

数字に見る 科学と未来 Vol.5



うちだ けん
内田 建

慶應義塾大学 理工学部
教授

1995年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。博士(工学)。
95年 東芝研究開発センター、2003年 米国スタンフォード大学研究員、08年 東京工業大学大学院理工学研究科准教授を経て、12年より現職。18年より東京大学大学院工学系研究科教授(兼任)。

1マイクロ秒で機能を切り替え 低消費エネルギーの 小型ガスセンサー

低消費エネルギーで駆動するガスセンサーをスマートフォンなどモバイル端末に搭載し、呼気による健康管理に利用しようと試みているのが、慶應義塾大学理工学部の内田建教授だ。ガスセンサーの電圧を制御して、検出する物質をたった1マイクロ秒で切り替え、異なる複数のガスを認識することに成功した。

すべき問題があるという。

「モバイルに搭載して健康管理に用いるには、ガス分子を精度良く認識できるだけでなく、省電力で動く小型センサーが必要です。そこで、10億分の1(ナノ)メートルのスケールで物質を自在に操るナノテクノロジーとLSI(集積回路)の製造技術を駆使することで、省エネルギー化、小型化、高性能化を一気に達成しようとしています」。

ナノスケール材料で エネルギー消費10億分の1

従来のガスセンサーは、化学反応を起こさせてガス分子の有無を検出する。そのためにはセンサー部分を約250度まで熱する必要があり、それが非常に大きなエネルギーを使う要因となっていた。この問題の解決につながったのがナノスケール材料だ。

金属などの伝導体に電流を流した時に、抵抗によって生じる熱エネルギーをジュール熱という。このジュール熱で自らを加熱するのがジュール自己加熱だ。

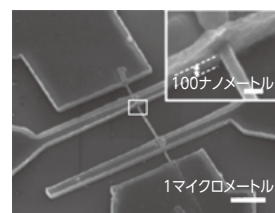
「一般に材料がナノスケールになると、熱伝導性が下がって熱容量も小さくなるので、ジュール自己加熱で十分に温まります。非常に短時間で高温になりますから、消費エネルギーを飛躍的に下

げることができるのです」と内田さん。

CRESTの研究メンバーでもある九州大学の柳田剛教授が中心となり開発した、数十ナノメートルのワイヤを使ったセンサーでは、従来のガスセンサーの約10億分の1のエネルギー消費量で化学反応を起こさせることに成功した(図1)。ただ、このセンサーはどんな分子でも酸化されるものなら認識するため、分子の種類まで特定することは難しかった。

グラフェンの温度を瞬時に調節 1つのセンサーに2つの機能

そこで、内田さんと田中貴久助教が同じジュール自己加熱の原理を使って開発したのが、呼気に含まれるわずかな水素を検出できるだけでなく、1マイクロ(100万分の1)秒の速さで水分検



サスペンデッドナノワイヤセンサー



透明基板
プラスチック基盤上におけるデバイス

■図1

ナノワイヤを使ったガスセンサー。酸化スズ製のナノワイヤを加熱することで、周囲のガスが酸化スズによって酸化され、ナノワイヤの電気伝導度に変化する。それによりガスの有無がわかる。



出に切り替えられるというセンサーだ。肉眼では捉えられない蚊の羽ばたきでさえ1秒間に800回程度と考えると、その速さがイメージできるだろうか。その狙いを内田さんはこう説明する。

「1種類の分子を1つのセンサーで検出する場合、認識したい分子種の数だけセンサーが必要になります。モバイル端末への応用を見据えると、1つのセンサーで複数の分子を認識したいと考えました。1つのセンサーで1回の呼気に含まれる複数成分を同時に検出することは難しいですが、超高速で検出対象を切り替えられれば、それに近いデータは得られます」。

着目したのは、瞬時に温度を切り替えられるというジュール自己加熱の特徴だ。化学反応には高温で起こりやすい反応と、低温で起こりやすい反応がある。従来のセンサーでは温めるための時間がかかるため、温度を一定にして使っていたが、瞬時に温度を切り替えられれば複数の温度でセンサーを使うことができる。

そう考えた内田さんは、グラフェンと呼ばれる薄いシート状の炭素を用いたセンサーの開発に着手した。グラフェン

は分子スケールの厚さしかないため、これを使ったデバイスは、微量な分子の吸着による表面の変化でも高感度で検出可能だ。一方、熱伝導率も高いので、熱を容易に逃がしてしまうという難点もあった。瞬時に温度を上げるには発生した熱をとどめる工夫が必要だ。

「周囲の物質に熱が逃げないように、2つの金電極間をグラフェンで橋渡ししました。さらに金電極表面に微細な凹凸を作り込み、金電極とグラフェンの接触面積を小さくすることで、グラフェンに瞬時に熱を集めることができました」(図2)。

水素の検出を担うのはグラフェンにまぶしたナノサイズのパラジウム触媒だ。100度以上に温度を上げると触媒活性が高まり、水素分子が分裂してパラジウムとグラフェンの界面でイオン化し、電気抵抗が変化することで検出できる(図3)。この時、水分子は蒸発してパラジウムから離れるため、呼気のように多くの水分が含まれる気体であっても、わずかに含まれる水素が検出できるのだ。一方、低い温度では水分子がくっつき電気抵抗変化を生じて水分を検出できる。

「電圧を変えるという単純な操作だけで一気に100度以上温度を上下させ、わずか1マイクロ秒ほどで機能を切り替えられます。センサーを小型化し複数を集積させることも重要ですが、1個のセンサーでも温度を高速で切り替えることで複数種類のガスを分離して検出できることがわかったので、新しい可能性が広がると期待しています」。

集積が生み出す新たな価値 世界を感じるLSIを目指す

このようなガスセンサーは、健康管理以外にも、大気中に含まれる汚染物質の検知などにも活用できる。食べ物の鮮度や傷み具合の検知、テロ対策など、応用の可能性は広がる。

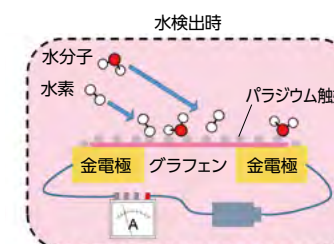
「LSIの研究を続ける中で培った信念は、『数は力なり。集積化することで新たな価値が生まれる』ということです。これまでガスセンサーは集積化されていませんでしたが、ナノ材料を使い、小型化、省エネルギー化を進めることで集積化が可能になります。それにより、今後どのような新たな価値を生み出せるか、私自身とてもワクワクしています」。

従来、LSIにできるのは計算と記憶だと考えられてきた。内田さんは、世界を感じるLSIを作りたいと夢を語る。入力に対し答えを返すだけではなく、LSIが外界とつながり情報を収集する未来。センサーの研究はその第一歩だ。



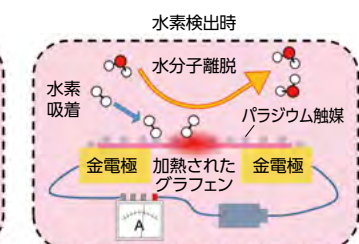
■図2

グラフェンを使ったセンサーの走査型電子顕微鏡写真。金電極間をグラフェンが橋渡しする構造になっている。



■図3

グラフェンの上には、パラジウム触媒のナノ粒子を載せている。低温では触媒としての活性がなくなるため、パラジウム周りに付いた酸素に水分が付きやすくなる。高温では吸着した水分が熱反応で離れるとともに、パラジウム触媒が活性化して付着した水素が水素イオンになる。グラフェンの抵抗値の変化から分子を検出する。ジュール自己加熱により、触媒の活性・不活性を制御して検出物質を切り替えている。



測定室での内田さんと田中さん。

【CREST・さがけ複合領域「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」報告会を開催】
本研究内容の紹介やデバイスのデモンストレーションに加え、多くの研究成果を紹介します。
日時：2019年1月30日(水)9:30～17:10 場所：東京大学駒場コンベンションホール(東京都目黒区)
URL：https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research/activity/1112063/poster_nanoeele3.pdf

