ランダムウォークを利用した
蟻の帰巣メカニズムの検証

武蔵野大学工学部数理工学科
上山大信

1．研究の要約

蟻が巣から出て、巣の周りをランダムウォーク[1]する際に、地面にフェロモンを足跡のように残すと仮定する。そのような蟻が数多く存在する場合、巣を中心とした蟻の分布は正規分布に近くなる[1]。よって、その蟻の集団が残す足跡の分布は巣の近くで高くなり、巣から離れたところでは低くなると予想される。本研究では、蟻の移動シミュレーションを用いて、巣から出発した蟻が足跡フェロモンを地上に残すことで、到達先から帰巣する際に、足跡フェロモン濃度（足跡数）がより高い方向に移動すれば、高い確率で帰巣できることを示す。

2．研究の動機と目的

蟻は巣から餌を求めて旅立ち、餌を発見すると巣に戻る。あたりまえの事に思えるが、餌を求めて移動するその探索範囲が半径最大 500 メートルという事を考えると[2]、そのような遠方から正確に巣に戻ることは困難であるように思われる。このような蟻の帰巣行動について、フェロモンを足跡のように残すことで巣から遠く離れたところから巣に迷うことなく戻ることができるといわれている[3]。ここでは、足跡フェロモンを用いた蟻の帰巣に関して、コンピュータシミュレーションによってその可否を検証する。

3．方法

蟻は比較的単純な生物であると考えられるが、その動きを精密に再現する事は困難である。行列を形成している蟻の集団の動きはとてもランダムウォークとは言えないだろう。しかしながら、餌を探索している蟻の動きは[1]にも無秩序

---

[1] ランダムウォークは、次に移動する方向が確率的に無作為（ランダム）に決定される運動である。

と表現されているので、ランダムウォークで表現しても良いだろう。ここではできるだけ単純なモデルを構築し、その解析から本質的なメカニズムを知る事を中心課題とする。

3.1. モデル化

実際の蟻を精密にモデル化するのではなく、概念的なものとして捉えたモデルを構築する。蟻が移動する平面は格子状に区切られており、蟻は格子上を離散的に移動すると考える（図 1）。移動方向は、東西南北に限られ、その移動方向はランダムで等方的[2]であると仮定する。巣から数多くの蟻が出てきて、同時にランダムウォークしつつ、移動先の格子上に足跡フェロモンを一定量落とす。十分な数の蟻がこのような動きを複数回繰り返せば、巣の周りに足跡フェロモンの分布が創り上げられるであろう。本研究では、その分布の特徴とそれを用いた蟻の帰巣について調べる。

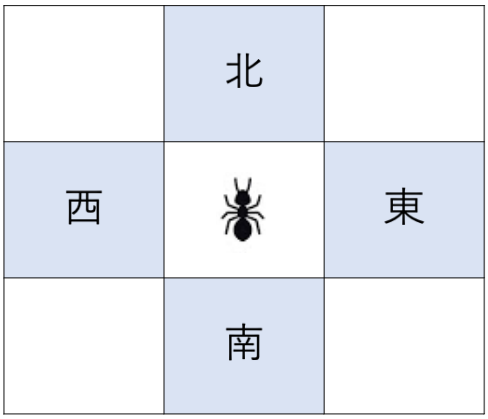

図 1：蟻の移動ルール

3.2. アルゴリズム

蟻は格子上をランダムに移動する。また、一つの格子はある一定の面積を持つと仮定し、1 格子上に複数の蟻が存在する事を許すことにする。蟻は時刻 0 において巣から同時に N 匹が出てきて M 回ランダムウォークするが、各蟻は現在位置に足跡フェロモンを残し、ランダムに近接四方向に必ず移動する。足跡フェロモンは個体間の差異はなく全て同じものであるとし、格子上の変数でその数（量）

[2] 移動確率が方向によらないこと。

を管理する。格子上の足跡フェロモン数は初期状態では全て 0 とする。まとめると、次の様なアルゴリズムとなる。

【バーチャル蟻のアルゴリズム】

1. 蟻を巣の位置（場の中心）にN匹発生させる
2. 格子上の足跡フェロモンを全て0にする
3. 以下をM回繰り返す
    - 3-1. 全ての蟻について、現在位置の足跡フェロモン数を1つ増やす
    - 3-2. 全ての蟻をランダムに移動させる
4. 最終的な蟻および足跡の分布をファイルに出力する

バーチャル蟻のアルゴリズムを Processing[4]にて実装し、シミュレーション実験を行う。ここでは二つの変数M, Nについて、移動回数 M は 100 に固定し、蟻の数 N を変化させることにする。領域サイズについては移動回数Mを考慮し、2M×2M の格子を用意し、その中心に巣を配置する。この設定では、領域外に蟻が到達することはないので、境界での処理は考える必要がない。但し、データとして出力する蟻および足跡の分布は、図の見やすさを考慮して巣から±20格子分を出力し可視化した。

4. 結果と考察

前章にて示したアルゴリズムに従った Processing によるプログラムを作成し、最終状態の蟻および足跡の分布データを CSV ファイルとして出力した。それらを、Microsoft Excel を用いて可視化した。

4.1. 蟻の分布と蟻の総数Nの関係

ここでは、蟻の総数 N を変化させ、巣から出発した蟻がランダムに M 回（ここでは 100 回に固定する）移動したときの分布を見る。N が十分大きいときには、分布は巣を中心に正規分布になると考えられるが[1]、N が小さい場合にはその限りでは無い。ここではN = 100, 1000, 10000 の場合について、分布を示す（図2)。

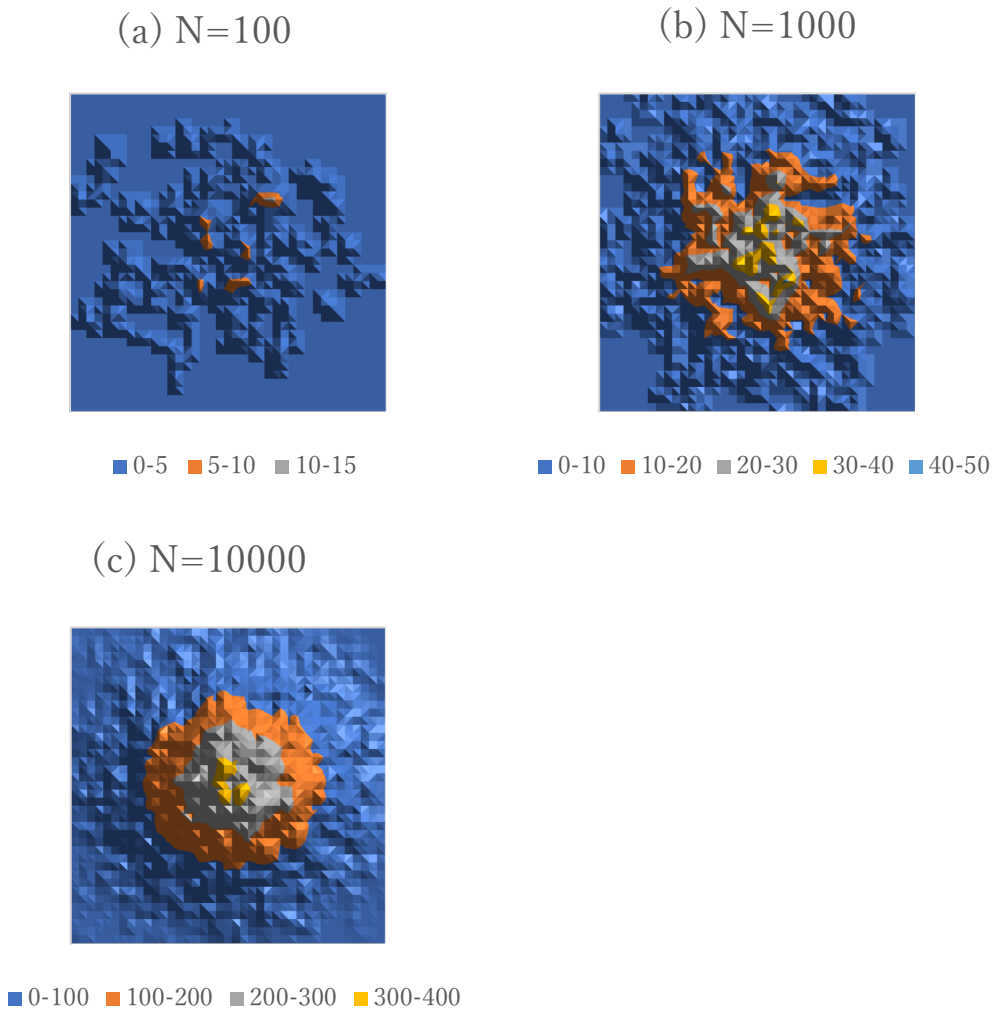

図２：時刻 M = 100 における蟻の分布。各図の格子の色は、各格子上の蟻の数の範囲（各図の下の凡例に対応）を表す。(a) N = 100 では、図の中心付近に蟻が多い傾向はあるが、その分布はでこぼこしている。(b) N = 1000 では、巣の周りの蟻の数が多いが、局所的な最大値点が複数見られる。(c) N = 10000 では、巣の近くに最大値点があるが、必ずしも一点とはならない。

図２をみると、蟻の総数 N が大きくなるにつれて、その分布は正規分布に近くなり、巣の周りの蟻の数が多くなることがわかる。但し、N = 10000 においても、一般に巣の位置が単独の最大値となる事はなかった。

4. 2.　蟻の足跡分布と蟻の総数 N の関係

前節 4. 1. で見たように、蟻の分布は N が小さいときには正規分布に近いとはいえず、局所的な最大値点を多く持つ分布となり、巣の位置が単独の最大値点とな

る分布にはならなかった。N が 10000 では、ほぼ正規分布となったが、巣の位置が全体の最大値点とは必ずしもならなかった。それでは、足跡の分布についてはどうであろうか。前節と同様に、N = 100, 1000, 10000 の場合について、足跡分布を等高線表示によって示す（図３）。

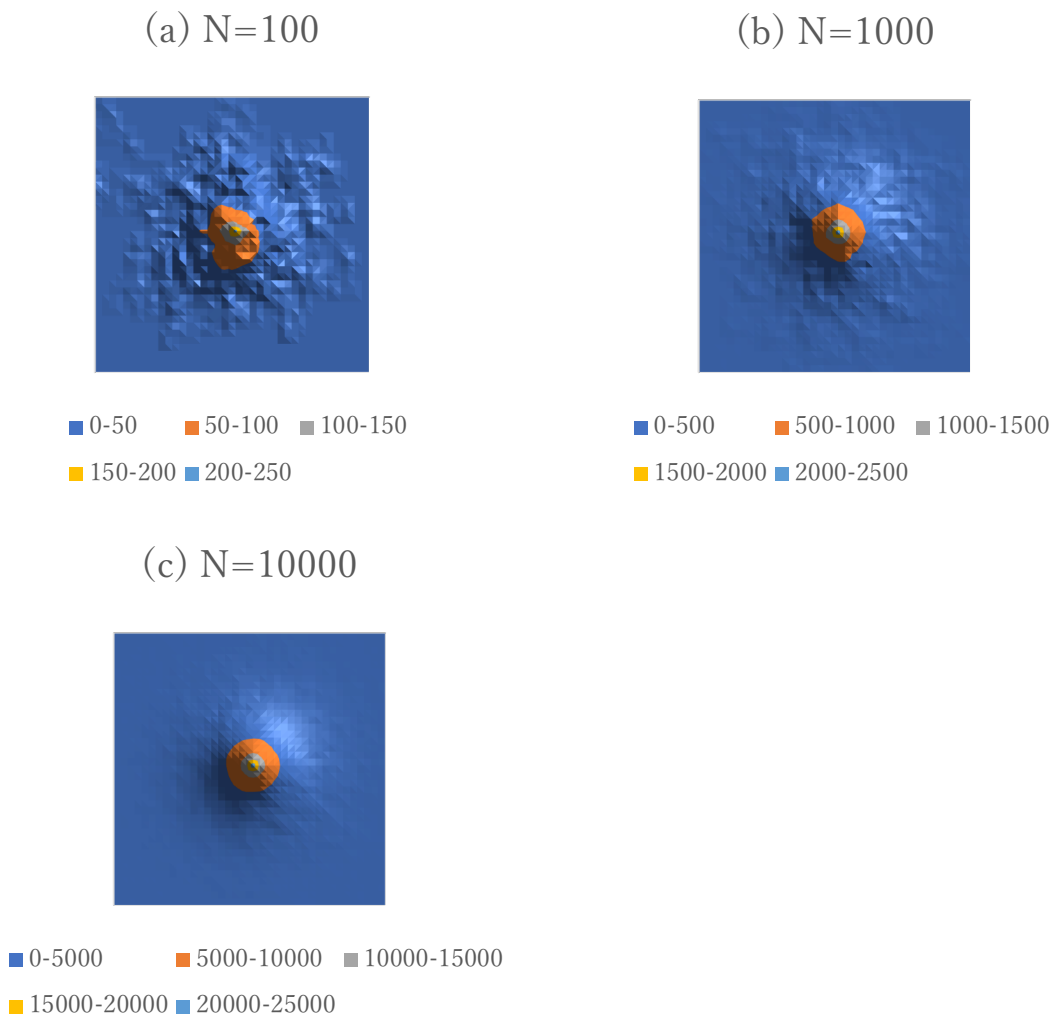

図３：時刻 M = 100 における蟻の足跡分布。各図の格子の色は、各格子上の蟻の足跡数の範囲（各図の下の凡例に対応）を表す。(a) N = 100 においても、巣を最大値点とする分布となった。(b)(c)蟻の数が多くなるにつれ、分布はなめらかになる。N = 1000 では、局所的な最大値点が複数みられるが、N = 10000 においては、それも殆ど存在しない。

図３からわかるように、足跡分布は蟻の分布と異なり、巣を最大値点とする対称性の高い分布が N = 100 においても得られる。しかしながら、帰巣を考える

と分布に局所的な最大値点（以降 LM と呼ぶことにする）が存在する為、帰巣に失敗する可能性がある。なぜなら、そのような地点に到達した蟻は、足跡が自身の位置より多い方向を見つける事ができず、移動できなくなってしまうからである。一方で、図からはそのような LM の個数は N が大きくなるにつれて少なくなるように見える。LM の存在は、帰巣行動の失敗に直接関係する為、LM がどの程度生じるかを次の実験で確認する。

4.3. 足跡分布の考察

前節 4.2. において、足跡の分布は蟻の総数 N が比較的小さい値でも巣の位置が最大値となる分布になる事がわかった。続いて、蟻が帰巣行動に足跡の分布を用いる場合、帰巣に失敗する可能性について考察する。蟻は、M 回のランダム移動後の最終到達位置から帰巣を始めるが、その際に自分の位置の東西南北について足跡数を調べ、一番多く足跡がある方向に移動する。もしも、巣の位置が領域全体における足跡数の最大値点であって、他に局所的な最大値点(LM)が存在しなければ必ず帰巣に成功するだろう。よって、巣の位置以外に LM がいくつ存在するかを調べれば良いと考えた。それを調べるために、蟻の総数 N に対して異なる足跡の分布を 500 回作成し（蟻の移動はランダムである為、できあがる足跡分布は全て異なる）、巣の位置を含めた局所的な最大値点の平均個数（以下 NLM と書く）を計算した。次の表 1 がその結果である。

表 1

	N = 100	N = 1000	N = 10000
NLM（局所的最大値点の個数の平均値）	42.478	46.416	40.708

表 1 によると、NLM は、N が変化しても殆ど変わらないようである。N が大きいほど巣の位置以外の LM が少なくなるだろうと予想していたが、それは正しくないようである。更に N = 100000 について同様の実験をすると、NLM は 35.714 となった。このことから、更に N を大きくすると、NLM は少なくなる可能性はあるが、その減り方は遅いようである。

つづいて LM の位置に注目する。LM は領域のどの位置に存在するのだろうか？次の表 2 は、LM の位置を示す図と、それらの巣からの平均距離を示している。

表 2

	N = 100	N = 1000	N = 10000
LM の分布			
巣からの平均距離	12.60	16.37	22.86

表 2 より、蟻の総数 N が大きくなるにつれて、LM は巣から遠いところとなる事がわかる。巣から遠い場所では、図 2、図 3 で見たように、蟻の数、足跡の数ともに少なく、ゆらぎが大きいと考えられ、このような LM が生じると考えられる。一方で、LM が存在する場所近くには、そもそも蟻が少数しか存在していないため、これらの LM の影響を受けて帰巣に失敗する蟻の総数は少ないであろう。また、蟻の総数 N に対して、NLM はほぼ一定であったことから（表 1)、N が十分大きければ帰巣に失敗する蟻の率は小さくなると予想される。

4.4. 帰巣行動のシミュレーション

前節の予想、すなわち N が十分大きければ、帰巣に失敗する蟻の率は低いことを確認するために、足跡分布を用いた蟻の帰巣行動をプログラムに追加し、シミュレーションにて確認する。帰巣のアルゴリズムは、蟻の現在位置に対して東西南北方向の足跡数を確認し、現在位置の足跡数に対して、足跡数が真に多くかつ一番足跡数が多い方向に移動する。そのような方向が見つけられない場合、すなわち自身の位置が LM であるとき、その位置が巣の位置に一致すれば帰巣が成功したとし、そうでなければ帰巣に失敗したとする。このアルゴリズムに従って、巣からランダムウォークで移動した蟻を帰巣させ、帰巣に失敗した蟻の数と、全体数に対する率を計算し、表にまとめたものが表 3 である。なお、この表は、100 回のシミュレーションの平均をとったものである。

表 3

	N = 100	N = 1000	N = 10000
帰巣に失敗した蟻の数	66.07	141.51	141.92
帰巣失敗率	0.6607	0.14151	0.014192

表 3 から、帰巣失敗率は N が大きい場合には大変低くなる事がわかる。帰巣に失敗した蟻の数は、N が増えると多くなる傾向が見られるが、N = 100000 では、帰巣に失敗した蟻の数は 129.41 であり、帰巣失敗率は 0.0012941 と、ほぼ 0 となったことから、必ずしも N に連動して増えるものではないと考えられる。一方で、帰巣失敗率は N が 10 倍になると 1/10 となる傾向がみられる。この結果は、4.3 節において NLM が N によらずほぼ一定であったが、そのことが帰巣に失敗する蟻が N によらずほぼ一定であることに対応しており、結果として帰巣失敗率が N の増加に対して減少すると考えられる。

5. 結論と今後の課題及び感想

足跡フェロモンを用いた蟻の帰巣メカニズムを、蟻のモデル化とそのコンピュータシミュレーションを用いて検討した。結論として、蟻の総数が十分大きくかつ、餌を探索している蟻の動きがランダムであれば、足跡フェロモン濃度（足跡数）のより高い方に移動する事で、巣に戻ることが可能であるといえる。また、帰巣失敗に関係する足跡フェロモンの局所的な最大値点の総数(NLM)は、蟻の総数に関わらずほぼ一定であり、結果として帰巣に失敗する蟻の数も、蟻の総数にあまり関係しないことがわかった。一方で、蟻の総数を更に増やせばそのような局所的な最大値点はなくなると予想しているが、確認は今後の課題である。

ランダムウォークというデタラメな動きが、正確な帰巣行動を可能とする為の鍵であった事は大変面白い。例えばランダムウォークに、ある一方向に進みやすいといった異方性がある場合にどのような結果となるのか？領域内に障害物がある場合には帰巣の成功率はどうなるのか？蟻の移動距離と総数の組み合わせに最適な組み合わせはあるのか？等、考えられる問題は数多くある。特に、単純で適法範囲が広い本メカニズムを用いた応用事例については今後の課題として考えてみたい。

参考文献

[1] ブラウン運動(物理学 One Point 27), 米沢富美子, 共立出版

[2] 驚くべき動物の帰巣本能, NATIONAL GEOGRAPHIC, https://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/article/news/14/7465/ （最終確認日 2021 年 6 月 25 日）

[3] 蟻の足跡と拡散現象, 上山大信, 数学セミナー5 月号(2003), 31-36, 日本評論社

[4] Processing, https://processing.org/