

導電性高分子複合繊維の特性と医療・安全・スポーツ分野への応用

体内埋め込み電極からウェアラブル hitoe へ

NTT 物性科学基礎研究所 ○塚田信吾

●導電性高分子と繊維の複合素材による体内埋め込み生体電極

体内埋め込み医療機器に用いられる生体電極、特に長期間使用される心臓ペースメーカー用の刺激電極や脳に埋め込む神経刺激・信号記録用の電極には、高い耐久性が要求されることから、プラチナイリジウムなどの金属が主に用いられている。金属製の電極は耐久性に優れるものの、柔らかい生体組織と接触する界面の状態は必ずしも安定ではない。しかも体動や血管性の拍動による振動により境界に繰り返し機械的ストレスが加わるため、炎症が発生し、瘢痕や組織の萎縮による電極の接触不良、信号の欠損、刺激閾値の上昇、電極寿命の短縮などが生じる場合がある。

より生体適合性の高い生体電極の実現を目指して、ソフトマテリアルを用いた生体電極の研究が進められている。導電性高分子の PEDOT-PSS は生体適合性が高く柔軟な素材であり、培養細胞用のマイクロスケールの生体電極や薄膜コーティングに用いられている。

しかし PEDOT-PSS は高い親水性によりウェットな環境では極めて脆弱であり、耐久性を求められる心臓ペースメーカー用の電極や心電図用の生体電極の製作は困難であった。

我々は PEDOT-PSS をシルク繊維にコーティングし、柔軟性を保ちながら引張強度を付与した導電性高分子複合繊維を考案した¹。この導電性複合繊維を用いた Brain Machine Interface により長期間安定した神経組織の信号記録に成功した。さらにポリエステル系を基材繊維に用いた PEDOT-PSS 導電性複合繊維を心臓ペースメーカー用電極に応用する研究を進めている。

●医療用ウェアラブル電極の背景と要求される特性

超高齢化社会の我が国においては、心疾患の患者数は増加しており、院外の在宅治療の比重も高まっている。急性心筋梗塞に代表される心臓血管系の緊急のモニタリングとして心電図等のバイタルサインの遠隔モニタリングは重要である。近年、腕時計型や着るタイプのウェアラブルセンサが実用化され、スポーツや健康増進だけでなく、心臓病の早期発見や再発抑制に向けた活用が始まっている。

心臓の長時間の検査は、現在 24 時間のホルター心電図検査が標準的であるが、潜在性の重篤な不整脈や虚血性心疾患の検出率を高めるには、より長期間の検査が有効であるとされる。しかし従来型の生体電極では、皮膚と金属電極の間に電解質ペーストやゲルを使用するため、皮膚に接触性皮膚炎（かぶれ）を生じやすく、長期検査に適さない。また皮下に埋め込むインプラント式の心電計は手術が必要でハードルが高い。一方、銀メッキ導電糸やカ

ーボン系素材を生体電極として用いたウェアラブル電極が開発され主にスポーツ用途に用いられている。これらの電極素材は剛直で疎水性であるため、皮膚との接触は不安定になりやすく、特に発汗の乏しい夜間や寒冷期には皮膚が乾燥して皮膚の導電性が著しく低下するため、医療水準の心電図を安定して記録できない場合がある。

●ナノファイバを活用した生体電極用布帛” hitoe “

我々は前述の PEDOT-PSS 導電性複合繊維を元に、基材繊維を繊維径 700nm のポリエステルナノファイバに変更した、生体電極専用の布帛” hitoe ”を東レ株式会社と共同開発した。ナノファイバを用いた” hitoe ”は通常の繊維を用いた布帛と比較し、皮膚表面と多数の接触点を得られるために電極と皮膚の合成抵抗を低下させることができる。また皮膚と接する電極表面は繊維の布帛であるため、肌触りも良好で、ゲル電極のように皮膚を密封しないため長時間接触させても違和感は少ない。さらにナノファイバと PEDOT-PSS はいずれも親水性であり布帛内に多くの水分を吸収することができる。この水分の皮膚への保湿作用によって、皮膚の乾燥を防ぎ皮膚の導電性の低下を抑制するため、発汗の乏しい早朝や寒冷期を含めて生体信号の長時間安定記録が可能となった。

ウェアラブル電極には、生体電極に求められる電気的特性とともにアンダーウェアに求められる着心地や耐久性などの実用的な特性を兼ね備える必要がある。特に繰り返される洗濯に対して生体電極、配線、コネクタ部の電気的特性を維持する必要があり、JIS 規格の洗濯耐久性試験と生体電極の特性試験を実施し、洗濯後の電極と配線の電気的特性ならびに防水性を確認した。親水性の PEDOT-PSS は洗濯時に水を吸収し柔化する傾向があるため、洗濯による摩耗や剥離を抑制する対策を行い、洗濯耐久性を高めた。

さらに着圧の安定するストレッチ生地を立体的な裁断により仕立てたアンダーウェアと組み合わせることにより、着心地を考慮しつつ着圧を適切な範囲に調整し、生体電極と体表面の接触状態を安定化させた。これらの工夫により、衣料品に求められる耐久性、着心地、かぶれにくさ、医療用電極の規格を満たし、低雑音で長時間安定した記録が可能となったウェアラブル電極を実用化することができた²。着るだけで心電図を手軽に測ることのできる医療用の hitoe により、1 週間から数ヶ月間の長期心電図検査が一般化し、心疾患の早期発見役立つことを期待している。

hitoe は心電図の記録だけでなく筋電図の測定にも適しており、アスリートのトレーニングやパフォーマンス評価、リハビリテーションにも利用されている。さらに hitoe のデータの信号処理や機械学習を活用し、高齢者の安否確認、乳幼児の健康チェック、作業者の安全管理等への応用を進めている。

1. S. Tsukada , H. Nakashima, K. Torimitsu “Conductive Polymer Combined Silk Fiber Bundle for Bioelectrical Signal Recording”, PLOS ONE, Published: April 6, 2012
2. Tsukada YT, Tokita M, Murata H, Hirasawa Y, Yodogawa K, Iwasaki YK, Asai K, Shimizu W, Kasai N, Nakashima H, Tsukada S. Heart Vessels. 2019 Jan 24.