

「自己駆動運動における粒子間相互作用の解明」

神戸大学人間発達環境学研究科

小谷野 由紀

1 研究の背景と目的

自発運動する粒子集団はアクティブマターと呼ばれ、近年盛んに研究されている。アクティブマターを構成する粒子は自己駆動粒子と呼ばれ、自己駆動粒子単独の運動についても研究がなされている。しかし、自己駆動粒子単独の運動の理解とその集団挙動のダイナミクスの理解には大きな隔たりがある。その理由としては、自己駆動粒子の運動は継続的なエネルギー供給の下に実現することが挙げられる。エネルギー供給があるということは力学的エネルギーの保存則を破った運動であり、単一粒子の自己駆動運動の運動メカニズムは実際複雑であることが多い。自己駆動粒子集団であるアクティブマターのモデルでは、粒子の運動機構を簡略化して考えることが多いが、現実の系をどこまで再現できているのか疑問である。さらに、自己駆動粒子同士の相互作用はより一層複雑であることが予想される。そこで本研究では、自己駆動粒子同士の相互作用について明らかにすることを研究目的とした。

2 研究方法・研究内容

相互作用を考える上で、粒子同士の距離が定められている場合を考えた。これにより、重心運動の自由度を取り除けるため議論しやすくなる。また、相互作用を長時間観察することが可能となり、並進運動では無視できないシステム境界での跳ね返り運動を考慮する必要もなくなる。重心運動がないことと自発運動する状況を両立するため、自発回転する運動素子（回転子）を考えた。具体的な系としては、樟脳を用いた自己駆動系を想定し、数理モデルを解析した。

樟脳は常温で揮発性のある固体の化学物質で、クスノキから抽出できる成分のため、古くは着物の防虫剤として用いられていた物質である。樟脳の粒を水面に浮かべると樟脳分子が主に水面に広がり表面張力を変化させ、樟脳粒が自らつくった表面張力差によって駆動される。また、揮発性により、水面の樟脳分子は次第に空気中へと逃げていくため、水面で樟脳分子が飽和することがなく、持続的な運動が実現できる。そのような樟脳粒をある一定の半径に束縛した場合を考える。樟脳粒子は自発運動し、動き始めた方向に進み続ける性質があるので、一定半径の円上を時計回りもしくは反時計回りに一定の運動することとなる。これを回転子とみなすこととした。実験系としては、リボン状のプラスチック板の片方の端点の位置を固定、ただし、固定位置周りで自由に回転できるようにする。また、もう片方の端点に樟脳粒子を取り付け、水に浮かべると樟脳回転子を実現できる[1]。1つの回転子は初期状態に応じて、時計回りもしくは反時計回りに一定の速度で回転し続ける。このような運動は、樟脳粒子の位置に関する運動方程式と、樟脳粒子が放出する樟脳分子の空間分布の時間発展を記述する反応拡散方程式によって記述することができる。数理モデルの解析により、樟脳の自発運動は、ピッチフォーク分岐によって生じることが知られている。

このとき、樟脳回転子2つを、回転中心を一定の距離にして配置し、その相互作用の結果、どのような運動状態が現れるのか数値的・解析的に調べた。

3 研究成果

実際に数値計算を行い、樟脳回転子の運動と樟脳濃度場の時間発展を調べた。数値計算の結果、十分時間が経過すると樟脳回転子の角度に相関がみられるようになることが明らかとなった[2]。図1には、長時間経ったときの回転子の角度差を示した。回転子の先端に取り付けられた樟脳粒子は、回転によってもう片方の回転子に近づいたり遠ざかったりを繰り返す。相互作用の結果、樟脳粒子が同じタイミングで近づく場合（角度差0）と、互い違いに近づき合う場合（角度差 π ）の2通りが存在することがわかった。前者を同相同期、後者を逆相同期と呼ぶこととする。2種類の同期が双安定になることはなく、回転子の重心間距離に依存しどちらか片方が安定になる。安定な同期状態は重心間距離に関して入れ替わる。また、通常非線形振動子と異なり、回転子の回転方向の自由度がある系となっている。対称性から、回転方向が揃っている場合（どちらも時計回りもしくは反時計回り）と回転方向が逆の場合（時計回りと反時計回りの組み合わせ）が考えられるが、このどちらについても、同相同期・逆相同期が回転子の重心間距離に応じてみられた。図2には樟脳回転子が同相同期している場合のスナップショットを示した。

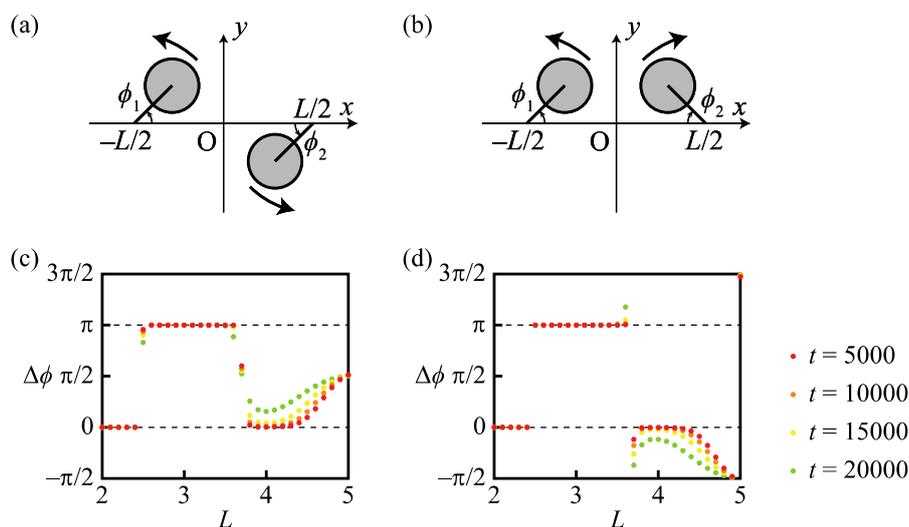


図1 : (a,b) 2つの樟脳回転子のイメージ図と(c,d) 角度差 $\Delta\phi$ の長時間観察結果。(a,c) 回転方向が揃っている場合。(b,d) 回転方向が逆の場合。時間が経つにつれ、角度差は0もしくは π に収束する。角度差0が同相同期状態、 π が逆相同期状態である。重心間距離 L が小さいほど相互作用が大きいので、 L が大きいところでは同期状態への収束が遅い。また、同相同期と逆相同期が切り替わる重心間距離ではどちらの同期状態も中立になるため、その近くの重心間距離では同期状態への収束が遅くなる。

2つの樟脳回転子は運動しながら樟脳分子を周囲に撒き散らし、樟脳分子は拡散によって他方の樟脳回転子の運動に影響を与える。樟脳分子は表面張力を下げるので、基本的には互いに斥力的な作用を及ぼし合う。しかし、水面の樟脳分子濃度は樟脳分子の供給源である樟脳粒子の位置の時間変化に依存するため、単純な斥力相互作用とならない。そのため、同相同期と逆相同期が交互に現れるといった複雑な同期現象が見られると考えられる。

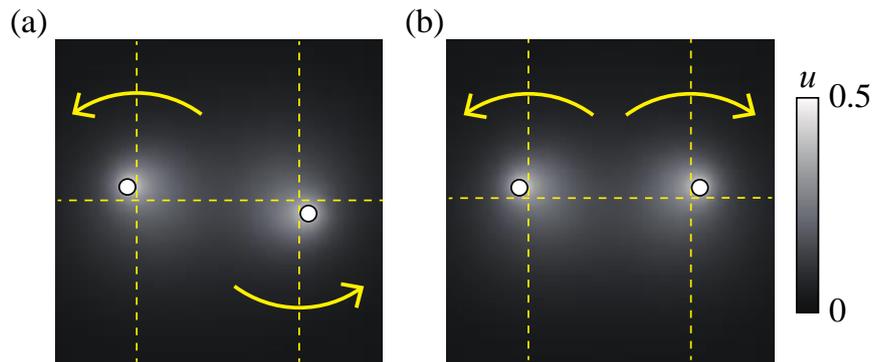


図 2：樟脳回転子を構成する樟脳粒子と樟脳濃度場のスナップショット。樟脳粒の位置を白い円、樟脳回転子の中心位置を波線の交点として表示している。また、樟脳濃度場 u をグレースケールで表示している。(a) 回転方向が揃っている場合。(b) 回転方向が逆の場合。どちらの場合も同相同期状態を示している。

より詳細に同相同期・逆相同期のメカニズムを理解するため、数理モデルを位相差に関する少数自由度の力学系に解析的に縮約した。この際、樟脳回転子の重心間距離は樟脳回転子の半径より十分大きいことを仮定した（図 3）。その結果、数値計算で見られた同相同期・逆相同期がみられる条件を理論的に導出することができた。同相同期・逆相同期状態は、回転子の重心間距離に応じて周期的に現れることを明らかにした。この周期構造は、樟脳回転子が一定速度で回転することで形成する渦状の濃度場の成分が由来となっていることがわかった。図 4 では、実際の濃度場のスナップショットから、濃度場の時間平均を差し引き、濃度場の非対称成分を可視化した。

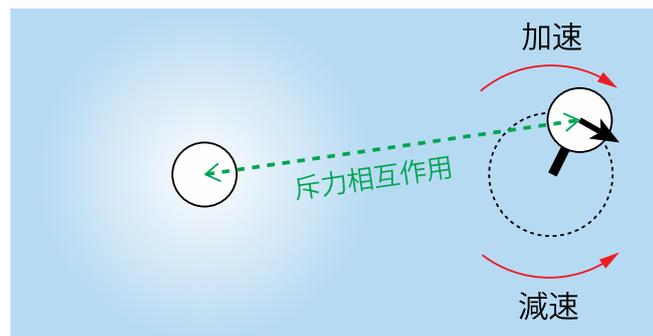


図 3：樟脳回転子の相互作用を簡略化したイメージ図。重心間距離が大きいとき、相手の回転子の角度はほとんど感じられない。

4 生活や産業への貢献および波及効果

自己駆動粒子やアクティブマターの研究は、生物や人、物流など能動的に動くモノやその集団に潜む基礎的な物理的知見を得ることにある。自発運動する素子の集

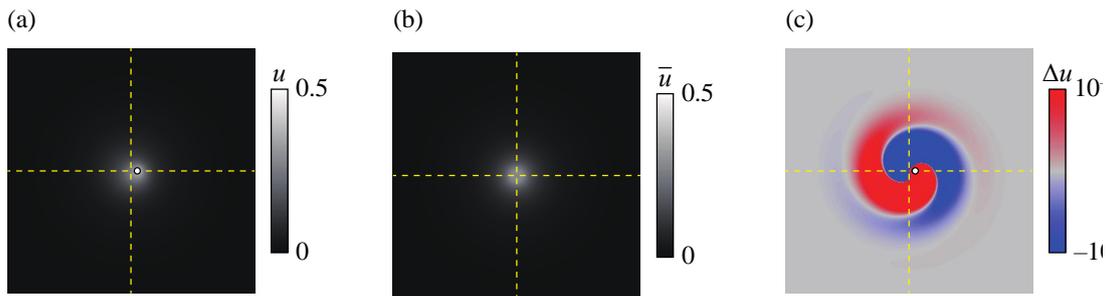


図 4: 濃度場の成分分解。(a) 実際の濃度場のスナップショット。(b) 濃度場の時間平均。(c) (a)から(b)を差し引いたもの。(b)に示す時間平均は濃度場の対称成分、(c)は非対称成分となっている。

団はときに **Motility Induced Phase Separation (MIPS)** と呼ばれる相分離現象を示すことがある。これは、通常の気体では、気体分子(自己駆動性のない粒子)が一様な密度で分布していることと比較して特徴的な性質だと言える。**MIPS** は単純化・理想化されたモデルで発見され、自己駆動粒子の粗密ができるという意味で、自己駆動粒子の渋滞現象だといえる。応募者は、このような理想化された状況下で見つかった現象であっても、現実社会の問題を解決する糸口を与えるのではないかと考えている。例えば車の渋滞は、自己駆動粒子である車が目的地に向かって交通ルールに則り運動することで引き起こされる現象である。また、パンデミック下では密を避けた行動が重要であり、公共交通機関などの人が集まりやすい場所では人の混雑(渋滞)を作らないような誘導路が必要である。自発運動する素子が渋滞を作る現象は様々あり、短期的に見れば個別具体的に解決されることが多いが、渋滞を解消する対処方法の本質は、理想化されたモデルの解析によってもたらされる可能性がある。本研究はアクティブマター物理学の基礎を築く一端を担い、様々な自発運動を行う集団に対して統一かつ抽象度の高い理解を与える基礎研究の立場をとる。基礎研究の抽象度が高い知見が具体的な系の理解や改良に即座に役立つとは言い難いが、基礎研究と応用研究は相補的であるため、応用研究の知見が蓄積するにつれ、次第にアクティブマターの基礎研究の重要性が増していくと期待する。

(references)

1. Yuki Koyano, Marian Gryciuk, Paulina Skrobanska, Maciej Malecki, Yutaka Sumino, Hiroyuki Kitahata, and Jerzy Gorecki, "Relationship between the size of a camphor-driven rotor and its angular velocity," *Physical Review E*, **96**, 012609 (2017).
2. Hiroyuki Kitahata and Yuki Koyano, "Mathematical modeling for the synchronization of two interacting active rotors," *Physical Review E*, **107**, 064607 (2023).