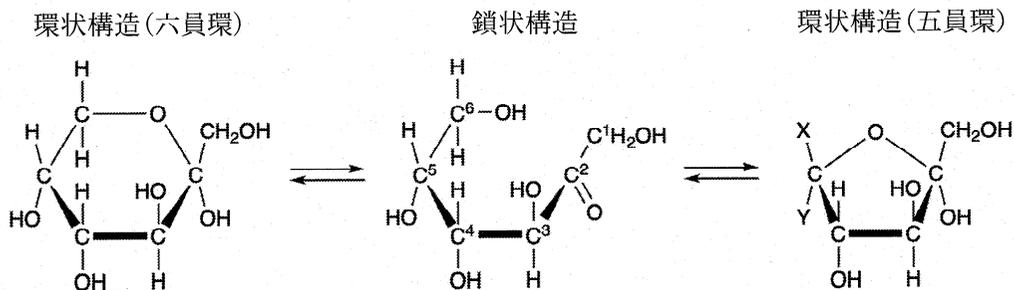


図2 水溶液中のフルクトース分子の構造変換(環状構造は α 型のみが示されているが、 β 型も存在する)

二糖類にはマルトースやスクロースなどがある。マルトースには α 型と β 型の2つの立体異性体があり、その1つである α -マルトースは、2分子の α -グルコースが、一方の分子のC¹に結合したヒドロキシ基(-OH)と、もう一方の分子のC⁴に結合した-OHとの間で縮合した構造をもつ。スクロースは、 α -グルコースのC¹に結合した-OHと、五員環構造の β -フルクトースのC²に結合した-OHとの間で縮合したものである。

多糖類のデンプンにはアミロースとアミロペクチンという2種類の成分があり、いずれも α -グルコース分子が繰り返し縮合した高分子化合物である。アミロースは α -グルコースのC^aとC^bに結合した-OH ②どうしの間で縮合した構造であり、アミロペクチンはアミロースと同じ結合をもつほか、C^cとC^dに結合した-OHの間でも縮合した枝分かれ構造を含んでいる。③

問 1 β -グルコースの構造式を書け。

問 2 下線部①の操作によりグルコースから生じる生成物の構造式を書け。

問 3 図2のXとYにあてはまる原子または原子団を示せ。

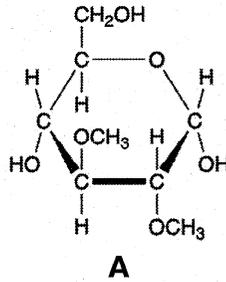
問 4 α -マルトースの構造式を書け。

問 5 解答用紙の図に原子または原子団を記入してスクロースの構造式を完成させよ。ただし、図2のXとYをそのまま用いること。

問 6 下線部①の実験において、グルコースをフルクトース、マルトース、スクロースのそれぞれにかえて同じ操作を行ったとき、グルコース以外に銀鏡反応を示す化合物の名称をすべて書け。

問 7 下線部②と③のa~dにあてはまる炭素原子の番号を書け。ただし、 $a \leq b$, $c \leq d$ とすること。

問 8 アミロペクチン 3.89 g のすべての $-OH$ を $-OCH_3$ に変化させてから酸で完全に加水分解すると、0.208 g の化合物 **A** (α 型の構造を示すが、 β 型も存在する) やそれとほぼ同じ物質量の化合物 **B** を含む混合物が得られた。このアミロペクチンは、グルコース単位が平均して何個あたりに 1 個の枝分かれをもつかを、計算過程を示して整数で答えよ。また、化合物 **B** の構造式を書け。



生 物 問 題

(解答はすべて生物解答用紙に記入すること)

【注意】

字数制限のある解答においては、ひらがな、カタカナ、漢字、アルファベット、数字、句読点等の符号等、すべての文字を一つのマスに一つ記入すること。

〔1〕 以下の文章を読み、問1～問6に答えよ。

動物の有性生殖では雌でつくられる卵と雄でつくられる精子の接合によって新しい個体が生じる。精巣では体細胞分裂により増殖している **ア** 細胞の一部が減数分裂を開始して、複数の過程を経たのちに精子となる。精子では特徴的な構造が認められ、中心体から伸びる **イ** と、核をはさんだ反対側に **ウ** が形成される。卵巣では体細胞分裂により増殖している **エ** 細胞が減数分裂に移行して、第一分裂の完了とともに二次 **オ** と第一極体が生じ、これに続く第二分裂により卵が形成される。受精の際には精子が卵の周囲にある **カ** に接着して **ウ** 反応をおこす。その後、精子が卵の細胞膜に到達すると卵の細胞質内に蓄えられた **キ** が放出されて、他の精子の侵入を防ぐ。

卵や精子がつくられる過程でおこる減数分裂では、体細胞分裂とは異なる様々な現象が認められる。第一分裂では、相同染色体が並行に並んで対合した **ク** が形成される。対合した相同染色体間では乗換えにより染色体の一部が入れ替わる組換えという現象が認められる。同じ染色体にある複数の遺伝子が行動をとともにすることを **ケ** という。 **ケ** のパターンは組換えにより変化する。様々な遺伝子の組み合わせをもつ染色体は減数分裂の第一分裂および第二分裂により配偶子に分配される。このように多様な遺伝子の組み合わせをもつ配偶子が生じる。

問1 文中の空欄 **ア** ～ **ケ** に適切な語句を入れよ。

問2 下線部①について、減数分裂を開始してから完了するまでに生じる細胞の大きさと数について、雌雄間で異なる点を60字以内で述べよ。

問 3 下線部②について、受精の際にほかの精子の侵入を防ぐためにおきる卵の反応を、下記の語句をすべて用いて 50 字以内で述べよ。

使用する語句：卵黄膜，受精膜

問 4 下線部③の現象を調べる目的で以下の交雑実験を行った。

交雑実験：同一の染色体上に 3 組の対立遺伝子 A と a, B と b, C と c が存在する。A と a は α , B と b は β , C と c は γ の独立した形質を制御している。A, B, C はそれぞれ a, b, c に対して優性である。いずれの形質も優性の個体 X と、いずれの形質も劣性の個体 Y を交雑した F_1 個体の形質はすべて優性であった。この F_1 個体をいずれの形質も劣性の個体と交雑して生じた 3000 個体の表現型は表 1 のようになった。

表 1

α の形質	β の形質	γ の形質	個体数
優 性	優 性	優 性	1146
優 性	優 性	劣 性	3
優 性	劣 性	優 性	258
劣 性	優 性	優 性	68
優 性	劣 性	劣 性	80
劣 性	優 性	劣 性	238
劣 性	劣 性	優 性	5
劣 性	劣 性	劣 性	1202

このときの各遺伝子間での組換え価(%)を求めよ。組換え価は小数点以下を切り捨てることとする。また、これにもとづき予想される染色体上の各遺伝子の配列順序と相対的距離を解答欄の線上に示せ。

問 5 下線部④について，精子形成過程の減数分裂における細胞一個あたりの DNA 量の推移を解答欄に示せ。

問 6 下線部⑤について， $2n = 8$ の染色体をもち全ての遺伝子座の遺伝子がヘテロ接合体である生物の場合，相同染色体間に組換えがおこらず，正常に染色体が分配されるとすると，つくられる配偶子における染色体の組み合わせは何通りあるか，答えよ。

〔2〕 以下の文章を読み、問1～問7に答えよ。

体内環境の恒常性を維持するしくみとして、非自己の物質(異物)を認識して排除する免疫がある。

ヒトの体は、様々な防御機構によって多種多様な異物の侵入に対応している。生体内への異物の侵入は、予測できないことが多い。このため、免疫のしくみとして、不特定の異物に対してはたらく① 先天性免疫(自然免疫)がある。しかしながら、寄生虫や微生物には自然免疫を巧妙に回避しながら侵入するものも多く、そのような異物に対しては、② 獲得免疫(適応免疫)がはたらく。また免疫は、微生物など外部から侵入した病原体の排除だけでなく、③ 移植された組織やがん化した細胞の排除にも関与する。

問1 下線部①に関連する以下の文章を読み、空欄 ～ に適切な語句を入れよ。

最初にはたらく防御機構として物理的・化学的な防御機構がある。たとえば、気管内部では が常に分泌され、 が外部からの異物を捕捉し、 の運動によって喉の方向へと異物を押し出している。咳やくしゃみも異物の排除に役立っている。

このような防御機構をうまくすり抜けて生体内に侵入した微生物に対しては、血液中の好中球やマクロファージが細胞表面の化学物質の違いから識別して、それらを取り込んで消化することで取り除く。これを という。

問2 下線部②について、体液性免疫と細胞性免疫の違いを、下記の語句をすべて用いて100字以内で述べよ。

使用する語句：B細胞、T細胞、抗原、抗体、毒素、ウイルス

問 3 下線部③について、T細胞は、がん細胞の表面に発現する抗原情報を提示したタンパク質を認識して反応する。この細胞上の抗原情報を提示するタンパク質の名称を答えよ。

免疫によるがんの排除機能を利用したがん治療の1つにキメラ抗原受容体発現T細胞(CAR注-T細胞)を用いた治療がある(図1)。CARは、がん細胞の表面にある特徴的な抗原を認識する抗体の抗原結合部位とT細胞受容体の細胞内シグナル伝達部位との融合体である。CAR-T細胞はCARを発現しており、がん細胞の表面の抗原に結合すると、CARを介して活性化・増殖し、がん細胞を傷害することでがんを排除する。CAR-T細胞を患者に投与する治療法は、一時的な治療効果だけでなく、持続的な治療効果も確認されている。

注) CAR, chimeric antigen receptor

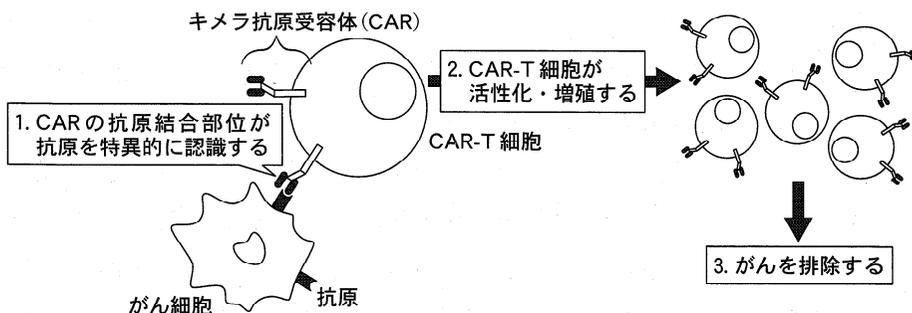


図 1

問 4 下線部④に関連する以下の文章を読み、空欄 , に適切な語句を入れよ。

抗体は、ポリペプチド4本(H鎖2本とL鎖2本)が結合し、Y字型になっている。H鎖とL鎖の先端部分は、抗体ごとにアミノ酸配列が異なっており、 部と呼ばれる。 部の立体構造の違いによって、抗体は抗原と特異的に結合する。 部以外の部分は 部と呼ばれ、どの抗体でもアミノ酸配列がほとんど同じである。CARの抗原結合部位は、H鎖とL鎖の 部から構成されている。

CAR-T細胞によるがん細胞の傷害によりがんの大きさが小さくなる効果を確認するため、マウス由来のCAR-T細胞を作製し、以下の実験を実施した。なお、実験に用いたマウスの系統は全て同じである。

【実験1】

抗原Aを認識するCARを有するCAR-T細胞(抗A-CAR-T細胞)を、抗原Aを発現するマウスのがん細胞(抗原A発現がん細胞)とともに培養したところ、多くの抗原A発現がん細胞が傷害された。

【実験2】

抗A-CAR-T細胞を、抗原Bを発現するマウスのがん細胞(抗原B発現がん細胞)とともに培養したところ、抗原B発現がん細胞はほとんど傷害されなかった。

【実験3】

抗原A発現がんを有するマウスを用意し、0日目に抗A-CAR-T細胞またはCARを発現していないT細胞を投与し、がんの大きさを測定した(図2)。何も投与しない場合(△印)およびCARを発現していないT細胞を投与した場合(◆印)、がんの大きさは徐々に大きくなった。一方、抗A-CAR-T細胞を投与した場合(○印)、投与後9日目において、血液中に抗A-CAR-T細胞が多数確認され、その後がんの大きさは徐々に小さくなり、投与後21日目にはがんは消失した。

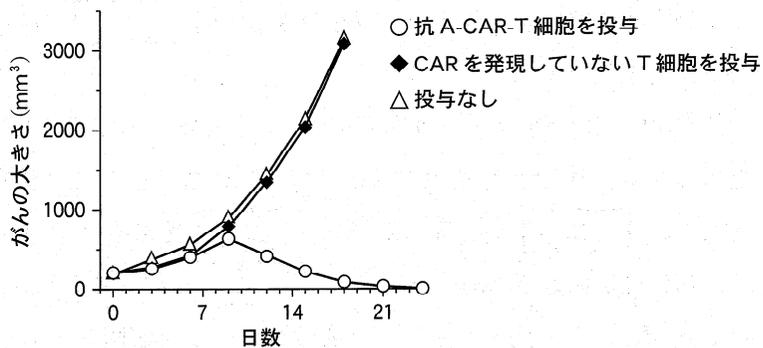


図2

【実験4】

実験3と同様に、抗原A発現がんを有するマウスに抗A-CAR-T細胞を投与し、がんの消失から半年後にマウスの血液を解析したところ、ごくわずかではあるが、抗A-CAR-T細胞が確認された。

問5 実験3において、抗A-CAR-T細胞の投与後早期にはがんの大きさが小さくならず、9日目以降にがんの大きさが小さくなったことについて、考える理由を80字以内で述べよ。

問6 下線部⑤について、実験4の結果を踏まえ、再びがん細胞が増殖しないようにするためには抗A-CAR-T細胞が免疫学的にどのような細胞になることが必要か、答えよ。

問7 実際のCAR-T細胞を用いた治療では、治療を受ける患者自身のT細胞を用いてCAR-T細胞を作製する。その理由を65字以内で述べよ。

〔3〕 以下の文章【A】～【C】を読み、問1～問5に答えよ。

【A】

細胞内には様々な酵素が存在し、それぞれに特異的な化学反応を触媒している。酵素の作用を受ける物質を基質といい、酵素が特定の基質だけに作用する性質を という。酵素は基質と結合して酵素-基質複合体を形成し、触媒作用により化学反応を促進する。細胞内の物質は安定したものが多く、常温常圧の条件では変化しにくい。化学反応が進行するためには反応しやすい状態(活性化状態)になる必要がある。活性化状態になる際に必要とされるエネルギーを活性化エネルギーといい、酵素はこのエネルギーを させることで、反応を起しやすくなるはたらきがある。

基質と構造が似た物質の中には酵素の触媒部位に結合して、触媒作用を阻害するものがある。こうした阻害物質が存在すると、基質と触媒部位を奪い合うことになり、酵素反応を阻害する。こうした阻害を 阻害という。酵素の触媒部位とは異なる部位に結合して酵素の働きを妨げる物質も存在し、このような物質による阻害を 阻害という。また、酵素の触媒部位とは異なる部位に物質が結合することで立体構造が変化し、触媒活性が変化する酵素を 酵素という。

問1 文中の空欄 ～ に適切な語句を入れよ。

【B】

酵素Eの触媒部位に基質Sが結合して酵素-基質複合体ESとなり、生成物Pが生成される反応を考える。この反応を次の反応式で表すことにする。



酵素Eの濃度が一定のときに、基質濃度を変えて反応速度を計測してグラフを書くと、図1のような曲線が得られる。基質濃度が高いほど反応速度が速くなり、やがて反応速度は最大値(v_{max})になる。この酵素が単位時間あたりに生成するPの量、すなわち酵素の反応速度(v)は次式で表せる。

$$v = \frac{v_{\max} \cdot [S]}{K_m + [S]} \quad (\text{式 1})$$

ここで、 $[S]$ は基質Sの濃度、 K_m はミカエリス定数と呼ばれる定数である。 v_{\max} はこの酵素の最大反応速度である。酵素は、 K_m の値が小さいほど酵素-基質複合体を形成しやすく、 v_{\max} の値が大きいほど単位時間あたりに多くの生成物を生成する。酵素の種類によって K_m や v_{\max} の値が異なるので、これらの値を実験によって決定することは、酵素のはたらきを理解するうえで重要である。式1から、 v が v_{\max} の半分になるのは、基質濃度 $[S]$ が のときである。式1を変形して、 $\alpha =$, $\beta =$ とおくと、

$$\frac{1}{v} = \alpha \frac{1}{[S]} + \beta \quad (\text{式 2})$$

と表される。式2から、反応速度の逆数 $\frac{1}{v}$ を基質濃度の逆数 $\frac{1}{[S]}$ に対してグラフを書くと、図2のように直線になる。この直線と横軸の交点は , 縦軸との交点は となるため、 K_m と v_{\max} の値を交点から決定できる。

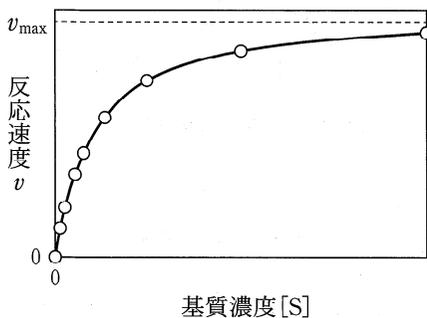


図 1

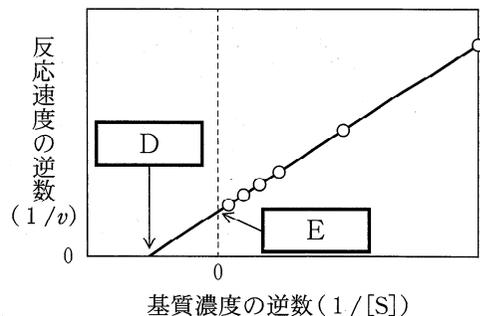


図 2

問 2 文中と図2中の ~ を K_m , v_{\max} のうち必要なものを用いてそれぞれ表せ。

【C】

著作権処理中のため、公開できません。

図3Aの曲線の立ち上がり(基質濃度の低濃度領域)はS字状になっている。こうしたS字状の反応は、形式的には、酵素Eに対してn個の基質分子Sが同時に結合して酵素-基質複合体 ES_n を形成し、n個の生成物Pが生成されれば説明できる。反応は次のように表せる。



この場合の反応速度 v は次の式で表すことができる。

$$v = \frac{v_{\max} \cdot [S]^n}{K_m^n + [S]^n} \quad (\text{式3})$$

$n = 1$ の時には、式 3 は式 1 と同じになる。式 3 を変形して両辺の対数をとると、

$$\log\left(\frac{v}{v_{\max} - v}\right) = n \log [S] - n \log K_m \quad (\text{式 4})$$

となる。図 3 A のデータを式 4 に従ってグラフに書くと図 3 B に示した直線になり、この直線から K_m や n の値を決定することができる。 K_m の値は、式 4 の左辺の値が になる基質の濃度である。また、 n の値はこの直線の から得られる。

問 3 文中の空欄 , に適切な語句を入れよ。

問 4 下線部①で述べた、 K_m と n の値を決定する方法について , に適切な値または語句を入れよ。また、CTP がいない条件での K_m の値を図 3 B から読み取って整数で答えよ。

問 5 CTP の代わりにアデノシン三リン酸 (ATP) (2 mM) を加えて ATC アーゼの酵素活性を計測すると、図 3 B に 印で示された直線が得られた。このように、ATC アーゼの酵素活性は反応液に ATP や CTP が共存することによって変化する。ATC アーゼは 酵素であり、触媒部位とは異なる部位 (調節部位) に ATP や CTP が結合することで、立体構造が変化すると考えられる。

反応液に ATP が共存する場合と CTP が共存する場合とで、ATC アーゼの触媒部位と基質 (アスパラギン酸) との相互作用にはどのような違いが生じるか、下記の語句をすべて用いて 50 字以内で説明せよ。

使用する語句：酵素-基質複合体, ATP, CTP

〔4〕 以下の文章を読み、問1～問5に答えよ。

PCR法は、試料中のわずかなDNAを増幅して検出するのに有用である。鋳型(いがた)となるDNA、増幅させたい領域の各末端と相補的なプライマーのペア、アデニン(A)、グアニン(G)、シトシン(C)、チミン(T)を塩基として含む4種類のデオキシリボヌクレオチド(以下、4種類のヌクレオチドとする)、DNAポリメラーゼを試験管内で混合し、2本鎖DNAを1本鎖DNAに解離させる変性過程、プライマーを1本鎖DNAに結合させるアニーリング過程、プライマーに続くヌクレオチド鎖を合成して2本鎖DNAとする^(a)伸長過程を1サイクルとした反応を繰り返すことで、目的の長さのDNA断片を大量に得ることができる。PCR法を用いて以下の実験1、実験2を行った。

【実験1】

大腸菌は約460万塩基対からなるひとつの環状2本鎖DNAをゲノムとして持つ。既知量の大腸菌ゲノムDNAを鋳型とし、1000塩基対からなる領域XをPCR法を用いて増幅させた。まず、領域Xのそれぞれの末端に相補的な各20ヌクレオチドの長さを持つプライマー①、プライマー②を図1のように設計した。次に、表1に示す量の大腸菌ゲノムDNA、プライマー①、プライマー②、4種類のヌクレオチド、および反応に十分な量のDNAポリメラーゼを試験管内で混合し、表2に示す各過程を1サイクルとしたPCRを25サイクル行った。この時、各サイクル終了後に生じた1000塩基対の2本鎖DNA断片の量は図2のようになった。なお、反応に用いたDNAポリメラーゼは1分あたり1000ヌクレオチドを伸長させる能力を持ち、全てのサイクルが終了するまでこの活性を保っていた。また、各サイクルの反応は100%の効率で行われたものとする。各物質量の単位は表3に示した。

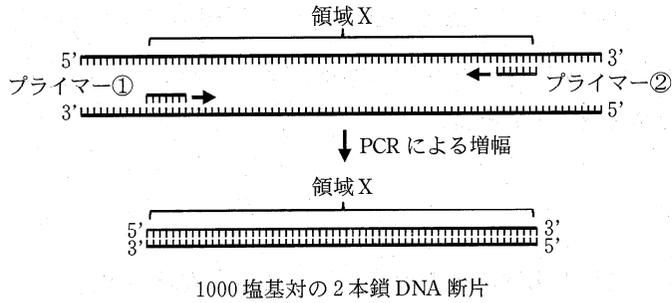


図1

	試験管内の量
大腸菌ゲノム DNA	1 fmol
プライマー①	0.8 nmol
プライマー②	0.8 nmol
4種類のヌクレオチド	各 1.6 μ mol

表1

	温度	時間
変性	95 $^{\circ}$ C	30 秒
アニーリング	60 $^{\circ}$ C	30 秒
伸長	72 $^{\circ}$ C	5 分

表2

μ mol	10^{-6} mol
nmol	10^{-9} mol
pmol	10^{-12} mol
fmol	10^{-15} mol

表3

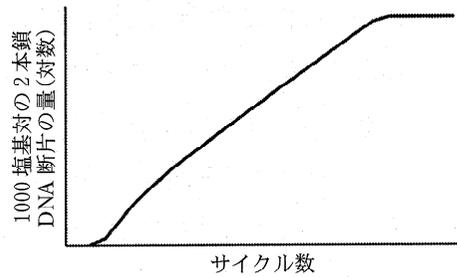


図2

問1 下線部(a)の伸長過程の反応は72 $^{\circ}$ Cで行うことが多い。PCRに用いるDNAポリメラーゼの特性を考慮し、その理由を25字以内で述べよ。

問2 1000塩基対の2本鎖DNA断片は3サイクル目に初めて現れた。この時点で、試験管内に存在する1000塩基対の2本鎖DNA断片は何fmolであるか。整数で答えよ。

問 3 3 サイクル終了時点で消費された4種類のヌクレオチドの総和は何 pmol であるか。各サイクルの伸長過程が5分であることを考慮し、小数点第二位を四捨五入して答えよ。

【実験 2】

実験 1 と同じ大腸菌による汚染が疑われる牛肉試料がある。この中に含まれる大腸菌由来の DNA を PCR 法により増幅し、検出することを試みた。この牛肉試料から抽出した全ての DNA を鋳型とし、実験 1 で設計したプライマー①および②を用いた PCR を行うことで DNA 試料(1)を得た。さらに、図 3 に示すように、領域 X 内の異なる配列に相補的な各 20 ヌクレオチドの長さを持つプライマー③、プライマー④を新たに設計し、プライマー①および③を用いた PCR を行うことで DNA 試料(2)を、プライマー②および④を用いた PCR を行うことで DNA 試料(3)を得た。PCR の反応条件は実験 1 と同様とした。DNA 試料(1)~(3) および実験 1 で得た DNA 試料(4)をアガロース電気泳動により分離して、観察したところ、図 4 の結果を得た。なお、検出されたバンドは全て DNA に由来し、バンドの太さは DNA の重量に比例するものとする。また、プライマー①~④の配列は全て異なるものとする。

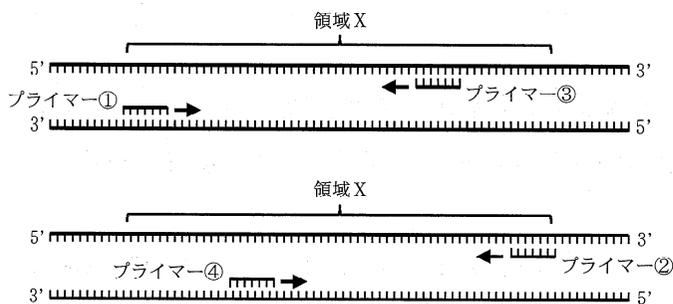


図 3

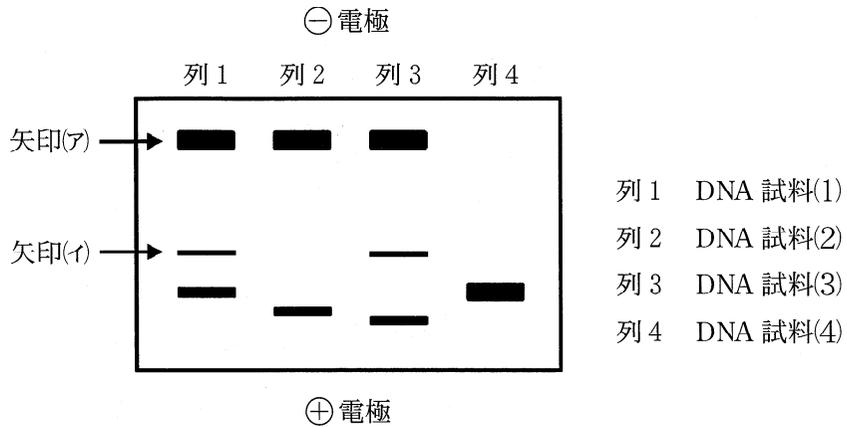


図 4

問 4 図 4 の矢印(ア)の位置のバンドは何に由来すると考えられるか。15 字以内で答えよ。

問 5 DNA 試料(1), (3)で見られた矢印(イ)の位置のバンドに含まれる DNA の塩基配列を比較したところ、全く同じであった。この矢印(イ)の位置のバンドが生じた理由を 60 字以内で答えよ。