

# 日本生物学オリンピック 2025

## 予選問題

2025年7月13日（日）

〈正解・解説〉



国際生物学オリンピック日本委員会



問1) 【正解】 D 【部分点】 (配点の3/10) B C H L (配点の1/10) A F G J K

【解説】 酵素 X が触媒機能を失うと中間産物ができなくなるので赤色の色素も薄黄色の色素も合成できない。一方で黄色の色素は他の色素に変わることがないので全体として黄色の色素のみとなる (①)。

酵素 Y の活性が低くなると赤色の色素の合成量は少なくなる。一方でより多くの中間産物が増えることにより薄黄色の色素の合成が増えると考えられる (⑤)。

酵素 Z の活性が高くなると中間産物から薄黄色の色素の合成が増える。一方でより少ない中間産物から合成することになる赤色の色素の合成量は少なくなる (⑦)。

問2) 【正解】 E 【部分点】 (配点の3/10) A B

【解説】 コハク酸脱水素酵素 (コハク酸デヒドロゲナーゼ) はクエン酸回路 (TCA サイクル) に関係する酵素で、コハク酸からフマル酸への脱水素反応を触媒する。この酵素には補酵素 FAD が結合しており、水素受容体としてはたらく。反応液中にメチレンブルー (青い色素) を加えておくと、FADH<sub>2</sub> の水素はメチレンブルーに渡され、還元型の無色となる。したがって、反応の進行に伴い反応液の色は青色から無色に変化する。これに要する時間を測ることによって、酵素活性の有無、強弱および酵素活性に及ぼす種々の因子の影響を比較判定することができる。ただし還元型のメチレンブルーは、酸素によって直ちに酸化され、青色に戻るため、反応は嫌気的条件下で行わなければならない。この目的のために、ツンベルク管がよく用いられる。

上記の原理より、ツンベルク管 1 では、コハク酸から引き抜かれた水素が FAD 経由でメチレンブルーに渡り、脱色されたと考えられる。よって①は正しい。またツンベルク管 4 では、還元型のメチレンブルーと空気中の酸素が反応したため、青色に戻ったと考えられる。したがって④は誤り。一般的にタンパク質は温度の上昇により高次構造が破壊され、不可逆的な変化を起こして活性を失う (熱変性)。本実験においても色調が全く変化しないことから、コハク酸脱水素酵素が熱変性して失活したことがわかる。よって②は正しい。本酵素は、コハク酸と化学構造の似ているマロン酸によって競争阻害を受けるが、競争阻害の場合、阻害剤は酵素の活性部位に可逆的に結合することによって機能し、K<sub>m</sub> (ミカエリス定数) の増大を引き起こす。したがって阻害剤存在下で反応速度は低下するが、完全には阻害されない。今回の結果も若干の反応の進行が観測されており、③は誤り。

問3) 【正解】 G 【部分点】 (配点の3/10) K (配点の1/10) H J

【解説】 PCR で増幅した DNA 断片を制限酵素で切断する際、目的遺伝子の塩基配列を認識する酵素は使用することができない。したがって、プライマーに付加する配列は、SphI, HindIII, EcoRI 以外である。ベクター側に、DNA 断片側と同じ制限酵素を使おうとすると、XbaI しか使えない。両者を XbaI で処理することでも、ベクターに目的遺伝子を挿入することはできる。しかし、2分の1の確率で、正しい転写方向とは逆向きに挿入されてしまう。その後の確認の操作によって正しく挿入されたものを選ぶことも可能なため、選択肢 K には部分点を付けた。

リガーゼを使った結合反応を行う場合、必ずしも同じ制限酵素で切断した DNA 同士である必要はない。切断によって形成される粘着配列 (突出した 1 本鎖 DNA 部分) が同じであれば、認識配列が異なる制限酵素でも構わない。表をみると、EcoRI と MfeI が、認識配列全体は異なるが、切断後に形成される粘着配列が、3'-TTAA-5'で同じである。したがって、目的配列の増幅に使用するプライマーに MfeI の認識配列を付加することで、3'-TTAA-5'の粘着配列をもつ DNA 断片を得ることができる。ベクター側は、EcoRI を使って切断することで同じ粘着配列をもつことになる。

正しい方向で挿入するためには、異なる 2 種類の制限酵素を使えばよい。XbaI が使用できるので、挿入 DNA 断片側では MfeI と XbaI を使い、ベクター側では EcoRI と XbaI を使えばよい。ベクターのプロモーターとオペレーター的位置を考えると、目的遺伝子上流側であるプライマー 1 に MfeI、下流側であるプライマー 2 に XbaI の認識配列を付加すればよい。

また、一見すると HindIII と SacI の粘着配列が同じようにみえる。しかしながら、DNA の方向をみると、HindIII は

5' A... であり、SacI は 5' GAGCT すなわち 5' ...C 3' であるので、相補的に結合しないことがわかる。  
3' TTCGA 3' C... 3' TCGAG 5'

なお、選択肢 J の XbaI と SacI の組合せも、目的遺伝子が挿入された環状の DNA を作成することができる。選択肢にはないが、XbaI と MfeI の組合せなども可能である。しかしながら、これらの場合、複製開始点あるいはプロモーターとオペレーターを含まない DNA になるため、その後の宿主細胞による DNA の増幅が起これず消失してしまう。

問4) 【正解】 F 【部分点】 (配点の 3/10) B E H (配点の 1/10) A D G

【解説】 脊索動物門に分類され、脊椎動物に近縁な無脊椎動物であるホヤ類は、胚への遺伝子導入が容易であり、ゲノムサイズが小さく染色体上の遺伝子と遺伝子の間隔が比較的せまいため、遺伝子近傍の遺伝子発現調節領域（プロモーターやエンハンサー）の機能解析が簡便に行えるモデル生物として、遺伝子発現調節の研究に用いられている。受精卵から一晩でさまざまな組織が分化した幼生へと発生し、この問題のように、遺伝子上流領域をクローニングして GFP などの蛍光タンパク質の遺伝子に連結して、ホヤ胚に導入することで、遺伝子発現調節に必要な DNA 領域のはたらきを調べることができる。組織特異的な遺伝子発現の調節には、多くの場合、発現する組織での転写促進と、本来発現しない組織での転写抑制の両方が関与している。DNA①+GFP は遺伝子 X と同様に脳だけで発現を示すのに対して、上流領域 P を含まない DNA②+GFP では、表皮と筋肉でも GFP の発現がみられることから、上流領域 P には表皮と筋肉で遺伝子 X の発現を抑えるはたらきがあると考えられる。上流領域 Q を欠いた DNA③+GFP では脳での発現がみられないことから、上流領域 Q は遺伝子 X が脳で発現するために必要なシス調節配列を含むと考えられる。一般に真核生物の遺伝子の転写開始点近傍の上流領域には RNA ポリメラーゼが結合し、プロモーターとしてはたらくことが知られている。上流領域 R のはたらきの詳細はこの問題に示された実験だけではわからないが、DNA③+GFP は表皮で発現することから、上流領域 R には遺伝子 X のプロモーターが含まれていると考えられる。

問5) 【正解】 B 【部分点】 (配点の 3/10) A C D E H I

【解説】 二糖類は 2 分子の単糖から水 1 分子が取れるグリコシド結合によって結合したもので、含まれる水分子を除くと炭素しか残らない。よって吸収される酸素数と排出される二酸化炭素のモル数は等しくなり、呼吸商は 1 となるので、①は正解。炭水化物は呼吸商が一般に 1 となる。コレステロールは計算すると  $(C_{27}H_{46}O + 38O_2 \rightarrow 27CO_2 + 23H_2O)$  なので、呼吸商は  $27/38$  (およそ 0.71) ほぼ 0.7 となるので②は間違い。飽和脂肪酸は不飽和脂肪酸に比べて H が多く、酸素をより消費して水ができるので呼吸商は小さくなるので③は正しい。④は計算すれば  $(C_2H_6O + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O)$  なので呼吸商は  $2/3$  (およそ 0.67) 1 より小さいので間違い。タンパク質の窒素は哺乳類では尿素や尿酸として排出されるので⑤は間違い。

問6) 【正解】 F 【部分点】 (配点の 3/10) B E H (配点の 1/10) A D G

【解説】 問題中の図は呼吸生理の基本的な法則を示したものである。実線で示された換気量と排出される二酸化炭素量の間には反比例の関係があり、metabolic hyperbola (代謝双極線) とよばれている。この関係は換気量と取り込まれる酸素量の間にも成り立っている。一方、点線で示された関係は、脳幹部にある呼吸中枢の特性を示しており、おもに血液中の二酸化炭素量の増加に反応して呼吸数と深さを増加させる。ある程度以上の二酸化炭素濃度に対してはほぼ直線的に反応して呼吸量を増やす。この 2 本の線の交点が、通常のを呼吸しているときに二酸化炭素の排出量と呼吸量がバランスしたところで、自然に呼吸している状態となる。

①と②については毎分換気量 20 L あるいは 40 L で比較すると、運動時には排出される二酸化炭素量が 4 倍になっていることがわかる。ここで行っている運動はいわゆる有酸素運動であり、排出される二酸化炭素量は消費される酸素量と比例すると考えられる。③、④は、赤の点線の傾きが青に比べて大きいことから、運動時は二酸化炭素濃度の上昇に対してより鋭敏に中枢が反応するようになっていることがわかる。⑤、⑥は、実線と点線の交点を比較することになる。やや読み取りづらいが安静時の呼吸量は 7~8 L/min.程度であり、運動時は 25 L/min.程度であるから、およそ 3 倍になっている。

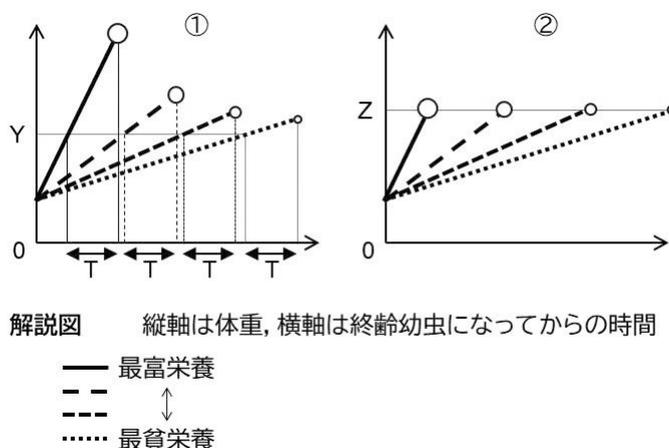
通常の呼吸を行っている場合には、ここで示されたような血液中の二酸化炭素濃度に応じた呼吸量の調節がなされているが、高地などで気圧が大きく下がった場合や酸素濃度が薄い場合には、血液中の酸素濃度の低下が頸動脈などに存在するセ

ンサーで感受されて呼吸量を増やす制御も行われる。

この実験では、実験参加者はかなり苦しい思いをすることとなる。測定1では、グラフの右側の領域では息苦しさに耐えながら意識的にゆっくりと浅い呼吸を行わなければならない、逆に左側の領域では過呼吸のリスクを伴う。測定2で二酸化炭素を加えた気体を吸うことは当然に息苦しさを覚えることとなる。さらにその状態でサイクルマシンを漕ぎ続けなければならない。研究倫理の観点から、このような実験では被験者に対してこれらのリスクを十分に説明した上で、実験参加の同意を得る必要がある。実際に、この問題のデータの元になった研究（「持久性トレーニングによる運動時換気応答の制御には中枢性（脳）の適応メカニズムがどの程度関与するのか？」宮本忠吉他. デサントスポーツ科学 Vol.28, p.127, 2006. [https://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/textiles/db/seeds/descente28\\_15\\_miyamoto.pdf](https://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/textiles/db/seeds/descente28_15_miyamoto.pdf)）でも、参加者にあらかじめ実験内容を説明し、実験参加の意志を確認して同意書に署名する手続きをとっている。

問7) 【正解】E 【部分点】(配点の3/10) F (配点の1/10) A

【解説】問題文にしたがって、終齢幼虫期を通じての成長の様子をグラフに描いてみると、解説図の①のようになる。最終的な丸だけを表示したのが図3のEである。



本問のモデルは、内分泌系による体サイズ制御に関する古典的な研究材料の1つ、タバコスズメガ *Manduca* である。ある一定の体重を超えた終齢幼虫は絶食させても（つまりそれ以降の成長を止めても）蛹化が阻害されないことが明らかにされ、そのような体重の閾値が **critical weight** と定義された。その後、この **critical weight** の達成が幼若ホルモン (juvenile hormone, 本問の X) の産生停止とリンクすることがわかった。本問の体重 Y である。興味のある方は Nijhout らの美しい原著論文 1, 2 を参照されたい。

1. Nijhout and Williams 1974, "Control of moulting and metamorphosis in the tobacco hornworm, *Manduca sexta* (L.): growth of the last-instar larva and the decision to pupate." J. Exp. Biol. 61, 481-491.
2. Nijhout and Williams 1974, "Control of moulting and metamorphosis in the tobacco hornworm, *Manduca sexta* (L.): cessation of juvenile hormone secretion as a trigger for pupation." J. Exp. Biol. 61, 493-501.

幼虫の摂食停止を制御する機構は昆虫によって異なる。たとえば解説図の②に示すように、終齢幼虫の体重が一定の値 Z に達するとただちに摂食を停止する昆虫もいる。

【補足】解説図の①から E が正解であることは明確であるが、ここではもっと詳しくみていくことにする。数学的な取り扱いが必要であるが、興味のある方は読んでもらいたい。

この問題では、体重 (m) と摂食停止までの時間 (t) の関係は

$$m = a + bt \quad (1)$$

で表すことができる。図1に示されているように、Xの産生が止まる体重(Y)は

$$Y = a + b(t - T) \quad (2)$$

となる。bは餌の濃度に依存するが、(2)から得た  $b = (Y - a)/(t - T)$  を(1)に代入して、

$$m = a + \frac{(Y - a)t}{t - T} \quad (3)$$

を得る。a, Y, Tは定数であることから、mはtのみに依存する。Y > a, t > Tの範囲で、

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{(Y - a)T}{(t - T)^2} < 0, \quad \frac{d^2m}{dt^2} = \frac{2(Y - a)T}{(t - T)^3} > 0$$

となるので、mは下に凸の減少関数である。下表に具体例を示す。

表：3行目の数値は2行目の式にa=1, Y=2を代入したものである

t	T	1.5T	2T	3T	4T	5T	...	∞
m	∞	a + 3(Y - a)	a + 2(Y - a)	a + 3(Y - a)/2	a + 4(Y - a)/3	a + 5(Y - a)/4	...	Y
		4.00	3.00	2.50	2.33	2.25	...	2.00

#### 問8) 【正解】J 【部分点】(配点の3/10) C D

【解説】神経繊維の興奮伝導速度は、繊維の直径と髄鞘の有無によって大きく左右される。一般に径が大きい繊維ほど(断面積が大きいほど)伝導速度は高まり、直径と伝導速度はほぼ比例関係にある。ネコの有髄神経繊維では、神経繊維の直径が2倍になれば興奮伝導速度も約2倍になっている。しかし、イカの無髄神経繊維では、直線が原点を通っていないため、直径と伝導速度は比例関係からずれている。したがって、①は誤り。また神経繊維の直径については、プロットされたデータ点より、ネコの有髄神経の直径は約2~10μm、イカの無髄神経の直径は約20~800μmであることが読み取れる。よって②は誤り。図より直径2μmのネコの有髄神経の伝導速度は約15~20m/秒と読み取り、これは直径400~500μmのイカの有髄神経の伝導速度に相当する。よって③は正しい。同じく図より、直径5μmのネコの有髄神経の伝導速度は約45~50m/秒と読めるので、反射弓(たとえばネコの脚→脊髄→脚の長さ)が1mの場合、興奮の伝導にかかる時間は1/45=0.022秒から1/50=0.020秒程度と求められる。よって④は正しい(実際はシナプスの伝達速度が加わるため、これよりも時間を要する)。以上の計算より、有髄神経は細い神経繊維でも非常に早い伝導速度を得ることができることがわかる。なお有髄神経では、シュワン細胞の細胞膜が軸索の周囲に幾重にも巻き付いて髄鞘(ミエリン鞘)を形成している。1~2mmごとに髄鞘のない部分(ランビエ絞輪)が存在し、髄鞘の部分は電気抵抗が増大するため、活動電位は絞輪から絞輪へとジャンプするように伝導する(跳躍伝導)。この構造が、神経軸索の興奮伝導速度の著しい増大を生みだしている。

#### 問9) 【正解】I 【部分点】(配点の3/10) C G H L (配点の1/10) A B F J K

【解説】メスが放出する性フェロモンは同種のオスを誘引する。条件がよければ、1~2km離れたオスを誘引することもある。大量捕獲法では、メスと交尾する前に合成フェロモンを発するトラップを設置し、オスを捕獲する(Aは②である)。交信かく乱法では、合成フェロモンをメスの周辺の空气中に散布し、メスの居場所がわからなくし、交尾を妨げる(Iは①で

ある)。交信かく乱法では、合成フェロモンを広範囲に散布するので、フェロモンがとどまりやすく風の影響が少ない平坦地が、理想的である（ウは⑤である）。

なお、カミキリムシ類には、メスが放出するフェロモン（メスフェロモン）だけでなく、オスが放出するフェロモン（オスフェロモン）も知られている、メスフェロモンはオスを誘引するが、オスフェロモンはメスだけでなくオスも誘引する。メスフェロモンは明らかに性フェロモンであるが、オスフェロモンはこれとは異なっており、集合・性フェロモン（あるいは、集合フェロモン）とよばれている。

[参考文献] 若村定男（1993）「性フェロモン防除法の適用条件」 植物防疫 47：499—502。

石川幸男（2022）「昆虫の性フェロモン研究とその害虫管理への応用」 におい・かおり環境学会誌 53：25—36。

問10) 【正解】K 【部分点】(配点の3/10) E G I L (配点の1/10) A C F H J

【解説】個体数を推定する方法の1つである糞粒法の問題である。問題文にしたがっていけば、解ける問題である。調査日に実際に存在した糞粒数を  $X$  とすると、糞粒の発見率  $b$  は  $b = M/X$  となるので、 $X = M/b$  となる。また、 $X$  は個体数  $N$ 、1 個体が排泄する糞粒数  $h$ 、糞粒の平均寿命  $(1/c)$  の積になるので、 $X = hN/c$  となる。したがって、 $M/b = hN/c$  が成り立ち、これを解くと

$$N = \frac{cM}{bh}$$

がえられる。 $c$  と  $N$  は比例関係にあり、 $c$  を過小評価すると  $N$  を過小評価する。

この問題を解くのに必要ではないが、問題文にある「糞粒の平均寿命（日数）は消失率の逆数  $(1/c)$  であること」が気になる受験生も多いと思われるので、ここで詳しく解説する。

時間  $t$  において、糞粒が消失せずに存在している確率を  $f(t)$  とする。消失率  $c$  が一定であることは、

$$\frac{df(t)}{dt} = -cf(t)$$

を意味している。この微分方程式を解くと、糞粒の時間的変化は

$$f(t) = e^{-ct}$$

で表すことができる。糞粒の平均寿命は

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-ct} dt = \frac{1}{c}$$

となる。

確率を勉強した受験生は、次のように考えてもよい。 $f(t)$  は確率分布ではなく、

$$p(t) = \frac{df(t)}{dt} = ce^{-ct}$$

が確率分布である。これは、指数分布とよばれている。したがって、糞粒の平均寿命は

$$\int_0^{\infty} tp(t)dt = \int_0^{\infty} cte^{-ct}dt = \frac{1}{c}$$

となる。

[参考文献] 池田浩一, 岩本俊孝 (2004) 「糞粒法を利用した個体数推定の現状と問題点」 哺乳類科学 44 : 81-86。

問 11) 【正解】 G 【部分点】 (配点の 3/10) A D H I

【解説】 植物にも、光や栄養塩類などの資源をめぐる種間競争があり、一般に競争的排除が起きて、生育する種数は減少する。しかし、植食動物の被食により密度が下がることで、種間競争が弱まり、より多くの種が共存できる場合がある。

この問題では、被食圧 0 (放牧なし) の区画は、植物がウシに食べられることがまったくないため、植物同士の種間競争が激しく、競争的排除が強くはたらいた結果、種数は減少したと推測される。軽い被食 (被食圧 1) や中程度の被食 (被食圧 2) の区画では、競争力の強い種がウシに食べられて減ったことで、競争力の弱い種が生育可能になり、植物の種数は全体として増加したと推測される。

被食圧がもっとも強い 4 の区画では、ウシがよく食べる好みの植物種を食べ尽くし、あまり好まない種も食べざるをえないようになるにつれ、何種かの植物が消滅し、生育する植物の種数が減少したと推測される。

< 出典・参考資料 > 『生態学—個体から生態系へ 原著第四版』: 京都大学学術出版会

問 12) 【正解】 E 【部分点】 (配点の 3/10) B D F L

【解説】 ABC モデルでは、遺伝子が欠損すると次表のような結果が予想される。

	領域 1	領域 2	領域 3	領域 4
野生型	A 遺伝子の活性化 がく片	A 遺伝子と B 遺伝子の活性化 花卉	B 遺伝子と C 遺伝子の活性化 雄しべ	C 遺伝子の活性化 雌しべ
A 遺伝子のみが欠損している変異体	C 遺伝子の活性化 雌しべ	B 遺伝子と C 遺伝子の活性化 雄しべ	B 遺伝子と C 遺伝子の活性化 雄しべ	C 遺伝子の活性化 雌しべ
B 遺伝子のみが欠損している変異体	A 遺伝子の活性化 がく片	A 遺伝子の活性化 がく片	C 遺伝子の活性化 雌しべ	C 遺伝子の活性化 雌しべ
A 遺伝子と B 遺伝子が欠損している変異体	C 遺伝子の活性化 雌しべ	C 遺伝子の活性化 雌しべ	C 遺伝子の活性化 雌しべ	C 遺伝子の活性化 雌しべ
B 遺伝子と C 遺伝子が欠損している変異体	A 遺伝子の活性化 がく片	A 遺伝子の活性化 がく片	A 遺伝子の活性化 がく片	A 遺伝子の活性化 がく片

この表から明らかなように、突然変異体 1 は B 遺伝子のみが欠損している。また、突然変異体 2 は A 遺伝子と B 遺伝子がともに欠損している。なお、一方が正解の場合には部分点を与える。

問 13) 【正解】 F 【部分点】 (配点の 3/10) B D H

【解説】 師管液の体積流によって葉から茎頂にフロリゲンが運ばれていることから、この師管内の正の圧力つまり膨圧は、茎頂よりも葉の方が高いはず。よって③は想定される記述として正しい。葉における師管内の高い膨圧は、師管への水の流入が葉で盛んであることによる。この水の流入には、師管内外の圧力差を上回る大きな浸透圧差 (師管内浸透圧 - 師管外浸透圧 > 師管内膨圧) が必要である。よって①も正しい。師管に一方向的に水が流入したのでは、師管が破裂してしまうので、どこかで水が師管から出て行かないといけない。この場合は、茎頂で師管から水が出て行くことになる。水の流出が起きるといことは、茎頂では、師管内浸透圧 - 師管外浸透圧 < 師管内膨圧、であることを意味する。すでに述べたように、師管内膨圧は茎頂よりも葉の方が高いので、茎頂の師管外浸透圧が葉に比べて極端に高くない限り、師管内浸透圧は葉よりも茎頂の方が低いと考えられる (少なくとも師管内浸透圧が葉よりも茎頂で高いと考える根拠はない)。よって②は想定されない。以上から、①と③を選ぶ F が正解。

問 14) 【正解】 E 【部分点】 (配点の 3/10) F (配点の 1/10) D

【解説】 被子植物の胚のう形成は、核相  $2n$  の 1 個の胚のう母細胞から減数分裂により 4 個の核相  $n$  の細胞ができるが、そのうち 3 個の細胞は消失し、1 個の細胞が胚のう細胞になる。その後分裂によって形成される卵細胞や中央細胞をはじめとする各細胞の核はすべて同一の遺伝子型をもつ。また、中央細胞は同一の核を 2 個もつ。したがって、 $Yy$  の遺伝子型をもつ個体 P の卵細胞の遺伝子型は  $Y$  と  $y$  の 2 通りあり、それぞれの場合での中央細胞は  $YY$  と  $yy$  である。

一方、花粉形成は、核相  $2n$  の 1 個の花粉母細胞から減数分裂により 4 個の核相  $n$  の花粉四分子ができ、それぞれが花粉に成熟する。花粉の中では 1 回の細胞分裂により、1 個の雄原細胞が形成され、雄原細胞から 1 回の細胞分裂により 2 個の精細胞が形成される。この 2 個の精細胞の遺伝子型は同一である。

受精後、1 個の精細胞は卵細胞と受精し、核相  $2n$  の受精卵となり、胚発生が始まる。それと同時に、もう 1 個の精細胞は、中央細胞と受精し核相が  $3n$  の胚乳細胞になり、それが成熟して胚乳となる。したがって、胚乳細胞における  $Y$  の遺伝子型は、 $YYY$ ,  $YYy$ ,  $Yyy$ ,  $yyy$  の 4 通りあり、それぞれ濃い黄色、明るい黄色、淡い黄色、白色を示す (Ford 2000)。

遺伝子型  $YY$  と  $yy$  の 2 通りの中央細胞が形成される場合、 $YYY:YYy:Yyy:yyy$  が  $1:1:1:1$  となるためには、精細胞の遺伝子型は  $Y$  または  $y$  の 2 通りが形成される必要がある (下表)。したがって、個体 Q の遺伝子型は  $Yy$  である。

	$YY$	$yy$
$Y$	$YYY$	$YYy$
$y$	$YYy$	$yyy$

個体 R については、元の種子の胚乳の色が明るい黄色であるので、胚乳の遺伝子型は  $YYy$  であり、受精前の中央細胞の遺伝子型が  $YY$  であり、精細胞が  $y$  であることがわかる。同じ胚のうの中の核は全て同一であり、そこに侵入する 2 個の精細胞の核も同一であることから、この場合の卵細胞の核は  $Y$  であり、受精する精細胞の核は  $y$  である。したがって個体 R の遺伝子型は  $Yy$  である。

Ford, R. H. (2000). Inheritance of Kernel Color in Corn: Explanations & Investigations. The American Biology Teacher, 62(3), 181-188.

問 15) 【正解】 L 【部分点】 (配点の 3/10) I J K (配点の 1/10) H

【解説】 遺伝の問題ではどのように親から子に伝わるかを考える問題が多いが、ここでは子の遺伝子がどのように親の遺伝子から伝わってきたのかも考えてもらいたい。

妹が AB 型するとき、両親の遺伝子型は  $AX_1$  と  $BX_2$  である。ここで、 $X_1$  と  $X_2$  は不明な対立遺伝子を表す。この両親から生まれた子 (姉) の遺伝子型は  $AB$ ,  $AX_2$ ,  $BX_1$ ,  $X_1X_2$  が考えられるが、これらの 4 つの遺伝子型はそれぞれ等確率 (1/4 の確率) で生じる。 $AX_2$  では、 $X_2$  が B のとき AB 型になる。この確率は  $q$  である。 $BX_1$  では、 $X_1$  が A のとき AB 型になる。こ

の確率は  $p$  である。  $X_1X_2$  では、(ハーディ・ワインベルグ平衡と同様に)  $2pq$  の確率で AB 型になる。したがって、姉の遺伝子型が AB 型である確率は  $(1+p+q+2pq)/4$  となる。

なお、両親の遺伝子型は  $AX_1$  と  $BX_2$  であることに気づけば、その後の確率の計算ができなくても、姉が AB 型である確率は  $1/4$  より大きいことがわかる、したがって、 $1/4$  より大きい選択肢に部分点を与える。

複雑にはなるが、親の遺伝子がどのように子に伝わるかを考えても解くことができる。下表はそれぞれの両親の遺伝子型の組合せについて、その確率 (P)、妹が AB 型である確率 (Q)、妹も姉も AB 型である確率 (R) を示している。

両親の遺伝子型	P	Q	R (= Q <sup>2</sup> )	P×Q	P×R
AB×AB	$4p^2q^2$	$1/2$	$1/4$	$2p^2q^2$	$p^2q^2$
AB×AA	$4p^3q$	$1/2$	$1/4$	$2p^3q$	$p^3q$
AB×AO	$8p^2qr$	$1/4$	$1/16$	$2p^2qr$	$p^2qr/2$
AB×BB	$4pq^3$	$1/2$	$1/4$	$2pq^3$	$pq^3$
AB×BO	$8pq^2r$	$1/4$	$1/16$	$2pq^2r$	$pq^2r/2$
AA×BB	$2p^2q^2$	$1$	$1$	$2p^2q^2$	$2p^2q^2$
AA×BO	$4p^2qr$	$1/2$	$1/4$	$2p^2qr$	$p^2qr$
AO×BB	$4pq^2r$	$1/2$	$1/4$	$2pq^2r$	$pq^2r$
AO×BO	$8pqr^2$	$1/4$	$1/16$	$2pqr^2$	$pqr^2/2$
合計				$2pq$	$pq(1+p+q+2pq)/2$

すべての可能性を考慮すると、妹が AB 型である確率 ( $P_1$ ) は、予想どおり、 $2pq$  となり、妹も姉も AB 型である確率 ( $P_2$ ) は  $pq(1+p+q+2pq)/2$  となる。したがって、妹が AB 型であるとき、姉も AB 型である確率は  $P_2/P_1 = (1+p+q+2pq)/4$  となる。

### 条件付確率

問 15 は、「妹が AB 型であるとき、姉が AB 型である確率」を考える問題である。この確率は、「姉が AB 型である確率」ではなく、条件付き確率である。以下、簡単に説明する。

2つの事象 ( $E_1$  と  $E_2$ ) を考える。上記の例では、 $E_1$  は「姉が AB 型であること」であり、 $E_2$  は「妹が AB 型であること」である。 $E_1$  が起きる確率を  $P(E_1)$  とし、 $E_2$  が起きる確率を  $P(E_2)$  とする。 $E_1$  と  $E_2$  が同時に起きる確率 (姉も妹も AB 型である確率) を  $P(E_1 \cap E_2)$  とすると、 $E_2$  が起きたとき、 $E_1$  が起きる条件付き確率 (妹が AB 型であるとき、姉が AB 型である確率) は

$$P(E_1|E_2) = \frac{P(E_1 \cap E_2)}{P(E_2)}$$

で与えられる。 $P(E_1 \cap E_2) = P(E_1|E_2)P(E_2) = P(E_2|E_1)P(E_1)$  が成り立つことから、上式は

$$P(E_1|E_2) = \frac{P(E_2|E_1)P(E_1)}{P(E_2)}$$

と書き換えることができる。これはベイズの定理として知られている。

問 16) 【正解】 E 【部分点】 (配点の 3/10) B D F L

【解説】 対立遺伝子  $A_2$  の頻度が低い場合、対立遺伝子  $A_2$  をもつ個体の多くはヘテロ接合の状態にある。そのため世代数が少ない段階においても対立遺伝子  $A_2$  の頻度上昇がみられるものは、ヘテロ接合が  $A_1$  のホモ接合よりも相対適応度が高い場合である。これは  $A_2$  が  $A_1$  に対して顕性 (優性) あるいは半顕性 (半優性) の場合である。よって図 1 と図 2 は (X) あるいは (Y) の場合に相当する。ここで注目しておきたい点は図 2 の場合で最終的に頻度が 1 近くになる (このことを対立遺伝子の固定という) までの時間が図 1 にくらべ長く要していることである。これらの違いは  $A_2$  のホモ接合とヘテロ接合の間で適応度に差があるかないかに起因する。 $A_2$  のホモ接合とヘテロ接合の間で適応度に差がない場合は対立遺伝子  $A_1$  の排除に時間を要する一方で  $A_2$  のホモ接合とヘテロ接合に間に差がある場合は対立遺伝子  $A_1$  の置き換わりが滞りなく行われる。そのため任意交配を行うもとで  $A_2$  が  $A_1$  に対し顕性 (優性) である場合 (X) に対応するものは対立遺伝子  $A_1$  の排除に時間を要している図 2 である。すなわち (ア) に入るのは図 2 である。

図 3 と図 4 はともに  $A_2$  が  $A_1$  に対して潜性の場合であるが、この場合少しでも自殖する割合が高いほうが  $A_2$  のホモ接合の出現が早く (ヘテロ接合の個体のなかで自殖する割合の 25% で  $A_2$  のホモ接合の個体が生じることに注意)、対立遺伝子  $A_2$  の頻度上昇が早く生じる。そのため (イ) に入るのは図 3 である。よって正解は E となる。

問 17) 【正解】 I 【部分点】 (配点の 3/10) B C F K (配点の 1/10) G H J

【解説】 遺伝子型と表現型 (毛の色) は次のようになる。

メス	三毛	$SSX^OX^B, SsX^OX^B$	黒白	$SSX^BX^B, SsX^BX^B$
	茶白	$SSX^OX^O, SsX^OX^O$	茶	$ssX^OX^O$
	黒	$ssX^BX^B$	茶黒	$ssX^OX^B$
オス	茶白	$SSX^OY, SsX^OY$	黒白	$SSX^BY, SsX^BY$
	茶	$ssX^OY$	黒	$ssX^BY$

① 黒白のメス ( $SSX^BX^B, SsX^BX^B$ ) と茶のオス ( $ssX^OY$ )

子のメスは茶のオス親から  $O$  を受け継ぐので黒は生じない。 $SsX^BX^B \times ssX^OY$  の組合せで  $ssX^BY$  (黒オス) が生まれる。

② 茶のメス ( $ssX^OX^O$ ) と黒のオス ( $ssX^BY$ )

子のオスもメスも、茶のメス親から  $O$  を受け継ぐので黒が生じることはない。

③ 茶黒のメス ( $ssX^OX^B$ ) と茶白のオス ( $SSX^OY, SsX^OY$ )

子のメスは親の茶白のオスから  $O$  を受け継ぐので黒は生じない。子のオスはメス親の茶黒のから  $B$  を受け取った場合に黒  $ssX^BY$  が生まれる可能性がある。

④ 黒のメス ( $ssX^BX^B$ ) と茶白のオス ( $SSX^OY, SsX^OY$ )

$ssX^BX^B \times SsX^OY$  の組合せで子のオスに  $ssX^BY$  (黒) が生まれる。子のメスはオス親から  $O$  を受け継ぐので黒は生まれない。

三毛ネコの遺伝については、古くから注目されてきた。まれにみられる「オスの三毛ネコ」については、問題文の設定だけでは説明がつかない。 $B$  と  $O$  は  $X$  染色体にあるので、 $X$  染色体を 2 本もつメスにしか、茶と黒は同時に発現しないことになる。まれに生じる「オスの三毛ネコ」の多くは、性染色体の構成が通常と異なる  $XXY$  (クラインフェルター症候群) で、 $X^OX^BY$  となって、茶黒の両方が発現されことになる。また、メスが  $X^OX^B$  の場合、 $O$  と  $B$  の両方がはたらいて「黒っぽい茶色」の毛色になりそうな感じもするが、ヒトやネコなどでは発生初期の段階で 2 つの  $X$  染色体の片方が不活性化されてしまう現象が知られていて、1 つの細胞では片方の  $X$  染色体の遺伝子しか発現しない。 $X$  染色体の不活性化はある程度細胞分裂が進んだ時期に起こり、2 つの  $X$  染色体のどちらが不活性化されるかは決まっていないので、 $X$  染色体に注目すると個体全体では 2 種類の細胞がモザイク的に存在することになる。 $X^OX^B$  の場合を考えると、 $O$  が発現する細胞と  $B$  が発現する細

胞がモザイク的に存在することになる。その結果、Oが発現する細胞が多い領域の毛は茶となり、Bが発現する細胞が多い領域の毛は黒となり、さらにSが加われば白が入って「三毛」となる。昨年12月に、日本と米国の研究チームがそれぞれ別々に、この遺伝子の実体に関する論文を発表した。この問題におけるB遺伝子はARHGAP36という遺伝子で、この遺伝子の発現で毛色は黒色になる。ARHGAP36のDNAに欠失が起こることなどから、赤色素合成量が増えて結果的に毛が茶色になることが示された。この問題では変異した遺伝子をO遺伝子と表記している。

[参考文献]

A deletion at the X-linked ARHGAP36 gene locus is associated with the orange coloration of tortoiseshell and calico cats

Current Biology Online now, May 15, 2025 Open access

[https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822\(25\)00391-4](https://www.cell.com/current-biology/fulltext/S0960-9822(25)00391-4)

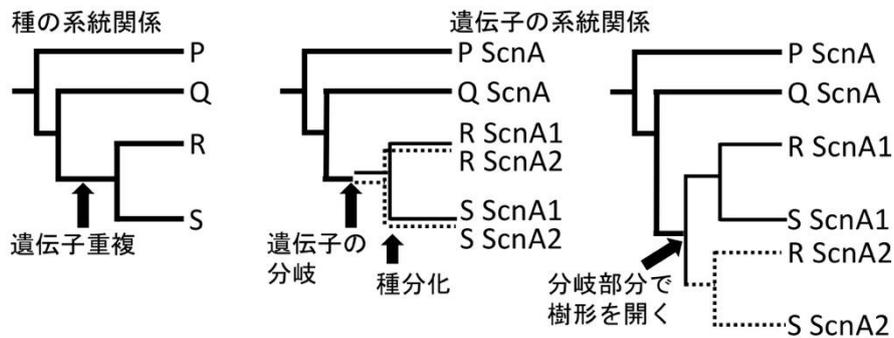
Molecular and genetic characterization of sex-linked orange coat color in the domestic cat

Current Biology Online now, May 15, 2025

[https://www.cell.com/current-biology/abstract/S0960-9822\(25\)00552-4](https://www.cell.com/current-biology/abstract/S0960-9822(25)00552-4)

問18) 【正解】D 【部分点】(配点の3/10) C (配点の1/10) F

【解説】Pは最初に分岐したので、まずAとBは除外される。RとSで遺伝子重複がみられたので、最節約原理の考えからRとSの共通祖先で1回の遺伝子重複が生じたとしてRとSを近縁とするのが妥当となる。RとSの種分化の前に、重複した遺伝子はそれぞれ変異を蓄積して遺伝子の系統関係が分岐する。RとSの種分化の後、重複したどちらの遺伝子もそれぞれの種の中で独自の変異を蓄積するため、遺伝子ごとの系統関係が種の系統関係と同じ樹形となることが期待され、正解はDとなる。EとFは遺伝子重複が2回または遺伝子重複と遺伝子喪失が生じたことになるなど変化の数が多いので除外される。2018年1次試験の問22が本問と同じ論理を含むので参照してほしい。



題材はPLoS Biology 16(3): e2004892で、デンキウナギの系統の中でナトリウムチャンネル (Sodium channel) 遺伝子群の発現部位が変化したことが発電と電気受容の行動の変化につながった可能性が挙げられており、そのうちひとつの遺伝子では一部の系統で重複が生じている。

表紙の写真 (タイサンボクの花 : 2025年5月31日, 千葉県柏市で撮影)

タイサンボク (泰山木, *Magnolia grandiflora*) はモクレン科モクレン属に属する常緑の高木である。アメリカ合衆国の南東部が原産地であり、ルイジアナ州とミシシッピ州では州木になっている。またミシシッピ州には、タイサンボクが多いため、マグノリア州との愛称がある。現在世界中で植栽されているが、日本へは明治初期に導入され、東北地方南部以南の日本各地で見られる。