生物集団の採餌モデルの数理モデルとシミュレーション-集団知の検討-

理学専攻・情報科学コース　藤澤彩也香

1　はじめに

集団運動をする動物はたくさんいる．細胞性粘菌，魚，鳥，デモ…，彼らはよってたかって何をしているのだろうか？

動物や微生物はある目的のために協力し合いながら集団で行動することがある．例えば，イワシやシマウマは集団運動することで敵から身を守ったり，ガンやハクチョウはエネルギーの消耗を抑えるために集団で飛んだりするといわれている．

これまでの集団運動の数理的研究はダイナミクスに関心があるものが多い．例えば，Vicsek らは集団運動を数学的な手法やシミュレーションを行うために，現実的な振る舞いする簡単なモデルを提案した [1]．一方，数は少ないが，集団運動の機能を論じた研究もある．例えば，Iain らは餌の位置等の情報をもつ個体の比率が非常に小さくても、高精度で目的に達することを明らかにした [2]．本研究でも集団運動の機能に着目する．具体的には，微生物が餌を探すときの集団運動の効果を数理モデルを使って研究する．多くの動物や微生物には化学走性と呼ばれる，化学物質の濃度の高い方向へ進む性質があり，これを利用して餌や異性を見つけている．そこで，化学走性を持つ個体の集団に，お互いの動きを揃えようとする相互作用を導入することによって，状況によっては能率よく餌や敵を見つけやすくなることを示す．これは「集団知」の原始的な形態の 1 つであると考えている．

2　モデル

空間 2 次元の場合，個体は半径 a の円形とし，上下左右の 4 カ所にレセプターを持つ (図 1 参照)．また，空間 1 次元の場合はレセプターは左右 2 カ所持つ．各レセプターはこのにおい分子を微小時間 dt あたりに $f(r)dt$ の確率で受け取るとする．いずれかのレセプターがにおい分子を受け取ると，その方向へ vdt だけ瞬間的に移動する．本要綱では空間 1 次元の場合のみ考える．

向きをそろえる相互作用をさらに考慮し，集団運動を作り出す．各時間ステップにおいて，各ユニットは確率 $1-q$ で，さきほど決めた移動をする．確率 q で，周りの個体と次のように相互作用して移動ベクトルが決める．考えている個体を中心としたある半径 R 内にいる個体 (自分を含む) の移動ベクトルの平均をとり，この平均ベクトルを最終的な移動ベクトルとする (図 2)．パラメータ $0 \le q \le 1$ を，相互作用強度と呼ぶことにする．

3　結果

空間 1 次元で個体数 10000，個体の初期位置を $x = 0.0$，餌の位置を $x = 1.0$ とした．におい分子の濃度は次にしたがうとする．

$$f(r) = C\frac{1}{s}e^{-\frac{r}{s}}. \tag{1}$$

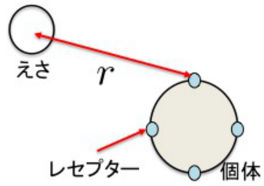

図 1: モデルの概略

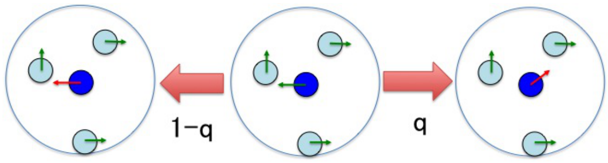

図 2: 相互作用のルール

ここで C はにおいの強さ，s は餌の拡散長，r は餌からレセプターへの距離である．$v = 1$，$s = 1/3$ とした．

まず，相互作用がないときのレセプターの距離の効果を調べた．図 3 はレセプター間の距離を変えた個体の平均距離と時間の関係 (図 3(右)) と分散と時間の関係 (図 3(左)) である．レセプター間の距離が大きい方が餌にたどり着く時間が早くなっている．レセプターの距離が離れているとにおい濃度の勾配がわかりやすくなるためである．

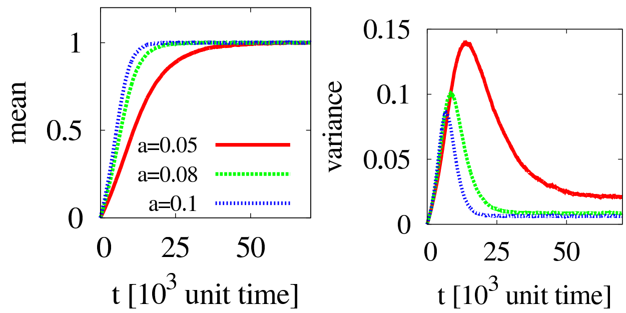

図 3: 個体の動きに対するレセプター間の距離の効果．（左図）個体の平均位置と時間の関係．（右図）個体の位置の分散と時間の関係．

次に，個体間相互作用の効果を調べた．各時刻における個体の位置のヒストグラムを図 4 に示した．図 4(左) は相互作用がない場合で，図 4(右) は相互作用がある場合である．相互作用がある時は，個体が固まって動いているが，餌に近づく速度は相互作用がない場合と比べてあまり変わらないように見える．

相互作用の効果をより詳しく見るために，平均位置と分散の時間発展を相互作用の強さを変えて調べた（図 5）．図 4 では不明瞭だったが，実際は，相互作用が強いほど餌にたどり着く時間が早くなることがわかった

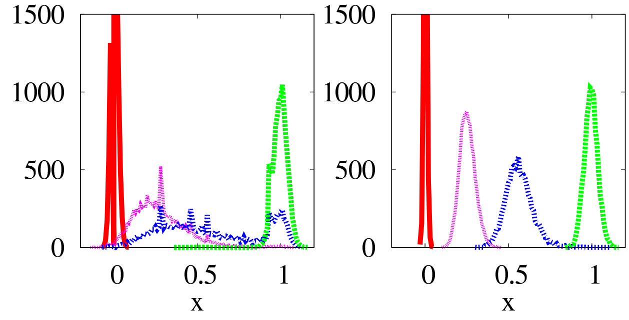

図 4: 各時刻における個体の位置のヒストグラム．(左図）$q = 0.0$．(右図） $q = 0.8$．赤：$t = 1000$，ピンク：$t = 20000$，青：$t = 30000$，緑：$t = 80000$．

(図 5(左))．餌から離れている時は，進行速度は相互作用の強さによってほとんど変わらないが，餌に近づくと相互作用が強い方が早く進む．また，相互作用が強いほどより集まって動いている (図 5(右))．

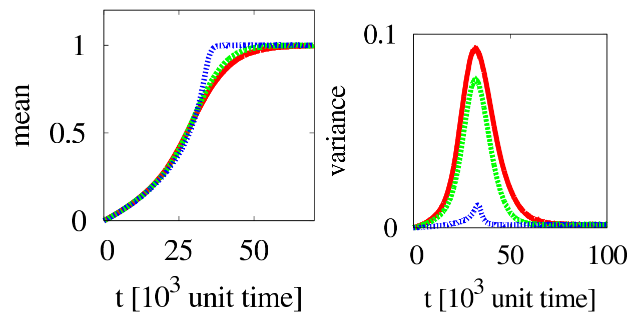

図 5: 個体の動きに対する相互作用の効果．餌が 1 個の場合．(左図）個体の平均位置と時間の関係．(右図）個体の位置の分散と時間の関係．赤：$q = 0.0$，緑：$q = 0.2$，青：$q = 0.8$．

次に餌が 2 個の場合を調べた．個体数 10000，個体の初期位置を $x = 0.0$，餌の位置を $x = -1.0, 1.0$ とした (図 6(左))．においの濃度は (1) と同様である．個体の平均位置の絶対値と時間の関係を見ると，相互作用が強いと餌にたどり着く時間が遅くなり (図 6(右))，餌が 1 個の場合と逆の結果となった．相互作用が強いとそれぞれの餌の場所の情報を受け取ってしまうため，個体が進む方向を迷ってしまうためだと考えられる．餌の方向が定まると，一方の餌に近づき，餌に向かって進む速度は相互作用の大きさにあまり依存しない．

4 理論

個体間に相互作用がないときは，時刻 t，位置 x にいる確率 $P(x,t)$ の時間発展は次の偏微分方程式によって書き表される [3]．

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(VP) + \frac{\partial}{\partial x}(DP') \tag{2}$$

これは移流拡散方程式と呼ばれ，右辺の第一項は移流項，第二項は拡散項である．$V(x)$ は流れを $D(x)$ は拡散の大きさを表す．我々のモデルに対しては，V と D は次のような表式を持つ．

$$D(x) = f(x)\Delta x^2, \tag{3}$$

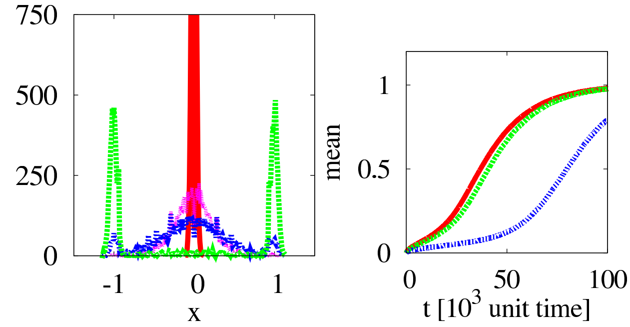

図 6: 餌が 2 個の場合．(左図）各時刻における位置のヒストグラム ($q = 0.0$)．凡例は図 4 と同じ．(右図）個体の位置の絶対値の平均と時間の関係．赤：$q = 0.0$，緑：$q = 0.2$，青：0.8．

$$V(x) = \left(\frac{2r}{\Delta x} - 1\right) f'(x)\Delta x^2. \tag{4}$$

(4) から，レセプター間の距離 r とともに流れが大きくなり，したがって，餌にたどり着くのが早くなることがわかる．一方，拡散の大きさは r によらない．次に，相互作用がある場合を考える．相互作用が強いと個体が集まり，一体となって動くので実効的に集団は一個体のように振る舞う．そのレセプターが増える効果として，$V(x)$ を $N_{\mathrm{eff}}V(x)$ とおく．ここで N_{eff} は一体となって動く集団の実効的なサイズである．また，相互作用する個体の平均移動ベクトルをとるので，進む距離が減る効果として Δx を $\frac{1}{\sqrt{N_{\mathrm{eff}}}}\Delta x$ とおく．これを (2) に入れると，

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(VP) + \frac{1}{N_{\mathrm{eff}}}\frac{\partial}{\partial x}(DP'). \tag{5}$$

となり，右辺第二項の拡散だけ弱くなる．よって，相互作用があるとき，集団で動くが餌へ向かう早さは変わらず，拡散だけが弱くなることが期待される．実際，図 5 では，餌から離れているときは速度はあまり変わらないのに対し，分散は q が大きくなると小さくなっている．一方，図 5 より，餌に近いときは，相互作用が大きいほど，餌への接近速度が増加することが観察されているが，これの理由はまだわかっていない．

5 まとめ

レセプター間の距離が離れていると餌にたどり着く平均時間が短くなることがわかった．また，餌が 1 個の場合，相互作用が強いほどたどり着くまでの平均時間が短くなることがわかった．しかし，餌が複数ある場合は相互作用が強ければ良いというわけではない．相互作用が強いと多くの個体が 1 カ所に集中し，集団の中での餌の位置の情報が混在し，餌の位置を迷ってしまう．したがって，餌が複数ある場合は，弱い相互作用でわかれて餌を探した方が，餌に早くたどり着く．

参考文献

[1] T. Vicsek, A. Zafeiris, Phys. Rep. **517**, 71, 2012.

[2] Iain D. Couzin, et al., Nature **433**, 513, 2005.

[3] E. F. Keller, L. A. Segel, J. Theor. Biol **30**, 225, 1971.