

# 地域森林資源から製造する セルロースナノファイバー

木質バイオマスのマテリアル利用開発事業  
地域材を活用したセルロースナノファイバーの利用技術開発



国立研究開発法人 森林研究・整備機構

## 森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute



## はじめに

研究ディレクター 木質バイオマス利用研究担当 眞柄謙吾

経済産業省は、2009年のリーマンショックにより落ち込んだ紙の需要を回復すべく、高度バイオマス産業構想を打ち出しました。この構想は、製紙産業と化学産業の連携による新たな地球環境対応型産業の創出を目的としており、セルロースナノファイバー（CNF）の製造・利用技術開発はその柱の1本として重要視されていました。このCNFは、日本再興戦略の林業の成長産業化の中に書き込まれ、日本全国産学官をあげての開発が始まりました。当初、CNFは重さが鉄の1/5で強度は5倍とのコピーが独り歩きし、世間に対してあたかもCNFだけで自動車が作れるような印象を与えましたが、それはナノサイズの繊維レベルでの重量と強度の話で、実際の構造材のサイズにしたときに、CNFだけで超軽量の車が造れるというものではありませんでした。しかし、CNFは合成樹脂にわずか数%分散させるだけでその引張強度を増加させたり、水の中で油滴エマルションの界面崩壊を阻止したり、また希薄スラリーでも高い粘度を示したりと、今までのセルロース材料では考えられないような特性を示すことが判ってきました。そのため、山村で国産材を原料に簡易的にCNFを製造できれば、中山間地域に新しい産業を創出し、また国産材の需要拡大にも結び付くのではとの構想の下、本CNF利用開発事業は始まりました。

当初は、製紙工場で大量生産されるCNFに価格競争の面で遠く及ばないとの意見もありましたが、CNFはごく微量の添加で効果を発揮するため、製品全体として心配するほどのコスト増にならないこと、および配合する製品により必要とされるCNFの特性が異なるため、大量生産の汎用CNFに加えて、特定の製品に特化したCNFも必要とされることが判り、それを中山間地域で中小規模に生産することも夢とは言えなくなってきました。もっとも、原料をパルプ化しさらにナノ化してCNFを生産する工程は立派な化学工業であることから、基盤となる工業の無い中山間地域にこれを導入するには、高いハードルを乗り越える必要があります。しかし、上述したように、CNFは大きな可能性を秘めており、それらハードルを乗り越えても製造する価値のある新素材です。今後、このCNF製造が核となって、中山間地域で、その地域の特色ある製品が生み出され、地方の活性化に繋がっていくことを、切に期待します。



図 茨城県つくば市森林総合研究所内セルロースナノファイバー製造技術実証施設

目次	01
1. 本事業の目的と成果について	02
2. 地域森林資源からのパルプ製造	04
3. 酵素・湿式粉碎によるナノ化プロセス	06
4. 製造コスト試算	08
5. CNF 利用木材用塗料の開発	10
6. CNF 含有ポリプロピレン繊維の開発	12
7. CNF を利用した地盤改良材への取り組み	14
8. 地域内エコシステム構築に向けて	16
用語集	17



図 CNF配合塗料（下塗り）を使用した木製ベンチ  
屋内用（左）、屋外用（右）

本冊子は、林野庁木材需要の創出・輸出力強化対策のうち「地域内エコシステム」構築事業のうち木座の材料利用技術開発事業の支援を受けて行った「地域材を活用したセルロースナノファイバーの用途技術開発」（平成30年度）、「地域材を活用したセルロースナノファイバーの利用技術開発」（令和元年度）の成果を主としています。



# 1

## 本事業の目的と成果について

研究代表者 森林総合研究所 森林資源化学研究領域 下川知子

林野庁補助事業により、中山間地域の身近な森林資源からセルロースナノファイバー(CNF)<sup>†</sup>を製造し、それを利用する技術を開発しました。大規模な工場を導入することが困難な中山間地域において、環境に配慮した方法で、中小規模にCNFを製造するため、ソーダ・アントラキノン蒸解法<sup>†</sup>による簡便なパルプ化と、有害化学物質を排出しない漂白法、酵素反応と湿式粉碎による省エネルギーなナノ化法による一貫製造プロセスを開発しました。このプロセスにより得られたCNFは、木材用水性塗料のアクリルエマルジョンや繊維用のポリプロピレンとの複合化が可能であり、美観を維持する木材用塗料や保温性の高い繊維素材としての用途を追求しました。また、地盤改良材への添加では、限定条件下での性能向上を確認しました。

### セルロースナノファイバーは環境配慮型の新素材

2030年の達成を目指して国連が定めた持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals(木)SDGs))や地球温暖化に対する数値目標を定めたパリ協定など、環境を保全するための具体的な取組み及びバイオエコノミーの達成が今までに強く求められています。木質バイオマスから取り出されるCNFは、これらの社会的ニーズに対応できる再生可能な天然資源です。CNFは、木材の主成分のひとつであるセルロース<sup>†</sup>の繊維構造を活かして、ナノ<sup>†</sup>サイズにまでほぐした新素材です。軽く強度があり、高い粘性や低熱膨張性といった特徴を持っています。合成樹脂との複合化による物性改善効果などが見いだされていることから、その利活用が期待されています。

### 地域森林資源の活用

本事業の目的は、スギをはじめとする地域材から製造したCNFの利活用を軸として、中山間地域にこれまでの原料供給の場だけでなく、新たに素材産業の場としての役割を持たせて地域経済の活性化と森林資源活用による持続的森林管理、すなわち地域内エコシステムの構築を図るものです。この目標に近づくため、製品化を視野に入れたCNFの製造と利用技術の開発を目指しました。

### 地域森林資源からCNFを製造する一貫製造プロセス

一貫製造プロセスの構築では、以下の3点に着目

しました。①中小規模でも対応可能であること、②既存の設備を利用して組み立てられること、③環境に優しい方法であること。これら3点の条件を満たす一貫製造プロセスには、もう一つ大きな利点があります。CNFは、使用する用途により求められる性質が少しずつ異なりますが、パルプからナノ化まで一貫して製造するこのプロセスでは、必要とされるCNFの性質に合わせて各工程の条件を調整し、一本のラインで様々な性質のCNFを製造できると同時に、最終的に得られるCNFの品質を管理することも可能です。

### 酵素・湿式粉碎で製造したCNFの利活用

地域の森林資源から製造されるCNFの出口用途として、木材用水性塗料及び繊維用PPとの複合化及び地盤改良材への添加を検討しました。

CNFを利用した木材用水性塗料は、下塗りに使用するシーラーとして特化した検討を行い、塗装された木製品の退色を抑えて美観を維持する耐候性に効果が認められました。この特徴を生かすため、外構用木製フェンスや木製外壁への試験塗装を実施しました。また、木製食器への適用も検討しました。

親水性のCNFと繊維用PPを複合化したコンパウンドから紡糸した繊維には、水蒸気吸着能が認められ、それにより保温性が向上しました。

地盤改良を目的とした薬液へのCNF適用性検討では、限定的な条件下ではありますが、試験体の強度増加が認められました。



図1 中山間地域でのCNF一貫製造



図2 地域材由来CNFの広報普及活動

身近な木材資源からCNFを製造し活用することの利点を広く知ってもらうため、様々な展示会などで広報を行いました。図は、G20新潟農林水産大臣会合での展示の様子です。



図3 身近な木製品への展開

CNF配合シーラーの美観維持効果を活用した木製の器です。環境に優しいCNFを利用して、木製品の需要を高めることに貢献します。



森林総合研究所 戸川英二、久保智史、下川知子、眞柄謙吾

CNFを製造するためには、まず木材からセルロースを取り出す必要があります。木材からセルロースを取り出すことをパルプ化（蒸解）、取り出したセルロースあるいは植物繊維物質のことをパルプといいます。木材をパルプ化する方法は、用いる装置や試薬の違いによって多種多様あります。また、得られるパルプの特徴や性質も、原料樹種やパルプ化の条件によって変わってきます。したがって、パルプの製造方法は、製造装置の設置環境や求めるCNFの特性に合わせて、適切に選ぶ必要があります。

### ソーダ・アントラキノン蒸解

中山間地域で、簡便にCNFの製造に適したパルプ/セルロースを取り出すために有効な方法に、ソーダ蒸解法があります。ソーダとは苛性ソーダ（水酸化ナトリウム・NaOH）のことです。ソーダ蒸解は、化学薬品を用いて行なう数あるパルプ化法の中でも、苛性ソーダだけを用いる簡便なパルプ化法です。また、ソーダ蒸解法は、イオウも併用する製紙工場と異なり、パルプ化中に強い臭気が発生しないため、その除去装置が不要で、大がかりな設備が必要ありません。ただし、苛性ソーダだけではパルプ化が進行しにくいので、アントラキノンという蒸解補助剤をほんの少量添加します。このパルプ化法をソーダ・アントラキノン（ソーダAQ）蒸解といいます。この簡便なソーダAQ蒸解法ならば、立地条件の不利な中山間地域であっても小規模で設置や操業が可能です。

### 過酢酸による漂白

CNFの原料となるセルロースを作るには、パルプから着色物質を取り除くプロセス、漂白が必要です。蒸解によって木材から取り出されたパルプは薄茶色をしています。これはパルプ中にまだセルロース以外の物質、リグニンが含まれているからです。リグニンはCNFを製造する際には邪魔になりますから漂白によって取り除きます。漂白は過酢酸という薬品を用いて行ないます。過酢酸は、液体の市販品を用いることが出来るため、製紙工場で使われている二酸化塩素などの他の漂白剤と比較してその取り扱いが容易です。

### パルプの性質

ソーダAQ蒸解では、蒸解する条件を変えることによって二種類のパルプを作り分けることができます。繊維の長いパルプと短いパルプです。パルプを溶剤に溶解させると、繊維の長いパルプは高い粘度の溶液、短いパルプは低い粘度の溶液にそれぞれなります。ソーダAQ蒸解は、とくに繊維の短いパルプを製造することに適しており、今回の事業で製造したソーダAQパルプも、市販の製紙用パルプと比べてパルプ粘度が低めとなっています。

### 広葉樹やタケへの適用

森林総合研究所ではこれまでに、国産のスギだけではなく、ヒノキ・ヒバ・サクラ・タケを用いてソーダ・アントラキノン蒸解、続く過酢酸漂白を行なって、パルプを調製しています。上記の方法・設備を用いることで、地域で搬出される樹種に合わせたパルプ化を行い、CNFを得ることができます。



国産スギチップ



ソーダ  
AQ蒸解



パルプ蒸解装置



固液  
分離



蒸解直後のスギチップ



脱水



脱水中の未漂白パルプ



解繊  
その1



パルプ離解機



解繊  
その2



スクリーン解繊機



水洗



未漂白パルプ



過酢酸  
漂白



パルプ漂白ミキサー



漂白中のパルプ懸濁液



脱水



遠心式パルプ脱水装置



水洗



漂白パルプ



ナノ化プロセスへ

図 森林総合研究所ベンチプラントにおける木材チップからパルプ製造の流れ



森林総合研究所 下川知子、野尻昌信、戸川英二、久保智史、  
黒田克史、田仲玲奈、菱川裕香子、眞柄謙吾

身近な木質系資源から製造したパルプを原料として、酵素・湿式粉碎により調製したCNFは、原料としたパルプの性質の影響を大きく受けることが明らかとなりました。パルプ粘度（重合度）が低めのスギソーダ・アントラキノン（ソーダAQ）パルプはナノ化しやすく、そこから調製された酵素・湿式CNFは分散しやすい特徴を示しました。

### 酵素による前処理

木材の軽くて丈夫な構造を支えるうえで、セルロースは大きな役割を果たしています。このセルロースを、ナノサイズの繊維へほぐしてCNFとして利用するためには、大きなエネルギーが必要です。このエネルギーを軽減するため、セルロースを分解する働きを持つ酵素を利用しました。自然界では、きのこをはじめとしたさまざまな微生物が、酵素の働きでセルロースを分解しています。セルロースを分解する酵素のうち、セルロースの構造をほぐす働きを持つエンドグルカナーゼという酵素で予めセルロースを処理し、ビーズミルで湿式粉碎することによってCNFを少ないエネルギーで調製できます。

### 酵素・湿式粉碎で製造されるCNFの性質

セルロースに化学処理を施すことによって調製したCNF（TEMPO酸化CNF<sup>+</sup>やリン酸エステル化CNF）は、それぞれのマイクロフィブリルが単分散し、透明な形状を示します。一方、機械粉碎によって調製したCNFは繊維の幅の分布が広くなり、部分的に太い構造を含むことから白濁した外観となります（図1）。酵素・湿式粉碎法も機械粉碎法の範疇に入るため、調製したCNFは白濁した粘性のあるスラリーとなります。また、枝分かれの多い構造が観察されています（図2）。

### 原料パルプの影響

身近な資源からセルロースをパルプとして取り出し、CNFを調製し、これを工業原料として利用していくためには、その品質を安定させる必要があります。例えば最終製品に使用するCNFの白さは、パルプの白色度（%ISO）の許容範囲を設定しておくことで、いつも同じ色調のCNFを得ることができます。また、得られるCNFの粘度は、その重合度に大きく影響されます。そのため、目的とするCNFの粘度や重合度、結晶化度等の性質の範囲を設定しておき、パルプ化やナノ化処理の段階で、各製造条件を調整して最終的に得られるCNFの品質を一定範囲に納めることが重要になります（表1）。

同じ条件でナノ化処理をした場合、パルプ粘度の低い、重合度の低いパルプから製造したCNFは低めの重合度でさらりとした粘度となる傾向があります。表2に下塗り用塗料（シーラー）へのCNFの適合性の検討結果を示しました。下塗り用塗料に使用する場合、粘性が高すぎても均一な製品を調製することが困難であり、ダマなどが生じやすいものも不適になります。また、あまりにも最終製品の粘度が高い場合も、施工の際に均一な塗布がし難いことから不適と判断しました。検討した中では、重合度が低く、配合のしやすいスギソーダAQパルプ由来のCNFがシーラーの製造に適していると評価されました。



図1 スギソーダAQパルプから酵素・湿式粉碎で製造したCNF

酵素・湿式粉碎により製造したスギ由来のCNF（1.6%の水懸濁状態）。白濁で、粘性を示します。

表1 酵素・湿式粉碎スギソーダAQパルプ由来CNFの諸性質

成分	セルロースを主成分とする微細繊維懸濁液（以下、スギ由来）
ヘミセルロース含量	～20%（CNF乾燥重量中） （値はパルプ製造条件により変動）
白色度	75%ISO以上
重合度	～300～ （銅エチレンジアミン法より概算） （パルプ製法、ナノ化条件による）
結晶化度	～50%～
重金属	ヒ素、鉛、カドミウム、総水銀等有害金属は非検出

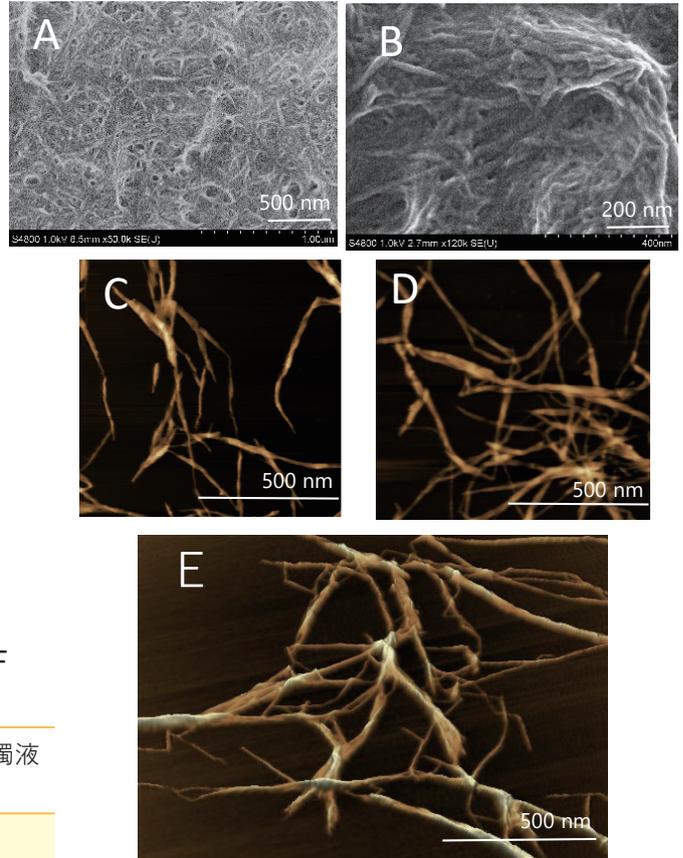


図2 各種パルプより製造されたCNFの電子顕微鏡及び原子間力顕微鏡観察図

酵素処理の後、機械解繊によって調製されたCNFは繊維幅の分布範囲が広く、15～20 nm程度の幅が多いですが、それよりも細い繊維や太い繊維も含まれます。

A、E：スギソーダAQパルプCNF、  
B：市販漂白クラフトパルプ由来CNF、  
C：ヒノキソーダAQパルプCNF、  
D：ヒバソーダAQパルプCNF

表2 CNFの下塗り用塗料への適合性

	原料パルプ粘度 (mPa·s)	CNF 重合度*	結晶化度 (%)	シーラーとしての利用 適正評価
広葉樹漂白クラフトパルプからのCNF	16	800	50	×
針葉樹漂白クラフトパルプからのCNF	13	550	42	○
スギソーダAQパルプからのCNF	5	360	53	◎

\*重合度は銅エチレンジアミン法による粘度からの換算値



# 4

## 製造コスト試算

森林総合研究所 野尻昌信、眞柄謙吾

当初（平成27年度）コスト試算を実施したときの製造プロセスから、酸素漂白と過酸化水素漂白を省いて過酢酸処理を強化するパルプ製造法とした場合でも、CNFの品質を保持できることが確認されました。また、ナノ化工程での超音波処理工程も削除できることが分かり、製造プロセス全体の見直しを行いました。これにより、製造機器の削減と製造スケジュールが改善され、年間330バッチ処理から510バッチ処理へ増加可能と試算されました。また、ピーズミルの稼働率を最大化するためにタンクとポンプを増設すると、年間990バッチ処理できることが明らかになりました。製造機器、薬剤費、エネルギー、製造量等を見直し、製造コストを試算した結果、平成27年度の¥12,106/kgから¥7,855/kg（35%減、機器増設無し）、さらに¥4,858/kg（60%減、機器増設）まで縮減可能であることが示されました。

### CNF製造プロセスの概略

試算に使用したCNF製造プロセスは、①ソーダ・アントラキノン蒸解、②固液分離、③洗浄、④過酢酸漂白、⑤固液分離、⑥洗浄、⑦濃度、pH調整、⑧酵素処理、⑨酵素失活、⑩ピーズミル処理、⑪加熱殺菌、⑫出荷としました（図）。また、黒液は濃縮し、燃焼処理することとして機器をリスト化しました。また、廃液の処理も含んだプロセスとして試算しました。

### コスト試算の前提条件

セコスト試算にあたり、次のように条件を設定しました。①チップ500kg（水分50%）/バッチ、②330日/年、24時間稼働、③製品濃度：2.4%、④土地代なし、⑤工場建屋建設、製造設備、ユーティリティ含む、⑥4直3交代、12人雇用、500万円/人・年、⑦製品製造量：Dry100kg/バッチ、⑧原価償却：10年、⑨金利：設備費の3%、⑩固定資産税：設備費の1.4%、⑪保守点検費：設備費の3%、⑫諸経費：設備費の5%、⑬その他経費：設備費を5%と設定しました。

### 製造プロセスの見直しによるコスト削減

当初（平成27年度）の製造プロセス試算に含まれていた酸素漂白、過酸化水素漂白、超音波処理の

3工程を省略することで、製造機器にかかわる設備費を14%削減することができました。また、プロセスが減ったことにより、製造時間が35%短縮され、年間製造量が約1.5倍に増加しました。これにより、製造コストは、当初の¥12,106/kgから¥7,855/kgとなり、35%減となりました（表）。また、製造プロセスのうち、酵素処理とピーズミル処理の二つの工程でタンクとポンプを共用していたため、ピーズミルの稼働率が抑制されており、この稼働率を上げることでコストを大きく削減できることが分かってきました。そこで、共用していた機器を追加で整備することとしました。これにより設備費用は5%上昇となりましたが、1日に3バッチ処理することが可能となり、タイムスケジュール解析から平成27年度の1日1バッチから3倍の生産力となることが明らかになりました。このスケジュール改善により、CNF製造コストは¥4,858/kgまで下がり、当初の試算から60%減を達成できる見通しとなりました。

### 参考資料

眞柄謙吾(2016)セルロースナノファイバー製造技術実証事業.生物資源, 10(3), 1-12.

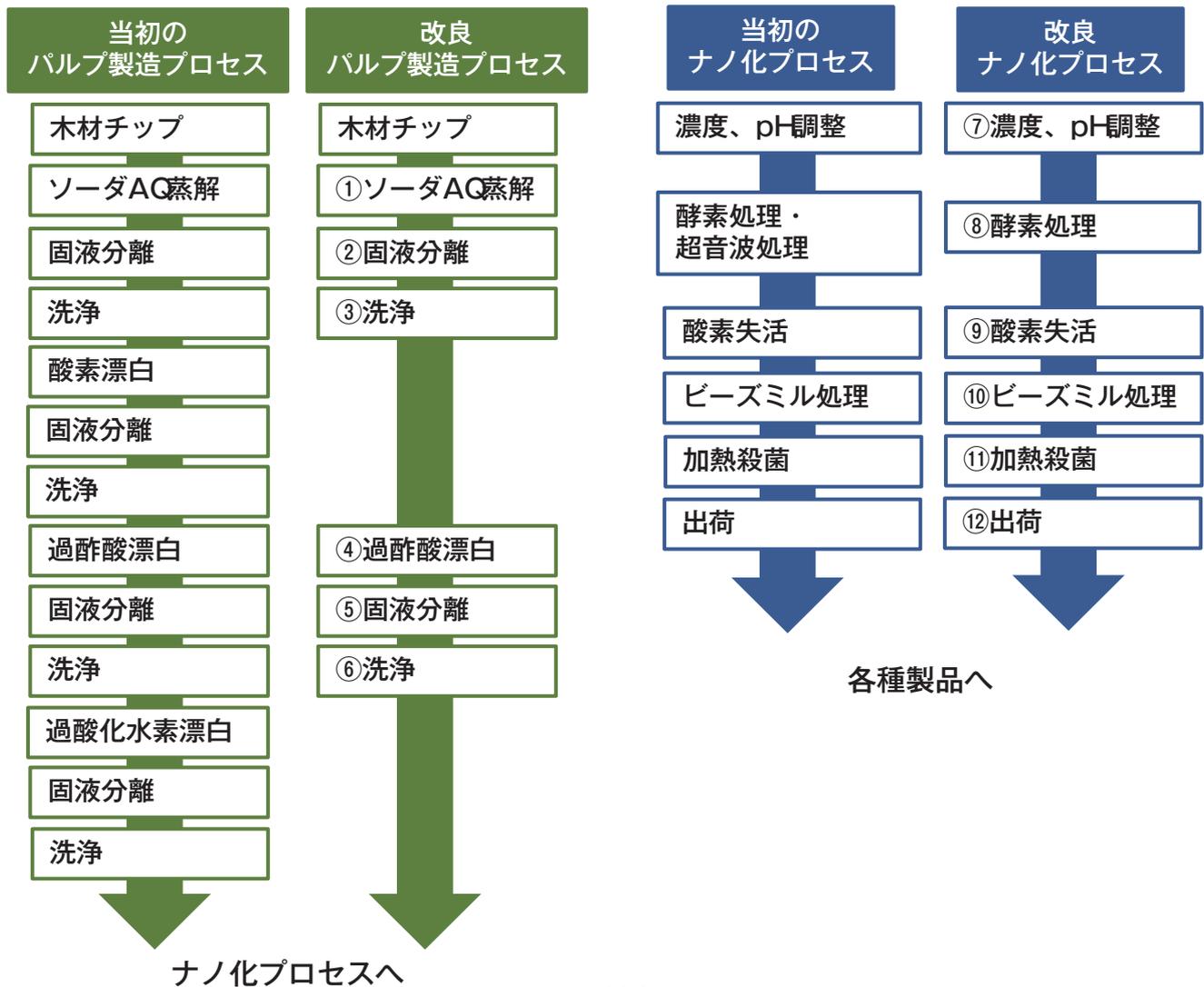


図 CNF製造フロー

表 コスト試算表

項目	単位	2017 試算結果	2019試算結果	
			機器増設なし	機器増設 増産
製造コスト	[¥/kg]	12,106	7,855	4,858
乾燥セルロースナノファイバー生産量 (日産)	[kg/d]	104.8	154.8	300.0
乾燥セルロースナノファイバー生産量 (年産)	[t/y]	35	51	99



# 5

## CNF利用木材用塗料の開発

森林総合研究所 石川敦子、下川知子、小林正彦、神林徹、眞柄謙吾  
玄々化学工業(株) 大木博成、何昕、伊藤拓美

公共建築物や商業施設、住宅等の様々な用途で、内外装ともに木材が使われる機会が増えています。こうした用途では、木材の美しさが長期間持続することが求められています。木材を塗装することで変色等を抑制できますが、ある程度の年月が経つと劣化するため、さらに美しさを長持ちさせることが望まれています。CNF配合塗料を上塗り又は下塗りに用いた塗装板で促進耐候性試験を行ったところ、特に下塗りに用いることで変色が抑制され、木製品の美観維持に貢献できることが明らかになりました。

### CNF配合塗料の性質

木材塗装には一般的に、下塗り、中塗り、上塗りの3工程があります。このうち特に重要なのは、木材に浸透して基礎を固める下塗りと、塗装表面の強度や美観を高める上塗りです。そこで、CNFを下塗りや上塗り用の塗料に配合することで、塗装性能がどのように変化するのか調べました(図1)。

CNF配合塗料を上塗り又は下塗りに用いてスギ材を塗装し、人工太陽光と人工降雨を照射する促進耐候性試験を行ったところ、CNF配合塗料を用いたスギ材は、紫外線や雨水の影響を受けても表面欠陥の発生が少なくなること、特に下塗りに用いた場合には、表面の変色が大幅に抑制されることがわかりました(図2)。下塗り塗料では、CNFを配合すると、塗装後に塗料が乾く時、木材表面に微細な網目構造を形成し、木材と上塗り塗料の界面を安定化することで塗膜欠陥と変色が抑制されると推察されます。CNFを配合することで塗料の性能が向上するメカニズムについては、今後さらに研究を進める予定です。

### 実用性の検討

開発した塗料の実用性を検討するため、木製のベンチやフェンス等に塗装し、塗装作業性を評価するとともに、経年変化やメンテナンス等について研究を進めています(図3、4)。

木材の塗装は、変色や塗膜割れ等の欠陥が目立つようになると塗り替えますが、この塗り替え時期

は、木材や塗料の種類、設置条件等によって大きく異なります。現状では、屋外用途で木目を見せる半透明の塗装の場合(ペンキのように木目を覆い隠さない場合)、長くても3~5年程度で塗り替えられるケースが多くなっています。

一方、開発したCNF配合塗料が何年で塗り替え時期になるかは、今後さらに試験時間を延長して検討しますが、図2に示した変色抑制効果が今後も持続するようであれば、通常の倍以上長持ちする可能性があります。ただ、試験時間を延長した場合には、ある時期から急に塗膜割れが目立つようになることもあるため、その点を見極める必要があります。

### 身近な木製品への展開

CNF配合塗料は、身近な木製品にも利用可能です。図5はCNF配合塗料を木製の器の下塗りに用いることで変色が抑制された例です。このようにして、木製品の美観維持効果を高めることで、木製品およびCNF配合塗料の需要を高めることが期待できます。

### 参考資料

大木博成(他)(2017)特開2018-150429  
石川敦子(他)(2019)酵素・湿式粉碎処理により製造されたセルロースナノファイバーを配合した塗料の性質. 木材保存, 45(2), 68-76

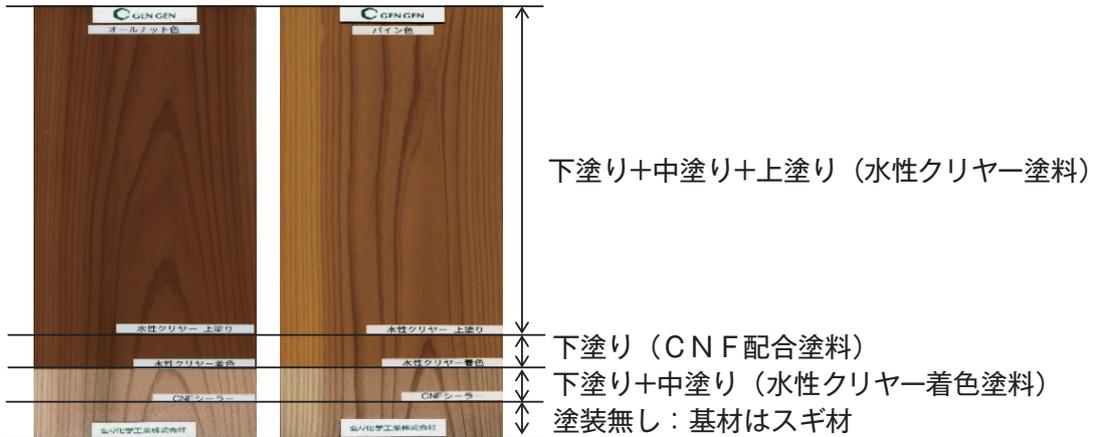


図1 塗装見本 (左:ウォールナット色、右:パイン色)

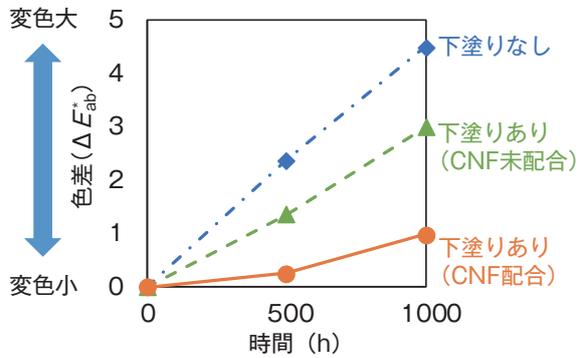


図2 促進耐候性試験の結果

下塗り用塗料CNFを配合すると変色が抑制されることがわかりました。(石川他2019より修正して引用)



図3 CNF配合塗料を下塗りに用いて塗装した室内用(左)及び屋外用(右)ベンチ



図4 CNF配合塗料を下塗りに用いて工場塗装した木材で作製したフェンス(高知県嶺北森林管理署)

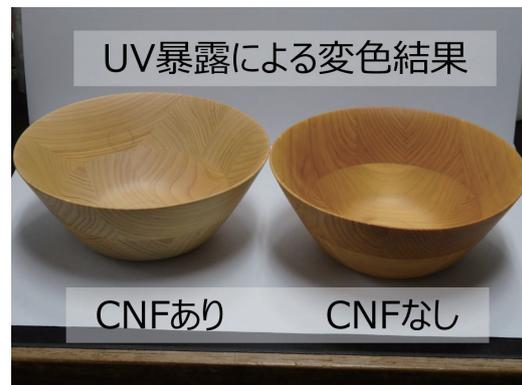


図5 CNF配合塗料を下塗りに用いた場合(左)と用いない場合(右)の紫外線照射による変色の違い



株式会社Zetta 谷岡明彦  
 トクラス株式会社 大峠慎二  
 森林総合研究所 小林正彦、久保智史、下川知子

樹脂にCNFを混練することで、その性質を変化させることが可能です。強度向上に向けてCNFを利用する取り組みは多いですが、水に対する性質を変化させることも可能です。疎水性の樹脂（ポリプロピレン、PP）に親水性のCNFを混合したコンパウンドから熔融紡糸<sup>+</sup>によって繊維（CNF/PP繊維）を製造したところ、水蒸気吸着能の向上が確認されました。このCNF/PP繊維は、目付当たりの保温性に優れていることが示されました。今後、安定的に市場へ展開するために、CNF/PP繊維を製造できる条件について検討を行いました。

### CNF/PPコンパウンドの製造法とその改良

CNFは、水が同時に存在するスラリー状で安定して分散状態を保っていますが、これを乾燥させると、水素結合によるCNFの強い凝集体が出来上がってしまいます。そのため、樹脂との混合には、分散状態を維持しつつ複合化する特殊な混練手法をとる必要があります。従来プロセスでは、不織布用PPが粉末樹脂であることを活かしてCNFスラリーと粉末樹脂をビーズミルで攪拌混合し、プラネタリーミキサーにて脱水と熔融混合を行っていました。更なる生産性向上をめざした改良プロセスとして、高速攪拌ミキサーにより攪拌混合と脱水を同時に行い、続いて、高速回転の2軸押出機で熔融混合を行うことを検討しました（図1）。その結果、改良型コンパウンドは、従来プロセスと同等以上の機械特性を得ることができました。

改良プロセスは、一般的なコンパウンドメーカーが有する既存設備を組み合わせた方法で実施できるため、投資リスクが少なく、事業参入しやすいコンパウンドプロセスです。

### CNF/PP繊維の紡糸

PPの繊維用コンパウンドからナノファイバーを紡糸する方法の一つに、Zs-melt法（ゼターメルト法）があります。この方法は、ナノファイバーを安全かつ大量に紡糸するために開発された方法で、高

速高圧エアアを使用した熔融紡糸を行います。この方法を用いて繊維用のポリプロピレンから大量のナノファイバーを紡糸する方法はほぼ確立されていますが、セルロース起源のCNFを含有させた場合にはCNFの耐熱性が低いため、温度条件の再設定、ノズルヘッドの改良などが必要となりました。従前の方法では押し出し機内の温度が高く、コンパウンド中のCNFに熱劣化を生じましたが、紡糸方法を改良し、繊維径約0.8~4mm程度のCNF/PP繊維を紡糸することが可能となりました（図2）。

### CNF/PP繊維の性質

1%のCNFを含むPPコンパウンドから紡糸されたCNF/PP繊維の水蒸気吸着量を、CNFを含まないPP繊維と比較しました（図3）。水蒸気が吸着する比表面積を、窒素が吸着する比表面積で除した値には3.9倍の差があり、CNFを混合することで、PP繊維に吸湿性を付与できました。水蒸気を吸着する性質の付与は、布団の綿などへの展開を可能にします。また、生地の高さを単位面積あたりで示す、目付（g/m<sup>2</sup>）という基準でその保温性を評価しました（図4）。CNF/PP繊維は、CNFが含まれていないPP繊維やウールよりも目付当たりの保温性に効果が認められたので、防寒用途への展開なども可能となります。

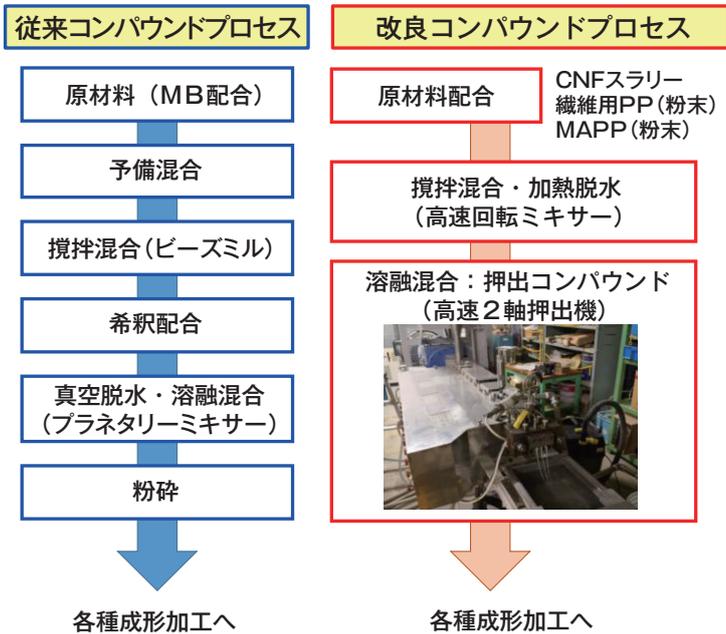


図1 CNF/PPコンパウンドプロセス図  
 工程数の少ないシンプルなコンパウンドプロセスに改良しました。

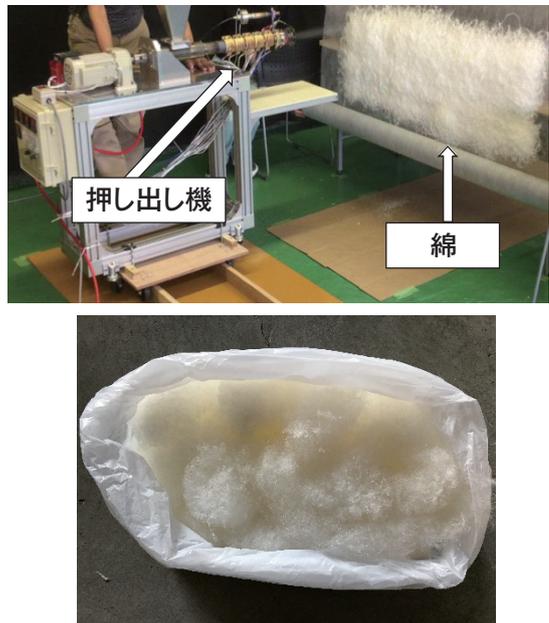


図2 Zs-melt法(溶融紡糸)によるCNF/PP繊維の製造と、製造された綿状の繊維

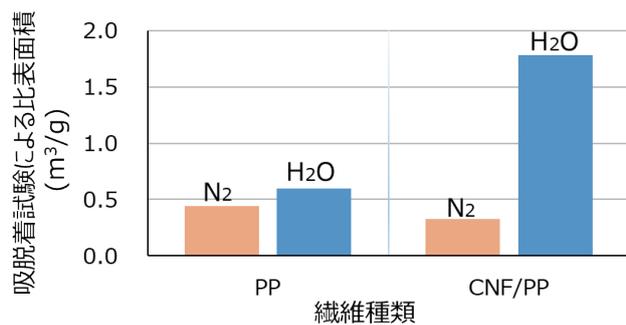


図3 水蒸気を吸着する性質の比較  
 PPにCNFを混ぜることで、水蒸気に対する親和性が上昇しました。

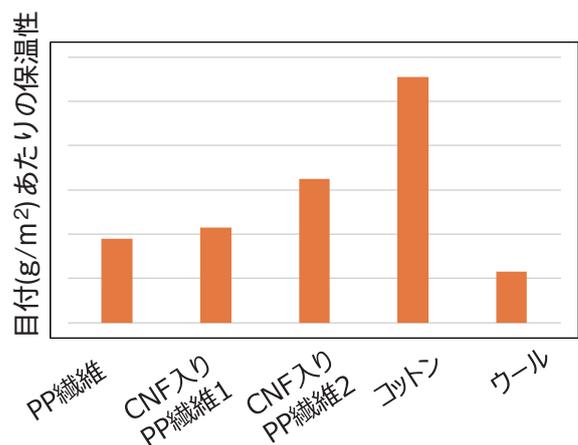


図4 複合繊維の目付当たりの保温性



# 7

## CNFを利用した地盤改良材への取り組み

早稲田大学理工学術院

赤木寛一

ケミカルグラウト株式会社

渡邊陽介、西寿三男、和田忠輔、川村淳

大規模地震などで甚大な被害を及ぼす液状化現象が社会問題となっています。その対策として、地盤を固まるため土中に注入する薬液（水ガラス<sup>+</sup>系溶液型注入材）にCNFを添加することで、これまで使用してきた薬液材料より高い地盤強度を発現させることができました。また、薬液注入材にCNFを最適に配合することで、従来配合以上の高強度化の可能性が示されました。

### CNFを添加した薬液の適用性評価

実験室での室内配合試験結果（図1、図2）より、薬液にCNFを添加することで模擬土試験供試体の強度増強効果を確認しました。

標準配合薬液はCNF添加0.25%、高濃度配合薬液はCNF添加0.10%で供試体の高強度化が確認できました。

### 最適な配合設計

実現場条件に近い注入方式（図3）により作製した供試体の強度試験を行ったところ、標準配合薬液はCNFを0.25%添加することで増強効果が確認されました。一方、中強度配合薬液に関しては、CNF添加0.10%で増強効果が確認できました（図4）。

これらの結果から、標準配合薬液はCNF添加0.25%程度、中強度配合薬液ではCNF添加0.10%が最適な配合になりうることを確認できました。

### 薬液注入工法による液状化対策

薬液注入工法は沿岸区域やトンネル周辺、タンク直下など既設構造物の液状化対策としてこれまでに多くの実績があり（図5）、液状化対策市場における年間平均改良土量は「浸透固化処理工法研究会データ」によると約72,332m<sup>3</sup>/年（図6）です。

また、改良土量から換算した年間薬液使用量は約32,550kL/年と推定されます。

液状化対策材料として、地域材由来CNF添加薬液注入材を実用化できれば大量消費が期待できます。

### CNFを添加した薬液注入材による薬液注入工法

CNFが、地盤の間隙中を浸透していくことができると懸念されました。そのため、小規模な模擬液状化地盤を作製して、既存の薬液注入工法設備で注入実験を行ったところ、問題なく注入することができました。また、模擬地盤を掘り出して注入改良体を確認したところ、CNF未添加とCNFを添加したもので外観に大きな差はなく、CNFによる不具合は特に認められませんでした（図7）。

### 【室内配合試験】

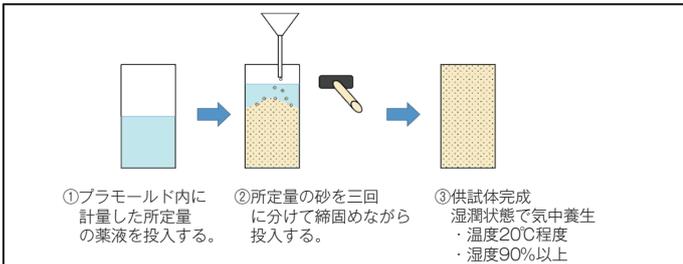


図1 室内配合試験による供試体作製

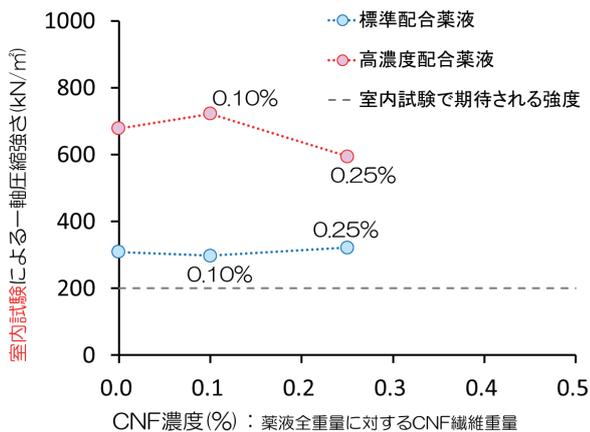


図2 室内配合試験：一軸圧縮強さ (28日材齢)

### 【注入試験：実現に近い室内試験方法】

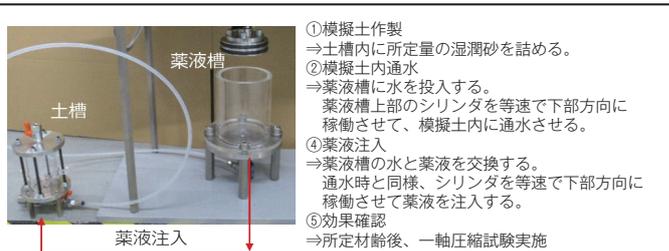


図3 注入試験による供試体作製

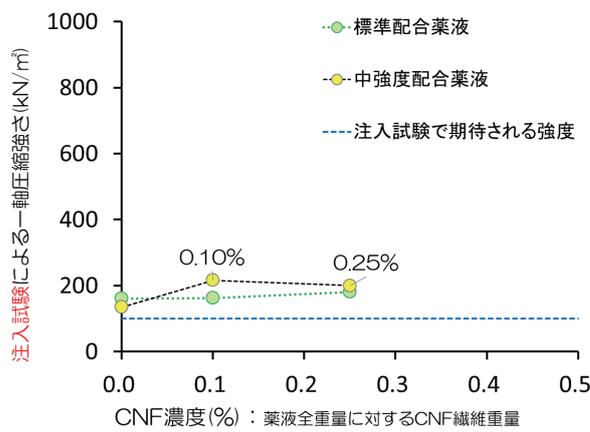


図4 注入試験：一軸圧縮強さ (28日材齢)

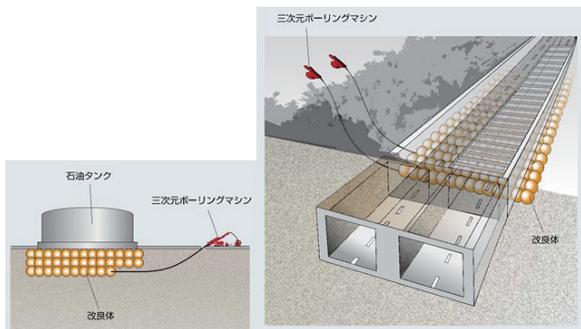


図5 薬液注入工法による液状化対策  
トンネルやタンク直下の地盤改良



薬液注入後  
土槽解体による効果確認

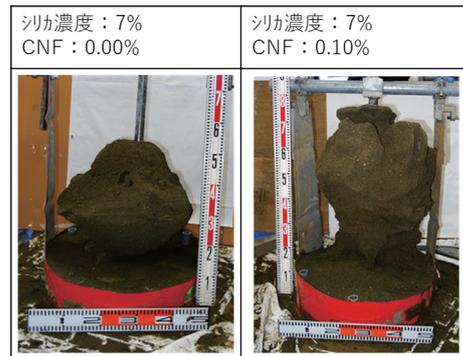
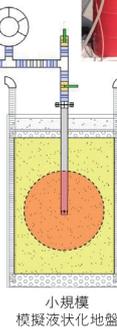


図7 小規模模擬液状化地盤で行った注入実験

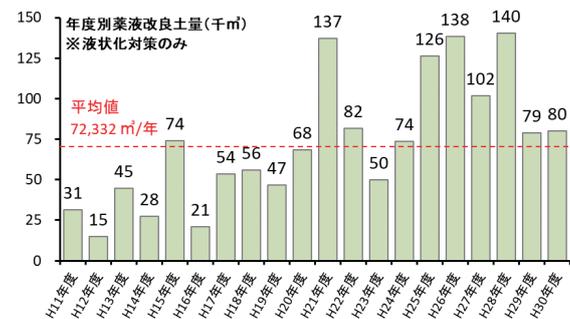


図6 液状化対策における年度別薬液改良土量  
(浸透固化処理工法研究会データ参照)



環境に配慮した資源循環型社会を実現するためには、木質バイオマスの利用を推進し、森林資源をマテリアルやエネルギーとして地域内で持続的に活用していく「地域内エコシステム」を構築する必要があります。CNF製造を、この地域内エコシステムへ組み込む場合に生じる課題について検討を行いました。モデルとした岩手県釜石・大槌地域での調査の結果、既存システムである木質バイオマス発電と協業した資源確保の重要性と、CNFを利用した新しい付加価値を創出していくための地域産業との連携、そしてそれを推進していくための産官学協力体制の重要性が確認されました。

## 地域内エコシステム

地域での木質バイオマス利用の目指すべき方向として、「地域内エコシステム」という考え方が示されています。「地域内エコシステム」は、森林資源をマテリアルやエネルギーとして地域内で持続的に活用するための担い手確保から発電・熱利用に至るまでのシステムであり、森林資源を地域内で持続的に循環させる仕組みです。農林水産省及び経済産業省により、平成29年7月に報告書「「地域内エコシステム」の構築に向けて」が取り纏められています。同報告書では、同システムの在るべき方向として、地域住民が受益できるコンパクトな地域循環型のシステムとすることや、山村の振興や地域経済の発展のためには、木材のマテリアル利用とエネルギー利用の両方を進めていくことが必要等、整理されています。

## CNF製造を含めた地域内エコシステムの構築における課題

モデルとして設定した岩手県釜石・大槌地域の森林組合では、素材として生産される森林資源の約9割がスギを主とする針葉樹で、バイオマスとして年間11,265 tを取り扱っています。地域では5個所の大型バイオマス発電所が稼働しており、木材チップの流通網が整備されています。しかし、資源の供給が追い付いていない状況にあることから、すぐに大型のマテリアル利用設備を組み込むことは難しいと考えられます。しかし、今回想定したCNF製造システムの規模は、CNFの乾燥重量として年間52

tであり、原材料として必要な絶乾スギチップの量は130 t程度です。これくらいの量のスギ材であれば安定供給は可能であると見込まれています。

「地域内エコシステム」では、地域の木質バイオマスから得られるエネルギーや熱を、その地域内で有効活用する地産地消型のシステムが基本になります。しかし、新素材であるCNFの利用を考える場合には、製造したCNFや、CNFを素材とした製品を地域外へも販売していく必要があります(図)。地域材を利用したCNFによる、新たな付加価値を地域内外に創出していくためには、原料調達、製品開発、CNF利用者などのステークホルダーと一緒に地域内エコシステムを形成することは必須です。原料調達においては、地域の木材を安定的かつ効率的に供給する体制構築はもちろんのこと、認証材制度などの活用を通じて、地域材利用の利点を強調する情報発信が必要になると考えられます。また、CNF事業の自立可能な運営を行うためには、地域の事業者を含む産学官連携による用途開発や販路形成が重要です。

## 参考資料

「地域内エコシステム」の構築に向けて～集落を対象とした新たな木質バイオマス利用の推進～ 「木質バイオマスの利用推進に向けた共同研究会」報告書. 平成29年7月13日

平成30年度 森林・林業白書 第1部第4章第3節  
釜石地方森林組合だより. 第5号. 令和元年8月20日



図 CNFを軸とした地域内エコシステムのイメージ

## 用語集

### か

過酢酸：強い酸化力を持つ薬剤であり、漂白に使用可能。分解すると酢酸と過酸化水素になる。除菌剤として医療現場や食品加工施設で使用されている。

### せ

セルロース：地球上で最大の蓄積量を持つとされる多糖類で、グルコースが $\beta$ -1,4結合した構造。

セルロースナノファイバー：セルロースの繊維をナノレベルにまで解繊した新素材。樹脂等と混合することにより強度などの物性を変化させる機能が注目されている。

### そ

ソーダ・アントラキノン蒸解法：アントラキノンという化学触媒を利用して、苛性ソーダ（水酸化ナトリウム）によるパルプ化を行う方法。

### て

TEMPO酸化CNF：2,2,6,6-テトラメチルピペリジン 1-オキシルを触媒として、セルロースの表面にカルボキシ基を導入してナノ化したCNF。

### な

ナノ：1nmは10億分の1メートル。

### み

水ガラス：ケイ酸ナトリウム（珪酸ソーダ）の水溶液で、薬液注入工法では注入材として利用し硬化剤や助剤を添加することで、硬化時間を調整しながら固結させる。ケイ酸ナトリウム（珪酸ソーダ）の水溶液で、薬液注入工法では注入材として利用し硬化剤や助剤を添加することで、硬化時間を調整しながら固結させる。

### よ

溶融紡糸：化学繊維を製造するための主要な紡糸法の一つで、高分子化合物を主に熱等によって融解し、一定速度で繊維状に押し出し、繊維を製造する方法。





国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所



玄々化学工業株式会社



株式会社Zetta



トクラス株式会社



学校法人 早稲田大学 理工学術院総合研究所



ケミカルグroupt株式会社

国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所  
〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

編集・発行 森林資源化学研究領域  
発行日 2020（令和2）年 2月28日  
お問い合わせ先 広報普及科編集刊行係  
電話 029-829-8373  
Email: kanko@fpri.affrc.go.jp

※本誌掲載内容の無断転載を禁じます。



この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。