

令和 5 年 8 月 23 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02055

研究課題名(和文) 固体に近い液晶を利用した新しい機械要素の創出

研究課題名(英文) Development of novel machine elements utilizing the cholesteric and smectic liquid crystals

研究代表者

辻 知宏 (Tsuji, Tomohiro)

高知工科大学・システム工学群・教授

研究者番号：60309721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：液晶の中でも固体に近い分子配向構造を有するスメクティック液晶およびコレステリック液晶を利用した新たな機械要素の創出を行った。その1つ目は、コレステリック液晶滴を利用した3次元駆動可能なマイクロアクチュエータである。液体中に浮遊する液晶滴の並進駆動および回転駆動に成功した。2つ目は、スメクティック液晶と等方相界面における界面力を利用したマイクロマニピュレータである。材料中に混入した微粒子をスメクティック液晶-等方相界面で捕獲することに成功するとともに、微粒子の運動を解析することで界面力の評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、コレステリック液晶およびスメクティック液晶の力学についての学術的知見を積み上げるとともに、それらの液晶を利用した新たな機械要素の創出を行った。ディスプレイ材料として盛んに研究が行われてきたネマティック液晶に加え、上記の液晶の性質を調べることは学術および応用分野の両方に貢献する。また、本研究で提案した機械要素は、MEMSやLab-on-a-chipのようなマイクロ機械デバイスの駆動装置としての可能性を大きく秘めており、今後、更なる研究が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We have proposed the novel machine elements utilizing cholesteric and smectic liquid crystals which possess the molecular orientation configurations close to crystals. The first one is the micro-actuator using the cholesteric liquid crystal, which can drive three-dimensionally. We have successfully made the translational and rotational drive of a micro cholesteric liquid crystal droplet suspended in a liquid. The second one is the micromanipulator utilizing the interfacial force between the smectic liquid crystal and isotropic liquid phases. We have successfully captured the particle onto the interface and also estimated the interfacial force by analyzing the motion of the particle.

研究分野：流体工学

キーワード：液晶 機械要素 非ニュートン流体 マイクロアクチュエータ マイクロマニピュレータ

液晶やスメクティック液晶では、電場や磁場の印加によって分子配向制御のみならず、分子配置の空間構造も制御できると考えられ、ネマティック液晶の場合と比べて、より高度な流動制御が可能となることは明白である。

以上のように、本研究は液晶力学という流体力学と固体力学の間を補完する学問体系の拡充に貢献し、コレステリック液晶およびスメクティック液晶を利用して、新たな液晶機械要素の実現を行う。

3. 研究の方法

(1) コレステリック液晶を利用した液晶滴アクチュエータの開発

図2に実験セルの概略図を示す。2枚のガラス基板から成るセル内に液晶を封入する。セル内側の基板表面には、ITO電極が成膜されている。また、セル厚を一定とするためスペーサーとして厚さ150 μm のマイクロフィルムが基板間に挿入されている。実験セルを断熱性が高いMDF（中密度繊維板）で覆われた実験装置（図3）内に設置し、ガラスヒータを用いて実験セルの温度コントロールを行う。コレステリック液晶として、ネマティック液晶である4-Cyano-4'-pentylbiphenyl（5CB）にらせん構造を安定させるためのカイラル剤S-811（メルク社製）を適量添加したものをを用いる。ガラスヒータの温度を40に上昇させ液晶を等方相に相転移した後、ヒータ温度を等方-液晶相転移温度である約34に下げ等方相中にコレステリック液晶滴を発生させる。ITO電極を介して液晶滴に電場を印加し、液晶セルを顕微鏡観察および画像解析することで、液晶滴の挙動を解析する。

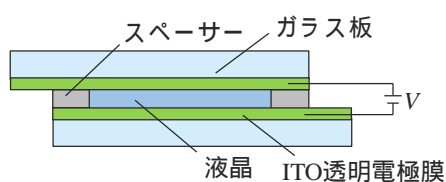


図2 液晶セル

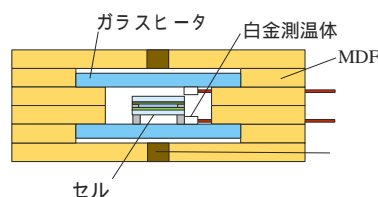


図3 実験装置概要

また、ITO電極としてガラス表面前面に電極を施した一様電極と図4に示すようなパターンニングを施されたくし型電極の2種類を用いる。

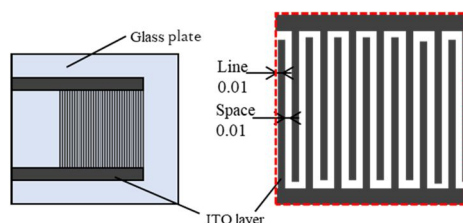


図4 くし型電極パターン

(2) スメクティック液晶を利用したマイクロマニピュレータの開発

スメクティック液晶-等方相界面における界面力を利用したマイクロマニピュレータの開発を目的として、相界面の生成および相界面を用いた微粒子の捕獲を試みた。図5に実験装置概要を示す。

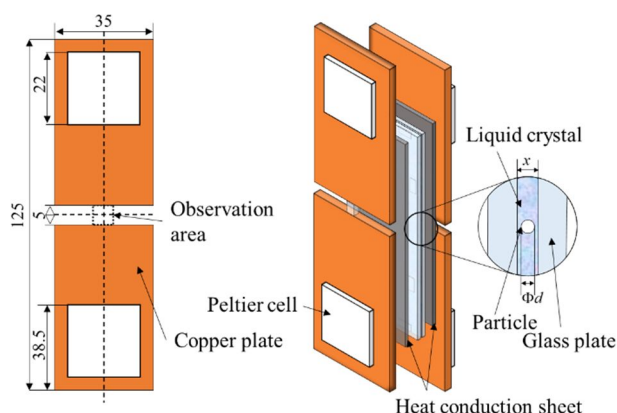


図5 実験装置概要

液晶セルは 250 μm のスペーサーで貼り合わされた 2 枚の長方形のガラス板で構成され、液晶材料はセルの内側に封入される。各ガラス板の表面に垂直配向膜が形成されている。液晶材料には、球状粒子（直径 100 μm 、ジルコニア：密度 6.0g/cm³）が混合されている。液晶セルの温度分布を制御するために、ペルチェモジュールを取り付けた 4 枚の銅板の間に液晶セルを配置する。ペルチェモジュールは PID コントローラを介して制御される。最初に、液晶セル全体をスメクティック液晶 - 等方相転移温度よりも高い温度に昇温し、セル内の液晶材料を等方相にする。その後、上部ペルチェモジュールの温度を相転移温度より高く、下部ペルチェモジュールの温度を相転移温度より低くすることによって、セルの上部に等方相が、下部にスメクティック相が、それらの相の境界にスメクティック - 等方相界面が現れる。観察口から液晶に混入した微粒子と相界面の挙動を顕微鏡観察する。さらに、界面力を評価するために、画像解析により、界面およびジルコニア粒子の位置の時間変化を調べる。

4. 研究成果

代表的な研究成果を以下に示す。

(1) コレステリック液晶を利用した液晶滴アクチュエータの開発

図 6 に電圧 $V=10\text{V}$ 、周波数 $f=50\text{Hz}$ 、duty 比 50% のパルス電場印加時におけるコレステリック液晶滴（コレステリックらせんピッチ $P=13.1\ \mu\text{m}$ ）の並進駆動の様子を示す。画像中の縞模様を持つ円形の物体が液晶滴である。液晶滴の初期の重心位置を白色 \times 印、各時刻における重心位置を黒色 \times 印で示す。液晶滴内部の縞模様はコレステリック液晶分子配向のらせん構造によるものである。図 3 より時間の経過とともに、液晶滴の重心位置が左下方向に移動しており、電場の印加による液晶滴の駆動が確認できる。また、駆動時に液晶滴の形状変化は見られない。また、液晶滴表面の縞の方向は液晶滴の駆動方向におおよそ一致しており、パルス電圧印加時の液晶滴の駆動方向と縞の方向の間に相関があることがわかる。図 7 にパルス電場周波数 f とコレステリック液晶滴（ $P=13.1\ \mu\text{m}$ ）の駆動速度の v との関係を示す。電圧 $V=10\text{V}$ 、duty 比 50% のパルス電場印加時のグラフである。 v はそれぞれ 10 回実験を行った平均値をプロットしており、エラーバーは標準偏差を表している。 $f \leq 50\text{Hz}$ において f の増加に伴ってともなって v は増加し、 $f=50\text{Hz}$ のとき最大値（ $v \approx 16\ \mu\text{m/s}$ ）となる。 $f \geq 50\text{Hz}$ では f の増加にともなって v は減少する。 $f \geq 200\text{Hz}$ において f の増加によらず $8\ \mu\text{m/s}$ と一定の速度で駆動する。

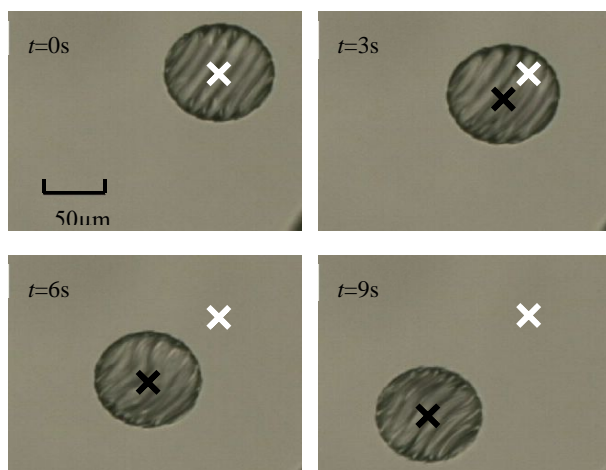


図 6 液晶滴の並進駆動の様子

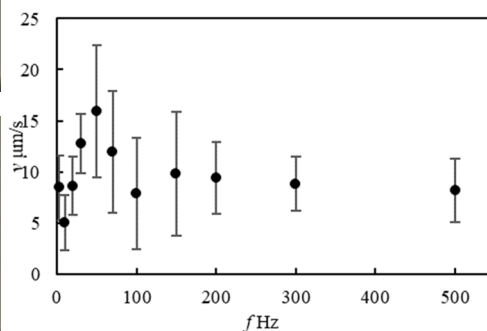


図 7 駆動速度と印加電圧周波数の関係

次に、図 8 にくし型電極セルに直流電圧 $V=2.5\text{V}$ を印加した場合のコレステリック液晶滴の回転駆動の様子を示す。液晶滴の初期の軸頂点位置を白色 \times 印、各時刻における軸頂点位置を黒色 \times 印で示す。図 9 より時間の経過とともに、液晶滴の軸頂点位置が液晶滴の中心に移動しており、電場の印加による液晶滴の回転駆動が確認できる。図 9 に図 8 の結果におけるコレステリック液晶滴のらせん軸と X-Y 平面との角度の時間変化を示す。図 9 より、角度は時間の経過に伴って小さくなり、 $\approx 75^\circ$ になると角度に変化が見られなくなった。以上の結果より、コレステリック液晶滴は直流電場下において、分子配向構造のらせん軸が電場と直交するように回転挙動を示すことが明らかとなった。

以上の結果を要約すると、コレステリック液晶滴は一樣電場によって分子構造のらせん軸に垂直な方向に並進駆動することおよびくし型電極による電場によって回転駆動する。すなわち、回転駆動を制御することで駆動方向をコントロールし、並進駆動させることで、自由度の高いアクチュエータの実現が可能であることが明らかとなった。

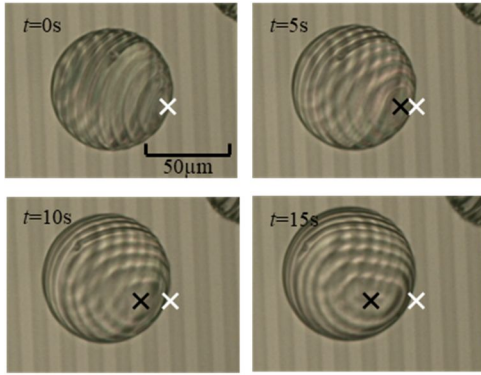


図 8 液晶滴の回転駆動の様子

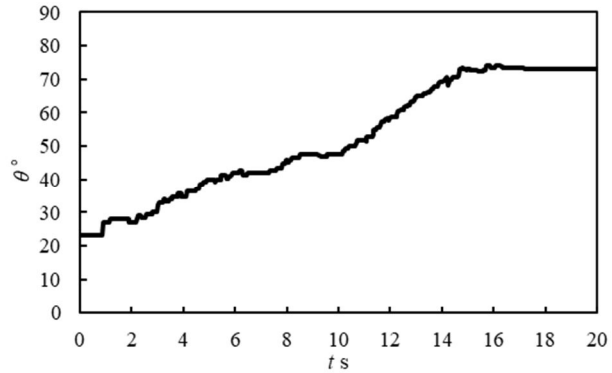


図 9 液晶滴のらせん軸の時間変化

(2)スメクティック液晶を利用したマイクロマニピュレータの開発

図 10 は、12CB におけるスメクティック 等方相界面およびジルコニア粒子の顕微鏡画像を示す。図中の黒色の円形がジルコニア粒子であり、画像を横切る相界面を挟んで上側が等方相、下側がスメクティック相である。図はそれぞれ、(a)ジルコニア粒子が相界面に接触する前、(b)接触した瞬間、および(c)接触後であり、ジルコニア粒子が相界面に接触した瞬間を $t = 0\text{s}$ と定義する。12CB とジルコニア粒子の比重差によりジルコニア粒子は等方相内を沈降し、相界面に接触する。その後、相界面がわずかに変形するものの、ジルコニア粒子は相界面を突き破ること無く、相界面上に保持される。比較のために、図 11 に 5CB におけるネマティック 等方相界面およびジルコニア粒子の顕微鏡画像を示す。図中の相界面を挟んで、上側が等方相、下側がネマティック相である。12CB の場合と同様に、ジルコニア粒子は等方相領域内を沈降し、相界面に接触する。その後、相界面は大きく変形し、最終的にジルコニア粒子は相界面を突き破り、ネマティック相領域内へと沈降する。

以上の結果より、ネマティック 等方相界面は沈降するジルコニア粒子を停止させるだけの界面力を有さないのに対して、スメクティック 等方相界面力はジルコニア粒子を停止・保持することができることが分かる。すなわち、ネマティック 等方相界面力と比較して、スメクティック 等方相界面力は大きいと言える。

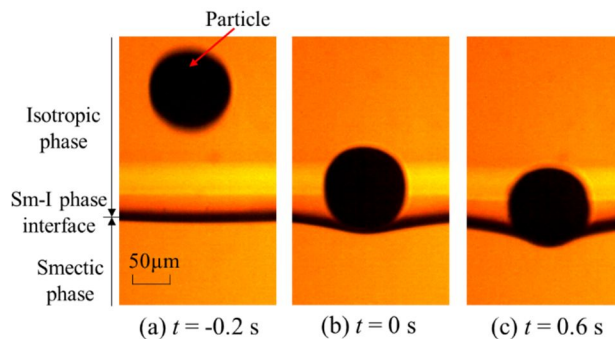


図 10 スメクティック液晶 - 等方相界面とジルコニア粒子の顕微鏡画像

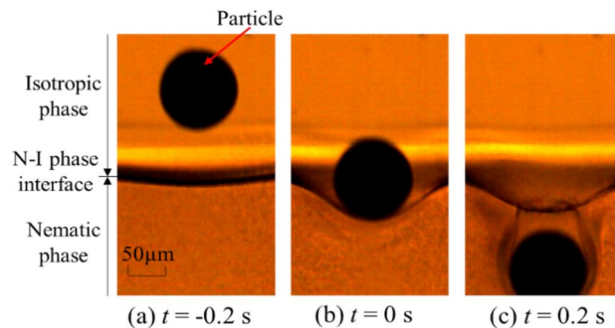


図 11 ネマティック液晶 - 等方相界面とジルコニア粒子の顕微鏡画像

粒子挙動の動画データから粒子の加速度を求め、微粒子の運動方程式に代入することでスメクティック液晶 - 等方相界面力が 75nN 以上であることを明らかにした。また、界面の位置は温度によって制御可能であり、スメクティック液晶 - 等方相界面を利用することで、十分な駆動力を有するマイクロマニピュレータが開発可能であることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tsuji Tomohiro, Chono Shigeomi	4. 巻 318
2. 論文標題 Development of micromotors using the backflow effect of liquid crystals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 112386 ~ 112386
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sna.2020.112386	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mejia Jose Eduardo, Tsuji Tomohiro, Chono Shigeomi	4. 巻 349
2. 論文標題 Capture of microscale objects using the smectic-isotropic phase interfacial force for soft-manipulation devices	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 113985 ~ 113985
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sna.2022.113985	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Jose Eduardo Mejia, Tomohiro Tsuji, and Shigeomi Chono
2. 発表標題 MANIPULATION OF MICROSCALE OBJECTS UTILIZING THE SMECTIC-ISOTROPIC PHASE INTERFACE FORCE BY A LIQUID CRYSTALLINE MICROACTUATOR DEVICE
3. 学会等名 IEEE MEMS 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田伊吹, 辻知宏, 蝶野重臣
2. 発表標題 テンソル型ディレクタを用いた二重円筒間における液 晶せん断流れの数値計算
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石本真輝, 辻知宏, 蝶野重臣
2. 発表標題 スメクティック液晶のせん断流れの分子動力学解析
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会 第50 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中山祐輔, 辻知宏, 蝶野重臣
2. 発表標題 電場下におけるコレステリック液晶滴の回転 駆動と並進駆動
3. 学会等名 日本機械学会 第 97 期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 スメクティック液晶を利用したマイクロマニピュレータ	発明者 辻知宏, 蝶野成臣	権利者 高知工科大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-185403	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	蝶野 成臣 (Chono Shigeomi) (20155328)	高知工科大学・システム工学群・教授 (26402)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------