

A03-003 非熱的に駆動されたバイオマターの非平衡力学

九州大学大学院理学研究院 木村 康之

九州大学大学院理学研究院 水野 大介

生命現象は熱的・非熱的に駆動された柔らかいバイオマターが担っており、その非線形・非平衡挙動を理解することで、生命現象を支配する普遍的な法則を明らかにすることができる。本研究では、様々な非熱的場により駆動されたバイオマターおよびそのモデル系のメソスケールのゆらぎと力学応答に関する実験的研究を行ない、以下のような成果を得た。

[1] 流体相互作用する駆動多粒子系が形成するクラスター構造の解明 (木村)

流体中を運動する微粒子および微生物系では、流体相互作用に起因した非自明な集団運動や動的な構造形成がしばしば報告されている。本研究では、流体相互作用しつつ運動する微粒子系の単純なモデルとして、同一円周上を一定の駆動力を与えられて運動する多粒子系をリング光渦により実験的に実現し、この系で現れるさまざまな集団運動を実験および数値シミュレーションを用いて研究した。同径粒子系では、流体相互作用により自発的にクラスターが形成されるが、2粒子以上のクラスターが不安定なため、クラスターの形成と崩壊を伴う動的構造形成を示す。一方、異径粒子系では、そのサイズ比が臨界値を越えると動的クラスターから定常クラスターへの相転移が起こることを見出した[1, 2]。また、粒径サイズと同程度の空間拘束下では、2粒子クラスターが1粒子より速度が小さいために空間束縛がない場合のリズム運動と逆の特徴的な運動が現れることを見出した[2, 3]。これらマイクロ流体系でのアクティブ粒子を用いたモデル実験は、微生物における集団運動やマイクロ流路中での微粒子の能動的輸送に対して基礎的な知見を与えるものと考えている。

[2] 液晶電気対流での粒子の運動 (木村)

熱対流や生物対流中でのミクروسケール粒子の運動は、定常的なエネルギー注入により形成される対流による非平衡揺らぎに駆動された運動として理解できる。このとき、長時間での粒子運動は拡散的となるが、その拡散定数はアクティブ流体の速度に依存して、エネルギー注入のない平衡系での分子拡散とは異なるものとなる。本研究では電圧で制御可能なアクティブ流体である液晶電気対流系を用いて、対流中での粒子の輸送現象を調べた。以下ではネマチック液晶中で1次元の周期的対流ロールが発生するウィリアムズドメイン中での粒子運動をその例として取り上げる。低電圧下では、粒子はロール対流による往復運動をしつつ、1つのロール中をロール軸に沿って並進運動する様子が観察された。また、高電圧下で発生するロール構造が乱れる欠陥乱流状態では、ロールの組換えに従って軸と垂直方向に拡散的な運動を示すことがわかった。粒子の回転速度、拡散定数が印加電圧に対して単調に増加していくことがわかった。さらに、観測された拡散定数は平衡状態での粘性から予想される値の数百の大きな値を示した。観測された挙動はロール内での回転運動とロールを超えての確率的なホッピング運動を考慮したシミュレーションと定量的に良く一致した[4]。さらに、非平衡度の高い、高電圧下で観察される3次元乱流状態において、蛍光粒子を用いて同様の非平衡拡散の実験を行い、その結果、この系を等方性乱流と見なしたとき、短時間の速度相関関数から得られる平均速度および相関時間を用いて予測される拡散係数と長時間での非平衡拡散定数が定量的に良い一致を示すことを明らかにした。

[3] 多重フィードバック下のマイクロレオロジーによる細胞のガラス的挙動の観測 (水野)

ソフトマターのメソスケールでのゆらぎや力学応答を観測する手段であるマイクロレオロ

ジー (MR) 法を用いた研究を推進した[1]。MR 法は、大別してコロイド粒子に外場を加えてその応答を観測する active MR、および、外場を加えずに自発的な揺らぎを観測する passive MR に分けられる。平衡状態では active MR と passive MR が等価な情報を与えるため、両者の差 (揺動散逸定理の破れ) が系の非平衡性の指標となる。我々はこれを非平衡環境下で実行するために、流れや揺らぎに対して多重のフィードバックで追従しながら計測を行うシステムを開発した[2]。当該システムを用いて生きている細胞内部や細胞抽出液のレオロジー計測を行った結果、細胞質は混みあいによりガラス化するが、細胞内部は代謝活性により流動化していることが分かった[3]。しかも、生きている細胞内部環境がアレニウスの粘性上昇する strong glass former であるのに対して、代謝の失われた細胞抽出液は、fragility の大きなガラス形成挙動を示すことが分かった。

[4] 非ガウスかつ非レヴィな非平衡揺らぎの統計分布の解析表現と現実系での検証 (水野)

連続体近似が可能な巨視的スケールの物理量を観測する場合、熱平衡系における観測量の揺らぎはガウス分布になる。しかしながら、非平衡系における揺らぎは必ずしもガウス分布に収束しない。その物理的起源が明らかになれば、分布の形状とその時間発展を解析することで、非平衡系の性質や振る舞いを理解できる。そのためには、従来の統計学の基礎的定理 (中心極限定理) を超え、非平衡揺らぎを定量的に記述する新たな理論的枠組みが必要である。本研究プロジェクトでは、べき的な相互作用の和として得られる極限分布の新しい解析的な表現を見出した[4]。この新しい極限分布は、系の特徴的なサイズと相互作用源の濃度により、ガウスとレヴィの間を連続的に接続する。我々は、この新しい非ガウス分布の解析的表現が、現実系 (遊走微生物懸濁液やアクチン/ミオシンゲル) で観測される非平衡揺らぎを定量的に説明すること実験、理論、および数値シミュレーションを用いて明らかにした[5]。

[5] 分子モーターキネシンの非平衡エネルギー計測とその収支 (水野)

キネシンは、細胞内で小胞体などの荷物を運ぶ生体分子モーターである。近年、この分子モーターのような、ゆらぎの大きく関わる小さい系でのエネルギー論を記述する非平衡等式が原田・佐々らによって提唱された。この等式により、速度のゆらぎと外力に対する応答を計測することで、系からの非平衡散逸流を定量できる。そこで我々は、高速フィードバック制御を導入した光ピンセット装置を用いた 1 分子計測手法を用いて、キネシンが荷物となるプローブ粒子を運ぶ際の非平衡散逸流を定量した。2 状態マルコフ遷移モデルとランジュバンダイナミクスを組み合わせたモデルの解析を通じて、実験結果の評価も行い、キネシンの非平衡散逸流のエネルギー収支を明らかにした。(現在 PRL に投稿中)

参考文献:

- [1] S. Okubo, S. Shibata, Y. S. Kawamura, M. Ichikawa and Y. Kimura, *Phys. Rev. E* **92**, 032303 (2015).
- [2] Y. Kimura, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **86**, 101003 (2017).
- [3] 木村, 齊藤, レーザー研究, **46** (4) 205 (2018).
- [4] K. Takahashi and Y. Kimura, *Phys. Rev. E* **90**, 012502 (2014).
- [5] D. Head, E. Ikebe, A. Nakamasu, P. Zhang, L. Villaruz, S. Kinoshita, S. Ando, and D. Mizuno, *Phys. Rev. E* **89**, 042711 (2014).
- [6] K. Nishizawa, M. Bremerich, H. Ayade, C. F. Schmidt, T. Ariga and D. Mizuno, *Science Advances* **3**, e1700318 (2017).
- [7] K. Nishizawa, K. Fujiwara, M. Ikenaga, N. Nakajo, M. Yanagisawa, and D. Mizuno, *Scientific Reports* **7**, 15143 (2017).
- [8] I. Zaid, D. Mizuno, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 030602 (2016).
- [9] T. Kurihara, M. Aridome, H. Ayade, I. Zaid, and D. Mizuno, *Phys. Rev. E* **95**, 030601R (2017).