

入学試験問題

理科



(配点 120 点)

令和 4 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 95 ページあります(本文は物理 4～25 ページ, 化学 26～41 ページ, 生物 42～71 ページ, 地学 72～95 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。

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

物 理

第1問 地球表面上の海水は、地球からの万有引力の他に、月や太陽からの引力、さらに地球や月の運動によって引き起こされる様々な力を受ける。これらの力の一部が時間とともに変化することで、潮の満ち干が起こる(潮汐運動)。ここでは、地球の表面に置かれた物体に働く力について、単純化したモデルで考察しよう。なお、万有引力定数を G とし、地球は質量 M_1 で密度が一様な半径 R の球体とみなせるとする。以下の設問 I, II, III に答えよ。

I 地球の表面に置かれた物体は地球の自転による遠心力を受ける。地球の自転周期を T_1 とするとき、以下の設問に答えよ。

(1) 質量 m の質点が赤道上的ある地点 E に置かれたときに働く遠心力の大きさ f_0 、および北緯 45° のある地点 F に置かれたときに働く遠心力の大きさ f_1 を求め、それぞれ m, R, T_1 を用いて表せ。

(2) 設問 I(1)の地点 E における、地球の自転による遠心力の効果を含めた重力加速度 g_0 を求め、 G, M_1, R, T_1 を用いて表せ。

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

II 次に、月からの引力と、月が地球の周りを公転運動することによって発生する力を考える。ここではこれらの力についてのみ考えるため、地球が自転しないという仮想的な場合について考察する。

月が地球の周りを公転するとき、地球と月は、地球と月の重心である点 O を中心に同一周期で円運動をすると仮定する(図 1—1)。なお、図 1—1 において、この円運動の回転軸は紙面に垂直である。月は質量 M_2 の質点とし、地球の中心と月との距離を a とする。また、地球の中心および月から点 O までの距離をそれぞれ a_1 、 a_2 とする。以下の設問に答えよ。

- (1) 点 O から見た地球の中心および月の速さをそれぞれ v_1 、 v_2 とする。 v_1 および v_2 を a 、 G 、 M_1 、 M_2 を用いて表せ。
- (2) 点 O を原点として固定した xy 座標系を、図 1—2(a)のように紙面と同一平面にとる。時刻 $t = 0$ において、座標が $(-a_1 - R, 0)$ である地球表面上の点を点 X とする。月の公転周期を T_2 とするとき、時刻 t における点 X の座標を、 a_1 、 R 、 T_2 、 t を用いて表せ。ただし、地球の自転を無視しているため、時刻 $t = 0$ 以降で図 1—2(b)、(c)のように位置関係が変化することに注意せよ。
- (3) 設問 II(2)の点 X に、 M_1 および M_2 に比して十分に小さい質量 m の質点が置かれているときを考える。この質点について、地球が点 O を中心とした円運動をすることで生じる遠心力の大きさ f_c を求め、 G 、 m 、 M_2 、 a を用いて表せ。
- (4) ある時刻において、地球表面上で月から最も遠い点を P 、月に最も近い点を Q とする。質量 m の質点を点 P および点 Q に置いた場合に、質点に働く遠心力と月からの万有引力の合力の大きさをそれぞれ f_p 、 f_q とする。 f_p 、 f_q を G 、 m 、 M_2 、 a 、 R を用いて表せ。また、点 P および点 Q における合力の向きは月から遠ざかる方向か、近づく方向かをそれぞれ答えよ。

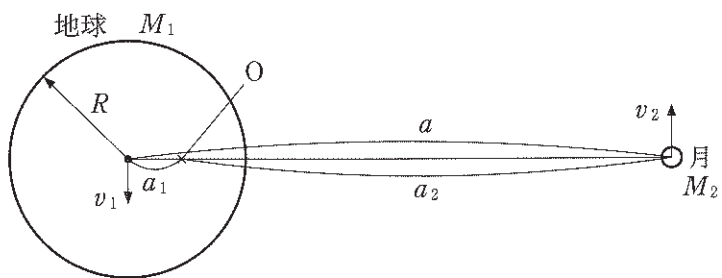
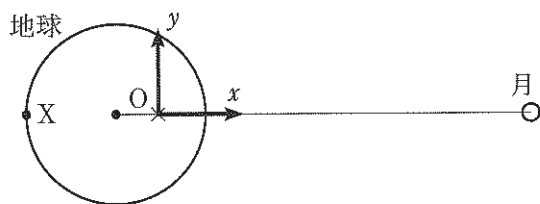
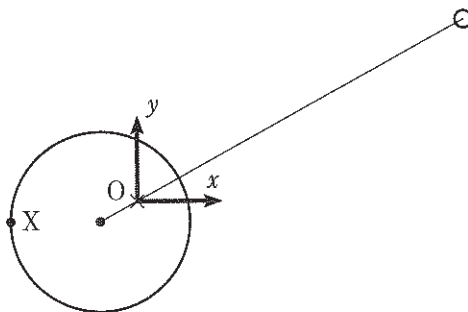


图 1—1

(a) $t = 0$



(b)



(c)

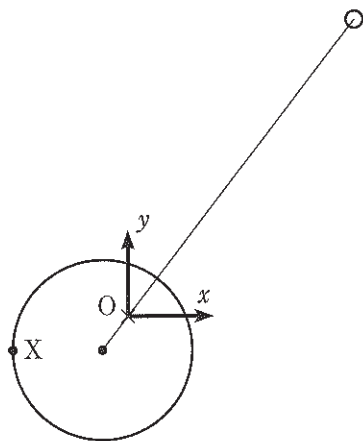


图 1—2

Ⅲ さらに、太陽からの引力と、地球の公転運動によって発生する力について考える。これらの力についても設問Ⅱと同様に考えられるものとする。なお、地球と太陽の重心を点 O' とする。太陽は質量 M_3 の質点とし、地球の中心と太陽の距離を b とする。

図 1—3 のように、ある時刻において地球表面上で太陽から最も遠い点を S とする。質量 m の質点が点 S に置かれたとき、地球が点 O' を中心とした円運動をすることで生じる遠心力と太陽からの万有引力の合力の大きさを f_s とする。設問Ⅱ(4)で求めた f_p に対する f_s の比は以下のように見積もることができる。

$$0. \boxed{\text{ア}} < \frac{f_s}{f_p} < 0. \boxed{\text{イ}}$$

$\boxed{\text{ア}}$ と $\boxed{\text{イ}}$ には連続する 1 桁の数字が入る。表 1—1 の中から必要な数値を用いて計算し、 $\boxed{\text{ア}}$ に入る数字を答えよ。

表 1—1

地球の質量	M_1	$6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$
月の質量	M_2	$7.3 \times 10^{22} \text{ kg}$
太陽の質量	M_3	$2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$
地球の中心と月との距離	a	$3.8 \times 10^8 \text{ m}$
地球の中心と太陽との距離	b	$1.5 \times 10^{11} \text{ m}$
地球の半径	R	$6.4 \times 10^6 \text{ m}$
万有引力定数	G	$6.7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{s}^2)$

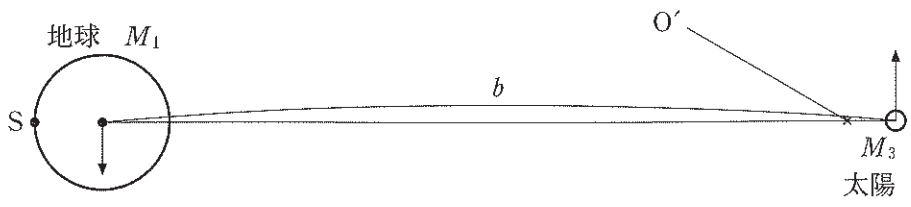


图 1—3

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2問 図2—1のように、水平な xy 平面上に原点 O を中心とした長円形のレールがあり、斜線で示された $-\frac{d}{2} < x < \frac{d}{2}$, $y < 0$ の領域には鉛直上向き方向に磁束密度の大きさが B の一様な磁場が加えられている。レール上に木製の台車があり、コイルを含む回路が台車に固定されている。コイルは xy 平面に平行な正方形で、一辺の長さは L 、ただし、 $L > d$ とする。コイルの四つの辺は台車の進行方向に対して平行または垂直である。上から見たとき台車とコイルの中心は一致しており、回路を含む台車の質量は m である。レールの直線部 P_0P_2 は台車の大きさに比べて十分長いものとし、区間 P_0P_2 上の $x = 0$ の点を P_1 とする。

台車が点 P_0 を速さ v_0 で x 軸正の方向(図の右方向)に出発し、その後、台車の中心が最初に P_1 , P_2 を通過した瞬間の速さをそれぞれ v_1 , v_2 とする。 v_0 に比べて速さの変化 $|v_1 - v_0|$ と $|v_2 - v_1|$ は十分に小さい。また、 $v_a = \frac{v_0 + v_1}{2}$ とする。コイルの右辺が磁場に進入する瞬間と磁場から出る瞬間の台車の中心位置をそれぞれ Q_1 , Q_2 とする。同様に、左辺が磁場に進入する瞬間と出る瞬間の台車の中心位置をそれぞれ Q_3 , Q_4 とする。台車に働く摩擦力や空気抵抗、コイル自身の電気抵抗は無視できる。

I 図2—2のように、回路が正方形の一巻きコイルと抵抗値 R の抵抗からなる場合に、台車が最初に区間 P_0P_2 を走る時の運動を考える。

- (1) 台車の中心が Q_1 から Q_2 へ移動する運動について、以下の と に入る式を v_a , L , d , B , m , R のうち必要なものを用いて表せ。磁束の符号は鉛直上向きを正とする。

速さに比べて速さの変化が十分に小さいため、台車が Q_1Q_2 間を移動するのにかかる時間は $\Delta t = \frac{d}{v_a}$ と近似できる。移動の前後でのコイルを通る磁束の変化量 $\Delta\Phi$ は であり、この間の誘導起電力の平均値は $\bar{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ と書くことができる。移動中に誘導起電力が \bar{E} で一定であると近似すると、この間に抵抗で発生するジュール熱の総和は と書ける。

- (2) v_1 を v_0 , L , d , B , m , R のうち必要なものを用いて表せ。

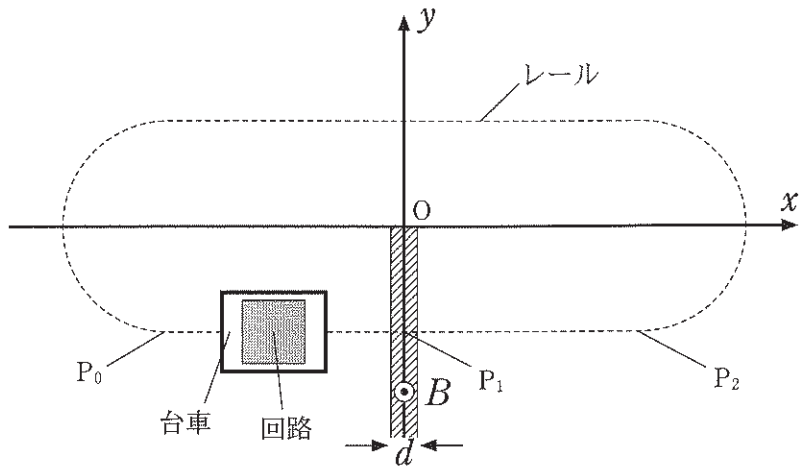


図 2—1

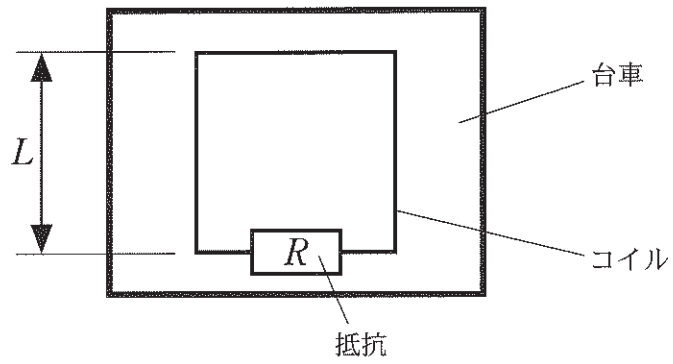


図 2—2

II 正方形の一巻きコイルに，抵抗値 R の抵抗，起電力 V で内部抵抗の無視できる電池，理想的なダイオードが接続された回路を台車に載せて走らせる。理想的なダイオードとは，順方向には抵抗なしに電流を通し，逆方向には電流を流さない素子である。図 2—3 は，区間 P_0P_2 を走る台車を上から見たものである。 P_0 を出発した台車は磁場を通過することにより減速した。

台車が最初に区間 P_0P_2 を走る時の運動について， v_0, L, d, B, m, R, V のうち必要なものを用いて設問(1)~(3)に答えよ。ただし，設問 I と同様の近似を用いることができるものとする。

- (1) 台車の中心が Q_1 から Q_2 へ移動する間にコイルに流れる電流の大きさを求めよ。
- (2) この電流によりコイルが磁場から受けるローレンツ力を求めよ。力の符号は， x 軸正の向きを正とする。
- (3) 同様に，台車の中心が Q_3 から Q_4 へ移動する間のローレンツ力を求めよ。

台車はレール上を繰り返し回りながら徐々に速度を下げ，やがて一定の速さ v_∞ で運動するようになった。設問(4)，(5)に答えよ。

- (4) n 回目に P_2 を通り抜けた時の台車の運動エネルギー K_n を n の関数としてグラフに描いた場合，図 2—4 の①~④のうちどの形が最も適切か答えよ。
- (5) 速さ v_∞ を v_0, L, d, B, m, R, V のうち必要なものを用いて表せ。

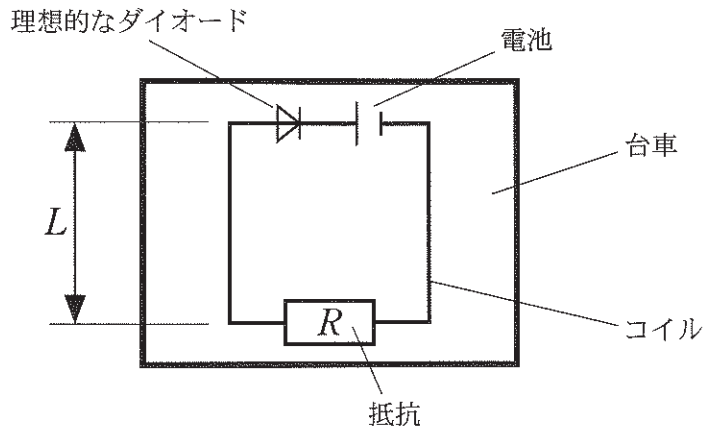


図 2—3

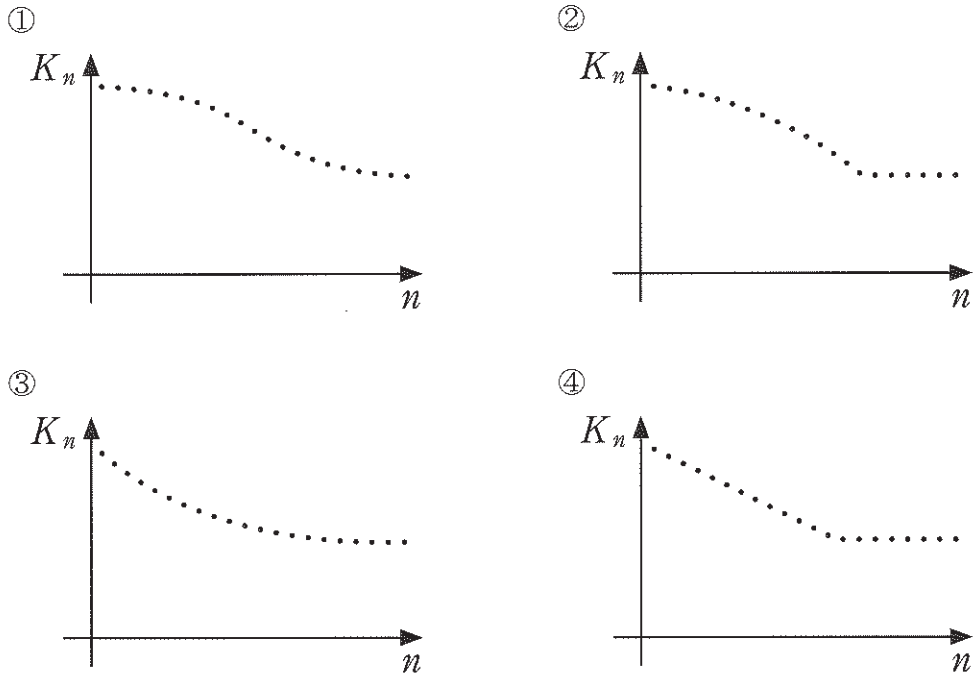


図 2—4

Ⅲ 2本の正方形一巻きコイルと接続パネルからなる回路を台車に載せて走らせる。図2—5は区間 P_0P_2 を走る台車を上から見たものである。2本のコイルの両端は接続パネルの端子A, B, C, Dに接続されている。接続パネルは図2—6に示すような抵抗と理想的なダイオードからなる回路である。設問Iと同様の近似を用いることができるものとし、台車が最初に区間 P_0P_2 を走る時の運動について、以下の設問に答えよ。2本のコイルは上から見たときに完全に重なっているとみなすことができ、接続パネル以外の部分では互いに絶縁されている。また、接続パネルの大きさは無視できるものとする。

(1) 端子Dの電位をゼロとする。台車の中心が Q_1Q_2 間を移動する間の端子A, Bの電位をそれぞれ求め、 v_0, L, d, B, m のうち必要なものを用いて表せ。

(2) 抵抗 R_1 と R_2 の抵抗値 R_1, R_2 は $R_1 + R_2 = 6R$ を満たしながら $0 < R_1 < 6R$ の範囲で値を調節することができる。区間 P_0P_2 を通り過ぎた後の台車の速さの変化 $|v_2 - v_0|$ を $v_0, L, d, B, m, R_1, R_2$ のうち必要なものを用いて表せ。また、 $|v_2 - v_0|$ が最小となるような R_1 を求め、 R を用いて表せ。

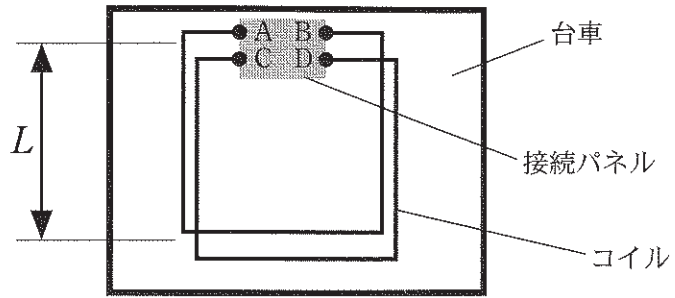


図 2—5

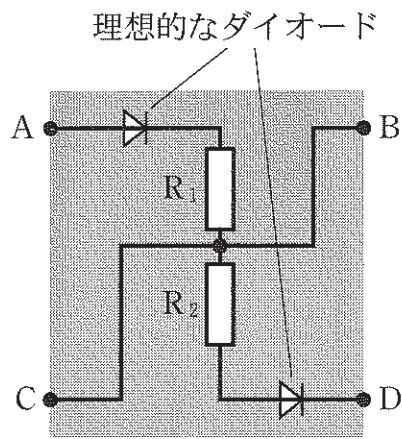


図 2—6

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のようにピストンのついた断面積一定のシリンダーがある。ピストンには棒がついており、気密を保ちながら鉛直方向に滑らかに動かすことができる。シリンダーとピストンで囲まれた空間は、シリンダー内のある位置に水平に固定された特殊な膜によって領域1と領域2に仕切られている。領域1と領域2には合計1モルの単原子分子理想気体Xが、領域2には気体Xのほかに1モルの単原子分子理想気体Yが入っている。図3—2のように気体Xの分子は膜を衝突せず通過できるのに対し、気体Yの分子は膜を通過できない。シリンダーとピストンで囲まれた空間の外は真空であり、膜の厚さや、膜、シリンダー、ピストンの熱容量、気体分子に対する重力の影響は無視できる。ピストンは断熱材でできている。気体Xの分子1個の質量を m_X 、気体Yの分子1個の質量を m_Y 、シリンダーの内側の断面積を S 、アボガドロ定数を N_A 、気体定数を R とする。鉛直上向きに z 軸をとる。以下の各過程では気体の状態は十分ゆっくり変化するため、領域1の圧力と領域2の圧力はそれぞれ常に均一であり、気体XとYが熱のやりとりをすることでシリンダー内の温度は常に均一であるとみなせる。

以下の設問に答えよ。

I はじめにピストンは固定されており、領域1の体積は V_1 、圧力は p_1 、領域2の体積は V_2 、圧力は p_2 、シリンダー内の温度は T であった。気体分子の z 方向の運動に注目し、気体XとYの分子の速度の z 成分の2乗の平均をそれぞれ $\overline{v_z^2}$ 、 $\overline{w_z^2}$ とする。気体Yの分子は、膜に当たると膜に平行な速度成分は一定のまま弾性衝突してはね返されるとする。同様に、気体XとYの分子はピストンおよびシリンダーの面に当たると面に平行な速度成分は一定のまま弾性衝突してはね返されるとする。分子間の衝突は考慮しなくてよいほど気体は希薄である。

(1) ピストンが気体Xから受ける力の大きさの平均を F_1 とする。 F_1 を、 m_X 、 $\overline{v_z^2}$ 、 N_A 、 S 、 V_1 、 V_2 のうち必要なものを用いて表せ。

- (2) シリンダーの底面が気体 X と Y から受ける合計の力の大きさの平均を F_2 とする。 F_2 を、 m_X , m_Y , $\overline{v_z^2}$, $\overline{w_z^2}$, N_A , S , V_1 , V_2 のうち必要なものを用いて表せ。
- (3) ボルツマン定数を k として、各分子は一方向あたり平均して $\frac{1}{2}kT$ の運動エネルギーを持つ。 p_1 と p_2 を、 R , T , V_1 , V_2 のうち必要なものを用いて表せ。
- (4) 気体 X と Y の内部エネルギーの合計を、 R , T を用いて表せ。

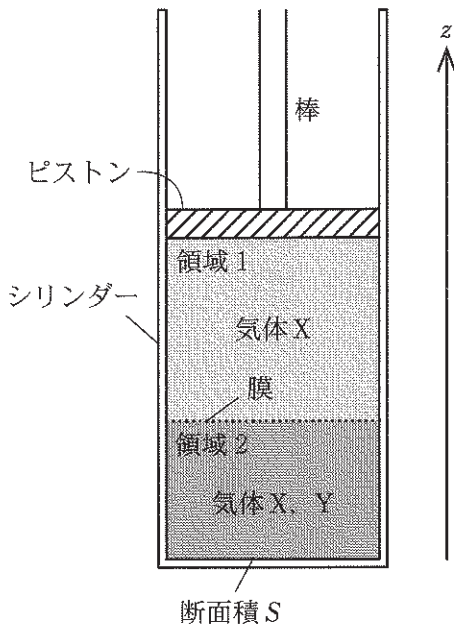


図 3—1

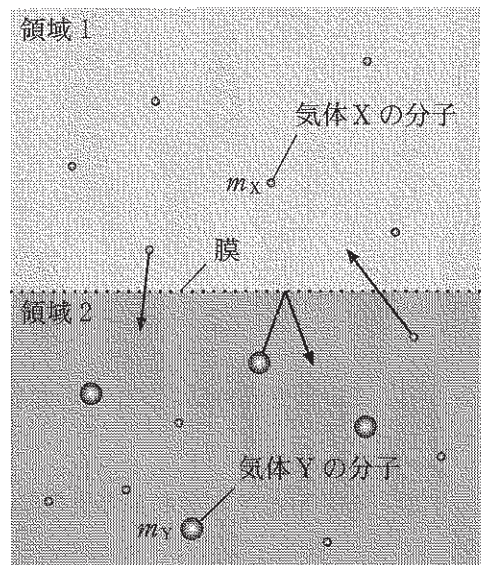


図 3—2
(膜近傍の拡大図)

II 次にピストンを設問 I の状態からゆっくりわずかに押し下げたところ、領域 1 の体積が V_1 から $V_1 - \Delta V_1$ に、領域 1 の圧力が p_1 から $p_1 + \Delta p_1$ に、領域 2 の圧力が p_2 から $p_2 + \Delta p_2$ に、シリンダー内の温度が T から $T + \Delta T$ に変化した。この過程で気体と外部の間で熱のやりとりはなかった。以下の設問では、 Δp_1 、 Δp_2 、 ΔT 、 ΔV_1 はそれぞれ p_1 、 p_2 、 T 、 $V_1 + V_2$ より十分小さな正の微小量とし、微小量どうしの積は無視できるとする。

(1) 温度変化 ΔT を、 p_1 、 R 、 ΔV_1 を用いて表せ。

(2) $\frac{\Delta p_1}{p_1} = \boxed{\text{ア}} \frac{\Delta V_1}{V_1 + V_2}$ が成り立つ。 $\boxed{\text{ア}}$ に入る数を求めよ。

III 設問 I の状態からピストンについている棒を取り外し、おもりをシリンダーに接しないようにピストンの上に静かに乗せたところ、領域 1 と領域 2 の体積、圧力、温度に変化はなかった。さらに図 3—3 のようにヒーターをシリンダーに接触させ気体を温めたところ、ピストンがゆっくり押し上がった。領域 1 の体積が $2V_1$ になったところでヒーターをシリンダーから離れた。

(1) このときのシリンダー内の温度を、 T 、 V_1 、 V_2 を用いて表せ。

(2) 気体 X と Y が吸収した熱量の合計を、 R 、 T 、 V_1 、 V_2 を用いて表せ。

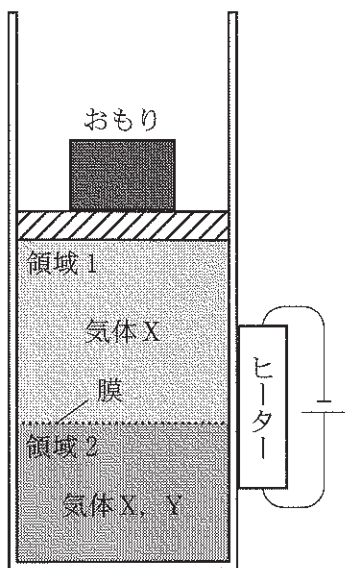


図 3 — 3

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。)

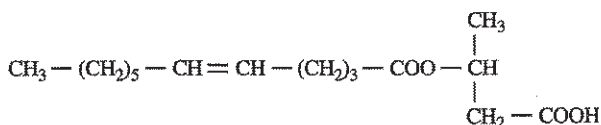
化 学

第 1 問

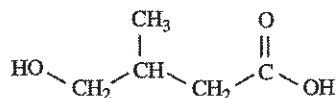
次の I, II の各問に答えよ。必要があれば以下の値を用いよ。構造式は, I では [構造式の例 I] に, II では [構造式の例 II] にならって示せ。

元 素	H	C	O	Na	標準状態 (273 K, 1.01×10^5 Pa) における水素 1 mol の体積 : 22.4 L
原子量	1.0	12.0	16.0	23.0	

[構造式の例 I]



[構造式の例 II]



I 次の文章を読み, 問ア～オに答えよ。

油脂 A はグリセリン(1,2,3-プロパントリオール) 1 分子に対し, 分岐のない高級脂肪酸 3 分子が縮合したエステル化合物である。A に含まれる炭素間二重結合はすべてシス形であり, 三重結合は含まれない。A の化学構造を決定するため, 以下の実験を行った。

なお, 図 1-1 に示すように, 炭素間二重結合にオゾン O_3 を作用させると環状化合物であるオゾニドが生成し, 適切な酸化的処理を行うとカルボン酸になる。一方, 適切な還元的処理を行うとアルコールになる。また, カルボン酸をジアゾメタン CH_2N_2 と反応させると, 図 1-2 に示すようにカルボキシ基がメチル化される。

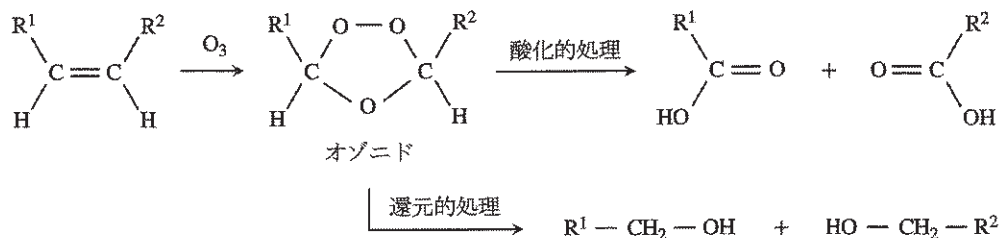


図 1-1 炭素間二重結合のオゾン分解 (R^1, R^2 : 炭化水素基など)

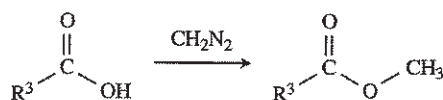
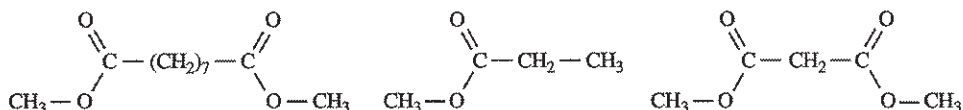


図1—2 ジアゾメタンによるカルボン酸のメチル化(R³:炭化水素基など)

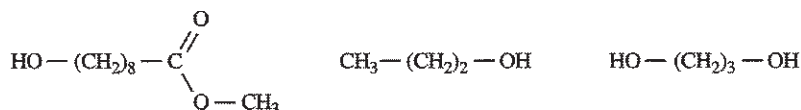
実験1: 2.21 gのAを水酸化ナトリウムと反応させて完全に加水分解したところ、グリセリン230 mgと2種類の脂肪酸(飽和脂肪酸Bと不飽和脂肪酸C)のナトリウム塩が生成した。

実験2: 2.21 gのAを白金触媒存在下で水素と十分に反応させたところ、標準状態換算で168 mLの水素を消費し、油脂Dが得られた。Aは不斉炭素原子をもつが、Dは不斉炭素原子をもたなかった。

実験3: Cにオゾンを作用させ、酸化処理を行った。生じた各種カルボン酸をジアゾメタンと反応させたところ、次の3種類の化合物が得られた。



実験4: Cをジアゾメタンと反応させた後に、オゾンを作用させ還元処理を行ったところ、次の3種類の化合物が得られた。



[問]

- ア 油脂Aの分子量を有効数字3桁で答えよ。
- イ 脂肪酸BとCの分子式をそれぞれ示せ。
- ウ BとCの融点はどちらのほうが高いと考えられるか答えよ。さらに、分子の形状と関連付けて、理由を簡潔に説明せよ。
- エ 実験4を行わず、実験1～3の結果からCの化学構造を推定したところ、一つに決定できなかった。考えうるCの構造式をすべて示せ。
- オ 実験1～3に加えて実験4の結果も考慮に入れると、Cの化学構造を一つに決定できた。Aの構造式を示せ。

II 次の文章を読み、問カ～ケに答えよ。

C_5H_{10} の分子式をもつ4種類のアルケンE～Hに対して実験5と6を行った。また、実験6の生成物に対して実験7～9を行った。なお、それぞれの反応中に二重結合の移動や炭素骨格の変化は起きないものとする。立体異性体は考慮しなくてよい。

実験5：E～Hに対して白金触媒を用いた水素の付加反応を行うと、EとFからは化合物Iが、GとHからは化合物Jが得られた。

実験6：E～Hに対して酸性条件下で水の付加反応(以下、水和反応)を行うと、EとFからはアルコールKが、GからはアルコールLがそれぞれ主生成物として得られた。HからはアルコールLとアルコールMの混合物が得られた。E、F、Gへの水和反応は、主生成物以外に少量のアルコールN、O、Pをそれぞれ副生成物として与えた。

解説1：実験6の結果はマルコフニコフ則に従っているが、この経験則は炭素陽イオン(以下、陽イオン)の安定性によって説明できる(図1—3)。アルケン(a)への水素イオンの付加は2種類の陽イオン(b)と(c)を与える可能性があるが、陽イオン(b)のほうがより安定である。これは、水素より炭化水素基のほうが陽イオンに電子を与える性質が強いからである。その結果、陽イオン(b)から生じるアルコール(d)が主生成物となる。

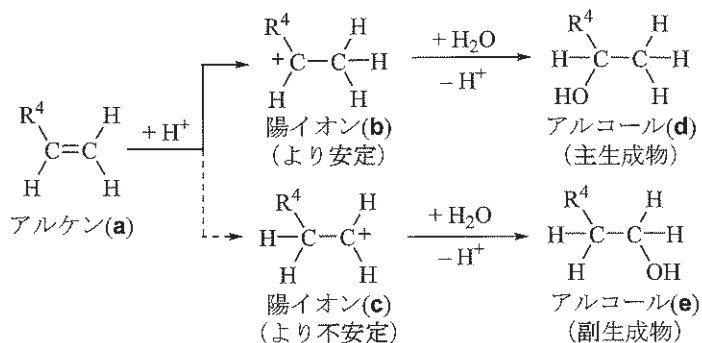


図1—3 水和反応の例とマルコフニコフ則の概要 (R^4 ：炭化水素基)

実験7：ニクロム酸カリウム $K_2Cr_2O_7$ を用いて6種類のアアルコールK～Pの酸化を試みたところ、Kだけが酸化されなかった。

実験8：K～Pの中で、LとNだけがヨードホルム反応に陽性を示した。

実験9：K～Pを酸性条件下で加熱すると水の脱離反応(以下、脱水反応)が進行し、いずれの化合物からも分子式 C_5H_{10} のアルケンが得られた。

解説2：図1—4に実験9の脱水反応の概要を示す。この反応はアルコール(f)から生じる陽イオン(g)を経由するが、陽イオン(g)から速やかに水素イオンが脱離することでアルケン(h)が生成する。すなわち、脱水反応の速度は陽イオン(g)の生成速度によって決まる。② 安定な陽イオン(g)ほど生成しやすくその生成速度は速いと③考えてよい。

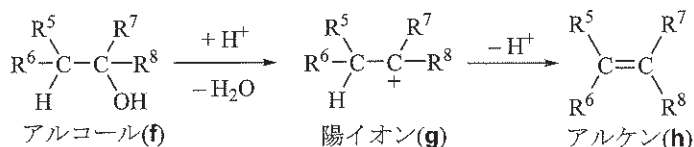


図1—4 脱水反応の概要 (R^{5-8} ：水素か炭化水素基)

解説3：実験9の脱水反応が2つ以上の異なるアルケンを与える可能性がある場合、炭素間二重結合を形成する炭素上により多くの炭化水素基が結合したアルケンの生成が優先することが一般的である。この経験則はザイツェフ則と呼ばれている。

〔問〕

- カ 化合物IとJの構造式をそれぞれ示せ。
- キ アルコールK～Pの中から不斉炭素原子をもつものすべてを選び、該当する化合物それぞれの記号と構造式を示せ。
- ク アルコールK～Pの中で、脱水反応が最も速く進行すると考えられるのはどれか、記号で答えよ。下線部①～③を考慮すること。
- ケ アルケンE～Hのなかで、それぞれに対する水和反応とそれに続く脱水反応が元のアアルコールを主生成物として与えると考えられるのはどれか、該当するすべてを選び記号で答えよ。ただし、マルコフニコフ則およびザイツェフ則が適用できる場合はそれらに従うものとする。

第2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。

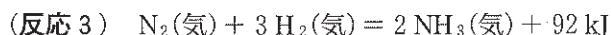
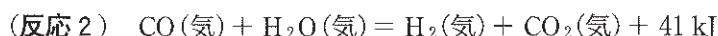
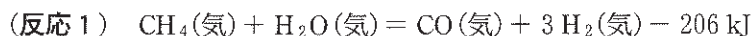
元 素	H	C	N	O	K	Fe
原子量	1.0	12.0	14.0	16.0	39.1	55.8
物質(状態)	CH ₄ (気)		CO ₂ (気)	H ₂ O(液)		
生成熱 [kJ/mol]	75		394	286		

アボガドロ定数 $N_A = 6.02 \times 10^{23}/\text{mol}$, 気体定数 $R = 8.31 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{L}/(\text{K}\cdot\text{mol})$

I 次の文章を読み、問ア～オに答えよ。

火力発電の燃料として、天然ガスよりも石炭を用いる方が、一定の電力量を得る際の二酸化炭素 CO₂ 排出が多いことが問題視されている。そこで、アンモニア NH₃ を燃料として石炭に混合して燃焼させることで、石炭火力発電からの CO₂ 排出を減らす技術が検討されている。

従来 NH₃ は、主に天然ガスに含まれるメタン CH₄ と空気中の窒素 N₂ から製造されてきた。その製造工程は、以下の3つの熱化学方程式で表される反応により、CH₄(気) と N₂(気) と H₂O(気) から、NH₃(気) と CO₂(気) を生成するものである。



このように得られる NH₃ は、燃焼の際には CO₂ を生じないものの、製造工程で CO₂ を排出している。発電による CO₂ 排出を減らすために石炭に混合して燃焼させる NH₃ は、CO₂ を排出せずに製造される必要がある。

そこで、太陽光や風力から得た電力を使い、水の電気分解により得た水素を用いる NH₃ 製造法が開発されている。

(問)

- ア 下線部①に関して、石炭燃焼のモデルとして C(黒鉛)の完全燃焼反応(反応4)、天然ガス燃焼のモデルとして CH₄(気)の完全燃焼反応(反応5) を考える。C(黒鉛)1.0 mol、CH₄(気)1.0 mol の完全燃焼の熱化学方程式をそれぞれ記せ。ただし、生成物に含まれる水は H₂O(液)とする。また、反応4により 1.0 kJ のエネルギーを得る際に排出される CO₂(気)の物質量は、反応5により 1.0 kJ のエネルギーを得る際に排出される CO₂(気)の物質量の何倍か、有効数字2桁で答えよ。
- イ 下線部②に関して、NH₃(気)の燃焼反応(反応6)からは N₂(気)と H₂O(液)のみが生じるものとする。C(黒鉛)と NH₃(気)を混合した燃焼(反応4と反応6)により 1.0 mol の CO₂(気)を排出して得られるエネルギーを、反応5により 1.0 mol の CO₂(気)を排出して得られるエネルギーと等しくするためには、1.0 mol の C(黒鉛)に対して NH₃(気)を何 mol 混ぜればよいか、有効数字2桁で答えよ。答えに至る過程も示せ。
- ウ 下線部③の製造工程により 1.0 mol の NH₃(気)を得る際に、エネルギーは吸収されるか放出されるかを記せ。また、その絶対値は何 kJ か、有効数字2桁で答えよ。答えに至る過程も示せ。
- エ CO₂と NH₃を高温高压で反応させることで、肥料や樹脂の原料に用いられる化合物 A が製造される。1.00 トンの CO₂が NH₃と完全に反応した際に、1.36 トンの化合物 A が H₂O とともに得られた。化合物 A の示性式を、下記の例にならって記せ。
- 示性式の例：CH₃COOC₂H₅
- オ 下線部④に関して、下線部③の製造工程により 1.0 mol の NH₃(気)を得る際に排出される CO₂(気)の物質量を有効数字2桁で答えよ。また、この CO₂排出を考えたとき、反応6により 1.0 kJ のエネルギーを得る際に排出される CO₂(気)の物質量は、反応5により 1.0 kJ のエネルギーを得る際に排出される CO₂(気)の物質量の何倍か、有効数字2桁で答えよ。

II 次の文章を読み、問カ～コに答えよ。

金属イオン M^{n+} は、アンモニア NH_3 やシアン化物イオン CN^- などと配位結合し、錯イオンを形成する。金属イオンに配位結合する分子やイオンを配位子とよぶ。図2—1に NH_3 を配位子とするさまざまな錯イオンの構造を示す。銅イオン Cu^{2+} の錯イオン(a)は4配位で正方形をとる。錯イオン(b)は2配位で直線形、錯イオン(c)は6配位で正八面体形、錯イオン(d)は4配位で正四面体形をとる。

正八面体形をとる錯イオンは最も多く存在し、図2—2に示すヘキサシアニド鉄(II)酸イオン $[Fe(CN)_6]^{4-}$ はその一例である。鉄イオン Fe^{3+} を含む水溶液にヘキサシアニド鉄(II)酸カリウム $K_4[Fe(CN)_6]$ を加えると、古来より顔料として使われるプルシアンブルーの濃青色沈殿が生じる。図2—3に、この反応で得られるプルシアンブルーの結晶構造を示す。 Fe^{2+} と Fe^{3+} は1 : 1で存在し、 CN^- の炭素原子、窒素原子とそれぞれ配位結合する。鉄イオンと CN^- により形成される立方体の格子は負電荷を帯びるが、格子のすき間にカリウムイオン K^+ が存在することで、結晶の電氣的な中性が保たれている。しかし、 K^+ の位置は一意に定まらないため、図2—3では省略している。格子のすき間は微細な空間となるため、プルシアンブルーは気体やイオンの吸着材料としても利用される。

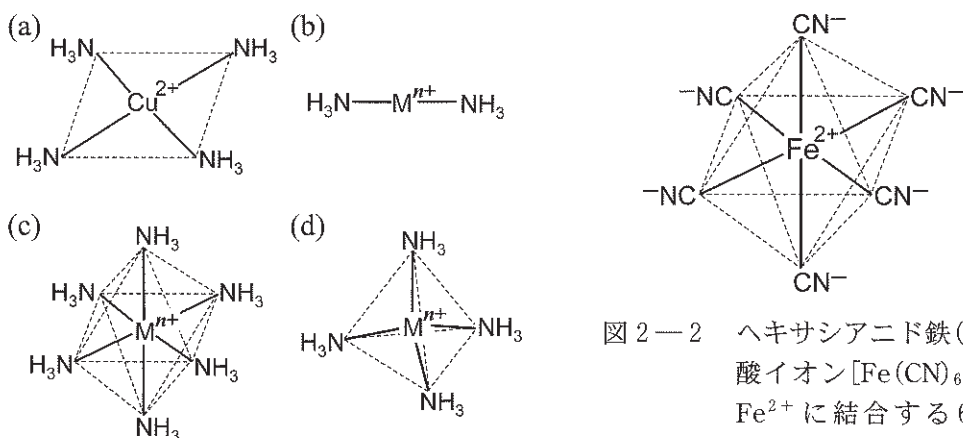
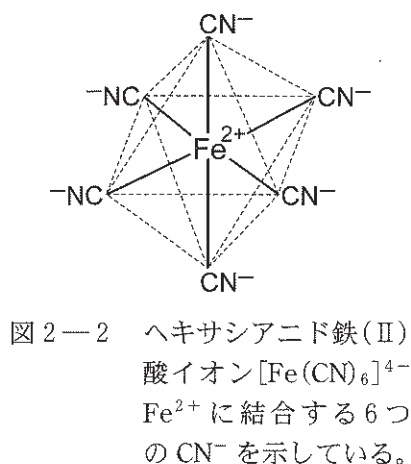


図2—1 NH_3 を配位子とする錯イオン



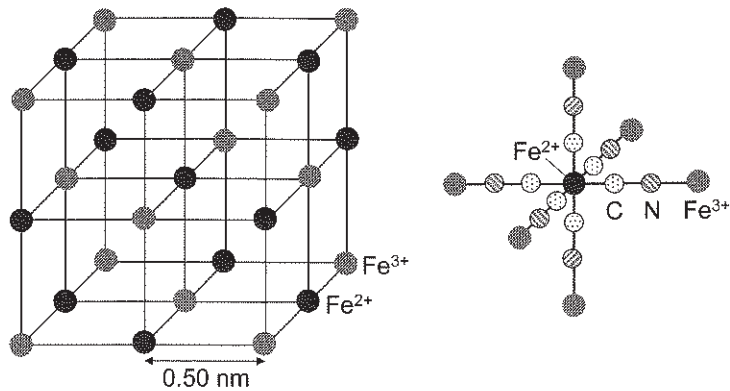


図 2—3 プルシアンブルーの結晶構造

周期的に配列する鉄イオンとシアン化物イオンの一部を取り出した構造である。Fe²⁺ と Fe³⁺ は CN⁻ を介して結合するが、左図では CN⁻ を省略し、Fe²⁺ と Fe³⁺ を実線で結んでいる。右図は、Fe²⁺ に結合する 6 つの CN⁻ と、これらの CN⁻ に結合する 6 つの Fe³⁺ を示している。

〔問〕

- カ 下線部⑤に示した錯イオン(b), (c), (d)について、中心の金属イオンとして最も適切なものを、以下の(1)~(3)の中から一つずつ選べ。
 (1) Co³⁺, (2) Zn²⁺, (3) Ag⁺
- キ Cu²⁺ を含む水溶液に、少量のアンモニア水を加えると、青白色沈殿が生じる。この青白色沈殿に過剰のアンモニア水を加えると、錯イオン(a)が生じる。⑧ 下線部⑧に対応するイオン反応式を記せ。
- ク 下線部⑥より、プルシアンブルーを構成する K, Fe, C, N の割合を、最も簡単な整数比で示せ。
- ケ 図 2—3 に示すように、隣接する鉄イオン間の距離は 0.50 nm である。プルシアンブルーの密度は何 g/cm³ か、有効数字 2 桁で答えよ。答えに至る過程も示せ。
- コ 下線部⑦について、プルシアンブルー 1.0 g あたり、300 K, 1.0 × 10⁵ Pa に換算して 60 mL の窒素 N₂ が吸着した。図 2—3 に示す一辺が 1.00 nm のプルシアンブルーの中に、N₂ が何分子吸着したか。小数点第 1 位を四捨五入して整数で答えよ。答えに至る過程も示せ。N₂ は理想気体とみなしてよいものとする。

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よ。

元 素	H	C	O	Fe
原子量	1.0	12.0	16.0	55.8

気体定数 $R = 8.31 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{L} / (\text{K} \cdot \text{mol})$

I 次の文章を読み、問ア～カに答えよ。

地球温暖化対策推進のため、二酸化炭素 CO_2 排出の抑制は重要な課題である。日本の主要産業の一つである製鉄では、溶鉱炉中でコークスを利用した酸化鉄 Fe_2O_3 の還元反応によって**銑鉄**を得る方法が長年採用されているが、近年 CO_2 排出抑制に向けて、水素を利用した還元技術を取り入れるなど、さまざまな取り組みがなされている。

一方で、排出された CO_2 を分離回収、貯留・隔離するための技術開発も盛んにおこなわれている。回収した CO_2 を貯留する手段として海洋を用いる方法がある(図3-1)。海水温は、大気と比較して狭い温度域(0～30℃程度)に維持されており、海洋は膨大な CO_2 貯蔵庫として機能しうる。 CO_2 をパイプで海水中に送り込み、ある水深で海水に放出することを考える。 CO_2 は 15℃、 $1.00 \times 10^5 \text{ Pa}$ では気体であり(図3-2)、水深の増加に伴って、放出時の CO_2 密度 $\rho(\text{g/L})$ は増加する。ある水深以降では、 CO_2 は液体として凝縮された状態で放出される。液体 CO_2 は、浅い水深では上昇するが、深い水深では下降するので、液体 CO_2 を深海底に隔離することができる。

海水面の圧力は $1.00 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、海中では、水深の増加とともに 1 m あたり圧力が $1.00 \times 10^4 \text{ Pa}$ 増加するものとする。海水温は水深にかかわらず 15℃ で一定とする。また、放出時における CO_2 の温度、圧力は周囲の海水の温度、圧力と等しく、気体 CO_2 や液体 CO_2 の海水への溶解は無視するものとする。

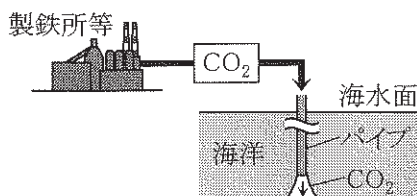


図3-1 排出 CO_2 の海洋への貯留・隔離

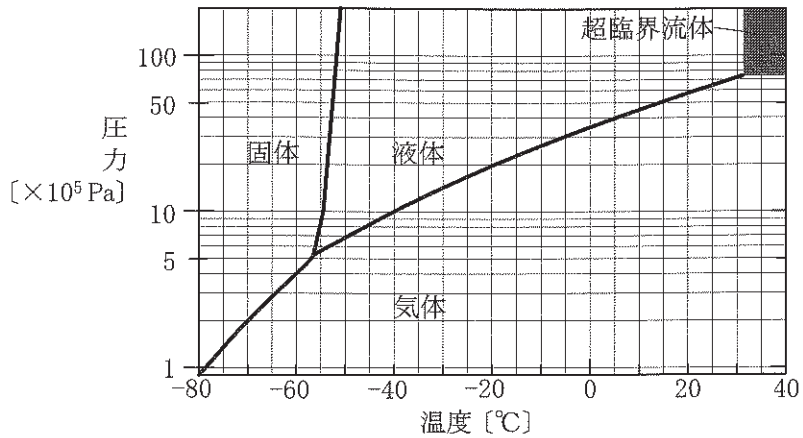


図 3—2 CO₂ の状態図

[問]

- ア 下線部①に関して，高炉法はコークスと酸素の反応により得られる一酸化炭素 CO を用いた製鉄法であり，Fe₂O₃ を CO で段階的に還元し，Fe₃O₄，^⑤ FeO を経て最終的に鉄 Fe を得る。 下線部⑤における反応の化学反応式をすべて記せ。
- イ 下線部⑤の反応により，Fe₂O₃ から Fe を 7.50×10^7 トン (日本の 2019 年鉄生産量に相当) 生成する際に排出される CO₂ は何トンか，有効数字 2 桁で答えよ。答えに至る過程も記せ。
- ウ 下線部②に関して，水深 10.0 m で放出される CO₂ の密度 ρ は何 g/L か，有効数字 2 桁で答えよ。ただし，CO₂ は理想気体としてふるまうものとする。答えに至る過程も記せ。
- エ 下線部③に関して，CO₂ が液体として放出される最も浅い水深は何 m か，有効数字 1 桁で答えよ。

オ 下線部④に関する以下の説明文において、a ~ c にあてはまる語句をそれぞれ答えよ。

CO₂分子の間に働く分子間力は a であり、低圧では分子間の距離が長く、高圧にすると単位体積当たりの分子数が増加する。一方、H₂O分子の間には b による強い分子間力が働くので、低圧においても分子間の距離が短く、高圧にしても単位体積当たりの分子数があまり変化しない。高圧となる深海では、CO₂とH₂Oで単位体積当たりの分子数が近くなる。一方で、構成元素の観点からCO₂のほうがH₂Oより c が大きい。よって、このような深海ではCO₂密度 ρ [g/L]はH₂Oの密度より高くなり、CO₂はH₂Oが主成分の海水中で自然に下降する。

カ CO₂放出水深とCO₂密度 ρ [g/L]の関係を示した最も適切なグラフを、以下の図3—3に示す(1)~(5)の中から一つ選べ。

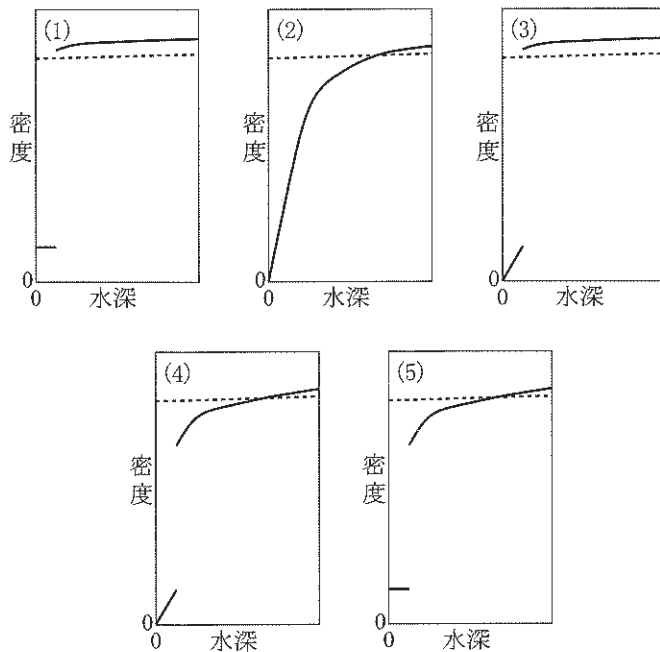


図3—3 CO₂放出水深とCO₂密度(実線—), 海水密度(破線……)の関係

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

II 次の文章を読み、問キ～シに答えよ。

抗体(Ab)はタンパク質であり、特定の分子に結合する性質をもつ。病気に関連した分子に対する Ab は、医薬品として用いられる。例えば炎症の原因となるサイトカイン(Ck)という分子に Ab が結合すると、Ck の作用が不活性化されるため、Ck に対する Ab は炎症にかかわる病気の治療薬として使用されている。

Ck と Ab は式 1 の可逆反応で結合し、複合体 Ck・Ab を形成する(図 3—4)。



反応は水溶液中、温度一定で起こり、Ck, Ab 等の濃度は、 $[\text{Ck}]$, $[\text{Ab}]$ 等と表すこととする。また、Ab の初期濃度 $[\text{Ab}]_0$ は Ck の初期濃度 $[\text{Ck}]_0$ に対して十分に大きく、反応による Ab の濃度変化は無視できる ($[\text{Ab}] = [\text{Ab}]_0$) ものとする。

式 1 の正反応と逆反応の反応速度定数をそれぞれ k_1 , k_2 とすると、各反応の反応速度 v_1 , v_2 はそれぞれ、 $v_1 = k_1[\text{Ck}][\text{Ab}]$, $v_2 = k_2[\text{Ck} \cdot \text{Ab}]$ と表される。ここで、 $[\text{Ab}] = [\text{Ab}]_0$ であることに注意すると、Ck・Ab の生成速度 v は、

$$v = v_1 - v_2 = \boxed{\text{d}}$$

と表される。このとき、 $\alpha = \boxed{\text{e}}$, $\beta = \boxed{\text{f}}$ とおくと、

$$v = -\alpha[\text{Ck} \cdot \text{Ab}] + \beta$$

と表され、 v を $[\text{Ck} \cdot \text{Ab}]$ を変数とする一次関数として取り扱うことができる。これにより、 $[\text{Ck} \cdot \text{Ab}]$ の時間変化の測定結果から、 α を求めることができる。さらに、 α は $[\text{Ab}]_0$ に依存するので、さまざまな $[\text{Ab}]_0$ に対して α を求めることで、 k_1 , k_2 を得ることができる(図 3—5)。

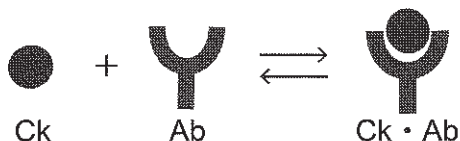


図 3—4 Ck と Ab の反応の模式図

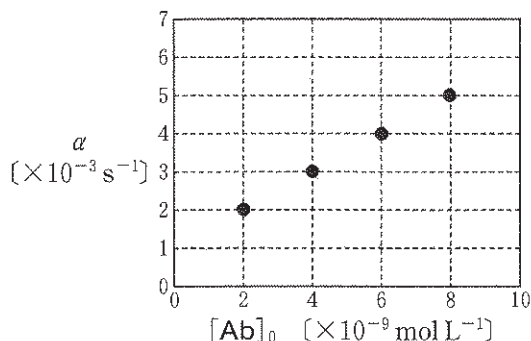


図 3—5 $[\text{Ab}]_0$ と α の関係

反応が十分に進行すると、 $v_1 = v_2$ の平衡状態に達する。ここで、 $[Ab] = [Ab]_0$ であるので、平衡定数 K は、

$$K = \frac{k_1}{k_2} = \boxed{g}$$

と表される。このとき、 Ck の Ab への結合率 X は、

$$X = \frac{[Ck \cdot Ab]}{[Ck]_0} = \boxed{h}$$

と表すことができ、どの程度の Ck を不活性化できたかを表す指標となる。 X の値は $[Ab]_0$ によって変化する(図3—6)。目標とする X の値を得るために必要な $[Ab]_0$ の値を見積もるためには、 K の逆数である $1/K$ がよく用いられる。

⑦ 用いる Ab の種類によって k_1 , k_2 は異なり、これにより平衡状態での $[Ck \cdot Ab]$ ⑧ や平衡状態に達するまでの時間などが異なる(図3—7)。 Ab を医薬品として用いる際には、これらの違いを考慮して、適切な種類の Ab を選択することが望ましい。⑨

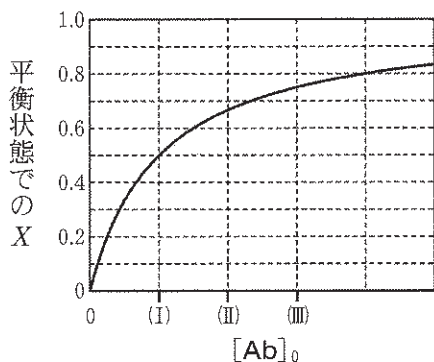


図3—6 $[Ab]_0$ と平衡状態での X の関係

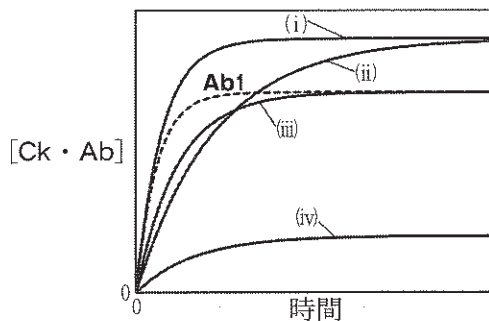


図3—7 Ck 水溶液にさまざまな Ab を加えた際の $[Ck \cdot Ab]$ の時間変化

(問)

- キ \boxed{d} ~ \boxed{f} にあてはまる式を, k_1 , k_2 , $[\text{Ck} \cdot \text{Ab}]$, $[\text{Ck}]_0$, $[\text{Ab}]_0$ のうち必要なものを用いてそれぞれ表せ。
- ク 下線部⑥に関して, 図 3—5 に示す結果から, $k_1[\text{L mol}^{-1}\text{s}^{-1}]$, $k_2[\text{s}^{-1}]$ の値をそれぞれ有効数字 1 桁で答えよ。
- ケ \boxed{g} にあてはまる式を $[\text{Ck} \cdot \text{Ab}]$, $[\text{Ck}]_0$, $[\text{Ab}]_0$, また, \boxed{h} にあてはまる式を K , $[\text{Ab}]_0$ を用いてそれぞれ表せ。
- コ 下線部⑦に関して, $1/K$ は濃度の単位をもつ。図 3—6 の横軸上で, $1/K$ に対応する濃度を, (I)~(III)の中から一つ選び, 理由とともに答えよ。
- サ 下線部⑧に関して, 表 3—1 に異なる 3 種類の Ab (**Ab1** ~ **Ab3**) の反応速度定数を示す。Ck 水溶液に **Ab1** を加えた際の $[\text{Ck} \cdot \text{Ab}]$ の時間変化を測定したところ, 図 3—7 の破線のようになった。この結果を参考に, 同様の測定を **Ab2**, **Ab3** を用いて行った場合に対応する曲線を, 図 3—7 の (i)~(iv)の中からそれぞれ一つずつ選べ。なお, 測定に使用した $[\text{Ck}]_0$, $[\text{Ab}]_0$ はそれぞれ, すべての測定で同一とする。

表 3—1 3 種類の Ab (**Ab1** ~ **Ab3**) の反応速度定数

	Ab1	Ab2	Ab3
$k_1[\text{L mol}^{-1}\text{s}^{-1}]$	1.0×10^6	5.0×10^5	1.0×10^5
$k_2[\text{s}^{-1}]$	1.0×10^{-3}	5.0×10^{-4}	1.0×10^{-3}

- シ 下線部⑨に関して, Ck 水溶液に表 3—1 の Ab を加える際, より低い $[\text{Ab}]_0$ で, かつ短時間に $X = 0.9$ の平衡状態を得るために適切なものを, **Ab1** ~ **Ab3** の中から一つ選べ。また, このとき必要となる $[\text{Ab}]_0$ は何 mol L^{-1} か, 有効数字 1 桁で答えよ。

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

生 物

第 1 問

次の I、II の各問に答えよ。

I 次の文 1 と文 2 を読み、問 A～I に答えよ。

[文 1]

光合成生物にとって、時々刻々と変化する光環境の中で、光の射す方向や強度に応じた適応的な行動をとることは、生存のために必須である。緑藻クラミドモナスは眼点と呼ばれる光受容器官によって光を認識し、光に対して接近や忌避をする [1] を示す。近年、この眼点の細胞膜で機能する「チャンネルロドプシン」と呼ばれる膜タンパク質に注目が集まってきた。チャンネルロドプシンは、脊椎動物の視覚において機能するロドプシンと同じく、生体において光情報の変換にはたらく光受容タンパク質である。ロドプシンは、 [2] というタンパク質と [3] が結合した形で構成されており、光受容過程では網膜上の高い光感度を示す視細胞である [4] において主に機能する。光が受容されることにより、ビタミン A の一種である [3] が [2] から遊離し、そのシグナルが細胞内の他のタンパク質へと伝達された結果、 [4] に電気的な変化が生じる。一方で、チャンネルロドプシンは光駆動性のチャンネルであり、青色光を吸収するとチャンネルが開き、陽イオン、特にナトリウムイオンを [5] に従って細胞外から内へと [6] によって通過させる。このチャンネルロドプシンを神経科学研究へと応用し、多様な行動を司る神経細胞の働きの解明が進んできた。

[文 2]

図 1—1 で示すように、実験動物であるマウスは、部屋 A で電気ショックを受け、恐怖記憶を形成することにより、再度、部屋 A に入った際に過去の恐怖記憶を想起し、「すくみ行動」という恐怖反応を示すようになる。一方で、部屋 A

とは異なる部屋Bに入った時には、すくみ行動は示さない。脳内では、記憶中枢である海馬という領域の神経細胞が、記憶の形成と想起に関わっていることが明らかになっており、「記憶形成時に強く興奮した一部の神経細胞が、再度、興奮することにより、⁽¹⁾記憶の想起が引き起こされる」と考えられている。

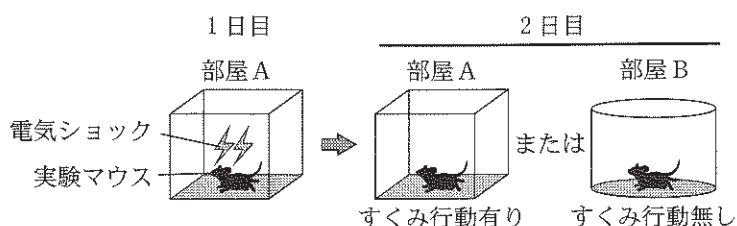


図1—1 恐怖記憶の形成とすくみ行動

さらに、近年では遺伝子組換え技術を組み合わせ、海馬の神経細胞における記憶の形成・想起のメカニズムが詳しく研究されている。例えば、特定の刺激によって興奮した神経細胞の機能を調べるための遺伝子導入マウスが作製された。強く興奮した神経細胞内で転写・翻訳が誘導される遺伝子Xの転写調節領域を利用して、⁽²⁾図1—2に示すような人工遺伝子を海馬の神経細胞に導入した。遺伝子Xの転写調節領域の働きで発現したタンパク質Yは、薬剤Dが存在する条件下のみ、調節タンパク質としてタンパク質Y応答配列に結合し、その下流に位置するチャンネルロドプシン遺伝子の発現を誘導することができる。

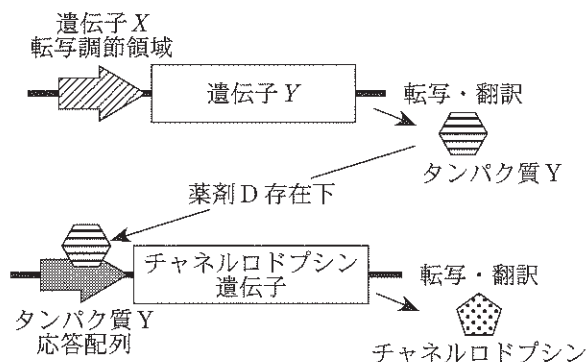


図1—2 海馬の神経細胞に導入した人工遺伝子

図1—2の遺伝子導入を施したマウスを用いて、図1—1と同様の行動実験を行った。1日目に部屋Aで電気ショックを与え、恐怖記憶を形成させた後、2日目に部屋Aまたは部屋Bの中に入れ、その際のすくみ行動の時間を測定した。

その際、薬剤Dと青色光照射の有無の組み合わせにより、図1—3に示す実験群1～実験群4を設定した。「薬剤D投与有り」では1日目の電気ショックを与える前にマウスに薬剤Dを投与した一方、「薬剤D投与無し」では薬剤Dを投与せずに電気ショックを与えた。投与した薬剤Dは電気ショックを与えた後、速やかに代謝・分解された。^(エ)また、「青色光照射有り」では、2日目にマウスを部屋Aまたは部屋Bに入れた際に、海馬領域に対してある一定の頻度(1秒間に20回)で青色光照射を行った。一方、「青色光照射無し」では青色光照射は行わなかった。それぞれの実験群における2日目のすくみ行動の時間を図1—3に示す。ただし、実験群2のマウスは2日目の行動実験では、すくみ行動以外の顕著な行動変化は現れず、恐怖記憶以外の記憶は想起されなかった。^(オ)

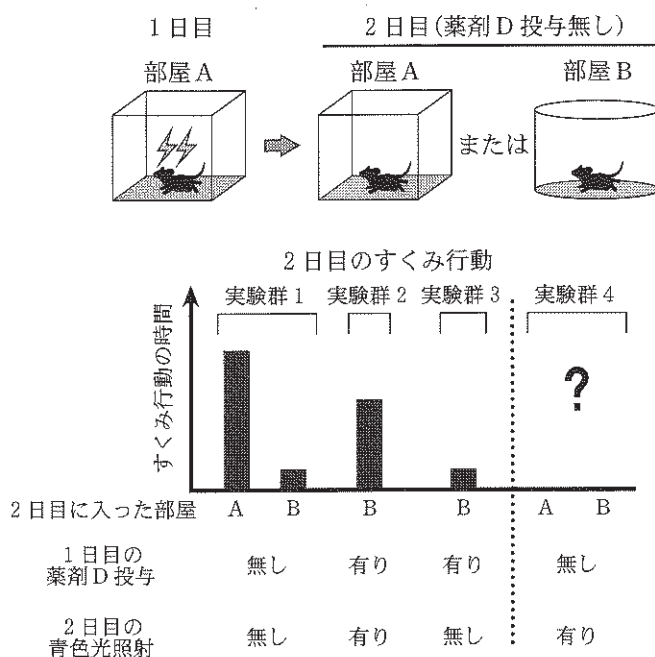


図1—3 遺伝子導入マウスを用いた行動実験

〔問〕

A

1

 ~

6

 に入る最も適切な語句を、以下の語群の中から1つずつ選べ。

〔語群〕 錐体細胞, 光屈性, フェロモン, レチナ, 走化性, ペニシリン,
ATP, 桿体細胞, レチナール, 能動輸送, 形成体, 走光性,
オプシン, 濃度勾配, 受動輸送, 吸光性, ミオグロビン,
生殖細胞, 競争阻害, グルコース

B 生体膜の選択的透過性においてポンプの持つ機能を、生体エネルギーとの関連に触れつつ、問Aの語群で挙げられた語句を3つ用いて1行程度で説明せよ。ただし解答文で、用いた語句3つには下線を引くこと。

C 人為的にチャンネルロドプシンを発現させた哺乳類の神経細胞に青色光を照射すると、神経細胞において何が起こると予想されるか、イオンの流れも含めて2行程度で説明せよ。

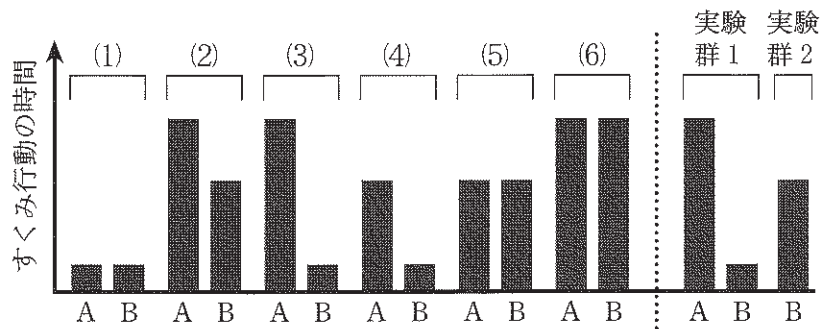
D バプロフの行った実験にも共通する、下線部(ア)のような行動現象を何と言うか。また、図1—1に関して、マウスが部屋Aにおいてのみすくみ行動を示す学習課題での、条件刺激と無条件刺激は何かをそれぞれ単語で答えよ。

E 図1—3において、2日目の行動実験後に海馬の神経細胞を調べたところ、実験群2と実験群3のマウスでは海馬領域の一部の神経細胞のみにチャンネルロドプシン遺伝子が発現していることが確認された。下線部(ウ)(エ)を考慮すると、どのような刺激に応じてチャンネルロドプシン遺伝子の発現が誘導されたと考えられるか、最も適切なものを以下の(1)~(4)の中から1つ選べ。ただし、誘導開始後にチャンネルロドプシンが神経細胞内で十分量発現するまで24時間程度かかり、発現後は数日間分解されないものとする。

- (1) 1日目よりも前の何らかの記憶形成時の刺激
- (2) 1日目に部屋Aで電気ショックを受けたという記憶形成時の刺激
- (3) 2日目に部屋Bに入ったことによる記憶想起時の刺激
- (4) 2日目の青色光照射による刺激

F 図1—3に示される実験群2のマウスが、部屋Bですくみ行動を示したのは何故か。実験群1と実験群3の部屋Bでの結果を考慮し、青色光照射により何が起こったかに触れながら、理由を3行程度で述べよ。

G 図1—3に示される実験群4のマウスが、部屋A・部屋Bで示すすくみ行動の時間について、最も適切なものを以下の(1)~(6)の中から1つ選べ。ただし、光照射そのものはマウスの任意の行動に影響を与えないものとする。また、すくみ行動の時間の絶対値については、併記した実験群1・実験群2の結果を参考にせよ。



H 実験群2と同様の薬剤D投与有り・青色光照射有りという条件で、部屋Aとも部屋Bとも全く異なる部屋Cにおいて2日目に青色光照射を行うと、実験マウスはどのような行動をどの程度示すと予想されるか、1行程度で述べよ。

I 海馬領域の神経細胞が、「限られた数の細胞」で「膨大な数の記憶」を担うためには、どのような神経細胞の「組み合わせ」でそれぞれの記憶に対応する戦略が最適だと考えられるか。海馬が仮に1～9の異なる9つの神経細胞で構成されていると仮定し、記憶A・記憶B・記憶C...という膨大な数の記憶を担う際の、神経細胞と記憶の対応関係の例として最も適切なものを以下の(1)～(6)の中から1つ選べ。ただし、文2と問Eの実験結果、および下線部(イ)(オ)を考慮せよ。また、太黒字で示された番号が記憶形成時に興奮した神経細胞とする。

(1) 記憶A **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 記憶B **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 記憶C **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 ∴ ∴

(4) 記憶A **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 記憶B **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 記憶C **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 ∴ ∴

(2) 記憶A **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 記憶B **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 記憶C **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 ∴ ∴

(5) 記憶A **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 記憶B **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 記憶C **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 ∴ ∴

(3) 記憶A **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 記憶B **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 記憶C **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 ∴ ∴

(6) 記憶A **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 記憶B **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 記憶C **1 2 3 4 5 6 7 8 9**
 ∴ ∴

II 次の文3を読み、問J～Lに答えよ。

[文3]

マウスを含めた多くの動物は、自身のいる空間を認識し、空間記憶を形成・想起できることが知られている。これまでに空間認識の中心的役割を担う「場所細胞」という神経細胞が海馬領域で発見されてきた。それぞれの場所細胞は、空間記憶の形成後にはマウスの滞在位置に応じて異なった活動頻度(一定時間あたりの、活動電位の発生頻度)を示す。図1—4に、マウスがある直線状のトラックを右から左、または左から右へと何往復も歩行し、この空間を認識した際の5つの異なる場所細胞の活動頻度を示した。

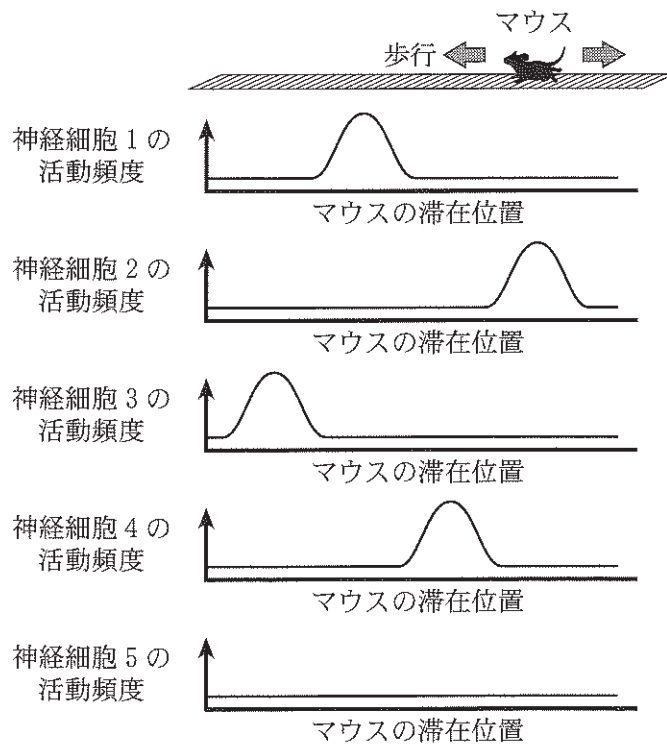


図1—4 マウスの滞在位置に応じた、場所細胞の活動頻度の変化

[問]

J 社会性昆虫であるミツバチは、餌場の位置などの空間を認識・記憶し、コロニー内の他個体に伝達する。餌場が近いときと遠いときに示す、特徴的な行動の名称をそれぞれ単語で答えよ。

K 図1—4について、マウスが直線状のトラックを右端から左端まで歩行するのにしたが、神経細胞1～神経細胞5は経時的にどのような順番で活動頻度の上昇が観察されると考えられるか。3→5→1という形式で順番を示せ。ただし、含まれない番号があってもよいものとする。

L 文2・文3のような実験から、記憶想起における神経細胞の働きの一端が明らかになってきた。図1—3の実験群2で、マウスが部屋Bで青色光照射を受けた際のすくみ行動の時間が、実験群1の部屋Aで観察されたすくみ行動の時間よりも短かったのは何故か。文2では、海馬領域全体にある一定の頻度で青色光を照射した点を考慮し、文3の実験結果をもとに、以下の(1)~(3)、(4)~(6)、(7)~(9)の中から最も適切と考えられるものをそれぞれ1つずつ選べ。

海馬の神経細胞における記憶想起の過程では、

- (1) 「神経細胞の組み合わせ」(以下、「組み合わせ」と表記)にのみ意味がある。
- (2) 「神経細胞の活動頻度」(以下、「活動頻度」と表記)にのみ意味がある。
- (3) 「組み合わせ」と「活動頻度」の両方に意味がある。

実験群1の2日目において、マウスが部屋Aに入れられた際、恐怖記憶を担う細胞は記憶想起するために、

- (4) 適切な「組み合わせ」と、適切な「活動頻度」で興奮した。
- (5) 適切な「組み合わせ」と、適切でない「活動頻度」で興奮した。
- (6) 適切でない「組み合わせ」と、適切な「活動頻度」で興奮した。

実験群2の2日目において、一定の頻度で与えた青色光照射の刺激によって、恐怖記憶を担う細胞が刺激された。それらの細胞の興奮は、実験群1の2日目に部屋Aに入れられた時と比較して、記憶想起するために、

- (7) 適切な「組み合わせ」と、適切な「活動頻度」で興奮した。
- (8) 適切な「組み合わせ」と、適切でない「活動頻度」で興奮した。
- (9) 適切でない「組み合わせ」と、適切な「活動頻度」で興奮した。

草 稿 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

第2問

次のⅠ、Ⅱの各問に答えよ。

Ⅰ 次の文章を読み、問A～Fに答えよ。

光合成は生物が行う同化反応^(ア)の一種である。光合成は、光エネルギーを化学エネルギーに変換し、無機物から有機物を生み出す反応であり、十分な光が供給される昼間に行われる。これに対して、光が当たらない夜間には光合成は行われず、光合成に関わる酵素の多くが不活性化される。植物では、この不活性化には、実験1で示すような光合成に関わる酵素タンパク質の特定のアミノ酸残基が受ける化学修飾^(イ)が関与することがわかっている。このタンパク質化学修飾は、光合成で発生する還元力を利用して、酵素活性を直接的に調節する巧妙な仕掛けだと考えられている。朝が来て植物に光があたると、これらの酵素は再び活性化され、光合成が再開される。このとき、実験2に示すように、光合成能力が最大化されるまでの時間^(ウ)は、植物体への光の照射範囲に影響される。

光合成を行う原核生物であるシネココッカスの一種では、夜間にメッセンジャーRNAのほとんどが消失する。このメッセンジャーRNAの消失は、薬剤処理によって昼間に光合成を停止させても誘導される一方、夜間に呼吸を阻害すると誘導されない。また、この種のシネココッカスを昼間に転写阻害剤で処理すると死滅するが、夜間に転写阻害剤で処理しても、その生存にはほとんど影響がない。

このように、光合成生物は昼夜の切り替わりに応答して積極的に生理活性を調節し、それぞれの環境に適した生存戦略を進化させている。

実験1 光合成に必須なシロイヌナズナ由来の酵素Aについて実験を行った。

酵素A タンパク質の末端領域には、周囲の酸化還元状態に依存してジスルフィド結合を形成しうる側鎖をもつ2つのシステイン残基(Cys①およびCys②)がある。酵素活性を調べるため、野生型酵素AおよびCys②を含むタンパク質末端領域を欠失した変異型酵素A'を作製した。作製した酵素にジスルフィド結合の形成を誘導し、活性を測定したところ、図2-1に示す結果を得た。さらに、野生型酵素Aあるいは変異型酵素A'を発現するシロイヌナズナ植物体を作製し、異なる明暗期条件で30日間生育させて生重量を測定した結果を、図2-2に示した。

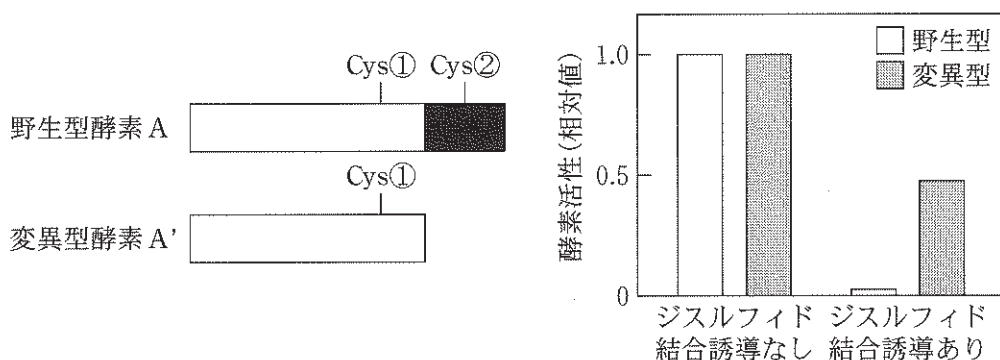


図2-1 光合成に関わる酵素Aのタンパク質の一次構造の模式図(左)と野生型酵素Aおよび変異型酵素A'の酵素活性(右)

変異型酵素A'では、野生型酵素Aのうち、Cys②を含む黒塗りで示す部分が欠失している。棒グラフは、野生型酵素Aのジスルフィド結合誘導なしの条件の値を1.0とした場合の相対酵素活性を示している。

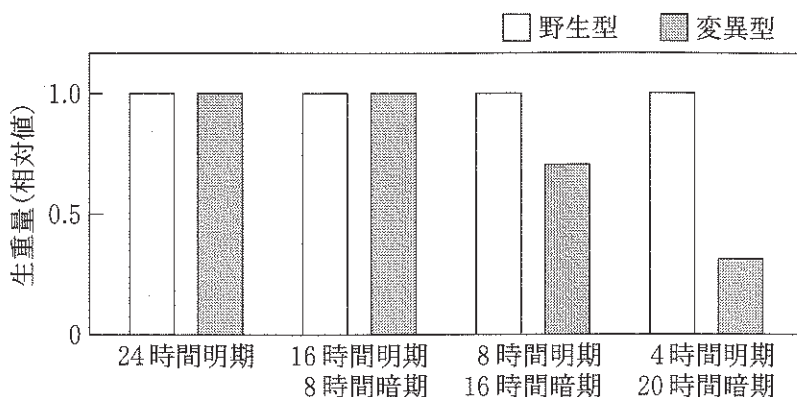


図2—2 野生型酵素Aあるいは変異型酵素A'を発現するシロイヌナズナを異なる明暗期条件で成長させたときの植物体生重量

各条件における野生型酵素を発現するシロイヌナズナの生重量を1.0とした場合の相対生重量を示している。

実験2 暗所に静置していたシロイヌナズナ野生型植物およびアブシシン酸輸送体欠損変異体Xに光を照射し、光合成速度と気孔開度を測定した。図2—3のように光合成速度と気孔開度を測定する葉1枚にのみ、あるいは植物体全体に光を照射したところ、図2—4に示す結果を得た。

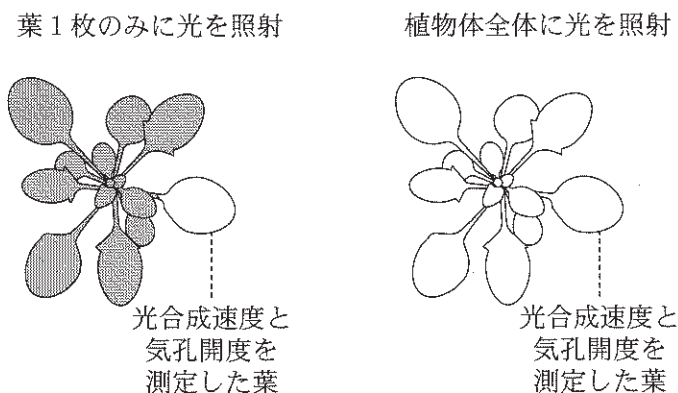


図2—3 シロイヌナズナ野生型植物およびアブシシン酸輸送体欠損変異体Xへの光照射方法

植物体の白く示した部分に光を照射して、光合成を活性化した。

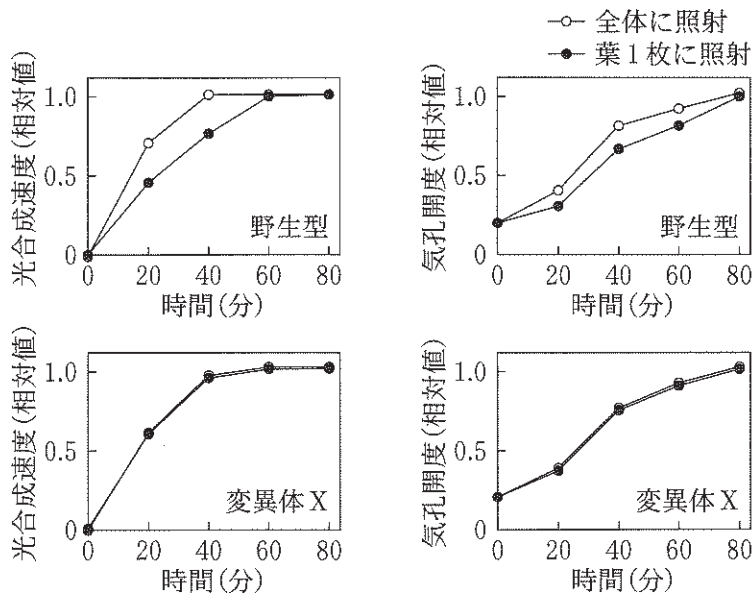


図2—4 シロイヌナズナ野生型植物およびアブシシン酸輸送体欠損変異体 X の光合成速度と気孔開度

野生型および変異体 X のそれぞれの最大値を 1.0 としたときの、相対光合成速度および相対気孔開度を示している。

〔問〕

A 下線部(ア)について。以下の(1)~(4)の生物学的反応のうち、同化反応に含まれるものをすべて選べ。

- (1) 土壌中のアンモニウムイオンが亜硝酸菌によって亜硝酸イオンに変換され、さらに硝酸菌によって亜硝酸イオンから硝酸イオンが生成される。
- (2) 1分子のグルコースから2分子のグリセルアルデヒド3-リン酸が作られ、さらに2分子のピルビン酸が生成される。
- (3) 多数のアミノ酸がペプチド結合によってつながれ、タンパク質が合成される。
- (4) 細胞内に取り込まれた硫酸イオンが亜硫酸イオンに、さらに亜硫酸イオンが硫化物イオンに変換され、O-アセチルセリンと硫化物イオンが結合することでシステインが生成される。

B 下線部(イ)について。一般的な植物は、十分な光が当たっている昼間に二酸化炭素を取り込み、光合成を行う。一方、CAM 植物と呼ばれる植物は、二酸化炭素の取り込みを夜間に行うことが知られている。以下の(1)~(3)のCAM 植物について述べた文章として正しいものを、(a)~(d)から1つずつ選べ。ただし、(a)~(d)は複数回選んでもかまわない。

解答例：(1)―(a), (2)―(b), (3)―(c)

- (1) 砂漠に生育するサボテン科の多肉植物
- (2) 藻類が繁茂する湖沼に生育するミズニラ科の水生植物
- (3) 熱帯雨林の樹上や岩場に生息するパイナップル科の着生植物

- (a) 湿度や温度が最適条件に近く、光が十分強い場合には、葉内の二酸化炭素濃度が光合成の制限要因となりうるため、二酸化炭素を濃縮する機構を発達させている。
- (b) 日中に気孔を開くと、体内水分が激しく奪われてしまうため、相対湿度が高い夜間に気孔を開いて二酸化炭素を吸収する。
- (c) 周辺の二酸化炭素濃度が低いため、他の生物が呼吸を行い二酸化炭素濃度が上昇する夜間に、積極的に二酸化炭素吸収を行う。
- (d) 共生している菌類が作り出す栄養分を共有することで発芽・成長し、ある程度育った段階から光合成を行うようになる。

C 下線部(ウ)について。こうした酵素の1つに、二酸化炭素の固定を行うリブロース 1,5-ビスリン酸カルボキシラーゼ/オキシゲナーゼ(略してルビスコ)がある。ルビスコが活性化されているときに光合成速度を低下させる要因を2つ挙げ、その理由をそれぞれ1行程度で述べよ。

D 下線部(エ)について。図2—1および図2—2に示された実験1の結果から推察されることについて述べた以下の(1)~(4)のそれぞれについて、正しいなら「○」を、誤っているなら「×」を記せ。

解答例：(1)—○

- (1) 酵素Aのジスルフィド結合は、十分な光合成活性を得るため、昼間に積極的に形成される必要がある。
- (2) 酵素Aの不活性化は、Cys②を介したジスルフィド結合によってのみ制御されている。
- (3) ジスルフィド結合による酵素Aの活性制御は、明期の時間よりも暗期の時間が長くなるほど、植物の生育に影響を与える。
- (4) 変異型酵素A'を発現する植物では、光合成活性が常に低下するため、昼の時間が短くなると植物の生育が悪くなる。

E 下線部(オ)について。野生型において、葉1枚のみに光を照射するより植物体全体に光を照射した方が、光合成能力が最大化するまでの時間が短いのは、どういう機構によると考えられるか。図2—4で示した結果から考えられることを、アブシシン酸のはたらきに着目して3行程度で説明せよ。

F 下線部(カ)について。この機構について考えられることを、エネルギーの供給と消費の観点から、以下の3つの語句をすべて使って2行程度で説明せよ。

呼吸, ATP, 能動的

II 次の文章を読み、問G～Jに答えよ。

葉緑体は植物に特有の細胞小器官であり、原始的な真核生物にシアノバクテリア⁽⁴⁾が取り込まれ、共生することで細胞小器官化したと考えられている。この考えの根拠の1つが、シアノバクテリアと葉緑体との間で見られる、膜を構成する脂質分子種の類似性である。生体膜を形成する極性脂質には大きく分けてリン脂質と糖脂質が存在し、植物の細胞膜とミトコンドリア膜はリン脂質を主成分としている。これに対して、シアノバクテリアと葉緑体の膜の主成分は糖脂質であり、大部分が、図2—5に示すような糖の一種ガラクトースをもつガラクト脂質⁽⁵⁾である。

では、なぜそもそもシアノバクテリアは糖脂質を主成分とする膜を発達させたのだろうか。その理由については、貧リン環境への適応⁽⁶⁾がその端緒であったという説が有力視されている。遺伝子操作によって図2—5に示すジガラクトシルジアシルグリセロール(DGDG)の合成活性を大きく低下させたシアノバクテリアでは、通常の培養条件では生育に影響はないが、リン酸欠乏条件下では生育が大きく阻害される。また、植物では、リン酸欠乏条件下ではDGDGの合成が活性化⁽⁷⁾され、ミトコンドリアや細胞膜のリン脂質がDGDGに置き換わる様子も観察される。糖脂質を主成分とする膜の進化は、光合成生物が、光合成産物である糖をいかに積極的に利用してさまざまな栄養環境に適応してきたのかを教えてくれる。

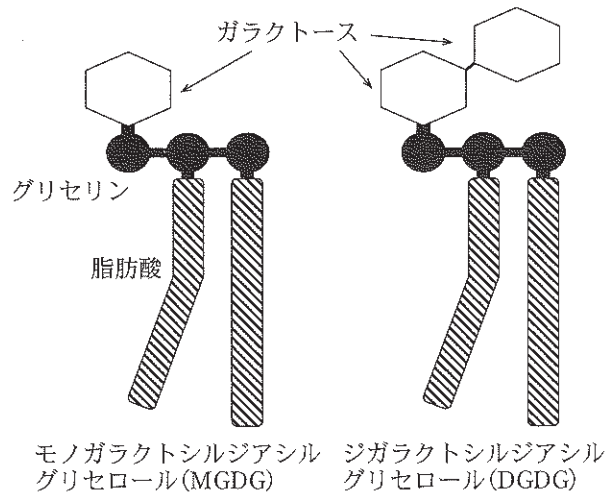


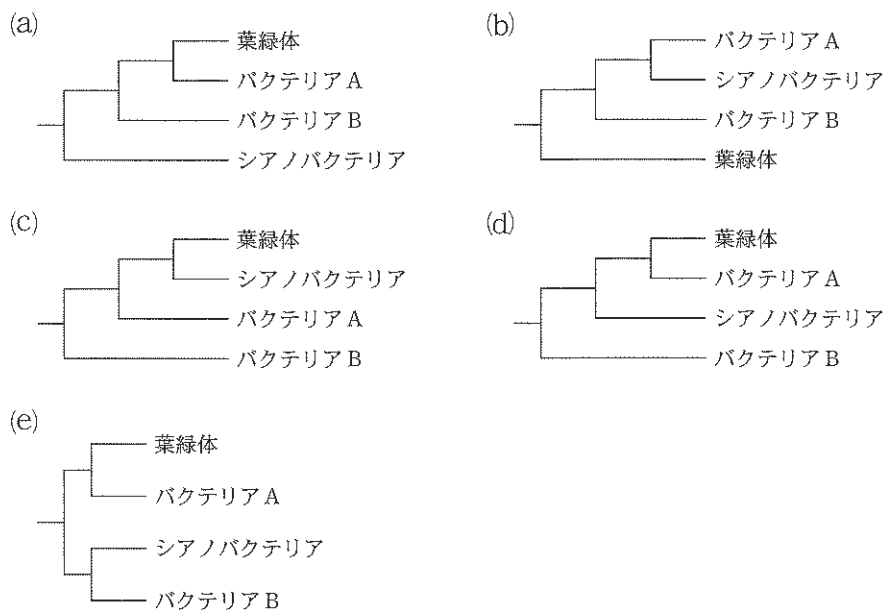
図 2—5 シアノバクテリアと葉緑体の膜に多く存在する糖脂質である、ガラクト脂質構造の模式図

黒で塗った領域はグリセリンに、斜線で示した領域は脂肪酸に、白い六角形はガラクトースに由来する部分を、それぞれ示している。

〔問〕

- G 下線部(キ)の考えを細胞内共生説とよぶ。この考えに関連した以下の(1)~(4)の記述のうち、正しいものをすべて選べ。
- (1) シアノバクテリアが葉緑体の起源であり、古細菌がミトコンドリアの起源であると考えられている。
 - (2) 葉緑体やミトコンドリアは、共生初期には独自の DNA をもっていたが、現在ではそのすべてを失っている。
 - (3) 真核生物の進化上、ミトコンドリアと葉緑体の共生のうち、ミトコンドリアの共生がより早い段階で確立したと考えられている。
 - (4) シアノバクテリアの大繁殖による環境中の酸素濃度の低下が、細胞内共生を促した一因であると考えられている。

H 下線部(ケ)について。ガラクト脂質の生合成に関わる酵素について分子系統樹を作成した時、細胞内共生説から想定される系統関係を表した図として最も適したものを、以下の(a)~(e)から1つ選べ。ただし、バクテリアAおよびBは、シアノバクテリア以外のバクテリアを示している。



I 下線部(ケ)について。貧リン環境下で膜の主成分を糖脂質とすることの利点を、リンの生体内利用の観点から2行程度で説明せよ。

J 下線部(コ)について。以下の文章は、リン酸欠乏時にリン脂質と置き換わる糖脂質が、モノガラクトシルジアシルグリセロール(MGDG)ではなくジガラクトシルジアシルグリセロール(DGDG)である理由について考察している。文章の空欄を埋めるのに最も適した語句を下の選択肢から選び、解答例にならって答えよ。ただし、語句は複数回選んでもかまわない。

解答例：1—親水性

真核細胞がもつ生体膜は、脂質二重層からなっている。これは、リン脂質分子が の部分を内側に、 の部分を外側に向けて二層にならんだ構造である。脂質が水溶液中でどういった集合体を形成するかは、脂質分子の 部位と 部位の分子内に占める の割合に大きく依存し、この比が一定の範囲にあるとき、分子の形が を取るため、安定的な二重層構造が可能となる。図2—5のMGDGとDGDGの模式図を見ると、DGDGはMGDGよりガラクトース分子約1個分だけ大きい 部位をもっている。この違いによって、DGDGの分子はMGDGよりも に近くなり、安定的な二重層構造を取りやすく、リン脂質の代替となりうると思われる。

選択肢：親水性、疎水性、可溶性、不溶性、面積、体積、長さ、円筒形、円錐形、球形

第3問

次の I、II の各問に答えよ。

I 次の文章を読み、問A～Dに答えよ。

脊椎動物の中枢神経系が形成される過程において、神経幹細胞が多様なニューロンへと分化することが知られている。正常な個体発生では、全ての神経幹細胞が一度にニューロンへと分化してしまい神経幹細胞が予定よりも早く枯渇することがないように調節されている。ここではノッチシグナルと呼ばれる以下のシグナル伝達経路が重要なはたらきをしている。

リガンドである膜を貫通するタンパク質(デルタタンパク質)が、隣接する神経幹細胞の表面に存在する受容体(ノッチタンパク質)を活性化する。デルタタンパク質により活性化されたノッチタンパク質は、酵素による2段階の切断を経て、細胞内へとシグナルを伝達する(図3—1)。最初に細胞外領域が膜貫通領域から切り離され、次に細胞内領域が膜貫通領域から分離する。切り離されたノッチタンパク質の細胞内領域は核内へと輸送され、それ自身がゲノムDNAに結合することにより標的遺伝子の転写を制御する。標的遺伝子の機能により、ノッチシグナルが入力された細胞は未分化な神経幹細胞として維持される。

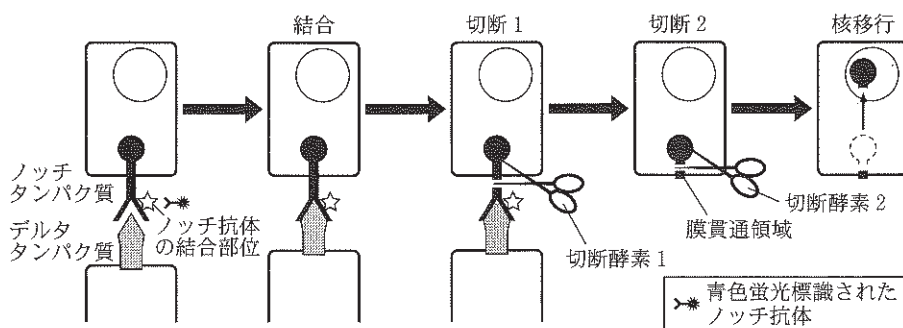


図3—1 ノッチタンパク質が活性化される過程

リガンドであるデルタタンパク質との結合が引き金となり、ノッチタンパク質の2段階の切断が起こる。最終的に細胞内領域が核内に輸送され、標的遺伝子の転写を制御する。ノッチタンパク質の細胞外領域にある星印は、実験2で使用するノッチ抗体(ノッチタンパク質を認識する抗体)の結合部位を示している。

ノッチシグナル伝達の活性化機構を明らかにするために、次の一連の実験を行った。

実験1 ショウジョウバエなどのモデル動物においては、エンドサイトーシスに関わる遺伝子の突然変異体が、ノッチシグナルの⁽⁴⁾欠損と同様の発生異常を示す。このことから、エンドサイトーシスに関連する一連の遺伝子がノッチシグナルの伝達に必要であることが推測された。ノッチシグナルの送り手の細胞(デルタタンパク質を発現する細胞)と、受け手の細胞(ノッチタンパク質を発現する細胞)のどちらにおいてエンドサイトーシスが必要であるか調べるために以下の実験を行った。

初期条件ではノッチタンパク質とデルタタンパク質のどちらも発現しない培養細胞を用いて、次のような2種類の細胞株を作製した。

受け手細胞株 A：改変したノッチタンパク質が常に一定量発現するように設計した。改変したノッチタンパク質の効果により、入力されたノッチシグナルの量に依存して、緑色蛍光タンパク質が合成される。緑色蛍光タンパク質は核に集積するように設計されているため、核における緑色蛍光強度を測定することにより、ひとつひとつの細胞に入力されたノッチシグナルの量を知ることができる。なお、全ての細胞は同様にふるまうものとする。

送り手細胞株 B：デルタタンパク質とともに、赤色蛍光タンパク質が常に一定量合成されるように設計した。なお、デルタタンパク質と赤色蛍光タンパク質は全ての細胞において同程度に発現するものとする。

細胞株 A と B を混合して培養し、ノッチシグナル伝達におけるエンドサイトーシスに関連する遺伝子の必要性を検証した(図3—2)。それぞれの細胞株において、エンドサイトーシスに必須な機能を有する遺伝子 X の有無を変更してから、2種類の培養細胞株を一定の比で混合した。混合状態での培養を2日間行った後に、多数の細胞株 A における緑色蛍光強度を測定した(図3—3)。なお、図3—3に示す結果は、4つの実験条件における多数の細胞の測定値の平均を、条件1の値が1.0になるように標準化したものである。培養容器中の細胞数は4つの実験条件間で同一であったものとする。

条件1：野生型(機能的な遺伝子Xが存在する状態)の受け手細胞株Aと、野生型の送り手細胞株Bを使用した。

条件2：遺伝子Xを除去した受け手細胞株Aと、野生型の送り手細胞株Bを使用した。

条件3：野生型の受け手細胞株Aと、遺伝子Xを除去した送り手細胞株Bを使用した。

条件4：遺伝子Xを除去した受け手細胞株Aと、遺伝子Xを除去した送り手細胞株Bを使用した。

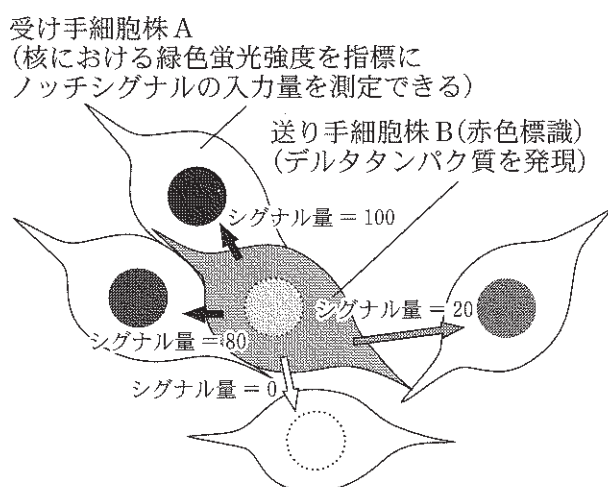


図3—2 ノッチシグナルの受け手細胞株Aと送り手細胞株Bの模式図
細胞株AとBの2種類を混合して培養した。細胞株Bだけが赤色蛍光タンパク質で標識されているため、2種類の細胞株を識別することが可能である。細胞株Aの核における緑色蛍光強度の測定値を指標にノッチシグナルが入力された量を評価する。

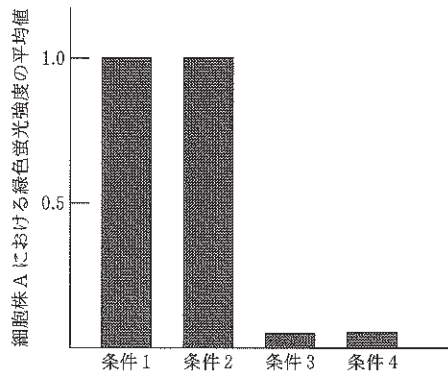


図 3—3 ノッチシグナル伝達における遺伝子 X の必要性を調べた実験の結果

実験 2 実験 1 を行なった細胞について、緑色蛍光強度の測定後に固定し(生命活動を停止させ)、青色蛍光分子で標識したノッチ抗体を用いて免疫染色実験を行った。使用した抗体はノッチタンパク質の細胞外領域に結合する(図 3—1)。青色蛍光を指標にノッチタンパク質の分布を観察した。

その結果、ノッチタンパク質を発現している受け手細胞株 A の表面において一様に青色蛍光が観察されるだけではなく、送り手細胞株 B の内部においてもドット状(点状)の青色蛍光が観察された(図 3—4)。実験 1 と同様の 4 つの実験条件において、送り手細胞株 B における細胞あたりの青色蛍光のドットを数え、多数の細胞での計測数の平均を得た。なお、測定値は、条件 1 の値が 1.0 になるように標準化した(図 3—5)。

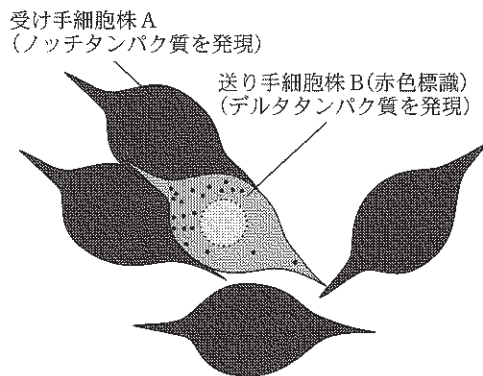


図 3—4 ノッチタンパク質を認識する抗体を用いた免疫染色像
青色蛍光分子で標識したノッチ抗体の分布を黒い色で表示している。

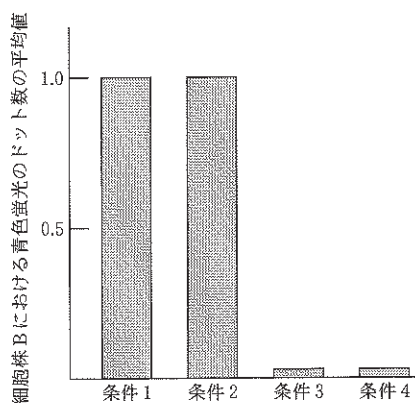


図3—5 ノッチ抗体を用いた免疫染色実験の結果

〔問〕

- A 下線部(ア)に関して、両生類の中樞神経系が発生する過程を2行程度で説明せよ。ただし、「形成体」、「脊索」、「外胚葉」、「誘導」、「原口背唇部」の語句を必ず含めること。また解答文で、用いた語句5つには下線を引くこと。
- B 下線部(イ)に関して、エンドサイトーシスとはどのような現象か、2行程度で説明せよ。
- C ノッチシグナル伝達における遺伝子Xの必要性を調べた図3—3の実験結果について、以下の(1)~(5)の選択肢から適切な解釈をすべて選べ。
- (1) 遺伝子Xの機能は、ノッチシグナルを受容する細胞において必要である。
 - (2) 遺伝子Xの機能は、ノッチシグナルを受容する細胞において必要でない。
 - (3) 遺伝子Xの機能は、ノッチシグナルを送る細胞において必要である。
 - (4) 遺伝子Xの機能は、ノッチシグナルを送る細胞において必要でない。
 - (5) 遺伝子Xの機能は、ノッチシグナル伝達には関係しない。

D 問題文と実験 1 と 2 の結果を元に、以下の(1)~(7)の選択肢から適切な解釈をすべて選べ。

- (1) 細胞株 B においてノッチタンパク質の合成が促進された。
- (2) 細胞株 B がノッチ抗体を合成した。
- (3) 細胞株 B がノッチタンパク質の細胞外領域を取り込んだ。
- (4) 細胞株 A と細胞株 B が部分的に融合し、細胞株 A の内容物が細胞株 B へと輸送された。
- (5) 細胞株 A においてノッチタンパク質が切断されたために、ノッチタンパク質の細胞外領域が細胞株 A から離れた。
- (6) 細胞株 A における遺伝子 X の機能により、ノッチシグナルが活性化し、ノッチタンパク質を細胞外へと排出した。
- (7) 遺伝子 X はノッチタンパク質の細胞外領域の分布に影響しない。

II 次の文章を読み、問E～Hに答えよ。

Iの実験により、ノッチシグナルの伝達とエンドサイトーシスとの関係がわかった。しかし、エンドサイトーシスがノッチシグナルの伝達をどのように制御するのは長年解明されず、様々な仮説が提唱されてきた。現在受け入れられている仮説のひとつが「ノッチシグナルの張力依存性仮説」である。この仮説では、^(ウ)エンドサイトーシスにより発生する張力が、ノッチシグナルの活性化に不可欠であると考えられている。ノッチシグナル伝達における張力の重要性を検証するために次の実験を行った。

実験3 DNAは4種類のヌクレオチドが鎖状に重合し、2本の鎖が対合した二重らせん構造をとる。望みの配列のDNA鎖を容易に化学合成できる利点により、DNAを「紐」あるいは「張力センサー」として活用することができる。例えば、図3—6のように、DNAの「紐」が耐えられる、張力限界値(引っ張り強度)を測定することが可能である。ある値を超える力がかかると、DNAの「紐」の一方の端が基盤から離れる。上向きに引き上げる力の大きさを少しずつ大きくし、DNAの「紐」の一端が基盤から離れる直前の力の大きさ(pN:ピコニュートンを単位とする)を張力限界値と見なすことができる。同一構造の多数の分子についての測定結果を統計的に処理することにより、特定の構造のDNA分子の張力限界値を求めることができる。

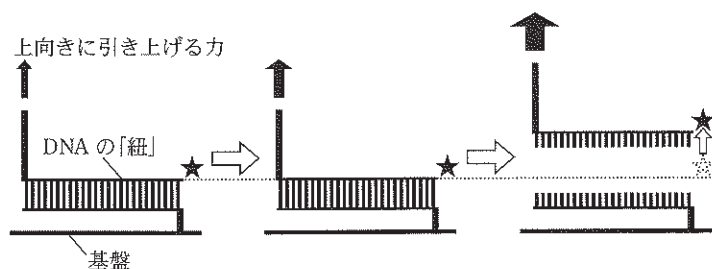


図3—6 DNA「紐」の張力限界値の測定原理

DNA「紐」を上向きに引っ張り上げる力を徐々に大きくしていき、「紐」の端点(星印)が基盤から大きく離れる直前の力の大きさをもとに張力限界値を求めた。

同様の測定方法により、図3—7のようなGC含量(DNAを構成する塩基に占めるグアニンとシトシンの割合。GC%)と塩基対の数が異なる様々な構造のDNA「紐」について、張力限界値を測定したところ、値の大きさは次の順になった。

$$(1) < \boxed{\alpha} < \boxed{\beta} < \boxed{\gamma} < \boxed{\delta}$$

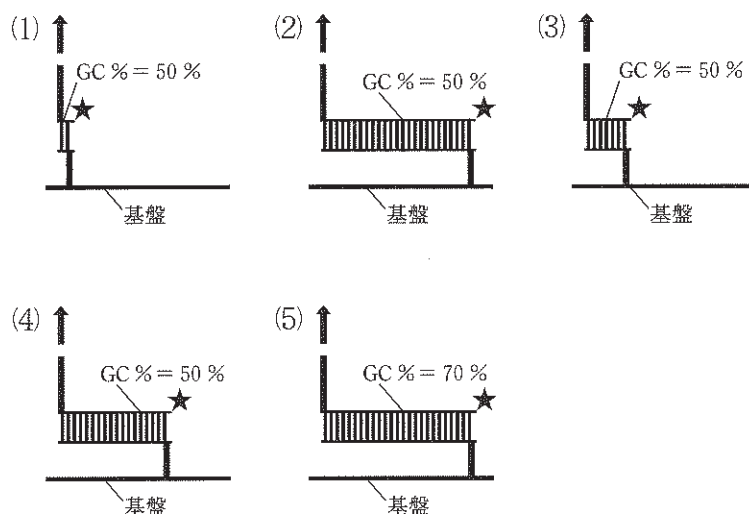


図3—7 DNA「紐」の張力限界値に対する塩基組成や塩基対の数の影響
それぞれのDNA「紐」の構造は等しい縮尺で描いてあり、DNA「紐」の中の縦線の本数は相対的な塩基対の数を示している。

実験4 実験1で作成した野生型の受け手細胞株Aを、張力限界値が異なるDNA「紐」に結びつけたデルタタンパク質の上で培養した(図3—8)。DNA「紐」を介してデルタタンパク質を培養容器の底に固定し、その上で細胞株Aを2日間培養した。培養中の細胞はたえず微小な運動を続けているために、細胞株Aと固定されたデルタタンパク質との間に張力がかかる。実験条件ごとに張力限界値が異なるDNA「紐」を使用し、ノッチシグナル伝達量を反映する緑色蛍光強度を測定した。5つの実験条件における多数の細胞の測定値を平均し、条件1の値が1.0になるように標準化した(図3—9)。

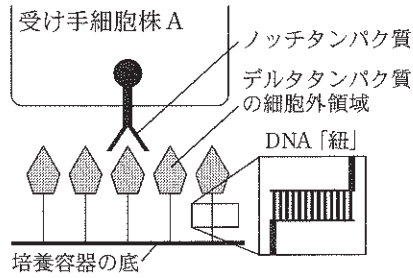


図 3—8 ノッチ—デルタタンパク質間の張力が、ノッチシグナル伝達に与える影響を評価する実験の原理

実験条件

条件 1 : 30 pN まで耐えられる DNA「紐」を使用する。

条件 2 : 12 pN まで耐えられる DNA「紐」を使用する。

条件 3 : 6 pN まで耐えられる DNA「紐」を使用する。

条件 4 : 30 pN まで耐えられる DNA「紐」を使用し、かつ、培養液に DNA 切断酵素を添加する。ただし、DNA 切断酵素は細胞内には入らないものとする。

条件 5 : デルタタンパク質を DNA「紐」に結合せず、培養液中に溶解した状態にする。

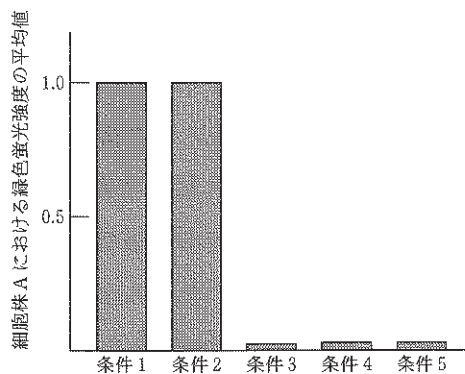


図 3—9 ノッチ—デルタタンパク質間の張力が、ノッチシグナル伝達に与える影響を評価する実験の結果

[問]

- E $\alpha \sim \delta$ に当てはまる番号を図 3—7 の(2)~(5)からそれぞれ選べ。
- F DNA「紐」は塩基対の数が等しい場合でも GC 含量の違いにより張力限界値が異なる。塩基の化学的性質に触れながらその理由を 2 行程度で述べよ。
- G 図 3—9 に示す実験 4 の結果について、以下の(1)~(5)の選択肢から正しい解釈をすべて選べ。
- (1) ノッチタンパク質を活性化できる最小の張力は 30 pN よりも大きい。
 - (2) ノッチタンパク質を活性化できる最小の張力は 12 pN よりも大きく、30 pN 以下である。
 - (3) ノッチタンパク質を活性化できる最小の張力は 6 pN よりも大きく、12 pN 以下である。
 - (4) ノッチタンパク質を活性化できる最小の張力は 6 pN 以下である。
 - (5) 細胞株 A において、ノッチシグナルが活性化するためには張力は必要でない。
- H 図 3—1 に示す一連の過程に着目し、実験 1 ~ 4 の結果を踏まえて下線部(ウ)「ノッチシグナルの張力依存性仮説」の内容を 4 行程度で説明せよ。ただし、「受け手細胞」「送り手細胞」「張力」「切断」の語句を必ず含めること。また解答文で、用いた語句 4 つには下線を引くこと。

地 学

第1問 宇宙に関する次の問い(問1～2)に答えよ。

問1 恒星の表面の明るさに関する以下の問いに答えよ。計算の過程も示せ。

- (1) 半径 R 、表面温度 T のある恒星の光度 L (単位時間あたりに放射されるエネルギー) を求めよ。シュテファン・ボルツマン定数を σ とする。また、その恒星までの距離が D であるとき、我々が観測するみかけの明るさ F (単位時間あたりに、光線に垂直な面の単位面積を通過するエネルギー) を求めよ。
- (2) その恒星は半径が角度 θ_s の円に見え、天球面上での面積は $\pi\theta_s^2$ となる。ひろがって見える天体の面輝度 S を、天球面上の単位面積あたりの明るさと定義する。この恒星の平均の面輝度 $\langle S \rangle$ は、 F を $\pi\theta_s^2$ で割ったものとなる。 θ_s を R と D で表した上で(単位はラジアンとする)、 $\langle S \rangle$ を求めよ。
- (3) 以下では、面輝度は恒星のみかけの円内でどこでも一定で、前問で求めた $\langle S \rangle$ であるとする。図1—1のような食連星を考える。光度 L がより明るい星を主星と呼ぶ。二つの食において、恒星が隠される部分の面積は同じであるとする。

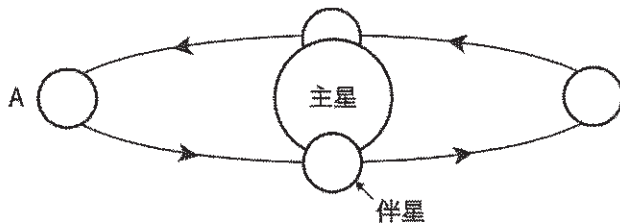


図1—1 地球から見たある食連星の模式図。主星を固定して描いてあり、矢印は公転方向を表す。

- (a) 連星の二つの星はともに主系列星であるとする。伴星が A の位置から主星の周りを一周する間の、この食連星全体のみかけの明るさ F_T の時間変化を、横軸に時間、縦軸に F_T をとって図示せよ。二つの食における光度変化量の違いを明示すること。
- (b) 二つの星が主系列星と限らない場合、どのような種類の恒星の連星ならば二つの食における光度変化量の大小が(a)の場合と逆になるか。理由も含めて 3 行程度で述べよ。
- (4) 観測者が恒星の中心から見込む角度を θ とする。現実の恒星の面輝度 S は中心 ($\theta = 0$) から境界 ($\theta = \theta_s$) にむかって暗くなる (周辺減光)。これを以下のように単純化して考えよう。恒星を、半径 R の内側では密度が一定、外側では密度ゼロのガス球とする。恒星からの光はガス球の表面ではなく、それよりわずかに内側の光球面から放たれる。光球面は、それより外側のガスによって光が吸収されるかどうかの境界であり、図 1—2 に示すように、光球面からガス球表面まで光が観測者にむかって伝搬する距離 d は、 θ によらず一定であるとする。なお、 d は R よりはるかに小さいとする。
- (a) ガス球表面から測った光球面の深さ r は θ によって異なる。 r を d , θ , θ_s を用いて表せ。図中に示された角度 α を途中で用いてもよい。
- (b) 恒星の温度は、ガス球表面から恒星内部に向かって高くなる。(a)の結果に基づいて、周辺部ほど面輝度が減少する理由を 3 行程度で説明せよ。

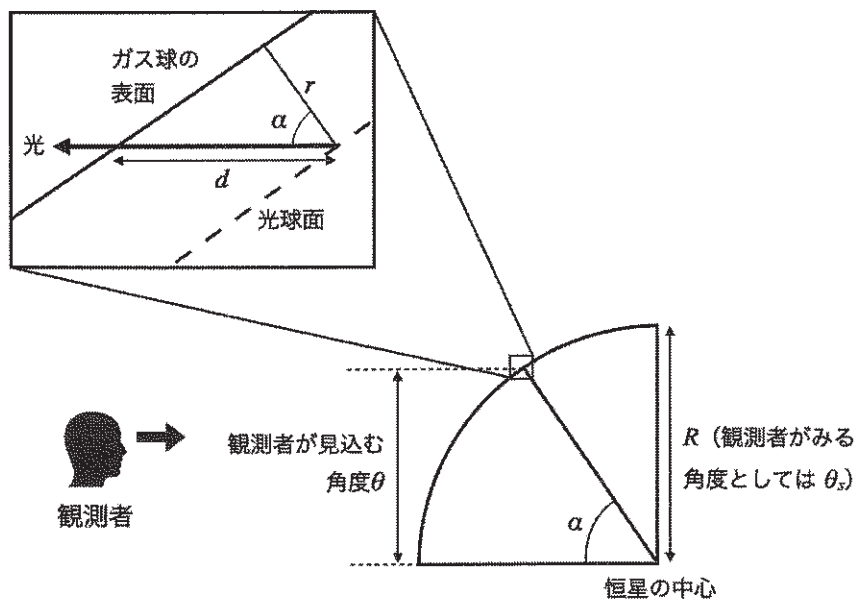


図 1 — 2 恒星の表面付近の光の経路の模式図

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

問 2 太陽系の惑星と衛星に関する以下の問いに答えよ。数値での解答には計算の過程も示せ。必要に応じて、 $2^{1/3} = 1.26$ を用いてよい。

(1) 太陽の周りを公転する惑星と同様に、惑星の周りを公転する衛星の運動もケプラーの法則に従っている。木星にはガリレオ衛星と呼ばれる特に大きな4つの衛星イオ、エウロパ、ガニメデ、カリストがある。そのなかで、イオ、エウロパ、ガニメデのそれぞれの公転周期 P_I , P_E , P_G は $1 : 2 : 4$ の整数比の関係が成り立つことが知られている。

(a) イオの公転軌道の長半径(木星からの最大距離と最小距離の平均)を $a_I = 4.2 \times 10^5 \text{ km}$ として、エウロパとガニメデの軌道の長半径 a_E , a_G を有効数字2桁でそれぞれ求めよ。

(b) イオでは活発な火山活動が起こっており、内部が高温になっていると考えられている。この高温の最も重要な原因と考えられるものを答えよ。

(2) 水星は惑星のなかで最も小さいが、平均密度は惑星の中で2番目に大きく、表面には地球の衛星である月と同様に、他の地球型惑星に比べて多くのクレーターを残している。また、水星の公転軌道は他の惑星と比較して特に大きな離心率を持っている。

(a) 水星が大きな平均密度を持つことは、水星の内部構造のどのような特徴を反映していると考えられるか、簡潔に答えよ。

(b) 水星表面に多くのクレーターが消えずに残されていることの主要な原因を一つ、1～2行で答えよ。

(c) 水星の遠日点での公転速度 v_a に対する近日点での公転速度 v_p の比を、図1—3を参考にして、軌道離心率 e を用いて表せ。また、 $e = 0.21$ として公転速度の比を有効数字2桁で求めよ。

(d) 水星の近日点において太陽方向に直交した平面が受ける単位時間、単位面積あたりの太陽放射エネルギーは遠日点の何倍か、軌道離心率 e を用いて表せ。

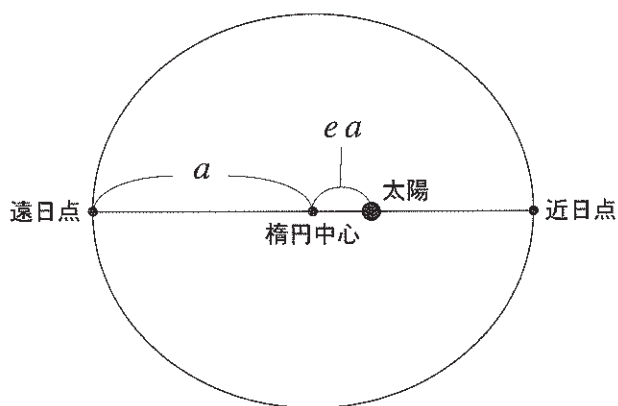


図1—3 水星の公転軌道の模式図

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2問 大気と海洋に関する次の問い(問1～2)に答えよ。

問1 以下の問いに答えよ。

- (1) 等圧面が水平方向と高度に対して図2—1のように分布している。ここで等圧面の圧力は $P_1 > P_2 > P_3 > P_4$ の関係を満たし、等圧面の間隔は左ほど大きい。大気組成は均一とする。

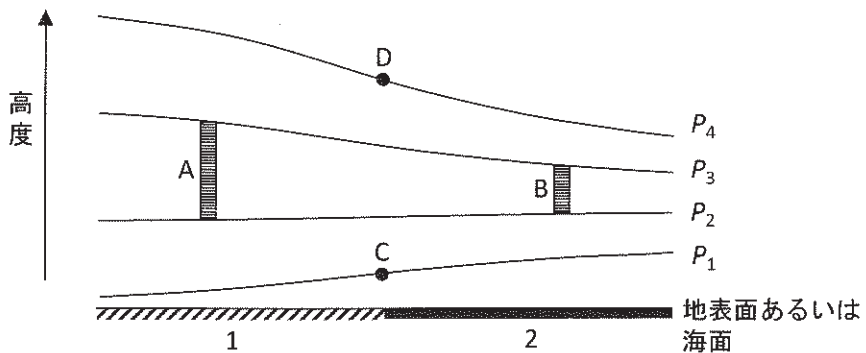


図2—1 等圧面の構造

- (a) 圧力が P_2 , P_3 の等圧面に挟まれた領域 A の平均気温と領域 B の平均気温のうちどちらが高いかを答え、その理由を、気圧はその高度より上にある単位面積あたりの大気の重さに等しいことを用いて2行程度で述べよ。
- (b) 図2—1 が夜間の海陸風の模式図であるとき、表面1(左)と表面2(右)のどちらが海面であるかを、海洋の熱容量が大きいことを考慮して答えよ。また、点Cにおける風の向きを「右向き」「左向き」から選べ。
- (c) 図2—1 を海陸風ではなく南半球の地衡風の模式図とする。紙面に垂直方向の気圧傾度力はないものとする。このとき、点Dにおける風の向きを「右向き」「左向き」「手前向き」「奥向き」の中から選べ。

(d) 点Cにおいて、気圧傾度力とコリオリの力(転向力)と摩擦力がつり合っており、摩擦力の大きさは気圧傾度力の半分の大きさであるとする。このときの風速は、摩擦力が働かず気圧傾度力とコリオリの力がつり合っているときの風速の何倍であるかを、計算の過程も示して答えよ。計算の過程では気圧傾度力の大きさを F_p 、コリオリの力の大きさを F_c 、摩擦力の大きさを F_v とする。

(2) 北半球中緯度で発達しつつある偏西風波動を考える。図2—2は地表の気圧分布の模式図である。同心円に囲まれた領域Eと領域Fのうち、いずれかが低気圧で、いずれかが高気圧である。

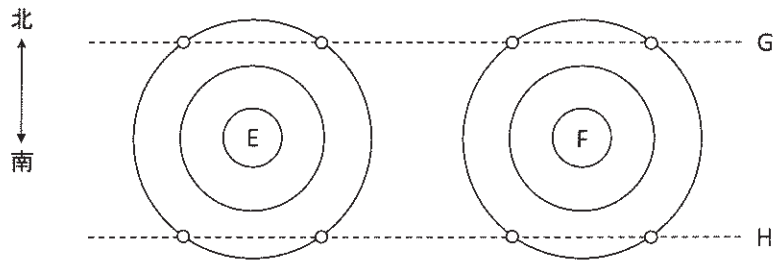


図2—2 地表の気圧分布

(a) 線分Gと線分Hのいずれかに沿った白丸の地点における風向が図2—3の矢印のように表される。これらの風向は線分G, Hのいずれに沿ったものであるかを答えよ。また、領域E, Fのいずれが低気圧であることを答えよ。

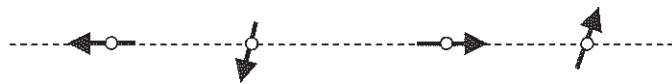
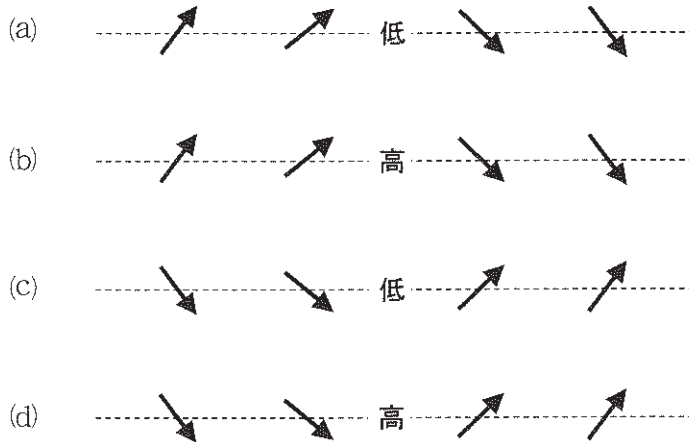


図2—3 風向の分布

(b) 線分 G の上空の 500 hPa 等圧面における風向と、気圧の谷(「低」で表す)、あるいは尾根(「高」で表す)の位置として、適切なものを次の(a)~(d)から選べ。



(c) 偏西風波動が発達するとき、上空の気圧の谷の東側で気温が高く、西側で気温が低くなっている。このことと上記の風向を使って、偏西風波動が地球全体のエネルギー収支においてどのような役割を果たしているかを、「太陽放射」という語を用いて2~3行で述べよ。

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

問 2 以下の問いに答えよ。数値による解答は有効数字 2 桁で答え、計算の過程も示せ。なお、重力加速度は 9.80 m/s^2 、円周率は 3.14 とする。

- (1) 太平洋域には複数のプレート(図 2—4)が存在し、プレート境界で発生した巨大地震が引き起こす津波は遠洋に広がる。2011 年東北地方太平洋沖地震により E1 において発生した津波は、地震発生から 8 時間後、津波計が深海に設置されている観測点 S1 に到達した。同様に 2010 年チリ地震により E2 において発生した津波は、8 時間 40 分後、津波計が深海に設置されている観測点 S2 に到達した。E1 から S1 までの大円距離(地球表面に沿った最短距離)を 6800 km, E2 から S2 までの大円距離を 6100 km とし、津波の伝播の速さから、それぞれの津波伝播経路の平均水深を求めよ。簡単のため、それぞれの伝播経路の水深を平均水深で、伝播経路を大円で近似できるものとする。

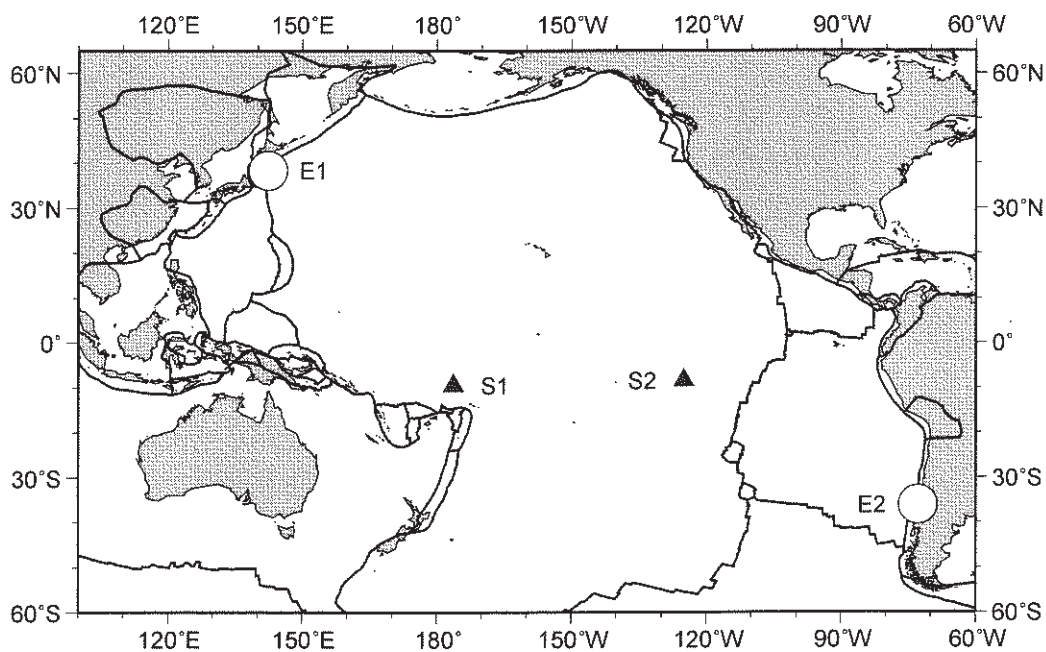


図 2—4 太平洋を中心とする海陸分布とプレート境界

- (2) (1)で求めたE1-S1間とE2-S2間の平均水深が異なる理由を、以下の語をすべて用いて4行程度で述べよ。

語群：東太平洋中央海嶺，プレート，海洋底年代，リソスフェア，冷却

- (3) 海上の強風が生成する波浪は、強風域から遠く離れると、形の整った（ア）と呼ばれる海洋波浪として観測される。いま、水深4000mの平坦な深海底に設置されている流速計の直上の海面を、波高が2mで周期12秒の（ア）が一方方向に伝わっている。

- (a) 空欄（ア）に入る適切な語句を答えよ。
- (b) 下線部の波の波長と波の伝わる速さを答えよ。
- (c) 流速計は海水の流速を計る。例えば、この流速計の直上の海面を一方方向に伝播する波高2mの津波は、海底付近で最大10 cm/s程度の水平方向の流速を生じる。一方、下線部の波は海底付近で流れを伴わず、この流速計は（ア）を検知しない。下線部の波が海底付近で流れを伴わない理由を2行程度で述べよ。

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。)

第3問 地震と地質に関する次の問い(問1～2)に答えよ。

問1 地震と断層に関する以下の問いに答えよ。

(1) P波の振動方向などの地震波形の特徴を分析すると、1点での観測であっても震源の方向と震源までの距離が推定でき、このことは緊急地震速報で活用されている。いま、 z 軸を鉛直上向きにとった3次元 x - y - z 座標系上で位置 $(x_0, y_0, 0)$ に設置された観測点でP波が観測され、震源が観測点から方向 $\vec{e} = (e_x, e_y, e_z)$ および距離 R の位置にあると推定された。ここで \vec{e} は観測点から震源の位置へ向いた単位ベクトルであり、地表面は $z = 0$ に位置する。また、P波速度 V_p 、S波速度 V_s は場所によって変化しないものとする。

(a) x - y - z 座標系上での震源の位置 (x_s, y_s, z_s) を、それぞれの成分ごとに $R, e_x, e_y, e_z, x_0, y_0$ を用いて表せ。

(b) 観測点でP波が検知され瞬時に緊急地震速報が発令されたとしても、S波(主要動)の到達に緊急地震速報が間に合わない領域内の点 $(x, y, 0)$ が地表面上にある場合を考える。 x, y が満たす不等式を $V_p, V_s, R, x_s, y_s, z_s$ を用いて記せ。

(c) (b)の結果をもとに、地表面における緊急地震速報が間に合わない領域と観測点のおよその位置を x - y 平面上に図示せよ。簡単のため $x_s = y_s = y_0 = 0$ とする。

(d) 陸側プレート内の浅部で発生する地震(直下型地震)に対して緊急地震速報を全ての地域で間に合わせるには難しさがある。(c)までの考察をもとに、多数の観測点からなる地表の観測ネットワークをどのように整備すれば間に合わない地域の範囲を狭められるか理由を含め2行程度で述べよ。

(2) 実際の断層は点ではなく、大きさのある面であり、断層のずれは、一定の速度 V_r (マグニチュードによらず S 波速度の数十分程度) で断層面上を移動する震源として表される。各地点での揺れは、断層から放出された最初の地震波が到達したら始まり、最後の地震波が到達するまで継続する。以下では、P 波による揺れのみを考え、S 波や屈折波、反射波の影響は考えないものとし、P 波速度 V_p は場所により変化しないものとする。断層面の幅(深さ方向の長さ)は無視できるほど小さいものと考えよ。

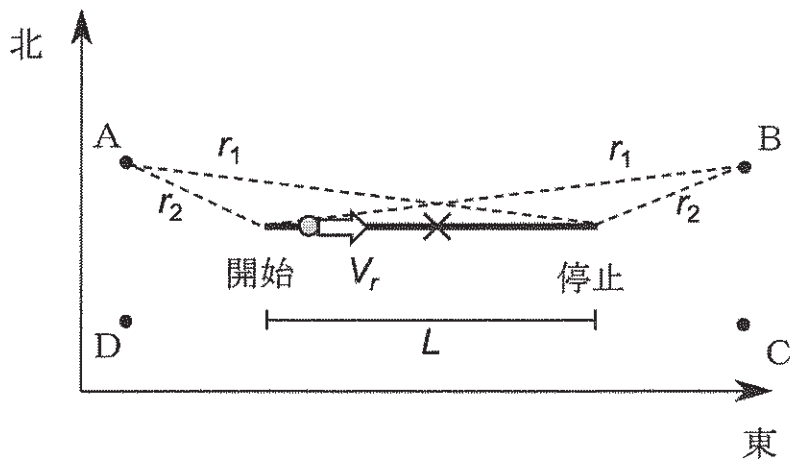


図 3—1 鉛直な断層面を上から見た平面図。太線は断層面であり、白矢印は白丸の位置にある震源が断層面上を移動する方向、点 A~D は観測点を示す。

- (a) 一般に、地表面で揺れが継続する時間は、地震のマグニチュードとどのような関係にあるか、その理由を含めて 2 行程度で説明せよ。
- (b) まず簡単のため、図 3—1 の×の位置に移動しない右横ずれの震源を考える。観測点 A~D での初動の向きをそれぞれ押し波か引き波で答えよ。

(c) つぎに、図 3—1 の白矢印のように断層の西端から移動を開始し東端で停止する右横ずれの震源を考える。初動が押し波の領域と引き波の領域を分ける境界線を、断層上の震源の移動開始点と停止点の位置とともに図示せよ。

(d) (c)の場合で、観測点 A と B での揺れの継続時間を断層の長さ L 、 V_r 、 V_p を用いて表し、震源の移動が各点での継続時間に与える影響を 2 行程度で説明せよ。ここでは、断層面上端は地表面に位置し、観測点 A と B は断層の端から等距離にあり図 3—1 での距離 r_1 と r_2 には、 $r_1 - r_2 = L$ の近似が成り立つとせよ。震源は、それぞれの位置で瞬間的に地震波を放出しながら移動するものとする。

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)

問 2 日本列島の地質構造に関する次の文章を読み、以下の問いに答えよ。

日本列島は、ユーラシア大陸と太平洋の間に位置する島弧であり、プレートの沈み込みに伴う造山運動が過去約5億年間にわたって繰り返されてきた。海洋プレート表面の物質や陸源の碎屑物が、海溝で陸のプレートに押し付けられて形成された地質体を(ア)と呼び、ジュラ紀に形成された美濃・丹波帯や、白亜紀から新第三紀にかけて形成された四万十帯^(I)はその一例である。また、^(II)(ア)の一部は変成作用により鉱物が再結晶して変成岩となっている。西南日本の広域変成帯である領家帯と三波川帯の境界は(イ)と呼ばれる断層である。新第三紀には日本海の拡大や、(ウ)プレートと呼ばれる海洋プレート上にある伊豆一小笠原弧の西南日本弧への衝突などが生じ、日本列島の形が作られてきた。

(1) 空欄(ア)～(ウ)に入る適切な語句を答えよ。

(2) 下線部(I)に関して、美濃・丹波帯の中には石灰岩の採掘がおこなわれている場所がある。美濃・丹波帯の中の石灰岩はどのような場所で形成されたか15字以内で述べよ。また、これらの石灰岩が美濃・丹波帯の中にとりこまれるまでの過程について、プレートの運動と沈み込み帯を表す模式的な断面図を描いて説明せよ。

(3) 下線部(II)に関して、図3—2は四国における四万十帯の複数の地点(A～D)において産出する岩石の種類と年代を示した模式柱状図である。

(a) 岩石種P, R, Sはそれぞれ何だと考えられるか。以下のうちから適切な語句を選択せよ。

流紋岩 玄武岩 花崗岩 砂岩・泥岩 チャート 岩塩

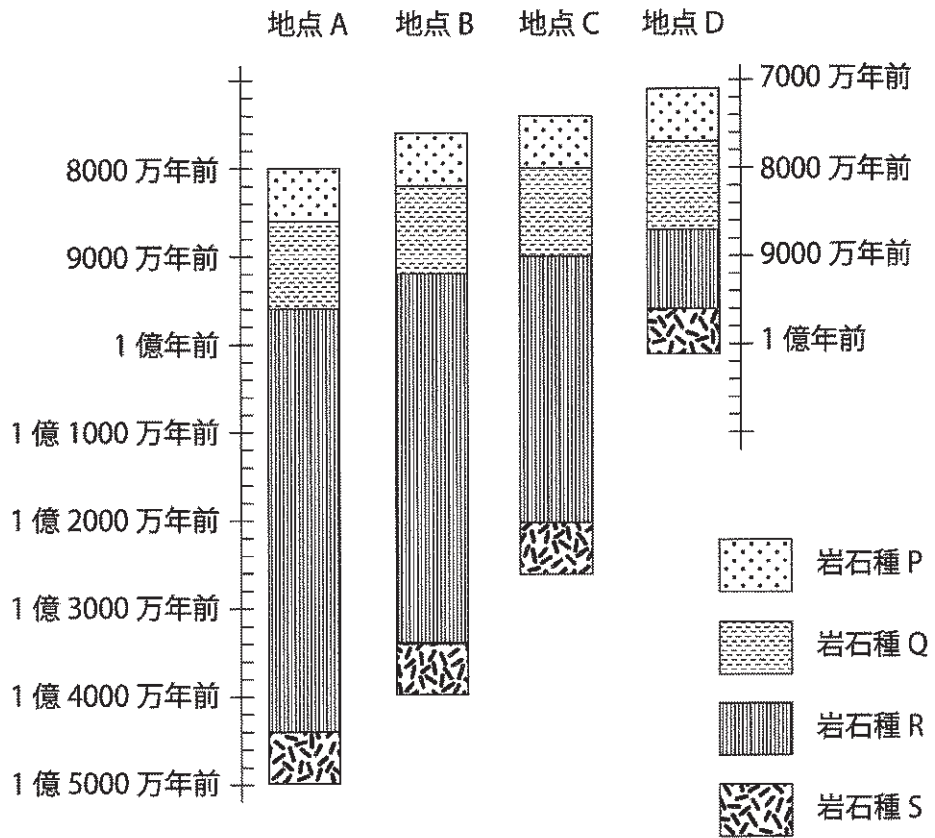


図3—2 四国における四万十帯の地点A～Dに産出する岩石の種類と年代を示す模式柱状図。柱状図の縦軸は層厚と一致しないことに注意。

- (b) 岩石種 Q は異なる起源をもつ粒子から構成されている。岩石種 Q を構成する粒子の起源を 2 つ挙げ、そう考えた理由を岩石種 Q が形成された場所と関連付けて 2 行以内で答えよ。
- (c) 地点 A～D のうち、最も南側に位置すると考えられるのはどの地点か。理由とともに 2 行以内で答えよ。
- (d) 図 3—2 では、岩石種 R の形成が生じていた期間が地点により異なる。この原因として、白亜紀後期に沈み込んでいた海洋プレートにどのような変化が生じたことが考えられるか。2 行以内で答えよ。

(e) 地点 A と地点 D から採取された岩石の分析の結果、両地点の岩石はいずれも、岩石種にかかわらず 150 °C の温度に達する弱い変成作用を受けたことが判明した。岩石種 P の最も若い年代と岩石種 S の最も若い年代の差が沈み込む海洋プレートの年齢をあらわしていると仮定して、地点 A, D の岩石はそれぞれ地下何 km まで沈み込んだと考えられるか、計算の過程とともに有効数字 2 桁で求めよ。なお、沈み込み帯におけるプレート境界浅部の地殻熱流量は、海溝に到達した海洋プレート内の地殻熱流量と同じであると仮定し、海洋プレートの年齢 t (単位：百万年) と地殻熱流量 q (単位：W/m²) には、

$$q = 0.5/\sqrt{t}$$

地温勾配 G 、地殻熱流量 q 、岩石の熱伝導率 k の間には

$$q = k \cdot G$$

の関係が成り立っているとする。また、プレート境界浅部における岩石の平均的な熱伝導率は 2.0 W/(K·m)、海底面の温度は 0 °C とし、岩石は沈み込みに伴って埋没し、弱い変成作用を受けた後には再加熱されていないものとする。

計 算 用 紙

(切り離さないで用いよ。)