

生体適合性をもつ温度センサの開発

電子デバイス技術課 七谷佳祐、坂井雄一

1. 緒言

介護・ヘルスケア分野において、ウェアラブルデバイスやスマートウォッチに代表されるように、日常生活に溶け込む形で生体情報(心拍数、血圧、睡眠パターンなど)を、計測できる技術の需要が年々高まっている。これに伴い、身体と衣服の狭い空間や動きのある曲面など、これまで計測が困難だった箇所にセンサを取り付け、手軽に連続計測することの重要性が増している。特に温度センサは、熱中症予防のための体温測定¹⁾や、おむつ着用時の排泄検知²⁾など多くの活用が期待されている。

このようなセンサは、皮膚や人体と接触する製品に長期的に使用できることが望ましい。そのため炎症やアレルギーなどの生体反応を起こさないこと、時間が経過による腐食や分解が生体に影響を及ぼさないことなどの生体適合性が求められる。さらに、汗や呼気などの水分による影響を抑えることができる耐湿性や、汚れた際に廃棄しやすい等の経済面の問題解決が必要となる。

本研究では、1.柔軟性、2.生体適合性、3. 耐湿性、4.低コストを満たす温度センサの開発を目指す。センサの基板や電極など、使用材料による温度特性の影響比較を行う。本稿では、ベースとなるセンサ感温部における性能および感度の評価結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 センサ使用材料

Fig. 1 に作製した温度センサを示す。温度センサは基板上に順に電極部、感温部、保護膜の3層で構成される。本研究では基板に柔軟性のある樹脂材料としてポリエチレンナフタレート(PEN)を使用した。また電極には感温部との接触抵抗を低減するため、高い導電性を示す酸化インジウムスズ(ITO)を使用した。感温部には水分分散体で加工が容易な高分子複合材料、ポリ(2,3-ジヒドロチエノ-1,4-ジオキシン)-ポリ(スチレンスルホナート)(PEDOT:PSS)を使用した。PEDOT:PSS は電気抵抗変化から温度特性が得られる^{3,4)}。しかし、PEDOT:PSS は PSS シェルが水分子を吸収し膜が膨張することで抵抗-温度特性に影響を与えることがわかっている^{4,5)}。Wang らは水蒸気透過性の低いフッ素樹脂で PEDOT:PSS をベースとした感温部を保護した温度センサの開発を行い⁴⁾、この影響が抑制されたと報告している。そこで本研究では保護膜としてアクリル系 UV 硬化樹脂を使用し、温度特性への影響を評価した。

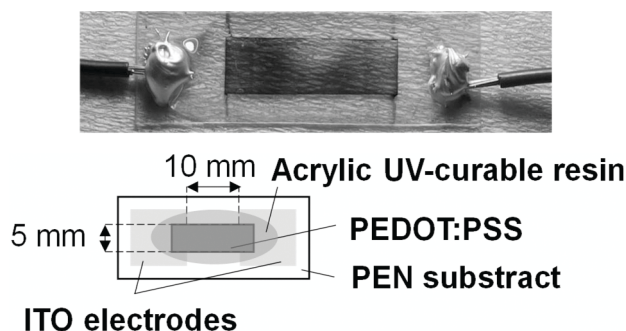


Fig. 1 Fabricated temperature sensor

2.2 センサ作製

まず ITO-PEN フィルム(厚さ 200 μm 、シート抵抗 11~13 $\Omega/\text{sq.}$)を用いて電極間距離が 10 mm になるようエッチングを行った。ポリイミドテープを電極部分に貼り付けマスキングし、希塩酸液中で触媒として添加した亜鉛粒と反応させた。次に、超音波洗浄を行い、乾燥させたのちブラズマ洗浄を行った。その後、感温部が幅 5 mm になるよう PEN フィルム基板上にマスキングテープ(エレップマスキング、日東電工株式会社)でマスクを作製した。PEDOT:PSS(Clevios PH 1000, Heraeus Epurio)を塗布しスピコートにより膜を形成、硬化させた。そして、感温部全体を覆うよう UV 硬化樹脂を塗布し、紫外線を照射、硬化させた。最後に、抵抗特性を測定するため、センサにリード線を接続した。電極に対し導電ペースト(DOTITE、藤倉化成株式会社)を塗布し、硬化させた。

2.3 評価および測定方法

本研究では以下の式で与えられる抵抗温度係数(Temperature Coefficient of Resistance、TCR)によりセンサの性能および感度を評価した。

$$TCR [^{\circ}\text{C}^{-1}] = \frac{R - R_0}{R_0} \times \frac{1}{\Delta T} \quad (1)$$

ここで、 R は測定温度における抵抗値[Ω]、 R_0 は室温(25 $^{\circ}\text{C}$)における抵抗値[Ω]、 ΔT は温度変化[$^{\circ}\text{C}$]を表す。 R_0 を基準とした相対抵抗(R/R_0)の温度による変化から TCR が算出される。

本研究では作製したセンサをホットプレート上に設置し、加熱する際の抵抗値を測定した。電極部に取り付けられたリード線をデジタルマルチメーターに接続し、 R を 30 $^{\circ}\text{C}$ から 80 $^{\circ}\text{C}$ まで 10 $^{\circ}\text{C}$ ごとに測定、記録した。また温度は、感温部近傍に設置した K 熱電対にて測定した。まず保護膜なしの状態でグローブボックス内において、次に

保護膜の塗布前後に大気雰囲気中で測定した。

3. 実験結果および考察

Fig. 2 に作製した温度センサの温度による R/R_0 の変化および TCR を示す。グローブボックス内での測定結果では、温度上昇に対して R/R_0 が緩やかに減少する傾向を示した。これに伴い TCR 値の上昇が見られた。保護膜なし

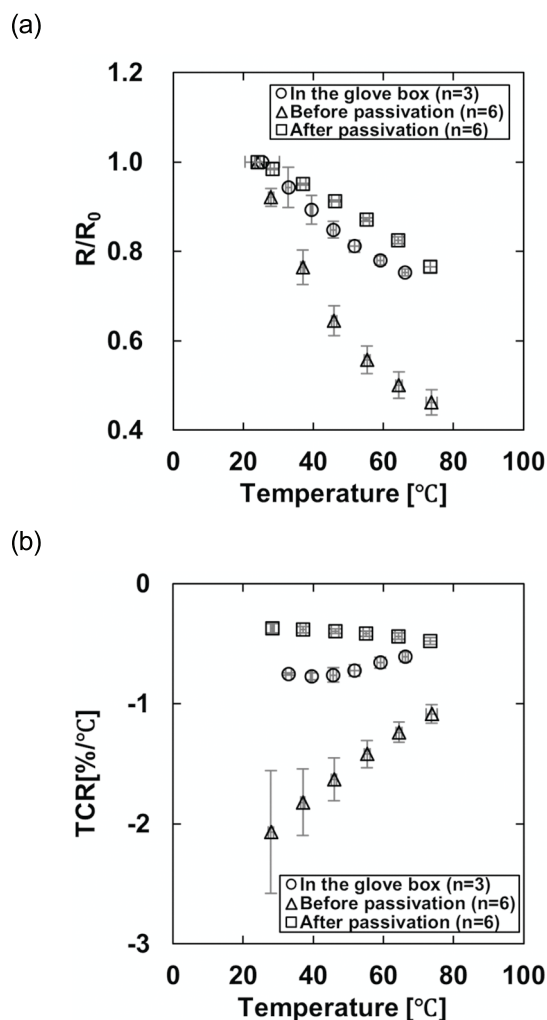


Fig. 2 (a) Temperature-dependent relative resistance, R/R_0 , changes
(b) TCR of the fabricated temperature sensor

では、温度上昇に伴って R/R_0 が急激に減少する傾向を示した。そのため、TCR 値の上昇が顕著であった。保護膜ありでは、この温度上昇による R/R_0 の減少量が小さくなった。そのため、TCR が温度上昇によらずある程度一定であった。以上の結果から、保護膜により感温部の水分子による抵抗-温度特性への影響が小さくなったと考えられる。

しかし、保護膜ありでは他 2 つの測定と異なり、高温域において TCR 値が低下する傾向を示した。これは保護膜の不均一性が影響している可能性が考えられる。今回の試作では、保護膜の厚さ制御を十分に行えていない。そのため、膜厚の制御方法を改良する必要がある。

4. 結言

本研究では温度センサ感温部に PEDOT:PSS を使用し、温度上昇による抵抗変化から感度および性能を評価した。保護膜で感温部全体を覆うことにより、温度上昇に対する抵抗温度係数の値が安定した。今後、さらにセンサ材料が温度特性に与える影響を検証するため、冷却時、伸展時および相対湿度の変化に応じた評価を進める。

参考文献

- 1) 吉村拓巳, 黄銘, 田村俊世: 日本 AEM 学会誌, **31** (2023) 510-516
- 2) 紺家千津子 他: 日本創傷・オストミー・失禁管理学会誌 **4** (2000) 57-59
- 3) Wu Sheng, et al.: *IEEE Sensors Journal*, **24** (2024) 22249-22258
- 4) Yi-Fei Wang, et al.: *Scientific reports*, **10** (2020) 2467
- 5) 渡辺充: ネットワークポリマー論文集, **41** (2020) 215-221

キーワード：温度センサ、PEDOT:PSS

Development of Biocompatible Temperature Sensor

Electronics and Device Technology Section; Keisuke SHICHITANI and Yuichi SAKAI

In this study, we aimed to develop a temperature sensor that satisfies the following requirements: 1) flexibility, 2) biocompatibility, 3) moisture resistance, and 4) low cost. The performance and sensitivity of the sensor temperature-sensitive layer, PEDOT:PSS, were verified by the temperature coefficient of resistance (TCR). As a result, it is suggested that TCR shows constant trend due to the passivation of the sensor temperature-sensitive layer.