

昆虫の嗅覚学習

神経情報研究分野 水波 誠, 松本 幸久, 佐倉 緑, 岡田 龍一

昆虫の嗅覚学習の特徴とその中枢機構を明らかにするための第一歩として、ゴキブリとコオロギの嗅覚学習能力について調べた。どちらの昆虫でも、わずか1回の訓練で匂いと報酬との連合学習が成立した。1回の訓練で成立した記憶は少なくとも24時間保持され、3回の訓練で成立した記憶は少なくとも1週間保持された。これらの昆虫は非常に優れた匂い学習の能力を持ち、匂い学習の神経機構を調べるための材料として適していると結論づけられた。

1 はじめに

昆虫の脳を形成している神経細胞の数は約百万個であり、これはヒトの脳が一千億もの神経細胞から成るのに比べて桁違いに少ない。従って、性能面で比較してヒトの脳をスーパーコンピュータに例えると、昆虫の脳はせいぜいパソコン程度であろう。しかし地球環境（市場）への適合度という観点に立てば昆虫は圧倒的な成功者であり、この惑星はパソコン駆動型の動物で満ち満ちているのもまた事実である。たとえば既知の昆虫の種は90万種にも及び、これは全動物種の2/3以上を占める。自然選択によって長い年月をかけて磨き上げられた小型・軽量・低コストの「もう1つの」情報処理装置の傑作である昆虫の脳的设计原理を解明することは、現代の神経科学に課せられたチャレンジの1つであり、また、次世代の情報処理装置やマイクロロボットの開発に繋がると期待される。

私達は小型軽量な体での生活に適合した昆虫を典型とする節足動物の脳を微小脳（Microbrain）という概念で捉えることを提案し [1]、微小脳のシステム設計をヒトを頂点とする哺乳類の脳すなわち巨大脳（Megalobrain）と対比して捉える試みを進めている。特に、私達は、昆虫の脳の最高次中枢であるキノコ体に着目し、ゴキブリを材料にその構造や機能の解明を進めてきたが [2-4]、キノコ体での情報処理を更に解明するためにはキノコ体ニューロンの活動と特定の学習行動との関係を詳細に解析できる実験系の確立が急務となっている。私達はそのような研究の材料としてはゴキブリとコオロギが、学習パラダイムとしては匂い学習が最も適切であると

考えている。しかし従来、コオロギに嗅覚学習の能力があるのかについての報告はなく、またゴキブリの嗅覚学習についてもわずか1編の報告があるのみ [5] である。そこで、本研究ではワモンゴキブリとクロコオロギの嗅覚学習能力について調べた。

2 ゴキブリの嗅覚学習

学習訓練には Balderrama の方法 [5] を用いた。広場にペパーミントとバニラの匂い源を置き（図1A）、ワモンゴキブリに自由に選択させる嗜好性テスト（図1B）を行うと、ほとんどのゴキブリはバニラを選んだ。そこで、バニラの匂いを食塩水（無報酬）と、ペパーミントの匂いを砂糖水（報酬）と連合させる学習訓練（図1C）を行った。

嗜好性テストおよび学習訓練は暗期に赤色灯下で行った。匂い源として、容器の中に匂いを染み込ませたろ紙を入れ、ガーゼでふたをした。訓練の際にはガーゼに砂糖水または食塩水を染み込ませて与えた。虫の行動は赤外線ビデオカメラで撮影した。テスト中に虫がガーゼに口をつけている時間を餌を探索している時間として、全探索時間に対するペパーミントにおける探索時間の割合を算出した。このようなテストを訓練前後にそれぞれ行い、その結果を統計的に解析した。

1回の訓練の後、2時間以内と1週間後にそれぞれテストを行うと、いずれもペパーミントの嗜好性が訓練前より有意に高かった。すなわち1回の訓練で学習が成立し、その記憶は少なくとも1週間保持されていた。次に訓練を毎日1回ずつ、3日続けて行った。1日目の訓練によってペパーミント嗜好性

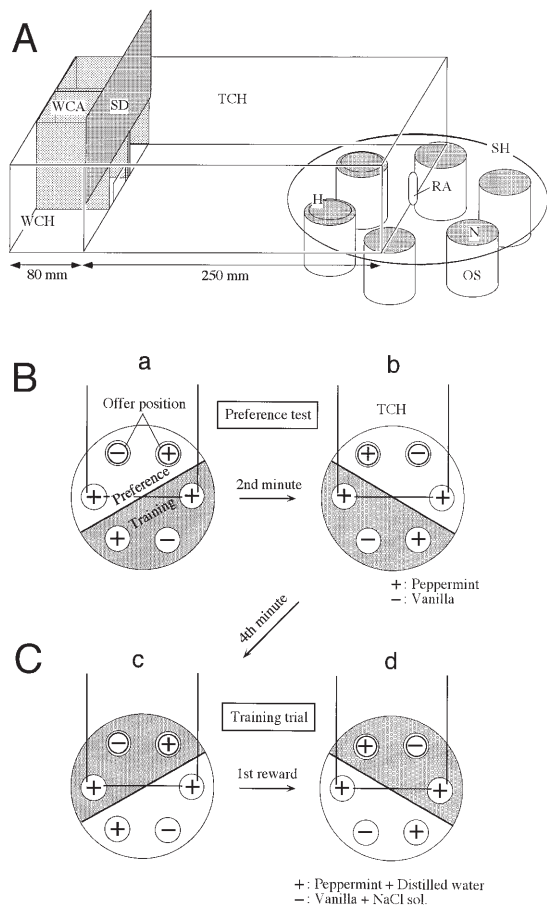


図1 コオロギの匂い学習訓練装置 (A) および嗜好性テスト (B) と学習訓練 (C) の方法。ゴキブリでも同様な方法で学習訓練を行った。

が有意に高くなり、3日目では実験したすべての個体でペパーミント探索時間の割合が50%以上であった。3日間・3回の訓練後、4週間の間隔をあけてテストを行ったところ、分布は訓練前と有意に異なった。すなわち3日間・3回の訓練で成立した記憶は少なくとも4週間保持されていた。

ペパーミントで3回訓練を行った個体に対して、ペパーミントと食塩水を、バニラと砂糖水を連合させる再訓練を行った。1回の再訓練後、ペパーミント嗜好性は有意に低くなり、記憶の書きかえが達成された。3回の再訓練後の嗜好性の分布は訓練前と有意差が見られなかった。すなわち、3回の訓練で得られた記憶は3回の再訓練で消去された。ゴキブリの匂い記憶は極めて長期間安定に保持されるにもかかわらず、その書きかえは再訓練によって容易に起こる、と言える。

3 コオロギの嗅覚学習

クロコオロギでも同様な学習実験を行ったが、訓練およびテストは明期に行い、また報酬には水を用いた。コオロギも学習前の嗜好性テストではペパーミントよりもバニラを選んだ。4日以上断水したコオロギにペパーミントと水を連合させる学習訓練を1回行い、その後にテストをするとペパーミントを有意に選択した。1回の訓練で成立した記憶は少なくとも24時間保持され、3回の訓練で成立した記憶は1週間後にもほとんど減衰しなかった。また3回の訓練で成立した記憶は3回の再訓練で消去されることなど、ゴキブリと同様な結果が得られた。

コオロギの匂い記憶がどのくらい長く保持されるのかを調べるために、20 - 30匹の4齢幼虫を集団で学習訓練するパラダイムを考案した。バニラと水とを連合させる訓練を1日1回、5日間行った個体と、ペパーミントと砂糖水を連合させる訓練を同様にを行った個体の嗜好性を、訓練から6週間および10週間後に前述の個別学習パラダイムを用いて1匹ずつ調べてみると、両グループの間で匂い嗜好性に有意の違いが認められ、匂いの記憶が少なくとも10週間保持されていることが判った。我々の飼育環境下でのコオロギの寿命は12 - 16週であるので、コオロギでは数回の経験によって成立した匂い記憶は生涯にわたって保持される、と結論できる。

さらに、小さなピーカーに入れて動きを制限したコオロギにペパーミントと水を連合させる学習訓練を行った。このような条件での訓練でも匂い学習が容易に成立した。このパラダイムを用いることにより、将来、埋め込みワイヤ電極法を用いて学習前後でのキノコ体ニューロンの活動変化を直接捉えることが可能になる、と期待できる。

4 まとめ

本研究により、ゴキブリとコオロギではわずか1回の訓練により匂いと報酬との連合学習が成立すること、1回の試行で成立した記憶は少なくとも1日間は保持されること、3回の訓練で成立した記憶は少なくとも1週間は保持されることが明らかになった。これらの昆虫は非常に優れた匂い学習の能力を持ち、匂い学習の中枢機構の研究材料として適していると結論づけられた。今後、上記の成果を基盤

に、匂い学習の成立に伴うキノコ体ニューロンの活動変化についての電気生理学的な解析を進めて行きたい。

[参考文献]

- [1] M. Mizunami, F. Yokohari and M. Takahata, *Zool. Sci.* **16**: **703** (1999).
- [2] M. Mizunami, M. Iwasaki, R. Okada, M. Nishikawa, *J. Comp. Neurol.* 399: **153** (1998).
- [3] M. Mizunami, J. M. Weibrecht and N. J. Strausfeld, *J. Comp. Neurol.* 402: **520** (1998).
- [4] R. Okada, J. Ikeda and M. Mizunami, *J. Comp. Physiol.* **185**: **115** (1999).
- [5] N. Balderrama, *J. Insect Physiol.* 26: **499** (1980).