

RFID チップを用いた アリの分業ダイナミクスの定量的解析

広島大学大学院理学研究科 *

山中 治† 粟津 暁紀、西森拓

Osamu Yamanaka, Akinori Awazu, Hiraku Nishimori
Graduate School of Science, Hiroshima University

1 はじめに

アリは産卵を行う個体（女王）と、コロニー内の様々なタスクを分担する雌の個体（ワーカー）、そして少数の雄の個体とが共同で生活を送る「社会性昆虫」である。彼女たちは、コロニーが必要とするタスクを周囲の状況を元に柔軟に振り分け、こなしていること（状況依存型役割分担）が様々な実験で確認されている。

Wilson らは、体が大きな major ワーカーと小さな minor ワーカーの二型であるオオズアリ（*Pheidole noda*）の人工コロニーを用いて状況依存型役割分担について観察を行った。具体的には、元のコロニーの major ワーカーと minor ワーカーの構成比を自然界のコロニーの構成比とは異なるように系統的に変化させ、それぞれの型が担う役割が自然のコロニーと比べてどれだけ変化するかを観察した [1]。すると、major ワーカーの構成比を自然界のコロニーの構成比より高くするにつれて、major ワーカーの中から minor ワーカーが本来行っていた卵の世話といったタスクを代行するものが、増加することがわかった。

最近、Ishii と Hasegawa らは状況依存型役割分担に関して、シワクシケアリ（*Myrmica kotokui*）を使って次の実験を行っている [4]。彼らはシワクシケアリの人工コロニーを構

成し、個体識別を行う為に個々のアリにインクでマークをつけ継続的に観察した。朝昼晩3回の観察を行い、採餌や巣の掃除といった他の個体に影響するタスクを行う頻度を数えた。すると、コロニー内の個々のアリの働き頻度が広く分布していることが分かった。言い換えれば、コロニー内にはよく働くアリと働かないアリが共存している。さらに彼らは、働き頻度を計測したコロニーからよく働くアリ集団または、働かないアリ集団のみをコロニーに残しさらに働き頻度を計測した。すると、よく働くアリ集団のみを残したコロニーでは、一部のアリの働き頻度が極端に低下し働かないアリが出現した。一方で、働かないアリ集団のみのコロニーでは、一部のアリが分割前よりも高い頻度で働き始めた。

以上のことから個々のアリが、コロニー内の状況を何らかの形で感知し役割を変化させる仕組みが存在することが示唆される。このような役割分担を数理モデルで再現する方法として、Bonabeauらは反応閾値モデルを提唱した[2,3]。反応閾値モデルの基本ルールは次のように表される。まず、(i) 個々のアリはタスクに従事し始めるための固有の腰の軽さ(閾値)を持ち、そして(ii) コロニー内でそれぞれのタスクの遂行がどの程度必要とされているか(ストレスレベル)を全てのアリが共有していることが仮定されている。個々のアリは各個体固有の閾値とコロニーのストレスレベルを比較しコロニーのストレスレベルが閾値を上回っていれば、そのストレスを解消するようにタスクを開始する。また、タスクを担うアリの数が増えることで、コロニーのストレスレベルが減少する。その結果、ストレスレベルが自分の閾値よりも小さくなったアリは、役割を休止状態に変える。このフィードバックによって、アリの役割分化を説明している。

反応閾値モデルは上述したWilsonらの実験結果を再現することができ、アリの役割分担を表す数理モデルとして定着している。一方で、反応閾値モデルが仮定しているコロニー全体が共有するストレスと各個体固有の閾値が実際に存在するかについて議論が続いている[12,13]。閾値については個体の働く頻度が広く分布していることから、その仮定が正しいことが示唆されている。具体的には、コロニー内に働き頻度の階層が生じることがアリやハチで広く観察されており、普遍的な性質であることが示唆されている[5-9]。

個々のアリが固有の閾値を持っていることが反応閾値モデルでは仮定されている。言い換えると、コロニー内の個々のアリの働き頻度を連続的に計測すると、計測期間の前半と後半では労働階層が変化しないことを仮定している。しかし、目視で多量のアリを連続的に観察することが困難なことから、個々のアリの閾値の時間変化・定常性についての定量的な検証は十分行われていない。そこで本研究では、RFIDチップによる自動計測システムを用いて、個々のアリの働きを長期間・連続的に計測し、労働モデルについて検証を行った。

2 実験方法

本研究で用いたクロオオアリについて紹介する。クロオオアリ（*Camponotus japonicus*）は、日本に在来するアリの中でも最大となる大型のアリで、体長 7mm-12mm の個体が分布する多型のアリである。女王アリは 1 匹である単女王性 (monogyny) であり、成熟したコロニーではワーカーの数が 1000 匹を超える。

2.1 RFID チップ

RFID(Radio Frequency Identification) とは、電磁波を用いた近距離無線通信によって、ID 情報を埋め込んだ RFID チップと情報をやり取りするものである。我々が普段利用する Suica や ICOCA などの IC カードと同様の技術である。具体的には、コイル状のアンテナを内蔵している RFID チップが読み取りセンサーの下を通過すると磁界が発生し、電流が生じる。この電流を利用して RFID チップが起動し、メモリに内蔵された固有 ID が無線で読み取られる。そして、読み取りセンサーが接続されているパソコンに RFID チップ固有の ID と通過時刻を記録する。この工程の繰り返しによってデータを蓄積していく。

RFID チップは、すでにオオミズナギドリなどの大型の動物やハチやアリといった小型の動物の生態調査のために利用されている [10, 11]。野外生物の生息地は研究者が入るには困難な場所であり、従来の目視による観察は研究者の負担になっていた。そこで、一度設置すれば、長期にわたり自動的にデータを取得することのできる RFID チップを使用し、データを取得する研究が進められている。

2.2 実験セットアップ

実験で使用するアリは、広島大学東広島キャンパス構内で採取した 150 匹のワーカーと 1 匹の女王個体がいるコロニーである。光が入らないようにした人工巣 (NestSpace) にアリを住ませ、ゴムチューブで採餌スペース (ForagingSpace) と連結させた (図 2A)。このゴムチューブの上にセンサーを設置する (図 2B)。コロニー内にいる全てのワーカーに RFID チップ^{*1}を付けた (図 1)。センサーの通過頻度を採餌頻度とした。ForagingSpace には、常に昆虫ゼリーを設置しておき、ミールワームについては適宜与えた。これらを 8:00-20:00 まで LED ライトが照射される暗室内で管理し、温度 25°C、湿度 50% 以上を保つようにした。実験期間は 2014 年 11 月 1 日から 12 月 31 日、総採餌頻度は 15224 回

である。



図1 クロオオアリ (*Camponotus japonicus*) に RFID チップを貼り付けた様子

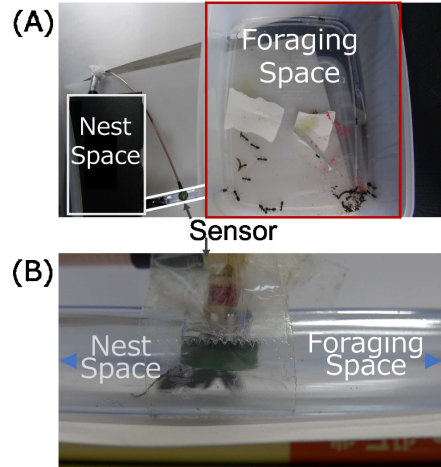


図2 (A) 実験スペースを上から見た様子。
(B) NestSpace と ForagingSpace を繋ぐゴムチューブを横から見た様子

3 結果

3.1 採餌階層

図3は、12月に1回以上採餌を行ったアリ(38匹)が11月と12月に行った採餌頻度を、採餌頻度の少なかった者の順に表示した。どちらの月においても、採餌頻度の階層ができていることがわかる。この結果は、反応閾値モデルの(i)の仮定である各個体毎の閾値の存在と矛盾しない。

12月の採餌頻度の総量が11月と比べて減っているのは、寿命などによりメンバー数が減少していることが影響していると考えられる。そこで、アリが途中死亡することによって見かけ上の階層ができる可能性を排除するために、実験最終日の12月31日に採餌を行ったグループを取り出して、彼らの11月と12月における採餌階層を表示した(図4)。すると、このメンバーでも働く者と働かない者がコロニーに共生していることがわかる。つまり、採餌階層ができることは、コロニーメンバーが実験途中で死亡し、その後採餌を

*1 株式会社エスケーエレクトロニクス(本社京都市)にて開発中の極小サイズのRFIDチップおよびその専用読み取り装置。チップのサイズは約0.5mm角。

行わないことが起因する訳ではない。

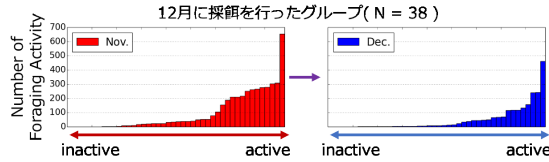


図 3 12 月に採餌を行ったアリの採餌階層 ((左)11 月での採餌階層、(右)12 月での採餌階層)

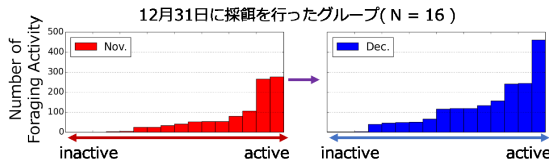


図 4 12 月 31 日に採餌を行ったアリの採餌階層 ((左)11 月での採餌階層、(右)12 月での採餌階層)

3.2 採餌行動の時間的特性

次に、個々のアリが働く時間帯と採餌階層の関係を調べた。具体的には、ライトの点いている 8 時から 20 時までの働きと、ライトの消えている 20 時から翌 8 時までの働きについて、各個体のそれぞれの時間帯における採餌頻度の総和から働きランクを決定し、スピアマンの相関係数を計算した (図 5)。こうすることで、夜間において働き者が昼間においても働き者なのかを調べた。すると、昼間と夜間の働きランクには正の相関があることがわかった。つまり、夜間働くアリは昼間もよく働くことがわかる。

また、昼間の働きランクより夜間の働きランクが高い個体が数匹いる。これらは、夜間はよく働くが昼間はほとんど働いていないものたちである。つまり、非常に少数のアリが夜行性の行動傾向を持っている。

4 まとめ

アリコロニーの役割分担モデルである反応閾値モデルについて RFID チップを用いて検証を行った。その結果、採餌に関する労働階層が 11 月・12 月のそれぞれにおいて現れていることがわかった。短い期間 (1 日や 1 週間) についても同様の検証を行っており、それぞれの期間で労働階層が現れることがわかっている。一方で、労働階層の変動について

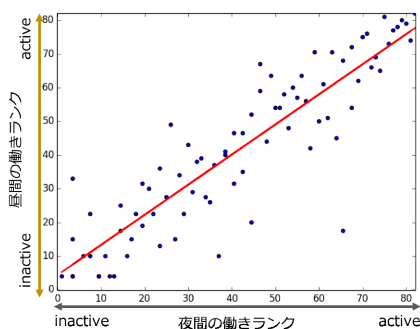


図5 夜間と昼間での採餌ランクの関係 (採餌頻度の多い個体が高いランクを持つ)。

はどのように定量的に示していくのかを検証していく必要がある。個々のアリの様々なタスクに関する労働頻度について、その変動メカニズムを解明することが、アリの分業ダイナミクスを理解するのに重要であると考えられる。

労働時間については、コロニーの数匹のアリがリズムを持つことが示唆された。今後は、夜行性・昼行性の傾向がある個体コロニーにいるのかを精査する。

今回我々が導入して RFID チップを使った実験系は、個々のアリの行動調査を長期に行える実験系といえる。今後はこれまで発見されていない、個々のアリが時間に応じて役割を変化させる時間的役割分担などの発見を目指す。

5 謝辞

本研究は、科学研究費 (16H04035) の補助を受けたものである。また、極小 RFID チップ及びその読み込みセンサーを提供いただいた株式会社 エスケーエレクトロニクス社に感謝いたします。

参考文献

- [1] E.O.Wilson "The relation between caste ratios and division of labor in the ant genus *Pheidole* (Hymenoptera: Formicidae)." *Behav. Ecol. Sociobiol.* 16.1(1984): 89-98
- [2] E.Bonabeau, G.Theraulaz, and J.L.Deneubourg "Fixed response thresholds and the regulation of division of labor in insect societies." *Bull. Math. Biol.* 60.4

- (1998): 753-807
- [3] E.Bonabeau, G.Theraulaz, "Quantitative study of the fixed threshold model for the regulation of division of labour in insect societies" *Proceedings Royal. Soc. London B* 263.1376 (1996): 1565-1569
 - [4] Y.Ishii and E.Hasgeawa "The mechanism underlying the regulation of work-related behaviors in the monomorphic ant, *Myrmica kotokui*" *J.Ethology*, 31(1), 61-69
 - [5] A.Weidenmüller "The control of nest climate in bumblebee (*Bombus terrestris*) colonies: Interindividual variability and self reinforcement in fanning response" *Behav. Ecol.*, 15(1), 120-128
 - [6] G.E.Robinson and R.E.Page.Jr "Genotypic constraints on plasticity for corpse removal in honey bee colonies" *Anim. Behav.* 49.4 (1995): 867-876
 - [7] B.D.Beverly, H.McLendon, S.Nacu, S.Holmes, D.M.Gordon "How site fidelity leads to individual differences in the foraging activity of harvester ants" *Behav. Ecol.* 20(3), (2009):633-638
 - [8] N.Pinter-Wollman, J.Hubler, J.A.Holley, N.R.Franks, and A.Dornhaus "How is activity distributed among and within tasks in *Temnothorax* ants?" *Behav. Ecol. Sociobiol.* 66.10 (2012): 1407-1420
 - [9] D.Charbonneau, and A.Dornhaus "Workers 'specialized' on inactivity: Behavioral consistency of inactive workers and their role in task allocation" *Behav. Ecol. Sociobiol.* 69.9 (2015): 1459-1472
 - [10] E.J.H.Robinson, O.Feinerman, and N.R.Franks "How collective comparisons emerge without individual comparisons of the options" *Proceedings Royal. Soc. London B* 281.1787 (2014): 20140737
 - [11] M.Henry, M.Bguin, F.Requier, O.Rollin, J.F.Odoux, P.Aupinel, A.Decourtye "A common pesticide decreases foraging success and survival in honey bees" *Science* 336.6079 (2012): 348-350
 - [12] G.E.Robinson "Regulation of division of labor in insect societies" *Annual review of entomol.* 37.1 (1992): 637-665
 - [13] D.Charbonneau, and A.Dornhaus "Workers 'specialized' on inactivity: Behavioral consistency of inactive workers and their role in task allocation" *Journal Bioeconomy.* 17(3), 217242