

# 林産試 だより

ISSN 1349-3132



走行集材機械（フォワーダ）実技の様子  
（北森カレッジニュースより）



令和6年林産試験場研究成果発表会の様子  
（林産試ニュースより）

・木の個体差を調べてみよう！	.....	1
・道産木材からCNF（セルロースナノファイバー）を造る 取り組みの紹介	.....	4
・行政の窓 〔2024北海道森林・林業・環境機械展示実演会が開催されました〕	.....	8
・林産試ニュース・北森カレッジニュース	.....	9

10  
2024



道総研

(地独)北海道立総合研究機構  
林産試験場

# 木の個体差を調べてみよう！

性能部 構造・環境グループ 村上 了

## ■はじめに

木は地球上のほとんどの地域で育ち、その存在は人間にとって生活のさまざまな面で欠かせないものです。森林は生態系を支え、木材は建築や製品の材料として使用され、二酸化炭素の吸収にも寄与しています。木材の利用は古代から続く伝統的なものであり、今日においてもその重要性は変わりません。

木材の品質は、育った環境や種類、木自体の特性によって大きく左右されるため、正確な分析と理解が必要です。特に、木材の密度は製品の強度や耐久性に関わるため、重要な研究対象となっています。

毎年木が上へ進展するのを支えるために木は一年ごとに横方向へ成長します。横方向の成長は季節によって変わり、春から夏にかけては急速に成長し、秋にはゆっくりになり、冬には成長が止まります。このため、木の横方向には年輪が形成されます。

年輪の中で、春から夏にかけて早く成長した部分を「早材」、秋にゆっくり成長した部分を「晩材」と呼びます。晩材は早材に比べて密度が高いのが特徴です。また、木の成長量は、①木の種類、②育っている環境、③木の樹齢によって毎年異なります。

この違いは、木製品を作る際に考慮する必要があります。つまり、①どの種類の木なのか、②どこで育った木なのか、③木のどの部分から切り出された材料なのかによって、木製品の「密度」、「硬さ」、「強度」が変わってしまうのです。

この文章では、北海道で植えられているアカエゾマツ間伐材の密度に焦点を当て、同じ林分から切り出した木の個体差を線形混合モデルという統計手法を使って調査しました。

## ■年輪密度の解析

津別町の道有林から入手したアカエゾマツの間伐材を用いて密度解析を行ったデータを調査に使用しました。試料に関する詳細は過去の報告りを参照ください。

入手した間伐材（3.65 mで玉切り、一番玉）の末口から厚さ10 cm程度の円板（図1）を採取し、その円板から髄を含む厚さ2mmの切片を作製しました。この切片をX線で撮影し、X線透過画像（図2）を取

得します。この画像の色の濃淡から密度を推定します。具体的には図2の場合、白い箇所がより密度の高い箇所になります。

髄から樹皮までの密度の変化を調べた結果を図3に示します。一例として、グラフの曲線上に示された赤い点が年輪の境界にあたります。2つの赤い点の間が1年間の成長量を示し、そのX軸上の距離が年輪幅となります。このグラフを元に、1年間の平均的な年輪の密度や年輪幅など、さまざまなデータを抽出します。

図4に1年ごとの平均年輪密度を示します。髄からの年輪数が15～20年輪以下を未成熟域として、それ以降を成熟域として扱います。この未成熟域は成熟域と異なり、木の繊維の長さが短かったり、強度が低かったりします。また、アカエゾマツ間伐材の特徴として、未成熟域の髄近くで密度が高いことが挙

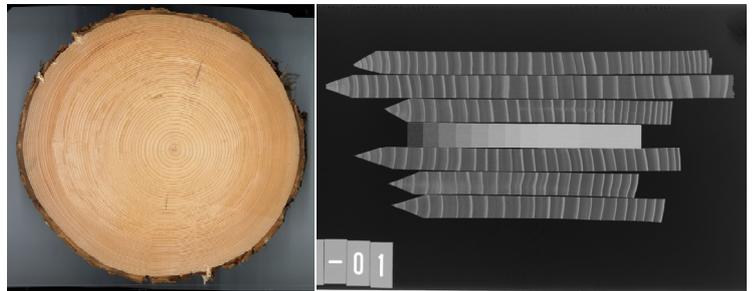


図1 切り出した円板

図2 木材のX線透過画像

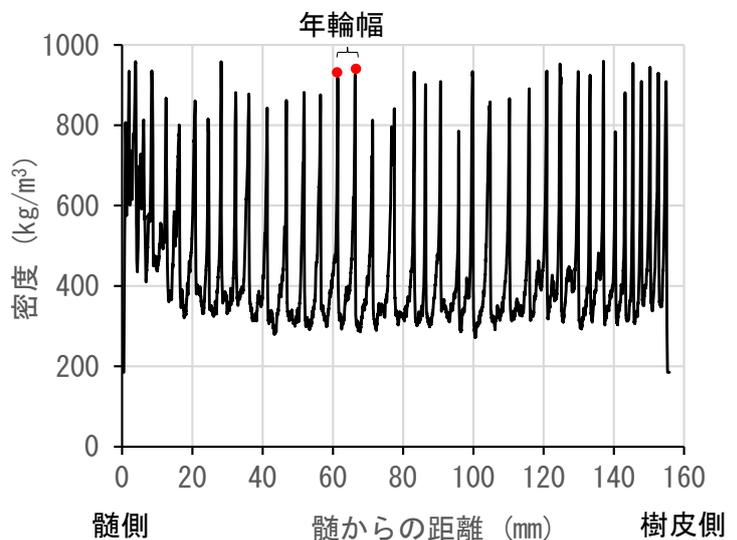


図3 髄から樹皮までの密度の分布

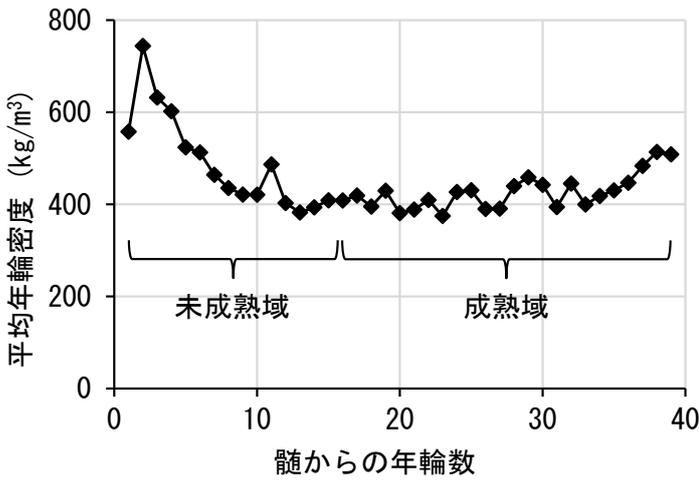


図4 平均年輪密度の推移

げられます。

以降では成熟域の密度の解析について説明します。そして、この成熟域の密度において、同じ地域で入手した材料にはどれくらいの個体差があるのかについて調べます。

■一つの林分から伐採された材料の個体差

図5に津別町産アカエゾマツ間伐材15個体について成熟域とみなせる髄からの年輪数15年以上のデータをプロットしたものを示します。赤の直線は平均年輪密度と髄からの年輪数の回帰曲線です。このグラフを見る限り、成熟域では年輪数が大きくなるにしたがって密度が上がっていると考えられます。

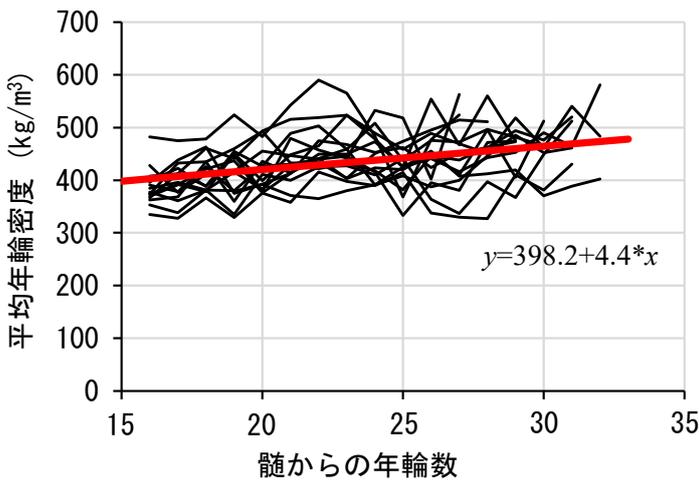


図5 成熟域の年輪密度の推移(1林分, 15体)

次に、個体によってどれくらい誤差があるのか見ていきます。個体ごとに各年の年輪データがありますので、年輪データは個体に紐づけられた下層のレイヤーだと考えることができます(図6)。

ここでは、①個体差、②一つ一つの年輪データを測定する時に生じる誤差(以下、観測誤差)の二つ

を考えます。

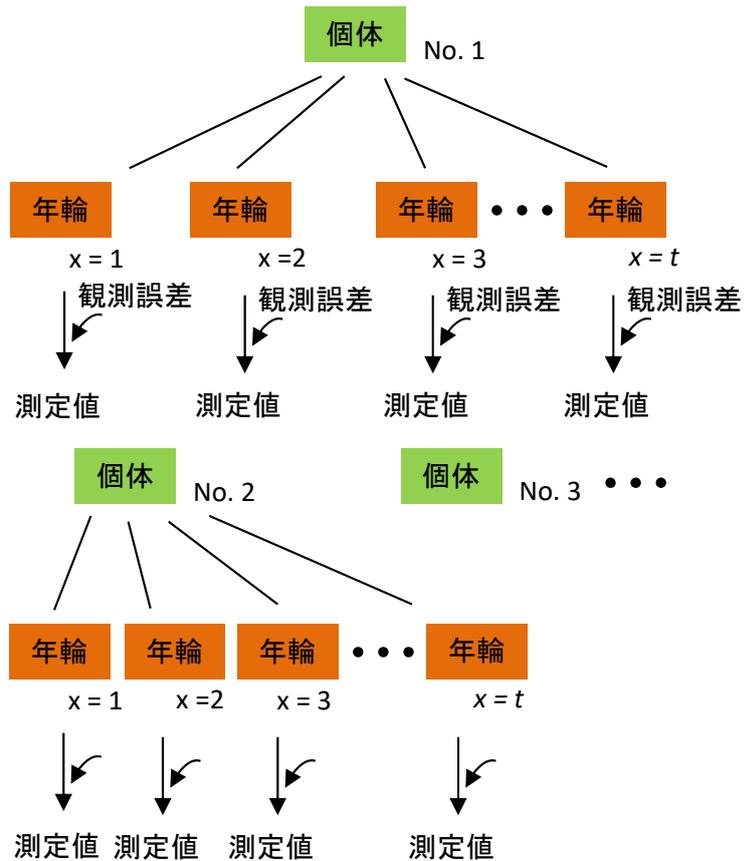


図6 測定値一年輪一個体の関係

線形混合モデルを使うとを個体差と観測誤差と分けて考えることができます。モデルは式(1)~(3)で表します。

$$y = a_{\text{個体}} + b * x + \epsilon_{ii} \quad \text{式(1)}$$

$$a_{\text{個体}} = \text{Normal}(a_{\text{全体平均}}, \sigma_{\text{個体}}) \quad \text{式(2)}$$

$$\epsilon_{ii} = \text{Normal}(0, \sigma_{\text{観測誤差}}) \quad \text{式(3)}$$

式(1)のyは平均年輪密度、 $a_{\text{個体}}$ は特定の個体の切片、bは傾き、xは髄からの年輪数、 $\epsilon_{ii}$ は観測誤差を表します。式(2)で示すとおり $a_{\text{個体}}$ は個体と関係ない共通の全体平均 $a_{\text{全体平均}}$ と個体間のバラツキを表す標準偏差 $\sigma_{\text{個体}}$ の正規分布で表すことができます。また、モデルでは全ての個体で同じ傾きbを持つと仮定しています。

図7にモデル式の結果、表1に誤差の推定値を示します。図5に示した回帰曲線の切片と傾きとモデル式の結果はほとんど変わりませんでした。個体差と観測誤差はそれぞれ33.1, 37.2ですので、個体差、観測誤差が切片に対してそれぞれ10%弱あることが分か

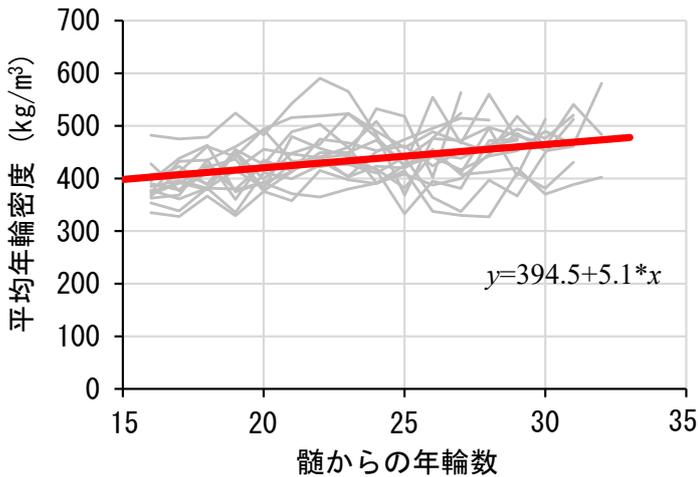


図7 線形混合モデルの結果

表1 線形混合モデルによる誤差の推定値

	推定値	下限値	上限値
$\sigma_{\text{個体}}$	33.1	22.4	48.9
$\sigma_{\text{観測誤差}}$	37.1	33.7	40.9

\* 下限値, 上限値はそれぞれ95%信頼区間の値を示す。

りました。

すなわち今回のモデルから、年輪密度は個体によって全体の平均からプラスマイナス10%程度、違いがあることが分かりました。同様に、データ自体のバラツキ（気温や降水量等環境の影響）、測定の不確実性（X線を照射した時のノイズや現像した時のノイズ）によっても10%程度誤差があることが分かりました。

■おわりに

木材の年輪密度のデータについて線形混合モデルを用いてどのように表現できるか、個体差に起因する誤差はどれくらい生じるものなのかを調べ、研究のヒントを探りました。今後、よりモデルを精査して、地域ごとの密度と気象要因との関連性等についても調べていきたいと考えています。

■参考文献

- 1) 村上了：アカエゾマツ間伐材の密度解析：北海道の林木育種 65 (2), 11-14 (2022).
- 2) 久保拓弥：データ解析のための統計モデリング入門. Vol. 267. 岩波書店, (2012).

# 道産木材からCNF（セルロースナノファイバー）を造る 取り組みの紹介

利用部 バイオマスグループ 長谷川 祐

## ■はじめに

年々深刻化する異常気象や激甚化する自然災害、農作物の生育異常や病虫害の分布拡大など、地球温暖化はすでに日常生活にも大きな影響を及ぼすまでに進行しています。国は温暖化に歯止めをかけるため、2050年に温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルの実現を国際公約として掲げ、公約実現に向けて地球温暖化対策計画（令和3年10月閣議決定）を定めました。これに基づき、温室効果の主要因とされる二酸化炭素を排出する化石資源の使用量削減のため、様々な対策・施策を進めています。

エネルギー分野においては、2023年5月にGX（Green Transformation：グリーントランスフォーメーション）推進法が成立し、石油や石炭などの化石燃料を太陽光や風力、あるいはバイオマス燃料といった再生可能エネルギーへの転換が進められています。これによって化石資源の消費や依存を前提として作り上げられてきた社会構造そのものを変革し、それを新たな経済成長に結びつけることを目標としています。このGXの成否が、今後、企業や国の競争力を左右するとさえ言われています。

材料分野においても二酸化炭素を削減するための施策が進められています。このうち木材・木質材料に関係するものとしては、「都市（まち）の木造化推進法」により伐採適期に達した人工林材の木造建築物等への利用促進が掲げられています。さらに、木質をはじめとするバイオマスからプラスチックやプラスチック代替素材を開発する取り組みも進められています。このような材料としての利用は、大気中の二酸化炭素を光合成により木材などの生物材料という形で固定し、使用期間中は炭素を貯蔵し続けると言えますので、より長期にわたり二酸化炭素を固定できるものと期待されます。

そこで今回は、木質をはじめとする植物を原料に製造が可能で、化石資源由来プラスチックの使用量の削減、さらには代替材として期待される素材として、CNF（セルロースナノファイバー）を紹介します。

## ■身近な新素材、CNF

樹木をはじめとする植物の細胞は、いずれも細胞壁で囲まれています。樹木（木本植物）の場合、木材となる部分の細胞は、一定の長さや大きになると細胞の外側から内側に向かって細胞壁が厚くなっていきます。この細胞壁を構成する成分が、木材の主要3成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニンです。このうち細胞の骨格成分となるセルロースは、セルロース分子が18~36本（最近の研究では18本鎖の妥当性が高いと提案されています）束になったものが基本単位とされています。樹木の場合はこの束の径が3~4 nmとされ、セルロースマイクロフィブリル、あるいはシングルセルロースナノファイバーと呼ばれることもあります。この基本単位の束がさらに水素結合や分子間力で積層していき、これをヘミセルロースやリグニンが補強して木材の細胞壁が構成されています（図1）。

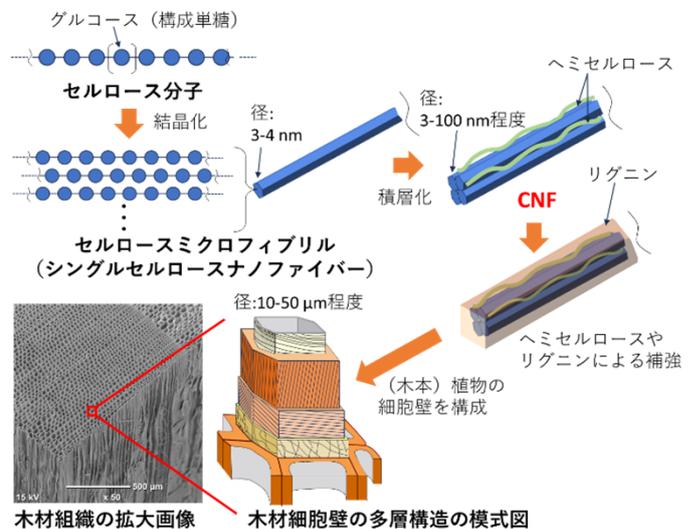


図1 木材細胞壁の多層構造を構成するセルロースマイクロフィブリルのイメージ

CNFは、上述の細胞壁の生成工程を逆行することで得られます。すなわち、まず細胞壁を補強しているヘミセルロースやリグニンを除去し、積層状態のセルロースマイクロフィブリルを物理的な力や化学的な処理を加えて細分化していきます。細分化の程度によって、前述のシングルナノファイバーが1束~何十束が集まった状態のものが得られ、ファイバー径

がナノレベルになった状態のものが一般にCNFと呼ばれます。2017年発行のISOの標準仕様書では、径が概ね3~100 nm以下、アスペクト比（長さ/径）が10以上、長さが100 μm以下のものがCNFと定義されています<sup>2)</sup>。

木材をはじめとする植物はすべてセルロースを構成成分とする細胞壁を持っているので、身近な植物も細分化していけばいずれもCNFになると言えます。

なお、ここでは植物由来のCNFについて説明しましたが、植物以外にもセルロースを産出する生物があります。一つは酢酸菌です。酢酸菌が造るCNFはバクテリアセルロースとも呼ばれ、植物由来のCNFとはまた違った特徴（糖を原料にボトムアップ型で製造できる、食品に向く、結晶化度が高い等）を持つため、大量培養が試みられています<sup>3)</sup>。1970年代に流行った「紅茶キノコ」や、食材としておなじみになった「ナタデココ」も、じつは酢酸菌が造るCNFです。そしてもう一つ、海産物のホヤもセルロースを造ることができる動物です。味の好みに分かれるホヤですが、ホヤの殻（被のう）から取り出したCNFは結晶化度が非常に高く、高級スピーカーの振動板（コーン紙）が造られたこともあるようです<sup>4)</sup>。

## ■CNFの特徴は？何に使える？

CNFにはどのような特徴があるのでしょうか。主だったものと期待される用途の一例を示します（図2）。

### CNFの特徴を活かした用途例

特徴	期待される用途
① 軽量で高強度	・ プラスチックやセラミックの強化繊維
② 低熱膨張率で高熱伝導性	・ 半導体封止材、プリント基板
③ チキソトロピー性*のある粘度特性	・ 既存木質材料との複合化
④ リグニンを活かした用途**	・ 化粧品
⑤ 低環境負荷性（植物由来、生分解性）	・ 塗料添加材
⑥ 3次元的な成形が可能 etc...	・ 天然系農薬
<small>* 力を加えると粘度が下がり、放置すると粘度が上がる性質</small>	・ プラスチック代替素材 etc...
<small>** リグニンが残存するCNFの場合</small>	

図2 CNFの特徴と期待される用途

このうち、今回は紙面の都合上①と②について説明します。

①の高強度かつ軽量という特徴ですが、前項で述べたCNFの基本単位であるセルロースマイクロファイブリルの軸方向の単位断面あたりの引張強さは、木材由来の場合1.6~3 GPaと推定されています<sup>5, 6)</sup>。無垢

木材の引張強さは高いもので約20 MPa、一般構造用圧延鋼材（SS400）が0.4 GPaですので、数字だけ比べると無垢木材はもちろん、鋼材よりもはるかに高強度ということになります。実際には他の因子の影響を受けるため、ここまで高い値には至っていないのですが、ポテンシャルのある素材（逆に言えば、能力をどう引き出すかが鍵）であることはわかります。

CNFの密度は、ナノ化する前のセルロースと変わらず1.5 g/cm<sup>3</sup>とされています。比較対象によりませんが、高強度の構造材料である金属やコンクリートと比べるとはるかに軽量と言えます。

この特徴を活かして、軽量化・高強度化が求められる自動車・家電製品に使用されるプラスチック類、強じん性が求められるスポーツシューズ等の発泡ゴムやタイヤの強化繊維としての利用が行われています。

もう一つ、少し意外な特徴として期待される性質として、②の低い熱膨張率と高い熱伝導率が挙げられます。CNFは、耐熱性自体は基本的に紙と変わらず200°C位とされています<sup>7)</sup>。非晶性多糖のヘミセルロースが多く含まれていると、さらに耐熱性が下がる可能性があるため注意が必要です。一方、熱膨張率は0.1 ppm/Kと報告されており<sup>7)</sup>、これは低熱膨張率で知られる石英ガラス0.5 ppm/K<sup>8)</sup>よりも低い値です。また、CNFから作ったシートの面内熱伝導率（面方向の熱の伝わりやすさ）は1.1（スギ由来CNF）~2.5（ホヤ由来CNF） W/K・mと報告されており<sup>9)</sup>、これは一般的なプラスチックの値0.2~0.6よりも高い値です。さらに最近では、CNFの分子を配向させて作製したCNF糸材が、14.5 W/K・mの高熱伝導率を持つことも報告されています<sup>10)</sup>。

これらの特徴は、電子デバイスのプリント基板等への展開が期待されています。現状の基盤は、リサイクルが困難で環境負荷の高い熱硬化性樹脂が使用されており、これらの樹脂は熱伝導率も低いいため基盤の温度が高くなる傾向があります。プリント基板は今後ますます高機能化が求められていくと考えられており、CNFを活用することで、放熱性に優れ、高温になっても変形が少ない植物由来の基板が誕生するかもしれません。

今回紹介した特徴以外にも、CNFは図2のように様々な特徴を持っており、脱化石資源化を支える生物由来の機能性材料として、多方面で基礎~応用に向けた研究開発が進められています。

### ■道産木材でCNFを造ってみました

林産試験場では、主に道産樹種を原料にCNFを造り、その性質を調べています。ここではトドマツを原料とした場合の結果の一部を紹介します。

CNFの造り方ですが、原料として(a) 各樹種の未晒しパルプを用いる方法、(b) 各樹種のおが粉をそのまま用いる方法、の2種類としました。未晒しパルプとは、木チップから蒸解という処理によってリグニンの大部分とヘミセルロースの一部を取り除いて作ったパルプで、リグニンを1.5（広葉樹）～4（針葉樹）wt%程含んでいます。これらの原料を数%の水懸濁液として、図3に示すような石臼式磨砕機によって微細に磨り潰してCNFとしました。

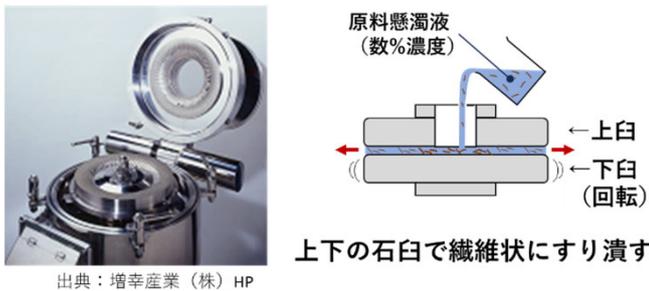


図3 石臼式磨砕機の外観（左）と断面模式図（右）

なお、(b)の方法のように、リグニンを取り除かずに木質をそのままCNF化したものは、LCNF（リグノセルロースナノファイバー）と呼ばれます。本報でも以降、LCNFと表記します。

図4に、得られたCNFおよびLCNFのスラリー（水懸濁物）とこれを高分解能の電子顕微鏡で観察した画像を示します。

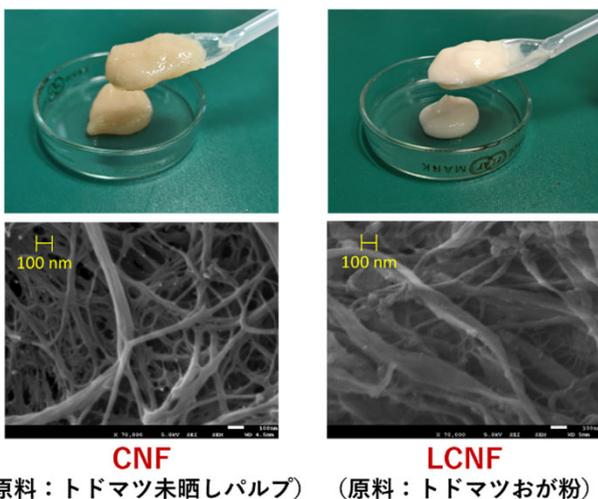


図4 CNFおよびLCNFの3 wt%スラリー（上段）とFE-SEM画像（下段）

CNFもLCNFも、どちらも微細に磨り潰すことで高粘度のクリーム状になりました。顕微鏡の画像から、径が数十nm～数百nmの混合物であり、CNF領域のものとそれより太い領域のものの混合物ということになります。

CNFおよびLCNFの各スラリーから濾別とホットプレスによりシートを作製し、引張強さを測定した結果を図5に示します。

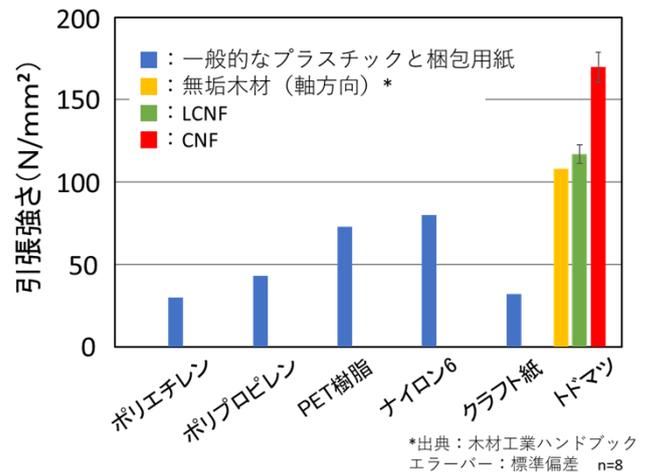


図5 トドマツ材を原料としたCNFおよびLCNFシートの引張強さ

CNFおよびLCNFのシートは、一般的なプラスチック類や段ボールに使用されるクラフト紙よりも高い値を示し、無垢木材の縦引張よりも高い値でした。特に、おが粉を蒸解など脱リグニン処理を行わずにそのままCNF化したLCNFであっても、無垢木材よりも高い引張強さを示したことは、製材時に発生するおが粉や端材を原料に、簡易な処理で高強度材料が製造できる可能性を示しています。

### ■まとめ

今回、植物由来の機能性素材としてCNFと林産試験場の取り組みについて紹介しました。道産樹種のパルプやおが粉から作ったCNFは、無垢木材よりも高い引張強さを示すなど、そのポテンシャルの高さが確認できました。

化石資源の登場以前、木材をはじめとする植物由来材料は、マテリアル用途・エネルギー用途の両面で主要な原料でした。それが、化石資源の登場以降は用途範囲が縮小し、木材を産出する山村地域の衰退や過疎化へとつながる、ひとつの要因になった経緯があります。

脱化石資源化が世界中で喫緊の課題となる中、木

材をはじめとする植物由来材料の二酸化炭素吸収・固定機能や自然界での生分解性などの特徴があらためて見直されてきています。木材を産出する山村地域で脱炭素社会の主役となる素材が製造・発信され、経済発展や地域振興につながるよう、林産試験場では今回得られた道産樹種によるCNFについての知見を基に開発を進めていきます。

#### ■参考文献

- 1) Kazuho Daicho, Tsuguyuki Saito, Shuji Fujisawa, Akira Isogai: *ACS Appl. Nano Mater.* 1(10), 5774–5785 (2018).
- 2) ISO/TS20477:2023  
(<https://www.iso.org/standard/83010.html>)
- 3) 田島健次, 小瀬亮太, 松島得雄, 石田竜弘, 安藤英紀: 醸造協会誌, 114(9), 540-549 (2019).
- 4) 門脇宏則: 東レ理科教育賞, (公財) 東レ科学振興会 (2006)
- 5) Tsuguyuki Saito, Ryota Kuramae, Jakob Wohler, Lars A. Berglund, Akira Isogai: *Biomacromolecules*, 14, 248 (2013).
- 6) D. T. Page and F. El-Hosseiny: *J. Pulp and Paper Science*, 9, 99-100 (1983).
- 7) Takashi Nishino, Ikuyo Matsuda, Koichi Hirao: *Macromolecules*, 37, 7683-7687 (2004).
- 8) 英興株式会社HP  
([https://eikoh-kk.co.jp/tecdata/silicaglass\\_data.html](https://eikoh-kk.co.jp/tecdata/silicaglass_data.html))
- 9) Kojiro Uetani, Takumi Okada, Hideko T. Oyama: *Biomacromolecules*, 16 (7), 2220-2227 (2015).
- 10) Guantong Wang, Masaki Kudo, Kazuho Daicho, Sivasankaran Harish, Bin Xu, Cheng Shao, Yaerim Lee, Yuxuan Liao, Naoto Matsushima, Takashi Kodama, Fredrik Lundell, L. Daniel Söderberg, Tsuguyuki Saito, Junichiro Shiomi: *ACS Nano Letters*, 22(21), 8406-8412 (2022).

# 行政の窓

## 2024北海道森林・林業・環境機械展示実演会が開催されました

一般社団法人北海道林業機械化協会主催、北海道及び当別町後援により、令和6年9月8日（日）、9日（月）の2日間にわたり、当別町道民の森（青山中央地区）において、「2024北海道森林・林業・環境機械展示実演会」が開催されました。

本展示実演会は、ハーベスタ等の高性能林業機械をはじめ、最新の林業機械の展示・実演を通じて、関係者の皆様にその性能を紹介するとともに、林業の機械化と安全性の向上を推進することを目的としており、同協会主催の機械展示・実演会としては、平成28年に厚真町で開催して以来、8年振りの開催となりました。

当日は、機械メーカー15社のほか、スマート林業関係メーカー18社にも協力していただき、各社が開発・改良した最新のハーベスタ、フォワーダ、コンテナ苗植栽機等の林業機械をはじめ、ラジコン式地拵・下刈機、産業用ドローンといったスマート林業関連機器、チェーンソー、林業防護服、ポータブルウィンチなどの機械器具、さらには木材破砕機等の木質バイオマスに関連する環境保全に資する最新機械が展示されました。

また、実演は、60年生のトドマツ林分において、ハーベスタの伐倒・枝払い・玉切作業やフォワーダによる運搬及び木材破砕機等によるチップ加工作業、各種ドローンの実演が行われました。



会場入口

### 機械展の様子

#### 林業機械関連



ハーベスタ



バイオマスプロセッサ



運転席

遠隔操作グラップル

#### スマート林業関連機器



ラジコン式下草刈り機械



産業用ドローン

#### その他



チェーンソー

開催期間中は、好天にも恵まれ、来場者数は、林業関係者など1,531名となり、前回を上回り、大盛況の内に開催することができました。来場者には、機械化の重要性やメリットを理解していただくとともに、最新の林業機械の魅力を感じていただけたと思います。

(水産林務部林務局林業木材課事業体育成係)

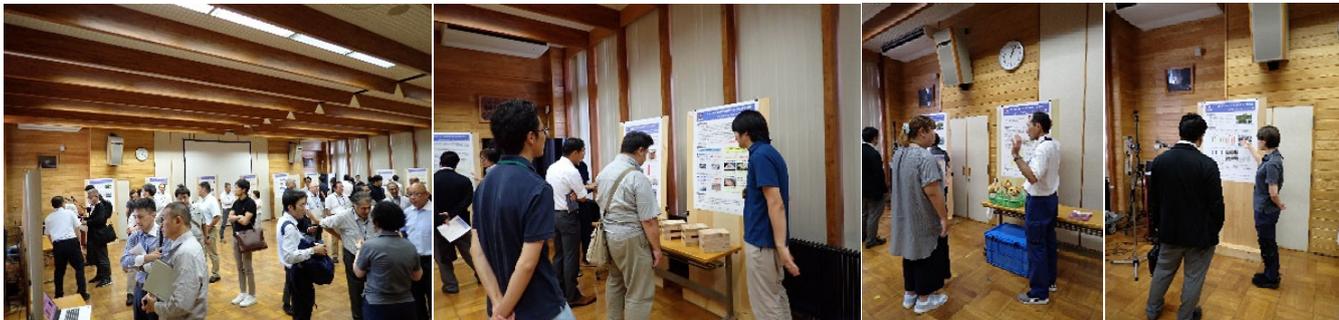
# 林産試ニュース

## ■令和6年林産試験場研究成果発表会を開催しました

9月12日（木）13：00～14：30、林産試験場講堂において、旭川近郊・道北地域の方々を主な対象として、令和6年林産試験場研究成果発表会を開催しました。

ここでは、林産試験場で取り組んでいる19件の課題についてポスター発表を行い、林業・木材関連団体、研究・行政機関などを含め30人以上の方にご参加いただきました。

限られた時間の開催でしたが、各ポスターの前では、熱心な議論があり会場は終始にぎやかでした。



【令和6年林産試験場研究成果発表会の様子】

（林産試験場 広報担当）

## 北森カレッジニュース

### ■1年生が各種資格の取得に取り組んでいます

北森カレッジで過ごす2年間で、最大15の資格を取得できるようにカリキュラムを組んでおり、生徒は林業・木材産業への就業に関わる様々な資格等を取得することができます。

今年4月に入学した1年生は、9月までの6カ月間に「伐木等機械運転業務」や「走行集材機械運転業務」など、既に7つの資格を取得しました。

特に「車両系建設機械」の資格取得では、機械操作や特殊な大型車に興味のある生徒のみならず、初めて林業機械を操作した生徒も、目を輝かせて真剣に取り組んでいました。

今後は、より実践的なカリキュラムへと進み、ハーベスタやフォワーダの操作技術を向上させるための授業が始まります。



【伐木等機械（ハーベスタ）実技の様子】



【走行集材機械（フォワーダ）実技の様子】

（北海道立北の森づくり専門学院 那須 貴洋）

林産試だより

2024年10月号

編集人 林産試験場  
HP・Web版林産試だより編集委員会  
発行人 地方独立行政法人 北海道立総合研究機構  
森林研究本部 林産試験場  
URL：<http://www.hro.or.jp/fpri.html>

令和6年10月1日 発行  
連絡先 企業支援部普及連携グループ  
071-0198 北海道旭川市西神楽1線10号  
電話 0166-75-4233（代）  
FAX 0166-75-3621