

数が増えるとリズムが生まれる？～しょうのう粒に現れる集団振動運動～

要旨

水面に浮かべると自発的に動き回る「しょうのう粒」という無生物素子の集団において、数密度の増加に伴い個々の粒の運動様相が劇的に変わる現象が発見され、実験と理論モデルと組み合わせることで、その基本的な発現メカニズムが明らかにされた。これは、生物において、個体群の密度に応じて個々の振る舞いが切り替わる「クオラムセンシング」に類似した現象である。実験制御の容易な無生物系でのクオラムセンシングの研究は、従来の生物系の研究に対して新たな視座を与えるものと期待される。

本文

渡り鳥の V 字飛行や海の中のイワシ玉、アリの行列など、生き物は単体では実現できないような大規模で秩序だった群構造を形成し、流体力学的に無駄のない集団飛行、天敵からの効率的逃避などの多彩な機能を実現している。これらは「群れ運動」(条件に応じて「スウォーミング」)と呼ばれ、個体の数密度や運動特性と群れ全体の運動状態の関係がフィールドワーク、実験、数理モデルなどにより広く研究されてきた。身近なところでは、高速道路での車の自然渋滞の発生も、車の密度増加による群れ運動の状態変化の一種ともいえる。これらの現象の背後には一見すると複雑な機構が隠れているように思われるが、比較的単純な個体間の相互作用で説明できることも多い。それを裏付けるように、知能も複雑な相互作用もない、無生物系のおもちゃの群れでも、渋滞現象などが再現されている。代表的な例の一つに「しょうのう船」が挙げられる。しょうのう船は、かつて縁日で子供に親しまれた、水面を自律的に動く船(自己駆動粒子の一つ)であり、船のお尻にしょうのうの粒を付けただけのおもちゃである。しょうのう粒は周囲の表面張力を下げため、船の前後に働く表面張力のバランスがくずれ、船はどんどん前方に引っ張られることで自発的に運動する。

例えばこのしょうのう船を車に見立てて、円環状の水路にたくさん浮かべると、前の船との間隔に応じて単調に減衰する斥力的な相互作用が働く。そのため、数密度が少ないときは、船は等間隔に並んで一定速度で運動する(図 1 a-i)。一方、ある数密度を超えると、車の渋滞のように密度が高いところと、密度が低いところの「密度のムラ」が自発的に表れる(図 1 a-ii)。これは高速道路で自然渋滞が発生した状況とほぼ同等であることが数理モデルで示されている。このように、集団に現れる自発的な秩序形成現象は生物、無生物を問わず類似していることが多く報告されてきた。ただしその多くは、個々の要素の運動はほとんど変化せず、その数密度の不均一性が、空間パターンを形成するものがほとんどである。

最近、明治大学の総合数理学部および MIMS 先端科学インスティテュートと広島大学統合生命科学研究科の研究グループは、水面に浮かべた「しょうのう粒」の群れが数密度に依存して異なる運動モードを示すことを見出し(図 1 b, c)、そのメカニズムを説明する最初の数理モデルの構築に成功した。数密度依存性の研究を行うためには、要素の数を増やすのが一般的な方法だが、当該研究グループは今回、水相の表面積を変数とすることで、単体の粒の数密度を連続的に変化させた。このように、現象のツボ(興味深い特徴)を失わない形で群れの運動を実験的に単純化することで、数密度に依存した運動モードの段階的な変化を、粒の運動と水面の平均しょうのう濃度が結合した連立微分方程式系として記述できるようになった。

要素の数密度に依存して、各個体のダイナミクスが変化する現象は生き物でよく認められ、クオラムセンシング(quorum sensing)と呼ばれる。この現象は例えば、動物の個体内で活躍する大腸菌の細胞間コミュニケーションに利用されるなど、生命系の様々な階層における情報制御機構の一つとして注目されている。今回、無生物系の実験にもかかわらず、細胞などで見られるものと同じように、環境の変化と個体のダイナミクスとが相互作用することで個々の粒の運動様相に急激な変化が現れることが、数理モデルを介して明快に説明された。この成果は日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2019 年 9 月号に掲載された。

このような自己駆動粒子は、人による細かい制御を必要としないで、自律的に運動方向や運動モードを決定することができるため、その場観察の難しい生体内部や微細空間内、地球外環境下などにおいて、人の制御なしに必要な機能を発現する未来型のソフトロボットとしての応用が期待されている。近年では、化学濃度場や光強度場に応答して、走化性や走光性を示す自己駆動粒子も報告されており、目的の場所に自発的に到達させることは可能になってきている。それに対して今回の報告は、数密度に応じて運動モードや系のダイナミクスが自発的に変化する現象であり、自己駆動粒子の可能性を広げる新たな機能となるだろう。現在は基礎研究の段階であるが、生物で認められているような機能的な環境応答性は徐々にその本質的な機構が明らかにされ、無生物系でも再現されるようになってきている。近い将来、これらの基礎研究で得られた知見を元にして、環境にやさしく、無駄のない、機能性自己駆動粒子が活躍する時代が来ることが期待される。

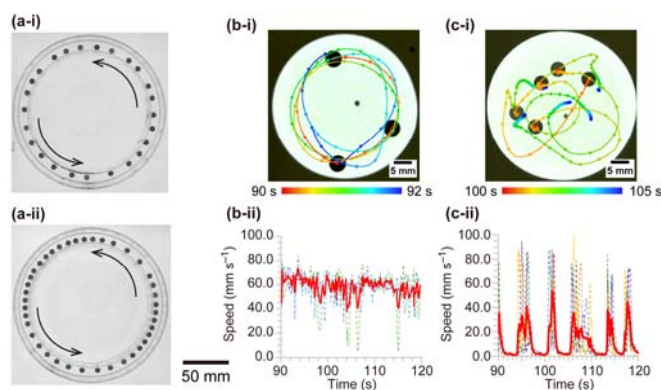


図 1. (a-i) しょうのう船が円環水路を一定速度で滑走する自由流と(a-ii) 止まったり動いたりする渋滞流のスナップショット。(b) しょうのう粒の連続運動と(c) 振動運動を表す(i) 運動の軌跡と(ii) 速さの時間変化のグラフ。

原論文

[Dynamical Quorum Sensing in Non-Living Active Matter](#)

Yui Matsuda, Kota Ikeda, Yumihiko S. Ikura, Hiraku Nishimori, Nobuhiko J. Suematsu, *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 093002 (2019).

<情報提供 末松 J. 信彦 (明治大学総合数理学部、明治大学 MIMS) >