

超柔軟有機LEDの大気安定動作に成功 ～ 貼るだけで人の肌がディスプレイに ～

1. 発表のポイント

- ◆超柔軟な有機LEDにより、貼るだけで皮膚がディスプレイになる。
- ◆超柔軟な有機光センサーを貼るだけで血中酸素濃度や脈拍の計測が可能となる。
- ◆ヘルスケア、医療、福祉、スポーツ、ファッションなど多方面への応用が期待される。

2. 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染谷 隆夫 教授と横田 知之 講師らの研究グループは、超柔軟で極薄の有機LEDを作製し、大気中で安定に動作させることに成功しました。この超柔軟有機LEDは、すべての素子の厚みの合計が3マイクロメートルしかないため、皮膚のように複雑な形状をした曲面に追従するように貼り付けることができます。実際に、肌に直接貼りつけたディスプレイやインディケータを大気中で安定に動作させることができました。さらに、極薄の高分子フィルム上に有機LEDと有機光検出器を集積化し、皮膚に直接貼り付けることによって、装着感なく血中酸素濃度や脈拍数の計測に成功しました。開発の決め手となったのは、水や酸素の透過率の低い保護膜を極薄の高分子基板の上に形成する技術です。本研究で、貼るだけで簡単に運動中の血中酸素濃度や脈拍数をモニターして、皮膚のディスプレイに表示できるようになった結果、ヘルスケア、医療、福祉、スポーツ、ファッションなど多方面への応用が期待されます。

本研究成果は、2016年4月15日（米国時間）に米国「Science Advances」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。

3. 発表内容：

<研究の背景と経緯>

近年、エレクトロニクスと生体との融合が進んでおり、エレクトロニクスや情報通信技術の発展によって、老化によって弱りつつある能力を回復させたり、健康状態をモニタリングしたりする技術への応用が進められています。実際に、義手・義足、人工内耳、人工心臓などがすでに実用化されています。また、人が身に着けるタイプの新しいエレクトロニクスが、ウェアラブルデバイスとして大きな発展を遂げています。スマートメガネやコンタクトレンズを身につけただけで、ライフログや血糖値を計測できるデバイスが実現されています。さらに、パワ

スーツが実用化され、高齢者の弱った力をアシストしたり、作業員の重い荷物の運搬をアシストしたりできるようになりました。

このような背景の中、人がデバイスを身に着けるだけでなく、皮膚を含む生体組織の表面を直接電子化する技術が注目されています。この技術は、薄い高分子フィルムに半導体デバイスを製造した後に、ロボットの表面に貼り付けてモノの表面を電子化する手法から派生しています。一方で、ロボットの表面と比較して人間の生体組織の表面は、複雑な形状をしており、柔らかく、いつも動いています。そのため、より柔軟性に優れた極薄の電子デバイスが求められています。特に、高分子フィルム上に作製された有機デバイスは、可とう性と生体との密着性が優れているため、装着感のないウェアラブルデバイスとして応用が期待されています。実際に、これまでに厚みが2マイクロメートルの有機トランジスタ集積回路（注1）などが開発され、人間の皮膚に直接貼りつけて、筋肉を動かすときに生じる電位である筋電など生体の電気信号計測に応用されてきました。ところが、有機発光ダイオード（LED、注2）など有機発光デバイスは、大気中で安定に動作させることが困難であり、生体に表面に様々な電子的機能を実現する際の制約となっていました。そのため、極薄の有機LEDを大気中で安定に動作するための技術の確立が待ち望まれていました。

＜研究の内容＞

本研究グループは、高性能な有機LEDを極薄の高分子フィルム上に作製することによって、くしゃくしゃに曲げられる超柔軟性を維持したままで、大気中で安定に動作させることに世界で初めて成功しました。基材は、パリレン（注3）と呼ばれる生体適合性に優れた高分子フィルムで、厚さは1マイクロメートル（1マイクロメートルは1/1000ミリ）です。基材や保護膜を含むディスプレイ全体の厚みは、3マイクロメートルしかありません。この厚みは、人間の皮膚表皮の約1/10に相当します。

この超柔軟有機LEDは、高分子材料を発光層に用いたLEDとしては世界最高水準の特性を示します。具体的には、赤、緑、青（ピーク波長はそれぞれ609、517、460ナノメートル）の3色の超柔軟有機LEDの外部量子効率はいずれも12.4、13.9、6.3%であり、10ボルトの動作時に輝度10000カンデラ/平方メートルを実現しました。この超柔軟有機LEDの特性は、ガラス基板上に作製したデバイスとほぼ同等（その差は最大で5%程度）で、これまでに報告された柔軟性の高い有機LEDの効率が1%であることと比較すると、10倍程度の特性改善が実現されています。

超柔軟有機LEDは、超薄型であるため人間の皮膚の表面のように複雑な形状をした自由曲面にぴったりと貼り付けることができ、ディスプレイやインディケータとして使うことができます。例えば、赤色のLEDで7セグメントのディスプレイを作製し、実際に人の手の甲に直接貼り付けて0から9までの数字を表示させる実験を行いました。さらに、1色もしくは2色の有機LEDを使って、実効的な発光面積が約10平方センチメートルのインディケータを作製し、人のほほに貼り付けて、明るさを変化させる実験も行いました。これらのディスプレイは、後で述べるヘルスマonitoringセンサーと連動させ、例えば血中酸素濃度を表示させることができます。

この超柔軟有機LEDは曲率半径100マイクロメートルまで曲げても、くしゃくしゃに折り曲げても、特性が損なわれません。さらに、この優れた折り曲げ特性を活かすことによって、ゴムシートと貼り合わせて、伸縮自在な有機LEDを実現しました。まず、予め伸ばしたゴムシートと超柔軟有機LEDを貼り合わせます。その後で、ゴムシートをもとの長さに戻すことによって、ゴムシートの表面に超柔軟有機LEDのしわの構造を意図的につくることによって、

伸縮性を実現します。その結果、1000回繰り返して60%伸張させても、デバイスの特性が10%しか変化しないことが示されました。

超柔軟有機LEDの大気安定動作を実現する鍵となった技術は2つあります。まず、デバイスを極薄に維持したままで、水や酸素の透過率の低い保護膜を極薄の高分子基板上に形成する技術です。具体的には、有機層として500ナノメートル厚のパリレン膜、無機層として200ナノメートル厚のSiONを積層化した5層の多層膜を成膜しました。保護膜の総厚みが2マイクロメートル以下でありながら、水分透過率を 5×10^{-4} グラム/平方メートル・日まで、同時に酸素透過率を0.1センチメートル/平方メートル・日まで低減することができました。

第2のポイントは、極薄の高分子基材に損傷を与えずに、透明性電極の代表である酸化インジウムスズ（ITO、注4）を成膜する技術です。高分子基材は、熱によって簡単に収縮し、またプラズマのような高エネルギープロセスによって簡単に表面が荒らされてしまいます。そこで、ITOを室温にて極薄高分子基材上に成膜する技術を開発しました。特に、ITOを成膜する前に、500ナノメートル厚のポリイミドをコーティングすることによって、表面の平坦性を3.6ナノメートルから0.3ナノメートルまで改善するなどの工夫を凝らしました。これらの新しい2つの技術によって、超柔軟性や極薄膜性を維持しながら、従来は不可能であった極薄有機LEDを大気中で動作させることに成功し、寿命29時間（半減期）を達成しました。

さらに、本研究では、有機光検出ダイオード（PD、注5）を極薄高分子基材に形成し、有機LEDと集積化する技術を開発しました。より具体的には、2色（緑と赤）の有機LEDを有機PDと集積化した極薄デバイスを指の先端に巻き付けることによって、血中の酸素濃度を反射型の配置で計測しました。その結果、ほとんど装着感のない状況で、心拍数や血中酸素濃度（測定範囲は90から99%）を1分以上に渡って安定に計測することに成功しました。

<今後の展開>

貼るだけで簡単に人の肌をディスプレイにできるようになった結果、ヘルスケア、医療、福祉、スポーツ、ファッションなど多方面への応用が期待されます。

例えば、今回開発された有機光センサーを人の肌に直接貼り付けて、装着感なく血中酸素濃度や脈拍を計測し、その測定結果をリアルタイムで腕に貼り付けられたセグメントディスプレイに表示するという応用が考えられます。ランニングなど運動中の生体情報を簡単にモニターできるようになると期待されます。また、入院中の患者の掌にディスプレイを貼り付けて、人に見られたくない自分の健康状況を簡単に寝たままで掌の中で確認できるようになります。工場の作業員の手の甲にディスプレイを貼り付けて、そこにマニュアルを表示することによって、手元の作業の効率を上げられるといった応用が期待されます。

さらには、人に見せることを目的とした利用方法も考えられます。服とコーディネートして皮膚を電飾媒体としたファッションやスポーツ応援のペインティングなども期待されます。また、自分の心拍数に同期して明るさの変わるインディケータを頬につけて、自分のドキドキをほんの少し相手に伝えることによって、コミュニケーションのあり方が変わるかもしれないなど、さまざまな未来が想像されます。

4. 発表雑誌：

雑誌名：米国「Science Advances」誌（オンライン版：4月15日）

論文タイトル：“Ultra-flexible Organic Photonic Skin”（超柔軟な有機フォトニックスキン）

著者：Tomoyuki Yokota, Peter Zalar, Martin Kaltenbrunner, Hiroaki Jinno, Naoji Matsuhisa, Hiroki Kitano, Yutaro Tachibana, Wakako Yukita, Mari Koizumi, and Takao Someya
DOI 番号：10.1126/sciadv.1501856

5. 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
Tel : 03-5841-0411 Fax : 03-5841-6709
E-mail : someya@ee.t.u-tokyo.ac.jp

<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
Tel : 03-5841-1790 Fax : 03-5841-0529
E-mail : kouhou@pr.t.u-tokyo.ac.jp

6. 用語解説：

(注1) 有機トランジスタ集積回路：有機半導体をチャネル層に用いた電子スイッチを組み合わせて実現した集積回路。曲げやすさ、大面積性、耐衝撃性に優れるため、次世代のセンサーやディスプレイへの応用が期待されている。

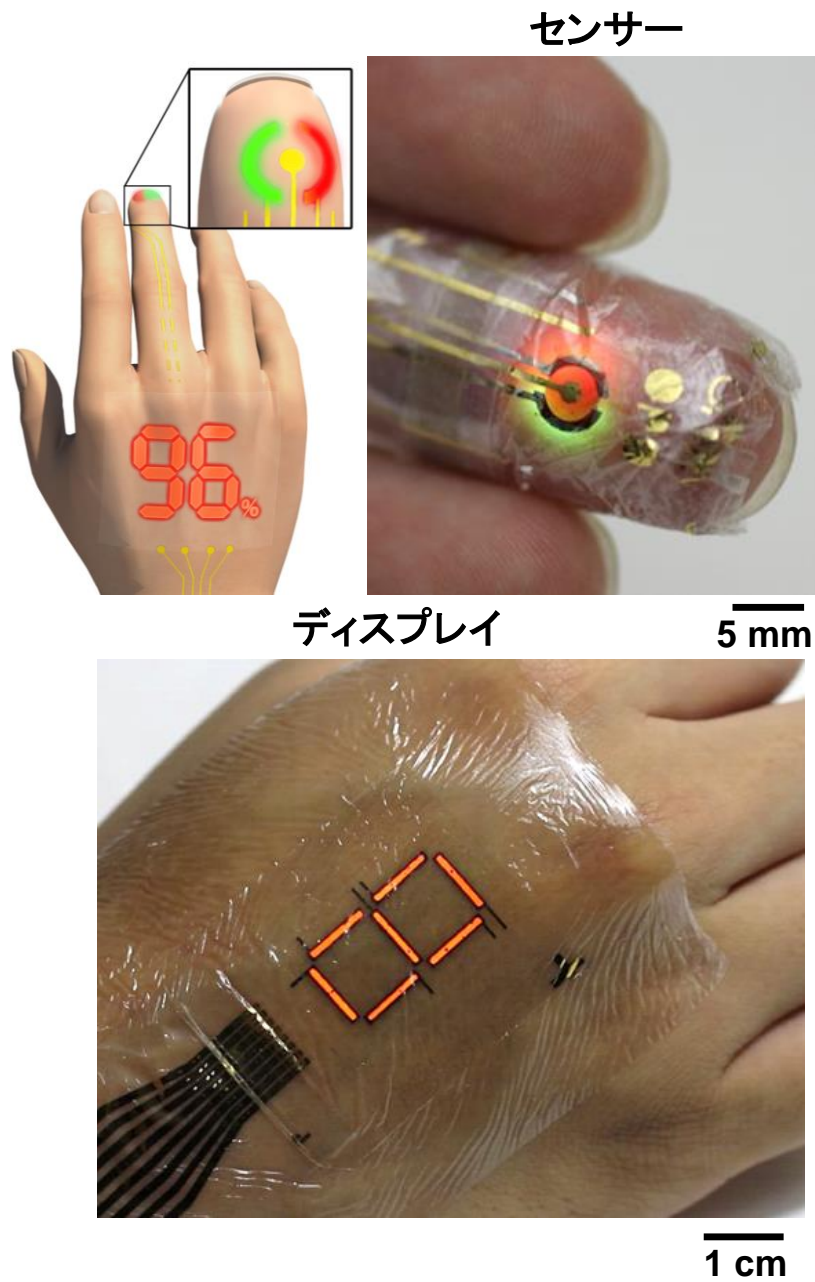
(注2) 有機発光ダイオード (LED)：有機半導体を発光層に用いたダイオードのこと。有機エレクトロルミネセンスとも呼ばれる。すでにスマートフォンのディスプレイとして広く普及している。発光層に高分子材料を用いたものを特に高分子LEDと呼ぶこともある。

(注3) パリレン：高分子の一種。化学気層堆積法によって良質の均一薄膜が形成できる。生体適合性に優れているためさまざまな生体・医療用途に応用されている。

(注4) 酸化インジウムスズ (ITO)：インジウムとスズを含む酸化物で、透明性に優れた導電性物質として太陽電池やディスプレイ向けに広く利用されている。

(注5) 有機光検出ダイオード (PD)：有機半導体を受光部分に用いたダイオード構造。有機太陽電池とほぼ同様の構造であるが、暗電流を低減して感度を上げるなど光検出器としての性能を改善して作製される。低温プロセスに向くため、薄型高分子フィルム上に作製しやすい。

7. 添付資料：



(図) 皮膚に貼ることのできる超柔軟有機光デバイスの写真

超柔軟な有機LEDにより、肌に貼るだけで、顔や手をアナログディスプレイやデジタルディスプレイにすることができる。さらに、超柔軟有機PDと超柔軟有機LEDを組み合わせ、血中酸素濃度を計測するヘルスケアセンサーとして利用することもできます。