

日本生物学オリンピック本選2021

鶴岡大会（山形）

理論試験



2021年9月18日（土）



## 諸注意

1. この試験は遠隔で行いますが、基本的な規則に関しては対面で行われる試験に準じます。
2. 机の上に置けるものは、①受験票、②本人確認書類(学生証等)、③ノートパソコン (Zoom 接続用)、④スマートフォン (緊急個人連絡ならびに解答用紙撮影送付用)、⑤筆記用具一式、の必要不可欠なもの他に、⑥時計 (ただしスマートウォッチはのぞく)、⑦メガネ、⑧水分補給用のペットボトル (ラベルがはがれた状態の透明のボトルに限る)、⑨タオル (汗拭き用として無地に限る) です。上記以外のを許可無くおくことは不正行為として判断し、失格とします。
3. 試験中は常に監督者の指示に従ってください。指示に従わない場合、不正行為として判断し、失格とします。監督者とは全体ルームにいる場合は運営側の教員を、Zoom のブレイクアウトルームにいる場合は SCIBO スタッフを指します。ただし、災害の発生等の極めて緊急性の高い事態が生じた時は、ご自身の身の安全を最優先してください。
4. ノートパソコン、スマートフォン、Zoom について
  - ノートパソコンは Zoom 接続のためにだけ用います。
  - Zoom は常時画面オン、音声入力オフとしてください (監督者の声は聞こえる必要があります)。
  - スマートフォンは運営者からの緊急個人連絡時ならびに回答用紙の写真撮影と送付のために用います。
  - 試験中はスマートフォンの電源はオフにしてください。マナーモードや機内モードも認められません。
  - ノートパソコンやスマートフォンを含め、あらゆる電子機器は、試験の解答を導くための補助とすることは許されません。そのような行為が認められた場合、不正行為として判断し、失格とします。
  - 試験時間中は、Zoom を通じて監督者が試験中の様子を随時確認します。⇒この原則に従えば、お手洗いなどの途中退席は認められませんが、やむを得ない場合は「5. 緊急個人連絡」に従ってください。
5. 緊急個人連絡について
  - 監督者→受験者、の場合。まず Zoom 上にて監督者から個人名を音声にて伝えます (同じブレイクアウトルームにいる全員がその音声を聞くこととなりますが、該当者以外は無視してください)。その後、スマートフォンの電源を速やかにオンにして、監督者からの電話に出てください。
  - 受験者→監督者、の場合。まず Zoom 上にて音声をオンにして、監督者に緊急個人連絡がある旨だけを伝えてください (同じブレイクアウトルームにいる全員がその音声を聞くこととなりますので、内容は伝えないでください。緊急個人連絡があります、とだけお伝えください)。その後、速やかに Zoom の音声をオフとし、スマートフォンの電源をオンにし、監督者からの電話をお待ちください。
6. 問題冊子、解答用紙について
  - 解答用紙左上の『氏名』欄に自分の名前を書くとともに、右上の『番号』欄に受験番号を左詰めで記入してください。余った欄にはゼロを記入してください。実際には 2021XYZ0000 のように、自分の受験番号の右横にゼロが 4 つ並ぶこととなります。
  - 各問題について、解答用紙の指定された解答欄に正しくマークしてください。正しくマークされていない場合は、事故答案となって採点できないことがあります。
  - 問題内容に関する質問は受け付けません。問題冊子に印刷の不鮮明なページや乱丁・落丁があったり、解答用紙に汚れなどがあった場合、質問がある場合は「5. 緊急個人連絡」の案内に従って、監督者に知らせてください。全員で共有する必要がある場合は、監督者から指示があります。個人の案件である場合は、個人にのみ指示があります。その際、別のブレイクアウトルームに移動していただく可能性もあります。
  - 問題冊子の余白をメモ用紙や計算用紙として利用して構いませんが、ページは切り離さずに使用してください。切り離すなど著しく改変が認められる場合は、不正行為として判断し、失格とします。
7. 試験終了後
  - 問題冊子は返却不要ですが、問題冊子の入っていた封筒は郵送で返却していただくこととなります。
  - 解答用紙に関する扱いを監督者から指示します。その指示に従って、速やかに正しく作業を完了させてください。

## The IBO Oath

国際生物学オリンピック（国際大会）では、開会式の際に、選手全員で以下の英文を読み上げ、宣誓します。

We, competitors of this International Biology Olympiad solemnly swear that we will answer the theoretical and practical competition questions in the most responsible way and we will compete honestly according to the principles of "Fair Play".

それに従い、この試験を受ける皆さんは、以下の文章を黙読し、心の中で宣誓を行ってください。

### 宣誓

我々は日本生物学オリンピック本選 2021 鶴岡大会 (山形) 理論試験において、フェアプレーの精神に則り、誠実かつ正々堂々と試験に臨むことを誓います。

## 次のページから 問題が始まります

試験時間は90分です。

この試験の問題数は17問で、解答欄の数は45個です。  
また、満点は103点です。

この試験では、同一の解答欄に複数の選択肢を  
マークする場合があります。

問題ごとの指示に従い、注意して解答してください。

# 第1問

(7点)

生命現象に関わる生体分子や薬物には鏡像異性体（エナンチオマー、対掌体、光学異性体ともいう）が存在するものがある。鏡像異性体とは互いに鏡像体（鏡に映った相手、あるいは右手と左手の関係）となる異性体で、D型・L型あるいはR型・S型と表記する。ある分子の立体構造が鏡像異性体となるかどうかは、異なる4種の原子もしくは原子団が結合した「不斉炭素」に起因する。生体分子や薬物を化学的に合成した場合、ラセミ体（鏡像異性体の混合物）として生成することが多いが、生体内では特定の鏡像異性体のみが生成している場合がある。また、鏡像異性体間での生理活性を比較した場合、特定の鏡像異性体の方が高い活性を示す場合がある。

## 問1

図1-1の(あ)-(う)に、様々な生体分子の構造式を示した。また、これら構造式中出现する炭素に番号をふってある(炭素の上、もしくは左上の数字)。これをもとに、(あ)-(う)の生体分子に含まれる「不斉炭素」の番号を全て選び、該当する番号を解答欄に全てマークしなさい。なお、「不斉炭素」がない場合は(0)をマークし、全てが「不斉炭素」の場合は(9)をマークしなさい。

(あ) グルコース 解答欄は

(い) グリシン 解答欄は

(う) イソロイシン 解答欄は

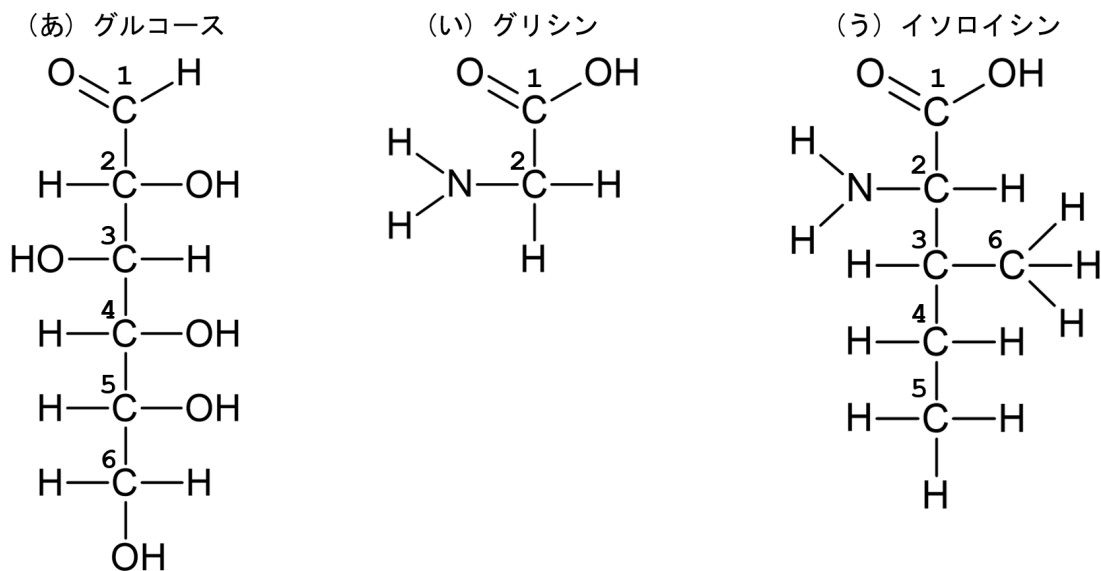


図 1-1. さまざまな生体分子の構造式

## 問2

鏡像異性体に関して、以下の(1)-(4)の記述の正誤を判定し、正しいと判断される選択肢の番号を解答欄に全てマークしなさい。なお、全ての記述が正しいと判断した場合は(9)だけをマークし、正しい記述が無いと判断した場合は(0)だけをマークしなさい。解答欄は

- (1) ラセミ体から特定の鏡像異性体を分離することはできない。
- (2) 天然の鏡像異性体を有する単糖類の大部分は、D型である。
- (3) タンパク質を構成する鏡像異性体を有するアミノ酸は、全てD型である。
- (4) 鏡像異性体間で生理活性が異なる理由は、化合物が標的タンパク質に結合する際に、それぞれが立体構造的に異なる配置で結合することに由来する。

### 問3

サリドマイドは1950年代に妊婦に対して吐き気防止薬や睡眠導入薬として使用されたが、胎児に対して深刻な形成異常誘発性（四肢の形成異常を誘導）を有することから使用が禁止された。その後、サリドマイドがハンセン病や多発性骨髄腫などの難病に有効であることが明らかとなり、現在は厳格な投薬規制を遵守した上での使用が認可されている。

サリドマイドにはR型・S型の鏡像異性体が存在し、1979年にS型のみ形成異常誘発性を有するという報告がされた。一方、生体内に投与したR型あるいはS型サリドマイドは速やかに立体構造変化を起こし、ラセミ体となることが知られており、なぜS型のみ形成異常誘発性を有するという結果が得られたのか矛盾があった（サリドマイドパラドックス）。最近の研究によると、サリドマイドはR型とS型が混在すると両者は結合して安定な二量体を形成し、二量体は溶解度が低下し、消化管あるいは血中から細胞内に吸収されにくくなるという結果が示された。また、別の研究では細胞内でサリドマイドが結合するタンパク質（セレブロン）が同定され、サリドマイドが結合したセレブロンはその機能が変化することにより形成異常誘発性が生じることも明らかとなった。さらにセレブロンタンパク質の立体構造解析の結果、R型・S型サリドマイドとの結合部位と結合様式の詳細も明らかとなった。

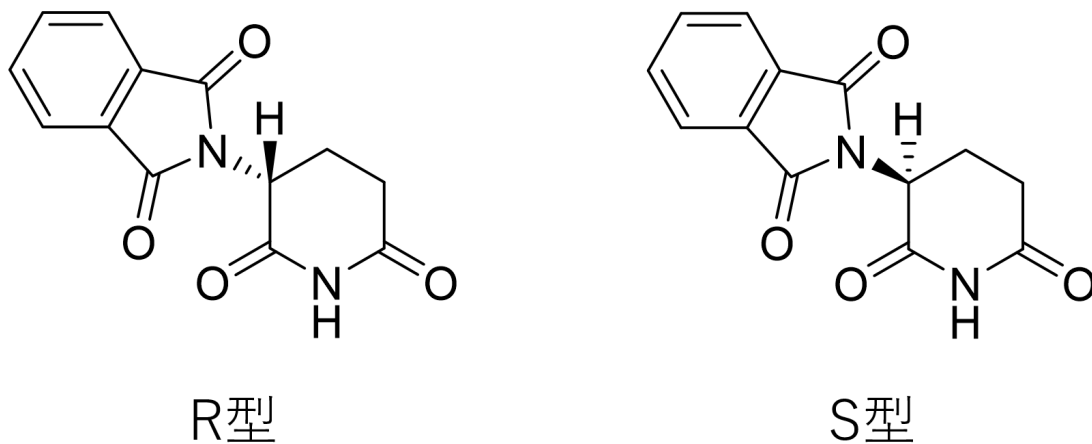


図 1-2. サリドマイドの構造式

これらの研究成果をもとに、サリドマイドパラドックス（なぜS型のみ形成異常誘発性を有するという結果が得られたのか？）を説明する下記の(1)–(5)の記述の正誤を判定し、正しいと判断される選択肢の番号を全て解答欄にマークしなさい。なお、全ての記述が正しいと判断した場合は(9)だけをマークし、正しい記述が無いと判断した場合は(0)だけをマークしなさい。解答欄は

- (1) 生体内ではS型サリドマイドの方がR型より化学的に安定である。
- (2) S型サリドマイドの方がR型よりセレブロンに強く結合する。
- (3) 生体内で投与されたR型サリドマイドは、全てS型に立体構造変化する。
- (4) R型サリドマイドを大量に投与した場合、立体構造変化により生じたS型は速やかにR型と結合し、吸収されにくくなる。
- (5) S型サリドマイドを大量に投与した場合、セレブロンの遺伝子配列に変化が生じる。

## 第2問

(8点)

染色体DNAの2本鎖を切断するX線が遺伝に及ぼす影響を調べる実験を行った。X線を照射したショウジョウバエの純系野生型の雄と、X染色体上に複数の劣性変異をホモに持つ純系の雌(図2-1)を、世代Iとして交配させた。生じた雌(世代II)の表現型はほとんどが野生型であったが、ごく少数の例外が見られた。

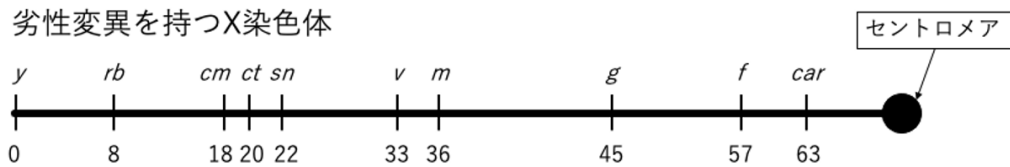


図2-1. 世代Iの雌のX染色体上の劣性変異の位置。図中  $y$ ,  $rb$ ,  $cm$  などは各劣性変異の遺伝子名を示し、劣性致死の変異はないものとする。

### 問1

世代IIの例外的な雌の1個体は  $ct$  と  $sn$  劣性変異の表現型を示していた。この雌を野生型の雄と交配させて得られた世代IIIの雌と雄の比率は2:1であった。このとき、世代IIIの雌と雄それぞれが取り得る全ての表現型の適切な記述を以下の(1)-(5)から全て選び、選択肢の番号を解答欄に全てマークしなさい。雌の解答欄は 、雄の解答欄は

- (1) 野生型である。
- (2)  $ct$  と  $sn$  の表現型を示す。
- (3)  $ct$  あるいは  $sn$  の表現型の個体が一部生じる。
- (4)  $ct$  と  $sn$  以外の変異の表現型を示す。
- (5)  $ct$  と  $sn$  以外の変異については、様々な組み合わせの表現型を示す。

### 問2

問1と同じ実験で、見かけは野生型の表現型を示す世代IIの雌のうち、1個体の染色体を調べたところ、図2-2Aのように1つのX染色体に逆位が見られた。この雌の生殖細胞の減数分裂では図2-2Bのように逆位領域がループした対合が見られた。これは相同染色体間の対合領域を最大化するために起こる現象である。

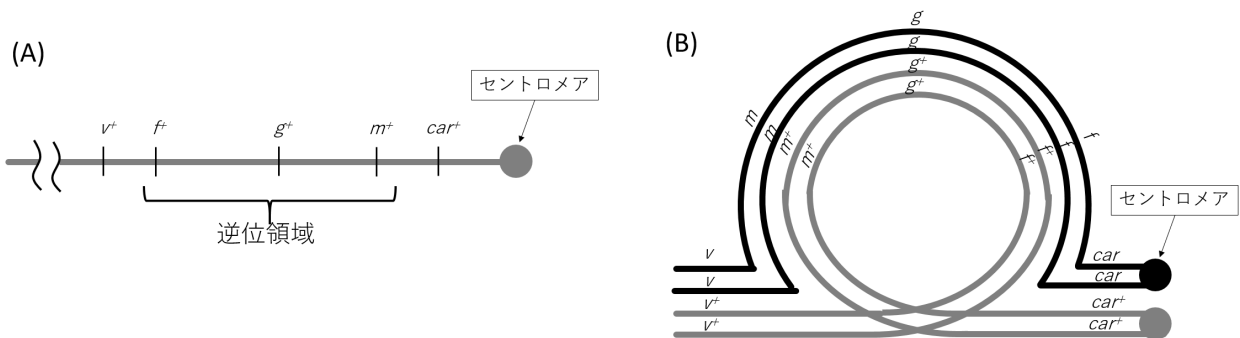


図2-2. (A) 世代II雌に見られる逆位を持つX染色体。  $v^+$ ,  $m^+$ ,  $g^+$ ,  $f^+$ ,  $car^+$  は、それぞれが野生型の遺伝子であることを示す。(B) 劣性変異を持つ染色体と逆位を持つ染色体が対合して作る逆位ループ(世代II雌の減数分裂の相同染色体間での対合で生じるループ構造)。(A)、(B)ともに、黒線は劣性変異を持つX染色体、灰色線は逆位を持つX染色体を表す。

減数分裂中に逆位領域内で1回だけ交差が起きた場合、この雌と野生型雄の交配で出現し得る世代IIIの雄の表現型を以下の(1)-(8)から全て選び、該当する番号を解答欄に全てマークしなさい。なお、全ての記述が正しいと判断した場合は(9)だけをマークし、正しい記述が無いと判断した場合は(0)だけをマークしなさい。解答欄は

- |   |   |   |                                       |
|---|---|---|---------------------------------------|
| (1) $v^+$ , $m^+$ , $g^+$ , $f^+$ , $car^+$ | (2) $v^+$ , $m^+$ , $g^+$ , $f^+$ , $car$ | (3) $v^+$ , $m^+$ , $g^+$ , $f$ , $car$ | (4) $v^+$ , $m^+$ , $g$ , $f$ , $car$ |
| (5) $v^+$ , $m$ , $g$ , $f$ , $car$         | (6) $v$ , $m$ , $g$ , $f$ , $car$         | (7) $v$ , $m^+$ , $g^+$ , $f^+$ , $car$ | (8) $v^+$ , $m$ , $g$ , $f$ , $car^+$ |



### 第3問

(7点)

枯草菌はゲノム配列が全て明らかなモデル生物であり、そのゲノムサイズは約 420 万塩基対である。この枯草菌のゲノムに対して、ある DNA 配列が新たに挿入されていることが判明した (以後、この挿入配列を IS と表記する)。IS の長さは 1,012 塩基対であり、その両端 15 塩基の配列と、制限酵素で切断される位置が明らかになっている (図 3-1)。しかし、IS が枯草菌ゲノムのどの位置に挿入されているのか、分かっていない。

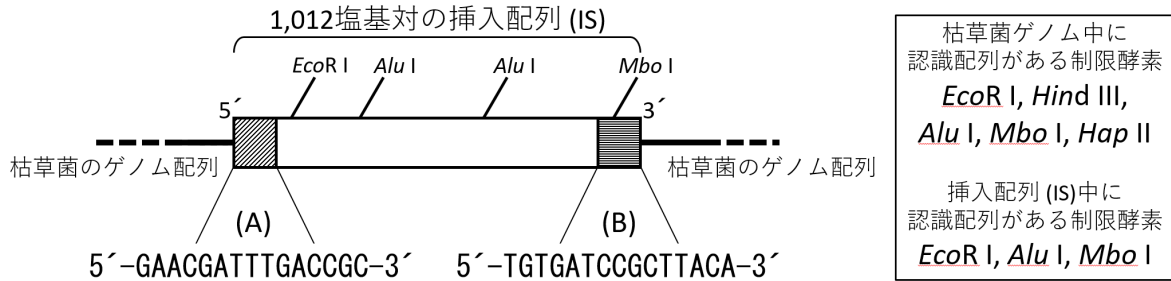


図 3-1. 枯草菌のゲノムに挿入された DNA 配列の模式図

IS の挿入位置を解明するために、以下の手順で実験を行うこととした。なお、この実験では、どこかの段階で PCR 装置を用いる。

- (あ) この配列が挿入されている枯草菌から、純度の高いゲノム DNA を精製する。
- (い) 図 3-1中の (A)(B) の領域をもとに、それぞれ 15 塩基の PCR プライマーを設計する。
- (う) (あ) で精製した DNA、(い) で設計した PCR プライマーと、研究室にある酵素のうち必要なものを用いて実験を行う。研究室にある酵素は表 3-1 の通りである。なお、これら全ての酵素は本問において十分な活性を持つ。
- (え) 上記の実験により最終的に PCR 増幅断片を確保し、その断片の DNA 配列をダイデオキシリボヌクレオチド連鎖終結塩基配列決定法で解読する。

表 3-1. 研究室にある酵素  
認識配列

(1) <i>Taq</i> ポリメラーゼ	(4) 制限酵素 <i>EcoR</i> I	5'-G A A T T C-3' 3'-C T T A A G-5'	(6) 制限酵素 <i>Alu</i> I	5'-A G C T-3' 3'-T C G A-5'
(2) DNA リガーゼ	(5) 制限酵素 <i>Hind</i> III	5'-A A G C T T-3' 3'-T T C G A A-5'	(7) 制限酵素 <i>Mbo</i> I	5'- G A T C-3' 3'-C T A G -5'
(3) 逆転写酵素			(8) 制限酵素 <i>Hap</i> II	5'-C C G G-3' 3'-G G C C-5'

PCR では標的 DNA 配列の鎖長に応じ、1,000 塩基対あたり 60 秒の割合で伸長反応の時間を調節する。今回用いる PCR 装置の伸長反応は 60 秒と設定されており、その条件で IS が増幅することが確認済みである。今回は、この設定のまま PCR 装置を用いることとした。なお、ここで用いるゲノム DNA、プライマー、酵素類は、すべて実験操作 1 回分の量しか用意されていない。このことを踏まえて以下の問いに答えなさい。

#### 問 1

この実験を行う際に使用する酵素を表 3-1 から全て選び出し、該当する番号を解答欄に全てマークしなさい。全ての酵素を使う場合は (9) を、どの酵素も使わない場合は (0) をマークしなさい。解答欄は

#### 問 2

手順 (い) において、(A) の領域をもとにデザインしたプライマーの 5 端から 8 塩基めまでに出現する G の位置を全て抜き出してマークしなさい。例えばプライマー配列が 5'-AGAGAGAGAG...-3' であれば、(2)、(4)、(6)、(8) をマークしなさい。ひとつも出現しない場合は (0) をマークしなさい。解答欄は

同様に、(B) の領域をもとにデザインしたプライマーの 5 端から 8 塩基めまでに出現する G の位置を全て抜き出してマークしなさい。ひとつも出現しない場合は (0) をマークしなさい。解答欄は

# 第4問

(8点)

嗅覚受容体タンパク質は、互いに塩基配列の似た数多くの遺伝子によってコードされており、自然界の多様な匂い（化学物質）の識別を可能にしている。この嗅覚受容体遺伝子は、数億年にわたる進化の過程で重複と消失を繰り返し、染色体上の様々な場所に散らばって存在している。この嗅覚受容体遺伝子に関して以下の問いに答えよ。

## 問1

ヒトゲノム中には長さ約 900 bp の嗅覚受容体遺伝子が 400 コピー程度存在している。ここで、ヒトゲノム DNA を制限酵素 *EcoR* I で処理することで、両端に *EcoR* I サイトを持つ様々な長さのゲノム断片に分解した。そのゲノム断片をアガロースゲル電気泳動し、それをメンブレンに移しとった。次に、嗅覚受容体遺伝子の約 20 個の断片をまとめて標識したプローブを、このメンブレン上にハイブリダイゼーションさせた。その場合、メンブレン上ではどのようなパターンのシグナルが検出されると予想できるか。図 4-1 に示すレーン 1~5 の中から 1 つ選び、該当する番号を解答欄にマークしなさい。なお、嗅覚受容体遺伝子配列に *EcoR* I サイトは含まれないとする。解答欄は

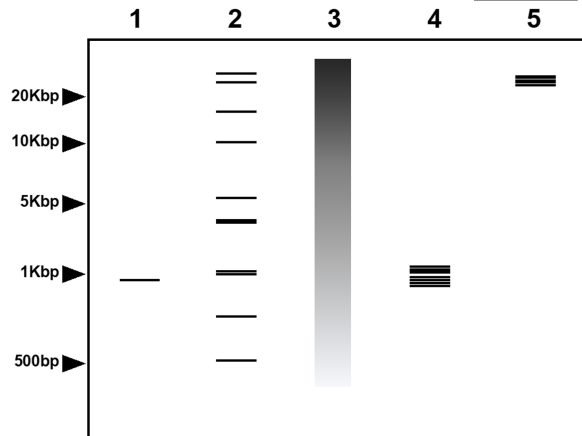


図 4-1. 嗅覚受容体遺伝子配列をプローブとしたゲノミックサザンハイブリダイゼーション（予想図）

## 問2

種 A、B、C が持つ嗅覚受容体遺伝子（それぞれ a, b, c と名付けた）は、種が分岐していく過程で遺伝子数の増減を繰り返す、現在ではそれぞれの種が 6、8、6 個の遺伝子を持つ（図 4-2A）。ここで、全ての嗅覚受容体遺伝子 a、b、c の系統樹を構築すると、図 4-2B に示す通りとなった。この時、種 A、B、C の系統樹（図 4-2A）の各枝上で嗅覚受容体遺伝子がどのように増減したのかを最節約的に考え、~に入る数値を埋めよ。ただし A、B、C の共通祖先では 8 個の嗅覚受容体遺伝子を持っていたとする。なお、の解答欄は 、の解答欄は 、の解答欄は 、の解答欄は 、の解答欄は 、の解答欄は 、の解答欄は 、の解答欄は  とし、それぞれに該当する数字をマークしなさい。

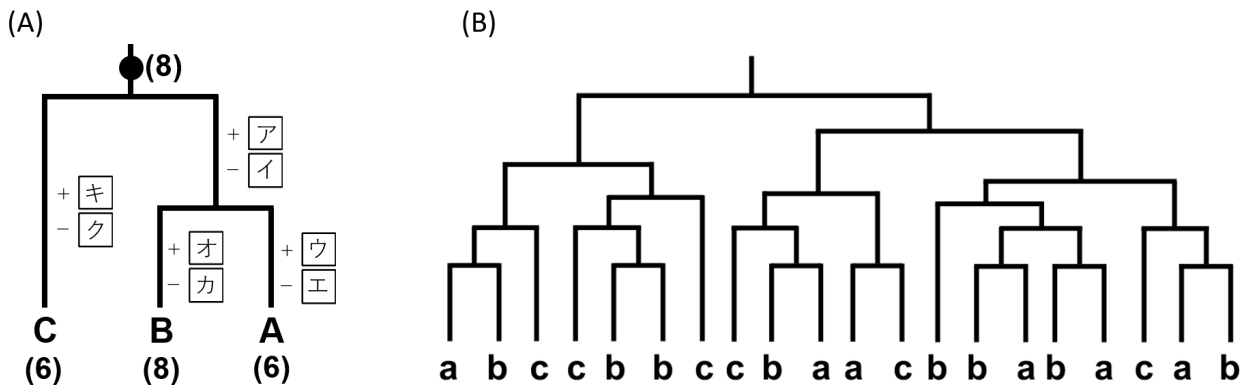


図 4-2. (A) 種 A、B、C の系統樹。 (B) 種 A、B、C がそれぞれもつ複数の嗅覚受容体遺伝子 a, b, c の系統樹。

## 第5問

(4点)

ほとんどの陸上植物は芽生えた場所から移動できない固着性生物であり、刻々と変化する周囲の環境を敏感に感じ取って生存している。その感覚を哺乳類と比較した場合、類似するものと大きく異なるものがある。これまでの植物生理学実験において、植物の環境認知能力として証明されている記述を以下の(1)-(5)から全て選び、選択肢の番号を解答欄に全てマークしなさい。なお、全ての記述が正しいと判断した場合は(9)だけをマークし、正しい記述が無いと判断した場合は(0)だけをマークしなさい。解答欄は

- (1) 視覚に相当する感覚が存在し、色を区別することができる。
- (2) 聴覚に相当する感覚が存在し、食植者が発する音を感知することができる。
- (3) 味覚に相当する感覚が存在し、栄養のある場所とない場所を区別することができる。
- (4) 嗅覚に相当する感覚が存在し、隣に生えている植物が発する匂いを感じることができる。
- (5) 触覚に相当する感覚が存在し、人が撫でたことを感知することができる。

## 第6問

(4点)

光が植物の形態形成に及ぼす影響を調べるために、アズキ胚軸の長さを比較する実験を行った。実験には 22 °C 恒温のインキュベーターと太陽光スペクトルを模した LED 照明 (16 時間・8 時間の明暗サイクルで制御) を用いた。また実験に用いたアズキは、同条件で発芽させた後に 2 日間育成させたものを用いた。さらに 4 日間、以下の被覆材を用いて育成させたアズキ胚軸の長さを比較した場合、得られる結果を以下の (12)-(34) から 1 つ選び、該当する番号を解答欄にマークしなさい。解答欄は 22 とし、解答が (12) なら (1)、(2) の両方の番号を同一解答欄にマークしなさい。

- a: 厚手の寒冷紗の下 (光強度 30% 減少) で育てた。
- b: 薄手の寒冷紗の下 (光強度 15% 減少) で育てた。
- c: エンドウマメのグリーンカーテンの下 (光強度 30% 減少) で育てた。
- d: アサガオのグリーンカーテンの下 (光強度 15% 減少) で育てた。

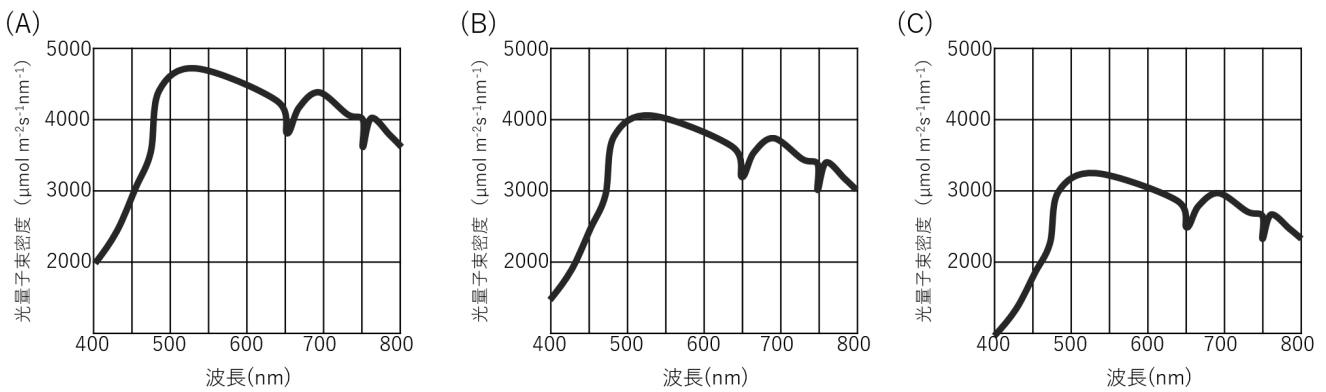


図 6-1. (A)LED 照明のスペクトル. (B) 薄手の寒冷紗を通した場合のスペクトル. (C) 厚手の寒冷紗を通した場合のスペクトル.

- |                    |                    |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| (12) a = b = c = d | (16) a > b > c > d | (23) a > c > b > d | (27) c = d > a = b |
| (13) a = b > c = d | (17) a = c > b = d | (24) c > a > d = b | (28) c = d > a > b |
| (14) a = b > c > d | (18) a = c > b > d | (25) c = a > d > b | (29) c > d > a = b |
| (15) a > b > c = d | (19) a > c > b = d | (26) c > a > d > b | (34) c > d > a > b |

## 第7問

(6点)

光合成の電子伝達反応では、水から引き抜かれた電子が光化学系II複合体(PSII)で光により励起され、シトクロム $b_6f$ 複合体(Cyt $b_6f$ )へと伝えられたのち、光化学系I複合体(PSI)で光により再度励起され、還元力を供給するNADPHの合成に用いられる。これらタンパク質複合体は、チラコイド膜で均一には分布しておらず、偏りのある分布をしている(図7-1)。そのため、各複合体間で電子を運ぶ担体が必要であり、PSII - Cyt $b_6f$ 間はキノンの一種であるプラストキノンが、Cyt $b_6f$  - PSI間は酸性タンパク質であるプラストシアニンが担っている。

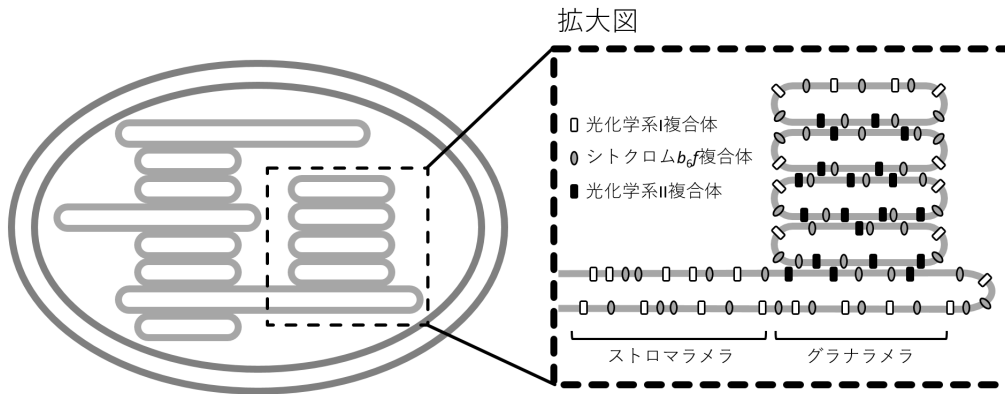


図 7-1. 葉緑体の模式図

### 問 1

各タンパク質複合体の分布を図から読み取り、その記述として最も適当な組み合わせを以下の(1)-(8)から選び、選択肢の番号を解答欄にマークしなさい。解答欄は

	PSI	Cyt $b_6f$	PSII
(1)	一様に分布	一様に分布	一様に分布
(2)	一様に分布	一様に分布	グラナラメラに多い
(3)	一様に分布	グラナラメラに多い	一様に分布
(4)	一様に分布	グラナラメラに多い	グラナラメラに多い
(5)	ストロマラメラに多い	一様に分布	一様に分布
(6)	ストロマラメラに多い	一様に分布	グラナラメラに多い
(7)	ストロマラメラに多い	グラナラメラに多い	一様に分布
(8)	ストロマラメラに多い	グラナラメラに多い	グラナラメラに多い

### 問 2

植物は、光条件によってPSIやPSIIの活性が変化するため、臨機応変にそれぞれの活性の比を調整する必要がある。そのしくみの一つにステート遷移がある。このしくみでは、プラストキノンの酸化・還元状態によって、光を捕集するアンテナタンパク質(LHC)のリン酸化状態が変化し、それによってLHCがPSIに付くのか、PSIIに付くのかを変化させる。ステート遷移の記述として、最も適当なものを以下の(1)-(8)から1つもしくは2つ選び、選択肢の番号を解答欄にマークしなさい。解答欄は

- (1) PSIの活性が低下し酸化型のプラストキノンが蓄積すると、LHCはPSIに結合する。
- (2) PSIの活性が低下し酸化型のプラストキノンが蓄積すると、LHCはPSIIに結合する。
- (3) PSIの活性が低下し還元型のプラストキノンが蓄積すると、LHCはPSIに結合する。
- (4) PSIの活性が低下し還元型のプラストキノンが蓄積すると、LHCはPSIIに結合する。
- (5) PSIIの活性が低下し酸化型のプラストキノンが蓄積すると、LHCはPSIに結合する。
- (6) PSIIの活性が低下し酸化型のプラストキノンが蓄積すると、LHCはPSIIに結合する。
- (7) PSIIの活性が低下し還元型のプラストキノンが蓄積すると、LHCはPSIに結合する。
- (8) PSIIの活性が低下し還元型のプラストキノンが蓄積すると、LHCはPSIIに結合する。

## 第8問

(6点)

間葉系幹細胞は多分化能をもっており、骨や軟骨などさまざまな細胞に分化できる。間葉系幹細胞は、培地に加える試薬の違いによって異なる細胞に分化するが、近年、細胞を培養する際の基板（土台のようなもの）の硬さによっても分化の方向が変わることが示された。ここで、間葉系幹細胞を硬さの違う二種類の基板上で分化させた。両者の培養条件は基板の硬さ以外すべて同じであるとする（図 8-1）。

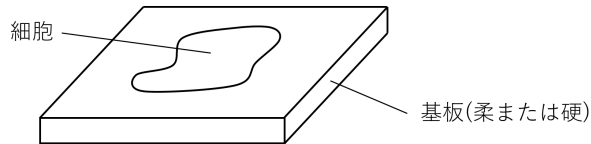


図 8-1. 培養の概略

- (あ) タンパク質 X は細胞外の刺激に応答してその信号を核内に伝える役割がある。細胞外の刺激が OFF のときタンパク質 X は細胞質に存在するが、刺激が加わるとタンパク質 X は核に移動し、標的遺伝子の発現を活性化する。二種類の基板上で培養した細胞におけるタンパク質 X の存在場所はそれぞれ図 8-2A のとおりであった。
- (い) 分化した骨芽細胞はアルカリフォスファターゼ (ALP) 検出試薬に反応し青く発色する。一方、分化した脂肪細胞はオイルレッド (ORO) という色素で赤く染色される。正常な間葉系幹細胞 (正常細胞)、タンパク質 X をコードする遺伝子を欠損した間葉系幹細胞 (欠損細胞) を用い、硬い基板、柔らかい基板上で分化させ、ALP、ORO でそれぞれ染色すると図 8-2B のような結果が得られた。

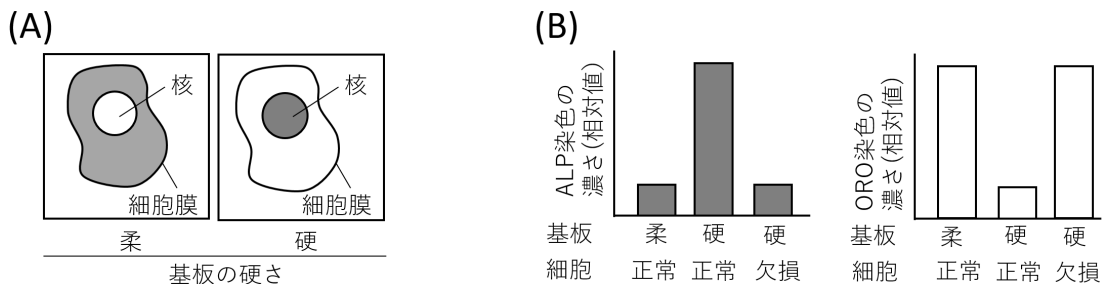


図 8-2. (A) それぞれの基板上で培養した細胞におけるタンパク質 X の存在場所 (グレーの塗り潰しで示す). (B)ALP、ORO 染色の結果.

以上のデータから導き出される仮説として、以下の (1)-(4) の記述が正しいかどうかを判定し、正しいと判断される選択肢の番号を全てマークしなさい。なお、全ての記述が正しいと判断した場合は (9) だけをマークし、正しい記述がないと判断した場合は (0) だけをマークしなさい。解答欄は

- (1) タンパク質 X が核に存在している時、正常細胞は脂肪細胞に分化しやすいと考えられる。
- (2) 細胞質に存在するタンパク質 X と核に存在するタンパク質 X は異なる遺伝子を制御すると考えられる。
- (3) 硬い基板上で培養された正常細胞は柔らかい基板上で培養するより脂肪細胞に分化しやすいと考えられる。
- (4) 欠損細胞を硬い基板上で培養すると、細胞は正常細胞に比べ、脂肪細胞に分化しやすいと考えられる。
- (5) 欠損細胞を柔らかい基板上で培養すると、細胞は正常細胞と同様、骨芽細胞に分化しやすいと考えられる。

## 第9問

(6点)

CRISPR/Cas9 法による遺伝子 A のノックアウトを試みた実験を想定する。図 9-1A に示すように、第一卵割前のネッタイツメガエル受精卵（1 細胞期）に遺伝子 A を標的とするガイド RNA と Cas9 タンパク質を微量注入し、オタマジャクシになるまで 14 日間飼育した。その後、オタマジャクシの尻尾の一部を採取してゲノム DNA を抽出し、ガイド RNA が結合する配列を含むようにゲノム DNA の一部の領域を PCR 法により増幅した。ガイド RNA が結合する配列は図 9-1B に示す塩基配列の下線部であり、四角で囲まれた部分は開始コドンを示す。なお、この図に示す配列にイントロンは含まれていない。受精卵に注入されたガイド RNA と Cas9 タンパク質は、発生が進む胚の中で図 9-1B の下線部やその近傍の DNA 配列を切断する。胚内の DNA 修復酵素は切断領域を修復するが、その際、切断領域付近の塩基配列が欠失したり、余分なヌクレオチドが挿入されたりして DNA 配列が変異することがある。この切断と修復は、塩基配列の変異の結果ガイド RNA が標的配列を認識できなくなるか、ガイド RNA や Cas9 が細胞内で完全に分解されるまで各細胞で独立して続く。従って、この実験で増幅した PCR 断片は図 9-1B の下線部近傍において多様な塩基配列をもつ。今、図 9-1A の手順に従い、次世代シーケンス解析により PCR 産物 9,000 分子の塩基配列を決定した結果、PCR 産物の塩基配列のパターンは表 9-1 の通りであった。以下に示す文章 (1)–(5) のうち、正しいと思われるものを全てを選べ。なお、ネッタイツメガエルは二倍体であり、Cas9 およびガイド RNA は注入後速やかに卵全体に拡散し、注入後 1 日以内に完全に分解されてそれ以降は新たな塩基配列変異は生じない。また、この実験において CRISPR/Cas9 による切断は図 9-1B の下線部以外では起こらないとする。

解答欄は

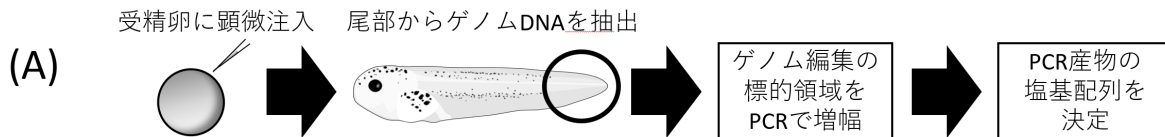


図 9-1. (A) 実験手順の流れ。 (B) CRISPR/Cas9 によるゲノム編集の標的配列。

表 9-1. PCR 産物の塩基配列（一部抜粋）

編集された領域の塩基配列	分子数	割合	欠損	挿入
GATTCGTA <u>AA</u> GGGCTGGACACCCAGG	1,800	20	0	3
GATTCGT--GCTGGAC--CCAGG	3,600	40	4	0
GATTCGTGGGCTGGAC <u>G</u> ACCCAGG	2,520	28	0	1
GATTCG-GGGCTG <u>CCG</u> ACGTACCCAGG	900	10	1	4
GATTCGTGGGCTGGACACCCAGG	180	2	0	0

- 表 9-1 の結果から判断すると、採取した尻尾に含まれるゲノム DNA のうち、図 9-1B に示している遺伝子 A の下線部以降にフレームシフト変異が生じている割合は 68% と考えられる。
- 尻尾の他に胴部の皮膚組織からゲノム DNA を採取して同様の実験を行っても、表 9-1 とはほぼ同じ結果となると予想される。
- サンプル採取後、実験に用いたオタマジャクシの飼育を変態直前まで継続し、再度尻尾から DNA を採取して同様の実験を行った場合、表 9-1 に示した結果とは大きく異なることが予想される。
- 別個体で上記の実験を行っても、表 9-1 に示された結果はほとんど変わらないと予想される。
- 表 9-1 に示された結果と全く同じ変異が生じたオスとメスを掛け合わせた場合、相同染色体の両方で遺伝子 A にフレームシフトが生じた細胞のみからなる個体が生じる可能性がある。

# 第10問

(5点)

哺乳類の血液循環は、右心室から肺を巡って左心房に流れ込む肺循環と、左心室から全身を巡って右心房に流れ込む体循環の二重循環となっている。いずれも心臓から送りだされた血液は大動脈から動脈細枝に分岐してひとつの器官の毛細血管床に達し、再合流して静脈となって心臓に戻る(図10-1A)。哺乳類の循環系では数カ所でこの原則が破られている。そこでは、ある器官で毛細血管床となった血管が、静脈に似た構造の血管に再合流した後、直接心臓には戻らず、再び毛細血管床を形成して別の器官に分布する(図10-1B)。ふたつの器官を結ぶ静脈に似た血管を門脈と呼ぶ。哺乳類が有する門脈のひとつは肝臓に見られる(図10-2)。ヒトでは、全身の血液量が約5L、うち体循環が約4.5L、肺循環が約0.5Lである。

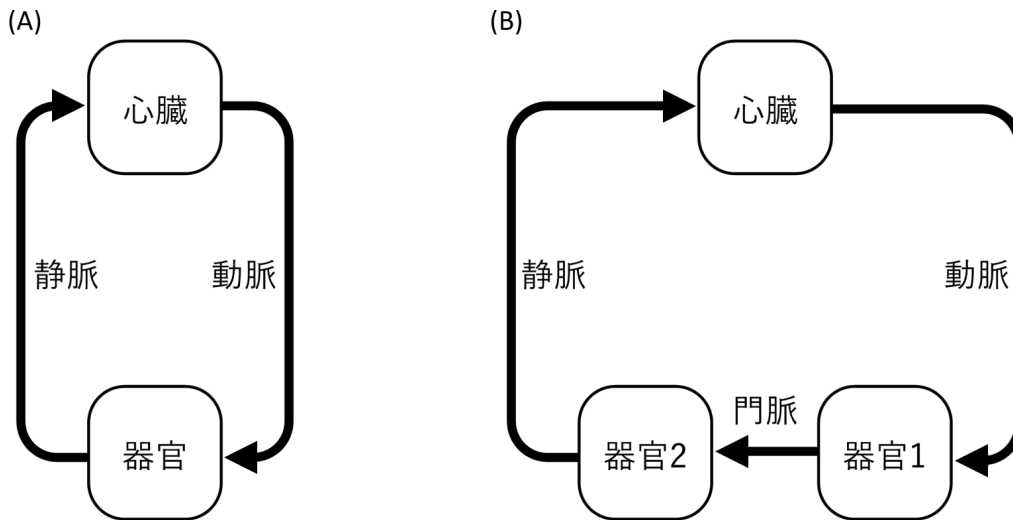


図 10-1. 哺乳類の血液循環

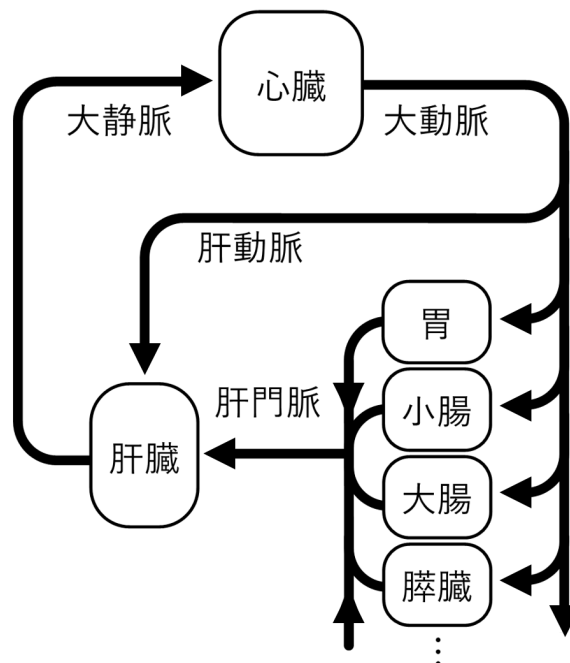


図 10-2. 血液の循環と肝門脈



### 問 1

哺乳類の体内で他に門脈が見られるのはどこか、以下の (1)-(5) からひとつだけ選び、選択肢の番号を解答欄にマークしなさい。解答欄は

- (1) 胸腺
- (2) 骨髄
- (3) 心臓 (冠動脈)
- (4) 肺
- (5) 脳

### 問 2

問 1 で解答した器官に見られる門脈が、個体にとって何らかの利得があるために進化的に選択され獲得された形質であるとするなら、この門脈の獲得が個体にもたらした利得は何だっただろうか。以下の (1)-(4) から最も適切な記述を 1 つ選び、選択肢の番号を解答欄にマークしなさい。解答欄は

- (1) 門脈の直後にある器官は、門脈の上流の器官が血中に分泌した有害物質を、全身に循環する以前に捕捉して解毒することができる。
- (2) 門脈の直後にある器官は、門脈の上流の器官から分泌されたホルモンを、直ちに高濃度で受け取ることができる。
- (3) 門脈の直後にある器官は、門脈から流入した血液の成分などを感知し、門脈の上流の器官では不十分だった代謝を補うことができる。
- (4) 門脈の直前にある器官から移動を開始した細胞が、最初に間違いなく門脈の直後にある器官に到達できる。

### 問 3

肝臓には、大動脈の枝である肝動脈から直に肝臓に達する酸素に富んだ通常の動脈血の他に、肝門脈と呼ばれる門脈から血液が流入する (図 10-2)。肝門脈から流入する血液は、胃、小腸、大腸、膵臓、脾臓といった (肝臓を除く) 腹部の消化器官に毛細血管床となって分布し、その後合流したものである。これら腹部消化器官の毛細血管床の血液は、すべて肝門脈に合流し、直接心臓へと帰る循環経路はない。ヒトでは、肝臓の血液量は約 0.45L、血流量は肝動脈、門脈合わせて約 1.35L/分である。

グルコースホメオスタシスを維持する上で主要な役割を果たすインスリン、グルカゴンのうち、インスリンは膵臓内のランゲルハンス島と呼ばれる細胞塊に含まれる  $\beta$  細胞から分泌される。分泌されたインスリンは、膵臓の静脈を経て肝門脈から肝臓へと流れ込む。

$\beta$  細胞は、周囲の毛細血管内の血液中のグルコース濃度 (血糖値) を感知して、状況に応じてインスリンを分泌し、全身のグルコースホメオスタシスの維持に寄与している。分泌されたインスリンは、肝臓、筋肉、脂肪組織などを刺激し、糖質のグリコーゲンとしての貯蔵を促進するなどして、血液中のグルコース濃度の低下をもたらす。分泌されたインスリンはそのほとんどが肝臓で分解され、ヒトでは、分泌後 70 分程度でほぼ完全に分解される。

$\beta$  細胞が感知している血糖値に最も近い血糖値を呈する血液が流れていると考えられる血管はどれか。以下の (1)-(5) から適切なものを 2 つ選び、選択肢の番号を解答欄に 2 箇所マークしなさい。解答欄は

- (1) 肝動脈
- (2) 肝臓の毛細血管床
- (3) 肝門脈
- (4) 腎静脈
- (5) 大動脈

## 第11問

(4点)

代表的な生活習慣病のひとつである糖尿病は、何らかの原因でグルコースホメオスタシスを正常に維持することができなくなり、高血糖の状態がつづくことによって全身の様々な器官に不可逆の障害が起こる疾患である。その原因のひとつに、 $\beta$ 細胞の機能低下により、血糖値が上昇してもインスリンが十分に分泌されない状態がある。こうした状態の患者に、血糖値が上昇していると考えられる食後にインスリンを皮下注射して血糖値を下げる治療法がある。皮下注射は、注射針で上皮組織を貫通し、その内側にある結合組織に薬剤を注入する手技である。結合組織に注入された薬剤は、周囲の毛細血管床に徐々に吸収され、やがて大静脈に合流して、肺循環を経た後に心臓から全身に送りだされる。結合組織から毛細血管床への薬剤の移行が緩やかであるため、血管に直接薬剤を注入する静脈注射などと比較して、薬剤の血中濃度の急激な上昇が起こりにくい。

### 問1

ここで、 $\beta$ 細胞が分泌するインスリンと、注射薬のインスリンの分子機能が同じであるとする。食後の糖尿病患者にインスリンを皮下注射し、 $\beta$ 細胞から生理的に分泌されるインスリンと同じ量が、同じ時間経過とともに皮下組織から近傍の毛細血管中に流入したとする（本問の仮定は実際の治療での薬物動態等とは異なる）。このとき、 $\beta$ 細胞が分泌する生理的インスリンに対する身体の反応と、今回皮下注射したインスリンに対する身体の反応との間に見られる差違として考えられるのはどれか。以下の(1)-(4)から最も適切と考えられる記述を1つ選び、選択肢の番号を解答欄にマークしなさい。解答欄は

30

- (1) 皮下注射したインスリンは、注射した部位の周辺の筋肉、脂肪でその多くが消費されてしまい、肝臓や離れた筋肉、脂肪に到達する量は限られている。
- (2) 皮下注射したインスリンは、心臓、肺、大動脈などを経た後から肝臓や筋肉などの標的組織に達するため、注射した量に比べ効果が減少する。
- (3) 皮下注射したインスリンは、全身の筋肉に対しては $\beta$ 細胞由来のインスリンとおおむね同等あるいはそれ以上の効果を発揮する一方、肝臓への効果が減少する。
- (4) 皮下注射したインスリンは、肝臓に対しては $\beta$ 細胞由来のインスリンとおおむね同等あるいはそれ以上の効果を発揮する一方、筋肉への効果が減少する。

### 問2

もし、哺乳類の血液循環に肝門脈が存在せず、肝臓を含む腹部の消化器官が通常の循環経路に接続され、毛細血管床を経て集合した血液が静脈を経て直接右心房へと流れ込む構造になっていた場合にどんなことが起こると考えられるか。以下の(1)-(4)から適切なものを2つ選び、選択肢の番号を解答欄に2箇所マークしなさい。解答欄は

31

- (1) より多くの酸素に富んだ血液が肝臓に供給されるため、肝機能全般の効率が向上する。
- (2) 肝臓とその他の消化器官の血液循環が独立することにより、腹部の消化器官の血流量が増加し、その分、脳など他器官への血流量が減少する。
- (3) 消化管で吸収された栄養素がほぼそのまま全身に供給されるため、グルコースをはじめとする血中の栄養素の濃度の日内変動が大きくなる。
- (4) 消化管で吸収された有害物質がほぼそのまま全身に供給されるため、有害な影響を受ける器官がより大きな危険にさらされる。

# 第12問

(6点)

生物が持つ毒のうち、神経毒と呼ばれるものは、神経細胞の活動電位の発生・伝導、あるいはシナプス伝達に異常を引き起こす。新種のクモ、カイ(貝)、ヘビ、ハチが持つ毒の性質を調べるために、以下の実験を行なった。

カエルの腓腹筋(ふくらはぎの筋肉)を、支配する坐骨神経を付けたまま摘出し、リンゲル液を満たした刺激用シャーレに入れた。刺激用シャーレは2つに区切られていて、坐骨神経線維のみがあるAと坐骨神経-腓腹筋の神経筋接合部があるBの間で物質の行き来はないものとする(図12-1)。

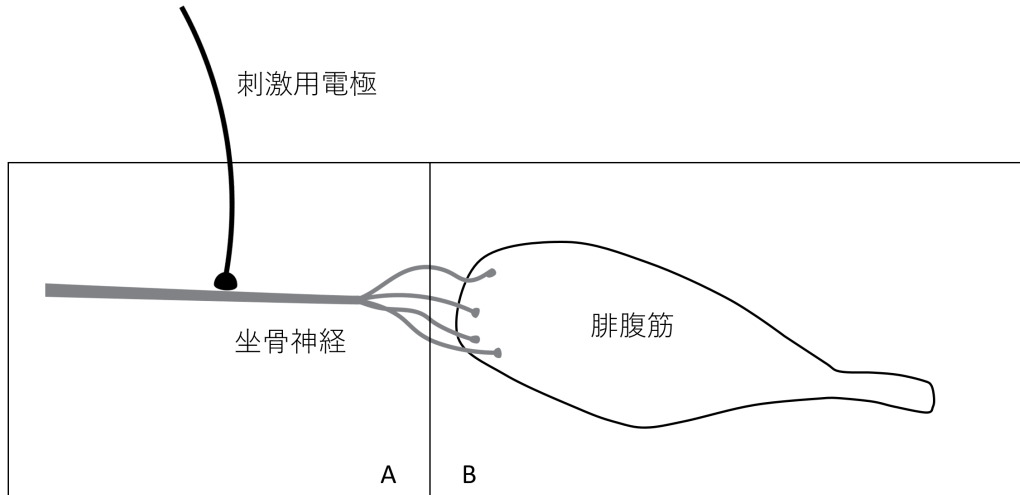


図 12-1. カエル坐骨神経-腓腹筋標本

坐骨神経を電気刺激しながらクモ毒、カイ毒、ヘビ毒、ハチ毒(いずれも水溶性)をAあるいはBに加え、腓腹筋の収縮・弛緩を観察した結果を表12-1に示す。

表 12-1. 未知の生物毒存在下での坐骨神経刺激時の腓腹筋の反応

	クモ毒	カイ毒	ヘビ毒	ハチ毒
A	単収縮	弛緩	収縮が続く	単収縮
B	収縮が続く	弛緩	収縮が続く	単収縮

この結果を基に、それぞれの毒の性質について可能な組み合わせを以下の(1)-(8)から全て選び、該当する番号を解答欄に全てマークしなさい。なお、全ての記述が正しいと判断した場合は(9)だけをマークし、正しい記述がないと判断した場合は(0)だけをマークしなさい。解答欄は

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
クモ毒	a	a	a	a	b	b	c	c
カイ毒	d	d	e	e	d	e	d	e
ヘビ毒	e	c	c	d	c	c	e	d
ハチ毒	f	f	f	f	f	f	f	f

- a: 電位依存性カルシウムチャンネル不活化阻害
- b: アセチルコリン分解酵素阻害
- c: 電位依存性カリウムチャンネル阻害
- d: 電位依存性ナトリウムチャンネル阻害
- e: 電位依存性ナトリウムチャンネル不活化阻害
- f: 非神経毒(ホスホリパーゼ・ポリペプチド混合)

## 第13問

(5点)

ある神経細胞から別の神経細胞への情報伝達はシナプスと呼ばれる場所で行われる。シナプス前細胞から放出される様々な神経伝達物質は、シナプス後膜上の受容体に結合し、シナプス後細胞に興奮性あるいは抑制性シナプス後電位を生じさせる。通常、グルタミン酸やアセチルコリンは興奮性、 $\gamma$ -アミノ酪酸 (GABA) は抑制性神経伝達物質として作用する。ドーパミンはシナプス後膜上に1型ドーパミン受容体が発現している場合には興奮性、2型ドーパミン受容体が発現している場合には抑制性神経伝達物質として作用することが知られている。神経伝達物質がシナプス後細胞にどのような影響を与えるかを調べる生物学実験においては、実際の神経伝達物質の代わりに、受容体と結合して神経伝達物質と同様に作用するアゴニスト、あるいは作用を減弱するアンタゴニストと呼ばれる物質を用いることが多い。

中枢神経系を構成する脳では、ある領域の同じ神経伝達物質を放出する神経細胞の多くが別の特定の領域の神経細胞とシナプスを形成していることがある。ラットの脳標本を用いた実験で以下のことがわかった。

- 領域 A の神経細胞が領域 B の神経細胞とシナプスを形成している。同様に領域 B 及び D は P と、領域 C は B 及び D とシナプスを形成している (図 13-1)。
- それぞれの領域の神経細胞が放出する神経伝達物質及び発現している受容体は表 13-1の通りである。

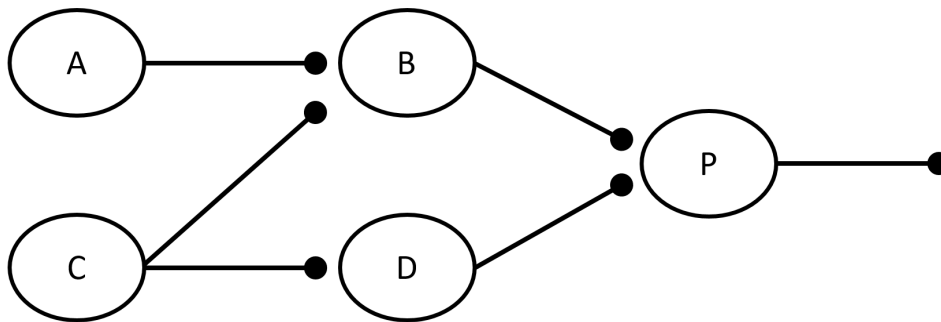


図 13-1. ラット脳各領域の神経回路模式図。●は軸索終末 (シナプス前膜) を表す。

表 13-1. ラット脳各領域が放出する神経伝達物質

領域	A	B	C	D	P
神経伝達物質	グルタミン酸	GABA	ドーパミン	グルタミン酸	グルタミン酸
受容体	グルタミン酸受容体	1型ドーパミン受容体 グルタミン酸受容体	GABA受容体	2型ドーパミン受容体	GABA受容体 グルタミン酸受容体

各神経伝達物質のアゴニスト、アンタゴニストをそれぞれの領域に投与した場合、投与前に比べ領域 P の神経細胞が興奮しているものを以下の (1)-(8) から全て選び、選択肢の番号を解答欄に全てマークしなさい。なお、(1)-(8) の全てが該当する場合は (0) をマークし、(1)-(8) のいずれも P を興奮させない場合は (9) をマークしなさい。ただし、図 13-1 に示す以外のシナプス結合はないものとする。また全ての領域の神経細胞は自発的な活動がある (神経伝達物質がなくても一定の活性がある) ものとする。解答欄は

- (1) A にグルタミン酸受容体アゴニストを投与
- (2) B にグルタミン酸受容体アゴニストを投与
- (3) B に GABA受容体アゴニストを投与
- (4) B にドーパミン受容体アゴニストを投与
- (5) C にドーパミン受容体アンタゴニストを投与
- (6) D にグルタミン酸受容体アンタゴニストを投与
- (7) D にドーパミン受容体アゴニストを投与
- (8) D にドーパミン受容体アンタゴニストを投与

## 第14問

(6点)

サンゴは熱帯や亜熱帯の海域に多く見られる動物である。しかし、山形県酒田市（試験会場の鶴岡市の隣）の沖に位置する飛島周辺にはオノミチキサンゴやムツサンゴなどが生息し、サンゴ類の北限として重要な地域である。

### 問1

次の(1)-(5)の動物の中からサンゴと最も近い類縁関係にある分類群を1つ選び、選択肢の番号を解答欄にマークしなさい。解答欄は

- (1) フジツボ (2) ヒドラ (3) クシクラゲ (4) ホヤ (5) カイメン

### 問2

前問で選んだ分類群とサンゴに共通して見られる特徴として正しいものを次の(1)-(5)の中から1つ選び、選択肢の番号を解答欄にマークしなさい。解答欄は

- (1) トロコフォア幼生 (2) プルテウス幼生 (3) えり細胞 (4) 刺細胞 (5) 外とう膜

### 問3

サンゴの消化管の構造として正しいものを図14-1の(1)-(5)の中から1つ選び、選択肢の番号を解答欄にマークしなさい。なお、外骨格は省略されている。解答欄は

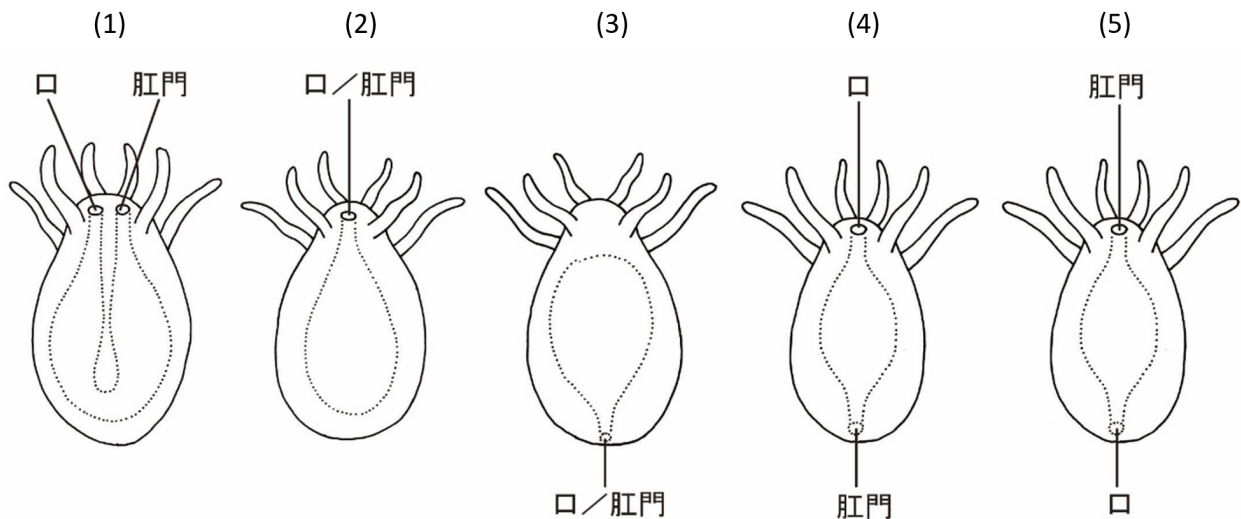


図 14-1. サンゴにおける消化管の構造

# 第15問

(5点)

山形県の淡水域には、トミヨ属山形型、ハナカジカ山形型、ホトケドジョウ山形型など県内もしくは東北地方日本海側の水系に固有の魚類が多く知られている。ある魚類（種ア～種カ）について、【形質 a】～【形質 j】をまとめると表 15-1 のようになった。0 はその形質が欠損していること、1 は存在することを示す。表に示された【形質 a】～【形質 j】に基づいて推定される種ア～種カの系統樹として適切なものを図 15-1 の (1)～(8) の中から 1 つ選び、選択枝の番号を解答欄にマークしなさい。ただし、それぞれの形質をもつようになる進化は 1 度だけ生じたものとする。解答欄は

表 15-1. 種ア～種カの特徴

		形質									
		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
種	ア	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	イ	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0
	ウ	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1
	エ	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0
	オ	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1
	カ	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1

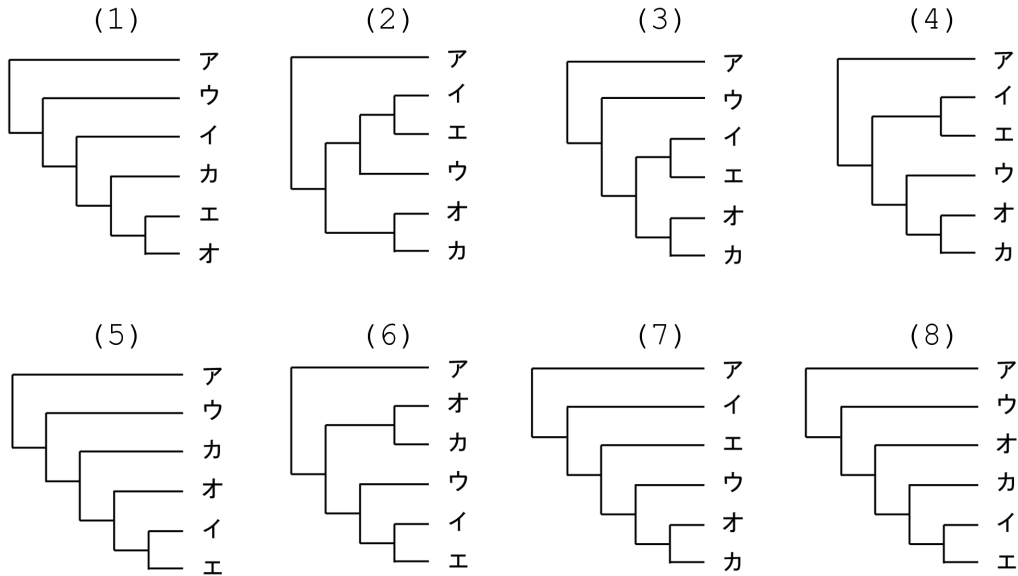


図 15-1. 種ア～種カの系統樹

# 第16問

(8点)

生物の個体数は、一般に生息密度に応じて増減することが知られている。図16-1の(1)~(5)は、時点 $t$ での個体数密度( $N_t$ )に対する次の時点 $t+1$ での個体数密度( $N_{t+1}$ )の関係を表している。下記の(あ)~(え)に該当する生物種は、図16-1の(1)~(5)のどれに該当すると考えられるか、(1)~(5)の中から1つずつ選び、該当する番号を解答欄にマークしなさい。同じ選択肢を何度用いても良い。ただし、図16-1中の実線は実際に生じる関係、破線は密度に変化がない場合の仮想的な関係を表す。

- (あ) 密度効果が最も弱い種 解答欄は
- (い) 絶滅のリスクが最も高い種 解答欄は
- (う) 環境収容力の周りで個体数変動が最も激しい種 解答欄は
- (え) 新たな環境への侵入後の個体数増加が最も大きい種 解答欄は

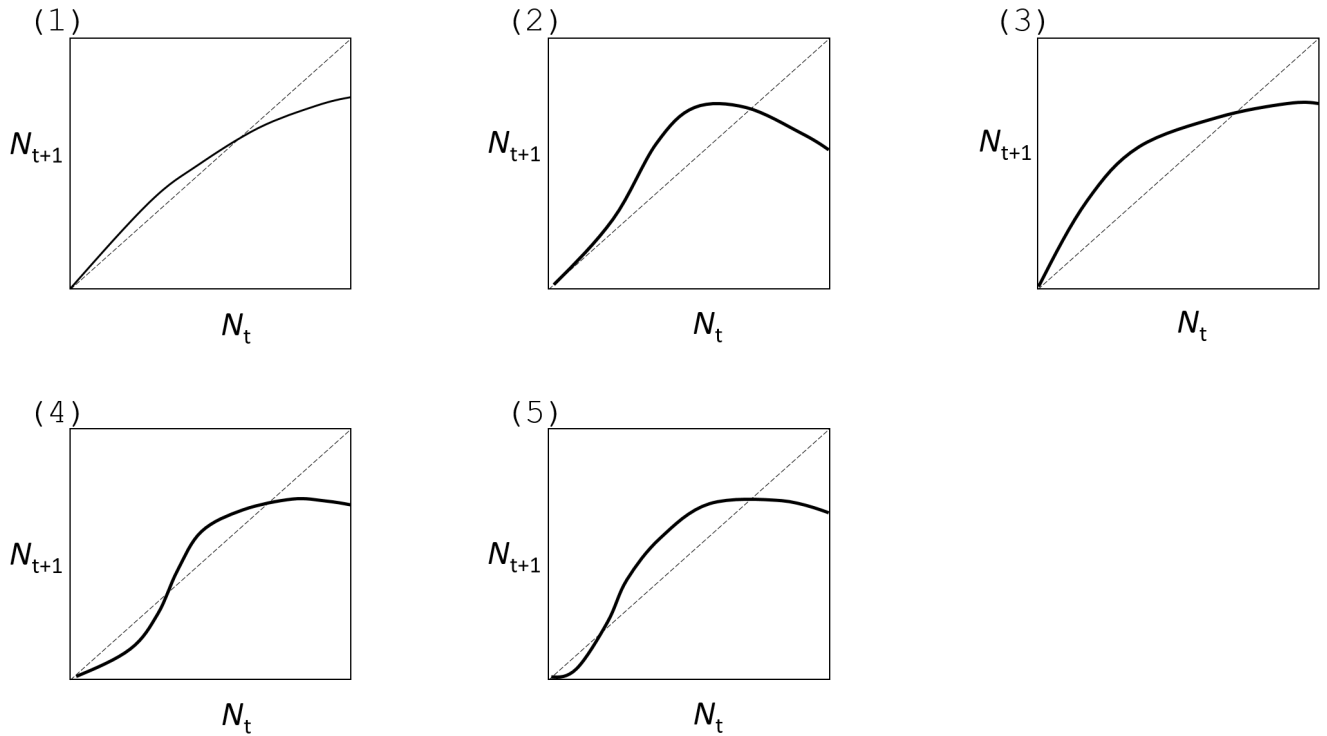


図16-1. 連続する2時点における個体数密度の関係

# 第17問

(8点)

自然界の生物群集は互いに様々な関係をもちながら暮らしている。直接的な捕食-被食の関係だけでなく、間接的な種間関係も普遍的にみられる。間接効果は、3種以上の生物が、2つ以上の種間のつながり(リンク)を経ることで生じる。

以下の(あ)~(え)の記述は、3種の生物(又は病原体)の間で見られる間接効果であり、間接効果を与える種と受ける種を下線で示している。これらの記述は、図17-1の(1)~(5)のいずれかの種間関係から生じている。(あ)~(え)に該当する種間関係を(1)~(5)の中からひとつずつ選び、該当する番号を解答欄にマークしなさい。同じ選択肢を何度用いても良い。ただし、図中の丸は生物(または病原体)の種を表し、網掛けの丸は間接的関係にある種のペアを示している。また、物質やエネルギーの流れは矢印の実線、場所をめぐる干渉的關係は実線のみで示している。

(あ) 岩礁からのヒトデの除去は、イガイを増やし、カサガイを減らした。 解答欄は

(い) ラッコの減少によりウニが増えて、コンブの群落が増えた。 解答欄は

(う) 春に水田から羽化するユスリカがクモの数を増やし、夏に出現するイネの害虫を減らした。 解答欄は

(え) ウサギ出血病をもたらすウイルスの流行によりアナウサギが減少し、オオヤマネコが減少した。 解答欄は

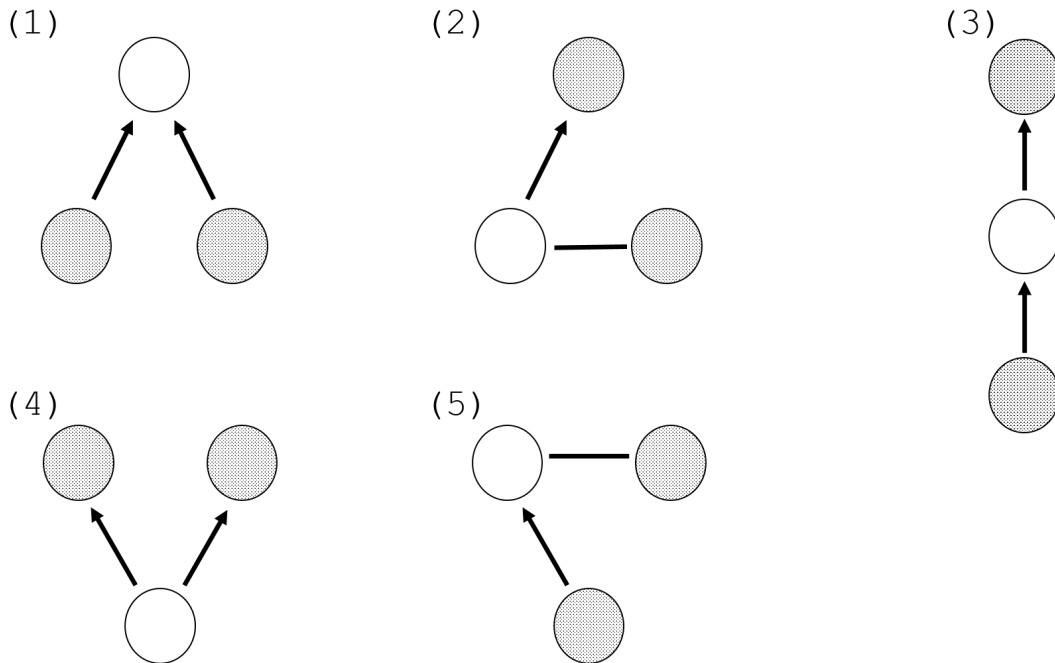


図 17-1. 3種の生物の種間関係



これで問題は終了です