

## 液晶駆動型マイクロアクチュエータの開発\*

### (第1報, 流動の発生とそのメカニズム)

蝶野 成臣<sup>\*1</sup>, 辻 知宏<sup>\*1</sup>

## Development of Micro-Actuators Driven by Liquid Crystals

### (1st Report, Generation of Flow and Its Mechanism)

Shigeomi CHONO<sup>\*2</sup> and Tomohiro TSUJI<sup>\*2</sup> Department of Intelligent Mechanical Systems Engineering, Kochi University of Technology,  
Tosayamada-chou, Kochi, 782-8502 Japan

As a purpose of developing micro-actuators driven by liquid crystals, unsteady behaviors of a nematic liquid crystal between two parallel plates under an electric field are investigated both numerically and experimentally. Imposition of the electric field on the liquid crystal induces flows, whose profile and magnitude depend strongly on the twist angle of the director; that is, the velocity profile between plates is S-shaped and the maximum velocity is about 80  $\mu\text{m/s}$  when the twist angle is 0 deg. On the other hand, unidirectional flow is generated and the maximum velocity is 350  $\mu\text{m/s}$  when the twist angle is 180 deg. Generation of flow is confirmed by means of a flow visualization experiment. Mechanism of the generation of flow can be explained by the consideration that the rotation of liquid crystalline molecules generated by imposition of an electric field induces local velocity gradient.

**Key Words:** Non-Newtonian Fluid, Micro-Actuator, Liquid Crystal, Leslie-Ericksen Theory, Electric Field, Flow Visualization

## 1. 緒 言

液晶に関する研究は 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飛躍的に増加し、基礎から応用まで幅広く展開されてきた。その結果、今では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。液晶ディスプレイは世界的規模の一大産業に成長し、さらなる発展が期待されるが、細部の改善点は残されているものの、技術的にはほぼ成熟期に達したと言っても過言ではない。実際、日本液晶学会が学会誌の充実を目的として 2003 年に会員に対して行ったアンケート調査結果でも、液晶の新しい応用を期待する声が多かった。

液晶の研究はディスプレイ開発を目的としたものが圧倒的多数であるが、それ以外の研究も皆無ではない。例えば液晶が流動する際の速度場と配向場の相互作用を調べた研究<sup>(1)(2)</sup>や、液晶の ER・MR 特性について検討した研究<sup>(3)(4)</sup>もなされている。しかしこれらの研究では液晶をあくまでも流体の一つとして捉え、流体

工学の立場からその挙動を明らかにしている。

機械工学において固体には「固体力学（または材料力学）」が、液体と気体には「流体力学」という学術分野が確立していること、そして液晶は固体（結晶）、液体、気体に続く物質第 4 番目の状態であることを考えれば、「液晶力学」という学術分野が存在しそこでは液晶に関する様々な研究が力学的側面から遂行されているべきである。しかしながら現実にはこのような分野は存在していない。図 1 は液晶の応用を概念的に描いたものである。すなわち、電磁場、流動、熱、光

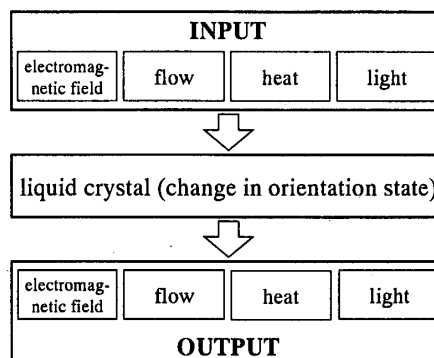


Fig. 1 Application of liquid crystal

\* 原稿受付 2005 年 6 月 27 日。

<sup>\*1</sup> 正員, 高知工科大学知能機械システム工学科(〒782-8502 高知県土佐山田町)。

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

等を液晶に入力し、液晶の最大の特徴である配向状態の容易な変化を利用して入力と異なった因子を取り出すことを意味する。電気エネルギーを入力して透過光の変化を取り出したのが液晶ディスプレイであり、組み合わせによっては液晶をエネルギーの変換媒体と見なすことにもなる。入出力因子の組み合わせを変更したり図1以外の因子も提案できれば、液晶の応用はさらに広がると思われる。

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、液晶分子が回転すると（例えば電場印加によって）その回転運動が速度こう配（流動）を誘発するという逆現象については明らかでない。この現象は、図1において入力に電場を、出力に流動を選択した場合に相当する。背流 (back flow) という名称で流動の発生が過去に論じられているが<sup>9)</sup>、それらの研究は背流が分子挙動に及ぼす影響を調べることであり、力学的応用を目指したものではない。

本論文は、液晶駆動型マイクロアクチュエータの開発研究の初報として、低分子ネマティック液晶の流動に関して完成度の高い理論である Leslie-Ericksen (L-E) 理論<sup>9)~10)</sup>を構成方程式として、電場を印加した際の液晶分子の回転運動とそれが誘起する流動の非定常計算について報告する。さらに簡単な実験結果と、流動発生メカニズムについても言及する。

## 2. 支配方程式

**2.1 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。

・連続の式

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

・運動方程式

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \mathbf{F} - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2)$$

・偏差応力テンソル

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

・角運動方程式

$$\mathbf{n} \times \left\{ \mathbf{G} - \frac{\partial F}{\partial \mathbf{n}} + \nabla \cdot \left( \frac{\partial F}{\partial \nabla \mathbf{n}} \right) + \gamma_1 \mathbf{N} + \gamma_2 \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} \right\} = \mathbf{0} \quad (4)$$

・電場による単位体積当たりの外力

$$\mathbf{F} = (\varepsilon_{\perp} \mathbf{E} + \Delta \varepsilon \mathbf{n} \cdot \mathbf{E} \mathbf{n}) \cdot (\nabla \mathbf{E}) \quad (5)$$

・電場によるディレクタに作用する単位体積当たりの外力

$$\mathbf{G} = \Delta \varepsilon \mathbf{n} \cdot \mathbf{E} \mathbf{E} \quad (6)$$

ディレクタの弾性ひずみに基づく自由エネルギー密度

$$F = \frac{1}{2} \left\{ K_1 (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + K_2 (\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n})^2 + K_3 |\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n}|^2 \right\} \quad (7)$$

・ディレクタの相対角速度ベクトル

$$\mathbf{N} = \frac{D\mathbf{n}}{Dt} - \boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{n} \quad (8)$$

・変形速度テンソル

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2} \left\{ (\nabla \mathbf{v})^T + \nabla \mathbf{v} \right\} \quad (9)$$

・渦度テンソル

$$\boldsymbol{\Omega} = \frac{1}{2} \left\{ (\nabla \mathbf{v})^T - \nabla \mathbf{v} \right\} \quad (10)$$

ここで  $\mathbf{v}$  は速度ベクトル、 $\rho$  は流体密度、 $p$  は圧力、 $D/Dt$  は実質微分、 $\mathbf{n}$  は液晶分子の局所的な平均配向方向を表す単位ベクトルでディレクタ、 $\alpha_1 \sim \alpha_6$  はレスリー粘性係数、 $K_1 \sim K_3$  は分子場弾性定数、 $\mathbf{E}$  は電場ベクトル、 $\varepsilon_{\perp}$  および  $\varepsilon_{\parallel}$  はそれぞれディレクタに垂直および平行方向の誘電率、 $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$  は誘電率の異方性である。 $\gamma_1, \gamma_2$  は粘性係数で、 $\gamma_1 = \alpha_3 - \alpha_2$ 、 $\gamma_2 = \alpha_6 - \alpha_5$  である。

**2.2 座標系と基礎式の展開** 図2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  $E$  (定数) の一様電場

$$\mathbf{E} = (0, E, 0)^T \quad (11)$$

が印加されるとする。図2において、ディレクタ  $\mathbf{n}$  は面外成分も有するとすれば

$$\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)^T \quad (12)$$

となる。この場合、速度ベクトル  $\mathbf{v}$  は  $y$  方向成分のみが0となり

$$\mathbf{v} = (u, 0, w)^T \quad (13)$$

と表される。式(11)~(13)を用いれば、成分表示した運動方程式(2)および角運動方程式(4)は以下となる。

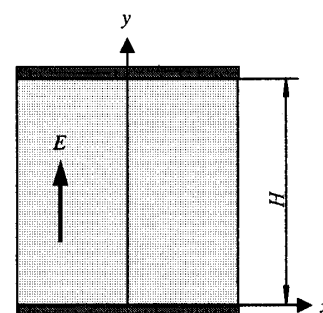


Fig. 2 Coordinate system

$$\begin{aligned}
\rho \frac{\partial u}{\partial t} = & \alpha_1 \left\{ \frac{\partial}{\partial y} (n_x^2 n_y^2) \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (n_x n_y^2 n_z) \frac{\partial w}{\partial y} \right. \\
& + n_x n_y^2 \left( n_x \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + n_z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \left. \right\} + \frac{\alpha_4}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\
& + \alpha_2 \frac{\partial}{\partial y} \left( n_y \frac{\partial n_x}{\partial t} \right) + \alpha_3 \frac{\partial}{\partial y} \left( n_x \frac{\partial n_y}{\partial t} \right) \\
& - \frac{\alpha_2 - \alpha_5}{2} \left( 2n_y \frac{\partial n_y}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} + n_y^2 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\
& + \frac{\alpha_3 + \alpha_6}{2} \left\{ 2n_x \frac{\partial n_x}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (n_x n_z) \frac{\partial w}{\partial y} \right. \\
& \left. + n_x^2 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + n_x n_z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right\}
\end{aligned} \quad (14a)$$

$$\begin{aligned}
\rho \frac{\partial w}{\partial t} = & \alpha_1 \left\{ \frac{\partial}{\partial y} (n_x n_y^2 n_z) \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} (n_y^2 n_z^2) \frac{\partial w}{\partial y} \right. \\
& + n_y^2 n_z \left( n_x \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + n_z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \left. \right\} + \frac{\alpha_4}{2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
& + \alpha_2 \frac{\partial}{\partial y} \left( n_y \frac{\partial n_z}{\partial t} \right) + \alpha_3 \frac{\partial}{\partial y} \left( n_z \frac{\partial n_y}{\partial t} \right) \\
& - \frac{\alpha_2 - \alpha_5}{2} \left( 2n_y \frac{\partial n_y}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} + n_y^2 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\
& + \frac{\alpha_3 + \alpha_6}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} (n_x n_z) \frac{\partial u}{\partial y} + 2n_z \frac{\partial n_z}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \right. \\
& \left. + n_x n_z \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + n_z^2 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right\}
\end{aligned} \quad (14b)$$

$$\begin{aligned}
\gamma_1 \frac{\partial n_x}{\partial t} = & n_y \left\{ 2(K_3 - K_2) \frac{\partial n_x}{\partial y} \frac{\partial n_y}{\partial y} - \alpha_2 \frac{\partial u}{\partial y} \right\} \\
& + \left\{ K_2 + (K_3 - K_2) n_y^2 \right\} \frac{\partial^2 n_x}{\partial y^2}
\end{aligned} \quad (15a)$$

$$\begin{aligned}
\gamma_1 \frac{\partial n_y}{\partial t} = & n_y \Delta \epsilon E^2 - \alpha_3 \left( n_x \frac{\partial u}{\partial y} + n_z \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\
& - (K_3 - K_2) n_y \left\{ \left( \frac{\partial n_x}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial n_y}{\partial y} \right)^2 \right. \\
& \left. - \left( \frac{\partial n_z}{\partial y} \right)^2 \right\} + \left\{ K_1 + (K_3 - K_2) n_y^2 \right\} \frac{\partial^2 n_y}{\partial y^2}
\end{aligned} \quad (15b)$$

$$\begin{aligned}
\gamma_1 \frac{\partial n_z}{\partial t} = & n_y \left\{ 2(K_3 - K_2) \frac{\partial n_y}{\partial y} \frac{\partial n_z}{\partial y} - \alpha_2 \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \\
& + \left\{ K_2 + (K_3 - K_2) n_y^2 \right\} \frac{\partial^2 n_z}{\partial y^2}
\end{aligned} \quad (15c)$$

### 3. 数値計算

**3.1 境界条件と初期条件** 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、図3のようにディレクタの姿勢を $\theta$ ,  $\phi$ で表現し、 $\theta$ をチルト角、上下壁面での $\phi$ の差をツイスト角と定義すれば、チルト角は $1^\circ$ のみ、ツイスト角は $0^\circ$ と $180^\circ$ の2通りとした。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次元の定常解を用いた。

**3.2 数値計算** 式(14), (15)を離散化するにあたり、空間方向には二次精度の中心差分法を、時間方向には二次精度のルンゲ・クッタ法を用いた。予備計算より $\Delta y = H/100$ ,  $\Delta t = 10^{-9}$ 秒とした。

本計算では、低分子ネマティック液晶である5CB (4-n-pentyl-4'-cyanobiphenyl)の物性値を用いた。表1にレスリー粘性係数、分子場弾性定数および誘電率を示す<sup>(14)</sup>。密度は $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ とした。

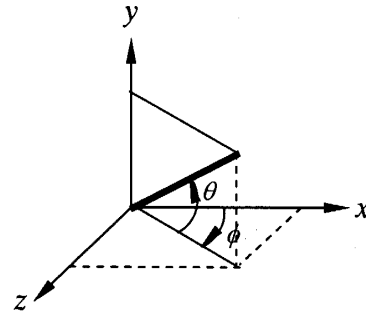


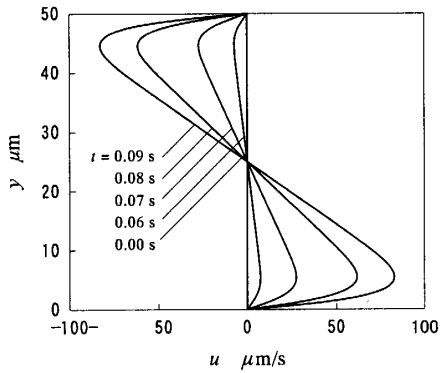
Fig. 3 Coordinate of the director

Table 1 Material constants of 5CB

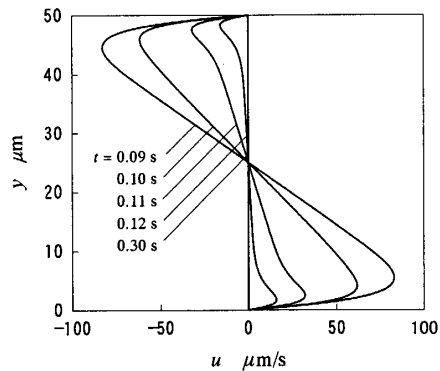
		(Pa·s)		(N)			(F/m)			
$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$\epsilon_{//}$	$\epsilon_{\perp}$
			$\times 10^{-2}$			$\times 10^{-12}$			$\times 10^{-11}$	
0	-8.6	-0.4	8.9	5.9	-3.1	6.37	3.81	8.60	15.7	5.7

### 4. 結果および考察

**4.1 流動の発生** 図4は、 $t = 0$ で直流電圧10Vを印加した場合(OFF→ONにしてその状態を保つ)の速度分布の時間変化である。平板間隔 $H$ が $50 \mu\text{m}$ 、ツイスト角が $0^\circ$ の場合の結果である。図4(a)はスタートから最大速度に達するまでを、図4(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0である。一連の変化は0.3秒間で生じているが、加

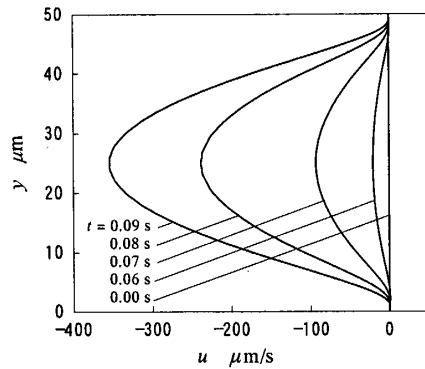


(a) From start to maximum

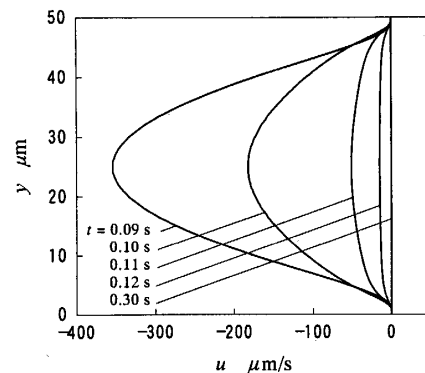


(b) From maximum to cessation

Fig. 4 Change in velocity profile with time (twist angle = 0 deg)



(a) From start to maximum



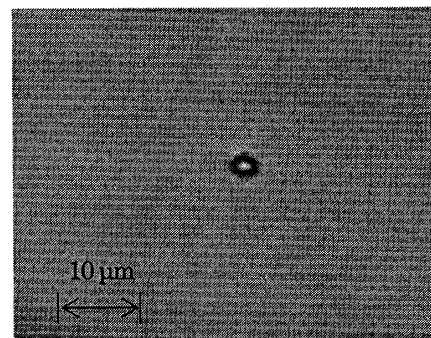
(b) From maximum to cessation

Fig. 5 Change in velocity profile with time (twist angle = 180 deg)

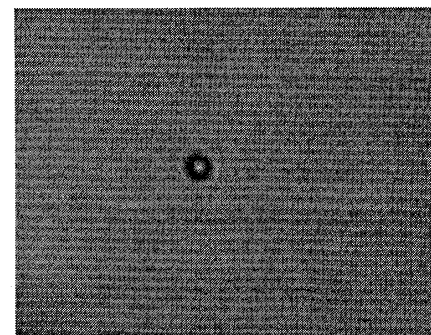
速は約 0.1 秒間であるのに対し、粘性による減速は約 0.2 秒間で生じている。加速時と減速時の分布形状にほとんど差はない。より詳細に見ると、加速初期の約 0.06 秒間はほとんど流動しておらず、0.06 秒～0.09 秒に急激に加速している。同様に減速はほぼ 0.09 秒～0.12 秒で起こっており、その後の 0.18 秒間は極めてゆっくりと減速している。誘起された速度の最大値は約  $80 \mu\text{m/s}$  である。

図 5 はツイスト角を  $180^\circ$  に変更した結果である。全ての  $y$  位置で同方向 ( $x$  の負の方向) に速度が誘起されており、図 4 と異なり平板間の流量は 0 とならない。一連の変化に要する時間は図 4 と全く同じであるが、発生速度の値 (絶対値) はかなり大きく、最大値は約  $350 \mu\text{m/s}$  に達している。

上述した流動の発生を実験的に追認するため、5CB を封入した間隔  $50 \mu\text{m}$  のガラス平板間に直流電圧 10 V を印加した場合の顕微鏡観察を行った。ツイスト角は  $0^\circ$ 、アンカリングは図の左右方向である。流動を可視化するため、直径約  $2.5 \mu\text{m}$  のポリスチレン微粒子を液晶に適量混入した。図 6(a), (b) は、それぞれ電圧印加前と印加後十分時間が経過した時の、上部平板から約  $7.5 \mu\text{m}$  位置での顕微鏡画像である。図より粒子が左方に約  $5.6 \mu\text{m}$  移動しており、電場による配向状態の変化に伴って流動



(a) Before imposition of electric field



(b) After imposition of electric field

Fig. 6 Visualization of the flow induced by electric field

の発生が確認された。

**4.2 流動発生メカニズム** ここで流動発生メカニズムについて考える。図7のように棒状の分子(実際には分子の集合体であるディレクタ)が回転するとそこに速度こう配が発生すると考えられる。図8(a)のようにツイスト角が $0^\circ$ で配向している液晶分子に電場を印加すると、図8(b)に示すように壁面近傍の液晶分子は壁面でのアンカリング効果により回転角は制限され、小さな速度こう配が発生する。一方流路中央部ではこのアンカリング効果が低減するので液晶分子は大きく回転でき、同時に大きな速度こう配が生じる。速度こう配を連続に繋げると図8(c)のような速度分布となり、これに壁面でのすべり無し条件を重ねると図8(d)となる。なお電場印加時の分子の回転方向は、分子にチルト角を付与することで制御できる。図では反時計回りに回転する場合を描いている。

一方ツイスト角が $180^\circ$ の場合について検討する。図9(a)のように配向している分子に電圧を印加すると、流路の下半分の分子は図において反時計回り

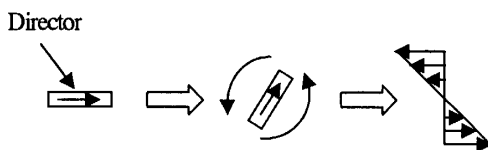


Fig. 7 Rotation of the director

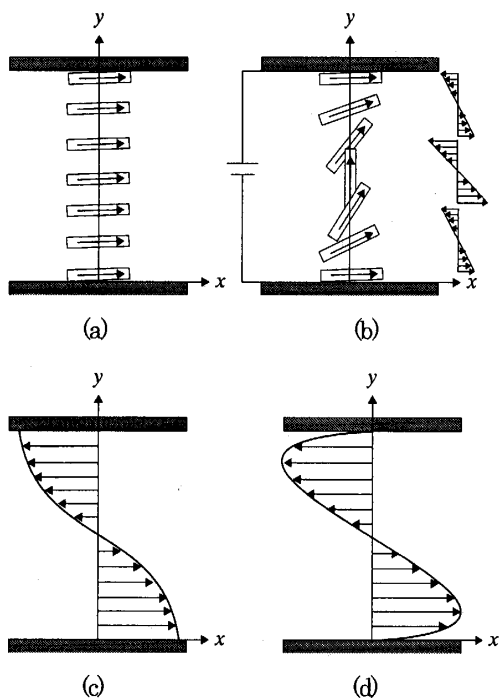


Fig. 8 Mechanism of generation of flow for twisted angle of  $0^\circ$

に回転するが、上半分の分子は時計回りに回転するため、流路中央部で速度こう配が逆転する(図9(b))。流路中央部の分子も回転するがこれは $y-z$ 面内で起こるので、 $x$ 方向の流動には寄与しない。その結果、図9(c), (d)のような一方向流れとなる。

以上のように液晶に電場を印加することで、流動が発生することが数値的、且つ実験的に確認できた。この結果を応用すれば極小サイズ(本研究は連続体力学に基づいていることから、代表長さが数 $10\text{ nm}$ ~ $100\text{ nm}$ 以上について成立する)の様々なアクチュエータを開発できる。例えば平行平板の一方が固定され、他方が平面方向に可動であれば、電圧印加により平板を運動させること、またその精密制御も可能となる。また液晶が“液体”の性質を兼備していることを考えれば、どのような形状のデバイスにも適合できる。すなわち、上述の平板を曲板に置換することもでき、さらには二重円筒間に液晶を充填すればモータの開発にもつながる<sup>(12)</sup>。ここで言及したアクチュエータはほんの数例に過ぎず、今後、液晶力学(液晶のメカニクス、ダイナミクス)に関する幅広い研究が待たれる。

## 5. 結 言

本研究では、ネマティック液晶に電場を印加すると流動が誘起されることを調べるため、Leslie-Ericksen

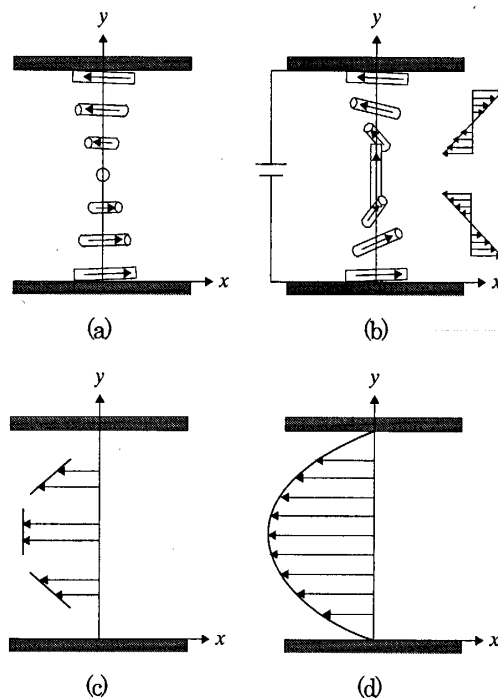


Fig. 9 Mechanism of generation of flow for twisted angle of  $180^\circ$

理論を構成方程式として平行平板間のネマティック液晶の非定常計算を行った。さらに流動の可視化実験も試みた。得られた結果を要約して以下に示す。

(1) 数値計算と実験により、液晶に電場を印加すると流動が発生することが明らかにされた。

(2) 発生する速度分布はツイスト角に依存する。ツイスト角が  $0^\circ$  の場合、分布は S 字形となり、ツイスト角が  $180^\circ$  の場合には一方向流れとなる。

(3) 本計算条件では、速度の最大値はツイスト角が  $0^\circ$  の場合  $80 \mu\text{m/s}$ 、 $180^\circ$  の場合  $350 \mu\text{m/s}$  であった。

(4) 液晶分子の回転は局所的な速度こう配を誘発する。これが流動発生メカニズムである。

終わりに、積水化学工業株式会社から可視化用微粒子を提供して頂いたこと、また平成 15 年度科学研究費補助金 [基盤研究 (C), 課題番号 15560159], および平成 15 年度財団法人カシオ科学振興財団の補助を受けたことを記し、謝意を表す。

#### 文 献

- (1) Rey, A. D. and Denn M. M., Jeffrey-Hamel flow of Leslie-Ericksen nematic liquids, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol. 27 (1988), pp. 375-401.
- (2) Chono, S., Tsuji, T. and Denn, M. M., Numerical simulation of planar contraction flow of nematic liquid crystals, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 60, No. 574 (1994), pp. 1944-1950.
- (3) Chono, S., Tsuji, T. and Denn, M. M., Spatial development of director orientation of tumbling nematic liquid crystals in pressure-driven channel flow, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol. 79 (1998), pp. 515-527.
- (4) Koyama, K. ed., *Development of electro-rheological (ER) fluids*, (1999), CMC.
- (5) Tsuji, T. and Chono, S., Numerical simulation of nematic liquid crystalline flow between parallel plates under a magnetic field, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 69, No. 688 (2003), pp. 2649-2656.
- (6) Brochard, F., Backflow effects in nematic liquid crystals, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, Vol. 23 (1973), pp. 51-58.
- (7) Berreman, D. W., Liquid-crystal twist cell dynamics with backflow, *J. Appl. Phys.*, Vol. 46 (1975), pp. 3746-3751.
- (8) Ericksen, J. L., Anisotropic fluids, *Arch. Ration. Mech. Anal.*, Vol. 4 (1960), pp. 231-237.
- (9) Ericksen, J. L., Conservation laws for liquid crystals, *Trans. Soc. Rheol.*, Vol. 5 (1961), pp. 23-34.
- (10) Leslie, F. M., Some constitutive equations for liquid crystals, *Arch. Ration. Mech. Anal.*, Vol. 28 (1968), pp. 265-283.
- (11) Knepe, H., Schneider, F. and Sharma, N. K., Rotational viscosity  $\gamma_1$  of nematic liquid crystals, *J. Chem. Phys.*, Vol. 77 (1982), pp. 3203-3208.
- (12) Knepe, H., Schneider, F. and Sharma, N. K., A comparative study of the viscosity coefficients of some nematic liquid crystals, *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.*, Vol. 85 (1981), pp. 784-789.
- (13) Karat, P. P. and Madhusudana, N. V., Elasticity and orientational order in some 4'-n-alkyl-4-cyanobiphenyls (part II), *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, Vol. 40 (1977), pp. 239-245.
- (14) Editors for handbook of liquid crystals, *Handbook of liquid crystals*, (2000), pp. 209, Maruzen.
- (15) Chono, S. and Tsuji, T., Liquid crystal flow forming mechanism, method of forming same, and object moving mechanism using liquid crystal flow, Japan Patent No. 3586734 (Aug. 20, 2004).