

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 佐藤勝彦
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. 液晶電気対流により誘起された負のせん断応力と履歴曲線

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¹⁾。今回、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、応力ゼロの状態では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も見出された。さらに、せん断応力とせん断速度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。

試料として負の誘電異方性を持つネマチック液晶MBBA(N-(4-ブチルフェニル)-4-メトキシベンゼンメタンイミン)を用いた。治具には直径35mmの金属製円盤を用い、ギャップを0.1mmに設定した。測定は、せん断応力制御およびせん断速度制御により負から正へ線型的に増加させた後、正から負へ減少させた。このような測定を電圧を変えながら(0V, 67V, 95V, 116V, 134V, 150V)繰り返し行なった。せん断応力制御およびせん断速度制御におけるせん断応力 τ とせん断速度 $\dot{\gamma}$ の関係をそれぞれ図1(a)および(b)に示す。せん断応力制御では、無電場下を除き強磁性体や強誘電体で見られる履歴曲線が現れている。ループは電圧の増加とともに広がっている。第2および4象限では応力とせん断速度の符号が異なっており、これは通常の粘性抵抗ではなく、回転を助長する負のせん断応力あるいは負の粘性抵抗が存在することを示唆している。一方、せん断速度制御の結果では、無電場下を除き、S字カーブが観測されており、原点付近では負の粘度が発生していることが明確にわかる。原点の傾きに注目すると、電場印加時では傾きは電場の大きさに依存していないのが特徴である。さらに、せん断応力およびせん断速度を $\epsilon_0|\Delta\epsilon|E^2$ (ϵ_0 :真空の誘電率, $\Delta\epsilon$:誘電率異方性, E :電場)でスケールすると電圧の異なるデータ点がすべて一本の曲線上に乗り、スケールング関係が見出された。

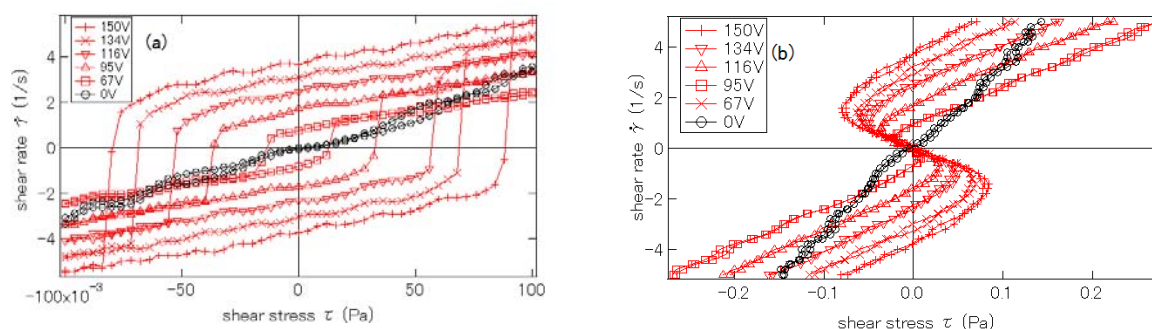


図1. せん断応力とせん断速度の関係。(a)せん断応力制御、(b)せん断速度制御。

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²⁾、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。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 (0.32 1/s) を印加し、共焦点レーザー顕微鏡により観測した。観測画像から速度勾配方向の流速分布を求めた結果を図 2(a1)に示す。観測点におけるギャップは 92 μm である。下側に高せん断層、上側に低せん断層が形成されている。図には示されていないが、実際にはさらに上に高せん断層が存在する。低せん断層と高せん断層における 3 次元画像をそれぞれ (a2) と (a3) に示す。低せん断層では比較的等方的であるのに対し、高せん断層では x 軸方向 (流れ方向) にアクチンフィラメントが配向しているのがわかる。

ここでは画像の 3 次元空間相関関数から配向テンソル $q_{\alpha\beta} = \langle n_\alpha n_\beta \rangle - 1/3 \cdot \delta_{\alpha\beta}$ (\vec{n} : アクチンフィラメント方向の単位ベクトル) を以下のように求めた。3 次元画像の空間相関関数を $c(\vec{r}) = c_0 \exp(-\sum_{i,j=1}^3 c_{ij} x_i x_j / 2)$ のようにガウス関数で近似すると、蛍光標識されたアクチンフィラメントが十分細く、濃度が十分低ければ、関係式 $\langle n_\alpha n_\beta \rangle = c_{\alpha\beta}^{-1} / \text{Tr}(c^{-1})$ を示すことができる。つまり、空間相関関数から配向テンソルを求めることができる。ただし、実際には深さ方向の分解能を考慮して、補正を行なう必要がある。図 2(b) に $\sum_{i,j=1}^3 c_{ij} x_i x_j = 1$ を満たす面を示す。低せん断層 (上図) と比べ高せん断層 (下図) では流れ方向に配向度が大きいことが分る。図 2(c) は配向分布を示しているが、同様な異方性を見ることができる。棒状高分子に対する土井・エドワード理論によるとせん断応力は $\langle n_x n_z \rangle$ に比例する。今回、本実験によって初めて高せん断層と低せん断層でこの値が一致することを示すことができた。

参考文献:

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

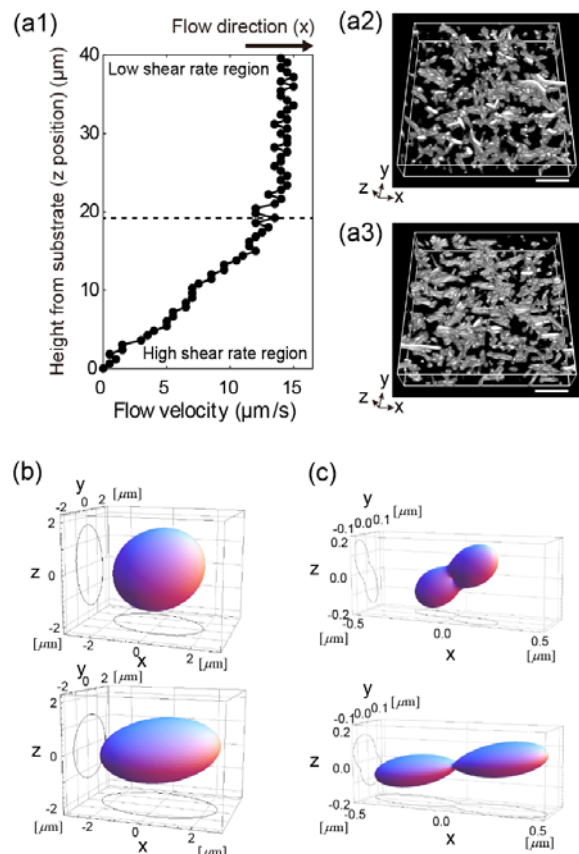


図 2. (a1)速度分布. (a2)低せん断層と (a3)高せん断層の構造. (b)配向分布と (c)配向分布関数.