

## 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  
北海道大学電子科学研究所 佐藤勝彦  
九州大学大学院工学研究院 日高芳樹

本研究では、非平衡定常状態におけるソフトマターの構造およびゆらぎの測定手法を開発し、それを用いて特にせん断流と関係した非平衡構造およびゆらぎの性質を調べた。以下に主な結果を示す。

### 1. せん断流下におけるネマチック液晶の非平衡ゆらぎ

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。我々はネマチック液晶で電場に対する特異な応力応答を実験的に観測していたが、本研究ではその起源をネマチック液晶の基礎理論であるエリクセン・レスリー理論から考察した。せん断流を印加すると通常ダイレクター（液晶分子の平均方向を向いた単位ベクトル）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、静磁場を印加してダイレクターがせん断面から外れるとこれらのゆらぎが相互に影響し合い、非保存力が現れ、これが特異な応力応答の起源であることを明らかにした。また、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<sup>1)</sup>。定常せん断流および直流電場下ではダイレクター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ダイレクターの方向が変化し、それにより応力も変化する。直流電場の大きさを変えたときの応力応答の交流電場周波数依存性を観測した。直流電場が小さいときはデバイ型であるが、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、プラトーが現れることが分かった。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た。

### 2. シアバンディング時のF-アクチン溶液における配向分布の直接観測

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）が見出されているが、今回各相におけるアクチンフィラメントの配向分布の測定を行なった<sup>2)</sup>。測定には蛍光標識したアクチンと無標識のアクチンを1:225になるように調製した水溶液を用いた。この試料を、下側のステージをガラス板で置き換えたコーンプレート型レオメーターにセットし、シアバンドが形成されるせん断速度を印加し、共焦点レーザー顕微鏡により観測した。シアバンドが形成された状態において低せん断相および高せん断相のフィラメントの配向テンソルを求めた。棒状高分子に対する土井・エドワード理論によると応力テンソルは配向テンソルに比例するので、配向テンソルから応力テンソルを求めることができる。高せん断相と低せん断相でせん断応力は等しい筈であるが、これまで実験的

には示されていない。今回、本測定によって対応する配向テンソルの成分が一致することを確かめることによって、両相のせん断応力が等しいことを初めて示すことができた。

### 3. 液晶電気対流により誘起された負の粘性と履歴曲線

ネマチック液晶に電圧を印加すると対流が発生するが、この状態におけるレオロジー測定が長屋らによって行われ、負の誘電率異方性（ダイレクターに平行方向より垂直方向の誘電率が小さい）を持つ液晶では電圧を上げていくとせん断応力が減少することが報告されていた。本研究では<sup>3)</sup>、高電圧側を測定したところせん断応力が負となることがわかった。また、応力ゼロの状態でもレオメーターの平行平板間に挟んだネマチック液晶に電場を印加し、液晶電気対流を発生させると、円盤が自発的に回転する現象が見出され、この回転方向が外力により反転することも確認された。さらに、せん断応力制御によりせん断速度との関係を負の領域を含めて測定したところ、これらの量の間には強磁性体や強誘電体などで見られる履歴曲線が観測された（図 1(a)）。これより、この性質を *ferroviscosity*、この状態の液晶を *ferroviscous fluid* と命名した。また、せん断速度制御により測定を行なうと図 1(b) のような S 字曲線が観測され、明らかに粘度が原点付近で負になっていることが分かった。さらに、電場を変えると履歴曲線や S 字曲線が相似的に変化することから、次元解析的考察を行ない、応力とせん断速度を電場の自乗でスケールすると電場の異なるデータがすべて一つのユニバーサルな曲線に乗ることを示した（図 1(c) と (d)）。実験結果をエリクセン・レスリー方程式により解析したところ、応力は粘性と電場を起源とする 2 種類に分離できることが分かり、負の粘性に寄与するのは後者であることが明らかになった。また、乱流状態におけるダイレクターの配向分布を考慮したモデルにより実験によって得られた履歴曲線を再現することができた（図 1(d) の実線）。

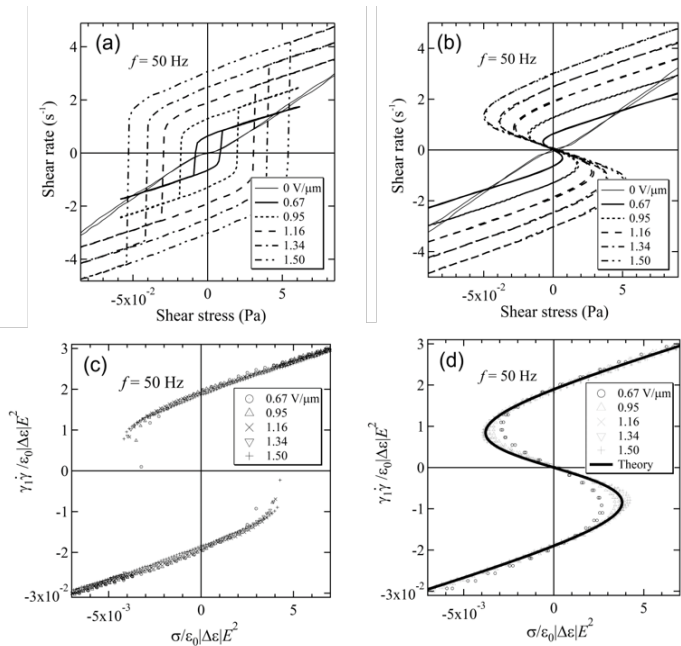


図 1. 異なる電場におけるせん断応力とせん断速度の関係。(a) 応力制御, (b) せん断速度制御。(c) と (d) はそれぞれ (a) と (b) に対応するスケージング則。

### 参考文献

- (1) J. F. Fatriansyah, Y. Sasaki, and H. Orihara, *Phys. Rev. E* **90**, 032504 (2014).
- (2) I. Kunita, Y. Takikawa, D. Takeuchi, Y. Tanaka, T. Nakagaki, and H. Orihara, *Soft Matter* **13**, 2708 (2017).
- (3) H. Orihara, Y. Harada, F. Kobayashi, Y. Sasaki, S. Fujii, Y. Satou, Y. Goto, and T. Nagaya, *Phys. Rev. E*, in press.