

卒業論文要旨

液晶の円管内流れの数値解析

流体力学研究室

吉岡利樹

1. 緒言

液晶ディスプレイに代表される液晶製品の製造において、液晶を輸送するプロセスなどに時間を要しており、生産効率低下の一因となっている。そこで液晶流れの解析技術を確立し、最適な流動条件の同定が必要となる。しかしながら、液晶は分子の流れ方向に対する分子配向軸の向きにより速度場が依存する複雑流体であり、その解析は困難である。つまり、実際の液晶製品の製造プロセスにおける複雑な流路形状や流動条件に対応するために、液晶流の解析を多岐にわたって行い、液晶流動に関する幅広い知見を得ることが重要である。

そこで本研究では、液晶の円管内流れの数値計算を行い、速度場と液晶分子の配向との関係を明らかにするとともに、液晶製品の生産効率向上についての提案を行う。

2. 基礎方程式と計算条件

基礎方程式である連続の式および運動方程式は、

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

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

である。 \mathbf{v} は速度ベクトル、 ρ は流体の密度、 D/Dt は実質微分、 p は圧力、 $\boldsymbol{\delta}$ は単位テンソルである。また $\boldsymbol{\tau}$ は偏差応力テンソルで、本研究では Leslie 構成方程式⁽¹⁾を用いる。

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

ここで $\alpha_i (i=1\sim 6)$ はレズリ粘度、 \mathbf{n} は液晶分子の平均配向を示す単位ベクトル \mathbf{n} (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、 F は液晶分子の空間的歪みによる液晶分子場の弾性エネルギーである。

図1に解析場の座標系を示す。直径 $D=1.0$ mm の管内に液晶を満たし、 z 方向に圧力勾配 $|dp/dz|$ (以下、 $|P_z|$) を与える場合について計算を行う。 z 軸方向および θ 方向に流れは変化しないものとする。したがって、ディレクタ $\mathbf{n}=(n_r(r), n_\theta(r), n_z(r))$ 、速度ベクトル $\mathbf{v}=(0, v_\theta(r), v_z(r))$ と表される。

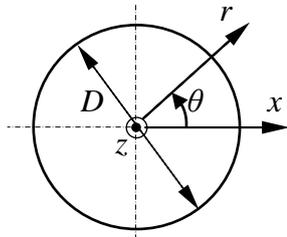


図1 座標系および解析領域

初期条件として、管内の初期流れは $|\mathbf{v}|=(0,0,0)$ m/s、ディレクタの初期配向は $\mathbf{n}=(0,0,1)$ とした。数値計算法として、空間には中心差分法を時間積分には2次精度の Runge-Kutta 法を用いた。時間刻み幅 $\Delta t=5.0 \times 10^{-8}$ s、空間刻み幅 $\Delta r=1.0 \times 10^{-5}$ m、液晶の物性値には 4'-cyanobiphenyl を使用した。境界条件

として、管の中心($r=0$)において $\mathbf{n}=(0,0,1)$ 、周方向速度 $v_\theta=0$ m/s、壁面で $\mathbf{n}=(0,0,1)$ 、速度ベクトル $\mathbf{v}=(0,0,0)$ とした。

3. 結果および考察

図2に $|P_z|=7.0$ Pa/m におけるディレクタ成分 (n_r, n_θ, n_z) の定常値および流量 Q で規格化された z 方向定常速度 $v_z^{LC} (=v_z/Q)$ の r 方向分布を示す。比較のために同様に規格化したニュートン流体の速度分布 v_z^N を併記する。まず、ディレクタ成分に着目する。 $r=0.3$ mm 近傍において $|n_\theta| \approx 1$ であることから、ここでのディレクタはせん断面にほぼ直交した方向を向いていることが分かる。すなわち、out-of-plane 挙動として知られているディレクタがせん断面から逃れる現象が現れている。次に速度分布 v_z^{LC} および v_z^N に注目する。 $r=0.3$ mm 近傍において液晶流の速度勾配がニュートン流体のものと比較して大きくなっている。ここを境に流路中心側で v_z^{LC} は v_z^N よりも大きく、逆に壁面側で v_z^{LC} は v_z^N よりも小さくなっている。ディレクタ分布と対比すると、速度勾配が大きくなっている領域では out-of-plane 挙動を発現していることが分かり、このディレクタがせん断面から逃れる現象が液晶の局所粘度の低下につながっている。

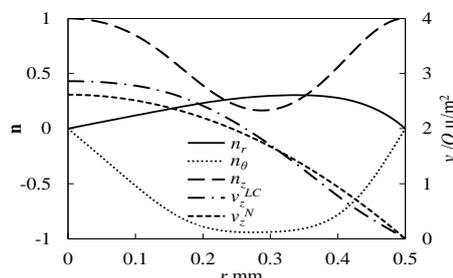


図2 $|P_z|=7.0$ Pa/m における分子配向分布および速度分布

図3に圧力勾配 $|P_z|$ と定常流量 Q の関係を示す。 $|P_z| \leq 5$ と $|P_z| \geq 5$ の領域で Q の勾配が異なっている。 $|P_z|$ に対する Q の勾配が大きい $|P_z| \geq 5$ の領域では、out-of-plane 現象によって流量が増加していると考えられる。このことから、液晶の円管内流動は、 $|P_z| \approx 5$ を境にディレクタがせん断面内に留まる低圧力勾配領域とディレクタがせん断面外に逃れる高圧力勾配領域に大別できることが分かった。

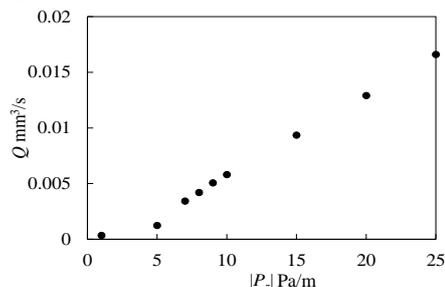


図3 $|P_z|$ による定常流量 Q の変化

文献

- (1) Leslie, F. M., Arch. Ration. Mech. Anal., 28(1968), 265