

細胞性粘菌の凝集過程：界面モデル

京都大学大学院 情報学研究科 複雑系科学専攻 筒 広樹¹

細胞性粘菌はバクテリアを食べて増殖するが、飢餓状態になると、増殖をやめ、集合流、マウンド（盛土）、移動体、子実体と一連の形態形成を行うアメーバ状の生物である。本研究では集合流パターンからマウンド形成までのパターン形成のモデル化について考察する。集合流パターンは、比較的良好に理解されており、多くのモデルが提出されている。その生成機構は、cAMP 濃度のスパイラルパターンによって自発的にできた中心にむかって細胞移動が起こることで、細胞分布の非均一化が、cAMP 生成率の非一様化を引き起こし、そのことが細胞移動の速度のゆらぎを加速されるという正のフィードバックによって引き起こされると理解されている。マウンド形成も生成機構としては単純であり、マウンド状の構造を再現できる数値計算などが提出されているが、その形や成長過程がどのような量で表されるかといった観点からはまだ十分調べられていないようである。

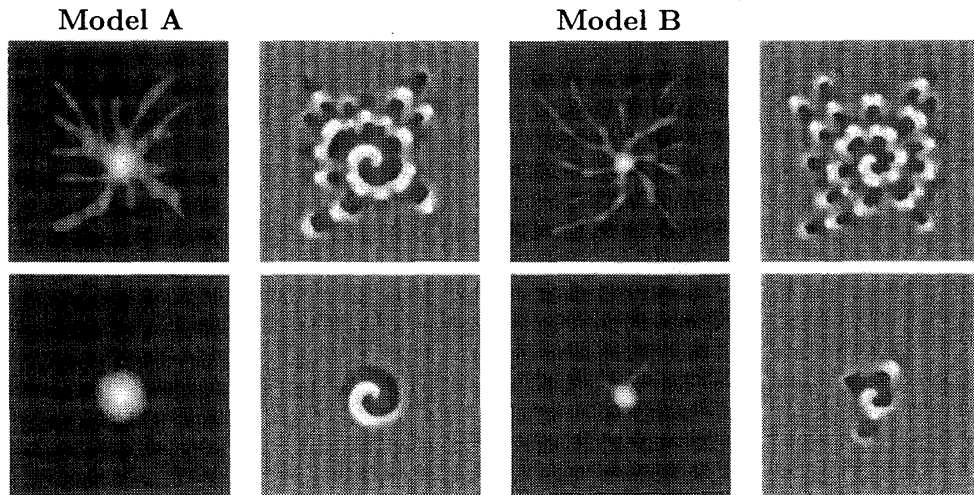
ここでは、細胞性粘菌の集合流パターンからマウンド形成に至る凝集過程を界面モデルを用いて調べたことについて述べる。本モデルは Höfer[1] らの 2 次元モデルに、3 次元方向への成長を採り入れている。モデルは、cAMP(u) と cAMP 受容体の平均活性度 (v) の化学動力学と細胞層の高さ (h) についての現象論的な界面の運動方程式から構成されている。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \kappa(h)f(u, v) + D\nabla^2 u, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = g(u, v), \quad \frac{\partial h}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{J} - \nabla \cdot \chi(h, v)\nabla_s u$$

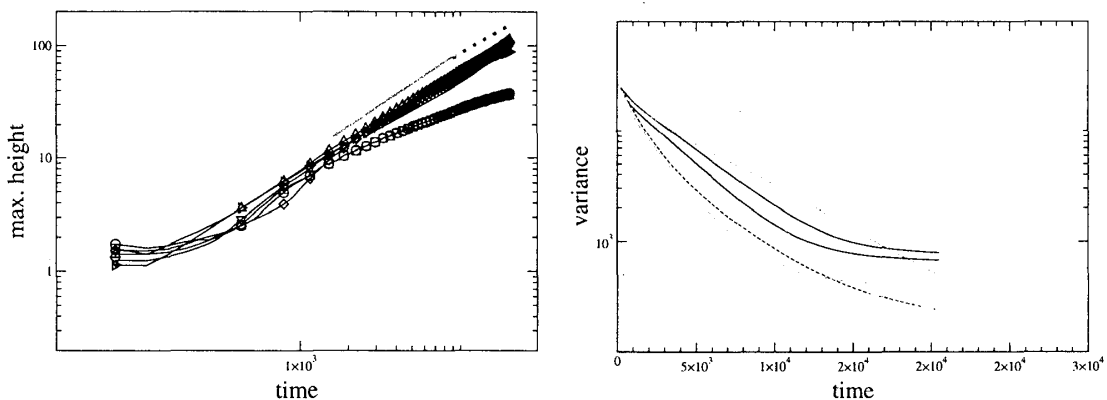
1 と 2 番目の式で、 $\kappa(h)$ は細胞層の高さから cAMP 生成率への正のフィードバック、 $f(u, v)$ と $g(u, v)$ は、興奮性を示す関数でここでは、FitzHugh-Nagumo 方程式を用いた。第 3 式の第 1 項目は細胞密度の輸送で、以下で 2 つの可能性を考える。2 項目は走化性の効果を表し、 $\chi(h, v)$ は細胞移動を制御するための関数である。ここではマウンドの高さは、 u の高さ方向の空間変化の長さに比べて小さいとし、 u の高さ方向の依存性を無視できる状況を考え、 ∇_s を界面上での微分とする。走化性は、形態形成を駆動する原因であるが、一方において界面の凹凸の不安定化を引き起こすと考えられ、形態形成にはこれを押え込む効果も必要である。そこで界面を平滑化する原理として、細胞が参照系であるシャーレに沿って平になろうとする傾向と、水滴状の形になろうとする傾向があるのかという 2 つの場合を考え、第 3 式の 1 項目の $\mathbf{J}$ に対して、 $\mathbf{J} = -\mu\nabla h$ (Model A)、 $\mathbf{J} = -L\nabla\delta P$ (Model B) を考える。 P は界面近傍での「静水圧」でギブス-トムソン効果により、 $P \sim -\sigma_0\nabla^2 h$ と書ける。Model A は、初期の 2 次元的な空間分布の時に有効で、マウンドが発達するにつれて、マウンドの部分で Model B の表面拡散が主要になると仮定している。Model B のような、4 階の空間微分は結晶成長などのモデルで使われているようである。

¹E-mail:tutu@acs.i.kyoto-u.ac.jp

以下に、Model A と Model B の数値計算による比較を示す。



図はモデル A(左 2 列)と B(右 2 列) のパターンを示す。それぞれ $h(\mathbf{r}, t)$ と $u(\mathbf{r}, t)$ を表し、上側と下側はそれぞれ時刻 $t = 5190$ と $t = 19270$ でのパターンである。それぞれの量を 0 から 255 の間にスケールしたものを色の明るさで表している。



左側の図は $h(\mathbf{r}, t)$ の最大値の時間変化の両対数プロットを示している。上側はモデル B に対するデータで、傾きは左側で 0.96、右側で 0.81(右)となっている。下側はモデル A のデータで、傾きは 0.53 程度である。右側の図は、 $h(\mathbf{r}, t)$ の最大値の位置 ($\mathbf{r}_0$) の周りの分散、 $\int d\mathbf{r} |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2 h(\mathbf{r}, t)$ の時間変化の片対数プロットを示す。分散の時間変化は冪則よりは速いが、指数関数とも言えない時間変化を示しており、モデルによる違いははっきり現れていない。

以上の結果は、マウンドがあまり高くない状況に限定されるが、マウンドの高さの変化を調べることによって、形態形成を支配する界面からの力についての知ることができるのではないかと期待できる。

参考文献

- [1] T. Höfer and P. K. Maini, Phys. Rev. E **56** (1997), 2074.