

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03676

研究課題名（和文）バクテリアの走化性機構を模倣した無生物自己駆動粒子の集団運動

研究課題名（英文）Bacterial Chemotaxis Reproduced by Collection of Self-Propelled Objects

研究代表者

末松 信彦（Suematsu, Nobuhiko）

明治大学・総合数理学部・専任教授

研究者番号：80542274

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、バクテリアにみられる走化性戦略を実装した無生物系を構築し、その背後に潜む普遍的な仕組みを明らかにすることを目指して研究を行った。これまでに、水面を自発的に滑走する固体粒が水相中の物質と化学反応すると、バクテリアのrun-and-tumbleに似た特徴的なふるまいをすることが知られていた。そこで、水相中に反応物の濃度勾配を作り、固体粒の存在確立の空間分布を実験的に調べ、バクテリアと同様にrunの期間が長い方に優位に集まることを明らかにした。さらにその挙動を説明する単純なランダムウォーカーモデルを構築し、さらに数理的に定常状態を求め、走化性の普遍的な仕組みを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自己駆動粒子の開発は近年様々な物質で行われ、種々の機能が実現されてきている。その中で、走化性をはじめとする環境応答性は最も重要な機能の一つである。これまでは、外部環境の優位な勾配に決定論的に応答する系が多く開発されてきたが、系が小さくなると、勾配の影響が小さくなるため、バクテリアで実現されているような確率的な応答が求められる。今回、我々が明らかにした実験系はバクテリアの走化性にみられる戦略をうまく再現しており、その実装可能性を示すことができた。今後、ドラッグデリバリーシステムのように、自発的な環境応答性が求められる場に対しての応用が期待される成果である。

研究成果の概要（英文）：In this project, we focused on chemotaxis of self-propelled particles. It was known that a nonliving solid particles can show spontaneous motion on water surface, furthermore, run-and-tumble behavior could be reproduced with a chemical reaction where the reactant was in the water phase. "Run-and-tumble" is well known characteristic behavior of bacteria, which succeeds chemotaxis by tuning periods of run and tumble depending on the surrounding chemical conditions. Similarly, our nonliving self-propelled particles showed chemotaxis response to chemical concentration gradient. In addition, our observations were reproduced by a simple random walker model. We mathematically analyzed the model and got a profile of existing distribution mathematically. This result indicates that bacterial chemotaxis was well reproduced by nonliving matter and the fundamental mechanism was almost same. Therefore, our findings are probably applied to variety of situations and materials.

研究分野：非線形科学

キーワード：自己駆動粒子 環境応答性 走化性 確率微分方程式 界面化学

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は、物理化学系における自己駆動粒子の開発が進んでおり、種々の機能性を持った自己駆動粒子が様々な物質で報告されていた。その中で、環境応答性、特に走性の研究は多く行われていた。しかし、その仕組みは主に、物理化学的パラメータの大きな勾配が駆動力に空間非対称性を生み出し、物質をターゲットに向かわせるというものが主であった。このような仕組みは理解しやすく、制御性が高いが、その反面、系が小さくなると、物質の前後の対称性を破ることは難しくなり、走性の実現可能性が低くなることがわかっている。そこで注目されるのが、バクテリアの走化性である。バクテリアの走化性戦略はよく研究されており、run-and-tumble を繰り返しながら遊泳するバクテリアは、run と tumble の長さを周囲の化学物質の濃度及びその遊泳中の時間変化によって調節することで、等方的に運動方向を決めるにもかかわらず目的の方向に進む走化性を実現している (図 1)。

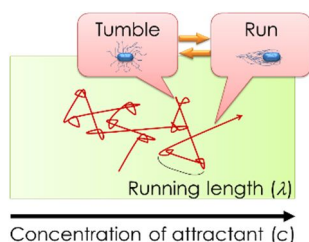


図 1 . バクテリアの走化性を示した模式図

2. 研究の目的

本研究課題では、バクテリアの走化性戦略を物理化学系の自己駆動粒子で実現するとともに、その背後に潜む普遍的な仕組みを数理的に明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

水相表面を自発的に滑走することが知られていた、フェナントロリンの固体粒を用いた。フェナントロリンは鉄イオンが水相中に存在すると、錯形成反応を起こしてフェロインを生成する。この時、フェナントロリンは水の表面張力を優位に低下させるので、粒の自発的な運動が誘起されるが、フェロインは表面張力をあまり低下させないため、粒の駆動力は錯形成反応によって阻害される。これらの化学反応が関与することで、動いたり、止まったりを繰り返す特徴的な運動がみられることがフェナントロリン粒の特徴である (図 2 a)。

本研究では、このフェナントロリン粒の特徴的な運動を、バクテリアの run-and-tumble に見立てて、run や tumble の時間と粒の存在確率分布の関係を調べた。具体的には、鉄イオンの勾配を作った水相を用意し、その上にフェナントロリン粒を浮かべ、運動の様子を解析した (図 2 b)。

また、仕組みを解明するために、単純なランダムウォーカーモデルを構築し、確率微分方程式を求めて、定常状態における存在確率の分布を数学的に求めた。

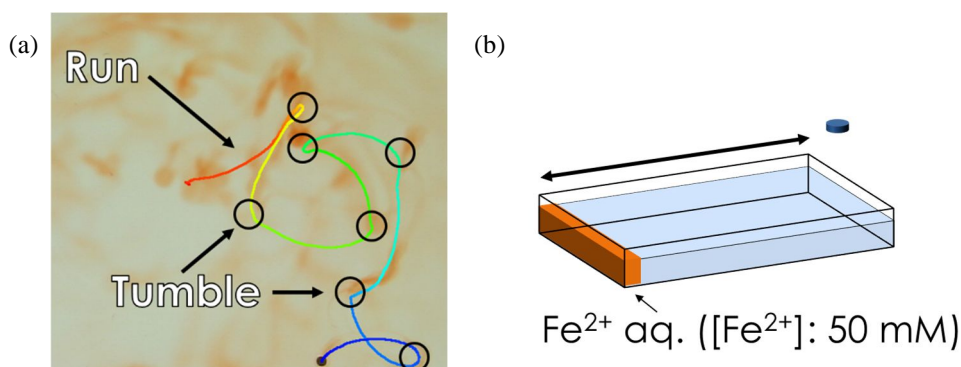


図 2 . (a) フェナントロリン粒の run-and-tumble 運動の軌道と (b) 実験装置の模式図。

4. 研究成果

実験では、フェナントロリン粒の存在確率は鉄イオン濃度の低い領域ほど高いことが分かった (図 3)。

また、run の方向を調べたところ、ほぼ等方的であることが分かった。つまり、鉄イオンの低濃度領域への遊泳は、運動方向を制御したことによるものではないことが明らかになった。さらに、run の長さを詳細に調べ、run のスタート位置と方向への依存性を求めたところ、スタート位置が低濃度ほど、また方向が低濃度側を向いているほど、run の長さが長くなることが明らかになった。つまり、バクテリアの走化性と同様に、run の長い領域に集まることが明らか

になった。

この実験結果を理解するため、run の長さが位置と方向のみに依存するような単純なランダムウォーカーモデルを構築し、数値計算を行った。この時、運動する方向はランダム（一様分布）に決まるものとした。その結果、分布は run の長さの位置依存性と方向依存性の強さの係数に依存して変わることが分かった。位置依存性が強い場合は run の長さが短い領域に、逆に方向依存性が強い場合は run の長さが長い領域に集まった。物理化学実験では、得られた結果を分析した結果、方向依存性が強いことがわかり、数値計算で得られた結果と実験結果が一致した。

さらに、ランダムウォーカーモデルを、存在確率分布の確率微分方程式に書き直し、定常状態を数学的に求めたところ、位置依存性のパラメータと方向依存性のパラメータの比が分岐パラメータとなり、分布が変わることを示すことに成功した。これらの成果は、今回提唱した単純なモデルが普遍的に様々な系に適用可能であることを示している。

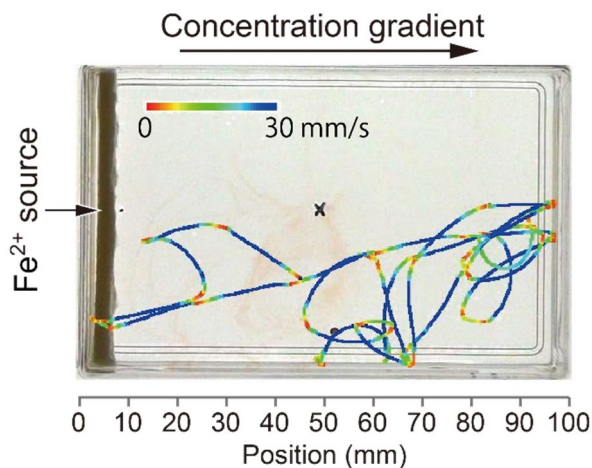


図3 . 鉄イオン濃度勾配のある水相におけるフェナントロリン粒の軌道。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hamano Yuko, Ikeda Kota, Odagiri Kenta, Suematsu Nobuhiko J.	4. 巻 13
2. 論文標題 Reproduction of bacterial chemotaxis by a non-living self-propelled object	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8173
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-023-34788-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 末松 J. 信彦, 池田 幸太, 小田切 健太
2. 発表標題 Stochastic Chemotaxis Demonstrated by a Self-Propelled Particle
3. 学会等名 生物物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nobuhiko J. Suematsu, Yuko Hamano, Kenta Odagiri, Kota Ikeda
2. 発表標題 Bacteria-like Chemotaxis of a Non-living Self-propelled Object
3. 学会等名 XLIII Dynamics Days Europe（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小田切 健太 (Odagiri Kenta) (20552425)	専修大学・ネットワーク情報学部・准教授 (32634)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	池田 幸太 (Ikeda Kota) (50553369)	明治大学・総合数理学部・専任准教授 (32682)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関