

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

フリースタANDING状態の高分子超薄膜（ナノシート）はユニークな物性を有しており、その高い柔軟性のために生体などの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電極は皮膚に貼付させた状態で筋電図や心電図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激しい運動で発汗状態で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期ではスポーツ科学領域ならびに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きた。第3期ではさらにナノシートの安全性と性能を高めて、センサとしての機能を拡張すると共に、ユーザビリティを高めた周辺機器の改良を進め、「生体情報モニタリングシステム」として発信する。

2. 主な研究成果

2.1. 多層薄膜型疎水性薬物放出デバイスの開発

経皮吸収型製剤では疎水性薬物が多く用いられ、放出制御層による速度調整が必要だが、膜厚の確保や粘着剤使用に伴うアレルギーが課題となっている。特に疎水性薬物は生体組織の脂質層に溶解・拡散しやすく、疎水性高分子膜では放出制御が困難であった。そこで本研究では、親水性高分子薄膜が疎水性薬物の徐放制御に有効であるとの仮説のもと、蛍光分子ナイルレッドを疎水性モデル薬物として、親水性のポリビニルアルコール(PVA)薄膜を用いた放出挙動の評価を行った。疎水性溶媒 TOG 中では、PVA 膜厚が 100 nm 以上で Higuchi モデルに従う放出制御が可能となり、1521 nm 膜では透過をほぼ完全に遮断できた。また、 β シクロデキストリン水溶液では水溶性の低い完全鹼化 PVA を用いることで放出制御層として機能し、薄膜では初期バーストが見られたが、膜厚増加に伴い放出速度は低下して 7 日間にわたり放出が抑制された。これらより、親水性 PVA 薄膜の膜厚調節により疎水性薬物の放出制御が可能であることが示された。今後は親水性高分子の種類や架橋により、より薄く強度に優れた材料を目指すと共に実薬物での検証やデバイス設計を進める。

2.2. 高付着性と隠蔽性を兼ね備えた薄膜の開発

外見への自信は心理的健康や生活の質と深く関わり、特に皮膚の状態は自己評価や社会生活に大きな影響を与える。シミやあざなどの色素沈着部位を隠すためにコンシーラーやファンデーションが広く用いられるが、塗布タイプは厚塗り感が出やすく付着性の悪さから崩れやすいという課題がある。より自然で快適な隠蔽技術の必要性から、本研究では高分子薄膜の開発に取り組んだ。PDMS（シリコーン）は柔軟性と生体適合性に優れ、数百 nm の薄膜は皮膚の微細構造に密

着する特性をもつ。そこで、PDMS連続層の上にTiO₂/PDMS複合材料からなる隠ぺい性ドットを規則的に配置させた二層構造の薄膜を作製した。スクリーン印刷により形成したドットパターンは点描画的な光学効果で色素沈着を自然に隠蔽し、組成やパターン調整により隠蔽度の制御も可能であった。得られた薄膜は粘着剤なしで皮膚に対して高い付着性を示し、長時間経過後も安定して色素沈着をカバーした。本技術は人工角質層として有望であり、ヘルスケアから医療用途まで幅広い応用が期待される。

2.3. 自己ドーブ型導電性高分子材料の生体用電極への応用に関する研究

生体の電気生理学的シグナル（筋電図・心電図・脳波など）の測定において、臓器や組織は低ヤング率かつ不規則な表面形状を持つため、従来の剛性材料によるセンサーでは感度や侵襲性に課題がある。高分子薄膜（ナノシート）は膜厚由来の柔軟性と物理接着性を持ち、接着剤なしで微細な凹凸に追従できる。本研究では、完全水溶性で添加剤が非溶出という高い生体適合性を持つ自己ドーブ型 PEDOT (S-PEDOT) に CNT を複合化し、エラストマー (SBS) と積層した薄膜電極を作製し、静電容量型筋電図 (cEMG) 測定への応用を目指した。CNT 添加により S-PEDOT 単体の約 7 分の 1 まで抵抗値は大幅に低下した。SEM 観察で薄膜表面に CNT ネットワークが確認され、接触抵抗の低下に寄与していた。導電層と SBS 界面の界面分極により低周波数帯で容量が増加し、cEMG 電極として応用可能であることが示された。S-PEDOT・CNT/SBS 薄膜の水蒸気透過率は皮膚の値を大きく上回り、長時間の皮膚貼付に適していた。CNT 添加により SNR が S-PEDOT 単体の 2 倍、ノイズフロアが大幅に改善して 10 μ V レベルの微弱信号検出の可能性が示された。

2.4. 皮膚に直接貼付する高分子薄膜型力センサの開発

近年、柔軟材料や生体模倣技術を用いた触覚・ひずみセンサの研究が進展し、人工皮膚やウェアラブルデバイス向けに高い柔軟性と生体適合性を備えた設計が求められている。中でも指先にかかる力の計測は、精密動作や技能伝達、リハビリなど多様な分野で重要である。しかし従来の指先センサは接触面を覆う構造が多く、触覚低下や装着違和感、耐久性の問題から自然な動作や感覚を妨げるという課題があった。

本研究では、指先の爪側（非接触側）に生じる皮膚変形を検出するという新しいアプローチを提案する。指先の腹側（接触側）に力が加わると爪側の皮膚がわずかに伸長する現象に着目し、これを検出することで触覚を損なわずに力計測を行うことを可能にした。センサには、カーボンブラックを SBS エラストマーに分散させた 1 μ m 未満の薄膜を用い、粘着剤なしで皮膚に付着してピエゾ抵抗効果により微小ひずみを電気信号へ変換する。

引張試験と顕微鏡観察により、ひずみに伴う導電経路の変化が抵抗変化となることを確認し、皮膚変形検出に十分な感度と再現性を確認した。また、薄膜を非接触側に装着することで繰り返し荷重下での抵抗ドリフトが大幅に抑制され、触覚保持と耐久性の両立が実証された。材料・膜厚の最適化により、SBS-カーボンブラック系が柔軟性・感度・加工性のバランスに優れることも明らかとなった。

さらに、筆記動作や指紋押印など実タスクでの力計測にも成功し、技能評価や日常動作モニタリングへの応用可能性を示した。本研究は、触覚を損なわずに指先接触力を計測する新たなセン

シング概念を提示し、実用的なウェアラブル力センサの基盤技術を確立するものである。

2.5.本プロジェクトに関わる共同研究の進捗状況

筋電図や圧力歪みの計測に本プロジェクトで開発されたナノシート電極ならびに伸縮性電極ケーブルを活用した研究が、日本科学未来館の研究エリアにて行っているスポーツ科学、ロボット工学との共同研究にて進められている。今年度はアプリの開発にも注力し実用化に向けて本格的に活動を開始した。

当プロジェクト研究グループが保有しているナノ材料、特にフリースタANDING状態を可能とする高分子薄膜（ナノシート）の積層化・複合化技術や、ナノ粒子、特にリポソームへの薬物内包・表面修飾技術を用いて、本プロジェクトをベースとした国内外での共同研究が進められた。永年行っている H12 表面修飾 ADP 内包リポソームによる血小板凝集促進作用に関する研究については、製薬会社に対して臨床試験に向けて GMP 製造について技術移転を行い、見通しが立ってきたことは大きな成果である。また、血小板が活性した血小板凝集塊にデリバリーされた本製剤からの ADP 放出がホスホリパーゼ A2 の作用であることを明らかにした。また、カチオン性アミノ酸型脂質を用いた核酸医薬品デリバリーの国際共同研究では、ナノシート様分子集合体、バイセル様分子集合体が形成されていることがクライオ電子顕微鏡観察で明らかにされ、膜融合機構に関する理解が深まった。温度応答性リポソームでは複数の抗原の同時検出や、高感度に向けた多重層リポソームをマイクロ流路デバイスで安定に製造する技術が確立できた。従来のラテックス凝集免疫比濁法や末梢血塗抹検査を MID (Micro Imaging Device) と AI による画像処理によって臨床現場即時検査(POCT)用技術として開発も進んでいる。抗体結合ラテックスビーズの AI を用いた検出アルゴリズムの開発についても確実な進捗が得られている。また、日本科学未来館の研究エリアにて行っているスポーツ科学、ロボット工学との共同研究では、ショートトラック選手の筋電図計測に本プロジェクトで開発されたナノシート電極ならびに伸縮性電極ケーブルを活用した。

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
東京工業大学生命理工学院 准教授 藤枝 俊宣
防衛医科大学校 医学教育部医学科 教授 木下 学
防衛医科大学校 生理学講座 准教授 萩沢 康介
防衛医科大学校病院 外科 石田 治
ナノシート株式会社 取締役社長 晝間 信治、取締役 大坪 真也
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 FR 研究所 医療グループ 主任研究員 三原 将、研究員 富澤延行
東ソー株式会社有機材料研究所 ファインケミカルグループ主任 在田知央

4. 研究業績

4.1 学術論文

[1] Koyama, T., Oi, F., Murakami, M., Saito, S., & Takeoka, S. (2026). Influence of pulmonary vein ovality on the occlusion efficacy of a size-adjustable cryoballoon: Insights from a 3D silicone model study. *Indian Pacing and Electrophysiology Journal*, 26(1), 23-

27. <https://doi.org/10.1016/j.ipej.2025.12.019>

[2] Kiuchi, M., Takeoka, S., & Sou, K. (2026). Microfluidic preparation of size- and lamellarity-controlled liposomes using a static mixer and the advantage of a multilamellar structure in biosensing applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, Article 1715496. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1715496>

[3] Ishida, O., Hagsawa, K., Yamanaka, N., Aoki, M., Tsutsumi, K., Takeoka, S., & Kinoshita, M. (2026). Synergetic hemostatic potential of fibrinogen γ -chain peptide-coated, adenosine 5'-diphosphate-encapsulated liposomes combined with whole blood transfusion: A preclinical study. *Transfusion*, 66(2), 405-412. <https://doi.org/10.1111/trf.70034>

[4] He, J., Shatz-Binder, W., Robles, A., Zang, N., Jia, W., Sahai, S., Johnson, M. C., Li, J., Yen, C. W., & Takeoka, S. (2026). Unconventional Lysine-Type Lipid Assemblies Enable Efficient Antisense Oligonucleotide Delivery with Distinct Structural Features. *Pharmaceutics*, 18(2), Article 228. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics18020228>

[5] Prabhune, N., Du, Y., Zainab, A., Ebihara, S., Takeoka, S., Kawaoka, S., & Vandenbon, A. (2025). Mining Spatial Transcriptomics Datasets using DeepSpaceDB. *Journal of Visualized Experiments*, 2025(223), Article e68892. <https://doi.org/10.3791/68892>

4.2 招待講演

[1] Shinji Takeoka, Free-Standing Polymer Thin Films for Drug- or Cell-Loading in Biomedical Applications, 12th International Conference on Chemical and Biological Sciences (ICCBS 2025), Apr 08-Apr 11, 2025 Key note speaker

[2] 武岡 真司、清水 健、貼る薄膜センサによる生体情報モニタリング、TOBIRA 第 13 回交流フォーラム、2025 年 7 月 25 日 招待

[3] 武岡 真司、貼る高分子薄膜の面白い物性と貼るデバイスとしての応用、2025 年度日本接着学会東北・北海道支部講演会、2025 年 11 月 25 日 招待

[4] 武岡真司、H12-(ADP)liposome 製剤の in vitro 評価系に関する研究、第 31 回日本血液代替物学会、2024/12/5-6 依頼

4.3 受賞・表彰

[1] 廣瀬友香、ホスホリパーゼ A2 (PLA2)によるリポソーム内包物質の放出応答性に関する研究、第 32 回日本血液代替物学会年次大会 学生講演賞

4.4 学会および社会的活動

[1] 藍原隆寛、武岡真司、皮膚に直接貼付する高分子薄膜型力覚センサーの開発、第 74 回高分子学会年次大会、2025/5/19-23、オンライン

[2] 谷口広晃、谷口幸奈、箭野裕一、武岡真司、CNT を含む自己ドープ型 PEDOT 薄膜の作製とその物性、第 74 回高分子討論会、2025/9/16-18、大阪

[3] 藍原隆寛、武岡真司、皮膚の変形にตอบสนองする高分子薄膜型触覚センサーの開発、第 74 回高分子討論会、2025/9/16-18、大阪

[4] 石田真子、武岡真司、ポリビニルアルコールを放出制御層とした多層薄膜型薬物放出デバイスの開発、第 74 回高分子討論会、2025/9/16-18、大阪

[5] 山口敦大、戸田航平、宗慶太郎、武岡真司、ラテックス凝集反応と画像解析を用いたバイオマーカーの定量、第 74 回高分子討論会、2025/9/16-18、大阪

[6] 廣瀬友香、Mao Maunick、武岡真司、ホスホリパーゼ A2 (PLA2)によるリポソーム内包物質

の放出応答性に関する研究、第32回日本血液代替物学会年次大会、2025/10/30-31、熊本

[7] Mo Chen、武岡真司、Development of an In Vitro Blood Fluidic System for Evaluating the Performance of H12-(ADP)liposomes、第32回日本血液代替物学会年次大会、2025/10/30-31、熊本

[8] 堀田盛弘、武岡真司、細胞質カルシウム応答測定を利用した膜融合リポソームの探索、第47回日本バイオマテリアル学会大会、2025/11/9-11、東京

[9] 桃塚耀平、武岡真司、フロー合成法を用いたカチオン性脂質のライブラリー合成とリポソームとしての評価、第47回日本バイオマテリアル学会大会、2025/11/9-11、東京

[10] 武岡真司、宗慶太郎、山口敦大、戸田航平、免疫凝集体等の凝集体の画像解析によるバイオマーカーの定量法、特願 2025-13537、平成7年8月15日

[11] 武岡真司、藍原隆寛、三原 将、富澤延行、シート状歪センサ及びそれを用いた歪検出器、特願 2025-194190、平成7年11月13日

[12] Editors, 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した。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んできた。アスリート、子どもや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が進んだ。本プロジェクトは2026年3月31日をもって満期終了となったが、今後は、同研究所にて、走る、跳ぶ、投げるなどの基本動作において、各筋肉の筋電図や体の各部にかかる力（加速度）、関節の角度などを被験者の運動画像と一緒に取得することで、姿勢推定像にこれらの情報を同期させるプログラムを開発する。スポーツ科学、人間工学、認知科学、情報工学の共同研究者やアスリート、指導者と一緒になって実用的な身体能力の拡張プログラムを開発したい。それによって本プロジェクトで開発された生体情報モニタリングシステムが実用化されることとなる。

また、本理工総研のプロジェクト研究として、「分子集合科学を基盤とする在宅用医療デバイスとAIを用いた情報共有システムの開発」が本プロジェクトの後継として新たに採択された。本プロジェクトで得られた知見を更に分子集合科学といった大枠で捉え、社会に対する応用として在宅医療デバイスに発展させ、生活空間をラボ化した情報共有システムといったマクロな中で分子集合科学というミクロなシステムを捉え、進化させてゆきたい。