

産総研 LINK

技術を社会へつなげるコミュニケーション・マガジン

No.31

9

2020 September

特集

The Sensing Technology in AIST

■ CROSS LINK

産総研にはどんなセンシング技術があるの？

Mori Masahiko

■ NEW TECHNOLOGY

シートセンサでインフラの亀裂を検知！

Yamashita Takahiro / Daniel Zymelka

超薄型圧電センサで製造プロセスの異常を検出

Tabaru Tatsuo / Ishida Shuichi

においをかぎ分けるガスセンサ

Shin Woosuck / Itoh Toshio

筋肉の声を聴く

Takei Yusuke

1,000℃の高温を正確に測る！

Nakano Tohru / Widiatmo Januarius



産総研には

どんなセンシング技術があるの？

センシング技術を集約し、
オール産総研で企業と連携



エレクトロニクス・製造領域研究戦略部
研究戦略部長

森 雅彦

Mori Masahiko



KEY POINT

自動車の安全機能向上、自動運転の開発、橋梁・道路などインフラの異常診断、健康な生活を送るための心身の状態の把握、疾病の検知など、“**センシング**”という技術はさまざまな分野で活用され、**社会課題の解決**や人々の**生活向上**に大きく貢献している。産総研でも多様な領域でセンシングに関する研究が行われているが、所内に分散する**センシング技術**を**横断的に集約、見える化し、企業ニーズ**に迅速に**応えられる体制**を構築しようとしている。

センシング技術に対する企業のニーズに オール産総研で応える

——エレクトロニクス・製造領域に「センシング技術連絡会」
ができたそうですが、これはどんな組織なのですか？

産総研ではさまざまな領域で、多様なセンシング技術を研究しています。産総研のどこに、どのようなセンシング技術があるかを集約してデータベース化し、オール産総研としてセンシング技術を打ち出していく体制を整えていきたいと考え、連絡会を立ち上げました。2019年に新たに設立したセンシングシステム研究センターに中核を担ってもらい、各領域のイノベーションコーディネータなどにも協力してもらおう全所的な取り組みです。

産総研の取り組みの一つは技術を社会に橋渡しすることですが、エレクトロニクス・製造領域の研究内容は産業と直結しており、私たちは常に、どのように技術を橋渡ししていくかという問題に直面しています。先に述べたセンシングシステム研究センターの立ち上げも、IoT (Internet of Things:モノのインターネット)ですべての人とモノがつながる未来社会に向けて、自動車や工場などの機械システム、道路や橋などのインフラの状態、ウイルスなどの病原体、人々の感じる快適や苦痛など、フィジカルな空間で生じるさまざまな出来事をセンシングして情報化し、サイバー空間に接続することが求められている、という将来展望を踏まえたものです。社会から求められ、かつ日本が強い分野でもあるセンシング技術にしっかり取り組んでいくことが、産総研にとって重要であると考えました。

——センシングシステム研究センターが産総研のすべての領域のセンシング技術を網羅するのですか。

センシング技術の範囲は広く、産総研でもさまざまな領域で研究が行われています。一方で、せっかくこのような研究セ

ンターをつくるのであれば、エレクトロニクス・製造領域に限らず、すべての領域の技術も含め「こんなセンシング技術がほしい」「こんな技術はできないか」といった外部からのニーズに対してオール産総研でワンストップ対応ができる機能が必要ではないか、という意見が出てきました。

もちろん産総研には総合窓口があり、外部からの問い合わせに対応し、適宜、研究者につないでいますが、どこでどのようなセンシング研究がなされているかは、産総研の人間であつても把握しきれていない現状があります。そこで、エレクトロニクス・製造領域が中心となり、産総研すべてのセンシング技術を把握し、整理して、外部に適切に紹介できるようにしようと考えたわけです。

——企業はニーズにあったものを探るのが楽になるということですね。

産総研にどのようなセンシング技術があるのか、研究者たちもすべてを知っているわけではないため、これまで研究現場では企業のニーズに応えきれなかったケースも数多くあったと思います。それは産総研だけでなく、企業にとっても機会の損失となります。技術の橋渡しを推進するためには、産総研全体のセンシング技術を整理して企業に提供できるシステムが必要でした。

産総研内のセンシング技術を 徹底的に調査し集約した

——産総研内のセンシング技術を、どのように把握していったのですか。

まずはそれぞれの領域、それぞれの部門に対し、センシング技術にかかわる研究をしているかというアンケート調査から始めました。そこで上がってきた情報をもとに、研究戦略部のスタッ

フがつくばだけでなく、全国各地に赴いて個別にヒアリングを行い、技術の把握に努めました。現在はその情報をデータベースとしてまとめ、対象者限定ではありますが、開示もしています。

——データベースを開示する対象は。

現段階ではセンシングシステム研究センターが運営する「FIoTコンソーシアム」の会員企業約50社や、産総研の技術コンサルティングの契約者の一部に、データベースの内容をすべて開示しています。一般の企業にはタイトルだけをオープンにして、内容を知りたい方には個別にコンタクトしていただく仕組みで進めようとしています。今後は産総研の他のコンソーシアムの会員企業への開示も予定しています。

——調査を進める中で、興味深く感じた点がありますか。

もともとセンシングのために開発された技術ではなくても、センシングに使える例が多々あることを再認識しました。

例えば、チップ間をつなぐフレキシブルな配線をつくるとき、この配線をつくるための導電線インクの研究開発に注力します。この導電線インクで実際に配線をつくり基板に実装したうえで曲げてみると、電気抵抗が変わってしまった事例がありました。これは、欲しい機能からみれば失敗です。しかし、曲げると抵抗が変わるのであれば、抵抗値の変化から曲がり具合を知るセンサの材料に使えるかもしれないと発想を変え、風の状態を知る面状センサに応用された例があります。

あるいは、梅雨時に反応が不安定になる材料があり、原因が湿気だったとすれば、湿度センサとして使える可能性もあるわけです。このように、本来の目的には使えなくても、他の用途にセンサとして活用できる例は多くあります。センシング技術に

取り組んでいる部署を把握しにくいのは、そのような転用例の多さも一因となっていました。今回私たちは、そういったものも含め、産総研にあるセンシング技術の多くを把握できたのではないかとと思っています。

内部連携を進めれば 外部連携につなげやすい

——現在はどうのような活動をしているのですか。

第一に、産総研内の連携です。もともとは外部のニーズに応えようと始めたプロジェクトですが、実際にどの研究者がどのような研究をしているかを知ったことで、内部連携の重要性に気がついたのです。

産総研内には似たようなテーマの研究をしている人があちこちにいますが、領域が異なっていると、他の研究を知る機会はほとんどありません。しかし、データベースによってお互いの研究内容を把握し、必要に応じて連携できれば、研究が加速する可能性は大いにあります。実際、この研究者とあの研究者が連携することで、より高いレベルの成果につながるのではないかと考えられるケースは多々あり、現在私たちは研究者同士の「お見合い」を積極的に働きかけています。

もう一つは、当初の目的通り、データベースを活用したオール産総研ワンストップサービスの提供です。本部だけでなく、各領域・各地域センターにいるイノベーションコーディネータにも活用していただき、外部のニーズを適切な研究者に迅速につなぎ連携を促進していきます。

——研究者同士のマッチングは成果を上げていますか。

まだ始めたばかりですが、情報交換を継続的にすることになったという例も、実際に成果につながった例もあります。また、共同でプロジェクトを立ち上げ、外部資金を申請するという人たちもおり、相互に協力するよい機会になっていると感じます。

——イノベーションコーディネータがデータベースを活用した事例があれば教えてください。

産総研の北海道センターは農業・バイオ系の研究に力を入れており、イノベーションコーディネータも農工連携を意識してマッチングを進めています。現時点で具体的なお話はできませ



んが、今回、農作物の付加価値を高めるために使えるようなセンシング技術を、イノベーションコーディネータがデータベースから探し、農業事業者とのマッチングを働きかけています。

当領域でも、データベースから企業との連携に適した技術をピックアップし、航空機分野やインフラ系企業へ異常検知技術を中核とする連携につなげており、技術の橋渡しに有効なツールであると実感しています。

「使える」「使われる」センサの開発を目指して

——今後の活動予定は。

まだ把握しきれていないセンシング技術を探し出し、企業のニーズにさらに対応できるよう、データベースを拡充していきます。

また、これからデータベースの公開範囲を広げ、企業の方々にもっと活用していただけるようにしていきます。企業の方には産総研の技術シーズをどんどん発掘してもらい、活用していただきたいですね。

そして、産総研の内部連携を進めるツールとしての機能をさらに強化していきます。多様な分野のプロの研究者がいるところが産総研の強みですが、お互いに組んで研究することで、その強みはより効果的に発揮されるでしょう。

——産総研のセンシング技術の特徴はどのようなところにあるのでしょうか。

センサにはさまざまな種類があり、いろいろな状況で使うことができます。産総研が企業と連携を進めるには、この「使える」という点が非常に重要です。ある状況に対して反応する物質があり、そこから物理量を計測できたとしても、それがすべてセンサとして使えるわけではありません。既存技術に対して優位性がなくては意味がありませんし、コスト面も含めて使

う側にメリットがなければいけません。そのような意味で「使える」技術であるかが、私たちには常に問われています。

さらに、その先の未来への希望といってもよいのですが、産総研のセンシング技術であるからには、たとえ現時点では形になっていなくても「これから先に使われる物語」をもっていなくてはなりません。センシングシステム研究センターに「システム」という名前がついているのも、センサをシステム化し、本当に使えるものにしていく、ということを示しています。

——センシング技術が社会課題の解決に貢献する例を、いくつか挙げていただけますか。

高度成長期につくられたトンネルや橋などのインフラは更新の時期を迎えています。現在は新しくつくるのではなく、できるだけ維持して長寿命化させる方向で進められています。センサでインフラの危険箇所などを自動診断する技術は、コストをかけずに安心・安全を維持するために非常に役立つはず。また、センシングして得られたデータをAIで解析して測定精度を上げ、現場で本当に使えるシステムにする研究もいくつも行われています。

さらに、高齢化社会で医療保険制度の健全な運営が困難になっている中で、健康を維持していくことは日本人にとって重要なテーマです。産総研では人間の心身を計測するさまざまなセンサを開発し、健康の増進や維持などに活用できるシステムとして組み上げています。

もっと基礎的な研究分野としては、最高レベルの「測る」技術を開発して、国際標準の高度化にも貢献しています。

産総研はこのように多様で高度なセンシング技術を持っています。そして私たちは企業の皆さまからのニーズに応じて必要な技術や人材をご紹介できる体制づくりに取り組んでいます。センシング技術で解決したい課題があれば、ぜひ産総研にお問い合わせいただければと思います。

産総研のセンシング技術を知りたい、活用したい方はぜひご連絡ください！

産総研
エレクトロニクス・製造領域研究戦略部
センシング技術連絡会

〒305-8560 茨城県つくば市梅園1-1-1 つくば中央第1 本部情報棟
rpd-eleman-ml@aist.go.jp
https://www.aist.go.jp/aist_j/dept/delma.html

シートセンサで

インフラの亀裂を検知！

“低コスト”と“高精度”。特性を活かす2つの技術



KEY POINT

今、日本全国には、建造から40年以上を経て老朽化が進んだ道路、橋、ダムなどが多数存在している。そのすべてを新しく作り直すことはできないため、これら**インフラの保守・点検・修繕**が重要になる。しかし、そのための作業員も予算も足りない。そこでいかに**低予算で高精度**にこれらのインフラを**モニタリング**し、**事故を未然に防いでいく**かが大きな課題となる。産総研ではこのニーズに応える**面状センサ**を開発し、実用化に向けて動き出している。

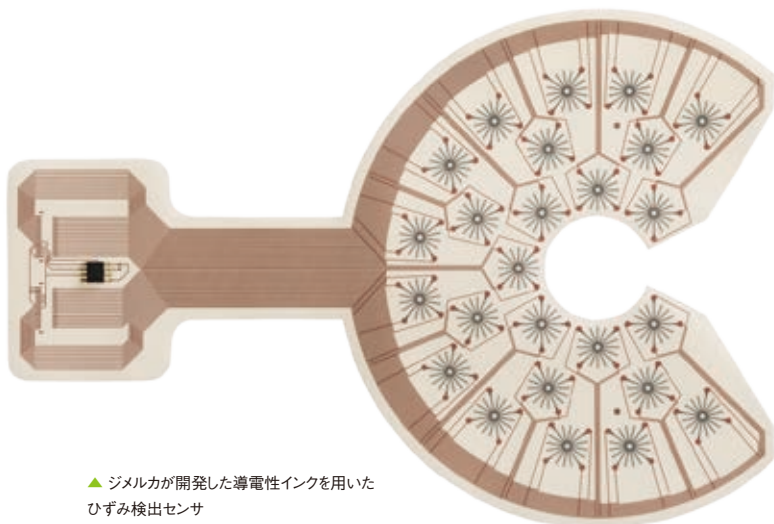
センシング技術で 人手・コスト不足を補う

高度成長期、日本全国で道路、トンネル、橋梁、ダムなどの巨大インフラが次々と建造された。40～50年経った現在、それらは一斉に更新期を迎えているが、今の日本にはそのすべてを新しく建て直す財政的な余力はなく、建設

エレクトロニクス・製造領域
センシングシステム研究センター
ハイブリッドセンシングデバイス研究チーム
研究員

ダニエル ジメルカ

Daniel Zymelka



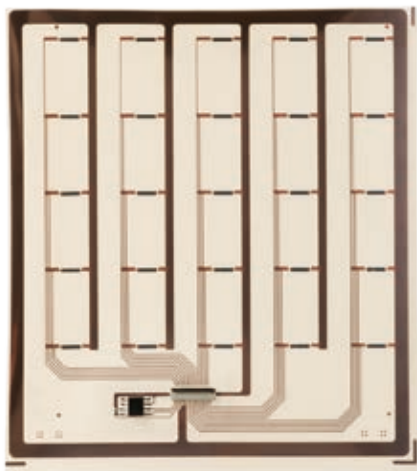
▲ ジメルカが開発した導電性インクを用いた
ひずみ検出センサ

当時から大きく変化した周辺環境の影響からも難しい。そのため国や自治体、企業は、今あるものを修繕しながら、できるだけ長く安全に使っていくことを基本方針としている。

しかし問題は、保守・点検・修繕しながら維持していくことさえ、現在は難しくなっているということだ。例えば、高速道路などの高架橋の疲労亀裂は全国で数千カ所以上発生していることがわかっているが、対処できる作業員も費用も不足しており、亀裂が見つかったから応急処置が施されるまでに数年かかるケースも少なくない。また、応急処置はしても、その後の経過観察や補修・補強が行われないままということもあるという。劣化の進む構造物をそのままにしておくことがどれだけ危険であるかは、2012年に起きた笹子トンネル天井板崩落事故を例に出すまでもなく、明らかだ。

「事故を起こすわけにはいかない。しかし、十分な手当ができない。全国で問題になっているこのような状況に対応するため、現在、巨大インフラを自動でモニタリングするためのさまざまな技術の開発が進められています」

こう語るセンシングシステム研究センターのダニエル ジメルカは、インフラモニタリングセンサの開発に取り組む一人だ。ジメルカは導電性インクを用いたフレキシブルなひずみ検出センサの開発に取り組んでおり、シリコンチップを用いたシート状センサの研究を進める山下崇博とともに、2014年、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のインフラ維持管理・更新などに関する大型プロジェクトに参画した。



▲ 山下が開発したシリコンチップを用いたシート状センサ

エレクトロニクス・製造領域
センシングシステム研究センター
ハイブリッドセンシングデバイス研究チーム
主任研究員

山下 崇博

Yamashita Takahiro

単なる振動か、それとも亀裂か？ 面状センサだから判別できる

高速道路などを支える高架橋の点検・保守作業は、まず作業員が目視で状態を確認し、そこで塗膜割れなどが見つかると、磁粉探傷試験という非破壊検査をして亀裂発生箇所を特定、その後、半年から数年かけて応急処置を施す、という手順で行われる。実際に亀裂部分の補修や補強が行われるのに、応急処置後、さらに数年も要することがある。その後はまた目視点検から、同様の点検サイクルが繰り返される。

この方法では、定期点検として求められている5年に1回の目視点検への対応は可能だが、老朽化した橋梁の亀裂が5年の間にどのように変化するかはわからない。彼らが取り組んでいるのはまさにこの部分、亀裂の応急処置後の経過観察を人手に頼らず行うセンサの開発だ。

「亀裂がしやすい箇所は亀裂発生前からモニタリングするのが理想ですが、道路・橋梁やダムといったインフラは巨大すぎ、全面にセンサをつけるのは現実的ではありません。そのためまずは応急処置後の経過観察を主目的とし、その場所にセンサをつけました」と、山下は説明する。

開発対象は、道路・橋梁などの亀裂をモニタリングするのに適していると考え、シート状センサとした。道路には常に車が走り、道路を支える橋梁もそれに伴って振動するため、単体のセンサだと、大型トラックが走ったから大きく揺れひずんだのか、躯体に亀裂が生じたからひずんだのかを判別することが難しい。また、センサは気温や湿度によって異なる測定結果が出ることもあるが、その場合も、やは

り単体のセンサでは亀裂なのか暑さの影響なのかがわかりにくい。

「それに対して、多数のセンサを並べた面状センサであれば、反応があったときに同一面上の他のセンサの反応と比較することで、亀裂のせいかな、そうでないかを判断できるのです」(ジメルカ)

低コストで大型化も容易な 印刷でつくれるセンサ

ジメルカが考案した、導電性ペーストをシートにプリントしオープンで乾燥させてつくるセンサは、低コストで作成が可能なおうえ、大型化も容易なので、巨大構造物のセンシングにより適していると考えられた。写真(6ページ下)で模様のように見えるものは、すべて印刷されたセンサだ。

「この導電性ペーストは曲がったときに電気抵抗が変化します。その抵抗値の違いを利用してひずみを計測するので、瞬間的に大きく動く動ひずみだけでなく、時間をかけて少しずつひずんでいく静ひずみの検出も可能です」(ジメルカ)

写真を見てこのシート状センサの形が不思議な形と思った方も多だろう。橋梁の亀裂が見つかったら、応急処置として、亀裂の先端部にストップホールという丸い穴が開けられる。亀裂の先が尖っていると割れは先に進みやすいが、丸くしておけば、そこにかかる力は四方に分散し、亀裂の進行を抑えることができるからだ。そのストップホールの周囲をモニタリングするのに適しているのが、この形なのだ。

「当初は一方向に整列させていましたが、それでは、センサに直交するひずみは最も検出しやすいですが、平行するひずみは検出しにくかった。つまり、亀裂の方向によっては検出しにくいという問題があったのです。そこでストップホールを囲むような形状にセンサを配置し、どの向きに亀裂が生じても有効に検出できるようにし、検出精度を向上させました」

このセンサは曲がったときの電気抵抗の変化で亀裂を検出するが、電気抵抗の数値だけ見ても、どの位置がどのように危ないのかがわかりにくい。そこでジメルカは抵抗が変化した箇所を可視化するソフトウェアも開発し、ユーザーに伝わりやすく、使いやすいシステムとしてつくり上げた。そし



て、このセンサを高架橋の亀裂のある場所に貼り付け、実証実験を行った。

「実験では1日に6回、4時間ごとにセンシングを行いました。時間帯により車の交通量は変動しますが、交通量が多いときでも少ないときでも、亀裂部分のセンサは特殊な反応をすることが明らかになりました。コスト的にも大量生産が可能であり、実用化に向けて動き出しています」

橋梁での有効性が確認されたことを受け、その後、このセンサを用いてダムの静ひずみを検出する実験も行われている。

2020年度は亀裂発生前から常時モニタリングするシステムの開発もスタートした。

この技術は道路や橋梁だけでなく、他の大型建造物に適用することも可能だ。例えば原油などの揮発性オイルは直径数十mにもなる巨大なタンクで貯蔵されているが、近年はタンクや浮き屋根の老朽化による大規模火災事故なども起きている。事故を予防するには亀裂を迅速に見つけて補修し、ガス漏れを防ぐ必要がある。浮き屋根に生じる亀裂のほとんどが溶接線で生じるため、帯状のシートセンサを全溶接線上に貼り付け、亀裂ができる前からモニタリングを行うことができる。

「印刷でつくるセンサはスケールアップが容易です。今後巨大構造物に対応していくほか、クレーンなどの産業機械のモニタリングにも応用していく予定です」(ジメルカ)

高精度な半導体センサシートは知覚拡張デバイスなどへの応用を期待

一方、山下が開発するシリコンチップを使ったセンサは、どのような特性があるのだろうか。

「このセンサは、外から力が加わると電気を発生する圧電材料をシリコンウエハ上に成膜し、マスクして露光し、エッチングをして……という半導体プロセスでつくったシリコンチップを用いています。構造物に亀裂ができたりすると、圧電素子がそのときに一瞬発生する微小な電気を増幅することによって、変形が起きたことと、その度合いを検知します。このセンサは半導体そのものですので感度の高さが強みです」

しかし、一般のシリコンチップデバイスは厚さが数十 μm 以上あるため、フレキシブル基板との相性はよくない。これ



を山下はシリコンチップを5 μm 以下に薄膜化することでフレキシブル性を実現し、その超薄型チップを直接フレキシブル基板に実装する技術を開発。それにより、高性能でありながら柔軟なシート状センサとすることに成功した。

このセンサシート1枚の上に、何十ものシリコンチップがびっしりと配置されている(7ページ下)。

「この一つ一つがすべてひずみセンサです。置かれる位置の誤差は $\pm 5\mu\text{m}$ ほどと、製造過程は非常に高精度に制御されています。また、酸化や湿度などに強い環境による劣化が起こりにくく、長期的な信頼性にも優れています」

この技術に関しても開発当初はインフラモニタリング用途を想定していたが、センサが大量に必要なインフラモニタリングよりも、その精度の高さや圧電素子の特質を活かせる他分野での応用を検討している。

例えば、スポーツの分野において、ラケットなどの用具にセンサを組み込み、打球の位置や強度を測定することでより効果的なトレーニングにつなげることが考えられる。また、圧電チップでシートを振動させることで音波を発生させるフィルムスピーカーへの応用も考えられ、エンターテインメント分野での用途が広がるかもしれない。

「超薄型スピーカーはモバイルディスプレイやウェアラブルデバイスの盛り上がりとともに注目されており、これから福祉やエンターテインメントなど、さまざまな分野での応用が期待できます。多様な分野で、ぜひこのセンサの可能性を探っていきたいと考えています」

産総研のひずみセンシング技術は、インフラモニタリングを中核に、拡大していくスマート社会のニーズに幅広く応えていく。

超薄型圧電センサで 製造プロセスの異常を検出

AIとの組み合わせで
生産効率を大幅にアップ



KEY POINT

製造現場では、"歩留まりの向上"は永遠の課題だ。例えば、半導体デバイスの製造工程におけるプラズマの異常放電はまさにこの歩留まりに大きく影響するため、その検知技術が求められていた。産総研は**耐熱性を有する圧電薄膜**を用いた**薄型構造のAEセンサを開発**、これを製造装置の内部に取り付けることで**プラズマ異常放電の検出に成功**した。さらに、このセンシング技術をAIによる異常診断技術と組み合わせることで、製造工程での異常検出率を大きく向上させ、製造現場の歩留まり向上に貢献している。



エレクトロニクス・製造領域
センシングシステム研究センター
生産プロセス評価研究チーム
研究チーム長

田原 竜夫

Tabaru Tatsuo



エレクトロニクス・製造領域
センシングシステム研究センター
生産プロセス評価研究チーム
主任研究員

石田 秀一

Ishida Shuichi

製造プロセスの異常放電を プロセス中で早く捉えたい

IT技術の進展で多くの機器に使われているLSIやMEMSデバイスの製造時には、ドライエッチングやスパッタリングなどのプラズマを使うプロセスが不可欠だが、このプロセス中にプラズマの異常放電が発生することがある。するとウエハ上につくこむデバイスの配線がショートしたり装置内の部品が損傷したりするため、デバイスの歩留まりが悪くなってしまう。さらにこのような異常放電は他の不具合も引き起こす恐れがあり、できるだけ早く発見し、修復を図りたい、それが製造現場の願いだった。

「デバイス製造時のプラズマ処理工程は30回以上に及ぶこともあります。欠陥に気づかずには後工程に進み、多くの時間を費やし、付加価値がついてから不良品だとわかった場合の損害は小さくありません。そのため、異常放電があったらすぐにそれを検知し、製造プロセスへの影響を抑えられる技術が求められてきました」と生産プロセス評価研究チームを率いる田原竜夫は説明する。

中でも必要とされているのが、ウエハの損傷に直結するウエハ周辺部の異常放電を検出する技術だが、これまで有効な検出手法は存在しなかった。その理由は、半導体デバイスの量産装置は非常にコンパクトかつ精密に設計され、センサの設置が困難だったからだ。

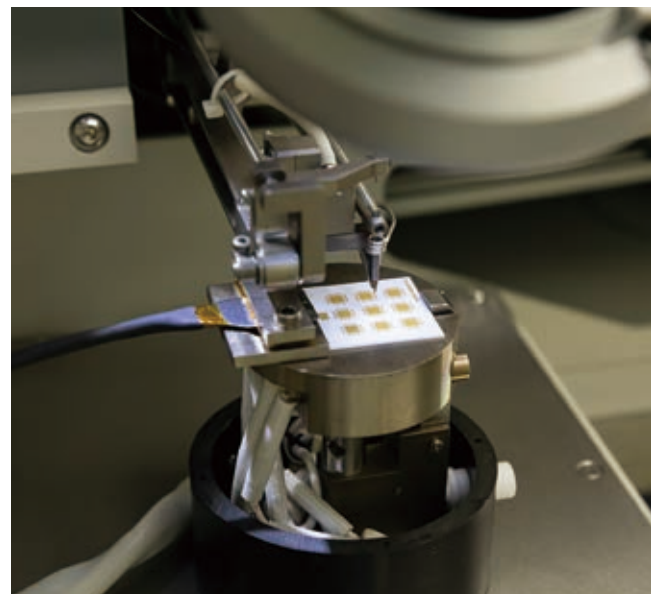
材料が変形あるいは破壊されると、内部に蓄えていたひずみエネルギーを弾性波として放出するAE（アコースティック・エミッション）という現象が生じる。異常放電が起こると、そのときの衝撃も弾性波として伝播するため圧電素子を用いたAEセンサで検知することが可能だ。しかし、半導体デバイスの量産装置内は狭く、電磁波が飛び交い、かつ熱が加わるため、厚みがあり耐熱性も高くない汎用AEセンサは設置できない。装

置の外にセンサをつける方法もあるが、さまざまなノイズが入ってくるため、センサの反応が異常放電かどうかを判別することが難しい。

田原は検知センサの研究を進める中で、圧電性セラミックスの中で最も高い耐熱性(1,200℃)を有する窒化アルミニウムを使って薄型AEセンサにすれば、デバイス製造装置にセンサを内蔵できると考えた。

窒化アルミニウムは力が加わると電荷を発生する圧電材料で、薄膜化しても圧電センサとして使えることが知られていた。田原は窒化アルミニウムの圧電センサをウエハ製造装置内部に入れられるよう、薄型AEセンサとしての機能化に挑戦した。

「開発したセンサは、素子の厚さ3μm、検出部の厚さ1mmという超薄型です。これを実際のデバイス製造プロセスで試してみたところ、ノイズに邪魔されずにプラズマの異常放電を検出できました。これでようやく、これまで困難だったプロセス中の異常検出が実現できたのです」



AIによる異常診断と組み合わせることで 診断精度が大幅に向上

この窒化アルミニウム薄膜センサはほかにも量産用ワイヤボンドや自動車部品加工など、センサによる検知が有効でも汎用AEセンサを設置するスペースがないというプロセスに用いることができる。

田原が所属する生産プロセス評価研究チームの強みは、このような新しい高精度なセンサを開発することに加え、さまざまなセンサやデータの解析方法を組み合わせ、それぞれの現場に適したかたちで有効な異常検知システムとして機能させる提案ができるところにある。

「現在は、センシングと機械学習を組み合わせ、いかに異常診断を高精度化するかに取り組んでいます。センサ自体は既存のものでも、それらと情報技術を組み合わせることで、それまで応えられなかった課題を解決できるのです」(田原)

人工知能(AI)にビッグデータを学習させ、何らかのソリューションにつなげていくための研究開発は、近年盛んに行われている。製造業においてもIoT化が進み、毎秒毎秒、さまざまな情報が取得され、処理が試みられている。

「しかし製造現場においてはデータの量が確保できないことが多く、価値や質に注目して進めています」

そう語るのは、製造プロセスのセンシングデータと機械学習を組み合わせ、診断精度を向上させる研究に取り組む石田秀

一だ。センサで得られた信号が不具合につながるものか、そうではないものかを診断し、より診断の正答率を上げていくことに取り組んでいる。

「機械学習ではAIに良品をしっかりと覚えさせ、それ以外を不良品として診断させるわけですが、実は製造現場では、これが正解だとAIに学習させる教師データがとても少ないのです」

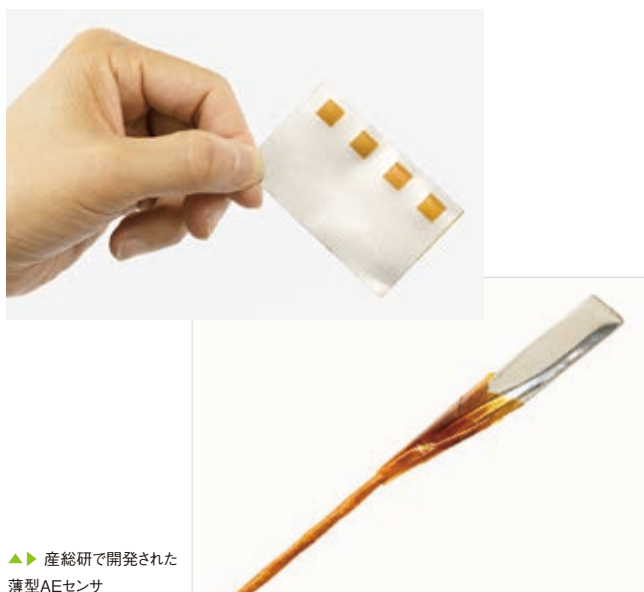
通常、デバイスを製造するとき、ラインから出てくる最初のいくつかをチェックし、問題がなければ本格的にラインを稼働させる。つまり“良品”と確定されるのは最初のいくつかだけで、その後のデバイスは良品とみなされるものの厳密には良品であると判断されてはいないのだ。しかも、現在の製造現場では多品種を切り替えながら製造しているため、同じ種類の製品から良品と確定したデータを得る機会は少なくなってしまう。

確実に“良品”と認められたものだけを教師データとするなら、教師データは少ししか確保できず、診断精度は向上しない。この問題を乗り越えるため、石田は少ない情報をいかに有効活用するかを考えなければならなかった。

「製造ラインでつくられているものは、良品だと厳密に判定されていないだけで、ラインによって多少のばらつきはあっても、実際にそのラインで作られているものはほとんどが良品です。つまり、確実に良品判定を受けていなくても、現場から聞き取った情報から、教師データとして取り込む価値のある情報だと判断して良いと考えました。データ数をそろえるため、未検査の製品から価値のあるデータ、すなわち多少の質のバラつきのある中で、品質が高いと判断できる製品を選別し、教師データとして取り込むことにしたのです」

学習するデータ数が増えたことでAIのパターン推論能力は強化され、実際に異常診断に使えるレベルの指標を獲得することができた。センサでの異常検知とこのような機械学習の成果を組み合わせることで、ある製造現場では、30%程度だった異常検出率を96%まで高めることに成功したのである。この適切なセンシングと情報処理の組み合わせという手法は、単なる異常検出率の向上にとどまらず、異常そのものの発生原因解明やプロセス改善提案にもつながっている。

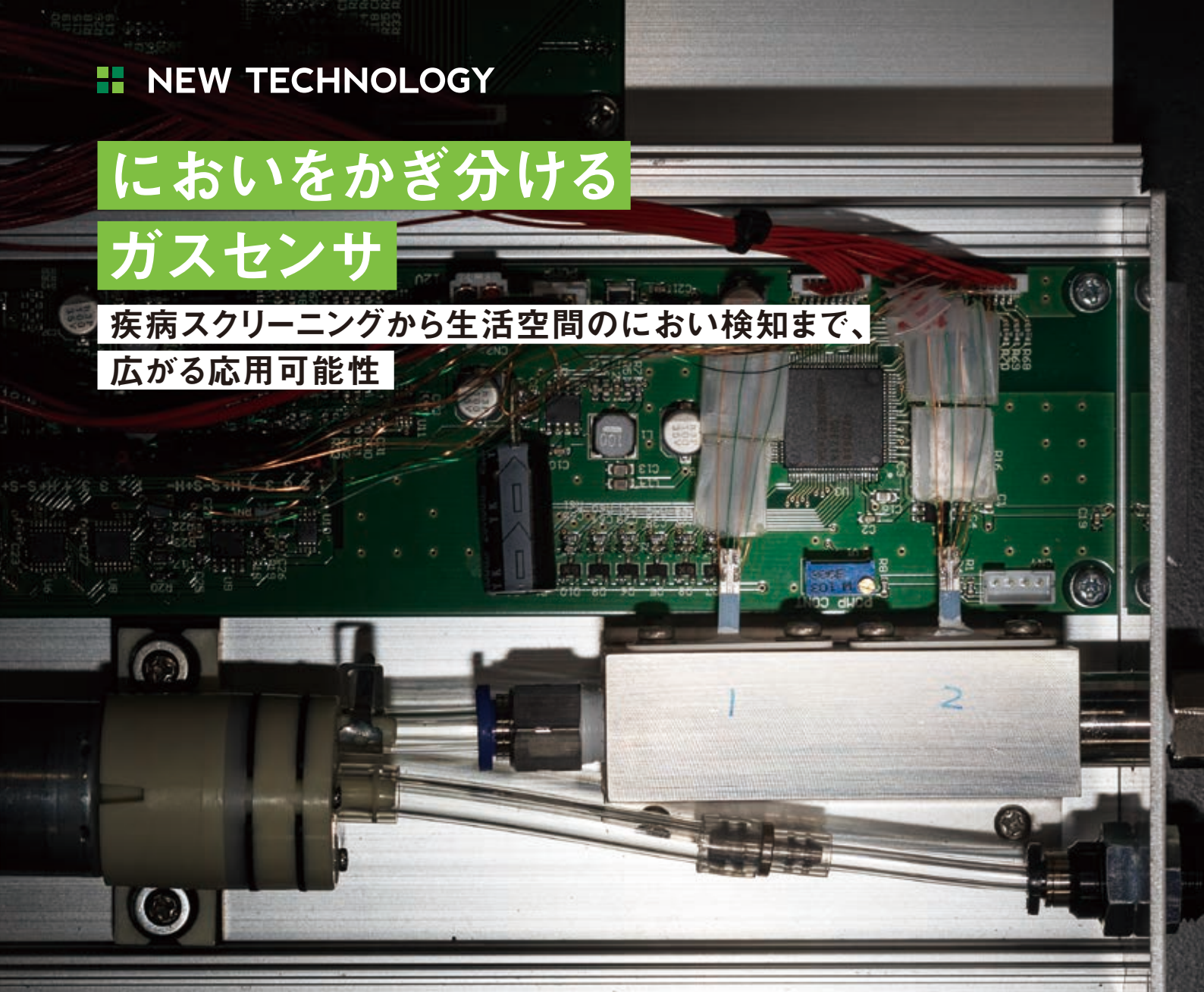
「生産プロセス評価研究チームは、今後、異常の予兆を正確に把握するための研究をさらに進め、予防保全に有効な技術を開発して、製造現場の生産性向上に貢献していきたいです」田原はそう語った。



▲▶ 産総研で開発された
薄型AEセンサ

においをかぎ分ける ガスセンサ

疾病スクリーニングから生活空間のにおい検知まで、
広がる応用可能性



KEY POINT

人間の呼吸や室内の空気には、さまざまなにおいの原因となる多様なガス成分が含まれている。産総研の**セラミックガスセンサ**は、そのにおいの元となる化学物質を迅速にかつ正確に検出することができ、**口臭の検知、消化不良や肺がんなどの疾病発見**への応用が進められている。またこのセンサの能力を活かし、生活空間に漂うにおいを分析し、快適性を維持することや、腐敗臭を検知することで**食品の鮮度管理に応用**するなど、今後の幅広い展開が期待されている。



材料・化学領域
極限機能材料研究部門
副研究部門長

申 ウソク

Shin Woosuck



材料・化学領域
極限機能材料研究部門
電子セラミックスグループ
主任研究員

伊藤 敏雄

Itoh Toshio

息を吹き込むだけで健康状態をセンシング

歯科医院などで口臭を測る装置を使ったことはあるだろうか。呼気を装置に吹き込むと、口臭の原因となる微量のガス成分が検出され、測定値が示されるというものだ。数値の変化から歯周病などの疾病が検知できる簡便さと明確さから実用化から数年で、すでに多くの歯科医院において使われている。極限機能材料研究部門の申ウソからは、この装置の開発をきっかけに本格的に医工連携を始めることになった。

呼気には窒素、酸素、二酸化炭素、水蒸気のほか、ごく微量の可燃性ガスが複数含まれている。その中で先のガスセンサが検出しているのは、口臭の原因となる揮発性硫黄化合物である。

ガスセンサというとガス漏れ警報機や水素漏れ検知器が広く知られるが、口臭検知器もそれらの一種といえる。

「ただ、ガス漏れ警報機は気体成分のうち1%ほどの濃度のガスを検知すればよいのに対し、口臭センサの検出対象は0.0001%(1 ppm)~0.0000001%(1 ppb)しかないため、非常に高い感度が求められます」と申は言う。

また、呼気内の微量成分は人間の代謝や疾患と関連することがわかっている。例えば、消化不良によって腸内の嫌気性菌が異常増殖すると、呼気に水素ガスが増える。人間は体内で水素をつくらないので、水素ガスが出れば腸内の細菌によるものだとわかる。水素を検知できるガスセンサがあれば、息を吹き込むだけで腸の不調が検知できるわけだ。

2015年、申はわずか30秒で呼気中の水素ガス濃度を測

定する装置を開発した。そして、医療機関と連携して、呼気内の水素は1日のうちにどれだけ変動するか、生活習慣や食事による違いはあるか、個人差はどの程度かなどのさまざまな項目で調査を実施した。この装置を愛知県内の集団調査などで利用してもらい、生活習慣などと対照して分析したのだ。その結果、呼気中の水素量は飲酒習慣や牛乳を飲む習慣などと関係することが明らかになった。

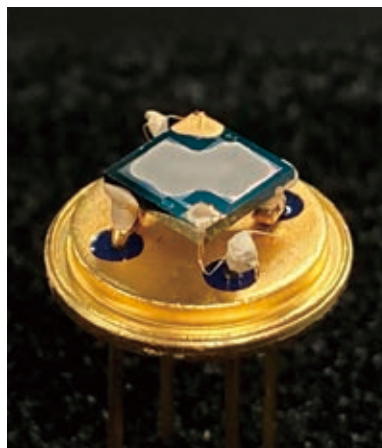
「病院や介護施設でこの検査装置を用いれば、食事の種類によって消化不良を起こしている人を判断するひとつの指標となり、各人の体質に合った食事の提供を行うことでより良い体調管理が可能になると考えています」

肺がんの早期発見にも応用

その後、申は肺がん検知用ガスセンサの開発に取り組んだ。

「犬ががん患者を見つけると聞いたことはないでしょうか。がん患者の呼気、尿、汗などには特有の成分が含まれており、犬はそれをかぎ分けているのです。それならば、センサで呼気からその成分を検出することで、がんの早期発見ができると思いました」

がんの種類はいろいろあるが、早期発見が難しく死亡率が高い肺がんを検知することに目標を絞った。そこで、愛知県がんセンターに協力を依頼し、肺がん患者および健康者から延べ180人の呼気を収集し、対象となるガスの特定に取りかかった。しかし、においのパターンは複雑で、1つ1つの気体成分は1 ppb以下と非常に薄い。どのようなガスの組み合わせが肺がん特有のにおいになるのかを見いだす



◀▶ がん由来の気体成分を測定するセンサ(左:高感度半導体式VOCセンサ)とそれを使ったがん検知のための濃度測定装置(上:呼気計測器のプロトタイプ)
※VOC:揮発性有機化合物

のは容易ではなかった。その難関を乗り越え、申は、同研究部門の伊藤敏雄や共同研究のグループとともに、データ解析に人工知能技術を用いて、においパターンを特定し、濃度測定装置の開発に成功した。

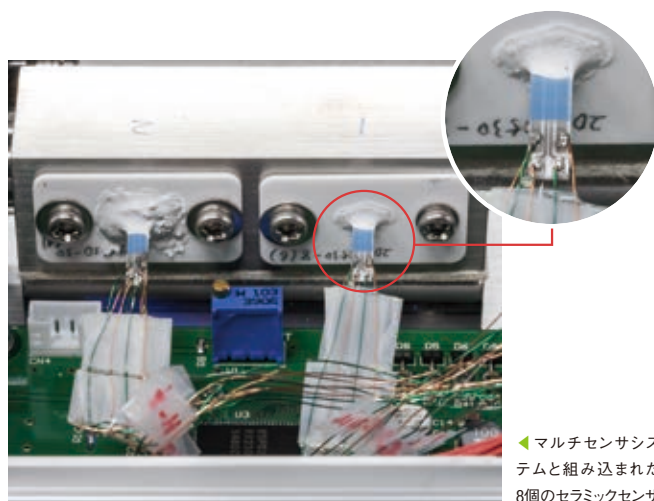
「ガスの濃度だけ示しても現場の医師には判断できません。そこで、においパターンから肺がんと考えられる確率を数値で示すことにしました。ある確率以上であれば精密検査の受診を勧めるなど、病気のスクリーニングとしてお使いいただけることを想定しています」

呼気の測定という簡易な方法により初期段階で肺がんのリスクを発見する意義は大きい。今後はこの解析精度を向上させ、医療現場でもっと積極的に利用される機器を開発していくことを目指している。

生活空間のにおいを3分で識別

がんの早期発見を高精度に実現するためには、低濃度の揮発性有機化合物を確実に検知できる技術が必要となる。この研究の一環として、現在、申と伊藤は生活空間内のにおいの検知技術に力を入れている。人、ペット、果物、床材の木やオイルのにおいなど、生活の場にはさまざまなにおいが存在する。これまで説明してきた呼気と同じく、空間のにおいにもいろいろな成分が複雑に含まれている。さらに、空間内のにおいはいつも同じではない。複雑かつ変化するにおいを機械に識別させるのは簡単ではないと思われるが、すでに実現に近づきつつあるという。

下の写真の装置には、産総研で試作したそれぞれ違うガスを検知するセラミックセンサが8個組み込まれている。



◀ マルチセンサシステムと組み込まれた8個のセラミックセンサ



「原理や特性の異なる複数のセンサを用いることで多様な信号を検出でき、その傾向から対象の特徴を把握しやすくなるのです」と、伊藤は説明する。

この装置で検出できるガスの組み合わせが何のにおいになるのかを、事前にAIに学習させておく。(センサAのある検出値)+(センサBのある検出値)+…=(リンゴのにおい)というように、センサ検出値のパターンを記憶させているのだ。表示の際は、誰にでもわかるように、測定値を測定している対象物の名前に変換して何のにおいかを可視化している。

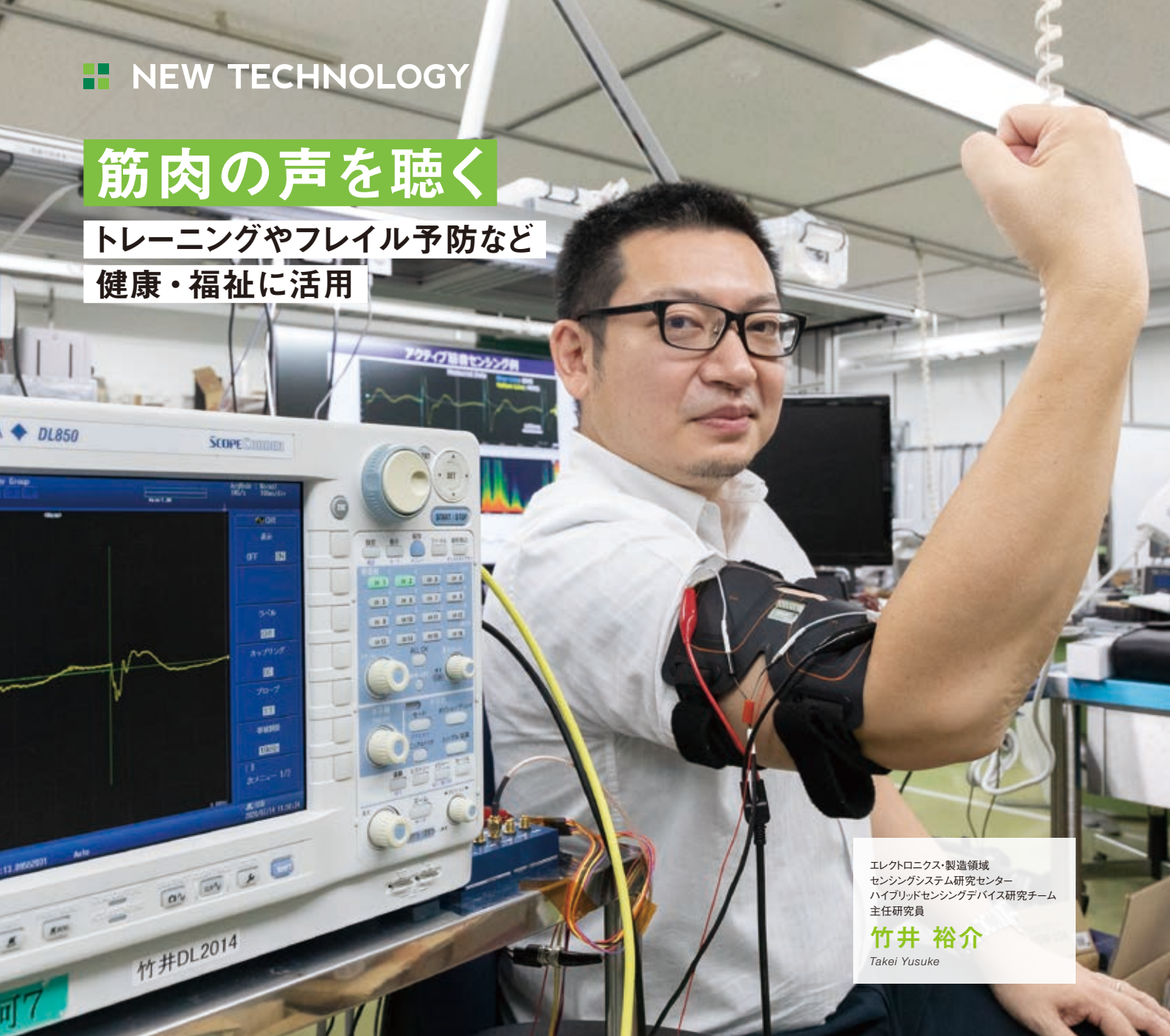
装置に仕込まれたセンサの反応・分析速度は速く、室内の空気を吸ってから3分ほどで何のにおいかを識別する。センサ自体が高性能でなければ、微量の各成分を個別に検出できず、それらが混ざり合ったにおいを正確に判断することはできない。

現在、伊藤はこの装置をより小型化し、自動車や電車内、生活空間内のにおい識別を行うマルチセンサシステムとして構築することに取り組んでいる。閉じられた空間の中で、何が人にとって良いにおいなのか嫌なにおいなのかまで判断することができれば、その空間に適した脱臭や快適な空間づくりが可能となる。

このように、におい検出技術は、人々の健康維持や疾病の早期発見、生活空間の快適性向上に貢献している。さらに今後の応用の可能性として、異臭検知による機械の不具合の発見や、腐敗臭の検知による食品の鮮度管理への活用も考えられている。産総研のにおい検知に特化したこの高性能ガスセンサ、幅広い応用が期待できそうだ。

筋肉の声を聴く

トレーニングやフレイル予防など
健康・福祉に活用



エレクトロニクス・製造領域
センシングシステム研究センター
ハイブリッドセンシングデバイス研究チーム
主任研究員

竹井 裕介

Takei Yusuke



KEY POINT

運動能力を向上させたい、体型を維持したい、加齢に伴う身体的機能や認知機能の低下を避けたい——。竹井は筋肉に電気刺激を与えたときの**筋肉の収縮を「音」で計測**する技術を開発。個人の**筋量の変化**や**筋肉疲労度**などの**定量的な測定を可能**とし、この課題に挑む。

筋肉の音から、効果や疲労度がわかる

筋力の向上は、アスリートだけでなく、体力維持を心がける人や筋力が徐々に落ちていく高齢者などさまざまな人にとって関心の高いテーマだ。しかし、特に個人でトレーニングに励んでいる場合、そのトレーニングが自分に合っているのか、筋

力がどのくらいついたかなど、運動の適合性や効果のほどが見えづらい。

この問題に対し、センシングシステム研究センターの竹井裕介が提案するのが、「筋肉の声を聴く」ことだ。

「筋肉は動くときにさまざまな音、筋音を発します。従来はこの音を聴診器やマイクロフォンで捉えていましたが、現在はセ

ンサの性能が上がり、高精度な筋音計測をすることで、筋肉のさまざまな状態を知ることができるようになっていきます」

最近の研究で、筋音は音というより、筋繊維が収縮・拡大して変形するときに発生する振動（機械的な信号）であることがわかってきた。重いものを持ったときに筋肉がブルブルするのがまさに筋音の一種である。

筋音研究の歴史は17世紀にまでさかのぼるが、筋電（筋肉が収縮するときに筋繊維から発生する活動電位）に比べ、測定に多種の機器を必要とすることや解析の手間がかかることもあり、19世紀以降、筋肉計測は筋音より筋電が主流となっていた。それが近年、センサや計測器の性能が上がり、より正確な測定が可能となったことで筋音を用いた研究が進んでいる。

竹井は数年前から筋肉の動きと筋音の関係に関心を持ち始め、加速度センサや高周波音響センサを用いて皮膚表面の変位を計測することで、筋肉が強い力を出すときには高い周波数の筋音が発生し、疲労してくると音が小さくなる、などといったことに注目していた。

電気刺激と組み合わせ、筋音を定量的に評価

筋音の問題は、計測はできても定量的評価ができないことだった。

「背筋力測定装置で複数の人に5 kgの重りを持ち上げてもらったところ、腕の力だけを使う人もいれば、腰を入れるなど複数の筋肉を使う人もいて、比較可能なデータは得られませんでした。また、同じ人の筋肉量の変化を見ようとしても、結果は姿勢や体調、精神状態に左右されることがわかりました」

これでは研究が先に進まない。この技術を筋肉トレーニングの効果的なプログラムづくりや、高齢者のフレイル*予防に応用するのであれば、再現性が高い測定方法を開発し、個人の意志を介在させない定量的評価を行う必要がある。それには対象の筋肉に定量的なタスクを与え、かつアウトプットを定量的に計測しなければならない。どうすればいいのか？

ここで竹井が注目したのが電気刺激だった。筋肉に電気刺激を与える装置は、治療器やトレーニング用具などとして広く実用化されている。これらの器具を使って電気刺激を与えると、筋肉は本人の意思とは無関係にビクッと動く。そのような刺激を定量的に与え、筋音を計測することで、個人の意思や姿

勢などに左右されない数値が得られると考えたのだ。

竹井は電気刺激用の2つのゲル電極パッドの間に筋音センサを配し、そのデバイスを上腕部に貼り付けて筋肉のハンマリング（振動計測）試験を行った。モニタには刺激信号が青、筋音信号が黄色に表示されたのだが、刺激を与えるとすぐに速筋が反応のピークを迎え、その後、遅筋が反応していくのがわかった。この手法によって定量的な評価が得られ、筋肉の種類ごとの収縮速度やそれぞれの筋肉の割合などがわかるようになった。これで個人間の比較も、同じ人のトレーニングによる筋量の変化も計測・評価が可能となる。

「ウォーミングアップの前後では同じ刺激に対して筋音の振幅が増加することや、刺激を与え続けると時間経過に伴って筋肉が疲労して筋音振幅が減り、あるところから一定幅になることなどもわかりました。これらの結果から、個人の特性にあわせた効果的な筋トレが、より高い精度で実施できるようになると考えています」

実用化に向けた次の課題は、測定する人に付けてもらうデバイスの小型化だ。現在、直径5 cm程度までのダウンサイズが実現している。また、着るだけで筋肉計測ができるスマートウェアの実証実験や、タブレットなどで筋トレ中の波形が見られるアプリと連動したトレーニング用具の開発なども進められている。

「より多くの人に使っていただけるよう、まずは500円玉サイズ、さらには使い捨て磁気治療器サイズにまで小型化を進めたいと考えています。また、電気刺激で筋肉をかなり大きく収縮させられるため、将来的には歩行支援デバイスなどにも応用できるのではないかと期待しています」

健康・スポーツから福祉まで、人々の生活向上に貢献できる筋音測定技術の今後の展開が楽しみだ。



▲ 現在実用化されている直径約5 cmの筋音センサ

*フレイル…Frailtyの日本語訳。健康な状態と要介護状態の中間に位置し、加齢に伴い身体的機能や認知機能の低下が見られる状態。

1,000℃の

高温を

正確に測る！

世界最高精度の
白金抵抗温度計を開発



◆ KEY POINT

製品製造、品質管理、安全管理など、産業現場では高精度な温度測定・制御が求められる。しかし、**1,000℃付近の高温域で高精度**に安定的な計測ができる温度計はこれまで開発されていなかった。産総研と株式会社チノーは、この高温域を**1/1,000℃の精度で安定的に計測**できる**新しい白金抵抗温度計を開発**した。この世界トップレベルの温度計開発により、製品製造の安定化・品質の向上、研究現場における温度管理の信頼性確保などに大きく貢献することが期待されている。



計量標準総合センター
物理計測標準研究部門
温度標準研究グループ
研究グループ長

中野 享

Nakano Tohru



計量標準総合センター
物理計測標準研究部門
温度標準研究グループ
主任研究員

**ウィディアトモ
ジャヌアリウス**

Widiatmo Januarius

1,000℃の高温を、正確に測りたい

温度測定というのは、生活から産業現場まであらゆるところで活用されている「センサ」技術である。特に、産業現場での温度測定は、製品を安定して製造し、同時に品質管理を行うための重要な手段である。物質の熱容量や熱伝導、電気抵抗、磁性、化学反応の制御などの正確な温度測定には、高精度な機器が求められる。

「温度測定において高温域は安定的な計測が難しく、2016年に産総研が新しい白金抵抗温度計を開発するまで、660℃以上の温度は最高レベルの精度で計測することはできませんでした」

温度センサの開発や評価など温度標準研究グループのプロジェクトを仕切っている中野享はそう語る。ここで言う最高レベルの精度とは1/1,000℃。しかし、それまで660℃以上の温度域では1/100℃程度の精度しか実現できていなかった。

「白金抵抗温度計は半導体製造の現場や化学プラント、宇宙・航空分野などで広く利用されていますが、その現場では、測定精度が製品の品質に直結します。精度が低ければ目指す品質に達せず、歩留まりが悪くなり、すべての工程が無駄になることさえあります。産業界を中心に、高温域を高精度に測定できる温度計のニーズは高まっていました」

なぜ測定が不安定になるのか

2015年、産総研は、長く温度計の開発で連携を続けてきたチノーと共同で新しい白金抵抗温度計の開発を開始した。担当したのは、それまで13年間、産総研で温度標準の開発や高精度化に取り組んできたウィディアトモ ジャヌアリウスだ。

当時、白金抵抗温度計の高精度化は世界的に成果が出ず、諦めムードも漂い始めていた。しかし、ウィディアトモは多様な温度計を手掛け、多くの物質を扱ってきた経験から、どの部分を改良すればよいか、当たりをつけることができたという。

「物質は熱によって変形したり融けたりします。高温の測定が安定しないのは、まさにそのためです。つまり、白金線は高温で伸び、冷めると縮みますが、温度測定を繰り返しているうちに熱で白金線がひずみ、伸びたあとに十分に戻

らなくなる。さらに、熱で表面の酸化膜の状態が変わってしまう。それらにより電気抵抗が変わり、測定が不安定になると推測できました」

熱ひずみを抑え、世界トップレベルの安定性を実現

白金線をセンサ部に用いた白金抵抗温度計は白金の性質を利用し、測りたい温度の白金の抵抗値を測定し、それを温度に換算して測定するという仕組みのものだ。

ウィディアトモはセンサ部の白金線の状態を詳しく調べ、実験を繰り返し、抵抗値を安定化させる条件を探し続けた。そして2016年、センサの作製過程で白金線に一定の熱を加え、その後、一定の温度まで下げることで表面が安定することを見いだした。

一方、熱ひずみの抑制に取り組んでいたチノーも、白金線の上部の伸縮がセンサ部の白金線に伝わらないような、新たな構造の開発に成功した(18ページ写真)。

これで本当に抵抗値は変わらなくなるのだろうか。ウィディアトモは熱処理を施した白金線をチノーの開発した構造に適用し、0.01℃の水の三重点と、961.78℃の銀の凝固点において、高温にしたあと低温に戻して抵抗値を測る熱サイクル試験を実施した。従来の温度計ではサイクルを経るごとに抵抗値が上がり、4回目の熱サイクル試験では抵抗値の変動が0.01℃まで達していた。ところが、新しい構造の温度計では試験を繰り返しても抵抗値の変動が非常に少なく、±0.0005℃で安定するという成果を得ることができたのだ。

「これにより、安定して測れる温度が660℃付近から1,000℃付近まで、一気に300℃近く拡大されました。信頼性は世界最高レベルです」と、ウィディアトモは笑顔を見せる。

この新しい温度計により、1,000℃付近の温度標準が史上初めて1/1,000℃の精度で保証されるようになった。これは産業界にとどまらず科学全体の進歩に直結する成果である。

「今後は1,000℃以上でも最高精度で計測できる温度計の開発を目指し、産業に科学に、さらに貢献していきます」と中野とウィディアトモは力強く声を揃えた。



LINKの先にあるのは「技術を社会へ」
そんな思いをのせたコミュニケーション・マガジン
「産総研LINK」をお届けします

Search

産総研LINK



産
総
研

LINK

技術を社会へつなげるコミュニケーション・マガジン

産総研LINK No.31 2020年9月発行

編集・発行 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
問い合わせ 広報部 広報サービス室 出版グループ
〒305-8560 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第1
TEL : 029-862-6217
E-mail : prpub-ml@aist.go.jp

次号 予告 スマート社会を支える「データ連携」
についてご紹介します。



■ 禁無断転載 ©2020 All rights reserved by the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
■ 所外からの寄稿や発言内容は、必ずしも当所の見解を表明しているものではありません。
■ 「産総研LINK」へのご意見・ご感想がございましたら、上記E-mailまでお寄せください。今後の編集の参考にさせていただきます。

