

フレキシブルエレクトロニクスを使った
生体センシングと、さらに進化させた
ナノメッシュエレクトロニクスの可能性

上

『科学の萌芽』とは

各分野で活躍する次世代の科学技術の担い手にご登壇いただき、成功までの軌跡や知られざるエピソードなど、サイエンスの“今”と“未来”が見えてくる企画です。

取材日：2024年8月23日
(一社) 日本科学機器協会 会議室

科学の萌芽 13

東京大学工学系研究科総合研究機構
准教授

よこた ともゆき

横田 知之先生



横田 知之 先生のプロフィール

【学歴・職歴】

- 2008年 3月 東京大学工学部物理工学科卒業 学士(工学)
- 2010年 3月 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了 修士(工学)
- 2013年 3月 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了 博士(工学)
- 2010年 4月～2013年3月 日本学術振興会特別研究員(DC1)
- 2013年 4月～2016年3月 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻特任助教
- 2016年 4月～2019年5月 東京大学工学系研究科電気系工学専攻講師
- 2019年 5月～現在 東京大学工学系研究科電気系工学専攻准教授
- 2019年 7月～2019年12月 Google X客員研究員
- 2022年 4月～現在 東京大学工学系研究科総合研究機構准教授

【主な論文】

- Tomoyuki Yokota, Takashi Nakamura, Hirofumi Kato, Marina Mochizuki, Masahiro Tada, Makoto Uchida, Sunghoon Lee, Mari Koizumi, Wakako Yukita, Akio Takimoto, Takao Someya, “A conformable imager for biometric authentication and vital sign measurement” Nature Electronics, 3, 113-121 (2020).
- Tomoyuki Yokota, Takashi Kajitani, Ren Shidachi, Takeyoshi Tokuhara, Martin Kaltenbrunner, Yoshiaki Shoji, Fumitaka Ishiwari, Tsuyoshi Sekitani, Takanori Fukushima, Takao Someya, “A Few-Layer Molecular Film on Polymer Substrates to Enhance the Performance of Organic Devices” Nature Nanotechnology, 13, 139-144 (2018).
- Tomoyuki Yokota, Peter Zalar, Martin Kaltenbrunner, Hiroaki Jinno, Naoji Matsuhisa, Hiroki Kitanosako, Yutaro Tachibana, Wakako Yukita, Mari Koizumi, and Takao Someya, “Ultraflexible organic photonic skin” Science Advances, 2, e1501856 (2016).

【主な受賞歴】

第27回研究業績表彰 丸文学術賞 / 第三回 オープンイノベーション大賞 科学技術政策担当大臣賞 / 令和3年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞 / 第20回 船井学術賞(受賞者代表挨拶) / Highly Cited Researchers for 2019 / ICFPE 2019 Outstanding Paper Award / 2016年秋季 応用物理学会講演奨励賞 / SSDM young researcher award / The 2011 Roger A. Haken Best Student Paper Award / 2010 IEEE EDS Paul Rappaport Award

聞き手：

富山 裕明 日本科学機器協会 広報委員長
岡田 康弘 “ ” 事務局長

(取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)



薄くて柔らかい特性を持つ
フレキシブルエレクトロニクスを
生体センシングに応用する研究

横田先生は、最先端かつ未来的なエレクトロニクスやデバイスの領域で研究を進められています。研究の専門分野について教えてくださいませんか。

横田 私は主に、フレキシブルエレクトロニクスと呼ばれる非常に柔らかい材料を使ったエレクトロニクスの研究を行っています。例えば、薄くて柔らかいプラスチック、金属箔、紙、フレキシブルガラスなどの基板を、人間の皮膚に貼って使用することができる電子デバイスです。その研究と関連して、最近では生体センシングというキーワードを踏まえた取り組みを進めています。

フレキシブルエレクトロニクスの中でも、有機の半導体と有機物を用いたエレクトロニクスが研究の主体です。有機半導体を用いたエレクトロニクスとしては、有機ELディスプレイが皆さんにも身近だと思います。そうした材料を使った応用に関する研究を進めてきました。

横田先生は、東京大学大学院工学系研究科の准教授をつとめられています。これまでの経緯を簡単に教えてくださいませんか。

横田 私は2008年に東京大学の物理工学科を卒業した後、修士課程・博士課程ともに、物理工学専攻を修了しました。ですので、博士を取得するまでは物理工学

の分野にいまして、デバイス応用というよりはデバイス物理に関する研究が主でした。

その後、2013年から有機エレクトロニクスやフレキシブルデバイスの研究で世界的に高名な、染谷隆夫教授が行っていたプロジェクトの特任助教に就任しました。このプロジェクトでは生体センシングも行い、現在の研究の方向性に繋がるきっかけとなりました。3年間、このプロジェクトに携わる中で2019年に准教授に昇進させていただきました。

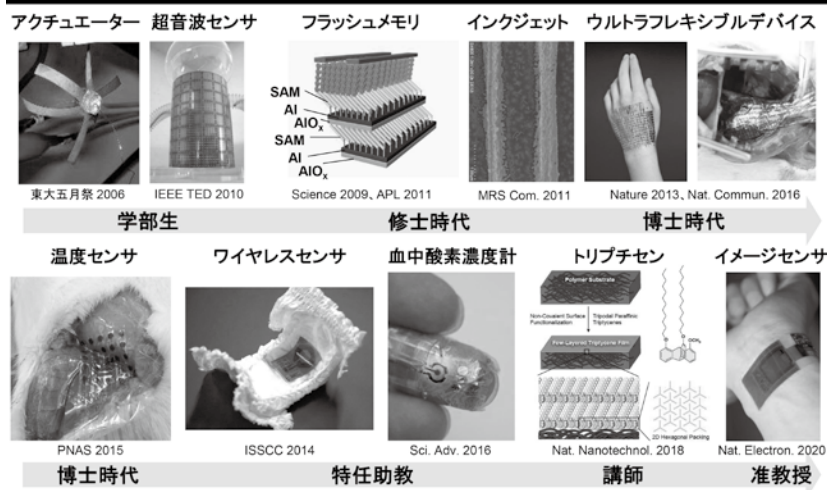
また幸いなことに、その年にアメリカの Google X(現社名X)に客員研究員として半年間赴任する機会を得て、次世代デバイスの研究を行いました。翌2020年に帰国し、2022年から現職となっています。

デジタルデバイスの最先端や未来のお話を伺いたいと思います。



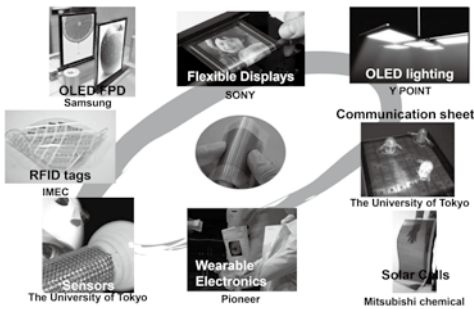
横田 ご存知のように、エレクトロニクス市場は非常に拡大をしてきました。戦後間もない頃に家電製品の普及が進み、そして自動車や電話、時代が進んでからはパソコン等が登場しました。それらが一家に1台あるかどうかという時代を経て、デバイスの小型化、高性能化、また低価格化が進み、個人が色々な製品を持つようになりました。デジタルカメラ、ノートパソコン、携帯電話やがてスマートフォンというように、1人が数台の機器を持つのが当たり前になったわけです。そして現在はApple Watchなど、

これまでの研究内容



産学官との連携

フレキシブルエレクトロニクス



身に付けられるウェアラブル機器が登場しています。これから将来的には、こうした機器を1人でいくつも身につけるウェアラブルエレクトロニクスの時代になってくると考えられています。その中で、キーになるテクノロジーと考えられるのが、私たちが研究しているフレキシブルエレクトロニクスです。

フレキシブルという名の通り、非常に柔軟な柔らかなデバイスということですね。

横田 おっしゃる通りです。元々はフレキシブルな、つまり柔らかくて折り曲げられるようなディスプレイの開発から始まり、2000年から2010年にかけて多くの企業が研究を進めてきました。それ以後はディスプレイにとどまらず、例えば、センサーシートやフィルム状の太陽電池など、非常に様々な研究開発がされて来ています。

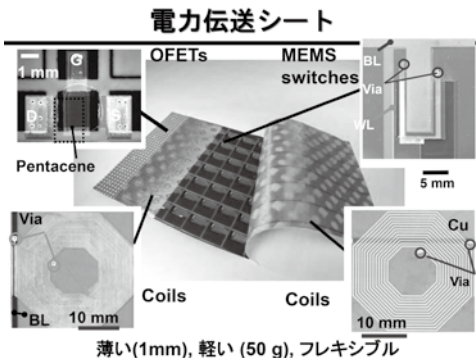
また、フレキシブルエレクトロニクスは、印刷装置を使って作製できるという特徴があり、インクジェット印刷やスクリーンで、機能性のあるインクを使う事でデバイスが作製できるのです。

薄さは表皮の約10分の1 ウルトラフレキシブルデバイス

横田 私は卒論生から修士課程、博士課程、特任助教と染谷先生の研究室で研究に取り組み、染谷先生が行っていたプロジェクトの中で、特に薄いウルトラフレキシブルデバイスの研究に携わるようになりました。

人間の皮膚の表皮の厚さが約10 μ mと言われていますが、ウルトラフレキシブルデバイスは約1~2 μ mの非常に薄い基板の上に有機エレクトロニクスを作る技術のことで、フレキシブルデバイスが印刷できることを話しましたが、博士課程の時には線幅1 μ mという非常に細い線が書けるインクジェット装置で有機トランジスタを作製する研究に取り組んでいました。

また、特任助教の頃は、よりシステムに近いところを作っていこうという目的のもと、東京大学の桜井貴康教授、高宮真教授という回路を専門とする先生方と共同研究を行い、オムツの中に入れるワイヤレスセンサーを開発しました。電力供給の仕組みを備えていて、おむつの中のセンサーが尿で濡れ



ると、それを信号変化させてデータを送信し、見守りを検知できるというセンサーシステムです。

ごく一部を話しても色々なテーマが出てきましたが、ありがたいことに、私が様々なことに興味があるようだというので、毎年のようにテーマを変えて色々な研究をさせていだいたのです。それらの多様な知見や経験が、現在の研究に繋がっています。

フレキシブルエレクトロニクスを 生体センシングに応用する 動きが世界的に活発になる

デバイスの研究が、生体センシングと結びついたきっかけをお聞かせください。

横田 2010年代前半頃からフレキシブルエレクトロニクスの新しい応用を求めて研究を深める中で、世界的にフレキシブルエレクトロニクスを使って生体情報をセンシングすることが非常に注目されるようになってきました。

そもそも、皮膚から測ることができる生体情報は様々なものがあります。例えば、電気信号では、脳波、心電、筋電などがあります。脳波をみることで、てんかんの状況や、脳の損傷がないか、脳腫瘍、睡眠障害のことなどが調べられます。心電図や筋電図からも分かることは非常に多いです。

電気信号の他に化学信号もあります。汗の成分や涙の成分を化学センサーを使って分析することで、例えば、グルコース濃度から

糖尿病の進行度が分かり、乳酸を測ることで筋肉疲労の度合いが分かり、ナトリウムイオンを測る事で脱水症状など、たくさんの生体情報が分かり、病気の予防や対策に役立てられます。

もう1つ、物理信号もあります。体温、呼吸数、心音などの他、体のゆがみや、眼圧、血圧といったことも、皮膚から物理信号を得ることができます。例えば、胸にセンサーを貼ることで、呼吸数や体のゆがみや体動などを測ることができます。

そういう動きの中で、今や皆さんも目にしたことがあるような、ウェアラブルエレクトロニクスのデバイスが登場してきます。従来は小型化してもスマートフォンぐらいの大きさがあったものが、スマートウォッチのように身に着けられるように小型化していきました。それらの多くは、時計をつけるようなバンド型や指輪のようなリング型となっています。

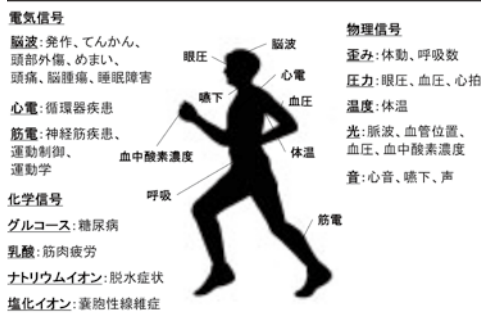
フレキシブルエレクトロニクスを体に密着させる必要があるのですね。

横田 それ以外にも、例えばコンタクトレンズ型なども開発されています。目の中の涙の成分を測ることができるセンシング機能をつけることで、成分を分析して病気の発見や予防に役立てるわけです。

いずれにせよ、基本的には身につける物にエレクトロニクスを加えるという考え方でした。しかし課題は、装着感と充電が必要ということです。スマートウォッチも、着ける事に負荷を感じる人がいますし、

産学官との連携

皮膚から測れる生体情報



ウェアラブルエレクトロニクス



使ったら充電しなければいけない、だけど生体センシングをするという意味合いからすると、本来は継続して着けていたいわけです。この装着感の負荷を軽減することが、ウェアラブルエレクトロニクスの非常に重要な課題となっています。

その問題を解決するのに、非常に薄いウルトラフレキシブルデバイスは最適なのですね。

横田 そういことです。当時、海外でもそうした報告が見られるようになってきました。フレキシブルな基板に電極アレイを付けて脳の活動を検知するものや、バルーンカテーテルにフレキシブルなエレクトロニクスを集積化したようなデバイスといったものです。そうした頃に、染谷先生のプロジェクトがスタート

することになり、生体センシングを組み込んだ研究の方にシフトしていきました。

先程、皮膚から得られる信号には電気信号、化学信号、物理信号などがあることに触れましたが、私たちは、まず有機トランジスタを用いて電気信号を計測することに着目し、研究を進めました。

薄く柔らかい基板を追求 皮膚との一体化を目指す

横田 皮膚に貼って使えるような表皮電子デバイスでは、ノースウエスタン大学の著名なジョン・ロジャース教授が作製したものが有名です。まるで皮膚と一体化して見えるほどの、非常に薄い基板の上に作っていて、デバイスと皮膚の境界がひと目見ても分からないものです。また、このデバイスの大事な点であり優れている点は、圧縮したりひずみをかけたりしても壊れないということです。

このブレイクスルーとなったのは、基板が薄くできたというシンプルなことでした。そもそもフレキシブルデバイスは、大体基板の厚さが数100 μ m~100 μ mと、少し厚めでした。それくらいの厚さですと、ある程度の曲率がくるとどうしても割れていました。これをどんどん薄くしていくと、皮膚の動きに追従するようなフレキシブルなデバイスができるわけです。500 μ m~100 μ m、さらに36 μ m、5 μ mと薄くしていくと、36 μ m程の薄さになると、皮膚の細かいシワにも追従し、高倍率で拡大してもほとんど皮膚に密着し

産学官との連携

て見える程になります。

ロジャース先生がそうした報告をした頃に、私たちも似た研究をしていて、2008年頃から取り組んでいました。当時、元々125μmあった基板を10μm程まで薄膜化できた頃、ロジャース先生の報告がされ、私たちが取り組んでいる方向性は非常に意味があるのだということで研究を継続しました。その成果として、いくつかのデバイスを開発できました。

フレキシブルデバイス基板は、何μm程まで薄くできたのでしょうか。

横田 2013年の当方で2μmの薄膜基板を作る事ができました。現在では1μmを達成しています。そしてロジャース先生が示したのと同様、薄くすることで優れた追従性

を持つことを示すことができました。実は染谷先生は2003年に厚みが2mmの表皮電子デバイスである、ロボットスキンというものを発表しました。つまり10年で薄さを1000分の1にできたことになります。

薄くする事で、柔軟かく追従性が高まることは、皆さん直感的に想像しやすいと思います。例えば金の板は曲げにくいものの、金箔ほど薄くすると、貼る対象に密着するように追従できます。それはなぜかというと、デバイスにかかるひずみを算出する式にあてはめると、デバイスの厚さが薄くなるほど、ひずみの値が小さくなるからです。物体は、極限のひずみを超えると割れてしまいます。このひずみを小さくすることにより、曲げ半径を小さくできる仕組みになっています。そして私たちは、このような表皮電子デバイスを大面積で作る事を目指していました。

ロジャース先生の製法は「転写プロセス」と呼ばれ、デバイスを作った後、薄い基板にデバイスを転写するものでした。これはごく一般的な方法で、特徴は非常に高解像度かつ高特性なデバイスを作ることができる一方、大面積に作る場合には課題がありました。

そこで私たちは、転写するのとは違い、薄膜基板に直接エレクトロニクスを作りました。元々、有機エレクトロニクスの研究を行ってきた知見があったので、低温プロセスで作ることが可能で、それができたわけです。結果、より大きな面積で作ることができ、目的を達成できました。一方でこちらは、

転写する製造法に比べると、どうしても特性が低くなるという難点があります。

大きな面積で、重量はどれくらいになりますか。

横田 薄さ1μmの基板は1平方メートルでわずか3gです。羽毛と一緒に落とすと、同じようにすぐゆっくりと落ちていくほどです。柔軟かく追従し、超薄膜で、さらにゆっくり落ちるので落としても大変壊れにくいデバイス、ということが言えます。

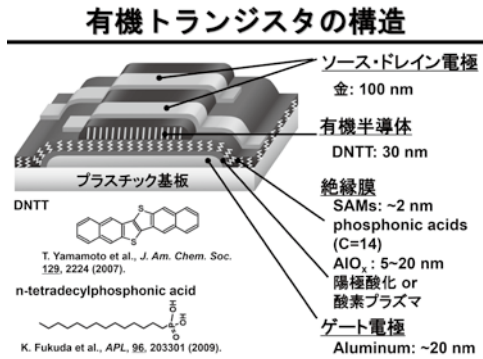
ガラス・シリコン基板と違い高温加工できない課題を克服

基板は、どのような構造になっているのでしょうか。

横田 基本的な構造は一般的なトランジスタと一緒に、プラスチック基板、つまり薄いフィルムの上にまずゲート電極があり、ここでスイッチングのON・OFFを制御します。その上に絶縁膜という電流を流さない層を作り、その上に有機半導体をつけて、最後にソース・ドレイン電極というものを配します。この電極間の電流値を読み出すことで、スイッチがONになっているか、OFFになっているかを読み出せるようになっています。

この基板が、ガラスやシリコンとは違い、非常に薄いフィルムなので、高温になると熱膨張したり溶けてしまったりするので、製造プロセスの温度を下げるのが非常に重要なポイントとなりました。この問題はクリ

アしたのですが、低温にすると、特にゲート電極の絶縁膜が品質の良いものがないということがあり、低電圧での駆動が難しいという課題が持ち上がりました。



こちらを立てれば、あちらが立たず、という状況なのですね。

横田 私が研究を始めた頃、有機トランジスタの駆動電圧は30Vや40Vが当たり前の世界で、高い時は100Vの電圧で動かすというものでした。しかし生体センシングに使用おうとしているので、高い電圧を使う事は避けなければいけません。ですので、いかに駆動電圧を下げるかということで研究に取り組みました。

その結果として、ちょっと複雑なことになるので詳細は省きますが、アルミ酸化膜と自己組織化単分子膜という、自己組織化的に非常に単分子の膜が綺麗に緻密にできる技術を使い、達成することができました。10nm程度の均一な絶縁膜をつけることに成功し、有機トランジスタを低電圧で駆動させることができるようになりました。

しかし、まだ2点課題が残りました。

産学官との連携

た。1つは有機物を使った有機半導体ですので、水や酸素などの影響で、半導体の構造が化学的に変化しないよう、バリアをする封止膜をどうつけるかという事が研究の鍵で、こちらもクリアすることができました。

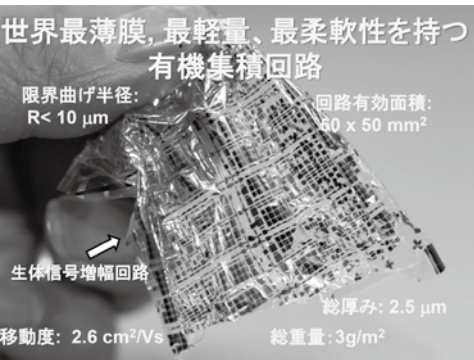
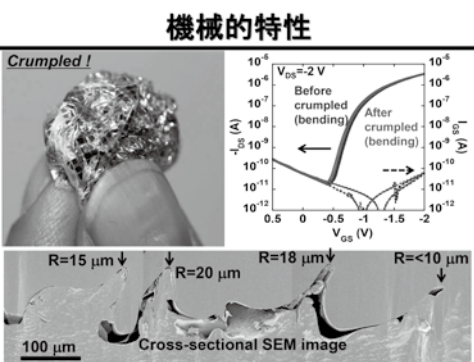
もう1つは、先ほど薄くしていくとひずみが小さくなるという話をしましたが、それでも、実は幾分かのひずみはかかっているの、例えば金属材料などの硬いものはどうしてもクラック割れてしまうという課題がありました。しかし、「ニュートラルストレインポジション」と呼ばれる、曲げた時に、真ん中の部分にひずみがかからないような構造をとることで防げることが分かり、これもクリアできました。こうして薄膜デバイスが完成できたわけです。

最薄膜・最軽量・最柔軟性特性を持つ有機集積回路

横田 そして、出来たデバイスの機械的耐久性を評価し、様々な検証の結果、実は非常に驚くべき耐久性があることが分かりました。この評価試験では、作ったデバイスをくしゃくしゃに曲げて、その後を広げて特性を評価しました。

写真では、デバイスをくしゃくしゃに丸めていますね。

横田 その後に広げて、特性を評価すると、丸める前とほとんど同じような特性が見られたのです。グラフで、青い線が曲げる前、赤い線が曲げた後で示すと、ほとんど



ピッタリ一致するほどでした。つまり、非常に高いフレキシブル性が実現できたことが証明されました。このようにして当時、世界最薄膜・最軽量・最柔軟性を持つ有機集積回路というものを作り上げることができたのです。

世界的な功績ということですね。

横田 今お話してきたことは、単体の電氣的なスイッチということになりますが、さらに有機トランジスタの技術を応用して複数のトランジスタを集積化することにより、様々な機能性を持った回路を作りました。それが、増幅回路です。

生体センシングで得られる信号は非常に小さいものなので、増幅するための増幅回路を薄膜基板上に作ったわけです。詳細は割

産学官との連携

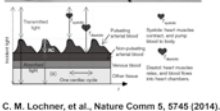
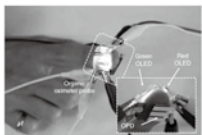
愛しますが、非常に単純化して言うと1つの増幅回路にトランジスタが4つ含まれているものになり、そこに必要なものを配しました。結果、非常に素晴らしいデータが得られました。信号増幅率は545倍、そしてこの場合の指標にゲインというものがあるのですが、それは54.7デシベルという、この論文を発表した当時、世界最大の数値が得られました。つまり、フレキシブルな有機半導体を用いた増幅回路として、非常に特性の高いものが実現できました。

さらに良いことに、特に低周波の部分を増幅できることがわかりました。生体信号は低周波部分に非常に特徴的な信号があらわれるので、この部分が増幅できることは大変素晴らしい特性になります。

実際にこのデバイスを、ラットの心臓に使用し、センシングを行ったデータがあります。つまり先ほど話しました薄さ1μmの電極を貼り、その先に増幅回路がついているものです。電気信号を直接薄いフィルムで取り、増幅したものとなっています。すると、増幅前は非常にノイズな電気信号だったものが、我々の増幅回路を使う事で非常にクリアに得られました。

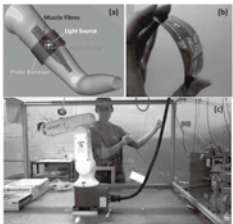
有機光デバイスを用いたセンサ

血中酸素濃度計



C. M. Lochner, et al., Nature Comm 5, 5745 (2014).

筋肉収縮検知センサ



A. K. Bannai, et al., Adv. Mater. (2014). DOI: 10.1002/adma.201403560

非侵襲に生体信号を検知可能

電気信号を用いたデバイスから、光デバイスの研究へ

当時、世界最高レベルの技術を次々に達成していったのですね。

横田 しかし、元々は生体に埋め込んで様々なセンシングを行うことを目指したものであったのですが、使用する材料の安全性の確保などを考えると、難しい課題が多いことが分かってきました。

そこで、電気的な信号以外で生体内の情報を取得できないかということで、今度は電気ではなく、光を用いることによってセンシングする方法に研究がシフトしていきました。ちょうど私が特任助教に着任した頃、2013年頃から活発になりました。

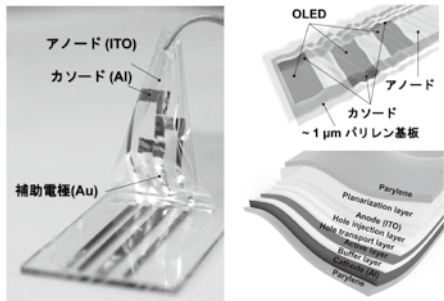
光デバイスを研究室で始めてみようという頃、色々な他のグループの報告がありました。例えば、有機の発光素子を使って筋肉の収縮具合を検知する腕に貼って使うセンサーがあり、そうして筋肉の動きから検知したシグナルを使ってロボットアームを制御するというような研究成果などです。私たちとしては、光デバイスを使うことで、電気信号だとなかなか難しかったのが見られる可能性があるのだとエンカレッジされました。

光デバイスで実現できた
ウルトラフレキシブルOLED

横田 その中でできたのが、ウルトラフレキシブルOLED（有機EL）です。先ほど話した1μmという薄

い基板の上に有機の発光素子を配して作る事ができたのです。先に結果を言いますと、基本的には、ガラス基板に作ったデバイスとはほぼ同等の特性を得ることに成功しました。薄さを改めてイメージしていただくために例えると、ラップより薄い基板です。

ウルトラフレキシブルOLEDの構造



D. Kim, T. Yokota et al., Proc Natl Acad Sci U S A., 117, 21138 (2020).

これはどのように作るのでしょうか。

横田 ご想像のように、これだけ薄いフィルムなので自立させて作る事は至難の業です。なので、少し硬いサポータリングの機材の上に基板を成膜してデバイスを作って、最後にサポータリングの機材から剥がすことによって、薄いデバイスとして使うというプロセスを踏んでいます。

発光素子の特性は、基本的には有機の半導体層を変えることで様々な発光のスペクトルを得ることができるものです。このデバイスで、基本的にはガラス基板などの上に作ったものとはほぼ同等の特性を出せることに成功した事に触れましたが、もう1つ、先ほどの電気信号の方のデバイスで性能を評価した時のように、やはりくしゃくしゃに曲げてみても壊れません。

くしゃくしゃに曲げた有機LED



くしゃくしゃにしても壊れない

写真は、銀紙を丸めたようにしているのに、発光しています。

横田 つまり、このようなフレキシブル性があるということです。また、有機のフォトディテクターの開発にも成功しました。つまり、発光素子と受光素子ができたので、次は何ができるかというと、我々が最終ゴールとしてきた生体センシングが可能になったわけです。そして実際にプロトタイプとして製作したのが、血中酸素濃度計です。

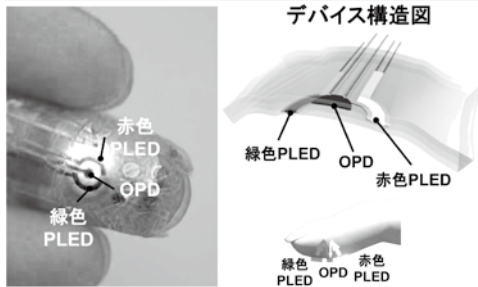
当時、別々の素子を同じ基板上に作るのが難しかったことから、基本的には3つのデバイスを作った後に集積化したため、薄さは10μmほどあります。しかし、指に巻

産学官との連携

き付ける形で、血中酸素濃度が測定できます。

血中酸素濃度計の原理はシンプルで、基本的には酸化ヘモグロビンと還元ヘモグロビンという2つの割合を求めることで血中酸素濃度をはじき出します。その酸化ヘモグロビンと還元ヘモグロビンは、光の波長によって吸光度が変わる特性があります。それを利用し、赤い光と、もう1つよく使うのは近赤外の光の2つを使い、その差から計測できるのです。この時の私たちの実験では、近赤外の光を作ることが難しかったので、赤の光と緑の光で測定を行う仕組みをとりました。この血中酸素濃度計は被験者2名でデータを取り、正確性を裏付けられる結果を得る事ができました。

超柔軟血中酸素濃度計



血中酸素濃度計は、小型なもので指を挟む形ですので、薄い基板を指に巻き付けておくだけというのは、非常に手軽ですね。

横田 指への密着性が優れているので、非常に安定した測定ができました。そして、先ほど話した、汗などで有機の構造が化学的に変化しないための封止膜の部分も研究開発することによって、1週間程度はセンサーとして用いることができるバリア性を付与できました。数日間使い、使い捨てするセンサーとして使用する分には十分な安定性が得られたと考えております。

ここまですぐに特任助教から講師時代に行っていた研究です。その後、さらに高特性を持ったデバイスができないかと試行錯誤し、企業との共同研究で、装着したまま静脈を撮影すること等が出来るイメージセンサーを開発しました。

イメージセンサーについては、次号下編でお伝えさせていただきます。



フレキシブルエレクトロニクスの進化は
疾病予防などに役立つ生体センシングの
可能性を大いに広げています

次号「科学の萌芽」では、引き続き 横田知之 先生 にお話を伺います。