

会話型ヒューマンインターフェースに向けた ナノ材料電子機械フレキシブルデバイス

Nanomaterial-based mechanical electro flexible devices toward human interactive interfaces

2041017



研究代表者

大阪府立大学

助 教

竹 井 邦 晴

【研究の目的】

本研究では、次世代のエレクトロニクスそしてヒューマンインターフェースとして期待されているウェアラブル・フレキシブルデバイスの実現を目指し、フレキシブル基板上への各デバイスの集積化技術の確立を行うことを目的とする。特に、ナノ材料を用いた歪みセンサや温度センサ、さらにフレキシブル回路としてCMOS回路の提案及び作製技術の開発を行う。ウェアラブル・フレキシブルデバイスには、「低価格」且つ「使い捨て」が重要な要素になる。そこでまずセンサ形成技術として、完全印刷法による大面積、低価格化を実現する作製方法を提案する。集積回路については現状、印刷法のみによる作製は困難であるため、プロトタイプとして一般的な半導体プロセスを用いることでその可能性を示唆する。本デバイスの応用としては、図1のような絆創膏のように人の皮膚に違和感無く添付することで、リアルタイム

に体の状態の観察などを可能にする「安心・安全・快適なデバイス」及び「人・環境に優しい次世代デバイス」の可能性を示唆する。

【研究の内容、成果】

本研究では、将来のウェアラブル・フレキシブルデバイス実現へ向けた、各デバイスの要素技術の開発を行った。その詳細について以下に述べる。

1. 印刷技術によるフレキシブル歪みセンサ

高感度フレキシブル歪みセンサ実現に向け、本研究ではカーボンナノチューブ (CNT) インク (SWeNT, USA) と銀ナノ粒子 (AgNP) インク (Paru, Korea) の混合インクを形成することで、フレキシブル基板上へスクリーン印刷によるセンサ形成を目指した。本歪みセンサは抵抗変化型であり、抵抗の変化率を計測することで歪み量を算出することが可能となる。これまでの実験で、CNT インクと AgNP インクの混合比を変化させることで歪み感度を調節可能であることがわかっている。本研究では図1に示すような健康管理を実現するウェアラブル・フレキシブルデバイスとして、本歪みセンサを脈拍計測へ応用することを提案した。脈拍計測には、CNT/AgNP インク=5:3の混合比を用いた。これまでの研究で、5:4の混合比

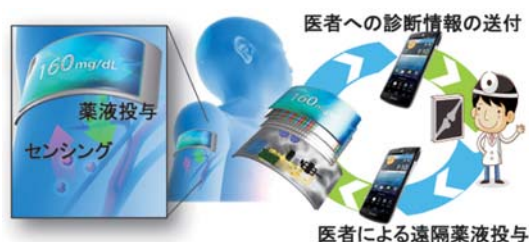


図1 将来のフレキシブル・ウェアラブル健康管理デバイスのイメージ図

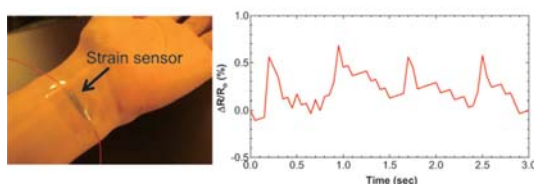


図2 印刷形成した歪みセンサを用いた脈拍計測

で感度が最大になることがわかっているが、5:4の混合比では人間の僅かな動作や振動も計測してしまうため、今回は感度が若干落ちる5:3の混合比を用いた。このように用途に応じて、本歪みセンサはデザインを変えることなく感度を調整することが可能である。実際に本歪みセンサを手首に添付することで測定した脈拍の結果を図2に示す。被験者は、34歳の男性であり、脈拍は～75 BPM（1分間当たりの脈拍数）であることがわかり、本歪みセンサがウェアラブルデバイスとして脈拍の測定が可能であることを示すことができた。

2. 印刷技術によるフレキシブル温度センサ

印刷形成する温度センサとして、これまでCNTインク（SWeNT, USA）と導電性ポリマーのPEDOT:PSS（Sigma Aldrich, USA）溶液を混合させることで実現してきた。本温度センサも、歪みセンサ同様、抵抗変化型のセンサである。本温度センサは、CNTとPEDOT:PSS界面による電子の温度に対するホッピング伝導の確率を計測する原理となっている。そこで本研究では、温度センサのさらなる高感度化を目指しホッピング伝導確率の向上へ向けCNTインクとPEDOT:PSS溶液の混合比の最適化を行った。実験は、単純に混合比を変化させた場合のそれぞれの温度に対する抵抗変化率の計測を行った。図3に混合比と温度に対する感度（1℃の変化に対する抵抗変化率）を示す。本結果から混合比3:1（＝PEDOT:PSS溶液:CNTインク）で最大感度～0.8%/℃を得ることができた。このように印刷形成した温度センサであっても、一般的に市販されているPt温度センサ（～0.6%/℃）と比べ、若干であるが

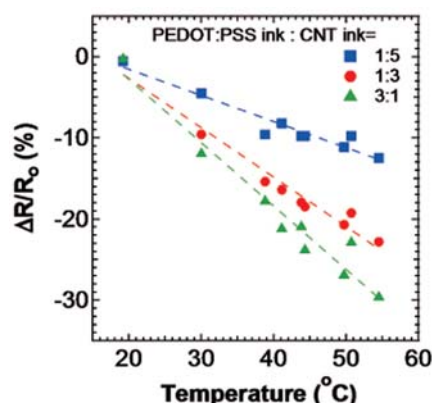


図3 温度センサ印刷用インクの混合比による温度に対する抵抗変化率

高感度化を実現できた。本感度は人の皮膚温度の変化0.1℃程度であれば容易に計測可能であり、ウェアラブルデバイス応用としての利用も大きく期待できる。

3. フレキシブルセンサの集積化とその応用

上述した印刷形成による歪みセンサと温度センサの集積化技術を開発することで、フレキシブルセンサシートとしての可能性を示す。第一段階として、現在盛んに研究が行われている電子皮膚デバイスに着目した。現状の電子皮膚デバイスは「触覚」と「温度」の検出は可能であるが、人の皮膚機能として重要なせん断応力である「摩擦」検出を可能とする低価格・大面積電子皮膚デバイスは報告されていない。そこで本研究では、大面積フレキシブルセンサシートの開発により「触覚」「摩擦」「温度」分布検出可能な電子皮膚デバイスの実現を目指した。まず「触覚」と「摩擦」の同時検出を実現する方法として、SiのMEMS技術の知見を融合することで、3次元突起物を形成し、その周辺に歪みセンサを集積化させる構造を提案した。図4aの有限要素法の結果からも明らかのように、「触覚」と「摩擦」応力印加時では、全く異なる歪み分布が突起物周辺には形成される。これを歪みセンサで読み取ることで、「触覚」と「摩擦」の同時検出を提案した。なお、本構造では、その歪み応力の大きさを読み取ることで

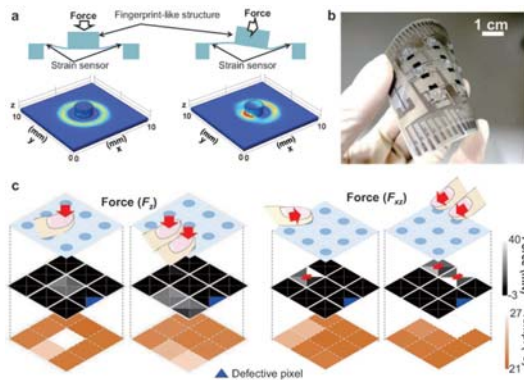


図4 「触覚」「摩擦」「温度」分布計測を可能とする電子皮膚デバイス
(a) 有限要素法による触覚及び摩擦印加時の歪み分布
(b) デバイス写真
(c) 「触覚」「摩擦」「温度」分布計測結果

印加された力の大きさも読み出すことが可能となる。さらに温度分布検出には、上記の温度センサを歪みセンサと集積化させることで、人の皮膚のような「触覚」「摩擦」「温度」分布の計測を実現させた。図4b-cには、実際に作製した電子皮膚デバイスとデバイスを人の手で実際に触った際の「触覚」「摩擦」「温度」分布結果を示す。このことから印刷技術のみを用いて異なるセンサを集積化させることで多機能なフレキシブルセンサシートの作製に成功した。

4. フレキシブル CMOS 回路

フレキシブルデバイスシステムの可能性を示すにはフレキシブル基板上での集積回路の実現が必要となる。そこで本研究では、n型半導体の InGaZnO 薄膜と p型半導体の CNT ネットワーク膜をフレキシブル基板上に集積することで CMOS 回路を形成した。トランジスタの特性を示す移動度は、n型で約 $5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、p型で約 $2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度であった。次にこれらのトランジスタを集積化させることで CMOS インバータ回路を作製し、その特性評価を行った。その結果、良好なインバータ特性を示し、その電圧ゲインは 60 程度であり、フレキシブル基板上に高性能な CMOS インバータ回路の作製に成功した。次にフレキシブルデバイスとして重要であるフレキシブル基板の機械的曲げ

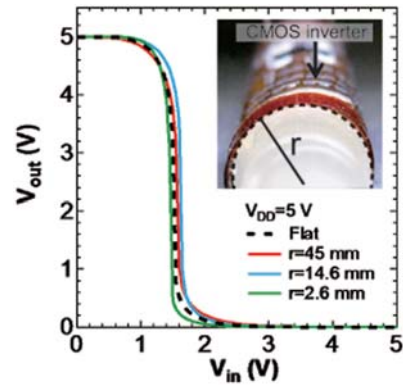


図5 フレキシブル CMOS インバータ回路の基板の曲げによる入出力特性

に対する CMOS 回路の特性の変化の解析を行った。ここで、基板は局率半径 2.6 mm 程度まで曲げており、これは本研究が目指すウェアラブルデバイスとしては十分な曲げ量である。図5に示すように、基板の曲げに対しても、CMOS 回路の特性が変化することなく動作することを確認した。これは、CMOS 回路上にパッシベーション層を形成することで曲げ時に CMOS 回路にかかる応力を出来る限り緩和したためである。さらにナノ材料を用いることで、曲げによる応力の影響をできる限り軽減している。実際、有限要素法で CMOS 回路部分の最大応力を計算すると、その応力は、約 0.08% 程度と非常に小さい応力であり、CMOS 回路が曲げから保護されていることがわかる。

[今後の研究の方向、課題]

本研究では、将来の低価格、多機能なフレキシブル・ウェアラブルデバイス実現へ向けた基礎技術としてフレキシブル基板上に印刷形成したセンサの集積化技術、また主に無機ナノ材料を用いた CMOS 論理回路の集積化技術の開発を行ってきた。今後は、本研究にて開発した基礎技術を応用展開システムとしてのフレキシブルセンサシートの実現を目指す。現状、フレキシブルデバイスに関する研究が非常に盛んに行われているが、まだシステム化レベルでの実証実験が行われておらず、その実用化への道は

見えていない。そこで本研究を継続し、さらに発展応用を目指すことでフレキシブルデバイスの実用化への可能性を示すことが必要不可欠である。もし例え本材料技術が最終的に採用されなくても、本研究によって得られたフレキシブルデバイスの作製技術や応用用途など今後のエレクトロニクス分野への貢献は大きいものであると期待できる。

[成果の発表, 論文等]

1. S. Harada, K. Kanao, Y. Yamamoto, T. Arie, S. Akita, K. Takei, "Fully printed flexible fingerprint-like three-axis tactile and slip force and temperature sensors for artificial skin", *ACS Nano*, **8**, 12851-12857, 2014.
2. K. Takei, W. Honda, S. Harada, T. Arie, S. Akita, "Toward flexible and wearable human-interactive health-monitoring devices", *Adv. Healthcare Mater.*, **4**, 487-500, 2015.
3. K. Kanao, S. Harada, Y. Yamamoto, W. Honda, T. Arie, S. Akita, K. Takei, "Highly selective flexible tactile strain and temperature sensors against substrate bending for an artificial skin", *RSC Advances*, **5**, 30170-30174, 2015.
4. S. Harada, T. Arie, S. Akita, K. Takei, "Highly stable liquid-solid metal contact toward multi-layered detachable flexible devices", *Advanced Electronic Materials*, in press 2015.
5. W. Honda, S. Harada, T. Arie, S. Akita, K. Takei, "Printed wearable temperature sensor for health monitoring", *Proc. IEEE Sensors 2014*, 2227-2229, 2014.
6. K. Kanao, S. Harada, Y. Yamamoto, W. Honda, T. Arie, S. Akita, K. Takei, "Printable flexible tactile pressure and temperature sensors with high selectivity against bending", *Proc. MEMS 2015*, 756-759, 2015.
7. W. Honda, T. Arie, S. Akita, K. Takei, "Inorganic material-based flexible CMOS circuit and optical sensor", 18th *Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2015)*, accepted 2015.
8. S. Harada, T. Arie, S. Akita, K. Takei, "Flexible, printed tactile, friction, and temperature sensor array for artificial skin", 18th *Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2015)*, accepted 2015.
9. 原田真吾, 本田航, 有江隆之, 秋田成司, 竹井邦晴, 「大面積印刷技術を用いた歪み, 温度センサ集積人工電子ウイスキー」第31回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2015 (優秀ポスター賞).
10. 本田航, 有江隆之, 秋田成司, 竹井邦晴, 「異種無機材料集積によるフレキシブルCMOS回路」第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015.
11. 原田真吾, 金尾顕一郎, 山本祐輝, 有江隆之, 秋田成司, 竹井邦晴, 「触覚, 摩擦, 温度センサ集積人工電子皮膚」第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015.
12. 金尾顕一郎, 原田真吾, 山本祐輝, 本田航, 有江隆之, 秋田成司, 竹井邦晴, 「触覚と曲げに対する高い選択性を有した電子皮膚デバイス」第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015 (注目講演に選出).