



森林

科学

[特集]

森から生まれる新素材「セルロース
ナノファイバー」を紐解く

シリーズ

森をたべる

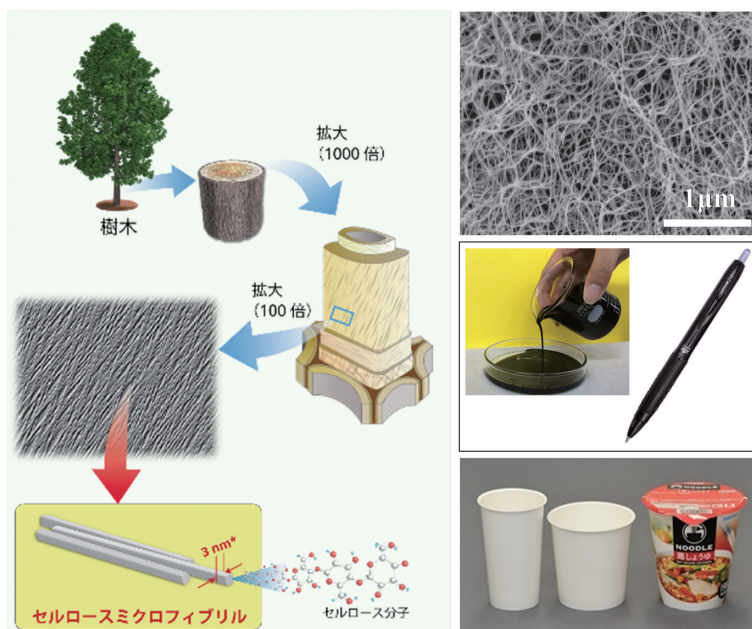
野生鳥獣をたべる

林業遺産紀行

「飯能の西川材関係用具」コレクション

現場の要請を受けての研究

伐採箇所の奥地化に伴う最適路網の検討



No. 81
October 2017

特集 森から生まれる新素材「セルロースナノファイバー」を紐解く

注目の新素材「セルロースナノファイバー」の特集に寄せて 木口 実	2
木の国ニッポンの資源 矢野 浩之	3
ウォータージェット法によるセルロースナノファイバー 小倉 孝太	7
酵素・湿式粉碎によるセルロースナノファイバー製造法とその応用 林 徳子	11
TEMPO 酸化セルロースナノファイバー / 高分子複合材料の基礎的物性 藤澤 秀次	15
リン酸エステル化セルロースナノファイバー 権藤 あい子	19
リグノセルロースナノファイバーの製造と樹脂複合化技術 遠藤 貴士・伊藤 弘和	23
TEMPO 酸化セルロースナノファイバーの増粘剤としての利用 後居 洋介	27
セルロースシングルナノファイバーを用いたゲルインクボールペンの開発 竹内 容治	31
セルロースナノファイバーのパッケージへの応用 加藤 友美子	35

森林科学 No.81

2017年10月1日発行

頒 価 1,000円(送料込み)

年間購読割引価格

2,500円(送料込み)

編集人 森林科学編集委員会

発行人 一般社団法人 日本森林学会

102-0085 東京都千代田区六番町7

日本森林技術協会館内

郵便振替口座：00140-5-300443

電話/FAX 03-3261-2766

印刷所 創文印刷工業株式会社

東京都荒川区西尾久7-12-16

表紙写真：左：樹木の階層構造とセルロースの模式図

右上：木材細胞壁におけるセルロースナノファイバー (CNF)

右中段：セルロースシングルナノファイバーからなるインクボールペン

右下：CNFを用いたバリア紙カップ

特集「森から生まれる新素材「セルロースナノファイバー」を紐解く」より

シリーズ 森をたべる

野生鳥獣をたべる 37

松浦 友紀子

シリーズ 森めぐり

ガボン オートオゴウエ州の熱帯林 40

佐藤 顕信

シリーズ 森をはかる

根の滲出物をはかる 42

孫 麗娟

シリーズ 林業遺産紀行

「飯能の西川材関係用具」コレクション 44

竹本 太郎

シリーズ 現場の要請を受けての研究

伐採箇所の奥地化に伴う最適路網の検討 46

櫻井 倫

記録

50 「林政・風致・経営、観光・レクリエーション、教育分野のあり方検討会」報告

田中 伸彦・山本 信次・光田 靖・奥 敬一・

庄子 康・上原 巖・大石 康彦・田村 典江・

井上 真理子

コラム 森の休憩室Ⅱ 樹とともに

54 木材は水を通さない

二階堂 太郎

55 Information

ボックス

北から南から

森から生まれる 新素材「セルロース ナノファイバー」 を紐解く

注目の新素材「セルロースナノ ファイバー」の特集に寄せて

木口 実 (きぐち まこと、森林総合研究所九州支所)

1990年代、京都大学の矢野浩之教授のグループが、木材セルロースをナノオーダーまで解した超微細繊維による新素材「セルロースナノファイバー (CNF)」を開発した。これまでも、セルロースはパルプにすることでミクロンオーダーの繊維として紙の原料となったり、溶剤に溶かして繊維材料やプラスチックとして利用されていた。しかし、CNFはその強度が鋼鉄の約5倍、質量は1/5、熱膨張はガラスの1/50といった驚異的な性能を持つため、さらに幅広い活用が期待されている。CNFの誕生は我が国発の技術として炭素繊維やカーボンナノチューブに匹敵するものであり、現在では製品化に向けて世界中で開発競争が繰り広げられている。

新素材であるCNFは、水酸基を多く持つため水素結合により再凝集しやすく、極性の低いプラスチックや溶剤と混ざりにくいなど、実用面において多くの課題がある。また、セルロース繊維をナノオーダーまで解繊するための効率的な技術開発が必要とされている。そのような中、東京大学の磯貝明教授のグループが、TEMPO (2,2,6,6-テトラメチルピペリジン-1-オキシル) という酸化触媒を用いると、幅3nm程度の反応性に富むCNFを簡単に調製できることを2007年に発表し、CNFの用途開発研究が一挙に進むことになった。現在まで、CNFを使用した製品として、擦れにくいボールペンや消臭効果の高い大人用紙おむつ、透明フィルム、高ガスバリア性包装材料等が開発されている。

我が国のCNFの研究業績は国際的にも高い評価を得ており、磯貝教授は2015年に森のノーベル賞と言われるスウェーデンのマルクス・ヴァーレンベリ賞をアジア地域の研究者として初めて受賞した。また、矢野教授も磯貝教授と共に2016年本田賞を日本人としては16年ぶりに受賞するなど、国内外で「セルロースナノファイバー」への注目度が高まっている。

CNFの技術開発及びその市場の発展・拡大を目指して「ナノセルロースフォーラム」が立ち上がり、多くの企業や研究機関が参画している。CNFは持続可能な資源である木材が原料であるため、地方再生のキーテクノロジーとなりうることから、2014年には政府による「日本再興戦略改定版」において、我が国の木質バイオマスの有効利用技術の一つとしてCNFの研究開発を促

進することが明記された。更に、今年6月に政府が発表した「未来投資戦略2017」でもCNFが取り上げられており、今や国家戦略として研究開発が進められている。

このように魅力ある新素材のCNFだが、木材パルプが原料のため、例えば1kgのCNFで10万円の製品が開発されても、山に入るお金は紙用パルプチップの価格である15円/kg程度にしかならない。あるいは、海外の輸入チップが使われることになる。これでは、CNFが製品化されても森林に還元される資金は現在とほとんど変わらない。そのため、地域の活性化のためには中山間地域において国産材をCNFまで加工する産業を興すことが必要となる。我が国の林業においてCNF生産を考える場合、この視点が非常に重要となる。

本特集号では、CNFについて製造から利用技術まで各分野で活躍されている方々に最先端の話題を紹介して頂いた。まずCNFを開発した矢野氏に、CNFの特性、製造方法、今後の可能性等について解説して頂いた。次にCNFの代表的な製造技術として、(株)スギノマシンの小倉氏にウォータージェット法によるCNFの特性と応用展開を解説して頂いた。森林総研の林氏には酵素処理とミリングを用いた湿式粉碎によるCNFを、藤澤氏にはTEMPO触媒酸化による化学的な製造方法とプラスチックとの複合化についてご紹介頂いた。次に、イオン性官能基の導入による化学的手法のCNFとして、王子ホールディングス(株)の榎藤氏にリン酸エステル化によるCNFを、産総研の遠藤氏、伊藤氏には、リグニンが残った状態の「リグノセルロースナノファイバー」を紹介して頂いた。最後に、製品開発について、第一工業製薬(株)の後居氏にCNFの増粘剤としての利用技術を、三菱鉛筆(株)の竹内氏にCNFを用いたゲルインクボールペンの商品化について、凸版印刷(株)の加藤氏からは、CNFの高いガスバリア性に着目した容器・包装資材への応用技術について紹介頂いた。

本特集を通してCNFはもとより、木材の新しい利用技術や、化学製品を凌駕する木材成分のポテンシャルの高さ等にご興味・ご関心を持って頂けたら幸甚である。最後に、最前線でご活躍されている中、ご多忙にも関わらず本特集号にご寄稿頂いた先生方に対して厚く御礼申し上げます。

木の国ニッポンの資源

矢野 浩之 (やの ひろゆき、京大大学生存圏研究所)

はじめに

今世紀中には100億人を越えるとされる急激な世界の人口増、発展途上の国々における生活レベルの向上は、石油や鉄鉱石といった埋蔵資源の大量消費、加速度的枯渇をもたらす。また、これらの人間活動は同時に地球温暖化の原因物質であるCO₂の排出を増加させる。このような全地球規模での危機的状況は今後、様々な場面において一層顕在化するであろう。持続型資源に基づく社会の構築、CO₂の排出削減は人類に求められる喫緊の課題であり、光合成により大気中のCO₂を固定して生産される植物バイオマス資源の先進的利活用は、この課題解決に不可欠なアプローチとして年ごとにその重要性を増していくことが必至である。

植物細胞壁の骨格であるセルロースナノファイバー(以下、CNF)は植物バイオマス資源の主要成分である。鋼鉄の1/5の軽さでその5倍以上の強度を有する。CNFは可視光の散乱を生じないため、アクリル樹脂、エポキシ樹脂などの透明樹脂を、その透明性を大きく損なわずに補強できる。バイオマス資源の先進的利用の軸としてCNFの製造、機能化、構造・複合化に関する研究開発や開発品を、自動車や電子機器、医療、化粧品など幅広い用途に利用する取り組みが、今後、世界中で急速に活発化していくことが予想される。

2015年、トヨタ自動車はトヨタ環境チャレンジ

2050として2050年までに自動車走行時の排出CO₂のゼロ化と自動車製造から廃棄、再利用までのライフサイクルにおける排出CO₂のゼロ化にチャレンジすることを宣言した。この宣言に代表されるように、地球温暖化の原因となっている大気中のCO₂削減は産業界が総力を挙げて取り組む喫緊の課題である。大気中のCO₂を地中に埋める試みもなされているが、それよりも大気中のCO₂を原料とした高性能材料の製造の方が産業的に好ましいことは言うまでもない。光合成の化学式から明らかなようにCNF中には大気中のCO₂が大量に固定されている。人間が排出したCO₂を植物が有用な物質に変換して大気中から減らし、逆に新鮮な酸素を送り出してくれている。同時に、適切に管理されれば、植物には緑のダムとしての国土保全や環境修復といった多面的な機能も期待できる。

CNFの構造と特性

木材や竹の細胞は鉄筋で強化したコンクリート構造の様な構造の壁で出来ている。CNFが鉄筋として約半分を占め、リグニンがコンクリートの役割を果たしている(図-1)。そのコンクリートを取り除いて、細胞一つ一つに解したものが、コピー紙などの原料となるパルプである。我が国では、年間2000万トン近い紙用パルプが流通している。それを機械的処理、化学的処理により

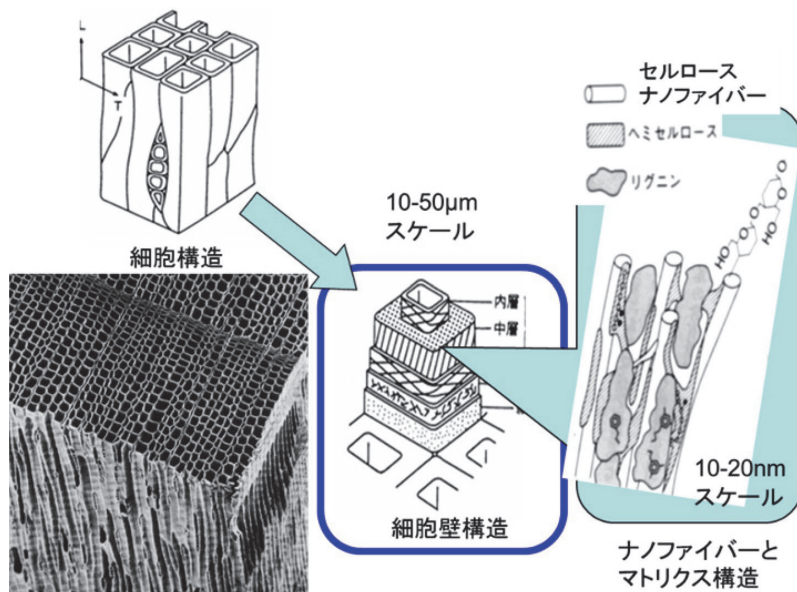


図-1 木材の階層構造

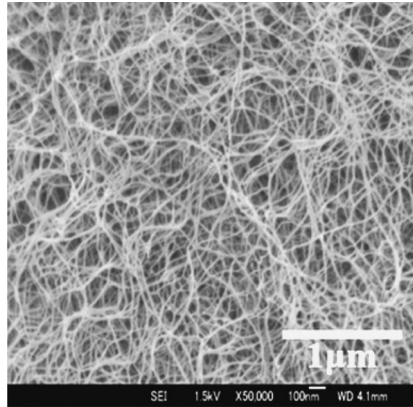


図-2 木材細胞壁中におけるセルロースナノファイバー

解すことでほぼ 100% の歩止まりで CNF が得られる。

CNF はセルロース分子鎖が伸びた状態で水素結合により微結晶化している。最小単位は幅 3-4 nm のシングル CNF である。それが数本の束となって細胞壁中で観察される基本単位、CNF (図-2、幅 15-20 nm) となっている。鋼鉄の 1/5 の軽さでその 5 倍以上の強度があり、結晶弾性率は 140 GPa である。熱による伸び縮みが小さく、線熱膨張係数は 0.1-0.2 ppm/K と推測されており、-200℃から +200℃の範囲で弾性率が動かない。高分子材料であるにも関わらずガラス相当の熱伝導率を有している。

CNF の製造

解繊方法により、シングル CNF からマイクロフィブリル化セルロース (MFC: ミクロフィブリルが数十~数百 nm の束となりクモの巣状のネットワークを形成した状態) まで様々な形態のナノファイバーが製造されている。機械的処理による CNF 製造技術として高圧ホモジナイザー法、水中カウンターコリジョン (ACC) 法、マイクロフレイダイザー法、グラインダー磨砕法、超音波解繊法、二軸押出機による混練法などがある。

製造に要するエネルギーを低減する目的で様々な解繊促進技術が開発されている。東京大学の齊藤准教授、磯貝教授らは、TEMPO (2,2,6,6-tetramethyl-1-piperidinyloxy radical) を触媒に用いて非晶領域にある 6 位のセルロース水酸基を選択的にカルボキシル化すると、水中でナノファイバー相互の反発性が高まりナノファイバー化が促進されることを明らかにしている。ミキサー等のゆるやかな機械処理によってもシングル CNF にまで解繊できる。同様に、CNF 表面の水酸基をカルボキシルメチル化やリン酸エステル化してもナノ化は促進される。この他に酵素を用いたナノファイバー化の促進も行われている。

CNF は植物細胞壁の基本物質であり、全ての植物資

源が原料となり得る。これまで木材や竹から製造したパルプ以外に、稲ワラ、バガス (サトウキビの絞りカス)、ジャガイモやキャッサバのデンプン絞りカス、砂糖ダイコン (シュガービート) の絞りカス、あるいはミカンやブドウの搾汁カスや焼酎カスといった農産廃棄物や産業廃棄物についても検討がなされ、いずれの原料からも機械的解繊により幅 15-50 nm 程度の均一ナノファイバーが得られている。特に、コットンを原料とすると純度の高い CNF が得られる。

CNF の利用

CNF やセルロースナノクリスタル (CNC: パルプや CNF を高濃度の硫酸や塩酸で処理して得られるセルロース純度の高い結晶性素材) の高比表面積、可食性、軽量・高強度、低熱膨張性、生分解性、生体適合性など CNF が有する特徴を活かし、様々な用途開発が進められている。それは金属材料、セラミックス・ガラス、高分子材料といった主要工業材料すべての用途にまたがるとともに、食品などこれら工業材料では対応できない用途にまで広がっている (図-3)。詳細については他の記事¹⁻³⁾を参照していただきたい。

可視光波長 (400-800 nm) に比べ十分に細い CNF は可視光の散乱を生じないため、アクリル樹脂、エポキシ樹脂などの透明樹脂を、その透明性を大きく損なわずに補強できる (透明補強)。有機薄膜太陽電池や有機 EL 用の透明ガラス基板の代替として検討されている。

TEMPO 酸化触媒を用いた表面イオン化により幅 10 nm 以下にまで解繊したシングル CNF のフィルムはそれだけで高い透明性を示す。適度な透湿性を保ちながらポリエチレンテレフタレート (PET) やポリ塩化ビニル (PVC) の 1/100 以下の酸素ガス透過性を示すことから、包装容器のコーティング素材として検討されている。

軽量・高強度繊維の特性を活かし構造用途への検討も進められている。ナノファイバーシートにフェノール樹脂を注入後、積層、硬化すると、繊維率約 90% のもので鋼鉄なみの強度でありながら 1/5 の軽さの成形体を得られる。

上記の他に、ゴムの補強材、紙の表面平滑化や紙力増強、食品・化粧品用添加剤、人工血管や人工腱といった医療用途、触媒等の担持体、フィルター素材、二次電池セパレーター、キャパシターへの応用についても研究されている。

現在、10 を越える企業や公的機関から CNF や CNF 複合樹脂材料のサンプル提供が始まっており、用途開発が活発化している。CNF の添加により脱臭性を高めた



図-3 セルロースナノファイバー材料の拡がり

大人用オムツやCNF溶液のチクソトロピー性（外力により流動性が高まる性質）を利用して、液ダレを防ぎ書きやすくしたボールペンインクなどがすでに商品化されている。

京都プロセス

CNFの用途で最も期待されているのは、軽量、高強度、低熱膨張という特性を活かした自動車部材等、構造用途である。その多くは熱可塑性樹脂を補強する強化材料としての利用である。現在、世界のプラスチック消費量は年間3億トンになろうとしており、この5%をCNFで補強するとCNFだけで10-15兆円のマーケットになる。

そこで我々は高効率でCNF強化熱可塑性樹脂を製造する「京都プロセス」という独自の製造プロセスを開発した。樹脂との複合化では、樹脂に合わせてCNF表面の化学構造の設計や相溶化剤との組み合わせが必要となる。これらは製造コスト増を招き、複合材料の用途が限定される。このため、CNF集合体としてのパルプの優れた価格競争力（50-100円/kg）を最終製品にまで維持するための、原料バイオマスの選択からパルプ化法、ナノ解繊法、化学変性法、成形加工法までを俯瞰した製造プロセスの開発が不可欠である。

我々は製紙メーカー、製紙薬品メーカー、京都市産業技術研究所との産官学共同研究で、化学変性したCNFをポリプロピレンやナイロン6といった熱可塑性樹脂に10%混ぜると、強度が2-3倍も向上することを明らかにした。それを踏まえ、原料である木材や竹などの木質バイオマスからリグノパルプを製造して乾燥シートと

し、それを化学処理後に粉砕し樹脂と溶融混練して、高耐熱CNF強化樹脂材料を連続的に製造するプロセス（京都プロセス、図-4）を開発した。昨年春にはこのプロセスに基づく、年間1トンのCNF強化樹脂を製造するテストプラント（将来的には年間5トンにまで拡張可能）を京都大学宇治キャンパス内に建設し、複数の企業、公的機関にサンプル提供を行っている。並行して当技術を樹脂成形品の発泡化技術と組み合わせながら軽量、高強度の特性が求められる自動車など輸送機用の構造部材への利用について検討している。

日本再興戦略とナノセルロースフォーラム

2014年3月に、経済産業省、農林水産省並びに産学の学識経験者の共同により、CNFの将来展開プランについて、技術ロードマップが策定された。続いて、6月24日に閣議決定された「日本再興戦略」改訂2014において、木質バイオマスについて“セルロースナノファイバー（超微細植物結晶繊維）の研究開発等によるマテリアル利用の促進に向けた取組を推進”することが明記された（改訂2015、改訂2016においても記載）。それを踏まえ、8月には農林水産省、経済産業省、環境省、文部科学省、国土交通省が連携してナノセルロース（CNF、CNC、およびそれらを用いた材料の総称）に関する政策を推進することとし、政策連携のためのガバナングボードとして「ナノセルロース推進関係省庁連絡会議」が創設された。関係省庁は定期的に連絡会議を持ち、各省の取組について情報共有を図るとともに、各省間で施策の連携について模索している。また、昨年5月にはCNF活用推進議員連盟が発足し、CNF材料の社会実



図-4 京都プロセスに基づくテストプラント

装を支援している。

これらの動きと並行して、2014年6月には、オールジャパン体制でナノセルロースの研究開発、事業化、標準化を加速するためのナノセルロースフォーラムが発足し、木材、製紙、化学・樹脂、自動車、電気・電子製品など幅広い分野から200を越える企業の参画を得ている。また、ナノセルロース研究を進めている個人会員とともに、経済産業省、環境省地球環境局、特許庁、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構、(株)産業革新機構、岡山県、高知県、愛媛県、京都市などの50近い公的機関が特別会員として参加している。

こうした活発な動きは、地域単位でのまとまりも見せている。東海、近畿、中国、四国などの地域では、すでにナノセルロースに関する研究会、コンソーシアムが出来ている。このような地域の動きを受けて、2015年4月には、ナノセルロースフォーラム内に地域分科会が新たに設立され、地域のナノセルロース研究開発の支援に向けて動き出している。

終わりに

日本は国土の7割近くが森林に覆われており、世界の先進国の中ではフィンランドやスウェーデンと並んで最も森林率の高い国である。特に、森林の2/3を占める人工林において木材の蓄積量が毎年8000万 m^3 近く増加しており、資源的に有利な位置にある。スギ、ヒノ

キ中心の木材1 m^3 の重量を400kgとすると、その半分はCNFなので、人工林で毎年1500万トンのCNFが蓄積していることになる。それは我が国における年間プラスチック消費量の約1.5倍の量に匹敵する。持続的に管理される人工林において生産されるCNFの製造と利用に関する研究開発が進めば、海外の原油や鉄鉱石に依存してきた我が国の産業形態を、林業、製紙産業、高分子化学産業、部素材加工業、自動車・家電・建築産業が垂直に繋がった自国の持続型資源による21世紀型産業形態へと大きく変革できる。化石資源に依存した20世紀型の発展は、長い地球の歴史の中で見れば短いタイムスパンで環境的には大きく負の方向に振れた出来事といえる。そのプレを本来の地球環境の状況に戻すことこそ、木の文化を育ててきた日本が世界をリードして進めべき取り組みである。

引用文献

- 1) 矢野浩之(2010)セルロースナノファイバーの製造と利用. 日本エネルギー学会誌 89(12): 1134-1140
- 2) 矢野浩之(2015)未来の自動車は植物でつくる. 自動車技術 69(4): 71-76
- 3) 矢野浩之(2015)セルロースナノファイバー材料の社会実装に向けて. 化学経済 62(5): 1-5

ウォータージェット法による セルロースナノファイバー

小倉 孝太 (おぐら こうた、株式会社スギノマシン)

はじめに

木材の主成分であるセルロースは、分子鎖が36本集まったセルロースマイクロフィブリルと呼ばれる繊維径3-4nmのセルロースナノファイバー(CNF)で構成されている。CNFは、再生可能な有機資源であるとともに、高強度・低熱膨張・軽量・極細繊維などの優れた特性を幾つも有している。そのため、世界中で研究開発が進められ、実用化に向けた取り組みがなされている。日本はそのトップを走っており、国を挙げて支援をしている。

セルロース源の木材は安価で身近な材料だが、木材中のセルロースは、CNF同士が非常に強固な分子間水素結合をしているため、CNFを得るのは容易ではない。実用化のためには、効率良く分子間水素結合を切断する方法が必要となる。その方法は、①機械解繊法と②化学処理と機械解繊を組み合わせた方法に大別され、様々なCNF製造法が報告されている。いずれも機械解繊工程は必須であるため、CNFの有効利用を進めるには、さらなる高効率解繊技術が求められている。

このような状況の中、当社では独自のウォータージェット技術を応用することで、水のみを使用して高効率でCNFを製造する装置・技術を開発し^{1, 2)}、製造したCNFを「BINFi-s[®] (ピンフィス)」の商品名で販売している。このウォータージェット法は、水と原料のみでCNFを製造しているため、環境にも人体にも優しく、比較的低コストでCNFを製造できる優れた技術である。本稿では、このウォータージェット法の特徴とウォータージェット法で製造したCNFの特徴について紹介する。

ウォータージェット法によるCNFの製造

ウォータージェットとは、超高圧まで加圧した水を微細なノズルに通して得られる細い高速噴流のことである。当社のウォータージェット法を利用したCNF製造装置の模式図を図-1に示す。セルロース水分散液を原料タンクに投入し、給液ポンプを用いて2本の増圧機に送り込み、最大245MPaまで加圧する。加圧されたセルロース水分散液は、微細化チャンバーと呼ばれる衝突室で向かい合った二つのダイヤモンドノズルから噴射

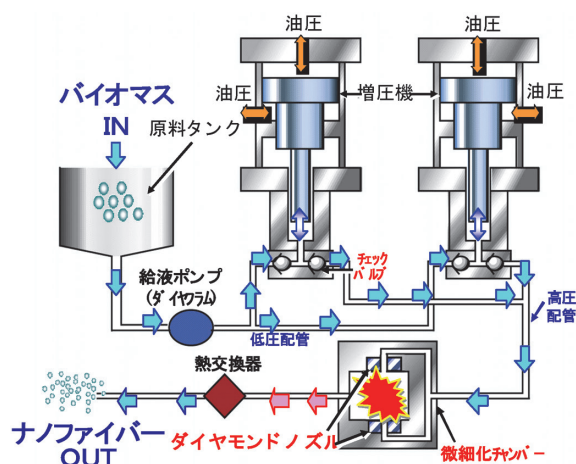


図-1 ウォータージェット法によるCNF製造装置の模式図

される。これらは、約700m/s(マッハ2)のセルロースを含んだウォータージェットとなり、チャンバー中でセルロース同士が衝突する。すると(1)高速によるせん断力、(2)セルロース同士の衝突力、さらに(3)衝突噴流中のキャピテーション気泡の破裂による衝撃力により、ナノファイバー化が行われる。噴射後のセルロース水分散液は、処理圧力に比例して温度上昇を伴うため、熱交換器を通すことで、冷却してから回収している。本法の特徴を下記に示す。

- ①水と原料のみでナノファイバー化が可能のため、環境・人体に優しい。
- ②粉碎媒体を使用していないため、コンタミネーションが極めて少ない。
- ③エネルギー密度が高いため、短時間・高効率でナノファイバー化が可能である。
- ④連続処理が可能であり、装置のスケールアップ・ナンバリングアップで大量製造も容易である。
- ⑤高濃度・高粘度な原料の処理も可能である。
- ⑥過度な力を用いた強引なナノファイバー化でないため、原料のファイバー形状を壊さない。
- ⑦噴射圧力や衝突回数を制御することで、得られるナノファイバーの物性を制御できる。

効率良くCNFを製造するためには、前述した3種類の力を最大限に利用する必要があるが、一部、トレード

オフもあるため、CNF 製造に適した条件を見出す必要がある。当社では、このウォータージェット法を利用した CNF 製造プラントを構築している。本プラントの製造能力は、CNF 水分散液の状態ですべて 1t/day である。用いる原料によっても異なるが、最大処理濃度は概ね 10wt% である。高粘度、長繊維、高結晶化度の CNF を高品質・高効率に製造でき、さらにクリーン環境にも対応している。このような製造設備は他に類を見ない。

ウォータージェット法で製造した CNF の外観

ウォータージェット法で製造しているため、CNF は水分散液の状態です。2 wt% CNF 水分散液の外観を写真-1 に示す。通常、セルロースは水に不溶なため、水に分散させると直ぐに沈殿してしまいが、CNF 化することにより、表面積が増大し、セルロース表面の多数の水酸基が水と水素結合し、CNF は水中で三次元ネットワークを形成することで均一に分散した高粘度流体となる。この状態は、凍結や乾燥をさせなければ半永久的に保持される。高濃度になることで、粘度はさらに上昇し、5 wt% ではクリーム状、10 wt% では紙粘土状になる。CNF 水分散液は、せん断力が高くなると粘度が低下し、その粘度には時間依存性（チクソトロピー性）を有していることも大きな特徴の一つである。

次に、ウォータージェット法で製造した CNF の乾燥粉末体の電界放射型走査電子顕微鏡（FE-SEM）像を図-2 に示す。繊維径が約 20 nm、繊維長が数 μm 以上（アスペクト比 100 以上）の、一本一本独立した CNF になっていることが確認できる。

ウォータージェット法で製造した CNF の結晶化度と重合度

CNF は、結晶化度や重合度（繊維長）の違いにより性質が大きく異なってくるため、それらを緻密に管理する必要がある。つまり、使用方法や使用目的に合った結晶化度や重合度の CNF を選定することが重要となる。CNF を製造するための解繊方法によっては、結晶化度や重合度を大幅に低下させるものがあるが、それでは目的にあった CNF を製造することは困難である。それに対して、ウォータージェット法の大きな特徴の一つに、セルロースの結晶化度および重合度をほぼ低下させることなく CNF を得られる点が挙げられる。この点については、CNF の機械解繊法の中で、ウォータージェット法が最も優れていると考えられる。ウォータージェット法で製造した CNF の結晶化度の変化を図-3 に示す。CNF 製造時の噴射圧力は 200 MPa である。衝突回数を増加させても X 線回折（XRD）パターンに大きな変

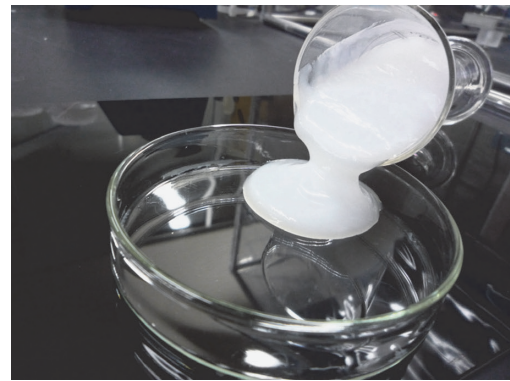


写真-1 2wt% CNF 水分散液

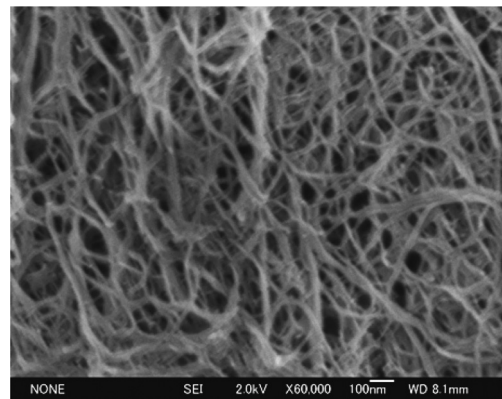


図-2 CNF の FE-SEM 画像

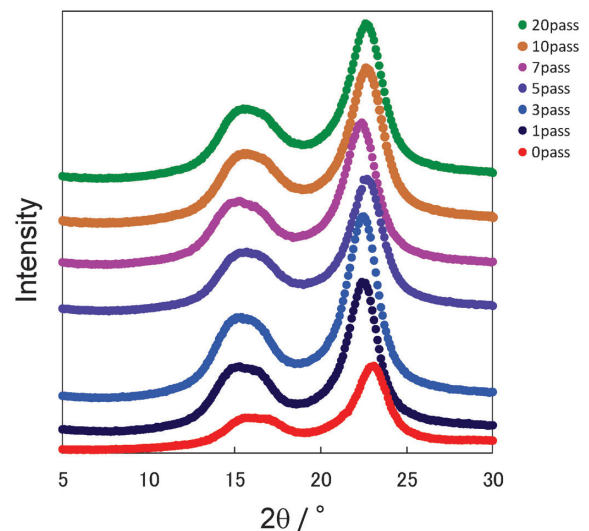


図-3 ウォータージェット法で製造した CNF の XRD パターンの変化（産業技術総合研究所エネルギー貯蔵材料グループ・吉澤徳子グループ長提供）

化は見られず、20 回衝突後も結晶化度をほぼ保持したまま CNF 化していることが分かる。

次に、重合度を測定した結果を図-4 に示す。重合度が小さいセルロース B を用いた場合は、重合度にほぼ変化は無く、比較的重合度の大きなセルロース A を用いた場合でも、重合度は約 7 割保持していることが分かる。つまり、分子鎖の β-1,4 グリコシド結合はほぼ

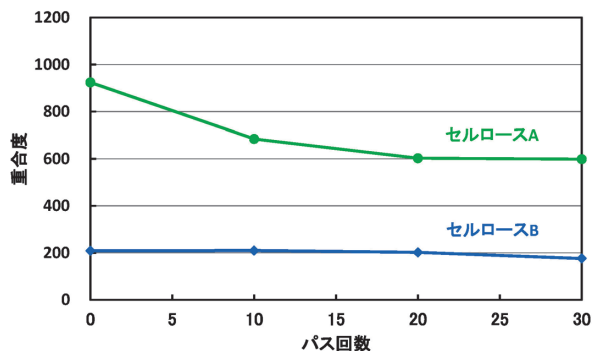


図-4 ウォータージェット法で製造した CNF の重合度の変化

切断せずに、分子間水素結合のみを切断し、CNF 化している。重合度の低下は、繊維長の低下を意味しているため、重合度がほぼ低下しない本手法なら、原料に重合度の大きなセルロースを用いれば長い CNF を、重合度が小さなセルロースを用いれば短い CNF を製造できる。

ウォータージェット法は、原料を変えることによって様々な性質を持つ CNF を製造できるため、それぞれの使用方法や使用目的にあった CNF を提供できる。

CNF の応用展開—分散安定剤、乳化剤

ウォータージェット法で製造した 0.5 wt% CNF 水分散液に、ポリスチレン (PS) 製ビーズ、活性炭微粒子、SiO₂ 微粒子、TiO₂ 微粒子を混合させた様子を写真-2 に示す。わずか 0.5 wt% の CNF 水分散液にもかかわらず、PS のように低比重 (約 1.0) であれば直径が約 3 mm の比較的大きな粒子でも分散安定化し、逆に TiO₂ のように高比重 (約 4.0) でもメジアン径が約 3.0 μm の二次粒子であれば分散安定化する。このメカニズムとしては、水中の CNF 三次元ネットワークに対象粒子が絡まることで分散が安定化するためと考えられる。そのため、比較的低粘度にもかかわらず、幅広いサイズの粒子を分散安定化することができる。さらに興味深いのは、チクソトロピー性を利用することで、容器を激しく振った際には、対象粒子も激しく動くが、容器を止めた際には、対象粒子もその場で止まり分散状態を保持する点である。これらの性質は、CNF が持つユニークな特性である。既存の分散安定剤では不可能であった製品の開発も、CNF を用いることで実現できる可能性があり、新たな市場開拓のカギとなる新素材として期待されている。

水と油の中に固体微粒子を添加すると、水と油の界面に固体微粒子が層を形成し、エマルジョン (乳化した状態) を得ることができる。これは、Pickering エマルジョンと呼ばれている。CNF を用いることでも Pickering エマルジョンを作製することができる。0.1 wt% CNF

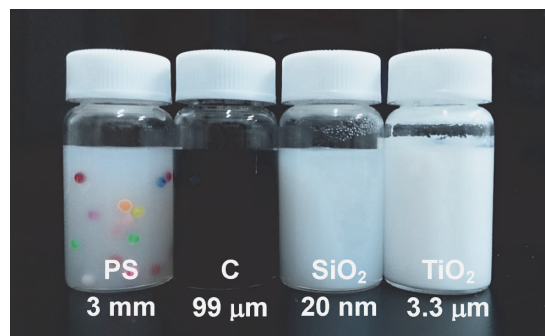


写真-2 CNF による微粒子の分散安定性
粒子の種類と粒径を示した

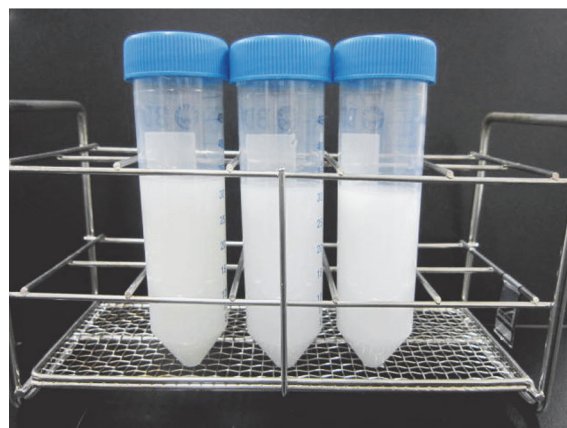


写真-3 CNF による Pickering エマルジョン
左：なたね油、中：流動パラフィン、右：トルエン

水分散液と種々の有機溶媒を混合し作製した Pickering エマルジョンを写真-3 に示す。いずれも均一な Pickering エマルジョンを形成していることが分かる。この状態は、数ヶ月後も維持される。油成分にモノマー (単量体) を用いて、Pickering エマルジョンを作製後、モノマーを重合すれば、CNF/ポリマー複合体の作製も可能である。この複合体の CNF を改質して機能性を持たせることで、応用の幅を広げることができる。また、TEMPO 酸化 CNF を用いた均一なマイクロ粒子の開発も報告されている³⁾。

CNF の応用展開—補強材

CNF は、炭素繊維やガラス繊維と比較して、軽量、安価の可能性、高サーマルリサイクル性、高平滑性そして再生可能資源などの特徴を有するため、CNF 強化プラスチックの開発が望まれている。

一例として、ポリビニルアルコール (PVA) に CNF を 10 wt% 添加した、PVA/CNF 複合フィルムを挙げる。CNF は繊維長の異なる 2 種類を用いた。それぞれの PVA/CNF 複合フィルムの応力-ひずみ曲線を図-5 に示す。CNF を添加することで PVA の強度が向上してい

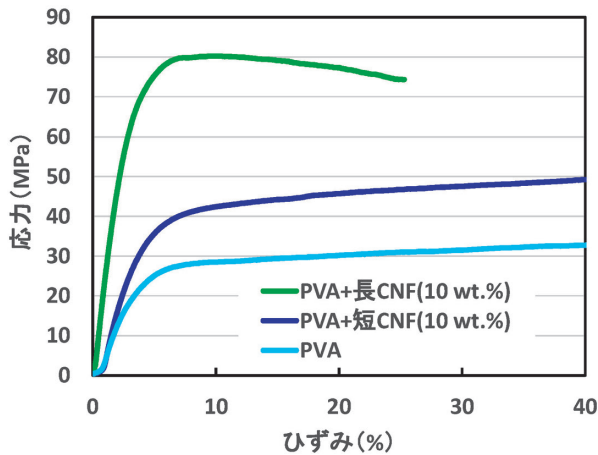


図-5 PVA/CNF 複合フィルムの応力-ひずみ曲線

る。また、CNFの種類で比較すると、繊維が長いCNFを添加した複合フィルムの方がより補強効果が高いことが分かる。このことから、PVAの補強には繊維長が長い方が適していると言える。また、複合フィルムの可視光領域での透過率は80%以上であり、透明性を十分に保持している。これは、CNFが可視光の波長よりも十分に小さく、光の散乱を生じないためである。

一般的な汎用プラスチックやエンジニアリングプラスチックは、疎水性のため、水に分散した親水性の高いCNFと複合化するのは困難である。そこで、様々な研究機関で疎水化CNFの開発が進んでいる。ウォータージェット法は、有機溶媒にも対応することができるため、疎水化CNFの作製にも利用できる。

おわりに

最近、CNFはメディアにも多数取り上げられ、夢の新素材としての期待は高まる一方である。しかしながら、実用化された例は乏しい。理由として大きな2つの課題が挙げられる。1つ目は価格である。CNFの原料と

なるパルプは非常に安価な材料であるが、現在のところ前処理工程、解繊工程、乾燥工程などに掛かる処理費用が高く、結果としてCNFは高価な材料となっている。2つ目は、その高アスペクト比、高親水性がもたらす「扱いにくさ」である。上記の特徴はCNFの大きなメリットでもあるが、水分散体の場合は高粘度流体となり、第三成分と混合しにくい場面も多く、CNFの優れた特性を活かしきれていない場合が多い。また、疎水性の樹脂などと複合化する場合は、疎水化処理という1ステップを増やす必要が出てくる。

CNFを本当の意味で、夢の新素材にするには、上記の課題をクリアする必要がある。当社のウォータージェット法は、現在最も優れたCNF製造方法の1つである。今後も、そのウォータージェット法を基に、CNFの市場拡大の一助になれるような技術開発を進めていく。

引用文献

- 1) Watanabe Y, Kitamura S, Kawasaki K, Kato T, Uegaki K, Ogura K, Ishikawa K (2011) Application of a water jet system to the pretreatment of cellulose. *Biopolymers* 95(12): 833-839
- 2) 小倉孝太 (2016) 第5章 ウォータージェット法によるナノセルロースの製造. I編 ナノセルロースの製造. (ナノセルロースの製造技術と応用展開. シーエムシー・リサーチ). 42-52
- 3) 藤澤秀次・戸川英二・黒田克史 (2017) ナノセルロース/ポリマー複合マイクロ粒子のエマルジョンテンプレート合成. 第84回紙パルプ研究発表会講演要旨集: 129-132

酵素・湿式粉碎によるセルロース ナノファイバー製造法とその応用

林 徳子 (はやし のりこ、森林総合研究所)

はじめに

植物バイオマス素材に注目が集まったのは、石油資源の枯渇問題が契機であった。その後も原油の価格高騰の度にバイオマスが話題になり、石油由来のプラスチックに替わり、再生可能なバイオマス資源を燃料や化学製品原料とする技術開発が提唱された。また、戦後造林された日本の森林蓄積は増加の一途を辿っており、これら森林資源の新規な利用分野の開拓が、日本の森林・林業・林産業において望まれている。

セルロース

セルロースは、樹木細胞壁の骨格成分としてセルロースマイクロフィブリルという繊維の形態で生産され、リグニン、ヘミセルロースとともに木材の主要成分として化学組成の約半分を占める。セルロースは、グルコース2個からなるセロビオースを基本単位とする直鎖状高分子で構成されるが、セルロース分子鎖は整列して互いに水素結合等で結合し、複雑な高次構造をとる。このような構造は、セルロースにしなやかでありながら、高い強度、寸法安定性を与えている。

また、セルロースは植物、微生物等が生産するが、その起源によってセルロース分子鎖の水素結合が若干異なる結晶を形成し、セルロースI α とセルロースI β に分類される。I α は、海藻やバクテリアセルロース(bacterial cellulose, BC)に、I β は樹木等の高等植物や海産動物の原索動物ホヤ殻に多く含まれる。

セルロースの利用については、環境調和型プロセスで燃料や先端材料へと変換する技術革新研究が進められてきたが、近年特に、植物繊維をマイクロフィブリル単位までほぐすことにより生産される「セルロースナノファイバー (cellulose nano-fiber, CNF)」が注目されている。CNFは軽くて強く、大きな比表面積を有し、熱に対する寸法安定性がある。高強度・高じん性プラスチックの補強材料であるガラス繊維の代替、ゴムに混ぜるシリカの部分的代替等への利用の他、エアロゲル、増粘剤などの様々な実用化研究が進行している。

セルロースナノファイバー

ナノファイバーは、径が1-100 nm、アスペクト比(長さ/径)が100未満の繊維と定義されている。セルロースはその起源によってサイズが異なるが、径は3-20 nm(緑藻バロニアは約20 nm、ホヤは10 nm、樹木等高等植物は3-4 nm)、長さは数百nm~数 μ mで、セルロース分子鎖が整列した構造を取る「ナノファイバー」である。最もセルロースの蓄積量が多いのは樹木であるが、このセルロースは細胞壁に含まれ、リグニン、ヘミセルロースによって稠密に充填されているため、セルロースを利用するにはリグニン等の除去が重要である。また、セルロースは精製や乾燥により凝集しやすく、一旦凝集すると、ナノサイズにほぐすことは困難になる。CNFの製造における課題は、いかにこの凝集を効率的にほぐすかであり、物理的には高圧ホモジナイザー等の強力なせん断力を、化学的にはセルロース表面の化学修飾とその後の軽微な解繊処理を行って製造されている。

セルロースの凝集を効果的にほぐす方法はあるか?筆者らは、セルラーゼによる結晶性セルロースの酵素加水分解残渣を精査し、セルラーゼがセルロースをマイクロフィブリルレベル、すなわちCNFレベルまでほぐしてから分解することを明らかにした¹⁻⁴⁾。酵素加水分解は、セルロースと酵素液の固液反応であるため、反応が不均一で長時間を要するという欠点がある。しかし、水と酵素のみを用いて常温から50℃の温かな温度条件で反応を行えば、セルロースの解繊に必要な多大なエネルギーを節約できる上、地球環境への負荷も低い。ここでは、セルラーゼ及びそのセルロース分解機構について解説し、これを用いたセルロースのナノ化の方法について解説する。

セルラーゼおよびその加水分解機構

セルラーゼはセルロースをグルコースに分解する加水分解酵素で、微生物、動物等に広範に見出され、地球上に最も多い酵素の一つである⁵⁾。特に *Trichoderma*, *Aspergillus* 等の糸状菌は強力なセルラーゼを分泌するが、醤油等の醸造や果実エキス等の抽出など食品分野、医薬品分野で多く利用されている。

セルラーゼには、基質への作用機作の相違により、セルロース分子鎖の末端から作用するエキソ型のセロピオハイドロラーゼ (CBH)、分子鎖にランダムに作用するエンド型のエンドグルカナーゼ (EG)、生成したセロピオースをグルコースへと分解する β -グルコシダーゼの3つに大きく分類される。多くの微生物は2種以上のセルラーゼ成分を生合成し、相刺的に作用させて効率的にセルロースを分解する^{5, 6)}。強力なセルラーゼ系酵素を分泌する *Trichoderma* 菌のセロピオハイドロラーゼ I (CBHI) は、セルロース分子鎖を分解するトンネル状のサイトを有する触媒モジュールと、セルロースマイクロフィブリル表面に結合して触媒モジュールを基質表面に濃縮するくさび状のセルロース結合モジュール (CBM)、これらがリンカーにより結合されたオタマジャクシ様の構造である。小さいくさび状の CBM がセルロース鎖と結合してセルロース鎖間の水素結合を切断し、結晶構造を緩めると考えられている^{7, 8)}。

セルロースの酵素分解

セルロースは結晶性を有するなど複雑な高次構造のため、酵素加水分解のメカニズムも複合的で複数の酵素が相乗的に作用する。1950年に提唱された「C1 - CX 説」⁸⁾では、まず C1 酵素がセルロースを断片化し、CX 酵素が可溶性の短い分子まで分解するとされ、C1 については「強固な結晶セルロースを形成する水素結合を壊す hydrogen bondase」や「アルカリ性下でセルロース鎖間に水分子を導入して膨潤させる swelling factor」が提案された。これらの酵素の存在は現在否定されているが、いずれもセルロースを「割る」作用を示す。1980年代以降、酵素分解残渣の電子顕微鏡観察から、セルロース結晶のフィブリル化など、微細構造においても酵素の「割る」作用が明らかになった⁹⁾。

一方、セルロース結晶構造も酵素加水分解性の相違に寄与することを明らかにした。*Trichoderma* のセルラーゼや CBHI を用いて数種のセルロースの分解挙動を調べたところ、結晶化度が高い海藻のセルロースや BC の方が、ホヤや木材のセルロースより容易に分解された。海藻セルロースや BC はセルロース I α を含んでいる。そこで、これらの残渣に含まれる I α と I β の量を比較したところ、I α が選択的に分解されて減少または消失したことが判明した²⁻⁴⁾。I α の選択的分解は I α と I β の結晶構造のわずかな相違に起因すると考えられる。

結晶構造とセルラーゼの加水分解機構の関係をより理解するため、セルロースの結晶領域のみを残した微結晶セルロース (microcrystalline cellulose, MCC) 試料

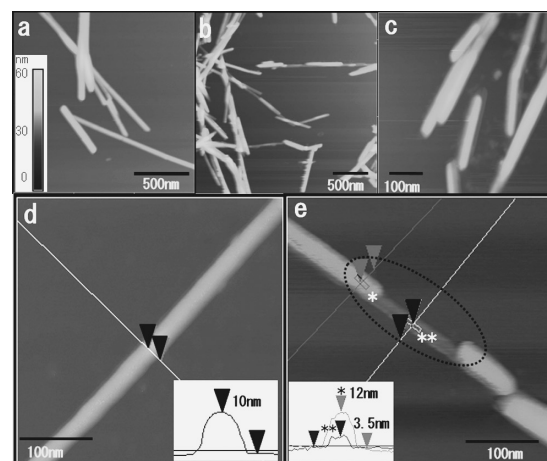


図-1 原子間力顕微鏡による *Cladophora* sp. MCC の酵素加水分解残渣の観察結果
a: 未処理、b: 酵素処理2日後、c: 短繊維、d: 未処理 MCC の厚さ (挿入図: MCC 横断面の高さ)、e: 酵素処理後ブロック状に剥がれた部位 (挿入図: 剥がれた部位の MCC 横断面の高さ)

について、*Trichoderma* の CBHI による酵素加水分解後の残渣を比べたところ、緑藻の *Cladophora* (シオグサ) では I α は減少し、約 350 nm 長の短繊維が生成された (図-1c)。この短繊維は I β に富み、酵素処理前と同様に高い結晶性を示すナノファイバーであった (ここではナノエレメントと呼ぶ)。原子間力顕微鏡の結果から、ナノエレメントは元の MCC からブロック状に剥がれて形成されたものと推定された (図-1e)。以上の結果から、*Trichoderma* のセルラーゼの選択的な I α 分解によってナノエレメントが生成したと考えられる。

酵素加水分解によるセルロースの微細化

セルラーゼのセルロースを「割る」作用を利用できないか？我々は、非晶領域に作用する EG と物理的破碎の同時処理がセルロースの微細化に寄与することを明らかにした。微結晶セルロースを、攪拌子を器壁に擦りつけながらの攪拌、超音波処理、ボールミル処理等によって物理的破碎する際に、エンドグルカナーゼ (例えば、マツノザイセンチュウ *Bursaphelenchus xylophilus* 由来の酵素である EGx1 や *Trichoderma* の EGII) を加えて酵素が作用できる条件で処理したところ、試料は粘度の高いゲル状になり、電顕でマイクロフィブリルが1～数本ずつに分散したことを確認した。図-2に示す通り、ボールミル処理のような物理的破碎のみではセルロース試料に軸方向に沿った亀裂や部分的なフィブリル化が生じるものの、凝集した部分が多く残っていたが (図-2a)、物理的破碎と EG 処理を同時に行うとマイクロフィブリル単位までフィブリル化した (図-2b)^{10, 11)}。

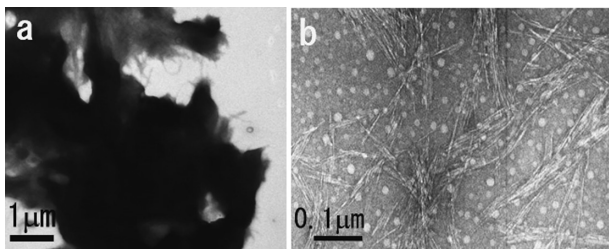


図-2 MCC (アビスセル) の透過型電子顕微鏡写真
a: ボールミル処理3日後、b: ボールミル+EG
処理3日後

また、竹パルプについても機械処理とEG処理の同時処理したところ、幅3-4 nm、長さ約800 nmとアスペクト比の大きいCNFが生産された(図-3)。タケCNFの分散性がよいため、懸濁液(左から0.5%、1%、2%)は濃度が低いと半透明になり(図-4a)、これを乾燥させると透明フィルムになり(図-4b)、わずかに1%以下の低濃度の状態でゲル化した(図-4c)。タケCNFにはヘミセルロースが2割含まれるが、CNF表面にヘミセルロースのキシランが存在するためゲル化しやすいと考えられる。また、タケCNFが分散の難しいカーボンナノチューブとの相溶性に優れていることを明らかにしたが、これもヘミセルロースがCNF表面に存在することに起因すると考えている。本方法では、自然界でもセルロースを分解するセルラーゼ酵素によってセルロースマイクロフィブリル間をほぐしてCNFを調製しており、そのヘミセルロースの残存状態は、植物が形成する細胞壁骨格からリグニンを除去したものをほぐした状態に近いと推定できる。ヘミセルロースはセルロースよりも若干疎水性を示し、ゲル化やカーボンナノチューブなどとの相溶性を示すことから、このような性質を活かした新しい利用開発が期待できる。

国産スギを活用したCNF製造と利用技術の開発(平成26-27年度木材需要拡大緊急対策事業)

我が国は、国土面積の約7割が中山間地域と呼ばれる山間地で、この地域の森林は戦後植栽されたものが多い。戦後72年が経過した現在、森林蓄積は大幅に増加している。特に人工林では、50年生以上の高齢級の面積が2017年には全体の6割に達する見込みであるなど、資源としての本格的な利用が可能な段階を迎えており、この状態は今後も続くものとみられる(平成25年度森林・林業白書より)。これらの森林の適切な施業のために、成熟した木材資源の利用が重要であり、併せて過疎化、高齢化等の問題をも抱えている中山間地域の活性化につながることを期待できる。

平成27年6月に内閣府より発表された『日本再興

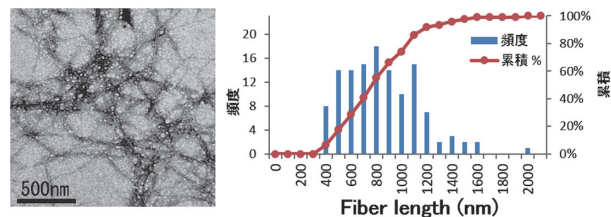


図-3 酵素処理と機械処理を併用して得られたタケ由来CNFの透過電子顕微鏡写真(左)およびCNFの長さ分布(右)

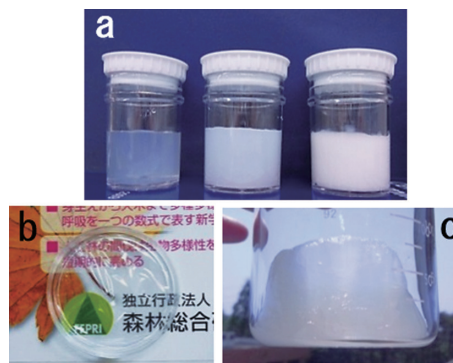


図-4 酵素処理と機械処理を併用して得られたタケCNF
a: セルロース懸濁液、b: フィルム、c: ゲル

戦略』改訂2015』においても、林業の成長産業化を進めるための手段として「セルロースナノファイバーの国際標準化に向けた研究開発を進めつつマテリアル利用への取組を推進する」ことが明記されており、セルロースは今最も期待される素材である。

しかし、CNF製造はパルプ産業が主体となって進められており、国内の森林利用は視野に入っていなかった。現状では、東北のカラマツや九州のスギを使用する一部の製紙工場を除いて、クラフトパルプ原料への国産針葉樹の利用は極めて少ない。また、仮に国産針葉樹を原料に使用したとしても、チップとして製紙工場へ販売することを前提にするので、木材生産者にチップ原料の販売価格以上の利益は還元されない。国産材の需要拡大と林業の活性化を目指すためには、製紙工場で製造されるパルプを原料にするのではなく、中山間地域で入手できるスギやヒノキ等の国産材を生産者が直接パルプ化してCNFを製造し、利益を地域に還元させる新産業の創出が望まれる。また、中山間地域という地域性を考慮すると、CNF製造に関わる環境負荷をできるだけ抑えとともに、安全で簡便な工程システムを開発する必要がある。

そこで、その端緒とすべく、平成26年度木材需要拡大緊急対策事業では、地域産のスギ等を原料とし、付加価値の高いCNFを中山間地域で生産できるシステム開発を試みた。すなわち、小規模、低環境負荷型のパルプ

化・CNF一貫製造システムを実証するため、森林総合研究所内に、ソーダAQ蒸解パルプ漂白ユニットと、酵素処理およびビーズミル等の機械処理によるCNF製造ユニットの2つのユニットからなる製造プラントを建設し、中山間地域で特に問題となる用水・排水に関する問題等について検証を進めている。また、これと並行して、27年7月からは本プラントで試験的に生産したCNF懸濁液を森林総合研究所のホームページに掲載して無償で配布した。本事業で製造したのは無修飾CNFで、木質成分のヘミセルロースを含むため、これに起因する特異的な物性を有している。我々は、このような特徴を利用した製品開発を市場で進めていくための足場を形成する必要があると考え、CNFの利用開発の可能性を模索している。そこで、水分散液の状態で得られるCNFについて、様々な分野で検討を行い、汎用プラスチックや水溶性樹脂との複合化も進めている。この事業を通じて、成熟期を迎えた人工林が産出する豊富な森林資源の循環利用と、林業の成長産業化の実現を目指しており、その中から今後の発展につながる結果が出ることを切に願っている。

謝辞

本研究の一部は平成26-27年度及び平成28年度林野事業、平成26-28年度異分野融合事業、平成25-27年度科学研究費助成事業で実施した。また、Novozymes社からEG酵素を提供して頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 林 徳子・石原光朗・志水一允 (1995) 高結晶性天然セルロースの酵素加水分解残渣の特徴. 木材学会誌 41: 1132-1138
- 2) Hayashi N, Ishihara M, Sugiyama J, Okano T (1997) The enzymatic susceptibility of cellulose microfibrils of the algal-bacterial type and the cotton-ramie type. Carbohydr Res 305: 261-269
- 3) Hayashi N, Ishihara M, Sugiyama J, Okano T (1997) Selective degradation of the cellulose I α component in *Cladophora* cellulose with *Trichoderma viride* cellulase. Carbohydr Res 305: 109-116
- 4) Hayashi N, Kondo T, Ishihara M (2005) Enzymatically produced nano-ordered short elements containing cellulose I β crystalline domains. Carbohydr Polym 61: 191-197
- 5) Henrissat B, Claeyssens M, Tomme P, Lemesle L, Moron JP (1989) Cellulase families revealed by hydrophobic cluster analysis. Gene 81: 83-95
- 6) Tomme P, Warren RAJ, Gilkes NR (1995) Cellulose hydrolysis by bacteria and fungi. In: Advances in Microbial Physiology Vol.37. Poole RK (ed) Academic Press, 1-81
- 7) Tormo J, Lamed R, Chirino AJ, Morag E, Bayer EA, Shoham Y, Steitz TA (1996) Crystal structure of a bacterial family-III cellulose-binding domain: a general mechanism for attachment to cellulose. EMBO J 15: 5739-5751
- 8) Reese ET, Siu RGH, Levinson HS (1950) The biological degradation of soluble cellulose derivatives and its relationship to the mechanism of cellulose hydrolysis. J Bacteriol 59: 485-497
- 9) Chanzy H, Henrissat B (1983) Electron microscopy study of the enzymatic hydrolysis of *Valonia* cellulose. Carbohydr Polymer 3: 161-173
- 10) 林 徳子・澁谷 源 (2007) 酵素によるセルロースのフィブリル化. セルロース学会要旨集 14: 87
- 11) 澁谷 源・林 徳子 (2008) セルロースナノファイバーとその製造方法. 特開 2008-150719

TEMPO 酸化セルロースナノファイバー / 高分子複合材料の基礎的物性

藤澤 秀次 (ふじさわ しゅうじ、森林総合研究所)

はじめに

地球上に最も豊富に貯蔵されている植物資源であるセルロースは、天然においてセルロースマイクロフィブリルという非常に細い繊維状の結晶を形成している(図-1)。樹木中のセルロースマイクロフィブリルは、幅が3ナノメートル(1ナノメートルは1ミリメートルの100万分の1)、長さ数ミクロンという非常に細長い構造を有する。また、高強度(つよい)^{1, 2)}、高弾性率(かたい)^{3, 4)}、低熱膨張率(熱で伸びにくい)⁵⁾といった優れた物性を示すため、樹木の構造を支える補強材としての役割を担っている。近年、このセルロースマイクロフィブリルを樹木から取り出し、セルロースナノファイバー

(CNF)として材料利用する研究が注目されている。特に上記物性から、CNFを高分子材料の補強材として利用する研究が盛んに行われている。代表的な補強材である炭素繊維やガラス繊維と比べてもCNFは環境調和性や再生産可能性において高い優位性があるため、次世代の補強繊維として利用が期待されている。本報告では、TEMPO酸化という手法によって調製したCNFを補強材として用い、高分子と均一複合化した材料の物性について述べる。

TEMPO 酸化 CNF/ 高分子複合材料

樹木由来製紙用パルプに対してTEMPO触媒酸化処理と数分間の簡単な機械処理(ミキサーおよび超音波処理)を施すことで、幅3ナノメートルのCNFを取り出すことができる⁶⁾。このTEMPO酸化CNFは、表面選択的にカルボキシ基を有するため、他の方法で調製されたCNFよりも優れた分散性を有する。この分散性を活かすことで、様々な高分子とナノメートルレベルでの複合化が可能である(図-2a)。さらに、この表面カルボキシ基を足場としてさらなるCNF表面改質を行うことで、複合材料中でのCNF/高分子界面の相互作用を制御でき、得られる材料の物性を制御することが可能である(図-2b)。以下に、TEMPO酸化CNF/高分子複合材料の各種物性を示す。

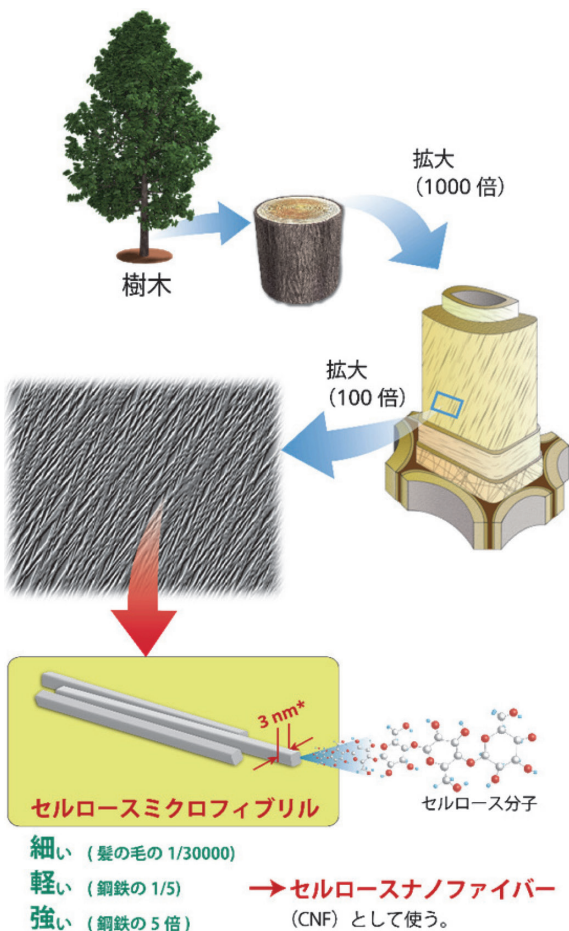


図-1 樹木の階層構造とセルロース(* nm はナノメートルと読む)

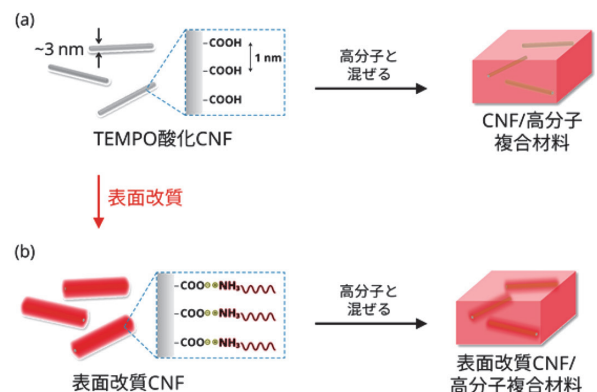


図-2 TEMPO 酸化 CNF/ 高分子複合材料の調製

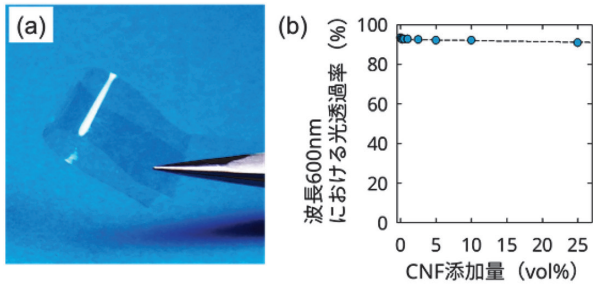


図-3 CNF/ポリメチルメタクリレート複合フィルムの (a) 写真 (25%のCNFを含む) および (b) 光透過率

光学物性

CNFと高分子を均一に複合化することで、得られる複合材料は高い透明性を示す。図-3に、CNF/ポリメチルメタクリレート複合フィルムの写真を示す。複合フィルム中には25 vol%のCNFが含まれているが、高い透明性を示している。複合フィルム断面の透過型電子顕微鏡観察を行うと、フィルム中でCNFが均一に分散している様子が確認できた。すなわち、幅3ナノメートルのCNFを高分子中で均一に分散させることで可視光散乱が抑えられ、高い透明性を維持できたと考えられる。また、ナノ補強材料として利用が検討されているカーボンナノチューブやグラフェンなどと比べて、可視光波長吸収が少なく高い透明性を維持できることがCNFの特徴のひとつと言える。このように、CNFを多量添加しても、高分子材料の高い透明性を著しく損なうことなく複合化できる。添田らは、液晶ディスプレイ用偏光板の保護フィルムに用いられているセルローストリアセテートとTEMPO酸化CNFの均一複合化に成功している⁷⁾。得られる複合フィルムは、セルローストリアセテートの特徴である透明性および低複屈折性を維持していた。さらに、CNFの補強効果により、フィルムの力学物性が向上したことから、得られる複合材料はフレキシブルな薄膜ディスプレイなどの新規材料開発への応用が期待される。

熱機械物性

高分子中においてCNFは低添加量で強固なCNF間ネットワークを形成する(主に水素結合によるもの)。このネットワーク形成により、高温領域で高分子材料がやわらかくなったり伸びたりするのを抑える事ができる。ネットワーク形成のしやすさは、CNFの長さとの比(アスペクト比)に依存し、アスペクト比が大きい(細長い)ものを用いることでより低添加量でネットワークを形成する。平均アスペクト比が310のCNFを用いた場合、わずか0.3 vol%のCNF添加で高分子中におい

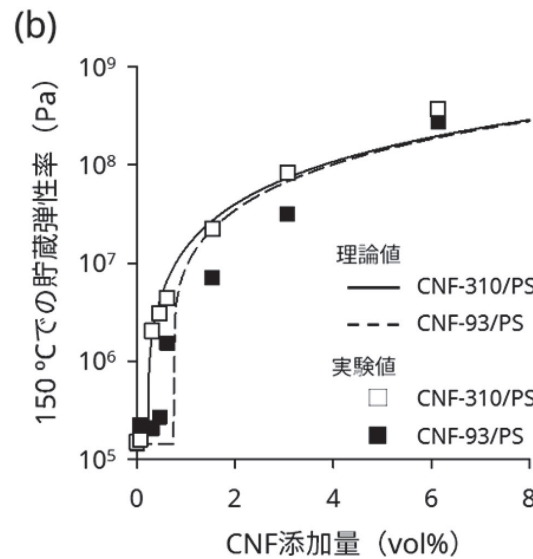
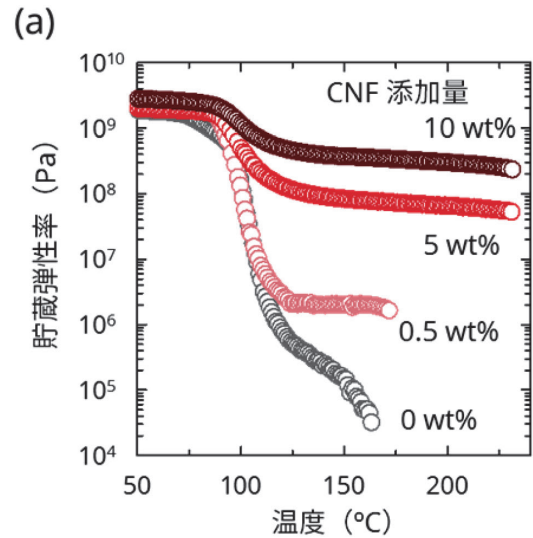


図-4 CNF/ポリスチレン複合材料の (a) 貯蔵弾性率および (b) 150°Cにおける貯蔵弾性率と弾性率の理論値

てひとつつながりのネットワークを形成し始める。

図-4に、CNF/ポリスチレン複合材料の動的粘弾性測定結果を示す。図-4a(貯蔵弾性率は、かたさを表す指標)を見ると、CNFを添加していない場合(0 wt%)、ポリスチレンのガラス転移領域である100°C付近を超えると、貯蔵弾性率が大きく低下し、やわらかくなっていることが分かる。一方、CNFを添加することでその低下が抑えられ、添加量に伴ってその効果が大きくなっている。ここで注目すべきは、わずか0.5 wt%(0.3 vol%)のCNF添加でCNF間ネットワークを形成し、150°C付近の貯蔵弾性率が約10倍向上している点である。このネットワーク形成による貯蔵弾性率増加をパーコレーションモデル⁸⁾によって考察した。パーコレーションモデルを用いた場合、CNFネットワーク形成に依存した弾性率向上の様子が理論的に予測できる。図-4bに本モデルから予測される理論値と実験値のグラフを示し

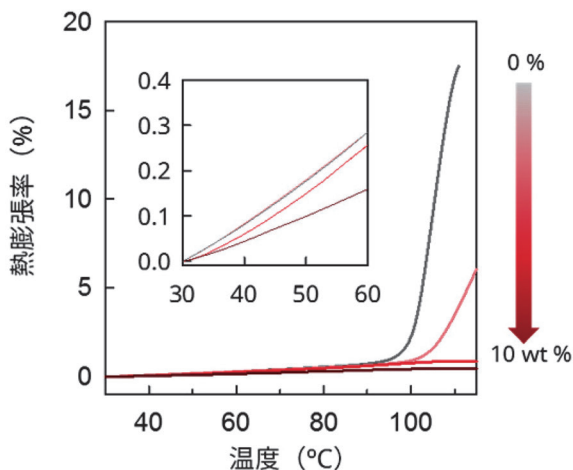


図-5 CNF/ポリスチレン複合材料の熱膨張率
(30-60度における熱膨張率を拡大して挿入図に示した)

た。なお、本実験では、平均アスペクト比が310および93のCNFを用いている(それぞれCNF-310およびCNF-93)。グラフから、理論値と実験値がよく一致していることが分かる。すなわち、CNFは高分子中でよく分散しており、効率的にネットワークを形成していることが示された。CNF-310およびCNF-93のどちらを用いた場合も、理論値によく一致して少量添加(それぞれ0.3、0.6 vol%)でネットワークを形成し始めた。一般的に、親水性のCNFと疎水性汎用高分子材料は、水と油を混ぜるようになじみにくく、CNF同士は凝集し不均一に複合化してしまう。そのため、少量添加でのネットワーク形成が難しい。一方、本実験ではTEMPO酸化CNFの良分散性を活かすことで、高温でやわらかくなってしまいうという高分子材料の欠点を効率的に改善することができた。

CNFの添加により、高分子材料の熱寸法安定性が向上する(熱で伸びにくくなる)。図-5に、CNF/ポリスチレン複合フィルムの熱膨張率測定結果を示す。動的粘弾性測定結果と同様に、CNF添加によって100°C以上の顕著な熱膨張率低下が確認できる。また、常温においてもCNF添加量に伴って熱膨張が抑制され、グラフの傾きから求められる熱膨張係数が116から63.7 ppm K⁻¹に低下した。このように、CNFの添加によって高分子の熱寸法安定性が大きく向上し、熱で伸びにくくなる。これまで述べた繊維間ネットワーク形成は他の補強繊維と比べてもより強固なものであり、CNFの特徴のひとつである。

力学物性

CNF自身の高弾性率・高強度といった特徴から、CNFを添加することで高分子材料が、かたく、つよく

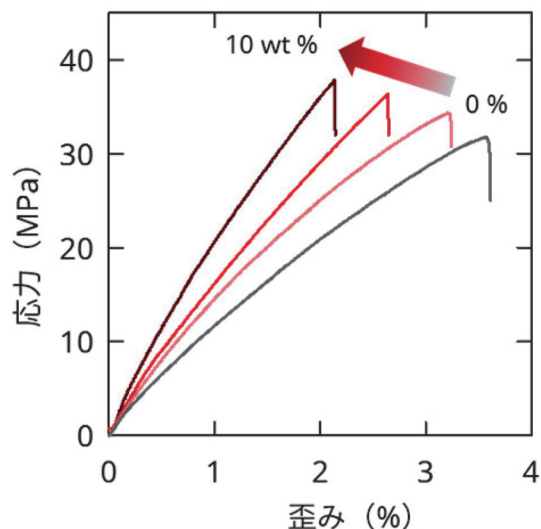


図-6 CNF/ポリスチレン複合材料の応力-歪み曲線

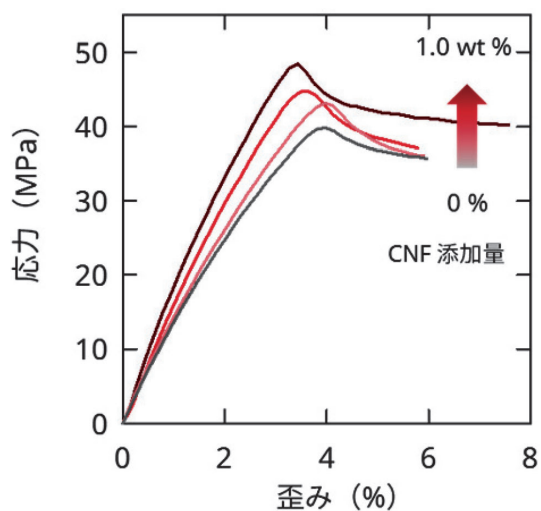


図-7 表面改質CNF/ポリ乳酸複合材料の応力-歪み曲線

なる。図-6にCNF/ポリスチレン複合フィルムの引張試験結果を示した。CNF添加量に伴ってグラフの傾きが大きくなり(かたくなる)、最大応力の値も若干ではあるが増加する(つよくなる)。しかし、破断時の歪みがCNF添加量に伴って顕著に減少してしまう(もろくなる)。これは、親水性のCNFと疎水性のポリスチレン界面での接着が弱く、歪みを与えた際、界面ですべてのCNFが剥がれてしまうためと考えられる。このもろくなっていく現象は、CNF/高分子複合材料においてよく起こるものであり、改善するためにはCNF/高分子界面相互作用の制御が必要である。

本研究で用いているTEMPO酸化CNF表面のカルボキシ基を化学改質の足場とすることで、CNF表面の選択的改質が可能である。この表面改質CNFを用いることで、界面相互作用を制御した複合材料が調製できる(図-2b)。本報告では、CNF表面にポリエチレングリコール(PEG)を導入し、生分解性プラスチックであるポ

リ乳酸と複合化した場合の結果を図-7に示す。図-6で得られた結果と同様に、CNF表面改質CNF添加量に伴って材料がかたく、つよくなった。ここで注目すべきは、破断時の歪みがCNF添加によって減少していないという点である。図-7の結果から破断仕事を計算するとCNF添加量に伴って値が向上した（もろくならず、強靱になった）。これまで、CNFとポリ乳酸を複合化させた報告はあったが、前述の理由から、どれもCNF添加によって破断歪みが減少し、もろくなってしまっていた。しかし、今回CNF表面改質により界面での接着性を改善させることですべりを抑制できた。さらに、本実験で得られた弾性率の値をモデル式から得られる理論値と比較したところ、よく一致していたことから、表面改質によって界面で理想的な応力伝達が行われたことが示唆された。本表面改質手法は非常に多様性があり、表面に導入する鎖の親和性および長さを選ぶことで、得られる複合材料の力学物性を制御できる。本手法で調製した表面改質CNFとセルローストリアセートを複合化した場合、わずか2.5%のCNF添加量で破断仕事は4倍に向上するという結果も得られている⁷⁾。このように、CNFと高分子材料を均一に複合化し、界面親和性を制御することで力学物性を向上できる。

おわりに

樹木由来CNFを高分子材料と均一複合化すると、高分子材料の光学特性を顕著に損なうことなく、熱機械物性や力学物性を効率的に改善できる。このCNFを用いた補強により、プラスチックフィルム薄膜化や石油資源の節約が期待される。しかし、課題としてCNFと高分子の均一複合化に時間とエネルギーがかかるという点が挙げられる。本実験では、基礎的評価を行うために、有機溶媒中で均一に混ぜた後、乾燥させて複合フィルムを調製するという非常に手間のかかる手法を用いている。工業的には溶媒を用いない熔融混練による複合化手法が求められるが、比表面積が大きく凝集しやすいCNFをこの方法で高分子と均一ナノ複合化することは今のところ困難である。このように、材料調製過程において課題は依然あるが、CNFは他の補強材料と比較しても高い環境調和性や再生産可能性を有しているため、既存補強材料の代替となりうるポテンシャルがあると考えられる。

謝辞

本研究は、東京大学大学院農学生命科学研究科の磯貝・齋藤研究室および森林総合研究所森林資源化学研究領域で行った。ご指導いただいた先生方や研究室の皆様、職員の皆様に感謝申し上げます。

引用文献

- 1) Wu XW, Moon RJ, Martini A (2014) Tensile strength of $I\beta$ crystalline cellulose predicted by molecular dynamics simulation. *Cellulose* 21: 2233-2245
- 2) Saito T, Kuramae R, Wohler J, Berglund LA, Isogai A (2013) An ultrastrong nanofibrillar biomaterial: The strength of single cellulose nanofibrils revealed via sonication-induced fragmentation. *Biomacromolecules* 14: 248-253
- 3) Sakurada I, Nukushina Y, Ito T (1962) Experimental determination of the elastic modulus of crystalline regions in oriented polymers. *J Polym Sci* 57: 651-660
- 4) Iwamoto S, Kai W, Isogai A, Iwata T (2009) Elastic modulus of single cellulose microfibrils from tunicate measured by atomic force microscopy. *Biomacromolecules* 10: 2571-2576
- 5) Hori R, Wada M (2005) The thermal expansion of wood cellulose crystals. *Cellulose* 12: 479-484
- 6) Isogai A, Saito T, Fukuzumi H (2011) TEMPO-oxidized cellulose nanofibers. *Nanoscale* 3: 71-85
- 7) Soeta H, Fujisawa S, Saito T, Berglund L, Isogai A (2015) Low-birefringent and highly tough nanocellulose-reinforced cellulose triacetate. *ACS Appl Mater Interfaces* 7: 11041-11046
- 8) Azizi Samir MAS, Alloin F, Dufresne A (2005) Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their application in nanocomposite field. *Biomacromolecules* 6: 612-626

リン酸エステル化 セルロースナノファイバー

権藤 あい子 (ごんどう あいこ、王子ホールディングス株式会社)

はじめに

近年、再生可能な資源を積極的に利用する気運が高まっている中で、特に、セルロースナノファイバー（以降、CNF）は木質バイオマス由来の新規バイオナノ材料として注目されている。CNFはセルロース分子鎖が規則的に配列した結晶性を有する、繊維径3-4nm、繊維長はサブミクロンから数 μm の高アスペクト比を有する繊維である¹⁾。

CNFは、セルロースが元来有する、再生可能資源、生分解性、生体適合性、耐溶剤性、耐熱性といった性質に加えて、ナノ化により、①低線熱膨張係数（温度変化に伴う寸法変化がガラス並みに小さい）、②高強度・高弾性率（アラミド繊維並みに硬くて丈夫）、③高透明（分散液が高透明であり、膜を形成した際には光学フィルム並みに透明）、④高粘性・高チクソトロピー性（粘度が高いがべたつかない）、⑤大きな比表面積（通常のパルプ対比で1000倍以上）等、ナノ材料特有の性質を示す。

CNFは、木質パルプ（繊維径20-30 μm 、繊維長0.5-3mm）に、機械処理を行うことにより得られる。しかし、木質パルプ中のCNFは、CNF間に強固な水素結合を形成しているため、機械処理のみでは、結晶の最小サイズ（繊維径3-4nm）までのナノ化が不十分であったり、CNFへのダメージが大きくなったり、ナノ化に大量のエネルギーが必要になるなどの課題があった。

そこで、ナノ化に要するエネルギーを低減する手法の一つとして、機械処理の前に木材パルプ中のセルロース結晶表面にイオン性官能基を導入する化学前処理を行うことが提案されている。イオン性官能基を導入することで、CNF間に水の浸透圧効果と静電的反発効果が発現し、水中での軽微な機械処理によりナノ化が可能となる。また、ナノ化後の分散安定性が飛躍的に高まる。代表的な化学前処理方法としてTEMPO酸化²⁾、カルボキシメチル化³⁾、カチオン化⁴⁾等が報告されている。

当社では、CNF製造の化学前処理として「リン酸エステル化法（以降、リン酸化）」を開発した⁵⁾。本稿では、リン酸化CNF（図-1）の製造方法と特長、また、CNF水分散液、CNF透明シート、CNFパウダーの当社開発品について解説する。



図-1 リン酸化CNF水分散液（固形分濃度0.4%）

リン酸化CNFの製造

リン酸化によるCNF製造の特長としては、①ナノ化に必要なエネルギーを低減可能、②ほぼ100%の収率で繊維径3-4nmまで完全にナノ化可能、③安全な薬品のみを使用して製造可能、④得られたリン酸化CNFは高透明性、高粘性を発現、といった点等が挙げられる。

リン酸化CNF製造の原材料としては、木質パルプの他、リン酸塩および尿素といった、食品や化粧品に使われているものを使用している。また、リン酸化工程はリン酸塩および尿素の水溶液を木質パルプに添加し、乾燥・加熱するだけというシンプルな製造プロセスである。製紙工場に隣接させることで、パルプ原料の供給、廃熱の有効利用ができる。また、リン酸化工程でパルプと反応しなかった余剰のリンや尿素は、そのまま製紙会社が保有する水処理設備（活性汚泥）に送られ、微生物の栄養源として再利用が可能である。したがって、余分な廃棄物を出さない環境調和型プロセスとなる。

前述のように、CNFはパルプ中で強固な水素結合を形成しているが、CNF表面にイオン解離する官能基を導入することで、ナノ化が容易になる。これまでに報告されてきた方法は、セルロース結晶表面に1価の陰イオンまたは陽イオンを導入する方法であった。これに対し、リン酸化では、セルロース結晶表面のC2、C3、C6位水酸基の一部にリン酸基を導入するが、リン酸基

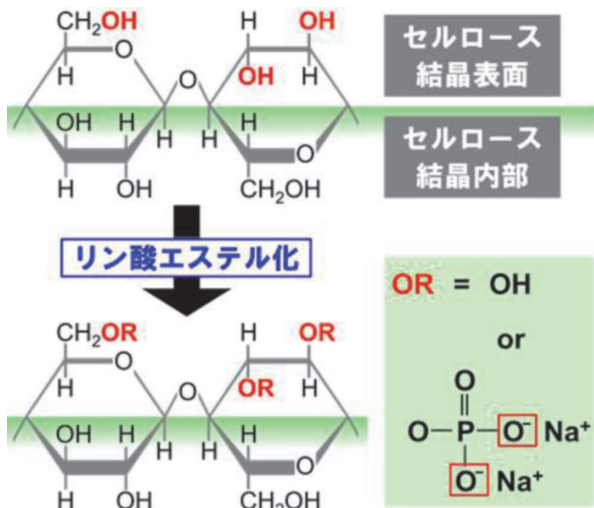


図-2 リン酸化 CNF の構造式

は 2 価の官能基であるため、より大きな浸透圧効果、静電反発力を付与できる (図-2)。このため、パルプをより容易にナノ化できる。この効果はリン酸基量が増えるほど大きくなり、当社はセルロース結晶表面に存在する水酸基のうち、半分以上にリン酸基を導入することに成功している。

化学前処理後に機械処理を行い、ナノ化を行う。機械処理には、主に高圧ホモジナイザーを用いているが、リン酸化パルプの白濁した懸濁液に機械処理を施すと、直ちに透明性が向上する。これは、CNF の繊維径が、光の波長 (400-900 nm) よりも十分に小さく、光が透過するためである。したがって、十分にナノ化されると、高透明な分散液が得られる。機械処理は、十分にナノ化されるまで、必要に応じて複数回施す。機械処理の回数が少ないほど、低エネルギーでナノ化できることになる。リン酸化パルプより得られた CNF 水分散液を 0.2 wt% に希釈した際の全光線透過率は、機械処理 1 回で 97% 程度、2 回以降で 99% 程度にまで達する。つまり、非常に少ない機械処理回数で高透明なリン酸化 CNF 水分散液を得ることができる。

リン酸化 CNF の透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察では繊維径 3-4 nm と均一な繊維径を有する繊維が確認され、リン酸化と機械処理により完全にナノ化した CNF が得られることが確認された (図-3)。

リン酸化 CNF 水分散液

リン酸化 CNF 水分散液は高透明であるとともに、既存のキサンタンガム、グァーガム等の天然系増粘剤より 10-100 倍高い粘性を有している。これは、アスペクト比が高い剛直な結晶であるリン酸化 CNF が、水中でネットワーク構造を形成しているためである。透明な美観性を持った増粘効果や、天然系では従来達し得なかった高

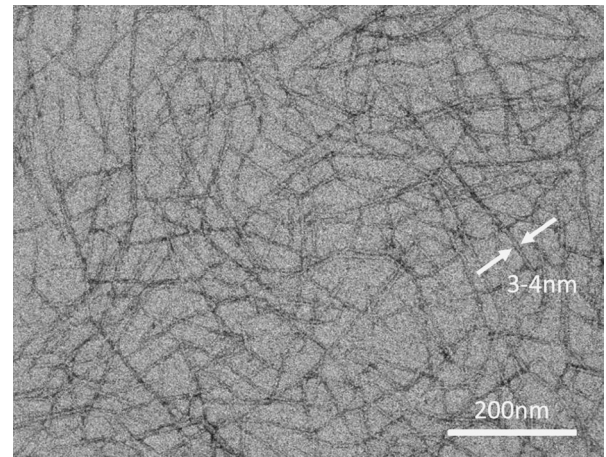


図-3 リン酸化 CNF の TEM 像

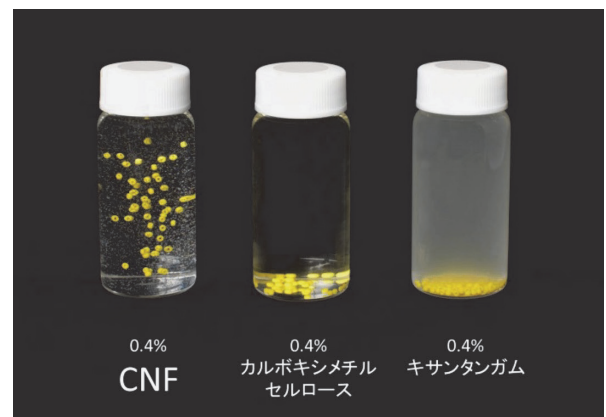


図-4 リン酸化 CNF と各種増粘剤の粒子分散効果 (各濃度 0.4% における比較)

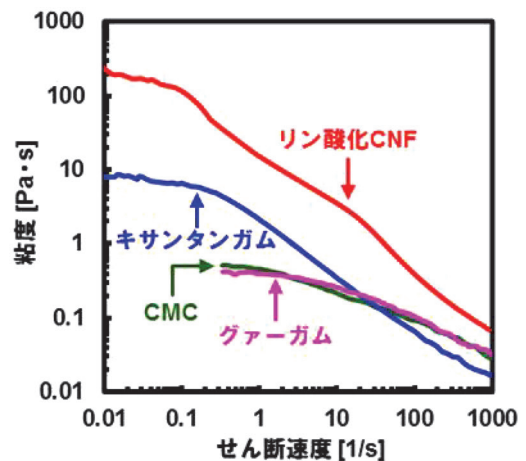


図-5 リン酸化 CNF と各種増粘剤の粘性 (各濃度 0.4%、レオメーター測定) ※ 参考値

い増粘性を付与でき、微粒子や油滴の分散性にも優れる (図-4)。また、従来同等の増粘性を従来の増粘剤より少量添加で可能となる。

また、せん断力を加えると粘度が低下するチクソトロピー性も合わせ持っている (図-5)。この性質により、静止時には増粘性・分散性を有しつつ、べとつかず延び

表-1 リン酸化 CNF 透明シートの物性 ※1
(アウロ・ヴェール™ 25 μm 厚)

全光線透過率 (%)	ヘイズ (%)	線熱膨張係数 (ppm/K)	熱分解温度 (°C)
91.4	0.5	7.2	312
引張強度 ※2 (MPa)	弾性率 ※2 (GPa)	フレキシブル性	有機溶剤耐性
150	10	◎	◎

※1 参考値

※2 ASTM D882 に準拠

やすい触感が得られ、攪拌混合時の流動性に優れる。

これらの特長を活かし、各種工業用増粘剤、レオロジー改質剤等への展開を検討しているところである。上記用途のリン酸化 CNF 水分散液は、「アウロ・ヴィスコ™」として提供を開始している。

当社では、リン酸化 CNF 水分散液の実証プラントを王子製紙(株)富岡工場内に導入し(生産能力 40t/年)、2016 年度後半から稼働している。

リン酸化 CNF 透明シート

リン酸化 CNF 水分散液を脱水・乾燥させることで得られる、CNF 同士が緻密に絡まったリン酸化 CNF 透明シートは、①全光線透過率が 90% 以上の光学用 PET や TAC フィルムと同等の透明性、②引張強度約 150MPa、弾性率約 10GPa という汎用プラスチックフィルムよりも優れた引張強度・弾性率、③線熱膨張係数が 10ppm/K 以下でガラス並みの熱寸法安定性、④直径 1mm の丸棒に巻き付けたときでも割れが生じない良好なフレキシブル性等、優れた特性を有している(表-1)。これらの特性を活かし、電子デバイス用のフィルムや基板、フレキシブル電子基板材料やディスプレイ材料、透明な構造部材等への利用を検討している。

CNF 透明シートは、「アウロ・ヴェール™」としてサンプルワークを進めている。また、CNF 透明シートが持つ透明性・フレキシブル性・低線熱膨張性に加えて、自由に成形加工できるという新しい特長を持った CNF 透明シート「アウロ・ヴェール 3D™」も開発し、サンプルワークを開始した(図-6)。

当社では、リン酸化 CNF 透明連続シートの実証プラントを 2017 年度後半から稼働予定である。

リン酸化 CNF パウダー

一般的に、CNF はその製法上の制約から濃度 1-2% 程度の CNF 水分散液として製造されるが、水を多く含むことから、CNF の添加量が制限されてしまうことがあった。また、輸送において大量の水を運ぶこととなり、輸送エネルギー面での環境負荷、及び輸送コストも課題



図-6 (左) CNF 透明シート「アウロ・ヴェール™」、
(右) 新規透明シート「アウロ・ヴェール 3D™」

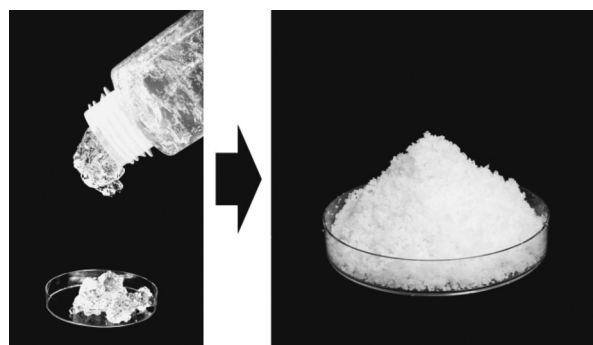


図-7 ウェットパウダー状リン酸化 CNF
(左) CNF 水分散液 (固形分濃度：2%)、
(右) ウェットパウダー状 CNF (固形分濃度：20%)

となっていた。当社では、① 20% 以上の高濃度の状態であり、②水に再分散した際、低濃度で製造した CNF 水分散液と同等の粘度を発現する「ウェットパウダー状 CNF」の製造に成功した(図-7)。これにより、輸送時の環境負荷が低減できるほか、CNF が持ち込む水の量を大幅に減らすこともできるため、CNF を高濃度添加したい、系内に持ち込む水の量を制限したいといったニーズに応えることが可能となった。

パウダー状の CNF は、軽微な攪拌により通常の CNF 水分散液同等に分散可能となっている。

これまで製造してきた CNF は、セルロースが水酸基を多く持つこと、より効率的なナノ化のためにイオン性官能基を導入していることから親水性を有する。一方で、有機溶剤中では CNF 間の反発が十分でなく、CNF の水酸基同士の水素結合により CNF の凝集が生じてしまうという課題があった。有機溶剤中で増粘性を付与したい、あるいは樹脂補強したいという要望が多くなっており、これに応えるため、「多様な有機溶剤に分散可能な CNF パウダー」を開発した(図-8)。これにより、従来の CNF では困難とされていた、種々の有機溶剤中での増粘・分散性付与が可能となった。その分散液は高透明、かつ高粘度な特長を有するため、塗料、インキ、ポリマー合成などへの応用が期待される。

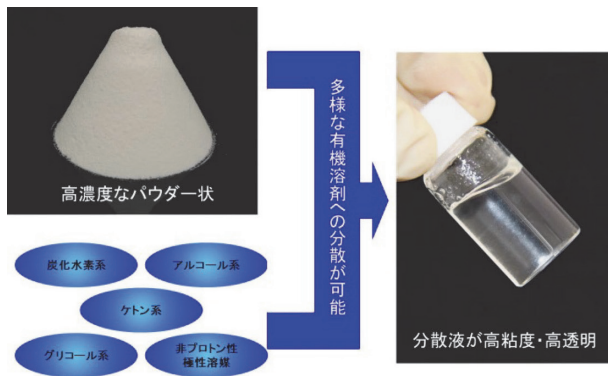


図-8 有機溶剤に分散可能な CNF

おわりに

リン酸エステル化法は、セルロース結晶表面に 2 価のアニオン性官能基であるリン酸基を導入することにより、CNF 製造時のナノ化エネルギーを大幅削減できる手法である。本手法は、木質パルプにリン酸塩および尿素を添加して加熱するという大変シンプルなプロセスにも関わらず、ほぼ 100% の収率でパルプを繊維径 3-4 nm の完全ナノ化 CNF に変換可能である。

現在、上述したリン酸化 CNF の水分散液、透明シート、パウダーのサンプル提供を行っている。用途展開としては、増粘剤・分散剤、プラスチック補強、高強度でフレキシブル性の高いディスプレイパネル、自由に変形する有機 EL・太陽光発電パネル、高機能・高細密ナノフィルター等、幅広い利用が考えられる。リン酸化 CNF は優れた材料物性を有しており、当社ではその特長を生か

した様々な分野への応用展開を進めていくとともに、安定的に CNF 供給可能な体制を整え、事業化への取組みを加速していく。

引用文献

- 1) Isogai A, Saito T, Fukuzumi H (2011) TEMPO-oxidized cellulose nanofibers. *Nanoscale* 3: 71-85
- 2) Saito T, Nishiyama Y, Putaux JL, Vignon M, Isogai A (2006) Homogeneous suspensions of individualized microfibrils from TEMPO-catalyzed oxidation of native cellulose. *Biomacromolecules* 7: 1687-1691
- 3) 村松利一・金野晴男・藤井健嗣・中川かおり・河崎雅行 (2014) セルロースナノファイバーの粘度特性. 第 81 回紙パルプ研究発表会要旨集: 11
- 4) Ho T, Zimmermann T, Hauert R, Caseri W (2011) Preparation and characterization of cationic nanofibrillated cellulose from etherification and high-shear disintegration processes. *Cellulose* 18: 1391-1406
- 5) Noguchi Y, Homma I, Matsubara Y (2017) Complete nanofibrillation of cellulose prepared by phosphorylation. *Cellulose* 24: 1295-1305

リグノセルロースナノファイバーの 製造と樹脂複合化技術

遠藤 貴士・伊藤 弘和 (えんどう たかし・いとう ひろかず、産業技術総合研究所)

はじめに

近年、木質等の植物系バイオマスから製造されるセルロースナノファイバー (CNF) に関する研究・製品開発が加速している。ナノファイバーは全ての植物のほぼ全ての部位から製造することができ、軽量 (1.5 g/cm³)、高強度 (3 ~ 8 GPa)、高弾性 (150 GPa 程度)、低熱膨張 (石英ガラス並)、高いチクソトロピー性など、素材として高いポテンシャルを持っている。このような特徴を生かして、樹脂やゴム等との複合化による高性能材料、透明材料、流動性・分散性改良材料などの開発が進められている。

我々の研究グループでは、木質からのバイオエタノール製造技術開発の中で、木質組織をナノサイズの超微細繊維にほぐし、酵素分解性を向上させる、「水熱メカノケミカル処理技術」を開発している¹⁾。得られた超微細繊維は、セルロースとともに他の木質主要成分であるリグニンやヘミセルロースも含有したリグノセルロースナノファイバー (LCNF) である。

化学的処理と機械的処理を併用してパルプ等から製造されるナノファイバーは、極めて微細で幅は3~5nm程度である^{2, 3)}。我々は、主に機械的処理によって製造するナノファイバーをターゲットとしており、その幅は20nm程度である (図-1)。本稿では、当研究グループで中心的に研究開発を進めている LCNF に関する製造と複合材料化技術について解説する⁴⁾。以下、CNF と LCNF の両方に共通する事項については、ナノファイバーとして記載している。

木質組織とナノファイバー

木質等の植物からは、極めて微細なナノファイバーが製造できるが、特殊な方法で裁断等を行っている訳ではなく、木質の本質的な組織構造を利用して製造されている。木質の主要成分は、セルロース、ヘミセルロースおよびリグニンであり、セルロース成分が最も多く、約50%を占めている。セルロース分子は生合成された直後に、規則正しく自己集合してセルロースマイクロフィブリルと呼ばれる分子集合体を形成する。このセルロースマイクロフィブリルはさらにヘミセルロースやリグニンを

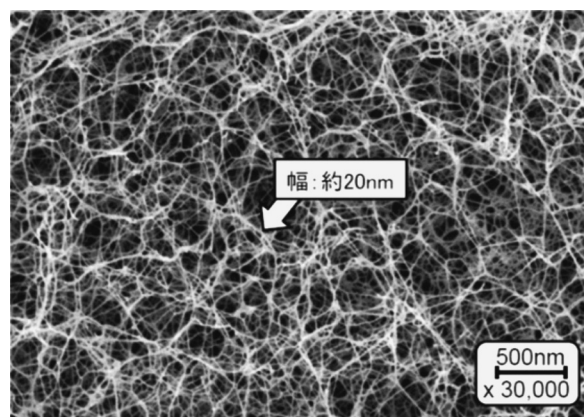


図-1 セルロースナノファイバーの高分解能走査型電子顕微鏡写真

接着剤のようにして集合・積層して木質組織を形成している。この最初の自己集合体であるマイクロフィブリルの幅が3~5nmで、ナノファイバーの基本的なサイズとなっている。木質組織は、マイクロフィブリルが水素結合や分子間力などの比較的弱い力で集合・積層したナノ構造体であるため、適切な方法でほぐせばナノファイバーを製造することができる。

しかしながら、木質は、古くから建材や道具として利用されているように、その耐久性、強靱性は歴史的にも実証されている。木質組織には、セルロース分子が本質的に持っている物性ととも、容易にほぐされない木質細胞壁の構造的特徴がある。

木質の細胞壁は、外側から細胞間層、一次壁、二次壁と続いている (図-2)。二次壁ではマイクロフィブリルが同一方向に並んで大きく3層 (S1、S2、S3) で積層している。二次壁の各層では、マイクロフィブリルの方向がそれぞれ90度近く異なっており、これらが、ヘミセルロース等を接着剤のようにして積層することで木質は高強度・高靱性を発揮している。二次壁の最も外側のS1層は内側のS2層の周囲を取り囲み縛り付けた構造となっており、樽や桶のタガに相当している。これらヘミセルロース等によるマイクロフィブリル同士の接着と、タガに相当する組織構造により、木質は強靱化している。木質組織を効果的にほぐしてナノファイバーを製造するためには、木質組織の強靱化要因を部分的にでも破壊・

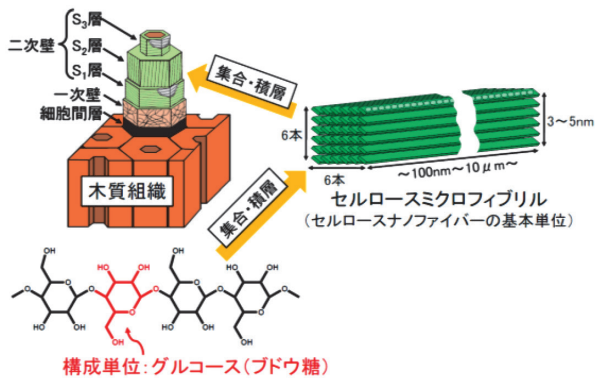


図-2 木質組織とセルロースナノファイバー

除去する必要がある。

ナノファイバー製造の基本

ナノファイバーの製造に機械的処理は必須である。化学処理を併用する場合でも、適正な機械処理を行わないと、数 nm のナノファイバーは製造できない。実験室レベルで微細化を行う機械装置としては、ボールミルがよく知られている。しかし、木粉等を投入して乾式でボールミル粉碎しても、一次粒子の再凝集等により平均粒径 10 ~ 20 µm 程度の粒子までしか得ることができない。粉碎時間を延長しても、逆に再凝集により粒子の増大が起きる場合もある。通常の乾式粉碎処理では、ナノサイズの粒子を得ることは相当に困難である。

種々の検討を行った結果、木質組織を効果的にナノ化する方法としては、紙パルプ分野で行われている、叩解(こうかい)処理が有効と考えられた。叩解プロセスは、パルプ原料を水に浸漬し、機械的にせん断力や圧力を加えることで、太いパルプ繊維をさらに微細な繊維にしたり、表面を毛羽立たせたりすることで(内部・外部フィブリル化)、繊維の絡まり合いや繊維間の水素結合の量を増大させて紙の強度を向上させる方法である。実験室的な叩解処理は、木粉やパルプを固形分濃度 5 wt% 程度で水に分散させた後、ボールミルを用いた湿式粉碎で調製することができる。このような単純な湿式粉碎プロセスでは、その工程で精製等を行っていない。そのため、木質を原料として直接的にナノ解繊した場合、得られた超微細繊維は、リグニンやヘミセルロースを含有した LCNF である。

木質からの効率的ナノファイバー製造

前項では、湿式ボールミル粉碎による LCNF 製造について述べたが、ボールミル処理は、大量・連続処理が困難であり、高コストなプロセスである。そこで種々の湿式粉碎方法について検討を行った結果、電動石臼タイプのディスク型粉碎機(スーパーマスコイダー、増幸

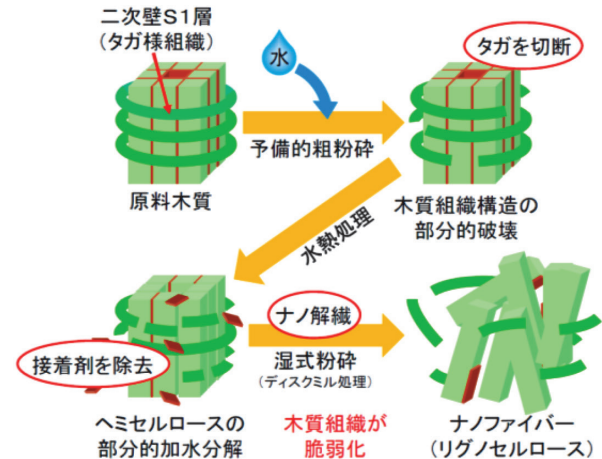


図-3 水熱メカノケミカル処理によるナノ解繊モデル図

産業(株))が効果的であった(固形分濃度は 5 wt% 程度)。しかし、試験を進めると、原料として用いる樹種によってナノ解繊効率が大きく異なり、ボールミルと比較してせん断力の高くないディスクミルでは、広葉樹のような硬質な木質では効率が低下した。

装置の運転条件(ディスク間クリアランス、回転数等)を最適化させることも検討したが、より確実な方法として、原料となる木質組織を事前に脆弱化させることによる、効率化プロセスについて検討を進めた。その結果、予備的粗粉碎処理と水熱処理を組み合わせることで木質組織を脆弱化できることが分かった。これらの複合処理を「水熱メカノケミカル処理」と呼んでいる。予備的粗粉碎処理としては湿式高速カッターミル(マイクロマイスター、増幸産業(株))や乾式でのカッターミル粉碎等による微細化(1 mm ~ 100 µm 程度)が効果を示した。水熱処理は、専用の圧力容器などを用いて 100 °C 以上の加圧熱水により、木質成分を部分的に加水分解させる方法を用いた^{5, 6)}。

前述したように、木質組織の強靱化要因として、積層した細胞壁構造とヘミセルロース等の接着作用がある。上記の予備粉碎処理では、強固な組織構造(タガ様の構造)が部分的に破壊され、水熱処理ではヘミセルロースが部分的に加水分解され、接着剤の作用が弱まる。これらプロセスにより、木質の強靱化要因は部分的に破壊または分解され、木質組織は大きく脆弱化する。最終段階として、ディスクミル処理を行うことで、効率のかつ効果的に木質組織をほぐしてナノファイバーが製造できる。このプロセスで得られるナノファイバーはリグニンやヘミセルロースを原料に近い組成で含有した LCNF であり、共存しているリグニンやヘミセルロースはセルロース表面に付着している⁷⁾。図-3 に水熱メカノケミカル処理のモデルを示した。精製パルプからは、比較的容易に CNF が製造可能であるが、これはパルプ化工程

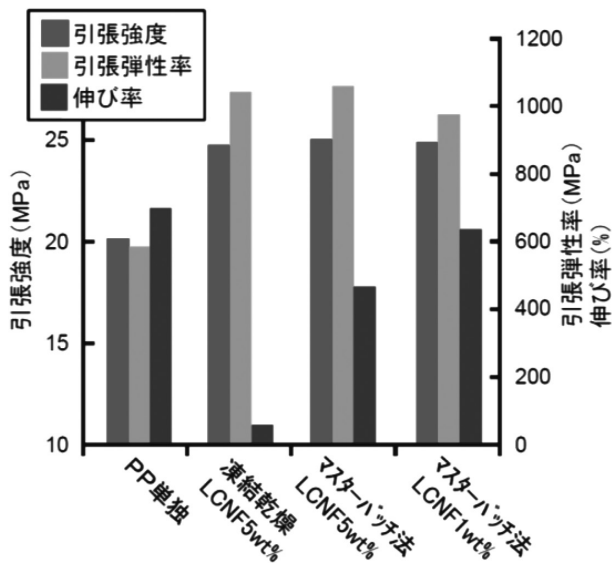


図-4 マスターバッチ法によるナノファイバー複合材料の強度物性

で、強靱化要因の分解・除去が行われているためである。

ナノファイバーの樹脂複合化技術

現在、ナノファイバーの高強度・高弾性等の特性を生かし、樹脂やゴムと複合化させることによる高性能材料の開発が進められている。しかし、前述のようにナノファイバーは高含水状態で得られるため、ポリプロピレン等の疎水性樹脂との複合化では、水の除去が必須となる。水の除去・乾燥を適切に行わないと、ナノファイバーは強固に凝集して、樹脂に分散できなくなる。凝集が発生すると複合材料の物性は低下する。

当研究グループでは、ポリビニルアルコールやウレタンなどの水系でのモデル試験により、十分にナノファイバーをマトリックス樹脂中に分散させれば、わずか1 wt%のナノファイバー添加で、複合材料物性が向上できることを確認している。しかし、高含水状態のナノファイバーをポリプロピレンに複合化させるには、工夫が必要である。単純で基盤的な方法として、ナノファイバーを凍結乾燥して樹脂と複合化させる方法もあるが、コスト的にも実用化は難しい。そこで、より現実的な疎水性樹脂（ポリプロピレン等）との複合化方法として、これまでに高含水ナノファイバーの脱水・乾燥と樹脂複合化を同時進行させるマスターバッチ法⁸⁾や固相せん断法⁹⁾を開発している。

マスターバッチ法では、急激な水の蒸発によるナノファイバーの凝集を抑制するため、融点が100℃以下の特殊樹脂（物性改善樹脂、三井化学・タフマー等）を用いた。比較的低温で熔融させた特殊樹脂に高含水状態のナノファイバーを徐々に添加することで、乾燥と複合

化を同時進行させ、マスターバッチを作製した。次いでポリプロピレンと熔融混練することで、複合材料を作製した。図-4にヒノキ由来LCNFを用いて作製した複合材料の強度試験結果を示した。ポリプロピレン単独と比較して、マスターバッチ法および凍結乾燥法の両方とも、強度物性（引っ張り強度、弾性率）は向上したが、物性値の中で特に、伸び率は特徴的であった。ポリプロピレン単体は700%程度の伸び率を示したが、凍結乾燥LCNFでは5 wt%添加で、60%程度まで大きく低下した。一方、マスターバッチ法では、5 wt%添加で400%以上、1 wt%添加では600%以上の伸び率を保持しており、LCNFがマトリックス樹脂中で均一に分散していることが示された。セルロース分子自身は伸びる特性が極めて低いため、ナノファイバーが凝集していたりナノファイバー同士が接触していたりすると伸び物性は大きく低下する。この結果は、高純度のCNFを用いた場合も同様であった。

固相せん断法では、目的とする樹脂の粉末に固相状態（非熔融）で直接的に高含水ナノファイバーを複合化させる方法である。せん断力を適切に加えることでナノファイバーと樹脂粉末は高度に分散・混合される。次いで、熱風乾燥等で水を除去した後に180℃程度で熔融混練して複合材料を作製する。この場合も、強度と伸びに優れた複合材料を得ることができた。その他に、界面活性剤を用いたナノファイバーの表面コート法による疎水性付与および樹脂複合化¹⁰⁾についても報告している。これまでに開発してきたマスターバッチ法や固相せん断法では、少ないナノファイバー添加で強度を向上させ、伸び物性にも優れた複合材料を製造することができた。これらの複合材料は、他の系では困難とされている耐衝撃性も向上している。

おわりに

我々の試験では、リグニンやヘミセルロースを含有したLCNFの樹脂補強効果は、高純度CNFよりも高い結果を得ている。その理由として、LCNFが持つリグニン等の疎水性の性質により、疎水性樹脂との界面接着性が改善して物性が向上するためと考えられている。また、我々の試験では、LCNFはCNFと比較して凝集しにくいことを明らかにしており、このことで分散性が向上して複合材の物性も改善することも示されている。また、実用化の面から考えると、LCNFは植物系の廃棄物や未利用材など（例えば、おが屑、林地残材、稲わら、もみ殻等）、様々な原料から製造することができ、ナノサイズにすることで、原料の多様性は均質化され、コスト的にも有利と考えている。

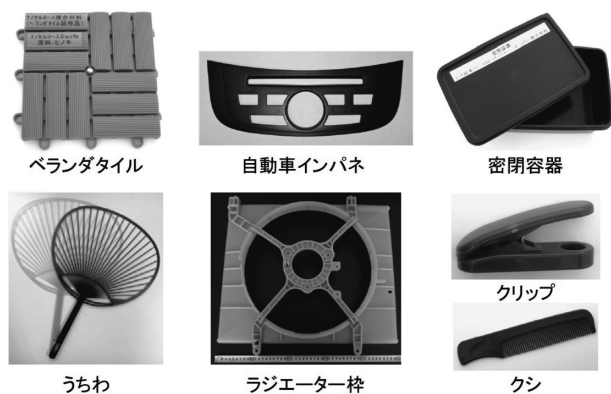


図-5 ナノファイバー複合化材料を用いた試作製品

我々が参画していた文科省や農水省系列のプロジェクトでは、ヒノキ等の未利用材を原料として、直接的な LCNF 製造装置の開発、LCNF の樹脂複合化・成形材料化技術の開発や、農業系廃材利用としてもみ殻が含有しているシリカ成分も活用した複合材料開発を進めてきた。これらのプロジェクトでは、LCNF の効果的かつ実用的な複合化技術を開発し、参加機関の連携により、既存の設備・金型を用いた LCNF 複合化材料の製品試作も、企業との共同研究により達成している（図-5）。このような LCNF を用いた樹脂複合材料は、成形加工性が高いことから、従来の無機フィラー系複合材料では成形加工が困難であった部素材への応用も有望と考えられる。

現在、ナノファイバーを用いた自動車用部素材の開発が注目されているが、自動車分野は性能とともにコスト要求も厳しい。将来的に、自動車への応用を想定しながらも、現状では、多少高コストでも性能重視で市場展開可能な製品、従来型の無機フィラーでは発揮できない性質や特性を持たせた製品をターゲットとして研究開発を進める必要があると考えている。今後、ナノファイバーを基幹素材として、日用品から自動車等の高性能材料まで幅広く応用展開できる技術開発が期待される。

引用文献

1) 遠藤貴士 (2009) バイオ燃料を木材からナノテクで生産する. シンセシオロジー 2(4): 310-320
 2) Saito T, Nishiyama Y, Putaux JL, Vignon M,

Isogai A (2006) Homogeneous suspensions of individualized microfibrils from TEMPO-catalyzed oxidation of native cellulose. *Biomacromolecules* 7(6): 1687-1691
 3) Iwamoto S, Endo T (2015) 3 nm thick lignocellulose nanofibers obtained from esterified wood with maleic anhydride. *ACS Macro letters* 4(1): 80-83
 4) 遠藤貴士 (2014) リグノセルロースナノファイバーの製造と高性能複合材料の開発. *工業材料* 62(10): 40-44
 5) Ando H, Sasaki T, Kokusho T, Shibata M, Uemura Y, Hatate Y (2000) Decomposition behavior of plant biomass in hot-compressed water. *Ind Eng Chem Res* 39(10): 3688-3693
 6) Sakaki T, Shibata M, Sumi T, Yasuda S (2002) Saccharification of cellulose using a hot-compressed water-flow reactor. *Ind Eng Chem Res* 41(4): 661-665
 7) Kumagai A, Lee SH, Endo T (2013) Thin film of lignocellulosic nanofibrils with different chemical composition for QCM-D study. *Biomacromolecules* 14(7): 2420-2426
 8) Iwamoto S, Yamamoto S, Lee SH, Ito H, Endo T (2014) Mechanical and thermal properties of polypropylene composites reinforced with lignocellulose nanofibers dried in melted ethylene-butene copolymer. *Materials* 7(10): 6919-6929
 9) Iwamoto S, Yamamoto S, Lee SH, Endo T (2014) Solid-state shear pulverization as effective treatment for dispersing lignocellulose nanofibers in polypropylene composites. *Cellulose* 21(3): 1573-1580
 10) Iwamoto S, Yamamoto S, Lee SH, Endo T (2014) Mechanical properties of polypropylene composites reinforced by surface-coated microfibrillated cellulose. *Compos Part A: Appl S* 59: 26-29

TEMPO 酸化セルロースナノファイバーの 増粘剤としての利用

後居 洋介 (ごい ようすけ、第一工業製薬株式会社)

はじめに

近年、セルロースの新たな利用方法として、セルロースナノファイバー (CNF) が注目されている。CNF は植物の細胞壁から取り出したセルロース繊維をナノレベルにまで微細化したもので、環境負荷が少ないうえに鉄よりも強くてもろいというような特長を持つことから、「夢の新素材」とも言われている。中でも、東京大学の磯貝明教授らのグループが見出した「セルロースの TEMPO 触媒酸化によって CNF を調製する手法」を用いた場合、繊維幅 3 ~ 4 nm の均一な CNF が得られることが知られている^{1, 2)}。

増粘剤としての CNF

セルロースを原料とする増粘剤やゲル化剤は食品添加物や飼料添加物、農薬添加物として利用されている。安全性が高いこと、環境への負荷が低く再生可能な原料からできることが特徴であり、従来から広く産業利用されている^{3, 4)}。

増粘・ゲル化剤は、原料および製造方法によって次の3つに分類できる。

- ・天然系増粘剤
- ・天然物を化学修飾した半合成系増粘剤
- ・石油化学原料から化学合成される合成系増粘剤

この分類においては、セルロースを原料とする増粘・ゲル化剤は、天然系増粘剤と半合成系増粘剤に分類される。従来から知られているセルロースを原料とする半合成系増粘剤としては、セルロースを化学修飾したカルボキシメチルセルロースナトリウム (CMC)、ヒドロキシエチルセルロース (HEC)、ヒドロキシプロピルメチルセルロース (HPMC) などがあり、化粧品、電子材料、一般工業品、食品、医薬、土木の分野に応用されている。これらは水に溶解して透明となり、増粘効果を発現する。

一方、セルロース由来の天然系増粘剤としては、セルロースそのものを物理的に微細に加工したものが知られている。繊維幅の大きい順番に、粉末セルロース、マイクロフィブリル化セルロース、発酵セルロース (バクテリアセルロース) などが主に食品や医薬、化粧品などの増

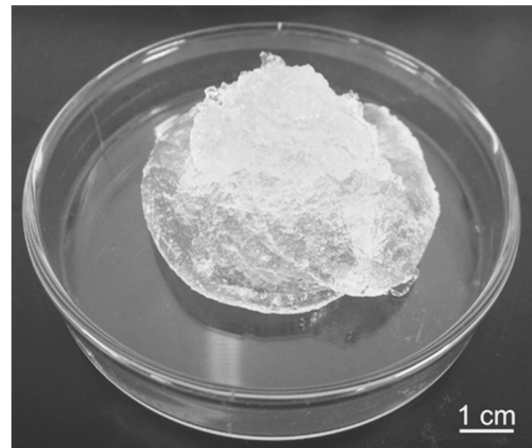


図-1 増粘剤「レオクリスタ」

粘剤として利用されている。セルロース自体は水に溶けないため、これらの増粘剤は、水にセルロースが分散して増粘効果を発現する。

前述の TEMPO 酸化により調製した CNF (TOCNF) は半合成系増粘剤であり、外観は他のセルロース誘導体と同様に透明であるものの、天然系増粘剤のように水に (溶解ではなく) 分散して増粘効果を発現している。つまり、従来のセルロース系増粘剤とはまた違った特徴を有する増粘剤と言える。

増粘剤としての TEMPO 酸化 CNF の特徴

第一工業製薬 (株) では、TOCNF を水系増粘・ゲル化剤「レオクリスタ[®]」として製造販売している (図-1)^{5, 6)}。本項では、増粘剤としてのユニークな TOCNF の特徴を紹介する。

TOCNF の特徴① ネットワーク構造の形成

TOCNF 水分散物の濃度と降伏値 (流動させるために必要な力) の関係を調べると、濃度 0.1 wt% 以上で急激に降伏値が増加する。これは、水中で孤立分散している TOCNF が、濃度 0.1 wt% 以上ではそれぞれが水素結合を介してゆるやかなネットワーク構造を形成するためと考えられる⁷⁾。このネットワーク構造により、下記のような機能が発現する。

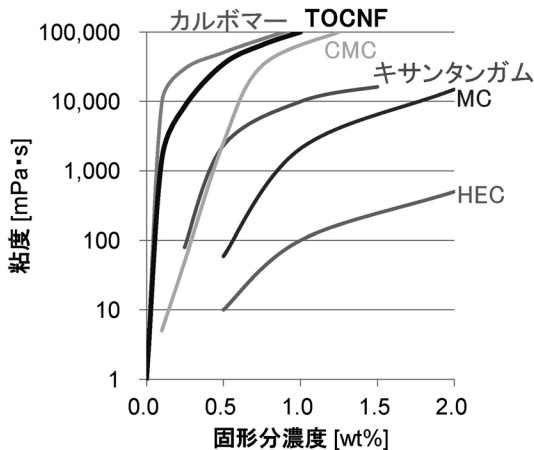


図-2 TOCNF および各種増粘剤の固形分濃度と粘度の関係

高い増粘性

図-2 に 25℃における TOCNF 水分散物の濃度と粘度の関係を示す。TOCNF 水分散物は、低濃度領域では流動性を示すが、固形分濃度 0.5 wt% 以上では流動性がなくなりゲル状の外観を呈する。TOCNF はセルロース誘導体である CMC、メチルセルロース (MC)、HEC、および多糖類であるキサンタンガムと比較しても高い粘度を示す。濃度 - 粘度曲線のパターンが異なるので一概には比較できないが、合成系増粘剤であるカルボマー (カルボキシビニルポリマー) と同レベルの高い粘度を示す。TOCNF は増粘剤としては、増粘効果が最も高い部類に属する。

乳化安定性

固形分濃度 0.1 wt% の TOCNF 水分散物に、スクワラン、オリーブ油、シクロペンタシロキサンなどの油を全量に対して 20 wt% 加え、ホモミキサーで混合して 1 日間放置したところ、界面活性剤を使うことなく安定した乳化物が得られた。先に述べたように TOCNF 水分散物は濃度 0.1 wt% 以上でネットワーク構造を形成することから、この濃度以上であればネットワーク構造による油滴の安定化が可能と考えられる。

分散安定性

TOCNF 水分散物に酸化チタン、炭酸カルシウムなどの微粒子を全量に対して 10 wt% 加え、ホモミキサーで分散後 1 週間放置して分散状態を観察した。いずれの微粒子についても前述の乳化安定性と同様に TOCNF 濃度 0.1 wt% 以上で分散安定力を発現し、微粒子の沈降を抑制できた (図-3)。

なお、そのような微粒子だけでなく、金箔のようなサイズ、密度ともに大きなものであっても、沈降抑制が可



図-3 TOCNF (固形分濃度 0.2 wt%) による分散安定効果
左から酸化チタン、炭酸カルシウム、金箔。TOCNF 無添加だと、酸化チタンと炭酸カルシウム (それぞれ左側の試験管) は均等に分散せず沈殿する

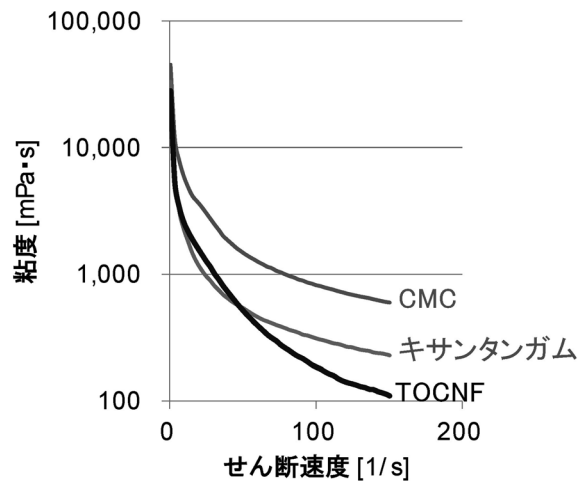


図-4 TOCNF および各種増粘剤のせん断速度と粘度の関係

能である (図-3)。一般的な増粘剤を用いた場合でもある程度沈降抑制は可能であるが、TOCNF の場合には 150 ~ 300 mPa·s 程度の流動性があるような粘度であっても効果を発現することが特徴である。

TOCNF の特徴② ネットワーク構造のせん断による破壊と再構築

前述のように TOCNF 水分散物のネットワーク構造は水素結合によるものである。水中での水素結合は比較的結合力が弱いため、せん断力を加えることで容易にネットワーク構造を破壊することができる。その後、静置することでネットワーク構造の再構築が可能であり、せん断によるネットワーク構造の破壊と再構築は可逆的に繰り返すことができる。

図-4 に TOCNF 水分散物の粘度とせん断速度の関係を示す。せん断を加えていない状態ではネットワーク構



図-5 0.5wt%TOCNF のスプレー噴霧

造が形成されているので高い粘度を示すが、せん断を加えることでネットワーク構造が破壊され、粘度が低下する。つまり、TOCNF 水分散物はせん断速度の増加に伴い粘度が低下する典型的な擬塑性流動（広義の意味でのチクソトロピー性）を示す。

スプレー可能でタレないゲル

せん断による TOCNF のネットワーク構造の破壊と再構築といった特徴に起因する高い擬塑性流動により、「スプレー可能でタレないゲル」というようなユニークな剤型を作り出すことができる。TOCNF 水分散物は透明なゲル状でありながらスプレーノズル中でのせん断によりネットワーク構造が破壊されて粘度が低下し、スプレー噴霧が可能である（図-5）。比較のため、擬塑性流動性が高い CMC やキサンタンガムで同様の操作を試みたが、ゲルのスプレーは不可能であった。さらに、スプレー噴霧された後はネットワーク構造が再構築されて粘度が回復するため、液のタレ防止や付着性向上といった効果も期待できる。

TOCNF の特徴③ 皮膜形成能

TOCNF 水分散物は水を蒸発させて乾燥することで緻密な不織布のような状態となり、セルロース繊維同士が強固に絡み合った皮膜が形成される。この皮膜は高透明性、高強度といった特徴を有している。しかも、TOCNF はコピー用紙などの紙と同じセルロース由来の素材であるため、折り曲げても割れない、柔軟性に富むフレキシブルな皮膜を形成することができる。

顔料の乾燥時の凝集抑制

CMC などの増粘剤（分散安定化剤）とナノジルコニアなどの微粒子水分散物を混合し、乾燥して皮膜を調製すると、白濁する。これは、乾燥段階で微粒子が凝集するためである。一方、TOCNF 水分散物と微粒子水分散物を混合し、乾燥すると透明な皮膜が得られる（図

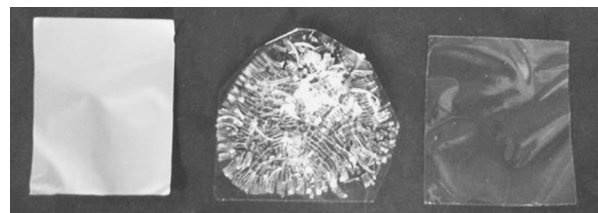


図-6 TOCNF によるナノジルコニア (ZrO_2) の凝集抑制効果
左から CMC/ ZrO_2 、 ZrO_2 のみ、TOCNF/ ZrO_2



図-7 TOCNF/BG ゲル状皮膜の外観

-6)。TOCNF が存在することで乾燥中の微粒子の凝集が抑制でき、一次粒子の状態を保ったまま乾燥することが可能であるためと考えられる。ちなみに、ナノジルコニア単独では乾燥しても皮膜状にはならず、ひび割れが生じる。

ゲル状皮膜の作成

TOCNF 水分散物にブチレングリコール (BG) などのグリコール系溶媒を添加後、乾燥することで、ゲル状皮膜の形成が可能である（図-7）。添加するグリコールの量を調整することで、フィルム状からゲル状まで、目的に応じた皮膜が形成可能である。

開発状況と応用事例

現在、前述のような機能をいかした用途開発に取り組んでおり、高い擬塑性流動性をいかしたタレ止め剤、分散安定性をいかした顔料、セラミック、機能性微粒子などのインク、ペースト化など、様々な用途、分野での利用が期待されている。

水性ゲルインクボールペンインクとしての実用化

一般的に、水性ゲルインクボールペンのインクは非筆記時（静置時）には粘度が高く、筆記時には粘度が低下し、筆記後には再び粘度が上昇することが求められている。このための添加剤として増粘剤が用いられているが、増粘剤の添加量が少なすぎると非筆記時のインク漏れや筆記後の描線のにじみが生じ、反対に添加量が多すぎる



図-8 TOCNF 配合水性ゲルインクボールペン「ユニボールシグノ UMN-307」

と筆記時の粘度低下が不十分で描線がかすれるといった問題が生じる。三菱鉛筆（株）では、増粘剤としての TOCNF のインクへの配合を検討し、筆記していない時は高粘度だが、筆記速度に応じて適切に粘度が低下するインクが調製可能であることを見出した。TOCNF を配合したインクを用いたボールペンは、早書きでもカスれず、ボテにくい「スキップフリー描線」が書けるといった特徴を持つ⁸⁾。本技術は「ユニボールシグノ UMN-307」として商品化され、2015年3月より北米地域で販売を開始し、9月からは欧米地域にて本格展開を開始した。さらに、2016年5月26日より日本国内でも販売を開始した（図-8）。ちなみに、本案件は世界初の CNF の実用化例である⁹⁾。また、このユニボールシグノ UMN-307 は、2016年5月26～27日に開催された伊勢志摩サミットの応援アイテムとして協賛したことで国内外で注目を集めている¹⁰⁾。

おわりに

TOCNF からなる増粘剤は、環境負荷が低く、再生産可能なセルロースから得られる。増粘剤としての特徴は、セルロース繊維同士のネットワーク構造に起因する高い増粘性、高い乳化・分散安定性、ネットワーク構造のせん断による破壊と再構築に起因する高い擬塑性流動性、皮膜形成能などが挙げられる。

第一工業製薬（株）では、このような特徴をいかした用途開発を進めるとともに、顧客の要望に応じた TOCNF の改良、変性にも取り組んでいる。

引用文献

- 1) Saito T, Nishiyama Y, Putaux JL, Vignon M, Isogai A (2006) Homogeneous suspensions of individualized microfibrils from TEMPO-catalyzed oxidation of native cellulose. *Biomacromolecules* 7: 1687-1691
- 2) Isogai A, Saito T, Fukuzumi H (2011) TEMPO-oxidized cellulose nanofibers. *Nanoscale* 3: 71-85
- 3) 佐藤恵一ら (1999) 水溶性高分子の開発技術. シーエムシー
- 4) 加藤忠哉ら (2001) 水溶性・水分散型高分子材料の最新技術動向と工業応用. *日本科学情報*
- 5) 神野和人 (2013) セルロースシングルナノファイバーの増粘・ゲル化剤への応用. *第一工業製薬株式会社報 拓人* 565: 10-13
- 6) 三ヶ月哲也 (2014) セルロースシングルナノファイバーからなる新規増粘剤レオクリスタ. *第一工業製薬株式会社 社報 拓人* 569: 16
- 7) Tanaka R, Saito T, Ishii D, Isogai A (2014) Determination of nanocellulose fibril length by shear viscosity measurement. *Cellulose* 21: 1581-1589
- 8) 神野和人・竹内容治 (2016) セルロースシングルナノファイバーからなる増粘剤の水性ボールペンインクへの実用化. *成形加工* 28(8): 319-321
- 9) 三菱鉛筆株式会社ホームページ. <http://www.mpuni.co.jp/news/pressrelease/detail/20160302173951.html>, 2017年9月5日確認
- 10) 三菱鉛筆株式会社ホームページ. <http://www.mpuni.co.jp/news/pressrelease/detail/20160224093934.html>, 2017年9月5日確認

セルロースシングルナノファイバーを用いた ゲルインクボールペンの開発

竹内 容治 (たけうち ようじ、三菱鉛筆株式会社 横浜研究開発センター)

ボールペンの種類と特徴

現在市場に流通しているボールペンは水性、油性、ゲルインクの3種類に大別できる。

水性ボールペンは溶剤に水や水溶性溶媒を使用し、粘度が20 mPa・s以下に調整されたインクを搭載している。細かい繊維を固めた誘導芯と呼ばれる部材の毛細管力によりペン先や筆記紙面へインクが供給される構造になっている。

油性ボールペンは、鉱物油・多価アルコール・脂肪酸・セルソルブ等の油性溶媒を使用したインクで粘度が1,000～20,000 mPa・sと高く設計されている。油性ボールペンは、簡素な樹脂製のチューブにインクが充填されており、ボールに付着したインクがボールの回転によって紙面に転写され、その転写された分だけのインクがペン先に供給される構造となっている(図-1)。

水性ボールペン用インク及び油性ボールペン用インクはそれぞれ優れた長所を有している反面、弱点も抱えている。例えば、水性ボールペン用インクは、粘度が低いいため、ボールペン先端部と紙が接触しさえすればその接点に毛細管現象が働きインクは供給され、筆圧をあまり加えなくても紙面に良好な筆跡をつくり出し、濃い描線を得られる。しかしインク粘度が低い為に描線が滲みやすくなり、小さい文字を筆記すると描線がつぶれ見難くになってしまう。また、ペン体に振動、衝撃や外気の温度上昇などが加わると、ペン先からインクが漏れ出しやすいといった欠点が発生する。インクの漏れ出し防止のため中継部材となる誘導芯や中綿などでペン体中のインクの保持力を高めた設計にすると、複数の部品が必要となり複雑な構造故にコストが高くなるといった問題も有している。

油性ボールペン用インクは粘性が高いためペン先からインクが漏れにくく、樹脂製のチューブに直接インクを収納でき構造が簡素化出来る事や、そのチューブに透明な材質を使用することでインク残量の確認が可能となる特徴がある。しかし反面、筆記により回転したボールと接触した紙面のみにインクが転写されるため、インク供給量が少なくボールの回転が不安定になりやすく、筆記した描線がうすくなるなどの課題を有している。

ボールペンの種類



図-1 ボールペンの種類
大きく分けて水性、油性、ゲルインクの3種類がある。

1984年に日本で誕生したゲルインクボールペンは、水性ボールペン用インクに増粘剤を添加し、チクソトロピー性(力が加わったときに粘度が下がる性質)を付与したインクを搭載している。筆記していないときのインク粘度は高いが、筆記中はボールの回転力によってインク粘度が下がるため、水性ボールペンのように滑らかに筆記ができ、濃い筆跡を作り出すことができる。また筆記した後の描線は、インク粘度が高くなるため、滲みにくくはっきりとした描線が得られる。更に筆記していないときのインク粘度の高さはペン先からの漏れ出し抑制に効果があるため、ペン体の構造も簡素化でき、製造コストも抑えることができる。

加えて、筆記していない時のインク粘度は色材などインク中に配合された微粒子の沈降抑制にも効果を及ぼす。発色のよい粒子径の大きな色材、隠ぺい力のある酸化チタンのような比重の大きい色材、描線に光輝感を与えるメタリック顔料やラメなどは非常に沈降しやすいが、ゲルインクの場合これらの分散を維持する効果もあり、描線に様々な色や機能を付加させることもできる。

ゲルインクボールペンの優位性と課題

ゲルインクボールペンは、油性ボールペンと水性ボールペンの特徴を併せ持つ。そのため、多くの仕様やカラー

線割れ発生のメカニズム

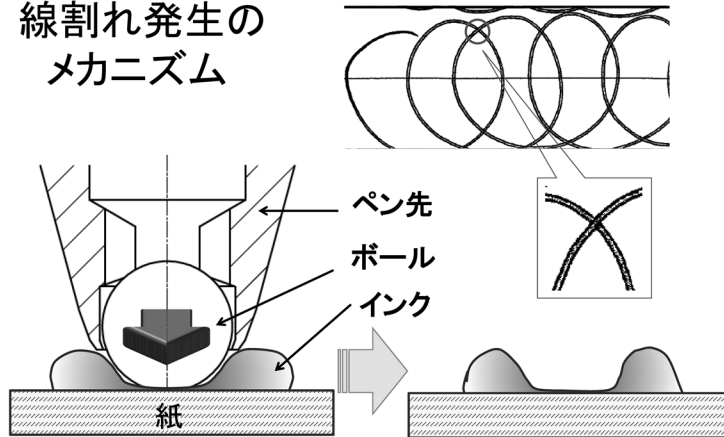


図-2 筆記時に起こり得る「線割れ」現象
紙面上のインク粘度が急激に高まることでインクが濡れ広がらず、ボールの通った後がそのまま残ってしまう。

ボテ発生のメカニズム

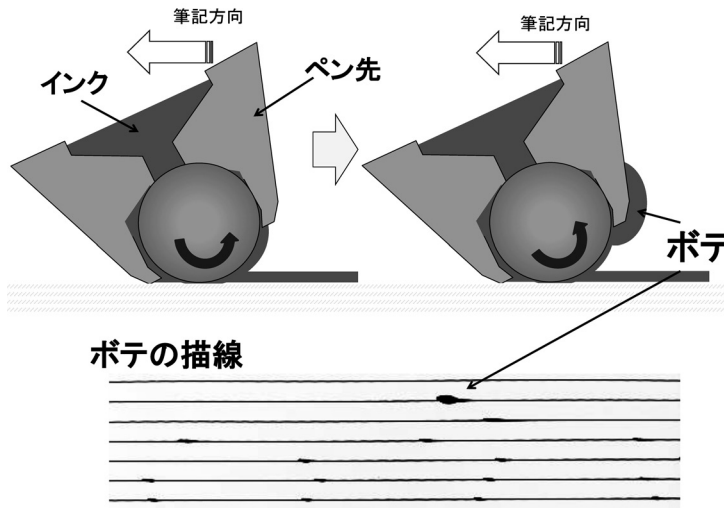


図-3 筆記時に起こり得る「ボテ」現象
紙面に乗り切れなかったインクがカシメ外側に溜まり、溜まりきれなくなったインクが塊となって紙面に付着する。

バリエーションを取り揃えることが容易となり、その市場は発売以来、年々高まりをみせている。ゲルインクはボールペン用インクとして理想形に近づいていると思われるが、実際はその品質にはまだ改善の余地が残されているのも事実である。ユーザーから品質に対し改良を望む声も聞かれており、その具体的な要素としては、「線割れ」、「ボテ」、「速書時のカスレ」が挙げられる。

線割れは筆記した時にボールが通った跡がそのまま轍のように残る「2本に割れた描線の状態」である。インクはペン先部に具備してあるボールとカシメ部の隙間から流出するが、その流出状態が描線として残り、両脇が盛り上がり中央はカスレて2重線ようになり、描線が醜くなる(図-2)。

ボテは、筆記した際に紙に乗り切れなかったインクが

ペン先のカシメと呼ばれる部位の外側に溜まり続け、大きく成長することによって紙の上に着いてしまう描線の不具合である。ボテが発生すると、その部分はインクの塊で文字が潰れ、インクが乾燥するのに時間がかかるため、周辺の紙や手を汚してしまい、ユーザーにご迷惑をおかけするケースも生じてしまう。線割れ、ボテは油性ボールペンでも生じやすい現象である(図-3)。

速書時のカスレは、アルファベットの筆記体やサイン書きなど素早く筆記するケースにおいて描線がうすくなる現象である。筆記する速度に対し、インクの流出速度が追いつかない状態で発生する不具合であり、描線の判読が困難となる。

これら線割れ、ボテ、速書時のカスレが生じる原因は共通しており、いずれも筆記している時にインクの粘度

インク粘度フローカーブ

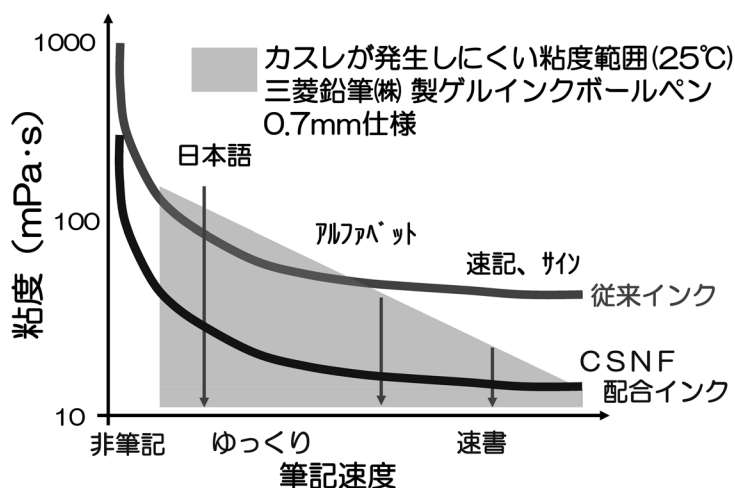


図-4 CNSF 配合インクと従来インクの様々な筆記シーンにおけるインク粘度変化の模式図

CNSFインクの描線品位

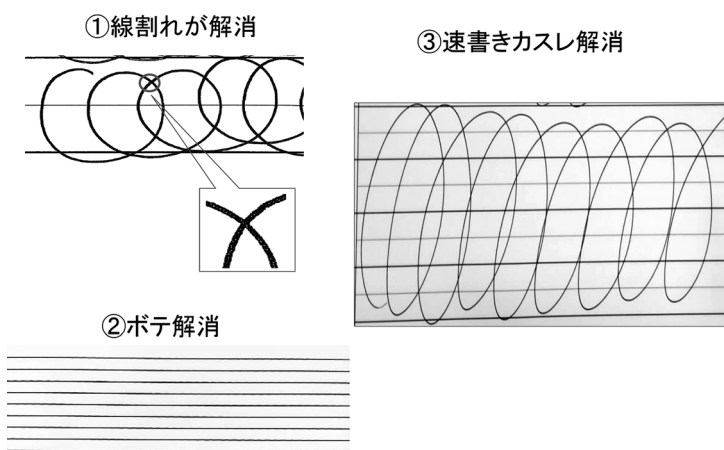


図-5 CNSF 配合インクを使用した場合の描線
CNSF 配合インクでは従来インクで見られた「線割れ」、「ポテ」、「速書カスレ」が解消されている。

が十分に低下していないことに由来する品質不具合である。筆記時のボールの回転力に対する粘度の下がり方が不十分であると、インクが硬い状態でペン先から流出するため、ボールの通り跡がそのまま残り（線割れ）、ペン先にインクの塊として堆積しやすくなり（ポテ）、流出抵抗になりやすくカスレしてしまう（速書時のカスレ）。

これらの不具合を改善するためには、筆記時の応力で素早く大きくインク粘度を下げる必要がある。インクの粘度設計は、主に増粘剤の種類と配合量にほぼ支配されているが、従来使用されている増粘剤の配合量を減らしただけでは低粘度でチクソトロピー性がない流体となり、筆記後の描線が滲んだり、筆記していないときにペン先からインクが漏れ出すなど品質の制御が困難となっ

てしまう。つまり、ゲルインクボールペンの基本品質を維持しながら線割れ、ポテ、カスレを抑制するには、筆記時の力により従来よりも大幅に粘度を下げる新しい増粘剤が必要であった。

セルロースナノファイバーのゲルインクへの応用

そのように考えていた折、工業薬剤メーカーである第一工業製薬のセルロースシングルナノファイバーを利用した新規増粘剤「レオクリスタ」の情報を得た。レオクリスタは、天然由来のセルロース繊維を化学処理と物理処理を併用することで得られる。繊維幅が10nm未満である為、セルロースシングルナノファイバー（CNSF）と呼ばれている。

CNSF は従来の化学合成系増粘剤や天然由来のガム系

ユニボールシグノUMN-307インク



図-6 UMN-307 製品とその使用インク

増粘剤とは異なり、非常に高い増粘効果と優れたチクソトロピー性を有している。半固体（硬いゲル）状のCSNFの水分散体サンプルを小瓶に入れて振とうすると瞬時に液状となり、非常にユニークな粘性挙動を示す。従来の増粘剤と比べてその違いは一目瞭然であった。この粘性特性の発現は、水中に分散したCSNF同士がゆるく凝集・架橋することで高い粘性を示す一方、繊維が細かく規則性のある分子構造であるので、応力がかかった際には高い流動特性を発現するためと推測される¹⁾。この特徴的な強いチクソトロピー性能をインクの粘度設計に活かせば、線割れ、ポテ、カスレの問題が改善されたインクの開発が可能になると考えられた。

そこで当社では、実用化に向けて試行錯誤を繰り返すことになったが、開発当初はなかなか思い通りの結果は得られなかった。CSNFを添加したインクを充填したペンは、インクを最後まで使い切ることが出来ず、途中でカスレたり筆記不能となった。また、ポテ、線割れ抑制などのパフォーマンスも十分に発揮されなかった。

これは、インク中のCSNF成分が塊となって点在し、インク全体にムラが生じたためと考えられた。ボールペンのペン先からインクが流出する隙間は10 μ m程と非常に狭く、安定的に流出させるためには、このムラを解消しなければならない。また、ボールペンは生産から流通、店頭陳列、お客様のもとでの使用・保管のすべての期間を通じて、品質を保証しなければならない。この間に品質を変化させないようなインク的设计が求められる。

インク中にCSNFを均一に分散し、その状態を安定に保つためには、高い精度の分散技術と安定化の技術を取り入れることが必要である。均一に分散させる手法については、当社が培ってきた顔料の分散技術やインクの配合技術を駆使し、CSNF分散に適した分散装置を選定することで、適切な分散条件を導き出すことが出来た。

また、CSNFの分散安定性を保つためには、インク中で経時的に生じるCSNF自身の水素結合による凝集を抑える必要がある。この課題については水素結合の阻害効果があり、分散安定化機能をもつ高分子材料を配合するなどして対策を施した。

水性ボールペン用のインクには、着色剤としての顔料や顔料の分散性を維持させるための分散剤、筆記時のボールの回転性を高めるための潤滑剤、ペン先の乾燥を防ぐための溶剤や保湿剤、更に防腐剤、防錆剤などが配合されている。それら様々な化学構造をもつ材料とCSNF自身の化学的な相互作用を1つずつ調査し、各材料の使用に対する安全性の見極めも実施した。

また、実験室での試作スケールから量産スケールへ移行させる段階では、製造コストを抑える生産技術的な工夫も盛り込み、スケールアップを実現した。このようにして得られたインクは水分散体で発現した強いチクソトロピー性を再現し、応力がかかることで大幅に粘度が下がり、流動性が高まることを確認できた（図-4）。

非筆記時の粘度は高く、筆記時の応力によりインクの流動性を著しく向上させることで、インクの漏れ出しを抑えつつも、①筆記直後の割れた線を両側のインク自身でその隙間を埋めるため線割れが解消でき、②筆記時のインク粘度が低いため、ペン先にインクの塊となって残りにくく（ポテ改善）、③素早い筆記速度においてもインク流出性を阻害しない（速書時のカスレ抑制）ボールペン用ゲルインクが完成した（図-5）。また本インクは筆記時の流動性が高いため、ボール回転にかかる抵抗も小さくなり、従来品以上の滑らかな書き味も実現できている。

このようにして世界に先駆けCSNFのインクへの実用化を進めてきた結果、「速書きでもカスレが起きず、線割れやポテが発生しない滑らかな次世代ボールペン（ユニボール シグノ UMN-307）」の製品化に世界で初めて成功した（図-6）。当初はアルファベット筆記で使用される機会が多い北米地域を対象に0.7mmボール仕様で先行発売し、その後、0.5mm、0.38mmと展開し、販売地域も欧州や日本国内にも拡大した。発売地域からは“カスレないボールペン”や“SKIP FREE”などと評され、好評を頂いている。

引用文献

- 1) 神野和人・竹内容治(2016)セルロースシングルナノファイバーからなる増粘剤の水性ボールペンインクへの実用化. 成形加工 28(3): 319-321

セルロースナノファイバーの パッケージへの応用

加藤 友美子 (かとう ゆみこ、凸版印刷株式会社)

はじめに

パッケージに求められる機能は年々増えており、中に入れるもの（内容物）をガスや光による劣化や物理的衝撃から守ること以外にも、運搬性、利便性、ブランド性、コミュニケーションツールとしての社会性、更には環境に配慮していることが求められている。特に、環境問題への関心が高まっている現在、企業活動においても持続可能な社会の実現に向けてさまざまな取り組みが進められており、パッケージについても環境に配慮した製品の提供が強く求められている。

主に植物が大気中の二酸化炭素を吸収して生成するセルロースは、地球上に存在する炭水化物の中で最も存在量が多い再生可能な天然資源である。セルロースを機能性材料として利用できれば、二酸化炭素の固定化に貢献することが出来る。また、セルロースなどのバイオマス材料を用いた素材はカーボンニュートラルな材料（図-1）といわれるように、そのまま焼却・廃棄しても、排出される二酸化炭素の量は石化資源由来の材料よりも少なく済む。

近年、パッケージ製品において石化由来材料の使用量削減を実現する素材として、木の繊維を原料とするセルロースナノファイバー（CNF）の応用が期待されている。しかし、いくら原材料がカーボンニュートラルであっても、素材を得るために大量のエネルギーを使用しなければならないのであれば元も子もない。なるべく簡便な処理で機能性材料として利用することが重要となる。

セルロースとセルロースナノファイバー

セルロースは古くから、薪、建材、紙・パルプ、更にはセロハンやTAC（トリアセチルセルロース）などのフィルム、レーヨン等の繊維など様々な形態や役割で用いられてきた。

天然に存在する植物の骨格を成し、雨風など様々な外部からの力に耐える役割を果たしているセルロースは、分子間・分子内に多数の水素結合が存在し、強固な構造をなしている。そのため、こうしたセルロースを機能性材料として利用するには、高温高圧での反応や、各種有機溶剤や強酸、強アルカリを用いた激しい反応が必要と

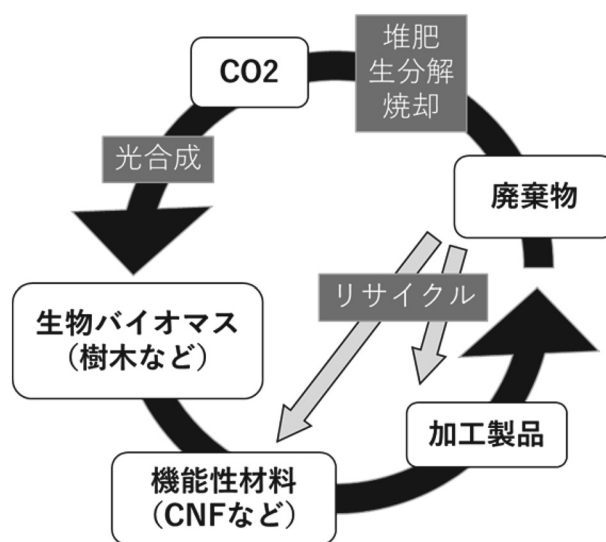


図-1 カーボンニュートラルな CNF の概念図

されてきた。

しかし、TEMPO という触媒を用いることにより、水系での室温近辺の温和な条件でセルロースを効率よく改質できる手法が見出された¹⁾（以下 TEMPO 酸化と呼ぶ）。この TEMPO 酸化により改質されたセルロースは水溶媒でコーティングすると透明な膜となり、高い酸素バリア性を発現することが明らかにされている²⁾。

一方で、CNF はどのように作られるのか。植物の細胞膜などにはセルロース合成酵素が存在し、この酵素からセルロースが合成される。セルロース合成酵素はいくつかの集合体（セルロース合成酵素複合）として存在しており、何本ものセルロースが同時に合成され、それぞれのセルロース分子鎖間で強固な水素結合を形成している。このセルロースの束が CNF の原型となる。しかし、植物の骨格となっているだけに、この CNF 間にも無数の水素結合が存在し、更には、リグニンという高次に架橋構造をもつガチガチのポリマーに固められているため、天然に存在する CNF を 1 本ずつ取り出すことは容易ではない。

2000 年前後からこの天然のナノファイバーを機能性材料として活用しようという研究が世界で盛んになってきた。当時は、リグニンを取り除いた後の、ほぼ 100% セルロースからなるパルプを高圧ホモジナイザー、グラ

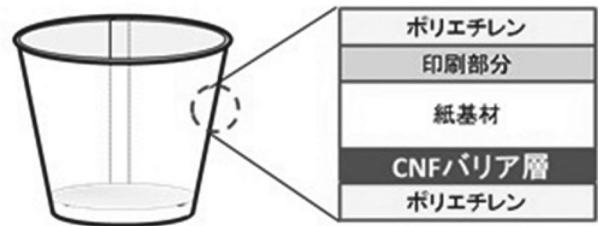


図-2 CNF を用いたバリア紙カップのサンプル (左) と層構成図 (右)

インダーなどで大きな機械的な力を加えることで得られていた。後により効率よく少ないエネルギーでCNFを得る方法が各種研究されてきた。2006年、前述のTEMPO酸化をパルプに用いた後、機械的な力を加えることで、より少ないエネルギーでCNFを得る手法が見出され³⁾、工業化、実用化に向けた動きが加速された。

CNFのガスバリア性

紙やポリエチレン、ポリエチレンテレフタレートなど一般的なプラスチックフィルムは、ガスの透過をある程度防ぐことはできるが、その繊維や分子鎖の隙間をぬってガスは溶解・拡散し、長い眼で見ると少しずつ透過する。

CNFは、幅がナノオーダーの結晶構造を維持した天然素材である。その結晶内にはガスが殆ど入り込むことができない。更に、CNFの表面には水酸基やカルボキシル基などの極性基が存在するため、水などの溶媒に分散したCNFをコーティングすると、乾燥の過程でCNF同士がぴったりとパッキングされ、ファイバー間にも水素結合が多数存在するようになる。こうして緻密な膜を形成することで、酸素などのガスが透過しにくくなり、ガスバリア性が発現する。

バリア紙カップとしての応用例

紙カップは内容物や想定保存期間など、求められる特性によって、様々な構成で成り立っている。例えば、酸素で劣化してしまう内容物を長期間保存する必要があるときには、劣化のスピードや保存期間に応じて、紙だけでなくアルミ箔や蒸着フィルムやプラスチックフィルムを貼り合わせた材料を用いる。こうしたバリア紙カップの構成を見ると、重量比で大部分（紙として分類できるものは51%以上）が紙基材であるが、バリア材料（層）には通常、石化由来材料を用いている。

紙基材の片面にCNFを薄くコーティングし、印刷、成形加工することで、バイオマス素材でありながら、従来の石化由来材料と同等の酸素バリア性を持つ紙カップが作製できる（図-2）。また、このバリア紙カップは匂いに対するバリア性を併せ持つ為、内容物の香りを維持したいときにも効果が期待できる（保香性）。また逆に、保存時に外からの匂いや香りが内容物へ移ることを抑制する効果（移り香防止）も期待できる。

紙基材に透明なCNFを薄くコーティングして作られるバリア紙カップは、石化由来材料を貼りあわせたバリア紙カップより紙の風合いを維持することができる。また、最大の特徴は、バリア層がバイオマス由来の材料からなっているという点で、石化由来材料を貼りあわせた紙カップと比べ、基本的な構成では、同じ酸素バリア性を発現しながら、石化由来材料の使用量を40%以上削減することが可能となる。

引用文献

- 1) Isogai A, Kato Y (1998) Preparation of polyuronic acid from cellulose by TEMPO-mediated oxidation. *Cellulose* 5: 153-164
- 2) Kato Y, Kaminaga J, Matsuo R, Isogai A (2005) Oxygen permeability and biodegradability of polyuronic acids prepared from polysaccharides by TEMPO-mediated oxidation. *J Polym Environ* 13: 261-266
- 3) Saito T, Nishiyama Y, Putaux JL, Vignon M, Isogai A (2006) Homogeneous suspensions of individualized microfibrils from TEMPO-catalyzed oxidation of native cellulose. *Biomacromolecules* 7: 1687-1691



野生鳥獣をたべる

松浦 友紀子 (まつうら ゆきこ、森林総合研究所北海道支所)



狩猟をしていると、普段は食べられないモノが食べられる。シカやイノシシ、クマ類はもちろん、ウサギ、タヌキ、トド、アライグマ、エゾライチョウ、カモ類、ヒヨドリ、ハト、カラス。自分で獲ったものに限らず、狩猟仲間たちと集まる場には驚きの食材が並ぶ(写真-1)。ヒグマの掌、トドの舌、シカの腎臓や子宮、睾丸等々、なかなかお目にかかれぬ部位も食べられる。中には、一度食べれば十分、というものもあったが、ほとんどの肉は滋味深く美味しく、森の(時には海の)恵みに感謝しながらいただいている。様々な動物の様々な部位を食べられるのは狩猟の魅力の一つだろう。

これら野生鳥獣肉の中でも、シカ肉は魅力的な食材だ。高たんぱく、低脂質、高铁分という特徴を持ち¹⁾、その特徴から生活習慣病の一次予防²⁾や、女性スポーツ選手にも適した食材と考えられている³⁾。栄養成分のみならず、シカ肉は味も優れている。北海道東部にある認定こども園では、月に1度給食でシカ肉を提供しているが、この日は残食が出ないほど子供たちはシカ肉が大好きだという⁴⁾。味覚センサーという機械で分析してみると、シカ肉は旨み、コク、さっぱり感のバランスがとれた肉と位置付けられる⁵⁾。このように科学的にも認められた魅力的な食材にもかかわらず、食肉利用されずに廃棄されているシカは多い。

全国各地でシカによる農林業被害や生態系被害が問題となっており、狩猟の規制緩和や狩猟以外の新たな捕獲体制の構築により、捕獲数を増加させる取り組みが行われている。これにより捕獲数は増加し、2014年度には狩猟及び許可捕獲により58.8万頭ものシカが捕獲された⁶⁾。しかし、このうちの程度が食肉利用されているかはよくわかっていない。農林水産省によると、野生鳥獣(シカ以外も含む)の食肉等への利用率は2014年段階で14%と推定されている⁷⁾。シカに限った利用率の全国平均は5%前後との推定もある⁸⁾。シカ肉の流通量が最も多い北海道では、食肉処理場に持ち込まれたシカの割合は、2015年度の段階で17.6%とされる⁹⁾。ただしこの値は、食肉利用以外(ペットフード、廃棄等)も含まれるため、実際に処理場を通じて食肉として流通



写真-1 各種狩猟鳥獣の薪火ロースト
ウサギ、ハト、キジ、カモ、カラスが乗っている。

しているシカの割合は更に少ないと考えられる。一方で、北海道経済部によるアンケート調査¹⁰⁾によると、捕獲個体の59.1%が狩猟者の自家消費とされる。ただし、一狩猟者として、狩猟者と付き合い、狩猟の現場を知るものとしては、実際にはこれほど利用されていないと思っている。ロース等の個体の一部分のみを利用して、残りは廃棄されることも多く、59.1%にはこれも含まれると推察される。このように、食肉利用の現状は十分に把握されていない。

ヨーロッパでは、狩猟鳥獣肉は、旬の食材として人気がある。狩猟鳥獣肉は、抗生物質不使用の健康的な自然食材であり、フードマイレージが低い万能食材とされる¹¹⁾。英国にはニホンジカを含む6種のシカが生息しているが、捕獲個体の97%が食肉利用されている¹²⁾。しかし実は、英国でも以前からシカ肉の利用が盛んだったわけではなく、かつては高級で特別な人たちの食べ物とされていた。そこでシカ肉の利用促進のため、英国では主に二つの取り組みがなされた。まず一つは、衛生管理制度の整備である。2006年にEUの法律を導入し、狩猟者、卸業者、食肉処理者、レストラン業者など、シカ肉の処理に関わる全ての人に対して、シカ肉を安全に扱うことを義務付けた¹³⁾。二つ目は、狩猟鳥獣肉をア



ピールする大規模なキャンペーンの実施である。英国狩猟協会が中心となり 2005 年から始まったこの取り組みでは、有名な料理人たちが狩猟鳥獣肉のレシピを開発し、イベントや TV で公開した。これにより、一般人にシカ肉が広がり、国内需要が増大したという。

日本でも近年、「ジビエ」をキーワードにした需要拡大のための取り組みが各地で行われ始めた。ジビエとは、食用として狩猟により捕獲された野生鳥獣肉を意味するフランス語である。海外の知人からは、なぜフランス語を使うのか疑問を呈されるが、シカ肉に興味を持つきっかけとしては良いのかもしれない。ただし、この言葉からは高級食材をイメージしてしまい、逆に縁遠く感じてしまう可能性も否めない。シカ肉の利用促進のためには、英国のように一般人にも受け入れられることがポイントとなる。

北海道では、この「ジビエ」ブームに先駆けて、実は英国と同様の取り組みがなされてきた。シカ肉の衛生管理を徹底するために、2007 年に一般社団法人エゾシカ協会によるエゾシカ肉認証制度が創設され、安全で安心なシカ肉の提供が可能になった。このことで、大手企業がシカ肉を扱うようになり販路拡大につながった¹⁴⁾。最近では一部のスーパーでも販売されている。また 2010 年から、毎月第 4 火曜日を「シカ(4 火)の日」に設定し、シカ肉を扱う店舗を増やすなど、需要拡大の取り組みを続けている。そのため北海道では、近年はシカ肉の需要が供給を上回るまでになった。需要が増加したのは喜ばしいことだが、北海道では年間 12 ~ 14 万頭ものシカが捕獲されているにもかかわらず、供給が足りないのはなぜなのか。これは、せっかく捕獲されても、食用に適さないシカが多いことを意味する。

シカを食用にするためには、捕獲時点からシカを“食べ物”として扱う必要がある。すなわち、捕獲前からシカの行動を観察し、異常行動等が見られないかを確認する。捕獲時にはシカにストレスをかけることなく、急所を狙い仕留める。捕獲後、処理場に運ぶ際も衛生的に取り扱うことが求められ、捕獲者が担う役割は大きい。しかし、捕獲者がこのような知識を得る場はほとんどなく、大半が自己流である。そのため、シカが食肉となる「入口」段階の管理が不十分であり、食用として受け入れる原材料としての「と体」の安全性に係る危機管理が希薄であることが指摘されていた¹⁵⁾。そこで、前出のエゾシカ協会は、入口の段階から衛生管理ができる人材を育成するために、「シカ捕獲認証制度(略称 DCC)」を 2015 年に創設した¹⁶⁾。DCC がモデルとした英国の資



写真-2 英国で捕獲したダマジカ

著者は英国の検査資格を持っているため、このシカを解体・検査し、食肉流通にのせることができる。

格は、厳しい衛生管理で知られる EU において、シカ肉を流通させる際に求められる捕獲個体の検査を行う資格を兼ねている(写真-2)。DCC もこれに相当する内容になっており、シカ肉の衛生管理に関する適切な知識と技術が得られる(ただし、現段階では英国や EU 市場向けの出荷には対応していない)。当たり前であるが、人が食用とする肉は、衛生的に処理されていなくてはならない。これを担保するためには、DCC 取得者のような人材がシカ肉の「入口」管理に関わるべきである。

食用に適さないシカが多い理由は、もう一つ考えられる。捕獲数増加のための取り組みとして、国や市町村はシカの有害駆除に捕獲奨励金を出している。金額は地域によって異なるが、1 頭当たり 1 ~ 3 万円程度であろう。駆除をしさえすれば報奨金が入るため、捕獲者の目的は「シカを殺すこと」になってしまう。駆除したシカは、捕獲の証拠資料をとったのちに捕獲現場に放置する者もいる。食用として販売しなくても実入りがあるのである。食肉利用に適した撃ち方ではない、腹部や臀部を撃つ場合も多いという。森からの恵みであるはずのシカが、ただ殺されてゴミになっているのだ。

シカは適正な密度に達した後も、それを維持するために捕獲し続けなくてはならない。つまり、シカの管理に終わりはないのである。持続的なシカ管理のためには、殺すことにお金をかけるだけの対策ではなく、シカの食肉利用率を上げて廃棄率を下げるのが求められる¹⁷⁾。多くのシカを殺さなくてはならない今こそ、シカが資源であることを改めて認識すべきだろう。

引用文献

- 1) 岡本匡代・坂田澄雄・木下幹朗・大西正男 (2004) 野生エゾシカ肉の栄養特性について. 日本栄養・食糧学会誌 57: 147-152
- 2) 岡本匡代 (2012) おいしいシカ肉おいしい生活. 獣医畜産新報 65: 487-490
- 3) 亀井 明 (2007) 貧血予防と鉄・たんぱく質摂取. (新版コンディショニングのスポーツ栄養学, 樋口満編, 市村出版). 84-94
- 4) 太田 晶 (2014) シカ肉で食育! Gun Magazine 3(14): 124-125
- 5) 都甲 潔 (2007) プリンに醤油でウニになる. ソフトバンククリエイティブ
- 6) 環境省. 狩猟及び有害捕獲等による主な鳥獣の捕獲数. <https://www.env.go.jp/nature/choju/docs/docs4/higai.pdf>, 2017年9月5日確認
- 7) 農林水産省. 第4章 鳥獣被害対策関連資料. http://www.maff.go.jp/form/pdf/6_chapter4.pdf, 2017年9月5日確認
- 8) 小谷浩治 (2016) 特定非営利活動法人日本ジビエ振興協議会の活動. 日本鹿研究 7: 16-18
- 9) 北海道 (2017) 北海道エゾシカ管理計画 (第5期). 北海道
- 10) 北海道経済部 (2011) エゾシカ活用実態調査事業報告書 (概要版). 北海道経済部
- 11) Taste of Game. "Why you should eat game meat". <https://tasteofgame.org.uk/why-you-should-eat-game-meat/>, 2017年9月5日確認
- 12) PACEC (2014) The Value of Shooting. <http://www.shootingfacts.co.uk/pdf/consultancyreport.PDF>, 2017年9月5日確認
- 13) 松浦友紀子・伊吾田宏正 (2012) 英国の一次処理と資格制度. 獣医畜産新報 65: 451-454
- 14) 松浦友紀子・井田宏之・近藤誠司 (2013) エゾシカの食資源化における課題とエゾシカ協会の取り組み. 水利科学 333: 38-51
- 15) 鈴木正嗣 (2012) 欧州委員会 (EC) の規則に準拠した英国の HACCP モデル. 獣医畜産新報 65: 455-458
- 16) 松浦友紀子 (2016) 今後のニホンジカ管理に求められる人材とその育成. 地方議会人 47: 24-26
- 17) 松浦友紀子 (2015) ニホンジカの食肉資源化に向けた取り組み. 山林 1576: 2-11

ガボン オートオゴウェ州の熱帯林

佐藤 顕信 (さとう あきのぶ、日本森林技術協会)

はじめに

ガボンと言う国をご存じでしょうか。アフリカの国々の中でも、ケニア等に比べ、その知名度は高くないと思います。

ガボンは、アフリカ中部の大西洋側に位置する熱帯気候の国です（首都リーブルヴィルの年平均気温は26℃、年降水量は2,900mm）（図-1）。その国土面積は約26万7千km²（本州と九州を合わせた位）、人口は約180万人です¹⁾。ガボンの産業は、原油やマンガン、ウラン等の輸出で成り立っています¹⁾。そして驚くことに、産業としての農業はほとんど行われておらず（粗放な農耕はされていますが）、食料はほぼ輸入で賄われています。一方、国土の約82%（22万km²）が森林であるため、林業が原油輸出等に次ぐ産業となっています^{1, 2)}。筆者は、森林資源量の把握を行うガボン森林省の職員への技術支援に2014年から関わり、年に1-2ヶ月ガボンに渡航し、その間の現地調査のため、東部のオートオゴウェ州には1ヶ月程度滞在しました。

ガボンの森林とオクメという木

ガボンを含むコンゴ盆地地域は、サバンナとライオンといった一般的なアフリカのイメージと異なり、地球上でアマゾンに次ぐ広さの森林地帯となっています。ガボンの森林は、カメルーンやコンゴ共和国の森林とつながっており、ゴリラやヒョウ、アフリカゾウの生息地となっています。



図-1 ガボン、オートオゴウェ州の位置

オートオゴウェ州は、内陸の高原でやや乾燥した気候（州都フランスピルの年平均気温24℃、年降水量1,800mm）ですが、林冠高が30～40mに達する森林が広がり、ムヴィンギ (*Distemonanthus benthamianus*)、ソロ (*Scyphocephalum ochocoa*)、オクメ (*Aucoumea klaineana*) 等の樹種が出現します（図-2）。それらの樹種の中で、ガボン人が特に重要視するのがオクメです。

オクメは、直径2m、樹高30～40mに達する種で、ガボンで最も利用されている商用樹種です。その材は、合板、内装材、家具、地域住民のボートの材料として利用されます。また、オクメの樹脂は、トーチの燃料やお香（燃やすと虫避けになるとも）、化粧品の香料に使われます。このように、オクメは木材としても特用林産物としても、ガボンの人々にとって馴染み深い木なのです。

日本の森林調査技術支援の現場

ガボンの森林では、林業省の認可を受け、欧州を中心とした林業会社が商業伐採を行っています。国道では写真のような木材運搬トラックが頻繁に見られます（図-3）。それらの林業会社は、操業の認可や森林認証を得るために、伐期のインターバルや樹種ごとに決められた最小伐採直径（オクメは70cm）の遵守等、森林資源の持続的利用に取り組んでいます。一方で、無認可の違法伐採や、食糧確保のための住民による森林の伐開・耕作が



図-2 オートオゴウェ州ンゴウニの森林



図-3 伐出された丸太を運搬しているトラック



図-4 樹木地下部の掘り出し調査の様子

問題となっており、これらが森林の減少や劣化につながっていることはご存じのとおりです。

これらを背景に、ガボンの森林省では気候変動枠組条約に基づく炭素排出量の報告に向け森林炭素量把握を模索していましたが、体系だった調査は行われていませんでした。そこで、森林炭素量把握にむけた調査機材の供与や技術移転が、日本政府の無償資金協力で行われました。筆者は、その一環として、森林バイオマス把握のための調査機材の利用技術をガボン森林省の職員に指導するため、オートオゴウエ州ンゴウニ地域において立木の伐倒調査や根の掘り出し調査の現地実習を行いました。実習内容のうち、根の掘り出しは作業が困難なため、これまで行われてこなかったようで、ガボンの職員や手伝ってくれた研究者は初めての試みに関心を持って取り組んでいました(図-4)。

3週間のンゴウニ地域滞在中の食事は、当然、現地食ですが、その内容はガゼルの肉の煮込み、ティラピアの唐揚げ、付けあわせにキャッサバやバナナです(図-5)。食材に限られ単調とは言え、毎日食べているとキャッサバの発酵具合や茹で具合、バナナの調理法に好みが出てきます。ちなみに筆者は、キャッサバは柔らかめで酸味の少ないもの、バナナは揚げたものが好きです。

滞在中、ほぼ毎日食べたキャッサバですが、それは現地の住民が森林を伐開し栽培したものです。食糧確保の術が限定される地域では、住民の生計確保と森林分野での地球温暖化対策の兼ね合いの難しさを感じます。

現在、ガボンでは天然資源の保全と持続的利用に、国を挙げて取り組んでいます。この取組はGabon Vert(緑のガボン)と呼ばれ、森林資源の持続的開発、付加価値を付けた木材製品の輸出、地球温暖化対策、食糧自給率



図-5 現地の食事(野生動物の肉料理とキャッサバ)

の増加等、包括的に取組目標を掲げています³⁾。しかし、農業分野の雇用創出に向け3,000 km²の森林をオイルパームへの転換を目指す等、立場によっては疑問符が付く目標があることも否めません。

地球温暖化対策においては、コンゴ盆地地域諸国の森林・林業政策の動向が注目されますが、ガボンの取組に我々の技術支援とその成果が活かされることを願うばかりです。

引用文献

- 1) 外務省. ガボン共和国 (Gabonese Republic) 基礎データ. <http://www.mofa.go.jp/mofaj/area/gabon/data.html>, 2017年7月12日確認
- 2) FAO (2010) Evaluation des ressources forestières mondiales 2010. Rapport national Gabon 2010. FRA2010, Rome
- 3) Le Gabon.org. Green Gabon. <http://www.legabon.org/emerging-gabon/green-gabon>, 2017年7月12日確認

根の滲出物をはかる

孫 麗娟 (Sun Lijuan、京都大学農学研究科)

はじめに

植物の根からは呼吸の二酸化炭素フラックスと同様に有機態炭素が連続的に放出されています。これらの有機態炭素を総称して根滲出物と呼びます。根滲出物の中にはグルコースなどの糖類、クエン酸などの低分子有機酸、グリシンなどのアミノ酸が大量に含まれています。これらの物質は微生物にとって使いやすい炭素源であるため、根の周りの土壌（根圏土壌）は根から離れた個所にある土壌（バルク土壌）より常に数十倍の微生物活性を示します。そのため、根圏土壌における有機物分解速度は通常、バルク土壌より早い傾向にあります。この効果は根圏プライミング効果とよばれ、土壌有機物分解の重要な駆動力となっています。

土壌有機物の分解による栄養塩循環は生態系を維持するための基盤となるプロセスです。根圏プライミング効果で放出された栄養塩は根の近くに存在するため（根圏は根から通常 1-5 mm 以内の範囲）、植物にとってアクセスしやすい特徴があります。従って、根滲出物による根圏プライミング効果は植物にとって極めて効率的な栄養塩獲得戦略といえます。

根滲出物は微生物に利用されやすいため、放出されると速やかに森林の消費者や分解者である微生物の呼吸（従属栄養呼吸）に変換されます。従来の測定手法ではこの根滲出物を従属栄養呼吸の一部として測定してきました。しかし今後、根圏プライミング効果による土壌有機物分解プロセスをより深く理解していくためには、正味の根滲出物フラックスを測定する必要があります。

シリンジシステムによる根滲出物のほかり方

森林生態系内の成木を対象として、根滲出物をはかるため、シリンジシステムを導入しました（写真-1、Phillips *et al.* 2008 から改良）。周辺の微生物に根滲出物を利用されないように土から細根を母樹から切り離さない状態で掘り出し、土壌を洗浄した後、注射器の可動式の押し子（プランジャ、ゴム製のガスケット）に設けた小さな穴を通じ、シリンジ内に根系を入れました。根の活性を維持するため、土粒子のように細かいガラスビーズと炭素フリーの栄養塩溶液も一緒にシリンジ内に入れました。母樹と繋がったままの状態、細根が栄養塩溶液中に放出した根滲出物を溶液状態でサンプリングし、全溶存態炭素濃度から根滲出物を測定しました。

コナラを例にとると、滲出物を盛んに放出すると考え

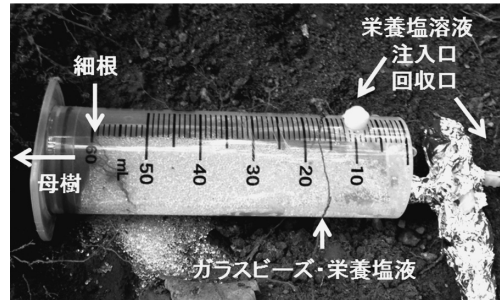


写真-1 現場に設置した根滲出物回収シリンジシステム



写真-2 滲出物回収用のコナラの細根

られるのは直径 0.2-0.5 mm くらいの先端部分の細根です。このような細根は（写真-2）、一房だと数十 mg 程度であり、培養時間が短すぎると滲出物の炭素量が少なすぎて検出できません。一方、根は滅菌していないため培養時間が長くなると、周辺の微生物によって根滲出物が消費される可能性がどんどん高くなります。予備実験の結果、フラックスを捉えるのに 1-2 日程度の培養期間が妥当であることが分かりました。

森林で根滲出物をはかる

森林総合研究所のフラックス観測サイトである山城試験地（京都府）の暖温帯林において、2013 年から 2014 年にかけて優占樹種コナラとソヨゴを含めた 4 樹種の根滲出物フラックスを測定しました。同属の落葉樹と常緑樹であるコナラとアラカシ、ソヨゴとアオハダをそれぞれ比較しました。根滲出物は地下部に配分される光合成産物に由来することから、その配分量は樹種の光合成能に比例した量であると考えられます。また、窒素が制限因子である温帯林では、窒素要求度が高い樹種ほど、根圏プライミング効果によって窒素獲得能を高めていると考えられます。実際に前述の 4 樹種を比較したところ、落葉樹種の方が常緑樹より根滲出物フラックス

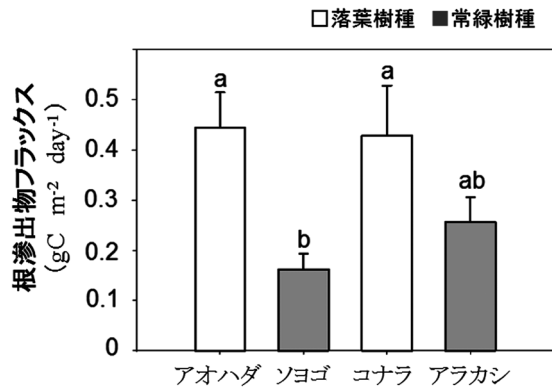


図-1 4樹種の根滲出物フラックス
 平均値±標準誤差(n=14)を示した。異なるアルファベッ
 トは Scheffe の多重比較による有意差を示す (p < 0.05)

が高いという結果が得られました (図-1)。このパターンは、同属の落葉・常緑樹種間の光合成能力と窒素要求度の種間差とも合致しました (Sun *et al.* 2017a)。

滲出物と並行して根呼吸をはかる

根滲出物の現地測定例はまだ限られているものの、根呼吸の測定例は既に充実しています。根の機能と活性の関係性を考えると、呼吸フラックスと滲出物フラックスの間には正の相関関係が存在しうるので、この両者の関係性を確認することで、根呼吸フラックスから根滲出物フラックスを推定する手法が開発できるのではないかと考えました。そこで、同じく山城試験地のコナラとアラカシを用いて、根滲出物と根呼吸フラックスを同時に測定しました。生理活性がピークに到達したと思われる7月(2015年)に、両者の間には正の相関関係が示されました (Sun *et al.* 2017b, 図-2)。この相関関係において両樹種の間には有意な差は認められませんでした。

炭素量として測られた根滲出物フラックスは細根呼吸によって放出される炭素量の約11.5%であり、これは山城試験地の純一次生産の約2.9%に相当しました。根滲出物の放出により周囲の栄養塩の可給性が高い細根付近では、根は栄養塩を積極的に吸収すると同時に、根呼吸として炭素を多く消費していると考えられました。

おわりに

山城試験地では根滲出物フラックスが高いほど、根の

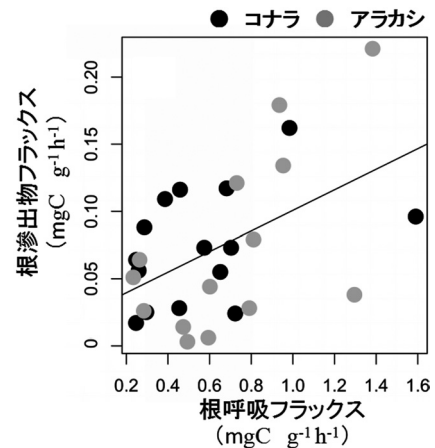


図-2 根滲出物フラックスと根呼吸フラックスの関係
 コナラとアラカシ両種をまとめた回帰直線を示した

周辺の有機物分解酵素活性も上昇するという結果が得られました。今後、滲出物の年間フラックスを測定する際に、窒素獲得量を同時に測定していくことで、樹木が窒素をどのくらい根滲出物に依存して、獲得しているのが解明されていくのではないかと期待されます。このような測定で得られるデータは私達に、森林生態系がどのように窒素制限を乗り越えているのかを深く理解させてくれると考えられます。

引用文献

- Phillips RP, ERLITZ Y, BIER R, BERNHARDT ES (2008) New approach for capturing soluble root exudates in forest soils. *Funct Ecol* 22: 990-999
- Sun L, Kominami Y, Yoshimura K, Kitayama K (2017a) Root-exudate flux variations among four co-existing canopy species in a temperate forest, Japan. *Ecol Res* 32: 331-339
- Sun L, Ataka M, Kominami Y, Yoshimura K (2017b) Relationship between fine-root exudation and respiration of two *Quercus* species in a Japanese temperate forest. *Tree Physiol*, <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx026>

林業遺産紀行 第9回



「飯能の西川材関係用具」コレクション

竹本 太郎 (たけもと たろう、東京農工大学大学院農学研究院)

西川林業と西川材

西川林業は、近世・江戸時代にかけて武州西方の名栗川（入間川上流）・高麗川を中心とする流域（現在の埼玉県西部地域）に成立し、そこから産出される材木が西川材と呼ばれた。近世初期には薪炭生産が中心だった西川林業は、中・後期に人工造林による建築用材生産へと生産構造を転換し、この過程を通じて江戸への民間用材の供給地として発達した¹⁾。明治後期以降は、飯能の平地部における双柳地区での苗木生産を契機に、スギ・ヒノキなどの植林が一層促進された。現在、西川林業地は飯能市を中心として越生町、毛呂山町、日高市などにひろがり、およそ2万haに及ぶ山林を抱えている²⁾。

「飯能の西川材関係用具」

飯能市郷土館には、植え付けから伐採、製材に至るまで、西川材生産のほぼ全ての過程を網羅した道具類が、市民からの寄贈を受けるかたちで保存・展示されている。コレクションの整理にあたっては、市民学芸員が平成15年度から4年間にわたり積極的に取り組み、資料の

クリーニングや寸法の計測などを行った。その成果が、平成19年に埼玉県の有形民俗文化財の指定を受けることに繋がり、さらに『飯能の西川材関係用具』（飯能市郷土館所蔵目録3）として目録を含めた冊子化がなされた³⁾。

448点の道具たち

表1に示すようにコレクションは全部合わせて448点にもなる。大きく分類すると、苗木を植えるのに用いた「トウグワ」などの育林用具（45点）、「ヨキ」や「ノコ」などの伐採用具（115点）、杉皮を剥くために使用した「カワマワシ」などの皮剥用具（56点）、木材を動かすための「トビ」や運搬のための「ソリ」などの搬出用具（76点）、筏製作に使用した「メドキリ」などの流送用具（12点）、角材に加工するための「ケズリヨキ」や材木を板にする木挽きに使用した「マエビキノコ」などの製材用具（105点）、仕事着である「シルシバンテン」や雨具である「ミノ」などの衣類（22点）、信仰用具（9点）、その他（8点）となる。これらのなかには、現在



写真-1 飯能市郷土館で西川材関係用具の一部について説明を受ける大学生（通常、このような展示は行っていないのでご注意ください）

「飯能の西川材関係用具」コレクション

表-1 「飯能の西川材関係用具」の一覧（分類表）

大分類	中分類	概要	点数
育林用具 (45点)	(1) 植林用具	苗木を植える植林に用いた道具。トウグワ、ショイバシゴなど	5
	(2) 下刈用具	植林後の下刈作業で用いた鎌および手入れ道具。アイガリガマ、トイシなど	14
	(3) 枝打用具	不要な枝を落とす枝打ちの作業に用いられた道具。ナタ、ハシゴ類など	14
	(4) その他	育林などで山に入る際に携行する道具類。ショイカゴ、コシナタ、コシノコなど	12
伐採用具 (115点)	(1) 伐採準備用具	伐採に際し行われた山見や、ネボリ・鋸の手入れなど伐採前に用いられた道具類。巻尺、ツチカキ、鋸の手入れ用具など	18
	(2) 斧類	伐採に用いた斧類。ヨキ、テオノ、ヨキの刃を保護するハマキなど	20
	(3) 鋸類	伐採や玉詰め用いた鋸類。テノビノコ、テマガリノコ、カイリョウノコ、リョウビキノコなど	50
	(4) クサビ類	伐採時に鋸が挟まれないように打ち込んだクサビ。ヤとも呼ぶ	15
	(5) その他（定規・刻印）	伐採などで用いた小物類。定規類とコクインなど	12
皮剥用具 (56点)	(1) 杉皮製作用具	商品とするため杉の樹皮を傷めずに剥くための道具。カワマワシ、シャクボウ、製品の杉皮など	27
	(2) 杉皮結束用具	剥離した杉皮を整え結束するための道具類。カワマルキガマ、カワマルキダイなど	15
	(3) その他皮剥用具	杉以外の皮を剥くための道具。杉皮に商品価値がなくなってからは杉にも用いられた。ツキムキ、カワケズリ、カワムキガマなど	14
搬出用具 (76点)	(1) トビ類	木材を動かす際に用いた道具。タケトビ、オオトビ、ツルトビなど	16
	(2) 搬出補助用具	搬出時に補助的に用いた金具などの道具類。キマワシ、カジカン、トチカン、カスガイ、カッシャ、カタナワなど	44
	(3) ソリ	木の搬出に用いた運搬用のソリ	7
	(4) 荷車類	山から運び出した木材を積み、運搬に用いた荷車類。センガン、ジグルマ、タカハなど	9
流送用具 (12点)	(1) 筏製作用具	筏を製作するときに用いた道具類。結束用の穴をあけるメドキリ、カスガイなど	7
	(2) その他	筏の流送用に用いた道具類。筏のサオ、係留用のオオヅナ、鑑札など	5
製材用具 (105点)	(1) 木挽用具	板材を製造する木挽き職人が用いた道具類。マエビキノコ、製品であるコビキイタなど	28
	(2) 削り用具	角材を製造する削り職人（杣）が用いた道具類。ケズリヨキ、チョウナなど	15
	(3) 製材補助用具	製材関係の職人が用いた小物類。ヤ、スミツボ、スミサシ、カスガイ、リンクギなど	14
	(4) 名入れ用型	製材後に種類や屋号などを刷り入れるための型板。スリコミイタ	48
衣類 (22点)	(1) 仕事着	仕事時に着用した衣類。シルシバンテン、ハラガケ、ハバキ、モモヒキなど	9
	(2) 雨具類	雨天時に着用した雨具類。ミノ、カサなど	9
	(3) 履物	作業時にはいた履物。雪上での滑り止めであるガンジキなど	4
信仰用具 (9点)	(1) 奉納品	山の神に奉納されたもの。酒器であるオミキスズ、初申の作り物である弓矢など	9
その他 (8点)	(1) 看板類	材木商の軒先にあった看板類	6
	(2) その他	どこにも属さないもの。メンバ（弁当箱）、ナワナイなど	2
合計			448

飯能市郷土館 HP（<https://www.city.hanno.lg.jp/article/detail/1479>）より転載。なお詳細な目録は、飯能市郷土館の『飯能の西川材関係用具：埼玉県指定有形民俗文化財（飯能市郷土館収蔵資料目録3）』⁽³⁾に収録されている。

ではその道具を用いた作業自体がほとんど行われていないものも多数含まれており、西川材の生産の歴史を知る上での貴重な資料となっている。

林業遺産への登録

以上の資料の貴重さ、及び所有者・管理者レベルでの普及・保存活動を踏まえて、「飯能の西川材関係用具」は、平成25年度に最初に選定された林業遺産10件の一つとなった。なお、飯能市郷土館では大学生の見学の受け入れ（写真-1）なども行っており、林業や森林を含む地域の歴史を学ぶことができる。

引用文献

- 1) 脇野博（2006）日本林業技術史の研究．清文堂出版
- 2) 埼玉県西部地域博物館入間川展合同企画協議会（2004）
入間川再発見！身近な川の自然・歴史・文化をさぐって．埼玉県西部地域博物館入間川展合同企画協議会
- 3) 飯能市郷土館（2007）飯能の西川材関係用具：埼玉県指定有形民俗文化財（飯能市郷土館収蔵資料目録3）．飯能市郷土館

伐採箇所の奥地化に伴う最適路網の検討

櫻井 倫 (さくらい りん、宮崎大学農学部)

はじめに

宮崎県の林業は全国に先駆けて主伐時代を迎え、県内の素材生産量は統計値で平成 27 年に 179 万 m³、その他の用途も含めた木材生産量の実勢値としては 250 万 m³ とも言われており、県内のあちこちで主伐が行われています。しかし、それだけの生産量をまかなうために、集落と道路に近い森林から伐採が進み、伐採箇所が次第に奥地化しつつあります。一方で、統計値として計上されているいわゆる「森林資源量」には、伐採が容易にできない利用困難な資源量も含まれており、「実際に使える森林」の残存量が統計上の数字から離れつつあります。

今回、宮崎県治山林道協会からの依頼により、現在利用困難な森林資源の利用率を向上させることを目的として、整備すべき搬出用路網を抽出することとしました。特に、統計上の森林資源量に対する「産業的に利用可能な森林資源」の比率を算出するとともに、宮崎県の県北地域の五ヶ瀬川、耳川、一ツ瀬川の各流域（それぞれ森林計画区と一致）を対象として路網整備の重点的箇所の抽出を行いました。本稿ではそのうち、GIS を用いた「利用可能な森林資源の比率」の解析および「路網の充実が必要な地域」の把握について紹介します。

「利用可能な」森林資源量の把握

本研究を実施するにあたり、まず「利用可能な森林」を定義する必要があります。そこで、市場や製材所に搬出するためのトラックに材を積むまでの搬出距離が 1 km 以内である森林を利用可能な森林資源としました。この定義には異論も多いかと思いますが、宮崎県では現在、高密度の森林作業道を敷設し、伐倒した立木をプロセッサやチェーンソーで造材してフォワーダで運材する作業システムが主流であり、フォワーダの運材距離の上限や架線集材（集材機集材）のスパン長を勘案すると 1 km を搬出距離の上限とすることが適当と判断したためです。

「森林」の GIS データは環境省自然環境局による自然環境保全基礎調査結果のうち植生調査結果を用い、植生が「伐採跡地」「人工林」など今後の生産活動が期待できる地域を抽出して対象地としました。ただし、この GIS データでは、空間的に連続する同一の植生は一つの区画（ポリゴン）として設定されており、場所によっては数十 ha の森林が一つのポリゴンとなっています。そこで、図-1 左のように森林を 100 × 100 m のメッシュで区分し、一区画あたりの最大面積を 1 ha と設定しました。

次に「道路」の GIS データについては、国土交通省国土地理院が発行している「国土基本情報」を用い、この中に含まれる「道路中心線」を利用しました。この道路データには「階級別に区分された道路幅員」「有料・無料」「トンネル・高架・地上」など道路の属性に関する有用な情報が含まれているため、これらを解析に利用しました。具体的には、トラックが進入可能な「幅員 3 m 以上の」「庭園路等ではない一般に開放された」「階段等ではない車両走行可能な」道路のうち、トラックへの積載が可能な区間である「トンネルや高架・橋梁ではない地上部」の道路を設定しました。

GIS データ解析のソフトウェアには、QGIS および ArcGIS を併用しました。森林の各区画の重心から道路データの「トラックへの積載が可能な区間」までの直線距離を計算し（図-1 右）、これが 1 km 以下であるならばその区画の森林資源は利用可能であるものと設定しました。この考え方はすなわち、「開発幅」(Backmund 1966) を 1 km と設定したときの、開発領域に含まれる森林を「利用可能な森林」とした、ということになります。

結果を全体の地図として表したものが図-2 になります。また、低規格の路網の発達度合いをあわせて検討するため、搬出先の道路として「幅員 3 m 以上」の条件を外し、すべての地上の道路に搬出可能としたときの計算結果もあわせて示しました。結果を市町村（図-3）

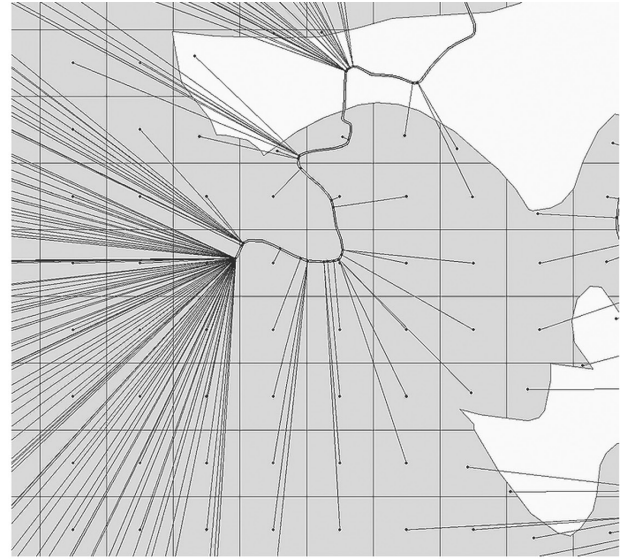
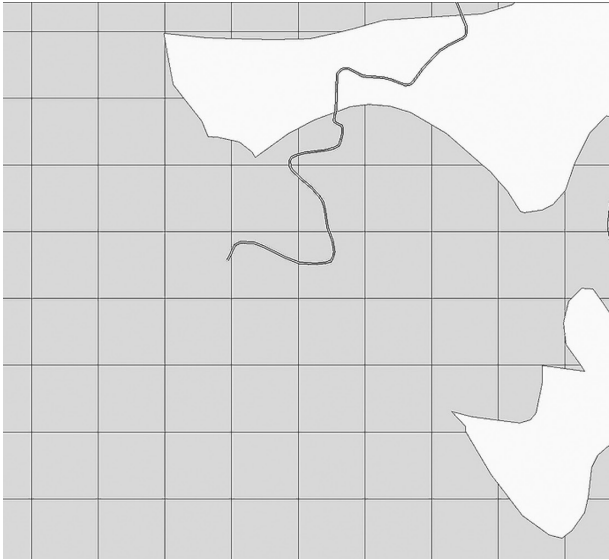


図-1 1 ha 区画に分割された森林 (左) と、各区画の森林重心点から道路までの直線距離の算出法 (右)。森林以外の田畑、市街地などは白塗りで示した。



図-2 利用可能な森林および利用困難な森林の全体図

ごとに集約したものが表-1です。現在の市町村は平成の大合併により流域を跨ぐなど地形と整合しない市町村界があることから、大合併以前の平成7年時点の市町村の区分により分類しました。

森林のうち「利用可能な森林」と判定された割合（開発率）が高い、換言すればトラックが進入可能な路網がよく発達している自治体は、高鍋、新富、都農、諸塚、北郷、五ヶ瀬といった市町村で、開発率は90%を超えています。逆に開発率が低いのは、西都、西米良、北川、



図-3 検討の対象とした市町村

北方、門川、北浦、南郷といった箇所で、70%未満でした。

開発率が高い市町村のなかでも上位の高鍋、新富、都農の三町村は海岸に近い平野部にあり、もともとの森林面積もあまり広いとは言えないところですが、その下に続く諸塚、北郷、五ヶ瀬といった町村は山間部にあり、平均傾斜も急なところでありながら、平地と同等の開発率の高さは特筆すべきものがあります。特に諸塚村は林道の充実ぶりが全国的にも有名になるほどでした

伐採箇所の奥地化に伴う最適路網の検討

表-1 市町村ごとの利用可能な森林面積

市町村	全対象森林面積 (ha)	幅員 3 m 以上の道路から 1 km 以内の森林		道路から 1 km 以内の森林	
		森林面積 (ha)	比率 (%)	森林面積 (ha)	比率 (%)
延岡市	12,079	9,207	76.2	11,938	98.8
延岡市 (旧北浦町)	5,489	3,583	65.3	5,489	100
延岡市 (旧北川町)	16,148	9,787	60.6	15,777	97.7
延岡市 (旧北方町)	10,476	6,488	61.9	9,947	94.9
高千穂町	11,069	8,806	79.6	10,928	98.7
日之影町	11,541	8,292	71.8	11,372	98.5
五ヶ瀬町	10,797	9,780	90.6	10,688	99.0
日向市	3,635	3,207	88.2	3,635	100
日向市 (旧東郷町)	13,652	9,658	70.7	13,621	99.8
門川町	4,751	2,980	62.7	4,722	99.4
美郷町 (旧西郷村)	10,682	7,830	73.3	10,682	100
美郷町 (旧南郷村)	14,695	9,434	64.2	14,695	100
美郷町 (旧北郷村)	7,901	7,280	92.1	7,901	100
諸塚村	12,552	11,695	93.2	12,552	100
椎葉村	26,373	20,704	78.5	25,689	97.4
西都市	18,069	9,834	54.4	17,470	96.7
高鍋町	782	782	100	782	100
新富町	814	775	95.3	786	96.6
西米良村	13,812	8,280	59.9	12,425	90.0
木城町	6,916	5,109	73.9	6,809	98.4
川南町	2,907	2,431	83.6	2,907	100
都農町	4,477	4,160	92.9	4,440	99.2
総計	219,617	160,102	72.9	215,252	98.0

が、このように GIS を用いて解析することで、あらかじめ路網の発達の度合い、また森林の開発率の高さが客観的に示されました。

一方、開発率が下位であった西米良、西都、北川といった市町村ですが、いずれも九州山地に位置しています。しかし、同じ急峻な九州山地内にありながら、諸塚や五ヶ瀬は高い開発率を誇っており、その違いは興味深いところです。両者を比べてみますと、開発率が低い市町村は高い市町村よりも海側に位置しています。すなわち、本来ならば路網の開発も進んでいておかしくない立地です。この理由は色々あるかと思いますが、筆者は樹木の成長の良い宮崎では、高性能林業機械や大型トラックが普及する以前から、より海側にあるこれらの地域で伐採搬出が盛んであり、森林作業道に相当する低規格の路網が発達していたため、トラック用道路の新たな開発が進んでいないのではないかと考えます。利用可能な森林の抽出において、「3m 以上の道路」という条件を外して森林の開発率を計算すると、奥地にある西米良こそ 90% に留まりますが、その他の市町村は 95% 以上と高くなっており、細い車道は充実していることが推測できたためです。

トラック輸送量の推定

次に、各森林から市場、製材所等まで木材を輸送するときに、どこの地域、路線が利用可能な森林の拡大を妨げているのかを明らかとするために、各森林から木材を利用する地点までのトラックによる輸送ルートおよび輸送量を計算し、道路各区間の輸送量を分析しました。輸送ルートを求めるにあたっては、各道路の幅員からその道路の走行速度を時速 15 ~ 60 km の範囲で設定し、それぞれの道路の延長距離から各区間の走行に要する時間を求め、最短時間で輸送先まで走行できる経路を選びました。

輸送先は、本来は木材市場や製材所を候補としますが、流通が複雑であり計算量が多くなることが予想されたため、ケーススタディとして林地残材の輸送を想定し、延岡市、日向市、川南町、都農町にある木質バイオマス発電所への輸送について計算を行いました。

各道路の輸送量を地図にしたものが図-4 になります。広い道路ほど走行速度を高く、すなわち優先的に選択されるようにしたため、輸送ルートは基本的に国道や県道がより高頻度で使用されましたが、一部には市町村道でありながら大量の輸送トラックの通行が予想される道路がありました。主にふるさと林道や幹線林道等の広い道

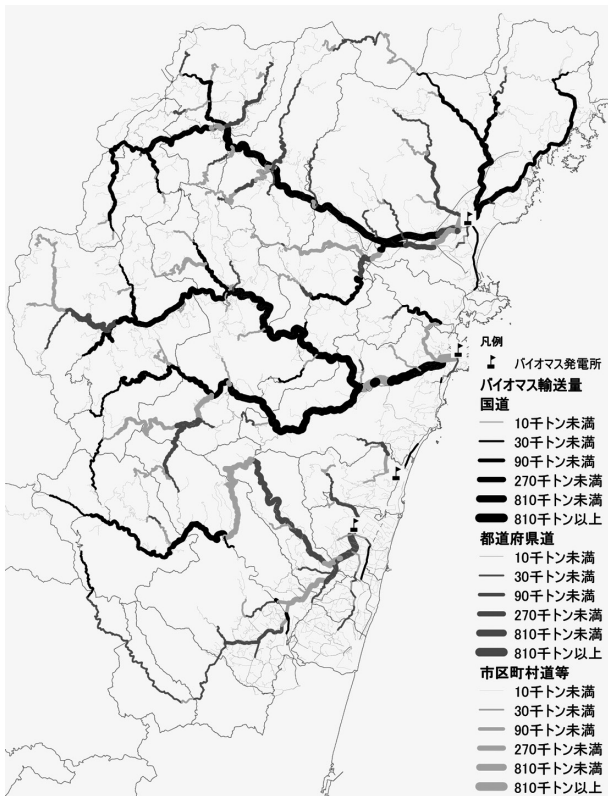


図-4 各道路の推定輸送量

路でしたが、平野部で集落を抜けるような道が選択されるケースもありました。

次に、道路の拡幅による利用可能森林の拡張効果を調べるため、「幅員3m以上」の条件をなくし、すべての一般用道路を使用したときの輸送ルートおよび各区間の輸送量を算出しました。なお、幅員3m未満の道路の走行速度は時速15kmとしました。その結果、幅員3m未満、かつ著しく輸送量が多い区間が対象地の全域に存在していることが示されました。これらの区間を拡幅することで、この奥にある現在の輸送基盤では利用不可能な森林が産業的に利用可能となるものと推測されます。

その一例として、図-5に幅員3m未満かつ木質バイオマス輸送量1万トン以上（1輪伐期あたり）となる区間を示しました。この区間は研究対象とした県北地域に広く点在し、その中でも南側の西都市、西米良村には広域に抽出された箇所があり、拡幅による利用可能な森林面積の拡大効果が高いことが示されました。なお、木質バイオマスの輸送量については、宮崎県の平成27年度主伐面積と同材積より求めた収穫期における平均蓄積234.8m³、森林総合研究所が求めたスギの拡大係数1.23、同じくスギの乾燥密度0.314dry-t/m³より、林分1haあたりの木質バイオマス収穫量を16.96tと

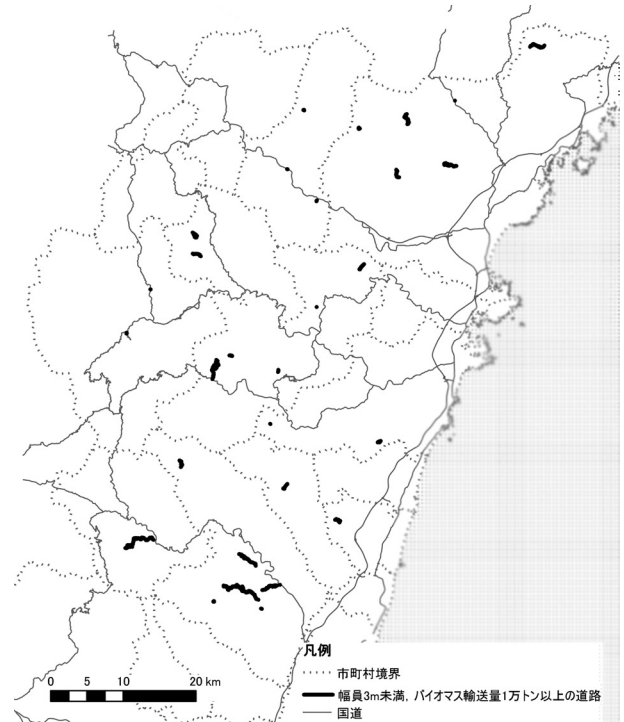


図-5 幅員3m未満かつ輸送量1万トン以上の道路

して搬出面積から換算しました。

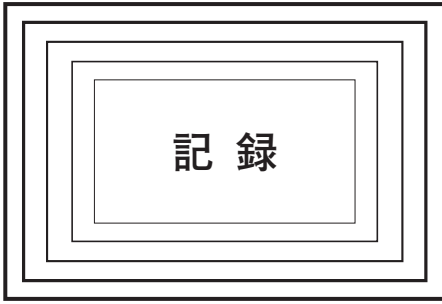
おわりに

このように、現地に存在する森林のうち、どれほどの森林が実際に利用できるのか、またその割合はどこで高いのかを明らかにすることで、行政における林内路網の整備の優先度を定めることが容易となりました。この結果を全国で応用すれば、他の地域と比較したときの開発率の傾向や地域ごとの現時点での適切な作業システムの選定など、主に基盤整備計画の場面において有用な資料となると思われます。

なお、本研究成果の一部は平成29年3月28日に鹿児島大学で開催された第128回日本森林学会大会にて発表しました。また全文は宮崎県治山林道協会のWebページ (<http://mcr.or.jp/?p=110>) で公開されております。

引用文献

Backmund F (1996) Kennzahlen für den Grad der Erschliessung von Forstbetrieben durch autofahrbare Wege. Forstwiss Cbl 85: 342-354



「林政・風致・経営、観光・レクリエーション、 教育分野のあり方検討会」報告

田中 伸彦 (たなか のぶひこ、東海大学)
山本 信次 (やまもと しんじ、岩手大学)
光田 靖 (みつだ やすし、宮崎大学)
奥 敬一 (おく ひろかず、富山大学)
庄子 康 (しょうじ やすし、北海道大学)
上原 巖 (うえはら いわお、東京農業大学)
大石 康彦 (おおいし やすひこ、森林総合研究所 多摩森林科学園)
田村 典江 (たむら のりえ、総合地球環境学研究所)
井上 真理子 (いのうえ まりこ、森林総合研究所 多摩森林科学園)

はじめに

日本森林学会大会においては、近年「観光・レクリエーション(以下、レク)」及び「教育」にかかわる研究発表が増加し、関連する複数の公募セッションや企画シンポジウムが毎年のように開催されるようになった。このような状況の中で、これらを主催する研究者の中から、各々の分野を部門化してほしいという要望が出ていた。本検討会は、その要望を受け、第128回日本森林学会大会(鹿児島市)の場を借りて、2017年3月26日(日)の16:30～19:00にかけて、かごしま県民交流センター、大ホール3にて開催された。

この検討会は公開形式で行われた。進め方としては、まず「林政」、「風致」、「経営」などの既存部門における「観光・レク」及び「教育」に関わる研究発表の現状等を各部門委員会の委員らに総括してもらおうとともに、「観光・レク」、「教育」に関わる公募セッションや企画シンポジウム等を学会大会で長年コーディネートしてきた研究者に登壇してもらい、これまでの総括と将来の展望をまとめていただいた。さらに冒頭では、国際森林研究機関連合(IUFRO)の社会科学系研究の部門分け等の現状も説明し、日本森林学会における社会科学系の研究部門の今後の在り方まで広く視野に入れた上で、「観光・レク」及び「教育」の部門化に当たっての考えを検討した。

その後の討論においては、各発表を参考にしながらも、議論を拡散させないために、デフォルトとして「『観光・レク』及び『教育』部門の両者を各々次回大会から部門化する」と据え、それに対する意見を集約するようにした。ただし、結論によって

は上記デフォルトにはこだわらないこととした。

当日は29名の出席者があり、活発な議論が行われた。その結果、発表や討議を踏まえて、「教育」分野は即時に部門化可能、「観光・レク」分野は分野化に値するが、十分に議論を尽くせなかったため、次年度以降に引き継いで部門化に対する検討を継続すべきと判断し以下の提案をとりまとめた。

1. 検討会案として、「教育」分野を新たに部門化することを提案する。新部門は、2018年に開催予定の第129回日本森林学会大会より運用を開始することを提案する。
2. 検討会案として、「観光・レク」分野は、部門化するに値する要件は満たしていると判断する。しかしながら、関連部門等との仕分け等について、今回の検討会では十分に議論を尽くせなかったため、次年度も引き続き検討を継続することを提案する。

本検討会の判断を日本森林学会理事会に報告した結果、「教育」部門が正式に部門化されることが確定し、2018年3月26日(月)～29日(木)の期間に、高知市内および高知大学を会場として開催される第129回日本森林学会大会から適用されることになったのは周知のとおりである。また、具体的内容は確定していないが、同じく第129回日本森林学会大会の期間中に「観光・レク」の部門化に関する検討会を引き続き開催する予定である。

以下に、今回の検討会で発表された内容と、発表後の発言を記録としてとりまとめる。

発表概要

(1) 趣旨説明・IUFROの部門構成など

田中伸彦

検討会のコーディネータ(日本森林学会プログラム編成委員会林政・風致部門委員長)の立場から、上記「はじめに」に記載されている検討会の趣旨を説明した後に、国際森林研究機関連合(IUFRO)の社会科学系研究の部門分けに関する説明を行った。

現在、IUFROの研究部門は9部門(Division)に分かれていて、そのうちの3部門が社会科学系研究に関連している。それらは「第4部門:森林評価・モデリングおよび森林管理(Division 4 - Forest Assessment, Modelling and Management)」、「第6部門:森林の社会的側面(Division 6 - Social Aspects of Forests and Forestry)」、「第9部門:森林政策および経済(Division 9 - Forest Policy and Economics)」である。現在第4部門には1人、第6部門には6人、第9部門には1人の日本からの委員がいる。第6部門と第9部門は2010年までは同一部門として活動していたが、IUFROソウル大会において、社会的側面と政策経済的側面を分ける決議が行われた。IUFROにおける「観光・レク」及び「教育」の主たる部門は第6部門に当たる。ただし、第6部門と第9部門との区分けについては森林史や伝統知(現状では第9部門)など再区分に余地を残している研究分野も

ある。

この様な IUFRO の動きを、日本森林学会の部門の再編において考慮しておくことが参考になる。

(2) 林政部門における「観光・レク」及び「教育」研究の現状

山本信次

林政分野の標記研究増加の背景は、80年代の林業不振の中で「森林利用の多様性の回復（森林の総合利用）」と「森林・林業に関わるアクターの拡大（水源税構想にみる下流域都市住民の費用負担者化）」が提起され、「狭義の林業」から研究が広がりを見せたことにある。

観光・レクについては80年代には森林の総合利用による地域振興やリゾート法を背景に研究が進展し、90年代には、前期の傾向を引き継ぐグリーンツーリズム研究に加え、自然資源管理の一環としての国立公園などの「保護地域」利用管理問題の指摘が行われた。2000年代以降は6次産業化などを前提とした山村振興・観光レク論と自然資源管理や環境ガバナンスなどを前提とした国立公園など「保護地域」利用問題に大別できよう。

森林教育については90年代、森林の総合利用の一環として森林の教育的利用への注目にはじまり、知床・白神問題に起因する一般市民への林業理解を求める視点や教育学的視点から、環境教育や野外教育などと森林における教育問題を原論的に提起するものなどがみられた。2000年代以降は森林における教育活動の効果測定等、数量化と教育効果への注目も始まった。また現在は感性を養う「野外教育」と持続性について学ぶ「環境教育」と林業が社会に果たす役割を学ぶ「産業教育としての林業教育」、後継者養成のための「職業教育としての林業教育」などが入り乱れ、かつ山村における6次産業化のメニューとしての教育的利用なども加わり多様な分析が行われている。

(3) 経営部門における「観光・レク」及び「教育」研究の現状

光田 靖

かつて経営部門においては「教育」に関する研究発表が行われてきたが、

近年ではテーマ別セッション等が継続的に開催されており、経営部門での発表はほとんど無い状態である。「観光・レク」に関する研究も、経営部門での発表がほとんど無い状態が続いている。このような状況を踏まえ、経営部門では部門の設立に対して広く意見を収集するため、森林計画学会のメーリングリストを使って意見募集を行った。集まった意見を集約すると、両分野の重要性から部門を新設すること自体には反対でないものの、部門の継続性を危ぶむ声が多かった。一方で、会員拡大の観点から、これまで森林学会で発表したことのない「観光・レク」および「教育」関係の研究者を受け入れる場として機能する可能性をメリットと考える意見もあった。

(4) 風致部門における「観光・レク」及び「教育」研究の現状

奥 敬一

1994年以降、24年間の大会における風致部門、および関連セッションの口頭発表の変遷をたどった。風致部門では90年代から2000年代はじめ頃は例年10件前後の報告があり、森林景観評価、景観の地域性、保護区・資源管理制度、里山の景観構造と保全、療養・福祉利用といったテーマが発表されてきた。2000年代後半から関連するテーマ別セッションが複数並行するようになり、風致部門の発表は7件前後に減少した。2008年以降はテンポラリーなテーマ別セッションがより多く開催されるようになり、風致部門で発表を行っていた研究者もそうした新たなセッションの企画や中心的な役割を担うようになる。

風致部門はもともと分野横断的な部門であり、そこに集まって発表を行う研究者も、幅広い関心を持ち新たな分野を開拓する資質を持つ傾向にあった。そして、境界領域での議論を元にして多様な新規セッションが形成されていった。ある意味、風致分野は新たな研究分野を生みだしていく「ゆりかご」の役割を果たしていたといえるだろう。結果的に、他分野との共同によるセッションなどに研究者が分散していき、もともと研究室などの母体がそれほど多く

ない風致分野の研究は一見減少したように見える。しかし、時代ごとの新しい研究関心を取りこみつつ、新たな分野を拓いていく機能は、今後変わらないと思われる。

(5) 観光・レクの部門化に向けて1（これまでの総括と展望）

庄子 康

本セッションは2015年大会から企画している新しいセッションである。近年の観光やレクに対する社会的な注目を反映し、これらについて議論できる場を設定することで、研究交流の促進を図ることが目的である。森林だけでなく自然保護地域や自然公園、都市公園、景観、野生動物など幅広い対象を想定しており、様々な学問分野の研究発表がなされることを想定している。名称は「観光とレク」であるが、自然と人間との相互関係を幅広く取り扱うことを意図している。国際的に言えば、「International Association for Society and Natural Resources」や「IUFRO Division 6」がカバーする内容を取り扱いたいと考えている。ここ2年の発表件数は20件を超えており、ある程度の発表者・参加者を集めてきた。一方で部門化に向けては、1) 継続的にセッションを維持できるだけの関係者を確保できるのか、2) 観光とレクという名称が適切なのか、3) 「林政部門」「風致部門」とのすみ分けをどうするのかといった課題が残されている。

(6) 観光・レクの部門化に向けて2（これまでの総括と展望）

上原 巖

「森林環境の持つ保健休養の基礎的研究と応用研究」のセッションは2005年の大会より13年継続して運営をしてきている。主な内容は、生理的、心理的な休養効果のアプローチをはじめ、樹木の揮発・芳香物質といった分子レベルから地域の社会レベルのものまでの森林、樹木の効用について、また、その調査研究手法についての「基礎的研究」、そして地域の病院、社会福祉施設などにおける森林を活用した臨床事例とその保養・治療プログラム、保健休養に供する森林の整備手法などの「応用

研究」の2つである。

セッションの特色としては、多分野、多領域にわたる内容であると同時に、発表者もまた森林関係者だけでなく、医療、社会福祉、心理、教育、芸術分野などの多分野、多領域からの出自であることである。これらのことから、「教育」だけでなく、「観光」や「レク」といったカテゴリーにも単純にひとくくりできないことも特色である。

(7) 教育の部門化に向けて1 (これまでの総括と展望)

大石康彦

日本森林学会と連携学会(旧支部会)、関連学会および林業経済研究所が2011年までに刊行した学会誌等から計448件の森林教育研究の文献が確認された。それらの内容は、概念、教育の種別(専門教育、学校教育、社会教育)、教育活動現場の要素(森林・展示施設、対象者、教材・プログラム、指導者)など広範な内容におよんでいる。さらに、森林教育研究の文献のこれまでの推移をみると、1925～1989年の65年間には77件であったのに対し、1990～1999年の10年間に78件、2000～2009年の10年間に245件と増加している。また、日本森林学会大会における教育セッションは2003年大会から2017年大会まで、15回連続して開催されている。教育セッションでは、この間に236件の研究発表が行われており、わが国における森林教育研究の推進に大きく貢献してきている。森林教育研究は1925年の家高甚一氏の論文「農業学校ノ林學ニ就キテ」から90余年の歴史をもち、1990年前後からは研究テーマの拡張、文献数の増加のなかで森林教育学の基盤を形成してきた。森林教育現場では新たなニーズも生じており、森林教育研究が取り組むべき課題は幅広い。

(8) 教育の部門化に向けて2 (これまでの総括と展望)

田村典江・井上真理子

森林学会における教育の研究のテーマには、環境教育に関連して注目されてきた一般向けの教育活動に限らず、林業の技術者・技能者育成

を図る専門教育もある。専門教育については、戦前から研究発表が行われており、昭和初期の林学会春季大会討論会(1930年)では、林業教育の改善をテーマに12件の報告が行われた。また近年では、林業の成長産業化を目指す施策として人材育成が注目されている。専門教育の企画シンポジウム(学校教育:2016年、人材育成:2017年)を開催したところ、多くの聴衆が参加され、森林学会で教育研究へのニーズの高さが伺えた。また、教育に関連して、2016、2017年には大学演習林での教育活動の企画シンポジウムが開催された。

教育研究の特徴は、教育学や社会学、心理学など他の学問体系とも研究手法が共通する分野であることから、他の学問領域を専門とする研究者が発表する機会も多い。そのため、部門化により議論の深化が期待できる。その一方で、特に専門教育の研究は、森林学会の全部門の内容と関連している特徴も持っている。そのため、教育は部門が設置されても、他の部門と研究面での交流・協力が特に必要な部門と考える。

検討会における主な発言

(1) 「観光・レク」及び「教育」両者に係る全般的な意見

- ・10年以上継続して開催しているセッションであり、「観光・レク」も「教育」も部門化を前向きに考えるべき。
- ・部門化した場合には、公募セッションとして採択されなくなることを周知することが必要。
- ・IUFROのDivision 4 (Forest Assessment, Modelling and Management)、Division 6 (Social Aspects of Forests and Forestry)、Division 9 (Forest Policy and Economics)の仕分けは参考になる。「観光・レク」、「教育」はDivision 6のユニットとして存在していることを考えると、「社会的側面」という言葉が部門再編のキーワードとなる。
- ・部門化を行う目安の1つとして学生ポスター賞が出せるか否かという視点がある。現在でも、経営は独立してポスター賞を選出しているが、林政・風致・観光レク・教

育は共同選出している状況にある。ポスター賞については現状を踏襲するのが現実的である。

- ・「観光・レク」、「教育」が独立部門化した場合には、これまでどおり林政・風致・経営での発表を希望してきた上記関連の一般発表等を「観光・レク」、「教育」部門へ移す作業をしっかりと行うべきである。
- ・平成に入ってから部門化された風致部門の発表件数が伸び悩んでいる。
- ・「観光・レク」、「教育」を部門にすることは可能だとは思いますが、人文社系研究の知の細分化に繋がるため好ましくないのでは。
- ・「森林の社会的側面」全体での部門の再構築を行うことが理想である。
- ・各々の部門の境界部分の線引きに細かくこだわると話が進まなくなる。どの分野が独立峰、つまり部門として認知できるか否かに着目して議論を行うと良い。

(2) 「教育」の部門化に関する意見

- ・10年以上継続して開催しているセッションもあり、近年は教育関係の企画シンポジウムや公募セッションが複数立ち上がっている。部門化するための発表件数は十分にある。
- ・「経営」にも「林政」にもキーワードとして「教育」が入っている現状なので、独立する場合にはキーワードの再編が必要。
- ・職業教育と環境教育の両方を射程に入れる部門にする。
- ・教育部門には「教育学」という、林政・風致・経営に収まらない基盤的学問体系がある。
- ・企画シンポジウムや公募セッションが途切れると、既設の各部門に発表内容が拡散してしまう恐れがあるため部門化を進めたほうが良い。
- ・発表件数は多いが、ポスターで発表を行う学生数は1桁である点は、ポスター賞の点から懸念される。
- ・「演習林」に関するセッションは、教育をキーワードとするものが多いが、森林管理などの他のキーワードも重要で、必ずしも「教育」の

セッションに収まりきるものではない。

- ・「教育」が独立部門化しても、既存3部門の運営に大きな問題は生じないと考えられる。

(3) 「観光・レク」に関する意見

- ・2015年の第126回大会より継続して開催している公募セッションである。部門化するための発表件数は十分にある。
- ・企画シンポジウムや公募セッションが途切れると、既設の各部門に発表内容が拡散してしまう恐れがあるため部門化を進めたほうが良い。
- ・発表件数は多いが、ポスターで発表を行う学生の数は1桁である点は、ポスター賞の点から懸念される。
- ・観光学を主体的に教育研究する大学が21世紀に入ってから著しく増加している。林政・風致・経営に収まらない基盤的学問体系を構築するポテンシャルがある。
- ・林政・風致の2部門が主体的に関わっているが、自然保全と観光、

災害と観光など、自然科学系分野における研究ポテンシャルもある。

- ・地域活性化や合意形成など、必ずしも観光だけとは言い切れないテーマで、林政等で発表されているテーマについての仕分けが難しい。
- ・「保健休養」セッションについては、10年以上継続して開催されているが、医学・生理学・心理学系の発表が多く、「産業としての観光」を想定するのであれば異質で部門化編入には馴染まない。
- ・発表件数の少ない風致部門と統合・再編しては如何か。例えば「風致観光」、「景観・観光・レク」、「自然資源管理・観光」など。

おわりに

冒頭でも説明したとおり、上記の発表や意見に基づいた討議を踏まえて、検討会としては、①「教育」分野は即時に部門化可能、②「観光・レク」分野は部門化に値するが、十分に議論を尽くせなかったため、今後引き続き検討を継続すべきという

判断に至った。

ちなみに「教育」部門については、既にプログラム編成委員会の委員構成が選出され、部門キーワードなどが確定し、順調な滑り出しを見せている。一方、「観光・レク」分野の検討が次年度以降へ持ち越しになったことから、今回参集された「林政・風致・経営、観光・レクリエーション、教育分野のあり方検討会」については、解散とはしなかった。そして、2017年度中は、電子メールなどを通じて連絡を取り合い、第129回日本森林学会大会の期間中に「『観光・レク』の部門化に関する検討会」を開催するために意見交換をすすめている状況にある。

この検討会の日時や検討内容の詳細などについては、決まり次第、日本森林学会誌や学会ホームページなどで、適宜アナウンスをしていく予定である。また、今回同様、検討会を公開形式で行う予定であるので、興味のある方は、ご参集願えれば幸いである。

木材は水を通さない

二階堂 太郎

(にかいどう たろう、国立科学博物館 筑波実験植物園)



群馬には日本3大名湯に数えられる草津温泉があります。源泉の温度が高くそのままでは利用出来ないため、「湯畑」と呼ばれる長さ40mの木樋(きどい)へ一旦流して冷ます仕組みが設けられています。整然と並んだ7本の木樋は古風で且つ重厚な趣があり、通った湯が最後に一つの木樋から貯湯池へ流れ落ちる様はこれまでの長い歴史が見えるような迫力です。そこからモワモワと立ち上がる白い湯気は温泉街を一層際立たせ、加えて周囲を囲む山々の景色も素晴らしく、「湯畑」は草津温泉の中心をなす名所となっています。なお、名の由来は樋に沈着する温泉成分を湯の花として採取することからになります。この樋が木で作られている事は別段何でもない事のように見えますが、あえて言うと、木材は水を通さない性質があるから樋の素材として利用できるのです。

木製のお椀は中に注がれた汁物を外に漏らさず、丸太をくりぬいて作った丸木船も水がどんどん染み込んできて沈んだりしません。木材とは、加工しやすく、強度があり、長持ちし、さらに水を通さない素材です。現代では、鉄や陶器、そして石油由来の様々な素材があるので木材に優れた点を見出しにくいかもしれませんが、木材以外に頼る物がなかった時代はそう昔の事ではありません。近年では、江戸の発展に大変深く関わっています。海に近いこの都市は地下水に塩分が含まれており、深く掘って地下水を得る深抜き井戸でもあまり質が良くありませんでした。大量の生活水や農業用水を確保する為には他から引いてくる必要があり、遠方の綺麗な川の水を江戸まで送る神田上水や玉川上水が建築され、その上水を町中へ給水したのが地中に張り巡らした木樋による水道管です。それを地面深くに埋めた大きい桶に接続して貯水する上水井戸を設ける事により、世界でも極めて稀な巨大都市へと発展できたのでした。

世界の上水道の歴史を見ると、市街地の水道管には陶器や鉛管などが使われてきました。木材が使われなかったのは、気密性を高めた管を作るのが難しかったからだと思います。水を勾配に従って流すだけならば管に多少の隙間があっても大丈夫ですが、高い所から低い所へ流した水を再び給水元と同じ高さまで上げるには、完全に密閉された管を用いてサイフォンの原理を利用する必要がありますからです。江戸にて、各所様々な地面の高低に応じながら木樋を用いた給水が可能であった事は、木材であっても十分な気密性を確保した管を作る技術があった証と言えます。なお、板と板を密着させて水を漏らさないようにする樽や桶は、ある程度の技術があれば出来ました。それを大きい材でも駆使する事で木船

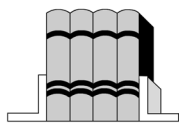
が作られ、15世紀には巨大帆船による大航海時代が始まりました。ヨーロッパでは16世紀に全長50mを超える巨大な木造船が何艘も建造され、中国では15世紀になると全長150m、幅60mの船が建造されています。木は水を通さないという性質が、人類にとってどれほどの意味があったのか、私達は歴史から知る事ができます。

樹木は導管や仮導管により根から吸った水を葉まで上げますが、それらは幹の外周にある形成層という細胞が内側へ分裂した後に死んで出来る管で、生きている細胞が管を形づくっているわけではありません。死んでいく過程で、細胞壁にはリグニンが沈着して強固な筒となり、各細胞の上面と下面が消失し、これらが連なって一本のストローのようになります。また、隣り合う導管同士は有縁壁孔と言う穴で通じ、根からの水は螺旋状に上がって行くとされています。管の直径は0.02~0.3mmと大変細く、直径を0.1mmとした場合は丸太の切断面1×1cmあたりに10,000本もあり、顕微鏡で見ると驚くほど穴だらけです。しかし、そこに水を掛けても導管を通じて下面から流れ出てくる事はなく、幾分か染み込むだけです。その深さは、木材の腐朽を防ぐ塗料を刷毛で塗ると数ミリ程度です。もっと深く浸透させる方法に、密閉された容器に入れて行う加圧注入がありますが、それでも数センチしか浸透させられません。長時間水の中に漬ければ、いずれ木材にある全ての導管の中は水で満たされ、幾分は反対側から染み出て来るようになりますが、生きた樹木の導管内で起きているような水の流れにはなりません。それは様々な生理現象や物理現象が組み合わさる事で動く仕組みなので、その再現なく導管に水を流す事は難しいのだと思います。

木材の様々な性質は、高く伸びる為の肥大成長や、根から葉まで水を送る維管束の仕組みなどによるものですが、先人たちはそんな進化の事も樹木の生理も構造も知らない中で、そこに内在する性質を使う技術を高め、利用してきました。きっと今の私達も、いつか解明されるであろう樹木の様々な仕組みを知らないままに扱っているのだと思います。未来人はそんな私達を笑うでしょうか。できれば、理屈を知らないのによくそこまで樹木を利用したものだと言わせてやりたいものです。

著者プロフィール

二階堂太郎：1970年生まれ。山形大学農学部林学科修士課程修了。新潟市のらう造景(旧後藤造園)に入社、後藤雄行氏に師事する。現在は筑波実験植物園の技能補佐員。屋外エリアの管理と教育普及に携わる。樹木医、森林インストラクター。



ブックス

造林学 第四版

丹下健・小池孝良 編、朝倉書店、2016年8月、192ページ、3,672円（税込）、ISBN 978-4-254-47051-2

公務員試験を受験した私にとって、朝倉書店の「造林学」といえば同書店から出版されている「森林・林業実務必携（当時は林業実務必携）」と並んで、公務員試験の受験参考書として欠かせないものであった。その「造林学」が、実に24年ぶりに改訂（第四版）された。

前回の改訂版（三訂版）が出版された1992年は、環境と開発に関する国際連合会議がリオデジャネイロで開催され、「森林原則声明」の合意や、「気候変動枠組条約」と「生物多様性条約」が採択されており、森林・林業に携わる者にとって象徴的な年でもあった。現在に至るまで、上記条約に示されている「気候変動」や「生物多様性」という言葉は、一般の人にも広く浸透してきており、同時に森林に対する社会的要求は、木材生産だけではなく、より多様なサービスに広がっている。冒頭で編者が示している「造林学は、人間社会が森林資源を持続的に利用し続けるための森林の維持・造成技術を科学的に支える学問分野である」との考えのもと、上述の森林を取り巻く社会情勢の変化を受けて、日本国内の造林技術だけではなく、熱帯荒地への環境造林にもその対象を拡げている。

今回の第四版では、国内外の森林を対象に研究を行ってきた第一線の研究者11名が全11章からなる本論を執筆しているが、本論は大きく以下の4つで構成されている。

- 第1章 造林学の定義および今日的な意義
- 第2章～5章 樹木の成長特性、構造や森林土壌などの基礎科学

第6章～8章 立地環境や樹木の環境応答特性を評価可能とする基盤技術

第9章～11章 上述の基礎・基盤技術に基づいた造林技術

今回の第四版では、「造林技術の基盤となる樹木の環境応答を科学的に理解するための説明に紙面を多く割く」との編集方針から、樹木の環境応答に関する記述が充実している。一方、三訂版まででは詳細に説明がなされてきた育苗、更新、保育に関する記述は、コンパクトにまとめられている。従来、スギやヒノキの人工林造成に関する確立された造林技術に関する知識の習得が中心であったものを、与えられた課題の解決の方法を考案できる資質の養成に重点を移すべきという著者達の考えは、章ごとに最初に要点と最後に演習問題を掲載する教科書スタイルに反映され、読者自身が理解度を確認できるように工夫がなされている。また、三訂版までは巻末に参考図書（文献）の書誌情報を示すのみであったが、第四版ではより専門的に学びたい人のために参考図書をそれぞれの内容や難易度の解説を付して紹介している。これら解説は短いながらもよくまとめられており、文字通り参考になる。

よりコンパクトな構成になった第四版であるが、森林・林業を学ぶ学生にとっての教科書だけではなく、林業に携わる現場技術者にとっても、困ったときにもう一度基礎に立ち返る際に参考にすべき良書である。

佐藤保（森林総合研究所）

ウサギ学—隠れることと逃げることの生物学

山田文雄 著、東京大学出版会、2017年2月、275ページ、4,860円（税込み）ISBN 978-4-13060-199-3

本書は著者が40年近く取り組んできたウサギの研究成果を軸にしつ

つ、ウサギ全般について幅広く解説したモノグラフである。

第1章では、人間とウサギの関係についてさまざまな角度から述べられている。狩猟、食糧、被害、文化などについて手短かにまとめられており、ウサギが人間にとっていかに身近で重要な存在であったか理解できる。食糧としてのウサギの記述は興味深く、徳川將軍家では正月料理に使っていたそうである。人間とウサギの関係について、まとまった内容を読める文献は少なく、多面的かつ簡潔にウサギと人間の関係がまとめられている本章は非常に勉強になる内容であると思う。

第2章からウサギ類の生物学的な内容が始まる。まず91種が知られているという分類学的な知見と、ほぼ全地球的に生息しているという自然分布についての概要が説明され、そのあとに形態的な特徴といった生物学的な解説がなされる。続いて、ウサギ科の起源と系統、さらに属ごとの詳細な解説が記される。世界のウサギ類の起源・系統について日本語で読める文献はほとんどないことから、きわめて有益な内容であろう。日本に生息するウサギ科の分類学的な変遷についても解説されており、学名や英名、和名といった名前を巡る歴史的な変遷も垣間見えて興味深い。

次の章からはノウサギ（第3章）、アナウサギ（第4章）、アマミノクロウサギ（第5章）について、詳細な解説がなされる。第3章では主にニホンノウサギを対象として、分類や生態、生息状況、生態系における役割などについて詳細に解説されている。とくに、ノウサギに特徴的な繁殖や成長に関しては、著者の直接観察を交えながら興味深く語られている。また、餌選択という基礎的な研究成果に基づいた食害対策への展開も解説されており、基礎研究の重要性を感じることができる。第4章では日本で野生化しているヨーロッパアナウサギが解説されている。章

の前半では生態などが説明され、後半では日本では無人島や離島でもに定着しているという野生化アナウサギの実態やその影響と対策が説明されている。第5章ではアマミノクロウサギについて、奄美諸島の成立過程、発見史から分類や形態、生息実態、生態、さらには保護対策まで幅広く述べられている。中でも、島という捕食者戦略が不必要な環境であったがために残ってきた個体間の音声コミュニケーションは非常に興味深い内容である。

最後の第6章では、最近の研究や研究者の交流などについて述べられている。この章の最後に、日本におけるウサギ研究の成果が少なく、ウサギを対象とする研究者や論文も減少していることが挙げられている。確かに、哺乳類学会に参加しても、ウサギ類に関する発表は少ないと感じる。本書の中でも随所に書かれているが、ウサギ研究について未解明な部分はまだまだあるとのことである。また著者も強調している人間との関係についても踏まえると、研究する余地は多く残されているだろう。

著者は本書について、教科書的ではないと最初に述べている。確かに著者の研究成果を中心に構成されている部分もあるが、全体としてはウサギについて幅広く知ることができる内容になっている。日本語でここまで学ぶことができる類書はなく、これからも当面の間は出版されることはないのではないだろうか。また節々に垣間見える著者のウサギ研究に対する姿勢も、大いに学ぶべきところがある。ウサギ研究に興味を持つ人はもちろんのこと、そうでない人にとっても一読をおすすめしたい。

斎藤昌幸 (山形大学農学部)

森林環境 2017 一特集 —森のめぐみと生物文化多様性—

森林環境研究会 編著、田中俊徳・酒井章子 責任編集、公益財団法人森林文化協会、2017年3月、217ページ、1836円(税込)、ISBN 978-4-9980871-3-7

日本では古くから木材や薪炭、山菜、キノコ、野生動物の肉や毛皮など、多種多様な森のめぐみによって人々の暮らしが成り立ってきた。しかし、戦後の拡大造林期以降、森林の利用と管理は木材生産に重きが置かれるようになり、近年の過疎化と都市部への人口集中も相まって、昔のように多様な森のめぐみに触れる機会を私たちは失いつつある。本書の特集では、人が自然と関わる過程で生まれる技術や道具、ルールなどを含めた文化の多様性を「生物文化多様性」と定義し、その過去と現在に触れながら未来の姿について考察している。

伝統的な人と森の関係に着目している第1部では、山菜・キノコ利用に関わる森林文化(齋藤暖生氏)、和紙の原料であるコウゾやミツマタの栽培(田中求氏)、樹叢に囲まれた聖地である「杜(もり)」(永松敦氏)に関する3つの論考を通して、地域の豊かな生物文化多様性がどのように育まれてきたか述べられている。山菜・キノコ利用と和紙の原料の栽培については、伝統的な利用を踏まえた新しい利用についても示唆に富む内容となっている。また「禁足地」というイメージが強い山の聖域が、実は人々の森林への関わりや積極的な働きかけの結果として形作られてきた点が興味深かった。

新しく創造される現代の関係を論じた第2部は、ジビエ(狩猟肉)振興の課題の多角的な分析(田中俊徳氏)、新しい里山コミュニティの形成(寺田徹氏)、登山利用者による登山環境の保全・修復(愛甲哲也氏)、自然あそびを満喫する里山再生活動(野田奏栄氏)、地域の「当たり前」を「特別なこと」に変える

山菜利用(栗山奈津子氏)の5つの多彩な論考で構成される。昔はよく利用されていた森のめぐみに再び価値を与えるために、情報発信やブランド化に取り組んだり、都市部などより広範囲の人々を巻き込んだり、森のめぐみとその価値を共有する新しいコミュニティを形成したりと、現代ならではの新しい関係を創造するヒントが散りばめられている。

未来の関係を論じた第3部では、薬用酒や茶炭の生産に取り組み始めた石川県の事業者(飯田義彦氏)、都市部に増える新しい木造建築の可能性(腰原幹雄氏)、ユネスコ・エコパークの枠組みの下での照葉樹林文化の活用(湯本貴和氏)の3つの論考を通して、地方と都市部での新たな挑戦を紹介している。普遍的な解が提示されているわけではなく、それぞれの地域の特徴を活かした取り組みの重要性が読み取れる。

人やモノ、情報がかつてない速さで往来する現代において、地域の伝統文化は失われる一方であるが、これは必ずしも生物文化の多様性の消失と同義ではないと編者の酒井章子氏は論じる。これは「生物文化多様性」が保全の対象としてではなく、時代に応じた森のめぐみの活用の中で新たに築くものとして捉えられているためである。多彩な論考で正に生物文化の多様な姿を発信する本特集は、人と自然の持続可能な関係を探求するための様々な示唆を読者に与えてくれるだろう。

なお、本書は(公財)森林文化協会のホームページで2015年以降について全文無料で閲覧可能である。メインの特集以外に、森林・環境に関わるトレンド・レビュー(本書では熊本地震による木造家屋倒壊や天守閣の木造再建の課題などを掲載)のほか、1年分の朝日新聞の報道や各種プレスリリースの一覧が掲載されており、国内外の森林・環境に関わる話題を俯瞰するのも役立つだろう。

古川拓哉(森林総合研究所)

温暖化対策で熱帯林は救えるか 住民と森林保全の相利的な関係を 目指して

奥田敏統 編、文一総合出版、
2017年6月、208ページ、2,700円（税込）、ISBN 978-4-8299-6529-0

熱帯域での森林の荒廃が止まらない。その主要因は、途上国における農地開発のための大規模な森林伐採や、杜撰な森林施業、非持続的な焼畑などであり、これらは熱帯域での貧困や経済格差といった社会問題と密接に関わっている。一方で、熱帯林の減少や劣化は大量の二酸化炭素を放出し、地球の温暖化に拍車をかけている。こうした中、近年、熱帯林を保全しながら、森林減少と劣化を抑制し温暖化の進行を緩和しようとする「温暖化対策としての熱帯林保全」、いわゆる REDD+（途上国の森林減少・劣化に由来する排出の抑制、ならびに森林保全、持続可能な森林経営、森林炭素蓄積の増強）が注目されている。

本書の目的は、1) 温暖化対策と熱帯林保全との関係の説明、2) 熱帯林などの保全対象とその周辺の住民との間に「時空間的な緩衝帯」を設ける土地利用管理方策とその具体例の紹介、そして3) 温暖化対策としての森林資源管理メカニズムへの提言、と大きく三つに分けられる。その中でも特に2) に紙面を割いている。

本書の特徴は、熱帯林の減少と温暖化という社会問題を、生態学者である編著者の奥田敏統教授（広島大学）が「ニッチ」理論の視座を用いて捉え、「曖昧さの徳」をキーワードに編集・執筆した点である。編著者によれば、ニッチは「それぞれの生き物がある空間や食物連鎖の中で占有している位置」、ニッチ理論は「各生物種がすみ分けていることで複数種が共存したり、多様性が保たれているとする概念」である。編著

者は、ニッチ理論での「未使用資源の有効利用や新たな時空間の開拓」という考え方にもとづき、（熱帯林などの）保全には、単に自然保護区や国立公園の指定のように白黒をはっきりさせる「線引き」を行うよりも、「生活空間と保全地域との間に緩衝地帯を設け、時空間的な『曖昧さ』を用いて土地利用管理を行うほうが、保全の効果が長期的に持続するかもしれない」と主張し、熱帯林が提供する多様な生態系サービスと現地住民の便益とを調和させるしくみ、すなわち「ニッチの有効活用」の在り方を模索する。

本書は、序論と3つの章、8つの節で構成されている。第1章（天野正博、浦口あや）では、熱帯地域の土地利用と REDD+ の導入の課題について、ラオス、インドネシア、カンボジア、ペルーでの事例を用いて解説している。第2章（高橋進、竹田晋也、鈴木英治、山田俊弘）は、インドネシアとミャンマーの事例から、地域住民の生計向上と行政による熱帯林保全・管理の相乗便益を図るための試みについて分析している。第3章（敷田麻実、奥田敏統ら）では、この相乗便益を長期的に担保するための仕組みづくりについて、エコツーリズムや半島マレーシアのオイルパームプランテーション内での生態系再生を目的とした植栽事業の事例を紹介し、考察している。

本書のすごい点は、熱帯林の荒廃を引き起こす社会的な諸要因について、網羅的に把握できるだけでなく、その解決策についての最新の議論や国際動向までも分かってしまう点である（個人的には「保全契約」の詳しい事例紹介が特に新鮮に感じられた）。東南アジア地域の事例に偏りがあるものの、現場経験の豊富な研究者や専門家が、我々が容易に行けない、または、行けたとしても容易には理解できない、熱帯地域の山奥の村の実情や「曖昧さの徳」、「相乗便益」について具体例を用いて分かりやすく解説している。また、「温

暖化対策で熱帯林は救えるか」の問いに対して、各執筆者が、自身の経験から見解を述べている点は面白かった。

従って、熱帯林保全に関心のある研究者はもちろん、温暖化対策に関わる方の中でも、熱帯地域の森林減少問題や農山村社会の実情を知りたい方に一読を勧めたい。さらには、編著者が意図した通り、温暖化問題や熱帯林に興味のある高校生や大学生にもお勧めの本である。

江原誠（森林総合研究所）

もうひとつの森林生態系を構成するもの

福澤 加里部 (ふくざわ かりぶ、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター)

北から



森林は樹木で覆われてこそ森林です。私が所属している北海道大学中川研究林は北海道北部に位置し、そのエリアの大部分は針広混交林という針葉樹と広葉樹が混ざって生育する森林であり、多様な樹種で構成されています。針葉樹にはトドマツ、アカエゾマツ、エゾマツなどがあり、広葉樹はより多様で、ミズナラ、イタヤカエデ、ダケカンバ、シラカンバ、シナノキなどが代表的な優占種です。そのためモザイク状の景観を有し、特に新緑や紅葉の時期は美しいです。一方、森林に実際に分け入ってみると、「もうひとつの森林を構成するもの」の存在に気づかずにはいられません。森林内で10m歩くのも難しくするそれは、林床を高密度で覆うササです。ところによっては背丈以上にもなりますから、平泳ぎの要領でササの海を泳ぐような感覚でないと全く身動きがとれません。全身運動になりますから、ここで調査をしたらダイエット効果は間違いありません！中川研究林では背丈ぐらいになるクマイザサと最大3m以上にもなるチシマザサが生育しています。チシマザサのシュート（芽）は通称「ネマガリダケ」と呼ばれ、山菜として珍重されます（北海道で「タケノコ」といえばこれです）。しかし、ササが森林の生態系においてどのような意味を持っているのかについては、樹木の更新（発芽や稚樹の生長）を妨げることを除くと、よく分かっていない点が多く残されています。

私の研究は森林における物質循環で、その中でササの役割に興味を持っています。植物間でさまざまな資源をめぐる競争があります。樹木の成木は高い位置に葉をつけられるため、光資源の獲得の上では林床のササより圧倒的に優位ですが、地下でも水や養分を巡る競争があります。その地下資源の獲得の機能を担っているのが細根とよばれる直径数mmの根なのですが、細根量は樹木とササで拮抗していることも分かってきています（もちろん林分の状態によっても変わりますが）。ということは、樹木の生長にとって地下資源獲得という点でササは大きな脅威であるかもしれません。また、森林は水源であり、水質浄化機能があるといわれます。大気から降り注いだ無機態窒素量よりも、河川水に溶け込んで森林から流出する量の方が少ないのは、生態系内で植物を中心とした窒素の利用があるか

らです。ですから、森林伐採をすると窒素成分が流出することもさまざまな実験により明らかにされています。しかし、北海道北部では森林伐採をしても窒素の流出量が増加しないことも報告されています。その原因として、ササの存在が疑われ、ササが生態系の環境機能（この場合は水質浄化機能）の維持に貢献している可能性が示唆されています。

北大中川研究林では、集水域スケールで大規模にササを刈り取るという野外操作実験を行っています（写真）。森林伐採実験は世界各地で行われていますが、樹木はそのまま林床植生のみを除去する処理はあまり例がありません。土壌中の窒素量や樹木の生長量に加えて、森林から始まる河川の水質の変化など、生態系の環境機能への影響も観測しています。現在データ採取中ですので、結果が出るのはこれからですが、どのようになるか楽しみです。近年は全国でシカが増加しており、ササを含む林床植生が消失の危機にあります。「木を見て森を見ず」とはよく言いますが、「木とササをみて森を見たい」と考えています。



写真 ササ刈り取り実験サイトの様子
中心にある対象木はミズナラである。刈り取り前は高さ1.5m以上のクマイザサが地表を完全に覆っていた（ミズナラ樹幹に引かれている線（矢印）が高さ1.3m位置）。

四国の森の近年の変化をみて思うこと

米田 令仁 (よねだ れいじ、森林総合研究所四国支所)



2003年3月に四国を離れ、2016年4月に再び四国で仕事をする事になりました。比較的变化の遅い森林を対象とした研究で13年というのは決して長い期間と言えるものではありませんが、この間に随分と状況が変化したと感ずります。それは鳥獣による森林・林業への影響でした。現在、四国では徳島県、高知県、愛媛県南部において森林・林業へのシカによる被害が甚大です。シカ対策なしで林業をおこなうことはできず、天然林でも天然更新がすまない状況です。今年2月に発行された森林科学79号でも特集が組まれているように、シカによる被害は全国的にも深刻で、その対策が注目されています。

2000年前後に四国ではそれほど「獣害」という言葉を聞くことはなく、自分のフィールドもシカによる影響とは無縁でした。その頃、シカによる森林への影響というのは丹沢、大台ヶ原、日光、知床ぐらいで、当時は愛媛県の高縄半島の森林で夜通しの計測をしていた際にしばしばシカに遭遇するぐらいでした。しかし、実際には四国でも2000年前後からシカによる被害が確認されていました。私は自分の専門が鳥獣や鳥獣害でなかったことから当時は注目していなかったただけのことだと後になって気がついたのです。特に、高知県と徳島県の県境にある剣・三嶺山系、高知県と愛媛県の県境にある鬼ヶ城山系の植生において食害による劣化が問題になっており、現在に至るまで様々な研究と対応がおこなわれています。

シカの生息頭数が多い地域の天然林では、角こすりによる樹皮の皮剥ぎや冬季の摂食剥皮が顕著で、稚樹や幼樹の採食による後継樹の消失が深刻な問題になっています。人工林では壮齢林においては角こすりによる皮剥ぎのほか、冬季の摂食剥皮の被害がみられます。また植栽後数年の苗木については摂食剥皮だけでなく枝葉も多く採食され、ほとんどの枝葉を食べつくされ枯死することもあります(写真)。また、コンテナ苗の場合、しっかりと植栽されていない苗については食害に加えて、シカによる引き抜きも確認されます。シカによる被害を防ぐために防鹿柵の設置や捕獲がおこなわれていますが、どちらの手法も完全に獣害を解決するまでには至っていません。被害を軽減させるためにはさらに捕獲圧を高めたり、防鹿柵の破損個所の早期発見と補修に労力を割かなければなりません、実際にはどちらにも時間、お金、人をかける余裕がないとい

う実情があります。そのため、現場から「より効果的な捕獲法」や「より効果的な防鹿柵の設置方法」などの技術開発が求められています。また防鹿柵設置の判断や捕獲頭数の目標をたてるために、簡便にシカの生息数を推定する方法も求められています。これらの技術開発は早急にすすめる必要があると感じます。

シカの生息数は近年になって増加しています。原因を明らかにして、シカの増加を抑えることも同時進行で進めていかなければいけないと考えられます。シカが増加した背景として一般的には、シカの捕食者であるオオカミがいなくなったこと、温暖化による降雪期間や降雪区域の減少、銃猟従事者の高齢化と減少、山村の過疎化、田畑などの耕作地の放棄、再造林放棄地の増加などが挙げられています。再造林放棄地の理由として森林所有者が再造林に対して魅力を感じないこと、後継ぎがないことも挙げられています。そのため、シカ生息数増加の対策は、林業を取り巻く諸問題の対策と同じと考えられます。

近年、急速に生息数が増えてシカは「悪者」扱いを受けることになってしまいました。しかし、シカが増える、つまりシカが生育しやすい環境を作っているのは我々人間と森林・林業との関わりが変化している結果としてみられる現象なのかもしれません。四国のシカ問題をどうするかは四国の森林・林業をどうするか、ということまで考えないといけないのではないかと思います。



写真 積雪のなかシカによって食害を受けたスギの苗

特集

観光のグローバル化に向けた森林管理のあり方(仮題)

森林科学 82 は 2018 年 2 月発行予定です。ご期待ください。

本会は、複写権の行使について、下記の一般社団法人学術著作権協会に委託しています。本誌に掲載された論文の複写をご希望の方は、公益社団法人日本複写権センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括的許諾契約を締結されている企業等法人の社員による社内利用目的の場合を除き、日本森林学会が複写に関する権利を委託している下記の団体から許諾を受けて下さい（社外頒布用の複写は許諾が必要です）。電子複製についても同様です。

一般社団法人学術著作権協会
107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F
info@jaacc.jp <https://www.jaacc.jp/>

お知らせ

- ・「森林科学」では読者の皆様からの「森林科学誌に関する」ご意見やご質問をお受けし、双方向情報交換を実践したいと考えております。編集主事まで e-mail でお寄せ下さい。
- ・日本森林学会サイト内の森林科学のページでは、29号以降からの目次および56号以降のオンラインPDFがご覧いただけます。また、紙媒体のバックナンバー（完売の号あり）の購入申し込みもできます。
- ・刊行から一年間は、森林学会会員の方は別途お送りするパスワードでオンライン版をご利用になれます。その後はどなたでも閲覧できます。パスワードに関するお問い合わせは編集主事へどうぞ。

森林科学編集委員会

委員長	太田 祐子（日本大）
委員	小長谷啓介*（保護/森林総研）
	古川 拓哉*（植物生態/森林総研）
	山浦 悠一（動物/森林総研）
	深山 貴文（防災/森林総研）
	江口 則和（保護/農水事務所）
	田中 一生（経営/日本森林技術協会）
	長倉 淳子（土壌/森林総研）
	平野悠一郎（林政/森林総研）
	磯田 圭哉（育種/森林総研）
	田中 恵（土壌・造林/東京農大）
	斎藤 仁志（利用/信州大）
	田中 憲蔵（造林/森林総研）
	大橋 伸太（木材/森林総研）
	宮本 敏澄（北海道支部/北海道大）
	松木佐和子（東北支部/岩手大）
	逢沢 峰昭（関東支部/宇都宮大）
	松浦 崇遠（中部支部/富山県森林研）
	上谷 浩一（関西支部/愛媛大）
	川崎 章恵（九州支部/九州大）

(*は主事兼務)

編集後記

本誌で最後に木材分野の特集が組まれたのは10年以上前のことのように、近年盛り上がりを見せるセルロースナノファイバー（CNF）などの話題もぜひ森林科学で取り上げたいという意向が数年ほど前から編集委員会にあったようです。昨年、木材担当の編集委員のお話が私のところに来ました（木材の部署で森林学会に所属しているのは私くらいなので…）。「木材」という担当範囲の広さに戸惑いながらも、少しでもお役に立てればとお引き受けしました。

しかし、「森林」がそうであるように、「木材」と一口で言っても様々な分野があります。私はこれまでCNFに関わったことが全くなかったため、実際に特集を組むとなったとき、とにかく特集コーディネーターを引き受けてくださる方を探し出さなければ始まらない状態でした。しかしそこは現在の職場（森林総研）の素晴らしいところで、ディレクター室というところに駆け込めば何かしらの啓示を受けることができるのです（逆に人狩りに遭ってしまうこともあります…）。そして木口ディレクター（当時）に特集コーディネーターをお願いしたところ、二つ返事で快諾してくださいました。実はCNF特集を組むにあたって一番懸念していたのは、コーディネーターや著者の方々がほぼ間違いなく森林学会に所属していない方々になるという

ことでした。果たして引き受けてくださる方はいるだろうか、原稿はどのくらい集まるだろうか…そんな不安を抱いていました。なので、木口さんに相談した際に言っていた「森林学会や川上の方々に知ってもらえる絶好のチャンスですし、大丈夫ですよ!」というお言葉がとても心に残りました。

そして蓋を開けてみますと、お陰様で記事は合計10本、ページ数は通常よりも約10ページ増という大ボリュームの特集となりました。しかしそのため後半の記事は白黒刷りとなってしまいました…この場をお借りしてお詫び申し上げます。また、記事の校閲・校正に関しましては、未熟者の私ではほとんど勤まらず、その大部分を編集主事が担ってくださったことをここに申し添えておきます。

特集の記事を拝読して、CNF入りのボールペンを個人的に購入して使用してみたところ、その書き心地の良さに驚きました。木を使っているということだけでなく、その性能自体が高いことがCNFの強みなのだということを実感できた気がしました。これからも高性能の製品が実用化され、更に盛り上がりを見せていくことを期待しています。

(編集委員 大橋伸太)



7年先の確かな未来を

確かな効果

豊富なデータが裏付ける確かな効果で
皆様の信頼に応えてきた
グリーンガード・NEOは
7年間の薬効期間という
新たな時代の夜明けを
迎えました。



松枯れ防止樹幹注入剤

グリーンガード®・NEO

Greenguard® NEO

農林水産省登録：第22028号

グリーンガードホームページ

www.greenguard.jp/

「林業遺産」 選定事業について

日本各地の林業は、地域の森林をめぐる人間の営みの中で編み出され、明治期以降は海外の思想・技術も取り入れつつ、大戦期の混乱を経て今日に至るまで、多様な発展を遂げてきました。

日本森林学会では、学会100周年を契機として、こうした日本各地の林業発展の歴史を、将来にわたって記憶・記録していくための試みとして、「林業遺産」選定事業を2013年度から開始しています。

各年度ごとに、林業発展の歴史を示す景観、施設、跡地等、土地に結びついたものを中心に、体系的な技術、特徴的な道具類、古文書等の資料群を、林業遺産として認定しています。

会員の方々はどなたでも推薦できます。非会員の方も、該当される地区の林業遺産地区推薦委員等を通じて応募することができます。

詳細情報については、学会ウェブサイト「林業遺産」をご参照下さい。

<http://www.forestry.jp/activity/forestrylegacy/>



林業遺産
ロゴマーク



日本森林学会

The Japanese Forest Society Since 1914

