

着るだけで心電図を測る ウェアラブル電極インナー

NTT研究所では、着用するだけで心拍や心電図を計測可能なウェアラブル電極インナーを開発しました。導電性高分子(PEDOT-PSS)を繊維にコーティングすることで、柔軟性・伸縮性・通気性・生体親和性に優れた電極を実現し、従来の医療用電極で必要とされた電解質ペーストを使うことなく安定な心電図計測を可能にしました。使用者に負担をかけることのない心拍・心電図の常時モニタリングを実現したことで、医療分野やスポーツ・健康増進への応用に期待されます。

日常の生体信号計測

近年の高齢化社会においては、疾病の早期発見・早期治療の必要性は年々高くなってきています。中でも、心臓発作等の突然死や重篤な健康障害に対するリスクを軽減するために、心拍や心電図の常時モニタリング実現への関心が高まっています。また、30～40歳代の働き盛りの世代においても、職場や家庭でも常に過大なストレスにさらされており、心拍・心電図のモニタリングを通じて体や心の状態を把握することは健康維持のために有効と考えられています。しかし、従来の心電図計測で用いられる医療用電極では、電解質ペーストを用いて皮膚に粘着させて計測するため装着感が悪く、かぶれや痒みの原因にもなり、日常における長期間の連続使用には不向きでした。また、近年の健康への意識の高まりとともにスポーツをする人口も増え、ランニング中などの負荷をモニタするために心拍計測をする例も多くなってきています。そのような場合には、銀などの金属をコーティングした導電性繊維が電極として用いられていますが、皮膚との接触の不安定性に起因するノイズが大きく、医療用途の心電図計測

は困難とされていました。

今回NTT研究所では、導電性高分子〔PEDOT-PSS: Poly(3,4-ethylene dioxythiophene) -Poly(styrene sulfonate)〕を繊維表面にコーティングすることで、柔軟で伸縮性・通気性に優れた電極素材を実現しました。本素材は親水性にも優れ、汗や蒸気を吸うことで肌となじみやすく、電解質ペースト*1を使うことなく、医療用電極に匹敵する安定な心電図計測を可能にします。繊維素材であることから、シャツに電極を配置することで、着るだけで心拍変動や心電図を計測するウェアラブル電極インナーを実現しました。患者・使用者の負担を大幅に軽減し、日常の生体信号のモニタリングを可能にします。

PEDOT-PSS・繊維複合素材

PEDOT-PSSは、導電性が良好で環境安定性にも優れた、もっとも一般的に使用されている導電性高分子の1つです。タッチパネルやフレキシブル液晶ディスプレイの透明電極として酸化インジウム錫(ITO)の代替材料として大きな注目を集めています。一方で、親水性や生体適合性に優れる特徴から、生体電極への活用も期待されて

つかだ しんご^{†1} かさい なほこ^{†1}
塚田 信吾 / 河西 奈保子

かわの りゅうすけ^{†2} たかがはら かずひこ^{†2}
川野 龍介 / 高河原 和彦

ふじい こうじ^{†3} すみとも こうじ^{†1}
藤井 孝治 / 住友 弘二

NTT物性科学基礎研究所^{†1}
NTTマイクロシステムインテグレーション研究所^{†2}
NTT先端技術総合研究所^{†3}

います。しかし、湿潤な環境にもろく耐水性・加工性に課題があるため、その用途が制限されていました。我々は、PEDOT-PSSを金属製の多点電極(MEA: MicroElectrode Array)*2の表面修飾に用いることで、細胞培養実験や動物を使った生体内埋め込み実験における高い生体適合性と良好な電気特性を確認してきました⁽¹⁾。

今回、繊維素材にPEDOT-PSSをコーティングし固定化することで、PEDOT-PSSの持つ導電性・親水性・生体適合性を損なうことなく、強度に優れ、耐水性・加工性の課題を解決した素材を作製しました。シルク糸にコーティングした場合の電子顕微鏡像を図1に示します。糸の表面に均一に薄くコーティングすることで、PEDOT-PSSとシルク糸の両方の特性を併せ持つ複合素材となっています。シルク糸に限らず、合成繊維の糸

*1 電解質ペースト: 電解質を含有するペーストあるいはゲルであり、医療現場における心電図計測では、皮膚表面に塗布し金属電極に貼り付けて使用します。金属電極と皮膚表面の間を密着させることで皮膚表面になじみ接触抵抗を低減します。ホルター心電図計測用には、粘着性のある導電性ゲルも用いられています。

*2 多点電極: 神経信号の検出あるいは神経細胞への刺激を行うために使われる微小電極がパターニングされたデバイス。

や布にも同様にコーティングし固定化することが可能で、柔軟で伸縮性・通気性のある繊維の特徴を活かした導電性複合素材を実現しています。今回作製した導電性複合素材を用いて、実験動物（ラット）の心電図を計測したところ（図2）、電解質ペーストを用いる従来の医療用電極に匹敵する心電波形を、電解質ペーストを用いることなく計測可能であることが分かりました⁽²⁾。金属をコーティングした繊維では、呼吸性の体動により基線が動揺したり、体表面との接触抵抗に起因す

るノイズが顕著になったりします。一方、今回の複合素材ではPEDOT-PSSの親水性・柔軟性の特徴により、体から出る汗や蒸気を吸って体表面と優しく密着して馴染むことで安定な計測を可能にしています。

ウェアラブル電極インナーによる心電図計測

繊維状の導電性素材という特徴を活かして、人が身に着けるだけで心拍や心電図といった生体信号の計測を可能とするシャツ（ウェアラブル電極イン

ナー）を開発しました。心臓の活動に伴う心起電力により身体の各部には心活動電流が流れ、電位分布が生じています。体表面の2点間の電位差の時間経過を波形として表したものが心電図となりますが、ウェアラブル電極インナーでは着衣することによって布状の電極を肌に接触させ心電図計測を行います。図3に東レ株式会社と共同で開発したウェアラブル電極インナーの写真と、それを着ることで計測できる心電図の例（24時間連続計測の内の10分を抜粋）を示します。今回開発した電極は柔軟で通気性もあり、電解質ペーストを使う必要もないため、装着者に負担をかけることなく長期間の心拍・心電図のモニタリングが可能です。

東レとウェアラブル電極インナーを共同開発する以前に、我々はNTTオリジナルのウェアラブル電極インナーを作製し、その安全性と、心拍・心電図計測への有効性を検証するため、82名のボランティア（NTT厚木研究開発センタに勤務する社員）を対象として実証実験を行いました（図4）。それぞれの被験者に対して、24時間（入浴時以外）の連続計測（心拍変動：R-R間隔）を2日間行い、PEDOT-PSSをコーティングした布（電極）を原因とする皮膚への影響（湿疹、かぶれ、かゆみの発生）がないことを確認できました。また、外部分析機関に依頼して、皮膚刺激性試験(OECDガイドラインTG439)も実施しました。PEDOT-PSSコーティングの有無による培養細胞の生存率の比較試験では、いずれの場合も100%近い生存率を示し、PEDOT-PSSコーティングによる皮膚刺激性は見られませんでした。これらの結果から、今回開発した導電性高分子複合素材が、ウェアラブル電極として安全性に問題なく

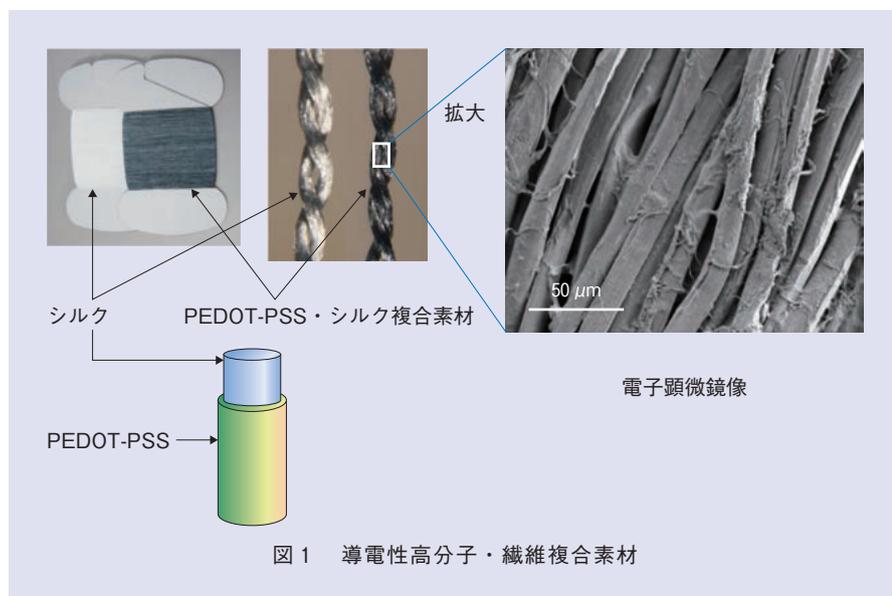


図1 導電性高分子・繊維複合素材

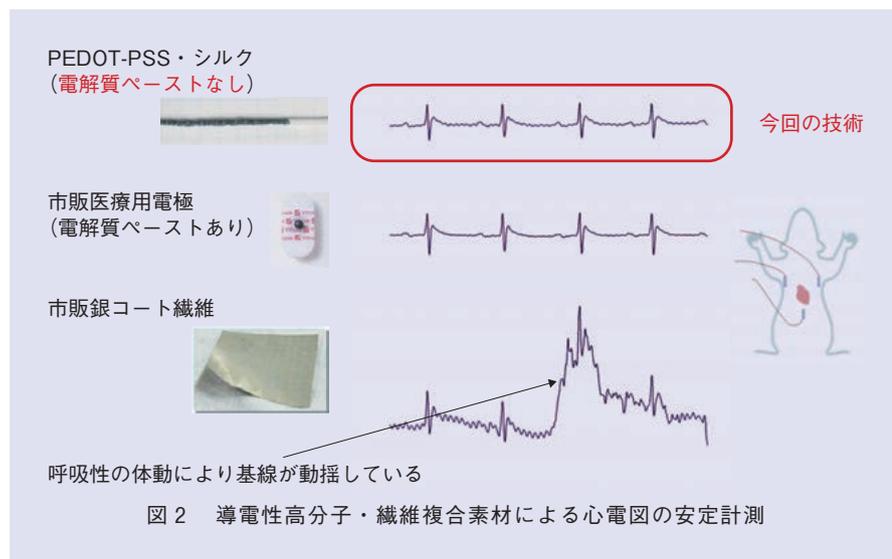


図2 導電性高分子・繊維複合素材による心電図の安定計測

利用可能であることが示されました。

また実証実験では、睡眠時を含めて、心拍変動の長時間計測が安定に実施可能であることも確認されました。この実証実験から、電極の密着性（着衣圧）の低下や肌の乾燥が、ノイズの発生や計測中の信号遮断を引き起こし、長時間の心拍計測を妨げることが分かりました。そのため、電極の肌への密着性を確保するためのインナー仕様や肌の保湿方法の最適化を重要なポイントとし、東レとウェアラブル電極インナーの共同開発を進めました。

心電波形送信端末

PEDOT-PSSをコートした電極で計測した生体信号（体表面の電位の変動）は、ウェアラブル電極インナーに取り付けられる小型の送信機から無線（Bluetooth）でスマートフォンやPCに送信されます。今回開発した心電波形送信端末と、スマートフォンで受信した心電波形を図5に示します。ノイズレベルの低い（S/N比の高い）良好な心電波形が得られていることが分かります。シャープなQRS波*3とともに、その前後のP波やT波もきれいに計測されています。心拍数は、QRS

波のピークと、次に現れるピークとの時間（R-R間隔）を計測することで算出されます。端末はリチウムイオン二次電池を搭載し、12時間程度連続的に波形送信が可能です。スマートフォンに送られた心電図の情報は、場所を選ばずインターネットを通じてサーバに送られ、情報の解析や共有が可能になります。今後、クラウドサービスやビッグデータ解析等と連携した新たな価値提案や、さらなる小型化、低消費電力化、多機能化など使い勝手の向上を進めていきます。

将来の利用イメージ

今回開発したウェアラブル電極インナーは、着るだけで心拍・心電図の計測を可能にします（図6）。電解質ペーストを使用する必要もなく、柔軟で通気性のある電極素材なので、着用者に負担をかけることなく日常の生体情報をモニタすることができます。心電図の常時モニタリングにより、疾病の早期発見・早期治療につながる診断サポートに期待が持たれます。医療ICTのキーデバイスの1つとして、在宅医療や遠隔医療等の医療分野への応用を検討しています。病院や大学の医学部と連携しながら、医療品質の検証とその適用範囲の拡大についても取り組んでいます。今回開発した導電性高分子・繊維の複合素材は、生体信号を検出するための電極として、ウェアラブル電極インナーによる心拍・心電図のモニタリング以外への応用も可能です。脳波の計測や、体内への埋め込み電極への応用についても、研究レベルから検討を進めています。

心拍変動のモニタリングは、運動時の負荷を管理し、無理のない運動の指

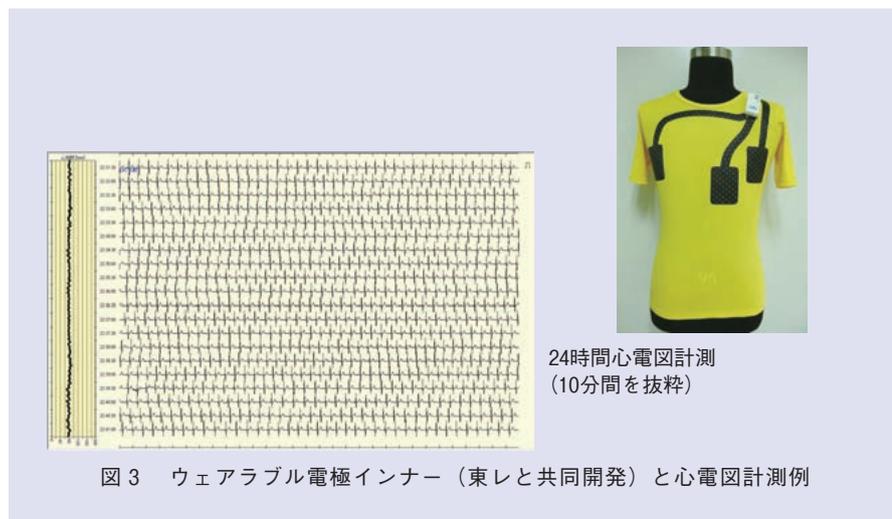


図3 ウェアラブル電極インナー（東レと共同開発）と心電図計測例

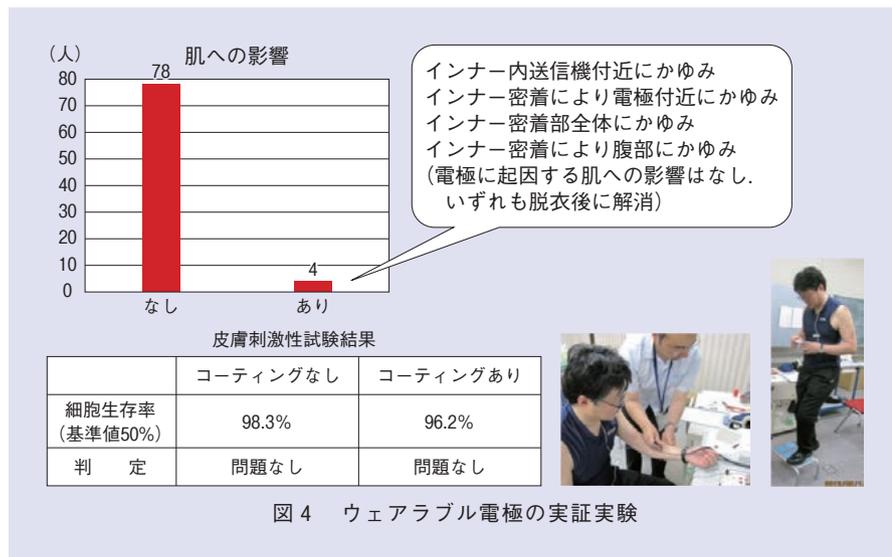


図4 ウェアラブル電極の実証実験

*3 QRS波：心室の興奮時に生じる波形。

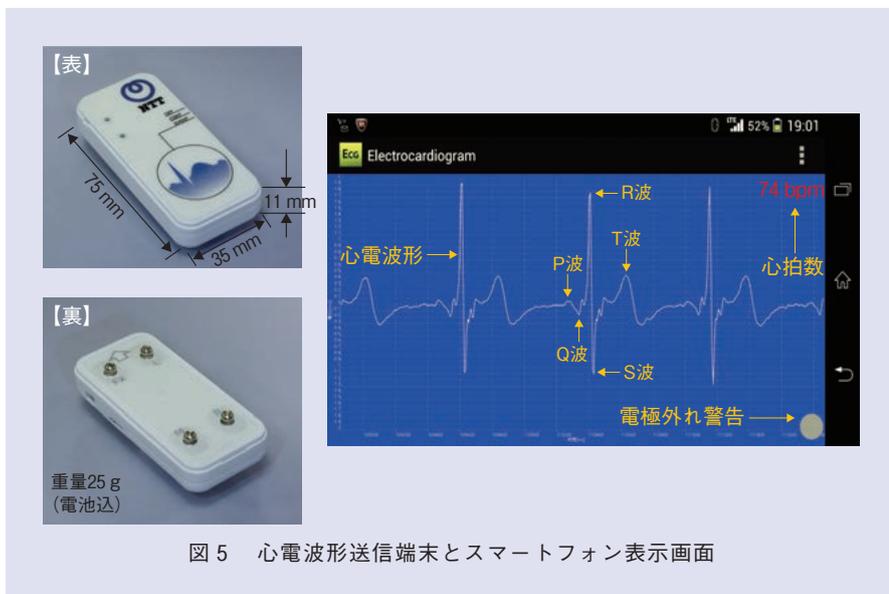


図5 心電波形送信端末とスマートフォン表示画面

メンタル面からの健康管理にも有効であると考えられます。

このようにウェアラブル電極インナーは、医療分野から、健康増進やスポーツ・エンタテインメントまで、幅広い応用が考えられます。社内外での連携を深めながら、実用化を目指した取り組みを進めています。

■参考文献

(1) T. Nyberg, A. Shimada, and K. Torimitsu: "Ion Conducting Polymer Microelectrodes for Interfacing with Neural Networks," J. Neurosci. Meth., Vol. 160, pp.16-25, 2007.
 (2) S. Tsukada, H. Nakashima, and K. Torimitsu: "Conductive Polymer Combined Silk Fiber Bundle for Bioelectrical Signal Recording," PLoS ONE, Vol.7, e33689, 2012.

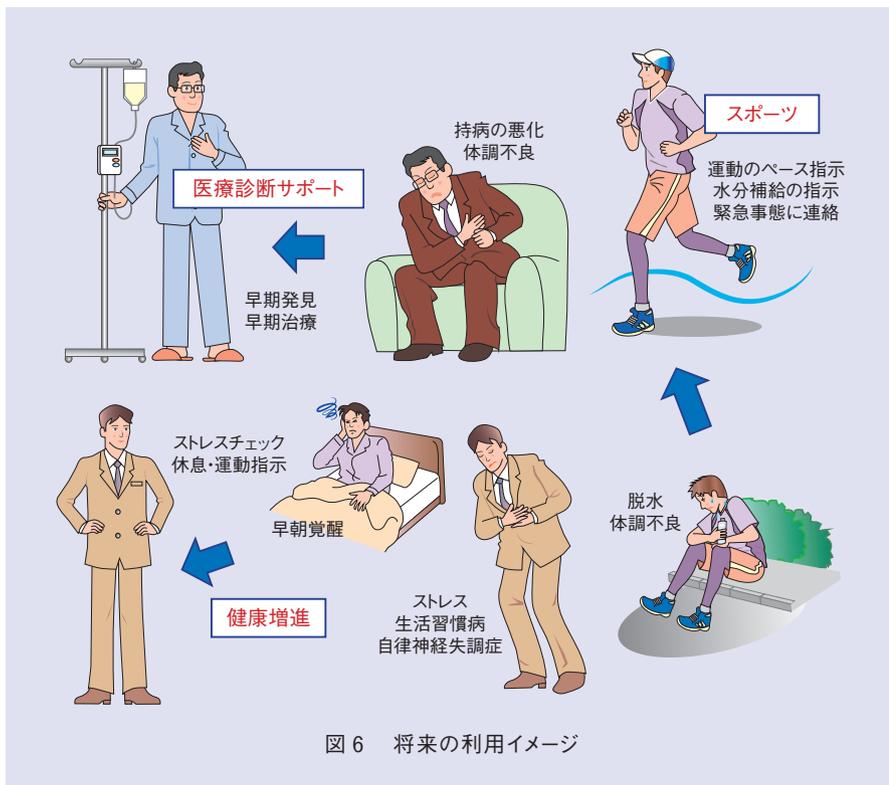


図6 将来の利用イメージ



(後列左から) 住友 弘二 / 川野 龍介 / 高河原 和彦
 (前列左から) 藤井 孝治 / 塚田 信吾 / 河西 奈保子

ウェアラブル電極インナーで、心電図計測が必要な患者さんの負担を減らすことを目指しています。また、スポーツやエンタテインメントでの活用をとおして、健康で豊かな生活への貢献ができるように研究や開発を進めていきます。

◆問い合わせ先

NTT先端技術総合研究所
 企画部 プロデュース担当
 TEL 046-240-2256
 FAX 046-270-2351
 E-mail fujii.kouji@lab.ntt.co.jp

示や健康管理に有効です。ウェアラブル電極インナーを着用するだけで、いろいろなスポーツを楽しむ場面での利用が考えられます。また心拍間隔は、じっと安静にしているときでも変動しているのが普通ですが、この心拍変動の揺らぎは、自律神経機能やストレスと密接なかかわりを持つことが知られ

ています。心電図のQRS波から正確に計測される心拍変動は、運動負荷の評価に加えてメンタル面の定量的な評価にも活用できます。今回開発したウェアラブル電極インナーは、睡眠時を含めた心拍変動の常時モニタリングを可能にするため、いろいろなストレスにさらされている働き盛り世代の、