

各ボトルは、
それぞれの木材から
つくった「木の酒」の
蒸留酒



最新技術を用いることで、
いま木材の利用も大きな変化をみせています。

これまでの材としての直接的な利用に加え、
化学的な変換を加えることで、新しい可能性を切り拓きました。

森林総研が開発した微生物機能の活用による、
それらの新しい木材の利用技術について、解説します。

特集◎

微生物で 木材を大变身!

微生物機能を活用した新たな木材利用に向けて

文責＝編集部
監修＝下川 知子
大塚 祐一郎
荒木 拓馬



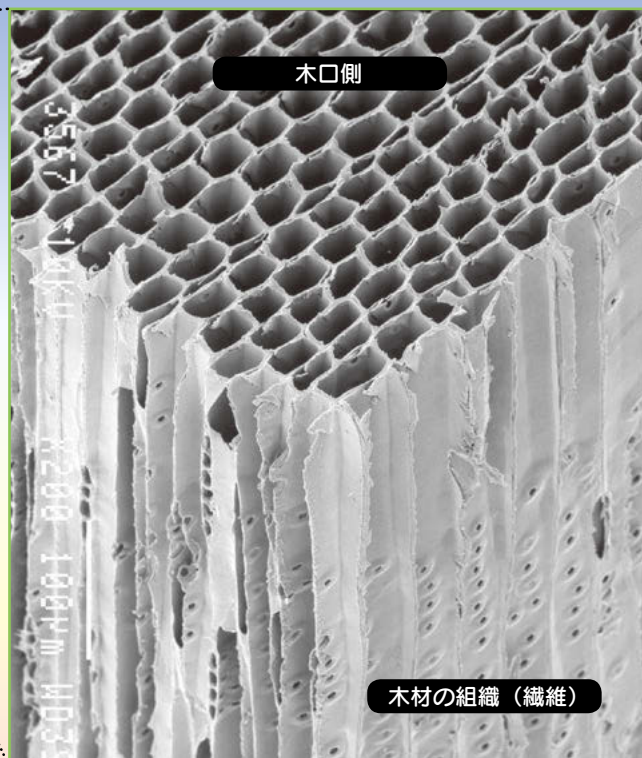
微生物で 木材を大変身



木材の木部

木材の組織構造

木材の構造を電子顕微鏡でみてみると、中が空洞の細長い繊維状の組織が連なっているようすがみられる。この繊維状の組織は、木材の強さや樹木内の水の通り道としての働きを担っている。



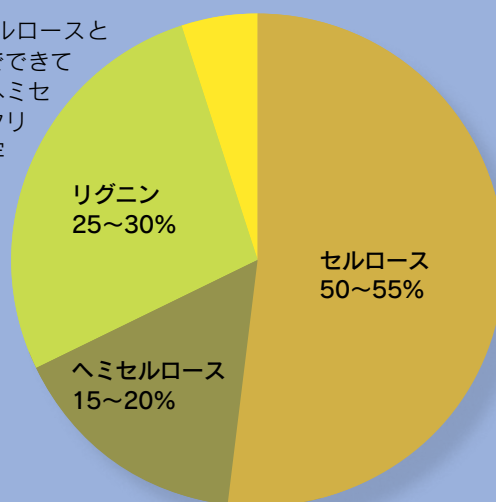
木口側

木材の組織（繊維）

その他（温水・有機溶剤
可溶成分、灰分） 5～10%

木材の細胞壁は、おもにセルロースとヘミセルロース、リグニンでできている。セルロースを鉄筋、ヘミセルロースやリグニンはコンクリートにたとえられ、この堅牢な構造で大木も支えられている。

参考：『木材化学』（原口隆英ほか
文永堂1985）



代表的な国産針葉樹材の化学成分組成

木材と微生物との関わり

山歩きが好きな人の中には、山道の脇に倒木がある姿を目にされた方も多いと思います。

森の中ではこのような倒木も、ゆっくりとですが微生物などにより分解されます。木はおもに、多糖であるセルロース、ヘミセルロースとフェノール骨格を持つリグニンという化合物で成り立っています。これらの成分はそれぞれ、微生物がつくり出す酵素の働きによって自然界では別々の経路で分解されていきます。酵素は生物の生命活動の基盤となる物質で、生体内外での化学反応に関与しています。現在では多くの酵素が生物体内から取り出され、産業利用もされています。化学薬品に替わって酵素を使うことには、温和な条件下で副反応を抑制した反応が可能になるなどの利点があります。しかしその一方で、反応が遅い点やコスト高になるという欠点を持ち合わせています。森林総研では、酵素の持つ利点と欠点を考慮したうえで、酵素や微生物そのものを効果的に作用させることで、木材を機能性材料に変換するための研究を行っています。

今回はその中から、実証研究に至った研究や実証に向けて取り組みを進めている研究について紹介します。

木の酒の製造プロセス



食品加工用ビーズミルで、湿式ミリング処理を行い原料の木材をクリーム状のスラリーにすることで、素材としての新しい可能性を切り拓いた。湿式ミリングとは、水の中に小さなビーズと粉砕原料を入れて攪拌することで、セルロースをすりつぶす技術。

原料樹種	特徴的な香り成分	左欄の成分を含む食品等*	香りの説明*	香り成分の由来	
				原料	糖化・発酵
スギ	醸造系の特有香に加えて、スギ特有の木の香りなどを含み、その香りは樽酒に近い				
	イソアミルアルコール	ビール、ワイン、ピワ	アルコール臭、バナナ様		○
	安息香酸エチル	ブランデー、マンゴー	フルーティ		○
	1-エピカベノール	ストロベリーグアバ	セスキテルペン系	○	
シラカバ	白ワインのようなフルーティな香りとなっているが、独特な青臭みも有る				
	イソアミルアルコール	ビール、ワイン、ピワ	アルコール臭、バナナ様		○
	1-ヘキサノール	ワイン、豆類、トマト	グリーン、脂肪臭		○
	γ-ノナクトン	ブランデー、昆布	ココナッツ様		○
ミズナラ	醸造系の特有香に加えて、オークラクトンのウイスキー様の独特な香りが特徴である				
	イソアミルアルコール	ビール、ワイン、ピワ	アルコール臭、バナナ様		○
	カブリン酸	ビール、ミルク、チーズ	せっけん臭、動物臭		○
	オークラクトン	ブランデー、ウイスキー	バナナ系、スウィート	○	
クロモジ	柑橘系とバラ様の香りのする独特な甘く花のような香りが特徴である				
	シトロネロール	焼酎、ブランデー、緑茶	フローラル		○
	リナロール	ビール、緑茶、オレンジ	柑橘系、フローラル	○	
	ゲラニオール	ビール、焼酎、緑茶	ライム臭、バラ様	○	

* 国立医薬品食品衛生研究所 HP「〈食品中揮発性有機化合物について〉揮発性有機化合物濃度に関する調査結果」を参考

木の酒の香り

4種類の原料樹種からつくった木の酒のそれぞれの香り成分を比較したところ、左の表のような特徴をもつことがわかった。樹種ごとに異なる香りのアルコールが製造できることを示している。また、飲料に関する安全性に関する試験でも、問題はみとめられなかった。今後は、樹種レパートリーを拡大しつつ、全国の山村地域での活用へ向けて技術移転を進めていくことになる。

木材から酒をつくる

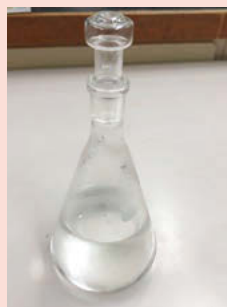
セルロースは、微生物から取り出したセルラーゼという酵素でブドウ糖に分解できます。しかし、木材の中のセルロースは酵素が作用しにくい成分で取り囲まれているので、木材をそのまま酵素で処理してもほとんど分解しません。木材を粉碎してセルロースを取り囲む成分を破壊することで、セルロースが露出し、酵素のセルラーゼが作用してブドウ糖に分解されます。このブドウ糖に酵母を働かせることで、木材からアルコール（エタノール）をつくりだすことができます。

そのため「木の酒」の研究では、セルラーゼが作用できる数マイクロの大きさまで木材を粉々に砕くことができる湿式ミリング処理という方法を開発する必要がありました。この開発により、木材を特徴付ける香り成分を残したまま、高効率でアルコールに変換することが可能になりました。また「木の酒」の香りは、酵母の働きで木材成分から新たに生み出される香りが、木材の香りと複雑に絡み合ってもたらされることがわかっています。

森林総研は、木材の種類の違いによって特徴的な香りをもつ「木の酒」の実生産に向け、民間企業と共同で大規模生産技術の開発に取り組んでいます。



製品化



蒸留酒



醸造酒

発酵もろみを濾したものの。香り成分が多くふくまれている。



発酵もろみ

酵母によってアルコール発酵が行われた状態。

アルコール

2回蒸留

蒸留を重ねることで、アルコール濃度を高めることができる。反面、揮発しない香り成分は、取りのぞかれる。

蒸留残渣

◀ 森林総合研究所 HP 内の「木の酒」特集ページもご覧ください。

セルロースナノファイバー（CNF）は、木の酒とはべつの酵素を加えて、繊維をナノレベルまで細かくすることで得られる新素材。塗料の下塗りや上塗りに活用することで、紫外線による劣化を抑えることができる。

特集

微生物で木材を大変身



スギパルプから製造された CNF
酵素・湿式粉碎方式により製造された CNF。白濁して粘性がある。



CNF を身近な木製品に活用

上の写真は、CNF 配合塗料（下塗り）を使用した木製ベンチ。室内用（左側）と室外用（右側）。右の写真は、CNF 配合シーラーを施した木製の器。

CNFの利用

酵素を活用した

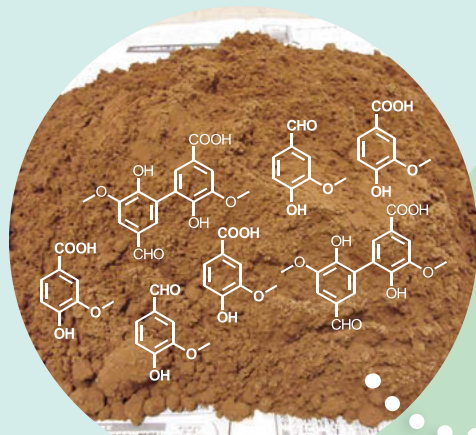
セルロースナノファイバーの製造

セルロースナノファイバー（CNF）は、軽量・高強度などの優れた特性を持つ、木材から製造される新素材です。CNF は幾つかの異なった方法で製造することができますが、森林総研では、微生物の酵素を活用した方法で CNF を製造する研究を行っています。

その研究成果として私たちは、木材のパルプにお酒をつくる際には異なる種類のセルラーゼ（エンドグルカナーゼ）を作用させ、さらに機械的な力を加えて細かくすることで、CNF を高効率で生産する手法を開発しました。エンドグルカナーゼは、木材パルプに含まれる強固なセルロース繊維間の結合を選択的に分解し、繊維同士の結びつきをゆるめる働きを担っています。

この方法で製造される CNF は、木造建築の外壁用塗料に混合した際に、他の CNF に比べて紫外線などによる木材製品の自然劣化を大きく抑制する効果があることが明らかになりました。

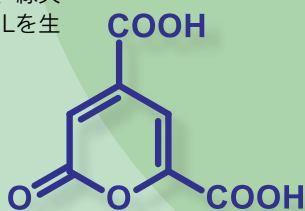
民間企業との共同で得られたこれらの成果の一部は、実験室規模での基礎的な検討を終え、CNF を配合した木材用の高性能性塗料として販売が開始され、実際の建築物への施工例も増えてきています。



工業リグニンとリグニン分解物

使用する微生物のちがいや先端バイオテクノロジーである「分子育種」により、リグニンの分解物からポリマー原料を生産する。

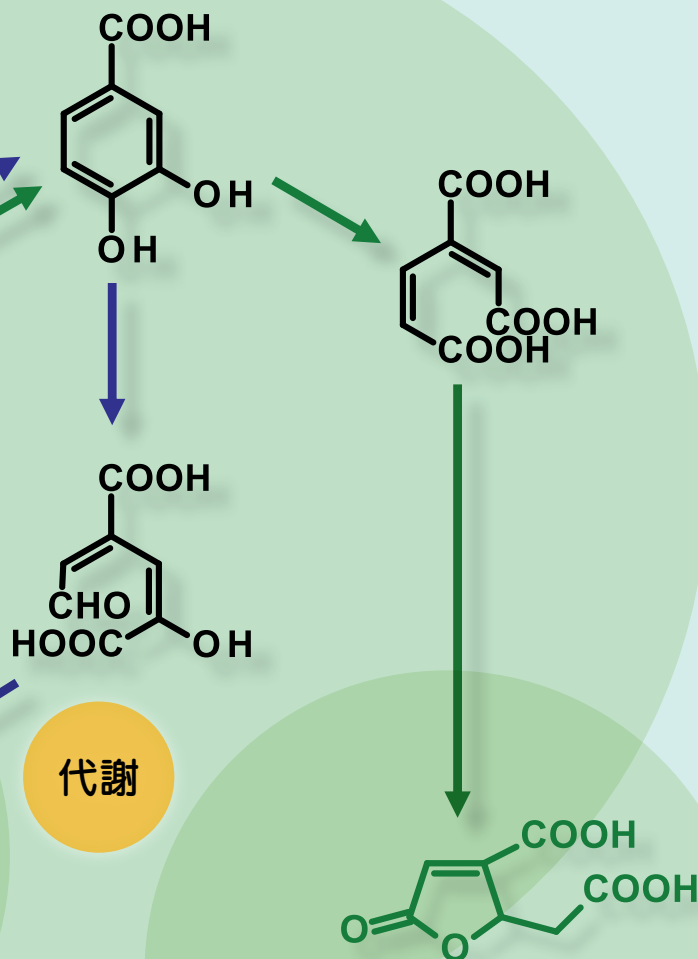
代謝を青矢印の方向に誘導するとPDCを生産することができ、緑矢印の方向に誘導すると3CMLを生産することができる。



PDC

2-ピロン-4,6-ジカルボン酸

プラスチックフィルムや接着剤といったポリマー素材の原料となる。



3CML

3-カルボキシムコノラクトン

PDCに続きPDC以外の化合物の培養製造の検討を開始

3CMLは、カビの仲間の体内でつくられる。3CMLは新しいポリマー原料として期待されているため、微生物の代謝機能を活用して高収率で生産する研究を行っている。

PDCは石油系の化合物に替わるプラスチック原料として使用できるだけでなく、石油系化合物にない優れた特徴も兼ね備えている。たとえば、金属イオンと強い結合性を持つ化合物であり、金属と金属あるいは金属と他材料間を接着する非常に強力な接着剤の原料としても有望視されている。

リグニンから得られる素材

▶ P.16「研究の森から」も参照ください。

微生物の代謝を利用した ポリマー原料の生産

木材には多糖成分の他にリグニンが含まれています。聞きなれないこのリグニンという化合物は、木材に耐水性、耐腐朽性という特性を与えていると考えられています。ここで「考えられている」と紹介したのは、木材の中で実際にリグニンがどのような役割を担っているかは明確にはわかっていないからです。

またこのリグニンは、セルロースやたんぱく質などの他の高分子とは異なり、規則正しい化学構造を持たないことから、石油化学原料のように構造が明確であることが重要な用途で利用することが難しい化合物です。しかし微生物の代謝機能を活用すれば、ブドウ糖からアルコールをつくるときのように、多様な構造を持つリグニンからも一つの化合物を選択的に製造することもできます。

森林総研では、リグニンの分解物を微生物で処理することで、PDC(2-ピロン-4,6-ジカルボン酸)や3CML(3-カルボキシムコノラクトン)という化合物を製造する培養技術の開発を行っています。これらの化合物は石油代替プラスチック原料としても有望視されていることから、実工業に適合した培養技術の開発に取り組んでいます。

研究成果



バイオエタノールのプラント (2008～2012年度)

これまでの成果と今後の展開

林野庁から「平成20年度森林資源活用型ニュービジネス創造対策事業(大規模低コスト型製造システム)」の委託を受け、秋田県北秋田市に設置された木質バイオエタノール製造実証プラントでは、大規模生産でのエネルギー収支やコストなどのデータを蓄積することで、生産効率の向上へ向けての研究が行われた。今後のバイオエタノールビジネスに貢献する成果となった。



PDCの大規模生産実験

PDCの実用化に向けて、商用レベルの発酵タンクによるPDCの大規模生産実験を進めている。

特集◎

微生物で 木材を大変身

木の酒研究棟 (2023年度～)



小型プラント(上写真)で研究を続けてきた木の酒を連続的に生産できるプラントを備えた「木の酒研究棟(正式名称:木質バイオマス変換新技術研究棟)」が、2023年に完成した(左写真)。

これからの展望

これまでの化学工業は、プロセスの大型化が可能な石油化学工業の発展とともに進展してきました。その結果いまでは、私たちの身のまわりにプラスチックをはじめとするさまざまな石油化学製品がふれています。

しかし近年では、地球温暖化といった環境に関わるさまざまな問題が提起され、石油化学工業による大量生産・大量消費を見直そうとする社会的な、そして産業的な機運が高まっています。

木材は、太陽からの光エネルギーを利用した光合成によって水と二酸化炭素から生産される環境親和性の高い素材です。森林総研では今回の特集以外にも、発酵技術を利用することで、木材からバイオエタノール(季刊 森林総研 Vol.10)や、メタン(森林総合研究所 平成27年版 研究成果選集)などのバイオマスエネルギーを生産する研究に取り組んできています。

木材そのもの、あるいは木材から製造されるパルプ、リグニンなどを原料としたバイオマスを、従来の化学薬品に頼る手法ではなく、生物が持つ機能を利用して高付加価値化できれば、より環境にやさしい木材利用プロセスが構築できると私たちは考え、これからの研究を続けていきます。