



京都バイオ産業技術フォーラム・京都バイオ産業創出支援プロジェクト連携事業

第4回バイオ材料プロジェクト

第144回京都大学生存圏シンポジウム

# 「百年前を振り返り、次の百年を目指す バイオ材料を次世代基幹産業の 柱のひとつに」

平成 22 年 3 月 15 日 (月)

京都大学宇治キャンパス 宇治おうばくホール

主 催： 財団法人京都高度技術研究所、京都大学生存圏研究所、京都市、  
京都バイオ産業技術フォーラム、京都バイオ産業創出支援プロジェクト

後 援： 経済産業省近畿経済産業局、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構、  
京都工芸繊維大学繊維科学センター、(財)バイオインダストリー協会、  
(財)化学技術戦略推進機構、京都府、京都商工会議所、(社)京都工業会、  
京都産学公連携機構、NPO 法人近畿バイオインダストリー振興会議、  
文部科学省知的クラスター創成事業京都環境ナノクラスター

第4回バイオ材料プロジェクト  
第144回京都大学生存圏シンポジウム

## 百年前を振り返り、次の百年を目指す バイオ材料を次世代基幹産業の柱のひとつに

<プログラム>

13:30-13:35 ご挨拶

経済産業省近畿経済産業局 地域経済部 部長 国吉 浩 氏

13:35-13:50

「はじめに」

財団法人京都高度技術研究所 専務理事 白須 正

13:50-14:50 講演1

「Nanocellulosic materials - inspiration, achievements and future developments  
ナノセルロース材料 - 着想、現状、将来的発展 -」

Wallenberg Wood Science Center, Royal Institute of Technology  
スウェーデン王立工科大学 ワレンバーグ木材科学センター、教授  
Prof. Lars Berglund 氏 (通訳：矢野 浩之 氏)

14:50-15:30 講演2

「バイオベースマテリアルの開発動向：最近の話題を中心に」

京都工芸繊維大学大学院 工芸科学研究科 生体分子工学部門 教授  
繊維科学センター長 木村 良晴 氏

15:30-15:45

休憩

15:45-17:40 NEDO 大学発事業創出実用化研究開発事業

「変性バイオナノファイバーの製造および複合化技術開発」成果発表

発表① 「プロジェクトの概要」

京都大学生存圏研究所 教授 矢野 浩之 氏

発表② 「バイオナノファイバー製造技術の開発」

日本製紙ケミカル株式会社 橋本 唯史 氏

発表③ 「バイオナノファイバー強化不飽和ポリエステル樹脂材料の開発」

星光 PMC 株式会社 佐藤 明弘 氏

発表④ 「バイオナノファイバー強化PP樹脂材料の開発」

王子製紙株式会社 鈴木 勝人 氏

発表⑤ 「バイオナノファイバー強化ゴム材料の開発」

住友ゴム工業株式会社 磯部 行夫 氏

発表⑥ 「バイオナノファイバー複合材料高機能化技術の開発」

京都市産業技術研究所 工業技術センター 研究部長 北川 和男 氏

発表⑦ 「バイオナノファイバー研究の今後」

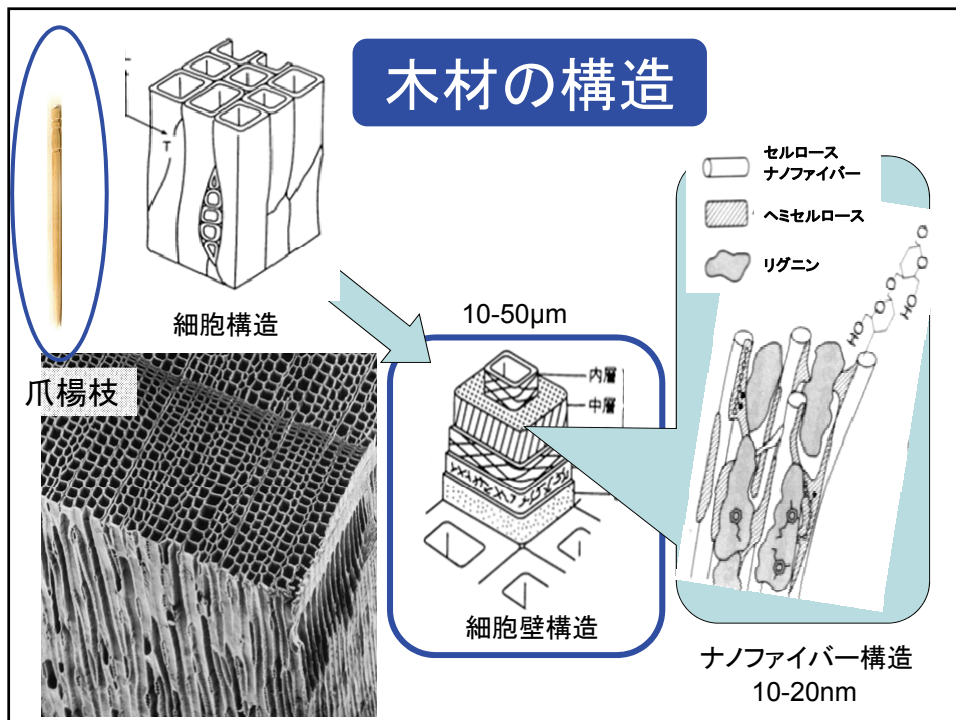
京都大学生存圏研究所 特任教授 中坪 文明 氏

17:40-17:45 閉会挨拶

17:50-19:30 交流会

H19-H21 NEDO大学発事業創出実用化研究開発事業  
変性バイオナノファイバーの製造および  
複合化技術開発

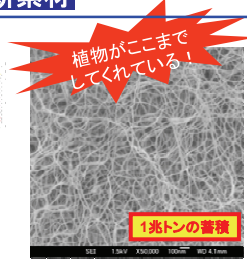
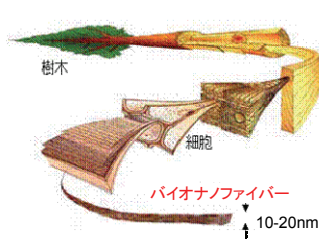
京都大学、京都市産業技術研究所  
産業技術総合研究所バイオマス研究センター  
王子製紙(株)、日本製紙(株)、日本製紙ケミカル(株)  
三菱化学(株)、DIC(株)、星光PMC(株)、住友ゴム工業(株)



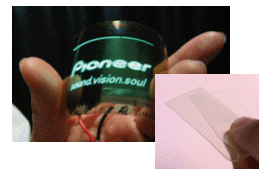
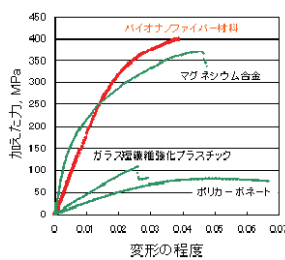
# 未来を拓くバイオナノファイバー

## ■バイオナノファイバー(BNF)：環境対応大型新素材

BNF(セルロースナノファイバー)はすべての植物の基本骨格物質で、一兆トンを越える蓄積がある、鋼鉄の1/5の軽さで、鋼鉄の5倍の強度、ガラスの1/50の低線熱膨張を有するスーパーナノファイバーです。



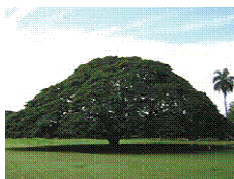
京都大学では、バイオナノファイバーを用いて、**鋼鉄並みの強度を有する環境対応型バイオ材料**の開発に成功しました。さらに、透明樹脂と複合し、**ガラス並に熱膨張が小さい、フレキシブル透明材料**を開発しました。また、並行してすべての植物資源から均一ナノファイバーを製造する技術開発を進めてきました。



# 様々なナノファイバー源

H19年度NEDO国際共同研究先導調査より

木材



稲ワラ



砂糖キビ



キャッサバ



砂糖ダイコン



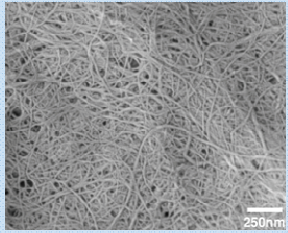
ジャガイモ



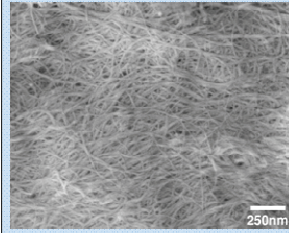
## 様々な植物資源からのナノファイバー

(H18,H19年度NEDO国際共同研究先導調査)

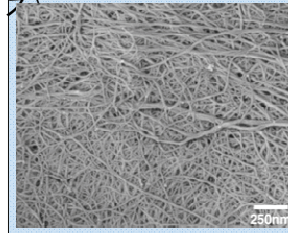
木材：ダグラスファー



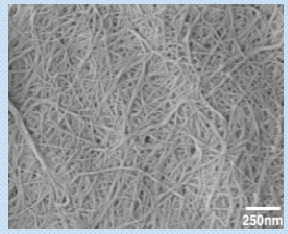
稲ワラ



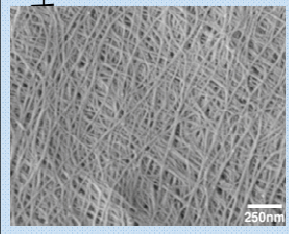
砂糖キビ絞りかす（バガ）



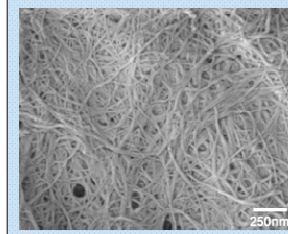
キャッサバ絞りかす



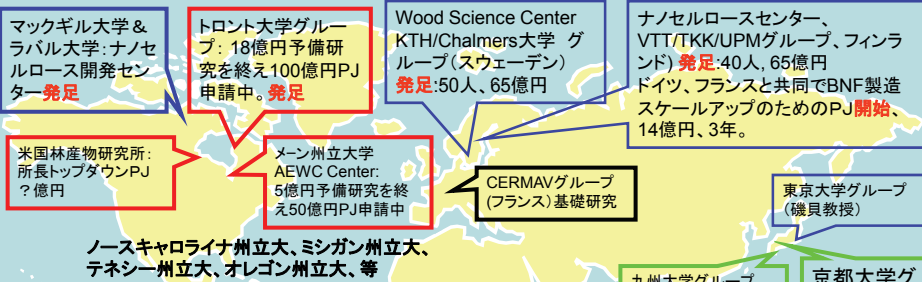
砂糖ダイコン絞りか



ジャガイモ絞りかす



## 激化する世界のバイオナノファイバー材料研究



### 世界の動向・日本の強み: 3-5年が勝負

- ・基礎研究はフランス、日本がリード。しかし、研究体制は北欧。それを北米がナノセルロース微結晶を中心に急迫。
- ・日本には製紙産業、化学産業に加え、垂直連携可能な自動車産業・IT産業・繊維産業がある。環境材料・技術としてこれらの産業基盤をBNF材料で補強できる。

セルロース発展型

植物系複合材料: WPC発展型

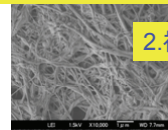
紙・パルプ発展型

## NEDO大学発事業創出プロジェクト H19-21

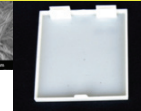
### 目的

バイオナノファイバー（BNF）に関する京都大学シーズ技術を用い、PP樹脂、ゴムおよび不飽和ポリエステル樹脂との複合化に優れた変性BNFの製造ならびにその複合化技術の実用化研究開発を行う。

### 1. 変性BNFの製造

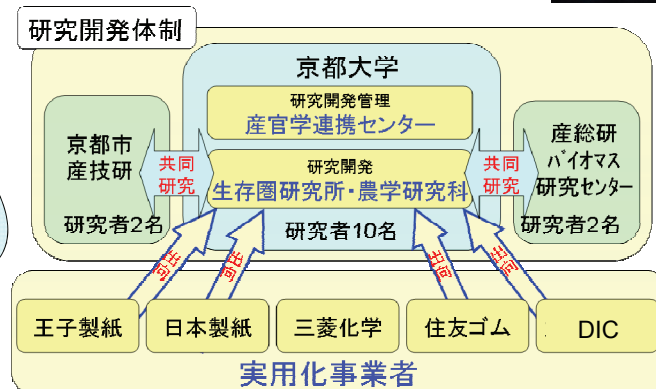


### 2. 複合化技術の開発



### 体制

産官学  
異業種  
垂直連携



## 開発する技術の新規性・優位性／ 実用化する製品の優位性

### 開発する技術の新規性・優位性

新規性: 変性BNF原料から複合体製造までのトータル制御

優位性: 低コストでの変性BNF製造が可能に(世界初)

セルロース(親水性)と極性が大きく異なるPP樹脂、ゴム、不飽和ポリエステル樹脂とのナノ複合化が実用化レベルで可能に(世界初)

### 実用化する製品の優位性

- 植物由来の環境対応材料
- 安価・軽量・高強度
- 低熱膨張
- フレキシブル性可能
- 意匠性(色・平滑性)に優れる

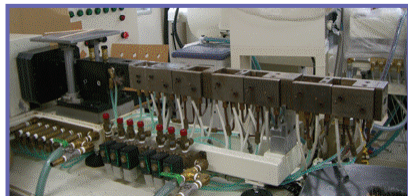
### 複合材料フィラーとしての特性比較

	BNF	GF	CF	セルロース 繊維
強度	○	○	○	×
軽量化	◎	○	◎	◎
密度	1.5	1.8	1.5	1.5
コスト	○	○	×	○
CO <sub>2</sub> 削減量	◎ 植物由来	×	×	◎
焼却適性	◎	×	△	◎
意匠性	◎	×(粗い)	△黒い	△(粗い)

## バイオナノファイバーの製造技術の開発

日本製紙ケミカル株式会社  
京都大学 生存圏研究所

○橋本 唯史 (京都大学出向)  
矢野 浩之、中坪 文明、  
Yeni Yanuar、Jilani Tahsin



二軸押出機  
(15mm径、  
L/D=45)

石油資源の枯渇や地球温暖化ガスの問題から、植物資源の利用検討が活発化している。近年、京都大学のシーズ技術として効率の良い植物のナノ繊維化技術が開発され、得られるBNFに構造材料としての優れた特徴が見出されている。

植物繊維のナノ解繊技術はその基幹技術として広範な応用が期待できることから、本プロジェクトでは均一ナノ解繊技術の開発を進めてきた。

その結果、京都大学が保有している二軸押出機を用い、既存の解繊技術をさらに発展させ、均一にナノ解繊された新規な変性BNF及びその効率的な製造方法を見出すことに成功した。

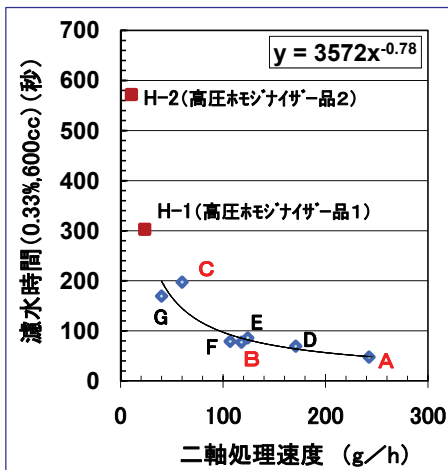
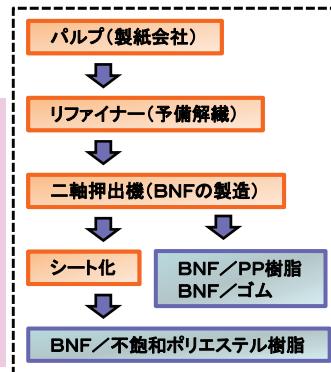


図1 BNFの生産性とろ水性の関係

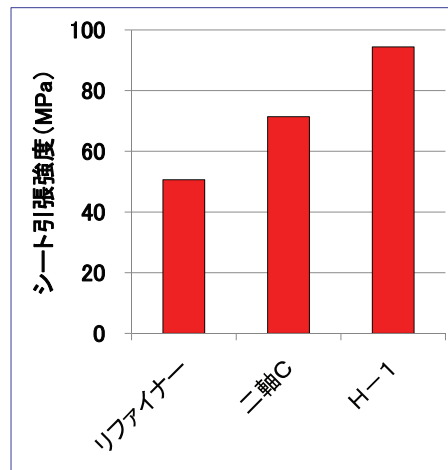


図2 各種BNFの紙力強度

二軸押出機のスクリー条件を改変して(A~G)、BNFを製造。原料流れを抑制し解繊負荷を高めれば、BNFスラリーのろ水時間が長くなり(図1)、紙力強度も向上する(図2)。しかし、それに伴いBNFの生産性は大きく低下。解繊負荷を上げてナノ化を進め、紙力強度を更に高めることは可能であるが、逆にBNFの生産性を悪化させることになる。

⇒ 高効率で、且つ、均一に解繊されたナノ化レベルの高いBNF製造技術の開発を検討。

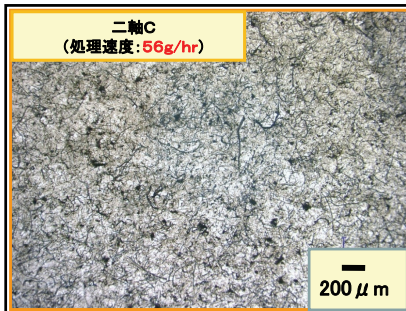


図3 BNF(二軸C)観察;100倍

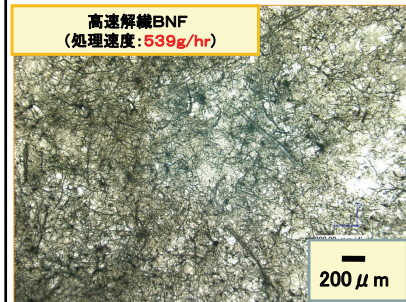


図4 BNF(高速解繊)観察;100倍

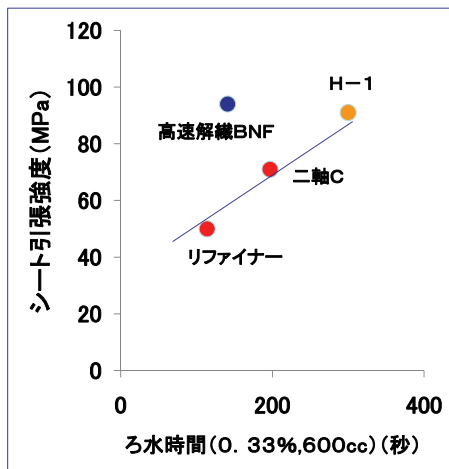


図5 各種BNFのろ水性と紙力強度の関係

二軸押出機を用い、高せん断速度下でパルプを処理することで、高い生産性を維持しつつ、良好なるろ水性と強い紙力強度を両立させる高せん断速度解繊BNF(以下:高速解繊BNFと呼称)の製造が可能になった。

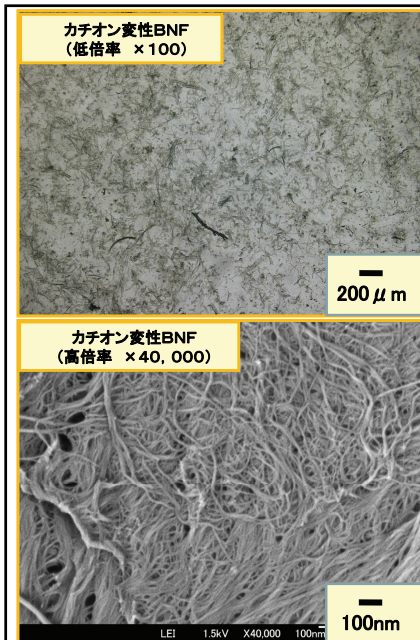


図6 カチオン変性BNF観察 (上段:100倍、下段:40,000倍)

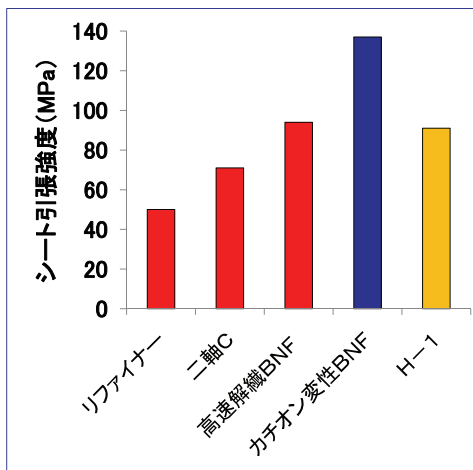


図7 各種BNFの紙力強度(2)

パルプを軽度にかチオン変性させることで、電氣的反発効果による易解繊性が付与される。その結果、二軸押出機を用いてカチオン変性パルプを高せん断速度下で解繊すると、高度にナノ化されたカチオン変性BNFが効率的に製造できることが判った。



# バイオナノファイバー強化 不飽和ポリエステル樹脂材料の開発

星光PMC株式会社  
京都大学 生存圏研究所  
(独)産業技術総合研究所

○佐藤 明弘(京都大学出向)  
矢野浩之、中坪 文明、  
Antonio Norio Nakagaito  
李 承桓、遠藤 貴士

## 1. 概要

再生可能資源の利用と高強度・軽量化を目指し、変性バイオナノファイバー(BNF)で強化した不飽和ポリエステル樹脂材料を開発した。BNF強化材料中のBNF比率は20-90wt%と任意に設定が可能である。

作製したBNF強化材料を各種手法(FE-SEM, FT-IR, DMA, AFM等)で分析した。BNF強化材料中でBNFは比較的均一に分布していることが分かった。

また、得られたBNF強化材料は密度が約 $1.3\text{g/cm}^3$ 、線熱膨張係数が $20\text{ppm/K}$ 、曲げ強度が最大で約 $300\text{MPa}$ と軽くて低熱膨張で高強度の材料であることが示された。

## 2. 緒言

不飽和ポリエステル樹脂は代表的な熱硬化性樹脂の1つで、ガラス繊維(GF)で強化された不飽和ポリエステル樹脂(FRP)は住宅機材、建設資材、自動車・車両、工業機材等の用途に幅広く使用されている。GFの代わりに再生可能資源であるBNFを使用することで次の点が期待される。

- ①化石資源の節減・CO2排出量の削減
- ②軽量・高強度化に伴う肉薄化、輸送コスト(エネルギー)の削減
- ③易廃棄性・易リサイクル性の付与

この様な背景からBNF強化不飽和ポリエステル樹脂材料の開発を実施した。

## 3. BNF強化材料の作製

機械的処理、あるいは化学処理と機械処理を組み合わせることで木材由来パルプから変性BNF得た後、得られたBNFの水懸濁液から脱水し、BNF乾燥シートを得た。(図1)

このシートに不飽和ポリエステル樹脂を含浸した後に加熱・プレスすることでBNF強化不飽和ポリエステル樹脂複合材料を得た。この複合材料を必要に応じて切削し、各種分析・試験に供した。

図1a

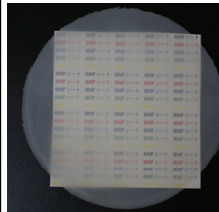


図1b

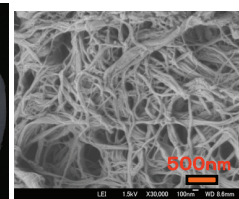


図1 変性BNFシート(円形)の概観(a)とFE-SEM写真(30,000倍。一例)(b)

## 4. BNF強化材料の外観

BNF製造に用いる原料の種類やナノ解繊の程度により得られた複合材料の色目や透明性は異なった。解繊度を上げるほど、得られた強化材料の透明性は向上した。(図2)

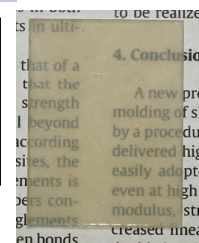


図2 BNF強化複合材料の外観(一例)

#### 4. BNF強化材料のモルフォロジー

BNF強化不飽和ポリエステル樹脂材料より試験片を作製し、表面、及び断面のAFM測定を行った。  
平面方向、厚さ方向ともに多量のBNFが均一に分布している様子が観察された。(図3)

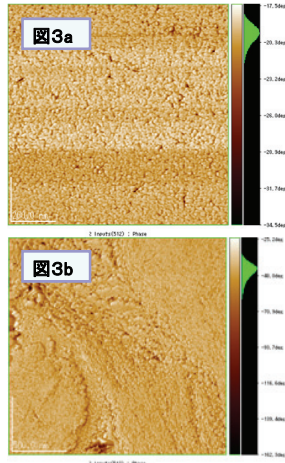


図3 BNF強化複合材料のAFM測定結果(a: 平面、b: 断面)

#### 5. BNF強化材料の組成分析

得られたBNF強化不飽和ポリエステル樹脂材料の厚さ方向の組成分布を求める為、マイクロームにより厚さ方向に40分割し、各切片をFT-IR分析に供した。

各切片のセルロース由来、不飽和ポリエステル樹脂由来のピークの比を比較したところ誤差範囲で略同等だったことから、厚さ方向で比較的組成の均一な複合材料が作製出来ていることが示唆された。(図4)

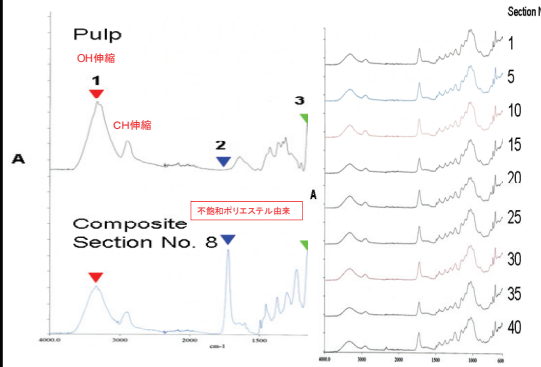


図4 BNF強化複合材料の切片のFT-IRチャート(一例)

#### 7. BNF強化材料の線熱膨張

BNF強化不飽和ポリエステル樹脂材料の線熱膨張係数(CTE)を測定し、各種材料と比較した。  
BNF強化不飽和ポリエステル樹脂複合材料の熱膨張係数は20-23ppm/Kと、アルミニウムと同レベルの低熱膨張係数を示した。(表1)

表1 各種材料の線熱膨張係数

Sample	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	CTE (ppm/K)
不飽和ポリエステル樹脂	1.1	69
高強解繊BNF強化樹脂	1.3	28
カチオン変性BNF強化樹脂	1.3	20
アルミニウム	2.8	24(*1)
鋼	7.8	12(*1)

(\*1)小野木重治著：高分子材料科学  
日本材料学会編 材料科学と材料工学より  
誠文堂新光社、東京、1973、pp330-331

#### 8. BNF強化材料の強度測定例(曲げ強度)

BNF強化不飽和ポリエステル樹脂材料より試験片を作成し、曲げ強度測定を行った。BNFで強化することにより複合材料の強度、弾性率は大幅に向上した。(図5)  
BNF比率が約90%の複合材料の曲げ強度は約300MPaとマグネシウム合金(Mg)に迫る高い強度特性を示した。(図6)

また、BNFの表面改質方法を工夫することで未変性の場合と比較し強度と破断伸びが向上することも確認している。

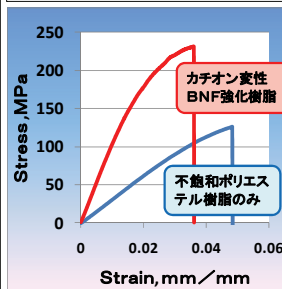


図5 BNF強化複合材料の曲げ強度 (BNF率: 約50%)

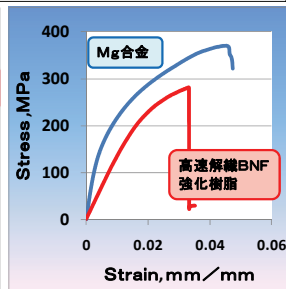


図6 BNF強化複合材料の曲げ強度 (BNF率: 約90%)

#### 9. 終わりに

種々の工夫により軽量、均一、高強度、低熱膨張係数のBNF強化不飽和ポリエステル樹脂材料を開発した。  
実用化にはまだ幾つか課題が残っており、BNF強化樹脂材料の実用化に向け、更に開発を進めていきたい。

# バイオナノファイバー強化 PP樹脂材料の開発

王子製紙株式会社(京都大学出向)○鈴木勝人  
京都大学 矢野浩之、中坪文明、奥村博昭、  
Yeni Yanuar、Jui Tahsin

## 1. 研究概要

高強度・軽量でなおかつ環境対応型であるPP樹脂材料の開発を目的としてバイオナノファイバー(BNF)で強化したPP樹脂材料の開発をした。  
二軸押出機を用いてBNFの作製、樹脂との混練を行い、BNF強化PP樹脂を作製した。得られたBNF強化樹脂材料の比重は約1.05、線膨張係数は45.6ppm/K、引張強度は80MPa、熱変形温度は142.1°C(負荷1.82MPa)であり、軽くて低熱膨張で高強度、なおかつ熱変形の少ない材料である事が示された。  
また、BNF強化PP樹脂材料に加えた新規添加剤を用いてBNF強化ポリエチレン樹脂材料を作製したところ、BNFを10%含有させることで母材樹脂の約2倍程度の弾性率、強度を示した。

## 2. BNF強化PP樹脂材料の作製方法

機械的処理により解繊したBNFを二軸押出機にてPP樹脂と溶融混練することでBNF強化PP樹脂を得た。得られた樹脂を射出成形機で成形して各種分析・試験に供した。

## 3. BNF強化PP樹脂材料の引張強度測定例

BNF強化複合材料中に新規添加剤を配合させる事で引張強度は約80MPaを達成。  
また、植物系繊維材料を40%配合したPP複合材料と比較してBNFは30%繊維含有率でも大幅に強度、弾性率が向上。(図1)

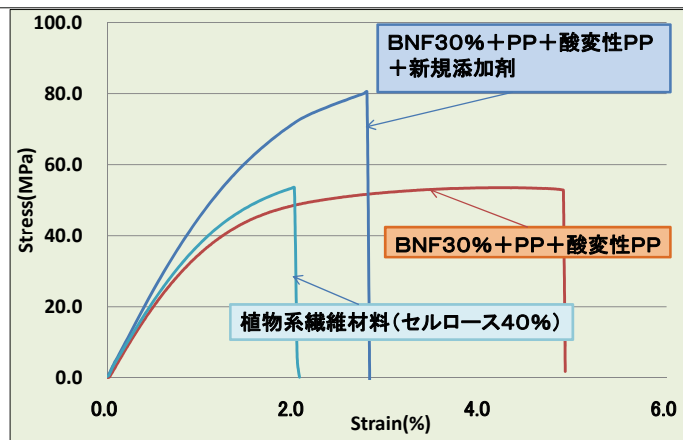


図1 BNF強化PP樹脂の引張強度

#### 4. BNF強化PP樹脂材料の線膨張係数

BNF強化PP樹脂を成形した材料の線膨張係数を測定した。BNFを配合する事で大幅に線膨張係数は低下した。(表1)

表1 BNF強化PP樹脂の線膨張係数

材料	比重	CTE(ppm/K)
ポリプロピレン	0.91	172.0
BNF30%	1.05	45.6

#### 5. BNF強化PP樹脂材料の熱変形温度

BNF強化PP樹脂の熱変形温度(負荷1.82MPa)を測定した。BNFおよび新規添加剤を加える事で荷重たわみ温度が向上。(68.5℃→142.1℃)

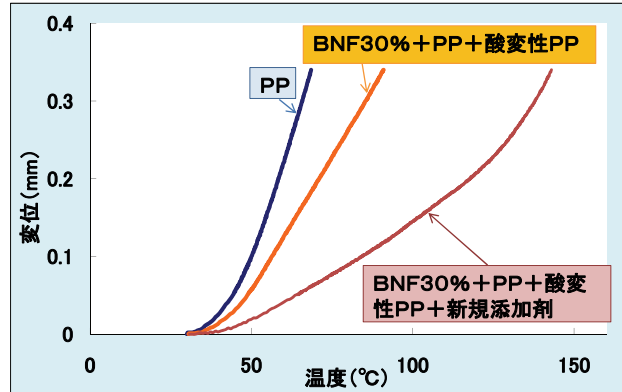


図2 BNF強化PP樹脂の熱変形温度

#### 6. BNF及び新規添加剤のポリエチレンへの応用

BNF含有率10%となるよう高密度ポリエチレン(HDPE)複合材料を作製(酸性PP、新規添加剤配合)。試験片の引張強度を測定した所、母材樹脂であるHDPEと比較して弾性率、強度共に約2倍となった。(表2、図3)

表2 BNF強化HDPEの引張強度

材料	HDPE(高密度ポリエチレン)	BNF10%+酸性PP+新規添加剤
弾性率(GPa)	1.5	3.3
強度(MPa)	22.7	39.5

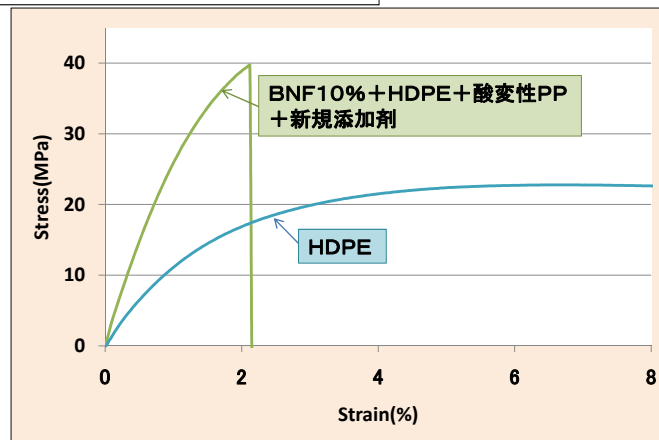


図3 BNF強化HDPEの引張強度

## バイオナノファイバー強化ゴム材料の開発

住友ゴム工業株式会社  
 京都大学 生存圏研究所  
 産業技術総合研究所 バイオマス研究センター

○磯部 行夫(京都大学出向), 市川 直哉  
 中谷 文史, 矢野 浩之  
 李 承桓, Thi thi NGE, 遠藤 貴士

- 目的: BNFをゴム用**軽量補強剤**として活用するための要素技術を開発すること
- 目標: 「**軽量／高剛性／強靱**」の特性のバランスがポイント

特性	軽量化特性	剛性	破壊特性
物性	比重	E*	破断伸び
数値目標	1.15 ≤	≥25MPa	≥200%

### ●開発経緯

検討内容	2007年	2008年	2009年	2010年
解繊方法検討	二軸押出処理条件			
BNF原料検討	パルプ種類(リグニンの有無など)			
導入量検討		増量評価	★目標達成	比重: 0.99 E*: 33MPa 破断伸び: 338%
界面強化検討			ケミカルによるBNF表面の疎水化	
プロセス検討			ゴムとの複合化の操作条件	
モデル検討				均一分散コンソジット調製

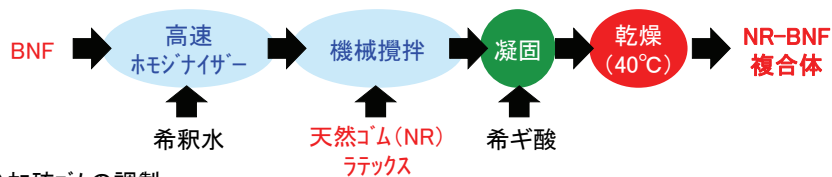
### トピック① ～調製方法～

- BNF強化ゴムの調製方法・・・BNFの凝集を抑制するためゴムラテックスとウェットブレンド

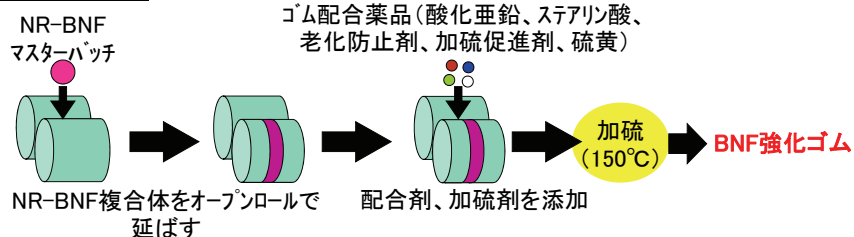
#### A) BNFの調製



#### B) 天然ゴムとの複合化(ウェットブレンド法)

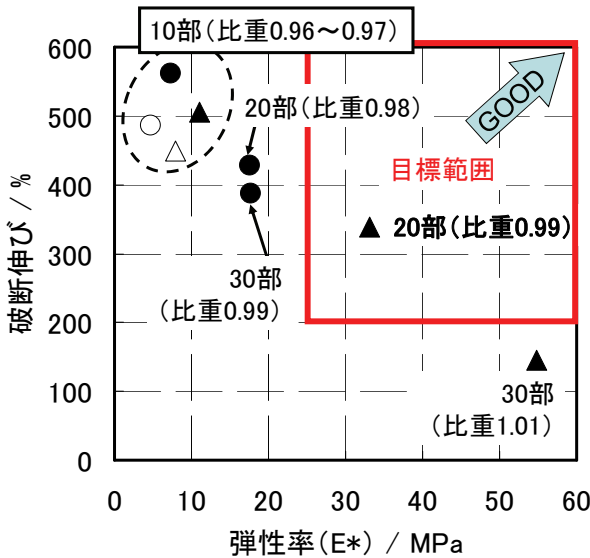


#### C) 加硫ゴムの調製



●解繊方法／BNF原料／BNF導入量による天然ゴム補強効果の違い

剛性(弾性率)と破壊特性(破断伸び)の関係



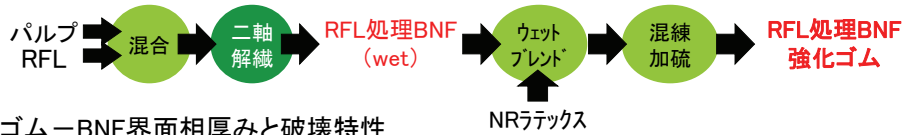
NBKP: 針葉樹漂白クラフトパルプ  
NUKP: 針葉樹未漂白クラフトパルプ

- NBKP強化ゴム(解繊BAD)
- NBKP強化ゴム(解繊GOOD)
- △NUKP強化ゴム(解繊BAD)
- ▲NUKP強化ゴム(解繊GOOD)

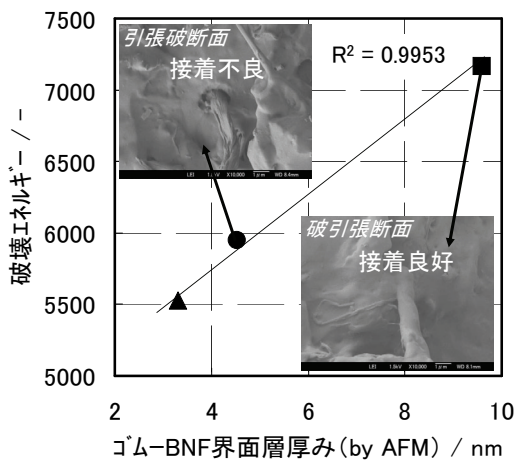
- ①リグニン含有原料 (NUKP)
- ②均一な解繊 (GOOD品)
- ③導入量制御 (20部)

目標物性をクリア

●ゴム-BNF界面の制御・・・フェノール樹脂系接着剤(RFL)によるBNF表面処理



ゴム-BNF界面相厚みと破壊特性



- NBKP強化天然ゴム
- ▲NUKP強化天然ゴム
- RFL処理NUKP強化天然ゴム

BNF表面のRFL処理

ゴム-BNF界面接着性向上

破壊エネルギー向上

# バイオナノファイバー複合材料 高機能化技術の開発

京都市産業技術研究所工業技術センター  
仙波 健, 伊藤彰浩, ○北川和男  
京大大学生存圏研究所 奥村博昭, 矢野浩之

1. バイオナノファイバー(BNF)と  
極性ポリマーの複合化

2. バイオナノファイバー(BNF)-PP の  
発泡による高機能化

# 1. バイオナノファイバー(BNF)と極性ポリマーの複合化

## Key point

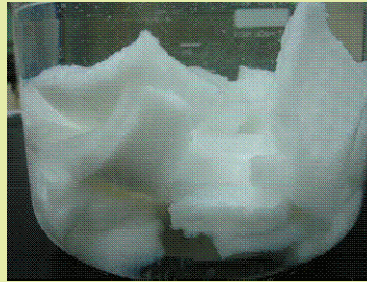
BNF表面を化学修飾することにより、繊維間の水素結合を阻害し、ポリマーマトリックス中に均一分散させる

### 繊維表面の化学修飾による変化

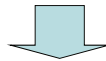
未処理BNF



化学修飾BNF



化学修飾により、水中で膨潤 → 表面状態が変化している

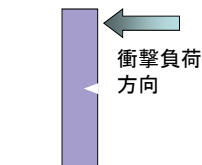


化学修飾BNFと極性ポリマーの複合材料化

## ●力学的特性評価

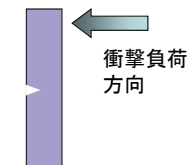
- ・ Izod衝撃試験
- ・ 引張試験

ノーマル試験



ノッチ感度評価

リバース試験



実成形品評価

### 結果

	Izod衝撃試験 (kJ/m <sup>2</sup> )		
	2.75J ノーマル	2.75J リバース	5.5J リバース
極性ポリマー	4.5	破壊せず(ハンマー停止)	破壊せず(ハンマー通過)
極性ポリマー/OMMT5wt%複合体	6.0	破壊せず(ハンマー停止)	86.7
極性ポリマー/BNF5wt%複合体	4.4	破壊せず(ハンマー停止)	破壊せず(ハンマー停止)

※OMMT:有機化モンモリロナイト

	引張試験	
	強度(MPa)	破断ひずみ(%)
極性ポリマー	41.9	266
極性ポリマー/OMMT5wt%複合体	46.2	251
極性ポリマー/BNF5wt%複合体	51.1	240

### Izod衝撃試験

- ・ 2.75J ノーマルでは、マトリックスである極性ポリマーと同等、OMMT複合体より劣る
- ・ 5.5J リバースでは、OMMT複合体を上回る。剛性と耐衝撃性の向上によりハンマーをブロック

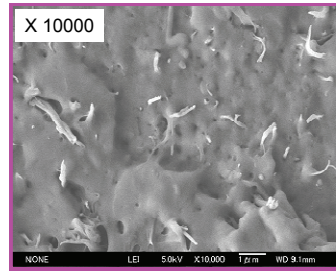
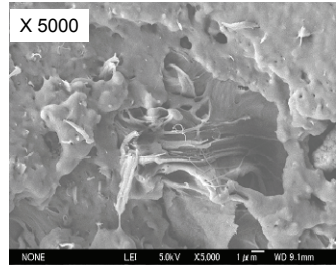
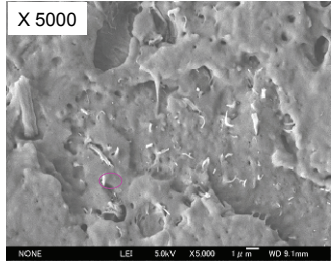
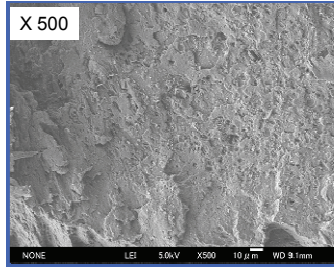
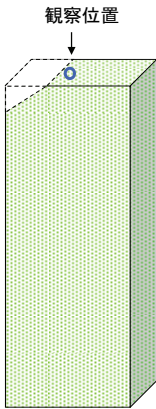
### 引張試験

- ・ 強度はOMMT複合体を上回る
- ・ 破断ひずみは、極性ポリマーと同等



### ●分散状態の観察 [Izod破断面 1]

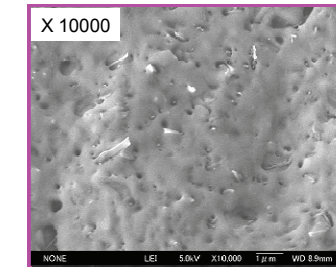
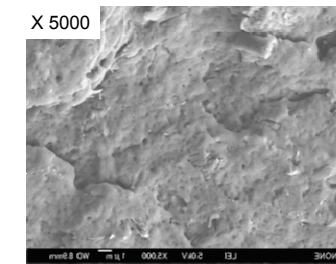
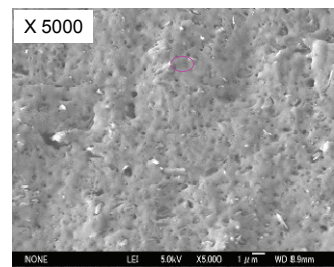
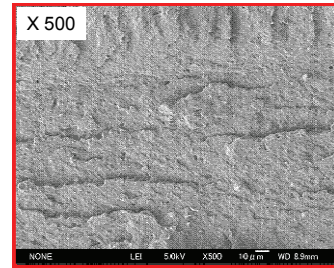
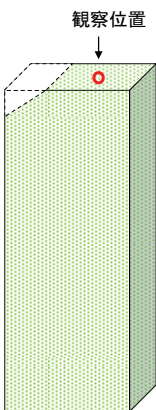
2.75J ノーマル  
極性ポリマー/BNF 5%(ノッチ近傍)



・ナノ繊維分散を確認

### ●分散状態の観察 [Izod破断面 2]

2.75J ノーマル  
極性ポリマー/BNF 5%(中央部)

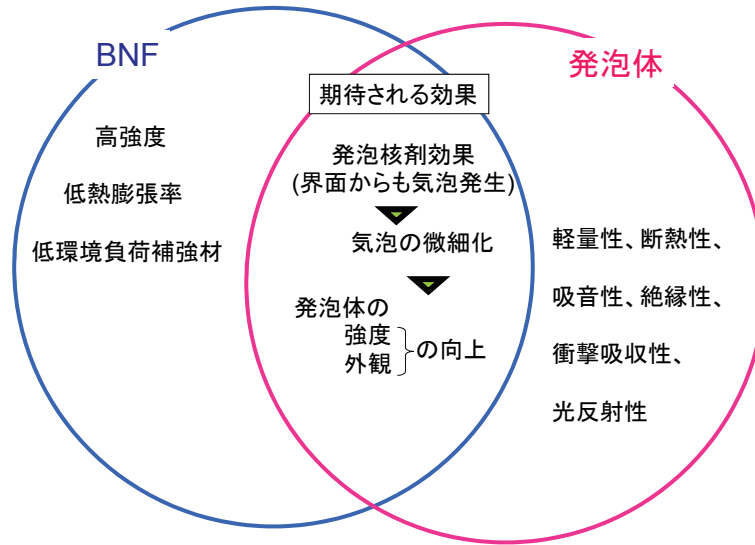


・ナノ繊維分散を確認

## 2. バイオナノファイバー(BNF)-PP の発泡による高機能化

### コンセプト

BNFコンパウンドと発泡体の性質を合わせもった材料の創製

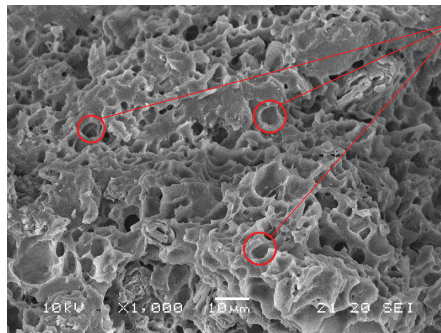


### ●BNF-PPの発泡成形

【目標】 ~1.5倍の低発泡倍率で比強度を落とさず軽量化 (比重0.8~0.9程度)

【評価】 ①気泡性状 (気泡径分布、気泡数密度、均一性)  
②比重  
③曲げ試験

#### BNF-PP発泡体の断面観察



気泡

・成形・発泡条件の検討、添加剤の利用、等により、PPより軽量で、弾性率・強度ともに高い発泡体を作製できた。

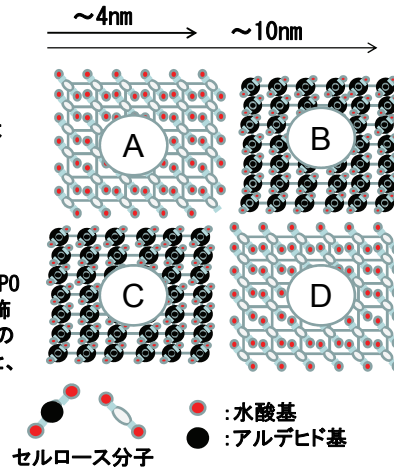
# バイオナノファイバー研究の今後

## —化学構造から見た場合—

京大大学生存圏研究所 中坪文明

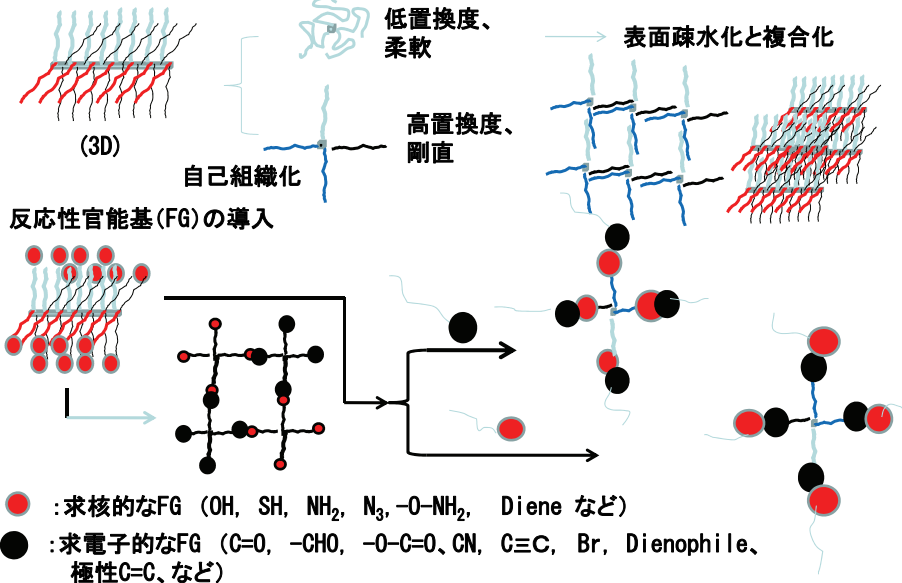
### 1) セルロースナノファイバ(CNF)の官能基と配列

木材から得られるセルロースナノファイバ(CNF)の幅はおおよそ10~20nmである。すなわち、幅が10nmの場合は、幅4nmのマイクロフィブリル(MF)が4個が束になっていると推測される(右図の正面図)。ここでは、A、Dの手前が非還元性末端であり、B、Cの手前は還元性末端である。すなわち、この場合は平行鎖が交互に集合し全体としては、逆平行鎖となっている。当然のことながら、4nmのCNF (TEMPO酸化の場合)は全て平行鎖となる。アルデヒド基を化学修飾のために利用する際には考慮すべき点である。一方、CNFの側面図から、CNF分子の表面の水酸基の立体配座を見ると、分子鎖に沿って、一級水酸基が1.03nmの間隔で配列し、セルロース分子間でも特定の距離に位置する。すなわち、嵩高な置換基を導入する際には考慮するべき点である。



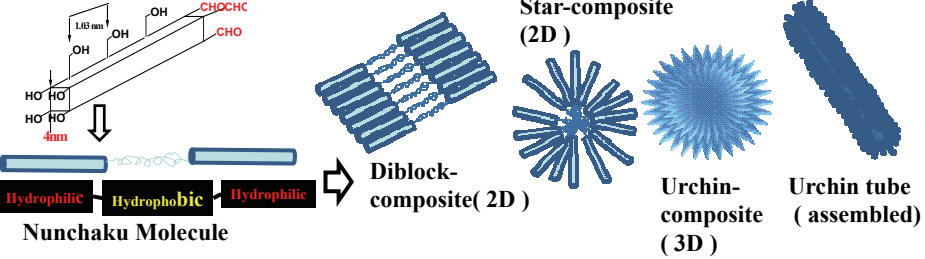
### 2) 繊維側面水酸基の反応

化学処理CNFの形状 (置換度、側鎖長(低分子化合物、重合)と剛直さ、疎水性)

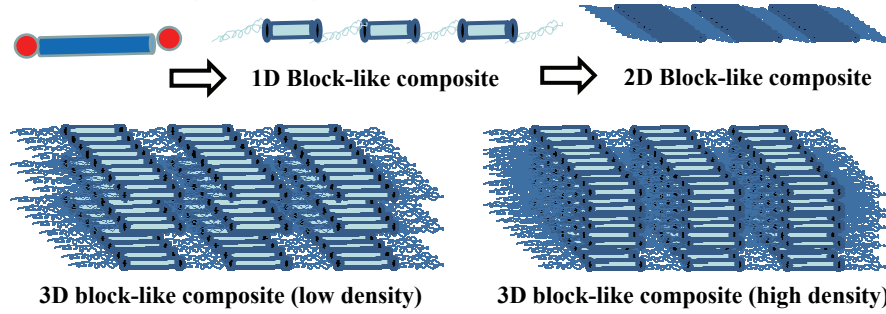


3) 繊維軸方向の官能基の反応

Monofunctional NF (幅4nm)



Difunctional NF (幅4nm以上)



4) まとめ—CNF材料開発—

①どのような反応が進行するか  
有機化学 (Reactions)

エステル化、エーテル化、  
アセタール化などによる官能基の導入



②どのような分子設計ができるか  
高分子化学 (Molecular designs)

Ligation 反応  
Mono-, bi-, tri-function官能基による  
Comb-, Block-, Dextrinized-,  
Star-shapedなどの分子設計



③ どのような物性が期待されるか  
材料科学 (Properties)

化学的、物理的安定性、  
機械的強度、高選択性、  
多機能性などの機能性材料