

生物教育学雑誌

The Journal of Biological Education

Vol. 21 No. 1

目次

論文

旧制中学校「理数科生物」にみられる生物教育の意義
安東 久幸 ……………1

中学生を対象としたブロッコリーからの簡易DNA抽出実験の試み
小石 裕之, 五十嵐 聡, 小淵 直樹, 干場 英弘 ……………7

MCC

回遊魚(赤身魚)と底棲魚(白身魚)の比較解剖
渡辺 採朗 ……………12

環境教育シンポジウムを通じて培うサイエンスリテラシー
飯塚 光司, 中里 直, 小石 裕之, 干場 英弘 ……………16

会務報告

第28回(2009年度)研究発表会および総会 ……………18

第1回研究会

アルデヒド脱水素酵素(ALDH2)とアルコール脱水素酵素(ADH)の
遺伝子解析実習 ……………19

第2回研究会

プラスミドの電気泳動分析 ……………22

第3回研究会

動物の感覚・脳・行動のしくみ ……………24

会則・投稿規定等 ……………27

2010年5月

神奈川県生物教育研究会

日本生物教育学会神奈川支部

神奈川県生物教育研究会

日本生物教育学会神奈川支部

2009, 2010年度 役員

会長 苗川 博史 (元湘南工科大学附属高等学校)

副会長 高梨 征雄 (県立立野高等学校)

評議員 安藤 秀俊 (国士舘大学)

石塚 崇 (北里大学)

石橋 篤 (県立神奈川総合高等学校)

森屋 一 (元県立茅ヶ崎高等学校)

幹事長 鈴木 恵子 (法政大学女子高等学校)

幹事 朝倉 正海 (県立海洋科学高等学校)

飯島 和重 (清泉女学院中学高等学校)

石塚 悟史 (県立平塚湘風高等学校)

井上 直子 (県立相模原高等学校)

井上 陽子 (県立西湘高等学校)

小川 智彦 (サレジオ学院中学高等学校)

鈴木 紀子 (フェリス女学院中学高等学校) 高橋 和也 (藤沢市立藤ヶ岡中学校)

田中 雅彦 (県立平塚農業高等学校) 難波 純治 (県立中央農業高等学校)

野村 浩一郎 (県立磯子高等学校) 安田 明雄 (横浜高等学校)

梁瀬 公成 (県立横浜桜陽高等学校) 横山 一郎 (湘南学園中学高等学校)

吉澤 久光 (浅野中学高等学校) 万行 由美子 (県立逗葉高等学校)

渡辺 採朗 (県立小田原総合ビジネス高等学校)

会計監査 萩谷 盛雄 (元県立厚木西高等学校)

山川 宏 (県立二俣川看護福祉高等学校)

顧問 楠元 守 (元日本大学)

渡辺 克己 (元県立港南台高等学校)

生物教育学雑誌編集委員会

編集委員長 安田 明雄

編集委員 楠元 守, 岡 五十, 鈴木 恵子, 吉澤 久光, 万行 由美子

学会担当 神奈川県生物教育研究会事務局

動物の感覚・脳・行動のしくみ

報告 神奈川県立西湘高等学校 井上 陽子

はじめに

新学習指導要領に対応した学習に向けて、動物の環境適応のしくみを環境、感覚、脳神経、行動の面から体系的に研修できるようにした。

まず、講師である神崎亮平先生(東京大学 先端科学技術研究センター教授)による動物の行動発現のしくみに関する講義の後、カイコガ(*Bombyx mori*)を用いたフェロモン探索行動の実験、及びカイコガの脳解剖や昆虫の生体情報計測のデモンストレーションに参加した。会場は東京大学駒場Ⅱキャンパスにある東京大学先端科学技術研究センターで、参加者は会員外も含め24名であった。

実習概要

1. 神崎亮平先生の講義

今までの学習では、脳、身体、環境などそれぞれ独立に学ぶことが多かった。しかし、脳は身体や環境などの相互作用によって常に変化するためであり、その変化(可塑性)が脳や神経の最も重要な機能である。したがって、感覚、脳、行動、環境など体系的に学ぶことが非常に重要であり、それを示すことのできる実験を同時に体験させることで理解を支援する必要がある。脳の進化をみると、初期の頃から反射、プログラム行動など本能的な部分を発達させ、その後その構造をバラバラにするのではなく、それを保ちつつその上に情動や認知などの新たな階層をつくってきた。

したがって、昆虫をモデルに使うことによって、生物に共通した反射や生得的(本能的)行動パターンなどを示すことができる。しかし、ヒト以外の動物を使って講義や実習をする場合には、「環境世界」の違いを十分に認識する必要がある。

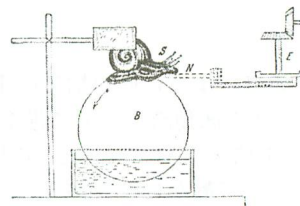
動物をとりまく環境世界はさまざまで、具体的には感覚の世界、時間の世界、サイズの世界という3

つの要素に分けられる。しかし、動物の環境世界とヒトの環境世界とは全く異なる。同じ環境でありながらも生物によって認識できるものが違うためである。以下にそれぞれの世界について説明する。

感覚の世界：昆虫の視覚器である複眼は20 μ m程度のレンズが数千枚~1万枚程度集まって構成されているが、視力は0.01以下である。色については、可視光線の黄色~紫外線領域の波長を認識することが可能である。アブラナの花をミツバチが見ると、紫外線フィルターを通してヒトが見た時と同様に見える。蜜がある中心部は紫外線の吸収により黒く見える。ミツバチはこのヒトには感知できない情報によって花に止まった際に、花卉の内側の蜜源(黒い部分)に向かって移動することができる。しかし、同じ花をヒトが見た場合には黄色にしか見えない。

また、ヒトの眼では色によってモンシロチョウの雌雄を区別することはできないが、これらに紫外線を当てると雄は紫外線を吸収して黒く、雌は反射して白く見えることから、モンシロチョウ同士では、雌雄を識別することが可能になる。

時間の世界：第2図のようにカタツムリをボールの上に乗せ、1秒間に3、4回の頻度でバーを前方に差し出すと、ボールの上を動いていたカタツムリはバーに登ろうとする。この現象を時間分解能の面から考えてみると、ヒトではバーが出される回数を認識で



第16図 カタツムリの実験 B: ゴム球 E: 偏心輪 N: 棒 S: カタツムリ

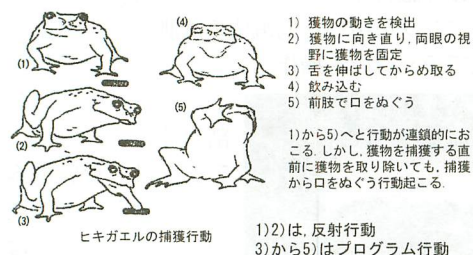
生物から見た世界 ユクスキュルJekov von Uexkull, 1933

きるが、カタツムリでは、常にバーが同じ場所にあるように見える。このように動物が見える一瞬の長さは動物ごとに異なる。一瞬の長さは、次のように測定できる。点滅する光の頻度を上げていくと、どこかで連続的にしか見えなくなる。この値が一瞬の長さであり、これを臨界融合頻度と呼ぶ。ヒトでは、60Hz、ミツバチでは300Hzぐらいが臨界融合頻度になる。

スケールの世界：ヒトを昆虫の大きさに縮小したら、ヒトは動くことができなくなる。これはスケール効果によるもので、大きさが小さくなる程、体積に対する表面積の割合が大きくなることを示す。スケール効果により面積で効く粘性抵抗や摩擦力が体積で効く慣性力に対して相対的に大きくなる。したがって、空気は粘性を増すめ、ショウジョウバエでは蜂蜜のような状態の中を羽ばたいことになる。このように我々ヒトの直観とは異なる世界が広がっていることを、動物を扱う場合には十分に認識しておく必要がある。摩擦力や粘性力が高くなる世界でもそれを上手くクリアして機能的な構造を作り出す昆虫のしくみが、工学的に興味深く思われているのもこの点にある。

動物の行動のしくみ：動物の生得的行動には反射行動とプログラム行動の2つがある。前者は信号が入力されると一過的に終わる反応で、刺激がなくなると反応しなくなる。後者は信号入力により神経の複雑な回路がはたらき、そこを介して連続的な行動パターンが生じる。ヒキガエルの捕獲行動(第3図)は、この2つのしくみが組み合わされて起こる典型的な例である。まず、餌を発見すると振り向き、次に餌をよく見て確認後、舌を出して餌を舌で絡め取る。

最後に餌を飲み込み、前足で口をぬぐう。この一連の行動の中で、ヒキガエルが餌を発見した時または餌をよく見て確認した時に、餌を除去すると元の状態にリセットされる。しかし、舌で餌を絡め取ろうとする寸前に餌を除去すると餌を食べた時と同様にゴクンと飲み込み、口をぬぐう。これは餌を発見し、眼で見て確認する行動までは反射であるが、それに続く一連の行動はプログラム行動と考えられる。プログラム行動では、脳の中に複雑な神経回路があり、それが一度動かされると最後まで全部動いてしまうことを示している。



第3図 ヒキガエルの捕獲行動

舌で餌を絡め取ろうとする寸前に餌を除去すると餌を食べた時と同様にゴクンと飲み込み、口をぬぐう。これは餌を発見し、眼で見て確認する行動までは反射であるが、それに続く一連の行動はプログラム行動と考えられる。プログラム行動では、脳の中に複雑な神経回路があり、それが一度動かされると最後まで全部動いてしまうことを示している。

2. カイコガの行動の観察・実験

(1) 雄は雌の何の信号をたよりに雌を探すか

密閉した容器に雌のカイコガを入れ、雄のカイコガのいる場所に容器から雌を出して置く。

観察結果：雄だけではカイコガは羽ばたかないが、雌のカイコガが近づくと、雄は急に羽ばたき出す。これは、雌から放出されたフェロモンを雄が受容したためである。

カイコガのフェロモンの抽出：ビニール手袋をはめ、雌の腹部を押すと、おしりからフェロモン腺が押し出されるので、それをハサミで除去する。これを予めn-ヘキサン(2cc)を加えた13.5ccのバイアルビンに入れ、5分後にフェロモン腺を取り出す。この抽出液をスポイトで雄のカイコガにかけると簡単に実験ができる。現在ではフェロモンの化学構造は、ポンピコールとポンピカールの2種類が存在することが解明された。

(2) フェロモンの臭いを受容する感覚器はどこか

正常のカイコガと根元から触角を切り離れたカイコガを用意し、それぞれの個体にフェロモンの匂いを与える。

観察結果：正常のカイコガはフェロモンの臭いに反応し、激しく羽ばたすが、触覚を除去したカイコガは反応しない。触覚が匂いのセンサーになっており、電顕で観察すると細い毛が多数あることがわかる。この毛の中に匂いを感知する嗅覚受容細胞が2種類存在する。嗅覚受容細胞はフェロモンの濃度に応じて応答が大きくなる。

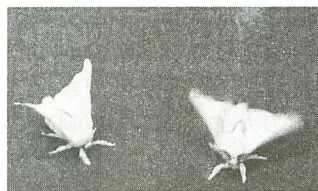
(3) 雄はどのようにして匂いを探すのか

雄にスポイトでフェロモンの匂いを与えて羽ばた

かせた際、どのような行動パターンをとるかを観察する。

観察結果：フェロモンの匂いを与えた時のカイコガの最初の行動は、

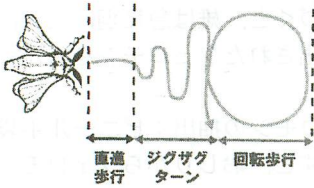
羽ばたきながらの直進歩行である。右側の触覚に与えるとまず右に、左側の触覚では左に、両方の触覚では、真っ直ぐに進む。次いで、左右に移動するジグザグ歩行が生じ、さらに回転歩行へと変化する(第5図)。匂いは化学物質が空気中に塊として存在するため、匂い源に近づくと匂いの塊の数が多く(匂いは空気中に不連続に匂いの塊として浮遊している)、遠ざかると少なくなる。匂い物質の塊がカイコガの触覚で感知されると、まず物



第4図 フェロモン投与実験

質が来た方向に直進し、次にジグザグ歩行に移行するが、その前に次の匂い物質の塊が感知されると、

- 1. 匂いによって起動するジグザグプログラム
- 2. プログラムは匂いを受けるたびにリセットされる



第5図 匂い刺激により発現する歩行パターン

て、一連の歩行プログラムのセットやリセットを行い、フェロモンの匂い源を探索している。したがって、カイコガの匂い探索行動は反射である直進歩行と、プログラム行動であるジグザグ及び回転歩行から構成されており、そのシステムはヒキガエルの餌の捕獲行動と類似している。

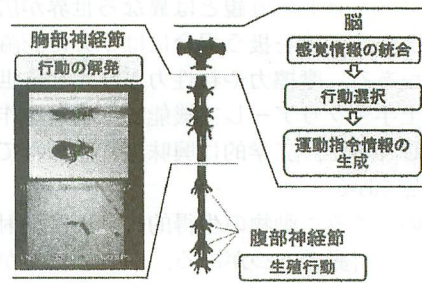
(4) 頭部、胸部、腹部の脳（神経節）のはたらき

カイコガにフェロモンを与えた後、触角を切り落とし、次に頭を、さらに腹を切った時どのような反応が起こるかを観察する。

観察結果：フェロモンを与えるとカイコガは羽ばたきはじめ、羽ばたきながら一連の歩行行動（第5図）を行う。触角を切ってもこの行動は止まらない（刺激入力遮断されても動き続ける）。頭を切ると動きが止まる。同様に腹を切っても止まっている。しかし頭を切断及びさらに腹を切断した時、羽を持ち上げることで脚が地面から離れるとカイコガは羽ばたく。持ち上げた後、再び脚を地面に着けると羽ばたきは止まる。頭と腹を切り胸だけにした時の羽ばたきは羽が左右対称に動くため、回転運動はできない（歩行も同様）。一方、正常のカイコガの匂い刺激に反応した羽ばたきでは、羽の動きは左右非対称である。つまり頭（脳）があると回転歩行（飛翔も同様）が可能になる。

昆虫の胸部には羽や脚が付いている。触角を切断しても羽ばたきが続くことからフェロモンの刺激は触角で受容され、脳に送られ信号となって胸に下り、胸部神経節の支配により羽ばたきが起こると推察される。また、頭を切断した状態および胸だけにした状態で脚が地面に付いていれば羽ばたきが止まることから脚からは羽ばたきを抑制する信号が出ていると考えられる。以上のことから、カイコガにフェロ

モン刺激を与えた時に生じる羽ばたきながらの連続したプログラム行動は、次のように説明できる。触角で受容されたフェロモン情報が脳に入ることにより、反射やプログラム行動を起こす信号が脳で作られ、それが胸部神経節へと下降する。一方、脚からは抑制信号が来るが、脳からの信号の方が脚からの抑制信号に打ち勝つため、羽ばたきながら反射やプログラム歩行を行うことが可能となる。フェロモン



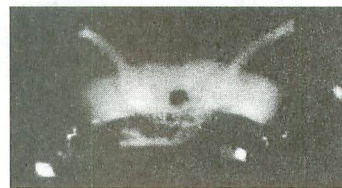
第6図 脳の役割と分散脳

刺激による正常なカイコガの羽ばたきと胸部だけにした時の羽ばたきの違いは、ビデオカメラでの撮影で簡単に確認できる。カイコガの脳、神経節の役割は第6図のようにまとめられる。

3. デモンストレーション

参加者が4、5人ずつ5班に分かれ、ローテーションしながら以下の4つのデモンストレーションに参加した。

- (1) カイコガの脳の解剖
- (2) 偏光、臨界融合頻度、行動の高速度撮影
- (3) 安価なアンプを用いた筋電位の計測
- (4) 筋電位でチョロQを操作



第7図 カイコガの脳の解剖

カイコガの脳の解剖や筋電位測定用のアンプは、比較的容易にできるとの説明があった。アンプは約2,000円程度で作製可能となる。これらについては、またの機会に詳細に説明したい。

おわりに

本研究会の実施にあたり、お世話になった方々に紙面を借りて厚く御礼申し上げます。本研修は参加者の知的好奇心を十二分に満足させる内容で、各学校での実践にも役立つものであった。参加者からは、さらに本研修の発展学習を望む声も大きかった。

(http://www.brain.rcast.u-tokyo.ac.jp/) 参照