

細野 秀雄 (ほその ひでお) 教授

電気を通すセラミックスで 材料の常識を一変させる

自分の中からしか出てこないオリジナルな発想で
酸化物に無限の可能性を追う

セラミックスといえば、陶磁器やコンクリートなど、どれも「電気を通さない」とされてきた。しかし、総合理工学研究科・材料物理学専攻の細野秀雄教授は、電気を通すことに成功したばかりか、半導体を開発。透明で曲げられるトランジスタまで生み出した。

科学の世界では、「常識が覆されること」など、よくあることだ。電気を通さないと思われていたプラスチックも、白川英樹博士によるポリアセチレンの登場以来、電気を通す物質に加わっている。

だがしかし、「セメントは電気を通すか否か」と聞かれれば「できない」と答えるであろう。ところが、細野教授は、セメントに電気を通すことを可能にしてみた。しかも、黒鉛(グラファイト)よりもよく電気を通す。この事実は世の中を大いに驚かせたが、一番驚愕していたのは細野教授たち研究に携わった研究者だった。

「電気が通りました」という報告を受けた際、細野教授は「ウソだろう!」と叫んだという。

セメントが電気を通す!

電気を通るセメントの発見は、偶然によるものだった。セラミックスとは、一般的に陶磁器を意味するが、狭義では細野教授の研究対象である金属酸化物のこと。

当時、細野教授たちが注目していたのは「C12A7」というセラミックス。酸化カルシウム(石灰)と酸化アルミニウムから成る物質で、アルミナセメントの材料として古くから使われているものだ。ただし、酸化カルシウムも酸化アルミニウムも電気を通さない素材としてよく知られている物質である。

この物質は、ケージ(カゴ)のような構造をしていて、その中には酸化物イオン(O²⁻)が閉じこめられている。

しかし、乾燥した酸素中でC12A7を作ってみると、カゴの中

心に「幻のイオン」と呼ばれ、最強の酸化力を持つO⁻イオンを閉じこめていることを見出ししていた。その証拠に、白金を乗せてみると、酸化しにくいといわれる白金すら酸化して黒くなってしまう。

その後、研究室ではできなかったC12A7からO⁻イオンを取り出すことにも成功。強力な活性酸素「O⁻イオン」を取り出す技術は、ディーゼルエンジンのガスを浄化する触媒や電子デバイス酸化プロセスの応用が考えられている。

この発見によりC12A7への興味が一気に高まった頃、「偶然」がさなる大発見につながる。このカゴの中に、別のイオンを入れることができるか研究を進めるうちに、研究員たちは様々な条件下で材料を作っては構造や元素の解析を繰り返していた。ところがある日、林克郎さん(現、准教授)が材料を炉の中に置き忘れてしまった。しかもその翌日、別の研究員が炉の中の材料に気づかず、水

素を流しながら焼いてしまった。

念のため、林さんがその物質を調べてみたところ、変わった反応を示した。X線を当てると色が変わり、赤外線ならば、さらに色が濃く変わるのだ。しかも、光吸収スペクトルを調べてみると、赤外線域を全く通さないことがわかった。

後日、林さんがこれらの結果を報告したところ、細野教授が「電気を通すかもしれない」と指摘した。赤外線域を通さないのは、電気を通す物質の特徴の一つだからだ。

とはいえ、細野教授自身も半信半疑であった。本来、絶縁体であるセラミックスに電気が通るはずがないと、疑問に感じていたのだ。ところが、テスターを当ててみたところパツと電気が流れた。

当時のことを細野教授は「うまくいくかどうかはわからないが、何かが絶対に出てくるという研究者としての勘があった」と振り返る。それまで長くかかっていた

物質だけに、何か変わった現象があるという実感はある。一方で、どういう条件で何が起こるのかはわからないし、五里霧中の状態ではある。それでも「こうした勘はほとんど外れない」のだという。

ナノのカゴに電子を閉じこめる

電気の流れるセラミックスの作り方は、水素を充填した炉でC12A7を焼くだけ。すると水素の陰イオンがカゴに閉じこめられた状態になる。そこにさらに赤外線を当てると、電子が解離し電気伝導性を持つという仕組みだ。

この材料の優れた点は、紫外線を当て、電気配線を簡単に書き込めること。しかも薄膜の状態であれば透明なので、電気を通す、安くて透明なセラミックスを作り出すことも可能だ。

現在、液晶ディスプレイに使われているのは、透明で伝導性のある金属「インジウム」だが、希少な物質であり、高価なのが難点。ところがありふれた材料であるセラ

「ありふれた酸化物にこんな物性があったのかと、物理学の研究者をうならせたい」と語る細野秀雄教授



細野 秀雄教授

フロンティア創造共同センター 応用セラミックス研究所
大学院総合理工学研究科 材料物理学専攻
1977年東京都立大学工学部工業化学卒業、82年同大学院工学研究科
工業化学博士課程修了。工学博士。90年名古屋工業大学助教授、95年岡
崎国立共同研究機構助教授、97年東京工業大学助教授、99年から現職。

いう、そのときに最高の性能を示したのだから。

その後、現在までに、このトランジスタを使った「折り曲げられる電子ペーパー」が大手印刷会社によって試作されたほか、韓国の家電メーカーはディスプレイの試作に成功したと発表。わずか2年で、一気に実用化に近づいた。

今後は、高性能なトランジスタが大量に必要な有機ELにとって、高性能な酸化半導体は理想的な材料となるはずだと細野教授は考えている。

「セラミックスに電気を通し、半導体を作るといって、世の中では不可能と言われることを可能にしてみました。次は、ありふれたセラミックスで超伝導を実現してみたい。『絶対にムリだ』と言われるでしょうが、今までやってきたことだって常識では考えられなかったこと。酸化物にはそれだけのポテンシャルがあると信じています」

今こそ、セラミックスという酸化物の可能性を信じ、その面白

さに魅せられてしまっている細野教授だが、研究の道に進んだのも、もともとは「透明なものが好き」という単純な理由からだ。

ありふれた元素で機能を実現する

自分でも理由はわからないが、昔から「透明な物質」が好きだった。高温超伝導を研究しなかった理由も、「黒い」から。週れば、小学校の頃。初めて化学が面白いと思ったのも、透明な「水」を使った実験だった。水を分解すると、水素と酸素という、全く違う性質のものができる。その不思議が今までつながっている。

高校生のときには、ナイロンの発明に感銘を受けた。ナイロンの合成に成功したデュボンが作った、こんな宣伝文句が衝撃的だった。「水と空気と石炭からできた、絹よりも柔らかく銅よりも強い繊維」。ありふれたものを使って、全く違う、社会に役立つものを作る。この言葉に、化学変化の本質を学んだ。

高度成長期後の日本に育った細野教授は、水俣病などの公害を生み出した「科学の負の面」を見ている。人の役に立つ科学というものに対する思いも人一倍強い。

社会や環境に配慮すれば、ありふれた元素からものを作り出すことを考えるべき。そう考える細野教授の発想は、原子の世界にも通じるものがあるという。地球上で一番多い元素は酸素。その次にシリコン、アルミニウム、鉄、カルシウムと続いていく。つまり、すべて酸化物。人類の歴史の中で最も古い道具である石器は、酸化マグネシウムと酸化アルミニウムの結晶だ。

人類が優れているのは、そこから酸素を取り出したこと。石器の中から酸素を取ったのが鉄。鉄ならば石器ではできないような自由な形が作れるし、曲げられる。そして次に、酸化ケイ素から酸素を取り、シリコンを作った。その結果できあがったのが半導体だ。

しかし、元素自体が増えることがないことを考えれば、原点に戻

いものと思われている。電子デバイスとして使おうと考えられたことさえほとんどなかった。そこで、細野教授はアモルファス酸化物に目を付けた。「アモルファス」は非結晶とも呼ばれ、結晶構造を持たない物質の状態を示す。

液晶ディスプレイなどに使われている材料として最も一般的なものはアモルファスシリコンだが、結晶シリコンと比較して性能が100分の1以下になってしまうという欠点がある。

その点、アモルファス酸化物ならば、シリコンよりもはるかに高性能なトランジスタを室温で作ることができるという。

この研究は1995年の発表当時、全くと言っていいほど注目されなかった。アモルファスシリコン全盛期で、それ以外の素材には誰も興味を示さなかったからだ。ところがそれから10年経った2005年の発表では様子が違った。細野教授が発表したアモルファス酸化半導体は、シリコンの10倍と

「材料研究の面白さは、基礎研究といつてもかなり応用に近いこと。世の中の科学技術の基礎と応用はかけ離れています。ところが、材料の場合は『この研究はどのよう社会の役に立ちますか』と聞かれても答えやすい。ただし、『絶縁体だと思っていたのに電気を通す物質は、他にどんなものがありますか』とよく聞かれますが、そんなことを聞くのは本当の研究者ではない。その物質を見つけ出すことこそ研究テーマなのだから。そんな時は『Only God Knows』って返事してやります(笑)」

細野教授は、娘から「前向きを通り越して上向き」と言われるほどの超ポジティブ思考。セラミックスのように、透明で、強く、しかしフレキシブルな心の持ち主でもあるようだ。

C12A7の持つ様々な可能性

超強酸化力を持つO⁻の大量生成



通常 O-ケージ

常温で安定なエレクトライド



伝導性を持つ透明な素材

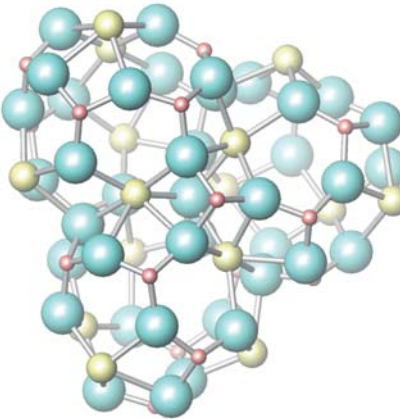


絶縁性 透明伝導性

透明な電子回路をパターンニング可能な素材



C12A7の結晶構造を構成するケージ(カゴ)



炭素が球状に連なったフラーレン(C₆₀)のような球状の構造をしている。プラスの電荷を帯びているため、ケージの中に酸素イオン(O⁻)が取り込まれる。C12A7の結晶構造は、常温で安定なエレクトライドや電子伝導性など、様々な機能を発現する

ミックスであればコストも低く抑えることができる。

さらに、ケージの中に閉じこめられている酸化物イオンを電子に置き換えることにも成功する。このことは、低温や真空中でしか安定に存在することのできなかった「エレクトライド(電子化物)」を室温で安定に存在できるようにしたことを意味する。すなわち、この領域で20年来の課題が解決できたのだ。

「エレクトライド」とは、電子が陰イオンの働きをして陽イオンと結合してできる物質である。様々な可能性があるものの、不安定な物質しかできなかったため研究が進んでいなかった。しかし、細野教授たちの研究はここにも新たな道を広げたことになる。

透明トランジスタも実現

細野教授の研究成果として重要なものももう一つある。それが「透明トランジスタ」だ。

ガラスも常識では電気を通さな

いものと思われている。電子デバイスとして使おうと考えられたことさえほとんどなかった。そこで、細野教授はアモルファス酸化物に目を付けた。「アモルファス」は非結晶とも呼ばれ、結晶構造を持たない物質の状態を示す。

液晶ディスプレイなどに使われている材料として最も一般的なものはアモルファスシリコンだが、結晶シリコンと比較して性能が100分の1以下になってしまうという欠点がある。

その点、アモルファス酸化物ならば、シリコンよりもはるかに高性能なトランジスタを室温で作ることができるという。

この研究は1995年の発表当時、全くと言っていいほど注目されなかった。アモルファスシリコン全盛期で、それ以外の素材には誰も興味を示さなかったからだ。ところがそれから10年経った2005年の発表では様子が違った。細野教授が発表したアモルファス酸化半導体は、シリコンの10倍と