

## 木材の横圧縮と加工\*

則元 京\*\*

Transverse Compression of Wood and Its Application to Wood Processing\*

Misato NORIMOTO\*\*

(平成6年7月31日受理)

### 緒言

木材は、森林において、空気の浄化、水源地涵養、災害防止などの役目を果たしながら生産された後、建築、家具、楽器、運動具、美術・工芸品などの材料や、紙および木質材料などの原料として、広く利用されている。木材は、加工が容易で、軽くて強く、適度に硬く、安心感を与える材料で、色は、暖かく感じられ、木目模様は、自然で快い感じを、木材からの光の反射は、方向によって異なり、特有の光沢と質感を与える。木材は、断熱性に優れ、吸放湿性に富み、木材で囲まれた空間では、温度調節や湿度調節が行われ、木材の香りは、気分を爽快にさせる。このように、木材は、住宅の構造材料や内装材料としての優れた特性を備えている。また、廃棄の段階で、建築解体からの木材は、建築材料、木質材料、木炭、肥料などとして、紙は、再生紙として、一部が再利用されている。木材は、生産、利用、再利用、廃棄に至る全ての段階において、無公害で、環境に与える負担が少なく、環境と調和のとれたエコマテリアルである。

一方、有用熱帯材の乱伐や焼き畑による森林破壊、砂漠化、酸性雨による森林崩壊、環境保護による樹木伐採の制限または禁止など、地球規模でみて、木材資源を取り巻く問題は、非常に厳しい。わが国では、戦後造林され続けてきたスギに代表される針葉樹が既に伐期を迎え、木材の蓄積は、着実に増加してきている。しかし、スギ材については、価格や材質の問題などから、その利用に苦慮されているのが現状である。将来、外材の輸入には、一層厳しい制限が加えられて行くものと予想されるので、国産の針葉樹材を有効に利用することが、ますます重要になってくると思われる。

スギなどの軟質の木材を住宅の構造部材、床、壁などの内装材料や家具材料を始め、あらゆる木材の用途に利用していくには、多くの問題がある。その中で、特に、軟質で強度が低く、材質に偏差が大き

---

\* 本報の内容は、京都大学木質科学研究所創立50周年記念講演会（1994年5月、宇治）において発表した。

\*\* 物性制御分野 (Laboratory of Property Enhancement)

Key words: Transverse compression, Drying set, Permanent fixation, Heat treatment, Steam treatment

いことが上げられる。これを克服する有効な方法の一つに、横圧縮加工が考えられる。ここでは、木材の横圧縮について解説し、それを応用したスギ材の加工について紹介する。

### 横圧縮変形

#### 応力-圧縮度図

木材の繊維に直交する方向から圧縮することを横圧縮、その方向に生じる圧縮変形を横圧縮変形と言う。接線方向では、早材と晩材が並列に配列している。それらは、曲率をもつので、圧縮力を加えると、比較的小さな力で座屈し、その進行によって、大きな変形が生じる。放射方向では、早材と晩材が直列に配列している。圧縮力を加えると、まず、薄壁の早材部の細胞が座屈する。その後、早材部のより厚い壁の細胞へと座屈が続き、次いで、晩材部の細胞の座屈が続く。両方向で異なる座屈変形が生じるにもかかわらず、力と変形の関係は、類似した傾向を示す。木材の横圧縮を利用する加工では、放射方向に圧縮することが多いので、以下では、放射方向の圧縮に限って述べる。

横圧縮すると、細胞が座屈を起こし、巨視的な破断を伴うことなく、非常に大きな変形が生じて、木材は、圧密化する。木材の横方向の大変形は、圧縮において、比較的容易である。図1に、木材の横圧縮

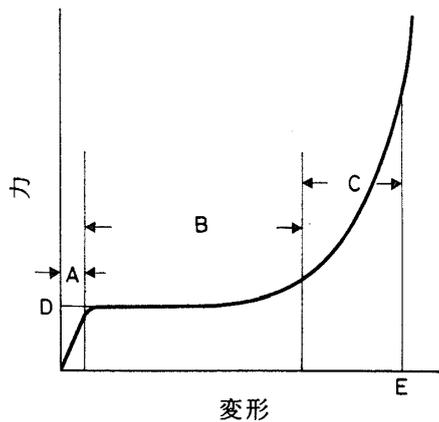


図1 木材の横圧縮における力と変形の関係(模式図)

A：弾性域，B：高原域，C：圧密域

D：降伏点，E：内こうが消失する時の変形量

縮における力と変形関係を模式的に示す。横圧縮すると、最初、力と変形が比例する領域（弾性域）が現れる。細胞の壁には、わずかな圧縮や曲げの変形が生じるものの、細胞の断面形状には、顕著な変化は、生じていない。次いで、力がある大きさ（降伏点）に達すると、力の増大が少なくて、変形が著しく増大する領域（高原域）が現れる。細胞が座屈を起こすためであり、それは、放射方向では、壁の厚さが薄い細胞から順次圧縮方向と直角方向に層状に生じる。大部分の細胞が座屈し、細胞の壁同志が接触し始めると、力が急激に増大する領域（圧密域）が現れる。高原域と圧密域の境界は、はっきりと区別できない。細胞の内こうが完全に消失すると、変形は、細胞の壁の変形のみによって生じる。

一般に、力Pを応力 $\sigma$ （断面積A当たりの力： $\sigma = P/A$ ）で、変形量 $\Delta l$ をひずみ $\epsilon$ （試料寸法l当たりに生じる変形量： $\epsilon = \Delta l/l$ ）で表す。大変形を扱う場合、応力を公称応力（初期断面積 $A_0$ 当たりの力： $\sigma = P/A_0$ ）で、ひずみ（初期寸法が $l_0$ のものを寸法lまで変形させた時のひずみ： $\epsilon = \ln(l/l_0)$ ）を公称ひずみ（初期寸法当たりの変形量： $\epsilon = \Delta l/l_0$ ）で、それぞれ近似することは、一般にできない。しかし、実用的には、公称応力および公称ひずみを用いると便利なため、以下では、そ

## 則元：木材の横圧縮と加工

れらを用い、それぞれを応力および圧縮度と呼ぶ。

木材の横圧縮における応力 $\sigma$ と圧縮度 $\epsilon$ の関係を式で表すことができれば、便利である。比重の異なる多くの木材の横圧縮において、室温・気乾状態、室温・飽水状態、100℃・飽水状態いずれの条件においても、 $\sigma$ と $\epsilon$ の関係は、次式によって表せる<sup>1)</sup>。

$$\begin{aligned} \epsilon < \epsilon_y : & \quad \sigma = E \epsilon, \\ \epsilon_d > \epsilon \geq \epsilon_y : & \quad \sigma = [1 + C \left\{ \frac{\epsilon_d}{\epsilon_d - (\epsilon - \epsilon_y)} - 1 \right\}] \sigma_y, \\ & \quad \epsilon_d = 1 - K \cdot \frac{\gamma}{\gamma_w}, \quad \epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}, \\ \epsilon \geq \epsilon_d : & \quad \sigma = E_w (\epsilon - \epsilon_d) + \sigma_d, \end{aligned}$$

ここに、 $\sigma_y$ および $\epsilon_y$ は、それぞれ降伏点（降伏応力）および降伏点における圧縮度、 $E$ および $E_w$ は、木材および細胞壁のヤング率、 $\gamma$ および $\gamma_w$ は、木材の比重および細胞壁の比重、 $C$ は、降伏後の応力の上昇の程度を示す係数、 $K$ は、ポアソン比に関係する量で、側面を拘束した場合に1、拘束のない場合に1以下の値を取り、 $\gamma$ の上昇とともに小さな値となる。 $\epsilon_d$ および $\sigma_d$ は、全ての細胞の内こうが消失する時の圧縮度および応力である。 $\epsilon_d$ は、 $K=1$ の場合には、空隙率に一致する。

$\sigma_y$ は、 $\gamma$ の増大によって増大し、同じ $\gamma$ で比較すると、20℃・気乾状態、20℃・飽水状態、100℃・飽水状態の順で減少する。また、同じ $\gamma$ および測定条件で比較すると、拘束のある場合とない場合とで顕著な差は、認められない。 $K$ は、 $\epsilon_d$ 付近での圧縮に伴う接線方向への試料の膨張の割合に関係する量であり、横拘束のない場合、一般に、測定条件によらず、 $\gamma$ の増大とともに減少し、組織構造と関係していることを示す。すなわち、小さい $\gamma$ では、細胞壁が薄く、圧縮によって壁が内こう側に折りたたまれるように座屈するため、接線方向へ膨張せず、 $K$ は、大きい値となる。高い $\gamma$ では、そのような変形が生じ難く、ポアソン効果により、接線方向へ膨張し、 $K$ は、低い値となる。 $C$ は、20℃・飽水状態と100℃・飽水状態では、ほぼ同じ値となり、20℃・気乾状態では、それより低い値となる。このことから、 $C$ は、細胞壁の粘弾性に依存せず、細胞壁の座屈に伴う変形のモードに関係すると考えられる。 $C$ は、 $\gamma$ によって、また、横拘束の有無によって、顕著に変化しないようである。

### 残留変形

金属や無定形の線状高分子などの固体に大きな力を加えると、破壊を伴わずに連続的に変形し、力を除くと、変形の一部は、復元しない。この性質を塑性または可塑性、残留する永久変形を塑性変形と言う。力が降伏点を越えると、金属では、結晶の欠陥を介して、結晶面ですべりが生じ、再び原子間に結合が生じて、塑性が現れる。無定形の線状高分子では、分子が流動を起し、塑性が現れる。従来、大変形を与え、木材を任意の形状に変形させる加工を木材の塑性加工と呼んでいる。木材の圧縮加工や曲げ加工がそれである。しかし、木材の大変形は、塑性変形と見做せるであろうか。

20℃・気乾状態において、スギ材 (*Cryptomeria japonica* D.Don) を放射方向に圧縮（実線）と回復（点線）を繰り返した場合の応力-圧縮度図を図2に示す<sup>2)</sup>。1回目に、降伏点以下の応力を加えて、それを除くと、変形①は、完全に回復する。2回目に、降伏点を越えて大きな圧縮度②の変形を与えた後、応力を除くと、かなりの変形が残留する。3回目には、変形は、2回目に与えた圧縮度②まで、徐々に増大しながら、②を過ぎると、横這いになって増大する。以後、4、5、6回目と、圧縮度を増大させながら、圧密域に至るまで負荷と除荷を繰り返していくと、回復後に大きな変形が残留する。圧縮度5%以上になると、残留変形が現れ、圧縮度と残留変形との間に直線関係が認められる。圧縮度60%における残留変形量は、約40%である。しかし、煮沸などの水熱処理を行うと、残留変形のほとんどが回復す

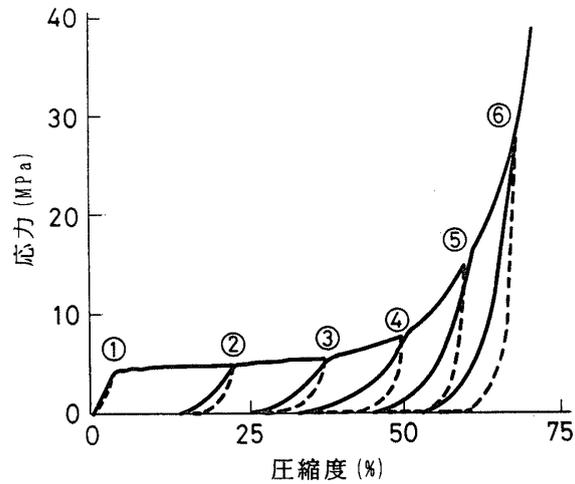


図2 20℃・気乾状態においてスギ材を放射方向に圧縮(実線)と回復(点線)を繰り返した場合の応力-圧縮度図<sup>2)</sup>

る。したがって、この残留変形のほとんどは、永久変形ではない。

100℃・飽水状態において、スギ材を放射方向に圧縮(実線)と回復(点線)を繰り返した場合の応力-圧縮度図を図3に示す<sup>2)</sup>。圧密域に及ぶ圧縮度を与えても、応力を除いた後、変形のほとんどが回復する。残留変形量は、圧縮度とともに増加の割合を増大させながら増大するが、圧縮度が70%に及んでも、

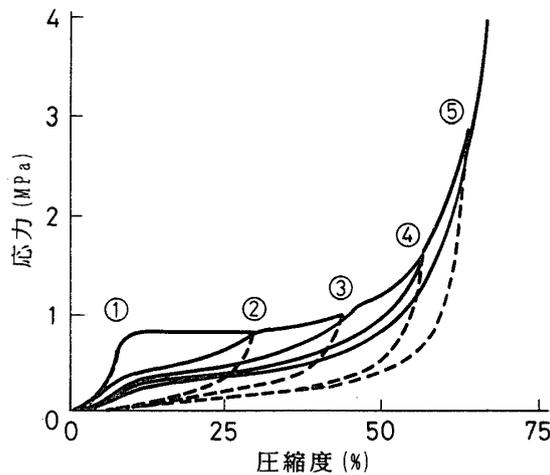


図3 100℃・飽水状態においてスギ材を放射方向に圧縮(実線)と回復(点線)を繰り返した場合の応力-圧縮度図<sup>2)</sup>

残留変形量は、わずか6%程度である。20℃・飽水状態における結果も、これと類似する。したがって、降伏点以上の圧縮応力を与えた時、木材に生じる横圧縮の大変形のほとんどは、金属や線状高分子に見られるような塑性変形ではない。

図4に、横圧縮大変形を与えた木材の細胞の座屈変形と、回復後残留する永久変形の生じる部位を模式的に示す<sup>3)</sup>。大変形によって、細胞壁には、切断や裂け目などの損傷は、全く認められないが、わずかに残留する永久変形は、図中斜線で示す部位に生じる超微細構造における損傷によるものと考えられる。

#### ドライグセット

飽水状態の木材を横圧縮大変形させた後、変形を拘束して乾燥すると、変形は、固定される。この現

則元：木材の横圧縮と加工

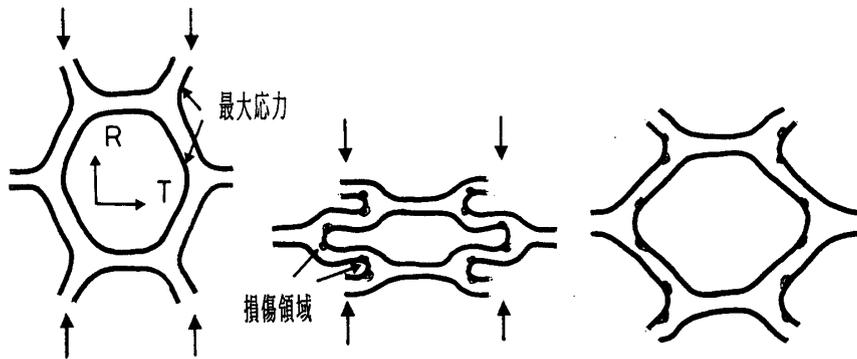


図4 放射方向に圧縮大変形を与えた場合の細胞の座屈後残留する永久変形の生じる部位(模式図)<sup>3)</sup>

象をドラインセット(以下セットと呼ぶ)と言う。この変形の固定は、永久的なものではなく、煮沸などの水熱処理を行うと、変形のほとんどが回復する。写真1には、スギ材を圧縮する前(左)、飽水状態

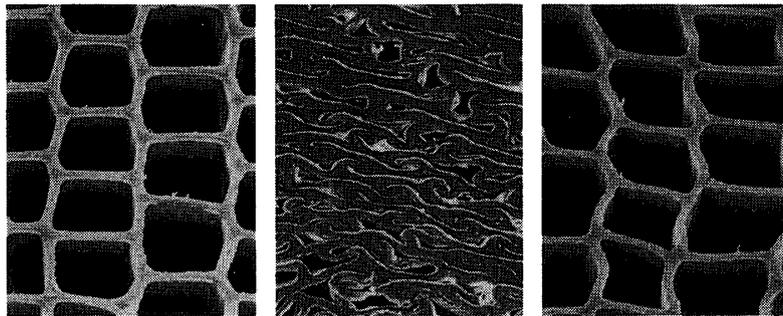


写真1 スギ材を圧縮する前(左)、飽水状態にして圧縮・乾燥後(中央)、煮沸して乾燥後(右)の走査型電子顕微鏡写真<sup>4)</sup>

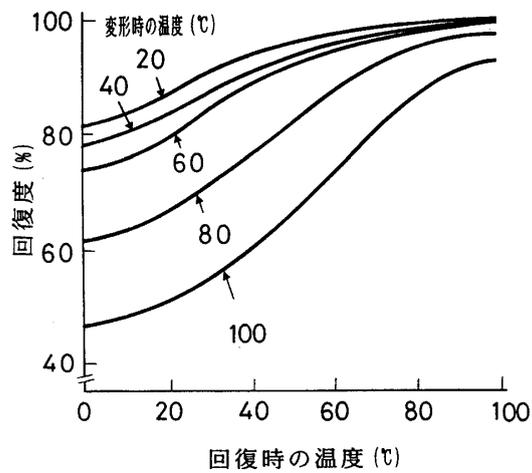


図5 変形の回復と変形を与えた時の温度および回復させた時の温度の関係<sup>2,5)</sup>

態にして圧縮・乾燥後（中央）、煮沸して乾燥後（右）の走査型電子顕微鏡写真を示す<sup>4)</sup>。変形の回復度と変形を与えた時の温度および回復させた時の温度との間には、図5に示すような明確な関係が認められる<sup>2,5)</sup>。ここに、回復度とは、与えた変形量に対する回復した変形量の比を百分率で表したものであり、100%の時、変形が完全に回復したことを、0%の時、変形が完全に固定されたことを示す。飽水状態のスギ材を放射方向に20~100℃の各温度で圧縮・乾燥・固定させたものを、0~100℃の各温度で水熱処理した時の回復度を調べたものであるが、水熱処理温度が圧縮・乾燥・固定させた時の温度に近くなると、回復度が増大する。このことから、木材成分の軟化の程度、すなわち、分子運動の程度が、回復に深く関与していることが伺える。

木材の細胞壁は、複雑な層構造をもつが、基本的には、マイクロフィブリルとマトリックスより構成されている。マイクロフィブリルは、セルロース分子が集合し、結晶した辺長3~4 nmの矩形断面をもつ極めて細長い構造体である。マトリックスは、リグニン分子とヘミセルロース分子より構成される3次元の架橋をもつ無定形の高分子物質であり、マイクロフィブリルの間隙を充填している。マイクロフィブリルは、大部分が結晶しているため、水分子は、その内部には入ることができず、軟化しない。一方、マトリックスは、常温で乾燥した状態では、ガラス状態にあるが、水分を吸収し、温度が高くなると、著しく軟化し、ゴム状態に変化する。マイクロフィブリルは、弾性体と見做すことができ、バネのように変形し、力が除かれると、変形は、完全に回復する。一方、マトリックスは、軟化状態では、粘弾性を示す。しかし、変形しても、分子に架橋が存在するため、流動を示すことはない。したがって、変形には、時間依存性が現れるが、力が除かれると、変形は、エントロピー弾性によって、徐々に回復する。細胞壁が軟化した状態で木材に大変形を与えると、マイクロフィブリルおよびマトリックスは大きく変形するが、いずれも回復する性格をもつので、力が除かれると、変形のほとんどは、回復する。しかし、マイクロフィブリルは、細長い形状をしているため、曲がりや座屈などの変形を生じ、極度に変形した部位では、マトリックスとの界面で、部分的に裂け目が生じたり、マイクロフィブリル自身が部分的に折れたり、マトリックス分子の一部が切断することも考えられる。また、さらに大きなレベルでのラメラの座屈や、ラメラ間での結合の切断が生じることも考えられる。わずかに残留する永久変形や、一度大変形の履歴を受けたものの弾性率の低下は、これらの原因によるものと推定される。

軟化している木材に大変形を与え、変形を拘束して乾燥すると、水分子の離脱に伴って、マトリックス分子は収縮する。マトリックスの分子内、マトリックス分子とマイクロフィブリル表面のセルロース分子間、マイクロフィブリル表面の隣接するセルロース分子間および分子内に水素結合が形成され、マイクロフィブリルおよびマトリックスは、変形した状態で固定される。これがセットの機構である<sup>2,6,7)</sup>。細胞壁が再び水分を吸収すると、変形を固定していた水素結合が切断され、温度の上昇により、マトリックスが軟化すると、マイクロフィブリルに蓄積されていた弾性エネルギーの解放と、マトリックス分子のエントロピー弾性によって、変形は回復する。セットの回復は、このような機構で起こるものと思われる<sup>2,6,7)</sup>。

#### 横圧縮による物性変化

木材を横圧縮し、セットすると、圧縮の程度に応じて、比重や強度的な性質が変化する。図6に、スギ材を放射方向に圧縮したセット材の気乾状態における比重、曲げヤング率、曲げ強度、耐摩耗度、ブリネル硬さと圧縮度の関係を示す<sup>8)</sup>。圧縮度60%まで圧縮すると、比重は、0.4から0.9程度に増大する。比重は、最高1.2程度までに増大させることができる。圧縮度60%で、曲げヤング率および曲げ強度は、無処理材の約2倍に、耐摩耗度は、60%程度に、硬さは、無処理材の4倍以上に増大する。したがって、横圧縮加工により、軟質の木材を、硬質の広葉樹材なみの物性をもつ木材に変えることができる。

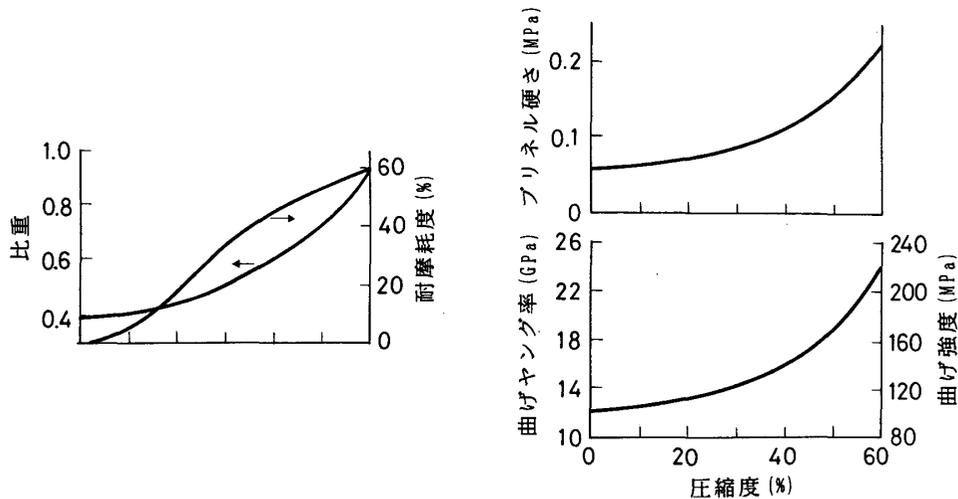


図6 スギ材を放射方向に圧縮したセット材の気乾状態における比重、曲げヤング率、曲げ強度、耐摩耗度、ブルネル硬さと圧縮度の関係<sup>8)</sup>

### 圧縮変形の永久固定

#### 永久固定法

セットの発生と回復の機構を考えると、圧縮変形を永久に固定する方法として、1) 分子間に架橋を形成させる、2) 細胞壁内に樹脂を注入、硬化させて、マトリックスおよびマイクロフィブリルを変形した状態に固定する、3) 変形したマイクロフィブリルやマトリックスに内在している力を緩和させるなどが考えられる。

1) の例として、気相ホルマル化処理<sup>5)</sup>やマレイン酸・グリセリン処理 (MG 処理)<sup>9)</sup>が上げられる。気相ホルマル化処理は、触媒に例えば二酸化イオウなどを用い、140℃でパラホルムアルデヒドにより、木材成分の水酸基間にオキシメチレンの架橋を形成させるもので、短時間の処理により、変形は、完全に固定される。MG 処理では、木材にマレイン酸とグリセリンの水溶液を含浸し、圧縮・加熱して、エステル化により木材成分間に架橋構造を形成させ、変形を固定させる。

2) の例として、低分子フェノールやメラミン樹脂処理が上げられる<sup>10,11)</sup>。分子量300程度の樹脂水溶液を木材に含浸後、放射方向に圧縮し、加熱して樹脂を硬化させて変形を固定する。フェノール樹脂では、濃度15% (重量増加率50%) 以上で、メラミン樹脂では、濃度25% (重量増加率60%) 以上で、変形は、完全に固定される。MG 処理では、架橋の形成と同時に、フェノール樹脂と同様の効果も含まれる。

(3)の例として、熱処理や水蒸気処理がある。

#### 熱処理による変形の固定

##### 1) 熱処理による木材成分の化学変化<sup>12)</sup>

180℃以下の時間単位の熱処理により、セルロースでは、分解と重合が同時に進行し、βセルロースが減少し、αおよびγセルロースが増大する<sup>13)</sup>。ヘミセルロースについても、同様の変化が生じるものと推定される。100~250℃の範囲の木材の熱処理の初期段階で、木材の結晶化度の増加が認められている<sup>14)</sup>。木材の短時間の熱処理によるIR吸収の変化を調べた結果によると、180℃以下では、木材成分の分解によるCOOおよびC=Oに基づく吸収は、認められないが、200℃では、それらの吸収が現れる<sup>15)</sup>。150および180℃でナラ材を24時間処理すると、αセルロース、ヘミセルロース、ペントザンが、それぞれ40.5%から38.9%および29.2%に、23.3%から14.4%および13.6%に、17.5%から15.0%および4.9%に変化する<sup>15)</sup>。160℃でブナ材を1~2日間処理すると、ペントザンやリグニンなどのかなりの減少が

起こる<sup>15)</sup>。熱処理によって、水分に対する木材の寸法安定性が向上するが、この原因は、吸湿性の高いヘミセルロースが吸湿性の低いフルフラールなどに変化するためと考えられている<sup>16)</sup>。

## 2) 熱処理による木材の物性変化

熱処理したスギ材の20℃、60%RHにおける繊維方向の曲げヤングは、180℃の処理では、時間とともに、一旦わずかに上昇した後、20時間後には、約10%低下する。200℃、220℃では、時間とともに減少し、200℃では、10時間後に約15%の低下が、220℃では、7時間後に約60%の低下が起こる。変形が完全に固定される条件での曲げヤング率の低下は、約5%程度である<sup>17,18)</sup>。曲げ強度は、いずれの温度でも、時間とともに急激に減少し、180℃では、20時間後に約40%の低下が、200℃では、10時間後に50%以上の低下が、220℃では、7時間後に約80%の低下が起こる。変形が完全に固定される条件での曲げ強度低下は、約40%程度である<sup>17,18)</sup>。熱処理により、比重の変化は、ほとんどない。硬さ、耐摩耗性は低下し、透湿性、吸湿性は減少し、はっ水性は向上する<sup>19)</sup>。熱処理により、材色は、暗色に変化する。色差の変化は、明度の変化にはほぼ等しく、色度の変化は少ない。熱処理による材色の変化は、ほとんど明度の変化による。圧密材についても、同じ傾向を示す。スギ材では、変形が固定される条件での色差は約30、明度の変化は、-30%程度である。

## 3) 熱処理による変形固定の機構

種々の温度で熱処理した圧縮材の回復度と圧縮していない熱処理材の抗膨潤能 ASE の間には、負の高い相関があり、ASE の増加に伴って、回復度は低下する。ASE が約40%になると、変形は完全に固定される。

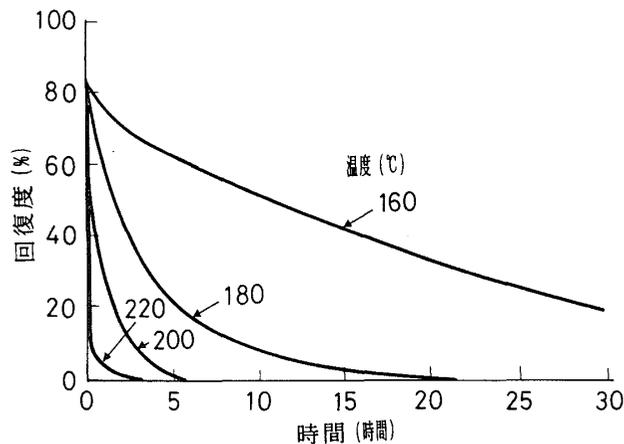


図7 圧縮度51%のスギ圧縮材を熱処理したものの回復度と熱処理時間の関係<sup>17)</sup>

圧縮度51%のスギ圧縮材を160～220℃で熱処理したものの回復度と処理時間の関係を図7に示す<sup>17)</sup>。160℃では、30時間の処理によっても完全な変形の固定は起こらないが、180℃では、20時間の処理で、200℃では、5時間の処理で、220℃では、3時間以内の処理で、変形の完全固定が起こる。

以上の結果を要約すると、160～220℃の熱処理によって、木材の主要成分が一部分解を起こし、それに伴って、マトリックスの構造の弛みや、マイクロフィブリルの切断が生じるものと推定される。一方、分子間に架橋が形成されることも考えられる。しかし、架橋の形成を否定する報告もあり<sup>16)</sup>、また、強度の減少が著しいことから、主として、分子が切断され、マトリックスやマイクロフィブリルに蓄積されていた力が緩和することによって、変形の固定が起こるものと思われる。

## 水蒸気処理による変形の固定

### 1) 水蒸気処理による木材成分の化学変化

## 則元：木材の横圧縮と加工

水蒸気圧力0.6 MPa (温度160℃) 以下の数分の処理では、木材成分の内、主として、ヘミセルロースに、若干の加水分解が生じる。0.6~1.6 MPa (160~200℃) の範囲では、ヘミセルロースの加水分解による低分子化が主体的に進行し、低分子化したヘミセルロースの一部は、水に可溶となる。リグニンおよびセルロースには、顕著な変化は、生じていないようである。Hsu らによる1.55 MPa の水蒸気処理による木材の水可溶および不溶成分の変化についての報告によると<sup>20)</sup>。4分間の処理によって、セルロースや Klason リグニンには、ほとんど変化が現れていない。ヘミセルロースは、比較的減少しているが、単糖の生成量は、わずかである。水可溶成分のほとんどは、加水分解したヘミセルロースと考えられる。2.0 MPa (210℃) の処理では、ヘミセルロースの分解が顕著になり、水可溶のオリゴ糖が増大するが、単糖の量は、わずかである。また、リグニンのアリルエーテル結合の開裂が若干進行する。注目すべきことは、温度が同じでも、水中の処理と、水蒸気処理とで、リグニンの分解生成物が著しく異なることである。水蒸気処理では、アリルエーテル結合のホモリティックな開裂が、水中処理では、加水分解が生じる<sup>21)</sup>。一方、セルロースには、化学構造上の顕著な変化は、起こっていないようであるが、一部加水分解が起こり、マイクロフィブリルが切断されたり、融合したりして、結晶化度や結晶の幅に変化が現れる。2.8 MPa (230℃) の処理では、ヘミセルロースの半分以上が単糖に変化し、リグニンの低分子化が進行し、メタノールに可溶成分が増大する。この段階で、リグニン分子の構造変化が顕著に進行しているものと推定される。また、マイクロフィブリルの結晶の寸法や結晶形に変化が現れる<sup>21)</sup>。木材セルロースの結晶は、セルロース I の結晶であるが、不完全で、I  $\alpha$  (三斜晶：a=0.584nm, b=0.693nm, c=1.036nm,  $\alpha=117\text{deg.}$ ,  $\beta=113\text{deg.}$ ,  $\gamma=83\text{deg.}$ , 空間群 P 1) および I  $\beta$  (単斜晶：a=0.801nm, b=0.817nm, c=1.036nm,  $\gamma=97.3\text{deg.}$ , 空間群 P 2<sub>1</sub>) のいずれの結晶形にもあてはまらないが、水蒸気処理すると、I  $\beta$  の結晶形に変化することが報告されている<sup>22)</sup>。最近の報告によると<sup>23)</sup>、木材セルロースの結晶形は、I  $\beta$  で、準結晶や非結晶の成分が結晶の面間隔を移動させ、結晶形を不明瞭にしているようである。水蒸気処理によって、よりはっきりした I  $\beta$  の結晶形に変化するものと思われる。

### 2) 水蒸気処理による木材の物性変化

水蒸気処理の程度によって、木材の物性にどのような変化が生じるかを知ることは、水蒸気処理を木材の加工に应用する場合に、水蒸気の圧力 (温度) と処理時間を選ぶ上に、重要である。

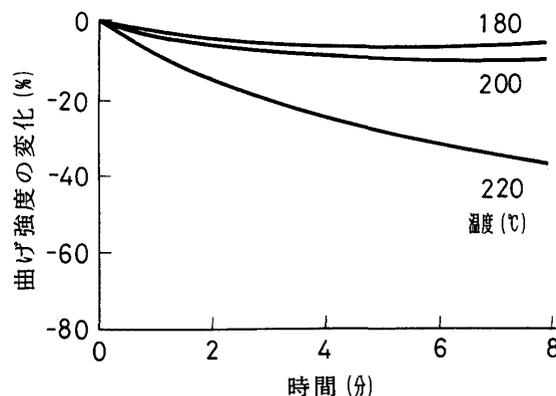


図8 水蒸気処理によるスギ材繊維方向の曲げ強度の変化割合と水蒸気処理温度、時間の関係<sup>18)</sup>

水蒸気処理による木材の繊維方向の曲げ強度の変化割合と水蒸気処理温度、時間の関係を図8に示す<sup>18)</sup>。200℃以下では、8分間までの処理による曲げヤング率および曲げ強度の低下は、わずかである。上

で述べたように、200℃までの処理では、ヘミセルロースの加水分解による重合度低下が主体的に起こり、リグニンの低分子化やセルロースマイクロフィブリルの切断などの顕著な構造変化は、生じていない。木材の繊維方向の強度や弾性を受け持っているのは、主にマイクロフィブリルであり、200℃までの処理によって、強度や弾性率の低下が極めて少ないことから、逆に、マイクロフィブリルの切断などの変化は、余り生じていないことが伺える。220℃になると、曲げ強度の低下は、顕著となり、8分の処理では、無処理木材の強度に比べ、処理材のそれは、40%程度も低下する。上で述べたように、210℃以上になると、ヘミセルロースおよびリグニンの低分子化が顕著になり、230℃になると、ヘミセルロースの単糖への変化や、セルロースマイクロフィブリルの切断や再融合など、木材成分および微細構造に著しい変化が現れる。中間の220℃の温度では、ヘミセルロースおよびリグニンの顕著な低分子化とセルロースの加水分解による結晶の切断や融合などの変化が生じ始めているものと推定され、強度やヤング率の著しい低下からも、このことが伺える。

水蒸気処理によるスギ材の色の変化については、180℃の処理により、色は、若干黄色味を帯び、200℃および220℃では、暗黄色に変化する。明度は、無処理木材で80%であるが、8分間の処理により、180℃で約70%に、200℃で約60%に、220℃で約50%に減少する<sup>18)</sup>。

温度140~220℃で4分間水蒸気処理した木材の水分吸着量の変化を、図9に示す。処理温度が高くなるにつれて、相対湿度60%における吸着量は、徐々に減少する。これは、処理温度が高くなるにつれて、

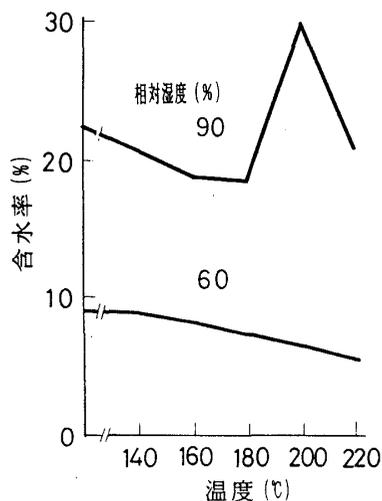


図9 種々の温度で4分間水蒸気処理した木材の相対湿度90%および60%における水分吸着量

ヘミセルロースが低分子化し、溶脱する量が増加するためと考えられる。相対湿度90%では、200℃あたりで、吸着量が著しく増大する。これは、ヘミセルロースの溶脱とリグニンの低分子化によって、マイクロフィブリル間を充填しているマトリックスの構造が弛み、多分子層吸着する水分量が増大するものと思われる。220℃になると、ヘミセルロースの溶脱量が増大、セルロース非結晶領域の結晶化や加水分解による減少によって、吸着量が減少すると思われる。

### 3) 水蒸気処理条件と回復度の関係

飽水状態のスギ材を放射方向に圧縮大変形させた状態で、180℃の水蒸気で処理し、乾燥した場合と、同じ温度の水蒸気で処理後に圧縮、乾燥した場合について、煮沸による変形の回復度と水蒸気処理時間の関係を調べると、水蒸気処理後に変形を与えたものでは、水蒸気処理時間に関係なく、約85%の回復度となる。一方、変形を与えた状態で水蒸気処理したものでは、回復度は、水蒸気処理時間とともに減少し、10分間の処理で、0%となり、変形は、完全に固定される。この結果から、変形固定の効果は、

## 則元：木材の横圧縮と加工

変形を与えて後に水蒸気処理した場合に現れる。すなわち、水蒸気処理によって、変形後の永久変形が増大するような構造変化が木材に生じるのではなく、変形した状態で水蒸気処理した時に、マイクロフィブリルやマトリックスに蓄積されている復元力が消失するか、あるいはそれらを固定する分子間架橋が形成されるかのいずれかによる。

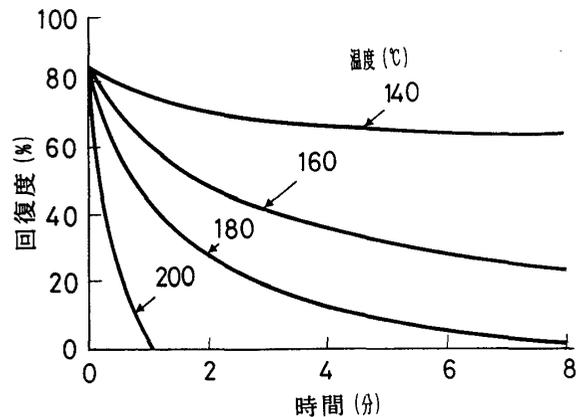


図10 圧縮度51%のスギ圧縮材を水蒸気処理したものの回復度と水蒸気処理時間の関係<sup>18)</sup>

放射方向に圧縮変形を与えた後、水蒸気で処理したスギ圧縮材を、煮沸した時の回復度と水蒸気処理時間の関係を示したのが、図10である<sup>18)</sup>。140℃の処理では、変形固定の効果は、非常に小さい。160℃の処理では、比較的效果が認められるものの、8分間の処理では、変形を完全に固定することはできない。180℃の処理では、効果が顕著に現れ、8分間の処理で、変形は、完全に固定される。200℃の処理では、1分間程度で、変形は、完全に固定される。

### 4) 水蒸気処理による変形固定の機構

ステンレス製の耐圧容器中にプレス機を内蔵する装置を用い、飽水状態の木材を放射方向に所定の圧縮度になるまで圧縮した後、種々の温度の水蒸気を導入し、一定圧縮度を保つに要する力の変化を測定すると、力は、時間とともに緩和する。水蒸気温度が160℃以上になると、力の緩和は、著しくなる。力は、160℃では、3000秒間以内に、完全に緩和してしまうことはないが、180℃では、1000秒間以内に、完全に緩和する。力の緩和の過程で力を除き、煮沸後に圧縮度と回復度を求めると、力の緩和の程度に応じて、回復度の減少が認められる。一方、水蒸気を導入後、一定の大きさの力を時間を変えて負荷すると、負荷する時間が大きくなるにつれて、生じる変形は、著しく増大する。このことから、水蒸気処理による変形の固定は、木材成分分子間での架橋の形成に基づくよりも、分子切断によるものが主体であると推定される。

上に述べたように、180℃、数分間の処理によって、主にヘミセルロースが加水分解する。リグニンには、顕著な重合度の低下は、生じていないようであるが、当然、わずかの分子切断は起こっているものと予想される。一方、木材の強度の低下がほとんど起こらないことから、マイクロフィブリルの切断は、起こっていると看做しても、わずかであると思われる。このことから、変形の固定は、ヘミセルロースと一部のリグニン分子の切断によるマトリックスの網目構造の弛みによって、マトリックス分子に局所的な分子運動が生じ、マトリックスに内在する力の緩和と、マイクロフィブリルの変形の回復が生じることによるものと考えられる。なお、200℃以上で数分間の処理では、マトリックス分子の切断やマイクロフィブリルの切断や融合が起こるので、内在する力は容易に緩和し、変形は固定されるが、強度の低下を伴う。

## 木材の横圧縮加工

### 圧縮木材

スギなどの軟質の木材を床、壁などの内装材料や家具材料に利用するには、表面の硬さや耐摩耗性が問題となる。これらを向上させるには、圧縮することが有効である。また、圧縮することにより、早材部の比重が増大するので、材質が均質化される。

木材を横圧縮する場合、多くの水分を含ませ、温度を上げて、木材を十分に軟化させることが有利と考えられがちである。確かに、小さな力で大きな変形を与え得るが、圧縮の過程で、木材中の水が容易に外に押し出されず、水が圧縮されて生じる内圧や、高温で乾燥する過程で、内部の水分が水蒸気に変化することにより生じる圧力で、木材が裂けることが多い。そのため、含水率を12%程度に調整することが有効である。

プレス機によって、製材を厚さ方向に圧縮したまま熱処理すると、硬くて強く、美しい圧縮木材が得られる。既に述べたように、例えば、180℃の温度では、数時間以上の熱処理が必要である。生産性を向上させ、同時に生産コストを下げるためには、変形が一時的に固定するのに必要な短時間だけ圧縮し、後に熱処理することが有効である。

圧縮の程度によって、比重や硬さを調節することができる。圧縮木材は、家具、調度品、工芸品などの部材として利用できる。写真2は、スギの圧縮木材で製作した机を示す。



写真2 スギの圧縮木材で製作した机  
(京都府林業試験場提供)

製材に低分子量のフェノール樹脂やメラミン樹脂の水溶液を含浸させた後、圧縮・硬化しても、圧縮木材が得られる。また、製材の長さ方向と直角に、所定の幅と深さの溝を適当な間隔で入れ、その溝を通して、低分子樹脂の低濃度水溶液を溝の深さまで均一に含浸し、それにマイクロ波を照射して、樹脂含浸層を選択的に軟化した後、圧縮・加熱すると、製材の表層だけが圧密された木材が得られる。溝に埋め木をしたり、繊維の方向に対し傾斜した溝を切ると、圧縮後に溝は消失する。これは、床や家具の天板部材として利用できる<sup>24)</sup>。写真3は、フェノール樹脂を用いた表面圧密木材の床材料を示す。

単板に樹脂を含浸し、圧縮・硬化したものを、製材、合板、繊維板などの台板の表面に積層しても、同様のものが得られる。単板に低分子フェノール樹脂を含浸したものを繊維の方向をそろえて、接着剤塗布後に積層し、圧縮・硬化させると、強化単板積層材が得られる。これは、強度的性質に優れていて、建築部材、台所用品、機械部材、装飾、工芸品などに利用できる。

## 則元：木材の横圧縮と加工

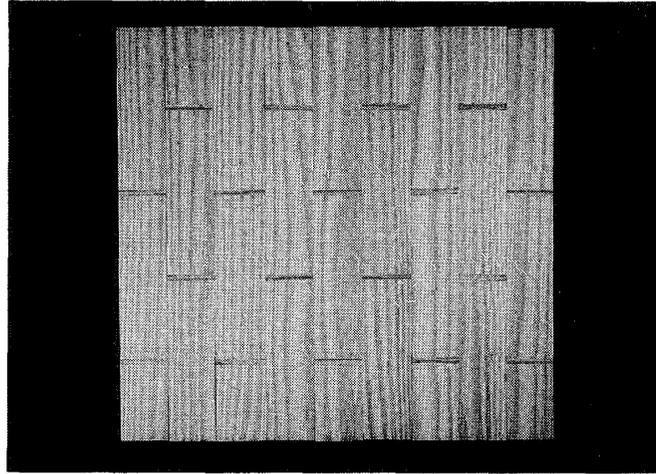


写真3 フェノール樹脂を用いた表面圧密木材の床材料  
(和歌山県林業技術センター提供)

### 成形木材

スギなどの生丸太に、マイクロ波を照射し、十分軟化させた後、それを四方から圧縮して角柱に成形し、冷却した後に熱処理すると、写真4に示すような成形木材が得られる<sup>26)</sup>。皮つき丸太を圧縮すると、人工シボ丸太が得られる。

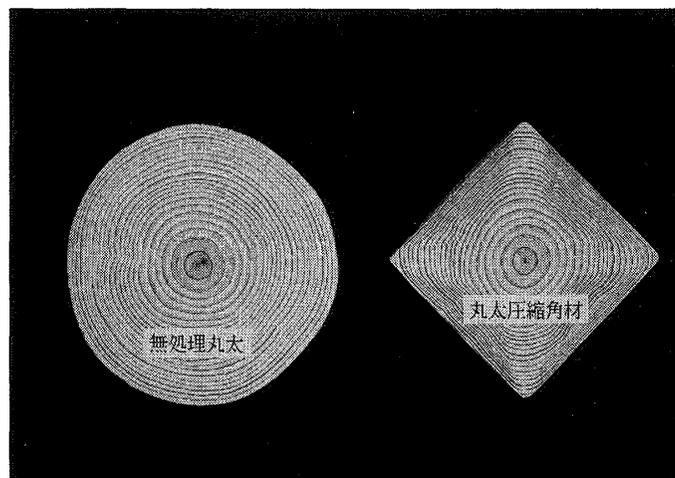


写真4 スギ丸太の角材への成形

スギ製材にマイクロ波を照射した後、それを凹凸のついたローラーに通すと、早材部が潰れて、製材の表面に凹凸が加飾される。これは、塗装して壁や床材料に利用できる。

一方、プレス機を内蔵する高圧シリンダー内で、丸太を水蒸気処理する過程で圧縮すると、短時間で変形が永久に固定した写真4と同様の成形木材が得られる。

### 水蒸気固定木材

適当な量の水分を含むスギの製材や単板を、冷却機能を備えた、側面がシールできるプレス機を用い、圧縮しながら、例えば、180℃で数分間加熱すると、木材中の水分は水蒸気となるが、側面がシールされているために、外部に出ることができず、木材は、高温の水蒸気で処理され、変形は、永久に固定される<sup>25)</sup>。処理前後で含水率は変わらず、材色もほとんど変化しない。

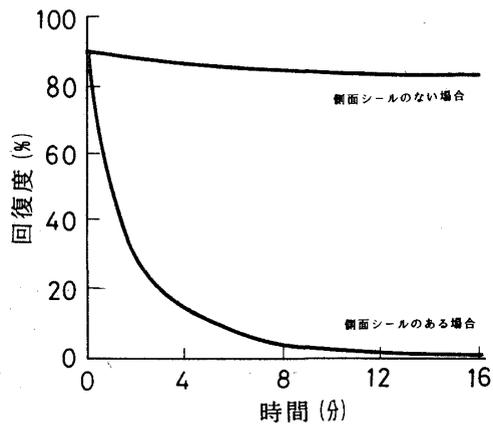


図11 側面シールがある場合とない場合について180℃での圧縮加工スギ材を煮沸処理した時の回復度と熱圧時間の関係<sup>25)</sup>

図11に、側面シールがある場合とない場合について180℃での圧縮加工スギ材を煮沸処理した時の回復度と熱圧時間の関係を示す<sup>25)</sup>。シールがある場合には、約8分間で変形が完全に固定されるのに対し、シールがない単なる熱処理では、このような短時間では、変形は、ほとんど固定されない。また、木材の初期含水率は、回復度に大きく影響し、数%以下だと、回復度は、大きくなるので、少なくとも含水率約12%以上の水分が必要である。

処理した圧縮単板を、合板や繊維板などの台板の表面に積層した床材料が開発されている。写真5は、スギの圧縮単板を合板の上に積層した床材料である。

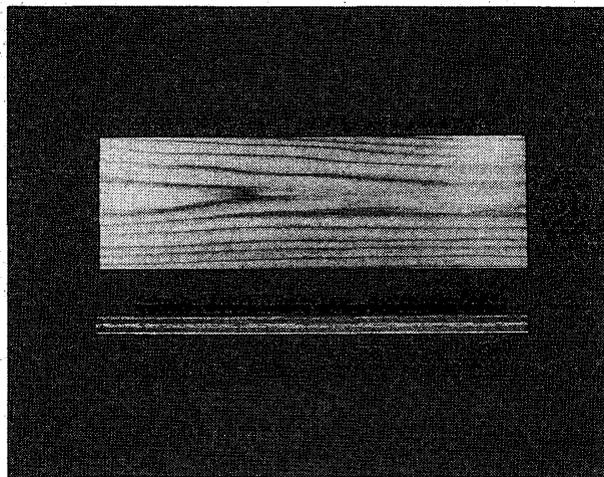


写真5 スギの圧縮単板を積層した床材料  
(永大産業(株)提供)

## 結 言

世界的な人口の増加が、食料危機、エネルギー危機、環境汚染などをもたらしつつある。このような状況にあって、森林の荒廃を防ぎ、森林を健全な状態に維持しつつ、合理的に木材を利用していくことが、極めて重要である。そのためには、木材の諸性能を高めて、木材の使用期間を延長させたり、工場

## 則元：木材の横圧縮と加工

残廢木材や未利用木材を有効に利用したり，使用後の廢木材を再度利用する技術の開発やシステムの確立などが不可欠と考えられる。ここに示した木材の横圧縮加工が，スギなどの軟質の針葉樹材や，ポプラ，ヤナギ，ファルカーターなどの早生広葉樹材の新しい有効利用に役に立てば幸いである。

## 文 献

- 1) 劉 一星, 則元 京, 師岡淳郎: 木材学会誌, 39(10), 1140-1145 (1993)
- 2) 則元 京: 木材学会誌, 39(8), 867-874 (1993)
- 3) J.Gril and M.Norimoto: Proc. COST 508 Wood Mechanics Workshop on Wood: Plasticity and Damage, Ireland, 135-144 (1993)
- 4) 井上雅文, 青木 務, 額川五郎: 木材研究・資料, No.28, 59-71 (1992)
- 5) M.Inoue, T.Morooka, M.Norimoto, R.M.Rowell and G.Egawa: New Zealand FRI Bull., No.176, 181-189 (1992)
- 6) M.Norimoto and J.Gril: J. Microwave Power and Electromagnetic Energy, 36(11), 969-975 (1989)
- 7) 則元 京: 化学と教育, 39(2), 170-174 (1991)
- 8) 井上雅文: “木材の横圧縮大変形の永久固定”, 京都大学学位論文, (1993)
- 9) H.Fujimoto: New Zealand FRI Bull., No.176, 87-96 (1992)
- 10) 井上雅文, 則元 京, 大塚康史, 山田 正: 木材学会誌, 37(3), 227-233 (1991)
- 11) M.Inoue, S.Ogata, S.Kawai, R.M.Rowell and M.Norimoto: Wood and Fiber Sci., 25(4), 404-410 (1993)
- 12) M.Norimoto, C.Ota, H.Akitsu and T.Yamada: Wood Research, No.79, 23-33 (1993)
- 13) 栗山 旭: 材料, 16(169), 772-776 (1967)
- 14) N.Hirai, N.Sobue and I. Asano: Mokuzai Gakkaishi, 18(11), 535-542 (1972)
- 15) 今村博之 外5名: “木材利用の化学”, 共立出版, p23-40 (1983)
- 16) A.J.Stamm: “Wood and Cellulose Science”, The Ronald Press Company, p317-320 (1964)
- 17) 井上雅文, 則元 京: 木材研究・資料, No.27, 31-40 (1991)
- 18) M.Inoue, M.Norimoto, M.Tanahashi and R.M.Rowell: Wood and Fiber Sci., 25(3), 224-235 (1993)
- 19) R.M.Rowell and P.Konkol: FPL-GTR-515, 1-12 (1987)
- 20) H.E.Hsu, W.Schwald, J.Schwald and J.A.Shields: Wood Sci. Technol., 22, 281-289 (1988)
- 21) M.Tanahashi: Wood Research, No.77, 49-117 (1990)
- 22) M.Tanahashi, T.Goto, F.Horii, A.Hirai and T.Higuchi: Mokuzai Gakkaishi, 35(7), 654-662 (1989)
- 23) M.Wada, J.Sugiyama and T.Okano: Mokuzai Gakkaishi, 40(1), 50-56 (1994)
- 24) 日本材料学会編: “先端材料の基礎知識”, オーム社, p109-118 (1991)
- 25) 井上雅文, 門河倫子, 西尾治郎, 則元 京: 木材研究・資料, No.29, 54-61 (1993)
- 26) 越島哲夫編: “マイクロ波加熱技術集成”, NTS, p196-209 (1994)