

卒業論文要旨

液晶モータ駆動の数値シミュレーション

システム工学群

流体工学研究室 1200119 能見 真衣佳

1. 緒言

液晶に外部電場を印加すると背流と呼ばれる流動が誘起される。近年、電場を印加した際に誘起される背流を利用した直動モータおよび回転モータが提案され、実用化に向けた研究が行われている⁽¹⁾。

液晶アクチュエータは、平行平板間等に液晶を充填し、電場を印加した際の背流による粘性応力を利用して液晶に接した物体を接線方向に駆動することができる。これまでに、液晶アクチュエータの駆動実験を通じて、印加電圧、電圧波形、電圧周波数といった入力パラメータがアクチュエータの駆動特性を及ぼす影響が調べられてきた⁽²⁾。一方、駆動源である液晶材料の物性値も、液晶アクチュエータの駆動特性を左右する要因の一つである。しかし、従来の研究で用いられた液晶は 4-Cyano-4'-pentylbiphenyl (5CB) のみであり、液晶の物性値の関係を明らかにする必要がある。

本研究では、液晶の物性値の内、背流挙動に強く影響する誘電率、弾性係数、および粘性係数に着目する。これらの物性値をパラメータとし、液晶アクチュエータ内の液晶背流挙動の数値シミュレーションを行い、背流に及ぼす液晶物性値の影響を明らかにする。さらに、アクチュエータに適した液晶物性値についても言及する。

2. 数値計算法

電場印加時の上下平行平板間の液晶流動と平板の運動の連立解析を行うことで、液晶アクチュエータ駆動のシミュレーションを行う。液晶流動の支配方程式である、連続の式および流れの運動方程式を以下に示す。

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

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

ここで、 \mathbf{v} は速度ベクトル、 ρ は流体密度、 D/Dt は実質微分、 p は圧力である。偏差応力テンソル $\boldsymbol{\tau}$ は Leslie-Ericksen 理論⁽³⁾ -⁽⁵⁾より以下の式で与えられる。

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

ここで $\alpha_1 \sim \alpha_6$ は粘性係数、 \mathbf{n} は局所的な分子の配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、 \mathbf{N} はディレクタと流体の相対角速度ベクトル、 $\boldsymbol{\Omega}$ は渦度テンソル、 F は配向場の弾性ひずみに基づく単位体積当たりの Frank の弾性自由エネルギー密度であり、以下の式で与えられる。

$$F = \frac{1}{2} K_1 (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_2 (\mathbf{n} \cdot \nabla \cdot \mathbf{n})^2 \quad (4)$$

$$+ \frac{1}{2} K_3 |\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n}|^2$$

ただし第 1 項はディレクタの広がり変形、第 2 項はねじれ変形、第 3 項は曲げ変形に対応し、 K_1 、 K_2 、 K_3 は広がり、ねじれ、曲げ弾性定数である。Leslie-Ericksen 理論では分子配向場と速度場が相互に影響を及ぼしあうために、ディレクタの角運動方程式を導入する。

$$\mathbf{0} = \mathbf{n} \times \left\{ \Delta \epsilon \mathbf{n} \cdot \mathbf{E} \mathbf{E} - \frac{\partial F}{\partial \mathbf{n}} + \nabla \cdot \frac{\partial F}{\partial \nabla \mathbf{n}} + (\alpha_3 - \alpha_2) \mathbf{N} - (\alpha_5 - \alpha_6) \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} \right\} \quad (5)$$

ここで、 $\Delta \epsilon$ は誘電率異方性、 \mathbf{E} は液晶に印加される電場強度である。一方で、上部平板の運動方程式は以下で与えられる。

$$m \frac{dU}{dt} = \tau_w S - \text{sgn}(U) \mu m g \quad (6)$$

ここで、 m は上部平板の質量、 S は上部平板の面積、 U は上部平板の駆動速度、 τ_w は液晶が上部平板に及ぼすせん断応力、 μ は摩擦係数である。

図 2 に本研究で用いた二重円筒の計算モデルおよび座標系を示す。外筒面及び内筒面に配向処理を行った液晶を円筒内に充填し、円筒間に電場を印加した時の液晶の速度場および内筒に生じるせん断応力を解析する。ここで、円筒間距離に対して、円筒の周の長さは十分に長いと見做し、円筒半径方向の 1 次元モデル化を行う。内外筒面での分子配向は任意に設定でき、電場などの外力によって変化しないものとする。計算条件として、円筒間距離 ($H=5\mu\text{m}$) に図 1 に示すパルス電圧 (電圧 $V=10\text{V}$ 、周波数 $f=1000\text{Hz}$ 、デューティ比 $D=20\%$) が印加される場合について数値シミュレーションを行った。

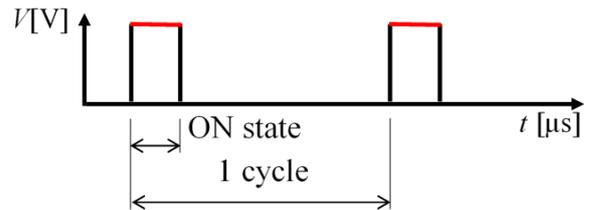


Fig. 1 The cycle of voltage pulse

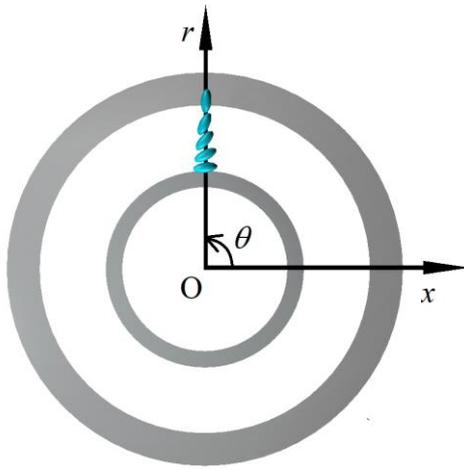


Fig. 2 Calculating area and coordinate system

液晶には 6 個の粘性係数, 3 個の弾性定数, 誘電率異方性の合計 10 個の物性値が存在するが, これらの影響を独立に考慮することは, 非常に複雑である. そこで簡略化のために, 粘性, 弾性, 誘電率に対して, 表 1 に示す 5CB の物性値を基準とする 3 個の倍率 C_α , C_K , C_ϵ を導入した. すなわち $\alpha_i = C_\alpha \alpha_i^{5CB}$, $K_i = C_K K_i^{5CB}$, $\Delta\epsilon = C_\epsilon \Delta\epsilon_i^{5CB}$ とし, $C_\alpha = 0.05 \sim 20$, $C_K = 0.25 \sim 2.0$, および $C_\epsilon = 0.2 \sim 5.0$ の範囲について解析を行う.

Table 1 Material constants of 5CB

(mPa · s)						(pN)			(pF/m)
α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	K_1	K_2	K_3	$\Delta\epsilon$
0	-8.6	-0.4	8.9	5.9	-3.1	6.4	3.8	8.6	100

3. 計算結果および考察

図 3(a)~(e)に, 内筒面にて 0° , 外筒面にて 90° となる分子配向処理を行った場合における, 分子配向場と速度場, 内筒面に生じるせん断応力の時間変化を示す. 電場周期の開始時刻 $t = 0\mu\text{s}$ にて $V=0\text{V} \rightarrow 10\text{V}$ に変化して電場 ON 状態となり, ON 状態の時間周期の終了時刻 $t = 50\mu\text{s}$ にて $V=10\text{V} \rightarrow 0\text{V}$ と変化する. ON 状態開始直後, 分子配向は電場の向きにそろそろように変化するとともに正方向の速度場が表れた. その後, OFF 状態になると分子配向は元の状態に戻るよう変化し, 慣性による物と考えられる逆向き速度場が形成された.

4. 結言

本研究の数値解析により, 電場の ON, OFF により液晶の速度場の方向を変化させられると分かった.

参考文献

- (1) 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 1 報, 流動の発生とそのメカニズム)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 72(2006), pp. 96-101.
- (2) 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 編, Vol. 77 (2011), pp.1758-1766.
- (3) Ericksen, J.L, Arch Ration. Mech. Anal., 28 (1968), 231.
- (4) Ericksen, J.L, Trans.Soc.Rheol, 5(1961),23.
- (5) de Gennes, P.G. and Prost, J., The Physics of Liquid Crystals, 2nd Ed, Clarendon Press, Oxford (1993).

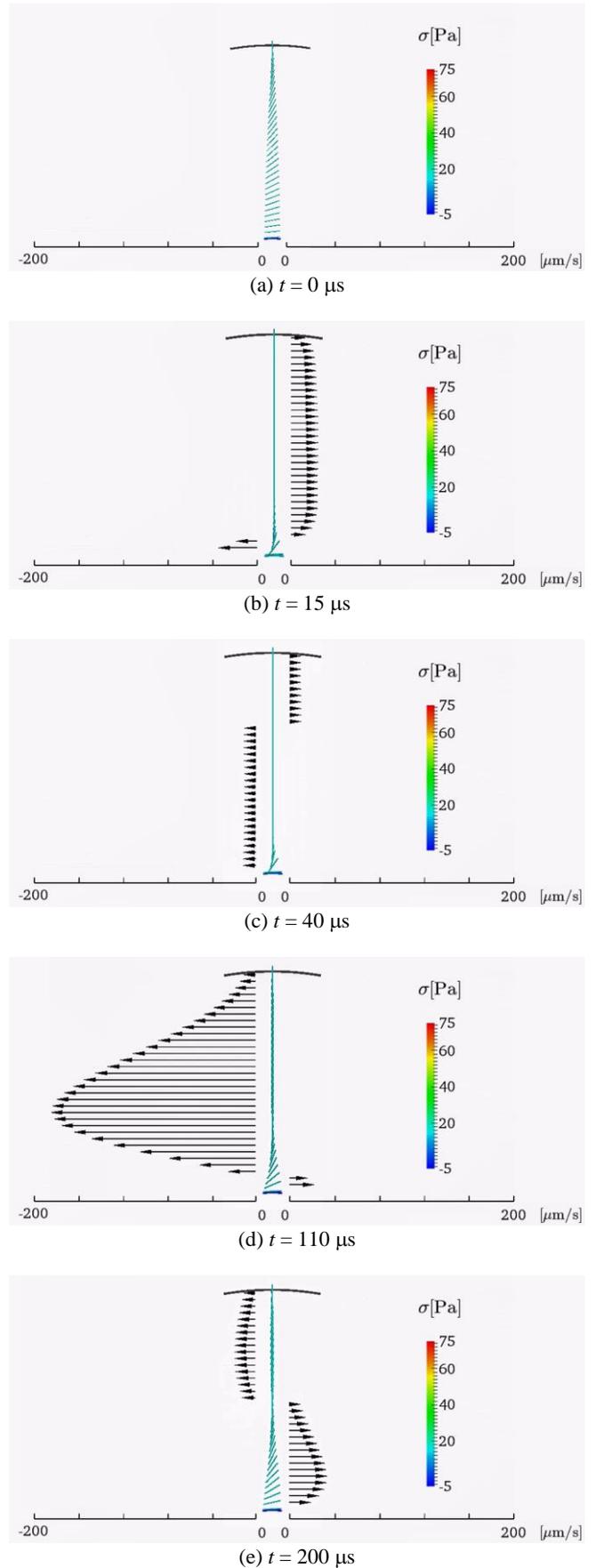


Fig. 3 A result of calculating director distribution and shear stress in the double cylinder