

# 平成30年度入学試験問題

## 生物科学専攻

# 専門科目

### [注意事項]

1. 試験開始の合図があるまで、この問題冊子を開いてはならない。
2. 解答には、必ず黒色鉛筆(または黒色シャープペンシル)を使用すること。

### [以下、特に重要]

3. 問題冊子1冊と答案用紙4枚が配られているか確かめること。過不足がある場合は挙手して監督者に知らせること。
4. 問題は全部で11問ある。問題の内訳は以下の通りである。
  - 第1問～第4問:分子生物学・細胞生物学・生化学・遺伝学の問題
  - 第5問～第7問:生物化学・生物情報科学分野の問題
  - 第8問～第11問:動物学・植物学・人類学分野の問題これら11問の中から任意の4問を選択して解答せよ。
5. 選択した4問の解答を答案用紙1枚ずつに分けて記入すること。
6. 各答案用紙の所定欄に受験番号および氏名を必ず記入すること。
7. 各答案用紙の問題番号欄に問題番号をひとつだけ記入すること。なお、**第8問～第11問にはそれぞれ複数の選択問題**が含まれている。これらの問題を選んだ場合には、答案用紙の自由記入欄にいずれの選択問題を選択したかを明記し、全体を1枚の答案用紙に収めて解答せよ。
8. 答案用紙の科目名の欄には、「専門科目」と記入すること。
9. 答案用紙の裏面も使用する場合は、表面にその旨明示すること。ただし、答案用紙は上部区切り線で綴じられるので、区切り線より上部は使用しないこと。
10. 答案用紙には、解答に関係のない文字、記号、符号などを記入してはならない。
11. 解答しない場合でも答案用紙には受験番号、氏名、および問題番号を記入して提出すること。
12. 答案用紙を草稿用紙として絶対使用しないこと。草稿用紙は問題冊子にあるが切り離さないで用いること。また問題冊子の余白は自由に使ってよい。
13. 試験時間は2時間30分である。原則として試験終了時間まで席を離れることは許さない。

この問題冊子は試験終了後に回収する。以下の欄に受験番号と氏名を記入すること。

受験番号		氏名	
------	--	----	--

## [第1問]

次の文を読み、以下の問1～6に答えよ。

真核生物の核内では、DNAはクロマチン(chromatin)構造をつくっている。クロマチンは均一な構造ではなく、遺伝子発現が盛んな領域である **ア** と、遺伝子発現が抑えられている領域である **イ** に分けられる。さらに細かく見ると、DNAは (a) ヒストンコア(histone core) に巻きついた状態となっており、この構造単位は **ウ** と呼ばれている。転写開始の際には、転写因子が制御配列に結合し、**エ** などのタンパク質が転写因子と基本転写因子とを結び付ける。

さて、ある遺伝子Aについて研究をすることにした。まず、遺伝子Aが各組織B～Dにおいて発現しているかどうかを調べるために、遺伝子Aの翻訳配列(coding sequence)を増幅できるプライマー対を用いてRT-PCR(reverse transcription polymerase chain reaction)を行った。その結果を図1に示す。次に、遺伝子Aの発現制御について調べることにした。遺伝子Aの発現制御に関わることが示唆されているタンパク質X、YおよびZは、いずれもヘリックス・ループ・ヘリックス(helix-loop-helix: HLH)構造をもち、核に局在する。一般に、塩基性(basic)HLH型転写因子は、ホモあるいはヘテロダイマーとしてDNAに結合することが知られている。そこで、タンパク質X、YおよびZのタンパク質-タンパク質間の相互作用を、酵母ツーハイブリッド法(yeast two-hybrid system)により調べた。その結果を表1に示す。さらに、(b) タンパク質X、YおよびZが、遺伝子Aの発現を直接制御しているかどうかを検証した。

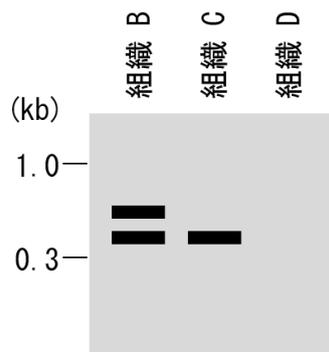


図1. 各組織B～Dにおける遺伝子Aの発現。

RT-PCR産物の電気泳動像。サイズマーカー(キロ塩基対: kb)の位置を左に示す。

表 1. 酵母ツーハイブリッド実験の結果

		GAL4 DNA結合ドメインと融合したタンパク質			
		なし	タンパク質X	タンパク質Y	タンパク質Z
GAL4 転写活性化ドメインと融合したタンパク質	なし	—	+	—	—
	タンパク質X	—	n. d.	+	—
	タンパク質Y	—	n. d.	—	+
	タンパク質Z	—	n. d.	+	—

＋は選択培地上で酵母が増殖したことを、－は増殖しなかったことを、n. d. は実験しなかったことを示す。

- 問1.  ～  に入る最も適切な語を記せ。
- 問2. 下線部 (a) について。ヒストンコアはどのような構造であるかを 2 行程度で述べよ。また、修飾を受けることにより、遺伝子の発現制御に最も重要な役割を果たすと考えられているヒストンは何か、その名称を答えよ。
- 問3. 図 1 に示すように、組織 B では、検出された遺伝子 A のバンドパターンが組織 C とは異なっていた。その理由としてどのような可能性が考えられるか、1 行程度で答えよ。なお、用いた RNA サンプルの品質は保証されており、また、用いたプライマー対で非特異的なバンドが検出されないことを確認している。
- 問4. 下線部 (b) について。遺伝子 A の上流域にある 30 塩基対 (bp) の塩基配列 R をもつ DNA 断片 (以下、配列 R) をプローブとし、タンパク質 X、Y、Z を用いて electrophoretic mobility shift assay (EMSA) を行った。この解析ではどのようなゲルを用いる必要があるか。この手法の原理にふれながら 3 行程度で述べよ。
- 問5. タンパク質 X が遺伝子 A の発現を直接制御しているかどうかを EMSA とは別の方法によって調べたい。この場合、どのような実験を行ったらよいか。考えられる方法を 1 つあげ、2 行程度で述べよ。

問6. 配列 R とタンパク質 X、Y、Z を用いて行った EMSA の結果を図 2 に示す。表 1 に示す酵母ツーハイブリッド実験の結果とあわせて考察し、以下の小問 (1) ~ (3) に答えよ。なお、ここで遺伝子 A の発現制御は、配列 R とタンパク質 X、Y、Z のみが担っていると仮定する。

- (1) タンパク質 X、Y、Z およびそれらの組み合わせにおいて、配列 R に何がどのような状態（ホモあるいはヘテロダイマー）で結合するか、あるいは結合しないかを、3 行程度で述べよ。
- (2) 遺伝子 A の発現制御におけるタンパク質 X、Y、Z の役割を考察し、5 行程度で述べよ。
- (3) 図 1 において、タンパク質 X が組織 C と組織 D で同程度に発現していた場合、組織 D におけるタンパク質 Y と Z の発現量はどの程度であると推定されるか、2 行程度で述べよ。

タンパク質 X	—	+	—	—	+	—	+	+
タンパク質 Y	—	—	+	—	+	+	—	+
タンパク質 Z	—	—	—	+	—	+	+	+

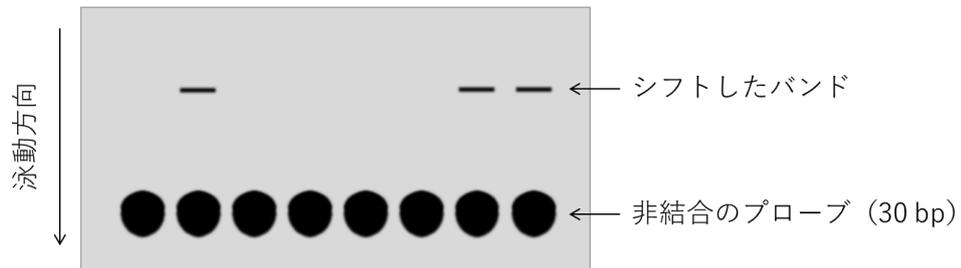


図 2. 配列 R とタンパク質 X、Y、Z を用いた EMSA の結果。  
配列 R を放射性同位元素で標識したプローブに、タンパク質を種々の組み合わせで加え（+で示す）、一定時間インキュベーションした後、電気泳動した。

# 草稿用紙

## [第2問]

次の文1と文2を読み、以下の問1～5に答えよ。

<文1>

真核生物の細胞内には膜に囲まれた区画、すなわち細胞小器官 (organelle) が存在し、それぞれが固有の生命活動を営んでいる。その中で小胞体 (endoplasmic reticulum: ER) は、多くの細胞で最大の表面積を有し、分泌タンパク質や膜タンパク質の生合成など、いくつもの重要な機能を受け持っている。

小胞体は、電子顕微鏡による観察から (a) 粗面小胞体と滑面小胞体に大別されることが以前より知られ

ていたが、さらに立体的な観察から、これらがそれぞれシート状構造とチューブ状構造という異なる形態におおむね対応することも明らかになってきた (図1)。また小胞体は核膜 (nuclear envelope) とも連絡し、核膜の外側にはリボソームがしばしば付着していることから、(b) 核膜も小胞体の一種であることがわかる。

小胞体は、細胞外への分泌や細胞表面への輸送、およびゴルジ体、エンドソーム、リソソーム、液胞など、単膜系の細胞小器官へのタンパク質輸送の開始点でもある。(c) 分泌タンパク質、細胞膜タンパク質、そして単膜系細胞小器官ではたらくタンパク質の多くは、翻訳と同時に小胞体膜を通過し、小胞体内腔で正しく折りたたまれたのちゴルジ体に送られる。これらのタンパク質は、ゴルジ体において糖鎖修飾などを受けて成熟し、さらに最終目的地へと運ばれていく。こうした一連の過程を小胞輸送 (vesicular transport) あるいは膜交通 (membrane traffic) と呼ぶ。

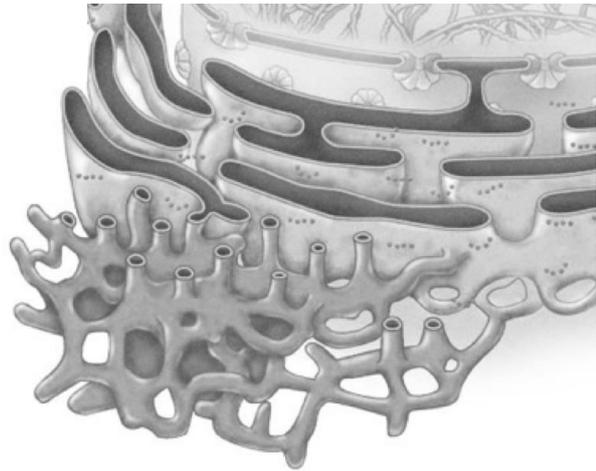


図1. 小胞体のモデル図。

- 問1. 下線部 (a) について。以下の小問 (1) と (2) に答えよ。
- (1) これら 2 種の小胞体が粗面および滑面と呼ばれる理由は何か、1 行で述べよ。
  - (2) これら 2 種の小胞体は異なる機能をもつと考えられている。どのような機能か、それぞれ 2~3 行で述べよ。
- 問2. 下線部 (b) について。核膜の核質側 (内膜) は、一般の小胞体膜とは違った性質をいくつかもっている。たとえば、動物細胞の核膜内膜の表面には中間径細胞骨格の一種であるラミン (lamin) が存在し、内膜タンパク質であるラミン受容体とともに核質側に核ラミナ (nuclear lamina) を形成する。核ラミナにはどのような機能があるか、2 行程度で述べよ。
- 問3. 下線部 (c) について。小胞体内でタンパク質が正しく折りたたまれない事態が起こると、それを処理するために小胞体品質管理 (ER quality control) と呼ばれるメカニズムが発動することが知られている。このメカニズムについて、以下の語句のうち 3 つ以上を用いて、5 行程度で説明せよ。

翻訳の抑制、転写の誘導、分子シャペロン (molecular chaperone)、逆輸送 (retrotranslocation)、プロテアソーム (proteasome)

<文 2>

膜交通の過程では、多数の低分子量 GTPase がはたらいている。たとえば、小胞体でゴルジ体行きの被覆小胞 (coated vesicles) (直径約 60 nm) が形成される際に、Sar1 という低分子量 GTPase が重要な役割を担っている。一般的に GTPase は、GTP 結合状態が活性型、GDP 結合状態が不活性型の分子スイッチと考えることができる。Sar1 の場合、GTP から GDP への加水分解がどのような意味をもつかを調べるために、以下の手順 (1) ~ (5) で無細胞系の再構成実験を行い (図 2 参照)、図 3 の結果を得た。

- (1) 被覆小胞の形成に必須である Sar1、Sar1 の GDP/GTP 交換因子 (膜タンパク質 S)、および被覆タンパク質を精製した。
- (2) 小胞体からゴルジ体に運ばれる積荷タンパク質である膜タンパク質 P を精製し、可視化のために緑色の蛍光化合物で標識した。
- (3) P と似ているがゴルジ体に運ばれず小胞体に留まる膜タンパク質 R を精製し、可視化のために赤色の蛍光化合物で標識した。
- (4) 小胞体膜の脂質組成に似せた組成で主要なリン脂質とコレステロールを混合し、膜タンパク質 S、P、R も同時に組み込んだ人工脂質平面膜 (artificial planar lipid bilayer) を作製して、図 2 に示す装置で倒立蛍光顕微鏡にセットした。
- (5) この人工脂質平面膜に、Sar1 と被覆タンパク質、および GDP、GTP または GMP-PNP のいずれかを加えた (GMP-PNP は GTP のアナログ分子で、GDP への加水分解を受けない)。30 分間反応させたのち、人工脂質平面膜から形成されてカバーガラスの表面に落ちてきた被覆小胞の数と、その被覆小胞の緑色と赤色の蛍光量を顕微鏡画像から定量した。

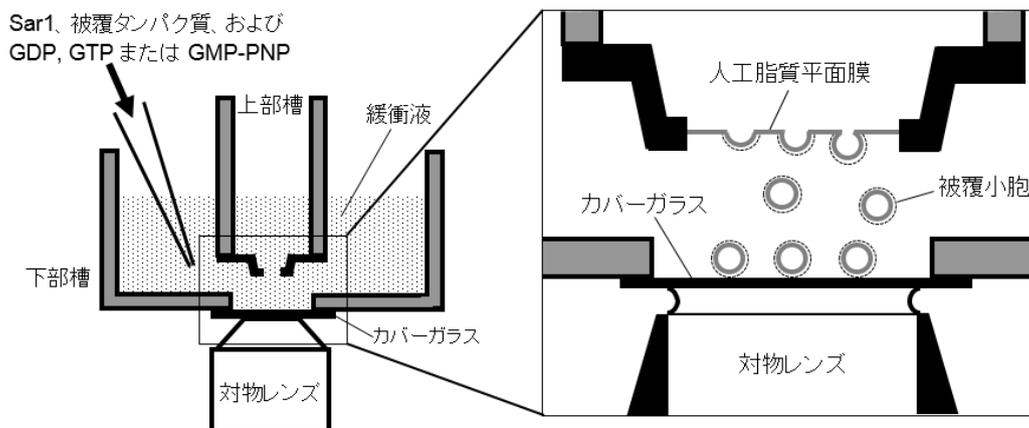


図 2. 被覆小胞形成の無細胞系再構成実験の模式図。

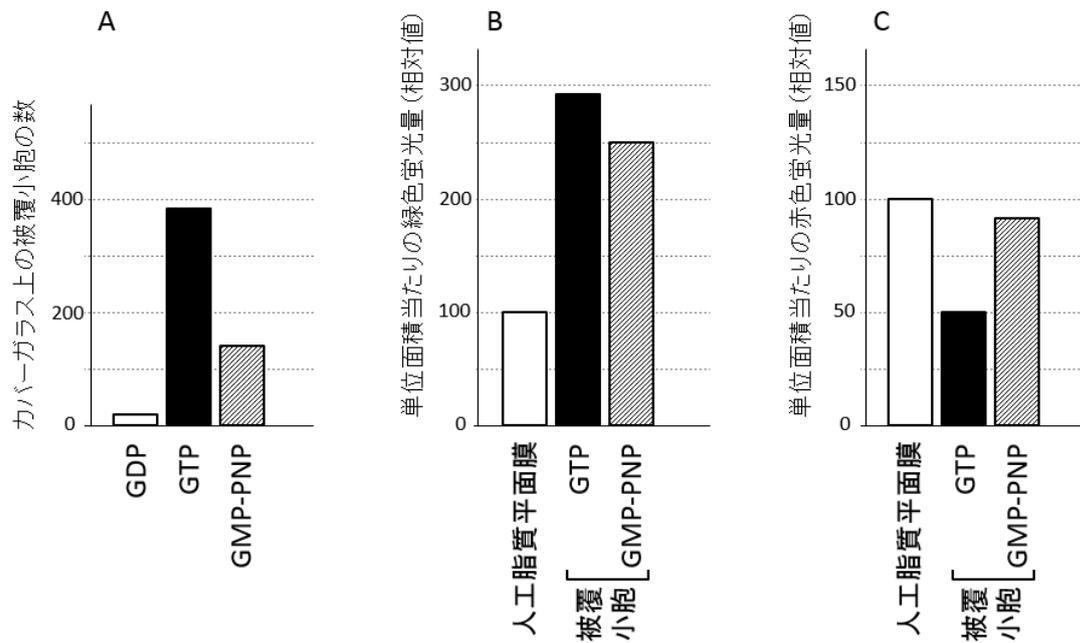


図3. 被覆小胞形成の無細胞再構成実験の結果。

(A) カバーガラス上の一定視野内に検出された被覆小胞の数。(B, C) 被覆小胞の緑色 (B) および赤色 (C) の蛍光量。単位面積当たりの蛍光量を計算し、もとの人工脂質平面膜上の単位面積当たりの蛍光量を 100 とした相対値で表した。

- 問4. 図 3A の実験結果から、Sar1 による GTP の加水分解には、被覆小胞の形成においてどのような意義があると考えられるか。実験結果を引用しながら 5 行程度で考察せよ。
- 問5. 図 3B と 3C の実験結果から、Sar1 による GTP の加水分解には、被覆小胞への積荷タンパク質 P の濃縮と非積荷タンパク質 R の排除において、どのような意義があると考えられるか。実験結果を引用しながら 10 行程度で考察せよ。

### [第3問]

次の文を読み、以下の問1～7に答えよ。

哺乳類の細胞は血液中のグルコース (glucose) を細胞内に取り込み、好氣的条件下においては、細胞に取り込まれたグルコースは解糖系 (glycolytic pathway) およびトリカルボン酸回路 (tricarboxylic acid cycle) によって代謝されて (図1)、エネルギー合成に利用される。細胞内において解糖系の反応は  で起こり、トリカルボン酸回路の反応は  で起こる。

従来、がんなどの腫瘍組織では、正常組織と比較して、グルコースの細胞内への取り込みが亢進していることが報告されている。一般に、血液中のグルコースの細胞内への取り込みは、グルコース輸送体を介して起こる。GLUT1、GLUT2、および GLUT3 は、グルコースの (a) 受動輸送 を担う輸送体であり、グルコースに対してそれぞれ固有のミカエリス定数 ( $K_m$  値) をもつ (表1)。そこで、細胞のがん化に伴うグルコースの取り込み量とグルコース輸送体の発現量の変化を調べるため、培養細胞をがん化して検討した。その結果、(b) がん化に伴いグルコースの細胞内への取り込みは増大し、GLUT1～GLUT3 の mRNA の発現量が変化 した (図2)。

さらに、腫瘍組織におけるグルコースの代謝を調べるため、腫瘍組織と正常組織を用いて、解糖系およびトリカルボン酸回路の代謝産物の量を測定した (図3)。腫瘍組織では、(c) グルコース 6-リン酸 や (d) 乳酸 などの含有量が増加していた。(e) このようなグルコース代謝の変化は、代謝関連酵素の発現量が変化することによって生じていることがわかっている。

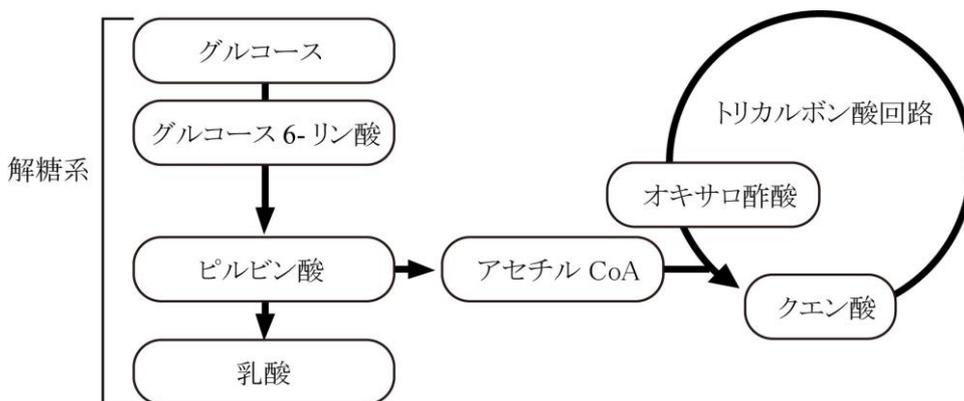


図1. 解糖系とトリカルボン酸回路の模式図。  
中間代謝物の名称は一部のみを記した。

表 1. GLUT1~GLUT3 のグルコースに対する  $K_m$  値

グルコース輸送体	$K_m$ 値 (mM)
GLUT1	1.0
GLUT2	15
GLUT3	1.2

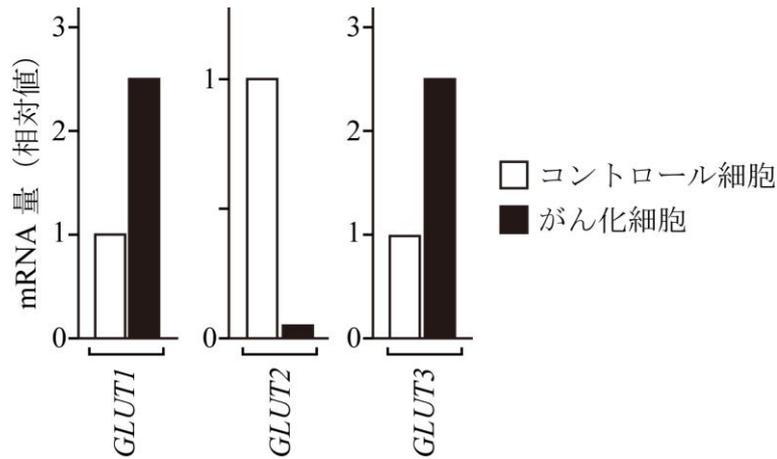


図 2. がん化における *GLUT1*~*GLUT3* の mRNA 量の変化。  
培養細胞 (コントロール細胞) および、それをがん化した細胞 (がん化細胞) に発現する各 *GLUT* の mRNA 量を測定した結果を示す。縦軸は、コントロール細胞の mRNA 量を 1 とした相対値。

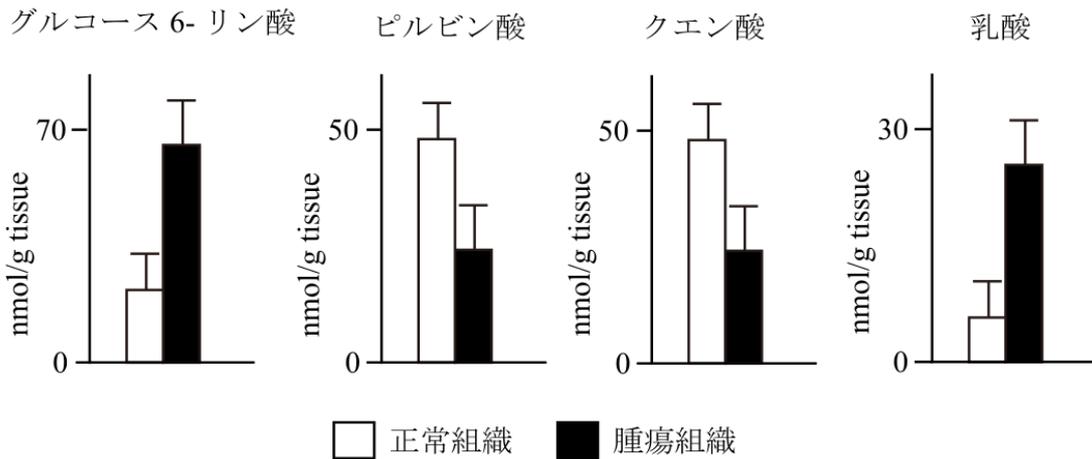


図 3. 正常組織と腫瘍組織における種々の代謝産物の量。  
Hirayama *et al.*, 2009 より改変。

問 1. 文中の  および  に入る適切な語を、下記から選んで答えよ。

核、ミトコンドリア、小胞体、細胞質基質 (cytosol)、ゴルジ体

問 2. 下線部 (a) について。受動輸送について 1 行程度で説明せよ。

問 3. 下線部 (b) について。がん化に伴いグルコースの細胞内への取り込みが亢進した理由はどのように考察されるか。図 2 および表 1 を参考にして 4 行程度で述べよ。ただし、血液中のグルコース濃度は約 5 mM である。なお、各グルコース輸送体が単位時間に輸送できるグルコースの最大量は同程度とし、がん化前の培養細胞 (コントロール細胞) の *GLUT1*~*GLUT3* の mRNA 量は同程度で、細胞膜上のグルコース輸送体の量は mRNA 量に比例すると仮定する。

問 4. 下線部 (c) について。グルコース 6-リン酸は、ペントースリン酸経路を介して、生体高分子の合成に必要な材料に変換される。その生体高分子の名称を記せ。

問 5. 下線部 (d) について。嫌気的条件下において、ピルビン酸の還元により乳酸が生成することが、解糖系の進行に重要である。その理由を 3 行程度で述べよ。

問 6. 下線部 (e) について。正常組織と比較して、腫瘍組織では解糖および酸化的リン酸化は、亢進していると考えられるか、もしくは減弱していると考えられるか。図 3 をもとにして、理由と共に 5 行程度で述べよ。

問 7. 臓器内に存在する腫瘍は細胞の塊として増殖するため、腫瘍内での血管新生が起こるまでの間、腫瘍への血流が不足する。この場合、下線部 (e) のような変化は、腫瘍細胞の増殖や生存に有利であると考えられる。その理由を 2 行程度で述べよ。

## 草稿用紙

[第4問]

次の文1と文2を読み、以下の問1～5に答えよ。

<文1>

二倍体の仮想モデル動物 Y について考える。Y のある形質 Z の大きさは、遺伝子座 1 と遺伝子座 2 によって完全に決定され、遺伝子座 1 には 2 つの対立遺伝子 Q と q が、遺伝子座 2 には 2 つの対立遺伝子 R と r が存在する。遺伝子型が qqrr の個体の Z の大きさは 8 であり、Q と R を 1 個保有するごとに値が 1 だけ加算的に増える。たとえば、遺伝子型が Qqrr の個体の Z の大きさは 9、QqRr の個体の Z の大きさは 10、QQRR の個体の Z の大きさは 12 である (図 1)。遺伝子型が QQrr の個体と遺伝子型が qqRR の個体とを交配させて生まれた個体を F<sub>1</sub>、F<sub>1</sub> どうしを交配させて生まれた個体を F<sub>2</sub> とする。

		雌親の配偶子			
		QR	Qr	qR	qr
雄親の 配偶子	QR	12	11	11	10
	Qr	11	10	10	9
	qR	11	10	10	9
	qr	10	9	9	8

図 1. 遺伝子型と形質 Z の大きさの関係。

雄親の配偶子に含まれる対立遺伝子を左側、雌親の配偶子に含まれる対立遺伝子を上側に記す。

- 問 1. 遺伝子座 1 と遺伝子座 2 が独立であるとき (連鎖していないとき)、以下の小問 (1) と (2) に答えよ。
- (1) F<sub>2</sub> 個体のうち遺伝子型が QqRr である個体の割合を求めよ。
  - (2) F<sub>2</sub> 個体の Z の大きさの平均を求めよ。
- 問 2. 遺伝子座 1 と遺伝子座 2 が連鎖しているとき、以下の小問 (1) と (2) に答えよ。
- (1) 完全連鎖のとき (組換えを起こさないとき)、F<sub>2</sub> 個体がとりうる遺伝子型を全て記せ。
  - (2) 遺伝子座 1 と遺伝子座 2 の間の組換え率が 0.2 のとき、F<sub>2</sub> 個体中で大きさが 10 となる個体の割合を求めよ。解を得る過程がわかるように記せ。

<文 2>

ヒトのタンパク質をコードする遺伝子 (protein-coding gene) (以下、遺伝子) の機能の重要性を明らかにするため、機能喪失型変異 (loss-of-function variant) のホモ接合体 (homozygote) について調べた。 (a) 近親婚が頻繁に行われている集団に属する 3,222 人の健康な成人を対象に全遺伝子の配列解析を行った。ナンセンス変異 (nonsense variant)、フレームシフト変異 (frameshift variant)、またはスプライシング異常 (missplicing) を引き起こす変異を機能喪失型変異と定義した。 (b) 全個体の結果をあわせると、対立遺伝子頻度が 1%未満の機能喪失型変異は一万種類以上見つかり、そのうち数百種類の変異でホモ接合体が観察された。 (c) これらホモ接合体が観察された遺伝子のうち 215 種類については、オーソログ (ortholog) のノックアウトマウス (knockout mouse) が既に作製されており、そのうちの 52 種類の遺伝子で致死的な表現型を示した。

問 3. 下線部 (a) について。この解析で、近親婚が頻繁に行われている集団を対象とした利点を 3 行程度で述べよ。

問 4. 下線部 (b) について。対立遺伝子頻度が 1%未満の変異に注目すると、機能喪失型変異の中で「ホモ接合体が観察された機能喪失型変異」の割合は、同義変異の中で「ホモ接合体が観察された同義変異」の割合よりも 13.7% 低く、この差は有意であった。この低くなった理由を 4 行程度で述べよ。

問 5. 下線部 (c) について。以下の小問 (1) と (2) に答えよ。

(1) この結果の解釈として最も適切なものを、次の (ア) ~ (エ) の中から 1 つ選んで記号で答えよ。

(ア) ヒトにとって生存上必須な遺伝子は、マウスでも必須である。

(イ) ヒトにとって生存上必須な遺伝子は、マウスでも必須であるとは限らない。

(ウ) ヒトにとって生存上必須ではない遺伝子は、マウスでも必須ではない。

(エ) ヒトにとって生存上必須ではない遺伝子は、マウスでも必須ではないとは限らない。

(2) 致死的な表現型を示した 52 種類のマウス遺伝子がコードするタンパク質の機能は、マウスとヒトの共通祖先でも生存上必須であったとすると、ヒトに至る進化の過程で、どのような変化が遺伝子やゲノムに起こったと考えられるか。2 つの可能性をあげ、あわせて 3 行程度で述べよ。

[第5問]

次の文1と文2を読み、以下の問1～6に答えよ。

<文1>

(a) サイクリン依存性キナーゼ (cyclin dependent kinase: CDK) は細胞周期進行の要となる酵素であり、適切な時期に活性化・不活性化される必要がある。また、細胞周期にはいくつものチェックポイント機構が備わっており、細胞周期の重要な過程が、確実に正しい順序で起こることを保証している。M 期には「紡錘体 (spindle) チェックポイント機構」がはたらき、(b) 条件が整うまで M 期の進行を途中で止めている。

M 期開始直前の細胞に  を作用させて培養を続けると、条件が整い紡錘体チェックポイントが解除されても、細胞は M 期の  にとどまる。

(c) この状態の細胞にさらに  を作用させると、細胞はやがて細胞質分裂を開始し、染色体の周囲には核膜が再形成された。 さらに、細胞質分裂完了直前に  は作用させたまま  のみを除去すると、分裂溝が消失し、細胞の形態や染色体、微小管の様子は  の状態に戻った。

問1. 下線部 (a) について。G2 期から M 期への進行時に、CDK の活性化のために起こる CDK タンパク質の修飾状態の変化について 2 行程度で説明せよ。

問2. 下線部 (b) について。「条件が整う」とは具体的にはどういうことか。下記の語をすべて用いて 2 行程度で説明せよ。

微小管、動原体

問3.  ～  に入る適切な語を次の①～⑧から選べ。

- ①微小管重合阻害剤、②アクチン重合阻害剤、③アポトーシス阻害剤、④プロテアソーム阻害剤、⑤CDK 阻害剤、⑥前期、⑦中期、⑧後期

問4. 下線部 (c) について。このとき、紡錘体チェックポイントが解除されたあとに、通常の M 期進行過程で染色体に起こるはずの重要な事象が起こっていない。それはどのような事象か。起こらない理由とともに 5 行程度で述べよ。

<文2>

非同調的に細胞周期を繰り返し、20時間で細胞数が倍になる速度で増殖し続けている株化された培養細胞がある。この細胞集団の細胞周期を、チェックポイント機構を利用して同調させたい。実験条件を決めるために、まず予備実験を行った。細胞の培養液にブロモデオキシウリジン (BrdU) を加え、30分後に BrdU を含まない培地に交換した。その後、1時間ごとに12時間後まで細胞集団の一部を固定して染色体に取り込まれた BrdU を検出したところ、5時間後から10時間後のサンプル中にのみ BrdU 陽性の M 期細胞が観察された。

- 問5. 予備実験において、全細胞数に対する BrdU 陽性細胞数の割合を時間ごとに算出すると、どのように変化すると考えられるか。横軸に時間、縦軸に BrdU 陽性細胞の割合 (%) を示すグラフを作成し、その根拠を3行程度で説明せよ。
- 問6. 作用が可逆的な DNA ポリメラーゼ阻害剤を用い、図1に示す手順で細胞同調を行うことにした。最も高い同調率を得たいが、阻害剤を作用させる時間はできるだけ短くしたい。図1に示す、1度目に阻害剤を作用させる時間 A、一度阻害剤を除去してから2度目に阻害剤を加えるまでの時間 B、および2度目に阻害剤を加えてから G1/S 期境界に同調した細胞が獲得できるまでの時間 C はそれぞれ何時間が適切か。理由とともにそれぞれ3行程度で答えよ。

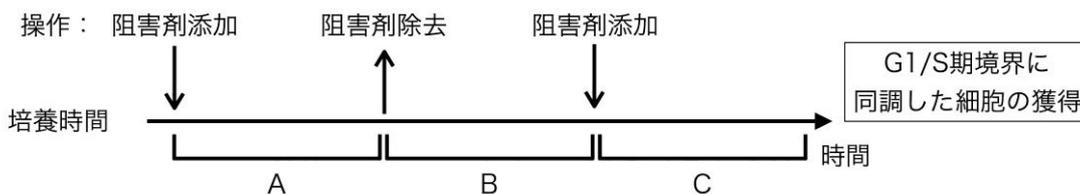


図1. DNA ポリメラーゼ阻害剤を用いた細胞同調実験の概要。

[第6問]

次の文1と文2を読み、以下の問1～7に答えよ。

<文1>

ア のゲノムにコードされている CRISPR (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats) 領域、およびその周辺から発現する RNA および関連 Cas タンパク質 (CRISPR-associated proteins) は、(a) 外来 DNA に対する免疫システムとして知られており、様々なサブタイプが存在する。その中でもヌクレアーゼ活性をもった Cas9 タンパク質およびターゲット DNA と相補的な配列をもつ gRNA (guide RNA) は、多様な生物における染色体 DNA 配列の編集を可能にした。CRISPR/Cas9 を用いたゲノム編集では、gRNA-Cas9 複合体が、(b) PAM (protospacer adjacent motif) と呼ばれる認識配列に隣接する 20 塩基程度のターゲット DNA 配列に結合する (図 1)。Cas9 は 2 つのヌクレアーゼドメイン (nuclease domains) をもち、ターゲット DNA を二重鎖切断し、変異を引き起こす。この方法により、(c) 遺伝子領域をターゲットにして遺伝子機能を破壊することができる。現在、広範な生物種において最も簡便な遺伝子ノックアウト技術となり、約 イ 万のヒト遺伝子全てを標的としたノックアウトスクリーニング用のライブラリーも構築された。

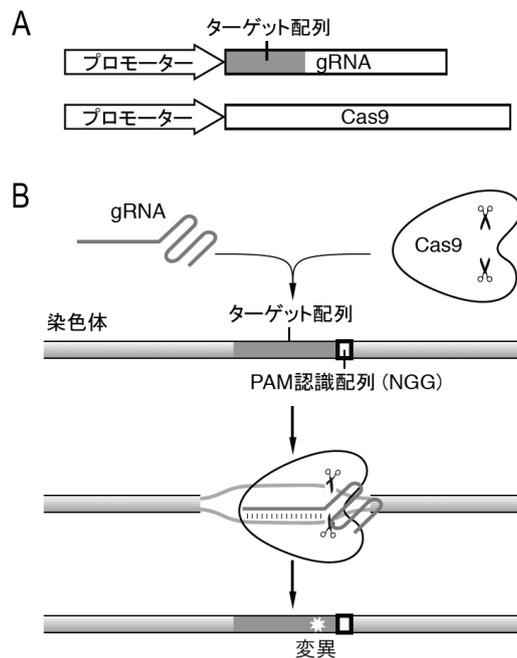


図 1. CRISPR/Cas9 によるゲノム編集。

(A) ターゲット DNA に Cas9 を誘導する gRNA はターゲット DNA 配列と同じ配列を持つ DNA から発現する。(B) gRNA による野生型 Cas9 のターゲット領域への誘導と Cas9 による DNA の切断。Cas9 内の 2 つのハサミはそれぞれ 2 つのヌクレアーゼドメインを示している。

問 1.  と  に入る最も適切な語句または数字を以下から選択せよ。

真核生物、原核生物、ウイルス、2、20、200

問 2. 下線部(a)と(b)について。PAM 認識配列を持つ外来 DNA に対する免疫システムとしての PAM 認識配列の役割について、「自己」、「非自己」、「染色体」という語を使用して 5 行程度で説明せよ。

問 3. 下線部(c)について。Cas9 による染色体の切断が遺伝子機能を破壊できるメカニズムについて、「非同源性末端結合」という語を使って 5 行程度で説明せよ。

問 4. 一般にゲノム編集ではターゲットと似た配列を持つ染色体を意図せず切断するオフターゲット効果が知られている。これを解決するために、図 2 のように野生型の Cas9 が持つ 2 つのヌクレアーゼドメインの片方を不活性化したニッカーゼ型の nCas9 (nickase Cas9) と 2 つの異なる gRNA によって同時に染色体を切断する手法がある。どうしてこれがオフターゲット効果を下げられるのか、5 行程度で説明せよ。

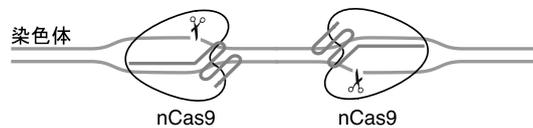


図 2. ニッカーゼ型 Cas9 (nCas9) と二つの gRNA を利用した染色体の切断。

<文 2>

ある特定のタンパク質をヌクレアーゼ活性のない dCas9 (deactivated Cas9) に融合させたものや、タンパク質ドメインが結合できる RNA 配列を gRNA に付加したものを利用することによって、任意の活性を持つ機能性タンパク質をターゲット DNA へ誘導することができる(図 3)。これによって転写因子やエピゲノム修飾因子を自在に任意の染色体領域に誘導することが可能となる。

活性化誘導型シチジンデアミナーゼ AID (Activation-Induced cytidine Deaminase) は DNA 中のシチジン基からアミノ基を取り除く。大学院生の A 君は dCas9 にこの AID を融合させたタンパク質を考案し、染色体を切断せずにターゲット DNA 周辺のシチジンを (d) 別のヌクレオシドに変換する新しいゲノム編集ツールを開発した。これをヒトの任意の染色体領域をターゲットにする gRNA とともにヒト培養細胞に導入、3 日後にゲノム DNA を抽出した。ゲノム DNA からターゲット領域周辺の DNA 配列を解析したところ、ターゲット領域内のシトシンに相当する塩基の 1%程度がアデニン、チミン、グアニンに変換されていることが観察された。(e) そこで先輩の B 君は別のヌクレオシドへの変換が DNA 損傷として認識され修復される機構に着目し、(f) グリコシラーゼ阻害剤となるタンパク質をさらに融合させると編集効率が上がるのではないかと提案したので、実際に作製し、同様のアッセイを行ったところ、シトシンに相当する塩基の 10%程度が別の塩基に変換されるようになり、そのほとんどがチミンであった。

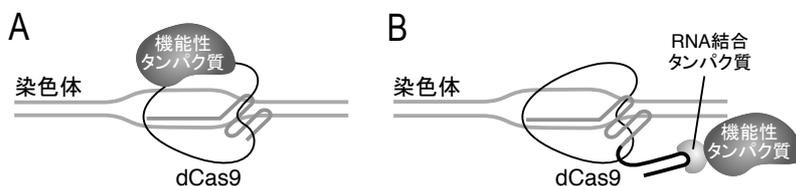


図 3. 不活性型 Cas9 (dCas9) による機能性タンパク質のターゲット DNA への誘導。(A) dCas9 と機能性タンパク質の融合タンパク質を利用した例。(B) gRNA に RNA アプタマーを付加し、機能性タンパク質と RNA 結合タンパク質の融合タンパク質を利用した例。

問 5. 下線部 (d) について。シチジンの脱アミノ基反応によって生成するヌクレオシドは何か。その名称を答えよ。

問 6. 下線部 (e) について。グリコシラーゼが用いられる DNA 修復機構において、グリコシラーゼの役割を 2 行程度で答えよ。

問 7. 下線部 (f) について。グリコシラーゼ阻害剤の融合によって編集効率が向上し、編集されたシトシンのほとんどがチミンに変換されたのはどのような理由が考えられるか。その理由を 5 行程度で説明せよ。

## 草稿用紙

[第7問]

次の文を読み、以下の問1～6に答えよ。

DNAには複製の過程で置換・挿入・欠失などの突然変異が生じる。いま、TACGTという5塩基の塩基配列Xが、TCAAGCという6塩基の塩基配列Yへと変化したとする。もし、変化の過程で1塩基の挿入が1回だけ起こったと仮定すると、挿入が起こった場所としては、Xの各塩基間の4カ所および両端の2カ所の合計6カ所の可能性が考えられる。例えばXの左端に1塩基の挿入が起こった場合、XとYの関係は図1のようなアラインメント (alignment) によって表すことができる。



図1. 塩基配列Xと塩基配列Yのアラインメント。  
「|」は塩基の挿入または欠失を、「○」は一致を、「×」は不一致を表す。

- 問1. タンパク質に翻訳される領域で1塩基のみの挿入や欠失が起こった場合には、タンパク質の機能が失われる場合が多い。その理由を2行程度で説明せよ。
- 問2. 一般に2つの塩基配列が与えられたとき、可能なアラインメントの数は、2つの塩基配列の長さを表す自然数 $n$ および $m$ のみによって定まる。ここでは、これを $f(n, m)$ と書くこととする。例えば図2のように、 $f(1, 1) = 3$ 、 $f(1, 2) = 5$ である。 $f(n, 1)$ と $f(1, m)$ をそれぞれ $n$ と $m$ を用いて表せ。

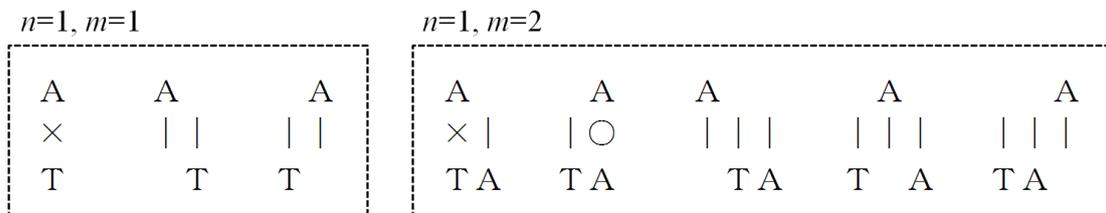


図2. 可能なアラインメントを表した図。

- 問 3.  $f(n, m)$  を  $f(n-1, m)$ 、 $f(n, m-1)$ 、 $f(n-1, m-1)$  を用いて表せ。なお、 $n > 1$ 、 $m > 1$  とする。
- 問 4. 下線部について。塩基配列  $X$  と  $Y$  の関係について可能なアラインメントの数  $f(5,6)$  を答えよ。
- 問 5. 問 4 で答えた全てのアラインメントのうち、「|」と「×」の数の合計が最も少ないアラインメントは、 $X$  から  $Y$  への変化の過程で実際に起こった突然変異を表している可能性が高い。そのようなアラインメントを答えよ。また、そのアラインメントにおいて「|」と「×」の数の合計が最も少ないことを示せ。
- 問 6. 塩基配列に変化が蓄積される速度はゲノム上の領域によって異なる。その蓄積速度が遅い領域の例を挙げよ。また、その領域ではなぜ速度が遅いのか、2 行程度で説明せよ。

[第8問]

動物学の選択問題 I～VI の 6 問題から 3 問題を選び、答えよ。

[選択問題 I]

哺乳類の腎臓の働きに関する以下の問 1～2 に答えよ。

問 1. 糸球体で生成された原尿が尿になる過程において、ネフロン(nephron)にある次の(1)～(4)の部分はどのような機能を担うか。以下の選択肢(ア)～(カ)から該当するものをすべて選び、(1)–ア イのように記せ。

- (1) 近位尿細管 (2) 遠位尿細管  
(3) ヘンレループ(loop of Henle)の下降脚 (4) ヘンレループの上行脚

(選択肢)

- (ア)  $\text{Na}^+$ の能動輸送、(イ)  $\text{Na}^+$ の受動輸送、(ウ)  $\text{H}_2\text{O}$ の能動輸送  
(エ)  $\text{H}_2\text{O}$ の受動輸送、(オ) グルコースの能動輸送  
(カ) タンパク質の能動輸送

問 2. 哺乳類の腎臓において、バソプレシン(vasopressin)の作用により尿量が減るしくみについて、4 行程度で説明せよ。

[選択問題 II]

動物の形態形成(morphogenesis)に関する以下の問 3～4 に答えよ。

問 3. 原腸形成(gastrulation)の時期の胚発生に見られる重要な事象について、脊椎動物の胚を例として、5 行程度で述べよ。解答には以下の語句をすべて用いよ。

胚葉(germ layer)、パターン形成(patterning)  
巻き込み運動(involution)、予定(presumptive)、誘導(induction)

問 4. 胚を生かしたまま、形態形成時の細胞の形態と運動を観察したい。このためにはどのような実験系を用いれば良いか、5 行程度で述べよ。解答には、用いる生物種、観察の対象となる形態形成、生体標識の方法、観察方法を含めること。

[選択問題 III]

神経生物学に関する以下の問 5～6 に答えよ。

- 問 5. 脊椎動物脳内で抑制性シナプスの神経伝達物質としてはらたく物質の名称をあげよ。また、それが抑制性シナプス電位を発生させるしくみについて、関与するイオンチャンネルのはたらきにふれながら、5 行程度で説明せよ。
- 問 6. ニューロンの軸索のある部位に電気刺激を与えて活動電位を生じさせる実験を行った。このとき、いったん軸索を伝わり始めた活動電位が途中で向きを変えて引き返すことは決して起こらない。その理由について、活動電位発生のおしくみにもふれながら、7 行程度で説明せよ。必要ならば、別途、図を用いても良い。

[選択問題 IV]

生物の進化に関する以下の問 7～8 に答えよ。

- 問 7. すべての生物は進化の産物であるというのは、現在では共通の理解である。この礎を築いたのがチャールズ・ダーウィン(Charles R. Darwin)の提唱した進化仮説「自然選択説」である。自然選択説とはどのようなものか。5 行程度で説明せよ。
- 問 8. 真社会性の動物では、繁殖を行わない「不妊カースト(sterile caste)」が存在する。自らの遺伝子を子孫に伝達することができない不妊カーストの形質がいかにして進化したのかについては、ダーウィンも頭を悩ませた。この問題に解答を与えたのがウィリアム・ハミルトン(William D. Hamilton)の「血縁選択説(kin selection theory)」である。血縁選択説とはどのようなものか。以下の語句をすべて用いて 7 行程度で説明せよ。

血縁者、血縁度、利他行動、コスト、半数倍数性、包括適応度

[選択問題 V]

進化発生学に関する次の文を読み、以下の問 9～11 に答えよ。

タンパク質をコードする遺伝子の数が減る遺伝子喪失や数が増加する  は、動物の進化において大きな役割を果たしてきたことが知られている。一方で、遺伝子の総数を大幅に変えることなく、新奇形質の出現や既存の形質の喪失が起こる現象も知られている。例えば、昆虫類に至る進化の過程では、 が特定の機能ドメインを失うことで、一部の下流遺伝子群の転写が誘導されなくなり、脚の数が 6 本に減少したと考えられている。また、<sup>(a)</sup> 遺伝子コ・オプション (gene co-option) による新奇形質の獲得も遺伝子数の大幅な増減を伴わない形質進化の一例である。

問 9. 、 に入る最も適切な用語を答えよ。

問 10. 下線部(a)について。遺伝子コ・オプションとは何かを説明せよ。また、ゲノム配列上のどのような変化が遺伝子コ・オプションを引き起こすか。あわせて 5 行程度で答えよ。

問 11. 遺伝子コ・オプションが形質進化に寄与したと考えられている具体例を 1 つあげよ。

[選択問題 VI]

動物生理学に関する次の文を読み、以下の問 12～13 に答えよ。

生物が水や空気などの流体中で移動(運動)するとき、生物のサイズ(body length)と移動速度(velocity)、流体の密度(density)と粘度(viscosity)には、次式の関係がみられる。

$$(式) \quad Re = \rho VL / \mu$$

$\rho$ : 流体の密度、 $V$ : 生物の速度、 $L$ : 生物のサイズ、 $\mu$ : 流体の粘度

この関係はレイノルズ数(Reynolds number,  $Re$ )と呼ばれ、生物の種類を問わず成立する(図 1)。また、この関係は、生物が外界から受ける慣性力と粘性力との比を表している。(b)  $Re < 1$  の生物の運動装置は、主に鞭毛・繊毛であるのに対し、 $10^6$  以上の生物の運動装置は筋肉である。

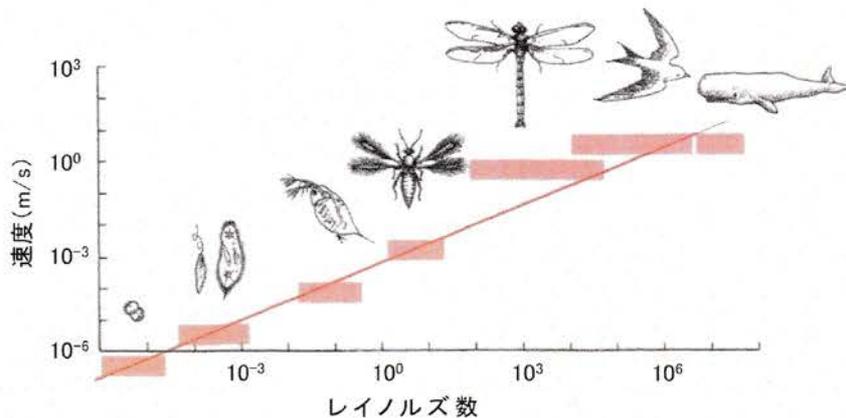


図 1. 水棲動物と飛翔動物における移動速度とレイノルズ数との関係。

(Eckert, "Animal Physiology" 5<sup>th</sup> ed. より改変)

問 12.  $Re < 0.01$ 、 $0.1 \leq Re < 10^2$ 、 $10^6 \leq Re$  の場合について、運動速度に大きく寄与する因子は何か。それぞれ、最も適切なものを以下から選び、番号で答えよ。

- (1) 粘性力が優位にはたらく。
- (2) 慣性力が優位にはたらく。
- (3) 粘性力も慣性力も大きく寄与する。

問 13. 下線部(b)について。鞭毛・繊毛および筋肉について、基本的構造と調節メカニズムの特徴を、それぞれ 4 行程度で説明せよ。

## [第9問]

植物学の選択問題 I～V の 5 問題から **3 問題を選び**、答えよ。

### [選択問題 I]

遺伝に関する次の文を読み、以下の問 1～2 に答えよ。

ある遺伝子  $M$  の機能を喪失した変異アレル (allele) を  $m$  とする。 $m$  をホモに持つ個体 ( $m/m$ ) を母親、野生型アレル  $M$  をホモに持つ個体 ( $M/M$ ) を父親として交配した場合、子は初期胚が肥大する表現型を示す。一方、母親が野生型 ( $M/M$ )、父親が変異ホモ ( $m/m$ ) の交配の場合には、子は正常に育つ。

- 問 1. 上記のような遺伝様式が起こる原因となりうる 2 つの機構の名称をあげ、それぞれを 2 行程度で説明せよ。
- 問 2. これらの 2 つの機構のどちらが機能しているのかを明確にするために、交配実験を行いたい。どのような遺伝子型の親を用いればよいか。また、交配の結果、子の遺伝子型と表現型はどのようになると考えられるか。それぞれの機構が機能する場合を区別して、5 行程度で具体的に述べよ。

### [選択問題 II]

花の発生に関する以下の問 3～4 に答えよ。

- 問 3. 花の発生の ABCE モデルにおいて、SEPALLATA3 タンパク質は 2 つの役割を担っている。それぞれを 2 行程度で説明せよ。
- 問 4. シュート頂 (茎頂) 分裂組織における幹細胞の維持機構について、関与する遺伝子 (またはタンパク質) を少なくとも 3 つあげながら、5 行程度で説明せよ。

[選択問題 III]

次の文を読み、以下の問 5～6 に答えよ。

植物細胞は、原形質連絡(plasmodesma、複数形は plasmodesmata)と呼ばれる特殊な構造によって、隣接する細胞とつながっていることが多い。(a)タンパク質の中には、原形質連絡を通して、細胞から細胞へと移動するものがある。(b)発生の制御などにおいて、こうしたタンパク質の細胞間移動は重要な役割を果たしている。

問 5. 下線部 (a) について。あるタンパク質 P が原形質連絡を通して細胞間を移動するかどうかを調べたい。どのような実験を行ったらよいか、3 行程度で述べよ。

問 6. 下線部 (b) について。根の発生の制御に関わるタンパク質 Q は、原形質連絡を通して細胞間を移動することが示されている。この細胞間移動が Q による発生制御にとって重要かどうかを調べたい。どのような実験を行ったらよいか、3 行程度で述べよ。

[選択問題 IV]

共生(symbiosis)に関する以下の問 7 に答えよ。

問 7. マメ科植物(leguminous plant)は、窒素栄養の乏しい土壌では根粒菌(root-nodule bacterium、rhizobium)と共生し窒素固定を行うが、窒素栄養の豊富な土壌では根粒をつけない。共生が成立する過程とその土壌窒素栄養濃度依存性について、以下の用語を用いて 5 行程度で説明せよ。

感染糸(infection thread)、システミック制御(systemic regulation)  
nod ファクター(nod factor)、バクテロイド(bacteroid)  
フラボノイド(flavonoid)

[選択問題 V]

生態系の一次生産に関する以下の問 8～9 に答えよ。

問 8. 熱帯多雨林の純一次生産速度は植物体の乾燥重量で  $2.0 \text{ kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$  程度である。ここでは、植物体は炭水化物のみから構成されると仮定し、炭水化物の化学式  $\text{C}(\text{H}_2\text{O})$  で表すことにする。熱帯多雨林に降り注ぐ太陽からの全短波放射が、年間で  $5.0 \times 10^9 \text{ J m}^{-2} \text{ year}^{-1}$  とすれば、熱帯多雨林の純一次生産によって固定されるエネルギーは、全短波放射の何%にあたるか。以下の炭素 1 mol あたりの光合成の化学式を参考にし、計算過程もわかるように記すこと。



問 9. 以下の表を参照し、自然生態系における森林と草原の光合成生産の違いについて 4 行程度で述べよ。

表. 種々の生態系の太陽からの全短波放射に対する生産効率の比較

	純一次生産／総一次生産	総生産効率(%)	純生産効率(%)
森林生態系	0.25~0.50	2.0~3.5	0.5~1.5
多年生草本草原	0.45~0.55	1.0~2.0	0.5~1.0
一年生草本草原	0.55~0.70	~1.5	~1.0

吉良竜夫(1976)による

## 草稿用紙

[第 10 問]

自然人類学の選択問題 I～V の 5 問題から **3 問題を選び**、答えよ。

[選択問題 I]

ヒトの骨格形態に関する以下の問 1～2 に答えよ。

- 問 1. 寛骨あるいは骨盤には、大きさによらない性差が現れる。そのような形質を 3 つあげ、それぞれについて 1 行程度で性差を説明せよ。
- 問 2. ヒトの骨格には、成長にともなう大きさの変化以外の経年変化(年齢変化)を示す形質が知られている。それらについて、未成年と成人以降の各時期の形質を 1 つずつあげ、その変化をそれぞれ 1 行程度で説明せよ。

[選択問題 II]

霊長類の系統に関する以下の問 3 に答えよ。

- 問 3. 図 1 は、霊長類と近縁哺乳類のいくつかの属の類縁関係を示している。現生の属は上に並べてあり、F、I、J は化石だけから知られている。枝長は任意である。A～J にはどのような属が当てはまるか、適切な属名を答えよ。

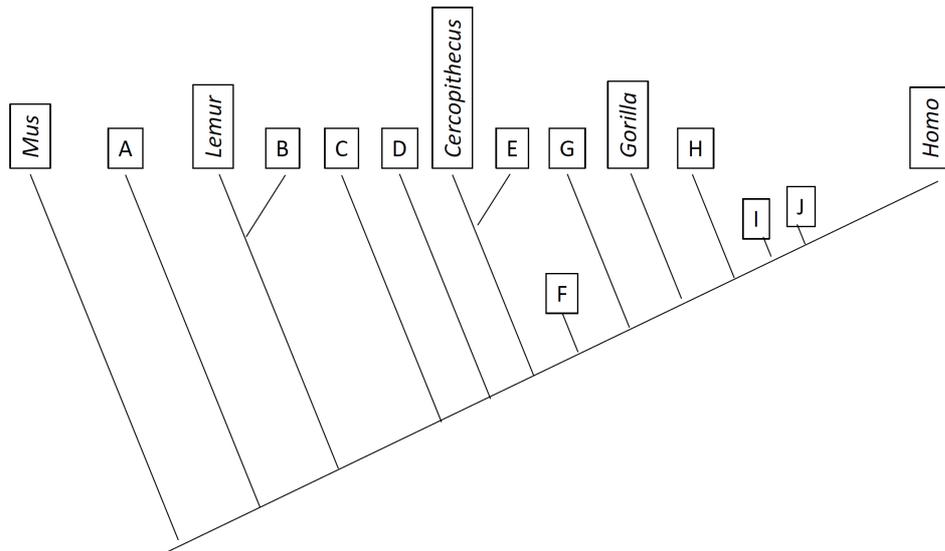


図 1. 霊長類と近縁哺乳類の類縁関係

[選択問題 III]

ヒトゲノムに関する以下の問 4～5 に答えよ。

問 4. ヒトゲノムについて、以下の語をすべて用いて、3 行程度で述べよ。

遺伝子、転移因子、染色体、塩基対、母系遺伝

問 5. ヒトゲノムと比較して、大型類人猿ゲノムはどのような特徴を有するか。3 行程度で述べよ。

[選択問題 IV]

家系分析に関する以下の問 6 に答えよ。

問 6. 図 2 は、非常に稀な疾患 A について、ある大家族で 5 世代にわたり調査をおこなった結果を示した家系図である。婚姻は非血縁者間でおこなわれていた。この疾患は、X 染色体劣性疾患か、ミトコンドリア病に該当すると考えた。両者の識別に役立つと考えられる情報を家系図から読み取り、箇条書きで示せ。図中の人物の特定は、ローマ数字とアラビア数字の組み合わせにより示すこと。なお、新たな突然変異の出現はないものとする。

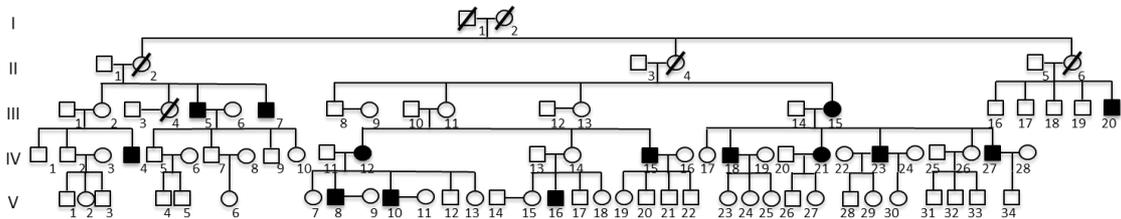


図 2. 疾患 A をもつある家系図。

○は女性を、□は男性を示し、黒く塗りつぶされたのが疾患 A の罹患者である。

たすき掛けは死亡者で、罹患者の有無は不明。

[ 選択問題 V ]

集団遺伝学に関する以下の問 7~9 に答えよ。

ここでは、2 倍体の有性生殖集団を考える。この集団で、対立遺伝子 (allele)  $A$  と  $a$  をもつ、ある遺伝子座に注目する。以下では、集団が大きく、世代が離散的で重複しないことを仮定する。

問 7. ある世代の誕生時における対立遺伝子  $A$ 、 $a$  の頻度を、それぞれ  $p$ 、 $1-p$  とする。Hardy-Weinberg 比を仮定し、遺伝子型  $AA$ 、 $Aa$ 、 $aa$  の頻度 (それぞれ  $P_{AA}$ 、 $P_{Aa}$ 、 $P_{aa}$ ) を、 $p$  を使って表せ。

問 8. 遺伝子型  $AA$ 、 $Aa$ 、 $aa$  の相対適応度を、それぞれ  $1+s$ 、 $1$ 、 $1+t$  とする ( $s > -1$ 、 $t > -1$ )。このとき、次世代の誕生時における対立遺伝子  $A$  の頻度 ( $p'$ ) は、次式により表される。

$$p' = \frac{(1+s)P_{AA} + \frac{1}{2}P_{Aa}}{1 + sP_{AA} + tP_{aa}} \quad (*)$$

遺伝子頻度の変化が式(\*)に従うとき、ある条件の下で多型平衡が存在する。この多型平衡における  $A$  の頻度を、 $s$  と  $t$  を使って表せ。

問 9. 対立遺伝子  $a$  の頻度がごく小さい場合を考える。十分な時間が経過した後、集団が多型平衡に収束するのはどのような場合か。 $s$  と  $t$  が満たすべき条件を求めよ。

## 草稿用紙

[第 11 問]

系統分類学に関する選択問題 I (動物)または II (植物)のどちらかを選び、答えよ。

[選択問題 I]

以下の問 1～5 に答えよ。

- 問 1. 節足動物門と環形動物門のボディプラン (body plan) および発生学的特徴を比較し、両者の共通点を 2 つ、相違点を 3 つ、具体的に記せ。なお、共通点は多くの動物門に広くみられる一般的な特徴ではなく、少数 (2～3) の動物門にのみ共通する特徴を答えよ。
- 問 2. 節足動物門からみて、環形動物門よりも近縁な動物門を 3 つ答えよ。
- 問 3. 環形動物門からみて、節足動物門よりも近縁な動物門を 3 つ答えよ。
- 問 4. 節足動物門と環形動物門の祖先はいずれも海生種であったと考えられるが、節足動物門は陸上で著しく多様化している。一方、環形動物門には陸生種がいるものの、陸生種の種多様性は節足動物門よりも圧倒的に低い。節足動物門が環形動物門よりも陸上で繁栄している理由を、形態学的特徴の違いという観点から 5 行程度で説明せよ。
- 問 5. 節足動物門の附属肢の形態は、種や属レベルの重要な分類形質となっているのみならず、綱や目などの高次分類群レベルでも有用な分類形質である。一方、節足動物門の附属肢に対応する構造は環形動物門の X であるが、X の分類形質としての有用性は節足動物門よりも著しく低い。X が何か答えよ。また、その分類形質としての有用性が節足動物門よりも劣る理由を 2 つあげ、それぞれ 5 行程度で述べよ。

[選択問題 II]

次の文を読み、以下の問 6～8 に答えよ。

分子系統学的解析が進んだ結果として、陸上植物の系統関係は 20 世紀の頃に比べて大きく変化したところがある。専門家以外にも大きな影響が及んだことの例として、「(a) 双子葉植物」、「離弁花類」という系統群の名称が意味を失ったことがあげられる。またトマトの学名は以前 *Lycopersicon esculentum* Mill.がよく用いられていたが、(b) 最近では *Solanum lycopersicum* L.が用いられる。その一方で、(c) コケ植物の系統的な分岐の順序については今も議論が続いている。

問 6. 下線部 (a) について。以前に認識されていた「双子葉植物」の形態学的に共通する特徴を 3 つ答えよ。また、分子系統学的解析の結果、「双子葉植物」は被子植物の中においてどのような系統的位置であることが判明したか。2 行程度で述べよ。

問 7. 下線部 (b) について。この背景として次の選択肢から正しいものをすべて選び、番号で答えよ。

- (1) *Lycopersicon* 属を含むとされていた科が、別の科と合体して科名が変わったため。
- (2) *Lycopersicon* 属が *Solanum* 属の中の一群に過ぎないことが判明したため。
- (3) *Lycopersicon* 属が種レベルにランク変更されたため。
- (4) *Lycopersicon* 属の記載年代が *Solanum* 属の記載年代よりも新しいため。
- (5) *Lycopersicon* 属の記載年代が *Solanum* 属の記載年代よりも古いため。

問 8. 下線部 (c) について。コケ植物は他の陸上植物からは生活環における特徴によって区別されており、3 個のグループ(タイ類、セン類、ツノゴケ類)に大別される。コケ植物の系統関係については、多遺伝子の情報を用いた分子系統解析によっても異論があり、コケ植物が側系統であるという解析結果と、単系統であるという解析結果とが報告されている。前者の系統樹(Tree A)では、タイ類が他のすべての陸上植物の姉妹群となり、ツノゴケ類が維管束植物の姉妹群となっている。後者の系統樹(Tree B)ではセン類とタイ類が姉妹群となる。Tree A と Tree B の樹形に矛盾しない有根系統樹を、以下の生物(群)名をすべて使用して、それぞれ描け。ただし、陸上植物、維管束植物、種子植物はそれぞれ単系統であるとする。

タイ類、セン類、ツノゴケ類、ソテツ、イネ、ヒカゲノカズラ