

生物学オリンピック2017 代表選抜試験 出題意図、解答例、解説

第1問 刺激の受容と応答

出題意図

(問1)

私たちは外からの刺激を五感で受けて、いろいろな行動や対応をしているが、体の中でどのような仕組みであるのかを知る。ここでは聴覚を例にして考えてもらった。

(問2)

私たち人は視覚が大変よく発達しているが、他の生物は必ずしもそうではない。コウモリは聴覚の発達がよく、音の反射音などで脳の中で私たちが目で見ていると同じように、周りの風景などがわかる。それはなぜかを問うている。昆虫などでは、私たちの可視光の世界でなく紫外線を使って見ているものもある。

(問3)

私たちの体は本当によくできている。人の五感では視覚が一番、発達していると言われている。その眼球を正しく描き、それぞれの名前と機能を知ることが自分自身を改めて知ることである。

(問4)

一見、昆虫などの無脊椎動物と人などの脊椎動物とは中枢神経系などにおいても全く異なると考える人が以前は多かった。ところが最近の生物学などの発達により、その相違点と共通点なども明らかになってきた。それが、形態や遺伝子レベルでどのようになっているのかを問うてみた。

解答

(問1)

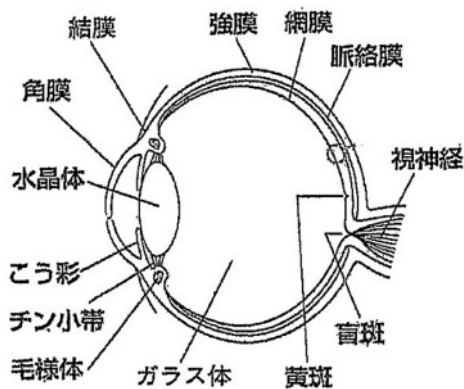
私たちは外にいたとき、雷鳴の音の刺激をまず、感覚受容器である耳の聴覚器で受ける。聴覚器の外耳では空気の振動である音波をとらえ、鼓膜の振動を引き起こし、中耳の耳小骨の振動に伝える。その後内耳の渦巻き管内のリンパ液の振動に、聴細胞の興奮を引き起こす。このようにして受容器の情報は感覚神経を介在して中枢に伝えられる。中枢神経である脳の脳の聴覚の中枢で、情報処理が行われ、その中枢の指令として、運動神経や自律神経を通して、効果器（作動体）である骨格筋などに情報が伝わり反応行動として、慌てて安全な建物に入ることになる。

(問2)

動物の種類により音を受容できる範囲が異なることが知られている。人の耳は、20—20,000Hz（周波数）の範囲の音を聞くことができる。コウモリは2,000—100,000Hzの超音波の音を聞くことができる。つまりコウモリはヒトでは聞くことのできない20,000—100,000Hzの超音波を聞いているのである。

(問3)

人の目の断面図と構成要素は下記のとおりである。



角膜： 外界と接し、水晶体と共にピントの役割。

水晶体： 外から入ってきた光を網膜に伝え、像のピントをあわせる。

ガラス体： 眼球の形態を保ち、水晶体の後方に位置し、眼球の大部分を占める。

網膜： 水晶体を通して、入った光を網膜にある黄斑部からつながっている視神経に伝える。

視神経： 網膜に入ってきた光刺激を中枢神経の脳に伝える。

こう彩： 瞳孔の大きさを調整する。

毛様体： 毛様体内にある毛様筋によって水晶体の厚みを調節し、ピントを合わせる。

チン小体： 毛様体の中の毛様体小体とも呼ばれ水晶体を支えている。

結膜： 眼球の強膜を覆う粘膜。

強膜： 眼球全体を外からの衝撃や圧力から守る構造膜。

脈絡膜： 眼球や網膜に酸素や養分を補給したり、眼球内の老廃物を運び出したりしている。

黄斑： 網膜の最も後方に位置する部分が黄斑（部）である。錐体細胞が分布し、ものの形や色を識別する働きが強い。黄斑の中心のくぼみの中心窩は視覚の感度が非常に高い。

盲斑： 網膜全体を貫いている部分であるが、網斑には視神経が全く分布していないので、光の受容はできない。

(問4)

脊椎動物と昆虫などの無脊椎動物の中枢神経系

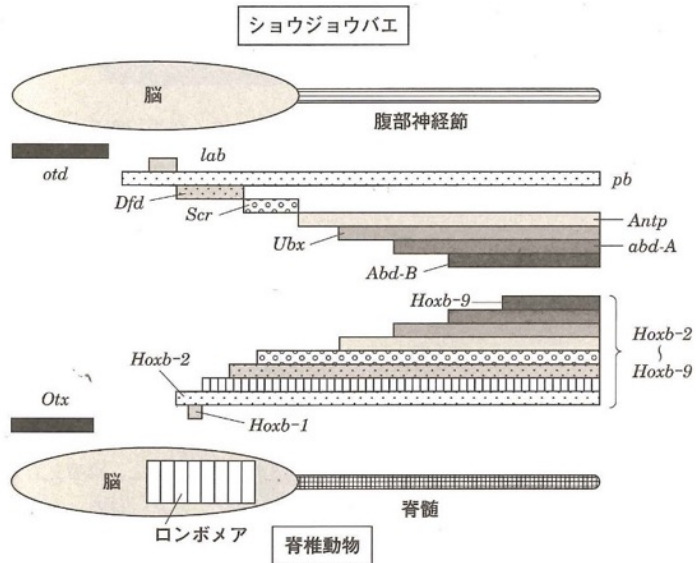
相違点：昆虫： 腹側の神経節が左右に連なったはしご状の中枢神経系

脊椎動物： 背側の神経管の前方が膨らんで脳構造、後方が脊髄
の管状の中枢神経系

同じ点： (1) 脊椎動物とショウジョウバエの体づくりや中枢神経系のでき方を調べるとマスター調節遺伝子であるホメオティック遺伝子の発現を見ると同じシステムであるがわかってきた。

下記の図はショウジョウバエの腹側の神経節に発現する遺伝子と脊椎動物の中樞神経に発現する遺伝子を比較したものである。

遺伝子の名前は、別々に見つかったので別々であるが、パターン（棒状の図）を比較すると同じ遺伝子の発現をしていることがわかる。



ショウジョウバエと脊椎動物の中樞神経系における HOM-C と Hox

つまり、ショウジョウバエの腹側の中枢神経系と脊椎動物の背側の中枢神経系のホメオボックス遺伝子はほとんど同じで、無脊椎動物と脊椎動物の中枢神経系は同じ、システムで出来上がってくる事がわかる。

第2問 遺伝学

解答例

問1 ヌクレオチド

問2 ①2本鎖DNAの分離

細胞内：ヘリカーゼが2本鎖DNAを巻き戻して分離する。一本鎖DNA 結合タンパク質が巻き戻された一本鎖DNAを安定に保持する。

PCR: 高温 (95 °C) 処理でDNAを熱変性する。

②DNA合成の開始

細胞内：DNA鎖を鋳型としてプライマーゼが5-10塩基のRNAプライマーを合成し、その3'末端からDNA合成が開始する。

PCR：標的領域の両末端にそれぞれ相補的なDNAプライマー（通常は15塩基以上）の3'末端からDNA合成が開始する。

① DNAの合成

細胞内：複数の種類のDNAポリメラーゼがはたらく。複製フォークの進行に伴って連続的に伸長する鎖と岡崎フラグメントを形成し、RNAプライマーをDNAに置換した後に連結して伸長するラッキング鎖がある。

PCR: 高熱耐性のあるTaqポリメラーゼが用いられ、標的領域の両末端に結合するDNAプライマー3'末端から同時に5'から3'方向へと伸長する。

問3 反復DNA配列は複製時のスリップによるエラー、組換え時のエラー（不等交叉）などにより生じる。

ゲノム中のタンパク質に翻訳されない領域。特にセントロメアやテロメア付近に多いことが知られている。

問4 遺伝子型が①；12と13, ②；6と6, ③；18と19 となる確率は

$$2 \times 0.233 \times 0.066 \times 0.324 \times 0.324 \times 2 \times 0.293 \times 0.011 (=0.00002081)$$

で求められる。

問5 サンプル（毛髪など）のDNAと個体のDNAを採取して、複数の遺伝的マーカーの遺伝子型を調べる。一つでも遺伝子型がことなれば、そのサンプルが調査した個体に由来しないと100%断定できる証拠となる。遺伝子型が完全に一致した場合でも調査した個体に由来すると断定はできない。多数の遺伝的マーカーを使用して、その集団中の対立遺伝子の平均頻度を用いて計算した偶然に一致する確率が十分に低ければ（例：100億分の1～数兆分の1）説得力のある証拠となる。

第3問 植物形態学・植物生理学

問1 1, 内皮; 2, アミロプラスト; 3, ニトロゲナーゼ; 4, 窒素; 5, アンモニア

問2 根が土の中を伸長して行くときに、植物にとって大事な体細胞分裂の場である根端分裂組織が壊れないように保護する役割を持っている。

問3 根粒菌は、空気中の窒素からニトロゲナーゼの働きによってアンモニアを合成し、それを植物体に供給している。植物は、アンモニアを使ってアミノ酸などの窒素化合物を合成するとともに、光合成によって合成した糖などの光合成産物を根粒菌に供給する。このような物質のやりとりによって、マメ科植物と根粒菌の間には共生関係が成り立っている。

問4 根粒菌とマメ科植物の種間に特異性（種特異性）が生じることになる。つまり、マメ科植物の特定の種は、根粒菌の特定の種のみと相互作用して、共生関係を持つことができることになる。

問5 根に形成する根粒の数が多過ぎると、根粒菌から供給される窒素化合物（アンモニア）の量は増えるものの、植物から根粒菌に供給しなければならない光合成産物の量も増えてしまい、植物自身の生育に利用できる光合成産物の量が減ってしまう。そのため、変異体xは野生株よりも生育が悪くなったのではないかと推測される。

問6 遺伝子が壊れた変異体xでは、根粒菌の数が野生株に比べて多くなっている（表1）ので、この遺伝子は根粒の数を負に制御する働きを持っていると考えられる。また、接ぎ木した植物の根粒の数は、地上部が変異体xであるときにだけ野生株に比べて増加している（表2）ので、遺伝子は地下部ではなく地上部で発現していると考えられる。根粒は根にあるにも拘わらず、遺伝子は地上部で発現して根粒の数を負に制御していることになる。

第4問 発生生物学

本問は、細胞分化に関わるいくつかの基本的な事項を理解しているかどうかを問うている。多角的な知識を必要とする。

解答例

問1

分化に伴ってゲノムそのものが変化する例としては、免疫グロブリン(Ig)を産生するB細胞がある。B細胞では、常にゲノムの組み換えが起こっていて、それによってきわめて多様なIgを産生することが出来る。タンパク質としてのIgは、分子量の大きい重鎖と分子量の小さい軽鎖とからなり、それぞれが定常領域と可変領域からなり、定常領域を指定する遺伝子は変化しない。重鎖の可変領域は、さらにV, D, J領域からなり、ヒトの場合V領域を指定する遺伝子は44個、D領域は27個、J領域は6個存在し、個々のB細胞内では、それぞれの領域から1個の遺伝子が選択されて転写され、残りの遺伝子は排除される(ゲノムが変化する)。軽鎖でも複数のV領域とJ領域の遺伝子が存在し、そのうちそれぞれ1個が選択される。このようなしくみでB細胞は106ともいわれる多様なIgタンパク質を産生する。(「キャンベル生物学」1095ページ)

分化に伴ってゲノムが変化するもう一つの例は、古くから知られていたウマカイチュウの細胞である。線虫の仲間のこの回虫は、受精卵からの発生に伴って、卵割した一方の細胞では染色体の削減(ゲノムの変化)が起こり、卵割ごとに染色体が削減される。一方、常にすべての染色体を保持する細胞も存在して、それが最終的には次世代に遺伝子を伝える生殖細胞へと分化する。この現象は、かつては細胞分化におけるゲノムの変化として注目を浴びた。

問2

ほとんどの分化細胞でゲノムが変化していないという証拠としては、例えば、(1)体細胞核を用いたクローン動物の作出、(2)iPS細胞の作成、(3)種々の再生現象、などがあげられる。(1)は分化した腸の上皮細胞核を用いてクローンカエルを作出したガードンの研究、分化した乳腺上皮細胞核を用いてクローンヒツジを作出したウィルムートらの研究である。これにより、分化した細胞の核には、全個体の細胞組織、器官を作る遺伝子が残っていることが証明される。(「キャンベル生物学」496, 497ページ)(2)は、分化した細胞を用いて作成されたので、分化した細胞核の全能性を明確に示している。(「キャンベル生物学」499ページ)。(3)は、例えばイモリのレンズを除去した時に、由来の異なる組織である虹彩の上皮細胞が一度脱分化して、レンズの細胞へと分化転換を遂げるという場合に見られる。これは必ずしもすべての遺伝情報が虹彩上皮細胞の核に保存されている証拠にはならないが、分化した細胞の核にも、他の細胞に特異的な遺伝子を発現する能力があることを示している。

問3

多くのホルモンは、直接に標的細胞の遺伝子発現を制御する。水溶性ホルモン、例えばインスリンは、細胞膜を通過できないので、細胞膜上にある特異的受容体に結合し、細胞内のシグナル伝達系を経て、遺伝子発現(転写)を制御する。脂溶性ホルモン、例えばステロイドホルモンなどは、細胞膜を通過し、細胞内、あるいは核内の受容体と結合して転写因子として機能し、転写を制御する。(「キャンベル生物学」1140, 1141ページ)

問4

DNAのメチル化は、シトシンとグアニンが隣接した(CpGと表される)位置のシトシンの5の位

置の炭素にメチル基が結合して5-メチルシトシンとなることで、多くの場合にメチル化の多い遺伝子は発現が抑制される。遺伝子が長期に渡って発現抑制される例として、X染色体の不活化があり、その場合には高度のメチル化が観察される。DNAのメチル化は、DNAが複製され、細胞が分裂しても維持される機構により、娘細胞にも起こる。

ヒストンはヌクレオソーム中でDNAが巻きついているタンパク質であり、H1, H2A, H2B, H3, H4などの種類がある。それぞれタンパク質のN末端領域はヌクレオソームから突出する「ヒストンテール」を形成している。テールのリシンにアセチル基が結合するのがヒストンのアセチル化であり、ヌクレオソーム構造を緩め、転写活性が上昇する。一方、テールのアミノ酸残基のメチル化やリン酸化はアセチル化とは逆の効果を引き起こす。このように、ヒストンの修飾状況は遺伝子発現に重要な要因であり、近年「ヒストンコード」と呼ばれている。（「キャンベル生物学」428, 429ページ）

第5問 生殖・比較内分泌学

問1

無性生殖は、卵と精子の接合なしに起こる新個体の生産で、例として、ある種のイソギンチャクにみられるような、親個体がほぼ同じ大きさの2個体に分かれる分裂などが知られている。(サンゴの出芽、海綿動物の断片化と再生、アリやハチ、ある種の脊椎動物の単為生殖、なども可)

有性生殖は、雌性の一倍体配偶子である卵と雄性の一倍性配偶子である精子が接合して二倍体の細胞である接合子、すなわち新個体を作る様式で、無脊椎動物・脊椎動物を問わず雌雄のある多くの動物種に見られる。

問2

それぞれの性は、減数分裂によって配偶子を形成しているが、減数分裂時の組換えおよび受精時の配偶子間のさまざまな組み合わせにより、有性生殖では遺伝的多様性が生み出されている。(無性生殖ではクローンが作られている。)それにより、環境要因の変化に対する適応能力が高まっていると考えられている。

(減数分裂の詳しい説明は必要ない)

問3

X-Yシステム XとY、2種類の性染色体を持つ動物では、卵がXだけ、精子がXまたはY染色体をもち、X染色体をもつ精子の受精で受精卵はXXの雌、Y染色体をもつ精子の受精で受精卵はXYの雄になる。XYが雄になるのは、Y染色体上に、精巢の発生に必要で、転写調節因子でもあるSRY遺伝子が乗っているためである。

X-Oシステム 性染色体としてXだけがある。雌はXX型、雄はX染色体を1本だけもつXO型で、精子がX染色体を1本もつかもたないかにより性が決まる。

Z-Wシステム 卵がもつ性染色体により受精卵の性が決まるシステムで、性染色体はZおよびWと名付けられている。雌はZW型、雄はZZ型である。

問4

3つのグループは、アンドロゲン、エストロゲン、プロゲステロンである。

アンドロゲン： 主要なホルモンはテストステロンで、性決定時には雄性化を、思春期には雄の二次性徴の発達を支配する。

エストロゲン 重要なのはエストラジオールで、雌の生殖系の維持と二次性徴の発達を司る。

プロゲステロン 主要なのはプロゲステロンで、胎児の発生や成長を支えるための子宮組織の準備や維持に拘わる。

性ホルモンは、いずれも脂溶性で細胞膜を通過することができるため、転写因子である細胞内受容体に結合して、その働きを制御することで、生理機能を現す。

問5

雌雄いずれでも、FSHは配偶子を養う細胞(雌では卵胞(=濾胞)細胞、雄ではセルトリ細胞)の発達を促し、LHは配偶子形成を促進する性ホルモンの産生(雌では卵胞細胞によるテストステロンの合成とエストラジオールへの変換、雄ではライディッヒ細胞によるテストステロンの合成)を高める。したがって、生殖腺におけるFSHとLHの働きは基本的に似ていると言える。

第6問 植物生態学

出題の意図

地球温暖化に深く関わる大気CO₂濃度の変化に関する二つのグラフを用いて、大気CO₂濃度変化に関わる炭素循環に関する知識とグラフを読み解く力を問いました。図1は、高校の教科書にもキャンベルにも載っていない図でおそらくほぼ全ての受験生が初めて目にするグラフだと思います。しかし説明文と合わせて考えれば、大気CO₂濃度と大気O₂濃度の変化パターンの違いとその要因を考察することができ、解答できると思います。

問1 近年の大気CO₂濃度の変化パターンとその地域による差を示したグラフの読解に関する問いです。(1)で、北半球と南半球のCO₂濃度とその変動パターンの違いについてグラフから言えることを問い、(2)でその違いの理由を問うています。北半球と南半球で大陸分布が大きく異なることや、陸域の植生によるCO₂吸収と放出とその変動など、生態学に関する様々な分野の知識を応用することで正解にたどり着けると思います。

問2 大気CO₂濃度の変化に影響を与える地球の炭素循環の仕組みを理解しているかどうかを問いました。

問3 目新しいグラフだと思うので難しさを感じるかもしれませんが、解答に導くための説明文も豊富ですので、説明文とグラフを読解できれば、この問いは難しくありません、

正解例

問1 (1)

この4年間では、北半球(実線)のCO₂濃度が南半球(点線)のCO₂濃度よりも相対的に高い。また、北半球のCO₂濃度の季節変動が南半球のCO₂の季節変動よりも大きい。さらに両者の季節変動パターンが逆になっている。

問1 (2)

北半球(実線)のCO₂濃度が南半球(点線)のCO₂濃度よりも相対的に高い理由は、CO₂放出源が北半球に集中しているからと考えられる。その季節変動パターンが両者で逆になっており、かつ変動の幅が北半球の方が大きい理由は、

植物による光合成によるCO₂吸収と、呼吸や有機物分解にともなうCO₂放出が、季節が真逆なので両者で逆になっていることと、北半球では南半球に比べて、陸地が広く植物が多く存在するからと考えられる。

問2

陸域と海洋の植物の光合成によるCO₂吸収と、海洋によるCO₂吸収があるために、実際の観測される値が化石燃料消費によるCO₂濃度増加の程度が小さくなる。

問3

A: 陸域の光合成に伴うO₂放出による大気O₂濃度の変化・増加(量)

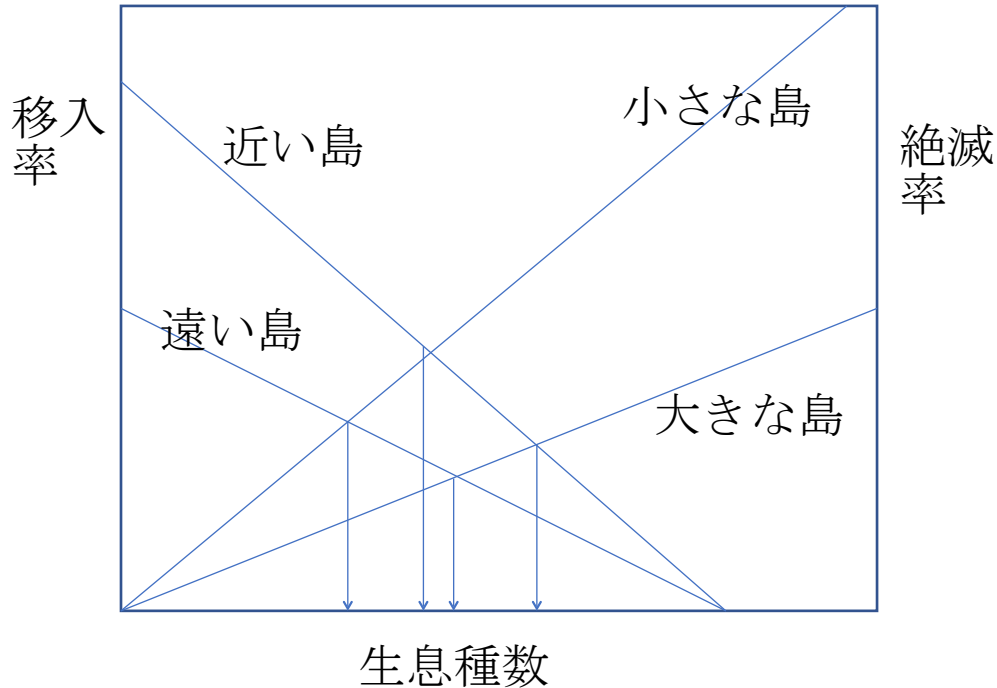
B: 陸域の光合成に伴うCO₂吸収による大気CO₂濃度の変化・減少(量)

C: 海洋のCO₂吸収に伴う大気O₂濃度の変化・増加(量)

第7問 島嶼生態学・生物多様性

問1

MacArthurとWilsonが組み立てた島の生物地理学の平衡理論とは、1) 島の大きさと隔離そのものが重要な役割を果たし、ある島での種数は移入と絶滅のバランスで決められること、2) このバランスはそこに生息する種の絶え間ない絶滅と、移入を通じた種の置き換えとの間に成り立つ動的な系であること、そして3) 移入と絶滅の速度は島の大きさと隔離の程度によって異なる、という考えである。このことを、下図で説明する。



まず、生物が全くいない島へ生物が移入する場合を考える。このような時、どんな移入個体もその島に新たに到達した種を代表するので、種の移入率は高いが、生息種数が増えるにつれて今までにない新しい種が移入する確率は低下し、供給源にいる種の全てが移入し終われば移入率はゼロになる。そして、移入率は供給源に近い島で高く、遠い島ほど小さくなるだろう。

島に到達した種の絶滅率は、そこに種がないときにはゼロで、種数が少ない間は低い値を示すだろう。しかし、生息種が増えるにつれて種間競争が激しくなり、個体数の少ない種ほど絶滅しやすくなると考えられるからである。そのため、大きな島より小さな島の方が絶滅率が高くなるが、それは小さな島ほど生息個体数が少ないからである。

移入率と絶滅率の曲線が交差する点の種数は動的な平衡点であり、その島の種の豊富さを表している。

問2

島の生物地理学の平衡理論からは、以下の予測を立てることができる。

1. 一部の種の絶滅と別の種の移入によって生じる種の置き換えりによって、時間が経てば島の種数は最終的にほぼ一定になるだろう。
2. 大きな島の方が小さな島よりも種数が多いだろう。
3. 島の遠隔度が大きいほど、種数は少ないだろう。

これらの予測のうち、2と3は平衡理論でなくても説明（予測）できる場合があるが、種の置き換えりによって島の種数が最終的に定常性を示すという考えは、平衡理論だけの特徴である。