

日本生物学オリンピック2016

予選問題

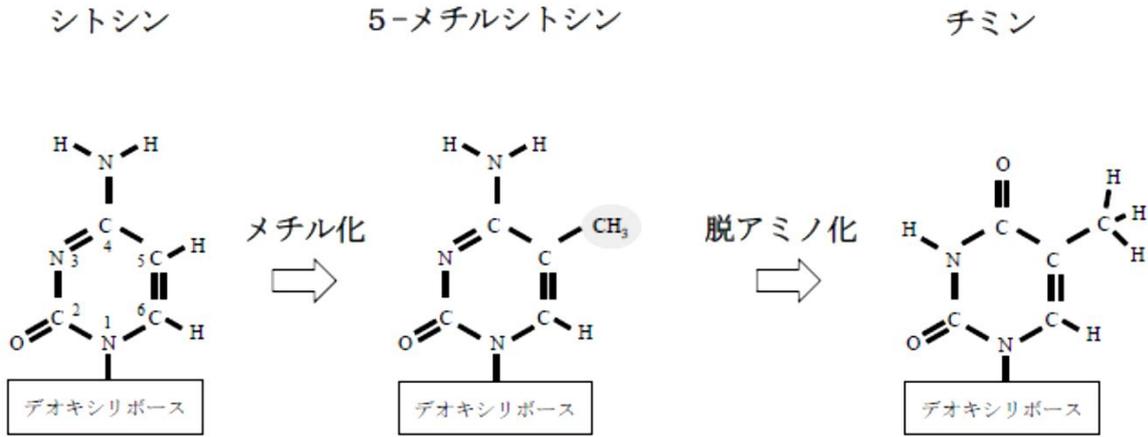
2016年7月17日（日） 13:30~15:00

〈正解・解説〉

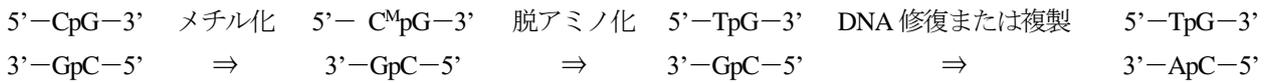


問1) 【正解】 G

【解説】 ヒトを含む多くの生物では、多数の CpG のシトシンはメチル化され、5-メチルシトシン (C^M) として存在する。また、その一部は脱アミノ化されることでチミンとなる。



この問題では DNA は二重らせん構造をもち、2つの鎖が相補的であることに注意する。一方の鎖で CpG→C^MpG→TpG となると、



のように相補的な鎖では CpG→CpA となることから、G→A の頻度も C→T と同様に増加すると考えられる。よって正解は G となる。

問2) 【正解】 H 【部分点】 K

【解説】 遺伝子あたりのタンパク質のアミノ酸配列をコードする DNA の大きさは、 $200 \times 8.0 - (50 + 250) = 1300$ 塩基対である。したがって、ゲノムに含まれるタンパク質のアミノ酸配列をコードする DNA は、 1300×24000 塩基対である。この値がゲノムサイズ (1.2×10^9 塩基対) の何パーセントであるかを求めればよい。すなわち、

$$1300 \times 24000 \div (1.2 \times 10^9) = 0.026 = 2.6\%$$

となる。なお、問題文には遺伝子の大きさの平均値が与えられているが、問われている値を求める計算には必要のない値である。

エクソンには、アミノ酸配列をコードする DNA (コード領域) だけでなく、転写開始点から開始コドンの間の 5'非翻訳領域と終止コドンより 3'側の 3'非翻訳領域も含まれている。また、脊椎動物では、多くの場合、最後のエクソンは、コード領域と 3'非翻訳領域から成っており、他のエクソンより長い傾向にある (たとえば、ヒトゲノムでは平均で約 2 倍長い)。

原核生物である細菌のゲノムは、大部分の DNA がタンパク質、tRNA、rRNA をコードする遺伝子とそれらの遺伝子の転写を調節する制御領域によって構成されている。一方、多細胞真核生物では、タンパク質をコードする配列と tRNA や rRNA に転写される配列を合わせても、ゲノム全体のごく一部であり、ヒトゲノムの場合、わずか 1.5% 程度である。それ以外の「非コード DNA」は、以前は「junk DNA (がらくた DNA)」とよばれたこともあったが、現在では、非コード DNA にも重要な機能をもつ DNA 領域が多く含まれていると考えられている。本問題の生物は、ゲノムサイズがヒトゲノムの 2/5 と比較的大きく、非コード DNA がゲノムの大半を占めていることから、複雑な体をもつ多細胞真核生物 (たとえば脊椎動物) であると考えられる。

問3) 【正解】E 【部分点】B H I

【解説】大腸菌の遺伝子発現制御の基本的なメカニズムは、フランスのF. ジャコブとJ. モノーにより発見され、オペロンモデルとして、1961年に提唱されている。オペロンモデルによれば、ラクトースオペロンは3つの遺伝子 *lacZ* (β -ガラクトシダーゼ), *lacY* (パーミアーゼ), *lacA* (トランスアセチラーゼ) の上流にリプレッサー遺伝子、プロモーター領域、オペレーター領域があり、全体としてオペロンを構成している。転写制御の仕組みは問題文に書いてあるとおりである。

i 遺伝子は劣性の遺伝子であるために、①と②は誘導的に発現する。③では、劣性のホモ接合であるので、構成的な発現をする。*o^c* は優性の構成的発現をする遺伝子であるために、④と⑤は構成的な発現をする。⑥は構成的な発現をする *i* 遺伝子のホモ接合および優性の構成的発現をする遺伝子 *o^c* をもつので構成的に発現する。

ラクトースオペロンは、上述のようにラクトースが存在しない状態ではオフの状態になっている誘導性オペロンである。一方、トリプトファンオペロンは、生存に必要なトリプトファンを合成するために通常はオンになっている抑制性オペロンである。すなわち、トリプトファンが増加すると、より多くのトリプトファンがリプレッサーに結合して活性型のリプレッサーになり、これがオペレーター領域に結合する。この結果、転写は抑制され、トリプトファンの生産が停止する。

F. ジャコブとJ. モノーは、オペロンモデルによる遺伝子発現の研究で、1965年にノーベル賞を受賞している。また、J. レーダーバークが発見した大腸菌の接合現象は、接合性プラスミドとよばれるF因子の発見、大腸菌の遺伝的組換えや遺伝子地図の作成へと発展し、J. レーダーバークは1958年にノーベル賞を受賞している。

問4) 【正解】H 【部分点】B

【解説】動物の組織・器官の発生はさまざまな遺伝子の相互作用により成り立っている。この問題では、遺伝子間の抑制を題材とした。

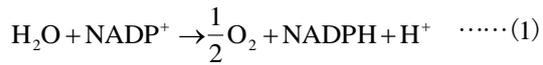
問題文にあるように「遺伝子 X は遺伝子 Y の発現を抑制することで心臓の正常な形成に寄与している」という結論を導くためには、遺伝子 Y の発現が心臓形成を抑制することを示す実験が必要となる。そして、問題文から遺伝子 X を欠失させると遺伝子 Y の発現が高まることが示されているので、遺伝子 X の欠失による心臓形成の異常が Y の発現上昇によるのかどうかを確かめることが鍵となる。したがって、遺伝子 X の欠失により発現上昇する遺伝子 Y が心臓形成の異常を導くのであれば、両方を欠失させた場合には心臓の形成は正常になるということを示す必要がある。また、「遺伝子 Y の発現により心臓形成が阻害される」ことを立証するためには、遺伝子 Y を本来発現しない心臓で高発現させたときに心臓形成が異常になることが示されなくてはならない。

国際生物学オリンピックでの日本代表の成績

大会	開催年	開催地	金メダル	銀メダル	銅メダル	備考
第16回	2005	北京			2名	初参加
第17回	2006	アルゼンチン			3名	
第18回	2007	カナダ		1名	3名	初めて参加者全員がメダルを受賞
第19回	2008	インド		3名	1名	
第20回	2009	つくば	1名	3名		日本初の金メダルを受賞
第21回	2010	韓国	1名	3名		
第22回	2011	台湾	3名	1名		過去最高の金メダル3と銀メダル1を受賞
第23回	2012	シンガポール		4名		日本チームがIBOビデオコンペで優勝
第24回	2013	スイス	1名	3名		
第25回	2014	インドネシア	1名	3名		日本チームがIBOビデオコンペで優勝
第26回	2015	デンマーク	1名	2名	1名	

問5) 【正解】 F 【部分点】 A E

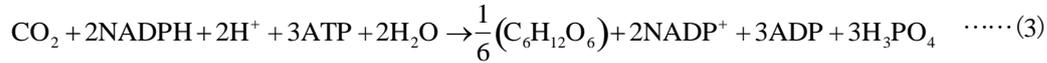
【解説】 H_2O から NADP^+ に電子が渡って O_2 と NADPH が生じる電子伝達の反応式は



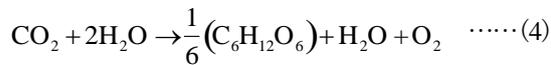
であり、 ATP が ADP と無機リン酸から合成される反応式は



である。また、カルビン・ベンソン回路で1分子の CO_2 が固定され糖がつくられる反応式は

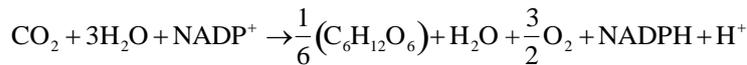


である。電子伝達過程での生成比が $\text{NADPH} : \text{ATP} = 2 : 3$ のときには、(1)の反応式を2倍したものと(2)の反応式を3倍したものを(3)の反応式と合わせると、 NADP^+ 、 NADPH 、 H^+ 、 ADP 、 H_3PO_4 、 ATP が相殺されて、問題文にもあるとおり、光合成全体の反応式は次のようになる。



なお、ここでは解説のために(3)の反応式を書いたが、本問を解く上ではこの反応式に関する知識は不要である。

電子伝達過程での生成比が $\text{NADPH} : \text{ATP} = 1 : 1$ のときには、1分子の CO_2 から糖をつくる際に使われる3分子の ATP を用意するのに、3分子の NADPH を生じる電子伝達が必要となる。したがって、この場合、光合成全体の反応式は、(1)の反応式を3倍したものと(2)の反応式を3倍したものを(3)の反応式と合わせることでえられる。これは(4)の反応式に、(1)の反応式をもう1つ追加したものにはかならないので、



となる。

問6) 【正解】 H 【部分点】 G

【解説】 植物Xは連続暗期が8時間では花芽形成し、16時間では形成しない。これは長日植物の特徴である。植物Yは連続暗期が8時間では花芽形成をせず、16時間では形成する。これは短日植物の特徴である。人工的に日長条件を変えると、短日植物と長日植物にはそれぞれ、花芽の分化に必要な最長または最短の日長があり、これを限界日長とよぶ。また、光の周期によって花芽分化を誘導する現象を光周性誘導とよぶ。光周反応において重要なのは連続した暗期の長さであり、短日植物に長い暗期を与えても光中断があると花芽は分化しない(たとえば、処理区(4))。

たとえば、長日植物である植物Xの限界暗期を9時間であると仮定すると、連続暗期が9時間未満になると花芽が形成される。そのため、花芽形成がおきる。また、短日植物である植物Yの限界暗期を9時間であると仮定すると、連続暗期が9時間を越えると花芽が形成される。そのため、(3)、(4)、(5)、(6)のどの処理区でも花芽形成はおこらない。

問7) 【正解】 A 【部分点】 B

【解説】 嫌気条件下では発酵によって ATP が生産され、この過程では酸素は必要とされない。コムギは酸素のある条件でないと発芽できないが、イネは嫌気条件下でも発芽し成長することができる。イネは冠水条件下でも成長できるが、これには植物ホルモンのエチレンが関与することが知られている。したがって、イネは発芽率も発芽後の成長率も、低酸素条件ではコムギよりも高い値を示すことになる。また、低酸素条件でコムギは呼吸できないため、二酸化炭素の放出量も少なくなる。しかし、低酸素条件でイネの呼吸は発酵に大きく依存するため、相対的な二酸化炭素の放出量は、大気条件下での通常の呼吸反応だけの場合とくらべて、大きくなる。

問8) 【正解】F 【部分点】E

【解説】ここで示した変異体*x*の表現型は、Bクラス遺伝子の変異体*apetala3*や*pistillata*で報告されたもので、Aクラス遺伝子の変異体、Cクラス遺伝子の変異体、二重変異体、三重変異体の表現型と合わせて、ABCモデルの発想の元となった。

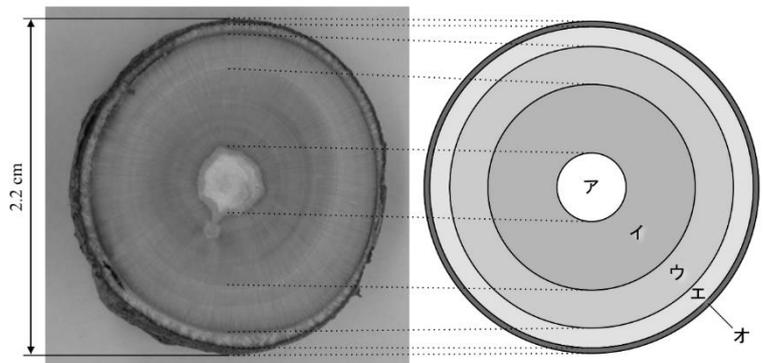
模式図ではよく、A~C各クラスの遺伝子の機能欠損で、花器官の完全な転換が起きるように描かれるが、実際には外見からはどの器官か判断のつきにくい構造物が生じることも多い。*x*の場合、花卉が失われ、それと同じ数だけがく片が増えていること、雄しべが失われていること、雌しべが太くなっており、心皮の増大がうかがわれることを総合して、まずBクラス遺伝子の機能の欠損ないし低下が原因になっていると想定し、その上で糸状の構造物は、部分的に雌しべに合着していることも考え合わせて、不完全な心皮であるとするのが妥当な解釈となる。

問9) 【正解】F 【部分点】G H

【解説】単子葉類を除く被子植物と裸子植物の茎の茎頂近くを見ると、中心部分は柔組織が占め、その周りを維管束が取り囲むように並び、さらにその外にはまた柔組織が広がっているのが一般的である。中心部の柔組織は髄、外縁部の柔組織は皮層とよばれる。維管束では、内側に木部、外側に師部が配置する。この木部と師部は、茎頂分裂組織から茎が分化していく過程で形成されたもので、それぞれ一次木部、一次師部という。一次木部と一次師部の間には、分裂して増殖できる細胞が存在する。これが形成層（より丁寧に言うなら維管束形成層）である。形成層の細胞は放射方向あるいは接線方向に分裂して、茎の肥大成長をもたらす。形成層から生み出された細胞は、内側ではやがて木部細胞に分化して二次木部を形成し、外側ではやがて師部に分化して二次師部を形成していく。幹細胞だけを形成層とするなら、原理的に形成層の細胞は1層（二次木部と二次師部の起源となる幹細胞が共通の場合）か、2層（二次木部の幹細胞と二次師部の幹細胞が別の場合）のいずれである。幹細胞だけでなく、その娘細胞で未分化なものまで形成層に含めるとしても、形成層を構成する細胞は数層程度である。

ここまでは、草本植物でも木本植物でも、基本的には同様である。木本植物と草本植物との大きな違いは、形成層の活動の期間にある。木本植物では、形成層の活動が何十年、何百年と持続して、茎の肥大が進み、茎内部に二次木部が集積して材ができるのである。1年間につくられた材が年輪であり、形成層からの木部の分化に大きな季節変動があると、年輪の境界（年輪界）が明瞭となる。

写真を見てみると、イとウは色の濃淡がやや異なるものの、同質で連続しており、同じ種類の組織と考えられる。また、イとウの領域には、年輪界と言えるほどはっきりはしていないが、それに似た同心円状の様が見られる。これらのことと、上に述べた標準的な木本植物の茎の構造から、イとウは二次木部であり、材であると判断できる。樹木によっては、材の中心に近い部分の着色が著しく、辺縁部の材と明確に区別される。このような場合、中心部の材は心材、辺縁部の材は辺材とよばれる。二次木部には水の通道にはたらく道管や茎の支持にはたらく木部繊維などの死んだ細胞が多いが、心材となると、すべての細胞が死んでおり、さまざまな物質が沈着して、通道の機能も失っているとされる。アは、材と判断されたイ・ウとは質感が異なり、それらの内側の中心部に位置することから、髄であると推定される。



最外層のオは、枝の表面の皮であるが、ある程度の厚みから、多数の細胞層から構成されていることがわかる。これは周皮とよばれる部分である。材（二次木部）は形成層の活動によりつくられ、形成層は外側には二次師部をつくるので、周皮と材（二次木部）の間には、二次師部と形成層が存在し、外から二次師部、形成層、材（二次木部）の順に隣接しているはずである。エは1mm近い厚みがあるが、細胞わずか数層の形成層ではこのような厚さになりえないため、エは二次師部で、形成層はエとウの境界部に位置すると考えるのが妥当である。本問で問われている肥大成長をもたらす細胞分裂が起きる領域とは形成層のことにほかならないので、正解はFのウとエの境界領域となる。

最外層のオは、枝の表面の皮であるが、ある程度の厚みから、多数の細胞層から構成されていることがわかる。これは周皮とよばれる部分である。材（二次木部）は形成層の活動によりつくられ、形成層は外側には二次師部をつくるので、周皮と材（二次木部）の間には、二次師部と形成層が存在し、外から二次師部、形成層、材（二次木部）の順に隣接しているはずである。エは1mm近い厚みがあるが、細胞わずか数層の形成層ではこのような厚さになりえないため、エは二次師部で、形成層はエとウの境界部に位置すると考えるのが妥当である。本問で問われている肥大成長をもたらす細胞分裂が起きる領域とは形成層のことにほかならないので、正解はFのウとエの境界領域となる。

問 10) 【正解】 G 【部分点】 I K L

【解説】 フェニルケトン尿症は、フェニルアラニン水酸化酵素（以下 PAH）の欠損またはその補酵素であるテトラヒドロピオプテリン（以下 BH4）BH4 の欠損によって起こる代謝異常である (①)。PAH が欠損しているとき、以降のメラニン色素を含む代謝産物も減るため、皮膚や髪の色が薄くなることも多い (②)。BH4 はフェニルアラニンをチロシンに変換するフェニルアラニン水酸化酵素の補酵素であるとともに、チロシンを DOPA に変換するチロシン水酸化酵素、トリプトファンを 5-ヒドロキシトリプトファンに変換するトリプトファン水酸化酵素の補酵素でもあるので、BH4 欠損では、ドーパミン、ノルアドレナリン、セロトニン（トリプトファンの誘導体）などの神経伝達物質の欠乏も引き起こし、脳神経機能の障害を起こす (⑥)。治療を怠れば、高濃度のフェニルアラニンおよびフェニルピルビン酸により、脳の発達障害などが起こる。いずれも、遺伝子突然変異の結果であるので、将来的には遺伝子治療も期待されている (⑦)。

1977 年からフェニルケトン尿症を含む 6 種類の疾患について新生児マス・スクリーニングが始まり、効果を上げている。2014 年 4 月からはタンデムマス法が導入され、従来の方法と合わせて 19 種類の疾患（自治体によりこれより多いところもある）の新生児マス・スクリーニングが可能となっている。しかし、フェニルケトン尿症の治療は基本的には、フェニルアラニンの摂取をコントロールする食餌療法しかない。フェニルアラニンはタンパク質に含まれる必須アミノ酸であることから、タンパク質の摂取量でコントロールする (⑤)。他のアミノ酸の摂取量を確保するために、フェニルアラニン除去ミルクで補う。大人になると、脳神経細胞が完成していること、フェニルアラニンの単位体重あたりの必要量が減ること、脳血液関門の機能が高まることなどから、子供の時より食事制限が緩やかで済む場合もあるが、一生食餌療法が推奨されている。BH4 欠損ではフェニルアラニンの摂取量コントロールだけでは、症状の改善は期待できない。逆に、PAH は正常で、BH4 のみが欠損している場合は、BH4 を経口摂取することで、症状を回避できる (④)。

<参考>

PKU 治療ネット <http://www.pku-dsc.info/index.html>

日本先天代謝異常学会 先天代謝異常症の診療指針 フェニルケトン尿症および類縁疾患

<http://jsimd.net/documents/GuidelinesInClinicalGenetics/feniruketonnnyousyou.pdf>

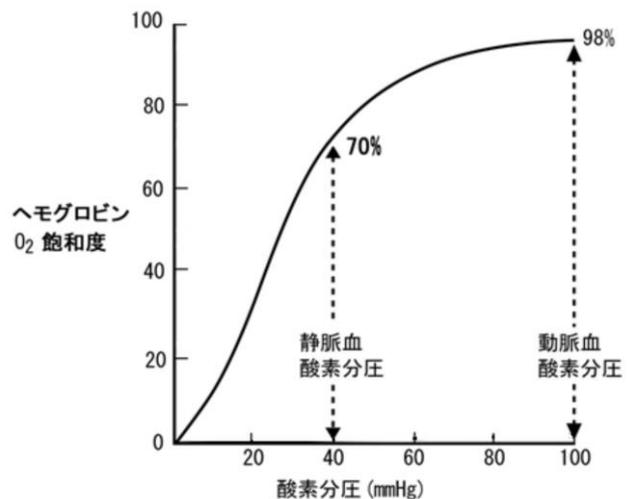
日本マススクリーニング学会 <http://www.jsms.gr.jp/index.html>

タンデムマス・スクリーニング普及協会 <http://tandem-ms.or.jp/>

問 11) 【正解】 D 【部分点】 C

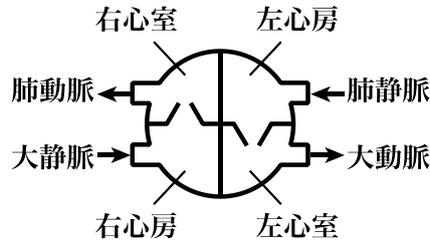
【解説】 肺に送り込まれた酸素は大部分が赤血球中のヘモグロビンに結合して運搬される。ヘモグロビンは問題の図のような S 字型の酸素平衡曲線を示すので、これをもちいてヘモグロビンが運搬する酸素量を求める問題である。

安静時の動脈血中（酸素分圧 100 mmHg）のヘモグロビンは、ほとんどすべて酸素を結合した状態にある（98%飽和）。したがって、動脈血 100 mL 中でヘモグロビンに結合している酸素は $1.4 \times 16 \times 0.98 = 22.0 \text{ mL}$ と求められる。この時、末梢（酸素分圧 40 mmHg、ヘモグロビン 70%飽和）で放出される酸素の量は、 $1.4 \times 16 \times (0.98 - 0.70) = 6.3 \text{ mL}$ となる。いま酸素スプレーをもちいて 100%の酸素ガスを肺に入れることにより、動脈血中の酸素濃度が 2 倍の 200 mmHg になったとする。しかしヘモグロビンの飽和度は 98%から 100%に上昇するに過ぎないので、ヘモグロビンに運搬される酸素量は $1.4 \times 16 \times (1 - 0.98) = 0.4 \text{ mL}$ （約 7%）しか増加しない。したがって安静時には酸素スプレーはあまり効果がないことがわかる。なお、疾病等により動脈血中の酸素分圧が下がった時や激しい運動時には、酸素スプレーが効果的である場合もあると考えられる。一方、高濃度酸素投与にはさまざまな副作用（たとえば、活性酸素による肺への直接的障害、高酸素濃度による呼吸中枢の抑制など）が知られており、この点にも注意する必要がある。



問 12) 【正解】 E 【部分点】 D F H

【解説】 選択図のうち問題図の循環に沿って血液が流れうるのは、B、D、E、F、H である（それ以外は酸素が供給できない）。B が 2 心房 2 心室の構造であることは明らかである。D、E、F、H はいずれも皮膚から取り込まれた酸素を利用することのできる構造なので、あとは心房と心室の定義によって判別することになる。静脈が流れ込む部屋が心房、動脈へ送り出す部屋が心室であり、心房から心室に向かって弁があり、左右の心房は（2 心室の場合は左右の心室も）隔壁で隔てられる。したがって、心室が 1 つにつながった E が正解となる。D は肺静脈の流れ込む左心房と肺動脈が出て行く右心室が一体化した構造であり、F は左右の心房が合体し心室が分離した構造、H は右心房と左心室が一体化した構造である。



両生類の心臓が 2 心房 1 心室であることはよく知られているが、これが必ずしも進化途上の不完全な構造ではないことを知ってほしい。たしかに、肺呼吸している時にはせっかく肺で酸素を取り込んだ血液を静脈血と混合してしまうのだから多少効率が悪くなることは否めない（とはいえ、実際には心室内のらせん弁などの構造によって肺静脈からの血流と大静脈からの血流は 90% 程度まで分離されるようだ）。この心臓の構造には問題文中で述べたように水中での呼吸に適応的な意味があるとされている。問題文に沿って水中での血液の流れを追って、どこで酸素が取り込まれ、その血液がどこに流れていくかを考えてみてほしい。皮膚呼吸でえた酸素を利用するためには心室が分離してはまずいことがわかるだろう。哺乳類・鳥類の 2 心房 2 心室の構造がもっとも“優れた”構造であるというのが一般的な理解だが（肺回路を全面的に生かすためにはその通りだが）、この構造では肺循環と体循環は直列につながり、大静脈の血液に含まれた皮膚からの酸素を有効に利用することはできない。

なお、水中での活動時間の長いワニ類でも、これとは異なるが肺回路を切り離すような仕組みが備わっている。脊椎動物の心臓の進化については東京大学の小柴和子博士らが読みやすい日本語の解説を发表している（森山雄大，竹内純，小柴和子 脊椎動物の心臓進化—形態と機能の多様性はどのように生み出されたか。生物の科学 遺伝 Vol. 67, No.2, 197-208, 2013 <http://www.iam.u-tokyo.ac.jp/junktakeuchi-lab/publications/Iden.67.2013.pdf>)

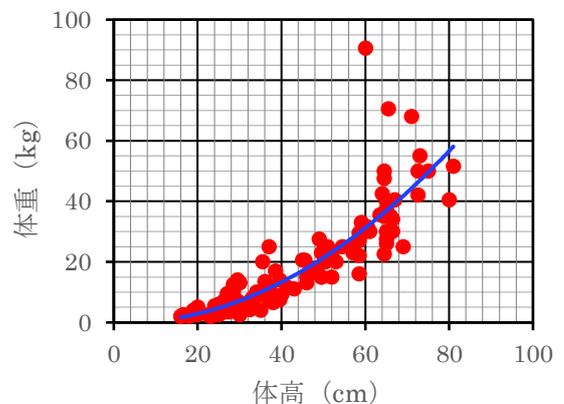
対数グラフの有用性 (1)

右のグラフは、117 犬種のデータをもちいて、イヌの体高と体重の関係を示した散布図である。ここで、体高とは、イヌが自然に立った状態で、肩甲骨のもっとも高い部分から地面までの垂直距離である。グラフ中の曲線は 2 次の多項式にあてはめた近似曲線である。

このグラフから、体高が低いときには体重のばらつきは小さいが、体高が高いときには体重のばらつきは大きいことがわかる。このようなとき、対数をとると、体高による体重のばらつきの差は小さくすることができる。

次ページのグラフは、体重だけが対数目盛になっている片対数グラフと、体高も対数目盛になっている両対数グラフである。

どちらのグラフでも、体高による体重のばらつきの差は小さくなっている。なお、両対数グラフの近似曲線がほぼ直線になっていることは興味深い。



問 13) 【正解】 E 【部分点】 K

【解説】 問題のグラフは両対数グラフである。すなわち横軸縦軸ともに一目盛りで10倍ずつ値が変わる。横軸が一目盛り変化した時に縦軸の変化量が一目盛りより小さいことがわかれば①～③の解答は容易だろう。

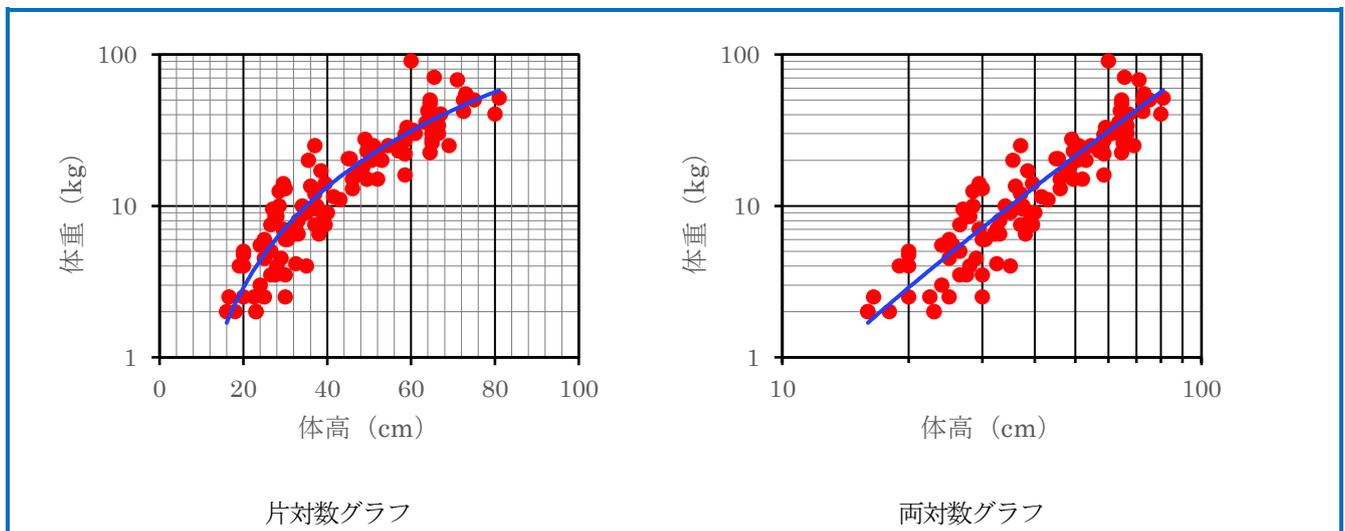
小さい動物ほど代謝量が多くなることは、おもに体の体積と表面積の比によって説明される。すなわち、体重（体積）は体長の3乗に比例するのに対して表面積は2乗に比例するので、体が大きくなるほど体重あたりの表面積は小さくなり、体表面から体内で発生した熱を放散しにくくなる。これだけが影響するなら代謝量は体重の3分の2乗に比例することになるが、多くの動物を調べると、これよりもやや傾きが小さく、体重の4分の3乗がより近いとされている。ただし、実際にはそれほど簡単な問題ではなく、「ヒトにかぎれば3分の2乗の方が近く、単純に体重のべき乗ではなく、さらなる補正が必要である」「内温動物と外温動物では傾きが若干異なる」などそれぞれの場合によって多少の違いがみられ、現在もさまざまな研究が進んでいる。

④と⑤について、鳥類・哺乳類と魚類・両生類・爬虫類の差は、内温性（体内の代謝により発生する熱によって体温が支配される）か、外温性（外部の熱環境により体温が支配される）かの違いと考えてよいだろう。内温動物は体熱を発生するための代謝が必要になるので代謝量が大きくなる。酸化的リン酸化によってATPを産生する経路で、あえてATP合成酵素をはたらかせずに系を“空回り”させるようなタンパク質も存在しており、これは熱を産生するためだと考えられている。ここでは代謝量を酸素消費量で測定しているが、消費される酸素はほとんどすべて呼吸基質を酸化するために使われるので、ほぼ食物摂取量と比例すると考えてよい。グラフからは内温動物では食べたものの9割は熱を生じるためにだけ使われてしまっているともみてとれる。（実際には神経系の発達によるエネルギー消費量の増大によって生じる差もあり、また活動時には筋肉から発生する熱量が体温維持に必要な量を上回ることも多く、通常の動物の生活の中では体熱だけのために使われるエネルギーは9割よりは少ない。）

⑥と⑦について、外気温が低くなれば、内温動物では体温を維持するために代謝量を上げる必要があるが、外温動物は外気温に応じて体温が下がり代謝量が小さくなるのが一般的な傾向である。したがって両者の差は広がる。ただし、特に小型の哺乳類では外気温が低い時には体温を下げて代謝量を減らすものもあるため（冬眠はその典型的な例の1つ）、差の広がり方は一様ではない。この図では一般的な傾向だけを示したが、エネルギー代謝生理は動物の生活環境と生活スタイルの多様性に応じてさまざまな適応を示している。

なお、鳥類・哺乳類に対して恒温動物、魚類・両生類・爬虫類に対して変温動物ということばが広く使われてきたが、恒温性か変温性かということと内温性か外温性かということは必ずしも一致しない。魚類や爬虫類でもほぼ一定の体温を維持しているような恒温性のももあり、また哺乳類であっても先に述べたような異温性のももある。この場合でも、冬眠明けには代謝量を増大させて体温を上げて活動を開始するのであり、内温性であることには変わらない。

対数グラフの有用性（2）



問 14) 【正解】 C 【部分点】 E

【解説】 図 1 で、精子は誘引物質がなくとも周回軌道を描いて泳ぐことがわかる。図 2 では卵が原点にあり、誘引物質はそこから拡散で広がっていくので、誘引物質は原点に近いほど濃く、原点から離れるにしたがって連続的に薄くなっていくと考えられる。そのような濃度勾配のある空間で、精子が原点に近づくときには周回軌道の半径はほぼ変わらないか大きくなるのに対し、離れていくとあるところで鋭く遊泳方向を転換させる（周回軌道の半径が一時的に小さくなる）。これを繰り返すことによって徐々に卵（原点）へ近づいていく。

- A. 問題文中に遊泳速度は一定とあるのであてはまらない。
 - B. 図 2 中で 3 つある矢尻の左端および中央のものをくらべると、座標の原点からの距離が異なるのは明らかで、誘引物質の濃度は異なっているはずだから、間違い。
 - C. 精子が遊泳して進むにしたがって誘引物質の濃度が減少することを感知すると鋭く曲がる仕組みをもっているうえで、その反応はある程度の濃度変化が必要であろうこと、またその変化を運動の変化に転換するには一定のタイムラグがあると考えられることなどから合理的な考察である。
 - D. やはり図 2 中で 3 つある矢尻の左端および中央のもの間の軌跡の直径が図 1 にくらべると大きいこと、またもう 1 例でも原点の近くで誘引物質濃度がもっとも濃いと考えられるところでもそのようなことはみられないことから、間違い。
 - E. 問題文に拡散が均等に起こっているとあるので、矢尻の場所でとくに大きな変化があるとは考えられないから、間違い。
 - F. 図 2 で精子はらせん状に遊泳しているので、間違い。
 - G. 濃度が高くなると鋭く曲がるとあり、反対なので、間違い。
- よって妥当な説明文は C だけである。

問 15) 【正解】 J 【部分点】 A D

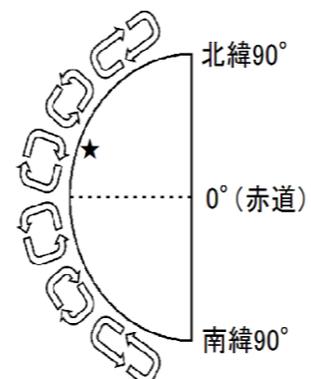
【解説】 図 1 と図 2 の比較から、生物 X の増殖には光が必要であることがわかる。すなわち、生物 X は光合成を行う生物であると考えられる。

種間の相互作用には、競争、捕食、共生などがある。図 3 で、生物 X がある程度増えた段階で生物 Y が増殖し、最終的に生物 Y のみが生き残っていることから、生物 Y は生物 X を捕食し増殖していることがわかる。

問 16) 【正解】 C 【部分点】 A B

【解説】 赤道では強い日射により水分が蒸発し、暖かく湿った空気が上昇する。上昇する空気は熱帯に多量の雨を降らせる。水分を放出し、乾いた空気の塊は上空で赤道付近から南北に押しつけられ、北緯および南緯 30° 付近で下降する。この下降する乾いた空気が砂漠を作り出す。図の★印は乾いた空気の下降地点であり、グラフ (ア) [アスワン：エジプト] が対応する。

また、樹木の生育には草よりも多くの水分が必要だが、グラフ (イ) [クアラルンプール：マレーシア] は十分に降水量が多く森林（熱帯多雨林）が成立する。グラフ (ウ) [ダカール：セネガル] はある程度の降水があるので砂漠にはならないが、森林は成立せずバイオームはサバンナとなる。



<参考>

『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
 気温と降水量のデータは「気象庁ホームページ」のものを利用した。

問 17) 【正解】H 【部分点】B E I

【解説】刷り込みは、特定の期間（感受期）に覚えたものが長時間維持する学習の1種である。感受期があることが刷り込みの特徴であり、他の学習と区別される。

③は有名で、卵からかえったひなが最初に見た（あるいは認識した）動くものを親とみなす行動であり、刷り込みによるものと考えられている。

④は、幼鳥期に頻繁に接していると、同じ仲間（同種）と認識されてしまい、成鳥になると交尾の対象になる行動であり、刷り込みによるものと考えられる。現在、野鳥保護区では、このようなことが起きないように、細心の注意が払われている。たとえば、ある保護センターでは、タンチョウのひなを飼育する際にタンチョウの衣装を着る、いわゆる「コスチューム飼育」が行われている。

①は生得的にもっている攻撃行動であり、ひなを守るため、ヒト以外の動物（たとえば、ネコ）に対しても攻撃する。②と⑤は、学習の結果であると考えられる。

問 18) 【正解】A 【部分点】B D G

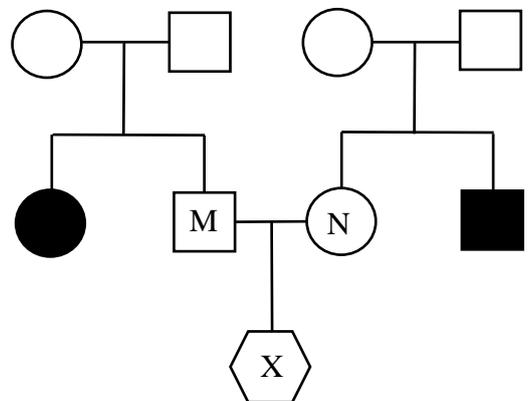
【解説】それぞれの遺伝様式について考えてみよう。ここでは、2つの対立遺伝子（ A_1 と A_2 ）があり、 A_1A_1 の表現型はR型、 A_2A_2 の表現型はS型とし、 A_1A_2 の表現型は優劣関係で決まるとする。

- ① R型の遺伝子型は A_1A_1 と A_1A_2 が考えられる。一方、S型の遺伝子型は A_2A_2 である。 A_1A_1 の母親と A_2A_2 の父親からは A_1A_2 の子（表現型はR型）が生まれる。 A_1A_2 の母親と A_2A_2 の父親からは A_1A_2 の子（表現型はR型）または A_2A_2 の子（表現型はS型）が生まれる。したがって、可能性がある。
- ② R型の遺伝子型は A_1A_1 である。一方、S型の遺伝子型は A_1A_2 と A_2A_2 が考えられる。 A_1A_1 の母親と A_1A_2 の父親からは A_1A_1 の子（表現型はR型）または A_1A_2 の子（表現型はS型）が生まれる。 A_1A_1 の母親と A_2A_2 の父親からは A_1A_2 の子（表現型はS型）が生まれる。したがって、可能性がある。
- ③ 母親の遺伝子型は A_1A_1 と A_1A_2 が考えられる。一方、父親の遺伝子型は A_2 である。 A_1A_1 の母親と A_2 の父親の場合、息子の遺伝子型は A_1 （表現型はR型）である。 A_1A_2 の母親と A_2 の父親の場合、息子の遺伝子型は A_1 （表現型はR型）または A_2 （表現型はS型）である。したがって、可能性がある。
- ④ 母親の遺伝子型は A_1A_1 であり、父親の遺伝子型は A_2 である。この場合、息子の遺伝子型は A_1 （表現型はR型）である。（注：息子のX染色体は母親に由来し、父親からは伝わらない。）したがって、可能性はない。
- ⑤ ミトコンドリアは母性遺伝する。したがって、息子の遺伝子型と表現型は母親と同じになるはずで、可能性はない。

ここではそれぞれの遺伝様式を厳密に検討したが、「息子のX染色体は母親に由来し、父親からは伝わらないこと」および「ミトコンドリアは母性遺伝すること」を知っていると、④と⑤の可能性はないことがすぐわかるであろう。

問 19) 【正解】C 【部分点】F

【解説】遺伝病Qの対立遺伝子をDとdとした場合、男性Mの妹の遺伝子型はddである（常染色体劣性遺伝の病気を発症しているため）ことから、健康な両親の遺伝子型はともにDdであるとわかる。その両親から生まれた子供の遺伝子型は $DD:Dd:dd=1:2:1$ となるが、男性Mは発症していないため、その遺伝子型は $DD:Dd=1:2$ 、すなわち、ヘテロ接合体Ddである確率は $2/3$ である。したがって、精子にdが含まれる確率は、 $2/3 \times 1/2 = 1/3$ となる。同様に、女性Nがヘテロ接合体Ddである確率は $2/3$ であり、卵にdが含まれる確率は $1/3$ である。したがって、MとNが結婚して生まれた子がddとなって発症する確率は、 $1/3 \times 1/3 = 1/9$ となる。



家系図（●と■は発病者）

問20) 【正解】A 【部分点】B E

【解説】①②について：減数分裂での組換え（乗換え）は、相同染色体が対合する第1分裂時に起こる。

③④⑤⑥について：哺乳類の減数分裂では、一般に雌性における組換え頻度が雄性より高い。このことはどの常染色体にもいえることで、ヒトでは女性の減数分裂での組換え頻度は、平均すると男性の約1.5倍程度高いことが知られている。図の13番染色体の場合は1.3倍(125/96.5)。したがって、組換え頻度を基にした染色体の長さ(cM)は、女性の染色体の方が男性より長くなるが、実質的なサイズ(塩基対数や分裂中期での大きさ)が変わるわけではない。

なお、多型性(個人差)のあるDNA塩基配列は、連鎖解析や個人ゲノム解析の際に遺伝的マーカーとして有力な指標となる。DNAの多型は、一塩基多型(SNP)、制限酵素断片長多型(RFLP)、単純反復配列パターンなどによって知ることができる。

問21) 【正解】H

【解説】この問題は、平衡選択の1つである超優性選択に関する問題である。 Uu と uu が1:1であるとき、これらが任意交配すると受精卵の遺伝子型の割合は次のように求められる。

- (1) Uu と Uu の交配は1/4の確率で起こり、受精卵の1/4は UU 、1/2は Uu 、1/4は uu である。
- (2) Uu と uu の交配は1/2の確率で起こり、受精卵の1/2は Uu 、1/2は uu である。
- (3) uu と uu の交配は1/4の確率で起こり、受精卵のすべては uu である。

この結果、遺伝子型 UU の割合は $1/4 \times 1/4 = 1/16$ 、遺伝子型 Uu の割合は $1/4 \times 1/2 + 1/2 \times 1/2 = 3/8$ 、遺伝子型 uu の割合は $1/4 \times 1/4 + 1/2 \times 1/2 + 1/4 = 9/16$ となる。したがって、成虫の遺伝子型の比は、生存率を掛け合わせて、

$$[Uu \text{ の割合}] : [uu \text{ の割合}] = 3/8 \times 1 : 9/16 \times W = 3/8 : 9W/16$$

となる。これが1:1であることより、 $3/8 : 9W/16 = 1 : 1$ を解いて、 $W = 2/3 \approx 0.67$ となる。

平衡選択

平衡選択は、高い遺伝的変異量を維持できる自然選択である。平衡選択にはいくつかの様式が知られているが、代表的なものは頻度依存選択と超優性選択である。

頻度依存選択は、適応度が頻度に依存する選択様式であるが、重要と考えられているのは「少数者有利」の場合である。たとえば、ある遺伝子座に2つの対立遺伝子(A_1 と A_2)が存在し、遺伝子型の適応度が次のようであったとする。

遺伝子型	A_1A_1	A_1A_2	A_2A_2
適応度	W_{11}	W_{12}	W_{22}

A_1 の頻度が低いときは $W_{11} > W_{12} > W_{22}$ であり、 A_1 の頻度が高いときは $W_{11} < W_{12} < W_{22}$ であると、 A_1 と A_2 は集団内に共存できる。すなわち、頻度の低い対立遺伝子は有利であり、その頻度は増加するが、頻度が高くなりすぎると不利になり、その頻度が減少する。この結果、対立遺伝子はある安定な頻度(平衡頻度)にとどまる。これが(少数者有利の)頻度依存選択である。

超優性選択では、遺伝子型の適応度は $W_{11} < W_{12} > W_{22}$ の関係にある。すなわち、ヘテロ接合体の適応度はホモ接合体の適応度より高い。遺伝子型の適応度を $W_{11} = 1 - s$ 、 $W_{12} = 1$ 、 $W_{22} = 1 - t$ とすると、 A_1 の頻度は $t/(s+t)$ で安定することが知られている。マラリアが蔓延している地域で鎌形赤血球症を発症する人がある割合で維持されているのは、超優性選択によると考えられている。また後天性免疫に深く関与している主要組織適合性複合体(MHC: Major Histocompatibility Complex)の遺伝子群の中には高い遺伝的変異を維持している遺伝子座が多数存在するが、この変異の維持機構として超優性選択が強く示唆されている。

問 22) 【正解】 K 【部分点】 D H

【解説】 系統樹を作成する方法には、平均距離法、近隣結合法、最節約法、最尤法、ベイズ法などがある。DNA の塩基配列に基づいて最節約法で系統樹を作成する場合、考えられる系統樹の中から必要な塩基変化がもっとも少ないものを選択する。

生物種 I~III の場合、考えられる系統樹は 3 通りである (図 1)。まず、塩基サイトごとに祖先配列からの塩基変化 (置換) を調べる。塩基変化イベントを系統樹上にバーで示すと図 2 のようになる (たとえば、1/G のラベルはサイト 1 で塩基 G への変化を示す)。すべての塩基サイトを比較すると、種 I と種 II をもっとも近縁とする系統樹 (図の左端の系統樹) および種 I と種 III をもっとも近縁とする系統樹 (図の中央の系統樹) では最小限の塩基変化は 7 回となる。一方、種 II と種 III がもっとも近縁とする系統樹 (図の右端の系統樹) では最小限の塩基変化は 6 回である。したがって、最節約法では、種 II と種 III がもっとも近縁とする系統樹 (図の右端の系統樹) が選ばれる。

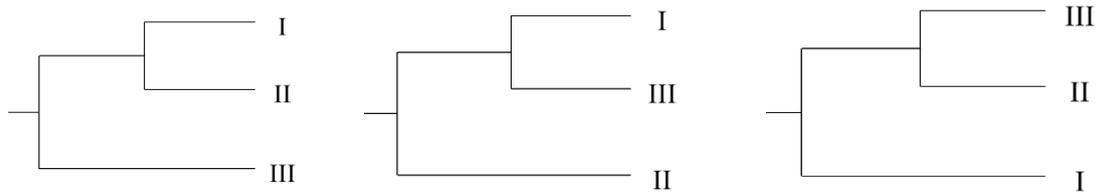


図 1 : 3 通りの系統仮説

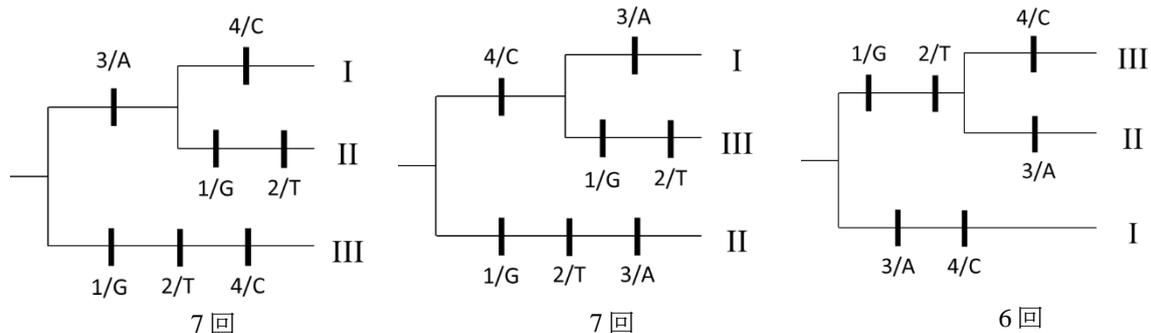


図 2 : 系統仮説における塩基変化

表紙の写真 (姫路城 : 2015 年 3 月 29 日撮影)

もちろん姫路城である！

改修直後「しろすぎ城」ともよばれていましたが、「白鷺城」との愛称で親しまれています。城の別称や愛称に生物の名はしばしば使われています。たとえば、「舞鶴城」「鶴ヶ城」「白鶴城」「初雁城」「千鳥城」「鷹城」「鳥城」「亀城」「鯉城」「鯉ノ城」「菖蒲城」「银杏城」など。探せば、もっともとあるでしょう。

「しらさぎ」と聞くと、列車の愛称が思い浮かびます。鳥の名がついた列車には、「つばめ」「はやぶさ」「とき」「サンダーバード (雷鳥)」「こうのとり」「かもめ」「白鳥」などがあります。鳥の名が列車の愛称として人気があるのは、いまに始まったことではないようです。1929 年に東京～下関間の特別急行列車の愛称を一般公募した結果は、2 位 : 燕 (つばめ)、5 位 : 隼 (はやぶさ)、6 位 : 鳩 (はと)、8 位 : 鷗 (かもめ)、9 位 : 千鳥 (ちどり) でした。ちなみに、1 位は富士 (ふじ)、3 位は櫻 (さくら) でした。

鳥の多くは身近な生きものとして、人間の近くで (あるいは、人間とはある一定の距離を保って) 生きています。愛称に鳥の名をつけるほど、鳥は身近な存在なのでしょう。