

平成15年度

独立行政法人 森林総合研究所
研究成果発表会

循環型社会をめざす木質資源の有効利用技術

講 演 要 旨 集

独立行政法人
森林総合研究所

平成15年度

独立行政法人 森林総合研究所

研究成果発表会

循環型社会をめざす木質資源の有効利用技術

日 時 平成15年10月21日（火） 13：20～16：20
場 所 イイノホール
東京都千代田区内幸町2-1-1 飯野ビル7階
Tel. 03-3506-3251

発 表 課 題

(I) 国産材の利用促進に向けて

スギ材の乾燥技術開発

黒田 尚宏（加工技術研究領域 木材乾燥研究室長）…………… 2

木造住宅の耐震性向上と針葉樹厚物合板の新用途開発

神谷 文夫（構造利用研究領域長）…………… 6

(II) 木質資源のリサイクルとエネルギー化

木材廃棄物からの有用ケミカルス製造技術 ―加溶媒分解反応の応用―

細谷 修二（成分利用研究領域長）…………… 12

木質バイオマスからのエタノール製造技術 ―超臨界水及びオゾンの利用―

眞柄 謙吾（成分利用研究領域 木材化学研究室長）…………… 16

スギ材の乾燥技術開発

黒田 尚宏（加工技術研究領域 木材乾燥研究室長）

1. スギ材乾燥の背景と必要性

木材需要の大半を占める住宅建築においては、工場における部材の加工・組み立て、パネル工法等によって建築期間の短縮と合理化が進んできました。また、省エネのための断熱性・気密性の向上、耐震性・耐久性の向上など、強く住み心地がよく不具合のない住宅が求められています。ところが、この住宅建築に未乾燥の木材を使用すると、経年とともに収縮や狂いが生じ住宅の様々な不具合につながるがあります。そのため使用前に建築用材、特に断面の大きな構造用材には乾燥処理が必要です。

しかし、我が国人工林蓄積の6割近くを占めるスギは、生材含水率が他と比較して高く、乾燥処理に時間がかかりその分コストが高くつくために、乾燥材の供給は低迷してきました。そのため、スギ材は、輸入乾燥材やこれを原料とする集成材にシェアを奪われ、需要を確保するための厳しい競争を強いられているのが現状です。また、柱材などは心持ち材であり乾燥が難しいのですが、住宅の品質確保の促進に関する法律の施行（平成12年）によって、これまで以上に品質要求が高まっています。このため、とくにスギ材の乾燥処理の効率化と製品の品質確保とが必要であり、そのための技術開発を行っています。

2. 原木丸太を選別する

スギは丸太によって形質（径、曲がりなど）や材の性質（密度、生材含水率、強さなど）が様々で

す。そのため最終

的な製品の品質や価値を向上させ、かつ効率的に原木を利用するためには、目的別に原木を選別することが必要です。スギには生材含水率が高くそのばらつきも

表1. 心持ち柱材製材を想定した丸太の選別指標と選別方法

対 象	選別指標	乾燥性評価の尺度	選別の方法
形 質 (外 見)	丸太径	乾燥時間	機械計測、画像処理
	心材色	乾燥時間	目視、画像処理
	辺心材率	乾燥時間、割れ	目視、画像処理
	曲がり	変形（反り・ねじれ）	目視、機械計測
	繊維傾斜	変形（反り・ねじれ）	目視、機械計測
	偏心率	変形（反り・ねじれ）	目視、画像処理
	年輪幅	乾燥時間、割れ	目視、画像処理
材の性質	密度	乾燥時間	重量測定
	生材含水率	乾燥時間	電気測定
	ヤング係数	乾燥時間、割れ	重量・振動測定
	強さ	乾燥時間、割れ	重量・振動測定

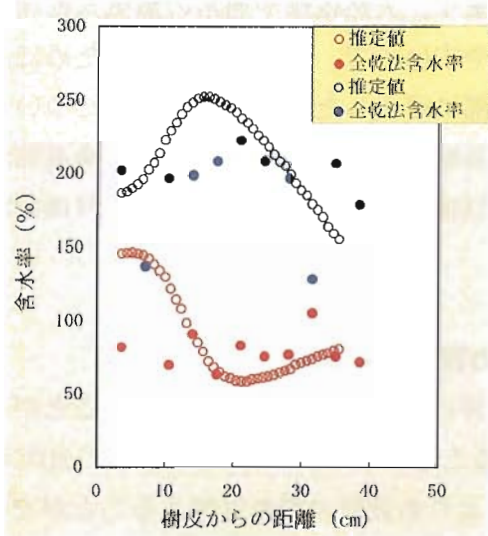


図1. 電氣的測定による丸太内の生材含水率分布の推定結果

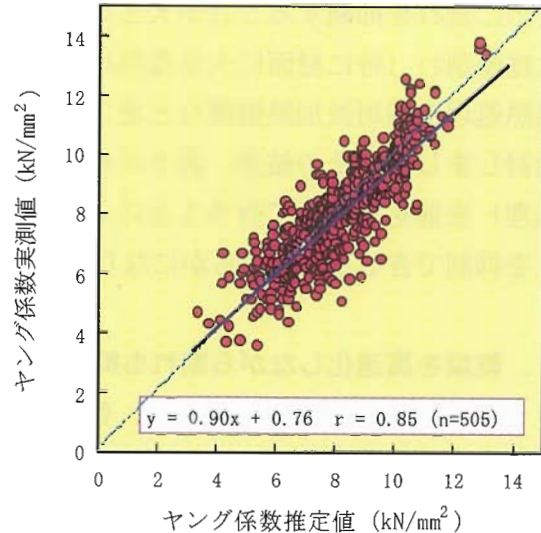


図2. 丸太段階における製材製品強度の推定結果

大きいという特性がありますので、特に乾燥の歩止りを上げつつ乾燥品質を整えるには原木選別が不可欠です。表1には、心持ちの柱材製材を想定した場合の丸太の選別指標と、選別の方法を挙げています。生材含水率は原木の乾燥性を推し量るための重要な指標ですが、これまでその計測や分布を推定するよい方法がありませんでした。このため電気測定に基づく水分測定技術の開発を進め、図1に示すように丸太内の含水率分布を推定できるようになりました。また、材の強さは乾燥性に限らず利用目的や価値を判断する基本的な性質です。そこで、打撃法による原木丸太のヤング係数測定によって、原木段階において製材後の製品強度を推定する方法を開発しました。図2は、その方法によって推定した製品のヤング係数を実測値と比較したものです。

3. 乾燥割れを抑制する

スギの柱材や梁桁材、丸太などは、断面が大きいので乾燥に時間がかかり、また心持ち材であるため割れやすいことが難点です。そのため、コストを低減するには天然エネルギーを活用するなどの省エネ化も必要ですし、また歩止りの向上と品質確保の

表2. 割れを抑制するための前処理条件

前処理方法 (条件)			仕上げ乾燥方法 (条件)
装 置	蒸煮処理	乾燥処理	
蒸気式乾燥機	温度：95℃ 時間：6hr	乾球温度：120℃ 湿球温度：90℃ 時 間：18～24hr	①天然乾燥 ②蒸気式中温乾燥 (乾球90℃/湿球60℃) ③高周波減圧乾燥 (材温55℃～75℃)
	温度：140℃ 時間：2hr	乾球温度：140℃ 相対湿度：約40% 時 間：4hr	①天然乾燥 ②蒸気式中温乾燥 (乾球90℃/湿球75℃)

ために割れを抑制することが大きな課題になります。天然乾燥や通常の蒸気式乾燥では乾燥割れ（特に材面に大きな割れ）が発生しやすいので、割れを抑制するために高温熱処理や高周波加熱処理などをプロセスの一部に導入した組み合わせ乾燥について検討しました。その結果、表2に示すように、高温の予備乾燥処理（蒸煮と高温乾燥処理）を前処理として行うことによって、それ以後の仕上げ乾燥においても材面の割れを抑制できることが明らかになりました。

4. 乾燥を高速化しながら割れも抑制する（圧力容器による）

一般的な蒸気式乾燥によれば、乾燥温度の上昇によって乾燥速度を上げることができますが、温度が高すぎると乾燥品質を制御することができません。例えば、120℃程度の高温乾燥では、中温乾燥（温度80～90℃）よりも表面の割れは抑えることができますが、材の内部に割れが発生します。この材内部の割れを抑制するには、乾燥中頃から温度を下げる必要があります、このため乾燥処理に長い時間（1週間程度）が

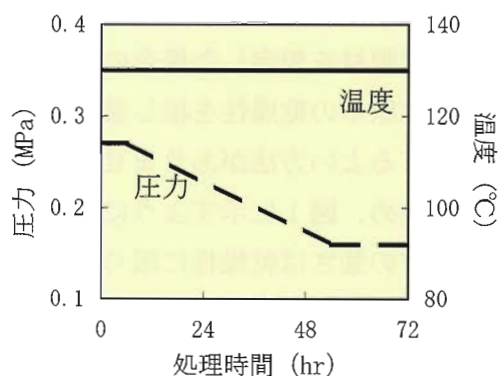


図3. 圧力容器内の温度・圧力の制御方法



図4. 処理材の断面

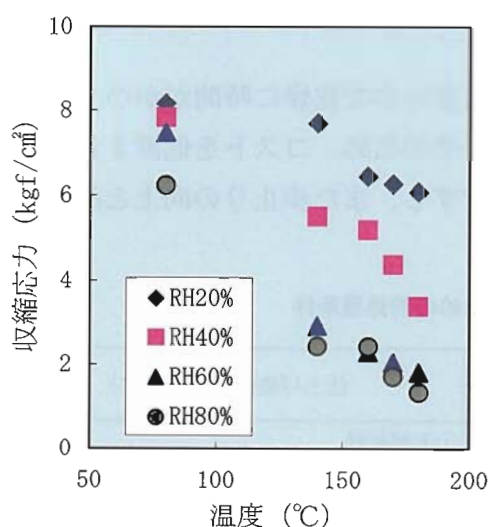


図5. 高温過熱蒸気処理下での乾燥終期の収縮応力
処理温度と湿度が高いほど乾燥収縮によって発生する応力が小さい。

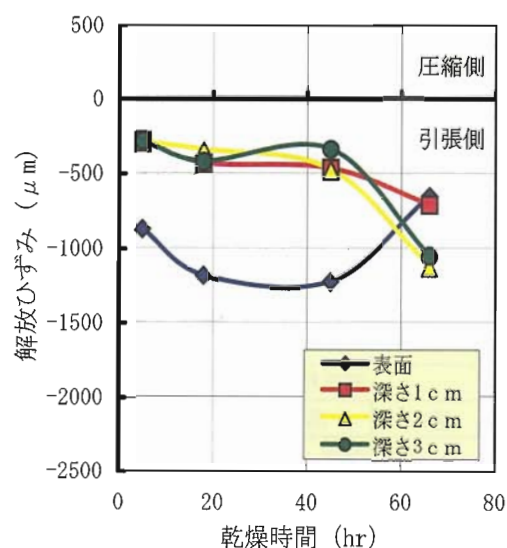


図6. 処理中の解放ひずみの挙動
負の解放ひずみが大きいほど引張りの乾燥応力が大きい。乾燥が進んでも応力の発生が少ない。

かかります。しかし、圧力容器内において高温の過熱蒸気で適当に乾燥速度を調節しながら乾燥すると、3日以内でうまく仕上げるできるようになりました。図3がその処理例です。高温下で容器内の圧力を連続的に低下させながら処理します。材色の変化はやや大きいのですが、図4に示すように、材面、内部ともに割れが抑制されています。

これは図5に示すように、高温過熱蒸気の中では収縮（乾燥）応力が大きく低減することが一因です。また、図6は材を切断して解放ひずみを測定した結果ですが、乾燥の初期から終期まで材面及び内部の乾燥応力が抑制されたままで急速乾燥が可能であることを裏付けています。

5. 乾燥処理材の性能を把握する

乾燥材の性能は乾燥条件や処理方法によって異なるため、強度、耐久性等の性能を見極めながら目的にあう適切な処理条件を決定することが大切です。

乾燥過程における熱処理は寸法安定性の付与に効果的ですが、一方で過度の高温かつ長時間の処理では、強度的な粘りがなくなり、耐蟻性が低下するなどの変化が予測されます。例えば135℃で乾燥された柱材の一部には粘りの低下が認められ、他方150℃の飽和蒸気で処理された小ブロックでは、耐蟻性の低下が明らかになりました。しかし、120℃程度以下の処理では大きな変化が認められず、さらに乾燥処理条件との関係について詳細な検討を進めています。また、乾燥材の部材としての性能評価のみではなく使用環境下における住宅性能とのかかわりも検討する必要があります。接合部の挙動や性能、壁組や床組といった構造体の経時的な性能変化が明らかになりつつあります。

6. おわりに

国産針葉樹製材の約80%は建築向けです。このため、木造住宅建築を中心とした様々な需要に即した乾燥材生産技術の向上を図っていく必要があります。とくにスギ材の乾燥では、乾燥材の生産コストを低減することと、整った品質を安定供給することが求められています。そのため、スギの材質的なばらつきを考慮しつつ材の用途に合わせて適正な生産システムの選択や構築が実現できるように研究開発を行っています。

なお、この報告はプロジェクト研究「スギ材の革新的高速乾燥システムの開発」における研究成果からその一部を抜粋してとりまとめたものです。

木造住宅の耐震性向上と針葉樹厚物合板の新用途開発

神谷 文夫（構造利用研究領域長）

洪沢 龍也（複合材料研究領域 主任研究官）

末吉 修三（構造利用研究領域 木質構造居住環境研究室長）

三井 信宏（構造利用研究領域 主任研究官）

青井 秀樹（構造利用研究領域 木質構造居住環境研究室員）

杉本 健一（構造利用研究領域 構造性能評価担当チーム長）

1. 背景と目的

兵庫県南部地震では、当時の耐震基準を守って建てられた木造住宅の大半は、倒壊することなく、中には被害がほとんどない住宅もありました。しかし、倒壊しなくとも損傷を受けた住宅の修理に多額の出費を要するのは大きな痛手です。そのため、同地震以降、損傷をできるだけ少なくして、修理代を最小限に留められるような高耐震住宅が望まれています。

高耐震化するには、筋かいを入れたり合板等を張った耐力壁を十分に設けたりすることの他に、床を地震で変形しないよう強固に造ることが必要です。在来軸組構法の床は、隅に火打ちばりを設けた上に製材板を張る構造ですが、変形しやすく強度が不十分です。そのため、森林総合研究所では、かねてより各種床構造の耐震実験と理論的解析を基に、在来軸組構法においても、枠組壁工法やプレハブ工法のように構造用合板（厚さ12mm）を張る床構造を奨めてきた結果、兵庫県南部地震の前後からこの構造方法を採用するビルダーが増加してきたところです。

本研究では、さらに高耐震化を進め、床根太をなくして厚さ24～35mmの厚物構造用合板を梁に直接張ることにより施工を合理化し、耐震性をはじめとする住宅性能を向上させる床構造を広めるため、厚物構造用合板の基礎物性評価と床構造の各種性能評価を行うとともに、スギ、カラマツ、アカマツ等の国産材による厚物構造用合板の利用を促進することを目的としています。

2. 厚物構造用合板の強度評価

(1) 試験の概要

開発の基となる厚物構造用合板について、曲げ試験、面内せん断試験、釘接合せん断試験（写真1～3）を行い、その強度性能を評価しました。試験した合板は、スギ、アカマツ、カラマツ、ラジアータパイン、北洋カラマツ、ラワン（通称）の単一樹種によるものと、スギ+アカマツ、スギ+ラジアータパイン、スギ+北洋カラマ

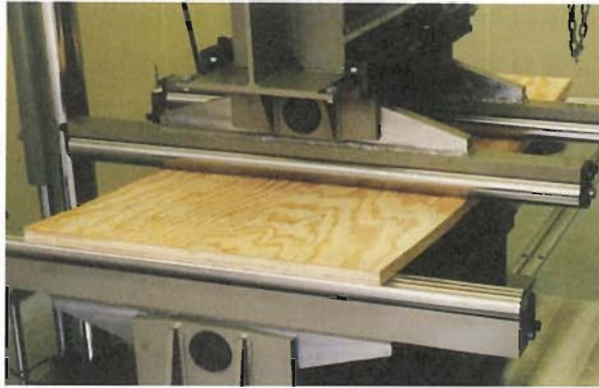


写真1. 厚物構造用合板の曲げ試験

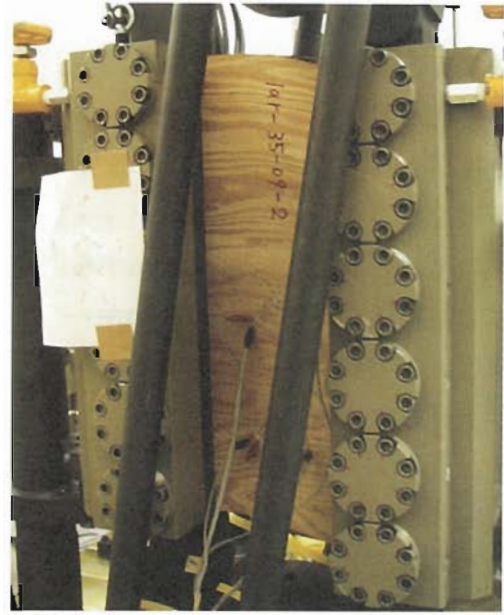


写真2. 厚物構造用合板のせん断試験



写真3. 厚物構造用合板の釘接合せん断試験

ツ、アカマツ+ラジアータパイン、北洋カラマツ+アカマツの複合樹種によるもので、厚さは24、28、35mm（ただし35mmはラジアータパインと北洋カラマツのみ）です。試験体は、大型試験体による0°方向曲げと小型試験体による0°及び90°方向曲げがそれぞれ280体、せん断が144体、釘接合せん断が177体の合計1,161体です。これらの試験結果は、本床構造の設計に用いられました。

(2) 曲げ試験の結果

曲げ強さは、いずれの樹種、厚さとも構造用合板のJAS 1級のいずれかの等級に格付けが可能な値でした。また、曲げヤング係数はいずれの樹種、厚さともJAS 2級の基準値を満足しました（図1）。ただし、スギ合板の曲げヤング係数については基準値ギリギリであり、全国のスギ強度

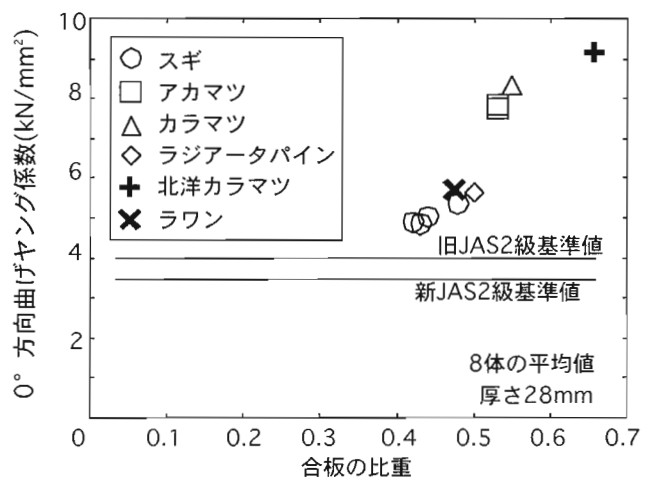


図1. 厚物構造用合板の曲げヤング係数

データを見ると使用する原木によっては基準値を下回るものが出現する可能性があります。このため、2002年度の合板JAS改訂委員会において、本試験結果を踏まえて、厚物構造用合板2級の曲げヤング係数基準値（当時 4.0kN/mm^2 ）を全国のスギによる合板がクリアできるように 3.5kN/mm^2 まで引き下げる提案がなされました。この引き下げを行うと、床のたわみが増大することになりますが、合板のたわみの増大は、基準の積載荷重に対して 2.2mm から 2.5mm へのわずか 0.3mm にすぎません。床のたわみはこれに梁のたわみ（約 12mm ）を加えたものであり、その影響は事実上ないといえます。このような検討の結果、ユーザー側の賛同を得て、JASは2003年3月に提案通り改訂されました。

(3) 面内せん断試験の結果

せん断強さとせん断弾性定数は、比重の低いスギであっても他の樹種とそれほど大きな差はありません。また、せん断強さについては、JAS 1級の基準値を十分に満足しています（図2）。床の耐震性の約50%は、合板のせん断強さとせん断弾性定数に依存しており、スギ合板は軽くて優れた材料といえます。

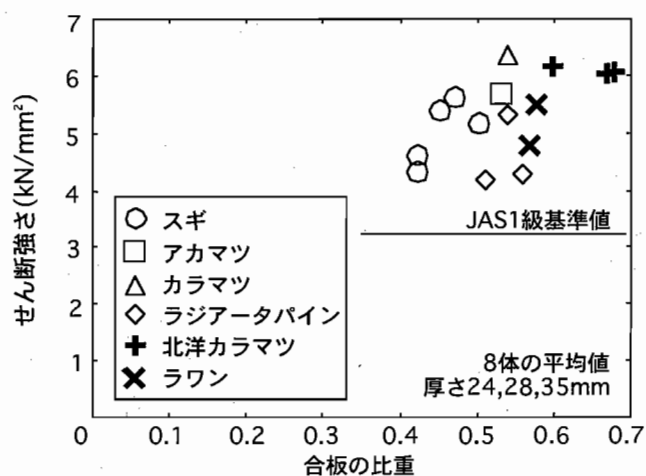


図2. 厚物構造用合板のせん断強さ

(4) 釘接合せん断試験の結果

釘接合せん断強度は、製材の比重（樹種）に依存し、合板の比重（樹種）の影響は少ないことが分かりました（図3）。これは破壊形態が釘の製材からの引き抜けであるからです。合板が薄いと、比重の低いスギ合板は釘頭が合板を貫通する破壊形態を示し接合強度が低くなりますが、合板を厚くすることでこの欠点が解消されたといえます。床

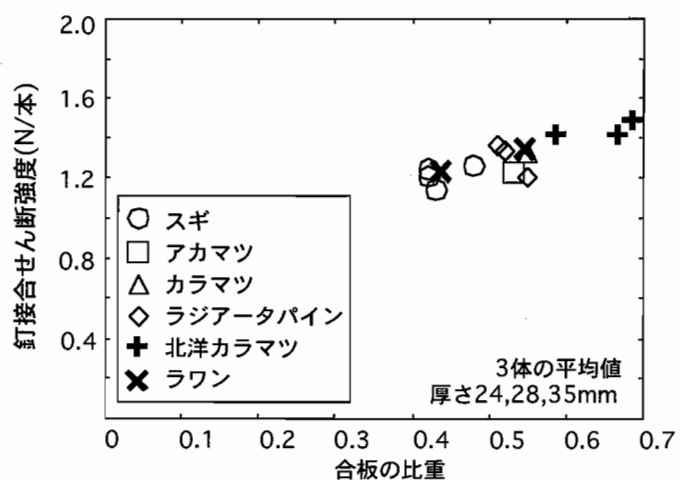


図3. 厚物構造用合板の釘接合せん断強度
(製材は全てS-P-F)

の耐震性の約50%は、釘接合強度に依存しており、ここでもスギ合板は軽くて優れた材料といえます。

3. 床構造の性能評価

(1) 床構造の耐震性能評価

床は水平構面と呼ばれ、耐力壁と同様に重要な耐震要素です。特に、部屋が大きく（壁と壁の間隔が広く）吹き抜けなどを設ける最近の住宅では、床が弱いと、いくら耐力壁を十分に配置しても地震に弱い住宅になってしまいます。本研究では設計した床について、長さ10.92m、奥行き3.64mの実大床試験体によるせん断実験を行いました（写真4）。



写真4. 床構造の耐震性能評価試験

既往の実験データを用い、他の構造の床と比較してまとめると（図4、赤色が本構造による床）以下になります。受け材型の床（図5）は、従来の火打ちばりによる床の約10倍、根太を設けて12mm合板を張った受け材型の床の1.5倍の耐力があり

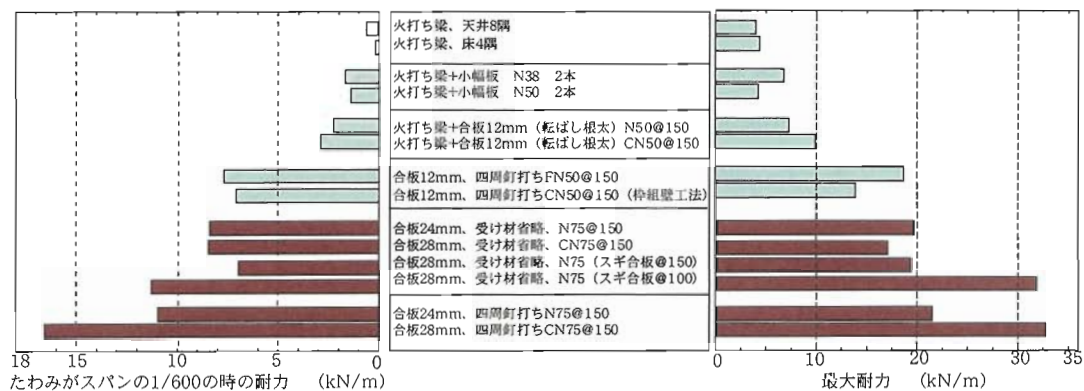


図4. 各種構造方式による床のせん断耐力比較
(日本住宅木材技術センターの実験データを含む)

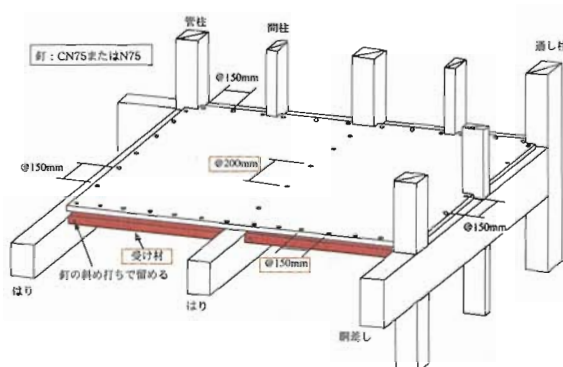


図5. 厚物構造用合板による受け材型の床構造

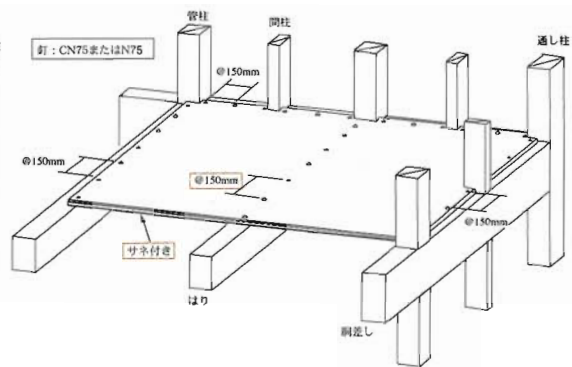


図6. 厚物構造用合板による受け材省略型の床構造
(サネ付き合板使用)

ます。受け材省略型の床（図6）は、12mm合板を張った受け材型の床と同等の耐力があります。受け材省略型でも釘間隔を標準の150mmから100mmに狭めると、受け材型と同等の耐力があります。

（2）床構造の遮音性能評価

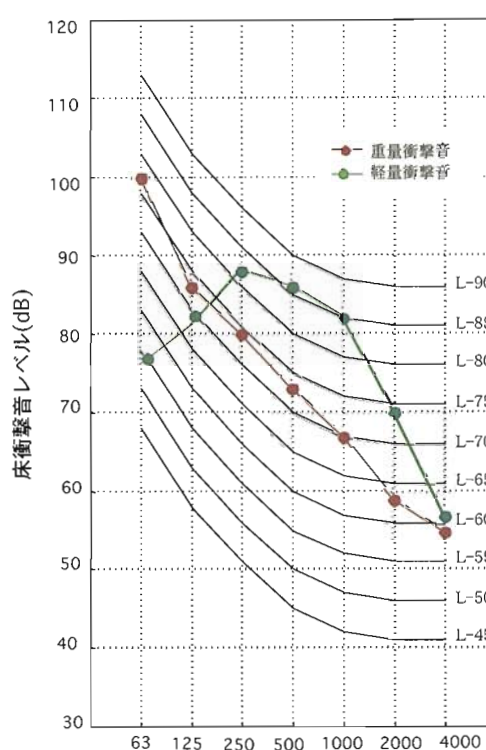
マンションでは上階からの音の遮音性能が問題となっていますが、木造住宅でも床に対して高い遮音性能が求められるケースが増えています。本研究では、6 畳間の箱形実大モデルを作り、JISに定められた重量及び軽量衝撃音試験により、その遮音性能を評価しました（写真5）。その結果、遮音性能は重量衝撃音に対してL75（従来の床と比べて1～2ランク上、12mm合板床の1ランク上）、軽量衝撃音に対してL85（12mm合板床と同程度）の性能であることが分かりました（図7）。

（3）床構造の局部荷重に対する耐力性能評価

本床構造は床根太を省略しています。また場合によっては、合板の目地を受ける部材（受け材）をも省略し、別途開発した形状のサネ（住宅金融公庫認定、特許出願中）で合板の縁部をつないでいます。その効果を調べるため、ピアノ（250kg程度）の脚等による局所的な集中荷重を想定した局部荷重試験を行いました（写真6）。その結果、250kg程度の荷重では合板が陥没したり、曲げ破壊したりすることではなく、本床構造は1トン以上の



写真5. 床構造の遮音性能評価試験
（ボラス暮らし科学研究所にて）



オクターブ帯域中心周波数 (Hz)

図7. 床の遮音性能



写真6. 床構造の局部荷重に対する耐力評価試験
（約1トンの荷重が加わった状態）

局部荷重に耐えることが分かりました。

4. 研究成果の普及とこれからの展開

以上の研究成果は、逐次、東京・東北合板工業組合に受け渡し、まず2001年には約20頁にわたる設計指針「ネダノンマニュアル」（ネダノンは、厚物構造用合板の組合商品名）を作成し、合板メーカー、流通、設計事務所、ビルダー等に配布するとともに、講習会等を実施しました。同マニュアルは研究の進捗とともに改訂を重ね、2003年には、国産樹種による合板の試験データを加えて第3版となっています。

2001年当時は、本床構造は開発して間もないため、事実上の設計基準ともいえる住宅金融公庫の「木造住宅工事共通仕様書」に掲載されておらず、また、建築基準法上、本床構造の解釈に難しい部分があったため、建築主事が建築許可を出さないケースが大部分でしたが、同マニュアルにより性能の優れていることが説明された結果、2002年には大半の地域で建築許可が得られる状況となりました。さらに、2003年には、本床構造が優れた性能があり広く受け入れられているとの認識により、金融公庫の「木造住宅工事共通仕様書」に本床構造が掲載されました。これにより、今日では全国どこでも建築許可が得られる状況になっています。

国産材による合板の人気は上昇しており、特にスギ厚物合板は見た目が美しくて軽いことから（厚さ28mm、910mm×1820mmの合板1枚の重さは北洋カラマツ約30kg、スギ約20kg）人気が高まっています。そのため、2002年にはスギを中心に国産材20万m³が消費され、2003年はさらに増加中です。

厚物構造用合板の床への利用は、在来軸組構法に留まらず、枠組壁工法の1階部分やコンクリートマンションの置き床にも拡大しており、さらに耐力壁への利用も試みられています。今後、厚物構造用合板のさらなる新しい用途開発に取り組もうとしているところです。

なお、本研究は、東京・東北合板工業組合、(株)ポラス暮らし科学研究所、静岡大学農学部、秋田県立大学木材高度加工研究所、岩手県林業技術センター、宮城県林業試験場との共同研究によるものです。また、(株)三井ホーム、(株)一条工務店の協力を得ました。

木材廃棄物からの有用ケミカルス製造技術

—加溶媒分解反応の応用—

山田 竜彦（成分利用研究領域 主任研究官）

細谷 修二（成分利用研究領域長）

1. はじめに

現在ゴミとして処分されている廃棄物でも、何らかの処理を施すことにより、有用な物質に生まれ変わる可能性があります。私たちは廃材や古紙等の木質系の廃棄物を化学的手法を用いて分解し、有用ケミカルスを製造する一連の技術「加溶媒分解システム」を開発しました。このシステムは、廃棄物中のセルロース成分を徹底的に分解し、レブリン酸に変換する点を特徴としています。レブリン酸は、燃料添加剤、除草剤、ポリマー等の原料であり、将来的に多量の需要が予想される有用ケミカルスです。私たちは有用物を廃棄物から製造することによって、バイオマスの有効利用をめざしています。

2. 加溶媒分解について

現在、最も成熟している化学的な木材利用技術を用いているのは紙パルプ産業であると考えられています。木材は主として、セルロースという紙の主原料となる物質、ヘミセルロースというセルロース以外の多糖物質、そしてリグニンという植物体の組織を強固にする役割を持つ物質で構成されています。例えば、パルプを製造する場合には、木材中のセルロースを、繊維としての特性を損なわずにいかに効率よく取り出すかに技術の鍵があります。ここで述べる「加溶媒分解」という用語も、これまでに、パルプ化技術の一つとして用いられてきました。加溶媒分解は、物質を有機溶媒中で分解する時の化学反応を指す言葉で、物質が分解されると同時に、使用した溶媒と分解された物質が化学的に結合しながら（溶媒分子が分解物に加わる）分解反応が進んでゆくの、加溶媒分解（ソルボリシス）と呼ばれています。パルプ化技術で用いられる加溶媒分解は、主として木材中のリグニン、ヘミセルロースを分解し、セルロースを主成分とするパルプを得る目的で検討されてきました。今日までに、様々な手法が提唱されましたが、どれも既存の「クラフト法」と呼ばれる効率のよいパルプ化法に取って代わる経済性は示せず、実用化はなされていません。

一方、木材の加溶媒分解反応を応用した技術として「木材液化法」と呼ばれる手法が1990年代初めより盛んに試みられてきました。これは、木材全体を液状物質に変化

させて、プラスチックや接着剤などの樹脂原料として利用することを目的に開発が進んできました。液化法としては様々な手法が提唱されましたが、基本的には、フェノールやアルコール系の試薬中で木材全体を分解して、結果的に液状物を得るという加溶媒分解反応を応用した技術でした。私たちも、この研究を進化させ、反応メカニズムや生成物の解析を通して、多くの成果を得ています。

これらの研究背景の中で、私たちはパルプ化や液化技術で用いられてきた加溶媒分解反応の反応条件をコントロールすることにより、セルロースの分解を促進し、有用物質を生成する技術を開発しました。私たちの技術は、パルプ化技術と異なりセルロースの分解を目的としているので、原料中のセルロース繊維の品質は全く問題とされません。このことは、この技術がセルロース繊維の質が低い廃棄物の利用に適していることを示しています。また、新たに「環状カーボネート」という試薬を用いることにより、加溶媒分解反応を高速に進めることを見出し、特許を取得しました。環状カーボネートは、特にセルロースの加溶媒分解を促進して、有用化合物である「レブリン酸」の生成を促進します。私たちは、この一連の新技术を「加溶媒分解システム」と名付け、木質系廃棄物の再利用システムとして提唱しました。以下に当システムの特徴について解説します。

3. 加溶媒分解システム

図1に、加溶媒分解工程により液状化された木質系物質の写真を、図2に当加溶媒分解システムの工程図を示します。加溶媒分解工程は、それほど煩雑なものではなく、木粉と分解試薬を任意の割合で混合し、硫酸等の酸触媒を1～3%ほど加え、常压下、120～150℃程度で加熱するだけの処理です。分解試薬としてエチレンカーボ



図1. 加溶媒分解処理により液状となった木材

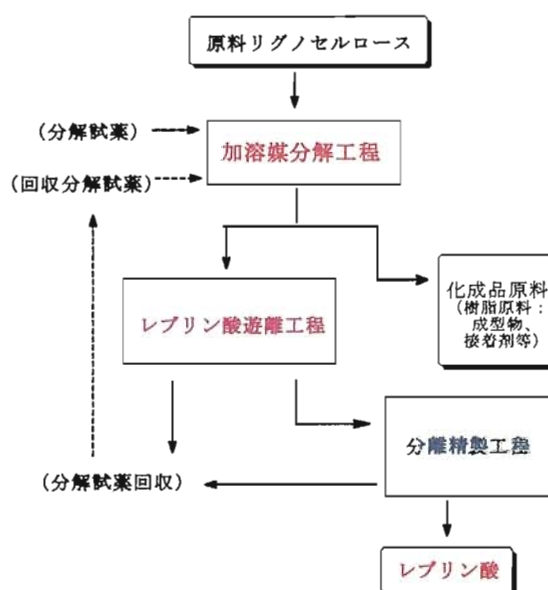


図2. 加溶媒分解システムの工程図

ネート等の環状カーボネートや、ポリエチレングリコール等の高沸点のアルコール類が使用されます。分解工程を通じて、セルロースはどんどん分解され「レブリン酸」という有用化合物に変換されます。精製されたレブリン酸は、燃料添加剤、除草剤、ポリマー等の原料であり、将来的に多量の需要が予想される有用化合物です。その利用の一例を図3に示しました。

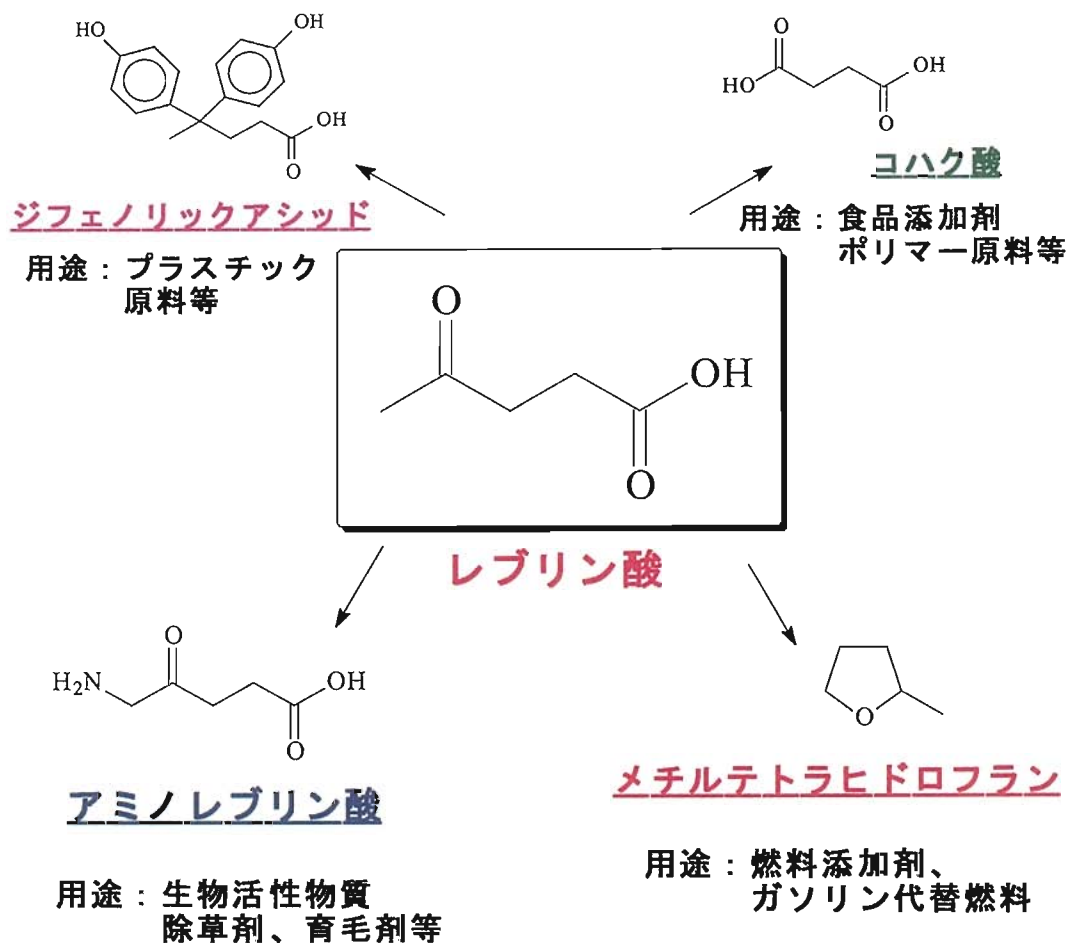


図3. レブリン酸から誘導される代表的有用ケミカルス

通常、レブリン酸はセルロース系物質から酸加水分解法によって製造されます。しかしながら、木材を酸加水分解すると、木材中のリグニンが非常に強く変質されてしまい、利用の困難な残留物を生じてしまうという欠点がありました。当システムでは加溶媒分解反応で木材を処理するので、用いた試薬によりリグニン成分の性状をコントロールすることが可能となっています。当システムでは、ポリオール系試薬と環状カーボネートを組み合わせることにより、リグニン成分をプラスチックなど化成品の原料として利用することが可能となりました。また、使用した試薬もできるだけ回収して再使用できるような工程をもっており、木材液化では達成されなかった試薬の回収が可能となりました。回収試薬中には酸触媒も含まれているので、回収試薬のみを

再び用いた場合でも十分な加溶媒分解が達成されることを確認しています。

当システムによるレブリン酸の収率は、原料中のセルロースから導き出される理論値に対して20～30%と低い値に留まっています。これは、当技術の加溶媒分解工程が一段のみで構成されるためと考えられます。酸加水分解の例をみても、効果的なレブリン酸の製造には少なくとも2段階の条件の異なった分解反応工程が必要と思われます。それは、反応のメカニズムを考えた場合、セルロースの分解過程の中間体として生成する単糖及びその分解物のヒドロキシメチルフルフラール（HMF）誘導体の生成反応と、HMF誘導体からのレブリン酸の生成反応では反応条件が大きく異なるためと考察されています。現在、私たちは反応工程の改善により、より効率の良いシステムの構築に努めています。

4. おわりに

当システムはバイオマス総合利用のため、有用ケミカルスであるレブリン酸を、酸加水分解反応ではなく加溶媒分解反応で調製することを達成した初めての試みという点で高い評価を得ています。加溶媒分解という手法は、バイオマス利用の手段として、今後も大いに可能性のある手法であり、さらに研究の深化を図っています。

なお、本研究は農林水産省環境研究「農林水産バイオリサイクル研究」において実施したものです。

木質バイオマスからのエタノール製造技術

－超臨界水及びオゾンの利用－

松永 正弘（木材改質研究領域 機能化研究室研究員）

松井 宏昭（木材改質研究領域 表面加工担当チーム長）

杉元 倫子（成分利用研究領域 木材化学研究室研究員）

真柄 謙吾（成分利用研究領域 木材化学研究室長）

1. 背景

私達が大量に使用し続けている石油や石炭といった化石燃料は、将来の枯渇が予想されていることに加えて、多量の炭酸ガスの放出により地球環境に温暖化の危機をもたらしています。これら問題を解決するために、現在、木質バイオマスから、石油・石炭に代わるエネルギー源としてバイオマスエタノールを製造する技術の開発が強く求められています。木質バイオマスは樹木として再生産可能で、かつその燃焼により放出された炭酸ガスは、樹木の成長時に吸収・固定されるため大気中で増加することはありません。また、間伐材、住宅解体材や紙ゴミなどを原料とすることにより、未利用資源の活用や廃棄物処理問題に貢献することも可能です。では、このような木質バイオマスからどのようにエタノールを製造するのでしょうか。

2. 木質バイオマスからのエタノールの製造と従来技術の問題点

木材の約7割は、セルロースやヘミセルロースといった多糖から成っています。これを加水分解すると、単糖であるグルコース（ブドウ糖）やキシロースが生成します。この内、グルコースはお酒を作る酵母を用いてエタノールへ変換することができます。キシロースも、特殊な酵母を用いることによって同様にエタノールへ変換可能です。これら発酵エタノールの濃度は7～8%程度ですから、これを蒸留して95%以上に濃縮します（図1）。このプロセスで一番問題となるのは加水分解です。木材中の、特にセルロースは結晶化しているので、これを効率的に加水分解するためには硫酸や塩酸といった強い酸が必要になります。しかし、強い酸は生成したグルコースをさらに分解して収率を低下させると共に、その回収処理にも多大な費用を必要とします。また、容器の腐食や酸廃液の処理も問題となります。そこで、このような強い酸を使わずに加水分解できる方法を開発しました。それが、超臨界水処理法とオゾン前処理酵素加水分解法です。

3. 超臨界水処理法

水は、温度・圧力を374℃・22MPaまで上げると、液体でも気体でもない状態とな

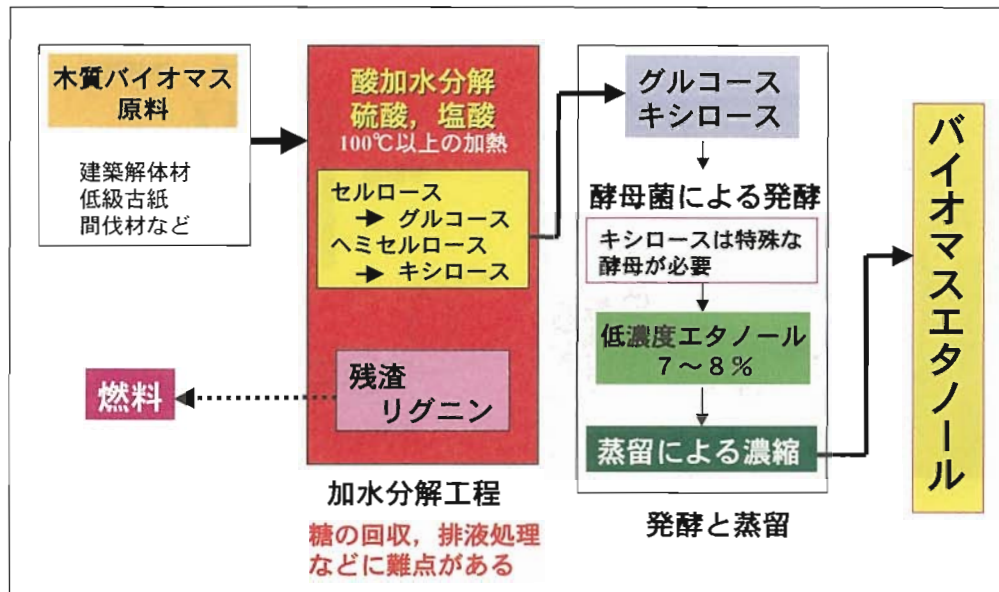


図1. 酸加水分解を用いたエタノール製造プロセス

ります。この温度・圧力条件を臨界点と言い、臨界点以上の状態の水を超臨界水と呼びます（図2）。超臨界水は、木質バイオマスをはじめとした有機物を溶解する力が非常に高く、かつ短時間に加水分解することが知られています。そこで、（株）神戸製鋼所との共同研究により、図3、4に示すような装置を用いてスギ木粉を超臨界水処理しました。その結果、臨界点よりもやや温度の低い亜臨界域の311℃、25MPaにおいて、セルロース及びヘミセルロース由来の糖成分の回収率が最も高くなり、わずか20分の処理で約70%を回収することができました。処理に数時間を要する硫酸加水分解と比較して、生産性のうえで大きな利点となります。さらに、超臨界水処理は水と熱だけを利用した反応で、他には何も必要ありません。現在の段階では、木材－水の固液比を1：500で処理していますが、水の使用量を減らせばそれを加熱するために必要だったエネルギーやコストを削減することができます。今後は、固液比の見直しなどさらに実用化に向けた開発を進めていく予定です。

4. オゾン前処理加水分解法

糖の収率低下、酸の処理、反応容器の耐酸性といった問題点を持つ硫酸加水分解に代わるもう一つの方法として、セルラーゼというセルロー

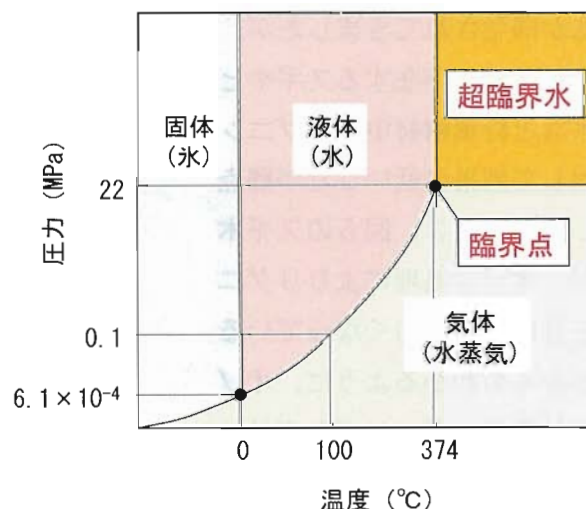


図2. 水の状態図（※1MPaは約9.87気圧）



図3. 超臨界水処理装置全体像

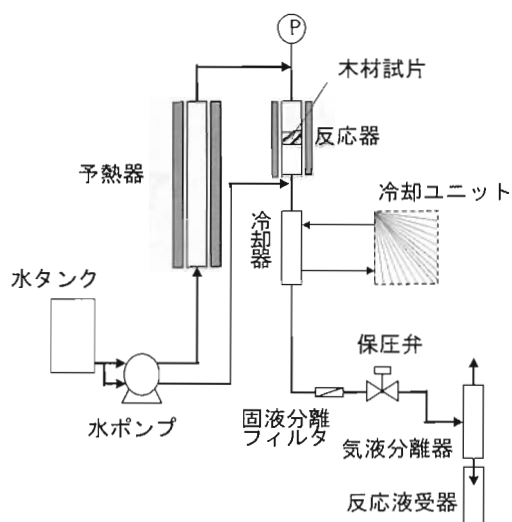


図4. 超臨界水処理装置概略図

スやヘミセルロース専用の加水分解酵素を用いる酵素加水分解法があります。ところが、木材中でセルロースやヘミセルロースはリグニンという接着剤のような物質で覆われているため、セルラーゼを作用させる前にそのリグニンを分解する処理（前処理）が必要になります。これまで、蒸煮や爆砕といった木材を高温高圧の水蒸気で処理する方法が開発されてきましたが、日本に大量に存在するスギやヒノキなど針葉樹材中のリグニンに対して効果の低いことが難点でした。しかし、図5のスギ木粉が、オゾン処理によりリグニンを分解されて白くなっていることからわかるように、オゾンは針葉樹リグニンでも容易に分解することができます。しかも、気体のオゾンを直接木材に作用させるため、排水処理が不



図5. オゾン処理によるスギ木粉中のリグニンの分解

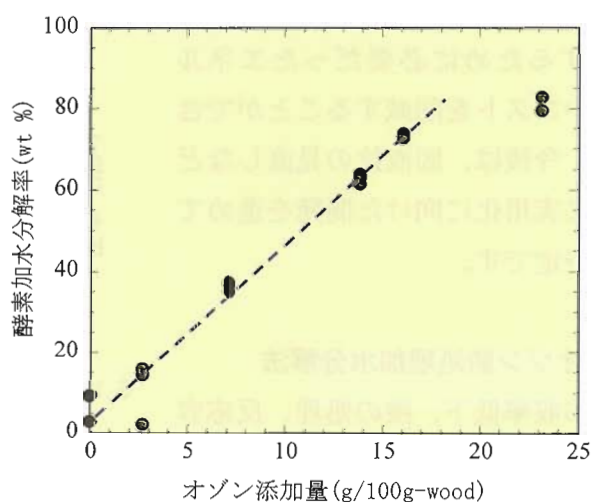


図6. スギ木粉のオゾン添加量と酵素加水分解率の関係

要であるという利点もあります。

図6にオゾンで前処理してリグニンを分解したスギ木粉の酵素加水分解率を示しました。この実験では、添加したオゾンの90%以上がリグニンと反応し、酵素加水分解率は約80%に達しました。しかし、オゾン添加量が多くなると加水分解効率が少し低下する傾向が認められますので、この点を改良するために、気体であるオゾンと固体である木粉を効率的に接触させる反応装置の開発を行っています。

5. おわりに

今回紹介したこれら超臨界水処理とオゾン前処理酵素加水分解法は、まだ解決すべき問題も多々残されていますが、私たちの生活環境を守る木質バイオマスを活用するためにはなくてはならない安全な技術の一つです。実用化に向けて、今後さらに開発に取り組んでいきたいと考えています。

なお、本研究は農林水産省環境研究「農林水産バイオリサイクル研究」及び「農林業におけるバイオマスエネルギー実用化技術の開発」により実施しました。

平成15年度

独立行政法人 森林総合研究所

研究成果発表会 講演要旨集

・平成15年10月21日発行

編集・発行

独立行政法人 森林総合研究所

企画調整部 研究情報科 広報係

〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地

Tel. 029-873-3211 Fax. 029-873-0844

E-mail : kouho@ffpri.affrc.go.jp

URL <http://www.ffpri.affrc.go.jp/>