

# 正負の走化性を実装した真性粘菌変形体のセルオートマトンモデル

丸山 大地<sup>\*1</sup> 白川 智弘<sup>\*2</sup> 高橋 達二<sup>\*3</sup><sup>\*1</sup>東京電機大学大学院 <sup>\*2</sup>防衛大学校 <sup>\*3</sup>東京電機大学

## 1. はじめに

生物は外的環境の下で生存するために、進化および適応をしてきている。それは、単細胞生物である真性粘菌変形体（以下：変形体）も例外ではない。変形体はシート状の移動先端と全体を繋ぐチューブ構造で構成されている。このチューブは輸送路として用いられており、その中では原形質流動が盛んに行われている。近年の研究では、変形体のチューブネットワークが環境からの刺激に応じて最適化することにより、迷路の最短経路の探索 [Nakagaki 00] が可能であることや、変形体が形成するネットワークが首都圏の鉄道網を再現 [Tero 10] できることが明らかにされ、その計算能力は広く注目されている。

本研究では、Sawa らが提案した変形体のモデル（以下：Sawa モデル）[Sawa 12] に着目する。Sawa モデルは変形体が行うゲル-ゾル変換メカニズムに基づくセルオートマトン（以下：CA）モデルであり、このモデルによって変形体の形態形成メカニズムの一部が再現された。しかしながら、変形体に走化性を与える誘引物質や忌避物質の要素がなく、変形体の形態形成メカニズムを完全には再現できていない。そこで、Sawa モデルに正負の走化性を実装した Chemotaxis Sawa モデル（以下：C-Sawa モデル）を提案する。そして、この C-Sawa モデルが変形体の形態形成メカニズムを再現できるかを観察する。

## 2. Sawa モデル

Sawa モデルはゲル-ゾル状態の区別を簡素化した CA モデルであり、変形体の原型質量のみを考慮することで、細胞の運動性を表現している。この簡素化を実現するにあたり、変形体の形態学的なパターンを分析するために利用されている 2 つの測定値を用いる [Takamatsu 09]。変形体の厚さに比例している contact angle は、各セルに存在できる原型質量の上限を設定している *upper* パラメータ（以下：*u* パラメータ）と対応している。移動先端部分の探索範囲に比例している spread angle は、隣接するセル間で移動可能となる原型質量の差の上限を設定している *difference* パラメータ（以下：*d* パラメータ）と対応している。この 2 つのパラメータを用いることで、変形体の挙動の再現を可能としている。図 1 では Sawa モデルでの原形質の挙動を示す。各セルの数字は原型質量を表している。原形質の移動元となるセルの選択方法は 0.9 の確率で、前回選択したセルの半径 3 の中にいる原形質の存在するセルを選択し、0.1 の確率で原型質の存在するすべてのセルからランダムで選択する。また、原形質の移動は隣接する上下左右のセルの中か

らランダムに選択されている。これらの値を用いて、複雑な計算を行わず変形体の原形質流動を表現している。

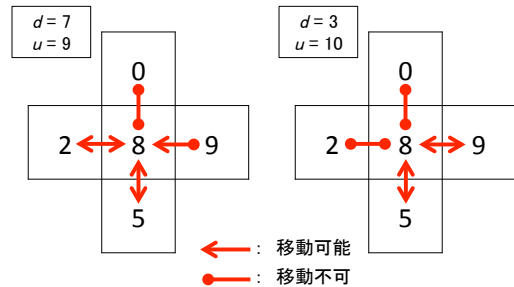


図 1: Sawa モデルの挙動

## 3. C-Sawa モデル

Sawa モデルは、前述した通り変形体が持つ走化性は実装されていない。例えば、餌などによる誘引刺激に対する正の走化性や、光などの忌避刺激に対する負の走化性である。これらが未実装であるために、変形体の形態形成メカニズムが再現できておらず、迷路の経路探索や、首都圏の鉄道網の再現など、誘引物質および忌避物質を用いた既存実験が再現できずにいた。そこで本研究では、Sawa モデルに変形体の走化性応答を実装し、その適応的行動を再現するために、以下の設定を追加した C-Sawa モデルを提案する。

### 3.1 走化性を与える物質の追加

変形体の走化性を実現するために、変形体をその方向への運動を誘導する、または妨げるような物質をそれぞれ実装する。新たに走化性を与える物質のパラメータを各セルに設定し、原形質が物質を有するセルに隣接した際に、そのセルを移動先として選択する確率を物質の種類や量に応じて変化させる。

### 3.2 原形質量の増減

誘引物質の一つである餌を変形体が捕食して増殖したり、移動に伴う原形質の減少を表現するために原形質量の増減を実装する。原形質と誘引物質が同じセル上に存在する際に、一定確率で誘引物質を消費して原形質量が増加する。また、原形質の存在するセルは、一定確率で原形質量が減少するように設定する。

## 4. シミュレーション

本研究では、実際の変形体を用いた実験の再現を行う。ここでは、正負の走化性の実装が確認するために、迷路の経路探索および首都圏の交通網の再現を C-Sawa モデルでも可能か検証する。

”The plasmodium of *Physarum polycephalum* in the cellular automata model implemented the positive and negative chemotaxis”, Daichi Maruyama : Graduate School of Tokyo Denki University, Tomohiro Shirakawa : National Defense Academy of Japan, Tatsuji Takahashi : Tokyo Denki University

4.1 迷路の最短経路探索

ここでは、正の走化性応答が再現できているか確認するために、Nakagaki らが行った迷路の経路探索を C-Sawa モデルで行う。CA 上で迷路を作成し、スタートとゴールには誘引物質を、迷路全体に原形質を配置した状態で実験を開始した。このシミュレーションでは、経路が 1 つに収束することで、提案モデルでも迷路の経路探索が観察されるかを検証した。また、変形体が収束し迷路の解を示した際に、どの程度の割合で最短経路を選択したかも確認する。80 × 80 セルのフィールド上で実験を行い、 $u$  パラメータを 10、 $d$  パラメータを 6、原型質量の減少確率を 0.1%、増殖確率を 1%とした。シミュレーションは 100 回実施し、各経路を選択した回数を記録する。

4.1.1 迷路シミュレーションの結果および考察

必要のない経路での原形質の減退が見られ、スタートからゴールまで 1 本の経路に収束する様子が確認された。これは、行き止まりである経路は辺りに誘引物質である餌が配置されていないため、原型質の増殖量よりも減少量の方が勝るからだと考える。1 本の経路として収束が確認されたのは、全体の原形質の増殖量と減少量とのバランスが出来ているからではないかと考える。また、100 回の試行中 23 回 (23%) の割合で最短経路を選択することが記録された。これは、既存実験の 9 回試行中 5 回 (26%) の割合で最短経路を選択したものと同程度の結果である。これにより、現実の変形体で見られる挙動に近い振る舞いを、C-Sawa モデルでも再現できることが確認された。しかし、スタートからゴールまでの経路は 4 種類のみであり、見方によっては、ほぼランダムで変形体が経路を選択したとも捉えられる。そのため、変形体が真に最短経路を選択していたかを検証するための追加実験をした。

4.2 追加実験

ここでは、変形体が最短経路を選択するのかを確認するために、新たにシミュレーションを行う。ドーナツ状のフィールドを CA 上で作成し、そのフィールド上部、時計で言うと 12 時の位置に誘引物質を設置する。この誘引物質は固定で設置しておき、その他に各シミュレーションごとに 1 時から 11 時までの位置にもう一つの誘引物質を設置し、最短経路を選択する割合を確認する。1 時から 5 時まででは時計回りに、7 時から 11 時まででは反時計回りに経路が収束すると最短経路を選択したこととなる。各設定は迷路シミュレーションと同様に設定した。また、各誘引物質の設置場所ごとに 100 回シミュレーションを実施し、最短経路を選択した割合を記録する。

表 1: 最短経路生成確率 (1~5 時)

餌の設置場所 (時)	1	2	3	4	5
最短経路確率 (%)	66	68	64	60	59

表 2: 最短経路生成確率 (7~11 時)

餌の設置場所 (時)	11	10	9	8	7
最短経路確率 (%)	67	78	70	65	63

4.2.1 追加実験の結果及び考察

表 1, 2 に追加実験の結果を示す。表から読み取れるように、どの位置へ誘引物質を配置しても、最短経路を選択し易いことが確認された。また、誘引物質同士の距離が近いと選択し易く、遠くなるにつれて選択しにくくなる傾向も確認されたが、い

れの位置でも 50%以上の確率で最短経路を選択することが確認された。そのため、変形体はランダムで経路を選択しているのではなく、自ら最短経路を選択していることが分かる。これらのことから、C-Sawa モデルへの正の走化性応答が実装されており、また、最短経路を選択し易いモデルであることが確認された。

4.3 首都圏交通網の再現

ここでは、変形体が忌避物質に反応し負の走化性応答を再現できているのかを確認する。実際の首都圏の地形を模したマップを CA 上で作成した。主要都市には人口に応じて誘引物質を配置し、海や山、川など、鉄道が敷かれにくい地形には忌避物質を配置した。各設定は迷路シミュレーションと同様に設定しており、実際の変形体での実験のように首都圏の交通網が再現できるのかを確認する。

4.3.1 首都圏交通網の結果及び考察

C-Sawa モデルでの現実の首都圏の交通網を再現しようと試みたが、現実からはかなりかけ離れた結果となった。基本的に、変形体は忌避物質を避けて経路を収束させようとするが、忌避物質と誘引物質が隣り合っている部分などでは忌避物質を避けない様子も確認された。従って、負の走化性を実装し首都圏の交通網を再現することは、現状の C-Sawa モデルでは達成できなかった。負の走化性応答を再現可能とするには、鉄道の敷かれにくさに応じて強弱をつけることや、更なる C-Sawa モデルの改変が必要であると考えられる。

5. 結論

本研究では、原型質量のみを考慮した Sawa モデルに対し、変形体が生存していくことに当たって、重要なファクターとなる誘引物質と忌避物質を追加した C-Sawa モデルを提案し、正負の走化性の実装を試みた。

その結果、正の走化性に対しては実際の変形体に近い挙動を確認でき、既存実験で行われたものと同じ構造の迷路の最短経路を解かせるシミュレーションにも成功した。しかしながら、負の走化性に対しては既存実験で行われた首都圏交通網の再現をすることは達成できなかった。原因としては、忌避物質の実装が不完全である事や、パラメータのバランス、または、忌避物質の表現方法の不備など様々な要因が考えられるので、首都圏交通網の再現は今後の課題とし、より再現性の高いモデルを提案したい。

参考文献

[Sawa 12] Sawa, K., Balaz, I., Shirakawa, T.: Cell Motility Viewed as Softness, *International Journal of Artificial Life Research*, 3(1), 1-9 (2012).

[Nakagaki 00] Toshiyuki Nakagaki, Hiroyasu Yamada, Ágota Tóth.: Maze-solving by an amoeboid organism, *Nature*, 407, 470 (2000).

[Tero 10] Atsushi Tero, Seiji Takagi, Tetsu Saigusa, Kentaro Ito, Dan P. Bebber, Mark D. Fricker, Kenji Yumiki, Ryo Kobayashi, Toshiyuki Nakagaki.: Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design, *Science*, 327, 493 (2010).

[Takamatsu 09] Atsuko Takamatsu, Eri Takaba, Ginjiro Takazawa.: Environment-dependent morphology in plasmodium slime mold *Physarum polycephalum* and a network growth model, *Journal of Theoretical Biology*, 256, 29-44 (2009).