

# B-152 粘菌の走性における情報統合メカニズム (1)

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

## 1. はじめに

生物は非常に多数の要素から構成されるシステムである。しかも、複雑な外部環境下においても、個体全体としての統合性を維持し協調的に行動することができる。どのような情報統合メカニズムがはたらいているのだろうか？

我々は、真性粘菌変形体 (*Physarum plasmodium*) の走性 (taxis) に着目している。これは、巨大なアメーバ状の単細胞生物であり脳などの集中的な情報処理器官を持たないにも関わらず、Fig. 1に示す様に一部に刺激を与えると、刺激部位だけでなく個体全体として刺激部位への協調的行動が生じる。カルシウムやATP等の濃度振動は、細胞内のいたるところに観察されており<sup>1)</sup>、環境からの情報を処理するためには、これらの細胞内リズムの相互引き込みが重要な役割をはたしていると考えられている。例えば、誘引刺激においては振動数が増加し忌避刺激では減少する<sup>2)</sup>。さらにこのような刺激に対して大域的な位相パターンを形成し、誘引刺激では刺激部位が位相進み、忌避刺激では位相遅れとなる<sup>3)</sup>ことが報告されている。しかし粘菌が複雑な環境下において個体としてまとまった行動をするためには、環境からの情報を受容するだけでなく統合する働きが必要である。

そこで本研究においては、粘菌の2カ所に同時に誘引刺激を与えることにより、環境から受けた2つの情報が細胞内リズムの相互作用をへてどのように統合され、個体全体としての協調的行動が生成するのかを解析する。これは、生物における情報統合機能の解明にとどまらず、大規模な工学的ネットワークシステムを複雑な環境下で協調的に制御する問題に対しても極めて有用な知見をもたらすであろう。



Fig. 1 Taxis of *Physarum plasmodium*.  
(A)はオートミール、各写真の時間間隔は2時間毎

## 2. 実験方法

### 2.1 真性粘菌変形体

真性粘菌変形体はCampの方法<sup>4)</sup>で培養し、スクレロチウムと呼ばれる状態にして保存した。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°C)の暗所で一晩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部分を切り出し実験に用いた。

### 2.2 実験システム

実験システムの概要をFig. 2に示す<sup>5)</sup>。20°C飽和水蒸気に保った観測箱内の寒天上に粘菌を置き、その上方に設置したビデオカメラで反射光画像を2秒間隔で取り込み(512×512、256譜調)パソコンで処理する。画像データは一定サイズ(12×60ドット、実寸5×25mm)のマトリクスで分割され、マトリクス内の平均反射光強度として処理される。以降マトリクスに位置座標(position)を割り当て振動及び行動の解析単位とする。



Fig. 2 Experimental set up.

### 2.3 解析方法

各マトリクスの平均反射光強度は粘菌の厚さと近似的に比例していることを確認した。そこで、反射光強度の経時変化から、次式(1)(2)より振動成分と、オフセット成分に分離し、振動成分を粘菌の細胞内リズムの指標としての原形質厚さ振動(thickness oscillation)、オフセット成分を行動の指標としての原形質分布量(cytoplasm distribution)と対応づける(Fig. 3)。

$$f_1(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} F(t) dt \quad \dots (1)$$

$$f_2(t) = F(t) - f_1(t) \quad \dots (2)$$

ここでF(t)は反射光強度、 $f_1(t)$ はオフセット成分、 $f_2(t)$ は振動成分、Tは平均時間を表す。通常粘菌の厚さ振動の周期が120秒前後なので、256秒の区間で平均してオフセット成分を求めている。

原形質厚さ振動からは周期(period)、位相勾配(phase gradient)を求めらる。これは、Fig. 4の表記を用いれば式(3)(4)のように定義される。

$$\text{period} = T_n \quad \dots (3)$$

$$\text{phase gradient} = \frac{\Delta t \times 360^\circ}{(T_n + T_{n+1})/2} \quad \dots (4)$$

つまり、各マトリクスにおける周期は、振動の最小値のピーク間時間差として求められる。また、位相勾配は隣接するマトリクス間で局所的に定義され、マトリクス間で対応した振動ピークの時間差を平均周期で割ることにより求める。極性は位置座標の小さい側が位相進みの時に正の値を取るよう定める。

原形質分布量からは、行動速度に対応する原形質移動速度(migration velocity)を求める。一次元の粘菌変形体の原形質に対して連続方程式をたてると

$$\frac{d}{dt} f_1(x, t) = \frac{d}{dx} v(x, t) \quad \dots (5)$$

と表される。これを速度について解くと

$$v(x, t) = \int_0^x \frac{d}{dt} f_1(x, t) dx \quad \dots (6)$$

となり、マトリクスに対応させて空間方向に離散化すれば原形質移動速度が求まる。ここで $f_1(x, t)$ 、 $v(x, t)$ は時刻t、位置座標xにおける原形質分布量、原形質移動速度をそれぞれ表す。位置座標の小さい側に行動方向が向かう時に正の値を取るよう極性を定める。

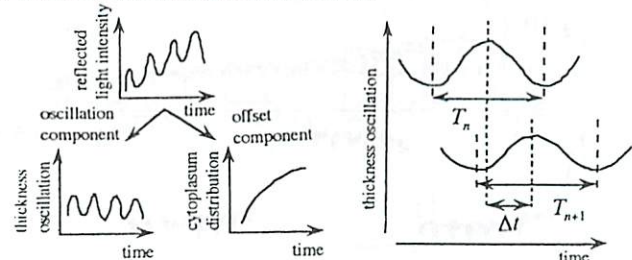


Fig. 3 Separation of reflected light intensity into oscillation and offset components.

Fig. 4 Definition of period and phase gradient.

## 2.4 刺激条件

5mm×80mmのシート状に切り出した粘菌を無栄養寒天シート上に約2時間置き、両端1cmの部分に20mM及び0.5mMのガラクトースを含む寒天を接触させる(Fig. 5)。さらに1カ所にのみ誘引刺激を与える場合は5mm×50mmの粘菌を用い、一端1cmに20mMのガラクトース入り寒天を接触させる。

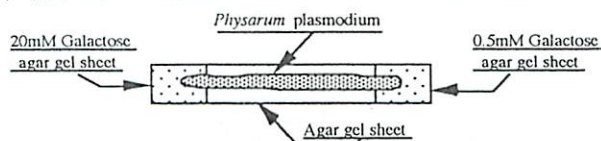


Fig. 5 Stimulation condition.

## 3. 結果

### 3.1 2カ所での誘引刺激

Fig. 6に刺激約2分後からの原形質厚さ振動、同6分後からの周期、位相勾配、及び原形質移動速度の時間発展の1例を示す。グラフは縦軸に位置座標を取り、上を20mM側に、下を0.5mM側に対応させ20mM側を座標軸原点とする。横軸は時間をとる。Fig. 6aの区間Aに着目すると厚さ振動の中央にくびれが生じ、徐々に0.5mM側へ移動したことが分かる。Fig. 6bの区間Aでは環境からの刺激に応じて、周期の短い20mM側の領域と周期の長い0.5mM側の領域が生成し、周期の短い領域が徐々に拡大した。Fig. 6cに示すように位相勾配では周期の異なるそれぞれの領域に対応して20mM側位相進み、0.5mM側位相進みの極性の異なる2つの領域が生成した。Fig. 6dの原形質移動速度も同様に20mM側に向かう領域と0.5mM側に向かう領域が生成した。位相勾配と原形質移動速度の極性は粘菌の中央を境界として一致した。

区間Bにおける厚さ振動はグラフ上端の傾きが異なるものの、全体としては同一の傾きを示した。周期は20mM側の周期に、位相勾配は20mM側が位相進みとなる極性に、原形質移動速度も20mM側に向かう極性に個体全体で揃った。原形質移動速度の極性の統合は位相の極性より数分遅れた。なお区間A、B共に行動方向先端の位相勾配は遅れていた。

Fig. 7, 8に上記の例と同条件下で得られた結果を、区間A、Bでそれぞれ統計処理したグラフを示す。Fig. 7aに示す区間Aの周期は、20mM側の周期が短い領域と0.5mM側の周期が長い領域に分かれた。Fig. 7b, cの位相勾

配、原形質移動速度のグラフは正の値を取る領域と負の値を取る2つの領域に分裂したことを示している。Fig. 8aより区間Bの周期は個体全体で同一周期に同調した。Fig. 8b, cに示す位相勾配、原形質移動速度の値は共に正の値で個体全体が揃った。ただ行動方向先端の位相勾配は負の値をとった。このように、区間A、B共に上記Fig. 6と定性的に一致した結果が得られた。

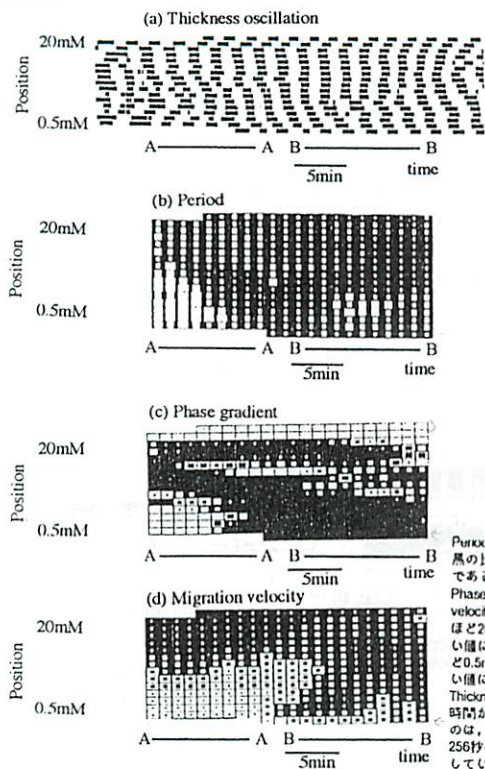


Fig.6 Time evolution of thickness oscillation, period, phase gradient and migration velocity.

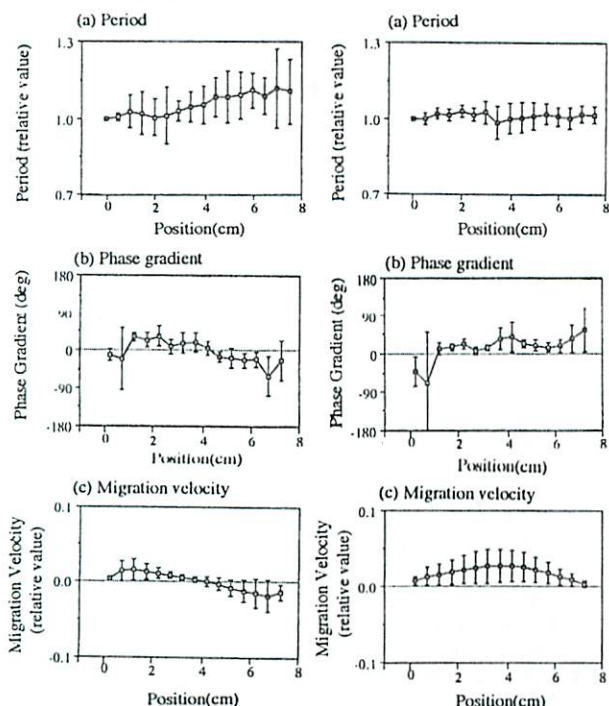


Fig.7 Spatial pattern of period, phase gradient and migration velocity. (n=5)

Fig.8 Spatial pattern of period, phase gradient and migration velocity. (n=5)

グラフの横軸はPositionを取り、1メモリ0.5cmに対応する。刺激領域との対応は位置座標の小さい側を20mM刺激とする。Periodは、20mM刺激の領域(Position=0)の周期を基準に相対化した値とする。Migration velocityは、原形質分布量と総原形質量で割った原形質分布率で原形質移動速度を求めることにより相対化する。

### 3.2 1カ所での誘引刺激

Fig. 9に1カ所に刺激を与えた時の刺激6分後の時間発展の1例を示す(厚さ振動は約2分後)。表示方法はFig. 6と同様である。Fig. 9aの厚さ振動ではグラフ上端の傾きが異なるものの、刺激後の最初の3~4分ではほぼ全体として安定した一定の傾きのパターンが形成された。Fig. 9bは周期が個体全体で揃ったことを示している。Fig. 9cの位相勾配は20mM側が位相進みの極性で、Fig. 9dの原形質移動速度も20mM側に向かう極性で揃った。

Fig. 10にこの例と同条件下で得られた結果を統計処理したグラフを示す。表示はFig. 7, 8と同様である。Fig. 10aのように、周期は個体全体で同一周期に同調した。Fig. 10b, cの位相勾配、原形質移動速度は正の値で個体全体が揃ったことを示している。これらは、Fig. 9と定性的に一致し、かつ2カ所での誘引刺激の区間Bとも定性的に一致している。

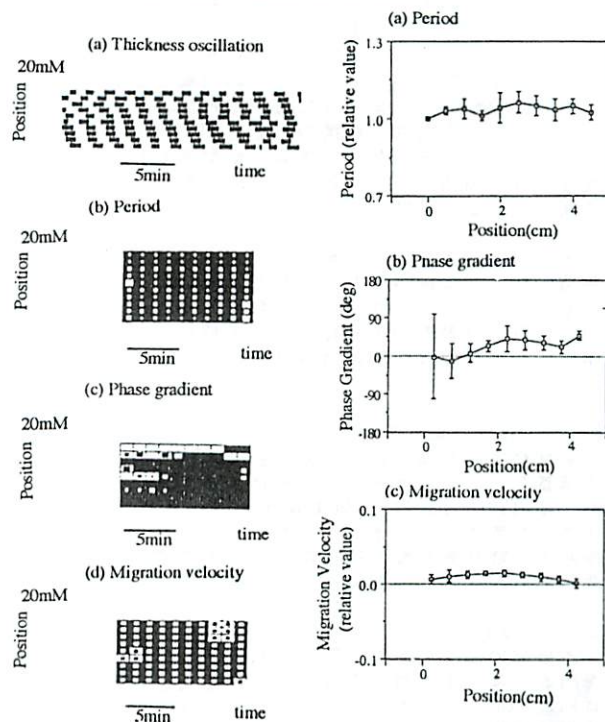


Fig.9 Time evolution of thickness oscillation, period, phase gradient and migration velocity

Fig.10 Spatial pattern of period, phase gradient and migration velocity. (n=5)

### 4. 考察

粘菌の両端2カ所に誘引刺激を与えた場合、各刺激点方向が位相進みとなる2つのクラスタが生成した。また、各クラスタの行動方向も各刺激点方向に対応し、クラスタ間には周期差が生じた。その後、短い周期のクラスタが拡大して他方のクラスタを引き込み1つに統合された。また1カ所に誘引刺激を与えると最初から単一のクラスタが生成した。このことは、環境からの情報に基づき、極性の異なる位相勾配をもつクラスタが複数生成され、相対的に短い周期のクラスタが長い周期のクラスタを引き込むことによって、短い周期側の位相勾配に統合され、結果として行動方向も統合されることを示している。

### 5. おわりに

粘菌の走性においては細胞内リズムの相互引き込みを通して情報統合が行われていると考えられる。そこで次の発表(2)では、粘菌の細胞内リズムを人為的に変調し、短い周期のクラスタと長い周期のクラスタを生成させることで、両者の間で引き込みによる競合関係が生じることを検証する。

#### 参考文献

- 1) K. Natsumo, Y. Miyako, M. Yano, H. Shimizu, "Development of spatio-temporal pattern of Ca<sup>2+</sup> on the chemotactic behavior of *Physarum polycephalum*," *Protoplasma* 166, pp55-60, (1992)
- 2) T. Ueda, T. Nakagaki, T. Yamada, "Dynamic organization of ATP and birefringent fibrils during free locomotion and galvanotaxis in the plasmodium of *Physarum polycephalum*," *J. Cell Biol.*, 110, pp1097-1102, (1990)
- 3) A. C. H. Durham, E. B. Ridgway, "Control of chemotaxis in *Physarum polycephalum*," *J. Cell Biol.* 69, pp218-223, (1976)
- 4) H. Tanaka, H. Yoshimura, Y. Miyako, J. Imaizumi, K. Nagayama, H. Shimizu, "Information Processing for the organization of chemotactic behavior of *Physarum polycephalum* studied by micro-thomography," *Protoplasma* 138, pp98-104, (1987)
- 5) W. G. Camp, "A method of cultivating myxomycete plasmodia," *Bull. Torrey Bot. Club* 63, pp205-210, (1936)
- 6) 大戸, 鈴木, 高桑, 田畑, 土原, 長谷, 堀池, 干場, 堀川, 村上, "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, (1991)