

フェロモン・コミュニケーションの起源に関する 進化シミュレーション

中道 義之[†] 有田 隆也^{††}

蟻は、個々は単純な知能しか持っていないにもかかわらず、フェロモンによるコミュニケーションを行うことで知的で複雑な群行動を実現していることが知られており、多くの研究がなされている。これらの研究における焦点の1つは、フェロモン・コミュニケーションをどのように与えたら適応的になるかという点である。本研究は、フェロモン・コミュニケーションのメカニズムをア priori に与えず、タスクの達成を通してそれを獲得（創発）・進化する過程を観察し、複雑系科学に関わる知見を得ることを目的とする。複数種のフェロモンが利用可能な環境における蟻の採餌行動をモデル化し、実験を行った結果、人手で設計したコミュニケーションよりも適応的なコミュニケーションが創発しうることが分かった。創発したコミュニケーションは、フェロモンが巣と餌の両者の場所を適度に反映するような分布となるように利用するもので、フェロモンの偏りやアントの集団行動の偏りを妨げることによってロバスタな採餌行動を可能としていると考えられる。

An Evolutionary Simulation of the Origin of Pheromone Communication

YOSHIYUKI NAKAMICHI[†] and TAKAYA ARITA^{††}

Social insects exhibit complex and adaptive behavior. In particular, it is well known that ants solve difficult problems by communicating with each other via pheromone, which include finding the shortest path between two points. The fundamental question regarding pheromone communication is: How have the pheromone communication systems emerged? This paper proposes an ant foraging model for evolution of pheromone communication, in which neural networks of ant agents evolve based on the result of foraging. The results of the computer experiments show that ants using emerged pheromone communication are more adaptive for foraging food resources than ants without pheromone communication. Furthermore, the results suggest that cleverer pheromone communication emerged through evolution than human designed pheromone communication.

1. はじめに

社会性昆虫である蟻や蜂は、個々は単純な知能しか持っていないにもかかわらず、知的で複雑な群行動を実現している。特に蟻においては、フェロモンを媒体としたコミュニケーションを行っていることが知られており、その群知能を生み出す大きな要因の1つであると考えられている^{1)~3)}。

フェロモン・コミュニケーションが、どのようにして生み出され進化してきたかという基本的な疑問は、生物学にとどまらない学際的なテーマであり、複雑系科学に関わるものである。たとえば、工学的な応用とい

う観点からも、フェロモン・コミュニケーションはマルチエージェント環境における適応的コミュニケーションモデルとして注目されている。また、フェロモンが持つ情報量が増えていくような進化のシナリオを想定した際、そこに創発するコミュニケーションは、書き言葉の原初的な形態の一種になりうるかといった新たな言語観を得られる可能性といった面からも、フェロモン・コミュニケーションの創発と進化は興味深い⁴⁾。

これらの研究における焦点の1つは、フェロモン・コミュニケーションをどのように与えたら適応的になるかという点である。これに対するアプローチは2つに大別することができる。

1つは、フェロモンに係わる行動ルールをア priori にあたえ、その有効性を検証するというアプローチである。たとえば、車谷は人工蟻エージェントの採餌行動において、フェロモン・コミュニケーションが大域的振舞いに与える影響を考察している^{5),6)}。また Ant Colony Optimization^{7),8)} や群ロボットへの適用⁹⁾ を

[†] 名古屋大学大学院人間情報学研究科

Graduate School of Human Informatics, Nagoya University

^{††} 名古屋大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science, Nagoya University

はじめとして、工学的な応用を目的とした研究も多くなされている。

もう1つは、進化や学習によってコミュニケーションを自律的に獲得させるというものである。このアプローチによる先駆的研究として、フェロモンを用いた蟻の採餌行動をモデル化した AntFarm¹⁰⁾ をあげることができる。ただし、この研究ではエージェントの適応度は進化によって上昇したものの、フェロモンに基づいた協調的行動は創発しなかった。また、川村らは、比較的単純な、蟻の餌の奪い合いを模したエージェント環境である Ants War において、コミュニケーションが自律的に獲得される過程について明らかにした¹¹⁾。

進化や学習によってコミュニケーションを自律的に獲得させるというアプローチは、問題解決のためのフェロモン・コミュニケーションが既知でない場合に有効であるが、必ずしも適応的なフェロモン・コミュニケーションが創発するとは限らない。なぜならば、1) フェロモンは時間とともに拡散するので、その分布を直接的に制御できず、2) 餌をみつけた蟻にとってフェロモンを拡散することは自分にとっての直接的なメリットは必ずしも大きくなく、また、3) 「どのような状況でフェロモンを分泌するか」と「フェロモンを検知したらどのような行動をとるか」という2つの行動ルールが全体として機能するように進化していかなければならないという難しい問題だからである。

適応的なフェロモン・コミュニケーションはどのようにすれば獲得されるのであろうか。また、進化や学習を用いてフェロモン・コミュニケーションを獲得させるというアプローチを進めることによって、より難しい問題に対応できる高度なフェロモン・コミュニケーションは実現できるのであろうか。あるいは、複数のフェロモンを利用できる設定においては、それぞれどのようにフェロモンに係わる行動を獲得していくのであろうか。

本論文では、蟻の採餌行動を対象にしたフェロモン・コミュニケーションの進化モデルを使った進化実験について述べる。以下、2章ではモデルの詳細を述べる。3章では実験を行い、創発したフェロモン・コミュニケーションの解析を行う。最後に、4章で本論文をまとめる。

2. 蟻の採餌行動モデル

2.1 設計指針

AntFarm は、グリッド環境に存在する餌を巣から出発した人工蟻エージェントが拾い、巣まで持ち帰

るというモデルである。人工蟻エージェントはニューラルネットで構成されており、周辺の餌・巣の有無、フェロモンの量、餌保持の真偽、巣の方向、ランダムな値を入力とし、出力値に従って周囲への移動、餌を持ち上げる・置く、フェロモンの分泌という行動を行う。巣に持ち帰った餌の数を評価関数として、ニューラルネットの重みを遺伝的アルゴリズムによって進化させるというものである。このモデルにおいて、人工蟻エージェントはより多くの餌を獲得するように進化したが、フェロモンに基づいた協調的な行動は創発していない¹⁰⁾。

これに対し、Ants War では、適応的なフェロモン・コミュニケーションが創発しうることが示されている。Ants War は、蟻の餌の奪い合いを模したエージェント環境であり、グリッド環境に存在する餌を2種類の人工蟻エージェントが牽引し、その餌獲得数を競うというモデルである。人工蟻エージェントはニューラルネットで構成されており、周辺の餌の有無、周囲の仲間(同種のエージェント)の有無、フェロモンの勾配を入力とし、出力値に従って周囲への移動、待機、餌の牽引、フェロモンの分泌という行動を行う。遺伝的アルゴリズムによって、ニューラルネットの重みを進化させた結果、フェロモン・コミュニケーションによって餌に仲間を集めるという協調的な行動が創発した¹¹⁾。

Ants War において適応的なフェロモン・コミュニケーションが創発した要因を AntFarm との比較から考察すると、次のことが考えられる。

- AntFarm のエージェントはフェロモンの量を検知するものであったが、Ants War のエージェントはフェロモンの勾配という方向性を持った情報を検知する。このことは、フェロモンの情報と移動という行動を結び付けやすい。
- AntFarm は餌と巣を探索するという問題であるが、Ants War は餌のみを探索するという問題である。Ants War は問題をこのように限定し、フェロモンを餌を探索する行動に結び付けることを促すことで、協調的な行動の創発に成功したといえる。2種類のフェロモン・コミュニケーション(誘引フェロモンと忌避フェロモン)が創発したが、どちらも餌を探索するという行動をサポートするという点で同じ役割を果たしているといえる。

問題の複雑化によってサポートすべき適応的な行動が複数となった場合、適応的なフェロモン・コミュニケーションは創発するのだろうか。また、問題の複雑化に対応するために、フェロモンの数を増やしたらど

のようなフェロモン・コミュニケーションが創発するのであろうか。

以上をふまえ、本研究ではより難しい問題に対応できる適応的なフェロモン・コミュニケーションは実現できるのかということを検証するために、Ants Warを基に次のような蟻の採餌行動モデルを設計した¹²⁾。Ants War との主な相違点は、問題設定と利用できるフェロモンの数である。

問題設定は、AntFarm と同様の、餌を探索し巣に持ち帰るといった採餌行動とする。この問題では、エージェントは「餌にたどり着く」と「巣に戻る」という2つの行動を効率良く行うことが求められる。

エージェントの設計は、Ants War と同様の、フェロモンの勾配を検知するエージェントとする。エージェントの行動はニューラルネットによって決定され、ニューラルネットの重み・閾値を遺伝子として遺伝的アルゴリズムによって進化させる。協調的な行動を創発させやすくするため、その際の選択の単位は同じ遺伝子を持つエージェント集団とする。さらに、エージェントは複数種のフェロモンを検知・分泌可能とする。これは、問題の複雑化に対応して、フェロモンの種類ごとに別の機能を持ったフェロモン・コミュニケーションが創発することの可能性を期待するものであると、実際の蟻が1種類のフェロモンだけでなく複数種のフェロモンを利用しているということを考慮したものである。これまでに、2種類のフェロモンを考慮し、あらかじめ役割を与えたモデル^{13),14)}が提案されているが、複数種のフェロモンによるコミュニケーションの進化を考慮したモデルは存在しない。より複雑化したタスクにおいて、複数種のフェロモンを利用したコミュニケーションが創発する可能性を検証することは、フェロモン・コミュニケーションの起源と進化を明らかにするうえで重要であると考えられる。

2.2 環境

本モデルは $X \times Y$ のグリッド環境からなる。環境中には、 N_a 匹の人工蟻エージェント（以下アントと呼ぶ）、餌、フェロモン、巣が存在する（図1）。定められた時間までに各種行動を繰り返し行い、より多くの餌を巣に運ぶことがアントに与えられる問題である。餌はグリッド上に置かれる。同じグリッドに複数置くこともできる。巣とはグリッド上の隣接したある一定の領域のことである。この領域上に餌が置かれた場合、その餌は巣の中に格納されたものとして、環境から消滅する。

2.3 フェロモン

アントは互いに影響を及ぼさない複数の種類のフェ

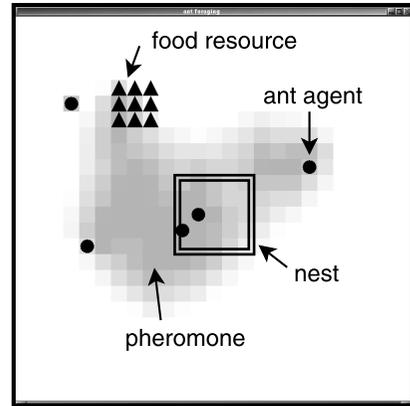


図1 環境に存在する要素
Fig.1 Objects in the environment.

ロモンを分泌することができる。その種類は添字 v ($v = 0, 1, \dots$) によって識別される。分泌されたフェロモンは地表に置かれるが、徐々に蒸発し空中に拡散していく。アントが検知できるのは空中のフェロモンだけである。グリッド上の位置 (x, y) に存在する地上と空中のフェロモンの量は、それぞれ、 $T_v(x, y)$ 、 $P_v(x, y)$ で表される。添字 * は時刻 $t+1$ を表す。蒸発と拡散のプロセスは次式によって定義される。

$$T_v^*(x, y) = (1 - \gamma_{eva})T_v(x, y) + \sum_{k=1}^{N_a} \Delta T_v^k(x, y) \quad (1)$$

$$\Delta T_v^k(x, y) = \begin{cases} Q_p & \text{if } k\text{-th ant agent on} \\ & \text{the grid } (x, y) \text{ put the} \\ & \text{pheromone } v \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_v^*(x, y) = P_v(x, y) + \gamma_{dif}(P_v(x-1, y) + P_v(x, y+1) + P_v(x, y-1) + P_v(x+1, y) - 5P_v(x, y)) + \gamma_{eva}T_v(x, y) \quad (3)$$

ここで γ_{eva} 、 γ_{dif} はそれぞれ蒸発係数、拡散係数である。 γ_{eva} 、 γ_{dif} の定義域はそれぞれ $[0, 1]$ 、 $[0, 0.2]$ である。 Q_p はアントが一回に分泌するフェロモンの量である。なお、領域外のグリッドについてはすべて $P_v(x, y) = 0$ とする。

2.4 アント

コロニーを構成するアントは、同一の行動決定機構を持っており、また、 N_v 種類のフェロモンを使うことができる。アントの初期位置は巣の中心である。同じグリッドに複数のアントが存在することができる。アントは以下の行動を順に行う（図2）。

1) 環境と自身の状態の感知 その場の餌の有無、そ

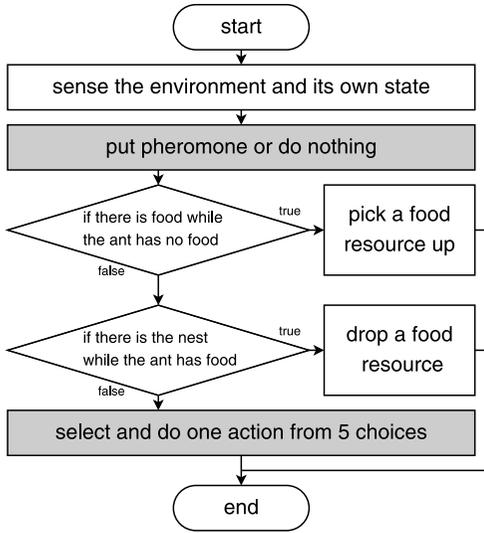


図2 アントの振舞い

Fig. 2 Behavior of ant agents.

の場が巣か、餌を所持しているかについて感知する。また、フェロモンの種類ごとに、前後左右の空中のフェロモン量に関して離散的な4ビットの値として感知する。

- 2) フェロモンの分泌 フェロモンの種類ごとに、何もしない、フェロモンを分泌するという2つの行動から1つ選び、行動する。
- 3) 餌の取得・放置 もし、餌を持っておらず、その場に餌がある場合、餌を1つだけ持つ。もし餌を持っており、その場が巣の場合、餌を置く。
- 4) 待機・移動・方向転換 3)の行動が実行されなかった場合、待機(何もしない)、前に移動、後を向く、左を向く、右を向く5つの行動から1つ選び、行う。前が定められた領域外のグリッドという状況で前に移動する行動を選択した場合は待機とする。

以上の行動で、2)と4)(図2のグレーの部分)については、2層ニューラルネットによって決定する。つまり、感知した値を入力とし、出力された値から行動を決定する。

入力層の i 番目のニューロンの出力値 I_i ($i = 1, \dots, 3 + 4N_v$) は次式で定義される。

$$I_1 = \begin{cases} 1 & \text{if food is present} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$I_2 = \begin{cases} 1 & \text{if the ant agent is on the nest} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$I_3 = \begin{cases} 1 & \text{if the ant agent has food} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$I_{3+4v+d} = \begin{cases} 1 & \text{if the } F_v \text{ is satisfied} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)の添字中における $d = 1, 2, 3, 4$ はそれぞれアントの方向に対して前後左右に対応している。ここで、アントの位置を (x, y) とすると、アントに隣接する位置は $(x', y') \in \{(x-1, y), (x+1, y), (x, y-1), (x, y+1)\}$ である。これを用いて、発火確率 $F_v(x', y')$ が次式で定義される。 S はセンサの感度に関するパラメータである。

$$F_v(x', y') = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{P_v(x', y') - P_v^\#(x, y)}{S}\right)} \quad (8)$$

$$P_v^\#(x, y) = \{P_v(x-1, y) + P_v(x+1, y) + P_v(x, y-1) + P_v(x, y+1)\} / 4 \quad (9)$$

出力層の j 番目のニューロンの出力値 O_j ($j = 1, \dots, 5 + 2N_v$) は次式で定義される。

$$O_j = f\left(\sum_{i=1}^{3+4N_v} w_{ij} I_i - \theta_j\right) \quad (10)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (11)$$

ここで、 w_{ij} と θ_j はニューラルネットの重みと閾値である。出力層の1~5番目のニューロンは待機(何もしない)、前に移動、後を向く、左を向く、右を向く5つの行動に対応しており、出力値に基づいたルーレット選択によって1つ選択される。同様に、6番目以降のニューロンはフェロモン v に関して、 $6+2v$ 番目が分泌することに、 $6+2v+1$ 番目が分泌しないことに対応している。フェロモンの種類ごとに出力値に基づいたルーレット選択を行い、分泌するかしないかを決定する。つまり、フェロモン v を分泌する確率は $\frac{O_{6+2v}}{O_{6+2v} + O_{6+2v+1}}$ である。

2.5 進化

アントが持つニューラルネットを進化させるために遺伝的アルゴリズム(GA)を適用する。全体の流れを図3に示す。ニューラルネットの重みと閾値をそのまま遺伝子型とする。各世代の遺伝子数(集団サイズ)は N とする。各遺伝子型の初期値は $[-0.5, 0.5]$ の一様乱数とする。遺伝子の評価値はすべてのアントが t_{\max} 回の行動を行ったとき(これをタスクと呼ぶ)

```

Initialize GA
For  $g = 1$  to  $g_{\max}$  do
  For  $n = 1$  to  $N$  do
    Initialize ant foraging
    For  $t = 1$  to  $t_{\max}$  do
      For  $k = 1$  to  $N_a$  do
        ant agent  $k$  acts according to Figure 2
      For  $n = 1$  to  $N$  do
        Select one genotype by roulette selection
        Mutate the genotype and add it to pool of next generation
    End
  End
End

```

図 3 全体の流れ

Fig. 3 The overall flow.

表 1 パラメータの値

Table 1 Parameter setting.

Ant foraging model									GA		
X	Y	N_a	t_{\max}	Q_p	γ_{eva}	γ_{dif}	S		N	g_{\max}	μ
50	50	40	1000	1	0.1	0.1	0.002		20	25000	0.05

までに巣に格納された餌の数+1とする。この評価値に基づいたルーレット選択によって次世代の遺伝子を選定する。選ばれた遺伝子には、各遺伝子座において確率 μ で $[-0.5, 0.5]$ の一様乱数を加えるという突然変異の操作を行う。上記の操作を最終世代 g_{\max} まで行う（これを試行と呼ぶ）。

3. 実験

3.1 設定

各アントの初期状態における向きは、東西南北のうちからランダムに設定される。表 1 に採餌モデルと GA のパラメータの値を示す。巣のサイズは 5×5 とし、環境の中央に位置する。 $t = 0$ で、タスクごとにランダムに選ばれた巣に重ならない 3×3 の領域に餌が 8 個ずつ（つまり合計 72 個）置かれる。 $N_v = 0, 1, 2$ についてそれぞれ 15 試行の実験を行う。

3.2 結果

3.2.1 進化ダイナミクス

まず、GA によってアントがより餌を多く獲得できるように進化したかどうか調べた。試行の後半（15001 世代から 25000 世代まで）の全タスクの餌取得数（餌が巣に格納された数）の平均を全試行について求めた。そのヒストグラムを図 4 に示す。同図から、餌取得数はばらついており、進化の程度に差があることが分かる。比較的、餌取得数が少ない試行（餌取得数が 6~12）をクラス a、多い試行（餌取得数が 14~22）をクラス b とする。フェロモンを使わない設定 ($N_v = 0$) ではすべての試行がクラス a に属しているが、フェロモンを使う設定 ($N_v \geq 1$) では、 $N_v = 1$ で 3 試行、 $N_v = 2$ で 2 試行がクラス b に属している。最も成績

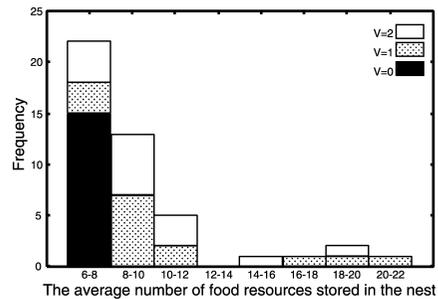


図 4 15000 世代以降の全タスクの餌取得数の平均のヒストグラム
Fig. 4 Histogram of the average number of stored food resources.

が良かったのは $N_v = 1$ の場合である。

図 5 にクラスの特徴を表す典型的な試行の餌取得数の移動平均を示す。移動平均の期間は過去 15 世代である。餌取得数は 3000 世代までに 7 から 10 程度まで急増し、その後はフェロモンの種類数 N_v の値によって推移が異なっている。 $N_v = 0$ の場合、すべての試行がクラス a に分類され、移動平均は 7 程度で推移した。 $N_v \geq 1$ の場合は、各試行は 2 つのクラスに分類された。1 つは、7 から 10 で推移する 1a と 2a の試行で、クラス a に属する。もう 1 つは、10 以上に増加する 1b と 2b の試行で、クラス b に属する。1b は 15 から 25 で振動し、2b は 7 から徐々に増加している。

この結果はまとめると以下ようになる。フェロモンを利用可能なアント ($N_v \geq 1$) は、フェロモンを利用できないアントに比べてより適応的であった。特に、1b の場合は最も良い結果となった。しかしながら、フェロモンの数を増やせば増やすほど適応的にな

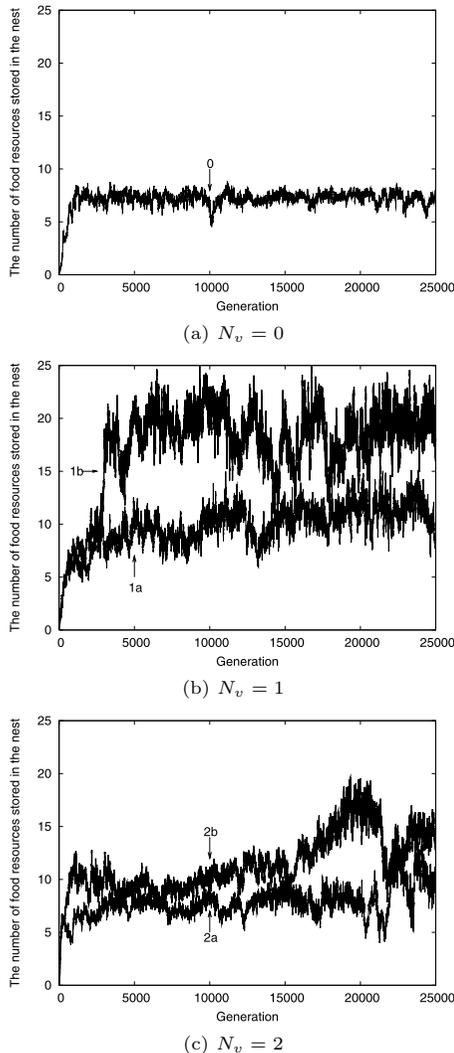


図5 餌取得数(移動平均)の推移

Fig. 5 Moving average of the number of stored food resources.

とは限らない。これは、複数のフェロモンを使った場合は、フェロモン・コミュニケーションの確立が困難であるということに起因すると推測される。より適応的とするためには、ニューラルネットの構成を含むアントの表現方法を改良したり、より洗練された進化方法を採用したりするなどが必要であると考えられる。

3.2.2 フェロモンの有効性

3.2.1 項における性能向上は、フェロモンのみの利用によってもたらされているわけではなく、フェロモンに依存しない行動の進化にも影響を受けていると考えられる。したがって、適応的なフェロモン・コミュニケーションが創発したかどうかを確かめるためには、フェロモンの利用が性能向上に寄与しているかどうか

表2 1タスクあたりの餌取得数の平均(20000世代目のアント)

Table 2 Average number of stored food resources per task in ants of the 20000th generation.

trial	normal	pheromone-inhibited
0 ($N_v = 0$)	8.8	(same as normal)
1a ($N_v = 1$)	18.9	12.3
1b ($N_v = 1$)	28.0	15.6
2a ($N_v = 2$)	14.4	13.8
2b ($N_v = 2$)	24.7	5.7

を調べる必要がある。そこで、採餌行動におけるフェロモンの有効性を検討するために、「フェロモン抑制アント」を用いて実験を行った。これは、図5に示した各試行の20000世代目($g = 20000$)のアントを取り出し、フェロモンセンサを抑制したアントのことである。フェロモンセンサの抑制とは、アントが感知するフェロモン量 $P_v(x, y)$ がつねに一定となることと定義する。これにより、フェロモンに関するニューロン(式(7))はランダムに発火することとなり、環境中に存在するフェロモンの情報を探知することはできなくなる。ここでは区別のため、フェロモンセンサを抑制する前のアントを「ノーマルアント」と呼ぶ。ノーマルアントがフェロモンセンサからの情報を有効に使っている(すなわちフェロモン・コミュニケーションを利用している)ならば、フェロモン抑制アントと比較して多くの餌を取得できるはずである。

ノーマルアントとフェロモン抑制アントが各1,000回のタスクを実行したときの餌取得数の平均値を表2に示す。フェロモンが使用可能なすべてのケースでノーマルアントがフェロモン抑制アントよりも多くの餌を取得した。これは、創発したフェロモン・コミュニケーションが採餌行動にとって有効であることを示している。注目すべきは、3.2.1 項において1bの方が結果が良かったにもかかわらず、2bは1bよりもノーマルアントとフェロモン抑制アントの餌取得数の差が大きいということである。つまり、創発したフェロモン・コミュニケーションの役割が2bの方が大きいことを意味しており、餌採行動に対する寄与が大きいフェロモン・コミュニケーションを進化によって獲得した可能性がある。

3.2.3 人手による設計との比較

創発したフェロモン・コミュニケーションがどのくらい有用なのかを調べるために、人手によって設計した図6に示すアルゴリズムで動作するアントについて実験を行い、結果を比較した。

本研究で対象としている問題では、アントは、1) 巣から餌までたどり着き、2) 餌を取得したら巣に帰るという2つの行動を行うことが求められる。このため、

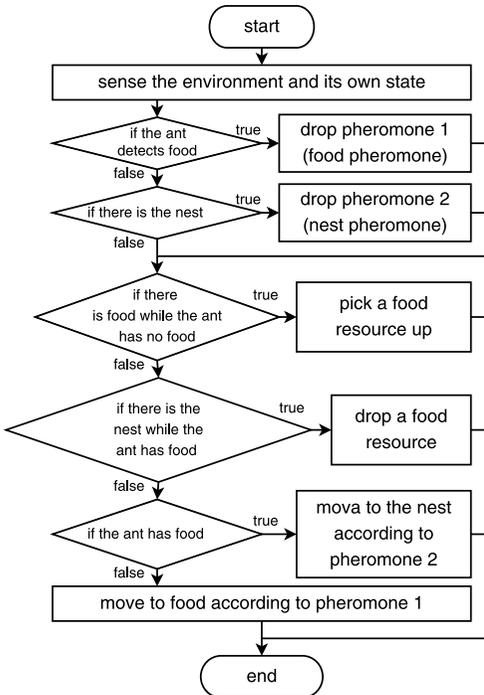


図 6 人手によって設計されたアントの振舞い
Fig. 6 Behavior of human-designed ant agents.

この2つの行動をサポートするフェロモン・コミュニケーションを組み込むことによって効率の良い採餌行動が可能になると考えられる。この考えに基づき、次の2つのフェロモンを利用する。

餌フェロモン (pheromone 1) 餌にたどり着く行動のために使われる。もしアントが餌を検知した場合、このフェロモンを分泌する。もし餌を検知しなかった場合は、このフェロモンの勾配が高い方向に移動・方向転換する確率が高まる。

巣フェロモン (pheromone 2) 巣に帰る行動のために使われる。もしアントが巣にいる場合、このフェロモンを落とす。もしアントが餌を持っている場合、このフェロモンの勾配が高い方向に移動・方向転換する確率が高まる。

このような巣フェロモンと餌フェロモンを使う設計は、Gambhir らの研究¹⁴⁾ にも見ることができる。Gambhir らは行動ルールの違いによっても餌取得数に違いが出ることを報告している。本研究でもこのことを考慮し、餌フェロモンを分泌する条件と移動・方向転換に関してそれぞれ2つのバリエーションを用意した。餌フェロモンを分泌する条件は、その場に餌がある場合 (present) と餌を保持している場合 (carrying) の2つの設定を考える。移動・方向転換は、「前に移

表 3 1 タスクあたりの餌取得数の平均 (手設計のアント)
Table 3 Average number of stored food resources per task in hand-coded ants.

	present	carrying
nondirectional	12.4	9.3
directional	7.7	11.4

動、後を向く、左を向く、右を向く」の場合 (nondirectional)、もしくはこれから後ろを向くを除いた場合 (directional) の2つの設定を考える。

餌フェロモンの分泌の設定および移動・方向転換の設定の違いによる4種類のアントについて各1,000回のタスクを実行したときの餌取得数の平均を表3に示す。この結果は、表2に示される、フェロモンを利用するアント ($N_v \geq 1$) よりも総じて少ない。つまり、創発したフェロモン・コミュニケーションは人手による設計よりも適応的ということである。

餌フェロモンを分泌する条件が present であるアントを例に、人手によって設計したアントにおける典型的な状態を図7に示す。このアントは、2種類のフェロモンが存在するときが理想的な状態 (図7(a)) である。しかし、人手によって設計したアント集団の振舞いを観察すると、特に巣と餌の距離が長い場合には、巣フェロモンを分泌するアントがいなくなったり (図7(b))、餌フェロモンがアントを誘引するまゝに蒸発してしまったりする (図7(c)) といった場合が目についた。これらの場合、アントは無駄な行動をとりがちである。これは、設計時には意図していない振舞いであり、時間とともに拡散するフェロモンを使ったコミュニケーションをアプライオリに与えることの難しさの一面を示していると考えられる。それに対して、進化によって創発したフェロモン・コミュニケーションは、このような状況に陥り難い、環境に対してロバスタな性質を持っていると推測される。

3.3 フェロモン・コミュニケーションの解析

適応的なフェロモン・コミュニケーションが創発したと考えられるアント 1b とアント 2b はどのような行動を獲得したのだろうか。比較のため、まず、フェロモンがない場合のアント (アント 0) がどのような行動ルールを獲得したのかを調べた。つまり、アントがどのような状態 (入力) のときにどのような行動を選択するのかを調べた。タスクを実行したときのすべてのアントについて、餌の有無 (I_1)、餌の保持 (I_2)、巣の有無 (I_3) の組合せの出現率 (A.R.) と、組合せに対応して選択される行動の選択率を表4に示す。W, T, B, L, R はそれぞれ「待機 (何もしない)」、「前に移動」、「後を向く」、「左を向く」、「右を向く」の選択

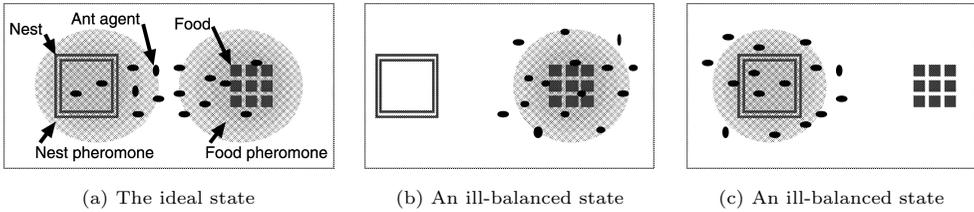


図 7 人手によって設計された 2 種類のフェロモンを使うアントにおける典型的な状態

Fig. 7 Typical states in the case of human-designed ant agents using two types pheromone.

表 4 状況の出現率と行動の選択率 (アント 0)

Table 4 Appearance rates of input patterns and appearance rates of actions in ant agent 0.

A.R.	I_1	I_2	I_3	W	T	B	L	R
84%	0	0	0	0.014	0.657	0.045	0.284	0.001
13%	0	1	0	0.000	0.676	0.000	0.234	0.091
2%	0	0	1	0.410	0.579	0.000	0.008	0.003
1%	otherwise							

率である。

アント 0 は「餌がなく餌を保持せず巣にいない状況」が 84%、「餌がなく餌を保持し巣にいない状況」が 13%であり、この両方で 97%を占める。そして、そのとき、約 66%で前に移動しそれ以外の場合はほとんど左を向くという行動をとるといことが分かる。このことから、「前に移動」と「左を向く」の組合せによって餌と巣を探索していることが分かる。そして、どちらを選ぶかという選択確率を進化によって調整してきたということが考えられる。

次に、アント 1b についても同様に、状況の出現率と対応する行動の選択率を調べた (表 5)。P1 はフェロモンを分泌する確率、NP1 は分泌しない確率である。同表より、アント 1b は「餌がなく餌を保持せず巣にいない状況」が 67%と最も多く、「餌がなく餌を保持し巣にいない状況」が 29%で、あわせて 96%である。

同表より、移動に関して、全体的に「前に移動」する確率が高いことが分かる。また、前に移動しない場合は「右を向く」行動となる確率が高い。これは、アント 0 と同様の行動ルールで、餌と巣を探索しているといえる。注目すべきは、 $I_4 = 0$ かつ $I_5 = 1$ 、すなわちアントがフェロモンの勾配を降りる方向を向いているときに「右を向く」行動となる確率が高いことである。つまり、フェロモンの量がより多い場所の周辺を移動するという傾向があるといえる。

フェロモンの分泌に関して、餌を保持しない ($I_2 = 0$) アントはフェロモンをほとんど分泌せず、餌を保持しているアント ($I_2 = 1$) は約 4 割の確率でフェロモンを分泌する。また、巣にいるとき ($I_3 = 1$) には

餌を保持していなくても約 2 割の確率でフェロモンを分泌する。

以上をまとめると、アント 1b は集団として次のような行動を行っていると考えられる。

- アントは巣にいるとき、餌を持っているときにフェロモンを分泌する確率が高まる。すなわちフェロモンの分布は巣と餌の位置をある程度反映している。
- アントはフェロモンの量がより多い場所の周辺を移動する傾向がある。すなわち、巣と餌の周辺を移動する。ただし、フェロモンに誘引される行動は絶対的なものではないため、その場にとどまるということは少ない。

つまり、アントが、1) フェロモンの分布が巣と餌の位置を適度に反映するようにフェロモンを分泌する、2) フェロモンの勾配が高い方に適度に移動する、という 2 つの行動を行うように進化した。この結果、巣から巣へ、あるいは餌から餌へという無駄な行動も生み出す反面、より悪影響の大きい、フェロモンの偏りやアントの集団行動の偏りが妨げられることによって効率的でロバストな採餌行動が可能となったのである。このことより、フェロモン・コミュニケーションが有効に働かない場合がある人手による設計よりも多くの餌を獲得することが可能になったと考えられる。

次に、アント 2b についても同様に、状況の出現率と対応する行動の選択率を調べた。アント 2b は「餌がなく餌を保持せず巣にいない状況」が 52%と最も多く、「餌がなく餌を保持し巣にいない状況」が 31%で、あわせて 84%である。移動に関しては、左側にフェロモン 1 ($v = 1$) を検知したとき ($I_{10} = 1$)、前に進む

表 5 状況の出現率と行動の選択率 (アント 1b)

Table 5 Appearance rates of input patterns and appearance rates of actions in ant agent 1b.

A.R.	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	W	T	B	L	R	P1	NP1
67%	0	0	0	0	0	0	0	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.988
	0	0	0	0	0	0	1	0.000	0.980	0.000	0.000	0.020	0.002	0.998
	0	0	0	0	0	1	0	0.000	0.994	0.000	0.000	0.006	0.000	1.000
	0	0	0	0	0	1	1	0.000	0.726	0.000	0.000	0.274	0.000	1.000
	0	0	0	0	1	0	0	0.000	0.878	0.003	0.000	0.119	0.156	0.844
	0	0	0	0	1	0	1	0.000	0.516	0.000	0.000	0.484	0.036	0.964
	0	0	0	0	1	1	0	0.000	0.527	0.042	0.000	0.431	0.000	1.000
	0	0	0	0	1	1	1	0.000	0.501	0.000	0.000	0.499	0.000	1.000
	0	0	0	1	0	0	0	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.999
	0	0	0	1	0	0	1	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
	0	0	0	1	0	1	0	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
	0	0	0	1	0	1	1	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
	0	0	0	1	1	0	0	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.022	0.978
	0	0	0	1	1	0	1	0.000	0.991	0.000	0.000	0.009	0.004	0.996
0	0	0	1	1	1	0	0.000	0.997	0.000	0.000	0.003	0.000	1.000	
0	0	0	1	1	1	1	0.000	0.824	0.000	0.000	0.176	0.000	1.000	
29%	0	1	0	0	0	0	0	0.000	0.997	0.000	0.000	0.003	0.500	0.500
	0	1	0	0	0	0	1	0.000	0.824	0.000	0.000	0.176	0.500	0.500
	0	1	0	0	0	1	0	0.000	0.932	0.000	0.000	0.068	0.306	0.694
	0	1	0	0	0	1	1	0.000	0.530	0.000	0.000	0.470	0.107	0.893
	0	1	0	0	1	0	0	0.000	0.595	0.009	0.000	0.396	0.500	0.500
	0	1	0	0	1	0	1	0.000	0.501	0.000	0.000	0.499	0.500	0.500
	0	1	0	0	1	1	0	0.000	0.441	0.125	0.000	0.434	0.483	0.517
	0	1	0	0	1	1	1	0.000	0.500	0.000	0.000	0.500	0.418	0.582
	0	1	0	1	0	0	0	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.500	0.500
	0	1	0	1	0	0	1	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.500	0.500
	0	1	0	1	0	1	0	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.069	0.931
	0	1	0	1	0	1	1	0.000	0.995	0.000	0.000	0.005	0.013	0.987
	0	1	0	1	1	0	0	0.000	0.999	0.000	0.000	0.001	0.500	0.500
	0	1	0	1	1	0	1	0.000	0.902	0.000	0.000	0.098	0.500	0.500
0	1	0	1	1	1	0	0.000	0.967	0.000	0.000	0.033	0.374	0.626	
0	1	0	1	1	1	1	0.000	0.563	0.000	0.000	0.437	0.170	0.830	
3%	0	0	1	0	0	0	0	0.000	0.814	0.185	0.000	0.000	0.395	0.605
	0	0	1	0	0	0	1	0.000	0.962	0.000	0.000	0.038	0.196	0.804
	0	0	1	0	0	1	0	0.000	0.529	0.465	0.000	0.006	0.000	1.000
	0	0	1	0	0	1	1	0.000	0.650	0.000	0.000	0.350	0.000	1.000
	0	0	1	0	1	0	0	0.000	0.449	0.447	0.000	0.104	0.493	0.507
	0	0	1	0	1	0	1	0.000	0.508	0.000	0.000	0.492	0.462	0.538
	0	0	1	0	1	1	0	0.000	0.345	0.345	0.000	0.309	0.000	1.000
	0	0	1	0	1	1	1	0.000	0.500	0.000	0.000	0.499	0.000	1.000
	0	0	1	1	0	0	0	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.137	0.863
	0	0	1	1	0	0	1	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.031	0.969
	0	0	1	1	0	1	0	0.000	0.999	0.001	0.000	0.000	0.000	1.000
	0	0	1	1	0	1	1	0.000	0.999	0.000	0.000	0.001	0.000	1.000
	0	0	1	1	1	0	0	0.000	0.981	0.018	0.000	0.000	0.438	0.562
	0	0	1	1	1	0	1	0.000	0.982	0.000	0.000	0.018	0.275	0.725
0	0	1	1	1	1	0	0.000	0.753	0.243	0.000	0.004	0.000	1.000	
0	0	1	1	1	1	1	0.000	0.745	0.000	0.000	0.255	0.000	1.000	
1%	otherwise													

確率が高く、それ以外 ($I_{10} = 0$) は左を向く確率が高い。フェロモンの分泌に関しては、前方にフェロモン 0 ($v = 0$) を検知したとき ($I_4 = 1$) は、9 割以上の確率でフェロモン 0 を分泌し 1 割以下の確率でフェロモン 1 を分泌する。これ以外 ($I_4 = 0$) はどちらのフェロモンも約 5 割の確率で分泌する。

以上をまとめると、アント 2b は集団として、巣からの距離を徐々に伸ばしながら、巣を中心に左回りに移動するという行動を行うことによって、より多くのアントが餌にたどり着くようにしている。しかし、餌を保持したアントが効率良く巣にたどり着くための手段を備えておらず、このことが餌取得数がアント 1b

よりも少ない原因であると考えられる。2種類のフェロモンが使える設定 ($N_o = 2$) において適応的な行動が現れなかった原因として、次の2つが考えられる。

- (1) 1種類のフェロモンが使える設定 ($N_v = 1$) と比較して、2種類のフェロモンが使える設定 ($N_v = 2$) は遺伝子長が長くなり、遺伝子の探索空間が広がったため、適応的な遺伝子が現れにくい。
- (2) 手設計の結果から示唆されるように、2種類のフェロモンの使い分け自体が必ずしも良い解であるとは限らない。

4. おわりに

本論文では、フェロモン・コミュニケーションの進化に関する蟻の採餌行動モデルを構築し、計算機実験を行った。実験の結果、最も適応的となったアントは、巣と餌の配置と対応して分布する1種類のフェロモンを使うもので、人手によって設計されたアントの2倍以上の餌を取得する可能性があることが示された。

計算機実験の結果は次のようにまとめられる。

- 創発的なフェロモン・コミュニケーションは適応的になりうる。しかしながら、フェロモンの種類を増加させればさせるほどフェロモン・コミュニケーションは適応的になるとは限らない。
- 創発したフェロモン・コミュニケーションは人間が設計したものよりも優れたものになりうる。これは、進化によって人手による設計を超える巧妙なフェロモン・コミュニケーションが創発したことを示唆する。

フェロモン・コミュニケーションを言語的なコミュニケーションと考え、発せられた記号が動的に変化するという難しい問題である。しかし、発信者と受信者の完全なコミュニケーションはそもそもありえず、コミュニケーションの本質の一面でもある。人手による設計があまりうまくいかないのは、コミュニケーションというものを記号的にとらえがちになってしまうため、そのような定義に忠実な行動をさせると、フェロモン分布の複雑な動的パターンに対してロバストでない行動を生み出すからである。

巣の場所に関する情報、および、餌の所在に関する情報を複数のフェロモンを使用して効率的に伝えることができれば、それに越したことはないはずであるが、2種類のフェロモンを使い分ける人手による設計のアントの実験では、アントの集団行動とフェロモン分布の両者がお互いに影響しあうために、複数のフェロモンがバランス良く働く状態の実現が難しいことが示さ

れた。効率の良い採餌行動を行うためには、アントの行動とフェロモン分布の偏りを調整する機構が必要であるということが示唆される。一方、1種類のフェロモンの進化実験では、アントが、1) フェロモンの分布が巣と餌の位置を適度に反映するようにフェロモンを分泌する、2) フェロモンの勾配が高い方に適度に移動する、という2つの行動を行うように進化した結果、フェロモンの偏りやアントの集団行動の偏りが妨げられ、2種類のフェロモンを使い分ける人手による設計の性能を大きく上回る可能性があることが示された。

また、2種類のフェロモンを使った進化実験の性能は1種類のフェロモンを使った場合より劣るものであった。実験結果から、フェロモンの種類の増加はただちに性能向上に結び付かない困難性があることが示唆される。上記のような手設計の場合と同様な困難性が存在するため、原理的に上回るの不可能なのであろうか。あるいは、より高度なアントの表現方法やより洗練された進化方法を採用することにより、手設計ではありえないような柔軟なコミュニケーションシステムが実現される可能性もある。フェロモンごとの段階的な創発を促すメカニズムと適切なタスク（環境）と学習や進化などのメカニズムの組合せを想定した実験を行うことが今後の検討課題である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE 「計算科学フロンティア」の援助による。

参考文献

- 1) Hölldobler, B. and Wilson, E.O.: *The Ants*, Belknap Press (1990).
- 2) Deneubourg, J.-L., Aron, S., Goss, S. and Pasteels, J.-M.: The Self-Organizing Exploratory Patterns of the Argentine Ant, *Journal of Insect Behavior*, Vol.3, pp.159-168 (1990).
- 3) Bonabeau, E., Dorigo, M. and Theraulaz, G.: *Swarm intelligence: From natural to artificial systems*, Oxford University Press (1999).
- 4) 有田隆也：人工生命，改訂2版，医学出版（2002）。
- 5) 車谷浩一：蟻コロニーにおける協調採餌行動のマクロモデルの生成（1），人工知能学会誌，Vol.15, No.9, pp.829-836（2000）。
- 6) 車谷浩一：蟻コロニーにおける協調採餌行動のマクロモデルの生成（2），人工知能学会誌，Vol.15, No.9, pp.837-843（2000）。
- 7) Dorigo, M.: *Optimization, Learning and Natural Algorithms*, Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano (1992).
- 8) Bonabeau, E., Dorigo, M. and Theraulaz, G.: *Inspiration for Optimization from Social Insect*

- Behaviour, *Nature*, Vol.406, pp.39–42 (2000).
- 9) Payton, D., Daily, M., Estkowski, R., Howard, M. and Lee, C.: Pheromone Robotics, *Autonomous Robots*, Vol.11, No.3, pp.319–324 (2001).
- 10) Collins, R.J. and Jefferson, D.R.: AntFarm: Towards Simulated Evolution, *Artificial Life II*, Langton, C.G., Taylor, C., Farmer, J.D. and Rasmussen, S. (Eds.), pp.579–601 (1992).
- 11) 川村秀憲, 山本雅人, 大内 東: 外部観測の基づく進化的フェロモンコミュニケーションの評価と群知能の創発に関する研究, 計測自動制御学会論文集, Vol.37, No.5, pp.455–464 (2001).
- 12) Nakamichi, Y. and Arita, T.: An Evolutionary Simulation of the Origin of Pheromone Communication, *Proc. 5th International Conference on Simulated Evolution and Learning*, pp.1–6 (STP–1–93) (2004).
- 13) Panait, L. and Luke, S.: Ant Foraging Revisited, *Proc. 9th International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALIFE9)*, pp.569–574 (2004).
- 14) Gambhir, M., Guerin, S., Kauffman, S. and Kunkle, D.: Steps toward a possible theory of organization, *Proc. International Conference on Complex Systems 2004* (2004).

(平成 16 年 12 月 1 日受付)
 (平成 17 年 5 月 14 日再受付)
 (平成 17 年 9 月 19 日再々受付)
 (平成 17 年 9 月 27 日採録)



中道 義之

1977 年生。2000 年沼津工業高等専門学校専攻科修了。2002 年名古屋大学大学院人間情報学研究科博士課程（前期課程）修了。現在、同大学院博士課程（後期課程）在学中。



有田 隆也（正会員）

1960 年生。1983 年東京大学工学部計数工学科卒業。1988 年同大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。名古屋工業大学講師，カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員を経て，現在，名古屋大学大学院情報科学研究科教授。人工生命や情報科学の研究に従事。複雑適応系，言語の進化，進化的計算論等に興味を持つ。人工知能学会，電子情報通信学会，日本認知科学会，日本数理生物学会各会員。