

セイヨウミツバチの造巣過程 – 透明アクリル板の巣箱での観察

大崎 浩一*・北尾 一真**・大谷 剛***

Comb Construction of European Honeybees – Observations in a Clear Acrylic Plastic Hive

Koichi OSAKI*, Kazuma KITAO** and Takeshi OHTANI***

はじめに

ハチの巣は正六角形のセルが整然と並んだ形をしており、その美しい幾何学模様は昔より人々を魅了してきた。また、その構造がもたらす強度と軽さによって、アルミニウムなどの金属にハニカム構造の部材をサンドイッチした材料が航空部品に用いられるなどして、工学的にも利用されてきた。このように私たちにとって身近なハチの巣であるが、その発生に対する基本的な問題、すなわち、ハチの巣は、ハチ達が何に反応し、いかに行動することで、どのように造られていくのか？という問題に対する解答は、これまで十分には得られていない。よく取り沙汰されるのが、「空間を効率的に充填し強度もあるから」といった理由であるが、脳細胞が100万個程度しかなく（水波 2006）、自らの周辺にある刺激に対する反応しか持ち合わせていないように見えるハチが、巣の建設効率性や強度を計算しているとは考えにくい。また、後に述べるように空間充填だけでは説明しにくい現象も存在する。

著者たちは、ミツバチの造巣過程に注目し、化学物質などの刺激に対するミツバチの反応のみを仮定した数理モデルを構成することで、造巣過程のメカニズムを理論的に理解することを目指している。数理モデルを用いることの意義は、主要と考えられる要因のみを導入できることにある。加えて、何度でも繰り返し実験できることや実験環境のパラメータを簡単に換えられること、同条件のパラメータを何度でも再現できることなども挙げられる。したがって、現象をよく再現するモデルを構成することが重要となるが、それには現象をつぶさに観察し、主要な要因をうまく抽出しなければならない。そこで本研究では、まず、セイヨウミツバチの造巣過程に注目し、その時間発展の様子を観察した。得られた結果とそれに基づくまとめと今後の課題を以下に述べる。

観察方法と結果

五面が透明アクリル板で作られ、底が木でできた巣箱(360×450×230mm。以下、アクリル巣箱)を用意し、そこに約8千匹のセイヨウミツバチ (*Apis mellifera ligustica* の雑種、市販のもの)を導入した(2010年6月3日)。実験当初、ハチのみを入れて観察を行う予定であったが、アクリル巣箱はハチ群がぶら下がるための足場が足りなかったと考えられ、ほとんどが底に留まっていた。時間が経てば天井からぶら下がってくれるだろうと思っていたが、4時間後、再び見に行くと、底に群がったミツバチが蜜切れ状態(各個体の蜜胃が空になり餓死寸前の状態)になっており、1割程度が死んでしまっていた。したがって、当初の予定を変更して、巣が既に完成している巣枠(450×250×30mm、巣礎を基に働きバチのセルが全面にできているもの。片面約2000セル)を2枚、ほぼ対角線上に約2cmの間隔をあけて追加した。巣枠の一方(巣枠A)には、両面とも卵と幼虫が中心部に1割程度(計約400匹)存在し、その周辺に蓋蜜5割、蓋なし蜜2割、花粉2割が分布しており、もう一方の巣枠(巣枠B)には、両面とも卵と幼虫が中心部に2割程度(計約800匹)存在し、その周辺に蓋蜜5割、蓋なし蜜2割、花粉1割が分布していた。また、巣枠AとBのセル内のセイヨウミツバチ(卵・幼虫)と初めの約8千匹のミツバチとは血縁関係はなかった。この巣枠にハチたちが一斉に登っていき、蜜切れ状態は回避された。この状態で観察系(システム)が安定したため、約4ヵ月間これを定期的に観察した。

実験開始から8月下旬までの天井部への造巣の様子は図3の通りであり、9月下旬の最終の様子は図5の通りである。木製の天井の場合、サーフボードのような巣板(comb コームと呼ばれる、以下コーム)がほぼ等間隔に並ぶことが知られているが、アクリル天井の場合、蜜ロウが直接付きにくいいためか、まずプロポリスを付着し、それが安定したところから蜜ロウが追加されていった。この意味で今回の実験結果は、木のうろなどに形成される自然巣の時間発展過程とは異なるかもしれない。しかしながら、アクリル板の透過性

* 〒669-1337 三田市学園2-1 関西学院大学理工学部 数理科学科
** 〒669-1546 三田市弥生が丘6丁目 兵庫県立人と自然の博物館
内 兵庫県立大学 大学院環境人間学研究所 博士前期課程1年
*** 〒669-1546 三田市弥生が丘6丁目 兵庫県立人と自然の博物館
内 兵庫県立大学自然・環境科学研究所 生態研究部門
2010年12月31日受理

を生かしたことで、天井部分に形成される巣領域が拡大していく様子をとらえることができた。

天井に接したセルの形状（図 5-D 参照）は正六角形とは言い難いが、次に続く下段の形状から、その向きは図 1 の向き A となっていると考えられる。実際、そのようにセルを生成することが多いためか、巣枠に設ける巣礎も全面が向き A の六角形で作られている。一方、上から 5 段目以降のセルは図 1 の向き B となっており、このコームに関しては全ての以降の段で向き B となっていた。しかし、他のコームでは向き A のまま作り続けられるものもあったため、天井部分の形状は、コームのセルの向きを決定するわけではないということがうかがえる。コームは上の段から順番に作られており、その裏面は巣枠と接触していない。つまり、六角形セルの形成は上段や両隣のセルの影響は多少受けるものの、3, 4 セルの距離が離れた部分からはあまり影響を受けないことが予想される。

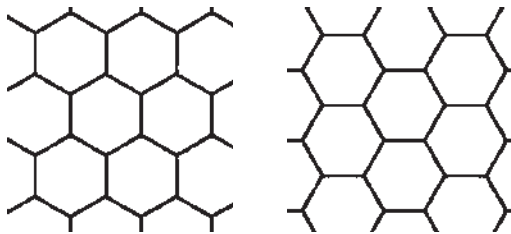


図 1. 六角形の向き A (左) と向き B (右)。

コームの形状についても同様のことが言える。天井部分のコームの形状は、緩やかに曲がっているが、下に向かうにしたがって、巣枠と平行をなす形状に漸近していた（図 5-B と 5-C を参照）。

初めの約 2 週間、造巣活動は活発であったが、それ以降は停滞気味であった。これはシステムに存在する個体数ならびに、この群の女王バチの産卵数に基づく羽化ハチ数の全体がぶら下がるだけの巣板を手に入れてしまったからかもしれない。3 カ月経った 9 月に入ってから、2 枚の巣枠部分から羽化バチが新たに誕生したようで（新たに発生した巣には見える部分には幼虫はいなかった）、個体数が増加していた。それを受けてかシステム内のハチ達の動きもやや活発化したように見受けられたが、セルやコームが急に増えるといった現象は、これまでのところ観察されていない。

考察と今後の課題

ミツバチの巣は、蓄えた蜜がこぼれず、かつ両面を利用するためか、正六角形をなす平面が地面に垂直に形成される（大谷・栗林 1981）。他方、スズメバチやアシナガバチなどの蜜を貯めないハチの巣は、必ずしもこのようにはなっておらず、円盤状の巣盤が上から

下へ向かって造られていく（小野 1997）。また、マルハナバチのように蜜を貯めるものは地面に上向きの壺形である（片山 2007）。ミツバチ巣の水平方向と垂直方向に対する空間異方性は、何に起因して発生するのだろうか。ひとつに考えられるのは重力の影響である。しかし、ミツバチ自身に働く重力の大きさはそれほど大きくないはずなので、重力の影響を受けているにしても、彼らがそれを感じ取ることで何らかの本能が働いて水平・垂直方向の巣を作り分けているのか、それとも単にぶら下がるという性質が影響して空間異方が発生しているのかは、現在のところ不明である。蜜ロウ自身も初期段階ではやわらかいので、重力方向に垂れ下がる方が形を保ちやすいのかもしれない。この問題に答えていくことは今後の課題である。

先に、空間充填だけでは説明しにくい現象が存在することを述べたが、それは次のようなことである。彼らミツバチが体長に依存してセルの大きさを決定し空間を充填するのであれば、大きさの異なるセルによって巣が構成されるのが自然なように思われる。ところが実際には、大きさのはっきり異なるメス（の幼虫が入る）サイズとオスサイズのセルが存在する。メスサイズのセルは、セルを正六角形で見立てたとき、直径（長い対角線）が約 5.1mm であり、オスサイズはそれよりやや大きく約 6.5mm である（吉田 2000）。両者の間には、肉眼でも簡単に判別できるほどの大きさの差がある（図 6 参照）。巣枠を設置した巣箱では、巣礎が一般にメスサイズのセルで構成されているため、巣枠内にメスサイズのセルのみが形成される。ところが巣枠をはみ出した部分には、オスサイズのセルが形成されることが経験的に多い。巣礎を基準に作られたメスサイズばかりの巣の一部分を取り除き、そこに新たな巣がどのようにできるかを試した実験（ミツバチさんの基礎講座、於三木山森林公園、講師 大谷剛、2010 年 5 月 15 日。近藤伸一氏協力）があるが、新たにできた部分には、経験と変わらずオスサイズのセルが構成された（図 6）。

このような事実から、造巣過程の要因に対する次のような仮説を立てることができる：「造巣過程には、空間充填の要因、すなわち、1 セル分程度離れた部分にのみ影響を与える短距離の要因のみならず、巣箱全体に影響を与える長距離の要因、もしくは昆虫長よりも長く、巣箱サイズよりは短いコームサイズ（10 から 20 セル分程度の長さ）の中距離の要因が存在する」。実際、今回の実験においては、となりあったセル同士はその影響を無視できなかつた一方で、セルの向きについては、天井部分から下に向かうにしたがい、向き A から向き B に変化するものが存在していた。これは、1 セル分の影響だけではセルの生成は説明できない可能性があることを示唆している。また、コームの

形状についてもコームサイズの中距離程度離れた場所では、形状が変化していた。

巣箱のシステムにおける要因を考えてみると、長距離の要因には、群をひきつけておく作用がある女王フェロモンなどの化学物質が予想され、中距離の要因には、分蜂群などの集合体を形成するのに必要な熱などが予想される。これを明らかにしていくことも今後の課題である。

著者の一人・大崎は、これまで走化性大腸菌の分布パターン形成に対する次の三村・辻川モデル (Mimura & Tsujikawa 1996) :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a\Delta u - b\nabla(u\nabla v) + cu(1-u),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = d\Delta v + fu - gv$$

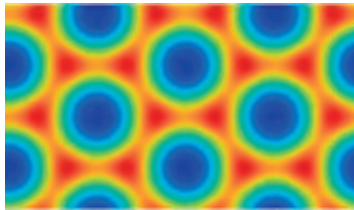


図2：三村・辻川モデルにおける正六角形パターン解 (Okuda et al., submitted)

を扱い、それに正六角形のハニカム構造を有する解が存在することを理論的に証明した (久藤ほか 2007; Okuda et al., submitted) (図2)。ここで、係数 a, b, c, f, g は正定数、未知関数 u は大腸菌の密度を表し、 v は大腸菌自らが分泌する化学物質の濃度を表している。第1式右辺第1項は大腸菌が寒天上をランダムに動きまわる拡散、第2項は大腸菌の走化性による移流、第3項は大腸菌のロジスティック的増殖をそれぞれ表している。第2式右辺第1項は化学物質の拡散、第2項は大腸菌自らが化学物質を分泌する作用、第3項は化学物質の自然崩壊を表している。三村・辻川モデルは、Deneubourg (1977) の提案したシロアリなどの社会性昆虫の巣の建設過程に対するモデルと定常問題においては同値であるため、Deneubourg モデルについてもハニカム構造の定常パターンが同様に存在することが示される。

著者たちは、ミツバチの造巣過程についても三村・辻川モデルや Deneubourg モデルを基礎としたモデルを作ることを現在検討中であるが、ミツバチ巣の六角形セルはミツバチ長と同程度の大きさをもっているため、システムを構成する因子と形成されるパターンとのオーダーが異なる大腸菌分布やアリ塚とは似て非なる現象である可能性が否定できない。このことは、上述2つのモデルの類推ではミツバチ巣モデルは構成で

きない可能性があるということを示唆している。ミツバチの体長よりも大きなコームについては、これがある間隔をもって発生することを示したモデル (Belic et al, 1986; Skarka et al, 1990) が存在するため、コームの発生については、ある程度理論的に示されていると言える。しかしながら、これらのモデルを含めて、六角形セルの形成にまで踏み込んでいるモデルは著者たちの知る限りまだ存在しない。今後、ミツバチの体長を考慮に入れた N 個体に対するモデルを構成することも検討していきたい。

謝辞

宮崎大学工学部の辻川 亨教授には、 N 個体モデルの必要性をご助言いただいた。関西学院大学理工学部数理科学科応用数理グループの秘書である福島 真理子さんには観察データの整理を手伝っていただいた。

本研究は、科学研究費補助金 若手研究 (B) 22740112 「反応拡散走化性系の解が呈する蜂の巣構造と空間異方の与える影響」、大崎 浩一 (個人研究) の助成を受けている。

引用文献

- Belic, M. R., Skarka, V., Deneubourg, J. L. and Lax, M. 1986. Mathematical model of honeycomb construction. *Journal of Mathematical Biology*, **24**: 437-449.
- Deneubourg, J. L. 1977. Application de l'ordre par fluctuations a la description de certaines étapes de la construction du nid chez les Termites. *Insectes Sociaux*, **24**(2): 117-130.
- 片山栄助. 2007. 『マルハナバチ—愛嬌者のしられざる生態』. 189pp. 北海道大学出版会.
- 久藤 衡介・大崎 浩一・櫻井 建成・辻川 亨. 2007. Hexagonal pattern formation in a chemotaxis-diffusion-growth model. 盛岡応用数学小研究集会報告集, 29-39.
- Mimura, M. and Tsujikawa, T. 1996. Aggregating pattern dynamics in a chemotaxis model including growth. *Physica A*, **230**: 499-543.
- 水波 誠. 2006. 『昆虫—驚異の微小脳』 (中公新書 1860). 291pp. 中央公論社.
- Okuda, T. and Osaki, K. Bifurcation of hexagonal patterns in a chemotaxis diffusion growth system. (submitted).
- 小野 正人. 1997. 『スズメバチの科学』. 174pp. 海遊舎.
- 大谷 剛・栗林 慧. 1981. 『ミツバチ (カラー自然シリーズ 41)』. 36pp. 偕成社.
- Skarka, V., Deneubourg, J. L. and Belic, M. R. 1990. Mathematical model of building behavior of *Apis*

mellifera. Journal of Theoretical Biology, 147 :
1-16.

吉田 忠晴. 2000. 『ニホンミツバチの飼育法と生態』,
135pp. 玉川大学出版部.

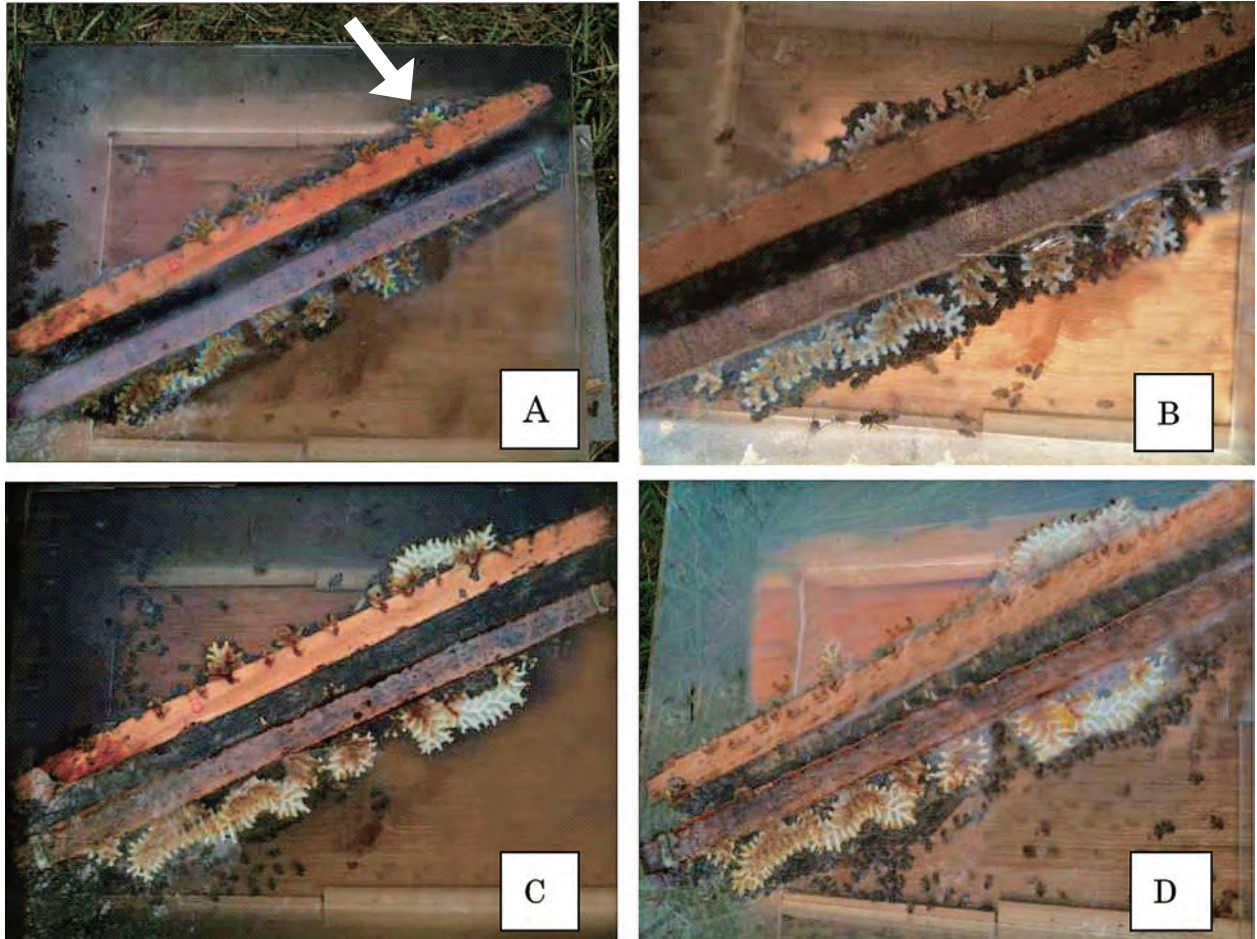


図3. 二枚の巣枠（上：巣枠A，下：巣枠B）から新しく造巣されたコームの天井部。開始してから1週間程度で一気に造巣された（A, B）。2週間が過ぎると造巣は停滞し（C），2ヶ月後もほぼ形に変化は見られなかった（D）。図3-Aの矢印方向から観察したコームを図4に示した。（2010年 A：6月8日，B：6月9日，C：6月27日，D：8月13日）



図4. 新しく造巢されたコームの側面部 (図3-Aの矢印方向から見たもの)。
(2010年 A : 6月8日, B : 6月14日, C : 6月17日, D : 8月26日)

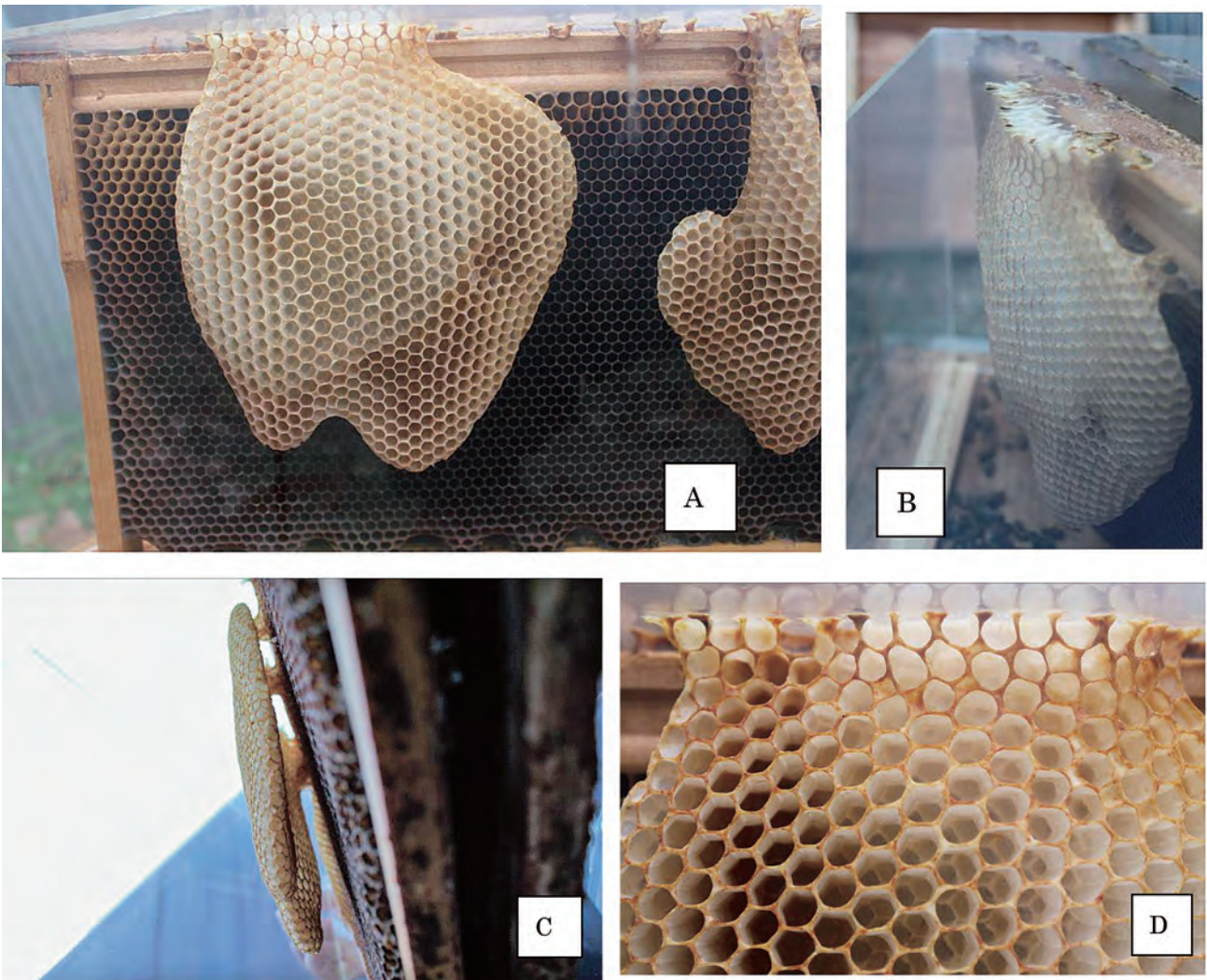


図5. 図3-Aの矢印方向から観察したコームの最終形。(9月20日, A:正面, B:天井部と側面, C:下側から撮影, D:天井部との接触部分を拡大)



図6. ミツバチさんの基礎講座(於三木山森林公園, 講師 大谷剛)における実験観察。巢の2か所を切り取り, ボール紙の楕円枠を取りつけた。その一方に, 働きバチ用のセルより少し大きいオスのセルが形成された。