

## 皮膚密着型ウェアラブルデバイスを用いた連続生体モニタリング

\*<sup>1</sup>東京農工大学大学院工学研究院, \*<sup>2</sup>東京大学大学院工学系研究科

山岸 健人\*<sup>1</sup>, 横田 知之\*<sup>2</sup>, 染谷 隆夫\*<sup>2</sup>

Kento YAMAGISHI, Tomoyuki YOKOTA, Takao SOMEYA



### 1. はじめに

電子デバイスの小型化・高性能化に伴い、人体に装着して生体情報を長時間取得するウェアラブルデバイスの研究開発が急速に進展している。特に心電図、筋電図 (electromyogram, EMG)、体温、呼吸などの生体信号を日常生活の中で連続的に計測する技術は、疾患の早期発見や慢性疾患の長期管理、さらには予防医療の実現に向けた重要な基盤技術として注目されている。

従来の生体信号計測では、ゲル電極や粘着電極を用いた計測が広く用いられてきたが、長時間装着に伴う皮膚刺激やゲルの乾燥による信号品質の低下などが課題とされてきた。また、人体は日常生活の中で常に变形や運動を伴うため、硬い電子デバイスを直接装着すると機械的ミスマッチが生じ、装着感の低下や計測の不安定化につながる。

これらの課題を解決するために、近年では皮膚の变形や動きに追従可能な柔軟・伸縮性エレクトロニクスが注目されている<sup>1)</sup>。特に、極薄の高分子フィルムやナノメッシュ構造を用いた皮膚密着型デバイスは、皮膚表面の微細な凹凸にまで追従して密着することができ、接着剤を用いずに安定した生体信号計測を実現できる可能性が示されている<sup>2)</sup>。また、液体金属などの高い伸縮性を有する導電材料の導入により、大きな变形を伴う人体動作下でも安定した電気特性を維持できるウェアラブルデバイスの開発が進んでいる<sup>3)</sup>。

本稿では、皮膚密着型ウェアラブルデバイスによる連続生体モニタリング技術について概説する。まず、生体組織

と電子デバイスの機械的整合性の観点から、柔軟・伸縮性エレクトロニクスの設計原理について述べる。次に、著者が開発したナノシート電極、ナノメッシュ電極などの代表的な研究例を紹介する。最後に医療・ヘルスケア分野における応用と今後の展望について述べる。

### 2. 皮膚密着型ウェアラブルデバイスの設計原理

皮膚密着型ウェアラブルデバイスを実現するためには、電子デバイスと生体組織の機械的特性の違いを適切に調整することが重要である。人体を構成する組織は一般に柔らかく、皮膚や筋肉などの軟組織の弾性率は数 kPa～数 MPa 程度とされている。一方で、従来の電子デバイスに用いられる金属や半導体材料の弾性率は数十 GPa 以上と非常に高く、生体組織との間には大きな機械的ミスマッチが存在する。このような剛性差は、装着時の違和感や皮膚への負担を引き起こすだけでなく、体動に伴うデバイスの剥離や接触抵抗の変動を生じさせる要因となる。その結果、生体信号の安定計測が困難になることがあり、機械的整合性の確保はウェアラブルデバイス設計における重要な課題となっている。

この問題を解決するため、柔軟エレクトロニクスおよび伸縮性エレクトロニクスの研究が進められてきた。代表的なアプローチの1つは、基板材料にエラストマーなどの柔軟材料を用いることである。ポリジメチルシロキサン (PDMS) やポリウレタン (PU) などの高分子材料は、生体組織に近い低い弾性率を有し、大きな变形にも追従可能である。そのため、これらの材料はウェアラブルデバイスの基板として広く利用されており、皮膚の变形や動きに追従できるデバイス構造の実現に寄与している。さらに、柔軟材料を用いることで、長時間装着時の装着感の改善や皮膚への負担の軽減も期待されている。

#### ■ 著者連絡先

東京農工大学大学院工学研究院  
(〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16 14号館506号室)  
E-mail. yamagishi@go.tuat.ac.jp

もう1つの重要な設計指針は、デバイスの厚みを極薄化することである。薄膜材料の曲げ剛性は厚みの3乗に比例するため、材料自体の弾性率が比較的高い場合でも、デバイスを数百nm～数 $\mu$ mオーダーまで薄くすることで、柔軟性を大幅に向上させることができる<sup>2)</sup>。これにより、皮膚の曲面や微細な凹凸にまで追従することが可能となり、安定した密着状態を実現できる。この原理に基づき、数百nm程度の高分子ナノシートや超薄膜電子デバイスが開発されている。これらの極薄デバイスは皮膚表面に自然に密着し、接着剤を用いなくても安定した接触を維持できる点が特徴である。

さらに、デバイス全体の伸縮性を確保するためには、配線構造の設計も重要となる。直線状の金属配線は数%程度の伸びで破断してしまうが、蛇行状構造<sup>4)</sup>やメッシュ構造<sup>5)</sup>、切り紙構造<sup>6)</sup>などの幾何学的設計を導入することで、大きな変形を構造的に吸収することができる。このような構造設計により、電子回路としての機能を維持したまま数十%以上の伸縮に耐えるデバイスが実現されている。また、これらの構造は人体の関節周辺など、大きな変形が生じる部位に装着するウェアラブルデバイスにおいて、特に有効である。そのため、構造設計は柔軟エレクトロニクスにおける重要な設計要素の1つとなっている。

近年では、材料そのものに高い伸縮性を持たせる研究も進んでいる。導電性高分子<sup>7)</sup>やナノコンポジット材料<sup>8)</sup>は、柔軟性と導電性を兼ね備えた材料として広く研究されている。さらに、ガリウム系液体金属<sup>9)</sup>などの導電材料は、金属レベルの高い導電率と流体のような変形追従性を併せ持つことから注目されている。これらの材料は大きな変形下でも電気特性を維持できるため、ウェアラブルエレクトロニクスにおける配線材料として有望視されている。加えて、液体金属を用いた配線は自動的に形状を回復させる特性を持つ場合があり、耐久性の高いデバイス設計にもつながる可能性がある。

以上のように、皮膚密着型ウェアラブルデバイスの実現には、材料特性の最適化、デバイスの薄膜化、および構造設計を組み合わせることにより、生体組織との機械的整合性を確保することが重要である。これらの設計指針に基づき、近年さまざまな皮膚密着型生体センサが開発されている。特に、極薄構造や高い通気性を備えたデバイスは、長時間装着時でも皮膚への負担が少なく、安定した生体信号計測を可能にする。こうした技術は、医療分野だけでなくスポーツ科学やヘルスケア分野など、幅広い応用が期待されている。

次項では、著者らのこれまでの研究の例として、①ナノ

メッシュ電極を用いた皮膚インピーダンス計測<sup>10)~12)</sup>および触覚センサ<sup>13), 14)</sup>への応用、②ナノシート電極を用いた筋電図計測とアスリートの運動計測への応用<sup>6), 15)</sup>について紹介する。これらの研究は、前述した設計原理を実際のウェアラブルデバイスに応用した例であり、皮膚密着型ウェアラブルデバイスの実用化に向けた重要な成果である。さらに、これらの技術は生体信号の長時間計測や日常生活環境での運動計測を可能にすることから、次世代の生体モニタリング技術として期待されている。

### 3. 皮膚密着型電極による生体信号計測

#### 1) ナノメッシュ電極による長期皮膚抵抗計測

皮膚インピーダンス(あるいは皮膚電気抵抗)は、角層のバリア機能や発汗状態を反映する重要な生理指標であり、皮膚疾患の評価や心理状態のモニタリングなどに広く利用されてきた。しかし、従来用いられてきたゲル電極は皮膚表面を密閉してしまうため、長時間の装着では蒸れや炎症を引き起こす可能性があり、皮膚の自然な生理状態を維持したまま長期連続計測を行うことは困難であった。そこで著者らは、ナノファイバーから構成される多孔質構造を利用したナノメッシュ電極<sup>16), 17)</sup>を開発し、皮膚の呼吸や発汗を阻害することなく長時間装着可能な皮膚密着型電極を実現した(図1)。金属をコーティングしたナノメッシュ構造は高いガス透過性と機械的柔軟性を有しており、皮膚の微細構造に追従して密着することで、快適性と高品質な生体信号取得を両立できる。

著者らはこのナノメッシュ電極を用いて、皮膚電気抵抗を日常生活環境下で連続的に計測する手法を提案した。ポリビニルアルコール(poly(vinyl) alcohol, PVA) ナノファイバーを基材とし、その上に金薄膜を形成したナノメッシュ電極を皮膚に直接貼付することで、皮膚の水分蒸散を阻害することなく安定した電氣的接触を実現した。この電極を用いた計測では、皮膚抵抗の時間変化を長時間にわたり連続的に取得できることが示されており、経皮水分蒸散量(transdermal water loss, TEWL)との間に高い相関があることも確認されている。さらに、日常生活中においても最大約30時間の連続計測が可能であり、皮膚の生理状態のダイナミクスを可視化できることを示した<sup>11)</sup>。

一方で、PVAのみを用いたナノメッシュ電極では、水や汗に曝露された際の耐久性や機械的安定性に課題が残っていた。特に手のひらなど発汗量が多く、かつ大きな変形が生じる部位では、長時間の安定計測が難しい場合がある。そこで著者らは、PVAと水系PUをブレンドしたナノファイバーを用いた新しいナノメッシュ電極を開発した。この

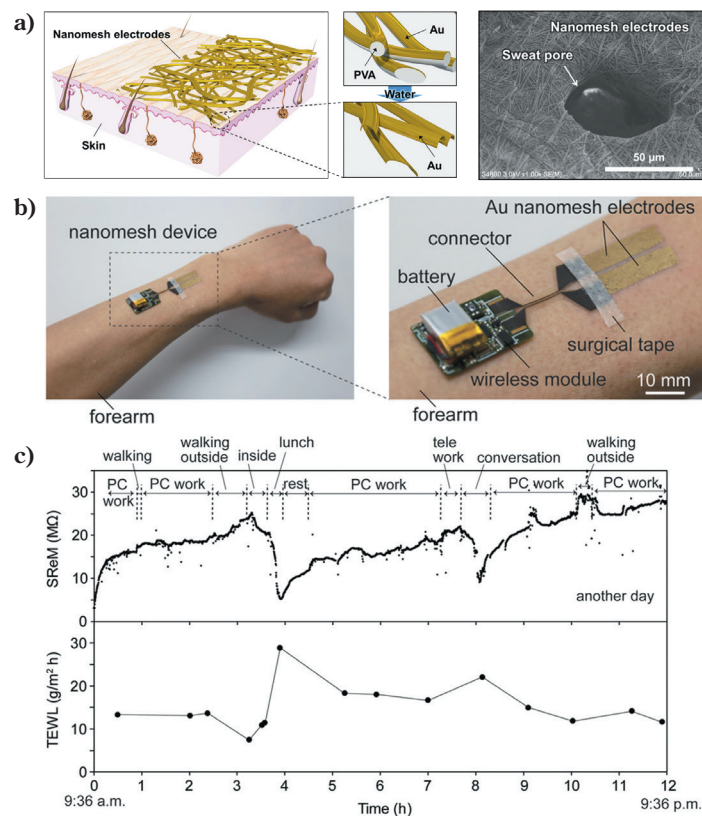


図1 ナノメッシュ電極による皮膚抵抗の長期計測 [a] 文献17より改変して転載, b), c) 文献11より転載]

a) ナノメッシュ電極の構造と皮膚への密着の概念図。エレクトロスピンニングにより形成したポリビニルアルコール (poly (vinyl alcohol), PVA) ナノファイバー上に金 (Au) を蒸着し、その後水処理によりPVAを除去することでAuナノメッシュ導体を形成する。得られたナノメッシュ電極は皮膚表面に高い追従性を示し、汗孔などの微細構造にも適合する。右図は汗孔周辺に追従したナノメッシュ電極のSEM像。

b) 前腕に装着したナノメッシュ電極と無線計測モジュールの外観。電極は医療用テープで固定され、小型バッテリーおよび無線モジュールと接続される。

c) 日常生活下における皮膚抵抗変動 (skin resistance measurement, SReM) の長時間計測例と、同時に測定したTEWLとの比較。歩行やPC作業などの日常行動に伴う皮膚状態の変化が連続的に記録されている。

電極では、PVAが皮膚への一時的な接着層として機能する一方で、PUが残存することで、メッシュ構造の機械的強度と耐水性を維持する。最適化されたPVA/PUブレンドナノメッシュ電極では、通気性を保持したまま高い耐水性と伸縮性を実現しており、水流下でも24時間以上安定した電気特性を維持するとともに、80%の伸長や繰り返し変形下でも高い電気的安定性を示すことが確認されている<sup>10)</sup>。

これらの研究により、ナノメッシュ構造を利用した皮膚密着型電極が、皮膚の生理機能を阻害することなく長時間の生体信号計測を可能にする有効なアプローチであることが示された。材料設計や構造最適化の進展により、耐水性・伸縮性・通気性を同時に満たす電極が実現されつつあり、皮膚抵抗を含む多様な生体信号の長期モニタリングへの応用が期待される。

## 2) ナノメッシュ電極による触覚センシング

皮膚上で触覚や力学的刺激を計測するためには、皮膚の自然な変形を妨げない柔軟なセンサが必要である。従来の歪みセンサや圧力センサは、ポリマー基板や封止層を含む

比較的厚い構造を有することが多く、皮膚表面の微小変形を計測する際に機械的干渉が生じる場合がある。特に、指先など外部物体と頻繁に接触する部位では、摩擦やせん断応力によってセンサが破損したり、剥離したりする問題も指摘されてきた。そこで著者らは、ナノメッシュ構造を利用することで極めて薄く柔軟でありながら、外部摩擦に対して高い耐久性を有する皮膚貼付型圧力センサを開発した(図2)<sup>13), 14)</sup>。

著者らが開発したナノメッシュ圧力センサは、PUナノメッシュを保護層とし、PDMSで被覆したPUナノメッシュ上に金薄膜を形成した導電層を組み合わせた構造を有する。このセンサは厚さ約5 μm程度と非常に薄く、皮膚の角層や表皮と同程度あるいはそれ以下の引張剛性を示すため、皮膚の自然な変形に追従することができる。また、ナノメッシュ構造によって有効弾性率が低減されるとともに、メッシュの多孔質構造により強い密着性が得られるため、皮膚上での安定したセンシングが可能となる。さらに、伸長に伴う抵抗変化を利用した抵抗型歪みセンサとして機

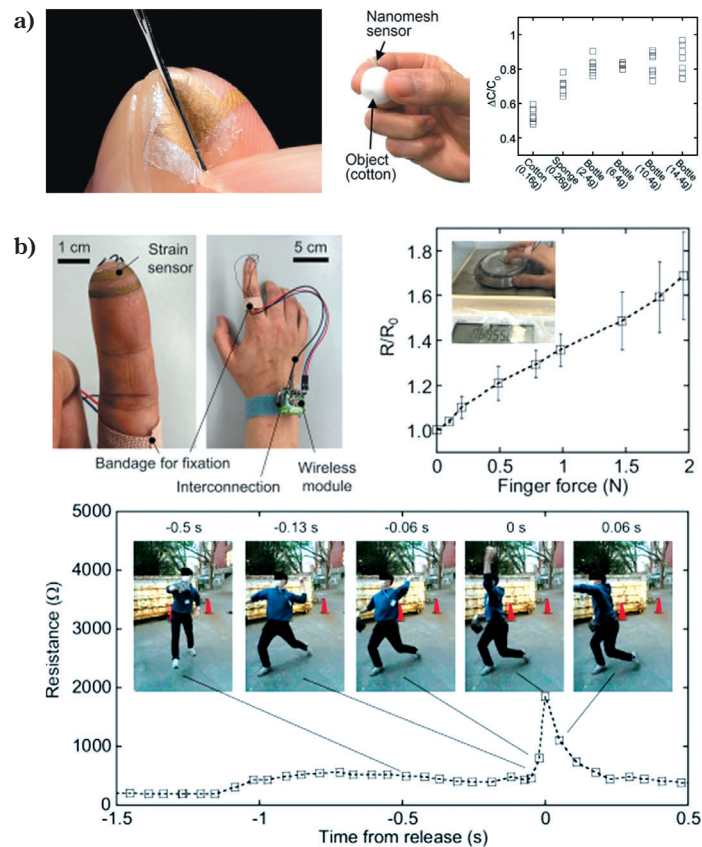


図2 ナノメッシュ電極による触覚センシング [a] 文献14より転載, b) 文献13より転載]

- a) ナノメッシュ圧力センサを用いた触覚センシング。  
 左：人差し指に装着したナノメッシュ圧力センサ。  
 中央：綿球などの自然物を把持した際の把持力計測の様子。  
 右：6種類の自然物を持ち上げた際のピーク把持力の測定結果（各プロットは1回の把持を示す）。  
 b) ナノメッシュ圧力センサによる指先動作計測。  
 左上：指先に装着したセンサの計測システム。  
 右上：指で加えた力に対する抵抗変化 (n = 3)。  
 下：投球動作中の抵抗変化の連続計測。

能し、皮膚変形に応じた抵抗変化を高感度に検出することができる<sup>14)</sup>。

さらに、このセンサではPUナノメッシュを用いた保護層を導入することで、外部摩擦に対する耐久性を大幅に向上させている。摩擦保護層を導入しない場合、外部物体との接触によりセンサ抵抗が不可逆的に増加し、測定が困難になることが確認された。一方、PUナノメッシュ保護層を導入することで、160 kPa以上の垂直圧力下での摩擦にも耐え、1,000回以上の摩擦サイクルに対しても電気特性の変化は数%程度に抑えられることが示されている。このような高い機械的耐久性により、日常動作やスポーツ動作などの過酷な条件下でも安定した計測が可能となる<sup>13)</sup>。

実際の応用例として、著者らはこのナノメッシュ圧力センサを指先に貼付し、物体操作時の指の変形をリアルタイムに計測できることを示した。指先に力が加わると皮膚が変形し、それに伴ってセンサ抵抗が変化するため、指先に

加わる力や動作を定量的に取得することができる。さらに、ボールを投げる動作のように強い摩擦やせん断応力が生じる状況においても、センサは破損することなく皮膚変形に対応した抵抗変化を検出できることが確認されている。このような特徴により、ナノメッシュセンサは触覚情報の計測や手指動作の解析、さらにはスポーツ科学やリハビリテーション分野への応用が期待される。

### 3) ナノシート電極によるEMG計測とアスリートの運動解析

表面筋電図 (surface electromyography, sEMG) は、筋活動を非侵襲的に計測できる代表的な生体信号であり、医学研究、リハビリテーション、スポーツ科学など幅広い分野で利用されている。しかしながら、従来のEMG電極はゲル電極や比較的厚いウェアラブルデバイスを用いることが多く、皮膚との機械的剛性の不一致や装着時の違和感が問

題となる場合がある。特にアスリートのように繊細な皮膚感覚を有する被験者や、激しい運動中の計測では、電極の厚さや剛性が動作を妨げる可能性がある。そのため、皮膚表面に高い密着性を有し、装着者の運動を妨げない超薄型電極の開発が求められている。

このような背景のもと、著者らは高分子ナノ薄膜を用いた極薄電極「電子ナノ絆創膏」を開発し、皮膚に直接貼り付けてsEMGを計測する技術を提案した<sup>15)</sup>。この電極は、導電性高分子であるPEDOT:PSS [poly(3,4-ethylene dioxythiophene) /poly(4-styrenesulfonate)]を導電層とし、ポリ乳酸(PLA)やスチレン-ブタジエン-スチレン(SBS)共重合体などの高分子薄膜を支持層として構成された二層型ナノ薄膜電極であり、膜厚はおよそ200~400 nmと極めて薄い構造を有する。ナノスケールの薄さにより曲げ剛性が大幅に低減されるため、皮膚の微細な凹凸や変形に追従して密着し、粘着ゲルを用いることなく皮膚表面に安定して貼付することが可能である。

電子ナノ絆創膏は、激しい運動や発汗条件下でも皮膚から剥離することなく安定して動作することが確認されている。例えば手首に貼付した場合、繰り返しの関節屈曲運動に対しても電極抵抗はほぼ一定に保たれ、皮膚との密着性が維持される。また、上腕部に貼付した電子ナノ絆創膏を用いて表面筋電位を計測した結果、市販の医療用生体電極パッドと同等の信号対雑音比(S/N比)で筋電位を取得できることが示されている。これらの結果は、ナノ薄膜電極が皮膚貼付型生体電極として高い性能を有することを示している。

さらに著者らは、この電子ナノ絆創膏を用いたアスリートの運動解析への応用を検討した。激しい運動中でも安定した電氣的接続を維持するため、切り紙構造から着想を得た伸縮配線を新たに開発し、ナノ薄膜電極と組み合わせた皮膚貼付型筋活動計測デバイスを構築した<sup>6)</sup>。この伸縮配線は、銅をスパッタリングしたポリイミドフィルムを切り紙構造に加工し、シリコーンゴムで封止した構造を有しており、元の長さの約2.5倍まで伸長しても抵抗値の変化が小さく、繰り返し伸縮に対しても高い耐久性を示す。

このデバイスを用いて、野球経験者の投球時における手のひらの筋活動のリアルタイム計測を行った(図3)。具体的には、手のひらの短母指外転筋付近に電子ナノ絆創膏を貼付し、前腕部に装着した無線通信モジュールと伸縮配線で接続することで、投球動作中の手のひらのsEMGをリアルタイムで取得することに成功した。さらに、ハイスピードカメラによる投球動作の映像と筋電信号を同期させることで、投球モーションと筋活動との関係を詳細に解析する

ことが可能となった。その結果、ストレートとカーブといった異なる球種の投球において、前腕筋の活動には大きな違いがみられない一方、手のひらの筋活動のタイミングの違いが存在することが示された。

このように、超薄型ナノシート電極と伸縮配線を組み合わせた皮膚貼付型筋活動計測デバイスは、アスリートの自然な運動を妨げることなく筋活動を高精度に計測できる。今後、本技術はスポーツ科学における動作解析やパフォーマンス向上の研究に加え、運動障害の理解やリハビリテーションへの応用など、幅広い分野での利用が期待される。

#### 4. まとめ

本稿では、皮膚密着型ウェアラブルデバイスによる連続的生体モニタリングを実現するための設計原理と、その具体例として著者らの研究を中心に、ナノメッシュ電極およびナノシート電極を用いた生体信号計測技術について紹介した。皮膚表面は柔軟で複雑な凹凸構造を有しており、従来の電子デバイスをそのまま装着すると、機械的剛性の不一致による違和感や炎症、信号品質の低下といった問題が生じる。この課題に対し、デバイスの薄膜化や多孔質構造化により曲げ剛性を低減させ、皮膚の変形に追従する構造を実現することが重要である。

ナノメッシュ電極は、ナノファイバーからなる多孔質構造によって高い通気性と柔軟性を兼ね備えており、皮膚の生理機能を阻害することなく長時間の生体信号計測を可能にする。本稿で紹介したように、このような電極を用いることで皮膚抵抗の長期連続計測や皮膚変形の高感度計測が可能となり、日常生活環境下での生体モニタリングへの応用が期待される。一方、導電性高分子ナノ薄膜からなるナノシート電極は、数百nm程度の極薄構造により皮膚表面へナノレベルで密着し、粘着ゲルを用いることなく安定した生体電極として機能する。これにより、EMG計測のような生体電気信号の取得においても高い信号品質を維持しながら、装着者の運動を妨げない計測が可能となる。

さらに、ナノシート電極と伸縮配線を組み合わせることで、アスリートの運動中における筋活動のリアルタイム計測が実現されている。野球投球動作の解析においては、ハイスピードカメラによる動作解析とEMG計測を同期させることで、投球モーションと筋活動の関係を詳細に解析できることが示された。このような皮膚密着型ウェアラブルデバイスは、スポーツ科学におけるパフォーマンス解析のみならず、リハビリテーションやヘルスケアモニタリングなど幅広い分野での応用が期待される。

今後は、センサのさらなる小型化・高機能化に加え、無

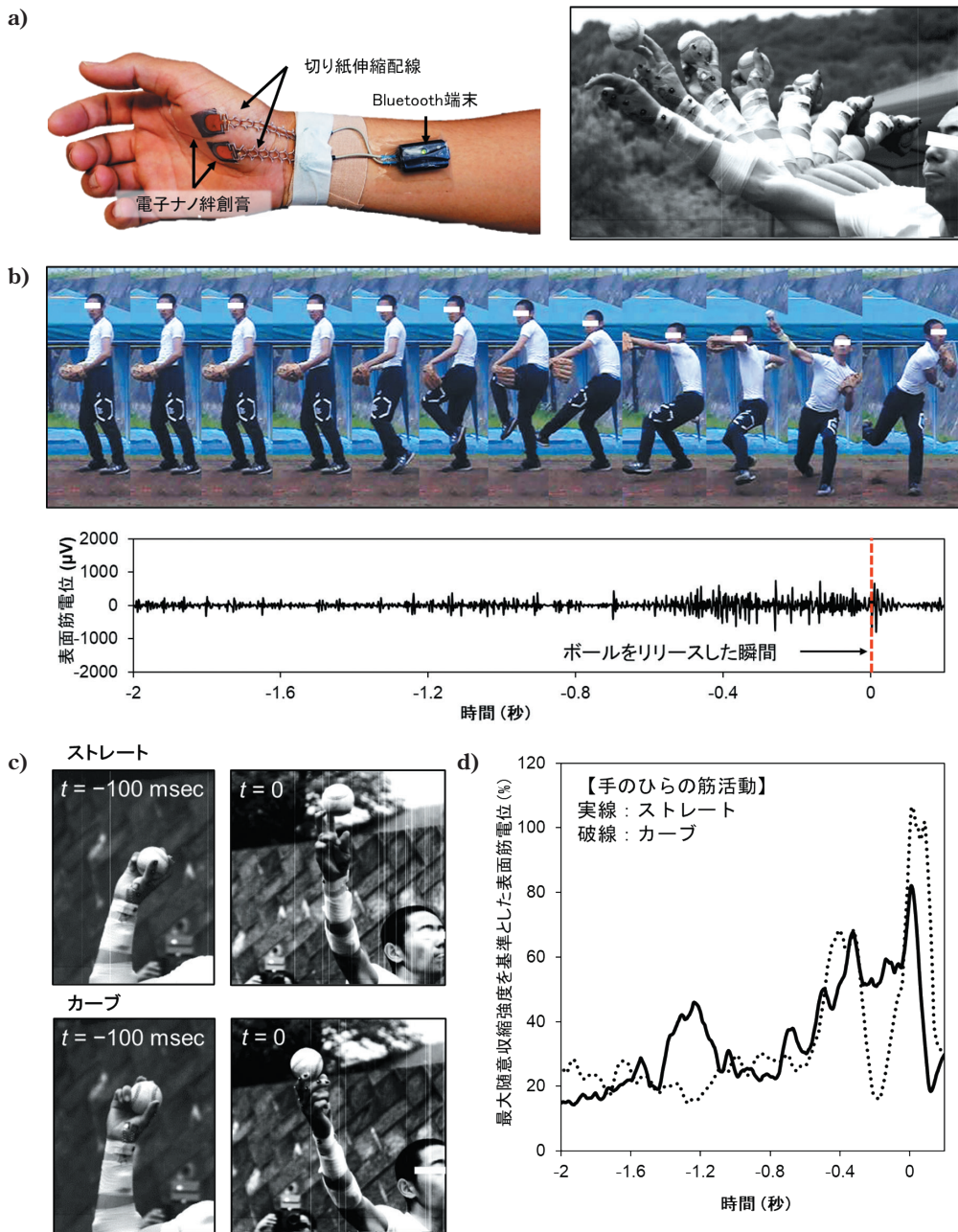


図3 ナノシート電極による投球時における手のひらの筋電計測 (文献6を改変して転載)

- a) 電子ナノ絆創膏と伸縮配線からなるデバイスを手のひらに装着し、前腕に固定したBluetooth端末と接続した様子(左)と投球中の連続写真(右)
- b) 投球モーションの連続写真(上)および投球時の手のひらの表面筋電位(下)
- c) ストレートおよびカーブ投球時のボールをリリースする直前と瞬間の腕の写真
- d) ストレートおよびカーブ投球時の最大随意収縮強度を基準とした表面筋電位

線通信技術やデータ解析技術との統合により、より高度な生体情報の取得と解析が可能になると考えられる。また、長期装着時の安全性や信頼性の向上、大量生産プロセスの確立なども重要な課題である。皮膚密着型ウェアラブルデバイスの研究は、材料科学、電子工学、生体工学、データ科学など複数分野の融合によって発展しており、今後も医療、スポーツ、ヘルスケアなど多様な分野に新たな可能性をもたらすことが期待される。

### 謝辞

本稿で紹介した研究内容は、東京大学の横田知之准教授、理化学研究所の李 成薫博士、慶応義塾大学の天谷雅行教授、東京科学大学の藤枝俊宜教授、早稲田大学の武岡真司教授、彼末一之教授、北里大学の永見智行准教授との共同成果であり、記して謝意を表す。

本稿のすべての著者には規定されたCOIはない。

## 文 献

- 1) Yamagishi K, Lee S, Yokota T, et al: Soft, Flexible, and Stretchable Platforms for Tissue-Interfaced Bioelectronics. *Adv Sci* **13**: e21521, 2026
- 2) Yamagishi K, Takeoka S, Fujie T: Printed nanofilms mechanically conforming to living bodies. *Biomater Sci* **7**: 520-31, 2019
- 3) Yamagishi K, Karyappa R, T. Ching, et al: Direct ink writing of silicone elastomers to fabricate microfluidic devices and soft robots. *MRS Commun* **14**: 846-61, 2024
- 4) Pan T, Pharr M, Ma Y, et al: Experimental and theoretical studies of serpentine interconnects on ultrathin elastomers for stretchable electronics. *Adv Funct Mater* **27**: 1702589, 2017
- 5) Someya T, Kato Y, Sekitani T, et al: Conformable, flexible, large-area networks of pressure and thermal sensors with organic transistor active matrixes. *Proc Natl Acad Sci USA* **102**: 12321-5, 2005
- 6) Yamagishi K, Nakanishi T, Mihara S, et al: Elastic kirigami patch for electromyographic analysis of the palm muscle during baseball pitching. *NPG Asia Mater* **11**: 80, 2019
- 7) Wang Y, Zhu C, Pfattner R, et al: A highly stretchable, transparent, and conductive polymer. *Sci Adv* **3**: e1602076, 2017
- 8) Tee BC, Wang C, Allen R, et al: An electrically and mechanically self-healing composite with pressure- and flexion-sensitive properties for electronic skin applications. *Nat Nanotechnol* **7**: 825-32, 2012
- 9) Dickey MD, Chiechi RC, Larsen RJ, et al: Eutectic gallium - indium (EGaIn): a liquid metal alloy for the formation of stable structures in microchannels at room temperature. *Adv Funct Mater* **18**: 1097-104, 2008
- 10) Mimuro M, Ebihara Y, Liang X, et al: Breathable nanomesh electrodes with improved water resistance and stretchability for skin impedance monitoring. *npj Flex Electron* **10**: 38, 2026
- 11) Miyamoto A, Kawasaki H, Lee S, et al: Highly Precise, Continuous, Long-Term Monitoring of Skin Electrical Resistance by Nanomesh Electrodes. *Adv Healthc Mater* **11**: e2102425, 2022
- 12) Matsukawa R, Miyamoto A, Yokota T, et al: Skin Impedance Measurements with Nanomesh Electrodes for Monitoring Skin Hydration. *Adv Healthc Mater* **9**: e2001322, 2020
- 13) Lee S, Kim JS, Yan W, et al: An ultrasoft nanomesh strain sensor with extreme mechanical durability against friction for on-skin applications. *Device* **3**: 100559, 2025
- 14) Lee S, Franklin S, Hassani FA, et al: Nanomesh pressure sensor for monitoring finger manipulation without sensory interference. *Science* **370**: 966-70, 2020
- 15) Zucca A, Yamagishi K, Fujie T, et al: Roll to roll processing of ultraconformable conducting polymer nanosheets. *J Mater Chem C* **3**: 6539, 2015
- 16) 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
- 17) Yokota T, in *Organic Electronics Materials and Devices*, ed. Ogawa S, Springer Japan, Tokyo, pp. 185-219, 2024