

液晶アクチュエータの駆動力に関する数値シミュレーション

流体工学研究室 1170089 竹葉 陽南

1. 緒言

近年液晶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)(2)

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液晶流動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。一方、液晶分子配向場の歪による弾性応力を利用すれば、液晶に接した物体に対して法線方向の力を発生することが可能であることが1次元シミュレーションによって確認された。すなわち粘性による接線応力と弾性による法線応力を組み合わせることで、物体を3次的に駆動可能な液晶アクチュエータの実現が可能となる。しかし、液晶分子配向場の歪による弾性応力の解析は、これまで簡易な1次元シミュレーションしか行われておらず、実際のアクチュエータの形態からは程遠い。そのため、3次元シミュレーションを行う必要がある。

本研究では、2枚の平板間に充填した液晶に電場を印加した際の分子配向場の歪が生む、弾性による法線応力について解析する。

2. 数値計算法

液晶の分子配向場は以下の方程式で表される。

$$\mathbf{0} = \mathbf{n} \times \left\{ \mathbf{G} - \frac{\partial F}{\partial \mathbf{n}} + \nabla \cdot \frac{\partial F}{\partial \nabla \mathbf{n}} + (\alpha_3 - \alpha_2) \mathbf{N} - (\alpha_5 - \alpha_6) \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} \right\} \quad (1)$$

上式において、 \mathbf{n} は液晶分子の局所的な平均配向方向を示すディレクタと呼ばれる単位ベクトル、 \mathbf{N} はディレクタと液晶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 Frank の自由エネルギー密度、 \mathbf{G} は電場 \mathbf{E} による単位面積あたりの外力である。

本研究では、液滴の大きさが最大応力にどのような影響を及ぼすのか検証するため、平行平板間隔を固定し、上部平板にかかると力を求める。液晶アクチュエータの駆動力には液晶流動および分子配向場の歪が影響しているが、分子配向場の歪により発生する弾性応力は、電場を印加し配向状態が定常状態となったときに、最大応力が発生すると考えられる。この時、定常状態となるため本研究では流れ場を無視する。また、平板間隔を固定し流れ場も無視するため、充填する液晶の形状は時間的に変化しない。そこで、液滴を円柱形状とモデル化し数値シミュレーションを行う。流れ場を無視するため、偏差応力テンソル $\boldsymbol{\tau}$ は Leslie-Ericksen 理論より

$$\boldsymbol{\tau} = - \frac{\partial F}{\partial \nabla \mathbf{n}} \cdot (\nabla \mathbf{n})^T \quad (2)$$

で与えられる。

図1に本研究で用いた計算モデルおよび座標系を示す。本研究では、水平配向処理を行った平行平板間内に液晶を充填し、 z 軸方向に電場を印加した時の分子配向場および駆動力を解析する。対象を円柱形状とみなすが、円筒座標の場合、中心部分が配向分布において特異点となるため、直交座標を用いる。

境界条件として壁面では、チルト角 5° の x 軸正の方向に水平配向とした。気-液界面では、液滴を円柱形状とみなすため、界面に対して垂直配向とする。ここで、境界において分子配向は、電場などの外力によって変化しないものとする。 H 、 ϕ を数値パラメータとし、 $H=1\sim 10\mu\text{m}$ 、 $\phi=20\sim 100\mu\text{m}$ とする。それぞれ基準値を $H=10\mu\text{m}$ 、 $\phi=100\mu\text{m}$ とする。また、空間メッシュおよび時間メッシュについて、誤差が出ないようメッシュリファインメントを行い、 $dx=dy=1.0\mu\text{m}$ 、 $dz=0.1\mu\text{m}$ 、 $dt=10\mu\text{s}$ と設定した。

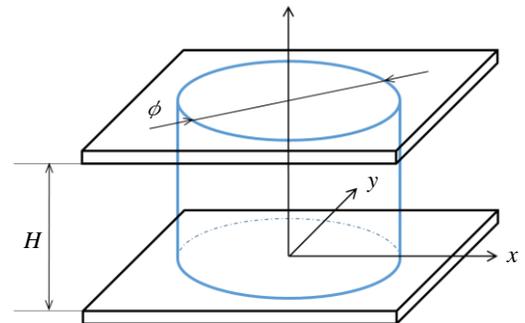


Fig. 1 Calculating area and coordinate system

時間積分には陽解法、空間微分項の離散化には中心差分法を用いる。界面境界では、直交座標のため、格子に境界がない場合がある。そこで、境界外に2次精度の外挿を行うことで中心差分を行う。壁面境界では、片側差分法を用いる。液晶流動の基礎式に 25°C における 4-pentyl-4'-cyano biphenyl (5CB) の物性値を用いる。

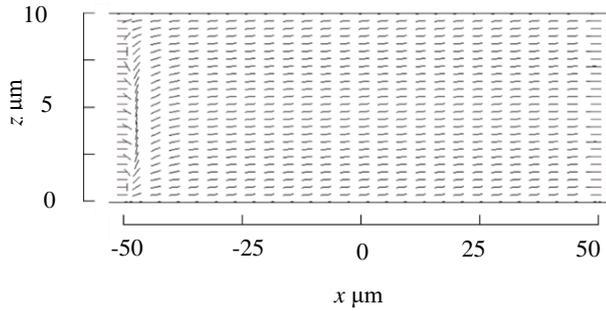
3. 計算結果および考察

平板間隔 $H=10\mu\text{m}$ の平行平板間に 5V の電圧を印加し、液滴直径を $\phi=100\mu\text{m}$ とし計算を行った。図2(a)に電場印加前、(b)に電場印加後の定常状態に至った時の x - z 平面上のディレクタ場を示す。電場印加前、大部分が水平配向処理の影響により壁面のディレクタに対して平行に配向している。一方で、壁面に x 軸正の向きに水平配向を行い、界面では界面に対し垂直配向としたため、 x 軸負の方向の界面でディレクタ場が歪んでいることが分かる。電場印加後、大部分が電場に対して平行に配向しているが、界面付近でのディレクタ場は界面の影響を受け、中央部分のディレクタ場と異なった配向をしていることが分かる。図3に z 軸方向から見た法線応力分布を示す。この時、平板中心部がうける応力は 24.0Pa であった。 x 軸負の方向の界面において中心部よりも発生応力が上回っており、 x 軸正の方向の界面では、わずかに中心部よりも発生応力が下回っていた。図2に示した界面付近でのディレクタ場の歪によって、界面付近の法線応力が変化していると考えられる。

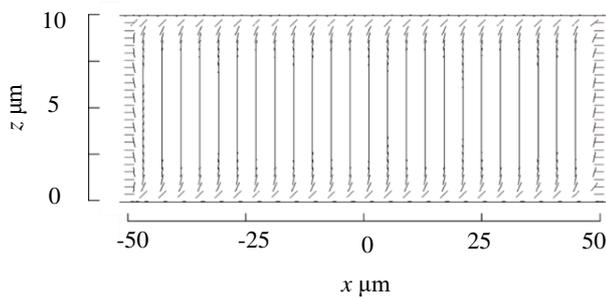
平板間隔 $H=10\mu\text{m}$ 、印加する電圧を 5V と固定し、液滴直径を $\phi=10, 20, 40, 60, 80, 100\mu\text{m}$ とし計算を行った。

図4に1次元計算での発生応力に対する3次元計算での平均発生応力の割合 X を示す. 直径 $20\mu\text{m}$ 以下で発生応力の平均値は 98% 以下となり, 発生応力は低下している. このことより, 直径 $20\mu\text{m}$ 以下の時, 気-液界面の影響が強まり, 発生応力の計算は1次元計算で対応できないことが分かる.

液滴直径を $\phi=100\mu\text{m}$, 印加する電場強度を $0.5\text{V}/\mu\text{m}$ と固定し, 平板間隔を $H=10, 5, 4, 3, 2\mu\text{m}$ とし計算を行った. 図5にそれぞれの条件での上部平板にかかる力と時間変化の関係を示す. 電場強度が一定であるとき, 発生する力の最大値は $H=5\mu\text{m}$ の時に $0.18\mu\text{N}$ に収束した. 図6に液滴中心部分のチルト角の z 軸方向変化を示す. 平板間隔が狭まることで, バルク領域がなくなり, 平板に施した配向処理の影響が強くなっていくことが分かる. そのため, 平板間隔が狭まるにつれて, チルト角の変化量が減少している. これが $H=5\mu\text{m}$ 以下の時に発生する応力が小さくなる原因だと考えられる.



(a) Before apply electric field



(b) After apply electric field

Fig. 2 Director on the x - z plane

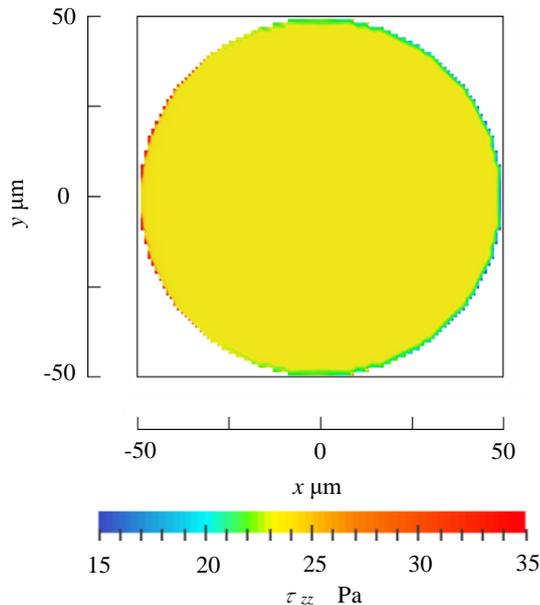


Fig. 3 Distribution map of stress

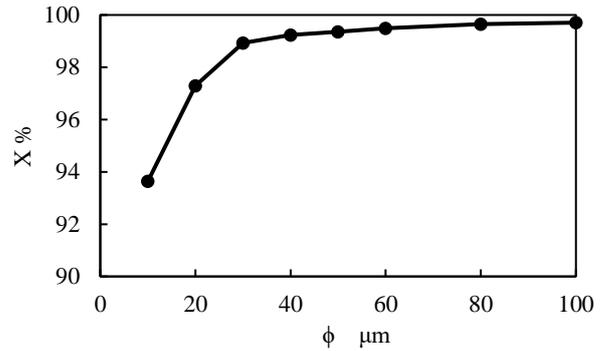


Fig. 4 The ratio 3D calculation to 1D calculation

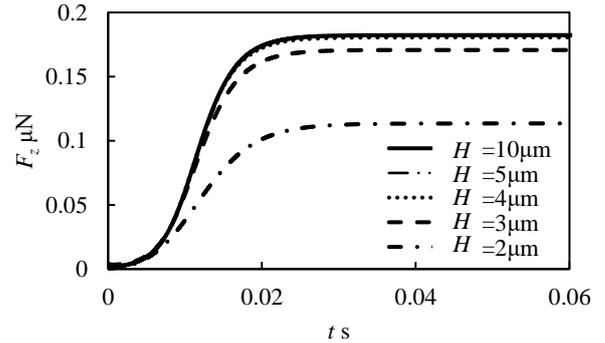


Fig. 5 Effect of gap on driving force

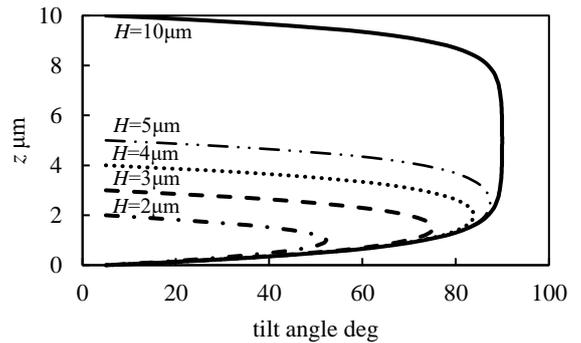


Fig. 6 Effect of gap on tilt angle

4. 結言

本研究では液晶アクチュエータの応用範囲を広げるために, Leslie-Ericksen 理論を用いて平行平板間に充填された液晶に電場を印加した際, ディレクタ分布の歪によって発生する駆動力の3次元シミュレーションを行い次の結果を得た.

1. 界面付近でのディレクタ分布には歪が生じ, それに伴い法線応力の分布にも偏りが生じる.
2. 液滴直径を $20\mu\text{m}$ 以下で界面の影響が強くなりはじめ, 発生駆動力は小さくなる. さらに小さくすると1次元計算では対応できなくなる.
3. 電場強度を一定とした時, 平板間隔 $5\mu\text{m}$ 以下で駆動力が減少する.

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, No.715(2006), pp.656-661.
- (2) 劉春波, 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2報, 各種パラメータの影響),” 日本機械学会論文集 B 編, Vol.72, No.721(2006), pp.2235-2241.
- (3) 折原 宏, 液晶の物理, 内田老鶴圃, (2004)