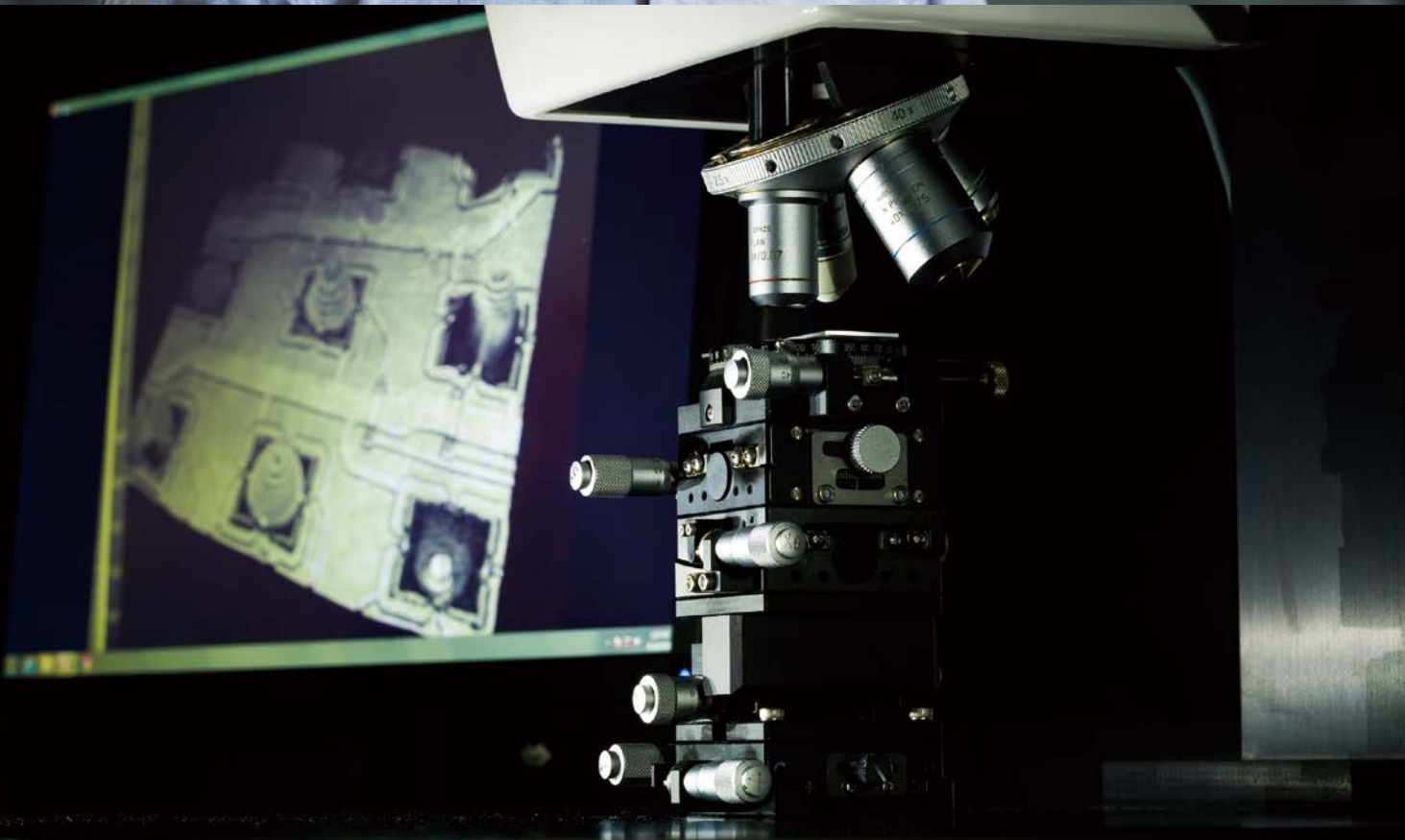


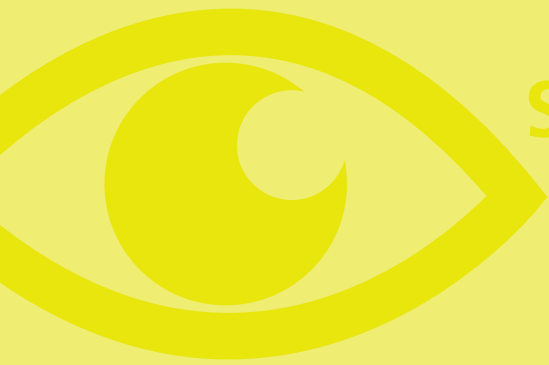
NIMS NOW

NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE

No. 5
2016

最先端
センサが
魅せる未来





Sight

最先端センサが 魅せる未来

人の五感の代わりとなるセンサ。

今日、私たちはあらゆる場所で意識せずともその恩恵を受け生活している。

医療、防災、インフラ管理、環境保全……

センサと無縁な分野はないと言ってもいいだろう。

そしてIoTの発達の中、その活用はますます広がろうとしている。

NIMSでも次々に魅力的なセンサが生まれている。

とりわけ嗅覚のように、化学物質をとらえる「化学センサ」の進化が目覚ましい。

カギを握るのはその独創的なアイデアだ。

未だかつてない斬新な発想は

材料そのもののさらなる追求や革新的なシステム開発を加速させ、

そうして生まれた超小型・超高感度のセンサは

これまで以上に精度の高い、膨大な情報を私たちに与えてくれるだろう。

それもより素早く、より手軽に。

人々の健康や安心・安全に寄与する大きな可能性を秘めた、NIMS発のセンサ。

その開発の経緯と画期的な発想に迫る。



Smell

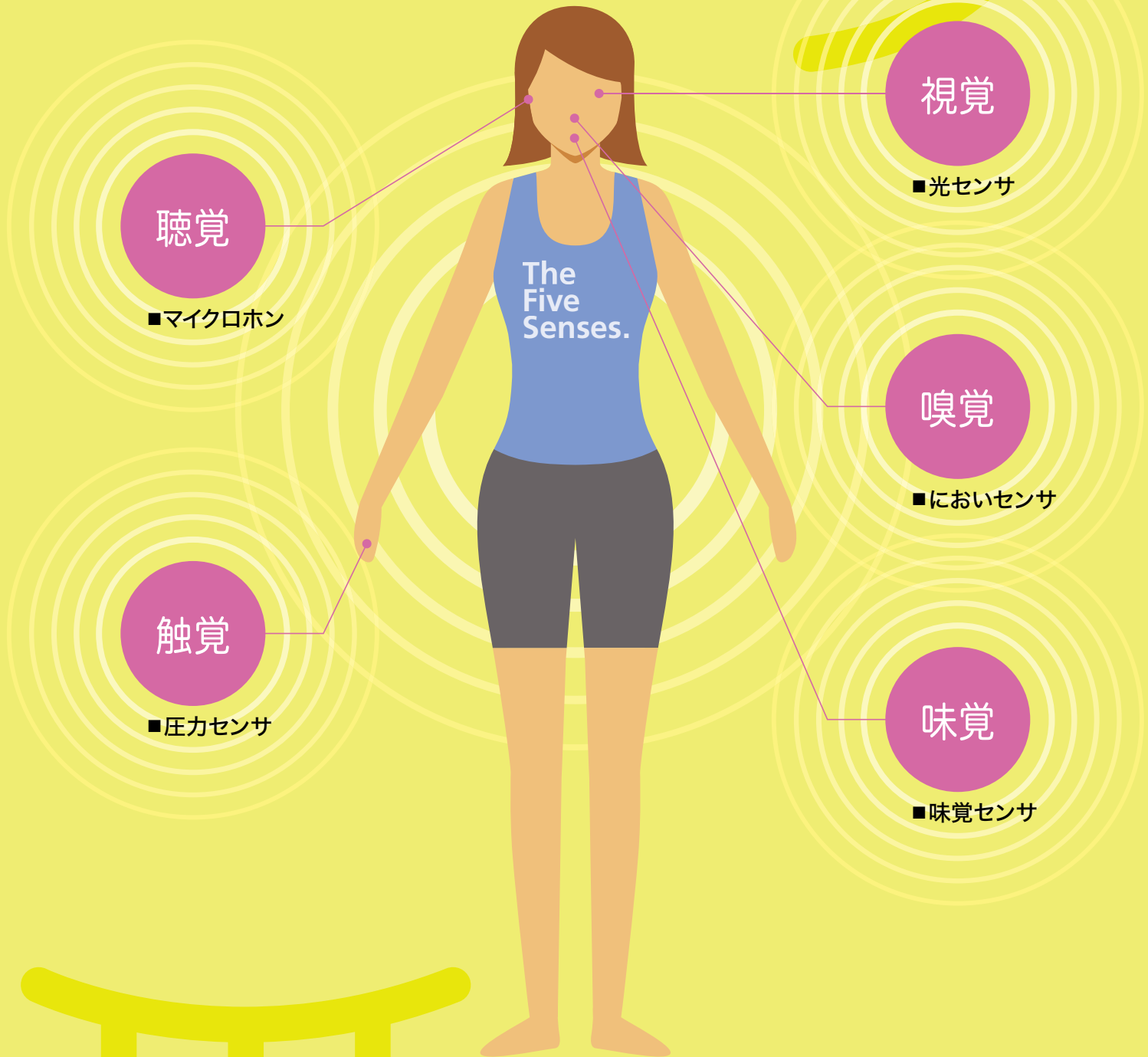


Touch

Hearing



人間の感覚と
対応するセンサの代表例



聴覚

■マイクロホン

視覚

■光センサ

嗅覚

■においセンサ

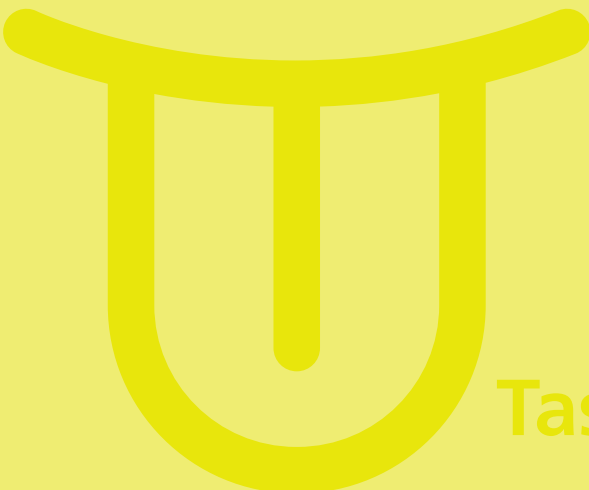
触覚

■圧力センサ

味覚

■味覚センサ

Taste



都甲 潔 × 小出 康夫

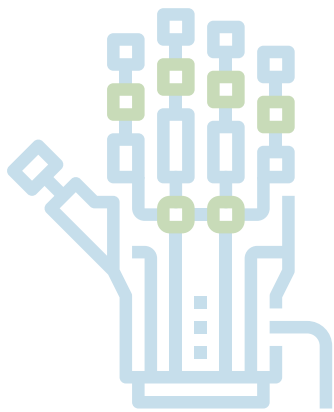
Kiyoshi Toko

九州大学
味覚・嗅覚センサ研究開発センター
センター長

Yasuo Koide

物質・材料研究機構(NIMS)
理事/技術開発・共用部門長





人工知能の発展で 研究開発が進む「センサ」

IoT社会の到来に向けて注目を集めるセンサ。中でも人工知能（AI）の発展により、味覚センサや嗅覚センサといった化学センサの研究開発が加速している。そこで今回は、世界で初めて味覚センサの実用化を果たした九州大学の都甲潔教授とNIMSの小出康夫理事が、化学センサを中心に、現在のセンサの状況と将来について語り合った。

物理センサと化学センサの違い

小出 都甲先生は1990年の初めに、味覚センサの実用化に世界で初めて成功したことで有名です。そのお話を伺う前に、まずはセンサとは何かについて整理したいと思います。そもそもセンサとは、人の五感の代わりとなる機能を持つ小型の装置のことですね。

都甲 その通りです。そして五感のうち、視覚、聴覚、触覚を担うのが物理センサ、一方、味覚、嗅覚を担うのが化学センサです。物理センサは物理量を、化学センサは化学量を電気信号に変換している装置という言い方もできると思います。そういった意味で味覚センサは化学センサに分類されます。

小出 味覚センサは今や全世界の食品メーカーや医薬品メーカーが製品開発や営業に活用していますよね。ただそういった例は稀で、物理センサが約40年も前から開発が進められ、さまざまなセンサが実用化されているのに対し、ガスセンサ等の特定な用途を除くと新しい機能を持つセンサの実用化があまり進んでいないのは一体なぜなのでしょう。

都甲 それにはセンサのしくみの違いが大きく関わっています。ご承知のとおり、物理センサも化学センサも受容部（レセ

プター）と変換部（トランスデューサー）の2つで構成されていて、受容部で物質を認識し、変換部でその物理量や化学量を電圧などの電気信号に変換しています。受容部と変換部の組み合わせによって、センサ全体の感度と物質の選択性が決まります。

小出 物理センサの場合、視覚は光、聴覚は音波、触覚は圧力が、受容部で認識する物質の物理量になりますね。

都甲 はい。ですので、物理センサは、光や音波など“単一”の物質の物理量を測定すればよいので、しくみが比較的簡単です。それに対し、化学センサは、味覚、嗅覚に相当するのが、味物質や匂い物質です。これらの中には数千、数万種類もの化学物質が含まれているため、複数の化学物質の種類や濃度を測定し、その結果に応じて総合的に判断し、電気信号として出力しなければならず、そのため、より難易度が高いのです。

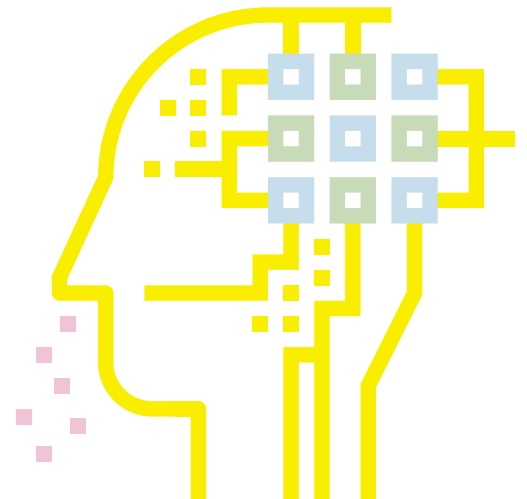
小出 私の専門分野は電子材料・半導体工学で、以前、ダイヤモンドなどの無機材料を使って、波長280nmの深紫外光を検知するという、視覚センサを開発した経験がありますが、確かに受光部で認識する物質は1つです。その点で、化学センサとの大きな違いを感じますね。

研究開発が加速する化学センサ

小出 NIMSでは現在、吉川元起研究員の嗅覚センサ（P.8参照）や川喜多仁研究員のモイスターセンサ（P.12参照）など、人々の新たな期待に応えるセンサが実用化に向けて動き出しています。

現段階で社会に普及している化学センサには、都甲先生が開発された味覚センサ以外に何かありますか。

都甲 まず、一般家庭にも設置されているガス漏れセンサですね。この受容部には、酸化半導体が使われています。最も信頼性が高い材料で、飲酒運転を取



り締まるアルコールチェッカーなどにも使われています。しかしながら、感度と化学物質に対する選択性が低く、特定のガスにしか使えないのが欠点です。そのため現在、有機材料を使った嗅覚センサの開発が進められています。

次に、糖尿病の判定に使われている糖値センサです。これは、血液に含まれるブドウ糖を検出するもので、酵素反応で生じる電子を直接電極で測定しています。すでに1兆円産業にまで成長しています。現在、広く普及している化学センサはこれくらいでしょうか。

小出 一方で、近年、人工知能(AI)などITが急速に進化し、ビッグデータが扱えるようになったことで、化学センサの研究

開発が加速していますよね。受容部で認識した複数種類の化学物質に関する膨大な情報を、AIを使って統計学的に高速処理できるようになったというわけですね。

また、例えば環境汚染物質の測定やガン細胞が発生させる特有の化学物質の検出など、社会的ニーズの高まりも化学センサの研究開発を後押ししているように感じますね。そこに、AIという追い風が吹いたということでしょうか。今後、化学センサは、安心・安全な社会を実現する上で重要な役割を担っていくことになりそうですね。

都甲 まさにおっしゃる通りです。加えて、化学センサの受容部には無機材料よ

りも有機材料を使った方が検出できる化学物質の種類が広がり、選択性が高まるわけですが、近年、数多くの有機材料の合成方法が新たに開発され、欲しい機能を持つ有機材料がより簡単に手に入るようになったことも、化学センサの研究開発を後押ししていますね。

匂いには“基本臭”がない

小出 ところで、都甲先生の味覚センサを知ったときは、「味覚をセンシングできるのか!」と、斬新なアイデアにとっても驚いたのを覚えています。現在、都甲先生は、九州大学の味覚・嗅覚センサ研究開発センターでセンター長を務められていますが、味覚センサと嗅覚センサでは、どのような違いがありますか。

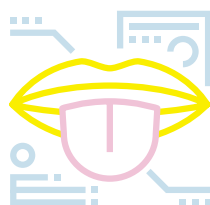
都甲 味覚センサと嗅覚センサでは、難易度が大きく異なります。理由は、味覚の場合、甘味、塩味、苦味、酸味、うま味という5つの基本味があり、測定する化学物質をこの基本味に振り分けることさえできればよいのですが、嗅覚の場合、基準となる基本臭がありません。

また、味覚の場合、我々は舌という受容部だけを使って、5つの基本味を識別していますが、嗅覚の場合、匂いを鼻という受容部ではなく、脳で認識し情報処理しています。そのため、経験や学習によって匂いの感じ方が異なってくるので、数値化がむずかしいのです。これが、嗅覚センサがなかなか実用化されない最大の理由です。

小出 味覚・嗅覚センサ研究開発センターには、工学部や理学部だけでなく、医学部や歯学部、農学部の先生が揃っていると伺いましたが、化学センサの実用化に向けては、やはり医学部などとの異分野融合が不可欠ということでしょうか。

都甲 おっしゃる通りです。そもそも同センターは、センサの開発だけに特化した組織ではなく、例えば、医学部と農学部の先生がガンのバイオマーカーを見つけるといった研究もしています。それが見

一人ひとりがどのような未来を創造していききたいのかをしっかりと考え、行動に移していくことが大切です。



つかれば、次は、センサを開発する工学部の出番といった具合です。センサについて、サイエンスとテクノロジーの両面からアプローチしているのです。今後、化学センサの開発には、多岐にわたる分野の連携が重要になっていくと考えています。

IoT社会を担うセンサ

小出 近年、IoT社会が進み、自動車の自動運転も現実味を帯びてきており、ますますセンサへの需要が高まってきます。都甲先生は、センサによって今後、どのような社会が実現されると思われませんか。

都甲 まずは、化学センサが身近なものになれば、味覚障害者や嗅覚障害者にとっては福音になるでしょうね。また、センサがあらゆるものに搭載され、センサを介して収集されたビッグデータがAIによって最適に処理されるようになれば、まさにSF映画のような、呼べば自動車が自分の元に来てくれて行きたい場所に連れていってくれるといった便利な社会が訪れることでしょう。

小出 一方で、IoT社会に関しては、プライバシーの侵害などセキュリティに関する課題も危惧されていますよね。

都甲 その点に関しては、例えば、独り暮らしのお年寄りの見守りのようなケースでは、視覚センサはプライバシーを侵害する度合いが高いので、代わりに嗅覚センサなど、より侵害性の低いセンサを用いるといったアイデアが出されています。また、今後、あらゆるモノや場所にセンサが搭載されるということを前提とした場合、強い倫理観の下、AIを使って自動的にデータを削除するといったアプローチを取る必要があるのではないかと考えています。

小出 実際には、斬新なアイデアや発明が突如起り、20年後、30年後には今からは想像もつかないような社会が到来していることでしょうね。

都甲 とはいえ、未来のベースを築くのは

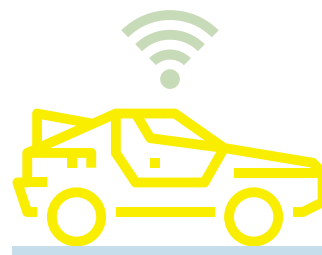
今後、化学センサは、
安心・安全な社会を実現する上で
重要な役割を担っていくことになるでしょう。



我々自身です。一人ひとりがどのような未来を創造していきたいのかをしっかりと考え、行動に移していくことが大切です。

小出 おっしゃる通りですね。本日はどうもありがとうございました。

(文・山田久美)



世界初、汎用性の高い 超小型・超高感度の 嗅覚センサMSSを開発

吉川元起

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
ナノライフ分野 ナノメカニカルセンサグループ
グループリーダー



人の五感の代わりに果たすセンサ。五感のうち、目(視覚)、耳(聴覚)、皮膚(触覚)を担う物理センサはすでに実用化されているものの、舌(味覚)、鼻(嗅覚)を担う化学センサはまだほとんど実用化されていないのが現状だ。そういった中、NIMS国際ナノアーキテクトニクス研究拠点の吉川元起グループリーダーが、ガス分子からDNA、タンパク質などの生体分子に至るまで、幅広い物質を小型の装置で高感度に検出できる汎用性の高い化学センサを開発した。食品や化粧品、医療、防犯、環境など幅広い分野での応用が期待されている。

超小型、超高感度、 高い汎用性を実現

物理センサと違って味覚、嗅覚を担う化学センサの実用化が進んでいない最大の理由は、検出対象となる化学物質の種類が数千、数万種類と膨大だからだ。そのため嗅覚センサの場合、実用化されているものは、ガス漏れセンサなど特定の化学種を検出するのに特化した製品にとどまっているのが現状だ。そういった中、吉川元起が、スイスの故ハインリッヒ・ローラー博士およびスイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)と共同で開発したセンサ「MSS(Membrane-type Surface stress Sensor, 膜型表面応力センサ)」が世界的な注目を集めている。

「MSSの特徴は、ニオイの元となるガス分子からDNA、タンパク質などの生体分子に至るまで、幅広い物質を検出できる

汎用性に加え、超小型、超高感度という特性を兼ね備えていることです」と吉川は説明する。大気中だけでなく血液など不透明な液体中の物質であっても検出できるため、食品や化粧品、医療、防犯、環境など幅広い分野での応用が期待されている。

MSS 1個の大きさは約1 mm角ほどで、MSS全体はシリコンで形成されている。この小さなMSSが高感度でニオイ物質を検出できる仕組みについて、吉川は次のように説明する。「MSS中央の円形部には感応膜と呼ばれる物質が塗布されていて、その円形部は4つのブリッジで周囲とつながっています。そして各ブリッジには、 piezo抵抗素子が埋め込まれています。piezo抵抗とは、応力を受けるとその電気抵抗が変化する物質のことです。感応膜にガス分子などが吸着すると、感応膜に応力が生じて中央円形部

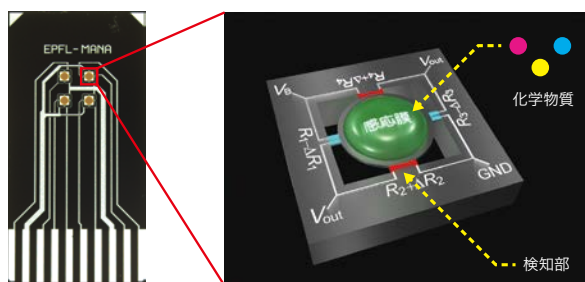
を変形させるため、それを支えている周囲のブリッジには大きな応力がかかることとなります。そのため、ブリッジに埋め込まれたpiezo抵抗素子の電気抵抗が大きく変化し、結果的に吸着した物質を高感度で電気的に検出できるのです」

パターンでニオイを判別

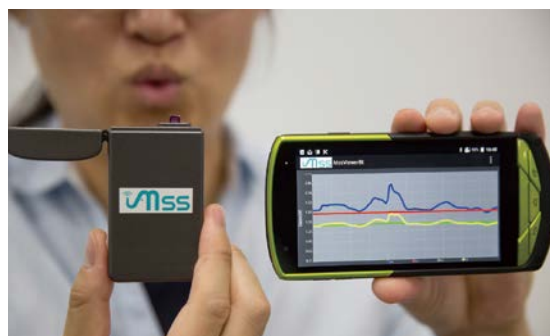
感応膜にはポリマーなどの有機材料に加え、無機材料や生体材料などさまざまなものが使え、種類に応じて検出できる物質が異なってくる。

MSSは従来の半導体微細加工技術を使って作製できるので、小型化、量産化が容易で、MSSを複数個、シリコン基板上に集積させて多チャンネル化することが可能だ。塗布する感応膜の材料をそれぞれ変えることで、複数種類の物質を同時に検出することができる。

■MSSチップとその構造



MSSチップの写真(左)と拡大図(右)。MSS素子間隔は約1mm。中央の感応膜に分子が吸着することによって生まれた表面応力を、周囲の4つのブリッジに埋め込まれた検知部がすばやく検出する



呼気の成分を検知し健康状態をモニタリングするモバイル機器応用のイメージ

「MSSは、1種類の受容部で1種類の物質のみを検出しているわけではありません。例えば、飲食物などの、数種～数百種類のガスの混合物である複雑なニオイを識別したい場合、単成分だけ検出しているのは難しいですが、複数種類の感応膜にガスを吸着させ、その際に生じるシグナル変化の“パターン”の違いに注目すれば、複雑なニオイも比較的容易に識別する事が可能になります。人間や犬の鼻でも似たような仕組みでニオイを識別していると考えられています」と吉川は説明する。

従って、感応膜の材料の種類に応じてニオイ物質がどのような応答パターンを示すかを把握することが重要となってくる。現在、吉川はNIMSの柴弘太研究員や今村岳研究員らと共同で、高感度かつ多様なニオイ成分に対応できるさまざまな感応膜の材料開発を進めるとともに、産学官連携で、シグナルライブラリの構築に取り組んでいる。これにより、各種ニオイの識別精度を高め、MSSの応用範囲を広げようと試みている。

感度は従来型センサの約100倍に

そもそも吉川がナノメカニカルセンサの研究開発を始めたきっかけは、約9年前にさかのぼる。東北大学金属材料研究所で助教をしていた吉川が、2007～2009年に、スイス・バーゼル大学に客員研究員として赴任したのが始まりだ。

「赴任先の研究室は、ナノメカニカルセンサで有名な研究室でした。そこで私はピエゾ抵抗型センサチップを使って、センサをゼロから作る研究を任せられました。日本から来た新参の研究者に、まずは預けてみようと思ったのでしょう。右も左も分からない状態からのスタートでしたが、新しいものを学ぶ絶好の機会だと開き直って、抵抗を1つずつ半田付けするところから始めました」

当時、多様な物質を検出できる化学センサとして、すでに「カンチレバーアレイセンサ」が開発されていた。これはマイクロメートルサイズの極微小なカンチレバー(片持ちの梁)を並べた構造を持つセンサだ。カンチレバーの表面に物質を吸着する受容体が被膜されており、物質が吸着するとカンチレバーがたわむ。このたわみを計測することで物質を検出するというものだ。

たわみの計測方法としては、レーザー光を使って読み取る方式と、ピエゾ抵抗素子をカンチレバーに埋め込んでおき、その抵抗値の変化から電気的に読み取る方式が考えられていた。

「当時の課題として、前者は高感度で検出できるものの、装置が大がかりになります。一方、後者は小型化、簡便化が容易だけど、感度が低いという欠点を抱えていました。そこで、この両者の“いいとこどり”ができるものは無いかと考え続けていたところ、故ハインリッヒ・ローラー博士と共同で研究する機会に恵まれました」

ローラー博士と毎日のように手で計算しながら議論を重ね、その後ローラー博士のIBM時代の同僚であるフェッティガー博士の仲介で、微細加工の第一人者である秋山博士を含むEPFLのチームも議論に参加するようになった。こうした議論を経て、ある程度まで最適化が進んだが、あと一歩決め手に欠け、悩む日々が続いた。そんなある日、「風邪をひいて寝込んでいたときに、布団の中でMSSの構造がひらめき、すぐに飛び起きてパソコンでシミュレーションしたところ、飛躍的な感度向上が確認できました」

MSSでは、その独特の構造によって、ピエゾ抵抗素子型カンチレバーセンサの利点そのままに、感度を100倍以上も向上させることに成功しただけでなく、機械的／電気的な安定性も飛躍的に向上し、一気に実用化が現実的なものとなった。

「MSSの実用化に向けては、2015年9月に、産学官連携体制『MSSアライアンス』を発足させました。ハードウェアの開発や膨大なニオイシグナルのビッグデータ解析などはNIMS内だけではできませんので、世界最高レベルの技術や知識を持つ企業や大学の先生と一緒に、現在、オールジャパン体制で研究開発に取り組んでいます」と吉川は語る。

いつでも、どこでも、だれでも使える世界初のニオイセンサの1日も早い実用化と業界標準化を目指している。

(文・山田久美)

NIMS×京セラ×NEC

産学官連携で、 自己成長する嗅覚センサの 業界標準を目指す



渡辺純子

日本電気株式会社(NEC)
データサイエンス研究所
主幹

2015年9月25日、NIMSは吉川元起グループリーダーが中心となって開発した嗅覚センサ「MSS」の早期実用化を目指し「MSSアライアンス」を発足させた。NIMS、京セラ、大阪大学、日本電気(NEC)、住友精化、NanoWorldの6機関による産学官連携の共同研究体制だ。そこで今回は、京セラの田島雅彦氏、NECの渡辺純子氏、吉川の3者が集まり、MSSアライアンスの狙いやMSSの魅力、NIMSと連携することの意義、将来展望について語り合った。

最先端の技術を持つ 産学官が集結

吉川 現在、NIMSは「MSSアライアンス」の下、本日お越し頂いた皆様方をはじめとした産学官連携体制でMSSの早期実用化を目指しています。

田島 NIMSが企業や大学とアライアンスを組むのは、実は今回が初めてのことで伺いました。

吉川 その通りです。嗅覚センサは開発すべき分野が多岐にわたり、しかも、各分野の最先端技術を結集しなければ、早期実用化は果たせません。幸いなことに、日本には最先端の技術を有する企業が揃っています。今回はそんな有数の企業の皆

様に集結していただけたことをとても心強く思っています。

渡辺 こちらこそ、今回はMSSアライアンスに参画させていただけたことで、新たなチャレンジにやりがいを感じています。

吉川 NECにはニオイデータの解析と、アルゴリズムの開発を担当していただいていますね。

渡辺 はい。MSSでは、複雑なニオイを識別するために、種類の異なる感応膜を被覆した複数のセンサを使ってニオイを吸着させ、それによって発生する電気信号のパターンを解析する必要があります。我々はこれまで、画像など物理センサで収集したデータの解析を数多く手掛けてきましたので、その技術の蓄積が活かせると考えています。と、いうものの、ニオイのデータ解析は初めてのため、日々試行錯誤の連続です。

吉川 京セラには、センサ制御基板やガスの流路などを含め、ハードウェア全般の開発を進めていただいています。

田島 まずは小型化が最初の課題となりました。MSSは、屋外などのオープンな空間を含め、さまざまな環境でいろいろなニオイを測定することが想定されるためです。数々の試作を繰り返して現在の持ち運べるサイズとなり、早速研究データの収

集に活用しています。

MSSは収集したデータ量に応じて精度が高まっていく自己成長型ともいえるセンサデバイスであり、高い汎用性を持つ次世代型の嗅覚センサである点に非常に大きな魅力を感じています。今後、幅広い分野に参入できる可能性を秘めていると考えています。

吉川 そうですね。MSSはさまざまな感応膜材料を利用できるので、検出できる物質の幅をどんどん広げていくことができます。さらに、さまざまなニオイのデータを蓄積・解析していくことで、目的や条件に応じた嗅覚センサを柔軟に開発できるようになっていくことが、MSSやこのアライアンス活動の強みですので、その核心部分に可能性を感じていただけたのはすごくうれしいです。

渡辺 MSSは単にニオイを検出するセンサというだけでなく、新たな市場を創造するデバイスになり得ると思っています。特に私が期待しているのがマーケティングです。

田島 それは面白い発想ですね。

渡辺 ニオイは快・不快など感情と密接に結びついていますが、これまでニオイを数値化する手段がありませんでした。そのため、香料を使った製品のニオイの良し悪





田島雅彦

京セラ株式会社
研究開発本部 ライフシステム研究開発部
第1開発部 副責任者

吉川元起

物質・材料研究機構(NIMS)
国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
ナノライフ分野 ナノメカニカルセンサグループ
グループリーダー

しは嗅覚判定士などが判定していたわけですが、今後MSSがスマートフォンなどに搭載されるようになれば、あるニオイに対して抱くユーザーの感情をリアルタイムに数値化できるようになります。その結果、アンケートなどを取らなくても、よりユー

の研究開発や、電気信号のパターン解析の基礎研究に専念できているのは、両社をはじめとした、アライアンスに参画していただいている皆様のお陰です。その強固な連携によってMSSの高精度化、最適化が加速するという、まさに好循環ができていますよね。これはNIMSだけでは不可能なことです。

田島 我々がこの取り組みを始めたとき、センサの仕組みとしても、連携の体制としても、まったく新しい取り組みでしたので、実は不安な面もありました。しかし、皆が一つのテーブルの上で率直に意見を交わし、一步一步改善を進めることで信頼関係を築くことができています。それがアライアンス活動において大きな力になっていると感じています。

渡辺 我々もその点を非常に強く感じています。通常、企業同士の連携は、業種の違いや目的の違いなどさまざまな壁があり非常に難しいのですが、NIMSが中心となって橋渡しをしてくださり、企業同士の役割分担も明確になるようプロジェクトを推進してくださっているの、円滑かつ良好な関係が築けているのではないのでしょうか。

吉川 実用化は全て企業に任せるのではなく、実用化まで視野に入れた研究開発を行なおうというのが、現在NIMSが標榜しているところですので、MSSアライアンスはまさにその実践であり、最初の成功例にしていきたいと願っています。

田島 今後はともに世界に先駆けて、数年後の実用化を果たしたいと思っています。

渡辺 そうですね。食品や化粧品をはじめ医療、防犯、環境に至るまで、安心・安全で、快適な社会の実現に貢献していきたいですね。

吉川 お二人にそういつただけて本当に心強いです。

こういったMSSアライアンスの運営は、私のような研究者だけでは到底無理ですが、これを支えているのがMSSアライアンス事務局です。この活動を通じて、事務的な視点からも企業連携のモデルケースとして確立していければと思っています。

いずれは、現在のクローズドな体制からオープンな体制に移行し、その中でNIMSはプラットフォームとしての役割を担っていく予定ですが、皆様にはライセンス契約などにより、それぞれ自由に事業を広げていっていただければと思っています。そして是非とも業界標準化を目指していきたいでしょう。

本日はどうもありがとうございました。
(文・山田久美)



ザーの好みに合った製品が開発できるようになるのではないかと思います。

田島 おっしゃる通りですね。現在、MSSは実証実験段階なのでこの大きさですが、さらなる小型化や組み込み方は弊社の得意分野となります。ご期待ください。

実用化まで視野に入れた研究開発を目指す

吉川 京セラによるMSSの小型化や、NECに進めていただいているさまざまなニオイの収集とデータ解析は、実用化に向けた大きな一歩です。

NIMSが実証実験の結果をフィードバックさせつつ、本領である感応膜材料



見えない湿気の “質”まで分かる モイスチャーセンサ誕生

川喜多 仁

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
半導体デバイス材料グループ 主席研究員



湿気の量を計測するだけでなく、“質”も判別する——そんな新しいセンサが誕生した。名前はモイスチャーセンサ。すでに、美容、素材、インフラ、住宅など、さまざまな業界からの問い合わせが相次いでいる。湿気の“質”とは？ どのように判別するのか？ 用途は？ 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点半導体デバイス材料グループの川喜多仁主席研究員に聞いた。

湿度計では 水分の量しか測れない

空気中の水分である湿気が多ければ、鏡や窓ガラスのくもり、カビの増殖、金属の腐食、少なければ、肌荒れ、インフルエンザの流行……。湿気は、私たちの生活の中でさまざまな影響を及ぼしている。

気温によっても変わるが、室内の理想的な湿度は50～60%くらいといわれている。湿気を計る湿度計には伸縮式と電気式があり、前者は動物の毛やナイロン糸が水分を吸収して伸び縮みする変化量を、後者は高分子膜などが水分を吸収して変化する電気の流れ方を計測する。「測っているのは、毛や高分子膜が吸収した水分の量です。空気中の水分は水滴として存在していますが、湿度計では水滴のサイズは分かりません」と川喜多は指摘する。しかし、同じ湿度でも水滴のサイズによって人は違った影響を受ける。例えば、ミストサウナでは水滴が小さい方が肌に浸透しやすく、加湿器では水

滴が小さい方が遠くまで広がりやすい傾向にある。したがって、湿度だけでなく、湿気の“質”を左右する水滴のサイズを測ることも重要である。

レーザーを使えば水滴のサイズを計測できるが、装置が大きき日常生活では使えない。そうした中、川喜多は水滴のサイズを判別することができて、しかも小型の画期的なセンサの開発に成功した。それが、モイスチャーセンサだ。

0.5 μm の水滴も判別、 高速応答、消費電力ゼロ

モイスチャーセンサの構造はシンプルだ。5mm四方のシリコンチップに、金の電極と銅の電極が交互に50本ずつ、合計100本並んでいる。2本の電極の間をつなぐように水滴が付着すると、金の電極と銅の電極に電位差が生じて電流が流れる。その電流を検出する。電流は水滴の量が多いほど大きくなる。

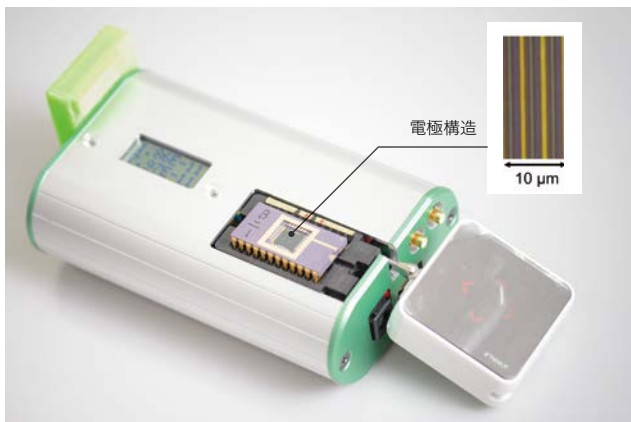
「電極の間隔が10 μm で電流が流れ

ず、1 μm で電流が流れたら、水滴のサイズは10 μm より小さく1 μm より大きいと分かります。そして、1種類のチップだけでは電極の間隔より大きい水滴があるかないかしか分かりませんが、電極の間隔を変えた数種類のチップを併用することで、より詳しい水滴のサイズを判別できるのです」と川喜多は解説する。

結露検出器も基本的な構造は同じで、電極を並べ、2本の電極の間をつなぐように水滴が付着したときに流れる電流を検出する仕組みだが、決定的な違いは電極の間隔だ。市販の結露検出器は最も狭いもので100 μm 程度、モイスチャーセンサは0.5 μm (500nm) である。極細の幅は半導体の微細加工技術によって可能になった。「肉眼で見ることができない水滴は10 μm 以上です。モイスチャーセンサは、肉眼で見えない水滴のサイズも判別できるのです」

モイスチャーセンサには、ほかにも特徴がある。まずはその小ささだ。湿度計や結露検出器の計測部は数cmほどだ

■モイスチャーセンサ



が、モイスチャーセンサは電極が並んでいる部分は数百 μm 、それが載っているシリコンチップでも5mmしかない。次に応答速度。湿度計は計測部が水分を吸う時間が必要なため、応答には数秒から10秒かかるが、モイスチャーセンサは0.02秒と非常に速い。また、2本の電極の間を埋めるように水滴が付着することで流れる電流を検出するため、センサ部分の消費電力はほぼゼロだ。

美容、素材、インフラ、住宅……用途は多様

水滴の大きさも測定できる画期的なモイスチャーセンサ。その潜在的な用途は多岐にわたると川喜多は言う。「まず思い付くのは美容業界です。例えば、肌から出てくる水滴のサイズから肌の状態が推測できます」また、「結露対策にも役立つ」と言う。鏡や窓ガラスをくもらせる結露は、水滴が肉眼で見えるほど大きくなった状態だ。その状態になれば、結露検出器でも捉えることができる。一方、モイスチャーセンサは肉眼では見えない水滴も検出できることから、結露してしまう前にヒーターを入れるなど対策が可能になる。

肌などの発生源からどのような大きさ

の水滴がどれだけ放出されているかという“出てくる湿気”と、窓ガラスなどの対象物にどのような大きさの水滴がどれだけ付着するかという“くっつく湿気”の両方を検出・判別できるので、広い用途が期待できる。

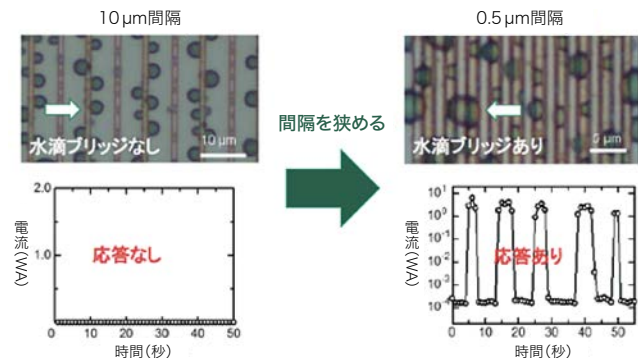
川喜多は、電流の信号を取り出してデジタル信号に変換しコンピュータに送信する計測器部分と、計測結果を表示するソフトも開発。そして、2016年1月に開催された国際ナノテクノロジー総合展に出展した。「想定を超えたいろいろな業界の方に興味を持っていただくことができました。すでにライセンス契約や共同研究が始まったものや、検討中のものがか!と驚くものも多く、開発者としてはとてもうれしいですね」

川喜多は、ぜひ農業で使って欲しいと考えている。「農業は育成中も輸送時も湿気が非常に重要です。モイスチャーセンサで湿気を管理できれば、品質向上だけでなく、自動化によって人手不足解消にも役立つと期待しています」

湿気も潤いも測る

「実は、最初から水滴のサイズを判別できるセンサの開発を目指していたわけで

■水滴のサイズ判別の例



電極の間をつなぐように水滴が付着すると電流が流れる仕組み。電極の間隔を変え応答を見ることで水滴のサイズが判別できる。

はありません」と川喜多は言う。NIMSでは、大気環境が橋など構造物の腐食に及ぼす影響を理解するため、構造物への水分の付着を常時モニターするセンサの開発が以前から進められていた。センサは5cm四方あったが、川喜多は2014年から、その小型化に取り組むことに。「まずは電極の間隔を狭めてみました。すると、小さい水滴を測れること、数種類のセンサを使えばサイズを判別することに気が付き、モイスチャーセンサへとつながったのです」モイスチャーセンサは、普及している半導体の微細加工技術で作製できるため安価で小型、さらに省電力なので、構造物にたくさん設置して水分の付着を常時モニターするのにも適している。

モイスチャーセンサという名前を付けたのは川喜多だ。「モイスチャーは、英語では“湿気”ですが、日本語では“潤い”という意味もあります。いろいろな用途に使ってほしいことから、幅広い意味、イメージがある“モイスチャー”にしました。いろいろな業界から声を掛けていただいているので、この名前で正解でしたね」(文・鈴木志乃/フォトンクリエイト)

安心・安全な社会へ貢献 スマートフォンで 有毒ガスを検知できる センサを開発

石原伸輔

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
フロンティア分子グループ 主任研究員



スマートフォンで有毒ガスを検知できる——そんな画期的なセンサが誕生した。開発者であるNIMS国際ナノアーキテクトニクス研究拠点フロンティア分子グループの石原伸輔主任研究員に、センサの仕組みや今後の展開を聞いた。キーとなるのは、カーボンナノチューブ、超分子ポリマー、そしてNFCタグだ。

火山の火口や工場などでの漏洩事故、さらにはテロ……。私たちが有毒ガスにさらされるリスクはゼロではない。万一の場合でも、有毒ガスをいち早く検知できれば、迅速な避難や解毒剤の投与が可能になり、被害を最小限に抑えられる。しかし、現在実用化されている有毒ガスセンサは、大型で重く、高価なため、たくさん設置したり、個人が持ち歩いたりできるものではない。

カーボンナノチューブ+超分子ポリマーで 高感度を実現

石原は、アメリカのマサチューセッツ工科大学(MIT)の研究グループと共同で、小型で安価、そして高感度で簡単に有毒ガスを検知できるセンサの開発に取り組んできた。「表面を超分子ポリマーで覆ったカーボンナノチューブを電極の間に分散させただけのシンプルなもの。ただし、超分子ポリマーに仕掛けがあります。求電子性の有毒ガスにさらされると弱い連結部位が切断され、カーボンナノチューブから離れるように設計してあるのです」と石原。

カーボンナノチューブは六角形に並んだ炭素原子が連結してチューブ状になった物質で高い導電性を示すが、超分子ポリマーに覆われていると電気が流れにくくなる。一方、求電子性の化学物質は相手の物質から電子を奪い取る性質があり、人体に触れると皮膚や肺のただれや神経障害を起こす。「有毒ガスにさらされると超分子ポリマーが離れてカーボンナノチューブがむき出しになり、導電性が高い状態に戻ります。導電性の変化を測定することで、有毒ガスを検知できるのです」

カーボンナノチューブを用いると小型化できることから、その導電性の変化を利用した有毒

ガスセンサは数多く報告されている。しかし導電性の変化量は1～10%と小さいため誤検知が問題になっていた。「私たちの方法では最大3000%も変化するので、確実に検知できます」と石原は胸を張る。「3000%という値は自分でも最初は信じられませんでした。何度も測り直してから報告したほどです」

NFCタグ+有毒ガスセンサで 安価と手軽さを実現

その報告を聞いたMITの同僚から、すぐ石原に提案があった。「NFCタグの電子回路にそのセンサを組み込んでみないか、と言うのです。それは面白いと、すぐに着手しました」 NFCタグとはSuicaなどに使われている近距離無線通信(Near Field Communication)を行なうチップで、NFC対応のスマートフォンをかざせば通信ができる。石原らは、安全な環境下ではNFCタグを読み取れないが、有毒ガスにさらされるとセンサ部分の導電性がおよそ100%上昇するとスマートフォンでNFCタグが読み取ることができるよう電子回路を設計。求電子性化学物質である塩化チオニルを用いた実験を行ったところ、10ppmという低濃度のガスに5秒間さらされただけで、NFCタグが読み取れる状態に変わることが確かめられた。「スマートフォンをNFCタグにかざすだけで有毒ガスの有無を判定できる画期的なセンサで、NFCタグの機能を活用すれば、警報を鳴らしたり、自動で消防などに通報したりする

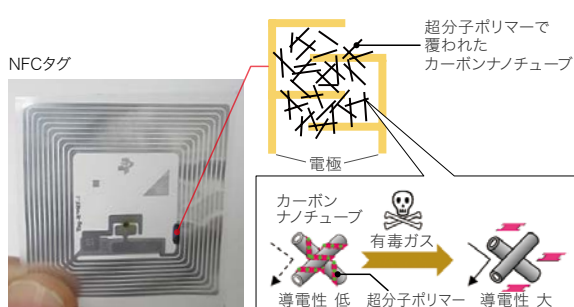
システムを構築することも原理的に可能です」と石原は言う。

センサは使い捨てになるが、カーボンナノチューブを超分子ポリマーで覆った材料1gで400万個のセンサが作成できるので、安価に大量に供給できる。NFCタグも一枚数十円と安い。「有毒ガスを扱う工場や駅など人が集まる場所の壁に取り付けたり、火山に行くときやテロに備えて持ち歩いたりしてもらうことで、安全・安心な社会の実現に貢献できればうれしいですね」

有毒ガスには、一酸化炭素や硫化水素など求核性の化学物質もあり、求電子性の化学物質とは逆の性質を有している。現在は、求核性の有毒ガスにさらされると結合が切れる超分子ポリマーを開発しており、求電子性と求核性の有毒ガスを同時に検知できれば、大部分の有毒ガスをカバーできるという。「今後、濃度や被爆量を表示したり、スマートフォンの位置情報を利用して避難経路を提示するシステムをつくる構想もあります。2020年までに実用化したいですね」と石原は意気込む。

(文・鈴木志乃/フォトンクリエイト)

■NFCの電子回路に組み込んだ有毒ガスセンサ



世界トップの感度を記録！ アルコールセンサを革新する 六角錐形の 酸化亜鉛ナノ粒子を合成

齋藤紀子

機能性材料研究拠点
セラミックス表面・界面グループ 主任研究員



六角錐形の酸化亜鉛のナノ粒子——より安価で、より高感度のアルコール検知器の実現が期待される新しい材料だ。その合成に成功したのは、NIMS機能性材料研究拠点セラミックス表面・界面グループの齋藤紀子主任研究員である。新しいセンサ材料が生まれた背景と今後の展開を聞いた。

現在のアルコールセンサは、半導体式と電気化学式の2種類が主流だ。低濃度ガスの検知に優れた半導体式では、基板上に電極を配線し、その上に感ガス材料である酸化亜鉛半導体を塗布したものが使われている。感ガス材料がアルコール気体にさらされると、表面で還元反応が起こり、電気抵抗が低下する。この電気抵抗を測定することで、アルコールを検知している。「半導体式センサでは、感ガス材料として酸化スズ(SnO₂)が主に使われています。以前から、アルコールの検知には酸化亜鉛(ZnO)も適していると指摘されていましたが、感度の向上やガス選択性が課題となっていました。私は長年、発光材料としての酸化亜鉛の合成の研究をしていたことから、その延長でアルコールセンサに関わるようになりました」と、齋藤は説明する。

六角錐の結晶面が センサ感度向上に効果

これまで酸化亜鉛粉体の合成には気相法や溶液法などさまざまな手法が用いられてきた。その中で、齋藤は数種類の溶媒を用いるソルボサーマル法という溶液法を採用した。「溶媒を変えることによって多様な形状の粒子が合成で

きるのが利点です」と齋藤は説明する。

例えば、水だけの溶媒中で酸化亜鉛を合成すると六角柱粒子となるが、エチレングリコール90%と水10%の溶媒中で合成すると六角錐ナノ粒子が配向凝集した球状の粒子ができた。反応時間によっても形が大きく変化する。はじめは球状だったものが、反応時間がたつと球にひびが入り、その後くさび形の粒子に分裂した。「粒子の分裂によって、エタノールセンサ感度をもっと高くできるかもしれない。そう考えて攪拌しながら酸化亜鉛を合成する方法を試しました。すると、分散した六角錐ナノ粒子ができたのです。球状粒子を構成していた粒子がバラバラになったものようです」と齋藤は言う。「このナノ粒子のエタノールセンサ感度を測定したところ、目盛りが振り切れてしまうほど高かったです。50ppmのエタノールを含む空気中での電気抵抗が、エタノールがない場合に比べて1万分の1という値を示しました。これまでに報告されている酸化亜鉛を用いたセンサに比べて20倍もの高い感度を持っていたのです。これは、現在アルコールセンサ感度が最も高いとされる、プラチナを添加した酸化スズと同等でした」

合成された粒子の結晶面を詳しく調べると、これまでに報告のなかった結晶面を持つ

六角錐形であることが分かった。齋藤らは、この結晶面が高いセンサ感度の要因だと考えている。新規のアルコールセンサ材料として特許も出願済みだ。「六角錐形の酸化亜鉛ナノ粒子は、プラチナなど高価な元素を使っていないので、安価に大量に生産できることも大きな強みです。ぜひ実用化まで達成したいですね」

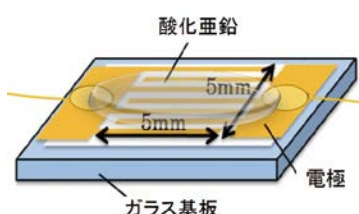
次のターゲットは 健康診断用のガスセンサ

健康診断用のガスセンサの開発も視野に入れている。例えば、糖尿病やがんの患者は、呼気に特定のガスが多く含まれていることが知られている。それらを簡単に検知できるセンサが実用化されれば、病気の早期発見や病態の把握にも役立つ。

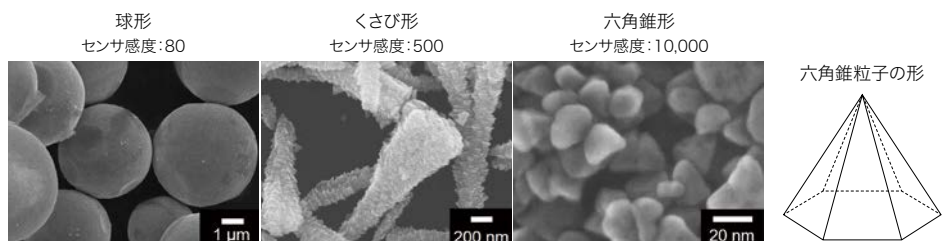
「溶液法の最大の魅力は、ビルドアップ式であること。特定の結晶面を発達させた形状を作ることができます」と齋藤は言う。「今回開発したソルボサーマル法によって合成された酸化亜鉛ナノ粒子は、さまざまなセンサ材料になる大きな可能性を秘めています」

(文・鈴木志乃/フotonクリエイト)

■アルコールセンサの構造



■さまざまな形状の酸化亜鉛ナノ粒子とアルコールセンサ感度(50ppm/350°C測定)



きみが思っているより
科学はもっとおもしろい



Trillion Sensors の時代

文・えとりあきお

イラスト・岡田 丈 (vision track)



私たち人間が生きて行けるのは、視覚・聴覚・嗅覚・味覚・触覚の五感によってまわりの環境を察知し、それに適応しているからです。

目・耳・鼻・舌・皮膚は私たちにとってとても大事なセンサです。このうち目・耳・鼻は一つまたは二つしかありませんが、皮膚は全身の表面に分布していて、どこでも感じることができます。舌にも表面に苦みや甘味などを感じる器官がついているので、生きものにはたくさんのセンサが備わっているともいえるでしょう。

ただ、人間の持っているセンサは、他の動物のそれと比べて、必ずしもすぐれているとはいえません。イヌの嗅覚はヒトの約100万倍～1億倍もするといわれています(だから麻薬捜査などにつかわれていますね)、コウモリは超音波を出してまわりの物体との距離を正確に測定しています。

こんな動物のセンサに学んで、高度なセン

サ開発が行なわれています。たとえば、昆虫の嗅覚に倣ったセンサもその一つ。

昆虫は、ある特定のニオイに関してはイヌに匹敵するすぐれた嗅覚をもっています。ガの仲間であるカイコガのオスは、メスのフェロモンを数キロメートルはなれた場所から嗅ぎつけ、その場所をめざして飛んで行くことができます。

昆虫の触角の中には受容体とよばれるセンサ部があります。そこに特定のニオイ物質がくっついて電流が流れると、脳に信号が送られ、ニオイ物質のもとに飛んで行けといった指令が送られます。昆虫の受容体の中には、1～数種類のニオイ物質にしか反応しないものがみつかっていて、これがセンサとして働きます。このセンサ部の細胞に遺伝子操作を加えると、別のニオイ物質に反応する細胞もつくりだすことができ、これをつかって麻薬や地雷の探知、災害現場での人の捜

索などに役立つセンサの開発がすすめられているのです。

こうしたセンサが私たちのまわりに無数に存在して、さまざまな情報を知らせてくれたら……。

情報革命によるIoT(Internet of Things:ものを情報化すること)の広がりによって、近い将来、センサが世の中のいたるところにばらまかれる時代がくるのではないかとわれています。

それがトリリオン・センサ(Trillion Sensors)の時代です。

トリリオンというのは1兆個のこと。つまり、1兆個のセンサが地球上にばらまかれている状態をトリリオン・センサ社会といいます。これは現在つかわれている量の100倍にあたり、一人一人が150個のセンサをつかうことになります。

トリリオン・センサの構想は、4年ほど前にアメリカの実業家、ヤヌス・ブリゼックという人が、「毎年1兆個を上まわるセンサをつかって社会に膨大なセンサ・ネットワークをはりめぐらし、地球規模で社会問題を解決するために活用しよう」と提唱したのがはじまりです。センサから送られ、蓄積されたデータはビッグ・データとなり、AIやパソコンで解析することによって医療、エレクトロニクスなどあらゆる分野に活用されるといわれています。

2023年ごろには実現したいと考えられているこの構想ですが、そのためには、センサを大量かつ安価に製造する方法の開発がぜひとも必要で、各所で熱心な研究が行なわれています。

AIが人間の脳を超え、IoTが世の中にいきわたり、高機能のセンサが地球上にばらまかれる時代。そうしたすばらしい成果をどう活用して新しい世界をつくり上げて行くか。人間の知恵がいっそう問われる時代になるでしょう。

えとりあきお: 1934年生まれ。科学ジャーナリスト。東京大学教養学部卒業後、日本教育テレビ(現テレビ朝日)、テレビ東京でプロデューサー・ディレクターとして主に科学番組の制作に携わったのち、『日経サイエンス』編集長に。日経サイエンス取締役、三田出版株式会社専務取締役、東京大学先端科学技術研究センター客員教授、日本科学技術振興財団理事等を歴任。