

A03-003 非熱的に駆動されたバイオマターの非平衡動力学

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う。本年度は以下に列挙するような研究を行った。

[1] 多重フィードバックマイクロレオロジーの開発 (水野)

我々は、非平衡環境下におかれたソフトマターの動力学を究明するための有力な手段として、マイクロレオロジー法を採用して生体ソフトマターの力学特性を研究してきた。当該手法では、試料中に分散させたコロイド粒子をプローブとしてメソスケールのゆらぎと力学応答を同時に観測することで、“揺動散逸定理の破れ”として系の非平衡性を定量化する。ただし、揺らぎ応答の精密観測に光学的な手法(光トラップ)を用いるために、試料内部の揺らぎがトラップ用レーザー光の収束径を超える強い非平衡系(例えば細胞内部環境や巨視的に流動しているソフトマター)には適用できない問題があった。逆に、トラップ力を強くすることでプローブ粒子を計測域に閉じ込めた場合、光トラップ自体がプローブの運動や試料の状態に影響を与えてしまい観測が不能になる。

そこで本研究では、試料を保持するピエゾステージをフィードバック制御することで、細胞内部の揺らぎや原形質流動に追従しつつ、弱いレーザー光でプローブの揺らぎ応答を広帯域観測した。プローブとして用いるコロイド粒子の3次元方向の運動を、画像解析(鉛直方向)およびレーザーインターフェロメトリー(水平方向)によりリアルタイム計測することでこれを実現した。同時にAOD(acousto-optic deflector)を用いてレーザー光を高速制御することで、比較的強度の強い駆動用光トラップの影響も除去した計測を行った。

その結果、柔らかい物質中に分散されたコロイド粒子の運動は、微弱なプローブ用光トラップの影響をも強く受けるために、熱揺らぎと非熱的揺らぎの間

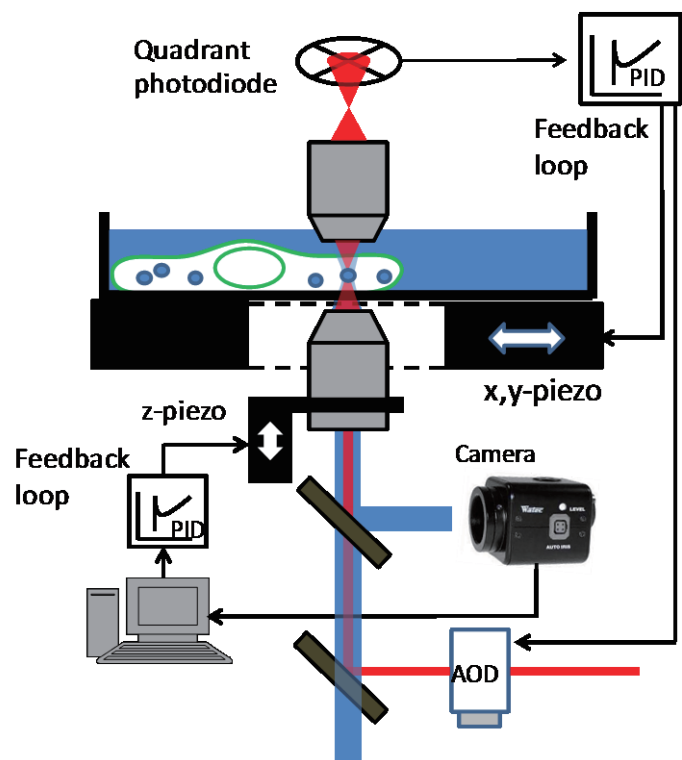


図. 多重フィードバックによる細胞内マイクロレオロジー

にフィードバックを介した相関が生じることが分かった。測定系のフィードバック応答を注意深く較正することで、こうした余計な相関の影響を除去した揺らぎ応答を求めることができた。

[2] 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研究している。

本年度は粒子サイズの不均一がある場合に、そのサイズ比のより粒子の集団運動がどのように変化するかを実験の実験および流体相互作用を考慮した粒子系の数値シミュレーションの双方を用いて調べた。その結果、例えば3粒子系においては、異径粒子を混入することで、(a)同径粒子のみの場合に観察されていた、3粒子クラスターの形成と分裂を伴うリズム的な集団運動が次第に消失し、3粒子からなる定常的なクラスター形成が起こること、(b)異径粒子と同径粒子の数比に依存してその変化が連続的に起こる場合と不連続に起こる場合があること、などを見出した。この結果から、流体中で運動するサイズ分布のある駆動粒子系では、粒径分布が定常状態で系の示す集団運動に大きな影響を与えることが明らかとなった。

[3] コレステリック液晶電気対流での粒子の運動 (木村)

前年に引き続き、本年度も電圧でその非平衡度が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と非平衡度との関係を調べた。本年度は、特に、前年度用いたネマチック液晶中にキラル物質を添加することで、液晶の配向方向にねじれ構造を持ったコレステリック液晶を作成し、その中でのコロイド粒子の輸送を調べた。コレステリック液晶ではネマチック液晶とは異なる対流構造が発現することが知られている。

キラル濃度が低い場合にはしきい値電場以上で、まず、ネマチック液晶の場合と同様の1次元の周期的対流ロールが発生する。この中で粒子はネマチック液晶と同様に、ロール軸に沿って並進運動しつつ、それと垂直方向に振動する運動を示した。しかし、その速度は電圧にあまり依存せず、キラル物質の添加量に強く依存することがわかった。一方、キラル濃度が高い場合には、しきい値電場以上で2次元の格子状対流が形成され、その中で粒子が特定の格子にトラップされ回転運動をしつつ一定の頻度で隣接格子に移ることで、長時間では2次元格子に沿って拡散する様子が観測された。この結果は、昨年度に行った確率的なホッピング運動を考慮した1次元モデルを2次元に拡張したモデル計算の結果と定性的に一致した。

参考文献:

- (1) D. Head, E. Ikebe, A. Nakamasu, P. Zhang, L. Villaruz, S. Kinoshita, S. Ando, and D. Mizuno, *Phys. Rev. E* **89**, 042711 (2014).
- (2) D. Head and D. Mizuno, *Phys. Rev. E* **88**, 022717 (2013).
- (3) D. Head and D. Mizuno, *Phys. Rev. E* **81**, 041910 (2010).
- (4) S. Okubo, S. Shibata, and Y. Kimura, *SPIE2014 proceeding*, No.9164, 91641P-1-6 (2014).
- (5) K. Takahashi and Y. Kimura, *Phys. Rev. E* **90**, 012502 (2014).