

[研究助成 (A)]

人体・ロボットに纏う大面積伸縮性エレクトロクロミックディスプレイ

A Large Area Stretchable Electrochromic Display for the Skin of Human and Robot

2211025



研究代表者

東京大学 先端科学技術センター

准教授

松 久 直 司

[研究の目的]

伸縮性を持つ柔らかいウェアラブルデバイスは、長時間装着しても違和感が非常に少ないため、次世代のパーソナルヘルスケアデバイスや仮想現実・拡張現実（VR/AR）デバイスとしての応用が期待されている。これまでに柔らかいディスプレイ素子が開発されてきたが、自由局面に高い追従性を示すディスプレイ素子は実現されていなかった。そこで本研究では、伸縮性のディスプレイ素子の柔軟性を極限まで高め、皮膚の細かい皺にまで密着するようなディスプレイ（図1）の実現を研究の目的とする。さらに本デバイスは、ロボット全体を覆うようなディスプレイとしても活用でき、人-ロボット間の新しいコミュニケーションを実現する。



図1 皮膚と完全に一体化するディスプレイ阻止のイメージ図

[研究の内容、成果]

伸縮性 ECD の構造図を図2に示す。導電性高分子を改質して得られる伸縮性導電膜2層でイオン電解質を挟み込んだ構造をとる。上下の導電膜に2V程度

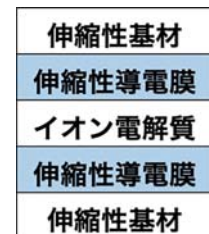


図2 伸縮性ECDの構造

の低電圧を印加することで導電性高分子の色が変わりディスプレイとして機能する。伸縮性導電性高分子材料の開発と、イオン電解質層の薄膜化に取り組んだ。

・伸縮性導電性高分子

導電性高分子 PEDOT: PSS はそのままでは伸長性に乏しいため、図3に示すようなイオン性添加剤を加えて材料の改質を行った。伸長性と導電性評価は、熱可塑性エラストマ基材（スチレン系エラストマ（SEBS）、熱可塑性ポリウ

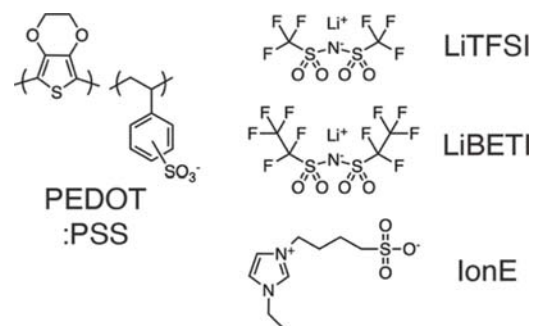


図3 本研究で用いた伸縮性導電性高分子材料

レタン (TPU)) 上に 100 nm 程度にスピンコート法で成膜したものを用いた。伸長性の評価基準としては、クラックオンセット歪 (伸長をかけながら光学顕微鏡で観察し、マイクロクラックが観察される歪) を用いた。

・導電性

図 4 に PEDOT: PSS に図 1 に示した添加物の違いによる非伸長時の導電性を示す。LiBETI を添加剤として選ぶことで、導電性を 330 S/cm まで向上できることがわかった。これは先行研究で用いられていた LiTFSI のときの導電率 270 S/cm よりも高い値となった。

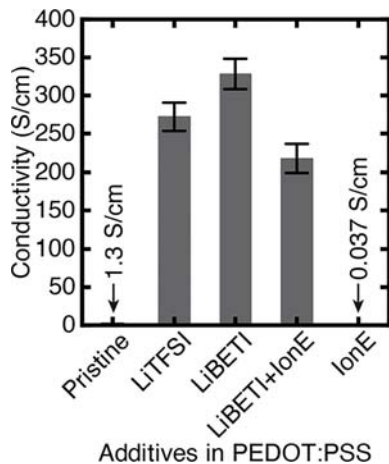


図 4 PEDOT: PSS の導電率の添加物依存性

・機械特性

図 5 に添加物の違いによる機械特性を示す。まず Hardness を見ると、LiBETI でも先行研究の LiTFSI や IonE と同じように PEDOT: PSS の半分以下にまで改質できていることがわかる。次に図 5 左のクラック歪を見ると、SEBS 基板上で 10% 程度だったものが LiBETI 添加によって 30% まで改善できた。さらに、TPU 基板上で同様にクラック歪を評価すると、LiBETI を添加剤に用いた系で 160% 程度まで大きくクラック歪を改善できることがわかった。基材を変えるだけでこのように大きく伸長性が改善できるのを示したのは本研究が初めてである。TPU 基板上で LiBETI を添加し

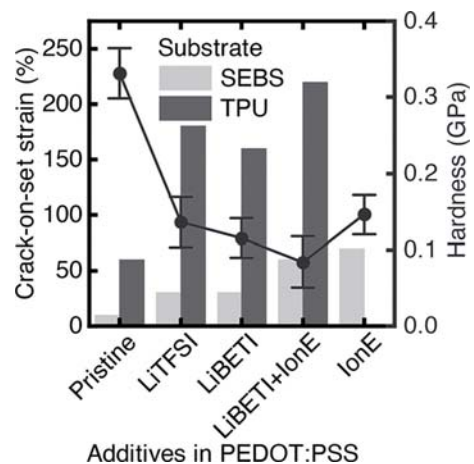


図 5 PEDOT: PSS の機械特性の添加物依存性

た PEDOT: PSS が大きな伸長性を示したメカニズムとして、LiBETI 添加した PEDOT: PSS と TPU が SEBS と比べて近い機械特性を有することが考えられる。TPU 基板上で LiBETI を添加した PEDOT: PSS が大きな伸長性を示したメカニズムとして、LiBETI 添加した PEDOT: PSS と TPU が SEBS と比べて近い機械特性を有することが考えられる。PEDOT: PSS に LiTFSI を加えた系のヤング率は、55 MPa と報告されている。今回用いた SEBS 基板および TPU 基板のヤング率はそれぞれ 5.5 MPa と 30.6 MPa である。また、PEDOT: PSS, SEBS, TPU のポアソン比はそれぞれ 0.35, 0.49, 0.45 となっている。

次に伸長をかけながら導電性を評価した結果を図 6 に示す。LiBETI を加えた系は、LiTFSI を用いたものよりもどの伸長歪でも大きな導電

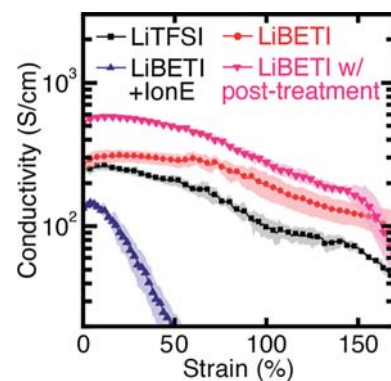


図 6 添加剤を加えた PEDOT: PSS の導電性の伸長歪依存性

性を示していることがわかる。これは図6に示したように、LiBETIを加えた系の方が伸長によって高分子が伸長方向にしやすいことが理由と考えられる。さらにLiBETIを加えた系についてLiBETIのメタノール溶液を膜に後からスピンコートすると、導電性がさらに向上できることがわかった。

・極薄電解質層

次に厚みの異なる3種類の電解質を用意し、ECDを作製し、特性を評価した。その結果、1 μm 未満の非常に薄い電解質を用いてもデバイスが問題なく動作することが確認された(図7)。イオン電解質の薄膜化は、全体の厚みの大幅な削減につながる。交流電圧をかけた時のインピーダンス測定結果である。低周波側では電気二重層の容量成分が現れており、高周波側ではPEDOT:PSSの配線抵抗が表れている。伸長時にPEDOT:PSSの抵抗成分が上がってお

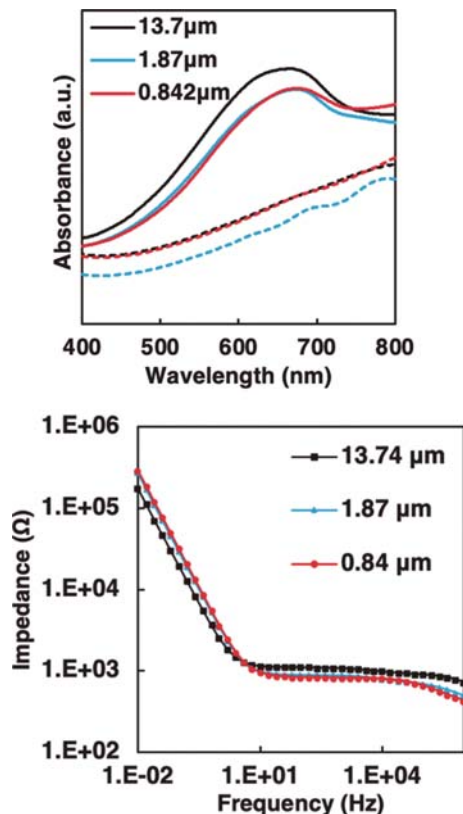


図7 ECDの吸光度特性(上)とインピーダンス特性(下)の電解質層膜厚依存性

り、これが色の劣化の原因になっていると考えられる。配線抵抗の改善が今後の課題の一つである。

次に、極薄電解質層が伸長しても機能することを確認するために、0%、25%、50%の引っ張り歪みのもとで吸光度測定を行なった(図8)。50%伸長時にも色の変化が確認された。この数値は皮膚の伸長率(30%)よりも大きいいため、ウェアラブルデバイスへの応用に十分である。

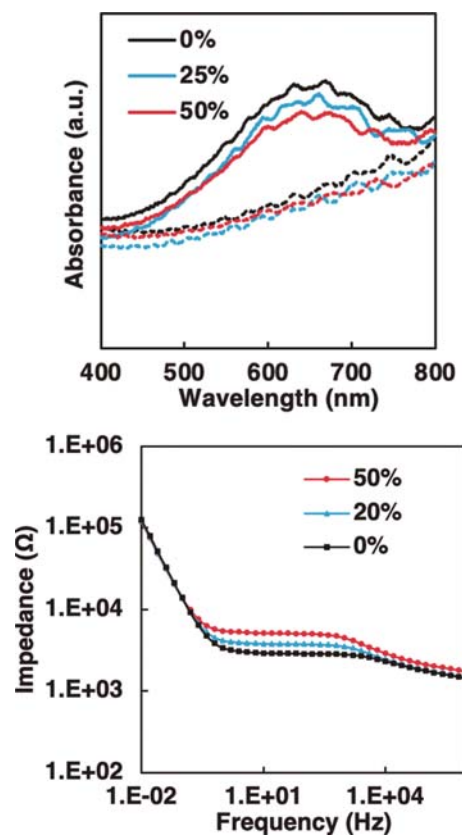


図8 極薄電解質層を用いたエレクトロクロミックディスプレイの吸光度特性(上)とインピーダンス特性(下)の伸長歪依存性

・新規応用探索

開発したディスプレイは、電解質層がわずか1 μm 程度の厚みしかないため、基材も薄膜化すればディスプレイ全体の柔軟性を非常に向上できる。そこで基材の厚みも含めて合計膜厚6 μm までディスプレイを薄膜化した。6 μm 厚のディスプレイ素子取り扱いが難しいため、水溶性のPVA犠牲層上にデバイスを作製し、

皮膚貼り付け時にはこの犠牲層を溶かすことで皮膚に密着させた。その結果、図9に示すように皮膚の皺にまで密着するディスプレイ素子の実現に成功した（図9）。

さらに、立命館大学情報理工学部村尾研究室との共同研究で、伸縮性 ECD の応用探索にも取り組んだ。図10に示すように、フレキシブルな ECD を心拍のリズムで駆動することでウェアラブルデバイスに搭載されている光学式脈波測定（PPG）装置に情報を送信できることがわかった。本技術により、義手の方でも別の

部位で計測した PPG の情報を ECD に送ることで市販のウェアラブルデバイスを使ってヘルスケアモニタリングができるようになった。

[今後の研究の方向、課題]

本研究により高導電性・高伸長性の伸縮性導体材料、極薄電解質層を開発することができた。それを用いて皮膚に非常に高い密着性を示すディスプレイ素子の開発と、義手用脈波デバイスの開発に成功した。今後、皮膚に密着するディスプレイとして周囲の環境に応じて色調変化させるデジタルコスメや、ロボットの電子人工皮膚として用いてロボットと人のインタラクションをより円滑にできるデバイスとしての応用探索が期待される。

[成果の発表、論文等]

論文

1. A. Fujii, K. Murao*, N. Matsuhisa “Pulse Wave Generation Method for PPG by Using Display” *IEEE Access* **11**, 31199-31211 (2023).

国際学会での発表

1. A. Fujii, K. Murao, N. Matsuhisa, “disp2ppg: Pulse Wave Generation to PPG Sensor using Display”, *ISWC '21*, Online (September 25th, 2021).
2. T. Tominaga, T. Shimura, N. Matsuhisa, “An ultrathin and stretchable electrochromic display with exceptional skin conformability”, *13th International Conference on Nano-Molecular Electronics (ICNME2022)* (December 14th, 2022).

国内シンポジウムでの発表

1. T. Tominaga, T. Shimura, S. Sato, S. Abe, N. Matsuhisa, “Reduction of an electrolyte thickness for on-skin stretchable electrochromic displays”, *Young Researchers Society for Flexible and Stretchable Electronics 3rd event* (December 28th, 2021).
2. T. Tominaga, T. Shimura, Y. Zhou, N. Matsuhisa, “A highly skin-conformable electrochromic display”, *Young Researchers Society for Flexible and Stretchable Electronics 5th event* (May 18th, 2023).

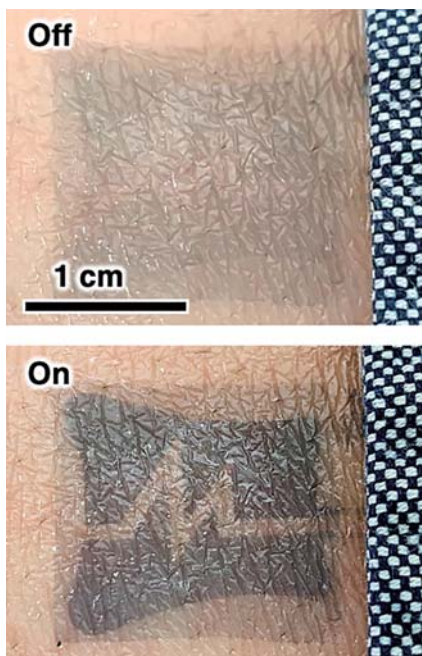


図9 皮膚の皺に密着するディスプレイ素子



図10 義手用脈波表示デバイスとしての応用