

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289035

研究課題名(和文) 液晶ドロップレットを用いた無定形マイクロアクチュエータの開発

研究課題名(英文) Development of amorphous actuators using a liquid crystal droplet

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)： 薄膜からなるソフトケーシング中に液晶が充填されたアクチュエータは、駆動中に周囲環境に応じて形状を自在に変え得るので、如何様な形状の間隙でも駆動できる。このような無定形アクチュエータの実現は、血管内を自律走行する医療ロボットや、密閉微小空間で自在な操作が可能なデバイスの開発に繋がる。液晶滴の移動量は電場強度の増加とともに増加することを明らかにした。櫛形電極を用いて液晶滴の連続駆動実験を行った結果、液晶滴の初期重心位置から電極間中心位置までの距離が移動量に大きな影響を及ぼすことがわかった。

研究成果の概要(英文)： Because an actuator, which consists of a soft casing made of thin film and a liquid crystal, can vary its shape depending on the surrounding environment, it is movable in a narrow gap with an arbitrary shape. Such an amorphous actuator advances the development of a medical robot moving autonomously in a blood vessel, and a device operating freely in a closed micro space. It is found from a single step-like change in voltage that the displacement of a liquid crystal droplet increases with increasing the applied electric field. Furthermore, a continuous moving experiment using a comb-shaped electrode shows that the distance between the initial center position of a droplet and the center position of two electrodes has a large effect on the displacement of a liquid crystal droplet.

研究分野：非ニュートン流体力学

キーワード：流体力学 非ニュートン流体力学 液晶 ドロップレット マイクロ・ナノデバイス

1. 研究開始当初の背景

(1) 蝶野(研究代表者)と辻(研究分担者)は、これまでディスプレイのみに応用されてきた液晶に対して力学的側面からアプローチすることで、新規な機械要素を提案してきた。その一環として、平板型アクチュエータと液晶モータを提案した。まず平板アクチュエータでは、大きさ10mm×10mmで質量50mgの平板の駆動実験を行った結果、電圧が10Vのとき、速度100 μ m/sの直線性に優れた駆動が得られた。続いて、オートフォーカスやズーム機構を具備した胃カメラの開発を目指して、超小型モータを製作した。外筒外径0.2mm、回転軸径0.1mm、長さ1mmで内外筒の間隙(5 μ m)に液晶を充填している。電圧10Vのとき、最大回転数は30rpmで、電圧と周波数を変えることで回転数を自在に変化できる。上述の新技术に関して、平成16年に基本特許を登録して以来、計17件の特許を登録した。

液晶アクチュエータの特長の一つは形状適合性、すなわち、曲面を含む任意形状のケーシングにも適合することであり、これを具現化したのが上述の液晶モータである。この形状適合性をさらに進化発展させ、例えば薄膜からなるソフトケーシング中に液晶が充填されたアクチュエータは、駆動中に周囲環境に応じて自在に形状を変化させ得るので、如何様な形状の間隙でも駆動が可能で、究極の形状適合性アクチュエータと言える。

周囲環境に応じて自在に形状を変えながら“しなやかに”駆動する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、細胞やDNAなどの生体試料を輸送するデバイスや、血管内を自律走行する医療ロボットなど、密閉微小空間で自在な操作が可能なデバイスの開発に繋がる。その結果、先端医療機器等の開発を大幅に加速するとともに、精密機器メーカーや液晶合成化学業界等も巻き込んだ新たな市場の創出をも可能にすると考えられる。

(2) 精密機器のアクチュエーションに関して幅広い知識と経験を有している岡(研究分担者)と議論するなかで、電極のパターンを工夫すれば横電界によっても液晶内に流動が発生し、液晶の無定形な駆動が可能であることを着想した。そこで予備実験として2つの電極を間隔15 μ m離して設置し、片側電極の端面近傍に液晶ドロップレット(以下、液晶滴)を滴下してこれに電場を印加した結果、液晶滴が変形しながら移動した。この操作を連続させれば、上述の無定形アクチュエータの開発に繋がる。

(3) 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。例えば、電気粘性(ER)効果を利用したブレーキやダンパの開発に関して森下⁽¹⁾や谷ら⁽²⁾の研究が、液晶ゲル・液晶エラストマーを利用した人工筋肉の開発に

関して de Gennes ら⁽³⁾や Ikeda ら⁽⁴⁾の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。

液晶アクチュエータは、液晶そのものが駆動源となる MEMS, NEMS と定義できる。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、サイズ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。

<引用文献>

- (1) 液晶を用いた可変減衰ダンパ, 森下信, 機論(C), 61, 43-48 (1995)
- (2) 液晶を用いた回転型ダンパに関する研究, 谷順二・ほか 5 名, 機論(C), 63, 3784-3789 (1997)
- (3) A semi-fast artificial muscle, P.G. de Gennes, C. R. Acad. Sci. Series IIB 324, 343-348 (1997)
- (4) Soft actuators based on liquid-crystalline elastomers, Y. Yu & T. Ikeda, Angew. Chem. Int. Edn, 45, 5416-5418 (2006)

2. 研究の目的

以下2点を達成することを本研究の目的とする。

(1) 電極間隔、電極パターン、および印加電圧が液晶滴の運動と変形に及ぼす影響を数値計算と実験の両面から定量化する。

(2) 微小電極で液晶を自在に駆動させるには、電気エネルギーをより効率的に運動エネルギーに変換できる力学特性に優れた液晶の合成が必須である。現存する代表的な液晶の力学物性と分子式から、アクチュエータ用の液晶を新規に合成する。

3. 研究の方法

(1) 代表的な液晶10種類を購入して、それらの粘弾性係数と誘電率を測定する。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。弾性定数は、市販の実験用セルを用いて、セル内に封入された液晶に電場を印加した際の電場強度と偏光顕微鏡観察による配向状態の関係から求める。誘電率は、液晶を充填する前後の液晶セルの静電容量をLCRメータで測定する。

代表的な10種類の液晶の粘弾性実測値とそれらの分子式から、新規液晶の分子設計を行い、触媒を用いてクロスカップリング反応させる。合成された液晶の力学物性を測定し、測定値を分子設計・合成する。

(2) 液晶滴内の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）、液晶滴の形状と量を広範囲に変化させて、変形状態と移動量を数値計算用コンピュータで見積もる。

(3) 電極パターンを設計製作する。まずは1枚の平板上に液晶滴が滴下された場合の実験を行う。隣接する微小電極間を適切に選択することで、液晶滴内の任意の位置に流動を発生させる。

マトリックス電極が施された電極を2枚用意して、両方で液晶滴を挟む。隣接電極の横電界のみでなく、対向する縦電界斜方電界を印加した場合も想定でき、より複雑な移動が可能となる。電極パターンの製作には、高周波スパッタリング装置を用いる。微小な電極を多数、マトリックス状に製作する。

液晶を所定の方向に配向させるため、スピノコートとラビング装置を用いて電極膜表面に配向処理を行う。液晶滴内に局所的に流動を発生させ、その変形状態と移動を、偏光顕微鏡観察するとともにコンピュータに画像を取り込む。電極間隔、電圧、周波数、液晶滴の量等を広範に変化させる。

4. 研究成果

(1) 代表的な 10 種類の液晶の粘弾性実測値とそれらの分子式に基づいて新規液晶を合成した。しかし、既存の液晶の力学物性を大きく上回る液晶の合成には至らなかった。数種類のブレンド調製を含め、さらなる新規合成の遂行が今後の重要課題である。

(2) 駆動実験に用いた液晶は 4-cyano-4'-pentylbiphenyl (5CB) である。ガラス基板上に、一定間隔を隔てて一対の矩形電極を蒸着し、その上から垂直配向膜を成膜した。直径約 50 μm の液晶滴を、液晶滴が一方の電極端と接するように基板上に滴下した。電場印加後の液晶滴の挙動を真上と真横から動画撮影し、これを画像解析することで液晶滴の形状変化と移動量を調べた。その結果、電場印加によって液晶滴が駆動することを実験的に確認するとともに、移動量は電場強度の増加とともに増加することを明らかにした。

(3) 液晶滴が駆動するメカニズムを解明するため液晶滴内流れの計算プログラムを作成し、電場印加直後に液晶滴内に発生する加速度分布を見積もった。その結果、液晶滴の端面近傍で斜め下方の加速度が生じており、これが液晶滴の駆動力であることがわかった。

(4) 電場印加時の液晶滴の変形状態と移動量を偏光顕微鏡観察した。パラメータは電極間隔、電圧、周波数、液晶滴の量、液晶滴と電極との相対初期位置である。電場印加直後に液晶分子は電場方向に回転して流動が発生する。液晶滴において、電極間中心位置の

左右領域で分子の回転方向が逆になり、発生する流れの方向も逆であるが、それらの大きさの違いにより液晶滴は結果的に移動する。電場印加により液晶滴の後端はほとんど移動しないが前端が前方向に移動しており、液晶滴は前後方向に伸びた形状になる。その後電場を解放すると後端が前方向に移動してほぼ初期形状に戻り、移動を完了する。移動量は電圧と電極間隔に依存し、電圧が大きいほど、また電極間隔が小さいほど大きい。ただし電極間隔が異なっても、電場強度（電圧 / 電極間隔）でデータを整理するとほぼ一本の曲線にのる。

(5) 櫛形電極を作成して液晶滴の連続駆動実験を行った結果、液晶滴の初期重心位置から電極間中心位置までの距離が移動量に大きな影響を及ぼすことがわかった。従って無定形アクチュエータの開発に際しては、電極間距離を基準に設計する必要がある。

(6) これまで、棒状分子の回転によって発生する背流を基本原理として液晶アクチュエータを開発してきたが、今回、液晶滴に DC 電圧を印加する実験も併せて行った結果、駆動に成功した。従って背流原理と異なるメカニズムでも液晶アクチュエータの開発が可能であることを示唆した。この点についてはさらなる実験が必要である。

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 3 件)

T. Tsuji, S. Chono, T. Matsumi, Velocity profiles of electric-field-induced backflows in liquid crystals confined between parallel plates, *J. Applied Physics*, **117**, 2015, 54501

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 6 報, 駆動方向制御), *日本機械学会論文集*, **81**, 2015, 627

亀井和正, 辻知宏, 蝶野成臣, 液晶のネマティック相と等方相の相界面を利用したマイクロマニピュレータの開発, *日本機械学会論文集*, **81**, 2015, 628

〔学会発表〕(計 17 件)

北野晶也, 辻知宏, 蝶野成臣, ネマティック液晶の矩形管内流れの数値シミュレーション, *日本機械学会年次大会*, 2013, 岡山

辻知宏, 蝶野成臣, 電場による液晶滴の駆動とその応用, *日本流体力学会年会*, 2013, 東京

山口淳, 辻知宏, 蝶野成臣, 液晶を用いた無定形アクチュエータの開発, *日本機械学会流体工学部門講演会*, 2013, 福岡

安田貴紀, 山口淳, 辻知宏, 蝶野成臣, 液晶を用いた無定形アクチュエータの駆動

特性,日本機械学会中四国支部発表会,2014,鳥取

S. Chono, T. Tsuji, Development of micro-manipulator utilizing isotropic-nematic phase interface, 25th International Liquid Crystal Conference, 2014, Dublin

T. Tsuji, S. Chono, Flow-induced electric polarization of nematic liquid crystals, 6th Pacific Rim Conference on Rheology, 2014, Melbourne

安田貴紀, 山口淳, 辻知宏, 蝶野成臣, 液晶無定形アクチュエータの駆動特性の評価, 日本機械学会年次大会, 2014, 東京

井上皓久, 辻知宏, 蝶野成臣, 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, 日本流体力学会年会, 2014, 仙台

山口淳, 安田貴紀, 辻知宏, 蝶野成臣, 液晶滴の電場による駆動とその制御, 日本レオロジー討論会, 2014, 福井

伊東良祐, 辻知宏, 蝶野成臣, 二重円筒間液晶せん断流れにおける巨視的分極に関する実験, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2014, 富山

辻知宏, 蝶野成臣, ネマティック液晶を用いた無定形アクチュエータの開発および評価, 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2015, 佐世保

蝶野成臣, 辻知宏, 液晶のネマティック相と等方相の相界面力の測定, 日本流体力学会中四国・九州支部講演会, 2015, 福岡

松崎一也, 辻知宏, 蝶野成臣, 液晶-等方相界面を用いたマイクロ粒子のマニピュレーション, 混相流シンポジウム, 2015, 高知

蝶野成臣, 辻知宏, 流動によって誘起される液晶の巨視的分極, 日本機械学会年次大会, 2015, 札幌

吉岡利樹, 辻知宏, 蝶野成臣, ネマティック液晶の円管内流れの数値シミュレーション, 2015, 神戸

安田貴紀, 辻知宏, 蝶野成臣, 液晶無定形アクチュエータの駆動実験, 日本流体力学会年会, 2015, 東京

太田琢也, 辻知宏, 蝶野成臣, 偏心二重円筒間における液晶分子配向場の数値解析, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2015, 東京

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計3件)

名称:液晶を利用した無定形アクチュエータ
発明者:辻知宏, 蝶野成臣

権利者:高知工科大学

種類:特許

番号:特願 2013-237486

出願年月日:2013年11月16日

国内外の別:国内

名称:変形可能な液晶移動体

発明者:辻知宏, 蝶野成臣

権利者:高知工科大学

種類:特許

番号:特願 2014-023637

出願年月日:2014年2月10日

国内外の別:国内

名称:横電界式液晶流動形成機構および液晶流動を利用した横電界式物体移動機構

発明者:辻知宏, 蝶野成臣

権利者:高知工科大学

種類:特許

番号:特願 2014-023638

出願年月日:2014年2月10日

国内外の別:国内

取得状況(計2件)

名称:液体-液晶間相転移を利用した物体選別機構および物体選別方法

発明者:辻知宏, 蝶野成臣

権利者:高知工科大学

種類:特許

番号:特許第5846600号

取得年月日:2015年12月4日

国内外の別:国内

名称:液体-液晶間相転移と液晶欠陥の相互作用による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

番号:特許第5880999号

取得年月日:2016年2月12日

国内外の別:国内

〔その他〕

ホームページ等

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・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

西脇永敏 (NISHIWAKI, Nagatoshi)

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号：30237763

(3)連携研究者
なし