

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] 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)

昨年度までに引き続き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た。

本年度はサイズ比を連続的に変えた3粒子系での動的クラスター形成と定常クラスター形成の変化をシミュレーションにより調べた。その結果、両者の間に転移が存在すること、この転移が起きる粒径比がダブレットの速度とシングレットの速度比で決まることを理論的に明らかにした[1]。

また、空間的拘束により流体相互作用が大きく変化することが知られているが、粒径程度のきわめて狭いセルに閉じ込めた場合には、クラスターの速度がシングレットより遅くなり、3次元系とは反対に先頭のシングレットが飛び出し、前のクラスターに結合するような特徴的運動を示すことが明らかとなった。

[2] 異方性コロイド構造体の示す液体-液晶転移の実験的研究 (木村)

異方性コロイド粒子は従来の球状粒子系にはないさまざまな特徴的な充填構造を形成することが注目されている。ことに楕円体コロイド粒子は方向がランダムである配向ガラスと重心位置がランダムである通常のガラス状態の2つのガラス状態を示す系として注目されている。本年度は粒子サイズが単分散の球状コロイド粒子を加熱延伸し、アスペクト比が揃った粒子を作成し、2次元での液体状態（面積分率 50%程度）における並進秩序と配向秩序を調べた。その結果、軸比の増大とともに長軸がそろった状態であるネマチック秩序が急速に増大することがわかった（図1）。図中で同じ方位角の粒子を同じ色で表している。この際、対応して短距離での重心秩序にも変化が現れることが明らかとなった。今後、高濃度での構造変化およびダイナミクス測定を行うことで配向ガラス-液晶転移の観測を試みる。

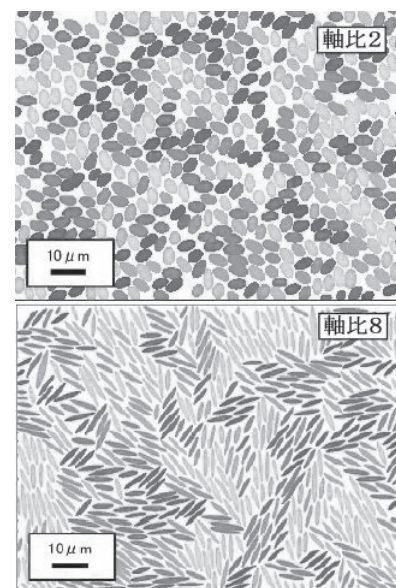


図1 楕円体粒子系の配向分布

[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。マイクロレオロジー法は、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、passive MR と active MR の差 (揺動散逸定理

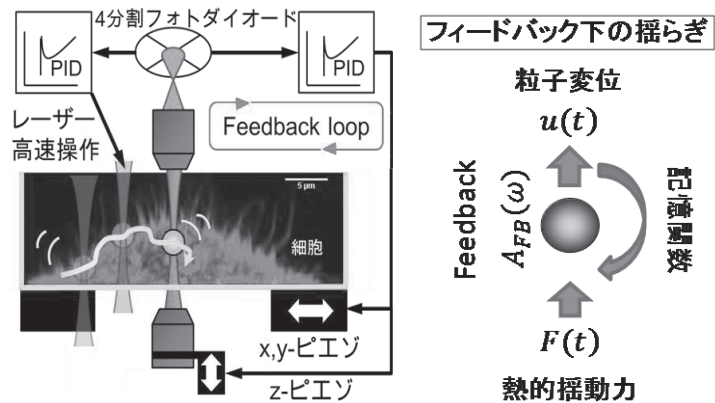


図2 多重フィードバック下におけるマイクロレオロジー

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(図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、細胞内部は混みあいによりガラス化するはずの濃度でありながら、代謝活性により流動化していることが分かった。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その現実系における検証 (水野)

連続体近似が可能な巨視的スケールで平均化された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。実際、乱流、ガラス、細胞、遊走微生物懸濁液 (アクティブマター) 等の様々な非平衡系において非ガウス揺らぎが観測されて来た。その物理的起源が明らかになれば、非ガウス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に関する理解を深めることが出来る。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。我々はこれを下記のコンセプトに基づいて構築しつつある。

自然は重力、静電気力、流体力学等々のべき的な相互作用で満ち溢れている。例えば多数の恒星からの重力相互作用、あるいは、多数の遊走微生物からの流体力学的な相互作用の和を観測することを考えよう。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ヴィ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、アクティブマターと呼ばれる遊走微生物の懸濁液や、ミオシンモーターたんぱく質により駆動されるアクチン細胞骨格中で観測される揺らぎは、そのどちらにも属さない。

本研究プロジェクトにおいて我々は、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。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) 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。

参考文献:

- [1] S. Okubo, S. Shibata, Y. S. Kawamura, M. Ichikawa and Y. Kimura, *Phys. Rev. E* **92**, 032303 (2015).