

理数系への進路は 中学時代の 数学教師との出会いから

——先生の少年時代は？

染谷：2つあります。一つは、中学

校の時に非常に素晴らしい数学の先生に巡り合ったことです。その先生のおかげで数学が大変に好きになりました。もう一つは、私の父が工学系の研究者でしたので、小さいころからその影響を強く受けてい

たのでしょ。

ということで理数系に進学。大学に入った後も、素晴らしい先生方に恵まれて、そのご指導をいただき研究者としての道が開けました。

視点 NO. 43

染谷 隆夫（そめや・たかお）教授のプロフィール

昭和43年（1968年）生

平成4年3月：東京大学工学部電子工学卒業

平成6年3月：東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻修士課程修了

平成9年3月：東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻博士課程修了、博士（工学）

平成9年4月：東京大学生産技術研究所 助手

平成10年4月：東京大学生産技術研究所 講師

平成12年1月：東京大学先端科学技術研究センター 講師

平成13年2月～平成14年12月：日本学術振興会海外特別研究員（米国コロンビア大学化学科・ナノセンター客員研究員）

平成14年5月：東京大学先端科学技術研究センター 助教授

平成15年5月：東京大学大学院工学系研究科 助教授（平成20年より准教授）

平成21年4月：東京大学大学院工学系研究科 教授（現在に至る）

平成23年3月：NEDO事業「次世代プリントドエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発」研究開発責任者（現在に至る）

平成23年8月：JST/ERATO 染谷「生体調和エレクトロニクス」プロジェクト研究総括（現在に至る）



東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 **染谷 隆夫** 教授

研究活動の原動力は

好奇心

「面白い」と感じるキュリオシティ

——皮膚感覚のウェアラブルデバイス研究を成し遂げる研究者の資質とは？

「半導体デバイスは硬いシリコン基板につくるもの」、というのがひと昔前までの一般常識であった。2000年代になると、曲がるエレクトロニクスの研究が活発になった。ところがその多くは表示デバイスが中心。その中であって、染谷隆夫教授（東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻）は、2004年にロボット用人工皮膚「E-skin」を開発した。最近では人の皮膚に1週間貼り付けても炎症反応を起こさない、超軽量のナノメッシュセンサーの開発に成功し、注目を浴びている。今回の「視点」は、その染谷教授にご登場いただいた。

——ご趣味は？

染谷：中学では天文部に入り、夜に観察をし、翌日の昼に写真の現像をしていました。今でも趣味は写真です。研究室が始まって10年くらい、対外的に発表する写真のほとんどは自分で撮影しており、それらの一部は『TIME』誌の表紙をはじめ、著名な雑誌の表紙や巻頭に掲載されました。

高校の時は音楽部で合唱をやっていました。パートはバスで、大学に入ってからも続けていました。好きなジャンルはクラシックが中心ですが、アメリカ留学でジャズに触れたことがきっかけでジャズも好きになりました。

米国留学がきっかけで有機エレクトロニクスへの道へ

——今の研究に結びついていった経緯は？

染谷：大学では直接人の役に立つ工学部を選択しました。日本の基幹産業と言われる半導体に興味を持ち、電子工学を専攻しました。

半導体の微細加工の一つ、無機化合物半導体のナノ構造をつくらせて、そこに閉じ込められた電子の物性を調べる研究室で研鑽を積みました。その時の指導教員は多方面で著名な活躍をされている榊裕之教授(当時)でした。アルバックさんの装置との出会いもその研究室でした。

卒業後は、荒川泰彦教授の研究室でナノテクノロジーの光物性や工学物性の研究を始めました。今

の研究とは直接結びついた研究ではありませんが、半導体の微細化という、いわゆる本流の研究をやっていました。

この微細化のトレンドは物理的な限界に近づいていましたが、研究を始めたばかりの自分にとっては、65歳の定年まで30年以上残っているわけです。もう少し違う、誰もやっていない新しい分野に挑戦したいと考えるようになりました。

2001年から約2年間、奨学金を得て米国に留学し、その留学先(ベル研究所)で巡り合ったのが有機半導体をトランジスタに応用する研究でした。これが有機エレクトロニクスとの出会いでした。

第二のジャンプはロボット向け「E-skin」開発

——その後の展開は？

染谷：ベル研究所では、イモ判みたいなスタンプ方式でプラスチックフィルム上に有機トランジスタの電子回路をつくる研究を手がけました。ちょうどその留学中に、ベル研究所の研究者が世界初の電子ペーパーの試作品を開発しました。大変な話題になりましたが、当時このような曲がるエレクトロニクスの研究というのは、すべて表示デバイス向けの研究だったのです。しかし、これは私にとって新しい分野に挑戦する大きな転換期になりました。

日本に戻ってからは、東大生産技術研究所の桜井貴康先生と有機トランジスタの共同研究を始めました。桜井先生はシリコンの集積回

路設計では日本を代表する研究者です。

桜井先生は民間企業の経験も持ちで、シリコンの低消費電力化や回路設計の低コスト化の第一人者でした。当時、印刷で回路をつくと安いと言われていたのですが、印刷でつくるから安いわけでもないという本質を早くから見抜いておられました。そして、印刷でつくと何がいいのかという理由をずっと議論してきました。

シリコンは微細化して限られた狭い面積にたくさんトランジスタをつくることのできるのですが、1個当たりのトランジスタのコストは安いのですが、大きいところにまばらにつくることは得意ではありません。大きい面積に回路をつくる領域においては、印刷に分がある。それをフィルム上に展開すれば、シリコンでは不得手な大面積で、曲がるセンサーが可能になるのではないかと思います。その開発を始めることにしました。

そして、2003～2004年にわたってロボットの表面に張り付けて、人間の皮膚の感覚に近い「E-skin」のプロトタイプを開発しました。これは2005年に『Time』誌に取り上げられ、表紙にも紹介されました。

ここが第二のジャンプでした。そして今ではさらに進化を遂げ、ロボットだけでなく、人の皮膚に貼り付けたセンサーも開発しています。最新の研究成果は「最新の研究動向【1】【2】」欄(P.16-17)をご覧ください。

失敗の中に 次への研究ステップが潜む

——研究者としての理念とは？

染谷：いつも心がけていることは、「自分も楽しく、他人も楽しく」ということです。研究とは、人ができていないことをやることです。当然、失敗することのほうが多い。なので、失敗してもあきらめずに、しつこくやり続けることが研究者にとって非常に重要な素質です。

研究中うまくいかないと落ち込むわけです。ところが、うまくいっていないことに次へのステップのヒントがある。失敗しても、失敗から学んで、挑戦し続ける。このプロセスは、ともすると苦しくなりがちですが、自分が面白いと感じることなら没頭できますし、プロセスを楽しめます。楽しいことは、続けられます。

それがいかに面白いかを自分で納得できれば、新しいものを生みだそうとする喜び、生きがいに感じる研究者魂が掘り起こされます。そして、寝食を忘れて研究に没頭していく。研究は、そういうみずみずしい感性と情熱がないとできないことなのです。まさに「面白い」というキュリオシティ（好奇心）が大学における研究活動の原動力なのです。企業においては事業としての収益性が求められますが、大学の場合には、本人の興味、キュリオシティが原点です。ですから大学の研究は、市場や事業だけを考えていたら思いつかないようなことに気がつくこともあるわけです。企業側から見ると、そのような大学の研究成果を

活用することで、産学の連携が進むのではないのでしょうか。

人間の理解につながる 有機エレクトロニクス研究

——実用化へのロードマップ、先生の夢は？

染谷：今行っている研究の中には、いよいよ実用化段階に入り、社会実証ができるフェーズを迎えているものがあります。そのためには外部との連携をより拡大し、実証に向けていきたい。

例えば、伸縮性のセンサーを皮膚に直接貼り付けるデバイスは、すぐに試したいというオファーを病院からいただいています。でも、大学ではプロトタイプしか作成できないので、少数しかつくり出すことができません。

そういう有用性を実証しようとする、100個とか、場合によっては1,000個といった数のある程度の品質でつくる技術が必要です。そこは大学の限界です。企業への橋渡しをスムーズに行い、そのギャップを埋めていくことで、技術が発展していくと同時に産学連携が重要な役割を果たしてくれると思います。

——先生の夢は？

染谷：私の研究は非常にシーズ志向で、やわらかいデバイスをどうつくるか、それが人工物と生物のギャップを埋める1つの大きな手段になるのでは、というのが研究の原点です。そして、ギャップを埋める研究は、ギャップがどこにあるかを正確

に知ることです。

そこから得られた生体の情報は、人間が自然な形で生活をしている中で、本来生体はどういう信号を出すか、活動しているのかを計測していることに他ならない。これらの情報は、そのまま人間の理解につながります。半導体の性能が上がる、と人間の理解が深まる。この関連性は面白いですね。

生体の活動を自然のまま計測したり理解することは、100年の計でやることなので、私が現役で行きつくところには限りがあります。私が研究者の現役を終えた後も、もっとそれが発展していくように、研究室のメンバーが自分たちの面白いところを、自分たちの視点で発展させていってほしい。

今使われている「フレキシブルエレクトロニクス」という言葉が将来はなくなると思います。つまり、ほとんどすべての電子デバイスがフレキシブルな技術を使うようになり、わざわざ「フレキシブル」と言う必要がなくなる。実際にはスマートフォンなどの中に曲がるフィルム状の配線板が使われていても、一般の消費者は、こういうものが曲がるエレクトロニクスでできているとは必ずしも思わないわけです。そしてこれらの技術が発展していくにつれて、曲がるセンサーや半導体などが意識されずに日常生活に組み込まれていく。そうなったとき、ウェアラブルデバイスの将来の延長として、例えばストレスをどのように感じ、そのときの血圧の上がり下がりなどの、さまざまな症状によ

り、たくさんのデータが集まっていく。そのデバイスを介して集まったデータによって、人間の行動や本質に科学的な根拠を与えて計測することができるようになっていくことでしょう。

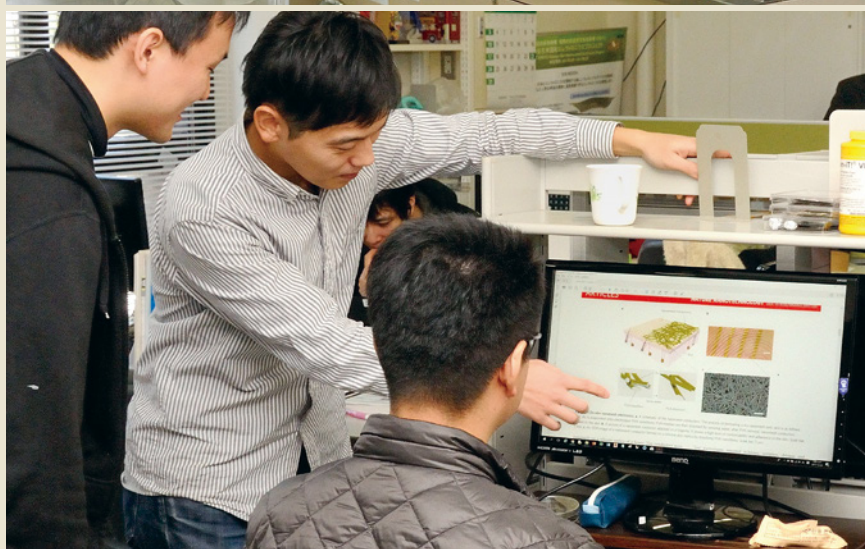
私が研究しているウェアラブルデバイスをさらに発展させる方向として、このような科学的な新しい計測法によって、人間の本質的な理解が進んでいけばと思います。それが私の夢です。

個々のカスタマイズに対応した技術・装置を

——アルバックに対して期待することは？

染谷：生体向けウェアラブルデバイスは、それぞれの人ごとにカスタマイズしてつくる必要があります。例えば、自分の体にフィットする電子部品をカスタマイズしてつくっていく際に、コストが上がらずにできるような製造技術です。アルバックさんの装置に限った話ではないのですが、そういうものがますます求められていくのだらうと思います。

私のやっている皮膚感覚の柔らかいセンサー研究は、一点物の工芸品のように手作業の職人技でやっています。しかし、職人的な工芸品はできるけど大量の工業品ができない。そういうところにコストを上げずにスループットを維持して良品率が担保できて、一人ひとりに向けてそれぞれ違うものをつくってもコストが上がらない。そういう装置をお願いしたいですね。



染谷研究室のメンバーは3分の2以上が海外からの留学生。国籍も多様で、研究の議論は基本的に英語。まさに「面白い」デバイス研究を通してグローバルな若いパワーで未来を切り拓こうとしている。

世界最高性能の伸縮性導体

—ゴム内で銀ナノ粒子の自然形成現象発見による 新素材への応用に期待

染谷 隆夫 (東京大学 大学院工学系研究科 教授)

松久 直司 (東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 博士課程)

元の長さの5倍の長さに伸ばしても935 S/cm という世界最高の導電率を示す伸縮性導体の開発に成功。この伸縮性導体は、ペースト状の材料を印刷することによって、ゴムやテキスタイルなど伸縮する素材の上に自由形の配線パターンを形成することができる。また、新素材の構造を高解像度の電子顕微鏡を用いて観察したところ、ゴムにマイクロメートル寸法の銀フレークを混ぜるだけで、ナノメートル寸法の銀の粒子がゴムの中に均一に自然に発生する現象を発見。

印刷できる伸縮性導体は、高い伸縮性が要求されるスポーツウェア型のウェアラブルデバイスや人間よりも高い伸縮性を必要とするロボットの人工皮膚を実現する上で必要不可欠な技術。従来の伸縮性導体は伸長させると導電率が大幅に減少するという課題があったが、本研究で発見した新現象によって解決される。この成果により、スポーツウェアやロボットの関節に簡単に高伸縮性センサーを形成できるようになり、今後ヘルスケアや人工触覚などさまざまな応用が期待される。

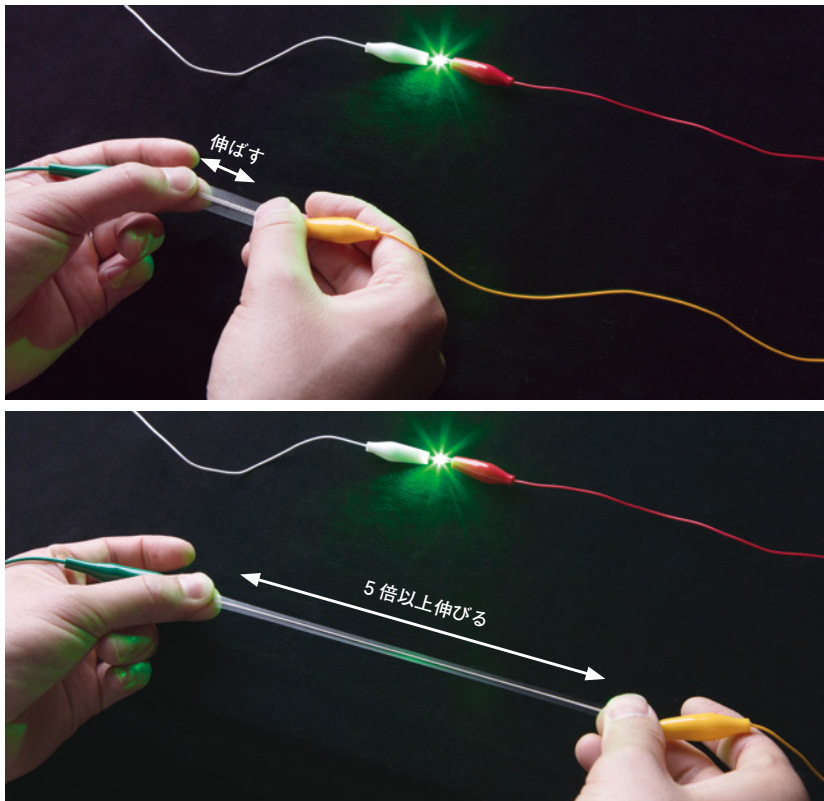


図1 ゴムシート上に印刷された伸縮導体を元の5倍以上伸ばしても高導電性を維持するので、発光ダイオード(LED)を明るく点灯できる。写真(上)は伸張する前。写真(下)は元の5倍以上に伸張した状態。

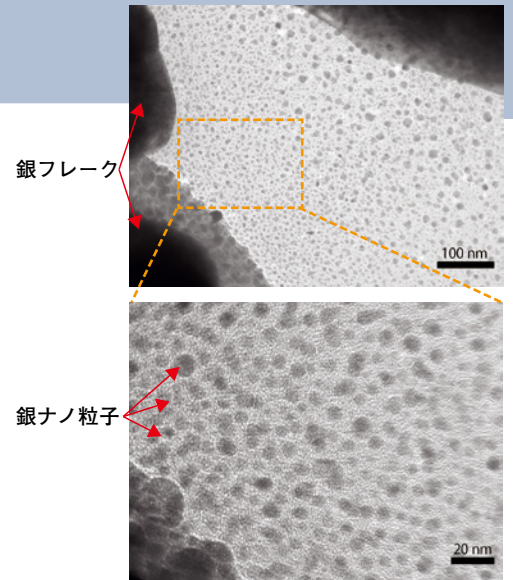


図2 開発した伸縮性導体の透過電子顕微鏡 (TEM) 像。銀フレークと銀フレークの間に自然に形成された高密度の銀ナノ粒子が均一に分散している。

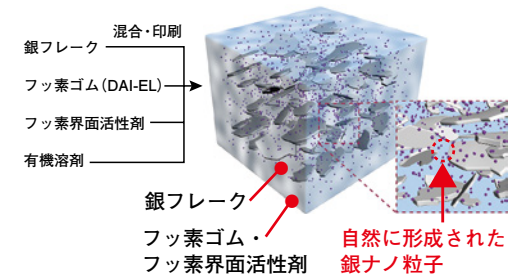


図3 今回開発された伸縮性導体の作製プロセスと材料の構造を模式的に示した。もともと材料に含まれていなかった銀ナノ粒子がフッ素ゴム中に自然に形成される。DAI-ELはダイキン工業株式会社の製品名。

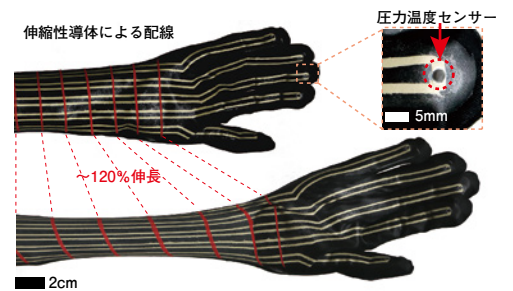


図4 印刷によって作製された伸縮性の圧力・温度センサー。テキスタイル基材にもホットメルトを用いて簡単に貼り付けて実装できる。

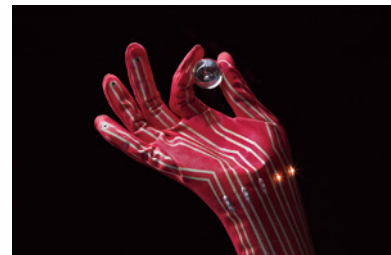


図5 手袋の指先に実装されたセンサーで指先の圧力の強さを計測し、その強さに応じてLEDの点灯強度が変わる。画像データではわからない力の入れ具合を知ることができる。

皮膚呼吸可能な 皮膚貼り付け型ナノメッシュセンサー

— 1週間貼り続けても炎症反応がないため、長期生体計測への応用に期待

染谷 隆夫（東京大学 大学院工学系研究科 教授） 天谷雅行（慶應義塾大学 医学部 教授）

1週間皮膚に貼り続けても明らかな炎症反応を認めない上に、装着していることを感じないほど超軽量で極薄のナノメッシュ電極の開発に成功。この電極は生体適合性の高い金と高分子（ポリビニルアルコール）に、ナノサイズのメッシュ構造を持たせたもの（以下、ナノメッシュ電極）で、少量の水で簡単に皮膚に貼り付けることができる。20人の被験者に対して1週間のパッチテスト（かぶれと皮膚アレルギー試験）を実施したところ、明らかな炎症反応を認めないことが示された。このような高い生体適合性は、今回のナノメッシュ構造が高いガス透過性を持っていることによって自然な皮膚呼吸が実現されたことによるもので、従来のフィルム型やゴムシート型では実現することはできなかった。

- さらに、このナノメッシュ電極を用いて金属などの導
- 体に触れたり、離したりしたときの抵抗変化や温度、圧
- 力センサーの動作実証、また、腕の筋電計測を実施し、
- 生体計測への適用可能性も実証。1週間貼り付けても炎
- 症反応を起こさず、装着感がない電極は、医療の現場で
- の長期測定や、スポーツにおける動作の詳細な分析を実
- 現する上で必要不可欠な技術で、今後さまざまな応用が
- 期待される。



図1 皮膚貼り付け型ナノメッシュ電極を人差し指に装着し、フレキシブルバッテリーから電力を供給して発光ダイオードを点灯させた。

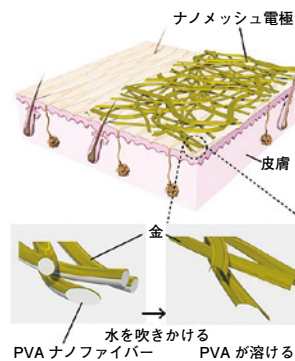


図2 ナノメッシュ電極の構造と装着方法。生体適合性の高い金とポリビニルアルコール（PVA）のナノメッシュ構造体で、シート状に作製されたものを皮膚の上のせて霧吹きなどを用いて水を吹きかけることで装着できる。

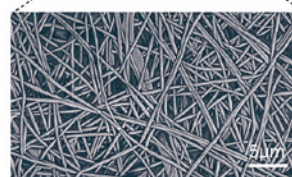
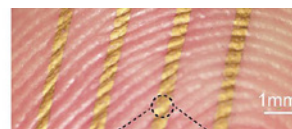


図3 指の指紋側に貼り付けられたナノメッシュ電極（上）、および皮膚レプリカ上に形成された電極の電子顕微鏡（SEM）像（下）。300～500nmのメッシュ導体が絡みあっている状態。



図4 皮膚貼り付け型ナノメッシュ電極を手の甲に装着した。皮膚の形状にもピッタリと沿って貼り付いている。極薄で超軽量であり、自然な皮膚呼吸が実現されているため、装着感がない。