

[研究助成 (A)]

静電容量の全支配因子を活用する人の皮膚感覚を模擬した 液晶触覚素子の創製

2251017



研究代表者
(助成金受領者)

長岡技術科学大学
技学研究院 電気電子情報系

助教 柴田 陽生

共同研究者

長岡技術科学大学
技学研究院 電気電子情報系

教授 木村 宗弘

[研究の目的]

人間の皮膚は感覚器官としての役割を有し、皮膚に加えられている力(力覚)や、冷温感覚、怪我や出血による痛み(痛覚)などの情報は、電気信号に変換され、脳に伝達されることで認知している。言い換えれば、皮膚は外界の物理情報を電気信号として出力するセンサーとしての機能を有すると言える。一方で、義手・義足の利用者に視点を移すと、装着物から感覚をフィードバックする機能が欠如しているために、身体の一部としての一体感が不足し、長時間使用時の負担が大きいことが課題となっている^[1]。また、近年開発が進むヒューマノイドロボットでは、人間の機能を忠実に再現することで、人手不足の問題を抱える業界や危険を伴う作業現場への導入が期待されている。しかし、人間の特性である「器用さ」をどう再現するのが技術的課題として立ちはだかっている。従って、人間の皮膚感覚を模擬した触覚センサー素子の実現は、障害者の感覚補助やソフトロボティクス技術の向上につながり、人間社会をより豊かなものに変貌させることが期待されている。

このような背景の下で、我々は圧力と日常生活で感じる温度を検知できるハイブリッドな触覚センサーの実現を目指した。柔軟な圧力センシングでは、感圧層のヤング率(硬さ)を下げることで感度を上げる研究が先行し、比較的大

きな圧力は検出できるものの、風圧のような微小圧力(数 Pa ~ 5 kPa 程度の領域)の満足な検出には至っていない。本研究では電子ディスプレイ材料として広く用いられている液晶材料と、シリコンエラストマー(ゴム弾性を有する高分子)の物理的性質の併用に焦点を当てた。既に著者らは、液晶を電極付きのパネルで挟み込んだコンデンサ構造の印加圧力-静電容量の関係を調査し、液晶の分子配向(特定の方向に分子が規則的に並ぶこと)の戻り応答によって、継続して印加された定圧力の検知が困難であることを報告している^[2]。そこで、配向戻りの応答を改善し、静電容量の変化量を稼ぐ素子構造を本研究で提案する(図1)。詳細は後述す

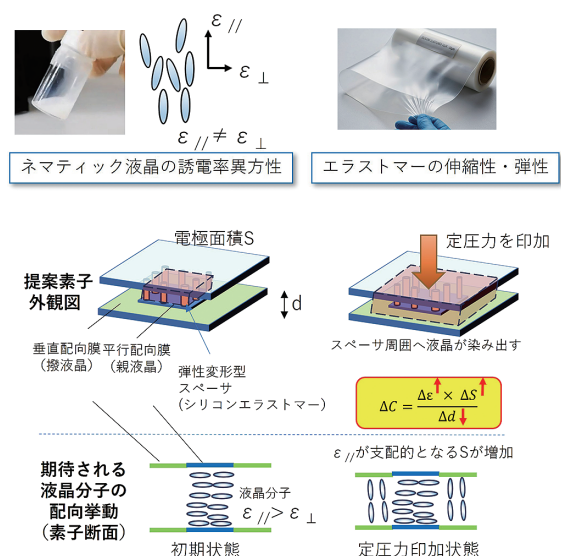


図1 本研究で提案する触覚センサーの概略図

るが、圧力印加によって静電容量値を支配する因子を全て活用した構造により、高感度化を狙いとする。本研究では、液晶分子の配向戻り応答を抑制した定圧力検出技術確立するとともに、触覚素子に資する液晶デバイスの設計指針の提示を目的とした。

[研究の内容, 成果]

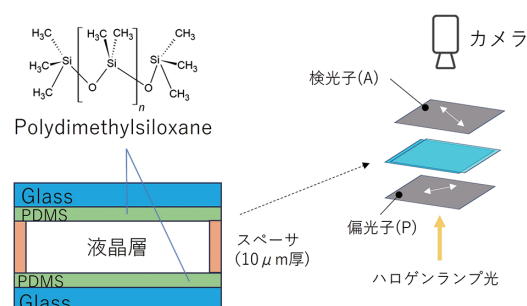
1. 液晶の流動を活用する力覚・感温素子の概要

液晶は、液体の流動性と結晶固体の有する分子秩序を併せ持つ物質の状態である。この液晶には、誘電率異方性 ($\epsilon_{//}$ と $\epsilon_{\perp}$ が異なる) があり、流れの方向に分子長軸を向けるように流動するため、圧力の印加によって液晶の染み出しが生ずると、分子配向 (誘電率) の変化が起きる。この変化した配向を固定することと、圧力をリリースした後に液晶が初期位置に戻る機構を設ける意図で、基板面内には、親液晶・疎液晶性の表面エネルギーの異なるパターンニングを施す。この液晶層の厚さに復元性を持たせる目的で、ゴム弾性のあるシリコンエラストマー (Polydimethylsiloxane: PDMS) の柱構造を形成する。このようにすると、静電容量を支配する3つの因子 (電極間距離 d , 感圧層の誘電率 ϵ , 液晶の誘電率が実効的に効く電極面積 S) を活用したセンサーが構築できると考えた。また、液晶の粘弾性には温度依存性もあるため、温度の違いを検出できることも期待される。

2. シリコンエラストマー界面の液晶配向評価

図1に示した提案構造の設計において、PDMSの柱スペーサ界面における液晶分子の配向状態を理解し、柱スペーサの位置を検討する必要がある。そこで2枚のシリコンエラストマー薄膜で種々の液晶材料をセル厚 $10\ \mu\text{m}$ で挟み込んだセル構造を作製し、直交ニコルの偏光顕微鏡像を取得し、液晶分子配向について評価した (図2)。

セルに用いた基板は、ガラス基板上に熱硬化性のPDMS (SYLGARDTM 184, Toray Dow



シアノ基(-CN)		フルオロ基(-F)	
5CB	E7	JD-5044XX	MLC-14100

図2 PDMS薄膜で挟んだ液晶セルの配向評価

Corning) をスピンコートし、約 $1\ \mu\text{m}$ の厚さの薄膜を形成している。このPDMS薄膜を対向させ、液晶材料をセル厚 $10\ \mu\text{m}$ の厚さで挟むことで作製した。使用した液晶材料には、分子末端の極性基が異なる液晶材料を検討した。その結果、極性基がシアノ基ではPDMS表面に対して垂直配向、フルオロ基ではランダム水平配向を示すシュリーレン組織構造が発現した。液晶の配向を決定する因子として、固体基板の表面エネルギーが液晶よりも低い場合は垂直配向し、高い場合には水平配向する経験則 (FCK 則^[3]) が知られている。このことから、基板の表面エネルギーの変化を試みた。

PDMSの表面エネルギーに変化を与えるため、酸素プラズマ照射を試みた結果を図3に示す。液晶5CBのPDMSセルでは、未処理では垂直配向を示す暗状態が得られていたが、酸素プラズマ処理を施すと配向秩序度の高い液晶相に特有のファンテクスチャが観測された。これを 150°C まで温め、室温に戻すアニール処理を施すと、フルオロ基の液晶を用いた場合と同様にランダム水平配向を示すパターンが得られた。

これらの現象を考察するために、Owens-Wendt's equation^[4] に基づき、純水、ジヨードメタン、グリセリンの3種類の液滴の接触角を

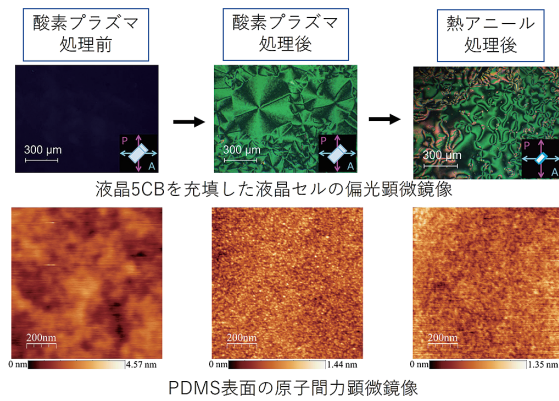


図3 PDMS 薄膜の表面処理による液晶の配向変化

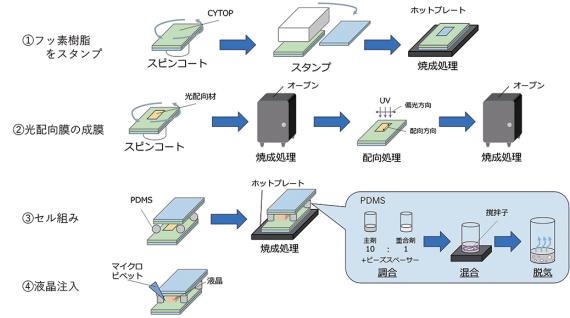


図4 提案素子の作製手順

表1 PDMS 薄膜の表面エネルギーの評価結果

PDMS 薄膜の表面処理	表面自由エネルギー [mJ/m ²]	極性項 [mJ/m ²]	分散項 [mJ/m ²]
未処理	20.88	0.07	20.82
酸素プラズマ処理後	70.91	49.36	21.55
酸素プラズマ処理+熱アニール処理	47.22	27.76	19.45

測定することで、各処理過程における PDMS 固体膜の表面エネルギー測定を行った。この結果を表1にまとめた。未処理の PDMS の表面エネルギーは 20.88 mJ/m^2 と低く、液晶が垂直配向を示すことが予想されるが、フッ素系液晶では水平配向を示したことから、FCK 則の単純な適用だけでは配向予測ができないことが分かった。また、PDMS 表面に酸素プラズマ処理を施すと、本来は垂直配向を好むシアノ系液晶 (5CB や E7) を含め、すべての液晶分子がランダム水平配向へと転移した。表面エネルギーの極性成分の増加がみられることから、プラズマ処理が PDMS 表面に分極を生じさせるプロセスとして働き、誘起された界面極性相互作用が液晶分子の水平配向を促したと考えられる。PDMS 表面の微細形状を原子間力顕微鏡で観察したところ、未処理の PDMS ではナノスケールで見ると約 4 nm の高低差があり粗い起伏 (短ピッチのうねり) が存在している。プラズマ処理後は、表面の凹凸が平滑化され、うねりが消失して水平配向の促進に寄与していることが窺える。アニール (熱) 処理後：プラズマ処理後に 150°C で加熱すると、高分子鎖の

熱運動によって誘起された分極が解消され、表面エネルギーが緩やかに低下したと考えられる。しかし、AFM 観察ではアニール後もプラズマ処理による平滑形状が維持され、表面エネルギーが低下しても液晶は水平配向を維持し続けた。結果として表面形状が配向に与える影響は比較的小さく、極性成分を中心とした表面エネルギーが配向転移の原因であると考えられる。

3. 提案素子の作製および定圧力検知の検討

前項2.において、PDMS 表面ではシアノ系の液晶は垂直、フッ素系液晶では PDMS 表面に対してランダム水平であることが分かり、表面処理により配向状態を変えることが可能であることを見出した。この結果を踏まえ、提案素子 (図1) の作製を検討した。

図1に示すコンセプトが、ネマティック液晶の圧力検知で課題となっていた配向戻り現象を解消し、定圧力検知を可能とするか否かを検証するため、図4のように、ガラス基板で作製を行っている。撥液晶性領域にはフッ素樹脂 CYTOP (旭硝子社) を用い、親液晶性領域には偏光紫外線の照射で配向処理ができる光配向

膜を用いている。PDMS の版でスタンプした CYTOP 膜上では、光配向膜が弾かれるために、基板中央部に配向膜が塗布形成できる。なお、セル厚を安定的に作製する都合上、PDMS の柱に所定の直径を有するガラスビーズを混合させている。

キャパシタンスの経時変化は、LCR メータ（岩崎通信、PSM3750）により取得し、印加した交流電圧の周波数は 1 kHz とした。印加する圧力荷重は、フォースゲージ（アイコーエンジニアリング社）で制御した。

図 5 は、作製した素子に対しセル上面から微小圧力域の力を印加・リリースした際のキャパシタンス応答である。これより、圧力印加中は上昇した静電容量値がほぼ一定値に保たれており、圧力をリリースすると元のキャパシタンス値 C_0 に戻ることが確認できる。圧力印加中は、液晶が親液晶性領域から撥液晶性領域へ流動していることは別途、偏光顕微鏡像で確認をしている。従って、本提案コンセプトにより、液晶を感圧層とするセンシング素子で定圧力の検知に成功した。次に、様々な圧力を加えた際のキャパシタンスの感度（最大到達キャパシタンスを C とすると、 $(C-C_0)/C_0$ ）を図 6 に示す。

セル厚 25 μm を除く条件では、セル構造に用いる上下のガラスの厚みが 1.1 mm と厚く、PDMS の柱に硬度のある粒子スペーサを混合していることから、圧力に対してセル厚の変化が乏しいことから、感度も最大で 0.12 kPa^{-1} となっている。セル厚が 5 μm と薄い場合は、上

下基板の配向膜による液晶の配向規制力が強まっているため、15 μm のセル厚となると、バルク液晶の流動を発生することが困難なため、セル厚 10 μm の感度が最も良くなったと考えられる。一方で、セル用のガラス基板の厚みを 0.2 mm まで薄くした素子（セル厚 25 μm ）では、感度が 2 倍に向上した。さらに印加圧力とキャパシタンスの変化量が 1:1 に対応しているダイナミックレンジが拡張できていることが分かる。つまり素子の変形自由度が高まると、幅広い圧力レンジの検知に対応可能な素子を形成できることが分かった。試作が容易ではないが、今後、電極付きのプラスチックフィルム基板で本提案構造の作製ができれば、さらなる感度と検出レンジの向上が見込まれる。また、今回使用した液晶は、親液晶性/撥液晶性の領域で所望の配向をする 5CB（誘電率異方性の最大値 $\Delta \epsilon = 11.0$ ）をモデルケースとして取り上げたが、誘電率異方性の大きい材料を導入することでキャパシタンスの変化量をより大きく与えることが可能と考えられる。

4. 温度検知能の検討

最後に、環境温度の違いを電気信号として検出することを検討した。最初にキャパシタンスのみで圧力と温度の検知を検討したが、異なる温度条件であってもキャパシタンス値が重複することが避けられないことが分かる（図 7 (a)）。そこで、配向変化に対して変化の鈍い抵抗 R で温度の検知が可能ではないかと考え、提案素

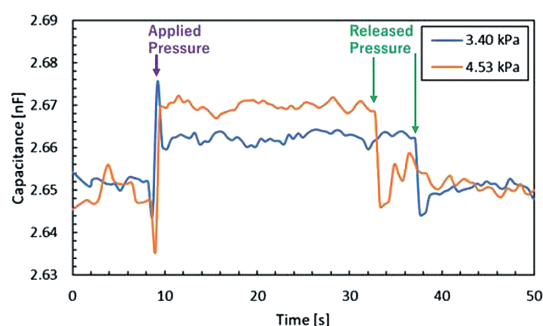


図 5 微小圧力を印加したキャパシタンス応答

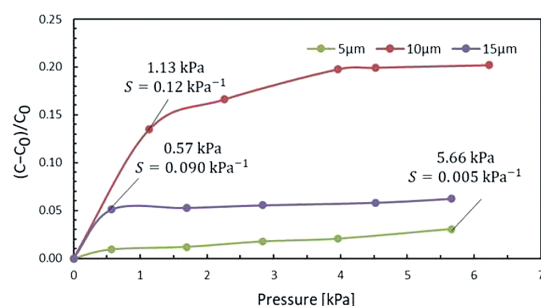


図 6 提案素子の感度評価（セル厚の依存性）

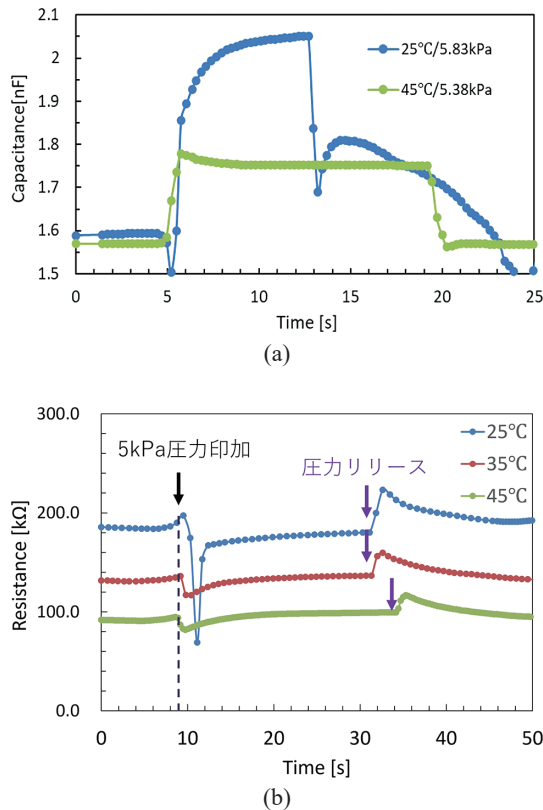


図7 RC成分分離による温度検知能力の検討 (a) キャパシタンス変化 (b) 抵抗変化

子構造に抵抗 R とキャパシタンス C からなる並列回路を仮定し、測定したインピーダンスから抽出された R の値で温度情報を読み取ることを検討した (図7 (b))。冒頭でも述べたように人間の皮膚が検知できる温度帯を想定しているため、ここでは25°C、35°Cと、少し熱めのお湯を想定した45°Cで保った素子に圧力を加える試験を行った。圧力を印加した直後は不安定な抵抗の変動が見られる場合もあるが、抵抗値の重複が少ない経時変化が得られたと考えている。

5. まとめ

本研究では、人間の皮膚感覚に近い特性を持った触覚センサーデバイスを検討するため、流動性と誘電率異方性を有する液晶と、柔らかさとゴム弾性を有するシリコンエラストマーの併用による力・温度のハイブリッド検出を目指した。その中で、これまで瞬間圧力の検知に制約されていた液晶のセンサー機能を、低圧力検

知に拡張させ、かつ微小圧力域のセンシング(数kPa 台の圧力の検出能力を見出すこと)に成功した。しかし、圧力と温度の検出を世界最高レベルの圧力検出感度(例えば圧力の場合、 0.5 kPa^{-1} 以上)を持ったセンシング特性を得るには至らなかった。この理由として、シリコンエラストマー単体の柱構造の高さを安定して作製できる技術や、現状の面内パターンニング構造に対して感度を上げるための液晶の選定に制約が加わり、単純に誘電率異方性 ($\Delta\epsilon$) が大きな液晶材料を現状の素子構造に適用できないといった種々の課題が挙げられる。今後、作製工程の見直しも含め、圧力検出と温度検出の機能をデバイス面内で分離した素子設計によってこれらの課題を解決してゆきたいと考えている。

[参考文献]

- [1] L. Jabban et al. IEEE Trans. Neural. Syst. Rehabil. Eng. Vol.30, pp.738-747 (2022).
- [2] Y. Shibata et al. IEICE Trans. Electron. E104C, No.2, pp.81-84 (2021).
- [3] Creagh LT et al. Mol Cryst Liq Cryst. Vol.24(1-2), pp.59-68 (1973).
- [4] Owens DK et al. J. Appl. Polym Sci. Vol.13, No.8, pp.1741-1747 (1969).

[成果の発表、論文など]

1. 那須若菜, 柴田陽生, 木村宗弘, “液晶を感圧層とする定圧力センシングに対する面内配向パターン制御の効果”, 2025年日本液晶討論会, PA-05, 京都国際会館, 2025年9月
2. 那須若菜, 柴田陽生, 木村宗弘, “柱状シリコンエラストマーと液晶の複合セル構造による圧力センシング感度の評価”, 第73回春季応用物理学会, 18a-PB1-3, 東京科学大学, 2026年3月
3. Yuki Imamura, Haruto Nakai, Nasu Wakana, Yosei Shibata, Munehiro Kimura: Surface topology and intermolecular interactions determining the liquid crystal molecular alignment at the silicone elastomer surface, Liquid Crystals (accepted, March 23, 2026)

[謝辞]

本研究の実施にあたり、ご支援をいただきました(公財)立石科学振興財団の関係者の皆様に厚く御礼を申し上げます。