

# 木材の加工とセット

信州大学農学部 徳本守彦

## 1 はじめに

木材の収縮率は引張応力下で小さく、圧縮応力下で大きくなる。すなわち乾燥の過程で木材の変形性能が高まり、応力に応じて伸びたり、縮んだりする。こうして生じた変形が乾燥によって固定されることをドライグセットという。また、軟化した木材に曲げ変形を与え、拘束乾燥によって変形を固定する曲げ木は典型的なドライグセットの応用例である。

生材状態では、木部は常に繊維飽和点以上であり、従って寸法変化のない安定した状態にある。新しい木部細胞は湿潤な状態で作られるため、細胞壁の構造は湿潤な状態にふさわしく設計されている。一方、我々は乾いた木材を利用しているが、どうも木材は乾燥状態にすべてが都合よく設計されていない。巨視的、光学顕微鏡的、さらに電子顕微鏡レベルのいずれにおいても異方的で不均質な木材が、ときに伸びたり、縮んだりして折り合いをつける「セット」という性質を持ち合わせなければ、木材は乾燥によってひび割れただけでつかいものにならなかったであろう。

## 2 熱軟化

木材が熱軟化することは曲げ木をとおして古くから知られていたが、その仕組みが詳細に明らかにされたのは、比較的最近のことである。図-1 はリグニンを除去すると、温度を高めても相対弾性率の変化がきわめて小さく、 $\tan \delta$  の分散が消滅し、熱軟化が発現しないことを示す。

木材が熱軟化することは木材が持つ高分子性のひとつの証でもある。高分子物体は、低温では硬いガラス状態にあるが、加熱によってある温度域を越えると非常に可塑的

になって、いわゆるゴム状態、すなわち小さな応力で大きく変形し、力を除くと容易に元に戻るようになる。このように高分子材料がガラス状態からゴム状態に移る温度を軟化点(Tg)と呼んでいる。

木材を水中浸漬したまま熱軟化点以上から室温付近まで急冷すると、強さや弾性率が20~30%も減少することが明らかになった(図-2参照)。また、水と熱で軟化した状態で変形を固定したまま冷却すると、かなりの残留変形(クーリングセット)が生じる。これも木材の高分子性の現れである。

## 3 水分非平衡状態のクリープ

応力下で木材の含水率が変化するとき、含水率一定状態の挙動からは予測できない、異常に大きな変形(mechano-sorptive creep)が生ずる。1960年代から現在まで多くの研究がなされ、いくつかの説明がなされてきた。代表的な説は以下のとおりである。

- 1) 水素結合説<sup>3)</sup>: 吸脱湿による水素結合の切断と再形成の間に構造が一時的にゆるむ。
- 2) 空孔理論<sup>4)</sup>: 水分子が脱着した後に一時的に空孔が生成し、これが変形を促進する。

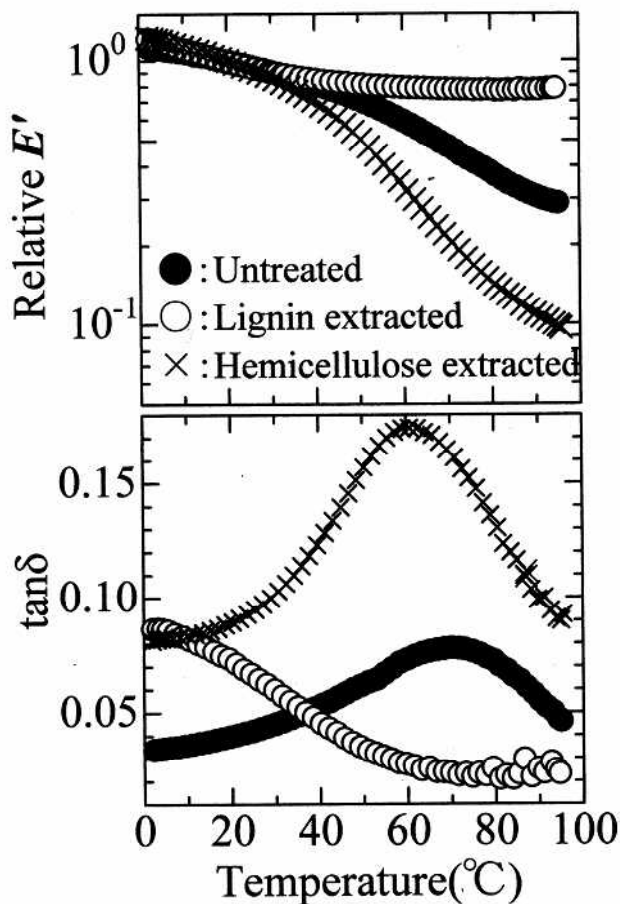


図-1 .脱リグニン処理及び脱ヘミセルロース処理したカツラ材の相対ヤング率と  $\tan \delta$  の温度依存性(相対ヤング率は20の測定値に対する相対値、測定周波数0.05Hz)<sup>1)</sup>

3) 高次構造説 : 細胞壁層間の滑り<sup>5)</sup>、滑り面の形成<sup>6)</sup>、マイクロフィブリルとマトリックスの相互作用<sup>7)</sup>など木材の細胞壁構造に原因を求める説。

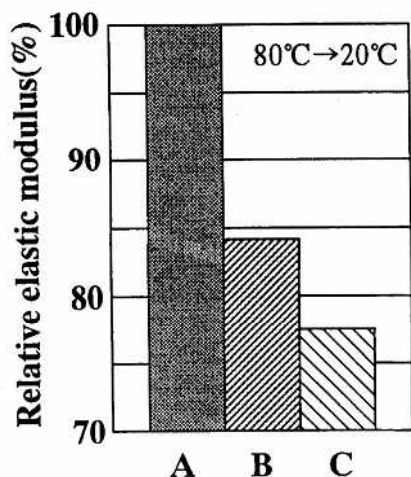


図-2 水中で 80 から 20 へ冷却した時の曲げヤング率の変化<sup>2)</sup>

A:長時間 20 で保持されたコントロール  
B: 緩やかに冷却  
C: 急冷

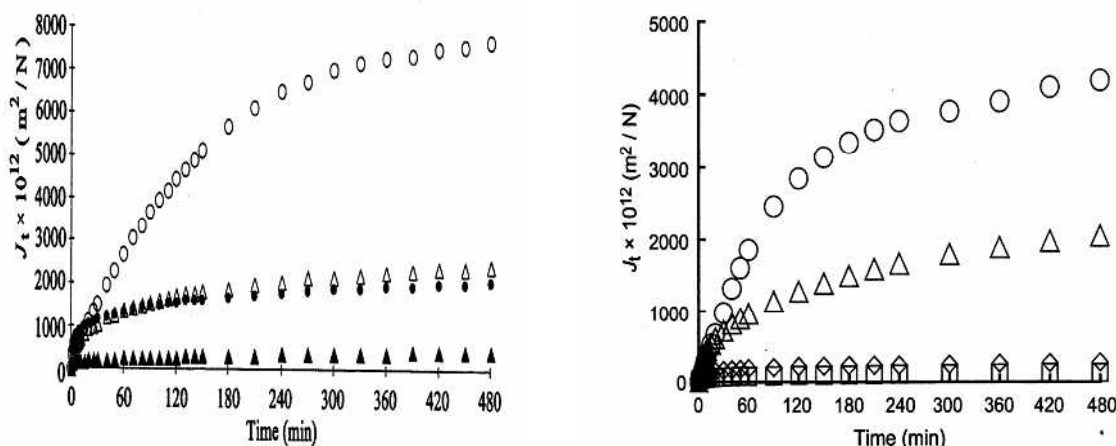


図-3 . 含水率が変化する過程のクリープ、含水率変化終了直後のクリープ、そして水分平衡状態にある木材のクリープの比較<sup>9)</sup> 右図:上の曲線から乾燥過程(○) 乾燥直後(△) 高湿度側の水分平衡状態(◇) 低湿度側の水分平衡状態(□) 右図:上の曲線から吸湿過程(○) 吸湿直後(△) 高湿度側の水分平衡状態、(◇) 低湿度側の水分平衡状態(□) .

4) 高分子材料の物理的エージング類似の機構<sup>8)</sup>: 熱軟化点以上に加熱された状態から急冷すると、高分子物体は外周と熱的平衡になるが、熱力学的には不安定な状態にあり、より安定な状態へと徐々に高分子鎖のコンフォーメーション(立体配座)が変化する。

最近、乾燥直後の木材が顕著なクリープ(乾燥過程のクリープほどではないが、水分平衡状態のクリープより明らかに大きい)を示すことが明らかにされた(図-3 参照)<sup>9)</sup>。木材のメカノソープティブクリープを、高分子材料の物理的エージング類似の現象として捉え、その原因を含水率変化による細胞壁構造の分子レベルでの不安定化によるものと説明し、無応力のもとでの乾燥直後にも不安定性が残留し(熱力学的平衡からはずれた状態におかれ)、これによって乾燥直後の木材のクリープが顕著に現れたと説明されている。

なお、吸脱湿繰り返し過程のクリープもセットと深くかわり、脱湿過程のみならず吸湿過程でもセットを生じ、これがサイクルとともに蓄積していくと考えられている。

#### 4 曲げ木と圧縮木材

水と熱によって木材を軟化した状態で曲げる、あるいは放射方向に圧縮し、生じた変形を拘束し乾燥すると、ドラインセットを生じた曲げ木や圧縮木材が得られる。ただし、再び水分と熱を加えると、肉眼的に無傷で、ほぼ元の状態まで復元することから、木材は一種の記憶材料であることがわかる。そ

ここで、発生した圧縮大変形を固定化する工夫が検討され、針葉樹材表面の圧密化、小径丸太の角材への成形、木材の新しい接合、さらには家具・工芸品などへ横圧縮大変形の応用が広がりにつつある。

### 5 高温高压水蒸気処理

木材成分の分解法として爆砕法が知られていたが、200 近い高温状態で水蒸気処理すると、木材の整形・固定処理が可能となり、しかも整形された木材は、過去の記憶を失って、以後あたかもそこで生まれ変わったかのごとく挙動する。この高温高压水蒸気処理によって、新しくつくられた形は、以後の吸湿・吸水によって回復することがない。

高压水蒸気処理によって細胞壁構成成分であるヘミセルロースやリグニンは軟化し、急速に低分子化する。一方セルロースは結晶性であるので、その内部まで水蒸気が浸透できず、非結晶域でのみ部分的な切断が起こるとともに再結晶化が生じ、結晶化度及びマイクロフィブリル幅が増加する。さらに結晶は含水状態で高温にさらされるため結晶形態が型から 型へ変換する。

注目すべきは、高温高压水蒸気処理によるドラインセットの固定であって、図-4 に示すように、180 で8分間、200 で1分間という短時間で達成され、物性的な変化はわずかにすぎない。一方、通常の加熱処理によって変形を完全に固定するためには、180 で20時間、200 で5時間必要であり、この場合の物性変化を無視できない。

最近では、高温高压水蒸気雰囲気のもとでの無背割り正角材の乾燥、高温乾燥後の加圧水蒸気によるコンディショニング等が検討されている。

### 6 高温セット法

通常の板材の乾燥では、初期の表層の引張応力を小さく押さえるために、初期条件を緩やかにすること、すなわち「低温高湿」を原則とした。

かつて、心持ち柱材の場合、乾燥のごく初期は別として、後半になると放射方向と接線方向の宿命的な収縮率の差に起因して、表層の引張応力は増大する方向となり、操作的にこれを防止することは困難であると考えられた。しかし、乾燥初期は「低温・

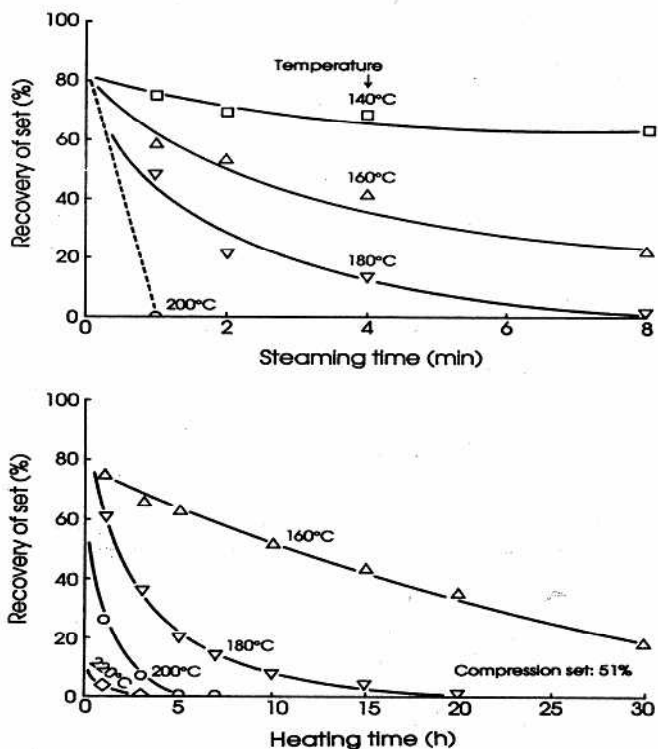


図-4 圧縮セットの水分回復に及ぼす高温高压水蒸気処理(上図)及び加熱処理(下図)の影響<sup>10)</sup>

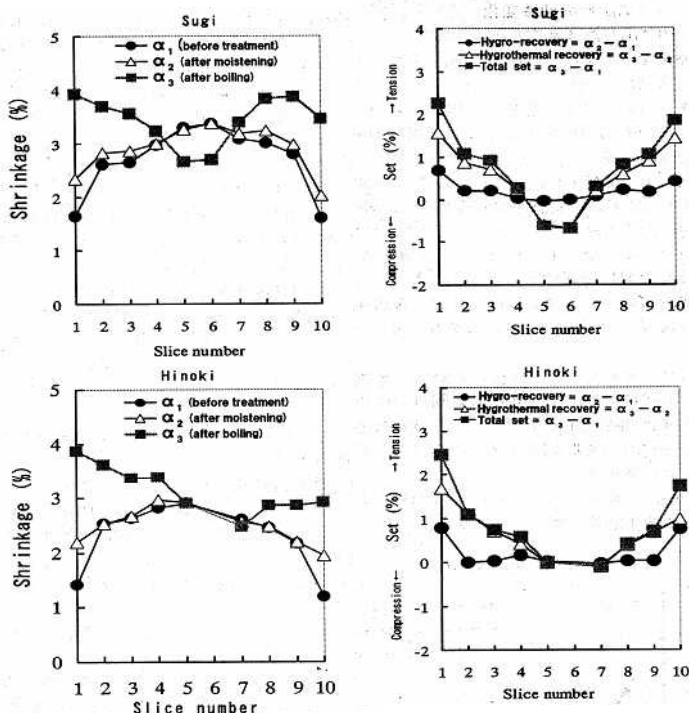


図-5 高温セット法で乾燥したスギ及びヒノキ正角材内から切り出したスライス各層の収縮率及びセット<sup>12)</sup>

高湿」という常識に反し、心持ち正角材に対して乾燥初期に過激とも言える「高温・低湿」処理を施すことによって、表面割れを生じることなく、短時間で心持ち正角材を乾燥することが可能となった<sup>11)</sup>。

乾燥後の正角材から切り出したスライス試片を用いて、室内放置後、水中浸漬後、そして煮沸処理後の気乾状態における収縮率の差から、水分回復性のセット、湿熱回復性のセット、そして両者の和として総セット量を測定した。その結果を図-5に示している。表層には2%を越す引張セットが存在し、湿熱回復性セットの占める割合が高い。

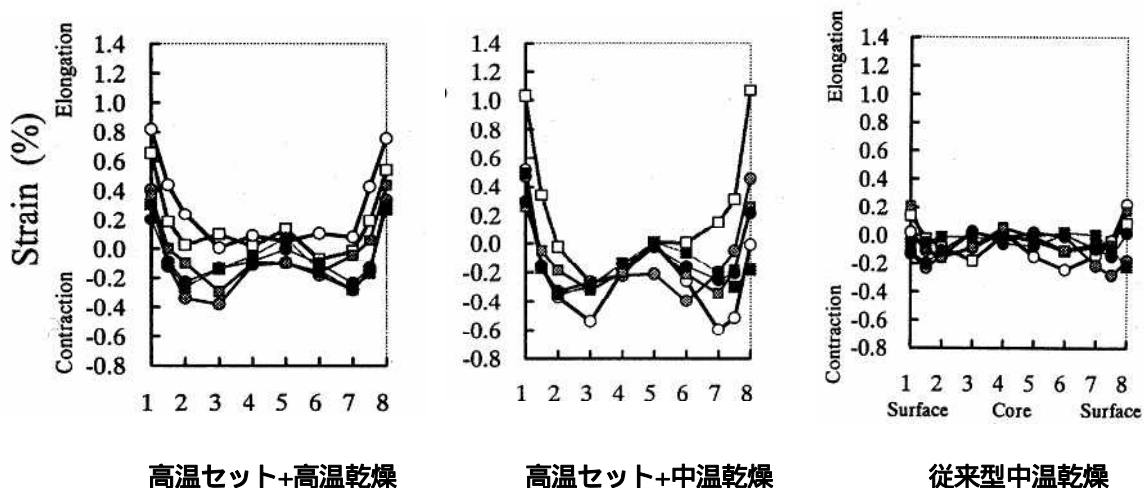


図-6 高温セット法で乾燥した正角材内の内部応力(指標として解放ひずみを用いた)<sup>13)</sup>

この結果から、通常の使用条件のもとでは表層の引張セットが長期にわたって保たれて、表面割れの危険は少ないと考えられた。

ピン打ちスライス法で求めた高温セット法で乾燥した正角材の内部応力を、従来型の中温乾燥材と比較すると図-6の通りである。従来型の中温乾燥材の表層の圧縮応力は著しく小さいのに対して、高温セット法で乾燥した正角材の表層部にはかなり強い圧縮応力が存在する。

なお、「高温セット+高温乾燥」材に比較し、「高温セット+中温乾燥」材表層の圧縮応力が大きい。高温セット処理後に高温乾燥を続けると内部割れが発生しやすく、これが内部応力を緩和させている可能性が高い。

高温セット法で乾燥した正角材の内部応力に及ぼす保管方法の相違を検討した結果を図-7に示す。約6年間屋内で保

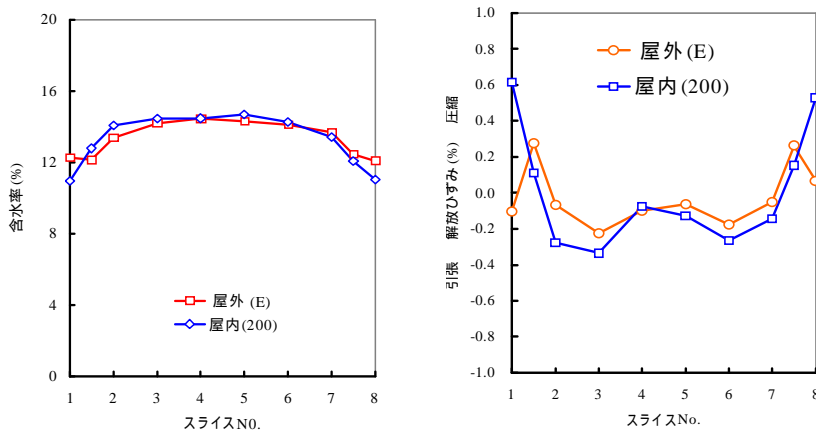


図-7 高温セット法で乾燥後約6～7年間屋内及び屋外保管されたスギ正角材内の含水率と内部応力<sup>14)</sup>

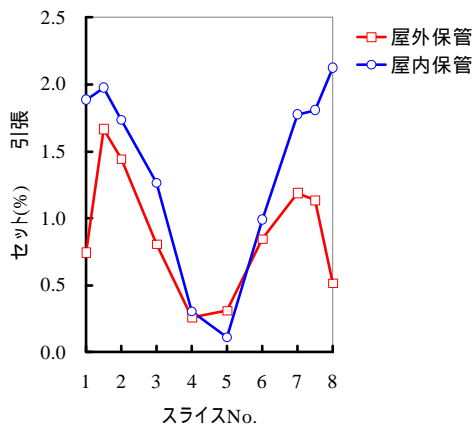


図-8 屋内保管材と屋外保管材のセット分布の比較<sup>14)</sup>

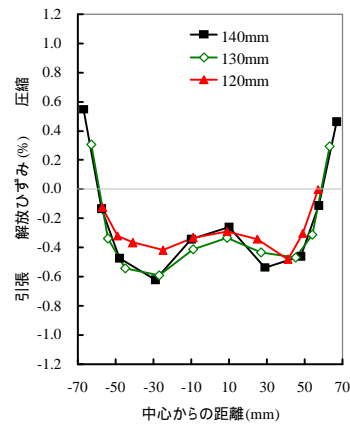


図-9 カラマツ正角材の挽き直しに伴う内部応力の変化<sup>15)</sup>

管した屋内保管材では表層の圧縮応力が依然として健在である。しかし、約7年間にわたり屋外で波板で覆った棧積み状態で保管した屋外保管材では表層の圧縮応力が明らかな減少を示した。ときに風雨にさらされ、長期間にわたる乾湿繰り返しを受けて表層のセットが見かけの上で減少したと推定される。表層部の引張セットの部分的な回復あるいは新たな圧縮セットの発生などが考えられる。

この点を確認するために、内部応力測定後のスライス試片を用いて、煮沸処理前後の全乾状態における収縮率の差から求めた材内のセットの分布を比較した。図-8に示す様に、屋内保管材では図-5と同様に表層に引張セットの最大値を示すV字型のセット分布が認められるのに対して、屋外保管材では表層のセットの明らかな減少が確認された。

高温セット法で乾燥したカラマツやヒバでは乾燥後に顕著なねじれを生ずるため、20mmにも及ぶ強度の挽き直しが行われている。このような挽き直しによって、表層に形成された引張セット層が削り取られ、表層の圧縮応力が大きく減少し、高温セット法の特徴が失われ、使用条件下で材面割れが発生することが懸念される。そこで、高温セット法で乾燥したカラマツ正角材の内部応力に及ぼす挽き直しの影響を検討した結果を図-9に示す。はじめの断面寸法140mmから130mmへの挽き直しの影響はあまり大きくないが、最終的に120mmに仕上げると、表層の圧縮応力は顕著に減少した。それでも、まだ応力状態に留まっている。

図-10は挽き直し前の正角材の解放ひずみ測定に用いたスライス試験片の全乾状態のピン間距離の煮沸処理前後の差から求めたセットの分布を示す。表層には3%を越す引張セットが形成されていることがわかる。挽き直しはこの部分をけずりとり、結果として正角材内の表層と内層のセットの差を縮める。従って、強度の挽き直しは、高温セット法特有の表層の圧縮応力の顕著な減少を引き起し、以後の材面割れ発生懸念を残す結果となった。

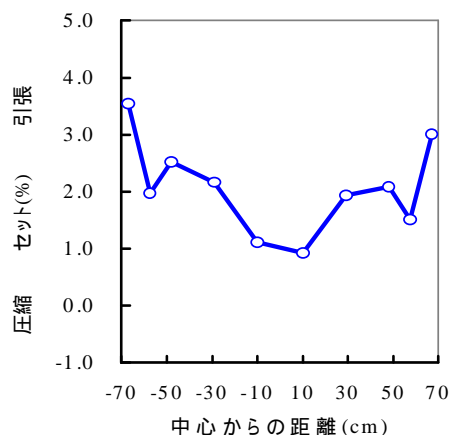


図-10 修正挽き前のカラマツ正角材内のセットの分布<sup>15)</sup>

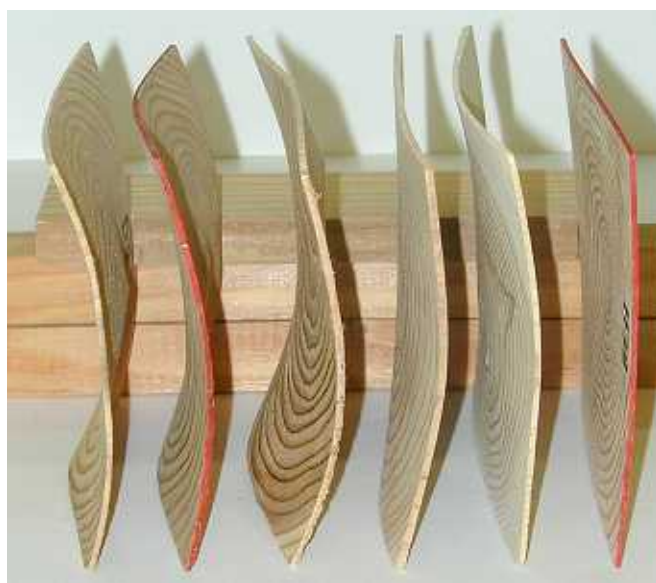


図-11 高温セット法で乾燥した正角材から切り出したスライスセクションの変形  
右端が従来型中温乾燥材、その他5枚は高温セット法で乾燥した材から切り出したもの。

## 《引用文献》

- 1) 古田裕三、中嶋聖充、中谷丈史、神代圭輔、石丸 優:材料、**57**,344-349(2008)
- 2) 工藤充康、飯田生穂、石丸 優、古田裕三:木材学会誌,**49**,253-259(2003)
- 3) Gibson,E.J.:Nature,**206**,213-215,1965.
- 4) 竹村富男:木材学会誌 **14**, 406-410,1968.
- 5) Mukudai,j.,Yata,S.: Wood Sci.Technol.,**20**,335-348,1986.
- 6) Hoffmeyew,P.,Dvidson,R.W.:WoodSci.Technol.,**23**,215-227,1989.
- 7) Boyd,J.: "New Perspective in Wood Anatomy",Nijoff/Junk(Hague), 171-222,1982.
- 8) Hunt,D.,Gril,J.:J.Materials Sci.Letters,**15**,80-82,1996.
- 9) Takahashi,C., Ishimaru,Y.,Iida,I.,Furuta,Y.:Holzforschung,**58**,261-267,2004.
- 10) M.Inoue,M.Norimoto,M.Tanahashi,R.Rowell:Wood and Fiber Science,25,224-235,1993
- 11) 吉田孝久、橋爪丈夫、藤本登留:木材工業 ,**55**,357,2000
- 12) 徳本守彦、穂苅謙一、武田孝志、安江 恒、吉田孝久、材料,**53**,370-375,2004.
- 13) 徳本守彦、武田孝志、吉田孝久: 材料,**54**,365-370,2005.
- 14) 徳本守彦、北原 誠、武田孝志、吉田孝久: 2008 年度日本木材学会中部支部大会講演要旨集,48-49,2008.
- 15) 徳本守彦、北原 誠、武田孝志、吉田孝久、松元 浩: 2008 年度日本木材学会中部支部大会講演要集,48-49,2008.