

日本生物学オリンピック2017

予選問題

2017年7月16日（日） 13:30~15:00

〈正解・解説〉



問1) 【正解】H 【部分点】G

【解説】x個の塩基からなるオリゴヌクレオチドと100%塩基配列が一致するゲノム領域の出現確率は、 $(1/4)^x$ である。ゲノムのサイズは30億 (3×10^9) 塩基対とされており、両鎖あるため、ゲノム全体においてオリゴヌクレオチドと100%塩基配列が一致する領域の出現回数の期待値は、 $3 \times 10^9 \times 2 \times (1/4)^x$ となる。この値が1未満になるようなxが求める値である。

$$3 \times 10^9 \times 2 \times (1/4)^x = 6 \times 10^9 / 4^x \approx 6 \times 4^{15} / 4^x = 6 \times (4^{15}/4^x) < 1$$

x=16では $6 \times (4^{15}/4^x) = 6/4 = 1.5$ となって1を越えるが、x=17とすれば $6 \times (4^{15}/4^x) = 6/4^2 = 0.375 < 1$ となるので、正解は17塩基以上である。二本鎖であることを忘れて、ゲノム全体の塩基数を $3 \times 10^9 \times 2$ ではなく 3×10^9 として計算してしまうと、16塩基になる。そこで、Gに部分点を与える。

なお、実際にPCRをする場合には、より特異性を高めるために、もっと長いプライマーを作成することが通常である。

問2) 【正解】A 【部分点】C

【解説】図1の電気泳動ではDNAは上から下に向かって移動し、短いDNA断片ほど移動度が大きいので下に、また、長いDNA断片ほど移動度が小さくなるので上に位置することになる。

レーン1の電気泳動の結果は、アの制限酵素は環状DNAを2か所切断することを示している。レーン2の電気泳動の結果は、イの制限酵素は環状DNAをまったく切断しないか、1か所切断するかのどちらかであることを示している。レーン3の電気泳動の結果は、アの制限酵素とイの制限酵素を同時にもちいると、環状DNAを3か所切断することを示している。したがって、イの制限酵素は環状DNAを1か所切断することになる。またレーン1とレーン3の比較から、イの制限酵素はアの制限酵素で切断されるDNA断片の中で小さいDNA断片を切断することも明らかである。

- A ○ 酵素アの認識部位が2か所あり、短い方のDNA断片の上に酵素イの認識部位があるので、正しい。
- B × 酵素イの認識部位が2か所、酵素アの認識部位が1か所なので、誤り。
- C × 酵素アの認識部位は2か所あるが、長い方のDNA断片の上に酵素イの認識部位があるので、誤り。
- D × 酵素イの認識部位が2か所、酵素アの認識部位が1か所なので、誤り。
- E × 酵素イの認識部位がないため、誤り。
- F × 酵素アの認識部位がないため、誤り。

問3) 【正解】B 【部分点】F

【解説】タンパク質合成の情報がDNAに暗号化されていることは、1950年代に明らかになった。1960年代になるとアミノ酸を指定するトリプレット暗号は、M. ニーレンバーグらによって解明された。しかし、アミノ酸を指定しない終止コドンの解明は、A. ガレンやS. ブレナー等によってこの問題に示してあるような方法で解明された。この研究では、アルカリフォスファターゼ遺伝子のある特定のコドンが終止コドンに変わったものが元の変異体であり、この終止コドンが1塩基置換で再びアミノ酸をコードするようになったものが復帰変異体であるととらえることができる。アルカリフォスファターゼのトリプトファンが1つほかのアミノ酸(リシン、グルタミン、チロシン)に置き換わっていた復帰変異体があったということは、元の変異体ではアルカリフォスファターゼ遺伝子のトリプトファンコドンの1つが終止コドンになっており、それがトリプトファン、リシン、グルタミン、チロシンのいずれかのコドンに変わって、復帰変異体となったと考えられる。トリプトファンを指定するコドンはUGGだけであり、終止コドンにはUAA、UAG、UGAの3種類がある。まず復帰変異体の中に終止コドンの1塩基置換でトリプトファンコドンに戻ったものがあつたことに着目すると、この終止コドンはUAGかUGAであつたことがわかる。次に1か所の塩基置換によってトリプトファンコドン以外に生じ得るコドンを考えると、UAGの場合はロイシン(UUG)、チロシン(UAA、UAC)、グルタミン(CAG)、リシン(AAG)、グルタミン酸(GAG)があるが、UGAの場合は、システイン(UGU、UGC)、ロイシン(UAA)、セリン(UCA)、アルギニン(AGA)、グリシン(GGA)であり、チロシンやリシンを指定するコドンが生じることはない。よつて正解はBとなる。この問題では、実験結果を簡略化しているが、実際にはもっと多くの突然変異体が使用されている。

問4)【正解】D 【部分点】B

【解説】日本酒の醸造工程では、イキのよい清酒酵母を確保する必要がある。現代では、ほとんどの酒造メーカーでは醸造協会などから頒布される純粋培養された清酒酵母を桶に投入している。伝統的な生酛（きもと）造りを行っている数少ないメーカーでは、麹菌を繁殖させた蒸し米に水を加え、開放系の容器で温度管理と攪拌操作だけで清酒酵母が生育してくるのを待つ。

開放系の桶には蔵に居着いている微生物が入り込んで、蒸し米から生じたグルコースなどの糖分を分解しながら繁殖し、変遷する。温度が高いと腐敗菌や乳酸菌が猛烈に繁殖して腐ってしまうので、5°C程度の低温でスタートする。伝統的な日本酒の製造が厳冬期に行われる理由である。最初に枯草菌などの生育の早い好気性の細菌が生育するが、シュードモナス属細菌が生育すると酸素を使い切った時点で代わりに硝酸を酸素受容体とする硝酸呼吸を始める。この過程で生じる亜硝酸は抗菌作用を有し、枯草菌などの雑菌が死滅する。酸素が枯渇すると乳酸菌が乳酸発酵を開始して生育し、pHが低下するためシュードモナス属細菌は死滅する。乳酸菌もやがて自身が生成した乳酸により衰えていく。清酒酵母は生育が遅いが、乳酸による酸性環境に強いので最後にゆっくりと生育し、アルコール発酵により生成したアルコールで乳酸菌を死滅させる。最終的に、ほとんど純粋な清酒酵母が大量に存在することになる。

問5)【正解】J 【部分点】L

【解説】お酒に弱くなる原因の1つはアセトアルデヒドがより多く体内に存在することであり、アセトアルデヒドを分解し酢酸を生成する反応に対して活性がない酵素Lys⁵⁰⁴をもつヒトがお酒に弱くなる。ALDH2は4量体を形成するため、この遺伝子座でLys⁵⁰⁴のホモ接合のヒト（お酒が全く飲めない、少量のお酒でも動悸、嘔気、頭痛などを引き起こす）以外にも、ヘテロ接合のヒトでも高々 $0.5^4=0.0625$ の酵素のみが機能するだけで、概して活性が低くお酒に弱くなる（お酒を少しは飲めても、顔面が紅潮するなどお酒に弱い体質になる）。今Lys⁵⁰⁴のホモ接合とGlu⁵⁰⁴とLys⁵⁰⁴のヘテロ接合のヒトの割合は、それぞれ $0.23^2=0.0529$ と $2 \times 0.23 \times 0.77=0.3542$ になるので、ALDH2の多型によってお酒に弱くなっているヒトの割合は、 $0.0529+0.3542=0.4071$ で約41%となる。（あるいは、Glu⁵⁰⁴のホモ接合のヒトの割合が $0.77^2=0.5929$ であることから、Lys⁵⁰⁴のホモ接合とGlu⁵⁰⁴とLys⁵⁰⁴のヘテロ接合のヒトの割合は $1-0.5929=0.4071$ と求められる。）よって正解はJとなる。日本の集団ではALDH2のLys⁵⁰⁴の対立遺伝子をもつヒトの頻度が比較的高く、お酒に弱い人の割合が欧米人に比べて多い原因となっている。

問6)【正解】D 【部分点】A B C

【解説】花粉発芽と花粉管の伸長には、スクロースなどの糖類、ホウ素、カルシウムが重要であると考えられている。その他にマグネシウムとマンガンの花粉発芽と花粉管の伸長に対する効果を、表の実験結果から考察してほしい。

- ① 妥当。ホウ酸を添加しない培地では発芽率が0になっていることから、花粉の発芽にホウ素が必須であると考えられる。
- ② 不適當。マグネシウムは花粉管の成長を抑制しているだけでなく、花粉の発芽率も低下させている。
- ③ 不適當。カルシウムは花粉の発芽率をわずかに高めるが、それだけではなく、花粉管の伸長も促進している。
- ④ 不適當。マグネシウムを単独で与えたときと、マグネシウムとカルシウムを同時に与えたときとでは、花粉に対する効果が逆転している。マグネシウムとカルシウムを同時に与えたときの効果は、カルシウムを単独で与えたときの効果がやや増強された形になっており、「カルシウムが存在するときには、マグネシウムはカルシウムの作用を強める」ととらえるのが合理的である。
- ⑤ 妥当。マンガンとカルシウムを同時に投与した場合の実験結果は、マグネシウムとカルシウムを同時に投与した場合のもの、非常によく似ている。そのためマンガンは、カルシウム共存下でマグネシウムと同様のはたらきを果たすことができるものと考察できる。

問7) 【正解】C 【部分点】G J

【解説】一般に、ある遺伝子の機能欠損変異と別の遺伝子の機能欠損変異が同じ形質に対して逆の影響を及ぼすようなとき、これらの変異をあわせもつ二重変異体の表現型から両遺伝子のはたらき方を推定することができる。本問の場合、 T の機能欠損変異体 t では毛の分岐回数が減り、 R の機能欠損変異体 r では分岐回数が増えるので、分岐に対して T は促進的、 R は抑制的に作用することがまずわかる。作用の仕方には、① T が R を介して分岐に作用する、② R が T を介して分岐に作用する、③ T と R が独立に作用する、の3通りがある。分岐に対して促進的か抑制的かを含めると、

- ① : R は分岐を抑制し、 T は R のはたらきを抑えることで、間接的に分岐を促進する。つまり選択肢G。
- ② : T は分岐を促進し、 R は T のはたらきを抑えることで、間接的に分岐を抑制する。つまり選択肢C。
- ③ : T は分岐を促進し、 R はこれとは独立に分岐を抑制する。つまり選択肢J。

ここで、①~③のそれぞれについて、二重変異体 tr がどうなるかを考える。①なら、 R の機能が欠損していれば、 T の機能の有無によらず、 R による分岐抑制がなくなるので、 tr では r と同様に分岐回数が増える。②なら、 T の機能が欠損していれば、 R の機能の有無によらず、 T による分岐促進がなくなるので、 tr では t と同様に分岐回数が減る。③なら、 tr では T による分岐促進がなくなる効果と R による分岐抑制がなくなる効果が相加的に現れるので、分岐は t と r の中間的な回数となる。このうち、問題文の説明に合うのは②で、選択肢としてはCである。

植物の毛は、本問にあるように、一般に細胞が突出したもので、植物発生学の専門用語では、毛状突起(英語では **trichome**)とよばれる。シロイヌナズナの葉・茎の毛状突起は、単細胞性で分岐しているが、植物によって、また器官によって、複数の細胞で構成されているもの、分岐のないものなど、様々なタイプの毛状突起がある。

問8) 【正解】H 【部分点】C D

【解説】本問では、食虫植物モウセンゴケの葉の屈曲反応が屈性か傾性か、その刺激は物理的な接触か化学物質かを問うている。

まず刺激についてみてみると、ショウジョウバエを付着させたときには屈曲が起きたのに対し、小石を付着させたり、ブラシでこすったりしたときには屈曲が起きなかったことから、単純な物理的接触ではなく、ショウジョウバエに由来する何らかの化学物質であることが推察できる。生きたショウジョウバエや潰したショウジョウバエの死骸では屈曲反応が早く、無傷の死骸では遅かったことは、この化学物質がショウジョウバエの生命活動によって体内から分泌・放出されるものであることを窺わせる。

次に刺激の方向についてみてみると、いずれの実験でも葉の表側にしか刺激を与えていないので、刺激の方向が変わると屈曲方向が変わるかどうかはわからず、屈性か傾性かを判断することができない。以上をまとめると、この葉の屈曲は化学屈性か化学傾性で、そのどちらかはわからない、つまり選択肢Hが正解となる。ちなみに、モウセンゴケに近縁な食虫植物でも、ハエジゴク(ハエトリグサ、ハエトリソウ)の場合は、捕虫葉が閉じる屈曲反応は接触傾性であることが示されている。

問9) 【正解】I 【部分点】B D E G H J

【解説】ヘモグロビンやミオグロビンは酸素分子と可逆的に結合し、ヘモグロビンは酸素の運搬に、筋肉中のミオグロビンは酸素の貯蔵に寄与している。

- ① 図より平地の人の赤血球中のヘモグロビン（曲線3）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。誤り。
- ② 単離ヘモグロビン（曲線2）とミオグロビン（曲線1）を比較すると、単離ヘモグロビンの方がミオグロビンよりも右側に曲線が存在している。したがって単離ヘモグロビンの方が酸素を手放しやすいことがわかる。誤り。
- ③ 単離ヘモグロビン（曲線2）と赤血球中のヘモグロビン（曲線3）を比較すれば、2,3-BPGの結合による酸素親和性の変化を知ることができる。赤血球中のヘモグロビンの方が酸素解離曲線は右側に移動しており、酸素と結合しにくいことがわかる。すなわち、2,3-BPGはヘモグロビンの酸素親和性を低下させている。正しい。
- ④ 高地に適応した人のヘモグロビン（曲線4）は、肺胞（55 mmHg）で87%、末梢（30 mmHg）で47%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。この値は平地の人のヘモグロビンの場合と等しい。誤り。
- ⑤ 高地に適応した人のヘモグロビン（曲線4）は、平地の人の赤血球中のヘモグロビン（曲線3）よりも、右側に移動しており、酸素と結合しにくいことがわかる。2,3-BPGはヘモグロビンの酸素親和性を低下させることから、高地に適応した人の赤血球中には平地の人よりも多くの2,3-BPGが誘導されていると考察される。正しい。

問10) 【正解】A 【部分点】B C D E G H

【解説】この写真は健康なヒト成人の末梢血の走査電子顕微鏡写真である。1の細胞は中央が窪んだ円盤状で赤血球と判断できる。2は小型で数が多いことから血小板であり、3は大きな球状な細胞で白血球であることがわかる。

- ① 哺乳類の赤血球は成熟の過程で細胞核やミトコンドリア、リボソームなどの細胞内器官を失い、無核である。内部にはヘモグロビンを含み、酸素運搬を行う。正しい。（なお、血小板も巨核球の細胞質が数千個にちぎれたものであるため無核である。白血球は核を有する。）
- ② 血液中の血球の正常値は、赤血球数が男性：400万～550万個/ μ L、女性：350万～500万個/ μ L、白血球数が3,500～9,000個/ μ L、血小板が15～35万個/ μ Lである。したがって、血小板の方が白血球よりもずっと数が多い。電顕写真からも明らかに2の細胞の方が数が多いことが読み取れる。正しい。
- ③ この写真には血小板が多数観察され、フィブリン繊維も見られないことから、血液の凝固反応が生じていないことがわかる。したがって、採血の際にはヘパリンあるいはクエン酸ナトリウムなどの血液凝固阻止剤が加えられたと考えられる。正しい。
- ④ 赤血球は核を失ったうえ、狭い毛細血管にも入り込む必要があることから、人体の中でもっとも小型の細胞の1つである。そのサイズは7～8 μ mであり、スケールバーは50 μ mで矛盾する。誤り。
- ⑤ 鎌状赤血球貧血症はヘモグロビン β 鎖の6番目のアミノ酸がグルタミン酸からバリンに変異することが原因の遺伝病である。赤血球中に変異ヘモグロビンが増えると、赤血球は鎌型に変形し、これらは壊れやすいので貧血と黄疸症状が現れる。この写真にみられる赤血球は円盤状で、鎌状のものは見られない。誤り。

問 11) 【正解】 B

【解説】 軸索上の 1 点を刺激すると、伝導はその場所から両方向に広がる。したがって、3 点を同時に刺激すると、イからの伝導が最初に X に到達し、X では活動電位が生じる。アとイからの刺激による伝導は、アとイの間で衝突し、不応期の存在によって、そこで消滅する。同様にイとウからの伝導はその中間点で消滅する。パターン 2 とパターン 3 から、イと X の距離はウと X の距離より近いので、イとウの中間点は X よりウに近く、ウからの伝導も X には到達できない。したがって、イを単独に刺激した時のパターンになる。

問 12) 【正解】 B 【部分点】 E H

【解説】 受精とは狭義には精子が卵内へ侵入することを指すが、真の受精成立は、卵内へ侵入した精核が卵核と融合して細胞分裂を開始することである。精子が卵内へ侵入することおよび精核が卵内を移動して卵核と融合する過程には、細胞運動機構が関与する。細胞運動にはアクチンフィラメント系、微小管系の運動機構が考えられる。そこでそれぞれの阻害剤をもちいた時の受精反応の変化から、これらの運動機構の関与を検討した。

図 1 から、海水中のサイトカラシン B 濃度が上昇すると受精率が減少した。しかし媒精 10 分後、すなわち精子が卵内に侵入した後であればサイトカラシン B 海水中でも核分裂が進行し、受精が成立したことがわかる。サイトカラシン B は卵内へ侵入した精子の卵核との融合、核分裂の進行を阻害しないことから、サイトカラシン B 海水中で媒精した時に受精率が落ちたことは、サイトカラシン B 海水中で精子侵入が起こらなかったものと結論できる①。コルセミド海水中では、精子が卵内へ侵入した後にコルセミド海水に移すと、前核同士の融合前（媒精 10 分後）であれば受精は抑制されたことから、両性前核の融合に至る過程に微小管系の運動が関与している⑤。図 2 においてコルセミド海水中で媒精した時に受精が成立しないことから、これだけではコルセミドが精子侵入を阻害している可能性を棄却できない。そこで②および③にも部分点を与える。この可能性を棄却する方法として、コルセミド海水中で媒精し、10 分後にコルセミドを含まない海水中に卵を移して、受精率をみるのが考えられる。

一般に細胞の表層部分はアクチンフィラメントが分布しており、さまざまな細胞の形の変化には表層のアクチンフィラメントの関与が考えられている。精子が卵内へ侵入する時にも卵表層のアクチンフィラメントが積極的な役割を果たしている。一方卵内へ侵入した精子は精子中心体を卵内へ持ち込み、中心体の周囲には精子星状体が発達する。精子星状体は微小管から構成されている。コルセミドはこの精子星状体の形成を阻害することで、卵内へ侵入した精核の移動を抑制し、精核と卵核の融合による真の受精成立を阻害する。

問 13) 【正解】 B 【部分点】 A C E H

【解説】 問題にもちいた実験は、頭部内胚葉と神経堤細胞が頭部骨格の形成にどのように関与しているのかを示した、Couly ら、そして Schneider と Helms による有名な実験である。頭部前方の骨格は神経堤細胞が分化して形成されることが知られているが、本問題ではその知識は必要ない。

頭部前方の内胚葉を除去すると、神経堤細胞が存在するにも関わらず頭部前方骨格が形成されなくなることから、頭部内胚葉は頭部前方骨格の形成に必須であることがわかる。一方、神経堤を交換移植すると、頭部前方の骨格の形はその神経堤が由来する動物の型となること、そしてこの時の内胚葉は移植された動物のものであることから、骨格の型の情報は神経堤細胞が担っており、内胚葉には骨格の型を指令することはできないことが推測される。

〔参考文献〕 Schneider, R. A. & Helms, J. A. (2003) Science 299(5606), 565-8.

問 14) 【正解】 C 【部分点】 F H

【解説】 動物は、現在地の位置を知る必要がある。たとえば、餌を求めて移動した後、巣に帰るときは、来た道を帰るのではなく、近道を通って帰る方が効率的である。すなわち、巣がどの方向にあるのか、および巣までの距離を知っている方がよい。

問題で取り上げた動物は、移動の際に現在地を認識するシステム (Path integration system) をもっているが、完璧ではなく、位置の決定に誤差を生じる。この誤差は移動するたびに蓄積する。地磁気情報は、この誤差の減少に寄与していると考えられている。

- ① 餌ににおいがあり、この動物が主として餌のにおいを頼りに移動したと仮定すると、長経路で訓練し、磁場を 90 度ずらした環境のときだけ移動距離が長くなることはない。したがって、この記述は間違っている。
- ② この動物が記憶した経路に沿って移動したと仮定すると、移動距離は訓練した経路の道のりに近いはずである。しかし、すべての場合、移動距離は訓練した道のりより短かった。したがって、この記述は間違っている。
- ③ この動物が長距離で訓練した場合も短距離と訓練した場合と同様の移動距離の平均値を示しており、何らかの形で位置情報を把握して出口に移動していることがわかる。磁気をずらした場合に (特に長距離において顕著に) その影響が出ていることから、位置情報の把握に磁気 (地磁気) も利用していることが推察される。したがって、この記述は正しい。
- ④ 磁場を 90 度ずらした環境では地磁気の情報を利用できない。むしろ、間違った情報を与えてしまう。したがって、この記述は間違っている。

〔参考文献〕 Kimchi, T., Etienne, A. S., & Terkel, J. (2004) PNAS 101(4), 1105-1109.

問 15) 【正解】 D 【部分点】 E F

【解説】 図 1 は集中分布、図 2 は一様分布、図 3 はランダム分布である。自然界で、もっとも普通にみられる分布は、個体がパッチ状に集合する「集中分布」である。繁殖の方法 (植物では栄養生殖など) や生育に適した環境要因が集中の原因となることが多い。「一様分布」は個体間に競争や縄張り制など反発力がはたらく場合にみられる。「ランダム分布」は自然界ではあまり例がない。条件の均一な生育地において風散布種子で広がる植物の分布など、ほとんど個体間に何の関係もない場合にみられる。

グラフ (ア) はランダム分布、(イ) は一様分布、(ウ) は集中分布である。(ア) のランダム分布のグラフを基準にすると、(イ) の一様分布のグラフはデータのばらつきが少なく (分散が小さい)、(ウ) の集中分布のグラフはデータのばらつきが大きい (分散が大きい) ことがわかる。詳しくは、数学の統計的手法をもちいて、個体数の平均値と分散を求めることで、分布のパターンを判断する。

〔出典・参考資料〕 『ベーシックマスター 生態学』 : オーム社

問 16) 【正解】 A 【部分点】 B

【解説】生存曲線が対数で示されていると、曲線の傾きは死亡率に対応している。すなわち、傾きが大きいと死亡率は高く、傾きが小さいと死亡率は低いことを示している。

生存曲線 a : 年齢とともに傾きは少しずつ小さくなっているため、死亡率はゆるやかに減少している。

生存曲線 b : 高齢期になると傾きは急激に大きくなっているため、死亡率は高齢期に急激に増加している。

生存曲線 c : 傾きは、12~13 歳までは小さくなっているが、それ以降大きくなっている。死亡率も同様に推移する。

問 17) 【正解】 H 【部分点】 I

【解説】植物の種名が与えられていないので、陽樹と陰樹を表から読み取る必要がある。高木層のア~ウ種について考えてみると、高木層がア種である③の林の中で亜高木層や低木層にア種はまったく生育していない。このことから、ア種は陽樹でありその林床でア種の芽生えが育たないと考えられる。一方、イ種やウ種は亜高木層や低木層にもみられるので陰樹である。したがって、陽樹の林である③が遷移のもっとも早い段階の林と考えられる。高木層の木が枯れたり倒れたりすると次の世代へ徐々に置き換わっていくので、次はア種とイ種の混交林である②となる。同様に考えると次は高木層にイ種を含んでいる④、最後に①でウ種の林となる。①の亜高木層、低木層を見るとウ種が生育しており、ウ種の林が極相となり、維持されていくと考えられる。

問 18) 【正解】 I 【部分点】 G J

【解説】個体 3 の遺伝子型は rr であることから、個体 1 と個体 2 の遺伝子型は Rr である。

個体 4 の遺伝子型は 1 つに決めることはできない。可能性のある遺伝子型は RR と Rr であるが、この家族以外の情報が必要である。対立遺伝子 R の頻度を p 、対立遺伝子 r の頻度を q とすると、 RR の頻度は p^2 であり、 Rr の頻度は $2pq$ である。したがって、 R 型の中で Rr である確率は $2pq/(p^2 + 2pq) = 2q/(p + 2q)$ で求められる。 $p = 0.75$ 、 $q = 0.25$ を代入して、この確率は 0.4 となる。

rr と RR の間の子は、すべて Rr であり、表現型は R 型である。 rr と Rr の間の子は、 Rr と rr が $1:1$ であり、半分は r 型である。したがって、個体 4 が Rr である確率の $1/2$ が、個体 5 の表現型の r 型である確率である。すなわち、この確率は $0.4/2 = 0.2$ である。

問 19) 【正解】 J 【部分点】 K L

【解説】遺伝的浮動は、自然選択の有無にかかわらず、集団のサイズ（個体数）が有限であれば、はたらいている。その影響は集団サイズが小さいほど大きい。実験室に作った小さい集団では、その影響は大きく、遺伝子頻度は大きく変動する。

平衡選択は遺伝的変異を積極的に維持する選択様式であり、超優性選択（ヘテロ接合強勢）や頻度依存選択が知られている。超優性選択は、ヘテロ接合体の適応度がホモ接合体の適応度より高く、遺伝的変異を維持できる選択様式である。頻度依存選択は、適応度が対立遺伝子の頻度に依存する選択様式である。超優性選択と頻度依存選択を区別するには、ヘテロ接合体の適応度がホモ接合体より高いかどうか、適応度が対立遺伝子の頻度に依存するかどうか、を知る必要がある。

実験 I では、 R_1 遺伝子の頻度は 0.4 前後で変動しているため、平衡選択と遺伝的浮動がはたらいていると考えられる。実験 II では、自然選択がはたらいている特徴的な傾向はみられず、遺伝的浮動のみがはたらいていると考えられる。

問 20) 【正解】 F 【部分点】 B E H

【解説】 多くの形質はその発現に必要な遺伝子型であっても、常に表現されるとは限らない。たとえばハンチントン病は優性遺伝子によって発現する遺伝病であるが、いつ発現するかは人によって異なり、発病する前に他の原因で亡くなってしまいうこともある。その遺伝子型をもった個体の形質を発現する率を浸透度という。①と②の常染色体にある雄の生存力を半分にする優性遺伝子とは、浸透度 50%の致死遺伝子と言い換えることができる。

性決定にかかわる遺伝子に異常があると性特異的致死や性特異的に生存力の低下がみられる。また、ショウジョウバエでは雄はヘミ接合体なので、雄の X 染色体の転写を 2 倍にして遺伝子量補正が行われるが、この遺伝子量補正にかかわる遺伝子に異常があると雄特異的致死となる。

①：雌 4/7 雄 3/7 となる。

生存力を落とす遺伝子をもたない雄と、生存力を落とす遺伝子をもつ雄が 1:1 の比率で生じ、生存力を落とす遺伝子をもつ雄の半分、すなわち雄の 1/4 が致死になる。雌の生存力は正常である。

②：雌 2/3 雄 1/3

この雌から生じる子はすべて常染色体にある雄の生存力を半分にする優性遺伝子をヘテロでもつので、雄の半分が致死となる。雌の生存力は正常である。

③：雌 2/3 雄 1/3

優性雄特異的致死遺伝子についてヘテロなので、この遺伝子をもつ雄ともたない雄が 1:1 の比率で生じる。したがって、雄の 1/2 は致死となる。雌の生存力は正常である。

④：雌のみ生じる。

雄は必ず優性雄特異的致死遺伝子を受け継ぐのですべて致死となる。

⑤：雌雄同数で生じる

ヘテロ接合体の雌から劣性致死遺伝子を受け継ぐ雄は半数であるが、劣性ヘテロ接合体も正常に生育できる。

⑥：雌 2/3 雄 1/3

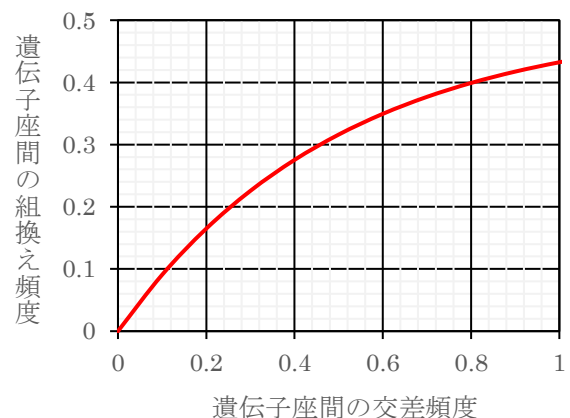
雄は雌から X 染色体を 1 本受け継ぎ、雄親からは Y 染色体を受け継ぐ。そこで、劣性致死遺伝子がヘテロ合の場合、X 染色体の半分が劣性致死遺伝子となるので、雄の半数が致死となる。

問 21) 【正解】 G 【部分点】 H

【解説】 問題では、イとウがもっとも離れている。イに近いのはエ、次に近いのはオ、その次がアである。したがって、G が正解である。

問題文にも書いてあるように、T. H. モーガンの学生だった A. H. スタートバントは、連鎖した遺伝子座と交差による組換えの発見により、特定の染色体上の遺伝子座を整列させて遺伝学的地図を作成する方法を考案した。スタートバントは「同一染色体上の 2 つの遺伝子座間の距離が長くなるほど交差の確率が高くなり、組換え頻度が上昇する」と仮定した。さらに、彼は「2 つの遺伝子座間の組換え頻度は、距離が短ければ比例するが、距離が長いと比例しなくなる」と考えた。

組換え頻度に基づいて作成した遺伝子座の位置関係を示したものが連鎖地図である。遺伝子座間の距離が長いと複数の交差が起き、組換え頻度は交差頻度より低くなる。右図は交差頻度と組換え頻度の関係をホールデンの式から求めたものである。このため、精度の高い連鎖地図を作成するには、多くの遺伝子座をもちいる（隣り合った遺伝子座間の距離を短くする）必要がある。



問 22) 【正解】 K

【解説】 四倍体の遺伝子型 $SSss$ の各遺伝子に説明のために番号をつけ、 $S_1S_2s_1s_2$ とする。この 4 本のうち 2 本をもつ配偶子がランダムにできるので、つくられる配偶子は S_1S_2 , S_1s_1 , S_1s_2 , S_2s_1 , S_2s_2 , s_1s_2 の 6 種類となる。したがって配偶子の遺伝子型とその分離比は $SS : Ss : ss = 1 : 4 : 1$ であり、この自家受精の結果できた個体では、

$$SSSS : SSSs : SSss : Ssss : ssss = 1 : 8 : 18 : 8 : 1$$

となる。したがって劣性形質をもつ個体は $1/36$ であり、 $35/36$ は S 遺伝子を少なくとも 1 つもち優性形質となる。遺伝子頻度は 0.5 であるのに、劣性形質をもつ個体は $1/36$ ということになる。

ここでは、四倍体の減数分裂において、「4 本の染色体のうち 2 本ずつがランダムに対合し、相同染色体を 2 本もつ配偶子がつくられるとする」としたが、実際には相同染色体対は必ずしも 2 本で構成されず、3 本や 4 本、あるいは対合せず 1 本が単独で振る舞う場合などがあり、その遺伝はさらに複雑である。

問 23) 【正解】 D 【部分点】 B C H L

【解説】 1900 年に発見されたヒトの ABO 式血液型は、発見された当時は独立な 2 つの遺伝子座 (対立遺伝子 A と a , B と b) で決まると考える説が有力であった。しかし、この説で説明すると、期待される子の血液型の中には実際には出現しない血液型が含まれてしまう場合がある。

どちらかの親が A 型の場合、実際には A 型 (遺伝子型 AO) と B 型 (遺伝子型 BO) の親からはすべての血液型が出現する。A 型の親の遺伝子型が $Aabb$ であり、もう一人の親の遺伝子型が $AaBb$ または $aaBb$ であると考え、すべての血液型の子が出現することが期待され、説明できる。

どちらかの親が AB 型の場合、実際には O 型の子どもは生まれない。しかし、AB 型の遺伝子型が $AaBb$ であるとする、もう一人の親の遺伝子型によっては、たとえば、B 型 ($aaBb$) では、すべての血液型の子どもの出現が期待され、説明できない。

どちらかの親が O 型場合、実際には AB 型の子どもは生まれない。しかし、2 つの遺伝子座を仮定すると A , B の両方の優性遺伝子をもう一人の親からもらうことが可能になり AB 型の子が生まれることが期待され、説明できない。したがって、正解は④と⑥となる。

このように、はじめに提唱された 2 つの遺伝子座による説は事実と合わない点があるため、1 つの遺伝子座にある A , B , O の 3 つの対立遺伝子による説が提唱された。その後、集団の血液型頻度から各遺伝子の遺伝子頻度を計算し、それぞれの説から導かれる血液型頻度と比較することにより、1 つの遺伝子座にある 3 つの対立遺伝子による説が広く認められるようになった。

問 24) 【正解】 G 【部分点】 E I

【解説】 特定の種の配列だけにみられるアミノ酸はどのような系統樹であってもその種にいたる末端の枝（「外部枝」とよばれる）で生じた変化とみなせる。最小の形質の進化で説明できる系統樹をもっとも可能性のある系統樹として選ぶ最（大）節約法では、そのような外部枝での変化によって進化関係を判別することは難しい。そこで、このようなアミノ酸（「シングルトン」とよばれる）を取り除くと

配列上の位置	38	46	67	68	80	87	88	91	95	96
シーラカンス	L	K	S		M		E	N		
ガー	M	Q	A	A	I	Q	Q	H	T	T
アロワナ	M	Q	A	A	I		Q	H	T	
ハイギョ	L	K	S				E	N	L	T
チョウザメ	L	Q	A	A	M	Q	E	N	L	

となる。68, 87, 96 番目の位置では取り残されたアミノ酸は同じもので、最（大）節約法ではこれらからも進化関係を判別することができない。そこでこれらのサイトを除くと

配列上の位置	38	46	67	80	88	91	95
シーラカンス	L	K	S	M	E	N	
ガー	M	Q	A	I	Q	H	T
アロワナ	M	Q	A	I	Q	H	T
ハイギョ	L	K	S		E	N	L
チョウザメ	L	Q	A	M	E	N	L

となる。これらの配列ではガーとアロワナは同じアミノ酸を各サイトでもつことから、ガーとアロワナが1つのグループ、姉妹群を形成することがわかる。38, 80, 88, 91, 95 番目の位置のアミノ酸ではシングルトンを除くとシーラカンス・ハイギョ・チョウザメは同じであるものの、残りの 46, 67 番目の位置のアミノ酸からはチョウザメがガーとアロワナと同じアミノ酸をもつことから、チョウザメがガーとアロワナに進化上近縁であることが示される。よって、正解は G となる。

ハイギョとシーラカンスはともに肉鰭（にくき）類に属する魚であり、魚類のなかでも四肢動物（両生類、爬虫類、鳥類、哺乳類を含む）と進化的には近縁である。一方でその他のチョウザメ、ガー、アロワナは条鰭（じょうき）類に属している。チョウザメは、条鰭類の中でもその進化の初期に他の条鰭類から分化した魚である。ガー（やアミア）も初期に分化した魚として知られている。現存する硬骨魚類の多くは真骨（しんこつ）類の魚であり、アロワナをはじめウナギ、ニシン、コイ、サケ、タラ、スズキ、メダカ、カレイ等の魚を含む。近年のゲノム研究から、シーラカンスやガーは分子レベルでも進化速度が真骨類や四肢動物に比べ遅くなっていることが明らかにされたが、これらのことがどの程度「古代魚」あるいは「生きた化石」とよばれる魚の形態の進化速度に影響しているかはまだ明らかではない。

問 25) 【正解】 I 【部分点】 B C F G H J

【解説】 系統樹の読み取りを問う基本的な問題である。種 1~3 の共通祖先から、種 2 と種 3 の直近の共通祖先が進化したと読み取れるため、①は誤り。②は正しい。系統樹から読み取れるのは分岐順序のみであるため（系統的に近縁なものが形態的にも類似しているとは限らない）、③は誤り。④は正しい。分岐点 a は分岐パターンが明らかでないことを示すため（多分岐とよばれる）、⑤は正しい。

表紙の写真（地図を奪い、食べるニホンジカ：奈良国立博物館前にて、2016年8月6日撮影）