

2026年度 医学部 一般選抜 問題訂正

教科・科目	ページ	設問	誤	→	正
理科 (物理)	p.6	Ⅱ 問3 (b)	V_{n+1} を e, V_n を用いて答えよ	→	V_{n+1} を e, v, V_n を用いて答えよ

2026年度

慶應義塾大学入学試験問題

医 学 部

理 科

注意事項

1. 受験番号と氏名は解答用紙の所定の記入欄にそれぞれ記入してください。
2. 受験番号は各科目ごとに2か所の所定欄の枠の中に1字1字記入してください。
3. 解答は、必ず解答用紙の所定の欄に記入してください。
4. この問題冊子の余白および下書き計算用ページは自由に用いてください。
5. この問題冊子の総ページ数は32ページです。試験開始の合図とともにすべてのページが揃っているかどうか確認してください。ページの脱落や重複があったら直ちに監督者に申し出てください。
6. この問題冊子は、試験終了後に持ち帰ってください。

—— 下書き計算用 ——

—— 下書き計算用 ——

物 理

解答は解答用紙の所定の欄に記入すること。

I

問1 (a) ある熱機関が1回のサイクルで高温の熱源から吸収した熱量を Q_1 、低温の熱源へ放出した熱量を Q_2 、この熱機関が外部にした仕事を W とする。この熱機関の熱効率 η を Q_1 、 W を用いて答えよ。

(b) ある物体が熱源から熱量 Q を吸収し外部に仕事 W を行った。このとき、この物体の内部エネルギーの変化量 ΔU と、 Q 、 W との間に成り立つ関係式を答えよ。

(c) 気体（物質質量 n 、定積モル比熱 C_V ）の体積を一定に保ち、温度を ΔT だけ上昇せたとする。このとき、この気体の内部エネルギーの変化量 ΔU を、 ΔT 、 n 、 C_V を用いて答えよ。

問2 音速を V [m/s] とし、図1のように静止した観測者と反射板、および反射板に向かって速さ v [m/s]（ただし、 $v < V$ とする）で運動している音源（振動数 f [Hz]）が一直線上に並んでいる。観測者は音源から直接届く音と、反射板で反射された音の両方を聞く。観測者が聞く音の1秒あたりのうなりの回数を答えよ。

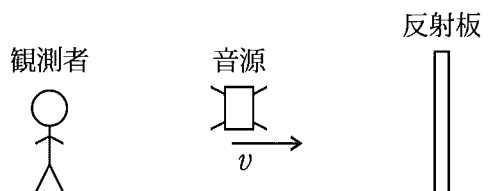


図1

問3 媒質の変位 y 、振幅 A 、時間 t 、周期 T 、速さ v で x 軸の正の向きに伝わる正弦波の式

$$y = A \sin(\boxed{\text{ア}} t - \boxed{\text{イ}} x)$$

における $\boxed{\text{ア}}$ 、 $\boxed{\text{イ}}$ にあてはまる適切な式を答えよ。

問4 ${}^{237}_{93}\text{Np}$ が α 崩壊と β 崩壊を繰り返して ${}^{205}_{81}\text{Tl}$ になった。 α 崩壊と β 崩壊の回数を答えよ。

—— 下書き計算用 ——

II

問1 ある物体が半径 r の円軌道上を一定の速さ V で半周運動した。平均の速さ（始点と終点間の直線距離をこの運動に要した時間で除した値）を r, V のうち必要なものを用いて答えよ（図1）。

問2 直線上の非弾性衝突を考える。質量 M で速度 v ($v > 0$) の物体と、質量 m で速度 $-V$ の物体が衝突し、質量 M の物体は速度 v' 、質量 m の物体は速度 V ($V > 0$) となった（図2）。この衝突における運動エネルギーの変化量（衝突前の全運動エネルギー－衝突後の全運動エネルギー）は $2mV \times \boxed{\text{ア}}$ となる。 $\boxed{\text{ア}}$ にあてはまる適切な式を m, M, v, V を用いて答えよ。

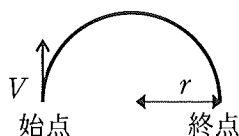


図1



図2

真空中における質量 m の質点の羽根つきについて考えよう。空間に y 軸を設定し、 $y \geq 0$ の領域を y 軸の負の向きに運動する質点が $y = 0$ を通る度に羽根つき（羽子板との衝突）を行う。羽子板は面を y 軸に垂直にして y 軸の正の向きに $y = 0$ において速さ v となるように運動し、質点との衝突は $y = 0$ において行われる。羽子板の質量は質点の質量より十分に大きく、質点と羽子板が非弾性衝突をする場合におけるはね返り係数を e ($0 < e < 1$) とする。

問3 下向きで大きさが一定値 g の重力が作用する空間の鉛直上向きに y 軸を設定し、質点と羽子板は非弾性衝突をする（図3）。

(a) $y = 0$ で静止した質点に羽子板が衝突した。衝突直後の質点の速さ V_1 を e, v を用いて答えよ。

(b) (a) の後、重力により落下する質点を羽子板で $y = 0$ において打ち返す。このような操作を繰り返す羽根つきを考えよう。(a) の場合を $n = 1$ とし、 n 回目の衝突直後の質点の速さを V_n とする。 V_{n+1} を e, V_n を用いて答えよ。

(c) n が無限大のときの衝突直後の質点の速さ V_∞ を、 e, v を用いて答えよ。

(d) n が無限大のとき、質点と羽子板の1回の衝突で失われる力学的エネルギーを m, v, V_∞ を用いて答えよ。ただし、羽子板の質量は質点の質量より十分に大きいことから、問2において、 M は m より十分大きく、1と比較して $\frac{m}{M}$ に比例した項は十分に小さいので無視する近似を参考にせよ。

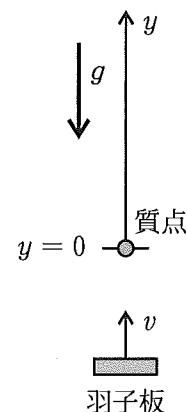


図3

xyz 直交座標で表される 3 次元空間の z 方向に磁束密度 B ($B > 0$) の磁場がある空間での質点 (質量 m , 電荷 $Q > 0$) と羽子板の衝突を考える (図 4)。質点の電荷は磁場との相互作用を通してのみ質点の運動に影響を及ぼす。羽子板, 質点供給器, 質点回収器は電場や磁場を生じない。また, 重力は無視する。

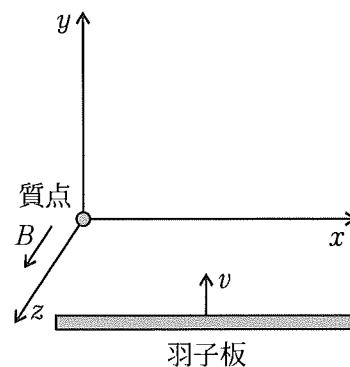


図 4

問 4 (e) 原点で静止した質点と羽子板が弾性衝突した。衝突後, 質点は円軌道運動を行った。以後, この軌道を C_1 軌道と呼ぶ。 C_1 軌道の半径を m, Q, v, B を用いて答えよ。

(f) (e) で示した衝突のあと, 質点は $y = 0$ 面を横切る度に羽子板と弾性衝突を行う。解答用紙の解答欄に描かれた C_1 軌道の後における質点の軌道を描け。

問 5 質点供給器と質点回収器を備えて, 質点が供給され続ける磁場中の羽根つきを考える (図 5)。質点供給器は原点で y 軸の負の向きに速さ V_∞ になるように質点を供給する。質点回収器は $x = L$ において質点を回収する。ここで V_∞ は, 問 3 (c) で定義された速さであり, 質点と羽子板は非弾性衝突を行う。質点間に力は働かず, 羽子板の長さは L より十分に大きいとする。

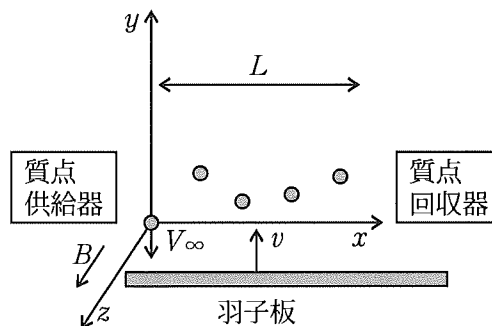


図 5

(g) 羽根つきは $x = 0$ から $x = L$ の領域 (領域 L) で行われ, 領域 L には x 軸方向に単位長さあたり N 個の質点がある。このとき, 電流 I (質点供給器から単位時間に射出される質点の数の時間平均値と Q の積) を問 1 を参考にして N, Q, V_∞ を用いて答えよ。ただし, L は円軌道運動の半径より十分に大きく, NL は 1 より十分に大きいとする。

(h) 1 個の質点の 1 回の衝突で羽子板が受ける力積, 領域 L 内の全質点が単位時間に羽子板に衝突する回数を考慮して, 羽子板が領域 L 内の全質点から受ける力の時間平均値の大きさを m, Q, I, v, B, L のうち必要なものを用いて答えよ。

III

平行板コンデンサに関する以下の問に答えよ。真空の誘電率を ϵ_0 とし、コンデンサの極板間の誘電率は真空と同じとみなす。極板の端やたわみの影響は無視する。 t を時間、 $f(t)$ を時間の関数とするとき、微小時間 Δt の間の $f(t)$ の微小変化を $\Delta f(t)$ と表記する。

問1 極板の面積 S 、極板の間隔 d_0 の平行板コンデンサの電気容量 C_0 を答えよ。以後、このコンデンサの電気容量を C_0 とする。

問2 図1のように電圧の最大値が V_0 で角周波数 ω の交流電源、抵抗値 R の抵抗、電気容量 C_0 のコンデンサを直列に接続した回路を考える。電流は図1の矢印の向きを正とする。交流電源の電圧は図1の矢印の向きに電流を流そうとする電圧を正として $V(t) = V_0 \sin(\omega t)$ とする。

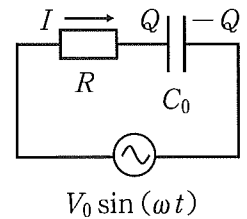


図1

(a) 時間 t にコンデンサに蓄えられた電荷を $Q(t)$ とすると (図1)、キルヒホッフの第2法則から、

$$V_0 \sin(\omega t) = \boxed{\text{ア}} \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t} + \boxed{\text{イ}} Q(t)$$

となる。 $\boxed{\text{ア}}$ 、 $\boxed{\text{イ}}$ を t 、 ω 、 V_0 、 R 、 C_0 のうち必要なものを用いて答えよ。

(b) 十分に時間が経ったとき、抵抗に流れる電流は $I(t) = \frac{V_0}{Z} \sin(\omega t + \alpha)$ と表せる。 Z と $\tan \alpha$ を t 、 ω 、 V_0 、 R 、 C_0 のうち必要なものを用いて答えよ。

(c) $\frac{V_0}{Z}$ の ω 依存性の概形を解答用紙にあるグラフに図示せよ。

問3 極板の面積が S で、極板の間隔 $D(t)$ が $D(t) = d_0 + d \sin(\omega t)$ のように時間変化する平行板コンデンサを図2のように電圧 V の直流電源と抵抗値 R の抵抗に接続した。ただし、 d は d_0 よりも十分に小さく、時間 t におけるコンデンサの電気容量を $C(t)$ とすると、コンデンサに蓄えられた電荷 $Q(t)$ はコンデンサの両端の電位差と $C(t)$ の積となる (図2)。電流 I は図の矢印の向きを正とする。

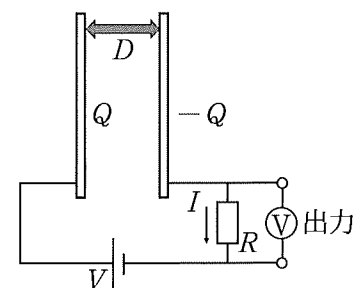


図2

(d) キルヒホッフの第2法則から、

$$V = \boxed{\text{ア}} \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t} + \boxed{\text{ウ}} Q(t) \quad (1)$$

となる。 $\boxed{\text{ウ}}$ を t 、 ω 、 V 、 R 、 $C(t)$ のうち必要なものを用いて答えよ。

$Q(t)$ を d の 1 次式

$$Q(t) = q_0(t) + q_1(t)d \quad (2)$$

で近似して (1) 式を解こう。ここで、 $q_0(t)$ 、 $q_1(t)$ は時間の関数であり d に依存しない。(1) 式に (2) 式を代入して、 d のべき乗でまとめ、 d^2 に比例した項は十分に小さいとして無視すると、

$$0 = A_0 + A_1d \quad (3)$$

が得られる。ここで、 A_0 、 A_1 は d を含まない式であり、

$$A_0 = \boxed{\text{ア}} \frac{\Delta q_0(t)}{\Delta t} + \boxed{\text{エ}} q_0(t) - V$$

$$A_1 = \boxed{\text{ア}} \frac{\Delta q_1(t)}{\Delta t} + \boxed{\text{エ}} q_1(t) + \boxed{\text{オ}} q_0(t)$$

となる。(3) 式が任意の微小量 d で成立するためには、 $A_0 = A_1 = 0$ となる必要がある。 $A_0 = 0$ より、回路を接続してから十分に時間経過した後は、 $q_0(t) = \boxed{\text{カ}}$ となる。以後の計算では、 $q_0(t) = \boxed{\text{カ}}$ と置き換えて計算せよ。同様に $A_1 = 0$ より、十分に時間経過した後の $q_1(t)$ は、

$$0 = \boxed{\text{ア}} \frac{\Delta q_1(t)}{\Delta t} + \boxed{\text{エ}} q_1(t) + \boxed{\text{キ}}$$

を満たす。

(e) $\boxed{\text{エ}} \sim \boxed{\text{キ}}$ を t 、 ω 、 V 、 R 、 C_0 、 d_0 のうち必要なものを用いて答えよ。

(f) 回路を接続してから十分に時間経過した後の抵抗に生じる電圧の大きさ $|V_R(t)|$ を問 2 を参考にして、 t 、 ω 、 V 、 R 、 C_0 、 d_0 、 d のうち必要なものを用いて答えよ。

問 4 問 3 の電気回路は音波を照射して極板を振動させることで音波を電気信号に変換する装置 (マイクロフォン) として実用化されている。図 2 のマイクロフォンは抵抗に生じる電圧を通じて電気信号を出力する。人間の可聴周波数は 20 Hz から 20000 Hz であり、マイクロフォンはこの周波数帯の音波を電気信号に変換できる必要がある。この要請を満たすために、 R 、 C_0 に成り立つべき条件を問 2 (c) を参考にして考察せよ。

化 学

解答は解答用紙の所定の欄に記入すること。

必要であれば、次の値を用いよ：

水のモル凝固点降下 $K_f = 1.85 \text{ K} \cdot \text{kg/mol}$ ，気体定数 $R = 8.31 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{L}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ 。

なお，気体は理想気体として扱うものとする。

原子量としては次の値を用いよ：

H, 1.00；C, 12.0；N, 14.0；O, 16.0；Na, 23.0；P, 31.0；S, 32.1；Cl, 35.5；K, 39.1；

Mn, 54.9；Fe, 55.9；Cu, 63.6；Hg, 201.

I 次の文を読み、問いに答えよ。

1834年にコールタール（石炭の熱分解物）から取り出されたフェノールは、当初、天然物から抽出されていた。しかし、医薬品や染料などの原料として優れていたことから、図1に示すようにさまざまな合成法が開発された。現在、工業的には^(a)図1（1）の方法で触媒を用いて製造される。この方法ではフェノールだけでなく、アも同時に得られる。この他にもベンゼンスルホン酸を使う方法（2）やクロロベンゼンを使う方法（3）などもよく知られている。これらの方法は、合成の最終段階は同じであり、イに二酸化炭素と水を反応させてフェノールを生成する。方法（2）では、ベンゼンスルホン酸を水酸化ナトリウム水溶液中で中和してベンゼンスルホン酸ナトリウムにし、^(b)固体の水酸化ナトリウムと高温で融解させてイを合成する。方法（3）では、クロロベンゼンを高温・高圧下で水酸化ナトリウム水溶液を用いて加水分解してイを合成する。また、塩化ベンゼンジアゾニウムを出発物質とする方法（4）もある。

フェノールはベンゼンよりも置換反応を受けやすい。例えば^(c)フェノールに濃硝酸と濃硫酸の混合物を加えて加熱すると、最終的にピクリン酸が生成する。

なお、^(d)フェノールは、同じく水酸基を有するアルコールとは異なる性質を有する。

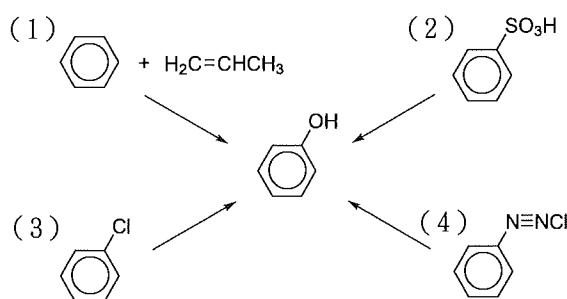


図1 フェノールの合成方法

1. ア，イ に該当する物質名と構造式をかきなさい。

2. 下線部 (a) について以下の設問に答えよ。

(1) 図2に反応におけるエネルギー変化を示した。この反応で触媒は活性化エネルギー E_a とエンタルピー変化 ΔH にどのようなはたらきをするか、下の中から適切なものを一つ選べ。

- ① E_a 増加, ΔH 増加 ② E_a 増加, ΔH 不変 ③ E_a 増加, ΔH 減少
 ④ E_a 不変, ΔH 増加 ⑤ E_a 不変, ΔH 不変 ⑥ E_a 不変, ΔH 減少
 ⑦ E_a 減少, ΔH 増加 ⑧ E_a 減少, ΔH 不変 ⑨ E_a 減少, ΔH 減少

(2) 触媒にはこの反応で使われるような無機触媒以外に生体触媒である酵素があるが、そのはたらきや反応条件には違いがある。酵素が無機触媒と異なる点を三つあげよ。

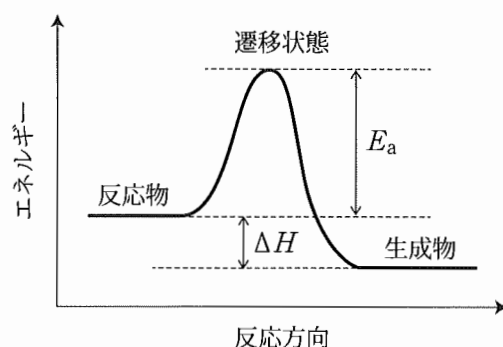


図2 反応におけるエネルギー変化

ΔH : エンタルピー変化, E_a : 活性化エネルギー

3. 下線部 (b) の反応操作の名称を答えよ。

4. 下線部 (c) の化学反応式を書け。

5. 下線部 (d) で、同じ炭素数6で一つのヒドロキシ基を有するフェノール (C_6H_5OH) とヘキサノール ($C_6H_{13}OH$) の性質について以下の設問に答えよ。

(1) フェノールもヘキサノールも水にわずかに溶ける。これらの水溶液の性質について、下の中からそれぞれ正しいものを一つ選べ。

- ① 酸性を示し、その強さはカルボン酸よりも強い。
 ② 酸性を示し、その強さはカルボン酸よりも弱い。
 ③ 塩基性を示し、その強さは炭酸水素ナトリウムよりも強い。
 ④ 塩基性を示し、その強さは炭酸水素ナトリウムよりも弱い。
 ⑤ 中性を示す。

(2) フェノールとヘキサノールについて、塩化鉄(Ⅲ)水溶液、水酸化ナトリウム、金属ナトリウムとの反応の有無に関して、下の中からそれぞれ正しいものを一つ選べ。ただし、下記の選択肢で、反応のある場合は「○」、反応のない場合には「×」と記載している。

性質	選択肢							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
塩化鉄(Ⅲ)水溶液との呈色反応	○	○	○	○	×	×	×	×
水酸化ナトリウムとの反応	○	○	×	×	○	○	×	×
金属ナトリウムとの反応	○	×	○	×	○	×	○	×

II 次の文を読み、問いに答えよ。

糖類はカルボニル基をもつ多価アルコールである。一般式 $C_nH_{2m}O_m$ で表されるが、ア と書けるので、イ とも呼ばれる。糖類のうち、それより簡単な分子に加水分解されないものをウ，加水分解によって二つのウを生じさせるものをエという。多数のウがオ重合の結果、カ結合で連結されてできたポリマーをキという。

ウの一つであるグルコースは、水溶液中では環状構造の α 型、 β 型および鎖状構造の3種類の異性体が平衡状態にあって、混合物として存在する。_(a) α 型、 β 型および鎖状構造のグルコースには、不斉炭素原子がそれぞれク，ケ，コ個存在する。グルコースは、酵母菌のはたらきによるアルコール発酵でサとシになる。

マルトースやセルビオースは2分子のグルコースから生じるエである。環状のグルコース2分子から生じるエには、 α 型、 β 型を考慮しない場合、その結合位置の違いにより、ス種類の構造が考えられる。

デンプンは多数の α -グルコースがオ重合してできたキであり、その構成成分は_(b)アミロースとアミロペクチンである。

1. ア～スにあてはまる適切な用語、化学式、物質名、数値を記せ。ただし、サのほうがシよりも分子量が大きい。

2. 糖に関する記述について正しければ○，正しくなければ×を書け。

- ① ラクトースを加水分解すると、マルトースが生成する。
- ② 核酸の構成成分であるリボースは、分子中に炭素原子を5個有する。
- ③ デンプンはヨウ素ヨウ化カリウム水溶液で青色または青紫色に呈色する。
- ④ グルコースは銀鏡反応を示さない。

3. 下線部(a)について、以下に示す図(図3)の空欄 を埋めて構造式を完成させよ。ただし、鎖状構造はフィッシャー投影式で示したものであり、不斉炭素原子の立体構造を簡便に表している。すなわち、C-C結合からなる主鎖を縦に並べてあるが、図4のように不斉炭素原子から出ている左右の線は紙面から手前に向く結合、上下の線は紙面から背後へ向かう結合を意味する。

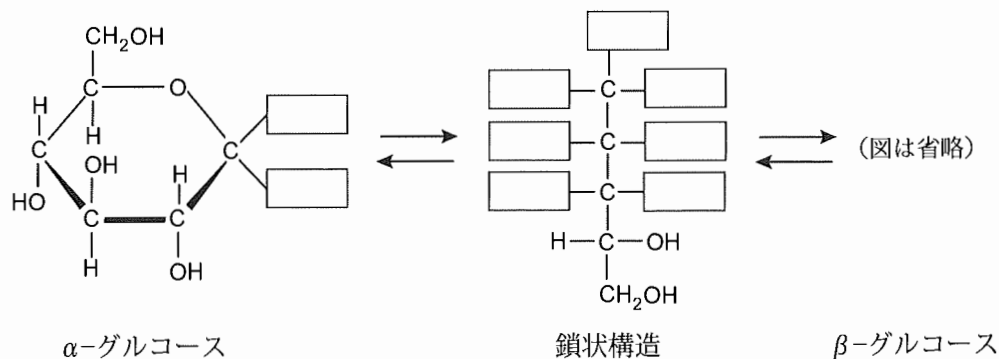


図3 グルコースの構造

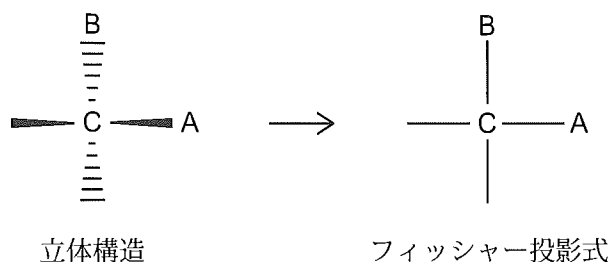


図4 フィッシャー投影式

C — A : A が紙面の手前側へ出ている。

C $\cdots$ B : B が紙面の背後へ出ている。

4. 下線部 (b) のアミロースとアミロペクチンに関する以下の記述で正しいものをすべて選べ。

- ① 分子量はアミロースよりアミロペクチンの方が大きい。
- ② 分子量はアミロペクチンよりアミロースの方が大きい。
- ③ アミロースとアミロペクチンの分子量は同程度である。
- ④ どちらも冷水に溶ける。
- ⑤ どちらも温水に溶ける。
- ⑥ どちらも水に溶けない。

5. 下線部 (b) のアミロースについて以下の文を読み、設問に答えよ。ただし、アミロース溶液、アミラーゼ溶液の密度は 1.00 g/cm^3 とし、アミラーゼによる凝固点降下、反応にともなう水の増減、混合による体積変化は無視せよ。なお、反応はすべて完全に進行して副反応は起こらないものとする。

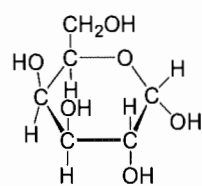
アミラーゼはヒトの唾液にも含まれる酵素で、アミロースを加水分解してマルトースにする。平均重合度が 500 のアミロース $M \text{ g}$ に水を加え、おだやかに温めた後に冷却して 140.0 mL にした。その後、濃度未知のアミラーゼ溶液 45.0 mL と混合した。これを 37°C で放置して、完全にマルトースに分解した。この溶液を溶液 A とする。溶液 A の凝固点降下を測定したところ、 0.370 K であった。次に、(c) 3.70 mL の溶液 A にフェーリング溶液を加えておだやかに温めると、沈殿 B が生成した。ろ別した (d) 沈殿 B に硫酸酸性の $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 水溶液を加えて完全に酸化した。その後、(e) 反応液中に生成した FeSO_4 を KMnO_4 で滴定した。

(1) 使用したアミロースについて次の問いに答えよ。

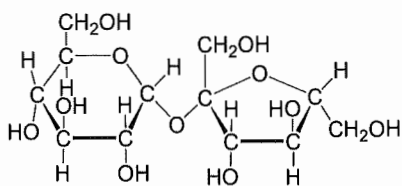
- (i) 平均分子量を求めよ。
- (ii) 物質量を求めよ。導出過程も簡潔に記せ。
- (iii) 質量 $M \text{ g}$ を求めよ。

—— 下書き計算用 ——

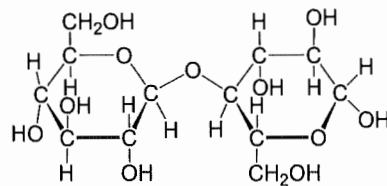
- (2) 下線部 (c) について、溶液 A 中のマルトースを次の物質に置きかえると、沈殿 B の生成量が明らかに違ってくるものをすべて答えよ。



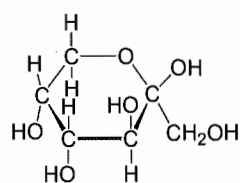
①



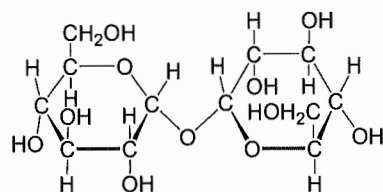
②



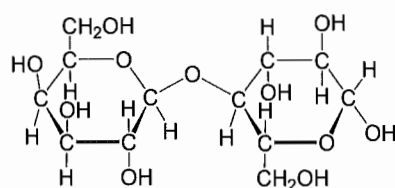
③



④



⑤



⑥

- (3) 下線部 (d) について、この反応の反応式を書け。

- (4) 下線部 (e) について答えよ。

(i) この反応の反応式を書け。

(ii) 反応液を KMnO_4 水溶液で滴定するとき、終点をどのようにして判断するか答えよ。

(iii) KMnO_4 の濃度が $4.00 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$ の場合、この反応に必要な KMnO_4 の体積は何 mL か。導出過程も簡潔に記せ。

Ⅲ 次の文を読み、問いに答えよ。なお、リンの単体および代表的な酸化物の性質を表 1 に示す。

1695年、フィレンツェで実験がおこなわれた。直径 80 cm のレンズを用いて日光を集光させ、その焦点に陶磁器や軽石を置いたところ、それらが融解した。9 g のダイヤモンドは約 30 分で燃焼した。当時、それはダイヤモンドが気化した、すなわち、ア したと思われていた。

1775年頃、フランスの^(a)ラボアジエは、酸素中で木炭を燃焼させると、イ が生じることを見いだした。木炭のかわりにダイヤモンドを用い、酸素を満たしたフラスコの中でレンズを用いて加熱したときにも、この気体が発生した。これにより、ダイヤモンドは結晶化した ウ にすぎないことが明らかになった。

ラボアジエは、図 5 に示すような実験装置を用いて鉄の燃焼実験をおこなった。水銀槽 A の中に容積約 6 L のガラス鐘 B がかぶせてある。B の中は酸素で満たされ、内側の水銀面に陶器の皿 C が浮かべてある。C には鉄くずが入れてあり、その上の一箇所に燃えやすい繊維の小さい塊とリンの小片が加えられている。ガラス管で作ったサイホン D の先に紙の小さい塊 d を巻き付け、中に水銀が入らないようにして B の中に差し込み、^(b)D の他方の端を口で吸い続けてから D を取りはずし、B の内側の水銀面を外側よりも 18 cm 高くした。次に、曲げた鉄 E の先端 e を火で強熱し、B の下から入れて C 中のリンに近づけ、すぐ抜き取った。リンが発火して、その火が繊維、さらに鉄へと伝わった。鉄くずは熱によって融解し、火花を散らして燃え尽き、さまざまな大きさの小球となって落下した。^(c)鉄は燃焼によって、磁性酸化鉄になった。その大部分は C の中に残り、一部は水銀の表面に浮かんできた。鉄の量が十分にあれば、酸素をほぼ全部消費させることもできる。しかし、その場合、C が B の天井に近づきすぎたり、エ の接触によって B の天井が オ されたりするため破裂してしまう可能性がある。

ラボアジエはリンの燃焼実験もおこなった。図 5 の B の中に酸素を満たし、その中に^(d)C を二つ入れ、それに 3.97 g のリンを分けてのせ、一方を板ガラスでおおった。D を用いて、B の内側の水銀面を十分に上昇させてから、E を使ってリンの一方に点火した。すると、急速に燃え、B 内の水銀面はいったん下がるがすぐに元の高さよりも上昇した。それと同時に B の内部は^(e)白い綿くず状の物質でおおわれた。なお、燃え残ったリンの質量は 1.05 g であった。反応によって消費された酸素の体積は、標準状態で 2.64 L であったと推定される。しかし、生成物の質量を測定することは不可能であったため、彼が発見した法則が成り立っていることを確認することはできなかった。そこで、別の実験装置を用いた。

図 6 に示すように球状のフラスコ F の中に台 G を入れ、その上に陶器の皿 H を乗せた。H には、9.72 g のリンを入れた。F の口を水晶板 I でふたをし、脂肪を塗って密閉した。I には 2 本のガラス管 J が差し込んであり、それぞれにコック K がついている。一方の J を空気ポンプにつないで容器内を真空にし、他方の J から酸素を F に入れた。二つの K を閉じた状態で、空気ポンプと酸素の供給源とを切り離してから、装置の質量を測定した。その後、^(f)ガラス棒を用いて F 中のリンに点火した。大きな炎と強い熱をともなって燃焼が進み、大量の白い綿くず状の物質が生じた。燃焼が終わってから放冷した後、装置の質量を測った。また、残ったリンを装置から取り出して、その質量を測定した。

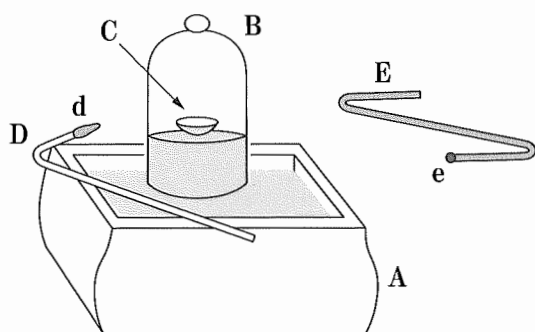


図5 ラボアジエの最初の実験装置

A：水銀槽 B：ガラス鐘
C：陶器の皿 D：サイホン
E：曲げた鉄

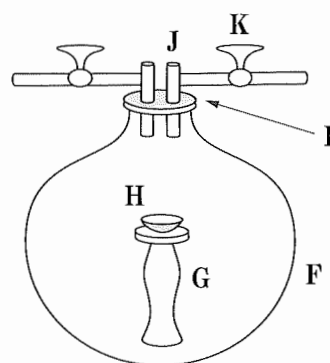


図6 ラボアジエの改良した実験装置

F：フラスコ G：台
H：陶器の皿 I：水晶板
J：ガラス管 K：コック

表1 リンの単体および代表的な酸化物の性質

物質	黄リン	赤リン	六酸化四リン	十酸化四リン
融点/℃	44	590 (加圧下)	24	580
発火点/℃	34	260	—	—

(注) 黄リンは白リンともいう。

発火点は、空气中で自然に燃焼する最低温度である。

1. ア～オにあてはまる用語，語句あるいは物質名を書け。ただし，アは物質の状態変化をあらわす用語である。

2. 下線部 (a) について，ラボアジエが確立した化学の基礎法則は何か。次の中から一つ選べ。

- ① 化学平衡の法則 ② 気体反応の法則 ③ 原子説 ④ 質量保存の法則
⑤ 総熱量保存の法則 ⑥ 定比例の法則 ⑦ 倍数比例の法則 ⑧ 分圧の法則

3. 下線部 (b) について，非常に危険なので現在はこのような実験操作はしない。どのような危険があるのか。次の中から二つ選べ。

- ① 塩基性の液体が口の中に入る。 ② 黄リンの微粉末が口の中に入る。
③ ガラスの粉末が口の中に入る。 ④ 酸性の液体が口の中に入る。
⑤ 水銀の蒸気を吸い込む。 ⑥ 赤リンの微粉末が口の中に入る。
⑦ 装置内の気体を吸い続けて酸欠になる。 ⑧ 熱した鉄に顔が触れ，やけどする。

—— 下書き計算用 ——

4. 下線部 (c) で、5.82 g の鉄から 7.72 g の純粋な磁性酸化鉄（四酸化三鉄）が得られた。使用した鉄に含まれていた炭素は重量比で何%であったか、有効数字 2 桁で答よ。また、導出過程も示せ。なお、鉄には炭素以外の不純物は含まれていなかったとする。

5. 下線部 (d) について、リンを二つに分けて入れ、一方を板ガラスでおおったのは何のためか。次の中から適切なものを一つ選べ。

- ① 加熱によって黄リンが赤リンに変化するのを防ぐため。
- ② 生成物ができるだけ飛び散らないようにするため。
- ③ リンが一気に燃え上がらないように、反応速度を下げるため。
- ④ リンの表面積を増やして、燃え残りを少なくするため。
- ⑤ リンに点火したとき、燃え広がりやすくするため。

6. 下線部 (e) の物質について、以下の設問に答えよ。

- (1) この白い綿くず状の物質は何か。図 7 の ①～⑤ の中から一つ選べ。また、その根拠も示せ。
- (2) この物質は吸湿性が高く、水に溶けるとリン酸が生じる。リン酸の構造式を描け。
- (3) この物質は装置からすべて取り出せたとしても、その正確な質量を測定することは困難である。その理由を簡潔に述べよ。

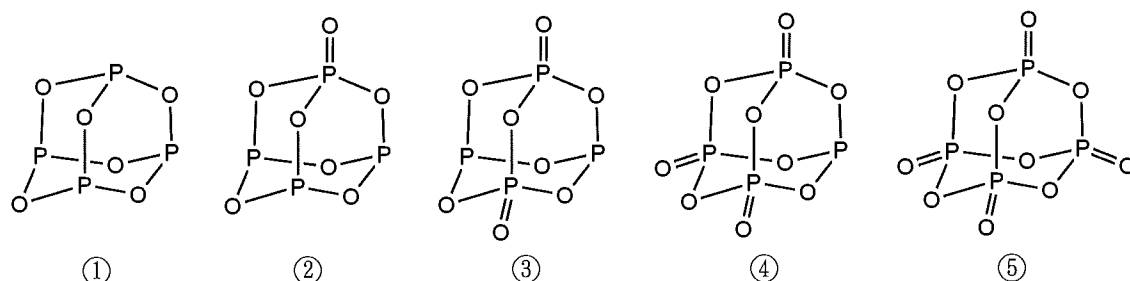


図 7 酸化リンの可能な分子構造

いずれの分子も四つの P は正四面体様配置であり、二つの P を架橋する O とは単結合、末端の O とは二重結合をしている。

7. 下線部 (f) について、ガラス棒でリンにどのようにして点火したのか考えよ。

生 物

解答は解答用紙の所定の欄に記入すること。

I 次の文章を読み、問いに答えなさい。

地球上の陸地の大半は植物に覆われており、ある一定の地表を覆っている植物の集まりを総称して植生という。植生を規定する因子として、気温、降水量、日照などの気候条件に加えて、地質の違いも重要である。地質構造線や断層に沿って、しばしば蛇紋岩^{じやもん}と呼ばれる緑色調の岩石が見られるが、蛇紋岩はニッケルやマグネシウムをはじめとして、通常の植物にとって有害となる高い濃度の重金属類を含んでいる。⁽¹⁾ そのため蛇紋岩地帯では多くの植物は生育できず、蛇紋岩植物と呼ばれる、蛇紋岩地帯に適応した植物による特徴的な植生を形成している。アブラナ科の一年生植物であるシロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) (以下、植物 At) は蛇紋岩植物ではないが、近縁のグンバイナズナ属に分類される *Thlapsi goesingense* (以下、植物 Tg) は蛇紋岩植物の一種であり、オーストリア南東部の蛇紋岩地帯をはじめとした地域に見られる (図1)。



図1 (左) *Arabidopsis thaliana* (植物 At) と、(右) *Thlapsi goesingense* (植物 Tg) と同じグンバイナズナ属に分類される *Thlapsi arvense* の図

蛇紋岩植物に限らず、ニッケルをはじめとする重金属類に耐性を示す植物では、根における重金属類の吸収を抑えたり、根から茎への重金属類の移行を抑えることで耐性を獲得するものが多いが、植物 Tg ではニッケルの根からの吸収や根から茎への移行は植物 At と同程度であることがわかっている。一方で、植物 Tg では葉に高濃度のニッケルを蓄積しているものの、植物 Tg の葉の細胞は高濃度のニッケルに対して耐性を有しており、これは代謝産物や老廃物を貯蔵する細胞小器官である あ 中にニッケルを隔離しているためと考えられている。ここで、植物 Tg がニッケル耐性を示す理由について、さらに次の検討を行った。

<検討 1>

細胞小器官である あ にニッケルを輸送するトランスポーターである分子 X をコードする遺伝子 X の配列を決定した。植物 At と植物 Tg の遺伝子 X をそれぞれ遺伝子 *AtX* と遺伝子 *TgX* とする。植物 Tg のゲノム上に遺伝子 *TgX* は 1 コピーしか存在しないが、遺伝子 *TgX* の転写産物である伝令 RNA (mRNA) の塩基配列を調べると、遺伝子 *TgX* のエキソン領域全長を含む mRNA (mRNA-TgX1) と、エキソン領域の一部を欠く mRNA (mRNA-TgX2) が認められた。これは、mRNA 前駆体から成熟 mRNA になる過程で い の機構が働いたためと考えられた。

<検討 2>

遺伝子 X の転写産物である mRNA-TgX1, mRNA-TgX2 から翻訳されて生じる分子を、それぞれ分子 TgX1, 分子 TgX2 と呼ぶ。これらの分子の機能の違いを検討するために、う 酵素を用いてそれぞれの mRNA から相補的 DNA (cDNA) に う し、順に、cDNA-TgX1, cDNA-TgX2 とした。植物細胞よりも酵母の方が取り扱いが容易であるため、以降の実験は酵母 Y を用いて行った。酵母 Y は、トランスポーターの変異により細胞小器官である あ に類似した構造内に重金属を輸送できず、重金属の濃度が高いと生育できない。この酵母 Y に cDNA-TgX1 あるいは cDNA-TgX2 を導入して発現させ、異なる濃度の重金属 (カドミウム, コバルト, ニッケル, 亜鉛) の存在下における酵母 Y の増殖抑制度を測定したところ、図 2 の結果を得た。

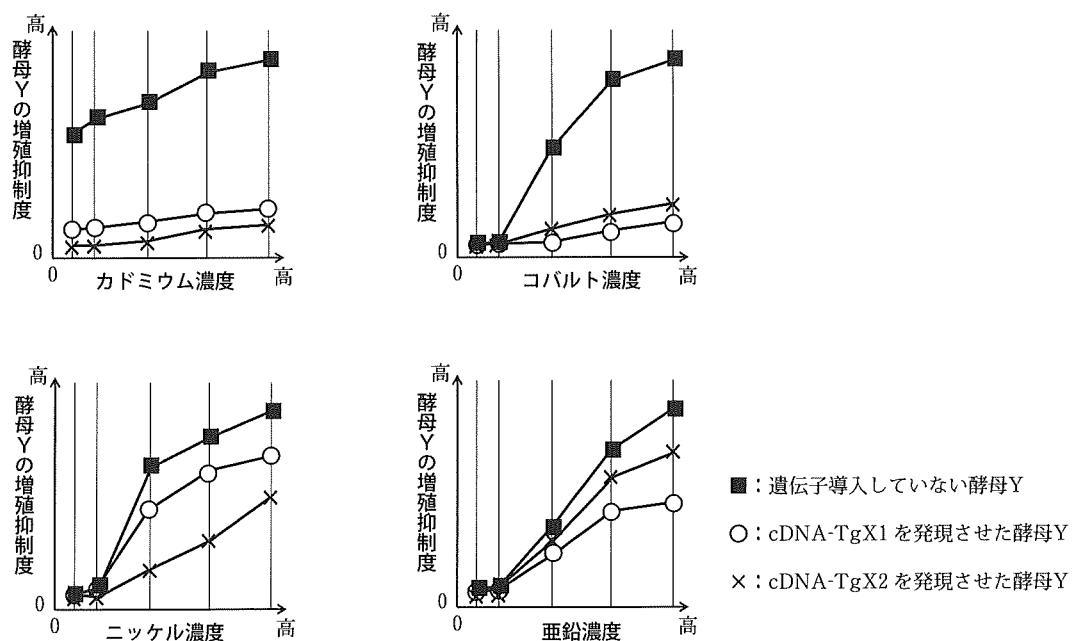


図 2 異なる濃度の重金属存在下における、cDNA-TgX1 と cDNA-TgX2 を発現させた酵母 Y の増殖抑制度のグラフ

<検討 3>

遺伝子 *AtX* の転写産物のうち最も代表的なものを mRNA-*AtX* とする。高濃度ニッケルを培地に添加していない状態で育てた植物 *At* ならびに植物 *Tg* と、高濃度のニッケルを2日間培地に添加して育てた植物 *At* ならびに植物 *Tg* の葉からそれぞれ mRNA を抽出し、PCR 法を応用した定量 PCR 法と呼ばれる方法を用いて mRNA-*AtX*, mRNA-*TgX1*, および mRNA-*TgX2* の発現量を検討したところ、図3の結果を得た。ここで、mRNA-*AtX* と mRNA-*TgX1* は、塩基配列の一致率が高いため、同一のプライマーで検出可能である。一方、mRNA-*TgX2* 用のプライマーは mRNA-*AtX* を検出できない。

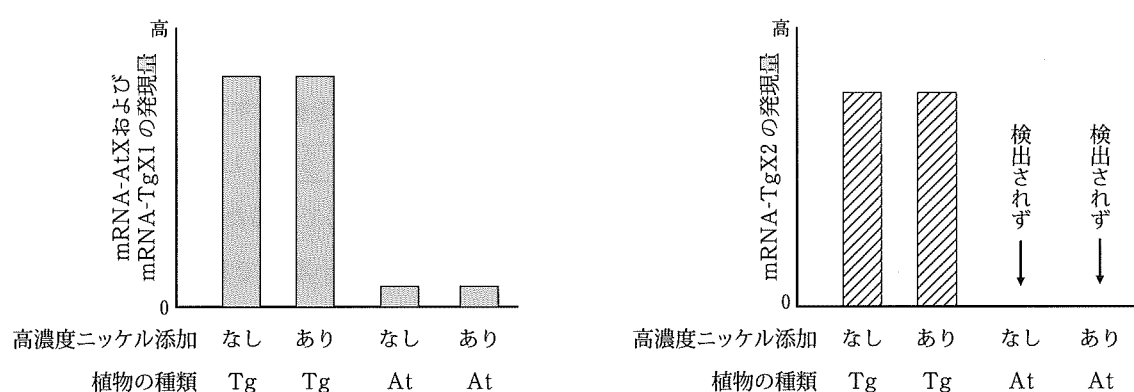


図3 植物 Tg と植物 At における, 高濃度ニッケル添加と mRNA 発現量の関係のグラフ

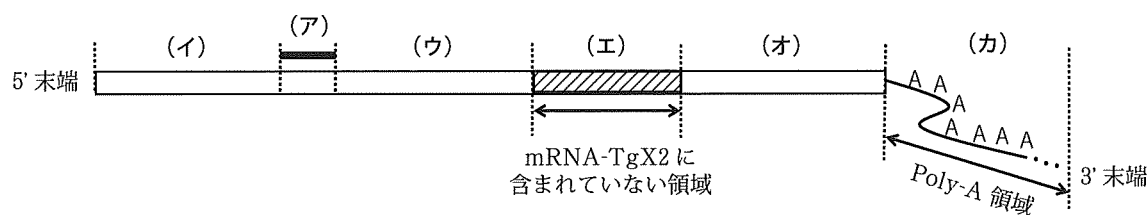


図4 mRNA-TgX1の全長の模式図

問1 下線部(1)に関連して、蛇紋岩植物を生じる進化の過程において、自然選択が果たす役割を次の語句を用いて簡潔に説明せよ。(語句：蛇紋岩地帯，世代)

問2 今回の蛇紋岩植物の例のような自然選択が働かなくても、遺伝的浮動により集団内の遺伝子頻度に変化することがある。遺伝的浮動と中立進化についてそれぞれ簡潔に説明せよ。

問3 空欄 ～ に入る適切な語句を答えよ。また， の機構が働く細胞内の場所を答えよ。

問4 mRNA-TgX1 と mRNA-TgX2 の発現量を区別して PCR 法で検討するためのプライマーをそれぞれ設計したい。一方のプライマーを図4の(ア)の位置に対応させて共通のプライマーとして作成する場合，もう一方のプライマーをそれぞれの位置に対応させて作成するのが良いか，理由とともに答えよ。必要に応じて，図4の(ア)～(カ)の記号を説明に用いて良い。なお，作成するプライマーの向きや塩基配列の詳細については説明しなくてよい。

問5 分子 TgX1 と分子 TgX2 の機能の違いに関して，検討2の結果からわかることを述べよ。図2のグラフの縦軸はいずれも増殖の抑制度であることに注意すること。

問6 植物 Tg がニッケル耐性を示す機序について，検討1～3の結果から考えられることをまとめよ。

問7 根からの吸収を阻害したり，根から茎への移行を阻害するのに比較して，トランスポーターを用いて能動的に葉の特定の細胞小器官内に重金属を取り込むことはエネルギー効率的に不利であると考えられる。そのようなしくみを持つことで植物にどのような利点があると考えられるか述べよ。

II 次の文章を読み、問いに答えなさい。

生態系の中では、炭素を中心とした物質の循環が不可欠である。植物や一部の細菌・アーキアでは、^(A) 体外から有機物を取り込まずに、1を用いて糖・アミノ酸・脂質などの有機物を合成できる。一方で、動物や菌類などは、^(B) 体外からこれらの有機物を取り込んで分解し、主として共通の中間体に変換する。さらに中間体は、2の存在下で^(C) 酸化*されることでエネルギーを生み出し、その過程で1が放出される。この一連の反応はさまざまな酵素によって進められ、炭素の循環とエネルギー獲得が効率的に行われている。

一方、原始の地球環境では、有機物や2はほとんど存在しなかったとされ(図1)、現代の生態系で見られるような炭素の循環は行われていなかったと考えられる。しかし、生物の進化が^(D) 「既存のしくみに新しいしくみが積み重なる」形で進んできたことを踏まえると、現在のエネルギーを獲得するための代謝は、原始地球における自然発生的な化学反応を元として形成された可能性が高い。

近年の研究では、酵素がなくても進行可能な始原的な化学反応が報告されている。例えば、^(E) 水や1といった原始地球にも存在した分子から、鉄・硫黄を含む鉱物が触媒となり、水素などの還元*的な気体や紫外線などのエネルギーによって、有機物が生成されうることが示されている。この反応は、植物における光合成の3回路と同様に1を有機物へ変換する「4反応」とみなすことができ、生命誕生以前から有機物が自然環境中に存在していた可能性を示している。つまり、これは代謝に似た始原的な化学反応の一例と考えることができ、生命の材料となる有機物が地球上に蓄積するきっかけになったとも考えられる。

<注釈> * 酸化と還元は、物質の間で電子のやりとりによって起こる。物質が電子を失うことを「酸化される」といい、電子を受け取ることを「還元される」という。

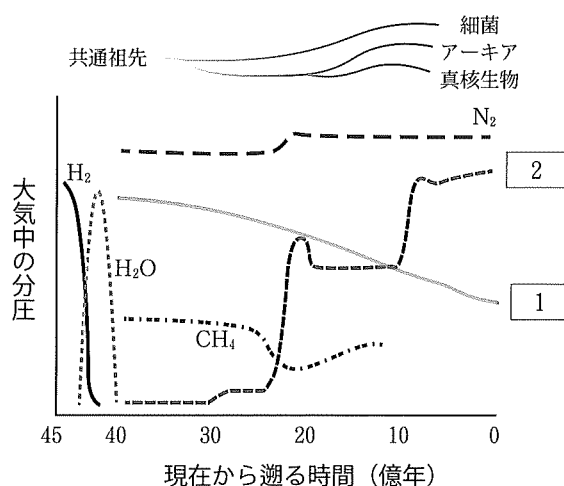


図1 地球の大気を占める気体の変遷

1 および 2 は文中の空欄と同じものが入る。線が途切れている箇所は、未解明または議論がある部分とする。(ten Kate ら, 2015; Catling and Zahnle ら, 2020より改編)

問 1 空欄 ～ に入る最も適切な語句を答えよ。

問 2 下線 (A) および (B) のような生物をそれぞれ何と呼ぶか。

問 3 下線 (B) 中の二重下線「共通の中間体」は、下線 (C) の代謝経路の起点となる。この中間体として適切な化合物の名称を答えよ。

問 4 下線 (C) の代謝経路の名称として、最も適切なものを答えよ。

問 5 下線 (C) の代謝経路は、 を直接的に消費しないものの、 が存在しないと停止してしまう。その理由を簡潔に説明せよ。

問 6 真核生物では下線 (C) の代謝経路は、ある細胞小器官で行われる。この細胞小器官は、(C) の代謝経路を持った細菌が、約20億年前に他の宿主細胞に取り込まれて細胞内に共生して進化したものと考えられている。図 1 の地球大気の変化の様子から、宿主細胞にとって、この細菌を取り込んだ利点を、エネルギー代謝および酸化・還元観点から簡潔に説明せよ。

生態系における炭素の循環では、有機物の合成が不可欠な役割を果たしている。植物の光合成では、光から産み出される大量のエネルギーを有機物の合成に必要とする。一方で、一部の細菌は、光やその他のエネルギーを多く必要としない有機物の合成反応の一つとして「下線（E）の経路」を進化させ、現在の生物で広く用いられている「下線（C）の代謝経路」とは逆方向の反応を利用している（図2）。近年、水界や陸上に広く存在する細菌でも「下線（C）の代謝経路」の逆方向の反応が見出され（図3）、炭素の循環における重要性が注目されている。

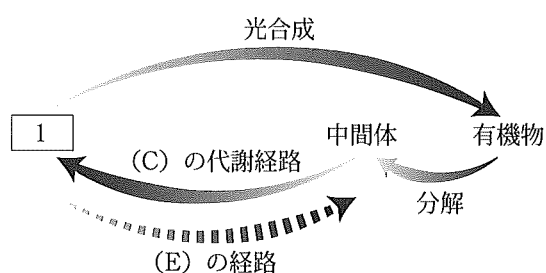
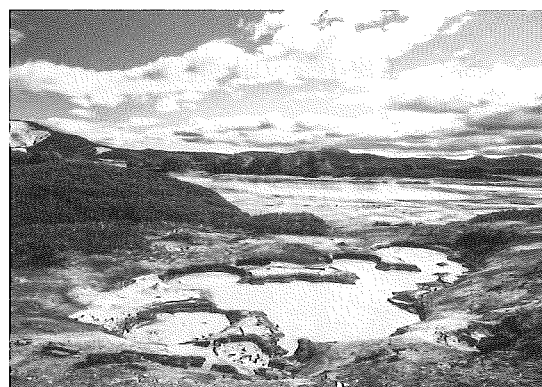


図2 炭素の循環経路の簡略図



(Ragsdale, 2018より改変)

図3 (C)と逆方向の反応経路を持つ細菌が生息するカルデラ

問7 「下線（C）の代謝経路」はいくつかの不可逆な酵素反応が含まれるため、多くの生物では酸化的に反応が進み、反応はエネルギー獲得の方向に一方方向である。しかし、上述のように一部の生物は、逆方向の反応を利用している。生物の進化は、下線（D）「既存のしくみに新しいしくみが積み重なる」形で行われたとすると、（1）「不可逆的な反応が存在し、それらがつながって代謝経路が形成された」、（2）「可逆的な反応を含む代謝経路が生まれたのち、その方向性が決定された」、という考え方のうちどちらが代謝の進化上で妥当であると考えるか。上述の内容を踏まえ、環境の変化、進化、酵素という言葉を使って考察せよ。

問8 本文の内容を踏まえて、「生物では有機物の分解経路が先に進化し、のちに下線（C）の代謝経路ができた」という主張に対して、地球環境の変遷と炭素の循環の観点から反論せよ。

—— 下書き計算用 ——

Ⅲ ヒドラに関する文章〔A〕～〔D〕を読み、問いに答えなさい。

〔A〕 レーウェンフックは水草に付着したアニマルキュル（微小動物）を見つけ、そのからだから⁽¹⁾「出芽」によって新たな個体が生じることを観察した。トランブレールはこの生物をポリプと呼び、その出芽や再生する能力を確認した（図1 A, B）。彼は再生実験により7本の頭部を持つポリプを作り出し、切られても首が生え変わるギリシャ神話の怪物にちなんでこれをヒュドラと呼んだ（図1 C）。後にリンネが、この生物に *Hydra* という属名を与えた。種の学名はリンネが確立した という方法により、属名と の組み合わせで与えられる。ヒドラは、現在の分類学では 門の仲間とされている。

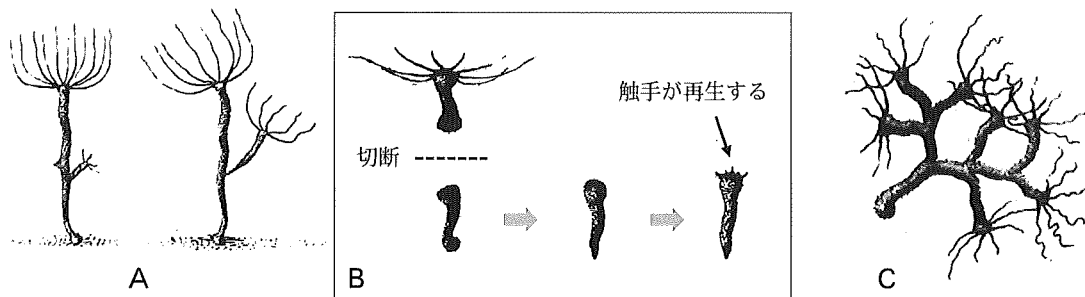


図1 トランブレールのポリプ A, ポリプの出芽。B, ポリプの再生。上下に切ると下半分から頭部が再生する。（上半分からは足部が再生する） C, 7本首のヒュドラ。
(Trembley, 1744より改変)

問1 下線部（1）は無性生殖の1例である。出芽以外の無性生殖の例を、生物名（種名でなくとも良い）とともにあげなさい。（書き方の例：ヒドラが出芽によって殖える）

問2 空欄 ～ に適切な用語を入れなさい。

[B] ヒドラのからだは内胚葉と外胚葉から生じる上皮が形作る(図2)。胴部の上皮細胞は細胞分裂能を保持しており、約3日毎に分裂する。からだの上下に押し出された上皮細胞は末端部から順に脱落し、あるいは胴部からの出芽で失われる。上皮の隙間にある幹細胞は24~30時間毎に細胞分裂し、刺胞細胞・神経細胞・配偶子などに分化する。この体制がヒドラの高い再生能を支えている。

著作権の関係により非公開

図2 ヒドラの体制

(Lenhoff & Lenhoff, 1988. Sci Amer 258:108-113より改変)

E. N. ブラウンは緑色のヒドラ *Hydra viridis* を用いて次の実験を行った。

実験1：触手を基部の口の周囲の組織(口丘^{こうきゅう})の一部とともに切り出し、別個体の胴部に移植したところ、翌日から体壁が突出し、2日目には触手が生じ始め、9日目までに双頭のヒドラとなった(図3A)。

実験2：触手のみの移植では、移植片は吸収されて体壁は突出しなかった。

実験3：口丘のみを移植すると、実験1と同様に、そこから体壁が突出して新たな触手が生じ、頭部が再生した。

実験4：再生した組織が宿主か移植片のどちらに由来するかを調べるため、緑色のヒドラと茶色のヒドラ *Hydra oligactis* の間で実験1と同様な移植実験を行ったところ、⁽²⁾ 移植片はつねに脱落した。

実験5：緑色のヒドラを0.5%グリセロール中に3週間置くことで、ヒドラを殺さず脱色することが可能となった(これを白ヒドラと呼ぶ)。実験1と同様、白ヒドラの触手を口丘の一部とともに切り出し、緑色のヒドラの胴部に移植したところ、頭部が再生した(図3B)。

これらの実験で示された現象は、シュペーマンとマンゴルトが エ 胚を用いて行った オ の発見を15年も先取りするものだった。

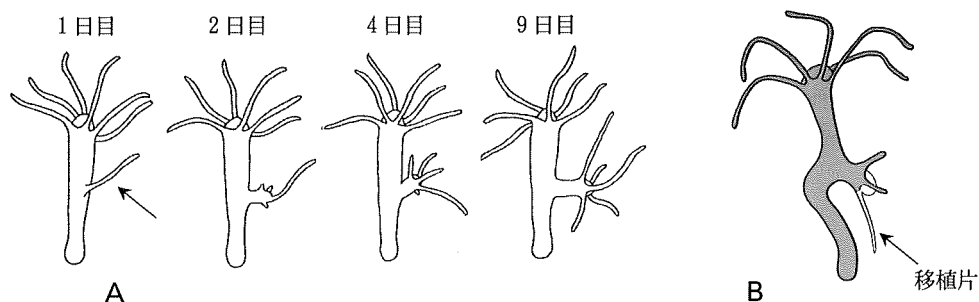


図3 移植実験の結果 A, 実験1の結果。1日目に口丘を含む触手を移植(矢印)。B, 実験5の結果。緑色の組織を、図では灰色で示す。

(Browne, 1909. J. Exp. Zool. 7: 1-23, Plate 1-6より改変)

問3 実験1～3から導かれることを簡潔に説明しなさい。

問4 実験4の下線部(2)の結果は何を示唆するか、考えられることを述べなさい。

問5 実験1～3に加えて実験5の結果から、ヒドラの移植実験の結果がどのように解釈できるか説明しなさい。空欄 に生物名を、 には適切な用語を入れなさい。

[C] 茶色のヒドラ *Hydra oligactis* は主に北半球の温帯域に分布する。この種のオス系統とメス系統それぞれを、実験室の18℃の恒温条件で、ブラインシュリンプ（小型の甲殻類）を餌として培養すると、それらは出芽により無性的に殖え続け、無限の寿命を持つように見える。ところが、このヒドラを10℃に移した後の経過を観察したところ、図4、5のような結果が得られた。

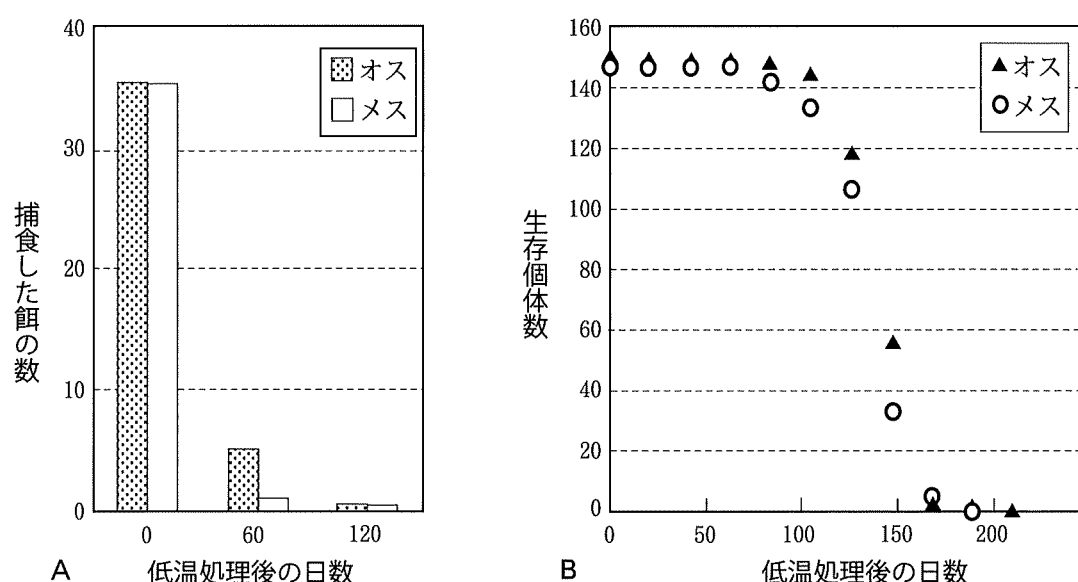


図4 低温処理後のヒドラにみられる変化 A, ヒドラ1匹が1日で餌を捕食した数。B, 生存個体数。横軸は18℃から10℃に移した日を0とした日数。

(Yoshida et al., 2006. Gene 385:64–70より改変)

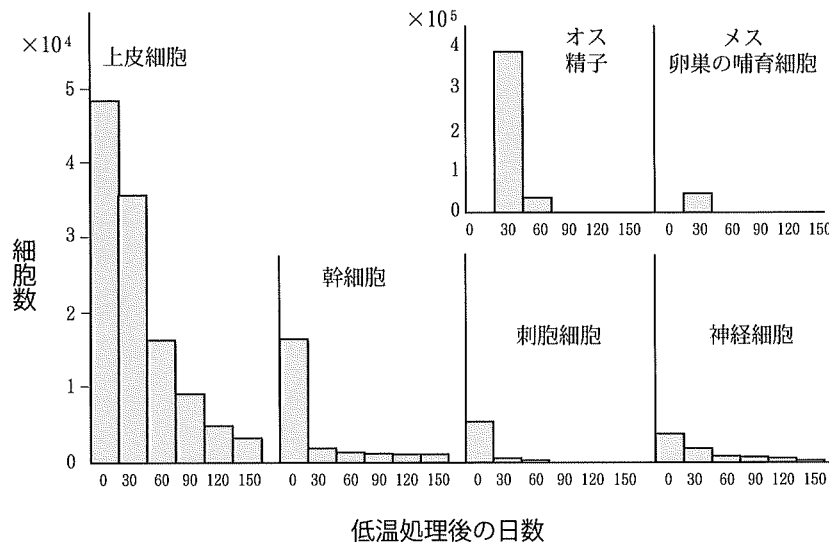


図5 低温処理後のヒドラにおける細胞構成の変化 縦軸は体内の各細胞数。横軸は18℃から10℃に移した日を0とした日数。メス卵巣内の卵母細胞のほとんどは「哺育細胞」となって少数の卵を成熟させる。
(Yoshida et al., 2006, Gene 385:64-70より改変)

問6 このヒドラは18℃では「無限の寿命」があるかのように見えたが、10℃では何が起ったのだろうか。図4と図5から読み取り、説明しなさい。

問7 温帯域の野外環境でこのヒドラが示す生活史・生活環を推定し、説明しなさい。

[D] 昆虫や脊椎動物の発生でも重要な機能を持つとして知られる遺伝子と相同な遺伝子群が、ヒドラ頭部の再生や、出芽の際にもはたらくことがわかってきた。同様に、昆虫・線虫・マウスなどの幹細胞ではたらく遺伝子がヒドラからも見つかり、これらの遺伝子のはたらきが、ヒドラの自己複製能力と「無限の寿命」維持に不可欠であることがわかってきた。つまり、ヒドラとわたしたち3胚葉動物の祖先が、およそ 億年前までに分岐した時には、すでにこれらの重要な遺伝子群を備えていたらしい。何故わたしたちには寿命があり、それが生物の進化とどのように関連するのか、ヒドラの研究からは、ますます興味深い知見が得られることが期待される。

問8 下の選択枝から、空欄 に最も近いと考えられる数字を1つ選びなさい。

選択枝：1, 2, 4, 6, 15, 21, 38

問9 出芽によって殖え続ける世代と、次の受精卵による世代とでは、遺伝的にどのような違いがあるか、簡潔に説明しなさい。

