

社会性昆虫を通してみる個と集団

A relation between individual behaviors and the global atmosphere in social insect

土井樹^{*1}

Itsuki DOI

池上 高志^{*2}

Takashi IKEGAMI

^{*1}東京大学総合文化研究科

Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo

Many global patterns and dynamics observed in a social animal/insect system often reflect and amplify the underlying characteristics of its individual constituents. We used the data of the positions and orientations of every individual bee in a hive recorded every second for approximately one week. We then defined and measured the activity level of each individual as well as the entire collective activity. We found that the hive often exhibited bursting behaviors and that some of the bees became highly active before each burst occurs. Some of these bees cause bursts multiple times, which suggests that individuality has hardly ignorable effects on the global organization of the hive dynamics.

1. はじめに

これまで社会性昆虫はその社会全体のグローバルなダイナミクス、それを構成する個体の振る舞い、またその個体間の関係性といった観点からこれまで幅広く研究が行われてきた。特に worker が foraging, nurse のような様々な仕事を担うようになる division of labor に関する研究は長い間盛んに行われている [Robinson 1992][Camazine 2003]。2013 年に Mersch らが数百のアリの人口コロニーを作成し、全個体トラッキングを行う事で、個体/個体間行動の空間的分布が労働分担と関わっていることを示唆する結果を得た [Mersch 2013]。ここでは、さらにグローバルな集団運動とそれを構成する個々の構成要素の個体行動をより定量的に扱うことを考える。例えば、我々の社会では、直感的に個体の運動が集団の振る舞いや雰囲気を作るだけでなく、集団自体の振る舞いや雰囲気によって個体の運動が生成されているように思える。こういった双方向の因果性は他の生物集団からも見出すことができるだろうか。本研究では、この関係性を探るために、社会性動物の代表的なひとつであるセイヨウミツバチ *Apis mellifera* を用い、人工的に作った約 1000 頭の個体からなるコロニーを作り、全個体トラッキングをしその解析を行った。

2. 手法・解析

2.1 データ

本実験では、セイヨウミツバチの、羽化後一日の働きバチと女王バチから構成されたの所謂 single cohort colony を用いた。コロニー内に存在するすべてのハチには事前に二次元 QR コードが貼附され、これを高解像度カメラによって約一週間一秒毎に撮影することによって全個体のコロニー内での行動をトラッキングした。コロニーの一部はトンネルを通して屋外と繋がっており、ハチは自由に行き来することが出来る。この屋外への出入り口は撮影開始から 2 日後までは閉じられており、その後開かれる。撮影は年月日時を変え計 5 回行われ、撮影された動画は最終的に毎秒の各ハチの座標とアングルというデータに変換された。これらのデータ取得はすべてイリノイ大学の T. Gerna 氏, G. Robison 氏によって行われ提供

された。一般的に division of labor はハチの羽化後の日数によって決まるとされている (age polyethism) [Robinson 1992] が、本研究のように働きバチの全ての年齢が同じような single cohort colony においても Frager (外に餌を取りに行くハチ) と Nurse/Cleaner (巣の中に居続けるハチ) という労働分化が生まれることがよく知られている。本研究では、コロニー入口が開いてから、毎日少なくとも一時間以上外にでていたハチを Forager と定義しそれ以外を Hive bee として以降の解析を行った。

表 1: 記録データの詳細

Data name	Experimental date	Total number of bees
1201	2012/7/4 ~ 2012/7/12	925
1202	2012/7/18 ~ 2012/7/24	946
1203	2012/7/28 ~ 2012/8/3	958
1205	2012/8/21 ~ 2012/8/27	966
1301	2013/7/3 ~ 2013/7/11	1165
1302	2013/7/16 ~ 2013/7/24	965

2.2 解析

セイヨウミツバチのコロニー内での個体活動を計測するため我々はミツバチの運動エネルギー $K_{individual}(t)$ を以下のように定義した。

$$K_{individual}(t) = \Delta x^2 + \Delta y^2, \quad (1)$$

ここで Δx 及び Δy は 1 秒あたりのミツバチの移動量である。またミツバチ体重の個体間差は無視できるほど小さいとした。またコロニー全体のアクティビティを $K_{individual}(t)$ の平均として定義した。

$$K_{global}(t) = \frac{1}{n} \sum_b K_{individual}(t). \quad (2)$$

この時系列を可視化したのが図 1 となる。詳細は結果にて述べるが、この時系列から、セイヨウミツバチは時折コロニー内全体の activity が大きくなりその後直ぐ様小さくなる所謂

バースト様の振る舞いを示すことがわかった。このバーストの検知法として、本研究では Kleinberg Algorithm を用いた [Kleinberg 2002]。

またバーストが起こっている間の各ハチとコロニー全体の活動の振る舞いの関係を明らかにするために、全個体のバースト中の $K_{individual}(t)$ の時系列行列（時間 x 個体数）に対して非負値行列因子分解を用いた [Lee 1999]。この手法は非負値行列を基底行列と重み行列に分解する手法で、これによってバーストが起こっている間の代表的な個体のアクティビティ、またどのハチがどのアクティビティに対応しているかを明らかにすることが可能となる。この手法の重要なパラメーターとして、いくつかの基底に分解するかを決める r (rank) という変数があり、いくつかの決定法が紹介されている。本研究では、Brunet らが提案する手法により r を決定した [Brunet 2004]。

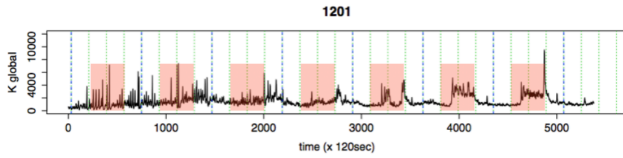


図 1: $K_{global}(t)$ の時間発展の例。オレンジで囲まれた部分は日中を表している。

3. 結果

3.1 内因的バーストと外因的バースト

本稿では紙面の都合上、Trial 1201 に焦点をあて議論をすすめる。その他の Trial においても基本的な結果は同様である。初めにコロニー全体の活動を計測するために、各時間におけるハチ全個体の運動エネルギー $K_{global}(t)$ を加算し、時系列を作成した (図 1)。この時系列から、全体の運動エネルギーがバーストすること、その立ち上がりの点から 2 つのパターン (内因性と外因性) が存在することが明らかとなった (図 3)。バーストの形を $y = \frac{b}{a^x + c}$ によって回帰された曲線及び α をプロットしたものが図 3 となる。この結果及び統計的解析を行った結果より、巣箱が初めて入り口を開けるまでは、内因性と外因性の差が大きい一方、開いたあとは大きな違いが見られなくなる傾向がある。実際には内因性と外因性が混合した状態であるためかもしれない。

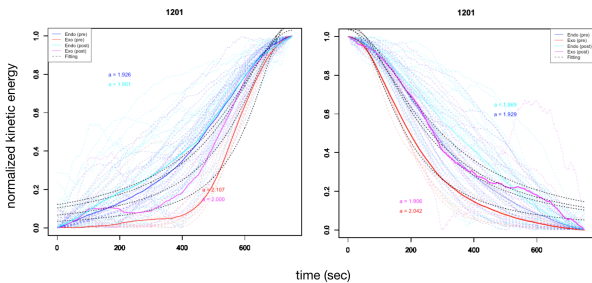


図 2: Trial1201 での外因的バーストと内因的バーストの立ち上がり及び立ち下りの時間発展。

3.2 Pioneer bee によるバーストの分類

ここでは各バーストにおいて、バーストを誘引するハチ (がいるならばそれ) を同定し (以降 "Pioneer bee" と呼ぶ)、これらのハチの共通点を探った。Pioneer bee の同定には非負値行列分解を用いた。具体的には各バースト付近における全個体の $K_{individual}(t)$ の時系列行列に対して非負値行列分解を行い、重み行列を計算した (図 3)。図 3 の例では全個体は 10 の

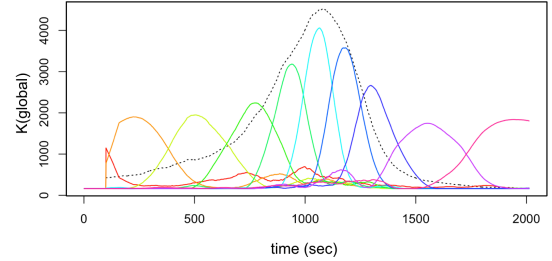


図 3: 非負値行列分解による、バーストの分解例。黒点線が $K_{global}(t)$ 。色付き線が、分解された基底である (ここでは $r = 10$ となっている)。

クラスタに分類され、バースト頂点よりも前でピークの存在する基底に分類された個体を Pioneer bee と呼ぶことにする。同様の手法をバースト毎に行い最終的に Pioneer bee かそうでないかの (バースト数 x 個体数からなる) 二値行列を作った。この行列を多次元尺度構成法 (MDS) によって次元圧縮したものが図 4 となる。この二次元空間の中では、Pioneer bee を構成する個体が似ているほど近い場所にプロットされる。

この図から、i) コロニー入口が開く前と後では Pioneer bee の構成が大きく異なること、ii) 図の左側に密に集合しているバースト群は、オリエンテーションフライト (セイヨウミツバチが日中に一斉にコロニーの外に飛び立ち、コロニーの周りを飛び回る行動) を行っている時間と一致することが分かった。また Pioneer bee 全体と Pioneer bee かつ Forager の割合を計算すると、入口が開く前では 0.3 ほどであるのに対し、開いた後は Pioneer bee の半数近くが Forager から構成されるようになることが分かった。

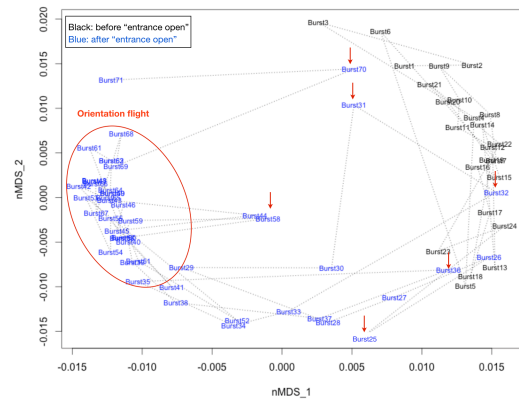


図 4: 各バーストにおける Pioneer bee のリストを多次元尺度構成法により次元圧縮した図。黒色で書かれたものがコロニーの入口が開く前、青色で書かれたものが開いた後を表している。また赤色の矢印は外因的バーストを表している。

4. 考察

本研究では、集団を構成する個体の振る舞いとその集団自体のグローバルな振る舞いの関係性についてセイヨウミツバチの全個体トラッキングデータを用いて解析を行った。その結果、セイヨウミツバチのコロニー内ではバーストと呼ばれる、コロニー内の個体の多くのアクティビティーが同期する現象が観察された。またこのバーストにはコロニー外部からの刺激によるもの（外因的バースト）とそうではないバースト（内因的バースト）が存在し、これらは巣全体のアクティビティー ($K_{global}(t)$) の時間発展からも区別できることが分かった。特にバーストの立ち上がりの仕方が異なるという結果は、外因的バーストが多くの個体が外からの刺激によって、同時にアクティビティーが高まるのに対し、内因的バーストは、（アクティビティーの高い）数個体の行動が段々と連鎖する、つまり、個体の行動をコロニー全体が増幅していることを示唆していると考えている。

我々は、バーストの多くで Forager が先行してそのアクティビティーが大きくなっている結果を得た。しかし Forager のアクティビティーが大きくなるからコロニー全体のアクティビティーが大きくなるのか、それともコロニーによってある個体の行動が増幅されたから、その個体が Forager になったのかという因果関係の問題は、未だ明らかにできていない。それに加えて Pioneer bee の空間分布など空間情報を使った解析結果を会場では発表予定である。

参考文献

- [Robinson 1992] Robinson, Gene E. "Regulation of division of labor in insect societies." Annual review of entomology 37.1 (1992): 637-665.
- [Camazine 2003] Camazine, Scott. Self-organization in biological systems. Princeton University Press, 2003.
- [Mersch 2013] Mersch, Danielle P., Alessandro Crespi, and Laurent Keller. "Tracking individuals shows spatial fidelity is a key regulator of ant social organization." Science 340.6136 (2013): 1090-1093.
- [Lee 1999] Lee, Daniel D., and H. Sebastian Seung. "Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization." Nature 401.6755 (1999): 788-791.
- [Kleinberg 2002] Kleinberg, Jon. "Bursty and hierarchical structure in streams." Proceedings of the eighth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. ACM, 2002.
- [Berndt 1994] Berndt, Donald J., and James Clifford. "Using dynamic time warping to find patterns in time series." KDD workshop. Vol. 10. No. 16. 1994.
- [Brunet 2004] Brunet, Jean-Philippe, et al. "Metagenes and molecular pattern discovery using matrix factorization." Proceedings of the national academy of sciences 101.12 (2004): 4164-4169.