

日本生物学オリンピック2015

予選問題

2015 年 7 月 19 日（日） 13 : 30～15 : 00

〈正解・解説〉



問1)【正解】D 【部分点】C J

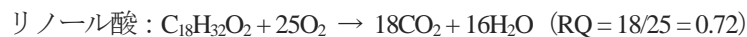
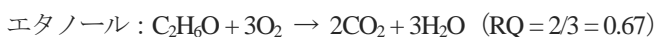
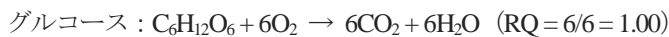
【解説】深さが0.1 mmということは、①～④の各区画の体積は、 $0.1\text{ cm} \times 0.1\text{ cm} \times 0.01\text{ cm} = 1 \times 10^{-4}\text{ mL}$ となる。また、1つの区画に含まれる細胞数は、①～④の各区画の細胞数の平均値をもちいる。計算上の注意としては、細胞数の計測のために細胞懸濁液の10倍希釈液をもちいているため、希釈前の細胞懸濁液の細胞数を求めるには希釈倍率をかける必要がある。細胞懸濁液1 mL中の細胞数は、次のように求められる。

$$\text{細胞懸濁液 1 mL 中の細胞数} = 10 \text{ 倍希釈細胞懸濁液 1 mL 中の細胞数} \times 10 (\text{希釈倍率}) = (160/4) \times 10^4 \times 10 = 4 \times 10^6 \text{ 個}$$

問2)【正解】J 【部分点】K

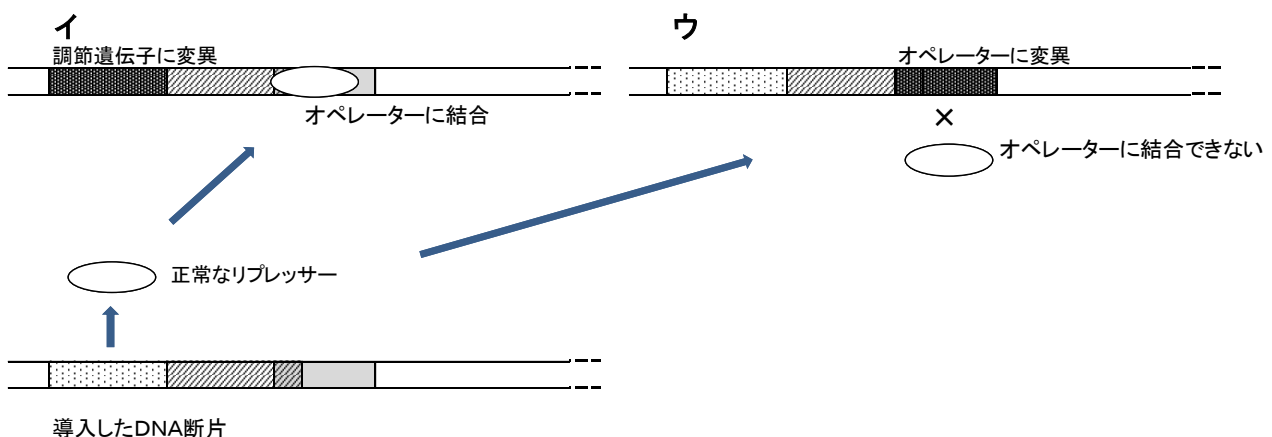
【解説】グルコースの代謝系では、解糖系とクエン酸回路では酸素を消費せず、電子伝達系において酸素を消費し、プロトン (H^+) がミトコンドリアのマトリクス側から内膜の外側へ輸送される。また、ピルビン酸がミトコンドリア内へ輸送される過程でアセチル CoA に変換され、そのアセチル CoA がクエン酸回路に入り、種々の化学反応を経ていく中で、二酸化炭素は発生する。

RQ の値は、グルコース ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)、エタノール ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$)、リノール酸 ($\text{C}_{18}\text{H}_{32}\text{O}_2$) のすべてが C, O, H からのみ構成されており、完全に代謝されると二酸化炭素と水になるので、分子式から生成する二酸化炭素と必要な酸素を求められる。注意すべきは、酸素は気体では O_2 であることを考慮することである。



問3)【正解】C

【解説】アでは、ラクトース分解酵素の合成が常に行われない。ラクトース分解酵素の遺伝子は正常であることがわかっているのに、転写ができなくなっていると考えられ、プロモーターに変異が起きて RNA ポリメラーゼが結合できないと考えられる。一方、イとウは常にラクトース分解酵素が合成されているので、転写の制御（抑制）に関わる部分の変異と考えられる。導入した DNA の発現により、イは転写の抑制ができた。これは導入した DNA の調節遺伝子からつくられるリプレッサーが変異株の DNA のオペレーター部分に結合し、転写が抑制されたと考えたと説明ができる。したがってイでは、オペレーターは正常であり、調節遺伝子に変異が起きていると考えられる。また、ウは導入した DNA が発現しても転写の抑制ができない。これは変異株のオペレーター部分に変異が起きたため、リプレッサーが存在しても転写の抑制ができなかったと考えられる。



問4)【正解】H

【解説】1,000 mLのスープに混入した1,000個のVaderが、100 mLあたり10万個となるためには、全部で100万個に増殖している必要がある。100万は1,000個の1,000倍なので、Vaderが1,000倍になるのに必要な時間を求めればよい。

$2^{10} = 1,024 \approx 10^3$ なので、細菌は10回分裂すると数がほぼ1,000倍になる。 $2^{10} \approx 10^3$ は、実用の上で非常に便利なので、覚えておく価値がある。

10回の分裂に、世代時間が10分ならば1時間40分(100分)、20分ならば3時間20分(200分)、30分ならば5時間(300分)、40分ならば6時間40分(400分)、45分ならば7時間30分(450分)、50分ならば8時間20分(500分)、55分ならば9時間10分(550分)、60分ならば10時間(600分)必要である。

午後0時に混入したVaderにより、午後8時の客は無事で、午後9時以降の客が食中毒を発症したことから、Vaderが10回分裂するのに必要な時間は8時間から9時間の間であり、Vaderの世代時間は50分に近いと考えられる。

微生物の増殖

微生物は新鮮な培地に移されると、通常は誘導期を経て新たな環境に適応してから分裂を開始する。横軸を時間に、縦軸を微生物の個体数の対数にとると、分裂増殖期は菌の数が倍々が増えるため、グラフが直線になることから対数増殖期という。やがて、培地の栄養分が枯渇し、老廃物が蓄積するため、分裂速度が低下して定常期を迎える。死滅期に入ると、生きている微生物の細胞数が減少していく。

自然界では、微生物の集団が長時間対数増殖を維持することは滅多にない。

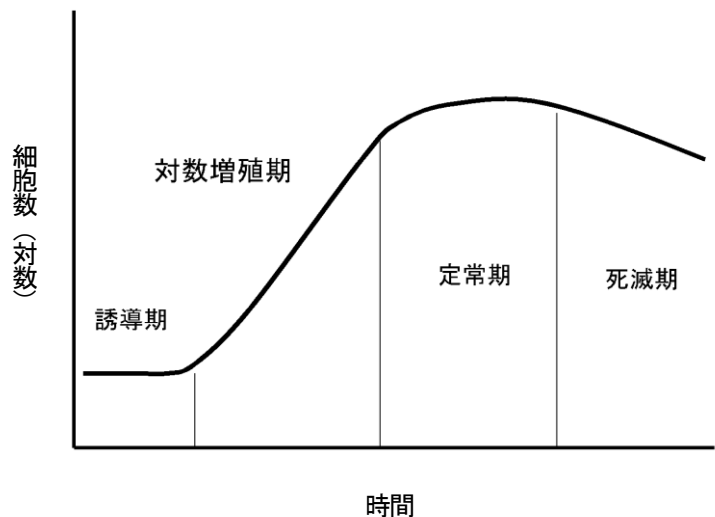
微生物の増殖速度は、微生物の種類によっ

てまちまちである。微生物が2分裂して菌数が2倍になるのに必要な時間を世代時間というが、最適な条件下では大腸菌の世代時間は20分、パン酵母は60分。もっとも早い細菌の1つといわれる腸炎ビブリオは約10分とされている。一方、結核菌は18時間で世代時間が比較的長い細菌である。

ヒトの腸内には膨大な数の(100兆個程度)常在菌が存在するため、限られた数の病原菌では常在菌に圧倒されて淘汰されてしまい、発症しない。腸炎ビブリオ菌などの、通常はヒトの腸内に常在しない食中毒病原菌の多くは、100万個程度の菌体を一気に摂取しない限り発症しないと考えられている。

ヒトに食中毒を引き起こす病原菌は、自然界のなかでも限られた種類の細菌だけである。特定の病原菌が数百万個混入しているということは、相当数の雑菌が繁殖していることを意味する。このレベルの汚染が起こっていれば、通常の食材であれば「においなど食べない方がよさそう・・・」と気が付くであろう。しかし、生牡蠣(カキ)などの生鮮海産物の場合は、元々生臭い食材であるため食中毒を発症するレベルの病原菌が混入していても気が付くのが困難であり、結果として毎年多数の食中毒が発生している。

一方、大腸菌は、ヒトの腸内に常在するため、比較的少数でも腸内細菌群に対抗して増殖することができる。病原性大腸菌 O-157 などは数100個の菌体を摂取しただけで食中毒を発症することがあるので、食中毒が発生したときにその原因となった食材を特定するのが困難な場合がある。



問5)【正解】C 【部分点】A B

【解説】制限酵素による切断結果を電気泳動から考察する基本的な問題。*Hind*III で切断すると2カ所で切断させることに注意する。各レーンの結果は、次のように考えられる。

1と2：それぞれ *Eco*RI または *Xmn*I のどちらか一方で切断 → 6031

3：*Hind*III で切断 → 2517+3514

4：*Eco*RI と *Xmn*I で切断 → 2684+3347

5：*Hind*III と *Eco*RI で切断 → 672+1845+3514

6：*Hind*III と *Xmn*I で切断 → 1502+2012+2517

<参考>

NS 遺伝子研究室「遺伝子の部屋 (いでんこのへや)」より「走れDNA！」

(広島大学 大学院理学研究科 数理分子生命理学専攻 生命理学講座 准教授 坂本尚昭先生制作)

<http://www.mls.sci.hiroshima-u.ac.jp/smg/education/ephoresis.html>

制限酵素の認識部位数

制限酵素は特定の塩基配列を認識すると、特定の位置でDNAを切断する。制限酵素が認識する特定の塩基配列を認識配列という。たとえば、*Eco*RI の認識配列は GAATTC であり、この部位（認識部位）でDNAは切断される。DNAの塩基配列がランダム配列（A, T, G, Cを1/4の確率で無作為に並べた配列）であると、ある部位が認識部位である確率は $1/4^6$ ($=1/4096 \approx 0.000244$) となる。16569塩基対からなるヒトのミトコンドリアDNAの場合、ランダム配列であると、 $16569 \times 1/4^6$ (≈ 4.05) の認識部位が期待される。下図は、ランダム配列で期待される認識部位数と実際に存在する認識部位数を比較したものである。

制限酵素	認識配列	ランダム配列で期待される認識部位数	GC含量を考慮した認識部位の期待数	実際に存在する認識部位数
<i>Alu</i> I	AGCT	64.7	53.6	63
<i>Taq</i> I	TCGA			29
<i>Hae</i> III	GGCC		29.2	52
<i>Hha</i> I	GCGC			17
<i>Eco</i> RI	GAATTC	4.05	4.14	3
<i>Xba</i> I	TCTAGA			5
<i>Bam</i> HI	GGATCC		2.25	1
<i>Kpn</i> I	GGTACC			3

制限酵素によっては、ランダム配列で期待される認識部位数と実際に存在する認識部位数に大きな差がみられるが、これには2つの理由が考えられる。1つは、ミトコンドリアDNAのGC含量（GとCの割合）が低いことである。この要因を考慮して計算した認識部位の期待数を右から2列目に示している。もう1つは、当然なことであるが、ミトコンドリアDNAは、遺伝情報をもっており、ランダムな配列ではないことである。

問6) 【正解】F 【部分点】E J

【解説】減数分裂の第一分裂では、両親由来の相同染色体は対合して二価染色体を形成し、対合面で分離する。したがって、対立遺伝子が分離するのは第一分裂である。これは動原体(セントロメア)が1か所にある染色体をもつ生物の基本である。第二分裂では、染色体を構成する2本の染色分体が両極に分離する。

遺伝子型が $a/a/c$ のトリソミー個体では、母側の2つの a が分離していないので、母側の第二分裂での不分離が原因であることがわかる。遺伝子型 $a/b/c$ の場合は、母側の a と b が分離していないので、第一分裂での不分離が起こったことがわかる。 $b/c/c$ では不分離が父側で起こったことはわかるが、父側2つの染色体は区別できないので、不分離が起こったのが第一分裂か第二分裂かは特定できない。

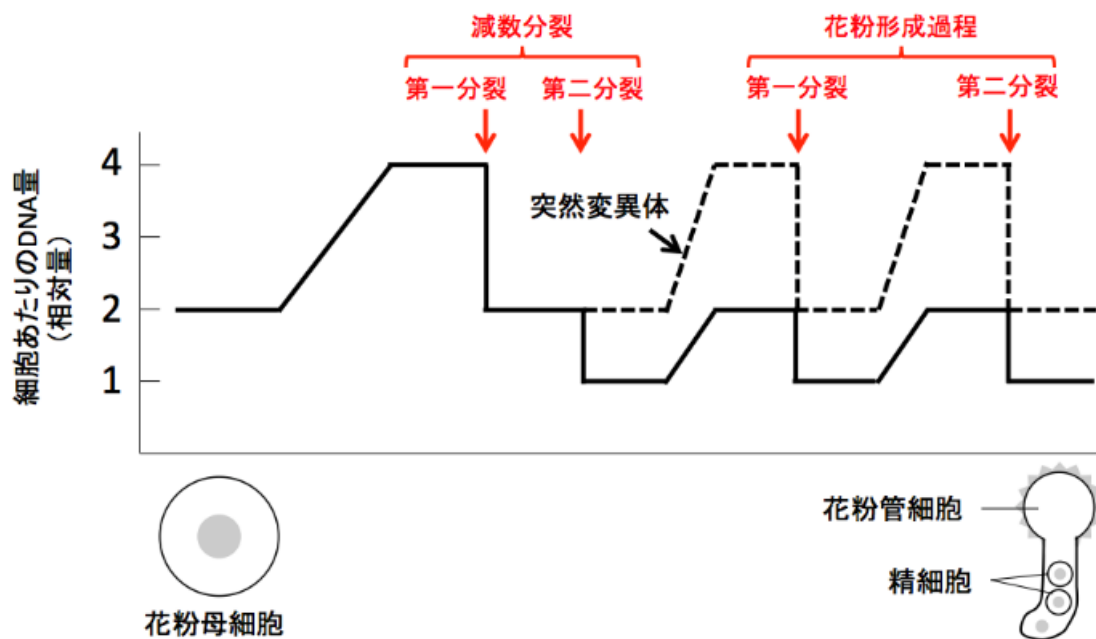
DNA の塩基配列の相違は、一塩基多型 (SNP) , 制限酵素断片パターン、単純反復配列の解析などによって知ることができる。DNA の塩基配列に個人差 (多型性) がみられる特定の箇所は、連鎖検定や個人ゲノム解析などの際には、遺伝的マーカーとして有力な指標になる。

ヒトのダウン症候群は21番染色体のトリソミーに起因する。21番染色体上の多型性遺伝的マーカーを指標に検索した研究から、ダウン症候群における余分な染色体の90%は母親由来であり、その大部分が第一分裂での不分離によることが明らかになった。

問7) 【正解】D

【解説】動物の減数分裂では、1つの生殖母細胞から生じた半数性細胞は、体細胞分裂を行うことなく直接配偶子として成熟し、受精に至る。しかし植物の減数分裂では、生殖母細胞から生じる孢子とよばれる半数性細胞は、さらに体細胞分裂を行い、多細胞性の配偶体を形成する。被子植物の葯では、1つの花粉母細胞から減数分裂により4つの小孢子が生じ、それぞれの小孢子は、2回の体細胞分裂を行い、3細胞性の花粉を形成する。減数分裂後の花粉形成過程の第1回目の分裂は不等分裂で、大きい花粉管細胞 (栄養細胞ともよばれる) と小さい雄原細胞に分かれる。雄原細胞は花粉管細胞の細胞質に取り込まれ、さらに等分裂である第2回目の分裂により2つの精細胞に分かれる。すなわち花粉は、花粉管細胞の細胞質に2つの精細胞をもつ3細胞性の半数性配偶体である。

DNA 量のグラフから、減数分裂および花粉の体細胞分裂は以下の赤い矢印に位置づけられる。突然変異体では、第二分裂で減数が起こらず、その結果できる小孢子が、正常なものの2倍量のDNAを含んでいることがわかる。すなわち正解はDとなる。

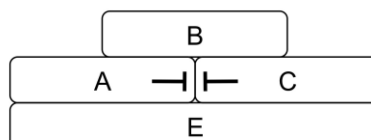


問8)【正解】G 【部分点】B

【解説】この問題で示されている表は、Enrico S. Coen と Elliot M. Meyerowitz が 1991 年に記した総説に示されているデータ (Nature 誌 353 号 31-37 頁) に基づいたものである。そこではシロイヌナズナやキンギョソウのモデル植物の花の形態形成に関する研究に基づいて、花の器官の決定には3つのクラス A, B, C の遺伝子が関与していること (いわゆる ABC 仮説) を提示している。ここでのクラス I, II, III は、それぞれ A クラス, B クラス, C クラスに相当する。シロイヌナズナの A クラスの遺伝子としては *AP1* や *AP2*, B クラスの遺伝子としては *AP3* や *PI*, C クラスの遺伝子としては *AG* があり、キンギョソウの A クラスの遺伝子としては *SQA*, B クラスの遺伝子としては *DEF* や *GLO*, C クラスの遺伝子としては *PLE* がある。今日ではこの ABC モデルをさらに発展させた ABCD モデルあるいは ABC(D)E モデルが提唱されている。D クラスの遺伝子は胚珠の形成に、E クラスの遺伝子は花器官全体の発生に基本的な遺伝子としてはたらいっている。

ABCE モデルの概要およびそれぞれの突然変異体の形態は、右の図に示すようなものである。

C クラス遺伝子の突然変異体で心皮の領域ががく片などとなっているのは、がく片の内側に花弁ができ、さらにその内側に花弁……というように、器官の形成が続くからである。これは、*AG* が花器官形成の終了にも関与するため、その突然変異によって花の中に花があるような繰り返しの構造をとることによる。



がく片	花弁	雄ずい	心皮	野生型
心皮	雄ずい	雄ずい	心皮	Aクラス遺伝子の突然変異体
がく片	がく片	心皮	心皮	Bクラス遺伝子の突然変異体
がく片	花弁	花弁	がく片など	Cクラス遺伝子の突然変異体

ABC 仮説を知っていれば上の図から解答を導きだせるが、この問題は ABC 仮説を知らなくても、次のように考えれば解くことができる。問題文に示されたそれぞれの遺伝子の機能を考えると各領域が本来形成する可能性のある器官が列挙できる。たとえば、クラス I の遺伝子はがく片と花弁への分化に関与しているので、領域 (ア) は本来、雄ずい あるいは がく片か花弁 になると考えられる。同様に、各領域での可能性を列挙すると次のようになる。

	領域 (ア)	領域 (イ)	領域 (ウ)	領域 (エ)
クラス I 遺伝子の突然変異体からの可能性	雄ずい がく片 花弁	心皮 がく片 花弁	雄ずい がく片 花弁	心皮 がく片 花弁
クラス II 遺伝子の突然変異体からの可能性	心皮 花弁 雄ずい	心皮 花弁 雄ずい	がく片 花弁 雄ずい	がく片 花弁 雄ずい
クラス III 遺伝子の突然変異体からの可能性	花弁 雄ずい 心皮	がく片など 雄ずい 心皮	花弁 雄ずい 心皮	がく片 雄ずい 心皮

ここで示された可能性から共通なものを選択すると、領域 (ア) と (ウ) は花弁か雄ずい、領域 (イ) は心皮か花弁に、領域 (エ) はがく片になる。心皮の可能性があるのは領域 (イ) のみであり、領域 (エ) はがく片なので正解は (B) か (G) のどちらかになる。さらにクラス II 遺伝子の突然変異体の結果から領域 (ア) と (イ) が心皮になっていることからこれらの領域ではクラス III の遺伝子をはたらいっていること、また領域 (ウ) と (エ) ががく片になっていることからこれらの領域ではクラス I の遺伝子をはたらいっていることが推察され、野生型では領域 (ア) は雄ずいか心皮へ分化すること、領域 (ウ) はがく片か花弁へ分化することと考えられる。このことから正解は (G) と導ける。

問9) 【正解】H 【部分点】G I

【解説】植物の成長に影響する大きな要因の1つとして、植物ホルモンの影響は単純ではなく、細胞によって植物ホルモンへの感受性は異なるし、複数のホルモンが相互作用することによっても植物の成長は変化する。成長がもっとも盛んなときに、植物の細胞壁成分（セルロースやその他の多糖類）は高い増加速度を示すが、細胞壁多糖をいくつかの成分に分けて1つ1つについてみると、成分によって成長との相関や植物ホルモンの影響が異なる。ここで引用した実験では、細胞壁多糖を、セルロース、酸性多糖からなる成分（ペクチンという）、セルロースとペクチン以外の成分（ヘミセルロースという）に分け、さらにヘミセルロースを比較的弱い条件で細胞壁から抽出されるもの（ヘミセルロース1）と、強い条件にして初めて抽出されるもの（ヘミセルロース2）に分けて、調べている。図中の多糖成分1はヘミセルロース1で、多糖成分2はヘミセルロース2である。結果は、上胚軸先端領域では、IAAは伸長およびヘミセルロース合成をともに促進し、この作用はGAによって強められること、また基部領域では、伸長はまったく起きないが、ヘミセルロースの合成はある程度みられ、とくにヘミセルロース1の合成はGAによって促進されることを示している。

問10) 【正解】E

【解説】植物体内の水が水蒸気として大気中に放出される現象を蒸散という。葉における蒸散には、気孔を通して行われるものと、表皮全体から行われるものがあるが、表皮は水を通さない厚いクチクラに覆われているため、一般には蒸散はほとんど前者により、後者の蒸散への寄与はきわめて小さい。土壤水分量が十分に多いときには、気孔は完全に開いており、根からの水の供給も多いので、蒸散速度は大きい。土壤水分が不足して、植物が乾燥ストレスを受けると、アブシシン酸の合成が高まり、アブシシン酸の作用により気孔が閉じるため、蒸散は低下する。蒸散に対して水供給が追いつかなくなると植物はしおれるので、蒸散を高める（あるいは抑えられない）A～E、水供給を低下させるF、Gのいずれも、一般論としてはしおれやすさの原因となりうる。

図を見ると、変異体*m*の土壤水分に応じた蒸散速度の変化は野生型と同様であり、乾燥ストレスに対応した気孔の開閉の調節には問題がないことがわかる。また変異体*m*では、蒸散速度がどの土壤水分条件でもつねに野生型より一定程度高いこと、とくに蒸散速度の曲線から土壤水分が十分に高く気孔が完全に開いていると考えられるとき、土壤水分が非常に低く気孔が完全に閉じていると考えられるときのいずれでも蒸散速度が野生型を上回っていることから、気孔ではなくクチクラを通した蒸散が増大していると推測できる。これより、*m*のしおれやすさの原因としては、クチクラ経由の蒸散を増大させるEがもっとも適当ということになる。

以下では、E以外の選択肢について、図の結果に合わないことを再確認する。まずCやDの場合、土壤水分が不足しても気孔が閉じないので蒸散の低下が起きにくいはずであるが、変異体*m*でも野生型と同様に、土壤水分減少と関連した蒸散の低下がみられることから、これらは*m*にはあてはまらない。AとBの場合、土壤水分量が十分に高く気孔が完全に開いているときの蒸散が野生型より高く、土壤水分が不足して気孔が閉じているときの蒸散は野生型と同程度になるはずであるが、*m*の蒸散速度は土壤水分量に関わらず野生型より高いので、これらも*m*にはあてはまらない。FとGの場合は、水の供給の低下とその結果として起きる乾燥ストレス・気孔閉鎖の両方の影響により、蒸散速度が小さくなるはずであり、蒸散速度が野生型より大きい*m*には適合しない。

問 11) 【正解】 H 【部分点】 E

【解説】 ガーリックマスタードは、サトウカエデとアーバスキュラー菌根菌の相利共生関係を破壊することで苗木の生育を抑制する働きをする。ここでは、ガーリックマスタードが侵入した土壌では菌根菌の形成が抑制されるため、サトウカエデの生育が抑制される。また、土壌を滅菌することによりアーバスキュラー菌が死滅することで、菌根の形成ができないことに気づけば、正しい記述を選択できる。

出典は K. A. Stinson et al., Invasive plant suppresses the growth of native tree seedlings by disrupting belowground mutualisms. *PLoS Biol(Public Library of Science: Biology)* 4(5):e10(2006) アメリカの自生木本 (サトウカエデ, アメリカハナノキ, アメリカトネリコ) を異なる土壌で生育させ、ガーリックマスタードの影響を調べる実験をしたもの。

問 12) 【正解】 H 【部分点】 C E G I

【解説】 静止状態の細胞膜電位を決めるのは、細胞内外の K^+ 濃度と、 K^+ 漏洩チャネルである。表から、 $C_{K^+}/C_{K^+} \sim 0.062$ だから、対数の値は負で 1 以上なので (実際は -1.2), 与えられた式から $-61.5mV$ より低くなるので③が正しい。また、文章から活動電位はほぼ細胞内外の Na^+ 濃度比で決まるはずなので、ほぼ一定と考えられ、⑦は正しい。活動電位は $61.5 \times \log_{10}(145/12)$ で、 $1 < \log_{10}(145/12) < 2$ が成り立つ。したがって、⑤と⑥は間違い。また、電位刺激性の Na チャネルは閾値以上の刺激によって一斉に開くと問題文中に記述されているので、開いたチャネルの数は一定である。また細胞内外の Na イオン濃度も一定だから、漏洩 K チャネルによる静止膜電位が一定値になるのと同じ理由で活動電位も一定になるので⑧も間違い。よって正解は③と⑦を含む H となる。

問 13) 【正解】 B 【部分点】 A C

【解説】 解説と問題の意図：単純なグラフから問題文の正誤を判定する問題である。ほとんどは直感的に正誤を判定することができるかもしれない。

- ① グラフから読み取って正しいことがわかる。
- ② 同様に、グラフの x 軸の左ほどコストが高いことがわかる。
- ③ この問題はグラフからおよその数値を読み取って、計算しなければならない。たとえば、走行動物において、体重 $0.1kg$ の動物は、およそ 7 ワット時 $kg \cdot km$ であり $1km$ 移動するのに全体重 ($0.1kg$) あたりでは 0.7 ワット時を要する。同様に体重 $10kg$ では、その値はおよそ 15 であるので、問題文は誤りである。
- ④ データがないので、あくまでも推測であるが、飛翔動物の線を外挿すると、走行動物の線より上に行くことから、この推測は正しい。
- ⑤ 遊泳動物の $0.01kg$ と $1kg$ のエネルギーコストを比較すると、前者は 2 以下であり、後者は 0.5 以上である。したがって、 $1/10$ にはならない。

解答にあたって、5つの文章のうち3つが正しいので、①と②が正しいこと、③と⑤が間違いであることがわかれば、必然的に④が正しいことに到達できる。

出典：Greenwald, C. H. (1977) The energetics of locomotion. Is small size really disadvantageous? *Proc. Amer. Philosoph. Soc.* 121: 100-106.

なお、『キャンベル 生物学』1289 ページ以降に、同様の記述があり、シュミット-ニールセン (1972) による図が 1290 ページに、掲載されている。

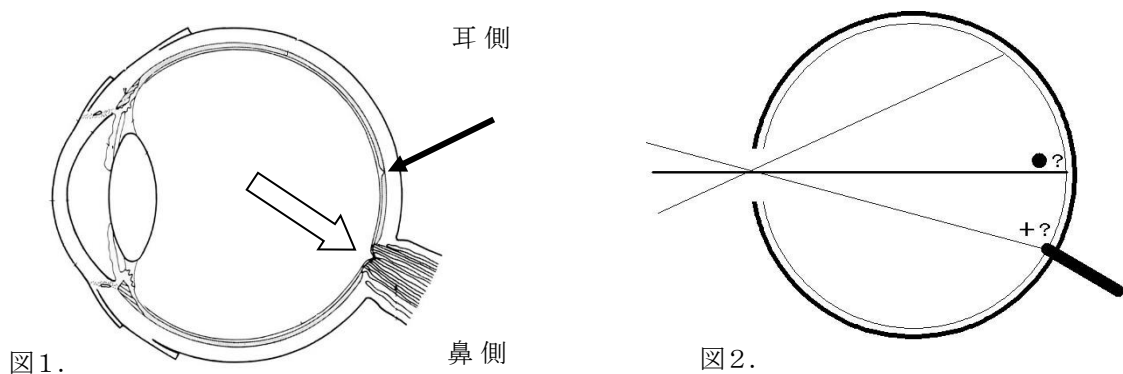
問 14) 【正解】H 【部分点】B C E F I J

【解説】教科書にも紹介されており、それぞれの条件について知っていた人も多いと思うが、必要とされるところに酸素を運ぶための条件を考えてみると答は出てくる。ヘモグロ빈は問題文にもあるように、肺胞で酸素と結合し、組織で酸素を解離する。活動の盛んな組織ほど酸素を必要としており、ヘモグロ빈は酸素を解離しやすくなる。(酸素解離曲線が右に移動する。)したがって、活発な組織の状態、すなわち、二酸化炭素分圧が高いほど、温度が高いほど、pH が低い酸性条件下で酸素解離曲線は右に移動する。したがって③が正しい。

また、高地に生息するリャマのもつヘモグロ빈は、高地の酸素分圧が低い条件下でも肺胞で酸素を結合する必要がある、低地に生息する哺乳類のヘモグロ빈よりも酸素との親和性が高く、高地での生活に適応している(④は正しい)。また、胎児は胎盤において母体から酸素を受け取る必要性があり、胎児のもつヘモグロ빈は、母体のもつヘモグロ빈よりも酸素との親和性が高く、母体のヘモグロ빈が解離した酸素を受け取ることができる。(⑤は間違っている)。

問 15) 【正解】E 【部分点】B C

【解説】図 1 は、ヒトの右眼の眼球の水平断の模式図である。黒矢印は中心窩 (fovea) を示す。ヒトが何かを注視したとき、像はこの中心窩に結ばれ、色や形などを識別できる。図 2 は、眼球に入射した光が進む光軸と、眼球の位置を示す。図 1 の白矢印で示した視神経の脳への投射箇所である視神経乳頭には一定の幅がある。そのために、最近では盲点という呼称ではなく、盲斑とよばれることが多い。盲斑の大きさなど、実験的に自分で確かめてみることも可能である。



「左眼を隠して、右眼で+印を見ると、●印は消えた」と「右眼を隠して、左眼で●印を見ると、+印は消えた」ことから、注視点(中心窩)と盲斑(神経乳頭)は機能が異なり、網膜上の視細胞の分布は均一ではないことが推論できるので①は正答。両眼とも注視点よりも盲斑(神経乳頭)の位置は鼻側にあり、②は正答で、③は誤答となる。

問 16) 【正解】 H 【部分点】 B

【解説】腸管の吸収を調べるための実験についての考察問題である。本来は粘膜が内側、漿膜が外側にあるが、粘膜を外側にした「反転腸管」がもちいられることがある。これは、内部（吸収した側）の体積を少なくすることで、内部での濃度の変化をより大きく捉えやすくするためである。反転腸管の、内部（漿膜側）から外部（粘膜側）へのグルコース移動は多分ないと推測できる。しかし、本当に受動輸送が起こらないかどうかについては、内部濃度を高く、外部濃度を低く設定した実験を行っていないので、断言することはできない。実験アとイにより、反転腸管の外部から内部へのグルコース移動が起こることは明らかである。実験ウより、通気しなかったときには移動がないことから、酸素をもちいた ATP 合成が起こらないと移動も起こらないと考えられる。つまり、能動輸送であることが推測できる。

<参考>

中学校理科における腸管吸収の簡易実験装置

https://ir.lib.osaka-kyoiku.ac.jp/dspace/bitstream/123456789/21469/1/KJC_07_183.pdf

問 17) 【正解】 C 【部分点】 D

【解説】1 回目の捕獲率は m/N であり、2 回目の捕獲率は $n/(N-m)$ である。これらの捕獲率は等しいと仮定しているので、 $m/N = n/(N-m)$ が成り立つ。この式を解くと $N = m^2/(m-n)$ をえる。もし 2 回目の捕獲率が 1 回目より低いと $m/N > n/(N-m)$ となり、 $N > m^2/(m-n)$ となる。したがって、 $m^2/(m-n)$ は N を過小評価する。

捕獲を繰り返していくと、捕獲した個体はもどさないで、捕獲個体数は減少していく。この減少の程度により、個体数を推定する方法は、除去法とよばれている。ここで取り上げたような 2 回の捕獲では信頼性の高い推定値はえられないが、捕獲回数を増やしていくと信頼性は高くなる。水産庁は、イワナ、ヤマメ、アマゴなどの溪流魚の生息個体数を調査する方法の 1 つとして、この除去法を紹介している。

問 18) 【正解】 D 【部分点】 B C H

【解説】島に生息する生物種の数、島の面積と大陸からの距離に影響を受けることは、以前から知られていた。しかし、実際の種数は島によりさまざまであり、その多様性のパターンがどのように決まるのかを説明することはできなかった。

1963 年、米国の生態学者であるマッカーサーとウィルソンは、移住率と絶滅率の動的な平衡が島の生物種の数を決めるという理論を提案した。さらに、1965 年、シンバーロフとウィルソンはフロリダ半島の沖にあるマングローブの小さな島（直径 10~20m 程度）で、この理論を検証する実験を行った。島に殺虫剤を散布し節足動物を絶滅させたところ、約 1 年で種数は元のレベルに戻ったが、以前とは種構成の 1/3~1/2 が異なっており、また大陸から遠い島ほど回復は遅かった。この結果は、理論を支持する。この実験は小さな島とはいえ、殺虫剤で生物を絶滅させており、現在の基準では許されない面がある。しかし、これらの研究は、生態学の理論を実験で検証した点で、歴史的に重要であり、さまざまな分野に影響を与えた。

図 1：リード文から、移住率を示す線は右下がりのアであり、絶滅率を示す線は右上がりのイと判断できる。図 2：島の大きさは絶滅率に影響する。小さい島は環境収容力も小さく種間競争が激しいうえに、環境変動の影響も受けやすいため、絶滅率は高くなる。その結果、種数も少ない。したがって、ウが小さい島で、エが大きい島である。図 3：種の供給源である大陸からの距離が近い島ほど移住率は高く、種数も多い。図 4：移住率（定着の初速度）が高く、生物種の数も多い α が大陸から近い島だと判断できる。

<参考>

『生態学入門』：東京化学同人、『カラー図解 アメリカ版 大学生物学の教科書 第 5 巻生態学』：講談社

問 19) 【正解】 A 【部分点】 G

【解説】 餌を見つけたミツバチは、巣の中でミツバチのダンス (Waggle dance) とよばれる行動を示す。これは、問題文の図にあるように、8 の字の中心部分の直線を移動する際に体を高頻度に震わせる際方向と鉛直軸の角度を、追従する他のミツバチに伝えることで、餌場の方向が示される。一方、巣から餌場までの距離は、ミツバチの腹部の振動の間隔 (腹部の振動と停止を繰り返す時間) の違いで示される。

鉛直上方が太陽の方向と一致するために、解答に際しては、⑧から④の方向が重力方向となる。アでは重力方向に対して 45° の方向に Waggle dance を踊っていることになるので、①の方向に餌場があることになる。同様にイでは水平左に向かってダンスしているので、⑥の方向に餌場があり、ウでは重力方向から 45° 右下方にダンスをしているので、③の方向に餌場があることになる。

問 20) 【正解】 E 【部分点】 A G

【解説】 この植物集団において、対立遺伝子 A_1 と A_2 の頻度は同じ 0.5 である。

仮説 1: 他家受粉では交配が無作為 (ランダム) に行われ、受精直後の個体の遺伝子型 A_1A_1 , A_1A_2 , A_2A_2 の頻度は、 $0.5 \times 0.5 = 0.25$, $2 \times 0.5 \times 0.5 = 0.5$, $0.5 \times 0.5 = 0.25$ であると考えられる。個体の生存率を遺伝子型 A_1A_1 , A_1A_2 , A_2A_2 のそれぞれを 1, $1-s$, 1 とすると、成長した個体での遺伝子型 A_1A_1 , A_1A_2 , A_2A_2 の相対的な頻度は、 $0.25 : 0.5(1-s) : 0.25$ となる。実際に観察された遺伝子型 A_1A_1 , A_1A_2 , A_2A_2 の頻度は同じなので、 $0.5(1-s) = 0.25$ となり、この式を解くと、 $s = 0.5$ となる。よって、ホモ接合体である遺伝子型 A_1A_1 , A_2A_2 の生存率を 1 とした場合にヘテロ接合体である遺伝子型 A_1A_2 の生存率は、 $1 - 0.5 = 0.5$ となる。

仮説 2: 自家受粉する場合、遺伝子型 A_1A_1 や A_2A_2 からはそれぞれ遺伝子型 A_1A_1 や A_2A_2 のみが生じ、また遺伝子型 A_1A_2 からは遺伝子型 A_1A_1 , A_1A_2 , A_2A_2 がそれぞれ 0.25, 0.5, 0.25 の頻度で生じる。そのため自家受粉からは

遺伝子型 A_1A_1 は $1/3 + 1/3 \times 1/4 = 5/12$

遺伝子型 A_1A_2 は $1/3 \times 1/2 = 1/6$

遺伝子型 A_2A_2 は $1/3 \times 1/4 + 1/3 = 5/12$

の確率で生じる。

他家受粉する場合遺伝子型とは関係なく

遺伝子型 A_1A_1 は $1/4$

遺伝子型 A_1A_2 は $1/2$

遺伝子型 A_2A_2 は $1/4$

で生じる。よって自家受粉が p の確率で生じ、他家受粉が $1-p$ の確率で生じる場合、ヘテロ接合体である遺伝子型 A_1A_2 の頻度は $p/6 + (1-p)/2$ となる。この値が $1/3$ となることから、 $p = 1/2 = 0.5$ と解ける。したがって、自家受粉する場合と他家受粉する場合の割合は $1 : 1$ となる。

仮説 2 の自家受粉・他家受粉といった交配様式は、1 つの遺伝子座ではなくすべての遺伝子座に影響する。一方、自然選択は個々の遺伝子座で状況が異なる。このことを考えると、他の遺伝子座がすべてハーディ・ワインベルグ平衡にあることは仮説 1 を支持することになる。

問 21) 【正解】C 【部分点】A B F

【解説】メンデル遺伝、優性遺伝、伴性（X連鎖）遺伝に関する総合的な基礎知識と思考力を試す問題である。まず注目することは、伴性（X連鎖）遺伝の場合、男女に違いがあることである。この問題では、③と④がそうである。以下、それぞれの特徴について、詳しくみていこう。

- ① この遺伝子病は非常にまれなことから、発病した男性のパートナーは正常であると考えられる。常染色体優性遺伝ではその子供が発病する確率は50%になる。常染色体劣性遺伝ではその子供が発病する確率は0%になる。伴性（X連鎖）遺伝の場合、男性の遺伝子は娘に伝わる。伴性（X連鎖）優性遺伝ではその娘が発病する確率は100%になる。伴性（X連鎖）劣性遺伝ではその娘が発病する確率は0%になる。したがって、①は常染色体優性遺伝の特徴である。
- ② この遺伝子病は非常にまれなことに注意する。常染色体優性遺伝子の場合には、発病者の片親がヘテロ接合で他の親は正常な遺伝子のホモ接合である。その結果、発病者の弟や妹が発病する確率は50%になる。常染色体劣性遺伝子の場合には、発病者の両親は通常ヘテロ接合となり、発病者の弟や妹が発病する確率は25%になる。伴性（X連鎖）優性遺伝子の場合には、母親は正常な遺伝子のホモ接合であり、父親は原因遺伝子をもっているか、あるいは母親はヘテロ接合であり、父親は正常な遺伝子をもっているかの、いずれかである。前者の場合、発病者の弟が発病する確率は0%になり、妹が発病する確率は100%になる。後者の場合、発病者の弟や妹が発病する確率は50%になる。伴性（X連鎖）劣性遺伝子の場合には、③で示すように、発病者のほとんどは男性である。これは、母親がヘテロ接合であり、父親が正常な遺伝子をもっているときに起きる。その結果、発病者の弟が発病する確率は50%になり、妹が発病する確率は0%になる。したがって、②は劣性遺伝の特徴である。
- ③ 伴性（X連鎖）劣性遺伝の特徴である。正常な遺伝子の頻度を p とし、伴性（X連鎖）劣性遺伝子の頻度を $q(=1-p)$ としたとき、ハーディ・ワインベルグの法則が成り立つとすると、女性発病者の頻度は q^2 で、男性では q になる。発病者のうち男性である割合は $q/(q^2+q)=1/(q+1)$ である。 q は限りなく0に近いので、発病者のほとんどすべては男性である。
- ④ 伴性（X連鎖）優性遺伝の特徴である。正常な遺伝子の頻度を p とし、伴性（X連鎖）優性遺伝子の頻度を $q(=1-p)$ としたとき、ハーディ・ワインベルグの法則が成り立つとすると、女性発病者の頻度は $2pq+q^2$ で、男性では q になる。ここで条件から p は限りなく1に近いので、女性の頻度は男性の2倍ほどになる。

問 22) 【正解】F 【部分点】B D

【解説】T. H. モーガンが野生型のキイロシヨウジョウバエから最初に発見したのは、白眼の雄の突然変異体であった。この白眼の変異遺伝子 (w) はX染色体にあるという伴性遺伝の研究に始まり、その後の多くの研究にもちいられてきた。近年の分子遺伝学的研究によってこの白眼突然変異は、眼色の色素形成の突然変異ではなくて、ATPのエネルギーをもちいて物質の輸送を行う膜輸送タンパク質であると推定されている。一方、キイロシヨウジョウバエの眼色は朱色の色素と茶色の色素の働きで赤色（野生型）になっていて、それぞれの色素合成に関係する遺伝子は、いくつもあることがわかっている。この問題は、キイロシヨウジョウバエの白眼突然変異に関して、与えられた条件のもとで行われる交配実験によって同じ表現型を示しながら、別の染色体にある遺伝子を区別する問題である。

(ア) と (イ) は、どちらが w で、どちらが $bw bw, cn cn$ でも同じ結論を出せる。①では (ア) が w の場合では、通常の伴性遺伝であり、 F_1 の雄は白眼になる。(ア) が $bw bw, cn cn$ の場合には F_1 の雄は赤色眼になるので、1回の実験で区別できる。②では (ア) が w の場合でも、 $bw bw, cn cn$ の場合でも F_1 の雌雄はすべて赤色眼になるので、1回の実験では区別できない。③では、(ア) が w の場合は、 F_1 の雄は白眼になるのに対し、(ア) が $bw bw, cn cn$ の場合には F_1 の雄は赤色眼になるので、1回の実験で区別できる。

問 23) 【正解】 I 【部分点】 L

【解説】 種 T は種 R や種 S から 2×1000 万年の隔たりがある。したがって、進化速度は $0.24/(2 \times 10^7) = 1.2 \times 10^{-8}$ と推定される。塩基配列間の 1 塩基部位あたりの置換数が 0.24 であるとき 1000 万年前に分岐したので、塩基配列間の 1 塩基部位あたりの置換数が 0.096 であれば $0.096 \times 1000 \text{ 万年} / 0.24 = 400$ 万年前に分岐したと推定される。

1 塩基部位あたりの置換数は進化的距離とよばれ、分子進化の研究で広く使われている。たとえば、ヒトとチンパンジーを比較すると、進化的距離は、ミトコンドリア DNA では約 0.09 であり、核 DNA では約 0.01 である。

問 24) 【正解】 H 【部分点】 D

【解説】 コドン内の塩基が変化した場合、アミノ酸が変化することもあるが、アミノ酸が変化しないこともある。コドン内の塩基の位置により、これらの割合は変わる。2 番目の塩基が変化すると、アミノ酸は変化するかあるいは終止コドンになる。コドン表から明らかなように、3 番目の塩基が変化してもアミノ酸が変化しないことは多い。一方、1 番目の塩基が変化した場合、アミノ酸が変化することが多いものの一部の塩基変化にはアミノ酸が変化しないものもある。

遺伝子 S では、コドンの 1 番目と 2 番目の塩基はあまり変化していない。突然変異によるアミノ酸変化が有害で、これを排除しようとする自然選択（純化選択）がより強くはたらいているためであると考えられる。

問 25) 【正解】 I

【解説】 \underline{XX}/Y がつくる卵の性染色体構成は $\underline{X^mX^m}$ または Y^m が同数 (m はメス親由来を示す)。 X/Y がつくる精子の性染色体構成は X^p または Y^p が同数 (p はオス親由来を示す)。これに基づいてパネット・スクエアを完成させると、受精卵としては $\underline{X^mX^mX^p}$, $\underline{X^mX^mY^p}$, X^pY^m , Y^pY^m が同数ずつできる。しかし、 \underline{XXX} および YY は生存しないので、 $\underline{X^mX^mY^p}$ (メス) と X^pY^m (オス) が同数ずつ生き残る。

	X^p	Y^p
$\underline{X^mX^m}$	$\underline{X^mX^mX^p}$ (致死)	$\underline{X^mX^mY^p}$ (メス)
Y^m	X^pY^m (オス)	Y^pY^m (致死)

付着 X 染色体は、ショウジョウバエ遺伝学の開祖 Thomas. H. Morgan の妻で、自身も生物学者であった Lilian V. Morgan が 1922 年に発見したものである。この特殊な遺伝様式はその後の染色体説の確立にも大きく貢献した。

分岐時間の推定

進化速度 (v) が一定であると、2 種の分岐時間 (t) は、2 種間の進化的距離 (d) から、 $\hat{t} = d/(2v)$ により推定できる。霊長類の分岐時間は、初期にはミトコンドリア DNA の塩基配列情報から、その後、核遺伝子の情報も使って調べられている。推定された分岐時間は、以下のとおりである。

チンパンジーとヒト : 400~700 万年前

ゴリラと (ヒト, チンパンジー) : 600~900 万年前

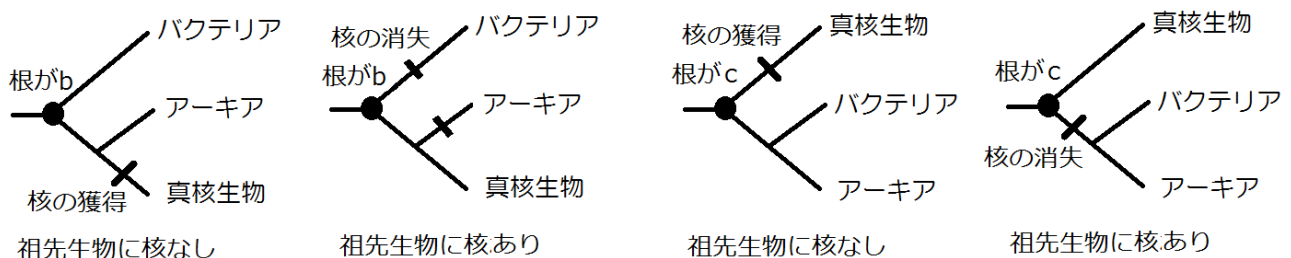
オランウータンと (ヒト, チンパンジー, ゴリラ) : 1200~1600 万年前

問 26) 【正解】 H 【部分点】 G I

【解説】 3 ドメイン説は 1990 年にカール・ウーズによって提唱された。リボソーム RNA の解析によって、それまで原核生物とよばれていたものはバクテリアとアーキアに 2 つのグループに分けられた。アーキアは原始地球のような高温や高圧の極限的な環境で生育することから「古細菌」とよばれてきたが、最近の研究からこの名称は適当でないことがわかってきた。

無根系統樹に根をつけて有根系統樹にすることは、それらの祖先を考えることになる。多くの場合、対象とする生物群に近い生物を外群として生物群内の関係を調べる。たとえば、魚類、両生類、爬虫類、哺乳類などの脊椎動物の系統関係を調べるときには、外群としてナメクジウオなどがもちいられる。しかし、3 つのドメインには生物全体が含まれているために外群が存在しないので、この方法は使えない。この問題は、重複した遺伝子に注目することで解決された。それによると、図 2 の b の位置に祖先生物が存在し、アーキアはバクテリアよりも真核生物に近い存在であることがわかった。

生物の系統解析で使用される方法の 1 つに最節約法があるが、そこでは系統樹にいろいろな形質や DNA のデータを配置して形質などの変化回数が最も小さいものが優れているとする。図 2 の b や c に根をつけて、祖先生物に核がなかったと仮定する場合と核があったと仮定する場合の系統樹は下図のようになる。この 4 つの系統樹のうち、最小の変化の回数が 1 回ものは 3 つあり、2 回のは 1 つである。この場合、核の有無だけでどの系統樹が正しいかを判断することはできない。



表紙の写真（果実発達中の「メンデルのブドウ」：小石川植物園）

遺伝学の基礎を築いたメンデル Gregor J. Mendel (1822-1884) が実験に用いた由緒あるブドウの分株で、「メンデルのブドウ」と呼ばれています。これは第 2 代園長を務めた三好 學が、大正 2 (1913) 年チェコのブルノーに、メンデルが在職した修道院を訪ねたとき、旧実験園に残っていたブドウの分譲を依頼して、その翌年に同地から送られてきたものです。この後、メンデル記念館のブドウは消滅したことがわかり、本園のブドウを里帰りさせて、現地にも同じブドウの株を復活させました。(小石川植物園のホームページより)

写真は 6 月 15 日に撮影したもので、5 月後半に開花し、その後果実が発達している。

