

ナノメッシュセンサを用いた生体信号計測

東京大学工学部電気電子工学科

横田 知之

Tomoyuki YOKOTA



1. はじめに

日本社会の急速な高齢化に伴い、増加する医療費を削減しつつ、生活の質を向上させるという課題が現代社会において重要な焦点となっている。この課題への解決策として、ウェアラブルデバイスなどを駆使した生体情報の計測手法が注目を集めている。特に、「セルフケア」と「在宅医療」というアプローチは、高齢者人口が急増している社会における解決策として有望視されており、個々の患者やその家族が自身の健康管理に貢献する枠組みが形成されると考えられている。実際、日常的に健康状態をモニタできるウェアラブルセンサや、通信機能を組み込んだ家庭用血圧計などの製品化が進んでいる。

このようなウェアラブルセンサの製品化が進んでいく中で、次世代のウェアラブルセンサの1つとして期待されているのがスキンセンサである。スキンセンサは、皮膚に直接デバイスを貼り付けることで、高精度な生体信号の計測が可能となる。このようなスキンセンサは、軟らかい素材を用いたり、デバイスの厚みを薄くすることで、皮膚への密着性・追従性が向上することが報告されている¹⁾。近年、皮膚との高い追従性・密着性という特徴を生かして、薄い基板上に作製された物理センサ^{2), 3)}や化学センサ^{4), 5)}といったスキンセンサの研究が次々と報告されてきている。一方で、これらのスキンセンサを用いて生体信号を長期間計測する際には、通気性が大きな課題の1つになっている。従来のスキンセンサは、基板に連続したフィルムを用いているため、通気性が低く、汗による蒸れや皮膚の炎症を起

こすことがあった。そのため、センサ自体が軟らかく、かつ通気性が高いスキンセンサ技術を開発する必要がある。

本稿では、我々が開発した通気性のあるナノメッシュセンサについて紹介する。開発したナノメッシュセンサは、直径が数百 nm のナノファイバーで構成されており、立体的にポーラス構造を有している。その結果、通常の連続したフィルムを用いたスキンセンサと比較して高い通気性を有している。実際、このナノメッシュセンサを1週間皮膚に貼り付けても、炎症を起こさないことが確認できた⁶⁾。さらに、複数のナノメッシュシートを積層することで、皮膚に貼り付けることが可能な圧力センサや音響センサを開発することにも成功した^{7), 8)}。

2. ナノメッシュ電極の構造

この節では、我々の開発したナノメッシュ電極の作製手法について説明する。まず、ポリビニルアルコール (PVA) のナノファイバーシートを電気紡糸法により形成し、ナノファイバーシートの表面に厚さ70~100 nm の金薄膜を蒸着により成膜する。次に、作製したナノファイバーシートを肌に直接貼り付け、水を吹き付けることで、PVA ナノファイバーを溶解させる (図1)。すると、金薄膜の下に数 nm の厚さのPVA層のみが皮膚上に残る。このPVA層が金薄膜を皮膚に固定するための接着層として作用することで、皮膚上にナノメッシュ電極を貼り付けることができる。貼り付けたナノメッシュ電極は、PVA を接着層として用いているため、水で容易に剥がすことができる。このナノメッシュ電極の抵抗率は、 $5.3 \times 105.3 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ 程度であり、ガラス基板やフィルム基板上に蒸着した連続した金薄膜の抵抗率と比較してわずかに高いものの、皮膚上の配線やセンサとして使用するには十分低い値を実

■ 著者連絡先

東京大学工学部電気電子工学科
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: yokota@ntech.t.u.tokyo.ac.jp

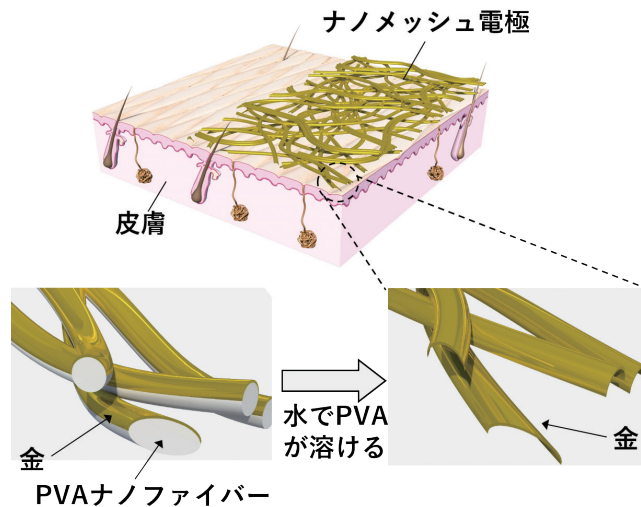


図1 ナノメッシュ電極の作製プロセス⁶⁾
PVA, polyvinyl alcohol.

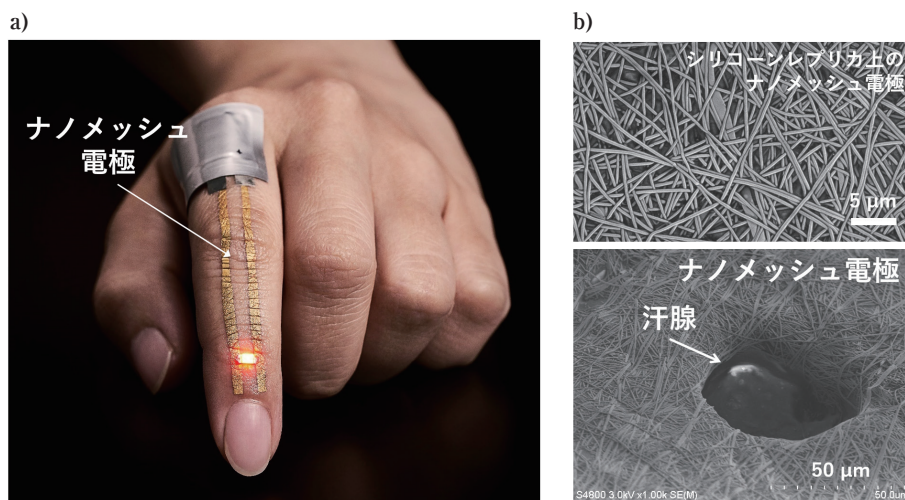


図2 指に貼り付けたナノメッシュ電極⁶⁾
(a) ナノメッシュ電極, (b) ナノメッシュ電極のSEM画像

現している。さらに、このナノメッシュ電極は機械的耐久性にも優れており、最大25%の伸縮試験を500回行ったのうちでも、抵抗率の変化は10%未満であった。

図2aに皮膚上に貼り付けたナノメッシュ電極を示す。ナノメッシュ電極は、皮膚の細かいしわにも追従するように貼られていることが見て取れ、さらにチップ型発光ダイオード(LED)とフレキシブルバッテリーをナノメッシュ電極と接続することで、電気が流れてLEDが点灯していることがわかる。次に、図2bに、ナノメッシュ電極の走査電子顕微鏡(SEM)画像を示す。ナノメッシュ電極は、直径数百nmの多数のナノファイバーから構成されており、3次元のポーラス構造を有している。このナノメッシュ電極は、指紋やしわといった皮膚表面の複雑な形状に追従して貼り付けることができるが、皮膚表面にある汗腺部分を

確認したところ、汗腺がナノメッシュ電極で覆われていないことが見て取れる。さらに、ナノメッシュ電極は3次元のポーラス構造を有しているため通気性が高く、皮膚にナノメッシュ電極を1週間貼り付けても、医学的な皮膚刺激などの臨床症状は観察されなかった。

3. ナノメッシュセンサを用いた生体計測

この節では、ナノメッシュセンサを用いた実際の生体計測に関していくつか紹介する。前節で説明した通り、ナノメッシュ電極は低い抵抗率と高い皮膚追従性を有している。そのため、心電図や筋電図といった生体信号の測定のためのドライ電極として用いることが可能である。実際にナノメッシュ電極を用いて心電図をワイヤレスで計測している様子を図3に示す。このワイヤレス心電図計測システ

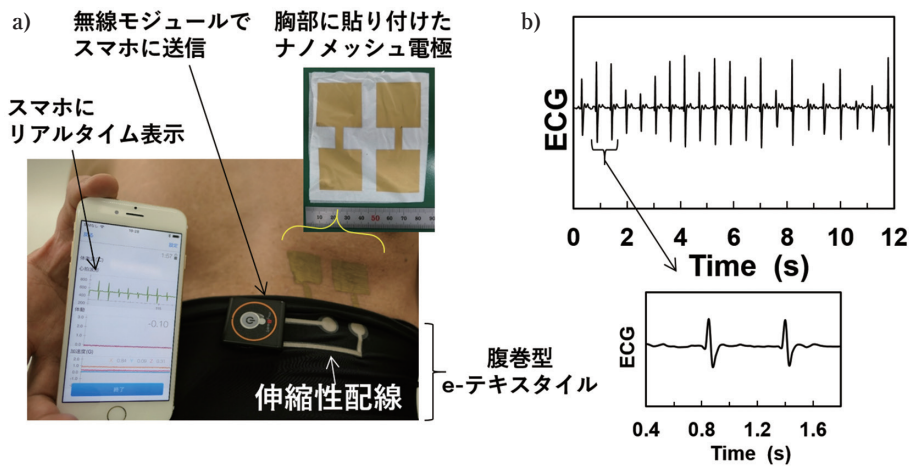


図3 ワイヤレス心電図計測システム
 (a) ワイヤレス心電図計測システム, (b) ワイヤレス心電図計測システムを用いた心電波形の測定結果
 ECG, electrocardiogram.

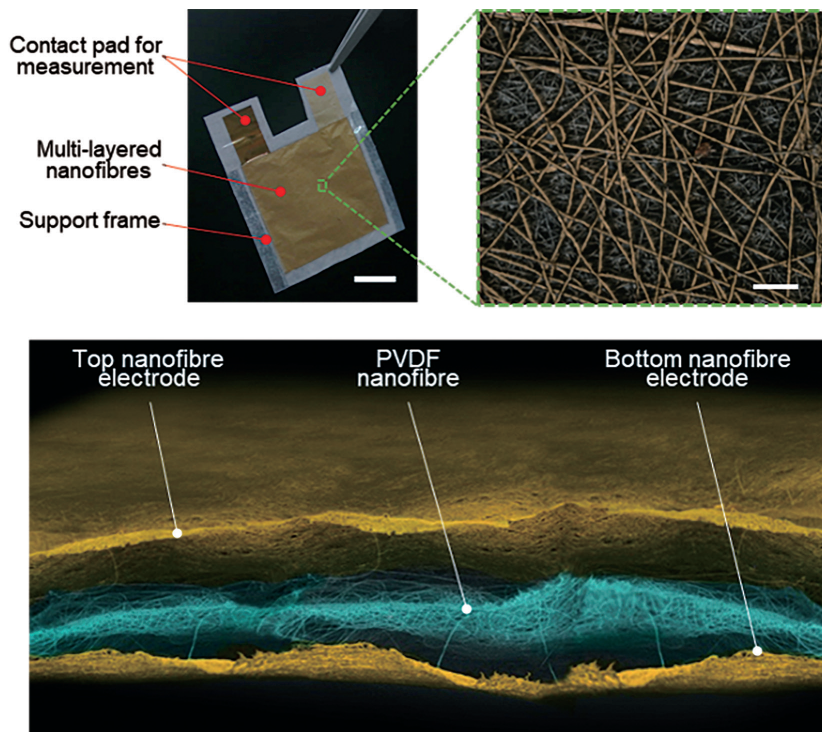


図4 ナノメッシュ構造を有する音響センサ (文献7より改変転載)
 PVDF, polyvinylidene fluoride.

ムは、生体信号を計測するためのナノメッシュ電極とデータを読み出すためのテキスタイル型の無線通信システムとの2つで構成されている。ナノメッシュ電極は皮膚に直接貼り付けられており、テキスタイル上に印刷された伸縮性導体を介して無線モジュールに接続されている。この無線モジュールは、テキスタイルとの良好な固定を実現するために、スナップボタンを用いて固定している。実際にこのシステムを用いて計測した心電波形を図3bに示す。これ

によると、ナノメッシュ電極は皮膚と高い密着性を有しており、さらにテキスタイルとナノメッシュ電極との接続も安定している。そのため、非常に安定した心電波形を計測できていることがわかる。

次に、複数のナノファイバーシートを積層した2種類のナノメッシュセンサを用いた生体計測について紹介する。図4に示すのは、音をセンシング可能なナノメッシュ型の音響センサである。このセンサは、3枚のナノファイバー

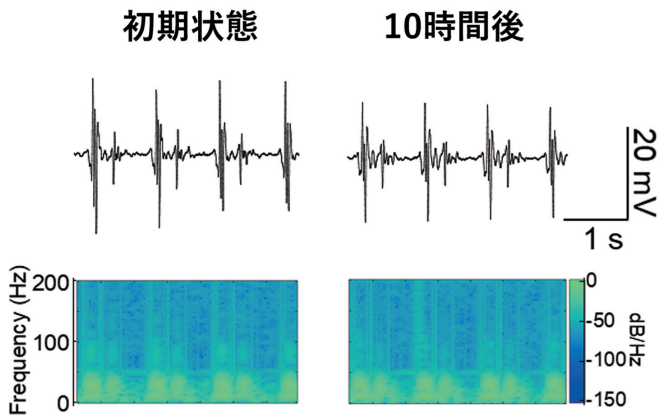


図5 ナノメッシュ型音響センサを用いた心音計測 (文献7より改変転載)

シートから構成されており、電極として用いる上下のナノファイバーシートと、中間層の圧電性を示すポリフッ化ビニリデン (PVDF) のナノファイバーシートを積層することでセンサとして動作する。この音響センサは、500 Hz以下の低周波領域で $10,000 \text{ mV/Pa}^{-1}$ 以上の高い感度を示している。これは、音波をセンサに印加すると、圧電性をもつ中間層のナノファイバーシートが大きく振動することで実現することができた。さらに、この音響センサはナノファイバーシートを用いているため、高い機械的耐久性と高いガス透過性を兼ね備えている。実際に曲げ半径6.5 mmで1,000回の曲げ耐久性試験を行っても、センサの電気的性能に大きな変化は確認できなかった。また、音響センサを胸部に貼り付けることで、心臓の鼓動音の長期連続(10時間)計測を行うことにも成功した。図5に、ナノメッシュ型音響センサを用いて心臓の鼓動音を測定した結果を示す。測定された心音信号は、市販の医療用のマイクで測定した心音とほぼ同等の波形を示しており、S/N比は40.9 dBと高い値を示していることが確認できた。

ナノメッシュセンサの中間層を変更することで、その他の機能性を付与することもできる。図6に示す圧力センサは、4つのナノファイバーシートを積層することで形成している。4つのナノファイバーシートはそれぞれ、封止膜層、上部ナノメッシュ電極層、ナノメッシュ中間層、下部ナノメッシュ電極層となっている。圧力センサ自体は、3層で構成されているが、さらに封止膜層として1層を追加することにより、センサの機械的耐久性を向上させることができる。実際、このセンサの表面に50 gの荷重を加えながら摩耗試験を行ったところ、センサの電気特性がほとんど変化しないことが確認できた。また、図7にナノメ



図6 ナノメッシュ構造を有する圧力センサ (文献8より改変転載)

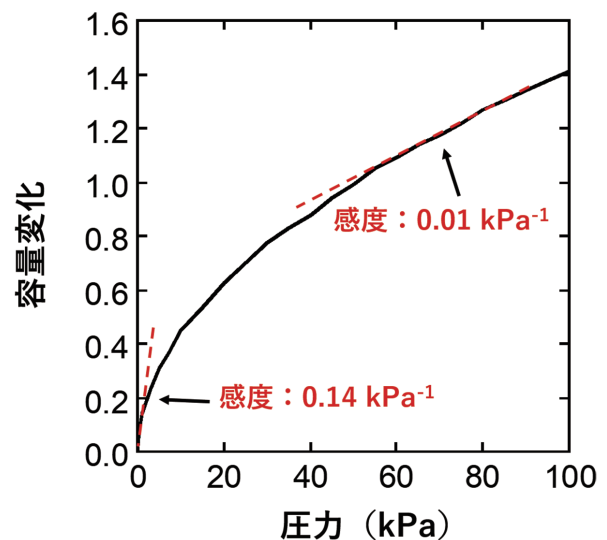


図7 ナノメッシュ構造の圧力センサの電気特性 (文献8より改変転載)

シユ構造の圧力センサの電気特性を示す。これによると、圧力を印加すると、上限の電極層と中間層とのギャップや接触の具合が変化し、センサの静電容量が変化することで、圧力をセンシングすることができる。この圧力センサの感度を計算したところ、低い圧力領域では 0.14 kPa^{-1} という高感度を示すことが確認できた。さらに、このデバイスを指に装着して物を持ったときの把持力の評価を行った。綿のような軽くて軟らかいものを把持したところ、センサの静電容量は変化を示しており、高い感度を有していることがわかる(図8)。

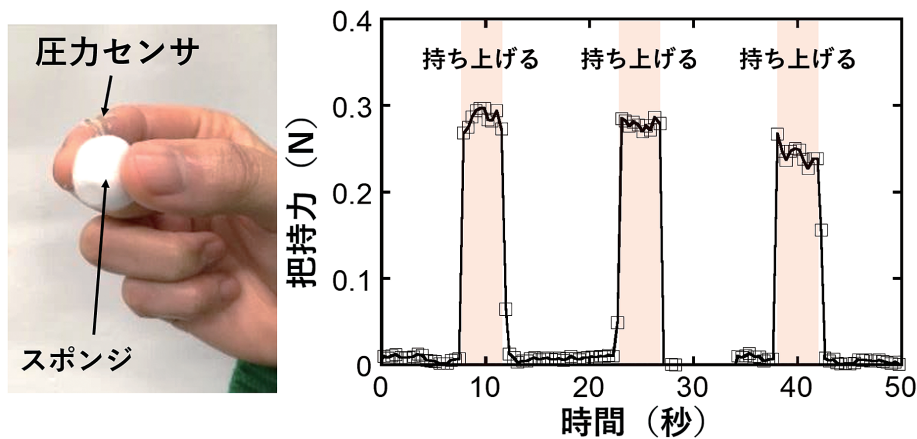


図8 軟らかい綿を用いた際の把持力計測 (文献8より改変転載)

4. まとめ

我々は、ナノファイバーを用いたナノメッシュセンサを開発し、心電図や心音、把持力といった生体信号を計測可能なスキンセンサの開発にも成功した。このセンサは、多孔質構造のナノファイバーから形成されているため、高いガス透過性と軟かさを有している。また、このナノメッシュセンサを皮膚に直接貼り付けることで、心電図や心音、把持力といった生体信号を長期連続モニタリングすることにも併せて成功した。さらに、実際にセンサを1週間皮膚に直接貼り付けた際の皮膚の状態を観察したところ、装着した全員が炎症を起こしていないことが確認できた。

今回、開発したセンサとテキスタイル型の無線通信システムを組み合わせることで、将来の在宅医療やセルフケア向けのウェアラブルセンサの開発に大きく貢献することができると期待されている。

本稿の著者には規定されたCOIはない。

文 献

- 1) Kim DH, Lu N, Ma R, et al: Epidermal electronics. *Science* **333**: 838-43, 2011
- 2) Webb RC, Bonifas AP, Behnaz A, et al: Ultrathin conformal devices for precise and continuous thermal characterization of human skin. *Nat Mater* **12**: 938-44, 2013
- 3) Kaltenbrunner M, Sekitani T, Reeder J, et al: An ultralightweight design for imperceptible plastic electronics. *Nature* **499**: 458-63, 2013
- 4) Araki H, Kim J, Zhang S, et al: Materials and device designs for an epidermal UV colorimetric dosimeter with near field communication capabilities. *Adv Funct Mater* **27**: 1604465, 2016
- 5) Gao W, Emaminejad S, Nyein HYY, et al: Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis. *Nature* **529**: 509-14, 2016
- 6) Miyamoto A, Lee S, Cooray NF, et al: Inflammation-free, gas-permeable, lightweight, stretchable on-skin electronics with nanomeshes. *Nat Nanotechnol* **12**: 907-13, 2017
- 7) Nayeem MOG, Lee S, Jin H, et al: All-nanofiber-based, ultrasensitive, gas-permeable mechanoacoustic sensors for continuous long-term heart monitoring. *Proc Natl Acad Sci U S A* **117**: 7063-70, 2020
- 8) Lee S, Franklin S, Hassani FA, et al: Nanomesh pressure sensor for monitoring finger manipulation without sensory interference. *Science* **370**: 966-70, 2020