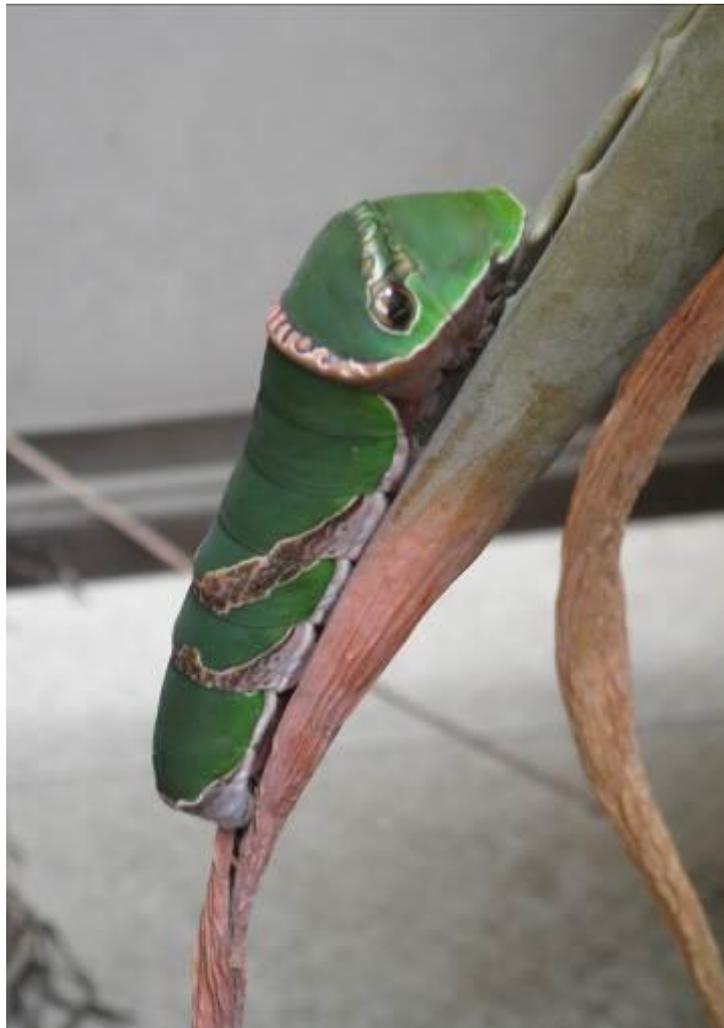


日本生物学オリンピック2013

予選問題

2013年7月14日（日） 13:30~15:00

〈正解・解説〉



問1) 【正解】D 【部分点】A, B, C, G, I, J

【解説】動物の中心体は微小管形成の起点となつて中心的なはたらきをしており、その複製は、DNA 複製とともに、1細胞周期あたり1回のみ起こる。2つに複製された中心体は、細胞分裂の際に紡錘体微小管を形成する中心となり、娘染色体を両極方向に引っ張る役目も担っている。DNA 合成と細胞分裂の調節機構を調べる方法の1つとして、1970年に Rao と Johnson は、細胞周期のステージの異なる HeLa 細胞どうしを、ウイルスをもちいて融合させる実験を試みた。2003年には Wong と Stearns (2003, *Nature Cell Biology* 5:539-544) は、中心体の複製がどのように調節されているかを知るために、ヒト繊維芽細胞の融合実験を行なった。本問題は Wong と Stearns (2003) の内容に基づいて作成された。

左の図の実験で G1 期と S 期の細胞を融合させると、G1 期の核が S 期に移行することから、①は正解である。真ん中の図で、細胞融合によって G1 期と G2 期の核が共存すると、G1 期の核では DNA 合成が開始されず、中心体が複製されることから、⑤も正解である。一方、真ん中の図から中心体の複製は抑制されていないし、また G1 期の核が S 期に進んでいないので、②と④は不正解である。右の図で S 期と G2 期を細胞融合させると、特に変化は起こらないので、③は不正解である。

問2) 【正解】J 【部分点】E, H

【解説】この実験は、形質転換の確認実験としてよく行なわれるものである。コントロール I は X-gal を含まない培地で培養しているので、青色を呈することはなく、アンピシリン耐性遺伝子が導入された少数の大腸菌から白いコロニーが少数生じるはずである。このことから、本実験の青色のコロニーは X-gal により呈色したものであることが確認できる。コントロール II はアンピシリンを添加しないので、アンピシリン感受性の大腸菌も増殖できる。したがって、多数の白いコロニーと、プラスミドがとりこまれた少数の大腸菌が青色のコロニーとして生じる。コントロール III はプラスミドを導入していないので、アンピシリンの作用で、コロニーは生じない。これらのことから、本実験で生じた少数のコロニーはアンピシリンによって選択されたものであることが確認できる。

大腸菌に遺伝子を導入しても、大腸菌にとって必要がない遺伝子は読まれないことも多い。1977年にジェネンテック社が開発した、大腸菌にヒトのインスリン遺伝子を導入して、大腸菌にヒトのインスリンを作らせる方法では、β-ガラクトシダーゼを利用してヒトのインスリン遺伝子を読まれるようにした。その後、β-ガラクトシダーゼ遺伝子は各種の遺伝子導入の際のレポーター遺伝子として使われている。

	使用する大腸菌	アンピシリン	X-gal	期待される結果
本実験	プラスミド導入	添加	含む	青いコロニーが少数
コントロール I	プラスミド導入	添加	含まない	白いコロニーが少数
コントロール II	プラスミド導入	添加しない	含む	白いコロニー多数と青いコロニー少数
コントロール III	プラスミド非導入	添加	含む	生育しない

問3) 【正解】D 【部分点】C

【解説】このグラフは、基質の初期濃度が Km 値(ミカエリス定数=反応速度が最大速度の半分になるときの濃度)の10倍程度の場合にえられるものである。反応生成物濃度は時間がたつにつれて増加する。逆に基質濃度は減少する。反応速度は、基質濃度が高い反応初期には滑らかに低下するが、基質濃度が低くなると急激に低くなる。これは、基質濃度が高く、すべての酵素が基質と複合体を作る飽和状態にある場合は、反応速度は最大速度に近いが、基質濃度が低下し、酵素が余るようになると反応速度は急激に低下することになるためである。

基質の初期濃度が Km 値の100倍程度と大量の基質が存在する条件下では、反応速度は、反応の進行にともなって起こる基質濃度の減少にほとんど影響されず、長時間にわたってほぼ最大速度を保つ。

問4) 【正解】 E

【解説】 *P*は「胚発生中の極細胞は正常であるが、配偶子は形成されない」ことから配偶子の形成に異常が起こったことが、*Q*は「生殖巣外に極細胞がある」ことから移動がうまくいかなかったことが、*R*は「胚のどこにも極細胞がない」ことからアポトーシスが起こったことが分かる。以上より、*P*は配偶子形成遺伝子、*Q*は移動関連遺伝子、*R*はアポトーシス抑制遺伝子となる。

相補的な配列の二本鎖RNAにより、mRNAの分解を引き起こさせる現象は、RNAi (RNA interference, RNA 干渉) とよばれる。RNAi はアンドリュー・ファイアー (米スタンフォード大) とクレイグ・メロー (米マサチューセッツ大) が線虫で発見し、1998年に発表した。当時はあまり大きく注目されなかったが、その後、次々に他の生物 (ショウジョウバエ, 酵母, イネ, シロイヌナズナなど) でも発見され、その原理が研究において利用された。やがて、RNAi 発見の功績が認められ、2006年にノーベル生理学・医学賞を受賞した。最近では、RNAi を医薬品に応用する研究が進んでいる。

本試験に登場した生物

真正細菌ドメイン				大腸菌	(問2)			
真核生物ドメイン	植物界	被子植物門	双子葉植物綱	マメ科	ツルマメ (問12)			
					ダイズ (問12)			
				アブラナ科	セイヨウアブラナ (問10)			
				ナス科	トマト (問11)			
				単子葉植物綱	イネ科	トウモロコシ (問12)		
		動物界	節足動物門	甲殻亜門		アメリカザリガニ (問6)		
					六脚亜門	昆虫綱	ハエ目	ショウジョウバエ (問4, 18, 19)
					棘皮動物門		ウニ綱	ウニ (問5)
				脊椎動物門	脊椎動物亜門	両生綱	有尾目	サンショウウオ (問8)
無尾目	ヒキガエル (問9)							
	哺乳綱	鯨偶蹄目	ラクダ (問21)					
			ブタ (問21)					
			キリン (問21)					
			ウシ (問21)					
			カバ (問21)					
			ヒゲクジラ (問21)					
			ハクジラ (問21)					
			霊長目	ヒト (問1, 7, 16, 17)				

問5)【正解】C 【部分点】B

【解説】ウニなどでは異種間での受精は困難とされるが、この実験はうまく受精が起こった例である。この時、卵核と精核は融合し、融合核を形成する。与えられた実験とその結果1と2から、卵細胞質が胞胚までの時間を規定していることが容易に推測され、残りの実験で核の影響を受けないことが確かめられる。一方、実験5と6から、受精卵の核が胞胚から原腸陥入までの時間を決めていることが分かる。そして、3と4の実験結果から、受精卵の核でも、胞胚から原腸陥入までの時間を決めているのは、卵にもともと存在していた核の方（精子核ではなく卵核）であることが結論される。したがって、胞胚までの時間は卵細胞質をもつ種 Y の時間経過となり、胞胚から原腸陥入までの時間は、卵核供与体である種 X のものとなる。

問6)【正解】B 【部分点】A, D, F

【解説】アメリカザリガニでは、赤色素胞は明所で拡散、暗所で凝集し、白色色素胞は明所で凝集、暗所で拡散すると報告されている。これはホルモンによって調節され、眼柄に含まれる赤色素凝集ホルモンによって赤色素胞は凝集するが、白色色素胞には影響しない。また、コラゾニンは、赤色素胞と白色色素胞のいずれにも影響する。

(参考文献：Porras ら(2003), *Peptides* 24:1581-1589)

- ①は○ 図1から赤色素胞は拡散、白色色素胞は凝集していることがわかる。
- ②は×
- ③は○ 図1よりコラゾニンは赤色素胞と白色色素胞のいずれにも影響する
- ④は×
- ⑤は× 図2より赤色素凝集ホルモンは白色色素胞に影響しない。
- ⑥は○ 図2よりコラゾニンより赤色素凝集ホルモンの方が赤色素胞に強く影響する。

ABO 式血液型についてあれこれ (1)

<なぜ日本人は自分の血液型をよく知っているのか>

1つは、ABO 式血液型の遺伝のしくみを解明したのが日本人であること（古畑種基 1891-1975）と、もう1つは、血液型と性格が関係あるという説を出したのも日本人である（古川竹二 1891-1940）からであろう。その真偽は、次のコラムを参考に、諸君自身が考えて欲しいが、血液型とは本人の意思で変えられないものであるから、これについてあまり云々するのは、差別的思想につながるであろう。実際に一流企業が血液型を限定して社員を募集して問題になったことがある。いずれにしても、こんなに自分の血液型を知っている国民は、日本人だけらしい。

<血液型と性格>

血液型と性格は関連があるという説を出したのは、前述の通り、古川竹二という教育学者である（1928）。その後、いろいろな議論があったが、「相性占い」と関連させて、おもしろおかしく紹介したのが能見正比古である（1971）。そして、何回かのブームを経て今日に至っている。

さて、血液型と性格は本当に関係があるのだろうか。統計学者は、そのことを裏付けるデータはないという。また、心理学者は「自分は△型だから～である」と思いこんでいたり、「あなたは□型だから～だ」と言われ続けたりすると、心理作用でその「～」の部分が強調されて感じられたり、実際にそう変化したりするという。

問8) 【解答】 E

【解説】 サンショウウオはカエルと同じ両生類なので、甲状腺ホルモン：チロキシンが変態を促進する。チロキシンについては間脳視床下部から放出ホルモンが出て、脳下垂体前葉から甲状腺刺激ホルモンが出る。これを受けた甲状腺からチロキシンが放出される構造をとる。ホルモン分泌はフィードバック調節を受ける。

体色変化については、脳下垂体中葉から分泌されるインテルメジンの分泌により、色素細胞の黒色素粒の拡散（暗色化）が促進される。光は目で受容され、興奮は視神経を通じて間脳に達する。その結果、間脳は中葉の体色暗化作用を抑制し、体色は明化する。

この問題では：

- A 脳下垂体前葉から出る甲状腺刺激ホルモンが、チロキシンの分泌を促進する。
- B 脳下垂体中葉から出るインテルメジンが色素胞の顆粒を拡散するので、体色は暗色化する。
- C 対照実験として手術ストレスを考えるものである。
- D 目隠し実験から、視覚が重要であると考えられる。
- E 脳下垂体中葉から分泌するインテルメジンは、体色を暗色化する。分泌を抑制しないと明色化しないので誤り。
- F この実験情報からは何ともいえない。

問9) 【正解】 H 【部分点】 D

【解説】 この実験は、石居進著『カエルの鼻』（八坂書房）で紹介されている、著者が行なった実験である。仮説は池の方向を知る手掛かりから、次の3つに分けられる。①⑥（池からのカエルの声や池の臭いといった池からの情報）、②④（太陽や地磁気などの天体的な方向）、③⑤（池までの通り道を何らかの形で覚えている）。この実験を行なったとき、この3つの仮説によるカエルの反応はそれぞれ次の3つに分かれることが期待される。①⑥が正しければ、どこに置かれても池に向かって歩くので東に向かって歩く。②④が正しければ、池の方向とは関係なく西に向かって歩き続ける。③⑤が正しければ、新しい場所で迷子になり、でたらめな動きをする。実験結果は、まず対照群から箱に入れて運んだことの影響はないことがわかる。実験群はバラバラの動きをしたことから新しい場所で迷子になったと考えられ、したがって、①②④⑥が否定できることになる。

『カエルの鼻』によると、その後の実験でヒキガエルは嗅覚で繁殖池までの道筋を覚えていることが確認された。また、他にも「子ガエルはどうやって池から出ていく方向を決めるか」「雄はどうやって雌を見つけるか」「産卵のとき、雄が雌に抱きつくのはなぜか」などが、実験結果に基づき科学的に紹介されている。興味のある人はぜひ読んでみてほしい。

問10) 【正解】 H 【部分点】 J

【解説】 植物ホルモンには、オーキシン、ジベレリン、サイトカイニン、アブシシン酸（ABA）、エチレン、ブラシノステロイドなどが知られている。一般に植物ホルモンは、細胞分裂や細胞伸長、細胞の分化に影響を与えることで、植物の生長と分化を制御している。また、植物ホルモンの中には、環境刺激に対する生理反応を仲介するものもある。植物ホルモンはごく微量しか存在しないが、それぞれ複数の効果をもっており、作用する場所や濃度や発生の段階によってその効果は変わってくる。植物ホルモンの中で ABA は、植物の生長抑制、種子休眠の誘導、発芽抑制の機能や、植物の乾燥耐性を可能にする重要な内部シグナルである。ABA 濃度は種子の成熟ともなって増大し、成熟種子における高濃度の ABA が発芽を阻害し、成熟に伴って起こる過剰な脱水から種子を保護するタンパク質を細胞内に蓄積する役割がある。休眠中の種子から ABA が除去あるいは不活性化されると発芽が開始されるが、ジベレリンの ABA に対する割合で種子の休眠と発芽が制御されている。したがって、ABA 存在下では、発芽は抑制され、休眠状態が続き、吸水も呼吸にともなう酸素の取込みも低くなった状態が続くことになる。

なお、乾燥種子の吸水には、水に接触すると休眠状態によらず初めに起きる物理的で可逆的な吸水と、その後起きる発芽と関係した生理的で不可逆的な吸水があり、前者の吸水は ABA で抑えられないことに注意する必要がある。

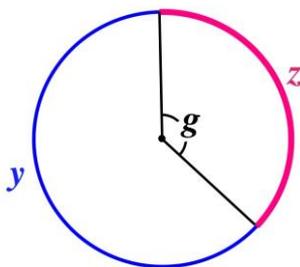
問 11) 【正解】 D 【部分点】 B, C

【解説】 $\angle P_3OP_2$, $\angle P_2OP_1$, $\angle P_1OI_1$ が $136^\circ \pm 5^\circ$ であったことから、トマトでは直前の葉と 136° 前後の角度をなすような位置に葉が発生することがわかる。 I_1 の内側に切れ込みを入れたとき、 $\angle I_1OI_2$ は 140° と通常の角度の範囲内であったが、 $\angle I_2OI_3$ は 169° となった。つまり I_2 の発生位置は変化しなかったのに対し、 I_3 の位置は大きく変化し、通常より I_2 から遠く I_1 に近い方にずれた。この結果は、 I_1 が発達し始めている時点で、 I_2 の発生位置はすでに決定されているが、 I_3 は未決定であることを示唆している。したがって、⑤と⑥のうちでは、⑥が妥当である。また、切れ込みによって I_1 からの作用を遮断すると、 I_3 の位置が I_1 に近い方にずれたことから、この作用は近傍に新たに葉が発生することを抑えるような性質のものであることが推定され、①と②のうちでは、①が妥当となる。③のように、ある葉の発生位置に影響する葉がただ1つであれば、その葉からの抑制作用がもっとも弱い、O を挟んで正反対の位置に葉はできるはずである。しかし、そのような位置関係にある葉の対は、通常の状態では存在しない（例えば I_1 に着目すると、 $\angle P_3OI_1$, $\angle P_2OI_1$, $\angle P_1OI_1$ のいずれも 180° に近い角度ではない）ので、③は考えにくい。一方、④のように、先行する複数の葉から受ける抑制作用の合計が低いところを選んで、葉が発生すると仮定すると、連続する葉のなす角度が 136° 前後という中途半端な数字になることも不思議ではない。 I_1 が発生する場合について言えば、直前に生じた P_1 が茎頂部に強い抑制的作用を及ぼしているものの、茎の成長につれて茎頂から遠ざかりつつある P_2 もやや弱い抑制的作用を及ぼしているので、 P_1 の正反対の位置から P_2 の影響で少しずれたところに発生すると考えることができる。よって、③と④のうちでは、④が妥当である。

葉の発生パターンに関しては、これまでに様々な数理モデルが提案され、コンピュータシミュレーションが行なわれている。その中で、発達中の葉が距離に応じて減衰するような抑制的作用を後続の葉の発生に対して及ぼしていると仮定すると、実際に植物の葉の配列によくみられるパターンが安定的なパターンとしてえられることが示されている。さらに最近の分子生物学的研究により、葉の発生には茎頂表層部におけるオーキシンの極性輸送と蓄積が重要であること、発達中の葉には周辺領域の表層部からオーキシンが流れ込むことなどが明らかにされており、発達中の葉が新たな葉の発生に及ぼす抑制的作用の正体はオーキシンの除去であると考えられるようになってきている。

黄金角と葉の角度

円周 x の円を中心角 g で長さ y の弧と長さ z の弧に分割する。 x と y の比が y と z の比に等しくなるときの g を黄金角という。



$$y : z = x : y = (y + z) : y$$

$$(360 - g) : g = 360 : (360 - g)$$

$$\left(\frac{360}{g}\right)^2 - 3 \times \frac{360}{g} + 1 = 0$$

これを解いて、 $g = 137.50766\dots$

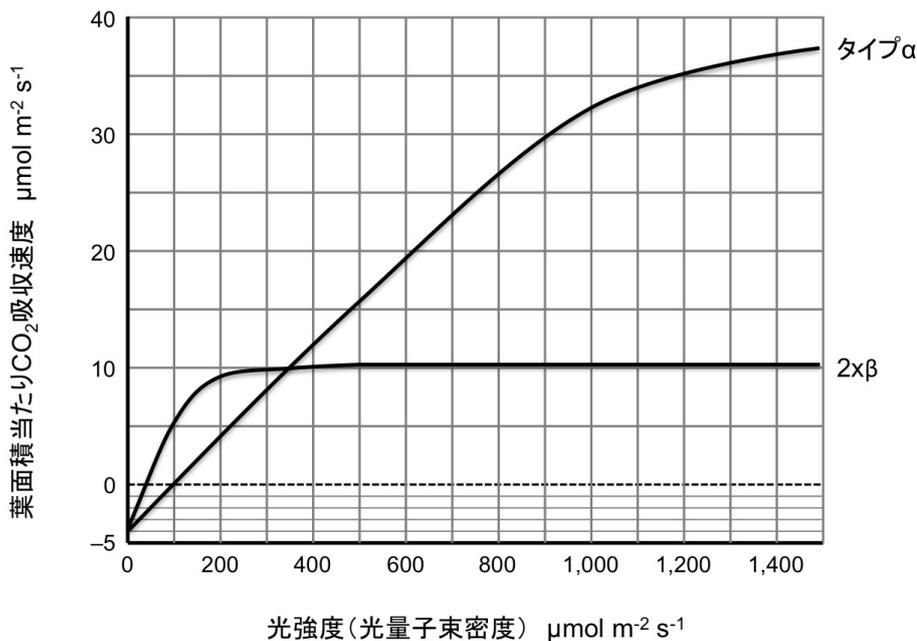
1つの節に1枚ずつ葉をつけるタイプの植物の大半では、不思議なことに、連続する葉のなす角度がこの黄金角に近く、 $135^\circ \sim 140^\circ$ くらいである。問 11 の解説にあるように、先に生じた葉が新たな葉の形成を抑制する作用を及ぼしていると仮定してシミュレーションを行なうと、実際の葉の配列にみられるようないくつかのパターンが再現される。どのパターンになるかは条件設定次第だが、とくに幅広い条件で安定してえられるパターンの1つが、葉を1枚ずつ、黄金角に近い角度分ずれるように形成するパターンであり、このとき葉の配列は全体として美しいらせんを描く。

問 12) 【正解】 F 【部分点】 A, G

【解説】 トウモロコシは、畑の外で生き残ることができないため、いずれの遺伝子を導入した場合でも野生植物に影響を与えることは考えにくい。 $pA::BT$ を導入したトウモロコシでは、BT タンパク質を発現した花粉が飛散して周辺の植物に付着し、それを餌と一緒に食した昆虫に害が出る可能性がある。一方、ダイズは花粉が訪花昆虫によって運ばれ、畑の近くに生育するツルマメが受粉することによって、BT タンパク質の遺伝子が野生のツルマメに広がっていく可能性がある。このツルマメを食した昆虫はBT タンパク質により害をこうむるので、そのツルマメは虫害を受けにくくなり、より増殖する可能性がある。

問 13) 【正解】 G

【解説】 タイプ α の葉を1 m²形成するのと同じコストで、タイプ β の葉なら2 m²形成することができる。そのため、同一コストで形成されるタイプ α の葉の物質生産量とタイプ β の葉の物質生産量を比較するには、図中のタイプ β の曲線をCO₂吸収速度が0のラインを中心に上下に2倍に拡大してから（この曲線を曲線2 \times β とよぶことにする）、タイプ α の曲線と比べればよい。光強度0のときにタイプ α の曲線と曲線2 \times β は同じ値をとることから、夜間の呼吸で消費する物質の量はタイプ α の葉を形成した場合とタイプ β の葉を形成した場合とで変わらないことがわかる。したがって、タイプ α の曲線と曲線2 \times β とが交わる光強度がそのまま、タイプ α を形成した方が有利になる日中の光強度を与える。



問 14) 【正解】 F 【部分点】 E

【解説】 天敵解放説の予測は、侵入地系統が天敵に対する防御を減じているということであるので、天敵有条件下で食害量を比較した①の結果が必要である。競争力増大仮説の予測は、侵入地系統の成長がより大きいということであるので、天敵無条件下で成長量を比較した④の結果が必要である。適応的分化が生じていることを示すためには、原産地と侵入地を模した実験条件（天敵有と天敵無）のもとで、それぞれ由来地の系統の適応度が相対的に高いというような適応度の逆転が起きていること（ホームサイトアドバンテージともいう）を示す必要がある。そのため、⑤と⑥の結果が必要である。したがって、問題文にあるような結論をだすためには、①、④、⑤、⑥の結果が必要であり、それらの結果を含む組合せはFのみである。

問 15) 【正解】 E 【部分点】 A, I

【解説】 生物はつねに絶滅の危険性にさらされている。なんらかの原因で個体数が極端に減少すると、交配相手を捜すことが困難になることや近親交配の割合が高くなり適応度が減少することなどにより、個体数はさらに減少し、絶滅してしまう。また、異常発生により個体数が極端に増加すると、生息環境が悪化するなどにより個体数が極端に減少することもある。この問題ではこの両方を取り入れたモデルを考えている。なお、実際の生物はもっと複雑であり、このように単純なものではない。

$X=Y$ の上にあれば個体数は増加し、下にあれば個体数は減少する。したがって、個体数が 3000 より少なくなると個体数は減少し、絶滅する。また、個体数が 12000 より多いと、次世代の個体数は 3000 より少なくなり、その後個体数が減少していく。個体数が 3000 と 12000 の間にあれば、個体数は 6000 に向かって変化していく。

個体群成長モデル

個体群の個体数の増減モデルの中でもっとも基礎的な 2 つのモデルを紹介する。これらのモデルは、単純な仮定に基づいており、現実とは大きな違いがあるが、仮定と予測の関係を理解する上で重要なモデルである。

(1) 指数関数的個体群成長モデル

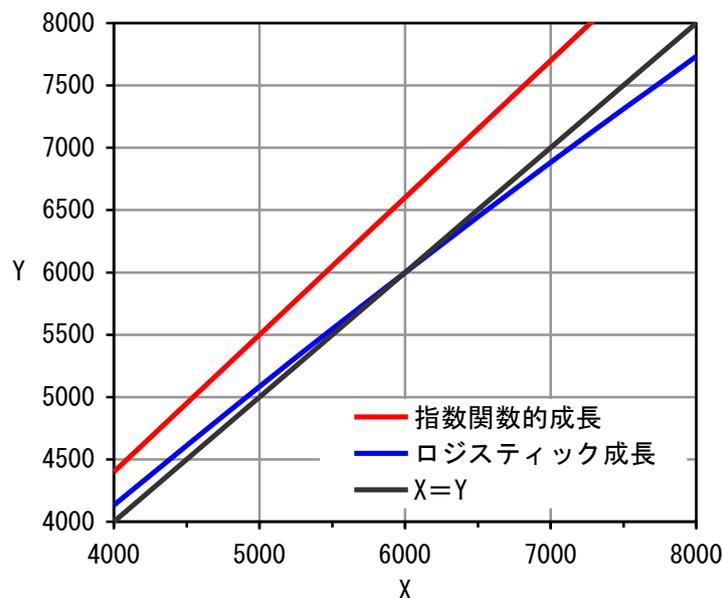
個体数 (N) は毎世代 a 倍増加するというモデルである。すなわち、ある世代の個体数 (X) が N であるとき、次の世代の個体数 (Y) は aN となる。これは微分方程式 $dN/dt = rN$ で表現できる。ここで、 r は内的増加率とよばれ、 $r = \log_e a$ であたえられる。このモデルでは、 a が 1 より大きい (r が 0 より大きい) と、個体数は増加し続け、無限に大きくなる。

(2) ロジスティック個体群成長モデル

上のモデルでは、個体数は無限に大きくなる。しかし、環境 (生息域や食料) には限りがあり、個体数が無限に大きくなることはない。上のモデルに、個体数は K が最適であり、無限に大きくなれないことを取り入れたモデルが、ロジスティック個体群成長モデルである。ここで、 K は環境収容力とよばれており、微分方程式 $dN/dt = rN(K-N)/K$ で表現される。このモデルでは、 $N=K$ のとき、 $dN/dt=0$ となり、個体数は増減しない。なお、このモデルでは、問 15 のモデルとは違い、個体群は絶滅しない。

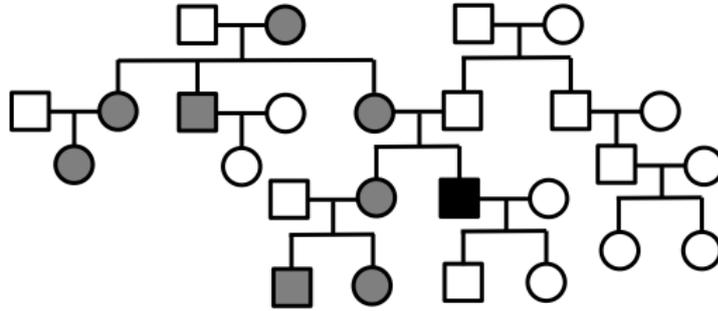
図は、 $r=0.1$ 、 $K=6000$ のときの、ある世代の個体数 (X) と次の世代の個体数 (Y) の関係を示している。 $X=Y$ の上にあれば増加し、下にあれば減少する。(1) 指数関数的個体群成長モデルでは、個体数は常に増加する。(2) ロジスティック個体群成長モデルでは、個体数が 6000 より少ないと、6000 に向かって増加していく。一方、個体数が 6000 より多いと、6000 に向かって減少していく。

[注：微分方程式は大学で学ぶことになるでしょう。そのとき、思い出してください。]



問 16) 【正解】 H

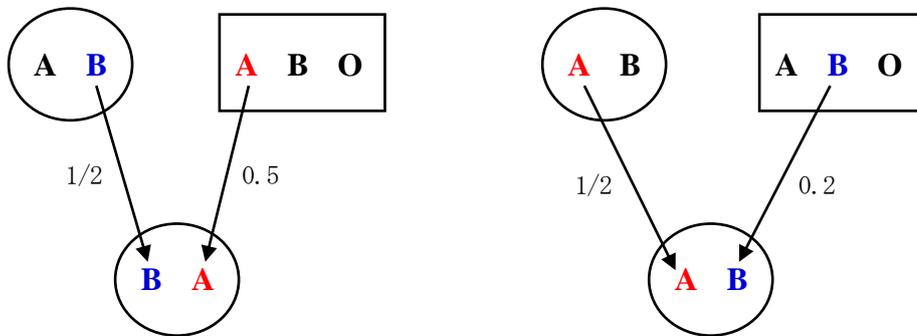
【解説】 ■で示す男性がもっている変異ミトコンドリア遺伝子は、その母親のミトコンドリアに由来する。変異ミトコンドリア遺伝子をもつ母親から生まれた子は、すべて変異ミトコンドリア遺伝子を有すると考えられる。したがって、図のグレーで示した8名が変異ミトコンドリア遺伝子をもつと考えられる。



問 17) 【正解】 G 【部分点】 D

【解説】 両親とも遺伝子型の情報がない場合、子どもの遺伝子型が AB 型になる確率は、ハーディ・ワインベルグの法則が成り立っていると、 $2 \times 0.5 \times 0.2 = 0.2$ となる。この問題では母親の遺伝子型が分かっているため、次のように考える必要がある。

子どもが母親から A 遺伝子を受け取る確率は $1/2$ であり、B 遺伝子を受け取る確率は $1/2$ である。父親の遺伝子型は不明であるため、集団の遺伝子頻度を使う。すなわち、子どもが父親から A 遺伝子を受け取る確率は 0.5 であり、B 遺伝子を受け取る確率は 0.2 である。したがって、子どもの遺伝子型が AB 型となる確率は、 $1/2 \times 0.5 + 1/2 \times 0.2 = 0.35$ となる。



この問題ではハーディ・ワインベルグの法則が成り立っている必要はないが、ハーディ・ワインベルグの法則を仮定しても解くことができる。下の表はその計算方法を示しており、求める確率は、右下のように、 0.35 となる。

父親の遺伝子型	頻度 (a)	子どもが AB 型である確率 (b)	a×b
AA	0.25	$1/2$	0.125
AO	0.30	$1/4$	0.075
BB	0.04	$1/2$	0.020
BO	0.12	$1/4$	0.030
AB	0.20	$1/2$	0.100
OO	0.09	0	0.000
合計	1.00		0.350

問 18) 【正解】 I 【部分点】 J

【解説】ヘテロ接合度は、1960年代以降、タンパク質や血液型の遺伝的多様性を知るために広くもちいられている。しかし、DNA配列が容易に調べられるようになった現在、塩基多様度などのDNAレベルの遺伝的変異量を調べるのが主流になってきている。

ヘテロ接合度を計算するには、ホモ接合度（ホモ接合体の割合）を計算し、1からこれを引く方が簡単である。すなわち、地点1のヘテロ接合度は $1 - (0.4^2 + 0.3^2 + 0.3^2) = 0.66$ となり、地点2のヘテロ接合度は $1 - (0.1^2 + 0.4^2 + 0.5^2) = 0.58$ となる。

2つの集団の遺伝的構成が大きく異なるためには、集団間の交流がほとんどないことが必要である。すなわち、集団間の移住が制限されていることになる。もし移住が頻繁に起きていると2つの集団の遺伝的構成は似たものになる。

DNA レベルの遺伝的変異量

ここでは、DNAレベルの遺伝的変異量の1つである塩基多様度を紹介する。塩基多様度とは、DNA配列間で違っている塩基数の（塩基あたりの）平均値である。

今、あるヒト集団から無作為に4人（個体1、個体2、個体3、個体4）を選び、彼らからミトコンドリアDNAを抽出し、ある領域のDNA配列を決定したとしよう。その結果、4本のDNA配列（長さ：80塩基）が、以下のものであったとする。なお、赤字は、違いがある部位を示している。

個体1 TCGATTAGCGG**A**TAAGCCGATTACAGTCGACGTGCAATT**G**CCGT**G**TAGCCAGTACGAGGCGAT**G**CGTGTCTGAAGCGATG
個体2 TCGATTAGCGG**A**TAAGCCGATTACAGTCGACGTGCAATT**G**CCGT**G**TAGCCAGTACGAGGCGAT**G**GGTGTCTGAAGCGATG
個体3 TCGATTAGCGG**T**TAAGCCGATTACAGTCGACGTGCAATT**G**CCGT**G**AGCCAGTACGAGGCGAT**G**CGTGTCTGAAGCGATG
個体4 TCGATTAGCGG**T**TAAGCCGATTACAGTCGACGTGCAATT**C**CCGT**G**TAGCCAGTACGAGGCGAT**G**CGTGTCTGAAGCGATG

個体1のDNA配列と個体2のDNA配列を比較すると、80か所のうち、1か所（右から16番目の塩基）に違いがみられる。したがって、この2本のDNA配列間の違いは $1/80 = 0.0125$ である。同様に、個体1と個体3の違いは $2/80 = 0.025$ 、個体1と個体4の違いは $2/80 = 0.025$ 、個体2と個体3の違いは $3/80 = 0.0375$ 、個体2と個体4の違いは $3/80 = 0.0375$ 、個体3と個体4の違いは $2/80 = 0.025$ である。したがって、塩基多様度は、これらを平均して、

$$(0.0125 + 0.025 + 0.025 + 0.0375 + 0.0375 + 0.025) / 6 \approx 0.0271$$

となる。

塩基多様度は、領域ごとに違いがある。一般的に、重要な機能を担っている領域の塩基多様度は低く、あまり重要でない領域の塩基多様度は高い。たとえば、多くの場合、アミノ酸に翻訳されるDNA領域の塩基多様度は、アミノ酸に翻訳されないDNA領域の塩基多様度より低い。（例外もある。たとえば、免疫系の遺伝子座には、アミノ酸に翻訳されるDNA領域で高い塩基多様度を示すものがある。）

ヒトでは、ミトコンドリアDNAの塩基多様度は、核DNAの塩基多様度の約10倍である。これは、ミトコンドリアDNAがあまり重要でないことを意味しているわけではない。事実、ミトコンドリアは重要な細胞小器官であり、高い塩基多様度はミトコンドリアDNAの突然変異率が核DNAより高いことに起因すると考えられている。

塩基多様度を決定するおもな要因は、突然変異率、集団の大きさ（個体数）、自然選択であると考えられている。すなわち、突然変異率が高いと塩基多様度は高くなり、集団が大きいと塩基多様度は高くなる。また、負の自然選択（有害な突然変異を排除しようとする自然選択）がはたらいていると塩基多様度は低くなるが、平衡選択（変異を積極的に維持しようとする自然選択：超優性選択や頻度依存選択）がはたらいていると塩基多様度は高くなる。

問 19) 【正解】 H 【部分点】 D, F, G

【解説】 比較的簡単な伴性遺伝の問題である。F₁ 雌の遺伝子型は、+ B/m+であり、表現型は [B] であることは容易にわかるであろう。F₁ 雄の X 染色体は m+であり、二重劣性になっていることから、F₁ どちらの交配はそのまま検定交配になることがわかる。したがって、[+] と [mB] が組換え型であり、全体に占める組換え型の割合が、m と B の間の組換え価になる。F₂ のうち、[mB] の表現型を示す雌の遺伝子型は、mB/m+であり、mB/Y の雄と交配すると、子供の雄には [mB] と [m] の 2 種類の表現型が生じる。

問 20) 【正解】 E 【部分点】 F

【解説】 突然変異はある個体の 1 つの対立遺伝子に生じるが、その突然変異が既存の対立遺伝子にくらべて有利である場合は、種内に広がって、ほぼ全ての個体はその対立遺伝子をもつ可能性が高まる (正の自然選択)。また新たな突然変異が既存の対立遺伝子と同じ機能をもっている (自然選択に対して中立であれば)、そのような突然変異の一部は偶然によって種内に広がって (これを遺伝的浮動という)、種内のほぼ全ての個体はその突然変異をもつこともある。このように、ある突然変異が種内全体に広がることを対立遺伝子の固定という。

1 塩基の挿入/欠失が 3 箇所あれば、突然変異と種内への固定は 3 回起こったことになる。いっぽう 3 塩基がまとまって一度の挿入/欠失が起こったとすれば、突然変異と種内への固定が起こったのは 1 回となる。ここで調べている遺伝子は必須タンパク質をコードしているので、3 塩基がまとまって 1 度に挿入/欠失が起こらないとフレームシフトが起こってしまい、必須タンパクが作られなくなってしまう。フレームシフトのような不利な変異遺伝子は生物進化の過程においては非常に短い時間で集団中から脱落する。これらのことから、正解は E と F に絞られる。塩基置換の数は、E では 3 箇所、F では 4 箇所、よってここでは少ないほうの E が正解となる。

国際生物学賞

国際生物学賞は、「昭和天皇の御在位 60 年と長年にわたる生物学の御研究を記念するとともに、本賞の発展に寄与されている今上天皇の長年にわたる魚類分類学 (ハゼ類) の御研究を併せて記念し、生物学の奨励を図る」ことを趣旨として、昭和 60 年に創設された賞です。これまで 28 名の方が受賞しています。その内、日本人 (受賞当時) の受賞者は、以下の 4 名です。() 内は受賞当時の所属です。

昭和 63 年度	授賞分野「集団生物学」	木村 資生 博士 (国立遺伝学研究所名誉教授・日本学士院会員)
平成 8 年度	授賞分野「生殖の生物学」	柳町 隆造 博士 (ハワイ大学教授)
平成 11 年度	授賞分野「動物生理学」	江橋 節郎 博士 (東京大学名誉教授・岡崎国立共同研究機構生理学研究所名誉教授)
平成 14 年度	授賞分野「進生物学」	根井 正利 博士 (ペンシルベニア州立大学教授)

問 21) 【正解】 D 【部分点】 F

【解説】 表の順番を並び替えてみると

生物種	遺伝子座				
	1	4	5	3	2
ヒゲクジラ	?	+	+	+	-
ハクジラ	+	+	+	+	-
カバ	+	+	+	-	-
ウシ	+	+	-	-	+
キリン	+	+	-	-	+
ブタ	+	-	-	-	-
ラクダ	-	-	-	-	-

となる。遺伝子座 2 からはウシとキリンが近縁であること、遺伝子座 3 からはヒゲクジラとハクジラが近縁であること、遺伝子座 5 からクジラ（ヒゲクジラとハクジラ）はカバと次に近縁であること、さらに遺伝子座 4 からは（ヒゲクジラ、ハクジラ、カバ）のグループが（ウシ、キリン）のグループとその次に近縁であることがわかる。遺伝子座 1 の結果についてはヒゲクジラのデータを除くと、（クジラ、カバ、ウシ、キリン）がラクダよりもブタと近縁となることが示される。ここで遺伝子座 1 でのヒゲクジラのデータははっきりしない。しかし、生物の長い進化時間においては突然変異などが生じて PCR 法の実験等でその存在が簡単に確認できない場合がある。また挿入された転移因子を含む DNA 領域あるいはその一部がゲノムから欠失することも稀にある。今回の結果では、ヒゲクジラとハクジラの近縁関係は 2 つの遺伝子座（3 と 5）で支持され、2 つの遺伝子座（2 と 4）の結果とも整合していることから、ヒゲクジラの系統で何らかの突然変異が生じ、調べた方法では挿入された転移因子を確認できなかったとするのが妥当である。これらのことから正解は D となる。

この表のデータは、東京工業大学の岡田典弘教授の研究グループが 1999 年に発表した論文（二階堂ら、米国科学アカデミー紀要 96 号 10261~10266 頁）に基づいたものである。この論文では鯨目（旧分類）がカバのような偶蹄目（旧分類）と進化的に近縁であることが示された。これ以外の研究結果もあわせ、現在では鯨目（旧分類）が一部の偶蹄目（旧分類）に近縁であることが確立しており、ここで示した生物は全て鯨偶蹄目に分類されている。また同論文で調べられた転移因子は RNA を介して増幅するレトロポゾンである SINE（Short interspersed element）や LINE（Long interspersed element）である。レトロポゾンは生物のゲノムに数多く存在しているが、その機能や生物への影響などは一部を除いてよくわかっていない。動物のゲノムには tRNA に由来する SINE が多く知られているが、ヒトゲノムには 7SL-RNA に由来する Alu ファミリーの SINE も多数存在することが知られている。

表紙（クロアゲハの終齢幼虫：2013 年 6 月 24 日 千葉県柏市にて撮影）

クロアゲハ (*Papilio protenor*) の幼虫は、カラタチ、ユズ、サンショウなどの柑橘類の葉を食べて育つ。表紙の写真は、ユズで育った終齢幼虫が蛹になるために移動し、現在アロエの葉の上で休息しているところ。この後、さらに移動し、適当な場所を見つけ、身体を口から出した糸で固定し、蛹になった。それから 15 日後、右の写真のように無事に成虫になり、旅立った。

アゲハチョウ（ナミアゲハ *Papilio xuthus* やクロアゲハ）は、飼育が簡単で、完全変態を観察するのに適した生き物の 1 つである。葉に産みつけられた卵から出発して、幼虫がどのように変化していくかを見るだけでも楽しい。ただし、幼虫は食欲旺盛なので、注意を要する。また、蛹になる際、終齢幼虫は『逃亡』するので、これも要注意。

