

原著論文

## 粘菌変形体の化学走性を利用した高校生物実験の開発

高橋和成<sup>1</sup>

### Development of classroom experiments in high school biology on chemotaxis of slime mold plasmodium

Kazunari TAKAHASHI<sup>1</sup>

**Abstract:** The myxomycete plasmodium, a unicellular organism, may become a huge amoeboid cell which migrates in search of food. It connects the shortest paths possible between oatmeal flakes (food patches), while avoiding citric acid (repellent) solutions ( $0.2-0.3 \text{ M}$ )  $\leq \text{pH}=1.8$ . Using this organism, I experimented and observed the following. On an agar gel plate, food pieces were put at three points forming an equilateral triangle, at the centroid of which the plasmodium was placed, and filter paper pieces containing the repellent were placed in the middle between the food pieces. In this arrangement, the plasmodium frequently formed a network connecting the food pieces with the shortest paths. When a repellent piece was put between the plasmodium and a food piece, the plasmodium formed a network with paths bypassing the repellent piece. When three repellent pieces were placed, the plasmodium searched for the shortest bypasses detouring the repellent pieces. Based on these observations, I propose the following three sets of classroom experiments for senior high school students: (1) shortest path network experiment with triangular food source points, (2) chemotaxis experiment with food pieces and repellent pieces, and (3) gate experiment with repellent pieces as the obstacles. With these, students will enhance their knowledge and comprehension of biological phenomena as well as their experimental skills. Thus the plasmodial chemotaxis provides an excellent topic suitable for the senior high school biology curriculum.

**Key words:** 忌避化学物質, クエン酸, 最短経路, 新教育課程

#### 1. はじめに

近年, 日本では理科離れがすすみ(鶴岡ほか1996), 2006年に実施されたOECDのPISA調査によると日本の高校生の科学に対する意識が国際的に低い水準にある(加藤 2009). そのため, 今日の理科教育への課題と期待は一層大きくなってきている. 平成24年度からは, 高等学校の理数において新教育課程での教育が始まるが, 生命科学に関連の深い高等学校の生物領域は, 今回大幅に改訂されている. 「生物基礎(2単位)」「生物(4単位)」では, 最近20-30年の

間に明らかになった生物学の基礎的な事項が積極的に取り入れられているのである. また, 文科省高等学校学習指導要領の内容の取扱いでは, 「中学校理科との関連を考慮しながら, 生物学の基本的な概念の形成を図るとともに, 生物学的に探究する方法の習得を通して, 科学的な思考力, 判断力及び表現力を育成すること」とある. 新課程では, 教育内容が増加し, 質的に変化しているため, 従来とは扱い方が異なるものも多い. 実際の授業では, 指導方法の再考や新たな教材開発が求められる.

1. 〒700-0005 岡山市北区理大町1-1 岡山理科大学附属高校 Okayama University of Science High School, 1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama City, Okayama 700-0005, Japan. E-mail: kumakusu03@yahoo.co.jp

本研究の目的は、高校生の理科への興味・関心を高める教材の開発にあり、生きた真正粘菌を材料として具体的で分かりやすい生物教材実験を工夫・開発することである。真正粘菌(変形菌)は、南方熊楠の生涯を描いた漫画「猫楠」(水木 1996)や「もやしもん」(石川 2005)にも登場し、高校生にも親しみやすく興味ある生物である。粘菌変形体はアメーバ状の塊を形成し、主に森林内などの落葉や朽木で、強い光や危険な物質などを忌避しながら、餌となる物質を求めて言うように移動する。その化学走性は、よく知られた現象であり、従来から多くの研究報告がある(Carlile 1970, Kincaid and Mansour 1978, Knowles and Carlile 1978, Ueda and Kobatake 1982など)。教材利用の点では、高橋(1986a, 1986b)によって、主に正の化学走性実験の開発が試みられている。本研究では、変形体の負の化学走性に着目してその行動を制御する実験の開発に取り組んだ。特に、継続観察や生物現象を探索するための一組の実験観察を工夫することに重点を置いた。

## II. 方法

### 1. 変形体の培養

真正粘菌モジホコリ(*Physarum polycephalum*)の変形体は、適切な環境下では長さ数十センチメートルから数メートルにまで成長し、並外れて大きな単細胞の平面膜を形成する。細胞内では律動的な往復原形質流動を繰り返し、細胞全体が大規模な移動運動をする。変形体の培養は、クエーカーオートミールを餌として与え、スチロールケース(L36 cm×W26 cm×H4 cm)の2%寒天ゲル上で行った(18~20℃, 全暗)。増殖した変形体はゲル上に這い広がるので(図1A)、2日ごとに新しい寒天ゲルに植継いだ。実験には餌に集まっている変形体塊を使用した。

### 2. 変形体の餌探索実験

変形体と餌(オートミールフレーク)を2%寒天ゲル(9 cm径シャーレ)上に置いて、変形体が餌を探す様子を観察した。まず、培地の下に正三角形(一辺6 cm)とその重心を描いた紙を敷き、重心に変形体を

配置する(図1B)。変形体はオートミールフレークの10粒ほどを摂食している塊を用いる。次に餌(オートミールフレーク1粒)を正三角形の3つの頂点に置き、定温器(18~20℃, 暗所)中で培養する(餌3点実験法)。

約40時間後に、変形体が広がって餌をつなぐ経路を観察した。餌をつなぐ変形体の太い管を、透明フィルム(ポリ袋)に油性ペンで描いて写し取り、その距離をキルビメーターで測った。太い管から分岐した細管は無視した。3点の餌をつなぐ経路は、次の3つのパターンにモデル化し類別した。①重心から3つの頂点を最短距離でつなぐ経路(センター型)、②3点の餌を三角形でつなぐ経路(三角型)、③明らかな規則性がない経路(不規則型)。これらの経路パターンの出現頻度を10回以上の繰り返し実験から求めるとともに、変形体がつないだ餌接続経路の距離(PR)と図形上の最短距離(MSR)との比(PR/MSR)を計算し、最短経路からのずれの程度を調べた。

### 3. 忌避化学物質と忌避作用の検証

変形体の化学走性はpHによる影響を受ける(Ueda and kobatake 1982)。変形体はpH4~7の溶液には誘引されるが、それ以外は忌避する。このことは、クエン酸リン酸緩衝液(pH2.6~7.0)のpH=3(0.1 mol/Lクエン酸39.8 ml+リン酸水素二ナトリウム10.2 ml)とpH=5(0.1 mol/Lクエン酸24.3 ml+リン酸水素二ナトリウム25.7 ml)の溶液で検証した。忌避化学物質としては、生徒が安全に扱えるクエン酸溶液(0.05~0.3mol/L)および0.2mol/Lの酢酸溶液を用いた。各溶液は、穴あけ機で円形に打ち抜いた濾紙(直径5 mm, パンチ濾紙)の2枚重ねにしたものに、浸み込ませた。また、試験液を濾紙片と同じ大きさ(厚さ2 mm)の5%寒天ブロックに固めたものを用意した。忌避物質は、餌3点実験法の培地に適宜配置し、10枚以上の培地で実験した。変形体が形成する餌接続経路は、次の3タイプに類別した。①センター型：三角形の重心から3つの頂点までの最短距離を太い管でつなぐ、②不完全センタ

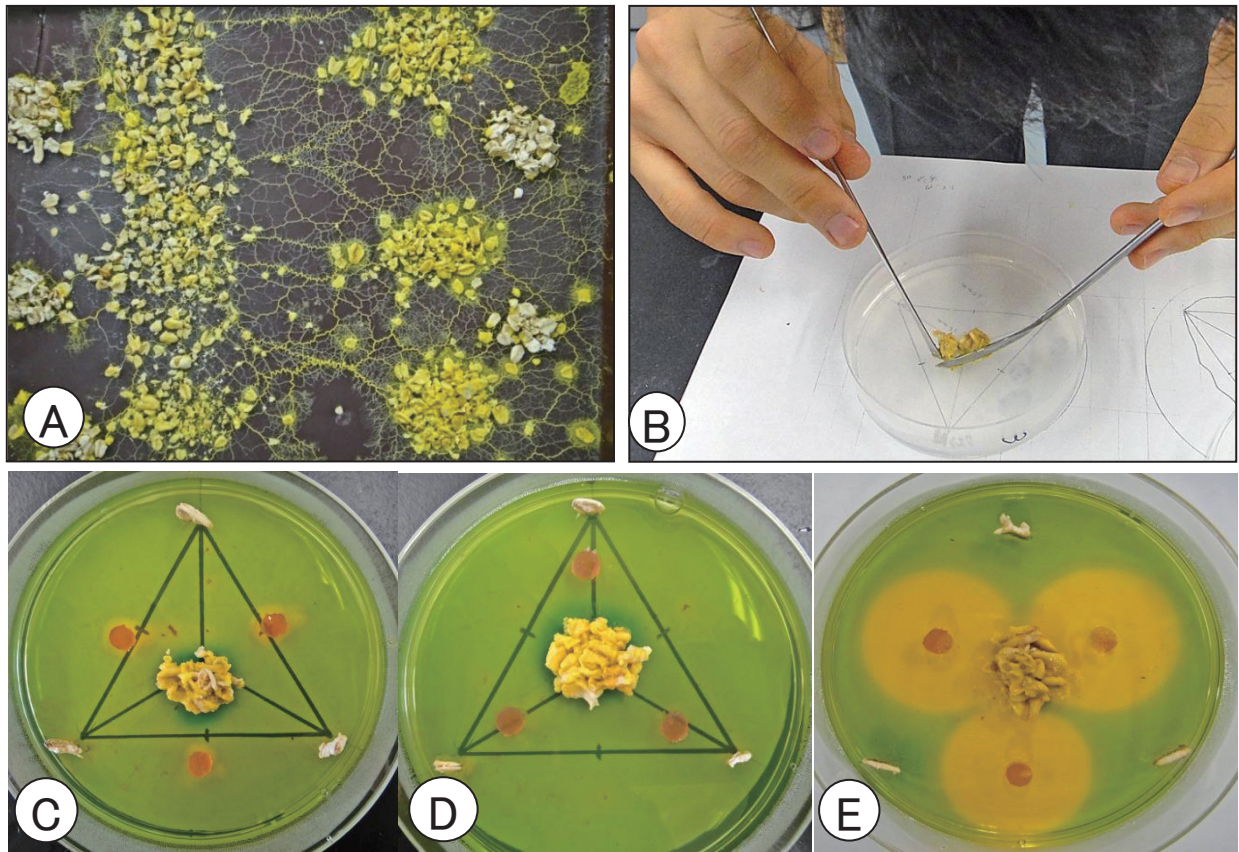


図1. 粘菌変形体の培養と実験方法. A: 2%寒天ゲル上でオートミールを餌として培養する. モジホコリ (*Physarum polycephalum*) の変形体は左端の古い培地から這い出して、新たに与えた餌のオートミールを摂食したのち、右方向に広がった. B: およそ10片のオートミールに取り付いている変形体をスプーンで集めて実験培地に移植する. C: 一辺が6 cmの正三角形の中央に配置した変形体に対し、餌と餌の間に忌避物質を配置する. D: 変形体に対し、変形体と餌との間に忌避物質を配置する. E: 寒天ゲル中のBTBが黄色に変色した領域は、クエン酸の拡散領域(6時間後)を表す.

一型：重心から2つの頂点までを太い管でつなく、  
 ③その他：一本の太い管でつながるものや規則性が見られないもの. そして、各経路タイプの出現頻度(%)を記録した.

変形体の忌避作用は2通りの忌避物質配置実験で検証した. 1)忌避物質を餌と餌の間に配置する実験：餌3点実験法で正三角形の辺の中間に忌避物質を設置する(図1C), 2)忌避物質を変形体と餌との間に配置する実験：餌3点実験法で餌と変形体をつなぐ線上の中間に忌避物質を置く(図1D). 忌避物質の拡散の様子は、pH指示薬であるBTB液を寒天ゲル容量に対して1/5の割合で加え、ゲルの色の変化で確認した(図1E). 対照実験では忌避物質の代わりに水を含ませた濾紙を配置して実験した.

#### 4. 忌避化学物質によるゲート実験

変形体が忌避物質を避けながら、餌まで到達する様子をゲート実験で調べた. 角形プラスチックケース(L14 cm×W10 cm×H2.5 cm)の対角に配置した餌と変形体との間に、忌避物質か水を含ませたパンチ濾紙(径5 mm)を5つ等間隔で直線状に配置した(図8A, 変形体に近い方から●○●●○の順で、○は水、●はクエン酸溶液). 変形体が忌避物質を避けて対角の餌に到達する経路は、Aルート(対角線に対する比=約1.20), Bルート(対角線に対する比=約1.30), 両経路をたどるABルートのいずれかになると仮定した. 対照実験では、すべて水を含ませた濾紙を配置したので、対角線で餌をつなぐ経路をC(対角線に対する比=約1.0)とした. 変形体は18~20℃の暗所で培養し、約40時間後に変形体が形成した経路をA, B, AB, Cに類別した.



### III. 結果

#### 1. 最短経路の検証

変形体はいったん円形に広がり、最終的には餌と餌を最短でつなぐ太い管のみを残した。変形体の広がる先端部の移動速度は培養開始16時間から24時間目にかけて $3.4 \text{ mm} \pm 1.5 \text{ mm/時}$  ( $n=10$ )であった。

正三角形の重心から3つの頂点に向かって最短距離で餌をつなぐ経路(センター型, 図2A)は, 36%の頻度で出現した(表1)。そのルートは, 平均して最短距離の1.20倍であった。他には, 三角型(図2B)が出現しており, その距離は最短経路に対して平均1.39倍であった。センター型の頻度は高くはないものの, 変形体自身が最短経路を形成する能力をもつことが示された。

#### 2. 忌避物質に対する応答

忌避物質の拡散は緑色の寒天ゲルに同心円状の黄色斑が拡大する様子で確認した(上述, 図1E)。パンチ濾紙に $0.2 \text{ mol/L}$ クエン酸溶液( $\text{pH}=1.8$ )を含ませたとき, 20時間後(温度 $18^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ )には周囲に直径約6 cmの黄色円が形成された。濾紙直下の $\text{pH}$ は3.0で拡散末端部の $\text{pH}$ は4.3であり, その $\text{pH}$ 勾配は約1.3であった。40時間後には培地全体が黄色になり, 濾紙の下部は $\text{pH}=5.0$ , 寒天ゲル末端部は $\text{pH}=5.3$ で, 濃度勾配はほとんどなくなった。

$\text{pH}$ に対する応答を見ると, 培養約40時間後にクエン酸リン酸緩衝液の $\text{pH}=5$ ではほとんど忌避効果が認められなかった(図3A)。 $\text{pH}=3$ では, センター型が高い頻度で誘導された(図4)。 $\text{pH}=1.7$ の酢酸溶液( $0.2 \text{ mol/L}$ )に対しては, センター型と不完全センター型が合わせて70%の割合で出現した(図4)。しかし, 太い管から分枝した細い管も多く見られたので, 酢酸の忌避作用を確認するために, 酢酸濾紙( $0.2 \text{ mol/L}$ )を重ねた。すると, 6時間後には周囲に変形体の忌避円が現れた(図3B)。クエン酸濾紙( $0.2 \text{ mol/L}$ ,  $\text{pH}=1.8$ )でも同様の操作を行ったが, クエン酸には6時間後に顕著な忌避円は現れなかった。酢酸には即効性が認められた。

クエン酸溶液の濃度への応答を, クエン酸を餌間

に配置して調べた。培養約40時間後に $0.1 \text{ mol/L}$ クエン酸溶液では, 不規則な型が多く, センター型と不完全センター型の出現頻度は対照実験とあまり変わらなかった(図5)。しかし,  $0.2 \text{ mol/L}$ クエン酸溶液では, センター型(図3C)と不完全センター型(図3D)が合わせて70%の頻度で出現した(図5)。さらに,  $0.3 \text{ mol/L}$ クエン酸溶液では, これらが80%になった。こうしたことから, 変形体は強酸性物質であるクエン酸溶液( $0.2 \sim 0.3 \text{ mol/L}$ )や酢酸溶液( $0.2 \text{ mol/L}$ )に忌避応答することが分かった。

#### 3. 迂回ルートの探索

餌3点実験法で, 忌避物質のクエン酸溶液( $0.2 \text{ mol/L}$ )を, 餌と変形体の間に置く実験を行った(図6)。培養40時間後に3点の餌をつなぐ経路がどの程度できているか調べたところ, 餌間のつながりは極めて悪かった(図7)。それは, 変形体が忌避物質を避けて迂回し, 40時間後までに餌に到達できなかったためであった(図6A, B)。しかし, 64時間後に観察すると, 変形体は餌間をつなぐ環状の接続経路を形成した(図6C)。その時, クエン酸濾紙( $0.2 \text{ mol/L}$ 溶液)を重ねて忌避物質量を増すと, 74時間後には太い管のみで接続する環状経路になった(図6D)。クエン酸を忌避するこの迂回経路は変形体と餌をつなぐ直線距離の約1.6倍( $n=3$ )の長さになっていたが餌間を最短経路でつないでいた。

#### 4. ゲート実験

忌避物質を含まず水を含んだ濾紙を置いた場合に, 変形体はいったん広がった後に, 主に対角線をたどるCルート(最短経路)で餌をつないだ(表2)。変形体と餌との間に忌避物質を設置すると, 変形体の太い管は水を含んだ濾紙の位置を通過する経路をとった(図8B, C)。忌避物質のクエン酸を避ける時には, 変形体に近い水濾紙を抜けるAルートだけではなく遠くの水濾紙を経由して餌につながるBルートをも形成した(図8C)。変形体は, 忌避物質の濃い場所を避けて, 濃度が薄くて $\text{pH}$ の高い間隙を貫いていた。

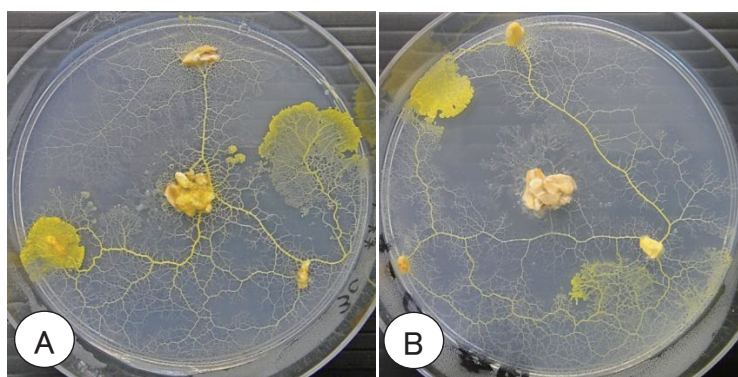


図2. 餌3点実験法の結果. A: センター型に経路をつくった変形体(40時間後). B: 三角型に経路をとった変形体.

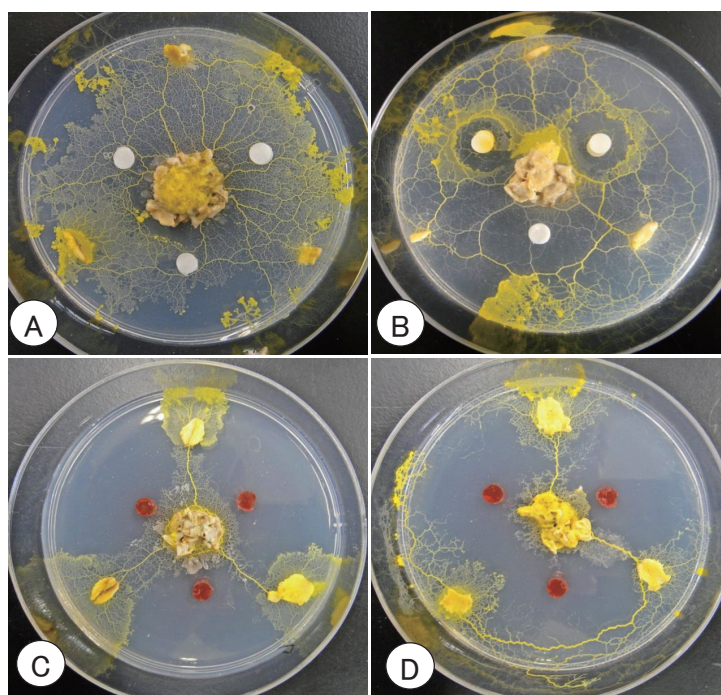


図3. 忌避物質に対するモジホコリ変形体の応答. A: 不規則型経路(pH=5のクエン酸リン酸緩衝液, 40時間後). B: 酢酸溶液(0.2 mol/L)を40時間後に重層追加したときに形成された忌避円(6時間後). C: センター型経路(0.2 mol/Lクエン酸溶液, 40時間後). D: 不完全センター型経路(0.2 mol/Lクエン酸溶液, 40時間後).

表1. 餌3点実験でモジホコリ(*Physarum polycephalum*)の変形体がつないだ経路型の出現頻度(%)と餌経路の最短経路に対する平均距離比(18°C暗所で培養2日後).

経路型	出現頻度 (%)	例数	平均距離比* (標準偏差)
センター型	36	18	1.20 ± 0.07
三角型	22	11	1.39 ± 0.13
不規則型	42	21	
計	100	50	

\*変形体がつないだ経路と図形の最短経路の距離比の平均値 (n=5)

表2. 異なる濃度のクエン酸ゲートを通過するモジホコリ(*Physarum polycephalum*)変形体の経路(ゲート設定は方法および図8参照).

クエン酸溶液濃度 (mol/L)	例数	変形体の経路*			
		A	AB	B	C
0.05	6	5	1	0	-
0.1	6	4	1	1	-
0.2	8	2	4	2	-
0.3	15	5	6	4	-
対照(水)	10	2	0	0	8

\*経路は, Aルート(対角線との比=約1.20), Bルート(対角線との比=約1.30), 両経路をたどるABルート, Cルート(対角線との比=約1.0)を類別した. 変形体が実際につないだCルートでは, 平均値が1.10±0.03(n=8)であった.

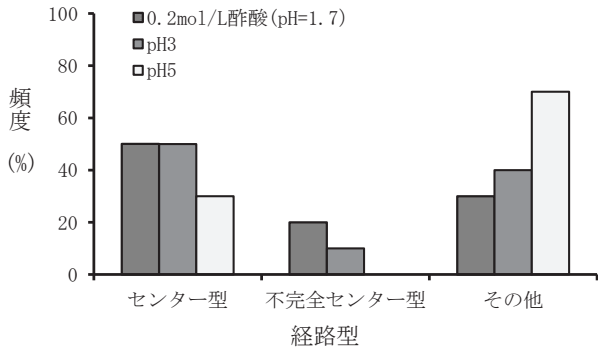


図4. 酢酸と緩衝液に対するモジホコリ変形体の応答.

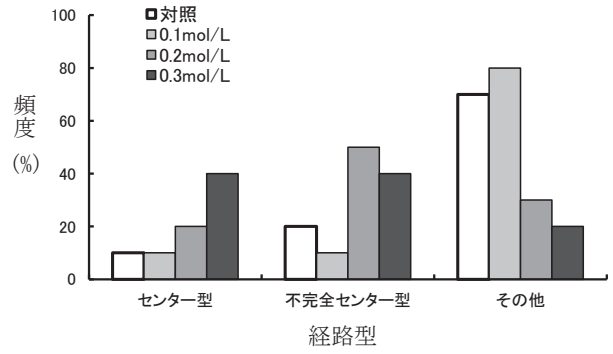


図5. 異なる濃度のクエン酸に対するモジホコリ変形体の応答.

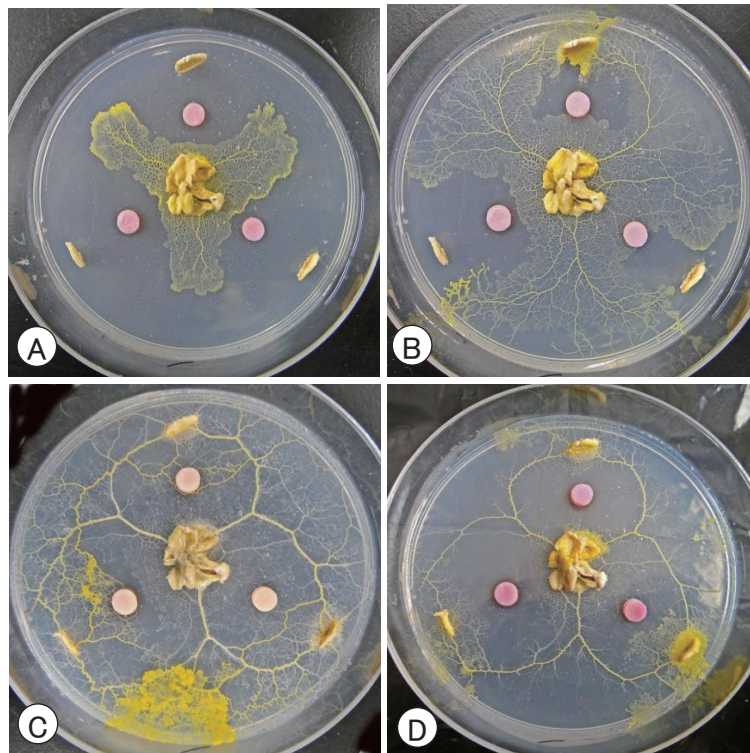


図6. 変形体と餌の間に忌避物質を配置した餌3点実験. A: 忌避物質のクエン酸溶液を変形体は避けて広がる. B: 忌避物質を迂回して餌に到達する変形体. C: 忌避物質を避けてつながる変形体の太い管(培養64時間後). D: 忌避物質を避けてつながる変形体の太い管(0.2 mol/Lクエン酸濾紙を重層して12時間後).

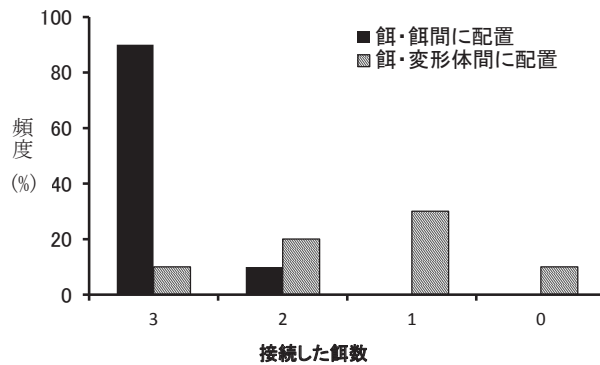


図7. 異なる配置の忌避物質(クエン酸0.2 mol/L)に対する変形体の応答(培養40時間後).



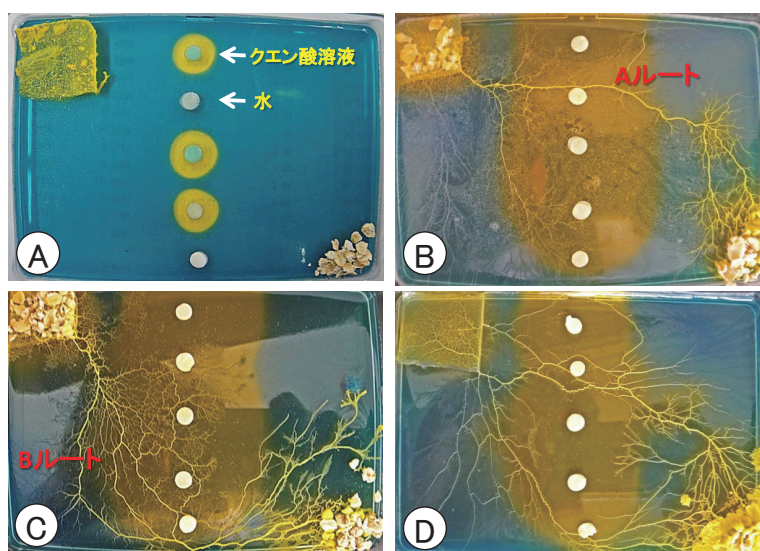


図8. クエン酸ゲート実験. A: 寒天ゲル上に直線状に配置したクエン酸濾紙と水濾紙. クエン酸の拡散領域は寒天に混ぜたBTB液が黄変している. B: Aルートを通過する変形体(40時間後). C: Bルートを通過する変形体. D: AとBの両ルートを通過する変形体.

異なる濃度のクエン酸溶液の濃度に対する変形体の応答を表2に示す. 低濃度(0.05 mol/L)のクエン酸溶液に対しては, 変形体はこれをあまり忌避せず, Aルートの頻度が高かった. しかし, 0.2 mol/Lクエン酸溶液ではAルートだけではなく, Bルートへの迂回数が増加し, AとBの両経路でつながるABルート(図8D)の頻度が高くなった. 0.3 mol/Lクエン酸濃度では, A, B, ABの3通りのルートに分散した. 変形体は, 障害物があれば迂回路を探し出し, 餌に最短距離でたどり着くだけでなく複数の経路を形成した.

#### IV. 考察

##### 1. 粘菌変形体の化学走性

粘菌変形体は単細胞ではあるが, 合理的で柔軟な行動を示し, 自律性と環境適応力をもった興味深い生物である. 変形体が糖類やアミノ酸類に対して正の化学走性をもつことはよく知られている. 糖類では, グルコース, マルトース, ガラクトース等に対して正の化学走性が確認され(Carlile 1970), アミノ酸は糖よりも誘引性が弱い(Kincaid and Mansour 1978, McClory and Coote 1985). 一方, 変形体は負の化学走性も示す. 忌避化学物質としては食塩水や

塩化カリウム溶液などがある(高橋 1986b). 本研究では, 変形体がpH感受性をもつことから, 強酸性物質の利用を考え, 代謝産物であるクエン酸と酢酸をとりあげた. これらは, 食品添加物として利用されるなど, 強酸性物質であっても試薬として容易に利用できる. クエン酸( $C_6H_8O_7$ , 分子量192)は柑橘類に多く含まれる有機酸で, 酢酸( $C_2H_4O_2$ , 分子量60)のような刺激臭をもたない. クエン酸の忌避効果は, 酢酸よりも長時間維持されるため, 実験に適している. 高濃度のクエン酸溶液(0.2~0.3 mol/L, pH=1.7~1.8)を利用すれば, 変形体の負の化学走性を明瞭に観察できるので, 簡便な実験法となる.

忌避物質(0.2 mol/Lクエン酸)は, 実験開始時に濾紙の下部でpH=1.8を示した. これは20時間後にpH=3.0, 40時間後にpH=5.0に変化した. 忌避作用はpHが3.0以下で効果があったので, 強度の異なる障害物としてクエン酸(0.2 mol/L)が作用したのは20時間程度と推定される. 実際, 培養時間が長くなると変形体の末梢部で細かい管がゲル全面に広がる傾向が現れ, 忌避作用が消失した. 忌避作用は, 濾紙を重ねて忌避物質を追加することによって回復する. 従って, 長時間培養実験も濾紙の重層によって簡便に実施できることが示された.

## 2. 実験上の留意点

粘菌変形体は変化自在であり、その広がり方と餌へのつながり方は始めに設置する変形体の量と培養温度、与える餌の量などが影響する(小林ほか 2007)。本実験ではおよそ10粒のオートミールフレークにとりついている変形体の塊を用い、餌として1粒のオートミールフレークを設置した。最初に設置する変形体量は、例えばその量が少ないと、典型的なセンター型のパターンが形成されず、不完全型になる。また、与える餌の量が多いと変形体がそこに長く留まるため、経路形成に長い時間を要する。使用した寒天ゲルの広さは最大で幅13 cmであり、変形体の平均移動速度が約3.4 mm/時(18~20℃)であったことから、餌間をつなぐ接続経路の観察は、培養を開始しておよそ40時間後を目安とした。変形体が広がりつながる様子はゆっくりと変化するため、典型的な接続パターンを現している時間帯があり、観察はその数時間内に行えばよい。変形体の移動速度は温度の影響を受けるため、結果の観察時間は培養温度により調節できる。本実験では培養温度を18~20℃として、実験開始の翌日から翌々日にかけて断続的に観察したが、培養温度を18~25℃の範囲で設定することで授業計画に適切に合わせることも可能である。

## 3. 生物教育への利用

粘菌変形体は、教材生物に適したいくつかの特性をもつ。例えば、培養が容易であること(寒天ゲルあるいはペーパータオルを基物に、オートミールを餌として培養する)、2日間の培養(18℃~20℃暗所)で実験材料として必要な量が得られること、実験用途が多様であることなどがある。また、変形体を暗所でゆっくりと自然乾燥すると菌核を形成するため実験に再使用するまで保存できる。粘菌の教材利用例には、原形質流動の観察(高橋 1983)、細胞分画法(高橋 1980, 1984)、化学走性の実験(高橋 1986a, 1986b)、遺伝実験への利用(高橋ほか 1990)、生活環境の観察(高橋 1991)、酵素の競争阻害実験(高橋 1985, 1992)などがある。

理科離れの改善には、創造性を育む実験やリアルな観察が求められる(経済同友会 2011)。本研究の結果から筆者は、粘菌変形体の3つの新たな利用法を提案する。①餌3点実験法による最短経路探索実験、②餌と忌避物質(クエン酸)の適宜配置による化学走性実験、③忌避物質を配置するゲート実験である。これらは、餌間をつなぐ接続経路を観察するだけでなく、そのパターンをモデル化して比較するため、データ整理や更なる考察につなぐことができる。また、3つの実験を継続して行えば、仮説の設定、観察・実験の計画立案、観察・実験の実施、結果の解釈等、いわゆる一般的な探究の過程を繰り返して展開できる。新課程の「生物(4単位)」の実験観察や「課題研究(1単位)」の探究活動において、粘菌変形体を利用した実験は有用である。

本実験は科学部の生徒の協力で進めたものであり、方法が簡便であるため、生徒は実験計画を容易に提案し、興味を持って取り組んだ。必要な実験用具は、シャーレ、四角ケース、濾紙であり、薬品もクエン酸や酢酸と培地の寒天のみである。定温器がなくとも、変形体は酷暑や酷寒の時期を避ければ、室温でも培養することができる。理科教育におけるプロセスとスキルの重要性は不易であり、本研究の提案する3つの実験一組は、中学や高校で行う生物実験として、また科学部の研究活動の一環として有効だと考えられる。

## V. 謝辞

本研究で利用した粘菌変形体は、岡山理科大学理学部の南善子准教授から株分けしていただいた。岡山理科大学附属高校中高一貫コースの築地克弥君、松田千夏さん、鈴木貴博君、松野哲朗君、坂東潤一郎君は、科学部の活動を通して本研究に積極的に協力してくれた。ここに、紙上をお借りして感謝申し上げる。

## 摘要

1. 粘菌(*Physarum polycephalum*)変形体を利用して、高校生物教育で活用できる教材実験を開発し



た。変形体は有害な化学物質を忌避する行動をとることから、強酸性のクエン酸溶液(0.2 mol/L, 0.3 mol/L濃度)や酢酸溶液(0.2 mol/L濃度)を忌避化学物質として与えて変形体の行動を制御した。

2. 寒天ゲル上で餌を正三角形(一辺6 cm)の頂点に配置し、その重心に変形体を置いた(餌3点実験法)。餌と餌の間に忌避物質を置くと、三角形の重心から3頂点の餌を最短距離でつなぐ経路(センター型)が高頻度で形成された。餌と変形体との間に忌避物質を配置した場合には、変形体は忌避物質を迂回する環状の経路を形成した。さらに、忌避物質を餌と変形体の間に線上に並べたゲート実験では、変形体は障害物を避けて行動し、餌に最短距離でたどり着く経路だけでなく、迂回路をも探し出した。

3. 新教育課程の高校生物「生物(4単位)」「課題研究(1単位)」で有用な教材実験として、次の3つの実験一組を提案する。①餌3点実験法によって最短経路で餌をつなぐ実験、②餌と忌避物質(クエン酸)の適宜配置による化学走性実験、③忌避物質を障害物とするゲート実験。これらの実験は単なる観察だけでなく、モデル化して比較することでデータ整理や更なる考察につなぐことができる。

## 引用文献

Carlile, M. J. (1970). Nutrition and chemotaxis in the myxomycete *Physarum polycephalum*. *J. Gen. Microbiol.*, 63: 221-226.

石川雅之(2005). もやしもん(2). 講談社.

加藤巡一(2009). 理科教育と理科離れの実態(三)高校生・まとめ. 神戸松蔭女学院大学研究紀要 人文科学・自然科学篇 50: 65-80.

経済同友会(2011). 科学技術立国を担う人材育成の取り組みと施策 - 経営者アンケート調査を踏まえて - 報告書. <http://www.doyukai.or.jp/policy-proposals/articles/2011/pdf/110602b.pdf>

Kincaid, R. L. and Mansour, T. E. (1978). Chemotaxis toward carbohydrates and amino acid in *Physarum*

*polycephalum*. *Exp. Cell. Res.*, 116: 377-385.

Knowles, D. J. C. and Carlile, M. J. (1978). Growth and migration of plasmodia of the myxomycete *Physarum polycephalum*: the effect of carbohydrates, including agar. *J. Gen. Microbiol.*, 108: 9-15.

小林 亮・手老篤史・中垣俊之(2007). 粘菌による迷路の解法. *細胞工学* 26(7): 769-773.

McClory, A. and Coote, J. G. (1985). The chemotactic response of the myxomycete *Physarum polycephalum* to amino acids, cyclic nucleotides and folic acid. *FEMS Microbiology Letters*, 26 (2): 195-200.

水木しげる(1996). 猫楠. 角川ソフィア文庫 角川書店.

高橋和成(1980). 粘菌変形体を材料とした簡単な細胞分画. *岡山県高等学校教育研究会理科部会誌* 30: 28-34.

高橋和成(1983). 原形質流動の観察-変形体糸を教材とした生徒実験-. *教材生物ニュース* 98: 161-165.

高橋和成(1984). 細胞分画法の教材化実験とミトコンドリア分画の酸素呼吸反応を調べる教材実験の開発. *岡山県立鴨方高校研究紀要* 3: 61-88.

高橋和成(1985). コハク酸脱水素酵素の阻害について. *岡山県高等学校教育研究会理科部会誌* 35: 74-76.

高橋和成(1986a). 変形菌*Physarum polycephalum*の変形体を利用した新しい教材実験の開発. *生物研究* 25: 23-33.

高橋和成(1986b). 変形菌*Physarum polycephalum*の変形体の走化性とその教材実験. *岡山県高等学校教育研究会理科部会誌* 36: 19-28.

高橋和成・菅原正夫・中前恵美子(1990). 変形菌を用いた遺伝教材実験の開発に関する研究. *岡山朝日研究紀要* 11: 27-59.

- 
- 高橋和成(1991). 生活環観察の変形菌教材利用に関する研究. 岡山県高等学校教育研究会理科部会誌 41: 37-40.
- 高橋和成(1992). コハク酸脱水素酵素反応の定量と競争阻害に関する教材実験-変形体ミトコンドリア浮遊液を用いて-. 岡山の生物教育 岡山県小中高教育研究会理科部会. pp. 185-191.
- 鶴岡森昭・永田敏夫・細川敏幸・小野寺彰(1996). 大学・高校理科教育の危機-高校における理科離れの実状-. 高等教育ジャーナル(北大) 1: 105-115.
- Ueda, T. and Kobatake, Y. (1982). Chemotaxis in plasmodia of *Physarum polycephalum*. In Henry C. A. and John W. D. (eds) Cell biology of *Physarum* and *Dicymium* I. Academic Press, New York, pp.111-143.
- (2012年1月5日受理)