



日本生物学オリンピック

生物チャレンジ 2010

第一次試験問題

＜正解・解説＞

試験日：2010年7月18日（日）



国際生物学オリンピック日本委員会

問1~2) 【正解】 問1 D 問2 F

【解説】体細胞1個あたりのDNAの相対量と細胞数の関係を、フローサイトメトリーにより解析したグラフである。Aのグラフでは、DNAの相対量を考慮すると、DNAの相対量1の時期が細胞周期のG₁期、1から2の間の時期がS期、2の時期がG₂期からM期に相当することがわかる。

問1では、アフィディコリンはDNAポリメラーゼを阻害するために、DNAの複製が阻害される。そのため、薬剤投与時にS期にあった細胞では、DNA複製が不完全な状態ですぐに細胞周期が停止し、DNA量が相対量1と2の間となる。一方、薬剤投与時にG₁期またはG₂期~M期にあった細胞では、しばらくはそのまま細胞周期が進行し、S期に進入する直前で細胞周期が停止する。したがってDのグラフのようになる。

問2では、ビンブラスチンを作用させることにより、紡錘体の赤道面に染色体が並んだM期中期の状態で細胞周期が停止する。薬剤投与時に細胞周期のどの位相にあった細胞でも、M期中期まで細胞周期が進行して、そこで細胞周期が停止する。したがってFのグラフのようになる。

問3~4) 【正解】 問3 B 問4 F

【解説】ユープロテス(和名はミズヒラタムシ)は、繊毛虫類に属する原生生物であり、ゾウリムシなどと同じ分類群に属する生物である。繊毛虫類の特徴は、大核と小核という2種類の核を持つことであり、この問題では大核の複製と細胞周期に関して設問されている。昨年ノーベル賞を受賞したグライダーとブラックバーンは、ユープロテスに近縁の繊毛虫であるテトラヒメナをもちいて、テロメラーゼを発見している。テロメアやテロメアーゼの研究には繊毛虫はよい研究材料であるので、ユープロテスも核内における遺伝子の再配置を研究するためのよいモデル生物として注目されている生物の1つである。繊毛虫の大核の分裂は、分裂装置の形成を伴わない、いわゆる無糸分裂の例として有名である。また、S期にはDNA合成を行う特殊な構造(複製帯)が現れるという点も多細胞動植物とは異なっている。しかし、細胞周期がG₁→S→G₂→Mと進行するという点では他の生物群の細胞周期となんら変わりはない。この問題文でも扱っているこの生物の興味深い点は、それぞれの細胞周期の時期(G₁期、S期、G₂期、M期)のすべてにおいて、核の形状が明瞭に異なり、簡単な顕微鏡観察で判別が可能であるという点である。この特長により、ユープロテスをもちいた実験は、細胞周期を理解する上で扱いやすく、きわめてわかりやすい。このため、この実験は国内外の多くの大学の一般教養レベルでの生物学実験でもちいられており、日本の高校でも生物の実験に取り入れられ始めている。

タイプ③の帯状構造は、S期の大核に生ずる「複製帯」である。チミジンが取り込まれることからこの部分でDNAが複製されることがわかる。このことから、この時期はS期であると判断できる。タイプ②は細胞の輪郭にくぼみが生じているのでM期であることがわかる。タイプ④は細胞の大きさから、分裂直前のステージ、つまりG₂期と推測できる。したがって、残るタイプ①はG₁期であることがわかる。

S期の細胞の出現頻度は、 $139 \div 500 = 0.278$ である。これに5時間を要することから、全体の時間は $5 \div 0.278 = \text{約} 18$ 時間となる。

細胞周期の省略形

| 時期 | 省略形 | 省略形の由来 | 時期 | 省略形 | 省略形の由来 |
|----------|------------------|-----------|-------|------------------|---------|
| DNA合成準備期 | G ₁ 期 | Gap 1 | 分裂準備期 | G ₂ 期 | Gap 2 |
| DNA合成期 | S期 | Synthesis | 分裂期 | M期 | Mitosis |

問5) 【正解】 D

【解説】弱酸は pH が低い環境下ではあまり解離せず、pH が高くなると解離しやすくなること、生体膜は電荷をもたない親油性低分子はよく通すが、電荷をもつ物質は通さないこと、の2点が解答のポイントである。以下に少し詳しく解説する。

まず、解離していないαつまり RCOOH は膜を通過できるので、十分な時間の後ではこの濃度はすべての区画で等しくなるはずである。次に、RCOOH と平衡にある解離型の RCOO⁻（これは電荷をもつため膜を透過できない）の濃度を各区画で見積もってみよう。大まかにはαは最も pH が高い細胞質基質で最もよく解離して、RCOO⁻濃度が最大になる。きちんと計算すると、細胞膜の外側では pH が5なので、H⁺濃度が10⁻⁵で

$$\frac{[\text{RCOO}^-] \cdot 10^{-5}}{[\text{RCOOH}]} = 10^{-5.2}$$

$$\frac{[\text{RCOO}^-]}{[\text{RCOOH}]} = 10^{-0.2} \approx 0.63$$

となる。これより細胞膜の外側では RCOO⁻の濃度は RCOOH の濃度より低いことがわかる。細胞内に入ると、細胞質基質は中性なので、

$$\frac{[\text{RCOO}^-] \cdot 10^{-7}}{[\text{RCOOH}]} = 10^{-5.2}$$

$$\frac{[\text{RCOO}^-]}{[\text{RCOOH}]} = 10^{1.8} \approx 63$$

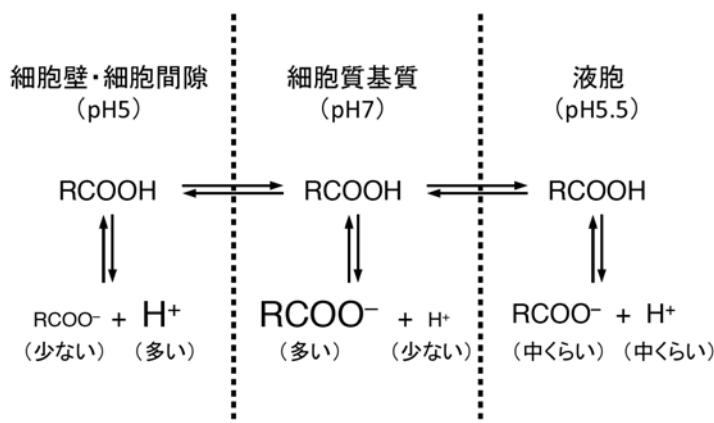
となり、RCOO⁻の濃度は RCOOH の濃度の数十倍もあることがわかる。また、液胞の中では

$$\frac{[\text{RCOO}^-] \cdot 10^{-5.5}}{[\text{RCOOH}]} = 10^{-5.2}$$

$$\frac{[\text{RCOO}^-]}{[\text{RCOOH}]} = 10^{0.3} \approx 2.0$$

となって、RCOO⁻の濃度は RCOOH の濃度と比べて2倍程度である。

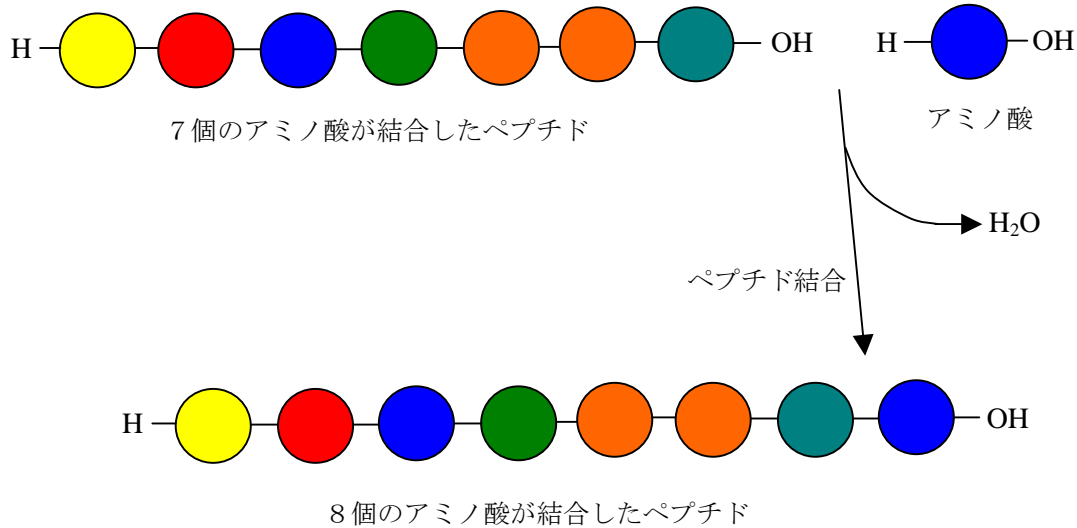
したがって、十分に時間が経過した後では、大部分のαは RCOO⁻として細胞質基質に分布するようになる。αの分布量比には各区画の体積も影響するが、細胞質基質の体積が他の区画に比べて極端に小さくない限り、結論は変わらない。



問6) 【正解】 C

【解説】 3塩基対で1つのアミノ酸を指定しているのだから $1,200 \div 3 = 400$ アミノ酸。これにアミノ酸の平均分子量のおおよそ 130 をかけ、ペプチド結合で除かれる水の分子量 18×399 を差し引く。得られる値 44,818 に最も近い 4.5×10^4 を正解とする。「翻訳開始点から翻訳終結点までの長さ」に終止コードが含まれるとみなすと、 $130 \times 399 - 18 \times 398 = 44,706$ となるが、正解は変わらない。

図は、脱水反応によりペプチドが伸張する様子を模式的に示している。ペプチドの分解は、これとは逆向きの加水反応による（加水分解）。



問7~8) 【正解】 問7 F 問8 F

【解説】 アルビノは色素を作れない変異体であり、色素を作る酵素がはたらいていないことによる。このことおよび実験3より、サンプル②がアルビノのサンプルであると推定できる。また、実験2の「サンプル②の分子量がサンプル①とサンプル③より小さい」ことから、酵素タンパク質が正常に作られていないことが、酵素活性を失う原因になっていたことがわかる。サンプル①とサンプル③が野生種(黒色の個体)と四肢の先端部だけが黒色の個体のどちらのものかは、四肢の先端部だけがなぜ黒色になるのかを実験3より考えられれば推定できる。本文中にこの動物が平均体温 37°C の恒温動物であることが記されている。四肢の先端部は放熱が起きやすく、体幹部より体温が低くなっていると考えられる。実験3の結果より、サンプル①由来の酵素は、 35°C 以上で急激に活性が失われている。つまり、四肢の先端部の体温が低いところでは(酵素がはたらき)体毛を黒色にし、体幹部の体温の高いところでは(酵素がはたらかず)体毛が白色になったと考えられる。これより、サンプル①が四肢の先端部だけが黒色の個体のものと推定できる。

実験1よりアルビノ種の変異は、野生種の遺伝子の塩基配列が1カ所で違っていることがわかった。また、実験2よりアルビノ種の酵素の分子量が野生種より明らかに小さいことより、塩基が置き変わった部分のアミノ酸が別のアミノ酸に置き換わっただけではないことがわかる。例えば、塩基が変化した部分のコドンが停止コドンになり、それ以降のコドンがアミノ酸に置き換わることがなかったことが考えられる(記述(b))。また、ヌクレオチドが欠失することで、そのヌクレオチドを含む読み枠が変わり、多くのアミノ酸配列が変わることがある(記述(c))。この変異の中には、途中で停止コドンが生じ、酵素の分子量が小さくなることも考えられるので、(c)が起きた可能性もある。

問9) 【正解】 B

【解説】 この問題を解くのに P, Q, R が具体的に何という抗生物質であるかを知っている必要はないが、この問題に登場する抗生物質およびその作用は次のとおりである。

抗生物質 P：ペニシリンは 1929 年 A. Fleming によりアオカビの培養液中より発見された。細胞壁の新規合成を阻害するため、静止した菌体には影響を与えないが、増殖中の菌体は細胞壁が裂けて破裂する。アンピシリンは、大腸菌などのグラム陰性細菌にも効くように、ペニシリンの構造の一部を改変したものである。

抗生物質 Q：テトラサイクリンは 1948 年に放線菌の培養液から発見された。細菌のリボソームの 30S サブユニットと可逆的に結合し、アミノ酸が結合した tRNA が 50S サブユニットに結合するのを阻止する結果、タンパク質のペプチド伸長が阻害される。テトラサイクリンの濃度が薄くなれば、リボソームからテトラサイクリンが離れるのでタンパク質の合成を再開できる。

抗生物質 R：ストレプトマイシンは 1944 年 S. A. Waksman らにより放線菌の培養液から発見された。細菌のリボソームの 30S サブユニットと 50S サブユニットの接触領域に結合して、タンパク質合成の開始過程を阻害するとともに、アミノ酸が結合した tRNA の選択に影響してコドンの誤訳を引き起こし、異常なタンパク質が蓄積して菌体に毒性を与えるので、増殖を再開するのが難しくなる。

問10) 【正解】 B

【解説】 小さな細胞が列をなして密に並んでいるパターンから、先端成長を行う軸性器官の末端部であることが判る。とくに細胞が稠密な領域の外側（写真では右側）に、大きな細胞からなる層があり、これがだんだんに剥がれていく様子が見られる。このような細胞層として考えられるのは根冠であることから、この写真は根の先端を示したものと判断できる。ちなみに根冠の組織構造は、内側にある分裂組織からの細胞の供給と、外側における細胞の脱落とのバランスによって保たれている。

問11) 【正解】 B

【解説】 A と C～F では、アブシシン酸のデンプン分解阻害の作用メカニズムによらず、デンプンの分解が起きない。B では、アブシシン酸がジベレリン合成より後の段階に作用する場合にはデンプンの分解が起きず、そうでない場合にはデンプンの分解が起きる。したがって、生物クラブの目的にとって有用な情報を与える実験は B のみである。ただし、B の実験でデンプンの分解が起きなかったときに、アブシシン酸がジベレリン合成段階に作用せずそれより後の段階にのみ作用するのか、ジベレリン合成段階とそれより後の段階の両方に作用するのかは判定できないので、この点注意が必要である。なお実際には、アブシシン酸はジベレリンによるデンプン分解酵素遺伝子発現の誘導を妨げることが示されている。

細胞間のシグナル伝達

多細胞生物では、細胞は独立に存在するのではなく、細胞間でシグナルや情報を伝達しています。アセチルコリンは一般的な神経伝達物質の1つです（問 19～20）。発生過程では、細胞間の相互作用は欠くことができません（問 24, 問 25）。動物でも植物でも、ホルモンとよばれる化学物質は長距離のシグナル伝達を担っています（問 11, 問 12, 問 21）。

問 12) 【正解】 D

【解説】側芽の成長は、普段、頂芽で合成され、約 1 cm/時間の速度で茎の中を根に向かって極性移動するオーキシシンによって抑制されている。ある葉のすぐ上で頂芽を含む上部が切除されると、数時間後には側芽の近くの茎の中のオーキシシンが下部へ移動して無くなる。すると、それまで茎の中でオーキシシンによって合成が抑制されていたサイトカイニンが、側芽の近くの茎の中で合成されるようになり、そのサイトカイニンが側芽に移動して側芽の成長を促す。このように成長を抑制する物質が頂芽から移動し側芽の成長を妨げる一方で頂芽がよく成長する現象を、頂芽優勢と言う。

問 13) 【正解】 D

【解説】チラコイド膜上で起こる明反応（光化学反応）において、光エネルギーにより水分子が水素と酸素に分解される。おもにグラナに存在する光化学系 II の反応中心にあるクロロフィル *a* は、クロロフィル *b* とほぼ同じ構造をしているが、わずかな官能基の違いのために色素の吸収スペクトルが少し異なっている。クロロフィル *b* はクロロフィル *a* よりも波長の長い光よりも短い光に対する吸収能力が高く、突然変異体が知られている。このクロロフィル *b* の突然変異体は、赤色光下での光合成反応に影響はほとんどないが、波長の短い紫から青にかけての光下での光合成反応が抑制されている。これに対し、クロロフィル *a* はクロロフィル *b* よりも反応中心に近い位置にあるため、クロロフィル *a* の突然変異体はほぼ生育できない。

問 14) 【正解】 B

【解説】マツは裸子植物で、被子植物のような重複受精は行われませんが、雌性配偶子ができる過程はよく似ていて、大孢子嚢中で $2n$ の大孢子母細胞から減数分裂により n の大孢子が 4 つできる。しかし、このうち 3 つは退化して、1 つの大孢子だけが生き残り、雌性配偶体となる。雌性配偶体内で 2～3 個の造卵器ができ、それぞれの造卵器の中に 1 つの卵細胞ができて精細胞との間で受精する。

スギゴケなどのコケ植物やゼンマイなどのシダ植物では、減数分裂により多数の胞子が孢子体の孢子嚢につくられる。この段階では 1 つの母細胞から 4 つの胞子が生じ、それらすべてが後に配偶体を形成する。スギゴケでは別々の胞子から雄性及び雌性配偶体が発生し、雄性配偶体の造精器の中で精子が、雌性配偶体の造卵器の中で卵細胞が形成される。シダでは、胞子から発生した配偶体（前葉体）に造精器と造卵器がどちらも形成される。

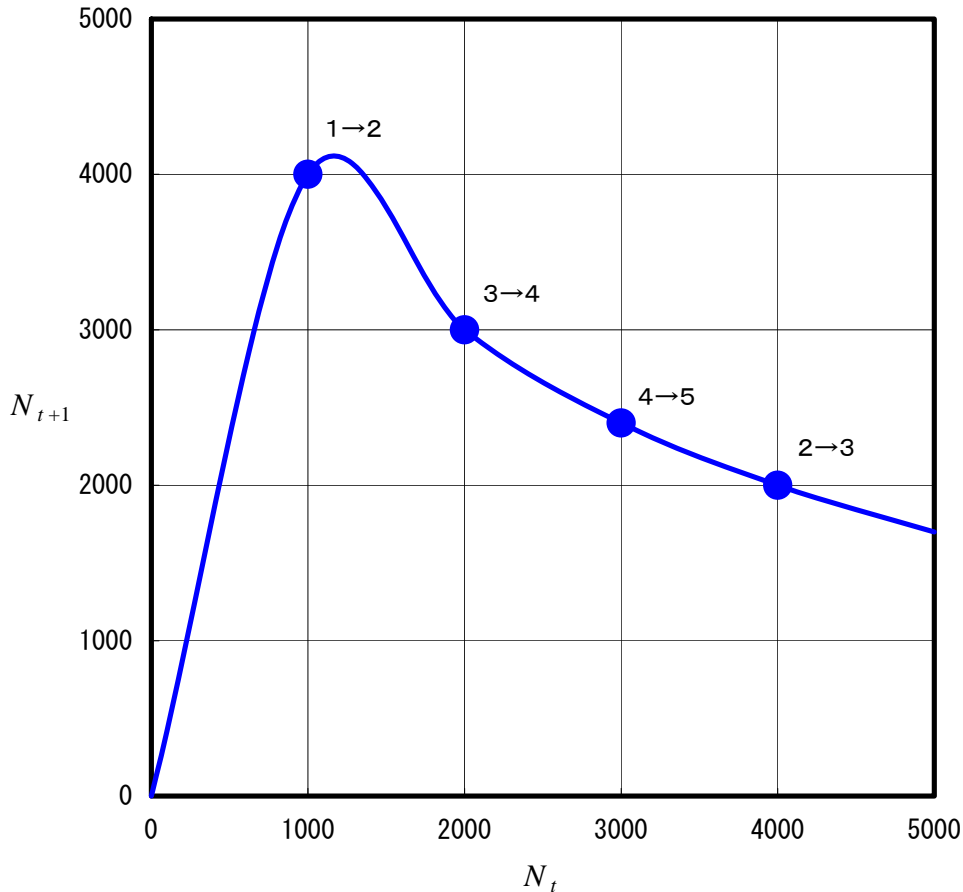
モデル生物

モデル生物は、普遍的な生命現象を解明するため、集中的に研究されている生物であり、試験問題としてもよく出てきます。以下に、おもなものを示します。*のついた生物は今回の試験に登場しています。

| | | | | | | |
|------|----------|------------------------|---------|---------|---------------------------|-----|
| *大腸菌 | 枯草菌 | パン酵母（出芽酵母） | 分裂酵母 | クラミドモナス | ヒメツリガネゴケ | |
| ゼニゴケ | ミヤコグサ | タルウマゴヤシ | シロイヌナズナ | *イネ | *線虫 (<i>C. elegans</i>) | |
| ヤリイカ | カイコ | *シヨウジョウバエ（キイロシヨウジョウバエ） | | *ウニ | ヒドラ | ホヤ |
| メダカ | セブラフィッシュ | *カエル（アフリカツメガエル） | | *ニワトリ | *マウス | ラット |

問 15) 【正解】 B

【解説】問題の図 1 は個体群の非線形な成長様式を、連続する 2 世代の個体数の対応関係から図化したものである。まず初期個体数を起点として、縦軸方向へ垂線を延ばし、各曲線との交点を求める。この交点の縦軸の値が次世代の個体数となる。次にこの値を横軸にして、同様な操作を繰り返すことで、さらに次の世代の個体数を求めることができる。それ以降の世代についても同様である。たとえば、図のような対応関係では、 $N_1 = 1000$ が初期個体数であると、2 世代目の個体数は $N_2 = 4000$ になる。同様に、 $N_3 = 2000$, $N_4 = 3000$, $N_5 = 2400$ になる。



①では個体数が順次減少し、絶滅に向かう。希少種でよくみられる。②は典型的な S 字成長（ロジスティック成長）を示すものである。③は内的増加率が高い場合で、密度効果が時間の遅れをともなって強くはたらくため、個体数は周期振動する。

問 16) 【正解】 H

【解説】ア (β のグラフ) は広い葉が水平に茎の上部につく広葉型の植物である。葉は光を効率よく吸収できるが、下部には光を通さない。また、茎など光合成を行わない部分の量が多いので、植物体全体に対して、葉の占める割合は比較的小さい。

イ (α のグラフ) は細い葉がほぼ垂直に立ち上がるイネ科型の植物である。葉が光を吸収する効率は悪いが、下部にも光が届くので、多くの葉を群落内にもつことができる。また、植物体全体に対して、葉の占める割合が大きい。

問 17~18) 【正解】 問 17 D 問 18 B

【解説】問 17: 植食者がいて天敵がいない場合, 化学的防御をしない個体が生産する種子の量は $s - d$, 化学的防御をする個体が生産する種子の量は

$$s - c - (d - q) = s - d + (q - c)$$

となる。化学的防御をする個体が増加するのだから, [化学的防御をしない個体が生産する種子の量] < [化学的防御をする個体が生産する種子の量] である。したがって,

$$s - d < s - d + (q - c)$$

より $q > c$ となる。

問 18: 植食者と天敵が両方いる場合, 化学的防御をしない個体が生産する種子の量は

$$s - (d - e) = s - d + e$$

であり, 化学的防御をする個体が生産する種子の量は

$$s - c - \{d - q - (e - f)\} = s - d + e + \{q - (c + f)\}$$

である。問 17 と同様に化学的防御をする個体が増加するのだから,

$$s - d + e < s - d + e + \{q - (c + f)\}$$

より $q > c + f$ となる。

問 19~20) 【正解】 問 19 E 問 20 E

【解説】アセチルコリンは, 海馬に対していろいろな活性があることが知られており, ニューロン新生もその 1 つである。また, アセチルコリンを外部から投与するのではなく, 海馬での産生を増やすことができれば, いろいろな疾病の予防・治療にも期待がもてる。この実験は, その 1 つである。

I 群と II 群を比較すると, 明らかに I 群の方がニューロン新生が活発である。その原因が, アセチルコリンであることを確かめるには, I 群と同じ条件で飼育しながら, アセチルコリンの作用を阻害して, II 群に近い結果となればよい。問題では, 結果を示した上で, 実験条件を問うている。I 群と同じ条件であるから, 回し車はある環境であり, アセチルコリンの作用を阻害すればよいので, E の条件が正解となる。

海馬とタツノオトシゴ

タツノオトシゴの学名は *Hippocampus coronatus* です。漢字では海馬と書きます。英語でも sea horse です。16 世紀にイタリアの解剖学者が, 脳内のタツノオトシゴに形状が似ている領域を hippocampus と名づけました。その後, 他の用語も提唱されましたが, 現在では, hippocampus が使われています。日本語では海馬です。ついでですが, 河馬 (カバ) の学名は, *Hippopotamus amphibius* です。英語では hippopotamus です。hippo は馬を, potamus は川を意味しています。

問 21) 【正解】 E

【解説】 インスリンは、すい臓のランゲルハンス島から分泌されるホルモンの1つであり、血糖値の恒常性を維持するために重要である。すなわち、血糖値が上昇すると、インスリンを放出し、血糖値を低下させる。インスリンは糖尿病の治療にもちいられているが、インスリン抵抗性により、インスリンを注射しても血糖値があまり下がらない患者がいる。インスリン抵抗性の原因の1つと考えられているのが、TNF- α である。

この実験は、インスリン抵抗性を確かめたものの1つである。この移植に使われているマウスは、ヌードマウスという胸腺が遺伝的に欠如した系統で、いろいろな細胞を移植することができる。

実験結果から、移植群の血中インスリン濃度が高いので、TNF- α にインスリン濃度を上昇させる作用があることは、すぐにわかる。次に、血糖値は移植群と対照群で差がないので、インスリンの作用が阻害されているために、血中インスリン濃度を高くしないと、血糖値を下げられない状態になっていることが、可能性の1つとして考えられる。これが、インスリン抵抗性が引き起こされた状態である。

TNF- α が直接血糖値に与える影響は、この実験だけではわからないが、インスリンとは独立に血糖値を上昇させる作用があつて、それが増えたインスリンによる血糖値低下と拮抗して、見かけ上血糖値が変わっていない、という可能性も考えられる。追加実験の例としては、インスリン濃度も血糖値も同じマウスにTNF- α を投与するなどする方法が考えられる。

問 22~23) 【正解】 問 22 C 問 23 A

【解説】 多細胞動物の有性生殖では、受精により卵の核と精子の核が融合し、発生が開始する。この時、複数の精子が卵に入ると染色体数異常がおき、異常発生をしてしまう。そのため、多くの多細胞動物では、受精時に精子を1個だけ卵内に入れるしくみがある。これを多精防止機構という。

この機構の1つが受精膜形成である。受精膜ができると精子はこの膜を通過できないため、完璧な多精防止機構となるが、この膜が形成されるまでに数分かかる。この間にも多くの精子が卵表面に到達する。

受精膜が形成されるまで次の精子の卵内への侵入を防いでいるのが膜電位変化である。実験3からわかるように、膜電位がプラス方向に変化すれば精子は卵内に入ることができない。この膜電位のプラスへの変化が2番目以降の精子の侵入を防いでいるのである。受精してから十数秒してこの膜電位変化が起きるようであれば、実験1で示した条件であれば、膜電位変化が起きるまでに2番目以降の精子が卵に到達し侵入してしまう。また、膜電位が変化してしまつてからは受精できない。そのため、膜電位変化は受精直後少なくとも数秒の間に起きていることがわかる。問22でこれらのことを満たす受精のタイミングは、Cしかないと判断できる。

問 24) 【正解】 A

【解説】 実験から、ニワトリは間充織細胞が、正常な誘導を行うことができないために歯を失つたと考えられる。また、組み合わせ実験で、マウスの間充織細胞に表皮外胚葉細胞が混入して歯が形成されるわけではないことを確認することは、この実験ではとても重要なポイントである。ニワトリの表皮外胚葉細胞が、間充織細胞による抑制が外れてエナメル層を作るようになったという可能性を排除するために、⑤の対照実験は必要であり、始祖鳥は歯をもつことを考えると、⑥の実験では、エナメル層と象牙層をもつ歯を形成することが予想される。

問 25) 【正解】 B

【解説】線虫の細胞分化に関する問題である。いくつか専門的な知識を必要とするが、それ以外はそれぞれの記述を丹念に読んで、論理的であるかを判断すればよい。

記述 1 は、遺伝子の転写と RNA ポリメラーゼ II の関係がわかれば、「正」であることが容易に解答できる。

記述 2 は、P4 細胞がすべての生殖細胞の祖先であることが読み取れば、「正」であることがわかる。

記述 3 の結論は、EMS 細胞を他の細胞から分離して培養した実験で消化管細胞が生じなかったこと、AB 細胞と P2 細胞の両方に接触した状態（つまり正常な状態）では EMS 細胞から消化管細胞が生じることから、支持されない。したがって、「誤」である。

問 26) 【正解】 D

【解説】ここでは、実験から否定できない命題を選択させている。基本的にサイエンスは命題を否定していくことで進歩してきた。

A の選択肢は、実験 3 で、受精後の同じ数の核分裂を経たはずの半胚間で、中期胞胚遷移の時期がずれていることから否定される。

B の選択肢も A と同様の理由で否定される。

C は、実験 2 で細胞質分裂を止めても中期胞胚遷移が正常な時期に起こっていることから否定される。

D は正解。

E は、実験 1 で転写の開始に依存して中期胞胚遷移が起こるわけではないので否定される。

問 27~28) 【正解】 問 27 E 問 28 D

【解説】行動学では至近要因と究極要因を区別してその両方からの研究を行うことが大切である。至近要因はその行動を直接引き起こす刺激やそのもととなる遺伝的、生理的、構造的機構であり、究極要因はその行動の進化的、適応的意義である。

本種 a はセダカズメダイという魚で、その名の通り体高比が比較的大きい魚である。藻類を食べるこの魚は、岩礁になわばりを作り、餌となる藻類を確保するため、ほかの藻食魚や雑食魚に対し激しい攻撃行動を示す。同じ生息域にすむ魚の中では、藻食魚と雑食魚の体高比が藻類を食べない肉食魚よりも有意に大きいため、体高比の大きな魚を攻撃するという行動により、セダカズメダイは藻類を食べる藻食魚と雑食魚を攻撃して追い出し、餌場を確保していると考えられる。

図 1 より本種の攻撃行動の至近要因はある閾値を越えた体高比であり、図 2 より究極要因は餌資源の確保である可能性が考えられる。問 27 のイの究極要因は行動の意味を生存価から考えた要因であるため、間違い。ウの条件刺激は条件反射の刺激となる場合にもちいる言葉なので間違い。

問 28 の A と E は、肉食魚は体高比が小さいので攻撃対象とならず、なわばりへ侵入するので間違い。また、E は肉食魚は藻類を食べないので餌資源を奪われる心配はない。B と C は今回の実験では生殖に関する観察は行っていないので議論することができない。F は雑食魚と藻食魚は体高比が高いため攻撃対象となり、餌を共有することはないので間違い。G は本種と肉食魚は異なる餌を食べるので間違い。

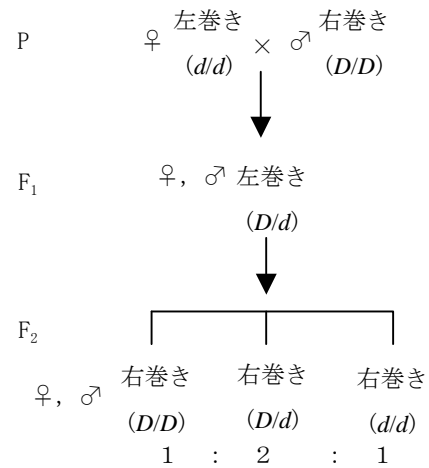
問 29) 【正解】 G

【解説】 表現型が母親の遺伝子型で決まるため、この場合の F_2 と F_3 の表現型は、それぞれ通常のメンデル遺伝の F_1 と F_2 の表現型と同じになる。

すなわち、 F_1 の遺伝子型は D/d なのでこれを母親とする F_2 の表現型は右巻きになる。また、 F_2 の遺伝子型は $(D/D):(D/d):(d/d)=1:2:1$ なのでこれを母親とする F_3 の表現型は (右巻き):(左巻き) = 3:1 になる。

一見メンデルの遺伝の法則に従っていないように思われる遺伝様式がいくつか知られている。その1つは、この問題のテーマである、「母親の遺伝子型がその子の表現型を決定する」という遺伝様式である。この様式は、細胞内小器官 (オルガネラ) の遺伝様式と混同されやすい。

たとえば、ミトコンドリアは独自の DNA をもっており、多くの生物では、受精の際母親の DNA だけが子に伝わる。この問題の遺伝様式は、オルガネラの遺伝様式とは異なり、子は両親の遺伝子を受け継いでいる。しかし、発生過程で卵細胞の細胞質に存在する物質 (mRNA やたんぱく質) が使われると、母親の遺伝子型が子の表現型を決定することになる。ショウジョウバエの身体の軸を確立する物質はこの例である。遺伝的刷込みという現象も知られている。この場合、両親から受け継いだ遺伝子のうち、一方だけが発現する。たとえば、マウスのインスリン様成長因子 2 では、父親由来の遺伝子だけが発現する。



遺伝と確率

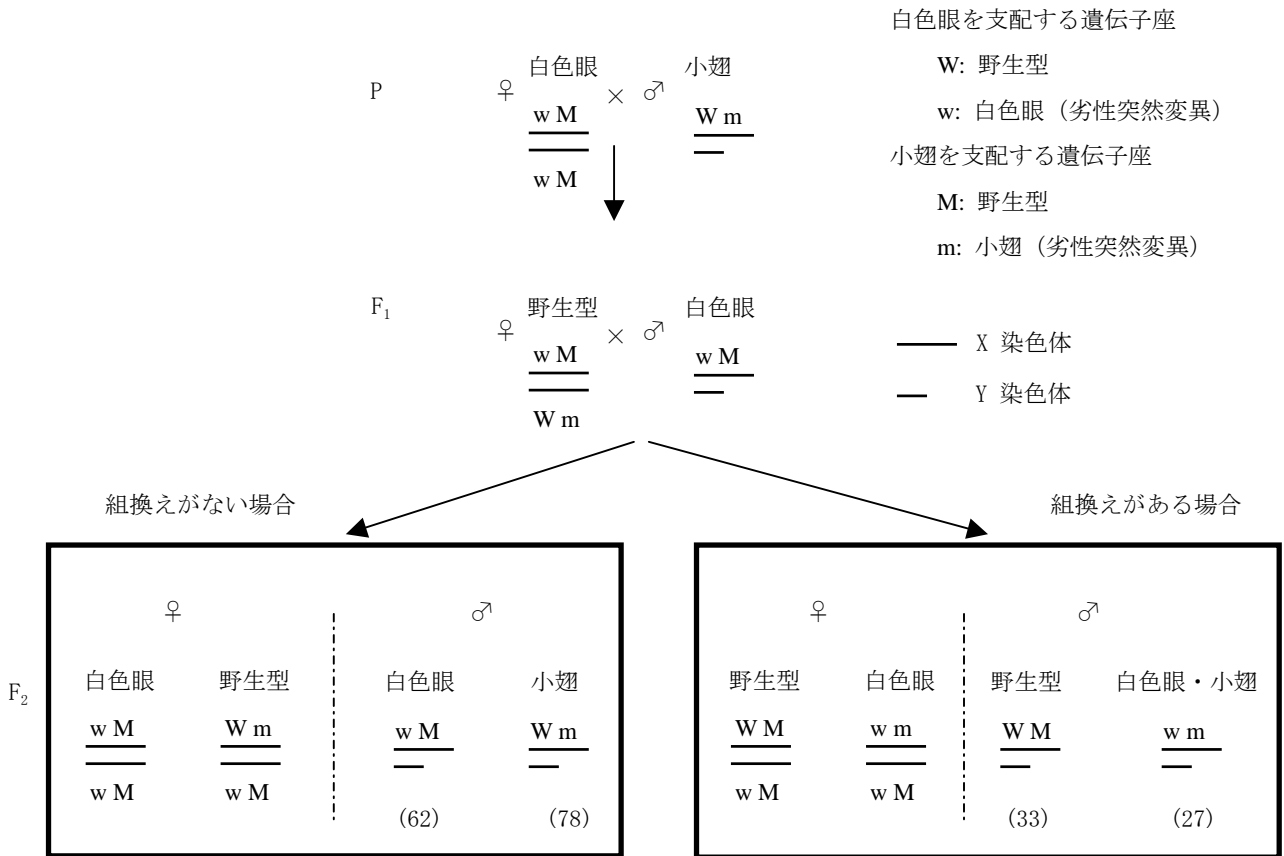
問 29 で (右巻き):(左巻き) = 3:1 という表現が出てきますが、これは、右巻きである確率は 3/4 であり、左巻きである確率は 1/4 であることを意味しています。確率とは、ある現象 (数学では事象という) が起きることが期待される割合のことです。たとえば、サイコロを振って 1 の目が出る確率は 1/6 です。これは、6 回サイコロを振ると、1 回は 1 の目が出ることを意味していません。実際には、2 回出ることもあり、全然出ないこともあります。何度も何度も (無限に) 振ると、その 1/6 は 1 の目が出ることを意味しています。したがって、実験結果がちょうど 3:1 になることは、ほとんどありません。事実、メンデルが行ったエンドウの実験でも、得られた結果は 3:1 から多少ずれています。

問 31 は、確率を求める問題です。A が起きる確率が P_A であり、B が起きる確率が P_B であるとき、A と B が独立であれば、A と B が同時に起きる確率はそれぞれの確率の積 ($P_A \times P_B$) で求められます。この問題では、それぞれの確率は 1/2 であり、独立性が成り立っているため、求める確率は $1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 = (1/2)^4 = 1/16$ となるのです。これは、メンデルが発見した独立の法則に対応しています。確率という独立と遺伝学という独立は同じものなのです。

問 33~34 では、ハーディ・ワインベルグの法則が成り立っていることを仮定しています。1908 年にハーディとワインベルグによって独立に公式化されたこの法則は、確率に基づいています。したがって、実際に観察される遺伝子型頻度は、この法則から予測される遺伝子型頻度と必ずしも一致しません。多少のずれを生じます。しかし、この問題では一致することを仮定しています。ついでですが、ワインベルグはドイツの医師でしたが、ハーディはイギリスの著名な数学者でした。

問 30) 【正解】 D

【解説】 F₁ の表現型は、伴性遺伝を理解していれば、雌が野生型、雄が白色眼であることは容易にわかる。F₂ の表現型は2つの遺伝子座の組換え価から推定することになるが、二重劣性雄をもちいる通常の検定交配とは異なり、雌では2種類の表現型しか出現しない。そこで、雄の結果だけに注目すると、(ハ) は(ニ) に比べて個体数が少ないことから、組換え型、つまり白色眼・小翅であり、(ニ) が非組換え型である小翅であることがわかる。



最新の IBO 規約による国際生物学オリンピックの出題範囲 (1)

| | |
|---|--|
| <p>1 細胞生物学 (配点 20%)</p> <p>1.1 細胞の構造と機能</p> <ul style="list-style-type: none"> * 細胞を構成する化学物質 * 細胞小器官 (核, 細胞質) * 細胞の代謝 * タンパク質の合成 * 生体膜を通過する輸送 * 有糸分裂と減数分裂 | <p>1.2 微生物学</p> <ul style="list-style-type: none"> * 原核細胞の機構 * 形態学 * 光合成生物と化学合成生物 <p>1.3 生物工程学</p> <ul style="list-style-type: none"> * 発酵 * 生物の遺伝子操作 |
|---|--|

問 31～32) 【正解】 問 31 E 問 32 C

【解説】 2つの系統間の交配で得られた雑種第1代が両親のいずれの系統よりも優れた形質を示す現象を雑種強勢という。雑種強勢を作物の栽培に利用したものとしてはトウモロコシ、米（イネ）などがよく知られている。これを題材にした問題であるが、遺伝についての基本的な知識がしっかりしていれば、雑種強勢についての知識がなくても解答できる。F₁ (A₁A₂B₁B₂C₁C₂D₁D₂) の自家受精でできるF₂は、1組の相同染色体に注目してみるとA₁A₁ : A₁A₂ : A₂A₂が1 : 2 : 1の分離比となる。すなわちF₁と同じものは1/2であり、これが全部で4対あるのだから(1/2)⁴=1/16となる。

ハイブリッド品種の栽培のためにもっとも問題となるのが、F₁種子の安定的な供給である。特にイネでは自家受精を防ぎ、大量にF₁を得るためには雄性不稔の利用が欠かせない。問32は雄性不稔系統作成についての問題だが、雄性配偶子はほとんど細胞質を持たず細胞質の遺伝は母性遺伝であること、核の遺伝子を置き換えるためには戻し交雑を何代にもわたって繰り返すことを知っていれば容易に解答できる。

ハイブリッド種子は、ア系統とウ系統からつくられた雄性不稔系統に別の固定品種を交雑してつくられる。栽培者が収穫する米はF₁が成長した植物体に実る種子であるから、F₁は不稔であってはならない。したがって、交雑にもちいる固定品種はア系統の核と雑種強勢を示す性質を持つことはもちろんであるが、それ以外にF₁種子に稔性を回復させる遺伝子を持たなければならない。

最新のIBO規約による国際生物学オリンピックの出題範囲 (2)

| | |
|--|--|
| <p>2 植物解剖学と生理学（種子植物を重点にして） （配点 15%）</p> <ul style="list-style-type: none"> * 光合成，蒸散とガス交換 * 水，ミネラル，同化産物の移動 * 成長と発生 * 生殖（シダ類およびコケ類を含む） | <ul style="list-style-type: none"> * 防御行動 * 交配システムと子育て * 生体リズム |
| <p>3 動物解剖学と生理学（脊椎動物，特にヒトに重点をおいて）（配点 25%）</p> <ul style="list-style-type: none"> * 消化および栄養 * 呼吸 * 循環 * 排出 * 調節（神経およびホルモン） * 生殖および発生 * 免疫 | <p>5 遺伝学および進化（配点 20%）</p> <ul style="list-style-type: none"> * 変異（突然変異と修飾） * メンデル遺伝 * 複対立遺伝子，組換え，伴性遺伝 * ハーディ・ワインベルグの法則 * 進化のメカニズム |
| <p>4 行動学（配点 5%）</p> <ul style="list-style-type: none"> * 行動学の方法論 * 生得的および習得的行動 * 伝達と社会的組織 * 摂食行動 | <p>6 生態学（配点 10%）</p> <ul style="list-style-type: none"> * 生物個体 * 個体群 * 生物群集 * 生態系 * 生物圏とヒト <p>7 生物系統学（配点 5%）</p> <p>典型的な生物間の構造と機能および進化的生態学的関係</p> |

問 33～34) 【正解】 問 33 J 問 34 D

【解説】 表現型の頻度から遺伝子頻度を推定するとき、ハーディ・ワインベルグ平衡を仮定しなくても推定できる場合と仮定しないと推定できない場合がある。前者は表現型から遺伝子型が明瞭に判断できる場合である。たとえば、MN 式血液型では、M 型、MN 型、N 型の 3 種類の表現型があるが、遺伝子型はそれぞれ MM 型、MN 型、NN 型である。したがって、ハーディ・ワインベルグ平衡を仮定しなくても、M 遺伝子の頻度は (M 型の頻度) + (MN 型の頻度) ÷ 2 で推定される。ABO 式血液型では、表現型が A 型するときその遺伝子型には AA 型と A0 型があり、B 型には BB 型と B0 型がある。したがって、何らかの仮定をしなければ遺伝子頻度を推定することができない。

問 33 : 0 遺伝子の頻度が p であるとき、ハーディ・ワインベルグ平衡を仮定すると、0 型の頻度は p^2 である。したがって、 $p^2 = 0.16$ より $p = 0.4$ となる。すなわち、0 遺伝子の頻度は 40% である。

問 34 : A 型の父親には 2 種類の遺伝子型 (AA 型と A0 型) が考えられる。0 遺伝子の頻度が p 、A 遺伝子の頻度が q であるとき、AA 型の頻度は q^2 、A0 型の頻度は $2pq$ である。したがって、A 型の父親のうち A0 型の割合は $2pq/(q^2 + 2pq) = 2p/(q + 2p)$ となる。父親が A0 型であるとき、生まれる子供の 1/4 は B 型である ($AB \times A0 = AA + A0 + AB + B0$)。父親が AA 型であるときは、B 型の子供は生まれない。したがって、 $2p/(q + 2p) \times 1/4 = 0.2$ となる。 $p = 0.4$ であるので、 $0.2/(q + 0.8) = 0.2$ より $q = 0.2$ となる。すなわち、A 遺伝子の頻度は 20% である。

問 34 の別解 : 父親の遺伝子型が A0 型であるときにのみ 1/4 の確率で B 型の子供が生まれる ($AB \times A0 = AA + A0 + AB + B0$)。子供の 20% が B 型であることから、父親の遺伝子型が A0 型である割合は $20\% \times 4 = 80\%$ である。したがって、父親の遺伝子型が AA 型である割合は 20% であることがわかる。父親が A 型であるためには、彼の母と父 (祖母と祖父) から A 遺伝子と 0 遺伝子を表のように受け継いだことになる。

(注 : 祖母から A 遺伝子を祖父から 0 遺伝子を受け継ぐ割合は、祖母から 0 遺伝子を祖父から A 遺伝子を受け継ぐ割合に等しい。)

表 : 期待される父親の遺伝子型。() 内にはその割合を示している。

| | | 祖父由来の遺伝子 | |
|----------|-------|------------|------------|
| | | A 遺伝子 | 0 遺伝子 |
| 祖母由来の遺伝子 | A 遺伝子 | AA 型 (20%) | A0 型 (40%) |
| | 0 遺伝子 | A0 型 (40%) | |

この表から祖母から A 遺伝子を受け継いだ場合、祖父から受け継いだ遺伝子のうち、1/3 は A 遺伝子であり、2/3 は 0 遺伝子であることがわかる。同様に、祖父から A 遺伝子を受け継いだ場合、祖母から受け継いだ遺伝子のうち、1/3 は A 遺伝子であり、2/3 は 0 遺伝子であることがわかる。いずれの場合も、A 遺伝子の頻度は 0 遺伝子の頻度の半分、すなわち $40\% \div 2 = 20\%$ である。

日本人の特徴

日本人の ABO 式血液型の遺伝子頻度は、およそ A 遺伝子が 29%、B 遺伝子が 18%、0 遺伝子が 53% です。世界的に見ると、日本人の特徴は 0 型の人 (約 28%) が少ないと言えます。多くの地域や民族では 0 型の割合は 30% を超え、南アメリカにはすべての人が 0 型である民族もいます。遺伝的浮動と自然選択によって (とくに遺伝的浮動によって)、このような地域間や民族間の違いが生じたと考えられています。

問 35) 【正解】 D

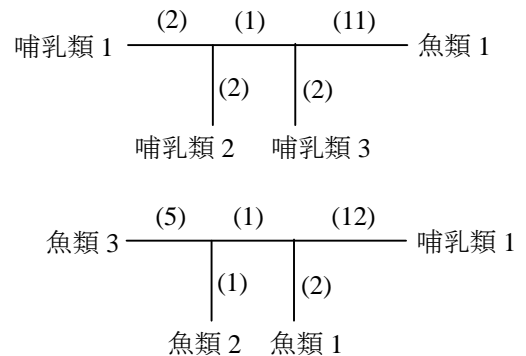
【解説】一般的に遺伝子の進化では、タンパク質や RNA の機能を維持するためにある限定されたアミノ酸配列や塩基配列を維持しなければならず、多くの突然変異は自然淘汰によって排除される。そのためアミノ酸の置換は、実際に生じた突然変異のごく一部を反映しているにすぎない。しかし、機能を失った偽遺伝子では、そのような制約がないので、さまざまな突然変異を受け入れることができるようになり、それにともないアミノ酸の置換数が増加したり、また場合によってはアミノ酸の読み枠であるコドンの読み枠がずれたり、新たな場所に終止コドンが生じたりする。一度偽遺伝子になれば、さまざまな突然変異が蓄積していくので、その遺伝子が復活して機能的な遺伝子になることはほとんどない。

遺伝子 *b* と分岐した後、遺伝子 *a* にはアミノ酸置換数の増大が見られない。したがって、遺伝子 *a* が偽遺伝子になったとは考えられない。遺伝子 *a* と分岐した後、遺伝子 *b* にはアミノ酸置換数の増大が見られる。しかし、種分化後、遺伝子 *b* にはアミノ酸置換数の増大は見られない。したがって、遺伝子 *b* が偽遺伝子になったとは考えられない。もし偽遺伝子になっていれば、種分化後もアミノ酸置換数の増大が見られるはずである。一方、遺伝子 *b* が（たび重なるアミノ酸置換により）新たな機能を獲得した可能性は排除できない。いったん新しい機能を獲得すると、新しい機能を維持するという制約により、アミノ酸置換数は減少する場合もある。したがって、④の仮説はこの系統樹と矛盾しない。また、それぞれの遺伝子のグループ内に種 S1 と種 S2 があるので、種分化より遺伝子重複の方が古いと考えられる。

遺伝子重複後に機能分化した例は多数知られている。有名な例はグロビン遺伝子であろう。繰り返し起きた遺伝子重複により、 α -グロビンや β -グロビンなどのヘモグロビンを構成する多数のタンパク質、ミオグロビン（筋肉の酸素貯蔵タンパク質）、レグヘモグロビン（植物タンパク質）などに分化してきたと考えられている。

問 36) 【正解】 A

【解説】使用した遺伝子には自然選択がはたらいっている可能性があるため、アミノ酸置換速度は一定であるとはかぎらない。すなわち、種間のアミノ酸置換が少ないからといって、この2種が近縁であるとはかぎらない。魚類 1 を外群とすると、3種の哺乳類の系統関係は3通り考えられるが、右上図だけが置換数のデータを説明できる。同様に、哺乳類 1 を外群とすると、3種の魚類の系統関係は右下図となる。（）内の数字はアミノ酸置換数を示し、この数字を足し合わせたものが種間の置換数になる。したがって、系統関係は A となる。



アミノ酸配列や塩基配列などの遺伝情報から系統樹を推測する方法は多数存在するが、基本的に2種類に大別される。1つは配列情報をそのまま使う方法で、(a) 配列の変化を数理モデルによって数式化し、観察された配列が得られる確率が最も高くなる系統樹を求める最尤法や (b) 観察された配列について、アミノ酸や塩基の置換数（あるいはそれに代わる指標）を最も少ない変化で説明できる系統樹を求める最節約法、などである。もう1つは、この解説にあるように置換数などの配列間の距離に基づいて推定する方法である。ここでは、全てを同時に考えるのではなく、哺乳類と魚類のそれぞれについて注目して考えるとわかりやすい。たとえば、3種の魚類の系統関係は、「もし魚類 1 と魚類 2 が近縁だったらどうなるか」、「もし魚類 1 と魚類 3 が近縁だったらどうなるか」、「もし魚類 2 と魚類 3 が近縁だったらどうなるか」の3通りについて考え、データと矛盾しないものを選べばよい。

問 37) 【正解】 D

【解説】アオサなどの緑藻類には、配偶子に雌雄の分化がみられないものも、雌雄の分化がみられるものもあるが、いずれにしても配偶子は自立的で他の細胞に保護されてはいない。シャジクモ藻類では、雌性配偶子（卵）が複数の細長い細胞に取り囲まれており、受精もこの中で起きる。これはコケ植物やシダ植物の造卵器にも対応するものである。

シダ植物、裸子植物、被子植物の地上部の表皮にはたくさんの気孔があり、水分の損失を抑えつつガスを交換することを可能にしている。気孔に類する構造はシャジクモには存在しないが、コケ植物（蘚類）の孢子体には普通にみられる。

シダ植物と裸子植物、被子植物は、リグニンで補強された通道組織を発達させており、こうした組織は地中からえた水を効率的に体内に行き渡らせるのに大きな役割を果たしている。コケ植物の中にも通道にはたらく組織をもつものはあるが、特殊化の程度は低く、リグニン化は認められない。

多細胞の孢子体の形成はコケ植物、シダ植物、裸子植物、被子植物のすべてに共通するが、発生初期の若い孢子体（胚）を休眠させ、これを頑丈な組織で包んで、乾燥にも強い散布体、つまり種子として繁殖に利用しているのは、裸子植物と被子植物だけである。

コケ植物やシダ植物では、雄性配偶子（精子）は鞭毛を有し、これを使って体外の水環境を遊泳して、造卵器中の雌性配偶子（卵細胞）に到達する。裸子植物のイチョウやソテツでは、胚珠に付着して発芽した花粉から、鞭毛をもった精子が生まれ、胚珠に含まれる液体の中を泳いで卵細胞に到達する。他の裸子植物と被子植物では、雄性配偶子も鞭毛をもたず、花粉管によって卵細胞まで送り届けられる。

以上の形質の変化は、植物の陸上への進出と関連しており、水環境への依存を減らし、乾燥への耐性を高める方向に進んできたと言える。

表紙の写真（写真提供：邑田 仁，東京大学大学院理学系研究科附属植物園 園長）

イチョウの雌花

1896 年（明治 29 年）、東京帝国大学の植物学教室の職員であった平瀬作五郎氏は、帝国大学附属植物園（小石川植物園）のイチョウの雌花から、鞭毛をもつ雄性配偶子、つまり精子を発見して、学術誌に報告しました。これは裸子植物の中に精子をつくる植物があることを世界で初めて示したもので、日本の近代植物学の黎明期における記念碑的な成果とされています。植物は陸上に進出した後、水環境への依存度を減らす方向に進化し、受精に関しては、鞭毛をもつ雄性配偶子（精子）が体外の水環境を自力で泳いで雌性配偶子の卵細胞に辿り着く方式から、鞭毛をもたない雄性配偶子（精細胞）を花粉管によって卵細胞に送り届ける方式に変わりました（問 37 の解説参照）。イチョウなどは、基本的には後者の方式でありながら、前者の性質を一部残しているわけで、進化を考える上できわめて興味深い事例と言えます。

ところで、「雌花」から精子を発見したとは、一体どういうことでしょうか。簡単に説明しましょう。イチョウの雌花は、剥き出しの胚珠の先端に、珠孔液と呼ばれる液体を分泌しています。ここに飛んできた花粉は珠孔液に捕らえられ、胚珠の中に取り込まれます。3ヶ月くらいすると花粉管が伸び始めますが、卵細胞までは到達しません。花粉管の中に精子がつくられ、この精子が花粉管から出て、卵細胞まで泳いで行って受精に至ります。平瀬氏は雌花の内部を注意深く観察し、胚珠の液体の中に花粉管から泳ぎだした運動中の精子を見つけました。これが雌花での精子の発見というわけです。