

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330346

研究課題名(和文)非線形動力学でつなぐ社会性昆虫の個体の挙動と集団特性

研究課題名(英文) Analysis of the relation between individual behavior and the characteristics of the colony in social insect and its non-linear dynamics

研究代表者

菅原 研 (Sugawara, Ken)

東北学院大学・教養学部・教授

研究者番号：50313424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の成果は大きく分けて2つあげられる。トゲオオハリアリのパトロール行動において、これまで個別に探求されていた「コロニー内で見られるパトロール行動の特性」と「個体が有する数分オーダーのリズム」を関係づける研究を行い、ワーカーとの接触で個体のリズムが変化し、それがパトロール行動に關与していると考えられる結果を得た。観察結果に基づいて、少数ワーカーに見られる同期現象に関する数理モデルとパトロール行動に関する基本的な数理モデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：We obtained two major results. (1) We measured the rhythm of *Diacamma*'s queen in small scale colony, and observed its rhythm is affected by the condition of the workers. (2) We made simple non-linear models for the synchronization of a few workers and for patrolling behavior of *Diacamma*'s queen.

研究分野：情報学

キーワード：トゲオオハリアリ パトロール行動 リズム現象 個体間相互作用 同期

1. 研究開始当初の背景

社会性昆虫であるアリは集団になることで「高度な協調機能の発現」や「環境変動に対する高い適応性」を示す興味深い生物である。社会生理学をはじめとした諸分野で、アリの社会性の根底にある仕組みを解明するための研究が多数報告されているが、「“ 個体 ” 間の局所的相互作用」と「その集団から発現される“ コロニー ” としての振る舞い」の関係を、行動学的視点から取り扱った先行研究例は少数にとどまっている。その理由として、多くの種のアリにおいて、コロニーを形成する個体数が 102 ~ 104 と大規模であること、アリが示す集団行動は多様であること、などがあげられる。我々は「個体レベルの局所的な相互作用」と「コロニーとしての協調行動」の関係をみるために、101 オーダーの小規模なコロニーを形成するトゲオオハリアリを実験対象とし、集団行動の具体例としてこのアリのコロニーに見られるパトロール行動に焦点を当て、研究を行ってきている。トゲオオハリアリは(i)ワーカーも産卵する能力がある、(ii)女王との接触によりワーカーの卵巣発達が一時的に抑制される、(iii)女王はワーカーの産卵を抑えるための断続的な移動を行いワーカーと接触する、という習性を有する。これは女王によるパトロール行動として知られている現象であり、コロニーサイズによってパトロール頻度が適応的に変化することが明らかにされている。コロニーサイズが大きくなるほどパトロール頻度が上がり、ワーカー 1 個体あたりの接触頻度が数時間以内になるような調整が図られている。

一方、先行研究において我々は「アリ単体に活発 - 不活発のリズムが存在すること」、「2 匹の場合、そのリズムが同期する傾向が見られること」、「不活発状態の時間幅がべき乗分布していること」などの発見を報告してきた。これらの発見の過程で、「女王の独断行動」と考えられていたパトロール行動には、ワーカー側からの働きかけもあり、かつ、それが重要な役割を果たしている可能性がある、個体に内在するリズムがパトロールの周期に大きく寄与している可能性がある、という新たな側面があることが見えつつあった。以上のことを踏まえ、

- ・個体レベルの行動を「リズム」「同期現象」という枠組みでとらえることを試みる
- ・現象に基づいた数理モデルを構築することでより普遍的な理解を求めるとの着想に至った。

2. 研究の目的

トゲオオハリアリに見られる「個体レベルでのリズムの同期現象」と「集団レベルでのパトロール行動」に関する「実験事実」を積み上げ、両者の関係性について論じる。また、それらの振る舞いを結合振動子系の枠組みでとらえてモデル化し、系を理解するための

一助とする。詳細な目的は以下の通りである。

(1) 少数個体での行動解析

我々のこれまでの研究により、アリ単体の行動は、基本的に「活発」と「不活発」のリズムによって構成されていることが明らかになっている。また、同じコロニーから採取した 2 個体のアリを同一閉空間におくと、各個体の基本行動である活動リズムに同期現象が見られる。本研究では 3 個体以上のアリを同一閉空間に置いた場合の振る舞い、すなわち「複数個体間に見られるリズムの同期現象」「停止場所の空間的な偏りの形成」などの特徴的な振る舞いについて、より詳細な実験と解析を行う。

2) 小規模なコロニー内におけるパトロール行動の観察

単純な人工巣を用意し、その中に 10 匹程度のワーカーと女王を入れ、小規模なコロニー内で女王が示すパトロール行動を計測する。その結果を解析し、個体としての振る舞いとパトロール行動の関係性をより明確に捉えることを試みる。

(3) 行動の数理モデル化

「複数個体間に見られるリズムの同期現象」は、各個体を振動子とみなし、振動子同士に簡単なカップリングを導入することで表現できると考えられる。「モデル化」「シミュレーション」「観察事実との適合性」を照らし合わせながら、アリのコロニーとしての行動を「自己駆動する結合振動子系」の振る舞いとして記述できるモデルの構築を目指す。

3. 研究の方法

本研究はトゲオオハリアリを中心として、(1) 10 匹以下の少数個体によるリズムの同期現象の計測

実験環境として「曲 2 次元空間」「擬 1 次元空間」を用意し、そこで見られる行動リズムの同期現象を計測する。曲 2 次元空間とは半球ボウルを意味する。球面を使用することでアリが好む縁の影響を軽減することを狙う。一方、擬 1 次元空間としては、複数のレーンから構成される直線空間と運動トラック様の円環空間を使用する。こちらはすべてを縁にすることでアリの嗜好に関係なく行動する様子が観察できることを狙う。

(2) パトロール行動の解析

図 1 のような特殊な実験空間内に人為的な小コロニーを形成し、かつ、ワーカーの隔離時間をコントロールすることで、個体がつりリズムとパトロール行動の関係性を論じる。



図 1 : 女王が動く通路 (左) と個室隔離されたワーカー (右)

(3) 簡単な非線形振動子モデルをベースと

して、結合振動子系の枠組みで「個体レベルのリズム現象」と「集団としてのパトロール行動」を統合することを試みる。

4. 研究成果

主たる研究成果は以下の通りである。

1) パトロール行動と個体リズムの関係性

先行研究により、女王が示すパトロール行動において、コロニーサイズが大きくなるとパトロール頻度が上がること、休止している時間を増減することでその頻度を変えていることが明らかになっている。一方、ワーカーがいない均質な閉空間での女王単独の行動を解析すると、活発に動いている状態とほとんど動かない不活発な状態を周期的に繰り返す「リズム行動」を有していることが報告されている。本研究では、パトロール行動の根本メカニズムは女王が個体として有するリズム行動であり、ワーカーとの接触により、このリズム行動が影響を受けることでパトロール頻度が変わる、という作業仮説を立てて実験を行った。

1匹のワーカーとの接触が与える効果

特殊な円形フィールドを作成し、そこに女王を単独で放置、一定時間後に隔離時間の異なるワーカーと1回もしくは2回接触させて、再び単独で放置する。接触の前後でリズムの変化の計測と解析を行ったところ、有意差は見られなかった。

複数のワーカーとの接触が与える効果

女王と接触することでワーカーに生じる内部状態の変化については詳細な知見が得られていない。そこで、同等の隔離時間を有するワーカーを複数用意し、それぞれと1回だけ接触できるという条件のもとでの女王のリズムを計測した。図1で示したように直径80mm幅8mmの円環状通路2つをつなげて8の字構造の行動領域を作成する。それぞれの円環通路には各5本の可動ガラス管が等間隔についており、通路とは金網で隔てられている。ガラス管内にワーカーを閉じ込め、金網越しに女王と接触できるようにする。

まず2つの円環通路を分断するように仕切り板を入れ、片側の円環内のみで女王をn時間行動させる。つまり隔離時間ほぼゼロのワーカー5匹との接触によるリズムをn時間に渡り計測することになる。

その後、仕切り板をはずし、女王がもう一方の円環通路に移ったところで再び仕切り板を入れ、ワーカーと接触させる。これはn時間隔離されたワーカーと接触することを意味する。一度接触したワーカーのガラス管は静かにスライドし、2回以上の接触がないようにする。

以上の操作により、隔離ゼロ時間のワーカーと接触したときのリズム行動と隔離n時間のワーカーと接触したときのリズム行動を比較、検討した。その結果、隔離時間に応じてパトロール時間が延びることが定性的に確認された。これは作業仮説の妥当性を支

持する結果であると考えることができる。

2) 数理モデルの検討

少数個体の振る舞いのモデル化

前述の通り、均質な閉空間に単体もしくは少数でおかれたトゲオオハリアリは「活発に動く状態」と「ほとんど動かない状態」を繰り返しており、女王、内役、外役によって周期性ならびに位相におおまかな特徴があることが見えてきている。この観察事実に基づいて、これまでに行ってきたモデル化は以下の通りである。

(i) 単純な振動子モデルに閾値を導入し、それを超えている間だけ移動するものとする。

(ii) 一定の確率で出会うものとする。

(iii) 出会ったときに結合定数に応じて位相が修正される。

以上の仮定に基づいて簡単な引き込みモデルを構築してきた。本研究では、さらなる観察事実を導入し、より精密な数理モデルの構築を試みた。まず基本となる振動子モデルとして、簡単な非線形振動子を導入した。閾値を設けることで、活発・不活発の2値化を行うとともに、振動子のパラメータにゆらぎを導入した。

パトロール行動のモデル化

女王、ワーカーそれぞれにスカラー量としての内部状態を導入する。女王の内部状態はパトロール行動を起こす・止めるをスイッチするためのものである。ワーカーの内部状態は卵巣の発達度合に相当するものである。女王の内部状態はワーカーの内部状態とカップリングしている。また、ワーカーの内部状態は女王との接触によって減少すると仮定した基本モデルはすでに構築していたが、本研究では上記1)で述べた知見も考慮して、女王の内部状態がワーカー1匹との接触により変化する量を少ないものとし、複数のワーカーと接触することで、内部状態が大きく変化するモデルに拡張した。

3) その他

方法のところでも述べたような実験を実施したが、複数個体の振る舞いについては、個体数が増えるほど、リズムの大きさのばらつきが影響して、モデル化に至るような十分な観察結果を得ることができなかった。また、全結合モデルにすべきか、あるいは個体間距離を加味した結合モデルを考えるべきかについても、方向性を決定するだけの観察事実を積み上げることができなかったため、結果的に少数個体によるリズムの同期現象については、当初の計画通りに研究を進めることができなかった。

パトロール行動におけるワーカーの積極性について

トゲオオハリアリのパトロール行動は必ずしも一方的なものではなく、ワーカー側からの働きかけもあるように見える。そこで、当初の計画には含まれていなかったものの、女王を固定し、ワーカーを自由にすることで、ワーカー側からの働きかけについて観察を

おこなった。本実験では女王を小さなガラス管に閉じ込め、一方の開口部に金属網をつけて、主に触角によるコミュニケーションだけが可能になる状況をつくった。固定する個体をワーカーとするコントロール実験においては、平均接触時間/平均非接触時間=37.4sec/142.2sec となったのに対し、女王を固定した場合、長時間女王と接触する個体群（平均接触時間/非接触時間 = 250.0sec/99.0sec）と、より女王に接触しない時間を長く設ける個体群（平均接触時間/非接触時間 = 75.9sec/290.0sec）に大別されることがわかった。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Yoshikatsu Hayashi, Mai Yuki, Tomonori Kikuchi, Kazuki Tsuji, and Ken Sugawara, Effect of Pair Interactions on Transition Probabilities between Inactive and Active States: Achieving Collective Behaviour via Pair Interactions in Social Insects, Journal of the Physical Society of Japan 84, 104801 (2015)
DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.104801>

〔学会発表〕(計 3 件)

菅原、結城、林、トゲオハリアリの行動にみられるリズムとそのモデル化、情報処理学会東北支部研究報告、2014
岩淵、菅原、トゲオオハリアリのワーカーはパトロール行動にどれくらい協力的か、情報処理学会東北支部研究報告、2015
浅野、菅原、トゲオオハリアリのリズム行動：女王のリズムにおけるワーカーの影響、情報処理学会東北支部研究報告、2015

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cs.tohoku-gakuin.ac.jp/~sugawara>

6. 研究組織

(1)研究代表者

研究代表者

菅原 研 (SUGAWARA KEN)

東北学院大学・教養学部・教授

研究者番号：50313424