

液晶アクチュエータの内部流動に関する数値シミュレーション

Numerical simulation of internal flows of liquid crystalline actuators

知能機械システム工学コース

流体工学研究室 1215014 竹葉 陽南

1. 緒言

近年、産業の技術進歩にともない、多種のアクチュエータが開発されてきた。特に、MEMS 技術の発展により、マイクロ・ナノサイズの機械部品の製作が可能となり、極小デバイスの駆動源となるマイクロアクチュエータに関する研究も行われるようになってきた。その1つとして、液晶に外部電場を印加した際に発生する流動を利用した液晶マイクロアクチュエータ⁽¹⁾⁽²⁾が提案されている。液晶アクチュエータには大きく2種類の形態がある。

1つは、固体ケーシング内で液晶流動を発生させることで、固体壁を駆動させる平板駆動型液晶アクチュエータ・液晶モータである。このアクチュエータの駆動方向制御⁽³⁾には、配向・電極パターンニングが必要であり、アクチュエータの構造が複雑化することで、マイクロ化が困難となる課題がある。

他方は、一部自由表面を有し、駆動対象物を内包した液晶滴自体が周囲環境に適応し、変形しながら駆動する無定形液晶アクチュエータ⁽⁴⁾である。無定形液晶アクチュエータは、実験的に駆動することが確かめられたが、アクチュエータの駆動原理・内部流動については解明できておらず、そのシミュレーション手法についても確立されていない。

本研究ではこれら2種類の液晶アクチュエータの実用化を目指し、それぞれのアクチュエータの内部流動に関する数値シミュレーションを行うことで、平板駆動型液晶アクチュエータの新たな駆動方法の提案ならびに無定形液晶アクチュエータのシミュレーション手法の確立を試みる。

2. 数値計算法

2種類の液晶アクチュエータ内部の液晶流動に関して数値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理論より以下の式で与えられる。

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

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、 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。

$$F = \frac{1}{2} K_1 (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_2 (\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_3 |\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n}|^2 \quad (4)$$

ここで右辺第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。

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

ここで、 $\Delta \varepsilon$ は誘電率異方性、 \mathbf{E} は液晶に印加される電場ベクトルである。また、液晶アクチュエータに用いる液晶の物性値には4-Cyano-4'-pentylbiphenyl (5CB)の物性値を用いる。

3. 平板駆動型液晶アクチュエータの駆動方向制御

水平配向処理を行った平行平板間に充填した液晶の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。図1に本研究で用いた計算モデルおよび座標系を示す。ここで、平板間隔に対して平板は十分に広いと見做し、平板間隔方向の1次元モデル化を行う。また、上部平板の運動方程式は以下の式で与えられる。

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

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力、 μ は摩擦係数である。

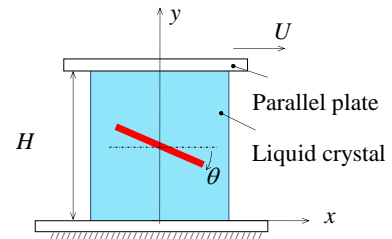


Fig.1 Calculating area and coordinate system

従来の駆動方向制御法は、アクチュエータ構造の複雑化の懸念があった。本研究では、アクチュエータの構造はそのままに、比較的制御の容易な印加電圧波形の制御によって、駆動方向制御法の確立を目指す。

これまでは印加電圧波形に、パルス波が用いられていた。電場印加に伴い、液晶分子が回転し、その分子の回転に伴い背流と呼ばれる液晶流動が誘起される。その後、液晶分子が電場方向に向き終えると背流も停止する。そこで、電場解放を行い、液晶分子を分子場弾性によって元の状態に戻した後に、電場印加を行う。パルス波を用いることで、電場印加と開放を繰り返し、上部平板を断続的に前進させていた。

本研究では、電場解放時にも背流が誘起され、その方向が電場印加時に誘起される背流と反対であることに着目する。電場印加時の背流が電場解放時の背流よりも大きければ前進駆動、電荷印加時の背流が電場解放時の背流よりも小さければ後退駆動となる。この制御を印加電圧波形のスイッチン

グにより行う。本研究では、印加電圧波形に図2に示すのこぎり波を用いる。後退駆動を行うために、電場印加を緩やかに行うことで分子の回転速度を低下させ、誘起される背流を小さくする。また、電場解放を瞬時にを行い、分子の回転速度をパルス波を印加する場合と同様に保つ。

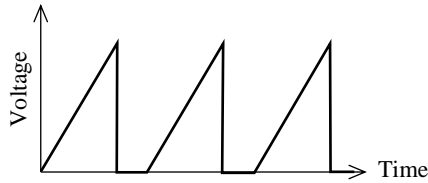


Fig.2 Sawtooth wave for applied voltage

印加電圧波形のパラメータとして、のこぎり波の周波数 $f=20\sim 100\text{Hz}$ 、デューティ比 $D=40\sim 100\%$ 、印加電圧 $V=4\sim 15\text{V}$ を入力パラメータとし数値シミュレーションを行う。

図3に $f=50\text{Hz}$ 、 $D=100\%$ 、 $V=10\text{V}$ ののこぎり波、 $f=50\text{Hz}$ 、 $D=50\%$ 、 $V=10\text{V}$ のパルス波を印加した場合の上部平板の駆動位置の時間変化を示す。図3より、のこぎり波を印加した場合、のこぎり波の1周期目に上部平板は前進し、その後は前進と後退を繰り返しながら巨視的に後退する。のこぎり波1周期目は、液晶分子が壁面配向と完全に平行になっているため、前方方向への背流が大きくなる。上部平板の挙動が定常状態に至ると、液晶分子が壁面配向と平行になる前に、電場が印加されるため、前方方向への背流はのこぎり波1周期目よりも小さくなる。また、パルス波を印加した場合と比較すると、のこぎり波を印加した場合は前進駆動距離が抑制される。印加電圧波形をのこぎり波とすることで、前進が抑制され、巨視的にみると上部平板は後退する。

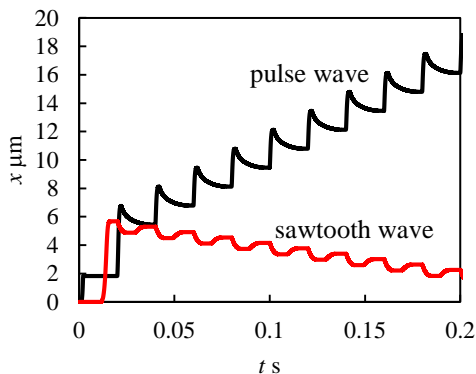


Fig.3 The effect of voltage waveform on the upper plate movement

図4に最大電圧 10V ののこぎり波を印加した場合の、周波数およびデューティ比と平均駆動速度 U との関係を示す。前進駆動速度は周波数の増加に伴い増加する。一方で、後退駆動速度は周波数に対してピーク値を持ち、 $D=70\%$ 以降では $f=40\sim 50\text{Hz}$ において最大となる。周波数が高い場合、のこぎり波の挙動はパルス波の挙動とほぼ一致し、前進駆動量が増加する。周波数が低い場合は、電場解放時間が長くなり後退駆動量が増加するため、のこぎり波1周期分の駆動距離は増加するが、平均駆動速度は低下する。そのため、後退駆動速度は周波数に対してピーク値を持つ。また、デューティ比の増加に伴い駆動速度は低下し、 $D=70\sim 80\%$ において上部平板は後退駆動へと転じる。デューティ比が低い場合、のこぎり波はパルス波の挙動とほぼ一致し、前進駆動量が増加する。デューティ比が高い場合、電場解放時間が短くなり、液晶分子が壁面と完全に平行になることを防ぐため、電場印加時の前進駆動距離が低下する。そのため、デューティ比の増加に伴

い平均駆動速度は単純に低下する。

図5に周波数 50Hz 、デューティ比 100% ののこぎり波を印加した場合の、最大電圧と平均駆動速度 U との関係を示す。図5より最大電圧によって、駆動方向制御が可能であることが分かる。最大電圧が低い場合、上部平板は前進する。最大電圧が低い場合、平板付近の液晶分子は印加電場よりも壁面配向の影響を強く受け、ほとんど乱れない。そのため、電場解放時の弾性による戻り効果が小さく、電場解放時の背流が小さくなり、上部平板は前進駆動する。最大電圧が高い場合、ディレクタ場が印加電場の影響を強く受け、電場解放時の弾性による戻り効果が大きくなるため、電場解放時の後退駆動量が増加する。一方で最大電圧が増加すると、電場印加時に誘起される背流も増加する。結果として、最大電圧の増加に伴い、平均駆動速度はほぼ一定値に収束する。

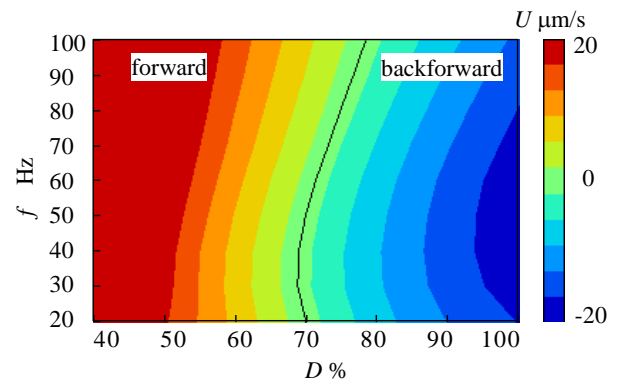


Fig.4 The effect of frequency and duty ratio on the the average speed U , for $V=10\text{V}$

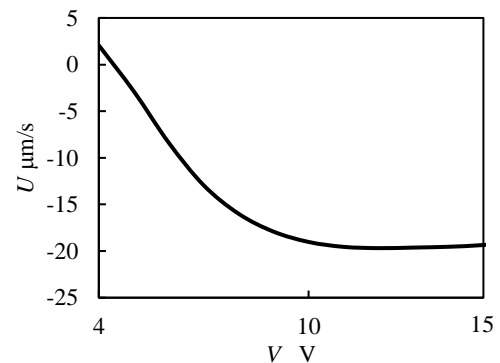


Fig.5 The effect of voltage on the the average speed U for $f=50\text{Hz}$ 、 $D=100\%$

4. 無定形液晶アクチュエータの解析手法

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、平板間隔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。無定形液晶アクチュエータは変形しながら駆動するため、液晶滴の変形を考慮した3次元解析が求められる。

3次元解析を行う上で、液晶分子の向きが急激に変わる構造(欠陥構造)が発生する可能性がある。液晶分子の対称性により、ディレクタに正負はないが、単位ベクトル \mathbf{n} と定義することで数学的には正負を有してしまい、ディレクタの正負に起因して数値計算特有の欠陥構造が発生する可能性がある。そこで、本研究ではディレクタをテンソルとして扱うことで、 $\mathbf{n}=-\mathbf{n}$ を満たし、数値計算に起因する欠陥構造が発生しない計算手法を提案する。以下の式にディレクタをテンソルとして表記した \mathbf{m} を示す。

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} m_{xx} & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{xy} & m_{yy} & m_{yz} \\ m_{xz} & m_{yz} & m_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x^2 & n_x n_y & n_x n_z \\ n_x n_y & n_y^2 & n_y n_z \\ n_x n_z & n_y n_z & n_z^2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

本研究では、ディレクタを \mathbf{m} と定義して計算した場合と、 \mathbf{n} と定義して計算した場合とを比較し、ディレクタ場へのどのような影響がみられるのかを確認し、計算手法の妥当性を検証する。ディレクタ場に与える影響のみを確認するため、本研究では発生する流動・表面張力を無視する。そこで、充填する液晶を時間的に変化しない円柱形状とモデル化し数値シミュレーションを行う。図6に計算モデルならびに座標系を示す。

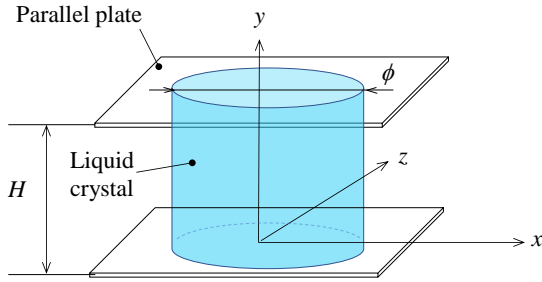


Fig.6 Calculated area and coordinate system

境界条件として壁面では、 x 軸方向に水平配向とした。 \mathbf{n} で定義する場合は、 x 軸正の方向に配向する。気-液晶界面では、充填する液晶材料(5CB)の特性より、界面に対して垂直に配向する。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。

平板間隔 $H=10\mu\text{m}$ の平行平板間に液滴直径 $\phi=20\mu\text{m}$ の液晶滴を充填した場合についてシミュレーションを行った。図7(a)に \mathbf{n} 、(b)に \mathbf{m} と定義して計算を行った場合の $y=5\mu\text{m}$ での x - z 平面上のディレクタ場を示す。(a)に関しては、ディレクタの正負を明らかにするため矢印を用いて可視化している。ディレクタは壁面配向の影響を強く受け、 x 軸方向に配向する。ディレクタの定義方法によって発生する欠陥構造が異なり、 \mathbf{n} の場合 x 軸負の方向1カ所に発生し、 \mathbf{m} の場合 z 軸正負に2カ所発生する。 \mathbf{n} の場合、境界条件として壁面では x 軸正方向に、気-液晶界面では、液滴中心を起点に放射状方向に配向させている。この境界条件の影響により、 x 軸上でディレクタが 180° 変化するため、欠陥構造が発生したと考えられる。 \mathbf{m} の場合、 x 軸上では欠陥構造は発生しない。 \mathbf{n} の場合、ディレクタの周期は 2π であるのに対し、 \mathbf{m} の場合、周期は π となる。このため、ディレクタの正負の影響がなくなり、 \mathbf{m} の場合には x 軸上で欠陥構造が発生しない。一方で、壁面配向と気-液晶界面のディレクタが 90° 変化する z 軸上で欠陥構造が発生する。ディレクタの正負を考えなければ、境界条件は左右対称に設定しているため、ディレクタ場が左右対象になっていない \mathbf{n} の場合は、数値計算に起因する欠陥構造であると考えられる。そのため、 \mathbf{m} の場合が計算手法として妥当である。

5. 結言

本研究では、2種類の液晶アクチュエータの実用化に向け、平板駆動型液晶アクチュエータの新たな駆動方法の提案と無定形液晶アクチュエータのシミュレーション手法の確立を目的とし、液晶アクチュエータの内部流動に関する数値シミュレーションを行い、次の結果を得た。

- 平板駆動型液晶アクチュエータ

1. 印加電圧波形をのこぎり波とすると、後退方向駆動が可能となる。

2. 後退駆動速度はのこぎり波の周波数に対してピーク値を持つ。
3. 後退駆動速度はのこぎり波のデューティ比の増加に伴い、増加する。
4. のこぎり波の最大電圧の増加に伴い、平均駆動速度は減少し、さらに増加するとほぼ一定値に収束する。
5. 壁面配向・電極パターンニングではなく、印加電圧波形のみの制御により平板駆動型液晶アクチュエータの駆動方向制御が可能であることを発見した。

- 無定形液晶アクチュエータ

1. 液晶流動の3次元数値シミュレーションにおいて、ディレクタ場の解析にベクトル \mathbf{n} を用いる場合とテンソル \mathbf{m} を用いる場合では、異なる欠陥構造が発生する。
2. 液晶流動の3次元数値シミュレーションにおいて、ディレクタ場の解析にテンソル \mathbf{m} を用いることで、数値計算に起因する欠陥構造の発生を防ぐことが可能である。

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) 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, No.781(2011), pp.1758-1766.
- (3) 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6報, 駆動方向制御),” 日本機械学会論文集, Vol. 81 (2015), No. 823 pp. 14-00627.
- (4) 山口淳, 蝶野成臣, 辻知宏, “液晶を用いた無定形アクチュエータの開発”, 第91期日本機械学会流体工部門講演論文集.

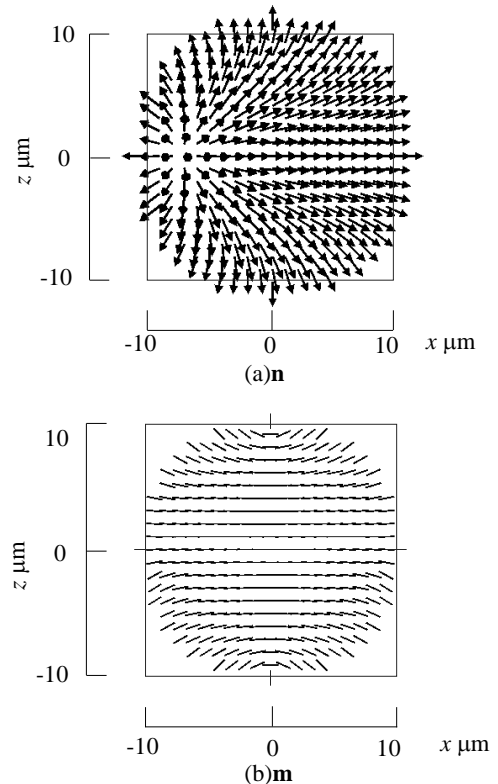


Fig.7 Director on the x - z plane