

2016 年度 北海道大学 前期 生物

1 顕微鏡と細胞の構造, GFP

出題範囲	細胞小器官, バイオテクノロジー, 顕微鏡の操作, 細胞骨格
難易度	★★★★☆
所要時間	14 分
傾向と対策	2016 年の第 1 問は細胞に関する問題が多く出題され, バイオテクノロジーの分野からも出題された。どれも基本的な問題が多く, 教科書をしっかり読んで正確な知識を身につけることが重要だと考えられる。教科書には書いてあるが, 忘れがちなところを聞いてくる問題もいくつかあるので, 細かいところまで注意して勉強する必要があるだろう。逆にいえば, 教科書を完璧にしてしまえば高得点を取れる問題構成であるので, 間違いが多かった場合は教科書をしっかりと復習しておこう。

解答

- 問 1 (ア)細胞壁 (イ)緑色蛍光タンパク質 (GFP)
- 問 2 (B)
- 問 3 (A)誤: 一重の生体膜で囲まれた → 正: 膜構造をもたない
(B)誤: 中間径フィラメント → 正: 微小管
- 問 4 トランスジェニック生物
- 問 5 葉緑体
- 問 6 5.6μm
- 問 7 12mm/時
- 問 8 (ウ)(E) (エ)(C) (オ)(G)

解説

問 1 難易度: ★★★★★

(ア)には細胞壁が入る。ロバート・フックは, 自作の顕微鏡でコルクの薄片を観察したところ, 壁で区切られている多数の小さな部屋のような構造を発見し, これを細胞と名付けた。コルクはコルクガシというカシの仲間の樹皮を乾燥させたものであり, すべての細胞が死んでいる。そのため, 細胞小器官などは分解や乾燥によって見るができないが, 細胞壁だけは残る。よって, 厳密にはフックが見たものはこの細胞壁である。

(イ)には蛍光緑色タンパク質 (GFP) が入る。オワンクラゲは日本各地の沿岸でみられるクラゲの仲間であり, 刺激を受けると生殖腺が緑色に光る。1960 年に下村脩がその蛍光を引き起こす蛍光緑色タンパク質 (GFP) を発見・単離精製し, その功績によって下村は 2008 年にノーベル化学賞を受賞した。

GFP は現在、遺伝子の解析に欠かせないものとなっている。調べたい遺伝子の下流に GFP を合成する遺伝子を組み込むことで、調べたい遺伝子によって合成されたタンパク質が GFP をその一部としてもつようになり、蛍光の有無によってそのタンパク質が細胞や体内のどこで機能しているのかを調べることができる。

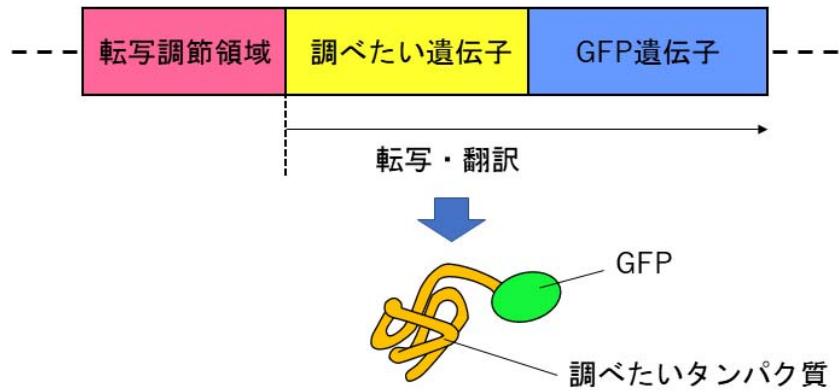


図 A GFP による遺伝子解析

以上より、解答は、(ア)細胞壁、(イ)緑色蛍光タンパク質 (GFP) である。

問 2 難易度：★★★★☆

ヒトの眼および、光学顕微鏡と電子顕微鏡の分解能を答える問題である。分解能とは、問題文に書いてあり、識別できる 2 点間の最小距離である。次の図のように、2 点間の距離が分解能より短いと、2 つの点が重なって見えてしまう。また、識別できる 2 点間の距離が短いほど分解能は高いといえる。

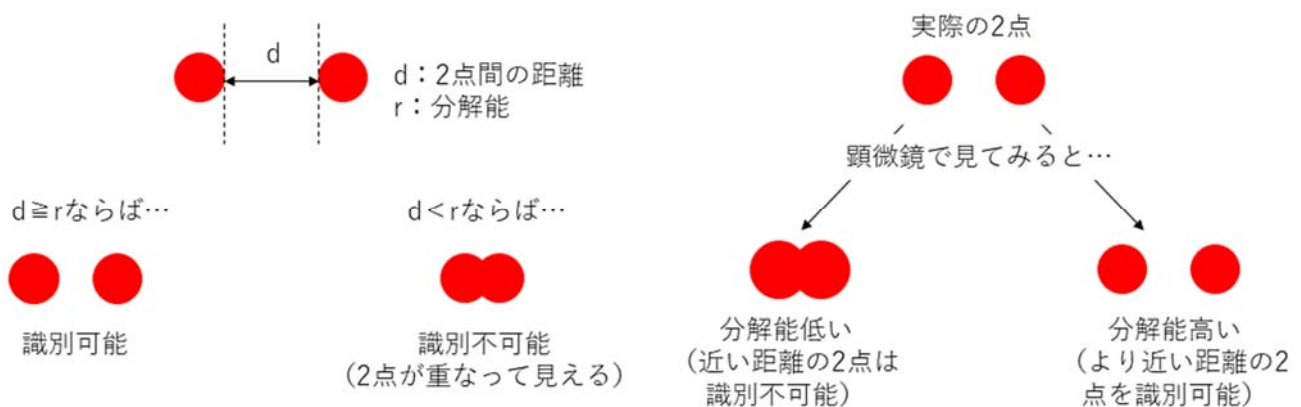


図 B 2 点間の距離と分解能

ヒトの眼、光学顕微鏡、電子顕微鏡の分解能はそれぞれ、0.1mm、0.2μm（マイクロメートル）、0.1nm（ナノメートル）である。

よって、解答は(B)である。

知識がないとすべてを正確に判断するのは難しいかもしれないが、この問題では、肉眼の分解能からある程度解答を絞ることができる。ヒトの目の分解能が 10mm や 1mm であつたら、1mm 間隔でものさしを読むのは難しいだろう。よって、(C)と(D)は除外される。また、皆さんが使っているシャープペンの芯の太さが 0.5mm 程度であることを考えると、(A)の 0.01mm はさすがに小さすぎるような気がしないだろうか。したがって、(B)が正しいのではないかと推測することができる。顕微鏡の分解能などの細かい知識はなかなか覚えていないものであるが、知らないことを問われたからといってパニックに陥るのではなく、日常の感覚などを使って正解に近づくことができる場合もあるので冷静に考えよう。ちなみに、 μm は mm の $\frac{1}{1000}$ の単位であるので 10^{-6}m 、 nm は μm の $\frac{1}{1000}$ の単位であるので 10^{-9}m である。

問 3 難易度：★★★★☆

与えられた文章中の間違いを指摘する問題。文章を区切って正誤を確認していこう。

(A) 「リボソームは、原核細胞と真核細胞のどちらにも見られる。」の部分は正しい。**リボソーム**は翻訳によってタンパク質の合成が行われる細胞小器官であり、これがないと細胞は生命維持に重要なタンパク質を合成することができないので、原核細胞も真核細胞もリボソームを有している。

「リボソーム RNA とタンパク質からなり、」の部分も正しい。リボソームはリボソーム RNA (rRNA) とリボソームタンパク質から構成されている。

「一重の生体膜で囲まれた粒状の細胞内の構造物である。」の部分は誤り。リボソームは粒状の細胞内の構造物であるが、膜構造をもたない。前述のように、リボソームはリボソーム RNA とリボソームタンパク質の複合体からなる。

「mRNA と結びつきタンパク質を合成する場として重要である。」の部分は正しい。前述のように、リボソームでは **mRNA** の結合後、翻訳が行われ、生命の維持に必要不可欠なタンパク質が合成されている。

(B) 「中心体は、動物細胞と一部の植物細胞に存在する。」の部分は正しい。**中心体**は通常、動物細胞にしかみられないが、一部の特別な植物細胞にもみられる。例えば、中心体は**べん毛**の形成に関係しているので、シダ植物、コケ植物、イチョウ・ソテツ類の精子は中心体を有している。

「筒状の 2 個の中心粒（中心小体）とその周囲にある中間径フィラメントからなる構造で、」の部分は誤り。中心体は、2 個の**中心粒（中心小体）**とその周囲にある**微小管**からなる構造である。

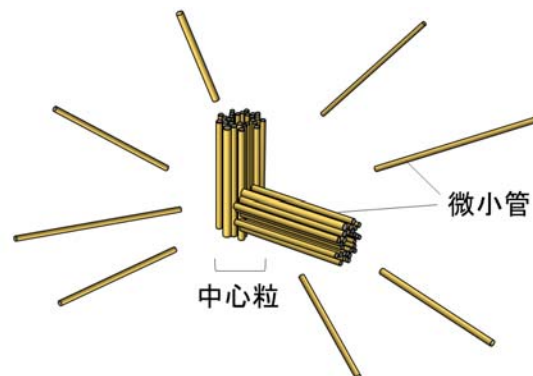


図 C 中心体の構造

「生体膜に囲まれていない。」の部分は正しい。中心体を形成する中心粒（中心小体）も微小管で構成されており、生体膜をもたない。

「細胞分裂時に紡錘体形成の起点となるほか、べん毛やせん毛の形成にも関与する。」の部分は正しい。細胞分裂時、中心体は細胞の両極に移動し、そこから微小管からなる紡錘糸が伸びて紡錘体形成の起点となる。また、中心体はべん毛やせん毛の形成にも関与している。

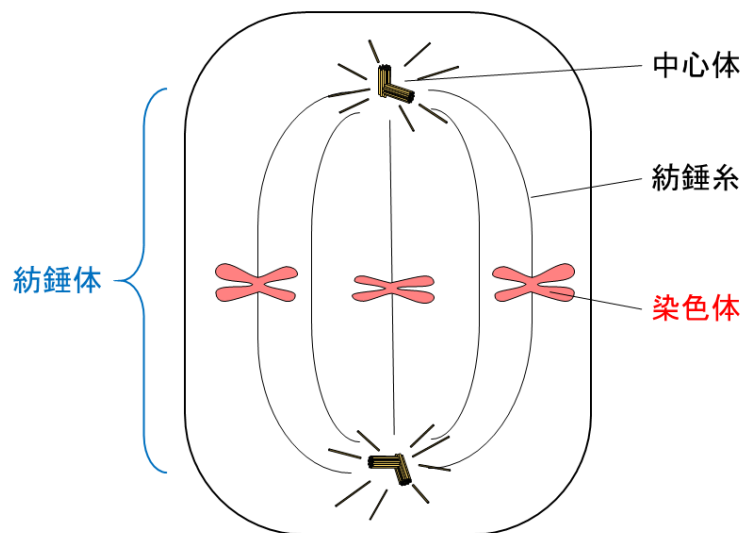


図 D 中心体と紡錘体

したがって、解答は次のようになる。

解答例

(A)誤：一重の生体膜で囲まれた → 正：膜構造をもたない

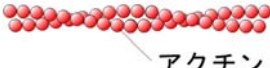
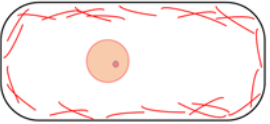
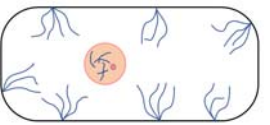
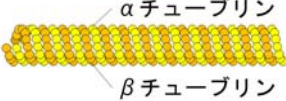
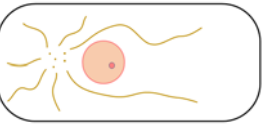
(B)誤：中間径フィラメント → 正：微小管

◆Check!!

細胞骨格

真核細胞の細胞内では細胞骨格とよばれる繊維状の構造が広がっている。細胞骨格は、タンパク質からなり、太さ・構成タンパク質の違いによって、アクチンフィラメント、中間径フィラメント、微小管の3種類に大別される。それぞれが異なる特徴やはたらきを有しているので、次の表でそれらの違いを確認してほしい。

表 A 細胞骨格の種類とその特徴

種類	太さ	構成タンパク質	関係するはたらき	細胞内における分布
アクチンフィラメント  アクチン	約 7nm	アクチン	筋収縮 アメーバ運動 原形質流動 細胞質分裂	主に細胞表面に分布 
中間径フィラメント 	約 10nm	ケラチンなど	細胞・核の形の保持	細胞膜や核膜の内側に分布 
微小管  αチューブリン βチューブリン	約 25nm	チューブリン (αチューブリンとβチューブリンの複合体)	細胞小器官・物質の輸送 紡錘糸形成 べん毛・せん毛の運動	中心体などの形成中心から放射状に分布 

問 4 難易度：★★★★☆

人為的に導入された外来の遺伝子をもつ生物を**トランスジェニック生物**という。外来の遺伝子をもつというのは、その遺伝子が体内で発現するようになったということであるので注意しよう。トランスジェニック生物の例としては、遺伝子組換え作物が挙げられる。農薬に対する耐性遺伝子を作物に導入すればその作物は農薬によるダメージを受けないため、農薬による除草作業が非常に楽になる。また、問 1 の解説で触れた GFP による遺伝子解析においてはマウスなどが用いられることが多いが、この場合マウスも GFP の遺伝子を外部から導入しているので、トランスジェニック生物である。

以上より、解答は**トランスジェニック生物**。

問 5 難易度：★★★★☆

オオカナダモは植物である。植物細胞に存在する細胞小器官のうち、染色を行わずに光学顕微鏡(分解能 $0.2\mu\text{m}$)で観察できるのは細胞壁、細胞膜、葉緑体、液胞のみである。矢印 A が指しているのは小さい球状の物体であるので、葉緑体であることがわかる。葉緑体は緑色の色素を有しているので無染色でも観察しやすいが、核は酢酸オルセイン液や酢酸カーミン液、ミトコンドリアはヤヌスグリーンなどで染色しなければ観察しにくい。

以上より、解答は葉緑体。難しい問題ではないので、確実に正解したい。

問 6 難易度：★★★★☆

マイクロメーターについての問題である。

問題文より、対物マイクロメーターの 1 目盛りは 1mm を 100 等分した長さであるから、

$$1[\text{mm}] \times \frac{1}{100} = \frac{1}{100}[\text{mm}] = 10^{-5}[\text{m}] = 10[\mu\text{m}]$$

であることがわかる。また、接眼マイクロメーターの 18 目盛りが、対物マイクロメーターの 10 目盛り ($=100[\mu\text{m}]$) と重なっているの、接眼マイクロメーター 1 目盛りあたりの大きさは、

$$100[\mu\text{m}] \div 18 = 5.555 \dots [\mu\text{m}]$$

であることがわかる。

以上より、解答は小数第 2 位を四捨五入して、 $5.6\mu\text{m}$ である。問題文に書かれているレンズの倍率に惑わされないように注意しよう。接眼マイクロメーターの 1 目盛りが対物マイクロメーターの何目盛りに相当するかを調べる際に、レンズの倍率は関係ない。マイクロメーターは頻出の問題でもあるので、わからなかった場合は次の Check!! をしっかりと確認しておこう。

◆Check!!

マイクロメーターの使い方

マイクロメーターには、接眼マイクロメーターと、対物マイクロメーターの 2 種類が存在し、マイクロメーターを使用する際は、まず接眼マイクロメーターを接眼レンズに、対物マイクロメーターをステージの上にセットする。接眼マイクロメーター、対物マイクロメーターにはそれぞれ目盛りがつけられているが、観察の際に使用するのは接眼マイクロメーターのみであることに注意しよう。このため、レンズを通して見た場合、接眼マイクロメーターの 1 目盛りあたりの大きさがどれくらいになるかを観察前に知る必要があるのである。

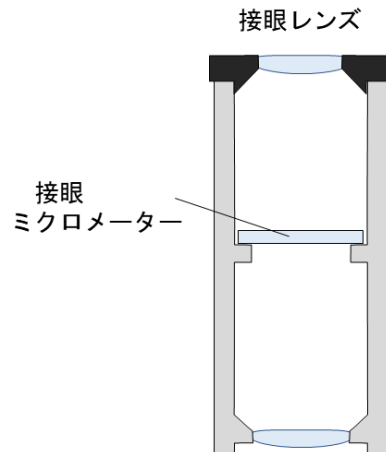


図 E 接眼マイクロメーターのセッティング

接眼マイクロメーターの1目盛りは、倍率によって大きさが変化してしまう。一方で、対物マイクロメーターは、ステージの上に置くので、1目盛りを $10\mu\text{m}$ だとすると、レンズを通さずに見ても、レンズを通して見ても、あるいはレンズの倍率が変わっても、その1目盛りの大きさは変化せず $10\mu\text{m}$ である。

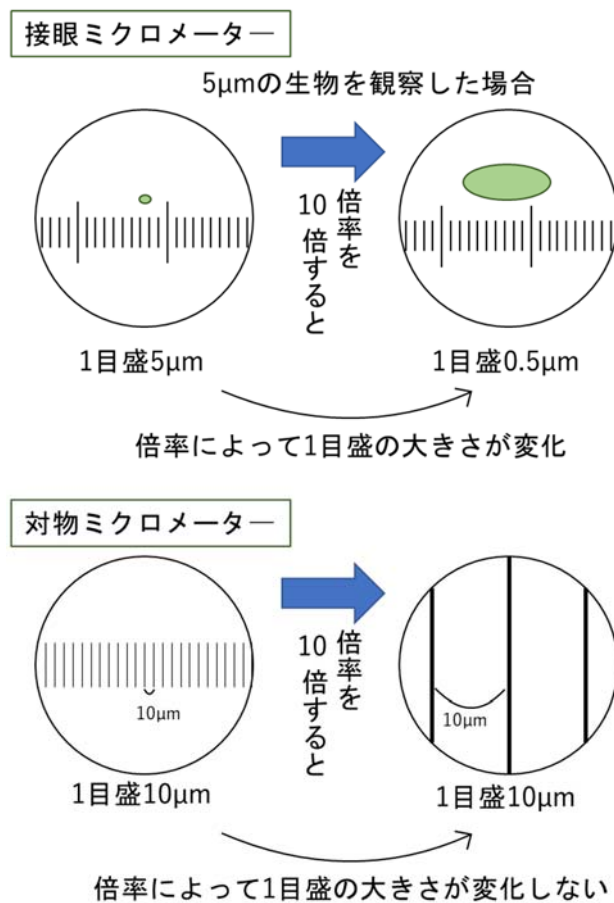


図 F 各マイクロメーターの1目盛りの大きさの倍率による変化

よって、対物レンズの目盛りを基準にし、対物レンズの何目盛りが接眼レンズの何目盛りに対応するかを調べることによって、接眼レンズの 1 目盛りの大きさを調べることができる。例えば、1 目盛りが $10\mu\text{m}$ の対物マイクロメーターを使用した際、対物マイクロメーターの 4 目盛りと接眼マイクロメーターの 2 目盛りが重なっていたら、この倍率では、接眼マイクロメーター 1 目盛りあたりの長さは $40[\mu\text{m}] \div 2 = 20[\mu\text{m}]$ となる。

接眼マイクロメーターの 1 目盛りの大きさが分かったら、倍率を変えない限りその 1 目盛りの大きさは変化しないことに注意しよう。

問 6 では、対物マイクロメーターの目盛りは $10\mu\text{m}$ であり、接眼マイクロメーターの 18 目盛りが対物マイクロメーターの 10 目盛りと重なっているため、接眼マイクロメーター 1 目盛りあたりの長さは、 $100[\mu\text{m}] \div 18 = 5.55\cdots[\mu\text{m}]$ となる。

問 7 難易度：★★★★☆

問 6 から、接眼マイクロメーター 1 目盛りの大きさは $100[\mu\text{m}] \div 18 = \frac{50}{9}[\mu\text{m}]$ であることがわかる。また、図 1 から、矢印 A の細胞小器官は 15 秒で接眼レンズの 9 目盛り分進んでいることがわかる。よって、原形質流動の速度は、

$$\frac{50}{9}[\mu\text{m}] \times 9 \div 15[\text{秒}] = \frac{10}{3}[\mu\text{m}/\text{秒}]$$

であることがわかる。しかし、ここで問われているのは、時速 (mm/時) であることに注意しよう。1 時間は $1 \times 60 \times 60 = 3600[\text{秒}]$ であり、 $1[\mu\text{m}] = \frac{1}{1000}[\text{mm}]$ であるから、

$$\frac{10}{3} \times 3600 \times \frac{1}{1000} = 12[\text{mm}/\text{時}]$$

以上より、解答は $12[\text{mm}/\text{時}]$ である。焦って指定されている単位を間違えないようにしたい。

問 8 難易度：★★★★☆

(ウ) には (E) ミオシン、(エ) には (C) ATP が入る。原形質流動は、細胞小器官に結合した **ミオシン** が、細胞骨格である **アクチンフィラメント** 上を一定の方向に移動することによって生じる。ミオシンは **モータータンパク質** の 1 つであり、ATP の分解によるエネルギーによってアクチンフィラメント上を移動する。ほかのモータータンパク質の例としては、微小管とくっつき、+ 端側へ移動するキネシンや、一端へ移動するダイニンが挙げられる。これらのモータータンパク質も、特定の物質と結合して、細胞内での物質の輸送を行っている。

(オ) には (G) 光と温度が入る。表 1 の実験は温度一定の環境下で、原形質流動の速度に及ぼす光の影響を調べたものであり、この結果から、6000 ルクス以下では、光が強いほど原形質流動の速度は大きくなることわかる。また、表 2 の実験は光の強さを一定にした環境下で、原形質流動の速度に及ぼす温度の影響を調べたものであり、この結果から、 30°C 付近が原形質流動の速度が最も大きく、そこから離れるにつれて原形質流動の

速度は小さくなっていることがわかる。これらのことから、原形質流動の速度は少なくとも光と温度に影響されることがわかる。したがって、活発な原形質流動のためには、適切な光と温度の条件が必要であると考えられる。

以上より、解答は、(ウ)(E)、(エ)(C)、(オ)(G)。モータータンパク質は紛らわしいので、(ウ)では戸惑った人もいるかもしれないが、(エ)の知識問題も(オ)の考察問題も標準的な問題であるので、正解したい。

(熊井勇介, 安藤さくら, 神戸朱琉)

2016 年度 北海道大学 前期 生物

2 アフリカツメガエルの幼生の遊泳行動

出題範囲	ニューロン
難易度	★★★★☆
所要時間	16 分
傾向と対策	第 2 問は刺激の受容と反応の分野からの出題であったが、比較的難しい問題が揃っており、時間をかけて問題を理解しないと高得点を狙うのは難しくなっている。問題集等でもあまり見かけることのない斬新な問題であり、焦ってしまった人も多いのではないだろうか。しかし、論述問題はなく、理解さえしてしまえば解答にはそれほど時間はかからないだろうから、とにかく落ち着いて考えることが大事である。見たことのない問題にあたってもすぐに解答を見るのではなく、自分の頭でよく考えてみよう。そういった努力の積み重ねがのちに大きな力になると思われる。

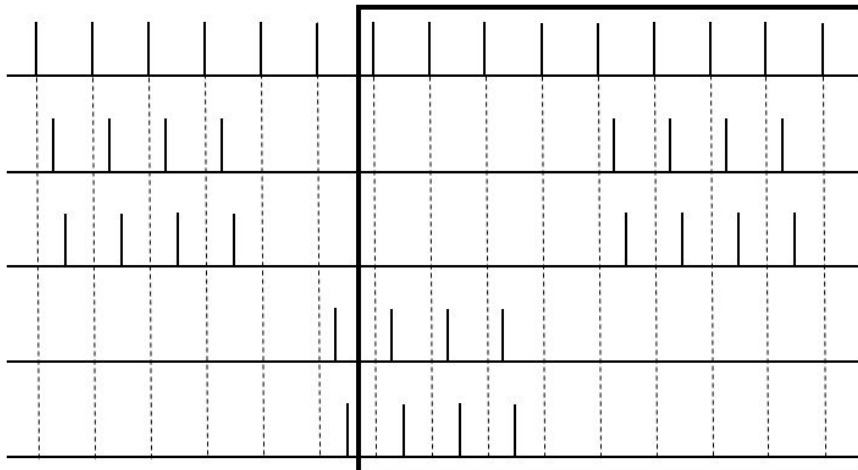
解答

問 1 (ア)カルシウムイオン (Ca^{2+}) (イ)シナプス小胞 (ウ)ドーパミン
(エ)ナトリウムイオン (Na^+ , ナトリウム)

問 2 n2 : ⑤ n4 : ④

問 3 n2 : ⑧ n3 : ⑨

問 4



問 5 50 ミリ秒

問 6 (D)

解説

問 1 難易度 : ★★★★★

活動電位が軸索末端まで伝わると電位依存性のカルシウムイオン (Ca^{2+}) チャネルが開き、軸索末端に Ca^{2+}

が流入する。これによってシナプス小胞が軸索末端の膜に融合し、シナプス小胞に含まれていた神経伝達物質がシナプス間隙に分泌される。神経伝達物質はシナプス後細胞の細胞膜にある受容体に結合する。この受容体はチャネルと一体になっており、神経伝達物質の結合によってチャネルの開閉が調節される。例えば、シナプス後細胞のナトリウムイオン (Na^+) チャネルが開くと、ナトリウムイオンが流入し、細胞内の電位が正の方向へ変化する。このように膜電位が上昇することを脱分極、その際に生じる電位を興奮性シナプス後電位 (EPSP) という。また、シナプス後細胞のクロライドイオン (Cl^-) チャネルが開きクロライドイオンが流入すると、細胞内の電位がより負になる。このように細胞内の膜電位がより負になることで分極がさらに進んだ状態を過分極、その際に生じる電位を抑制性シナプス後電位 (IPSP) といい EPSP の影響を打ち消す効果をもっている。IPSP の影響を受けながら EPSP が時間的・空間的に加重され、シナプス後電位が閾値を超えた時に活動電位が生じる。興奮性シナプス後電位を生じさせるシナプスを興奮性シナプスといい、抑制性シナプス後電位を生じさせるシナプスを抑制性シナプスという。

以上より、解答は、(ア)カルシウムイオン (Ca^{2+})、(イ)シナプス小胞、(ウ)ドーパミン、(エ)ナトリウムイオン (Na^+ 、ナトリウム) である。

(ア)の Ca^{2+} を本文中の空欄後の語句チャネルに合わせてカルシウムと答えた人もいるだろうが、2 つ目の空欄(ア)にカルシウムは適当ではない。空欄に適する形で語句を入れないと内容をわかっている最悪の場合×になってしまう可能性があるの、注意が必要である。

問2 難易度：★★★★☆

図 2A を見ると、興奮性シナプスの場合、刺激を受けたあと少し時間が経ってから次のニューロンに活動電位が発生することがわかる。また図 1A、2A の n3、n4 の活動電位の発生パターンが同じであることから、軸索が分岐していてシナプス後ニューロンが 2 つある場合、その 2 つのニューロンでは同時に活動電位が生じることがわかる。

まず、n2 の活動電位の発生パターンを考えよう。n2 は n3 に興奮を伝達する。よって、n2 で活動電位が生じると、多少の時間がかかったあと n3 でも活動電位が生じる。このことから、図 2B の n3 の活動電位の発生パターンを参考にして、その発生パターンが少し前にずれているものを選べばよい。よって、n2 における活動電位の発生パターンを表しているのは⑤である。

次に、n4 の活動電位の発生パターンについて考えていこう。前述のとおり、軸索が分岐していてシナプス後ニューロンが 2 つある場合、その 2 つのニューロンでは同時に活動電位を生じるので、n4 は n3 と同じ発生パターンを示すと考えられる。そのため、答えは④。

一応、n2 と n4 間の伝達において詳しくみておこう。n4 は n2 から興奮が伝達される。よって、n4 において活動電位が生じると、多少の時間がかかったあと n2 においても活動電位が生じる。このことから、n4 における活動電位の発生パターンは、n2 における活動電位の発生パターンを少しうしろにずらしたものであることがわかる。したがって、⑤を少しうしろにずらした④が正解とわかり、解答が同じになる。

以上より、解答は、n2 : ⑤, n4 : ④である。この問題はどの情報を用いるべきか考えることが大切である。例えば、n2 における活動電位の発生パターンについて考えるとき、n1 を軸にして考えてしまうと話がややこしくなる (n2 は n1 と n4, 2 つのニューロンから興奮が伝えられているため)。正しい答えを導きやすく明快な考え方で問題を解くことが受験にとって必要である。

問 3 難易度 : ★★★★★

まず、図 1C の神経回路を見てみると、n4 は抑制性ニューロンであることがわかるが、n4 における活動電位の発生パターンが図 2C に図示されているので、問 2 と同様に考えることで n2 と n3 における活動電位の発生パターンを知ることができる。

まず、n2 における活動電位の発生パターンについて考えていこう。n2 は n4 へ興奮を伝達している。よって、n2 において活動電位が生じると、多少の時間がかかったあと n4 においても活動電位が生じる。このことから、n2 における活動電位の発生パターンは、n4 における活動電位の発生パターンを少し前にずらしたものであることがわかる。したがって、図 2C の n4 を少し前にずらした⑧が n2 における活動電位の発生パターンである。

次に、n3 における活動電位の発生パターンについて考えていこう。n3 は n2 から興奮が伝達される。よって、n2 に活動電位が生じて多少の時間がたったあと、n3 で活動電位が生じる。このことから、n3 における活動電位の発生パターンは、n2 における活動電位の発生パターンを少しうしろにずらしたものであることがわかる。したがって、⑧を少しうしろにずらした⑨が n3 における活動電位の発生パターンである。

以上より、解答は、n2 : ⑧, n3 : ⑨である。問 2 で考え方がわかってしまえば、難しくない。抑制性シナプスがあろうがなかろうが、ニューロンのつながりを意識すれば考え方が変わらないことに気づくだろう。

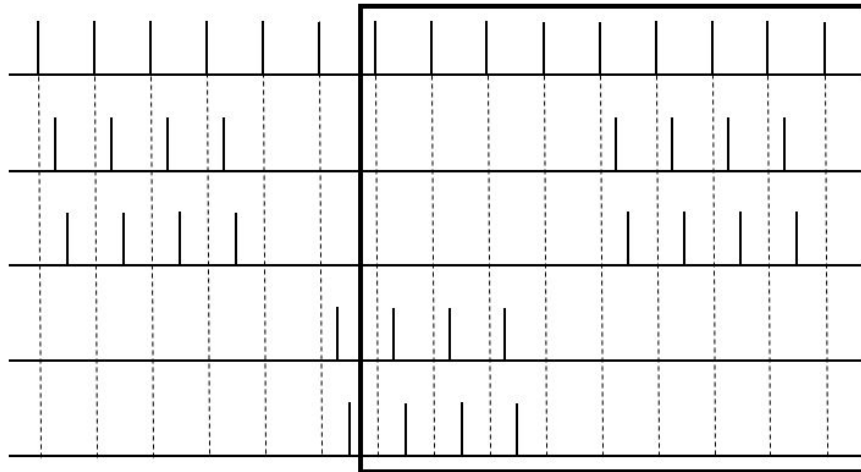
問 4 難易度 : ★★★★★

図 3C の神経回路を見ると、脳からの入力刺激は n1 と n4 に伝えられることがわかる。n1 の興奮は n2 と n3, n4 の興奮は n5 と n6 にそれぞれ伝達されていることがわかる。n2 と n5 は抑制性ニューロンであるから、n4 は n2 によって、n1 は n5 により、抑制性シナプス後電位を生じていることがわかる。また、n3 の興奮が左体側筋の収縮を、n6 の興奮が右体側筋の収縮を引き起こすことがわかる。

さて、図 3D を見てみると、図に示されている最初の刺激の入力から 20 ミリ秒間は、n1 では活動電位が生じているが、n4 では生じていない。n1 の興奮が n2 に伝わり、n2 によって n4 で抑制性シナプス後電位が生じることでこの間は n4 での興奮が抑制されていることがわかる。そして、図に示されている最初の刺激入力後 20 ミリ秒を過ぎると、n1 と n2 は連続して 4 回活動電位を発生してしまったので、その後 20 ミリ秒間は興奮でなくなる。図に示されている最初の刺激入力後 25 ミリ秒を過ぎると、今度は n4 に興奮が生じるようになっていく。これは、n2 による興奮の抑制の効果が (ii) でいわれている一定時間を過ぎてなくなったからであると考えられる。n4 に興奮が生じると、抑制性ニューロンである n5 に興奮が伝達され、n1 の興奮が抑制される。そのため、連続した 4 回の活動電位の発生から 20 ミリ秒経ったあとでも n1 では興奮が抑制され、興奮が起きる

のは n4 のみになる。したがって、このあとは n4 の興奮が 3 回続き、それに遅れて n5 も 3 回連続して興奮すると考えられる。計 4 回連続して興奮すると、そのあと n4 は 20 ミリ秒間興奮できないようになり、それに伴い n5 に興奮が伝達されなくなる。したがって、そのあと一定時間経つと、n5 による n1 の興奮の抑制がなくなり、再び n1 と n2 が興奮するようになると考えられる。その一定時間がどのくらいの長さであるのかはつきりとはわからないが、図 3D から n1 の 4 回目の活動電位の発生から約 10 ミリ秒後に n4 で初めて活動電位が発生していることはわかるので、n1 の 5 回目の活動電位の発生は n4 での 4 回目の活動電位の発生から約 10 ミリ秒後に起きると考えられる。

よって、解答の活動電位の発生パターンは下の図のとおりである。



遊泳（スイミング）行動では、解答のように尾を左右に規則的に動かす必要があるので、このように n1 と n2、n4 と n5 の興奮が規則的に交互に繰り返されることが考えられる。また、図 3C の神経回路の左右対称性から勘のいい人は答えが十分想定できたのではないだろうか。そういう場合でもきちんと論理的に考えて答案を作成するようにしたい。

問 5 難易度：★★★★☆

問 4 でも述べたように、遊泳（スイミング）行動では、尾を左右に規則的に（すなわち周期的に）動かす必要があると考えられる。図 3B を見ると、時間 x というのは、左体側筋の収縮の 1 周期に相当することがわかるだろう。周期とは、最初の状態から変化を経てもとの状態に戻る時間であるので、次ページの図で示したような時間に相当すると考えられる。これを数えると、入力 10 回分の長さに相当するので、その長さは、5 ミリ秒×10＝50 ミリ秒であることがわかる。

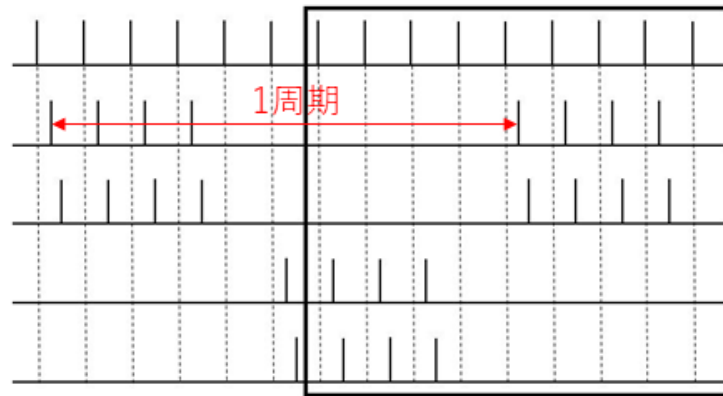


図 A 1 周期の長さ

以上より、解答は 50 ミリ秒。問 4 が理解できていなければ解けない問題であろう。このように、前問の答えや考え方を利用する問もあるので、そのような問題では前問が本当に正しいのかしっかりと見直しておく必要がある。

問 6 難易度：★★★★☆

実際に活動電位の発生パターンがどのようなになるかを図に書いてみればよい。

異なる点は n1 と n4 が連続して 4 回ではなく、連続して 2 回までしか活動電位を発生することができないということである。このことと、抑制性シナプスによる n1 と n4 の興奮の抑制に注意して図をかくと、次の図 B のようになる。

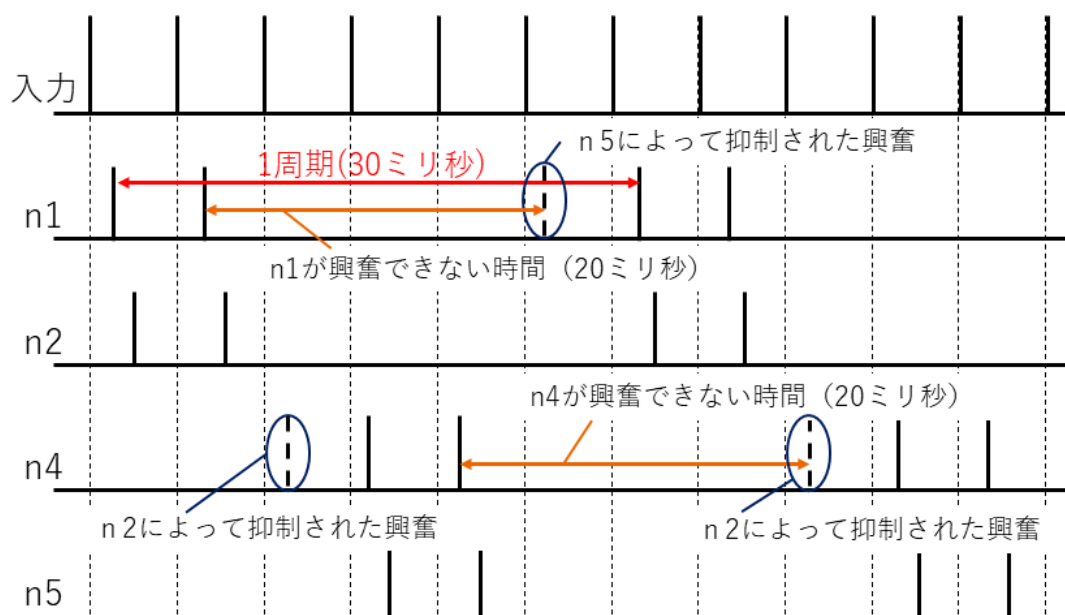


図 B 連続 2 回までしか活動電位が発生できなくなった際の活動電位の発生パターン

よって、周期は 30 ミリ秒となることがわかり、尾を振るリズムは速くなると考えられる。

また、筋肉において収縮が終わる前に次の活動電位が伝わると、筋肉はより強く収縮するので、連続して 2 回までしか活動電位を発生することができない場合、体側筋の収縮の強さは小さくなることがわかる。

以上より、解答は(D)。多少時間はかかるが、図 3D を利用して図を描くなどすれば、視覚的に活動電位の発生パターンがつかめるので、ミスが少なくなる。ぜひ臨機応変に図を描くなどの対応をしてもらいたい。

(熊井勇介, 西浦佑香, 西川尚吾)

2016 年度 北海道大学 前期 生物

3 細胞膜を介した物質の移動，遺伝子の変化が表現型の変化を引き起こすしくみ

出題範囲	植物の発生，細胞，突然変異，浸透圧
難易度	★★★★☆
所要時間	13 分
傾向と対策	問 1, 2, 3, 5 が知識問題で，問 4, 6 が考察問題であった。問 2 や問 5 は標準的な知識問題であるので間違えたくない。問 1 や問 3 は細かい部分まで正確な知識が必要であったため難しかったかもしれないが，このレベルまできちんと覚えるようにしておきたい。問 4, 6 は標準的な考察問題であった。論理は簡単であるため間違えたくないが，制限字数が少ないため，ポイントをおさえて短くまとめるのが難しかったかもしれない。特に問 6 はしっかり問題文を読めているかを問われる問題であった。

解答

問 1 (ア)胚柄 (イ)子葉 (ウ)フルクトース (エ)師管

問 2 (B)

問 3 (A), (D)

問 4 (1)スクロースからデンプンを合成する酵素活性を低下させる。(27 字)

(2)しわの種子はデンプン量が少なくスクロース量が多いこと。(27 字)

問 5 (1)アクアポリン (2) (A)

問 6 しわの種子は水によく溶けるスクロースの濃度が高いため，種子の浸透圧が大きくなり，水が多く流入する。(49 字)

解説

問 1 難易度：★★★★☆

知識をきちんと暗記しているかを問う穴埋め問題。少し細かいが，落としたいくない。植物の発生をきちんと暗記しよう。

被子植物の受精卵はまず不等分裂をする。大きいほうの細胞は一方向に分裂し，胚柄を形成する。小さいほうの細胞は分裂を繰り返し，胚柄の上部の細胞とともに球状胚を形成する。球状胚は分裂を続け，**幼芽**，**子葉**，**胚軸**，**幼根**に分化する。よって (ア) は胚柄。

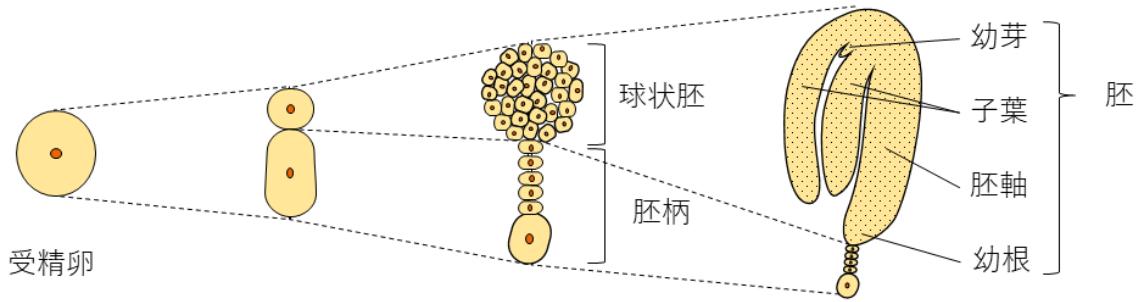


図 A 植物の胚発生

発芽時に必要な栄養を胚乳に蓄える植物の種子を**有胚乳種子**，子葉に蓄える植物の種子を**無胚乳種子**という。イネ科やカキノキ科は有胚乳種子，マメ科は無胚乳種子である。よって **(イ)** は子葉。

スクロースはグルコースとフルクトースが脱水縮合したものである。化学の分野の知識だが，この程度は生物でも要求されることがある。**(ウ)** はフルクトース。

葉で作られた養分（光合成産物）は維管束の師管を通して種子まで送られる。種子に送られた養分は胚柄を通して胚になる細胞まで送られ，胚発生が進む。葉で作られた光合成産物が各器官へ運ばれることを**転流**という。維管束の道管は根で吸い上げた水や無機塩類を運ぶ。**(エ)** は師管。

以上より，解答は，**(ア)胚柄**，**(イ)子葉**，**(ウ)フルクトース**，**(エ)師管**。

問 2 難易度：★★★★☆

知識問題。この程度の知識は確実にしておこう。

細胞内の小胞が細胞膜と融合することで，小胞内の物質が細胞外へ分泌されることを**エキソサイトーシス**という。一方，細胞外の物質が，細胞膜が陥入することで細胞内に取り込まれることを**エンドサイトーシス**という。エキソサイトーシスはホルモンや神経伝達物質を分泌する細胞で盛んであり，エンドサイトーシスは食作用をもつ細胞で盛んである。

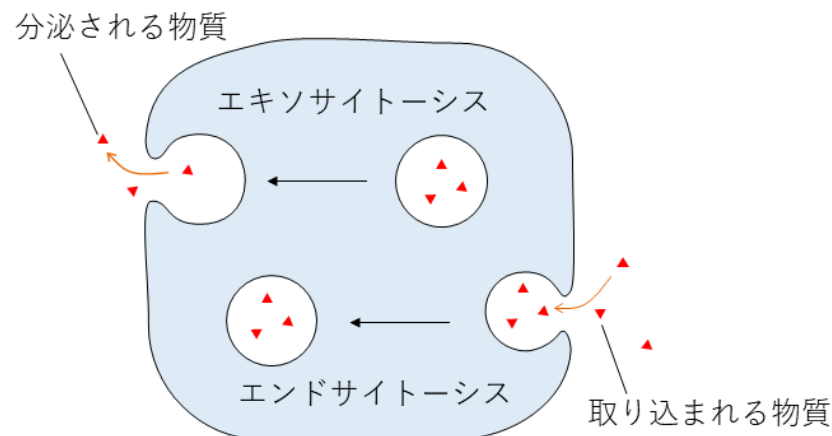


図 B エキソサイトーシス，エンドサイトーシス

- (A) 不適切。オートファジー（自食作用）の説明である。細胞内ではおもに細胞質にある不要となったものを細胞質ごとに取り込む小胞を作り、その小胞と酸性加水分解酵素を含むリソソームや液胞などの小胞が融合することにより内容物を分解する。分解産物は細胞内でリサイクルされる。また、不要となったものでなくとも、細胞が飢餓状態になると細胞内の構造をオートファジーにより分解し、分解産物を養分として用いることもある。
- (B) 適切。エキソサイトーシスの正しい説明である。
- (C) 不適切。エンドサイトーシスの説明である。
- (D) 不適切。エキソサイトーシスは細胞膜の受容体を介して行われるホルモンや神経伝達物質による細胞間シグナル伝達とは異なる細胞内外のやりとりである。

以上より、解答は(B)。

◆Check!!

エンドサイトーシス

食細胞ではエンドサイトーシスが盛んに起こる。食細胞がエンドサイトーシスにより盛んに取り込んでいるのは細菌などの異物（抗原）である。食細胞に抗原が取り込まれると、抗原の入った小胞に酸性加水分解酵素を含んだ小胞（リソソームなど）が融合する。すると抗原は分解される。ここまです自然免疫という。食細胞は分解した抗原の一部を細胞表面に出し、T細胞に抗原提示をする。この反応によって獲得免疫が始まる。

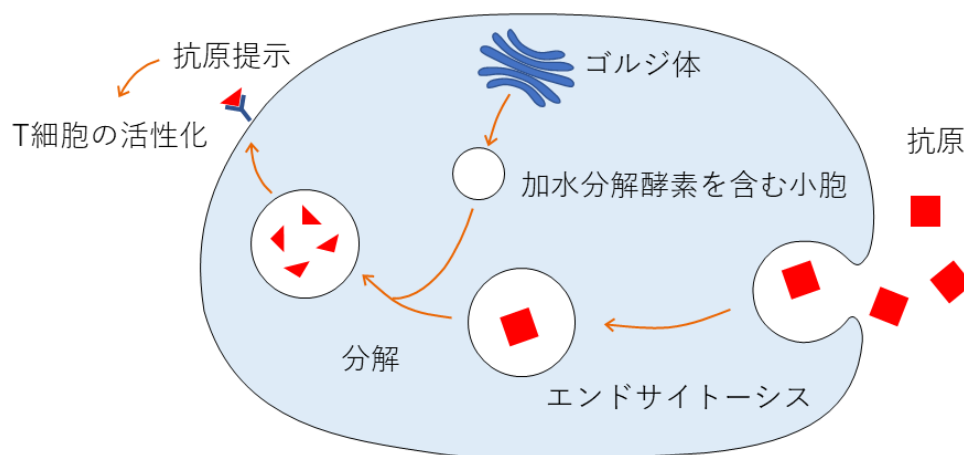


図 C 食細胞でのエンドサイトーシス

食細胞以外の細胞でもエンドサイトーシスは行われる。細胞外の不要となった物質がエンドサイトーシスにより細胞内に取り込まれる。取り込まれた物質は抗原の場合と同じように酸性加水分解酵素により分解される。分解産物はリサイクルされる。

さらには、エンドサイトーシスでは不要なものばかりが取り込まれるのではない。細胞に必要なが、細胞膜の輸送体では細胞内に取り込めない分子量の大きな物質はエンドサイトーシスによって細胞内に輸送される。

エンドサイトーシスは生物が生きていくための重要な役割を担っているのだ。

問 3 難易度：★★★★☆

植物の生殖に関する知識問題。被子植物だけでなく、コケ、シダ、裸子植物についても正確な知識が必要であった。それぞれの生活環をきちんと覚えよう。選択肢を見ていこう。

- (A) 適切。コケ植物、シダ植物、裸子植物の一部（イチヨウやソテツ）の雄性配偶子は精子である。精子は水中を泳いで卵まで達する。
- (B) 不適切。孢子は**孢子体**($2n$)の減数分裂によりできるので、核相は n である。これ以上減数分裂をすることはない。造精子 (n)、造卵器 (n) は孢子 (n) の体細胞分裂で生じたもので、減数分裂により生じたのではない。
- (C) 不適切。**重複受精**は被子植物特有の受精様式であり、裸子植物では起こらない。裸子植物の**胚乳**は単相(n)である。
- (D) 適切。被子植物では、まず**胚のう母細胞** ($2n$) が**減数分裂**を経て**胚のう細胞** (n) になる。胚のう細胞は3回核分裂して核が8個になる。8個の核のうち、1個は**卵細胞** (n)、2個は**助細胞** (n)、3個は反足細胞 (n) の核になり、残り2個の核は**極核**とよばれる**中央細胞** ($n+n$) の核になる。

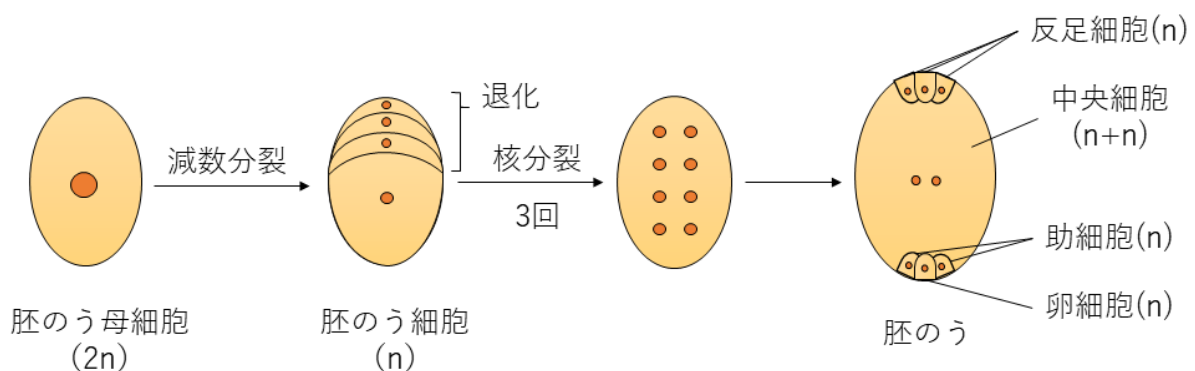


図 D 被子植物の卵細胞形成

- (E) 不適切。植物の栄養器官（根、茎、葉）から新しい個体が生じることを**栄養生殖**という。栄養生殖は無性生殖である。接ぎ木して成長するサクラや、ジャガイモから芽が出てきて成長するのはこの例である。

以上より、解答は(A)、(D)である。

◆Check!!

植物の生活環

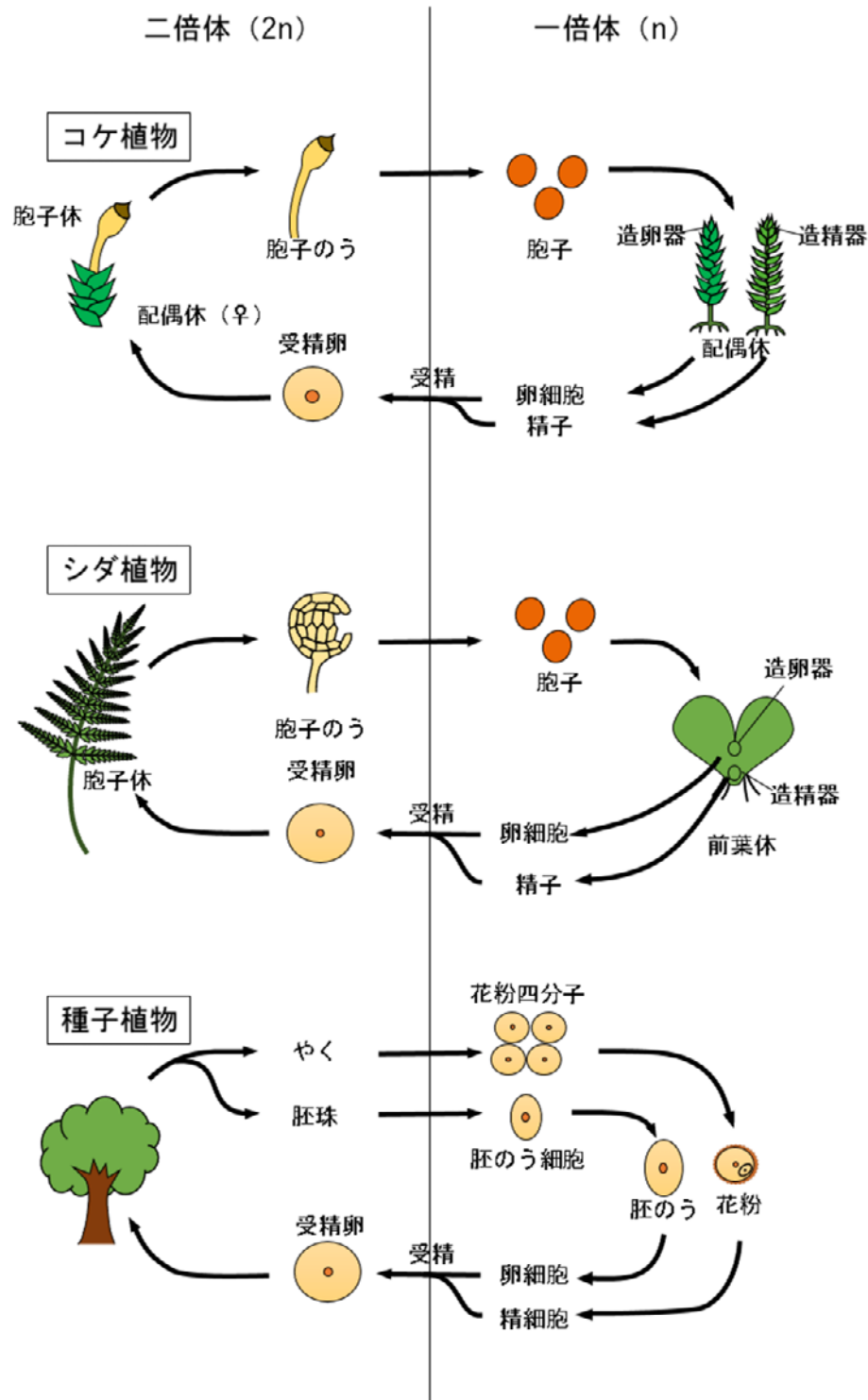


図 E 植物の生活環

植物は卵細胞や精細胞といった配偶子を作る配偶体（核相 n ）の世代と、胞子を作る孢子体（ $2n$ ）の世代を交互に繰り返す。配偶体の体細胞分裂で生じた卵細胞（ n ）と精細胞（ n ）が受精して孢子体（ $2n$ ）を作り、孢子体の減数分裂で生じた胞子（ n ）が配偶体となる。

コケ植物は主に配偶体（ n ）で過ごす。コケ植物の配偶体には雄株と雌株があり、雄株の造精器で作られた精子（ n ）が雌株の造卵器の中にある卵（ n ）に到達し受精する。受精卵は体細胞分裂を繰り返して孢子体（ $2n$ ）を形成するが、すぐに胞子のうで減数分裂が行われて胞子（ n ）が作られる。胞子が発芽して再び配偶体（ n ）が形成される。

シダ植物は主に孢子体（ $2n$ ）で過ごす。シダ植物の配偶体は前葉体とよばれる。前葉体には造卵器と造精器の両方があり、コケ植物よりも少ない水分で受精することができる。

被子植物と裸子植物は主に孢子体（ $2n$ ）で過ごす。配偶体とよべるのは胚のう細胞（ n ）と花粉四分子（ n ）であり、これらが分裂して生じた卵細胞と精細胞が受精する。受精卵が成長して植物本体ができる。

問 4 難易度：★★★★☆

論理は単純である。落ち着いて正確に解きたい。

下線部 c にあるとおり、しわの種子のデンプン合成に必要なある酵素の遺伝子には大きな DNA 配列が挿入されている。その結果として、表 1 にあるとおり、しわの種子では丸の種子に比べデンプン量が少なくスクロース量が多くなっている。問題文にも書いてあるとおりデンプンはスクロースから合成される。よって、しわの種子でデンプン量が少なくスクロース量が多いのは、DNA 配列の挿入によりスクロースからデンプンを合成する酵素のアミノ酸配列が変化し、酵素活性が落ちたからだと考察できる。よって、(1)配列の挿入が遺伝子の機能に与える影響と、(2)そのように考えられる根拠は次のとおり。

解答例

(1)スクロースからデンプンを合成する酵素活性を低下させる。(27 字)

(2)しわの種子はデンプン量が少なくスクロース量が多いこと。(27 字)

問 5 難易度：★★★★☆

水は生命維持のうえで非常に重要でありながら、細胞膜を形成するリン脂質二重膜は疎水性のため水を通さない。そこで、細胞膜には水を透過するチャネルが豊富に存在する。そのチャネルをアクアポリンという。

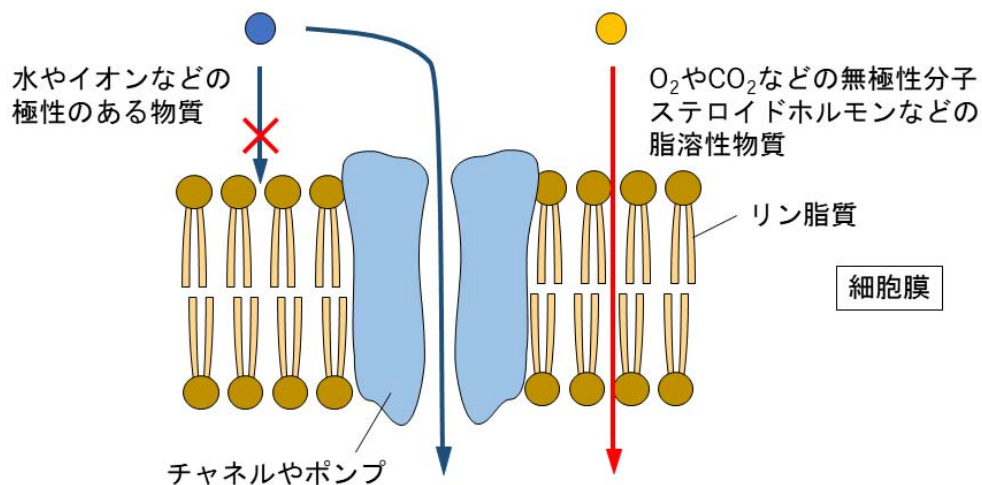


図 F 細胞膜内外の物質の移動

(2)は考察問題であるが、基本的な考察であり、間違えたくない。

まずはチャネルとポンプの違いを確認しておこう。両者はどちらも細胞膜で物質の通り道となる膜タンパク質であるが、**チャネル**はエネルギーを用いずに物質を濃度勾配に従って輸送する（**受動輸送**）のに対し、**ポンプ**はエネルギーを用いることで物質を濃度勾配に逆らって輸送する（**能動輸送**）。アクアポリンはチャネルなので、「能動輸送が行われ」とある選択肢、つまり(D),(E),(F)は誤りである。残りの選択肢について考えよう。

この設問の実験は、アクアポリンのない細胞にアクアポリンを発現させると、水は細胞内と細胞外のどちらに移動するかを見る実験である。細胞を蒸留水に浸せば、細胞内に流入する水のほうが細胞外に流出する水より多い。細胞内部の浸透圧のほうが蒸留水の浸透圧より大きいからである。よって正しい選択肢は、細胞内へ水が流入し細胞の体積が大きくなるとしている(A)である。

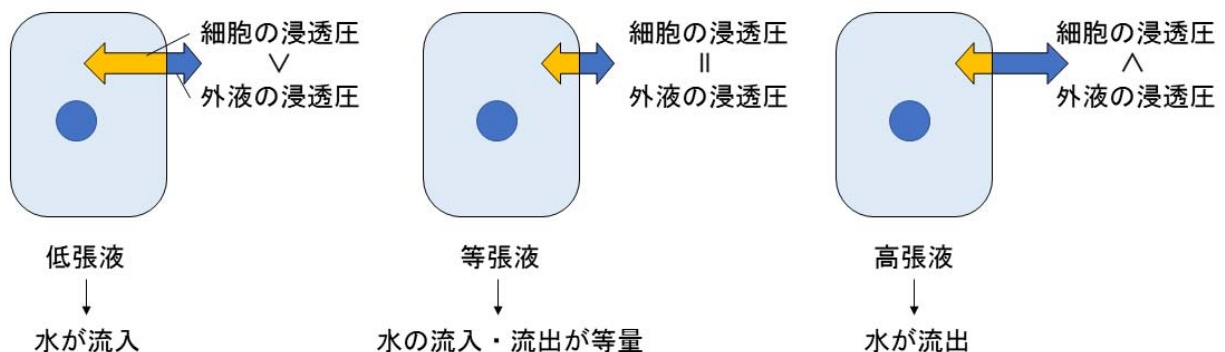


図 G 浸透圧

以上より、解答は(1)アクアポリン、(2)(A)である。

問6 難易度：★★★★☆

表のデータと問題文から、しわの種子が脱水前に水を多く含む理由を考察する問題。問4、問5はこの問題の誘導のようにになっている。

まず、しわの種子が水を多く含むのは浸透圧が大きいからだと推測できる。浸透圧の大きさは溶液中に溶けている物質の物質質量に比例する。よってしわの種子には水溶性の物質が多く含まれているのではないかと考えられる。表1を見ると、しわの種子はスクロースが多くデンプンは少ないことを示している。問題文にあるとおり、デンプンは水に溶けにくいがスクロースは水に溶けやすい。よって、しわの種子には水溶性であるスクロースが多く含まれるため、浸透圧は大きくなり、水を多く含むようになると考えられる。

したがって、解答は次のようになる。

解答例

しわの種子は水によく溶けるスクロースの濃度が高いため、種子の浸透圧が大きくなり、水が多く流入する。(49字)

問題文に「デンプンは水に溶けにくい、スクロースは水に容易に溶ける」ということがさりげなく書いてある。これをしわの種子の浸透圧が大きくなる理由としておさえられたかで差がつくだろう。普段から、問題文を飛ばし読みするのではなくきちんと読むようにしたい。

◆Check!!

細胞膜を介した物質の移動

この大問では細胞膜を介した物質の移動として、エキソサイトーシス、エンドサイトーシス、チャネル、ポンプに関する問題があったのでまとめておこう。この問題では出てこなかったが、このほかにも植物細胞にみられる原形質連絡や、動物細胞でみられるギャップ結合なども、物質が細胞膜を通過する通路として挙げられる。また、そもそも細胞膜を自由に行き来できる物質もある。さまざまな物質が細胞膜内外を移動するため、多様な移動方法が存在する。

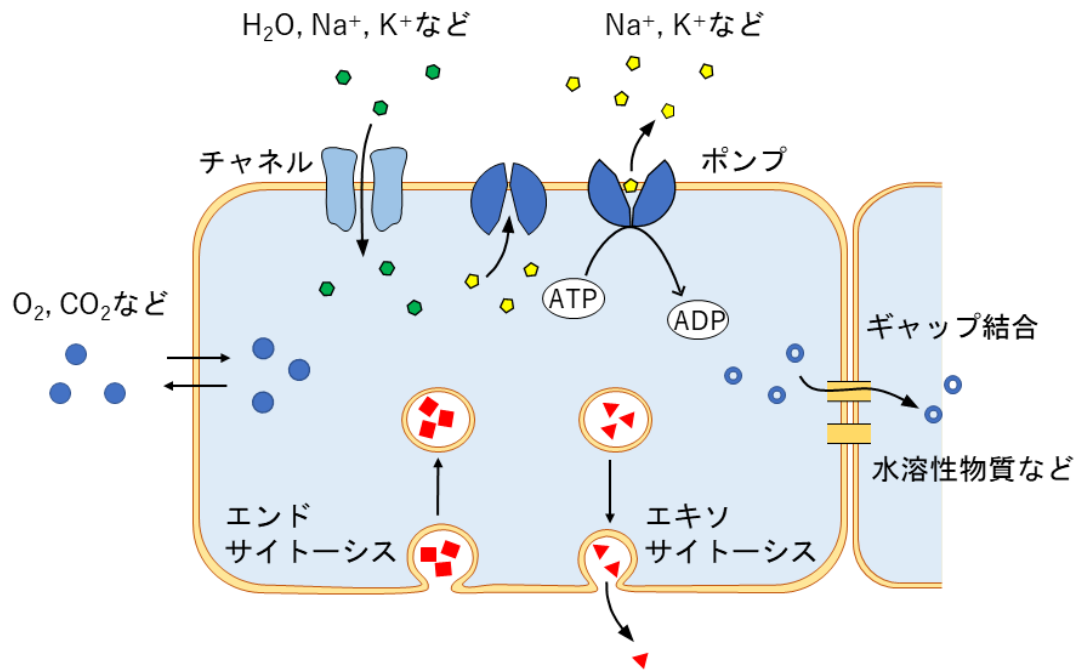


図 H 動物細胞における細胞膜を介した物質の移動

(大橋陽樹, 熊井勇介, 安藤さくら)

2016 年度 北海道大学 前期 生物

4 包括適応度と社会性昆虫の利他行動

出題範囲	進化，種内関係
難易度	★★★★☆
所要時間	14 分
傾向と対策	進化，遺伝，個体群などの分野を扱った問題である。これらの分野は北大ではしばしば出題される。問題文に「包括適応度」という受験生には目新しい概念が提示されており，その場で理解する必要がある。そのためには，やはり教科書レベルの知識を固めなくてはならない。問 5 は難しく，ほとんどの受験生が解けなかったと考えられるが，ほかの問題は基礎が身につけている人なら解けるであろう良問である。この問題であまり正解することができなかったという人は，教科書の進化や生態系の分野をしっかりと読み，基礎的な知識を確認しよう。

解答

問 1 性選択

問 2 (ア)相互 (イ)ヘルパー (ウ)社会 (エ)0.75 (オ)1.0

問 3 (カ)0.5 (キ)1.0

問 4 (E)

「兄弟個体が両親と共同して育てることによって両親のみで育てる場合よりも増える弟妹個体の数 $y-x$ に兄弟姉妹間の血縁度をかけた値が，兄弟個体が繁殖して育てることのできる自分の子の数 z に親子間の血縁度をかけた値よりも大きくなる」ということが求める条件となる。兄弟姉妹間の血縁度と親子間の血縁度はともに 0.5 で等しいから，式は $y-x > z$ となり，(E) が答えとなる。(178 字)

問 5 利他行動を行う個体群内で裏切りやただ乗りを阻止するしくみがある。(32 字)

問 6 アリのコロニーにおいて，オスは単為生殖によって生じるために姉個体からみた姉弟間の血縁度は $0.5 \times 0.5 + 0.5 \times 0 = 0.25$ である。一方姉妹間の血縁度は 0.75 であるため，メス個体であるワーカーは，弟にあたるオスよりも妹にあたる次世代女王のメスの世話をしたほうが，包括適応度が上昇するから。(145 字)

解説

問 1 難易度：★★★★☆

自然選択とは，生存や繁殖に有利な形質をもった個体がより多くの子孫を残すことをいう。生物の形質が生存や繁殖に有利であるか不利であるかは環境によって決定される。そのため，環境に適応した形質が代々受け継がれることにより進化が起こるのである。

しかし，本当にすべての生物の形質が環境に適応しているといえるだろうか。コクホウジャクという鳥につい

て考えてみよう。コクホウジャクは体長およそ 15 センチ程度であるにもかかわらず、繁殖期のオスの尾羽は 50 センチ以上にもなるという。このような尾羽は、目立つので外敵に襲われやすくなる、尾羽の形成にコストがかかるなど、生存の面で有利であるとは決していえない。オスがこのような尾をもつように進化したのはなぜなのだろうか。それはメスが尾羽の長いオスを選好してつがいとなるからである。これにより、長い尾のオスの形質が代々受け継がれているのである。このような配偶行動における同性間、あるいは異性間の相互作用（コクホウジャクは異性間相互作用の例）が選択圧となるものを**性選択**とよぶ。この選択により、雌雄によって異なる形質が生じると考えられている。

したがって、解答は**性選択**である。



図 A コクホウジャクのオス

問 2 難易度：★★★★☆

(ア) には相互が入る。**競争**とは、個体間の資源をめぐる相互作用である。同種個体間の競争を**種内競争**、異種個体間の競争を**種間競争**とよぶ。

(イ) には**ヘルパー**が入る。他個体の繁殖を助ける個体はヘルパーとよばれる。ヘルパーは血縁個体であることが多い。本文にある鳥類だけでなく、ジャッカルなどの哺乳類などでもみられる。

(ウ) には社会が入る。ハチ、アリ、シロアリなどは、血縁関係にある多数の個体でコロニーという集団を作る。コロニー内での生活は明確な分業制となっており、このような昆虫のことを**社会性昆虫**とよぶ。一般に、社会性昆虫のコロニーでは一部の個体のみが生殖を行い、多くの個体は子孫を残さない。

(エ) には 0.75 が入る。この値を求める過程は問 3 で問われているので、ここで解説は行わず問 3 でまとめて解説を行う。

(オ)には 1.0 が入る。アブラムシの単為生殖では複相の母親から複相の娘が生じる。この際に卵は減数分裂を経ないため、娘はすべて母親のクローンとなる。そのため、姉妹間の血縁度は 1.0 となる。

以上より、解答は、(ア)相互、(イ)ヘルパー、(ウ)社会、(エ)0.75、(オ)1.0 である。(イ)はやや難しいかもしれないが、ほかの問題はやさしいので確実に正解したい。

問 3 難易度：★★★★☆

膜翅目で同一の両親から生まれた姉妹の血縁度を計算する過程の考え方についての穴埋め問題である。(エ)は本来問 2 で求める問題であるが、ここでまとめて解説を行う。

まず、娘個体をもつ稀な対立遺伝子を考える、とある。稀な遺伝子を考えるのは、血縁のない他個体とも同じ遺伝子をもっている可能性を排除するためである。この時、どの個体もその遺伝子をホモではもっていない（この問題では特に母親）と考えることができる。血縁度というのは、問題文中にあるように「血縁者間で遺伝子を共有する確率」である。

娘個体をもつ稀な対立遺伝子が母親由来である確率と父親由来である確率は等しく、どちらも 0.5 である。よって、(カ)には 0.5 が入る。

その稀な対立遺伝子が母親由来であった場合、母親は複相の個体であるから、その稀な対立遺伝子が別の娘にも伝わる確率は 0.5 である。一方、その稀な対立遺伝子が父親由来であった場合、父親は単相の個体であるから、その稀な対立遺伝子が別の娘にも伝わる確率は 1.0 である。よって、(キ)には 1.0 が入る。

兄弟姉妹間の血縁度は母親経由の血縁度と父親由来の血縁度の和であるから、求める血縁度は次の計算により求められる。

$$0.5 \times 0.5 + 0.5 \times 1.0 = 0.75$$

したがって、(エ)には 0.75 が入る。

問 4 難易度：★★★★☆

問題文にあるとおり包括適応度とは、自分が子孫を残すことによる適応度と自分と同じ遺伝子をもつ他個体が子孫を残すことによる適応度を合わせたものである。包括適応度の観点から考えると、共同子育て行動が進化する条件は、共同子育てを行うことで兄弟と共通の遺伝子が通常の子育てを行うよりも残りやすくなるということである。すなわち、(共同子育てを行うことで増える弟妹の数) × (兄弟姉妹間の血縁度) が (共同子育てを行わない場合に残せる兄弟自身の子の数) × (親子間の血縁度) よりも大きくなるということが求める条件となる。

設問で、両親のみで育てることができるこの数を x 、両親が兄弟個体と共同で育てることができる子の数を y 、兄弟個体が他個体と繁殖して育てることができる自分の子の数を z としている。よって、共同子育てを行うことで増える弟妹の数は $y - x$ である。また、共同子育てを行わない場合に残せる兄弟自身の子の数は z である。

兄弟姉妹間、親子間の血縁度を考える。子は親の遺伝子を半分ずつ受け継ぐので、当然親子間の血縁度は 0.5 である。次に、兄弟姉妹間の血縁度を考えるが、問 3 で考えたのと同様に考えよう。兄弟個体のもつ稀な対立遺

伝子が母親由来である確率と父親由来である確率はそれぞれ 0.5 である。母親、あるいは父親のその稀な遺伝子が別の弟妹に受け継がれる確率はそれぞれ 0.5 である。したがって、兄弟姉妹間の血縁度は、

$$0.5 \times 0.5 + 0.5 \times 0.5 = 0.5$$

である。

したがって、求める条件は

$$(y-x) \times 0.5 > z \times 0.5$$

$$\therefore y-x > z$$

であるから、解答は(E)となる。理由の解答例は以下のとおり。

解答例

「兄弟姉妹が両親と共同して育てることによって両親のみで育てる場合よりも増える弟妹個体の数 $y-x$ に兄弟姉妹間の血縁度をかけた値が、兄弟姉妹が繁殖して育てることのできる自分の子の数 z に親子間の血縁度をかけた値よりも大きくなる」ということが求める条件となる。兄弟姉妹間の血縁度と親子間の血縁度はともに 0.5 で等しいから、式は $y-x > z$ となり、(E)が答えとなる。(178 字)

問 5 難易度：★★★★★

利他行動が進化するために包括適応度の上昇に加えて必要な条件を書く記述問題であるが、難しい問題である。問題文にヒントは与えられていないし、その場で思いつくのは厳しい。知らなければ解けないが、知らなくても仕方がないような知識なので解けなくてもやむを得ないだろう。しかし、次に似たような問題に出会ったときは必ず正解できるようにしたい。

チスイコウモリの具体例とともに考えよう。チスイコウモリは通常 100 匹ほどの群れを形成して生活している。チスイコウモリは夜間に鳥類や哺乳類に噛みつき、そこから血液を舐めとる。しかし、同じ群れの中に不運にも吸血できなかった個体があった場合、自分が吸血した血の一部を吐き戻し口移しで分け与えるという利他行動をとるのである。逆に、この利他行動をとらないような個体は、吸血できなかったときに血を分け与えてもらえなくなったり、集団から排除されたりする。

このように、他個体の利他行動の恩恵を受けるだけで自らは利他行動をとらない裏切り者は、恩恵を受けられなくなったり、集団から排除されたりする。そのようなしくみをとることで、利他行動がとられやすくなり進化する。

以上より、解答は次のとおり。

解答例

利他行動を行う個体群内で裏切りやただ乗りを阻止するしくみがある。(32 字)

問 6 難易度：★★★★☆

設問文に「血縁度に基づき記述せよ」とあるので、まずはアリのコロニーにおける姉妹間と姉弟間の血縁度を求めよう。

姉妹間の血縁度は問 2 の(エ)で求めたとおり 0.75 である。次に姉弟間の血縁度について問 3 と同様に考える。ワーカー個体(姉)がもつ稀な対立遺伝子が母親由来である確率と父親由来である確率はどちらも 0.5 である。オス個体は女王バチの半数性単為生殖によって生じる。よって、稀な対立遺伝子が母親由来である場合に、その遺伝子が弟にあたるオスにも受け継がれる確率は 0.5 であるが、父親由来である場合に、その遺伝子が弟にあたるオスにも受け継がれる確率は 0 である。したがって、姉個体から見た姉弟間の血縁度は

$$0.5 \times 0.5 + 0.5 \times 0 = 0.25$$

である。

したがって、姉であるワーカーは、血縁度が 0.25 の弟にあたるオスを育てるよりも血縁度が 0.75 の妹にあたる次世代女王のメスを育てたほうが、包括適応度が上昇するといえる。

以上のことをまとめると、解答は次のとおり。

解答例

アリのコロニーにおいて、オスは単為生殖によって生じるために姉個体から見た姉弟間の血縁度は $0.5 \times 0.5 + 0.5 \times 0 = 0.25$ である。一方姉妹間の血縁度は 0.75 であるため、メス個体であるワーカーは、弟にあたるオスよりも妹にあたる次世代女王のメスの世話をしたほうが、包括適応度が上昇するから。(145 字)

(西川尚吾, 神戸朱琉, 後藤暁彦)