

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 7日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23740290

研究課題名（和文） 個体・集団レベルの生命現象における能動的揺らぎと応答の関係

研究課題名（英文） Relation between active fluctuation and response in living matter

研究代表者

村山 能宏（MURAYAMA YOSHIHIRO）

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60334249

研究成果の概要（和文）：

生物個体・集団が示す能動的揺らぎと応答の関係を解明することを目的とし、走光性を有するボルボックスを用いて、光刺激に対する応答と刺激がないときの揺らぎの関係について調べた。その結果、速度揺らぎの大きい集団ほど光刺激に対して大きな応答を示すことが分かった。本研究で得られた揺らぎと応答に関する様々な実験式や係数は、本研究で構築した系が生物集団の統計力学的性質を探るためのプロトタイプとして有用であることを示している。

研究成果の概要（英文）：

A relation between fluctuation and response in phototactic behavior in volvox colonies was investigated to elucidate the relation between active fluctuation and response in living matter. We found that the larger velocity fluctuation is, the larger response is. We obtained several experimental equations and coefficients for the fluctuation and the response, which indicate that our experimental system will be a useful prototype to investigate the statistical properties in living matter.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：生物物理学

科研費の分科・細目：物理学（数理物理・物性基礎）

キーワード：揺らぎ，応答，ボルボックス，走光性

1. 研究開始当初の背景

溶液中の数ミクロンのバクテリアや基板上を動く細胞，流体中の個体，集団などは，明らかにブラウン運動（熱揺らぎ）とは異なる確率的な振る舞いを示す。同時に，細胞や個体の多くは，化学物質の濃度や温度，電磁場等の外力（外場）に対し，活性の変化や走性といった応答を示す。“生命現象特有の揺らぎ”と“何らかの刺激に対する応答”は，我々がその現象に対し“生物らしさ”を感じる一因ともいえるだろう。この極めて曖昧な感覚を物理的に理解するためには，“生命現象における揺らぎと応答の関係”を明らかにする必要がある。物理現象では線形領域にお

いて，外力に対する応答である応答関数が，外力がないときの力学量の相関関数を用いて表現できる（第一種揺動散逸定理）。生物個体や集団が示す能動的揺らぎと外力に対する応答にルールは存在するのであるか？

個体・集団レベルの生命現象では，生物種により形体や運動機構，相互作用が異なり，これらに対し十分妥当な物理的近似を行うことは通常困難である。その結果，個体・集団レベルの現象を解明するためのプロトタイプとなり得るモデル実験系は，現在のところ存在しない。逆にこれらの困難を克服し，物理的視点からの理想的なモデル系が構築

できれば、個体・集団レベルの生命現象の理解は飛躍的に進むと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、緑藻の一種であるボルボックスを能動的粒子とみなし、個体・集団レベルの生命現象を理解するためのプロトタイプとなり得るモデル実験系を構築する。ボルボックスが有する走光性を利用し、生物個体・集団が示す能動的揺らぎと応答の関係を解明することが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

図1に示すように、ボルボックスを入れた直方体の容器に対し、正面から波長660 nmのレーザーシート光を照射し、ボルボックスの散乱光を上方のCCDカメラで観測する。これにより、各個体の二次元的な運動が観測可能となる。19.2 mm x 14.4 mmの領域を5 frames/sで観測し各個体を追跡することにより、0.6 s間の変位から個体速度を算出した。光刺激に対する応答を観測するために、容器の両側面からボルボックスの反応性が高い波長500-575 nmの刺激光を照射する。左右の刺激光の照度をそれぞれ I_L 、 I_R とし、照度の和および差を

$$I_{sum} = I_R + I_L, \\ I_{dif} = I_R - I_L$$

と定義する。本研究では照度差 I_{dif} をボルボックスに与える刺激とみなし、 $I_{sum} = 25 \sim 400$ klx, $I_{dif} = -60 \sim +60$ klxの範囲で測定を行った。

刺激光の光軸と平行に x 軸を取り、時刻 t における i 番目の個体の速度を $\mathbf{v}^i(t) = (v_x^i(t), v_y^i(t))$ とする。時刻 t に観測領域に存在する N 個体の速度の x 成分の平均値

$$\langle V_x(t) \rangle = \sum_{i=1}^{N(t)} v_x^i(t) / N(t)$$

を刺激光に対する応答とみなした。以下では $\langle V_x(t) \rangle$ を集団速度と呼ぶ。照度差ありのときの刺激に対する応答と照度差なしのときの速度揺らぎから、揺らぎと応答の関係について調べた。

4. 研究成果

(1) ボルボックス易動度の発見

図2は、照度差に対する集団速度の定常値を示している。いずれの合計照度においても、ボルボックス集団は照度差に対し線形に反応していることがわかる。この結果からボルボックスの易動度を $\mu_{vol} = \langle V_x(t) \rangle / I_{dif}$ と定義した。さらに、易動度 μ_{vol} の合計照度依存性を詳細に調べた結果、易動度は合計照度に反比例することが分かった。これらの結果から、ボルボックス集団は $\hat{I} = I_{dif} / I_{sum}$ の刺激に対して応答するシステムとみなすことができ、集団速度は

$$\langle V_x(t) \rangle = \hat{\mu}_{vol} \hat{I}$$

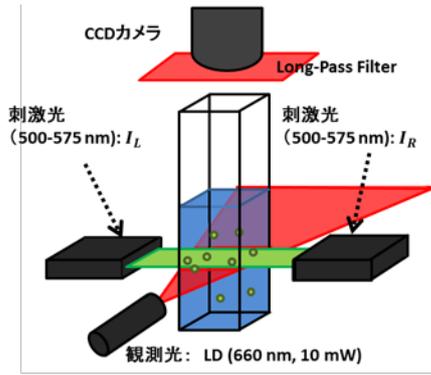


図1：実験装置の概略図

とあらわせることを発見した。図2の挿入図は $\langle V_x(t) \rangle$ を \hat{I} に対してプロットした結果であり、異なる合計照度のときの測定結果がほぼ同一の直線にのることがわかる。これらの結果から、ボルボックス易動度として、

$$\hat{\mu}_{vol} = (1.5 \pm 0.3) \times 10^2 \mu\text{m/s}$$

が得られた。

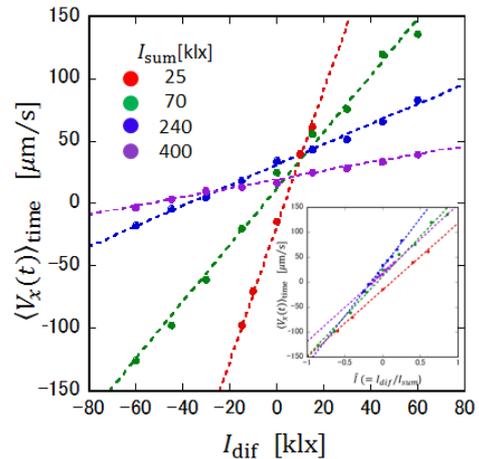


図2：照度差に対するボルボックスの応答

(2) 周波数応答関数

図3は、様々な周波数のもと、正弦波で照度差を変化させ集団速度を観測した結果から得られた、ボルボックス集団の周波数応答関数である。これらの測定結果を解析した結果、ボルボックス集団は照度差に対して線形に反応し、応答の緩和時間は合計照度の増加にともない減少することが分かった。その結果、光刺激に対する周波数応答関数の実験式として、

$$\hat{M}(if) = \frac{\hat{\mu}_{vol}}{1 + 2\pi i \left(\frac{C_\tau}{I_{sum}} + \tau_0 \right) f}$$

が得られた。ここで、 $C_\tau = 368.4$ klx s, $\tau_0 = 4.9$ sである。図3の実線は上式を表しており、測定結果とよい一致を示していることが分かる。

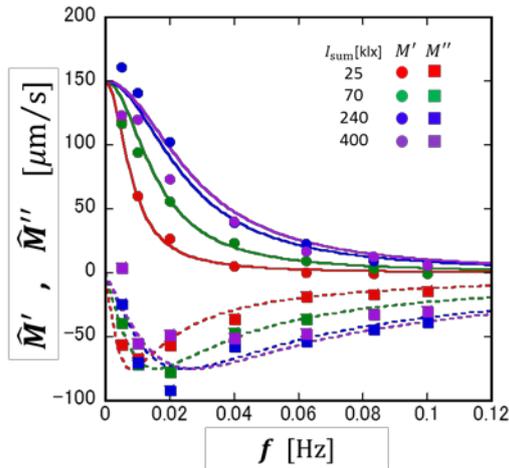


図 3 : 周波数応答関数

(3) 揺らぎと応答の関係

照度差なし ($I_{dif} = 0$) のときには、集団速度は 0 近傍で揺らぐ。図 4 は、同一のボルボックス集団に対し、照度差なしの状態における個体速度の分布 (図 4 上) が、照度差を加えることでどのように変化するか (図 4 下) を示している。プロット点の色の違いは、測定に用いた試料の違いであり、飼育条件や測定条件に違いはない。上下の図を比較すると、個体速度の分散 $\sigma_{v_x^i}^2$ が大きい集団ほど光刺激に対して大きな応答を示していることが分かる。この傾向を確かめるために、ボルボックス易動度 μ_{vol} を揺らぎの大きさ (個体速度の分散 $\sigma_{v_x^i}^2$) に対してプロットした結果を図 5 に示す。プロット点の色の違いは合計照度の違いであり、いずれの合計照度においても易動度は揺らぎに対して線形に増加していることが分かる。すなわち、揺らぎの大きい集団ほど刺激に対する応答が大きいといえる。この結果と (1) に示した結果から、易動度と揺らぎの関係式として、

$$\hat{\mu}_{vol} = \hat{A}(\sigma_{v_x^i}^2 - \sigma_0^2)$$

の実験式を得た。ここで、 $\hat{A} = 9.6 \times 10^{-3} \text{ s}/\mu\text{m}$, $\sigma_0^2 = 8.0 \times 10^3 \mu\text{m}^2/\text{s}^2$ である。

これらの結果は、生物が示す能動的揺らぎと外力に対する応答の間に、物理現象における揺動散逸関係に類似した関係が存在することを示している。上式のように、揺らぎと易動度の間に線形関係が成立することは、生物集団の振る舞いに対して統計力学的アプローチが可能であることを期待させる。一方、物理現象との相違点として、上式は易動度と関係がない揺らぎ σ_0^2 が存在することを予見している。この揺らぎの存在は熱揺らぎとは異なる能動的揺らぎの特徴といえることから、今後実験的に検証する必要がある。

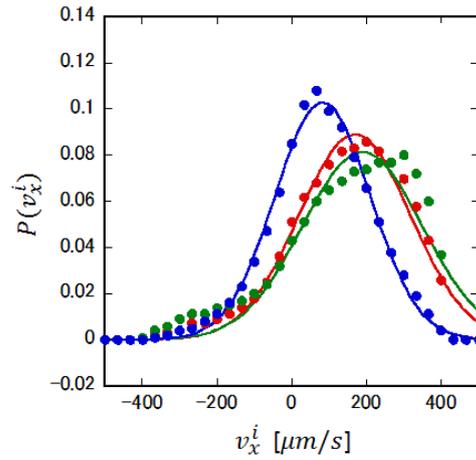
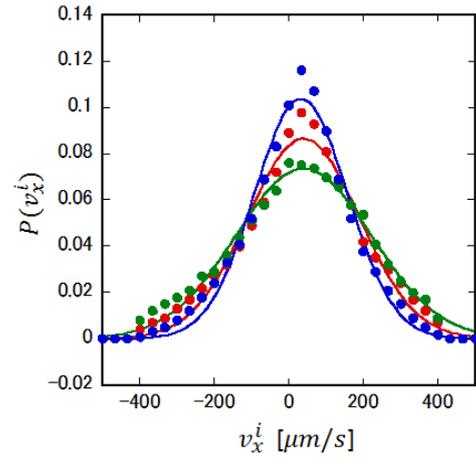


図 4 : 光刺激による個体速度分布の変化

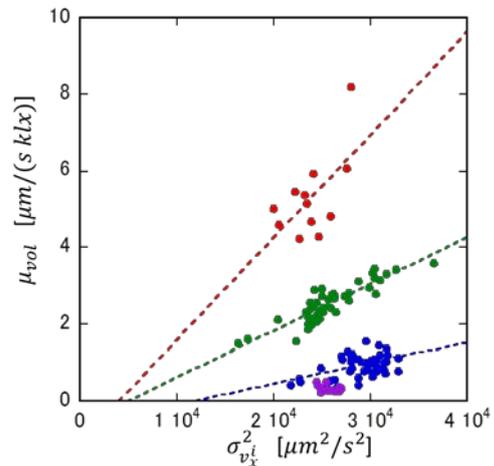


図 5 : 揺らぎと応答の関係

(4) まとめ

本研究は、微生物が示す能動的揺らぎと応答を系統的に測定し両者の関係を示した最初の例といえる。本研究により、ボルボックス集団は、物理現象と極めて類似した性質と

明らかに異なる性質を併せ持つことが分かった。これらの成果は、能動的粒子系に潜む普遍性を探る上で、本研究で構築した系が優れたプロトタイプとなり得ることを示している。今後は、本研究で得られた実験式の物理的および生物学的意味の解明や、適応現象などについて研究を進める必要がある。

本研究を発展させることで、“能動的粒子系の統計力学”が構築できれば、“温度差で生じる熱流”や“化学ポテンシャルの差で生じる物質流”という考え方を、生物個体や集団の動きはもとより、生態系や社会の動きに対しても応用できる可能性がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計6件)

(1) 村山能宏, 尾崎正志, 乙川俊也, 「ボルボックスの走光性における線形応答と揺らぎ」, 日本物理学会第68回年次大会, 2013年3月28日, 広島大学東広島キャンパス

(2) Yoshihiro MURAYAMA, Masashi OZAKI, and Shunya OTOKAWA, 「Relation between fluctuation and response in phototactic behavior of Volvox colonies」, Self Organization and Emergent Dynamics in Active Soft Matter, 2013年2月19日, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan

(3) 尾崎正志, 村山能宏, 「ボルボックスの速度揺らぎと走光性の照度依存性」, 日本物理学会2012年秋季大会, 2012年9月20日, 横浜国立大学常盤台キャンパス

(4) 村山能宏, 尾崎正志, 乙川俊也, 「ボルボックス集団における能動的揺らぎと応答の関係」, 基研研究会2012「非平衡系の物理—その普遍性を目指して—」, 2012年8月1日, 京都大学基礎物理学研究所

(5) 乙川俊也, 村山能宏, 「光刺激に対するボルボックスの揺らぎと周波数応答」, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月25日, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス

(6) 尾崎正志, 村山能宏, 「光刺激に対するボルボックスの応答と適応」, 日本物理学会2011年秋季大会, 2011年9月24日, 富山大学五福キャンパス

6. 研究組織

(1)研究代表者

村山 能宏 (MURAYAMA Yoshihiro)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：60334249

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし