

# 2013年度 日本生物学オリンピック 代表選抜試験

## 解答例および解説

第1問 生命現象のいろいろなレベルに見られる相互関係に関する以下の文を読み、問1～問4に答えなさい。

### 解答例

#### 問1 核と細胞質の相互作用

細胞は大きく分けて核と細胞質に分けることができ、いわば核は細胞質の中に浮かぶ島のようなものである。核の中には染色体や遺伝子があり、色々な遺伝情報を発現している。それらの遺伝情報は細胞質からの情報によって制御されている。また一方、細胞質では核の中でつくられたmRNA等の情報により細胞質のリボソーム等でタンパク質がつくられ、新しい細胞分化などを引き起こす。それゆえ細胞での核と細胞質は相互作用によって新しい構造と機能を実現するといえる。

#### 問2 細胞間相互作用

生体の中で 細胞は多くはお互い隣り合う同士によって、深く結合し、コミュニケーションを分子レベルで行っている。そこにはコラーゲンやラミニンなどの細胞間物質もあるし、インテグリンやカドヘリン、デスマゾームなどの細胞間結合分子や構造もある。各組織や器官が1つの集団となって、働くようになっているのは その細胞間のコミュニケーションを行う成長因子やイオンなどの働きによることが多い。例えば一般に各組織において細胞間の相互作用がなくなったりすると、正常細胞がガン化するなどの一因となっている。

#### 問3 上皮 - 間充織相互作用

私達の皮膚や消化管など多くの体の中の組織では、上皮と間充織の相互作用がおこって構造と機能をもつ分化がおこってくる。例えば、発生過程では、消化管において胃の上皮と胃の間充織による組み合わせでは、正常な胃ができる。次に胃の上皮と腸の間充織による組み合わせでは間充織の作用により、腸からのセクレチンが分泌する。さらに腸の上皮と胃の間充織の組み合わせでは、胃の間充織の働きにより胃の ペプシノゲンが分泌される。つまり、上皮 - 間充織の相互作用では 間充織の役割は大きい。

#### 問4 器官（臓器）間相互作用

私達の体には神経や血管がはりめぐらされており、それによって調整もなされている。膵臓のランゲルハンス島から血中に分泌されたインスリンは循環系に乗って体全体をめぐり、ほとんどすべての種類の体細胞を刺激してグルコースの取り込みを促進する。また、インスリンは肝臓でのグリコーゲン分解を抑えるとともに、グリセロールやアミノ酸からのグルコースへの変換を抑制する。血中のインスリンの他 アドレナリン、脳下垂体ホルモンなどのバランスも体の恒常性を保つ上でなくてはならないものである。このホルモンのバランスが各器官によって崩れると糖尿病など色々な病気が生じることが知られている。

第2問 エンドウの交配実験に関する以下の文を読み、問1～4に答えなさい。

解答例

問1 種子の色・種子の形 理由：他の形質は種子をまいて育てなければ分からない形質であるが、種子の色と形はその年のうちに判別できるから。

問2  $(3/4)^{10}$

問3 劣性形質の個体が生まれたかどうかに関わらず、計算に含めない。少し多めに種子をまいておく。

問4 1株でも劣性形質の個体が生まれた場合はヘテロ接合体であると判断したが、劣性形質の個体が生まれなかった場合は判断不能とした。

解説

問1 種子の色（緑色か黄色か）というのは、種皮を通して見える子葉の色である。また、種子の形（丸型かしわ型か）は、子葉に貯蔵されたデンプンの構造によって決まる（アミロペクチンを含むと丸型、含まないとしわ型）。いずれも子供の世代の形質が見えていることになる。ちなみに花の色（紫色か白色か）は、メンデルの原著論文では種皮の色（灰褐色か、白色か）となっているが（アントシアンという色素の有無によって決まる）、これは親の世代の形質である。

問2  $Aa \times Aa$ から1個体の子供が生まれるときに $aa$ となる確率は $1/4$ 、つまり、 $aa$ 以外が生まれる確率は $3/4$ である。10個体の子供がすべて $aa$ 以外になる確率は、その10乗である。これを計算すると $0.0563\dots$ となり、無視できないほどの割合であることが分かる。

問3 実験には失敗はつきものである。明らかな失敗であることが分かっているならば、そのようなデータは除外すべきである。そのようなことを考えて、実験には予備を準備しておくことが望ましい。

問4 10個体のうち何個体かがうまく育たなかった場合でも、①1個体でも $aa$ が現れれば、親がヘテロ接合体であったと判断できる。一方、②1個体も $aa$ が現れなかった場合、親がホモ接合体であったのか、観察数が少ないためにそうなったのか、判断に悩む。②を保留したことに関して、メンデルは正しかった。しかし、①のような処理をすると、データにバイアスがかかってしまう。たまたま問2のようなデータの反対方向へのバイアスと相殺されて、メンデルのデータは理論値に合致していたものと考えられる。

参考文献：E. Novitski (2004) Genetics 166: 1133-1136.

この文献は下記のアドレスで全文を読むことができる

<http://www.genetics.org/content/166/3/1133.short>

### 第3問 生態系に関する以下の文を読み、問1～4に答えよなさい。

#### 解答例

問1 大型藻類は海底に固着し、光合成により有機物を生産して成育している。このため、海底まで光合成に必要な光が到達することが成育の条件となる。水深の深い外洋では、光合成に必要な光が海底に到達することができないため、海底での藻類の生育は不可能である。この理由により、大型藻類は海底まで光合成が可能な光が到達する沿岸生態系のみ分布する。

問2 褐藻： クロロフィルc、フコキサンチン  
緑藻： クロロフィルb  
紅藻： フィコエリスリン

問3 A－外洋 B－沿岸

Aでは150mまで波長450nm付近の光が到達しているが、Bでは20mまで到達しているだけである。これから、光の吸収する物質の少ないAが外洋、吸収する物質の多いBが沿岸と考えられる。また、Bでは植物プランクトンが吸収する400-500nmの波長の光が、Aに比較して深度による減少が著しい。このことから、Bは植物プランクトンが多く生息する沿岸であると推定できる。

問4 紅藻

緑藻が保有するクロロフィルaとクロロフィルbは440nmおよび680nm付近の波長の光を吸収して光合成を行っている。しかし、この波長の光は、浅い深度で吸収されてしまうため深い深度までは透過しない。このため、緑藻は浅い深度でのみ成育が可能である。一方、紅藻が保有するフィコエリスリンは、沿岸において深い深度まで透過する550nm付近の光を吸収することができるため、緑藻より深い深度まで成育が可能と考えられる。

#### 出題の意図

本問では、藻類による光合成色素の違いに関する系統分類学的な知識をもとに、海洋の光環境との関係についての考察力を問いました。

問1では海藻類が海底に成育する底生生物であることを基礎として、光合成に必要な光が海底まで到達することが海藻の成育の条件になることを理解しているかを問題としました。外洋では水深が深いため海底まで光が到達しないことから、光合成が不可能であり、従って海藻は成育できません。

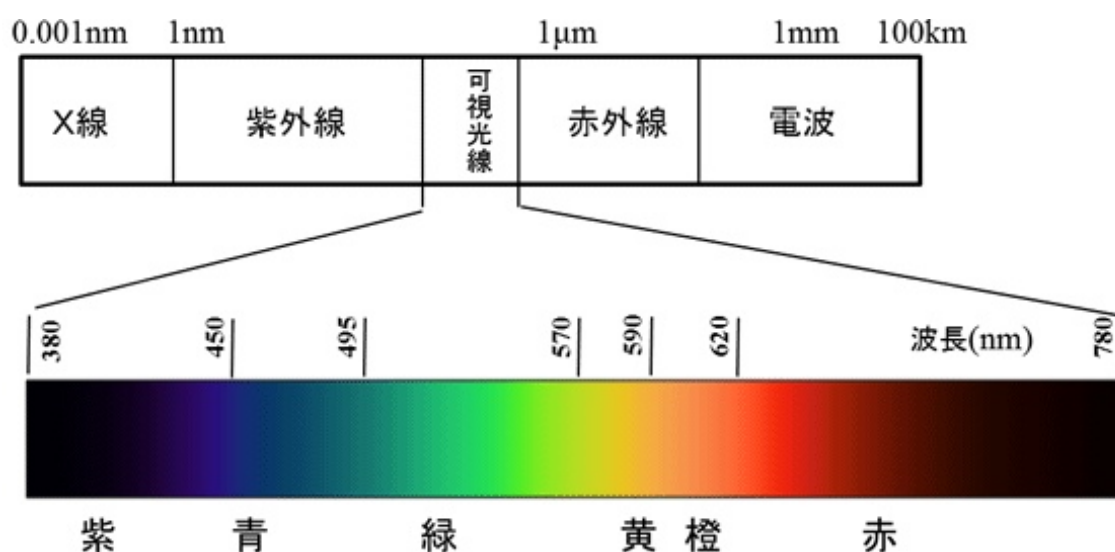
問2では、藻類の分類の基準となる光合成色素の違いに関する知識を問いました。藻類と光合成色素の関係は、植物の系統進化と分類を考える際の基礎的知識です。

問3では、外洋および沿岸の光の透過について問題としました。図3のグラフが示す意味を理解できるかが解答のポイントになります。Aの方が深い深度まで光が到達していることに気づくと、光を吸収する物質の少ない外洋がAに相当することが分かります。また、外洋では450-500nmの光が深い深度まで透過するのに対して、沿岸では550nmを中心とした光が最後まで透過することが読み

取れます。一方、この差が植物プランクトンの400-500nmの吸収によることが図2から分かります。植物プランクトンの多い沿岸では500nm以下の波長の光が浅い層で吸収されるため、吸収の少ない500-600nmの光がより深くまで透過することが分かります。

問4では、問2および問3で問われた内容を総合して考察する能力を問いました。ポイントは、沿岸でより深くまで透過する500-600nmの波長帯の光を、光合成色素により吸収できるかどうかです。緑藻類はクロロフィルaおよびクロロフィルbを保有していますが、これらの色素は、図1から明らかなように480nmから620nmの間の光をほとんど吸収できません。このため、この波長帯が中心となる深い深度では、光合成による有機物の生産ができません。一方、紅藻がもつフィコエリスリンは500nmから560nmの光の吸収が可能ですから、沿岸でより深くまで透過する波長帯の光を光合成に利用することが可能と考えられます。

また、問題とはしませんでした。褐藻がもつフコキサンチンはクロロフィルa、クロロフィルbよりも少し長波長側の500nmまでの光を吸収することが可能なため、緑藻より深くまで成育することが可能と考えられています。



[http://www.naro.affrc.go.jp/flower/kiso/color\\_shikiso/](http://www.naro.affrc.go.jp/flower/kiso/color_shikiso/)より

色と波長の関係を示します。褐藻、緑藻、紅藻の色と、それぞれのもつ光合成色素の吸収スペクトルとの関係を確認しておきましょう。（キャンベル生物学 光合成の項にもスペクトル図あり）

## 問題4 脊椎動物の四肢の形成に関する以下の問1～3に答えなさい。

### 解答例

- 問1. 鰭と四肢の原基にFGF10が作用すると、FGF10はそれぞれの原基の細胞で転写調節に関わり、種々の遺伝子が順次発現する。しかし、魚類と四足動物ではそれによって発現が引き起こされる遺伝子が異なり、魚類では鰭を形成するのに必要なタンパク質などが、四足動物では四肢を形成するのに必要なタンパク質などが合成される結果、魚類では鰭、四足動物では四肢が形成される。
- 問2. Sが後端部から分泌される因子であり、その濃度勾配が前後軸にそった指のパターンを決定することを証明するには、まずSをコードする遺伝子が肢芽後端部で発現することを確認しなければならない。さらに、S遺伝子を肢芽前端部で強制発現させる、あるいはSタンパク質を肢芽前端部に付着させると、後端部組織の移植と同様の結果を生じること、後端部におけるSの活性を抑制する、あるいはSの遺伝子発現を抑制すると、前後軸が生じない、あるいは乱れることを確認すること、などの実験を組み合わせて行う。
- 問3. 筋肉前駆細胞を送り出す体節を除去して肢原基から離れたところ（例えば胴体部）の体節を移植して、その体節の筋肉前駆細胞が肢原基に移動するかを検討する、肢原基を除去して、筋肉前駆細胞の移動が起こらないかを検討する、肢原基を胴体部に移植して、近くの体節からの筋肉前駆細胞の移動があるかどうかを検討する。さらに、肢原基と体節の間にアルミホイルなどの遮蔽物を挿入して筋肉前駆細胞の移動が開始しないかどうかを調べる、濾紙のようにタンパク質などは通過させる遮蔽物を挿入すると筋肉前駆細胞の移動が開始するかどうかを調べるなど。また、シャーレの中で、寒天のような培地上で、体節と肢原基を離して培養し、体節から筋肉前駆細胞が原基に向かって移動するかを検討する。

### 作題意図

問1～問3とも、四肢の形成に関する問題であるが、四肢の形成の詳しい知識は必要としない。

問1では、進化的に相同といわれる器官の形成に当たって、鍵になる遺伝子があること、それが発現するとその器官形成が進行すること、しかし動物によって、鍵遺伝子の「下流」に存在する遺伝子群が異なるために、最終的に異なる器官が形成されることを知っていてほしい。これは例えば昆虫の複眼とヒトの個眼（単レンズ眼）の両方で、Pax6という転写因子が鍵遺伝子になっているにも関わらず、生じる眼は複眼と単眼のように異なっている、という例にも現れている。

問2は比較的単純な実験を問う問題である。ある物質がある現象に関与していることを明らかにするには、一般的にその物質の作用を抑制する実験と、過剰に、あるいは異所的に働かせる実験の両者が必須である。またこの問題の場合、Sが肢芽後端部の組織で産生される、すなわち、Sの遺伝子がこの組織細胞で発現していることを確認しなければならない。キャンベルには後端部（ZPA）を移植する実験が紹介されているが、ここでは一步進めて、その分子的メカニズムについて考えることにした。

問3は、図を見ながら考えれば、容易にいくつかの実験を思いつくであろう。作題の意図は、ある一つの仮説を実証するには多くの実験（アプローチ）が必要であることを認識して欲しい、ということである。解答例に挙げたすべてが記述されている必要はないが、きちんと論理的に実験方法が書かれていることが望ましい。

## 第5問 動物の神経系に関する以下の文を読み、問1～4に答えなさい。

### 解答例

問1  $\text{Na}^+$ は細胞内より細胞外で濃度が高く、 $\text{K}^+$ はその逆となっている。静止状態の神経細胞ではリーク・チャンネルと呼ばれるたくさんの $\text{K}^+$ チャンネルは開いているが、 $\text{Na}^+$ チャンネルはほとんど開いていない。そこで $\text{K}^+$ は濃度勾配に従って細胞外へ流出し、細胞膜で電気的な不均衡を生じ、最終的に電気的な勾配と濃度の勾配が平衡状態に達する。この平衡状態における膜電位が静止電位となる。

問2 脊椎動物の神経軸索は有髄軸索であり、跳躍伝導を行うために細い神経でも伝導速度は速い。しかしイカをはじめとした無脊椎動物の神経軸索は無髄軸索であり、神経伝導速度は軸索断面の直径の二乗に比例する。従って、イカの巨大軸索のように長い神経は、神経伝導速度を速くするために軸索が太くなっている。HodgkinとHuxleyが研究した当時の電位を測定する機器は技術的に微小な神経内外の電位差を計測できるほどの能力がなく、太い神経を用いて実験することが必須であった。また、活動電位の仕組みを調べるためには、軸索内外のイオン濃度を変化させる必要があり、その意味でも太い神経であることが必要であった。

問3 シナプス前細胞が放出した神経伝達物質はシナプス後膜に存在するリガンド開閉型イオンチャンネルに結合し、シナプス後電位を生じさせる。シナプス後電位は興奮性のEPSPと抑制性のIPSPがある。シナプス後電位は段階的電位であるためにシナプスの部域から遠ざかるに従って減衰する。活動電位を生じる部位である軸索小丘に伝わったシナプス後電位が時間的加重、空間的加重によって統合されて閾値を超えた場合、活動電位が生じる。

### 問4 長期増強 (LTP)

海馬においてシナプス前ニューロンに高頻度の活動電位が発生し、同時にシナプス後ニューロンが他のシナプスから脱分極刺激を受け取っている状態にあると、シナプス前細胞から放出された神経伝達物質であるグルタミン酸によりNMDA型受容体が活性化し、 $\text{Ca}^{2+}$ がシナプス後ニューロンに流入する。この $\text{Ca}^{2+}$ によってAMPA型受容体がシナプス後膜に動員され、NMDA型受容体と共に大きなシナプス後電位を発生するようになる。同時に受容体はプロテインキナーゼによる修飾を受ける。この結果、同じ刺激によっても容易に活動電位を生じるようになる。

### 問題解説

動物生理の超基本分野である神経からの出題です。キャンベル生物学はもとより、高校の教科書にも出ている内容ですので、是非とも覚えてください。

問1 まず基本は $\text{Na}^+/\text{K}^+$ ポンプによって細胞内外で $\text{Na}^+$ と $\text{K}^+$ に濃度差ができることが基本ですが、この段階では電気的には釣り合っています。実際に膜電位の原因となっているのは漏洩チャンネルを通した $\text{K}^+$ の細胞外への流出で、これで生じる電気的なアンバランスと濃度差が平衡状態に達した点が静止膜電位となります。

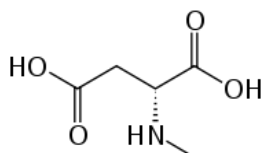
問2 イカの巨大軸索は何故巨大なのでしょう？ 無脊椎動物の軸索は無髄軸索なので、太くない

と必要な神経伝導速度がでないのです。この太さを利用して、HodgkinとHuxleyは細胞内に電極を挿入したり、神経軸索の内液を変えたりと、様々な実験を行っています。実はイカでなくとも、ミミズなどにも巨大軸索があることが知られています。一方、脊椎動物の神経は細い有髄神経が束になっているため、単一の神経の解析には不向きです。なお、脊椎動物の神経は脊髄にあるので取り出しにくいという解答も多かったですが、カエルの座骨神経等、むき出しになっている長い神経は脊椎動物にもあり、多くの研究に利用されています。

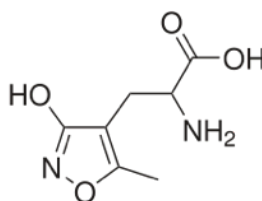
問3 シナプス前細胞から放出された神経伝達物質により引き起こされるシナプス後電位は減衰するため、そのままでは活動電位を生じません。これが時間的、空間的に加重され、結果的に電位が軸索小丘（軸索の付け根部分）で閾値に達すると、活動電位を生じて再び伝導が起こります。なお、EPSPは興奮性シナプス後電位（Excitatory PostSynaptic Potential）という脱分極性の電位変化、IPSPは抑制性シナプス後電位（Inhibitory PostSynaptic Potential）という過分極性の電位変化のことです。

問4 解答例には長期増強（LTP; Long-Term Potentiation）の例を書いてありますが、長期抑制（LTD; Long-Term Depression）やシナプスの構造的な増強、アメフラシの馴化などでも正解です。

注：NMDA（N-methyl-D-aspartate N - メチル - D - アスパラギン酸）



AMPA（ $\alpha$ -amino-3-hydroxy-5-methyl-4-isoxazolepropionic acid  
 $\alpha$ -アミノ-3-ヒドロキシ-5-メチル-4-イソキサゾールプロピオン酸）



キャンベル生物学 神経系を参照

## 第6問 酵素とATPに関する以下の文を読み、問1～4に答えなさい。

### 解答例

問1 アロステリック調節

問2 ATP生産（供給）、クエン酸回路に基質を供給、アミノ酸や脂質の合成の前段階として基質を供給、酸素を必要としない嫌気発酵によるATP生産、などのうち2つ。

問3 2 mM 程度。根拠：ATPが合成され 2 mM 程度に近づくと、ホスホフルクトキナーゼの活性は阻害され、ATP合成が抑制されるため。

問4 ATP濃度は大きく低下するとしても 0.03 mMまでは低下せず、やがて 2 mM程度まで回復する。根拠：ATPが激しく消費され大きく低下し、ホスホフルクトキナーゼの阻害が解除され、解糖系が進行することでATP合成が再び始まる。しかし、ホスホフルクトキナーゼがはたらくことができなくなる 0.03 mMまで低下することはないと考えられる。

### 作題意図

本問題には、生化学で習うホスホフルクトキナーゼの活性調節と実際の細胞内のATP濃度との関連を考えさせる意図があります。多くの教科書で、ATP濃度が減少すると解糖系が活性化されATPが合成され、再度上昇すると解糖系が阻害されることが紹介されています。また、この調節を行う酵素がホスホフルクトキナーゼという酵素であることも記されています。しかし、実際の細胞内のATP濃度の変動と関連づけて考えることはあまりありません。また、この問題を解くに当たって、もしATPを大量消費して、0.03 mM 以下まで低下してしまうと、その細胞はどうなるのだろうか、など思考が広がることを期待しています。なお、与えられている数字が限られているので、数字だけを答えるのであれば簡単な問題ですが、理由を論理的に説明できることも重要です。なお、酵素のはたらく基質濃度と阻害濃度は、大学では $K_m$ 値、 $K_i$ 値として学習します。正確には、この数値の前後で、「はたらく」/「はたらかない」と突然変化するわけではなく、徐々に変化します。つまり、生物のはたらきの調節はファジーで、ロボットのようなぎくしゃくしたものではなく、なめらかなものです。しかし、本問題では、この点は簡略化してあります。また、ホスホフルクトキナーゼは不思議な酵素で、ATPを基質として消費し解糖系を進めるとともに、解糖系全体の産物であるATPによってその酵素活性がアロステリックに阻害されます。一般に、代謝経路のフィードバック阻害を受ける酵素は経路の冒頭近くに位置することが多いですが、ホスホフルクトキナーゼは経路の3番目の反応を触媒する点でも異色です。これは、グルコースだけでなく、グリコーゲンやデンプンなどからも解糖系に流入してくる経路があるためです。



## 第7問 動物の個体群と生活史に関する以下の文を読み、問1～4に答えなさい。

### 解答例

問1 ロジスチック個体群成長

問2 環境収容力

問3 ヘビはトカゲを捕食するので、ヘビの個体数が多いほどトカゲの死亡率を増加させる。トカゲの出生率が一定であっても、ヘビの個体数が多くなるとトカゲの増殖率が低下する。一方、餌となるトカゲが多いほどヘビはトカゲを捕食できると考えられる。そこで、ヘビの出生率はトカゲの密度が高いほど高くなる。ヘビの死亡率が一定だとしても、トカゲが多いほどヘビの増加率が高くなる。ヘビとトカゲの個体数は、トカゲが増えたあとでヘビが増え、ヘビに捕食されてトカゲが減り始め、ヘビが後を追うように減る。するとまたトカゲが増え始める、というように増減を繰り返す。

問4  $K$ 選択は環境収容力を高めるように作用する自然選択の一形式である。 $\alpha$ 島のトカゲは、高い密度のもとでも成長・繁殖が可能になることで実現するため、 $K$ 選択は個体の競争能力を高めるように作用する。一般的に、動物の競争能力は体の大きさに依存するため、 $K$ 選択は卵サイズや体サイズを増加させ、その対価として、繁殖開始年齢の遅延、一腹卵数と1シーズン当たりの産卵回数の減少をもたらす。逆に、ヘビに捕食される $\beta$ 島では、個体群密度は低く抑えられ、種内の競争で高い増加率を実現するように、繁殖開始年齢が若く、産卵数が多くて、1つ1つの卵は小さくなることが予測される。

### 作題意図

動物の個体群成長の基本的なモデルの理解を基礎に、共通の資源をめぐる同種間の競争や、捕食者が被食者の個体群動態に及ぼす影響の仕組みを理解しているかを問う。さらに、個体群動態の状態が異なる場合に、生活史の特性がそれぞれ異なる方向に進化することについて、その基本的な仕組みを理解しているかを問う。

### 個体群生態学の背景

$\alpha$ 島でのトカゲの個体数の変化は ロジスティックモデル（キャンベル生物学の個体群生態学を参照）を適用すると、トカゲの個体数を $N_I$ 、内的自然増加率を $r_I$ 、環境収容力を $K_I$ として、つぎのような微分方程式で表される。

$$dN_I/dt = r_I N_I (K_I - N_I) / K_I$$

この微分方程式を解くとS字のロジスティック曲線が得られるのだが、これは高校の数学の範囲を超える。しかし微分方程式を解かずとも以下の様な特徴を引き出すことができる。

個体数が少なく密度効果が無いときの個体群成長は、 $K_I \gg N_I$ であるので

$$dN_I/dt = r_I N_I$$

と近似できる。個体数は「ねずみ算」（指数関数的）のように増える。

個体数が増加すると 増加率が生息密度に依存して低下するという増加率に対する密度効果は  $(K_1 - N_1/K_1)$  という係数で表現される。

成長率がゼロになるときの生息密度を環境収容力  $K_1$  と呼ぶ。 $N_1 = K_1$  では微分方程式の右辺が0になり、個体数  $N_1$  は一定になる。個体群成長速度が低下しはじめるところは  $N_1$  について二次微分が0になるという条件であるので、個体数が  $K_1$  の半分になる点であることもわかる。

$\beta$  島でのトカゲとヘビの個体数の変化について 次のようなモデルを立てることができる。捕食者であるヘビの出生率を  $B_2$ 、個体数を  $N_2$ 、死亡率を  $D_2$  とすると、捕食者の出生率  $B_2$  は餌資源であるトカゲの個体数  $N_1$  に比例して(比例係数を  $b_2$  とする)増加するが、死亡率は一定とみなすことで、つぎのような微分方程式で表される。

$$dN_2/dt = (b_2 N_1 - D_2) N_2$$

一方、トカゲの個体群成長は、出生率  $B_1$  は一定だが、死亡率  $D_1$  はヘビの密度増によって増加する(比例係数  $d_1$ )と仮定することで、つぎのような微分方程式で表される。

$$dN_1/dt = (B_1 - d_1 N_2) N_1$$

この2つの式は ロトカ・ヴォルテラの捕食式とよばれる。OB-OGによる過去問の解説のなかでもこの式は 表現は異なるが 説明されている。

[http://www.jbo-info.jp/jbo/OB\\_OG\\_Challenge.html](http://www.jbo-info.jp/jbo/OB_OG_Challenge.html)

上の微分方程式の解を求めると、発散したり  $N_1$   $N_2$  がゼロ以下になることも条件によってはあるのだが、トカゲとヘビの個体数の振動が続く解もなかには出てくる

微分方程式を解くのかえて エクセルのセルに差分式をいれて計算すると、ロジスティック曲線やロトカ・ヴォルテラの捕食式の様子を見ることができる。エクセルを駆使できる諸君は挑戦するとよい。

なお 問4での  $K$  選択、 $r$  選択 はロジスティックモデルの微分方程式での係数  $K$  および  $r$  に由来する。