

A04 光の射す方へ：微生物の動線をつくる流体力学

立命館大学理工学部 和田浩史

東京農工大学大学院工学研究院 村山能宏

東北大学 材料科学高等研究所 義永那津人

東京工業大学 化学生命科学研究所 植木紀子

ボルボックスは淡水で光合成を行って生活する球形の多細胞生物であり、細胞は球殻を構成する体細胞と球内部に位置する生殖細胞とに分化している。ボルボックスは生物進化における多細胞化の過程を探るためのモデル生物であり、球形という幾何学的な単純さと構造の均一性から、生物流体力学のモデルとしても近年盛んに研究されている。ボルボックスの球殻は数千個の同一の体細胞からなり、各体細胞は二本の鞭毛と眼点（原始的な眼）を有する。眼点による光受容に反応して、様々な光走性を示すが、体細胞は物理的に接着していることを除いて直接的な情報交換を行っていないと考えられており、これらは典型的な自律分散系である。

ボルボックスは表面にある数千の鞭毛を協同的に波立たせ、水流を引き起こす反作用によって水中を遊泳する。光照射に対しては、まず光驚動現象と呼ばれる初期応答を示す。このときおもに個体の前半分の鞭毛打が停止（または反転）し、水流の方向が変化する結果、ボルボックスは停止する。その後、光を最も強く受容する領域のみで鞭毛打が停止する結果、全体のトルクバランスが変化し、体を光の方向に旋回させる。車の運転に例えると、(a)が直進、(b)がブレーキ、(c)が光の方向にハンドルを切る操作、といえる。

本研究の目標は、緑藻類ボルボックスが光走性をなしとげる力学的な仕組みを、理論的なアプローチを実験結果と組み合わせることで定量的に明らかにすることであった。採択された申請書では、一個体の光刺激への応答のしくみ、すなわち、光刺激のセンシング、情報処理、鞭毛運動の制御、コロニーの旋回運動、という一連の動作がどうやってうまくいくのか、に注目し研究計画をデザインしていた。しかし、その後、種類の異なるボルボックスを用いた詳細な先行研究[1]にしたがって、光センシングからコロニーの旋回運動の動作についてはかなり見通しよく理解できることが判明した。

そこで、当初の研究計画の枠組みでは発展的な課題と位置づけていた「個体の応答特性のゆらぎと集団運動の関係」に着手することにした。具体的には、光応答の集団運動にかんする最近の実験結果[2]に注目してきた。この実験では、相対光強度を増すとともに、走光性を示す集団としての速度（平均速度）が比例して増加することが報告されている。

連携研究者の村山たち（東京農工大）は彼らのこの実験をさらに推し進め、個々のボルボックスコロニーは光の相対強度差とともに光源の向きをより正確にセンシングするようになる、ということ突き止めた。さらに、この応答特性は相対強度差のみに依存し、光刺激の強さそのものには依存しないことも示している [3]。彼らは、彼らの実験結果は「コロニーを構成する各体細胞には、光驚動反応を示し始める固有の閾値のようなものがあり、その閾値は相対強度差のみに依存し、かつそれらには体細胞ごとに内在的なばらつき（分布）がある」と仮定すると矛盾なく説明できる、と提案している [3]。

我々は現在、この仮説を検証する理論モデルを構築し、それを解析的および数値的に調べる作業に着手している。具体的には、先行する Drescher たちのモデル[1]をベースとする。

これに加えて、各体細胞が鞭毛打の運動を停止する光刺激の強さ閾値に分布を持たせる。体細胞レベルの信号処理にかかわるばらつき（応答の分布）を導入することによって、完全にメカニスティックにふるまう先行研究のモデルに、ある種のランダムさが追加され、最終的には、コロニー集団が光刺激に対して全体として示すゆらぎやばらつきを創発する。現在、このようなミニマルなセットアップで、村山らの実験結果がどこまで定量的に再現可能か、検証中である。

領域内の共同研究：

上記の主研究課題と独立に、本領域の木村暁博士との領域内共同研究も進めてきた。このプロジェクトでは、木村グループがとりくむ線虫 *C. elegans* の初期胚で生じる細胞質流動にかんして、先行研究[4]で提案されたモデルをもとに、細胞の閉空間性と曲率の効果を考慮した反転現象の流体シミュレーションを実施してきた。我々の計算結果は、流動の発生およびその間欠的な反転現象を再現する。計算で得られた流れ場は実際の細胞で観測される流動の様子とよく一致する(図2(a, b))。さらに、我々のシミュレーションでは、定常的な時計回り、反時計回り流れに加えて、これらが共存する準定常的な流れの構造も観測される [5]。このような空間的なパターンをともなう流れと細胞内輸送について、さらに理論・実験の両面から検討中である。

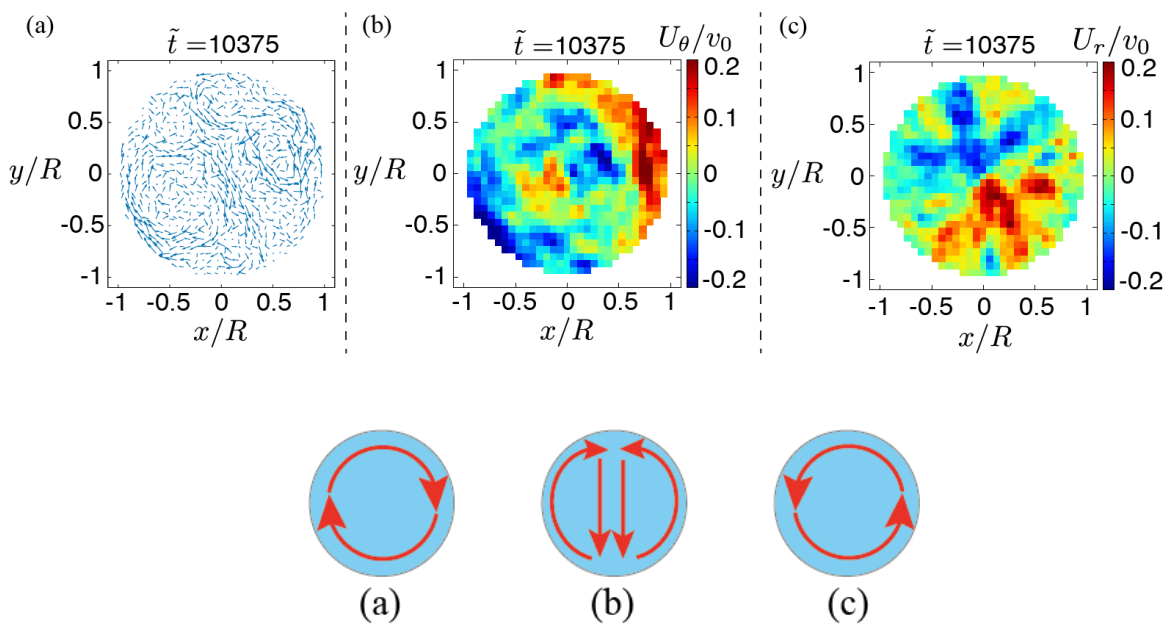


図1：(上) Dissipative particle dynamics 法による流体シミュレーションで再現された細胞質流動の流れ場の様子。下の(b)に相当する流れ場のスナップショット。(下) 模式図。(a), (c)に加え、(b)のような流れ場が準安定状態として観測される。

参考文献：

- (1) K. Drescher, R. E. Goldstein and I. Tuval, PNAS 107, 11171-11176 (2010).
- (2) M. Ozaki and Y. Murayama, Curr. Phys. Chem., 5, 64-72 (2015).
- (3) 山田 啓祐, 東京農工大学 大学院 工学研究院 修士論文 2017年度 (2018).
- (4) K. Kimura, A. Mamane, T. Sasaki, K. Sato, J. Takagi, R. Niwayama, L. Hufnagel, Y. Shimamoto, J.-F. Joanny, S. Uchida, and A. Kimura. Nat. Cell Biol. 19, 399-406 (2017).
- (5) 高木 俊明, 立命館大学 大学院 理工学研究科 修士論文 2017年度 (2018).