

経営講演会

講演録

『セルロースナノファイバーが変革する 日本のものづくり』

—日本の資源を活かした未来素材研究の最前線—

(平成29年10月10日 講演)

講師 京大大学生存圏研究所 教授

矢野 浩之 氏



りそな中小企業振興財団



講 師 京都大学生存圏研究所 教授
矢野 浩之 氏

◆プロフィールご紹介

●主な経歴

- 1986年 京都大学大学院農学研究科博士課程林産工学専攻退学
- 1986年 京都府立大学農学部 助手
- 1989年 京都大学農学博士
- 1992年 京都府立大学 講師
- 1998年 京都大学木質科学研究所 助教授
- 2004年 京都大学生存圏研究所 教授（現職）
- 2010～2013年 京都大学生存圏研究所 学際萌芽研究センター センター長
- 2014～2016年 ナノセルロースフォーラム会長

●主な受賞

- 2016年 セルロース・ナノファイバー（CNF）の高効率な製造法の考案、製品への応用、将来の可能性拡大に対する貢献により第37回本田賞を受賞

この講演録は、平成29年10月10日に開催された、当財団主催の経営講演会を収録・編集したものです。なお、財団ホームページにも掲載しております。<http://www.resona-fdn.or.jp>

この絵は、いまから 13 年前の 2004 年にセルロースナノファイバーの材料開発の将来についてのイメージを作ったものです (図 1)。森林資源から情報端末、自動車、人工衛星など様々なものが造られる時代が来るという図ですが、資源として考えられるのは日本の裏山にある森林資源です。

セルロースナノファイバーが変革する日本のものづくり ～日本の資源を活かした未来素材研究の最前線～



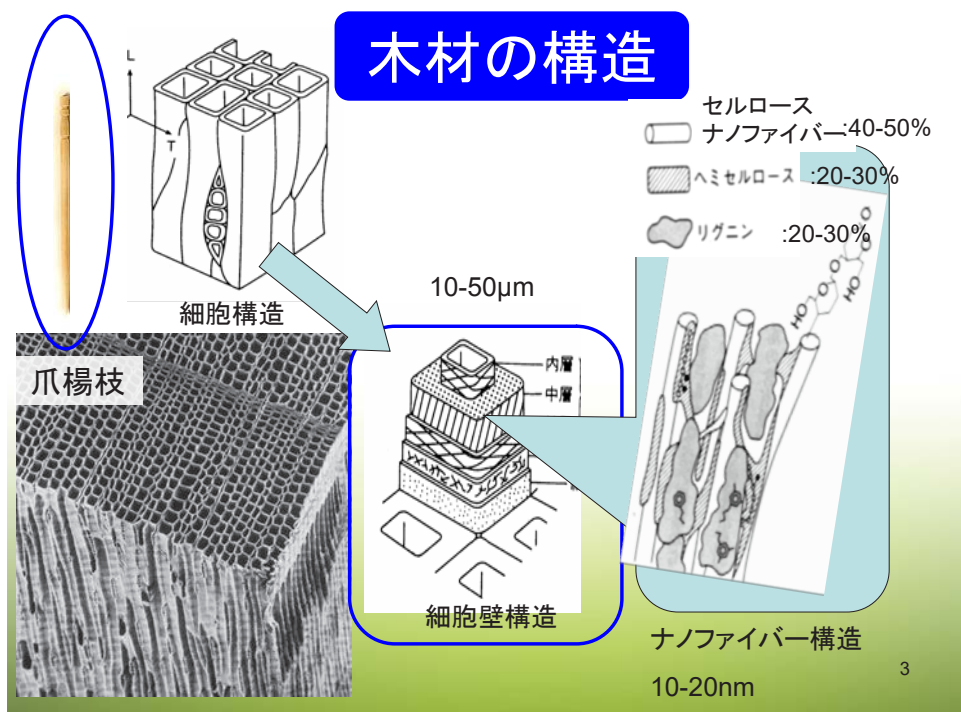
京大大学生存圏研究所 矢野浩之

(図 1)

私たちはいろいろな植物資源から均一なナノファイバーを造る技術やセルロースナノファイバーを使い、軽くて強い鋼鉄のような強度の材料や、曲げられるディスプレイに使えるガラスのように熱膨張が小さい透明材料などの開発をしてきました。最初の特許が 2001 年です。

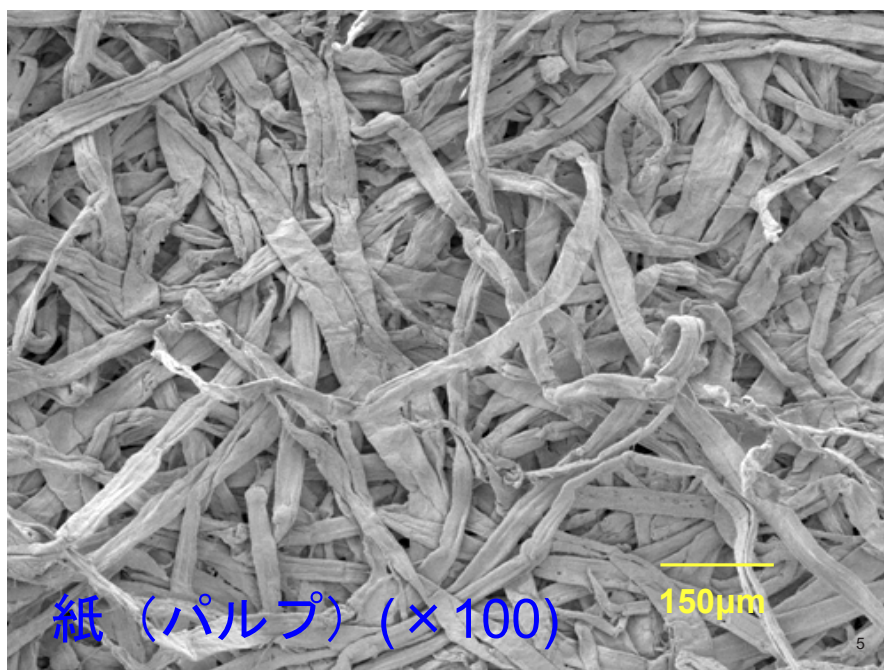
セルロースナノファイバーは、すべての植物細胞の基本となる物質です。樹木は代表的な植物資源ですが、木材は細胞の集合体です。その細胞は更に細いナノ繊維が集まって出来ており、直径が 10 nm～20 nm で細胞壁の中にあるときは非常に均一です。10 nm がどのぐらいの大きさかと言えば、髪の毛 1 本の断面が山手線の長辺ぐらいまで大きく広がったときにその中に立つ直径 1m ぐらいの棒。それが、セルロースのナノファイバーの大きさになります。

もう少し具体的には、木材の爪楊枝を 50 倍ぐらいに拡大して見るとこういう細胞が集まって出来ています (図 2)。その細胞の壁がものすごく美しいナノの構造体で出来ているということはあまり知られていません。細胞の壁は鉄筋コンクリートのような構造だと言いますが、「鉄筋」が今日お話をするセルロースナノファイバーです。コンクリートは、ヘミセルロース、リグニンといった物質で鉄筋の間を充填しています。これが、木材の構造です。



(図 2)

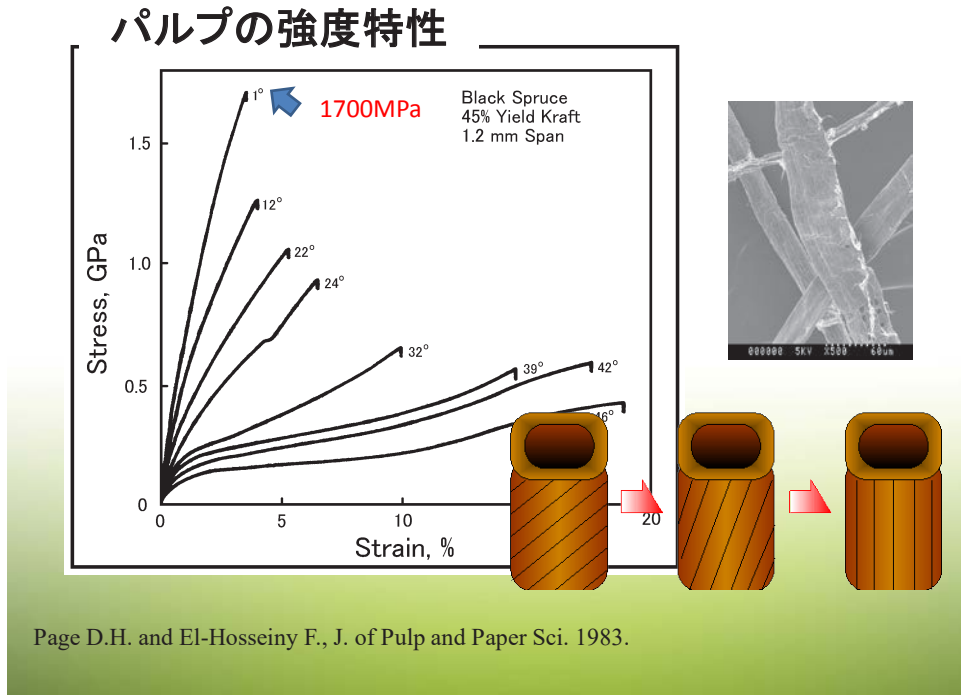
木材からセルロースナノファイバーを取り出すということは先ほどの鉄筋だけを残すということですから、コンクリートを溶かし出すわけです。それが、いわゆるパルプを造るというプロセスで、日本では年間 2,000 万 t ぐらい造られています (図 3)。そのパルプを 5 万倍ぐらいに拡大して見ると、確かに細いナノ繊維で出来ていることがわかります。



(図 3)

いまから 34~35 年ぐらい前に、紙の強度は実際どういう理屈で出来上がっているのか知りたいとカナダの紙関係の研究者がパルプを一本つまんで引っ張ってみたところ 1,700MPa の強度でした (図 4)。代表的な自動車に使われる部材の鋼鉄、ハイテンと比べると、フェンダー

やドアに使われるものが大体 300~400MPa ですから、それに対してパルプが鋼鉄の 4~5 倍も強い材料だということが、実は 1983 年の段階で明らかになっていました。しかし、なぜかそれを材料として使おうという発想が出てきませんでした。

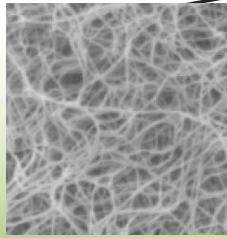


(図 4)

1,700MPa という数字を鉄筋の比率などから計算していくと、パルプを構成している基本要素のセルロースナノファイバーというのは、3,000MPa ぐらいであるでしょう。これは、代表的な炭素繊維や、高強度の代表的繊維であるアラミド、炭素繊維と変わらないわけです (図 5)。しかも、ポテンシャルとしては、ここでは仮に 300~400 円/kg と入れていますが、原料になるパルプ自体が既に 50 円/kg でマーケットにあるわけです。ですから、お金をかけずにパルプをほぐすことができれば、それほど高いものにはならないと言えます。

樹脂複合材に用いられる繊維との比較

| | CNF/ リグノCNF | 炭素繊維 (PAN系) | アラミド繊維 (Kevlar® 49) | ガラス繊維 |
|-------------------------|----------------|----------------|------------------------|---------|
| 密度 (g/cm ³) | 1.6 | 1.82 | 1.45 | 2.55 |
| 引張弾性率 (GPa) | 140 | 230 | 112 | 74 |
| 引張強度 (GPa) | 3 | 3.5 | 3 | 3.4 |
| 価格 (円/kg) | 300-400 | 3000 | 5000 | 200~300 |



リグノCNFは、ガラス繊維より軽く、また、強度、弾性率などの力学的性能はアラミド繊維と同程度ですが、ナノ繊維であるため比表面積が大きく、射出成形可能な短繊維強化樹脂複合材として比較した場合、炭素繊維やアラミド繊維、ガラス繊維に比べ高い補強性が期待できます。成形体の表面平滑性、精密加工性にも優れています。

(図5)

更に、日本は国土の7割が森林に覆われた森林国です。先進国で国土の7割が森林の国というのは非常に珍しく、世界トップでフィンランドやスウェーデンと変わりません。フィンランドやスウェーデンと比べて日本が違うのは、国土の7割を占める森林の約2/3は人工林です。人間が植え、育て、伐採して利用するというマネジメントをしっかりとやって、そこから出てきているバイオマス資源。それが、いま日本は2/3を占めています。

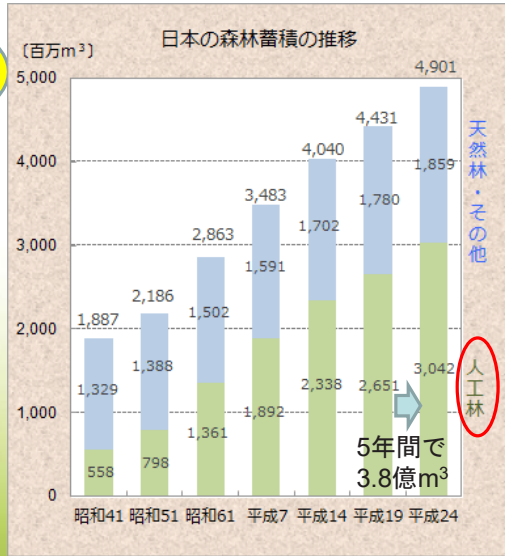
この図で、ブルーの部分は天然林です(図6)。それに対して、人工林にあたるグリーンの部分は毎年増え続けていきます。スギやヒノキが大部分ですから、私たちは住宅の材料、あるいは紙用チップの原料として使っているわけです。それにもかかわらず、日本では人工林が1年間に約8,000万m³増え続けています。この8,000万m³というのは、セルロースナノファイバーの量に換算すると約1,500万tだろうと推測されます。日本が1年間に使用しているプラスチックは1,000万tです。プラスチックはペットボトルに代表されるようにいろいろなところに使われていますが、それが日本で1,000万t。それに対して毎年1500万tの高性能のナノ繊維が裏山で増え続けているわけです。

日本の人工林ではセルロースナノファイバーが毎年1500万トン増えています。



日本は国土の7割が森林。しかも、、、

我が国では人工林の蓄積量が毎年7500万m³増加しています。スギ、ヒノキ中心の木材1m³の重量を約400kgとすると、その半分はセルロースナノファイバーなので、人工林で毎年1500万トンのセルロースナノファイバーが蓄積していることになります。それは我が国における年間プラスチック消費量の約1.5倍の量に匹敵します。



出展：林野庁 森林資源の状況、平成24年3月 10

(図 6)

そのような背景があり、「日本再興戦略」改訂 2014 から、木質バイオマスについて、セルロースナノファイバーの研究を推進するということが書き込まれて、国家の戦略になりました。

目指すところは裏山の木の利用です。人工林というのは人の生活圏からそんなに離れたところに植えられているわけではないので、ある意味で裏山です。そこにある森林資源からセルロースナノファイバーを取り出してきて、自動車や、場合によっては航空機などに使って、CO₂を吸収固定した材料でCO₂の排出を減らしていこうということになります。

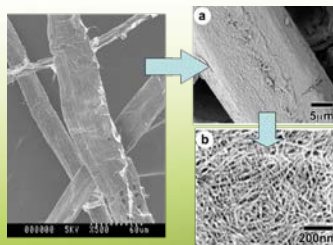
そのために重要なのは、林業から製紙産業、高分子化学、樹脂、そして自動車部品、自動車産業と非常に長い距離を繋いでいく**新たな産業の創生**だと思います。こういうことができ初めて、林業から持続型資源、再生可能な資源に基づくCO₂排出の少ないいろいろな部材、そして自動車、家電や建築にまで展開されていく商品が出来るだろうと思っています。

では、その先はどこになるかというと、やはり世界をイメージします。裏山の資源に付加価値を付けて加工して、世界に向けて売っていく。これは、日本の特徴を活かした未来の産業のあり方だろうと思っています。何しろ、毎年 8,000 万m³の木材、1,500 万 t のセルロースナノファイバーが増え続けている国ですから、どんどん自動車などに使っていても決して枯渇することがありません。

ということで、きょうはセルロースナノファイバーを幾つかキーワードに沿って説明したいと思います。私が 20 年近くこの材料を触ってきて、この**8つのキーワード**が重要な部分だと思うところです (図 7)。

セルロースナノファイバーとは

- ✓ **高性能**: 軽くて強い
- ✓ **豊富で多彩な原料**: 木材、稲わら、ミカン絞りかす、おから
- ✓ **多様な用途**: 自動車、携帯電話、化粧品、ソフトクリーム
- ✓ **コスト/パフォーマンス**: パルプは50円/kg
- ✓ **時間**: 20億年
- ✓ **CO₂削減**: 地球温暖化
- ✓ **持続性**: 裏山に1500万トン
- ✓ **未来**: 日本の未来、地域の未来



15

(図 7)

まずは、**高性能で軽くて強い**性質。それから、**資源的には非常に豊富で多彩**である。それから、**いろいろな用途に使える**。自動車、携帯電話のように硬いものから化粧品、ソフトクリームなど柔らかなものまで全部ターゲットになります。場合によっては、食べられる。

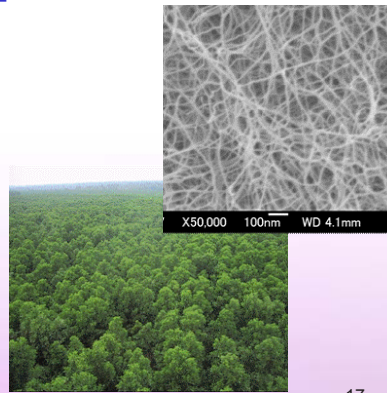
また、**コストパフォーマンス**は非常に重要なポイントです。そのときに大事なのは、原料になるパルプはすべてナノ繊維の集合体ですが、これが既に 50 円/kg でマーケットにあるという事実です。そして、鉄やプラスチックと違うのは、地球上に現れてからの**時間**がとんでもなく長くて多分 20 億年ぐらいです。ピンときませんが、宇宙が出来上がったのが、ビッグバンが 140 億年前で、地球が誕生したのが 46 億年前という時間軸から考えても、昔からこの地球上に存在するナノの繊維だということです。

そして、植物が作り出すときは光合成によって大気中の二酸化炭素を吸収固定しているので、**最初から CO₂ がマイナスでスタート**する。排出するどころか、マイナスからスタートする材料だということです。そして、特に日本は裏山に 1,500 万 t もあって、**持続型の材料**である。この 7 つの特徴が、この材料が社会に出ていくうえで非常に重要になってくるだろうと考えています。そして、最後は、未来について説明したいと思います。

まずは**高性能**です(図 8)。先ほども説明しましたが、**軽い**。鉄の 1/5 ぐらいで、強度が 3GPa、鉄の 7~8 倍です。それから、産業的に重要なのが、**熱による伸び縮みが非常に小さい**。そして、**熱伝導性が高い**。

木質の本質:セルロースナノファイバー(CNF)

- 全ての植物細胞の基本骨格物質
- 1兆トンの蓄積(埋蔵石油資源の6倍)・持続型資源
- 高性能グリーンナノファイバー
 - 伸びきり鎖微結晶ポリマー
 - 幅: 10-20nm, 長さ1μm以上
 - 軽量: 1.5g/cm³
 - 高弾性: 140GPa、高強度: 3GPa
(鋼鉄の8倍の強度)
 - 低線熱膨張: 0.1ppm/k (長さ方向)
(石英ガラス相当)
 - 弾性率不変: -200°C~+200°C
 - 高熱伝導性: ガラス相当



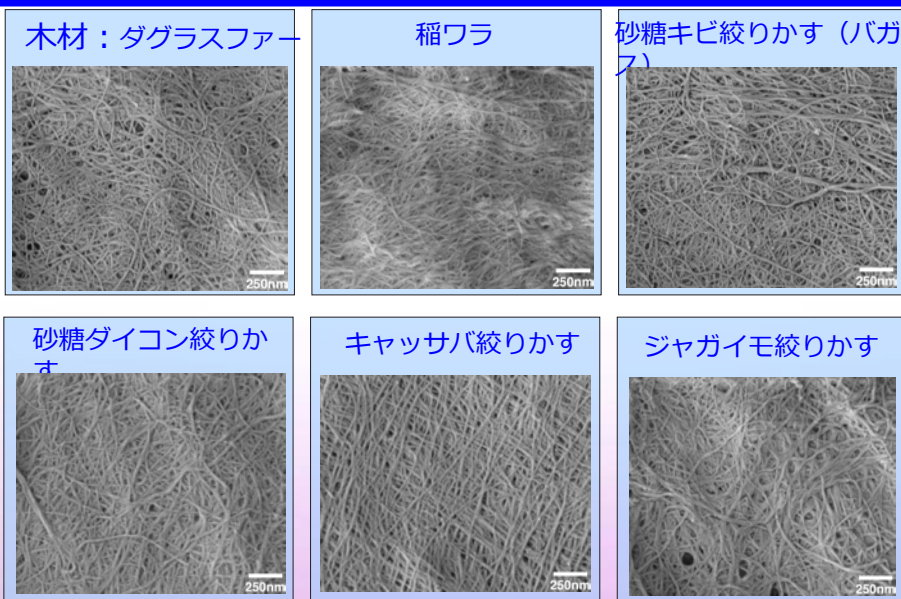
17

(図 8)

2番目に、豊富で多彩な原料ということです(図9)。すべての植物は、みな細胞から出来ており、細胞はナノファイバーで出来ています。だから、稲ワラ、サトウキビの搾りかす(バガス)。それから澱粉、エタノールをつくるのにも使いますが、キャッサバから澱粉を取った搾りかす。北海道に行けば、砂糖ダイコンから糖を取った後の搾りかす。あるいは、産業廃棄物や農村廃棄物もみな、セルロース以外のものを洗い流してグラインダーという機械で擦ってやるとほぼ同じ大きさのナノファイバーになります。シートにして性能を調べたり、結晶性を調べても変わりません。だから、植物は多分何億年前からこの構造はいじっていないくて、それだけ本質的なものだと言えらと思います。

様々な植物資源からのナノファイバー

(H18,H19年度NEDO国際共同研究先導調査)



20

(図 9)

もっといろいろなものがセルロースナノファイバーから出来ていて、コットンは90~95%がセルロースで出来ており、それはみなナノ繊維の形を取っています。ポンジュースの搾りかすもみなナノファイバー源になります。タケノコはセルロースと澱粉とタンパク質でできています。ですから、簡単にほぐしてナノファイバーまで持っていけます。ナタデココは実は細菌がつくるセルロースナノファイバーです。食べられるナノ繊維。タワシもそうだし、ワインを作る際に出てくるブドウの皮もみな、簡単な処理でセルロースナノファイバーになります。

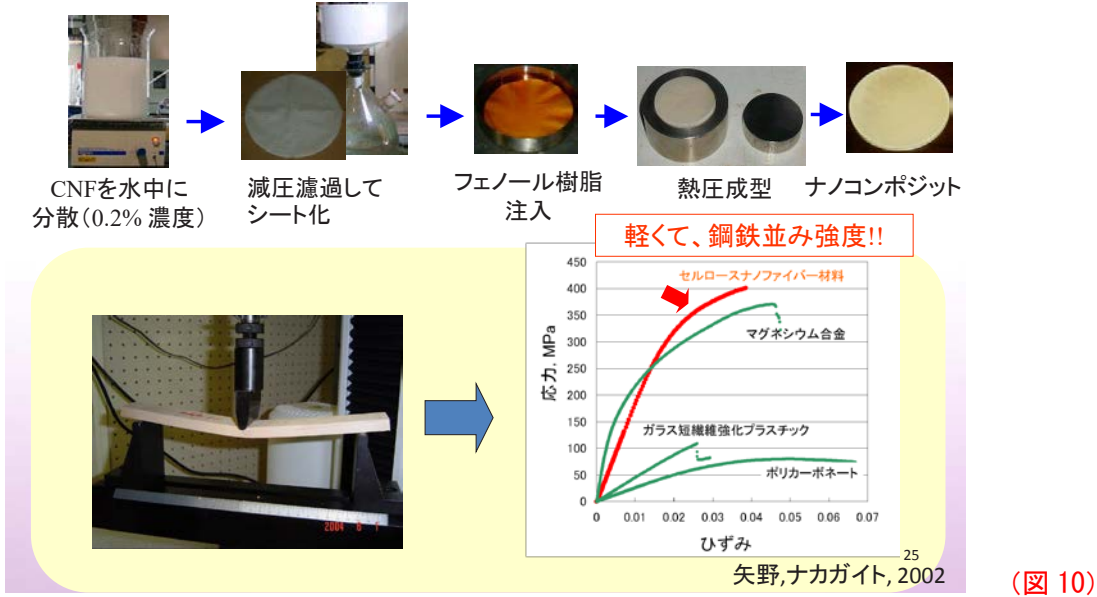
面白いのは**カニ殻**で、カニの殻はセルロースではないけれども、構造が非常によく似たキチンという物質でできています。そのキチンも同じように、伸び切り鎖で結晶構造をつくっているのも、とても強いナノ繊維からカニ殻も出来ています。ですから、鳥取辺りに行くところからナノファイバーを取り出して利用しようという研究が行われています。

将来的なイメージですが、セルロースナノファイバーはどこから来たか場合によって示せる材料です。「京都森林組合の美山スギから造ったセルロースナノファイバーがこのタイヤの中に入っています」とか、「愛媛飲料のミカン搾りかすでつくった透明材料」とか、「境港のカニから造ったディスプレイ材料」とか、将来はこのようなものが出てくるかもしれない。産地や生産者が見える材料も、セルロースナノファイバーの1つの特徴ではないかと思えます。

3番目に、**多様な用途**です。金属からセラミックス（ガラス）、プラスチック（高分子）にまたがるいろいろな用途があります。

最初に我々がこの材料で造ったのは高強度の材料で、元は葛湯みたいなものですが、それを水の中で分散させて濾過するとマットができます。それを乾かして、そこに熱硬化性樹脂を染み込ませて十数枚固めて成型する。そうすると、出来た材料は曲げの強度が400MPa、密度は1/5です。植物から鋼鉄のような強度を持つ材料を造ることができる。2001年に特許を出しました（**図10**）。

構造用途: 高強度セルロースナノファイバー材料



みなさんが不思議に思われるのは、セルロースナノファイバーは鉄の7~8倍強い。それを固めたら鋼鉄の5~6倍強い材料が出来るのではないかと思われるかもしれませんが、実際には繊維の長さの方向はそういう強度ですが、長さに直交する方向はそこまでの強度がなく、多分1/30とか1/40。そういうものが集まってシートになるので**等方性材料**ですが、強度としてはどんなに頑張っても多分500~600MPaが限界ではないか。それでも、このような造り方をすれば鋼鉄並みの強度の材料が造れるわけです。しかも、鋼鉄の1/5の軽さだということ。

また、透明な材料を作るには、アクリルのモノマーを染み込ませて紫外線を当てればそのまま硬化するので、屈折率がセルロースに近い1.5~1.58ぐらいの樹脂であれば、それを染み込ませたシートは透明になります。

我々がいま見ている光は電磁波だから波で来ますが、可視光の波長は400nm~800nmと意外に長いです。そういう波に対して20nmや30nmの物体は散乱を生じない、見えないらしいのでそのまま何も感じずに通り過ぎてしまう。だから、透明樹脂の中にセルロースナノファイバーを5割入れても透明性が全然損なわれない。

しかも、この材料は熱膨張が極めて小さくて強度があるので、出来た透明フィルムはこんなにフレキシブルですが、熱膨張がガラスのように小さく、鋼鉄のような強度の材料を造ることができるということです (図11)。

木材から、人間が作れなかったものを創る



鋼鉄の様に強くて、ガラスの様に熱膨張が小さく、
プラスチックの様にフレキシブルな透明材料

28

(図 11)

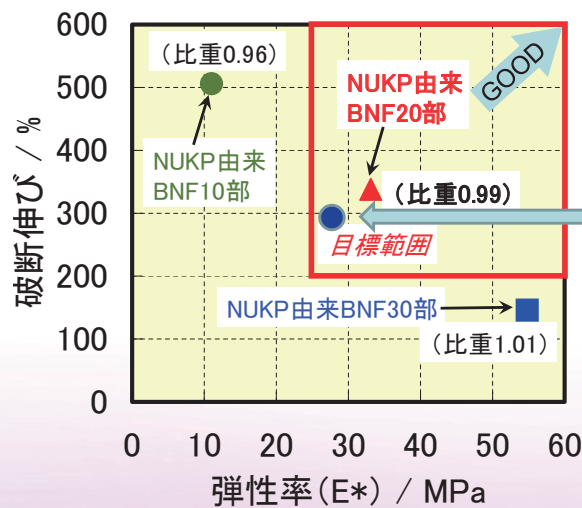
実際にその透明フィルムを使うと、熱膨張が小さいので有機 EL の素子、有機薄膜太陽電池の透明基盤として、ガラスの代わりに使うことができます。

次にご紹介するのは**ゴムの補強**です。剛直で熱膨張が小さいナノ繊維は、柔らかなものを補強するのは非常に得意です。少し入れるだけでゴムのような柔らかな性質を大きく変えることができます。

これは以前、ダンロップ（住友ゴム工業）と一緒に仕事をしたときの結果ですが、天然ゴムの中にセルロースナノファイバーを 20% ぐらい入れると、現在はカーボンブラックを 30% ちょっと入れています、その半分ぐらいの量で同じような弾性率、あるいは強度が得られます (図 12)。実際にタイヤを造ってその性能を評価したわけですが、最近では 5% ぐらい入れるだけでカーボンブラックを一切使わなくても、ほぼ同じ弾性率や強度が得られるようになっていきます。柔らかなものを強くすることは、セルロースナノファイバーは非常に得意なところですよ。いかにも、ナノコンポジットだなというという結果になります。

セルロースナノファイバー強化ゴム

H19-21年度Pj



京大/京都市産技研

現在はカーボンブラック50部添加品の性能を5部のCNF添加で達成。

20wt%CNF添加天然ゴムで密度0.99g/cm³
(現行のカーボンブラック50部添加品は1.11g/cm³)、340%の破断ひずみを保ちながら弾性率:33MPa (カーボンブラック品の4-5倍)を達成。



(図 12)

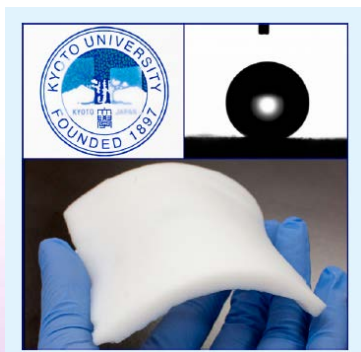
もう1つが、**ガスバリア性**です。紙の上に均一に、10数nmを切るぐらいまでほぐしたセルロースのナノファイバー溶液を塗ると、表面にセルロースナノファイバーの膜ができ、ナノファイバー同士が密着して、その間は酸素すら通りません。パッケージング材料として、表面に均質なセルロースナノファイバーを塗ると酸素を通さなくなるので、中に入れられているものが酸化しにくくなる。そのまま一緒に捨てても、セルロースとセルロースが集まって出来ているので廃棄もあまり環境負荷がない形で出来る。場合によっては、燃やしてもいいということになります。

ドロットした葛湯のような液体は、1%弱がセルロース、ナノファイバーで、残りは水です。これを、そのまま乾かすとナノファイバーが密着して光も通って硬い材料が出来ます。

ところが、ふんわりと乾かすとセルロースのナノファイバーが空気を抱き込んだようなエアロゲルというものになる(図13)。これは東京大学の齋藤先生、磯貝先生のお仕事ですが、**TEMPO**という触媒を使うと非常に細いナノファイバーをつくることことができる。それをふんわり乾かすと、実はこれは透明です。中はこういう構造になっているということは、空気を抱き込んでいるわけです。空気よりも優れた断熱性を示し、なおかつ透明なので、1つの例としては、自動車のサンルーフにもこの材料をプラスチックの間にでも入れてみる。そうすると、光は通すけれども熱は通さない、透明な断熱材が造れるわけです。ただ、大量に造るまでには技術ができていないのですが、ナノ繊維の特徴としてはこういうこともあります。

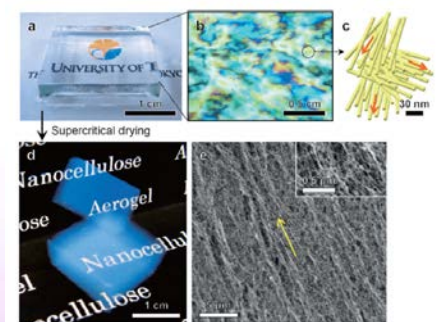
ふんわり乾かせば、 透明な断熱材(エアロゲル)

CNF強化
Polymethylsilsesquioxane



G. Hayase, *et al.*,
ACS Appl. Mater. Interfaces, 2014

Tempo oxidized CNF



T. Saito, *et al.*,
Angew.Chem. Int. Ed., 2014

32

(図 13)

これはスウェーデンの先生が2年ほど前に発表した結果ですが、スーパーキャパシタの材料としてセルロースナノファイバーを使うということです (図 14)。セルロースナノファイバーの表面を導電性のポリマーで覆ってナノファイバーのシートをつくります。そのシートの隙間に電解質を入れると、大量に電気を蓄えて一気に放出してくれるようなスーパーキャパシタをつくることのできる。特徴は、やはりセルロースナノファイバーの比表面積の大きさと、弾性率が140GPaという剛直な物質で出来ている繊維体なので、ちゃんと自立できるわけです。セルフスタンドでいて、そこに大量に電気を蓄えて一気に放出することのできる。このようなアプリケーションも研究されています。

大容量・大出力 スーパーキャパシタ

Storing electricity in paper

エネルギー

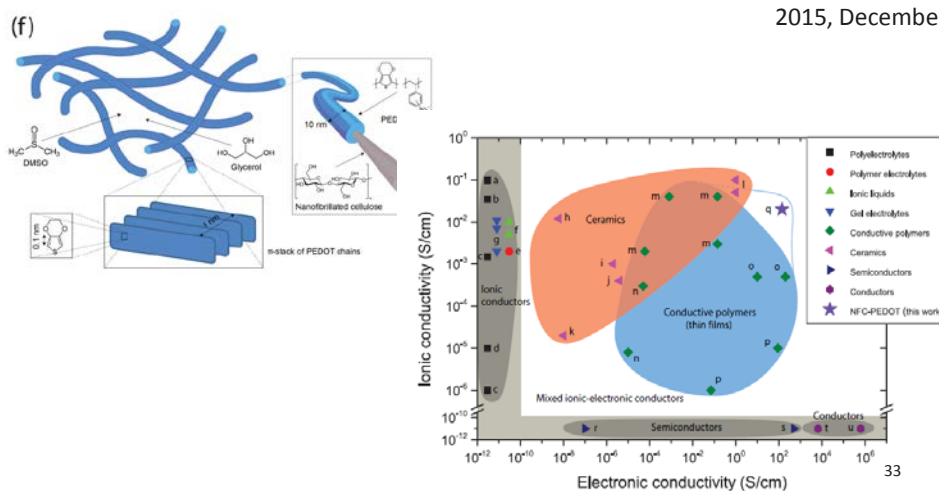
ADVANCED SCIENCE

www.advancedscience.com

An Organic Mixed Ion–Electron Conductor for Power Electronics

by A. Malti, J. Edberg, *et al.*, Sweden, Denmark and USA

2015, December



(図 14)

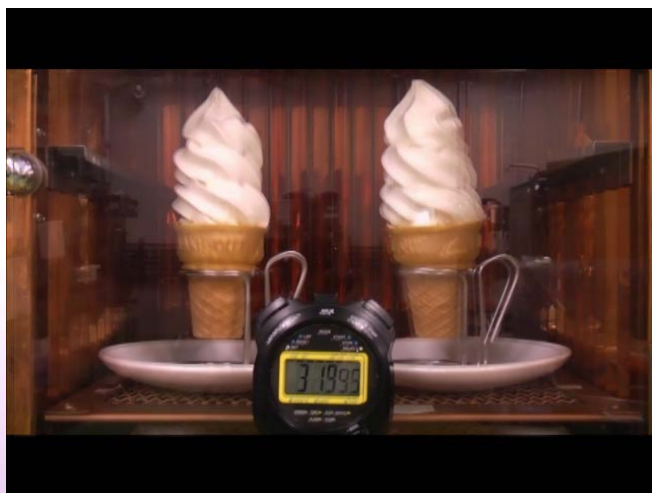
もう1つ、セルロースにとって大事なのは**メディカル関係**へのアプリケーションが期待できるということ。セルロースというのは我々の体の中に入ってもあまり害を及ぼさない物質です。生体親和性がある材料だということ、バクテリアセルロースで造った人工血管や、人工軟骨。最近では、吸湿性を持つアクリル樹脂と組み合わせて三次元的に成型したコンタクトレンズの開発も行われています。ですから、メディカルへの用途開発も考えられるということ。

整理すると、持続型の資源に基づいて**メディカル**、**エネルギー**、**IT 関係**、**環境材料**。フィルターもつくれるので、大気中の微量な粒子を捕まえてくれるようなフィルター。そういった、いろいろなところにこの材料は広がっていくだろうと考えられます。

その中で1つご紹介したいのは、**ソフトクリーム**に入れるという例です (図 15)。こちらに、セルロースナノファイバーを0.1%だけ入れました(右)。こちらは、普通のソフトクリームです(左)。35°Cに保たれた部屋の中にソフトクリーム2つを置いて、大体6分ぐらい経つと普通のソフトクリームは溶けてポタポタ垂れてきますが、こちらは全然形が変わりません。35°Cの部屋に入れて16分経っています。セルロースナノファイバーが入るといつまでも形を保ちます。これを**賦形性**といいます。氷が溶けていないのではないかという話をされる方がいますが、そんなことはなくて当然溶けていますが、そういう水をナノファイバーのネットワークで抱きかかえて形が崩れないようにしているわけです。もう少し時間が経つとポタッと落ちてくるということで、約18分ですから3倍長持ちするソフトクリームが出来るわけです。

冷菓への展開

at 35°C



日世株式会社

CNF:0.1%添加 36

(図 15)

食品添加剤としては、もちろんまだナノエレメントとしての社会的な心配もいろいろあるので、本当にこれを体内に入れて大丈夫なのかを明らかにしていかないと、企業としては商品化に踏み切れないところがあると思いますが、基本的にはモヤシ、レタスを我々は食べているので、多分、体に入れても大丈夫だろうと思います。

体に入れなくても、体に塗るということでも1つの用途として期待されているのは**化粧品**です。東大の磯貝先生たちのグループがTEMPO酸化触媒でつくったナノファイバーで、京都の第一工業製薬というところが既に商品として売り出したと思いますが、増粘剤としてスプレーに入れると、きれいに広がり、べたつかない化粧品がつくれます。また、こういったチクソ性を利用して、例えば、塗料に入れておくと一度に厚く塗っても垂れてこないとか、ただ強いというだけではない違う用途がいろいろ考えられるのではないかと思います。

そうは言いながらも、やはり気になるところは4番目のキーワードである**コストパフォーマンス**になります。材料がちゃんと世の中に出ているかどうかというのは、最終的にはパフォーマンスだけでは決まらず、「それは幾らなのか」という話になるわけです。

セルロースナノファイバーの原料になるパルプは確かに50円/kgでできている。これはナノファイバーの集合体ですね。それをドロツとした液体のようなものに丁寧にほぐしていこうとすると、いきなりキロ5,000円、10,000円になってしまう。それだったら構造用途に使うのなら炭素繊維で良いではないかという話になってしまうわけです。このコストパフォーマンスの壁をどう乗り越えていくかが、セルロースナノファイバーを構造用途に使っていくという意味で非常に重要になります。

というのは、やはり**構造用途**に使うのが一番大きなマーケットがあるわけです。1年間で3億tのプラスチックが世界で製造されています(図16)。その5%をセルロースナノファイバーで置き換えることができれば、多分15兆円ぐらいのマーケットになっていく。日本の裏山に資源があると言っておきながら、1年間に使うセルロースナノファイバーの量が全部集

めて 100t だというのでは全然話にならないわけです。

構造用途への期待： 日本の得意な技術で新たな市場を開拓

・世界のプラスチック生産量 3億トン

2010年の主要国・地域の樹脂別生産量

| | アメリカ | 中国 | 西欧* | 日本 | 韓国 | 台湾 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 低密度ポリエチレン | 9,312 | | 7,900 | 1,948 | 2,078 | 103 |
| 高密度ポリエチレン | 7,660 | 9,857 | 5,550 | 1,015 | 2,028 | 544 |
| ポリプロピレン | 7,826 | 9,167 | 8,800 | 2,709 | 3,806 | 1,215 |
| ポリスチレン | 2,293 | - | 3,700 | 822 | 1,037 | 845 |
| 塩化ビニル樹脂 | 6,358 | 11,300 | 5,550 | 1,749 | 1,404 | 1,432 |
| その他 | 13,184 | 13,283 | 14,900 | 3,999 | 2,675 | 2,192 |
| 合計 | 46,633 | 43,607 | 46,400 | 12,242 | 13,028 | 6,331 |

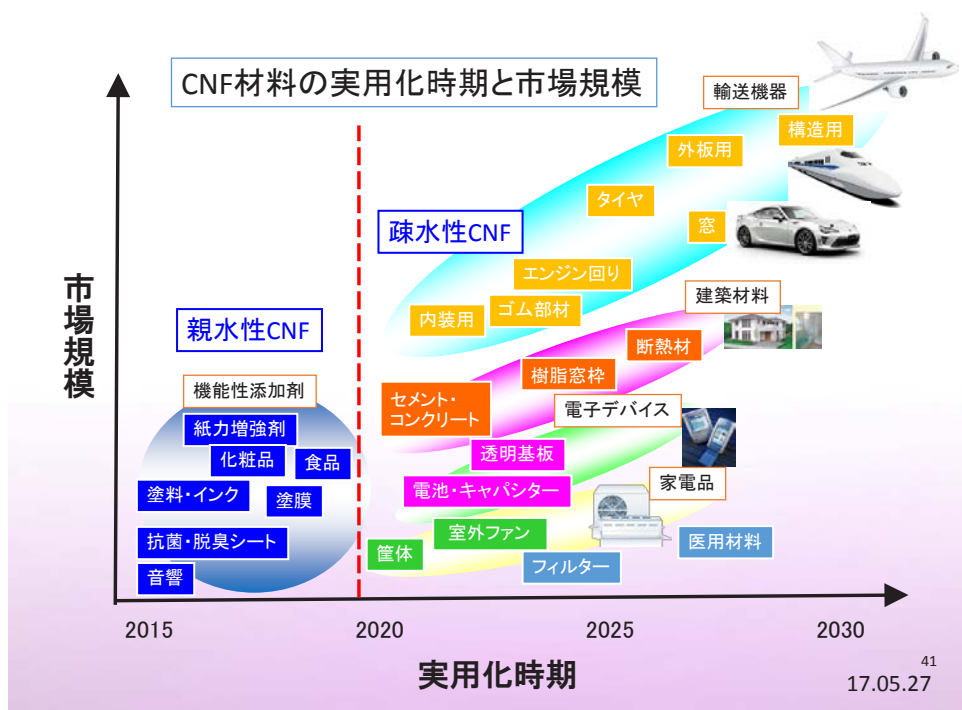
単位：1,000トン

3億トンの5%をセルロースナノファイバーに置き換える：1500万トン
1000円/kg とすると15兆円の市場

40

(図 16)

裏山にたくさんある資源を使って付加価値の高いものを造って、どんどん海外に売っていかないと構造用途をターゲットにしなければいけません。私の主観でつくった将来的なイメージ図ですが、現在マーケットに出ているのは親水性のセルロースナノファイバーです(図 17)。化粧品もみな、水の中にきれいに分散するナノファイバーです。パルプを何らかの処理でほぐしてやれば、水の中ではきれいにナノファイバーとして分かれるわけです。用途としては、塗料やインク、化粧品などに期待できますが、あまり量が出ていかない。やはり大量に使う期待としては、構造用途、建築材料、自動車、輸送機器などのプラスチックを補強して高強度で熱膨張の小さいものに変えていくことが大事になります。



(図 17)

大きく赤線を入れましたが、**疎水性**のセルロースナノファイバーを、いかにコストをかけずに造るかは結構ハードルが高い。ですから、それがマーケットに出て行くまでに時間がかかるだろうと思っています。

京都大学では平成 17 年から大型のプロジェクトで国の支援をいただいて、疎水化変性をしてプラスチックの中にセルロースナノファイバーを混ぜて、補強材料として使うという大型プロジェクトをずっとやってきました。現在は 4 つ目のプロジェクトを日本製紙、王子ホールディングス、星光 PMC といった企業と一緒に進めています。その中で開発した技術が「**京都プロセス**」と呼ぶ技術です (図 18)。これは「パルプ直接混練法」という名のとおり、パルプです。50 円/kg、ブラジルでは 20 円/kg らしいですが、パルプの状態、それを構成しているセルロースナノファイバーの表面すべてを、樹脂と仲の良い化学構造に変えてしまう。ナノファイバー化して、ドロットした液体の状態、化学修飾するとお金がかかって仕方ありませんが、原料になるパルプの段階でこのようなシートを薬液に浸けて、薬液をパルプの中まで染み込ませて、パルプを構成しているセルロースナノファイバー一本一本の表面を樹脂と仲の良い構造に変えてしまう技術です。二軸押出機の中でプラスチックを溶かしながら化学処理したパルプを練っていく。練っている間にパルプは解れて樹脂と仲が良くなっているので、樹脂に引き取られて樹脂の中に分散していくという技術です。

『パルプ直接混練法』“京都プロセス”

繊維のナノ化と高融点樹脂への均一分散を同時に達成。

➡ 製造コストの大幅削減！



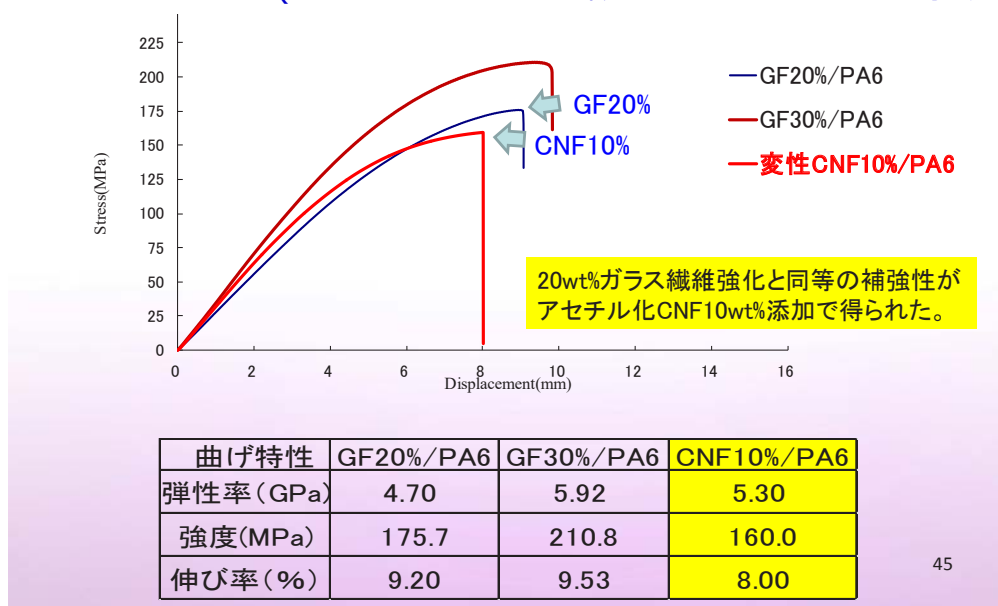
(図 18)

ですから、パルプさえ変性しておけば、あとはそのまま樹脂と練って、入れるときはパルプ、出て行くときはナノ化してナノコンポジットになっているという技術です。「京都プロセス」というのは、京都市産技研と一緒にあって、2005年から10年近くかけてようやく出来上がってきた技術ということでそう呼んでいます。それによって、何とかコストのハードルを越えていこうというわけです。

実際の実力ですが、**アセチル化処理**という一番お金のかからない化学修飾を主に私たちはやっています。いま世の中にセルロースの化学修飾として大きなマーケットをつくっているのはセルロースアセテート、酢酸セルロースです。セルロースナノファイバーの表面だけにそういう処理をするわけです。例えば、ナイロンの6という樹脂と一緒に二軸押出機の中で処理をしたパルプを練る。そうすると、10%のセルロースナノファイバーを入れますが、ガラス繊維を20%入れたものとほぼ同じ補強性が得られます (図 19)。

市販繊維強化材料(PA系)との比較

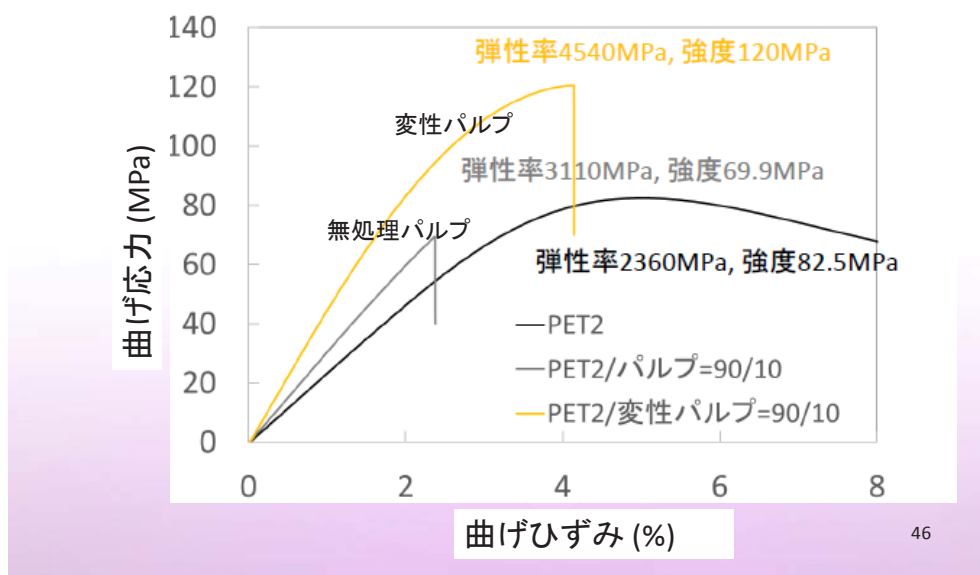
CNF10wt%(アセチル化)でガラス繊維20wt%品と同等の強度



(図 19)

あるいは、PET (ポリエチレンテレフタレート) は融点が 260°C ですから、化学修飾をしていないと、普通の処理をしていないセルロースはこの温度だと熱変性を起こして黄色くなったり、臭いが出てきたり、場合によっては煙が出てきたりしますが、アセチル化処理をしておく耐熱性が 20~30°C 上がります。分解が始まる温度は 20°C から 30°C 上がります。そうすることで、PET でも 10% 入れると弾性率はほぼ 2 倍、強度についても 1.5 倍ぐらい上げられます (図 20)。

無処理パルプとアセチル化パルプの比較 PET Tm: 260°C



(図 20)

それから、ガラス繊維や炭素繊維と比べて違うのは**マテリアルリサイクル**ができるということです。ガラス繊維で補強したプラスチックは、成型したあと砕いて、また成型すると、その間にガラス繊維がボキボキ折れて補強性がどんどん落ちてきます。ところが、セルロースナノファイバーは本当に小さいところまで分かれていますので、幾らプラスチックを砕いても、砕かれた剥片の大きさから見たらセルロースナノファイバーはものすごく小さいので全然痛まないわけです。だから、もう一度成型して使って、砕いて成型して使っても、弾性率も強度もほぼ変わらないという性質が得られます。つまり、サーマルリサイクルだけではなく、マテリアルリサイクルもできるという点では、ガラス繊維、炭素繊維材料とは違った特性を持っている材料だということです。

これらのことを踏まえて、京都大学では原料の木材から始まってセルロースナノファイバーに特化したパルプを造り、それを予備的にほぐしてシートに加工して化学処理をし、樹脂と練ってナノコンポジットを造る。この、一貫した製造プロセスを追いかけて行くことができるテストプラントを昨年3月につくりました。

生産能力としては、現在は1t/年ですが、キャパとしては5t/年までいけるようになっていきます。こういうものをいろいろなユーザーに提供して、実際に評価を受けるということでも研究が進んでおります。

最近の新聞報道で、日本製紙が「京都プロセス」をベースにしてプラスチックに複合化して年間10t造る、そういう生産設備を富士の工場に造りました。それから、星光PMCは京都プロセスをベースにしたテストプラントを2013年に造っていましたが、この12月を目処に、その生産量を70t/年まで引き上げるというプレス発表をしております。

ですから、京都大学だけではなく、こういったところからもどんどんセルロースナノファイバー、樹脂に混ざる、耐熱性のあるセルロースナノファイバーが、パルプの形、あるいは樹脂に混ぜたマスターバッチの形で提供されるようになってきています。これについては、今年の8月に『ニューヨークタイムズ』に「鉄より強い材料だ。日本は木材パルプから軽い自動車部品を造ろうとしている」と紹介されていまして。大本はロイターが世界に向けて発信したのですが、それがちょうど8月15日で、それ以降いろいろ海外のプレスで紹介されています。

我々の仕事がインターナショナルで紹介されたのは嬉しい面もありますが、逆にそうやって造ればコスト的にペイすることを世界が知ったわけです。いままでは、日本国内で「京都プロセス」と言って紹介していましたが、いきなりロイターの紹介によってグローバルにみんなが知ったことで今後はどんどん競争が厳しくなっていくだろうと思います。

その中で、我々がまだその先を行っているのは**発泡材料**です。セルロースナノファイバーで強化した樹脂材料を、超臨界の二酸化炭素を使って発泡させるという技術です。これで行くと、発泡するので厚く使うわけです。セルロースナノファイバーを5%入れて、超臨界の二酸化炭素でナイロン樹脂を発泡させます。そうすると、いまのエンジンカバーはガラス繊維を30%ぐらい入れて造っていますが、それと同じ剛性の部品が3割ぐらい軽く造られ、表面変化性も向上するという技術を開発しました (図21)。

PA6 エンジンカバー, 280°Cで発泡成形



CNF5%, foamed PA6

GF30% solid PA6

4.6 mm (二倍発泡) ... 厚さ ... 2.75 mm

0.13 Pa m⁴ .. 剛性 (EI, 10mm 厚さ) .. 0.13 Pa m⁴

660 g ... 製品重量 ... 960 g

- ✓ セルロースナノファイバー強化発泡樹脂成形品(ナイロン6)はガラス繊維強化樹脂成型品と比較し30%の軽量化を達成。
- ✓ 表面平滑性も向上

51

(図 21)

こういう材料は単に補強するだけではなくて、最終的にどういうものを作るかに合わせた更なる加工をそこに足していくことがポイントだということです。軽くて強い材料であれば、もっと軽くしてやる。それは、この材料の目指す1つの方向だろうと思っています。

次は、5番目の「時間」というキーワードです。2つ関係するものがありまして、1つは「日本は木の国」ということです。法隆寺の五重塔は1350年、地震が起きても、台風が来ても倒れずに立っています。これは、特殊かと言えそうではなくて、京都と奈良の間にある宇治に京都大学の研究所があり、私はその近くに住んでいます、家から10分も歩かないところに藤原時代の木造建築があります。柱に触りながらしみじみ思うのは、これは千何百年も前に伐られた木がずっとこの環境の中で使われてきたのだと思うわけです。

関心事としては、法隆寺の木は1300年も使われて強度はどうなのかということになります。当初材、それは法隆寺を建てたときの木材ですが、修理のときに一部切ったりするので、その当初材と、伐採した現在のヒノキの強度的な性質を調べています。曲げて折れるときの強度はほぼ変わりません。法隆寺のほうが少し良いのではないかという感じです。1300年も経って強度的に劣化しない高分子材料だということは、日本の木材利用の歴史が証明しているわけです。もう1つの「時間」というファクターが、この材料にとっては重要です。

木材は湿気た環境で使われると腐ったり、あるいはシロアリが出て来て食べたりするので、生物によって劣化する材料だというイメージがあると思います。

では、なぜ木は腐るのか。プラスチックは腐らないではないか。それは、地球上に現れからの時間の長さです。ビッグバンがあって地球ができて、多分、セルロースというのは真核生物のときは膜をつくっているし、もう少し前に遡ればシアノバクテリアが光合成を始めて、大気中の二酸化炭素が急激に減少した時代があります。そのときから多分、セルロースをつくってナノファイバーとして存在していたのだらうと思います。セルロースという物質が存在するときは、みなセルロースナノファイバーの形で存在しています。

そして、進化して陸上に植物が上がったのは5億年前です。5億年前からセルロースは陸上に現れ、その後、リグニンという物質ができてきて鉄筋コンクリートのような形になってきたわけです。非常に長い間、この地球環境の中にセルロースは存在しているので、同じようにそれを栄養源にする微生物なりシロアリが現れる時間だったということです。それだけ長い時間、地球環境中に存在して、大きな地球のサイクルの中にしっかり取り込まれている材料です。

プラスチックはたかだか戦後の化学産業の中で急激に出てきた材料なので、まだ70年です。最初の合成樹脂が出来たのが1907年と言われていますが、それでもまだ100年少しです。それだけの短い間で地球環境は、微生物もシロアリも、それを吸収して自分の栄養源にしていくだけの時間はないわけですが、何億年にも亘って地球上に存在してきた材料は、同時に何億年にも亘ってそれを分解して環境にうまく返していく時間であったということなので、本質的にセルロースナノファイバーという材料は地球環境に取り込まれている材料であると思います。ですから、長い目を見たときにも、それがどんどん大量に生活圏内に現れてきたとしてもあまり害を及ぼさないのではないかと考えています。

次は、6番目の「CO₂削減」というキーワードになります。いまの地球が抱えている課題は産業の課題でもあるわけです。地球温暖化。何とかCO₂を固定し、排出を削減しなければいけない。資源の枯渇。持続型資源への転換が必要です。バイオマスは両方の課題に対応可能なものであるし、セルロースナノファイバーという材料は、軽くて強くて熱膨張が小さい特性を活かしていけば、もっと積極的に材料として貢献していきたくらいということですから、次世代の大型産業としての期待があるわけです。

CO₂を排出しないということであれば、トヨタが「環境チャレンジ 2050」で言っているとおりで、トヨタだけでなくどの自動車メーカーも「何とかCO₂排出のない車を造ろう」と、内燃機関を電気自動車に変える、水素電池に変える。それだけではなくて、ボディの軽量化を図って燃費を向上させてCO₂排出を減らしていきたいという大きなモチベーションがあるわけです。

そういう背景の中で改めてこの材料を見ると、セルロースは光合成で出来ているわけです。光合成は6つの二酸化炭素に12の水を使って、植物がグルコースと酸素に変換しているわけです。ということは、先ほどの硬い乾パンのようなセルロースナノファイバー100%の材料はその9割は大気中の二酸化炭素を固めているわけです。CO₂というのはたくさんあると感じますが、手に取れるCO₂というのはなかなかないと思います。セルロースのナノファイバーはそういう材料です。大気中の二酸化炭素がこのまま材料として形を変えて存在している。ですから、本質的にはCO₂排出を減らす方向に繋がる材料であると思っています。

現在、環境省のプロジェクトを昨年10月から行っていますが、透明な材料、タイヤ、軽くて強いセルロースナノファイバー材料、発泡材料を使いながら、どこまでセルロースナノファイバーで自動車を造ることができるのか。20の機関が参画して、経済産業省とずっとやってきた我々のプロジェクトと連携する形でいま車造りをやっています。2020年3月までのプロジェクトですから、東京オリンピックの半年前までにセルロースナノファイバーで車を造る、これが我々のいまのモチベーションです (図 22)。

環境省 Nanocellulose Vehicle (NCV) モデル事業

2016-2020

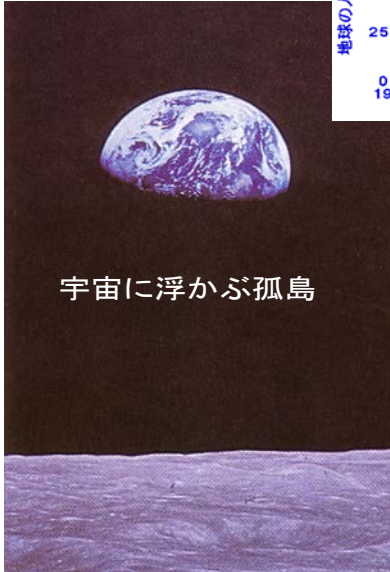


(図 22)

このように、植物というのはいろいろな機能を持っているわけです。そういったものを複合的に利用していく。森林の持ついろいろなポテンシャルを利用していくことが大事だろうと思います。

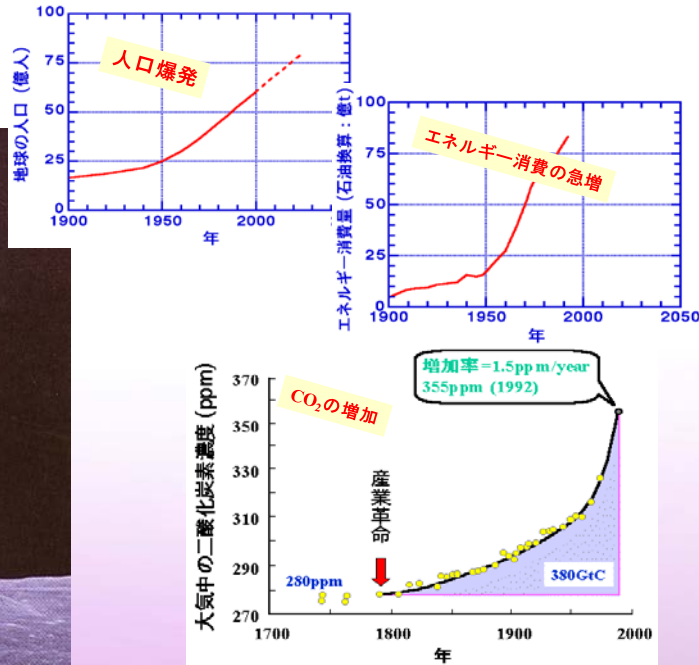
最後のキーワードは、「**持続性**」です。これは月面から見た地球の姿ですが、みなさんはこの地球を見てどう思われますか。私は、つくづく離れ小島だと思います。この地球の外から原油や鉄鉱石が飛んで来るわけでもないし、非常にクローズドな限られた空間の中で我々は生活しています。そこで人口が増え、生活レベルが上がればエネルギー消費が増える。当然、化石資源を燃やしていくので CO₂ が排出されていく。こういうことが、いま地球温暖化の原因になっているわけです。資源は限られているので原油は恐らく右肩上がりに価格を上げていくだろうし、鉄鉱石も上がっていくだろうと思われます (図 23)。

地球の 危機的状況



宇宙に浮かぶ孤島

<http://staff.aist.go.jp/k.morita/gaia.html>



69

(図 23)

そういう中で、資源保障としてはどうするのか。やはり、植物バイオマス。太陽の光によって二酸化炭素を吸収固定して作り出された地球上最大の有機物質に依存した社会をつくらなければならない。日本は、その中でも森林国なので積極的にそれをリードしていく責任があると思うし、やはり「木の国日本」としてのプライドをかけた持続型の植物資源に依存した社会づくりというのは、日本が世界をリードして進めていかなければいけないと思っています。

次に**未来**ということですが、チクソ性を利用して既にボールペンのインク、あるいは、比表面積が大きいという性質を利用して大人用オムツなどへの商品開発が進んでいます。それらはみな、水系のセルロースナノファイバーです。あまりマーケットが大きい。やはり、未来は**疎水化**されたセルロースナノファイバーで樹脂を補強し、あるいは、それだけが固まった非常に高強度の材料になってこういうところに展開していくことが未来の姿です。非常にハードルが高い (図 17)。

例えば、ポリプロピレン。みなさんが、セルロースナノファイバーで補強したポリプロピレンが欲しいと言うわけです。なぜかという、自動車に使われるプラスチックの7割ぐらいはポリプロピレンで軽く、ある程度の強度があり、価格的に安い。産業界のニーズはよくわかります。

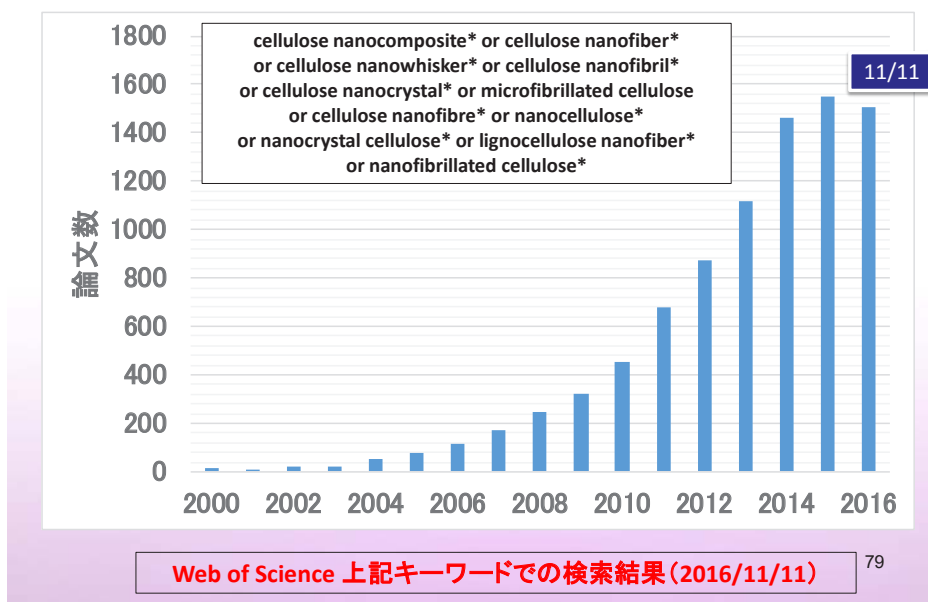
ところが、ポリプロピレンというのは性質的にはセルロースと正反対です。セルロースは水と非常に仲のいい物質ですが、ポリプロピレンは極性がほとんどない油のような性質を持ちます。水と油を混ぜ合わせて、セルロースナノファイバーの持っている性能を最終品に発現させる。それをコストとして、安い材料で達成することは非常にハードルが高い。それでも世の中のニーズが多いので、最近少しずつそこに向かって動き出しています。

少しずつハードルの高い出口に向かってこの材料は動いているというのが現状です。

もう1つ、我々は『日本経済新聞』で2006年に「植物繊維で金属並みの強度の材料が出来る」というのを取り上げていただきました。将来、車体や家電に応用できるということで、当時、プラスチックに混ぜることはやっていましたが、セルロースナノファイバーだけを固めて強い材料を造るのは時間がかかるだろうと思っていました。つい4日前の10月6日に、大阪の利昌工業という会社がセルロースナノファイバー100%の板を、生産技術の工夫によって出来るようになったという新聞報道がありました。ということで、少しずつセルロースナノファイバーが社会に入っていく。新しい産業として少しずつ前に進んでいるのではないかと考えています。将来的には、世界に向けてこの材料をどんどん出していききたいと思うわけです。

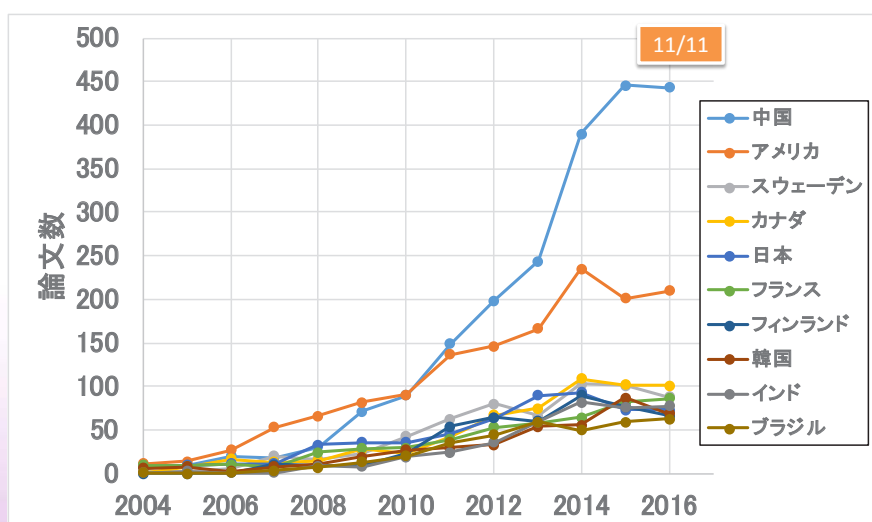
次に、国内外の動向をまとめます(図24, 25)。現在、世界で発表されている年ごとの論文数を縦軸、横軸は年です。2004、2005年辺りから急激に論文数が増えていて、現在では1年間に2,000ぐらい出ています。それを国別に分けてみて驚くのは、中国がダントツに増えてきています。本当に中国で研究をやっているのかということで、昨年、調査団が行きました。調べてみると、確かにやっています。30を超える大学や研究機関がセルロースナノファイバーの開発や材料への転換についての研究を行い、特許も出していることが明らかになりました。これは昨年に公開された特許ですが、ダントツに多いのが中国で382件です。日本は2位とはいえ、その1/4です。特許戦略においても、中国がいま非常に進んでいる状況です。

世界の動向: ナノセルロースに関する論文・著書数の推移



(図 24)

世界の動向: ナノセルロースに関する論文・著書数の推移

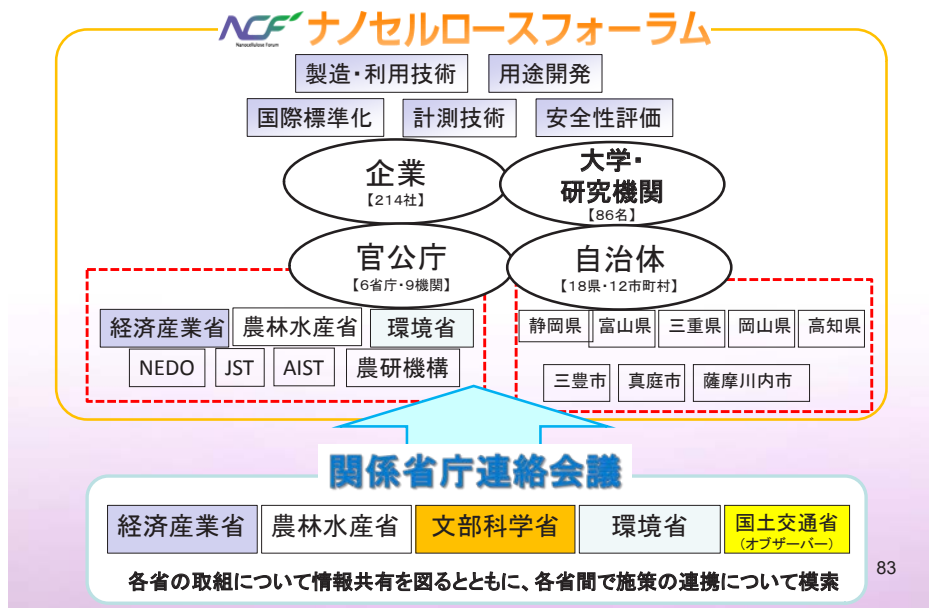


80

(図 25)

では、日本はそれで負けるのかという決してそうではないと思っています。1 つは、国家戦略としてこの材料が位置づけられている。それによって、「ナノセルロースフォーラム」という産官学の異分野が情報交換をする場が世界に先駆けて 2014 年（平成 26 年）に日本で誕生しました。現在は 220 を超える企業が参加していますが、特徴は官公庁や自治体が集まって来てここでいろいろ情報交換をしています。国家戦略ですから、このフォーラムを中心に関係省庁が連携してそれを支えようということで、経済産業省がリードした形で農水省、文科省、環境省、国交省が横串で、お互いにそれぞれの役割を確認したうえで、このセルロースナノファイバー材料の社会実装に向けて支援をしているという状況になっています (図 26)。

セルロースナノファイバー推進のための産学官連携体制



(図 26)

成長戦略に載ってから3年間で何が起きたかという、日本中にセルロースナノファイバーをつくるテストプラントが出来ました。京都プロセスをベースにして、樹脂に複合化できる変性パルプ、あるいは樹脂と複合化したセルロースナノファイバー材料を供給するという意味では、いま3つの拠点が出来ています。

こうして川上から流れて来ると、次は地域、地域で、それを最終品に加工して使ってみようという中小企業の方たちとの連携が始まっているという状況です。一番進んでいるのは、近畿経済産業局が主導する部素材産業 CNF 研究会です。2014年12月に発足して、現在は90社近く、近畿地域の企業が参加しています。主に不織布、プラスチック、ゴムへの利用についてセルロースナノファイバーでどういう材料をつくることができるかというようなことをやっています。将来的には地域への展開が進んでいって、新たな地場産業が創出できる。大手企業が物を造るだけでなく、地域、地域の企業がその特徴を活かしてセルロースナノファイバーの材料を造っていく。あるいは、開発していくという状況になってきています。

このときに大事だと思うのは、**マッチング**です。セルロースナノファイバーを普通にプラスチックに混ぜたのでは全然性能が出ません。混ぜているうちに、セルロースナノファイバーが凝集体をつくって、混ぜる前よりもかえって強度が落ちたりするわけです。そういうものがしっかりと樹脂中に混ざり、持っている性能が最終製品できちんと発現していくことをやらないと、この材料の未来はないと思っていますが、そのために必要なのは川上側と川中、川下が連携して、物を造っていくことだと思っています。せつかくいろいろなところで川上から材料が出てきているので、マッチングをしっかりとって社会に実装していくことが大事だろうと思っています。

ご清聴、ありがとうございました。

(平成29年10月10日(火) ホテルメトロポリタン エドモントにて)



RESONA

リそな中小企業振興財団

**The Resona Foundation
For Small And Medium Enterprise Promotion**

〒141-0021

東京都品川区上大崎三丁目 2 番 1 号

Tel. 03-3444-9541 Fax. 03-3444-9546

URL: <http://www.resona-fdn.or.jp>

E-mail: staff@resona-fdn.or.jp