

液晶の力学的応用

蝶野成臣*, 辻 知宏

(受領日: 2011年5月20日)

高知工科大学システム工学群

〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

E-mail: *chono.shigeomi@kochi-tech.ac.jp

要約: 本研究では、液晶に電場を印加した際に発生する流動(背流)を利用したアクチュエータの開発を目指し、まず数値計算によって平板間背流の速度分布を求めた。ツイスト角がこの分布形状に及ぼす影響は大きく、ツイスト角が 0° の場合、平板間中央面に関して反対称なS字形の速度分布になり、ツイスト角の増加とともにこの反対称性は崩壊し、 180° のツイスト角では流れは一方向となる。背流速度分布の可視化実験を行った結果、計算値と実験値は定性的に一致した。この背流が生み出す壁面せん断応力を利用して、2枚の平板からなるアクチュエータを開発した。その結果、可動状態にある上部平板の速度は印加電圧の周波数に大きく依存することが確認された。すなわち、周波数の増加とともに平板移動速度は急増し、周波数が175 Hzで最大速度約 $120 \mu\text{m/s}$ を示した後、緩やかに減少することがわかった。液晶の粘性係数と弾性定数が平板駆動速度に及ぼす影響を数値計算で調べ、最も大きな影響を及ぼす物性値はバルク粘度と呼ばれる α_4 であり、この値が小さいほど平板は高速に運動することを明らかにした。分子場弾性定数 K_3 も比較的大きな影響を有するが、この値の変化は駆動特性を低下させるのみで性能アップには寄与しない。

1. 緒言

液晶の存在が確認されたのは19世紀末である。液晶に関する研究は、1930年頃~1960年頃の約30年間の衰退期を除けば活発に行われてきた。とくに1960年代に表示デバイスとしての可能性が見出されて以来応用研究が著しく進展し、液晶ディスプレイはブラウン管の代替機器として確固たる地位を築くに至った。

一般に、液晶状態を発現する物質の分子形状は棒状または円盤状である。従って分子の整列状態(秩序)には、分子の位置に関する秩序のほかに、方向に関する秩序(配向秩序)も存在することになる。固体(結晶)は両方の秩序を有し、液体は両方とも失った状態である。液晶は位置の秩序を失っているが配向秩序を有している(位置に関して緩やかな秩序を持った液晶も存在するが、本稿では位置の秩序を失ったネマティック液晶を取り上げる)。このように液晶は配向秩序を有するので異方性を示すが、位置の秩序が無いので分子は自由に移動することができ、通常の液体のように、いわゆる“流れる”ことが可能である。

固体に対しては「固体力学(または材料力学)」が、

液体と気体に対しては「流体力学」が確立していることを考えれば、液晶に対しては「液晶力学」なる学術分野が存在し、そこでは液晶に関する力学的研究が遂行されているべきと思われる。確かに、液晶流動の速度場と配向場を調べた研究¹⁻³⁾や、液晶のER (ElectroRheological)・MR (Magneto-Rheological)特性について検討した研究^{4,5)}はあるが、これらは液晶をあくまでも流体の一つとして捉えている。

液晶に速度こう配を付与すると液晶分子が回転し配向することはよく知られているが、その逆現象、すなわち液晶分子が回転すると(例えば電場印加によって)速度こう配(流動)が誘発されることについては十分明らかにされていなかった。背流(backflow)という名称で流動の発生が過去に論じられているが^{6,7)}、そこでは背流が分子挙動に及ぼす影響が論じられており力学的応用を目指していない。

本稿では、背流の発生を連続体力学に基づく数値計算と可視化実験によって検討した結果と、この背流をアクチュエータに応用した場合の駆動特性を実験的に調べた結果について報告する。

2. 背流の発生

2.1 数値計算

2.1.1 基礎式

電場の作用下における液晶の等温流れを記述する基礎式を以下に示す。まず非圧縮性流体の連続の式と運動方程式はそれぞれ

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right\} = \mathbf{F} - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

と表される。ここで \mathbf{v} は速度ベクトル、 ρ は液晶の密度、 p は圧力、 \mathbf{F} は外力、 $\boldsymbol{\tau}$ は偏差応力テンソルで、構成方程式として Leslie-Ericksen (L-E) 理論⁸⁻¹⁰⁾を選択すれば

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} = & \alpha_1 \mathbf{nnn} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} + \alpha_2 \mathbf{nN} + \alpha_3 \mathbf{Nn} + \alpha_4 \mathbf{A} + \alpha_5 \mathbf{nn} \cdot \mathbf{A} \\ & + \alpha_6 \mathbf{A} \cdot \mathbf{nn} - \frac{\partial F}{\partial \mathbf{nn}} \cdot (\nabla \mathbf{n})^T \end{aligned} \quad (3)$$

となる。 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ はレズリー粘性係数、 \mathbf{n} は液晶分子の局所的平均配向方向を表す単位ベクトルであるディレクタ、 \mathbf{A} は変形速度テンソル

$$2\mathbf{A} = (\nabla \mathbf{v})^T + \nabla \mathbf{v} \quad (4)$$

\mathbf{N} はディレクタの相対角速度ベクトル

$$\mathbf{N} = \frac{\partial \mathbf{n}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{n} - \boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

である。 $\boldsymbol{\Omega}$ は渦度テンソル

$$2\boldsymbol{\Omega} = (\nabla \mathbf{v})^T - \nabla \mathbf{v} \quad (6)$$

である。式(3)の F はディレクタの弾性ひずみに基づく自由エネルギー密度で、

$$2F = K_1 (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + K_2 (\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n})^2 + K_3 |\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n}|^2 \quad (7)$$

と表される。式中の $K_1 \sim K_3$ は分子場弾性定数である。ディレクタ \mathbf{n} は、 \mathbf{n} の角運動方程式

$$\begin{aligned} \mathbf{0} = \mathbf{n} \times \left\{ \mathbf{G} - \frac{\partial F}{\partial \mathbf{n}} + \nabla \cdot \left(\frac{\partial F}{\partial \nabla \mathbf{n}} \right) - (\alpha_2 - \alpha_3) \mathbf{N} \right. \\ \left. - (\alpha_5 - \alpha_6) \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

で規定される。 \mathbf{G} は外トルクである。外場として電場ベクトル \mathbf{E} が液晶に作用しているとすれば、式(2)の単位体積当たりの外力 \mathbf{F} および式(8)の外トルク \mathbf{G} は

$$\mathbf{F} = (\varepsilon_{\perp} \mathbf{E} + \Delta \varepsilon \mathbf{n} \cdot \mathbf{E} \mathbf{n}) \cdot (\nabla \mathbf{E}) \quad (9)$$

$$\mathbf{G} = \Delta \varepsilon \mathbf{n} \cdot \mathbf{E} \mathbf{E} \quad (10)$$

となる。 ε_{\perp} および $\varepsilon_{//}$ はそれぞれディレクタに垂直および平行方向の誘電率、 $\Delta \varepsilon$ ($=\varepsilon_{//} - \varepsilon_{\perp}$) は誘電率の異

方性である。

2.1.2 境界条件と数値計算

Fig.1 に示すように間隔 H の平行平板間に液晶が存在しており、時刻 $t=0$ で y 方向に強度 E (一定) の一様電場が印加されるとする。

速度の境界条件は壁面ですべり無しとした。一方、配向については、Fig.2 のようにディレクタの姿勢を $\theta(y)$ 、 $\phi(y)$ で表現して、以下のように設定した。すなわち、壁面での θ ($\theta(0) = \theta(H) = \theta_w$) をチルト角、下部壁面と上部壁面の ϕ の相対差 ($\phi(0) = 0^\circ$ とすれば、上部壁面での $\phi(H) = \phi_w$) をツイスト角と定義し、 θ_w は 5° に固定、 ϕ_w は $0 \sim 180^\circ$ に設定した。初期値として、速度は領域全体で $\mathbf{v} = \mathbf{0}$ 、配向場には電場のない一次元の定常解を用いた。

基礎式の離散化には、二次精度の中心差分法とクランク・ニコルソン法を用いた。予備計算より $\Delta y = H/100$ 、 $\Delta t = 10^{-6}$ s とした。計算パラメータはツイスト角 ϕ_w 、印加電圧 V 、および平板間隔 H である。なお電圧の印加方法は、 $0 \text{ V} \rightarrow V \text{ V}$ のステップ変化1度だけとした。

本計算には、分子量約 250 の低分子ネマティック液晶である 4-n-pentyl-4'-cyanobiphenyl (5CB) の物性値を用いた。Table 1 にレズリー粘性係数、分子場弾性定数および誘電率を示す¹¹⁻¹⁴⁾。密度は $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ とした。

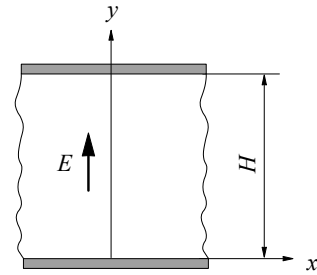


Fig. 1 Flow geometry and coordinate

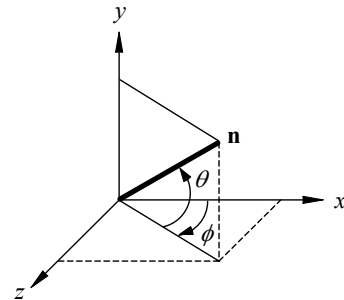


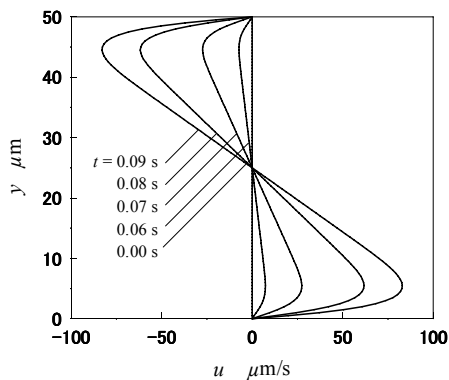
Fig. 2 Coordinate of the director

Table 1 Material properties of 5CB

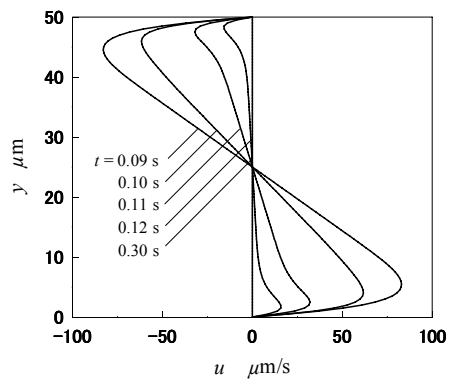
Viscosity $\times 10^{-2}$ (Pa·s)	Elasticity $\times 10^{-12}$ (N)	Dielectric constant $\times 10^{-11}$ (F/m)
α_1 0	K_1 6.37	$\epsilon_{//}$ 15.7
α_2 -8.6	K_2 3.81	ϵ_{\perp} 5.7
α_3 -0.4	K_3 8.60	
α_4 8.9		
α_5 5.9		
α_6 -3.1		

2.1.3 計算結果

Fig.3 は、 $t=0$ で電圧 10 V を印加した場合の x 方向速度成分 u の時間変化である。 $H=50 \mu\text{m}$ 、 $\phi_w=0^\circ$ の場合の結果である。Fig.3(a)はスタートから最大速度に達するまでを、Fig.3(b)は最大速度から再び静止するまでを示す。図のように平板間の上半分では負、下半分では正の速度が誘起されており、分布は平板間中央面に関して反対称の S 字形となる。従って局所速度は有限であるが平板間流量としては常に 0 である。誘起された速度の最大値は約 $80 \mu\text{m/s}$ である。



(a) From start to maximum



(b) From maximum to cessation

Fig. 3 Velocity profile ($\phi_w=0 \text{ deg}$)

Fig.4 に ϕ_w を変化させた場合の発生速度分布を示す。横軸の u_m は、流動が発生してから静止するまでの速度の最大値である。図より、平板間の速度分布形状は ϕ_w によって大きく異なる。 $\phi_w=0^\circ$ の場合、S 字形であった速度分布は、 ϕ_w が増加するとその反対称性は崩れ平板間流量は 0 とならない。そして ϕ_w が 180° になると一方向流れになる^{15,16}。

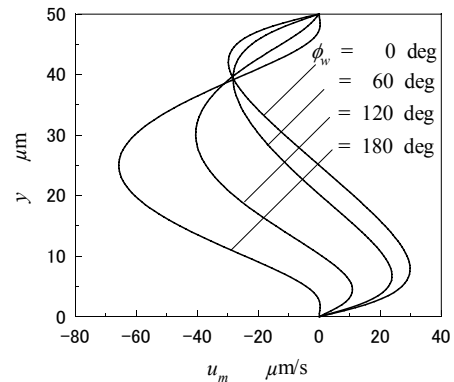


Fig. 4 Effect of twist angle on velocity profile

2.2 可視化実験

2.2.1 実験装置

本研究で自作した実験セルを Fig.5 に示す。自作手順は以下のとおりである。透明電極膜 (ITO 膜) が片側表面に施されているガラス平板を 2 枚用意し、ITO 膜の表面に、液晶分子を配向させるための配向膜 (オプトマー AL3046 の 2.5 wt% 溶液: JSR 株) を成膜する。この配向膜ではプレチルト角は約 5° となる。ラビング装置を用いてこの配向膜を一方向に擦る。配向処理を施した 2 枚のガラス板を、Fig.5 のようにフィルム状のスペーサ 2 枚を間に挟みながら、配向膜が対向するように重ね合わせる。このとき、

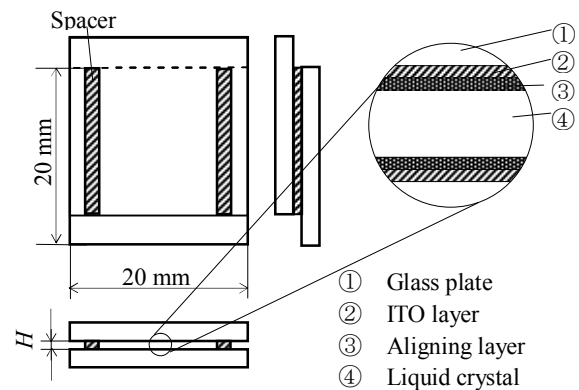


Fig. 5 Experimental cell

電圧印加を容易にするため、Fig.5のように両ガラス板を若干ずらしている。

ここで配向膜の役割について触れておく。電磁場などの外場が存在しない場合には、壁面での分子配向がセル全体の配向状態を決定する。換言すれば、電圧印加時に電場ベクトル方向に配向した液晶分子を、電圧解放時に元の状態に戻すのが、配向が固定されている壁面での分子である。この分子の配向方向は、配向膜を不織布等で擦ること（ラビング処理）で決定される。

使用した液晶は 5CB である。ツイスト角が 90° を超える場合、そのままでは液晶分子はツイスト配向状態をとらない。そこで、カイラル剤と呼ばれるツイスト配向状態を誘発する物質を 5CB に質量分率で 0.1% 添加した。

平板間に発生する流動を可視化するため、直径 $2.5 \mu\text{m}$ のシリカ微粒子を適量分散させた。体積分率は予備実験より 0.01% とした。

2.2.2 実験方法

2次元トラバース装置に Fig.5 の実験セルを固定し、これを偏光顕微鏡のステージ上に設置する。偏光顕微鏡の焦点目盛りを調節して平板間隔方向の所定の位置に焦点を合わせる。2次元トラバース装置を使って、この深さ位置において焦点の合う微粒子を探す。焦点の合った微粒子を視野内に捉えた状態で電場を印加し、微粒子の運動を撮影する。この操作を、平板間を 12 等分した位置で繰り返すことで平板間の速度分布を得た。顕微鏡からの画像は、CCD カメラを通してパソコンに取り込まれた後、画像処理される。取り込み速度は毎秒 30 フレームである。なお、各測定位置で同一条件の測定を 10 回繰り返した。また、実験は室温 (25°C) で行った。

2.2.3 実験結果

印加電圧 $V=5 \text{ V}$ 、平板間隔 $H=50 \mu\text{m}$ の場合の、ツイスト角 $\phi_w=0, 90, 180^\circ$ の速度分布をエラーバーとともに Fig.6 に示す。各図の横軸は x 方向速度成分 u の時間方向最大値 u_m 、縦軸は平板間の位置である。壁面では滑り無しと仮定し、 $u_m=0$ としている。図中の曲線は前節の計算結果である。図より、 $\phi_w=0^\circ$ の場合、平板間速度分布は $y=25 \mu\text{m}$ に関して反対称な S 字分布となっており、前節の数値計算で得られた結果を実験的に追認することができている。 ϕ_w が増加すると u_m は平板間上部領域で発達、下部領域で減衰し、反対称性を崩しながら一方向分布へ近づき、 $\phi_w=180^\circ$ で流れは完全な一方向となっている。

発生速度の大きさは、ツイスト角の増加とともに

増大していることがわかる。とくに $\phi_w=180^\circ$ では、 u_m の絶対値は最大となり、平板の中央部では $60 \mu\text{m/s}$ に達している。

測定値のバラツキはツイスト角や測定位置によって異なるが、大略、測定値の $\pm 20 \sim 30\%$ であり比較的大きい。これは、実験セルの製作誤差、とくにガラス表面に成膜した配向膜の配向特性のバラツキの影響が大きいと考えられる。

計算値と比較すると、上述した S 字分布や、 ϕ_w の増加に伴う反対称性の崩壊や一方向流れなど、定性的に見れば両者は十分一致しているといえる。しかしながら定量的には、両者に差異がある場合も見受けられる。この場合、必ず実験値が計算値を下回っている。これは、数値計算においては平板間隔方向の一次元計算を行っており、平板端面の影響を無視していることが主因であると考えられる。すなわち、実験セル端面の表面張力が発生流動を抑制するように作用するため、実験値は計算値よりも小さい値となっていると推察される。

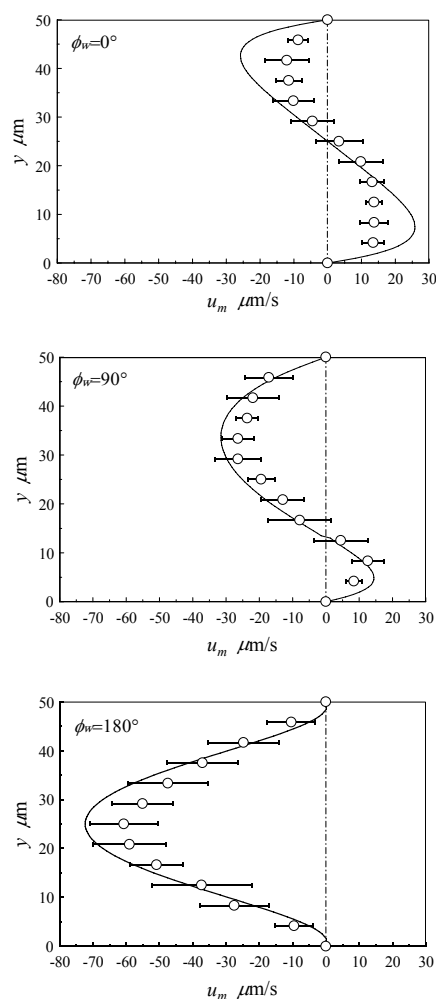


Fig. 6 Visualization of backflow between plates

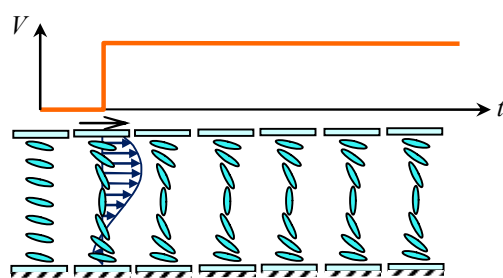
3. アクチュエータの開発

前章で明らかにされたように、電場印加によって液晶には流動が誘起される。Fig.5の実験セルにおいて、片方の（例えば上部）平板を平面方向に可動にすれば、壁面でのせん断応力によってこの平板を駆動することができる。これが液晶駆動型アクチュエータの基本原理である¹⁷⁾。

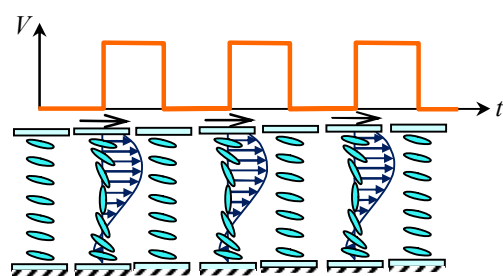
前章では、電圧の印加方法はFig.7(a)のように0 V → V のステップ変化1度だけとした。当然のことながら、発生した流動は粘性のために一定時間後には消滅する。従って電場方向に配向した分子を、電場を解放することで、一旦、初期配向状態に戻し、その後、電場を再印加するという連続操作が必須である (Fig.7(b))。この場合、電圧値以外に周波数、およびデューティ比もパラメータとなる。なお、電場印加時の分子の強制回転速度は電場解放時のそれよりも大きいので、結果的に平板は前進する。

3.1 実験セル

本研究で使用した実験セルは、上部平板が可動状態にあることを除けば、Fig.5のセルとほぼ同じである。上部平板の寸法は $10 \times 10 \times 0.15$ mmで質量は0.047 g、下部平板の寸法は 20×20 mmである。下部平板の上面（液晶に接する面）にはITO膜が蒸着され、さらに配向膜が施されている。上部平板には、後述するように電圧印加を容易にするためITO膜が平板全体に蒸着されている。ただし配向膜は液晶と接する面のみに施されている。



(a) Single application



(b) Continuous application

Fig. 7 Application of voltage and molecular orientation

上部平板を可動とし、且つ、2枚の平板の間隔を一定に保つため、Fig.5のフィルム状スペーサの代わりに球形のポリスチレン微粒子を使用した。微粒子直径が2枚の平板間隔に相当することは言うまでもない。平板間隔が微小であるため、上部平板の下面（液晶接触面）に電源を接続することは困難である。しかし、電極膜が上部平板全体を覆っていれば、上部平板の上面からの電圧印加が可能になる。また、液晶内部に電源との接続部が無くなることで、背流が阻害されなくなるため良好な結果が得られることも期待できる。これが、上述したように上部平板全体をITO膜で覆った理由である。

3.2 実験方法

使用した液晶は5CBである。実験は偏光顕微鏡下で行った。上部平板に付けた目印の動画をCCDカメラ（毎秒30フレーム）または高速度カメラ（毎秒1000フレーム）を通してパソコンに取り込んだ後、画像処理を行って移動距離と移動速度を算出した。

実験パラメータは、電圧 $V=1 \sim 10$ V、デューティ比 $D=1 \sim 50$ %、周波数 $f=1 \sim 1000$ Hz、平板間隔 $H=1 \sim 50$ μm である。なお自作した実験セルのプレチルト角や上部平板と微粒子の間の摩擦力にはバラツキがあるので、同一パラメータの実験を、異なった10個のセルに対して行った。

3.3 実験結果

3.3.1 平板の移動

一例として、電圧 $V=10$ V、デューティ比 $D=5$ %、平板間隔 $H=10$ μm で、周波数が $f=10$ Hzの場合の上部平板の移動距離 l の時間変化をFig.8に示す。平板は矩形波電圧の立ち上がりで微小距離移動してすぐに静止する。このような階段状の変化を繰り返しながら前進していることがわかる。1パルス当たりの平板移動量は 3 μm である。電圧解放時に液晶分子は逆回転をするので平板は若干後退すると推測したが、本実験では確認できなかった。

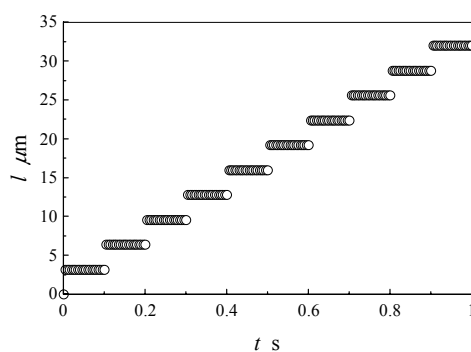


Fig. 8 Moving distance of the upper plate ($f=10$ Hz)

3.3.2 平板の移動速度

Fig.8 より、移動距離 l は微視的な階段状の変化を伴いながら時間に対してほぼ線形に増加しており、従って上部平板は巨視的には一定速度で運動していることがわかる。そこでこの移動速度 U と f の関係を Fig.9 に示す。 $V=10$ V、 $D=5$ %、 $H=10$ μ m である。 f の増加とともに U は急増し、 $f=175$ Hz において最大値約 120 μ m/s を取った後、緩やかな減少に転じている。 f が小さい場合、液晶分子の回転運動は周期に追従できるので、 f の増加は単位時間あたりの繰り返し数の増加になり、結果として U は増加する。しかし、 f が大きくなると分子はこれに追従できなくなり、分子の回転運動が十分な背流を発生できないので繰り返し数の増加に反して U は減少したと推察される。

3.3.3 平板移動速度の計算と液晶物性値の影響

平板間隔や印加電圧等が平板の運動に及ぼす影響を実験的に調べることは比較的容易である。これに対して液晶の物性値（粘性係数、弾性定数）の影響については、系統だった物性値を有する液晶を用意する必要があり、現存しなければ新規に合成しな

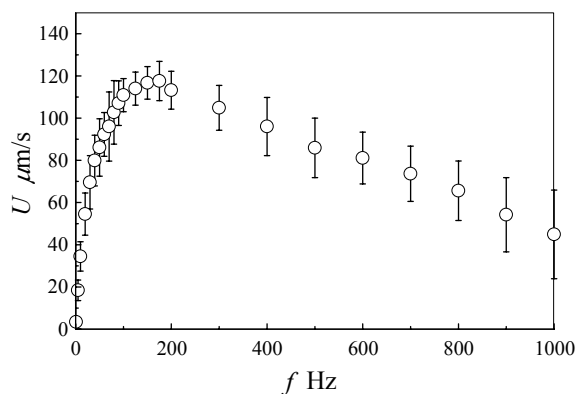


Fig. 9 Moving velocity of the upper plate

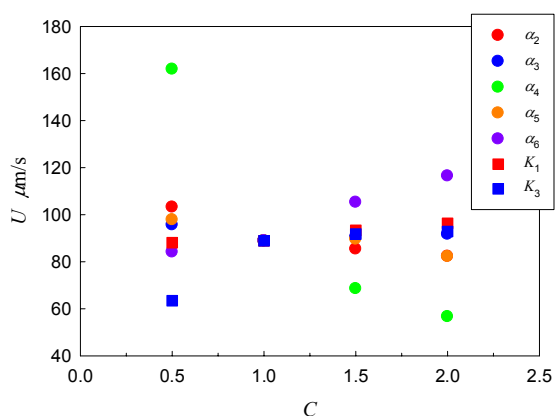


Fig. 10 Effect of materials constants on moving velocity of the upper plate

ればならない。数値計算であれば物性値の変化は容易であるが、一方で無作為な物性値の選択は合成化学の観点から合理性を欠く可能性がある。そこで従前の研究¹⁾に倣い、本研究で用いた 5CB 液晶の粘性係数と弾性定数を $C=0.5$ 倍、 1.0 倍、 1.5 倍、 2.0 倍に限定して計算を行った。

2.2.1 の液晶に関する支配方程式と、平板の運動方程式を連立させれば、平板の運動を数値的に求めることが可能である¹⁸⁾。式(3)の偏差応力テンソル τ の y_x 成分 τ_{yx} が、平板の牽引力となる。Fig.10 に、レズリー粘性係数 $\alpha_2 \sim \alpha_6$ と分子場弾性定数 K_1 、 K_3 （ツイスト角が 0° の場合、式中に K_2 は出現しない）を変化させた場合の平板駆動速度 U を示す。計算条件は $V=10$ V、 $f=100$ Hz、 $D=5$ %、 $H=10$ μ m である。図より、 U に最も大きな影響を及ぼす物性値は α_4 であり、この値が小さいほど平板は高速に運動する。 α_4 はバルク粘度とも呼ばれており、液晶全体の流動し難さに相当することから当然の結果といえる。分子場弾性定数 K_3 も比較的大きな影響を有しているが、この値が小さい液晶は駆動特性を低下させるのみで、大きな K_3 は性能アップに寄与しない。

4. 結言

本稿では、Leslie-Ericksen 連続体理論を構成方程式とした数値計算と可視化実験によって、ネマティック液晶に電場を印加した際に発生する流動を調べた。ツイスト角が 0° のとき S 字形の速度分布となるが、ツイスト角が増加するとこの S 字分布は崩壊し、 180° のツイスト角で一方向流れとなる。

この流動を利用したアクチュエータとして、平板を駆動するデバイスを試作して実験を行った。その結果、印加電圧の周波数によって平板駆動速度を制御できることがわかった。今後、液晶を力学的に応用する幅広い研究が待たれる。

参考文献

- (1) A. D. Rey and M. M. Denn, "Jeffrey-Hamel flow of Leslie-Ericksen nematic liquids," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol.27, pp.375–401, 1988.
- (2) 蝶野成臣, 辻知宏, M. M. Denn, "ネマティック液晶の二次元急縮小流れの数値シミュレーション," *日本機械学会論文集(B)*, vol. 60, pp.1944–1950, 1994.
- (3) S. Chono, T. Tsuji and M. M. Denn, "Spatial development of director orientation of tumbling

- nematic liquid crystals in pressure-driven channel flow,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol.79, pp.515–527, 1998.
- (4) 小山清人, “電気粘性流体の開発,” *CMC*, 1999.
- (5) 辻知宏, 蝶野成臣, “磁場下におけるネマティック液晶の平行平板間流れの数値シミュレーション,” *日本機械学会論文集(B)*, vol.69, pp.2649–2656, 2003.
- (6) F. Brochard, “Backflow effects in nematic liquid crystals,” *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol.23, pp.51–58, 1973.
- (7) D. W. Berreman, “Liquid crystal twist cell dynamics with backflow,” *Journal of Applied Physics*, vol.46, pp.3746–3751, 1975.
- (8) J. L. Ericksen, “Anisotropic fluids,” *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, vol.4, pp.231–237, 1960.
- (9) J. L. Ericksen, “Conservation laws for liquid crystals,” *Transactions of the Society of Rheology*, vol.5, pp.23–34, 1961.
- (10) F. M. Leslie, “Some constitutive equations for liquid crystals,” *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, vol.28, pp.265–283, 1968.
- (11) H. Knepe, F. Schneider and N. K. Sharma, “Rotational viscosity γ_1 of nematic liquid crystals,” *Journal of Chemical Physics*, vol.77, pp.3203–3208, 1982.
- (12) H. Knepe, F. Schneider and N. K. Sharma, “A comparative study of the viscosity coefficients of some nematic liquid crystals,” *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*, vol.85, pp.784–789, 1981.
- (13) P. P. Karat and N. V. Madhusudana, “Elasticity and orientational order in some 4'-n-alkyl-4-cyanobiphenyls (part II),” *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol.40, pp.239–245, 1977.
- (14) 液晶便覧編集委員会, 液晶便覧, 丸善, 2000.
- (15) S. Chono and T. Tsuji, “Proposal of mechanics of liquid crystals and development of liquid crystalline microactuators,” *Applied Physics Letters*, vol.92, 051905, 2008.
- (16) S. Chono and T. Tsuji, “Numerical analysis of characteristics of microactuators driven by liquid crystals,” *Chemical Engineering Science*, vol.64, pp.4625–4631, 2009.
- (17) 蝶野成臣, 辻知宏, “液晶流動形成機構、液晶流動形成方法および液晶流動を用いた物体移動機構,” 特許第 3586734 号, 2004.
- (18) 蝶野成臣, 辻知宏, “液晶駆動型マイクロアクチュエータの開発 (第 5 報, 平板駆動の数値計算),” *日本機械学会論文集(B)*, 投稿中.

Mechanical Application of Liquid Crystals

Shigeomi Chono*, Tomohiro Tsuji

(Received : May 20th, 2011)

*School of Systems Engineering, Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami city, Kochi 782-8502

E-mail:* chono.shigeomi@kochi-tech.ac.jp

Abstract: For the purpose of developing microactuators driven by liquid crystals, transient behaviors of a liquid crystal on applying an electric field have been investigated numerically. The velocity profile of an induced flow, known as backflow, depend strongly on the twist angle of the director; that is, the velocity profile is S-shaped when the twist angle is 0 deg, and unidirectional flow is obtained when the twist angle is 180 deg. Visualization experiments of the backflow confirm qualitatively the numerical predictions. Furthermore, we have performed experiments to drive a plate which is movable in its planar direction, by applying an electric field to a liquid crystal confined with two parallel plates. With the increase in the frequency of the electric field, the speed of the upper plate increases abruptly, reaches the maximum value, and decreases gradually.