

## 伝統材料の紙に 新たな命を吹き込む 温故知新融合研究

古くから伝わる伝統的な材料である紙の新たな用途を開拓したい——。そんな思いで始めた研究は、紙の触媒や蓄電デバイスという画期的な成果を生み出してきた。しかもその一部はすでに実用化されている。古くて新しい紙という素材が、私たちの生活を変える日が近い将来、やってくるかもしれない。

大阪大学  
産業科学研究所  
セルロースナノファイバー材料分野 特任助教

### 古賀大尚

[こが・ひろたか] 1981年、福岡県出身。九州大学農学部卒。同大学院生物資源環境科学府森林資源科学専攻修了。博士（農学）。東京大学大学院農学生命科学研究科・日本学術振興会特別研究員を経て、2012年4月より現職。研究はここまで順調にきたが「もちろん失敗は何度もしています。でも失敗しているときに考えて、次のアイデアが浮かぶことも多い」という。

## 水素をつくる紙

——事前にいただいた資料に、水素エネルギーをつくる紙を開発したとありました。想像もつかないのですが、いったいどのようなものなのでしょうか。

それは九州大学の大学院にいたときの研究テーマです。私はその研究で学位を取りました。紙というのは定義が広く、広義に言えば繊維が堆積してできたものを紙といいます。私がこの研究で使ったのは、木材繊維（パルプ繊維）由来の普通の紙ではなく、セラミック繊維でつくった広い意味での紙です。その紙の中に、水素をつくる金属触媒の粉を混ぜ込みます。粉の状態のままだと、水素をつくった後に回収して再利用するのが難しいので、紙に担持<sup>たんじ</sup>させるのです。そうすることで取り扱いやすくなります。

先ほども申しましたが、紙は繊維が堆積したもので、内部はスカスカの状態ですから、その中に液体やガスを流し込むことができます。したがって、水素をつくる触媒の粉を混ぜ込んだ紙の中に水素の原料を流し込めば、水素をつくる紙ができるのです。

——他にも環境を浄化する紙や、有用化成品をつくる紙も開発されたそうですね。

いずれも抄紙技術を応用して開発したペーパー触媒によるものです。環境を浄化する紙は、NO<sub>x</sub>を流し込むと、出てきたときには窒素になっているというものです。これは小型屋外作業機械用に一部が実用化されています。化成品をつくる紙というのは、原料を流し込んだら薬のもとになる化成品が出てくるというよう

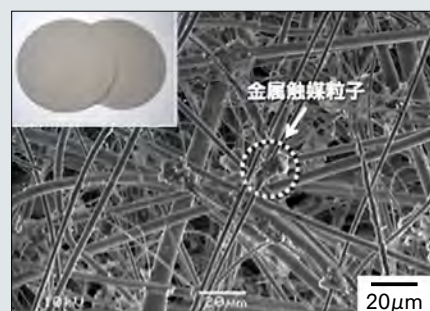
ないイメージです。

紙を使うと反応効率が上がるというのがひとつのポイントです。これは紙がとても都合のいい構造をしているためです。繊維が積層した紙のネットワークは、全部が連結した構造になっています。そのためあらかじめ繊維の表面に触媒の粉をつけておいて液体やガスを流し込むと、全体に行き渡るのです。これが単純なハニカム構造だったりすると、ガスや液体が直線的にしか流れず、拡散しにくくなってしまいます。物質をきれいに流し込む紙の構造が、反応効率を高めるということです。

## 紙の可能性をもっと広げたい

——そもそも、なぜ紙に着目したのですか。

九州大学の農学部で植物の有効利用について研究していました。紙は植物由来の材料の最たるものですから、そのときに紙の用途を開拓したいと思うようになったのです。紙の可能性をもっと広げたい、面白いことがしたい、というところで紙の構造に着目したときに、ハニカムの代



ペーパー触媒の写真（挿入図）と内部の走査型電子顕微鏡写真。繊維ネットワーク構造体内部に金属触媒粉末を抄き込んでいる。紙特有の相互接続マイクロ空間が反応物質の好適な流れ場・反応場となる。

替になり得るのではないかと考えたわけです。

——紙に着目したというよりは、紙からスタートしたということですか。

その方が、より真実に近いかもかもしれません。もちろんそれは、恩師である九州大学の北岡卓也教授から、アイデアとテーマをアドバイスしていただいたうえでのことですが。九州大学では今も後輩がこのテーマを引き継いで研究してくれていると思います。

——今は、紙の蓄電デバイスの研究をされているそうですね。



\*担持＝触媒として利用する金属（たとえば白金）の微粒子を担体に付着させること。（大辞林）

電子デバイスを紙で作るというテーマで取り組んでいる研究のひとつが、蓄電デバイスです。電池は、2つの電極の間にセパレーターがある構造になっています。もともとセパレーターには紙が使われることも多かったのですが、私は電極も紙で作れると考えています。もちろん通常の紙は絶縁体ですので、そのままでは電極にはなり得ません。

そこでこの研究では、ペーパー触媒で培った技術を用いて、還元型酸化グラフェンを紙に混ぜ込む方法を採用しています。還元型酸化グラフェンはナノ材料なので取り扱いにくい面があります。だから紙に混ぜて取り扱いやすくしているのです。紙にはフレキシブルにできるという利点もあります。また電極にも紙の構造が有効に働く面があります。

電極に電子がたくさんたまると、電池が長持ちします。その点、繊維のネットワークでできている紙は、比表面積が大きく、多くの電子がたまりやすい構造といえます。電子をためるときには電解液が電極にしみ込んでいる必要がありますが、その点でも中がスカスカの紙の構造がと

ても有効なのです。

電極は多孔質である方がいいのですが、孔が小さすぎると電解液が浸透しにくくなります。ですから比表面積が大きく、孔もある程度大きい方がいい。その最適なバランスがあるはず。そこを追求しています。

## パルプ繊維の方がいい結果に

——紙を使う難しさはありませんか。

紙は伝統的な材料なので、電子デバイスなどの新しい分野では使えないと考えられがちです。ところがあらためて立ち返ってみると、紙の技術が使えるところがいろいろある。そこがこの研究の面白さでもあります。しかも、ラボレベルではありますが、かなり性能のいいものができるのです。細かいところで難しいことも多少はありますが、ここまでは予想以上に順調にきています。

紙というと最近、セルロースナノファイバーが注目されています。実は私もこの研究で最初はセルロースナノファイバーを使ってみました。ところが意外にいい結果が得られ

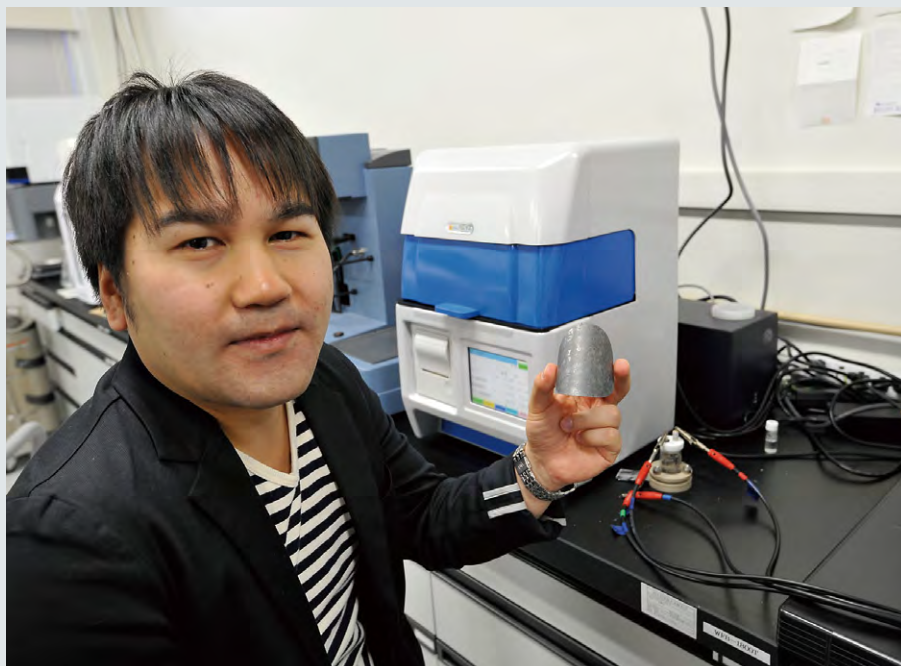
ませんでした。そこで従来のパルプ繊維に切り替えたら、予想以上にいい結果が出たのです。

——ナノファイバーでいい結果が出なかったのはどうしてですか。

細いセルロースナノファイバーで作った紙だと孔のサイズが小さすぎて、電解液が浸透しにくいので、容量を大きくできないのかもしれない。パルプで作る紙だと孔のサイズが1,000倍くらい大きいため、電解液が浸透しやすく、容量的には10倍くらい違う結果も出ています。紙の構造が容量を決定しているわけです。もちろん、セルロースナノファイバーでも改良を加えればさらによい結果が出せる可能性も十分にあると思います。材料は変えず、繊維の太さとか構造を変えて容量を増やしていくという紙中心の発想で、新しい研究テーマを開拓したいと考えています。

——構造を変えることは難しくないのですか。

そこがまた紙の面白いところで、簡単にできるのです。セルロースの細いファイバーがたくさん束になってひとつのパルプ繊維になっている。セルロースナノファイバーは、それを解きほぐして1本1本取り出しているイメージです。その過程で1本



人差し指の上に乗せた紙の蓄電デバイス（蓄電紙）試作品第1号。

1本にせずに、たとえば5本の状態にするとか、そうするといろいろなサイズの繊維が得られます。太いものを使うと孔も大きく、細いものを使えば孔も小さくなる。また、繊維を紙にする工程で工夫を加える手もあります。色々な戦略で孔のコントロールが自在にできます。

## 理論値に迫る容量を実現

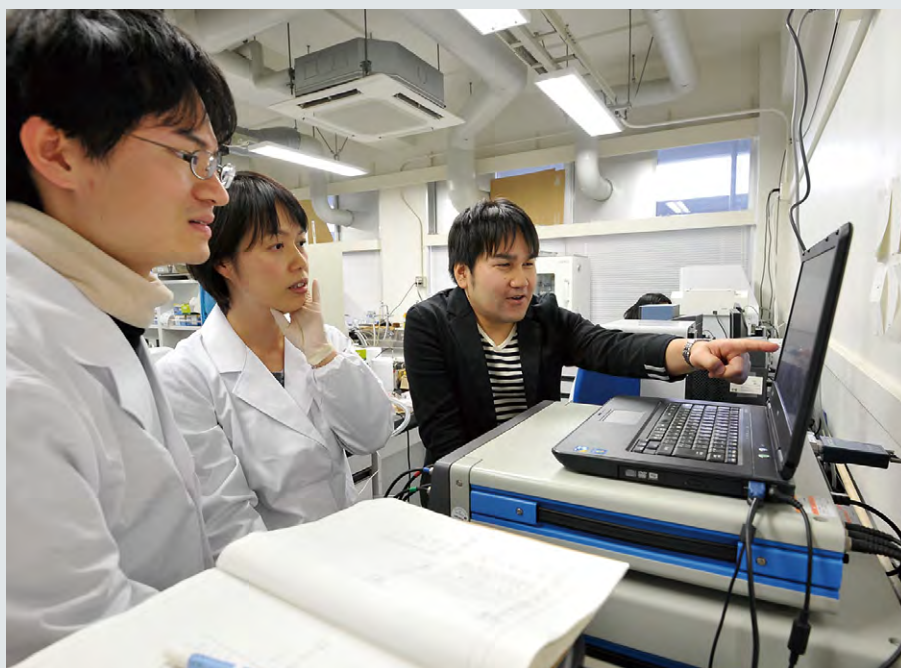
——パルプ繊維だと、容量はどれくらい出ているのですか。

スーパーキャパシタ用電極として評価した場合、ベストレコードで200F/gくらいです。現状では、平均値だと、150F/gくらいでしょうか。現在使われている活性炭の電極は容量が30~40F/gくらいといわれていますので、約5倍長持ちする電極ができていくということになります。もちろんラポレベルのことですが、高いポテンシャルといえます。

——より容量を向上させるには、どのようなことが必要になりますか。

表面積と浸透性を両立させるところでいろいろ条件を振ることが必要になると考えています。電極材料には今、還元型酸化グラフェンを使っていますが、その他のナノカーボン等、材料自体の最適化をすることも大事です。グラフェン電極の容量は理論値が550F/gといわれています。現状では、コンスタントに300F/gくらいいけば世界でも最先端レベルと胸を張れると思います。ただ、ここまではトントン拍子だったのですが、そこから先はなかなか上がっていないのが現状です。

——光照射技術による還元型酸化グラフェンペーパー電極の創製という研究もされているとお聞きました。これはまだ詳しくお話しできない



のですが、グラフェンは、比表面積が一番高いカーボンナノ材料ですが、高価なうえに、凝集しやすくて理論値どおりの成果が出ないという問題があります。それに対してグラファイト（鉛筆の芯）から得られる酸化グラフェンは、非常に価格の安いグラフェン材料として注目されています。ただ酸化グラフェンを電極利用するには還元処理が不可欠なのですが、それをするとグラファイトに戻って表面積が下がるというジレンマがありました。その問題を私は、紙抄き技術と光照射還元技術を併用する異分野融合戦略で解決を試みています。

## 研究が楽しくて仕方がない

——先生の研究がうまくいけば、将来は付箋のように薄くてペラペラの電池ができると考えていいのでしょうか。

それを目指しています。スマートフォンなどのように電子機器がどんどん小さくなっていったとき、電池をどう入れるかという問題があります。紙の電池ができれば、ほんのわ

ずかなスペースに入れることができるようになるはずですが。紙1枚分では容量が小さく長持ちしないというのであれば、何枚か積み重ねればいい。そういうデザインのフレキシブルなところも紙ならではの特徴です。ペーパー電池の量産が可能になり、新しい紙産業が立ち上がればいいなと、そういう夢は持っています。

——特任助教というのは、どういうポジションなのでしょうか。

特定のテーマによる研究が専門で、講義を持たずに研究に専念できる立場です。任期付きなのですが、もちろんその後は、さらにステップアップしていきたいと思っています。

——研究は楽しいですか。

楽しいですね（笑）。こんなに楽しいことが仕事でいいのかと思うくらいです。だからオンとオフの切り替えがあまりなく、いつも頭のどこかで研究のことを考えています。こういう研究者の方は多いのではないのでしょうか。山登りとか映画を見るのも好きですが、やはり研究はこれからもずっと続けていきたいですね。