

# アリ分業の反応閾値モデルに導入すべき 反応閾値の個体差と時間変化について

松浦竜也, 島田尚

東京大学 工学系研究科 システム創成学専攻

## 概要

真社会性昆虫は、効率的な分業により集団として高い適応度を見せる。その分業の記述のために、各個体が反応閾値と巢内のタスクに対応する刺激に応じてタスクに従事する、反応閾値モデルと呼ばれるモデルが提唱されている。しかしながら、大規模なデータを通じた検証の結果、反応閾値モデルを再考する必要性が示唆された。本研究では、反応閾値モデルに反応閾値の個体差と時間変化という二つの拡張を導入したシミュレーションによって、先行研究で得られたアリの労働に関する振る舞いを再現することができた。

## Necessary diversity and time variation of response threshold in response threshold model for division of labor of ants

Tatsuya Matsuura, Takashi Shimada

Department of Systems Innovation Graduate School of Engineering The University of Tokyo

## Abstract

One of the reasons of the success of eusocial insects is assumed to be their efficient division of labor. The system of their division of labor is thought to be described by a response threshold model. However, throughout a recent study to verify the model framework through a large set of activity data of ants showed the necessity to reconsider the simple modeling. We reproduced the empirical behavior through a response-threshold-model-based simulation, by introducing diversity and time-variation.

## 1 はじめに

アリやミツバチなどの真社会性昆虫は、不妊の階層を含む複数の階層をもち、階層ごとに分業を行っている。その効率的な分業は、彼らの繁栄の大きな理由の一つであると考えられている [1]。そのメカニズムを説明するため、固定反応閾値 (FRT) モデルというモデルが提唱された [2]。FRT モデルはシンプルかつ有力なモデルとして知られているが、Yamanaka らは大規模データによる検証を行い、FRT モデルを再考する必要性を主張した [3]。本研究では反応閾値モデルの閾値に個体差と時間変化を導入したシミュ

レーションによって先行研究の結果の再現を試みた。

## 2 先行研究

FRT モデルでは、休止状態と活動状態の二つの状態が存在すると仮定する。各状態間の遷移は、以下の式で与えられる活動を始める確率  $P_{Act}$  と休止する確率  $P_{Rest} = p$  (一定) によって記述される。

$$P_{Act} = \frac{s(t)^2}{s(t)^2 + \theta^2} \quad (1)$$

ここで、 $s(t)$  は時刻  $t$  におけるコロニーのストレスを、 $\theta$  は各アリの反応閾値を表している。FRT モデ

ルでは同じタスクを担当するアリの $\theta$ は同一で、時間変化しないと仮定する。

Yamanaka らは各個体が巣箱と餌場を繋いだチューブを通過した時刻を記録した大規模データによる FRT モデルの検証を試みた [3]。

まず、Yamanaka らは労働量の分布が正規分布に収束するという仮説を検証したが、観測の結果、労働量の分布は一般化ガンマ分布に収束していた。これは各個体の労働量には大きな偏りがあり、労働が個体間で均等に分配されていないことを意味している。

また、Yamanaka らは、任意の2日間の労働量が非常に弱くなるという仮説を、労働量のスピアマンの順位相関係数の観測期間平均：

$$S_d^W = \frac{1}{T-d} \sum_{m=1}^{T-d} S_{m,m+d}^W \quad (2)$$

によって検証した。ただし、 $S_{m,m+d}^W$  は  $m$  日目と  $m+d$  日目それぞれでの労働量間のスピアマンの順位相関係数、 $T$  は総観測期間である。この結果、 $S_1^W \simeq 0.7$  であることと、 $d \geq 2$  で  $S_d^W$  は半減期 30–45 日程度で緩やかに減衰することがわかった。

これらの結果が、従来の FRT モデルの通り反応閾値  $\theta$  が一様かつ時間変化しないものであれば観測されないものであったため、Yamanaka らは FRT モデルに拡張が必要だと主張した。そこで我々は、この結果を再現するため、反応閾値モデルの閾値に個体差と時間変化を導入したシミュレーションを行った。

### 3 シミュレーション

#### 3.1 反応閾値の個体差の効果

まずは、反応閾値に個体差を導入する。個体  $i$  の反応閾値  $\theta_i$  を  $\theta_i \sim N(10, \sigma^2)$  によって与える。ここで、 $\sigma$  は 0–5 で 0.5 刻みで変化させた。図 1 に得られた  $S_d^W$  を示す。 $\sigma$  が大きい時、 $S_d^W$  は、先行研究に近い 0.6 付近となることを再現できたが、 $S_d^W$  の減衰は観測できなかった。また、分布が 2 値分布、一様分布であるときも同様の結果となった。

#### 3.2 反応閾値の時間変化の効果

続いて、反応閾値に個体差と時間変化を導入する。個体  $i$  の反応閾値  $\theta_i$  を以下のように与える。

$$\theta_i(0) \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (3)$$

$$\theta_i(t + \Delta t) = \theta_i(t) + 0.1\xi - \beta(\theta_i(t) - \mu) \quad (4)$$

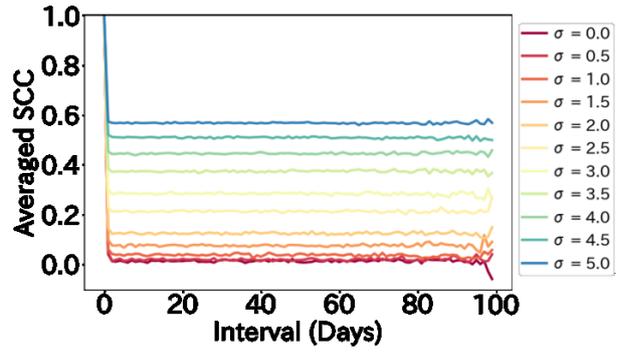


図 1: シミュレーションの結果得られた各時間間隔  $D$  のスピアマンの順位相関係数の平均  $S_d^W$

$\beta = \{2 \times 10^{-5}, 4 \times 10^{-5}, 6 \times 10^{-5}, 8 \times 10^{-5}, 10^{-4}\}$ 、 $\xi \sim U(-1, 1)$  であり、 $\mu = 10, \sigma = 4$  とした。

図 2 に得られた  $S_d^W$  を示す。反応閾値に時間変化を導入することで  $S_d^W$  の緩やかな減少が再現できた。また、異なる時間変化を導入した場合にも同様に  $S_d^W$  の緩やかな減少が観測された。

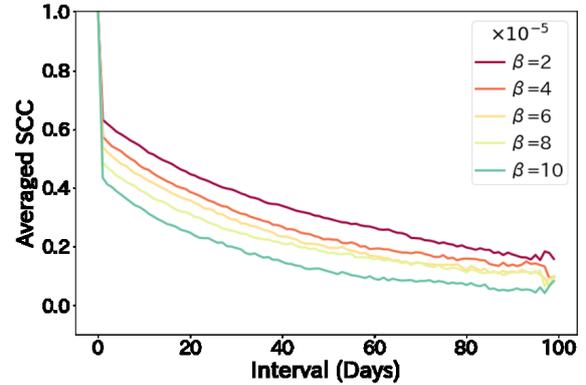


図 2: シミュレーションの結果得られた各時間間隔  $D$  のスピアマンの順位相関係数の平均  $S_d^W$

### 4 結論

シミュレーションの結果より、 $S(1) \simeq 0.7$  の再現には反応閾値が幅をもって分布する必要があること、 $S_d^W$  の緩やかな減少の再現には反応閾値の時間変化が必要であることがわかった。

### 参考文献

- [1] Gene E. Robinson, Annual review of entomology 37.1, 637-665 (1992).
- [2] E. Bonabeau et al., J. theor. Biol 215, 481-489 (2002).
- [3] O. Yamanaka et al., Scientific Reports, 9, 8845 (2019).