

# 紅工朋

SUS LEUCOMYSTAX

ANTILOPE CRISPA

第9号

京都大学広報誌

くれなゐもゆる

KYOTO  
UNIVERSITY  
MAGAZINE

PTEROMYS LEUCOGENYS

CANIS HODOPHILAX

CANIS FAMILIARIS JAPONICUS

LEPUS BRACHYURUS





樹木は、小さな種にはじまり、厳しい環境に耐えて育ち、やがて地球上で最も巨大な生き物となる。植物が陸上に上がったのは約五億年前のことであるが、その後、決して快適とは言えない地球環境の中で進化を遂げ、今では、樹木は地球上のバイオマスの約九五パーセントを占めるに至っている。樹木

# 樹の気持ちを知る

矢野浩之  
(生存圏研究所教授)

のこの圧倒的な存在感を掘り所として材料を開発できないものだろうか。この地球上で数億年にわたり種をつないできた生き物の力を借りて、二十一世紀を生き抜くための材料を開発することができないだろうか。

このような思いのもと、バイオリン作りの神様、ストラディヴァリに木材の化学処理という手法で挑んだり、バクテリアや植物の作るナノファイバーで、鋼鉄より強い材料や、次世代の発光素子である「有機EL」用の透明繊維強化材料の開発を目指したり、樹の皮を細かく砕いて魔法の粉を作ったりと、「樹の気持ちを」と称して、自由な発想で研究に取り組んでいる。

研究の最前線から  
生存圏研究所



鹿児島県蒲生(かもう)町の大クスノキ。樹齢1500年。樹高30メートル、幹周り24.2メートル。



■やの ひろゆき  
1982年 京都大学農学部卒業  
1984年 京都大学大学院農学研究科修士課程修了  
1986年 同博士後期課程中退  
京都府立大学農学部助手  
1992年 同講師  
1998年 京都大学木質科学研究所助教  
2004年 現職

生物の叡智とシンクロナイズした材料開発には、分子レベルからの構造制御を目指す金属やセラミックスあるいはプラスチックといった人工材料の開発にない面白さがある。作り手である生き物の思いとシンクロナイズすると、時として人知を超えた材料作りに踏み込むことができる。

## ストラディヴァリの秘法を解明

ストラディヴァリウスと呼ばれるバイオリンがある。弦楽器製作者を輩出しているイタリア北西部クレモナの、アントニオ・ストラディヴァリ(一六四四頃〜一七三七)によつて製作されたバイオリンの総称である。製作されて三〇〇年近く経つというのに、いまだにその響きは演奏者や聴衆の心を捉えてやまない。現代の新作バイオリンでは出せない音だともいわれる。ストラディヴァリは何か特別な秘法を楽器に施していたのだろうか。

バイオリンの心臓部は、表板と裏板、さらにはこの二つの間に渡さ

れた魂柱こんちゆうという細い棒、表板に取り付けられた力木ちからぎという補強材である(図1)。製作者は、表板と裏板を粗く木取りした後、両者の打音を聞きながらその相性を整えていく。木材一つ一つに個性があるのだから、この過程に法則などない。高音が出るようにある場所をほんのわずかに削ると、その影響は他の音域にまで及び、それを押さえようとする。このためバイオリン製作者には、複雑な情報を整理し、それを再構築する直感が求められる。

ストラディヴァリは九十歳を越すまで生きて、一〇〇〇台を優に越える楽器を作り続けた。研ぎ澄まされた五感を駆使して木材の発する情報を集め、それを卓越した第六感とも呼ぶべき能力で処理したのであ



写真1 ホルムアルデヒド処理(化学処理)後にバイオリンに組み上げ、塗装の前で音質を評価した。塗装前および塗装後、いずれにおいても、処理による音のつや、響きなどの向上が認められた。

図1 バイオリンの断面

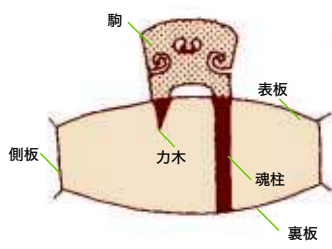


写真2 スギ小径丸太から製造したフェノール樹脂処理ギター。直径20センチほどのスギから得たベニヤ板に音質向上のための樹脂をしみ込ませ、2枚重ねた。裏板にもスギベニヤを使用。

ろう。その音色は、山に囲まれた静かな街で一心不乱に木材と対峙した天才のみが到達しえた高みである。人間を取り巻く環境が騒がしくなり第六感が衰えつつある現在、アマテ、ストラディヴァリ、ガルネリといったバイオリン製作者の再来はあまり期待できない。しかし、一方で、一七〜一八世紀のストラディヴァリの時代に比べて、木材に対する科学的知識は圧倒的に増えている。我々は、現代の木材科学を武器にオールドバイオリンに挑戦した。

木材は、軽くてよく振動するため、弦の振動を音に変換する振動板に適した材料である。しかし、どの木材を使っても良い、というわ

けではない。楽器製作者は長い時間をかけてそれぞれの楽器に適した木材を選び出してきた。その結果、バイオリンやギターの表板、ピアノの響板にはドイツトウヒあるいはシトカスプルスという、針葉樹でトウヒ属に属する木材が使われている(表1)。トウヒ属の木材について音響的性質を調べてみると、軽く振動吸収の少ない性質を持つていることがわかった。このことは、弦の振動に素早く反応し、効率よく音を放射する性質に優れていることを示す。材料に吸収される振動エネルギーが少なければ、それだけ振動を音に変換する効率に優れ、音

量の豊かな楽器になる。このことから、弦楽器の音質向上には、振動吸収のさらに小さい木材の使用が有効であると思われる。しかし、ドイツトウヒ以上に振動吸収が少なく、しかも軽い木材は見あたらない。

そこで、人工的に木材の振動吸収を低下させる処理についてさまざまな角度から検討した。その結果、ホルムアルデヒドにより木材成分の水酸基間に架橋構造を形成するホルマルル化処理や、木材細胞壁中に樹脂を染みこませる低分子量フェノール樹脂含浸処理やレゾルシン・ホルムアルデヒド処理などにより、少ない重量増加(軽さを保つ)で振動吸収を木目の方向で三〇〜四〇パーセント、木目に直角の方向で四〇〜五〇パーセントも低下することが明らかになった。これらの化

学処理は、いずれも木材の吸湿性を半分以下にまで低下させ、湿度変化に対し楽器の音響特性を安定化させる効果も併せて持つ。

早速、バイオリンの表板をホルマルル化処理し、その効果を調べたところ、音のつや、響きなどが向上することが明らかになった(写真1、2)。また、処理バイオリンの音は、オールドバイオリンと比べてもひけをとらないこともわかった。レゾルシン・ホルムアルデヒド処理についてはクラシックギターにおいて実用化され、すでに二〇〇台を越すギターが愛好家の手に渡っている。音量が増大するとともに、音の立ち上がり方が良くなるという評判である。

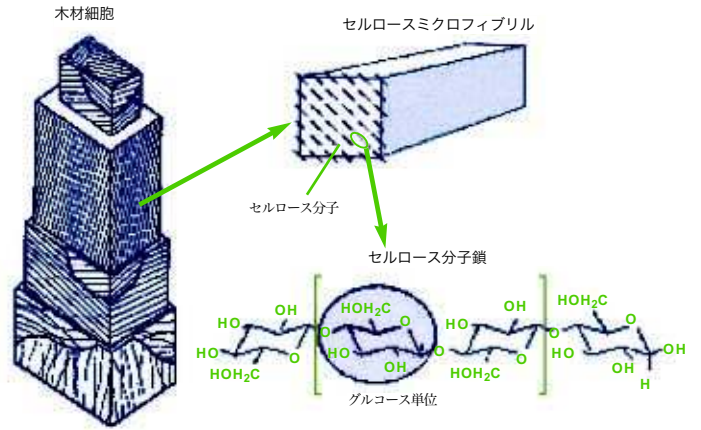
楽器の研究をしているうちに、困

**高強度で軽い  
ナノファイバー**

表1 楽器と木材	
打楽器	木琴・マリンバ: シタン、ローズウッド
	拍子木: アカガシ、シラカシ
	カスタネット: ローズウッド
	木魚: クスノキ、イチヨウ、ホオノキ
弦楽器	ピアノ: ドイツトウヒ、シトカスプルス
	ギター: ドイツトウヒ、ベイスギ(表板)、ブラジリアンローズウッド、インディアンローズウッド(裏板)
	バイオリン: ドイツトウヒ(表板)、カエデ(裏板、駒)
	琵琶: キリ、クワ(薩摩琵琶)
	箏(琴): キリ
木管楽器	クラリネット: グラナディア、ツゲ、カエデ
	リコーダー: カエデ、ツゲ、アンズ、サクラ
	尺八: マダケ
膜鳴楽器	太鼓: ケヤキ、センダン、マツ
	鼓: サクラ
	三味線: ローズウッド、タガヤサン、カリン



図2 木材細胞の構造とセルロースマイクロフィブリル



つた疑問がわき起こってきた。「樹は楽器になりたかったのだろうか?」。元々、木材は樹木の中では水をたつぷり含んだ状態で存在している。乾いて楽器材料として使われるなど、樹木は考えてもいなかっただろう。それならば、どのように木材を使うのが、樹の気持ちとよりシंकロナイズすることになるのだろうか。

水をたつぷり含んだ状態では、樹は一立方メートルあたり一トン近くもあるのだ、高さ一〇〇メートルとなると、その重さは数百トンにもおよび。それが、風が吹いても、地

震にあつても倒れず、何百年と立ち続ける。

樹木が、その巨体を支えられる秘密は、細胞の構造にある。図2に見られるように、木材の細胞は先端的高強度材料である繊維強化複合材料(FRP)と似た構造を有している。細胞を形成している繊維は、セルロースマイクロフィブリルという約五ナノメートルの細い糸である。細胞壁の約五割を占めるこのナノファイバーは驚くべきことに鋼鉄の五倍以上の強さを持つ。図2に示すように、セルロースマイクロフィブリルという分子鎖の束の長さ方

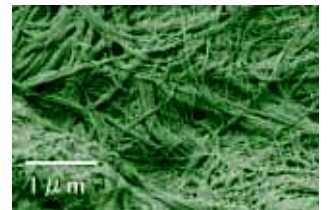


写真3 コピー紙を機械でさらにほぐすとナノファイバーが得られる。

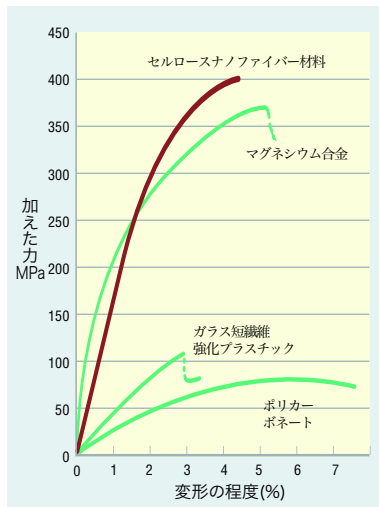


図3 セルロースナノファイバーの特性  
セルロースナノファイバーシートに加工し、樹脂を含ませてから積層、加熱プレスすると鋼鉄のように強い材料が得られる。

向に沿って、セルロース分子鎖がピンと伸びた状態でほぼ結晶化した伸びきり鎖結晶となつているからだ。伸びきり鎖結晶は、高強度繊維を得る目的で多くの研究者が追求している構造である。

そこで、木材からこのナノファイバーを取り出し(写真3)、接着剤を加えて固めてみた。クモの巣のようなネットワーク構造を有しているナノファイバーが、お互いに密着することで材料は粘り強くなり、結果として鋼鉄に近い強度が得られた(図3)。軽さは、鋼鉄の五分の一である。先端的な金属材料である

マグネシウム合金と比べても同程度の強度で、さらに軽い。このようなナノファイバーがほぼ無尽蔵にこの地上に蓄積されており、しかも、日々

### 偉大なる生物材料ナタデココ

一〇年ほど前に二世を風靡したデザートがある。ナタデココ。ココヤシの実のジュースで作る発酵食品である。酢酸菌(バクテリア)がジュースの糖類を栄養にして細い糸を体外に紡ぐ。その糸が堆積してゼリー状になり、ナタデココ独特の食感を生み出している。

このナタデココの糸もセルロースナノファイバーである(写真4)。強さは植物のナノファイバーと同じ鋼鉄の五倍で、細さは一ミリの一万分の一。可視光波長の約一〇分の一である。しかも、伸びきり鎖結晶であるセルロースナノファイバーは熱膨張も極めて小さく、もつとも熱膨張が小さい材料の一つである石英ガラスにも負けない。現在の最先端ナノテクノロジーをもつてして

も、このような高性能のナノファイバーを、均一かつ大量に作り出すことはできない。

我々は、企業の研究者と共同で、

植物によって作り出されている。セルロースナノファイバーは、未来材料の原料として極めて高いポテンシャルを有しているといえる。

このナノファイバーで透明のプラスチックを補強するという研究を行なっている。光の波長の一〇分の一程度の細さになると、物体は光の散乱を生じない。そのため、ナタデココを使えば、透明性を損なうことなくプラスチックの強度や熱的特性を改良できるのでは、と考えた。ナタデココを押しつぶして乾かしたフィルムに透明樹脂をしみ込ませたところ、繊維を六〜七割も含んだ状態で透明なフィルムを得ることができた。

バクテリアの作るナノファイバーで補強されたこの透明材料は、鋼鉄のように強く、ガラスのように熱膨張が小さい。しかも、プラスチックのように曲げることができる(写真5)。これには、曲げられるディスプレイの開発を目指している企業の研究者が驚いた。曲げられるディスプレイは、衣服に装着したり、ポスターのように丸めて持ち運び、

ピンで止められる次世代のディスプレイであるが、その基材として、彼らが長年探し求めていた材料だった。それが身近なデザート、ナタデココから作られるとは。早速、曲げられるディスプレイの基材（透明基板）への応用について共同で研究を進め、試行錯誤の結果、ついに「有機EL」をナタデココ透明材料上で光らせることに成功した（写真6）。

これは、京都大学が、三菱化学やパイオニアなど五社との包括的アライアンスに基づいて行なっている産学共同研究「有機エレクトロニクス・デバイスの開発」の成果である。全く異なる専門性を有する研究者

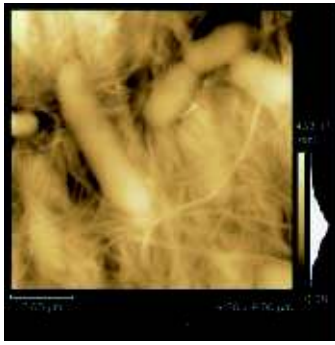


写真4 酢酸菌（バクテリア）がジュースの糖類を栄養にして、細い糸を体外に紡ぐ。その糸が堆積してゼリー状になり、ナタデココの食感を生み出す。この糸もセルロースナノファイバーである。

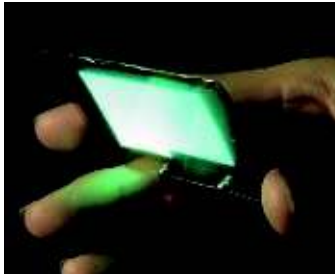


写真6 セルロースナノファイバーで補強した透明材料を基板に用い、有機EL発光に成功。



写真5 ナタデココで補強した曲げられる透明シート

が出会い、生物の力を借りて、高いレベルで共同研究を行なったことで、誰もが想像しなかった材料を開発することができた。最近では、植物繊維をバクテリアセルロースレベルまで均一にナノファイバー化する技術を開発し、植物からも透明繊維強化材料が作れるようになっていく。

### 樹の皮から魔法の粉

何億年もの進化を経て存在している樹木の想いは、木材だけではない。それを保護する樹皮にも現われている。

インドネシアのスマトラ島南部では、アカシアマンギウムという樹が大阪府の面積に匹敵する広大な土

地に植えられている（写真7）。この樹は、植えて10年で直径が四〇センチを越える。「ジャックと豆の木」とまでは行かないが、三、四年で、なにもなかった土地に突然森が現われる。植えてから六、七年で伐採され、近くのパルプ工場に運ばれ、紙原料のパルプへと加工される。一工場だけで一年間に二五〇万トンの木材をパルプ化しており、工場ではパルプ原料とらない膨大な量の樹皮が排出される。我々は、このアカシアの樹皮が、タンニンを豊富に含むことに着目した。タンニンは、カテキンが高分子化したポリフェノールである。

最初は、樹皮からタンニンを抽出していたが、そのうち、樹皮を粉砕して篩（ふる）うことで、タンニンを五〇パーセントも含む粉末を約六〇パーセントの収率で得られることが明らかになった。この樹皮粉末は、合板などを製造する際の接着剤に一回加えると、接着剤硬化の時間を約半分まで短縮できる魔法の粉である。さらに、タンニンには活性酸素の攻撃から身を守るスカベンジャーとしての機能や抗菌性が認められ

る。これらは樹皮が植物の保護の機能を有していることに関係していると思われる。タンニンの基本構造物質であるカテキンの性能から推測すると、さらにより多くの機能が樹皮粉末には期待できる。現在は、樹皮が樹木の保護部位であるという考え方に立ち、「魔法の粉」の用途開発を進めている。なお、この魔法の粉は大阪で企業化され、すでに販売されている。

有機EL発光までには、数多くのきびしい化学的プロセスを経る。それにセルロースナノファイバーが耐えられるだろうか？当初はこの点について、大きな不安があった。それだけに、ナタデココ透明材料上で有機ELが発光した時には、幸運の女神が微笑んでくれたように思った。しかし、しばらくして有機EL発光が決して女神の仕業ではないことに気がついた。細胞の基本骨格であるセルロースナノファイバーが数々の化学的プロセスに負けない強い材料であったという事実

写真7 スマトラ島南部に広がる大規模人工林。大阪府の面積に相当する広さに、アカシアマンギウムが植えられている。



は、逆に、そうでなければ植物は五億年にもわたって種をつないでこられなかった、ということ強く物語っているのだ。それぞれの戦略で進化を遂げ、今地球上に存在している生物の構造とその機能には、現在人類では及びもつかない強さやしなやかさがあるということである。

このような生物材料に関する研究を通じて、生物材料利用の根底には、すべての生物を尊敬し、その強さやしなやかさを借りるアプローチが必要なのではないか、と考えるようになった。生物とシンクロナイズした共生型科学とでも言うべきものだろうか。そこには、人間以外の生き物にも魂を感じる日本人ならではの感性が生きてくると思っている。