

令和6年5月8日

報道関係各位

信州大学 先鋭領域融合研究群 繊維科学研究所
信州大学 繊維学部

人間/ヒューマノイドの動きをモニタリングする 超高性能ハイテクナノファイバーセンサーの開発

【研究成果のポイント】

- ハイテクイノベーションにより世界は急速に変化し、ヒューマンロボットがますます重要な役割を果たします。
- ロボット工学やフレキシブルウェアラブルエレクトロニクスの分野で、高い圧電性能と広い圧力範囲に対応した圧電材料が求められています。
- 本研究で開発した圧電材料は、これまでの報告よりも最大出力電圧を示し、センサーとしては広い応答範囲、弱い力に対する高い感度と優れた動作耐久性を備えていることを示します。
- この技術を活用することで、ヒューマンロボットが髪の毛を持つことや、針に糸を通すような極めて繊細な動きの再現も夢ではなくなります。人間の動きと微妙な生理学的活動もリアルタイムモニタリングができる革新的な新技術です。

【発表概要】

信州大学 先鋭領域融合研究群 繊維科学研究所 金 翼水 教授、同大学 繊維学部 機械・ロボット学科 施 建 准教授らの研究グループは、エレクトロスピニング（※1）技術を使って異なるサイズを持つポリフッ化ビニリデン（PVDF）/ドーパミン（DA）ナノファイバー膜と超極細PVDF/DAナノファイバー用いる柔軟かつ高い圧電性能を有する圧電ナノファイバーセンサー（※2）の開発に成功し、ロボット工学やフレキシブルウェアラブルエレクトロニクスの分野で大きな期待が寄せられています。

本研究成果は世界的に著名な学術出版社Springer Natureが発行するAdvanced Fiber Materials(16.1)誌により発表されました。

【背景】

ハイテクイノベーションにより世界は急速に変化しています。課題はあるものの、近い将来、ヒューマンロボットがますます重要な役割を果たすようになるため、将来は有望であることは疑いの余地がありません。例えば、人間の動きを模倣し、人間のように歩く有名なテスラのヒューマンロボット「オプティマス」があります。最近、オプティマスは自分の手で卵を取って移動させるのが話題になりましたが、微細な動きの再現には至っていません。高い圧電性能と広い圧力範囲が実現できると、ヒューマンロボットが髪の毛を持つことや、針に糸を通すような極めて繊細な動きの再現も夢ではありません。さらに、発声、手首の脈拍計測、指のタッピング、フットスタンプなどの人間の動きと微妙な生理学的活動もリアルタイムモニタリングができる革新的な新技術となります。

【研究成果】

ポリフッ化ビニリデン(PVDF)/ドーパミン(DA)ナノファイバー膜と超微細PVDF/DAナノファイバーで構成され、連続で均一に分散した二次元トポロジカル構造(※3)を備えた高性能複合ナノファイバー膜(※4)をエレクトロスピンニング技術により作製しました。

従来知られているファイバー圧電材料においては、高い圧電性能と広い圧力範囲での使用は困難でした。本研究はその問題を解決するためのものであり、高い圧電性能を広い圧力範囲で得ることが可能なファイバー圧電材料である複合ナノファイバー圧電材料を実現しました。例えば、参考文献1に記載の圧電材料においては、 $8\text{mm} \times 50\text{mm}$ (400mm^2) のサンプルにおける最大出力電圧が 37mV であったとされており、出力電圧の値が小さいです。参考文献2に記載の圧電材料は、 $10\text{mm} \times 20\text{mm}$ (200mm^2) のサンプルについて、 1kPa の力を加えたときの出力電圧が約 16V であり、 6kPa の力を加えたときの出力電圧が約 33V であったとされています。これは、感度が $27.5\text{VN}^{-1} \sim 80\text{VN}^{-1}$ 、圧力範囲が $0.2\text{N} \sim 1.2\text{N}$ ということになります。つまり、感度は高いものの圧力範囲が狭く、ごく低圧条件でしか性能を発揮できません。

本研究で開発した圧電材料は、わずか 25×25 (625mm^2) の面積、圧力 1.5N の条件下で、最大出力電圧は 14.3V を示しています。センサーとしては広い応答範囲($1.5 \sim 40\text{N}$)、弱い力に対する高い感度($0 \sim 4\text{N}$ 、 7.29VN^{-1})と優れた動作耐久性を備えていることを示します。表1から、ナノファイバーセンサーに関する従来の研究と比較して、低圧力範囲($0 \sim 4\text{N}$)で少なくとも5倍、高圧力範囲($30 \sim 40\text{N}$)で6倍以上改善されました。重要なのは、その感度が一部の薄膜材料よりも優れており、セラミック材料のレベルに達しており、感度が高いレベルに維持したまま圧力範囲が広い点です。広い圧力条件下での応用可能性を示しています。また、わずか 1.5N 程度で 14.3V の圧電電圧を発生できることから、人体のわずかな動きを収集して電気エネルギーに変換できることが実証され、ナノ発電機(※5)として利用できる可能性を秘めています。

表1 各種センサーデバイスとその性能の比較

材料	形状	感度	圧力範囲
PVDF-rGo-MoS ₂ [参考文献 3]	Nanofiber	0.22 V N ⁻¹ (10N)	0-10 N
PVDF/Graphene@Ce ³⁺ [参考文献 4]	Nanofiber	1.375 V N ⁻¹ (8N)	0-10 N
PVDF/Y-ZnO [参考文献 5]	Nanofiber	0.325 V N ⁻¹ (40N)	0-40 N
PVDF/ZnO [参考文献 6]	nanocomposite films	6.94 V N ⁻¹ (0-0.3N) 5 mV N ⁻¹ (0-2.5N)	0-2.5 N
PVDF@CaTiO ₃ [参考文献 7]	Solvent casting	11.7 V N ⁻¹ (0-0.5N) 2.15 V N ⁻¹ (0.5-5N)	0-5 N
Ba _{0.85} Ca _{0.15} Ti _{0.9} Zr _{0.1} O ₃ (BCZT) [参考文献 8]	ceramics	2.1 V N ⁻¹ (10N)	0-10 N
本研究	nanofiber	7.29 V N ⁻¹ (0-4N) 4.11 V N ⁻¹ (5-10N) 2.01 V N ⁻¹ (30-40N)	0-40 N

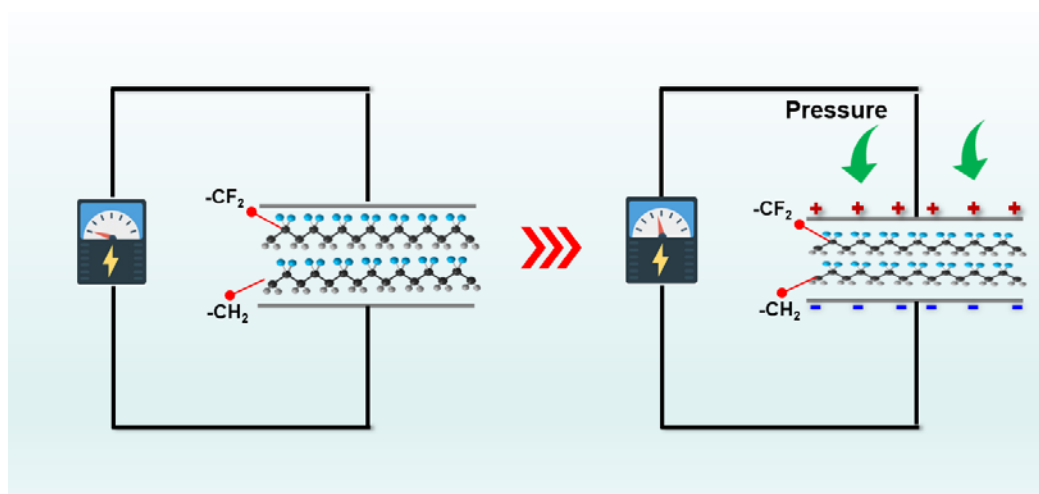


図1 圧電材料のメカニズム

圧電材料の特性は、外部の機械エネルギーを電気エネルギーに変換できることです。図1から、材料に圧力がかかると、材料の圧縮により内部構造が移動し、材料表面に電圧が発生することがわかります。この圧力が変化すると、材料が発生する電圧も変化します。別の観点から見ると、同じ圧力下で材料がより

強く外部の力に反応すると、材料はより大きな電圧を発生することができます。

今回の研究ではそれを利用し、二次元トポロジカル構造を持つ複合ナノファイバーを開発しました（図2(c-d)）。この構造が従来のナノファイバーと比較して、実験とシミュレーションの両方から、同じ圧力条件下で今回開発した材料の性能が優れていることを発見しました。応力プロセスではより大きな変形が発生し、電圧を高めることに非常に役立ちます。

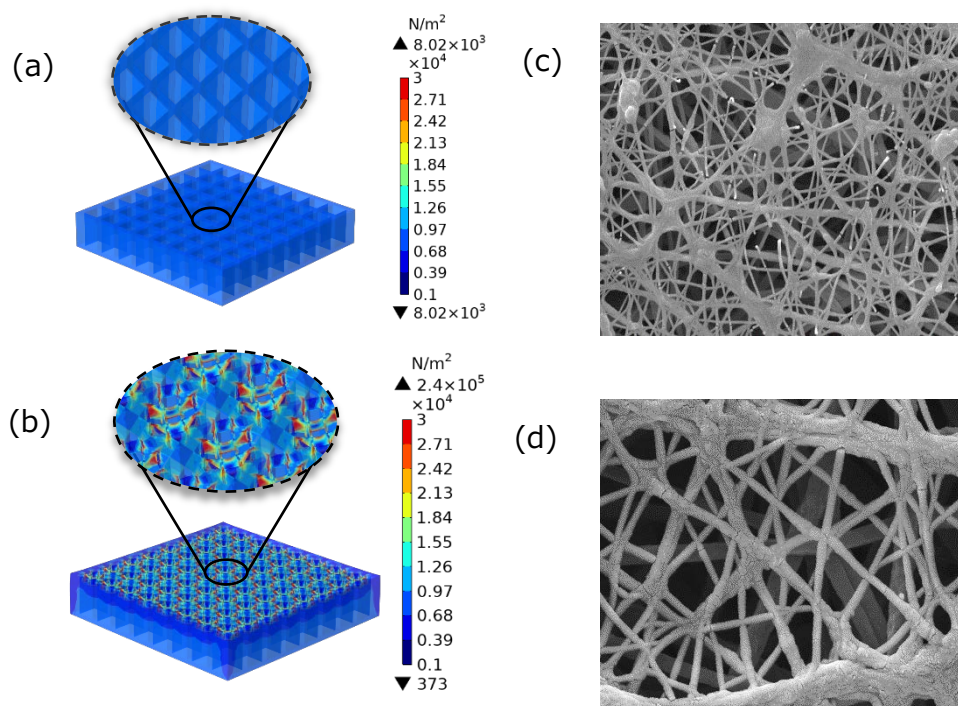


図2 従来のナノファイバーと今回開発したナノファイバーの比較 (a)従来ナノファイバーの圧カシミュレーション (b)今回開発したナノファイバーの圧カシミュレーション (c-d) 今回開発した二次元トポロジカル構造を持つナノファイバーのSEM写真

【波及効果】

AI知能が私たちの生活に入り込んだ現在、人とモノ、モノとモノのつながりが欠かせません。センサーは通信の中核コンポーネントとして重要です。ただし、現在のセンサーはバッテリー技術に依存する必要があるため、ウェアラブルで柔軟なセンサーへの応用が制限されますが今回作製したナノファイバーは新たなソリューションを提供し、フレキシブルなセンサーの実現を可能にしました。さらに、人間の動きや微妙な生理学的信号をモニタリングするための柔軟なウェアラブルセンサーとしての潜在的な応用も検証されています。この研究は、エレクトロスピニングされたナノファイバーをセンサーに応用するための新たな道を開く指針になると思います。

この研究は、人間の動きをモニタリングするための柔軟な圧電センサー用の二次元トポロジーネットワークを備えた高性能 PVDF/DA 複合ナノファイバー膜の開発およびその評価についての成果をまとめたものです。

【用語解説】

※1 エレクトロスピニング：紡糸ノズル内のポリマー溶液に高電圧を加えることにより、ナノファイバーを生成する製法です。高電圧を加えることで、直径サイズ数ナノメートルのナノファイバーを生成することができます。

※2 圧電ナノファイバーセンサー：圧電とは特定の材料などに圧力を加えることで生じるひずみに応じて、電圧が発生する現象をいいます。圧電ナノファイバーセンサーは、圧電材料をナノファイバー化して圧電特性を高めるため、圧力に対する感度を向上し、圧力センサーとして利用できます。

※3 二次元トポロジカル構造：トポロジカルはネットワークの形状のことで、スター構造、リング構造、ツリー構造、メッシュ構造など、さまざまな種類があります。二次元トポロジカル構造とは、平面上の特徴的なネットワーク構造を指します。

※4 高性能複合ナノファイバー膜：高性能複合ナノファイバーとは、2 つ以上の成分（異なる構造、異なる物質など）を含むナノファイバーであり、従来のナノファイバーよりも高い性能を有するナノファイバーを指します。今回は特に高感度、高い圧電性能と広い圧力範囲での使用ができる複合ナノファイバーのことを指します。

※5 ナノ発電機：ナノ発電機とは、微小な規模の物理現象から力学的エネルギーや熱エネルギーを取り入れて電気に変換する技術である。ナノ発電機の典型的な方式は圧電型、摩擦帯電型です。

【論文情報】

雑誌 Advanced Fiber Materials

題名 Flexible Piezoelectric Sensor Based on Two-Dimensional Topological Network of PVDF/DA Composite Nanofiber Membrane

著者 Junpeng Xiong, Ling Wang, Fanghua Liang, Mengying Li, Yoshinori Yabuta, Muhammad Asim Iqbal, Gopiraman Mayakrishnan, Jian Shi, and Ick Soo Kim

DOI 10.1007/s42765-024-00415-7

URL <https://link.springer.com/article/10.1007/s42765-024-00415-7>

【参考文献】

1. 特開 2015-109431 号公報

2. Tong Li, Minghe Qu, Corey Carlos, Long Gu, Fei Jin, Tao Yuan, Xiaowei Wu, Jijun Xiao, Ting Wang, Wei Dong, Xudong Wang, and Zhang-Qi Feng. High-Performance Poly(vinylidene difluoride)/Dopamine Core/Shell Piezoelectric Nanofiber and Its Application for Biomedical Sensors, Advanced Materials, Vol.33, 2006093, 2021

3. Mohd Faraz, Huidrom Hemojit Singh, Neeraj Khare. A progressive strategy for harvesting mechanical energy using flexible PVDF-rGO-MoS₂ nanocomposites film-based piezoelectric nanogenerator, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.890, 161840, 2021
4. Samiran Garain, Santanu Jana, Tridib Kumar Sinha, and Dipankar Mandal. Design of In Situ Poled Ce³⁺-Doped Electrospun PVDF/Graphene Composite Nanofibers for Fabrication of Nanopressure Sensor and Ultrasensitive Acoustic Nanogenerator, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol.8, pp.4532-4540, 2016
5. Juan Yi, Yiheng Song, Zhilong Cao, Chenjian Li, Chuanxi Xiong. Gram-scale Y-doped ZnO and PVDF electrospun film for piezoelectric nanogenerators, *Composites Science and Technology*, Vol.215, 109011, 2021
6. Ming Yuan, Ruixue Ma, Qiuyang Ye, Xue Bai, Hanchuan Li, Feifei Yan, Chuntai Liu, Yue Ren, Zhen Wang. Melt-stretched poly(vinylidene fluoride)/zinc oxide nanocomposite films with enhanced piezoelectricity by stress concentrations in piezoelectric domains for wearable electronics, *Chemical Engineering Journal*, Vol.455, 140771, 2023
7. Swati Panda, Sugato Hajra, Haejin Jeong, Basanta Kumar Panigrahi, Phakkhananan Pakawanit, Deepak Dubal, Seonki Hong, Hoe Joon Kim. Biocompatible CaTiO₃-PVDF composite-based piezoelectric nanogenerator for exercise evaluation and energy harvesting, *Nano Energy*, Vol.102, 107682, 2022
8. Mingyang Yan, Shengwen Liu, Qianqian Xu, Zhida Xiao, Xi Yuan, Kechao Zhou, Dou Zhang, Qingping Wang, Chris Bowen, Junwen Zhong, Yan Zhang. Enhanced energy harvesting performance in lead-free multi-layer piezoelectric composites with a highly aligned pore structure, *Nano Energy*, Vol.106, 108096, 2023

【本件に関するお問い合わせ先】

〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1

信州大学 先鋭領域融合研究群 繊維科学研究所

所長 金 翼水 (キム イクス)

TEL : 0268-21-5439 E-mail : kim@shinshu-u.ac.jp