



植物由来の新素材で循環型社会をめざす

植物由来のバイオマス材料として、注目を集めるセルロースナノファイバー。幅わずか3ナノ(10億分の1)メートルと極細の繊維は、軽く、強いだけでなく、環境にも優しい。触媒反応による植物繊維の分離に成功し、応用への道をひらいたのが、東京大学大学院農学生命科学研究科の磯貝明教授だ。

いそがい あきら
磯貝明

東京大学 大学院農学生命科学研究科 教授

1985年 東京大学大学院農学研究科博士課程修了。農学博士。米国紙化学研究所大学院大学化学科博士研究員、東京大学農学部助教授などを経て、2003年より現職。フィンランドアールト大学名誉学術博士。



植物繊維セルロースを新材料に

植物繊維の大半は、炭水化物の一種であるセルロースだ。セルロースは、植物細胞の細胞壁の主成分であり、光合成によって作られる。その生産量は、地球上の生物資源の中で最も多く、古くから紙や木綿、麻などとして利用されてきたほか、最近では液晶ディスプレイの部品材料などにも使われている。

1980年に東京大学農学部を卒業後、大学院で有機化学の研究をしていた磯貝さんは、セルロースを紙以外の材料に使えないかと考え、セルロースを有機溶剤に溶かして新たな生成物を得ようと実験を重ねていた。研究は進み、もくろんだ化学反応はうまくいったが、環境に大きな負荷をかけることが明らかになった。

「植物は自分の体を支えるためにセルロースで頑強な構造を作っていて、人工的に分解するには、大きなエネルギーと大量の有機溶剤、薬品が必要だということがわかったのです。わずかな生成物を得るために大量の廃液が出ました。この結果を見て、生物体内での反応のように水となじみやすい物質を使い、常温常圧で起

こせる反応はないかと考えるようになりました」。

TEMPO触媒酸化をセルロースに適用

ちょうどその頃、オランダの研究グループが「TEMPO触媒酸化」という化学反応をデンプンに適用し、1995年に論文を発表した。この反応により、常温常圧で有機溶剤は使わず、ごく少量の薬品だけで、デンプンの構造だけを変換できたという内容だった。この論文が磯貝さんにインスピレーションを与えた。

「TEMPO触媒酸化をセルロースに適用したら、高分子化学、セルロース化学の領域を広げる手法にならないかと考えたのです。そこで、TEMPO触媒酸化をセルロースなどに適用する研究を、1996年から始めました」。

この研究の中で、針葉樹のパルプから取り出したセルロース繊維を水に入れ、TEMPO触媒酸化を施してみた。セルロース繊維がばらばらになって水に溶けると予想していたのだが、反応後も繊維の形は残り、溶けることはなかった。研究は思うように進展せず、足踏み状態が続いた。

流れを変えたのは、2002年に研究室に

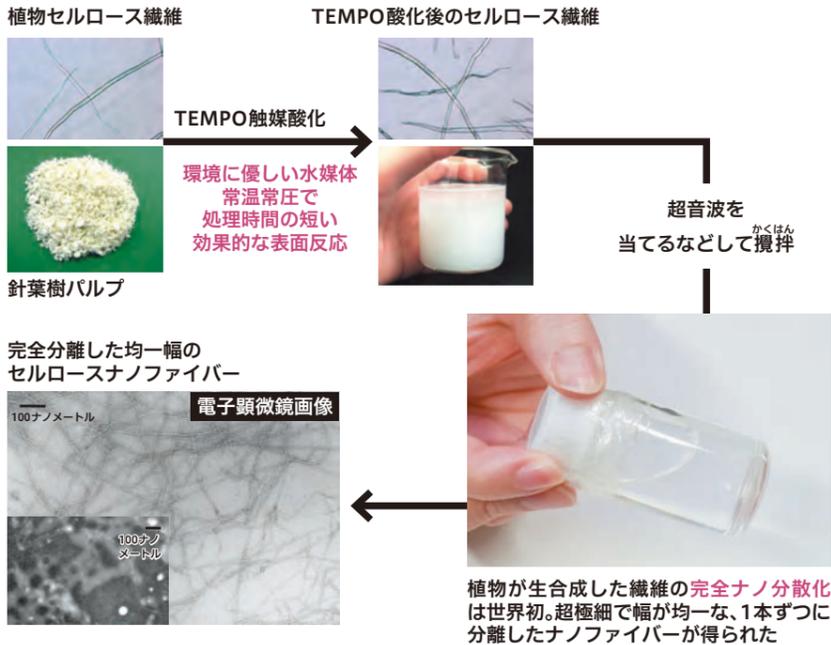
加わった齋藤継之准教授だ。当時大学4年生だった齋藤さんはこの研究を引き継ぎ、大学院在学中の2005年にはフランス・グルノーブルの植物高分子研究所に留学する。同研究所で西山義春博士の指導を受けていた齋藤さんは、TEMPO触媒酸化後のセルロース繊維に超音波を当ててみた。すると、透明なゲル状の物質が得られ、これを電子顕微鏡で観察すると、セルロース繊維の束が完全に分離し、1本1本の極細で均一な幅の繊維になっていることを発見した。こうして、セルロースの完全なナノファイバー化に世界で初めて成功したのだ(図1)。

セルロースの最小単位が見えた

TEMPO触媒酸化とは、「私たちの体の中にある酵素による反応と同じで、特定な部位を特定な形に変える化学反応」だと磯貝さんは説明する。

「植物は、セルロースで精緻な階層構造を作っています。最小単位はセルロース分子、次の単位がセルロースマイクロフィブリルで、36本が集まり束になっているといわれています。このマイクロフィブリル同士の間は結合は大変強く、単離・分離には非常

図1 針葉樹のパルプからセルロースナノファイバーを分離するプロセス



に大きなエネルギーが必要でした。ここにTEMPO触媒酸化を施すと、マイクロフィブリルの表面がマイナスに荷電します(図2)。この状態のマイクロフィブリルに水中で超音波を当てるなどしてかき混ぜると、マイナスの電気同士の反発によってばらばらになるのです。

こうして現れたセルロースナノファイバー(CNF)の幅は3ナノメートル、植物の繊維の幅はおよそ30マイクロ(100万分の1)メートルなので、1万分の1まで細くなった

ことになる。「1本1本のセルロースマイクロフィブリルが見られるようになったので、学術的に非常に面白いと思いました。ただ、この成果を2006年に発表した時は、これが何かの材料になるとはまったく想像もしませんでした」。

循環型社会を可能にする材料

企業に研究成果を紹介すると、反応は

上々だった。中でも日本製紙、花王、凸版印刷、グンゼ、第一工業製薬の5社が高い関心を示し、2007年には、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業に参加し、産学連携で研究開発を行った。

この連携の中で画期的だったのは、花王がCNFでフィルムを作ったことだと磯貝さんは評価する。ただ単にプラスチックフィルムのようなものができたのではなく、このフィルムが酸素をほとんど通さないことがわかったのだ。このフィルムはポリエチレンなどより酸素を通しにくいので、包装材料を作れば、医薬品や食品の有効期限を延ばすことができると考えた。さらに重要なのは、環境への負荷が小さい点だ。

「現在の包装材料はほとんどが石油系で、使用後に焼却処理をすると、かなりの二酸化炭素が新たに排出されます。一方、CNFに含まれる炭素は植物が大气中から取り込んだものです。植林をきちんと行えば、CNFを焼却して排出された二酸化炭素は、再び植物に吸収されます。排出分を吸収分で相殺できるので、CNFは二酸化炭素増加をゼロにする、カーボンニュートラルな材料になり得るといふ価値が見えてきたのです」。

こうしてCNFは、二酸化炭素を削減し循環型社会基盤の構築を可能にする材料

図2 樹木、木材とセルロースの階層関係

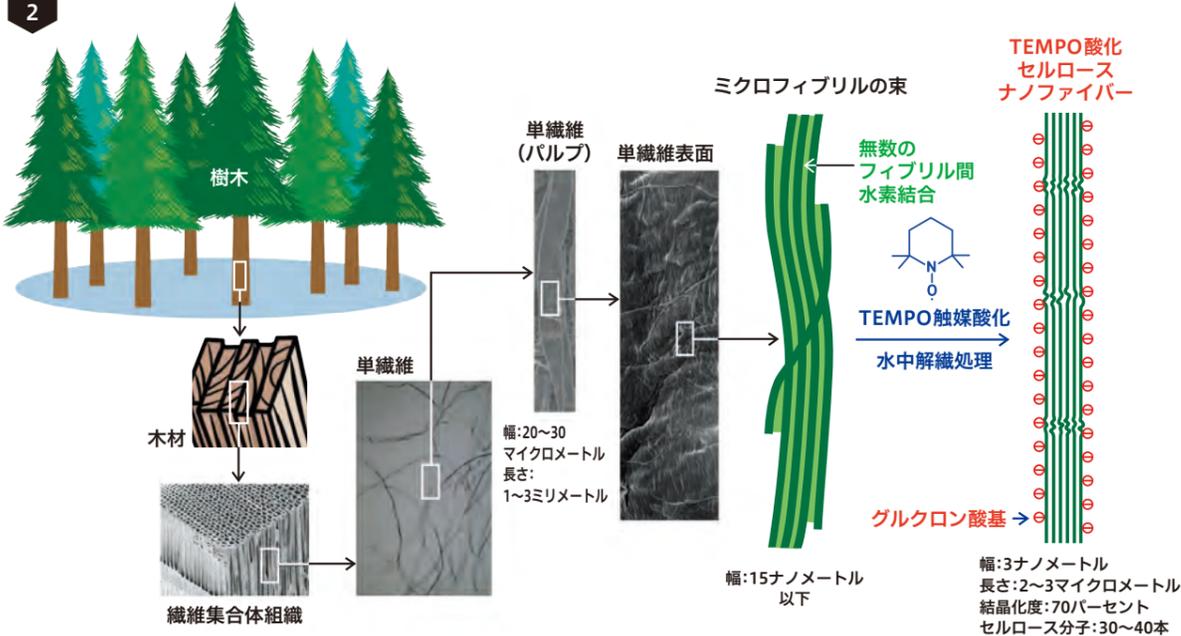


図3 木質バイオマスに蓄積された炭素は従来から循環利用されてきた(図の左側)。この循環に加えて、最先端の素材として利用する新しい物質循環の輪(図の右側)が、CNFによって創り出される。

として世界的に注目されることになった。

日本の森林を生きし 林業を活性化

新材料としてCNFの実用化が進むと、二酸化炭素が削減され循環型社会への移行が促進されるほか、林業の活性化も期待される。

磯貝さんらのCNFは針葉樹を原料としている。CNFは広葉樹からも、草や木綿からも作れるが、針葉樹が最適なのだという。植物の体はセルロース、ヘミセルロース、リグニンという成分から作られている。その割合は植物の種類によっても、植物の部位によっても異なる。セルロースを取り出すとき、ヘミセルロースやリグニンがわずかでも残っていると特性が変わってしまうので、取り除かなければならない。針葉樹は最も簡単にこれらを取り除くことがで

き、しかも長い繊維が得られる。繊維が細切れでなく長いと、材料として使いやすい。「広葉樹からCNFを作るときは、試薬を多めに入れ反応時間を長くするなど、ヘミセルロースとリグニンを取り除く手間がかかります。針葉樹からは短時間で繊維が長く不純物の少ないCNFが得られるので、結果的に環境負荷も小さく効率的なのです。日本は国土の66%が森林で針葉樹が大量に植えられ、間伐材などもたくさんあります。CNFの実用化が進めばこれらを有効に活用する道もひらけ、林業の活性化が期待できます」(図3)。

CNFの構造や 特性を明らかに

磯貝さんらの研究は、2013年度からCRESTにも採択され、京大生生存圏研究所の杉山淳司教授、神戸大学大学院工

学研究科の西野孝教授とともに進めている。

CNFの応用に向けた研究は国内外で活発だが、それは企業に任せるとした上で、磯貝さんは研究の目的と使命を次のように語る。

「CNFを使って何かを作ったという報告は世界中から聞こえてきますが、そのCNFがどのくらいの長さで、どのようなナノ構造をしているのかなどは、よくわかっていません。基礎が置き去りにされているのは、産業用の材料として使えません。実用化を進めるには、1本1本で異なる長さの分布、構造、表面特性、3次元的にどのようなつながり合っているかといったデータを集めることが必要です。基礎的な研究をしっかりと進め、CNFの信頼性を高めることが、CRESTでの主要な研究目的です」。

木材構造やセルロース科学が専門の杉

山さんは理学系で、樹木の細胞の機能や成り立ちを解明するという立場で参加している。「CNFの欠点の改善法を考えるときに、植物の成り立ちから素材を強くする方法を探ってくださいるので、杉山さんの存在はとても心強い」と磯貝さんは信頼を寄せる。

工学系の西野さんは、高分子材料の微細構造と物性に関する研究が専門で、次世代材料の開発をめざしている。「西野さんは、実用化を重視する姿勢で参加してください」。三者の役割分担は理想に近い」と磯貝さんもチームワークに期待をかける。

水に弱いという課題の克服

TEMPO触媒酸化でつくられたCNFは、もともと水となじみやすい親水性の素材で、湿度の高いところに放置すると水分を吸収して劣化する。これでは、酸素を通しにくいフィルムを作っても役に立たない。こうした欠点の改善も、CRESTでの研究目標の1つだ。

「TEMPO触媒酸化では、セルロースマイクロフィブリルの表面に、マイナス電荷を持つカルボキシ基を生成させることにより、完全に分離してナノファイバーになります。このカルボキシ基に結合するナトリウムイオンを鉄イオンやアルミニウムイオンに入れ替えると耐水性が2倍以上になり、湿気に強いフィルムを作ることができます。また、湿度が高い条件で酸素を通すフィルムでも、ナトリウムイオンをカルシウムイオンやアルミニウムイオンに入れ替えると、酸素を通しにくくなります。このように性質を変えられることが明らかになりましたが、どのようにしたら性質が変わり、なぜそうなるのかについても理論的に答えられるように研究を深めています」。

世界中で進む応用

CNFは単独であるいは他の材料と複合化して、包装材料、住宅の断熱材、自動車の断熱・軽量化材料、電子材料など広範な用途が期待されている。日本国内に限っても、磯貝さんらが開発したCNFを数社が製造し、数千社がこれを使って新



図4

スウェーデン国王からマルクス・ヴァーレンベリ賞(MWP)を授与される(左から順に) 齋藤継之さん、西山義春さん、磯貝明さん。写真提供：マルクス・ヴァーレンベリ財団、URL：<http://www.mwp.org/>、Photo：Ulf Palm

材料や製品を開発しようと研究を進めている。すでに実用化され市販されている製品もある。

その1つは、ボールペンだ。インクの分散剤にCNFを使用することで、従来品に比べ描線がかすれず、なめらかな書き味を実現した製品だ。もう1つは、大人用紙おむつ。消臭シートに、金属イオンを付着させたCNFを使用して、抗菌効果と強い消臭効果を持たせた製品だ。

このほかに、どのような具体的な応用が考えられているのだろう。その一例として、タイヤへの応用を磯貝さんに紹介してもらった。

「タイヤには、補強材としてカーボンブラックが添加されています。そのためタイヤは黒いのですが、摩耗していくと微粒子が空中に飛散して私たちの肺にも入ってきます。ヨーロッパでは健康面での影響が指摘され始め、カーボンブラックの代替物としてCNFが候補に挙がっています。私たちのCNFは親水性なので、疎水性の石油系プラスチックとは混ざりにくいのですが、タイヤのゴムは親水性のラテックスなので、CNFはよく混ざります。また、CNFは鋼鉄の5倍といわれる強度を持ちながら重量は5分の1と軽いので、軽量でもタイヤの強度を高められると期待できます」(図3)。

この研究は、信州大学先鋭領域融合研究群カーボン科学研究所の野口徹特任教

授らによって進められているという。

大切なのは人とのつながり

磯貝さん、齋藤さん、西山さんの3名は2015年に、CNFを高効率で生産する方法を開発した業績により、スウェーデンの「マルクス・ヴァーレンベリ賞」を受賞した(図4)。森林・木材科学分野、関連生物学分野における基礎研究や技術開発に対して贈られるもので、「森のノーベル賞」ともいわれる。磯貝さんは、このほかにも国内外で数々の著名な賞を授与されている。世界が磯貝さんらの業績を高く評価し、CNFに大きな期待を寄せている証しともいえるだろう。

研究で最も大切なことについて、磯貝さんは次のように語ってくれた。

「国内だけでなく世界も含めた人とのつながりだと思います。数学や物理では、1人の天才が偉業を成し遂げられるかもしれませんが、材料開発では1人の力には限界があります。人とのつながりを生かし、異なる物差しを持っている人たちと情報交換し、協調して成果を出すことが求められるのです。循環型社会への移行にはブレイクスルーが必要で、CNFはその1つになれるかもしれません。人とのつながりを最大限に活用し、循環型社会実現のために力を尽くしていきたいと考えています」。