

生物チャレンジ2010

国際生物学オリンピック 代表選抜試験

実施：平成23年3月26日

第1部 出題意図および解答例

第1問（細胞生物学）出題の意図

今回は、生体内の様々な代謝やその制御の知識を総合的に問うために、複数の小問を出題しました。問1では、生体内での同化反応と異化反応の関わり、どのような物質が貯蔵され、それはなぜなのかという基本的な知識を問いました。同化反応で合成される生体高分子や異化反応で作られられる小分子が互いにどのように関わっているかがわかれば、回答できると思います。問2では、光合成反応の全体像が理解できているかどうかポイントです。特に、酸素がどこから来るのか、光合成の反応式の左辺と右辺の両方に水があるのはなぜなのかなど、基本的な事項を研究の歴史を踏まえて抑えておく必要があります。酸素発生型の光合成は、現在の酸素が豊富な地球大気を形成した源ですが、その歴史にも興味を持ってもらいたいと思います。問3は、生体の様々な制御に関わる情報伝達系の一般的な知識を問う問題です。生体内の情報伝達機構は、単に点と点を線で結ぶように単純には作られていません。どうしてそんな必要があったのか、生体の複雑系がなぜ作られているかを考えるきっかけにしてほしいと思います。

第1問（細胞生物学）の解答例

問1 炭化水素鎖を多く含んでいる脂肪は、単位質量あたりのエネルギーが糖の2倍程度ある。このため、エネルギーを貯蔵するための同化物質としては、脂肪を利用することが有利である。同化経路は相互に基質分子を共有している。糖の分解の過程で生じる中間産物であるジヒドロキシアセトンリン酸は、脂肪合成に使われるので、糖を大量に取ると貯蔵物質として脂肪が蓄積する。

問2 酸素(O_2)を発生せずに CO_2 から炭水化物を生じる光合成細菌の研究から、光合成反応の過程で CO_2 が分解されて O_2 が生じることはないことがわかった。この発見をきっかけとして、光合成に必要な水素が H_2O を分解することで供給され、その結果として酸

素が発生することが明らかになった。後に、同位体 ^{18}O で標識した CO_2 や H_2O を用いた実験により、光合成で発生する O_2 は、 H_2O に由来することが確かめられた。

光合成が逆方向に進行しないのは、大きく二つの理由による。

まず、光合成に必要な ATP と NADPH は電子伝達系によって供給されるが、この電子伝達系は、ATP の分解と共役して NADPH を NADP に酸化する能力を持っていない。また、電子を NADPH から水に流す能力を持っていない。また、炭酸同化を行う酵素群である Calvin-Benson 回路の酵素は、通常条件ではすべて発エルゴン反応であるため自発的に進行する。すなわち、逆行させるためには、エネルギーを供給しなくてはならない。

問3 複数の段階からなるシグナル伝達経路は、ふたつの利点を持っている。ひとつは、シグナルの増幅である。シグナル伝達の過程で、受容体から伝達されたシグナルによって活性化された分子が、次の分子を活性化する場合、その分子数は、前の段階の分子数よりも格段に多くなる。その多数の分子が次の段階の分子を活性化することでシグナルは大きく増幅されることになり、最終的には重要な生理現象を誘導できる。もう一つの利点は、シグナル伝達に特異性を作り出すことが出来る点である。受容体の次のステップの分子を細胞毎に特異性を持たせることで、細胞独自の応答を可能にすることが出来る。これを実現するために、機能の異なる細胞は異なる組み合わせのタンパク質を持っている。

第2問（進化）の解答例

- (1) 1. 十分に大きな集団サイズ（小さな集団ほど世代ごとの遺伝子頻度の偶然の変動が大きな役割をする）
遺伝子流動がない（集団間の遺伝子流動は遺伝子頻度を変化させる）
突然変異がない
ランダム交配
自然選択が働かない（異なる遺伝子型を持つ個体間の適応度の違いは遺伝子頻度の変化をもたらす）
2. ハーディ・ワインベルク平衡

- (2) 1. ア：相対適応度（適応度でも正解）
イ：遺伝する変異
ウ：自然選択
2. 方向性選択：方向性選択は、平均値からずれている個体に有利に働くことにより、頻度曲線を一方向へシフトさせる。
分断化選択：ある環境条件下で表現型変異の両極端型が中間型よりも有利である場合に起こり、2つのピークをもつ頻度分布となる。
安定化選択：極端な表現型には不利に、中間の変異体には有利に働き、頻度分布の幅が狭まり、平均的な個体の割合が増える。
3. 平衡選択、ヘテロ接合強勢、頻度依存選択などがあり、どれかの例で解答してあればよい。
(解答例) 頻度依存選択：鳥は普遍的なタイプの餌をすぐに学習して標的にすることがある。その場合、どのようなものでも、より普遍的なタイプは不利となり、頻度が低くなる。一方、まれなタイプは有利であり、頻度が増えるが、そのタイプが普遍的になると今度は不利になる。

第3問（減数分裂）出題の意図

減数分裂は、生物 I の生殖の項でまず取り上げられ、その後のメンデルの遺伝の法則の理解のための基礎となる重要な事象である。教科書的には、2回の連続分裂が強調されるが、染色体の挙動として最も大きな特徴は相同染色体の対合による二価染色体の形成と相同染色体間の交叉（キアズマ形成）である。この二つの現象は遺伝子組換えの前提条件であり、古くから細胞遺伝学の中心的テーマであった。しかしながら、細胞学的観察や遺伝学的結果とは別に、その制御機構はいまだ明らかにされていない点が多い。そこで、従来の知見を基に、考えられる機構を問うた。真の答えは無いかも知れない。

第3問（減数分裂）の解説・解答例

問1：体細胞分裂では、すべての染色体が独立して複製と分離を繰り返すのに対し、減数分裂の第一分裂前期（合糸期）では、相同染色体同士が対合する。通常二倍体（ $2n$ ）では、それぞれの染色体が残りの $2n - 1$ 本の中から1本だけ存在する相同染色体を見出し、対合する。結果的に対合が完了した太糸期では n 組の二価染色体ができることになるが、それぞれの染色体は前もって複製しているため、一組の二価染色体は4本の染色分体を含むことになる。その際、複製した染色分体同士の接着は元々強いものに対し、対合した相同染色体同士はシナプトネマ（SC）構造によって接着する。このSCタンパク質はのりづけの役割を果たしているが、染色体ごとの特異性は無いので、相同染色体同士の認識には関与しないと考えられる。もし、抗原抗体反応のようにタンパク質が特異的認識に機能していると仮定すると、地球上に存在する全生物の全染色体の種類に相当するだけのタンパク質を想定しないと行かない。一方、雑種のように、異種ゲノム（異種染色体）が混在した場合、それぞれの染色体に相同染色体は存在しないので、対合は起こらない。逆に、種なしスイカのような3倍体では、3本の相同染色体が存在するので、そのうちの1本は残りの2本と対合が可能になる。染色体の成分はタンパク質とDNAである。従って、個々の染色体に座乗している遺伝子座の相同性、ひいてはDNAの塩基配列の相同性を手がかりに対合するとしか考えられない。ただし、対合を維持するためにはSCタンパク質は必要で、SCタンパク質が無いと二価染色体はできない。

かつては、染色体の長さを手がかりに、同じ長さの染色体（相同染色体）が対合するという説もあったが、哺乳類の雄の精巣中では明らかに長さの異なるX染色体とY染色体が対合する。両者は、遺伝子座は異なるが、相同な塩基配列部分を有していることが知られている。

問2：減数分裂では、対合した4本の染色分体を第一分裂で2本と2本に、さらに第

二分分裂で1本と1本に分けることになるが、4本の染色分体を第一分裂の中期まで結合させておくために、染色体の交叉（乗換え）は必須である。なぜなら、太糸期に続く複糸期でシナプトネマ構造は解体されるので、そのままでは二価染色体はばらけてしまう。そこで、4本の染色分体のうち接着の弱い相同染色体間を橋渡しする交叉が必要となる。交叉は、遺伝子の組換えを引き起こすことになるが、遺伝子型がABCとabcの相同染色体からAbCが生じるためには、当然遺伝子DNAの切断と再結合を伴う。従って、減数分裂の交叉時には、減数分裂を行うすべての生物において、高頻度にDNAの分解や結合が起こっていることになる。生体内でのこうした反応には酵素が必要であるが、DNAを基質とする酵素には共通性があるので、酵母菌からヒトまで遺伝子の組換えに関わる遺伝子やタンパク質は類似していることになる。実際の交叉の機構は不明であるが、相同染色体が全長にわたって対合したとき、複数の個所でそれぞれの染色体（DNA）に切れ目が入り、修復の過程で、別の染色体と再結合すると推察される。その結果、組換え染色体が生じる。例えば、上記の遺伝子型がABCとabcの相同染色体からAbCが生じるためには、最低2個の交叉が必要で、細胞学的にはキアズマとして観察される。

問3：染色体の分離には、分裂装置としての紡錘体（糸）とそれに付着する動原体（セントロメア）が機能する。通常の体細胞分裂では、染色体の複製後、複製された動原体もそれぞれ2個に分離し、分裂期で180度方向の異なる位置に形成される。そして、両極からの紡錘糸に引かれ、染色分体を接着させていたコヒーシンの分解とともに、染色分体は分離する。それに対して、減数分裂では、複製した2本の染色分体は1個の動原体とともに、第一分裂ではどちらかの極に移動する。すなわち、第一分裂では、相同染色体が分離するのであって、染色分体は分離しない。そこには、動原体不分離機構が存在する。第二分裂に入って初めて動原体は2個に分離するので、染色分体の分離が可能になる。減数分裂での染色分体の分離を制御している守護神（シュゴシン）というタンパク質も知られている（キャンベル生物学に記載）。従って、第一分裂で対合や交叉が起こらなかった染色体（一価染色体）は、体細胞分裂の場合のように均等に分離できず、動原体不分離機構のためにランダムにどちらかに移動せざるを得ない。そのため、不均等分離が起こり、減数分裂は破たんする。半数体（ n ）や3倍体（ $3n$ ）が不稔になるのはそのためである。

第4問（細胞膜）出題の意図

細胞膜の基本構造と膜電位に関する問題です。

細胞膜も細胞小器官の膜も、脂質が作る膜にタンパク質が島のように浮いている、という基本構造は共通しています。脂質の膜は、脂質分子の疎水性部分が向き合った形の二重層になっているのですが、最初にこの考えが提唱されたとき、ゴーターとグレンデルの実験が重要な根拠を提供しました。その後、膜タンパク質の配置に関する理解が進み、流動モザイクモデルへとつながっていきます。問1は、脂質が二重層になっていることを知っていれば解答可能な問題です。二重層を一層に広げれば面積は2倍になります。ちなみに実際の赤血球膜にはタンパク質があるので、2倍よりも小さい値になります。

膜電位が生じるしくみは理解が難しいものの1つですが、神経の働きなどを理解する上でたいへん重要です。本来、大学で習う内容なので仕方がないのですが、高校生向けの参考書で明解に説明してあるものは少数です。中には、「静止電位で細胞内がマイナスなのは Na^+ イオンが細胞の外にあるから」といった、間違った説明をしているものも少なからずあるので注意が必要です。キャンベル生物学にあるように、静止電位の発生に大きく貢献しているのは K^+ です。細胞の内外に分布する様々なイオンのうち、 K^+ は内側がより高濃度に、 Na^+ は外側がより高濃度に分布しています。細胞が静止状態の時は、膜が K^+ を通しやすく Na^+ はわずかししか通さないために、 K^+ の平衡電位に近い電位差（内側がマイナス）になります。細胞が刺激を受けて活動電位を発生させるときは、膜が Na^+ を通しやすくなって Na^+ の平衡電位に近づくため電位が逆転するのです。

平衡電位についてもキャンベル生物学に説明があるので理解しておくといよいでしょう。KClを水に溶かしても K^+ と Cl^- の数は同じなので電氣的に中性です。しかし K^+ だけを通す膜が濃度の異なるKCl溶液を仕切っていると、濃度が低い方に行こうとするエネルギー（浸透圧エネルギー）によって K^+ が溶液間を移動して各溶液内の K^+ と Cl^- の数に偏りが生じ、KCl濃度が低かった側がプラスとなるような大きな電圧が生じます。ここからわかるように、細胞外の K^+ 濃度が上がって細胞内との濃度差が小さくなると静止電位も小さくなります。

第4問（細胞膜）の解答例

問1 単分子膜の面積と赤血球細胞の総表面積の比は2 : 1になる。細胞膜では脂質分子が疎水性部分を向き合わせた形で並び二重層を形成している。これを単分子膜に広げれば、面積は2倍になる。

問2 イオンチャンネル（チャンネル、チャンネルタンパク質）。イオンポンプ（膜輸送体、輸送体）。能動輸送。

問3

（1）静止電位は細胞内がマイナスの値になる。

（2）c. 小さくなる。K⁺は細胞外よりも細胞内の方が高濃度になっている。この濃度差が静止電位の大きな要因となっているため、外液のK⁺が上昇して濃度差が小さくなると静止電位も小さくなる。

第5問（動物発生）標準解答

問1 頭索動物（ナメクジウオ）、尾索動物（ホヤ）から1種類あげれば完全。ユウレイボヤとかカタユウレイボヤ、オタマボヤなどから2つあげても正解とする。

問2 E

問3 脊索から分泌されるSタンパク質が、神経管に働きかけてS遺伝子を発現させる。神経管内では、Sタンパク質は拡散して、その濃度が高いとそこには運動ニューロンが分化できず、Sタンパク質の濃度がある至適濃度であると分化する。脊索の移植とSタンパク質を染みこませたスポンジの移植は同じ効果をもつ。

第5問（動物発生）出題の意図

この問題は、脊椎動物の器官形成における「誘導」を扱っている。脊索が神経管を誘導することは学んでいるが、神経管内における領域分化は学習しない。しかし問題文を読めば、脊索によって運動ニューロンが神経管のある領域に誘導されることが分かるはずである。もし領域が単純に脊索の誘導によるのであれば、それは脊索に接した（もっとも近い）ところに生じるはずである。しかし、正常発生においても、脊索の移植によっても、脊索から少し離れたところに分化することが分かる。その解釈はいろいろ考えられるが、もっともシンプルな考えは、脊索からある誘導物質が放出され、その濃度によって運動ニューロンの領域が決定するということである。この問題では、S遺伝子は神経管でも発現するので、脊索から分泌されるSタンパク質が、神経管の細胞におけるS遺伝子の発現を誘導し、その濃度が至適濃度になるところに運動ニューロンが分化すると考えられる。ただし、他にも脊索からは誘導物質と抑制物質が放出され、近いところでは抑制物質の作用が勝るが、抑制物質は誘導物質より速やかに活性を失うので、ある距離離れると誘導物質の作用が現れる、などの考えもあり、そのような考察も正答とみなされる。

問1と2は、知識を問う問題である。問1は頭索動物、尾索動物、脊椎動物の関係を知ってもらいたい意図での出題で、Campbell/Reeceでは脊索動物として扱われている。高等学校教科書では、頭索動物や尾索動物は原索動物として脊椎動物とは別門の扱いだが、脊索をもつことが明記されている。問2は、脊索が原口背唇部に由来し、神経誘導

に関わることは知っていても、その後の発生運命は必ずしも理解されていないので出題した。脊索は魚類などでは終生存続することもあるが、多くの場合退化する。ただし、哺乳類でも椎間板などに残存する。高等学校教科書や Campbell/Reece では、「ほとんど退化」とされている。ちなみに、A は体節の発生運命、D は神経冠についての記述である。

第6問（生態学）出題の意図

本問題は、海洋生態系をとりあげ、有機物の生産と物質の循環との関係と、食物連鎖とエネルギー転換効率に関して問いました。

(1) では、浅い層は光エネルギーを利用できるため光合成による有機物の生産が進むこと、深い層では光エネルギーを利用できないため呼吸による有機物の分解だけが進むこと、が分かると、比較的簡単に答えられたと思います。生物の代謝は、生物の体の中の物質変化だけではなく、生物を取り巻く媒体（水や空気）との間で、物質のやり取りも生ずること、を考えることにより、生態系における物質の循環を理解することができます。

(2) は、海洋の植物プランクトンの分布が海水の混合のしやすさにけってされていることに関する問題です。熱帯・亜熱帯では海洋の浅い層の海水は、水温が高いために、比重も軽くなります。一方、深い層は暖められないため水温は低く、比重は重い状態です。つまり、重い水の上に軽い水が乗った状態が続きます。このため、上下の混合はほとんど行われず、冷たい水に含まれる栄養素が、光合成の行われる浅い層に供給されにくい状態が続きます。下線部(B)の前の文も含めて考えると、答えが導き出せると思います。

(3) では生産者の植物プランクトンのサイズの違いと、栄養段階の数の違いとを結びつけて考えられるかがポイントになります。栄養段階間のエネルギー転換効率を考えると、栄養段階の数が少ないほど、生産者により生態系に取り込まれたエネルギーが、効率良く魚類まで到達することになります。

第6問（生態学）の解答例

(1) 海洋の浅い層では、植物プランクトンが光エネルギーを用いて光合成を行うことにより、活発に増殖している。植物プランクトンは海水中から窒素やリンを吸収して増殖に用いるため、浅い層での濃度は低い。一方、深い層では、浅い層から沈降してきた植物プランクトンの死骸などの有機物が分解され、窒素やリンが海水中に溶け出すため、海水中の栄養素の濃度が高い。

(2) 熱帯・亜熱帯では、浅い層の水温が高いために、深い層との間に比重の差が生ずる。このため、栄養素の濃度の高い冷たい水と、濃度の低い温かい水との上下の混合が行われにくい。これにより、光合成が行われる浅い層に栄養素が供給されにくいいため、植物プランクトンの現存量・生産量は低くなる。

- (3) 湧昇域では大型の植物プランクトンが優占するため、それを食べる消費者も大型になり、結果的に栄養段階が少なくなる。このため、食物連鎖全体を通して、消費者の呼吸によるエネルギーの損失量も少なく、植物プランクトンの生産量に対する魚類の生産量の割合は高くなる。逆に小型の植物プランクトンが生産者の場合は、一次消費者の動物プランクトンも小型であり、結果的に栄養段階の数が多くなる。このため、呼吸によるエネルギーの損失量が多く、魚類の生産量は少なくなる。