

## バクテリアの集団運動の数理モデル

学習院大学 理学部 物理学科 教授 西 坂 崇 之

学習院大学 計算機センター 教授 横 山 悦 郎

学習院大学 物理学専攻 博士前期課程 小 高 祥 子

### 【背景と概要】

本研究課題は、滑走運動を示すバクテリアである *Flavobacterium johnsoniae* の特徴的な集団運動を説明する数理モデルの構築を将来的な目標としている。本年度においては、モデル化の議論に必要なパラメータを抽出するために必要な実験系の構築を目指し、十分な成果を得た。

*Flavobacterium johnsoniae* (以下、*F. johnsoniae*) は長さ約  $5\mu\text{m}$ 、幅  $500\text{nm}$  の桿菌で、ガラスや寒天上など個体表面を滑るように動く滑走運動を行う(図1)。進行方向を前後に切り替え、速さ  $\sim 2\mu\text{m/s}$  で動く<sup>1</sup>。我々はこれまでに、*F. johnsoniae* の集団に着目し、特徴的な振る舞いを見出した。*F. johnsoniae* を寒天上に高濃度でスポットすると、集団で多数の巨大な渦状パターンを形成したのだ(図2)。渦の直径は最大  $2.5\text{mm}$  にもなった。個々のバ

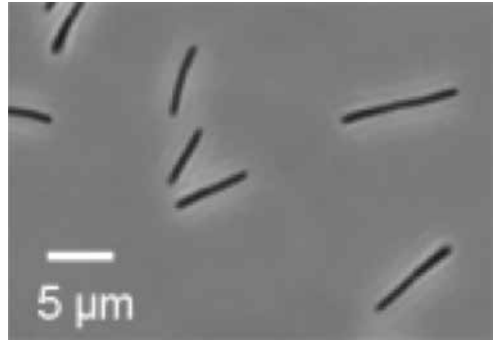


図1: *Flavobacterium johnsoniae* の位相差顕微鏡による像

クテリアは見かけ不規則な運動をするにもかかわらず、集団においてはミリメートルの自己組織化

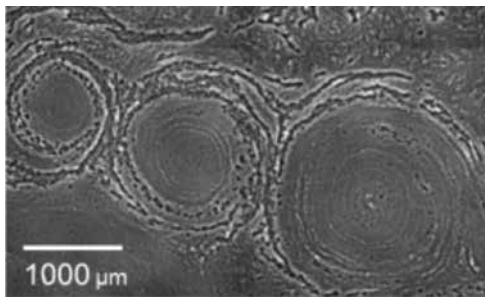


図2: *Flavobacterium johnsoniae* の集団が形成する巨大渦状パターン

をするのである。さらに興味深いことに、これらの渦は、形成時に例外なく反時計回転をしていることが分かった。回転方向に異方性のある巨大渦パターン形成という、これまでに報告されていない、新たな集団運動の現象を発見したのだ。

本研究課題では、この *F. johnsoniae* の集団での特徴的なパターン形成を説明する数理モデルの構築を最終目標としている。本年度においては、モデル構築に必要な各パラメータの値を求める実験系の確立

に集中し、以下の4つの方向性で研究を進めた。(1) 光学顕微鏡を用いた長時間の観察が可能な系の構築、(2) 渦形成の全過程について画像化・解析、(3) *F. johnsoniae* 一個体の運動の解析、(4) 渦形成についての徹底的な条件検討。

## 【研究の内容と成果】

### 1. 光学顕微鏡を用いた長時間観察が可能な系の構築

巨大渦パターンは、*F. johnsoniae* を寒天上にスポットしてから6～12時間後に現れはじめ、数日をかけてプレート全面に形成される。一定の領域について渦パターン形成の全過程を解析するためには、顕微鏡上で24～48時間にわたる観察を行い、画像化することが必要である。そこで、顕微鏡のある空間を $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ にする温度制御を行い、観察中の条件を一定にした。さらに、自動フォーカス調節機能を組み込み、長時間フォーカスを合わせたままタイムラプス撮影を行うシステムを構築した。

その結果、48時間にわたる撮影に成功し、渦パターン形成の全段階についての画像化が可能になった。連続画像は非圧縮でデスクトップPCに記録される。

### 2. 渦形成の全過程について画像化・解析

上で構築した系を用いて、渦パターン形成について記録を行い、詳細な解析を行った。その結果、高密度の細菌が無秩序に運動している状態から渦の「核」となる部分が形成される段階において、 $0.5 \mu\text{m/s}$  で左回転しながら周囲を巻き込み、渦の直径が成長する様子が見られた。この左回転しながらの成長は約5時間続き、その後回転は停止し直径の成長も止まった。渦の回転速度を解析すると、ほぼ角速度一定の分布を示しており、それぞれの渦は一枚の円盤状の構造を作り回転していることが示唆された。成長の最終段階に、まれに逆回転を示す様子も見られた。

### 3. *F. johnsoniae* 一個体の運動の解析

巨大渦を構成する要素である *F. johnsoniae* 一個体の運動を調べるために、密度を低くして観察を行った。すると、ガラス上では、前後運動をしながらも左旋回に偏った動きを行うことが分かった。また、寒天上では数個体で隣り合って動くクラスターを形成し、前後運動の性質がなくなり  $0.5 \mu\text{m/s}$  で一方向的な左旋回の運動を示す事が分かった。集団における巨大渦の反時計回転は、*F. johnsoniae* の一個体の左旋回の運動に由来しており、集団となることで一方向的な回転を達成していると説明できる。

### 4. 渦形成のための詳細な条件検討

渦形成について徹底的な条件検討を行ったところ、環境中の栄養分の濃度が渦形成の可否を決めるパラメータの一つである事が明らかになった。栄養分となる glucose が  $0.1 \text{ mM}$  以下である場合にのみ渦パターンは形成され、逆に、栄養分が豊富な条件では無秩序のままであった。渦が形成されない栄養分が豊富な条件で *F. johnsoniae* の一個体の運動を観察したところ、前後運動の頻度が

上昇し、左旋回の特徴が消失している事が分かった。バクテリア一個体の、左旋回の運動が巨大渦パターン形成において重要である可能性がある。

さらに基板となる寒天の硬さを変えると、形成される渦の最終的な大きさが変化することが分かった。寒天の濃度が1%の時、渦の直径の最大値は約 2.5 mm であり、より硬い 2.5% では約 1 mm であった。

## 【まとめと展望】

運動能を持つ桿状のバクテリア *F. johnsoniae* を対象にして、集団運動の研究を行った。*F. johnsoniae* を寒天上に高濃度でスポットすると、集団で多数の巨大な渦状パターンを形成した。これらの渦は形成時に例外なく反時計回転しており、回転方向に異方性のある巨大渦パターン形成という、これまでに報告されていない新たな集団運動の現象を見出すことに成功した。実験により、渦形成を説明する各パラメータを取得し、また一つの特徴である反時計回転はバクテリア一個体の運動に由来する可能性が示唆された。

これまでの注目すべき報告としては、分子モーターであるダイニンにより駆動される基質フィラメントの微小管が、自発的に特徴的な渦パターンを形成することが報告されている<sup>2</sup>。しかしこの渦は異方性のある回転ではなく、集団運動という視点からも、今回の知見がたいへん興味深いことであることが分かる。

今後は、実験結果をもとに数値シミュレーションを行う事で、この特徴的な集団運動の本質を明らかにしたい。

## 【謝辞】

計算機センターのスタッフの方には、本研究費の執行に当たり、惜しみないサポートをいただきました。感謝いたします。また本研究課題は、西坂研究室で2013年度まで進められた「最先端・次世代研究開発支援プログラム」とは関わりなく、課題内容や研究設備、消耗品についても一切オーバーラップが無いよう、十分な注意を払っています。

## 【文献】

1. Nakane D, Sato K, Wada H, McBride MJ, Nakayama K. Helical flow of surface protein required for bacterial gliding motility. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 110, 11145-11150 (2013).
2. Sumino Y, *et al.* Large-scale vortex lattice emerging from collectively moving microtubules. *Nature* 483, 448-452 (2012).