

日本生物学オリンピック 2014 代表選抜試験 第1部

解答例 および 解説

(細胞生物学・植物生理・生化学)

第1問 貯蔵多糖に関する文を読み、問1～4に答えよ。

解答例

問1：デンプンの合成・分解＝光合成産物の一時的蓄積と転流、葉肉細胞（葉）。グリコーゲンの合成・分解＝血糖の維持、肝細胞（肝臓）

問2：グリコーゲン。グルコースの切出しが起こる分枝の末端の数が多いため

問3：デンプンが適している。水に不溶性の大きな顆粒として大量に蓄積できるため。

問4：種子の発芽の時、貯蔵デンプンを急速に分解するため。

出題の意図：デンプンとグリコーゲンの構造の特徴（分枝の頻度のちがいは教科書でもよく説明されているが、なぜそのような特徴のちがいはあるのかは、あまり説明されていない。設問にあるように、日常的に進行する貯蔵多糖の合成と分解では、貯蔵多糖のおおまかな構造は維持したまま、その分枝末端からの糖の切出（動物ではホスホリラーゼが触媒してグリコーゲンからグルコースを切り出し、植物では β -アミラーゼが触媒しデンプンからマルトースを切り出す）とグルコースの付加（グリコーゲン合成酵素またはデンプン合成酵素が触媒）が行なわれている。分枝の程度が大きい動物のグリコーゲンの場合は、合成と分解を効率よく行うことができるというメリットがある。一方、分枝の程度が小さいデンプンは、不溶性のデンプン粒となり、蓄積量を多くできるというメリットがある。高校で学習するアミラーゼ（正確には α -アミラーゼという）は動物の唾液や膵液の消化酵素としてよく知られている。また、植物のアミラーゼはオオムギなどの種子の発芽において、植物ホルモンのジベレリンの作用で、胚乳のデンプンを急速に分解する酵素として産生が誘導されることも、学習する。また、問題文では触れていないが、アミラーゼは大量に存在する水分子とデンプン分子を基質とする加水分解酵素なので、活性が非常に高い。この特徴も、デンプンを急速分解することに適している。このように、生物は目的に応じて酵素を使い分け、さらに動物と植物の生き様に合わせて、デンプンとグリコーゲンの異なる特徴ができてきているのである。

(遺伝学全般)

第2問 血液型の遺伝に関する文を読み、問1～8に答えなさい。

解答例

問1 A型： $AAbb$ または $Aabb$
 B型： $aaBB$ または $aaBb$ 、
 AB型： $AABB$, $AABb$, $AaBB$, $AaBb$

問2 A型： $I^A I^A$ または $I^A i$
 B型： $I^B I^B$ または $I^B i$
 AB型： $I^A I^B$

問3 A, a, B, b の頻度をそれぞれ p_A, p_a, p_B, p_b とすると、各血液型の頻度は

O型： $p_a^2 p_b^2$

A型： $p_A^2 p_b^2 + 2p_A p_a p_b^2 = (p_A^2 + 2p_A p_a) p_b^2 = (1 - p_a^2) p_b^2$

B型：同様に、 $p_a^2 (1 - p_b^2)$

AB型：1から上記3つを引いて、 $(1 - p_a^2) (1 - p_b^2)$

期待値はそれぞれに90を掛ければよい。

(参考) 実際に計算するには、

O型+A型： $p_a^2 p_b^2 + (1 - p_a^2) p_b^2 = p_b^2$

$p_b^2 = (21+37)/90 = 0.64$ より、 $p_b = 0.80$, $p_B = 0.20$

O型+B型： $p_a^2 p_b^2 + p_a^2 (1 - p_b^2) = p_a^2$

$p_a^2 = (21+21)/90 = 0.47$ より、 $p_a = 0.68$, $p_A = 0.32$

問4 ABO式血液型が2つの独立な遺伝子座によって決まるという仮説は棄却される。

問5 各血液型の頻度は

O型： p_O^2

A型： $p_A^2 + 2p_A p_O$

B型： $p_B^2 + 2p_B p_O$

AB型： $2p_A p_B$

期待値はそれぞれに90を掛ければよい。

問6 $p_A = p_A(p_A + p_B + p_O)$
 $= p_A p_B + p_A(p_A + p_O)$
 $= 1/2(2p_A p_B) + (p_A + p_O)^2 - \sqrt{p_O^2(p_A + p_O)^2}$
 $= 1/2(2p_A p_B) + (p_A^2 + 2p_A p_O) + p_O^2 - \sqrt{p_O^2(p_A + p_O)^2}$
 $= 1/2[AB] + [A] + [O] - \sqrt{[O]([A] + [O])}$

ここで、[X]はXの表現型を持つ個体の頻度

問7 ABO式血液型が1つの遺伝子座によって決まるという仮説は棄却されない。

問8 過去に集団のサイズが劇的に減少したため、ビン首効果が現われた。

問題の意図: 遺伝学者が遺伝様式を解明して遺伝子を命名する過程を体験することで、論理的思考の能力を問うた。例として、ここではABO式血液型の研究史を題材に選んだ。ABO式血液型の遺伝はどのような教科書にも載っている単純なものであるが、その背後には奥深いものがあるという点に気付いていただければ有難い。2 遺伝子雑種、複対立遺伝子・ハーディ・ワインベルグの法則、統計検定、集団遺伝学についてよく理解できているかを問うた。なお、本問は安田徳一著「初歩からの集団遺伝学」(裳華房)の45~47ページを参考に作成した。

(動物生理学・動物比較生理学)

第3問 動物のガス交換に関する文を読み、問1～4に答えよ。

解答例

問1：カイメン、プラナリア、ヒドラ

問2：気管-昆虫類、書肺-クモ類、など

問3：組織で産生された CO_2 は血漿中に拡散し、その大部分が赤血球における炭酸脱水酵素の働きで水と反応し、 HCO_3^- (炭酸水素イオン) に変換される。 HCO_3^- は血漿中に溶け、血流によって肺に到達する。肺では、 CO_2 分圧の減少により HCO_3^- が CO_2 に変換される方向に化学平衡が移動し、再産生された CO_2 は肺胞へと拡散する。

問4：

(1) A： CO_2 分圧の低い環境では pH が高くなり、ボーアシフトによりヘモグロビンの酸素親和性が上昇するため。

(2) O_2 分圧 100 mmHg, CO_2 分圧 40 mmHg での酸素飽和度は 97%、 O_2 分圧 30 mmHg, CO_2 分圧 60 mmHg での酸素飽和度は 30%である。従って、
 $(97-30) \div 97 \times 100 = 69\%$

(3) 胎児は、肺よりも酸素分圧の低い胎盤で母体血液から酸素を得なければならない。従って、胎児のヘモグロビンが母体(成体)のヘモグロビンよりも低酸素分圧における酸素親和性が高いことは、胎盤において母体が酸素を解離する条件で酸素と結合することを可能とする。

問題解説

動物生理は呼吸とガス交換からの出題です。重要な基本分野の一つですので、循環系とあわせてキャンベル生物学、高校の生物基礎の教科書等で再確認してください。

問1：比較生理学の側面からの問題です。哺乳類だけでなく、他の動物群のガス交換の仕組みを再確認しましょう。体表でガス交換を行う動物群は、酸素や二酸化炭素分子の拡散速度が遅いことから これらの輸送距離を短くするため、みな薄い体を持っています。

問2：問1と同じく比較生理学の問題です。呼吸器官の多様性について、再確認しましょう。体制の複雑な昆虫は、気管と呼ばれる管を直接ほとんど全ての細胞表面近くまでのばし、循環系の関与なく細胞でのガス交換が可能となっています。

問3：二酸化炭素の運搬に関する問題です。酸素の運搬に関しては概ね分かる生徒は多いです

が、二酸化炭素の運搬は盲点なのか、正答率が下がる人が多いです。二酸化炭素は赤血球で炭酸水素イオンに変換され、血漿中に溶けて輸送されることを再確認してください。このほかにも、割合はちいさいですが、二酸化炭素はヘモグロビンのアミノ基に吸着されたり、あるいはそのまま血漿中に溶存して輸送されます。

問4：大学入試でも頻出の酸素の運搬の計算問題です。酸素解離曲線の正確な見方を再確認してください。二酸化炭素分圧が上昇すると、pHが下がり、ヘモグロビン分子の電荷分布が変化することにより分子の形が変わり、酸素とヘモグロビンの相互作用が変わることで起こるボーアシフトによって酸素解離曲線を右側に移動させることがわかれば容易だと思います。

(3) ヒトのヘモグロビンは2本の α 鎖と2本の β 鎖からなるHbAですが、胎児の際は2本の α 鎖と2本の γ 鎖からなるHbFがほとんどです。HbFは高二酸化炭素分圧下でも酸素を保持することができるようになっており、胎盤という環境でもガス交換を可能としています。

(発生生物学・系統進化生物学)

第4問 脊椎動物の神経冠（神経堤）細胞の移動と分化に関する文を読んで問1～3に答えよ。

解答例

問1：

外胚葉：神経細胞、表皮細胞、レンズ細胞、など

中胚葉：筋細胞、血球細胞、腎臓細胞、など

内胚葉：胃上皮細胞、腸上皮細胞、肺上皮細胞、など

問2：

細胞分化は、1つの細胞が分裂して種々の異なる細胞になることである。発生過程では、少数の例外を除いてゲノムは変化しないので、異なる細胞が生じうするためには、それぞれの細胞の遺伝子発現のパターンが変わらなければならない。細胞はその細胞機能ごとに異なるタンパク質を必要とするので、異なる機能をもつ細胞ではそれぞれのタンパク質のもとになる遺伝子の発現が異なることになる。このような異なる遺伝子発現には、細胞ごとに異なる転写因子が存在することが重要である。

問3：

実験1と2から、正常発生では、前方領域の神経冠細胞は腸管に移動してアセチルコリンを分泌する神経細胞に分化すること、後方領域の神経冠細胞は副腎髄質に移動してアドレナリンを分泌する内分泌細胞に分化することが分かる。実験3と4から、神経冠細胞の移動経路は予め決定されているのではなく、出発する領域に依存していること、実験3、4、5から神経冠細胞の分化は、移動した先の環境によることが分かる。とくに実験5からは、神経冠細胞の分化の方向は、移動開始以前に決まっているのではなく、移動を完了して異動先の環境に適合した分化を遂げることが分かる。

問題の意図

神経冠細胞は、脊椎動物に固有の細胞群で、脊椎動物の進化とも密接に関係している。特に頭部神経冠細胞は、頭骨や顎の骨の形成にも関わり、それは脊椎動物の活発な捕食行動を進化させたといわれる。

この問題では、神経冠細胞について行われた実験から、その移動と分化のしくみについて考えてもらうことを意図した。同時に、発生生物学における重要な概念についての基礎的知識を問うている。

問1 簡単な問題である。外胚葉、中胚葉、内胚葉がそれぞれどのような細胞に分化するかは、よく覚えておかなければならない。内胚葉について、すべて上皮細胞と書かれているのは、

消化器官や呼吸器官はすべて内胚葉性の上皮細胞と中胚葉性の結合組織や平滑筋から構成されているためである。

なお、神経冠細胞は、神経細胞（ニューロンやシュワン細胞）、色素細胞、内分泌細胞、筋細胞、骨細胞、軟骨細胞など、多様な細胞に分化する。これが第四の胚葉といわれる理由である。

問2 細胞分化の理解は発生生物学のもっとも重要な課題である。成体の分化した細胞は（例外を除いて）同じゲノムをもつことが知られているので、細胞分化はどの細胞でどの遺伝子が発現するかという、選択的遺伝子発現という概念で説明される。異なる遺伝子発現によって、異なるタンパク質がつくられ、それによって細胞は異なる機能を果たすということをしっかり理解してほしい。

問3 実験の結果の説明を読めば、すぐにその意味するところは理解できるであろう。勿論解答例にあげた結論は、この実験だけから導かれたわけではなく、さらに多くの実験がなされてきたが、問題文だけからも主要な結論は分かるはずである。

(植物生理・生態学・行動学)

第5問 植物の炭素同位体比に関する文を読み、問1～3に答えなさい。

解答例

問1：

C3植物は炭素固定回路としてカルビン・ベンソン回路が機能しており、RuBPカルボキシラーゼにより二酸化炭素が固定され、初期産物として炭素3個の化合物であるホスホグリセリン酸が合成される。一方、C4植物は葉肉細胞においてPEPカルボキシラーゼにより二酸化炭素が固定され、炭素4個の化合物であるオキサロ酢酸が合成される。その後、リンゴ酸などに変換され維管束鞘細胞に集められ、リンゴ酸から生じた二酸化炭素がカルビン・ベンソン回路により固定される。

問2：

Bグループ。

C4植物の二酸化炭素補償点が低いことなどから、大気から植物体に取り込まれた二酸化炭素は、そのほとんどがPEPカルボキシラーゼにより有機物として固定される。そのため、生産された有機物の炭素安定同位体比は、大気中の二酸化炭素に近い値を示すと考えられるから。

問3：

低下する。

大気中の二酸化炭素濃度は、化石燃料の消費により増加しつつある。化石燃料は植物を中心とした生物遺骸が変化したものであるため、その炭素安定同位体比は、大気中の二酸化炭素よりも低い。この炭素が二酸化炭素として大気に放出されるため、大気中の二酸化炭素の炭素安定同位体比は低下の傾向を示すと考えられる。

解説

本問では、C3植物とC4植物の光合成機構についての基礎的知識と、それぞれの植物グループの光合成において主要な役割を果たす酵素の特性の違いが、どのように炭素安定同位体比の差に反映されるのかについて、考察力を問いました。また、地球環境問題と関連して、化石燃料の消費による大気二酸化炭素濃度の増加が、安定同位体比に影響する原因について、思考力を評価しました。

問1．C3植物とC4植物の光合成機構については、高校生物の教科書に記載されているものであり、基礎的な知識があれば解答が可能だと思います。

問2．C4植物の二酸化炭素補償点は非常に低いため、C4植物は体内に取り入れた大気二酸化炭素のほとんどを有機物として固定できることを示しています。物質のほとんど全てが反応して他の物質に変化する場合には、結果的にその反応における同位体比の変化(同位体分別)

は非常に小さくなります。このため、大気二酸化炭素の $^{12}\text{CO}_2$ と $^{13}\text{CO}_2$ はあまり分別されることがなく有機物となり、C4 植物の有機物の $\delta^{13}\text{C}$ と大気の $\delta^{13}\text{C}$ には大きな差は認められません。実際に、C4 植物において PEP カルボキシラーゼにより二酸化炭素を固定する際の $\delta^{13}\text{C}$ の低下は小さく、2‰程度と考えられています。

一方、C3 植物の二酸化炭素補償点は高く、体内に取り入れた二酸化炭素の相当部分は有機物として固定されません。C3 植物において RuBP カルボキシラーゼによる二酸化炭素固定の際の $\delta^{13}\text{C}$ の低下は、29‰にも達するとされています。

従って、A グループは C3 植物、B グループは C4 植物と考えることができます。

問3. 近年の二酸化炭素濃度の増加は、人間活動による石油・石炭の化石燃料の消費によるものです。化石燃料は、植物を中心とした生物遺骸から生成したものと考えられるため、図1の情報から大気に存在する二酸化炭素より、かなり低い同位体比をもつと推定できます。このため化石燃料の燃焼により低い同位体比をもつ二酸化炭素が大気に放出され、大気中の二酸化炭素の同位体比も徐々に低下しています。

(<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/outreach/isotopes/c13tellsus.html>)

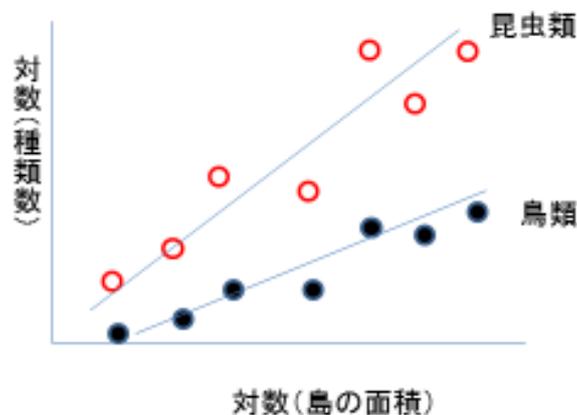
(島嶼生態学・生物多様性)

第6問 島の生物相の多様性とその成立過程に関する文を読み、問1から問3に答えよ。

問題の意図と解答例

問1：

主旨：種数-面積の関係についての問題。島の面積を x 軸に、その島に生息・生育する生物の種数を y 軸にして、それぞれの対数をグラフにプロットすると、直線にのり、 $\log \text{種数} = \text{係数} \times \log \text{島の面積} + \text{定数}$ の関係がみられる。直線の傾き（係数:アロメトリーの次数）は 0.2~0.3 の範囲に収まるので、面積が2倍になっても種数は2倍には増えない。鳥類は昆虫類を捕食する捕食者で、単位面積あたりの生息密度は昆虫よりも低く、必然的に単位面積当たりの種数も少なくなる。そのため、鳥と昆虫の種数-面積の関係は下図のようになると予想される。

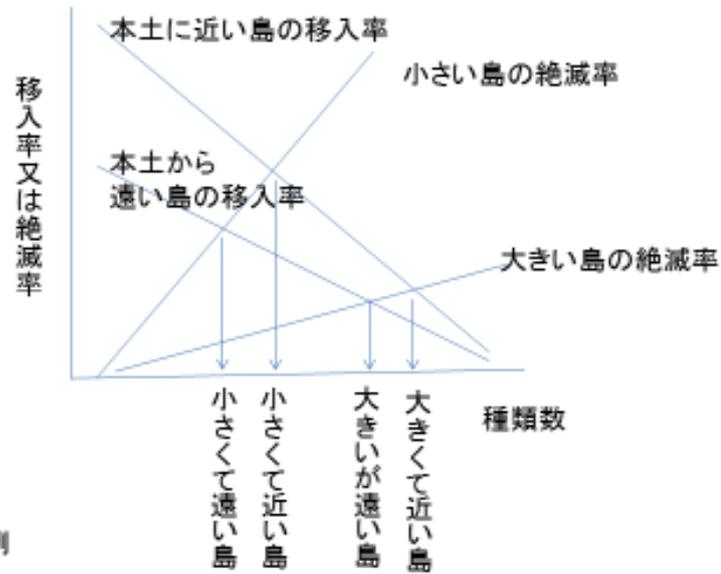


問1の解答例

問2：

マッカーサーとウィルソンが提唱した島の生物の種数の平衡モデルの理解度を問う問題。島に生息する種数は、供給源となる本土から移入する率（速度）と、その島での絶滅率（速度）が釣り合ったところの種数となる。ある面積の島に生息する生物の種数が、単位時間あたりの島への移入・定着と絶滅との平衡によって決まるとする考えを島の生物の平衡理論といい、平衡状態での種数を平衡種数と称する。

例えば、海洋島は火山活動によって大洋のなかに出現し、陸上生物にとって生態的な空白状態から出発する。生物相がゼロの状態から出発し、外部からの移住によって生息種数が増すが、いずれ島の面積に見合った平衡状態に達する。種の供給源に近くて大きな島には、移入率が高く絶滅率が低くなるので平衡種数は高くなり、逆に遠くて小さな島は移入率が低く、絶滅率が高いので平衡種数が低く抑えられる（図は次ページ）。



問2の解答例

問3：

島の生物の平衡理論から導かれる予測に関する問題。島の生物の平衡理論によれば、平衡種数は供給源からの距離と島の面積によって決まると考える。ゆえに平衡種数は同じ島ならば、環境が変化しなければ、同じ平衡種数を維持する。しかし、島の生物相を構成する種は、常に変化しており、それゆえ動的な平衡状態にあるため、同じ種がつねに同じ島に生息しているとは限らない。

(細胞生物学・細胞分化)

第7問 動物の発生に関する文を読んで、問1～4に答えよ。

解答例

問1：

イモリやカエル胚では、フォークトの局所生体染色法が有名であり、胚の原基分布図（予定運命図）をつくった。フォークトは原腸胚期の前後で胚のどの部分が将来どのような器官や組織になるかを、局所生体染色法を行った。寒天片に色素（ナイル青や中性赤など）をしみこませ、それを胚表面において染色し、胚表面の各部の細胞が、どのような組織や器官に分化するかを調べた。これは胚の外部からマーキングをおこなって、その色素を追跡して、原基分布図をつくった。

一方、線虫については、分裂のたびごとに細胞にマーキングして、細胞の追跡を行って、成体の形づくりの細胞系譜図を明らかにした。

問2：

1. 線虫のC.エレガンスは体が透明で、顕微鏡下で各細胞の追跡が可能であった。
2. 細胞数があまり多くなく、1個の受精卵から成体までの細胞の追跡が可能であった。
3. 動物が基本的に体軸（頭尾軸、背腹軸、左右軸）をもっており、かつ組織や器官をもっている。
4. 比較的、扱いやすく、かつ短時間で成長する。

問3：

卵から成体になるまで約1100個が生じるころ、成体になっても959個しかなかったということは、約140個の細胞が死滅していったことを示している。このような細胞死をひきおこす細胞はあらかじめ決められていたと考えられ、「プログラム細胞死」の性質をもつ細胞といえる。

問4：

原腸胚期に起こる生物学的に重要な事柄は（3つに限定されず）色々である。

1. 形態形成運動（挿入運動、伸長運動、陥入運動など）
2. 原腸形成運動による新しい腔（原腸）の形成
3. 今まで母性因子のみ働いていたが、父性因子もこの前後から両性の遺伝的に働き、真の遺伝子の合体した“個”をつくり出している。
4. 胚軸の形成。体づくりに最も重要な三軸（頭尾軸、背腹軸、左右軸）の形成が行われる。
5. 形態形成の時、約1万～2万個の細胞が動いているが、胚として統一性をもって動いている（胚の統合機能性の1つ）
6. 形成体（オーガナイザー）による形づくりの中心が働く。
7. 三胚葉（外、中、内胚葉）が出来上がる。

出題の意図

卵から親（成体）になる時、どのようにして形づくりや組織、器官づくりがなされていくことを理解することを、目的としている。

- 問 1. 胚発生での細胞系譜の調べ方のうち、代表的にフォークトの局所生体染色法と線虫を扱うことによって、理解してもらおう。
- 問 2. 研究する上で目的によって研究材料は異なる。ここでは卵から成体になるまでの様子を調べるのになぜ、線虫のC・エレガンスを用いたのかを、理解してもらおう。
- 問 3. 分裂した細胞がすべて生き残るのではなく、途中で死ぬ細胞があることを理解することと、その死ぬ細胞はもともと遺伝的に組み込まれていた「プログラムされた細胞死」であることを理解し、形づくりでは単に増えるだけでなく、死滅させながら形づくりをしていくことを理解してもらおう。
- 問 4. 生物の体の細胞はそれぞれの構造と機能を持っており、それは成体の中での細胞の位置情報に強く支配されている。ウォルパートは、卵から親（成体になる中で、最も大切でかつ、重要なのは「原腸胚形成」と述べている。その意味を考えて貰いたい。