

[研究助成 (A)]

高分子ゲル超薄膜を用いた指先に貼付可能な 全貼付型触覚センサの開発

2241025



研究代表者

東京科学大学

特任助教

堀 井 辰 衛

[研究の目的]

手術などの医療行為や、自動車板金塗装の検査のような、熟達者の精緻な感覚や触覚を定量化し触覚情報を共有することは、技術伝達の観点から重要である。そのためには、装着者に対して拘束感や不快感を与えない材料や構造を有する装着型触覚センサの開発が急務である。近年、高分子材料を基にした静電容量型触覚センサの開発と高感度化が検討されている^[1,2]。しかし、一般的に誘電エラストマーは比誘電率が10以下と低く、高感度化には不向きである。一方で、ポリ塩化ビニル (PVC) ゲルは 10^3 以上の高い比誘電率を持つ^[3]だけでなく、印加力に対して電位変化を示すことがわかっており^[4,5]、可塑剤の種類や含有比率によって物性を制御可能である。PVC ゲルシートを平板電極とメッシュ状電極で挟んだ単位構造体の膜厚方向に圧力を印加すると二つの電極間に電位変化が生じることが知られているが^[4]、そのメカニズムには議論の余地がある。また、金属を電極に用いるためにセンサ素子全体が硬質であり、生体親和性の求められる装着型触覚センサには不向きである。一方、電極を配置したPVC ゲルシートの表面に対して、人体のような誘電体が触れたときに生じる電位変化を利用したPVC ゲルトライボエレクトリックナノジェネレータが報告されており^[6,7]、タッチセンサとしての評価系について詳細に議論されているが圧力変化に対する検討や考察は乏しい。そこで私

は、ゲル表面への電極の接触状態の変化について着目した。

本研究では、柔軟な電極材料とPVC ゲルシートを組み合わせたファブリック様圧力センサの開発を目的とした。具体的には、Cu と Ni をコートしたポリエチレンテレフタレート (PET) モノフィラメントから成る導電布を電極として用いたときの、PVC ゲルシートの印加した力に対する電位変化を測定することで、センサ特性を評価した。電極構造と電位変化特性との相関に関する観点から、従来の SUS メッシュや平板金属、柔軟な導電織布を用いたPVC ゲルセンサの特性について検討した。

[研究の内容、成果]

【実験】

図1に示すアルミ (Al) シート、SUS メッシュ (#150)、さらに、市販の導電布2種、導電ニット (硬質タイプ)、導電フォームの合計6種類のファイバー幅やピッチ、折り方の異なる導電材料を検討した。レーザーカッターを用いて直径30 mmに短冊状の配線部分を残した形状に切り出した。PVC 粉末 (平均 Mw ~ 233,000) とアジピン酸ジブチル (DBA)、テトラヒドロフランの重量比が1:4:10となるように容器に量りとり、THINKY ARE-310を用いて攪拌脱泡することで均一なPVC ゲル溶液を得た。この溶液を直径15 cmのテフロンシャーレに15 mLキャストし、室温で24時間



図1 本報告で用いた導電材料外観

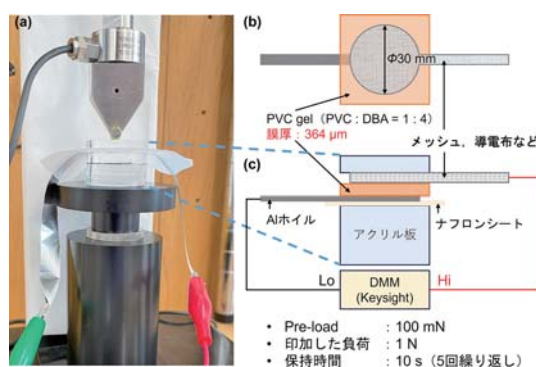


図2 (a) PVC ゲルセンサのセンサ応答測定系外観, (b) PVC ゲルセンサの俯瞰図, (c) センサ応答試験におけるセンサの電位変化測定系の概略図

以上乾燥させることで膜厚約 $364\ \mu\text{m}$ の PVC ゲルシートを作製した。図 2b, c に示すように、各導電材料を得られた PVC ゲルシート上に設置し、対極には Al シート電極を用いることで PVC ゲルセンサを作製した。圧縮試験機 (Univert, CellScale) を用いてセンサを圧縮する際に均一に力がかかるため膜厚 5 mm, 直径 30 mm のアクリル板 2 枚でセンサを挟み、測定を行った。電位変化は、デジタルマルチメータ (34461 A, Keysight) を用いて測定した。

【結果・考察】

〈電極表面形状の効果〉

それぞれの導電材料について 5 回繰り返し 1 N の力を 10 秒間ごとに印加した際の結果を図 3 に示す。得られた電位変化の生データを青色、移動平均 (ウィンドウ数: 200) で平滑化した結果をピンク色、印加した実際の力を黒破線で示す。まず、Al シートと導電布 B (図 3a, d) は印加した力の変化に対してほとんど電位変化を示さなかった。これに対し、他の導電材料は生データに大きなノイズを含むものの、明確に電位変化を示した。図 4 に示すように各導電材料は様々な表面形状を有しており、Al シートや導電布 B は凹凸が少なく、ゲルとの接触状態が変化しにくかったため電位変化がみられなかったと考えられる。一方で、メッシュや織布構造により圧力印加時の電極/ゲルの接触状態が変化しやすく電位変化を示したと考えられる (図 5)。図 3 に示す平滑化曲線から、各導電材料における繊維径 (繊維束径) やピッチ (繊維密度) と初期サイクルの電位変化幅を表 1 にまとめた。導電ニットや導電フォームは繊維が複雑に編まれており、繊維径最も太い箇所、ピッ

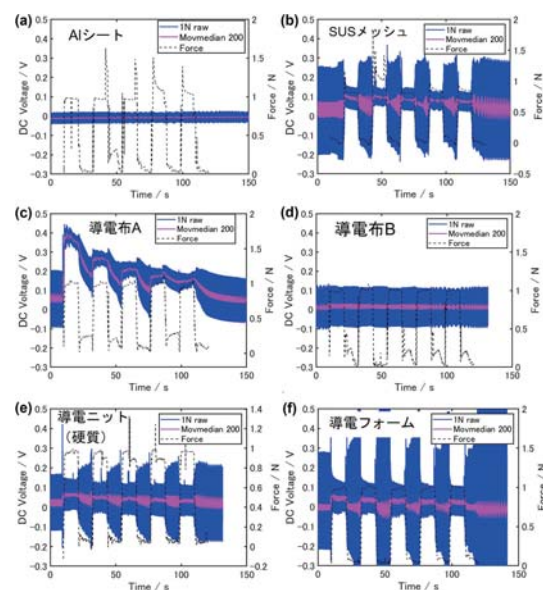


図3 10 s ごとに 1 N 負荷を 5 回繰り返し印加した際の PVC ゲルセンサの電位変化

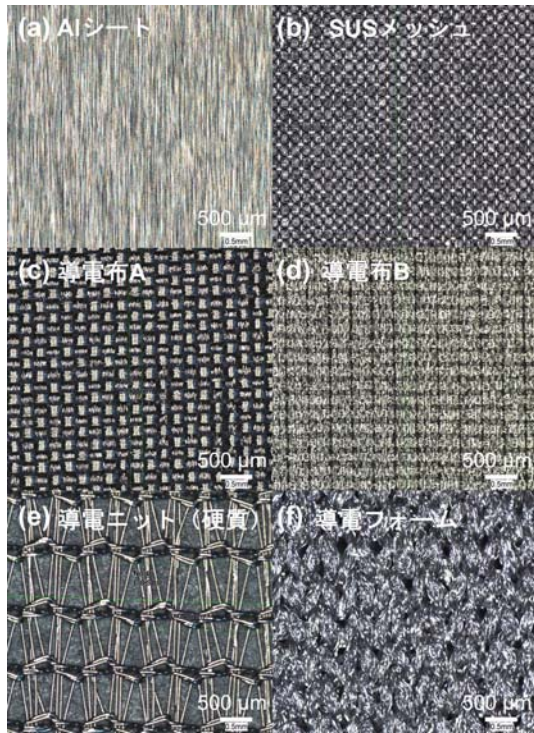


図4 Alシート, (b) SUSメッシュ, (c) 導電布A, (d) 導電布B, (e) 導電ニット(硬質), (f) 導電フォーム

図4 各導電材料の実態顕微鏡像(倍率:75)

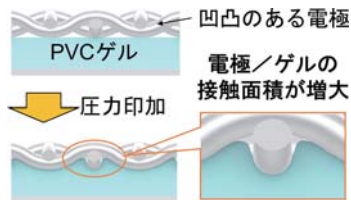


図5 圧力印加時の電極とPVCゲルとの接触状態変化に関する概念図

表1 各導電材料における繊維径(繊維束径), ピッチ, 初期サイクルにおける電位変化

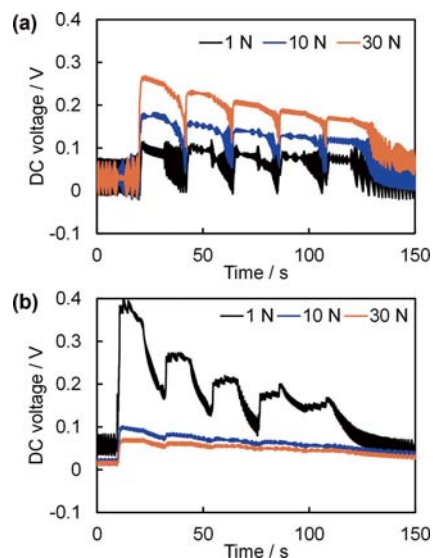
電極	線径/mm	ピッチ/mm	電位変化幅/V
SUSメッシュ(#150)	約0.06	約0.2	約0.05
Alシート	N/A	N/A	ND
導電布A	約0.2	約0.2	約0.3
導電布B	約0.1	約0.1	ND
ニット(硬質)	約0.04 (横糸一束当り)	約0.05 (横糸束間)	約0.04
導電フォーム	約0.2	約0.3	約0.05

チは大きい箇所画像解析により算出した。現段階では明確な仮説立案は難しいが、繊維径とピッチの組合せが重要と考えられる。例えば、繊維径が小さく密に織り込まれている(ピッチ小)場合だと、圧力印加時にゲルが網目に入り

にくく、電位変化は小さい。一方で、繊維径が大きくゲルとの接触状態変化が大きい場合でも疎に織り込まれていると電極全体での電極/ゲルの接触状態変化が起きずらいため、電位変化は小さくなる可能性が考えられる。今後は、有限要素法のようなシミュレーションによる電極/ゲル界面の接触面積変化の予測が重要と考えられる。

〈印加力と電位変化との相関〉

SUSメッシュと導電布Aについて、印加力を変化させたときの電位変化を図6に示す。SUSメッシュでは測定開始20秒後に力印加試験を開始し、導電布Aでは10秒後に試験を開始した。SUSメッシュは初期サイクルにおいて10, 30 Nでそれぞれ約0.15, 0.2 Vの変化を示し、サイクル数が増加するとともにピーク電位は低下した。また、力除去後に電位は減少したが、測定開始時の電位には戻らなかった。これはおそらく、PVCゲルの応力緩和時間が長いと考えられる。そのため、2サイクル以降の電極/ゲル接触面積変化が減少し、電位変化幅の低下につながったと考えられる。一方で、導電布Aでは1 N印加時の1サイクル目の電位変化幅は約0.3 VとSUSメッシュよりも大



(a) SUSメッシュ, (b) 導電布A
1 N, 10 N, 30 Nの順番で測定。10秒間力を印加→10秒間力を除去(0.1 N)を1サイクルとして、5サイクル実施。

図6 印加力を変化させたときの電位変化

さいが、サイクル回数の増大とともに減少した。また、SUS メッシュと対照的に、印加力が増大するとともに電位変化幅は減少した。これは、ゲルの応力緩和も考えられるが、力印加による導電布 A の表面構造変化によるものと考えられる。導電布 A は Cu と Ni がコーティングされた PET モノフィラメントで構成されるため、SUS メッシュと比較して柔軟であり、繊維同士の滑りや座屈によって繊維束内部や繊維束間の構造変化が起こりやすいと考えられる。今後は、PVC ゲルシートの動的力学特性や応力印加時の電極構造変化についての検討や、導電フィラーやイオン導電体を含有させたエラストマーの単繊維のように構造変化の起きにくい構造の検討が必要不可欠である。

【まとめ】

PVC ゲルから成る装着型触覚センサ開発の足掛かりとして、PVC ゲルシートの電位変化特性について電極構造の観点から検討した。Al シートや密に織り込まれた導電布は力印加に対する電位変化はほぼ示さなかったのに対して、ゲルが入り込む目開きがある電極材料（SUS メッシュ、導電布 B、導電ニット、フォーム）では電位変化を示し、繊維径とピッチの組合せに相関があることが示唆された。また、導電布 A は繊維同士の滑りや座屈による繊維束内部、繊維束間の構造変化が起こりやすく、そのため SUS メッシュよりも大きな電位変化を示したと考えられる。以上から、電極／ゲル接触面積を最大化する電極構造と、外部応力に対する電極構造の維持または変形のヒステリシスの低減が重要であることが示唆された。

本研究助成にて購入した設備を用い、今後は電位変化応答の再現性も含め、系統的に電極構造と電位変化との相関、PVC ゲルシートの応力緩和特性や応力印加時の電極構造変化について調べることで、センサ特性の向上やメカニズム解明に繋げる。さらに、圧力に対する構造変化のヒステリシスが小さくなるような繊維構造



図7 (a) PVC ゲル芯鞘導電ファイバー、(b) 身体装着可能な PVC ゲルファブリックセンサの概念図

(例：導電フィラーやイオン導電体を含有させたエラストマーの単繊維の利用) の開発や、図7に示すような PVC ゲル芯鞘導電ファイバーや身体装着可能な PVC ゲルファブリックを開発する予定である。

【謝 辞】

本研究を助成いただいた、公益財団法人 立石科学技術振興財団様へ感謝いたします。東京科学大学生命理工学院 藤枝俊宜教授の研究室内設備や試薬を一部使用して研究を推進しました。藤枝俊宜教授へ感謝申し上げます。

【参考文献】

- [1] B. Ji et al., "Gradient Architecture-Enabled Capacitive Tactile Sensor with High Sensitivity and Ultrabroad Linearity Range," *Small*, vol. 17, no. 43, p. e2103312, Oct. 2021.
- [2] H. Niu, Y. Chen, E. -S. Kim, W. Zhou, Y. Li, and N. -Y. Kim, "Ultrasensitive capacitive tactile sensor with heterostructured active layers for tiny signal perception," *Chem. Eng. J.*, vol. 450, p. 138258, Dec. 2022.
- [3] T. Hirai, "Dielectric Gels," in *Soft Actuators: Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives*, K. Asaka and H. Okuzaki, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 245-258.
- [4] M. Hashimoto, "Application of electroactive polymer," *J. Robot. Soc. Jpn.*, vol. 31, no. 5, pp. 457-460, 2013.
- [5] J. Neubauer, H. Jeremy Cho, and K. J. Kim, "Tunable polyvinyl chloride (PVC) and thermo-

- plastic polyurethane (TPU)-based soft polymer gel sensors," *Smart Mater. Struct.*, vol. 31, no. 11, p. 115025, Oct. 2022.
- [6] M. Kim et al., "Stretching-insensitive stretchable and biocompatible triboelectric nanogenerators using plasticized PVC gel and graphene electrode for body-integrated touch sensor," *Nano Energy*, vol. 107, p. 108159, Mar. 2023.
- [7] H. Park et al., "Plasticized PVC-Gel Single Layer-Based Stretchable Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Mechanical Energy and Tactile Sensing," *Adv. Sci.*, vol. 9, no. 22, p. e2201070, Aug. 2022.