

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
 九州大学大学院工学研究院 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交流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、今回定常せん断流に加えて直流電場も印加し、さらに微小な交流電場を印加したときの応力の応答を観測した。定常せん断流下では液晶分子はせん断面内で流れ方向と一定の角度をなしているが、交流電場を印加すると分子の方向が変化し、それにより応力も変化する。図1に直流電場 E_0 を変えたときの応力応答の交流電場周波数依存性を示す。直流電場が小さいときはデバイ型であるが(図1(a))、大きくなるにつれて高周波側の実部の値がゼロから大きくなり、プラトーが現れている(図1(b))。さらに大きくなると、高周波側の実部は低周波側より大きくなり、これに伴い、虚部は反転している(図1(c), (d))。高周波側で応答が持続するのは希な現象である。本研究では液晶の基礎理論であるエリクセン・レスリー方程式からこの結果を再現できることを示した。この現象はオンサーガーの相反関係とも関係していることを示すことができる。¹⁾

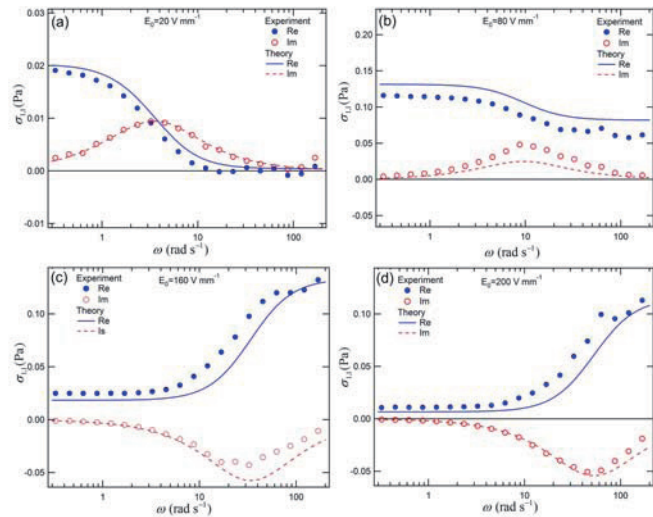


図1. せん断速度 10 s^{-1} において異なる直流電場での応力応答の周波数依存性。

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。我々はすでに流れ方向の平均自乗変位に時間の3乗の項が付け加わること(異常拡散)を示している。今回、粒子の3次元座標を測定できるステレオ顕微鏡を用いて流れ方向(x軸)と速度勾配方向(z軸)の変位の相関を調べた。位置 \vec{r} 、 \vec{r} での流体の速度 $\vec{v}(\vec{r})$ に対して、 $C_{\alpha\beta}(t) = \left\langle \left(r_\alpha(t) - r_\alpha(0) - v_\alpha(\vec{r}(t))t \right) \left(r_\beta(2t) - r_\beta(t) - v_\beta(\vec{r}(0))t \right) \right\rangle$ を定義する。 $C_{\alpha\beta}(t)$ は r_α と r_β に相関がなければゼロになり、さらに時間反転対称性が成立すれば $C_{\alpha\beta}(-t) = C_{\beta\alpha}(t)$ となる。すなわち、時間反転対称性が成立すれば $C_{\alpha\beta}(t)$ は対称となる。図2に無せん断流下とせん断流下 (2 s^{-1}) の $C_{xz}(t)$ と $C_{zx}(t)$ を示す。無せん断下では両方ともゼロであるのに対し、せん断流下ではゼロでない値をとり、さらに両者は異なっている。これより、せん断流下で

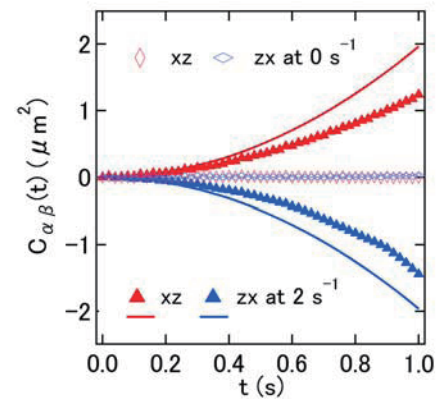


図2. 相関関数の xz と zx 成分。実線は理論。

せん断流下では両方ともゼロであるのに対し、せん断流下ではゼロでない値をとり、さらに両者は異なっている。これより、せん断流下で

は流れ方向と速度勾配方向の変位に相関が現れ、時間反転対称性が破れることが検証された。この結果はランジュバン方程式からの計算結果と一致する。

2. 液晶電気対流とレオロジー

誘電異方性($\Delta\epsilon$)が負のネマチック液晶 MBBA に $\Delta\epsilon$ が正のネマチック液晶 EBCA を混合し、 $\Delta\epsilon$ が-0.41 から+0.15 の混合液晶を準備して、粘性率(η)の低周波での電圧依存性を測定し、同時に誘起される液晶電気対流の観察を行った。電圧を増加させていくと、 $\Delta\epsilon$ が負の試料では、 η はいったん増加するが、50V 付近でピークを取って減少した。一方 $\Delta\epsilon$ が正の試料では、 η は単調に増加した。この結果から、 $\Delta\epsilon < 0$ の試料での高電圧下での粘性減少は Maxwell 応力の寄与と推察される。²⁾この実験では、 $\Delta\epsilon$ が 0 付近の試料においてある電圧範囲で剪断方向に垂直な縞模様が観測された(図3)。剪断を止めると縞模様は消失した。縞の間隔は、液晶試料の厚さに近く、電圧や剪断速度に依存して変化することがわかった。この剪断下での液晶電気対流の縞模様は本研究で始めて観測されたものである。現在は、生成条件、縞間隔の剪断速度および電圧依存性を調べている。

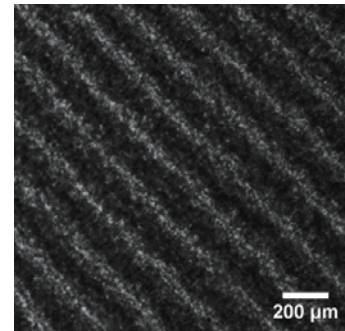


図3. EBCA1.9%, 110V 下での縞模様

また、電気対流中でコロイド粒子およびコロイド鎖の特異的な運動を見出した。³⁾

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 F-アクチン濃度のバンド形成に及ぼす影響を調べた。図4にせん断速度とアクチン濃度相図を示す。シアバンドは限られたせん断速度領域のみで出現し、さらにバンドが形成される臨界濃度(約 0.15 mg/ml)が存在することが分かった。アクチンの平均の長さ 1 μm から簡単なモデルをもとにこの臨界濃度を再現することができる。現在、蛍光標識したアクチンを用いて3次的に配向度が求められるようになり、応力との関係を定量的に調べている。

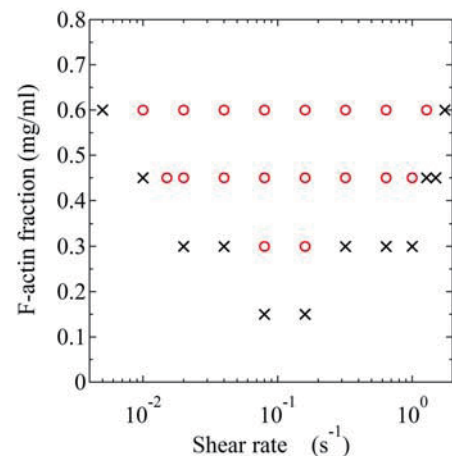


図4. せん断速度-アクチン濃度相図。○がシアバンドが観測されたところ。

参考文献:

- (1) J. F. Fatriansyah Y. Sasaki and H. Orihara, Phys. Rev. E **90**, 032504 (2014).
- (2) T. Nagaya, M. Niu, S. Nara, Y. H. Na and H. Orihara, Phys. Rev. E, **87**, 012501 (2013).
- (3) Y. Sasaki, Y. Takikawa, V. S. Jampani, H. Hoshikawa, T. Seto, C. Bahr, S. Herminghaus, Y. Hidaka, H. Orihara, Soft Matter **28**, 8813 (2014).
- (4) I. Kunita, K. Sato, Y. Tanaka, Y. Takikawa, H. Orihara and T. Nakagaki, Phys. Rev. Lett **109**, 248303 (2012).