

要旨

細胞性粘菌はライフサイクルの中で様々な形態の変化を見せる。ライフサイクルの一部において、粘菌細胞はバクテリアを捕食した後、飢餓状態になり、凝集する。本研究ではこの集合期における粘菌細胞の動作に注目する。集合期における粘菌細胞をエージェントとし、マルチエージェントシステムを用いて、粘菌細胞の動作をコンピュータ上で再現する。

1. はじめに

細胞性粘菌という生物は以前から生物学の分野で注目されつづけてきた。現在では工学の分野でもその特異な存在に注目し、粘菌の研究を行っている。

本研究の目的は、1つの粘菌細胞を1つのエージェントとして捉えたマルチエージェントシステムを用いて、集合期の細胞性粘菌の動作を再現することである。

2. 細胞性粘菌の生活環

細胞性粘菌とは不思議な生物である。その存在は今まで数多くの研究者達を魅了してきた。

ここで細胞性粘菌のライフサイクルを説明する。図1は細胞性粘菌のライフサイクル（無性世代）を示す。

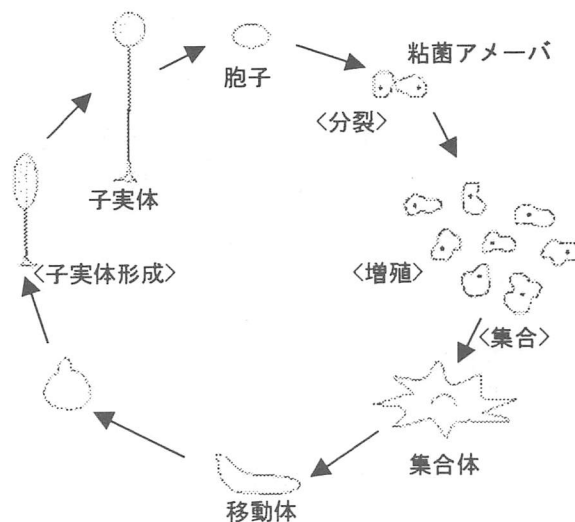


図1 細胞性粘菌のライフサイクル（無性世代）

まず温度や水分が十分な条件を満たすと孢子状態の粘菌は吸水して膨れ、膜が破れ、中から粘菌アメーバが出現する。出現した粘菌アメーバはバクテリアを捕食して生長し、分裂を繰り返して増殖する。そして飢餓状態になると走化性物質を合成・分泌し、凝集する。この集合期の粘菌アメーバの塊を“集合体”と呼ぶ。凝集した集合体は移動を始める。移動期の粘菌アメーバの塊を“移動体”と呼び、形状はなめくじに似ている。移動体の段階で粘菌アメーバは2種類の細胞に分かれる。1つは予定孢子細胞、もう1つは予定柄細胞と呼ばれ、その名の通り将来孢子になる細胞と柄になる細胞である。予

定孢子細胞は将来的に孢子になり、次世代の粘菌アメーバとして生き残るが、予定柄細胞は孢子嚢を支えるための柄となり、死んでゆく運命にある。移動を繰り返し、適当な場所に落ち着くと移動体は“子実体”という孢子を蒔くための形態を形成し始める。予定柄細胞は予定孢子細胞を持ち上げ、子実体の柄になってゆく。予定孢子細胞は予定柄細胞に持ち上げられて上に上ってゆく。結果的には球体になった孢子細胞のかたまりが上に存在し、その下に柄細胞が細い柄となって孢子細胞を支える形となる。そして孢子が蒔かれ、蒔かれた孢子が次の粘菌アメーバとなる。孢子はアメーバ状態の時とは違い、飢餓状態でも長期の生存が可能である。

以上が細胞性粘菌のライフサイクル（無性世代）である。このサイクルは20°Cの条件下で3～4日かかる。この他に細胞性粘菌には有性世代でのライフサイクルが存在するが、本研究では無性世代の細胞性粘菌にのみ焦点を絞る。

3. 集合期の粘菌細胞

細胞性粘菌のライフサイクルについては説明したので、ここでは集合期の粘菌細胞について詳しく説明する。

細胞性粘菌はバクテリアを捕食した後、飢餓状態において集合する。これは単細胞として動き回っていた粘菌アメーバが“飢餓状態”をきっかけに集合体（多細胞体）を形成するということである。この段階は細胞性粘菌のライフサイクルの中でも見ごたえのある劇的な時期であり、関心を寄せる研究者は少なくない。「単細胞の粘菌アメーバはどのようにして多細胞体への段階へ進むのか？」と、誰もが疑問に思うだろう。

ライフサイクルの説明の中で走化性物質の存在にふれていたが、この走化性物質こそが集合期における重要な鍵なのである。飢餓状態において粘菌アメーバは走化性物質を細胞の中で合成して分泌する。この走化性物質をcAMP（サイクリックAMP）という。粘菌アメーバたちはこのサイクリックAMPに惹かれあい、凝集する。他にも走化性物質は数種類確認されているが、本研究ではこのサイクリックAMPだけに注目した。粘菌アメーバは自らの細胞内でサイクリックAMPを生成し、その一部を細胞外へ放出する。放出されたサイクリックAMPを他の粘菌アメーバが感知し、凝集する。ここでcAMPを感知するのがcAMPレセプターである。cAMPレセプターは走化性物質(cAMP)と結合することで走化性シグナルを細胞内へ伝達する。cAMPレセプターは、粘菌細胞を低温状態から通常の培養温度(20°C)に戻して7時間程たつと発現

し、細胞膜上に存在する。

4. 手法

作成するシミュレーションでは粘菌アメーバ(エージェント)の1つ1つを点として扱い、重力などの物理条件は考えないものとする。粘菌アメーバ(エージェント)はcAMP濃度の高いほうに進む。

各粘菌アメーバが持つパラメータは次の通りである。

・粘菌アメーバの個体数

80に設定した。

・粘菌アメーバの初期位置

乱数で与える。ただし、最初にcAMPを放出する個体の位置は、フィールドの中心に設定する。

・最初にcAMPを放出する個体

乱数で決定する。

・cAMPレセプターが発現するまでの時間

乱数で与えている。cAMPレセプターが発現しない間、つまりこのパラメータが0でない間、粘菌アメーバは動かない。発現してこのパラメータが0になり、細胞の外に放出されている細胞外cAMPを受信すれば、cAMPの大きいほうへ移動する。

・各々の粘菌細胞が持っている力

乱数で与える。このパラメータが小さければ他の粘菌の上ののし上がることはできない。

・フィールドのサイズ(集合結果, 軌跡表示)

241×241に設定した。

cAMPレセプターが発現し、細胞外cAMPを受信してからは0.5秒間隔で、細胞内部で生成した細胞内cAMPの放出・停止を繰り返す。細胞内cAMPの値はレセプター発現から経過した時間と細胞外cAMPとで値が決まる。細胞外cAMPが大きければ細胞内cAMPは小さくなる。細胞外cAMPは、他の粘菌の細胞内cAMPと距離によって決まる。

凝集し終わったら各々の粘菌アメーバの動きを止める。

5. 実験

図2-1~2-6はシミュレーションの実行画面である。

図2-1はプログラム実行直後の画面である。粘菌アメーバ(エージェント)の初期位置は乱数で与えられ、フィールド全体にばらばらに散らばっている。図中の灰色の点は粘菌アメーバを表す。

図2-2~2-5は凝集シミュレーションの途中での粘菌アメーバの軌跡を示している。このシミュレーションで粘菌アメーバがほとんど凝集するまでに経過する時間は約7~10秒くらいかかるので、時間(t)を2秒間隔で区切り、軌跡を4個表示した。時間順に図2-2~2-5を観察すると、中心付近の軌跡がだんだん少なくなっていくのがわかる。これは中心まで凝集した粘菌アメーバが集合行動を終了して動かなくなっているせいである。図2-5になると凝集行動がほぼ終わり、軌跡は少ししか描かれていない。

図2-6にシミュレーションの集合結果を示す。図中の灰色と黒の点は粘菌アメーバを表す。灰色の点は縦に粘菌アメーバが重なっていない状態を示すが、黒色の点は粘菌アメーバが縦に数個体重なっている状態を示す。最終的に、フィールドの中心に粘菌アメーバ達のほとんど

が集まった。したがって凝集行動はほぼ成功したと考える。

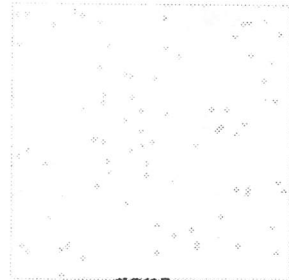


図 2-1 初期状態

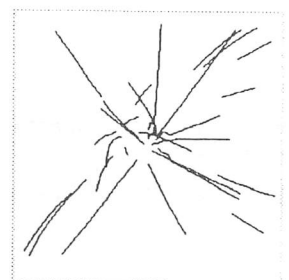


図 2-2 軌跡(0<t<2[sec])

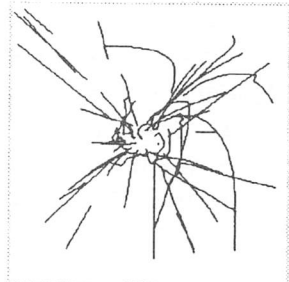


図 2-3 軌跡(2<t<4[sec])

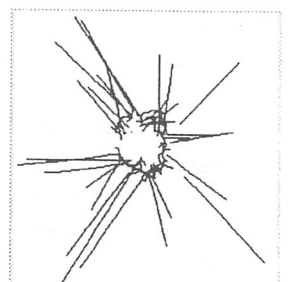


図 2-4 軌跡(4<t<6[sec])

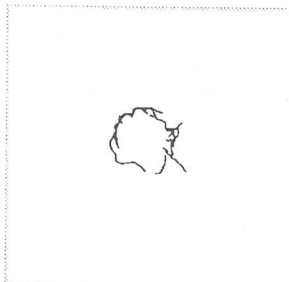


図 2-5 軌跡(6<t<8[sec])

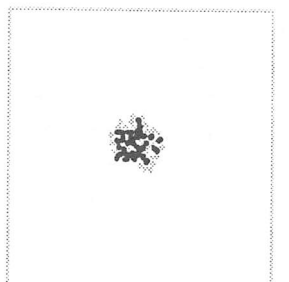


図 2-6 集合結果

6. まとめ

粘菌アメーバの集合期の動作をシミュレーションした結果、今回のプログラムに与えた条件ではほぼうまく凝集することがわかった。

今後、異なる条件を入れた場合どのように動作が変化するかを確かめようと考えている。

謝辞

粘菌に関してたくさんのご助言をいただいた産業技術総合研究所の水野敬文様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 前田靖男: "増殖から分化への移行のメカニズム", 長野正道: "細胞集合の数理モデル", 前田他: "モデル生物: 細胞性粘菌", 株式会社アイピーシー
- 2) 沼岡千里, 大沢英一, 長尾確: "分散協調メディアシリーズ・11 マルチエージェントシステム", 共立出版株式会社