

from
Z

Interview

エネルギー新時代の幕開け

カーボンアロイ 触媒による 燃料電池が担う未来

群馬大学理工学研究院 環境創生部門 教授

尾崎 純一氏

Feature Article

災害に備えて ITができること・やるべきこと

—DRについてあらためて考える—

Conversation

日本のモノづくりは 復活できるか

日本のモノづくり復活に若手の力を活かせる

微細加工研究所所長
工学博士

株式会社図研 常務取締役
EDA事業部長

湯之上 隆氏 × 仮屋 和浩

The Partner for Success

ZUKEN®

2014
Vol. **14**

CONTENTS

from Z 2014 Vol.14

Cover Illust
静かな滝



画家 / イラストレーター

水穂 真善氏

1976年兵庫生まれ。四季折々の自然や、日本という風土に育まれた色や造形などをアクリル絵の具と筆を使って描く。2007年、第59回全国カレンダー展にて、「日本印刷産業連合会会長賞」受賞。

<http://www.m-mizuho.com/>

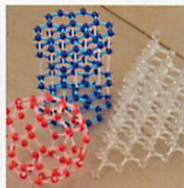
04 Interview

群馬大学理工学研究院
環境創生部門 教授 尾崎 純一氏

エネルギー新時代の幕開け

カーボンアロイ触媒による 燃料電池が担う未来

“必要な材料はどんなものなのか、私たちがみたい科学者がニーズに合わせてモノづくりを進めるわけですが、カーボン材料はいろいろなものを生み出す可能性を秘めています。それを使って大きな水素社会を作れたら、工学研究者としては非常に面白い。独りよがりには自分勝手なものを作るのではなく、人様に使ってもらえるような社会を目指したいですね” (本文より)



10 Feature Article

災害に備えてITが できること・やるべきこと

～DRについてあらためて考える～

“では、こうした事態を未然に防ぐには、どのような施策を打っておけばいいのだろうか？ ごく簡単に言ってしまうと、災害に備えて「予備のシステム」をあらかじめ用意しておけばいい。しかし、これは「言うは易し、行うは難し」で、実際に行うとなるとさまざまな課題が立ち上がる” (本文より)

14 Conversation 対談

日本のモノづくりは 復活できるか

日本のモノづくり復活に若手の力を活かす

微細加工研究所
所長 工学博士

湯之上 隆氏

株式会社図研 常務取締役
EDA事業部長

仮屋 和浩

“日本企業を取り巻く状況は本当に大きく変わっています。それに対応するには湯之上さんがおっしゃった次世代の教育システムの改革を進めたり、能力を持った若手を主役に引き上げてやる環境づくりや、企業レベルでは異文化との交流などが大切ということですね” (本文より)

エネルギー新時代の幕開け カーボンアロイ触媒による 燃料電池が担う未来

Interview



群馬大学理工学研究院 環境創生部門 教授
群馬大学アドバンスカーボン構造・機能相関解析研究拠点研究グループリーダー

尾崎純一氏

1961年6月生まれ。東北大学工学部卒業。1990年、工学博士（東北大学）取得。
2007年、群馬大学大学院教授就任。炭素材料の物理・化学構造を制御することにより、
表面機能を持った炭素材料の合成をする研究を行う。その他、バイオマス及び石炭からの
炭素材料の合成に関する研究、無機材料と炭素材料の複合化及びエネルギー変換関連触媒材料に関する
研究も行う。2012年4月、文部科学大臣表彰（科学技術賞 研究部門）受賞。

環境に優しくCO₂を排出しない、効率に優れ、音も静か——化石燃料に代わるエネルギーとして今、燃料電池が期待を集めている。だが、既に一部では燃料電池車が街を走り、家庭用発電システムも製品化されてはいるものの、思うような普及に至っていないのが実情だ。妨げとなる大きな課題がコスト。触媒に白金を利用する燃料電池は、どうしてもコストを抑えることが難しくなる。「ならば白金に変わる触媒はないのか？」

この現代の錬金術とも言える命題に対する答えとして注目されるのが群馬大学、尾崎教授が発見したカーボンアロイ触媒である。「炭素（カーボン）を使ってクリーンな社会を実現したい」と願う尾崎教授。その眼差しは、燃料電池が普及する社会を目前に見据えていた。

加速する 燃料電池開発

2013年11月、トヨタ、そしてホンダが相次いで燃料電池車を公開、2015年の市販を発表し話題を集めた。ハイブリッド車、電気自動車に続いて市場投入が待たれる燃料電池車は、水素と酸素を化合することで電気エネルギーを発生させモーターを駆動、排出するのは水のみという“究極のエコカー”として注目されている。

背景には2011年1月13日に経済産業省が発表した「燃料電池自動車の国内市場導入と水素供給インフラ整備に係る民間事業者による共同声明」がある。水素を燃料とし、走行時にはCO₂を一切排出しない燃料電池車は省エネルギー・地球温暖化対策に大いに寄与するとして、自動車会社3社とエネルギー事業者10社が2015年から市場に本格導入すると声明したのだ。自動車だけではない。エネファームと総称される家庭用定置式燃料電池など、いまや燃料電池は人々の生活に身近なものとなりつつある。

とはいえ、次世代エネルギーとして期待が高まる燃料電池にも課題はある。燃料となる水素を取り出すための触媒に希少金属である“白金”を使うためコストが高く、普及への足枷となっているのだ。産出量も少ない。そういった中、白金に代わる触媒として注目されているのが、群馬大学、尾崎純一教授が発見したカーボンアロイ触媒である。

炭素（カーボン）を使って 低炭素社会を目指す

群馬大学工学部の研究室（現“尾崎純一研究室”）は、60年前の1953年から炭素を専門に研究を続けている国内でも有数の研究室だ。尾崎教授で3代目にあたり、現在は文部科学省のアドバンスカーボン構造・機能解析研究拠点に認定もされている。

東北大学工学部化学系学科に学んだ尾崎教授は1997年に群馬大学に移籍。一貫して炭素、カーボンの研究を続け、炭素材料学会の運営委員長も務める“炭素の第一人者”である。

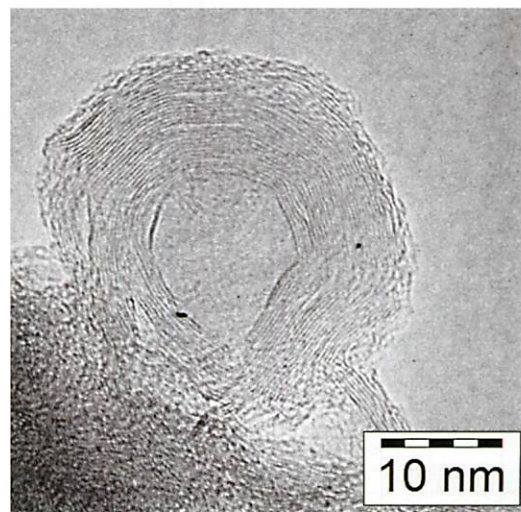
「カーボンを使って世の中を動かすような

面白いことをやってみたい。それが私の原点です。今、低炭素社会というのがひとつのキーワードになっていますが、この場合の炭素というのは二酸化炭素のことで、その排出量を抑えようという話。背反的な表現になりますが、我々は炭素（カーボン）を使った低炭素な社会、すなわち水素社会を目指しています。水素を使った燃料電池との関わりはそこにあります」

天然ガスや石油、ガソリンに代表される化石燃料に代わるエネルギー候補として、尾崎教授は水素に着目した。エネルギー効率に優れ、燃やしても排出するのは水のみ、爆発エネルギーも大きい。水素がクリーンエネルギーとして高い可能性を持っていることは明白だった。一方、水素は純物質としては自然界に存在せず、水や石油から取り出す必要がある。またその性質上、保管も容易ではない。水素をつくる、ためる、つかう——クリーンな低炭素社会を実現するため、尾崎教授はこの3つの課題にカーボンを使って取り組んでいるのだ。



提供：日清紡ホールディングス
日清紡HDはカーボンアロイ触媒を使った燃料電池で走る模型電車を公開している。ここで使われている燃料電池の出力は約10W。



極めて小さなナノシェル（中空の球状）構造を持つカーボンアロイ。ひとつのシェルの直径は10～50nm（ナノメートル＝10億分の1メートル）ほど。

透明なものは電気を通さない？ 素朴な疑問に引き込まれて 炭素（カーボン）の世界へ

「もともと“電気を通すもの”が、すごく好きだったんです。電気を通すというのはどういうことなのか？ それがこの道にきたきっかけです。高校の時、先生が『ガラスやプラスチックなど透明なものは電気を通さないだろう？』と教えてくれたのですが、ピカピカに光っている金属は電気を通す。不思議でしたね。東北大学に入ってから『電気を通すプラスチックはないのか？』と考え続けました。ちょうどその頃、後にノーベル化学賞を受賞した白川英樹先生達が『合成金属—ポリアセチレンからグラファイトまで—』という本を書いていて、この『合成金属って何だ？』と調べてみると、どうも電気を通すプラスチックについて研究していたようなんですね。そういう事を自分で調べながら大学の研究室に進みました」

尾崎教授が研究室で最初に取り組んだのが触媒だった。当時は日本がちょうど石油ショックから立ち直ってきた頃。『石炭をもう一度見直そう』と、固体である石炭をガスやガソリンのような流体燃料にするという取り組みが積極的になされた時期だった。尾崎教授に与えられたテーマは“触媒を使って石炭を一酸化炭素と水素に分けよ”というもの。そこが石炭＝カーボンとの本格的な取り組みの始まりとなった。

「カーボンは、こんなにきれいなのか。もしかしたら、電気を通すかもしれない。そう考えて調べていくと、今度はグラファイトと

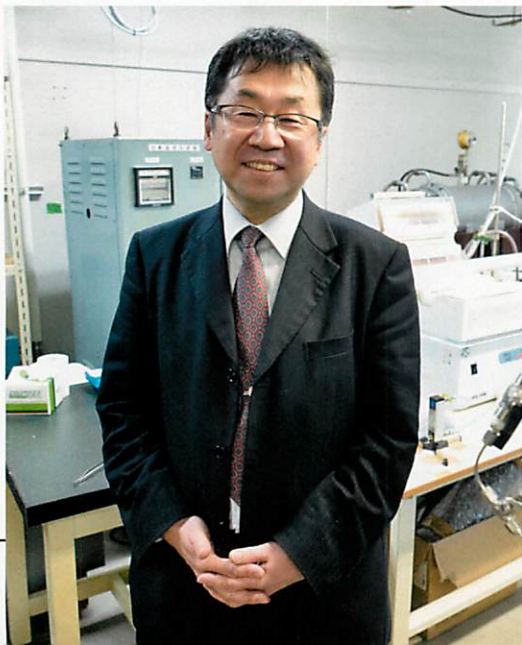
いう非常に金属に近い炭素に行き当たる。また、専門書を読んでいくと、摂氏1,000度以下で作ったカーボンは半導体的な性質を示すという話があり、ならばシリコンもゲルマニウムも全部同属の元素だからカーボンもそうなるのでは？ と、どんどん進むわけです。これは面白い、博士課程に行ってもっと研究してみようということになりました。電気を流してくれるところ、機能性のあるところ、そして後々ですが触媒的な特性を備え、化学反応するものに心惹かれたのです」

その後、東北大学からカーボンの研究に実績を持つ群馬大学に籍を移すことになる。

「元々、カーボンで半導体のようなことをやってみたいと思っていたのですが、根が化学屋なので化学反応がないと面白くない。我々は常に何か面白い形や結晶構造を持ったカーボンを作っていきたいと研究していますが、カーボンに電気化学的なすくいい特性があるということは分かっていたんです。群馬大学に来て、研究室の大谷杉郎先生や大谷朝男先生に『なんかこれ、面白いんですけどどうしましょうかね？ 触媒活性はあるんです』と相談したら、『ならばそのカーボンを燃料電池に使ってみなさい。燃料電池はこれからの分野だよ』と言ってくれた。そして、調べていくと面白い結果が出てきた。これが1998年頃のことです。まだ2000年にはなっていませんでした。ちょうどその頃から固体高分子学の燃料電池というのが国家プロジェクトとして動き始めるという話を聞いていた——そんな時期でした」

実験を繰り返すにつれてカーボンの活性は上がり、触媒としての可能性をさらに高めていく。

「その過程はもう面白くて仕方なかったですよ。当時、私はまだ実験室に入っている人間だったので、3ヶ月ぐらいかけて測定法を開発し確認して、学生達にテーマとして渡した。そうすると彼らは『先生、今日はこの実験をやってみました』といろいろトライする。その度に活性が上がる。今度は『この活性が発現するのはこういう理由なのでは？』と考えて実験してみると確かにまた活性が上がる。あれは非常に楽しい時間でした。あの時はうちの実験室、カーボンのマジシャンじゃ



ないかと思ったくらいです(笑)」

このとき尾崎教授が発見したのが窒素・ホウ素ドーピング系と呼ばれるカーボンアロイ触媒だ。ユニークなのは窒素とホウ素という相反する電荷を持つ元素を同時にドーピング^{※1}した点で、従来はお互い中和して効果がなくなるだろうと言われていた。

「半導体の説明になりますが、n型半導体とp型半導体というものがあり、それぞれn型のときは窒素をシリコンの中に入れ、p型のときはホウ素を入れるんです。ならば両方を一遍に入れたら何が起こるのか？ 何も起こらないだろうと考えるのが普通ですし、入れる手法も簡単ではない。でも、どうなるかやってみようとしてみたら意外な結果が出たわけです。化学というのは何でもやってみないとわからない。1+1が常に2になるとは限らない世界なんです」

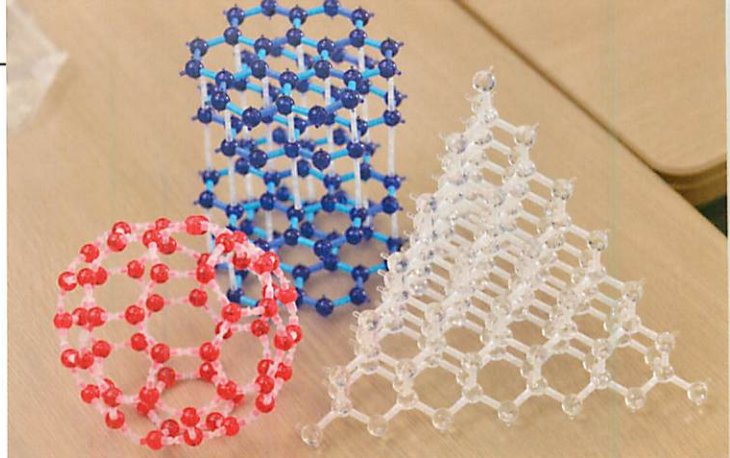
だが、あまりに革新的な発見だったこともあり、当初は思いがけない苦労もあったという。

「学会で発表するとなると、なぜ活性が上がったのか説明できる理由が必要なんです。通常の何もしていないカーボンと比べて、より高い電流が実際に流れるのは確認できても『なぜそうなるのか？』という話になる。そこは辛かったですね。何よりも錬金術ではありませんが、白金の代わりになるというところだけで眉唾だと思える人もいます。そういう話は後になっていろいろ聞かえてきましたし、信じてくれない人もいました」

尾崎教授は東北大学時代、既に中空構造を持つナノシェル系カーボンアロイ触媒を発見している。ナノシェル系と窒素・ホウ素ドーピング系。現在、燃料電池の触媒としては、この2つのカーボンアロイ触媒を掛け合わせて研究が進められている。

● 製品化に向け、日清紡HDと共同開発

カーボンアロイ触媒の具体的な製品化に向けては、2007年頃から日清紡ホールディングス株式会社（以下、日清紡HD）と共同で開発を進めている。これは元々、尾崎教授が所属している炭素材料学会の幹事に日清



写真上はカーボンの構造モデル。中央がグラファイト、右はダイヤモンド、左はフラーレン（炭素原子からなるクラスターの総称）。写真下は研究室にある多彩なカーボンの数々。試作のスプリングは恐ろしく軽量だが「実は引っ張りには弱い」（尾崎教授）とも。

紡HDの社員がいたのがきっかけだ。日清紡HDを中核会社とする日清紡グループは、「環境・エネルギーカンパニー」として燃料電池分野の素材に関する研究および事業を行っている。主たる製品は、燃料電池用カーボンセパレーターであり、その製造・販売を行い、これは家庭用燃料電池（エネファーム）にも適用されている。

「我々が見つけ、作った素材を具体的な製品化に向けて作り込んでいくのが日清紡HDさんの領域です。基礎と応用で、まさに両輪といったイメージ。まずこちらが基礎を回すと、あちらが応用で回してくる。それに応えてこちらがまた回して坂道を上がっていくイメージですね。あちらから頻繁に研究者が来られて、うちで実験してその結果を話し合ったりします。また、うちの特任教授も含めてさまざまなデータの解析やミーティングを行っています。企業の人はスピード感がありますね。こちらは大学院生などに任せているので、授業を優先してしまうのですが、あちらは非常にレスポンスが早い。

実はうちの卒業生がひとり先方にいるんですよ。女子学生ですが、今でもよくうちに来て実験しては『先生、こうなんですけど？』なんて気軽に言ってきます。私も相手が学

※1 結晶の物性を変化させるために少量の不純物を添加すること。



生のときみたいに『論文を書けるように進めなさいよ』『この測定はどうなった?』という感じで返していますが、共同で研究を進めるのに彼女の存在は大きいかもしれません」

● カーボンアロイ触媒が 燃料電池の起爆剤に

目前に迫った実用化に向けて、大学と企業という両輪で開発が進められているカーボンアロイ触媒。希少金属である白金にとって代わる“夢の新素材”の開発は、現在どの程度まで進んでいるのか?

「白金というのは非常に限られた物質です。しかもほとんどが南アフリカ、ロシアでしか産出されず、海外に頼らなければ手に入らない。でもカーボンであれば、極端な話をすれば原料はその辺に生えている木でも構わないですし、国内にあるようなプラスチックを使っても良いわけです。窒素と鉄とカーボン、これさえあればできる。エネルギー問題は時には政治的な絡みまで出てくるありますが、そういう意味で燃料電池は、資源に恵まれていない日本にこそ向い

ている技術だと考えています。課題としては燃料となる水素をいかにして取り出し、溜めるかなどがありますが、そこは社会インフラなどと含めて考えています。

性能について言及するのは何を指標にするのかが非常に微妙で、難しい問題があります。分かりやすい表現としては、セルに組んだときにどのくらいの発電ワット数が出てくるのか、何ボルト出てくるのか、そしてどのくらいの電流が取れるのか、という話になると思いますが、そこは産業的な話になるでしょう。同じ触媒を使ったとしても、それを電極マテリアルとしてどのくらい作り込んでいくのか、それこそモノづくりの世界の話なんです。この部分はパートナーである日清紡HDさんの領域で、私たちはもっと基礎的な部分を受け持っています」

日清紡HDによると、カーボンアロイ触媒を使った燃料電池の性能は白金にはまだ及ばないものの着実に実用段階に近づきつつあるという。日清紡HDではカーボンアロイ触媒を使った燃料電池で走る模型電車の模擬実験も公開しているが、この燃料電池の出力は約10W。このサイズの燃料電池で携帯電話やスマートフォンの充電を賄うことも可能で、価格も白金の6分の1～10分の1くらいまで抑えることができる。

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構が出版しているNEDO燃料電池・水素技術開発のロードマップ2010によると、自動車に搭載される燃料電池のシステム出力を約100kWとした場合、現状技術ベースで量産効果(年間50万台)を見込んだときのシステムコストは約100万円と言われているが、システム全体のコストのうち、現状技術ベースではスタック※2が約60%、その中で電極触媒のコストが半分以上を占めている。現状の触媒における白金使用量は0.5～1.0g/kWとなっており、これがコスト高の大きな要因と言われている。

● 炭素(カーボン)が実現する 水素社会の未来像

目前に迫った燃料電池の実用と普及。「炭素を使う低炭素社会の実現」を目指してきた

※2 水素と酸素を反応させて電気を発生させる燃料電池車の心臓部。



尾崎教授は、この先にどのような社会を思い描いているのだろうか？

「エネルギーがどうなっていくのかはとても大きな話ですが、やはり分散型電源というのが重要になってくるのかもしれません。先の大震災のときもやはり大規模停電は避けられませんでした。多くの方が指摘しているように、大規模発電でなくても効率が下がらない燃料電池というのが、これから期待されているものかもしれません。定置式燃料電池が普及して各コミュニティーレベルで電源を確保し、さらにそれがネットワークで繋がっているイメージです。エココミュニティーの電源は安価に供給されないといけません、そういうところで我々の技術が重要になってくると思います。

もちろんその時の水素の供給も忘れるわけにはいきません。水素吸蔵材料を使って運送を楽にして水素ステーションに運べるようにするのもいいし、もしかするとまた違う話になるかもしれない。また、水素の保管も重要な技術課題になります。

例えば山間部であれば水素ステーションではなく、やはりガソリンだとなるかもしれません。エネルギーに関しては、メインとなるライフラインが途切れたとしても稼働できるシステムであるべきですが、そのときの水素の供給というのがまだ見えていません。しかし、ガソリンスタンドは全国津々浦々ありますから、そこはすぐには変わらないでしょう。一方、大都市圏などでは思っているよりも早く水素に移行するかもしれません。

材料は我々が供給できるようにしていきたいですが、システム全体をどう考えていくかが重要になってくると思います。そこを受け持つのは、まずは大きな公共の立場にいる

人達とか、それを供給できるような大きなインフラストラクチャーを作る会社の人などです。

そこで必要な材料はどんなものなのか、私たちみたいな化学者がニーズに合わせてモノづくりを進めるわけですが、カーボン材料はいろいろなものを生み出す可能性を秘めています。それを使って大きな水素社会を作れたら、工学研究者としては非常に面白い。独りよがりには自分勝手なものを作るのではなく、人様に使ってもらえるような社会を目指したいですね。

あとは若い人たちが『カーボンなんてただのバーベキューの炭かと思っていたけど、こんなことができるんだ。材料というのは奥深い。それなら化学を勉強してみようかな』と思ってくれたら嬉しいことです。

最後にひとつ、尾崎教授はカーボンアロイ触媒に続いて、どのようなジャンルに視野を向けているのだろうか？

「工学というのは人がより良く生きていくためにあるものです。今、私たちが生きていくのに何が必要かといったらエネルギーが必要です。食べ物も必要。エネルギーと食べ物が満たされたら次は？ 長生きしたいと思うじゃないですか。今、私がやってないところといったら食べ物と健康という分野です。そこにどういう風にカーボン材料が関わるかというのを、長期のテーマで考えていきたいと思っています。

結局、私たちにできるのはカーボンの構造を変えること。カーボンの構造が変わることで、どう化学的な性質が変わるのかを調べる手立てを持っているわけです。どんな分野の、どんな状況で、どういった材料が求められているのかが明確になれば、どんどん具体的な話に進んでいけると 생각합니다」



群馬大学
理工学研究院
環境創生部門
尾崎純一研究室
<http://jozaki-carbon-lab.dept.eng.gunma-u.ac.jp/~jozaki/index.html>