

## プリンタブルなフレキシブル体温計の開発に成功 ～薄くて、軽く、生体組織に直接貼り付け可能～

1. 発表者： 横田 知之（東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 特任助教）  
染谷 隆夫（東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 教授）

### 2. 発表のポイント

- ◆印刷プロセスによって、くしゃくしゃと曲げられるフレキシブル体温計を作製した。
- ◆体温近傍で、高い感度（0.02℃）と速い応答速度（100ミリ秒）を同時に実現した。
- ◆シート型温度センサーを皮膚に直接貼り付けて赤ちゃんの体温をモニターするなど、ヘルスケア、医療、福祉など多方面への応用が期待される。

### 3. 発表概要：

JST戦略的創造研究推進事業の一環として、東京大学大学院工学系研究科の横田 知之 特任助教、染谷 隆夫 教授らの研究グループは、薄くてしなやかなプラスチック製の温度計を印刷プロセスによって作製し、生体組織に貼り付けて表面温度の分布を測定することに成功しました。

ウェアラブルデバイスによってさまざまな生体情報のセンシングが進む中、低コストで簡便なウェアラブル体温計の開発が重要性を増しています。本研究グループは、グラファイトを添加したポリマーを使って、高い感度（0.02℃）かつ速い応答速度（100ミリ秒）を有するプリンタブルなフレキシブル温度センサーの開発に成功しました。この温度センサーを使って、ダイナミックに呼吸運動をしているラットの肺の表面温度を計測し、呼吸の呼気と吸気における肺の温度差が非常に小さい（約0.1℃）ことを世界で初めて実測し、恒温動物が高精度に体温を一定に保っていることを示しました。

今回の研究で、皮膚を含む生体組織に直接貼り付けて表面温度の分布を大面積で簡単に精度よく計測する技術が実現されました。今後、赤ちゃんの体温をモニターするなどヘルスケア、医療、福祉など多方面への応用が期待されます。

本研究成果は、2015年11月9日（米国時間）に「アメリカ科学アカデミー紀要」誌オンライン速報版で公開されます。

本成果は、以下の事業・研究プロジェクトによって得られました。

戦略的創造研究推進事業 総括実施型研究（ERATO）

研究プロジェクト 「染谷生体調和エレクトロニクスプロジェクト」

研究総括 染谷 隆夫（東京大学 大学院工学系研究科 教授）

研究期間 平成23年8月～平成29年3月

上記研究プロジェクトでは、シリコンに代表される従来の無機材料に代わり、柔らかく、かつ生体との適合が期待できる有機材料に着目し、生体とエレクトロニクスを調和させ融合する全く新しいデバイスの開発の実現を目指しています。

#### 4. 発表内容：

##### <研究の背景と経緯>

プリンテッドエレクトロニクスは、印刷プロセスを利用して電子回路やセンサーなどを製造する技術です。材料の使用効率が高く、真空装置を利用しないため、省資源化、低コスト化、生産性に優れた次世代の製造手法として期待され、世界中で活発な研究開発が進められています。これまでに、太陽電池、ディスプレイ、半導体メモリ、プリント基板などさまざまなデバイスや電子部品の製造への応用が進められています。特に、薄い高分子フィルムに次世代フレキシブルデバイスを製造するための手法として本命視されています。

フレキシブルデバイスは、電子ペーパーからウェアラブルエレクトロニクスへと応用範囲が急速に広がりを見せています。ウェアラブルデバイスでは、さまざまな生体情報を計測するセンサーが搭載され、ヘルスケアへの応用が進んでいます。実際に、発光ダイオードを使った腕時計型の脈波計や小型の心電計測器などが実用化され、ウェアラブル・センサーの多機能化が進んでいます。特に、体温は健康管理のための基本的な情報であり、低コストで簡便なウェアラブル体温計の開発が重要性を増しています。

このような背景の中、グラファイトなどの導電性物質を添加したポリマーの中で、温度の上昇に伴って電気抵抗が増加する材料は、ポリマーPTC (Positive Temperature Coefficient：正温度係数、注1) と呼ばれ、温度センサーや加熱防止のための保護素子への応用が期待されています。ところが、ポリマーPTCを使って、体温付近における優れた温度応答性 (感度0.1℃以下) や繰り返し温度を上げ下げすることに対する高い再現性を実現することは困難でした。また、くじやくにやと曲げられる機械的な耐久性、印刷のような簡単なプロセスによる加工のしやすさを同時に実現する材料も報告がありませんでした。そのため、体温に応答温度が調整されたプリンタブルなフレキシブル温度センサーの実現が待たれていました。

##### <研究の内容>

本研究グループは、グラファイトを添加したアクリル系ポリマー (注2) を使って、高い感度 (0.02℃) と速い応答速度 (100ミリ秒) を両立したプリンタブルなフレキシブル温度センサーの開発に成功しました (図参照)。この温度センサーは、体温付近で非常に大きな抵抗値の変化を示し、1000回以上繰り返し温度を上げ下げしても高い再現性を示します。試作した温度センサーは、曲率半径700マイクロメートル (1マイクロメートルは1/1000ミリ) に曲げても壊れることなく、また生理的環境でも動作します。さらに、25℃から50℃まで応答温度を自由に調整できます。

開発の決め手は、ポリマーを合成する際に、2種類のモノマーの重合割合を変化させることによって、温度センサーの応答温度を体温付近に調整できるようになったことです。具体的には、オクタデシルアクリレートとブチルアクリレートの2種類のモノマーの混合比率を変化させて、25℃から50℃の範囲で応答温度を制御しました。従来の手法では、ポリマーの分子量を変化させることによって応答温度を調整してきたため、応答温度の制御性が良くありませんでしたが、本研究では、分子量ではなく混合比率で応答温度を調整する手法を確立し、0.02℃という精度を達成しました。

この温度センサーは、抵抗値の変化が非常に大きいため、複雑な読み出し回路を用いずに精度の高い計測ができます。本研究グループは実際に、ダイナミックに呼吸運動している状態で、ラットの肺の表面に温度センサーを貼り付けて計測を行いました。その結果、外気温25℃と体温37℃の違いがあるにも関わらず、呼吸の呼気と吸気における肺の温度差が非常に小さい

(約0.1℃)ことを世界で初めて実測し、恒温動物が高精度に体温を一定に保っていることを示しました。さらに、有機トランジスターのアクティブマトリックス(注3)と集積化した多点の温度計を製造することによって、リアルタイムで表面温度の分布を計測することに成功しました。

従来のフレキシブル温度センサーは、測温抵抗体(注4)や熱電対(注5)による報告があります。これらの温度センサーは、温度変化に対する抵抗変化が小さいため、高精度の温度計測には複雑な読み出し回路を必要とします。そのため、多点計測の測定点が増えた場合や、センサーの曲げによる歪みが加わった場合には、高精度に温度を計測できませんでした。一方で、今回の温度センサーは、体温付近で、5℃の温度変化に対して、抵抗値が5桁にも及ぶ変化を示します。そのため、多点で大面積にデバイスを作製した際にも、複雑な読み出し回路を用いずに、高感度に温度を測定することができるようになりました。

### <今後の展開>

皮膚を含む生体組織に直接貼り付けて表面温度の分布を大面積で簡単に精度よく計測する技術が実現されたことによって、ヘルスケア、医療、福祉など多方面への応用が期待されます。

例えば、今回開発された温度計を絆創膏にプリントすることによって、皮膚に直接貼り付けて簡単に体温を計測するという応用が考えられます。赤ちゃんや病院の患者の体温を常時モニターすることによって、体調の異変をいち早く察知することができるようになると期待されます。また、手術後に患部に体温計を貼り付けて、炎症による局所的な発熱など異常の有無をモニターするという利用方法も考えられます。

さらに、ヘルスケア・医療応用以外にも、体表面の温度計測はさまざまな応用があります。従来のサーモグラフでは、服の中の体温は外から計測できませんでした。本センサーを利用すれば、活動中に服の内側の体温計測や体表面の温度分布の計測が可能となり、快適で機能的なスポーツウェアの開発などに利用することが期待されます。

### <付記>

本研究は、米国テキサス大学ダラス校のワルター・ボイト(Walter Voit)教授のグループとの共同研究で進められました。

### 5. 発表雑誌:

雑誌名:「アメリカ科学アカデミー紀要(PNAS) Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America」(オンライン版:11月9日)

論文タイトル:“Ultraflexible, large-area, physiological temperature sensors for multipoint measurements”(多点計測のための超薄型大面積生理温度センサー)

著者:Tomoyuki Yokota\*, Yusuke Inoue, Yuki Terakawa, Jonathan Reeder, Martin Kaltenbrunner, Taylor Ware, Kejia Yang, Kunihiko Mabuchi, Tomohiro Murakawa, Masaki Sekino, Walter Voit, Tsuyoshi Sekitani, and Takao Someya\*

DOI番号:10.1073/pnas.1515650112

## 6. 問い合わせ先：

### <研究に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻  
教授 染谷 隆夫 (ソメヤ タカオ)  
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

### <報道担当>

東京大学 大学院工学系研究科 広報室  
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

## 7. 用語解説：

注1) ポリマーPTC (Positive Temperature Coefficient : 正温度係数) : ポリマーの中に導電性のある材料を分散させたもの。温度が上昇することで、ポリマーの体積が増大し、導電性物質同士の距離が大きくなり、電気抵抗が増加する。

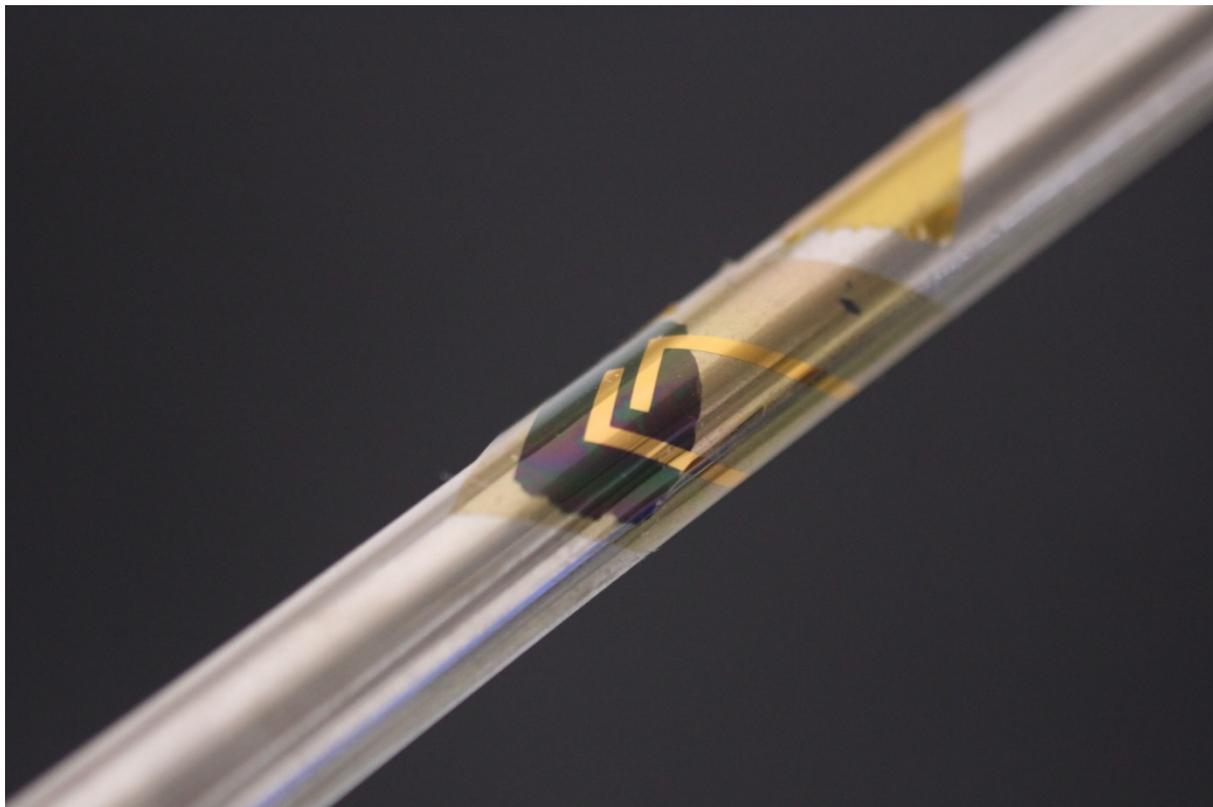
注2) アクリル系ポリマー : アクリル酸、メタクリル酸のエステルを主成分とした樹脂。

注3) アクティブマトリックス : ディスプレイやセンサーの駆動方式の一種。各セルにアクティブ素子 (薄膜トランジスタ) を集積化することによって、低消費電力化や高精度化が実現できる。

注4) 測温抵抗体 : 金属などの物質の電気抵抗が、温度変化に対して線形的に変化する温度センサー。

注5) 熱電対 : 異なる2種類の金属を接続し、その接合部分の温度差に応じた電圧が発生することを利用した温度センサー。

8. 添付資料：



(図) プリントブルなフレキシブル温度センサーの写真。