

原生生物でのリズム発現とコミュニケーション

最上 善広

コミュニケーションをどのように定義するかは、それが発生する局面ごとに様々であろう。親子（人間）の間での意思伝達と昆虫の求愛とでは、用いられるコミュニケーションは異質な要素から成り立っていると思われる。

ここではさらに異質性を極め、原生生物の集団におけるコミュニケーション(?)を取り上げてみたい。

原生生物は単細胞の生き物であり、単独で生きることができる。従って、多細胞生物のような細胞間のコミュニケーションは存在しないと考えられている。しかし、ある条件下では原生生物の集団内に協同的な挙動が発現されることがある。そのひとつの例が生物対流現象である。

繊毛虫などの水棲微小生物は、反重力方向へ向かおうとする行動特性（負の重力走性行動）を持っている¹⁻³⁾。この性質により、はじめは均一に分布していたとしても、次第に上へ向かうものが増えてきて、その結果、水面直下に細胞の集中が起こる（図1a, b）。この非対称な分布により、液体内部での密度が逆転し、トップヘビーな不安定状態となる（図1c）。この不安定性が限界をこえると、細胞が集団となって落下しはじめる（図1d）。落下しながら塊から離れた細胞は、また負の重力走性によって上へと泳ぎだす。このようにして、反重力方向への遊泳と落下という双方向の流れ（対流）が起こる（図1e）。はじめのうち対流はランダムに起こるが、それらが次第に組織化され、細胞集団内に一定の繰り返し（空間リズム）をもつ巨視的な空間パターンが形成される³⁾（図1f）。

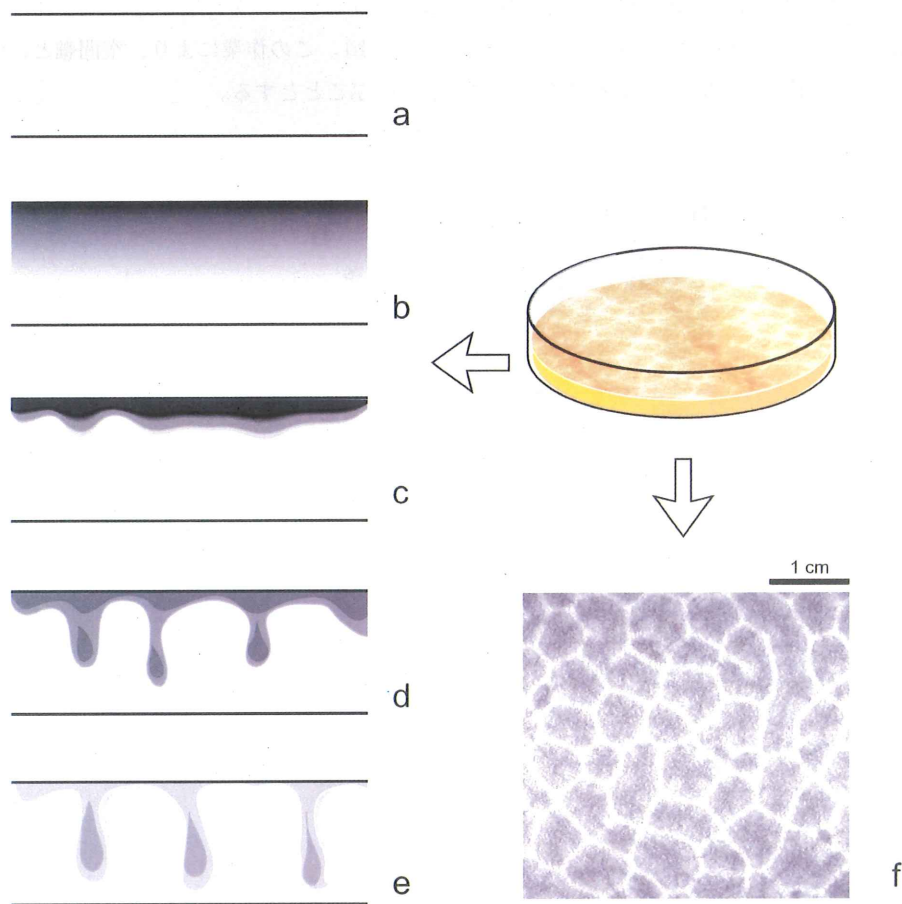


図1

生物対流現象に伴う時空間構造の形成は、熱対流によるRayleigh-Benard対流と並んで、重力が介在する自己組織化現象の例として研究されてきた^{4, 5)}。熱対流では上方向への駆動力は外から加えられた熱エネルギーであるのに対し、生物対流では個々の微小生物が示す重力走性行動である。物理学的には、対流を起こすエネルギーさえあれば粒子の種類は関係ないといえる⁵⁾。しかし、生物対流は細胞の動きが対流を起こしているため、その対流の中を動く粒子、つまり細胞の特性が、対流とそれによる空間パターン形成に影響を及ぼすはずである。この時、個々の細胞の持つ特性は、集団内での細胞間の相互作用を通して発揮されることになる。

ここで、「集団内の要素間に相互作用があり、その結果、集団としての新たな挙動が引き出される」状態を、「コミュニケーション」が成立している状態と定義するならば、生物対流のような協同現象がコミュニケーションという概念の境界 (lower limit) を示すように思われる。このような現象をプロトタイプの研究ツールとして見た場合、「コミュニケーションとリズム」というこのシンポジウムの命題にどこまで迫ることができるのだろうか。道のりは遙かであることを意識しつつ、私たちの最近の研究結果を紹介する^{7, 8)}。

集団内の要素間の相互作用と集団の巨視的挙動の関係を調べるための常套手段は、構成要素を換えたときに集団の挙動がどう変化するかを調べることである。そこで私たちは、繊毛虫テトラヒメナ (*Tetrahymena*) の作り出す生物対流パターンを取り上げ、細胞の大きさはほぼ同じだが、種や行動の異なるテトラヒメナを用いることで、生物対流パターンの形成に及ぼす細胞の相互作用について研究を進めてきた。

実験には *Tetrahymena thermophila* の野生株と行動突然変異株 (TNR: *Tetrahymena* Non-Reversal)、および種が異なる *Tetrahymena pyriformis* の3種類の株を用いた。行動突然変異株TNRは、後退遊泳ができない点を除くとほぼ野生株と同じ特性を持っている⁹⁾。一定の細胞密度になるように調節を行ったテトラヒメナ懸濁液を、一定の深さになるようにシャーレに入れる。その後の空間パターンの形成の様子をビデオに記録した。

生物対流現象の空間およびその時間発展を評価する目的で、本研究では空間情報を一定の時系列で表示することを試みた (図2)。VTRによる記録画像を画像スタックとしてコンピュータに取り込み、これらの画像から同一部分を直線状に切り出したものを時系列の順に並べていく (図2a, b)。この作業により、空間軸と、時間軸とを併せ持つひとつの画像が作られる (図2c)。これを時空間プロットと呼ぶこととする。

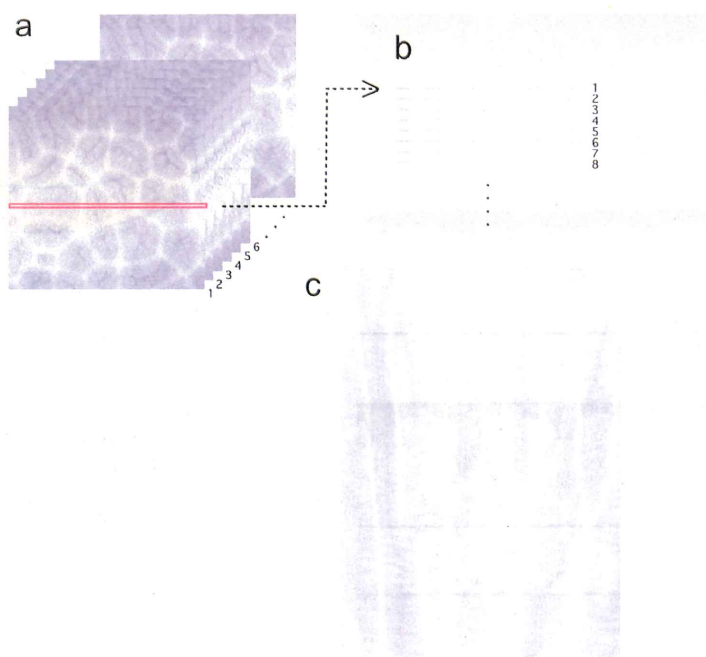


図2

実験に用いた3種の細胞株では、それぞれに特異的なパターン形成が行われることがわかった。*T. thermophila*の野生株はポリゴン状のパターンを形成した(図3a)。*T. pyriformis*もそのパターンはポリゴン状であったが、ポリゴンの大きさは*T. thermophila*の野生株の場合の半分程度であった(図3b)。一方、TNRの作るパターンはドット状で、ドットからのびた分枝が現れたり消えたりを繰り返していた(図3c)。各々の細胞株について、時空間プロットを作り、空間パターンの安定性を比較すると、*T. thermophila*の野生株と*T. pyriformis*のパターンは安定性が高く(図3d, f)、TNRではパターンが周期的に揺らいでいる(ドットの出現位置が変動する)ことがわかった(図3e)。さらに、時空間プロットの2次元FFT解析より、揺らぎはほぼ一定の周期で起こる(時間軸方向に明かなピーク(図4b, c)が認められる)ことがわかった。

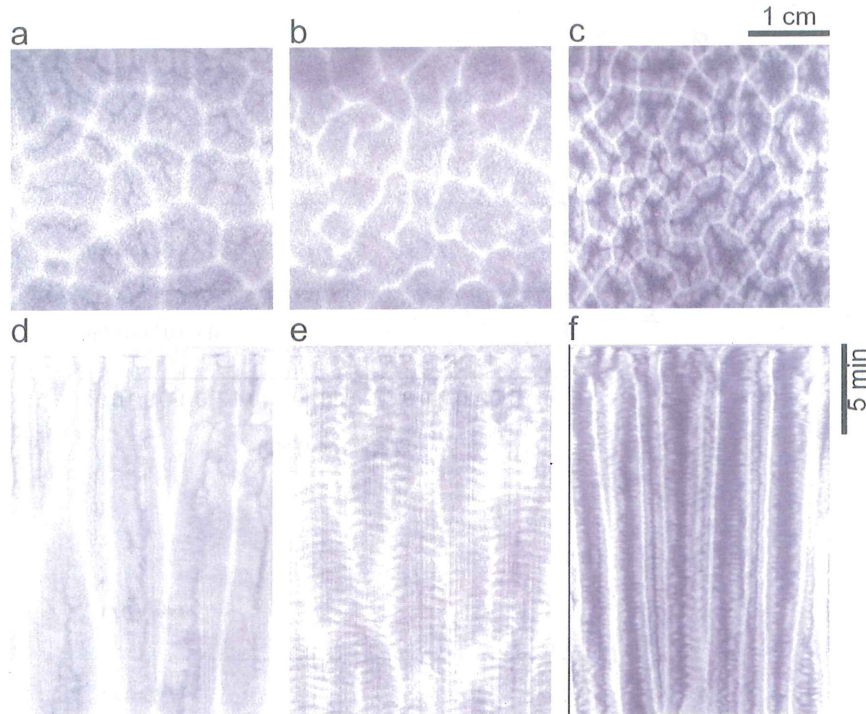


図3

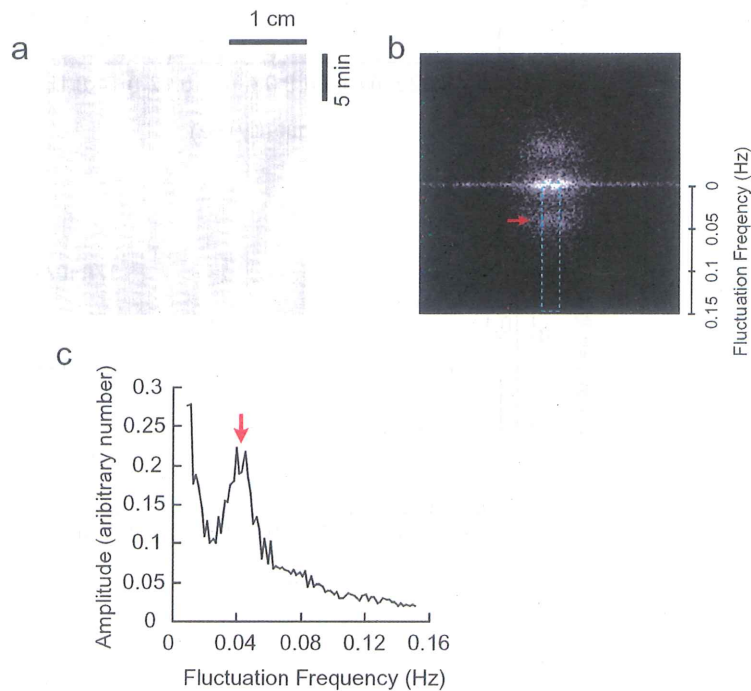


図4

次に、TNRのパターン形成に見られる周期性（リズム）を手がかりにして、異なる細胞株が共存する場合のパターン形成を調べてみた。TNRのパターンの揺らぎ周波数は、密度の低下とともに減少した（図5a）。そこで、TNRの減少分を、他の株の細胞で補ったところ、*T. thermophila*の野生株と*T. pyriformis*のどちらを用いても周波数の減少は起こらなかった（図5b, c）。TNRに見られる揺らぎ周波数の密度依存性は、生物対流パターン形成には細胞間の相互作用が必須であることを示している。さらに、その相互作用がどのようなメディアによって伝わるものかは不明ではあるが、それが相手となる細胞株によって変化しない性質のものであることが示唆される。誤解を恐れずに、あえて比喩的表現をとるならば、TNRが発信した固有のリズムが性質の違う細胞株でも同じように「理解」されたと考えることもできる。

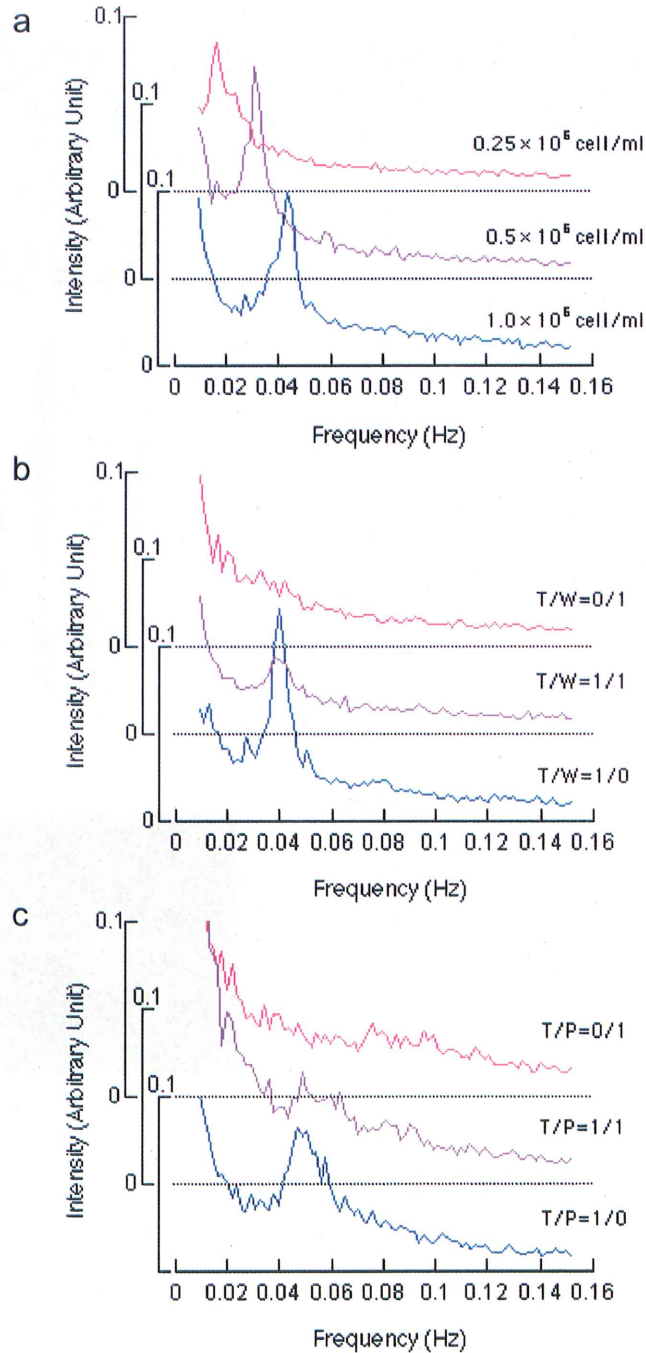


図5

ここで示したテトラヒメナの細胞間に見られる相互作用が、果たして、コミュニケーションという概念の範疇にはいるものなのか。その判断はコミュニケーションという事象にどのように向き合うかということに依存するだろう。原生生物の協同現象は人間が介在する高次のコミュニケーションに比較すると、あまりに単純な系かもしれない。しかし、ここで紹介したような現象をコミュニケーションという概念の境界領域として研究することで新たな展開がなされるかもしれない。物言わぬ単細胞の生き物が、人間によるコミュニケーションとそれによる高次元の文化の形成の理解につながるとすれば、これはかなり愉快なことではないだろうか。

引用文献

- 1) Bean, B. Microbial geotaxis. In “membrane and sensory transduction.” (G. Colombetti and F. Lenci eds) pp. 163-198. Plenum Press, NY., Lond. (1984)
- 2) Ooya, M., Mogami, Y., Izumi-Kurotani, A. and Baba, S. A. Gravity-induced changes in propulsion of *Paramecium caudatum*: a possible role of gravireception in protozoan behaviour. *J. Exp. Biol.*, 163, 153-167. (1992)
- 3) Mogami, Y., Ishi, J. and Baba, S. A. Theoretical and experimental dissection of gravity-dependent Mechanical orientation in gravitactic microorganisms. *Biol. Bull.*, 201, 26-33. (2001)
- 4) Plesset, M. and Winet, H. Bioconvection patterns in swimming microorganism cultures as an example of Rayleigh-Taylor instability. *Nature*, 248; 441-443. (1974)
- 5) Childress, W. S., Levandowsky, M. and Spiegel, E. A. Pattern formation in a suspension of swimming micro-organisms: equations and stability theory. *J. Fluid Mech.* 69, 595-613. (1975)
- 6) Levandowsky, M., Childress, W. S., Spiegel, E. A. and Hunter, S. H. A mathematical model of pattern formation by swimming microorganisms. *J. Protozool.*, 22, 196-306. (1975)
- 7) 山根章子・最上善広・馬場昭次 繊毛虫テトラヒメナによる生物対流パターンの時空間解析 宇宙利用シンポジウム, 17, 175-178 (2001)
- 8) 最上善広・山根章子・義之敦子・馬場昭次 繊毛虫テトラヒメナの生物対流パターン形成に対する過重力付加の影響 宇宙利用シンポジウム, 18, 1-4 (2002)
- 9) Takahashi, M., Onimaru, H. and Naitoh, Y. A Mutant of *Tetrahymena* with non-excitable membrane. *Proc. Japan Acad.*, 56, Ser. B (1980)

図の説明

図1. 生物対流パターン出現までの模式図 (a~e: 垂直方向の断面) とパターンの例 (f)。テトラヒメナの大きさは $50\mu\text{m}$ 程度であり、このような倍率ではこの細胞を見分けることはできない。パターン内では細胞が高密度で集中しているところが高輝度 (白)、低密度の部分が低輝度 (黒) となって現れている。

図2. 時空間プロットの作成方法。VTRに記録した映像をイメージボードにより画像スタックとしてコンピュータに取り込み (a)、これらの画像の同一部分を直線上に切り出す。それらを時系列の順に並べていく (b) と、空間軸と時間軸とを併せ持つ時空間パターンが作成される (c)。

図3. 細胞株による生物対流パターンの違い。生物対流の空間パターン (上段) とそれらから作成した時空間プロット (下段)。a, d: *T. thermophila* 野生株。b, e: TNR。c, f: *T. pyriformis*。細胞密度はすべて、 1.0×10^6 cells/mlで、同一規格の容器に同じ深さになるように入れてある。

図4. パターン揺らぎの周波数の検出方法。a: 2次元FFT解析のために時空間プロット画像を切り出す (512×512 pixels)。b: 時空間プロットの2次元FFTを施したもの。縦軸 (周波数に対応) 方向に揺らぎの周波数を示す輝点の集中部分 (矢印) が見られる。c: bの画像に示した範囲の輝度分布。矢印は、bの矢印で示した部分に対応している。

図5. 時空間プロットから検出された揺らぎの周波数。a: TNRを培養液で希釈したときの周波数。b: *T. thermophila* 野生株とTNRを混在させたときの周波数。T/W = 1/0はTNRとwtを1:0で、T/W = 1/1はTNRとwtを1:1、T/W = 0/1はTNRとwtを0:1で混在させたときを表している。いずれの場合も、全体の細胞密度は 1.0×10^6 cells/mlとしてある。c: TNRと*T. pyriformis*を混在させたときの周波数。比率の表記はbと同じ。いずれの場合も、全体での細胞密度は 1.0×10^6 cells/mlである。