

生 物

以下の文をよく読んで、設問に答えなさい。解答は解答用紙の指定された欄に記入しなさい。

カエルが池に帰る

去年に続いて今年も池にカエルがやってきた。産卵のためである。

何年前かに、あきら君は裏庭を小さなビオトープにしようと、池を作った。池といっても、少し掘り下げてビニールシートを敷き、水を張っただけの簡単なものだ。そこへ近所の池から取ってきたヒキガエルの、あの寒天の紐のような卵を放した。

採ってきたときから発生が進行していることは教科書に載っていた発生の段階表と比べてわかった。こんな小さな池でカエルの発生が正常に進むだろうか。期待と不安で毎日、池の中を観察した。すでに全体が黒くなっていて、植物極側の卵黄は見えなかった。翌日になると、動物極側に溝ができ、この溝が前後に長くなっていった。やがて、溝は見えなくなり、胚全体の形が前後に長くなってきた。さらに翌日になると長くなった胚はゼリーの紐の中で体を左右にくねらせるように動き出した。¹⁾₂₎

しばらくしてゼリー塊からオタマジャクシが^{ふか}孵化し、最初は池の底などに垂直に付着していたが、やがて泳ぎだし、小さな池の表面はもぞもぞとした黒い物体でいっぱいになった。

池の上に茂った庭木から落ちた葉っぱや池に落ちて死んだ昆虫が栄養になっているらしく、餌をやらなくてもオタマジャクシは大きくなっていった。やがて後肢がはえてきた。まだ小さいにもかかわらずじょうずに後肢を動かしている。もちろん泳ぎの主役は尾だが。

やがて前肢が見えてきて、カエルらしいからだつきになり、尾が少しずつ短くなったとき、池の縁に伸よく並んで、陸に上がる準備をはじめた。尾がさらに短くなったとき、池の周りに散っていった。真っ黒いわずか数 mm のカエルになって。

こうしてどきどきしながら観察した、卵からオタマジャクシを経て小さなカエルになるまでの楽しい期間が終了した。しばらくは池の周りの地面や植え込みの陰に小さ

な黒いカエルを見ることがあったが、それも見かけなくなった。

それからたぶん4～5年ほど経ただろうか、同じ池にヒキガエルが産卵のためにやって来た。きっとあの時この池から旅立っていった小さな黒い子供が成長して帰って来たのだと思った。かなり大きくなった3頭で、池の中で産卵していた。

カエルの形態と行動

こんな観察をしたので、あきら君はカエルについてもっと知りたくなり、さっそく図書館に行ってカエルについていろいろ調べてみた。

「脊椎動物両生綱無尾目に属する動物をカエルと呼んでいる。幼生はオタマジャクシ³⁾といい、変態して成体のカエルになる。極地を除く世界の各大陸に分布し、平地から高地まで、水中(海水を除く)から砂漠地帯まで、あらゆる環境に適応放散してすみついている。日本には帰化種3種と在来種約34種・5亜種が分布する。

体は全体的に薄べったく、頭尾の長さが体の幅に比して短く、尾もない。特に頭部は幅広く、首のくびれがなく胴部に直接続いている。前肢は短いが後肢はよく発達していて、陸に上がったとき、後肢を体の両側に折り曲げるので、全体的にさらに丸っこいカたちとなる。

四肢、特に後肢が発達しており、陸上ではジャンプするのに、水中では平泳ぎの後足のように動かして水を押しやるのに使われる。ただし、ジャンプも泳ぎも左右の後肢を同時に屈伸させる独特の運動様式で、歩行のような交互の足はこびはしない。前肢はジャンプにも泳ぎにも使わない。水辺にあがったカエルは、足音に敏感に反応して水中に飛び込み、素早く泳ぎ去る。この跳躍と素早い泳ぎが、カエルが身に付けた敵から逃げるための方法である。魚類では尻ビレと背骨をつなぐ骨はないが、カエルでは重力に対して体を後肢で支えるために、大腿骨と背骨をつなぐ関節構造として、腰帯が発達している。

頭部は大きく扁平なので、口はいわゆる“ガマ口”のように大きく開く。舌は楕円形で幅広く、先端が丸く、切れ込みがある場合もある。舌の基部は下あごの前方にあり、舌はふだん内側(後方)に倒されている。餌を見つけると、素早く起こして前方に突き出し、先端部で巻き込むようにして捕まえる。上あごと下あごには小さな歯が並び、舌で捕捉した餌を逃さないようにするのに役立っている。餌を飲み込むときには

頭部から突出した眼球を引っ込め、餌を喉の方に押しやり、飲み込むのに役立っている。

動くものを餌として認識して捕らえる一連の動きは定型的な行動である。1) 小さな動くものが目の前を横切ったことを片眼で認識すると、図1にあるように、2) 動く物体に接近し両眼で獲物を定位する、3) 舌を出して獲物をからめとる、4) 舌を引っ込め餌を飲み込み、5) 前肢で口をぬぐう、という行動の連鎖が続いていく。⁵⁾

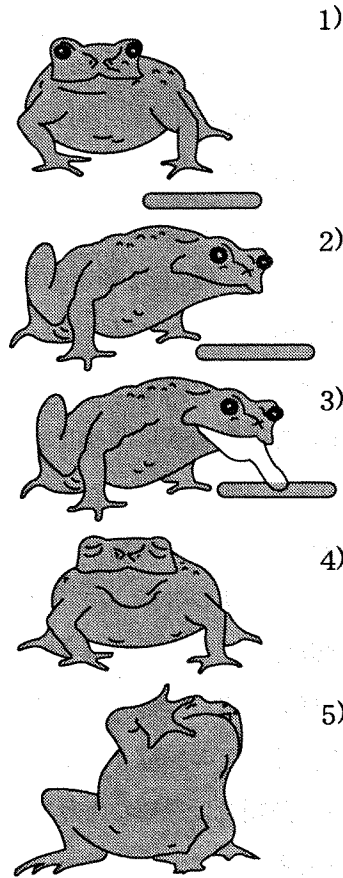


図1 ヒキガエルの餌捕獲行動に見られる刺激と反応の連鎖

『小さな動くもの』は必ずしも餌となるミミズのようなものでなくてもよい。白い背景の前で黒い紙で作った細長い四角形を横向きに動かしても図1の1)や2)の定型行動(定位行動)を誘発することができる。そこで実験装置を組んで実験を行うことができる。

透明な樹脂でできた筒の中にヒキガエルを入れ、7 cm 離れた同心円の円周上を黒い紙を切って作った物体を一定速度で動かす。もちろん背景は白くしておく。こうしてヒキガエルが黒い物体にどんな反応をするか記録する。提示する物体は、一辺の長さが異なる正方形で、ランダムに提示する。動くものに対する定位行動と動くものから逃れる逃避行動を観察し、1 分間あたりの反応の回数を計測する実験を 3 回行った。一連の実験の結果は次のとおりであった。⁶⁾

	正方形の一辺の長さ					
	1.25	2.5	5	10	20	40
定位行動	0, 0, 0	0, 0, 0	5, 4, 6	18, 21, 20	24, 22, 26	1, 2, 0
逃避行動	0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0
	60	80	120	160	320	640(mm)
定位行動	0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0
逃避行動	0, 0, 0	2, 3, 2	24, 26, 22	12, 12, 10	2, 2, 1	0, 0, 0

カエルの生活

呼吸はおもに肺によって行い、吻端に開口した外鼻孔の開閉によって空気を出し入れする。肋骨と横隔膜が無いため、空気は下顎と喉の部分の上下運動によって肺に送られ、そのため絶えず喉を動かしている。

カエルの皮膚はうろこや毛がなくて裸出しており、分泌腺からの分泌物でつねに湿っていて水の透過性が高い。皮膚は水を吸収するばかりでなく、呼吸機能もになっている。皮膚呼吸への依存度はかなり高く、冬眠中は必要な酸素の $\frac{2}{3}$ 以上を皮膚からとっていると報告されている。多くの種で真皮内に層をなしている色素細胞の凝集と拡散⁷⁾によって体色を変化させ、保護色の効果をあげている。

カエルの卵は透明な寒天質に包まれているが卵殻は無い。そのため乾燥に弱く、大部分の種では池沼や水田など静水中に産卵する。カエルの卵は典型的な端黄卵⁸⁾で、第 1, 2 卵割が等割で、あとは不等割となる。幼生は原則として外鰓^{がはい}が形成される段階で孵化する。

孵化した幼生はいわゆるオタマジャクシで、形態、生態ともに魚類に似て水中生活

を営む。外鰓は孵化後数日でえらぶたに覆われ見えなくなる。幼生は絶えず口から水を入れて内鰓へ送り、体側にある呼吸孔から排水する。雑食性で、角質のくちばし状突起と歯列によって藻類や死んだ魚などの表面を削りとって食べる。発生が進むとまず後肢が現れるが、前肢は鰓室内で発達するため外から見えず、変態直前に外から見えるようになる。四肢がそろそろ水辺に上陸し、尾の組織は分解され体内に吸収され、尾は完全に消失する。幼生から成体への変態は、単に外形ばかりでなく、鰓は肺に変わり、口は大きくなり、骨格や消化・排出・循環系など、体内でも大きな機能的変化が起こる。ふつう幼生は産卵後2～3ヵ月で変態するが、幼生のまま越冬する種もある。

カエルの種類

現生のカエルは両生類の中でもっとも分化の進んだもので、最大の勢力を占めている。現生種は主として頭骨、脊椎骨などの骨格や外部形質の違いで分類され、約2600種が22科に分けられる。それらは比較的原始的なグループ(ムカシガエル亜目)と、比較的新しいグループ(カエル亜目)に大別される。

ムカシガエル亜目のなかで、よく知られている種にアフリカツメガエルがいる。オタマジャクシは透明で、内臓が透けて見えるので、実験に使われる。成体になっても完全な水中生活者で、体の両側に側線がある。後肢の水かきもよく発達している。空中で餌を捕らえる必要が無いので舌が無く、水中で前肢を使って泥底から水生動物を追い出し、側線で感知して前肢で口にかきこむ。背中のくぼみに幼生を入れて保育する南アメリカ産コモリガエル類もこの仲間、やはり水中生活者であり、体はアフリカツメガエルよりさらに扁平になっている。

カエル亜目にはヒキガエル、アカガエル、アオガエル類などよく知られた仲間が含まれ、カエル類の大部分を占める。ヒキガエル科はオーストラリアを除く世界中に約300種が分布する。行動が緩慢でジャンプ力もないが、自衛用の武器として有毒の耳腺が発達している。アマガエル類、アオガエルの仲間は樹上性で、四肢の各指に吸盤が発達し、明瞭な体色変化を示す種が多い。また、泡状の巣をつくって産卵するモリアオガエルもこの仲間、変化に富んだ生態を示す。アカガエル科は、日本産トノサマガエルをはじめ典型的なカエルの形態をもち、生態的にも類似したものが多い。

皮膚呼吸に頼るカエル類は一般に乾燥に弱く、生息場所は水辺か湿った場所に限られる。しかしながら、ヒキガエルやヤドクガエルのように、毒腺に守られて水辺から離れた森林に棲息するものもある。また体色変化によって周囲の環境に紛れ込むことができるアマガエル、アオガエル類も樹上や草むらで生活して、産卵期以外は水に入らない。これら地上性の種は水辺にすむものより体内の水分消耗に耐えられる。乾燥地帯にすむカエルの中には体の中に水を溜められるものもある。スキアシガエルの仲間は、いぼ状突起のある後肢を使って地面を掘ってすばやく土中に潜ることができる。こうして昼間は土中に潜り、夜間に活動する。

卵胎生のアフリカ産コモチガエル類以外はすべて卵生で、体外受精を行う。繁殖期の雄は、さかんに種に特有な鳴き方で雌を誘引する。産卵場所に繁殖集団を形成し、いわゆる“蛙合戦”を呈する種もある。

カエルは生物学、とくに発生、生理、遺伝の分野において欠かせない教材や実験動物であり、かつてはツメガエルが妊娠判定に使用された(妊婦の尿をとってツメガエルの雌に注射するとツメガエルの雌の排卵が促進される)⁹⁾ほか、ホワイトアマガエルの皮膚からは胆道・膵機能診断用の物質が分離され、利用されている。またウシガエルをはじめ世界の各地で大型ガエルが食用に供されている。ヒキガエル類の耳腺から分泌される毒液は蟾酥^{せんそ}として古来漢方薬に用いられ、医用にも使用される。」

新たな疑問

カエルのことはだいたいわかったが、いくつもの疑問や興味がわいてきた。上の記述には、ヒキガエルはいったいどうやって同じ池に毎年、産卵のために帰ってくるのかについては何も書かれていない。また、外から見える変態の過程は観察してよく分かったが、体の中までは見えないので体の中で起こっている変化というのがぴんとこない。実際にどのようなことが起こっているのだろうか。

カエルの変態について調べてみた。オタマジャクシからカエルへの変態に伴って、生活空間が水中から陸上へと変わる。そのため、当然、生理的な変化が起こる。主なものは

- a) 鰓呼吸^{えら}から肺呼吸へ
- b) ヘモグロビンの構造が変化する

- c) 腸が短くなる
- d) アンモニア排出から尿素排出へ
- e) 水の保持能力の向上
- f) 皮膚の構造の変化

である。

a)の鰓呼吸から肺呼吸になるためには、呼吸器官の構造ががらりと変わる必要がある。調べてみたら、肺の原基はオタマジャクシのときにすでに存在し、変態に伴って鰓が消失し、肺原基が発達することがわかった。

呼吸器が変わるのはもちろん、心臓も変わらなくてはならない。鰓呼吸の場合は、心室から鰓に血液を送り、鰓でガス交換を行い、鰓から出た酸素に富んだ血液は体全体を循環して心房に戻ってくればいい。肺呼吸になると、鰓呼吸のように心臓とガス交換装置を直列につなぐことはできなくなり、別系統にしなければならない。すなわち肺循環と体循環が分離する。カエルの場合は完全に分離してなくて、血液を受け取る心房は別れているが、血液を送り出す心室は1つである。魚の心臓と鰓と全身、カエルの心臓と肺と全身をつなぐ血管の結びつき方はわかったが、¹⁰⁾オタマジャクシの心臓からカエルの心臓へ変化する様子は調べてみてもわからなかった。

b)のヘモグロビンは生物の授業で聞いたことがある。赤血球に含まれる酸素運搬のためのタンパク質だったはずだ。ヘモグロビンについてももう少し詳しく知りたかったので、図書館で調べた。ヘモグロビンは α 鎖2本と β 鎖2本の4本からなるタンパク質である。タンパク質はアミノ酸がペプチド結合でつながった鎖状の分子だが、ペプチド鎖はらせん構造をとって円筒形になり、この円筒が何本か集まって立体構造をもった α 鎖ができあがる。 β 鎖も同じようにでき、これらが2つずつ向き合うように組み合わさってヘモグロビン分子となる。 α 鎖も β 鎖も、ヘムと呼ぶ鉄原子をキレート結合した分子をそれぞれ抱えこんでいて、酸素はこの分子と結合する、と書かれていた。鰓を使って水中から酸素を取り込むのと、肺を使って空気中から酸素を取り込むのでは、だいぶ様子が違う。このことに対応して、ヘモグロビン分子の形が違っているのだろうと推察した。¹¹⁾

c)の腸の長さは餌の違いを反映している。オタマジャクシのおなかを見るとぐるぐると渦を巻いた腸が透けて見える。オタマジャクシは木の葉や虫、魚の死体な

ど何でも歯舌で削り取って食べる。オタマジャクシのときは雑食性だが、カエルになると昆虫やミミズなどの肉食性になる。きっと、消化酵素などにも違いが生まれるのだろう。

d)も水中生活から陸上生活に移行するために起きることである。アミノ酸の代謝などによって生じたアンモニアは、体にとって有害なのですぐに体外に排出しなければならない。アンモニアは水によく溶けるので、水中生活をするオタマジャクシではアンモニアのまま排出できるが、陸にあがったカエルでは周りに水がないので一定期間、体内に保持しておかなければならない。しかしアンモニアは有毒なのでそのままの形で体内に保持しておくことができず、毒性の少ない分子に変える必要がある。そのため陸への進化とともにアンモニアを無毒化する尿素回路が出現したと考えられる。尿素回路は、アンモニアと二酸化炭素からエネルギーを使って無毒な尿素を合成する。尿素は尿中に溶かされてある程度貯留したのち、尿として排出される。

尿素回路はオルニチン回路ともいい、イギリスのH. A. クレブスらが、ある臓器の切片を用いて尿素生成の実験を行っていた際に、オルニチンが尿素生成を促進することを¹²⁾見いだし、これをきっかけとして解明された。この回路によってアンモニアと二酸化炭素から2分子のATPを使って、最終的に尿素とオルニチンが生成する。こうして、尿素回路が1回転するごとに尿素1分子が生成する。

オタマジャクシでは、変態にともなって、それまで発現していなかった尿素回路の酵素群がある臓器に発現するようになるわけだ。

e)とf)はお互いに関連している。オタマジャクシの皮膚はカエルに変態するときに構造を変えるらしい。ヒトの場合も、体の表面を被う皮膚と、口の中や眼の表面の一部などを被う粘膜では、水を保持する能力が違う。皮膚の一番表面には、厚い角化細胞の層があって、皮膚の表面からの水分の蒸発を防ぐのに役立っている。粘膜の表面にはこのような層がないため、皮膚よりも乾燥に弱いらしい。オタマジャクシがカエルに変態するときにも、皮膚の細胞が変化して、角化細胞の層が新しく出来上がる。乾燥地帯に住むカエルでは、この角化細胞層が厚く、細胞間の結合が密なために水の保持能力がより高いのである。

ヒキガエルの産卵行動

あと残った疑問は、ヒキガエルは本当に生まれた池に産卵にくるのだろうか、という点である。昔、家族で北海道に旅行に行ったとき、石狩川のどこだったかに、サケの孵化場があって、ちょうど秋だったのだが、サケが産卵のためにたくさん遡上^{そじょう}しているのを見たことがある。孵化場の排水溝の出口にひしめくようにサケが群がっているのはまさに壮観だった。そのときお父さんから、あれは孵化場で孵化して放流されたサケが、自分の生まれた川の匂いを頼りに戻ってきたのだよ、と教えてもらった。

ヒキガエルも生まれた池に産卵のために帰ってくるのだろうか。図書館でおもしろい本を見つけた。「金沢城のヒキガエル」という本である。金沢大学があった金沢城内のヒキガエルを9年間にわたって追跡した調査記録で、ヒキガエルの生活が興味深く描かれていた。そこには雄が雌を得るための涙ぐましい努力が描かれていた。産卵のために池に向かう雌を待ち受け、雄は通り道と思われる場所で待機している。雌がやってくるとそれに抱きついてペアとなり、そのまま池まで進み産卵行動を行う。雄はそれほど動き回らずに、雌が通るのをじっと待っているらしい。ペアになっても途中でいろいろな障害にぶつかる。他の雄が割り込んでくることもある。ペアになる成功率は必ずしも高くないようだ。この本によると、必ずしも同じ池に戻ってくるという確証は得られなかったようだ。

図書館の同じ書架に「カエルの鼻」という本もあった。この本もおもしろい本で、カエルがどのようにして産卵のための池を見つけるかということをしていねいに観察し、¹³⁾ 実験を行って調べていた。

今までよく知らなかったけれど、カエルは陸上へあがるために、おおがかりな体の作り変えをしていることがよくわかった。首尾よく変態してカエルになっても成長して繁殖に参加するのはほんのわずかな数だけだと、「金沢城のヒキガエル」には書かれていた。来年また池にきたら、庭の池で孵^{かえ}ったカエルではないかもしれないけれど、「よくきたね」と声をかけてあげようと、あきら君は本から目を上げて思った。

問 1 下線部 1) の溝の名前を答えよ。また、溝がはっきりと外から見えなくなったときの胚の断面図を描け。

問 2 下線部 2) に関して次の問に答えよ。

- a) 胚が運動性を持ち始めるのは、運動神経が骨格筋と結合をし始め、収縮の指令である神経伝達物質を出すようになるためではないかと考えられる。この神経伝達物質の名前を書け。
- b) あきら君は、上の a) の記述が正しいかどうかを調べるために、理科の先生にお願いして、この伝達物質の受容体に結合して、その作用を抑制してしまう薬物もらった。そしてこの薬物をこの時期の胚を飼育している飼育水の中に入れてみた。すると、胚の運動は止まってしまった。喜んでそのことを先生に報告すると、先生は、「この薬物が他の所に作用して、運動しなくなったのかも知れないよ」と教えてくれた。先生はこの薬物がどこに作用した可能性を考えたのだろうか、考えを述べよ。

問 3 下線部 3) にあるように、カエルは脊椎動物両生綱に属するが、脊椎動物のこのほかの綱を、系統分類上、下位のものから順番に書け。

問 4 下線部 4) にある「小さな動くもの」を、動物行動学では何というか。

問 5 下線部 5) に行動の連鎖が続いていくと書いてあるが、これが一連の定型的な連鎖行動であることは、どのようにすると証明することができるか。具体的に述べよ。

問 6 下線部 6) に示した表を使って次の問に答えよ。

- a) 一連の実験の結果をグラフに表せ。刺激と反応の関係を考えて横軸を設定すること。ただし手書きでよい。
- b) この結果から、刺激の性質に関してどのようなことが考えられるか。

問 7 下線部 7) にある黒色素胞の凝集を促進する物質の一つは、神経伝達物質としても知られている。何という物質かその名前を答えよ。

- 問 8 下線部 8)のようにカエル卵は端黄卵であるが、卵黄の多少や局在によって卵割の様子が異なる。バッタとニワトリの卵割はどのような形式か答えよ。
- 問 9 下線部 9)にあるツメガエルの排卵を誘発するホルモンは生殖腺刺激ホルモンという。このホルモンはヒトでは何という臓器から分泌されるか。
- 問10 下線部 10)にある魚とカエルにおける血液循環の仕方を、解答欄に示す図を用いて、それぞれの関係が分かるように描け。心臓内の血液の流れ方についても示すこと。
- 問11 下線部 11)にあるようにヘモグロビンの構造がオタマジャクシとカエルで異なるのはどのような理由からだろうか。考えを述べよ。
- 問12 下線部 12)のある臓器とは何か。臓器の名前を書け。
- 問13 あきら君はヒキガエルが何を手がかりにして池への道を見つけているのか知りたくて(下線部 13)、先生に尋ねた。すると、大きく分けると次の3つの説が考えられることを教えてくれた。1)太陽コンパス説、2)雄のコーラス説、そして3)嗅覚説である。あきら君は嗅覚説に興味を持ち、「池の水の匂いを手がかりに池の方角を決めている」という仮説を立てた。そこでいろいろと考えてそのことを検証する実験計画を立てた。あきら君に代わって、この仮説を証明するための実験を2つ計画せよ。
- 問14 「地上性のカエル」と「一生水中に住むカエル」ではどこがどのように違うだろうか。本文をよく読んで、考えを簡条書きにして答えよ。