

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19360091

研究課題名（和文） 液晶の力学特性の評価とソフトアクチュエータの開発

研究課題名（英文） Evaluation of mechanical properties of liquid crystals and development of soft-actuators

研究代表者

蝶野 成臣（CHONO SHIGEOMI）

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号：20155328

研究成果の概要：

液晶に電場を印加した際に発生する流動を応用することで、極小サイズの駆動装置（アクチュエータ）の開発を試みた。電圧 3～10 V、周波数 1～1000 Hz の矩形波電圧を液晶に印加して、質量約 0.05g のガラス平板を運動させた。測定は偏光顕微鏡下で行った。印加電圧が大きいほど平板は高速で運動し、本実験範囲内では周波数が約 100 Hz のとき、平板は最大速度 90  $\mu\text{m/s}$  で運動することがわかった。また、計算結果と実験結果は満足に一致した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
2008 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
年度			
年度			
年度			
総計	15,500,000	4,650,000	20,150,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：液晶，マイクロ・ナノデバイス，アクチュエータ

## 1. 研究開始当初の背景

液晶は棒状の分子から構成されている。速度こう配（せん断流，伸長流）が液晶分子に作用すると、個々の分子は流れに沿うように回転して配向方向を変えることはよく知られている。平成 13 年、蝶野（研究代表者）と辻（分担者）は、この逆現象、すなわち液晶分子が配向方向を変えると（例えば電場印加によって）、そこに速度こう配が発生するののかということを発想し、数値計算を開始した。すなわち、平板間に液晶を充填し、すべての分子が平板の平面方向に配向している状態に電場を印加すると、壁面近傍を除く液晶分子は重心まわりに回転して平面に垂直方向に配向する。その結果、流動が発生することを見

出し特許出願した。平成 15 年～16 年、可視化実験に成功し、上述の計算結果を追認した。平成 17 年～18 年、流動発生メカニズムを解明し、さらに分子がツイスト配向状態にある液晶に電場を印加すると速度は一方向分布となり、配向状態によって速度分布を制御できることがわかった。

上記の現象を応用すれば、従来の機構と全く異なるアクチュエータ、すなわち

- ・構造が極めてシンプル
- ・自在形状
- ・極小化が容易
- ・低電圧（数ボルト）で駆動

という特徴を有するアクチュエータの開発が可能である。特に低電圧、低消費電力で駆動

できるため、生体内での使用に適している。

液晶を力学的に応用した研究は極めて少ないが皆無ではない。その中からいくつか例を挙げれば、電気粘性（ER）効果を利用したブレーキやダンパーの開発や、液晶ゲル・液晶エラストマーを利用した人工筋肉の開発を目指した研究が過去に見られる。しかし前者は他に駆動源を有する受動的機械要素としての利用であり、後者はその挙動が固体に近く液晶特有の柔軟性が生かされていない。

本研究が目指しているのは、液晶そのものが駆動源（換言すれば液晶という媒体を介して電気エネルギーを運動エネルギーに変換するデバイス）でありセンサであるソフトMEMS、ソフトNEMSの開発である。システム主要部を液体のように振る舞う液晶が占めているので、スケールダウンが容易であり、また自由自在な形状変化が可能である。この点が本研究の最もユニークな特色である。

“液晶”という言葉は特定の物質の固有名詞でなく、固体・液体・気体に続く物質第4番目の相を表現する言葉である。固体については“固体力学（または材料力学）”が、液体と気体については“流体力学”という学術分野が確立されている。本研究は“液晶力学”という新規学術分野の構築に繋がる独創的研究である。

液晶駆動による“しなやかな”マイクロアクチュエータの実現は、超精密化、超小型化が要求されている次世代マイクロロボット、先端医療機器、高度情報機器等の開発を大幅に加速するとともに、医療機器メーカー、精密機器メーカー等の製造業や液晶合成化学業界、情報産業等も巻き込んだ新たな市場の創出をも可能にする。さらに今後実用化へ至る過程で本研究を核とした新しい周辺技術の萌芽も期待でき、社会的・経済的波及効果は極めて高い。

## 2. 研究の目的

液晶研究はディスプレイ開発を目的になされてきたため、液晶の誘電率や屈折率のような電気的・光学的物性値は広範に測定されているが、力学物性はほとんど分かっていない。そこで本研究では、まず液晶の力学特性、特に粘性係数を精密測定する。続いてアクチュエータとして

- ・平板移動装置
- ・モータ

の2タイプを取り上げ、それらの動特性を数値計算と実験の両面から検討する。最後に、これまでの基礎研究により生み出された基本技術の実用化を目指して、液晶アクチュエータの研究室プロトタイプを設計・製作する。以上が本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

### (1) 液晶の粘度測定

まず、液晶の粘性係数を精密測定する。粘性係数は、液晶分子を所定の方向に強制的に配向させる電場印加装置を具備した粘度計で測定する。

### (2) 数値計算

平行平板間流れ、同心二重円管流れを計算するためのプログラミングを行う。本研究室で従来構築した各種プログラムを利用することでプログラミングの効率化・省力化を図る。

印加電圧、液晶の物性値（粘性係数、弾性定数、誘電率の異方性等）、アクチュエータの寸法等を広範囲に変化させて、壁面せん断応力、壁面移動速度、回転角速度、トルク等の動特性を数値計算用コンピュータで見積もる。

### (3) アクチュエータの設計

平板移動装置については平板の間隔が、モータについては内外筒の間隔が数 $\mu\text{m}$ ～数百 $\mu\text{m}$ のものを各約10種類製作する。製作の容易さから全体寸法をミリオーダーに設定するが、液晶部の間隔が数 $\mu\text{m}$ ～数百 $\mu\text{m}$ であるので、マイクロサイズへのスケールダウンは可能である。

### (4) アクチュエータの製作

基本的には前項の設計に基づいて製作するが、実際には試行錯誤の繰り返しで完成することになる。最も困難な点は壁面でのラビング処理である。壁面での分子配向角は配向境界条件として極めて重要であり、アクチュエータ内の配向状態を決定する要因の一つである。壁面配向角の設定はスピンコートによるポリイミド膜の塗布とラビング装置によるラビング処理によって行われる。モータの製作に必要な曲面用ラビング装置は市販されていないので特注する予定であるが、それでも曲面壁のラビング処理が満足に行われない場合は、二重円筒の外筒を半円、すなわち樋状にすることでラビング処理が容易になるように工夫する。

### (5) 動特性の評価

寸法の異なる各10種類のアクチュエータに対して、印加電圧を変化させながら、壁面せん断応力、壁面移動速度、回転角速度、トルク等の動特性を精密測定する。応力やトルク等の出力値は極めて小さいことが予想されるので市販のトルク計等は使用不可である。そのため平板移動装置では平板の移動量の時間変化から、モータでは回転角の時間変化から出力値を算出する。測定には高速度ビデオカメラを用いる。得られた実測データを計算結果と比較検討すると同時に、液晶アクチュエータとしての評価を行う。

## 4. 研究成果

本研究では、まず液晶の粘性係数を精密測定し、続いてアクチュエータとして“平板移

動装置”と“モータ”を取り上げ、それらの動特性を数値計算で検討し、最後に液晶アクチュエータの研究室プロトタイプを設計・製作して動特性を実測するとともに計算結果と比較検討した。以下に概要を記す。

#### (1) 液晶の粘度測定

粘性係数は、液晶の運動の数値計算を行う場合に最も重要な物性値である。現有設備であるレオロジー測定装置を用いてこれを測定した。電場を印加することによって、液晶分子が流動方向に配向している場合と、速度こう配方向に配向している場合について測定し、配向方向による粘度の違いを確認した。なお、実験に用いた液晶は、4-cyano-4'-n-pentyl biphenyl (5CB) である。

#### (2) 数値計算

平行平板間流れ、同心二重円筒間流れを計算するためのプログラミングを行った。本研究室で従来構築した各種プログラムを利用することでプログラミングの効率化・省力化を図った。印加電圧、液晶の物性値(粘性係数、弾性定数、誘電率の異方性等)、アクチュエータの寸法等を広範囲に変化させて、壁面せん断応力、壁面移動速度、回転角速度、トルク等の動特性を数値計算用コンピュータで見積った。

#### (3) アクチュエータの設計・製作

平板移動装置については平板の間隔が、モータについては内外円筒の間隔が数十 $\mu\text{m}$ ~数百 $\mu\text{m}$ のものを各約10種類製作した。製作の容易さから全体寸法をミリオーダーに設定したが、液晶部の間隔は上記の通りであるので、今後マイクロサイズへのスケールダウンは可能である。最も困難な点は壁面でのラビング処理であった。壁面での分子配向角は配向境界条件として極めて重要であり、アクチュエータ内の配向状態を決定する要因の一つである。壁面配向角の設定はスピンコートによるポリイミド膜の塗布とラビング装置によるラビング処理で行った。

#### (4) 動特性の評価

寸法の異なる10種類のアクチュエータに対して、印加電圧、周波数を変化させながら、壁面移動速度、回転角速度を精密測定した。応力やトルク等の出力値は極めて小さいので市販のトルク計等は使用不可であり、そのため平板移動装置では平板の移動量の時間変化から、モータでは回転角の時間変化から出力値を算出した。測定には高速度ビデオカメラを用いた。その結果、当然のことながら印加電圧が大きいほど平板は高速で運動すること、本実験範囲内では周波数が約100 Hz のとき、平板は最大速度約90  $\mu\text{m/s}$  で運動することが明らかにされた。また、計算結果と実験結果を比較して、両者は満足に一致したことから、今後、アクチュエータの動特性を数値計算によって予測できることがわかった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣, 液晶駆動型マイクロアクチュエータの開発(第3報, 平行平板間速度分布の可視化), 日本機械学会論文集, **75**, B編, 953-958, (2009), 査読有

S. Fu, T. Tsuji and S. Chono, Effect of magnetic fields on out-of-plane orientations of nematic liquid crystalline polymers under simple shear flow, *Molecular Physics*, **107**, 245-252, (2009), 査読有

A. Sunarso, T. Tsuji and S. Chono, Molecular dynamics simulation of backflow generation in nematic liquid crystals, *Applied Physics Letters*, **93**, 244106, (2008), 査読有

S. Fu, T. Tsuji and S. Chono, Effect of magnetic field on molecular orientation of nematic liquid crystalline polymers under simple shear flow, *Journal of Rheology*, **52**, 451-468, (2008), 査読有

S. Chono and T. Tsuji, Proposal of mechanics of liquid crystals and development of liquid crystalline microactuators, *Applied Physics Letters*, **92**, 051905, (2008), 査読有

黒岩正寛, 蝶野成臣, 辻知宏, 欠陥対消滅が誘起する液晶流動(第1報, 配向状態と計算精度の関係), 日本機械学会論文集, **73**, B編, 1585-1591, (2007), 査読有

S. Chono, T. Tsuji and J. Sun, Numerical simulation of molding Hele-Shaw flow of polymeric liquid crystals, *Journal of Fluid Science and Technology*, **2**, 368-379, (2007), 査読有

T. Nagae, T. Tsuji and S. Chono, Numerical simulation of flow-induced flexoelectric effect in liquid crystals, *Journal of Fluid Science and Technology*, **2**, 258-269, (2007), 査読有

[学会発表](計23件)

片田雄大, 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣, ハイブリッドセルにおける液晶の電場誘起速度分布, 日本機械学会中国四国支部第47期講演会, 2009年3月6日, 山口

吉井基晴, 辻知宏, 蝶野成臣, ネマティック液晶の二重円筒間せん断流れの非定常数値シミュレーション, 日本機械学会中国四国支部第 47 期講演会, 2009 年 3 月 6 日, 山口

英洋輔, 辻知宏, 蝶野成臣, 等方相 - ネマティック液晶相界面を利用したマイクロマニピュレーターの開発, 日本機械学会中国四国支部第 47 期講演会, 2009 年 3 月 6 日, 山口

小林奨治, 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣, 液晶アクチュエータの開発に関する基礎研究 (駆動特性に与える平板間隔の影響), 日本機械学会中国四国支部第 47 期講演会 2009 年 3 月 6 日, 山口

中澤武馬, 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣, 液晶アクチュエータの駆動特性 (印加パルス電圧の周波数と Duty 比の影響), 日本機械学会中国四国支部第 39 回卒業研究発表会 2009 年 3 月 5 日, 山口

森田祐介, 須佐美俊和, 辻知宏, 蝶野成臣, 液晶モータの開発に関する基礎研究, 日本機械学会中国四国支部第 39 回卒業研究発表会, 2009 年 3 月 5 日, 山口

杉島司朗, 辻知宏, 蝶野成臣, 平板駆動型液晶アクチュエータ, 日本流体力学会中四国九州支部講演会, 2008 年 12 月 13 日, 福岡

吉井基晴, 蝶野成臣, 辻知宏, ネマティック液晶の同心二重円筒間せん断流れの数値解析, 第 56 回レオロジー討論会, 2008 年 10 月 7 日, 新潟

片田雄大, 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣, 平行平板間背流の速度分布, 2008 年日本液晶学会討論会, 2008 年 9 月 18 日, 京都

A. Sunarso, Y. Mieda, T. Tsuji, and S. Chono, Molecular dynamics simulation of backflow generation in nematic liquid crystal between parallel plates, 15th International Congress on Rheology, 2008 年 8 月 5 日, Monterey

S. Chono and T. Tsuji, Back-flow of nematic liquid crystals and its application to liquid crystalline microactuators, 15th International Congress on Rheology, 2008 年 8 月 5 日, Monterey

S. Chono and T. Tsuji, On liquid crystalline microactuators, 22nd International Liquid Crystal Conference, 2008 年 7 月 4 日, Jeju

H. Yamasaki, T. Tsuji, and S. Chono, Numerical simulation of azimuthal flow of nematic liquid crystal between concentric cylinders, 22nd International Liquid Crystal Conference, 2008 年 7 月 4 日, Jeju

Y. Mieda, A. Sunarso, T. Tsuji, and S. Chono, Liquid crystal motors and actuators using backflow effect in HAN cells, 22nd International Liquid Crystal Conference, 2008 年 7 月 4 日, Jeju

Y. Mieda, A. Sunarso, T. Tsuji and S. Chono, A phase transition mechanism of liquid crystals reconsidered as a feedback system, 22nd International Liquid Crystal Conference, 2008 年 7 月 4 日, Jeju

今上悠大, 黒岩正寛, 辻知宏, 蝶野成臣, 液晶欠陥対消滅過程における分子配向場と速度場の関係, 第 57 回理論応用力学講演会, 2008 年 6 月 10 日, 東京

杉島司朗, 松見隆紀, 田村和之, 辻知宏, 蝶野成臣, 壁面配向処理が液晶アクチュエータの駆動特性に与える影響, 第 20 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2008 年 5 月 21 日, 別府

稲荷博文, 辻知宏, 蝶野成臣, 液晶アクチュエータの特性に及ぼす壁面分子配向処理の影響, 日本機械学会中国四国支部第 46 期講演会, 2008 年 3 月 7 日, 広島

黒岩正寛, 今上悠大, 辻知宏, 蝶野成臣, 欠陥対消滅を利用した液晶アクチュエータ, 日本機械学会中国四国支部第 46 期講演会, 2008 年 3 月 7 日, 広島

田村和之, 松見隆紀, 三枝嘉孝, A. Sunarso, 辻知宏, 蝶野成臣, ハイブリッドセルを用いた液晶アクチュエータの提案, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2007 年 11 月 17 日, 広島

21. 山崎一, 辻知宏, 蝶野成臣, A. Sunarso, 三枝嘉孝, ネマティック液晶の同心二重円筒間周方向流れの数値計算, 第 55 回レオロジー討論会, 2007 年 11 月 1 日, 金沢

22. 松見隆紀, 辻知宏, 蝶野成臣, 三枝嘉孝, 液晶駆動型マイクロアクチュエータの開発 - 駆動特性に及ぼす壁面アンカリングの影響 -, 日本機械学会年次大会, 2007 年 9 月 10 日, 大阪

23. M. Kuroiwa, T. Tsuji and S. Chono, Numerical and experimental studies of

liquid crystalline flows induced by annihilation of paired defects, 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, 2007年7月30日, San Diego

〔産業財産権〕

出願状況(計7件)

名称:液体-液晶間相転移を利用した物体移動機構および物体移動方法

発明者:辻知宏, 蝶野成臣

権利者:高知工科大学

種類:特許権

番号:特願2009-42163

出願年月日:2009年2月25日

国内外の別:国内

名称:分子配向の揃った分子配向部材およびその製造方法

発明者:辻知宏, 蝶野成臣

権利者:高知工科大学

種類:特許権

番号:特願2009-25696

出願年月日:2009年2月6日

国内外の別:国内

名称:多極型液晶モータ

発明者:蝶野成臣, 辻知宏

権利者:高知工科大学

種類:特許権

番号:特願2009-25695

出願年月日:2009年2月6日

国内外の別:国内

名称:液晶を利用した傾き検出装置

発明者:蝶野成臣, 辻知宏

権利者:高知工科大学

種類:特許権

番号:特願2009-25694

出願年月日:2009年2月6日

国内外の別:国内

名称:液晶流動の高効率形成機構,液晶流動の高効率形成方法および液晶流動を用いた高効率物体移動機構

発明者:蝶野成臣, 辻知宏

権利者:高知工科大学

種類:特許権

番号:特願2008-29597

出願年月日:2008年2月8日

国内外の別:国内

名称:ハイブリッド液晶流動形成機構,ハイブリッド液晶流動形成方法および液晶流動を用いたハイブリッド物体移動機構

発明者:蝶野成臣, 辻知宏, 松見隆紀

権利者:高知工科大学

種類:特許権

番号:特願2008-29596

出願年月日:2008年2月8日

国内外の別:国内

名称:エネルギー貯蔵装置

発明者:辻知宏, 蝶野成臣, 黒岩正寛

権利者:高知工科大学

種類:特許権

番号:特願2007-033951

出願年月日:2007年2月14日

国内外の別:国内

取得状況(計1件)

名称: Object rotating mechanism using liquid crystal flow

発明者:Shigeomi Chono and Tomohiro Tsuji

権利者: Kochi University of Technology

種類: Patent

番号: US 7,324,182 B2

取得年月日: 2008年1月29日

国内外の別: 国外(米国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蝶野 成臣 (CHONO SHIGEOMI)

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号: 20155328

(2) 研究分担者

辻 知宏 (TSUJI TOMOHIRO)

高知工科大学・工学部・准教授

研究者番号: 60309721

岡 宏一 (OKA KOICHI)

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号: 10160649