

アメーバ様運動細胞における運動リズムと知覚機能

北大・薬 小島陽之助, 松本健司

生体は、光や化学物質など外界からの刺激を敏感に受容し、適切な行動を取る。単細胞生物においてすら、刺激受容の鋭敏さ、伝達の速さや判断の的確さは驚く程である。我々は脳や中枢を持たない原生生物や細胞の知覚の素晴らしさが、カオスの機能性や適応性と強く関連していると考えている。

白血球やマクロファージなどのアメーバ運動細胞は複雑な行動をしながらも一様な二次元空間においてはフィックの拡散方程式に従う。すなわち図1のように変位の二乗平均距離（または分散） $\langle x^2 \rangle$ は時間 t に比例し、その傾斜は拡散係数 D の2倍を与える。これは、細胞がマルコフ過程に従いランダムウォークをしながら行動をしていることを意味する。これを（周辺）²/面積＝（複雑度）で表わされる形状の時間変化として観測すると、平均数分の概周期を以て丸くなったり細長くなったり形を変化しながら行動している。アメーバにおける複雑度の時間変化およびその周波数分布を図2に示した。同じような運動の概周期性は方向

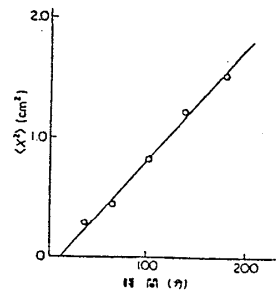


図1 アメーバ移動の平均二乗距離 $\langle x^2 \rangle$ vs 時間 t

変換頻度という形で鞭毛運動（バクテリア等）や繊毛運動（ゾーリムシやテトラヒメナ等）においても観測される。すなわち、細胞運動は常に概周期性を以て行動している。

運動性細胞は化学物質の濃度が各物質に対し特有の閾値以上になると電位応答や忌避—誘引行動を起こす。アメーバ運

動をする粘菌変形体でも同じである。種々の化学物質について調べてみると、各物質の濃度が一定の閾値以上となったとき初めて張力の緊張—弛緩、行動の駆動力、および膜電位が変化し

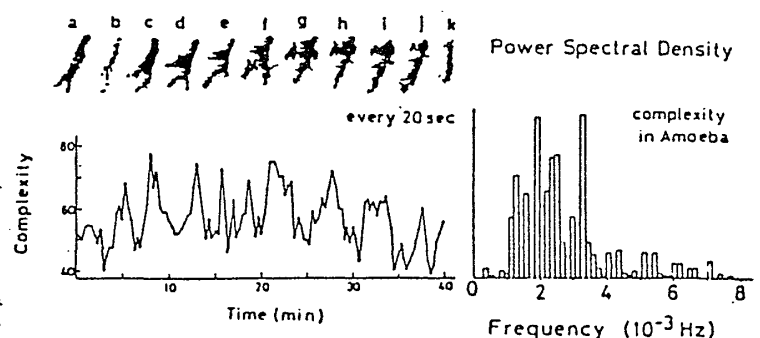


図2 アメーバ形状の時間変化の定量的表現

始める。行動および張力変化の方向は一致するが電位変化は行動の方向とは必ずしも一致しない。すなわち、アメーバ様細胞における誘引-忌避の判断は定常的膜電位変化で決定されているわけではないことを示している。中枢のないアメーバ細胞が外界からの刺激情報をどのようにして認識し、判断し、そして細胞全体に伝達して行動にまでトランスデュースしているのか大変興味ある問題である。

すりガラスの上に置いた寒天ゲル上を移動している粘菌を発光ダイオードで下から均一に照射し透過光を顕微ビデオで撮影する。ビデオ画像をデジタイザーで(60×46)ケの点に区切り、各点の明るさを17段階に分けて観測する。10秒毎にとった画像の例を図3に示した。各点の明るさは粘菌内の原形質の量に比例すると

と考えられるが、収縮リズムに伴って振動している。図3は20℃で飼っていた粘菌の1部を急に25℃にしたときの応答である。各点の振動は、 $f(\mathbf{x}, t) = a(\mathbf{x}) \times \sin(\mathbf{k}\mathbf{x} - \omega t)$ と表現できるが、このような一点情報では応答の方向性は示せない

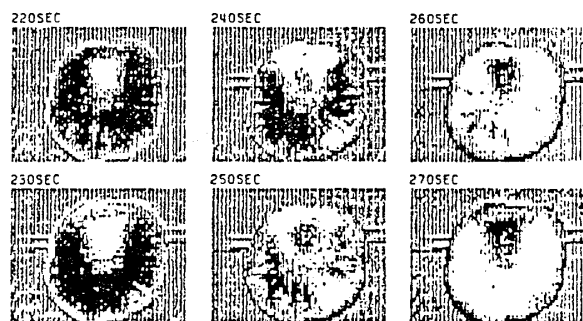


図3 粘菌における誘引条件の波状伝播

ので、次式で定義される位相勾配をとる。 $\omega \mathbf{k} = \partial f / \partial t / f(\mathbf{x}, t)$ この位相波は

三点情報であり、応答を完全に表現している。 $\mathbf{k}$ -ベクトルの大きさと方向を●の記号で表現すると、図4のように高温の誘引条件のところが位相が進み、位相勾配を情報伝達の手段としながら原形質が近付いていくのがわかる。20℃から1点を急に15℃にすると、その点の位相が他より遅れ、原形質が波状にその部分から逃避していく。温度とは限らず誘引条件、例えばオートミル、グルコースやリン酸塩を与えても同じことが起こる。位相波の伝播は実際の行動より遙かに速くおこる。別の実験から、誘引物質を受容すると振動が早くなり、忌避条件に置かれると振動がゆっくりすることが分かっている。上に示した実験は非線形振動系では周期が短い方に引き込まれていくという一般論と一致する。

Attraction

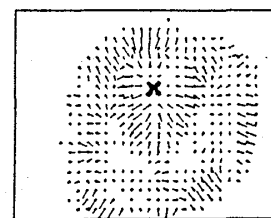


図4 位相波による情報伝達

更に、各種阻害剤の影響や嫌氣的条件で調べることにより、粘菌の振動はミトコンドリアが強く関与していることがわかっている。白血球やマクロファージ等アメーバ運動をする細胞はすべて同じである。