

セイヨウミツバチの造巣は「互生的魚骨パターン」造りから始まる

平坂 優衣*・大谷 剛**

The Comb Construction Behavior of European Honeybees starts from “alternative fish-bone pattern” making.

Yui HIRASAKA* and Takeshi OHTANI**

Abstract : We make a proposal as a working hypothesis of a process that honeybees create combs sitting back to back with cells (of hexagonal columns), using their bee-wax from their own secretory glands. We bring 10 items to the working hypothesis, from the mathematical literature on hive structure, from the exact examination of the literature data on comb making, and from our experiences of bee-keeping: Honeybees start to make the plane base of cell wall with alternate extending of wax branch. When this “alternative fish-bone pattern” making is repeated to the vertical direction and to the horizontal direction on double sides of comb, the cells of almost same size and depth are lined up systematically. Honeybee behaviors at start line are only two: “alternative fish-bone pattern” making and comb construction toward the gravity.

はじめに

ミツバチは六角形の巣室を整然と並べた美しい巣を造ることで知られている。昔から多くの人がこの巣の構造やその造られる過程を調べ、考察してきた (Martin & Lindauer 1966; Tautz 2007; Ball 2009)。しかし、ミツバチがどのような能力をもってこの構造を造っているのかはいまだに謎のままである (Ball 2009; Bauer & Bienefeld 2012)。ミツバチは脳細胞が100万個程度の微小脳の昆虫である (水波 2006) にもかかわらず、最初から六角形を造る能力が備わっているという報告 (吉田 1998) さえある。ミツバチは本当にそのような特殊な能力をもつのだろうか。この疑問を解決するために、現在までに知られている幾何学的な事実を整理し、最近の関連論文を精査したところ、セイヨウミツバチの造巣行動の全体像がおぼろげながら見え

てきた。そこで、最初に、整理・精査の中から、まとめの10項目を導出し、その10項目を組み合わせて、造巣過程全体を考察し、新しい作業仮説にまとめた。

10項目の導出

作業仮説を構築するにあたって、その素材となる以下の10項目 (①~⑩) を、文献および著者二人の経験から導出していく。

1. ミツバチの巣の構造

a. 巣室・巣板・巣礎について

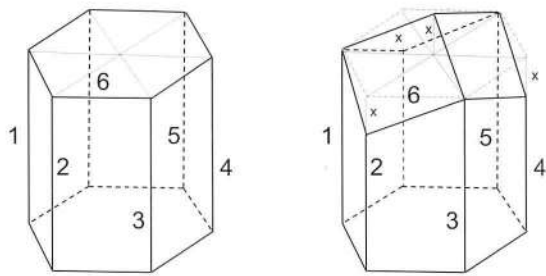
ハチの巣造りでよく知られているのは、外壁がなく観察しやすいアシナガバチ類である。アシナガバチ類は、春先、越冬明けの女王バチ一匹によって巣造りが開始される。女王バチは円筒形の巣室を1匹で造り始める (GAKKEN 1993)。ミツバチの巣の構造はアシナガバチ類の巣とは大きく異なっているため、ミツバチの巣造りに特有の巣室・巣板・巣礎について解説する。下向きのアシナガバチの巣のイメージはミツバチの巣の理解を妨げてしまう惧れがある。

ミツバチの「巣室 (すしつ)」は、アシナガバチと同様に、六角柱で出来ている筒状の部屋である (図 1a)。ただし、底にあたる場所は平らな六角面ではなく、

* 〒665-0073 : 宝塚市塔の町3-113 小林聖心女子学院中学校3年 (3-113 Tonocyo, Takarazuka, Hyogo 665-0073 Obayashi Sacred Heart Junior High School, a third-year student)

** 〒669-1337 : 三田市学園2-1 関西学院大学数理科学研究センター (2-1 Gakuen, Sanda, Hyogo 669-1337, Research Center for Mathematical Sciences, Kwansai Gakuin University)

2014年2月27日受理



a. 六角柱 b. ミツバチの巣室(底が上)

図1:六角柱の線画(a)とその変形で作画したミツバチの巣室(b)。数字は六角の垂直の辺を指している。aでは1~6が同じ長さなので、底は平らになるが、bでは、2, 4, 6の辺が長さ x だけ短くなり、天井(底)の中心が長さ x だけ突出するので、菱形の3面が現れる。この2つの立体の表面積は、ほとんど同じだが、bの方がわずかに小さくなる x の値がある(高木 2008)。

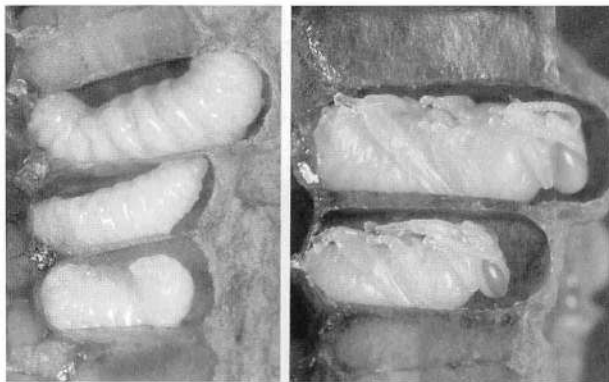


写真1 (大谷・栗林 1981よりモノクロコピー): セイヨウミツバチの雄バチ(上)と働きバチ(下)。左図は前蛹、右図は蛹である。どちらも仰向けになっている。手前の壁は取り除いてある。(借成社より許可を得て引用)

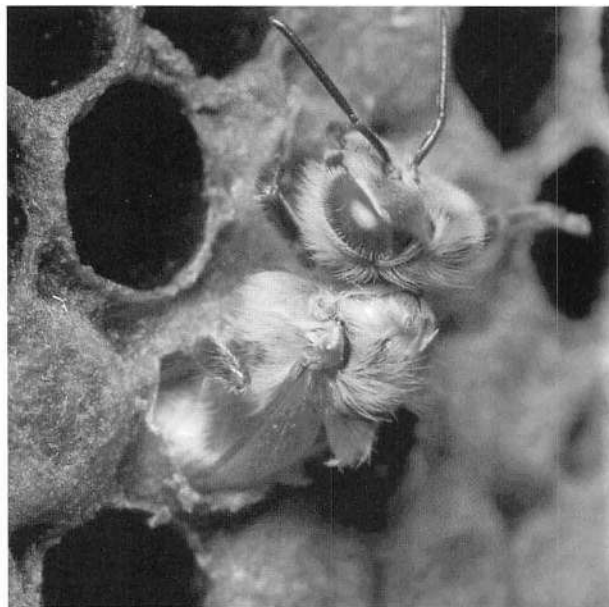


写真2 (大谷・栗林 1981よりモノクロコピー): セイヨウミツバチの働きバチが羽化してくるところ。前蛹のときから仰向けになっているので、スムーズに上に出てくることができる。(借成社より許可を得て引用)

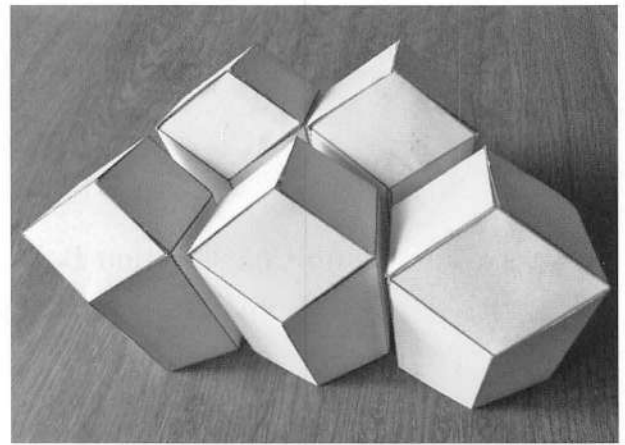


写真3: 型紙を切り抜いて制作したミツバチの巣室。同じものを5つ作って逆さ(底を上向き)に並べた。これで巣板の片側半分である。同じものを作って底同士をくっつけて乗せると、一番高いところと一番低いところと一致するので、ぴったりと重なる。実際の巣板では底面と壁面は共用する。したがって、巣板で巣室の壁をすべて除去すると、底面だけが残るが、それは巣礎そのものである。

斜方十二面体の一部で構成されている(Ball 2009; 図1b)。巣室は幼虫を育てる場所であり、女王バチは菱形の三面で造る凹部に産卵する。卵は3日で孵化し、6日の幼虫期間のあと、他の働きバチによって蓋掛けされ、幼虫は内側から糸を吐いて裏打ちしてから前蛹になり、蛹化する(写真1)。12日経つと、羽化して、内側から蓋を噛み破って巣室から脱出する(写真2)。巣室は幼虫を育てるだけでなく、食料の貯蔵室としても使用される。中心部の育児圏の周囲には、働きバチが後ろ足に花粉団子として持ち帰り挿入した花粉塊を、別個体が頭で押し潰して貯蔵し、その周辺と上部には蜂蜜を貯蔵する。蜂蜜が熟成し、水分が20%程度になると、働きバチにより蜜蓋が造られる。巣室の構造を理解するために、高木(2008)による型紙で造った巣室を逆さにして5つ並べた(写真3)。

ミツバチの「巣板(そうばん, すいた)」は、この巣室の底を垂直面にびっしりと並べたものを、底面同士の凹凸が収まりいいようにずらして、張り合わせた形となっていて、両面から使用できる「優れたもの」である。この巣板の構造をハニカム(honeycomb)構造と呼び、私たちの生活の中で軽さと強さを要求される場所に使用されている(吉田 1998; 高木 2008; 水谷 2010)。

「巣礎(すそ)」は、1857年にドイツのメーリンクによって発明された養蜂具だが、自然界の造巣では巣礎に相当するものはない(佐々木 1994)。巣礎は、巣板を形成する巣室の壁をすべて取り去ったものを指す。巣室の底の部分だけの型を造って、蜜ロウの板を両側から圧着して造ったものである。これを、23.6 × 44.8 cmの可動式巣板(佐々木 1994)の木枠に張ってミツバチ群に与えると、底の型通りに巣室の壁を盛り上げて

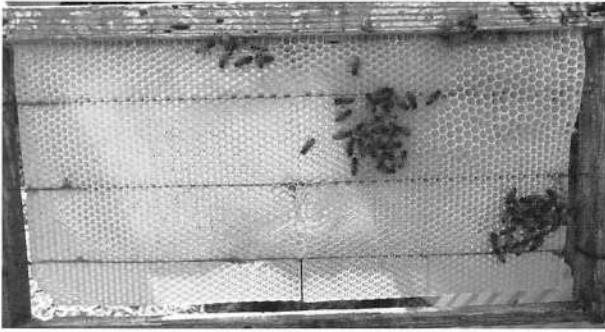


写真4: 通常の巣礎を90°回転させて張った実験巣枠。働きバチは働きバチの巣室の壁を少し盛り上げ始めているが、右上方には一回り大きい雄バチの巣室が混じっている。中心部の巣室には卵が産み付けられていて、以後も幼虫が育ち、蛹化し、働きバチも雄バチも羽化した。花粉を詰め込まれた巣室や、蜂蜜を蓄えられた巣室もあり、働きバチにとって、巣礎の90°回転は何の支障もなかった。3本の黒い横線は補強のための針金であるが、この撮影のとき、一番下の針金以下はほとんど巣室の壁がもりあがっておらず、巣礎だけになっている。裏面から日光が当たっているところは、裏面の壁の部分が透けて見えている。

くれる(写真4)ので、均一の巣室でびっしりときれいに埋め尽くされた巣板を得ることができる。もちろん、ミツバチは巣礎なしでも巣板を造ることができるが、市販品の巣礎(写真4下部参照)だけを造ることはできない。すなわち、ミツバチは巣礎を造ってから、巣室の壁を盛り上げるのではなく、「巣礎と壁を同時に」造っていく。

b. 数理的な規則性

ミツバチの巣の巣板を見ると、垂直面に両側から六角形の巣室が整然と並んでいる。巣室の断面はほぼ正六角形なので、巣室の壁同士のなす角は120°である。また、巣室の底は3つの菱形からなっている(図1b参照)。この3つの菱形がなす角度は109.5°であり、発見者の名をとって「マラルディの角」と呼ばれている(高木 2008)。

こうした角度が自然現象として現れる例について考えてみよう。自然界で120°、109.5°という角度は、シャボン玉と結晶構造に出現する。

1つ目の例、シャボン玉の膜(以降、シャボン膜とする)には19世紀から知られている基本的な3つの法則がある(Almgren & Taylor 1976)。1つは面積最小の法則で、与えられた枠に張られたシャボン膜の形はその両側の気圧が等しければ、膜の面積が最小になるように決まるというものである。今回ミツバチの造巢に関連する法則は残りの2つである:

- ①シャボン膜が平面で交わるときは、必ず3枚が交わり、この時できるシャボン玉の直径に関わらず、それらの間の角度は120°である(3枚出会うの法則: 図2)。

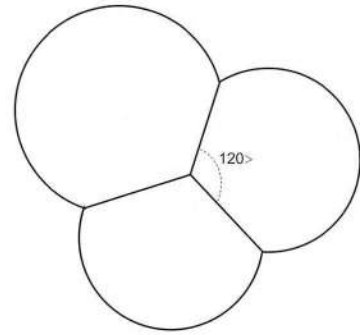


図2: シャボン膜の法則①「3枚出会うの法則: 3枚の膜が平面で出会うと必ず120°の角度になる。」直径に関わらず、3つのシャボン玉が接するところに見られる。

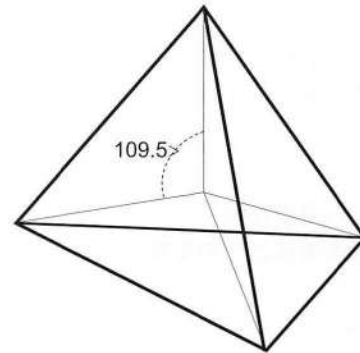


図3: シャボン膜の法則②「4本出会うの法則: 6枚の膜が出会ったとき、出来る4本の直線は必ず109.5°の角度になる。」太い直線は枠の針金を、細い線はシャボン膜の接している直線を表す。

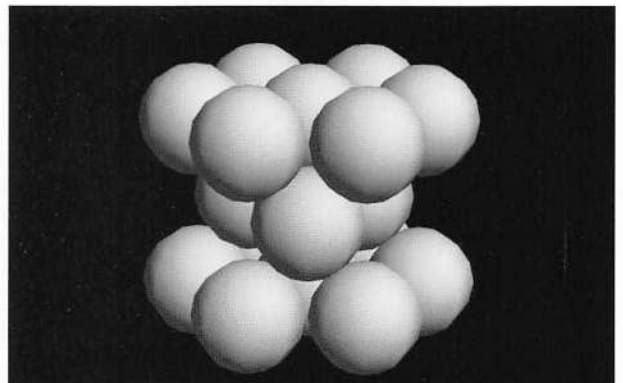


図4: 六方最密充填構造。球体を一定の空間に詰め込むときの、もっとも多くの球を詰め込む配置構造で、空間の74%を占めることができる(パソコンソフト「メタセコイア」で作成)。

- ②シャボン膜が立体交差するとき、交線の分岐点では、必ず4本の交線が集まり、4本の交線のどの2本をとっても、その間の角度はマラルディの角109.5°となる(4本出会うの法則: 図3)。

このように、シャボン膜では自然現象としてこの2つの角度ができる。

2つ目の例は結晶構造の一つ「六方最密充填構造」(図4)である。ミツバチの巣室の底に現れる3つの菱形が集まった図形は、斜方十二面体の一部であり(Ball 2009)、柔らかい球をできるだけ高密度に詰めた場合

に現れる。巣室の底は両側から球が集まった構造と考えればよい(高木 2008; 水谷 2010)。

ミツバチの巣の素材は主にハチ自身が腹部節間から分泌する蜜ロウまたは蜂ロウ(吉田 1998)という可塑性材である。図1に一つの巣室の底の形を示した。側面を含めた表面積は底の平らなaよりも底がとがったbの方が小さい。これは数学的に証明されている(高木 2008)。そして、ミツバチは、巣礎を受け入れて巣室の壁をためらいなく盛り上げていくので、bを選んでいると考えることができる。ミツバチはほぼ同じ大きさの巣室を同じ厚さの壁で整然と並べて造ることができるので、シャボン膜で見られたような2つの角度(①, ②)が自然に造られていく。

③ミツバチの巣板に 120° , 109.5° が現れるのは、「同じ大きさの巣室を同じ厚さの壁で整然と並べて造ることができる」ときである。

2. ミツバチの造巢行動

a. 液状平衡仮説とその反論

「自然に巣ができる」という説の代表として蜜ロウの特殊な性質に注目した液状平衡仮説(Pirk et al.

2004)がよく知られていた。蜜ロウが溶けて液体になりかけたとき、ミツバチがとくに何もしなくとも六角形の巣室ができるというものである。Bauer & Bienefeld(2012)はミツバチの体温と蜜ロウの温度を計測することによって、これを否定した。やはりミツバチは何らかの本能によって巣を造っているという結論だが、同時にあまりに精密な決まりに従っているのは環境の変化についていけなくなるとも述べている。つまり、何かの決まりには従っているが、それは単純な方が生き残りに有利だということであろう。

セグロアシナガバチでは、最初の巣室を造るとき、円筒形を造っていて、それに新しい円筒形の巣室を次々に連結していくと、巣室同士が引っ張りあって自然に六角柱になってしまう(七尾・小田・久保 1979)が、ミツバチの巣造りの場合、このアシナガバチの円筒形づくりにミツバチ独自の単純な行動要素が付け加わるというイメージであろうか。

b. 最近の観察記録から

セイヨウミツバチの造巢を観察している最近の論文(大崎・北尾・大谷 2011; 上道・大崎・大谷 2012)

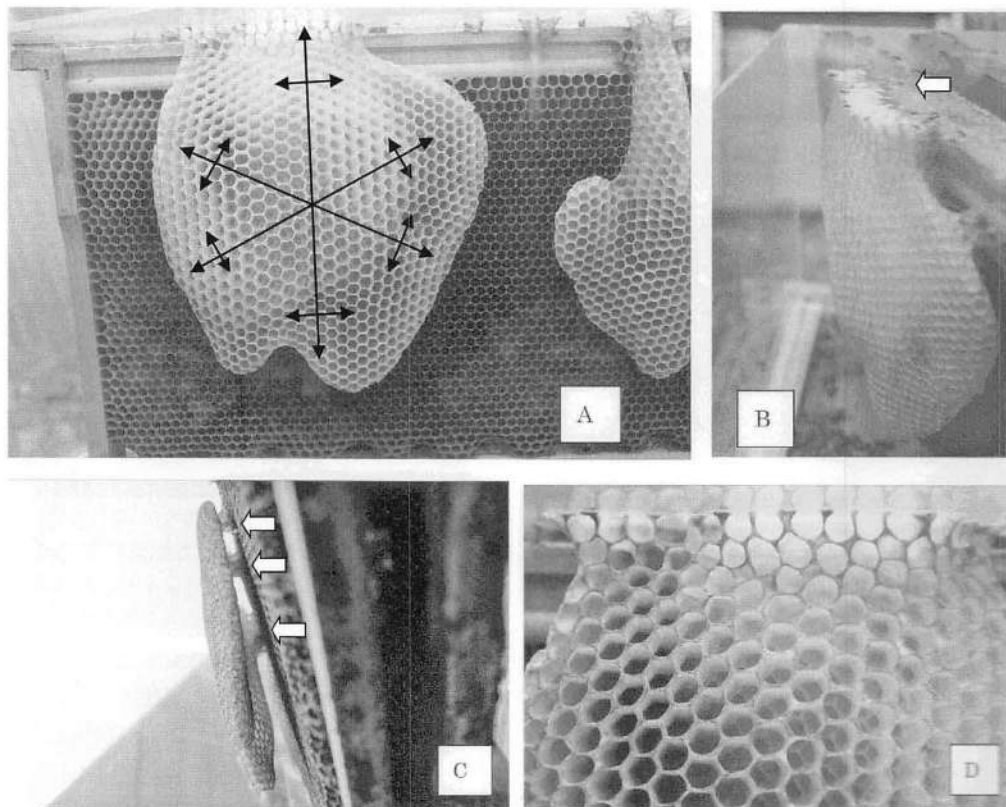
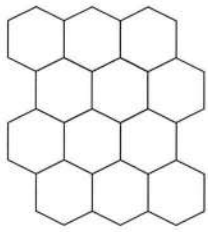
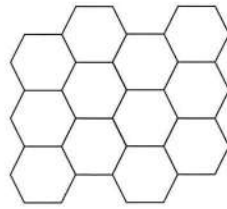


写真5(大崎ほか 2011の図5のモノクロコピー、矢印はすべて平坂・大谷による): すでに出来上がった巣板に造られた無駄巣。まず巣枠から垂直に立ち上がってから水平方向へもとの巣板と平行になるように下方へ向かって伸ばしたと思われる。巣箱の天井には後から接着した。A: 巣室の列が一旦形成されると6方向に向かって巣を展開することができ、そこから小矢印の方向に展開していく。B: 無駄巣の巣箱への接着部を上から見たところで、互生的魚骨パターンが見える(白矢印)。C: 無駄巣を下から見上げると、白矢印の3本の支柱が見えるので、巣枠から垂直に立ち上がったことがわかる。D: 無駄巣と巣箱天井への接着部の拡大写真。接着部のすぐ下は巣室列が乱れている。天井から造られたなら、このような乱れはみられなかったはずである。以上より、④, ⑤, ⑥の項目を導出した。(兵庫生物14(2):107-112より許可を得て引用)



a. 垂直



b. 水平

図5: 巣室の並びの向き: 向かい合う平行な二辺の向きで名前が決まっている(Pratt 1999). 六角形は60度回転すると元の形に重なる. つまりaとbは30度回転または90度回転によって重ねることができる.

を詳しく読んで、著者の一人の平坂はいくつかのことに気がついた。

写真5はすでに出来上がっていた巣板に造られた無駄巣の4枚の写真である。無駄巣とは、人間が管理する上で邪魔なので「無駄」と呼んでいるが、ミツバチにとっては必要なもので、ちょっとした空間があれば無駄巣を造ってしまう。造巣のヒントはこういうところにあるかもしれない。巣板から支柱(C)を造ってから鉛直方向に伸ばして造られ、あとから6方向に伸ばした結果、天井につながっている(B,D)。ミツバチを飼養していると、巣板から橋のような支柱が造られ、続いて天井に沿って水平方向に初めの列を造る。多くの場合、六角の平行な向かい合わせ辺が縦向き(「垂直」, 図5a)にできるが、この無駄巣(写真5A)では初めの列が30°傾いてできてしまったようで、六角の平行二辺は横向き(「水平」, 図5b)である。その後、ハチはそのまま下方へ巣の列を伸ばしていき、上方にも空間があったので巣室を並べて伸ばして行って天井に接着したものと思われる。そのため接着面のすぐ下では巣室の形が乱れている(D)。過去の観察経験を加えて、写真5の無駄巣の出来方をまとめると、次の3点が引き出される。

- ④ミツバチは巣の造り始めに、天井に沿って巣室を並べていく。
- ⑤初めの一列ができるとこれを下方にそのまま伸ばしていく。
- ⑥平らな面があればこれに巣室を並べるように伸ばして接着する。

さらに写真5から分かることは、いったん無駄巣が造られ始めると、巣室の列が直列する方向(6方向ある)に巣を展開していくことができるということである(A)。これは多数のハチで一斉に巣造りするミツバチにとって有利な条件である。

続いて写真6では巣箱の側壁から無駄巣が突出している。初めの巣室の列は鉛直な壁に接着されているので、その後の巣室の列もこれに従っている。つまり天

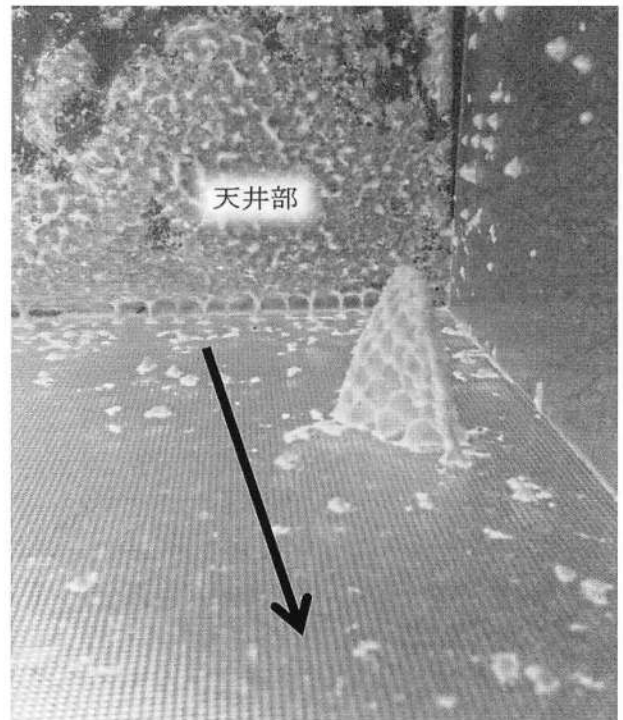


写真6 (上道ほか 2012の図2のモノクロコピー): 巣箱の側壁に造られた無駄巣。天井に対して90°傾いた巣室列をもつ(矢印は重力の方向)。初めの列が本来の方向に対して90°傾いているためにこのような結果になった。以上より⑦の項目を導出した。(兵庫生物14(3): 185-189より許可を得て引用)

井に対して90°傾いた巣室の列(図5b)を持つことがわかる。写真6から、初めの巣室列が鉛直な壁に付いていても伸長可能であることが推測されるので、6方向の展開を加え、より一般化した次の点にまとめる。

- ⑦ミツバチは鉛直方向に関わらず初めの巣室の列を6方向に伸長することができる。

さらに、写真6からは、天井部の角に横に並んだ「初めの一列」が見える。ミツバチはこのようにほぼ同じ大きさの巣室を横に並べていくことで初期巣を造ると考えられる。

これらの実験では、透明アクリル板製巣箱を使って初期巣を観察・記録している。写真7は、初期巣の上部接着面をアクリル板越しに上から見ている。また、写真8では、あとから側壁に接着した巣板の断面が見える。

この断面の形を上道・大崎・大谷(2012)はその形から「魚骨パターン」と呼んだが、この「魚骨」は普通の魚の骨と明らかに違う。「魚骨」と呼ばれる初期の壁の列が巣礎の両側に互い違いに伸びている。その同側の間隔は巣室の直径に相当し、そのほぼ中央で反対側の巣室壁が伸びている(図6)。この形は巣箱への接着面では天井部でも、側面でも、その部が比較的きれいな平面ならばほぼ同じである(写真5B, 写真8の白矢印; 写真7)。そこで、これを「互生的魚骨パターン」

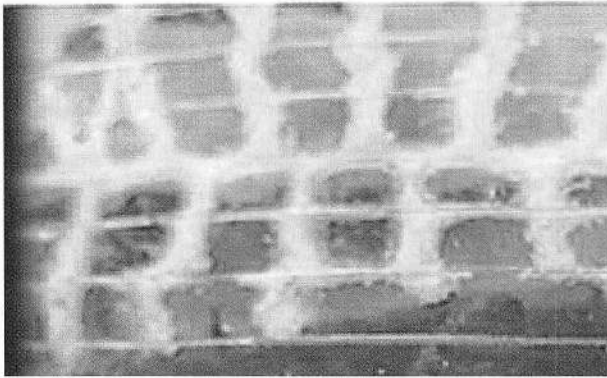


写真7 (上道ほか 2012の図5<一部, 90度回転>のモノクロコピー): アクリル板巣箱の天井面で観察された無駄巣の接着面。互生的魚骨パターンが認められる(白い直線はテグス)。写真8と合わせて⑧の項目を導出した。(兵庫生物14(3):185-189より許可を得て引用)

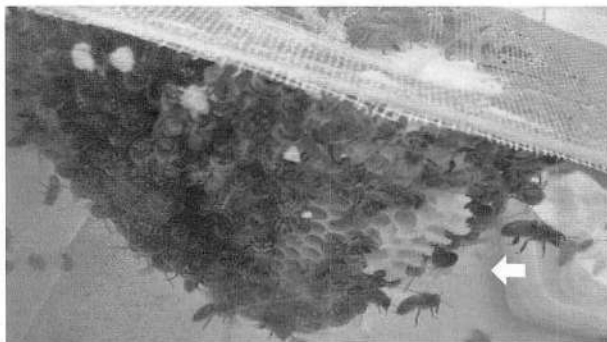


写真8 (上道ほか 2012の図3Aのモノクロコピー): アクリル板巣箱の側面で観察された無駄巣の接着面。ここでも互生的魚骨パターンが観察される(白矢印, 平坂・大谷らによる)。写真7と合わせて, ⑧の項目を導出した。(兵庫生物14(3):185-189より許可を得て引用)

と命名し直すことにした。

これらの写真から, 壁面への接着部は「互生的魚骨パターン」になるので, より一般化した次の点が導かれる。

- ⑧「互生的魚骨パターン」は鉛直面でも水平面でも斜めでもほぼ平らな面ならば同様に現れる。

c. ミツバチの飼養経験から

著者の一人, 大谷は大学生だったころから46年間ミツバチを飼養してきた。ミツバチに関する多くのことを学んできたが, ミツバチの習性に慣れきってしまっていて大半が常識化し, 感動が産みだせない状況にある(⑧の事実は頻繁に観察していたが, その一般性には気づいていなかった)。もう一人の著者, 平坂は2年ほどの飼養経験しかないが, それだけに多くのことに新鮮な疑問が湧き, 新たな発見に感動できる状況にある。平坂がミツバチの造巣について疑問を發し, それに大谷が応えていく中で, 造巣に関することがいくつか明らかになってきた。

私たちが普通の条件で観察している範囲内では, ミ

ツバチは巣板を鉛直になるよう, 下へと伸ばしていく。巣板でのミツバチの活動する面が天井を向いたり, 地面を向いたりすることは決してない。ミツバチは前蛹のころから「仰向けになって」巣室に入っている(大谷・栗林1981 写真1)。ミツバチの巣箱の蓋を開けて内部を観察するとき, または観察巣箱で働きバチの行動を観察するとき, 羽化した新成虫が巣室から容易に上方に登ってくるのをしばしば見ることが出来る(大谷・栗林1981 写真2)。これは, 幼虫が蛹化するとき, 重力の方向を感知することができるということを意味する。重力方向以外の方向に巣板を伸ばしていくと, 羽化した新成虫が落下しやすくなるので, 落下しにくい方向だけが残ることになる(写真5Aの上下方向)。

一方, 巣板の活動面そのものが傾いていることはよくみられる。傾いていても, 大きさ, 深さが適していれば問題なく利用する。つまり, 「初めの一列」が傾いていても, ほぼ直線上に並べられれば, そのまま巣を伸ばしていく。六角形の角がどこにあっても関係はないように思われる。Pratt (1999) は, 六角形の向き(図5のa=垂直とb=水平)が重力とは無関係に造られる, と述べた。ミツバチたちはaでもbでも同じように利用する。大谷も平坂も別個の実験で巣礎を90°張り替えて, ミツバチがaとbを区別していないことを確かめている(写真4参照)。区別しない理由は, ミツバチが六角形(または六角柱)というよりも円形(または円柱)として利用しているからだと考えられる。実際, 古い巣では, 側壁や底部の角が丸くなっているものもよく見られる。

以上のことは, 次の2点にまとめることができる。

- ⑨ミツバチはまず重力を感じて巣板を鉛直に伸ばしていく。
⑩一匹のミツバチが作業しやすい大きさの空間を巣室として造っていき, その作業の軌跡は六角柱でなく円柱を描く。

考察

整然とした六角柱の巣室が並ぶ条件は③である。「同じ大きさの巣室を同じ厚さの壁で整然と並べて造ることができる」ときであった。

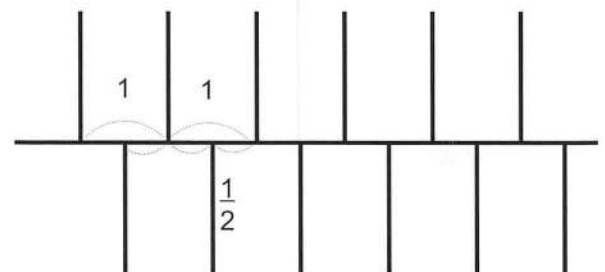


図6: 互生的魚骨パターンの模式図。本物の魚の骨とは違い, 互い違いに枝骨が出ている。

ミツバチにこのような能力があれば、精密に角度を計測しなくても六角柱の巣室の並びは造られるはずである。今までまとめた⑧はこの能力があることを意味している。少しずつニュアンスの違う10項目(①~⑩)から次のような作業仮説にまとめてみた。

作業仮説a: ミツバチは巣の造り始めに巣の平らな部分から互い違いに等距離になるように蜜ロウの枝を伸ばして巣室壁のもとを造っていく(写真7, 図6)。この「互生的魚骨パターン」造り行動を巣板上で鉛直方向、水平方向へ両面で繰り返すとほぼ同じ大きさ、同じ深さの巣室が整然と並んで造られていく。

これは数理的に(シャボン膜の法則に則って)いわゆる「ハニカム構造」(吉田 1998)が現れる条件を満たしている(高木 2008, 水谷 2010)。

以上のことは次の 作業仮説b (初期状況), 作業仮説c (その後の状況)のように言い換えることができる。

作業仮説b: ミツバチは巣の設置面に「互生的魚骨パターン」で初期巣を造り, この「初めの1列」にしたがって, 鉛直方向に巣板を伸ばしていく。

作業仮説c: ある程度巣板が大きくなってくると, ほぼ60°ずつ傾いた巣室の列を伸ばす形で6方向に向かって巣板を伸ばしていくことができる。

この繰り返して巣は造られるのである。図7に私たちの作業仮説の概略(10項目との関係)を図示した。作業仮説の部分に着目して巣造りの初期に限定すると, ミツバチの行動は「巣板の両面に互い違いに蜜ロ

ウの枝を伸ばす」こと(=「互生的魚骨パターン」造り行動)と「巣板は鉛直方向に沿って造られる」ということだけになる。鉛直方向も初期段階を過ぎると, 巣室の並びに沿って次々と造っていくので, 働きバチ一匹が入るのに適した大きさの空間を並べていく(項目⑩)ことをより重視しているように見える。したがって, 「互生的魚骨パターン」造り行動が基本行動としてクローズアップされる。

ミツバチは内なる本能と外からの環境変化に従って巣を造っている(Bauer & Bienefeld 2012)。環境の変化があるときは特に簡単な決まりに従っていた方が生き延びる確率が上がる。外から制約が加わるとき, 巣の造り方も臨機応変にする必要があり, あまりに精密な方法を取っていたのでは適応していくことができない(Bauer & Bienefeld 2012)。写真5で, 大きな無理をせずにいびつな巣室を造って天井に接着していた例(写真5D)は臨機応変の例であろう。結果として「無駄巣の補強」になっている。ミツバチは長い間社会性昆虫として生き延びてきた。その秘密がこの「単純なことの繰り返し」にあるように思える。

「単純なことの繰り返し」で複雑なパターン形成を外部からの介入なしに自動的に造りあげていくのは, 自己組織化(self-organization)のメインテーマである(Camazine et al. 2001)。この本『生物にとって自己組織化とは何か』の全21章のうち, 3章がミツバチに関するものである(蜜源選択, 巣の温度調節, 巣板パターン)。このことはミツバチの行動の多くが自己組織化

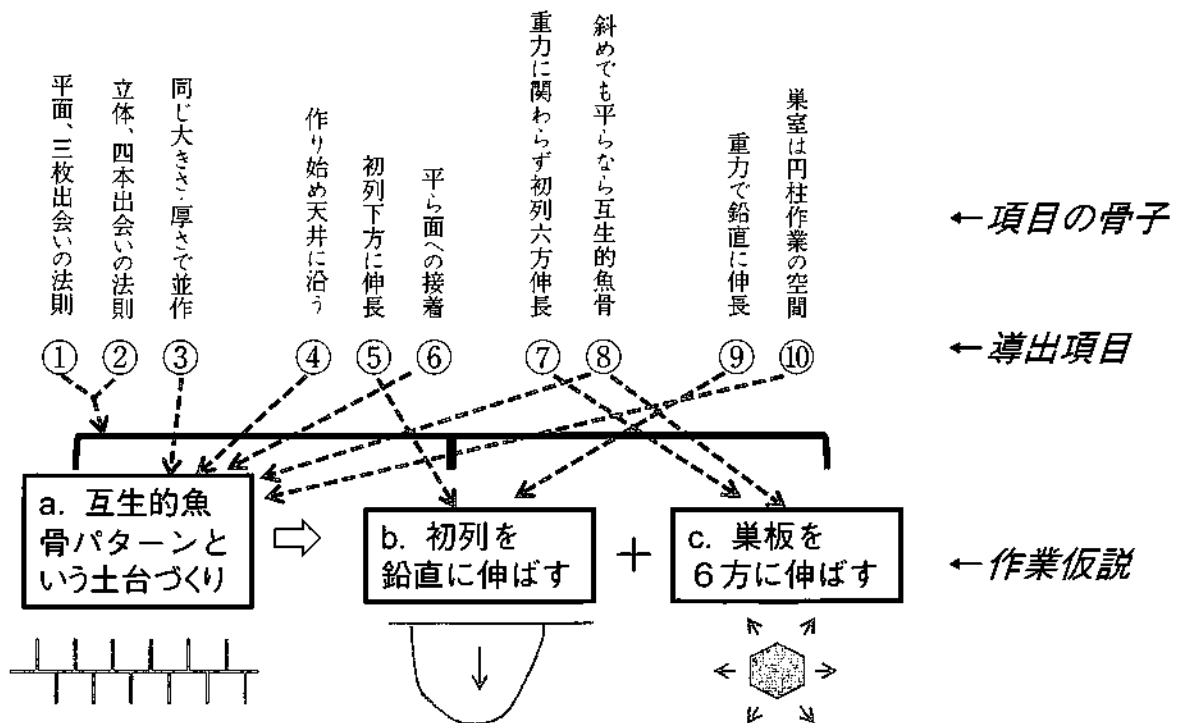


図7: 導出された10項目(①~⑩)とその骨子が, 作業仮説3項目(a~c)とどのように関連するのかを示す模式図。①と②の矢印は作業仮説全体に関係していることを示す。

の考えで理解されることを暗示している。本研究の行く末は、そうした自己組織化の一例になっていくことが予想される。

今後はこの作業仮説をベースにして、数理的に、動物行動学的に、自己組織化的に多方面から追究し、より真実に接近した仮説を目指す。

要 約

セイヨウミツバチが自ら分泌する蜜ロウを用いて、六角柱の巣室を背中合わせに張り合わせた形の巣板を造っていくが、その過程を作業仮説として提出する。作業仮説をつくるために、ミツバチの巣の構造で数学的に検討されている文献を調べ、造巣行動に関わる論文のデータを精査し、今までのミツバチ飼養の経験から10項目のまとめを行った。10項目を総合して造られた作業仮説は、次のようになる：ミツバチは巣の造り始めに巣の平らな部分から互い違いに等距離になるようにロウの枝を伸ばして巣室壁のもとを造っていく。この「互生的魚骨パターン」造り行動を巣板上で鉛直方向、水平方向へ両面で繰り返すとほぼ同じ大きさ、同じ深さの巣室が整然と並んで造られていく。巣造りの初期に限定すると、ミツバチの行動は「巣板の両面に互い違いにロウの枝を伸ばす」こと（＝「互生的魚骨パターン」造り行動）と、「巣板は鉛直方向に沿って造られる」ということだけになった。

謝 辞

大崎浩一教授(関西学院大学理工学部 数理科学科)および上道賢太氏(関西学院大学大学院 理工学研究科 数理科学専攻)には、重要な助言をいただき、有益な論議もしていただいた。感謝申し上げます。

引用文献

- Almgren, F. J. & J. E. Taylor. 1976. The geometry of soap film and soap bubbles. *Sci. Amer.* July 1976. (F.J.アルムグレン・J.E.テイラー 松信八十男訳1976). *シャボン玉の幾何学*. in 別冊日経サイエンス 数学は楽しい part 2(日経サイエンス社, 2010, 140pp):14-27.
- Ball, P. 2009. *Shapes. Nature's patterns: A tapestry in three parts*. Oxford Univ. Press (フィリップ・ボール, 林大訳. 2011. *かたち 自然が創り出す美しいパターン* 430pp. 早川書房, 東京)
- Bauer, B. & K. Bienefeld. 2012. Hexagonal comb cells of honeybees are not produced via a liquid equilibrium process. *Naturwissenschaften* DOI 10.1007/s0014-012-0992-3.
- Camazine, S., J.-L. Deneubourg, N. R. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz & E. Bonabeau. 2001. (松

本忠夫・三中信宏訳2009. *生物にとって自己組織化とは何か—群れ形成のメカニズム*. 532pp. 海游舎, 東京.)

- GAKKEN. 1993. *大自然の不思議・昆虫の生態図鑑*. 160pp. 学習研究社, 東京.
- Martin, H. & M. Lindauer. 1966. *Sinnesphysiologische Leistungen beim Wabenbau der Honigbiene*. *Z.vergl.Physiol.* 48:481-553.
- 水谷 仁. 2010. 3章, 円・球・ π の科学 ケプラー予想①②. in ニュートン別冊「カタチ」をめぐる数学の不思議 図形に強くなる(ニュートンプレス, 157pp.):80-83.
- 水波 誠. 2006. *昆虫—驚異の微小脳*(中公新書1860), 291pp. 中央公論社, 東京.
- 七尾 純・小田英智・久保秀一. 1979. *アシナガバチ(カラー自然シリーズ30)*. 32pp. 偕成社, 東京.
- 大崎浩一・北尾一真・大谷 剛. 2011. *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*. *兵庫生物* 14(2):107-112.
- 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, 東京.
- Pirk, C. W. W., H. R. Hepburn, S. E. Radloff & J. Tautz. 2004. Honeybee combs: construction through a liquid equilibrium process? *Naturwissenschaften* 91:350-353.
- Pratt, S. C. 1999. Gravity-independent orientation of honeycomb cells. *Naturwissenschaften* 87:33-35
- 佐々木正己. 1994. *養蜂の科学(昆虫利用科学シリーズ⑤)*. 159pp. サイエンスハウス(株), 東京.
- 高木隆司. 2008. 「理科」「数学」が好きになる 楽しい数理実験. 199pp. 講談社, 東京.
- Tautz, J. 2007. *Phänomen Honigbiene*. (ユルゲン・タウツ, 丸野内棟訳2010. *ミツバチの世界 個を超えた驚きの行動を解く* 292pp. 丸善, 東京.)
- 上道賢太・大崎浩一・大谷 剛. 2012. *セイヨウミツバチの造巣初期段階における行動と巣のパターン*. *兵庫生物* 14(3):185-189.
- 吉田忠晴. 1998. *六角形を造るミツバチの建築技術*. in *蜂は職人・デザイナー*(INAX出版, 83pp.):62-67.