

A02-001 非平衡定常状態におけるソフトマターのゆらぎとレオロジー

北海道大学大学院工学研究院 折原 宏
大分大学工学部 長屋智之
北海道大学電子科学研究所 中垣俊之
九州大学大学院 日高芳樹

1. せん断流下におけるネマチック液晶およびコロイドの非平衡ゆらぎ

せん断流により時間反転対称性が破れた非平衡定常系は平衡系にはない特徴的なダイナミクスを示す。ネマチック液晶では電場に対して特異な応力応答が実験的に観測されていたが、今回その起源である非保存力をエリクセン-レスリー (EL) 理論を基に検討した。せん断流を印加すると通常ディレクターは流動配向によりせん断面内で流れ方向と一定の角度をなして安定化する。このとき、せん断面内のゆらぎと面に垂直なゆらぎは独立であるが、静磁場を印加して平均の配向方向がせん断面からはずれるとこれらのゆらぎが相互に影響し合うようになり、非保存力が現れることがわかった。この非保存力が特異な応力応答の起源であることを明らかにした。さらに、線形安定性を調べ、図1に示すような印加磁場に対する相図を作成した。色の着いた部分が不安定領域である。さらに、ゆらぎの時間相関関数と応答関数を計算し、この系で成立する揺動散逸関係を導出した。¹⁾

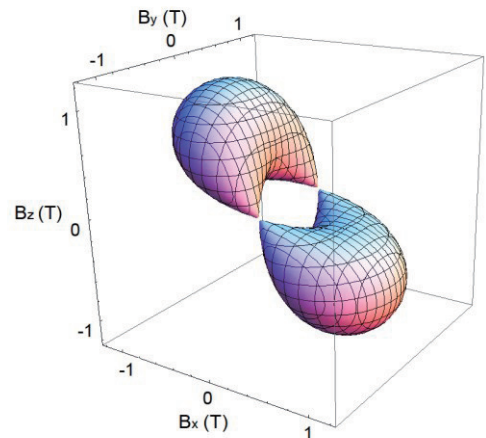


図1. 液晶 5CB の物性定数を用いて計算した磁場空間内の不安定領域。せん断流の速度勾配および流れの方向はそれぞれ z と x 方向。(文献[1] 図4 ©American Physical Society 2013)

コロイド粒子のブラウン運動もせん断流によって著しく変化する。例えば、流れ方向の平均自乗変位は通常的时间に比例する項に加えて、時間の3乗の項が付け加わる。今回、このようなせん断流の影響を軌跡の持続確率を用いて調べた。持続確率 $P(t)$ とは、ある時間間隔 t の間に確率変数 $x(t)$ が出発点に戻らない確率である。多くの場合、持続確率は冪関数的に減衰 ($P(t) \sim t^{-\theta}$) する。本研究では、微粒子を分散させた水に定常せん断流を印加し、非平衡定常状態にある微粒子のブラウン運動を観測した。流れ方向の軌跡からせん断流によるドリフトの影響を除くため、新たな変数 $\tilde{x}(t) = [(x(2t) - x(t)) - (x(t) - x(0))] / \sqrt{2}$ を導入した。図2に異なるせん断速度における $\tilde{x}(t)$ の持続確

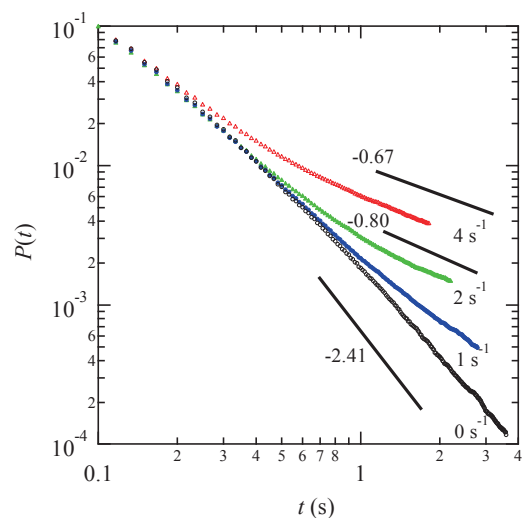


図2. 異なるせん断速度における持続確率。(文献[2] 図5 ©American Physical Society 2013)

率を示す。せん断速度が大きくなると θ が大きくなっている。近似計算により無せん断下では $\theta=2.41$ 、せん断流下では0.67 および 0.80 (異なる2種類の近似結果) が得られたが、長時間側でこれらとほぼ一致する実験結果が得られた。²⁾

2. 液晶電気対流のレオロジー

ネマチック液晶 MBBA に低周波電場を印加して電気対流を発生させて粘性率を測定すると、高電圧領域で見かけの粘性率が減少することが報告されている。³⁾ 高電圧領域では液晶は乱流状態になっているが、せん断によって配向状態に異方性が生じ、その結果、せん断応力の電場に起因する成分が負になると考えられている。電気的応力は誘電異方性に比例するため、誘電異方性 $\Delta\epsilon$ の値を連続的に変えた試料で粘性率の電圧依存性を測定した。 $\Delta\epsilon$ が負のMBBAに $\Delta\epsilon$ が正のEBCAをわずかに混合し、全体の $\Delta\epsilon$ が約-0.4から0.15までの6種類の試料を準備した。60Hzにおける粘性率の電圧依存性を測定した結果を図3に示す。粘性率の減少が観測されるのは $\Delta\epsilon < 0$ の試料のみで、 $\Delta\epsilon > 0$ の試料では観測されなかった。これは、上述の推測を支持する結果であるが、 $\Delta\epsilon > 0$ の試料における乱流の様子は $\Delta\epsilon < 0$ の場合とは異なっていた。現在、これらの結果の検討を行っている。

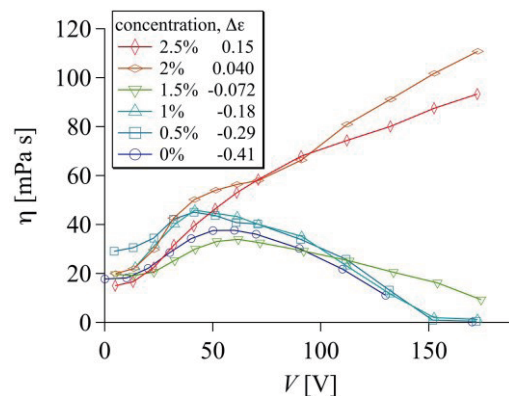


図3. 異なるせん断速度における粘度の電圧依存.

3. F-アクチン溶液のシアバンディング

せん断流下においてF-アクチン水溶液が低粘度と高粘度の2相に分離すること(シアバンディング)を見出しているが、⁴⁾今回配向状態との関係を調べるために蛍光染色したアクチンを用いてせん断流下において蛍光顕微鏡観察を行った。濃度0.6 mg/mlのF-アクチン水溶液(蛍光アクチンを2%含む)に 0.32 s^{-1} のせん断を印加したときの高粘度相の蛍光顕微鏡像およびその空間相関関数を図4に示す。流れ方向に明らかにアクチンが配向している。また、相関関数からも全体として流れ方向に配向していることがわかる。2相共存状態において、相関関数から配向度を求めたところ、低粘度相の方が高粘度相よりも配向度が高いことが見出された。粘度と配向度の定量的な関係を調べている。

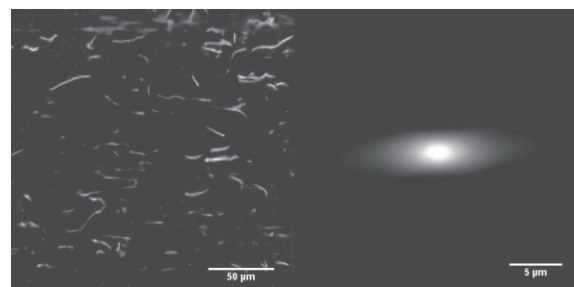


図4. せん断流下の蛍光アクチンの配向状態(左)と空間相関関数(右).

参考文献:

- (1) J. F. Fatriansyah and H. Orihara, Phys. Rev. E **88**, 012510 (2013).
- (2) Y. Takikawa and H. Orihara, Phys. Rev. E **88**, 062111 (2013).
- (3) T. Nagaya, M. Niu, S. Nara, Y. H. Na and H. Orihara, Phys. Rev. E **87**, 012501 (2013).
- (4) I. Kunita, K. Sato, Y. Tanaka, Y. Takikawa, H. Orihara and T. Nakagaki, Phys. Rev. Lett **109**, 248303 (2012).