

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う。本年度は以下に列挙するような研究を行った。

[1] ホログラフィック顕微鏡を用いた3次元粒子追跡 (木村)

マイクロ粒子系の流体中での運動や相互作用を定量的に理解するためには、粒子の3次元追跡を行うことは有用である。これまでにさまざまな3次元位置測定法が提案されているが、本研究では、深さ方向の広い範囲で高精度の位置測定が可能なホログラフィック顕微鏡を作成し、マイクロ粒子系の3次元追跡を行った。具体的には、コリメートされたレーザー光を粒子に照射した際の回折光と直接光との干渉により生ずるホログラムから、レーリー・ゾンマーフェルトの回折公式を用いて、回折光場を3次元構築し、その高強度重心として粒子の3次元位置を推定した。本年度はこれを用いて異形状コロイド粒子の沈降のダイナミクスや自己駆動液滴の3次元運動観察を行い、それらのダイナミクスに関して定量的な情報を得ることに成功した。

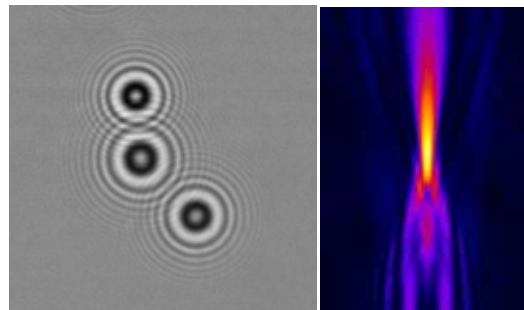


図1: 複数コロイド粒子のホログラム像(左)と再構築された光強度場(右)

[2] 界面活性剤水溶液中での自己駆動液滴の運動 (木村)

高濃度の界面活性剤水溶液中に分散したミクロンサイズの油滴は、界面活性剤分子の界面吸着により生じた表面張力の勾配に起因するマランゴニ対流により自己駆動することが知られている。本研究では大きさ数 μm ~数百 μm の等方的な油滴およびネマチック液晶液滴を界面活性剤水溶液中に分散し、それらが示す特徴的な自発運動を調べた。その結果、液滴サイズが小さい場合には並進運動やらせん運動を、また、サイズが大きい場合には回転運動や8の字運動を示すことがわかった。図2にホログラフィック顕微鏡を用いて求めたらせん運動の3次元軌跡の例を示す。特に、並進速度は液滴サイズとともに増大することなどが明らかとなった。

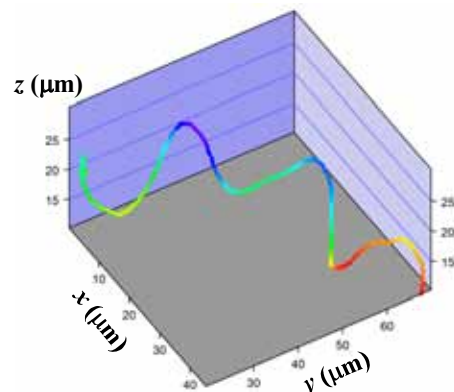


図2: 水中でらせん運動する油滴の重心の3次元軌跡

[3] 分子モーターキネシンの非平衡エネルギー計測と解析 (水野、有賀)

生体内では、様々な分子機械がATPの加水分解を燃料として力学的仕事を行っている。その一つであるキネシンは、細胞内で小胞体などの荷物を運ぶ生体分子モーターとして働く。近年の1分子観察・操作技術の発展により、その詳細な分子メカニズムは明らかになりつつある。しかし、1分子のキネシンを一つの非平衡散逸系と見立てた際のエネルギー収支につ

いては、単一分子の非平衡系を記述する難しさから、定量的な理解が進んでいなかった。

近年、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一つの指標として、原田・佐々らによって新しい非平衡等式が提唱された。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することが可能となる。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(図3)を用いて、キネシンが荷物となるプローブ粒子を運ぶ際に散逸される非平衡散逸流を定量した。

また、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シミュレーションとその解析解を通じて、実験結果の評価も行った。回転する分子モーターF1-ATPaseを用いた先行研究の結果と比較しつつ、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。

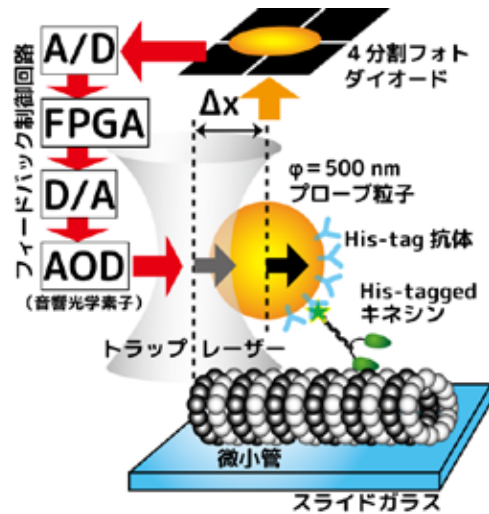


図3：高速フィードバックを導入した光ピンセットによるキネシンの1分子運動計測

[4] 遊走微生物懸濁液における非平衡揺らぎの統計分 (水野)

モデル非平衡系である遊走微生物懸濁液(アクティブマター)では、多数の遊走微生物からの流体力学的な相互作用の和が揺らぎとして観測される。その統計分布は、個々の相互作用の分散が有限である時にはガウス分布に、分布の裾野がべき的に広がり発散する場合にはレビ分布に収束することが期待される(中心極限定理)。しかしながら、遊走微生物懸濁液中の揺らぎは、そのどちらにも属さない(図4)。我々は、前年度までに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。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、ガウスとレビの間を連続的に接続する(図5)。本年度は、この新しい非ガウス分布の解析的表現が、遊走微生物懸濁液で観測される非平衡揺らぎを定量的に説明することを実験、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。

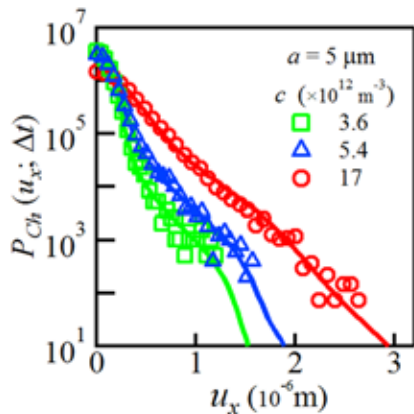


図4：クラミドモナス懸濁液中の流体揺らぎの非ガウス分布(実線は我々の見出した極限分布のあてはめ)

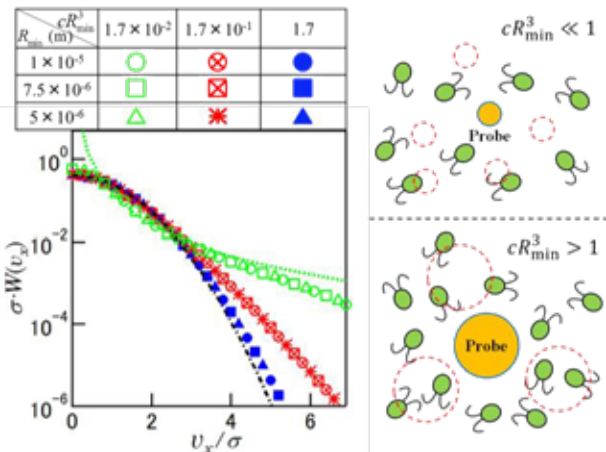


図5：ガウス(黒線)とレビ(緑)を連続的に接続する極限分布新しい極限分布のマスター曲線。プローブ粒子サイズの空間内に存在する相互作用源(クラミドモナス)の数が極限分布を決定する。