

6.3 文献調査

バイオナノファイバーおよびナノウiskカーの製造およびそれを用いた複合材料については、これまでに約 80 の論文が発表されているが、そのうち 6 割弱が 2004 年以降の論文であり、急激に BNF に関する研究が活発になっている(図 1)。それらの論文の内容を精査したところ、以下のことが明らかになった。

欧州ではセルロースナノウiskカー(BNFをさらに切断した針状結晶物質)によるナノコンポジット研究が盛んである。1995 年頃からフランス、CERMAV の研究者グループが、セルロースナノウiskカーとラテックスの複合(ウiskカー量:3-10wt%)を行い、これまでに 50 近い論文発表がなされている。多くは、柔らかなマトリックスを剛直なナノウiskカーのネットワークで補強するという考えに基づくもので、パーコレーション理論の適用可能な複合材料である。用途としては塗膜や生分解性フィルム、あるいはリチウムバッテリー固体電解質の補強がある。ウiskカー原料として、チュニシン(ホヤの外皮)や麦ワラ、砂糖ダイコンパルプ、ポテトパルプといった農産廃棄物、ウチワサボテン(*Opuntia ficus*)やサイザル麻の繊維などが使われている。

2000 年に入ってから、Oksman 教授(ノルウェーからスウェーデンに移った)が、ガスバリア性に優れた廃棄容易な容器の開発を目指して、ポリ乳酸とナノウiskカーとの複合について開発研究を進めている。それ以外にも、近年、スイス、ポルトガル、オーストリア、ドイツといった国々からも研究発表が相次いでいる。

一方、研究グループの数においては北米の急増が目覚ましく、論文も 2004 年頃から増えている。北米における BNF 研究の多くは、植物繊維や木材粉末をポリプロピレンなどの熱可塑性樹脂と熔融混練する複合材料研究の発展として行われており、極性材料であるセルロースと非極性の樹脂との界面制御技術には多くの蓄積がある。自動車産業との関係が深いトロント大学の Sain 教授は、植物繊維補強材料の延長としてセルロースナノコンポジットの開発研究を精力的に進めている。また、ニューヨーク・シラキュース大学の Winter 博士は表面を化学修飾したセルロースナノウiskカーを用いたナノコンポジットの開発を進めている。それ以外にも、近年は多くの北米の研究者あるいはアルゼンチンの研究者がセルロースナノウiskカーの研究に関する論文を発表するようになっている。

この様な欧米諸国の論文発表状況に対して我が国も負けていない。例えば、調査員の矢野らは、世界に先駆け高強度ナノコンポジットや透明繊維強化材料を開発している。また、斉藤らは TEMPO 酸化により均一ナノファイバーの製造に成功している。

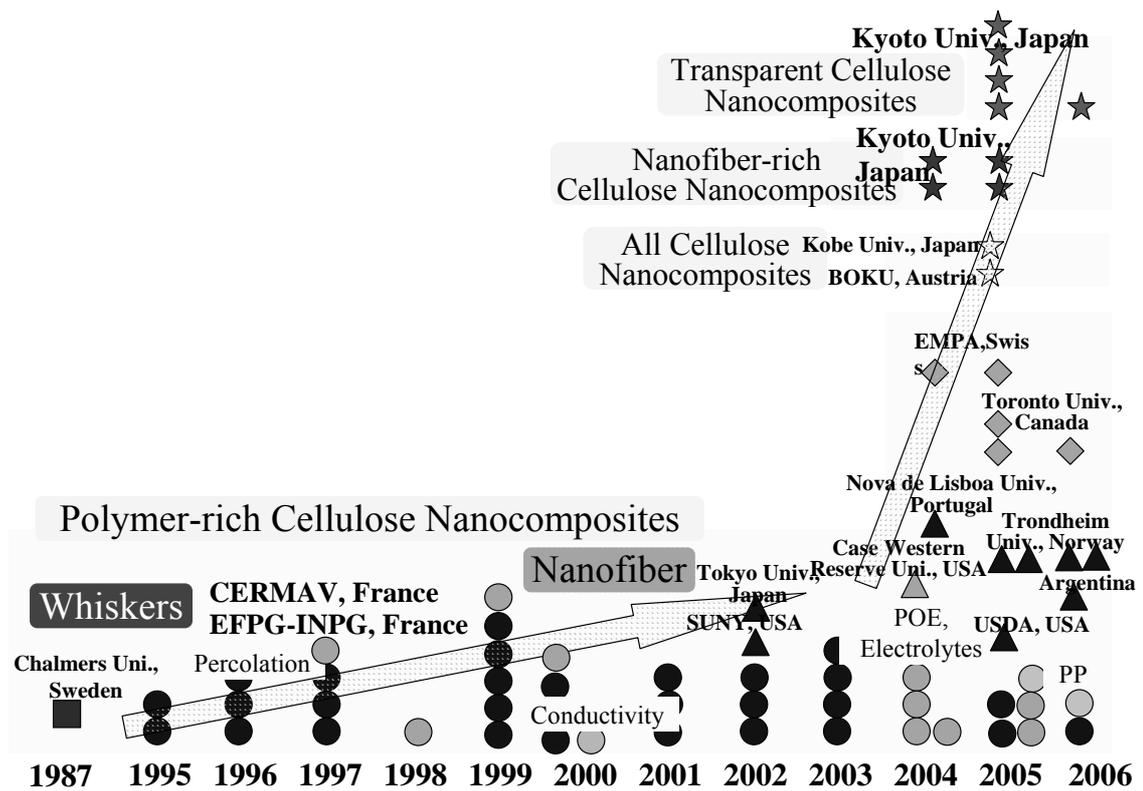


図1 バイオナノファイバーおよびナノウィスカーの製造とその利用に関する論文発表の推移。
 ○、△、□などのシンボル1つが論文一報に対応。●：フランス、グルノーブルグループのナノウィスカー関連論文、○：同ナノファイバー関連論文、△：グルノーブルグループ、日本以外のナノウィスカー関連論文、□：グルノーブルグループ、日本以外のナノファイバー関連論文、○：日本のナノファイバー関連論文

6.3.1 ヨーロッパの研究状況

ヨーロッパではセルロースナノウィスカー(BNFを強酸で切断した針状結晶物質)によるナノコンポジット研究が盛んである¹⁻³⁾。この背景には、豊田中央研究所が世界に先駆けて開発したナノクレコンポジットの影響があるように思われる。すなわち、研究の発想がナノクレコンポジットに近い。

セルロース系ナノコンポジットの基礎研究についてはフランスが世界のトップにある。フランス、グルノーブルにある研究者グループ(CERMAV、他)は、1995年頃に、セルロースナノウィスカーとラテックスの複合(ウィスカー量:3-10wt%)研究を行い、これまでに50近い論文を発表している⁴⁻⁵²⁾。多くは、柔らかなマトリックスを剛直なナノウィスカーのネットワークで補強するという考えに基づくもので、パーコレーション理論の適用可能な複合材料である(図1)。用途としては塗膜や生分解性フィルム、あるいはリチウムバッテリー固体電解質の補強がある。ウィスカー原料として、チュニシン(ホヤの外皮)や麦ワラ、砂糖ダイコンパルプ、ポテトパルプといった農産廃棄物、ウチワサボテン(*Opuntia ficus*)やサイザル麻の繊維などが検討されている。

最近注目される CERMAV グループの研究成果に、セルロースナノウィスカーによる iPP(アイソタクティックポリプロピレン)の補強がある。ポリプロピレンは多くの自動車部材に用いられている代表的な熱可塑性樹脂であり、ナノコンポジットによるその性能向上は産業界が特に注目しているところである。論文では、界面活性剤(BNA, polyoxyethylene-9-nonylphenyl ether)でコーティングしたウィスカーやマレイン酸変性 PP をグラフトしたウィスカーを用いると、ウィスカーが iPP

中で良分散し、強度が向上することが明らかにされている(図2)。ポリマー中での均一分散を可能にする添加剤やセルロース表面修飾がナノコンポジット開発の鍵であることがわかる。これまで、CERMAV グループの研究者は、ナノウィスカーを分散させやすい水系のポリマーやエマルジョンを用いてきたが、ここに来てより実用的な観点からナノコンポジット研究に着手したことは、知財競争において、世界のセルロースナノコンポジ

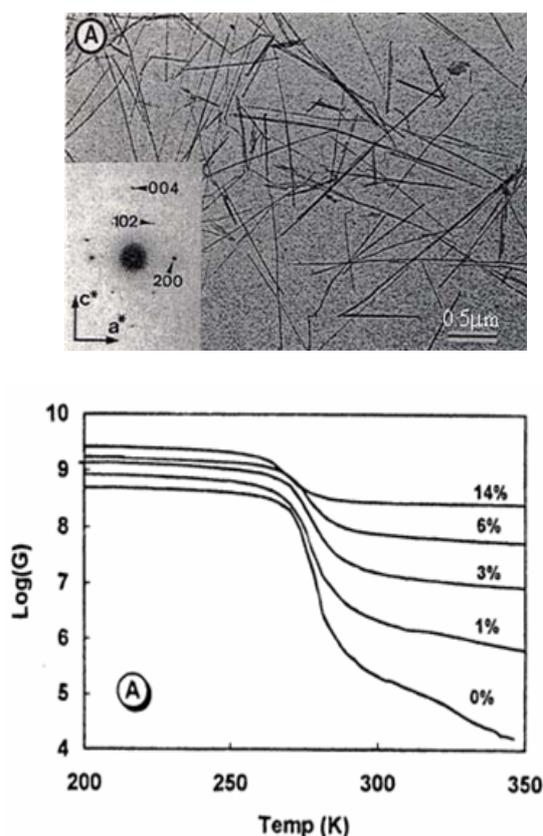


図1 セルロースナノウィスカー(上)で補強したラテックスの粘弾性特性(下)

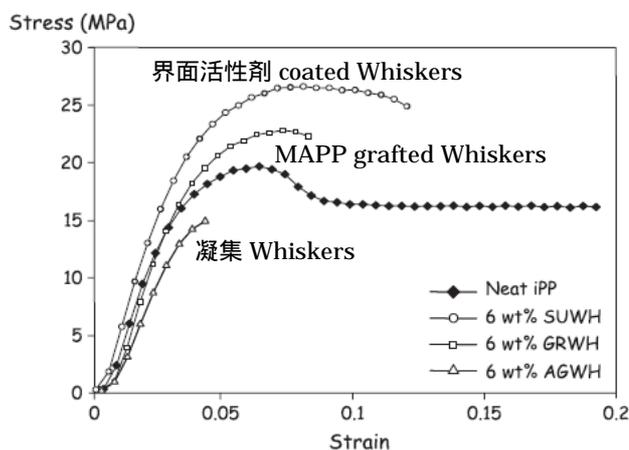


図2 セルロースナノウィスカー補強 iPP の強度特性。

ット研究が、今後激化することを示唆するものである。

一方、研究体制では北欧がリードしている。「森林資源利用でのナノテクノロジー」として製紙産業が主導してすでに複数のプロジェクトが立ち上がっており(スウェーデン)、その代表的なプロジェクトが、スウェーデンとフィンランドが共同で行っているプログラム (Wood Material Science Research Program、5年間、30億円)において、STFI-PACKFORSK (スウェーデン紙パルプ研究所) の Lindstrom 教授がリーダーとなっている“Nanostructured cellulose products”プロジェクトである⁵³⁾。本プロジェクトは、6つのサブプロジェクト、すなわち、1) ナノ化装置、2) 表面修飾と構造評価、3) 機能化繊維コーティング、4) 高性能ナノコンポジット、5) 機能性材料、6) 超撥水性セルロース材料から構成され(図3)、2004年に開始している。主たる目標は、1) 構造(アスペクト比、分子量、形態、表面化学特性)の明らかなミクロフィブリル化セルロース(MFC)を、木材から少ないエネルギー投入で製造する(図4)、2) 用途に応じたMFC表面の化学修飾、3) MFCを用いた新素材開発、である。プログラムのホームページ上で明らかにされている成果からは、フィルム・シート用途が主体であるように思われる。本プロジェクトは2006年に終了するが、得られた成果を発展させるべく、すでに2005年にはより大きなプロジェクトの立ち上げに向けたロードマップがSTFI-PACKFORSKの主導で作成されている。スウェーデンは、製紙産業が国の基幹産業であることから、セルロース科学は我が国と並んで世界のトップを走っており、今後もSTFIならびにKTHの研究者グループの動向からは目を離せられない。

上記のグループとは独立した研究者として、スウェーデン、Lulea工科大学のOksman教授(最近ノルウェーからスウェーデンに移った)がいる。2000年に入ってから、ガスバリア性に優れた廃棄容易な容器の開発を目指して、ポリ乳酸とナノウィスカーとの複合につ

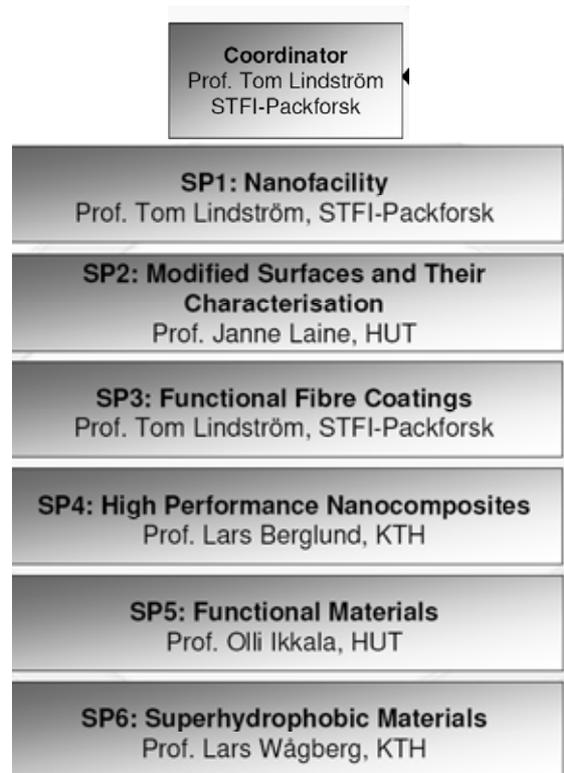


図3 バイオナノファイバーの製造と利用に関するスウェーデン・フィンランド共同研究の体制とサブプロジェクト内容

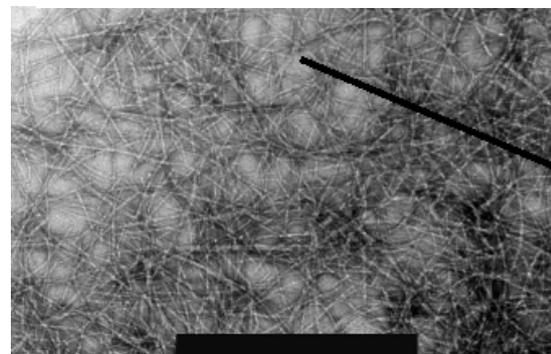


図4 STFIで開発した技術により製造されたセルロースナノファイバーバー: 500nm.

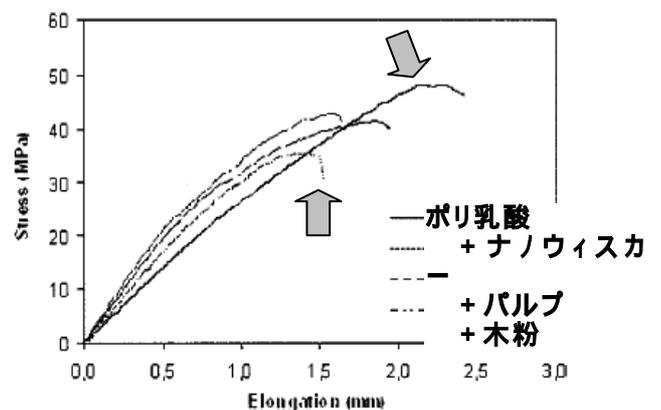


図5 種々の植物系エレメントとポリ乳酸の二軸混練機による複合化

いて研究を進めている⁵⁴⁻⁵⁷⁾。セルロースナノコンポジットの実用化に主眼を置き、二軸混練機を用いた製造技術の研究を精力的に行っている。論文を読む限りにおいては、ナノコンポジットの特性が十分に現れた複合材料は得られていないが(図5) Oksman 教授はアメリカ化学会の年次大会でセルロースナノコンポジットの特別セッションを、後述するカナダ、トロント大学の Sain 教授とオーガナイズしたり、関連書籍を出版したりと、情熱を持ってセルロースナノコンポジットの研究に取り組んでおり、世界的な研究者ネットワークの中で、多くの研究者との共同研究を通じて、セルロースナノコンポジットの実用化に途を開く二軸混練技術を世界に先駆け開発する可能性がある。

ヨーロッパでは、近年、スイス、ポルトガル、オーストリア、ドイツといった国々からも研究発表が相次いでいる⁵⁸⁻⁶⁴⁾。そのうち、スイス連邦材料試験研究所(EMPA)の Zimmerman 博士らのグループでは、水酸基を有しセルロースとなじみの良いポリビニールアルコール(PVA)とセルロースナノファイバーとの複合化について検討し、10%のナノファイバー添加で、破壊ひずみをあまり低下させることなく、PVAの強度が40MPaから60MPaまで増大することを示している(図6)。フィラーであるセルロースとマトリクスとの界面制御が重要なテーマであることを示す報告である。

欧州では植物資源利用に対する自動車産業の意識は高く、現在は、麻・ジュートなど植物繊維とポリマーの複合材料開発が中心であるが、今後は、より高性能のセルロースナノコンポジットに関心が集まることは間違いないであろう。

6.3.2 北米の研究状況

研究グループの数においては北米の急増が目覚ましい。研究者コミュニティ形成に向けた国際シンポジウムが多く開催されるなど、この分野を北米でリードしようとする動きがある(図7)。しかし、個々の研究については、論文や特許が公開されるまでのタイムラグ

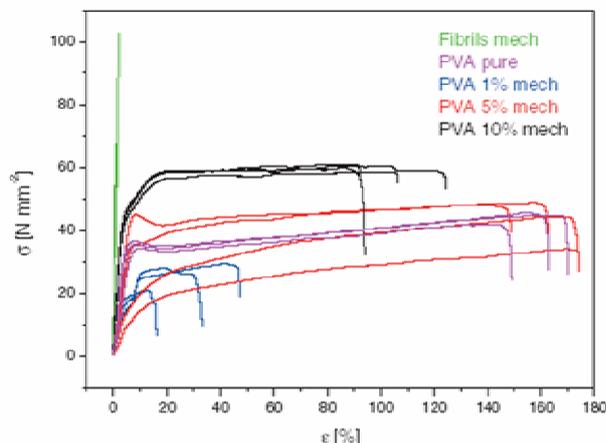


図6 セルロースナノファイバーで補強したPVAの引張変形挙動



図7 TAPPI(北米紙・パルプ技術協会)が2006年4月にアトランタで開催した林産物産業におけるナノテクノロジーに関する国際会議。世界中から研究者が集まった。

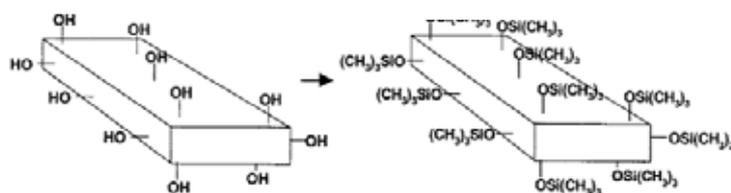


図8 バクテリアセルロース由来のナノウィスカーを trimethylsilylate 処理して、Cellulose acetatebutyrateを補強(0-10 wt%)。マトリクスとの相互作用の増大とともに、シリル化ウィスカーがCABの核剤となっていることを確認。無処理ウィスカーでは核剤の効果は認められず。

があり、実際のところがなかなか表に見えてこない。潜行して開発研究、特許出願がなされている可能性がある。

北米における BNF 研究の多くは、植物繊維や木材粉末をポリプロピレンなどの熱可塑性樹脂と熔融混練する複合材料研究の発展として行われており、極性材料であるセルロースとポリプロピレンなど非極性の樹脂との界面制御技術には多くの蓄積がある。自動車産業との関係が深いトロント大学の Sain 教授は、植物繊維補強材料の延長としてセルロースナノコンポジットの開発研究を精力的に進めている⁶⁵⁻⁶⁷⁾。また、ニューヨーク・シラキューズ大学の Winter 博士は表面を化学修飾したセルロースナノウィスカーを用いたナノコンポジットの開発を進めており(図8)⁶⁸⁾、昨年、日本の新聞で、米国の環境保護省のナノテクノロジー関連プログラムとして、「セルロースナノ粒子で補強したエコ複合材料」の開発を行っていることが報じられていた。環境保護省という人の健康にとりわけ敏感な部署が、セルロースのナノ粒子に関する材料開発を認めたということは注目値する。それ以外にも、近年は多くの北米の研究者あるいはアルゼンチンの研究者がセルロースナノウィスカーの研究に関する論文を発表するようになっており⁶⁹⁻⁷²⁾、学会やシンポジウム等での発表まで含めると、関連する研究者はかなりの数にのぼるとされる。

6.3.3 我が国の研究状況⁷³⁻⁸⁵⁾

この様な状況において、バイオナノファイバーに関する我が国の研究レベルは決して負けていない。例えば、矢野らは、世界に先駆け高強度ナノコンポジットや透明繊維強化材料を開発している⁷³⁻⁸⁴⁾。

クラフトパルプをナノファイバーまで解繊したマイクロフィブリル化セルロース(図9 MFC。BNFと同義)をシート化し、そこにフェノール樹脂(PF)を10-20%複合後、積層成型したMFC-PF複合成型物は、400MPa 近くの曲げ強度を示す(曲げヤング率は20GPa)。これは、軟鋼やマグネシウム合金に匹敵する値である。MFCコンポジットの密度は約1.5g/cm³で鋼鉄の1/5なので、植物繊維をナノ化し、セルロースナノファイバーとして利用することで、鋼鉄の1/5の軽さで鋼鉄と同等の曲げ強度を有する材料が得られるといえる。

MFC10%濃度のスラリーに酸化デンプンをバインダーとして2%添加し、脱水後に熱圧すると(MFC-Starch)、曲げヤング率は12.5GPaにまで低下するが、破壊ひずみが大きくなり、曲げ強度は320MPaに到達する。また、MFCとバイオベースの熱可塑性樹脂であるポリ乳酸の繊維(PLA)を水中で混抄し(MFCとPLAの重量比は7:3)、成膜後、積層熱圧すると、成型物(MFC-PLA)の曲げヤング率、曲げ強度が、それぞれ

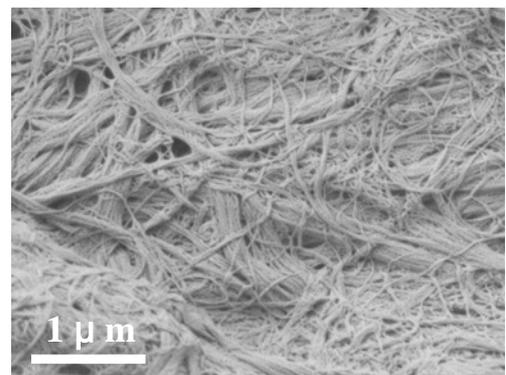


図9 ミクロフィブリル化セルロース(MFC) 高圧ホモジナイザーでパルプをナノファイバー化。

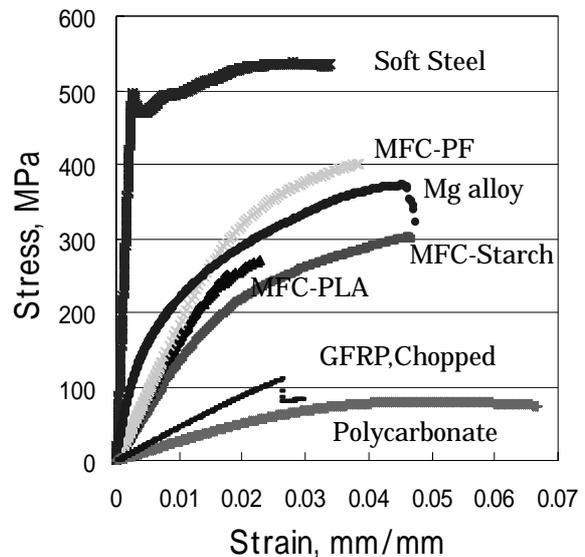


図10 ミクロフィブリル化セルロース成形材料と他材料の強度特性比較

17.5GPa および 270MPa に達する（図 10）。これは、ガラス短繊維で補強した繊維強化材料(GFRP)の倍以上の強度である。加えて本材料はリサイクルも容易である。

ポリ乳酸と MFC との複合化については、混練によるコンパウンド化についても検討を進

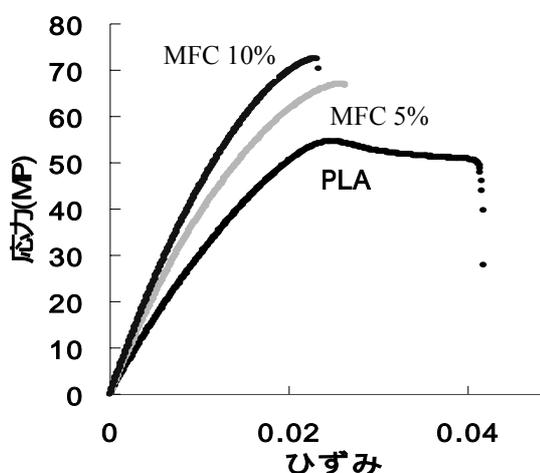


図 11 セルロースナノファイバー(MFC)によるポリ乳酸の補強

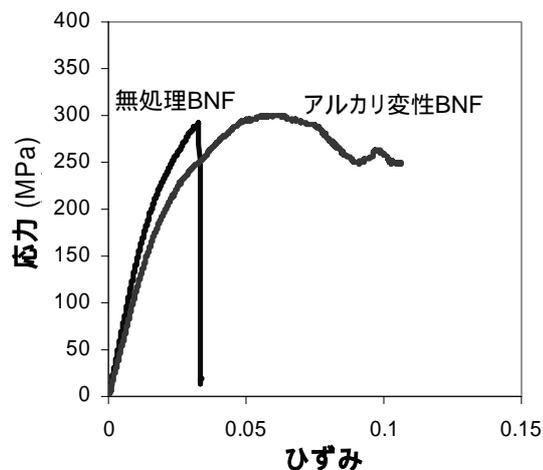


図 12 BNFのアルカリ変性によるPF樹脂複合成型体の強度特性向上

めている。ポリ乳酸を溶媒に溶かし、そこに MFC を添加してポリ乳酸中に均一分散後、混練して得たコンパウンドの熱圧シートでは、少量の MFC 添加で引張強度が約 1.4 倍にまで増大する（図 11、未発表）。また、軟化点以上での弾性率低下が大きく抑制されることも明らかになっている。

また、セルロースナノファイバーを高濃度のアルカリで処理（マーセル化）すると、MFC-PF 複合成型物の破壊ひずみが飛躍的に増大し、破壊までの仕事量が大きくなることを見いだした（図 12、未発表）。これはセルロースナノファイバーの表面修飾だけでなく、結晶および非晶構造を変化させることによってナノコンポジットの強度特性を大きく向上出来ることを世界で始めて示した研究であり、今後、セルロースナノファイバーの化学変成を考える上で重要な知見といえる。

矢野らは安価なバイオナノファイバー製造についても精力的に研究を進めている。現在、高圧ホモジナイザーを用いて解繊したセルロースナノファイバーが、食品添加剤やパルプ添加剤として製造、販売されている。高品質のナノファイバーではあるが、販売量が少ないこともあり、価格は乾燥重量で 5000 円/kg 前後であり、汎用の複合材料用繊維として利用することはできない。矢野は、リファイナーによりパルプの外層を傷つけておくと、吸水後、混練することでナノファイバーレベルまで解繊できることを見いだし（図 13、未発表）、その知見を基に、経済産業省の地域新生コンソーシアム研究開発による企業との共同研究において 2 軸混練機を用いた解繊処理技術について開発研究を行った。現時点で 400 円/kg 程度でパルプをナノファイバー化する技術の目途が立ちつつある。

さらに、セルロースナノコンポジットの実用化においては、製造コストとナノファイバーの品質のバランスを考えた原材料選びが重要である。そこで、木材パルプ以外に、例えば、ジャガイモのデンプン絞りカスや焼酎カスといった農産廃棄物や産業廃棄物からのナ

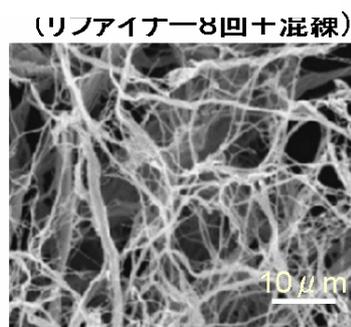


図 13 混練法によるナノファイバーと高圧ホモジナイザーによるナノファイバーの比較

ノファイバー製造について研究を行っている。

我が国の注目すべき研究としては、ナノファイバー製造に関する東京大学、磯貝教授らの研究グループの研究がある。これまでに、斉藤らは TEMPO 酸化により均一ナノファイバーの製造に成功している⁸⁵⁾。TEMPO 酸化処理したパルプは、乾燥後であっても水を加えミキサーで粉碎すると、極めて簡単に均一なナノファイバーが得られる。また、カルボキシル基の導入によりナノファイバー同士が反発し、凝集が防げる点も、ポリマー中での均一分散に関して重要な特性といえる。

文 献

1. Berglund, L. A. : Cellulose Based Nanocomposites (Ed.:M.A.D.Mohanty), CRC Press LLC, 2004.
2. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Dufresne, A.: Review of recent research into cellulosic whiskers: Their properties and their application in nanocomposite field. *Biomacromolecules* **6**, 612-626 (2005).
3. Boldizar, A., Klason, C., Kubat, J., Naslund, P., Saha, P.: Prehydrolyzed cellulose as reinforcing filler for thermoplastics. *Intern. J. Polymeric Mater.* **11**, 229-262 (1987).
4. Favier, V., Canova, G. R., Cavaille, J. Y., Chanzy, H., Dufresne, A., Gauthier, C.: Nanocomposite materials from latex and cellulose whiskers. *Polymers for Advanced Technologies* **6**, 351-355 (1995).
5. Favier, V., Chanzy, H., Cavaille, J. Y.: Polymer nanocomposites reinforced by cellulose whiskers. *Macromolecules* **28**, 6365-6367 (1995).
6. Helbert, W., Cavaille, J. Y., Dufresne, A.: Thermoplastic nanocomposites filled with wheat straw cellulose whiskers. part I: Processing and mechanical behavior. *Polymer Composites* **17** (4), 604-611 (1996).
7. Dufresne, A., Cavaille, J. Y., Helbert, W.: New nanocomposite materials: microcrystalline starch reinforced thermoplastic. *Macromolecules* **29** (23), 7624-7626 (1996).
8. Hajji, P., Cavaille, J. Y., Favier, V., Gauthier, C., Vigier, G.: Tensile behavior of nanocomposites from latex and cellulose whiskers. *Polymer Composites* **17**(4), 612-619 (1996).
9. Dufresne, A., Cavaille, J. Y., Helbert, W.: Thermoplastic nanocomposites filled with wheat straw cellulose whiskers. part II: Effect of processing and modeling. *Polymer Composites* **18** (2), 198-210 (1997).
10. Favier, V., Dendievel, R., Canova, G., Cavaille, J. Y., Gilormini, P.: Simulation and modeling of three-dimensional percolating structures: case of a latex matrix reinforced by a network of cellulose fibers. *Acta Materialia* **45** (4), 1557-1565 (1997).
11. Dufresne, A., Cavaille, J. Y., Vignon, M.R.: Mechanical behavior of sheets prepared from sugar beet cellulose microfibrils. *Journal of Applied Polymer Science* **64** (6), 1185-1194 (1997).
12. Favier, V., Canova, G. R., Shrivastava, S.C., Cavaille, J. Y.: Mechanical percolation in cellulose whisker nanocomposites. *Polymer Engineering and Science* **37** (10), 1732-1739 (1997).
13. Dufresne, A., Vignon, M. R.: Improvement of starch film performances using cellulose

- microfibrils. *Macromolecules* **31** (3) 2693-2696 (1998).
14. Dubief, D., Samain, E., Dufresne, A.: Polysaccharide microcrystals reinforced amorphous poly(beta-hydroxyoctanoate) nanocomposite materials. *Macromolecules* **32** (18), 5765-5771(1999).
 15. Dufresne, A., Kellerhals, M. B., Witholt, B.: Transcrystallization in Mcl-PHAs/cellulose whiskers composites. *Macromolecules* **32** (22), 7396-7401 (1999).
 16. Chazeau, L., Paillet, M., Cavaille, J. Y.: Plasticized PVC reinforced with cellulose whiskers. I. Linear viscoelastic behavior analyzed through the quasi-point defect theory. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* **37** (16), 2151–2164 (1999).
 17. Chazeau, L., Cavaille, J. Y., Canova, G., Dendievel, R., Bouterin, B. : Viscoelastic properties of plasticized PVC reinforced with cellulose whiskers. *Journal of Applied Polymer Science* **71** (11), 1797–1808 (1999).
 18. Chazeau, L., Cavaille, J. Y., Terech, P.: Mechanical behaviour above T_g of a plasticised PVC reinforced with cellulose whiskers; a SANS structural study. *Polymer* **40** (19), 5333–5344 (1999).
 19. Dinand, E., Chanzy, H., Vignon, M. R.: Suspensions of cellulose microfibrils from sugar beet pulp. *Food Hydrocolloids* **13** (3), 275–283 (1999).
 20. Angles, M. N., Dufresne, A.: Plasticized starch/tunicin whiskers nanocomposites. 1. Structural analysis. *Macromolecules* **33** (22), 8344-8353 (2000).
 21. Dufresne, A., Dupeyre, D., Vignon, M. R.: Cellulose microfibrils from potato tuber cell: Processing and characterization of starch-cellulose microfibril composites. *Journal of Applied Polymer Science* **76**, 2080-2092 (2000).
 22. Ruiz, M. M., Cavaille, J. Y., Dufresne, A., Gerard, J. F., Graillat, C.: Processing and characterization of new thermoset nanocomposites based on cellulose whiskers. *Compos. Int.* **7**(2), 117-131 (2000).
 23. Flandin, L., Bidan, G., Brechet, Y., Cavaille, J. Y.: New nanocomposite materials made of an insulating matrix and conducting fillers: Processing and properties. *Polymer Composites* **21** (2), 165-174 (2000).
 24. Dufresne, A.: Dynamicmechanical analysis of the interphase in bacterial polyester/cellulose whiskers natural composites. *Composite Interfaces* **7** (1), 53-67 (2000).
 25. Heux, L., Chauve, G., Bonini, C.: Nonflocculating and chiral-nematic self-ordering of cellulose microcrystals suspensions in nonpolar solvents. *Langmuir* **16**, 8210-8212 (2000).
 26. Brechet, Y., Cavaille, J. Y., Chabert, E., Chazeau, L., Dendievel, R., Flandin, L., Gauthier, C.: Polymer based nanocomposites: Effect of filler-filler and filler-matrix interactions. *Advanced Engineering Materials* **3** (8), 571-577 (2001).
 27. Angles, M. N., Dufresne, A.: Plasticized starch/tunicin whiskers nanocomposite materials. 2. Mechanical behavior. *Macromolecules* **34** (9), 2921-2931 (2001).
 28. Paillet, M., Dufresne, A.: Chitin whisker reinforced thermoplastic nanocomposites. *Macromolecules* **34** (19), 6527-6530 (2001).
 29. Ruiz, M.M., Cavaille, J. Y., Dufresne, A., Graillat, C., Gerard, J. F.: New waterborne epoxy coatings based on cellulose nanofillers. *Macromol. Symp.* **169**, 211-222 (2001).
 30. Eichhorn, S. J., Cavaille, C. A., Zafeiropoulos, N., Mwaikambo, L. Y., Ansell, M. P., Dufresne, A., Entwistle, K. M., Herrera-Franco, P. J., Escamilla, G. C., Groom, L., Huches, M., Hill, C., Rials, T. G., Wild, P. M.: Current international research into

- cellulosic fibres and composites. *Journal of Materials Science* **36**, 2107-2131 (2001).
31. Mathew, A. P., Dufresne, A.: Morphological investigation of nanocomposites from sorbitol plasticized starch and tunicin whiskers. *Biomacromolecules* **3** (3), 609-617 (2002).
 32. Morin, A., Dufresne, A.: Nanocomposites of chitin whiskers from riftia tubes and poly (caprolactone). *Macromolecules* **35**(6), 2190-2199 (2002).
 33. Dufresne, A.: Interfacial phenomena in nanocomposites based on poly saccharide nanocrystals. *Compos. Int.* **10** (4-5), 369-387 (2003).
 34. Nair, K. G., Dufresne, A.: Crab shell chitin whisker reinforced natural rubber nanocomposites. 1. Processing and swelling behavior. *Biomacromolecules* **4** (3), 657-665 (2003).
 35. Nair, K. G., Dufresne, A.: Crab shell chitin whisker reinforced natural rubber nanocomposites. 2. Mechanical behavior. *Biomacromolecules* **4** (3), 666-674 (2003).
 36. Nair, K. G., Dufresne, A.: Crab shell chitin whiskers reinforced natural rubber nanocomposites. 3. Effect of chemical modification of chitin whiskers. *Biomacromolecules* **4** (6), 1835-1842 (2003).
 37. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Sanchez, J. Y., Dufresne, A.: Cellulose nanocrystals reinforced poly(oxyethylene). *Polymer* **45** (12), 4149-4157 (2004).
 38. Samir, M. A. S. A., Mateos, A. M., Alloin, F., Sanchez, J. Y., Dufresne, A.: Plasticized nanocomposite polymer electrolytes based on poly(oxyethylene) and cellulose whiskers. *Electrochimica Acta* **49** (26) 4667-4677 (2004).
 39. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Sanchez, J. Y., Dufresne, A.: Cross-linked nanocomposite polymer electrolytes reinforced with cellulose whiskers. *Macromolecules* **37** (13), 4839-4844 (2004).
 40. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Sanchez, J. Y., El Kissi, N., Dufresne, A.: Preparation of cellulose whiskers reinforced nanocomposites from an organic medium suspension. *Macromolecules* **37** (4), 1386-1393 (2004).
 41. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Gorecki, W., Sanchez, J. Y., Dufresne, A.: Nanocomposite polymer electrolytes based on poly(oxyethylene) and cellulose nanocrystals. *J. Phys. Chem. B* **108** (30), 10845-10852 (2004).
 42. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Paillet, M., Dufresne, A.: Tangling effect in fibrillated cellulose reinforced nanocomposites. *Macromolecules* **37**, 4313-4316 (2004).
 43. Gousse, C., Chanzy, H., Cerrada, M. L., Fleury, E.: Surface sililation of cellulose microfibrils: preparation and rheological properties. *Polymer* **45**, 1569-1575 (2004).
 44. Samir, M. A. S. A., Chazeau, L., Alloin, F., Cavaille, J. Y., Dufresne, A., Sanchez, J. Y.: POE-based nanocomposite polymer electrolytes reinforced with cellulose whiskers. *Electrochimica Acta* **50** (19), 3897-3903 (2005).
 45. Malainine, M. E., Mahrouz, M., Dufresne, A.: Thermoplastic nanocomposites based on cellulose microfibrils from *Opuntia ficus-indica* parenchyma cell. *Composites Science and Technology* **65**, 1520-1526 (2005).
 46. Chauve, G., Heux, L., Arouini, R., Mazeau, K.: Cellulose poly (ethylene-co-vinyl acetate) nanocomposites studied molecular modeling and mechanical spectroscopy. *Biomacromolecules* **6**, 2025-2031 (2005).
 47. Ljungberg, N., Bortolussi, C., Boisson, C., Heux, L., Cavaille, J. Y.: New Nanocomposite materials reinforced with cellulose whiskers in atactic polypropylene:

- Effect of surface and dispersion characteristics. *Biomacromolecules* **6**, 2732-2739 (2005).
48. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Sanchez, J. Y., Dufresne, A.: Nanocomposite polymer electrolytes base on poly (oxyethylene) and cellulose whiskers. *Polimeros: Ciencia e Tecnologia* **15** (2), 109-113 (2005).
 49. Belgacem, M. N., Gandini, A.: Surface modification of cellulose fibers. *Artigo Tecnico Cientifico* **15** (2), 114-121 (2005).
 50. Ljungberg, N., Cavaille, J. Y., Heux, L.: Nanocomposites of isotactic polypropylene reinforced with rod-like cellulose whiskers. *Polymer* **47**, 6285-6292 (2006).
 51. Bordel, D., Putaux, J. L., Heux, L.: Orientation of native cellulose in an electric field. *Langmuir* **22**, 4899-4901(2006).
 52. de Rodriguez, N. L. G., Thielemants, W., Dufresne, A.: Sisal cellulose whiskers reinforced polyvinyl acetate nanocomposites. *Cellulose* **13**, 261-270 (2006).
 53. <http://www.woodwisdom.fi/?docId=12331>
 54. Mathew, A. P., Oksman, K., Sain, M.: Mechanical properties of biodegradable composites from poly lactic acid (PLA) and microcrystalline cellulose (MCC). *Journal of Applied Polymer Science* **97**, 2014-2025(2005).
 55. Kvien, I., Tanem, B. S., Kristiina Oksman, K.: Characterization of cellulose whiskers and their nanocomposites by atomic force and electron microscopy. *Biomacromolecules* **6**, 3160-3165(2005).
 56. Oksman, K., Mathew, A. P., Bondeson, D., Kvien, I.: Manufacturing process of cellulose whiskers/ polylactic acid nanocomposites. *Composites Science and Technology* (2006).
 57. Petersson, L., Oksman, K.: Biopolymer based nanocomposites: Comparing layered silicates and microcrystalline cellulose as nanoreinforcement. *Composites Science and Technology* **66**, 2187-2196 (2006).
 58. Borges, J. P., Godinho, M. H., Martins, A. F., Trindade, A. C., Belgacem, M. N.: Cellulose-based composite films. *Mechanics of Composite Materials* **37** (3), 257-264 (2001).
 59. Borges, J. P., Godinho, M. H., Belgacem, M. N., Martins, A. F.: New bio-composites based on short fibre reinforced hydroxypropylcellulose films. *Composite Interfaces* **3** (4), 233-241 (2001).
 60. Borges, J. P., Godinho, M. H., Martins, A. F.: Tensile properties of cellulose fiber reinforced hydroxypropylcellulose Films. *Polymer Composites* **25** (1), 102-110 (2004).
 61. Zimmermann, T., Pohler, E., Geiger, T.: Cellulose fibrils for polymer reinforcement. *Advanced Engineering Materials* **6**(9), 754-761 (2004).
 62. Zimmermann, T., Pohler, E., Schwaller, P.: Mechanical and morphological properties of cellulose fibril reinforced nanocomposites. *Advanced Engineering Materials* **7**(12), 1156-1161 (2005).
 63. Gindl, W., Keckes, J.: All-cellulose nanocomposite. *Polymer* **46**, 10221-10225 (2005).
 64. Klemm, D., Schumann, D., Kramer, F., Hebler, N., Hornung, M., Schmauder, H. P., Marsch, S.: Nanocelluloses as innovative polymers in research and application. *Adv. Polym. Sci.* **205**, 49-96 (2006).
 65. Chakraborty, A., Sain, M., Kortschot, M.: Cellulose microfibrils: A novel method of preparation using high shear refining and cryocrushing. *Holzforschung* **59**, 102-107

(2005).

66. Bhatnagar, A., Sain, M.: Processing of cellulose nanofiber-reinforced composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* **14**(12), 1259-1268 (2005).
67. Chakraborty, A., Sain, M., Kortschot, M.: Reinforcing potential of wood pulp-derived microfibrils in a PVA matrix. *Holzforschung* **60**, 53-58 (2006).
68. Grunert, M., Winter, W. T.: Nanocomposites of cellulose acetate butyrate reinforced with cellulose nanocrystals. *Journal of Polymers and the Environment* **10** (1/2), 27-30 (2002).
69. Schroers, M., Kokil, A., Weder, C.: Solid polymer electrolytes based on nanocomposites of ethylene oxide-epichlorohydrin copolymers and cellulose whiskers. *Journal of Applied Polymer Science* **93** (6), 2883-2888 (2004).
70. Pandey, J. K., Kumar, A. P., Misra, M., Mohanty, A. K., Drzal, L. T., Singh, R. P.: Recent advances in biodegradable nanocomposites. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* **5**, 497-526 (2005).
71. Orts, W. J., Shey, J., Imam, S. H., Glenn, G. M., Guttman, M. E., Revol, J. F.: Application of cellulose microfibrils in polymer nanocomposites. *Journal of Polymers and the Environment* **13** (4), 301-306 (2005).
72. Marcovich, N. E., Auad, M. L., Bellesi, N. E., Nutt, S. R., Arangures, M. I.: Cellulose micro/nanocrystals reinforced polyurethane. *J. Mater. Res.* **12** (4), 870-881 (2006).
73. Nakagaito, A. N., Yano, H., Kawai, S.: Proc. 6th Pacific Rim Bio-based Composites Symposium, Nov. 2002, Portland, pp.171-176.
74. Yano, H., Nakahara S., Nakagaito. A. N.: Proc. 6th Pacific Rim Bio-based Composites Symposium, Nov. 2002, Portland, pp.188-192.
75. Yano, H., Nakahara, S.: Bio-composites produced from plant microfiber bundles with a nanometer unit web-like network. *J. Materials Science* **39**, 1635-1638 (2004).
76. Nakagaito, A. N., Yano, H.: Novel high-strength biocomposites based on microfibrillated cellulose having nano-order-unit web-like network structure. *Applied Physics A* **80**, 155-159(2005).
77. Nakagaito, A. N., Yano, H.: 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).
78. Nakagaito, A. N., Iwamoto, S., Yano, H.: Bacterial cellulose: the ultimate nano-scalar cellulose morphology for the production of high-strength composites. *Applied Physics A* **80**, 93-97(2005).
79. Yano, H., Sugiyama, J., Nakagaito, A. N., Nogi, M., Matsuura, T., Hikita M., Handa, K.: Optically Transparent Composites Reinforced with Networks of Bacterial Nanofibers. *Advanced Materials* **17**, 153-155(2005).
80. Nogi, M., Handa, K., Nakagaito, A. N., Yano, H.: Optically transparent bionanofiber composites with low sensitivity to refractive index of the polymer matrix. *Applied Physics Letters* **87**, 1 (2005).
81. Nogi, M., Ifuku, S., Abe, K., Handa, K., Nakagaito, A. N., Yano, H.: Fiber-content dependency of the optical transparency and thermal expansion of bacterial nanofiber reinforced composites. *Applied Physics Letters* **88**, 133124 (2006).
82. Iwamoto, S., Nakagaito, A. N., Yano, H., Nogi, M.: Optically transparent composites reinforced with plant fiber-based nanofibers. *Appl. Phys. A* **81**, 1109-1112 (2005).

83. Nogi, M. Abe, K., Handa , K. , Nakatsubo , F., Ifuku , S., Yano, H.: Property enhancement of optically transparent bio-nanofiber compositesby acetylation. *Applied Physics Letters*, in press
84. Noishiki, Y., Nishiyama, Y., Wada, M., Kuga, S., Magoshi, J.: Mechanical properties of silk fibroin-microcrystalline cellulose composite films. *Journal of Applied Polymer Science* **86**, 3425-3429 (2002).
85. Saito, T., Nishiyama, Y., Putaux, J. Y., Vignon, M., Isogai, A.: Homogeneous suspensions of individualized microfibrils from TEMPO-catalyzed oxidation of native cellulose. *Biomacromolecules* **7** (6) 1687-1691 (2006).

6.3 文献調査

バイオナノファイバーおよびナノウiskカーの製造およびそれを用いた複合材料については、これまでに約 80 の論文が発表されているが、そのうち 6 割弱が 2004 年以降の論文であり、急激に BNF に関する研究が活発になっている(図 1)。それらの論文の内容を精査したところ、以下のことが明らかになった。

欧州ではセルロースナノウiskカー(BNFをさらに切断した針状結晶物質)によるナノコンポジット研究が盛んである。1995 年頃からフランス、CERMAV の研究者グループが、セルロースナノウiskカーとラテックスの複合(ウiskカー量:3-10wt%)を行い、これまでに 50 近い論文発表がなされている。多くは、柔らかなマトリックスを剛直なナノウiskカーのネットワークで補強するという考えに基づくもので、パーコレーション理論の適用可能な複合材料である。用途としては塗膜や生分解性フィルム、あるいはリチウムバッテリー固体電解質の補強がある。ウiskカー原料として、チュニシン(ホヤの外皮)や麦ワラ、砂糖ダイコンパルプ、ポテトパルプといった農産廃棄物、ウチワサボテン(*Opuntia ficus*)やサイザル麻の繊維などが使われている。

2000 年に入ってから、Oksman 教授(ノルウェーからスウェーデンに移った)が、ガスバリア性に優れた廃棄容易な容器の開発を目指して、ポリ乳酸とナノウiskカーとの複合について開発研究を進めている。それ以外にも、近年、スイス、ポルトガル、オーストリア、ドイツといった国々からも研究発表が相次いでいる。

一方、研究グループの数においては北米の急増が目覚ましく、論文も 2004 年頃から増えている。北米における BNF 研究の多くは、植物繊維や木材粉末をポリプロピレンなどの熱可塑性樹脂と熔融混練する複合材料研究の発展として行われており、極性材料であるセルロースと非極性の樹脂との界面制御技術には多くの蓄積がある。自動車産業との関係が深いトロント大学の Sain 教授は、植物繊維補強材料の延長としてセルロースナノコンポジットの開発研究を精力的に進めている。また、ニューヨーク・シラキュース大学の Winter 博士は表面を化学修飾したセルロースナノウiskカーを用いたナノコンポジットの開発を進めている。それ以外にも、近年は多くの北米の研究者あるいはアルゼンチンの研究者がセルロースナノウiskカーの研究に関する論文を発表するようになっている。

このような欧米諸国の論文発表状況に対して我が国も負けていない。例えば、調査員の矢野らは、世界に先駆け高強度ナノコンポジットや透明繊維強化材料を開発している。また、斉藤らは TEMPO 酸化により均一ナノファイバーの製造に成功している。

6.3.1 ヨーロッパの研究状況

ヨーロッパではセルロースナノウィスカー(BNFを強酸で切断した針状結晶物質)によるナノコンポジット研究が盛んである¹⁻³⁾。この背景には、豊田中央研究所が世界に先駆けて開発したナノクレコンポジットの影響があるように思われる。すなわち、研究の発想がナノクレコンポジットに近い。

セルロース系ナノコンポジットの基礎研究についてはフランスが世界のトップにある。フランス、グルノーブルにある研究者グループ(CERMAV、他)は、1995年頃に、セルロースナノウィスカーとラテックスの複合(ウィスカー量:3-10wt%)研究を行い、これまでに50近い論文を発表している⁴⁻⁵²⁾。多くは、柔らかなマトリックスを剛直なナノウィスカーのネットワークで補強するという考えに基づくもので、パーコレーション理論の適用可能な複合材料である(図1)。用途としては塗膜や生分解性フィルム、あるいはリチウムバッテリー固体電解質の補強がある。ウィスカー原料として、チュニシン(ホヤの外皮)や麦ワラ、砂糖ダイコンパルプ、ポテトパルプといった農産廃棄物、ウチワサボテン(*Opuntia ficus*)やサイザル麻の繊維などが検討されている。

最近注目される CERMAV グループの研究成果に、セルロースナノウィスカーによる iPP(アイソタクティックポリプロピレン)の補強がある。ポリプロピレンは多くの自動車部材に用いられている代表的な熱可塑性樹脂であり、ナノコンポジットによるその性能向上は産業界が特に注目しているところである。論文では、界面活性剤(BNA, polyoxyethylene-9-nonylphenyl ether)でコーティングしたウィスカーやマレイン酸変性 PP をグラフトしたウィスカーを用いると、ウィスカーが iPP

中で良分散し、強度が向上することが明らかにされている(図2)。ポリマー中での均一分散を可能にする添加剤やセルロース表面修飾がナノコンポジット開発の鍵であることがわかる。これまで、CERMAV グループの研究者は、ナノウィスカーを分散させやすい水系のポリマーやエマルジョンを用いてきたが、ここに来てより実用的な観点からナノコンポジット研究に着手したことは、知財競争において、世界のセルロースナノコンポジ

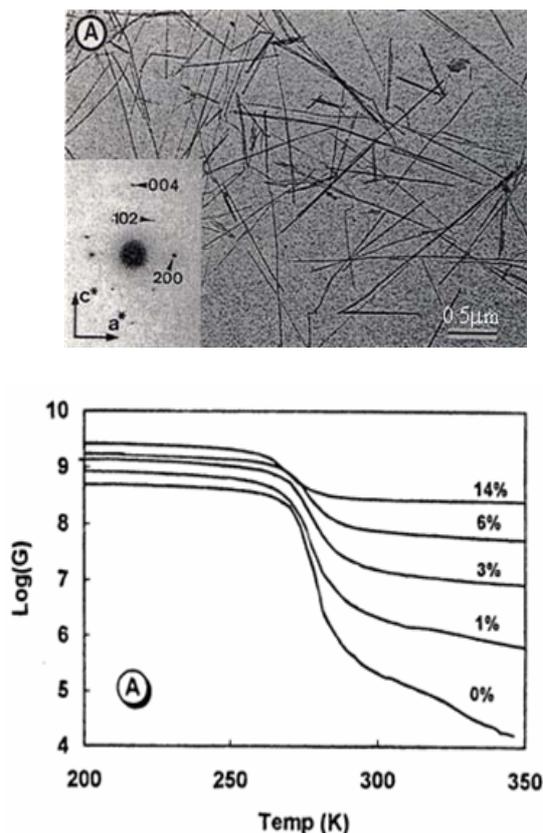


図1 セルロースナノウィスカー(上)で補強したラテックスの粘弾性特性(下)

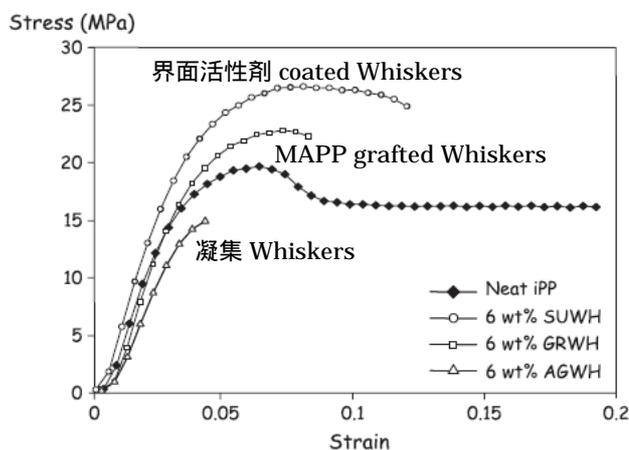


図2 セルロースナノウィスカー補強 iPP の強度特性。

ット研究が、今後激化することを示唆するものである。

一方、研究体制では北欧がリードしている。「森林資源利用でのナノテクノロジー」として製紙産業が主導してすでに複数のプロジェクトが立ち上がっており(スウェーデン)、その代表的なプロジェクトが、スウェーデンとフィンランドが共同で行っているプログラム (Wood Material Science Research Program、5年間、30億円)において、STFI-PACKFORSK (スウェーデン紙パルプ研究所) の Lindstrom 教授がリーダーとなっている“Nanostructured cellulose products”プロジェクトである⁵³⁾。本プロジェクトは、6つのサブプロジェクト、すなわち、1) ナノ化装置、2) 表面修飾と構造評価、3) 機能化繊維コーティング、4) 高性能ナノコンポジット、5) 機能性材料、6) 超撥水性セルロース材料から構成され(図3)、2004年に開始している。主たる目標は、1) 構造(アスペクト比、分子量、形態、表面化学特性)の明らかなミクロフィブリル化セルロース(MFC)を、木材から少ないエネルギー投入で製造する(図4)、2) 用途に応じたMFC表面の化学修飾、3) MFCを用いた新素材開発、である。プログラムのホームページ上で明らかにされている成果からは、フィルム・シート用途が主体であるように思われる。本プロジェクトは2006年に終了するが、得られた成果を発展させるべく、すでに2005年にはより大きなプロジェクトの立ち上げに向けたロードマップがSTFI-PACKFORSKの主導で作成されている。スウェーデンは、製紙産業が国の基幹産業であることから、セルロース科学は我が国と並んで世界のトップを走っており、今後もSTFIならびにKTHの研究者グループの動向からは目を離せられない。

上記のグループとは独立した研究者として、スウェーデン、Lulea工科大学のOksman教授(最近ノルウェーからスウェーデンに移った)がいる。2000年に入ってから、ガスバリア性に優れた廃棄容易な容器の開発を目指して、ポリ乳酸とナノウィスカーとの複合につ

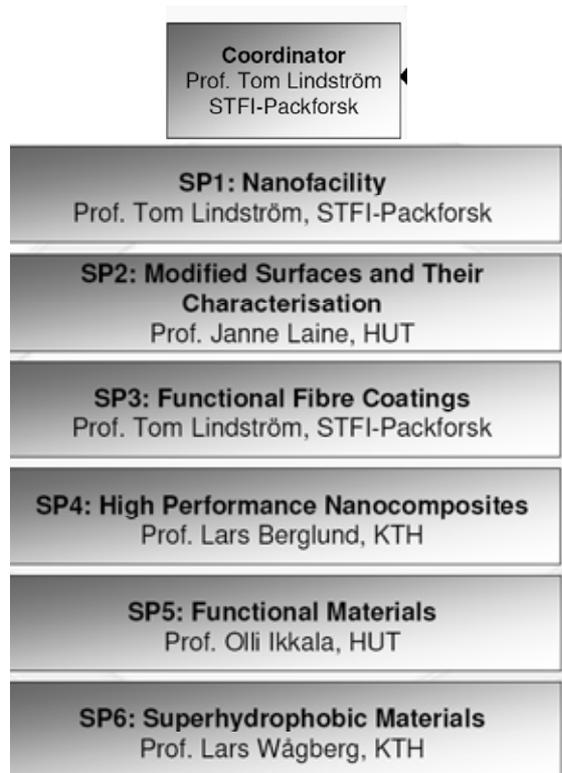


図3 バイオナノファイバーの製造と利用に関するスウェーデン・フィンランド共同研究の体制とサブプロジェクト内容

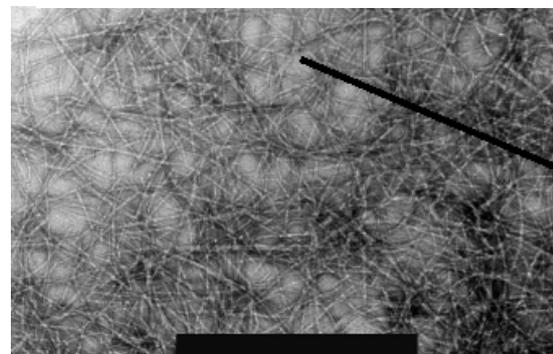


図4 STFIで開発した技術により製造されたセルロースナノファイバーバー: 500nm.

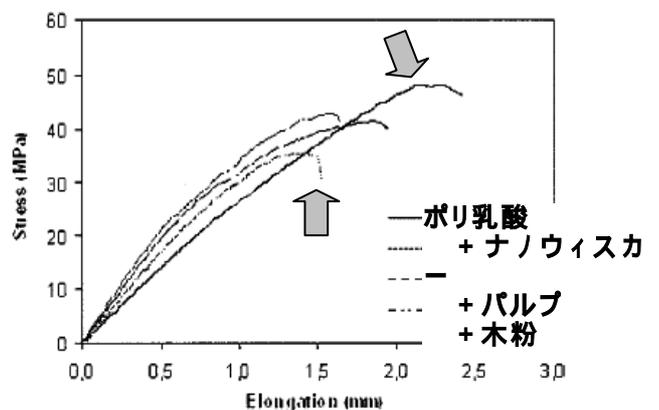


図5 種々の植物系エレメントとポリ乳酸の二軸混練機による複合化

いて研究を進めている⁵⁴⁻⁵⁷⁾。セルロースナノコンポジットの実用化に主眼を置き、二軸混練機を用いた製造技術の研究を精力的に行っている。論文を読む限りにおいては、ナノコンポジットの特性が十分に現れた複合材料は得られていないが(図5) Oksman 教授はアメリカ化学会の年次大会でセルロースナノコンポジットの特別セッションを、後述するカナダ、トロント大学の Sain 教授とオーガナイズしたり、関連書籍を出版したりと、情熱を持ってセルロースナノコンポジットの研究に取り組んでおり、世界的な研究者ネットワークの中で、多くの研究者との共同研究を通じて、セルロースナノコンポジットの実用化に途を開く二軸混練技術を世界に先駆け開発する可能性がある。

ヨーロッパでは、近年、スイス、ポルトガル、オーストリア、ドイツといった国々からも研究発表が相次いでいる⁵⁸⁻⁶⁴⁾。そのうち、スイス連邦材料試験研究所(EMPA)の Zimmerman 博士らのグループでは、水酸基を有しセルロースとなじみの良いポリビニールアルコール(PVA)とセルロースナノファイバーとの複合化について検討し、10%のナノファイバー添加で、破壊ひずみをあまり低下させることなく、PVAの強度が40MPaから60MPaまで増大することを示している(図6)。フィラーであるセルロースとマトリクスとの界面制御が重要なテーマであることを示す報告である。

欧州では植物資源利用に対する自動車産業の意識は高く、現在は、麻・ジュートなど植物繊維とポリマーの複合材料開発が中心であるが、今後は、より高性能のセルロースナノコンポジットに関心が集まることは間違いないであろう。

6.3.2 北米の研究状況

研究グループの数においては北米の急増が目覚ましい。研究者コミュニティ形成に向けた国際シンポジウムが多く開催されるなど、この分野を北米でリードしようとする動きがある(図7)。しかし、個々の研究については、論文や特許が公開されるまでのタイムラグ

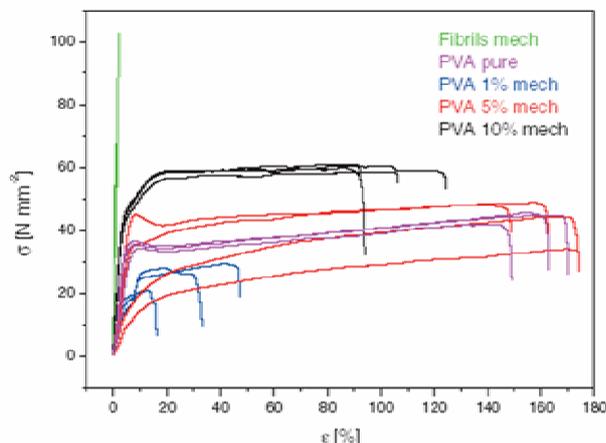


図6 セルロースナノファイバーで補強したPVAの引張変形挙動



図7 TAPPI(北米紙・パルプ技術協会)が2006年4月にアトランタで開催した林産物産業におけるナノテクノロジーに関する国際会議。世界中から研究者が集まった。

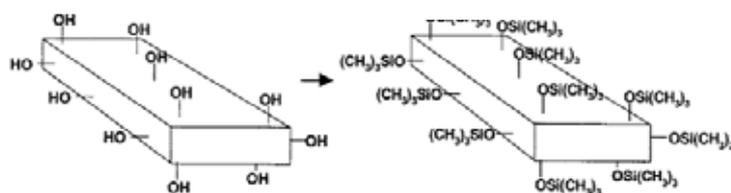


図8 バクテリアセルロース由来のナノウィスカーを trimethylsilylate 処理して、Cellulose acetatebutyrateを補強(0-10 wt%)。マトリクスとの相互作用の増大とともに、シリル化ウィスカーがCABの核剤となっていることを確認。無処理ウィスカーでは核剤の効果は認められず。

があり、実際のところなかなか表に見えてこない。潜行して開発研究、特許出願がなされている可能性がある。

北米における BNF 研究の多くは、植物繊維や木材粉末をポリプロピレンなどの熱可塑性樹脂と熔融混練する複合材料研究の発展として行われており、極性材料であるセルロースとポリプロピレンなど非極性の樹脂との界面制御技術には多くの蓄積がある。自動車産業との関係が深いトロント大学の Sain 教授は、植物繊維補強材料の延長としてセルロースナノコンポジットの開発研究を精力的に進めている⁶⁵⁻⁶⁷⁾。また、ニューヨーク・シラキューズ大学の Winter 博士は表面を化学修飾したセルロースナノウィスカーを用いたナノコンポジットの開発を進めており(図8)⁶⁸⁾、昨年、日本の新聞で、米国の環境保護省のナノテクノロジー関連プログラムとして、「セルロースナノ粒子で補強したエコ複合材料」の開発を行っていることが報じられていた。環境保護省という人の健康にとりわけ敏感な部署が、セルロースのナノ粒子に関する材料開発を認めたということは注目値する。それ以外にも、近年は多くの北米の研究者あるいはアルゼンチンの研究者がセルロースナノウィスカーの研究に関する論文を発表するようになっており⁶⁹⁻⁷²⁾、学会やシンポジウム等での発表まで含めると、関連する研究者はかなりの数にのぼるとされる。

6.3.3 我が国の研究状況⁷³⁻⁸⁵⁾

この様な状況において、バイオナノファイバーに関する我が国の研究レベルは決して負けていない。例えば、矢野らは、世界に先駆け高強度ナノコンポジットや透明繊維強化材料を開発している⁷³⁻⁸⁴⁾。

クラフトパルプをナノファイバーまで解繊したマイクロフィブリル化セルロース(図9 MFC。BNFと同義)をシート化し、そこにフェノール樹脂(PF)を10-20%複合後、積層成型したMFC-PF複合成型物は、400MPa 近くの曲げ強度を示す(曲げヤング率は20GPa)。これは、軟鋼やマグネシウム合金に匹敵する値である。MFCコンポジットの密度は約1.5g/cm³で鋼鉄の1/5なので、植物繊維をナノ化し、セルロースナノファイバーとして利用することで、鋼鉄の1/5の軽さで鋼鉄と同等の曲げ強度を有する材料が得られるといえる。

MFC10%濃度のスラリーに酸化デンプンをバインダーとして2%添加し、脱水後に熱圧すると(MFC-Starch)、曲げヤング率は12.5GPaにまで低下するが、破壊ひずみが大きくなり、曲げ強度は320MPaに到達する。また、MFCとバイオベースの熱可塑性樹脂であるポリ乳酸の繊維(PLA)を水中で混抄し(MFCとPLAの重量比は7:3)、成膜後、積層熱圧すると、成型物(MFC-PLA)の曲げヤング率、曲げ強度が、それぞれ

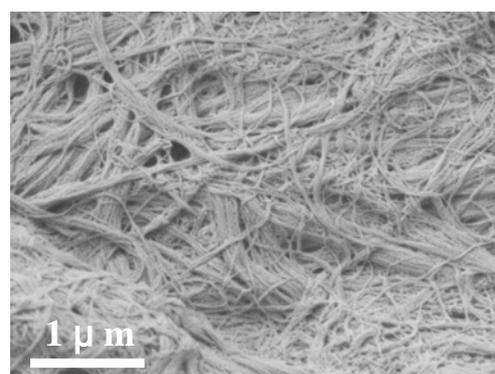


図9 ミクロフィブリル化セルロース(MFC) 高圧ホモジナイザーでパルプをナノファイバー化。

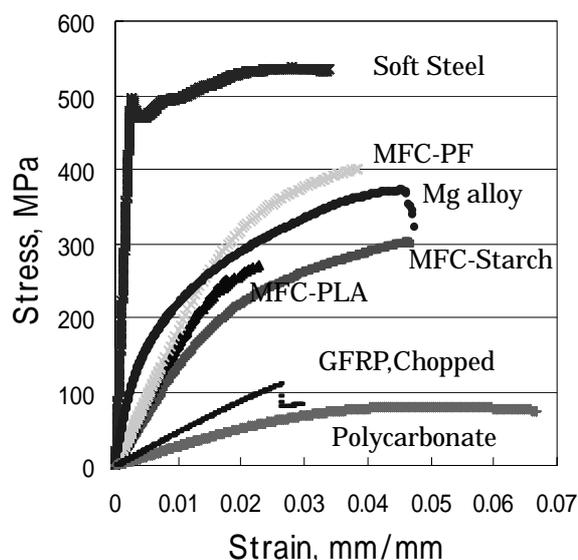


図10 ミクロフィブリル化セルロース成形材料と他材料の強度特性比較

17.5GPa および 270MPa に達する（図 10）。これは、ガラス短繊維で補強した繊維強化材料(GFRP)の倍以上の強度である。加えて本材料はリサイクルも容易である。

ポリ乳酸と MFC との複合化については、混練によるコンパウンド化についても検討を進

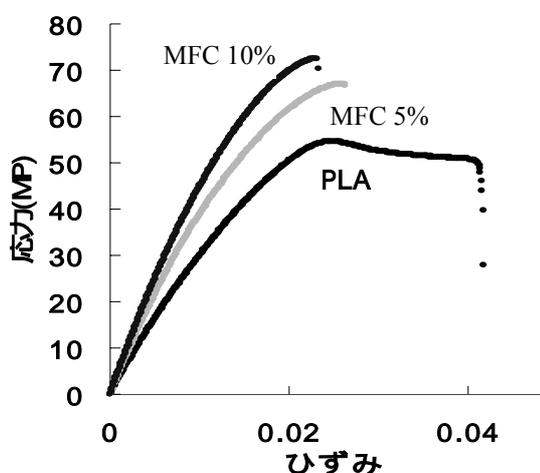


図 11 セルロースナノファイバー(MFC)によるポリ乳酸の補強

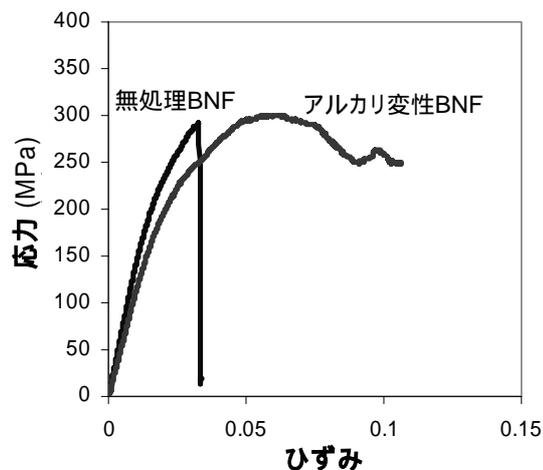


図 12 BNFのアルカリ変性によるPF樹脂複合成型体の強度特性向上

めている。ポリ乳酸を溶媒に溶かし、そこに MFC を添加してポリ乳酸中に均一分散後、混練して得たコンパウンドの熱圧シートでは、少量の MFC 添加で引張強度が約 1.4 倍にまで増大する（図 11、未発表）。また、軟化点以上での弾性率低下が大きく抑制されることも明らかになっている。

また、セルロースナノファイバーを高濃度のアルカリで処理（マーセル化）すると、MFC-PF 複合成型物の破壊ひずみが飛躍的に増大し、破壊までの仕事量が大きくなることを見いだした（図 12、未発表）。これはセルロースナノファイバーの表面修飾だけでなく、結晶および非晶構造を変化させることによってナノコンポジットの強度特性を大きく向上出来ることを世界で始めて示した研究であり、今後、セルロースナノファイバーの化学変成を考える上で重要な知見といえる。

矢野らは安価なバイオナノファイバー製造についても精力的に研究を進めている。現在、高圧ホモジナイザーを用いて解繊したセルロースナノファイバーが、食品添加剤やパルプ添加剤として製造、販売されている。高品質のナノファイバーではあるが、販売量が少ないこともあり、価格は乾燥重量で 5000 円/kg 前後であり、汎用の複合材料用繊維として利用することはできない。矢野は、リファイナーによりパルプの外層を傷つけておくと、吸水後、混練することでナノファイバーレベルまで解繊できることを見いだし（図 13、未発表）、その知見を基に、経済産業省の地域新生コンソーシアム研究開発による企業との共同研究において 2 軸混練機を用いた解繊処理技術について開発研究を行った。現時点で 400 円/kg 程度でパルプをナノファイバー化する技術の目途が立ちつつある。

さらに、セルロースナノコンポジットの実用化においては、製造コストとナノファイバーの品質のバランスを考えた原材料選びが重要である。そこで、木材パルプ以外に、例えば、ジャガイモのデンプン絞りカスや焼酎カスといった農産廃棄物や産業廃棄物からのナ

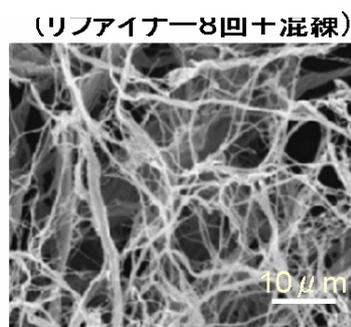


図 13 混練法によるナノファイバーと高圧ホモジナイザーによるナノファイバーの比較

ノファイバー製造について研究を行っている。

我が国の注目すべき研究としては、ナノファイバー製造に関する東京大学、磯貝教授らの研究グループの研究がある。これまでに、斉藤らは TEMPO 酸化により均一ナノファイバーの製造に成功している⁸⁵⁾。TEMPO 酸化処理したパルプは、乾燥後であっても水を加えミキサーで粉碎すると、極めて簡単に均一なナノファイバーが得られる。また、カルボキシル基の導入によりナノファイバー同士が反発し、凝集が防げる点も、ポリマー中での均一分散に関して重要な特性といえる。

文 献

1. Berglund, L. A. : Cellulose Based Nanocomposites (Ed.:M.A.D.Mohanty), CRC Press LLC, 2004.
2. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Dufresne, A.: Review of recent research into cellulosic whiskers: Their properties and their application in nanocomposite field. *Biomacromolecules* **6**, 612-626 (2005).
3. Boldizar, A., Klason, C., Kubat, J., Naslund, P., Saha, P.: Prehydrolyzed cellulose as reinforcing filler for thermoplastics. *Intern. J. Polymeric Mater.* **11**, 229-262 (1987).
4. Favier, V., Canova, G. R., Cavaille, J. Y., Chanzy, H., Dufresne, A., Gauthier, C.: Nanocomposite materials from latex and cellulose whiskers. *Polymers for Advanced Technologies* **6**, 351-355 (1995).
5. Favier, V., Chanzy, H., Cavaille, J. Y.: Polymer nanocomposites reinforced by cellulose whiskers. *Macromolecules* **28**, 6365-6367 (1995).
6. Helbert, W., Cavaille, J. Y., Dufresne, A.: Thermoplastic nanocomposites filled with wheat straw cellulose whiskers. part I: Processing and mechanical behavior. *Polymer Composites* **17** (4), 604-611 (1996).
7. Dufresne, A., Cavaille, J. Y., Helbert, W.: New nanocomposite materials: microcrystalline starch reinforced thermoplastic. *Macromolecules* **29** (23), 7624-7626 (1996).
8. Hajji, P., Cavaille, J. Y., Favier, V., Gauthier, C., Vigier, G.: Tensile behavior of nanocomposites from latex and cellulose whiskers. *Polymer Composites* **17**(4), 612-619 (1996).
9. Dufresne, A., Cavaille, J. Y., Helbert, W.: Thermoplastic nanocomposites filled with wheat straw cellulose whiskers. part II: Effect of processing and modeling. *Polymer Composites* **18** (2), 198-210 (1997).
10. Favier, V., Dendievel, R., Canova, G., Cavaille, J. Y., Gilormini, P.: Simulation and modeling of three-dimensional percolating structures: case of a latex matrix reinforced by a network of cellulose fibers. *Acta Materialia* **45** (4), 1557-1565 (1997).
11. Dufresne, A., Cavaille, J. Y., Vignon, M.R.: Mechanical behavior of sheets prepared from sugar beet cellulose microfibrils. *Journal of Applied Polymer Science* **64** (6), 1185-1194 (1997).
12. Favier, V., Canova, G. R., Shrivastava, S.C., Cavaille, J. Y.: Mechanical percolation in cellulose whisker nanocomposites. *Polymer Engineering and Science* **37** (10), 1732-1739 (1997).
13. Dufresne, A., Vignon, M. R.: Improvement of starch film performances using cellulose

- microfibrils. *Macromolecules* **31** (3) 2693-2696 (1998).
14. Dubief, D., Samain, E., Dufresne, A.: Polysaccharide microcrystals reinforced amorphous poly(beta-hydroxyoctanoate) nanocomposite materials. *Macromolecules* **32** (18), 5765-5771(1999).
 15. Dufresne, A., Kellerhals, M. B., Witholt, B.: Transcrystallization in Mcl-PHAs/cellulose whiskers composites. *Macromolecules* **32** (22), 7396-7401 (1999).
 16. Chazeau, L., Paillet, M., Cavaille, J. Y.: Plasticized PVC reinforced with cellulose whiskers. I. Linear viscoelastic behavior analyzed through the quasi-point defect theory. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* **37** (16), 2151–2164 (1999).
 17. Chazeau, L., Cavaille, J. Y., Canova, G., Dendievel, R., Bouterin, B. : Viscoelastic properties of plasticized PVC reinforced with cellulose whiskers. *Journal of Applied Polymer Science* **71** (11), 1797–1808 (1999).
 18. Chazeau, L., Cavaille, J. Y., Terech, P.: Mechanical behaviour above T_g of a plasticised PVC reinforced with cellulose whiskers; a SANS structural study. *Polymer* **40** (19), 5333–5344 (1999).
 19. Dinand, E., Chanzy, H., Vignon, M. R.: Suspensions of cellulose microfibrils from sugar beet pulp. *Food Hydrocolloids* **13** (3), 275–283 (1999).
 20. Angles, M. N., Dufresne, A.: Plasticized starch/tunicin whiskers nanocomposites. 1. Structural analysis. *Macromolecules* **33** (22), 8344-8353 (2000).
 21. Dufresne, A., Dupeyre, D., Vignon, M. R.: Cellulose microfibrils from potato tuber cell: Processing and characterization of starch-cellulose microfibril composites. *Journal of Applied Polymer Science* **76**, 2080-2092 (2000).
 22. Ruiz, M. M., Cavaille, J. Y., Dufresne, A., Gerard, J. F., Graillat, C.: Processing and characterization of new thermoset nanocomposites based on cellulose whiskers. *Compos. Int.* **7**(2), 117-131 (2000).
 23. Flandin, L., Bidan, G., Brechet, Y., Cavaille, J. Y.: New nanocomposite materials made of an insulating matrix and conducting fillers: Processing and properties. *Polymer Composites* **21** (2), 165-174 (2000).
 24. Dufresne, A.: Dynamicmechanical analysis of the interphase in bacterial polyester/cellulose whiskers natural composites. *Composite Interfaces* **7** (1), 53-67 (2000).
 25. Heux, L., Chauve, G., Bonini, C.: Nonflocculating and chiral-nematic self-ordering of cellulose microcrystals suspensions in nonpolar solvents. *Langmuir* **16**, 8210-8212 (2000).
 26. Brechet, Y., Cavaille, J. Y., Chabert, E., Chazeau, L., Dendievel, R., Flandin, L., Gauthier, C.: Polymer based nanocomposites: Effect of filler-filler and filler-matrix interactions. *Advanced Engineering Materials* **3** (8), 571-577 (2001).
 27. Angles, M. N., Dufresne, A.: Plasticized starch/tunicin whiskers nanocomposite materials. 2. Mechanical behavior. *Macromolecules* **34** (9), 2921-2931 (2001).
 28. Paillet, M., Dufresne, A.: Chitin whisker reinforced thermoplastic nanocomposites. *Macromolecules* **34** (19), 6527-6530 (2001).
 29. Ruiz, M.M., Cavaille, J. Y., Dufresne, A., Graillat, C., Gerard, J. F.: New waterborne epoxy coatings based on cellulose nanofillers. *Macromol. Symp.* **169**, 211-222 (2001).
 30. Eichhorn, S. J., Cavaille, C. A., Zafeiropoulos, N., Mwaikambo, L. Y., Ansell, M. P., Dufresne, A., Entwistle, K. M., Herrera-Franco, P. J., Escamilla, G. C., Groom, L., Huches, M., Hill, C., Rials, T. G., Wild, P. M.: Current international research into

- cellulosic fibres and composites. *Journal of Materials Science* **36**, 2107-2131 (2001).
31. Mathew, A. P., Dufresne, A.: Morphological investigation of nanocomposites from sorbitol plasticized starch and tunicin whiskers. *Biomacromolecules* **3** (3), 609-617 (2002).
 32. Morin, A., Dufresne, A.: Nanocomposites of chitin whiskers from riftia tubes and poly (caprolactone). *Macromolecules* **35**(6), 2190-2199 (2002).
 33. Dufresne, A.: Interfacial phenomena in nanocomposites based on poly saccharide nanocrystals. *Compos. Int.* **10** (4-5), 369-387 (2003).
 34. Nair, K. G., Dufresne, A.: Crab shell chitin whisker reinforced natural rubber nanocomposites. 1. Processing and swelling behavior. *Biomacromolecules* **4** (3), 657-665 (2003).
 35. Nair, K. G., Dufresne, A.: Crab shell chitin whisker reinforced natural rubber nanocomposites. 2. Mechanical behavior. *Biomacromolecules* **4** (3), 666-674 (2003).
 36. Nair, K. G., Dufresne, A.: Crab shell chitin whiskers reinforced natural rubber nanocomposites. 3. Effect of chemical modification of chitin whiskers. *Biomacromolecules* **4** (6), 1835-1842 (2003).
 37. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Sanchez, J. Y., Dufresne, A.: Cellulose nanocrystals reinforced poly(oxyethylene). *Polymer* **45** (12), 4149-4157 (2004).
 38. Samir, M. A. S. A., Mateos, A. M., Alloin, F., Sanchez, J. Y., Dufresne, A.: Plasticized nanocomposite polymer electrolytes based on poly(oxyethylene) and cellulose whiskers. *Electrochimica Acta* **49** (26) 4667-4677 (2004).
 39. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Sanchez, J. Y., Dufresne, A.: Cross-linked nanocomposite polymer electrolytes reinforced with cellulose whiskers. *Macromolecules* **37** (13), 4839-4844 (2004).
 40. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Sanchez, J. Y., El Kissi, N., Dufresne, A.: Preparation of cellulose whiskers reinforced nanocomposites from an organic medium suspension. *Macromolecules* **37** (4), 1386-1393 (2004).
 41. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Gorecki, W., Sanchez, J. Y., Dufresne, A.: Nanocomposite polymer electrolytes based on poly(oxyethylene) and cellulose nanocrystals. *J. Phys. Chem. B* **108** (30), 10845-10852 (2004).
 42. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Paillet, M., Dufresne, A.: Tangling effect in fibrillated cellulose reinforced nanocomposites. *Macromolecules* **37**, 4313-4316 (2004).
 43. Gousse, C., Chanzy, H., Cerrada, M. L., Fleury, E.: Surface sililation of cellulose microfibrils: preparation and rheological properties. *Polymer* **45**, 1569-1575 (2004).
 44. Samir, M. A. S. A., Chazeau, L., Alloin, F., Cavaille, J. Y., Dufresne, A., Sanchez, J. Y.: POE-based nanocomposite polymer electrolytes reinforced with cellulose whiskers. *Electrochimica Acta* **50** (19), 3897-3903 (2005).
 45. Malainine, M. E., Mahrouz, M., Dufresne, A.: Thermoplastic nanocomposites based on cellulose microfibrils from *Opuntia ficus-indica* parenchyma cell. *Composites Science and Technology* **65**, 1520-1526 (2005).
 46. Chauve, G., Heux, L., Arouini, R., Mazeau, K.: Cellulose poly (ethylene-co-vinyl acetate) nanocomposites studied molecular modeling and mechanical spectroscopy. *Biomacromolecules* **6**, 2025-2031 (2005).
 47. Ljungberg, N., Bortolussi, C., Boisson, C., Heux, L., Cavaille, J. Y.: New Nanocomposite materials reinforced with cellulose whiskers in atactic polypropylene:

- Effect of surface and dispersion characteristics. *Biomacromolecules* **6**, 2732-2739 (2005).
48. Samir, M. A. S. A., Alloin, F., Sanchez, J. Y., Dufresne, A.: Nanocomposite polymer electrolytes base on poly (oxyethylene) and cellulose whiskers. *Polimeros: Ciencia e Tecnologia* **15** (2), 109-113 (2005).
 49. Belgacem, M. N., Gandini, A.: Surface modification of cellulose fibers. *Artigo Tecnico Cientifico* **15** (2), 114-121 (2005).
 50. Ljungberg, N., Cavaille, J. Y., Heux, L.: Nanocomposites of isotactic polypropylene reinforced with rod-like cellulose whiskers. *Polymer* **47**, 6285-6292 (2006).
 51. Bordel, D., Putaux, J. L., Heux, L.: Orientation of native cellulose in an electric field. *Langmuir* **22**, 4899-4901(2006).
 52. de Rodriguez, N. L. G., Thielemants, W., Dufresne, A.: Sisal cellulose whiskers reinforced polyvinyl acetate nanocomposites. *Cellulose* **13**, 261-270 (2006).
 53. <http://www.woodwisdom.fi/?docId=12331>
 54. Mathew, A. P., Oksman, K., Sain, M.: Mechanical properties of biodegradable composites from poly lactic acid (PLA) and microcrystalline cellulose (MCC). *Journal of Applied Polymer Science* **97**, 2014-2025(2005).
 55. Kvien, I., Tanem, B. S., Kristiina Oksman, K.: Characterization of cellulose whiskers and their nanocomposites by atomic force and electron microscopy. *Biomacromolecules* **6**, 3160-3165(2005).
 56. Oksman, K., Mathew, A. P., Bondeson, D., Kvien, I.: Manufacturing process of cellulose whiskers/ polylactic acid nanocomposites. *Composites Science and Technology* (2006).
 57. Petersson, L., Oksman, K.: Biopolymer based nanocomposites: Comparing layered silicates and microcrystalline cellulose as nanoreinforcement. *Composites Science and Technology* **66**, 2187-2196 (2006).
 58. Borges, J. P., Godinho, M. H., Martins, A. F., Trindade, A. C., Belgacem, M. N.: Cellulose-based composite films. *Mechanics of Composite Materials* **37** (3), 257-264 (2001).
 59. Borges, J. P., Godinho, M. H., Belgacem, M. N., Martins, A. F.: New bio-composites based on short fibre reinforced hydroxypropylcellulose films. *Composite Interfaces* **3** (4), 233-241 (2001).
 60. Borges, J. P., Godinho, M. H., Martins, A. F.: Tensile properties of cellulose fiber reinforced hydroxypropylcellulose Films. *Polymer Composites* **25** (1), 102-110 (2004).
 61. Zimmermann, T., Pohler, E., Geiger, T.: Cellulose fibrils for polymer reinforcement. *Advanced Engineering Materials* **6**(9), 754-761 (2004).
 62. Zimmermann, T., Pohler, E., Schwaller, P.: Mechanical and morphological properties of cellulose fibril reinforced nanocomposites. *Advanced Engineering Materials* **7**(12), 1156-1161 (2005).
 63. Gindl, W., Keckes, J.: All-cellulose nanocomposite. *Polymer* **46**, 10221-10225 (2005).
 64. Klemm, D., Schumann, D., Kramer, F., Hebler, N., Hornung, M., Schmauder, H. P., Marsch, S.: Nanocelluloses as innovative polymers in research and application. *Adv. Polym. Sci.* **205**, 49-96 (2006).
 65. Chakraborty, A., Sain, M., Kortschot, M.: Cellulose microfibrils: A novel method of preparation using high shear refining and cryocrushing. *Holzforschung* **59**, 102-107

(2005).

66. Bhatnagar, A., Sain, M.: Processing of cellulose nanofiber-reinforced composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* **14**(12), 1259-1268 (2005).
67. Chakraborty, A., Sain, M., Kortschot, M.: Reinforcing potential of wood pulp-derived microfibrils in a PVA matrix. *Holzforschung* **60**, 53-58 (2006).
68. Grunert, M., Winter, W. T.: Nanocomposites of cellulose acetate butyrate reinforced with cellulose nanocrystals. *Journal of Polymers and the Environment* **10** (1/2), 27-30 (2002).
69. Schroers, M., Kokil, A., Weder, C.: Solid polymer electrolytes based on nanocomposites of ethylene oxide-epichlorohydrin copolymers and cellulose whiskers. *Journal of Applied Polymer Science* **93** (6), 2883-2888 (2004).
70. Pandey, J. K., Kumar, A. P., Misra, M., Mohanty, A. K., Drzal, L. T., Singh, R. P.: Recent advances in biodegradable nanocomposites. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* **5**, 497-526 (2005).
71. Orts, W. J., Shey, J., Imam, S. H., Glenn, G. M., Guttman, M. E., Revol, J. F.: Application of cellulose microfibrils in polymer nanocomposites. *Journal of Polymers and the Environment* **13** (4), 301-306 (2005).
72. Marcovich, N. E., Auad, M. L., Bellesi, N. E., Nutt, S. R., Arangures, M. I.: Cellulose micro/nanocrystals reinforced polyurethane. *J. Mater. Res.* **12** (4), 870-881 (2006).
73. Nakagaito, A. N., Yano, H., Kawai, S.: Proc. 6th Pacific Rim Bio-based Composites Symposium, Nov. 2002, Portland, pp.171-176.
74. Yano, H., Nakahara S., Nakagaito. A. N.: Proc. 6th Pacific Rim Bio-based Composites Symposium, Nov. 2002, Portland, pp.188-192.
75. Yano, H., Nakahara, S.: Bio-composites produced from plant microfiber bundles with a nanometer unit web-like network. *J. Materials Science* **39**, 1635-1638 (2004).
76. Nakagaito, A. N., Yano, H.: Novel high-strength biocomposites based on microfibrillated cellulose having nano-order-unit web-like network structure. *Applied Physics A* **80**, 155-159(2005).
77. Nakagaito, A. N., Yano, H.: 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).
78. Nakagaito, A. N., Iwamoto, S., Yano, H.: Bacterial cellulose: the ultimate nano-scalar cellulose morphology for the production of high-strength composites. *Applied Physics A* **80**, 93-97(2005).
79. Yano, H., Sugiyama, J., Nakagaito, A. N., Nogi, M., Matsuura, T., Hikita M., Handa, K.: Optically Transparent Composites Reinforced with Networks of Bacterial Nanofibers. *Advanced Materials* **17**, 153-155(2005).
80. Nogi, M., Handa, K., Nakagaito, A. N., Yano, H.: Optically transparent bionanofiber composites with low sensitivity to refractive index of the polymer matrix. *Applied Physics Letters* **87**, 1 (2005).
81. Nogi, M., Ifuku, S., Abe, K., Handa, K., Nakagaito, A. N., Yano, H.: Fiber-content dependency of the optical transparency and thermal expansion of bacterial nanofiber reinforced composites. *Applied Physics Letters* **88**, 133124 (2006).
82. Iwamoto, S., Nakagaito, A. N., Yano, H., Nogi, M.: Optically transparent composites reinforced with plant fiber-based nanofibers. *Appl. Phys. A* **81**, 1109-1112 (2005).

83. Nogi, M. Abe, K., Handa , K. , Nakatsubo , F., Ifuku , S., Yano, H.: Property enhancement of optically transparent bio-nanofiber compositesby acetylation. *Applied Physics Letters*, in press
84. Noishiki, Y., Nishiyama, Y., Wada, M., Kuga, S., Magoshi, J.: Mechanical properties of silk fibroin-microcrystalline cellulose composite films. *Journal of Applied Polymer Science* **86**, 3425-3429 (2002).
85. Saito, T., Nishiyama, Y., Putaux, J. Y., Vignon, M., Isogai, A.: Homogeneous suspensions of individualized microfibrils from TEMPO-catalyzed oxidation of native cellulose. *Biomacromolecules* **7** (6) 1687-1691 (2006).

7. 成果の活用

国家プロジェクトの提案

植物系ナノ材料開発研究の動向と日本の優位性

ヨーロッパ 現地調査による現状分析

複合材料の基礎研究ではフランスが世界トップ。研究体制は北欧がリード。「森林資源利用でのナノテクノロジー」として製紙産業主導ですでに複数のプロジェクトを立ち上げ(スウェーデン)。フィルム・シート用途が主体。ヨーロッパ全体でロードマップを策定し活発な議論を行うなど、ナノファイバー研究機運の急激な高まり。

北米

研究者数が急増。個別に活発な研究。植物繊維材料、界面制御技術に多くの蓄積。研究者コミュニティ形成に向けた国際シンポジウムが多く開催されるなど、北米でこの分野をリードしようとする動きがある。しかし、訪問調査(面談)では詳細を語らず、潜行して開発研究、特許出願を進めている可能性有り。

欧米での植物系ナノエレメント、材料の認識

紙・パルプ産業や林産物産業におけるナノテクノロジーとして着目。**ナノファイバー、ナノウイスキーは高価**。すぐに安価な他材料に置き換えられる。したがって、セルロースナノエレメントならではの高付加価値化が必須。クレーナノコンポジット(600円/kg)と競合。できれば少量添加で優れた効果。**ナノエレメントリッチの構造用途という概念はない**。

日本

新規ナノファイバー製造技術開発と構造用途の基礎研究で世界をリード。世界トップのセルロース科学に強み。化学産業と製紙産業の垂直連携で汎用構造用途バイオナノ繊維、バイオナノ繊維ポリマーコンポジットの安価な供給ならびに関連特許取得を目指す。

日本の優位性

**安価なナノファイバー製造法を発明し、構造用途に特化
関連技術の早急な権利化。今なら世界で勝てる！！**

植物のナノ収束繊維構造を活用した超高性能汎用複合材料 創製の基盤技術開発

【目的】

鋼鉄を凌駕する超高性能汎用複合材料(安くて軽くて高強度)を創製する。
ナノ植物繊維の安定した高生産性の製造方法を開発する。
ナノ植物繊維の化学修飾技術と分散・配向制御技術を確立し、多様なポリマーとのコンポジット化による超高性能を発現させる基盤技術を開発する。

ポテンシャルを有する企業等

京都大学、東京大学、近畿大学、神戸大学、神戸女子大学
(独)産業技術総合研究所、京都市産業技術研究所
民間企業 26社

プロジェクトの概要

植物のナノ収束繊維構造を効率良く高強度ナノ繊維として取り出し、植物由来の低環境負荷、安心・安全、リニューアブル、サステイナブルなナノ繊維を大量に安価に供給する技術を世界に先駆けて確立し、軽量・高強度の複合材料の実用化・普及を大幅に促進し、わが国の国際競争力強化に貢献する。

研究開発課題(目的達成のための技術課題)

ナノ植物繊維の安定した高生産性製造方法の開発

- ・ナノ繊維化工程における単離エネルギーを大幅に削減する。
- ・繊維の形状因子(径・収束数、長さ)制御及び評価技術を確立する。

ナノ植物繊維の化学修飾による表面性能制御技術の開発

- ・化学変性により繊維化エネルギーを低減する。
 - ・共有結合形成、表面吸着制御による相溶性の制御技術を確立する。
- ナノ植物繊維含有ポリマーコンポジットの超高性能発現の基盤技術確立
- ・ナノおよびネットワーク構造などの分散・配向制御技術を確立する。
 - ・分散性評価技術、界面評価技術を確立し、超高性能機能発現機構を究明する。

研究開発の背景・効果等

将来の化石原料枯渇問題や二酸化炭素削減などから、循環可能な資源への代替が求められている。

最近、京都大学において、効率の良い植物ナノ繊維化技術が開発され、鋼鉄のように強い繊維強化材料や透明ナノ材料等、構造材料としての優れた特徴が見出されている。

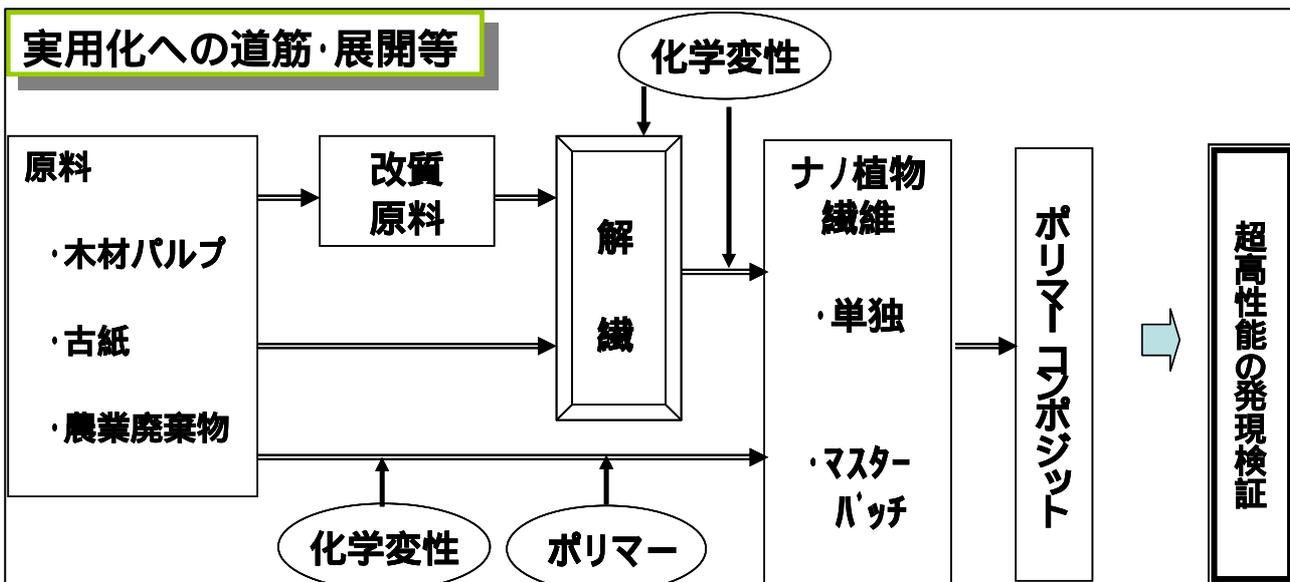
一般的に、ナノ繊維を利用したポリマーコンポジット材料は、軽量、高強度であり、例えば自動車用外板に利用することで軽量化、燃費向上が図れるなど、経済性と地球環境への貢献の両方のメリットがある。

しかしながら、ナノ繊維自身の生産性、供給性、コスト、さらには安全性などの課題がある。

植物繊維は多くの可能性を秘めている材料であるが、未だに、未知の部分が多く、研究開発の対象となっている。北米、欧州において国家的規模での研究開発活動が活発化している。

本プロジェクトでは、ナノ植物繊維の合理的製造方法を確立すると共に、ナノ繊維含有ポリマーコンポジットの基盤技術を確立することによって、軽量、超高強度で、汎用性の有る安全な持続型材料を求める国家のニーズに答える。

実用化への道筋・展開等



・原料依存性のない安定した高生産性製造方法の開発
(固形分: 単離エネルギー)

・ナノおよびネットワーク構造を活かした分散・配向制御技術の開発
(表面処理、in situ重合、含浸)

・ナノ植物繊維の化学修飾による表面性能制御技術の開発
分散・配向評価技術、界面評価技術

適用事例と応用分野

自動車材料

構造部材(垂直、水平部材)、機構部品、内装部品、伝導ベルトフロッキング、研磨材、ブレーキパッド、窓ガラスなど

航空機、船舶、列車の部材への応用展開が可能

電気・電子材料

筐体(OA、モバイル、携帯電話)、基板(電子ボード)、精密機構部品(光学ピックアップ)、フィルム(キャパシタ用セパレーター 太陽電池)、ロボット

ハウジング用構造材料

FRP(浴室・トイレ)、壁材、コンクリート補強材、風力発電(羽根)、海洋構造物

その他機能材料

HDD基板、インクジェット用塗料、低密度成形体、フィルター、分離膜、人工骨、保湿剤・増粘剤(化粧品)、防弾チョッキなど



技術ロードマップとの関連

ナノ : 革新的機能を発現するナノスケールの構造制御技術・物質、および実用化の開発

3R : 循環資源の用途拡大

部材 : 環境負荷低減部材(構造材)

自動車用部材(軽量車体、リサイクル車体)

建設用部材(建設部材)

ナノ計測

概算予算と研究期間:
70億円/5年間

(見積もり諸元)

	予算(億円)	概要
人件費	23	研究者30名
設備	40	製造28億、変性4億、複合8億
経費	7	

謝 辞

本調査の実施にあたり、現地調査・報告ならびに本報告書のとりまとめにおいて多大なるご協力をいただいた、株式会社豊田中央研究所、臼杵有光氏、京都大学生存圏研究所、杉山淳司氏、神戸大学工学部、西野孝氏、徳島大学大学院ソシオサイエンス研究部、高木均氏、兵庫県立大学大学院工学研究科、岸肇氏、京都市産業技術研究所工業技術センター、北川和男氏、近畿大学農学部、岡本忠氏、産業技術総合研究所バイオマス研究センター、遠藤貴士氏ならびに李承桓氏、委員会において我が国におけるBNF開発研究の今後について有益なご助言を賜った、トヨタ車体株式会社新規事業部、平田慎治氏、松下電工株式会社先行技術開発研究所、奥平有三氏、三菱化学株式会社科学技術戦略室、田中栄司氏に深く御礼申し上げます。また、この様な海外調査の機会を与えていただいた独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）に深く感謝いたします。