

回復を拘束・水中浸漬した 曲げセット材の解放後の復元

徳本 守彦・山内 仁人
信州大学農学部 空間利用整備学講座

Restoration of Bending Set Wood in Water-soaked Condition After Release from Restraint

Morihiko TOKUMOTO and Masato YAMANOUCHI

Laboratory of Wood Utilization, Department of Forest Science,
Faculty of Agriculture, Shinshu University

Summary

Small wet specimens (L×T×R: 10×3×120mm) of buna (*Fagus crenata* Blume) wood and hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) wood were dried under constant loads. After unloading, these bending-set wood were immersed in the water under restraint from recovery. After these specimens attained to the water saturated state, the restraint were removed and the restoration of bending-set wood were measured over 5 months in the water-soaked condition.

Main results are as follows.

- 1) After the release from the restraint, an instantaneous recovery occurred. Then, residual deflection decreased rapidly at a first stage, but tended to decrease slowly gradually.
- 2) Residual deflection-logt curve of buna wood was different from that of hinoki. This is because the restoration of hinoki occurred more slowly than that of buna.
- 3) Some bending-set specimens were taken out of the water in the course of the restoration process and were dried slowly. The residual deflection of buna wood after drying were greater than that in the water-soaked condition before drying. On the other hand, residual deflection of hinoki after drying were smaller than that in the water-soaked condition before drying.
- 4) The restoration of bending set wood in the water-soaked condition after the release from the restraint can be explained qualitatively by a elongated spring and a dashpot.

(Jour. Fac. Agric. Shinshu Univ. 30: 115—123, 1993)

Key words: restoration, bending set, water-soaked condition

緒 言

常温付近での木材の乾燥過程のクリープによって発生したセットは、吸湿によってほぼ復元することが知られている¹⁾。セットされた木材は湿潤状態に至る時、変形以前の、元来の構造を復元するものと考えられ、木材は一種の形状記憶効果を持つとみなすことができる。

さらに最近、木材の吸湿過程の曲げクリープにおいて、含水率20%以上の高含水率域に達する時、負荷下にもかかわらず、たわみが減少することが明らかになった²⁾。このことは、高含水率域において、外力を上回る内力が発生したことを示す。この内力の発生が、セットの復元になんらかの影響を与えているものと考えられる。

前述のとおり、無拘束下で吸湿・吸水させた場合、曲げセットのほとんどは回復し、木材は飽水状態で元来の安定な構造を復元する。一方、回復を拘束して吸湿・吸水させ、飽水状態にもたらず時、木材は本来の安定な構造からはずれた、いわば不安定な状態に置かれると考えられる。このように、飽水状態で余儀無く、不安定な状態に置かれた木材は、元来の安定な構造を取り戻そうとするであろう。

本報告では、飽水状態における復元力に関する知見を得るために、木材に比較的大きい曲げセットを発生させ、その回復を拘束した状態で吸湿、水中浸漬した後に拘束を解除し、その後の復元経過を明らかにした。

なお、回復を拘束して吸湿・吸水させると、木材には一種の水分応力が発生することが知られている⁴⁾⁵⁾。この水分応力の発生経過については改めて報告する予定である。

実 験 方 法

1. 試 験 片

気乾状態のヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) 材とブナ (*Fagus Crenata* Blume) 材から、放射 (R-) 方向120mm、接線 (T-) 方向80mm、繊維 (L-) 方向約600mmの試験材を取った。この試験材から連続的に切り出した厚さ10mm (L-方向) の木口セクションから、R-方向を長さ方向とする短冊型の試験片 (L×T×R: 10×3×120mm) を作製し、目の揃った試片を選んだ (Fig. 1参照)。選びだした試片を恒温・恒湿器を用いて、温度30°Cのもとで徐々に吸湿させ、最終的に相対湿度100%に近い状態で24時間調湿した。調湿後の含水率はヒノキ材で約28%、ブナ材で30%であった。

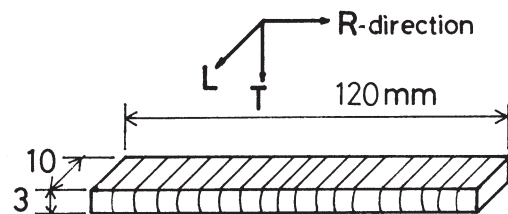


Fig. 1. Test piece (unit: mm).

2. 曲げセット材の作製

曲げセット材の作製は、アクリル製のデシケータ内にスパン10cmの曲げ試験台を組み込んで、中央集中荷重を加えて乾燥することによって行った。デシケータ内は温度30°Cで、

シリカゲルを適宜交換して、乾燥状態に保った。

初期含水率約30%の試片を塩化ビニル製の食品用ラップフィルムで作った小袋に封入した状態で、ブナ材で180g、ヒノキ材で140gの曲げ負荷を加えて、含水率約3%まで、約48時間で乾燥した。試片をラップフィルムに封入することによって、緩やかに乾燥できた。負荷の大きさは、比較的大きな曲げセット（15~17mmの残留たわみ）を発生させるように、予備的な検討結果を参考にして決定した。

乾燥後除荷した試片を、ポリエチレンフィルムで包んで試験管に封入し、乾燥デシケータ中で保存した。供試前の曲げセット量はブナ材で15~17mm、ヒノキ材で13~15mmであった。

3. 飽水状態における曲げセット材の復元の測定

Fig. 2に示すように、厚さ5mmの亚克力製の板に、中心間距離を100mmとする孔（直径6mm）を2つあけて、ステンレス製の同直径の細い丸棒を軽く叩き込んで、曲げセット試片を固定する台を作製した。スパンの中心部に同様のステンレスの丸棒を固定して、曲げセット試片の復元を拘束した。ただし、スパン中心の固定点はセットの大きさに応じて調節できる。

Fig. 2のように固定台に試片を軽く固定した後、30°Cの恒温・恒湿器内で、およそ24時間の間、段階的に相対湿度を高めて、繊維飽和点付近まで吸湿させた。その後、30°Cの恒温器中に置かれた、蒸留水を入れた蓋付の容器中に24時間浸漬した。さらに、水流ポンプを用いて減圧状態で約6時間処理し、ほぼ完全な飽水状態とした。その後、曲げセットの固定台から試片をはずして、拘束解除後の飽水状態における試片の復元経過を測定した。

適当な時間間隔で、30°Cの水中から試験片を取り出し、残留たわみを読み取り顕微鏡（1/100mm精度）で測定した。残留たわみの測定は、10cmのスパンの曲げ試験台上に試験片を置いて、基準点と試片の標点との距離を測定することによって行った。このような残留たわみの測定を、およそ3000時間（ほぼ5か月）にわたって行った。

4. 復元途中からの乾燥による残留たわみの変化

ブナ材では、拘束解除10日後、ヒノキ材では拘束解除5日後に、曲げセット試片を30°Cの水中から取り出し、その後30°Cの恒温・恒湿器内で、段階的に関係湿度を下げ、緩やかに乾燥し、残留たわみと試片含水率の変化を測定した。乾燥終了時の含水率は5~7%であった。

乾燥を始めた時点で、ブナ材の3本の試片の残留たわみ残存率（拘束したたわみ量に対する残留たわみの100分率）は平均33%（含水率125%）、ヒノキ材では平均68%（含水率約230%）であった。

なお、ブナ材については、乾燥終了後に再び緩やかに吸湿させ、なお残留したたわみが吸

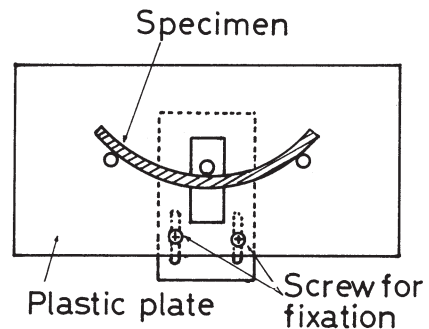


Fig. 2. Handmade tool for fixation of bending set specimen.

湿に際して復元する経過を測定した。

結果と考察

1. 拘束解除後の曲げセット材の復元経過

乾燥過程のクリープによって作製した曲げセット試片の残留たわみは、ブナ材で15~17 mm, ヒノキ材で13~15mmであった。このように大きく曲げセットした試片をアクリル製の固定台上に軽く固定し、吸湿・吸水させて、ほぼ完全に飽水状態とした後に、拘束を解除した。解除とともにスプリングバックが生じ、試片内に弾力的な力が蓄えられていたことを示す。この瞬間回復量を拘束たわみ量に対する比率で示すと、ブナ材で19%, ヒノキ材で16%であった。この値はブナ材の方が若干大きい。

さて、Fig. 3 は拘束解除後の飽水状態におけるヒノキ材およびブナ材の曲げセット試片の復元経過である。測定時間は3000時間（5か月）にわたっている。図には両樹種の各4本の試片から代表的と思われるものを1本ずつ選んで示した。●と▲のプロットは、解除前に一定に拘束したたわみ量を示す。両樹種ともほぼ同様の復元経過を示し、残留たわみは初め急激に減少したが、次第に減少速度がゆるやかに推移した。この経過はよく知られたクリープ回復曲線の傾向に類似する。とくに指摘すべきは、長期にわたって復元傾向が明らかで、5か月後においても依然平衡に達していないことである。

つぎに、拘束たわみ量を100として、飽水状態での残留たわみの減少経過を示すと、Fig. 4 のとおりである。4本の試片の経過曲線はほぼ重なって現れるので、ここでは平均曲線を示した。最終測定時間はヒノキ材で3080時間、ブナ材で3768時間であった。図から明らかのように、両樹種の復元度合いは異なる。3000時間でのたわみ残存率を比較すると、ブナ材で23%, ヒノキ材で36%であった。明らかにブナに比較する時、ヒノキ材の方が戻り方がわる

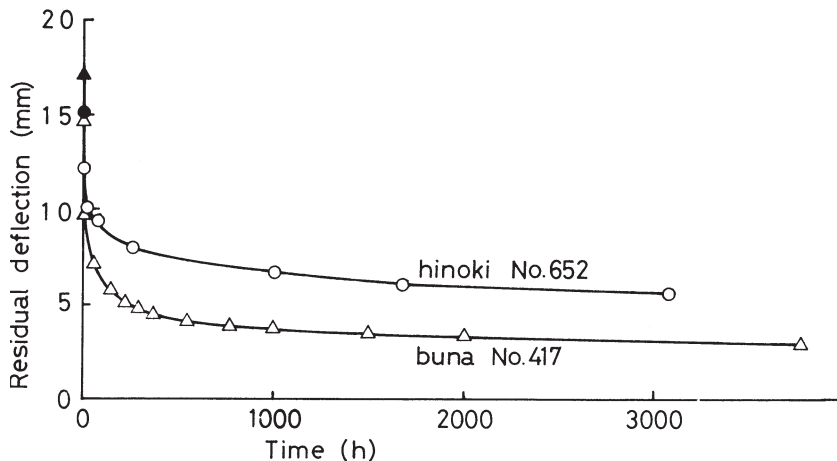


Fig. 3. Course of restoration of bending set wood in water-soaked condition after release from the restraint. ● and ▲ denote the initial values before release from restraint.

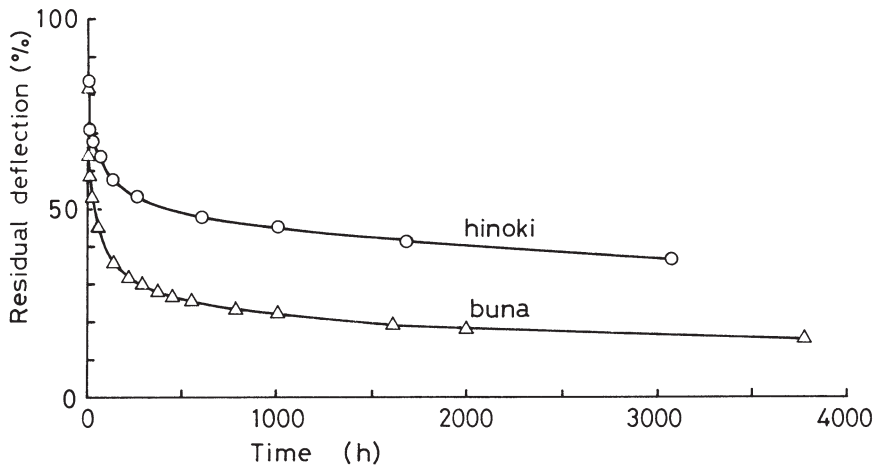


Fig. 4. Residual deflection-time curves in water-soaked condition after release from restraint.

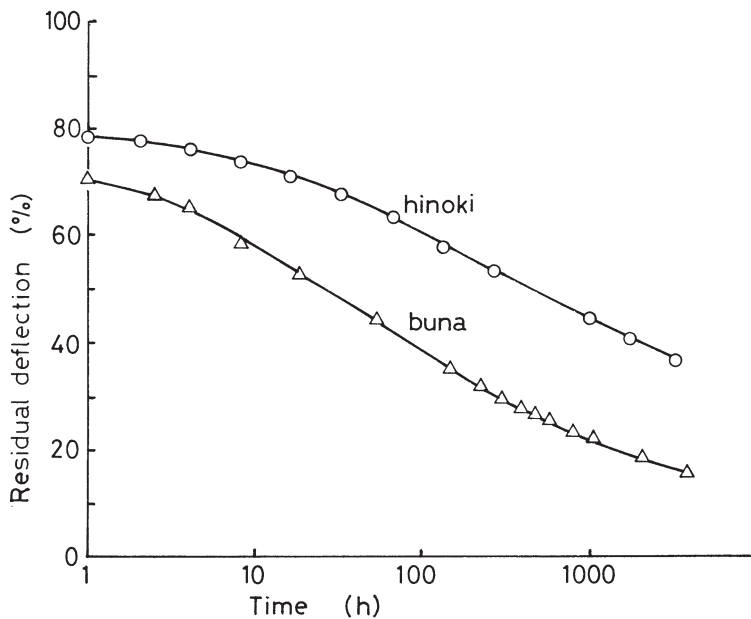


Fig. 5. Residual deflection-logt curves in water-soaked condition after release from restraint.

い。

両樹種の復元経過を詳細に比較するために、たわみの残存率と時間の対数の関係曲線を Fig. 5 に示した。同図のように片対数プロットで示されたブナ材の復元曲線は、初めと終わりの部分で傾きがなだらかで、中間域で比較的傾きが大きい。解放後1000時間付近に達する時、次第に復元傾向が弱まり、徐々に平衡に近づく傾向が読み取れる。

これに対して、同図におけるヒノキ材の復元曲線は初めなだからで、次第に傾きが大きくなる傾向が見られるが、ブナ材のように1000時間を越すに際して、次第に傾きが減少する傾向を示していない。このような経過の相違は、ブナ材に比較する時、ヒノキ材の復元が時間的に遅れて起こるためと考えられる。さらに測定を続けるならば、ブナ材のように次第に傾きがなだらかに推移し、最終的なたわみ残存率はブナ材より高い値にとどまるものと推察される。

なお、たわみ残存率と時間の関係を両対数プロットすると、両者の関係は近似的に直線となる。これを一年後に外挿する時、セット残存率はヒノキ33%、ブナ13%となった。このことから、完全な復元は難しいように思われる。

以上のようなスプリングバック後の復元経過は、一定のひずみの拘束状態から解放されたフォークト要素によって定性的に説明できる。フォークト要素に加えられた拘束が解除される時、スプリングに蓄えられた弾性エネルギーによって復元がおこるが、この復元過程はダッシュポットによって遅延されるものと考えられる。

ただし、単一のフォークト要素が一定のひずみを与えられて、拘束された状態から解放される時、ひずみの対数と時間との間に直線関係が成り立つから、この場合の結果は単一のフォークト要素では説明できないことは明らかである。ここでは、あくまでも定性的に説明するためのモデルとして用いたにすぎない。

木材の細胞壁は骨格をなすマイクロフィブリル (MF) がリグニン、ヘミセルロースからなるマトリックス中に埋め込まれた構造をとると考えられている。乾燥過程のクリープによって曲げセットを生じた木材では、変形した MF がマトリックス中に埋め込まれた状態で固定されているものと考えられる。

このような曲げセットを生じた状態から、無拘束下で吸湿・吸水する時、マトリックスとマイクロフィブリルの相互作用によって、セットの回復が生じて、飽水状態にいたる時、セットされる前の安定な構造を取り戻すと考えられる。

しかし、本報告におけるように、曲げセットの回復を拘束した状態で吸湿・吸水させて、飽水状態にもたらず時、変形した MF を取り囲むマトリックスは自由に膨潤できない。一方、MF もマトリックスの凝集構造の弛緩に応じて自由に復元するという動きもとれない。おそらく、拘束下で飽水状態に達する時、マトリックスと MF は相互に可能な協調した行動は取りえるであろうが、本来、飽水状態で再現される安定な構造からかなり外れた、不安定状態に置かれるものと推定される。

このような変形した MF をひずんだマトリックスが取り巻く状況は、二次壁中層のみならず、二次壁の内外層においても認められるはずである。二次壁の内外層では、MF が細胞の軸方向に対してフラットに配向しているの、木材の膨潤に対するタガの役目を果たしていることが知られている。このようにタガの役目を果たす二次壁内外層のフラット配向する MF もまた、変形を生じた状態で拘束されていると考えられる。

このように考える時、いま考察している復元力にかかわる要因として、1) 二次壁中層における MF の弾性回復力、2) 二次壁内外層におけるフラット配向した MF の復元力あるいはタガ効果、3) マトリックスを構成する分子鎖の復元力を上げることができる。これら3者が相互に作用して、曲げセット材の復元が進行するものと考えられる。この場合、マト

リックスと MF の相互作用および細胞壁内の局所的な復元とよりマクロな復元（たとえば細胞形態の復元）の相互作用が重要な役割を担うものと思われる。

拘束解除後の復元は非常に長い時間におよぶ遅延現象であることが示された。このような長時間に及ぶ復元の遅延は、前述した“局所的な復元作用とよりマクロな復元作用”の相互作用によるものと想定されるが、次ぎの点も指摘すべきであろう。すなわち、飽水状態において、膨潤したマトリックスを構成する分子鎖間には多数の水分子が存在するので、隣接する分子鎖間の相互作用は弱く、これが長時間にわたる復元の遅延を可能にしていると考えられる。

また、飽水状態においては、マトリックス成分であるヘミセルロースのガラス転移点は室温付近まで低下していると考えられるのに対して、リグニンは依然ガラス状態にあり、その疎水性とあいまって湿潤状態における強度に大きく貢献するといわれている。リグニンは細胞壁中で3次元的なネットワークあるいはスケルトンを構成すると考えられている。リグニン含量は広葉樹に比較して針葉樹材で高いことから、ブナ材に比較して、ヒノキ材で拘束解除後の戻りが少ない結果は、リグニン量の違いに由来するマトリックスの質的な相違に起因する可能性が考えられる。

2. 復元途中からの乾燥に伴う残留たわみの推移

ブナ材では拘束解除10日後、ヒノキ材では拘束解除5日後に試片を水中から取り出して、緩やかに乾燥した。この過程における曲げセットの残存率と含水率の関係を Fig. 6 に示した。乾燥を始めた時点のたわみ残存率はブナ材で約33%、ヒノキ材で約68%であった。

ブナ材の場合、含水率125%からゆるやかに乾燥する時、含水率30%付近まで残留たわみの変化は少なく、曲線はほぼ横這いで推移した。しかし、含水率30%以下になると次第に残留たわみが増加する傾向が認められた。乾燥終了時のたわみ残存率は41.5%で乾燥開始時の33%を上回った。

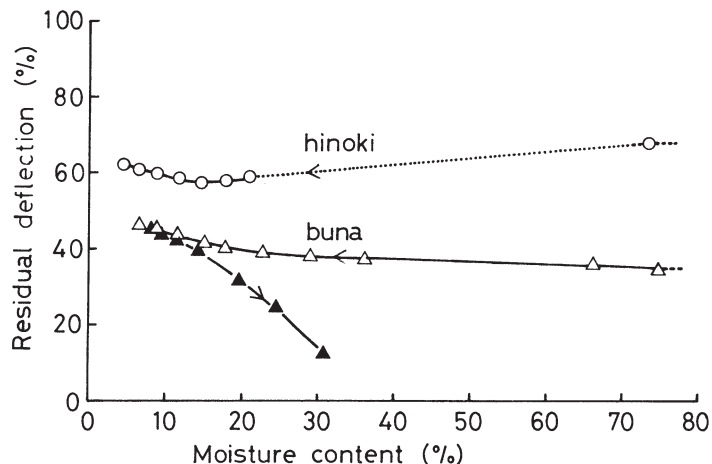


Fig. 6. Changes of residual deflection during drying. In the course of restoration process, some specimens were taken out of the water and were dried slowly.

一方、ヒノキ材では、含水率230%から約60%付近まで残留たわみの変化はなかった。その後含水率は23%まで一気に低下しているが、以後の含水率低下とともに、残留たわみは減少し、含水率15%付近で最小値を示した後、増加した。乾燥終了時のたわみ残存率は63%で乾燥開始時の68%より小さかった。なお、含水率15%付近の残留たわみの最小値は58%であった。

以上のように、復元途中から乾燥する時、残留たわみの推移は両樹種で若干異なった。ブナ材では、含水率30%付近まで残留たわみはほぼ一定で、その後わずかに増加したのに対して、ヒノキ材では乾燥にともなって、いったん減少したのちに増加した。一般的に、曲げセット材あるいはテンションセット材を吸湿あるいは吸水させた後の湿潤状態に比較する時、再びフリーで乾燥した後の残存セット量が大きくなる傾向がある。おそらく、湿潤状態ではなんらかの内力がセットを復元させるように働いているものと考えられる。これに対して乾燥状態においては、内力が消失するため、未だ完全に復元していない構造要素の残留変形が現れてくるものと考えられる。

ブナ材の場合、湿潤状態に比較し乾燥状態の方が残留たわみが大きく、前述の一般的な傾向と一致している。しかし、ヒノキ材では、湿潤状態よりも乾燥後の残留たわみが小さくなった。このような両樹種における乾燥過程における残留たわみの推移の違いを説明する一つの要因は両樹種における復元経過の遅速であろう。乾燥開始時点の両樹種のたわみ残存率はブナ材33%、ヒノキ材68%であった。たわみ残存率がこのような値を示す状態では、Fig. 4の復元曲線から明らかなように、両樹種における復元の勢いが明らかに異なる。このように、異なるたわみ残存率の状態から乾燥を始めた為に、乾燥のある段階までヒノキ材は依然復元傾向を示したのに対して、ブナ材では残留たわみの変化が認められず、結果として両樹種の挙動の違いが現れた可能性がある。

なお、ブナ材の曲げセット試片について、乾燥状態から吸湿させて、吸湿に伴う残留たわみの復元を検討した結果を、Fig. 6に示した。乾燥後のたわみ残存率は約40%であったが、吸湿に伴って明らかな回復を生じて、繊維飽和点付近ではたわみ残存率が10%程度まで減少した。おそらく、湿潤状態から乾燥することによって、復元力に寄与すると考えられる二次壁内外層のタガ効果が消失し、ミクロフィブリルは変形した状態で、高い凝集構造をとるマトリックスによって取り囲まれて固定されるものの、吸湿によって一時凍結されていた復元力が活性化し、繊維飽和点に向かって復元していくものと考えられる。

要 約

ヒノキ材とブナ材の短冊型試片を用いて乾燥過程のクリープによって曲げセット材を作製し、回復を拘束して吸湿・吸水させた試片の拘束解除後の飽水状態での復元経過を測定した。おもな結果は次のとおりである。

- 1) 拘束を解除する時、スプリングバックが生じたことから、回復を拘束して吸湿・吸水させる時、一種の水分応力が発生していることがわかる。
- 2) 両樹種とも、拘束解除後に残留たわみは初め急激に減少するが、次第に減少速度が低下した。しかし、5か月後においても、依然減少傾向が明らかである。

- 3) 復元経過を時間の対数に対してプロットする時、ブナ材とヒノキ材で経過曲線が異なった。これは、ヒノキ材の復元が相対的に遅れて生じることによると考えられる。
- 4) 5か月後のたわみ残存率は、ブナ材で23%、ヒノキ材で36%であり、明らかにヒノキ材の戻りがわるい。
- 5) 復元途中で、試片を取り出して緩やかに乾燥する時、ブナ材では残留たわみは、湿潤時（乾燥開始前）より乾燥後で大きかった。一方、ヒノキ材では含水率15%付近に残留たわみの最小値を示し、以後の乾燥によって増加したけれども、乾燥後の残留たわみは湿潤時（乾燥開始前）より小さくなった。
- 6) 以上の結果を踏まえる時、回復を拘束して水中浸漬した曲げセット材は、本来の安定な構造から外れた不安定な状態に置かれていること、拘束解除後の復元は非常に長い時間に及ぶ遅延現象であって、引き伸ばされて弾性エネルギーを蓄えた“スプリング”が復元力となって、その動きを“ダッシュポット”が遅延していると定性的に説明できる。ブナ材とヒノキ材における復元の度合い及び復元速度の違いは、細胞壁のマトリックスの質的な相違によるものと考えられる。

キーワード：復元，曲げセット，飽水状態

引用文献

- 1) 徳本守彦：木材学会誌，19，577-584，1973.
- 2) 徳本守彦：第41回日本木材学会大会（松江）研究発表要旨集，p.53，1991.
- 3) Armstrong, L. D. and Christensen, G. N.: Nature, 191, 869-870, 1961.
- 4) 板倉祥文，徳本守彦：材料，26，413-416，1977.
- 5) 佐道 健，木村泰男：木材学会誌，21，430-433，1975.