

機能性ナノシートを用いた生体情報モニタリングシステムの開発

研究代表者 武岡 真司
(先進理工学部 生命医科学科 教授)

1. 研究課題

高分子超薄膜（ナノシート）はユニークな物性を有しており、生体表面に接着剤や粘着剤を使用せずに安定に貼付させることができる。導電高分子（PEDOT:PSS）からなるナノシート（ナノシート電極）は皮膚に貼付させた状態で筋電位や心電位を測定することができ、既存のゲル電極では継続した測定が難しい水中や運動中の生体信号モニタリング、手のひらや足の裏などの身体の局所における生体情報の取得に利用できる。第 1 期ではナノシート電極の実地試験導入に必要な周辺機器を開発しつつ、スポーツ科学領域への応用を検討した。第 2 期ではヘルスケア領域への展開として入浴中の心電図計測や各種センサへの応用に挑戦している。また、ユーザビリティを高めるために周辺機器の改良を進め、「生体情報モニタリングシステム」として社会に発信する。

2. 主な研究成果

2.1. 生体情報モニタリングに適した高伸張性 PDMS ナノシートの作製

ポリジメチルシロキサン（PDMS）は高い柔軟性と耐熱性を示す生体適合性ポリマーである。PDMS は白金触媒を用いた付加反応により低温で迅速に架橋でき、その高い成形性によりナノ構造を作製するのに用いられる。本研究では、フリースタンディング PDMS 薄膜（PDMS ナノシート）を作製し、性能を評価した。マイクログラビアコーターにて調製した約 90 から 2500 nm の厚さの PDMS ナノシートの機械特性は調製時に添加した架橋剤の量に依存した。例えば、厚さ 93 nm の PDMS ナノシートは、破断伸び 338%、ヤング率 0.46 MPa と高い柔軟性を示し、密着強度は架橋剤の添加量が少ないほど高くなった。高い柔軟性、密着性、および耐熱性（150℃まで）を有する本 PDMS ナノシートは、PEDOT:PSS ナノシート電極と複合させると皮膚伸張に応じて 20%~30%の抵抗変化を示し皮膚接触歪みセンサとしての可能性が示唆された。

2.2. PEDOT:PSS を用いたペーパー型アンモニアセンサの開発

ペーパーエレクトロニクスは、従来のプラスチック基板のエレクトロニクスに取って代わる可能性のある次世代フレキシブルエレクトロニクスのゲームチェンジャーになると期待されている。ペーパー型電子機器は使い捨てで費用対効果が高く、広範にアクセス可能なデバイスとして利点がある反面、その性能や安定性の低さが実用的課題となっている。本研究では、PEDOT:PSS と鉄（III）化合物を複合させた高感度、高性能なペーパー型アンモニアセンサを開発した。このセンサは、従来の Kapton フィルムに形成させたセンサよりも 10 倍小さいサイズを実現しつつ、センサとしての実用的な応答性を示し、かつペーパーに懸念させる湿度耐性も保持していた。顔面マスクと鼻フィルタにおける着用可能なアンモニア検出のためのセンサとしての有用性を実証し、さらに生鮮食品の鮮度やおむつ内のアンモニア濃度をワイヤレスで監視することも実証した。本研究は、ユビキタスなウェアラブルセンシングに基づく先進医療への扉を開く可能性があるもの

として期待される。

2.3. 分子鋳型法を用いた薄膜型ドーパミン電気化学的センサの開発

脳内の神経細胞のシグナル伝達を担う神経伝達物質は、日常生活におけるさまざまな感情や行動だけでなく、脳の病気とも関連しているため、脳内の神経伝達物質の測定は脳科学の進歩に大きく貢献している。本研究は、ドーパミン (DA) を選択的に高感度で電気化学的に測定できる柔軟な薄膜型センサを開発することを目的としエチル。薄膜型センサは、脳への挿入に必要な座屈荷重 (1 mN) を維持しつつ、最も柔軟な 25 μ m 厚のポリイミドフィルム上に金コロイドインクを印刷することにより調製した。次に DA を分子鋳型としてポリピロール (PPy) の電解重合により電極 (DA-PPy 電極) を調製した。このセンサの曲げ剛性は 4.3×10^3 nNm で、これまでに報告された神経伝達物質センサの中で最も低かった。矩形波ボルタンメトリー (SWV) を用いて DA-PPy 電極で DA 溶液 (0~50 nM) を測定すると、検量線の勾配は PPy のみの対照電極より 3.3 倍高く、分子鋳型による感度の向上が示された。ノルエピネフリン (NE) 及びセロトニン (5-HT) に対する DA の特異性も確認できた。NE や 5-HT を分子鋳型に用いることによりこれらに特異的なセンサも開発できるので、本原理は脳内神経伝達物質の検出のための低侵襲な薄膜型センサとして期待される。

3. 共同研究者

早稲田大学スポーツ科学学術院 教授 川上 泰雄

早稲田大学スポーツ科学学術院 教授 彼末 一之

長崎大学 FFG アントレプレナーシップセンター 教授 上條 由紀子

東京工業大学生命理工学院 准教授 藤枝 俊宣

北里大学一般教育部 講師 永見 智行

エフ・ピー・エス株式会社 代表取締役社長 堀 昌司

ナノシート株式会社 代表取締役社長 大坪 信也

株式会社 iFlasco 代表取締役社長 木内 裕基

株式会社朝日ラバー 代表取締役社長 渡邊 陽一郎

株式会社朝日ラバー 企画本部 本部長 小林 由幸

株式会社朝日ラバー 企画本部 開発部 部長 高見 弘志

株式会社朝日ラバー 企画本部 開発部 係長 我妻 優

株式会社朝日ラバー 企画本部 開発部 主任 塚原 始

株式会社朝日 FR 研究所 主幹研究員 渡辺 延由

株式会社朝日 FR 研究所 研究員 三原 将

4. 研究業績

4.1 学術論文

[1] Fujita, H., Hao, M., Takeoka, S., Miyahara, Y., Goda, T., & Fujie, T. (2022) Paper-Based Wearable Ammonia Gas Sensor Using Organic-Inorganic Composite PEDOT:PSS with Iron(III) Compounds. *Advanced Materials Technologies*.
<https://doi.org/10.1002/admt.202101486>

[2] Mihara, S., & Takeoka, S. (2022). Preparation and characterization of highly elongated polydimethylsiloxane nanosheets. *Polymers for Advanced Technologies*, 33(4), 1180-1189.

[3] Takumi Kishi, T., Fujie, T., Ohta, H., & Takeoka, S.,(2021) Flexible Film-Type Sensor

for Electrochemical Measurement of Dopamine Using a Molecular Imprinting Method
Frontier Sensors, 01 October 2021, <https://doi.org/10.3389/fsens.2021.725427>

[4] Suematsu, Y., Nagano, H., Kiyosawa, T., Takeoka, S., & Fujie, T. (Accepted/In press). Angiogenic efficacy of ASC spheroids filtrated on porous nanosheets for the treatment of a diabetic skin ulcer. *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34995>

[5] Nagano, H., Suematsu, Y., Takuma, M., Aoki, S., Satoh, A., Takayama, E., Kinoshita, M., Morimoto, Y., Takeoka, S., Fujie, T., & Kiyosawa, T. (2021). Enhanced cellular engraftment of adipose-derived mesenchymal stem cell spheroids by using nanosheets as scaffolds. *Scientific reports*, 11(1), [14500]. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93642-6>

4.2 総説・著書

[1] 導電性材料の設計、導電性制御および最新応用展開, 技術情報協会, 859-864 (2021) ISBN: 978-4-86104-867-8

4.3 招待講演

[1] Shinji Takeoka, "Flexible Polymer Thin Films for Nano-Biointerfaces", ICNB 2021 5th International Conference on Nanomaterials and Biomaterials, 2021.12.23.オンライン, Key Note Speaker

[2] 武岡真司, ナノシートを利用した創傷被覆材の開発, 第 72 回医用高分子研究会, 2022/3/7, オンライン, 講師

4.4 受賞・表彰

Shinji Takeoka, International Scientist Awards on Engineering, Science and Medicine, ISAO AWARDS

4.5 学会および社会的活動

[1] 三原将, リーサイユン, 武岡真司 "Preparation and evaluation of free-standing polydimethylsiloxane ultrathin sheet", 第 70 回高分子討論会, 2021.09.06, オンライン

[2] Editor, Polymers for Advanced Technology, MRS Communications, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology

5. 研究活動の課題と展望

本プロジェクトは、本学総合研究機構のヒューマンパフォーマンス研究所と共同して、2022年4月1日より日本科学未来館の研究エリアに入居して、研究活動を開始する。具体的にはナノシート電極やナノシート型センサを用いて、身体運動の詳細解析やロボット開発に向けたコラボレーションに取り組む。子どもやアスリート、高齢者などを対象に様々な運動パフォーマンスの計測を行い、からだの状態や運動技能を体感・拡張するための装置の開発と応用、ヒューマノイド型ロボットに人間の運動データを活用することを予定している。更に、未来館の様々なイベントを通して本プロジェクトの研究をアピールする。