

水面滑走する自己駆動粒子のリズム運動

末松 J. 信彦 〈明治大学総合数理学部, 明治大学先端数理科学インスティテュート suematsu@meiji.ac.jp〉

池田 幸太 〈明治大学総合数理学部, 明治大学先端数理科学インスティテュート ikeda@meiji.ac.jp〉

西森 拓 〈広島大学統合生命科学研究所 nishimor@hiroshima-u.ac.jp〉

リズム現象は生物システムで広く認められる特徴的な現象のひとつである。細胞単体レベルで認められるものから、細胞や微生物の集団に現れるものまで、様々なリズム現象が知られている。集団に現れるリズム現象の中には、細胞密度がある一定以上になるとはじめて現れるものもある。例えばイースト菌では、細胞密度が高くなると細胞間の相互作用分子の濃度が増加し、それがある臨界値を超えると、培養液内の平均的な酸素濃度が時間周期的に振動する。このような細胞密度の増加に伴うリズム現象の発現は、振動子集団の同期現象による転移（蔵本転移）、またはクオラムセンシングにより個々の細胞の状態が定常から振動へと分岐することとして理解されている。

このような数密度の増加に伴い現れるリズム現象が、近年、無生物の自己駆動粒子の系で発見された。自己駆動粒子に現れる集団運動の研究は、Vicsekらによって報告された非常に単純なモデルを皮切りに、主に数值的、理論解析的に行われてきた。ここでは、数密度の増加に伴い、時空間的な疎密パターンが自発的に形成される。このような理論的な研究が進められる一方で、単純な物理化学系で構築された自己駆動粒子も数多く報告されている。ここでは、最も単純な自己駆動粒子の一つである「しょうのう（樟脳）粒」に着目し、その集団に現れる挙動について紹介する。

しょうのうは防虫剤としてよく使われていた身近な物質であり、近年でも着物などの保存に用いられている。このしょうのうの粒を水面に浮かべると、しょうのう分子が粒から水面に展開し、粒の周辺の表面張力を低下させる。このとき、わずかに生じるゆらぎによって空間対称性が破られると、しょうのう濃度場と粒の運動の結合によって正のフィードバック機構が働き、ゆらぎ

が増幅して粒の定常的な運動を生み出す。この運動の駆動力は、粒の周囲に働く表面張力の不均一性によって生み出される。つまり、運動している粒の前方（運動方向）はしょうのう濃度が低く、後方よりも表面張力が高くなるために表面張力差が生まれ、粒は定常的に駆動される。そのため、例えば界面活性剤を加えて水相全体の表面張力を低くすると、粒の前後に働く表面張力の差が小さくなり、やがて駆動力が摩擦力を下回って停止する。

我々は界面活性剤を加える代わりに、しょうのう粒の数を増やす実験を行った。複数のしょうのう粒を浮かべると、水相全体の表面張力が低下するため、界面活性剤を加えた場合と同様に、定常的な運動から停止への分岐が期待される。ところが、数密度を分岐パラメータにすると、低い数密度で現れる定常的な運動と、高い数密度で現れる停止の他に、中間的な数密度で運動と停止を繰り返す間欠的な振動運動が現れた。

従来のしょうのう粒の数値モデルは、水面におけるしょうのう濃度と粒の運動から構成される。このモデルは粒の定常的な運動から停止への分岐をよく説明できるが、間欠的な振動運動を説明することは難しい。そこで我々は、新たに水中のしょうのう濃度を考慮した数値モデルを提案した。このモデルを縮約すると、場の平均的なしょうのう濃度と運動する速さを変数とした2変数常微分方程式が導かれる。この方程式を数值的に解析することで、間欠的な振動運動および実験で得られた相図が再現された。

このように、環境の濃度場を介した相互作用によるリズム現象の発現は、細胞集団から自己駆動粒子の集団まで幅広い系に現れる普遍的な仕組みである。

—Keywords—

自己駆動粒子：

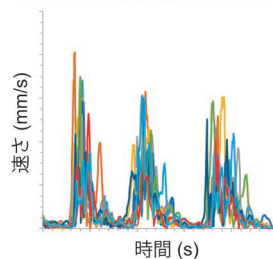
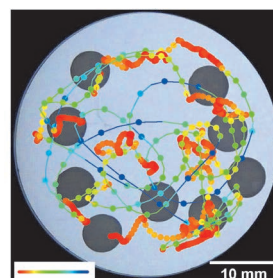
外力を必要とせずに、自発的に駆動力を生み出して運動する粒子の総称。空間均一な場において、自発的に対称性を破り、粒子に働く力のバランスを崩すことで駆動力を生み出す。ただし、まれに外場のポテンシャル勾配に沿って動く粒子に対して使われることもある。

クオラムセンシング：

細胞密度の変化によって各細胞の振る舞いが大きく変化すること。例えば、バイオフィルムの形成や生体物質の生成、解糖系におけるリズム現象の発現などが挙げられる。

分岐：

パラメータの連続的な変化に伴って、系の振る舞いが大きく変わること。例えばしょうのう粒の運動の場合、粘性抵抗が高いときは粒が停止した状態が安定であるが、低くなると運動した状態が安定に現れる。



しょうのう粒の集団に現れるリズム現象。運動の軌跡(上)と速さプロファイル(下)を示している。軌跡の色は粒の速さを示している。