

2012年度 日本生物学オリンピック 代表選抜試験

解答例および解説

第1問 趣旨

本問題は、細胞機能の原点であるATP合成のしくみとそのヴァリエーションから細胞エネルギーについて考えることを意図しています。問1は基礎的なATP合成の比率とその名称を問うものです。キャンベルにも詳しく説明されています。問2～5は、そのような効率的なATP合成をしない現象について、設問しています。教科書にはない難しい問題ですが、呼吸をするのにATPを合成しないとき、熱が発生するという、常識的な現象ですが、哺乳動物や特殊な花はその発生する熱を利用しています。つまり、哺乳動物は体温の維持、ザゼンソウなどの花は発生した熱によって揮発性の昆虫誘引物質を発散させます。このような現象のしくみを、教科書的なATP合成のしくみの理解と一助として取りあげました。

解答例

問1. 細胞質：ミトコンドリア=1:17 (1:18, 1:14, 1:15 なども可) 、基質レベルのリン酸化、酸化リン酸化

問2. 熱

問3. 化学浸透というエネルギー共役機構 (がはたらかないようになっている)

問4. 体温を上げる (ことで、生命活動しやすくする)

問5. 通常条件では、エネルギー共役しているので、生産したATPを消費しないと、呼吸反応 (電子伝達反応) が抑えられる。

解答の注

問1. 細胞質の解糖系とミトコンドリアでの酸化リン酸化におけるATP合成量は、よく出題されます。効率として、これまでの教科書やキャンベル7版では、1分子のNADH当たり3分子のATPとされています。この数字に基づくと、グルコース1分子当たり、細胞質の解糖系で2分子のATP、ミトコンドリアでは、クエン酸回路も含めて36分子のATPが合成されることになります。このときは、比は1:18となります。また、詳しい本では、細胞質でつくられたNADHをミトコンドリアに輸送するのみ2分子のATPを消費するので、ミトコンドリアで34分子のATPが合成されるとされています (比=1:17)。ただし、2013年1月に出版されたキャンベル9版では、NADH当たりのATP合成量が改訂されたため、ミトコンドリアでは30分子のATP、また輸送を考慮すると28分子が合成されると記述されています。これは、まさに進行中の研究成果を反映するものです。いずれ、日本の教科書もこのような数字に変わっていくと思われます。

問2. ATPの化学エネルギーに変換できないときは、熱に変換されます。

問3. 「エネルギー共役機構がはたらかなくなる」現象は、脱共役タンパク質がミトコンドリアの膜をH⁺イオンを透過させることによって起こります。

問4. ザゼンソウは雪解けの低温下で開花します。受粉のため虫を呼び寄せる目的で、熱を発生して揮発性の誘引物質を揮発させやすくします。褐色脂肪細胞や脱共役タンパク質は、キャンベル9版では新しく取り入れられています。熱の利用は、趣旨で述べましたが、他にもさまざまな利用が知られています。各自で調べてみると、生命活動の多様性の奥深さがわかります。

問5. 「エネルギー共役」している通常状態では、呼吸速度はATP合成速度と対応しています。したがって、ATPを大量消費していない通常細胞では、ATP合成速度が制限されることで、呼吸速度も抑えられています。

第2問 解答と説明

問1 世代時間が短い

実験条件で容易に飼育できる
体サイズが比較的小さく実験室で場所をとらない
ゲノムサイズが小さい

モデル生物の条件は多数あるが、遺伝や進化の実験では多数の世代にわたる観察や実験が必要であり、世代時間が短いことが最も重要である。また、統計的処理が必要である場合も多く、多数の個体を実験室で飼育する必要がある。最近では遺伝子解析を行うことも多くなってきており、ゲノムサイズが小さいことが重要となっている。（他にも突然変異体が多く得られるなどもある）

問2 自然選択

問3 その個体が育った培地により交配相手を選ぶといったような環境条件の可能性を排除するため。

この問題のような実験では、考えられる他の要因をできるだけ排除する必要がある。この場合、遺伝的な要因を調査するため、個体の育った環境要因を排除する必要がある。

問4 生殖的隔離

問5 （この小問は削除）

問6 対照群

問3 解答例

大腸菌のトリプトファン合成に関係する一連の酵素タンパク質それぞれは細胞内で一定の割合で合成されている。それが可能となる仕組みを述べよ。

→ 一連の酵素タンパク質の遺伝子は隣り合ってオペロンを形成しており、一つの転写単位として一本のmRNAから、順番に翻訳される。そのために前のタンパク質翻訳を受けて、次のタンパク質の翻訳と繋がるので、途中の過程に変化がなければ、一定の割合で下流にむけて翻訳されると考えられる。

大腸菌のトリプトファンの合成ができない突然変異体の種類によって、各酵素タンパク質の合成量の比が変わることがあるだろうか。その可能性を述べなさい。このときタンパク質のアミノ酸配列に変化が起こっても同じものと見なし、合成量は同じとする。

→ オペロンを形成して、一本のmRNAから連続して翻訳されるので、そのおたがいの翻訳の比が変わるということは、連続した翻訳が阻害される出来事が起こった場合が想定される。たとえば、読み取り枠(ORF)間にあらたな開始コドンがうまれて異常な長さの産物となったり、フレームがずれたタンパク質となったりした場合が想定される。

ヒトの大人のヘモグロビン分子は、 α グロビン2個と β グロビン2個が合わさって4量体を形成したものである。それぞれのタンパク質は別の染色体上の遺伝子にコードされているにもかかわらず、両者の存在量が一定になっている理由として可能性のある仕組みを述べよ。

→別の染色体に載っているにもかかわらず、独立の転写単位からmRNAができ、その翻訳産物が一定の比で合成されている。mRNAがある一定の割合で転写されていれば、そこからの翻訳は一定となるであろう。であるので、二つの転写開始を促進あるいは抑制するしくみが共通であることが想定される。プロモーター配列、エンハンサーに共通性がある、さらにかかわる転写因子が共通であることが想定される。

問3の場合、ある遺伝子が突然変異を起こすことで、 α グロビンと β グロビンの蓄積量の比が変わることがあるだろうか。その可能性を述べなさい。

→ どちらかの遺伝子上流配列（シスの配列）の変化によって、同じ転写装置が双方に関わる場合でも効果が一方に変化が及ぶ。

第4問 出題意図

本問題は腎臓を題材にした、物質交換の問題です。腎臓は漠然と老廃物を濃縮していると考えていることと思いますが、腎臓の物質交換は物理法則を上手に用いた精巧なシステムであることを学んでいただければと思います。

問1. 知識問題ですが、陸上への適応において、濾過-再吸収型の排出機構を発達させた脊椎動物と、分泌型の排出機構（マルピーギ管）を発達させた昆虫類の、進化の方向性の違いなどにも興味を持って頂けたら幸甚です。

炎細胞-扁形動物、という解答が数名見られましたが、扁形動物の排出器官としては原腎管になります。

問2. この問は、尿が出来る仕組みを聞いているのではなく、なぜ尿が高張となるかを問うています。ポイントとしては、

- 1) 水は能動輸送のシステムがないので、腎臓髄質中の最高浸透圧までしか濃縮できない。
- 2) ヘンレーループの上行脚では水の透過性がなく、水の受動輸送は起きない。その代わりにイオンの受動輸送と能動輸送を行い、これが結果的に腎臓内の浸透圧勾配を維持している。
- 3) ヘンレーループを上行した尿の浸透圧は一度体液と等張まで下がるので、最終的な尿の濃縮は集合管における水の受動輸送である。

という点です。細かい点は解答例に示しましたので、キャンベル生物学を見ながら再確認をお願いします。

問3.

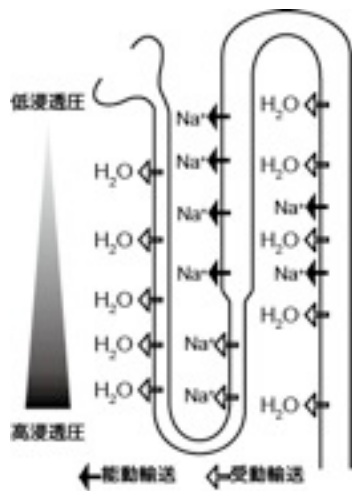
- (1) 対向流システムの実例の知識問題です。皆さんよく出来ておりました。
- (2) 問題意図がうまく伝わらなかったように感じますが、対向流交換は必ずしもヘンレーループのように折返し管である必要はありません。ポイントは平行流系では移動する側と移動される側の間での濃度差（温度差）が無くなってしまうとそこでおしまいであるのに対し、対向流系は移動する側から移動される側の間で常に濃度差を生じさせることです。これは工業的にも使われているシステムですので、再確認をお願いいたします。

解答例

問1 マルピーギ管 - 昆虫、後腎管 - 環形動物（ミミズ）、
原腎管 - 扁形動物（ヒラムシ）、など

問2 腎臓皮質にある糸球体からボーマン嚢へ濾過された原尿は、体液と等張である。細

尿管はヘンレーループの下行脚にかけて皮質から髄質にむかうが、この際に間質の浸透圧が高くなっているため、アクアポリンを介した受動輸送によって細尿管から間質へ水が移動し、尿の濃度は上昇する。一方、ヘンレーループの上行脚は水に対して不透過性で、ヘンレーループの上行脚では髄質の間ではNaCl等のイオンが受動的に、皮質に近づくと能動的に間質へ移動する。このイオンの移動は腎臓内での間質の浸透圧勾配の維持に寄与している。この水の移動を伴わないイオンの移動によって、尿の濃度は再び希釈される。そして尿は皮質から髄質にかけて集合管の中を再び移送する。集合管上皮は水の透過性が高いため、浸透圧勾配に従って水が間質へ受動輸送され、最終的に体液よりも高張まで濃縮される。（図参照）



- 問3 (1) 魚の鰓における酸素交換、イルカの鰭における熱交換、など。
 (2) 例えば酸素交換が行われる場合、平行流では移動する側から移動される側に50%ほど移行した段階で濃度差が消失してしまうが、対向流の場合は、常に濃度差を生じるため、100%近い交換効率が可能である。（図参照）

平行流

	水の流れ →					
移動する側	100	90	80	70	60	50
	↓	↓	↓	↓	↓	
移動される側	0	10	20	30	40	50
	水の流れ →					

対向流

	水の流れ →					
移動する側	100	85	65	45	25	5
	↓	↓	↓	↓	↓	↓
移動される側	95	80	60	40	20	0
	← 水の流れ					

第5問 意図と解答例

問1 多くの動物（ウニ、カエルなど）では、早くに食物を摂取できるようにするために、卵割は急速に進行する。卵割期には細胞はG1期を経ずにM期に続いてすぐにS期に入り、次の分裂に備える。従って接合子の遺伝子が発現するいとまがない。胞胚期を過ぎて、分裂速度が低下すると初めて接合子の遺伝子発現が起こる。一方、母親の体内で発生が進行する哺乳類では、卵割の速度は遅く、例えばヒトでは第一卵割は受精後24時間で起こり、その後の分裂にも12時間ほどを要する。この場合にはG1期が挿入されて、接合子の遺伝子発現が起こる。このように、急速な卵割とゆっくりした卵割では細胞周期に違いがあることに気付いて欲しい。

解答例：急速に卵割する場合には細胞周期のG1期が存在しないので、接合子の遺伝子発現は起こらない。哺乳類の卵割はゆっくりなので、G1期が存在し、接合子の遺伝子発現が起こる。

問2 発生におけるもっとも重要なことからであるオーガナイザーに関する基本的な設問である。シュペーマンの実験は必ず学習するので、それを記述することはそれほど難しくないのであろう。しかし、発生過程におけるオーガナイザーの役割を正しく認識しているかどうかは、初期発生過程の理解とも関係していて、是非ともきちんと知っておいて頂きたいと思う。標準的な解答例を以下に示す。

- (1) シュペーマンは、体色の異なる2種類のイモリを用いて、一方の原口背唇部を他方の将来腹側になる領域に移植した。移植した部分の細胞は、本来の発生運命に従って脊索に分化したが、その周囲の宿主の組織は神経管、体節などの組織に分化した。これにより、宿主の腹側に二次胚が生じた。このことからシュペーマンは、移植した原口背唇部が体制を構築する力をもっていると考え、形成体（オーガナイザー）とよんだ。
- (2) 動物の受精卵は、多くの場合急速に分裂（卵割）して細胞数を増やす。しかしそのまま分裂を続けても全体の形は受精卵とほぼ同じの球形のまま、成体の形にはならない。したがって発生過程の途中で、胚全体の形を変え、また成体を構成する多くの細胞種を生み出すような変化がなくてはならない。それをもたらすのがオーガナイザー領域である原口背唇部を中心とする原腸形成過程であり、原腸形成によって胚には3胚葉が成立し、胚の形も変化し、また体軸が明瞭になる。オーガナイザーのもう一つの重要な機能は、多分化能をもつ外胚葉に働きかけて最初の細胞分化としての神経形成を誘導することである。

問3 誘導現象における遺伝子の機能を推定する問題である。実験ではSeyの変異体由来の眼胞と正常表皮の組合せでレンズができるので、Sey遺伝子産物は誘導作用に必須ではないことが分かる。一方眼胞が正常でも表皮がSeyの変異体由来であるとレンズが誘

導されないので、Sey遺伝子産物は誘導を受ける側の機能に重要であることが推測される。その場合、その産物が、誘導を受けることに関わるか、誘導を受けた後に、レンズが実際に形成される過程で必要なかは分からない。したがって、以下のような解答が標準的である。なお、Sey遺伝子はPax6遺伝子という、転写因子をコードする遺伝子と同じ遺伝子であり、この遺伝子がショウジョウバエの眼の形成の鍵遺伝子であるeyelessと相同遺伝子であることは有名である。

解答例：Seyの変異体由来の眼胞と正常表皮の組合せでレンズができるので、Sey遺伝子産物は誘導作用に必須ではないことが分かる。一方眼胞が正常でも表皮がSeyの変異体由来であるとレンズが誘導されないので、Sey遺伝子産物は誘導を受ける側の機能に重要であることが推測される。Sey遺伝子産物は、眼胞からの誘導作用を受容するのに必要であるか、受容した後に実際にレンズが形成される過程で重要な働きをすることが考えられる。

第6問 出題の意図と正解例

本問では、生態系を構成する生物の構造と食物連鎖の関係についての知識と考察力を問いました。

問1では生態系における「生態系ピラミッド」を題材として、生産者および消費者の生物量の量的関係が、生態系の違いにより異なることについて問いました。一次生産者の生物量は一次消費者の生物量よりも多いのが一般的ですが、外洋等の水界生態系では、一次消費者の動物プランクトンの生物量が、一次生産者の植物プランクトンの生物量を上回る現象が見られます。これは、植物プランクトンの増殖速度と動物プランクトンによる捕食速度が高いこと、および植物プランクトンの増殖速度が動物プランクトンの増殖速度を上回ることに起因しています。一見、成立しないピラミッドに思えますが、「生産量のピラミッド」を描いた場合は、一次生産者の生産量が二次生産者の生産量を上回り、通常の上に行くに従って小さくなるピラミッドとなります。陸上生態系では、一次生産者の樹木の一部のみが二次消費者に捕食されるため、両者の生物量の差は大きくなります。

問2では、一次生産者と一次消費者である植物プランクトンと動物プランクトンにおける濃度が、海水中の濃度に比較的近いと考え、これらの生物における濃度に大きな違いがないことから、両湾の海水の濃度もほぼ同程度であると推定できます。

問3は生物濃縮の程度が栄養段階の数に依存することから考えてください。生物濃縮による生物体内の濃度の増加は、栄養段階の数が増えるにつれて増加します。そのため、同等の大きさのスズキ個体であっても、栄養段階の数の多い生態系では、より高い濃度のダイオキシンが体内に存在することになります。

問4では、全ての物質が生体濃縮されるのではなく、濃縮されやすい物質とされにくい物質があること、そして、排泄されやすい物質は濃縮されにくいこと、などを考慮して解答することができます。生体濃縮されやすい物質として知られているダイオキシン、PCB、DDTなどは、水に溶けにくく脂肪に蓄積しやすい物質です。

第7問 出題趣旨と解答・解説

原生生物（プロティスト）は、まだ、漠然とした分類群であることには変わらない。しかし、現在、種々の科学的根拠が蓄積されて来ており、かつての五界説で単細胞というだけでひとくくりにされたものとは大きく様相が変わりつつある。新しい生命科学を勉強する高校生には、原生生物を例にとるだけで、学問の進歩の様子だけではなく、多細胞の生物にやがて進化してゆく真核生物の歴史を理解できるだろう。また、系統分類が1つの仮説に過ぎない点、原生生物が人の生活に深く関わっている点など、さまざまな興味深い点を学ぶことができるだろう。

この設問は、原生生物の名前になじみを持ってもらうことを意図した出題である。実際の解答には原生生物学の知識は不要である。実際は、動物と菌類の違い（分類系統学）、寄生性生物の免疫系の回避機構（免疫学）、鎌形赤血球症の疫学上の知見（教科書に頻繁に取りあげられている遺伝の話題）、鎌形赤血球症と β ヘモグロビンの関係（遺伝子の発現機構と呼吸タンパク質としてのヘモグロビンの機能）を問う形式になっている。生命科学の分野が、1つ1つ分断できるものではなく、互いに関係し合っていること、分野横断的にも理解すべき点が多々あることを学んで欲しい。

<設問と解答>

問1 大きな分類群である動物界と菌界の特徴はなにか。その共通点と相違点をそれぞれ2つずつあげなさい。

<答えの例>

共通点：

- ・核を持つ真核生物である点
- ・従属栄養生物である点
- ・ユニコンタ（鞭毛を1つ持つ祖先型細胞）に由来する点

相違点：

- ・細胞壁の有無、菌類はキチン質の細胞壁を持つが、動物にはない点。
- ・菌類は、菌糸がその主な構成要素で単純な組織構造であるのに対して、動物は、組織・器官・器官系という階層構造を持つ点。
- ・菌類は体外に分泌した消化酵素によって消化した生成物を細胞内へ吸収するのに対して、動物は、体内に取り込んで吸収する（海綿は腔所で分解するのではなく細胞内に取り込んで分解、刺胞動物以上は消化管内で分解後吸収する）。
- ・運動性の有無の違い。

問2 スーパーグループの1つ、エクスカバータに属するトリパノゾーマ (*Trypanosoma brucei*) は、ツェツェバエを介してヒトの体内に入り、アフリカ睡眠病を引き起こす。体内に侵入したトリパノゾーマは、数週間もの間、ヒトの血液中で生き残り、やがて、脳内に侵入して不眠症を引き起こす。この原生生物が、血液中で長期間生き残ることができるのは、どのようなしくみを持つためか。数行以内で簡潔に説明しなさい。

<解説と解答>

ヒトの免疫機構は、侵入した異物細胞の表面にある糖鎖やタンパク質を目印 (エピトープ) にして反応する (免疫系を使って排除する) と考えられる。新しいエピトープに対して、ヒトは2~3週間かけて免疫を獲得して、その抗原を記憶して、異物細胞として取り除く特異的な反応を開始する。トリパノゾーマは、細胞表面のタンパク質を数週間の周期で変化させることができる。そのため、ヒトの体にとっては、同じ細胞であっても、絶えず異なる免疫刺激を与える新しい異物として認識されるので、免疫記憶がうまく機能できない。このため、免疫反応で駆除することが難しい。

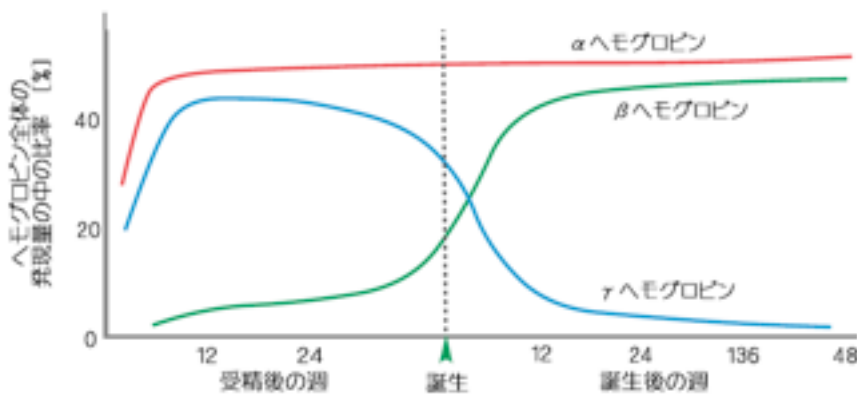
問3 スーパーグループの1つ、アルベオラータに属するマラリア原虫 (*Plasmodium*) は、ハマダラカなどを介してヒトの体内に入り、発熱を繰り返すマラリアを引き起こす。このマラリアと、遺伝的な貧血症である鎌状赤血球症 (Sickle-cell disease) との間で知られている疫学的な知見 (疾患の頻度や分布に関する研究の成果) とは何か。簡潔に解説しなさい。

<解説と解答>

鎌状赤血球症の多い地域、つまり、ヘモグロビン (β サブユニット) の変異 (6番目のグルタミン酸がバリンに置換した変異) を持った遺伝子頻度の高い地域とマラリアの発症する地域 (媒介する蚊の多い地域) は、よく重なっていることがわかっている。特にアフリカでの分布は、非常によく重なっている。そのため、鎌状赤血球症の原因遺伝子をヘテロで持つヒトは、マラリアにかかりにくいと推測される。原因は、まだ、よくわかっておらず、マラリア原虫に感染した赤血球細胞が血液中で寿命が短く優先的に排除されるためと考えられる。最近の研究報告では、変異ヘモグロビンを発現している赤血球細胞では、マラリア原虫の細胞内侵入を防ぐ作用がより高いとの報告もあるが、真相はまだ明確にはなっていない。

問4 鎌状赤血球症を治癒する方法として、ある研究者が、遺伝子療法を考案した。ヒトが成人になると発現しなくなるが、胎児の時に多く発現するヘモグロビンを人工的に発現させる方法である。鎌状赤血球症を発症しているモデルマウスで試験し、その貧血症症状を軽減することに成功した。この胎児性ヘモグロビンは成人ヘモグロビンとはどのような点が異なるか、また、鎌状赤血球症の症状を軽減できた理由は何と推測できるか。簡潔に述べなさい。

<解説と解答>



胎児性ヘモグロビン (γヘモグロビン) の特徴は、母胎の血液より酸素を獲得する必要があるために成人ヘモグロビンよりも、酸素に対して結合しやすい (高い親和性・結合能を持つ) のが特徴である。ヒト胎児性のγヘモグロビンは、誕生後から急激に発現が減少し (上図参照)、βヘモグロビンに置き換わってゆく。提案されている遺伝子治療では、大人で消失しているはずの (発現しなくなった) γヘモグロビンを人工的に多く発現させることで、変異したβヘモグロビンからなるヘモグロビン ($\alpha_2\beta_2$) の代わりに、 $\alpha_2\gamma_2$ のヘモグロビンが、正常に酸素運搬機能を果たすので、症状が軽くなると考えられる。γヘモグロビンが、酸素親和性が高い点も、このマウスでの治療実験効果が現れた一因になっているかも知れない。

問題の「図1」ではトリパノゾーマはクロモアルベオラータに、マラリア原虫はエクスカバータに属するように図示されているが、小問文での記載が正しい。各小問に答えるのに「図1」での誤記は直接に影響するものではなかった。