

入学試験問題

理科



(配点 120 点)

平成 28 年 2 月 26 日 9 時 30 分—12 時

注意事項

- 1 試験開始の合図があるまで、この問題冊子を開いてはいけません。
- 2 この問題冊子は全部で 91 ページあります(本文は物理 4～21 ページ, 化学 22～45 ページ, 生物 46～71 ページ, 地学 72～91 ページ)。落丁, 乱丁または印刷不鮮明の箇所があったら, 手を挙げて監督者に知らせなさい。
- 3 解答には, 必ず黒色鉛筆(または黒色シャープペンシル)を使用しなさい。
- 4 解答は, 1 科目につき 1 枚の解答用紙を使用しなさい。
- 5 物理, 化学, 生物, 地学のうちから, あらかじめ届け出た 2 科目について解答しなさい。
- 6 解答用紙の指定欄に, 受験番号(表面 2 箇所, 裏面 1 箇所), 科類, 氏名を記入しなさい。指定欄以外にこれらを記入してはいけません。
- 7 解答は, 必ず解答用紙の指定された箇所に記入しなさい。
- 8 解答用紙表面上方の指定された()内に, その用紙で解答する科目名を記入しなさい。
- 9 解答用紙表面の上部にある切り取り欄のうち, その用紙で解答する科目の分のみ 1 箇所をミシン目に沿って正しく切り取りなさい。
- 10 解答用紙の解答欄に, 関係のない文字, 記号, 符号などを記入してはいけません。また, 解答用紙の欄外の余白には, 何も書いてはいけません。
- 11 この問題冊子の余白は, 草稿用に使用してもよいが, どのページも切り離してはいけません。
- 12 解答用紙は, 持ち帰ってはいけません。
- 13 試験終了後, 問題冊子は持ち帰りなさい。

物 理

第1問 図1—1のように大きさの無視できる小球1, 2が床から高さ h の位置に固定されている。二つの小球は鉛直方向に並んでおり, その間隔は十分に小さく無視できるものとする。鉛直上側の小球1の質量を m , 下側の小球2の質量を M とする。小球は鉛直方向にのみ運動し, 小球1, 2の衝突および小球2が床で跳ね返る際の反発係数は1とする。小球1, 2の速度は鉛直上向きを正とし, 重力加速度の大きさを g で表す。以下の設問に答えよ。

I 小球の固定を静かに外す。小球1, 2は同時に落下を始め, 小球2が床で跳ね返った直後, 小球1と小球2が衝突する。その後, 小球1は床から最大の高さ H まで上昇した。

- (1) 小球2が床で跳ね返る直前における小球1, 2の落下する速さを v とする。小球2が床で跳ね返った直後, 速度 $-v$ の小球1と, 速度 v の小球2が衝突する。小球1, 2の衝突直後における小球1の速度を v_1' , 小球2の速度を v_2' とするとき, $v_1' - v_2'$ を, v を用いて表せ。
- (2) v_1' と v_2' を, m, M, v を用いて表せ。また, M が m に比べて十分に大きいとき, H は h の何倍か, 数値で答えよ。

II 以下では $M = 3m$ とする。図1—2のように小球1, 2を質量の無視できる長さ l ($l < h$)の伸びない糸でつなぎ, 設問Iと同様に高さ h から落下させる。糸は, たるんだ状態では小球の運動に影響を与えない。床で跳ね返った小球2は, 小球1と衝突した後, 床に静止した。

- (1) 小球1が高さ l に達すると, 糸に張力が生じる。その直前の小球1の速度を v_1 , 小球1と小球2の重心の速度を V とする。 V を, v_1 を用いて表せ。
- (2) 糸に張力が生じると小球2が床から浮き上がり, その直後, 再び糸がたるむ。糸がたるんだ瞬間における小球1の速度 u_1 と小球2の速度 u_2 を, それぞれ v_1 を用いて表せ。ただし, 糸に張力が生じる前後で小球1, 2の力学的エネルギーの和は保存されるものとする。

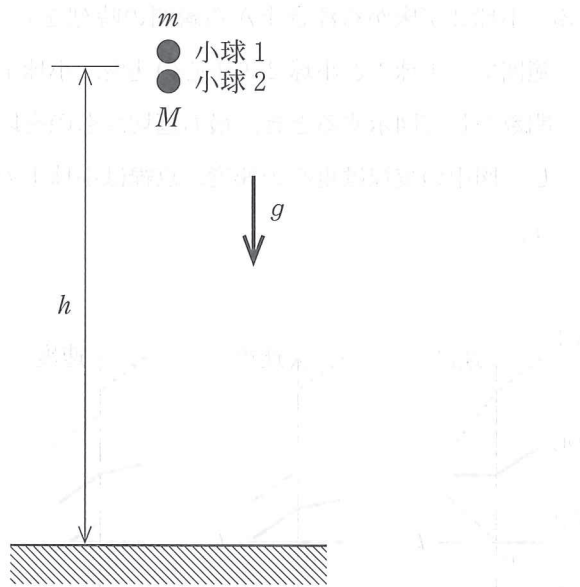


图 1—1

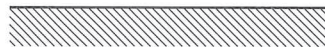
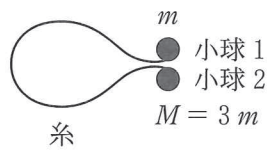
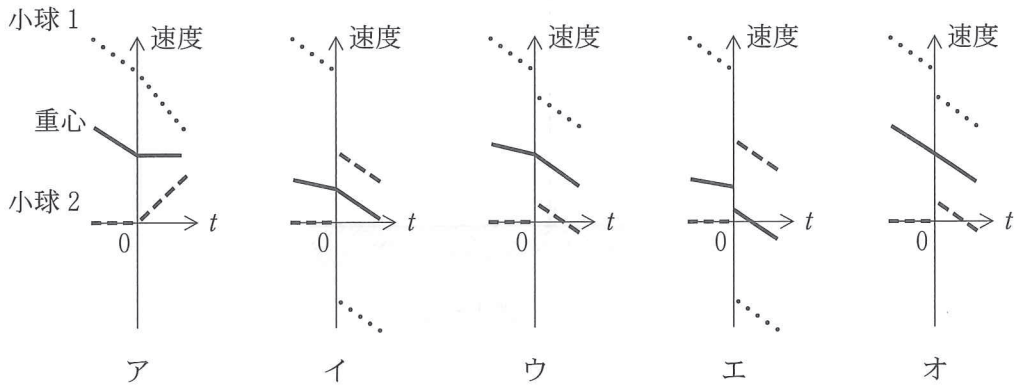


图 1—2

(3) 小球 2 が床から浮き上がる瞬間の時刻を $t = 0$ とする。 $|t|$ が十分に小さい範囲で、小球 1 と小球 2 の重心の速度、小球 1 の速度及び小球 2 の速度を t の関数として図示するとき、最も適切なものを以下のア～オから一つ選べ。ただし、図中の実線は重心の速度、点線は小球 1 の速度、破線は小球 2 の速度を表す。



Ⅲ 引き続き $M = 3m$ とする。小球 1, 2 を、質量の無視できる自然長 l ($l < h$) のゴムでつないで、設問Ⅱと同様に高さ h から落下させる。図 1—3 のように、ゴムを自然長より x ($x \geq 0$) だけ伸ばすと、大きさ kx の復元力が働くものとし、自然長から引き伸ばすために必要な仕事は $\frac{1}{2}kx^2$ で与えられる。また、ゴムは、たるんだ状態では復元力を及ぼさず、小球の運動に影響を与えない。

- (1) k がある値 k_c より大きければ、小球 1, 2 の衝突後に床に静止していた小球 2 は、やがてゴムの張力により床から浮き上がる。 $k > k_c$ のとき、小球 2 が浮き上がる瞬間におけるゴムの長さを $l + \Delta l$ とする。 Δl を m, g, k を用いて表せ。
- (2) 小球 2 が床から浮き上がる瞬間における小球 1 の速度 w を、 v_1, m, g, k を用いて表せ。ただし v_1 は設問Ⅱ(1)と同様、ゴムに復元力が生じる直前の小球 1 の速度とする。また、この結果より k_c を、 v_1, m, g を用いて表せ。
- (3) 小球 2 が床から浮き上がってから再びゴムがたるむまでの小球 1, 2 の運動は、重心の等加速度運動と、重心のまわりの単振動の合成となる。 k が十分に大きければ、小球 2 が浮き上がる瞬間におけるゴムの伸び Δl は無視してよい。このとき、小球 2 が床から浮き上がってからゴムがたるむまでの時間 T を、 m, k を用いて表せ。ただし、 k は十分に大きいため、ゴムがたるむ前に小球 2 が床に接触することはない。

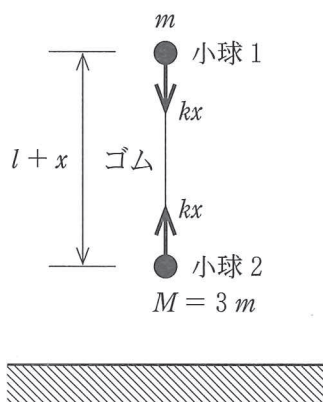


図 1—3

第2問 共振現象に関する以下の設問にそれぞれ答えよ。

I 交流電気回路における共振現象を考える。図2—1に示すように、抵抗値 R の抵抗器、自己インダクタンス L のコイル、電気容量 C のコンデンサーを角周波数 ω の交流電源に直列に接続した。時刻 t に回路を流れる電流を $I = I_0 \sin \omega t$ とするとき、交流電源の電圧は $V = V_0 \sin(\omega t + \delta)$ と表されるものとする。この回路について、以下の設問に答えよ。必要であれば三角関数の公式

$$a \sin \theta + b \cos \theta = \sqrt{a^2 + b^2} \sin(\theta + \alpha) \quad \text{ただし, } \tan \alpha = \frac{b}{a}$$

を用いてもよい。また、 $\overline{f(t)}$ は関数 $f(t)$ の時間平均を表し、 $\overline{\sin \omega t \cos \omega t} = 0$ 、 $\overline{\sin^2 \omega t} = \overline{\cos^2 \omega t} = \frac{1}{2}$ である。

- (1) 回路を流れる電流の振幅 I_0 および $\tan \delta$ を、 V_0 、 R 、 L 、 C 、 ω のうち必要なものを用いて表せ。
- (2) 交流電源が回路に供給する電力の時間平均 \overline{P} を、 V_0 、 R 、 L 、 C 、 ω を用いて表せ。ただし、 \overline{P} は抵抗器で消費される電力の時間平均に等しいことを用いてもよい。
- (3) 交流電源が回路に供給する電力の時間平均は、角周波数 ω がある値のときに最大値 P_0 となった。抵抗器の抵抗値 R を、 P_0 と V_0 を用いて表せ。
- (4) 交流電源の角周波数が ω_1 および ω_2 ($\omega_2 > \omega_1$) のときに、交流電源が回路に供給する電力の時間平均が設問 I (3) における P_0 の半分の値 $\frac{P_0}{2}$ となった。コイルの自己インダクタンス L を、 V_0 、 P_0 、 $\Delta\omega$ を用いて表せ。ただし、 $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ とする。

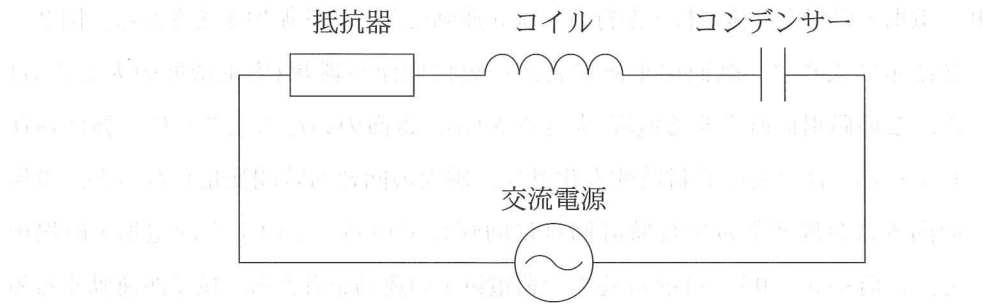


図 2—1

II 電場・磁場中の荷電粒子が行う二次元運動における共振現象を考える。図2—2に示すように、紙面に垂直で表から裏に向かう磁場(磁束密度の大きさ B)と、この磁場に直交する電場(大きさ E)が、紙面のいたるところに一様に存在している。 B および E は時間変化せず、磁場の向きも時間変化しないが、電場の向きは角周波数 ω で反時計回りに回転している。このような電場・磁場中で、電荷 q ($q > 0$)、質量 m をもつ荷電粒子の運動を考える。粒子が運動する領域には中性ガスが存在しており、粒子は、中性ガスによる抵抗力と、電場・磁場による力を受けて、角周波数 ω 、速さ v で、反時計回りに等速円運動を行っている。なお、中性ガスにより粒子が受ける抵抗力は速度と逆向きで、その大きさは kv である(係数 k は正の定数)。このとき、図2—2に示すように、荷電粒子の速度と回転する電場との間の角度 δ は時間変化しない。荷電粒子が放射する電磁波は無視できるものとして、以下の設問に答えよ。なお、本設問中で用いられている記号は、設問I中で用いられたものとは無関係である。

- (1) 荷電粒子の円運動の速度に平行な方向と垂直な方向のそれぞれについて、粒子に働く力の釣り合いの式を書け。
- (2) 荷電粒子の等速円運動の速さ v および $\tan \delta$ を、 m 、 q 、 E 、 B 、 k 、 ω のうち必要なものを用いて表せ。
- (3) 電場が荷電粒子に対して行う単位時間あたりの仕事(仕事率) P を、 m 、 q 、 E 、 B 、 k 、 ω を用いて表せ。
- (4) 電場の回転の角周波数が ω_0 のときに、 P が最大値 P_0 となった。さらに、電場の回転の角周波数が ω_1 および ω_2 ($\omega_2 > \omega_1$)のときには、 P が $\frac{P_0}{2}$ となった。荷電粒子の質量 m を、 ω_0 、 P_0 、 E 、 B 、 $\Delta\omega$ を用いて表せ。ただし、 $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ とする。

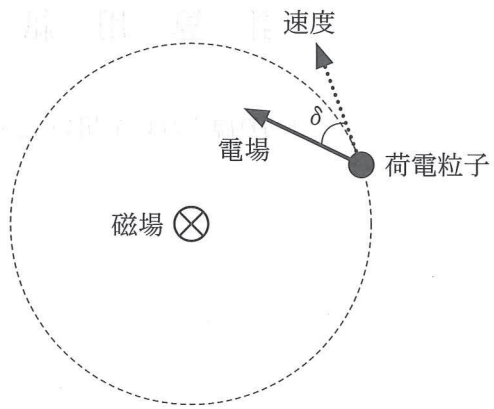


图 2—2

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)



計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

第3問 図3—1のように xy 平面に広がる水面が、 x 軸を境界として水深が異なる2つの領域に分かれている。領域A($y > 0$)における波の速さを V 、領域B($y < 0$)における波の速さを $\frac{V}{2}$ とする。簡単のため、波の反射と屈折は境界で起こり、反射する際に波の位相は変化しないと仮定して、以下の設問に答えよ。

I 図3—1のように、領域Aの座標 $(0, d)$ の点Pに波源を置く。波源は一定の周期で振動し、まわりの水面に同心円状の波を広げる。

- (1) 領域Aにおけるこの波の波長を $\frac{d}{2}$ とする。その波の振動数を、 V, d を用いて表せ。また、同じ波源が領域Bにある場合、そこから出る波の波長を求めよ。
- (2) 波長に比べて水深が十分に小さい場合、波の速さ v は重力加速度の大きさ g と水深 h を用いて $v = g^a h^b$ と表される。ここで a, b は定数である。両辺の単位を比較することにより a, b を求めよ。これを用いて領域Aの水深は領域Bの水深の何倍か求めよ。
- (3) 図3—2のように、波源Pから出た波が境界上の点Qで反射した後、座標 (x, y) の点Rに伝わる場合を考える。点Qの位置は反射の法則により定まる。このとき、距離 $\overline{PQ} + \overline{QR}$ を、 x, y, d を用いて表せ。
- (4) 直線 $y = d$ 上の座標 (x, d) の点で、波源から直接伝わる波と境界からの反射波が弱め合う条件を、 x, d と整数 n を用いて表せ。また、そのような点は直線 $y = d$ 上に何個あるか。
- (5) 領域Bにおいて波源と同じ位相を持つ波面のうち、原点Oから見て最も内側のものを考える。図3—3のように、その波面と x 軸($x > 0$)との交点をT、 y 軸との交点をSとし、点Tにおける屈折角を θ とする。点S, Tの座標と $\sin \theta$ を求めよ。

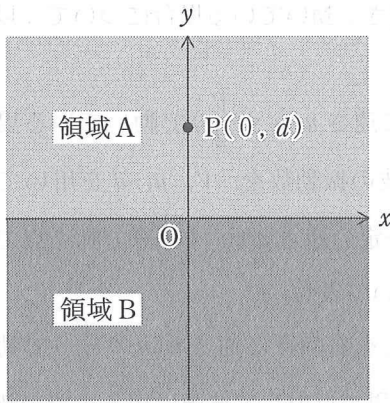


圖 3—1

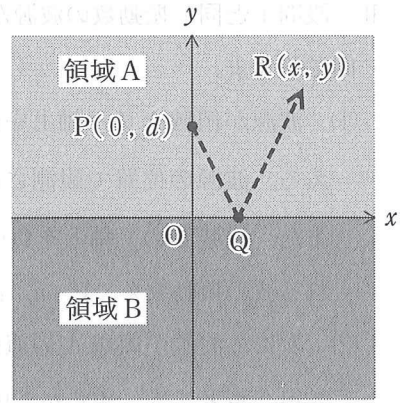


圖 3—2

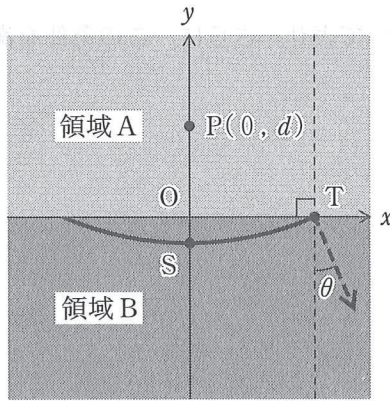


圖 3—3

II 設問 I と同じ振動数の波源が一定の速さで動いている場合について、以下の設問に答えよ。

- (1) 波源が領域 A の y 軸上を正の向きに速さ $u (u < \frac{V}{2})$ で動いている場合を考える。波源の位置で観測される反射波の振動数を、 V, u, d を用いて表せ。また、領域 B の y 軸上を負の向きに一定の速さ $w (w < \frac{V}{2})$ で動く点で観測される波の振動数を、 V, u, w, d を用いて表せ。
- (2) 次に、波源が領域 A の直線 $y = d$ 上を右向きに速さ $u (u < \frac{V}{2})$ で動いている場合を考える。波源から出た波が境界で反射して波源に戻るまでの時間を、 V, u, d を用いて表せ。
- (3) 設問 II(2)の設定で、波源における波と境界で反射して波源に戻った波が逆位相になる条件を、 u, V と整数 m を用いて表せ。さらに、この条件を満たす u をすべて求めよ。

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

化 学

第1問

次の I, II の各問に答えよ。必要があれば以下の値を用いよ。

元 素	H	C	N	O	Na	S
原子量	1.0	12.0	14.0	16.0	23.0	32.1

気体定数 $R = 8.3 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

I 次の文章を読み、問ア～エに答えよ。

イオン化合物の水への溶解度は、温度によって変化する。溶解度は、水 100 g に溶ける無水物の質量[g]で表される。溶解度と温度の関係を表した曲線は溶解度曲線とよばれる。図 1—1 は、化合物 A、化合物 B、硫酸ナトリウム (Na_2SO_4) の溶解度曲線である。化合物 A、B の溶解度は、温度上昇とともに単調に増加する。一方、硫酸ナトリウムの溶解度は、 32.4°C より低温では温度上昇とともに単調に増加するが、それより高温では単調に減少する。 32.4°C より低温において水溶液を濃縮すると十水和物 ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) が析出し、 32.4°C より高温では、水溶液を濃縮すると無水物 (Na_2SO_4) が析出する。

化合物 A のように、溶解度が大きく、かつその温度変化が大きな化合物では、溶解度の温度変化を利用して不純物を取り除き分離することができる。例えば、^①化合物 A 70 g と化合物 B 15 g の混合物から化合物 A を分離する場合について、各化合物の溶解度曲線は混合物の場合でも変わらないとして考えてみる。 80°C の水 100 g に混合物を完全に溶かし、加熱して水を蒸発させ水溶液の質量を 135 g にした後、 30°C に冷却する。この操作で、化合物 A のみが a g 析出することになる。析出した固体をろ過し、水で固体を洗えば高純度の化合物 A を得ることができる。

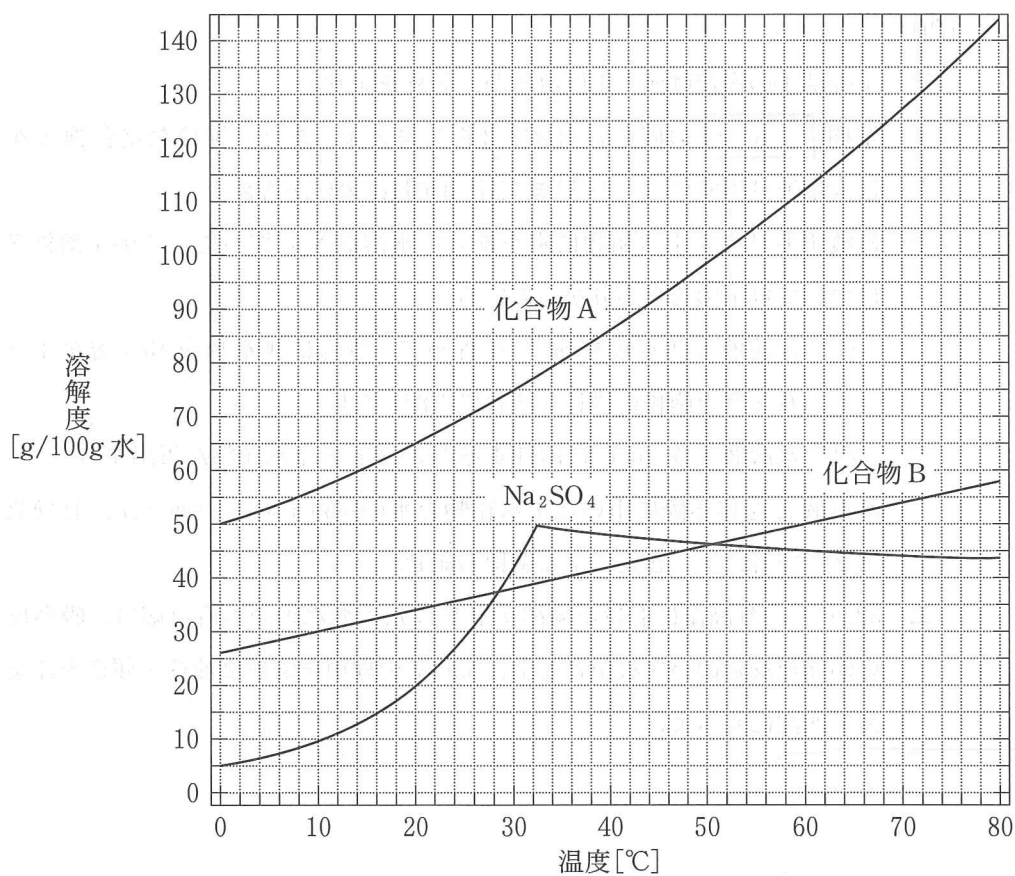


図 1—1 イオン化合物の溶解度曲線

[問]

- ア 下線部①の操作は何とよばれるか、名称を記せ。
- イ 空欄

a

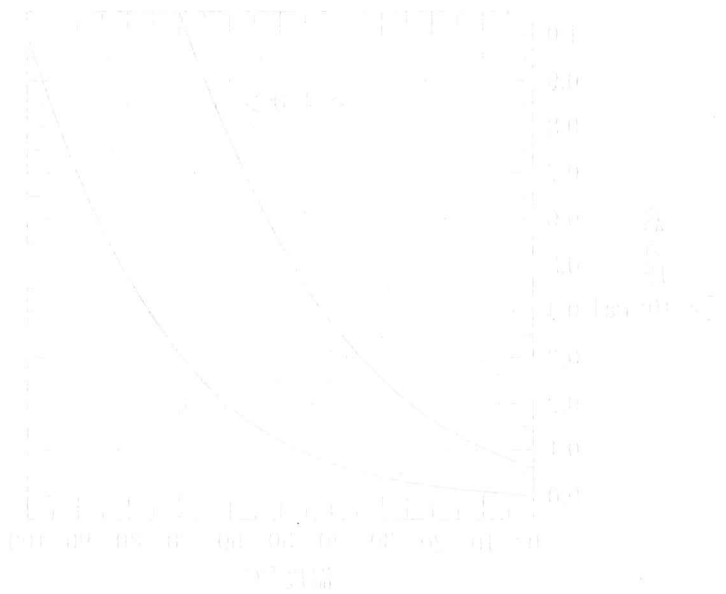
 の値を有効数字 2 桁で答えよ。また、純粋な化合物 A を最大量取り出すには、何℃まで冷却すればよいか答えよ。
- ウ 硫酸ナトリウム十水和物に水を加えて水溶液 X を作った。この水溶液 X について以下のことが分かっている。
- (1) 水溶液 X の温度を 60℃ に保って、さらに無水物を 10 g 溶かすとちょうど飽和に達し、それ以上溶けない。
 - (2) 水溶液 X を 20℃ に冷却すると 32.2 g の十水和物が析出する。
- 水溶液 X を作る際に用いた十水和物と水の量はそれぞれ何 g か、有効数字 2 桁で答えよ。答えに至る過程も記せ。
- エ 32.4℃ より高温における硫酸ナトリウムの無水物の溶解反応は、吸熱反応か発熱反応のいずれか答えよ。またその理由を溶解度曲線の傾きをふまえて簡潔に述べよ。

計 算 用 紙

この紙は、計算用紙 (切り離さないで用いよ。) の用紙の一種である。この紙は、計算用紙 (切り離さないで用いよ。) の用紙の一種である。この紙は、計算用紙 (切り離さないで用いよ。) の用紙の一種である。

この紙は、計算用紙 (切り離さないで用いよ。) の用紙の一種である。この紙は、計算用紙 (切り離さないで用いよ。) の用紙の一種である。この紙は、計算用紙 (切り離さないで用いよ。) の用紙の一種である。この紙は、計算用紙 (切り離さないで用いよ。) の用紙の一種である。

この紙は、計算用紙 (切り離さないで用いよ。) の用紙の一種である。この紙は、計算用紙 (切り離さないで用いよ。) の用紙の一種である。この紙は、計算用紙 (切り離さないで用いよ。) の用紙の一種である。



速度と時間の関係を示すグラフ

II 次の文章を読み、問オ～クに答えよ。

気液平衡の状態にある液体の飽和蒸気圧は、温度の上昇とともに急激に増大する。図1—2は、ヘキサン(C_6H_{14})と水(H_2O)の蒸気圧曲線である。一定の温度では、水よりもヘキサンの方が飽和蒸気圧は高く、一定の圧力では、水の方が沸点は高いことを示している。

ヘキサン 0.10 mol, 水蒸気 0.10 mol, 窒素 0.031 mol からなる $100\text{ }^\circ\text{C}$ の混合気体を考える。体積と容器内の温度が可変であるピストンを備えた装置にこの混合気体を注入し、その圧力が $1.0 \times 10^5\text{ Pa}$ で常に一定となるように保ちながら、以下の冷却操作 1～3 を行った。ただし、液体のヘキサンと水は混ざり合わないものとし、窒素はこれらの液体には溶けないものとする。また、気体はすべて理想気体として扱えるものとする。

操作 1 : 混合気体を温度 $100\text{ }^\circ\text{C}$ から徐々に冷却していくと、体積が減少し、ある温度で水滴が生じ始めた。

操作 2 : さらに冷却していくと、 $55\text{ }^\circ\text{C}$ においてヘキサンも凝縮し始めた。

操作 3 : さらに冷却していくと、水とヘキサンの 2 種類の液体が徐々に増加した。

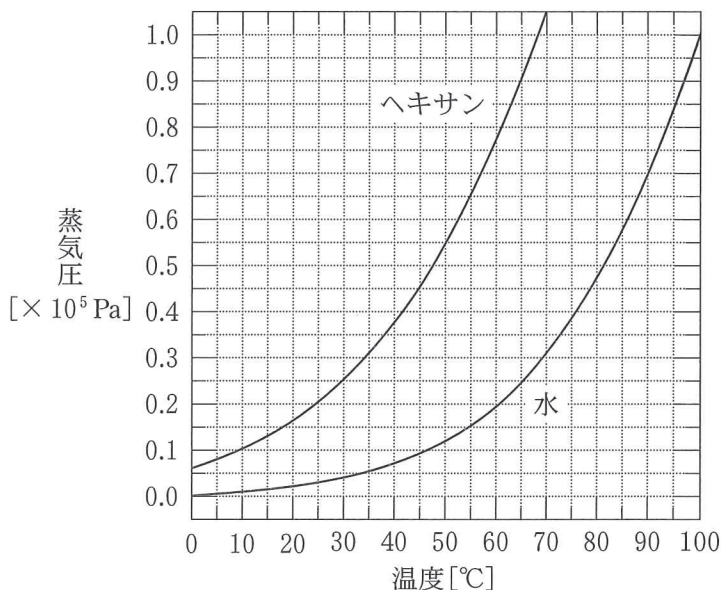


図 1—2 ヘキサンと水の蒸気圧曲線

〔問〕

オ 下線部②に関して、水の分子量はヘキサンより小さいにもかかわらず、水の沸点はヘキサンより高い。その理由を 60 字以内で述べよ。

カ 下線部③に関して、水滴が生じ始める温度は何℃か。

キ 下線部④に関して、このときに水蒸気として存在する水の量は何 mol か。有効数字 2 桁で答えよ。答えに至る過程も記せ。

ク 冷却操作 1～3 を行った時の、ヘキサンの分圧の変化を示す線の模式図として最も適当なものを、以下の図 1—3 に示す (1)～(6) のうちから一つ選べ。また、そのような変化を示す理由も 150 字程度で述べよ。

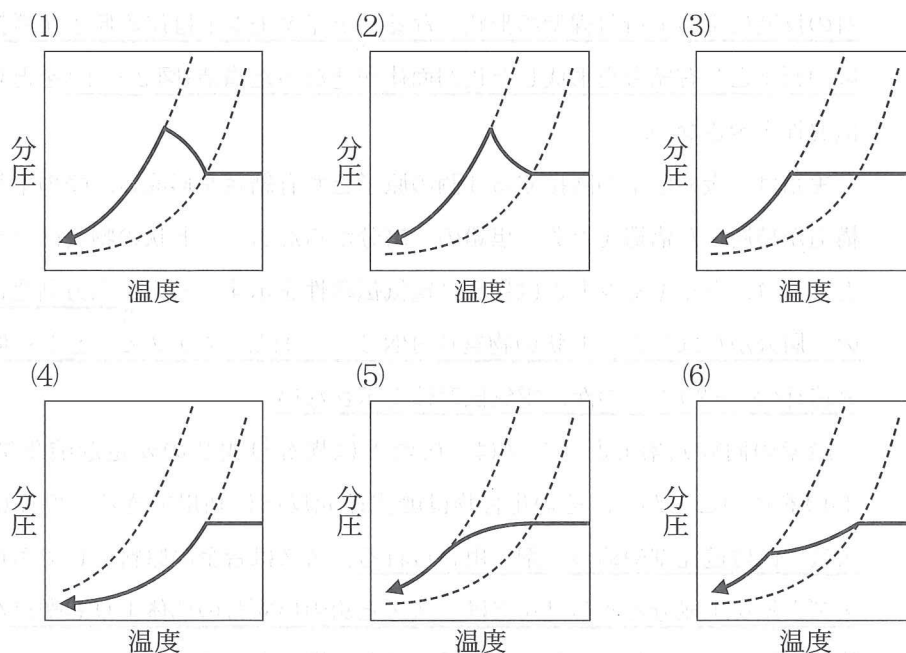


図 1—3 ヘキサンの分圧変化の模式図

破線は、図 1—2 に示したヘキサンおよび水の蒸気圧曲線を示す。

第2問

次のⅠ、Ⅱの各問に答えよ。

Ⅰ 次の文章を読み、問ア～オに答えよ。必要があれば以下の値を用いよ。

$\sqrt{2} = 1.41$, $\sqrt{3} = 1.73$, $\sqrt{5} = 2.24$

炭素の単体および化合物は、4個の価電子を隣接する原子と共有することで共有結合を形成する。一般に、分子の形状や共有結合性の結晶の構造は価電子の反発の影響を受ける。例えば、メタン分子は4つの共有電子対の反発を最小とするために正四面体型の形状をとり、水分子は2つの共有電子対と2つの非共有電子対の反発によって折れ線型の形状となる。ダイヤモンドは炭素原子が隣接する4個の原子と共有結合を形成した正四面体が連なった構造(図2-1)をとり、電気伝導性を示さない。

黒鉛は、炭素原子が隣接する3個の原子と共有結合を形成し、蜂の巣状の平面構造が積層した構造をとる。黒鉛の一層分からなるシート状の物質はグラフェンとよばれ、ダイヤモンドとは異なり電気伝導性を示す。一方、六方晶窒化ホウ素の一層分からなるシート状の物質(h-BNシート)は、グラフェンとよく似た平面構造(図2-2)をもつが、電気伝導性を示さない。

炭素の同族元素であるスズは、炭素とは異なり複数の安定な酸化数(+2と+4)を持つことから、その化合物は酸化還元反応に利用できる。例えば、塩化スズ(Ⅱ)は還元剤やめっき剤に用いられる。スズは合金の原料としても重要で、スズと鉛を主成分とするはんだは、スズと鉛のいずれの単体よりも融点が低く、他の金属とよくなじむことから金属の接合に用いられてきた。

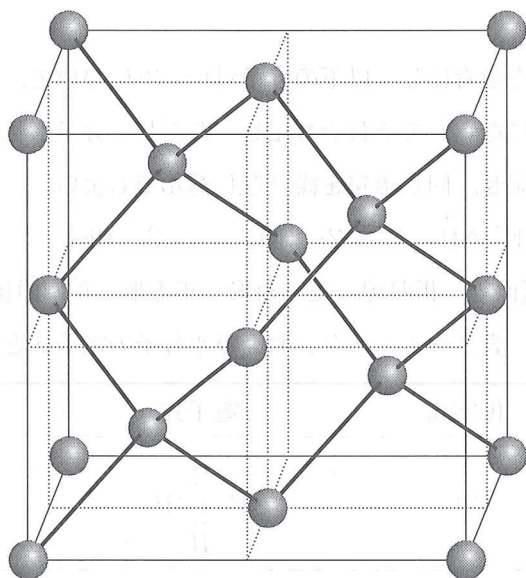


図 2-1 ダイヤモンドの単位格子

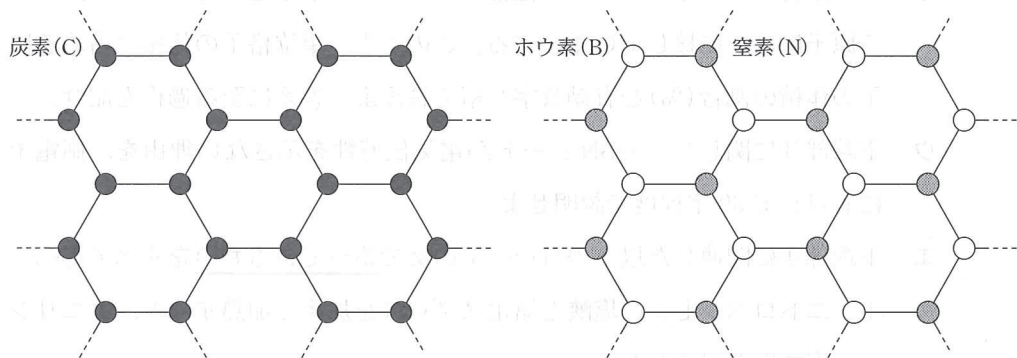


図 2-2 グラフェン(左)と h-BN シート(右)の構造

〔問〕

ア 下線部①を参考にし、以下の分子(1)～(3)について、電子式と分子形状を表2—1にならってそれぞれ記せ。ただし、分子形状については語句群から選んで記せ。同じ語句を繰り返し選んでもよい。

(分子) (1) NH_3 (2) CO_2 (3) BF_3

(語句群)【直線 折れ線 正三角形 正方形 正四面体 三角すい】

表2—1 メタンおよび水分子の電子式と分子形状

化学式	電子式	分子形状
CH_4	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \vdots \\ \text{H} : \text{C} : \text{H} \\ \vdots \\ \text{H} \end{array}$	正四面体
H_2O	$\text{H} : \overset{\cdot\cdot}{\underset{\cdot\cdot}{\text{O}}} : \text{H}$	折れ線

イ 下線部②のダイヤモンドの単位格子において、原子を球とみなし、隣接する原子は互いに接しているとする。このとき、単位格子の体積に占める原子の体積の割合(%)を有効数字2桁で答えよ。答えに至る過程も記せ。

ウ 下線部③に関して、h-BNシートが電気伝導性を示さない理由を、価電子に着目して30字程度で説明せよ。

エ 下線部④に関連した以下の(1)～(5)の文で誤っているものをすべて選べ。

- (1) ニトロベンゼンに塩酸と塩化スズ(Ⅱ)を加えて加熱すると、アニリン塩酸塩が得られた。
- (2) 過マンガン酸カリウムの酸性水溶液に塩酸酸性の塩化スズ(Ⅱ)水溶液を加えると、黒色の沈殿が生成した。
- (3) 塩化スズ(Ⅱ)水溶液に亜鉛板を浸すと、スズが析出した。
- (4) スズをめっきした鉄板に傷を付けて放置すると、露出した鉄が赤色にさびた。
- (5) 酢酸銀(Ⅰ)の酢酸酸性水溶液に塩化スズ(Ⅱ)水溶液を滴下すると、塩素ガスが発生して銀が析出した。

オ 下線部⑤に関して、1.0 kg のスズを融解した液体を溶媒とし、23 g の鉛を均一に溶かした。このスズ—鉛合金の融液を十分ゆっくり冷却すると、図 2—3 のような温度変化を示した。図 2—3 中の A で示す時間領域において、単体のスズの場合とは異なり、時間とともに温度が下がる理由を 30 字程度で説明せよ。ただし、融液から析出する固体は純粋なスズであると考えてよい。

また、凝固点が 220 °C のスズ—鉛合金を得るには、1.0 kg のスズ融液に何 g の鉛を溶かせば良いかを有効数字 2 桁で答えよ。答えに至る過程も記せ。

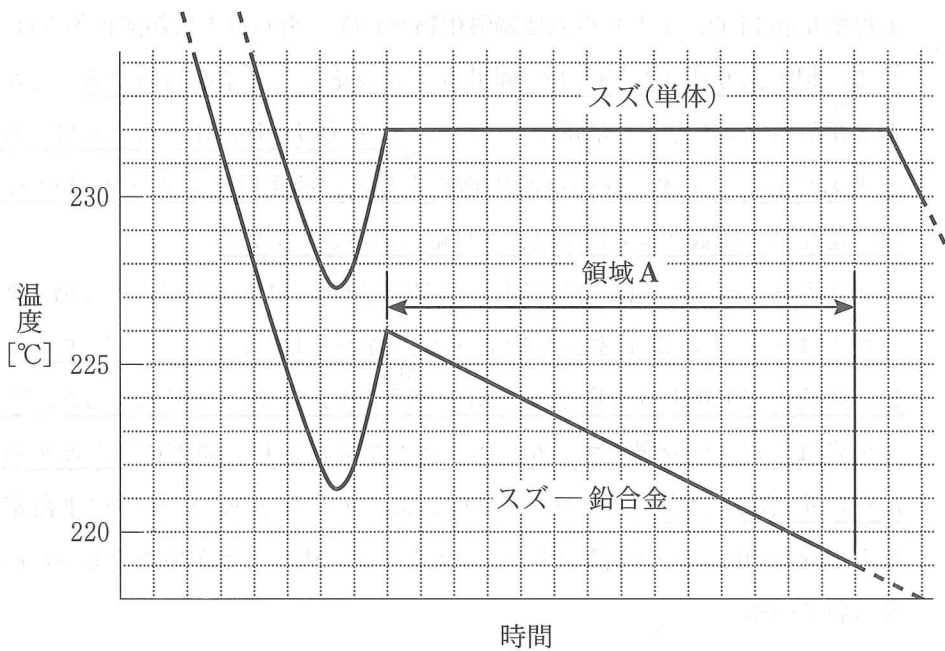


図 2—3 単体のスズおよびスズ—鉛合金を冷却した時の温度と時間の関係

II 次の文章を読み、問カ～ケに答えよ。

周期表の中で水素を除く 1 族元素をアルカリ金属といい、身近な例としてリチウムやナトリウム、カリウムなどが挙げられる。アルカリ金属の結晶内での原子配列は体心立方格子であり、他の金属に比べて融点が特に低い。アルカリ金属の融点が低いのは が弱いからであり、これは金属の単位体積あたりの自由電子の密度が低いためである。また、アルカリ金属は族の下方ほど融点が 。これはアルカリ金属の が族の下方にいくほど増大するためと説明できる。アルカリ金属を十分な量の純酸素ガス中で加熱すると、リチウムは酸化物 Li_2O 、ナトリウムは過酸化物 Na_2O_2 、カリウムは超酸化物 KO_2 を生じる。超酸化カリウム KO_2 は二酸化炭素と反応して酸素を放出することから、^⑦避難用酸素マスクなどに活用されている。アルカリ金属は水や酸素だけでなく水素とも反応し、イオン性の水素化物を生じる。^⑧例えば水素化ナトリウム NaH は、還元剤や塩基として様々な化学反応に活用されている。

アルカリ金属イオンは、酸素原子が環状に配置された王冠形の化合物であるクラウンエーテルと錯イオンを形成する。図 2—4 に示すクラウンエーテル A は、^⑨溶液中でアルカリ金属イオン M^+ と錯イオン $\text{A}\cdot\text{M}^+$ を形成するが、この平衡反応はアルカリ金属イオン M^+ のイオン半径に応じて顕著に異なる平衡定数 K を示す(表 2—2)。ここで、クラウンエーテル A と K^+ の反応の平衡定数が最大となるのは、A の空隙の大きさにに対して K^+ の大きさが最適であるためと考えられている。

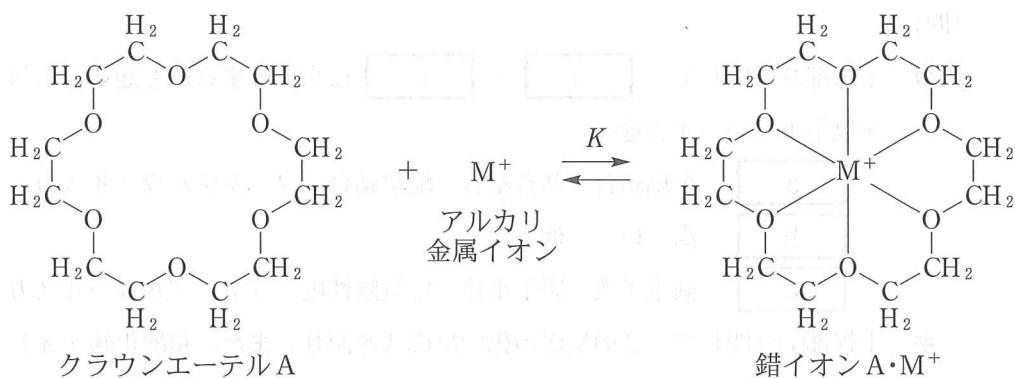
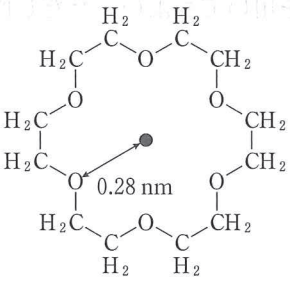
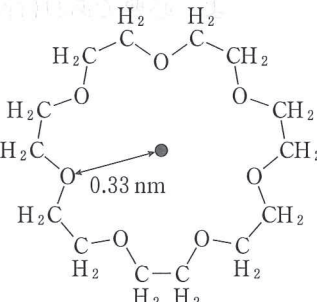


図2-4 錯イオン A・M⁺ が形成される反応

溶液中に存在する陰イオンや溶媒分子は省略されている。図中の K はこの反応の平衡定数を示す。

表2-2 クラウンエーテルA, Bと各アルカリ金属イオンの反応の平衡定数 K

陽イオン(イオン半径)	平衡定数 K [L・mol ⁻¹] の常用対数 $\log_{10} K$	
	クラウンエーテルA 	クラウンエーテルB 
Li ⁺ (0.076 nm)	3.0	
Na ⁺ (0.095 nm)	4.4	
K ⁺ (0.13 nm)	6.0	
Rb ⁺ (0.15 nm)	5.3	
Cs ⁺ (0.17 nm)	4.8	

クラウンエーテルA, B内の黒点は中心を表し、両矢印はクラウンエーテルの中心と酸素原子の中心の距離を示す。

(問)

カ 下線部⑥に関して、 ~ に当てはまる最も適切な語句を以下より一つずつ選べ。

- | | | | | |
|---|------|------|-------|------------|
| a | 金属結合 | 共有結合 | 配位結合 | ファンデルワールスカ |
| b | 高い | 低い | | |
| c | 価電子数 | 原子半径 | 電気陰性度 | ファンデルワールスカ |

キ 下線部⑦に関して、この反応の化学反応式を記せ。また、超酸化物イオン O_2^- に含まれる全電子数を記せ。

ク 下線部⑧に関して、水素化ナトリウムを構成するナトリウムと水素のどちらが陽イオン性が強いかを答え、その理由を 30 字程度で説明せよ。また、水素化ナトリウムと水が反応する際の化学反応式を記せ。

ケ 下線部⑨に関して、表 2-2 のクラウンエーテル B が錯イオン $B \cdot M^+$ を生成する反応の平衡定数が最大となるアルカリ金属イオン (Li^+ , Na^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+) を予想せよ。また、その根拠を 100 字以内で説明せよ。必要であれば図を用いてもよい。ただし図は字数に数えない。

クラウンエーテル A	クラウンエーテル B
0.8	1.0
1.4	1.2
0.6	0.8
0.3	0.5
0.1	0.2

計算用紙

問題集

式(2)の式(1)を(2)に代入して整理すると、式(3)を得る。

(切り離さないで用いよ。)

式(3)

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{2}{3} \frac{dx}{dt} + \frac{1}{3} x = \frac{1}{3} \sin t \quad (3)$$



式(3)の右辺が正弦波であるから、式(3)の一般解は、式(4)の形式で仮定する。

$$x = A \sin(t + \phi)$$

式(4)を式(3)に代入すると、式(5)を得る。

$$-A \sin(t + \phi) + \frac{2}{3} A \cos(t + \phi) + \frac{1}{3} A \sin(t + \phi) = \frac{1}{3} \sin t \quad (5)$$

式(5)の両辺を $\sin(t + \phi)$ と $\cos(t + \phi)$ の係数比較すると、式(6)を得る。

$$\begin{cases} -A \cos \phi + \frac{2}{3} A \sin \phi = \frac{1}{3} \cos \phi \\ \frac{1}{3} A \cos \phi + \frac{2}{3} A \sin \phi = \frac{1}{3} \sin \phi \end{cases} \quad (6)$$

式(6)を式(7)のように整理すると、式(8)を得る。

$$\begin{cases} -\cos \phi + \frac{2}{3} \sin \phi = \frac{1}{3} \cos \phi \\ \cos \phi + \frac{2}{3} \sin \phi = \sin \phi \end{cases} \quad (7)$$

式(7)の式(1)を式(2)に代入して整理すると、式(9)を得る。

$$\cos \phi = \frac{1}{2} \sin \phi \quad (8)$$

式(8)より、 $\tan \phi = 2$ となる。よって、 $\phi = \arctan 2$ となる。

式(8)より、 $\sin \phi = \frac{2}{\sqrt{5}}$ 、 $\cos \phi = \frac{1}{\sqrt{5}}$ となる。式(6)の式(1)に代入すると、式(9)を得る。

$$-\frac{1}{\sqrt{5}} + \frac{4}{3\sqrt{5}} = \frac{1}{3} \frac{1}{\sqrt{5}} \quad (9)$$

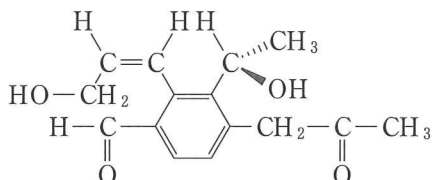
式(9)より、

第3問

次の I、II の各問に答えよ。必要があれば以下の値を用い、構造式は例にならって示せ。

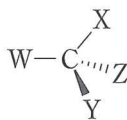
元素	H	C	N	O	Na
原子量	1.0	12.0	14.0	16.0	23.0

(構造式の例)



不斉炭素原子まわりの結合の示し方：

C, W, X は紙面上に, Y は紙面の手前に, そして Z は紙面の奥にある。



I 分子式が $C_{10}H_{10}O_4$ である芳香族化合物 A の構造を決定するため、以下に示す実験 1～5 を行った。問ア～オに答えよ。

なお、空気中の二酸化炭素の溶解の影響、水の蒸発の影響、および化学反応に起因する溶液の容積変化の影響については、無視できるものとする。また、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ における水のイオン積 K_w は $1.0 \times 10^{-14} \text{ mol}^2 \cdot \text{L}^{-2}$ 、気体はすべて理想気体とし、標準状態における 1 mol の体積は 22.4 L である。

実験 1：化合物 A をアンモニア性硝酸銀水溶液に加えて穏やかに加熱すると、銀が析出した。

実験 2： $0.250 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ の水酸化ナトリウム水溶液 10.0 mL を、ホールピペット ^① を用いてメスフラスコに移した。次に、このメスフラスコに水を加えてよく振った後 ^② に静置する操作を繰り返し、最終的にメスフラスコ上部に描かれた標線に溶液量を合わせることによって、 500 mL の希釈水酸化ナトリウム水溶液をつくった。

この希釈水酸化ナトリウム水溶液 50.0 mL を、ホールピペットを用いて三角フラスコに移した。ここに化合物 A 19.4 mg を加えてしばらく^③
^④
^{かくはん}攪拌したが、化合物 A はほとんど溶けなかった。しかし、三角フラスコを加熱すると化学反応が起こり、完全に溶解した。この溶液を 25 °C に冷却してから pH を測定したところ、11.0 であった。

実験 3 : 実験 2 の生成物を分析したところ、不斉炭素原子を含まない化合物 B のナトリウム塩であり、その分子式は $C_8H_7O_3Na$ であった。

実験 4 : 実験 2 で得られた pH が 11.0 の溶液に、標準状態で 1.12 mL の二酸化炭素をゆっくり吹き込んで中和反応を行った。その後、この溶液に対してエーテルによる抽出操作を行ったが、化合物 B はナトリウム塩のまま水層にとどまっていた。

実験 5 : 単離した化合物 B を少量の濃硫酸を含むエーテルに加えて穏やかに温めると、化合物 C が生成した。なお、化合物 B と化合物 C を構成する炭素原子の数は同じであった。

〔問〕

ア 実験 2 の下線部①～④のガラス器具の使用準備として、明らかに不適切な操作を以下の (1) ~ (4) から選び、その理由を簡潔に説明せよ。

- (1) 下線部①のホールピペットの内部を、 $0.250 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ の水酸化ナトリウム水溶液でよくすすいだ(共洗いした)。
- (2) 下線部②のメスフラスコとして、内側が水でぬれているものをそのまま使用した。
- (3) 下線部③のホールピペットを、室温で長時間放置して乾燥状態とした。
- (4) 下線部④の三角フラスコを、希釈水酸化ナトリウム水溶液で共洗いした。

イ 与えられた分子式と実験 2 の結果から、化合物 A に存在することがわかった官能基の名称とその個数を示せ。

- ウ 実験4で行った中和反応の化学反応式を示せ。
- エ 化合物Aおよび化合物Cの構造式を示せ。
- オ 上記の実験の報告書(レポート)を作成した。報告書を作成する上で明らかに不適切なものを、以下の(1)～(5)から二つ選べ。
- (1) 薬品が飛散したときに手と眼球への付着を避けるため、手袋と保護眼鏡を使用したことを記載した。
 - (2) 実験1において銀が析出した様子は、参考書に載っていた類似の反応の様子とは異なっていた。そこで、参考書に載っていた様子をそのまま記載した。
 - (3) 実験2において、実験書には25℃でpHを測定するように書かれていたが、実際には40℃で測定を行ってしまった。そこで、測定は25℃ではなく40℃で行った、と記載した。
 - (4) 実験2の生成物の分子式を同じ操作で三回繰り返し求めたところ、一回目と二回目は $C_8H_7O_3Na$ 、三回目は $C_8H_{11}O_3Na$ となったため、三回目は失敗と判断した。そこで、二回分析して組成式が $C_8H_7O_3Na$ となった、とだけ記載した。
 - (5) 別の実験によってわかった化合物Cの性質と、参考書に書かれていた化合物Cの性質を比較した内容を、考察として記載した。

II 次の文章を読み、問カ～コに答えよ。

図3-1に示すアドレナリン(L1)は、L-チロシンから作られる生体分子である。L1は、体の中のタンパク質であるアドレナリン受容体(R)と結合して、心拍数や心収縮力の増加などの生理作用を引き起こす。

ここではL1とRの結合について考える。L1はRの特定の立体構造をとる部位に適合し、図3-2に示すように主にイオン結合、水素結合、ファンデルワールス力^⑤によってRと複合体を形成する。一方、図3-2をもとに考えると、L1の鏡像異性体(光学異性体)^⑥は、L1に比べてRに a 結合する。

L1と似た構造をもつある医薬品(L2)は、化合物Dから合成される。このL2はRに結合し、L1の生理作用を阻害する。このため、L2は狭心症や不整脈の治療に用いられる。L1、L2、およびL2の原料であるDについて、以下の実験を行った。

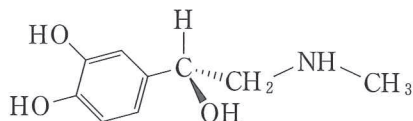


図3-1 L1の構造式

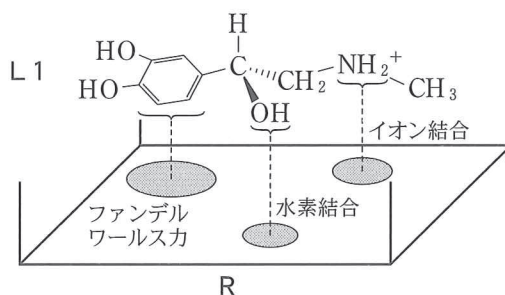
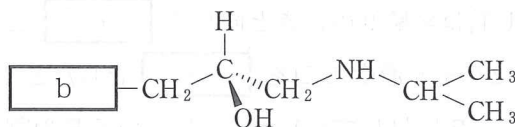


図3-2 L1とRとの結合の模式図

実験6：Dは、炭素と水素と酸素からなる分子量144.0の化合物であり、ある量を完全燃焼させたところ、二酸化炭素165.0mgと水27.0mgが得られた。

実験7：Dに塩化鉄(Ⅲ)の水溶液を加えると、紫色の呈色反応を示した。Dの炭素原子はすべてベンゼン環の炭素原子であり、水素原子が結合していない炭素原子が三つ連続して並んだ部分構造があることがわかった。

実験8：L2の構造式を調べると以下のとおりであり、bはDのヒドロキシ基から水素原子を取り除いた構造であることがわかった。



実験9：図3-3に示すように、膜に吸着させたRにL1を結合させる実験を行った。このとき、Rに対してL1の量は十分に多いので、結合していないL1のモル濃度[L1]は一定とみなせるものとする。一つのRにはL1が一つだけ結合し、L1の生理作用はすべてのRに対して何%のRがL1と結合しているかを示す結合率(%)に依存する。Rに対するL1の結合率が80%になったとき、[L1]はcであった。

ただし、この実験においては式(1)が成り立ち、平衡定数 K_{L1} は式(2)で表される。ここでは、Rは膜の表面に吸着しているが水溶液中に均一に溶けている溶質と同様に扱ってよいものとし、また、結合していないRのモル濃度およびRとL1の複合体R・L1のモル濃度を、それぞれ[R]および[R・L1]と表す。



$$K_{L1} = \frac{[\text{R} \cdot \text{L1}]}{[\text{R}] [\text{L1}]} \quad (2)$$

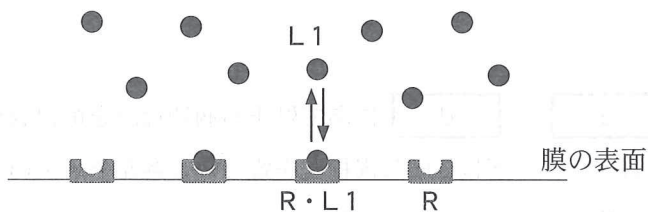


図3-3 RにL1を結合させる実験の模式図

実験10：図3—4に示すように、L2はL1の代わりにRと結合しようとする（競合）。実験9の水溶液にさらにL2も加え、L1とL2を競合させてL1がRに結合することを妨げる実験を行った。一つのRにはL1またはL2のどちらか一つだけが結合する。L2はL1に比べてRと d 結合し、平衡定数 K_{L2} は K_{L1} の1000倍の大きさであった。[L1]は実験9のときと同じく c とし、さらに結合していないL2のモル濃度[L2]を e としたところ、平衡状態においてすべてのRに対してL1と結合しているRの割合を示す結合率は10%であった。

ただし、この実験においては、式(1)および式(2)と同時に、式(3)も成り立ち、平衡定数 K_{L2} は式(4)で表される。ここでは、Rは実験9と同様に扱えるものとし、結合していないRのモル濃度およびRとL2の複合体 $R \cdot L2$ のモル濃度を、それぞれ[R]および $[R \cdot L2]$ と表す。

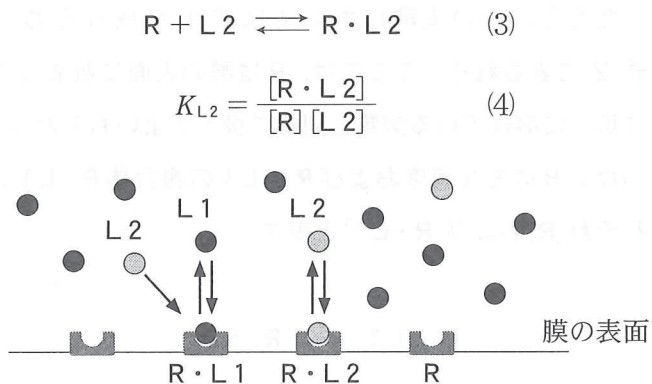


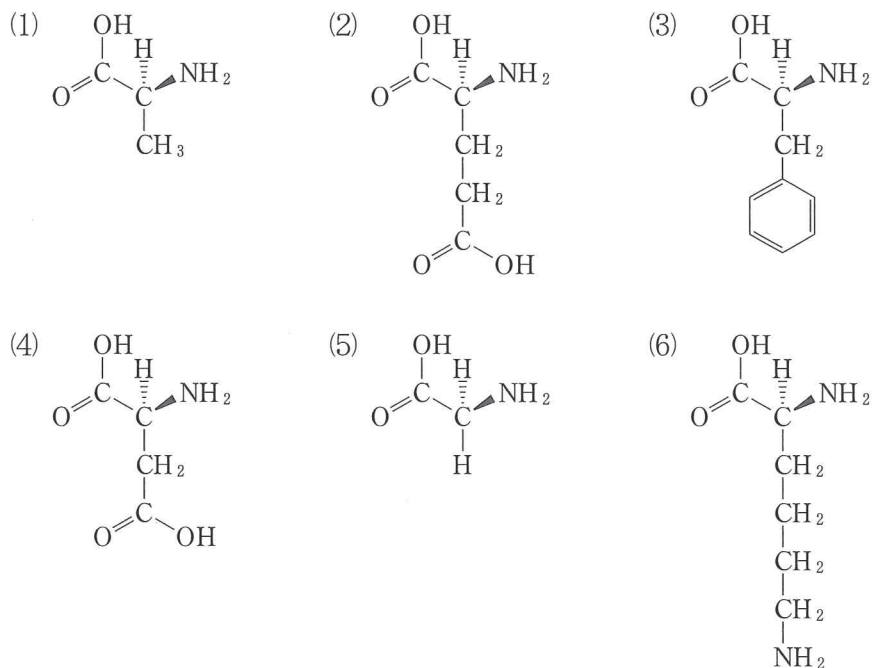
図3—4 RにL1とL2を同時に結合させる実験の模式図

〔問〕

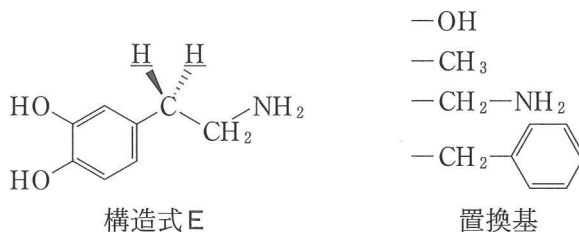
力 a , d にあてはまる適切な語を選択肢(1)～(3)からそれぞれ選べ。ただし、同じ選択肢を繰り返し選んでもよい。

- (1) 強 く (2) 同じ強さで (3) 弱 く

キ 下線部⑤について、図 3-2 の R を構成するアミノ酸の中で、pH が 7.4 で L1 の -NH_2^+ とイオン結合していると考えられる側鎖をもつものを、選択肢 (1) ~ (6) の中からすべて選べ。



ク 下線部⑥に関連して、下に示す構造式 E の下線を引いた水素原子の 1 個または 2 個を、下に示す 4 個の置換基のいずれかと置き換えた場合、不斉炭素原子をもつ構造式は何通りできるか答えよ。ただし、鏡像異性体は別の構造として数えるものとする。



ケ 化合物 D の構造式を示せ。答えに至る過程も示せ。

コ c , e にあてはまる値を K_{L1} を用いて表せ。答えに至る過程も示せ。ただし、結合率は下線部⑦で定義される。

計算用紙

(切り離さないで用いよ。)



Figure 2: Chemical structures of 1,2,3,4,5,6-hexahydro-2,2,4,4-tetramethyl-1,3-dioxane (1,2,3,4,5,6-HMDT) in chair conformations, showing different orientations of the methyl groups (Me) and hydroxyl groups (OH) on the ring carbons.

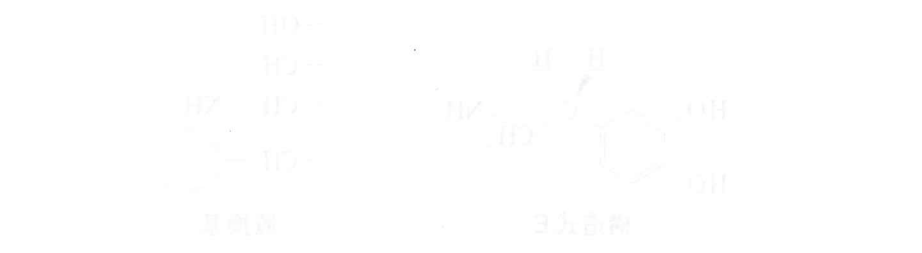


Figure 4: Chemical structures of 1,2,3,4,5,6-hexahydro-2,2,4,4-tetramethyl-1,3-dioxane (1,2,3,4,5,6-HMDT) in chair conformations, showing different orientations of the methyl groups (Me) and hydroxyl groups (OH) on the ring carbons.

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

生 物

第 1 問

次の文を読み、問に答えよ。

〔文〕

生体の様々な組織は、構成する細胞が入れ替わることによって、その構造と機能の恒常性が保たれている。ある細胞が寿命を迎えたり、傷つけられたりすることで失われた場合に、それに相当する細胞を別の細胞から新たに生み出すための仕組みが備わっている。いくつかの臓器・組織には組織幹細胞と呼ばれる未分化な細胞が存在し、分化した機能的な細胞を供給することが知られている。たとえば、血液中には赤血球やリンパ球などの種々の細胞が大量に存在しているが、それらの多くは数日から数箇月程度で寿命を迎えて死んでいく。失われた分の血液細胞は、骨髄中に存在する血液幹細胞(造血幹細胞)から日々新たに生み出され、補われている。

小腸の表面にある上皮細胞もまた、寿命が数日程度と短く、一定の速さで常に^(イ)入れ替わっている。小腸の内壁には、図 1—1 のように絨毛^{じゅうもう}という突起状の構造がある。絨毛どうしの間にはくぼみがあり、組織の断面を観察すると絨毛の頂上から、くぼみの底辺に至るまで、上皮細胞が一連なりに続いている。絨毛部分に存在するのは分化した上皮細胞で、その大部分は物質の吸収等に関わる吸収上皮細胞である。分化した上皮細胞は分裂することはなく、やがて寿命を迎えて死んだ細胞は絨毛の頂上部分から剥^はがれ落ちていく。一方で、くぼみ部分を構成する上皮細胞の大部分は未分化で、分裂能をもっている。特に、くぼみの底辺部には、分裂能が非常に高く(1日に1回程度分裂する)、特徴的な構造を示す細胞があり、それらは CBC 細胞と名付けられている。小腸上皮組織の維持における CBC 細胞の役割を明らかにするために、マウスを用いて以下の実験を行った。

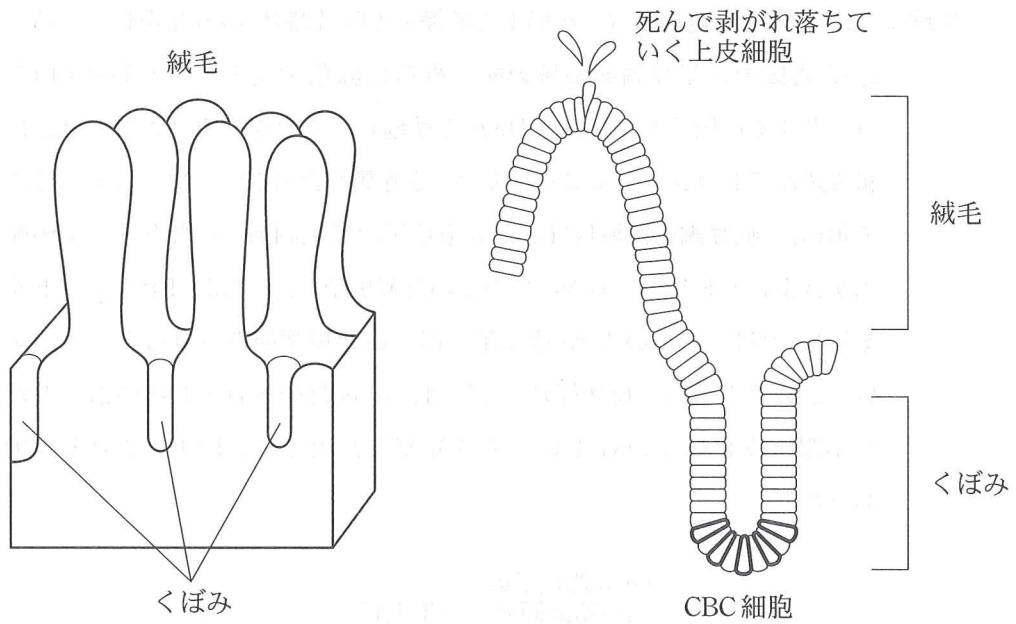


図1-1 小腸上皮組織の構造(左)と断面図(右)

右図で、くぼみの底辺部にある太線で囲まれた細胞がCBC細胞である。CBC細胞どうしの間には、別の種類の上皮細胞がある。

実験1 *Lgr5* という遺伝子は、小腸上皮組織で CBC 細胞にのみ発現している。
Lgr5 遺伝子の転写調節領域のすぐ後ろに緑色蛍光タンパク質 (GFP) をコードする遺伝子をつないだ DNA を準備し、これをマウスの核ゲノムに組み込んでトランスジェニックマウスを作製した(図1—2)。なお、ここで用いた「転写調節領域」には *Lgr5* 遺伝子の発現調節に必要なすべての配列が含まれており、その後ろにつないだ遺伝子(ここでは GFP をコードする遺伝子)は、本来の *Lgr5* 遺伝子と同一の発現調節をうけると考えてよい。このマウスの生後2箇月、4箇月、14箇月のそれぞれの時点における小腸上皮組織での GFP の蛍光を観察したところ、図1—3のようであった。

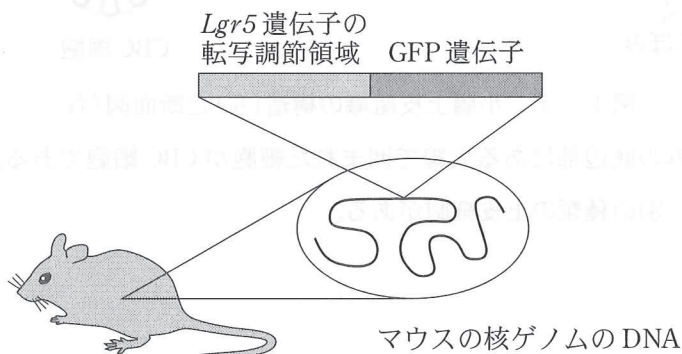


図1—2 実験1で作製したトランスジェニックマウス

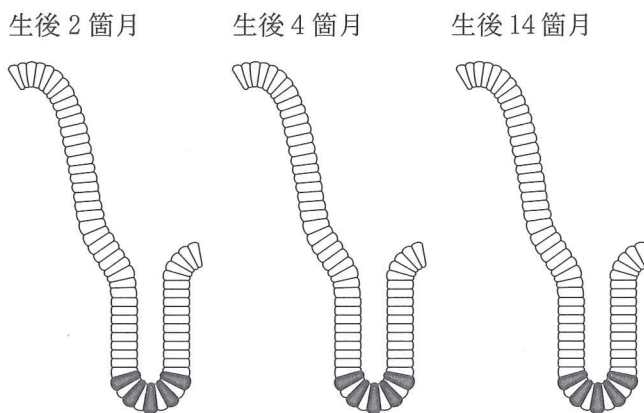


図1—3 実験1で観察された小腸上皮組織での GFP の蛍光の様子
 太線で囲まれているのが CBC 細胞，灰色の部分が GFP の蛍光を発している細胞。

実験2 以下の2種類のDNAを準備し、これらを同一のマウスの核ゲノムに組み込んだトランスジェニックマウスを作製した(図1-4)。

- ・実験1で用いたものと同じ *Lgr5* 遺伝子の転写調節領域に、酵素Cをコードする遺伝子をつないだDNA。
- ・*R* 遺伝子の転写調節領域、領域L、GFPをコードする遺伝子を、この順につないだDNA。

ここで、*R* 遺伝子の転写調節領域は、その後ろにつないだ遺伝子をマウスの体内のあらゆる細胞で常に発現させるはたらきをもつ。酵素Cは、発現している細胞において、化合物Tの存在下でDNA中の領域Lを抜きとり、残った部分をつなぎ合わせるというゲノムDNAの再編成反応^(ウ)を行う。領域Lは、転写調節領域と遺伝子の間に存在すると、その遺伝子の転写を阻害する。

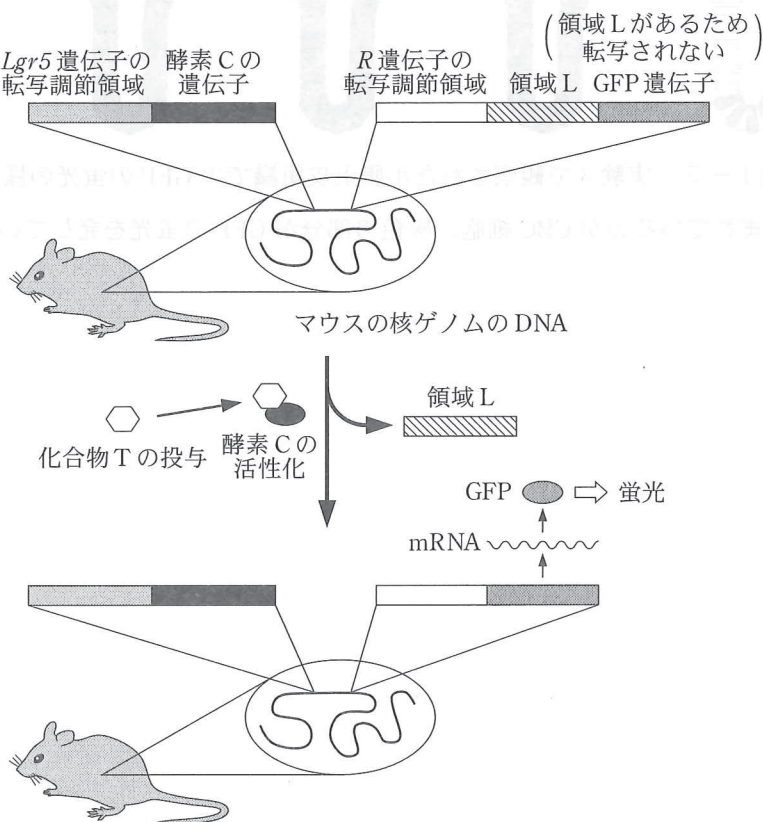


図1-4 実験2で作製したトランスジェニックマウス

実験3 実験2で作製したマウスに、生後2箇月の時点で化合物Tを投与した。投与直後(0日目)、投与後3日目、5日目、60日目、および1年目のそれぞれの時点で、小腸上皮組織における GFP の蛍光を観察したところ、図1—5 のようであった。化合物Tを投与しなかった場合には、いずれの時点でも小腸上皮組織において GFP の蛍光は全く観察されなかった。

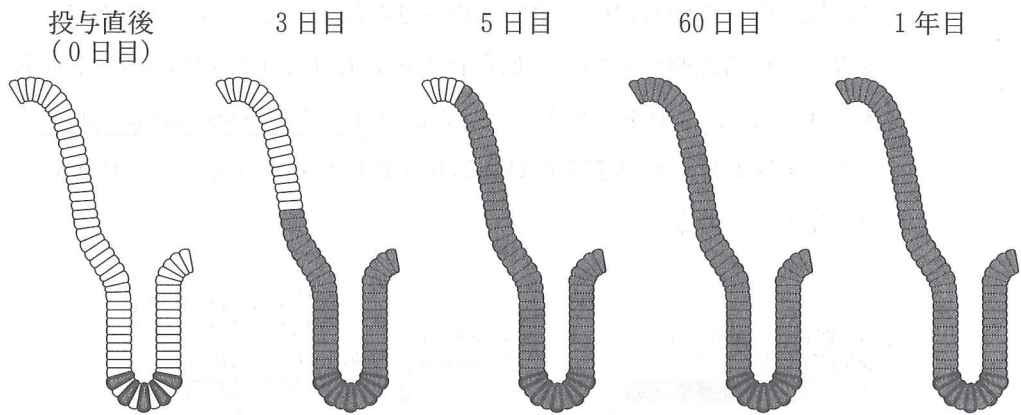


図1—5 実験3で観察された小腸上皮組織での GFP の蛍光の様子
太線で囲まれているのが CBC 細胞，灰色の部分が GFP の蛍光を発している細胞。

〔問〕

以下の小問に答えよ。

A 下線部(ア)について。血液や免疫に関する以下の選択肢(1)～(5)から、内容に誤りのあるものをすべて選び、番号で答えよ。

- (1) 血球は胚発生の過程で中胚葉に由来して作られる。
- (2) 血小板は血しょうの主要な構成成分である。
- (3) 好中球やマクロファージは、異物を取り込んで分解する食作用を示す。
- (4) 自然免疫の仕組みは、進化の過程で脊椎動物の登場より後に獲得された。
- (5) リンパ球は骨髄で作られたのち、T細胞は胸腺で、B細胞は脾臓のランゲルハンス島で、それぞれ分化・成熟する。

B 下線部(イ)について。ある遺伝性の貧血症は、ヘモグロビンの合成異常により正常な赤血球が作られないことで引き起こされる。この貧血症の重症な患者の治療のために、骨髄細胞の移植が行われることがある。一方で、対症療法として、輸血による赤血球の供給が行われることがあるが、これは根本的な治療とはならない。輸血が根本的な治療とはならない理由として考えられることを、骨髄細胞の移植による治療の場合と対比させて、2行程度で説明せよ。

C 下線部(イ)について。以下の文章の空欄1～5に適切な語を入れよ。

食事により摂取した物質を消化・吸収するための中心的な器官が小腸である。小腸で吸収された物質は、腸管にある静脈から と呼ばれる血管を通じて に運ばれ、代謝される。 は、 と共に体液の恒常性を保つために必須の臓器である。 は主に水やイオン、尿素などの水溶性物質のろ過・再吸収を行う。これに対して、 で処理された脂溶性の物質は、 を通じて消化管のうちの に放出され、最終的には便とともに体外に排出される。

D 実験1の結果のみから解釈できることとしてもっとも適当なものを、以下の(1)~(4)の選択肢の中から選べ。

- (1) 絨毛部分の上皮細胞は、それ自身が分裂することにより新たに作られると考えられる。
- (2) 絨毛部分の上皮細胞は、CBC細胞から新たに作られると考えられる。
- (3) 絨毛部分の上皮細胞は、血液幹細胞から新たに作られると考えられる。
- (4) 絨毛部分の上皮細胞が、どの細胞から新たに作られているのかを結論づけることはできない。

E 実験2の下線部(ウ)について。DNAがいったん切断された後につなぎ合わされることで再編成されるという現象は、ヒトのゲノムDNAでも起こっている。そのような現象を伴って作られるタンパク質の名称を1つあげよ。また、ゲノムDNAの再編成が起こる意義を、そのタンパク質の機能と関連づけて2行程度で説明せよ。

F 実験2について。このマウスに化合物Tを投与し、一定の期間ののちに観察を行うとする。以下の(1)~(4)のような細胞が存在する場合に、それぞれの細胞はGFPの蛍光を発するか、発しないか。(1)~(4)の場合について、それぞれ「発する」あるいは「発しない」で答えよ。なお、化合物Tの酵素Cに対する作用は投与と同時に、かつ、その時点でのみ及ぼされ、このときの酵素Cによる反応は100%の効率で起こると考えてよい。

- (1) 化合物Tを投与した時点から観察時までの間、常に*Lgr5*を発現している細胞。
- (2) 化合物Tを投与した時点から観察時までの間、常に*Lgr5*を発現していない細胞。
- (3) 化合物Tを投与した時点では*Lgr5*を発現していたが、その後、観察時までの間に*Lgr5*を発現しなくなった細胞。
- (4) 化合物Tを投与した時点では*Lgr5*を発現していなかったが、その後、観察時までの間に*Lgr5*を発現するようになった細胞。

G 実験3の結果から、化合物T投与後1年目の時点のCBC細胞はGFPの蛍光を発していたことがわかる。化合物T投与後1年目の時点のあるCBC細胞において、実験2で核ゲノムに組み込んだ*Lgr5* 遺伝子の転写調節領域に、そのはたらきを失わせるような変異が生じたとする。このとき、そのCBC細胞ではGFPの蛍光は維持されるか、失われるか。「維持される」あるいは「失われる」で答えよ。また、そのように考える理由を2行程度で説明せよ。

H 実験3の結果から、化合物T投与後3日目以降になると、絨毛部分の上皮細胞においてもGFPの蛍光が観察されるようになったことがわかる。このことからCBC細胞の性質についてどのようなことがわかるか。絨毛部分の上皮細胞におけるGFPの蛍光が、化合物T投与後3日目から1年目までのすべての時点で観察されている点を踏まえて、2行程度で説明せよ。

第2問

次の文1と文2を読み、IとIIの各問に答えよ。

〔文1〕

植物の細胞には色素体(プラスチド)が存在し、その色素体の1種である葉緑体は、原始的な真核細胞に光合成生物であるシアノバクテリアが 1 して生じたと考えられている。

色素体は植物の成長や環境の変化に応じて分化する。植物の 2 組織や 3 組織などにある未分化の細胞には、原色素体という色素体が存在する。細胞の分化に伴って原色素体は様々な色素体へと分化する。葉の柵状組織や海綿状組織の細胞には葉緑体が存在し、この葉緑体も原色素体が分化したものである。

色素体には多くの種類のタンパク質が存在するが、その大部分は核DNAにある遺伝子にコードされている。色素体のDNAには百数十個の遺伝子しか存在していない。ここでは、色素体DNAに存在する遺伝子を色素体遺伝子、核DNAに存在する遺伝子を核遺伝子と呼ぶことにする。

色素体には、PEPと呼ばれるRNAポリメラーゼが存在する。この酵素は、複数のサブユニットからなるコアとシグマ因子から構成される複合体を形成することで、RNAポリメラーゼとして機能する。コアを構成する各サブユニット(コアサブユニット)は色素体遺伝子に、シグマ因子は核遺伝子にコードされている。色素体DNAにはRNAポリメラーゼの遺伝子として、PEPのコアサブユニットをコードする遺伝子しか存在していない。

PEPのコアサブユニット遺伝子を破壊した植物体が作製され、その植物体における色素体遺伝子の発現が調べられた。破壊株では、多くの色素体遺伝子の転写が大きく抑制されていたが、一部の遺伝子の転写は野生株と同様に起こることから、PEP以外のRNAポリメラーゼの存在が推測された。その後の研究によって、第2のRNAポリメラーゼであるNEPが発見された。

実験1 核遺伝子にコードされているタンパク質Pについて、図2-1のように一部を削除したタンパク質をコードする遺伝子を核ゲノムに組込んだトランスジェニック植物を作製した。その作製した植物の葉の細胞において、合成されたタンパク質が細胞のどこに局在するかを調べたところ、図2-1の右欄に記載された結果となった。

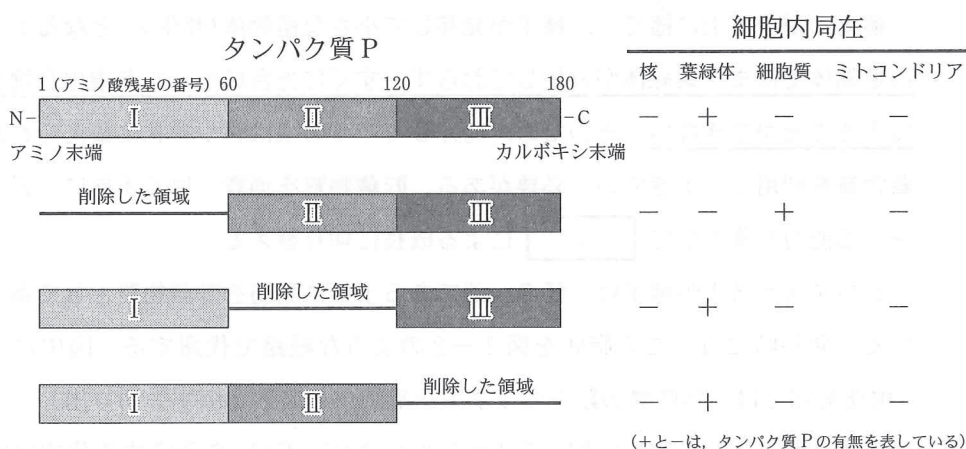


図2-1 発現させたタンパク質Pの模式図と細胞内局在性

実験2 ある植物の野生株の種子をリンコマイシン(原核生物の翻訳のみを阻害する物質)を添加した培地と無添加の培地で発芽させ、発芽後の植物体を観察した。得られた結果をまとめたのが表2-1である。

表2-1 子葉の形質におよぼすリンコマイシンの効果

調べた項目	リンコマイシン	
	無	有
子葉の緑化	正 常	抑 制
子葉細胞での葉緑体形成	正 常	抑 制

[文2]

植物は光合成を行い、光エネルギーを利用して二酸化炭素と水から糖やデンプンなどの有機化合物を合成し、それをもとにして生きている。そのため、植物は 4 生物と呼ばれる。それに対して、動物は植物が合成した有機化合物を利用して生きている 5 生物である。しかし、植物でも 4 で生育できない時期がある。

植物の種子を土に播くと、種子が発芽して小さな植物体(芽生え)となるが、この植物体ではまだ葉緑体が分化しておらず、すぐに光合成をして有機化合物を合成することができない。そのため、発芽してすぐの頃は胚や胚乳に蓄えられた貯蔵物質を利用して生きていく必要がある。貯蔵物質を消費し尽くす前に、光合成をする能力を獲得して 4 による成長に切り替える。

シロイヌナズナの種子は、胚の一部である子葉に脂肪を貯蔵物質として蓄えている。発芽時には、この脂肪を図2-2のような経路で代謝する。図中にあるβ酸化経路とは、脂肪酸の鎖をカルボキシ基側から炭素2個ずつ切り出し、その切り出されたC₂化合物を用いてアセチル CoA (C₂-CoA)を合成する代謝経路であり、糖新生経路は解糖系を逆に動かして有機酸から糖を合成する経路である。

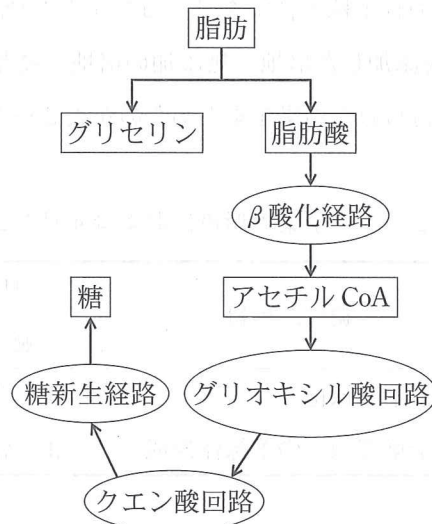


図2-2 脂肪の代謝

実験3 シロイヌナズナには、貯蔵物質の代謝が異常になった変異体が多数存在する。それらの変異体 x と y の種子を、野生株の種子とともに寒天培地(無機塩類のみを含み、ショ糖は無添加)の入ったシャーレに播いて発芽させて、芽生えの様子を観察した。得られた実験結果をまとめたのが表2—2である。

表2—2 芽生えの様子

調べた項目	野生株	変異体 x	変異体 y
葉の成長	正 常	異 常	異 常
根の伸長	正 常	異 常	異 常

実験4 変異体 x と y の種子を、野生株の種子とともに寒天培地の入ったシャーレに播いて発芽させた。ただし、この実験では培地にショ糖が添加してある。この条件で、脂肪酸の1種であるインドールプタン酸(IBA)を添加した場合と、添加していない場合とで発芽させ、生じた芽生えの根の伸長を調べた。得られた実験結果をまとめたのが表2—3である。

表2—3 根の伸長におよぼす IBA の効果

IBA の有無	野生株	変異体 x	変異体 y
無	正 常	正 常	正 常
有	異 常	正 常	異 常

(問)

I 文1について、以下の小問に答えよ。

- A 文中の空欄1～3に入るもっとも適切な語句を答えよ。
- B 下線部(ア)について。原始の地球には、ほとんど酸素が存在していなかったが、シアノバクテリアの光合成により多量の酸素が蓄積されるようになった。大気における多量の酸素の蓄積は、どのような生物が進化することを可能にしたか。1行程度で答えよ。
- C 下線部(イ)について。原色素体と葉緑体以外で植物細胞に存在する色素体の名称を1つ答えよ。
- D 下線部(ウ)について。以下の文中の空欄6と7に入るもっとも適切な語句を答えよ。

PEPのサブユニットであるシグマ因子は、特定の遺伝子の を認識し、これによってPEPは遺伝子の に結合する。PEPが転写を開始するときには、シグマ因子はPEPから解離し、コアは遺伝子DNAの配列をもとに4種の を基質としてRNAを合成する。

- E 実験1の結果から、タンパク質Pの領域Iは、他の領域IIとIIIにはない機能をもっていると推定される。その機能について、1行程度で述べよ。
- F 色素体のリボソームは、シアノバクテリア由来の原核生物型のものである。実験2の結果をもとに、色素体遺伝子と葉緑体の形成との関係について、1行程度で説明せよ。

G 色素体遺伝子の中には、PEPあるいはNEPによって転写されるタイプがある。表2—4は、PEPのコアサブユニットの1つをコードした遺伝子(*rpoA*)の破壊株と野生株において、いくつかの色素体遺伝子の転写を調べた結果である。なお、*rpoB*は、PEPのコアサブユニットの1つをコードした遺伝子である。以下の(ア)~(オ)に関する問(a)と(b)に答えよ。

(a) 空欄8と9には、表2—4の中のAとBのどちらが入るか答えよ。

(b) この結果から、葉緑体が分化する初期の段階では、NEPとPEPはどのような順序ではたらくと考えられるか。各項目に書かれた事象が起こる順序を答えよ。解答例：(ア)→(イ)→(ウ)→(エ)→(オ)

(ア) PEPのサブユニット遺伝子が発現し、核遺伝子にコードされたシグマ因子と複合体を形成する。

(イ) NEPの働きで、タイプ 8 の遺伝子が転写される。

(ウ) 光合成に関わっている遺伝子の発現が起こり、核遺伝子にコードされたタンパク質と協調して光合成機能を発揮する。

(エ) PEPの働きで、タイプ 9 の遺伝子が転写される。

(オ) NEP遺伝子が発現する。

表2—4 色素体遺伝子の発現

遺伝子	タイプ	機能	転写産物量	
			野生株	破壊株
<i>rbcL</i>	A	光合成	++	—
<i>psbA</i>	A	光合成	++++	—
<i>psbD</i>	A	光合成	+++	—
<i>rpoB</i>	B	転写	++	+++
<i>accD</i>	B	脂肪酸合成	+	++

転写産物がほとんど検出されない場合を—、検出される場合を+で表し、+の数は転写産物の量を反映している。

II 文2について、以下の小問に答えよ。

A 文中の空欄4と5に入るもっとも適切な語句を答えよ。

B 下線部(エ)について。色素体が葉緑体に分化するとき起こる、色素体の構造と機能の変化に関する、以下の文中の空欄10~12に入るもっとも適切な語句を答えよ。

葉緑体が色素体から分化するときには、色素体の内部に と呼ばれる膜が発達し、その膜には光エネルギーを化学エネルギーに変換する複合体が形成される。複合体は、タンパク質だけでなく、 やカロテノイドなどの色素、脂質などによって構成されている。また、ストロマには 回路に関わる酵素が集積し、炭酸固定を行う能力も獲得される。

C 実験3では、野生株の芽生えは正常に生育したのに対し、変異体xとyでは葉や根に異常が見られ、その伸長が抑制された。ところが、シヨ糖を添加した培地を用いて同様の実験を行ってみたところ、変異体xとyの芽生えには異常は観察されず、野生株と同様に生育した。野生株がシヨ糖無添加の培地でも正常に生育できる理由を2行程度で説明せよ。ただし、説明には以下のすべての語句を必ず用いること。

脂肪, 糖, 糖新生経路, エネルギー源, 炭素源

D 脂肪の分解によって生じた脂肪酸はCoAに結合した後、 β 酸化経路によって代謝され、アセチルCoAに変換される。炭素数16のパルミチン酸だけを脂肪酸として結合している脂肪が β 酸化経路によって完全に酸化された場合、脂肪1分子あたりに合成されるアセチルCoAの数を答えよ。ただし、グリセリンから合成されるアセチルCoAについては、計算に加えないものとする。

E 実験4において、IBAが β 酸化経路によって代謝されると、アセチルCoAだけでなくインドール酢酸(IAA)も生じる。このことを踏まえて、変異体xとyでは、 β 酸化経路が正常に機能しているか判断し、以下の選択肢(1)~(4)からもっとも適切だと考えられるものを1つ選べ。また、変異体yではなぜIBAの添加によって根の伸長が阻害されるのか、その理由を2行間の土曜程度で答えよ。

- (1) xとyの両方で、正常に機能している。
- (2) xでは正常に機能しているが、yでは正常に機能していない。
- (3) xでは正常に機能していないが、yでは正常に機能している。
- (4) xとyの両方で、正常に機能していない。

変異体xとyの両方で、正常に機能している。 (1) xとyの両方で、正常に機能している。 (2) xでは正常に機能しているが、yでは正常に機能していない。 (3) xでは正常に機能していないが、yでは正常に機能している。 (4) xとyの両方で、正常に機能していない。

変異体yではなぜIBAの添加によって根の伸長が阻害されるのか、その理由を2行間の土曜程度で答えよ。

第3問

次の文1から文3を読み、IからIIIの各問に答えよ。

〔文1〕

生態系を構成する生物には、食うもの(捕食者)と食われるもの(被食者)との関係が見られ、また、捕食者はさらに大型の捕食者に食われる被食者にもなる。食う—食われるの関係が一連に続くことを という。捕食された生物の一部は不消化のまま体外に排出される。捕食量(摂食量)から不消化排出量を差し引いたものが、消費者の同化量となり、その捕食量に占める割合を同化効率と呼ぶ。同化効率は100% の値をとるため、生産者から高次捕食者までの栄養段階が上がるにつれて、個体数や生物量は ことが多い。1種の動物は2種以上の生物を食べたり、2種以上の動物に食べられたりしており、自然界における の関係は、複雑な を構成している。より多くの種により構成される複雑な が存在する生態系ほど、生物群集の量は安定し、水の浄化・二酸化炭素の吸収・酸素の生産・生物生産などのサービス機能(生態系機能)は 。

〔文2〕

アラスカ沿岸からアリューシャン列島周辺の海域では、ジャイアントケルプをはじめとするコンブやワカメなどの褐藻類がケルプの森をつくり、多様な魚類・貝類・甲殻類が生活している。そこには、生産者であるケルプをウニが食べ、そのウニをラッコが食べるという がある。1970年代初頭、アリューシャン列島の地形的によく似た近接する2つの島でウニの生息密度を調べた。6,500頭前後のラッコが生息するX島にはケルプの森が繁茂し、小型のウニが低密度で生息していた。図3-1に示すとおり、ケルプは浅場ほど繁茂し、深場に行くにつれて減少した。一方、ラッコがほとんど生息していないY島にはケルプが繁茂せず、サンゴモで一面が覆われた海底に、大型のウニが高密度で生息していた。光合成を行うサンゴモはウニの餌となる藻類であるが、ケルプのような

背の高い群落を形成することは無く、海底の岩盤を薄く覆うように広がる。Y 島⁽¹⁾における魚類・貝類・甲殻類の種数や生物群集の量は、多数のラッコが生息する X 島よりも少なかった。ケルプの森の生態系におけるラッコのように、生態系に⁽²⁾はそのバランスを保つのに重要な役割を果たすキーストーン種がいることがある。

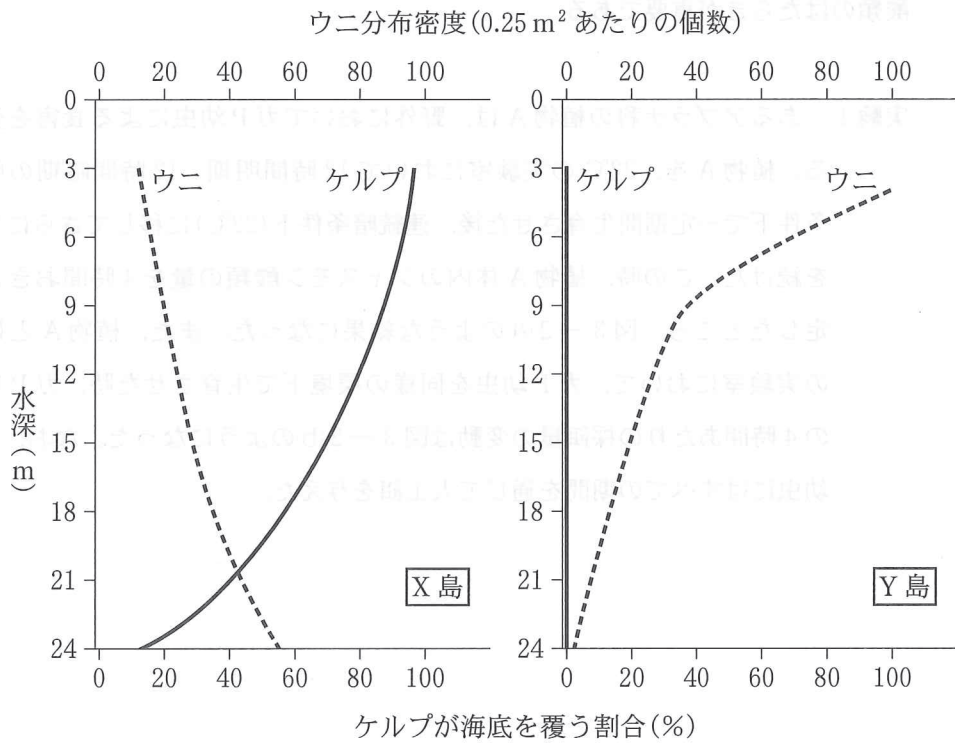


図 3—1 2つの島における水深とケルプが海底を覆う割合(実線), および水深とウニ分布密度(点線)の関係

〔文3〕

野外の植物は様々な植食者(植物を食べる動物)による食害を常に受けるため、食害を回避するためのいろいろな対抗策を講じている。第一の対抗策は、葉を硬くしたり葉の表面にあるトライコーム(毛状体)を発達させる「物理的防御」である。^(正)第二の対抗策は、植食者にとっての毒物や忌避物質を体内に蓄積する「化学的防御」である。化学的防御の誘導には、植物ホルモンの一種であるジャスモン酸類のはたらきが重要である。

実験1 あるアブラナ科の植物Aは、野外においてガP幼虫による食害を受ける。植物Aを、22℃の実験室において12時間明期/12時間暗期の明暗条件下で一定期間生育させた後、連続暗条件下(22℃)に移してさらに生育を続けた。この時、植物A体内のジャスモン酸類の量を4時間おきに測定したところ、図3—2(a)のような結果になった。また、植物Aとは別の実験室において、ガP幼虫を同様の環境下で生育させた時、ガP幼虫の4時間あたりの採餌量の変動は図3—2(b)のようになった。なお、ガP幼虫にはすべての期間を通じて人工餌を与えた。

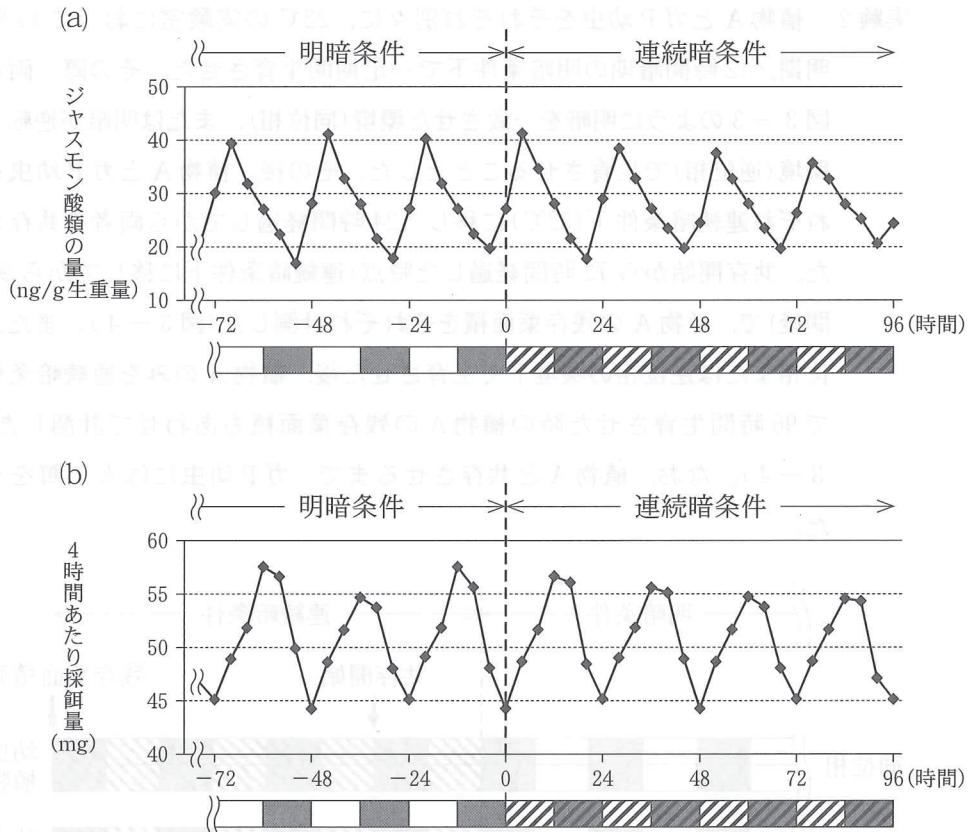


図3—2 植物A体内のジャスモン酸類の量(a)とガP幼虫の採餌量(b)の変動
 植物AとガP幼虫は別の実験室で生育させた。グラフの下のボックスは、それぞれ明暗条件下の明期(□)および暗期(■), 連続暗条件下において明暗条件が継続されていたとした場合の明期に相当する時間帯(▨)および暗期に相当する時間帯(■)を示す。

実験2 植物AとガP幼虫をそれぞれ別々に、22℃の実験室において12時間明期/12時間暗期の明暗条件下で一定期間生育させた。その際、両者は図3—3のように明暗を一致させた環境(同位相)、または明暗が逆転した環境(逆位相)で生育させることとした。その後、植物AとガP幼虫をそれぞれ連続暗条件下(22℃)に移し、24時間経過してから両者を共存させた。共存開始から72時間経過した時点(連続暗条件下に移してから96時間後)で、植物Aの残存葉面積をそれぞれ計測した(図3—4)。また、同位相または逆位相の環境下で生育させた後、植物Aのみを連続暗条件下で96時間生育させた時の植物Aの残存葉面積もあわせて計測した(図3—4)。なお、植物Aと共存させるまで、ガP幼虫には人工餌を与えた。

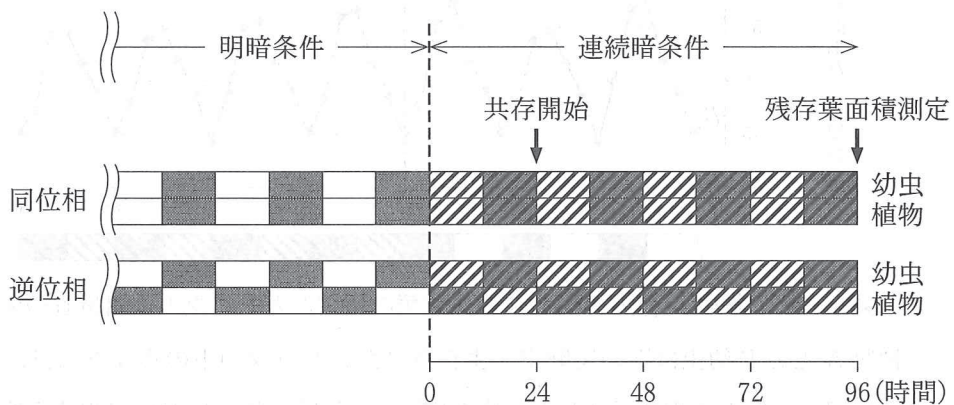


図3—3 植物AとガP幼虫の生育条件

図中のボックスの表記は、図3—2と同様である。

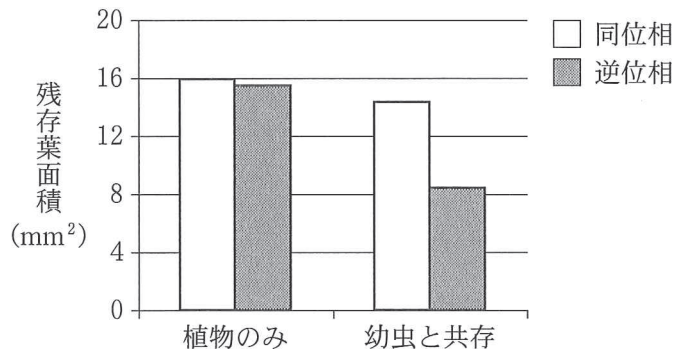


図3—4 共存開始から72時間後の植物Aの残存葉面積

〔問〕

I 文1について、以下の小問に答えよ。

A 空欄1～5にあてはまる適切な語句を、以下の選択肢①～⑮の中から選べ。解答例：1—①， 2—②

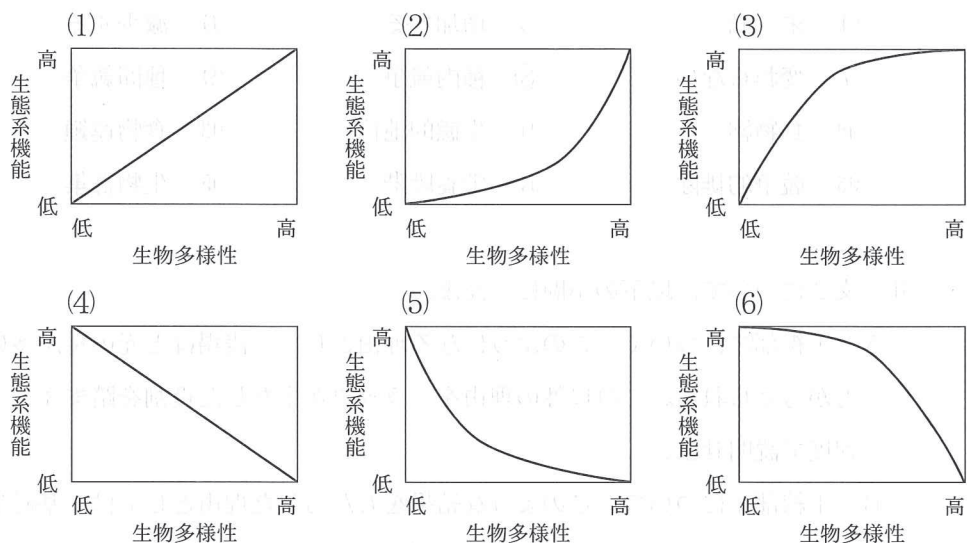
- | | | |
|---------|---------|--------|
| ① 前後 | ② 以上 | ③ 以下 |
| ④ 未満 | ⑤ 増加する | ⑥ 減少する |
| ⑦ 変わらない | ⑧ 種内競争 | ⑨ 種間競争 |
| ⑩ 食物網 | ⑪ 生態的地位 | ⑫ 食物連鎖 |
| ⑬ 競争的排除 | ⑭ 栄養段階 | ⑮ 生物群集 |

II 文2について、以下の小問に答えよ。

A 下線部(ア)について。このようになる理由として、浅場ほど光の量が多いことが考えられる。これ以外の理由を、ラッコが果たした役割を踏まえて2行程度で説明せよ。

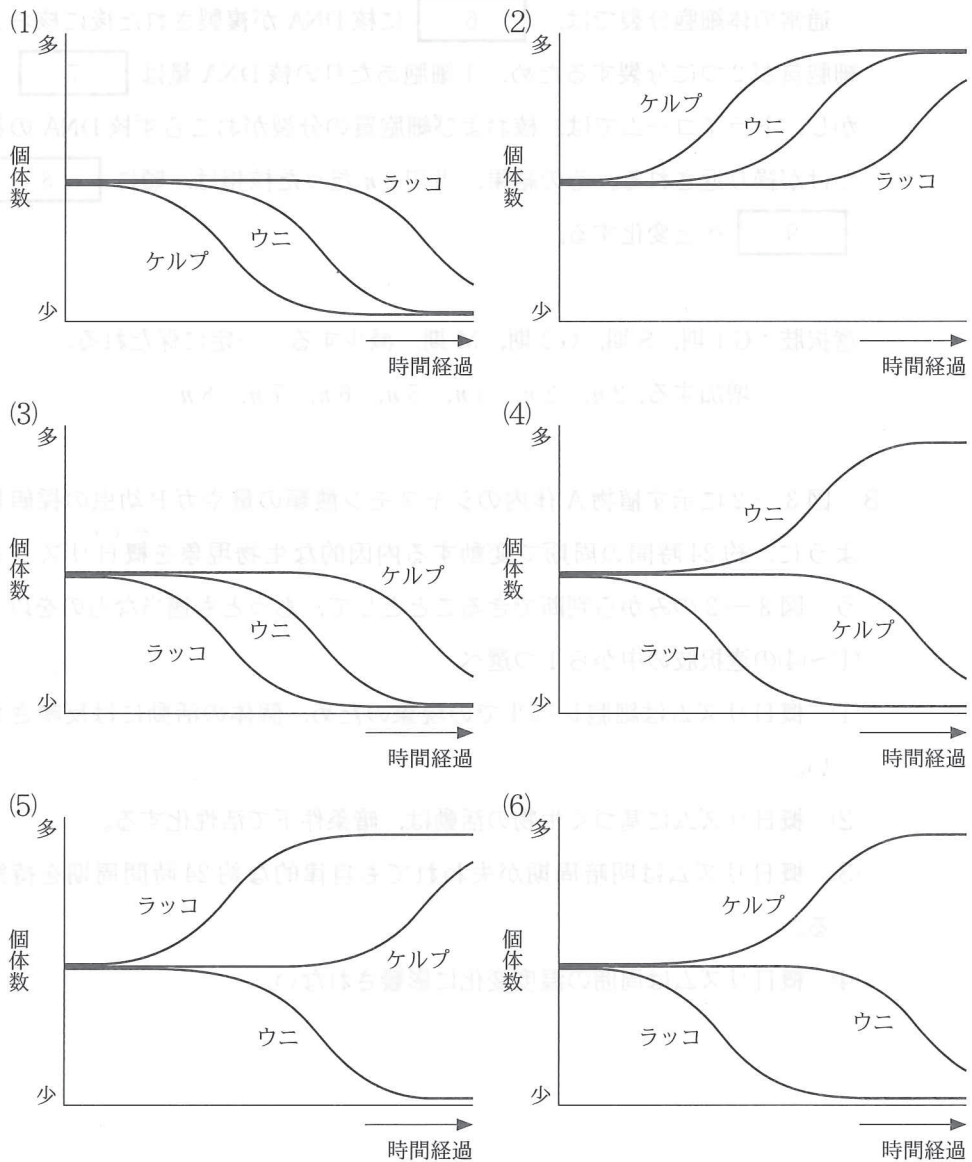
B 下線部(イ)について。このような結果をもたらした理由としては、基礎生産をまかなうサンゴモの生産性がケルプより低いことなどが考えられる。このような餌生物としての特性の違い以外に、理由となりうるケルプとサンゴモの違いを1つあげ、2行程度で説明せよ。

C 下線部(ウ)について。下の図は、生物多様性が著しく低い状態から健全な自然界のレベルまで増加するに従い、生態系機能がどのように変化するかを表す概念図である。キーストーン種が存在していることを示すもっとも適切な概念図を以下の(1)~(6)の中から1つ選べ。



D 1990年代に入りアラスカ沿岸からアリューシャン列島のケルプの森の生態系で、シャチがラッコを捕食する様子が初めて目撃されるようになった。平均体重4tのシャチが野外で生活していくのに、1日あたり200,000kcalのエネルギーを必要とする。1頭のシャチがラッコのみを捕食して必要なエネルギーをまかなうとした場合、1年間(365日)で何頭のラッコが必要となるか。計算結果の小数点第一位を四捨五入して整数で答えよ。答えを導く計算式も記せ。なお、ラッコの平均体重は30kg、体重あたりのエネルギー含有量は2kcal/g、シャチがラッコを摂食する際の同化効率(ア)は70%とする。

E 文2で紹介したX島周辺海域にラッコのみを捕食する数頭のシャチが定住した場合、ケルプの森の生態系を構成する生物種の個体数はどのように推移すると考えられるか。時間経過に伴うケルプ・ウニ・ラッコの個体数(相対値)の推移を示すグラフとして、もっとも適切なものを以下の(1)~(6)の中から1つ選べ。



Ⅲ 文3について、以下の小問に答えよ。

A 下線部(エ)について。多くの場合、トライコームは1つの巨大な細胞である。トライコームと細胞分裂に関する以下の文章中の空欄6～9に当てはまるもっとも適切な語を、選択肢の中から1つずつ選べ。なお、選択肢は繰り返し使用してもよい。

通常の体細胞分裂では、 に核 DNA が複製された後に核および細胞質が2つに分裂するため、1細胞あたりの核 DNA 量は 。しかし、トライコームでは、核および細胞質の分裂がおこらず核 DNA の複製だけが繰り返される。その結果、当初 $2n$ だった核相は、順に , へと変化する。

選択肢：G1期，S期，G2期，M期，減少する，一定に保たれる，増加する， $2n$ ， $3n$ ， $4n$ ， $5n$ ， $6n$ ， $7n$ ， $8n$

B 図3-2に示す植物A体内のジャスモン酸類の量やガP幼虫の採餌量の^{がいじつ}ように、約24時間の周期で変動する内因的な生物現象を概日リズムという。図3-2のみから判断できることとして、もっとも適当なものを以下の(1)~(4)の選択肢の中から1つ選べ。

- (1) 概日リズムは細胞レベルでの現象のため、個体の活動には反映されない。
- (2) 概日リズムに基づく生物の活動は、暗条件下で活性化する。
- (3) 概日リズムは明暗周期が失われても自律的な約24時間周期を持続する。
- (4) 概日リズムは周囲の温度変化に影響されない。

C 図3—2(a)について。ジャスモン酸類の量の増加に伴い、植物A体内においては様々な化学的防御反応が引き起こされる。当初は限られた数種類の調節タンパク質だけが活性化されるが、ジャスモン酸類の量がピークを迎えてから約6時間以内に、これらの調節タンパク質により直接調節されない遺伝子も含め数百種類もの遺伝子の発現が変動するようになる。発現が変動する遺伝子の数がこのように大幅に増加するためには、どのような遺伝子発現調節の仕組みが必要と考えられるか。2行程度で答えよ。

D 実験2について。図3—3のように逆位相下で生育させた植物AとガP幼虫をそれぞれ連続暗条件下に移してから、4時間おきに植物体内のジャスモン酸類の量と幼虫の採餌量を測定した。この時、植物体内のジャスモン酸類の量が最初にピークを迎えるのは、連続暗条件下に移してから何時間後か答えよ。また、ガP幼虫の採餌量が最初にピークを迎える時間についても同様に答えよ。

E 図3—4について。同位相下で生育させた植物AとガP幼虫を共存させた場合に比べて、逆位相下で生育させた両者を共存させた場合の方が、植物Aの残存葉面積は大きく減少した。この理由を化学的防御反応と幼虫の採餌活動の関係に注目し、同位相下の場合と逆位相下の場合を比較しながら、3行程度で説明せよ。なお、植物AとガP幼虫の共存は、植物A体内のジャスモン酸類の量の変動には影響を与えないとする。

地 学

第1問 宇宙に関する以下の問Ⅰ～Ⅱに答えよ。数値での解答には有効数字2桁で答え、計算の過程も示せ。

問Ⅰ 恒星の質量分布に関する以下の問いに答えよ。なお近似的に、質量 M が $M \geq 10 M_{\odot}$ (M_{\odot} は太陽質量) の大質量星の寿命は質量に反比例して減少するとしてよい。また、 $M = 10 M_{\odot}$ (B1型) の恒星の寿命を2000万年とする。

(1) ある星団では、観測される最も重い星の質量が $M = 40 M_{\odot}$ (O5型) であった。この星団では全ての恒星は同時に形成されたとして、この星団の年齢を求めよ。

(2) 恒星が誕生する際は、その質量はある質量分布に従う。質量範囲 $M \geq 10 M_{\odot}$ で誕生した恒星の総数を N_{10} とするとき、質量 M が $10 M_{\odot}$ と $m M_{\odot}$ の間である恒星の誕生時の個数 $N(m)$ は、近似的に

$$N(m) = N_{10} (1 - 10/m)$$

と表される(ただし $m > 10$ とする)。(1)とは別の星団を観測すると、質量範囲 $10 M_{\odot} \sim 20 M_{\odot}$ の恒星が60個観測され、 $20 M_{\odot}$ より重い星は20個観測された。この星団でも全ての恒星が同時に形成されたとして、この星団の年齢を求めよ。

(3) 銀河系は大質量星の年齢よりはるかに長い間、一定の割合で恒星を生み出し続けているとする。恒星が誕生するときの質量分布は(2)の式と変わらない場合、現在の銀河系内に存在する質量範囲 $10 M_{\odot} \sim 11 M_{\odot}$ の恒星の数と、 $20 M_{\odot} \sim 21 M_{\odot}$ の恒星の数の比はどうか。恒星の寿命はそれぞれ $10 M_{\odot}$ 、 $20 M_{\odot}$ のもので代表されるとして答えよ。

この図の z は計算に用いるべき数値である。式(11)の z にこの値を代入し、計算すれば式(11)の z を決定できる。この値は、式(11)の z に代入して、式(11)の z を決定する。

(切り離さないで用いよ。)

この図の z は計算に用いるべき数値である。式(11)の z にこの値を代入し、計算すれば式(11)の z を決定できる。この値は、式(11)の z に代入して、式(11)の z を決定する。

この図の z は計算に用いるべき数値である。式(11)の z にこの値を代入し、計算すれば式(11)の z を決定できる。この値は、式(11)の z に代入して、式(11)の z を決定する。

この図の z は計算に用いるべき数値である。式(11)の z にこの値を代入し、計算すれば式(11)の z を決定できる。この値は、式(11)の z に代入して、式(11)の z を決定する。

この図の z は計算に用いるべき数値である。式(11)の z にこの値を代入し、計算すれば式(11)の z を決定できる。この値は、式(11)の z に代入して、式(11)の z を決定する。

問Ⅱ 宇宙の膨張に関する以下の問いに答えよ。なお、天体からの光はどの方向にも同じように放射され、伝搬の途中でエネルギーが失われることはないものとする。

- (1) 宇宙膨張はハッブルによって発見されたが、ハッブルが最初に求めたハッブル定数は、様々な誤差のため現在知られている値よりかなり大きく、 6.0×10^2 (km/s)/Mpc 程度であった。ここで Mpc (メガパーセク) = 10^6 pc (パーセク) である。銀河間の相対速度は変わらないとして、過去にさかのぼると全てが一点に集中してしまうのは現在より何年前になるか、求めよ。必要であれば、 $1 \text{ pc} = 3.1 \times 10^{16} \text{ m}$ を用いてよい。
- (2) (1)で求めたものが宇宙の年齢だとすると様々な矛盾が生じるが、その例を一つ挙げよ。

ハッブルの法則は後退速度と距離の間の比例関係である。しかし、現実の宇宙では様々な効果によって単純な比例関係からずれる可能性がある。その一例として、空間が曲がっている場合が考えられる。例えば、我々が住んでいる地球の表面は、我々の近傍では平面に見えるが、実は大きな球面という曲がった二次元空間である。三次元空間でも同様の可能性が考えられる。簡単のため、我々の住む空間が三次元ではなく平面や曲面などの二次元空間であるとしてこの効果を考察しよう。

ケフェウス座 δ 型変光星など、光度が知られている天体を使って求めた距離を光度距離 d_L という。ある天体の光度 L (単位時間あたりに放出されるエネルギー) が知られており、観測されたみかけの明るさが F であった。通常の三次元空間では、みかけの明るさは天体からのエネルギーが半径 d_L の球面に広がった結果なので、 $F = L/(4\pi d_L^2)$ である。我々が二次元の平面の中に住んでいて、放射された光のエネルギーも二次元平面上のみに伝搬する場合は、 F は球面を円周に置き換えて $F = L/(2\pi d_L)$ となる。すなわち、 L と F から見

積もられる光度距離は

$$d_L = L / (2\pi F) \quad (a)$$

となる。

以下では我々は半径 R の球 (中心を O とする) の球面上に住んでいるものとする。球面上のある 1 点 P から別の点までの球面上の距離 d_T は、2 点を球面上で結んだ最短経路の長さである (ただし $d_T < \pi R/2$ とする)。 P 点からの距離が d_T であるような球面上の点の集合は円となり、その中心は球内部の直線 OP 上にある。

(3) この円の半径を R , d_T で表せ。

(4) 天体からの光は球面上のみを、常に最短経路をとるように伝搬する。 P 点にある光度 L の天体を、 P 点からの球面上の距離 d_T において観測した場合のこの天体の明るさ F を L , R , d_T で表せ。

(5) 宇宙が曲面であることを知らない観測者は、宇宙が平面であると仮定し、式(a)によって距離 d_L を見積もる。一方、球面全体が風船のように一様に膨張している場合、観測される後退速度 v は d_T に比例し、ハッブル定数 H を用いて $v = Hd_T$ となる。 d_T は観測できないので、観測されるハッブルの法則は d_L と v の関係となるが、これは比例関係にはならない。 d_L を v , H , R で表せ。

第2問 大気と海洋に関する以下の問Ⅰ～Ⅱに答えよ。

問Ⅰ 地面の影響を強く受ける対流圏の最下層は大気境界層とよばれる。大気境界層と地面は顕熱(熱伝導)によって直接に熱エネルギーを交換するだけでなく、水の蒸発と水蒸気の凝結により潜熱を交換している。

- (1) 1 m^2 の地面が1秒間に太陽放射により受け取るエネルギーを $S_0[\text{W}/\text{m}^2]$ 、大気から赤外放射により受け取るエネルギーを $F_a[\text{W}/\text{m}^2]$ 、赤外放射により失うエネルギーを $F_s[\text{W}/\text{m}^2]$ 、顕熱として失うエネルギーを $H[\text{W}/\text{m}^2]$ 、潜熱として失うエネルギーを $E[\text{W}/\text{m}^2]$ とする。また、広さ 1 m^2 、厚さ 1 m の土壌の平均の熱容量を $C_g[\text{J}/\text{K}]$ とする。この土壌の平均温度の1秒間の変化を式で表せ。ただし、 1 m より深い地中との熱の交換は無視できるとする。
- (2) 太陽活動の変動や火山の噴火、人間活動による大気中へのエアロゾルの放出などにより、地面の受ける太陽放射 S_0 が変化する場合がある。太陽放射 S_0 で地面温度 $T_s[\text{K}]$ の平衡状態から、太陽放射 $S_0 + \Delta S_0$ で地面温度 $T_s + \Delta T_s$ の平衡状態に変化したとき、 ΔS_0 と ΔT_s の関係を式で表せ。ここで、平衡状態とは土壌の平均温度が変化しない状態のことである。簡単のため、次の(a)～(e)の仮定を用いる。
- (a) 気温 $T_a[\text{K}]$ と F_a は変化しない。
- (b) 地面温度 T_s のとき $F_s = \sigma T_s^4$ である。 $\sigma[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$ はシュテファン・ボルツマン定数。
- (c) H 、 E は地面と大気の温度差 $T_s - T_a$ に比例し、 $H = C_H(T_s - T_a)$ 、 $E = C_E(T_s - T_a)$ と表せる。 $C_H[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ と $C_E[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ はそれぞれ顕熱と潜熱の交換効率を表す定数。
- (d) $|\Delta T_s|$ は T_s に比べて十分に小さい。
- (e) $|x|$ が1よりも十分に小さいとき、 $(1 + x)^4 = 1 + 4x$ と近似する。

次に、太陽放射 S_0 の日変化を考える。この場合、土壌の温度変化は無視できず、地面温度が日変化する。また、地面との熱交換のため大気境界層の気温

も日変化する。雲が無く風の弱い晴天時を考えると、日中に S_0 が大きくなると地面が温められ、地面からの熱エネルギーで暖められた空気塊は軽くなって上昇する。夜間は $S_0 = 0$ となり、赤外放射により地面から熱エネルギーが失われ、地面に接した大気は効率的に冷やされる。

(3) 図 2—1 は、雲が無く風の弱い晴天時における、大気境界層の気温と地表付近の気温の差の高度変化を描いた模式図である。図の(A), (B), (C)から現地時間の 8 時, 15 時, 22 時に相当するものを選び、選んだ理由を 2～3 行で説明せよ。

(4) 気温差の高度変化が図 2—1 の(B)であるとき、高度 z_c で煙が放出されたとすると煙は高さ方向にどのように広がるか、高度 z_a と高度 z_b に挟まれた層の名称を含めて 1～2 行で説明せよ。ただし、放出された煙の温度は同一高度の気温と等しいとする。

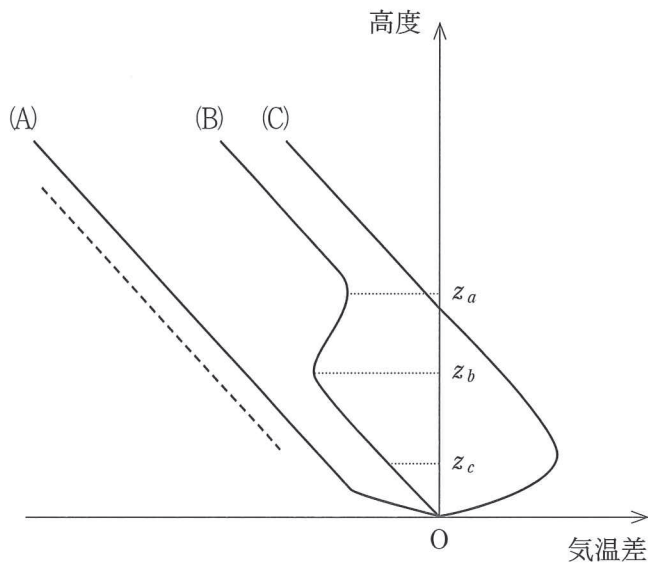


図 2—1 大気境界層の気温と地表付近の気温の差の高度変化の模式図。 z_c は煙の放出される高度を表す。破線の傾きは乾燥断熱減率を示す。

計算用紙

この紙は、計算機で計算するに用いられる。計算機は、この紙に記入された式を自動的に計算し、結果を出力する。この紙は、計算機に接続されたプリンターで印刷される。印刷された紙は、計算機に挿入し、計算機が自動的に計算を開始する。計算機は、この紙に記入された式を自動的に計算し、結果を出力する。この紙は、計算機に接続されたプリンターで印刷される。印刷された紙は、計算機に挿入し、計算機が自動的に計算を開始する。

この紙は、計算機で計算するに用いられる。計算機は、この紙に記入された式を自動的に計算し、結果を出力する。この紙は、計算機に接続されたプリンターで印刷される。印刷された紙は、計算機に挿入し、計算機が自動的に計算を開始する。

この紙は、計算機で計算するに用いられる。計算機は、この紙に記入された式を自動的に計算し、結果を出力する。この紙は、計算機に接続されたプリンターで印刷される。印刷された紙は、計算機に挿入し、計算機が自動的に計算を開始する。

この紙は、計算機で計算するに用いられる。計算機は、この紙に記入された式を自動的に計算し、結果を出力する。この紙は、計算機に接続されたプリンターで印刷される。印刷された紙は、計算機に挿入し、計算機が自動的に計算を開始する。



この紙は、計算機で計算するに用いられる。計算機は、この紙に記入された式を自動的に計算し、結果を出力する。この紙は、計算機に接続されたプリンターで印刷される。印刷された紙は、計算機に挿入し、計算機が自動的に計算を開始する。

問Ⅱ 大規模な海流は、赤道域以外では地衡流で近似できる。また、海洋表層の地衡流では、海面の勾配による圧力傾度力とコリオリの力が釣り合い、コリオリの力は流速と緯度の正弦(\sin)に比例する。これらのことを考慮して、以下の問いに答えよ。

(1) 図2—2の地点A, Bにおける矢印は、それぞれ大規模な環流の西側に位置する2つの海流の方向を模式的に示している。地点A, Bにおいて、海面勾配の大きさがそれぞれ0.30 cm/km, 0.85 cm/kmであった。地点Aにおける表層の地衡流の速さが0.31 m/sであるとき、地点Bにおける表層の地衡流の速さ(単位:m/s)を求めよ。ただし、地点A, Bにおける緯度 ϕ の正弦 $\sin \phi$ の値はそれぞれ0.66, 0.56とし、地衡流の速さの計算において海水の密度の違いは無視できるものとする。有効数字2桁で解答し、計算過程も示すこと。

(2) 地点A, Bの海流はそれぞれの環流の東側の海域に比べて流速が大きい。このように環流の西側に強い流れが生じることを何と呼ぶか。

(3) 海洋には、環流よりも規模は小さいが、コリオリの力の影響を強く受けている渦が多数存在することが知られている。図2—2に灰色の陰影で示したEはそのような渦の1つを示したものである(以下渦Eとする)。渦Eにおいて遠心力は無視でき、表層の流速は円形の等高線に沿った地衡流で近似できるとする。渦Eの表層における回転方向は、上から見て時計回り、反時計回りのどちらであるか。理由とともに2～3行で答えよ。

(4) 渦Eのような渦の内部では、緯度によるコリオリの力の違いは小さい。しかし、長い時間をかけてみたときには、緯度によるコリオリの力の違いは、渦の構造や移動に影響を及ぼす。

渦Eの流れに直交する方向の海面勾配が、場所によらず一定であったとする。このとき、表層の地衡流の速さは緯度によって決まり、流速が増加す

る場所では海面が下降し，減少する場所では海面が上昇していく。渦 E の東側と西側のそれぞれで，海面は上昇するか，下降するか，理由とともに 2～3 行で答えよ。

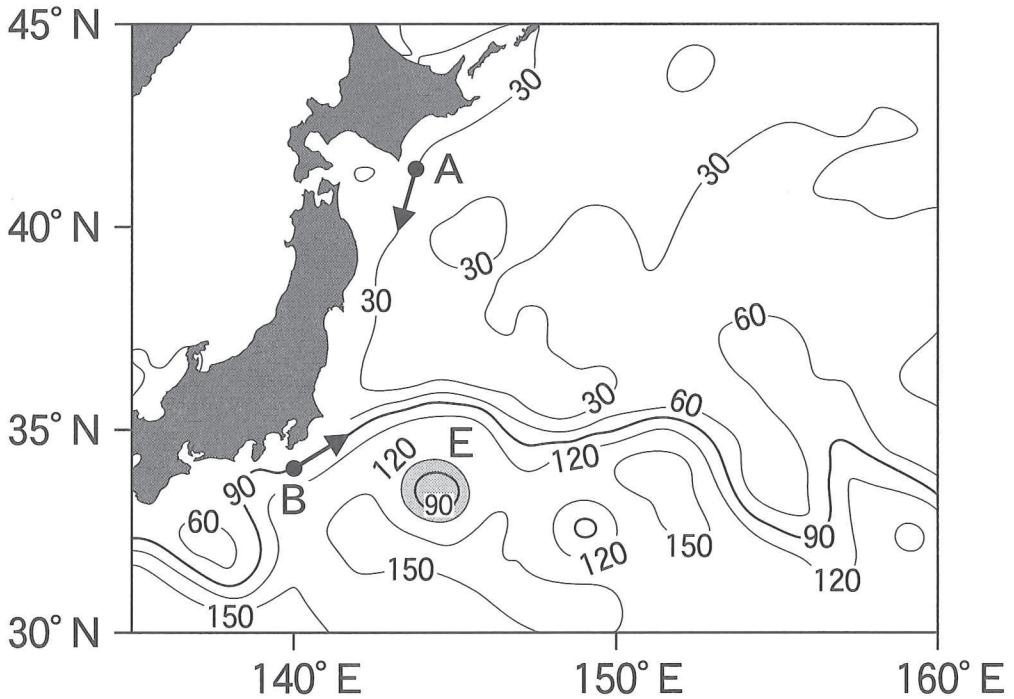


図 2—2 ある年の冬における海面の高さ(単位: cm)の分布。見やすさのため，90 cm の等高線を太線にしてある。2 つの矢印は地点 A, B における海流の向き，灰色の陰影で示した E は渦を表す。

計算用紙

(切り離さないで用いよ。)



計 算 用 紙

主計官印紙利便（切り離さないで用いよ。）

（切離さないで用いよ。）

（切離さないで用いよ。）

（切離さないで用いよ。）

（切離さないで用いよ。）

（切離さないで用いよ。）

（切離さないで用いよ。）

第3問 以下の問Ⅰ～Ⅱに答えよ。

問Ⅰ プレートの拡大境界である中央海嶺では、新しい海洋底が形成され、海嶺軸から離れる方向に移動していく。この海洋底の水深はアイソスタシーによって決まると考えられるが、岩盤上には堆積物が積もっており、その堆積物の荷重も水深に影響している。このため、観測される水深(海面から堆積物の上面までの深さ)は、仮に堆積物が全く積もらなかったとした場合の水深とは異なる。図3-1は、観測値に基づいて求められた、堆積物が積もらなかった場合の水深と、海洋底の年齢(形成されてからの経過時間)との関係を示したものである。

- (1) 図3-1に見られるように、水深が海洋底の年齢とともに深くなっていく理由を、以下の3つの言葉を用いて2行程度で説明せよ。

リソスフェア、アセノスフェア、密度

- (2) 堆積物が水深に及ぼす影響について考えてみる。水深が d 、堆積物の厚さが D である地点について、堆積物が積もらなかった場合の水深を d_0 とする。また、海水の密度を ρ_w 、堆積物の密度を ρ_s 、アセノスフェアの密度を ρ_A とする。

(a) d_0 を d 、 D 、 ρ_w 、 ρ_s 、 ρ_A を用いた式で表せ。

- (b) ある地点で観測された水深は4800 m、堆積物の厚さは370 mであった。堆積物が積もらなかったとした場合、この地点の水深は観測値とどれだけ異なるかを、有効数字2桁で求めよ。ただし、 $\rho_w = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_s = 2.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_A = 3.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とする。

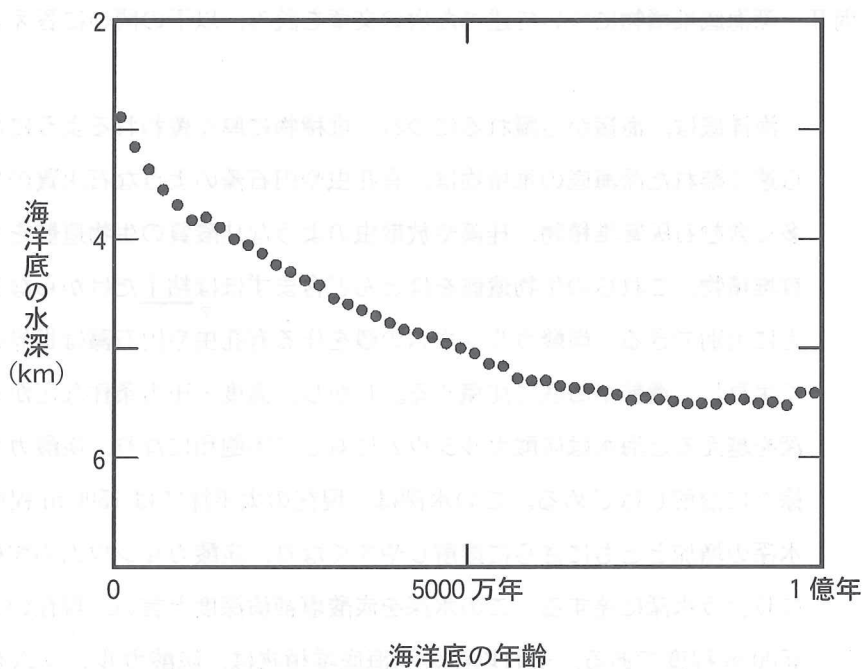


図 3—1 海洋底の水深と年齢の関係

海洋底の水深と年齢の関係は、図 3—1 のように示されています。この図は、海洋底の年齢（横軸）と水深（縦軸）の関係を示しています。横軸は 0 から 1 億年まで、縦軸は 2 から 6 km まで示されています。データポイントは、年齢が 0 から 500 万年までは、水深が急激に増加し、その後、500 万年を超えると、水深の増加が非常に緩やかになります。これは、海洋底の年齢が若いほど水深が浅く、年齢が古いほど水深が深いという傾向を示しています。

問Ⅱ 深海底堆積物について述べた次の文章を読み、以下の問いに答えよ。

海洋底は、海嶺から離れるにつれ、堆積物に厚く覆われるようになる。陸から遠く離れた深海底の堆積物は、有孔虫や円石藻のような石灰質の生物遺骸を多く含む石灰質堆積物、珪藻や放射虫のような珪酸質の生物遺骸を多く含む珪質堆積物、これらの生物遺骸をほとんど含まずほぼ粘土^(ア)だけからなる遠洋性粘土に大別できる。炭酸カルシウムの殻を作る有孔虫や円石藻は世界の海洋に広く生息し、遺骸が海底に沈積する。しかし、温度・圧力条件などから、ある水深を越えると海水は炭酸カルシウムに対して不飽和になり、炭酸カルシウムは徐々に溶解しはじめる。この水深は、現在の太平洋では1500 m程度である。水深の増加とともにさらに溶解しやすくなり、炭酸カルシウムの沈積と溶解がつり合う水深に達する。この水深を炭酸塩補償深度と言ひ、現在の太平洋では4500 m程度である。それ以深の深海底堆積物は、炭酸カルシウムをほとんど含まない。

深海底堆積物の年代を知るためには、様々な方法が用いられる。有孔虫や珪藻などの生物遺骸を含む堆積物では、示準化石を用いて年代を推定することが可能である。有孔虫の遺骸は、放射性炭素年代法により年代測定をすることができる。大気中の二酸化炭素は、主として質量数12の炭素(^{12}C)からなるが、一定の割合で質量数14の放射性炭素(^{14}C)がわずかに含まれている。生きている有孔虫が作る炭酸カルシウム殻には、大気中の二酸化炭素と同じ割合で ^{14}C が含まれるが、その死後は放射壊変により減少する。このことを利用し、過去^(イ)の大気中の ^{14}C 濃度は現在と同じであったと仮定して年代を計算する。 ^{14}C は、地球の上層大気中で高エネルギーの宇宙線が窒素原子と衝突することにより生成する。宇宙線の^(ウ)大気への入射量は変化するため、大気中の ^{14}C 濃度は、実際は過去から現在まで一定ではなく変化してきた。そのため、正確な年代を求めめるためには、この影響を補正しなければならない。

- (1) 下線(ア)の粘土は、主としてどのように陸から運ばれるか。
- (2) 太平洋における、石灰質堆積物、珪質堆積物、遠洋性粘土の分布を図3—2に示す。凡例A, B, Cのうち、石灰質堆積物を表すものはどれか。そのように判断する理由とともに、2行程度で述べよ。
- (3) 下線(イ)の仮定のもと、放射性炭素年代法で年代を求める。 ^{14}C 濃度の測定限界が現在の大气中の濃度の1000分の1である場合、求めることができる最も古い年代は何年前か、計算式を示し、有効数字2桁で答えよ。ここで、 ^{14}C の半減期は5700年とし、必要であれば $\log_{10} 2 = 0.30$ を用いてよい。
- (4) 下線(ウ)のように、地球大气への宇宙線の入射量に変化してきた原因を2行程度で述べよ。
- (5) 遠洋性粘土は、石灰質および珪酸質の生物遺骸を含まないため、年代を知るために示準化石や放射性炭素年代法を用いることはできない。この場合にも用いることができる他の方法を一つ挙げよ。

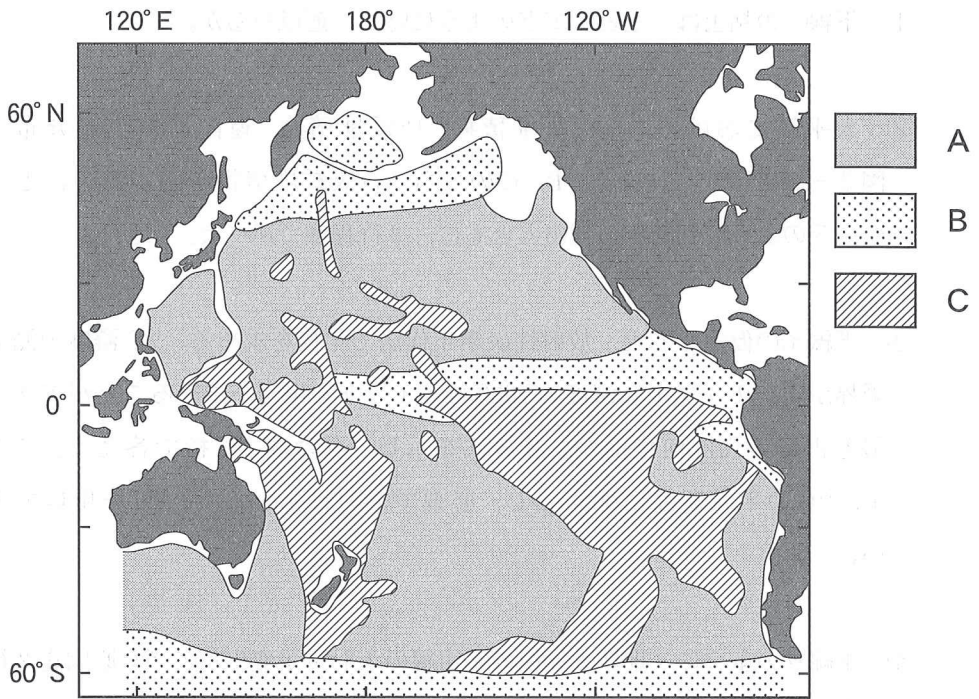


図 3—2 太平洋における深海底堆積物の分布

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)