

シアノバクテリア (ランソウ) の走光性と細胞運動

横浜市立大学大学院・総合理学研究科 博士課程 星 章子 (Fumiko Hoshi)
 修士課程 大西賢司 (Kenji Onishi)

Graduate School of Integrated Science, Yokohama City University

I. シアノバクテリアの走光性と細胞運動 - 生理学的リサーチ -

1. 微生物の走性 (taxis)

生物の行動とは、外界からの刺激に応答しながら行う運動のことである。刺激に強い方(正)、または弱い方(負)へと移動する運動を「走性」と言う。

走性の例 ・走光性 (phototaxis) →光 ・走化性 (chemotaxis) →化学物質
 ・重力走性 (gravitaxis) →重力 ・走熱性 (thermotaxis) →熱

2. シアノバクテリアの光依存性運動

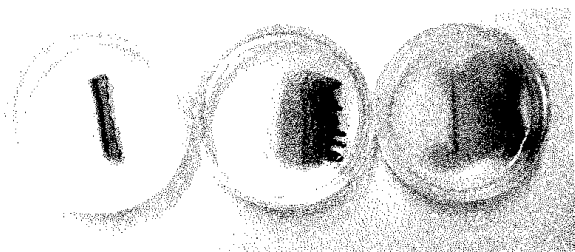
シアノバクテリアには次の3種の光依存性運動が考えられる。光の「方向」を認識しての動きか否かをきちんと確認して実験しなければならない。

- ・走光性 (phototaxis) - 光の方向を認識して、正または負の方向に移動。
- ・光走速性 (photokinesis) - 光強度によって定常状態の運動スピードが変化する反応。光の方向と無関係。
- ・光驚動性 (photophobic reactions) - 光強度の突然の変化に依存する運動現象。光の方向と無関係。

3. シアノバクテリアの走光性と細胞運動

シアノバクテリアは単細胞性、多細胞性(糸状態)のものがあり、その一部の種が走光性を示すことが知られている。

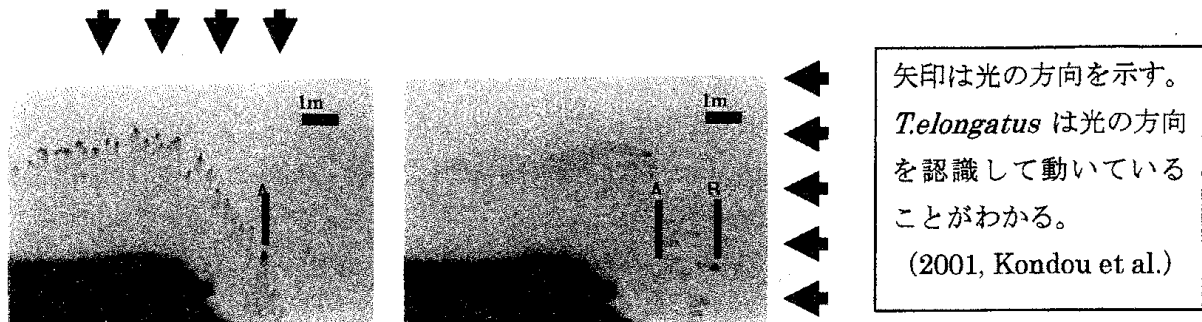
好熱性ランソウ *Thermosynechococcus elongatus* BP-1 (単細胞性の桿菌 $1\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 。生育温度は 55°C 。以下 *T.elongatus* と記す。) は白色光に対して正の走光性を示す。



寒天培地プレート (直径 3cm) で 4 日間生育させた後、矢印の右方向からのみ白色光を照射して走光性を誘導した。左から 8hr、16hr、24hr 誘導後。

白色光は主に青色光から遠赤色光の波長に分けられる。*T.elongatus* は低光量 ($\sim 30\mu\text{mol/s}^2$) の赤色光、中光量 ($10\sim 30\mu\text{mol/s}^2$) の緑色光、高光量 ($60\sim 90\mu\text{mol/s}^2$) の遠赤色光で走光性を示す。

走光性の検定。寒天プレートを顕微鏡で拡大した写真。指状に光に向かって走っている。

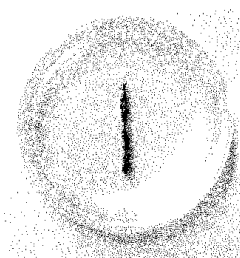


シアノバクテリアの細胞運動には次の3種の運動が考えられる。

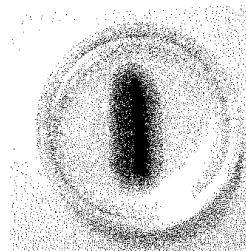
- ・ gliding (滑走) - 固体の表面をかなりの液体層でカバーし、その表面を滑るように動く運動。鞭毛 (flagellar) を必要としない運動だが、そのメカニズムは不明。
- ・ twitching (単収縮?) - 固体の表面を、細胞全体を使って断続的な痙攣移動と静止状態を繰り返しながら動く運動。また、細胞にある線毛 (pili) は固体表面に細胞を引っかける手綱のような役割を担っていると考えられている。しかし、詳しいメカニズムは不明。
- ・ swimming (遊泳) - 液体中で螺旋状の鞭毛 (flagellar) を回転してモーターの様にして動く運動。鞭毛は数本あるものを束ねて泳ぐ種類もある。他の微生物の走化性での運動と同じことから、メカニズムは良く研究されている。

では、*T. longatus*の走光性の運動メカニズムとして考えられるモデルは？

実は詳細なメカニズムについての研究はまだ進んでいない。しかしながら、ランソウ一個体では動くことができないことが実験から確認されていること、寒天培地プレートに植菌後数日経過しないと動かないことから、ソーシャル・モティリティー (social motility) だと考えられる。



植菌1日後のランソウ。
 増殖はしているが、拡散は見られない。走光性を誘導してもランソウは動かない。



植菌8日後のランソウ。
 増殖して、粘液物質による周辺への拡散が見られる。走光性を誘導するとランソウは指状の集団で動き始める。

*T. longatus*の走光性は次のような twitching または gliding による運動だと考えられる。

(1)細胞集団の密度が増えることにより、多糖類と思われる粘液物質がランソウから排出される。この粘液物質がランソウの動きを助ける。(2)光が照射されるとその方向に、細胞集団の先頭が自身の細胞にある線毛 (pili) を固体表面に引っかけて動き始める。(3)残りの細胞集団が、寒天培地に排出されていた粘液物質の液体層に乗り、その表面を滑るように動いていく。

(以上担当：星)

II. シアノバクテリアの走光性と細胞運動 - 数学的リサーチ -

目的

T. elongatus 細胞集団の運動の様子を観察し運動に関わるパラメーターを推測し、特に細胞集団の前方部分の運動の様子を定性的に再現することを目的とした。

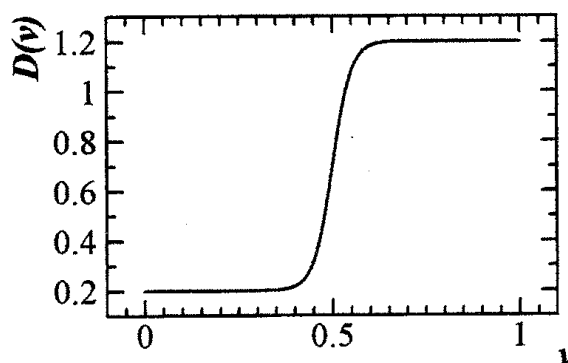
方法

集団の速度 ; $D(v)$ について

観察結果からの仮定として、液体成分量 ; v が一定量以下ならば細胞はほとんど動かないこと、液体成分量が一定量以上存在する場合、活発に動くと考えた。具体的には v と細胞集団の速度 ; $D(v)$ の間には次の関係が成り立つものとして細胞密度に関するモデル方程式の中に採用した。

$$D(v) = 0.5 \times (\tanh((v - 0.5)/0.05)) + 0.7$$

液体成分量 v の速度 $D(v)$ への影響



細胞密度についてのモデル方程式

T. elongatus 細胞集団を全体として一つの流体として考え、この運動の様子を連続の方程式（流体の方程式）で記述することを試みた。単純化のために1次元での様子を考えた。

流体の方程式を一次元で表示すると

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} J \quad \left(\text{または} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} J = 0 \right) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho v = 0 \quad \text{連続の方程式}$$

ここで J と U は、流速と細胞の密度を表す。

さきほどの仮定から *T. elongatus* 細胞集団全体に液状の成分(液体成分)が観察され、これが運動に影響していること、この液体成分は *T. elongatus* 自身が分泌するものであると考え、これらの仮定を J として連続の方程式に当てはめた。流量 ; J として拡散に関わる項と移流項を考え、以下の式を採用した。

$$J = - \left(D(v) \frac{\partial u}{\partial x} + K D(v) u \right)$$

式中の $D(v)$ は液体成分量 ; v に影響される細胞集団の移動速度と考えた。

これを連続の方程式に代入し、整理して次の式を得た。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D(v) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + K u \right) \right\} \quad \text{細胞密度に関するモデル方程式}$$

液体成分量についてのモデル方程式

液体成分量 ; v は拡散によって変化することが考えられるため、拡散の項を加えて拡散の度合いを定数 δ と決めた。液体の粘性を反映していると考えた。

この液体成分は細胞とともに一定の割合 γ で取り残されることから、 $(-\gamma v)$ の項を加えた。 γ は粘液がランソウに吸収されないとしたとき、 $\gamma > 0$ である。

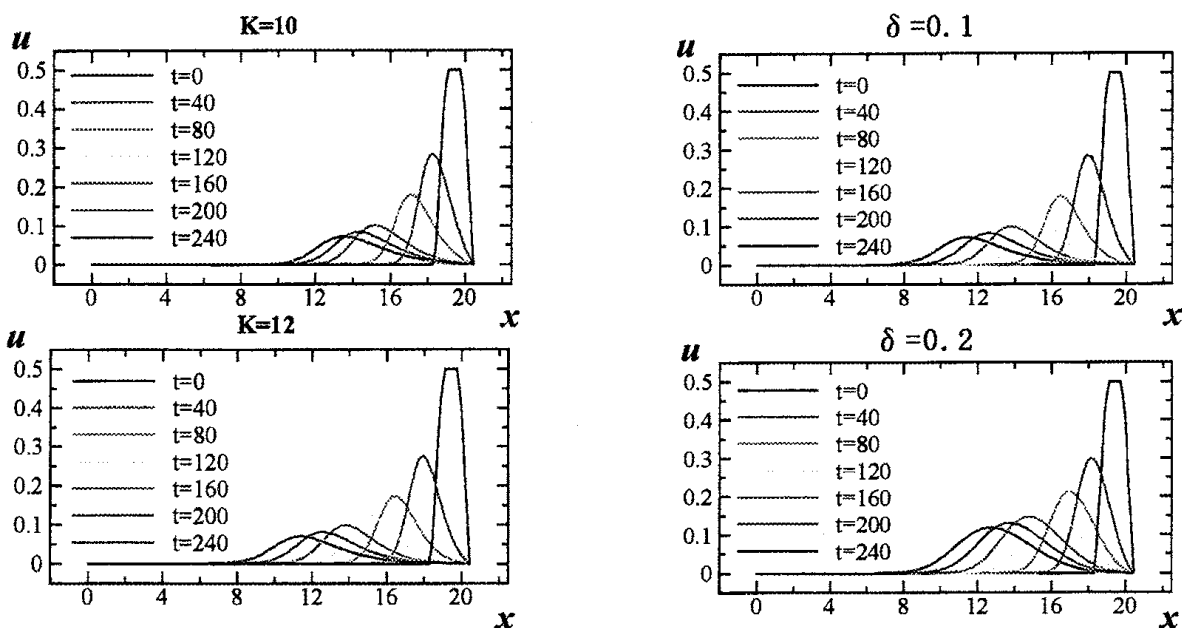
仮定として、液体成分が細胞から分泌されるものであると考えると、液体成分の量 v は集団の密度 u に依存することが推測される。

以上の観察結果と仮定から以下の式が液体成分の時間変化を表すと考えた。

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \delta \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + u - \gamma v \quad \text{液体成分量のモデル方程式}$$

結果

細胞密度と液体成分の2つのモデル方程式を陽解法による近似計算を行った。以下に移流項にかかる K と拡散の度合いを表す項 δ を、それぞれ値を変えて計算した結果を示す。



考察と課題

T. elongatus 細胞集団の移動について以下のような説明が示唆された。

T. elongatus が液体成分を分泌しているという解釈ができるならば、その量が細胞の運動に影響を及ぼしていること。液体成分が十分な量存在しない場合にはあまり動くことができず、一定量以上存在する場合に活発に動くことができること。

さらに、光源方向にある細胞集団前線部分では液体成分が少ないため、自身が液体成分を分泌するまで十分に動くことができないこと。集団内にいる細胞は十分量の液体成分が周囲に存在するために活発に動くことが可能であること。また、特定の割合で液体成分が取り残されていくことや、拡散によって液体成分が広がっていくこと。以上から、計算結果にあるように *T. elongatus* 細胞が移動方向に偏った分布になったと考えることができる。

課題が二点挙げられる。一点目は個々の細胞の運動を合算することでモデルを記述できないかということである。二点目として、発表の際に指摘された運動中に細胞が分裂する影響を考慮することや、実際の細胞密度を計測し今回の結果を比較することである。 (以上担当：大西)