

## 論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 ( 理 学 )	氏名	山 中 治
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1・2 項該当		
論文題目			
アリの社会における採餌活動の統計的特徴付けとタスク分担メカニズムの研究 (Study of task allocation mechanism and statistical characterisation of foraging activity in ants society)			
論文審査担当者			
主 査 教授 西森 拓 審査委員 教授 坂元 国望 審査委員 教授 中田 聡 審査委員 教授 秋野 順治 (京都工芸繊維大学) 審査委員 准教授 栗津 暁紀			
〔論文審査の要旨〕			
アリは、社会性昆虫の典型例である。コロニー全体を統括する特定のリーダーがいないにもかかわらず、高度に組織化された複雑な協働作業を実行し、コロニーを長期にわたって維持することができる。アリのコロニーの中で大多数を占めるのがワーカーであり、個々のワーカーは自分の周囲のワーカーの行動や、コロニーを取り囲む環境因子に応じて行動を変化させる。その結果、コロニー内に様々なタスクを担うグループが自然発生する。しかしながら、各個体の比較的単純な行動様式と組織全体としての高度な協調行動がいかに連動しているか未解明な部分が多い。とくに、効率的な協調行動の遂行に不可欠な、タスク分業の発生機構に関して、野外観察や限定された条件での室内実験による定性的記録は蓄積されつつあるものの、十分な量の行動データに裏打ちされた定量的研究はいまだ発展の途上にあるといえる。			
本論文第 1 章において、著者は、アリのタスク分業の形態を、次の二種、 <ul style="list-style-type: none"> <li>(i) 担当タスクの分化: コロニー内で主として従事するタスクが、ワーカー毎に分かれること。</li> <li>(ii) タスク実行量の偏在性: 同一タスクを分担するワーカーの中でも、一部のワーカーにタスク実行量が偏ること。</li> </ul> に大別し、それぞれの分業形態に関する先行研究を総括した。その結果、現状において、分業の詳細を表す行動データの蓄積量、とくに、(ii)のタスク実行量の偏在性に関するデータが絶対的に不足しており、これが定量的研究推進の障害となっていると結論づけた。さらに、十分量のデータの収集がなされた場合、これを、アリの分業の発生機構に関する標準的シナリオである反応閾値仮説 (RT 仮説)、および、RT 仮説に基づく固定反応閾値モデル (FRT モデル) の帰結と比較検討することで、アリのタスク分業の発生・維持機構に関する定量的研究が進展することを指摘した。			
以上のモチベーションの下、本論文第 2 章において、著者は、クロオオアリのワーカーの採餌行動に関して、次の 3 点に関する研究・開発を進めた。 <ul style="list-style-type: none"> <li>(i) 採餌行動の長期自動計測システムの構築: 微小 RFID タグをコロニー内の全てのワ</li> </ul>			

ーカーに設置し、これによってワーカーを個別認識した上で継続的に行動を測定し、PCに自動蓄積する新たな計測システムを構築した。これによって、アリの社会行動に関する過去に例のない大量データの収集が可能となった。

- (ii) 行動データに基づく分業の機構の解析: (i)で構築した自動計測システムから得られた長期間の個体別行動データを解析し、採餌タスクに関する活動度分布を調べ、さらにその時間変動の特徴を解析した。
- (iii) 既存の理論モデルの再検証: (ii)で得た実データの解析結果を、アリの役割分業に関する既存の仮説(RT仮説)や数理モデル(FRTモデル)と比較し、その有効性と問題点を検証した。

自動計測システム構築において、当時エスケーエレクトロニクス社で開発中の世界最小サイズのRFIDチップを5コロニーの全てのワーカーの体表に設置し、また、ワーカーが巣から採餌スペースに移動する際、必ず通過する隘路を設計し、隘路上にセンサーゲートを設け、個々のワーカー通過日時および単位時間毎の通過回数を、コロニー毎に約三ヶ月にわたって記録し、合計17万回を越すゲート通過データを得た。データ解析の結果、

- (i) 各コロニー内の採餌に関わるワーカーの採餌活動量は均一でないこと。具体的には、各コロニーでの全観測時間をとおしたタスク活動量分布(ゲート通過回数分布)は、一般化ガンマ分布で最適のフィッティングができること。
- (ii) 単位期間(1日)毎の各コロニー内のワーカー間の採餌活動量の順位付けは、長期にわたってゆっくり入れ替わる。具体的には、活動量順位の相関係数(スピアマンの順位相関係数)がおおよそ二ヶ月をかけてゼロ近くまで緩和していくこと。

が判明した。(i)で得られた一般化ガンマ分布は、「同一タスクを分担するワーカー間の活動量はほぼ均等」という、標準的な仮説(RT仮説)や標準モデル(FRTモデル)の帰結と大きく異なっている。また均一活動量のまわりでのゆらぎを想定した場合に得られる正規分布や正規分布の重ね合わせとも異なっている。また、(ii)の結果も、「同一タスクを分担するワーカー間の活動順位は非常に頻繁に入れ替わる」という従来の標準モデル(FRTモデル)の帰結に反した結果となっている。さらに、長期をかけて活動量順位が徐々に入れ替わるという長期間変動のシナリオは、そもそも固定反応閾値モデルの議論の枠の外にあり、分業組織の時間変化まで想定に入れた(FRTモデルの)既存の派生モデルである強化学習型反応閾値モデル(RTRモデル)によっても説明ができない。

以下、本論文の意義をまとめる。著者は、

- I. 新しい行動計測システムを構築し、それによって、アリのワーカーの社会行動に関して過去に例のない大量データの収集が可能となった。
- II. 新しい行動計測システムで得られた大量データの解析によって、アリのタスク分業、とりわけ、同一タスクを分担するワーカー間での活動量の偏在に関して、従来の標準的な仮説は破れており、仮説に基づく数理モデルの帰結とも一致しないことが判明した。また、標準モデルから派生した他の既存モデルでも、コロニー内でのワーカーの間でのタスク分業は説明できないことを示し、アリのタスク分業に関して、新たな解釈や理論モデルの構築が必要であることを示唆した。

これらの成果は、社会性昆虫の典型例であるアリのコロニー内での労働分化の機構に関する定量的研究を大きく促進させるものであり、学術的に高く評価されるものである。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士(理学)の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

#### 公表論文

- (1) Osamu Yamanaka, Masashi Shiraishi, Akinori Awazu & Hiraku Nishimori.  
Verification of mathematical models of response threshold through statistical characterisation of the foraging activity in ant societies.  
Scientific Reports Vol.9, 8845–1–8 (2019).

#### 参考論文

- (1) Osamu Yamanaka and Rito Takeuchi. UMATracker: an intuitive image-based tracking platform. *Journal of Experimental Biology*, 221, jeb182469(2018).
- (2) Satoshi Nakata, Hiroya Yamamoto, Yuki Koyano, Osamu Yamanaka, Yutaka Sumino, Nobuhiko J Suematsu, Hiroyuki Kitahata, Paulina Skrobanska, and Jerzy Gorecki. Selection of the rotation direction for a camphor disk resulting from chiral asymmetry of a water chamber. *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 120, 9166–9172 (2016)