

ウェアラブルセンサ

弘前大学理工学部機械科学科

森脇 健司

Takeshi MORIWAKI



1. はじめに

スマートウォッチやスマートバンドの普及により、日常生活において心拍数・血中酸素濃度・血圧・体温などを簡単に計測できるようになり、これらウェアラブルセンサは、健康管理のみならず疾患の早期発見にも多大な貢献をしてきた。新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) によるパンデミックを契機に、医療の遠隔化や分散化に対する社会的な需要は高まり、より個別化された患者ケアが求められる時代を迎え、ウェアラブルセンサの活用は今後より一層重要になると考えられる。

本稿では、多くのウェアラブルセンサで求められる特性について説明したうえで、最近の活用事例や筆者の研究を紹介する。なお、筆者はフレキシブルなセンサを自身の研究で使用しているもののウェアラブルセンサについて体系的な知識はなく、本稿の執筆にあたり、多くの総説記事^{1)~5)}を参考にしたので、詳細についてはそちらをご確認いただきたい。

2. 求められる特性

研究開発中のウェアラブルセンサについて、よく取り上げられる特性の例を図1に示す。電子皮膚⁶⁾などで必要な「呼吸性」や柔軟性の低い部品の「小型化・高集積化」、壊れてしまった場合の「自己治癒」⁷⁾なども重要なトピックであるが、本稿では次の3つについて取り上げる。

1) 柔軟性 (flexibility) ・ 伸縮性 (stretchability)

デバイスへの柔軟性や伸縮性の付与は、曲面からなる皮

膚や組織の表面に取り付け、モニタリング中の皮膚や組織の変形に追従し、不快感や組織損傷を最小限に抑える役割を有する。柔軟性は主に、エラストマー材料を基板に用い、電極などの機能層を成膜・リソグラフィや導電性インクの印刷により形成することで得られる。電極層などは十分な伸縮性がない場合も多いので、作製の際には中立面について意識する必要がある。つまり、デバイスに曲げ変形が生じる際には、外・内の表面には強い引張 (tensile) ・ 圧縮 (compression) 力による断線や破壊リスクがあるが、中立面に配置すると壊れにくくなる (図2a)。また、基板が薄いほど内外の周長差は短くなるため、曲げ変形による破壊のリスクは低減される。

伸縮性について、近年はセンサや表示器がついたシートを体表に貼り付ける電子皮膚の開発などにおいて重要なトピックとなっている。基板は前述のようにエラストマー材料などを用いるとして、導電部にも伸縮性が求められる。伸縮性電子材料としては、ガリウムなどの液体金属や PEDOT:PSS などの導電性ポリマー⁸⁾、イオン性ハイドロゲルや導電性フィラー混合エラストマーがよく利用されている。これらは材料自体に高い伸縮性がなくても、蛇行や切り紙、ハニカムなどの伸縮に強い構造にしたり、あらかじめ伸ばした状態で電極を描画することなどで伸縮性が付与できる (図2b)。また、剛体部品を配置せざるを得ない状況では、部品をできるだけ小型にして孤立化させることで、使用上は違和感のない伸縮性をもたらすことができる。

2) 無線通信 (wireless communications)

ウェアラブルセンサではデバイスの小型化が違和感や不快感の低減に影響するため、センサ側には検出機構などの最低限の要素のみ構成し、無線通信によって親機にデータを転送することが多い。通信手段は様々あるが、RFID (radio frequency identification) や Wi-Fi が多くのデバイス

■ 著者連絡先

弘前大学理工学部機械科学科
(〒036-8561 青森県弘前市文京町3)
Email. moriwaki@hirosaki-u.ac.jp

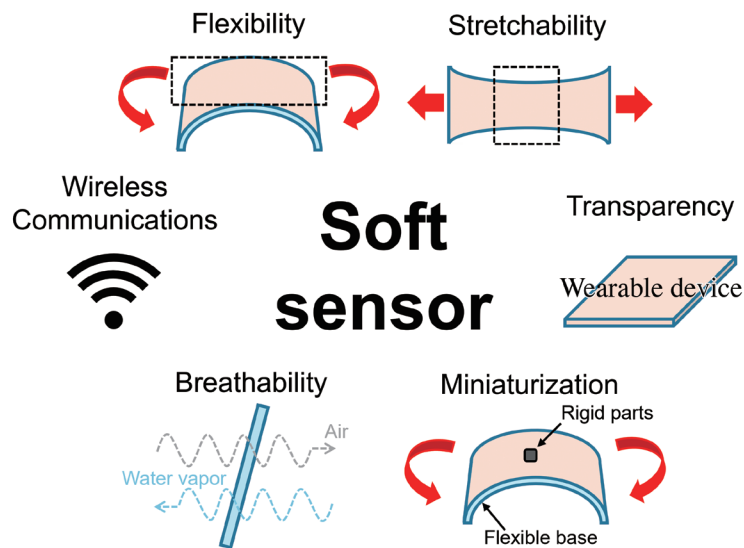


図1 変形可能なセンサに求められる特性の例

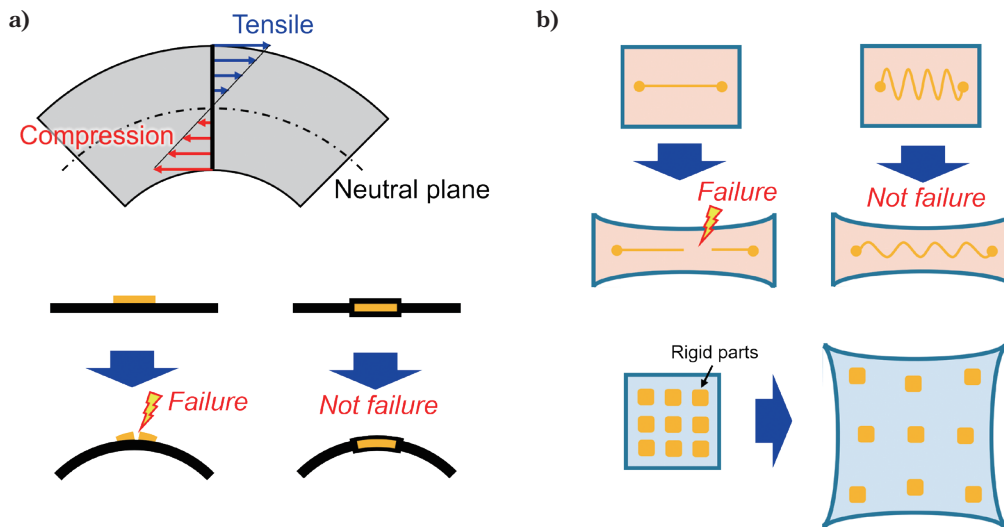


図2 柔軟性 (a) と伸縮性 (b) の付与例

で利用されている。また、バッテリーの小型化や長時間駆動には消費電力の低減化が重要であるため、Bluetooth LE (low energy) や ZigBee など活用されている。さらなる小型化のため、デバイス自体を電気回路要素として外部アンテナにより通信したり⁹⁾、生体内の糖や乳酸によって発電¹⁰⁾するなど、バッテリーレスな要素技術が数多く研究されている。

3) 透明性 (transparency)

スマートグラスやコンタクトレンズなど特定の用途においては、透明性は不可欠である。特に近年は、XR (extended reality) デバイスによる情報提示などの医療応用も活発に進められており、デバイスの透明性においては仮想現実と現

実世界のギャップを埋めることが没入型視覚表現の体験で重要とされる。透明な導電材料としては酸化インジウムスズや PEDOT:PSS など多く用いられ、これらを薄く成膜・塗布することで高い透明性が得られる。また、ハイドロゲルや複合材料による軟らかく透明な導電材も提案されている。

3. 活用事例

ウェアラブルデバイスの装着部位の例について図3に示す。医療分野への応用について、特に循環器領域ではスマートウォッチなどで就寝時も含めた心拍数や心拍変動、血中酸素濃度などが長時間測れるようになり、健康状態の把握や心疾患リスク評価に活用されてきた。Apple Watch SE 3

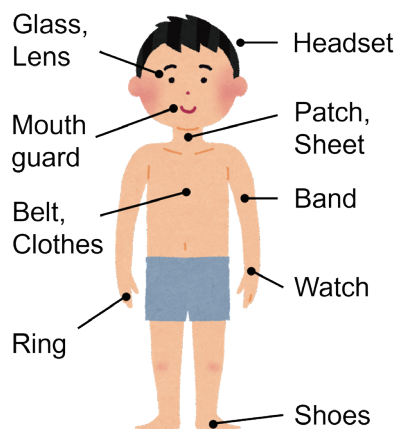


図3 ウェアラブルデバイスの装着部位の例

(Apple社)が標準的な心電図と比較して95%の精度を達成するなど¹¹⁾、最近のスマートウォッチは計測精度の向上がみられている。また、胸部にスマートベルトを巻くことで呼吸数の計測も実施されている。可動域の制限や違和感がほとんどなくこれらのデータを取得できるため、歩行やランニングなど運動時の計測も数多く行われている。

血糖値検査では、涙液中のグルコースセンサと無線通信用のコイルやオンデマンド制御された薬剤放出機構まで有するスマートコンタクトレンズ¹²⁾など、体液や呼気からバイオマーカーを検出する様々な技術が提案されており、在宅で簡便に病状を計測できるシステムの開発が、今後ますます進むと考えられる。また、脳波(EEG)や皮質脳波(EECoG)、筋電位(EMG)などの電気生理学的な信号の取得にもウェアラブルセンサが用いられ、患者の状態をリアルタイムで観察することができ、パーキンソン病やてんかん、心不全などへの応用が期待されている。直接的な医療行為以外にも、施術者の視野や触覚などを周囲に共有して非熟練者の習熟を促すなど、教育や実習などにも多くのウェアラブルデバイスが貢献している。

さらに、近年は体表に装着するデバイスのみならず、体内留置デバイスの開発も活発に行われている。例えば、脳波検出用ステント¹³⁾は脳血管内で展開したステントをアンテナとして利用しており、頭蓋骨を通さず高い精度で脳波を検出できると期待されている。また、ストラットの一部をセンサ構造にしたバッテリーレスなステント⁹⁾も開発されており、体表にアンテナを近づけることで血圧や流量波形をモニタリングすることが可能である。あくまで筆者の感覚ではあるが、ここ数年で海外の研究グループからスマート体内留置デバイスに関する研究報告が数多く出始めるようになり、カテーテル手術後に在宅にて患者自身が計測を行い、そのデータを基に医師が診断するという形式が

広がっていく可能性があるように思う。

4. バイオモデルへの応用

ここまで、フレキシブルなセンサのウェアラブルデバイスや体内留置デバイスとしての活用について紹介してきたが、筆者らは生体外評価試験用モデルへの応用として、カテーテルデバイス使用時に血管壁に作用する力を圧力センサフィルムによって定量評価してきた。これまで、主に経皮的血管形成術(PTA)用バルーンカテーテルを拡張させた際に血管へ作用する接触圧力について研究を進めており、その結果として、接触圧力は血管の硬さと拡張量(変位)とが密接に関係していることを*in vitro*実験にて確認した¹⁴⁾。また、この接触圧力は風船などの内外圧と張力との関係を示すラプラスの法則によって決まると考えられ、使用バルーンのコンプライアントチャートと拡張前後の血管径が分かればある程度推定できるため、今後は「径」の過拡張のみならず、「力」の観点からみた過拡張も考慮して新たな知見が得られれば幸いである。

また、近年はカテーテルシミュレータへの応用を目指し、あらかじめ圧力センサフィルムが内蔵されたバイオモデルの開発も進めている。壁内にセンサを埋め込んだ血管モデルにて血管作用力を定量評価できることを確認しており、拍動流を循環させた際の動脈瘤モデル内の壁圧分布の計測(図4a)や、狭窄血管モデルにステントを留置した後にその拡張力がどのように推移するか(図4b)など、様々な展開へ応用できる可能性がある。ガイドワイヤなどのカテーテル機器が通過した際の血管壁圧分布もモニタリングできるため、若手医師のトレーニングや、医療機器開発時のメーカーの評価試験などに活用できる生体外評価シミュレータになればと考えている。

5. おわりに

日常生活や運動・作業時など、これまでは気軽に計測できなかったデータを得られることから、ウェアラブルデバイスは多くの医学的研究に活用されてきた。材料開発や簡便作製技術、生体発電など、要素技術の開発は全世界的に活発に進んでおり、特に海外からはスマートカテーテルデバイスなどの開発について数多く報告されており、日本でも今後の盛り上がり期待したい。これらデバイスから得られるデータを活用することで、より客観的なエビデンスに基づいた診療を提供でき、予防医療の発展や健康寿命の延伸に貢献するのではないかと期待できる。

本稿の著者には規定されたCOIはない。

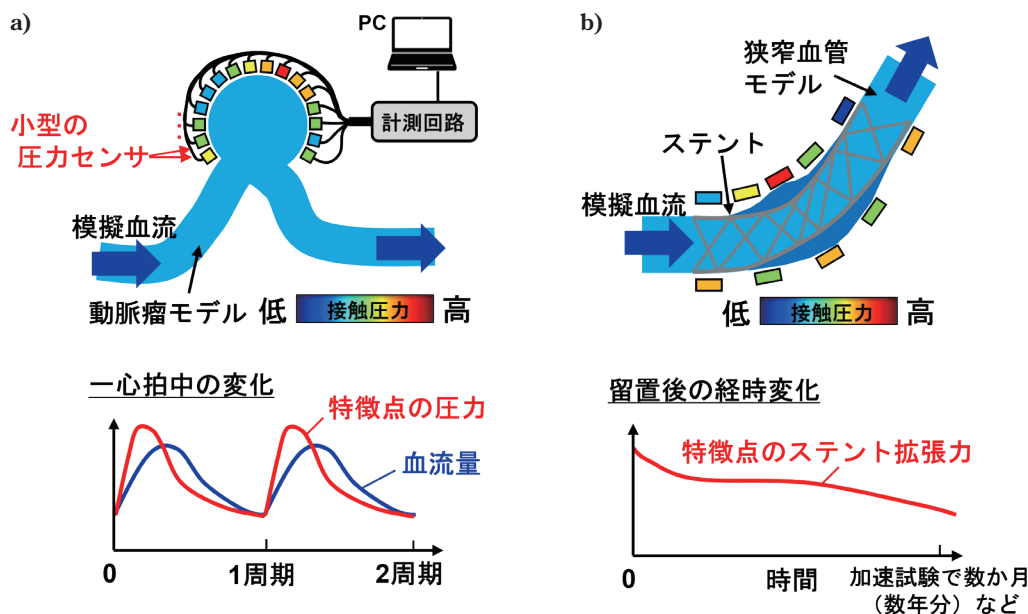


図4 センサ付き血管モデルのイメージ
a) 動脈瘤モデル, b) 狭窄血管モデルへのステント留置

文献

- 1) Papani R, Li Y, Wang S: Soft mechanical sensors for wearable and implantable applications. Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol **16**: e1961, 2024
- 2) Kulkarni MB, Rajagopal S, Prieto-Simón B, et al: Recent advances in smart wearable sensors for continuous human health monitoring. Talanta **272**: 125817, 2024
- 3) Kong L, Li W, Zhang T, et al: Wireless Technologies in Flexible and Wearable Sensing: From Materials Design, System Integration to Applications. Adv Mater **36**: e2400333, 2024
- 4) Babu M, Lautman Z, Lin X, et al: Wearable Devices: Implications for Precision Medicine and the Future of Health Care. Annu Rev Med **75**: 401-15, 2024
- 5) Ali SM, Noghianian S, Khan ZU, et al: Wearable and Flexible Sensor Devices: Recent Advances in Designs, Fabrication Methods, and Applications. Sensors (Basel) **25**: 1377, 2025
- 6) Lee S, Kim JS, Wang Y, et al: An ultrasoft nanomesh strain sensor with extreme mechanical durability against friction for on-skin applications. Device **3**: 100559, 2025
- 7) Li Z, Lu J, Ji T, et al: Self-Healing Hydrogel Bioelectronics. Adv Mater **36**: e2306350, 2024
- 8) Matsuhisa N, Niu S, O'Neill SJK, et al: High-frequency and intrinsically stretchable polymer diodes. Nature **600**: 246-52, 2021
- 9) Herbert R, Lim HR, Rigo B, et al: Fully implantable wireless batteryless vascular electronics with printed soft sensors for multiplex sensing of hemodynamics. Sci Adv **8**: eabm1175, 2022
- 10) Xue Z, Wu L, Yuan J, et al: Self-Powered Biosensors for Monitoring Human Physiological Changes. Biosensors (Basel) **13**: 236, 2023
- 11) Nelson BW, Allen NB: Accuracy of Consumer Wearable Heart Rate Measurement During an Ecologically Valid 24-Hour Period: Intraindividual Validation Study. JMIR Mhealth Uhealth **7**: e10828, 2019
- 12) Keum DH, Kim SK, Koo J, et al: Wireless smart contact lens for diabetic diagnosis and therapy. Sci Adv **6**: eaba3252, 2020
- 13) van der Eerden JHM, Liu PC, Villalobos J, et al: Decoding cortical responses from visual input using an endovascular brain-computer interface. J Neural Eng **22**, 2025
- 14) Moriwaki T, Okamoto Y, Yamaga H, et al: In Vitro Measurement of Contact Pressure Applied to a Model Vessel Wall during Balloon Dilation by Using a Film-Type Sensor. J Neuroendovasc Ther **16**: 192-7, 2022