

マイクロ波加熱による木材の曲げ加工
横方向曲げ処理材の水分・熱回復^{*1}

飯田 生穂^{*2}, 則元 京^{*3}, 今村 祐嗣^{*4}

Wood Bending Utilizing Microwave Heating
Hygrothermal Recovery of Bentwood in the
Direction Perpendicular to Grain^{*1}

Ikuho IIDA^{*2}, Misato NORIMOTO^{*3} and Yusuke IMAMURA^{*4}

Abstract

Wood pieces were bent in the direction perpendicular to grain during microwave irradiation and changes occurred in the anatomical structure of the bent pieces were examined through SEM observation. Furthermore, changes in curvature of the bent piece by moisture and heat treatments were investigated. Cells on the convex and concave sides of the bent piece were extremely extended and contracted to the directions of induced tensile and compressive stresses, respectively. Irregularities of the wall surface and distorted pit apertures were found on the radial walls on the concave side. The bent pieces returned almost to their original shapes when they were subjected to moisture and heat treatments. However, the extent of the recoveries by the respective treatments was different between hardwoods and softwoods. One of the causes seemed to be resulted from the different proportions in the chemical constituents. By such treatments the irregularities of the wall surface were disappeared and the distorted cells returned to their original shapes.

要 旨

マイクロ波加熱を利用して木材の横方向の曲げ加工を試み、組織構造上に現われる変化を SEM を用いて観察した。また、曲げ加工材の変形の水分および熱による回復を調べた。

細胞は、引張側では引張応力の作用した方向に伸び、逆に圧縮側では圧縮応力の作用した方向に縮んだ様子が明確に観察された。圧縮側の細胞の半径壁では、壁表面の凹凸および壁孔口の変形が顕著に認められ

*1 本報告の一部は、第32回日本木材学会大会（1982年4月、福岡）において発表した。

*2 京都府立大学農学部、京都市左京区下鴨半木町（Faculty of Agriculture, Kyoto Prefectural University, Kyoto 〒606）

*3 木材物理部門（Research Section of Wood Physics）

*4 木材防菌防虫実験施設（Research Facility of Wood Protection）

た。曲げ加工材の変形は水分と熱によってほぼ完全に回復した。針葉樹材と広葉樹材の間に、回復の様子に差異が認められ、その原因は木材成分割合の違いに基づくものと思われた。また、水分と熱によって変形の回復した材では、細胞および細胞壁に見られた変形は、ほとんど消失した。

1. 緒 言

従来より、木材の曲げ木加工は、繊維方向に限定して研究が行われてきている。しかし、今後、多方面にわたる曲げ木の利用を考えていく上で、繊維に直角方向の曲げ木加工についても検討しておくことが重要である。

木材の曲げ木加工は、水分・熱の作用下で生じる大きな変形とセットをたくみに応用したものである。したがって、曲げ加工過程における変形の様子や固定された変形の水分・熱による回復の様子を、木材の構造に現われる変化と関連づけて調べることは、セットの機構を解明する上で、重要な示唆を与えるものと思われる。

前報¹⁾では、マイクロ波加熱を用いた繊維に直角方向の曲げ加工について、破壊なしに達成しうる最大変形に主眼をおいて検討した。結果として、飽水材にマイクロ波を照射する過程で生じるクリープ変形は、繊維方向同様²⁻⁴⁾、繊維に直角方向でも著しく大きく、その量は瞬間たわみの30倍以上にも達すること、破壊なしに達成しうる最大クリープひずみが、飽水 100℃ の条件で求めた静的破壊ひずみをはるかに越えること、曲げ処理材横断面の SEM 観察で、組織構造には局所的な変形の集中や破壊などの欠点が発生していないことなどが明らかになった。

本報告では、マイクロ波照射過程におけるクリープひずみおよびその水分・熱による回復の様子を、樹種の組織構造上の差異ならびに SEM 観察で認められる組織構造上の変化と関連づけて検討した。

2. 実 験

2.1 クリープ測定

供試樹種として、マイクロ波照射過程のクリープ測定には、スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don), ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.), イチョウ (*Ginkgo biloba* L.), クロマツ (*Pinus thunbergii* Parl.) の針葉樹材 4 種, キリ (*Paulownia tomentosa* Steud.), ヤチダモ (*Fraxinus mandshurica* Rupr.), シオジ (*Fraxinus spaethiana* Lingelsh), ミズナラ (*Quercus crispula* Blume), ハリエンジュ (*Robinia pseudo-acacia* L.), ケヤキ (*Zelkova serrata* Makino.) の広葉樹環孔材 6 種, ポプラ (*Populus Sieboldi* Miq.), ホノノキ (*Magnolia obovata* Thunb.), オニグルミ (*Juglans mandshurica* Maxim.), クスノキ (*Cinnamomum camphora* Sieb.), ブナ (*Fagus crenata* Blume), カバ (*Betula* sp.), イスノキ (*Distylium racemosum* Sieb et Zucc.) の広葉樹散孔材 7 種の計 17 樹種を、熱気乾燥過程のクリープ測定には、これらに加えて針葉樹材としてスラッシュパイン (*Pinus elliottii* Engelm.), 広葉樹散孔材としてトチノキ (*Aesculus turbinata* Blume), 広葉樹放射孔材としてアラカシ (*Quercus glauca* Thunb.) の計 20 樹種を用いた。試片寸法は、長さ 15 cm (半径方向), 幅 1.0 cm (繊維方向), 厚さ 0.5 cm (接線方向) であった。マイクロ波照射装置内および温度 50℃, 相対湿度 9% の環境に保持した熱気乾燥装置内で、試料をスパン 10 cm とし二点で支持し、中央に負荷を与え、マイクロ波照射の過程および熱気乾燥の過程で中央のたわみを読取顕微鏡 (精度: $\frac{1}{100}$ mm) を用いて経時的に測定した。試片はいずれも飽水状態から全乾に近い状態まで乾燥した。与えた初期応力は樹種によって異なるが、マイクロ波加熱の場合、2.4~31.6 kg/cm² の範囲で、一樹種につき 4~8 段階に、熱気乾燥の場合、1.2~54.2 kg/cm² の範囲で、一樹種につき 6~12 段階に変化させた。また、比較のため温度 50℃ で試料をポリエチレンで包み、飽水状態を保った状態でのクリープ測定を行った。

2.2 曲げ処理材の水分・熱回復測定

マイクロ波照射過程のクリープ測定に用いた試片の中から、ヒノキ、イチョウの針葉樹材、ホオノキ、クスノキ、ブナの広葉樹散孔材、ミズナラ、ケヤキ、ヤチダモの広葉樹環孔材計8樹種を、熱気乾燥過程のクリープ測定に用いた試片の中から、ヒノキの針葉樹材、ホオノキ、カバの広葉樹散孔材、ミズナラ、ケヤキ、ヤチダモ、シオジの広葉樹環孔材計7樹種を、供試材として用いた。クリープ測定したのち室内に数ヶ月放置後全乾状態とし、飽湿→気乾→全乾→飽水→気乾→全乾→飽水で熱処理（30℃ から 100℃ へ上昇する7段階）→気乾→全乾と順次移行させ、その間の各条件においてたわみ測定を行った。たわみ量の測定は、試料をゼロックス紙上に写しとることにより求めた。また、マイクロ波照射過程のクリープ測定に用いた材の中から、ヤチダモ、オニグルミについて、約一ヶ月にわたり温度 20℃、相対湿度約 100%の条件で、吸湿過程のたわみ回復を経時的に測定した。

2.3 SEM による観察

曲げ加工試料および水分・熱回復処理試料について、走査電子顕微鏡（SEM）観察を行った。用いた樹種は、ヒノキ、ホオノキ、ヤチダモであった。曲げ加工試料の彎曲部引張側部分、中央部分、圧縮側部分、および水分・熱回復試料のそれに相当する部分から小片を切り出し、表面を平滑にした後、横断面、放射断面、接線断面で SEM 観察を行った。

3. 結果と考察

3.1 クリープ変形

静的破壊ひずみは、20℃ 気乾状態に比べて 20℃ 飽水状態で大きく、100℃ 飽水状態ではさらに大きくなった。このような水分と温度による破壊ひずみの増加の割合は、針葉樹材グループと広葉樹散・環孔材グループで異なったり。そこで、温度一定で水分のみが変化する熱気乾燥過程のクリープ変形と、水分・温度の両者が変化するマイクロ波加熱過程のクリープ変形に、静的破壊ひずみの場合にみられた両グループの相違と同様の傾向が認められるかどうかについて調べた。

図1は、ヒノキ材およびブナ材についてのマイクロ波加熱過程および熱気乾燥過程の最大クリープひずみと負荷応力との関係を示す。図中の●印はマイクロ波加熱を、○印は熱気乾燥の結果を示す。負荷応力が小

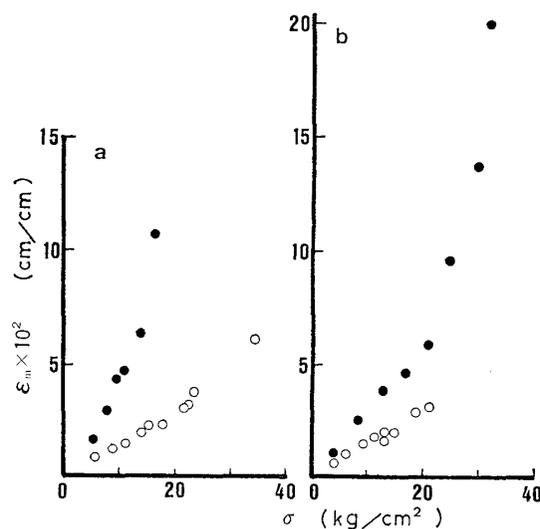


図1. 最大クリープひずみ (ϵ_m) と負荷応力 (σ) の関係
 ●：マイクロ波加熱， ○：熱気乾燥
 a：ヒノキ， b：ブナ

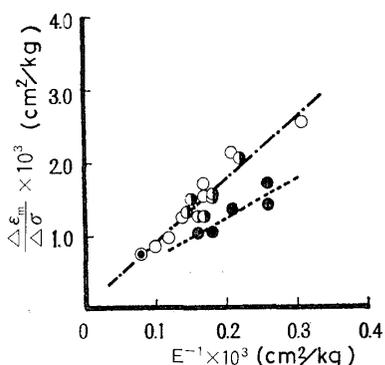


図2. 熱気乾燥による樹種のクリープ性能

$\frac{\Delta \epsilon_m}{\Delta \sigma}$: 単位負荷応力当たりの最大クリープひずみ

E : 飽水材の弾性率

- : 針葉樹材
- : 広葉樹環孔材
- ◐ : 広葉樹散孔材
- ⊙ : 広葉樹放射孔材

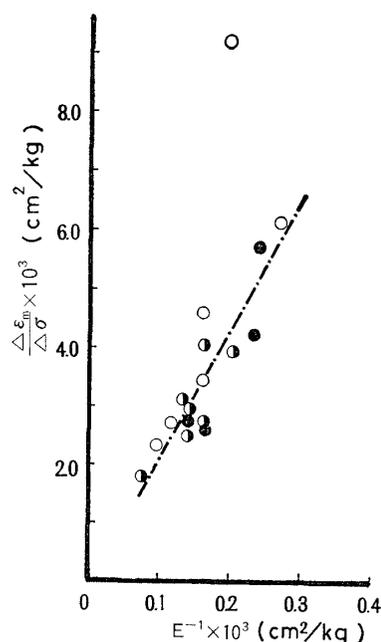


図3. マイクロ波加熱による樹種のクリープ性能

$\frac{\Delta \epsilon_m}{\Delta \sigma}$: 単位負荷応力当たりの最大クリープひずみ

E : 飽水材の弾性率

- : 針葉樹材
- : 広葉樹環孔材
- ◐ : 広葉樹散孔材

さい領域では、樹種、乾燥方法に関係なく、最大クリープひずみと負荷応力の間には比例関係が認められる。この傾向は、他の樹種についてもみられる。直線の傾きは、単位負荷応力の増大に伴う最大クリープひずみの増大を表わし、この値 $\frac{\Delta \epsilon_m}{\Delta \sigma}$ によってクリープ性能を評価する。図2および3に $\frac{\Delta \epsilon_m}{\Delta \sigma}$ と飽水時の弾性率の逆数 $\frac{1}{E}$ の関係を示す。図中の●印は針葉樹材を、○印は広葉樹環孔材を、◐印は広葉樹散孔材を、⊙印は広葉樹放射孔材を示す。図2の熱気乾燥の場合、 $\frac{\Delta \epsilon_m}{\Delta \sigma}$ は $\frac{1}{E}$ とともに直線的に増大し、広葉樹散孔材・環孔材および放射孔材との間には差異がほとんど認められないが、針葉樹材と広葉樹材の間には、明確な差異が認められる。すなわち、同じ $\frac{1}{E}$ の値で比較すると、広葉樹材の $\frac{\Delta \epsilon_m}{\Delta \sigma}$ は針葉樹材のそれに比べて大きく、また、 $\frac{\Delta \epsilon_m}{\Delta \sigma} - \frac{1}{E}$ の直線の勾配も大きい。一方、図3のマイクロ波加熱の場合、ヤチダモ材を除き、 $\frac{\Delta \epsilon_m}{\Delta \sigma} - \frac{1}{E}$ の関係は樹種にほとんど依存しない。前報¹⁾では、20℃ 気乾状態から20℃ 飽水状態へ変化することに伴う静的破壊ひずみの増大が、針葉樹材に比べて広葉樹材で大きく、また、20℃ 気乾状態から100℃ 飽水状態へ変化することに伴う静的破壊ひずみの変化に、針葉樹材および広葉樹材の間で差異が認められないことを示し、これらの結果から、水分の破壊ひずみに及ぼす効果は、針葉樹材に比べて広葉樹材で大きく、温度の破壊ひずみに及ぼす効果は、逆に広葉樹材に比べ、針葉樹材で大きいと結論した。図2および図3の結果から、 $\frac{\Delta \epsilon_m}{\Delta \sigma}$ に対しても、静的破壊ひずみの場合と類似の傾向が認められる。すなわち、水分のみが変化する熱気乾燥過程のクリープ性能は、針葉樹材に比べて広葉樹材で大きい。一方、水分および温度が変化するマイクロ波加熱過程のクリープ性能は、樹種に依存しないことから、クリープ性能の温度効果は、広葉樹材に比べて針葉樹材で大きいと考えられる。この原因については、水分・熱回復に関連づけて後述する。な

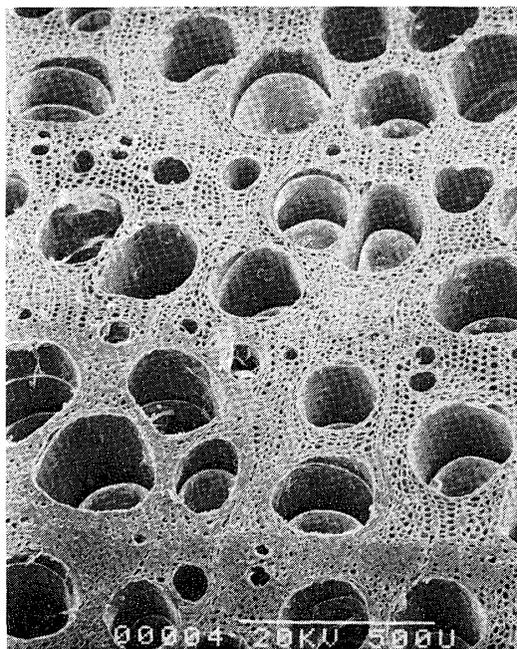


写真1. ヤチダモのぬか目試料

お、ヤチダモ材は、マイクロ波加熱に用いた材の中に、負荷部分で写真1に示すように、ぬか目の存在するものがある。そのため数値にバラツキがあり、勾配の決定に誤差を生じ、みかけ上高い値を示したものと思われる。

つぎに、各負荷応力下での 50℃ 飽水状態のクリープ測定から得た $\frac{\Delta \epsilon_m}{\Delta \sigma} - \frac{1}{E}$ の関係から求めたクリープ性能を1とし、熱気乾燥およびマイクロ波加熱のそれを比率で表わすと、熱気乾燥の場合、針葉樹材で1.9、広葉樹材で2.9となり、一方、マイクロ波加熱の場合、針・広葉樹材で差異はなく7.6となる。

3.2 曲げ加工材の水分・熱回復

マイクロ波加熱を用いて曲げ加工したヒノキ材およびケヤキ材についてのたわみ量の水分による回復の様子を図4に示す。図中の矢印は各含水率条件に移行させた順を、また、横軸はたわみ測定時の試片含水率を

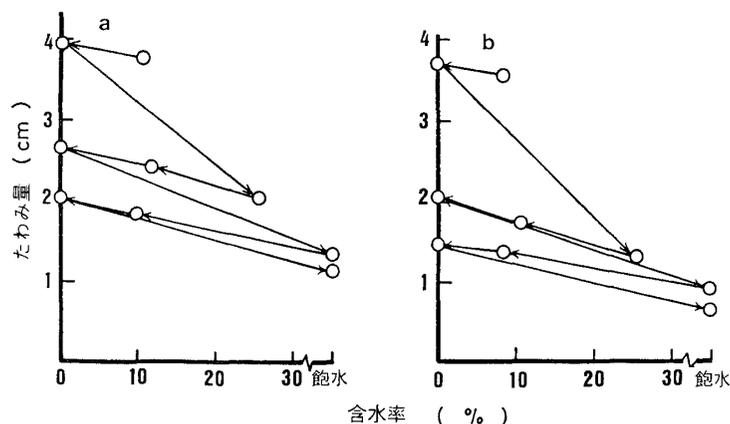


図4. マイクロ波加熱による曲げ加工材の水分回復
a: ヒノキ, b: ケヤキ
矢印: 各含水率条件に移行させた順を示す。

示す。最初気乾状態にあったものを全乾状態にすると、たわみはわずかに増大するが、その量は極めてわずかである。ついで飽湿状態にすると、たわみは著しく減少し、ヒノキ材では約 3.9 cm から約 2.0 cm に、ケヤキ材では約 3.7 cm から約 1.3 cm に変化する。以後、飽湿状態にあるものを気乾状態、さらに全乾状態にすると、たわみ量は増大するが、最初のとわみに達することなく、乾・湿の繰返しによってかなりのたわみが回復する。その後、飽水状態→気乾状態→全乾状態→飽水状態にすると、さらに若干たわみは回復する。なお、他樹種についても同様のたわみの回復が認められる。

吸湿過程でのたわみの変化の様子を詳しく知るために、気乾状態で約 4.0 cm のたわみをもつヤチダモ材およびオニグルミ材について、温度 20℃、相対湿度約 100% の環境下での長期にわたるたわみの回復経過を調べた。図 5 にたわみ量の減少量と吸湿量の関係を示す。吸湿初期には、たわみの減少は吸湿量に比例していないが、吸湿量 5% 以上では、たわみの減少量と吸湿量はほぼ直線関係となり、たわみの減少は吸湿量に依存することがわかる。

つぎに、図 4 に示した水分回復後の熱による回復の結果を図 6 に示す。飽水状態で熱処理した場合、たわみの変化は温度 50~60℃ までにはほとんど認められず、それ以上の温度でたわみの回復が急激になり、80℃ 以上になるとふたたびその程度は緩慢となる。急激にたわみが回復しはじめる温度は、木材成分の内のヘミセルロースおよびリグニンのガラス転移域に相当する^{5,6)}。100℃ 飽水状態でのたわみ量をみると、大半の樹種で 0.2 cm 以下で、比較的大きい値を示すヒノキ材およびイチウ材でたかだか 0.4 cm 程度である。回復処理前のたわみが 3~4 cm であったことから、回復後のそれは著しく減少している。ヒノキ材およびケヤキ材について、水分と熱による回復を最初の全乾状態でのたわみ量を 1 とし相対値で表わしたのが図 7 である。図中下向き矢印は飽水状態で 20℃ から 100℃ まで順次熱処理を行ったさいのたわみの変化を示す。一たん飽湿状態にした後全乾状態にした場合、たわみの相対値はヒノキ材で 0.68、ケヤキ材で 0.56、飽水状態にした後全乾状態にした場合、前者で 0.52、後方で 0.40 となる。飽水状態で 100℃ において処理したときのたわみの相対値は、それぞれ 0.11 および 0.08 となり、その後全乾状態にすると、いずれも 0.21 となる。この結果から、マイクロ波加熱によって曲げ加工した材のたわみは、水分と熱により初期の 1/10 から

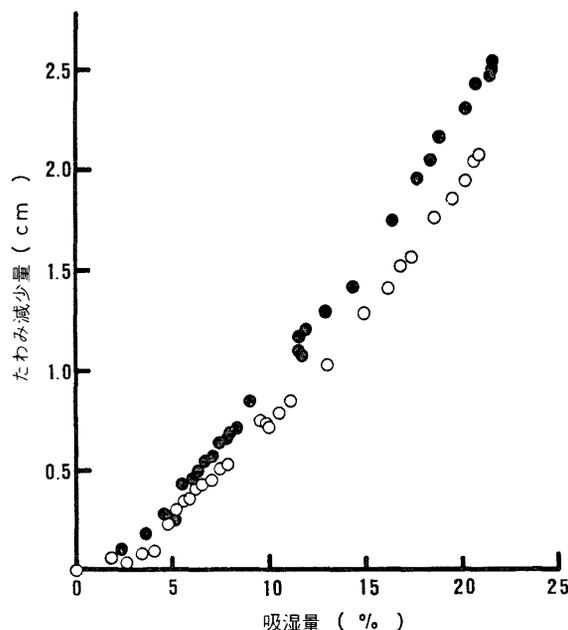


図 5. 吸湿過程におけるたわみ減少量と吸湿量の関係
● : ヤチダモ, ○ : オニグルミ

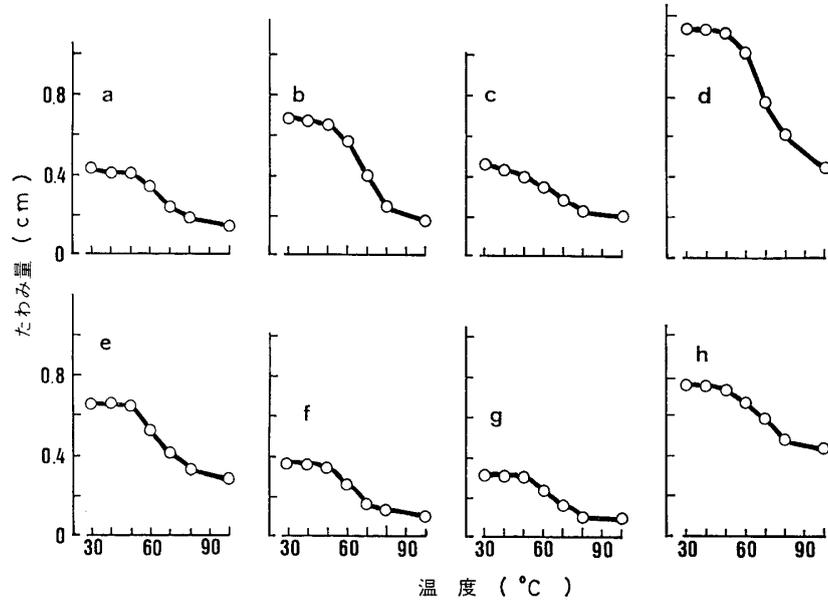


図6. 曲げ加工材の飽水状態での熱回復
 a：ホオノキ, b：クスノキ, c：ブナ, d：ヒノキ,
 e：ケヤキ, f：ヤチダモ, g：ミズナラ, h：イチヨウ

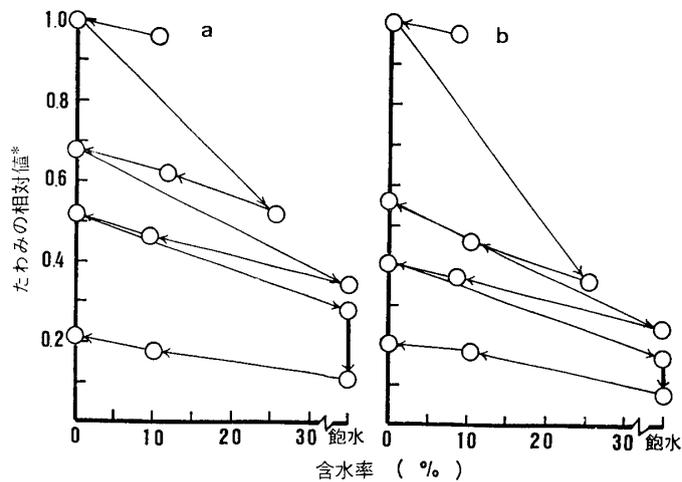


図7. たわみの相対値*と含水率の関係
 *：最初の全乾状態のときのたわみを1とした各含水率条件のたわみの比率
 a：ヒノキ, b：ケヤキ

1/5 に回復する。このように極めて大きいたわみが水分・熱処理をうけてその大半を回復させる事実は、マイクロ波加熱による曲げ変形の機構を考える上で有効な示唆を与えており、しかも、細胞・組織に破壊を生じていないことをうらづけている。ヒノキ材とケヤキ材の違いについて調べると、飽水状態にした後全乾状態にしたときのたわみの相対値は、ケヤキ材に比べヒノキ材で約0.1大きい。しかし、引き続き飽水状態で熱処理後全乾状態にしたとき、両樹種でたわみの相対値は等しい。写真2は水分・熱回復処理前の気乾状態の残留たわみの様子と、飽水状態で100℃の熱処理を行った直後のたわみの様子を比較したものである。

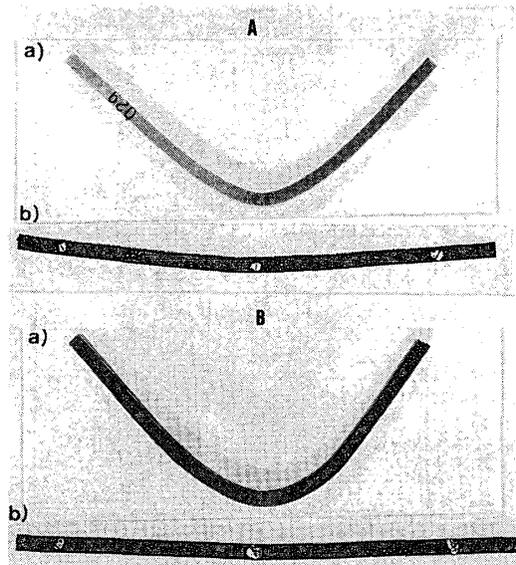


写真2. 水分・熱処理によるたわみの変化
 a : 気乾状態の曲げ加工試料
 b : 飽水100°Cで熱処理した試料
 A : ヒノキ, B : ブナ

表1. マイクロ波曲げ加工材の水分・熱回復

		飽湿処理後の 全乾試料	飽水処理後の 全乾試料	飽水熱処理後の 全乾試料
マイクロ波 曲げ加工材	針葉樹材	0.64*	0.48*	0.21*
	広葉樹散・環孔材	0.54	0.37	0.17
	全樹種	0.56	0.39	0.18

* : 最初の全乾状態のときのたわみを1とした相対値

表1は用いた全樹種についてのたわみの相対値を示す。水分・熱処理によるたわみの相対値の変化には、広葉樹散孔材と環孔材との間に差がほとんど認められない。飽湿状態および飽水状態にした後全乾状態にしたときのたわみの相対値は、針葉樹材と広葉樹散・環孔材との間に約0.1の差異があり、また、熱処理後では、両グループに有意な差が認められない。したがって、ヒノキ材とケヤキ材で認められた水分・熱回復性の違いは、針葉樹材と広葉樹散・環孔材グループの違いによるものと考えることができ、水分回復は広葉樹散・環孔材で、熱によるそれは針葉樹材で大きいといえる。全回復量に対する各処理条件での回復率を求めると、針葉樹材では飽湿状態にしたとき43.9%、飽水状態にしたとき19.5%、飽水状態で熱処理したとき36.5%、広葉樹散・環孔材ではそれぞれ56.1%、20.7%、および23.2%である。したがって、水分のみによる回復は、針葉樹材で63.4%、広葉樹散・環孔材で76.8%である。

以上の結果から、マイクロ波加熱を用いて曲げ加工した材の残留たわみは、水分と熱の作用をうけるとそのほとんどが回復すること、水分と熱による回復は、針葉樹材グループと広葉樹散・環孔材グループで異なり、水分回復は後者で、熱回復は前者で大きいことが明らかとなった。両グループで回復に差異を示す原因は、木材横断面の道管配列に特徴を示す広葉樹散孔材と環孔材で差異のないこと、および水分と熱の両作用をうけた後の値は、針葉樹材と広葉樹散・環孔材で等しくなることなどから、細胞の種類や細胞の配列・形態などの組織構造因子が関係しているとは思われない。したがって、細胞構造や木材成分が関係しているも

のと考えることができる。なかでも木材主成分は、一般に、針葉樹材は広葉樹材に比べリグニンが約10%多く、ヘミセルロースが約10%少ないといわれている⁷⁾。ヘミセルロースは吸湿性に富むため⁸⁾、それを多く含む広葉樹材は針葉樹材に比べ水分の影響を大きくうけるはずである。したがって、水分による回復が針葉樹材に比べて大きいことが説明できる。さらに、飽水状態で80℃以上の熱処理をうけると、リグニンが軟化するため⁹⁾、さらに回復が進行するが、その程度はリグニン量に影響をうけるはずである。したがって、リグニンを多く含む針葉樹材では熱による回復が広葉樹材に比べて大きいことが説明できる。以上のことは、50℃で熱気乾燥によって曲げ加工した材の水分・熱回復の結果と比較することによってさらに明らかになるであろう。図8は熱気乾燥過程で曲げ加工したヤチダモ材、ヒノキ材、ミズナラ材についての水分回復の様子を示したものである。たわみは加工後全乾状態にしたときのそれを1として相対値で示している。たわみの減少は、飽湿状態にしたとき著しく、乾燥後飽水状態にするとたわみがわずかではあるが減少する。飽水状態にしたときのたわみの相対値は約0.14となり、マイクロ波加熱過程で曲げ加工したものに比べて水分による回復がかなり大きい。全樹種について、水分・熱処理によるたわみの相対値の変化を表2に示す。熱気乾燥過程で曲げ加工した材の水分・熱処理後のたわみの相対値は、飽湿状態にした後全乾状態にした場合0.39、飽水状態にした後全乾状態にした場合0.23、飽水状態で熱処理した場合0.15である。したがって、飽湿および飽水状態になることによる回復は全回復の約91%をしめる。これに比べて、マイクロ波加熱による場合、水分による回復は全体の約74%、残りの26%が熱処理による。50℃の熱気乾燥過程では、リグニンが熱軟化していない状態であり、したがって、クリープ変形は水分の離脱のさいに現われるものが主体をなすと考えられる。一方、マイクロ波加熱過程では、80℃以上の温度になって、さらにリグニンの軟化を伴った状態でのクリープ変形が生じているものと考えられる。このことから、熱気乾燥過程で曲げ加工した材は、水分のみでたわみがほとんど回復するのに対し、マイクロ波加熱過程で曲げ加工した材では、水分のみではたわみの回復は不十分で、十分な回復を起こすためには、熱処理を必要とすることが考えられる。

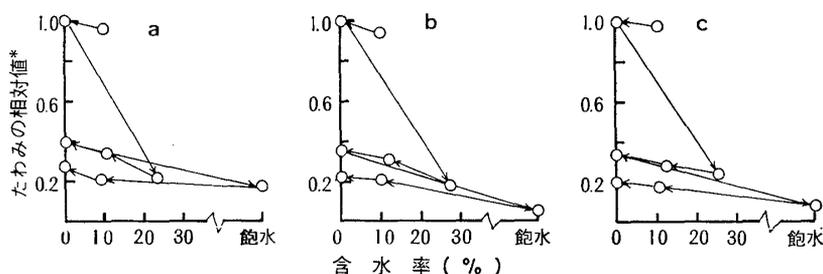


図8. 熱気乾燥曲げ加工材の水分回復

a : ヒノキ, b : ミズナラ, c : ヤチダモ

* : 最初の全乾状態のときのたわみを1とした各含水率条件のたわみの比率

表2. マイクロ波曲げ加工材と熱気乾燥曲げ加工材の水分・熱回復の比較

	飽湿処理後の全乾試料	飽水処理後の全乾試料	飽水熱処理後の全乾試料
マイクロ波曲げ加工材	0.56±0.06* (53.7%)	0.39±0.06* (20.7%)	0.18±0.04* (25.6%)
熱気乾燥曲げ加工材	0.39±0.04 (71.8%)	0.23±0.04 (18.8%)	0.15±0.04 (9.4%)

* : 最初の全乾状態のときのたわみを1とした相対値

() : 全回復量に対する比率

3.3 SEM による観察

曲げ加工したヒノキ材の SEM 観察結果を写真 3～5 に示す。写真中の矢印は引張りまたは圧縮応力の作用した方向を示す。写真 3-a はヒノキ材横断面の彎曲部引張側、3-b は中央部分、3-c は圧縮側を示す。仮道管の横断面の形状は、引張り側で伸び、圧縮側で縮んでいる。特に、圧縮側では半径方向への細胞の規則的な配列はくずれ、複雑な配列をとる。写真 4-a は彎曲部引張側の仮道管接線壁表面、4-b, b' は圧縮側の半径壁表面を示す。引張側では、写真 3-a に示されているように、細胞壁の半径方向に引張応力が作用し、細胞はその方向に細長く伸びる。反面接線方向では細胞は縮んでいる。したがって、半径壁には細胞壁のしゅう曲などは認められないが接線壁には写真 4-a から明らかなように、引張側であるにもかかわらず、圧縮応力を受けて生じたと思われる凹凸が観察される。一方、圧縮側の半径壁では壁孔口の形状がかなり変化し、半径壁表面にはかなり複雑なくぼみ、あるいはふくらみが生じている。また、写真 5 は彎曲部圧縮側での観察結果で、仮道管の接線壁から対向する接線壁を貫ぬいて現われるトラベキュラーの変形の様子が認められる。5-a は 3 細胞を貫ぬくトラベキュラーの変形の様子を示し、細胞中央付近でトラベキュラーの一部がもりあがっている様子が認められる。5-b はそれを拡大したものである。トラベキュラーそれ自身の上に一方からおいかぶさって圧縮変形の生じている様子が明確に認められる。以上の写真より、マイクロ波加熱過程での変形は次のように推定できるであろう。飽水状態にある木材にマイクロ波を照射すると発熱し、細胞壁でマイクロフィブリル間げきをうめているリグニンおよびヘミセルロースよりなるマトリックスが軟化する。このような状態下で負荷が作用していると、圧縮または引張応力に応じてマイクロフィブリル相互の間げきが縮小または拡大する。圧縮応力をうけている場合、マイクロフィブリル相互の間げきが十分縮小した後さらに変形が進行すると、当然半径壁の厚さを増加させる方向、すなわち、応力の作用方向に対して直角方向へのマイクロフィブリル相互の移動を生じる。このような変形過程を経てさらに変形が進むと、次に壁全体として直角方向への移動、すなわち、壁表面にくぼみやふくらみを生じる。この変形は細胞構造に関係してかなり複雑な様子を現わすはずである。たとえば、写真 4-b, b' にみられるような彎曲部圧縮側の仮道管半径壁に複雑な変形が現われる。これらの変形は、壁全体がかなり柔軟であることによって破壊することなく達成されたといつてよい。引張側の仮道管半径壁も圧縮側の変形の様子からみて、かなり伸張しているはずである。しかし、壁表面は平滑であるので、SEM 観察では十分にそれらの変形の様子は認められない。

ヤチダモ材の観察結果を写真 6, ホノキ材のそれを写真 7, 8 に示す。ヤチダモ材では、荷重直下の圧

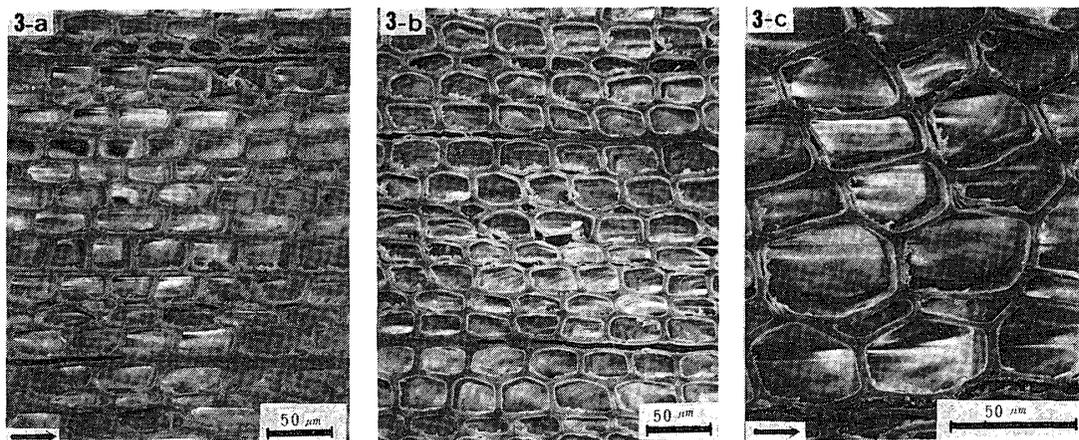


写真 3. ヒノキ曲げ加工材横断面の細胞形状
 3-a : 彎曲部引張側, 3-b : 中央部分, 3-c : 彎曲部圧縮側
 矢印 : 引張ないし圧縮応力の作用した方向を示す。

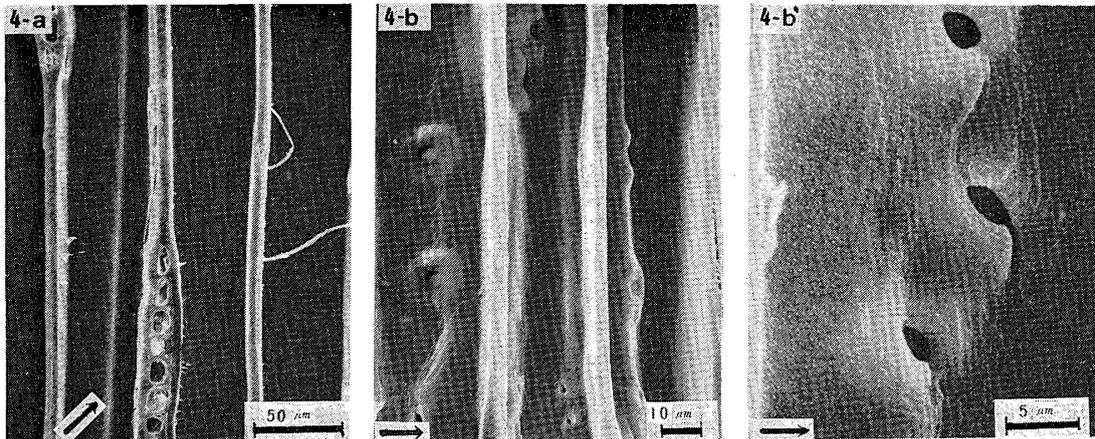


写真4. ヒノキ曲げ加工材の仮道管壁表面の変形
4-a：彎曲部引張側の接線壁表面
4-b, b'：彎曲部圧縮側の半径壁表面
矢印：引張ないし圧縮応力の作用した方向を示す。

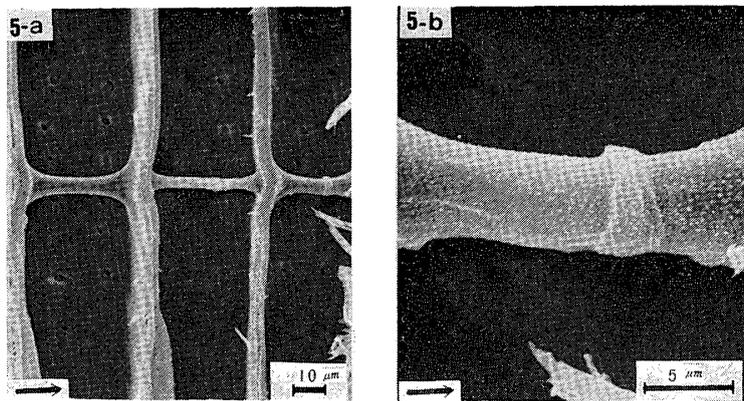


写真5. ヒノキ曲げ加工材のトラベキュラーの変形
5-a, b：彎曲部圧縮側
矢印：圧縮応力の作用した方向を示す。

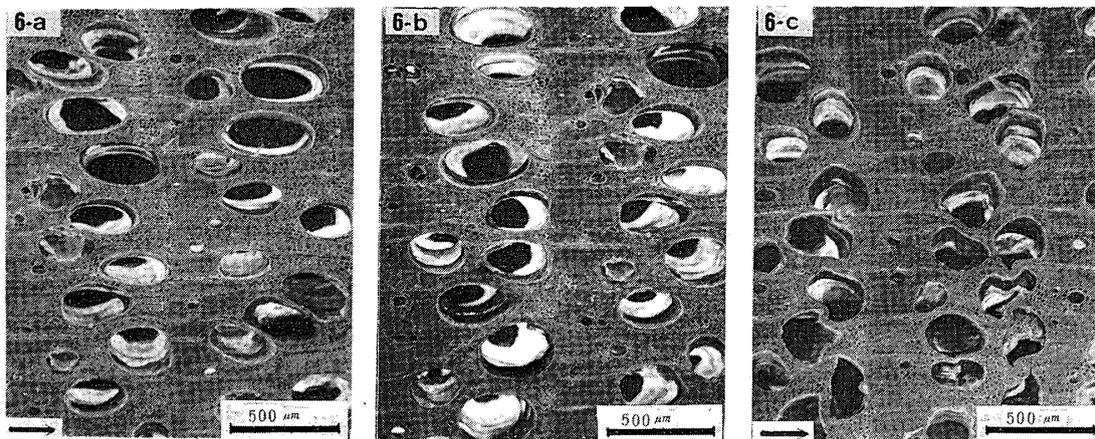


写真6. ヤチダモ曲げ加工材横断面の細胞形状
6-a：彎曲部引張側, 6-b：中央部分, 6-c：彎曲部圧縮側
矢印：引張ないし圧縮応力の作用した方向を示す。

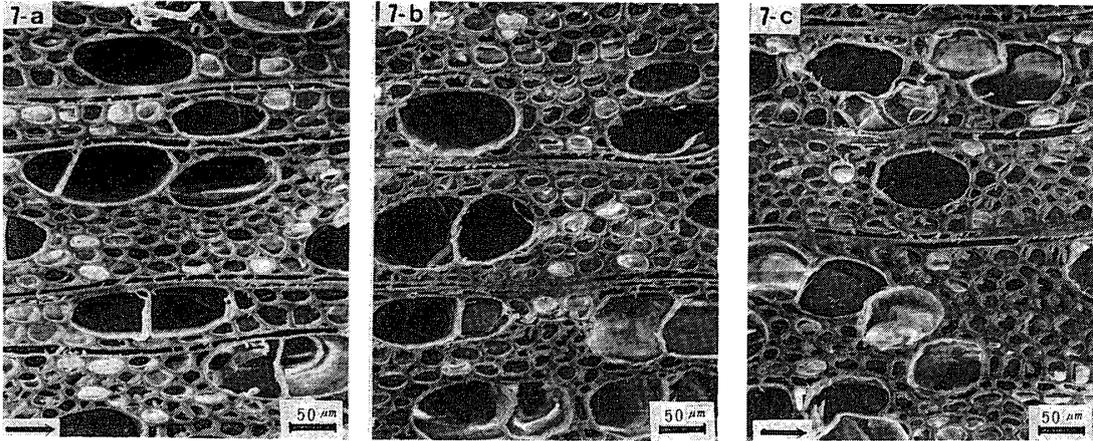


写真7. ホオノキ曲げ加工材横断面の細胞形状
 7-a : 彎曲部引張側, 7-b : 中央部分, 7-c : 彎曲部圧縮側,
 矢印: 引張ないし圧縮応力の作用した方向を示す。

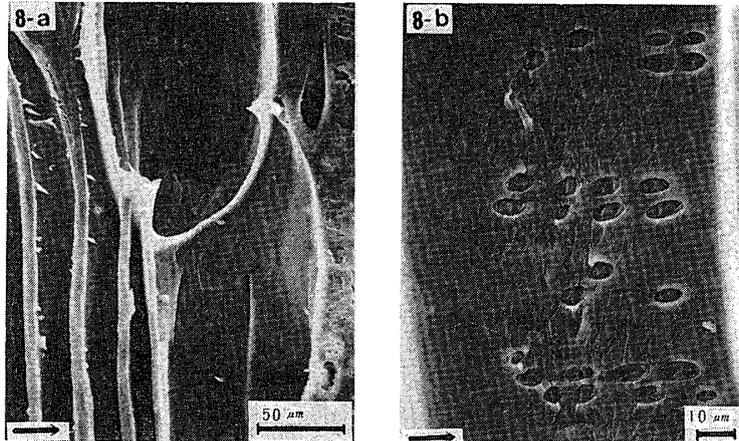


写真8. ホオノキ曲げ加工材の道管壁内表面の変形
 8-a, b : 彎曲部圧縮側
 矢印: 圧縮応力の作用した方向を示す。

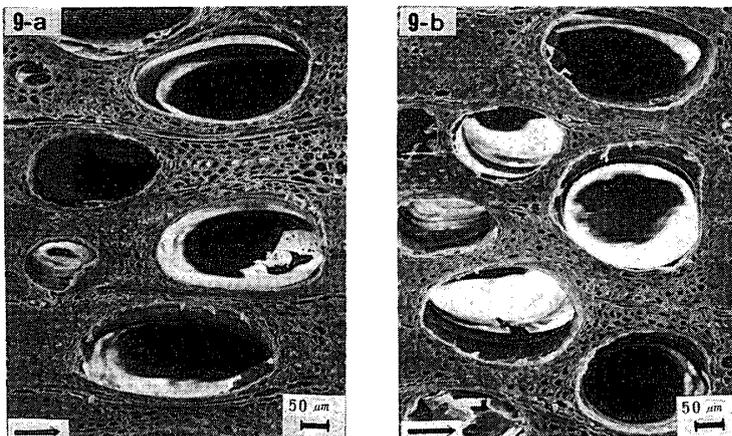


写真9. 水分・熱回復処理後の横断面の細胞形状(ヤチダモ材)
 9-a : 加工材彎曲部引張側の回復処理後の試料
 9-b : 加工材彎曲部圧縮側の回復処理後の試料
 矢印: 加工時の引張ないし圧縮応力の作用した方向を示す。

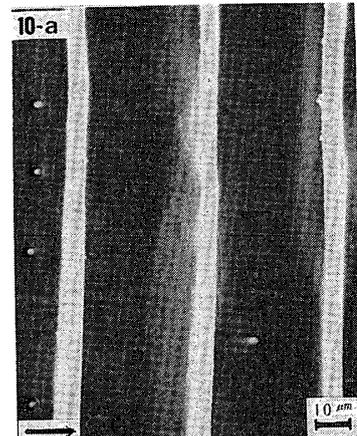


写真10. 水分・熱回復処理後の仮道管半径壁表面(ヒノキ材)
 10-a : 加工材彎曲部圧縮側の回復処理後の試料
 矢印: 加工時の圧縮応力の作用した方向を示す。

縮側で道管がかなり変形している様子が認められる。これに類似する変形は、静的横圧縮の場合にもほぼ同様に認められるが、その場合、一列の道管列に集中して生じる⁹⁾ので、写真に認められるように均等に分散して生じるものではない。ホオノキ材の観察結果では、圧縮側(7-c)の道管が折りたたまれており、引張側(7-a)でそれが顕著に伸びている様子が認められる。これらのことは繊維状仮道管の変形にも認められる。また、道管壁(8-a, b)には小さいしわが認められる。

マイクロ波加熱によって曲げ加工した材を水分・熱によって回復させた後のSEM観察結果を写真9および10に示す。曲げ加工材では、彎曲部圧縮側の道管が著しく変形した様子を示していたが、水分・熱回復処理後の同位置の道管では、そのような変形は認められない。

木材横断面での細胞形状については、水分・熱処理でそのほとんどが回復したとみなせ得るが、仮道管半径壁表面および接線壁表面にはなおわずかに変形のこん跡が存在している場合もある。

謝 辞

試料採取に当たって京都府立大学農学部演習林、本城尚正博士ならびに同演習林に多大の協力を賜ったので感謝致します。

文 献

- 1) 飯田生穂, 則元 京: 日本レオロジー学会誌, **9**, 162 (1981)
- 2) 則元 京: 木材研究資料, No. 14, 13 (1979)
- 3) 則元 京, 和田 博, 長谷川賢司, 飯田生穂: 日本レオロジー学会誌, **8**, 166 (1980)
- 4) 和田 博, 的場三輪子, 則元 京: 木材工業, **37**, 431 (1982)
- 5) GORING, D. A. I. : Pulp and Paper Magazine of Canada, **64** T-517 (1963)
- 6) TAKAMURA, N. : Mokuzai Gakkaishi, **14**, 75 (1968)
- 7) 右田伸彦, 米沢保正, 近藤民雄編: 木材化学, 上, 共立出版, p. 71 (1968)
- 8) 梶田 茂編: 木材工学, 養賢堂, p. 108 (1961)
- 9) BODIG, J. : For. Prod. Jour., **15**, 197 (1965)