

1. 緒言

液晶の背流効果を応用した新しい液晶デバイスとして、二枚の平行平板間に充填した液晶にパルス電場を印加し、上部平板を駆動させる液晶アクチュエータが提案されている⁽¹⁾。液晶アクチュエータは容易に小型化でき、形状適合性に優れるため、マイクロロボットや先端医療機器などへの応用が期待できる。液晶アクチュエータを開発する上で最適制御、最適設計を行う条件の解明は必須であり、そのためには駆動中の分子挙動および液晶流動に関する詳細な情報が必要である。本研究では、二枚の平行平板間に充填した液晶にパルス電場を印加した場合の数値解析を行う。そして、駆動中の分子挙動、上部平板駆動速度を明らかにし、液晶アクチュエータの最適制御を行うための駆動条件を吟味する。

2. 基礎方程式

非圧縮性流体を記述する連続の式および運動方程式を以下に示す。

$$\nabla \mathbf{v} = 0 \tag{1}$$

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

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、 \mathbf{F} は電場による外力ベクトルである。偏差応力テンソル $\boldsymbol{\tau}$ は Leslie-Ericksen 理論を用いると次式で与えられる。

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

ここで \mathbf{n} はディレクタと呼ばれる液晶分子の局所的平均配向方向を示す単位ベクトルである。 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ は Leslie 粘性係数、 \mathbf{A} は変形速度テンソル、 \mathbf{N} は流体とディレクタの相対角速度ベクトル、 F はディレクタ配向場の弾性歪みに基づく単位体積当たりの自由エネルギー密度である。また、液晶分子の回転に伴い流動が誘起されるため、液晶分子の角運動方程式を求める必要がある。Leslie-Ericksen 理論では \mathbf{n} を用いて次式で表される。

$$\mathbf{0} = \mathbf{n} \times \left\{ \mathbf{G} - \frac{\partial F}{\partial \mathbf{n}} + \nabla \cdot \frac{\partial F}{\partial \nabla \mathbf{n}} + (\alpha_3 - \alpha_2) \mathbf{N} - (\alpha_5 - \alpha_6) \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} \right\} \tag{4}$$

ここで \mathbf{G} はディレクタに働く外トルクである。また、本研究で用いた上部平板の運動方程式を以下に示す。

$$m \frac{dU}{dt} = \begin{cases} 0 & (U(t) = 0, \tau_w A < \mu_s mg) \\ \tau_w A - \text{sgn}(U) \mu_k mg & (\text{others}) \end{cases} \tag{5}$$

ここで m は上部平板質量、 U は上部平板駆動速度、 τ_w は液晶が上部平板に及ぼすせん断応力、 A は上部平板面積、 g は重力加速度、 μ_s は静止摩擦係数、 μ_k は動摩擦係数である。

図 1 に本研究で用いた流れ場および座標系を示す。ディレクタ \mathbf{n} は x - y 面成分のみとし、電場ベクトル \mathbf{E} は電圧 V を y 軸方向に印加するため y 軸方向成分のみとなる。さらに、速度ベクトル \mathbf{v} は x 軸方向成分のみとなり、それぞれ以下の式

で表すことができる。

$$\mathbf{n} = (n_x(t, y), n_y(t, y), 0)^T \tag{6}$$

$$\mathbf{E} = (0, E, 0)^T \tag{7}$$

$$\mathbf{v} = (u(t, y), 0, 0)^T \tag{8}$$

境界条件として上下平板壁面で $\mathbf{n} = (\cos 5^\circ, \sin 5^\circ, 0)$ とし、上部平板壁面で $u = U$ 、下部平板壁面で $u = 0$ のすべりなし条件とする。また、初期条件として平板間で $\mathbf{n} = (\cos 5^\circ, \sin 5^\circ, 0)$ 、 $u = 0$ とした。計算条件として印加電圧 $V = 10\text{V}$ 、周波数 $f = 1 \sim 1000\text{Hz}$ のパルス波、平板間隔 $H = 10\mu\text{m}$ 、デューティ比は 5%、上部平板質量 $m = 0.04675\text{g}$ 、上部平板面積 $A = 100\text{mm}^2$ 、静止摩擦係数 $\mu_s = 0.28$ 、動摩擦係数 $\mu_k = 0.196$ とする。

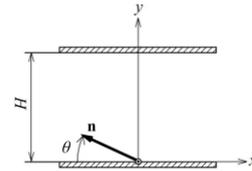


Fig1. Flow geometry and coordinate systems

3. 計算結果および考察

図 2(a), (b) に $f = 10\text{Hz}$ および $f = 100\text{Hz}$ での上部平板の位置の時間変化を示す。上部平板は電圧印加時に大きく前進し、電圧解放時に少し後退している。また、 $f = 10\text{Hz}$ では上部平板が $t = 0\text{s}$ から定常周期運動をしているのに対し、 $f = 100\text{Hz}$ では定常周期運動に至るまでに約 0.07s を要する。これは、 $f = 100\text{Hz}$ では $f = 10\text{Hz}$ と比べて一周周期当たりの電圧印加解放時間が短いため、液晶分子の回転挙動が定常に至るまでに時間を必要とすると考えられる。

図 3 に上部平板駆動速度の周波数依存性を示す。周波数の増加に伴い平板速度は急激に増加し、 $f = 100\text{Hz}$ 付近で一旦減少した後再び増加し、約 $f = 110\text{Hz}$ で最大速度約 $100\mu\text{m/s}$ を示す。

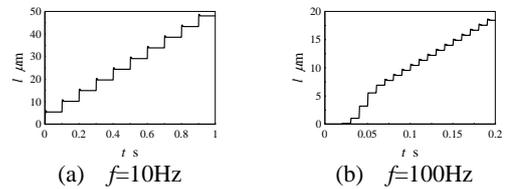


Fig2. Moved distance of the upper plate

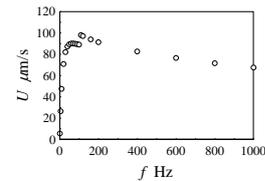


Fig3. Moved velocity of the upper plate

参考文献

(1). 蝶野成臣, 辻知宏, 日本機械学会論文集(B編), 72(2006), pp.656-661.