

集団運動と化学走性を作る「集団知」

藤澤彩也香 (指導教員：郡宏)

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。

本研究では微生物がえさを探する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いって、特定の化学物質の濃度の高い方向へ進む性質があり、これを利用してえさ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を考え、個体が集団を作ることによって、より能率よくえさや敵を見つけやすくなるという「集団知」を示すことを試みる。

2 モデル

個体の運動モデルを次で与える (図1 参照)。

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = v_i(\cos \theta_i, \sin \theta_i) \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \mu \xi_i \quad (2)$$

ここで、 $\vec{r}_i(t) = (x_i(t), y_i(t))$ は個体 i の位置 ($i = 1, 2, \dots, N$)、 N は個体数、 $\theta_i(t)$ は個体の進行方向、 v_i は進行速度、 $\xi_i(t)$ は白色ガウスノイズ、 μ はノイズ強度である。この個体はランダムウォークをする。空間を2次元とし、 $L \times L$ の周期境界条件とする。

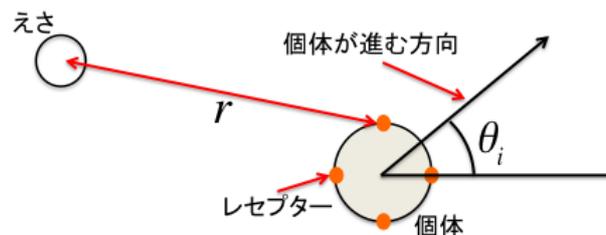


図1: モデルの概略

この個体にえさを探させる。化学走性を次のようにモデル化する。個体は半径 l 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)。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 θ_i をリセットする。えさは位置 $(L/2, L/2)$ に置かれており、そこからにおい分子が放たれ拡散し、におい分子の濃度は次のガウス分布にしたがうとする。

$$f(r) = C \frac{1}{\sqrt{\pi R_0}} e^{-\frac{r^2}{R_0^2}} \quad (3)$$

ここで C はにおいの強さ、 R_0 は拡散長、 r はえさからレセプターへの距離である。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。

個体の運動方向を決める (2) に、次のような個体同士の相互作用を考え、集団運動を作り出す。

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \mu \xi_i + \frac{\alpha}{N} \sum_{j=1}^N e^{-\frac{R_{ij}}{R_c}} \sin(\theta_j - \theta_i) \quad (4)$$

ここで $R_{ij} = |\vec{r}_i - \vec{r}_j|$ は個体間の距離、 R_c は相互作用を考える典型的な距離、 α は相互作用の強さである。 $e^{-\frac{R_{ij}}{R_c}}$ は近くの個体ほど強く相互作用することを表し、 $\sin(\theta_j - \theta_i)$ は θ_i が θ_j の値に近づく効果を表す。

3 シミュレーション結果

シミュレーションではパラメーター値を $L = 10$, $v_i = 0.3$, $\mu = 0.1$, $C = 10$, $R_0 = 2$, $R_c = 4$, $l = 0.1$, $N = 10$ とした。初期条件は、すべての個体の位置を $\vec{r}_i(0) = (2, 2)$ とし、その進行方向 θ_i は範囲 $[0, 2\pi]$ の一様乱数で与えた。計算スキームはオイラー法 (時間ステップ $dt = 0.01$) である。

まず、シミュレーションで集団の運動を観察した。図2(左)と図2(右)は $t = 50$ の時の個体の位置のスナップショットである。相互作用がない場合はなかなかえさに近づかず、えさにたどり着く個体が少ない (図2(右))。相互作用がある場合はある程度固まって動き、すぐにえさを見つける個体が多く、えさに近づこうとする個体も多く見られる (図2(左))。

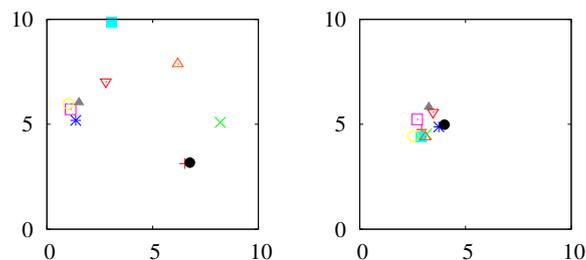


図2: 個体の位置のスナップショット。(左図) $\alpha = 1$ 。(右図) $\alpha = 7$ 。

次に、1000種類の異なる初期条件に対して観測時間内 ($0 \leq t \leq 100$) に個体 $i = 1$ がえさにたどり着く割合と、えさにたどり着くまでの平均時間を調べた。図3より、相互作用の強さ α が大きいほど、えさにたどり着く割合が増えることがわかる。図4は、えさにたどり着いた個体について、えさにたどり着くまでの平均時間を表示したものである。これから、相互作用が強いほど早くえさに到達することがわかる。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1個体のように振る舞う。このとき「超個体」は元の個体に比べてレセプターを多く持つのでよりすばやくえさを見つけられるようになるのだと考えられる。

さらに、相互作用の強さを一定 ($\alpha = 10$) にして、
 においの強さ C を変化させ、えさの発見に対する影響を
 調べた。図 5 より、においの強さが 1 付近のときえさを
 発見する割合が最も高く、それ以上では割合が減っ
 ていく。また、図 6 より、においの強さが 1.5 を過ぎ
 たあたりからえさにたどり着くまでの平均時間が長
 くなっている。においの強さが強すぎると、どのレセプ
 ターもおい分子を高い頻度で受け取り、正しい方向
 へ進まなくなってしまうことが原因だと考えられる。

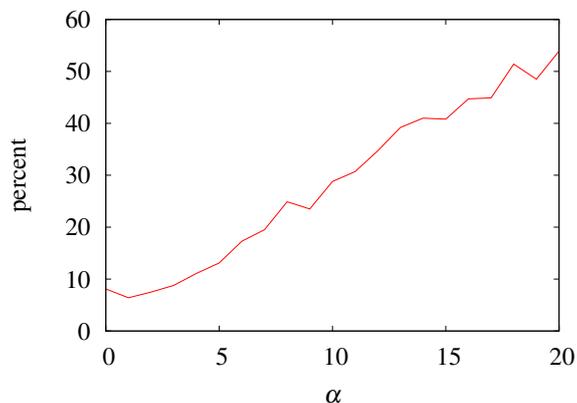


図 3: えさにたどり着く割合と相互作用の強さ α の
 関係

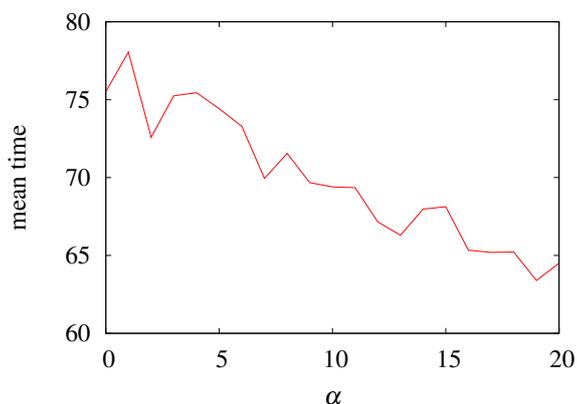


図 4: えさにたどり着くまでの平均時間と相互作用の
 強さ α の関係

4 まとめと今後の課題

相互作用が強いほど高い割合でえさまでたどり着く
 ことがわかった。さらに到達までにかかる時間も相互
 作用が大きくなると短くなることがわかった。しかし、
 えさから放出されるにおい分子が多すぎてしまうと、
 えさにたどり着く割合が減り、たどり着くまでの平均
 時間も長くなってしまふ。

本研究では数値解析しか行っていないが、次は到達
 割合や到達平均時間を説明する理論を作りたい。

今後はえさにたどりつけるまでの典型的な時間の N
 依存性を調べたい。また、えさが動く場合も調べたい。
 この場合はまとまって探すよりもバラバラで探した方
 がえさまでの到達時間が短いかもしれない。したがっ

て α が負の場合、つまり個体間に斥力が働く場合の研
 究も興味深い。

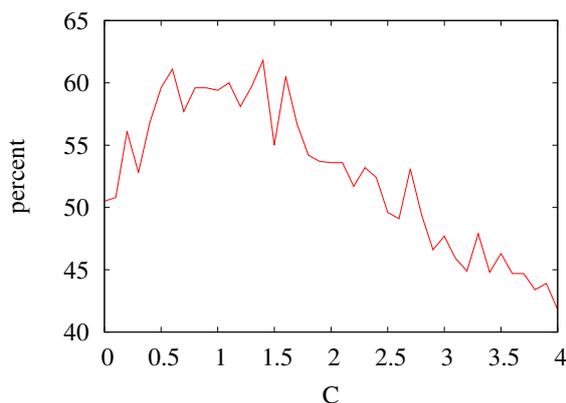


図 5: えさにたどり着く割合とにおい強度 C の関係

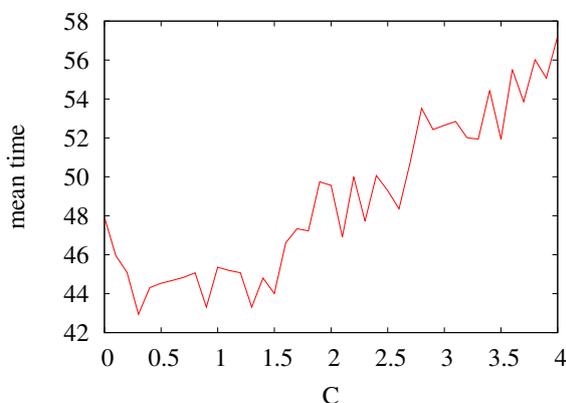


図 6: えさにたどり着くまでの平均時間とにおい強度
 C の関係

参考文献

- [1] Yutaka Sumino, Ken H. Nakai, Yuji Shitaka, Dan Tanaka, Kenichi Yoshikawa, Hugues Chaté, Kazuhiro Oiwa, Large-scale vortex lattice emerging from collectively moving microtubules, 2012
- [2] Tamás Vicsek, Anna Zafeiris, Collective motion, 2012
- [3] Jonathan Saragosti, Pascal Silliberzan, Axel Buguin, Modeling *E. coli* Tumbles by Rotational Diffusion. Implications for Chemotaxis, 2012
- [4] 澤井哲, 細胞性粘菌の運動理論 —動く振動子の作るソフト・インターフェイス—, 生物物理 39(6), 367-371, 1999