

研究終了報告書

「連続的多種健康・環境データ解析に向けたデバイスプラットフォームの創出」

研究期間：2017 年 10 月～2021 年 3 月

研究者：竹井 邦晴

1. 研究のねらい

本研究では、装着感や違和感無く人やモノに貼付することでその表面から多種情報を計測するフレキシブルセンサシステムを開発し、次世代 Internet of Things (IoT) 社会におけるコア技術の創出を目指す。特に機械的柔軟性を有したフィルム上に安価且つ大面積、そして多種センサを形成可能なプロセス技術の開発を行う。そしてそれを実際に実証試験へと展開することで、デバイスの改善点を見つけ出し、その改良及びシステム化を実施する。またフレキシブルデバイスとして、多種センサに加え、信号処理・無線システム、電源について総合的に解析及び検討し、実用化レベルでのフレキシブルデバイスシステムの構築を行う。これにより、まだ世の中に出てきていない多種計測型フレキシブルセンサシステムの実用化へと展開する架け橋となることを目指す。特に、健康データの連続的多種情報の同時計測及びそのデータの相関関係解析、そして最終的には「未病の発見」「予防医学」へ発展させるウェアラブル・フレキシブル多機能健康管理センサシートシステムのプラットフォーム創出を目標とする。

計測対象は、皮膚表面から計測可能なバイタルや活動情報であり、それらを無線且つ連続計測することで、バイタルの変化から異常を検知するシステムを実現させる。また健康状態は環境にも大きく起因することが考えられるため、環境情報の多種計測システムの開発も行う。このような常時バイタル計測と環境計測を実現し、その異常信号からアラームを出すシステムを構築することで、安全・安心・快適な健康社会へと導くデバイスプラットフォームを実現させる。そして将来的にはこのような常時バイタルを管理するウェアラブルデバイスの使用が当たり前となるような行動変容の基礎基盤を構築する。

2. 研究成果

(1) 概要

本さがけ研究では、様々な物理・化学センサをフレキシブルフィルム上に簡易に形成する材料及び作製技術の開発、そしてそのプロセス技術を用いた全く新しい機能を集積した多機能フレキシブルセンサシステムの開発を行った。IoT 応用として、飛行機や建物等の表面の風の流れ分布を計測する風量センサアレイシート、室内の環境情報や植物の蒸散状態を常時管理する多機能センサシートの開発を行った。またウェアラブル健康管理応用として、人に貼付することで常時バイタル情報を計測するウェアラブルセンサシートを開発した。次に新規フレキシブルセンサシートにより得られた信号を無線転送することにより、本センサの情報をリアルタイムでパソコンやスマートフォンで計測できるシステムと、結果が異常と判定した場合にアラームを出すフィードバック機構を搭載したフレキシブルセンサシートシステムの開発を行った。そのセンサシステムを、植物と環境の状態モニタリングや人の常時健康状態モニタリング、さらに乳幼児の「うつ伏せ状態」「おもらし」「呼吸」モニタリングによる乳幼児突然死症候群の予防や快適で安全・安心な生活を実現するデバイスプラットフォームへと展開させた。最

後に得られたデータの相関関係を解析することで、多種バイタル情報から対象とするセンサ出力以外の健康情報を抽出することにも成功しつつある。このように全く新しいセンサシートシステムを構築することで、これまで計測することが困難であった様々な情報を一括且つ常時計測することを可能とし、そこから更なる情報の抽出が可能であることが分かってきた。現状まだ基礎研究であり、実用化には更なるデータの取得及び蓄積、また実応用に向けた実証試験等を行う必要がある。しかし本研究課題を今後さらに進展させることで、次世代のフレキシブルセンサシステムが大きく発展することが期待でき、本研究課題ではその基礎基盤を構築できたと考えている。

(2) 詳細

本研究期間では IoT やウェアラブル健康管理分野への新たなブレイクスルーを目指し、センサの安定性や高精度化、多種センサの開発及び集積化技術、システム化、そしてデータ解析を実施してきた。それぞれ顕著な業績を例に下記に説明する。

1. センサの安定性・信頼性解析・改善

本課題では、様々なセンサを安定且つ高精度で形成するプロセス技術、材料、そしてデバイス構造の最適化を実施した。その一例としてフレキシブル温度センサについて説明する。なお説明は省略するが材料等を工夫することで、他にも高い安定性を有する湿度センサや傾斜センサ、歪みセンサ、圧力センサなどを簡易にフレキシブルフィルム上に作製することにも成功している。

フレキシブル温度センサは、作製プロセス及び材料を工夫することで、溶液プロセスによる簡易形成のセンサでも連続的な温度変化(15-55℃程度)下で1週間以上の安定動作を実現した。センサ材料にはカーボンナノチューブと酸化スズのナノ粒子を混合させた膜を溶液プロセス且つ低温(90℃以下)で形成した。様々な材料及びプロセスを試験する過程で、材料中の有機溶媒が安定動作に悪影響を及ぼしていることが明らかになり、その有機溶媒を温度センサ材料中から除去するプロセス技術の開発を行った。これにより溶液プロセスで作製した温度センサとしては、これまでに無いほど安定した動作を実現することに成功した。センサの温度に対する抵抗変化の感度は約 0.3 %/℃ であった。

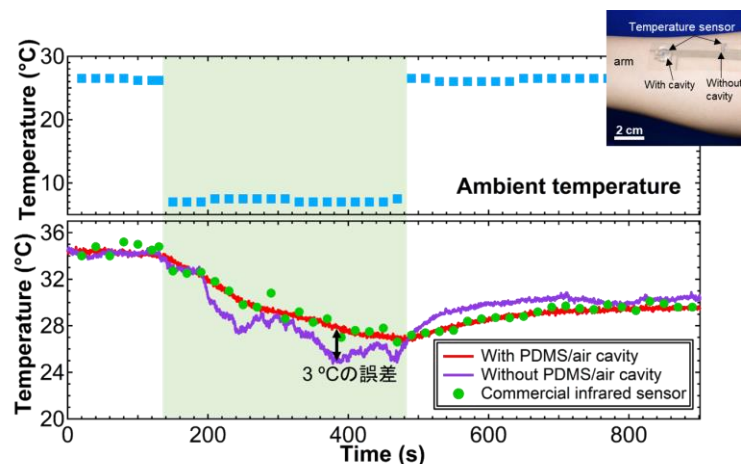


図 1 構造を工夫したフレキシブル温度センサの計測結果。室内から室外へ出ることで外気温度を急激に変化させた場合の温度センサの出力結果。“With PDMS/air cavity”が本研究で開発した構造の結果。

次に温度センサ出力の外気温の影響について議論する。一般的にフレキシブル温度センサは、柔らかく薄いフィルム上に形成される。これにより違和感無く対象表面に貼付することが可能になる。しかし、薄くなるとウェアラブルデバイス応用では外気温の影響を強く受けてしまうことが実験的に明らかになり、皮膚温度を正確に計測することが困難になってしまった。本問題解決に向け、外気の温度がセンサに影響を与えない熱遮断構造として、センサ上に空気層を有したポリマー構造を形成することを提案した。空気層を用いた理由は、ポリマー系材料等と比べ熱伝導率が非常に低いためである。これにより図 1 に示すように、外気温が急に変化しても皮膚温度をフレキシブル温度センサで正確に計測することが可能になった。その誤差は 0.1°C 程度であり、ウェアラブル用途においても皮膚温度を高い精度で計測可能であることを示唆することができた。また本研究により、センサの感度向上だけでなく構造を工夫するなど安定且つ高精度で計測することの重要性を示した。

2. 新規センサ及び集積化技術の開発

IoT 応用及びウェアラブル健康管理センサシステムの実現には、様々なセンサを新たに開発する必要がある。本研究では、これまでに「pH」「傾斜」「温度」「呼吸」「発汗」「蒸散」「光」「触覚圧力」「風向」センサなどをフレキシブルフィルム上に開発してきた。また各センサを集積化させることで多種バイタル計測や風向分布計測、室内環境・植物蒸散の同時計測、圧力分布計測などを実現させてきた。下記にその代表例として、高感度汗 pH センサについて説明する。

人の汗の化学物質を高感度で計測することを目指し、電荷転送・蓄積技術 (CCD) をフレキシブルフィルム上に実現する新規構造を提案した。これはフレキシブルトランジスタのゲート構造を多層にし、pH に応じた電子を転送及び蓄積させ、それを繰り返すことで出力電圧を増幅させる機構である。Si 半導体を用いた CCD 構造と

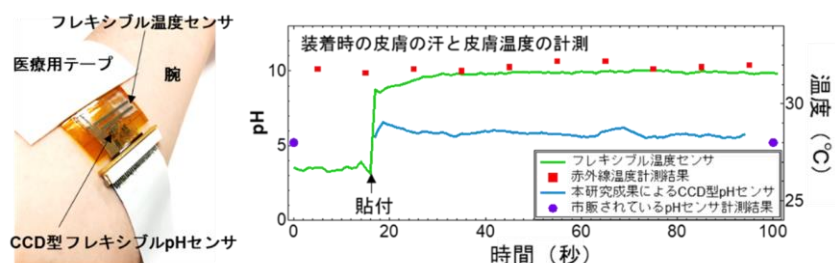


図 2 汗中の常時 pH 計測に向けた高感度フレキシブル化学センサ

は異なり、ショットキー接合状態をゲート電圧で制御することで pn 接合無しの CCD 構造を実現した。これはフレキシブルトランジスタでは、プラスチックフィルムを基板として用いているため高温プロセスを使用することができず、pn 接合を形成するのが難しいためである。そして本構造を pH 化学センサに適用し、その電荷転送及び蓄積回数を制御することで出力電圧を 240 mV/pH 以上に増幅させることに成功した。これにより電気化学のネルンストの法則の理論限界と比べ 4 倍以上の出力結果を得ることができた。また実際に人に貼付することで汗の pH のリアルタイム計測が可能であることも示した(図 2)。

3. 無線システム内蔵センサシート

開発してきた多種フレキシブルセンサに無線システム、信号解析回路を搭載させ、無線でバイタルや寝相などの情報を常時計測できるシステムの開発を行った。またそのデータを常

時解析することで乳幼児見守りデバイス(特に乳幼児突然死症候群防止デバイス)として、無呼吸やうつ伏せ寝、またオムツ内の蒸れを常時管理し、異常を検知した場合、アラームで知らせるシステムを実現させた。その他にもウェアラブル健康管理に向けたデバイスの無線・常時バイタル計測システムの開発にも成功した。無線機構は Bluetooth、バッテリーはリチウムイオン電池(3.7 V, 300 mAh)を用いた。なお、無線・信号処理回路はフレキシブル回路ではなく、一般的なプリント基板及びチップ回路を用いて実装した。センサシステムの消費電力は 31.4 mW 程度であった。

4. 実証試験及びデータ解析から提案するプラットフォーム構築

現在、無線センサシステムを実際に人に貼付し様々なバイタル情報を取得している。その得られたデータを信号解析することで、これまで計測出来なかった情報の抽出などの取り組みを開始した。そしてそのデータプラットフォーム構築に向け簡易のサーバー環境を整備した。本システムを用いて多種データ取得に向けた取り組みを開始することができている。またバイタル情報で異常を検知した場合、アラームで利用者や管理者に知らせるフィードバックシステムの開発にも成功した。その一例として、乳幼児見守りデバイスで、うつ伏せ寝状態や 10 秒間呼吸が停止した場合、保護者に無線で警告するシステムを作製し、実際にその簡易的な実証試験でデモを行うことができた。

目標に対する達成状況

本さがけ研究では、目標として上記 1-4 までをあげ研究開発を実施してきた。目標としたセンサシステムを実現し、実際に実証試験へと進んでおり、概ね目標通り研究開発を進めることができた。また予定していなかった植物の状態モニタリング(ACS Nano 2020)や超高感度センサ(Nature Electronics 2018)を実現出来た点は特筆すべき成果である。このような常時管理するセンサシステムの開発が出来たため、現在は、医師やリハビリ療法士、企業などと共にその実用化へ向けた実証試験・検討を開始しており、社会実装へ向けた展開へと発展することができている。ただし、達成できなかった項目として、バイタルと環境の相関関係解析がある。今後、実用化を目指し、計測環境を整え実証試験及び解析を進めていく必要がある。

3. 今後の展開

本研究では、安定且つ高精度なフレキシブルセンサを開発し、それを実際に人に貼付することで皮膚表面からの多種バイタル情報を常時計測する無線型センサシステムの開発を目指してきた。実際、本研究期間で目標とする無線型・常時バイタル計測可能な多種フレキシブルセンサシートを実現した。今後の展開は、本センサシステムの更なる高性能化やセンサ種の追加に加え、他分野研究者と共同で実応用に向けた実証試験から様々なデータを定量的に計測し、それを解析する必要がある。そしてこの実証試験及び解析により、これまでわからなかった知見を得ることを目指す。最終的にはこれらデータプラットフォームを用いて、常時健康管理による予防医学や未病の発見へと展開するシステムの実現を目指す。

4. 自己評価

本研究ではフレキシブルセンサシステムを開発し、その計測データを解析することで健康管理

や環境管理へと発展させることを目的とした。目標とした内容ほぼ全てを達成することができ、また想定外の成果も出すことができた。特にフレキシブルセンサを無線・信号処理回路と一体化させ、信号解析から異常を検知し、アラームで知らせるシステムへと発展出来たことは大きな成果である。これら成果として責任著者で論文 17 件(うち、Nature Electronics、ACS Nano、Advanced Functional Materials、Nanoscale Horizons を含む)の発表と、特許 5 件の出願を行ってきた。また本成果が実を結び、現在は大学研究機関(医学部など)や企業との共同研究・開発へと発展している。これはさきがけ研究が対象とする独創的・挑戦的且つ国際的に高水準の発展を成し遂げることが出来たためであると考えている。まだ社会実装には、多くの実証試験等が必要であるが、本さきがけ研究での成果はその基礎基盤になり得るものであると考えられる。現在本成果を基盤として、常時健康管理分野への社会実装を目指している。本分野は多くの研究機関で盛んに実施されている研究内容であるが、まだ実用化された例は稀である。これは、本分野が学術として成立することが出来ていないため、誰もが再現性良く常時生体計測が出来ないことが大きな理由であると考えている。この課題に気づき、そして現在はその学術としての構築も視野に入れ研究活動を開始することが出来ている。提案する常時健康管理が実現できれば、「もう少し早く病院に行っていれば・・・」といったことがない健康社会が構築でき、安全で安心、快適なスマート社会が構築できると考えている。本研究ではその基礎となるセンサシステムの基礎基盤を提案及び構築することができた。これらのことから、さきがけ研究として十分な成果を成し遂げることが出来たと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:17件

1. S. Nakata, M. Shiomi, Y. Fujita, T. Arie, S. Akita, K. Takei, "A wearable pH sensor with high sensitivity based on a flexible charge-coupled device", Nature Electronics, 2018, Vol. 1, pp. 596-603.

本論文では、汗中に含まれる微量化学物質の高感度計測に向けた新しいフレキシブル化学センサの開発を行った。電荷転送型(CCD)の構造を応用することで蓄積回数を増やし感度を増倍させた。通常の半導体プロセスとは異なり、フレキシブルフィルム上での CCD 構造作製では pn 接合を形成することができないため、デバイス構造を一から再設計する必要があり、その構造の決定及び原理提唱は難しい課題であった。本解決はナノデバイス物理の理解及び構造の新規提案、さらに実験の試行錯誤により解決した。

2. K. Xu, Y. Lu, T. Yamaguchi, T. Arie, S. Akita, K. Takei, "Highly precise multifunctional thermal management-based flexible sensing sheets", ACS Nano, 2019, Vol. 13, pp. 14348-14356.

本論文では、環境温度が与えるフレキシブル温度センサの影響を考察し、その解決方法として、空気層の導入を提案した。本空気層導入により大きく環境温度が変化しても対象とする温度を精度高く計測することを実現した。またその構造を用いて風の流れ分布を計測したり、皮膚温度を正確に計測するなどの実証試験にも成功した論文。

3. Y. Lu, K. Xu, L. Zhang, M. Deguchi, H. Shishido, T. Arie, R. Pan, A. Hayashi, L. Shen, S. Akita,

K. Takei, "Multimodal plant healthcare flexible sensor system", ACS Nano, 2020, Vol. 14, pp. 10966-10975.

本論文では、溶液形成可能な無機ナノ材料を用いた機械的柔軟性を有した湿度センサと光センサを新たに開発した。ZnInS ナノシートと電極材料を工夫することで比較的高感度及び高い選択性を有した湿度センサと光センサを実現し、またその基礎特性解析を実施した。また溶液形成した温度センサを集積させることで、室内環境として「室内温度」「室内湿度」、植物への人工太陽光の「光照射情報」、そして植物の葉表面からの「蒸散」を長時間モニタリングすることに成功した。

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 6 件 (特許公開前のもも含む)

1	発 明 者	竹井邦晴
	発 明 の 名 称	感圧センサ
	出 願 人	大阪府立大学
	出 願 日	2019/1/15
	出 願 番 号	特開 2020-112477
	概 要	触覚圧力を検知可能な抵抗変化型感フレキシブル感圧センサに関する特許。これは導電性と絶縁性の多孔質構造を形成し、触覚圧力が印加されるとその導電性箇所が接触し導通する。その圧力印加具合に応じて抵抗値が変化するため圧力を定量的に計測できる。

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- ・ プレスリリース (高感度でやわらかい pH センサーを開発: 絆創膏のような装着型ウェアラブル健康パッチに一步前進)、大阪府立大学と JST の共同発表
- ・ 平成 30 年度文部科学大臣表彰 若手科学者賞 (2018 年 4 月 10 日)
- ・ Clarivate Analytics, Highly Cited Researchers 2018 (2018 年 11 月 27 日)
- ・ NEDO-TCP 2019 審査委員特別賞 (2020 年 2 月 7 日)
- ・ 2019 年度船井学術賞 (船井哲良特別賞) (2020 年 6 月 6 日)
- ・ 国際会議招待講演 26 件、国内学会招待講演 13 件 (セミナーを含む)
- ・ 第 24 回丸文学術賞 (2021 年 3 月 3 日)