

あたりまえに  
なっている  
〈正しくはかる〉を  
支える人々と技術

日本の計量技術の最上位機関



釣竿から  
飛行機まで  
「炭素繊維」の  
開発プロセス

炭素繊維開発

# 登場も近い？ 夢のーT機器の 〈待機電力ゼロ〉の

## スピントロウクス技術



注目のエコ建材「調湿タイル」

# 呼吸するように湿度を 調整する建材の可能性



# 「ここにもあった産総研」の 発刊にあたって

---



「研究」といえば、白衣の研究者が試験管を振る姿や、物理学者が難しい数式を解いている姿を思い浮かべることでしょうか。産総研には、そのイメージ通りの研究者もいますが、それが単なる「研究」で終わってしまっているのは、産総研のミッションを果たしたことにはなりません。産総研が実践しているのは、「技術を社会へ」結びつける活動です。つまり、基礎研究や実用化研究で知り得た知見や成果を、企業に移転し、身近な社会生活の場までつなぐ「本格研究」を実施しています。

このたび発刊する『ここにもあった産総研』は、ご覧いただければわかりますように、単なる論文集ではありません。産総研が発信してきた研究成果が、どのように社会につながっているのか、研究開発の過程でどのような発見や苦労があったのか、その研究成果がどのような可能性を秘めていると考えているのか——。そのような産総研の魅力的な成果を、開発に携わった研究者や、今まさに研究開発をしている研究者に、直接、語ってもらうことで、わかりやすくお伝えしようとしたものです。

産総研の研究成果は、遠い将来の科学技術に関するものばかりではありません。身近なところで、すでに活用されているものや、もう少しで技術移転できるようになるものもあります。専門の研究者でない方にも、本書を通して産総研にご興味をもっていただき、産総研を身近に感じていただくことをねらいとしております。そして、これをきっかけに、実際に研究現場をのぞいていただき、皆さんと産総研の結びつきが生まれることを期待しております。

独立行政法人 産業技術総合研究所  
理事長 中鉢 良治



## 「産総研」とは

産業技術総合研究所（産総研）は、平成13年に発足した、わが国最大級の公的研究機関です。明治のころから日本の産業競争力の強化や資源の確保、計量計測の要として機能してきた経済産業省配下の15の国立研究所と計量教習所がひとつとなり、独立行政法人としてスタートしました。

産総研は「持続可能な社会の実現」を目指し、基礎研究から実用化研究まで一体かつ連続的に実行しています。現在は「21世紀型課題の解決」と「オープンイノベーションハブ機能の強化」という2つのミッションを掲げて、「豊かで環境にやさしい社会を実現するグリーン・テクノロジー」および「健康で安全な生活を実現するライフ・テクノロジー」の推進に取り組んでいます。

「オープンイノベーションハブ機能の強化」に関しては、このミッションを通じて、研究開発がイノベーションに直結するよう努めるとともに、産業界に対して「研究の場」を提供し、イノベーションの加速に産業界・学協会とともに貢献しています。世の中の情勢に対応した取り組みも推進し、平成25年度には福島再生可能エネルギー研究所を設立して国際的な研究開発・評価試験を行うなど、社会との結びつきを大切にしています。

また、はかりの基準・校正の基を扱う計量標準や、地下資源の調査や地表の状態を知る地質調査など、生活の基盤となる研究開発も産総研の大切な仕事です。

産総研では、科学技術に基づく「基礎研究」から、産業界に研究成果をつなげる「本格研究」までを実施しています。

これまでも、そして、これからも、「研究」の成果が「身近な生活」に活かされるよう、日々活動を行っています。

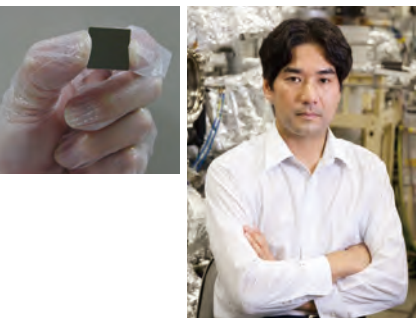
# ここにもあった 産総研

生活・社会を支える 変える 未来を創る

産総研ストーリーズ 2013年 No.1

## Contents 目次

こんなところに産総研!



### 電子工学と磁気工学を融合させたスピントロニクス技術 〈待機電力ゼロ〉の夢の IT機器の登場も近い? \_\_\_\_\_ 4

湯浅新治

「スピントロニクス」で、大容量・待機電力ゼロの不揮発性メモリ搭載、次世代PCを目指す。省エネ電子機器で社会に貢献。

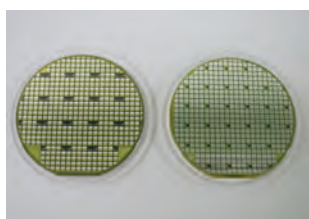


### 注目のエコ建材「調湿タイル」 呼吸するように湿度を調整する 建材の可能性 \_\_\_\_\_ 10

前田雅喜

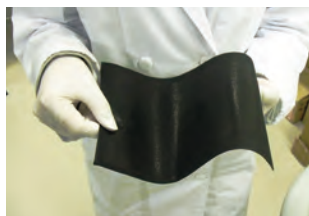
無電源で自律的に室内の湿度を快適に保つ調湿建材。エアコンをひかえめにして、家庭に、人に、優しい“かべ”。

未来のために産総研!



### 半導体シリコンカーバイド(SiC) 〈パワーエレクトロニクス〉の革新を 半導体SiCが可能にした \_\_\_\_\_ 16

電気なしには成り立たないこの社会。電力を有効活用できるSiCパワーデバイスで、無駄を少なく、賢くくらす。



### 単層カーボンナノチューブの量産技術の開発 夢の素材で期待される 〈21世紀の産業革命〉 \_\_\_\_\_ 18

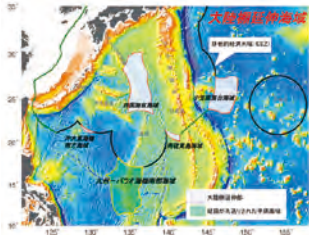
“すす”と同じ炭素だけど、形を少し変えて宝になった「カーボンナノチューブ」。軽くて強い夢の素材で未来を拓く。



### 少子高齢化社会を支える生活支援ロボット 〈新たなインフラ〉として普及が 期待される生活支援ロボット \_\_\_\_\_ 20

介護の負担減、家事の代行、健康維持・増進に役立つ生活支援ロボット。未来の技術を身近な技術へ。

## 今の暮らしに産総研!



### 日本の大陸棚が拡大

## 〈大陸棚の拡大〉で、未来社会に 貢献する海洋資源調査に弾み

22

科学の力で海底の地質を調査。そこには新しい「日本の大陸棚」があった。  
日本の天然資源に大きな期待を。



### 高所調査用ロボットによる福島第一原発の環境調査

## 人が近づけない極限環境での 調査にロボットが挑んだ

24

確実に出発点に戻れる高所調査用ロボットを開発。  
福島第一原発建屋内の状況を把握して、廃炉に貢献。

## くらしを支える産総研!

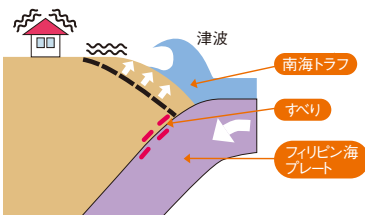


### 日本の計量技術の最上位機関

## あたりまえになっている 〈正しくはかる〉を支える人々と技術

26

安全・安心な生活の基本となる正確な計量を維持。  
いつでもどこでも、だれでも「同じ」正確さの計量を目指して。



### 南海トラフの巨大地震の観測網

## 巨大地震の予兆現象? 地中深くの〈ゆっくりすべり〉のゆらぎ

28

「ゆっくりすべり」の精密な観測データを蓄積・共有。  
安心社会実現のため、巨大地震の発生予測を目指す。

## これも産総研の成果なんです!



### 炭素繊維開発

## 釣竿から飛行機まで 「炭素繊維」の開発プロセス

30

60年前に産総研が製造技術を開発した炭素繊維。  
日本の産業界で大きく花開き、世界中で使われる素材に発展。

索引 | (私たちに身近なキーワード), QRコード 33

電子工学と磁気工学を融合させたスピントロニクス技術

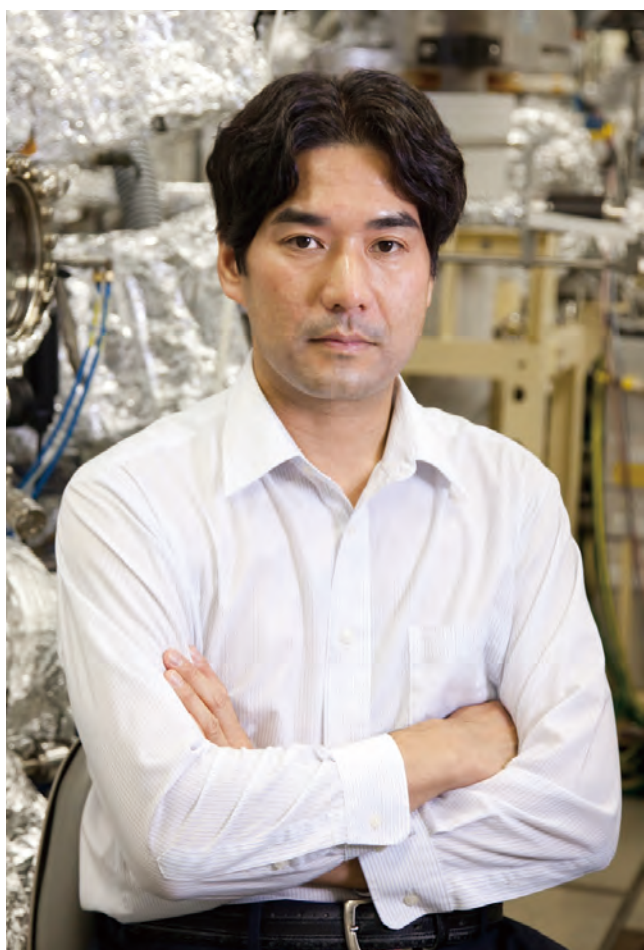
# 〈待機電力ゼロ〉の夢の IT機器の登場も近い?

世界中がほしがかる技術は産総研の基礎研究から生まれた!

私たちの**生活・社会**が  
こう変わる!



スピントロニクスから生まれた低消費電力型ハードディスクドライブ(HDD)ヘッドは、2007年に実用化されてパソコンの消費電力を大幅に削減した。今後、この技術をベースにした、より高機能な不揮発性メモリが実用化されれば、大容量でありながら待機電力を全く必要としない「ノーマリーオフ・コンピュータ」の実現に近づくことになる。電子機器の省エネルギー化が今にも増して進み、私たちが充電などの手間から解放されると同時に、地球環境問題の解決に大きく貢献できる。



ナノスピントロニクス研究センター 研究センター長

湯浅新治

YUASA SHINJI

## 世界シェア100%の 画期的なHDD磁気ヘッド

パソコンや携帯電話などの電子機器を動かす、現代の私たちの生活に非常に身近な技術が「エレクトロニクス(電子工学)」だ。しかし問題は、電力消費量が多いこと。パソコンをはじめとするIT機器の使用は今後も増え続け、それに伴って電力の消費量も増大していくことは間違いない。そのため、地球温暖化が世界的な問題となっている昨今、電子機器の消費電力量を抑えていくことは非常に重要な課題となっている。

たとえばパソコンの場合、電力消費量が大きくなる原因は2つある。まず、ハードディスクドライブ(HDD)自体の消費電力が多いこと、そしてメモリが揮発性であることだ。揮発性というのは、電源をオフにするとデー



タが保持できずに消えてしまうということ。つまり、使用中はつねに電源をオンにしていなくてはならないため、多くの電力を必要とするのだ。

「情報処理のクラウド化が進み、多くの人々がデータをインターネット上のデータセンターに保存するようになった結果、大量のHDDを備えるデータセンターの電力消費量も大幅に増えています。先進国の場合、総電力消費量のうち2%がデータセンターによって消費されているといわれており、HDDを低消費電力化するだけで、かなりの省エネ化が実現できるのです」

そう語るのは、ナノスピントロニクス研究センターの研究センター長を務める湯浅新治だ。湯浅はスピントロニクス研究のトップランナーとして、世界の注目を浴びている。

スピントロニクスは、電子のもつ性質のうち電荷だけを利用するエレクトロニクスと異なり、電荷と磁気の2つの性質を活用する、未来形エレクトロニクスとでもいえるべき技術で、HDDの大容量化や省電力化だけではなく、不揮発性のメモリなどにも貢献できる応用範囲の広さが特徴のひとつだ。その成果を活用した低消費電力のHDD用磁気ヘッド<sup>\*1</sup>は、じつはすでに実用化されており、その世界シェアは、なんと100%。現在つくられている全てのHDDに搭載されているのだ。

メモリについても、電源を切ってもデータが保てる不揮発性メモリ（MRAM）が実用化されているが、まだ性能を向上させる余地はたくさんある。こちらについても、現在、より高機能な第2世代の不揮発性メモリ（STT-MRAM）の開発が進められている。

## エレクトロニクスに 磁気の技術を融合

ここで改めてスピントロニクスについて説明しておく。

電子は電荷と磁気という2つの性質をもつが、それぞれの研究は、電荷を扱う「電子工学」と、磁気（電子スピン）を扱う「磁気工学」の2つの分野に分かれて発展してきた。

電子工学の成果のひとつにLSI（大規模集積回路）があるが、これは、計算は得意だが揮発性という欠点をもつ。一方、磁気工学の磁気記録の技術はHDDに応用されているが、こちらは計算は苦手だが不揮発性ができるという利点をもつ。それであれば、これらの両方の性質を活用することで、計算が速く省電力性にも優れた新し

## 目で見てわかる 用語解説

### スピントロニクス

固体中の電子の電荷と磁気（スピン）の両方を利用する研究分野。これを応用した代表的な素子として、ハードディスクドライブ（HDD）磁気ヘッドや磁気ランダムアクセスメモリ（MRAM）がある。



いデバイスができるのではないかと。そこで始まったのが、それら2分野を融合させて新しい高機能のデバイスを開発する「スピントロニクス」なのである。

スピントロニクスにおいて最も重要なのが、「磁気抵抗効果<sup>\*2</sup>」だ。これは磁気の変化によって強磁性<sup>\*3</sup>の薄膜に流れる電流が変化し、抵抗値が変化する現象のことだが、現象自体の発見は古く、1857年、イギリスのケルビン卿による「AMR効果」の発見にさかのぼる。

磁気抵抗効果の歴史は、スピントロニクスの歴史そのものともいえる。少々、これまでの技術の変遷をたどってみたい。

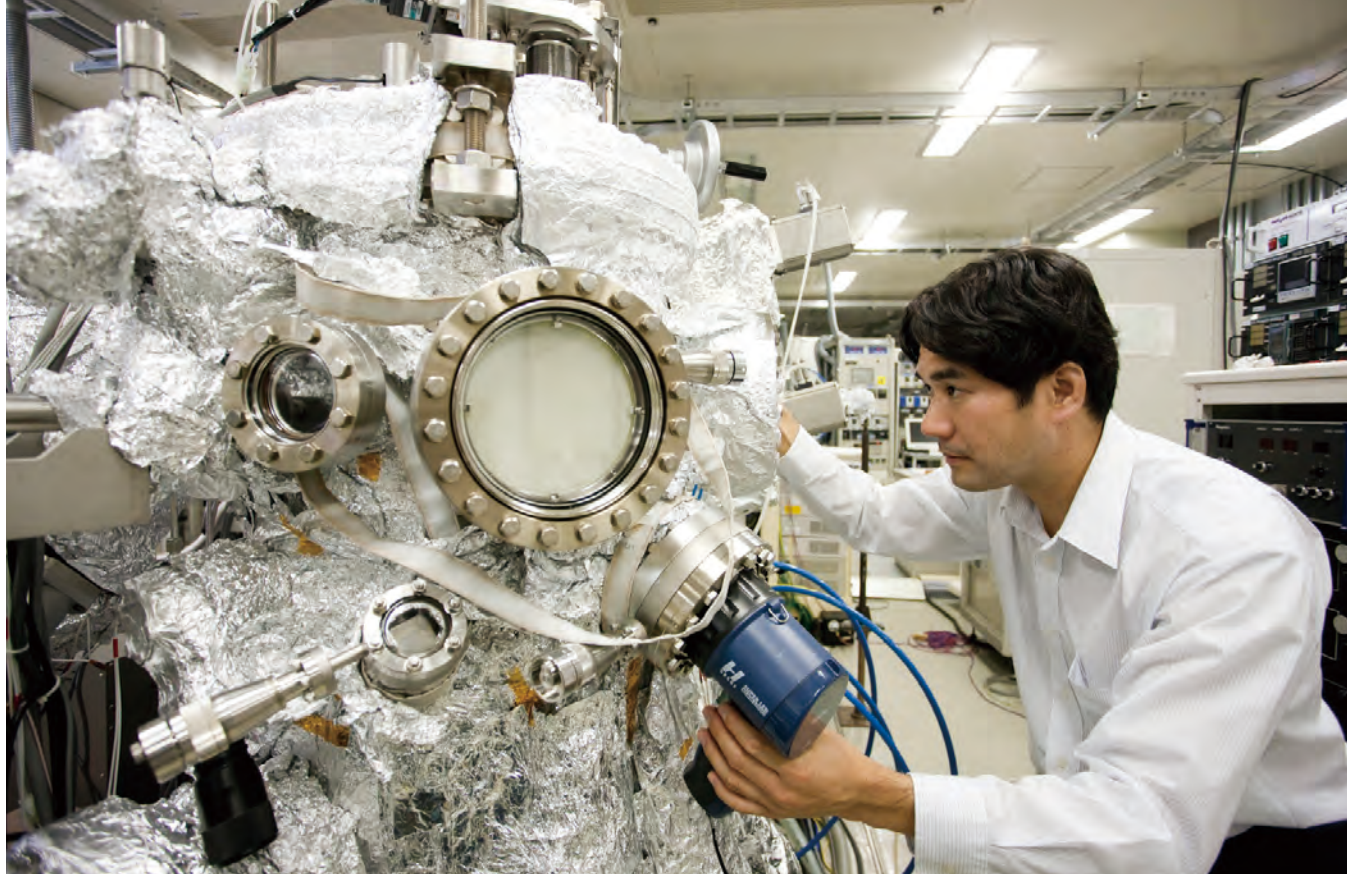
19世紀のケルビン卿の発見は、実は130年もの間、使われてこなかった。AMR効果の変化率（MR比<sup>\*4</sup>）は、室温でわずか1～2%にすぎなかったからだ。加えた磁気

\*1 **磁気ヘッド**：物質を磁化してデータを書き込んだり、磁界の変化を用いてデータを読み出したりする、HDDなどの記憶装置に組み込まれる装置のこと。

\*2 **磁気抵抗効果**：外部の磁界によって電気抵抗が変化する現象のこと。

\*3 **強磁性**：磁石に引き寄せられる性質のこと。この性質をもった物質を「強磁性体」という。ある大きさをもった強磁性体には、NS極の向きが一方にそろった「磁区」と呼ばれる領域が複数存在することが多く、HDDでは、この磁区が情報の記録に用いられている。

\*4 **MR比**：磁気抵抗効果の大きさを表す値で、2つの磁化状態での抵抗の差を、平行状態での抵抗値で割ったもの。



▲2003年に初めて酸化マグネシウムの薄膜を製造した実験装置は、いまだ現役だ。装置に巻きつけたアルミ箔は、装置を200℃に加熱して真空状態をつくるときに焼きムラをつくらぬ工夫だという。

エネルギーに対してほとんど変化しないのでは、応用するのは難しい。

その流れを変えたのが、フランスのフェール、ドイツのグリェンベルグによる「GMR効果（巨大磁気抵抗効果）<sup>\*5</sup>」の発見だ（1988年）。GMR効果のMR比は5～15%と、応用が十分に可能な数値である。MR比が高まるということは、磁気を読み取る感度が高まるということであり、HDDの情報を読み取る磁気ヘッドに応用すれば、よりHDDの記憶密度を高めることができる。各国でこの現象を利用したデバイス開発が進められ、1997年に大きく記録密度を増大させたGMRヘッドとして製品化された。フェールとグリェンベルグは、この発見で2007年にノーベル物理学賞を受賞している。

さらに1995年、東北大学の宮崎照宣教授とMITのムーデラ博士が、それぞれ、磁気トンネル接合素子（MTJ素子）<sup>\*6</sup>の絶縁体層に酸化アルミニウムのアモルファス<sup>\*7</sup>を利用することで、室温で20～70%という高いMR比が得られることを発見（TMR効果／トンネル磁気抵抗効果）。この画期的な発見は記録素子のさらなる微細化を実現させ、2004年、超高記録密度のHDD磁気ヘッド（TMRヘッド）として実用化された。HDDの記録密度

が高まれば、結果として省電力化につながり、省エネという点でも性能は大きく向上した。

そしてこの発見は、世界で初めての不揮発性メモリ（MRAM）の実現にもつながった。

## 個人研究から生まれた 世界最高レベルの成果

1996年に電子技術総合研究所（現・産総研）に入所した湯浅は、酸化アルミニウム素子を用いたHDDの磁気ヘッドや、第2世代の不揮発性メモリの研究開発に取り組んでいた。しかし、酸化アルミニウムのアモルファスを用いる方法にはすぐに限界が来る、と感じていたという。

「当時、社会のIT化が急速に進み、より大きなMR比、それこそMR比が100%を大きく超える材料が求められていました。私は、その効果を従来の方法の延長線上から得るのは無理ではないか、アモルファスよりむしろ結晶を利用したほうがよいのではないかと考えるようになりました」

そこで2002年、湯浅はJST（独立行政法人科学技術振

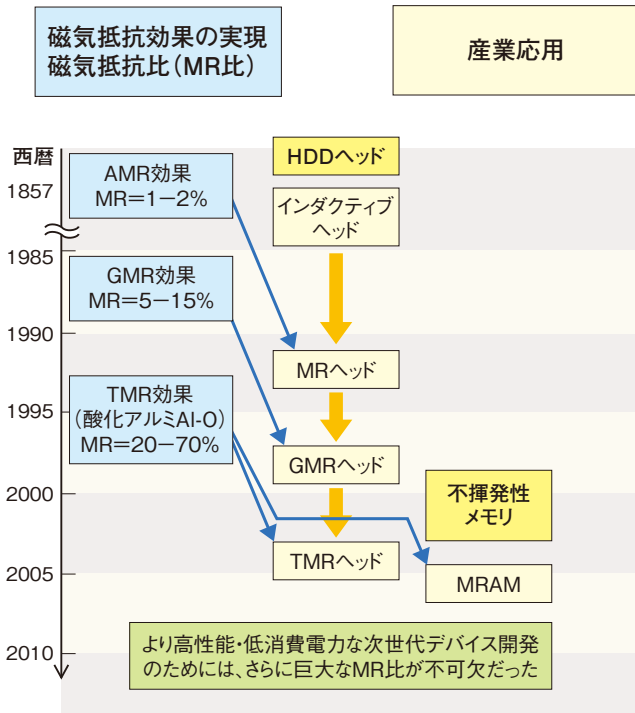
\*5 **GMR効果（巨大磁気抵抗効果）**：強磁性体と貴金属からなる多層膜に電流を流すと、各強磁性層でスピンの向きが平行に並んでいるときは電気抵抗が小さくなり、反平行に並んでいるときは電気抵抗が大きくなる現象のこと。

\*6 **磁気トンネル接合素子（MTJ素子）**：トンネル磁気効果を生み出す素子で、2層の強磁性の金属層で厚さ数ナノメートル（nm、nは $10^{-9}$ ）以下の絶縁層を挟んだ構造のもの。

\*7 **アモルファス**：物質を構成する原子の配列に規則性のない、結晶構造でないもの。



## 磁気抵抗効果の発見と産業応用の歴史



興機構)の「さきがけ<sup>8</sup>」というプログラムに応募する。「室温で150%のMR比を実現する」と、目標を明確にした出口志向の提案書が評価され、見事、研究予算を獲得することができた。

「さきがけ」は個人研究を対象とした事業だ。湯浅は、巨大なMR比を実現するためにいくつかの手法を検討し、一人でコツコツと研究を続けた。そのうちのひとつが、酸化マグネシウムの結晶体を用いる方法だった。

「この方法は2001年に欧米の研究者によって理論的に予測されていましたが、実験的にはうまくいかずに諦められていました。しかし私は可能性を感じ、酸化マグネシウムの結晶体に賭けてみることにしたのです」

「さきがけ」の1年目は製膜装置の製作に費やし、成果を出せずに終わった。装置が完成したのは、2003年も終わりに近づいた頃のことだ。

「やっとできたというので大急ぎで実験を始めたところ、最初に作製した素子で、いきなり室温でのMR比88%という、当時の世界最高性能が得られました。3回試みただけで180%に到達。あまりにあっけなく成功したので

\*8 さきがけ：科学技術振興機構が実施している、国が定めた戦略目標の達成に向けた目的志向型の基礎研究を推進するプログラム。未来のイノベーションの芽を育む個人型研究が対象。

驚きました」

同時に湯浅は、酸化マグネシウムという素材の“素性のよさ”を直感したという。実際、研究が進んだ現在のMR比は600%にまで達している。

## 企業との共同開発で“死の谷”をあっさりと越えた

湯浅の基礎研究は大成功をおさめた。が、そこでは小さな特殊基板に、1日1枚の素子を作製するのがやっとだった。産業に应用するには、量産技術の開発という大きな壁があった。

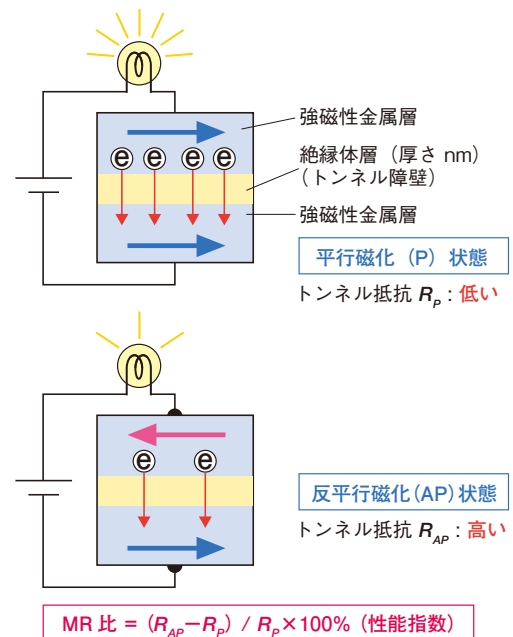
「酸化マグネシウムを用いた素子は面内4回対称の結晶構造をもっていますが、HDDヘッドや不揮発メモリに应用するには、面内3回対称の下部構造の上に素子を成長させなくてはなりません。それは常識的に不可能とされていました」

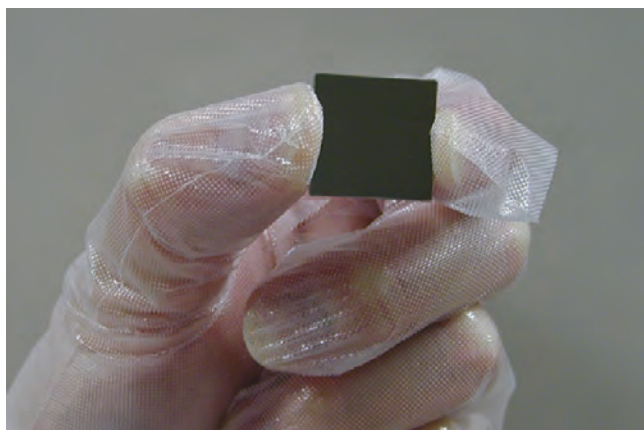
これは、たとえば、三角の格子状に並べたビー玉の上

## 目で見てわかる 用語解説

### TMR効果／トンネル磁気抵抗効果

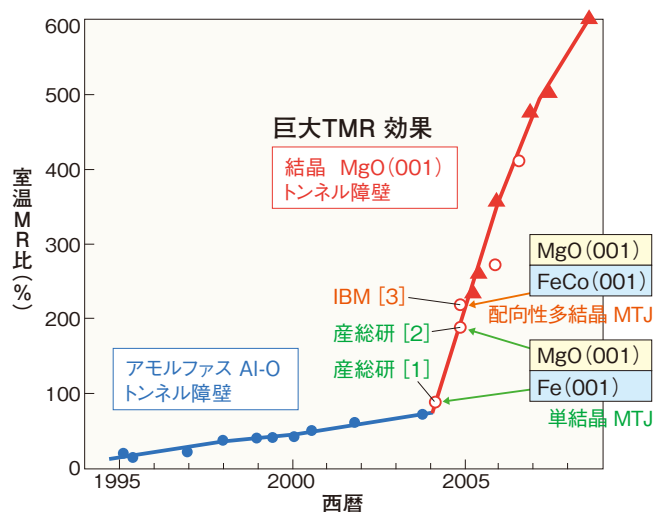
磁気トンネル接合素子の両端に電圧を加えると、絶縁層を通して微小なトンネル電流が流れ、磁界によって抵抗値(流れやすさ)が変化する現象をいう。一般的には、磁化が平行に配置されていると低抵抗、反平行の配置で高抵抗となる。





▲酸化マグネシウムを用いた素子。小さな特殊基板に1日1枚程度、作製できた。

### 巨大化するトンネル磁気効果



[1] Yuasa, Jpn. J. Appl. Phys. 43, L558 (2004). [2] Yuasa, Nature Mater. 3, 868 (2004). [3] Parkin, Nature Mater. 3, 862 (2004).

### 開発ヒストリー

**2001年** 酸化マグネシウムの結晶を用いた素子(MgO-MTJ 素子)の巨大 TMR 効果の理論予測がなされる(米・英)。(欧米の主要研究機関が実現を目指す、全て失敗)

**2003年** 産総研が巨大 TMR 効果を実現

**2004年** キヤノンアネルバと共同開発を開始

**2005年** MgO-MTJ 素子の量産技術を開発



NEDO ナノテク・チャレンジ・プロジェクトを開始

**2006年** NEDO スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクトを開始

**2007年** MgO-TMR ヘッドが製品化される(富士通・産総研・キヤノンアネルバ)



**2009~2010年** 東芝・産総研により大容量 MRAM (磁気対抗メモリ) の基板技術を開発

**2014年** 東芝から大容量 MRAM のサンプル出荷開始予定

に、別のビー玉を四角い格子状に積み上げなくてはならない、というようなことだ。しかし、常識外だからといって「できない」といわないのが研究者だ。

湯浅はHDD磁気ヘッドの部品製造装置メーカーであるキヤノンアネルバ(当時・アネルバ)と量産化を目指して共同開発を始め、その“常識外”を可能とする下部構造を開発してほしいと依頼した。

「すると、むしろ現行の下部構造の上に結晶させる方法を開発しては、と逆提案されたのです。私はそれに挑戦することにしました」

開発の過程でも幸運がいくつも重なり、ほどなく湯浅は画期的な解決策を発見する。強磁性電極の標準材料であるコバルトと鉄の合金(CoFe合金)にホウ素(B)を加えるとアモルファスCoFeB合金の薄膜ができるが、その上に、酸化マグネシウムの結晶層が成長することを見出したのだ。先のビー玉の例でいうと、三角の格子状に並べたビー玉の上に、軟らかい粘土の層を一層載せれば、その上には四角い格子状に積んでいくことができる、ということだ。

「このとき、対称性の異なる下地の上に素子を成長させるという難題が解決しただけではなく、キヤノンアネルバの製造装置を用いて量産することにも成功しました。基礎研究が、いきなり量産技術に大化けしたのです」

世界中がほしがっていた技術が誕生した瞬間だった。この技術の産業界への技術移転は、キヤノンアネルバ経由でスムーズに進み、早くも2007年には、それまでの倍以上の記録密度をもつHDD磁気ヘッドとして実用化

された。先述したように、現在の世界シェアは100%である。

「基礎研究と実用化の間には、越えるのが困難な“死の谷”と呼ばれる過程がありますが、この技術はそれをあっさりと越えることができました。しかも、HDDは年間3兆円、磁気ヘッドだけでも5000億円という巨大な市場規模をもっており、非常にインパクトの大きい成果だといえるでしょう」

## 成功の秘訣は つねに応用を意識すること

冒頭でも述べたように、スピントロニクスには、HDD磁気ヘッドの高記録密度化だけでなく、より高性能な第2世代の不揮発性メモリ（STT-MRAM）の開発が期待されている。コンピュータの場合、私たちがキーを押すとき以外はずっと入力待ちの状態にあるので、電源を切ってもデータが保てる不揮発性メモリに置き換えられれば、キーを押す一瞬だけ電源をオンにし、入力待ちの時間はオフにしておくことができる。

「そのような待機電力が不要な『ノーマリーオフ・コンピュータ』が実用化されれば、一般のパソコンの場合、約80%もの省電力化が期待できるのです」

2006年には、STT-MRAMの実用化を目指して、産総研と東芝らによる「NEDOスピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」がスタート。産総研オリジナルの酸化マグネシウム障壁技術と、東芝が発案した垂直磁化方式を融合させた「垂直磁化MTJ素子」が開発された。これは、「スピントルク書き込み<sup>9,10</sup>」という新しい書き込み技術を採用することで、メモリへの書き込み効率を上げ、ギガビット（Gbit, Gは $10^9$ ）級の大容量化を実現したものだ。2014年にはサンプル出荷が始まり、市場に出るのも時間の問題だと思われる。

短期間にこのように次々と大きな成果を出し続けている秘訣は何なのだろうか。

「シーズとニーズの両方に興味があり、基礎研究と応用研究のどちらにも敬意を抱いていることだと思います。ニーズを理解しないまま行うシーズの研究はあまり効率

がよくありません。しかし、何が必要かがわかっているれば目標を具体的に設定できますし、そのために必要な技術も把握しやすく、すべきことが明確にできますから」

基礎研究に取り組んでいた学生時代も、湯浅はつねに応用に結びつけることを意識してきた。現在も、応用研究で足りない要素が見つかり、既存の研究を組み合わせてもできないとなれば、不足分を満たす研究自体に自分で取り組んでしまうという。基礎研究を応用に結びつけることで、社会の役に立ちたい——。スピントロニクス研究のトップランナーを支えているのは、そんな、シンプルで力強い思いであった。

## スピントロニクスの将来像

私の専門とする固体物理の分野には、宇宙の研究やロボットの開発のように、誰もが純粋に夢を抱けるようなわかりやすさはありません。しかし、その成果を応用に用いることで、一般の人々に夢を与えることはできていると思っています。

2018年頃には、次世代の大容量不揮発性メモリ（STT-MRAM）も実用化されると見込まれています。これまでのメモリがSTT-MRAMに置き換えられれば、ついに、待機電力を必要としない夢のパソコンが実現できることとなります。そうなると、将来的にモバイル機器は、1カ月間は充電しなくてすむようになるでしょう。それだけ電子機器の省電力化が進められる、地球環境やエネルギーの問題に貢献できる技術なのです。

ほかにもスピントロニクスは、磁気センサ、発振機、スピンダイス（暗号用の乱数発生器）などのさまざまな用途に応用が可能で、私たちの生活は、これによって、より快適で、安全で、環境負荷の少ないものになると思われます。スピントロニクスによってそのような未来を創っていくことが、私の夢でもあるのです。



\*9 **スピントルク**：磁気をもった物質（強磁性体）に電流を流すと、電荷とともに電子のスピンが流れ、電子のスピンから強磁性体のスピンへ、「スピン角運動量」というものが受け渡される。スピントルクとは、その結果、強磁性体のスピンに生じる回転力のことをいう。

\*10 **スピントルク書き込み**：電流を担う電子のスピンをMTJ素子の記憶層に直接作用させることで記憶層の磁化を反転させ、情報の書き込みを行う方式。

## 注目のエコ建材「調湿タイル」

# 呼吸するように湿度を調整する建材の可能性

日本家屋における伝統の知恵を産総研の技術で再現!

(私たちの**生活・社会**が  
こう変わる!)



住宅用建材として調湿材料を使うことが一般的になったら、室内はつねに快適な湿度に保たれる。夏であれば室内の空気がサラッとして、エアコンの使用をひかえめにできるし、冬でも適度な潤いが保てて健康や美容にもよさそうだ。どの住宅にも使われるようになれば、非常に大きな省エネルギー効果が期待できる。



中部センター  
サステナブルマテリアル研究部門 上級主任研究員

**前田雅喜**

MAEDA MASAKI

## 電気を使わずに 快適な空間をつくりたい

木造のお寺のお堂や、土壁の土蔵の中に入ると、夏でもひんやりと感じる——そんな体験をした人は少なくないだろう。住まいをはじめとする建築は、本来その地域の風土に合わせて、過ぎしやすいよう、あるいはモノの保存に適するようにつくられてきた。湿度が高い日本では、たとえば、木造で風通しをよくしたり、土の壁で日差しを遮断したりして、蒸し暑い夏でも涼しく過ごせる工夫を施してきた。

しかし、現在はほとんどが気密性の高い、近代的な住宅で占められている。家庭でもオフィスでも、私たちはアルミサッシなどで空間を密閉し、エアコンで温度や湿度をコントロールしながらくらししている。

ここ20年ほど大きな問題となっている地球温暖化に加え、2011年の東日本大震災に伴う原発事故の発生以来、省エネや節電は社会の重要な課題となっている。とはいえ、一度手にした快適さを手放すのはなかなか難しい。



快適さと省エネの折り合いをどうつけるのか、迷いながらエアコンを使っている人も多いのではないだろうか。

「では、電気を使わずに、室内を快適な湿度に保つことができたかどうか?」

産総研中部センターの前田雅喜は、そう問いかける。空間内の湿度が15%下がれば体感温度は1℃下がるといわれる。電力を消費せずに湿度の調整ができれば、エアコンを使用しない時間も増やせるし、使用時には設定温度を高めにしても快適さをキープできるわけだ。

「1994年から、多孔質セラミックス\*1を用いた調湿材料の研究開発に取り組んできました。電気を使わずに室内を快適な湿度に保つ機能性の高い素材で、調湿タイル、調湿壁といった建材に応用することを想定したものです。昨今の猛暑では、エアコンを使わなかったために熱中症で倒れる方も跡を絶ちませんが、調湿建材が普及し、室内の湿度が適度に保たれることが一般的になれば、そのような悲劇も減らせると考えています」

前田らの研究をもとにして、調湿建材は1998年に大手生活設備メーカーINAX（現・LIXIL）から製品化され、省エネ志向、健康志向を追い風に、現在まで順調に売り上げを伸ばしている。

そして、数ある産総研の技術の中で、この7年間、特許収入ナンバーワンの座に輝き続けているのが、この調湿建材に関する特許なのである。

## 目指すは「土蔵の土壁」 風土に合った伝統の知恵

多孔質セラミックスを用いた調湿建材の研究開発が始まったのは、1992年のこと。新しい機能性建材の開発に取り組んでいたINAXから相談があったのがきっかけだ。当時は地球温暖化に対する危機感の高まりから一般の人々にもエコロジーの意識が浸透し始め、新しい価値観が生まれ始めていた時代だ。電気を使わずに快適さ

### 産業総合技術研究所 中部センター



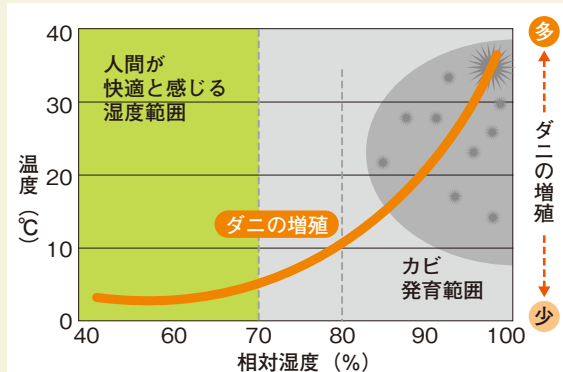
◀1952(昭和27)年、機械試験所名古屋支所、東京工業試験所名古屋支所、京都にあった陶磁器試験所を統合し、名古屋工業技術試験所として発足。陶磁器試験所が現在のサステナブルマテリアル研究部門の基礎になっている。

## 目で見てわかる 用語解説

### 快適な湿度

人間が快適に生活できる湿度は、相対湿度で50～60%といわれる。温度20℃～30℃で湿度が60%以上になるとダニが、湿度が80%を超えるとカビが発生しやすくなる。また、湿度が40%以下になると肌や粘膜が乾燥してくる。美容に影響が出るだけではなく、乾燥すると粘膜が弱ってウイルスに感染しやすくなるなど、健康面でも影響が出やすくなる。

### ●カビ・ダニの繁殖と湿度



資料提供：LIXIL

を維持できる建材・調湿タイルは、そのような時代の新製品として魅力があると考えられた。

歴史的には、日本で省エネ意識が高まったのは、このときが初めてではない。1970年代に起きた石油ショックにより、国を挙げて省エネへの取り組みが進められ、住宅は、すきま風が入るような密閉性の低い木造家屋から、気密性や断熱性に優れたアルミサッシとコンクリートの家に切り替わっていった。近代的な住宅になり省エネ効果は大いに高まったが、次第に別の問題も浮上し始めた。

「気密性が高まると、調理や風呂などによって出た水蒸気の逃げ場がなくなり、窓や壁に結露ができやすくなる。その結果、カビやダニが発生しやすくなりました。湿気で建物が傷みやすくなっただけでなく、アレルギーなど、健康への影響が問題になり始めたのです」

当時、前田の上司だったセラミックス応用部原料技術課長の芝崎靖雄は、これらの問題を解決する方法は伝統的な日本家屋の工法や材料の中にあると考え、伝統技術を見直していた。ちょうどその頃、関係者らは、江戸時

\*1 多孔質セラミックス：内部にたくさんの細孔をもつセラミックス(陶器、磁器といった粘土などを焼成してつくる物質)のこと。絶縁性や耐熱性に優れ、吸着材や断熱材などに用いられる。吸着量や断熱性は細孔の大きさや形状によって変化する。



▲ナノ多孔質セラミックスの吸湿性を試験する自動測定装置。こうした装置がないと、試験だけで2〜3カ月かかることもある。

代以前に建てられた土蔵が解体されるという情報を耳にする。そして、解体の際に、貴重な土壁のサンプルを入手することができた。

「土蔵は断熱性が高く、調湿性にも優れています。その理由を知るため、10数cmもの厚さの土壁の構造を調べたところ、壁は数層の多層構造になっていることがわかりました」

表層と中層のメカニズムはそれぞれ異なり、それが空気中の湿気を取り込む吸湿性や、内部に湿気をためておく蓄湿性の高さにつながっていた。つまり、それぞれの層のもつ大きさの異なる細かな穴（細孔）が、空気中の水蒸気をとらえ、内部に蓄え、乾燥したら放湿していたことがあきらかになったのだ。

「土壁はまさに、呼吸するように湿度の調節をしていました。失われかけていた古来の知恵が救われた瞬間でした」と前田は笑顔を見せる。

## 呼吸する壁をつくる 材料を探せ!

土壁のメカニズムは解明できた。次の課題は、それを

どう現代の技術で再現するかということだ。再現といっても、もちろん土壁自体をつくるわけではなく、それ自体が呼吸をするようにして湿度を調節できる、全く新しいセラミックスを開発するということだ。

当時も湿度調整ができる建材は存在していたが、文化財の収蔵庫など、用途はごく限られたものだった。文化財の収蔵庫なら扉の開閉が少ない閉鎖された空間なので、長いスパンで水蒸気の変動を抑えることを考えればよい。しかし、新しく取り組もうとしたのは、それとは条件の全く異なる一般住宅用だ。

「住宅の場合、1日に何度も扉が開け閉めされ、室内の水蒸気量は短い周期で変わっていきます。お湯を沸かす、調理をする、それだけで湿度はぐっと上がりますから。そのように数分から数時間という中で湿度を調整していくには、どのような素材を用いればよいのか、まずはそれを探ることからスタートしました」

前田らは、天然の粘土系素材を用いる方向を検討した。細孔がある特定の大きさのときに水蒸気を吸い込み、同時に、繊維が水分を吸い上げていくように、水蒸気を移動させて蓄えられる素材は何か。たとえば、ゼオライト<sup>\*2</sup>を用いた場合は、細孔が小さいためにすぐに水分が飽

\*2 **ゼオライト**：1ナノメートル程度の細孔が規則的に並んだ代表的な多孔質結晶。多くはケイ素、アルミニウム、酸素もしくはリンなどが結合することで細孔構造ができる。分離・吸着剤、形状選択性固体触媒、イオン交換剤、クロマトグラフィー充填剤、化学反応場、調湿剤、建築材料などと、利用範囲はきわめて広範囲にわたる。

\*3 **珪藻土**：植物性プランクトンの一種、珪藻の殻が堆積して化石化した多孔質の物質で、細孔による調湿作用や脱臭作用をもつことから、現在では建材として広く利用されている。

和してしまう。逆に、珪藻土<sup>\*3</sup>は少しばかり細孔が大きすぎるため、湿度が高くなると水蒸気を吸蔵しにくく、結露の防止には有効だが、快適な湿度を維持する素材としては十分ではなかった。細孔の容積が大きく、十分に水蒸気を吸蔵できる一方で、すぐに放湿せずに水分をためておける素材はいったい何だろうか。

「私たちが素材に求めていたのは、まず、人が快適と考える50~60%程度の湿度を自律的に維持できること。そして、短いスパンでの水蒸気量の変化にすぐに対応できるということです。また、それらのバランスを満たす素材であっても、商品化が前提だったので、コストが高つくものは除外して考えなくてはいけませんでした」

## 水蒸気凝縮現象に注目して 湿気を大量に吸う素材を発見

行き着いたのは、火山灰土壌が風化してできたアロフェン<sup>\*4</sup>という天然素材だった。1975年頃、有毒な揮発性有機化合物（VOC）の吸着剤を開発する際にアロフェンを用いた実績もあり、その特性は十分に把握していた。しかもアロフェンは、園芸用の鹿沼土に多く含まれているながら、植物の根腐れを起こすというので捨てられていた産業廃棄物だ。そのため、安価に安定的に入手できる点も評価された。

「もともとアロフェンは、人工粘土の合成<sup>\*5</sup>を研究していたときに用いていた素材でした。その研究過程で、アロフェンの5ナノメートル以下の細孔が水蒸気を凝縮すること、珪藻土などに比べてアロフェンの水蒸気の吸蔵性が高いこともわかっていました。それらのことから、アロフェンを低温で焼いたときに残るナノ細孔を活用することで、調湿性の高い素材ができると考えられたのです」

1970年代からのいくつかの研究成果がひとつのアイデアに結びつき、INAXとの新素材の共同開発は一気に具体的なものになっていった。なお、製品化に至るまでの現実的な課題を具体的にひとつずつクリアしていったのは、メーカーであるINAXであり、産総研（当時、名古屋工業技術試験所）は技術指導という立場で研究にか

かわった。

## 吸湿性と強度を両立させるには？ 試行錯誤の日々

製品化までの道のりにおいて、INAXはどのような困難にぶつかったのだろうか。前田はこう話す。

「セラミックスは焼き上げて完成になりますが、焼くと収縮して細孔構造がなくなります。強度を上げるためには高温で焼き締めて緻密化するとよいわけですが、そうするとナノ細孔が少なくなるので、水蒸気を吸う量が減ってしまうということです。逆にいうと、水蒸気の吸蔵性を高めるためにナノ細孔を残すと、強度は下がってしまう。多孔質でありながら高い強度をもたせるにはどうしたらよいか、その2つの条件を両立させるところが、最も苦労した点だと思います」

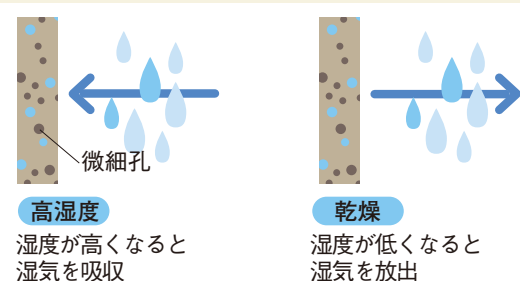
1年近くの試行錯誤の結果、最終的に、アロフェンを800℃程度の低温で焼くことで、十分な細孔量を残しつつ、建材としての強度も保てるという結論に至った。

1994年および1995年にはベースとなる技術が完成して、INAXと特許を共同出願。その数年後の1998年には、ナノ多孔質セラミックスを用いた調湿タイル「エコカラット」が、市場へのデビューを果たす。

## 目で見てわかる 用語解説

### 吸放湿のメカニズム

室内の湿度が高くなると、セラミックスのもつナノ細孔が湿気を吸収し、湿度が低くなり室内が乾燥してくると、自動的に放湿する。



資料提供：LIXIL

\*4 アロフェン：火山灰土壌中に広く存在し、土壌の風化によって多孔質に生成された粘土系鉱物のひとつ。細孔の水蒸気凝縮により、高い吸着性、吸蔵性を発揮する。

\*5 人工粘土の合成：産総研中部センターのある愛知県は、窯業が盛んな地域である。1970年代の高度成長期には、住宅地の開発などが急速に進められ、将来的に、窯業にふさわしい良質な粘土が枯渇するのではないかと

いう懸念があった。そこで名古屋工業技術試験所では人工的に良質な粘土を合成する技術の研究開発が進められ、前田もそのプロジェクトに初期から参加した。

この過程において、1996年から2000年まで、「インテリジェント型調湿材料の開発に関する基礎研究」が官民連帯共同研究制度に採択され、さらに、セラミック建材技術研究組合が組織された。そこで製造法が検討され、アロフェン以外でも調湿が可能となった。

## 調湿タイル「エコカラット」 目指すはさらなる普及

省エネ意識と、快適・健康を求める社会潮流の中で「エコカラット」は順調に売り上げを伸ばし、現在では、製品のバリエーションも大きく広がっている。2001年に着工した産総研中部センターのロビーや、産総研つくば中央食堂にも採用され、快適な空間づくりに役立っているし、もちろん前田も自宅で使っている。

「自宅では、以前よりもエアコンの効きがよくなったと感じます。名古屋の夏はとても蒸し暑いですが、湿度が適度に保たれるので、室内はさらっと感じることが多いですね」

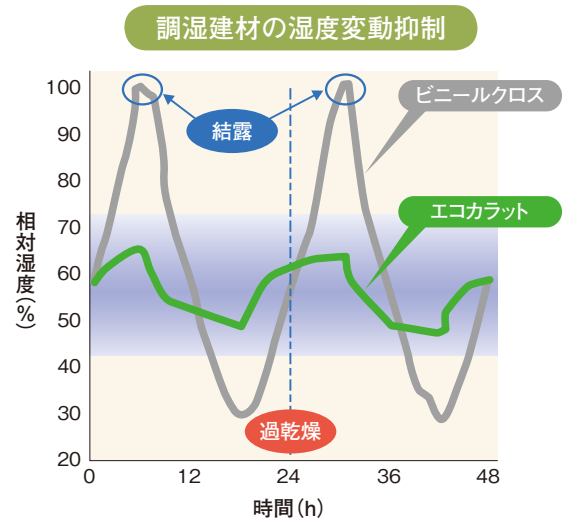
ただ、いくら調湿建材の機能が高いといっても、エアコンを使わずに近年の猛暑を乗り切るのは難しい。

「しかし、調湿建材を使うことでエアコンの設定温度を1℃でも上げることができれば、快適性を損なわないまま、省エネに貢献できることとなります。より多くの住宅に調湿建材が使われるようになれば、省エネの効果

もより大きくなるわけです。日本の多湿の風土には非常に適した建材ですので、省エネという観点からも、さらに普及していくことを期待しています」

## 省エネで快適な住まいのため 新たな挑戦は続く

現在も前田は、高機能な多孔質セラミックスを開発すべく研究を進め、主に、乾燥剤で空気中の水蒸気を吸い取ることで快適な空間をつくる「デシカント空調<sup>\*6</sup>」に



※LIXIL試験による。  
他建材、家具の配置、気象、換気などの条件によって異なる。

資料提供：LIXIL

## 開発ヒストリー

### 1975年頃

#### 揮発性有機物質(VOC)の 吸着材を開発

名古屋工業技術試験所時代、VOCの吸着剤の材料としてアロフェンが適していることを発見し、実用化。

### 1988~1992年

#### 人口粘土合成 技術研究組合 発足

### 1994~95年

#### アロフェンに 注目

天然の各種粘土系材料の吸放湿性を調べ、素材としてアロフェンを選択。

### 1998年

#### 調湿建材が 製品化

INAXがアロフェンを利用した調湿建材「エコカラット」を発売。

写真提供：  
LIXIL

### 現在

#### 新たな調湿材料の開発

ハスクレイなど、新たな高機能セラミックスの開発を推進。



新しい調湿建材の材料となるハスクレイ

1975

2000

### 1988年

#### 大手住宅設備メーカー に技術指導

「多孔質セラミックスの高性能化」についてINAX(当時)より相談を受け、技術指導を始める。

### 1992~93年

#### 江戸時代の土蔵 の土壁を分析

江戸時代に建築された土蔵が解体される際に土壁を入手し、吸放湿性を調査・分析。土壁が多層構造であることを発見する。調湿建材の開発がスタート。

### 1996~2000年

#### 官民連帯共同研究が スタート

民間企業と共同で「インテリジェント型調湿材料の開発に関する基礎研究」を実施。人間が快適と感じる範囲で吸湿・放湿を自律的に行う材料の合成や、調湿材料として利用可能な天然原料を探索。

### 2000~2004年

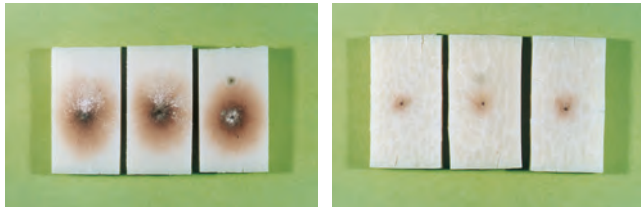
#### セラミック建材 技術研究組合発足



## カビの生え方実験

エコカラットの壁の部屋と、通常のビニールクロスの室内に餅を放置したところ、エコカラットを使用した部屋のほうがカビが増殖しにくいという結果が出た。

※ 試験結果は、部屋の使用条件、気象・換気等の環境条件によって異なる。



▲右：ビニールクロスの部屋

▲左：エコカラットの部屋

写真提供：LIXIL

適した吸放湿材の開発を行っている。デシカント空調システムは、一般的なエアコンに比べて使用する電力量が抑えられ、省エネ効果が期待できるものだ。すでに一部の家庭用エアコンにはこの空調システムが組み込まれているが、現在使われている吸放湿材の能力には、まだ改善の余地がある。

「産業分野では、工業をはじめとして湿気を好まないところが多いので、吸放湿材の高機能化は求められている技術といえます。そこで私たちは、2008年に新しい高機能セラミックス、ハスクレイ\*7を開発しました。安価な物質を材料としているために実用化につなげやすく、現在、工業材料メーカーが製品化を進めています。いずれ、家庭用の除湿器にもハスクレイが組み込まれれば、快適性と省エネ効果を両立させた空調システムができることになります」

日本の伝統的な知恵に、最先端の技術が出会ったとき、日本の風土に適した新しい技術が生まれる。これ自体が素晴らしいことであるが、新しい優れた技術というものは、もともと目指された用途に貢献するだけでなく、新しい用途を得て、新しい大きな需要を生み出していくものだ。現在、省エネは全世界的な課題となっている。ナノ多孔質セラミックスは、いずれ世界中で活躍する場を見つけるにちがいない。

\*6 **デシカント空調**：快適な生活空間を得るため、乾燥材（デシカント）を用いて除湿を行う空調システムのこと。従来の冷却結露による除湿システムと比較して、過冷却防止のための再加熱エネルギーを必要とせず、乾燥材を乾かし再生させる熱源として空調などから排出される低温排熱を利用できる。そのため電力消費量を削減でき、省エネルギー効果が期待されている。

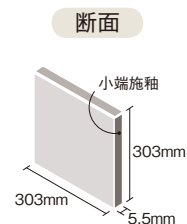
\*7 **ハスクレイ**：産総研で開発された、Si（ケイ素）-Al（アルミニウム）を主成分とする低結晶性粘土と非晶質アルミニウムケイ酸塩の複合体からなる高性能吸放湿材。非晶質アルミニウムケイ酸塩の“ハス”（HAS：Hydroxyl Aluminum Silicate）と低結晶性の層状粘土鉱物の“クレイ”（Clay）との造語。広い範囲の相対湿度で利用ができ、次世代省エネルギー・快適建材への応用が期待されている。

## 土壁とエコカラットの比較

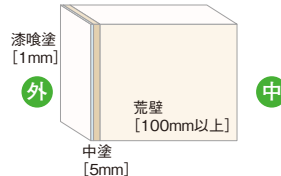
### エコカラット



エコカラット施行例  
写真提供：LIXIL



### 土蔵



写真・資料提供：LIXIL

▶ 中部センターのロビーにも調湿タイルが使われている



## 調湿建材の将来像

国内での普及と同時に期待されるのが、アジア市場への展開です。比較的乾燥した風土の欧米と異なり、東南アジア一帯は、いずれも暑く湿度も高いモンスーン気候です。アジアはこれからますますの経済発展が見込まれ、近い将来、省エネへの意識も、生活の快適さへの要望も高まってくるでしょう。そのいずれに対しても、調湿建材は大きく貢献できると思います。

私たちは現在、ナノ多孔質セラミックスの特長を最大限に発揮させる“烧かないセラミックス”の研究開発に取り組んでいます。もともと日本には、漆喰や石膏のように水で練ったものを乾燥させてつくる湿式工法の歴史がありますが、漆喰の壁は数十年はもちますし、傷んできたら塗りなおして補修できます。ハスクレイを利用した塗装タイプの調湿壁にも、私たちは将来性を感じています。

衣食住は人間の生活の基本です。その<住>の部分の向上させる産業に、私たちはこれからも積極的に貢献していきます。



## 半導体シリコンカーバイド(SiC)

# 〈パワーエレクトロニクス〉の革新を半導体SiCが可能にした

企業との共同研究でSiCと周辺技術の実用化を目指す!

私たちの**生活・社会**が  
こう変わる!



電気を使わずには成り立たない社会の中で、省電力化の推進は不可欠だ。電力を有効活用できるシリコンカーバイド(SiC)パワーデバイスは、電子機器や電力インフラのいっそうの省エネルギー化をもたらし、低炭素社会の実現に貢献する。

### 電力損失を極限まで減らす 新しい半導体デバイス

私たちの生活はもはや、電気なしには成り立たない。冷蔵庫や洗濯機、パソコンをはじめとする電化製品から、電車や電気自動車、水道、通信などの社会インフラまで、あらゆるところに電気は使われている。このような社会の中で欠かせないのが、電力の直流・交流の切り替えや周波数の変換などを、用途に合わせて迅速かつ効率的に行う「パワーエレクトロニクス」という技術である。

電力の変換や制御は半導体素子(電力変換素子)によって行われる。これまで、素子の素材には主にシリコン(Si:ケイ素)が用いられ、その歴史はすでに半世紀にもなる。電力変換時に生じる電力ロスを減らしていく研究はもはや限界に達しており、低炭素社会や省エネ社会の実現に向け、シリコンパワーデバイスに代わる、より高速で低損失なデバイスの開発が求められてきた。

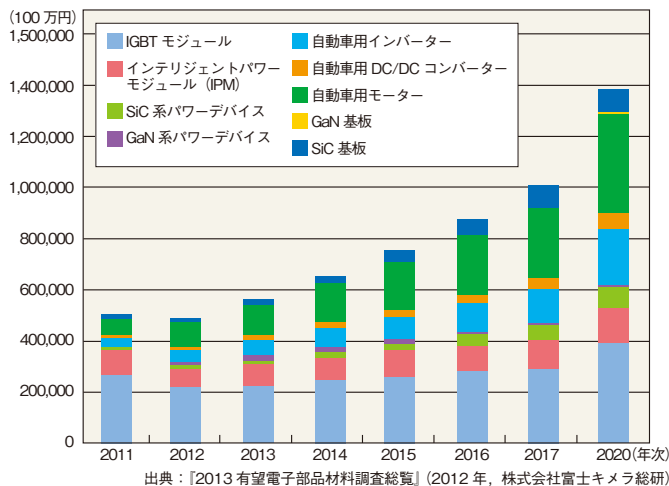


先進パワーエレクトロニクス研究センター  
研究センター長

奥村 元

OKUMURA HAJIME

### 拡大するパワーエレクトロニクス関連市場



産総研は、種々のNEDOプロジェクトなども活用しながら1970年代後半から絶えることなくこのテーマに取り組んできた。その中で開発を目指したのは、硬く、耐熱性に優れ、熱伝導率が高く、化学的にも安定しているシリコンカーバイド(SiC)<sup>1</sup>を



- 住
- エコ
- 社会インフラ
- 交通

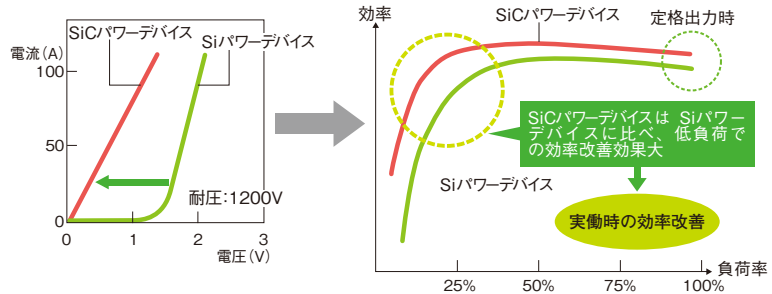


- エレクトロニクス
- 自動車

## 目で見てわかる 用語解説

### SiとSiCパワーデバイスの効率の比較

Siパワーデバイスと比較して、SiCパワーデバイスは発電量が少ない場合でも無駄がなく、電力を利用することが可能になる。右図では、SiCパワーデバイスが低負荷領域（発電量が少ない場合）において、Siパワーデバイスより高い電力変換効率を発揮する様子が示されている。



用いた、より高性能なパワーデバイスやそれらを搭載した高性能な電力機器である。

「半導体の材料をSiCに変えるだけとはいっても、開発は非常に困難でした。当初はSiCのウェハは欠陥が発生しやすく、大口径の基板をつくる技術もなかったからです」

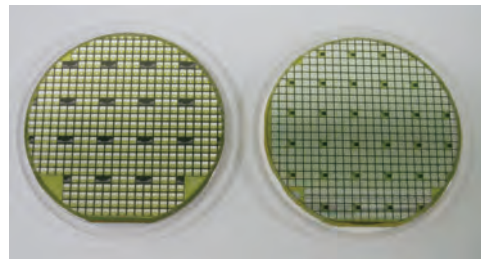
先進パワーエレクトロニクス研究センター・研究センター長の奥村元は、そう当時を振り返る。良品率を上げ、大口径の基板によってコスト削減を果たさなければ、産業応用には結びつかない。NEDOプロジェクトなどを通して開発してきたこれらの要素技術を量産技術に結びつけるべく、産総研では内部予算を活用して富士電機、アルバックといった企業と共同研究の体制を整えた。

## 電力の有効利用と国際的な競争力強化を目指して

量産化には欠陥を発生させない生産技術の確立が不可欠だし、電力機器としての実用化にはデバイスだけではなく周辺技術も同時に研究開発していく必要がある。すべての面で完成度を高めるべく、開発は進められた。

SiCパワーデバイスの高品質化を実現したきっかけは、2002年、MOSFET<sup>2</sup>（金属・酸化物・半導体電界効果トランジスタ）を作製するときに、高い電子走行特性を得られるSiCウェハのカーボン面上にイオン注入エピタキシャル構造<sup>3</sup>というデバイス構造を開発したことだ。この構造を用いて、2006年には世界最高性能の低損失パワーデバイス試作に成功している。現在、ボリュームゾーンである1kV領域のパワー半導体トランジスタやダイオードを搭載した汎用インバータ、太陽光発電用パワーコンディショナなどはすでに出荷されつつある。また、インバータの大幅な小型化も実現されている。

### 3インチウェハ上に形成したSiC素子の量産試作品



「SiCパワーデバイスを既存のデバイスと置き換えるだけではなく、パワーエレクトロニクスがまだ導入されていない領域にも適用していくことで、さらなる電力の有効利用や省エネが期待できます。日本の半導体産業の競争力強化にもつながっていくでしょう」

現在は、鉄道や重電機器に利用される数kV級のパワーデバイスを中心に、ウェハからシステムまでの研究開発を行っているところだ。

「長期的には、スマートグリッドなどに使われる10kV以上の超高耐圧デバイスの開発を目指しています。市場拡大には、次世代自動車などへの搭載が期待される高信頼のパワートランジスタが最大のポイントになるでしょう。日本にとって、エネルギー問題は非常に重要な課題です。これからも私たちは、新たなエネルギーエレクトロニクス技術体系の確立に取り組んでいきます」

\*1 シリコンカーバイド (SiC)：炭素とケイ素の1：1の化合物で、炭化ケイ素ともいう。ダイヤモンドとシリコンの中間の性質をもち、非常に硬く化学的安定性や熱伝導性にも優れ、半導体材料として使われるほか、研磨剤や登山鉄道の非常用ブレーキなどにも使われている。

\*2 MOSFET：大規模集積回路の最も基本となっているMetal-Oxide-Semiconductor（金属・酸化膜・半導体）Field-Effect Transistor（電界効果トランジスタ）の略号。シリコンなどの半導体基板上に、酸化膜を介してゲート電極を形成し、その両側にソース、ドレイン電極を形成した電界効果トランジスタ。

\*3 エピタキシャル構造：薄膜結晶成長技術のひとつで、半導体基板の上には複数の半導体結晶薄膜が積層された構造。

## 単層カーボンナノチューブの量産技術の開発

# 夢の素材で期待される 〈21世紀の産業革命〉

「スーパーグロース法」の開発で量産化・実用化を果たす!

私たちの**生活・社会**が  
こう変わる!



強度、軽さ、熱伝導率など、多くの面でこれまでの物質を超える性能をもつカーボンナノチューブ (CNT)。安価な素材として実用化されれば、より耐震強度を高めた建築、細くて軽いが発熱の少ない電線、より小型で高密度な半導体チップなど、あらゆる産業に応用できる。それによって、産業界全体に革命的な変化をもたらされるだろう。



ナノチューブ  
応用研究センター  
首席研究員

**畠 賢治**

HATA KENJI

合成効率が1000倍!  
画期的なスーパーグロース法

カーボンナノチューブ (CNT) とは、グラファイトの一枚面を巻いてできる、直径およそ1nm<sup>\*1</sup> (ナノメートル)、長さは数μm (マイクロメートル) ~数mmの筒状物質だ。単層と多層があり、単層CNTの特徴は、鋼の20倍にも達する力学強度、ダイヤモンド並みの高熱伝導率、アルミニウムの半分の密度など、あらゆる面で非常に優れた性質をもっていること。その特性を生かして、半導体素子や電線をはじめ、さまざまな用途への応用が期待されている。

大きさの異なる単層CNTが重なってできた多層CNTは、すでに世界中で生産プラントが稼働して低コスト化が進み、本格的な普及期を迎えている。しかし、多層よりも性能が優れている単層CNTは、世界中で長年にわたって研究されてきたにもかかわらず、合成効率がきわめて低く、これまで本格的な工業用素材として商業生産されてこなかった。

その状況を変えたのが、ナノチューブ応用研究センター主席研究員の畠賢治だ。2004年、畠のチームは「スーパーグロース法」という画期的な単層CNTの合成技術を開発したのだ。

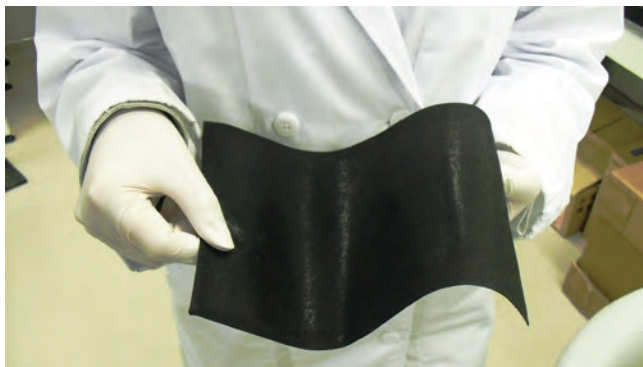
「単層CNTの合成時に極微量の水分を添加することで、従来の1000倍以上の成長効率が実現できました。この方法で合成された単層CNTは、従来のCNTと比べて純度がきわめて高く、比表面積も繊維状物質としては最高レベル、導電性フィラー (ある機能を付与するために添加する材料) としても最高のアスペクト比<sup>\*2</sup> (直径3nmで、長さ数百μm) であるなど、いくつもの優れた



- 生活用品
- IT
- エコ
- 社会インフラ



- エレクトロニクス
- 自動車
- 航空・宇宙
- 素材・材料



▲カーボンナノチューブを用いて開発した熱伝導性ゴムは、チタン並みの熱伝導率をもち、軽く、薄く、柔らかい。LSIの放熱材料として開発された。

特長をもっています」

従来の1000倍以上という合成効率を得たことで、ついに単層CNTにも量産化の可能性が開けることになった。

## すでに実用化が目前 新産業の創出も目指す

じつは畠は、スーパーグロース法を開発した後、どこに研究の軸足を置くべきか悩んだという。

「目の前に無限の可能性をもつ学問領域が広がっているのはあきらかでした。しかし私は、スーパーグロース法が一時のブームで終わるのではなく、10年、20年後まで生き残り、ますます花開く技術であってほしいと考えました」

そこで畠は、単層CNTのかつてない規模での量産を目指すことを決め、化学メーカーの日本ゼオンと共同で、単層CNTの量産技術の開発に着手することになる。量産プロセスの全体像、研究計画、課題の設定などを行うとともに、日本ゼオンの研究員を含む合成グループを指導。連続合成、大面積合成、湿潤触媒の開発、金属基板の開発など、研究を次々と成功に導いた。それらの技術を結集した実証プラントは、2012年から、世界で初めて単層CNTを100g単位で、しかも実用的なコストで提供する機関として運営されている。

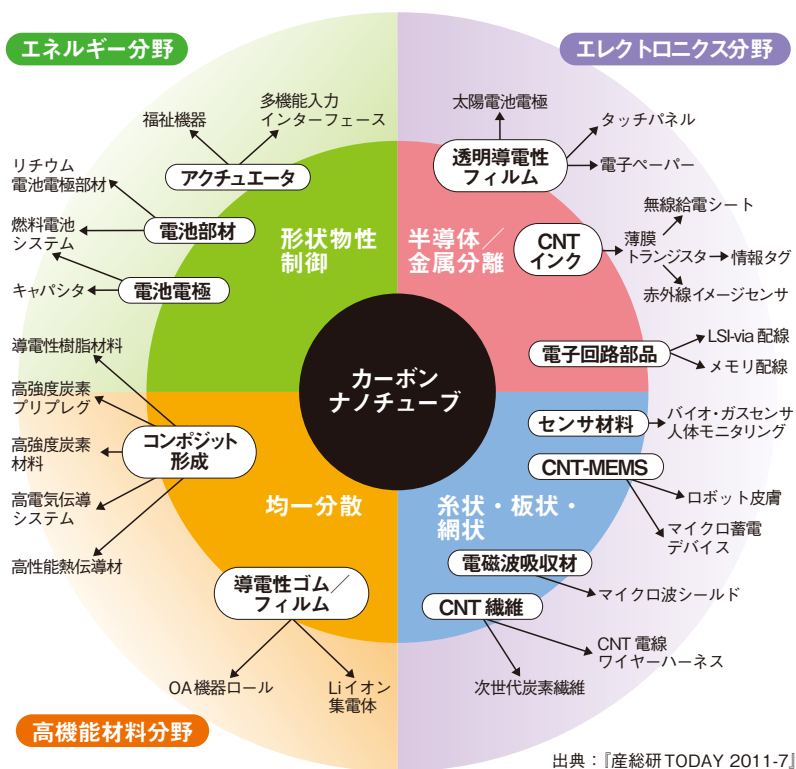
「現在は実用化研究の段階に移り、分散・成形加工・複合化技術により高機能なCNT部材を開発したうえで、

産業創出につなげる用途開発も行っています。今までに開発した技術をすべて結集させ、素材メーカーと用途メーカーの間でB2Bの流れをつくり出したのです」

単層CNTの応用範囲は、エネルギー、環境、IT（情報技術）と多岐にわたり、具体的に実用化が進められているものだけでも、導電性ゴム材料、炭素繊維、導電性樹脂、ひずみセンサ、キャパシタ<sup>\*3</sup>などがある。産総研では2020年までに1kgあたり1万円になることを目指しているが、量産による低コスト化が実現できれば、間違いなく産業界に大きなイノベーションが起こるだろう。いよいよ2015年には、単層CNTの初の工業的製造が実現する予定だ。

「私の目標は、単層CNTがあちこちで使われ、“Carbon Nanotube Here, There, and Everywhere”となること。そして、実家に帰った際に、母親がCNT入りの商品を持っているのを見ることです。この目標を実現するべく、研究人生をCNTの研究開発に尽くしていきます」

### カーボンナノチューブのさまざまな応用可能性



出典：『産総研 TODAY 2011-7』  
(2011年, NEDO)

\*1 nm (ナノメートル) : 1 nm = 0.001 μm = 0.000 001 mm

\*2 アスペクト比 : 要素の縦横比のこと。今回の研究開発の場合は、CNTの直径に対する長さの比を表す。

\*3 キャパシタ : 電子を蓄えたり、放出したりする機能をもつ素子などのエネルギー蓄積デバイス (コンデンサ) のこと。電気製品の部品などに用いられる。近年では、二次電池的な化学反応を伴うにもかかわらずキャパシタ的な急速充電が可能な疑似キャパシタなど、さまざまなタイプの次世代キャパシタが開発されている。

## 少子高齢化社会を支える生活支援ロボット

## 〈新たなインフラ〉として普及が期待される生活支援ロボット

産総研が世界標準の安全規格づくりを推進中!

私たちの**生活・社会**が  
こう変わる!

人の力を増幅させて介助者の肉体的な負担を軽減したり、家事を代行したり、さらには人の健康維持・増進を助けたり。このような生活支援ロボットの安全技術や安全基準が確立されることで、具体的に実用化への道筋がついてくる。私たちが安心してロボットとともに生活し、快適さ、便利さを実感する日も、そう遠くはなさそうだ。



知能システム研究部門 副研究部門長

大場光太郎

OBA KOTARO

人間の生活の場で働くロボット  
求められる新たな安全基準

近年の社会問題となっている少子高齢化。若年層人口が減少することで、産業労働力だけでなく、家事、介護などの生活面での労働力も不足すると懸念されている。この問題を解決する方法のひとつと期待されているのが、人間の力を増幅させたり、人間に代わって作業を行ったりする「生活支援ロボット」だ。

すでに、身体機能を増幅させる CYBERDYNE の装着型ロボット「HAL」や、Honda の「歩行アシスト」などがマスメディアでも紹介されている。いずれも試験段階だが、介護などに伴う肉体的な負担を減らす効果があるとみられている。しかし、現実の生活の中で使うには、現状の性能では十分ではない。特に問題となるのが、安全性の確保である。

工場のように、人と隔離され、規格化された環境で作業する産業ロボットと違い、生活支援ロボットの作業の場は一般住宅や福祉施設、屋外などさまざまであり、作業の環境も条件も多岐にわたる。たとえば、日常生活では、歩行中に何かが倒れてくる、ノイズとなる携帯電話の電波がいきなり入ってくるなど、細々とした不測の事態が生じるのはよくあることだ。それらの変化に対して、人の安全を脅かさずに動き、ロボット自体も動作の安定性を保たなければならない。しかも、ロボットを操作するのは工場の熟練工ではなく、不特定多数の一般の人々だ。そのため、産業用ロボットの安全規格以上に安全に配慮した、別の規格が必要となってくる。

今後、生活支援ロボットの普及のためには、安全基準の整備と同時に、認証・検証もしていく機関が不可欠な



- 住
- 医療・福祉・介護
- 安全安心



- 機械・ロボット



CYBERDYNE（茨城県つくば市）は2013年2月27日、同社が開発した装着型ロボット「ロボットスーツHAL福祉用」が、パーソナルケアロボット（生活支援ロボット）の安全性に関する国際規格の認証を取得したと発表した。具体的には、2011年9月に発行された国際規格原案「ISO/DIS 13482:2011」に基づいて、日本品質保証機構（JQA）がロボットスーツHAL（写真右/装着して身体機能の拡張、増幅、支援を行う）福祉用の安全性を評価し、世界で初めて認証した。

写真提供：JQA

や公共施設で生活支援ロボットが普及し、生活が便利になると実感できれば、国内のロボット産業の活性化も期待できる。また、世界に向けて日本の高度なロボット技術をアピールできれば、各国との技術交流も進み、産業の発展に貢献できるだろう。

「今後は、ロボットがさまざまな環境で使用されることを踏まえ、免許制、講習制などの運用体制を明確にすることが重要となります。将来的に、リスクの最小化とメリットの最大化を同時に図るビジネスモデルの構築も求められるでしょう。日本独自の安全文化をいち早く構築し、来るべき高齢社会を支える基盤となれば、と思っています」

のである。

## 安全性の検証手法を確立し 安心してロボットが使える社会に

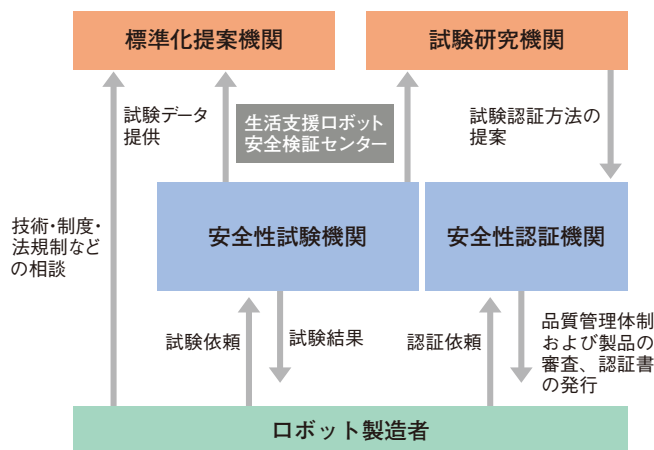
産総研では、「生活支援ロボット実用化プロジェクト」を推進して、この問題に取り組んでいる。これは、4つのタイプの生活支援ロボット（①操縦中心の移動作業型、②移動中心の移動作業型、③人間装着型、④搭乗型）の安全技術を中心とした研究開発と、安全性検証手法の研究開発を行うものだ。

他の工業製品と同じような耐久性や強度を保つのはもちろん、特に重視するのは、人や物にぶつかる前に停止できるか、人と衝突した場合はどのくらいの危害が及ぶのかなど、人の生活の場に入り込むロボットならではの側面だ。また、強力な電波を受けたときのロボットへの影響調査なども欠かせない。このようなさまざまな面から安全性をチェックしながら、同時に、ロボット分野に適用できるリスクアセスメント手法や安全性試験評価方法の開発、適合性評価手法の研究開発を行っている。現在はまだ国内での取り組みだが、将来的に、国際規格への反映を目指している。

研究開発を担当する知能システム研究部門副研究部門長の大場光太郎は「生活支援ロボットの安全基準づくりは世界的にも初めてのプロジェクトです。国際規格策定から試験方法、認証プロセスの構築など、全てを同時に行う必要があるため、作業は容易ではありません」と振り返る。

各社が開発した生活支援ロボットの安全性を検証し、認証する手法を確立することは、利用者が生活支援ロボットを選び、安心して利用するための手助けとなる。家庭

### 生活支援ロボットの安全性試験・認証体制

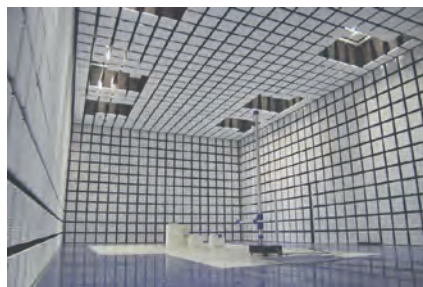


出典：「NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクト」パンフレット

### ロボットの安全性試験



▲衝突安全性試験。ロボットが人と衝突してしまった場合の安全性を確認する。



◀EMC試験。電波を遮断した電波暗室で、強力な電波を照射したときのロボットの動作変化を確認したり、ロボット自身が動作時発生する電磁波を測定したりする。

日本の大陸棚が拡大

# 〈大陸棚の拡大〉で、未来社会に 貢献する海洋資源調査に弾み

## 産総研の高い技術力で政府のプロジェクトに貢献!

### 大陸棚調査研究プロジェクトチーム

私たちの**生活・社会**が  
こう変わる!



大陸棚の範囲の拡大は、天然資源の開発対象域も拡大することを意味し、少資源国であるわが国にとって非常に有益なものといえる。また、大陸棚の調査・研究を通じて、海洋資源や地球科学的な未知の事実が明らかになることは、科学的に意義があるだけでなく、さらに新たな資源開発につながる可能性もある。

#### 日本の延長大陸棚が認められるまでの経緯(産総研関連)

|             |  |
|-------------|--|
| 1994年       | 国連 「海洋法に関する国際連合条約」発効                                   |
| 1996年       | 日本政府 海洋法条約を批准  |
| 2003年       | 日本政府 大陸棚評価・助言会議発足                                      |
| 2004年3月     | 産総研 大陸棚調査プロジェクトチーム発足<br>大陸棚調査検討ワーキンググループ(調査計画<br>骨子検討) |
| 2004年8月     | 日本政府 「大陸棚画定に向けた基本方針」策<br>定                             |
| 2004年11月    | 産総研 大陸棚調査研究プロジェクト発足                                    |
| 2005年1月     | 日本政府 国連提出情報素案作成部会発足                                    |
| 2003年～2008年 | 産総研 調査・分析の実施   |
| 2008年11月    | 日本政府 大陸棚延伸申請を国連に提出                                     |
| 2009年～      | 日本政府 大陸棚審査対応部会が発足し、国連<br>大陸棚限界委員会の日本小委員会の審査に対<br>応     |
| 2012年4月     | 日本政府 国連大陸棚限界委員会による勧告<br>を受領                            |

#### 日本の大陸棚が拡大?

2012年4月、「日本の大陸棚が拡大した」というニュースが、将来への期待感とともに報じられた。しかも、拡大した面積は、国土の約8割にも匹敵する面積であるという。「大陸棚」が広がるとはいったいどういうことであり、なぜ歓迎されたのだろうか。

中学の理科・社会の授業で「大陸棚は水深200mまでの平坦な浅い海の地形」と習った記憶がある人も多いだろう。一方、1964年に国連で採択された「大陸棚に関する条約」に始まる「海底と海底下の資源の開発のできる範囲」を指す法的な用語としての「大陸棚」が存在するのだ。今回、「拡大」したのはこちらのほうである。

1982年は、海の憲法といわれる「海洋法に関する国際連合条約」が採択され、大陸棚に関する厳密な定義と決め方が示された歴史的な節目の年である。それにより、沿岸国の200海里までの排他的経済水域（EEZ）の海底ほか、地形・地質が陸地と連続するなどの条件に当てはまれば、200海里を超えても大陸棚として認められるようになった。

大陸棚として認められた海域では、その国は海底資源の開発権を主張できる。今回、大きな面積の「大陸棚延長」が認められたことは、その分、海底に眠る新たな天然資源開発に道が開けたということだ。資源の少ない日本にとって、じつに喜ばしいニュースといえる。

#### 海洋地質学の専門家集団として 総合力を発揮

もちろん、条件さえ満たせば沿岸国が勝手に大陸棚を延長してよい、というわけではない。大陸棚を延長するには、国際条約による規定に基づき、沿岸国が科学的根





拠とともに国連に申請し、各国の地質学・地球物理学・水路学などの専門家て構成される「大陸棚の限界に関する委員会」の審査を受けて認められる必要がある。

そこで日本政府は、2004年、海域調査とそれらの結果を国連への申請文書としてまとめていく一連の事業（大陸棚画定調査）に着手。産総研は国の地質調査を担う立場として、地質情報研究部門を主体として大陸棚調査研究のチームを組織して、①海域調査、②採取した岩石の分析・解析・解釈、③申請書作成のとりまとめを担当し、8年にわたってこの事業に貢献した。

産総研は、日本周辺海域での調査実績や、地質データなどを特定地域の地質図に統合するといった知見が豊富である。それに加えて、海域の岩石の分析・解析においては国際的にも最高レベルの技術を有しており、海洋地質学の専門集団としてプロジェクトに総合的に貢献できる基盤が十分にあった。とはいえ、いわば科学的証拠をもって領土の拡大に寄与するという今回の作業は、産総研の歴史にとっても珍しい出来事だった。

## 未来の社会・国民への還元も重要な視点

近年、海底には未知の資源が存在する可能性があるとわかってきた。日本の大陸棚として新たに認められた場所にも、自動車や電子部品をつくるのに欠かせないレアメタル（希少金属）など、さまざまな海底資源が存在するとみられる。今回の「大陸棚延長」は、海底資源開発に向けた動きに大きな弾みをつけるきっかけとなるだろう。

しかし、海底資源開発には課題もある。採掘には特別な技術と大きなコスト、さらに開発に伴う環境影響の科学的評価が必要であり、事業として実施するまでには相当な時間がかかるのだ。プロジェクトチームに参加した岸本清行は、だからこそ、国の機関が時間をかけて調査を行う意味が大きいと強調する。

「現状は、約30年かけてやっと広大な海域の地形・地質の調査ができたところであり、海底資源の調査は端緒についたばかりです。注目されているレアメタルなどの資源発見はニュースになりやすいですが、現在の知識や技術では評価できない“未来に価値をもつ資源”もあるはず。そのような夢の資源を見つけることも、地道な調査や研究の中から生まれるのだと思っています」

今後も、産総研の延長大陸棚を含む海域における資源の調査は続く。

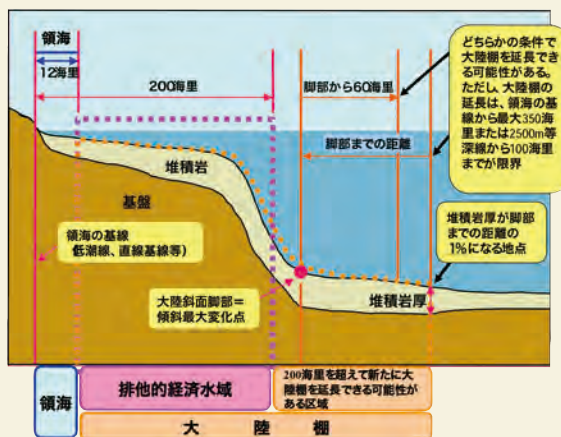
## 目で見てわかる 用語解説

### 延長大陸棚

「海洋法に関する国際連合条約」(United Nations Convention on the Law of the Sea ; UNCLOS) 76条が定めた「大陸棚」の法的な定義により、主権の及ぶ範囲の拡大が認められた海域のこと。2012年4月27日、国連の大陸棚限界委員会が採択した太平洋の4海域約31万km<sup>2</sup>を日本の大陸棚として新たに認める勧告を日本政府が受領した。

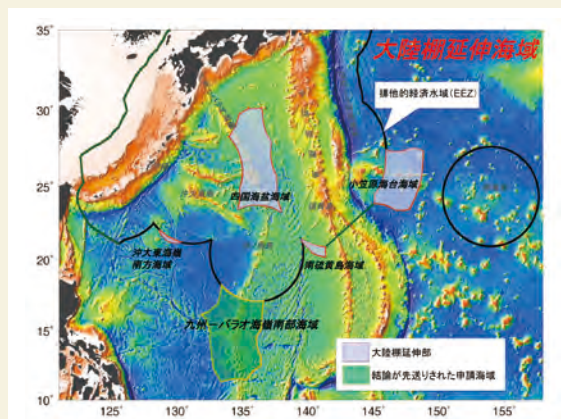
認められた延長大陸棚では、コバルトを多く含む「コバルトリッチクラスト」があると推定される場所や、レアメタルを多く含む「海底熱水鉱床」が発見される可能性が指摘されている。

### ●国連海洋法条約の大陸棚の定義



出典：大陸棚の限界の申請について、海上保安庁からの記者発表（2008年10月31日）資料

### ●わが国の延長大陸棚



出典：内閣官房「我が国大陸棚延長に関する大陸棚限界委員会の勧告について」



地質情報研究部門 資源テクトニクス研究グループ 上級主任研究員 岸本清行

高所調査用ロボットによる福島第一原発の環境調査

# 人が近づけない極限環境での調査にロボットが挑んだ

産総研とHondaが開発したロボットで復興への貢献を!

知能システム研究部門

私たちの**生活・社会**が  
こう変わる!



確実に出発点に戻って来られる高所調査用ロボットによって、今まで十分な調査ができなかった福島第一原発建屋内の高所の放射線量や、設備などがどの程度、どのように壊れているかといった状況を把握できると期待されている。正確な状況を知り、事故処理が進められるようになれば、今後、廃炉に向けた作業が大きく進展する可能性がある。

## 産総研とHondaがロボットを開発 福島第一原発で調査を開始

東日本大震災に伴って発生した福島第一原子力発電所の事故は、2年以上が過ぎた2013年の現在も、収束とはほど遠い状況にある。

処理作業が捗<sup>はかど</sup>っていない理由は、いうまでもなく、一帯が放射能に汚染されて人間が容易に近づくことができないからだ。作業員の年間被曝許容量は50ミリシーベルトと決められているため、高線量の場所で作業をすれば、10分、15分という、ごく短時間で切り上げなくてはならない。被曝量が基準に達した作業員は現場に入れなくなるし、交代要員も多数必要になる。だからこそ、人間の代わりに作業ができるロボットが求められている。

そのような状況下にあった2013年6月、産総研とHondaが共同開発した「高所調査用ロボット」が福島第一原発2号機原子炉建屋で稼働を開始した。調査用のアームの部分は、ヒューマノイドロボット「アシモ」を開発し、多数の関節を同時に制御できる技術をもつHondaが担当。そして、クローラーで動く高所作業台車とその遠隔操作の技術を産総研が担当した。

今回、高所調査用ロボットが行ったのは、これまで調査ができていなかった建屋内の1階高所について、遠隔操作によって狭いところまでアームを伸ばし、構造や作業の障害になるものがないかを確認したり、現場の放射線量を測定したり、ということだ。このニュースは朝日新聞、日本経済新聞などの全国紙のほか、日刊工業新聞、電気新聞などの専門紙にも取り上げられ、期待の大きさがうかがえた。



### 高所調査用ロボット

移動姿勢では幅が0.8m、高さ、奥行ともに1.8mだが、高所作業時には最大で高さ7mになり、そこから1.7mのアームを延ばす。アームは11自由度で、カメラ、線量計、LRF（測域センサ）が搭載されている。重量は1.1 t、バッテリー駆動時間は約5時間。



- 防災
- 安全安心
- 社会インフラ



- 機械・ロボット

## 「現場で役に立つもの」を目指し 改善を繰り返した

ロボットにかかる期待の大きさには、もちろん理由がある。事故現場での作業計画は、誰がどのような作業をするかということのほかに、その場所であれば何分間の作業ができるかも含めて立案する必要がある。つまり、正確な放射線量がわからなくては、線量の低減対策や補修などのための計画さえ立てられないのだ。これまでは建屋内の高所の状況について、十分に把握できていなかったが、今回の調査によって、今後、処理作業が大きく進む可能性が高まった。

もちろんこれまでも国内外のロボットが現場に投入されてきたが、原発は人間が作業をする前提でつくられており、大型のロボットによる作業はそう簡単ではない。たとえば2011年6月に投入された日本製のレスキューロボット「Quince (クインス)」は、放射線の測定と燃料プール付近の撮影には成功したが、クローラー幅よりも階段の幅が狭く、本来調査したかった地下には降りることができなかった。また、ケーブルの断線によって戻って来ることができず、現在も現場にとどまっている。

そのような先行事例があったため、産総研が重視したのは、確実に目的の場所に行き、かつ、元の場所に戻ってくることだ。そのために作業台車は、高性能なクローラーと遠隔操作機能を備えている。今回の高所調査用ロボットの開発に携わった横井一仁は、次のように説明する。

「このロボットは、先行事例も参考にして、現場で役立つものになるように改善を重ねて完成させました。建屋内は無線が通じないので基本は有線で通信しますが、無線も搭載しています。これはケーブルの断線があっても現場に残ったロボットとほかのロボットを無線通信させることで、現場からロボットを帰還させられる可能性も考えたからです。また、ケーブル長が400mもあるのは、ケーブルが何かに引っかかっても残りを引き出し、帰還できるようにとの配慮です」

アーム部分についても、狭い場所にある込み入った配管の間でも作業できるように設計されている。

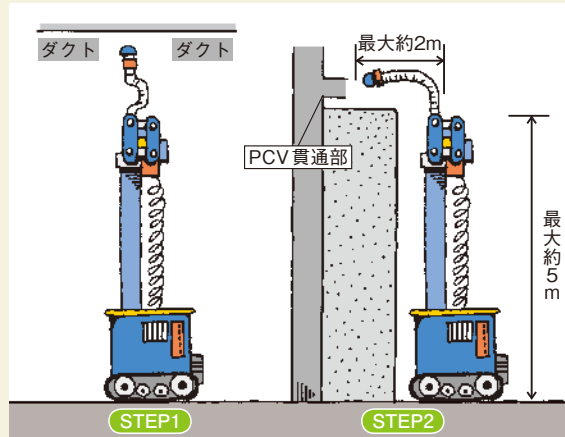
高所調査用ロボットはすでに現場に2回入り、線量の計測、調査などを行っている。横井も現場に赴き、実際に稼働させることで見えてきた課題について改善を進め、新機能を追加するなどして東京電力をサポートしている。

「東電からは今後も使用したいという要望が出ています。

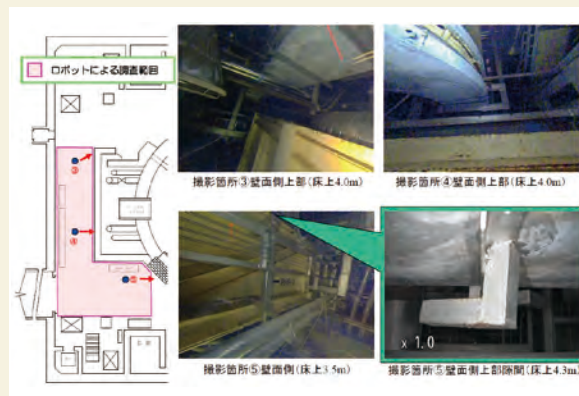
少しでも早く事故の処理が進むよう、ロボットを開発することで貢献したいと思っています」

## 目で見てわかる 用語解説

### 高所調査用ロボットによる原子炉建屋の調査



1回目 (STEP1: 2013年6月18日) は上部空間の調査を、2回目 (STEP2: 2013年7月23日) は高所のPCV (原子炉格納容器) 貫通部の周辺調査を行った。下図写真は、1回目の調査結果で確認した福島第一原子力発電所2号機原子炉建屋の上部壁面の様子。



出典：東京電力ホームページ公開資料



知能システム研究部門  
副研究部門長  
横井一仁

## 日本の計量技術の最上位機関

## あたりまえになっている〈正しくはかる〉を支える人々と技術

## 正確な計量を支える産総研の役割と〈はかる〉の未来

## 計量標準総合センター (NMIJ)

私たちの**生活・社会**で  
こう役立つ



私たちのくらし、特に経済活動と計量は切っても切り離せない関係にある。もしも、計量器によって違った結果が出るようなことがあれば、日々の生活は混乱に陥るだろう。安全・安心な生活の基本となる正確な計量を維持するため、重要な役割を果たしているのが産総研の計量標準総合センター (NMIJ) だ。社会や技術の変化に伴って、計量技術も進歩が求められている。より正確な計量を目指して、技術の研究・開発が進められている。

## さまざまな「はかる」道具



ガスメーター



惣菜売り場のはかり



水道メーター



タクシメーター



体温計

正しく「はかる」ための法律  
計量法

私たちはふだんの生活の中で、つねに何かを「はかる」場面に出会う。店では牛肉200 gで〇〇円、500 mlの牛乳が〇〇円といった具合に品物の量と値段を気にしながら買い物をし、料理をするときには計量カップや計量スプーンで食材をはかり、健康を気にして血圧計で血圧をはかり、電気、ガス、水道の公共料金はこれらのメーターで計量された使用量をもとに支払っている。

そして、そのはかられたものの過不足に疑問をもつことはほとんどない。私たちはなんら疑うことなく、はかり\*や定規を使い、他人の手で計量された商品に対して代金を支払う。現代の私たちにとって、正確な計量はあたりまえのことになっているのだ。なぜかというと、日本では計量法という法律で計量の基準が定められ、計量にかかわる人たちがそれを守ろうと努力しているからだ。

計量法の主な目的はふたつで、ひとつは計量の基準を設定すること (計量単位の設定など)、もうひとつは適正な計量の実施を確保すること (正確計量の義務など) だ。その法律に基づいて、何 kg や何 l をはかる「計量器」は「特定計量器」と呼ばれ、必ず出荷または使用前の検定と、その後も定期的な検査を受けて「正しい計量ができる」というお墨付きをもらわなければならない。じつは、近所のお肉屋さんでお肉をはかっているはかりも、定期的な検査が義務づけられているのだ。

国家標準による  
トレーサビリティの確保

産総研の計量標準総合センター (NMIJ) はさまざま



- 安全安心
- 医療・福祉・介護
- 社会インフラ
- 交通



- 医療・科学・バイオ
- 食品
- 流通・小売

な「はかる」について、日本の最上位にある機関だ。計測機器は校正事業者によって正確な（誤差がより小さい）標準器で校正される。その標準器はさらに正確な標準器によって校正される。このように正確な標準器を追っていくと国家標準にたどり着くようになっており、これを計量トレーサビリティと呼ぶ。産総研は、段階的に校正されるなかで最上位にあるさまざまな計量標準の校正を行っているのだ。

また、産総研では水道メーターやガスメーター、タクシーメーター、血圧計、体温計など身近で働く特定計量器が正しく世の中で働くための「仕組み」に一役買っている。メーカーが製造する特定計量器に対して、産総研が構造検査や性能試験を行い、法律で定める技術基準に合っているかを評価して、適合性の承認をするのだ。ここで認められた特定計量器は、使用する前に検定機関などで一台ごとに検定を受け合格することが義務づけられている。さらに、この検定機関などの測定の正しさは誰が保証するのかというと、計量トレーサビリティで産総研の国家標準へとつながっているのだ。そして、特定計量器は正しく使われてこそ、その正確さを発揮できる。そのため、産総研では計量研修センターで計量行政公務員や計量士などの計量を支える人材を育成している。

このように、いくつもの正確さを追求する過程を経て、特定計量器は一般消費者の安心を担保する「はかり」として社会へと届けられる。私たちが「正確に計量されてあたりまえの社会」に住んでいられるのは、適正な規制が機能しているからなのだ。

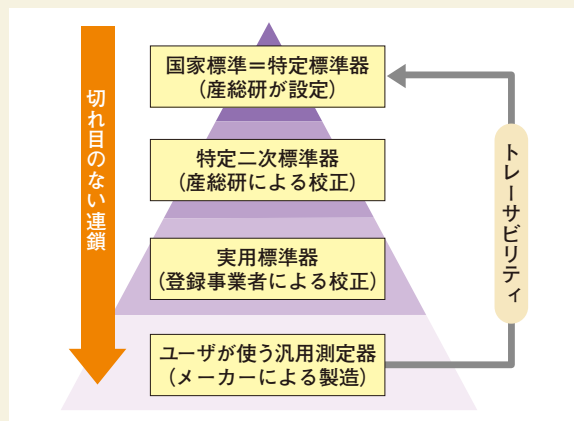
さらに、産総研ではより正確な「ものさし」を目指す研究・開発を行っている。かつて、長さの基準となっていたのは、白金とイリジウムの合金からつくられていたメートル原器だった。現在では1 mの定義は光の速さが基準となり、それを実現する「ものさし」として、光の周波数を利用した「光周波数コム」が国家標準となっている。紛失や破損の恐れがあり、つねに国際メートル原器との比較が必要な人工物から、どこでも1 mを表すことのできる真空中の光速度などの基礎物理定数に基づく仕組みに移ってきたのである。しかし、質量についてはいまだにキログラム原器が使われている。質量をもっと正確なカタチで決めるために、産総研では原子の質量を利用する方法を研究している。

今後はさらに、ソフトウェアを組み込んだり、通信機能を備えたりした新しいタイプの特定計量器と計測機器の普及が予測されている。ソフトウェア改ざんのリスク

## 目で見てわかる 用語解説

### 計量のトレーサビリティ

国家標準→特定二次標準器→実用標準器→汎用測定器の順に、ひとつ上位の精密なものをさしで測定していく国家計量標準までの連鎖が切れ目なくつながり、正しいものさしになるよう校正する仕組みのことを「計量トレーサビリティ」と呼ぶ。



出典：今井秀孝監修『トコトンやさしい計量の本』（2007年、日刊工業新聞社）

### ● トレーサビリティの例：長さのトレーサビリティ

**長さの国家標準：光周波数コム**  
現在の1mの定義は「光が真空中を2億9979万2458分の1秒間に伝わる長さ」である。これを実現するのが「光周波数コム装置」である。モード同期レーザを用いて、光周波数コムと呼ばれる櫛（コム）状のスペクトルを発生させる。この光周波数コムを「光周波数のものさし」として用いることで、レーザの周波数を正確に決定して1 mを実現させる。

**実用標準器：ブロックゲージ**  
直方体の向かい合う面の寸法が標準として利用される。直方体の向かい合う2面が高精度に研磨され、所定の寸法となるように仕上げられている。

ノギス  
ダイヤルゲージ

マイクロメータ

**汎用測定器**  
ユーザーがモノづくりに使う測定器。ノギス、ダイヤルゲージ、マイクロメータなど。

から一般消費者をどう守るのか、信頼性をどう担保していくのかなど、課題は多い。私たちが安心してくらするように、計量技術はさらに進歩していくことが求められている。

\* 一般的に「はかり」という用語は、計量法の中で「非自動はかり」と呼ばれている。

## 南海トラフの巨大地震の観測網

巨大地震の予兆現象? 地中深くの  
〈ゆっくりすべり〉のゆらぎ

地下の動きを監視、巨大地震予測や防災に役立てたい!

活断層・地震研究センター地震地下水研究チーム

私たちの**生活・社会**が  
こう変わる!

高精度で信頼できるデータによって「ゆっくりすべり」の観測事例を蓄積・共有していくことで、巨大地震の発生がどれくらい差し迫っているのかがわかるのではないかと期待される。そうなれば、家庭や企業、あるいは国・行政レベルで、必要な地震対策を講じることが可能になる。

地震の予兆データ発見で  
加速する地震予測研究

地球の巨大なエネルギーが引き起こす巨大地震。千年に一度ともいわれる東日本大震災による大津波を受けて、国や各自治体は、地震や津波高の想定や防災対策の見直しを進めている。

「南海トラフ」で発生する巨大地震の最大規模もM9に引き上げられ、2012年に行われた内閣府の作業部会では、静岡県から高知県の太平洋沿岸を中心に想定される死者数が最大で約40万人以上に上るなど大規模な被害に関する試算が示され、各界に激震が走った。

いつ来るかわからない震災にどのように備えるか。私たちは、巨大地震がいつ来てもおかしくない国に住んでいるが、世代が交代する中で高い防災意識をもち続けることは難しい。しかし、もし、来るべき地震がどの程度切迫しているのかが比較的正確にわかるようになれば、リスクを過小評価することなく、必要な地震対策を講じることができるようになるかもしれない。

歴史を振り返ると、国による地震予知研究が本格的に始まったのは1970年代のことだ。M8クラスの東海地震の発生を懸念した国は、1978年に大規模地震対策特別措置法（大震法）を制定して地震対策を検討してきた。国や大学の研究機関の観測データは気象庁に送られ24時間監視されている。

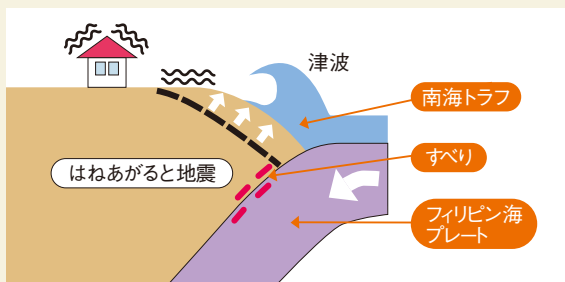
じつは、データ解析の結果、東日本大震災の際、震源域周辺で予兆を示すデータが観測されていたことがわかり、この事実が現在、地震予測につながる研究を加速させているのだ。

## 目で見えてわかる 用語解説

## 南海トラフの巨大地震

南海トラフの巨大地震は南海トラフのプレート境界が震源域とされ、M8~9クラスの地震が近い将来発生するのではないかと懸念されている。南海トラフの巨大地震のうち、東海地震に関しては「大規模地震対策特別措置法」（1978年12月施行）のもとで監視体制がとられている。

## ●南海トラフの巨大地震のメカニズム





## ターゲットは「ゆっくりすべり」 地中センサーでリアルタイムに観測

産総研は、来るべき巨大地震に備え、南海トラフの監視を続けている。南海トラフを震源とする巨大地震は過去に繰り返し発生してきた。南海トラフでは、年3~6cmの速度で海側のフィリピン海プレートが陸地側のユーラシアプレートに沈み込んでいる。想定震源域と考えているプレート境界（深さ10~30km）では、上側にある岩盤は沈み込むプレートに固着してふだんは動かないが、さらに深い場所（深さ30~40km）では、3カ月から半年ごとにゆっくりとしたすべり現象が見られる。

この「ゆっくりすべり」と呼ばれる現象は2005年頃から知られていたが、最近になって、大きな地震の前には回数が増えて長く続いたり、すべりが大きくなるといった変化が現れる可能性があることがわかってきた。また、東日本大震災の直前には、震源域付近における「ゆっくりすべり」がひと月にわたって起きていたのが確認されている。その現象と地震発生との関係が、コンピュータシミュレーションで根拠をもって指摘され始めたのはごく最近になってからである。

巨大地震の前兆現象として最も有望視されているこの「ゆっくりすべり」は、地下水位や地殻のひずみの変化



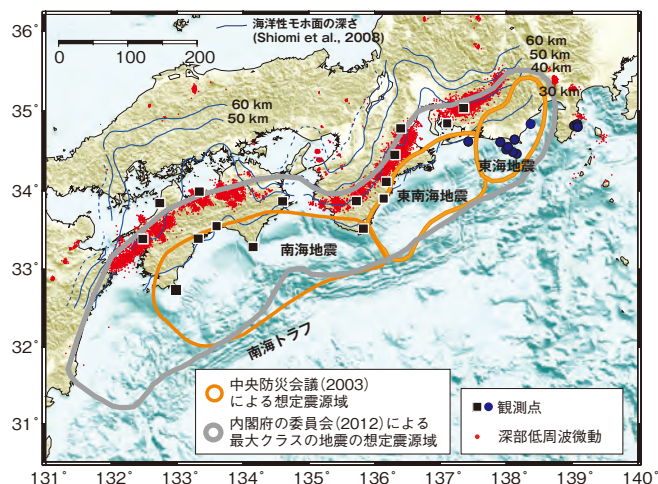
▲産総研の観測用井戸（建設中。完成後はやぐらを撤去）

として、目に見えるかたちで現れる。そのため産総研活断層・地震研究センター地震地下水研究チームでは、四国から紀伊半島にかけての16カ所に深い井戸を掘り、地中深くに設置したセンサーで測定を行い、その観測データをリアルタイムで気象庁などに提供し公開している。

巨大地震を予測する研究はまだ途上にあるが、地道な研究を支えているのは、いつの日か地震の予測を可能にしたいという研究者たちの強い思いだ。チーム長の松本則夫は、今後、さらに観測地点を増やすとともに、計測器が示すわずかなひずみから地殻の動きをより正確に読み取れるようにするなど、解析能力の向上をはかりながらデータを蓄積し、南海トラフの巨大地震の予測につなげることを目指したいという。

「巨大地震・津波に備えることは国の浮沈にかかわる重大な問題です。人々の暮らしや企業活動のために、観測結果を活かしていくことは、産総研の大きな責務のひとつだと思っています」

### 産総研の南海トラフの巨大地震の観測網



#### ●南海トラフの巨大地震の観測網の観測データ公開先など

政府内に設置され、各機関の調査結果を収集・分析を行い地震活動に関して総合的な評価を行う地震調査委員会、気象庁の地震防災対策強化地域判定会に報告されるほか、地震に関連する地下水観測データベースWell Web (<http://www.gsj.jp/wellweb>)で公開されている。



地震地下水研究チーム  
研究チーム長  
松本則夫

## 炭素繊維開発

# 釣竿から飛行機まで 「炭素繊維」の開発プロセス

## 技術を社会へ——産総研のイノベーションモデルの土台

2011年10月、次世代中型ジェット旅客機ボーイング787型機が成田・香港間で世界初の商業運航を行い、世界はこの新型の機体に注目した。それは、機体の軽量化による燃費向上が期待されたからだ。軽量化に一役買ったのは、日本企業の東レ製の炭素繊維複合材料。実は、炭素繊維複合材料は日本のモノづくり企業の得意分野で、日本の炭素繊維メーカーだけで世界の生産量の約70%のシェアを誇っている。しかもこの技術、1950年代に産総研で発見された、歴史のある技術なのである。

### 炭素繊維の応用分野:CFRPとして使用される用途例

|                           |               |   |
|---------------------------|---------------|---|
| 航空宇宙                      | 飛行機           | ・一次構造材：主翼、尾翼、胴体、フロアビーム<br>・二次構造材：補助翼、方向舵、昇降舵、フェアリング<br>・内装材：フロアパネル、ラバトリー、座席 |
|                           | ロケット          | 衛星フェアリング、段間部、モーターケース<br>ノズルスロート   |
|                           | 人工衛星          | アンテナ、太陽電池パネル、チューブトラス構造材   |
|                           | 電波望遠鏡         | アンテナ、支柱   |
| スポーツ<br>および<br>日常生活<br>用品 | 釣り具           | 釣竿、リール  |
|                           | ゴルフ           | シャフト、クラブヘッド、フェース板   |
|                           | ラケット          | テニス、バドミントン、スカッシュ  |
|                           | 自転車           | フレーム、ホイール、ハンドル、クランク   |
|                           | 海洋            | ヨット、クルーザー、競技用ボート、マスト  |
|                           | その他<br>スポーツ   | 野球バット、スキー板、スキースtock、剣道竹刀、<br>和弓、洋弓、ラジコンカー、卓球、ビリヤード                          |
|                           | 介護用品          | 車椅子、車椅子用携帯スロープ、義足、杖   |
|                           | 電気製品          | PCのハウジング、音響スピーカー  |
|                           | その他<br>日常生活用品 | 洋傘、ヘルメット、カバン、家具   |
| 産業用                       | 自動車           | プロペラシャフト、外板   |
|                           | 自動二輪車         | レース用カウル、マフラーカバー   |
|                           | 車両・コンテナ       | 鉄道車体、リニアモーターカー車体、座席   |
|                           | 機械部品          | 繊維部品、板ばね、ロボットアーム  |
|                           | 高速回転体         | 遠心分離機ローター、ウラン濃縮筒、フライホイール<br>工業用ローラー、シャフト、人絹ポット                              |
|                           | 電機部品          | パラボラアンテナ  |
|                           | 圧力容器          | CNGタンク、水素タンク、消防用空気呼吸器ボンベ  |
|                           | 化学装置          | 攪拌翼、パイプ、タンク   |
|                           | 医療機器          | 天板、カセット、X線グリッド  |
|                           | 土木建築          | コンクリート補強材、ケーブル、ロッド  |
|                           | その他           | 樹脂型<br>面状発熱体  |

出典：藪井哲郎『工業材料47(3)』（1999年、日刊工業新聞）をもとに作成

## 強くて軽くて熱伝導性がよい 素材界の優等生

炭素繊維とは、有機繊維を焼成して得られる炭素含有率が90%以上の繊維のこと。19世紀に発明王エジソンが日本の竹を蒸し焼きにして炭素化し、白熱電灯のフィラメントに使ったのが始まりといわれる。

この繊維の大きな特徴は、軽く、強く、硬いこと。鉄に比べて重さは4分の1、強度は10倍、硬度は7倍以上で、耐疲労性、耐腐食性、振動減衰性（すぐに振動が止まる）、X線透過性、熱伝導率が高い。一方で熱膨張率はきわめて低く寸法安定性（大きさが変わらない）に優れているという、なんとも優等生的な素材なのである。

炭素繊維の研究開発が本格化したのは1950年代のことだ。アメリカで宇宙開発用に耐熱性の高い炭素繊維が必要とされ、レーヨンを原材料にした炭素繊維が開発された。それを聞いた通商産業省工業技術院大阪工業技術試験所（産総研の前身の機関のひとつ）の進藤昭男博士は、ぜひ日本でもと意気込み、試行錯誤の後、ポリアクリロニトリル（PAN）繊維を用いて合成することで、より性能の高い炭素繊維ができることを発見。1959年にPAN系炭素繊維の特許を申請した。

## 開発から産業との協働へ 技術発展の基盤をつくった「進藤モデル」

PAN系炭素繊維の開発当初は、耐熱性や電気的特性





- 防災
- 医療・福祉・介護
- 娯楽・スポーツ
- エコ
- 交通



- エレクトロニクス
- 機械・ロボット
- 自動車
- 航空・宇宙
- 素材・材料



◀ ボーイングB787は機体構造重量全体の50%をCFRPが占める。燃費向上に加え、胴体構造の強度化により客室スペースが拡がり快適性も向上した。

写真提供：ボーイング

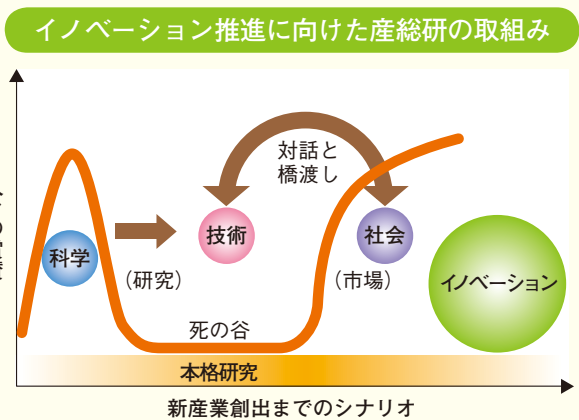
を主に利用することを想定していた。しかし、見学に来た米軍関係者から、強度と弾性に優れていることを指摘され、構造用材料としての可能性を確信、研究方針を変更することになった。これにより、産業用への応用範囲がぐんと広がることになる。

進藤博士の研究を受け、国内でも炭素繊維の研究に参入する企業が増え、産業化に向けた取り組みも活発になった。1962年には(株)日本カーボンがPAN系炭素繊維のパイロットプラントを設立。1971年には、ライセンス許諾を受けて産官連携で長期の研究開発を行っていた東レが、PAN系高性能炭素繊維の本格的生産を開始している。

進藤博士はPAN系炭素繊維の発明以後、製造法の特許を取得し、30社近くの企業への技術指導を実施、炭素繊維評価法の標準化の取りまとめなども行い、炭素繊維技術力の基盤形成に尽力した。発明を他分野での製品化に結びつけたこの方法論は、「進藤モデル」と呼ばれ、現在の産総研の研究開発の土台になっている。

## スポーツ用具から宇宙開発まで用途は拡大し続ける

炭素繊維を構造材料に使用するときには、繊維の状態ではなく、主に樹脂などに埋め込んだ複合材料(2つ以上の材料、全体を一体化する母材と強化・補強する役割の強化材を組み合わせた材料)として用いられる。なかでも最も多く使われているのが、母材に熱硬化性樹脂を用いた「炭素繊維強化プラスチック(CFRP)」だ。ふだんはあまり意識されないだろうが、この素材は現在、



- イノベーション推進に向けた強化のポイント
- イノベーションの潮流の形成
  - 本格研究の成果の統合的な発信
  - 社会のニーズの的確な受信
  - 本格研究の推進の視点からの研究資源活用と研究支援

経営陣主導のイノベーション推進

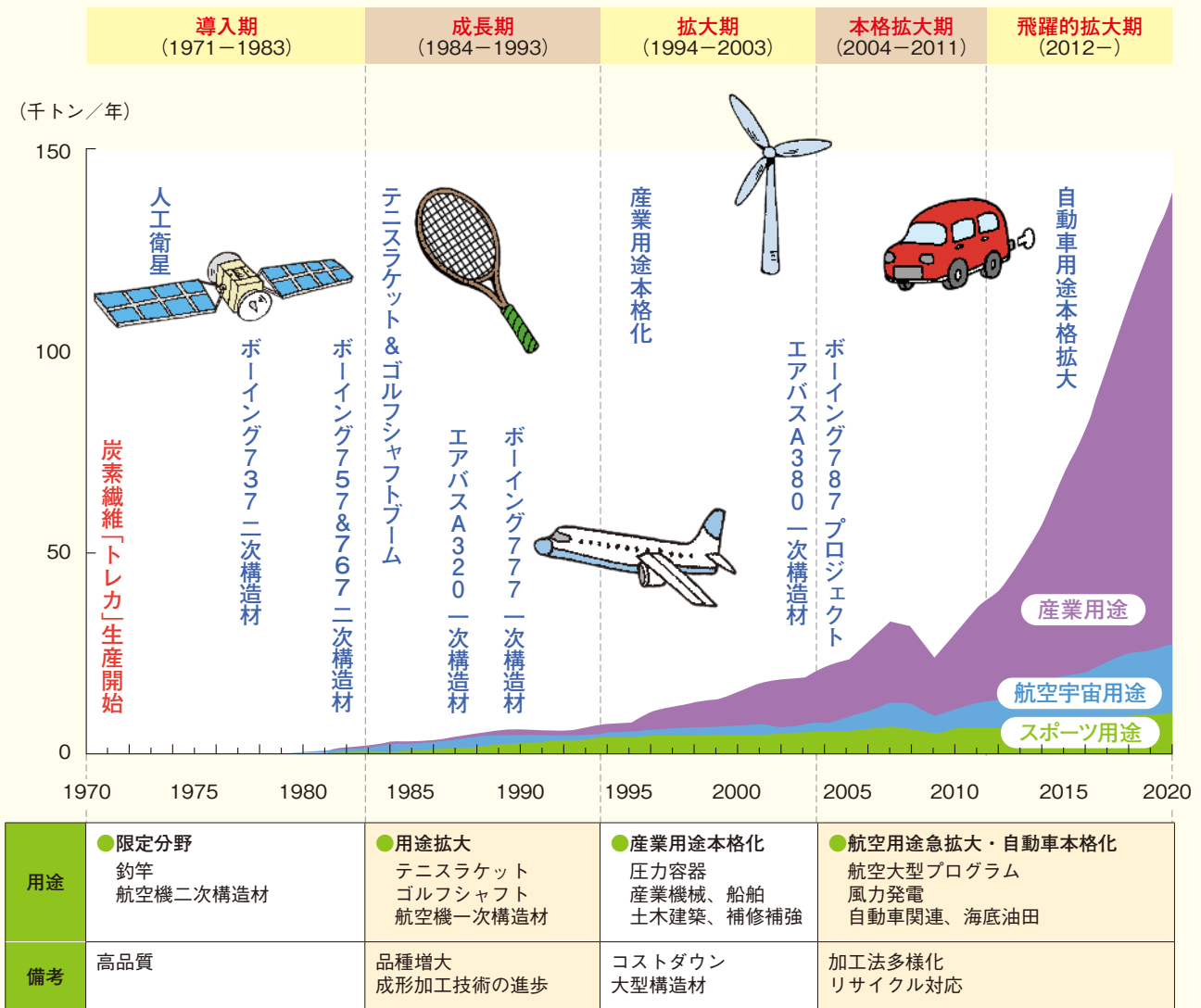


▲進藤昭男博士



▲旧大阪工業技術試験所跡地に建つ産業技術総合研究所関西センター 関西産学官連携研究棟(かんさいOSL)

## 炭素繊維市場の変遷



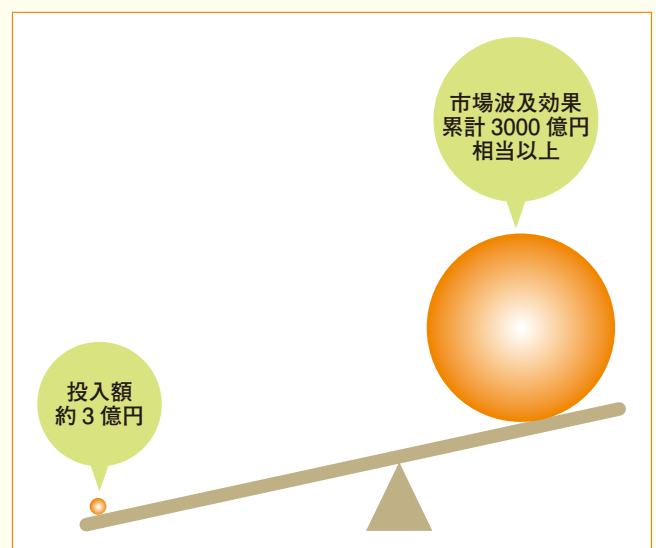
資料提供：東レ

私たちの暮らしになくてはならないものとなっている。

まずは1970年代、スポーツ用具に使用されたことで、炭素繊維は一般消費者に身近なものとなった。釣竿、ゴルフシャフト、テニスラケット、スキー板など、さまざまな用具に適用され、軽量化や性能の向上に大きな役割を果たした。現在ではスポーツ用具には欠かせない素材である。1980年代からは大型旅客機の機体への活用が始まり、その用途は現在まで、印刷機のローラー、高圧タンク、耐震補強材、風力発電のブレードなど、土木、建築、産業用機械、航空宇宙開発などへと広がり続けている。

PAN系炭素繊維の発明から、すでに半世紀以上が経過した。しかし、日本から生まれたこの技術は、今なお世界中の人々の生活を支えている。

## 炭素繊維研究の市場波及効果



# 索引

私たちに身近なキーワード

## あ

|       |    |
|-------|----|
| 医療支援  | 20 |
| インバータ | 16 |
| エコ建材  | 10 |
| エコ住宅  | 10 |

## か

|           |        |
|-----------|--------|
| 介護支援      | 20     |
| 海洋資源開発    | 22     |
| 海洋地質学     | 22     |
| 機械部品      | 30     |
| 計量        | 26     |
| 原発事故収束作業  | 24     |
| 構造材       | 30     |
| 航空機       | 18, 30 |
| 高所調査用ロボット | 24     |

## さ

|           |            |
|-----------|------------|
| 地震予測      | 28         |
| 次世代コンピュータ | 4          |
| 次世代メモリ    | 4          |
| 次世代構造材料   | 18         |
| 次世代電子デバイス | 18         |
| 自動車       | 16, 18, 30 |
| 省電力デバイス   | 16         |
| 省電力機器     | 16         |
| スポーツ用品    | 30         |

## た

|        |    |
|--------|----|
| 炭素素材   | 18 |
| 地質調査   | 28 |
| 天然資源開発 | 22 |
| 電気自動車  | 16 |

## な

|       |    |
|-------|----|
| 長さや重さ | 26 |
|-------|----|

## は

|                  |    |
|------------------|----|
| ハードディスクドライブ(HDD) | 4  |
| はかり              | 26 |
| パソコン             | 4  |
| パワーデバイス          | 16 |
| 不揮発メモリ           | 4  |
| 福祉支援             | 20 |
| 復興支援             | 24 |
| 防災・災害予測          | 28 |

## ま

|      |    |
|------|----|
| メーター | 26 |
|------|----|

## ら

|       |        |
|-------|--------|
| 量の基準  | 26     |
| レアメタル | 22     |
| ロケット  | 30     |
| ロボット  | 20, 24 |

## QRコード

産総研 HP

<http://www.aist.go.jp>



産総研 Twitter

[https://twitter.com/AIST\\_JP](https://twitter.com/AIST_JP)



YouTube 産総研 CHANNEL

<http://www.youtube.com/user/aistchannel>



## ここにもあった産総研 生活・社会を支える 変える 未来を創る

産総研ストーリーズ 2013年 No.1

編集・発行 独立行政法人 産業技術総合研究所  
問い合わせ 〒100-8921 東京都千代田区霞が関1-3-1  
経済産業省別館内 産総研企画本部  
<http://www.aist.go.jp>

表紙写真提供：ボーイング (B787)  
目次写真提供：JQA (CYBERDYNE 装着型ロボット「HAL」)

●本誌掲載記事の無断転載を禁じます。 ©2013AIST



独立行政法人  
産業技術総合研究所