本田財団レポート　No. 165
第 37 回本田賞授与式 記念講演（2016 年 11 月 17 日）

「新規セルロースナノファイバーの調製と特性・機能」

東京大学大学院農学生命科学研究科 教授
磯貝 明博士

「植物系ナノ材料の創成」

京都大学生存圏研究所 教授
矢野 浩之博士

Commemorative lectures at the 37th Honda Prize
Award Ceremony on the 17th November 2016

Development of Production Technology of Cellulose Nanofibers and Their Characteristics and Function

Dr. Akira Isogai

Professor of the Graduate School of Agricultural and Life Sciences at The University of Tokyo

Development in Bio-based Materials Inspired by Nano-to Micro-structures in Plants

Dr. Hiroyuki Yano

Professor of the Research Institute for Sustainable Humanosphere at Kyoto University

公益財団法人 本田財団
HONDA FOUNDATION

磯貝　明博士

東京大学大学院農学生命科学研究科 教授

Professor of the Graduate School of Agricultural and Life Sciences at The University of Tokyo

Dr. Akira Isogai

■生まれ

1954年10月19日

■略　歴

1980年	東京大学　農学部　卒業
1982年	東京大学　大学院農学系研究科修士課程修了
1985年	東京大学　大学院農学系研究科博士課程修了（農学博士）
1985～1986年	米国 Institute of Paper Chemistry（大学院大学）化学科博士研究員
1986～1994年	東京大学　農学部助手
1989～1990年	米国農務省林産物研究所客員研究員
1994～1996年	東京大学　農学部　助教授
1996～2003年	東京大学　大学院農学生命科学研究科助教授
2003年～現在	東京大学　大学院農学生命科学研究科教授

■学・協会活動

2013年～現在	セルロース学会会長
2003年～現在	紙パルプ技術協会理事 木材科学委員会委員長
2015年～現在	機能紙研究会副会長
2006年～現在	木材科学アカデミーフェロー
2009年～現在	ナノファイバー学会理事

その他：アメリカ化学会、米国紙パルプ技術協会、
高分子学会、日本木材学会、繊維学会、
キチンキトサン学会、米国紙パルプ技術協会、
会員

■Born

October 19, 1954

■Education and Employment History

1980	Bachelor from Faculty of Agriculture, The University of Tokyo
1982	Master Degree from Graduate School, Division of Agricultral Science, The University of Tokyo
1985	Ph.D from Graduate School, Division of Agricultral Science, The University of Tokyo
1985-1986	Post-doctoral fellow, The Institute of Paper Chemistry, Appleton, WI, USA
1986-1994	Assistant Professor, Faculty of Agriculture, The University of Tokyo
1989-1990	Visiting Scientist, Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture, Madison, WI, USA
1994-1996	Associate Professor, Faculty of Agriculture, The University of Tokyo
1996-2003	Associate Professor, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo
2003-present	Professor, The University of Tokyo

■Membership

2013-present	The Cellulose Society of Japan: President
2003-present	Japan TAPPI (Technical Association of Pulp and Paper Industry): Board, Chairman of Wood Science Committee
2015-present	High Performance Paper Society of Japan: Vice President
2006-present	Fellow of International Academy of Wood Science
2009-present	The Nanofiber Society: Board

American Chemical Society, TAPPI, Society Polymer Science Japan, etc.：Member

■研究業績・主な出版物

総説および著書：167編

例：セルロースの材料科学、単著、東京大学出版会＜2001年＞、
セルロースの科学、編集、朝倉書店＜2003年＞

出願特許：132件

■受賞歴

2015年　Marcus Wallenberg 賞

2015年　米国化学会 Anselme Payen 賞

2016年　日本農学会賞および読売農学賞

2016年　TAPPI（Technical Association of Pulp and Paper Industry, USA）Fellow

その他　13件

■Research Achievement and Publications

Review articles, books & book chapters: 167

Patents & patent applications: 132

■Awards

2015　Marcus Wallenberg Award from Sweden

2015　Anselme Payen Award from American Chemical Society, USA

2016　Japan Prize of Agricultural Science and Yomiuri Agricultural Science

2016　TAPPI (USA) Fellow and other 13 awards

矢野　浩之博士

京都大学生存圏研究所 教授

Professor of the Research Institute for
Sustainable Humanosphere at Kyoto University

Dr. Hiroyuki Yano

■生まれ

1959年2月6日

■略　歴

1982年	京都大学　農学部林産工学科　卒業
1984年	京都大学　大学院農学研究科修士課程 林産工学専攻　修了
1986年	京都大学　大学院博士課程　退学 京都府立大学　農学部　助手
1989年	京都大学　農学博士号　取得
1992年	京都府立大学　講師
1997～1998年	オーストラリア連邦科学産業研究機構 林産物研究所　客員研究者
1998年	京都大学　木質科学研究所　助教授
2002年	秋田県立大学　木材高度加工研究所 客員助教授
2004年～現在	京都大学　生存圏研究所生存圏開発 創成研究系　教授

■学・協会活動

2014年～2016年	ナノセルロースフォーラム会長
2008年～現在	木材科学アカデミーフェロー
2014年～現在	日本木材学会理事

その他：高分子学会、日本材料学会、セルロース学会、
日本成形加工学会、日本ゴム協会、他

■Born

February 6, 1959

■Education and Employment History

1982	Bachelor of Agriculture (Wood Science and Technology), Kyoto University
1984	Master of Agriculture (Wood Science and Technology), Kyoto University
1986	Assistant Professor, Dept. of Forestry, Kyoto Prefectural University
1989	Doctor of Agriculture, Kyoto University
1992	Lecturer, Dept. of Forestry, Kyoto Prefectural University
1997-1998	Visiting Scientist, Forest Products Laboratories, CSIRO, Australia
1998	Associate Professor, Wood Research Institute, Kyoto University
2002	Visiting Associate Professor, Institute of Wood Technology, Akita Prefectural University
2004-present	Professor, Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

■Membership

2014-2016	Nanocellulose Forum: President
2008-present	Fellow of International Academy of Wood Science
2014-present	Japan Wood Reasearch Society: Board

Society of Polymer Science Japan, Society of Materials Science Japan, Cellulose Society of Japan, Japan Society of Polymer Processing, Society of Rubber Science and Technology Japan, etc.: Member

■研究業績・主な出版物

総説および著書：101件

例：A. N. Nakagaito, 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, 547-552（2004年）.

H. Yano, J. Sugiyama, A. N. Nakagaito, M. Nogi, T. Matsuura, M. Hikita, K. Handa: Optically Transparent Composites Reinforced with Networks of Bacterial Nanofibers, Advanced Materials, 17（2）, 153-155（2005年）

A. N. Nakagaito, M. Nogi, H. Yano: Displays from transparent films of natural nanofibers MRS Bulletin, 35（3）（2010年） 214-218

出願特許：82件

■Research Achievement and Publications

Review articles, books & book chapters: 101(A. N. Nakagaito, 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,78,547-552(2004).

H. Yano, J. Sugiyama, A. N. Nakagaito, M. Nogi, T. Matsuura, M. Hikita, K. Handa: Optically Transparent Composites Reinforced with Networks of Bacterial Nanofibers, Advanced Materials, 17(2), 153-155(2005)

A. N. Nakagaito, M. Nogi, H. Yano: Displays from transparent films of natural nanofibers MRS Bulletin, 35(3) (2010) 214-218, and others)

Patents & patent applications: 82

■受賞歴

1989年　日本木材学会奨励賞

2005年　セルロース学会　林治助賞

2009年　日本木材学会賞

■Awards

1989　Young Scientist Award, Japan Wood Research Society

2005　Hayashi Jisuke Award, The Cellulose Society of Japan

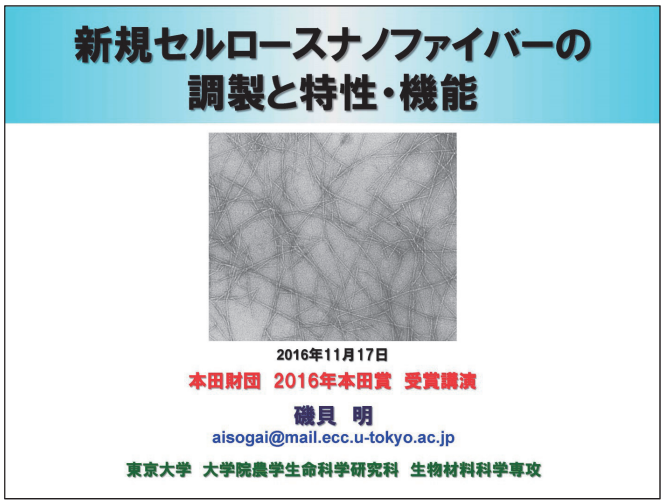
2009　Japan Wood Research Society Award, Japan Wood Research Society

このレポートは、2016 年 11 月 17 日　東京、帝国ホテルにおいて行なわれた第 37 回本田賞授与式記念講演の要旨をまとめたものです。

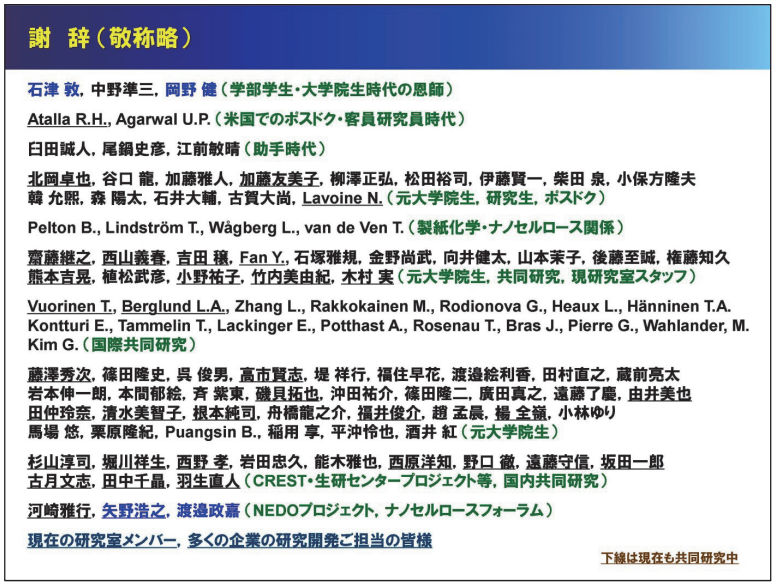
This report is the gist of the commemorative lectures at the 37th Honda Prize Award Ceremony at the Imperial Hotel, Tokyo on 17th November 2016.

新規セルロースナノファイバーの調製と特性・機能

磯貝　明



ご紹介ありがとうございました。このたびは栄えある本田賞に共にナノセルロース研究開発に携わっておられる矢野先生と一緒に受賞させていただく機会をいただき、関係の皆さまに厚くお礼申し上げます。また、選考委員会の皆さま、それから今日ご説明いただいた石田先生はじめ、ご祝辞をいただきました皆さまに厚くお礼申し上げます。それでは、短い時間ですが、簡単に内容を紹介したいと思いますので、よろしくお願い致します。



図－1

〈図－1〉　まず謝辞を申し上げます。この仕事は私一人で築き上げたものではありません。多くの皆さまのご尽力によって生まれ、何とかこれまでの成果につなげることができました。今日ご臨席いただいている学生時代の恩師である石津先生、岡野先生、それからアメリカ留学中にお世話になった方々、大学院生たち、下線は今でも共同研究中の皆様、ナノセルロース研究に入る前の製紙化学分野の先生方など多くの皆様にお礼申し上げます。

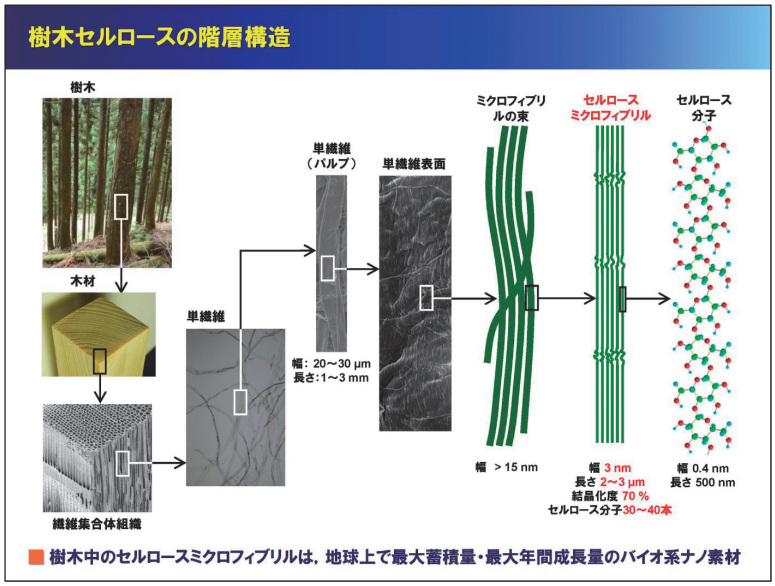
さらに、このナノセルロース研究を担当していただいた当時の大学院生で、現在は当研究室の准教授の斎藤先生、西山先生、現在のスタッフの皆様、また海外からも多くの留学生や研究生が当研究室に滞在し、情報交換し、帰国後に研究領域をさらに広げてくださったのも大きな成果につながりました。

これまで大学院生が多くの研究成果を積み上げてくださり、現在でも科学技術振興機構のCREST プロジェクト、生物系特定産業技術研究支援センター（生研センター）のプロジェクトなどで多くの先生方と一緒に仕事をさせていただいています。このプロジェクトが始まった当時は日本製紙の皆様、京都大学の矢野先生と、経産省紙業課の渡邉元課長様がこの分野を引っ張ってくださいました。私たちは皆様が築き上げられたナノセルロースの潮流にうまく乗せていただいたのが正直なところです。

今回の受賞に関しては、私たち、それから私たちの研究グループはもちろんのこと、現在ナノセルロースの実用化を目指して検討してくださっている多くの企業の皆さまとともに、この受賞の喜びを分かち合いたいと思います。また、これまでご挨拶させていただきました皆さまを通じて何十人、何百人の方々とネットワークでつながっております。多くの皆様方に少しでもこの受賞を喜んでいただき、また明日に向けた研究開発につなげていただければ幸いです。

図－2

〈図－2〉　これは 28 年前の若いころの国際学会参加での記念写真です。今日来ていただいている石津先生と、アメリカでお世話になった Atalla 先生との写真です。

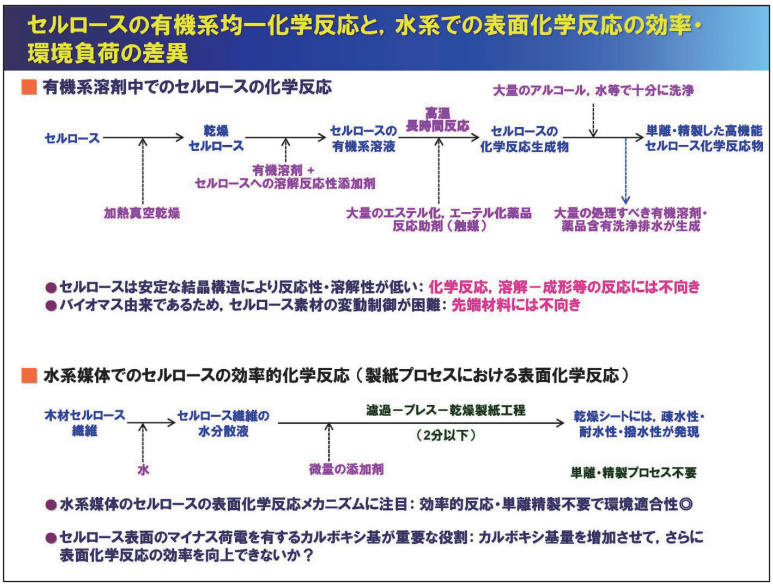


図－3

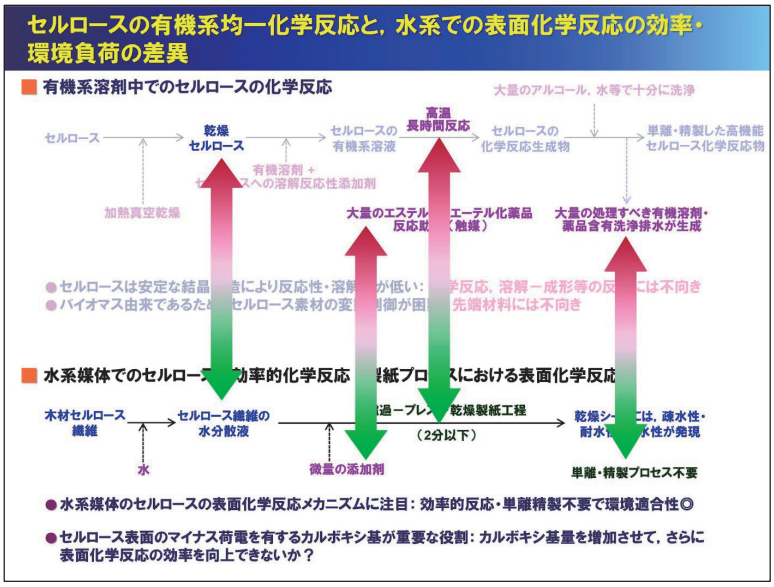
〈図－3〉　樹木は重力に逆らって樹体を上方に成長させ、風雨や微生物攻撃に耐え、そしてパイプの集合体のような細胞組織内を重力に逆らって水を先端の葉まで吸い上げる疎水性を有しています。それらのパイプ状の繊維集合体が樹木の樹体と生命を維持しています。

この木材組織から１本、１本の繊維に分離した素材がパルプで、紙の原料になります。さらにパルプ繊維表面を拡大していくと、最小単位は直鎖状の多糖であるセルロースです。このセルロースに次ぐ最小単位がセルロースミクロフィブリルで、セルロース分子が 6×6＝36 本、真っすぐに伸びた状態で規則正しく並べられた幅３ナノメートルのバイオ系ナノファイバーです。

すなわち、セルロースミクロフィブリルは地球上で最も多量に存在し、毎年最大量が蓄積され続けているバイオ系ナノファイバーです。しかし、このミクロフィブリル間は無数の水素結合で強固に結合しているため、これまでは、損傷なくこの１本、１本のミクロフィブリルを分離分散させてバイオ系ナノ素材として利用することはできませんでした。



図－4



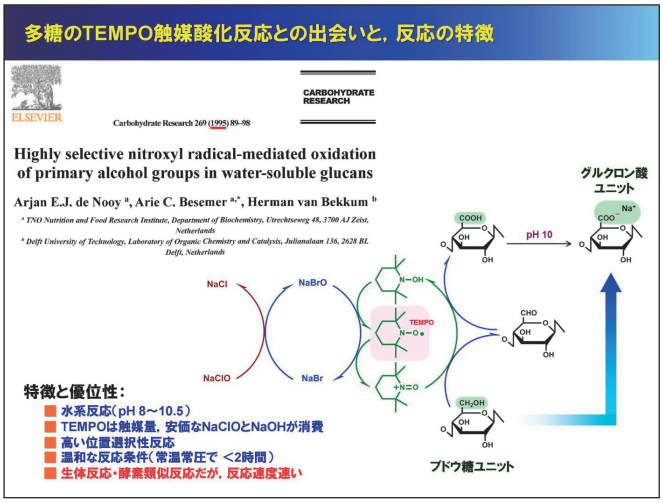
図－5

〈図－4、5〉　私は学生・大学院生時代には、石津先生の下、セルロースの様々な化学反応について研究していました。まず、セルロースを乾燥させ、有機溶剤を加え、多量の反応試薬を加え、そして高温で長時間撹拌し、その後、単離・精製過程では、大量のアルコールや水で洗浄すると、僅かなセルロースの反応物を取るために多量の処理すべき廃液が生じます。昔は多量の水と共に下水に処理しても問題ありませんでしたが、今では洗浄廃液は回収－処理しなければなりません。このころから、セルロースは安定な材料で、化学反応や溶解には基本的に向いていないように思っていました。また、セルロースのようなバイオマス由来の素材は生物多様性によって構造や特性の分布の幅が広く、先端素材に使用可能にするために、常に特性・構造・物性を一定範囲内に制御するのは困難でした。

そして、助手時代に製紙化学におけるセルロース繊維の表面化学反応に取り組みました。製紙化学では、木材セルロース繊維を水に分散させ、少量の添加剤を加え、2 分以内の抄紙工程を経て製造された紙には、本来セルロースにない撥水性や耐水性が効率的に付与され、私たちの身の回りの便利で安価な材料として利用されています。

有機化学反応でセルロースを改質する場合と、製紙化学プロセスでセルロース繊維表面を改質する場合を比較すると、前者は完全な乾燥、多くの反応薬品の添加、高温長時間の反応が必要で、単離・精製過程で大量の廃液が生成します。一方、後者では乾燥の必要はなく、微量の添加剤添加で済み、短時間のプロセスで、単離精製の必要なくセルロースを改質できます。すなわち、後者は環境負荷、反応効率の観点から極めて優れたセルロースの改質プロセスです。そこで、この効率的な改質のメカニズム解明に取り組みました。

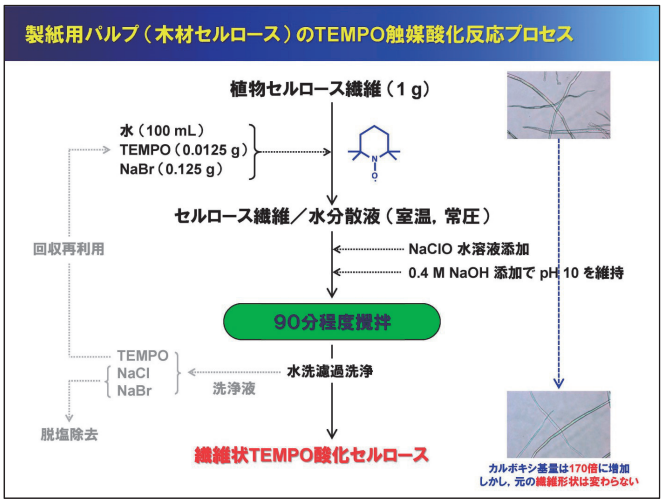
この研究の過程で、セルロース繊維表面にマイナス荷電を有するカルボキシ基の重要性を認識し、セルロース中のカルボキシ基量を増加させる必要性を感じていました。



図－6

〈図－6〉　1995 年にオランダのグループが、セルロースと類似した多糖であるデンプンに対し TEMPO 触媒酸化を適用しました。TEMPO は触媒的に作用し、安価な次亜塩素酸ナトリウムが食塩に変化する反応の過程で、多糖の 1 級水酸基が選択的にカルボキシ基のナトリウム塩に酸化される反応です。

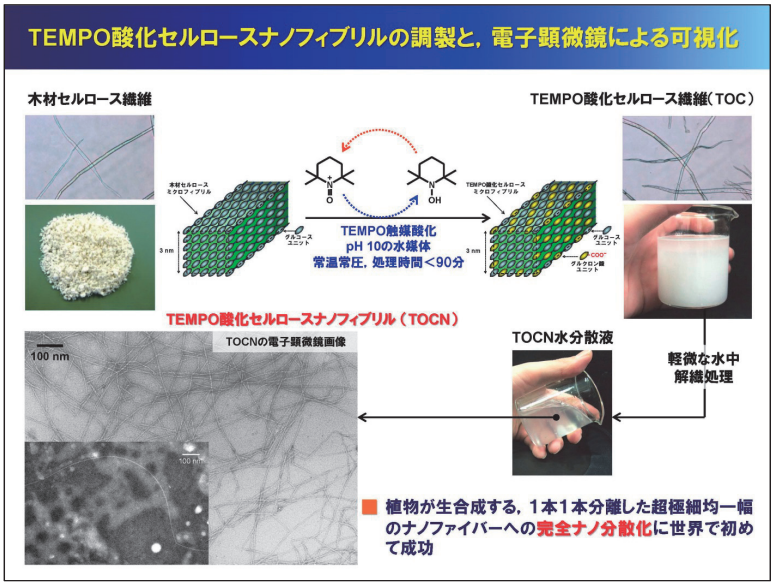
この反応は有機溶剤を用いたセルロースの化学反応に比べると、水系で、触媒的反応で添加薬品が少なくて済みます。また、極めて位置選択的な反応であり、私たちの体の中の生体反応・酵素反応と類似しています。私たちの体の中では常温常圧、水系で選択的な物質変換やエネルギー生産が可能です。現在、バイオテクノロジーが注目されている理由の一つは、常温常圧、水系で触媒反応によって選択的な物質変換、エネルギー生産が可能な点です。そのような観点から、セルロースを含む多糖類の TEMPO 触媒酸化に取り組みました。



図－7

〈図－7〉　実際の処理プロセスは極めて簡単です。セルロース繊維は水に溶けませんから、まず水に分散させ、少量の TEMPO を加えて常温で撹拌するだけです。その結果、マイナス荷電を示すカルボキシ基が、元のセルロース繊維の 170 倍も多く生成しているにもかかわらず、元の繊維形状が維持されます。研究の初期段階では、水に溶解しない元のセルロース繊維が TEMPO 触媒酸化反応によって水に溶解するように変化することを目的としていました。したがって、TEMPO 触媒酸化後に水にも溶解せず、繊維形状も元のままですから、研究を継続する対象外で放置していました。しかし、その後の研究から、繊維形状は変わらなくても、マイナス荷電を与えるカルボキシ基は元の 170 倍も生成していることがわかりました。

その後、日本製紙の研究開発の皆さんが、この洗浄廃液から、TEMPO を回収－再利用する技術を構築されました。

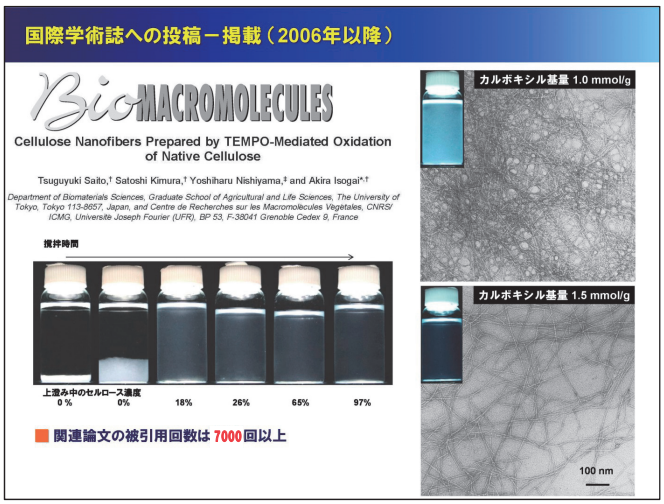


図－8

〈図－8〉　一連の図をここに示します。木材セルロースの TEMPO 触媒酸化反応によって、結晶性のセルロースミクロフィブリルの表面の 1 級水酸基がカルボキシ基に選択的に酸化され、黄

色で示しますマイナス荷電を導入することが可能です。この段階では元の繊維形状は変化しませんが、この TEMPO 酸化セルロース繊維を水に分散させ、軽微な撹拌処理することで透明なゲルになります。

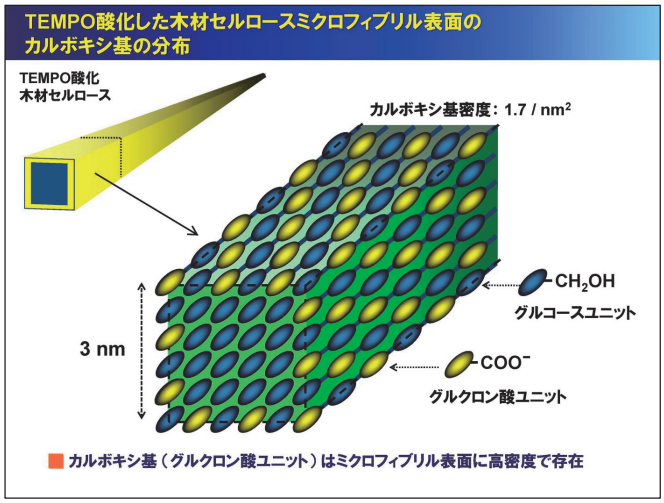
当初は水に溶解してしまったと思ったのですが、透過型電子顕微鏡で観察すると、植物が生合成したセルロース分子に次ぐ最小単位である、幅３ナノメーターのナノファイバーに完全に１本、1 本分離できることを世界で初めて見出しました。画像では鋭角に折れているナノファイバーも見られますが、これは観察用試料調製過程で生成したもので、3 ナノメーター幅でミクロンレベルの長さで、しかもしなやかな新規バイオ系ナノファイバーの調製に成功しました。



図－9

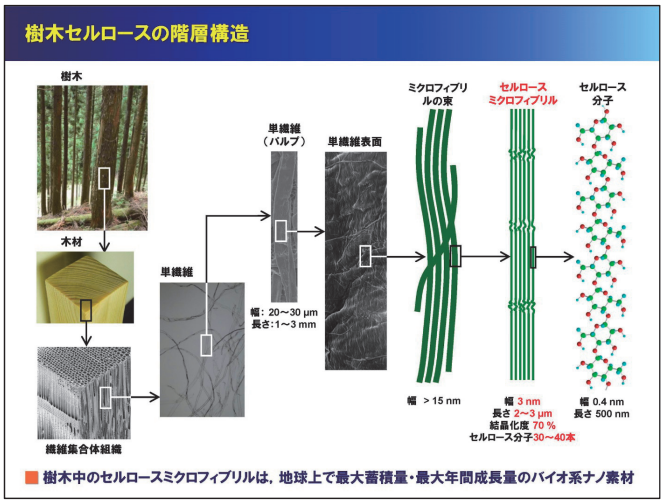
〈図－9〉　この新規バイオ系ナノファイバーの調製条件の発見については、実用化等は考えず、まずは論文を作成して国際誌に投稿しました。その理由は、このような新素材が何に利用可能なのか、全くわからず、考えもしなかったからです。この写真のように、繊維状の TEMPO 酸化セルロースは水に沈みます。しかし、水中で撹拌し続けるとしだいに膨潤し、最後には透明なゲルになり、ナノファイバー1 本、1 本に分離分散します。カルボキシ基量が少ないと、同じ条件ではまだ白濁して可視光サイズの凝集体が残りますので、導入するカルボキシ基量は、ナノファイバー化には重要な因子・条件となります。

私たちにはこの新素材が何に利用可能なのかわかりませんでしたので、まずはアメリカ化学会の国際誌に投稿－掲載したところ、多くの研究者の方々に引用していただき、追実験していただき、確かに直感的に面白いバイオ系ナノファイバーが簡単に調製できることが報告され、私たちが考えもしないような応用分野への検討が進みました。その結果、私たちの論文の引用回数が急速に増加していきました。これは私たちが予想もしなかったことです。



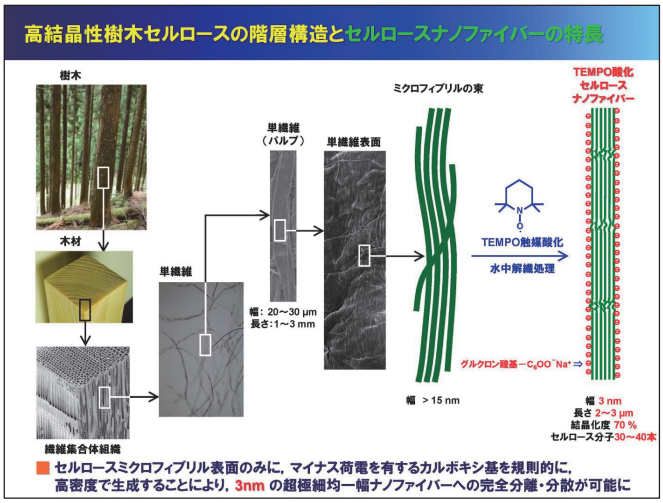
図－10

〈図－10〉　前述したように、植物は直鎖状セルロース分子が 6×6＝36 本束ねられたセルロースミクロフィブリルを細胞壁主成分としています。植物セルロースの TEMPO 触媒酸化反応では結晶内部の 4×4＝16 本のセルロースは全く酸化されることなく、表面に露出しているセルロース分子の 2 個に 1 個に、規則的にマイナス荷電を持ったカルボキシ基が導入されます。この反応は極めて特異的で位置選択的な反応です。このような選択的反応を目的として研究した成果であれば自慢できますが、事実は全く異なり、偶然の発見でした。



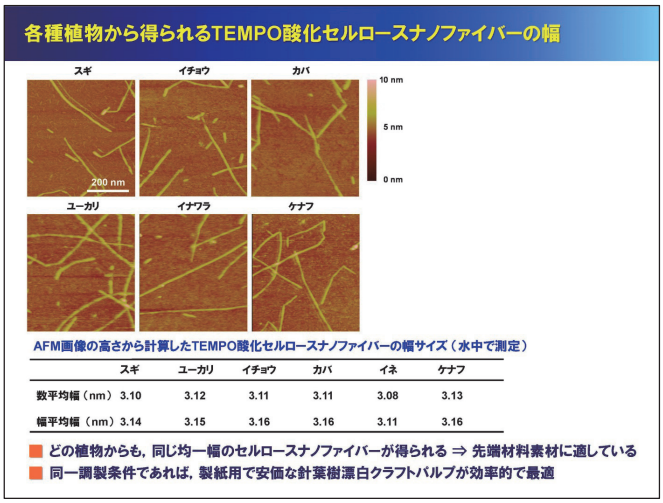
図－11

〈図－11〉　植物セルロースの階層構造のうち、セルロース分子に次ぐ最小単位であり、直鎖状のセルロース分子 6×6＝36 本からなる、幅 3 ナノメートルのセルロースミクロフィブリル間の水素結合をこれまで全て切断して 1 本 1 本のナノファイバーに分離することはこれまでは不可能でしたが、



図－12

〈図－12〉　植物セルロース繊維に TEMPO 触媒酸化処理することにより、セルロースミクロフィブリル内部は反応せず、その表面に規則的に高密度でマイナス荷電を導入することにより、強い浸透圧効果と荷電反発が作用し、１本１本の TEMPO 酸化セルロースナノファイバー、TOCN と略しますが、その TOCN が得られることになります。

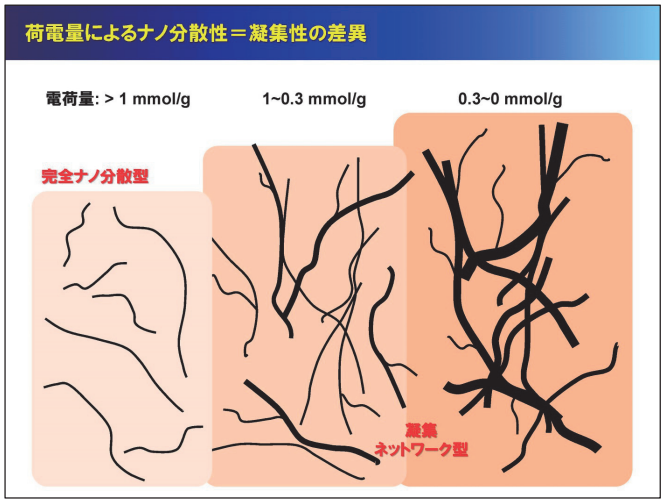


図－13

〈図－13〉　植物由来の材料は、樹種や生育地域によって特性が異なることがあります。これも生物多様性の一環なのですが、印刷・情報用紙用の原料は広葉樹が適していますが、段ボールや牛乳パックのような包装用紙には繊維長の大きい針葉樹が適しています。しかし植物を支えている細胞壁中のセルロースミクロフィブリルだけは、どの樹種からも全く同じサイズや構造を有しているのが特長です。スギのような針葉樹、ユーカリ、カバのような広葉樹、イチョウのような裸子植物、イネやケナフのような草本類、このように異なった植物種から得られる TEMPO 酸化セルロースナノファイバーは、すべて３ナノメーター幅の均一な素材が得られます。

残念ながら TEMPO 酸化セルロースナノファイバーの平均長さ・長さ分布はまだ完全には制御できませんが、このように樹種に拠らず、どのような植物原料からも均一な幅のナノファイバー素材が得られるのは、先端材料に使う際には必須な条件です。特別な樹種からでないと適正なナ

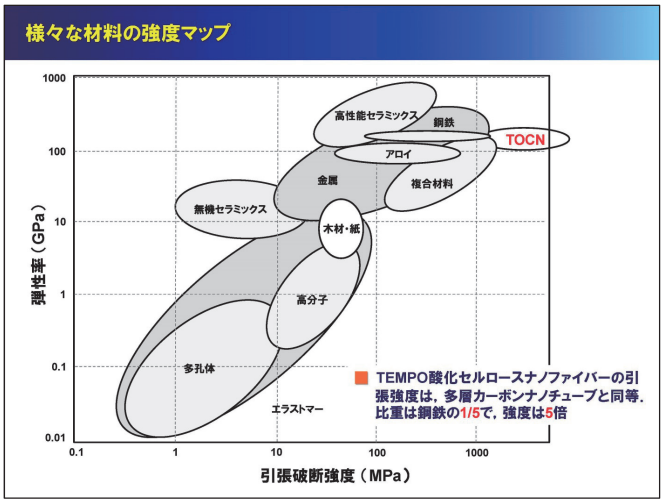
ノファイバーが得られないとなると、使用可能な原料や用途範囲が狭くなりますが、TEMPO 酸化セルロースナノファイバーのようにどのような植物原料からも同一ナノサイズ幅が得られるのは優位な特長です。



図－14

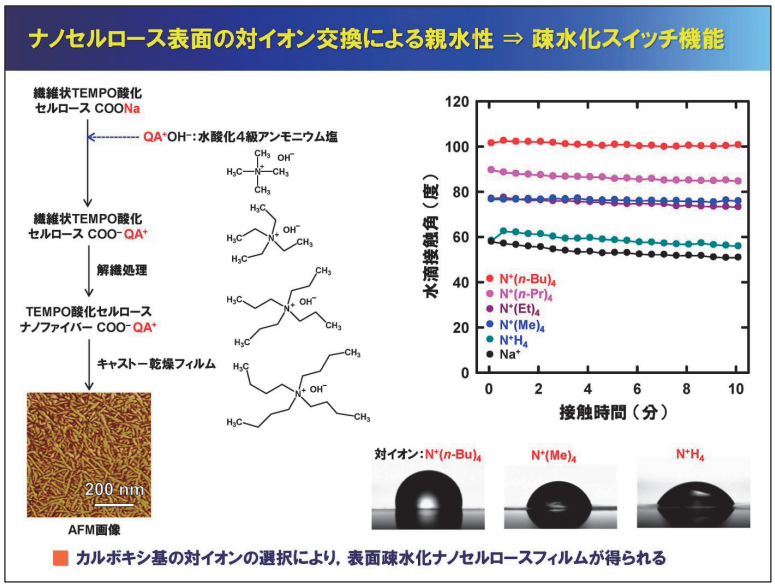
〈図－14〉　おそらく日本国内でもセルロースナノファイバーの種類は 100 種類以上あり、入手可能な状況です。しかし機械解繊処理のみで調製されるセルロースナノファイバーの多くは、この図に示すように太さがまちまちであったり、枝分かれがあったり、不均一な凝集・ネットワーク構造を有しています。このようなネットワーク型のセルロースナノファイバーは抄紙工程のように、ワイヤー上での濾過作用によって効率的に脱水、シート化できる優位性があります。しかし、このような不均一な構造のナノセルロースの形状や構造を正確に、科学的に測定・評価することは現状では不可能です。顕微鏡画像から測定できる場合もありますが、全体の僅かな一部分を観察していることになります。

一方、私たちが見出した TEMPO 酸化ナノファイバーは、完全に 1 本、1 本分離しており、幅が 3 ナノファイバーで均一ですから、これまで高分子科学の分野で理論的、実験的に積み上げてきた解析手法や学術手法がある程度適用できます。ただ、高分子に比べて幅が少し大きく、十本分の高分子鎖の集合体という差があります。それでも、まだセルロースナノファイバーは発見されたばかりの新ナノ素材ですから、基礎的に検討して明らかにしなければならない学術的な課題が山積です。TEMPO 酸化セルロースナノファイバーはあまりにも小さいため、水分散液を抄紙法でワイヤー上に注入した場合には、ワイヤー上でフィルムやシートが形成することなく、全てワイヤーの目から抜けて廃水側に行ってしまいます。したがって、製紙プロセスで TEMPO 酸化セルロースナノファイバーフィルムやシートは製造できません。しかし、1 本、1 本完全に分離している点は、特性解析には有利で、先端材料として利用可能な条件を満たす分析や構造解析にチャレンジしやすいナノ素材です。



図－15

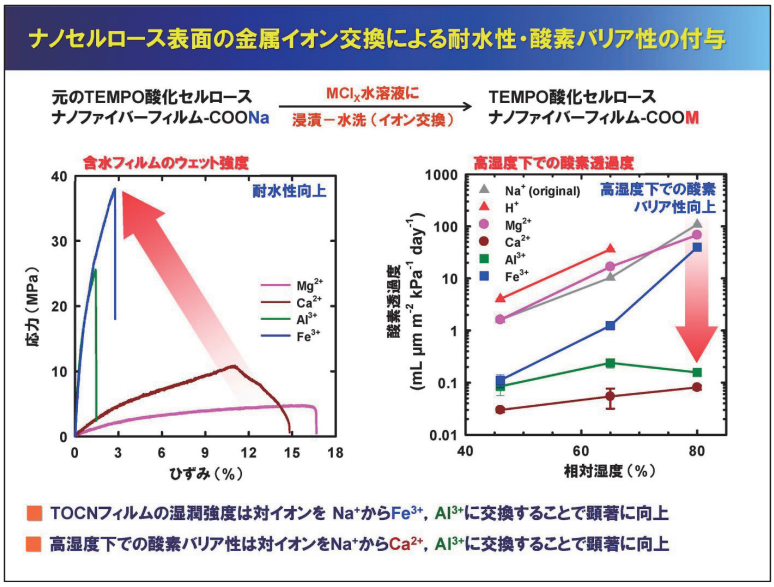
〈図－15〉　これは強度マップ図です。縦軸が弾性率、堅さを示します。横軸は引張破断強度です。この図は対数表示ですから、それぞれの材料の間には互いに大きな強度差があります。TEMPO 酸化セルロースナノファイバーは鋼鉄よりも堅くて強い材料と言えますので、その特徴を活かすことができれば高強度材料への利用が可能です。



図－16

〈図－16〉　TEMPO 酸化セルロースナノファイバーは、親水性のカルボキシル基のナトリウム塩が高密度で規則的に表面に存在しているため、極めて親水性です。一方、研究開発に携わられておられる皆様の多くは、ナノセルロースの高強度・高弾性率を活かして軽くて強いプラスチック複合材料へ利用し、ガラス繊維代替としてバイオマス由来の軽量高強度材料として、自動車等に利用できることを考えられます。しかし、TEMPO 酸化セルロースナノファイバーは極めて親水性で、一方、プラスチックは疎水性材料ですから、水と油の関係で十分均一に混合できず、せっかく３ナノメーター幅の出発素材でも、プラスチック基材中では凝集してしまい、ナノ複合化効果が発現できないことが多いという課題があります。

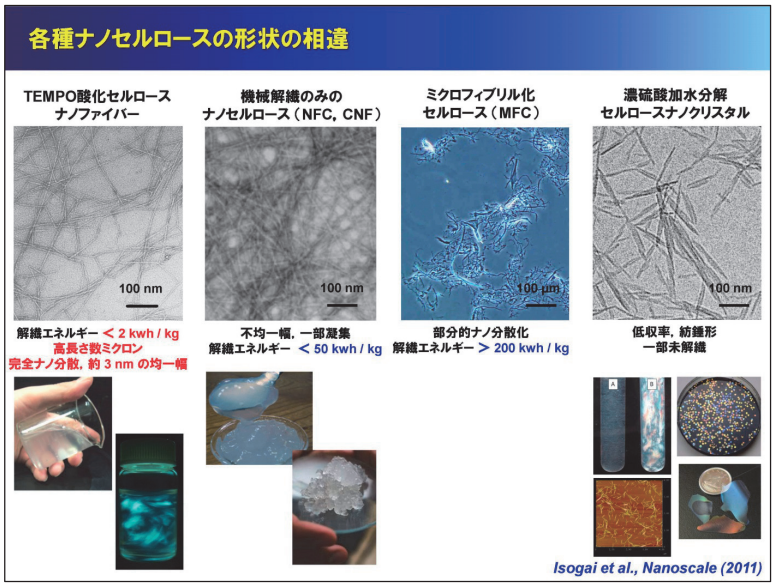
その場合には、TEMPO 酸化セルロースナノファイバー表面に高密度で存在しているカルボキシ基のナトリウム塩を、疎水性基を有する４級アルキルアンモニウム塩にイオン交換することで、簡単に表面を疎水性にスイッチすることができます。この疎水化処理が、有機溶剤中で高温長時間が必要な化学反応の場合には、実用化は困難です。しかし、このイオン交換反応は水系で、1 対 1 で化学量論的に進むことができますので、過剰な薬品添加は不要で、セルロースナノファイバー表面を効率的に親水性から疎水性にスイッチすることができるのが特徴です。



図－17

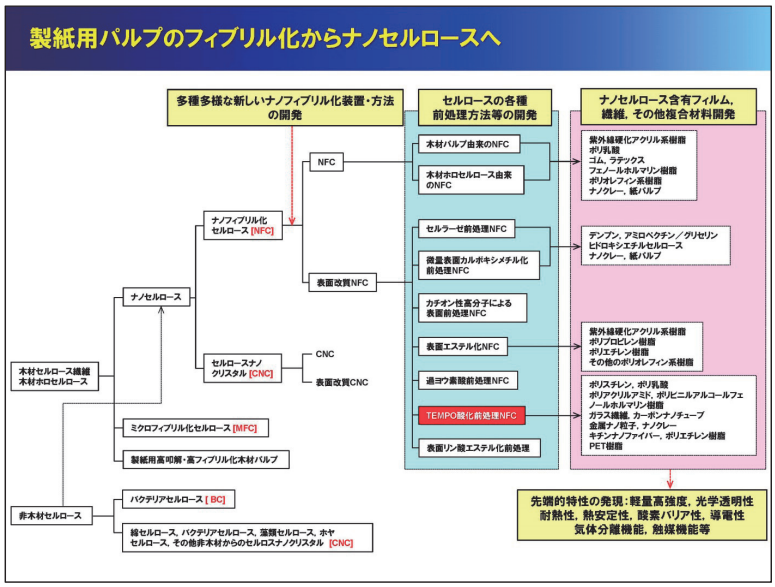
〈図－17〉　更に興味深い研究成果をこの図に示しました。直前の図では TEMPO 酸化セルロースナノファイバー表面のカルボキシ基のナトリウム塩を疎水性のアルキルアンモニウム塩に交換しました。この図では、ナトリウムイオンを他のアルミニウムや鉄イオンに交換した際の特性の変化を示します。元のナトリウム塩型の TEMPO 酸化セルロースナノファイバーフィルムは、水に浸漬するとすぐにフィルム形状が崩壊してしまうほど耐水性がありません。しかし、カルボキシ基の対イオンを、鉄やアルミニウムイオンに交換することで、明瞭な耐水性が発現し、弾性率、破断強度とも著しく向上します。

また、医薬品や食品包装、電子部品包装用フィルムには酸素バリア性、すなわち酸素を通さない特性が求められます。ナトリウム塩型の TEMPO 酸化セルロースナノファイバーフィルムは乾燥条件では極めて優れた酸素バリア性を示しますが、通常の条件に近い高湿度環境では、酸素バリア性は著しく低下、すなわち酸素透過度が著しく上昇してしまいます。この特性もナトリウム塩型の TEMPO 酸化セルロースナノファイバーの耐水性の低さが原因です。一方、対イオンをナトリウム塩から、カルシウム塩、アルミニウム塩に交換することにより、高湿度条件でも十分に高い酸素バリア性、十分に低い酸素透過度を示しました。TEMPO 酸化セルロースナノファイバーフィルムの対イオンをナトリウム塩からカルシウム塩に交換するのは、フィルムを塩化カルシウム水溶液中に浸漬し、乾燥するだけの処理で達成できます。このように、TEMPO 酸化セルロースナノファイバー表面のカルボキシ基の対イオンを他の金属イオンに交換することで新しい機能を水系で付与できるのが特長であり、優位性があると言えます。



図－18

〈図－18〉　これまで見出されている代表的なナノセルロース類を形状で分類してみました。右端がカナダやアメリカが注力しているセルロースナノクリスタルという、64％硫酸を用いて製造する紡錘形で長さの短いナノセルロースです。右から二番目が 1980 年代から国内でも既に市販されているミクロフィブリル化セルロース（MFC）です。この MFC ではものさしの長さが 100 ミクロンという、ナノメーターに比べ 1000 倍大きいスケールですから、ミクロンレベルの太い幅の繊維が混在しています。左から二番目のように、セルロースを水に分散させ、機械的処理だけで解繊した場合には 10～20 ナノメートルぐらいの幅になります。しかし、ナノファイバーの一部は凝集や網目構造を形成していています。TEMPO 酸化ナノファイバーの場合には完全に 1 本、1 本分離しており、幅が 3 ナノメーターで均一なのが特長で、ナノファイバー化に要する解繊エネルギーを大幅に削減することができます。



図－19

〈図－19〉　今世紀に入り、ナノセルロース素材は研究開発のブームになっています。その背景には、IT 化と人口減少により印刷・情報用紙の需要が低下し、製紙産業が、紙に代わる新しいパルプ繊維の用途を模索していたことも要因です。また、前述したように、日本では京都大学の矢野先生と経産省がタッグを組んでナノセルロースの特長や優位性を各方面に説明し、理解していただいた結果でもあります。

そこに至るまでには、ここに示します四段階のブレイクスルーがあったと思われます。一つは、ナノ解繊効率を向上させる新しい装置の開発です。それでもまだ解繊処理に多大な消費電力が必要となりますので、原料となるパルプの前処理による改質が検討されました。ヘミセルロース含有量を増加させる処理、セルロース分解酵素であるセルラーゼで軽微な前処理等が挙げられます。このパルプ繊維の前処理の中に、私たちが行った TEMPO 触媒酸化反応も含まれます。

このようなブレイクスルー手法が論文や発表会等で公表されますと、新しいバイオ系ナノ素材ということで関心を持っていただき、農学系以外の、工学系や理学系の研究者や、企業の方々が多種多様な複合材料化や実用化を検討してくださいます。単なる複合化では、１＋１＝２の結果しか期待できないことも多いのですが、場合によっては１＋１が３や５、１０になることがあります。

ナノセルロースの複合材料化研究の場合には、結果的に多くのケースで、軽量高強度、光学透明性、耐熱性、酸素を通さない酸素バリア性、導電性、高活性触媒機能のような先端材料としての多くの優れた特性が見出されました。このような研究結果は、パルプ繊維が既存の紙や板紙だけではなく、多種多様な先端材料に使えるのではないかという期待が生まれ、この四段階のブレイクスルーが今世紀のナノセルロースの研究開発急伸のけん引力になりました。

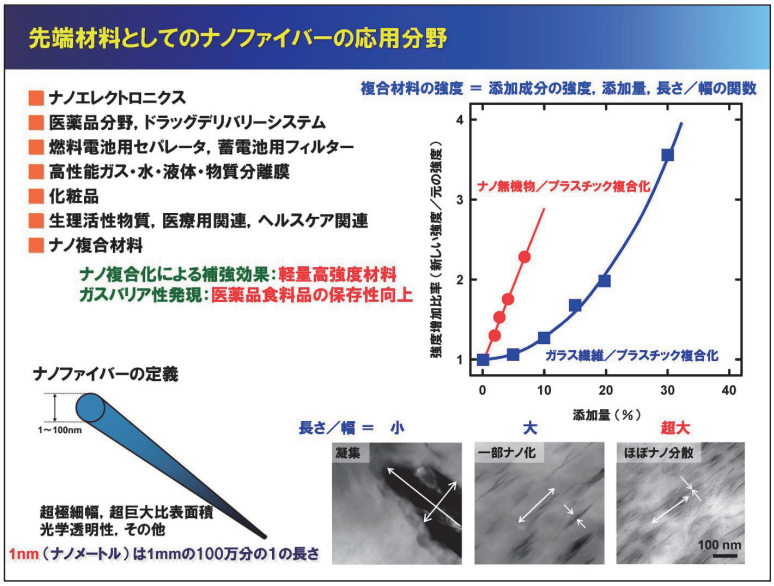
図－20

〈図－20〉　私たちは、ナノセルロースの新しい製造方法の開発を目的とせずに、多糖類の TEMPO 触媒酸化反応の研究過程で偶然に、特異的な構造を有する新規ナノセルロースの調製方法を見出しました。しかし、得られたナノセルロースがどのような分野の材料に利用可能なのかは、皆目見当が付きませんでした。農学系に在籍すると植物の構造や生合成には関心があっても、先端材料への利用や実用化というアンテナを張っているわけではありません。基本的には植物や

動物の生物、化学、物理、数学に関連する科学であり、モノづくりのセンスや意欲のある教員、大学院生は多くはおりません。そこで、この新しいナノセルロースを見出した際に、率直にいろいろな企業の方々に紹介して相談し、実用化に向けた基礎的な共同研究をお願いしました。多くの企業が、当初はたいへん冷たい対応でしたが、日本製紙、花王、凸版印刷、第一工業製薬、グンゼの各企業の一部のご担当者は関心を示してくださいました。これらの企業の方々とは既に 10 年以上、共同研究や情報交換を進めています。

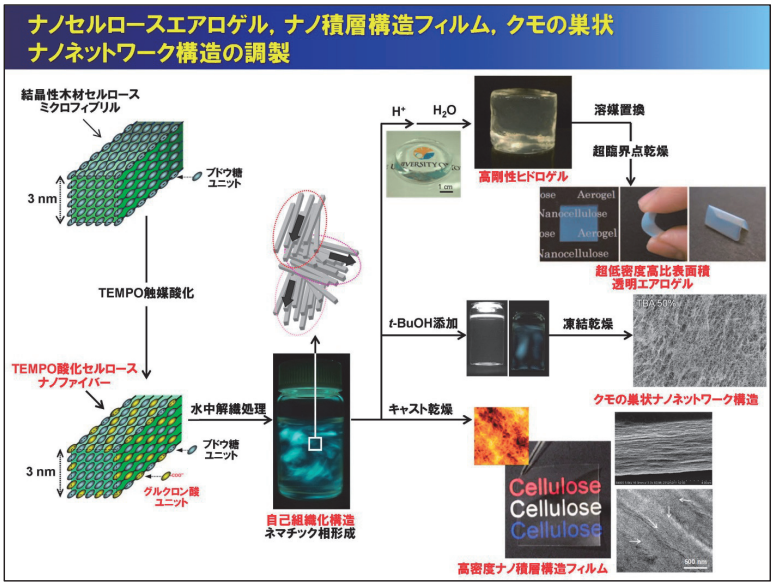
2007 年から 2012 年まで、日本製紙、花王、凸版印刷と共に国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援による「ナノテク・先端部材実用化研究開発」に申請して採択され、「セルロースシングルナノファイバーを用いた環境対応型高機能包装部材の開発」というテーマで共同プロジェクトを開始しました。TEMPO 酸化セルロースナノファイバーフィルムの高い酸素バリア性、すなわち酸素を通さないという特性を、環境に優しい高機能透明包装材料に利用することを目的としています。ほとんどの食品・医薬品・電子機器包装フィルムは、使用後は廃棄－焼却処理されます。現在の包装用フィルムは石油由来であり、焼却処理は大気中の CO_2 の増加、地球温暖化の要因になります。そこで、石油系包装フィルムの一部をバイオ系ナノファイバーに代替することで、CO_2 発生量の低下に貢献することを期待しております。

この企業との共同研究はたいへん勉強になりました。私たちの感覚ではとてもアプローチできない実用化、事業化のプロフェッショナルの方々とのネットワークと情報交換は極めて参考になります。例えば、企業の一人の方と情報交換すると、その方の後ろに同じ会社の方が何十人、何百人もいて、さらにその後ろには取引されている方々のネットワークがさらに細分化して拡がることになります。そのように多くの方々の技術、知恵、経験をお借りしないと、この用途を限定せずに偶然発見した新規ナノセルロースに適した用途は見つからないのではないかと実感し、大学の研究室としては基礎研究に軸足を置くことを決めて企業の方々との共同研究プロジェクトを開始しました。今では多くの皆様に関心を持って取り扱っていただいており、たいへん感謝しているところです。



図－21

〈図－21〉　ナノファイバー用途の可能性を挙げてみました。その中でも、多くの皆様が関心を持たれている軽量高強度複合材料が最も期待される用途です。ガラス繊維よりも細いナノファイバーであれば、少ない添加量で同じ強度が得られます。ただし、そのときに１本１本のナノファイバーがプラスチック基材中で完全にナノ分散していることが必要条件になります。もともとナノサイズのファイバーをどのようにすれば凝集せずにナノ分散できるかがカギとなります。この基材中でのナノ分散化手法を短期間で習得するには、初心者集団の大学研究室ではノウハウとなる技術と安全面から困難です。したがって、この複合化技術については各企業にお任せしています。



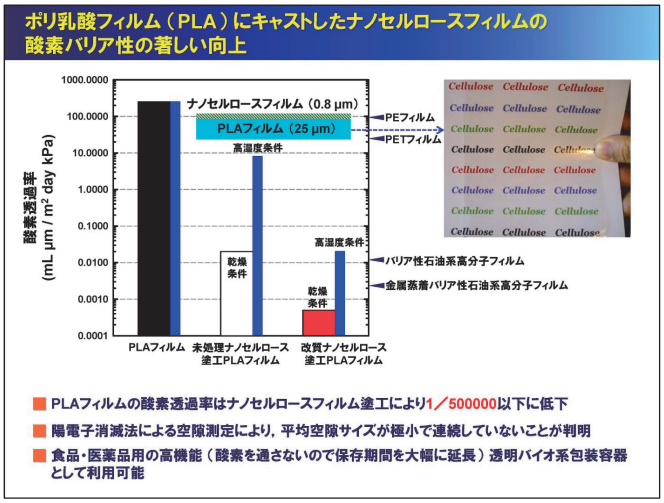
図－22

〈図－22〉　TEMPO 酸化セルロースナノファイバーの特徴として、その表面に規則的に高密度でマイナス荷電を有するカルボキシ基のナトリウム塩が存在しています。この特性により、水中では自己組織化してネマチック状の液晶構造を有しています。この液晶構造が要因となり、キャスト－乾燥フィルムは透明

で、緻密なナノ多層構造を有し、酸素を通さない性質が発現します。一方、成形プロセスを変えることでクモの巣状のネットワーク構造、透明で高強度、高断熱性のエアロゲルに変換できることが特徴です。

図－23

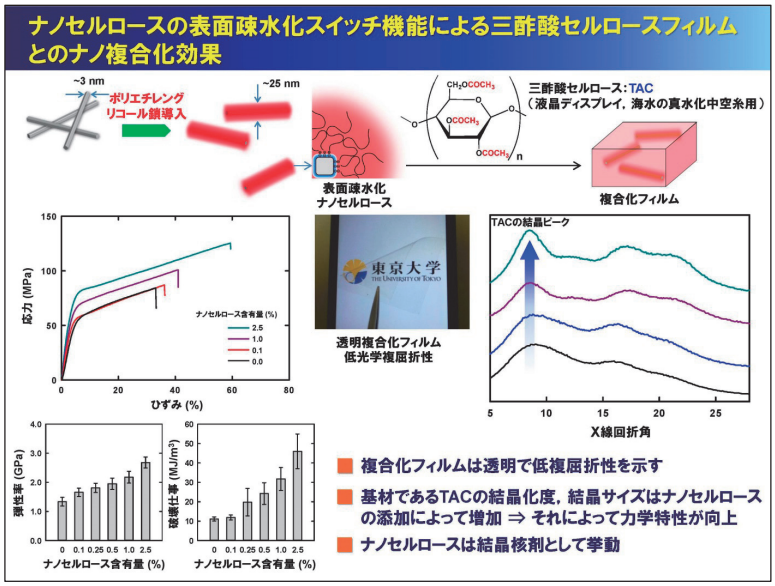
〈図－23〉　このように、TEMPO 酸化セルロースナノファイバーの水分散液を、キャスト－乾燥して得られるフィルムは透明、高弾性率、高強度、低線熱膨張率、高い酸素バリア性、水素ガス選択透過性が発現します。これらの特性は、このナノファイバーだからこそ発現する機能です。



図－24

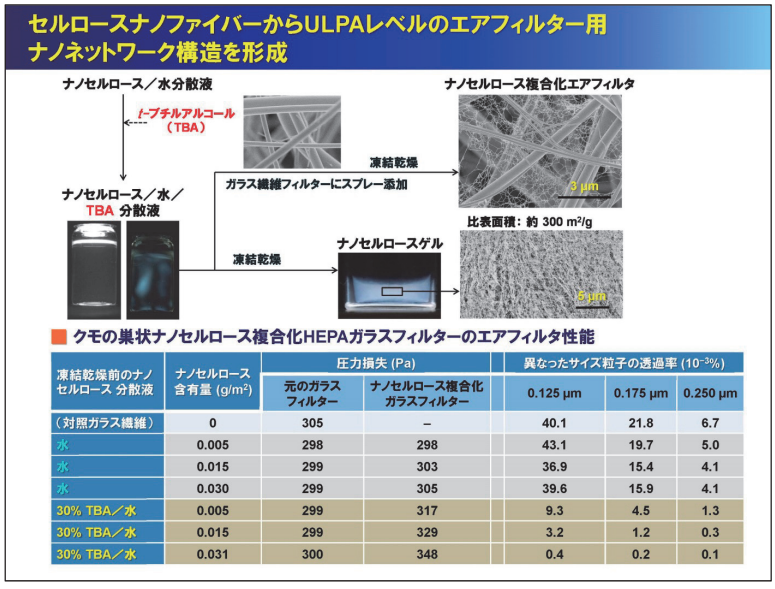
〈図－24〉　ここで示しますように、ポリ乳酸フィルム、ポリエステルフィルムは容易に酸素を通すため、高い酸素透過度を示します。そのフィルム上に 1 ミクロン弱の薄い TEMPO 酸化セルロースナノファイバーフィルムを複合化すると、酸素透過度は顕著に減少し、高い酸素バリア性が発現し、乾燥条件では酸素透過度は元の 50 万分の 1 以下に低下します。一方、高湿度条件下ではナノファイバーの親水性により酸素透過度は上がってしまい、酸素バリア性が低下してしまいますが、それでも既存の石油系フィルムよりも高い酸素バリア性を有するのが特長です。この要因を小さな空孔サイズを測定する陽電子消滅法で検討しました。この酸素バリア性フィルムを

用いることで食品や医薬品などの保存期間を大幅に伸ばすことができ、使用後は焼却処理してもバイオマス由来のカーボンニュートラル材料ですから大気中の CO_2 の増加にはなりません。



図－25

〈図－25〉　この図は液晶ディスプレイに用いられている三酢酸セルロースとの複合材料化の例です。数％セルロースナノファイバーを複合化させることにより、高強度、高靭性が発現します。高分子基材との複合化の効果は、基材中でのナノファイバーのナノ分散性に依存します。



■ クモの巣状ナノセルロース複合化HEPAガラスフィルターのエアフィルタ性能

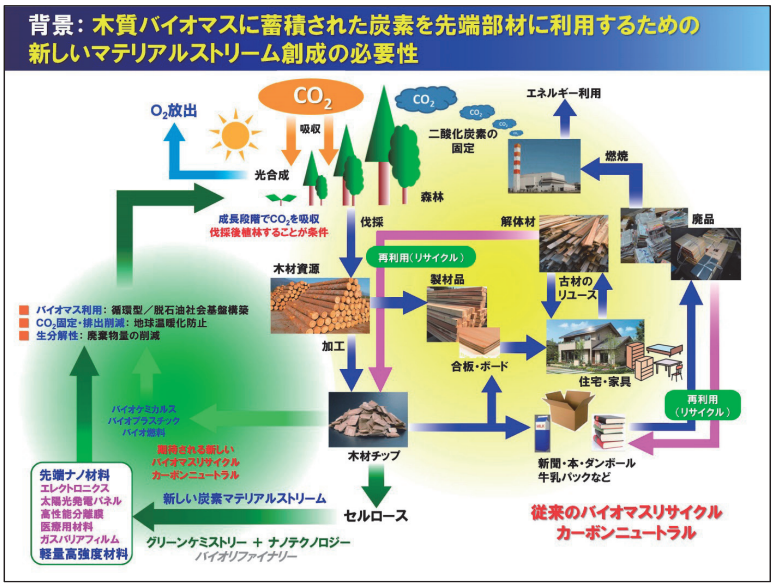
凍結乾燥前のナノセルロース 分散液	ナノセルロース含有量 (g/m²)	圧力損失 (Pa)		異なったサイズ粒子の透過率 (10^{-3}%)		
		元のガラスフィルター	ナノセルロース複合化ガラスフィルター	0.125 μm	0.175 μm	0.250 μm
（対照ガラス繊維）	0	305	–	40.1	21.8	6.7
水	0.005	298	298	43.1	19.7	5.0
水	0.015	299	303	36.9	15.4	4.1
水	0.030	299	305	39.6	15.9	4.1
30% TBA／水	0.005	299	317	9.3	4.5	1.3
30% TBA／水	0.015	299	329	3.2	1.2	0.3
30% TBA／水	0.031	300	348	0.4	0.2	0.1

図－26

〈図－26〉　このスライドでは、ナノファイバーを用いたクモの巣状のエアフィルターの製造方法と特性を示しています。TEMPO 酸化セルロースナノファイバー分散液をクモの巣状のナノネットワーク構造に変換することにより、PM2.5 のような微粒子を高効率で捕捉し、なおかつ圧力損失が少ない優れたエアフィルター特性が発現します。

図－27

〈図－27〉　以上の結果から、この図のような森林バイオマスの循環型利用が期待されます。すなわち国内産の豊富な未利用森林バイオマスを出発原料として、電気エネルギーと高純度セルロースが共に得られる既存のパルプ化・漂白技術を利用します。製紙会社の蓄積された技術を用いることで、乾燥 kg あたり約 60 円と安価なセルロース素材が得られます。これまでは、このセルロース素材は紙や板紙原料として用いられてきました。しかし、一部のセルロース素材をナノセルロースに変換し、さらにこれまで利用されていない新たな先端材料に利用するサイクルを進めることにより、森林産業の活性化、異分野異業種融合型の新産業の創生、そしてグローバルな課題である循環型社会基盤の構築、大気中の二酸化炭素の削減、地球温暖化防止に貢献できると期待しています。

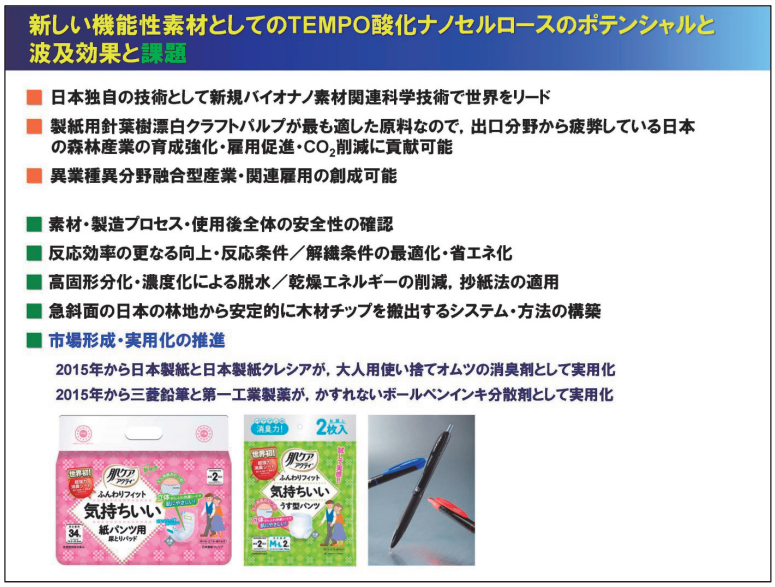


図－28

〈図－28〉　20 年ぐらい前までは森林資源を利用することは環境破壊になるという誤ったイメ

ージがありました。唯一大気中の CO_2 を吸収して固定化し、酸素を放出するのは成長段階の植物です。既に成長した樹木は樹体を成長させる必要がありませんので、呼吸により CO_2 を放出する量の方が多く、吸収－固定化は進みません。したがって、大気中の CO_2 を削減するためには、成長した樹木を伐採し、燃焼させずに CO_2 の蓄積－固定化材料として利用を進めることが重要です。そして、伐採した後は植林して樹木を成長させることが CO_2 の削減の代表的な方法です。しかし、人口減少、IT の進展により木造住宅や紙の需要は減少しており、この循環の輪が円滑に回らなくなっております。その結果、植林も進まず、CO_2 の削減も進まないという悪循環になります。

一方、この木材チップの半分の重量を占めているセルロースを環境に優しい方法で先端材料に利用することが可能になれば、この二つの輪を回すことにより、森林バイオマス資源をこれまでにない新しい産業や材料に使う道が開けます。この二通りの循環の輪を回すことで伐採後の土地に植林が進み、木を育てることにつながります。そして、その木が成長する段階で大気中の CO_2 を吸収して樹体に取り込み、地球温暖化の防止に貢献できる可能性があります。このグローバルな課題に対して、森林バイオマス資源を国内に豊富に有し、セルロースナノファイバーの科学と技術が集積している日本が、その解決の先頭に立つことが可能であり、是非日本が世界に先駆けて模範となる社会基盤を構築できればと思います。



図－29

〈図－29〉　セルロースナノファイバーに期待されることは、この図の上に示す 3 点です。一方、課題もあります。製造・利用の段階での安全性の確認。さらなる製造の効率化、効率的な耐水性の付与が挙げられます。また、急斜面の日本の林地から安定的に先端材料に利用するための木材チップ原料をどう搬出するか。この流通システムや方法の構築が必要です。もちろん、セルロースナノファイバーの製品化、市場形成、実用化の推進が求められます。今日ご祝辞をいただきました日本製紙では、消臭機能付きで介護者の負担を軽減する大人用の使い捨ておむつにセルロースナノファイバーを組み合わせて実用化されました。また、三菱鉛筆と第一工業製薬は、かすれないボールペンインクとしてセルロースナノファイバーの実用化を進めていただいています。これらの実用化は企業主導で進めていただいた実例で、たいへん感謝しています。

図－30

〈図－30〉　私たちが多糖に対する TEMPO 触媒酸化反応の研究を開始したのは 1996 年ですから、既に 20 年が経過しています。この 20 年間、日本学術振興会により継続的に支援していただいた成果であり、非常に感謝しています。それによって 10 年後の 2006 年に新しいセルロースナノファイバーの発見につながり、現在では様々な研究支援をいただいて基礎研究を継続して進めています。TEMPO 酸化セルロースナノファイバー発見の最重要メンバーは、当研究室の准教授の齋藤継之先生です。現在の研究室メンバーをこの写真に示しました。

図－31

〈図－31〉　最後に私がこれまで健康で研究・教育・社会活動を進めることができたのは、両親に健康に育てていただいた賜物です。上の写真は父が米寿のときの記念ですが、父自身は学者になりたかった技術者なので、天国で喜んでいるのではないかと思います。それから、世話になっている弟夫婦。母親はおかげさまで元気です。また、これまで毎日食事などに気を使って私の毎日の健康を支えている家内の千秋にも感謝したいと思います。どうもご清聴ありがとうございました。

〈MEMO〉

植物系ナノ材料の創成

矢野　浩之

はじめに、第 37 回目の本田賞受賞者に私を選出して下さった本田財団、石田理事長、山本常務理事、山本倫栄さんを始めとする本田財団の皆様、ならびに選考委員会の皆様に深く感謝申し上げます。また、お忙しい中、この授与式にお越しいただき、ご祝辞を賜った日本製紙連合会会長 馬城文雄様、日本木材学会会長・東京大学教授 鮫島正浩先生、本田技研工業株式会社代表取締役社長 八郷隆弘様を始めとする本日ご列席の皆様にも心より御礼申し上げます。このたいへん名誉ある賞の受賞は私にとってまさに晴天の霹靂です。過去に受賞された高名な研究者の皆さんと肩を並べられたとはとても思いませんが、その列に加えていただいたことは誠に光栄です。

木材物理学という学問的にはマイナーな分野における研究がエコテクノロジーの観点から受賞に値すると評価された点は、私の恩師、諸先輩、これまで一緒に研究をしてきた仲間たちにもとても喜んでいただけると思います。

今回、この様に多くの方に授賞式にご出席いただき、多くのお祝いのお言葉を頂戴し、私の丁度 25 年前のセレモニー、結婚式を思い起こしました。私はこの 11 月で銀婚式を迎えたのですが、尊敬する磯貝先生との同時受賞は私にとってたいへんな名誉であるとともに、磯貝先生のご研究と私たちの研究のマリアージュが、本田財団の理念とするエコテクノロジーの発展に繋がることが評価されたことをたいへんうれしく思います。

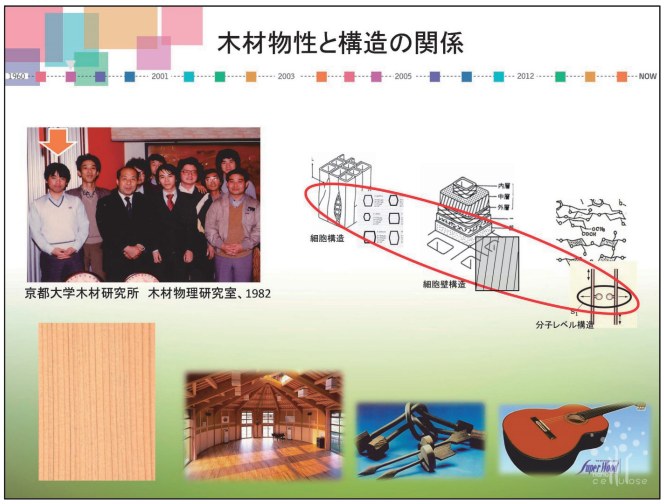
図－1

〈図－1〉　今日は、私がどの様にセルロースナノファイバーに出会い、その利用に関する研究を進めてきたかについて、お話をさせていただきたく思います。最初にお断りをしておきますが、私のセルロースナノファイバー研究は、磯貝先生のご研究と異なり、社会に実装されたものはまだ無く、いまだ発展途上です。

私は長野県で生まれました。小学校の時は、山と水がきれいな安曇野で過ごし、休日は一日中、自然の中で遊んでいました。

大学からは京都に移りました。平安からの都、京都にはたくさんの古いお寺や神社があります。この法界寺は私の家から歩いて 10 分のところにあるお寺です。1000 年も前の藤原時代の木造建築が、この様に町のあちこちにあります。

豊かな自然や木（造建築）に囲まれた環境の中で育ち、生活し、大学院からは宇治にある木材研究所に移りました。現在の生存圏研究所の前身です。

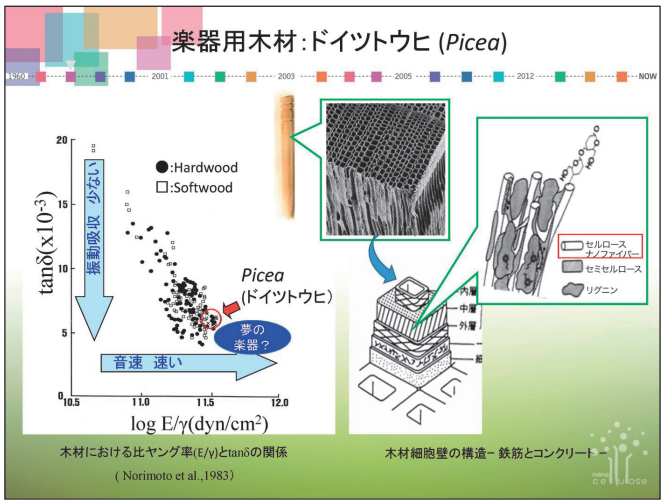


図－2

〈図－2〉　大学院では木材物理を学びました。木材は、建築材料や家具の材料としてすでに私たちの生活の中に多く使われています。

ご参列の皆さんの多くの方は、木材の物理なんて研究することがあるのか、と思われるかもしれませんが、植物が作りだすこの素材には、まだ明らかになっていないことがたくさんあります。

木材は、長い進化の過程で樹木が種を繋いでいくために獲得してきた、とても複雑な構造を有しています。私の所属した木材物理研究室では、木材の分子レベル、細胞レベル、細胞構造レベルでの構造と木材の物理的性質の関係を研究していました。



図－3

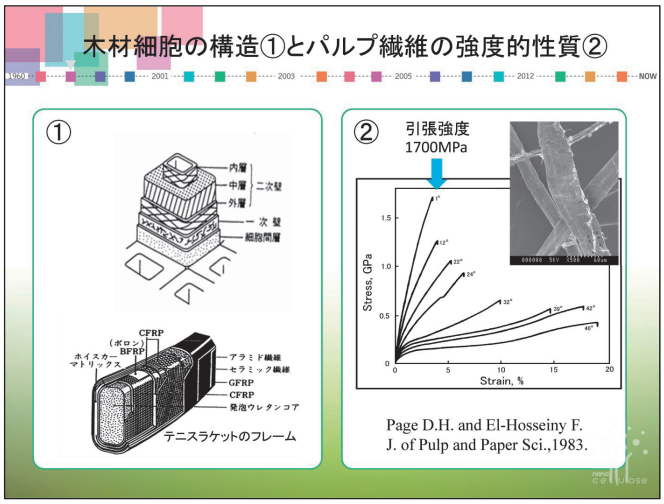
図－4

〈図－3、4〉　私は山田正先生、則元京先生の指導により、楽器に用いられる木材の音響的性質と化学処理によるその改質に取り組みました。

則元先生は、ミクロフィブリル、すなわちセルロースナノファイバーの結晶構造や細胞壁中での配向といった階層構造と木材物性の関係を研究されており、バイオリンやピアノに使用されているドイツトウヒは、木材の中では音の伝わる速度が速く、それは細胞壁中でセルロースナノファイバーが木目方向に配向していること、逆に、曲げやすい木は木目に垂直の方向に配向していることを発表されていました。

私は則元先生と出会い研究の面白さを知り、2 ケ月で博士課程まで進むことを決めました。則元先生から木材物性をセルロースナノファイバーを中心に考えることを学びました。

大学院ではアセチル化やホルマール化といった化学修飾で楽器用木材の音響的性質を向上できることを見出し、実際に化学処理した木材を使ってバイオリンを作製して、その音質の向上を確かめ、それを学位論文としてまとめました。

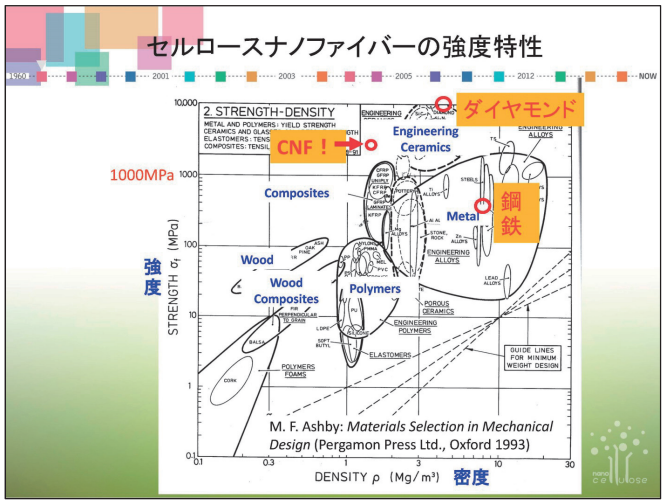


図－5

〈図－5〉　その後、京都府立大学に就職してからも楽器用木材の研究を続けていたのですが、そこで一つの転機がありました。

これは細胞壁の構造とテニスラケットの構造を比較しています。軽くて強い構造を追及しているテニスラケットのフレームの構造と木材の細胞壁の構造がよく似ていることに気がつきました。

また、パルプが鋼鉄の 3,4 倍も強いという実験事実を知りました。



図－6

〈図－6〉　パルプの強度を基に、セルロースナノファイバーの強度を計算し、他の材料と比べて見ると、驚くことに鋼鉄の 1/5 の軽さで 5 倍以上の強度を有していることがわかりました。

これはセルロース研究者、木材研究者の間ではあまり意識されていない事実でした。

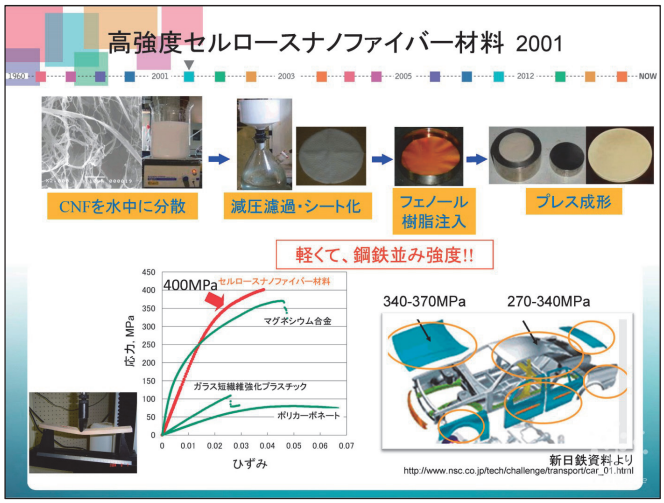
楽器の研究をこのまま続けていても良いものかと悩んでいた私には、とても衝撃でした。

セルロースナノファイバー、ミクロフィブリルは植物が進化の過程で獲得した軽量で強い構造

をつくるための、本質的な要素であることを理解し、それ以降、セルロースナノファイバーをベースとした材料を作ることを考えだしました。今から 20 年ほど前のことです。

図－7

〈図－7〉　これはその後、私たちがセルロースナノファイバーを使って作ってきた材料です。そのいくつかについて、これからご紹介します。



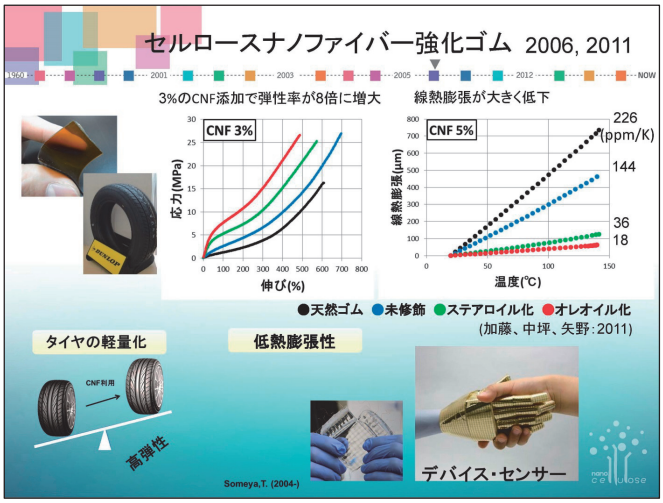
図－8

〈図－8〉　最初の材料は、セルロースナノファイバーの軽くて強いという強度特性を活かし、2001 年に作った高強度材料です。セルロースナノファイバーを水中に分散させ、それをろ過してシートにし、そこに樹脂を染み込ませて固めたものです。

植物から鋼鉄並みの強度の材料を作れることを世界で初めて示すことが出来ました。重さは鋼鉄の 1/5 です。

2001 年は大気中での二酸化炭素の増加による地球温暖化が指摘され、また、化石資源から持続型資源への転換が言われだした頃であり、二酸化炭素を吸収・固定した持続型の高性能ナノファ

イバーとして、そのポテンシャルを強く意識し出した頃でもあります。



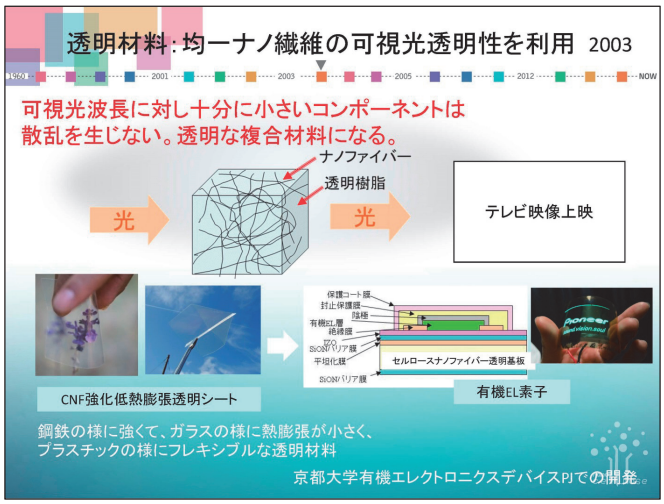
図－9

〈図－9〉　セルロースナノファイバーによるゴムの強化はたいへん興味あるテーマです。現在のタイヤにはカーボンブラックが３割程含まれており、タイヤが削れるに伴ってそれらは微粒子となって環境中に出て行きます。

2006 年からセルロースナノファイバーによるタイヤ用ゴムの補強に住友ゴムと共に取り組みました。CNF を添加したゴムでタイヤを試作し、その効果を実際の走行試験で確かめました。

さらに、セルロースナノファイバーを化学変性することで、少量の添加で大きな補強性が得られる様になりました。

例えばセルロースナノファイバーを３％添加するだけで、ゴムは８倍、変形しにくくなります。また、ゴムの熱膨張を大きく低下できるため、この様に柔らかなデバイスやセンサーへの応用が期待されます（右下）。



図－10

〈図－10〉　続いて、透明材料です。ビデオをご覧下さい。（テレビ映像上映）

私たちが見ている光は 400-800nm の波長を持つ電磁波です。その波長に対して、セルロースナノファイバーの様に細い繊維は、光の散乱を生じません。

そのため、透明な樹脂にセルロースナノファイバーを 50%、60%混ぜても樹脂の透明性が保たれます。

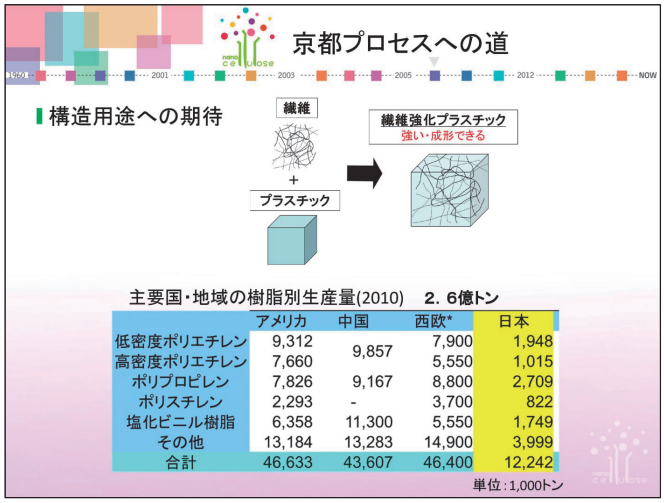
セルロースナノファイバーを補強繊維として用いることで、鋼鉄の様に強くて、ガラスの様に熱膨張が小さく、プラスチックの様にフレキシブルな透明材料が作れます。

この材料は京都大学が三菱化学や NTT,パイオニアなどと共同で行った有機エレクトロニクスデバイスの開発に関する包括的産学連携アライアンスにおいて、企業の方のアドバイスにより開発しました。2003 年のことです。

さらに、この透明材料をガラスの代わりに用いて有機 EL（LED）や有機トランジスタを作ることが出来ました。木材の研究者が最先端の電子デバイスにまでたどり着けたのは、異分野垂直連携という、今でも斬新なアライアンスの枠組みのお蔭です。セルロースナノファイバーの先端素材としての可能性を強く感じ出した時です。

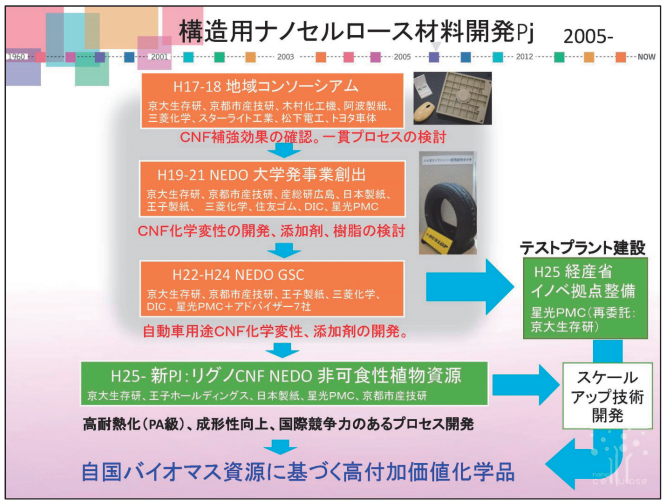
図－11

〈図－11〉　セルロースナノファイバーは、すべての植物細胞の基本物質です。モヤシもレタスもセルロースナノファイバーで出来ています。つまり、私たちはセルロースナノファイバーを毎日食べています。それをソフトクリームに 0.1%だけ混ぜて見ました。左が普通のソフトクリーム。右が 0.1%だけセルロースナノファイバーを混ぜたソフトクリームです。35 度の箱に入れました。真夏の炎天下の温度です。早送りでご覧ください。セルロースナノファイバー入りのソフトクリームは 35 度の部屋に 20 分近く置かれても、たれ落ちが起こりません。小さなお子さんも、服を汚すことなくソフトクリームをゆっくり楽しむことが出来ます。



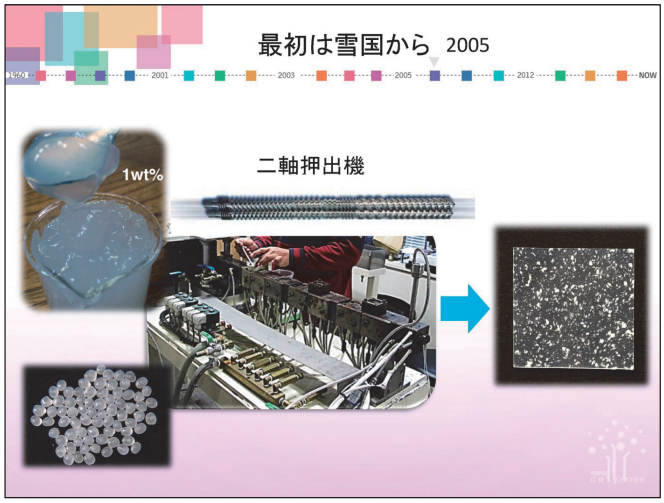
図－12

〈図－12〉　セルロースナノファイバーは、高強度の材料や透明な材料の他に、食品や化粧品、インクなど、様々な用途への応用も進んでいます。その中で、量的に最も期待されている用途は、この様な構造用プラスチックの補強です。現在、世界では毎年３億トンのプラスチックが生産されていますが、その 2-3 割をセルルロースナノファイバーで補強することになれば、グローバルには 10-20 兆円のマーケットになります。



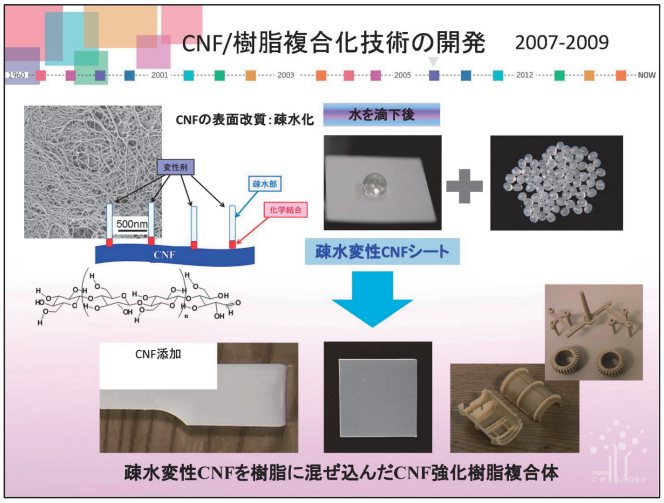
図－13

〈図－13〉　私たちは、京都市産業技術研究所と共同でこれまで多くの企業と構造用プラスチックスの補強に取り組んで来ました。最初の大型プロジェクトは今から 12 年前に、京都市産技研の北川和男博士と始めた、経済産業省のプログラムです。北川博士は、いまでもセルロースナノファイバー材料開発における大切な研究パートナーです。



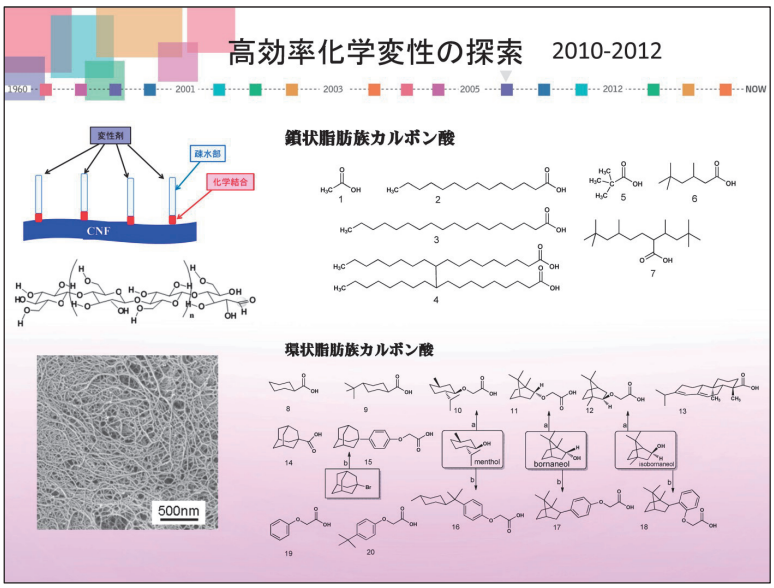
図－14

〈図－14〉　セルロースナノファイバーは鋼鉄の５倍以上の強度を有する繊維ですから、それを混ぜればプラスチックは簡単に強くできると考えたのですが、実際はたいへんでした。水と仲が良いセルロースナノファイバーと石油から作られる、油の様な性質を持つプラスチックは、全く混ざらないのです。まさにサラダドレッシングの様な状況です。また、水分が抜けると、セルロースナノファイバーだけが固まって、この様な白い粒になります。これでは樹脂を全く補強できていません。私たちは、この様な様子を雪国、と呼んでいました。



図－15

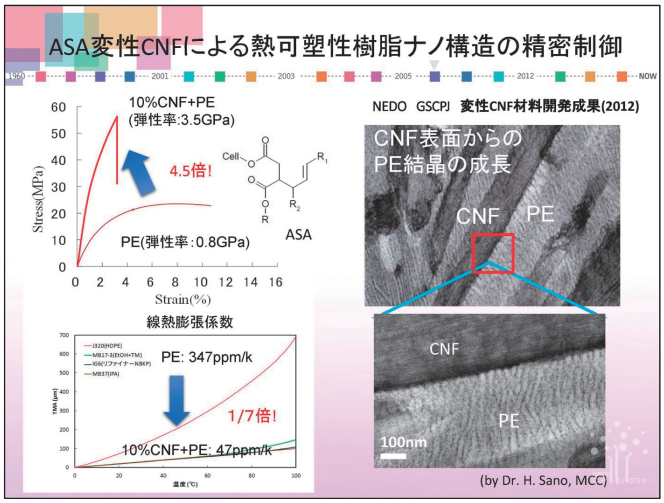
〈図－15〉　雪国状態は、北川博士のアイデアで粉末の樹脂を用いたり、変性剤により CNF の表面を改質し油の様な性質に近づけることで改善できました。しかし、補強性という点では十分ではありませんでした。



図－16

〈図－16〉　そこで、中坪先生にお願いし、この様な様々な化学構造をセルロースナノファイバーの表面だけに付けていただき、それをポリエチレンやポリプロピレンといった樹脂と混ぜては、補強性を調べました。中坪先生は、世界で初めてグルコースから有機合成でセルロースを作られたたいへん著名な化学者です。

このような多くの化学構造をセルロースナノファイバーに導入し、その補強性を系統的に調べることが出来たことは、中坪先生のお蔭です。



図－17

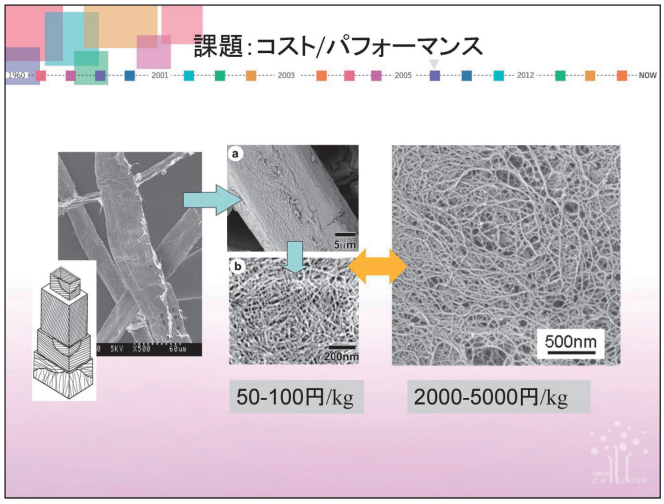
〈図－17〉　多くの化学変性を試み、段々と補強性に優れた化学構造が明らかになって来ました。その知見を基に、実用的な観点から選び出したのが、この ASA という薬品です。

紙の強度を上げるために用いられている薬品ですが、ASA で変性したセルロースナノファイバーを重量で 10％混ぜるだけで、ポリエチレンは 4.5 倍も変形しにくくなり、また、熱による伸び縮みが大きく下がります。

さらに、この様にポリエチレンの結晶構造も制御されており、水の様な性質のセルロースナノ

ファイバーの表面から、ASA 処理により油の様な性質のポリエチレンの結晶がきれいに成長していることがわかります。

セルロースナノファイバーによるプラスチックスの結晶構造制御は、今後、高分子科学における重要な研究領域になると思います。

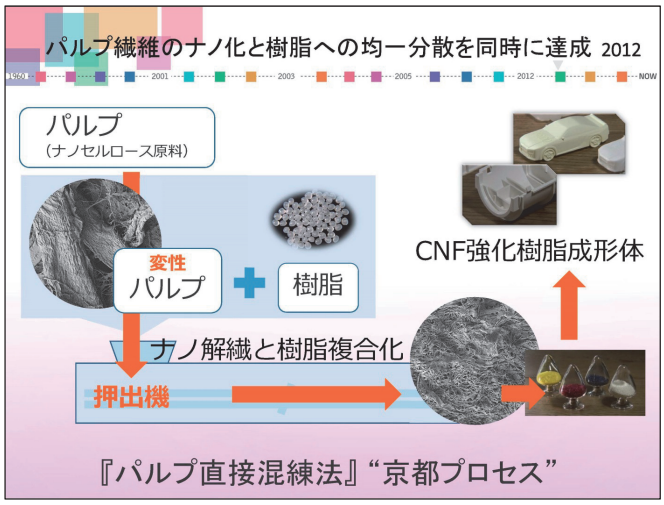


図－18

〈図－18〉　適切な化学変性により樹脂の補強性は上がったのですが、その実用化には大きな壁がありました。変性 CNF の製造コストです。

セルロースナノファイバーの集合体であるパルプは１ｋｇあたり 50 円と材料としては安価なのですが、それを解してナノファイバーとする際の製造コストは 2000-5000 円。それを化学変性すると、コストはさらに倍になります。

パフォーマンスに優れても、1ｋｇあたり 5000 円、1 万円もしたのでは、だれも樹脂補強用には使ってくれません。そこで、製造コストを下げるための様々な検討を行いました。



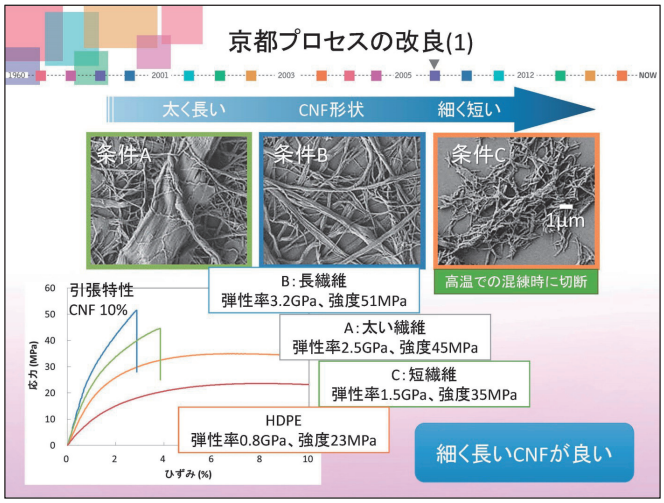
図－19

〈図－19〉　原料、化学処理方法の検討を進めた結果、パルプ繊維のナノ化と樹脂への均一分散を同時に出来る様になりました。今から５年前のことです。これによりパルプをあらかじめナノ

ファイバーにしておく必要が無くなりました。

セルロースナノファイバーの製造と樹脂への複合化を 1 プロセスで行うことで、大幅な時間とコスト削減が実現しました。

後に、これを『パルプ直接混練法』 “京都プロセス”と名付けました。その名前には京都大学と京都市産技研が 10 年以上にわたって一緒に研究をして出来たプロセスであるとの思いがありました。



図－20

〈図－20〉 しかしながら、初期の京都プロセスは、セルロースナノファイバーの耐熱性の関係で、200℃以下で加工する汎用性のプラスチックスにしか適用できませんでした。

さらに、樹脂と練る時に強い力をかけると、セルロースナノファイバーが千切れてしまい、補強性が大きく低下します。

この点を改良するために京都プロセスの各要素技術を一から見直しました。

図－21

〈図－21〉　木材やタケ、稲ワラといった原料からパルプの作り方、化学処理に使う薬品、成形加工技術まで、パルプの解繊性と耐熱性の向上に向けて、この①－⑤のすべての工程を見直しました。その結果、230℃-250℃で加工するナイロンなどのプラスチックも補強出来る様になりました。

図－22

〈図－22〉　その最新版の京都プロセスをベースに、原料から樹脂成形品までを連続して製造するテストプラントを今年の３月に京都大学に完成させました。

セルロースナノファイバー複合材の実用化、次世代の大型産業資材に向けた第一歩を、踏み出したといえます。

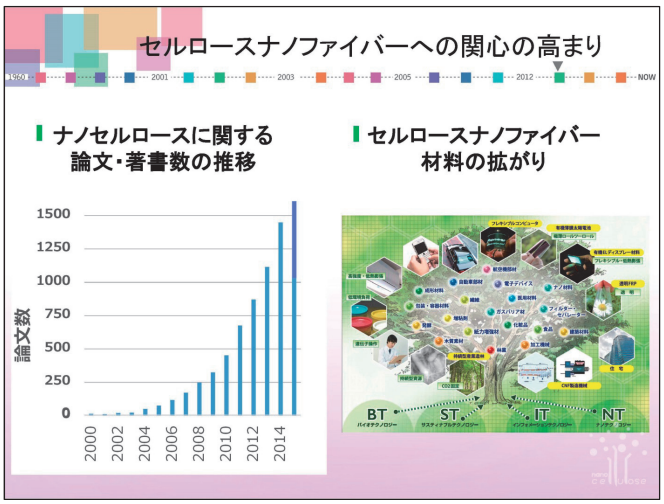
図－23

〈図－23〉　最近、このテストプラントにおいて製造される強化プラスチックなどを用いて、車を作るという環境省の大型実証プロジェクトが 20 機関の参加で始まりました。

セルロースナノファイバーをたっぷり使い軽量化され燃費が向上し、二酸化炭素の排出が減った、環境に優しい車が、東京オリンピックのマラソンの先導車として東京の街を走ることが今の夢です。

図－24

〈図－24〉　最後に、世界中のナノセルロース研究者が驚いている、ナノセルロースフォーラムについて話をしたく思います。



図－25

〈図－25〉　始まりは今から３年半ほど前になります。この図に見られる様に、セルロースナノファイバーに関する論文は急増していました。

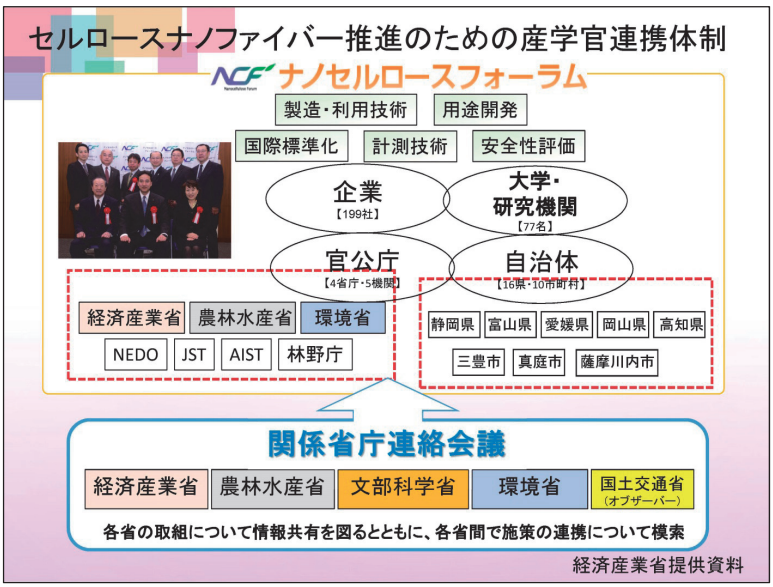
また、様々な用途への利用が考えられ、多くの企業から毎週のように CNF に関する問い合わせがありました。

図－26

〈図－26〉　この様な関心の高さは、平成 16 年度から私の研究室が主催してきたセルロースナノファイバーシンポジウムの熱気からも感じていました。

最初は 140 名だったシンポジウム参加者は平成 25 年度には 500 名を越え、会場探しに苦労する様になっていました。

何とか、多くの人と、セルロースナノファイバーについて情報を共有し、日本におけるセルロースナノファイバー研究を一気に加速させたい、そう思う様になりました。



図－27

〈図－27〉　そこで、平成 25 年の 7 月に、経済産業省に紙業服飾課の渡邉課長さんを訪ね、セルロースナノファイバーに関する情報交換の場の形成と、地方の公設試験研究機関におけるセルロースナノファイバー研究の活性化についてお願いをしました。

渡邊課長さんはすぐに動かれ、翌年の 6 月には世界で初めてセルロースナノファイバーに関するフォーラム、ナノセルロースフォーラムが発足しました。フォーラムには、現在、200 社近い企業が参加しています。

さらに、渡邉課長さんのリードで各省庁が連携してフォーラムを支援する組織として、ナノセルロース関係省庁連絡会議が立ち上がりました。

その後、日本中でセルロースナノファイバーを製造するプラントの建設が進み、現在は 12 の機関からセルロースナノファイバーが提供される様になりました。

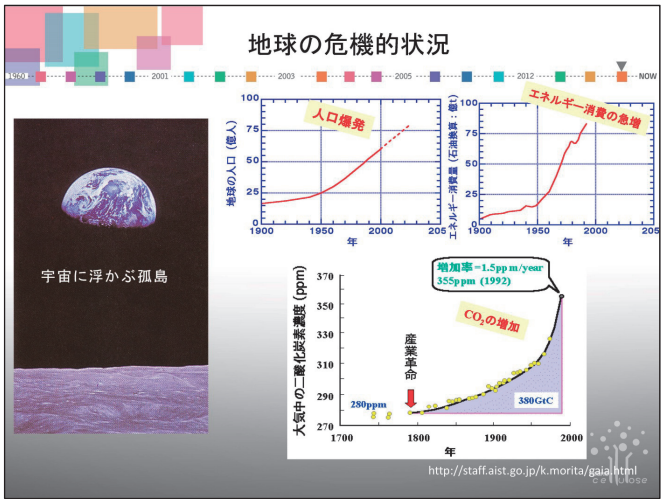
また、日本中で、地域の資源、産業的特徴を活かしたプロジェクトが大学や公設試を核に立ち上がりました。

図－28

〈図－28〉　フォーラムの発足により、それまでつながりが薄かった産業が連携して、持続型資源に基づく社会の構築に向けた大きな流れが出来つつあります。

例えば、林業と自動車産業がこの様な流れで繋がりつつあります。日本独自の産業形態が生まれることへの期待があります。

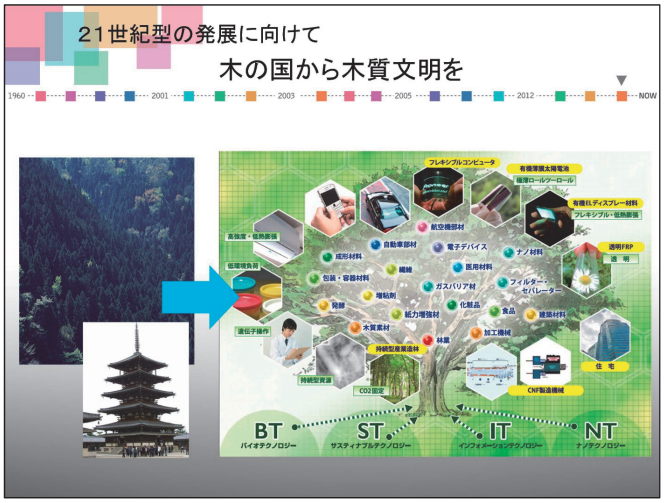
最後に、これまでの話をまとめ、エコテクノロジーに基づく 21 世紀型の発展について考えたく思います。



図－29

〈図－29〉　今、地球は危機的状況にあります。人口爆発、生活レベルの向上による化石燃料を中心としたエネルギー消費の急増、そして、それらに伴い増え続ける二酸化炭素。地球が閉ざされた環境にあり、そこに存在する資源が無限に生み出されるものではない以上、原油や鉄鉱石といった資源の奪い合いが起こり、先行きの価格は上昇せざるを得ません。

では、限りある資源を使って、我々の生活を豊かにする方法はないのでしょうか。その問いに対する答えの一つが、植物バイオマスの活用による循環型社会の実現です。



図－30

〈図－30〉　私は、将来、持続型の植物バイオマスから、この様な様々な材料が作りだされる時代が来ることを信じていますし、それは人類の生存にとって不可欠であると考えます。

50 年あるいは 100 年経って歴史を振り返った時に、持続型植物資源に依存した豊かな社会、木質文明の出発点が、磯貝先生のグループと私たちのグループがともに日本で行ったセルロースナノファイバー研究になっていれば、これほど喜ばしいことはありません。

図－31

〈図－31〉　私にはまだまだ作らなければならないセルロースナノファイバー材料があります。例えば、セルロースナノファイバー100％で鋼鉄の様に板金加工ができる材料です。

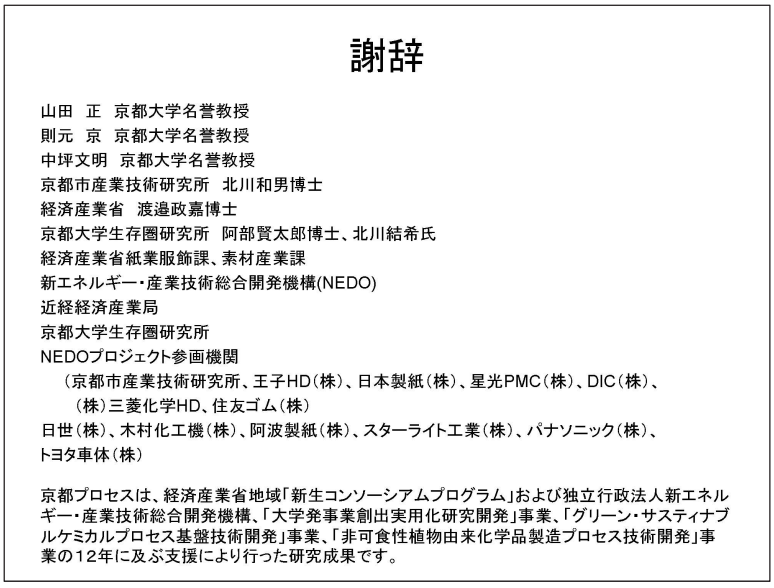
難しいいくつものハードルを越えて行くためには、素直な心で作り手である樹の気持ちを考え、それに沿って行くことが必要だと考えます。植物系材料の開発は、植物の力の借り方の研究です。

そのためには、作り手である植物が、何を目指してその構造を獲得してきたのか、その構造にはどのような機能が表れているのか、を考えなければなりません。

日本のような自然環境、文化を持つ国に育ち、暮らすと、生きとし生けるもの、すべてに仏性

があるとする思想があまり違和感が無く入って来ます。

そのような日本人の自然観だからこそ出来た、持続的社会の構築に役立つ研究、本田財団の設立趣旨にある「人間性あふれる文明の創造」が私の目指すところです。



図－32

〈図－32〉　本日の講演の最後にあたり大切な仕事が一つ残っています。京都プロセスを作り上げる過程で一緒に研究を行ってきた方々、支援いただいた方々への謝辞です。あまりに多すぎて、一人一人のお名前を紹介することが出来ません。この様な形でお名前だけを上げさせていただくことでお許しいただきたく思います。

最後に、これまでの私の人生を豊かなものにしてくれた信州で暮らしている両親、今日の式典に列席の妻と二人の子供に感謝します。

ご清聴、有難うございました。

公益財団法人 本田財団
HONDA FOUNDATION

発行責任者　山　本　雅　貴
Editor in chief　Masataka Yamamoto

104-0028 東京都中央区八重洲 2-6-20 ホンダ八重洲ビル
Tel. 03-3274-5125　Fax. 03-3274-5103

6-20, Yaesu 2-chome, Chuo-ku, Tokyo 104-0028 Japan
Tel. +81 3 3274-5125　Fax. +81 3 3274-5103

http://www.hondafoundation.jp