粘菌変形における振動の集団的挙動の情報理論的解析

北海道大学薬学部 松本 健司

Plasmodia of true slime molds are considered as a system of interacting virtual oscillators. Using television camera and computer image processing, we can observe simultaneously the states of these oscillators. The response of the plasmodia to external stimulus, expressed as the relations between these oscillators, suggests that the collective dynamics of these oscillators plays an important role in the information processing.

slime molds / collective Motions of oscillators / information Processing / shannon information

真性粘菌(*Physarum polycephalum*)の変形体が顕著な周期的原形質流動を示すことは昔から知られている¹⁾。2分程度の周期を持つこの流動の結果、コマ落としの映画などで容易に観測されるように、2次元状に広がった変形体の上に濃淡の波が現われる。

ところで、このような現象に対して、2種類の疑問を抱くことができる。一つは、この振動現象がどのようなメカニズムで起こっているのかというものであり、もう一つはこの振動現象は何の為にあるのか、変形体はこの振動現象を何に使っているのだろうか、というものである。以下で述べるのは、2番目の疑問に答えようとする我々の試みである。特に振動現象が変形体の情報処理について果たす役割を探してみたい。

ここで作業仮説として中心的な役割を果たすのが、変形体が多数の相互作用をし合う仮想的な振動子の集合体であるという考え方である。観測の結果得られるのは、これら仮想的な振動子の状態であると考えられる。また、実験的結果を解析するときには、それらの仮想的な振動子の間の位相関係や相関関係として表現することにする。

1 観測方法²⁾

変形体の振動を同時に多数の点で観測するために、テレビカメラとコンピュータ画像処理を使う。変形体の下側から光をあてて、上からテレビカメラで透過光を撮影する。この画像をコンピュータのメモリーに読み込んで、一画面を64×64個のピクセルに分割して各々のピクセルの中の平均の透過光強度を計算する。

Information Processing and Collective Motions of Oscillators in Slime Mold

Kenji MATSUMOTO

Pharmaceutical Sciences, Hokkaido University

一つのピクセルが上に述べた一つの仮想的な振動子に対応しているわけである。

このようにして得られた個々の振動子の時系列は、振動部分の外にゆっくり変化する成分も含まれている。振動部分だけを取り出す時には、一定時間離れた画像間の引き算を行う。すると、振動子間の位相関係はほぼ保たれたままで、零点のまわりで正負に振動する時系列が得られる。この方が扱いやすいので、以下の解析ではこの時系列を使っている。

2 刺激の種類と位相関係²⁾

大きな変形体から1センチ角程度の小片をいくつか切り取り、これらの小片を新しい寒天の上に重ねて置いておくと、小片は融合して一つの細胞となる。さらに数時間たつと、変形体は円状に広がってくる。この状態の変形体は比較的簡単な振動パターンを示す。位相は同心円上でほぼ等しく、半径方向では外周部分が進んでいて、中心部分に近づくに連れて遅れていく。変形体の濃淡の波が周辺部から湧きあがって中心部に進んでいくことになる。

変形体の一部に刺激を与えると、その刺激の種類によって刺激部分に寄ってきたり逃げていったりする。例えば、27℃程度の高温、常食のオートミール、ある種のアミノ酸等が誘引刺激であり、低温、乾燥、塩、高濃度の化学物質、青い光などが忌避刺激である。

これらの刺激を与えたときの仮想的な振動子の間の位相関係をみてみると、ある種の刺激については、刺激の種類と位相関係の間に非常に簡単なルールがあることがわかる。図1は円形の変形体の一部に高温刺激を与えたときの振動の様子である。

波が刺激部分から出発して周りに伝わって行くのがわかる。刺激部分の振動子の位相が周りより進んだの

OSCILLATION PATTERN
HIGH TEMPERATURE STIMULATION

図1 円形の変形体の左上部に高温刺激を与えたときの振動パターン。波が刺激部分から湧きだして周りに広がっていくのが解る。

である。逆に、忌避刺激を与えると刺激部分の位相が遅れて、周りから刺激部分へ波が入っていくようになる。つまり、高温と忌避刺激の場合には条件の良い部分の位相が進むのである。個々の振動子は周りの振動子との位相を比べれば、どちらに条件の良い環境があるのか解るわけである。

しかし、高温以外の誘引刺激では事はこう簡単ではない。これらの場合の位相関係は一定ではない。

3 変形体の中のシャノン情報量の流れ³⁾

変形体にオートミールを与えたときの振動パターンは非常に複雑なものになり、それを記述するためには、長時間の観測を平均するような統計的処理を必要とする。また、単に波が伝わっていくのが見られるような場合でも、個々の振動子は正確な周期で動いているわけではない。それぞれの振動子の周期が、かなり揺らいでいるにもかかわらず、波が伝わるには、ある振動子が別の振動子の動きにあわせて動くことが必要である。つまり、ある振動子の揺らぎが別の振動子に伝わっていくことになる。この揺らぎの伝播を捕えるのにも、長時間の観測結果を統計処理することが必要に

なる。

このような場合に便利なのがシャノンの情報理論⁴⁾で定義されている色々な情報量である。特に二つのランダム変数の間の相関を表す相互情報量が有効である。二つの変数、 i と j は確率 $p(i, j)$ (それぞれの出現確率は $p(i)$ と $p(j)$) に従って有限個の状態を取るものとする。相互情報量 $I(i, j)$ は、 $\sum p(i, j) \log(p(i, j) / (p(i) p(j)))$ と定義され、二つのランダム変数が統計的に独立な場合のみに相互情報量は零になる。また、変数 j の情報量はシャノンエントロピー $H(j) = \sum p(j) \log(1/p(j))$ で表わされるが、常に $I(i, j) \leq H(j)$ が成り立ち、 $I(i, j) = H(j)$ となるのは変数 i が決まると変数 j が完全に決まってしまう場合であり、この時 $H(j) = H(i, j)$ である。これらの事により、相互情報量 $I(i, j)$ は二つの変数に共通な情報量を表していると考えることができる。

変形体に上のような量を応用しようとする時に問題となるのは、正確な確率を求めるために必要な十分長い時間の観測が、細胞が移動してしまうために、困難であることである。そのため、ここでは図2のように四角い桶の中を一方に進む変形体を使う。

図 2

相互情報量を計算するための変形体の配置。この図では変形体は左の方向へ進んでいる。しかし、変形体が前進してもカメラの視野内では一定の場所に留まるように、変形体の載っている台はコンピュータで操作されている。

図 3

刺激のない変形体の相互情報量の等高線図。横軸が時間 (-400秒から+400秒)。縦軸が図2のX軸で下方が変形体の前方に当たる。点線は0.01, 0.02, 0.03, 0.04の等高線で、実線は0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4を表している。X線上には38個の振動子があり、この図では前から3番目の振動子と他の振動子との間の相互情報量を求めている。

この系では進行方向に垂直な方向には振動パターンはほぼ一様であるので、進行方向のみの一次元系であると考えて、進行方向に垂直な方向は平均する。それぞれの仮想的な振動子の時系列を正の時1、負の時0というように符号化して、二つの振動子の間の符号の出現確率 $p(i, j, t)$ を求める。ここで $p(i, j, t)$ は符号 i が一つの振動子に、符号 j がもう一つの振動子に時間差 t で現われる確率である。この確率から、 $I(i, j, t)$

を計算する。これは、二つの振動子の時間差 t の状態が、どれだけ相関しているかを与える指標である。

刺激をしない変形体についてこの量を計算したのが図3である。

周期的な時系列の相互情報量では半周期毎にピークが現われるので図3の山の部分を辿っていくと平均的な波の伝わる様子がわかる。波が湧きだすのは先端から少し下がったところで、そこから波が全体に伝わっていく。しかし、揺らぎがこの波に添って伝わっていく訳ではない。図4は相互情報量の振動部分を消すために時間方向に粗視化を行ない、さらに時間軸を延ばしたものである。

前の図3では変数はある時刻の符号であったが、今度は変数は連続した幾つかの時刻の符号を反映している。この図4で見ると、前方と後方のピークの位置が

図 4

図3の相互情報量の振動部分を消すために、時間方向に粗視化し、時間軸を延ばしたもの (-1200秒から+1200秒まで)。

図 5

前方にオートミールを与えたときの変形体の相互情報量。X軸上には44個の振動子があり、この図では前から3番目の振動子と他の振動子との相互情報量を求めている。他の振動子との相関は極めて低い。

図6

図5と同じデータを使い、前から19番目の振動子と他の振動子との相互情報量を求めている。後方の振動子の間17、かなりの相関がある。

ずれているのがわかる。これは、揺らぎが変形体の後方から前方に向かって、ほぼ百秒（約一周期）程度で伝わっていることを意味する。

この変形体の前方全体にオートミールを与えて振動の様子がどう変わるかを見たのが図5と図6である。

図5で見ると、オートミールの近傍の変形体の振動は相関距離が非常に短くなり、後ろの方の部分とは相関がなくなってしまう。しかし、図6では、粘

菌の後ろの方は波の伝播を示す山と谷がはっきりしており、相関を保っているのがわかる。また、山の高いところをつなげて見ると、左上から右下に向かった流れがある。つまり、揺らぎの伝播は後ろから前へ向かっているのである。

4 おわりに

以上、変形体の振動パターンを情報理論的に解析をしたわけだが、情報という言葉に惑わされてはいけない。ここで見たのは、振動パターンの組織化の様子であって、相互情報量の流れとして捕らえられた揺らぎの伝播が、変形体にとって「情報」であるかどうかは全く別の、今後の研究が待たれる問題である。

文 献

- 1) 南方熊楠全集, 平凡社, 1971年, 第7巻, 40頁.
- 2) K. Matsumoto, T. Ueda and Y. Kobatake (1986) *J. theor. Biol.*, 122, 339-345, K. Matsumoto, T. Ueda and Y. Kobatake, (1988), *J. theor. Biol.*, 131, 175-182.
- 3) K. Matsumoto, T. Ueda and Y. Kobatake, to be published.
- 4) C. E. Shannon and W. Weaver, (1949), "*The Mathematical Theory of Communication*", (Urbana, IL: University of Illinois Press)

■吉岡書店出版事業部より■

「自費出版」のご案内 —印刷した立派な本が簡単につくれます—

記念論文集 / 予稿集 / リプリント / 旅行記 / 回顧録 / 詩歌句集
遺稿・追悼集 / 画・写真集 / その他

字くばり・印刷・製本・用紙・装丁・あらゆるご相談に応じます
案内書お送りします

■京都市左京区田中門前町87

郵便番号606 / 振替京都3-4624

■TEL-075-(781)4747

吉岡書店出版事業部