

A01 運動方向への有色ノイズによって起こるアクティブマターの群れ運動

北陸先端科学技術大学院大学 マテリアルサイエンス研究科 永井 健
国立研究開発法人情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 大岩 和弘

Vicsek モデルや Toner-Tu モデルなどの現象論的な数理モデルの解析から、自発的に運動する粒子の群れ運動に普遍的な性質が予言されている。例えば、運動方向を揃える短距離相互作用による 2 次元空間内の長距離の秩序相や秩序相内の長距離相関を持つ密度ゆらぎなどである。数理モデルで見られている諸性質は実験的にも見出されている。例えば、Vicsek モデルで見られる運動方向の揃ったソリトン状の構造が走化性のない細胞性粘菌集団中에서도発見された(1)。また、A01-003 班代表の佐野教授と我々の共同研究により、薬剤を用いて体長を伸ばした大腸菌集団が臨界密度以上で運動方向の長距離秩序を持つことを発見した。この秩序相の中には予言されていた長距離相関を持つ密度ゆらぎがある。このように実際の系でも理論的に予言されていた結果が見られるため、現実の群れ運動に生物か無生物かなどの系の詳細に依存しない普遍的な性質があると考えられる。

これまでの群れ運動の研究は主に運動方向に白色ノイズが加わる系を対象としてきた。運動方向に白色ノイズを加えることは回転速度が時間無相関に変化することを意味する。しかしながら多くの状況で回転速度がしばらく維持される。例えば鳥や魚などは体が大きいため慣性が効き、回転速度を急に変化させることは出来ない。また、大腸菌や精子は微小なため慣性が効かないが、壁の近くで回転運動することが知られている。そこで本研究は群れ運動の相や密度ゆらぎの回転速度の記憶に対する依存性の解明を目的とする。

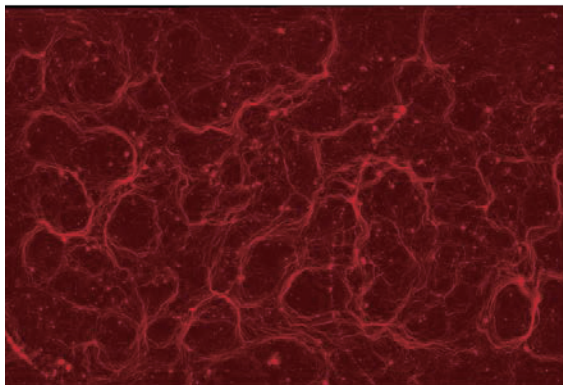
本研究は主にガラス面上に固定された軸索ダイニンに駆動される微小管の集団運動を研究対象としている。(2)に報告されているように他の微小管と相互作用しない時の微小管の回転速度はしばらく維持され、微小管の密度が高い時は回転速度の記憶のために多数の渦からなる群れ運動が生じる。本年度はダイニンの密度に対する回転速度の依存性を調べ、群れ運動との関連性を解析した。回転速度の解析のために、広視野を持つ CMOS カメラを用いて広い領域で孤立した微小管の運動を観察し、得られた軌道データから軌道の曲率のゆらぎと持続時間を見積もった。その結果、ダイニンの密度が高い時は微小管の回転方向がしばらく維持されるものの、ダイニンの密度が低いと微小管の回転方向は頻繁に切り替わることがわかった。現象論的な多粒子モデルを用い、回転速度の持続時間が長いと渦が多数形成され、短いとネマチック液晶状の構造ができることが予想されている(3)。微小管の群れ運動のダイニン濃度依存性を見ると、ダイニンの密度が高い時は(2)と同様に微小管の渦が多数形成されるものの、ダイニンの密度が低い時に微小管はネマチック液晶状に並ぶ(図 1)。このように、現象論的な数理モデルと微小管の群れ運動が一致するため、微小管以外の様々な系でも回転速度の記憶時間が群れ運動に対する重要なパラメータになっていることが示唆される。

実際に様々な系で微小管と同様の多数の渦からなる群れ運動が見られる。例えば、京都大学杉特任助教との共同研究により培養中の線虫がガラス壁に渦の格子模様を作ることを見出した。一匹の線虫の運動を観察すると、回転運動を頻繁に起こし、線虫同士の相互作用は微小管と同様に衝突時の運動方向を揃える相互作用だけである。また、早稲田大学岩崎教授と

の共同研究によりシアノバクテリアが寒天培地上に渦状構造を作ることも見出している。シアノバクテリアは運動時に粘液を出し運動しやすい道を作るのだが、この粘液を取り除いてやると微小管に見られたような渦の格子模様を作る。孤立して他のバクテリアと相互作用しない時、シアノバクテリアも回転速度を維持しながら運動する。また、シアノバクテリアに働く相互作用も衝突時の短距離ネマチック相互作用だけである。この2種類の生物の集団運動は微小管の集団運動の解析時に用いた多粒子モデルでよく再現される。そのため、微小管と同様に回転速度が維持されるために渦の格子模様が形成したと結論づけた。

本年度は当領域内での共同研究も行った。上述の佐野教授と共同で行った大腸菌の集団運動の解析だけでなく、A03 公募班の西坂教授と共同で寒天培地上のフラボバクテリウム・ジョンソニエの回転速度と集団運動の関連性を解析している。現在までに得られたジョンソニエの回転速度の維持時間に関する解析結果から、ジョンソニエが作る多数の渦模様も回転の記憶のために生じることが示唆されている。また、A03 公募班の濱田准教授と共に制限された空間内で生じる微小管の群れ運動を研究するため、水中油滴上で微小管運動を実現した。ビオチン化したリン脂質を用いて油滴を作ると、アビジンを介してビオチン化した分子モーターを油滴表面に固定できる。油滴上のモーターに微小管を固定しATPを加えると、油滴上で微小管が運動する。現在までに油滴上の微小管運動に必要な実験条件を明らかにし、今後、微小管濃度を増やして群れ運動を解析する。

多数の渦



ネマチック液晶状の構造

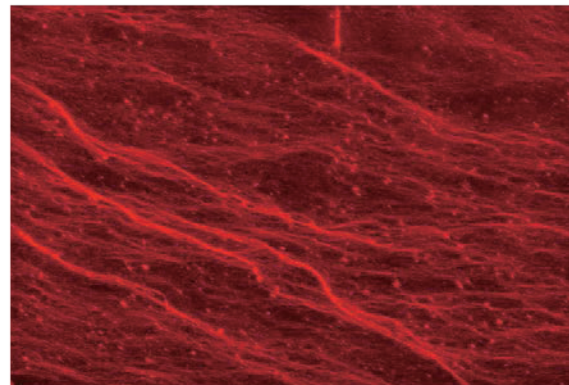


図 1: ガラス上の微小管の集団運動。左図のダイニン濃度は 75 nM、右図のダイニン濃度は 18.75 nM。セルの厚さは 60 μm 。

- (1) H. Kuwayama, and S. Ishida, *Sci. Rep.*, **3**, 2272 (2013).
- (2) Y. Sumino, K. H. Nagai, Y. Shitaka, D. Tanaka, K. Yoshikawa, H. Chaté, and K. Oiwa, *Nature*, **483**, 448–452. (2012).
- (3) K. H. Nagai, Y. Sumino, R. Montagne, I. S. Aranson, and H. Chaté, *Phys. Rev. Lett.*, **114**(16), 168001 (2015).