

生 物

(4 問題 100 点)

生物問題 I

次の文を読み、問 1～問 5 に答えよ。解答はすべて所定の解答欄に記入せよ。

ヒトの染色体 DNA は、約 200 塩基対を単位として、そのうち約 146 塩基対が ヒストンと呼ばれるタンパク質に巻きついている。この単位構造の繰り返しがさらに高度に折りたたまれたものが染色体である。DNA の複製の際には、複製を行う主要な酵素である が接近できるように、圧縮された構造を一時的にゆるめ、さらに DNA の二重らせん構造をほどこき一本鎖にする必要がある。

DNA から RNA が合成される過程を転写といい、それを行う主要な酵素が である。転写の開始を助けるタンパク質である基本転写因子は DNA 上の と呼ばれる部位に結合する。真核生物では、DNA から最初に作られた RNA の一部がスプライシングによって切断・再結合される。ヒトの大部分の遺伝子は、複数のエキソンとイントロンからなっていて、中には、特定のエキソンをある細胞では残し、別の細胞では除くことによって、個体全体でみると 1 つの遺伝子から複数種類の伝令 RNA が合成される場合がある。これを選択的スプライシングと呼ぶ。伝令 RNA は から へと輸送され、 と呼ばれる粒状の構造体で、伝令 RNA の塩基配列情報をもとにタンパク質が作られる。結局、選択的スプライシングにより、1 つの遺伝子から複数種類のタンパク質を作ることができる。ヒトの場合、少なくとも 50 % 以上の遺伝子で選択的スプライシングが起こるとされている。

問 1 文中の ～ の中に適切な語句を入れよ。

問 2 下線部 ① について、DNA が巻きついている部分のヒストンの表面電荷は正か負か、解答欄に記入せよ。

問 3 DNA に結合するヒトのタンパク質には、特定の塩基配列にのみ結合するものがある。以下の (あ)～(え)の中から、特定の塩基配列にのみ結合するものを選び、その記号を記せ。

- (あ) ヒストン
- (い) 複製を行う主要な酵素
- (う) 転写開始を助ける基本転写因子
- (え) 二重らせん構造をほどこき一本鎖 DNA にする働きをもつ酵素

問 4 前述の文章および次の表 1 を参考にして、次の文章(あ)~(お)のうち正しいものをすべて選び、その記号を解答欄に記せ。

表 1

ゲノムの塩基配列が 解読された生物	ゲノムあたりの総塩基対 の概数($\times 10^6$)*	遺伝子の概数*
ラン藻 A ^{*a}	3.6	3,300
大腸菌 B ^{*b}	4.6	4,300
酵母 C ^{*c}	12	6,300
線虫 D ^{*d}	100	20,000
シロイヌナズナ	120	27,000
キイロショウジョウバエ	120	14,000
イネ	390	29,000
ヒト	3,000	24,000

(*KEGG および NCBI のデータベースをもとに作成, ^{*a}*Synechocystis* sp. PCC 6803 株,
^{*b}K 12 株, ^{*c}*Saccharomyces cerevisiae*, ^{*d}*Caenorhabditis elegans*)

- (あ) 表中の生物では、ゲノムあたりの総塩基対数は真核生物の方が原核生物より多い。
- (い) ヒトのタンパク質の平均の大きさは、酵母 C のタンパク質の平均の大きさの約 65 倍である。
- (う) ヒトのタンパク質は、約 24,000 種類ある。
- (え) 表の上から下に向かって、タンパク質をコードしない DNA の量が多くなる傾向がある。
- (お) ラン藻 A の持つ遺伝子はすべてヒトにも存在する。

問 5 下線部②の現象に関連して次のような場合を考察する。

ある動物の遺伝子 G は 6 つのエキソンとそれらの間の 5 つのイントロンから成るものとしよう。6 つのエキシソンの長さは転写開始点側からそれぞれ、222, 153, 141, 135, 219, 350 塩基であった。健康な動物の遺伝子 G から作られるタンパク質の大きさは、通常の組織では 320 アミノ酸であったが、特定の組織 X で作られる場合だけ 365 アミノ酸であった。最初と最後のエキソンはどの組織でも共通に使用されており、開始コドンは最初のエキシソンの途中で、終止コドンは最後のエキソンの途中にあるので、組織 X とそれ以外の組織での遺伝子 G のエキソンの選ばれ方が違うことが推測された。この動物のある遺伝病の系統を調べてみると、遺伝子 G に 1 塩基置換の突然変異が起こっていることが分かった。この遺伝病の最も強い症状は組織 X に見られるため、この遺伝病の個体の組織 X で遺伝子 G から作られるタンパク質の大きさを調べたところ、正常な 365 アミノ酸のタンパク質の他に、その約半分の大きさの異常タンパク質が検出された。組織 X 以外の組織では正常な 320 アミノ酸のもののみが検出されたので、この遺伝病における組織 X の障害の原因は、この小さな異常タンパク質の発現にある可能性が考えられた。これらの情報に基づいて以下の (1), (2) にそれぞれ答えよ。

- (1) 組織 X とそれ以外の組織での遺伝子 G のエキソンの選ばれ方の違いについて推定し、解答欄の範囲内で記述せよ。
- (2) この遺伝病における突然変異が存在する場所は転写開始点側から数えて何番目のエキソンか、解答欄 **a** に記せ。また、その突然変異の結果なぜ約半分の大きさの異常タンパク質が産生されたと考えられるか、解答欄 **b** に、解答欄の範囲内で記述せよ。ただし、この突然変異はスプライシングのされ方に影響を与えることはなかった。

生物問題 II

次の文を読み、問1～問5に答えよ。解答はすべて所定の解答欄に記入せよ。

動物が体内からの発熱によって体温調節をする場合、その発熱の大部分は筋肉の収縮によって生じる。筋肉が収縮すると、その時の化学反応の結果として熱が放出される。鳥類や哺乳類では、とくに活動していない時でも、神経によって制御された筋肉の収縮を、気温が低い時の体温維持に利用している。いっぽう、昆虫の体温は、周囲の気温の影響を受けて大きく変化するが、つねに気温に支配されているわけではない。昆虫の種によっては、飛び立つ前に筋肉を使って発熱し、能動的に体温を上げることが知られている。筋肉の働きは温度によって影響を受けるため、飛翔のような大きな出力が必要な場合には、前もって筋肉の温度を上げておく必要があるのだと考えられる。ただし、発熱による体温調節を行うのは体の大きな昆虫に限られている。例えば、ギンヤンマは筋肉を震わせてウォーミングアップすることで、気温の低い早朝や曇った日でも飛行することができる。いっぽう、体の小さなハッチョウトンボは、太陽光が雲などによって遮られると体温を維持することができず、すぐに活動を停止する。つまり、ハッチョウトンボは、ほとんど外部からの熱源を頼りに体温調節を行っているのである。大型および小型の昆虫における体温の決まり方を比較するために、以下の実験1、実験2を行った。

実験1：次の式は、環境温度(T_a)と物体の温度(T_b)の変化速度 $\left(\frac{\Delta T_b}{\Delta t}\right)$ との関係を表したものである。

$$\frac{\Delta T_b}{\Delta t} = -K(T_b - T_a)$$

ここで、 t は時間であり、 K は物体の大きさ、形、比熱、風速などによって決まる定数である。

トンボの胸部には翅を動かす筋肉(飛翔筋)が詰まっている。また、飛翔力は飛翔筋からの出力に依存する。そこで、胸部の表面温度(以後、胸部温度と記す)を飛翔筋の温度とみなし、定数 K が体の大きさとどのような関係にあるのかを

調べた。簡単のために、大きさの異なる種であってもトンボの形は相似形で、比熱や比重も種によらず一定であるとしよう。Kは次のような測定をすることで近似的に求めることができる。

トンボを台の上に固定し、25℃の恒温室内に置いた。胸部温度の測定を開始する前に、白熱電灯でトンボを照らして加温し、胸部温度を約40℃まで上昇させた。その後、白熱電灯を消して胸部温度の測定を開始した。胸部温度の測定は1分ごとに5回、非接触的に行った。その結果、大型のギンヤンマ(体長約75mm)と小型のハッチョウトンボ(体長約18mm)の2種について、それぞれ表1、表2の測定値が得られた。なお、時間tにおけるKの計算にあたって、 $\frac{\Delta T_b}{\Delta t}$ は時間tからt+1(分)までの温度変化を、 $T_b - T_a$ は時間tにおける温度差を用いている。

表1 ギンヤンマの測定結果

消灯後の 経過時間 t (分)	胸部温度 T_b (℃)	$\frac{\Delta T_b}{\Delta t}$ (℃/分)	室温との温度差 $T_b - T_a$ (℃)	K (1/分)
0	40.5	-3.4	15.5	0.22
1	37.1	ア	イ	ウ
2	34.6	エ	オ	カ
3	32.4	-1.6	7.4	0.22
4	30.8		5.8	
平均				0.22

表2は次ページにある。

表2 ハッチョウトンボの測定結果

消灯後の 経過時間 t (分)	胸部温度 T_b ($^{\circ}\text{C}$)	$\frac{\Delta T_b}{\Delta t}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{分}$)	室温との温度差 $T_b - T_a$ ($^{\circ}\text{C}$)	K (1/分)
0	39.8	- 10.5	14.8	0.71
1	29.3	- 3.2	4.3	0.74
2	26.1	- 0.7	1.1	0.64
3	25.4	- 0.3	0.4	0.75
4	25.1		0.1	
平均				0.71

問 1 下線部①の化学反応とはどのようなものか、ATPおよびADPの語を用いて文章で説明せよ。解答欄の範囲内に記述すること。

問 2 表1の ア ~ カ に入れるべき数値を計算し、解答欄に記入せよ。ただし、ア、イ、エ、オは小数点以下1桁で、ウ、カは有効数字2桁で解答せよ。

問 3 定数 K が体の大きさによって異なるのはなぜだと考えられるか。体表面積および体重の語を用いて解答欄の範囲内で説明せよ。

実験 2：次に、トンボが飛び立つことのできる胸部温度を調べるために、トンボをしばらく恒温室に入れて胸部温度を約 15℃ まで下げた。その後、トンボを 25℃ の実験室内に移して棒の上にとまらせ、トンボが飛び立つまで、胸部温度の変化を記録した。図 1 はその結果である。ギンヤンマは白い矢印の時点で翅震わせを開始するが、ハッチョウトンボは翅震わせを行わない。

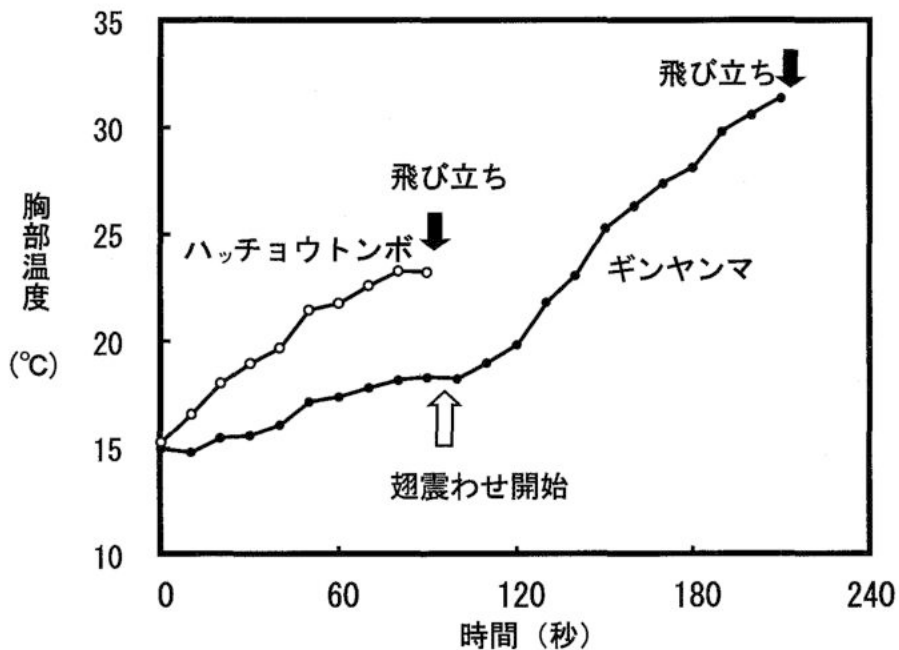


図 1

問 4 実験 2 の結果から、ギンヤンマが翅震わせによるウォーミングアップを開始するのは、胸部温度が約 18℃ まで上昇した時であった。これは、ギンヤンマは気温が 18℃ 以下だとウォーミングアップを開始しないという別の観察結果と整合性がある。ギンヤンマが気温の低い時にウォーミングアップを開始しない理由を、胸部温度の発熱による上昇と放熱による下降のバランスの観点から説明せよ。解答は解答欄の範囲内に記せ。

問 5 昆虫は、筋肉からの発熱や、外部からの熱を利用して体温を上げるだけでなく、体温を下げる、もしくは体温上昇を抑えるためのさまざまな行動を示す。以下の行動のうち、体温上昇を抑える効果があるものを2つ選び、その記号を解答欄に記入せよ。

- a. ショウジョウトンボが腹部の先端を太陽に向けてとまっている。
- b. タテハチョウが翅を広げて地面にとまっている。
- c. アゲハチョウが林縁部を飛びながら、時々日陰に入る。
- d. スズメガが時々空中で停止飛翔を行う。
- e. ミツバチが分蜂(巣わかれ)する時、密な集団をつくる。
- f. ユスリカが群れになって飛ぶ。

生物問題 III

次の文(A)、(B)を読み、問1～問6に答えよ。解答はすべて所定の解答欄に記入せよ。ただし、問題文中のLはリットルを表す。

(A) 水は植物の生存にとって非常に重要な物質である。根で吸収された水は維管束系の へ移り、葉まで運ばれる。葉などに存在する気孔は、発生の過程で 細胞が変化した一対の 細胞からなる。吸水した 細胞は細胞壁を押す圧力である が増すことによって外側に膨らむ。その結果、気孔が開く。根から吸い上げられた水の多くは気孔などから水蒸気として放出され、この現象は蒸散と呼ばれる。^①気孔の開閉は主に光で制御されるため、多くの植物で蒸散は日中最大になり、夜間は抑えられる。^②しかし、水を充分与えられていない植物では、日中でも蒸散の速度は低く抑えられる。これは、主に根が感受した乾燥ストレスの情報が植物ホルモンである を介して葉の気孔に伝えられ気孔が閉鎖するからである。

下線部②に示す光による気孔開口のメカニズムを調べる目的で、ツユクサを用いて2つの実験を行った。以下にそれらの内容と結果を示す。

実験1：光合成を飽和させるのに十分な強い赤色光を葉に照射すると気孔がある程度開き、それ以上赤色光の光強度を上げてても気孔の開度は変化しなかった。しかし、それに加えて弱い青色光を照射すると、気孔がさらに大きく開いた。

実験2：赤色光と青色光を含む光を照射する際に、ある薬剤を用いて光化学系Ⅱの活性を完全に阻害したが、気孔はわずかに開いた。

問1 文中の ～ に適切な語句を記入せよ。

問2 下線部①の蒸散には太陽光からの入射熱による葉温上昇を抑える働きがある。それ以外に蒸散の働きの最も重要なものを解答欄の範囲内で記述せよ。

問 3 上の実験 1, 2 の結果から導き出される考察として正しくないものを以下の a ~ f の記述から 2 つ選び, その記号を解答欄に記入せよ。

- a. 赤色光と青色光は, 一部別のメカニズムで気孔開口を促進している。
- b. 気孔開口の促進は, 光合成活性の上昇だけで説明できる。
- c. 光が気孔を開かせる過程には, 光合成を介するものと介さないものがある。
- d. 光による気孔開口には, 光化学系 II の活性に依存しないメカニズムが存在する。
- e. 気孔の開口は光の色に影響を受けない。
- f. 赤色光の照射だけで気孔の開口を促進することができる。

(B) 水中で二酸化炭素(CO₂)は水分子と反応し, 下記の(1)式に示す平衡状態で存在する。この反応を触媒する酵素が存在すると, 平衡に達する速度が上昇する。



光合成が活発になると, ラン藻(シアノバクテリア)は炭酸水素イオン(HCO₃⁻)を能動輸送により細胞内に濃縮する。ところが, 濃縮された HCO₃⁻ はラン藻の CO₂ 固定酵素に基質としては利用されない。そこで, (1) 式の平衡が左向きに移動することによって CO₂ が生成し, 固定酵素に供給される。ラン藻の生育と光合成に対する CO₂ 濃度の影響を調べる実験を行った。以下にその内容と結果を示す。

実験 3 : ある種のラン藻の野生株と突然変異株を, 一定の光強度のもとで空気を通気して培養した。使用した培養液にはブドウ糖などの炭素源が含まれていないので, 空気に 0.04 % 含まれる CO₂ を利用して細胞が増殖したと考えられた。通気する空気中の CO₂ 濃度を変えて細胞を培養し, 細胞数の変化を調べた結果を次ページの図 1 に示す。ただし, 培養時の CO₂ 濃度は各グラフの上部に示した。また, 細胞に与える HCO₃⁻ の濃度を変えて光合成速度を測定した結果を次ページの図 2 に示す。なお, 野生株と突然変異株からそれぞれ CO₂ 固定酵素を抽出し, その活性を測定したところ, 両者に差はなかった。

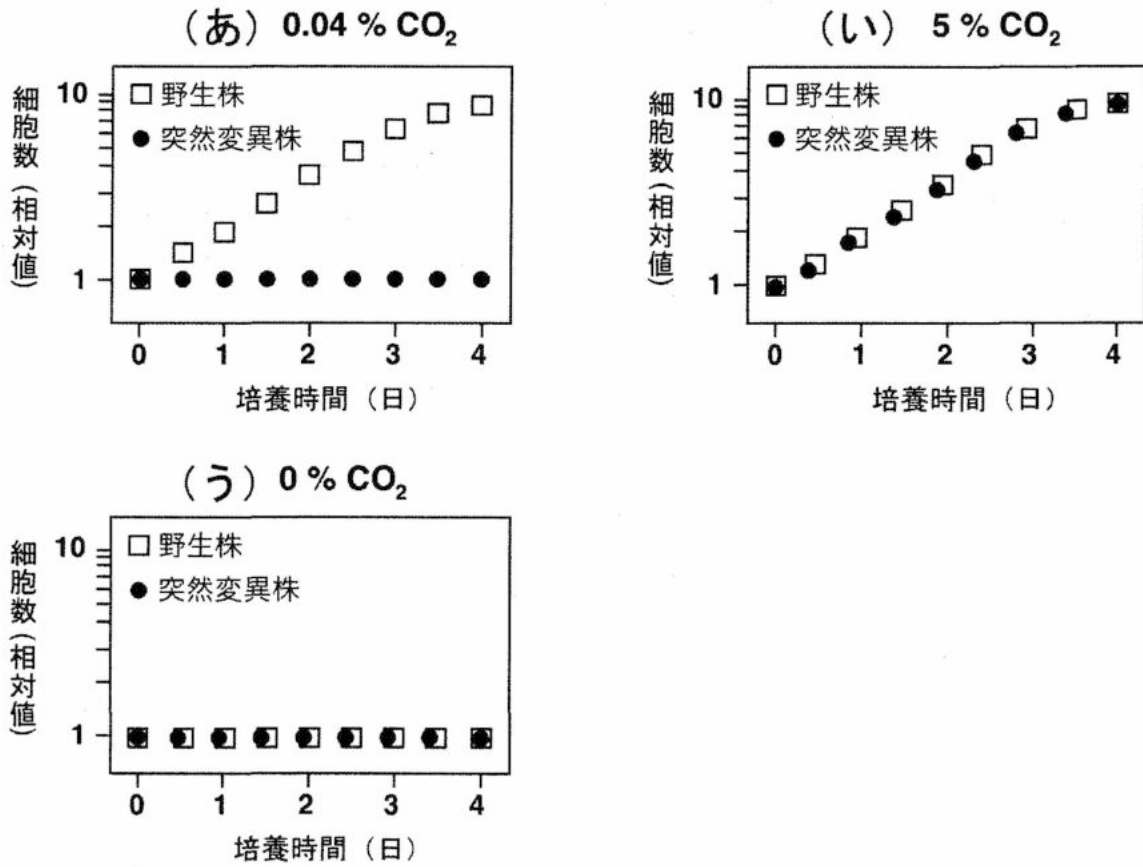


図 1

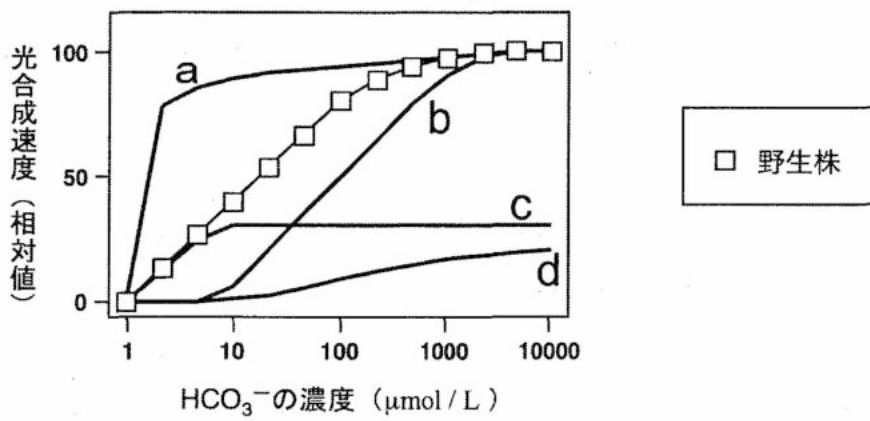


図 2

問 4 実験 3 で用いた突然変異株の増殖には、5% CO₂ を含む空気を通気する必要がある。それは、どのような変異が起きたためであると考えられるか。下に示す推論 i ~ iv の中から、この実験結果と矛盾するものを 2 つ選び、それらの記号を解答欄カおよびクに記入せよ。さらに、それぞれの解答について、矛盾すると判断する根拠となったグラフを (あ) ~ (う) から 1 つずつ選び、その記号を解答欄キおよびケに記入せよ。

- i. 光化学系に異常が生じ、明反応から CO₂ 固定反応に供給される化学エネルギーが不足した。
- ii. 細胞内で (1) 式の反応を触媒する酵素の活性が失われ、CO₂ 固定酵素への CO₂ の供給効率が低下した。
- iii. HCO₃⁻ の能動輸送系に異常が生じ、細胞内に HCO₃⁻ を濃縮できなくなった。
- iv. 窒素化合物の能動輸送系に異常が生じ、明反応で生成した化学エネルギーを窒素同化に利用できなくなった。

問 5 実験 3 で用いた突然変異株について、細胞に与える HCO₃⁻ 濃度を変えて光合成速度を測定した。図 2 のグラフの曲線 a ~ d の中から、その結果を示すと考えられるものを選び、解答欄に記号で答えよ。ただし、培養液に 5% CO₂ を含む空気を通気した時、培養液中の HCO₃⁻ 濃度は約 5,000 μmol/L であった。

問 6 野生株を培養する際に光強度を下げて、光合成速度と HCO₃⁻ 濃度との関係を調べた。図 2 のグラフの曲線 a ~ d の中から、その結果を示すと考えられるものを選び、解答欄に記号で答えよ。なお図 2 の□で示された曲線は、光強度を下げる前の野生株の測定結果を表している。

生物問題 IV

次のハーディ・ワインベルグの法則を説明する文を読んで、問1～問5に答えよ。
解答はすべて所定の解答欄に記入せよ。

多くの生物種において個体は単独ではなく集団(個体群)を形成し、その集団中で交配し子孫を残すことで種が維持されている。ヒトやショウジョウバエのような二倍体の生物種から成る十分に大きな集団を考えてみよう。この集団において、他の集団との出入りがない、突然変異は起こらない、自然選択が作用しない、任意交配が行われる、と仮定する。任意交配とは、ある雄(あるいは雌)がどの雌(あるいは雄)とも等しい交配の機会を持つような交配のことである。

ある常染色体上の遺伝子座に2つの対立遺伝子Aとaがあり、3種類の遺伝子型AA, Aa, aaをもつ個体の数を、それぞれ N_{11} , N_{12} , N_{22} とする(総個体数 $N = N_{11} + N_{12} + N_{22}$)。この遺伝子座における遺伝子型頻度は、

$$\text{遺伝子型 AA の頻度}(D) = \frac{N_{11}}{N}$$

$$\text{遺伝子型 Aa の頻度}(H) = \frac{N_{12}}{N}$$

$$\text{遺伝子型 aa の頻度}(R) = \frac{N_{22}}{N}$$

となる($D + H + R = 1$)。また、対立遺伝子頻度は、

$$\text{対立遺伝子 A の頻度}(p) = \frac{2N_{11} + N_{12}}{2N} = \frac{N_{11}}{N} + \frac{N_{12}}{2N} = D + \frac{H}{2}$$

$$\text{対立遺伝子 a の頻度}(q) = \frac{N_{12} + 2N_{22}}{2N} = \frac{N_{12}}{2N} + \frac{N_{22}}{N} = \frac{H}{2} + R$$

となり($p + q = 1$)、遺伝子型頻度の値で表すことができる。この集団における対立遺伝子の構成を($pA + qa$)、遺伝子型の構成を($DAA + HAa + Raa$)として表す。

この集団で任意交配が行なわれると、世代0の雌の3つの遺伝子型と雄の3つの遺伝子型との間に、表1の9種類の交配が考えられる。このとき、2つの遺伝子型の交配する頻度は、それぞれの遺伝子型頻度の積となっている。

表1 世代0における任意交配とそれぞれの交配から生じる遺伝子型の頻度

世代0における交配		世代1の遺伝子型と頻度		
♀ × ♂	交配頻度	AA	Aa	aa
AA × AA	D^2	D^2	0	0
AA × Aa	DH	$DH/2$	ア	イ
AA × aa	DR	0	DR	0
Aa × AA	DH	$DH/2$	ア	イ
Aa × Aa	H^2	$H^2/4$	ウ	エ
Aa × aa	HR	0	オ	カ
aa × AA	DR	0	DR	0
aa × Aa	HR	0	オ	カ
aa × aa	R^2	0	0	R^2

例えば、遺伝子型 AA 同士の交配は D^2 の頻度で起こり、遺伝子型 AA のみが生まれる。次の世代(世代1)の遺伝子型 AA の頻度(D')は、それぞれの交配から生まれる遺伝子型 AA の頻度の和であり、

$$D' = D^2 + \frac{DH}{2} + \frac{DH}{2} + \frac{H^2}{4} = D^2 + DH + \frac{H^2}{4} = (D + \frac{H}{2})^2 = p^2$$

となる。同様に、次世代(世代1)の遺伝子型 Aa の頻度(H')は $H' = 2pq$ 、遺伝子型 aa の頻度(R')は $R' = q^2$ である。これら3つの遺伝子型頻度の比 $p^2 : 2pq : q^2$ をハーディ・ワインベルグ比という。下線部②の表記法に従うと、世代1の遺伝子型の構成は、雌の対立遺伝子の構成 $(pA + qa)_♀$ と雄の対立遺伝子の構成 $(pA + qa)_♂$ を用いて、

$$(p^2AA + 2pqAa + q^2aa) = (pA + qa)_♀ \times (pA + qa)_♂$$

と表すことができ、前の世代の雌雄がもつ対立遺伝子(配偶子)が任意に組み合わせさ

た結果と考えられる。このことから、任意交配が行われると雌雄の対立遺伝子の任意の結合が起こり、雌雄の対立遺伝子頻度が同じである場合は、世代0の遺伝子型の状態($DAA + HAa + Raa$)に関わりなく、必ず世代1で3つの遺伝子型頻度の比はハーディ・ワインベルグ比に達することがわかる。また、世代1の対立遺伝子Aの頻度(p')は $p'=p$ 、対立遺伝子aの頻度(q')は $q'=q$ であり、対立遺伝子頻度は変化していない。したがって今後任意交配が続くと、この集団の対立遺伝子頻度($pA + qa$)と遺伝子型頻度($p^2AA + 2pqAa + q^2aa$)は変化しないまま維持される。このように対立遺伝子頻度と遺伝子型頻度が変化しない状態をハーディ・ワインベルグ平衡という。

要約すると、十分大きな集団において下線部①の仮定と任意交配を仮定すると、対立遺伝子(配偶子)が任意に結合され、雌雄の対立遺伝子頻度が等しければ、次世代でハーディ・ワインベルグ平衡が成立する。このことをハーディ・ワインベルグの法則という。

問 1 ハーディ・ワインベルグの法則が成り立つために、なぜ下線部①の仮定が必要なのか。その理由を対立遺伝子頻度という言葉を用いて、解答欄の範囲内で述べよ。

問 2 表1のア～カにあてはまる頻度はいくらか。適切な数式あるいは数字を解答欄に記入せよ。

問 3 D' を導いたのと同様に表1の頻度を使って、下線部③の $H'=2pq$ と $R'=q^2$ を導く計算式をそれぞれ解答欄(1)と(2)に記入せよ。

問 4 対立遺伝子頻度と遺伝子型頻度の関係を使って、下線部④の $p'=p$ と $q'=q$ を導く計算式をそれぞれ解答欄(1)と(2)に記入せよ。

問 5 ヒトやショウジョウバエのような二倍体生物種の十分大きな集団において、常染色体上の遺伝子座に 2 つの対立遺伝子 A と a があり、対立遺伝子 A の頻度が雌では 0.8、雄では 0.2 であった(世代 0)。下線部①の仮定のもとで任意交配が続けられるとする時、世代 1 と世代 2 における対立遺伝子 A の頻度と 3 つの遺伝子型の頻度はいくらになるか。それぞれ解答欄(1)と(2)に記入せよ。また、ハーディ・ワインベルグ平衡にはどの世代で達するか。解答欄(3)に記入せよ。

生物問題は、このページで終わりである。