

# 木材の横圧縮による高ダンピング特性発現機構の解明とその応用

筑波大学 生命環境科学研究科 小幡谷英一  
秋田県立大学 木材高度加工研究所 足立幸司

## 1. 緒言

木材は、軽さと強さを兼ね備えた優れた材料であり、住宅や家具、食器などに幅広く用いられている。ただ、引張に対する破壊歪が小さいため、大きく曲げることができない。もし、大きく曲げることができ、かつ弾力性や靱性の高い材料を、木材のみから作ることが出来れば、柔軟な木製家具や、衝撃吸収能の高い木質構造部材など、木材の新たな用途を拓くことができる。

木材はセル構造体であるため、放射 (R) 方向に大きく圧縮することができる。そして、圧縮され、折りたたまれた細胞壁は、R 方向のさらなる圧縮に対して柔らかく弾性的に振舞う<sup>1)</sup>。圧縮木材の高強度、高硬度に注目した研究は多いが<sup>2-4)</sup>、圧縮木材 R 方向の物性<sup>5)</sup>や、その応用<sup>6)</sup>に関する研究は少ない。また、圧縮木材の可撓性 (軟らかさ) を活かした用途が種々提案されているもの<sup>7)</sup>、その弾性 (軟らかさ) や、特異なダンピング特性については不明な点が多い。

本研究ではまず、長手方向が圧縮方向となるような圧縮木材の梁 (Beam compressed in radial direction, CR) および CR の引張側を圧縮木材の繊維 (L) 方向で補強した圧縮複合梁 (CR+L) について、曲げ弾性、曲げ破壊強度、クリープ特性等を明らかにした。次に、CR の著しく高い損失正接について、圧縮率依存性や樹種依存性を明らかにするとともに、水蒸気処理によって CR の形状を固定した場合の物性の変化から、圧縮による高ダンピング特性発現機構を明らかにした。さらに、圧縮木材の圧縮弾性や高ダンピング特性を活かした用途を検討した。

## 2. 圧縮材の圧縮弾性と圧縮梁の曲げ特性<sup>1)</sup>

ここではまず、R 方向に圧縮したスギ材 R 方向の圧縮弾性について述べる。図 2-1 に、スギの未圧縮材および圧縮材 (圧縮率 50%) R 方向の圧縮応力-歪線図を示す。未圧縮材は、1 回目の圧縮によって塑性的に変形し、与えた歪の多くが残留するが、圧縮材の場合、10%の歪を与えても変形が残らない。

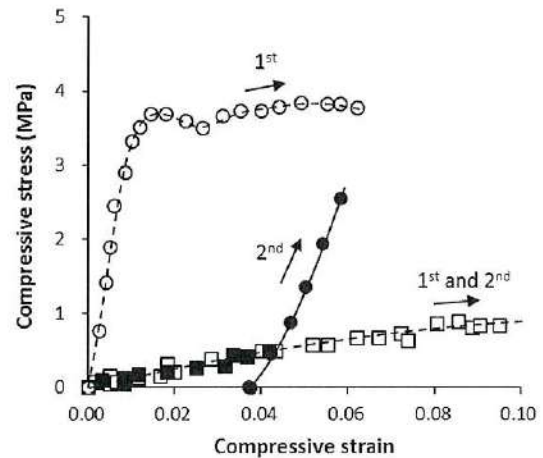


図 2-1 スギ未圧縮材 (○、●) および圧縮材 (□、■) の圧縮応力-歪線図

白抜きは 1 回目、黒塗りは 2 回目の圧縮を表す。

残留歪と初期歪の関係を図 2-2 に示す。圧縮材は残留歪が生じる初期歪が大きく、圧縮によって、弾性域が著しく拡大することがわかる。圧縮木材の圧縮弾性を活かすには、圧縮木材の放射方向が常に圧縮されるのが望ましい。本研究では、梁の圧縮側に CR を、引張側に CL を配置した複合梁について曲げ特性を測定した。試料の構造、形状を図 2-3 に示す。

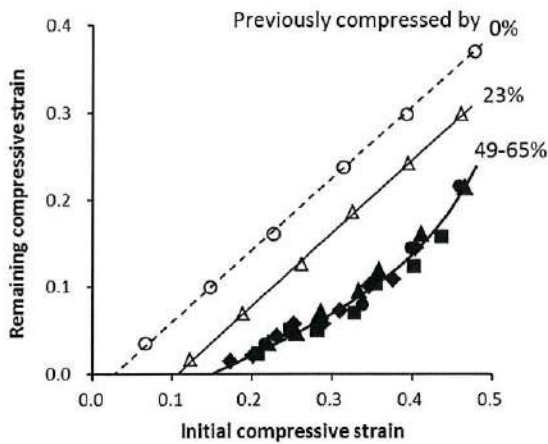


図 2-2 スギ材放射方向を圧縮した時の残留歪と初期歪の関係

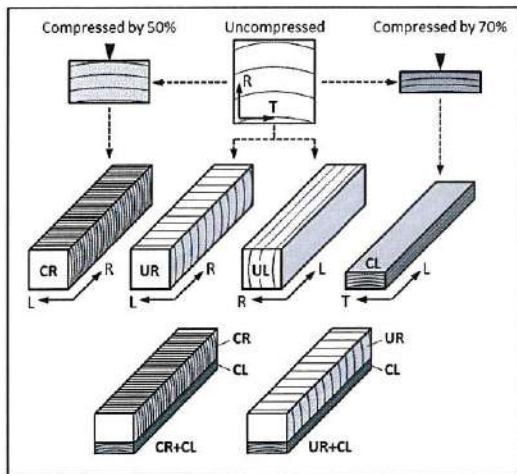


図 2-3 圧縮木材を用いた種々の梁

CR : 圧縮梁 (長手方向が R 方向)、UR : 未圧縮梁 (長手方向が R 方向)、UL : 未圧縮梁 (長手方向が L 方向)、CR : 圧縮梁 (長手方向が L 方向)

大きく変形する CR は圧縮率を 50%とし、曲げに際して引張応力を担う CL は圧縮率を 70%とした。未圧縮材 L 方向と圧縮複合梁 CR+CL を曲げた時の様子を図 2-4 に示す。未圧縮材は小さなたわみで破断したが、複合梁は大きく曲げても破断せず、除荷後にはほぼ元の形状に戻った。

図 2-5 に、種々の梁 (スパン一定、断面は全て  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ ) の曲げ荷重—たわみ線図を示す。CR

は非常に軟らかいが、引張側を補強することによってヤング率が増加する。ただ、補強材が厚くなると、破断するたわみが小さくなる。

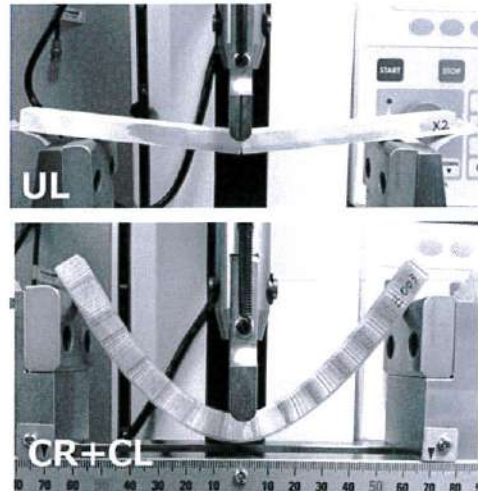


図 2-4 スギ材 (長手方向が L 方向) および圧縮複合梁の曲げ変形

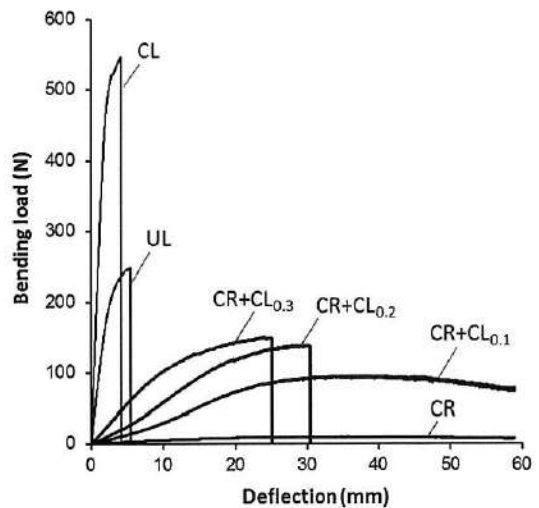


図 2-5 種々の梁の曲げ荷重—たわみ線図

図 2-6 に、種々の梁の曲げ剛性  $EI$  と弾性たわみ  $d_e$  の関係を示す。 $d_e$  は、繰り返し曲げ試験によって求めたもので、除荷後に歪が残留しない最大のたわみを表す。CR をそのまま使うより、厚さ比 0.1 の補強材を複合した方が、曲げ剛性、弾性たわみいずれも大きくなるのがわかる。

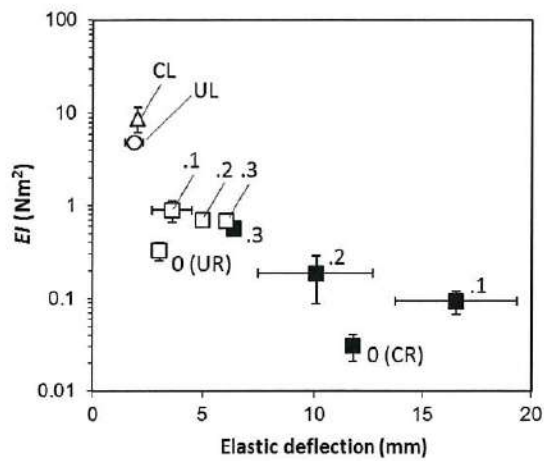


図 2-6 曲げ剛性  $EI$  と弾性たわみ  $d_e$  の関係  
 ○: 未圧縮材 L 方向 (UL)、△: 圧縮材 L 方向 (CL)、  
 □: 未圧縮複合梁 (UR+CL)、■: 圧縮複合梁 (CR+CL)、添え字は補強材の厚さ比を示す。

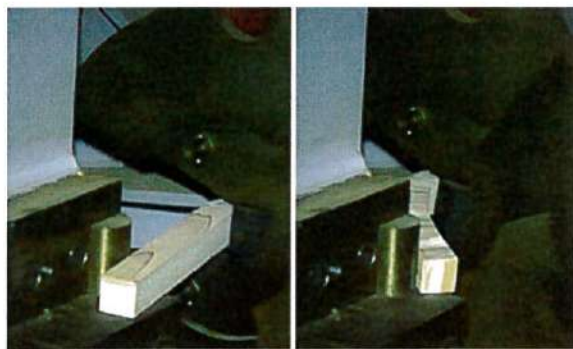


図 2-7 シャルピー試験機による衝撃曲げ試験  
 左: UL、右: CR+CL<sub>0.1</sub>

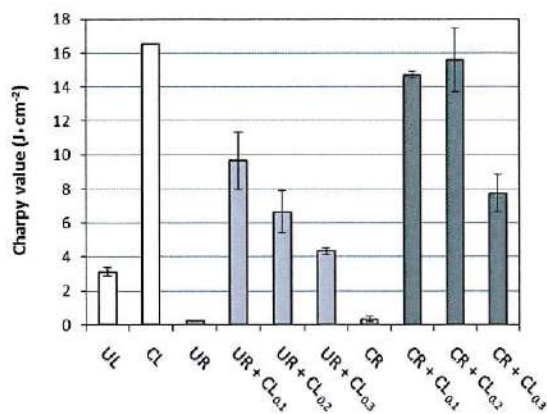


図 2-8 種々の梁のシャルピー値

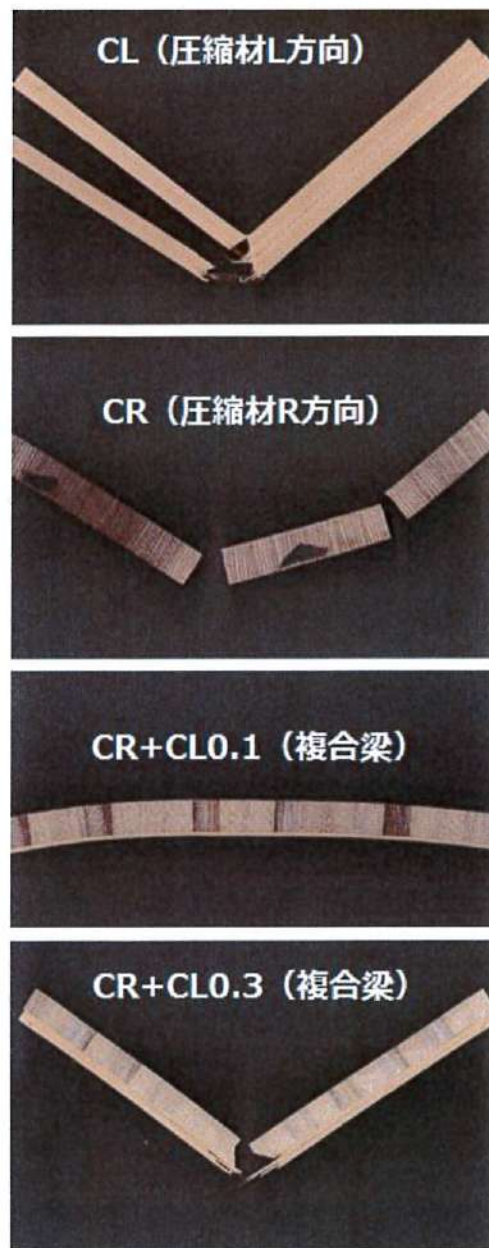


図 2-9 シャルピー試験後の梁の外観

図 2-7 に、シャルピー試験の様子を、図 2-8 に梁のシャルピー値を、図 2-9 に試験後の梁の外観を示す。圧縮材 L 方向 (CL) は、ヤング率や強度が大きいですが、破壊たわみが小さく、衝撃により完全に破断する。圧縮材 R 方向 (CR) は、ヤング率が低いいためシャルピー値が小さく、引張に対しては弾性的でないため、衝撃によってばらばらになる。一方、CR と CL を複合すると、粘り強さが著しく

向上する。CLの厚さ比が0.1~0.2のとき、複合梁は（補強材である）CLに匹敵する高いシャルピー値を示す。また、CLと違って容易には破断しない。ただ、補強材を厚くし過ぎると、大きな曲げに耐えられなくなり、シャルピー値が低下する。

ここで、補強材の最適な厚さについて考察する。CRの弾性を活かすためには、CRが常に圧縮される構造が望ましい。そこで、図2-10に示すような4点曲げ試験を行い、画像解析によって梁各部の歪を測定した。結果の一例を図2-11に示す。

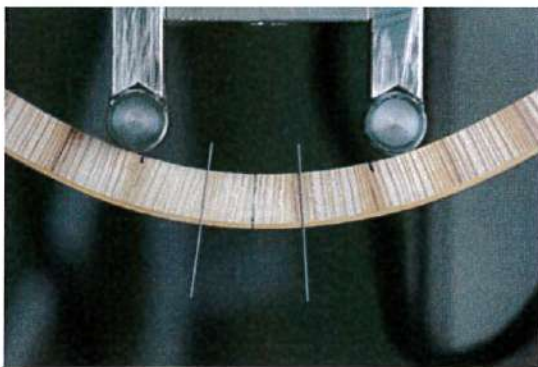


図 2-10 4点曲げ試験による表面歪の測定

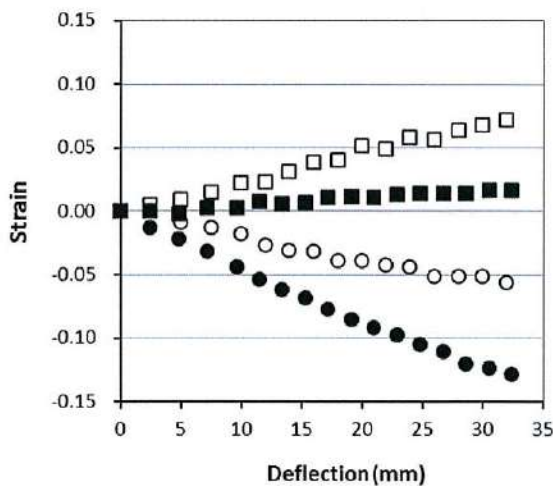


図 2-11 梁中央部の表面歪とたわみの関係

□ : CRの引張歪、○ : CRの圧縮歪、  
■ : CR+CL<sub>0.2</sub>の引張歪、● : CR+CL<sub>0.2</sub>の圧縮歪

CRは通常の木材よりはるかに大きく曲げることができるが、変形の仕方は通常の木材と同じで

ある。すなわち、凹側の圧縮歪と凸側の引張歪の絶対値がほぼ等しい。この場合、圧縮側が弾性的に変形する一方で、引張側が塑性的に変形する。一方、複合梁（CR+CL）では、ヤング率の高いCLが引張応力を支え、CRが大きな圧縮歪を請け負う。その結果、中立軸がCL側に移動し、CRの大部分が常に圧縮される。

表面歪から求めた中立軸の相対位置を、CLの相対厚さに対してプロットしたものを図2-12に示す。CLの相対厚さが0.1程度するとき、CLとCRの接着層付近が中立軸となる。つまり、CLには常に引張力が、CRには常に圧縮力が作用する。CLをそれより厚くすると、中立軸がCLの中に移動するため、CRの圧縮弾性が活かされないまま、CLがせん断破壊する。したがって、CRとCLの接着層が中立軸となるような構造にすれば、粘り強さが最大になると推察される。ただし、その場合、接着層に最大のせん断力が生じるため、せん断強度の高い接着を行う必要がある。

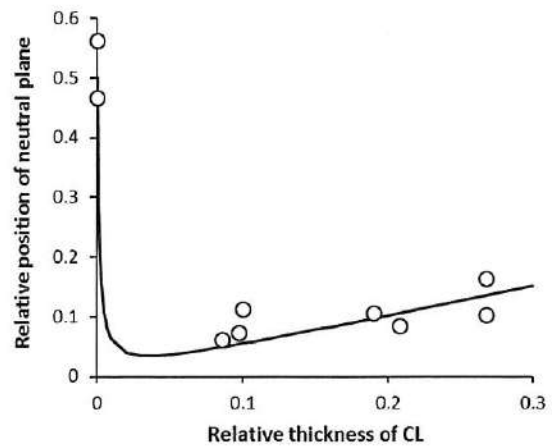


図 2-12 中立軸の位置とCLの相対厚さの関係  
プロット：実測値、曲線：計算値

次に、複合梁の粘弾性的な変形回復について述べる。図2-13に、複合梁の変形が時間と共に徐々に回復する様子を示す。複合梁を大きく曲げると、除荷後もたわみの一部が残留するが、残留たわみは時間と共に徐々に減少する。図2-14は、様々な残留たわみの回復挙動を示す。初期荷重が大きい

場合（最大荷重の 80%）、与えたたわみの一部が 10 時間後も残留するが、初期荷重が最大荷重の 60%以下なら、除荷後 1 時間以内に形状がほぼ完全に回復する。この回復は、主として CL に貯蔵された弾性力によるものと考えられる。

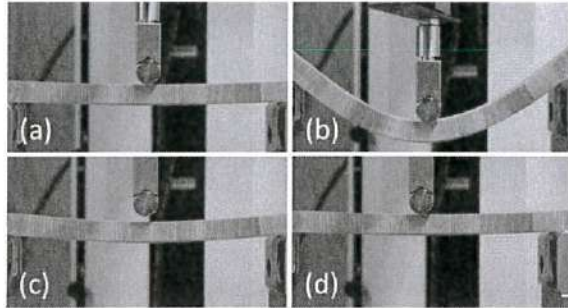


図 2-13 圧縮複合梁の粘弾性的な変形回復  
(a)：無負荷、(b)：負荷、(c)：除荷後 6 秒経過、  
(d)：除荷後 6 時間経過（形状がほぼ完全に回復）

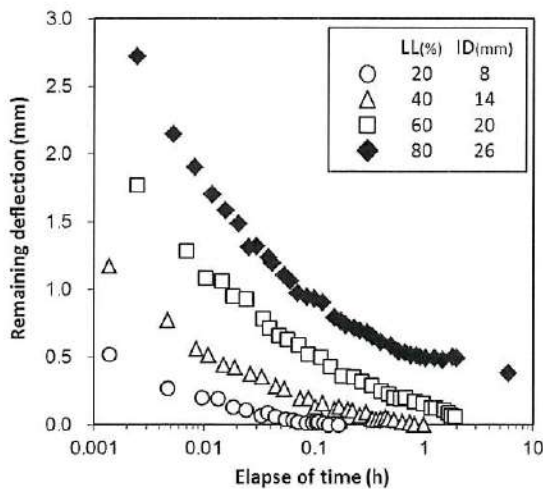


図 2-14 圧縮複合梁の除荷後のたわみ回復  
LL：初期荷重/最大荷重、ID：初期たわみ

横圧縮によって「軟らかい」材料を作れることは以前から知られていたが、圧縮材の圧縮弾性を活かせば、「柔らかい＝弾性的な」「粘り強い」梁を作ることができる。圧縮材や圧縮複合材を家具等に応用する試みについては後述する。

### 3. 圧縮木材放射方向のダンピング特性

#### 3.1 圧縮木材の高ダンピング

多くの高分子材料は粘弾性体であるため、力を加えて変形させる際、与えたエネルギーの一部が熱として散逸する。散逸するエネルギーが大きいほど、振動がより速く減衰する。また、共振曲線はなだらかになる。振動を緩衝、吸収する性質、いわゆるダンピング特性は、対数減衰率や、内部摩擦 ( $Q^{-1}$ )、力学的損失正接 ( $\tan\delta$ ) で評価されることが多い。ここでは  $\tan\delta$  を用いることにする。

木材は高分子材料の中では比較的  $\tan\delta$  が小さい材料である。これは、高弾性のセルロース結晶によって細胞壁が強化されていること、細胞壁のマトリックスを構成するリグニンが 3 次元の網目構造を形成していることなどによる。木材の中でも特に  $\tan\delta$  の小さい樹種は、打楽器の音板や弦楽器の響板に頻用される。 $\tan\delta$  が小さい木材は、弦の振動を効率よく音に変え、打音を長く響かせることができるからである。

一方、材料の  $\tan\delta$  が大きいほど、振動を抑制し、衝撃を吸収する「緩衝性能」が高くなる。 $\tan\delta$  が大きい材料は、種々の緩衝材に適している。また、減衰が速いだけでなく、振動の立ち上がりも速いため、鋭敏な反応が求められるスピーカーコーンなどに向いている。

楽器響板への応用を想定し、木材の  $\tan\delta$  を下げようとする試みは数多く行われている。しかし、木材の  $\tan\delta$  を高めようとする試みは少ない。圧縮により、木材の  $\tan\delta$  を増大させることができれば、制振性能の高い木質材料や応答の速い振動板など、木材の用途が広がる期待される。本研究では、様々な樹種を用いて圧縮材（図 2-3 の CR）を作製し、その R 方向の  $\tan\delta$  を測定した。全ての測定は 25°C、60%RH の恒温恒湿室中で行った。

図 3-1 に、未圧縮材と圧縮材の自由減衰の違いを示す。圧縮により密度が増加し、弾性率が低下するため、共振周波数が低下する。もし、両者の  $\tan\delta$  が同じなら、共振周波数の低い圧縮材の方が

緩やかに減衰するはずである。しかし、実際には圧縮材の方がはるかに減衰が速い。これは、圧縮によって  $\tan\delta$  が著しく増加したことを示している。以下では、樹種や圧縮方法の違いが圧縮材の  $\tan\delta$  に与える影響について述べる。

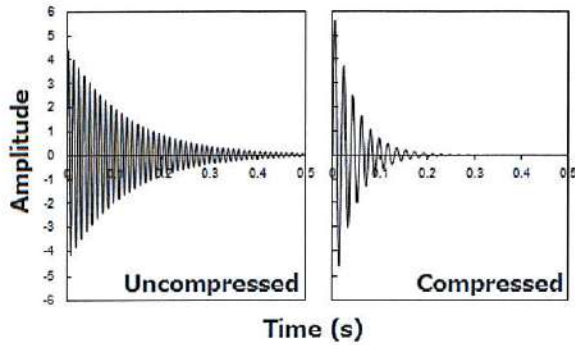


図 3-1 未圧縮スギ材および圧縮スギ材 (圧縮率 50%) の自由減衰曲線

### 3.2 圧縮率および組織構造の影響

図 3-2 は圧縮材 R 方向の  $\tan\delta$  を圧縮率に対してプロットしたものである。ヒノキやポプラ、キリ、バルサでは、 $\tan\delta$  の増加が 2~3 倍にとどまったが、アカマツとスギの  $\tan\delta$  は、圧縮によって 5 倍以上になった。圧縮により、R 方向の  $\tan\delta$  が増加するが、その程度は樹種に強く依存すると言える。

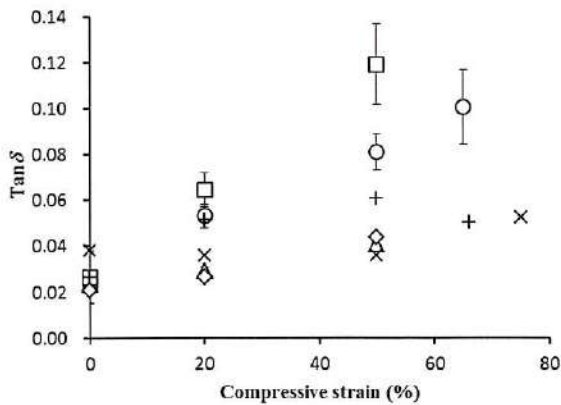


図 3-2 R 方向の  $\tan\delta$  と圧縮率の関係  
 ○ : スギ ( $347 \text{ kg/m}^3$ )、□ : アカマツ ( $568 \text{ kg/m}^3$ )、  
 △ : ヒノキ ( $533 \text{ kg/m}^3$ )、◇ : ポプラ ( $446 \text{ kg/m}^3$ )、  
 + : キリ ( $297 \text{ kg/m}^3$ )、× : バルサ ( $180 \text{ kg/m}^3$ )

ここで、同じ針葉樹でありながら  $\tan\delta$  の増加率が大きく異なるスギ、アカマツ、ヒノキについて、変形が著しい早材部の断面を図 3-3 に示す。圧縮によって  $\tan\delta$  が増加するスギやアカマツの細胞壁は、左右に折り畳まれるように変形した。一方、ヒノキでは横に倒れるようなせん断変形が主体であった。このような変形様式の違いは、木材中の密度分布に由来するものと考えられる。図 3-4 に、未圧縮材横断面の顕微鏡写真を画像解析して求めた R 方向の密度分布を示す。

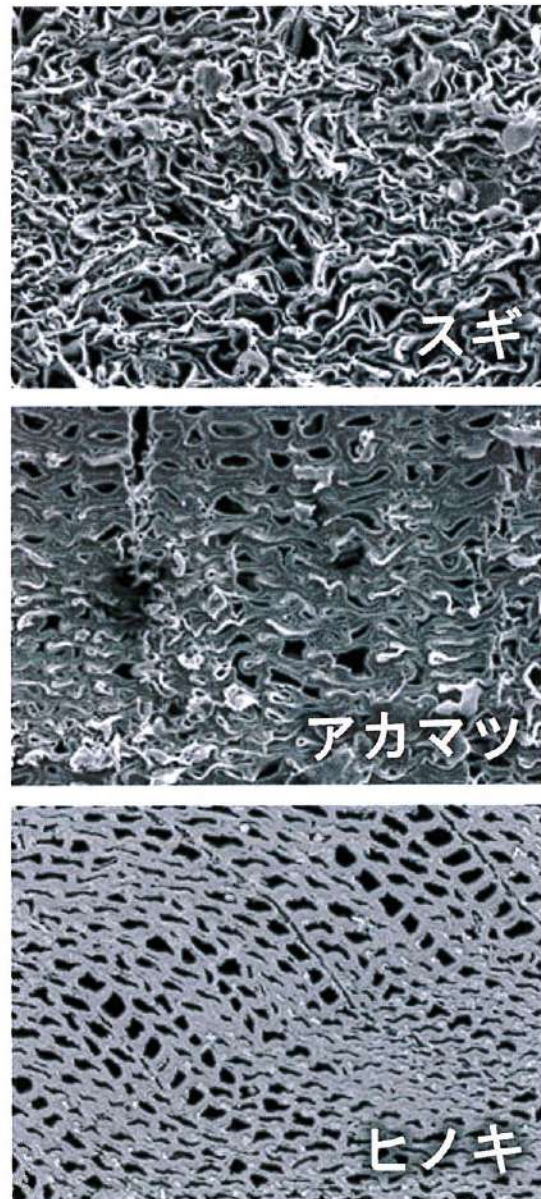


図 3-3 50%圧縮による早材細胞の変形

ヒノキは早晚材の密度差が小さかったが、スギやアカマツは早晚材の密度差が大きかった。スギやアカマツでは、密度が低く変形しやすい早材が、高密度で変形しにくい晩材に挟まれているため、変形が早材に集中するとともに、剛性の高い晩材によって、早材細胞の左右のずれが抑制される。その結果、細胞壁が横に倒れず、折り畳まれるように変形する。一方、早晚材の密度差が小さいヒノキでは、早材細胞の横ずれが抑制されないため、細胞壁が左右に折り畳まれることなく、一方向に倒れる。

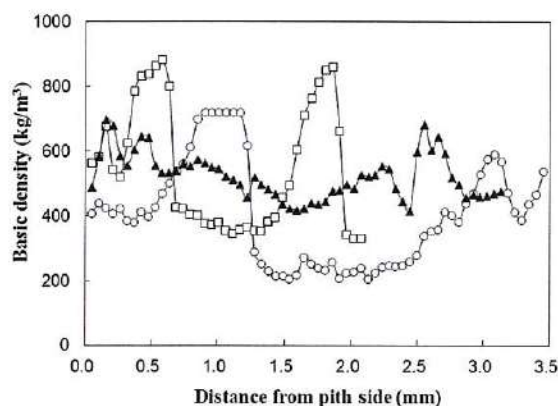


図 3-4 未圧縮材 R 方向の密度分布  
○：スギ、□：アカマツ、▲：ヒノキ

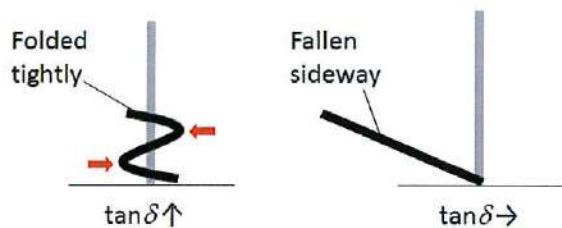


図 3-5 圧縮による細胞壁の変形  
左：折り畳み（座屈）、右：横倒し（せん断）  
太矢印（→）はきつく折り畳まれる部位を示す。

後に詳述するが、圧縮によって  $\tan\delta$  が増大するのは、細胞壁の褶曲によってマイクロフィブリル間またはマイクロフィブリルマトリックス間が破壊され、摩擦を生じるためと考えられる。細胞が横

倒しになるような変形（図 3-5 右）では、細胞のコーナーが折れるだけで、細胞壁自体はほとんど変形せず、その折れ角も  $90^\circ$  以内にとどまる。一方、細胞壁が座屈して左右に折り畳まれるような変形（図 3-5 左）の場合、細胞壁の折れ角は最大で  $180^\circ$  となる。折れ角が大きいくほど、破壊の程度や頻度が増加し、 $\tan\delta$  が大きくなると考えられる。

### 3.3 圧縮方法の影響

細胞壁の変形の仕方によって  $\tan\delta$  が変わるなら、同じ樹種でも圧縮の方法を変えれば  $\tan\delta$  が変わるはずである。異なる角度で圧縮したアカマツ材について、早材細胞の形状および圧縮前後の  $\tan\delta$  を図 3-6 に示す。年輪と垂直に負荷し、細胞壁を折り畳むように圧縮した方が明らかに  $\tan\delta$  が大きかった。同様の結果がスギ材でも得られたことから、少なくとも針葉樹材に限って言えば、圧縮材の  $\tan\delta$  は細胞の変形様式で決まると言える。時間の都合上試みなかったが、通常の圧縮では  $\tan\delta$  が増大しないヒノキ材でも、何らかの方法（多軸圧縮、硬い板と交互に積層する等）で細胞壁を折り畳めば  $\tan\delta$  が増大すると予測される。

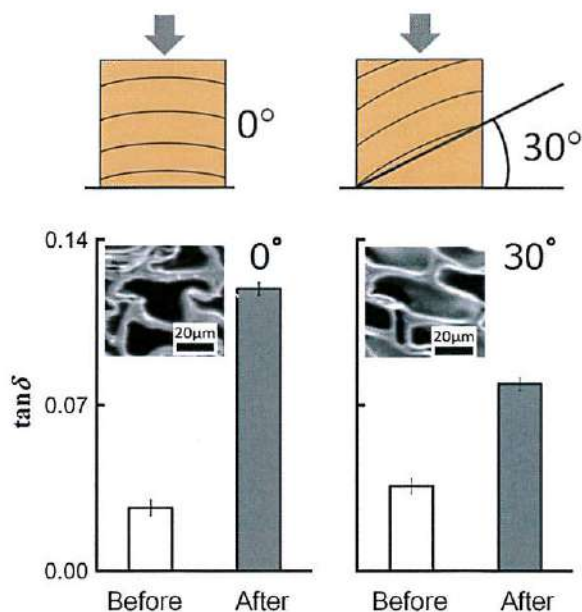


図 3-6 年輪傾角を変えてスギおよびアカマツ材を圧縮したときの早材細胞の変形と  $\tan\delta$  の変化

## 4. 水蒸気処理による物性変化

### 4.1 圧縮変形の回復と水蒸気処理による固定

先に述べたように、圧縮によって木材 R 方向の  $\tan\delta$  が著しく増大する。 $\tan\delta$  は材料の形状に依存しないため、圧縮による  $\tan\delta$  の増大を細胞壁の形状変化だけで説明することはできない。

$\tan\delta$  の増大が、緻密化によって接触した細胞壁同士の摩擦によるものなら、ヒノキ材でもスギ材やアカマツ材と同様に  $\tan\delta$  が増大するはずである。しかし、ヒノキ材の  $\tan\delta$  はそれほど増大しない。したがって、細胞壁同士の摩擦は、少なくとも  $\tan\delta$  増大の主因ではない。これらのことから、圧縮による  $\tan\delta$  の増大は、細胞壁自体の質的変化によるものと考えられる。ここでは、高温高压の水蒸気中で木材を圧縮した時の構造変化と物性変化から、圧縮による  $\tan\delta$  増大の機構を考察する。

木材の横圧縮と、水蒸気処理による変形固定については既に多くの研究報告があるが<sup>8-11)</sup>、それらのほとんどは、軽軟な針葉樹材を高硬度、高強度の重硬材に変換しようとする試みであり、R 方向の粘弾性に着目した研究は少ない。今回は、図 4-1 に示すようなオートクレーブを用い、飽和水蒸気中でスギ材を圧縮した。圧縮率は 50%、加熱温度は 160°C、処理時間は 15~480 分であった。

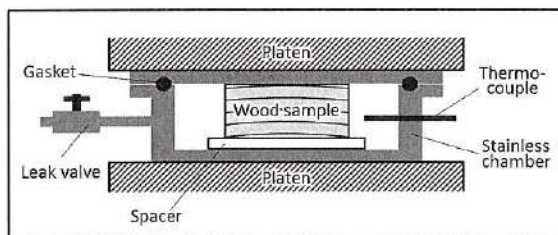


図 4-1 水蒸気処理に用いたオートクレーブ

水蒸気処理後の変形回復については、全乾寸法の変化に基づく回復度 ( $SR_d$ ) と飽水寸法の変化に基づく回復度 ( $SR_w$ ) の 2 通りの方法で求めた。

$$SR_d \equiv \frac{t_{d2} - t_{d1}}{t_{d0} - t_{d1}} \quad 6-1$$

$$SR_w \equiv \frac{t_{w2} - t_{w1}}{t_{w0} - t_{w1}} \quad 6-2$$

ここで、図 4-2 に示すように、d および w はそれぞれ全乾状態、飽水状態を表し、0、1、2 はそれぞれ圧縮前、圧縮後、回復処理後を表す。

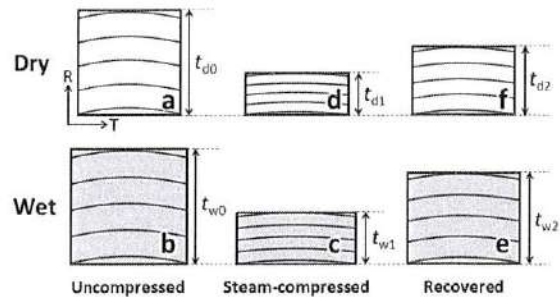


図 4-2 水蒸気処理中での圧縮による変形および煮沸による回復

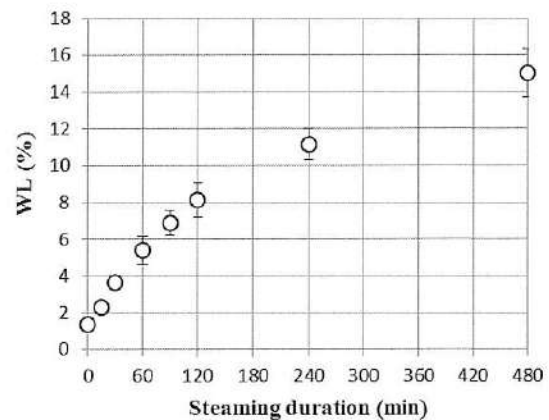


図 4-3 水蒸気処理による質量減少率（WL）と水蒸気処理時間の関係

図 4-3 に、水蒸気処理による質量減少率を示す。既往の研究と同様、処理時間の増加と共に WL が増加した。

図 4-4 に、全乾寸法ベースの変形回復率 ( $SR_d$ ) を示す。熱水による  $SR_d$  は 90 分の処理でほぼ 0 となった。90 分の水蒸気処理によって、圧縮変形がほぼ完全に固定されたと言える。その後、DMSO 浸漬によって  $SR_d$  がやや増加したが、新たな変形回復はわずかであった。

一方、図 4-5 に示すように、飽水寸法に基づく変形回復率 ( $SR_w$ ) は、DMSO 浸漬の後、著しく増加した。熱水による回復は、90 分の処理により



ほぼ0となったが、DMSO 浸漬による回復度は0.7に達した。

東原らは、DMSO やピリジン等の有機液体中で  $SR_w$  が著しく増加することから、水蒸気処理による圧縮変形の固定は、一時的な疎水構造の形成によるものであると推察した<sup>8,9)</sup>。しかし、図4-4に示すように、全乾ベースの回復度で見ると、DMSO 浸漬による新たな変形回復は僅少である。

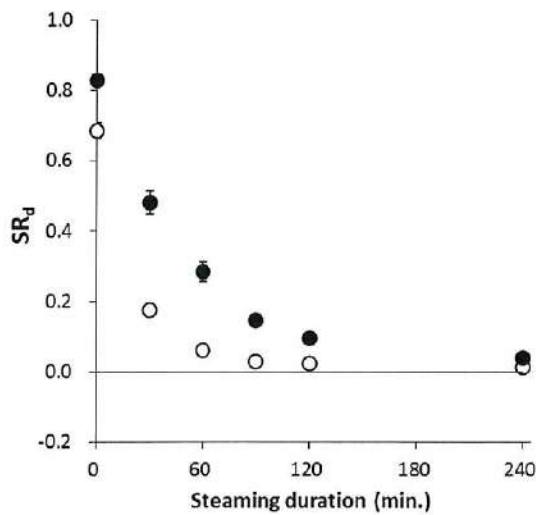


図4-4 全乾寸法の変化に基づく変形回復率( $SR_d$ )と水蒸気処理時間の関係  
○：熱水、●：DMSO 浸漬

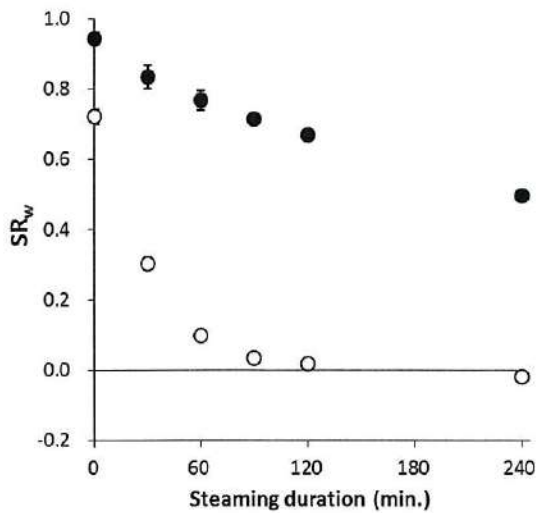


図4-5 飽水寸法の変化に基づく変形回復率( $SR_w$ )と水蒸気処理時間の関係  
○：熱水、●：DMSO 浸漬

この矛盾は、DMSO による  $SR_w$  の増加が、不可逆的な(本質的な)変形回復ではなく、可逆的な膨潤に伴う「見かけの回復」であることによる。

図4-6に、熱水による回復度がほぼ0であった90分処理材について、吸水に伴う横断面の変化を示す。吸水によって、押し潰された細胞の内腔が拡大し、未圧縮時の形に戻ろうとするのがわかる。これはいわゆる変形回復ではない。吸水に伴って拡大し、乾燥によって縮小するような「可逆的な」変形である。このような内腔の変形については、圧縮木材の寸法不安定性を示すものとして、既に Miyoshi ら<sup>12)</sup>が報告している。ただ、その機構について明確な説明はなされていない。

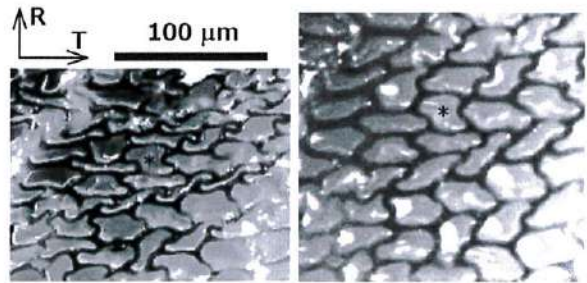


図4-6 全乾(左)および飽水状態(右)における水蒸気処理材(早材、水蒸気処理90分)の横断面  
\*は同じ細胞を示す。

細胞壁の膨潤に伴って内腔が可逆的に拡大する現象は、折り畳んだ浮輪に空気を入れると膨らむ、あるいは「吹き戻し」に息を吹き込むと伸びるのに似ている。そして、1) 細胞壁の座屈により細胞が変形しやすくなっている、2) 圧縮された細胞の形がある程度固定されている、という2つの条件が重なった時に見られる。我々はこのような内腔の拡大・縮小を「浮輪効果」と呼んでいる。



図4-7 「浮輪」と「吹き戻し」

木材の細胞壁は、空気で膨らんだ浮輪と同様、水で著しく膨潤し、内腔が拡張した状態で形成される。強靱なセルロースやリグニンで補強されているため、通常、乾燥や吸湿に伴って内腔が縮小・拡大することはない。一方、圧縮によりいったん座屈した細胞壁は、折りぐせを付けた紙と同様、外力により変形しやすくなる。そのため、水蒸気処理によってある程度形状が固定された後でも、細胞壁の吸放湿（膨潤・収縮）に伴って、内腔が可逆的に拡大・縮小する。

DMSO による  $SR_w$  の増加（図 4-5）は、明らかに浮輪効果によるものである。すなわち、水以上に細胞壁を膨潤させる DMSO により、内腔が著しく拡大し（浮輪が膨らみ）、 $t_w$  が増加するため、見かけ上、変形が回復したように見えるのである。もちろん、空気を入れて膨らませた浮輪は、空気を抜けばしぼむ。DMSO によって拡大した内腔も、乾燥による細胞壁の収縮に伴って縮小する。そのため、全乾ベースの回復度  $SR_d$  は、DMSO 浸漬後もさほど増加しない。

さて、図 4-8 は、ドライイングセットによる一時的な変形固定と、水熱による変形回復を説明するための従来の粘弾性モデルである。これによれば、マトリックスの軟化により、疎水性の繊維に貯蔵された弾性力が解放され、変形が回復する。もしこれが正しいければ、マトリックスの軟化が著しいほど、変形が大きく回復するはずである。

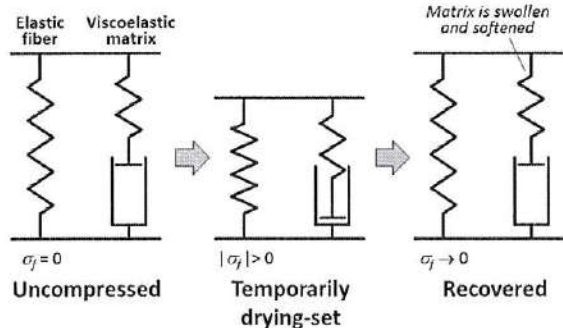


図 4-8 変形回復を表す従来のモデル

図 4-8 に、水中や DMSO 中で測定された無処理スギ材 R 方向のヤング率 ( $E_R$ ) を示す。疎水性の繊維は水や DMSO によって軟化しないため、 $E_R$  の低下は、マトリックスの軟化を反映していると考えて良い。 $E_R$  が最も大きく低下したのは熱水中であった。一方、図 4-9 に示すように、圧縮変形の回復度が最も大きかったのは、熱水中ではなく、常温の DMSO 中であつた。したがって、マトリックスの軟化によって変形が回復するという従来の説明は、誤りとまでは言えないが、不完全である。

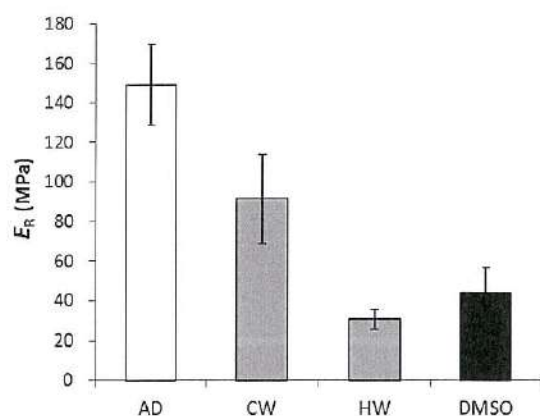


図 4-9 気乾状態 (AD)、常温水中 (CW)、熱水中 (HW) および常温の DMSO 中における未圧縮スギ材 R 方向の圧縮ヤング率 ( $E_R$ )

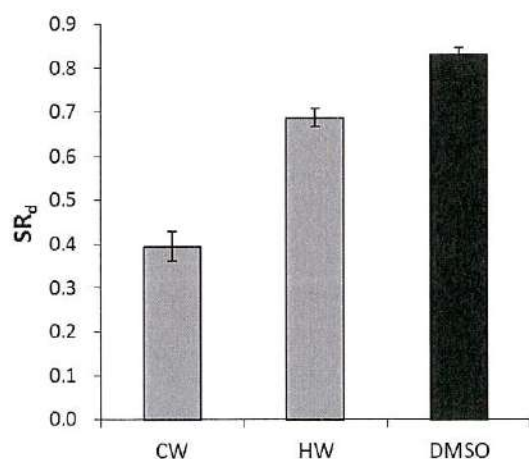


図 4-10 常温水 (CW)、熱水 (HW) および常温の DMSO (DMSO) による圧縮変形の回復度 ( $SR_d$ )

浮輪効果によって内腔の形状が大きく変化するなら、それが本質的な変形回復に関与していても不思議ではない。図4-11は、水蒸気処理した未圧縮材を種々の液体に浸漬した時の体積膨潤率と水蒸気処理時間の関係を示す。水蒸気処理により、体積膨潤率はいったん増加し、その後減少するが、その変化は小さい。水蒸気処理材も、無処理材と同様に膨潤すると言える。

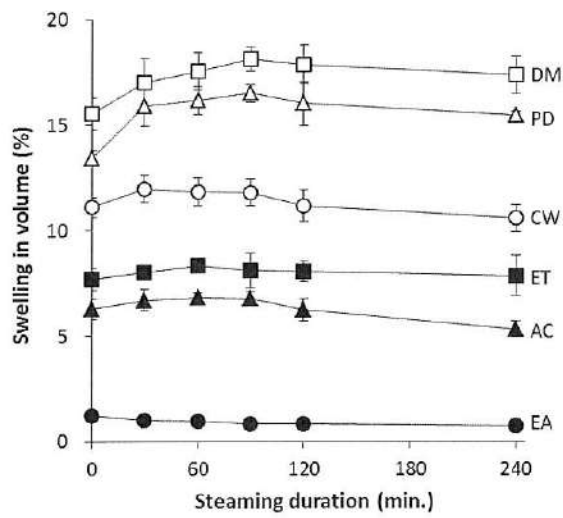


図4-11 様々な液体中(25°C)における未圧縮材の体積膨潤率と水蒸気処理時間の関係  
DM: DMSO、PD: ピリジン、CW: 常温水、ET: エタノール、AC: アセトン、EA: 酢酸エチル

図4-12は、圧縮材を様々な液体中(全て25°C)に浸漬した後の変形回復度  $SR_d$  を、未圧縮水蒸気処理材の体積膨潤率、すなわち各種液体の膨潤能に対してプロットしたものである。膨潤率が同じなら、親水性の液体より疎水性の液体の方が木材をより大きく軟化させる<sup>13)</sup>。したがって、もし、変形の回復が軟化の程度で決まるなら、図4-12のプロットはばらつくはずである。しかし、 $SR_d$  と膨潤能の関係は処理時間ごとに一本の曲線で表された。これは、細胞壁の膨潤量が変形回復の程度を大きく左右していることを示している。

図4-13は、軟化による変形回復と、膨潤に伴う浮輪効果を説明するための弾塑性モデルである。通常、木材は粘弾性体として扱われるが、今回の

ように時間依存性を考慮しない場合、粘性要素を導入する意味はあまりない。木材の横圧縮大変形が塑性的であることや、変形回復が極めて短時間で完了することを考えれば、弾塑性体と見なす方が合理的である。

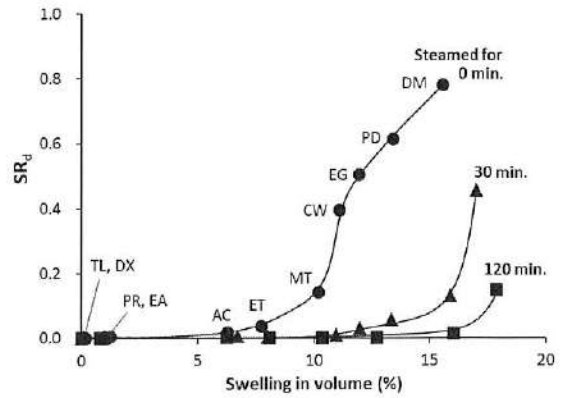


図4-12 様々な液体中(25°C)における圧縮材の変形回復度( $SR_d$ )と体積膨潤率の関係  
EG: エチレングリコール、MT: メタノール、PR: プロパノール、TL: トルエン、DX: ジオキサン、それ以外は図4-11と同じ

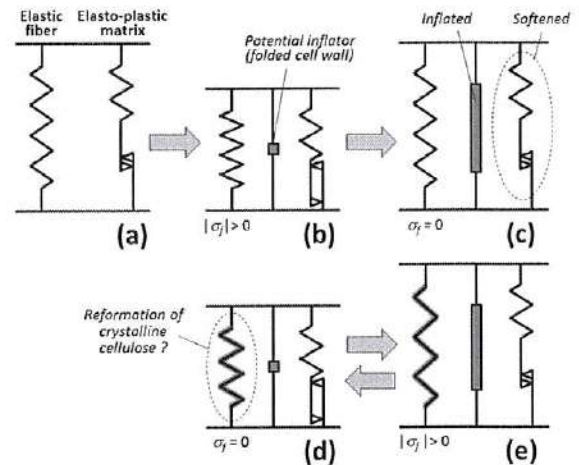


図4-13 細胞壁の膨潤に伴う浮輪効果(swimming ring-like inflation)を考慮に入れた弾塑性モデル

a から b はドライグセットによる一時的な変形を、b から c は軟化と膨潤に伴う変形回復を表す。圧縮により、マトリックスが弾塑性的に変形し、疎水性の弾性体(主としてマイクロフィブリル)に弾性力が貯蔵される。同時に、座屈した細胞壁が

潜在的な Inflator となる。これを水等に漬けると、マトリックスが軟化し、貯蔵されていた弾性力が解放されるとともに、Inflator によって内腔が拡大し、変形が回復する。DMSO による変形回復が水によるそれより大きいのは、著しく軟化するからではなく「著しく膨潤するから」である。

一方、d に示すように、圧縮した状態で水蒸気処理すると、細胞壁中で何らかの構造変化が生じ、貯蔵された弾性力が緩和する。これにより細胞壁は圧縮された状態で安定化し、変形が「永久固定」される。ただ、弾性力が緩和し、熱水による  $SR_d$  や  $SR_w$  が 0 となった後も、座屈した細胞壁はなお Inflator として機能する。そのため、水や DMSO の出入りに伴い、内腔が可逆的に拡大・縮小 (d~e) する。モデルの妥当性についてはさらなる検証が必要であるが、少なくとも現時点では、圧縮木材に関わる全ての現象を矛盾なく説明できる。

#### 4.2 水蒸気処理に伴う R 方向の物性変化

先に述べたように、圧縮した木材を水蒸気処理すると「何らかの」構造変化が生じ、貯蔵された弾性力が緩和する。この緩和は、Ito ら<sup>11)</sup>が述べるように、セルロース結晶領域または準結晶領域の構造変化によるものと考えられる。そこで、図 4-14 に示す試料を作製し、結晶構造の変化が影響すると思われる R 方向の動的粘弾性を測定するとともに、X 線を用いた結晶解析を行った。

図 4-15 に、未圧縮材および圧縮材 R 方向の動的ヤング率 ( $E'$ ) と水蒸気処理時間の関係を示す。圧縮せずに、水蒸気処理のみを行った場合、 $E'$  はわずかに低下した。これは、細胞壁成分の熱分解、特にヘミセルロースの加水分解によるものと考えられる。一方、木材を R 方向に圧縮すると、 $E'$  が一けた近く低下した。そして、いったん低下した  $E'$  は、水蒸気処理によって増加に転じた。つまり、水蒸気処理は、未圧縮材と圧縮材に対して、全く逆の影響を与えた。

類似の傾向は  $\tan\delta$  (図 4-16) でも認められた。

すなわち、圧縮せずに水蒸気処理した場合、 $\tan\delta$  はあまり変わらなかったが、圧縮によって著しく増加し、水蒸気処理によって低下に転じた。

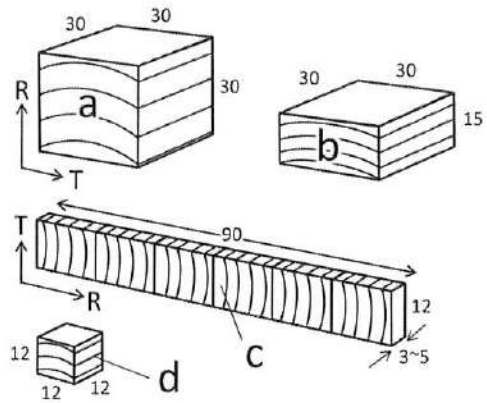


図 4-14 振動測定用の試料

a : 未圧縮材、b : 水蒸気処理中で圧縮した試料  
c : たわみ振動測定用試料、d : 圧縮試験用試料

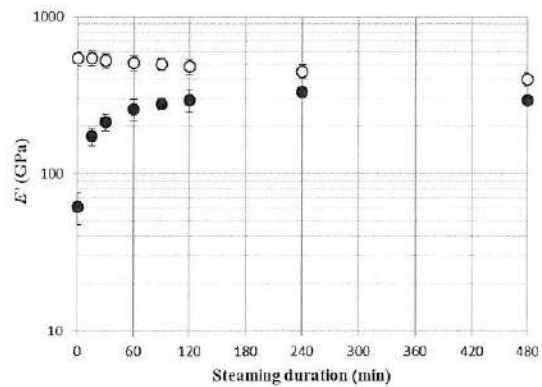


図 4-15 水蒸気処理による  $E'$  の変化

○ : 水蒸気処理のみ、● : 圧縮 + 水蒸気処理

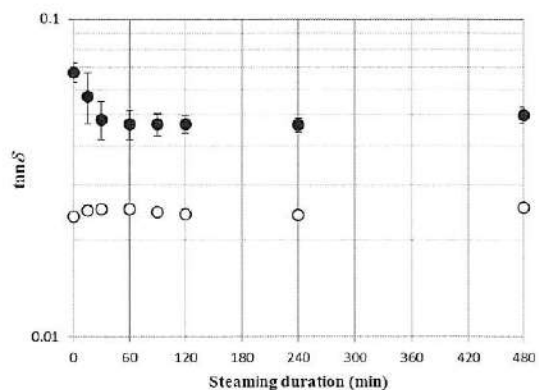


図 4-16 水蒸気処理による  $\tan\delta$  の変化

○ : 水蒸気処理のみ、● : 圧縮 + 水蒸気処理

水蒸気処理によるセルロース結晶化度 (CI) の変化を図 4-17 に、結晶幅の変化を図 4-18 に示す。CI、結晶幅いずれも 120 分まで増加し、その後はあまり変化しなかった。CI の変化 (+3%) よりも結晶幅の変化 (+12%) が大きかったことから、Kuribayashi ら<sup>14)</sup>が指摘する Co-crystallization (共晶化) が起こっていると推察された。

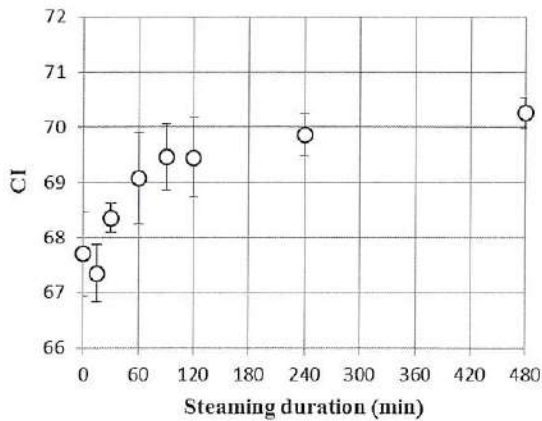


図 4-17 水蒸気処理による結晶化度 (CI) の変化

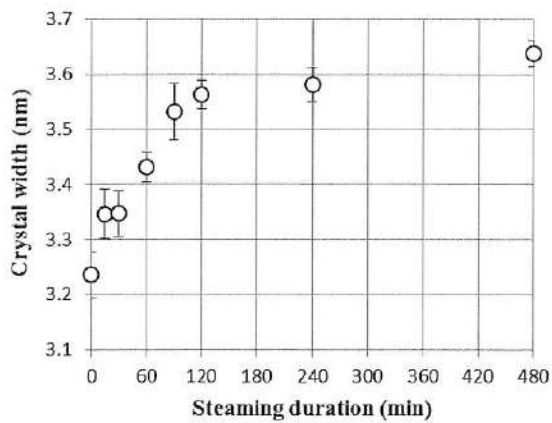


図 4-18 水蒸気処理による結晶幅の変化

圧縮材を水蒸気処理したときの変化 ( $E'$  の増加や  $\tan \delta$  の低下) は、圧縮によって破壊された構造が水蒸気処理によって再生されたと考えることで矛盾なく説明できる。

図 4-19 は、圧縮と水蒸気処理による構造変化を模式的に示したものである。圧縮によって細胞壁をきつく折り畳むと、その部分のセルロース結晶繊維間に微細な破壊が生じる (a)。繊維間の滑りにより、細胞壁の曲げ剛性が低下し、内部摩擦が増大する。つまり、 $E'$  が低下し、 $\tan \delta$  が増大する。一方、水蒸気処理により、破壊された結晶繊維間で分子鎖の弛緩と再配置が起こる。この「Cure」により、繊維間の滑りが減少するため、 $E'$  が増加し、 $\tan \delta$  が低下する (b)。

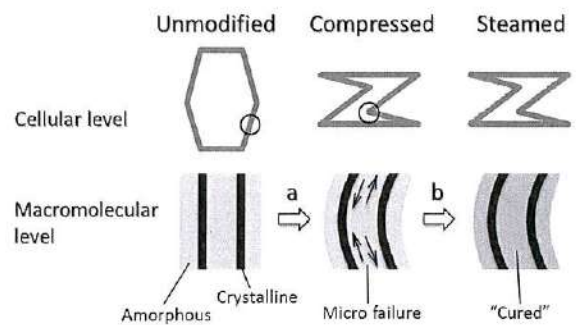


図 4-19 圧縮と水蒸気処理に伴う変化 (仮説)

a: 細胞壁の折り曲げによる細胞壁内の微細な破壊と内部摩擦の増大、b: 高温高圧水蒸気中での分子の膨潤と再配置による「Cure」と内部摩擦の低下

なお、 $E'$  や  $\tan \delta$  が著しく変化するのは、細胞壁が屈曲し、結晶繊維間に滑りが生じている場合に限られる。未圧縮材の場合、結晶繊維間に滑りが生じていないため、水蒸気処理によって繊維間の弛緩と再配置が起こっても、 $E'$  や  $\tan \delta$  はほとんど変化せず、ヘミセルロースの加水分解等によって  $E'$  はむしろ低下する。

以上の説明は、現時点では仮説にすぎないが、圧縮と水蒸気処理に伴う物性変化や、結晶構造の変化を無理なく説明できる。今後より詳細な検討を行い、その妥当性を検証したい。

## 5. 圧縮木材の高弾性・高ダンピング特性を活かした用途

### 5.1 制振材

図 5-1 に、圧縮木材の制振部材としての用法を示す。今回は時間の都合上検討できなかったが、制振部材は、圧縮木材の高い  $\tan\delta$  を活かすことのできる用途の一つである。たとえば、振動を発生する機器（冷蔵庫や洗濯機など）と床の間に圧縮木材を挿入すれば防振効果が期待できる。また、粘り強く、衝撃に強い複合梁で接合部を補強することにより、構造物の耐衝撃性を高めることができるかもしれない。これらについては、今後、機を見て詳しく検討したい。

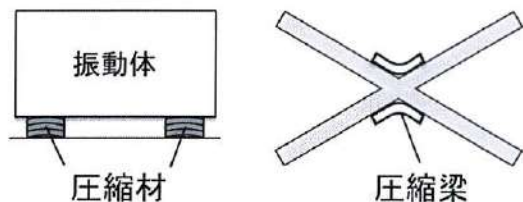


図 5-1 圧縮木材による制振の例

### 5.2 柔らかい家具<sup>15-17)</sup>

圧縮木材の高弾性、高ダンピング特性を活かした「柔らかい椅子」や「揺れないシェルフ」が既に提案されている。一例として、拓殖大学工学部の高木らにより試作された椅子を図 5-2 に示す。



図 5-2 圧縮スギ材を座面に用いた椅子

図 5-3 に示すような椅子を用い、22 名の被験者による官能検査を行った結果、圧縮スギ材を用いた椅子は、未圧縮スギ材やブナ材を用いた同形状

の椅子に比べて、「硬さ」「弾性」「安定感」「挙動」「なじみ」の観点から好ましいことが示された。また、座板および背板に加わる体圧の分布を調べた結果、圧縮スギ材の弾力性により、体圧が分散し、臀部や大腿部、背中への負担を軽減する効果があった。

弾性的にたわむ木質材料として成型合板がある。圧縮材や圧縮複合材は、成型合板よりもヤング率が低く、柔らかいが、粘り強く、大きなたわみを許容する。今後、新しい家具部材としての利用が期待される。

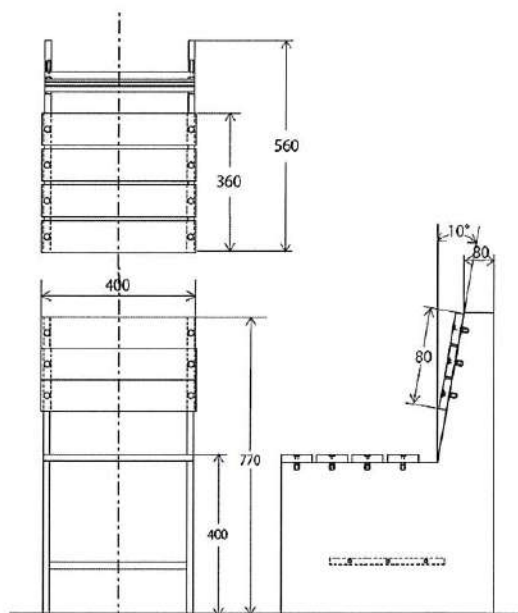


図 5-3 官能検査に用いた椅子

なお、図 5-4 のように、圧縮材を円筒状にすると、弾力的なパイプ状のベンチになる。



図 5-4 円筒ベンチ

圧縮材を帆立（柱）に用いたシェルフ（図 5-5）は優れた制振性能を示す。地震動を想定した加振試験（図 5-6）の結果、 $\tan\delta$ の高い圧縮材が棚板の揺れを効果的に抑制することが示された（図 5-7）。



図 5-5 帆立部材に圧縮材を用いたシェルフ

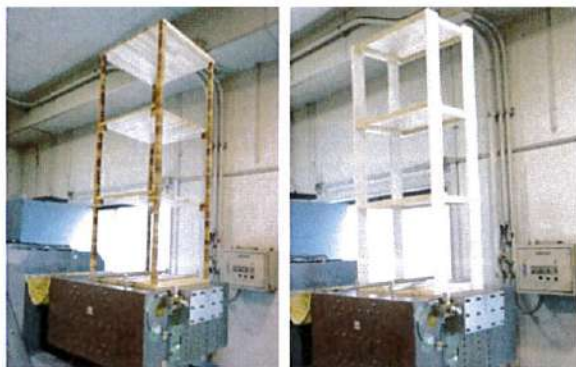


図 5-6 地震動を想定した加振試験  
(JIS C 60068-2-64 広帯域ランダム振動試験)

阪神・淡路大震災以降、家具の転倒や内容物の散乱が直接の被害や二次被害（避難の遅延等）につながるものが広く知られるようになった。それを防ぐための最も有効な手段は家具の固定である。

しかし、壁面を傷つけることに対する抵抗感や、固定作業に対する億劫さから、一般住宅における家具の固定は進んでいない<sup>18)</sup>。このような中で、今回提案された「倒れない」「揺れない」家具は、屋内防災につながるユニークなアイデアであると言える。なお、個々に示した一連の家具（図 5-8）は、ウッドデザイン賞 2016（技術・研究分野、ライフデザイン部門）の入賞作である。

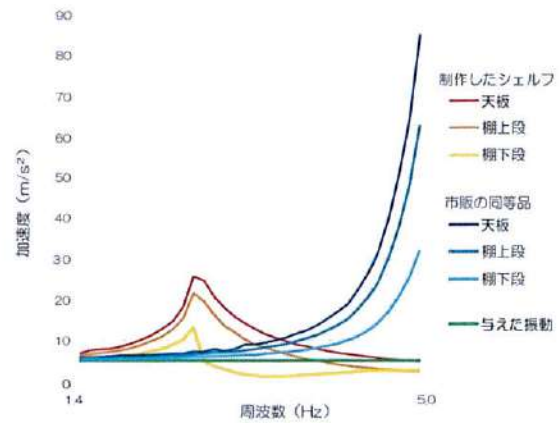


図 5-7 シェルフを加振した時の各部の加速度



図 5-8 ウッドデザイン賞 2016 入賞作

### 5.3 応答が速く割れにくいハープ響板

弦楽器の響板や打楽器の音板に用いられる木材は、 $\tan\delta$ が低いものが多い。 $\tan\delta$ が低いほど、音量が大きく、音の減衰時間（余韻）が長くなるからである。ただ、楽器の種類や音楽のジャンルによっては、音量や余韻の長さよりも音の立ち上がりが重要な場合がある。たとえば、バロックハープ

では、音が素早く立ち上がり、速やかに減衰するのが望ましいが、実際には、音の立ち上がり（の遅れ）を考慮に入れて撥弦し、弦を手で押さえて音を止めなければならない。もし、低音域を支配する響板 R 方向の  $\tan \delta$  を高めることができれば、低音が素早く立ち上がるハープを作れる可能性がある。時間の都合上、今回は実現できなかったが、今後、圧縮木材を響板に用いたハープを製作し、熟練した演奏家による試奏を行う予定である。

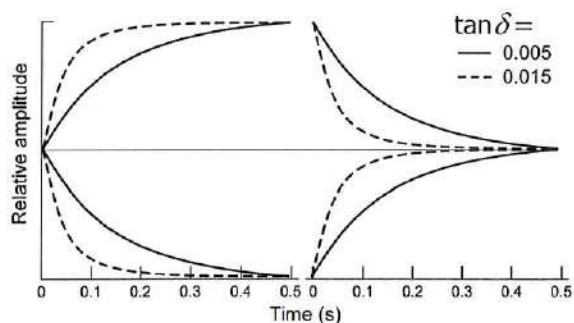


図 5-9  $\tan \delta$  の大小と音の立ち上がりの関係

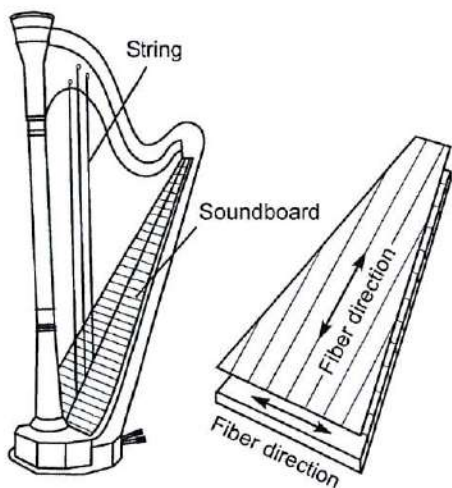


図 5-10 ハープ響板の合板構造

圧縮木材をハープ響板に使うもう一つの利点は、乾燥に伴う割れの抑止である。ハープの響板は図 5-10 に示すように、長手方向が R 方向となるように作られるが、弦の張力によるたわみと、湿度の低下に伴う収縮が重なると、響板の表面が割れることがある（図 5-11）。この割れを防ぐため、大型

のハープでは、響板の表面に突板を貼付して補強する。ただ、響板を合板構造にすると、幅方向の音響変換効率が低下し、音量が減少する<sup>19)</sup>。引張に対する破壊歪の大きい圧縮材を響板に使えば、表面が割れにくくなり、補強の必要がなくなると期待される。

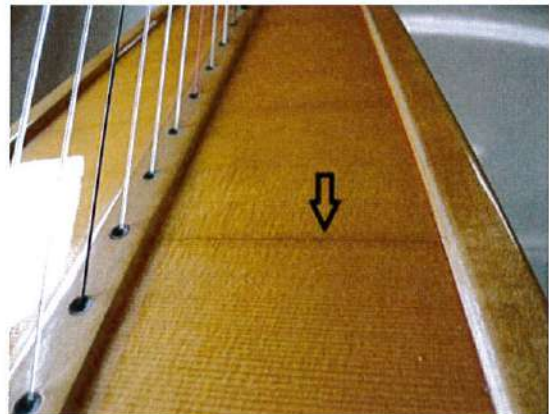


図 5-11 乾燥に伴う響板の割れ（旧ソ連製）

### 5.3 柔らかく、傷の残らない床

木材の中でも、特にスギやキリなどの低密度材は、横圧縮に対して軟らかく（容易に、塑性的に）変形するため、物体が衝突した際、衝突物に作用する力や加速度が小さく、硬質のフローリング材に比べて衝突物が損傷しにくい。また、熱伝導率が低いことから、触った時に暖かく感じられる。すなわち、低密度材は、人に接する材料として様々な利点がある。ただ、低密度材は傷が付きやすいため、その利用は限られている。圧縮して緻密化すれば傷付きにくくはなるが、その場合、軟らかさや暖かさが失われる。

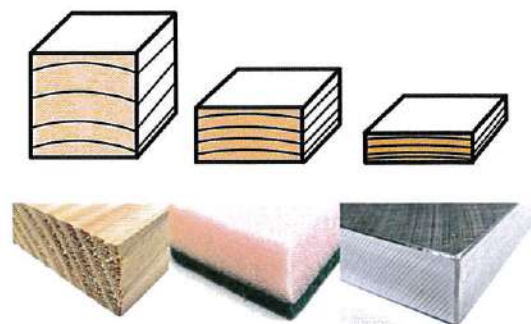


図 5-12 圧縮による質的变化（模式図）



一方、先述したように、低密度材を適度に圧縮すると、圧縮ヤング率が著しく低下すると同時に、弾性域が拡大する。多少大げさな言い方をすれば、完全に緻密化すると鉄板のようになり、中程度に圧縮するとスポンジのようになる（図 5-12）。

図 5-13 は、スギの圧縮材（50%圧縮）に 80cm の高さから 2.73kg の砲丸を落下させた瞬間の変形挙動である。圧縮材は、厚さが半分であるにもかかわらず、変形量が未圧縮材と同程度である。つまり、衝撃に対して、未圧縮材並みに大きく変形する。変形が大きいほど、長い距離を使って減速することになり、衝突物に作用する衝撃加速度（減速度）は小さくなる。

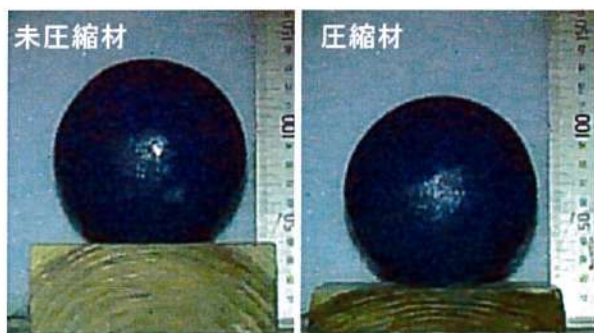


図 5-13 砲丸衝突時の板材の変形

図 5-14 は、砲丸衝突後のスギ材の表面である。未圧縮材は塑性的に（軟らかく）変形するため、衝突痕が残るが、圧縮材は弾性的に（柔らかく）変形するため、痕が残らない。

圧縮材に関する研究は、高硬度化・高強度化を目指したものが多かったが、「硬く、傷付きにくくする」より、「柔らかく、傷が残りにくくする」方が、木材本来の柔らかさや暖かさを活かすことができる。今回は時間の都合上検討できなかったが、今後、様々な圧縮材について、床を想定した衝撃試験を行い、その安全性や傷の残りにくさを評価したいと考えている。

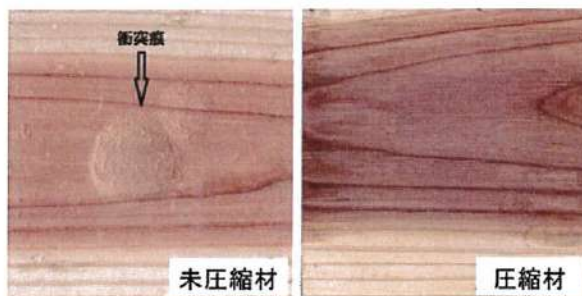


図 5-14 砲丸衝突後の板材の表面

## 6. 結 言

圧縮方向が長手方向となるような圧縮梁を用い、R 方向の  $\tan\delta$  が圧縮によって著しく増大する機構を明らかにするとともに、圧縮材の柔軟性や高い  $\tan\delta$  を活かした用途を検討した。得られた結果は以下のように要約される。

- 1) 50%程度の圧縮により、アカマツ材やスギ材の R 方向の  $\tan\delta$  は 5 倍以上（約 0.1）に達した。一方、ヒノキや広葉樹の  $\tan\delta$  は、圧縮によってあまり増加しなかった。圧縮材の  $\tan\delta$  に見られる樹種依存性は、細胞壁の変形様式の違いに由来すると推察された。
- 2) 圧縮によって  $\tan\delta$  が増大するのは、細胞壁がきつく折り畳まれた部分で、結晶繊維間の滑りが生じるためと推察された。水蒸気処理により、結晶周辺の非晶分子鎖の弛緩と再配置が起こるため、圧縮によって増大した  $\tan\delta$  は水蒸気処理によって低下した。
- 3) 圧縮材の弾性や高ダンピング特性を活かした用途として、構造用の制振材、柔らかい椅子、倒れないシェルフ、応答の速いハーブ響板、傷の残らない床材などが提案された。

## 謝 辞

本研究の遂行に当たっては、秋田県立大学木材高度加工研究所 山内秀文准教授、拓殖大学工学部・阿部眞理准教授、同・白石照美准教授、東京工業大学工学部 三上貴正教授より多大なご助力を頂きました。心より御礼申し上げます。また、多くの実験は、筑波大学大学院生物資源科学専攻・平野 葵氏（現・カリモク）、佐藤 史織氏の手によるものです。記して謝意を表します。

## 文 献

- 1) A. Hirano *et al.* : *Eur. J. Wood and Wood Prod.* **74**, 685-691 (2016).
- 2) 則元 京 : 木材学会誌 **39**, 867-874 (1993).
- 3) 井上雅文, 則元 京 : 木材研究・資料 **27**, 31-40 (1991).
- 4) 井上雅文ほか : 木材学会誌 **44**, 410-416 (1998).
- 5) 北守顕久ほか : 木材学会誌, **56**, 67-78 (2010).
- 6) 中村晋平ほか : 木材学会誌, **55**, 77-84 (2009).
- 7) たとえば、名古屋木材株式会社「iLignos システム手帳（ウッドデザイン賞 2016 木製品分野入賞作）」など
- 8) 東原ほか : 木材学会誌 **46**, 291-297 (2000)
- 9) 東原貴志 : 林試研報 No.23, 255-308 (2007)
- 10) M. Inoue *et al.* : *Wood and Fiber Sci.* **25**, 224-235 (1993)
- 11) Y. Ito *et al.* : *Holzforschung* **52**, 217-221 (1998)
- 12) Y. Miyoshi *et al.* : *Zairyo* **65**, 343-346 (2016)
- 13) E. Obataya and H. Yamauchi : *Wood Sci. Technol.* **39**, 492-501 (2005)
- 14) T. Kuribayashi *et al.* : *ACS Macro Lett.* **5**, 730-734 (2016)
- 15) 齋藤優太ほか : 日本デザイン学会研究発表大会概要集 **62**, p.102 (2015)
- 16) 高木拓哉ほか : 日本デザイン学会研究発表大会概要集 **63**, p.65 (2016)
- 17) 高木拓哉ほか : 日本デザイン学会研究発表大会概要集 **63**, p.237 (2016)
- 18) 白石照美ほか : 家具固定を促す内装デザインと内装建材の家具固定能評価. 2013 年度トステム建材産業財団研究助成報告
- 19) T. Gunji *et al.* : *J. Wood Sci.* **58**, 322-326 (2012)

## 成果発表

### 学術誌

- 1) A. Hirano, E. Obataya and K. Adachi: Potential of moderately compressed wood as an elastic component of wooden composites. *Eur. J. Wood and Wood Prod.* **74**, 685-691 (2016)

- 2) S. Sato, A. Hirano and E. Obataya: Drastic increase in the mechanical loss tangent of wood in the radial direction by transverse compression. *J. Materials Sci.*, 投稿中
- 3) S. Chen and E. Obataya: Effect of swimming ring-like expansion of cell lumina on the shape recovery of steam-compressed wood. *Wood Sci. Technol.*, 投稿中
- 4) S. Chen, M. Matsuo and E. Obataya: Mechanism of shape fixation of wood by steaming. *Wood Sci. Technol.*, 投稿準備中

### 学会等

- 1) A. Hirano, E. Obataya and K. Adachi: Bending properties of the composite beam using compressed wood. International Symposium on Wood Science and Technology (IAWPS 2015), 2015 年 3 月, 東京
- 2) 齋藤優太, 平野 葵, 阿部眞理, 白石照美, 小幡谷英一, 足立幸司: 弾性を有するスギ圧縮木材の家具への適用. 日本デザイン学会第 62 回研究発表大会, 2015 年 6 月, 千葉
- 3) 佐藤史織, 小幡谷英一, 山内秀文, 足立幸司, 山峯崇之: 木材の横圧縮に伴う  $\tan\delta$  増大の機構解明とその応用. 第 66 回日本木材学会大会, 2016 年 3 月, 名古屋
- 4) S. Chen and E. OBATAYA: A viscoelastic model to explain the shape fixation of compressed wood by hydrothermal treatment. 第 66 回日本木材学会大会, 2016 年 3 月, 名古屋
- 5) 高木拓哉, 齋藤優太, 姜超, 阿部眞理, 白石照美, 小幡谷英一, 足立幸司: 弾性を有するスギ圧縮木材による椅子部材の感覚評価. 日本デザイン学会第 63 回研究発表大会, 2016 年 7 月, 上田
- 6) 高木拓哉, 齋藤優太, 姜超, 阿部眞理, 白石照美, 小幡谷英一, 足立幸司: 弾性を有するスギ圧縮木材による帆立部材を持つシェルフの防振効果. 日本デザイン学会第 63 回研究発表大会, 2016 年 7 月, 上田
- 7) 佐藤史織, 小幡谷英一, 山内秀文, 足立幸司, 本馬洋子: 木材の横圧縮に伴う  $\tan\delta$  増大の機構解明とその応用. 第 67 回日本木材学会大会, 2017 年 3 月, 福岡
- 8) 陳 碩也, 小幡谷英一: 水蒸気処理した圧縮木材の変形回復挙動および膨潤挙動. 第 67 回日本木材学会大会, 2017 年 3 月, 福岡
- 9) S. Sato, E. Obataya, H. Yamauchi and K. Adachi: Extremely large mechanical loss tangent of compressed wood in the radial direction. IUFRO Division 5 conference, 2017 年 6 月, Vancouver (ポスター賞 1 位)
- 10) S. Sato, E. Obataya, H. Yamauchi and K. Adachi: Vibrational properties of compressed wood and possibility of using compressed wood as a material for repairing cracks in wooden musical instrument. COST Action FP1302 WoodMusICK, 2017 年 10 月, Brussel