

# 日本生物学オリンピック 2024

本選 熊本大会



解答と解説



## 配点と正解一覧

問題	解答欄	配点	枝問配点	正解
第1問	1	8	3	(2)(3)
	2		2	(3)
	3		3	(4)
第2問	4	7	2	(4)
	5		5	(5)
第3問	6	11	5	4095
	7			8192
	8		6	4095
	9			4097
第4問	10	9	2	(6)
	11		3	(9)
	12		4	(1)(2)(3)
第5問	13	9	3	(1)(3)(4)
	14		3	1
	15		3	5
第6問	16	7	4	(1)(3)(4)(6)(7)
	17		3	(2)(3)
第7問	18	7	3	(1)(3)
	19		2	60
	20		2	15.7
第8問	21	6	3	(2)(3)(7)
	22		3	(2)

問題	解答欄	配点	枝問配点	正解
第9問	23	8	1	(1)
	24		1	(1)
	25		1	(2)
	26		1	(7)
	27		1	(2)
	28		1	(7)
	29		1	(2)(7)
	30		1	(3)
第10問	31	8	2	(4)
	32		2	(3)(5)
	33		4	2500
第11問	34	8	2	(3)
	35		3	(1)(3)(4)
	36		3	(2)(4)
第12問	37	10	2	(2)
	38		2	(3)
	39		3	(2)
	40		3	(1)(4)

合計 98 点満点

なお、部分点については解答解説を参照すること。  
解答解説中に特に言及が無い場合、部分点は与えない。

## 第1問 解答と解説

1	の【正解】は(2)(3)(3点)
2	の【正解】は(3)(2点)
3	の【正解】は(4)(3点)

### 【解説】

アルツハイマー病は、海馬や大脳皮質を含む広範な脳領域における神経細胞死によって引き起こされる神経変性疾患である。日本において、アルツハイマー病は老人期における認知症の最大の原因疾患であり、その患者数は増加しており、根本的治療薬の開発が望まれている。これまで、アルツハイマー病患者においてアセチルコリンを神経伝達物質とするコリン作動性神経の障害がみられることから、アセチルコリンに着目した創薬が行われてきた。しかしながら、このような薬剤は症状を緩和する症候改善薬であり、根治のために原因物質を脳内から除去する病態修飾薬が必要とされている。

アルツハイマー病の患者の脳内には、老人斑とおよび神経原線維変化とよばれる特徴的な蓄積物が観察され、それぞれの主成分はそれぞれ凝集性の高い約40個のアミノ酸残基からなるペプチド(アミロイドβペプチド(Aβ))とおよび微小管に結合するタンパク質(タウタンパク質)である。後者よりも前者の蓄積の方が早期にみられることから、前者(Aβ)を標的とした治療薬の開発が世界中で進められている。つまり、脳内のAβを除去することを主眼としている。

2023年、Aβに対するモノクローナル抗体である「レカネマブ」がアルツハイマー病の治療薬として認可され、日本において初めて病態修飾薬が臨床使用されることになった。レカネマブは、アルツハイマー病による軽度認知障害及び軽度の認知症の進行抑制に対して処方され、通常、レカネマブ(遺伝子組換え)として10 mg/kgを、2週間に1回、約1時間かけて点滴静注する。これまで癌や関節リウマチ等の疾患には抗体医薬品が適用されてきていたが、アルツハイマー病のように脳における疾患でも有用性が認められたことにより、今後より多くの疾患に応用されていくことが予想される。

### 問1

- (1) × 通常、抗体の可変部は左右で同じ抗原を認識する。レカネマブは、説明文に記載されている通り、Aβに対するモノクローナル抗体である。
- (2) ○ タンパク質である抗体は、消化されるため経口での投与は困難である。
- (3) ○ 抗体はジスルフィド結合を有していることから、システインを2個以上含有していることになる。
- (4) × レカネマブ等のような抗体医薬品は、チャイニーズハムスター由来のCHO細胞を用いて産生される。哺乳類由来の細胞であることから、糖鎖修飾といった翻訳後修飾が行われるためである。しかしながら、インスリンやインターフェロン等は、大腸菌等を用いてつくられる。
- (5) × 2018年にノーベル医学・生理学賞を受賞された本庶佑博士の功績を理解しているか、確認するためにこの選択肢を加えた。抗体は分子量が大きいこと等から脳移行性が低く、神経変性疾患への応用は難しいと考えられていた。一方、がんをはじめ、関節リウマチやクローン病、喘息、皮膚疾患(乾癬やアトピー性皮膚炎)にはすでに応用されており、日本では50種類以上の抗体医薬品が承認されている。

### 問2

アクリルアミドゲルを用いた電気泳動をしてレカネマブ等の抗体を分離して染色すると、約50,000と約25,000の付近にバンドが1本ずつ検出される。高分子側の約50,000は抗体のH鎖であり、約25,000は抗体のL鎖である。抗体は、H鎖とL鎖が2本ずつが合わさった構造をしている。

抗体のH鎖は、 $50 \times \frac{1000}{110}$  から「454」となり、約450個のアミノ酸残基からできており、一方のL鎖は、 $25 \times \frac{1000}{110}$  から「227」となり、約220個のアミノ酸残基からできていることがわかる。

実際には、レカネマブは、454個のアミノ酸残基からなるH鎖(γ1鎖)が2本、また219個のアミノ酸残基からなるL鎖(κ鎖)が2本で構成され、分子量は約150,000とされている。

### 問3

レカネマブは、体重1 kg当たり10 mgを2週間に1回、約1時間かけて点滴静注するので、体重75 kgの患者には、750 mgのレカネマブを投与することになる。レカネマブの分子量は、問2からH鎖が約50,000、L鎖が約25,000であり、

抗体は H 鎖と L 鎖が各 2 本ずつ合わさった構造であることから、約 150,000 である。

$0.75 \text{ g} / 150,000 = 0.000005 \text{ モル}$ となり、 $5 \times 10^{-6} \text{ モル}$ を選択する。

**【参考】**

アルツハイマー病について      キャンベル生物学 p.1254-

アセチルコリンについて      キャンベル生物学 p.1228-

抗体について      キャンベル生物学 p.1064- p. 1092

レカネマブについて

<https://www.eisai.co.jp/news/2023/news202359.html> (エーザイ プレスリリース)

<https://pins.japic.or.jp/pdf/newPINS/00071040.pdf> (レカネマブ (遺伝子組換え) 製剤添付文書)

## 第2問 解答と解説

4 の【正解】は(4) (2点)

5 の【正解】は(5) (5点) ただし、(7) のとき部分点として3点

プライマーの位置は図解説 2-1 のようになる。DNA は 5' 側から 3' 側にしか伸長しないこと、およびプライマー I, II, V と III, IV, VI のそれぞれから 1 つ選んだ組み合わせのみで PCR を実施していることから、プライマー I, II, V が順方向 (フォワード) プライマー、プライマー III, IV, VI が逆方向 (リバース) プライマーである。野生型と突然変異型のそれぞれの DNA を鋳型とし、プライマー I と VI (または、プライマー II と VI) を利用した PCR 産物の長さの差が、欠失した範囲の長さである。次に、欠失した箇所であるが、プライマー III, IV, V を使用した PCR では産物が増幅されないので、欠失した範囲  $\alpha$  は、これらのプライマーの位置を含んでいることが分かる。プライマーは先端 (3' 側) が一塩基でも異なれば、アニーリングしない。以上を考慮すると、欠失した範囲  $\alpha$  が最も 5' 側の場合は、プライマー III の先端に対するゲノム DNA が欠けている場合で 74 - 120 番目 (図解説 2-1 の点線) である。逆に、最も 3' 側の場合は、プライマー V の先端に対するゲノム DNA が欠けている場合で 86 - 132 番目 (図解説 2-1 の実線) である。選択肢 (7) は選択肢 (5) の中に含まれているので部分点。

これ以上の特定は、通常は DNA シーケンスをして解析する。ここで「PCR を行わず、いきなり DNA シーケンスをできないの?」と考えが浮かぶかもしれない。問題作成の都合上、扱う領域を狭くしたが実際はもっと広いこと、およびシーケンスの可能な長さは数百 bp であることから、PCR でだいたい場所を特定していから、シーケンスを行っている。

表 2-1: PCR の結果と増幅産物の具体的な鎖長。  
×は増加しなかったことを示す。

プライマー	鋳型 DNA	
	野生型	突然変異型
I と III	117	×
I と IV	87	×
I と VI	147	100
II と III	87	×
II と IV	57	×
II と VI	117	70
III と V	47	×
IV と V	17	×
V と VI	77	×



## 第3問 解答と解説

6 の【正解】は 4095

7 の【正解】は 8192

6、7 両方正解で 5 点

8 の【正解】は 4095

9 の【正解】は 4097

8、9 両方正解で 6 点

### 問 1

実際に数世代にわたって思考実験してみると良い。親 (P) の遺伝子型が Aa なので、自家受精で生じる F<sub>1</sub> は AA:Aa:aa = 1:2:1 となり、F<sub>1</sub> 全体の出現頻度を 1 とすると AA:Aa:aa =  $\frac{1}{4} : \frac{2}{4} : \frac{1}{4}$  となる。

次に、F<sub>1</sub> から F<sub>2</sub> が生まれるところを考える。自家受精により AA からは AA、aa からは aa しか生じない。Aa から AA:Aa:aa =  $\frac{1}{4} : \frac{2}{4} : \frac{1}{4}$  の割合で各遺伝子型を持つ F<sub>2</sub> が生じる。従って F<sub>2</sub> 全体で各遺伝子型の出現頻度は以下のようになる。

$$\text{AA} \quad \frac{1}{4} + \left(\frac{2}{4} \cdot \frac{1}{4}\right) \quad \text{Aa} \quad \frac{2}{4} \cdot \frac{2}{4} \quad \text{aa} \quad \frac{1}{4} + \left(\frac{2}{4} \cdot \frac{1}{4}\right)$$

同様に、各世代における AA、Aa、aa の出現頻度を列挙していくと以下のようになる。

$$\text{AA} \quad \frac{1}{4} \quad \frac{3}{8} \quad \frac{7}{16} \quad \frac{15}{32} \dots \quad \text{Aa} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{1}{4} \quad \frac{1}{8} \quad \frac{1}{16} \dots \quad \text{aa} \quad \frac{1}{4} \quad \frac{3}{8} \quad \frac{7}{16} \quad \frac{15}{32} \dots$$

ここで AA の一般項を求めてやれば良い。AA の分母は 2<sup>n+1</sup> に従うことが簡単に分かる。分子だけ抜き出すと 1、3、7、15…となっており、それぞれ前項と差を取って階差数列を見ると 2<sup>n</sup> となっている。このことから分子だけ見ると 2<sup>n-1</sup> であることが分かる。従って F<sub>n</sub> における AA の出現頻度 (一般項) は  $\frac{2^n - 1}{2^{n+1}}$  である。

しかしここは Aa に着目したほうが簡単かもしれない。Aa の挙動を見ていくと、一般項は明らかに  $\frac{1}{2^n}$  である。AA と aa の出現頻度は同じなので、AA の出現頻度を求めるには全体から Aa の出現頻度の差を取り、さらに半分にしてやれば良い。

$$\left(1 - \frac{1}{2^n}\right) \cdot \frac{1}{2} = \frac{2^n - 1}{2^{n+1}}$$

### 問 2

これも問 1 と同様に、数世代にわたって思考実験してみると良い。遺伝子型が Aa の親 (P) から自家受精で生じる F<sub>1</sub> の卵は AA:Aa:aa =  $\frac{1}{4} : \frac{2}{4} : \frac{1}{4}$  となる。しかし aa は胚性致死で孵化しない。従って生じる幼虫を十分な数だけ拾い上げると、その遺伝子型は AA か Aa のみとなり、全体が 1 となるように注意すると、その頻度は以下のようになる。

$$\text{AA} \quad \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{2}{4}} = \frac{1}{3} \quad \text{Aa} \quad \frac{2}{4} \cdot \frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{2}{4}} = \frac{2}{3}$$

F<sub>2</sub> では以下のようになる。

$$\text{AA} \quad \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{1}{\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{4} + \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{4}} = \frac{3}{5} \quad \text{Aa} \quad \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{4} \cdot \frac{1}{\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{4} + \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{4}} = \frac{2}{5}$$

以降、同様に作業すると、以下のようになる。

$$\text{AA} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{3}{5} \quad \frac{7}{9} \quad \frac{15}{17} \dots \quad \text{Aa} \quad \frac{2}{3} \quad \frac{2}{5} \quad \frac{2}{9} \quad \frac{2}{17} \dots$$

ここで AA の分子が取る 1、3、7、15…は前問で出現した数列と同様で 2<sup>n</sup>-1 と書ける。分母は階差を取ると 2、4、8…となっており、ここから分母は 2<sup>n</sup>+1 と書けることが分かる。従って一般項は  $\frac{2^n - 1}{2^n + 1}$  と書ける。

ここでも、全体から Aa の頻度の差を取れば AA の頻度になるとして、以下の計算をしても良いだろう。

$$1 - \frac{2}{2^n - 1} = \frac{2^n - 1}{2^n + 1}$$

なお問 1・問 2ともに、分子と分母が互いに素であることを確認しておくこと。また本問において、 $2^{10}$  近辺の計算は紙と鉛筆で計算可能であることを前提にしている。

## 第4問 解答と解説

10	の【正解】は(6)(2点)
11	の【正解】は(9)(3点)ただし、(1)(2)とした場合は部分点として1点
12	の【正解】は(1)(2)(3)(4点)ただし、部分点として(1)(2)のとき1点、(3)のとき1点

### 問1

学名は「属名+種小名」であることから、キャベツとハクサイは同属であることがわかる。分類体系では属が同じものは同じ科に属するため、キャベツとハクサイが同じ科であることがわかる。イネとレタスは種小名が同じだが、属名が異なるため科が同じであるかを判断することはできない。

### 問2

- (1) 3ドメインの分類に関する理解をもとに判断する。核膜を持たない原核生物は細菌、古細菌に分けられ、真核生物は古細菌の一部のクレードから派生したため、原核生物は側系統群となる。
- (2) 細胞内共生(二次共生)に関する理解をもとに判断する。原生生物の葉緑体(褐藻など)は紅藻、緑藻を二次共生することで獲得されたものであり、光合成できる原生生物は複数回独立に起源した多系統群である(単系統群ではない)。
- (3) 被子植物が真正双子葉植物、単子葉植物、基部被子植物に分けられることに関する知識をもとに判断する。双子葉植物は単子葉植物を含まない被子植物であり、側系統となる(単系統群ではない)。

なお、(1)生物が3ドメインに分類されること、(2)細胞内共生(一次・高次共生)によって葉緑体が獲得されたことは、生物の進化における極めて一般性の高い現象であるため、(1)(2)両方を選択した場合には部分点として1点を与えることとする。

### 問3

「最節約法の原理が形質・塩基配列における変化の回数が最小となるように進化を考える」ことであることを踏まえた上で試行錯誤する。

4つのサイトにおける多型の変化した回数が最も少なくなる系統樹を探索する。選択枝にある各系統樹に対し、それぞれのサイトにおける多型が系統樹中のどの枝で変化した場合に最も変化の回数が少なくなるかをサイトごとに考える。その上で、4つのサイトで起こった変化の回数を合計し、各系統樹で起こった変化の回数を求める。(1)-(3)では6回、(4)では7回の変化が最も少ない変化の回数であるため、(1)、(2)、(3)が最節約的に構築される系統樹となる。共通祖先の配列に関する情報を与えていないため、共通祖先が種1-4の塩基のいずれかを持つと仮定して数える必要がある(種1-種4に現れない塩基を仮定すると、余分な変化を考える必要が生じるため、種1-種4の塩基のいずれかが祖先的と仮定した上で考える)

(補足)

(1)-(3)は一見異なる系統樹であるが、無根系統樹としては同じ樹形を示すものなので、今回の情報からはこれら3つの系統樹を区別することはできない。有根系統樹・無根系統樹に関する説明はキャンベル生物学には含まれていないが、最節約的な方法で機械的に試行錯誤すれば解答することはできる。

(問3の解法例)

(1) 単系統である種1/2がサイト1/サイト4にC/Tをそれぞれ共通して持つため、これらのサイトでは種1/2の共通祖先においてA>C(サイト1)、G>T(サイト4)の変化が起こった場合に回数が2回となり、最も少なくなる(種1/種2が持つ塩基を共通祖先が持つと考え、種3/4の枝でそれぞれ変化が起こることを想定する必要があるため、それぞれの枝で2回の変化が生じる必要があり、変化の回数が増える)。

サイト2/サイト3については、4種の共通祖先がC/T(サイト2)、A/T(サイト3)以外の塩基を持つと、変化を余分に数える必要が生じるため、共通祖先はそれぞれのサイトに、C/T(サイト2)、A/T(サイト3)のいずれかの塩基を持つと考えることができる。そこで、共通祖先の塩基をサイトごとに1つずつ仮定し、系統樹上で生じる変化の回数を数え上げる。例えば、共通祖先のサイト2をCとした場合には、種4の枝と種1の枝でC>Tの変化が起こったと考えることができる(変化の回数は2回)。共通祖先のサイト2をTとした場合には、種1/2/3の共通祖先でT>Cの変化が、種1の枝でC>T

の変化が起こったと考えることができる。あるいは、種 2 の枝と種 3 の枝でそれぞれ T>C の変異が起こったと考えることもできる。いずれの場合であっても、変化の回数は 2 回となり、サイト 2 では共通祖先の塩基を C/T のいずれと仮定した場合にも、最も少ない変化の回数は 2 回となる。サイト 3 についても同様に考えると、最も少ない変化の回数は 2 回となるため、(1) の系統樹では少なくとも 6 回の変化が起こったと考える必要がある。

(2) 単系統である種 3 と種 4 に着目し、(1) の系統樹と同様に考えると少なくとも 6 回の変化が起こったと考える必要がある。

(3) 種 1/2 と種 3/4 がサイト 1/サイト 4 に C/T をそれぞれ共通して持つことに注目する。これらのサイトにおいて共通祖先が種 3/4 と同じ塩基を持つ場合には、種 1/2 の共通祖先でサイト 1 では A>C、サイト 4 では G>T の 2 回の変化が起きたと考えることになる。また、共通祖先が種 1/2 と同じ塩基を持つ場合にも 2 回の変化を考えることになる。共通祖先が種 1-4 と異なる塩基をもつ場合には、余分に変化を考える必要が生じるため、これらのサイトについては少なくとも 2 回の変化が起きたと考えることになる。サイト 2、サイト 3 については、共通祖先が種 1-4 の持つ塩基のいずれかを持つと仮定した上で考える。サイト 2 を T と仮定すると、種 2 の枝と種 3 の枝で T>C の変異が起きたと考えた場合に変化の回数が最も少なくなる。同様に、いずれの仮定についても変化の回数は少なくとも 2 回となるため、サイト 1-4 の全体では少なくとも 6 回の変化が起こったことになる。

(4) 種 1/3 が共通して持つ塩基はサイト 3 の A のみであることに注目し、この塩基が共通祖先と同じ場合と異なる場合について考える。(3) と同様に考えると、サイト 3 では最も少ない変化の回数は 1 回である。他のサイトについては、共通祖先が種 1-4 の持つ塩基のいずれかを持つことを仮定すると、いずれのサイトについても、特定の種の枝で変化が起きた場合に変化の回数が最も少ない 2 回となる。したがって、3 つのサイトでは 6 回の変化が必要となり、この系統樹では少なくとも 7 回の変化を必要とする。

## 第5問 解答と解説

13	の【正解】は(1)(3)(4) (3点)
14	の【正解】は1 (3点)
15	の【正解】は5 (3点)

### 【解説】

ヤドカリのなかまでカニ化が生じていることを初めて発見したのは、L. A. ボラダイルというイギリスの動物学者である。彼は1916年にタラバガニが「変形したヤドカリ」であることを明らかにし、「カニではなかったものがカニのような形に進化する」この現象をカーシニゼーションと名づけた。「カーシニ」とはギリシャ語でカニのことで、「ゼーション」は英語の「～になる」を意味する。近年の分子系統解析の結果、カーシニゼーションは十脚目甲殻類で少なくとも5回独立に生じたことが示されている (Morrison et al. 2001; Wolfe et al. 2021)。

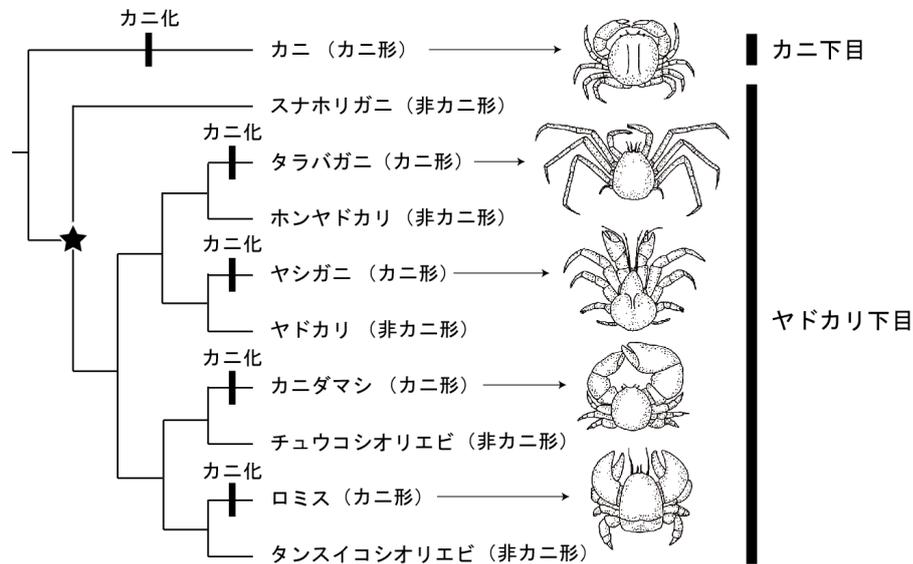
カニのなかまは、鋏脚とよばれる鋏状の脚 (= 第1 胸脚) を含めて5対 (10本) の胸脚をもつ。ところがタラバガニやヤシガニなどは胸脚が4対 (8本) しかないようにみえる。最後部の胸脚 (第5 胸脚) が小さく退化して背甲内に隠れてしまっているため、胸脚が1対 (2本) 足りないようにみえるのである。第5 胸脚が小さく変形するのは、まさにヤドカリ類の特徴である。彼らがまだ巻貝の殻に入って生活していた頃、第5 胸脚は貝殻のなかの掃除などに使われていたのだろう。貝殻を脱いだ生活をおくる現在では、この脚は背甲内にある鰓の掃除に使われている。

### 問 1

図解説 5-1の星印で示した分岐点がヤドカリ下目の共通祖先を表す。

### 問 2

最も形質の変化が少なくなるのは、図解説 5-1のバーで示した箇所です。「カニ形」という形質が獲得されたパターンである。このときの変化回数は5回となる。変化回数が5回になるのは、タラバガニ、ヤシガニ、カニダマシ、ロミスが独立にカニ形という形質を獲得したパターンのみである。



図解説 5-1. カニ下目とヤドカリ下目の主要な分類群の系統関係 (第5問の解説、Morrison et al. 2001 の図を参考に作図)

### 【文献】

- (1) Morrison CL, Harvey AW, Lavery S, Tieu K, Huang Y, Cunningham CW (2001) Mitochondrial gene rearrangements confirm the parallel evolution of the crab-like form. *Proc. R. Soc. Lond. B*.269: 345–350. <https://doi.org/10.1098/rspb.2001.1886>
- (2) Wolfe JM, Luque J, Bracken-Grissom HD (2021) How to become a crab: Phenotypic constraints on a recurring body plan. *BioEssays* 43:2100020. <https://doi.org/10.1002/bies.202100020>

## 第6問 解答と解説

16 の【正解】は (1)(3)(4)(6)(7) (4点)

17 の【正解】は (2)(3) (3点)

### 問1

地下部（根）が cle 変異体の場合、及び地上部（葉）が clv1 変異体の場合、全ての根に全身性シグナルが輸送されなくなるので、左の領域の根においても線虫感染率が下がると考えられる。例えば (7) の根は野生型であるが、全身性シグナルが根に輸送されないため、感染率は野生型に比べ下がると考えられる。

### 問2

実際は、根で合成された CLE ペプチドは地上部に移動し、地上部で糖輸送体の SUC2 遺伝子発現を上昇させ、糖の根への転流が促進される。また、CLE 遺伝子を過剰発現させると糖の根への転流が促進されると期待されるので (4) は誤答。線虫は、この CLE 遺伝子による糖の転流シグナルを乗っ取り、自身の感染の為に栄養分としての糖を無理矢理転流させているのである。線虫は、このシステムシグナルを無理矢理誘導しているため、(1) は誤答。なお、この問題で登場する CLE は類似した CLE1~CLE7 の7つの CLE 遺伝子が冗長して機能することがわかっている。

### 参考文献

- (1) Okamoto et al., 2022. Plant Physiol. 189, 2357-
- (2) Nakagami et al., 2023. Science Advance. 9. Adf4803

## 第7問 解答と解説

18	の【正解】は(1)(3)(3点)
19	の【正解】は60(2点)
20	の【正解】は15.7(2点)

### 問1

シアノバクテリアに感染するシアノファージ S-2L 株は DNA の塩基に Z を持つため、DNA が感染先のシアノバクテリアの制限酵素による切断を受けないが、Z を A に置き換えたウイルス W の DNA は、制限酵素によって切断される。また、DNA が変改しているため、転写が影響を受ける可能性はあるが、遺伝情報としては A と Z は等価であると記載があることから転写される RNA は同一のため、翻訳は影響を受けない。

DNA は ACGT の塩基がすべての生物に共通であると学ぶが、このような例外もあることを知って、生き物の多様性と生存戦略の面白さを感じてほしい。

### 問2

PCR 反応で用いるプライマーの設計で重要な  $T_m$  値についての概念を問う。単純な算数だが、塩基対の概念が理解できていないと答えられない。

### 問3

問2同様、塩基対の概念が理解できているとすぐに答えられる。頻出問題ではあり、Zに置き換わったことで混乱しなければ問題なく解ける。

## 第8問 解答と解説

21 の【正解】は(2)(3)(7) (3点)

22 の【正解】は(2) (3点)

### 問1

ムチン mucin は多くの動物において上皮細胞で発現する糖タンパク質である。その多くが細胞外へ分泌され、溶液に粘性を持たせてゲル化させることが知られており、それを通じて細胞表面の保護や潤滑作用として機能しているほか、軟体動物における貝殻の形成や棘皮動物の石灰化などにも関与しているといわれている。

学術的にはムチンは動物粘液中に含まれる糖タンパク質であるが、日本の一般社会では植物や微生物を含む『ネバネバ成分』もおしなべてムチンと称する傾向にあり、それを正そうとする指摘が報告されている。なお、納豆の粘り成分はポリグルタミン酸であり、山芋、里芋、ナメコの粘り成分はペクチンと呼ばれる多糖類である。

### 問2

カタツムリが這行するさい、単に腹足の筋肉が一様に収縮するだけではカタツムリは移動できず、一箇所では伸びたり縮んだりを繰り返すのみである。実際には、カタツムリの何かがどこかで足掛かり（摩擦力）となり、そのどこかを足掛かりにして伸びた体や縮んだ体が元に戻るさいに、個体としての移動が生じると考えられる。なお、カタツムリでは這行の際にシャクトリムシのような前方や後方を持ち上げる運動は観察されない。

カタツムリの這行方向に対して腹足の特定の部分の筋肉が収縮し、進行方向に対して鉛直に引き上げられると、腹足に収縮縞が生じる。この縞が生じるさいに腹足と接触面の隙間にくぼみが生じ、そのくぼみにはカタツムリが分泌するムチンが流れ込む。いわばこのくぼみの中で粘液中に急な力が加わり、攪拌されることになるため、結果として(X)の部分にあるムチンは流体として振舞う。収縮縞(X)と収縮縞に挟まれた部分(Y)を比べると(Y)の摩擦力が強く、カタツムリの進行時に(Y)が足掛かりとなる。いわばカタツムリ腹足の後方が縮んで収縮縞を形成し、その収縮が前方へ送られる形で伝達していくことを通じてカタツムリは前方へ這行している。

なお、アメフラシでは収縮縞がひとつだけみられ、這行のさいに収縮縞が前方から後方へ移動することが観察される。

### 参考文献

- (1) 生物工学 第97巻 48-49 (2019)
- (2) 数理解析研究所講究録 第1853巻 217-224 (2013)
- (3) [https://gfd.who.edu/wp-content/uploads/sites/18/2018/03/SamPegler\\_136807.pdf](https://gfd.who.edu/wp-content/uploads/sites/18/2018/03/SamPegler_136807.pdf)

## 第9問 解答と解説

23	の【正解】は(1)(1点)
24	の【正解】は(1)(1点)
25	の【正解】は(2)(1点)
26	の【正解】は(7)(1点)
27	の【正解】は(2)(1点)
28	の【正解】は(7)(1点)
29	の【正解】は(2)(7)(1点)
30	の【正解】は(3)(1点)

この設問で受験者に理解を求めているのは細胞膜の薬物透過性と、水輸送系のしくみである。アクアポリンによる水輸送の速度は、球状の細胞であれば、半径の変化として計測できる。水分子の輸送方向（浸透圧差で決まる）と阻害剤の作用・結合サイト（薬剤の親水性、疎水性で異なる）の違いで、予測される実験結果（実測データなく、シミュレーションのみ）との対応を考える課題。問1-3は標準的な問題で、細胞膜の浸透性を理解して解答できると期待している。

問4-6は、リンに細胞膜内で方向性があり、細胞内外の部位によって、薬剤の作用する部分が異なる場合の結果を予測する課題で、問4では、薬剤Wは、親水性のため細胞内部には浸透できないと考えられ、外向きの水輸送を（例えば、アクアポリンの細胞外出口に結合して機能を止めるなどの作用で）阻害すると仮定する。結果は、高張液条件下でのみ起こり、水排出だけが阻害される形で観察されるだろう。細胞半径の収縮変化のみ（アクアポリン50%の寄与を考慮する必要あり）が遅延すると期待できる。

問5では、薬剤Xは、親水性のため細胞内部には浸透せず、内向きの水輸送を（例えば、アクアポリンの細胞外入口に結合して機能を止めるなどの作用で）阻害すると仮定すると、低張液条件下での水侵入だけが阻害され、細胞半径の拡張変化のみが遅延すると期待できる。

問6では、薬剤Yは、疎水性のため細胞内部には自由に浸透するが、外向きの水輸送のみ阻害すると仮定すると、高張液条件下での水排出だけが阻害され、細胞半径の収縮変化のみが遅延すると期待できる。

問7では、薬剤Zは、疎水性のため細胞内部には自由に浸透し、外向き・内向き両方の水輸送を阻害する（アクアポリンの内部に結合して水分子の結合を阻害するなど）。この場合、低張・高張の両条件下での水の侵入・排出を阻害し、細胞半径の拡張・収縮の両方が遅延すると期待できる。

現在、ヒトのアクアポリンは様々な組織で、異なるタイプのものが発現していることがわかっており、それぞれが人の疾患と深く関係していることもわかってきた。アクアポリンによる水の内外輸送に関わるさまざまな阻害剤が開発されれば、薬剤として応用も可能となる。設問を解くことで、この実験の意義を理解してもらいたい。

最後は、細胞の大きさがわかっているので、体積の変化からおよその水の移動量を概算させる課題とした。50秒で80  $\mu\text{m}$  から95  $\mu\text{m}$  へと半径が増えているので、細胞体積は約  $2.1 \times 10^{-6}$  mL (g) から約  $3.6 \times 10^{-6}$  mL (g) へ増加するので、この差から解答は(3)となる。

## 第10問 解答と解説

31 の【正解】は(4) (2点)

32 の【正解】は(3)(5) (2点)

33 の【正解】は2500 (4点)

### 問1

本問題は人の血液に対する正しい知識を問いている。

- (1) 正しい
- (2) 正しい
- (3) 正しい
- (4) 誤り

リンパ前駆細胞が移動して胸腺で分化するのはT細胞であり、骨髄に残りで分化するのがB細胞である。

- (5) 正しい

### 問2

本問題はヘモグロビンの酸素飽和に関する知識及びボーア効果について問いている。

- (1) 誤り

それぞれのサブユニットはポリペプチド鎖と鉄原子を持つヘム基から構成されている。鉄原子1つが1つの酸素分子と結合するため、ヘモグロビン1分子あたり最大4分子の酸素を結合する。

- (2) 誤り

低pH下ではヘモグロビン構造が変化して酸素に対する親和性が低下する。よって、酸素解離曲線はbへと動く。

- (3) 正しい
- (4) 誤り

運動によって二酸化炭素の発生、それに伴うpH低下が起こる。よって、酸素解離曲線はbへと移動する。

- (5) 正しい

### 問3

本問題は赤血球数の恒常性維持における血球寿命と血球産生の関連性を問う計算問題となっている。細胞数の恒常性が維持されるためには常に壊される血球数と新たに造られる血球数が同じである必要がある。数の恒常性が維持されているということは寿命を迎える赤血球数と新たに造られる赤血球数が同数であることを意味する。本点に気づけば問題文に記述されている数値から下記のように計算ができる。体重の1/13が血液であることから体重78kgのヒトの血液量は6kgである。血液1kgは1Lであるため、赤血球数は1μLあたり500万個( $5 \times 10^6$ 個)である。よって、6L( $6 \times 10^6 \mu\text{L}$ )に含まれる赤血球数は $5 \times 10^6 (\text{個}) \times 6 \times 10^6 (\mu\text{L}) = 3.0 \times 10^{13}$ 個となる。ヒト赤血球の寿命は120日であるため、1日に寿命を迎える赤血球数は $\frac{3.0 \times 10^{13}}{120} = 2.5 \times 10^{11}$ 個(2500億個)となる。よって、1日に造られる赤血球数は約2500億個となる。

## 第11問 解答と解説

34	の【正解】は(3)(2点)
35	の【正解】は(1)(3)(4)(3点) 部分点は無し
36	の【正解】は(2)(4)(3点) 部分点は無し

### 問1

オーキシンは重力方向に輸送される。そのため、発芽直後の植物体を水平に置くと、下側のオーキシン濃度が高まる。根はオーキシン濃度の低いところでの伸長成長が促進されるため、結果として根は重力方向に曲がって伸びていく。地上部ではオーキシンに対する反応が逆であり、オーキシン濃度の高い下側の伸長が促進される。そのため、地上部は負の重力屈性を示す。発芽直後に見られる根の重力屈性は地上で発芽した場合に陥りやすい乾燥による枯死を回避するという適応的な意義があると考えられている。

### 問2

植物体がある程度成長すると、根は重力屈性を示さなくなる。特に側根では顕著であり、ほぼ水平方向に伸長していく。根が土壌の表面近くに分布する適応的な意義は次のように考えられている。土壌の地表面近くは多くの土壌有機物が蓄積しており、この有機物から窒素が無機化する。そのため、根は有機物を含む層に分布することで無機窒素を吸収することができる。実際、根は無機窒素の存在する方向に伸長していくことが知られている。また、根は水分の多い方向にも伸長するが、降水量の多い日本では土壌の深さに関係なく水は土壌中に十分に存在しており、根の分布が水分によって規定されることはない。他方、砂漠では水分は土壌深くにのみ存在しており、砂漠の植物の根は深さ10mにまで伸びていることが知られている。土壌の有機物層の直下が岩盤となっていることはむしろ希であり、多くの土壌では風化して生成した粘土、あるいは火山灰となっている。水田のように水が張られた場所では土壌の内部は嫌氣的になっているが、森林では土壌の深い場所まで酸素が拡散できるため、好気的な環境となっている。

### 問3

森林を伐採すると土壌有機物から無機化する窒素が河川に流出することが知られている。これは、根が枯死してしまうことで、根による窒素吸収がなくなるからである。自然の陸上生態系では無機化する窒素はほぼすべてが根によって吸収されるため、河川には無機窒素がほとんど出てこない。そのため、根は河川の富栄養化を防止する効果がある。また、根は保水力のある粘土質の土壌が浸食されることを防ぐ。そのため、降水は一時的に土壌に蓄えられ、ゆっくりと河川に流出する。これによって洪水の発生が抑えられる。土壌呼吸は主に微生物によって行われているが、根がそれを阻害することはない。土壌の深い層で起きる地滑りを植物の根が止めることはできない。こうした地滑りの場合、植物は立ったまま滑り落ちていくことが知られている。

## 第12問 解答と解説

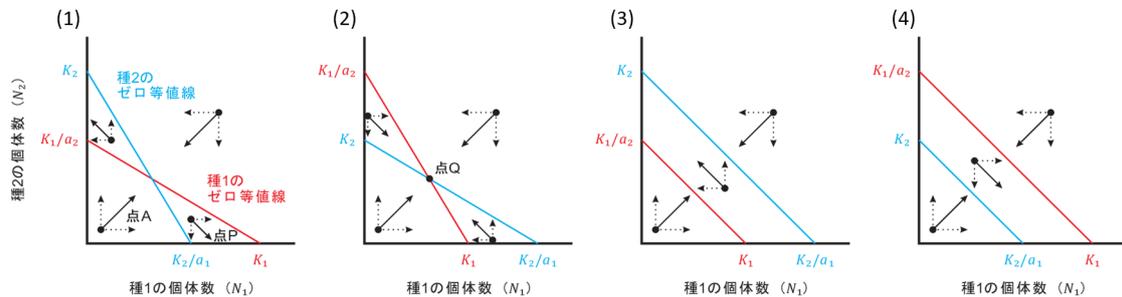
37	の【正解】は(2)(2点)
38	の【正解】は(3)(2点)
39	の【正解】は(2)(3点)
40	の【正解】は(1)(4)(3点)

### 問1

それぞれの微分式が0になるときの  $N_1$  と  $N_2$  を求めると、このような解答が得られる。

### 問2

2種のゼロ等値線によって分割された4区域もしくは3区域における2種の個体数の変化方向を図解説12-1(1)-(4)に示す。点Pが位置する区域では、種1の個体数は増加し、種2の個体数は減少する。そのうち種2の個体数は0になり、種1の個体数は種1の環境収量力  $K_1$  まで増加して平衡状態に至る。



図解説 12-1. ある係数条件下での2種のゼロ等値線

### 問3

2種のゼロ等値線が図解説12-1(2)のような位置関係になるとき、それぞれの種の個体数は0にならず、点Qに示される平衡状態に至り、2種は長期的に共存可能となる。

### 問4

- (1) (正) 2種が共存できる係数条件は図解説12-1(2)に示されており、このとき下記の2つの不等式が成立する。これらを変形すると、不等式  $a_1 a_2 < 1$  が得られる。

$$K_1 < \frac{K_2}{a_1} \quad K_2 < \frac{K_1}{a_2}$$

- (2) (誤) 環境の変化によって環境収容力などのパラメータ(各種のゼロ等値線の位置関係)が変われば、各種の個体数の変化方向、そして競争によって排除される種は変化する。
- (3) (誤) (1)の解説にあるように競争係数が小さいとき、あるいは自然環境下で捕食や攪乱により個体数が平衡状態に達しないまま維持されるとき、競争で劣位となる種も個体数を存続することができる。
- (4) (正) それぞれの分布内の環境の違い、分布間の地理的障壁、種間の繁殖干渉などが原因である可能性もある。