

# 蟻の行列の形成と崩壊

Ryu Fujiwara

## I. 概要

蟻は状況に応じて多種多様なフェロモンを放出して、互いに情報を伝達しあう。フェロモンはコミュニケーションの媒体となっている。情報を共有した蟻は社会的なふるまいを見せる。興味深い例として、蟻は2種類のフェロモンを巧みに使い分けて、巣から餌のある場所まで行列を形成する行動を見せる。本プログラムでは、個々の蟻が状況によってその状態を変えながら行動する様子をシミュレートする。結論として、時間の経過によって行列のできる過程について調べる。また、更なる時間経過によって行列が自然に崩壊する様子についても考察する。

## II. 本文

蟻は行動する毎に様々なフェロモンを放出し、他の蟻へと情報を伝えたり、他の蟻の残したフェロモンを通じて情報を得たりすることでコミュニケーションを行う。蟻は集団の中でフェロモンを通じて他の個体と互いに影響を及ぼしあいながら、社会性を成す。蟻の社会性を見ることができる顕著な例として、蟻の巣から餌場への行列の形成が挙げられる。

蟻は餌を探す際、揮発性の高い足跡フェロモンと揮発性の低いリクルートフェロモンという2種類のフェロモンを使い分ける。何も情報が身の回りにはない状態では、足跡フェロモンを放出しながら闇雲に歩き回る。あちらこちらと歩いているうちに餌場を見つけたら、今度はリクルートフェロモンを放出しながら、より足跡フェロモンの残された方向へと歩みを進め、巣を目指す。このように帰巣する際に残すリクルートフェロモンが他の蟻にとっての餌への道標となる。以上のように蟻一匹一匹がそれぞれの規則に従い動くことで、巣穴から餌場までの行列ができあがる。

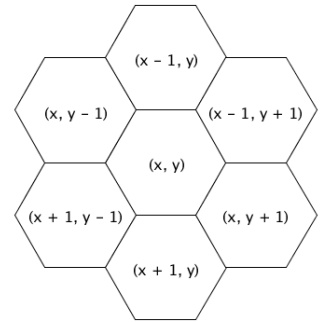
本シミュレーションでは蟻の以上のような習性を再現し、観察する。以下、II-1ではこのシミュレーションにて使われるプログラムの説明を述べ、II-2では本シミュレーションにて得られた結果とその分析について考察する。最後に、IIIではまとめと今後の課題について記す。

## II - 1 方法

### (1) プログラムの概要

蟻はハニカム構造の座標上をフェロモンの状態に従い確率的に動く。以下ではハニカム構造の座標を六角格子と呼ぶ。六角格子上の座標は中心の座標を $(0, 0)$ とし、その外側の座標は図1のように漸化的に決定される。 $(0, 0)$ を0殻目、その1つ外側を1殻目のように、漸化的に決定されたL\_MAX殻の内部を蟻は動く。

図1 六角格子の漸化的な座標の決定法



### (2) 蟻の構造

蟻1匹1匹はその構造体の変数として、六角格子上の座標  $p(x, y)$ 、向いている方向 **direction**（上方向を0として時計回りに5まで割り振られている）、以下に記述するような状態(mode)、体力 **vitality**、フェロモンを判断する閾値 **threshold**、餌を見つけたかどうかを記憶する変数 **hasFood** と帰巢したかどうかを記憶する変数 **hasComeBack** を持つ。

### (3) 蟻の状態と状態

それぞれの座標には蟻の移動によって放出される足跡フェロモンとリクルートフェロモンがそれぞれ独立して蓄積する。また、蟻は **direction** 方向とその左右方向を合わせた3つの方向にのみ動く事ができる。それぞれの蟻が3方向の中からどの方向へ進むかは、以下の3状態によって確率的に定められる。

#### (a) 状態1（ランダム移動状態: mode = 1）

全ての蟻はこの状態で巣から出現する。この状態では蟻は3つの方向のどれかへ一様な確率で移動する。移動先の座標に足跡フェロモンを **PHEROMON\_RELEASE\_ONE** で定められた量だけ放出する。もし **threshold** で定められた量以上のリクルートフェロモンがその座標か周囲6座標に存在すれば、状態2へ移行する。また移動先の座標に餌があると、状態3へ移行する。

#### (b) 状態2（フェロモン探索状態: mode = 2）

この状態では蟻は3方向を確率変数 **D** とした以下のような確率関数に従って、

進む方向を決定する。

$$P(D = d) = \frac{\exp\{\frac{16 * p_d}{N_0}\}}{N_1}$$

なお、 $p_d$ は方向  $d$  にあるリクルートフェロモンの量、 $N_0$  と  $N_1$  は正規化因子である。この状態においても、`PHEROMON_RELEASE_ONE` で定められた量の足跡フェロモンを移動先の座標に放出する。もし移動先の周辺 6 座標のリクルートフェロモンの量全てが `threshold` を下回った場合、状態 1 へ移行する。また、移動先に餌があったら、状態 3 に移行する。

#### (c) 状態 3 (帰巣状態)

この状態でも状態 2 と同様に上記の確率関数に従い移動先を決定する。しかし、状態 3 の場合では  $p_d$  を方向  $d$  にある足跡フェロモンの量とする。また、移動先の座標が巣である(0, 0)であれば、帰巣が成功したと見なす。また、この状態では `PHEROMONE_RELEASE_TWO` で定めた量のリクルートフェロモンを放出する。

#### (d) 2 種類のフェロモン

足跡フェロモンとリクルートフェロモンは時間経過と共に蒸発と、その周辺 6 座標へ拡散する。各座標に存在するそれぞれのフェロモンは `EVAPORATE_COEF` で定められる 0 以上 1 以下の実数が毎ステップ毎にかけられる。また `DIFFUSION_COEF` にて定められる量だけ周辺 6 座標へと拡散する。

#### (4) プログラムの流れ

まず `FOOD_NUM` 個分の餌を六角格子上のランダムな点に配置する。次に `ANT_NUM` 匹の蟻の状態を初期化し、時間差をもちながら中心から出現させる。初期化とは、座標を(0, 0)、`direction` を 0 ~ 5 のランダムな整数、`vitality` を予め定めた  $N$ 、`threshold` をランダムに敏感か鈍感かに 2 分して与え、`hasFood` と `hasComeBack` を両方 0 とすることをいう。出発したそれぞれの蟻は互いに独立しながら、それぞれの状態に従って動き続ける。もし蟻が帰巣することなく  $N$  ステップ移動した場合はその蟻は死滅したとし、状態を初期化して巣から新たな蟻を出発させる。また、餌を得て帰巣に完了した場合も状態を初期化し

て再度出発させる。このようにして、MAX\_PROCEDURE ステップ内で帰巢に成功した蟻の数と、出現した蟻の総数を記録する。

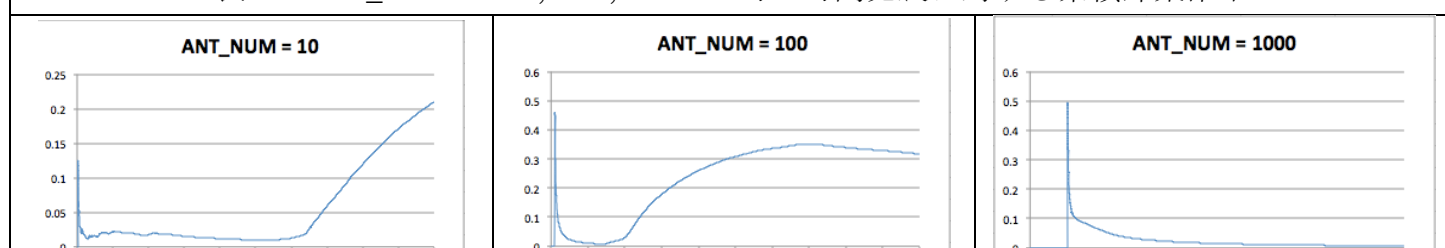
## II - 2 結果

まず蟻の3つの状態それぞれでの分布と2つのフェロモンの分布について言及する。シミュレーションが開始すると、全ての蟻は状態1で巣から飛び出す。状態1においてはランダムな行動を示しながら足元に足跡フェロモンを放つため、巣を平均とした正規分布上に足跡フェロモンを分布させる。餌を見つけると、状態3に切り替えて足跡フェロモンの多い中心へ、リクルートフェロモンを放ちながら向かう。こうして餌場から巣までをつなぐ道にリクルートフェロモンが溜まる。リクルートフェロモンが十分に溜まると、巣穴から出てきた蟻は即座に状態2に切り替わり、リクルートフェロモンの多い方へと進む。状態2の蟻が餌場へ進む際にも足跡フェロモンを放出し続けるので、餌への道に段々足跡フェロモンが蓄積する。このようにして、巣穴から餌へと行く道筋ができ、蟻はその道の上を適当なフェロモンを追って行列を形成するのである。

では、具体的なシミュレーションを行った結果と分析を以下に記す。まず  $L\_MAX = 5$ 、 $MAX\_PROCEDURE = 10000$ 、歩数の上限10にてフェロモンの認知の閾値を敏感な個体を15.0、鈍感な個体では30.0、足跡フェロモンの蒸発係数を0.997、リクルートフェロモンの蒸発係数を0.999として、蟻の匹数を  $ANT\_NUM = 10, 100, 1000$  と変え、観察を行った。餌の位置は(4, 2)に固定している。表2が  $ANT\_NUM$  を変えた時の、ステップ数に対して、累積の帰巢確率を示すグラフである。 $ANT\_NUM = 5$  以外の場合で見受けられるのが、早い段階での確率の急な上昇である。これは状態1においてランダムに行動するが、一度餌を見つけるとほぼ足跡フェロモンがよりある巣へとほぼ1直線に帰ることができることに起因している。また、 $ANT\_NUM = 1000$  では一斉に蟻が広がってしまい、狭い中ですぐにフェロモンを蓄積させてしまったがために行列を形成することはなかった。

次に、 $ANT\_NUM = 10, 100$  に着目する。これらの場合、行列が形成される

表2  $ANT\_NUM = 10, 100, 1000$  の時の時間発展に対する累積帰巢確率



ことで、巣から餌までの道筋ができ、帰巣に成功する確率が上昇しているのが見られる。しかし、その上昇率は減少方向にある。ANT\_NUM = 100 では 7000 ステップを境に、帰巣確率が減少し始めるのである。

ではこの境目で何が起きているかを検証するために、条件を変えて観察する。L\_MAX = 50, MAX\_PROCEDURE = 45000、歩数の上限を 150、蟻の数を 100 匹にし、その他のフェロモンの閾値や蒸発係数は上記と同様にする。

図 3 はそれぞれの時点での蟻の様子を可視化したものである。なお、白い印は状態 1、赤が状態 2、緑が状態 3、青いマークが餌を表している。また、表 4 はステップ数に対して、累積の帰巣確率についてのグラフである。縦線は図 3 がどの時点で撮影されたものかについて表している。

図 3 からわかるように、図 3-1 から図 3-2 にかけて一旦蟻の行列は形成されたものの、図 3-3 から図 3-6 にかけて行列の幅が段々と広くなり、図 3-7 では行列は崩壊している。

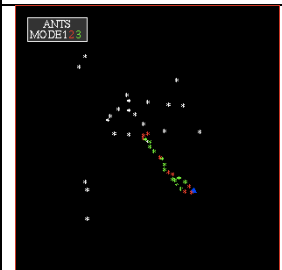
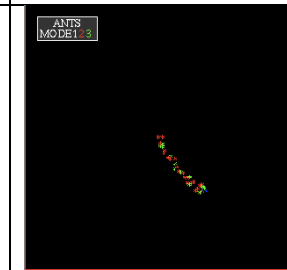
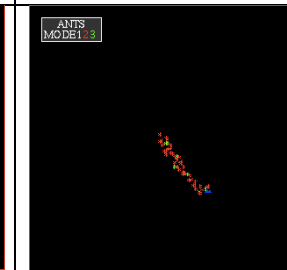

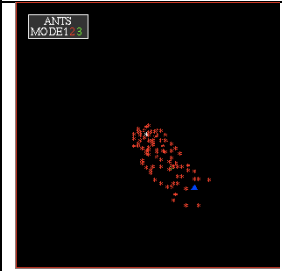
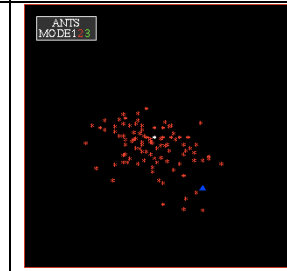
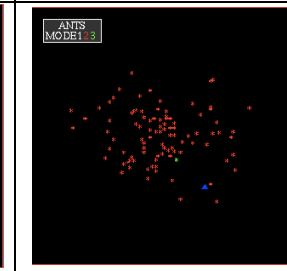
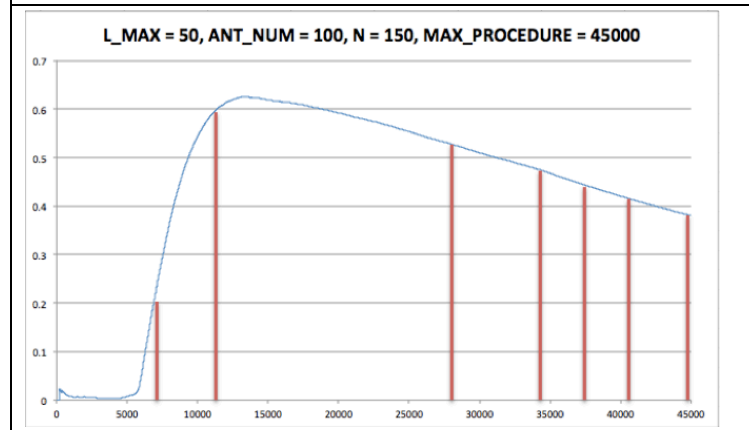
図 3 ANT_NUM = 100、L_NUM = 50 の時の時間毎の蟻の分布			
図 3-1: 6500 ステップ	図 3-2: 12000 ステップ	図 3-3: 27500 ステップ	図 3-4: 34500 ステップ
			
図 3-5: 37500 ステップ	図 3-6: 41000 ステップ	図 3-7: 45000 ステップ	
			

表 4 : ANT\_NUM = 100、L\_NUM = 5 の時の時間  
発展と累積帰巢確率の関係



このような行列の崩壊は状態 2 と状態 3 における方向決定の確率の計算に起因している。状態 2 と状態 3 における確率は

$$P(D = d) = \frac{\exp\{\frac{16 \cdot p_d}{N_0}\}}{N_1}$$

で表され、 $\frac{16 \cdot p_d}{N_0} \in [0, 16]$  の間で計算される。よって、フェロモンが全体的に増えれば増えるほど 3 方向への確立は均等化する。よって、蟻の行列の中で横道に反れる蟻が現れると、その方向へと他の蟻も広がっていき、次第に行列がくずれてしまうのである。

### III. まとめ

本シミュレーションでは蟻の行列が形成される様子とそれが崩壊する様子を観察し、このような振る舞いを見せる理由について考察した。フェロモンによって情報を伝達しあうことで徐々に行列が形成され、さらなる時間の経過によって行列から反れる蟻によって行列が崩壊する様子も見て取れた。しかし、実際の蟻はフェロモンだけではなく光量に導かれるように歩く習性もあるので、これを勘案することで更に良質なシミュレーションを実現することができるであろう。また、このような蟻のシミュレーションは最適化のアルゴリズムの 1 つである蟻コロニー最適化に 응용されている。解を探索する様子を適当なフェロモンを放出しながら歩きまわる蟻に見立て、最適な解を見つける手段である。今回見たような行列の崩壊は蟻コロニー最適化の脆弱性を指摘することに他ならない。確率的に蟻を動かす以上、細心の注意を払う必要がある。