

○工藤雅則 嘉数侑昇
(北大工)

要旨

本稿では細胞性粘菌の餌探索における社会的活動のメカニズムに着目し、これを計算機シミュレーションとして実現することへの試みが示されている。はじめに、シミュレーションの基となる実際の粘菌に対する着目点を示し、その後、今回行った実際のインプリメンテーションについての説明と実験結果を示し、それへの考察を行う。

1 はじめに

近年、自然現象に見られるような複雑な振舞いの解析を目的とした様々なシミュレーションが作られている。本稿では特に細胞性粘菌（以下、単に粘菌と略す）という多細胞生物の組織的振舞いに着目して、これをモチーフとしたシミュレーションの作成を試みる。

ここで実現しようとしている粘菌の組織的振舞いとは、餌が少なくなると多くの細胞が集合、合体して一つの多細胞生物となり組織的に餌の探索を行うことである。^[1]

2 モデル化へのアプローチ

ここでは実際の粘菌をモデル化する際に着目する点について箇条書きする。

2.1 環境

衝突； 環境中に存在する物体同士は衝突する。例えば、細胞対細胞や細胞対壁である。

化学物質の拡散・反応； 細胞の情報伝達に利用される化学物質は拡散する。また、これらは混合すると化学反応を起こし異なる化学物質（意味情報）となる。

粘性抵抗； 細胞は粘性流体の中に生息しており粘性抵抗を受ける。

細胞の大きさ； 細胞は自分の大きさ分の空間を占める。

2.2 細胞

細胞の特徴は遺伝子、タンパク質、振舞いの3つに分けることができる。

2.2.1 遺伝子

遺伝子； 遺伝子は細胞中のタンパク質の種類と量を決定する因子である。

2.2.2 タンパク質

タンパク質の量； タンパク質の量は時間変化する。
タンパク質の機能； 細胞が示す振舞いはそのタンパク質の機能に由来しており、これら細胞のマクロな振舞いは各タンパク質間の協調と競合の結果であることが多い。

2.2.3 振舞い

移動力の発生； 細胞は移動力を発生することによって空間を移動する。

化学物質の放出・吸収； 細胞は環境中に化学物質を放出し、また、環境中の化学物質を吸収する。即ち、細胞は化学物質に対する湧き出しや吸い込みの役割をする。
分裂； 細胞は細胞分裂によって子孫を増やす。
死； 細胞は飢えたと死ぬ。

細胞間接着； 細胞同士は互いに接着することができる。
センサー； 細胞は自分の局所環境の情報を感知できる。

2.3 細胞性粘菌

組織的行動； 粘菌は多数の細胞から成る多細胞生物であり、各細胞は合目的に振舞う。すなわち、各細胞が組織的に行動する為、粘菌は一つの生物として振舞う。

2.4 餌

餌； 餌も細胞と同様に単細胞生物であるが、粘菌のような組織的行動は取らない。

3 モデル

本節では2節で挙げた各特徴に基づき、多細胞粘菌の組織的行動モデルの実現手法を示す。基本的アイデアは文献[2]に詳しいが、ここでの問題向きに多少変更した。

3.1 環境モデル

衝突；

$$\text{CollisionForce}_c = \sum_{b \in \text{objects}} k(d(b, c) - \text{offset})^n \mathbf{p} \quad (1)$$

where: c ; 細胞のインデックス

b ; 細胞と衝突する物体

$d(b, c)$; b と c の重なりの場合

k, offset, n ; パラメーター

\mathbf{p} ; 力の作用線方向単位ベクトル

化学物質の拡散； $n \times n$ の格子に離散化した。

$$\frac{d_a^{i,j}}{dt} = D(f_a^{i+1,j} + f_a^{i-1,j} + f_a^{i,j+1} + f_a^{i,j-1} - 4f_a^{i,j}) - \text{dissipation}_a + \mathbf{R}_a(f_a, f_b, f_c, \dots) + \text{SourcesAndSinks}_a^{i,j}(t) \quad (2)$$

where: f ; 化学物質の濃度

D ; 拡散係数 (≥ 0)

i, j ; 格子点のインデックス

a ; 化学物質のインデックス

dissipation; 散逸度

R_a ; 反応関数

次に湧き出し関数を示す.

$$\text{SourcesAndSinks}_a(x, y, t) = \sum_{c \in \text{cells}} \delta(x - c_x, y - c_y) \text{Spew}_{c,a}(\text{state}_c, \text{env}_c) \quad (3)$$

where: δ ; ディラックの δ 関数 ($1 (x = y = 0)$, $0 (x \neq 0 \text{ or } y \neq 0)$)

c_x, c_y ; 細胞の中心位置

Spew ; 化学物質の放出関数

この結果を三角形一次要素を用いた補間 (或いは補外) により, 格子点上の値に換算する.

粘性抵抗; 細胞の速度はこれに作用する外力と粘性抵抗力との釣り合いを取ることによって決定する.

$$\sum_{\text{forces}} = \text{CollisionForce}_c + \text{MotiveForce}_c - kv \quad (4)$$

= 0

where: k ; 定数. v ; 細胞の移動速度

細胞の大きさ; 細胞の形は真円で半径は一定.

3. 2 細胞モデル

3. 2. 1 遺伝子モデル

遺伝子; 遺伝子はタンパク質の量の時間変化を記述する方程式とした. 遺伝子はひとつのタンパク質に対して複数個存在し, 各遺伝子は条件項 (制御項) が 1 の時のみ発火する.

$$\frac{d\text{state}_c[i]}{dt} = \sum_s \text{Condition}_c^s(\text{state}_c, \text{env}_c) \times \text{Consequent}_c^s(\text{state}_c, \text{env}_c) \quad (5)$$

where: S ; 遺伝子のインデックス

Condition ; 制御項 (= 0 or 1)

Consequent ; 遺伝子関数の本体

3. 2. 2 タンパク質モデル

タンパク質の量および機能; タンパク質の機能はタンパク質の量 ($\text{state}_c[i]$) と局所環境情報 ($\text{env}_c[i]$) との関数とする.

3. 2. 3 振舞いのモデル

移動力の発生; 以下の形の関数とした. 右辺は実例.

$$\text{MotiveForce}_c(\text{state}_c, \text{env}_c) \equiv (\text{state}_c[\text{fx}], \text{env}_c[\text{fy}]) \quad (6)$$

化学物質の放出・吸収;

$$\text{Spew}_{a,c}(\text{state}_c, \text{env}_c) \equiv \text{state}_c[\text{spew}_a] \quad (7)$$

センサー; 格子点上の情報から双一次補間によって各細胞の位置での値を概算し, 変数 ($\text{env}_c[i]$) の値とする.

4 計算機実験

ここでは細胞群の集合をシミュレートした.

4. 1 目的

モデル細胞の集合能力を検証実験する.

4. 2 実験条件, 遺伝子の設定

実験条件として, 或る一つの細胞 c に対して常に 1 種

類の誘引性化学物質を放出させた. 即ち, 細胞 c の state_c [spew] の値を常に 200.0 に保ち続けた.

設定した遺伝子を以下に示す.

fx: if true then -state[fx], if true then 7.0 * env[rdx]

fy: if true then -state[fy], if true then 7.0 * env[rdy]

4. 3 実験結果

シミュレーションの進行過程を図 1~3 で示す. 細胞群がランダムに配置された初期状態から, シミュレーションが進行するにつれ一つの小規模な細胞集団が作られるのを確認した.

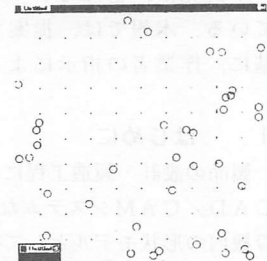


図 1 初期状態

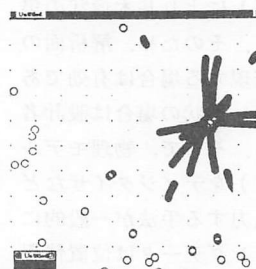


図 2 進行過程

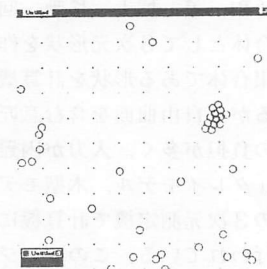


図 3 集合状態

5 考察

誘引性化学物質は散逸するので情報が遠くまで伝達されないのが原因で細胞集団は近隣の細胞のみから形成され小規模である. より大きな集団を作るためには各細胞による化学物質の中継・増幅機構^[1]の導入が考えられる.

6 おわりに

粘菌の組織的餌探索のモデル化を目指して次のことを行った.

- ・粘菌の組織的餌探索において着目すべき特徴を示した.
- ・これらの特徴に基づきモデル化手法を示した.
- ・粘菌の組織的餌探索の実現には至らなかったが, 細胞同士の集合行動をシミュレートした. 粘菌が組織的餌探索を行うメカニズムは解明されていないが, 計算機シミュレーションを利用して組織的行動の実現を少しずつ試みることによって有益な情報が得られることを期待する.

参考文献

1. 前田みね子, 前田靖男. 『粘菌の生物学』東京大学出版会, 1978.
2. Fleischer, Kurt et al. "A Simulation Testbed for the Study of Multicellular Development: The Multiple Mechanisms of Morphogenesis." Artificial Life III, Proc. Vol. XVII, 389-416. Addison-Wesley, 1994.