

自ら動く物質における秩序とトポロジカル欠陥

Keyword: アクティブマター

1. アクティブマターとは

アクティブマター (Active Matter) とは、自ら動く粒子 (物体) とその集合体を表す概念である。各粒子は、何らかの方法でエネルギーを消費しながら、持続的な運動を行う。実際にそのような粒子 (集合体) の例としては、自己駆動するコロイド粒子 (図 1a) がある他、微生物 (図 1b)、生体分子モーター (図 3a)、鳥、魚の群れなどあらゆるスケールの現象が含まれる。これらは、非平衡状態の凝縮系と呼ぶこともできる。現象を記述する数理モデルとして、相互作用しながら運動する粒子集団のモデル¹⁾があるが、連続体の極限では、アクティブな力を含む異方性流体の方程式により記述が可能である。²⁾ 平衡系と異なり、自由エネルギーの最小化で構造が決まらず、多彩な振る舞いが見られる。この分野では、各物体の運動機構や非平衡状態特有の新状態の有無、秩序・無秩序転移の有無、非平衡ゆらぎの性質などについて活発な研究が行われている。^{2,3)}

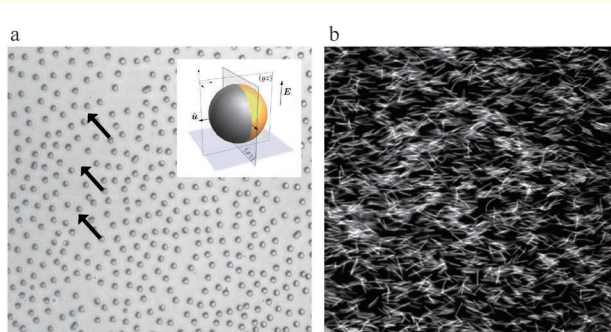


図1 a: 半球面を金属コートした Janus 粒子 (直径 $3\ \mu\text{m}$)。電場は紙面に垂直に印可されているが、電気浸透流の効果で各粒子は固有の向きに運動する。(PPタイプ) b: 細長く成長させたバクテリアを薄い容器内に閉じ込めると、方向秩序が現れ、対向した運動が観測される。(PNタイプ)

		Motion	
		Polar	Apolar
Alignment	Polar	PP	AP
	Nematic	PN	AN

図2 アクティブマターの分類: 各粒子の運動形態と粒子間相互作用により、4つのタイプに分けられる。

2. 相互作用と運動形態による分類

上で述べた多様なアクティブマターは、粒子の運動形態と粒子間相互作用によって分類できる。簡単のため運動として、粒子の極性方向に運動する場合 (Polar) と極性を持たず確率的に前後運動を繰り返す (Apolar) の2種類を考える。また、粒子間相互作用として、互いに向きを揃える Polar 相互作用と軸に向きがなく角度が0度または180度に揃う Nematic 相互作用の2種類を考える。従って、組み合わせで図2の4つのタイプがある。便宜上、運動形態の頭文字 (P または A) と相互作用の頭文字 (P または N) の組み合わせで、PP, PN, AP, AN タイプと呼ぶことにすると、それぞれで方向性秩序の現れ方が異なり、その様相はトポロジカル欠陥を考えることで理解が可能である。

3. トポロジカル欠陥と方向秩序

(1) PPタイプは、群れ運動のモデルとして知られる Vicsek (ヴィチェック) モデル^{1,3)}などがこれに相当する。各素子は、半径 r 内の近傍にいる他の個体の平均の向きに自分の向きを揃え運動するが、そこにゆらぎが加わる。具体例としては、界面電気現象で自己駆動するコロイド粒子の系などがあり、 10^6 個程度の粒子系が実現できる (図 1a)。大きさのない PP タイプの点粒子モデルは、XY モデルに似ているが、2次元 XY モデルでは、Marmin-Wagner の定理により、近距離相互作用の回転連続対称性が自発的に破れることはなく、真の長距離秩序は存在せず、トポロジカル欠陥が対を形成する Kosterlitz-Thoules 転移が起こることが知られている。一方、Vicsek モデルでは、各素子が空間を動き回るために、長距離秩序が存在すると信じられている。無秩序状態から秩序状態への遷移は1次転移的で、相分離共存状態では、ソリトンや伝搬するバンドなどの構造が出現する。また、欠陥は見られず、長距離にわたって一つの方向に揃う傾向があるため、Ising モデルで見られるような Domain Wall の存在が考えられるものの、モデルでは要素間の排除体積相互作用がないため、異なった向きに運動する集団は互いにすり抜けるか、向きを揃えてしまうため、Domain Wall も安定ではない。このことも長距離秩序形成の理由となっている。欠陥が存在するのは、球面上の運動などトポロジカルな拘束条件がある場合に限られる。

(2) PNタイプでは、粒子の運動は向きを持つが、粒子間の相互作用は、相対角度が0度または180度に揃う傾向を持つ。この場合も、Vicsek モデルのように粒子間の排除体積効果が弱いと、ネマチックな秩序状態が現れる。数値計

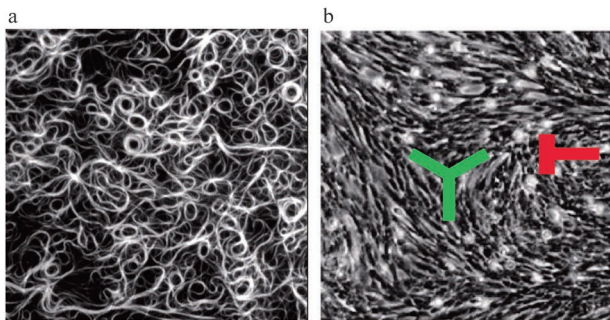


図3 a: 生体分子モーター(キネシン)の基板上的フィラメント(微小管)の運動。フィラメント間の衝突が顕著になると, vortexやasterなどのトポロジカル欠陥が現れ, 方向性秩序が弱くなる。(PNタイプ) b: 神経幹細胞を基板上で培養すると, 長手方向に往復運動をし, ネマティック秩序が見られるが, $\pm 1/2$ の欠陥が現れる。(ANタイプ)

算では, 2つの方向秩序を持った系が, 互いに逆方向にすれ違いながら運動する状態が現れ, あたかも Vicsek モデルの重ね合わせと見なすこともできる。実際に, 図 1b のような細長いバクテリアの集団では, そのような状態が見られ, 実験の精度内では, 方向秩序は長距離相関を持つことが報告されている。⁴⁾ PN タイプの系で, 排除体積効果が強くなると, トポロジカル欠陥が現れる。指数+1の欠陥には, 右回りと左回りの渦の他, 運動方向を表す矢印が内側を向いた十字型と外側を向いた十字型があるが, 外側を向いた十字型は離散してしまうので安定ではなく, 内側を向いたアスター型と渦, それと-1の欠陥が存在しうる。これらのトポロジカル欠陥の存在は, 系の長距離秩序を容易に破壊する。最近, 生体分子モーター(キネシン, ミオシン, ダイニンなど)とフィラメント(微小管やアクチンフィラメントなど)の再構成系において, 高密度で実験を行うと様々の集団運動が起こることが明らかになってきた。これらの系で, フィラメント同士の衝突が無視できなくなるような条件で実験を行うと, 図 3a のように多くの渦構造が観測される。また, アスター型の欠陥は, 衝突により拮抗して動きにくくなるため, クラスタを形成したり, ジャミングと呼ばれる極めてゆっくり変化する相の出現をもたらす。別の分子モーター系では, Vortex Lattice と呼ばれる渦が周期的に配列したパターンが観測されているが, これは+1の欠陥が三角格子状に並んだ構造になっている。⁵⁾

(3) AN タイプの系では, 各粒子の運動方向が確率的に反転する点が PN タイプの場合と異なっている。このような系で排除体積相互作用があると, $\pm 1/2$ のトポロジカル欠陥が存在できる。具体的な系としては, 加振された細長い粉体の系や, キネシンとバンドル状の微小管の系⁶⁾などがこれに相当する。また, ある種の細胞集団では, このよう

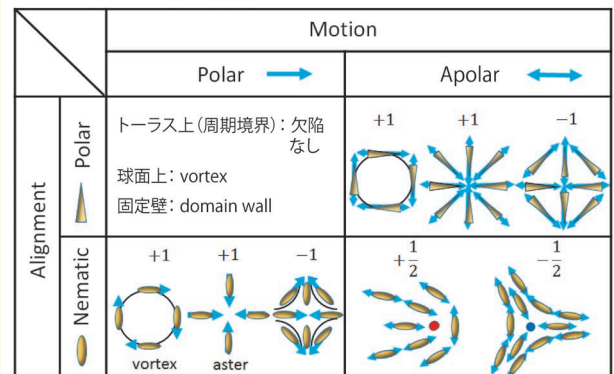


図4 2次元アクティブマターのトポロジカル欠陥と指数: トポロジカルな点欠陥は, 向きが決まらない特異点であり, 点の周りを一周したとき, 粒子の向きが 2π の m 倍だけ角度が回転した場合, 指数 m のトポロジカル欠陥と呼ぶ。指数の大きい欠陥の励起は, より大きいエネルギーを要するため, 低次の指数のみを示している。

な運動と相互作用が存在し, Interkinetic 運動と呼ばれている。対向運動により細胞が互いにすれ違うことができるため, 密な環境でも細胞の相互位置の入れ替えが可能であり, 発生過程などにおいて重要な運動と考えられる。図 3b は, 神経幹細胞の培養系でみられる $\pm 1/2$ のトポロジカル欠陥である。これらの欠陥の周りでは, 細胞密度の変化が起こり 3次元構造の形成が起こることが最近明らかになった。⁷⁾

(4) AP タイプは一見, XY モデルのようであるが, 粒子が運動し, 運動方向が確率的に反転する点で, 熱平衡系とは異なっている。この場合, ± 1 の欠陥が可能となる。対応する実験系はまだ見つかっていない。

4. 展望

動き回る粒子の集団を理論的, 数値的に調べることが可能となり, これまで個別に扱われてきた現象が統一的に理解できる。また, 一見複雑に見える細胞集団の振る舞いや構造も, トポロジカル欠陥とそのダイナミクスなどに着目することで, 新たな視界が開けつつある。

参考文献

- 1) T. Vicsek, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **75** (1995) 1226.
- 2) M. C. Marchetti, *et al.*: Rev. Mod. Phys. **85** (2013) 1143.
- 3) 太田隆夫: 日本物理学会誌 **70** (2015) 347.
- 4) D. Nishiguchi, *et al.*: arXiv: 1604.04247.
- 5) Y. Sumino, *et al.*: Nature **483** (2012) 448452.
- 6) F. C. Keber, *et al.*: Science **345** (2014) 1135.
- 7) K. Kawaguchi, *et al.*: arXiv: 1605.06470.

佐野雅己 (東京大学大学院理学系研究科 sano@phys.s.u-tokyo.ac.jp)

(2016年7月7日原稿受付)