

How to make a social insect

社会性昆虫の「設計図」が手に入った

Edward O. Wilson



このたびミツバチのゲノム塩基配列が解読された。そこには、高度の社会構造をもつようにミツバチを進化させた重大な生物学的変化が表れている。これでミツバチについては、分子からコロニーまであらゆるレベルの研究が可能となった。

Nature Vol.443 (919-920)/26 October 2006

昆虫種が単独性の生活スタイルからコロニーを作る高度な生活スタイルへと変容を遂げるには、体のあらゆる仕組みを変化させる必要がある、しかも、成虫のカースト（社会的階級）の間に大きな違いを生じる遺伝子によって規定される形質に、十分な可塑性もたせなければならない。この大革新のようすをゲノムレベルでとらえた成果が *Nature* 10月26日号に報告されている¹。

もし地球上にいる社会性をもつ生き物を採点して、コミュニケーションの複雑さや分業、集団の団結度で点数をつけるとしたら、進化の最高峰は3つになる。それは、人類、クラゲの仲間のクダクラゲ類、そして、一部の限られた社会性昆虫である^{2,3}。セイヨウミツバチ (*Apis mellifera*) はこの3つ目に入り、こうした高度な社会性昆虫の中には、面白い生態をもつハキリアリ類や軍隊アリ類、キノコシロアリ亜科のアリ塚を作るシロアリ類も含まれる。セイヨウミツバチがこのランクづけのトップクラスに入ることには、誰も異論がないだろう⁴。

この論文著者たちの指摘¹によると、セイヨウミツバチに関してずっと不思議がられてきたことは、働きバチのように小さくて、脳には我々ヒトの100万分の1の数のニューロンしかない生き物がいったいどうやって、これほどたくさんの仕事をこなすことができ、しかも全員が協調して一致団結できるのかということだ。近代で最初にミツバチを取り上げた Charles

Butler の『Feminine Monarchie』（ミツバチのコロニーを治めるのは王バチではなく女王バチだという説を述べた著書。1609年刊）が刊行されて以来、個体レベルやコロニーレベルの発見が次々と研究界にもたらされた。発見が続々ともたらされるそのありさまは、まさしく Karl von Frisch の言葉の通りだった。「ミツバチの生活はまるで魔法の井戸だ。汲み出しても汲み出しても、汲み出すべきものがまた満ちてくる。」

蜂蜜を集めたり受粉を助けたりする役目を別にすれば、セイヨウミツバチで最も有名な特徴はもちろん、「尻振りダンス」（8の字ダンス）である。採餌役の働きバチは、蜜源や新しい巣作りに適した場所を見つけると、巣箱に戻ってきて、巣箱の中に垂直に並ぶハチの巣の壁の表面で「8の字」を描いて歩き、胴体部分で飛行経路を抽象的に表現する。この「8の字ダンス」には、太陽の方向を参照した蜜源の方向に関する情報が含まれており、それに加えて、巣からの距離の情報も入れ込まれている。このメッセージは、時間を限ったブンブンという音と匂い物質の分泌で増強される。目的地が巣に近いことを仲間に知らせるときは、完全な8の字ダンスではなく、円を描いてぐるぐる回る「円形ダンス」を踊る。

ここ数年の研究で、ミツバチのダンスには他にも種類があることが明らかになってきた。帰還した採餌バチが荷下ろしする、つまり蜜や花粉を巣の仲間に受け渡す際に、餌運び役の働きバチが多数あぶれて



いるのを見つけた場合、「揺さぶりダンス」(shaking dance; 体を背腹方向に振動させつつ、両方の前脚で他の仲間を抱く)を踊って、そのダンスフロアにより多くの働きバチをよび寄せ、そこから野外へと飛び立たせる。その逆が起こった場合、つまり、帰還した採餌バチが蜜や花粉を巣の仲間になかなか受け取ってもらえない場合、「身震いダンス」(tremble dance; 体を前後方向に揺すりつつ、体軸を中心に体を少し回転させる)を踊って、もっと多くの働きバチを餌運び役として働くようにさせる。

ミツバチは、こうしたダンスの演目に加えてフェロモンも使っている。これらのフェロモン物質は全身に分布する腺から分泌され、これを使ってさまざまな警告を発したり、仲間を動員したり、外来者と巣の仲間を区別したり、また、性別やカースト、日齢によって仲間を区別したりする^{4,5}。働きバチが成虫になってから過ごす時間は、自然環境下でおよそ40日間であり、その間、彼らの分泌腺は社会的活動をみせ、担う仕事の内容とうまく調和するように、プログラムされた時間的順序で成長したり退縮したりする^{6,7}。この過程の進行は、コロニーの需要に応じてスピードアップしたり巻き戻したりできる⁸。また、働きバチの仕事内容が変化していくにつれて、特定のシグナルに対する感受能力が上昇したり低下したりする。

最後になるが、働きバチには驚異的な記憶力が備わっている。彼らは、自分の属するコロニーの匂いを覚えている。餌探しの飛行では、仲間のダンスでもらっ

た指示だけでなく、目印も使っている。また、最大で5か所の花畑など餌場のありかを覚えることができ、しかも、1日の中でその餌場の蜜がいちばん多い時間帯も覚えていられる^{8,9}。

ミツバチのゲノムに隠された暗号の解読にあたって研究者たちは、社会性にかかわるこれらの驚くような形質に、分子遺伝学のレベルで取り組み始めている(コラム「ミツバチのゲノムと社会性のある生活スタイル」参照)。過去数世代の研究者たちによる研究から、研究者たちはすでに、事実上すべての生体機構がある程度まで変化してきたことに気づいていた。そのゲノムが今回初めて解読され、当然のことながら、一部の遺伝子が大昔の前駆遺伝子から変更されてきたことが明らかになった。例えば1つの遺伝子クラスターは、yellow タンパク質ファミリーの1つをコードした単一の祖先遺伝子に由来するものであり、ミツバチでは、カーストの決定や女王を育てるのに使われるロイヤルゼリーを指定している。その他の化学受容や食糧管理をプログラムする遺伝子などには、他の昆虫系統からのハナバチ類系統の分岐以降に進化した革新部分が含まれているらしい。

今回得られたDNA塩基配列は、社会性の進化という根本的問題の解明に向けた大きな一歩となる。ゲノムレベルでみて、高度なコロニーを作る昆虫の出現には何が必要なのだろうか。この研究が発展すれば、最初の問題と同じくらい重要な第二の問題にすぐに取り組むことになるだろう。つまり、真社会性の動物種が

生まれるには、まず初めの段階でいったい何が必要なのだろうか。(真社会性のコロニーでは、構成個体が重複する世代からなっており、これらの世代は、繁殖カーストと、子を養育するワーカー・カーストに分けられる。) 現在では幸いなことに、この問題を解くために豊富な情報を集約させることが可能である。16,000 ほどの既知の現生ハナバチ種の中には、単独生活性だが真社会性との境界に近いものもあれば、この境界をやっとどうにか越えたものもあり、また、単独生活状態に舞い戻ったごくわずかの種もあれば、さらにはミツバチを最上位とする社会構造のさまざまな中間段階で安定しているものもある。こうした社会構造の系譜の進化史は、ほとんどが生体構造の情報を基盤として決められたものであり¹⁰、分子レベルの証拠を一部なりとも役立てた例はわずかしかない。ミツバチに最も近縁な仲間は、単独生活性の Euglossini 類 (orchid bee とよばれる玉虫色のハナバチ)、マルハ

ナバチ類、ハリナシミツバチ類で、最後にあげた仲間はどうやら、社会構造の複雑さから言えばミツバチと肩を並べるほどらしい。

この大きなジグソーパズルに、比較ゲノム解析の助けを借りていくつかのピースがはめられたとき、驚くような進化史がみえてきて、発展的進化や社会生物学に関してさまざまな展望をもたらしてくれるはずである。■

Edward O. Wilson、ハーバード大学比較動物学博物館 (米)

1. The Honeybee Genome Sequencing Consortium *Nature* **443**, 931-949 (2006).
2. Wilson, E. O. *Sociobiology: The New Synthesis* (Harvard Univ. Press, 1975).
3. Choe, J. C. & Crespi, B. J. (eds) *The Evolution of Social Behavior in Insects and Arachnids* (Cambridge Univ. Press, 1997).
4. Seeley, T. D. *The Wisdom of the Hive* (Harvard Univ. Press, 1995).
5. Michener, C. D. *The Social Behavior of the Bees: A Comparative Study* (Harvard Univ. Press, 1974).
6. Sekiguchi, F. & Sakagami, S. *F. Rep. Hokkaido Natl. Agric. Exp. Sta.* **69**, 1-65 (1966).
7. Lindauer, M. *Communication Among Social Bees* (Harvard Univ. Press, 1961).
8. Rösch, G. A. Z. *Vergl. Physiol.* **12**, 1-71 (1930).
9. von Frisch, K. *The Dance Language and Orientation of Bees* (Harvard Univ. Press, 1967).
10. Michener, C. D. *The Bees of the World* (Johns Hopkins Univ. Press, 2000).

ミツバチのゲノムと社会性のある生活スタイル

ミツバチはゲノム塩基配列が解読された昆虫としては、ショウジョウバエ (*Drosophila*)、カ (*Anopheles*) に続いて3番目である。したがって、ミツバチの遺伝子の数や中身を、コロニーを作らないこれら2種の昆虫のものと比較することができ、ミツバチの社会性のある生活スタイルがどのように進化してきたのか、またそれがゲノムをどう形作ってきたのかを、幾分なりと推測することができる。

ミツバチには、ロイヤルゼリーの産生にかかわる遺伝子の数が他の2種に比べて多い。ミツバチはロイヤルゼリーを幼虫に与えるが他の2種ではそれがないので、このことは理にかなっている。また、ミツバチは匂い物質の受容体をコードする遺伝子をかなり多くもっている。これは、さまざまなミツバチダンスの最中に感覚を使っ

たコミュニケーションをとるときや、カーストの違いやコロニーにとって余所のハチを識別するのに、フェロモンが重要なことの表れである。

共同体の生活スタイルをとることで、単独生活をする昆虫の場合にふりかかる災難が一部軽減される。例えば、巣という整った環境のおかげで、ミツバチは他の昆虫に比べてより簡単な外皮クチクラをもつだけですんでおり、そのため、クチクラタンパク質をコードする遺伝子は他の2種に比べてかなり少ない。味覚受容体も少なく、これはおそらく、大部分のハチは別のハチがすでに餌を食べている場所で餌にありつくため、有毒な餌を食べる見込みが低いせいだろう。

ただし、3種のゲノム間の違いがすべて、これほど簡単に説明できるわけではない。奇妙に思えることだが、ミ

ツバチがもっている免疫関連の遺伝子は他の2種より少ない。ミツバチは混雑した部屋で暮らしており、狭い空間では病気が容易に感染してしまう。おそらく、まだ知られていない仕組みのおかげで病気になりにくいのだろう。あるいは、身づくろい行動などの社会的行動によって、病気から十分に守られているのかもしれない。

今回のミツバチゲノムの論文では、ミツバチの一生の間に遺伝子発現がどう変化するかも初めて調べられている。働きバチは羽化後2~3週目に巣外で働き始めるが、重要なことに、こうした成長段階の移行には脳で発現する遺伝子の活性変化が伴っている。加えて、代謝にかかわる遺伝子の発現から見ると、カースト間には著しい違いが存在している。

Chris Gunter