

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610117

研究課題名(和文)アリにおける集団運動モードと集団機能の自律的発生機構の解明

研究課題名(英文)Elucidation of Autonomously Emerging Mechanism of Collective Dynamical Modes Accompanied by Group Functions in Ant Colonies

研究代表者

西森 拓(Nishimori, Hiraku)

広島大学・理学研究科・教授

研究者番号：50237749

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：個々が単純な情報処理しか出来ず、全体を統括するリーダーもいないアリ集団が、なぜ、状況に応じて複雑な協調運動や可変的役割分担を行い、高度な機能を持ちうるのかを、採餌に関する定量的実験と数理モデリングによって検証した。その結果、次のことが判明した：

1. 同一コロニー内のアリに採餌頻度に関する階層が存在する。2. コロニーから採餌頻度の高いアリの集団を取り除いた場合、コロニー内に残ったアリが採餌活動を補填する。3. 採餌頻度の順位付けは、短期間では大きく変化しないが、長期間では大きく変動する。このことは、従来広く信じられてきた反応閾値モデルの見直しを要請する。

研究成果の概要(英文)：In this study, by means of quantitative experiments and mathematical modeling for foraging behavior, we elucidated the mechanism through which group of ants without specific leader are able to perform sophisticated collective behavior and flexible task allocation and to get advanced functions. We got following results; 1. In each colony hierarchy for the foraging frequency among ants exists. 2. If active foraging ants are removed from a colony, a part of remaining ants get more active to compensate the activity of removed ants. 3. The rank order of foraging activity among a colony of ants does not greatly change in short time range but shows a remarkable change in long range of time.

研究分野：非線形物理学

キーワード：自己組織化 社会性昆虫 群れ 非線形動力学

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

個々の記憶力・情報処理能力や身体能力では比較的単純な作業しかできない社会性昆虫(アリ)は、いったん群れをなすと、統率者がいないにもかかわらず、協働や分業、さらに、環境変動に応じた分業体制の可塑的な変化をとおして、きわめて複雑な組織的作業を効率的に達成する。しかしながら、各個体がいかにして環境の情報を得るのか、あるいは各個体周辺の局所情報がいかに全体としての大域情報に変容するのか、逆に、全体としての情報が、いかに各要素に伝わり、各個が全体に有利なように自分固有の作業を遂行するのか、そして、これらの情報の流れと複雑な組織的作業遂行がどのように関連しあっているのかについて、いまだ、システムティックな理解がすすんでいない。そのため、本研究のように、数理科学的手法と、生物行動実験・生化学実験・物理化学実験などの実証的手法の密接な連携を通じて、アリの組織的な作業遂行のメカニズムを、定量的かつシステムティックに探求することが求められている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、一定の複雑さを内包する要素からなる集団の運動--主としてアリの集団行動--を行動実験、データ解析、理論モデルの作成と解析、化学分析などの手法の組み合わせにより、定量的に考察し、個の運動や機能と集団としての運動や機能の中に非自明な関係を見だし、その本質的機構を抽出・記述することにある。言い換えれば、個々は比較的単純なアリが、集団としてなぜ高度な集団作業を遂行し繁栄を謳歌しているかを、従来の昆虫研究とは大きく異なる角度から俯瞰し、アリの集団運動と機能の発生のしくみを理解する。また、これを土台に、アリに留まらない広範な集団運動の一般的な理解に貢献する。

具体的には、

1. 少数アリ集団内での各個体の運動様式(歩行、停止、相互接触などの時間占有分布や遷移則、移動速度の分布や軌道の特徴など)の個体数依存性を、実験データの画像解析や数理モデルに基づいて定量的に分析し、アリが群れらしく行動するための萌芽機構を探る。また、少数系での役割分担(2交代制・3交代制)の発生や、接触による行動変化を定量化し、賢い集団運動の萌芽機構を探る。

2. アリを支配する複数の走性の競合に関する実験および模型研究を行う。例えば、帰巢時において化学情報の指し示す巣の

方向と、視覚情報による巣の位置が矛盾している場合、アリは個および集団としてどのように判断を下し帰巢方向を決定するのか、これまでの予備実験を起点としその機構を探る。生物の自律的行動の原理を、化学走性や光走性に基づいて考察する研究は盛んになりつつあるが、複数の走性への応答の組み合わせ問題という視点で見ることは極めて新しく、単純な生物の「判断」がどのようにして発生するのか、データと模型によって迫っていく。

3. アリの集団採餌における多様性の効果の実験と模型研究を行う。代表者はこれまでの数理模型で、アリ集団の中に極端にフェロモンへの走性が弱く化学走性に基づく採餌行動で「間違い」を生じるような、「鈍感アリ」を混ぜることで集団としての採餌効率が増加することを示してきた。本研究では実験によるアリ行動のデータ解析法を駆使して、数理模型の結果を検証していく。

4. アリ以外の集団、具体的にはミドリムシや樟脳舟などの集団のダイナミクスを実験データに基づき論じ、自律運動するより広範囲の集団のダイナミクスと機能の関係の普遍的性質を抽出する。

以上、アリを中心とした、自律集団の複雑な行動と機能の関係の本質に迫る概念の提出を目指し、定量的な実証作業と数理モデル作成・改良の往復により、新しい「アリの集団動力学と機能の関係」、さらにアリを突破口に、より広い対象を含む「自律運動集団の動力学と機能の関係」の研究を世界に先んじて開拓する。

### 3. 研究の方法

A. 本研究では、アリの動態研究をこれまで主体的に担ってきた昆虫学や生態学の一般的手法とは大きく異なる計測・データ解析手法を導入し開拓することで、アリの動態の定量化を飛躍的に促進する。すなわち：

i) 徹底的な繰り返し実験/長時間ビデオ撮影/動画データ処理システムの開発・改良を通して、アリの動態に関する定量的解析手法を進化させ、より適切に系の特徴を記述できる新しい指標を探索する。これらを可能にする要因として、近年の計算機や動画撮影装置などのハードの発達も大きい。小コロニーでも100匹を超えるアリが相互接触しながら運動する様子を追跡し、かつ、集団としての特徴的運動モードを抽出する技術を開拓することは、計算機アルゴリズムとしての新しい挑戦でもあり、今後、増

加すると思われる多要素集団のダイナミクスの研究に先鞭をつける。(現時点で、2体のマルチトラッキングについては、すでに独自の高速ソフトを開発済みである。)

ii)従来の昆虫学や動物行動学では、自然環境下での直接観察や、比較的簡単な制御下での直接観察が主なデータ取得方法であったが、今回の研究では、実験環境自体をシステムティックに変化させ、「パラメータ変化に対するシステムの応答の変化」という物理学的視点を昆虫研究に持ち込む。すでに試行段階の例として、アリの走光性・走化性の複合実験における、人工フェロモンの濃度制御が、分担/連携研究者のフェロモン同定技術や合成技術によって可能にしつつあり、実験技術で世界に先鞭をつける。また、(多くの昆虫研究者の間で信じられてきた)赤色光に対するアリの視認性の弱さの定量的検定も開始し、これまでの仮説の否定的な結果も出始めている。このように、研究代表者の物理学研究者としての視点・手法と共同研究者による生物化学、応用昆虫学の視点・手法の融合がこれまでの常識をくつがえす可能性が大きい。

B.Aで説明されたような、「現実のアリ」の動態の実験的研究と並行して、現象に対応する数理モデルを構成し、モデルの数値実験や理論解析を行った上で、実験結果と比較検討し、現象の再解釈を進めていく。すなわち、実験、データ解析、数理モデリングを有機的に連動させることで、アリ集団の動態研究を、定量科学、とりわけ非線形非平衡科学の問題として進化させる。

#### 4. 研究成果

個々が単純な情報処理しか出来ず、全体を統括するリーダーもいないアリ集団が、なぜ、状況に応じて複雑な協調運動や可変的役割分担を行い、高度な機能を持ちうるのかを、採餌に関する定量的実験と数理モデリングによって検証した。その結果、次のことが判明した：

1. 同一コロニー内のアリの採餌頻度に関する階層が存在する。
2. コロニーから採餌頻度の高いアリの集団を取り除いた場合、コロニー内に残ったアリが活動度の高いアリの採餌活動を補填してコロニーの採餌活動度の低下を防ぐ。
3. 採餌頻度の順位付けは、短期間では大きく変化しないが、長期間では大きく変動する。このことは、従来広く信じられてきた反応閾値モデルの見直しを要請する。

さらに、これらの研究を遂行する上で、極小チップ(RFIDタグ)とセンサーを使って、群れ内の個々のアリの動きを長時間自動計測しPCに送りこむ新しい計測システムの構築に成功した。

並行して、アリなどの単純な生き物の運動を模倣する人工的な自己駆動粒子系の集団運動についても、実験と数理モデルの組み合わせによって、様々な特徴的集団運動モードの特定とそれらの発現機構を明らかにした。

#### 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 8 件)

1. 西森拓、荻原悠祐: アリの採餌経路決定における優先情報の切り替え, 昆虫と自然, Vol.51 (2016)36-38 査読なし

2. T. Ogawa, E. Shoji, N. J. Suematsu, H. Nishimori, S. Izumi, A. Awazu, M. Iima: The Flux of *Euglena gracilis* Cells Depends on the Gradient of Light Intensity, PLOS ONE. (2016)  
DOI:http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0168114 査読有

3. Kazunori Takamiya, Keisuke Yamamoto, Shuhei Isami, Hiraku Nishimori, and Akinori Awazu: Excluded volume effect enhances the homology pairing of model chromosomes, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE 7, (2016) 66-75. 査読有

4. Shuhei Isami, Naoaki Sakamoto, Hiraku Nishimori, and Akinori Awazu: Simple Elastic Network Models for Exhaustive Analysis of Long Double-Stranded DNA Dynamics with Sequence Geometry Dependence PLoS One 10, (2015) e0143760 査読有

5. Nobuhiko J. Suematsu, Kurina Tateno, Satoshi Nakata, Hiraku Nishimori: Synchronized Intermittent Motion Induced by the Interaction between Camphor Disks J. Phys. Soc. Jpn. 84, (2015) 034802 査読有

6. E. Shoji, H. Nishimori, A. Awazu, S. Izumi, and M. Iima: Localized

Bioconvection Patterns and Their Initial State Dependency in *Euglena gracilis* Suspensions in an Annular Container  
J. Phys. Soc. Jpn. 83 (2014) 043001 1-4  
査読有

7. Takafumi Mizuno, Susumu Yamaguchi, Ichiro Yamamoto, Ryohei Yamaoka  
Toshiharu Akino  
“Double-Trick” Visual and Chemical Mimicry by the Juvenile Orchid Mantis *Hymenopus coronatus* used in Predation of the Oriental Honeybee *Apis cerana*,  
Zoological Science  
巻 : 31 ページ : (2014) 795-801  
DOI <http://dx.doi.org/10.2108/zs140126>  
査読有

8. 西森拓 西村信一郎 アリの集団採餌とエラー戦略 応用数理 第24巻  
11-17(2014) 査読有

〔学会発表〕(計 8 件)

1. 中村哲朗・秋野順治: トビイロシワアリが獲物の捕獲成功を確実にするために伝達する情報は何か, 日本応用動物昆虫学会, 東京農工大学(ポスター発表) 2017/3/28

2. Hiraku Nishimori: Intelligent Group by Innocent Individuals: Autonomous Task Allocation Dynamics of Foraging Ant, The 1st Workshop on Self-Organization and Robustness of Evolving Many-Body Systems  
Hazaki, Ibaraki 2016/8/28 招待講演

3. Hiraku Nishimori: Intelligent Group Behavior by Innocent Individuals: Autonomous Task Allocation Dynamics of Foraging Ants, 九州大学伊都キャンパス 2016/6/17

4. 西森拓: アリ集団採餌 - 自発的制御による分業ダイナミクス, 生命動態の分子メカニズムと数理 生命動態システム科学四拠点・CREST・PRESTO・QBiC 合同シンポジウム、シェラトンホテル広島  
2016/3/25-26

5. 西森拓, 山中治, 泉俊輔, 粟津暁紀:  
単純要素の集団による精妙なダイナミクス  
アクティブマター研究会 2016  
発表場所九州大学, 箱崎キャンパス  
年月日 2016/1/22-23, 招待講演

6. Hiraku Nishimori, Rito Takeuchi, Shin I Nishimura and Akinori Awazu: Variation

on Error Strategy of Foraging Ants, Swarm2015, THE FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SWARM BEHAVIOR AND BIO-INSPIRED ROBOTICS, 2015/10/29 Kyoto, Japan, 招待講演

7. Hiraku Nishimori, Rito Takeuchi, Shin I Nishimura: Variation on Error Strategy of Foraging Ants, AROB20, B-Con PLAZA, Beppu, Japan 2015/1/21

8. Hiraku Nishimori: Variation on Error Strategy of Foraging Ants, ICMMA 2014 'Crowd Dynamics' 明治大学中野キャンパス, 2015/1/10, 招待講演

〔図書〕(計 1 件)

1. Yusuke Ogihara, Osamu Yamanaka, Toshiaki Akino, Shunsuke Izumi, Akinori Awazu and Hiraku Nishimori(分担執筆): 'Mathematical Approaches to Biological Systems Networks, Oscillations and Collective Motions', 総ページ数 166, 担当分 Chap.6, 'Switching of Primarily Relied Information by Ants: A Combinatorial Study of Experiment and Modelling' 119-137, Eds. T. Ohira, et al., Springer(2015)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西森 拓 (NISHIMORI HIRAKU)  
広島大学・大学院理学研究科・教授・  
研究者番号: 50237749

(2) 研究分担者

秋野 順治 (AKINO TOSHIHARU)  
京都工芸繊維大学・昆虫先端研究推進センター・  
生物資源フィールド研究部門・教授・  
研究者番号: 40414875.