

# 振動子結合系によるアメーバ走化性モデル

3K-6

高橋伸幸 横井浩史 嘉数侑昇  
北海道大学工学部

## 1. はじめに

ある種の粘菌は、自励振動する振動子の集合体であり、全体の同期した収縮リズムによって変形することが明らかになっている[1][2]。特に分化した感覚、運動器官を持たないにもかかわらず、誘引刺激には向かい、忌避刺激からは遠ざかるという走化性を備えている。粘菌はどのようにして協調して全体で統一のとれた行動を生成するのだろうか。本研究では、粘菌を非線型振動子結合系として、全体の統一行動生成のモデル化を試みる。これに類する研究では、振動子は化学反応系で記述されていることが多いが[2]、本研究では力学系で記述する。

## 2. 粘菌について

ここでの粘菌は、多核単細胞時期では粘菌変形体と呼ばれ、自励振動する細胞原形質の集合であり、形状変化や張力、そして細胞内の化学物質の濃度変化が振動現象であることはよく調べられている。

この粘菌変形体は全体が同期して振動するが、例えば、切断した後も各部分は1個の個体として生存し、切断した後の分かれた部分は各々別の振動数で振動する。これらから粘菌変形体は全体として1個の振動子なのではなく、非常に多くの自励振動子から構成されている分散システムであるといえる。

実際の観察から、粘菌は環境からの刺激を振動現象で捉えており、例えば誘引刺激では振動数が上昇することが分かっている。同時に数ヶ所でいくつかの振動数変化が起こった場合は、振動の引き込み現象により振動が全体で統合される。その引き込みの際に位相勾配が生じ、それが統合された情報になっていると考えられている。

## 3. モデル

### 3.1. 概要

粘菌の核とその周囲の複数の自励振動子の集合を1つのユニットとし、それを1素子とする。そして、この素子の集合体を粘菌変形体のモデルとする。(Fig. 3.1)

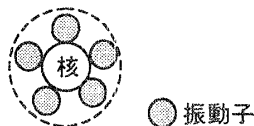


Fig. 3.1 素子

ここでは素子が行うタスクは移動とし、刺激に反応して全体と協調して移動することを目的とする。この時、素子を記述するのに必要なモデルを次の4つに分ける。

- 1) 素子内の自励振動子モデル
- 2) 素子間の局所的拡散結合モデル
- 3) 素子が状態を内部的に解釈するためのモデル
- 4) 素子の行動決定モデル

本稿では紙面の都合、1~3までについて述べる。また、そもそもなぜ粘菌が集合体を形成するか等を説明するには、上記のモデルでは不十分であり、エネルギーや生存競争の概念が必要だと考える。

### 3.1.1. 素子内の自励振動子のモデル

粘菌の情報統合とは、多数の振動子が結合した系で引き込み(同調)が起こることである。振動子は線形振動子と非線型振動子に分けられるが、単振動のような線形振動子では引き込みは起こらない。互いに引き込みが発生するのは、異なる初期状態からでもあるリミットサイクルに収束するような非線型振動子の場合である。ここでは van der Pol 型の振動子を利用する。

$$\alpha \ddot{x}_i - \beta(1-x_i^2)\dot{x}_i + x_i = 0 \quad (3.1.1)$$

第2項は抵抗を与え、 $x$ が小さい時は負の抵抗があり、振幅が大きくなると正の抵抗に変わる。ゆえにある軌道に収束するリミットサイクルとなる。 $\beta$ を大きくすると非線形度は増加する。(Fig. 3.2)

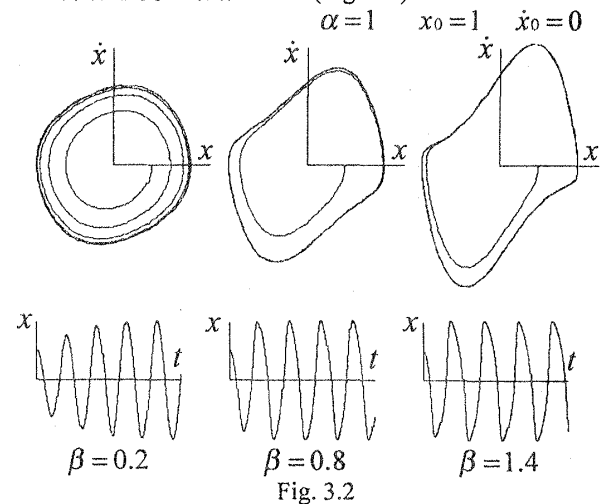


Fig. 3.2

変数  $\alpha$  を変える事によって、振幅が一定のまま振動数のみが増加する。これを粘菌内部の振動子モデルとする。誘引刺激を受けた実際の粘菌では振動数が上昇するため、このモデルでは変数  $\alpha$  を小さくする、結果、アトラクタが上下に長くなる。(Fig. 3.3)

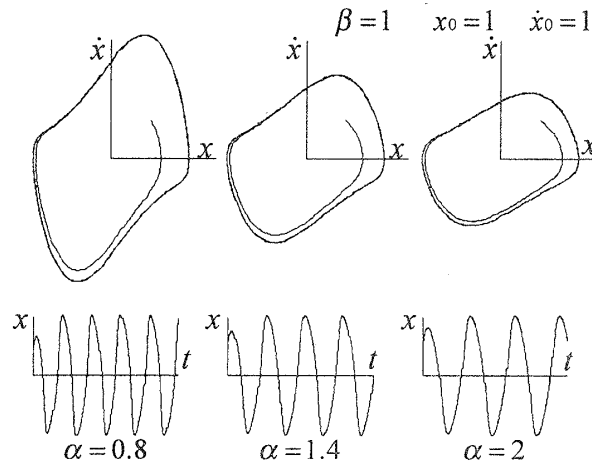


Fig. 3.3

3.1.2. 素子間の局所的拡散結合モデル

振動子結合系としては Globally Coupled Map(GCM) や Coupled Map Lattice(CML)が有名であり[3], 本研究でも同じようなモデルを用いる. 上記の2つと異なる所は, 素子同士が相互作用により位置が動的に変化すること, そして結合関係や結合強度もやはり変化することである.

$$x_{t+1}(i) = (1-\epsilon) x_t(i) + \epsilon \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_t(j) - x_t(i) \right\}$$

t: 時間 (3.1.2)

N: i 番目の素子の結合距離内にある素子の数  
 $x_t$  は(3.1.1)の解である.

3.1.3. 素子が状態を内部的に解釈するためのモデル

素子が自分の行動を決定するためには, 周囲の素子の状態を知る必要があり, どの様にしてそれを知るのかという問題がある. 全ての素子は等しく同じ場(この場が引き込みを生じる原因である)の中にあり, 周りの素子の状態を知る何らかのセンサを持っているわけではない. 自分が引き込まれたことによる隣接素子との位相差を, 素子はどのように知るのか. 隣との位相差は, 外部から計測することしか出来ない. そこで, 本研究では素子は自分自身の振動数の変化を比較することにより, 引き込まれたことを知ることとする.

4. 実験

モデル 1 と 2 の計算機実験を行う. 5 個の振動子を一列に配置し, 端の振動子の振動数の増加に全体が引き込まれた時のアトラクタと, その時に生じる位相差を調べた.

振動子のパラメータは  $\alpha = \beta = 1$  とし, 左端( $i=0$ )の振動子のみ, 誘引刺激を受けて振動数が増加( $\alpha=0.7$ )したとする. 初期値  $x$  及び  $\dot{x}$  はランダムとする.

Fig. 4.1 は振動子間に結合がない時( $\epsilon=0$ )である. Fig.4.1(上)より, 初期値にかかわらず一定の軌跡に収束するのが分かる. Fig. 4.1(下)は 5 個の振動子の  $x$  の変位を重ねて表示したものである. 結合がない時は位相がばらばらであることが分かる.

Fig. 4.2 は振動子間に結合( $\epsilon=0.2$ )がある. 結合距離

を 1 とし, それぞれ隣接振動子と結合している. Fig. 4.2(下)から, 全体が同期して引き込まれているのが分かる. その定常状態になった時の各振動子の位相差を表したものが Fig.4.3 である.

Fig. 4.3 から実際の粘菌と同様に, 刺振動数が上昇した振動子に周りが引き込まれて位相勾配が生成されていることが分かる.

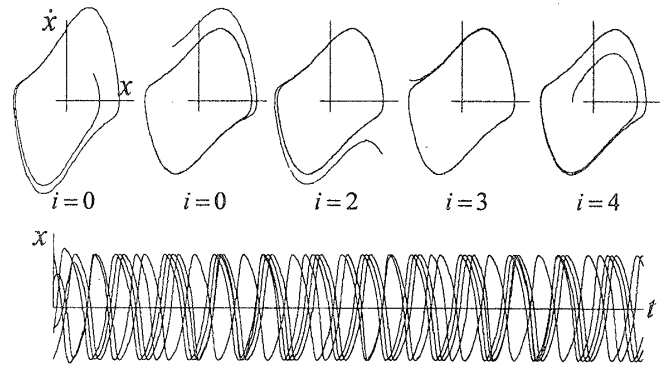


Fig. 4.1

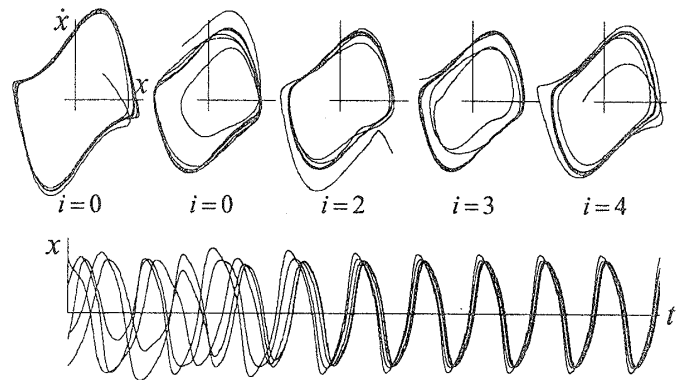


Fig. 4.2

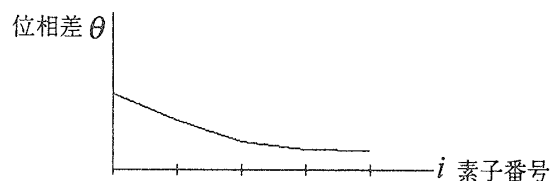


Fig. 4.3

5. 終わりに

本研究では, 非線型振動子結合系により多核単細胞粘菌のモデル化を試みた. 生物にみられるリズム同期現象に対して新しいモデルを提示したと考える. 今後は, なぜ粘菌が集合体を形成するのかまでを含めて, さらにモデルを拡張する予定である.

参考文献

[1] 矢野雅文, 三浦治己, 1997, 結合振動子による真性粘菌の情報処理, 数理科学 No.408  
 [2] 赤羽崇, 三宅美博, 山口陽子, 1999, 化学振動子-力学結合系としての粘菌の環境適応モデル, 自律分散シンポジウム p.109  
 [3] 金子邦彦, 津田一郎, 1996, 複雑系のカオス的シナリオ, 朝倉書店