

トポロジカル欠陥を中心に凝集する格子上的アクティブマター

[1] 要旨

実際の生物系において、トポロジカル欠陥に凝集するアクティブマター系と見做せる現象が観測されている。そのようなモデルに対する計算機シミュレーションにより、渦状のトポロジカル欠陥を核として粒子が凝集し相分離が生じることが発見された。このモデルはシンプルながら高速にシミュレートできて、アクティブマターとトポロジカル欠陥の関係を探る有力な研究の基盤となることが期待される。

[2] 本文

魚や鳥などの動物、またバクテリアなどの微生物は外部からエネルギーを注入せずとも、自発的にエネルギーを消費して運動することから、通常の平衡状態の物質とは異なるという意味でアクティブマターと呼ばれる。このようなアクティブマターが集まり集団を構成したときには、その個々の自発的な運動と相互作用をもとに多様で複雑な集団運動を示す。この集団運動によって生じるさまざまな現象は本質的に非平衡現象であり、その物理的な理解には、これまで平衡統計力学で使われてきた概念や手法だけではなく、新たな概念の導入や本質を捉えた簡便なモデルの開発などが重要である。

近年、そのようなアクティブマター系の集団運動で生じる現象の中でも注目を集めているのが、アクティブマター自身が作り出すトポロジカル欠陥と集団運動との関連である。これは単なる理論的な観点からだけではなく、実際に生物系で観測されているという点で非常に興味深い。例えば、神経前駆細胞では2次元の高密度培養系において、集団運動の結果、巻き数 $\pm 1/2$ をもつ複数のトポロジカル欠陥を形成することが確認されている。これは神経前駆細胞自体に前後の区別がなく液晶的な秩序を形成できることを考えると自然な現象のように思われるが、単にトポロジカル欠陥が存在するだけではなく、その欠陥の持つ巻き数の値に応じて欠陥に前駆細胞が凝集したり、欠陥から散逸したりすることが観測されている。これはトポロジカル欠陥の性質と細胞運動が密接に関わり、トポロジカル欠陥が生物学的機能の空間的組織化を担っていることを示している。この例は人工的な系における例だが、ヒドラ体表においてもアクチン繊維がつくるトポロジカル欠陥と組織再生時における器官形成との強い相関が確認されている。従って、アクティブマターの集団運動とトポロジカル欠陥の関連を非平衡物理学の観点から明らかにすることは重要な課題となる。

最近、大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻のメンバーからなる研究チームは、トポロジカル欠陥とアクティブマターの集団運動の関係を調べるために、トポロジカル欠陥をもつ2次元古典強磁性XYモデルと、排除体積をもつ格子上的ランダムウォークを組み合わせ、XYスピン間の相互作用をもち、かつスピンの方向にバイアスのかかったランダムウォークをおこなう格子上的アクティブマターモデルを構成した。このモデルを計算機シミュレーションにより調べた結果、XYモデルがもつ巻き数+1のトポロジカル欠陥を中心として、凝集が起こることを発見した(図1)。これはアクティブマター系でよく観測される運動性誘起相分離がトポロジカル欠陥を中心としておきることを示している。またXYモデルには巻き数-1のトポロジカル欠陥も存在するが、この欠陥は相分離に寄与しないことが分かった。この成果はJPSJの2026年5月号に掲載された。

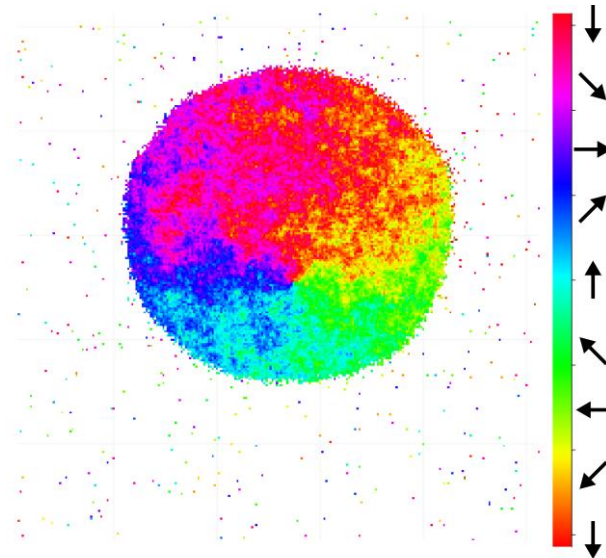


図 1: シミュレーションのスナップショット。色が XY スピンの向きを表し、凝集クラスターの中心にトポロジカル欠陥があることを示している。

本研究で構成されたモデルでは、欠陥への凝集に加えて 1 次転移的な相分離挙動および最大クラスターサイズの時間に対するスケーリング則が観測されている。これは、これまでに知られているアクティブマターの理論モデルと共通する振る舞いである。これは、本研究で構成されたモデルは非常にシンプルでありながら、トポロジカル欠陥の存在と集団運動の関係をより深く理解するのに非常に有効であることを示している。また他のモデルと比較して計算機上で高速にシミュレートでき、大規模に数値的に調べることが可能である。加えて、単純な格子モデルを基盤に構成しているため、液晶秩序を示す系への拡張や、相分離挙動の境界条件の影響などを調べることも容易である。これらの性質により本研究で構成されたモデルを基盤として、今後の研究のさまざまな展開が期待できる。

原論文 (2026 年 4 月 16 日公開済)

Defect-Mediated Aggregation and Motility-Induced Phase Separation in Self-Propelled Lattice-Gas Active XY Model

S. Inoue and S. Yukawa, J. Phys. Soc. Jpn. **95**, 054802 (2026).

<情報提供：湯川諭（大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻）>