

B-153 粘菌の走性における情報統合メカニズム (2)

三宅美博・○村上博文・田畑 淳 (金沢工大 情報工学)
 矢野雅文 (東北大学 電気通信研)・清水 博 (東大 薬学)

1. はじめに

どうして粘菌は複雑な外部環境下でも個体全体として柔軟かつ協調的に行動することができるのであろうか？ これまでに粘菌の走性における情報処理においては、周期数分の細胞内リズムとそれらの相互作用でできる空間的位相パターンが重要な役割を担うことが実験的に示されてきた。例えば、粘菌の一部に誘引的な化学刺激を与えると振動数が増加¹⁾、局所的振動数変動は相互引き込みを通してそのまわりに位相進みのパターンを生成し²⁾、その方向性が粘菌の行動方向に一致すること⁴⁾が報告されている。我々はさらに前発表(1)において、複雑な外部環境下での行動の協調性の発現には、クラスタ間での振動数に関する競合と同調が情報統合メカニズムとして重要であることを報告した。

そこで本研究では、上記メカニズムを検証するために粘菌の局所的な細胞内リズムを温度振動によって人為的に変調し、クラスタ間での振動数の大小関係に依存した相互作用と行動方向の変化について解析する。さらに工学的に応用可能な情報統合機構を提案する。

2. 方法

2.1 真性粘菌変形体

真性粘菌変形体 (*Physarum plasmodium*) はCampの方法⁵⁾で培養し、スクレロチウムと呼ばれる状態に保存した。使用前には1.5%の無栄養寒天シート上にスクレロチウムを置き、脱イオン水で湿らせ、室温(20-23℃)の暗所で一晚放置し変形体に戻した。その変形体のファン先端部のシート状の部分を取り出し実験に用いた。

2.2 実験システム

本研究で我々が新たに開発した実験システム⁶⁾の構成をFig. 1aに示す。特に点線で囲んだ測定部の詳細な配置はFig. 1bに示す。本システムではパソコン1からの出力を電流増幅し、4つのサーモモジュール(thermo module)に伝え、ペルチェ効果を利用してFig. 1cの様なシート状の粘菌変形体(3mm×25mm)の4つの領域に独立に温度振動を入力する。そして寒天の温度を熱電対(thermo pile)で測定し、電圧増幅を行いパソコン1にフィードバックして温度の自動制御を行う。このとき同時にビデオカメラで粘菌の反射光画像を一定時間(2秒)毎にパソコン1に取り込み前発表(1)と同じ方法を用いて画像処理を行う。なお、粘菌の反射光強度は粘菌の原形質の厚さに近似的に比例していることを確認した。また、温度の自動制御のパラメータ変更、温度振動と粘菌の反射光強度の経時変化の実時間表示とデータの保存はパソコン2を使用する。

2.3 データ解析

前発表(1)と同様な方法を用い、粘菌の反射光強度の時間振動成分として原形質の厚さ振動(細胞内リズムに対応)を、振動以外の成分として原形質分布量(行動パターンに対応)を求める。原形質厚さ振動からは周期と位相勾配を、原形質分布量からは行動速度の指標である原形質移動速度を求めた。特に、位相勾配は領域番号(region No.)の小さい側が位相進みのとき正の値を取るように極性を定める。原形質移動速度も領域番号の小さい側に行動方向が向かうとき正の値を取るように極性を定める。

3. 結果

3.1 領域1-2と領域3-4の温度振動の周期を一致させた場合

Fig. 2に温度振動(temperature oscillation)、原形質厚さ振動(thickness oscillation)と原形質移動速度(migration velocity)の時間発展パターンの一例を示す。

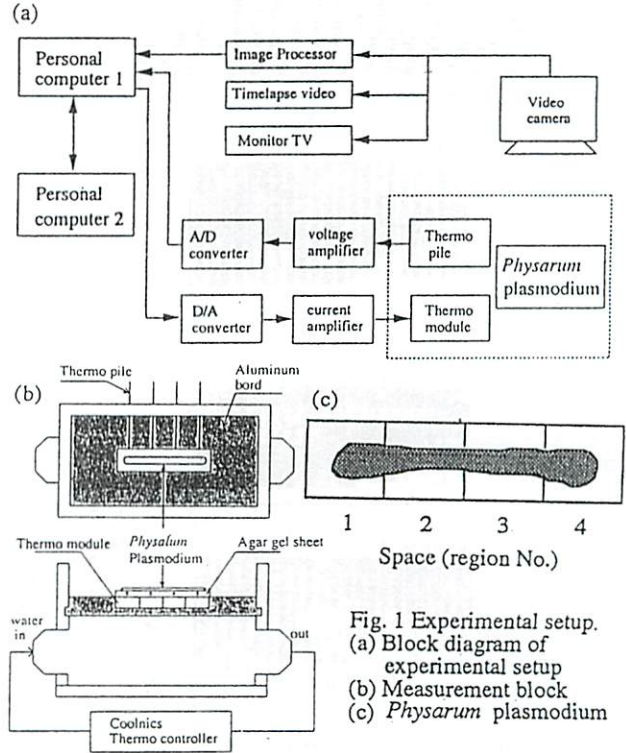


Fig. 1 Experimental setup.
 (a) Block diagram of experimental setup
 (b) Measurement block
 (c) *Physarum plasmodium*

グラフの縦軸は上端方向を領域1に、下端方向を領域4とし、横軸には時間をとる。Fig. 2aは温度振動を示しており、黒と白がそれぞれ振動の山と谷に対応している。温度振動は正弦波状の振動(20±6℃)とし、領域1-2と領域3-4はそれぞれ同一周期(130秒)とした。さらに領域1は領域2に対して、領域4は領域3に対して90°位相進みに設定した。Fig. 2bの原形質厚さ振動は温度振動の周期と位相関係に同調しており、領域1-2においては領域1方向が、領域3-4においては領域4方向が位相進みとする極性が逆向きの2つの同調領域が定常的に生成した。Fig. 2cは原形質移動速度を示しており、各メッシュ中の黒の比率が高いほど領域1方向に、白が高いほど領域4方向に対応している。このとき移動方向は領域1-2において領域1方向に、領域3-4において領域4方向に分かれおり、各領域における移動方向はそれぞれ位相進み方向に対応した。以下に同条件下で得られたデータに対し統計処理した結果をFig. 3に示す。

Fig. 3aにおいて点線は各領域における温度振動の周期を示し、実線は原形質厚さ振動の周期を示している。各領域の原形質厚さ振動と温度振動の周期は一致していることが同図より読み取れる。Fig. 3bは各領域の位相勾配を示しており、正符号が領域1方向の位相進みに、負符号が領域4方向の位相進みに対応している。このとき位相勾配の符号変化点としての位相の極性の境界は領域2-3の中央に位置していた。Fig. 3cは各領域の原形質移動速度を示しており、正符号が領域1方向に、負符号が領域4方向に対応している。このとき移動速度の符号変化点としての行動の極性の境界も領域2-3のほぼ中央に位置した。

3.2 領域1-2の温度振動の周期を領域3-4の周期に比べて短くした場合

Fig.4の表記はFig.2と同じである。Fig.4aの各領域の温度振動の周期は領域1-2の周期が基準周期(130秒)より10秒短くし、領域3-4の周期では基準周期より10秒長くした。さらに領域1は領域2に対して、領域4は領域3の対して90°位相進みに設定した。このときFig.4bの原形質厚さ振動において、領域1-2の振動が領域3-4にいくい込むような競合的な相互作用が領域間に見られた。また、Fig.4cの行動方向の境界の位置も領域3-4側へ移動するのが見られた。以下に同条件下で得られたデータに対する統計処理した結果をFig.5に示す。

Fig.5の表記方法はFig.3と同じである。Fig.5aの原形質厚さ振動の周期は領域1-2では温度振動の周期に一致しているが、領域3-4の周期は領域1-2の周期への引き込みが見られた。このときFig.5bの位相勾配の符号変化点としての位相の極性の境界は領域3-4側へ移動した。また、Fig.5cの移動速度の符号変化点としての行動の極性の境界も領域3-4側へ移動した。

4. 考察

位相の極性が逆向きの2つのクラスタにおいて、両者の周期を一致させた状態から異なるようにした場合、位相勾配のクラスタ境界は粘菌の中央の位置から長周期側へ移動し、原形質移動速度のクラスタ境界もそれに対応して変化した。また、行動方向はそれぞれ位相進みに対応した。したがって、短周期側のクラスタが長周期側を引込みむような競合が確認されたことになる。このことは、クラスタ間での周期の大小関係による競合と同調が走性における情報処理で重要な役割を担っていることを明確に示している。これは前発表(1)で提案された情報統合メカニズムに対応する。

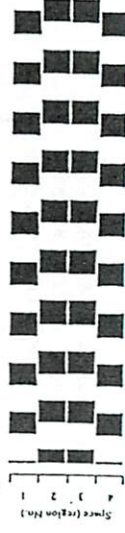
5. おわりに

粘菌は、細胞内リズムの相互引き込みを通して大域的なパターンを生成し、環境からの情報を統合し、協調的行動を生成することが明らかになった。このことは工学的ネットワークシステム(例えば、マルチエージェントシステム)の協調制御においても、要素間の相互作用メカニズムとして、リズムの相互引き込みが有効であることを強く示唆している。

参考文献

- 1) A. C. H. Durham, E. B. Ridgway "Control of chemotaxis in *Physarum polycephalum*", J. Cell Biol. 69, p218-223 (1976)
- 2) H. Tanaka, H. Yoshimura, Y. Miyake, J. Imaizumi, K. Nagayama, H. Shimizu "Information Processing for the organization of chemotactic behavior of *Physarum polycephalum* studied by micro-thermography", Protoplasma 138, pp98-104(1987)
- 3) Y. Miyake, N. Yano, H. Shimizu "Relationship between endoplasmic and ectoplasmic oscillations during chemotaxis of *Physarum polycephalum*", Protoplasma 162, pp175-181(1991)
- 4) K. Matsumoto, T. Ueda, Y. Kobatake "Reversal of thermotaxis with oscillatory stimulus in the plasmodium of *Physarum polycephalum*", J. Theor. Biol. 131, pp175-182(1988)
- 5) Camp, W. G. "A method of cultivating myxomycete plasmodia.", Bull. Torrey Bot. Club 63, pp205-210(1936)
- 6) 足立, 市川, 紺分, 白川, 鈴木, 三井, 宮崎, "生体(粘菌)における自律分散の情報処理メカニズムの研究", 金沢工業大学卒業論文(1992)
- 7) R. A. Brooks, "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot," IEEE Journal of Robotics Automation, vol. RA-2, no. 1, pp14-23(1986)
- 8) 1991年並列/分散/協調処理に関する「大沼」(7-7-7) 3777 (SWoPP 大沼'91), 情報処理学会研究報告, 91-A1-77(1991)

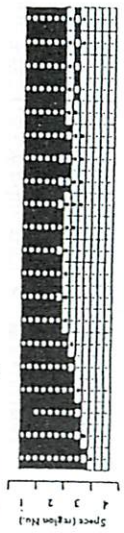
(a) Temperature oscillation



(b) Thickness oscillation



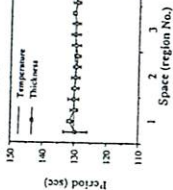
(c) Migration velocity



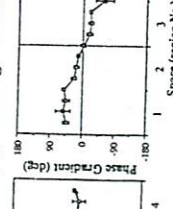
Time
5 min

Fig.2 Time evolution of temperature oscillation, thickness oscillation and migration velocity.

(a) Period



(b) Phase gradient



(c) Migration velocity

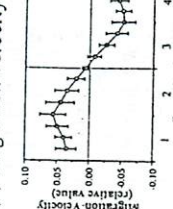


Fig.3 Spatial pattern of period, phase gradient and migration velocity. (n = 5)

(a) Temperature oscillation



(b) Thickness oscillation



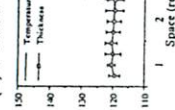
(c) Migration velocity



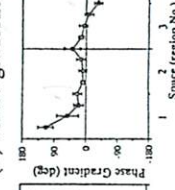
Time
5 min

Fig.4 Time evolution of temperature oscillation, thickness oscillation and migration velocity.

(a) Period



(b) Phase gradient



(c) Migration velocity

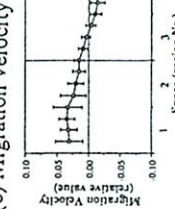


Fig.5 Spatial pattern of period, phase gradient and migration velocity. (n = 5)