

植物で自動車を創る

ー バイオナノファイバーの製造と利用 ー*

矢野浩之**

1. はじめに

樹木は小さなタネにはじまり、やがて地球上で最も巨大な生き物となります。最も大きな樹木は100 mを越えますが、これは30階建てのビルディングを優に越える高さです。植物が陸上に上がったのは、今から5億年ほど前のこと。その後、決して快適とは言えない厳しい環境の中で樹木は種（シュ）を繋いできました。その結果、現在では、バイオマス資源の大部分を占めるに至っています。私は、この樹木の圧倒的な存在感を抛り所にして、未来の植物材料開発を進めています。

本講演では、身近にありすぎて、反ってあまり知られていない代表的な植物材料、木材から鋼鉄のように強い材料や透明な材料を創る、という話をしたいと思います。将来の目標は、植物で自動車を創る。ボディだけでなく、窓やタイヤも全て持続可能な植物資源から創る、ということです。あるいは、携帯電話がさらに発展した、スクリーン、ディスプレイを丸めて収納できる情報端末も植物から創る、ということを考えています。

2. 軽くて強い木材

木材は、建築や楽器、あるいは野球のバットに使われるように、軽くて強いという性質を持っています。その特性に係るエピソードです。今から60年も前、戦争によって金属資源が枯渇してきた中、ハワード・ヒューズというアメリカの大富豪の手によって、700人乗りの水上飛行艇が木材で作られました。今の国際線の旅客機が大体300–400人乗りですから、乗客の数だけで言えば、その倍の大きさです。今もアメリカの博物館で保存されているそうですが、翼の長さは、約100 mです。スプルースグース、木の鷺鳥とでも言う名前のも木製飛行艇です。実際に、水上から飛び上がり、見事試験飛行に成功したそうです。

この様に木材は飛行機を作ることができる程に強いのですが、一方で、私たちは、割り箸を、簡単に折って捨ててしまったり、木材を原料にして作られている紙を簡単に破ってしまうことから、木材やそれを原料とした材料には、あまり強いという印象を持っていません。本当に木材は弱いのでしょうか。すこし考えてみましょう。

現在の紙は、ほとんどが木材から作られます。紙を作る際は、将棋の駒くらいの大きさの木材片（チップ）を、アルカリの液で満たされた釜の中に入れ、高圧でぐつぐつと煮ます。そうしますと、木材の繊維を接着していたリグニンという成分が取れて、木材が繊維状にバラバラになります。その繊維が、パルプと呼ばれる紙の原料です。紙の強度について研究する過程で、この長さ2–3 mm、巾0.05 mm程度の細い、短い繊維をつまんで引っばった研究者がいます。いまから30年近く前の話です。そうしましたら、1.7 GPaという強度が得られました。これは、鋼鉄の4倍もの強度です。つまり、紙を形作っている繊維（パルプ）、一本一本は、実はとても強いのです。しかし、その繊維と繊維の間の結合力が小さくて、紙は簡単に破れてしまうというわけです。

このデータを見たとき、私は大変驚きました。私自身の中に、木材は、金属材料や先端的な複合材料と比べると、その強度的性質は問題にならないくらいに劣る、という先入観があったからです。しかし、このデータは、実際はそうでは無い、とすることははっきりと示していました。

* 2010年9月6日作成 本稿は、第6回生存圏研究所公開講演会（2009年10月24日開催）講演要旨に、加筆・訂正を行ったものである。

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京大大学生存圏研究所 生物機能材料分野 E-mail:yano@rish.kyoto-u.ac.jp

3. セルロースナノファイバー

新たな興味は、紙の原料のパルプが、なぜそんなに強いのか、ということです。パルプを顕微鏡で10万倍程度まで拡大してみます(図1)。そうしますと、均質に見えたパルプが、巾10 nm程度の細い糸から出来上がっていることがわかります。これはセルロースで出来た結晶性の細い、細い繊維です。ナノの細さなので、セルロースナノファイバーと呼んでいます。どのくらい細いのかと言いますと、髪の毛一本の太さを、直径約10 kmの山手線くらいの大きさとした時、この巾10 nmのファイバーは、山手線の中にある直径1 mくらいの樹の太さとなります。

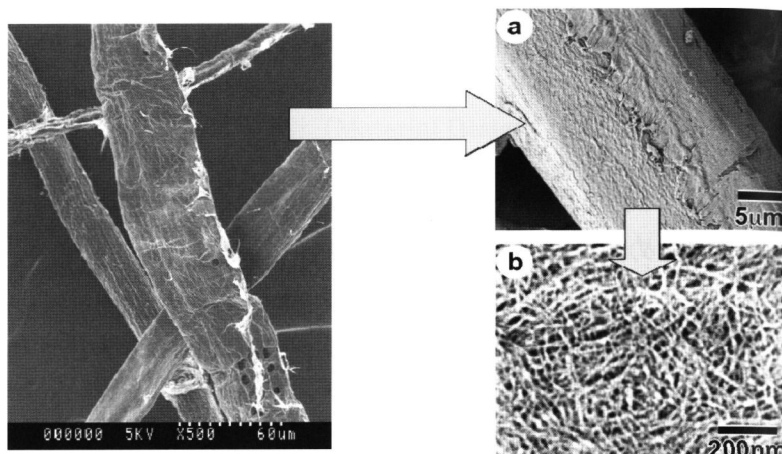


図1 木材繊維(パルプ)の拡大図¹⁾

さて、パルプが鋼鉄の4倍もの強度を示したということは、パルプを形成しているこのナノファイバーが、少なくともパルプより強い、つまり鋼鉄の4倍以上の強度があるということになります。実際、パルプの構造やセルロース以外の化学成分として一部残存しているヘミセルロースのことを考慮すると、この細い糸は、鋼鉄の5倍以上は強いことがわかります。これは、防弾チョッキに使われるアラミド繊維(ケブラー)とほぼ同じ強さです。この高強度のナノファイバーで出来ていることが、木材が飛行機材料に使えるほど強い理由の一つです。さらに言いますと、地球上のバイオマス資源の約半分はセルロースです。おそらくすべてが、このナノファイバーの形で存在していますから、鋼鉄の5倍の強度を持ったスーパー繊維が、この地球上にはほぼ無尽蔵に存在しているといえます。それが、毎日、太陽のエネルギーによって産み出されている……。これを材料として使わない手はありません。そこで、10年ほど前から、このナノファイバーを木材から取りだして、それもあまりお金をかけずに取りだして、材料として使う、という研究を始めました。

4. セルロースナノファイバーの製造と高強度材料^{2,3)}

さて、どうやって木材からナノファイバーを取り出すか、です。鉄筋コンクリートのような複雑な構造をしている木材の細胞(図2)をそのまま壊したのでは、ミンチ解体のようになってしまい、きれいなナノファイバーを取り出すことは出来ません。そこで、まずは、コンクリートの役割を果たしているリグニンという成分を取り除きます。これは、先ほど述べた木材から紙の原料であるパルプを化学的処理により作ることに同じことです。そうしてリグニンを取り除いた木材細胞つまりパルプを、水に分散させ、金属

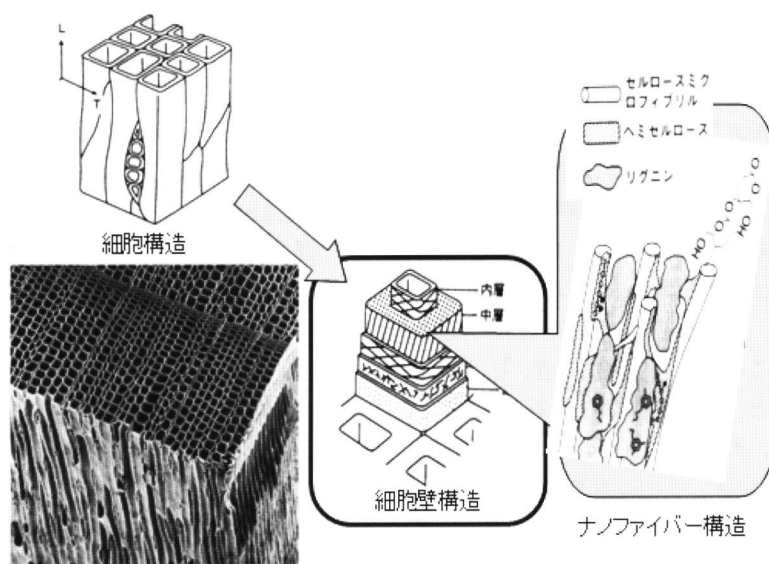


図2 木材の細胞構造からナノファイバー構造までの拡大モデル

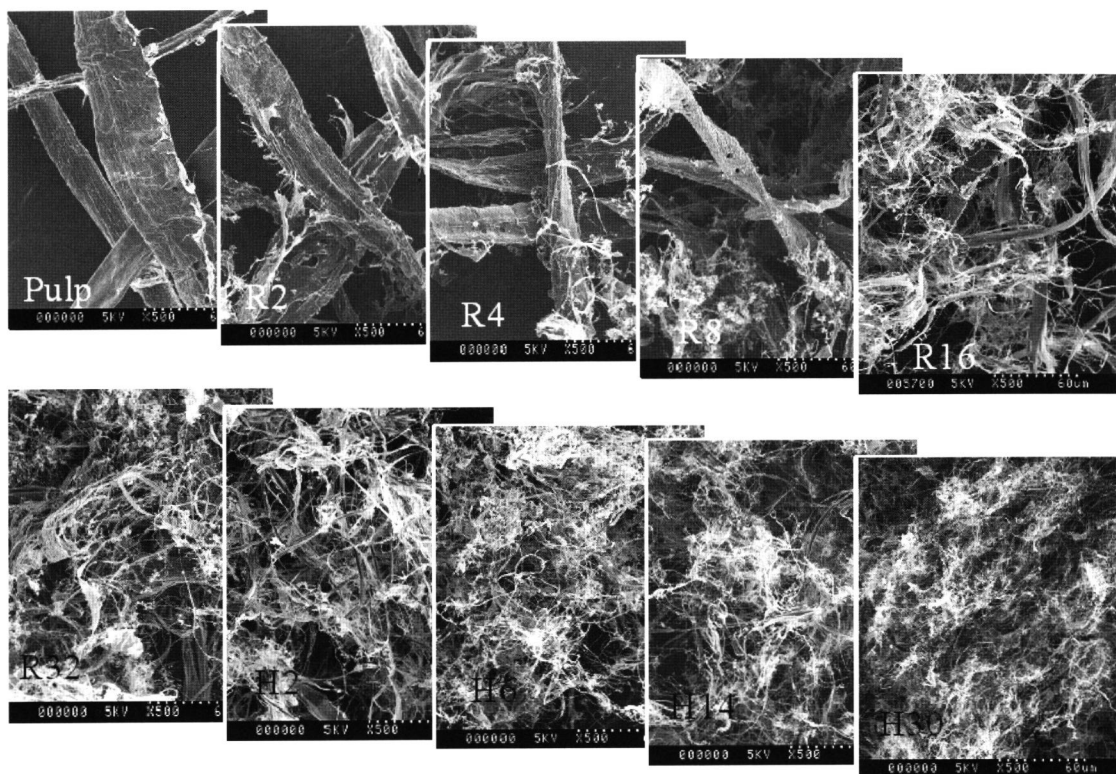


図3 リファイナー処理（R）と高圧ホモジナイザー処理（H）の繰り返しによるパルプのナノ解繊

製の臼のようなものや砥石で擦って解していきます。

臼を通す回数を増やしていくと、パルプは表面から少しずつ解れていきます。図3では、そのプロセスを同じ倍率で比べています。紙の原料であるパルプは、その状態でも髪の毛ほどに細い繊維なのですが、それがもっと細い繊維状の物質から出来ていることがわかります。

処理がどんどん進むと、最終的にナノレベルの繊維が集まった、もやもやとした集合体になります。このパルプを擦って解した繊維は、水が9割、残りの1割をナノファイバーとした状態では、大変なめらかで、まるでクリームの様です。しかし、面白いことに、それを乾かすと、どんどん体積が小さくなり、繊維同士が結合して硬くなります。そうして作られた材料の外観は白くプラスチックのようです。接着剤もなにも入れない状態、ただ、形を整えながらこのナノファイバークリームを乾かしたただけなのですが、鋼鉄の半分くらいの強度になります。軽さは、鋼鉄の1/5です。もっと強い材料を作るには、このナノファイバーを大量の水の中に分散させ、それを紙の様に漉きあげてシートにします。そこに熱を加えると固まる樹脂を染み込ませ、シートを何枚か重ねて熱を加えます。そうしますと、セルロースナノファイバーを8割くらい含んだ板が得られます。その板から切り出した棒状の材料について強度を調べたところ、鋼鉄とほぼ同じ強度であることがわかりました（図4）。重さは、鋼鉄の1/5です。鋼鉄の1/5の軽さで、鋼鉄並みの強度を有する材料を

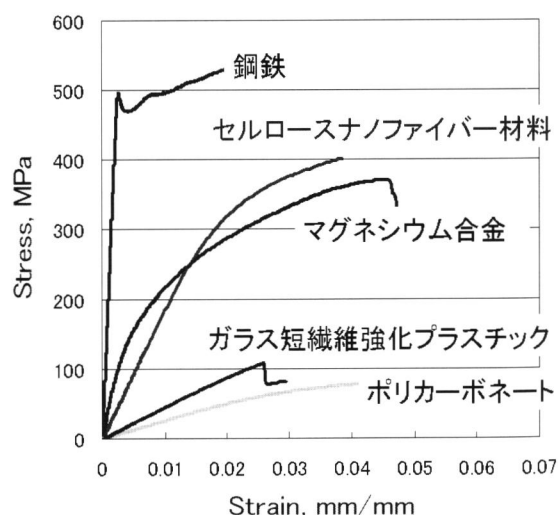


図4 セルロースナノファイバー成形体と他材料の強度特性比較

植物から作ることが出来たと言うことです。さらに、セルロースナノ繊維は、接着剤で固めるだけでなく、プラスチックに混ぜると、プラスチックの強度や耐熱性を大きく向上させることも出来ます。この場合は、射出成形といった技術によって、様々な形状に自由に成形できます。

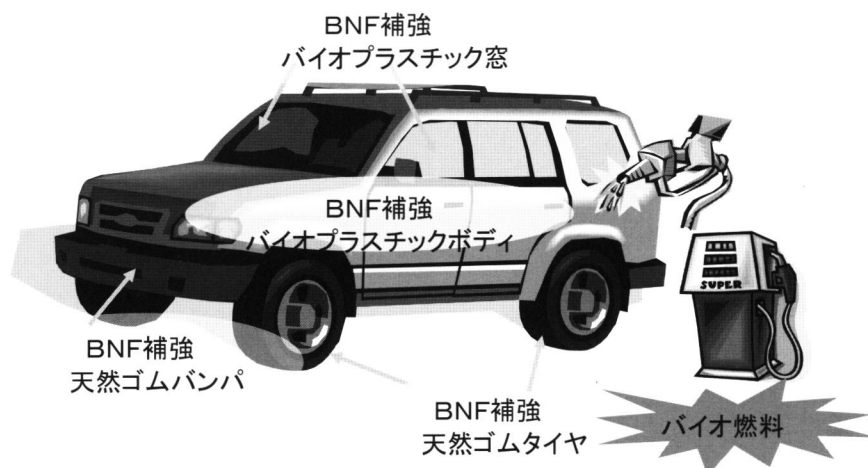


図5 未来の自動車は植物で創る

このようなことから、

セルロースナノファイバー材料は、たとえば高強度でリサイクル可能な住宅部材、耐衝撃に優れリサイクル容易などの用途が考えられます。なかでも私が、重要だと考えている用途は自動車です(図5)。その目的は、自動車の軽量化です。私たちの試算では、自動車のドアやボンネットといった部位にこの軽量で高強度のセルロースナノファイバー材料を用いると、今、平均で1.5トンある自動車の重量を300kg程軽量化出来ます。そうすると、燃費が約20%向上します。現在、日本で年間に放出されている炭酸ガスの約2割は、自家用車やバス、トラックといった自動車からですから、その燃費を20%向上できれば、温暖化の原因となる炭酸ガスの放出を約4%も低減することが出来るわけです。無尽蔵、無公害の太陽エネルギーによって自動車を作り、走らせる。つまり、バイオ材料で自動車を作り、太陽電池やバイオ燃料で自動車を走らせる(図5)。私の夢です。

5. セルロースナノファイバー補強透明材料^{4,5)}

もう一つ、セルロースナノファイバーの用途として紹介したいものがあります。セルロースナノファイバーを使って鋼鉄のように強く、ガラスのように熱膨張が小さく、しかも曲げられる透明材料を作るという話です。それは、未来のテレビ、丸めて収納できるテレビのための材料です。

まず、透明な材料を、その透明性を失うことなく、繊維で補強するという点について説明しましょう。透明補強といいます。普通は、透明な材料に繊維を混ぜると、光の散乱が生じて透明で無くなります。ところが、光の波長、私たちが見ることが出来る光の波長は400nmから800nmという波長なのですが、それより十分に細い、例えば、巾50nmほどの繊維であると、光の散乱が生じず、透明性を保ったまま透明材料を繊維で強化出来ます。透明材料を強化して、その熱膨張を小さくする、強度を高める、ということは、未来のテレビ材料を作る上で、大変重要です。今は、液晶や有機ELのテレビは、熱膨張の小さいガラスの上に、画像を映し出す回路や化学物質が載っていて、透明なガラスを通して画像を見ている訳ですが、ガラスは曲げることが出来ません。一方で、透明なプラスチックに変えると、曲げられますが、熱膨張が大きくて、その上に細かな回路を正確に載せていくことが出来ません。そこで、丸められるテレビのためには、透明なプラスチックの熱膨張を、透明性を損なうことなく繊維で強化し、小さくすることが求められます。

このような透明性を損なわない繊維補強の方法として、私たちは、可視光波長の1/10の細さの、すなわち、50nmほどの巾のナタデココ繊維に着目しました(図6)。ナタデココは、バクテリアが紡ぎ出すナノ繊維の集まりで、植物と同じくセルロースで出来ています。植物のセルロースナノファイバーより太いのですが、それでも透明補強には十分な細さで、また、木材からナノファイバーを取り出すのと違って、最初から均一な繊維が得られることが特徴です。

作り方です。厚さ 1cm 程のナタデココを、バクテリアをアルカリで煮て取り除いてから押しつぶして水を絞り出し、乾かします。そうしますと、プラスチックと同じ手触りの白いフィルムが得られます。このフィルムは空気を 1/3 ほど含んでいますので、それによる乱反射で、その状態では光を通さない白いフィルムとなります。しかし、フィルム内の空気を追い出し透明な樹脂に置き換えると、突然、透明になります。白かったフィルムが全く透明なフィルムになります。セルロースの繊維が溶けてしまったのでは、と思われるかも知れませんが、原子間力顕微鏡という大変細かな部分を観察できる顕微鏡で見てみると、白いフィルムと同じ状態で繊維が存在しています。百聞は一見にしかず、といったところでしょうか。確かに、ナノファイバーを用いると、透明性を損なわずに、たくさんの繊維を樹脂にいれることが出来ます。

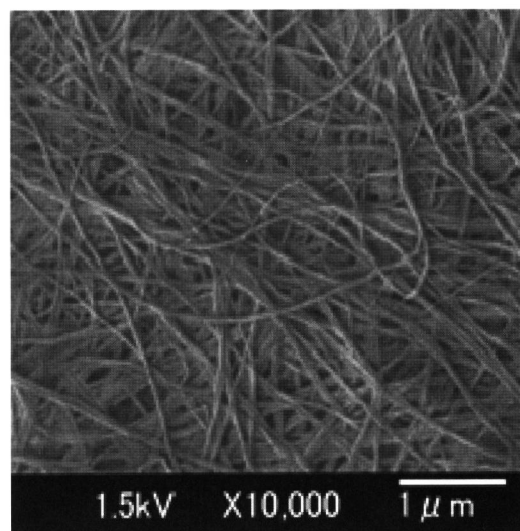


図 6 バクテリアの作るナノファイバー：バクテリアセルロース

さて、このナタデココのナノ繊維。先ほど述べたようにセルロースナノファイバーです。従って、木材のセルロースナノファイバーと同様に、鋼鉄の 5 倍の強度があります。しかも、セルロースナノファイバーは、ガラスの 50 分の 1 という極めて低い線熱膨張を有する材料です。そのため、この繊維を 7 割も含んだ透明なフィルム材料は、鋼鉄並みの強度で、ガラスと同じ様に熱膨張が小さく、しかも、自由に曲げることが出来ます。この透明なナタデココフィルムの上に、有機 EL という電圧を加えると発光する素子を搭載したところ、ちゃんと光らせることができました。最近では、柔らかな樹脂との複合で、曲げられるどころか、折り曲げられて、しかも、熱膨張係数がガラスよりさらに小さい透明材料を作ることが出来ています(図 7)。

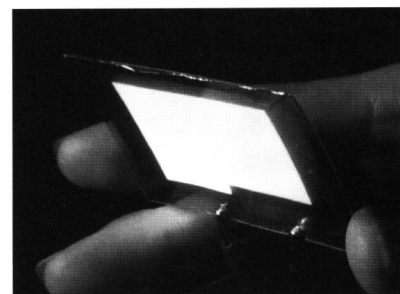


図 7 セルロースナノファイバー補強透明材料(左)とセルロースナノコンポジットを透明基板に用いた有機 EL 発光素子(右)

ここで、新たな興味がわいてきます。ナタデココのセルロースナノファイバーではなく、資源的に豊富な木材から取り出したナノファイバーで透明な材料を作ることが出来ないか、ということです。これについては、グラインダーという、回転する砥石で材料を擦る装置を使いパルプを擦ることで、簡単に、均一なナノファイバーを作ることができることを明らかになりました。このグラインダー、実は、食品加工に用いるフードプロセッサーです。例えば、砂糖で炊いたアズキを、この装置ですりますと“こしあん”になります。スープで炊いたコーンだったら濃厚なポタージュスープです。その食品加工用の装置を用いることで、紙の原料のパルプを、極めて均一で、傷みの少ない、巾 10-20 nm という、バクテリアセルロースより細いナノファイバーに解すことが出来る様になりました。もちろん、ナタデココ繊維より細いナノファイバーですから、透明な材料を作ることが出来ます。熱膨張もナタデココフィルムと同等の低い値です。この様に、木材から透明で熱膨張の小さい、丸められるフィルムを作ることが出来るようになりました。さらに、最近では、ナノファイバー間の空隙をナノレベルに制御することで、セルロースナノファイバーだけで透明でガラスのように低熱膨張の材料が得られています。この材料は、紙の様に折りたたむことができます。これまで我々は何世紀にもわたり紙に印字することで情報を伝えてきましたが、セルロースナノファイバー材料がディスプレイ用の透明材料(基板)として実用化されれば、21 世紀もやっぱり紙から情報を得ることになります。自動車については、ボディだけでなく、窓までも

木材から作ったバイオ自動車が出現するかもしれません。

6. 多様なセルロースナノファイバー源

良く聞かれることのひとつに、ナノファイバーは、どのような植物からも作れるのか、という質問があります。例えば、外来種のセイタカアワダチソウ。急激に広がって生態系に影響を与えているけれども、そこからナノファイバーを作ることにはできるのか、といった質問を受けたこともあります。答えは、イエスです。すべての植物細胞は、セルロースナノファイバーを骨格としていますから。ただ、自動車やテレビの材料に使う植物資源については、工業的なことを考えますと、まとまった量を安定して確保出来なければなりません。その観点からは、木材だけでなく、農産廃棄物、産業廃棄物として排出される植物バイオマスについても注意を払う必要があります。

表1 農産廃棄物等のバイオマス資源量 (R. Rowell, 1998)

植物資源	利用可能量 (百万トン/年)
木材	1750 (17.5 億トン)
ワラ (麦、稲、他)	1145
茎 (トウモロコシ、綿花、他)	970
砂糖キビ バガス	75
アシ・葦	30
竹	30
綿	15
ジュート、ケナフの茎芯部	8
ジュート、ケナフの茎繊維部	2.9
コットンリンター	1
葉脈繊維 (サイザル、アバカ)	5
天然ゴム	9

表1は、利用可能な世界の植物資源量について示したものです。世界で一年間に利用されている木材の量と農業で作られている植物バイオマス資源量について見てみますと、木材については、一年間に約18億トンが使われています。その半分以上は、薪炭材です。つまり、エネルギー源となっています。残りの8億トンが、住宅や家具材料、紙の原料です。ここで注目したいことは、一年間に住宅や家具、紙として利用されている木材以上の量が、稲ワラや麦ワラとして、農地で排出されているということです。農産廃棄物と呼ばれるものです。人間の食料生産活動の傍らで、年間に使用される木材量と変わらないくらいの量の木質資源、植物バイオマスが排出されているということです。さらに、麦ワラや稲ワラを合わせたのと同じくらいの量が、トウモロコシの茎や葉、サトウキビの絞りかす、バガスを合わせた量として排出されています。つまり、農業において、年間に消費される木材を大きく上回る量のバイオマス資源が作り出され、それらの多くが、これまでのところ、あまり有効に利用されていません。これらのバイオマス資源が、ナノファイバー源として利用できれば、バイオマス資源の材料用途はさらに広がるのですが、実際のところ、どうでしょうか。ナノファイバーをきれいに取り出すことが出来るのでしょうか。この点についていろいろと研究したところ、麦ワラやサトウキビの絞りかすであるバガス、デンプンを取りだしたあとのジャガイモやキャッサバの絞りかす、砂糖ダイコンからショ糖を絞り出した後の絞りかす、といったいわゆる“かす”と呼ばれる資源からも、木材と変わらない、きれいで均一なナノファイバーが得られることがわかりました。この世の中には、工業的に利用できる、高強度で低熱膨張のナノファイバーが、大量に廃棄されている言うことです。これからは、木材と共に、これら未利用のバイオマス資源の先端的な利用が重要になってくると考えています。

7. 植物材料ナノイノベーション

図8には、21世紀における新しいバイオ資源産業について示しています。これまでは、海外から持ってきた石油を始めとする化石資源を使って、我が国の化学産業は様々な材料や製品を作ってきました。また、それらが、現在の快適な生活を支えています。しかし、石油は今世紀の内に無くなろうとしています。このままだとあと40年程度しか持たないそうです。さらに言えば、石油は、無くなるだいぶ前から、工業原料としては

手に入りにくくなるでしょう。そう
なると、太陽の光
によって、水と炭
酸ガスから持続的
に作り出される植
物資源を使って、
様々な材料、製品
を作っていかなけ
ればなりません。
その時に、植物資
源をただエタノー
ルに変換してエネ
ルギーとして使い
ましょう、工業原
料の化石資源代替
としましょうとい
うだけではなく、
従来の化石資源ベ

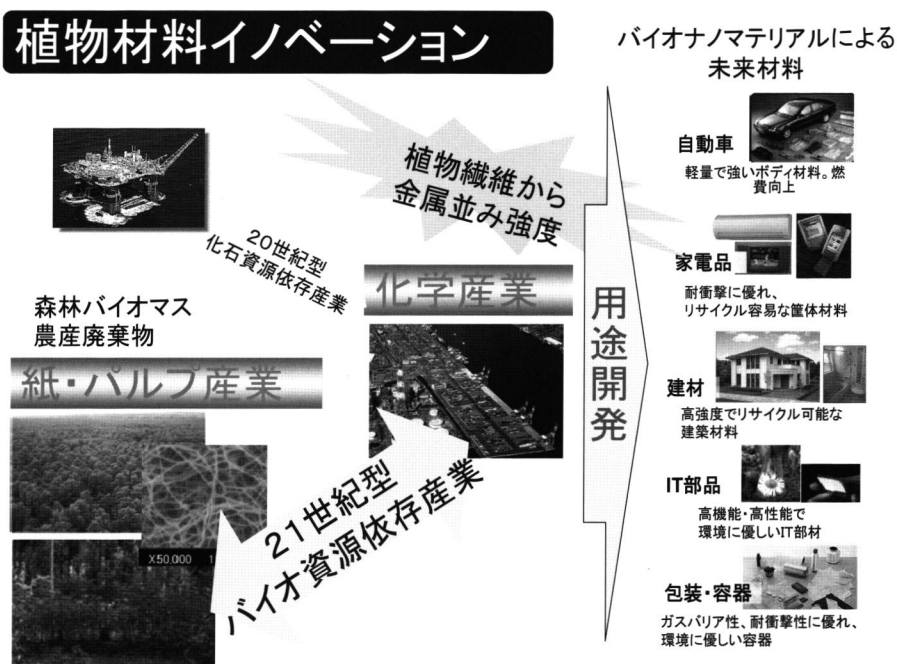


図8 21世紀のバイオ産業

ースの材料よりもっと強い、もっと優れた材料を、植物資源から創るという思いが大切だと思います。そうでなければ、急激な人工増加や生活の向上に伴う、資源の枯渇に対応できないからです。そのためには、これまで木質資源の生産に関わり、植林から紙・パルプの製造加工まで、幅広い範囲で、バイオマス利用に関して多くの技術を蓄積している製紙産業と、化石資源からの多様な材料製造について多くの技術を蓄積してきた化学産業が連携して、植物の構造や進化を良く理解した上で、森林バイオマスとか農産廃棄物の有効利用を考えなければいけない。そして、軽量で金属並の強度といった先端的な材料をバイオベースで作って、自動車、家電、建材、IT、包装容器にどんどん使っていきましょう、というのが、上の図に示した私の考えです。私は、埋蔵資源に乏しい、しかし、一方で、豊富な森林資源を有する我が国での、もの作り産業は、これからそうなるであろうと考えています。私は、それを植物材料イノベーションと呼んでいます。

8. おわりに - 生物資源利用の研究は生き物の力の借り方 -

植物材料に基づくグリーンイノベーションを推進するにあたり、植物が環境に優しいプロセスの中で作ってくれたものを、人間が使わせて頂く、という姿勢が大事だと考えます。全ての生き物を尊敬してその力を借りる、という姿勢です。生物資源の利用に関する研究は、生き物の力の借り方の研究といっても良いでしょう。例えば、セルロースナノファイバー材料について考えると、この材料でもっとも重要な、そして、もっとも難しいプロセスであるナノファイバー作りは、植物がやってくれています。軽量で高強度の材料や熱膨張が小さくて丸められる透明材料作りの99.9%、あるいは99.99%は植物の仕事だといっても過言ではありません。これだけの細いナノファイバーで鉄の5倍の強度をもった材料を人間は作れません。また、将来それが作れたとしても、炭酸ガスを固定しながら地球環境に負荷の無い形で、つまり、何か生産プロセスの間に害のあるものを流しだす、垂れ流すようなことは一切しないで、このような高機能材料を大量に作るということは到底出来ないと思います。そこに、地球環境と折り合いをつけながら、5億年の長きにわたり地球上に存在し続けてきた植物の凄さがあります。

我々は材料作りにおける残りの0.1%として、どの様にこの材料は使うのが作り手の思いに沿うのか、ということを一生涯懸命考え材料を作って行ってこそ、やっと21世紀を生き抜くことができる、と思っています。その際、生物材料の構造や特性には、生物が長い進化の過程で創り出した必然があることを忘れず、その必然

を損なうことなく材料の形を変えて行くことが重要です。生き物の思いの中に人間が入り込んで行って、シンクロナイズ（共鳴）して、方向性をうまく合わせてものを作っていく。私は、日本人は、そういう自然と調和したもの作りの感性を持っていると思っています。だからこそ世界に通じ、世界の人が驚くようなバイオ材料づくりを、このナノファイバーを使って日本人の手でやりたいと考えています。アメリカが先にやったことを追いかけるだとか、ヨーロッパがやることをずっと見ていて日本もその真似をしようなどというのではなく、日本の四季の中で、小さいときから私たちの体に染み付いた感性、自然に対する感性を大切にして、未来の生物材料を作っていく、そういう時代に今来ている様に思います。

参考文献

- 1) K. Abe, S. Iwamoto and H. Yano, "Obtaining Cellulose Nanofibers with a Uniform Width of 15 nm from Wood, *Biomacromolecules*, 8(10), 3276-3278(2007).
- 2) A. N. Nakagaito and H. Yano, "The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites", *Applied Physics A*, 78(4), 547-552 (2004).
- 3) A. N. Nakagaito and H. Yano, "Novel high-strength biocomposites based on microfibrillated cellulose having nano-order-unit web-like network structure", *Applied Physics A*, 80(1), 155-159(2005).
- 4) H. Yano, J. Sugiyama, A. N. Nakagaito, M. Nogi, T. Matsuura, M. Hikita and K. Handa, "Optically transparent composites reinforced with networks of bacterial nanofibers", *Advanced Materials*, 17(2), 153-155(2005).
- 5) M. Nogi, S. Iwamoto, A.N. Nakagaito and H. Yano, "Optically transparent nanofiber paper", *Advanced Materials*, 21(16), 1595-1598(2009).