

日本生物学オリンピック2018

予選問題

2018年7月15日（日） 13:30~15:00

〈正解・解説〉



問1) 【正解】 H J

【解説】ヌクレオチドの平均分子量が330であるので、1塩基対あたりの分子量は平均660である。このDNAの分子量は 4×10^6 なので、構成する塩基対の数は $4 \times 10^6 / 660$ 、すなわち、およそ 6×10^3 塩基対と計算される。したがって、対応するアミノ酸の数は約 $6 \times 10^3 / 3 = 2 \times 10^3$ 個と考えられる。

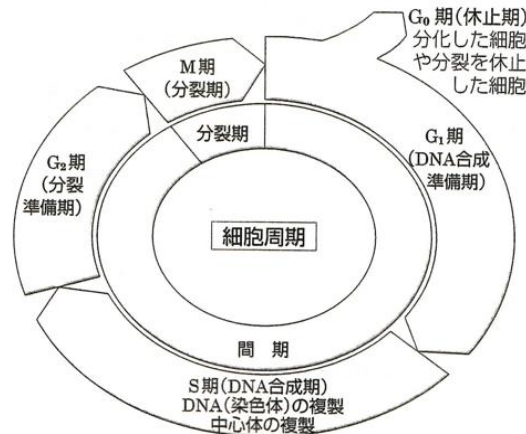
(注：この問題は、2本鎖DNAを想定し、構成する2つの鎖(ポリマー)の分子量の合計として、すなわち二本鎖DNAとして、 4×10^6 という分子量を与えたものでした。しかし、その示し方が明確でなく、 4×10^6 を1本鎖の分子量とみなすことも可能です。そのため、後者の場合の正解であるJを、Hとともに正解とすることにします。)

問2) 【正解】 E

【解説】グアニンとシトシンの合計が54%ということは、アデニンとチミンの合計が $100 - 54 = 46\%$ であることを意味している。この割合は両鎖とも同じであるはずなので、アデニンの割合が24%である方の鎖のチミンの割合は $46 - 24 = 22\%$ である。したがって、他方の鎖におけるアデニンの割合は22%である。一方の鎖におけるアデニンの割合が他方の鎖におけるチミンの割合と同じになることがポイントである。

問3) 【正解】 G

【解説】M期は全体の4%であることから、M期の時間は $25 \times 4\% = 1$ 時間である。細胞周期における時間と細胞数は比例するので、コルヒチンで処理した時点でのM期1時間分とM期に入る前6時間分の細胞がM期として検出されるはずで、 $(6 + 1) / 25 = 28\%$ となる。問題中の図(下図)は、生物図説(浜島書店)より抜粋した。



問4) 【正解】 C 【部分点】 A B D

【解説】DNAが半保存的複製することがよく理解できる実験である。また、体細胞分裂での姉妹染色分体交換(SCE: sister chromatid exchange)を検出するための手法でもある。国内の生物教科書では、染色分体という用語が記載されていないので問題に図1を書き添えた。

チミジンはデオキシリボースにチミンが結合したヌクレオシドである。5-ブロモデオキシウリジン(BrdU)は、チミジンの類似物質であり、DNAが複製されるS期にチミジンの代わりに取り込まれる。

TTおよびBT標識された染色分体は正常に濃く染色されるが、BB標識された染色分体は淡染するので、両者(姉妹染色分体)を顕微鏡下で明瞭に識別することができる。1本の染色分体は1本の二本鎖DNAで構成されているので、図2の選択肢のうち②と③のように染色されることはありえない。こうした実験ではふつう姉妹染色分体交換も観察できるが、問題を複雑にするのでここでは省いている。

問5) 【正解】D 【部分点】A E F G

【解説】脊椎動物の網膜には、感度が高くおもに暗所での視覚（薄明視）にはたらく桿体視細胞と、明所で色覚を伴った視覚にもちいられる錐体視細胞が存在する。錐体視細胞には、光波長感受性の異なるいくつかのサブタイプがあり、これらのサブタイプにより色覚が可能になる。この問題では、錐体サブタイプに特異的な遺伝子発現のしくみを調べるための仮想実験について出題した。

種間で保存された領域 Y と領域 Z は遺伝子 R のシス転写調節配列であると考えられる。領域 Y を取り除くと、本来遺伝子 R が発現しない長波長錐体で GFP の蛍光がみられるようになることから、領域 Y は長波長錐体で遺伝子 R の発現を抑制するはたらきがあると考えられる (②)。領域 Z を取り除くと、短波長錐体で GFP の蛍光が弱くなることから、領域 Z は短波長錐体で遺伝子 R の発現を促進するはたらきがあると考えられる (④)。一般に、桿体視細胞の光受容に関わるタンパク質は錐体視細胞のものと似ているが、アミノ酸配列が異なり、異なる遺伝子にコードされている。遺伝子 R が桿体視細胞で発現しない理由には、遺伝子 R の発現を促進する転写調節因子が桿体視細胞に存在しない可能性や、領域 Y 以外のシス転写調節配列に作用する転写調節因子によって転写が抑制されている可能性などが考えられる。

問6) 【正解】C 【部分点】A B D F H J

【解説】視細胞である錐体や桿体には、それぞれフォトプシンやロドプシンなどの視色素が含まれている。明所ではこれらの色素は分解され、視細胞の興奮の閾値が上がった状態になる。この状態で急に暗所に入ると、はじめは視色素が不足して何も見えない。しかし視色素が再合成され始めると、少しずつ閾値が下がり視覚が回復する。この時間変化を観測したものが暗順応曲線である。

- ① 曲線 1 の第 1 相は曲線 2 と一致している。曲線 2 は網膜の黄斑の部分のみで観察しており、錐体細胞の反応と考えられる。したがって、曲線 1 の第 1 相は錐体細胞の順応を示していると考えられる。正しい。
- ② 曲線 1 の第 2 相は、上記の考察より桿体細胞の順応を示していると考えられる。この順応は遅いが、その光覚閾値は第 1 相よりも非常に低い。したがって、桿体による視覚はおもに暗所ではたらく。誤り。
- ③ 盲斑は視神経が出る場所で黄斑とは異なる。盲斑は視細胞が存在しないため光を感じることができない。一方、黄斑は眼底中央部にあり、明所における視力および色の識別性をもっともよい場所である。誤り。
- ④ この患者は先天的に錐体が機能せず、桿体のみがはたらいている桿体 1 色覚疾患の患者（常染色体劣性遺伝）である。錐体がほとんどはたらかないため、第 1 相が欠損する。しかし第 2 相は曲線 1 と一致していることから、桿体の機能は正常である。したがって、暗所における視覚は正常であると考えられる。正しい。
- ⑤ ヒトの錐体細胞には青、緑、赤の 3 種類が存在し、色覚を司っている。錐体に異常があるこの患者は、色を見分けることができないと考えられる。誤り。

問7) 【正解】I 【部分点】J

【解説】呼吸における酸素の運搬はよく知られているが、二酸化炭素 (CO_2) の排出も同様に重要である。 CO_2 は、組織細胞から排出されると毛細血管に入り、およそ 23% が赤血球内のヘモグロビンと結合する。70% は炭酸脱水酵素のはたらきで、水と反応して炭酸 (H_2CO_3) となり、 H_2CO_3 は炭酸水素イオン (HCO_3^-) と水素イオン (H^+) に解離する。 HCO_3^- は血漿中に拡散して運ばれる。血漿に溶解して運ばれる CO_2 はごく僅かである。 H^+ は多くがヘモグロビンに結合する。血液が肺泡の近傍に達すると、ほぼこの逆の過程を経て、 CO_2 が肺泡中に放出される。解答にあたっては、 CO_2 が H_2O と結合して生じるのが H_2CO_3 であることが分かれば、容易に正解に達することができる。ヘモグロビンに気づくことも重要である。図は、「キャンベル生物学、第 9 版」の 1080 ページの図を改変した。なお、組織細胞の呼吸によって CO_2 が生成されて炭酸が生じると、その領域の pH が低下し、ヘモグロビンからの酸素の遊離が促進される。これはボーア効果（ボーアシフト）とよばれる。

問8) 【正解】B 【部分点】A C D E H I

【解説】ヘモグロビンの酸素解離曲線に関する問題である。

- ① 図より CO 中毒時のヘモグロビン (曲線 2) では、酸素分圧 100 mmHg において酸素飽和度が 50% しかないことがわかる。これは、CO が酸素よりも非常に高い親和性を有するため、酸素分圧を上げて CO が外れないことに起因する。したがって、最大でも、残る 50% のヘモグロビンに酸素が結合するのみである。正しい。
- ② 低酸素分圧 (0~20 mmHg) においては、CO 中毒時のヘモグロビン (曲線 2) の方が、生理条件下 (曲線 1) よりも曲線が左にシフトしていることがわかる。したがって、CO 中毒時のヘモグロビンの方が酸素を結合しやすいことがわかる。誤り。
- ③ 生理的条件下のヘモグロビンは S 字型のシグモイド曲線を示す。これは、酸素を結合する過程でアロステリック調節があることを意味している。すなわち、4 つあるヘムの 1 つに酸素が結合すると、ヘモグロビンの構造が酸素解離型 (T 型) から酸素結合型 (R 型) に変化し、残りの 3 つのヘムに酸素が結合しやすくなるという正の協同性を示している。一方、CO 中毒時のヘモグロビンは単純な直角双曲線であり、アロステリック調節が失われていることがわかる。この変化は、CO が結合することにより、すべてのサブユニットが R 型となることに起因する。正しい。
- ④ 生理条件下では、肺胞で 100%、末梢では 60% がオキシ型であると読み取れるので、差し引き 40% のヘモグロビンが酸素を手放していることがわかる。一方、CO 中毒時のヘモグロビンでは、肺胞で 50%、末梢では 43% がオキシ型なので、差し引き 7% の酸素が放出されている。これは正常時の 17.5% に過ぎない ($7 \div 40 = 0.175$)。誤り。
- ⑤ CO 中毒が進行すると末梢の酸素が不足し、酸素分圧は低下する。末梢の酸素分圧が 20 mmHg まで低下したとき、曲線 1 と 2 はいずれもオキシ型は約 35% と読み取れるが、放出される酸素量は正常時 65%、CO 中毒時 15% なので大きく異なる。誤り。

問9) 【正解】E 【部分点】A F I

【解説】ニューロンの性質についての基本的問題である。

1. 閾値についてはほとんど説明不要だろう。40°C で活動電位頻度は 0、43°C で 1 だから、この間のどこかに閾値がある。40°C では活動電位は発生していないので、閾値がちょうど 40°C である可能性はないが、43°C ちょうどという可能性はある。
2. 閾値未満の刺激では、刺激の大きさにしたがって流入する Na⁺ および Ca²⁺ の量が増えていくので、膜電位は次第に高くなる。この電位変化がある値を超えると (このときの刺激の大きさが閾値となる) 活動電位が発生する。一方、活動電位のピーク電位の値はほぼ一定に決まっており、多少の変動があった場合でも刺激の大きさには依存しない。
3. 中枢に送られ、われわれが感知する刺激の大きさは、個々のニューロンでの活動電位の発生頻度に依存する。50°C と 55°C では活動電位の発生頻度は変わらないので、これと同じ特性のニューロンだけでは、中枢ではその違いを知覚することはできないことになる。これを区別するためには感受性の異なる (活動電位頻度が飽和する刺激量の異なる) 複数のニューロンが必要となる。

ここで取り上げた温度受容体は侵害的な熱刺激に反応するもので、刺激は痛みとして知覚される。哺乳類の体温調節中枢である視索前野や前視床下部では、脳組織の温度上昇によって活動電位の頻度が上昇する温ニューロンが確認されていたが、温度受容体そのものについては長い間正体不明であった。1998 年にそれまでカプサイシン (トウガラシの辛味成分) の受容体として知られていたイオンチャンネル (TRPV1) が熱刺激によっても活性化することが明らかとなり、それ以降感受する温度領域の異なるいくつかの温度受容体が発見されている。なお、TRPV1 が温度受容体でもあることを初めて明らかにした富永真琴博士 (現岡崎統合バイオサイエンスセンター教授) による日本語の解説が多数ある (温度感受性 TRP チャンネル 漢方医学 Vol.37 No.3 pp.164-175, 2013 <http://tenaca-nips-2016.kenkyuukai.jp/images/sys%5Cinformation%5C20161004145432-C9A0307CDC5BFFBE368042C37301506118242A368CDD5986EDA4A983ED7B8D92.pdf> など)。

問 10) 【正解】 A 【部分点】 B C D G

【解説】 秋に発芽して冬を経たのちに花成（栄養成長から生殖成長への転換）がなされる植物種の場合、冬の間在一定期間の低温を経験することと（春化）、日が長くなることの両方が花成に必要である。すなわち、そのような植物は、低温を経験した期間の長さを記憶するシステムと、1 日中の明期の長さ（日長）を感知する能力を兼ね備えている。春化要求性が強ければ生殖成長への移行に要するのに必要な低温処理期間が長くなるし、日長感受性が強ければ生殖成長への移行に要するのに必要な日長の長さは長くなる。その分だけ開花の時期は遅れることになる。春化要求性を失ってしまえば花成に一定の低温処理期間を必要としないので、本来なら秋に播種される植物であっても、春に播種しても開花へと至る。日長感受性を失うと日が短い頃から生殖成長へと転換できるために、開花は早くなる。

品種ウは低温処理が開花までの日数に影響を及ぼさないことから春化要求性を失っている。品種アは、品種イよりも長い低温処理期間がないと開花が促進されないことから、品種イよりも強い春化要求性をもっており、春に播種しても十分な春化期間がないため開花が遅くなる。品種イは、短日条件下でも花成があまり遅れないので日長感受性をほぼ失っており、秋に播種した場合でも品種アより早生となる。

問 11) 【正解】 C 【部分点】 D

【解説】 浸透圧差 ΔS より膨圧 P が小さければ、細胞に水が流入し、逆に ΔS より P が大きければ、細胞から水が流出する。 ΔS と P が等しければ、水の出入りは釣り合っており、全体としての水の移動はない。ここで考えている気孔が完全に閉じて安定している状態と完全に開いて安定している状態は、いずれも「安定している」ことから孔辺細胞における水の出入りが釣り合っている状態ととらえることができる。したがって、 ΔS_c と P_c 、 ΔS_o と P_o はそれぞれ等しい。気孔が閉じているのは孔辺細胞が萎んで P が低くなっているときで、気孔が開いているのは孔辺細胞が膨らんで P が高くなっているときであるので、 P_c より P_o の方が大きい。これらを総合すると、Cが正しいことがわかる。実際に閉じた気孔が開く際には、孔辺細胞内の K^+ イオン濃度やスクロース濃度が上昇して細胞内浸透圧が高まり、 ΔS が増大して P を上回る結果、孔辺細胞への水の流入が起きる。水の流入により孔辺細胞は膨らんでいくが、細胞壁の伸張が限界に達すると、 P が上昇して ΔS に等しくなり、水の流入が止まる。

クラフォード賞

クラフォード賞は、ノーベル賞（物理学賞、化学賞、経済学賞）と同様に、スウェーデン王立科学アカデミーにより与えられる賞です。生物学関係では、ノーベル生理学医学賞とは補完的で、生態学や進化などの分野に与えられます。これまでの受賞者は以下のとおりです。

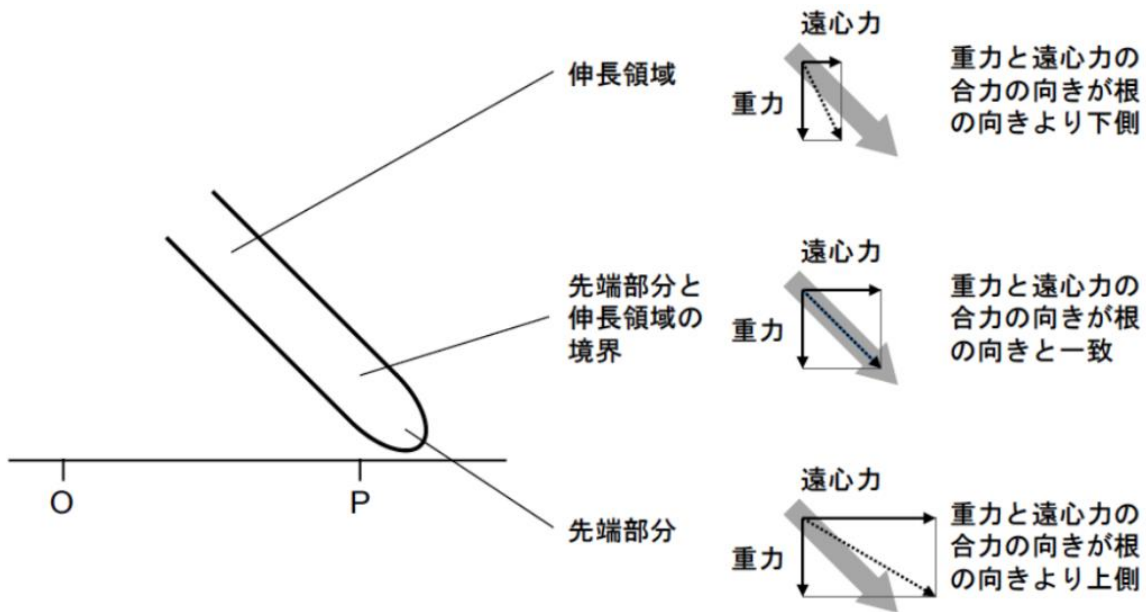
1984年	ダニエル・H・ジャンセン	1999年	ジョン・メイナード=スミス
1987年	ユージン・オダム ハワード・T・オダム		エルンスト・マイヤー ジョージ・C・ウィリアムズ
1990年	ポール・R・エーリック E・O・ウィルソン	2003年	カール・ベンザー
1993年	シーモア・ベンザー W・D・ハミルトン	2007年	ロバート・トリヴァース
1996年	ロバート・メイ	2011年	イルッカ・ハンスキ
		2015年	太田朋子 リチャード・ルウィントン

日本人で唯一の受賞者である太田朋子博士（国立遺伝学研究所名誉教授）は、「分子進化のほぼ中立説の提唱」や「多重遺伝子族の変異と進化に関する理論的研究」などにより、集団遺伝学や分子進化の分野に大いに貢献されました。

問 12) 【正解】 F

【解説】 この実験では、根に作用するのは遠心力と重力との合力である。この合力の向きと根の向きとのずれが、先端部分と伸長領域とで、根の軸に対して反対側になるような条件では、重力感知が先端部分で起きる場合と伸長領域で起きる場合とで、根の屈曲の方向が逆転する。本問の選択肢のうち、このような条件に当てはまるのはFのみであり、Fが正解となる（下図参照）。Fでは、先端部分と伸長領域の境界が、遠心力の大きさが重力に等しい点Pに位置している。この地点では、合力の向きは斜め下方 45°の角度であり、F のように置いた根の向きと一致している。遠心力は回転の軸から遠いほど大きいことから、P よりも外に位置する先端部分では遠心力>重力となって合力の向きは根の向きに対して上側にずれ、一方 P よりも内に位置する伸長領域では遠心力<重力となって合力の向きは下側にずれる。したがって、F の条件においては、先端部分が重力を感知するなら根は元の向きより上側に屈曲し、伸長領域が重力を感知するなら下側に屈曲する。

本問の題材は、1914年に発表されたF.Dewersの研究およびその再評価を行った1989年のK.L.PoffとH.V.Martinの総説による。Dewersのデータは、根の先端に近い部分が主として重力を感知していることを示しており、根冠のコルメラ細胞が重力を感知するという、現在の認識と矛盾しない。



問 13) 【正解】 B 【部分点】 A

【解説】 繁殖のスケジュールは生物種によっておおよそ決まっている。

生存率が高い生物ほど長命である。したがって、①は正しく、②は間違っている。なお、短命な生物は1回あたりの産卵数が多く、長命な生物は1回あたりの産卵数が少ないが繰り返し繁殖をする傾向がある。

繁殖に大きなコストがかかる状況では、繁殖に多く資源を回すほど、生存率が低くなってしまふという関係が生じる。グラフはこのことを示している。したがって、③は正しく、④は間違っている。

繁殖のコストと関係のない要因で生存率が低下する場合、将来の繁殖のために節約した資源が使われずに失われてしまうため、生存率が下がってしまったとしても、年間総産卵数を増やしたほうが有利である。したがって、⑥は正しく、⑤は間違っている。

問 14) 【正解】 E 【部分点】 A F G

【解説】 表層の水は温かく、深層の水は冷たい。有光層では光合成が行われ酸素が供給されるので溶存酸素濃度は高いが、光の届かない層では光合成が行われず、呼吸による酸素の消費が勝るため貧酸素の状態となる。なお、湖沼の透明度が極めて高く、深層まで光が届き光合成が行われる場合には、深層の方が低温なために飽和溶存酸素濃度が高く、溶存酸素濃度は深層でむしろ高くなる。

富栄養湖では、表層に大量の植物プランクトンが発生して光をさえぎるため、深層に光が届かず、光合成の行われない深層は溶存酸素濃度が低くなる。貧栄養湖では植物プランクトンの濃度が低く、深層まで光が届き光合成が行われるため、深層でも溶存酸素濃度は高い。

富栄養湖の表層には貧栄養湖の表層よりも多くの植物プランクトンが発生し光合成を行うので、日中は富栄養湖の方が表層の溶存酸素濃度が高くなる。しかし、光合成が行われない夜間は、植物プランクトンや動物プランクトン、細菌などの多い富栄養湖の方が呼吸による酸素消費量が大きく、溶存酸素濃度はより低くなる。

<出典・参考資料>

『図説 生態系の環境』：朝倉書店

問 15) 【正解】 L 【部分点】 D H

【解説】 出生率や死亡率は個体群密度に依存している場合がある。たとえば、密度が非常に高くなると、1 個体あたりの餌が不足し、死亡率は上昇し、出生率は低下する。密度が極端に低くなると、交配相手に出会う可能性が低くなり、出生率は低下する。また、共同で狩りをする動物や共同で育児をする動物にも低密度は影響を与える。

1 個体あたりの増加率が正であれば個体数は増加し、負であれば個体数は減少することが期待される。したがって、(イ)は②である。

1 個体あたりの増加率が 0 のとき、個体数はほとんど変化しないことが期待されるが、その個体数が安定的に維持されるかどうか、確認する必要がある。

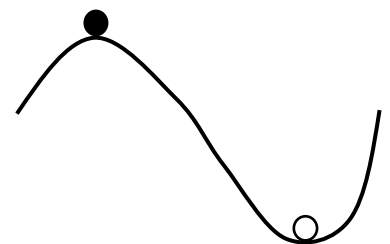
個体群密度が 10 を少しでも超えると、増加率は負になり、個体数は減少することが期待される。一方、個体群密度は 10 を少しでも下回ると、増加率は正になり、個体数は増加することが期待される。すなわち、10 の個体群密度は安定的に維持されることが期待される。したがって、(ウ)は③である。

個体群密度が 0.1 を少しでも下回ると、増加率は負になり、個体数は減少することが期待される。一方、個体群密度が 0.1 を少しでも超えると、増加率は正になり、個体数は増加することが期待される。すなわち、0.1 の個体群密度は不安定な状態にあり、個体数は増加することもあれば、減少することもある。したがって、(ア)は④である。

平衡

増加量と減少量が等しく、増加も減少もしない状態を「平衡」という。たとえば、ある代謝産物が分解される量と産生される量が等しいと、この代謝産物の量は変化しない。この状態は平衡であるといえる。問 15 では、個体密度が 0.1 と 10 のとき、この密度は平衡である。

平衡は、安定的に平衡状態が維持できるかどうかで、「安定平衡」と「不安定平衡」に区別される。右図のような地形があり、その上にボールを置いたとしよう。斜面に置いた場合、ボールは低い方に転がっていく。谷底に置いた場合 (○)、ボールは動かない。すなわち、安定平衡である。山頂に置いた場合 (●)、ちょっとしたきっかけでボールは右下か左下に転がっていく。すなわち不安定平衡である。問 15 では、個体密度が 10 の状態が安定平衡であり、個体密度が 0.1 の状態が不安定平衡である。



問 16) 【正解】 A 【部分点】 E G

【解説】昆虫の求愛行動の問題である。ショウジョウバエの交尾行動にはいくつかの段階があり、求愛ソングは最終段階である。雄が発する求愛ソングは、雌が同種の雄であることを確認する最終手段となっている。(キャンベル生物学, 第9版, p. 1298 参照)

翅を切除した雄の交尾率は低いが、録音した求愛ソングを聞かせると交尾率が格段に回復することから、求愛ソングは求愛行動の重要な要素である (①) と推測できる。

実験Ⅱで、交尾率は非常に低いが、0 ではない。ここで問題になるのは、翅を 90% 以上切除すると求愛ソングがなくなるかどうかということである。翅が非常に短くても、微量だが求愛ソングが出ている可能性がある。もし翅を 90% 以上切除すると求愛ソングが完全になくなると仮定すると、「求愛ソングがない場合、雄は交尾できるが、その可能性は低い」(④) ことになる。もし翅が非常に短くても、微量だが求愛ソングが出ていると仮定すると、「求愛ソングがない場合、雄はまったく交尾できない」(③) 可能性もある。この実験結果からだけでは、③が正しいのか、④が正しいのか、推測できない。

雌は明確に正常な雄と翅を切除した雄を区別しているので、交尾するかどうかの最終決定権は雌にある (⑤) と推測できる。

なお、正常な雄に対する雌の交尾率が 37.9% となっているが、これは 15 分以内に交尾した割合であり、長時間 (2 時間以上) 経つとほぼ 100% の雌は交尾する。

問 17) 【正解】 K 【部分点】 J L

【解説】ハーディ・ワインベルグの法則にしたがうので、劣性突然変異遺伝子の頻度を p とすると白い花を咲かせる劣性突然変異遺伝子ホモ個体の頻度は $p^2=0.01$ となる。よって、 $p=0.1$ で 10% となる。集団 3 に流れつく集団 1 由来の種子の割合を x とすると集団 3 に流れつく集団 2 由来の種子の割合は $1-x$ となる。すると、集団 3 の白い花を咲かせる個体の頻度は、 $0.01x+0.81(1-x)=0.49$ となり、 $0.81-0.8x=0.49$ となる。この式を解くと、 $x=(0.81-0.49)/0.8=0.32/0.8=0.4$ で 40% となる。野生型対立遺伝子のホモ接合体：ヘテロ接合体：劣性対立遺伝子のホモ接合体の頻度は集団 1 で 0.81 : 0.18 : 0.01、集団 2 で 0.01 : 0.18 : 0.81 となる。両集団ともヘテロ接合体の頻度は 0.18 なので、集団 3 においてもヘテロ接合体の頻度は 0.18 となる。(または $0.18 \times 0.4 + 0.18 \times 0.6 = 0.18$ と考える。) したがって、赤い花を咲かせる個体の中でヘテロ接合体である個体の割合は $0.18/(1-0.49) \approx 0.353$ で約 35% となる。

(補足) 集団 3 がハーディ・ワインベルグの法則にしたがうとすると、劣性の対立遺伝子頻度は 0.7 であることから、 $0.1x+0.9(1-x)=0.7$ で $x=0.25$ 、および赤い花を咲かせる個体の中でヘテロ接合体である個体の割合を $2 \times 0.3 \times 0.7 / (1-0.49) \approx 0.823$ と考えるかもしれない。しかし集団 3 はハーディ・ワインベルグの法則にしたがうとはかぎらないので、これは誤りである。

「優性、劣性」について

日本遺伝学会は、「優性、劣性」の代わりに「顕性、潜性」を使用するよう、提言していますが、本試験では教科書等でこの変更がなされるまで「優性、劣性」をもちいることにしました。以下は、日本遺伝学会による用語変更の趣旨説明です。そのまま掲載します。

「優性、劣性」は遺伝学用語として長年使われていたが、優・劣という強い価値観を含んだ語感に縛られている人たちが圧倒的に多い。疾患を対象とした臨床遺伝の分野では「劣性」遺伝のもつマイナスイメージは深刻でさえある。一般社会にもすでに定着している用語ではあるが、この機会に、歴史的考察もしながら、語感がより中立的な「顕性、潜性」に変更することになった。

問 18) 【正解】 D

【解説】他の形質は遺伝子型の間で異なるため、各遺伝子型の生涯繁殖成功率の相対値（適応度）は、これら生活史形質の相対値を掛け合わせればえられる。これにより、実験条件下でこの集団に自然選択がどのようにはたらくかがわかる。

本問題の場合には、ヘテロ接合体の適応度がもっとも高い超優性の状態にある。超優性の場合には、ヘテロ接合体が 100% にはならず、無作為交配により 2 種類のホモ接合体も代々生じるため、3 種類の遺伝子型が一定の頻度で共存し続けることになる。

問 19) 【正解】 B 【部分点】 A

【解説】最近、日本のメダカは、ミナミメダカ *Oryzias latipes* とキタノメダカ *Oryzias sakaizumii* の 2 種に分けられた。水槽には、ミナミメダカの雌雄各 1 匹とキタノメダカの雌雄各 1 匹の合計 4 匹が入れているのだから、そこで起こる交配には、♀ミナミメダカ×♂ミナミメダカ、♀ミナミメダカ×♂キタノメダカ、♀キタノメダカ×♂ミナミメダカ、♀キタノメダカ×♂キタノメダカの 4 つの組合せが考えられる。

図 1 の電気泳動像では、核遺伝子領域とミトコンドリア遺伝子領域では長さは異なっているが、ミナミメダカ、キタノメダカ、胚 1、胚 2 からそれぞれ同じ長さの DNA 断片が増幅されたことがわかる。

制限酵素処理後の図 2 の電気泳動像で、バンドが複数となる場合には制限酵素で DNA 断片が切断されたことになる。切断部位が 1 カ所なら、DNA は 2 つの断片に切断され、2 つのバンドが確認される。切断部位が 2 カ所なら、DNA は 3 つの断片に切断され、3 つのバンドが確認される。ただし、切断された DNA の長さが近い場合には、バンドが重なって区別できないこともある。

核遺伝子は両親から受け継がれる (AA×BB→AB) ので、A と B で DNA 断片に対する制限酵素の切断場所が異なれば、電気泳動のバンドは、両親のバンドが重なったものとなる。図 2 の核遺伝子部分をみると、ミナミメダカでは 2 つのバンドとなっているので、PCR 産物の DNA 断片は制限酵素で 1 カ所切断されて 2 つになったことがわかる。キタノメダカではバンドは 1 つで図 1 の位置と同じなので、PCR 産物の DNA 断片は制限酵素で切断されなかったことがわかる。胚 1 はミナミメダカのパターンのみがみられるので、胚 1 は♀ミナミメダカ×♂ミナミメダカの組合せで生じたことがわかる。胚 2 はミナミメダカとキタノメダカのパターンが重なったものとなっていて、両者の雑種であることがわかる。

ミトコンドリア遺伝子は母親からのみ受け継がれるので、電気泳動像のパターンは母親のものと同じになる。

図 2 のミトコンドリア遺伝子部分をみると、胚 1 はミナミメダカのパターンと同じで、胚 2 はキタノメダカのパターンと同じである。このことから、胚 1 の母親はミナミメダカであり、胚 2 の母親はキタノメダカであることがわかる。つまり、胚 2 は♀キタノメダカ×♂ミナミメダカの雑種であることになる。

ヒトを含めた哺乳類では、子供には母親のミトコンドリアしか伝わらない。精子のミトコンドリア DNA は受精後に分解されてしまい、ミトコンドリア DNA は子供に伝わらない。メダカでも同様な遺伝様式がみられる。

問 20) 【正解】 F 【部分点】 C D E

【解説】ミトコンドリア DNA は母系遺伝する。常染色体遺伝の場合、子どもは父と母の染色体を 1 つずつ受けつぐ。Y 染色体は男性のみに存在し、男性は X 染色体を 1 つしかもたないので、息子は母から X 染色体を受けつぎ、娘は父と母から 1 つずつ X 染色体を受けつぐ。したがって、それぞれの染色体を構成する DNA の塩基配列も受けつがれる。

家族 I では、息子は母から、娘は父と母の両方の塩基配列を受けついでいる。ミトコンドリア、Y 染色体、常染色体遺伝はこの条件に合わず、適合するのは X 染色体による遺伝である。一方、家族 II では、息子および娘ともに母の塩基配列を受けつぎ、父の塩基配列はみられない。そのため、母系遺伝であることからミトコンドリア DNA の塩基配列を示している。父と母では、2 ヶ所で DNA の塩基配列が異なっている。TCAGGACCGATCATGCG（下線部）。

問 21) 【正解】 H 【部分点】 G I

【解説】 前半は X 染色体連鎖の問題，後半は集団遺伝の問題である。

男性は父親から Y 染色体を受け継ぐので，男性が赤と緑が区別できなくなるのは，母親から X 染色体にある原因遺伝子を受け継いだときのみであり，女性が赤と緑の区別ができなくなるのは，父親と母親からともに原因遺伝子を受け継いでホモ接合体となったときである。そこで，個体 2 の母親は，赤と緑が区別できなくなる原因遺伝子についてヘテロ接合体である。女性 1 はヘテロ接合体の母親から，1/2 の確率で原因遺伝子を受け継ぐ，すなわちヘテロ接合体になる可能性がある。母親の情報がない場合，母親の生殖細胞は遺伝子頻度の確率で原因遺伝子をもつことになる。この場合，X 染色体を 1 つもつ男性で 1/20 の確率で赤と緑を区別できない表現型が現れることから，この遺伝子頻度は $1/20 = 0.05$ となる。

(ア) 母親 (個体 1) がヘテロ接合体である確率は 1/2，ヘテロ接合体の女性から原因遺伝子をもつ X 染色体が息子 (個体 3) に遺伝する確率は 1/2 である。そこで $(1/2)^2 = 1/4 = 0.250$ となる。

(イ) 個体 4 の父親は原因遺伝子をもっていないので，父親から X 染色体を受け継ぐ個体 5 がホモ接合体になることはなく，確率は 0 となる。

(ウ) 母親からのみ X 染色体を受け継ぐ個体 5 が原因遺伝子をもつ確率は，原因遺伝子の頻度と等しく，0.050 となる。

(エ) 個体 6 は，父親の個体 2 から必ず原因遺伝子を受け継ぐ。ホモ接合体になるのは，母親から原因遺伝子を受け継いだ時であり，その確率は，遺伝子頻度と等しく，0.050 となる。

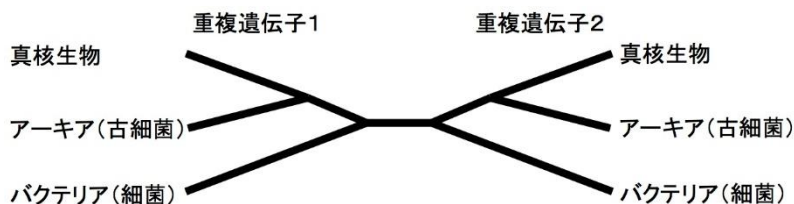
G と I を選択した場合には，X 連鎖遺伝を理解しているものとして部分点を与える。

問 22) 【正解】 B 【部分点】 A F

【解説】 この題材は優れた発想ながらあまり知られていないので，誤答を判断して消去法で絞り込んで正答を選ぶことを期待した。

間違いやすいのは A であるが，分子系統解析における系統樹の枝の長さは突然変異率の違いなどによる進化速度の違いも反映されるので，分岐してからの時間の長さに比例するとはかぎらないことから誤答である。偽遺伝子が生じるのは偶然性に大きく左右されるため，A と同様に系統関係には相関しないので，C は誤答である。D の絶滅した生物の化石から DNA をえることは，ドメインの祖先のような古い年代についてはいくら技術が進歩しても不可能である。もっとも古い生物の化石が原核生物であっても化石からはバクテリアかアーキアかは識別できないので，E は誤答となる。F のように比較する遺伝子をいくら増やしても，A と同じことでゲノム全体の進化速度はわからないため，分岐順序は特定できない。

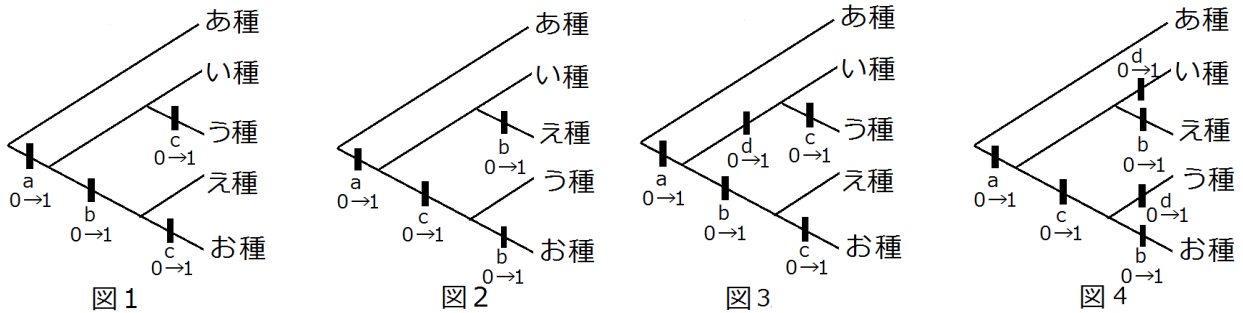
共通祖先で遺伝子重複が起きていた遺伝子であれば，3つのドメインの分岐より先に遺伝子の系統関係が分岐していたわけであるから，そのような重複遺伝子は相互に外群となる。外群があれば根を特定することで内群の分岐順序を決めることができる。実例としては，遺伝子重複によると思われる 2つの類似遺伝子がいずれのドメインにもみつかったポリペプチド伸長因子の遺伝子ファミリーをもちいて系統推定したところ下図のような無根系統樹がえられ，そこからドメインの分岐順序が推定された (「分子進化」宮田隆 編 共立出版 1998 年 第 11 章)。重複遺伝子 2 を外群とすることで重複遺伝子 1 について分岐順序を特定することができ，逆に重複遺伝子 1 を外群とすることで重複遺伝子 2 について分岐順序を特定することができる。重複遺伝子 1 と 2 で同じ分岐順序であったことが系統推定の信頼性を高くしてもいる。



問23) 【正解】E

【解説】形質dを、い種・う種が共有し、なおかつ、え種・お種が共有すれば、図1を支持することになる。これにあてはまるのはEであり、簡単に正解を選ぶことができる。

生物の系統関係を調べるのに、いくつかの形質に注目し、形質の変化の最少なものを選ぶ方法があり、最節約法とよばれる。問題では、い種～お種の系統関係を調べるために、あ種を外群としてもちい(外群比較)、形質a～形質cの形質状態の変化に注目している。この場合、変化の総数の最少は4で、図1と図2に書き込むと次のようになる。形質dの形質状態が選択枝Eのデータの場合、図1の系統樹は図3のようになり、変化数は5となるが、図2の系統樹では図4のように変化数は6となり、図3と図4では図3の方が最節約の系統樹となる。い種・う種、またはえ種・お種のみが共有する形質なら、変化数は1増えるだけだが、他は2以上増えることになる。



なお、これまでは、形質aについて、5種の共通祖先では形質状態は0であり、い種～お種の共通祖先に達するまでに0→1の変化があったとして説明してきた(図1～4)。もし5種の共通祖先の形質状態が1であった場合、あ種に達する枝にだけ1→0の変化があったと考えられる。どちらの場合も、形質aについては、変化は1回あったとみなされ、系統樹に何の影響も与えない。

ある形質について、調べたすべての種で形質状態が同じであった場合、この形質は系統樹作成に何の情報も与えない。形質aのように、1種だけが他と異なっていた場合、この問題で取り上げた通常最節約法では最小変化数は1となり、この形質も系統樹作成に何の情報も与えない。

表紙の写真(ヤマボウシ: 2016年6月7日, 千葉県柏市にて撮影)

ヤマボウシ(山法師)はミズキ科の植物で本州、四国、九州の山間部に自生していますが、街路樹や公園樹としても親しまれています。5月～7月に開花し、花言葉は、友情です。ヤマボウシに少し似ているハナミズキは、ヤマボウシの近縁種ですが、北アメリカ原産であり、アメリカヤマボウシともよばれています。