

## 研究課題別評価

### 1. 研究課題名 :ハキリバチによる昆虫の空間認識と巣の形成機構の解析

### 2. 研究者氏名 金 宗 潤

### 3. 研究の狙い：

動物の巣造り行動は、その空間認識と形態形成において、目を見張るものがある。ヒトのような言語認識を持たない彼らは、いったいどのように空間情報を認識し、材料を加工して巣を形造るのか？昆虫類、特にハキリバチは、巣造り行動において絶妙なテクニックで植物の葉を大顎で切り取り、巣の材料として用いるが、この時巣の空間サイズを正確に認識し、材料をこれにふさわしい大きさに加工する。また、環境条件に応じてフレキシブルに巣の空間サイズを調節し、巣の部分的欠損を修復しようとする。

これら空間情報の認識や、巣の形成における内部機構とは一体どのようなものか？私は、蜂は材料や巣をどのように認識しているのか？」という根本的な問いに答えることを目標として、巣造り行動の仕組みを明らかにし、生物による認識についての私達の理解に新しいコンセプトを与えることを目指したいと考えた。

本研究の目的は、蜂が行う巣の空間サイズの認識、材料加工における空間情報の置換という一行動連鎖に着目して、巣造り行動を主に行動学的な手法で解析することである。また、巣造り行動における動作を、超伝導磁気センサーを用いて定量し、目に見えない行動の動機に迫る。

本研究で解決すべき問題は、ハキリバチの行動におけるファブール (Fabre) の問いに答えることでもある。

ハキリバチの巣造り行動は、過去約百年余りの間に、4名の行動学者によって詳細に研究されてきた。中でもファブールは、蜂にガラス管の中で巣を造らせ、巣形成の一部始終を記述した。彼の方法は自然状態の行動を観察することでは良い方法だったが、ハチが空間をどのように認識しているのか？」というメカニズムに関して、未解明の問題を残した。それは、(1)巣造りの行動の各工程において、どの程度細部に至るまでプログラムされた生得的行動であって、それ以外が認識 (cognition) や学習などの高度な行動であるのか？(2)ハチは巣の空間サイズを認識しているように見えるが、その認識方法の実態とは何か？といった問いである。

本研究では、まず上述 (1) の問いに答える為、巣造りの途中で、巣に様々な人為的操作を加え、蜂がどのようにこれを修復しようとするかを、蜂が切る葉のサイズに着目して解析した。次に (2) の問いに答える為、ガラス管内に蜂に巣造りをさせ、その行動をビデオテープで録画し、細かな挙動も残さず解析するという動作解析法というアプローチを用いた。また、巣造り行動の中心である葉切り行動においては、蜂は脚の触覚感覚器や大顎によって葉のサイズを認識するというハーゼンカンプ (Hasenkamp) の提唱した仮説に対し、蜂はむしろ脚の開き (スタンス) によってこれを認識するという仮説を提案した。この両仮説を検証するため、3D 動画解析法を用いて、葉切り行動を細かく解析した。さらに、従来困難とされてきた行動中の電氣的計測の代りに、超伝導磁気センサー (SQUID) を用いて、巣や葉の空間認識に関わる脚の動作定量を試みた。

#### 4. 研究結果：

(1) 巣に対する操作実験の結果：蜂が形成中の巣に対して、葉を抜き取る、それを元に戻す、巣内空間を縮めるなど、様々な操作を加えた結果、蜂は巣の変化をその都度適切に認識すると同時に、最終的な巣内空間を常に一定のサイズに整えようとする事が解った。即ち、蜂は部品である葉を切る際、予め計測した巣内空間を葉のサイズに合うように形成すること、つまり後者に置換することが明らかになった。このことは同時に、巣造り行動は空間サイズを認識する内部機構をもち、その細部にいたるまで単にプログラム化された生得的行動だけで構成されていないことを示す。

(2) 巣内行動の画像解析：蜂が巣内で示す行動をビデオに収録し、その行動パラメータを解析した結果、蜂が巣を出る直前に後退しながら巣の長さを計測することが判明した。また、この時の前脚の歩幅と歩数を積算し、後退距離を求めると、これが切る葉の長さに近似した。これは、蜂が後退距離で巣の長さを計測し、この距離を何らかの方法で葉の長さに置き換えていることに他ならない。

(3) 葉切り行動の画像解析：蜂に一箇所葉を切るように訓練し、その3D画像を撮り、動作解析ソフトを用いて、体軸、関節角、脚の位相などを経時的に解析した結果、主に後脚の肘角度の開き方が、最終的な葉のサイズの決め手になっていること、つまり肘角度が広いと葉のサイズが大きいことが解った。

(4) 葉切り行動に対する操作実験：蜂が葉を切り始めてから、約2秒後（大顎の咀嚼数で約5回目）に、蜂に上から黒い布を貼ったビーカーを被せて遮光したが、葉切り行動は最後まで影響を受けないばかりか、切られた葉のサイズにも影響がなかった。このことから、やはり蜂は視覚によらない方法で葉のサイズを認識していることが確認された。次に、葉に予め小さな窓をくり抜いて、この部分が脚の感覚器や大顎に接触しないようにしたが、同様に行動や葉のサイズに影響はなかった。従って、これらの実験からハーゼンカンプの仮説は否定された。さらに、葉を切っている最中に後脚をピンセットで引っ張る、あるいは葉に切り込みをいれておき、途中で葉の一部を抜き取るなどの方法で、脚の開きを強制的に操作した結果、蜂は確かに後脚の開きによって葉のサイズを認識していることが明らかになった。

(5) 超伝導磁気センサーによる動作解析：動作進行中の蜂に対して、超伝導磁気センサー(SQUID)を用い、主に脚の動きに伴うナノテスラレベルの磁気変化を測定したが、検体自身の動きに起因するノイズを軽減することが殆ど不可能であったため、このアプローチは断念した。代りに、次に示すような神経行動学的手法によって、行動の内部メカニズムを明らかにしていく方法を採用した。

(6) 神経行動学的解析：昆虫の中樞神経による行動解発機構に関する最近の仮説では、3対の脚を制御する胸部神経球が、大まかな運動パターンを発生し、これを脳及び食道下中枢節が行動目標に沿うように調節すると考えられている。胸部神経球が葉切り運動パターンの発生を担い、脳がこれに対して葉切り動作の開始・停止を命じると想定すると、脳に細胞体を持つ下降ニューロン群中に後者の動作を担う命令ニューロンが存在すると考えられる。コバルトリジン染色法によって下降ニューロン群の脳内局在を確認し、これに対して吸引電極刺激を行った結果、触角葉基部に隣接する前脳(proto-cerebrum)の前野部(frontal surface below frons)に細胞体を持つ、下降ニューロンが、この動作に関与している可能性のあることが判明した。しかし、中脚及び後脚と大顎の動きは連動していたが、前脚は静止していたので、動作発現を担うニューロンとしては完

全ではない。今後、細胞内誘導法によって、この点を精査していく必要があると考えられた。

#### 5. 自己評価：

本研究は、ハキリバチが巣の空間を認識し、これを巣の形成に活かしている、という仮説が正しいことを明らかにした。すなわち、蜂はサイズパラメータを認識し、この情報を一時的に保存し、葉切りという別の工程でこれを再生したのである。これは、物体や空間のサイズを客観的に比較認識する、ヒトなどが持つ高度な脳機能に劣らない機構であり、大変有意義な発見であったと考える。研究の手法においては、画像解析法を用いて蜂の動作を正確に解析したことが、後退歩行による巣内空間の計測や、葉切り行動における脚の伸展の重要性などを確認するために適切であった。しかし、超伝導磁気センサーを用いた蜂の動作解析が不可能であると判明したことや、これに代わる電気生理学的解析が未完成であることなど、認識・形成行動の内部メカニズムを明らかにするための方法をさらにレベルアップしていく必要があると感じた。また、蜂はトンネル内の位置をどのように認識するのか？という問いについても、もうすこし時間をかけて研究すべきであったと思う。最後に、外部発表をより意欲的に行うことが必要であったと思う。操作実験をまとめた論文は未だ投稿中である。現在、3D 画像解析の実験結果を論文にまとめている。

#### 6. 研究総括の見解：

本研究は、本領域の目的である“生物の形成と修復”といった問題からいくらか距離のある課題を扱うものだが、研究内容のユニークな点が高く評価され採択された。アドバイザー等の助言や示唆を積極的に生かし意欲的に研究を展開したが、研究環境に加え生活上の制約もあって、研究計画を予定通りに実施することが困難なこともあった。したがって、当初に期待した成果を達成するには至らなかった。今後は、新たな解析法を開発し、ハキリバチの営巣行動の内部メカニズムにアプローチすることを強く望む。

#### 7. 主な論文等：

##### 論文

1. Kim, J.-Y. Regulation of nest material size and number in the leaf-cutter bee, *Megachile tsurugensis*. Behaviour. (投稿中)

##### ポスター発表

1. Kim, J.-Y. 6<sup>th</sup> International Congress of Neuroethology. Title: Video analysis of limb coordination in leaf-cutting behavior of *Megachile* spp. Bonn, Germany, 29 August, 2001 (Poster)

##### 招待講演

1. 金宗潤 JISTEC主催ウィンター・インスティテュート韓国大学院生の為の公演  
表題：「Entomology: Whence for the Future Technology?」茨城県つくば市JISTEC交流会館、平成15年1月10日
2. 金宗潤 名古屋大学農学部公開セミナー 表題：「ハキリバチの生態と空間認識について」  
名古屋大学農学部、平成13年11月29日