

論文審査の結果の要旨

氏名 西口大貴

自然界では、鳥の群れやバクテリアのコロニーなど、自ら動くものが相互作用することにより、集団レベルのパターンを形成する現象を広く見出すことができる。このような自己駆動粒子の集団運動のダイナミクスを考える分野はアクティブマターと呼ばれ、近年盛んに研究が成されている。様々な理論研究や数値計算による研究から、アクティブマターの集団運動が持つ普遍的な性質が議論されてきたが、その実験的な検証は限られており、その集団運動の普遍性がどのように実現され得るかは不明な点が多く残されていた。西口大貴氏による本論文は、バクテリアを用いた実験系を解析することにより、理論から予想された集団運動の普遍的な性質がどのように出現するか検証をしたものである。

本論文は6章から構成される。第1章は **General introduction** であり、アクティブマターの集団運動が持つ普遍的な性質に関する簡単な紹介と、本論文の構成が述べられている。

第2章では、アクティブマターの集団運動についての先行研究、特に **Vicsek** モデルと呼ばれる単純化した数理モデルと、その解析から見出される集団運動の普遍クラスについて述べている。**Vicsek** モデルは、自己駆動粒子が一定の速さで運動し、揺らぎと近距離の相互作用をその運動の向きに取り入れたものであり、強磁性体の数理モデルである古典 **XY** モデルの拡張されたものとなっている。**Vicsek** モデルは近傍の粒子と向きを揃えるような相互作用をしているため、ノイズの強さや粒子の密度に依存して、集団が同じ向きに動く秩序相への転移を示すことが知られている。また、この秩序相は長距離相関を持ち、その特徴的な性質として、巨大な粒子数揺らぎ (**Giant Number Fluctuations; GNF**) を持つことが理論的な解析と数値計算から示されている。本章では、こうした **Vicsek** モデルに代表される数理モデルの持つ普遍的な性質を論じた上で、それらの実験的検証を第3章の研究目的とすることが述べられている。

第3章では、バクテリアを用いた集団運動の解析について述べている。用いるバクテリアはネマティックな相互作用を強く働かせるために、抗生物質によりフィラメント状に伸長させた大腸菌を用いている。その懸濁液をガラス板と **PDMS** (シリコン樹脂) に挟み込むことにより、擬2次元系に大腸菌の運動を拘束している。ここで擬2次元系とは、大腸菌の運動が交差をすることが可能であるが、同時に相互作用によって同じ向きに揃う傾向が出現するという状態を指す。この系を用いることにより、大腸菌がネマティックに向きを揃えつつ、それぞれが一方向に進み、対向する流れが存在する秩序相を実現することに成功している。この秩序相は長距離相関を持ち、また理論モデルから予測された **GNF** を示すことから、この実験系により **Vicsek** モデル、あるいは同様のクラスの集団運動モデルが持つ普遍的な性質が、世界で初めて実験的に確認されたものであると言え、ゆえに重要な研究であると認められる。また、先行研究によってその普遍的性質が実験的に確認できず、本研究によって初めて成功した理由として、擬2次元系での相互作用の重要性が指摘され

ている。

第4章では、自己駆動粒子による乱流現象、特に集団運動するバクテリアによる乱流現象について論じている。第2章・第3章で論じた粒子の向きを通じた相互作用に起因する集団運動とは異なり、この乱流現象の出現には自己駆動粒子の運動を介した流体力学的な不安定性が大きく寄与をしている。この自己駆動粒子による乱流現象を解析する様々な解析手法、特に流体力学モデルを紹介した上で、バクテリアを用いた生物乱流現象の先行研究を論じ、その解析における境界条件の重要性を述べている。

第5章では、周期的な空間構造の下での生物乱流現象の解析について述べている。高濃度の枯草菌懸濁液を、周期的に配置した柱状の構造物が存在する環境に導入することにより、枯草菌による乱流現象がどのように空間構造に依存するかを解析している。その結果として、70 μm 程度の周期を持つ空間構造によって、枯草菌集団運動による渦状の構造が出現することが見出され、また隣接した渦状構造の向きが反強磁性的な配向となる傾向が明らかとなった。この結果は、バクテリアによる乱流現象における特徴的な長さスケールの存在を示唆し、また周期的な境界条件との相互作用によってその構造が安定化されることを示しており、自己駆動粒子による乱流現象に新たな知見をもたらすと評価できる。

第6章では、博士論文全体のまとめと今後の方向性が論じられている。

なお、本論文第3章は永井健博士、Hugues Chaté 博士、佐野雅己博士との共同研究であり、また第5章は Andrey Sokolov 博士、Igor S. Aranson 博士との共同研究であるが、論文提出者が主体となり実験と解析を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。