

木材におけるドラインセットの発生と回復の機構

飯田生穂

IKUHO IIDA

Mechanism of the formation and recovery of the drying set in wood

要旨：本研究は、木材のドラインセットの発生と回復の条件、セット材の性質及び組織構造などについて検討し、セットの発生と回復の機構に関する新たな解釈を提起したものである。主な内容は次のとおりである。

1. 木材含水率の減少と材温の急速な上昇がみられ、これによって数10%にも及ぶセットを発生するマイクロ波乾燥と、温度が50℃一定で含水率の減少のみが進行する熱気乾燥におけるセットの発生について比較した。この検討によって、従来不明なところが多かったセットに及ぼす湿熱の影響を100℃前後の温度域にわたって明確にし、この影響が動態水分に比べて顕著なものであることを明らかにした。

2. 一連の検討に供試した多くの樹種を針葉樹、広葉樹散孔材と環孔材に分け、これらグループ間の比較からセットの発生及び回復に及ぼす動態水分の影響が、ヘミセルロース含有量の大きい広葉樹の両グループにおいて、また熱の影響が、リグニン含有量の大きい針葉樹グループにおいて顕著であることをみいだした。

3. セットの発生と回復に伴う細胞の形状と壁の内表面にみられる変化をSEM観察し、水分・熱による細胞壁の軟化で、細胞壁の破壊や分離を伴うことなくセットが発生し、ほぼ可逆的に回復することを裏付けた。

4. 一連の検討結果に基づき、セットの発生・回復の機構は、セルロースからなるマイクロフィブリルの弾性変形とヘミセルロース、リグニンからなるマトリックスのガラスーゴム状態間の変化ならびに凝集力の変化によるものとする解釈を与えた。この解釈は従来の動的水分を中心に展開された機構に、湿熱の影響を加え、これを重視したもので木材にみられる数%から数10%にも及ぶセットの説明に耐えうるものである。しかも、検証実験を行った結果は、いずれも以上の解釈がほぼ妥当であることを示唆するものであった。

I 緒 言

木材の各種加工法のうち、木材の乾燥、曲げ木加工、パーティクルボードやファイバーボードの熱圧成型などに共通して認められる現象は、力を受けている状態で木材中の水分が減少することで

ある。このような過程では木材の変形性能が異常に増大し^{1)~3)}、ひずみの固定、いわゆるドラインセットが発生する^{6)~8)}。実際面でしばしばでくわすこのセットはどのような機構で発生し、どのような基本的性格をもつものであろうか。

著者は、これまでドラインセットの発生機構

京都府立大学農学部木材工学研究室

Laboratory of Wood Technology, Faculty of Agriculture, Kyoto Prefectural University, Kyoto, Japan.

昭和62年7月16日受理

を解明する観点から、木材の乾燥、曲げ木加工で生じるセットを対象として一連の実験を行ってきた。その結果は逐一報告^{14)~25)}してきたが、ここでそれらを総括し、得られた成果をもとに木材におけるドラインゲットの発生と回復の機構について整理してみたい。

II セットに関連する木材の力学的性質とセット

セットに関与する木材の力学的諸性質を総合的に検討し、セットに関与するひずみ成分がどのような条件および状態のもとで生起するかについて明らかにすることを試みた。ここでは、セットの発生が乾燥過程における木材の力学的性質（クリープ特性）と密接な関係にある^{3)~12)}ので、とくに水分平衡、水分非平衡（50℃一定の熱気乾燥）ならびに水分・温度非平衡（マイクロ波乾燥）下のクリープをとりあげて検討した結果を述べ、加えて針葉樹材、広葉樹散孔材、広葉樹環孔材などの樹種グループによるクリープ特性について明らかにする。

II-1 水分変化過程のクリープとセット

(1) 乾燥過程と水分平衡下のクリープの比較

Fig. 1は、乾燥過程における横引張りおよび曲げのクリープをそれぞれ水分平衡下のそれらと比較して示したものである。図によると、いずれの

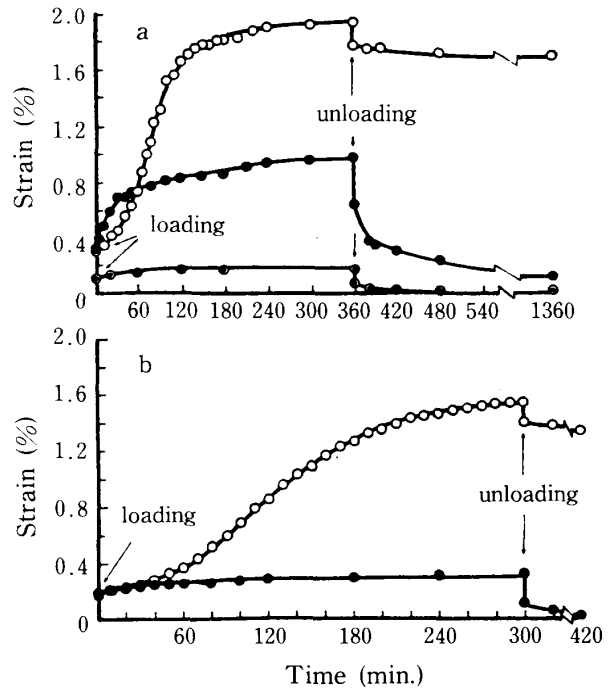


Fig. 1. Comparison of creep deformation during drying process and equilibrium state of moisture at 50°C (Radial direction of buna wood, Applied stress = 20kg/cm²).

a : in tension, b : in bending, ○ : green wood drying to 2% moisture content
● : Green wood kept green, ⊙ : wood kept at 2% moisture content

Table 1. Creep strain and creep recovery strain during drying and the equilibrium state of moisture.

			ε ₀		ε _t		ε _m		ε _{or}		ε _{cr}		ε _s	
			%	km	%	km	%	km	%	km	%	km	%	km
Tension*	Equilibrium state of moisture	2% m. c.	0.10	0.26	0.07	0.13	0.17	0.19	0.10	0.27	0.05	0.13	0.02	0.13
		green	0.39	1	0.52	1	0.91	1	0.37	1	0.38	1	0.16	1
	Drying	green→2%	0.40	1.03	1.51	2.90	1.91	2.10	0.09	0.24	0.11	0.29	1.71	10.7
Bending**	Equilibrium state of moisture	green	0.19	1	0.14	1	0.33	1	0.21	1	0.08	1	0.04	1
	Drying	green→2%	0.18	0.95	1.39	9.90	1.57	4.75	0.11	0.52	0.10	1.25	1.36	34.0

ε₀ : Instantaneous strain, ε_t : Maximum creep strain, ε_m : Maximum value of total strain (ε₀ + ε_t), ε_{or} : Instantaneous recovery strain, ε_{cr} : Maximum creep recovery strain, ε_s : Permanent strain.

km : Ratio of the respective strain under the other condition to each strain under the green, * : Drying condition=40°C, 10% R. H., Applied stress=20kg/cm², thickness of specimen=2mm. ** : Drying condition=50°C, 9% R. H., Applied stress=13.5kg/cm², thickness of specimen=5mm

クリープ曲線も負荷過程では瞬間ひずみ ϵ_0 、最大クリープひずみ ϵ_t (クリープひずみが一定に達したときの最大値) ならびに両者の和である全ひずみの最大値 ϵ_m が、また除荷過程では除荷時点における瞬間回復ひずみ ϵ_{or} 、回復が時間の経過に伴って増大し、ほぼ一定に達したときの最大クリープ回復ひずみ ϵ_{cr} 、ならびに回復しない永久ひずみ ϵ_s (セット) が特性値として認められる。また乾燥過程と水分平衡下のクリープでは両者の間に著しい差異がある。ここで上述の各特性値によって乾燥過程と水分平衡下のクリープを比較検討すると Table 1 および 2 となる。Table 1 によると、 ϵ_0 は両者の初期含水率や負荷応力が同一であるため乾燥過程と水分平衡 (飽水状態) 下とではほぼ等しいが、 ϵ_t したがって ϵ_m は乾燥過程で著しく増大し、飽水状態の 2~3 倍にも達する。また回復曲線では、除荷時の含水率が約 2% という低含水率であるため、 ϵ_{or} や ϵ_{cr} が小さくなり飽水状態の約 1/4 程度、従って ϵ_s が著しく増大して飽水状態の約 11 倍にも達する。また Table 2 よりひずみ割合の順位は、水分平衡下の場合には $\epsilon_0 \doteq \epsilon_t > \epsilon_{or} > \epsilon_{cr} > \epsilon_s$ 、乾燥過程の場合には $\epsilon_s \doteq \epsilon_t > \epsilon_0 > \epsilon_{or} \doteq \epsilon_{cr}$ の傾向を示し、水分平衡下では ϵ_{cr} や ϵ_s が小さいことが、乾燥過程では ϵ_{or} や ϵ_{cr} が小さく、 ϵ_s が大きいことが特徴として認められる。

以上の結果から、乾燥過程における木材の変形性能は水分平衡下のそれに比べてはるかに大きく、生じたひずみの約 90% が ϵ_s として固定され、水分平衡下の飽水状態では負荷過程に生じたひずみの大部分が除荷することによって回復し、ほとんど ϵ_s が生じないことが理解できる。

(2) 乾燥過程のクリープに及ぼす動態水分、温度、負荷応力の影響

Fig. 2 にセット量 (ϵ_s) と負荷中の含水率の関係を示す。図中の(1)は、飽水状態から含水率 2%

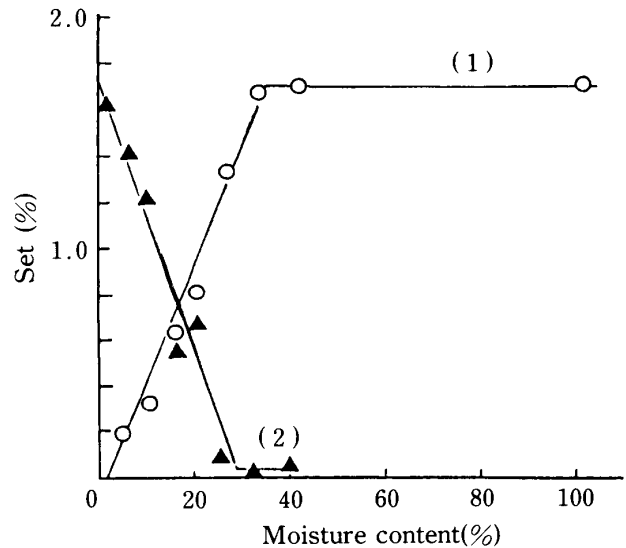


Fig. 2. Relation between the amount of set and moisture content

(1): Dried to 2% m.c. after the loading at the optional moisture content during drying processes.

(2): Dried to 2% m.c. under unloading after which the test specimen dried from green to optional moisture content under the loading.

Applied stress : 20kg/cm², Drying condition : 40°C, 9% R.H..

Table 2. Ratio of each strain to the maximum value of total strain

			ϵ_m^*	ϵ_0^*	ϵ_t^*	ϵ_{or}^*	ϵ_{cr}^*	ϵ_s^*
Tension	Equilibrium state of moisture	2% m.c.	1	0.59	0.41	0.59	0.29	0.12
		green	1	0.34	0.66	0.35	0.40	0.15
	Drying	green→2%	1	0.15	0.85	0.09	0.03	0.89
Bending	Equilibrium state of moisture	green	1	0.58	0.42	0.64	0.24	0.12
	Drying	green→2%	1	0.11	0.89	0.07	0.06	0.87

* : See footnote of Table 1.

まで乾燥する過程において試片含水率が任意含水率に達したところで負荷を与え、引き続き含水率2%まで乾燥したときの ϵ_s を、また(2)は、飽水状態で負荷し、乾燥中の任意含水率で除荷、引き続き含水率2%まで乾燥したときの ϵ_s をそれぞれ示してある。図によると ϵ_s は、含水率30%以上ではほぼ一定の最大値、または最小値を示すが、それ以下の含水率になると含水率とともに直線的に減少

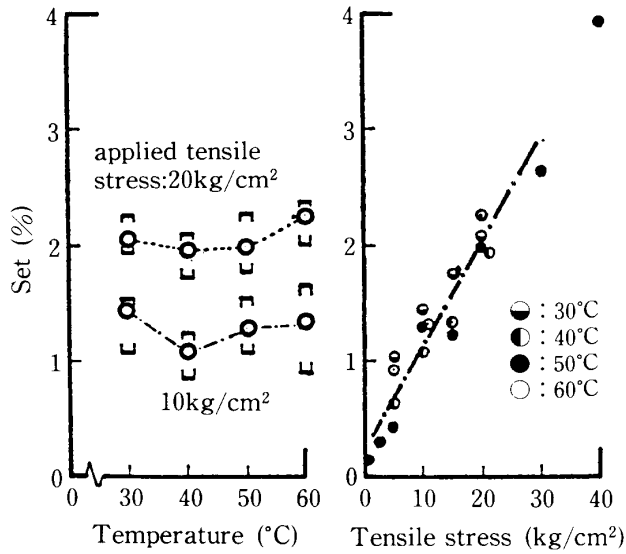


Fig. 3. The effect of temperature on the development of drying set.

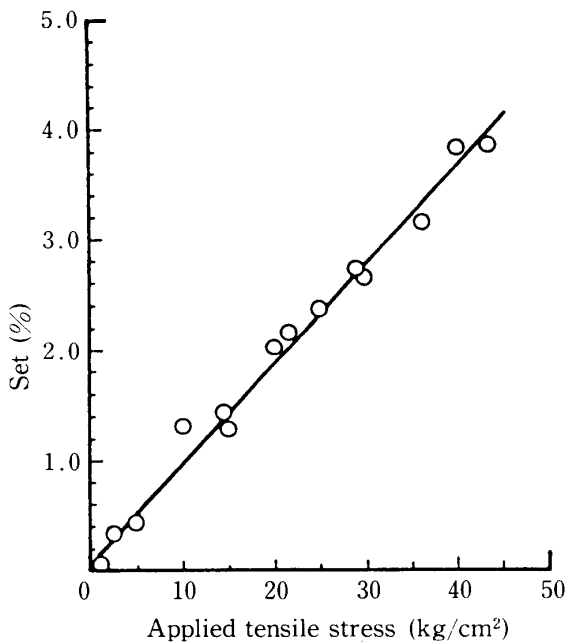


Fig. 4. Relation between the amount of set and the applied tensile stress.

ないし増加することが認められる。この結果は乾燥後の平衡含水率が2%と低く全乾状態に近い値であることから、 ϵ_s が自由水による影響を受けないで負荷下の結合水の量に大きく依存していることを示している。

Fig. 3に ϵ_s と温度の関係を示す。またFig. 4に ϵ_s と負荷応力の関係を示す。乾燥温度が30, 40, 50, 60°Cに上昇しても ϵ_s の値に差異は認められない。また ϵ_s は負荷応力とともに直線的に増大し、ほぼ原点をとる直線関係を示す。従って、60°C以下の比較的低い温度による影響はなく、しかも比例限度以下の極めて小さい応力においてもセットが発生することが明らかである。

(3) 乾燥過程におけるクリープの樹種特性

前述した各特性値は、各樹種いずれも負荷応力に比例して直線的に増大することが認められた。そこで樹種特性の検討にあたっては各特性値に対応するコンプライアンスを求めて検討した。Fig. 5に J_m/J_o と気乾比重の関係を示す。3樹種グループの J_m/J_o は、いずれの場合も気乾比重には無関係なほぼ一定の値を示し、広葉樹散孔材グループと環孔材グループの J_m/J_o の間には差異がないが、針葉樹グループの J_m/J_o は、広葉樹散・環孔材グループのそれよりも明らかに小さいことが認められる。 J_m を J_t と J_o 成分に分け、 J_t および J_o と気乾比重の関係を検討した結果からは、 J_t, J_o とも比重とともに減少する傾向を示したが、 J_o の両

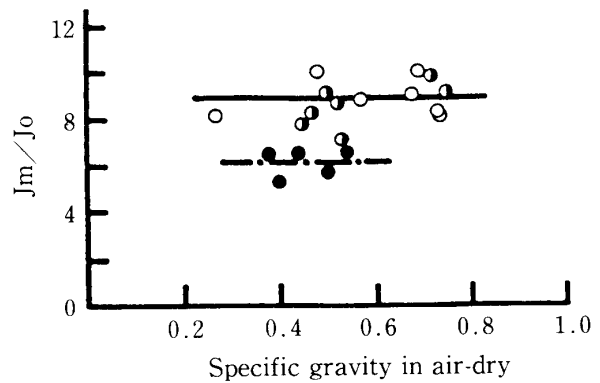


Fig. 5. Relation between J_m/J_o in bending and specific gravity in air-dry.

J_m : Maximum value of the total creep compliance, J_o : Instantaneous elastic compliance, ● : Coniferous wood, ○ : Diffuse-porous hardwood,

○ : Ring-porous hardwood. Drying condition : Hot-air drying (50°C, 9% R.H.)

グループによる差はなく、 J_t に差異のあることが認められた。従って、両グループの差異は乾燥過程のクリープひずみに起因していることが明らかとなった。

II-2 水分・温度変化過程のクリープとセット

(1) マイクロ波乾燥と熱気乾燥のクリープの比較

Fig. 6は、マイクロ波乾燥と熱気乾燥の両者についてひずみと含水率の時間的経過を比較したものである。図によると、マイクロ波乾燥では熱気乾燥に比べて乾燥初期に材温が急上昇するため極めて短時間内に全乾附近まで含水率が低下し、しかも全乾燥過程を通じ全ひずみは著しく増大することが認められる。両者いずれも乾燥前の ϵ_0 はほぼ等しいので、乾燥後の全ひずみの差はクリープひずみに帰することができる。同一含水率において比較したクリープひずみ、ならびに熱気乾燥の

クリープひずみを1としたマイクロ波乾燥のそれの比をTable 3に示す。マイクロ波乾燥におけるひずみは熱気乾燥のそれと比べて高含水率時において極めて大きく約7.1倍にも達するが、含水率の低下とともに漸減し、全乾附近では約2.3倍となる。従って、マイクロ波乾燥では初期の急激な材温上昇がクリープひずみの増大に著しく寄与している。

以上の結果から水分・温度変化過程のマイクロ波乾燥では、乾燥初期の高含水率時における材温の急上昇と高温度下における水分変化の2段階の経過を経て大きなクリープひずみを生じるが、その主体は熱気乾燥との比較から前者に帰することができる。また、特性値間の関係についての検討によると ϵ_m に対する ϵ_t ならびに ϵ_s の割合は熱気乾燥よりもやや大きい程度であるが、ひずみの絶対値は熱気乾燥に比べマイクロ波乾燥の場合では

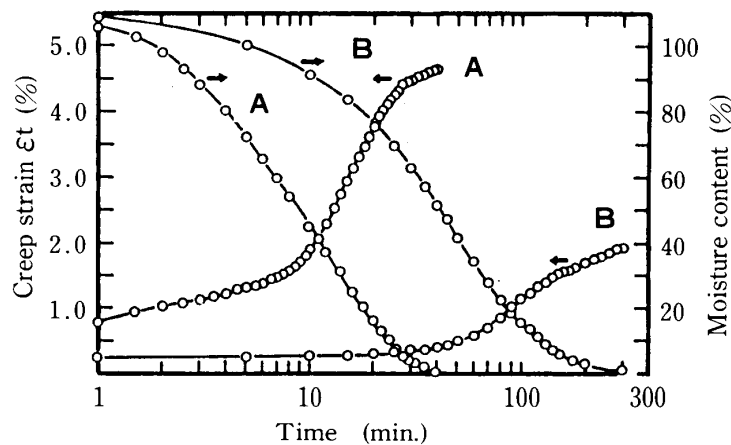


Fig. 6. Comparison of creep curves in bending during the microwave heating and the hot-air drying (Radial direction of buna)

A : Microwave heating (Power 600W), B : Hot-air drying (50°C, 9% R.H.), Applied stress = 16.2kg/cm²

Table 3. Creep strain at the each moisture content under the microwave heating and the hot-air drying.

	Creep strain ϵ_{t1} (%)											
	M.C. 80%		M.C. 60%		M.C. 40%		M.C. 20%		M.C. 10%		M.C. 0~2%	
	ϵ_{t1}	km	ϵ_{t1}	km	ϵ_{t1}	km	ϵ_{t1}	km	ϵ_{t1}	km	ϵ_{t1}	km
Hot-air drying	0.14	1	0.21	1	0.35	1	0.84	1	1.26	1	1.97	1
Microwave heating	0.99	7.1	1.26	6.0	1.87	5.3	3.27	3.9	4.06	3.2	4.45	2.3

km : Ratio of creep strain under the microwave heating to creep strain under the hot-air drying.

るかに大きいことが認められた。

(2) マイクロ波乾燥によるクリープの樹種特性

Fig. 7 に J_m/J_o と気乾比重の関係を示す。 J_m/J_o は同一グループ内の樹種間はもちろんグループを異にする樹種間においても明らかな差がなく、前記熱気乾燥の場合と傾向を異にすることが認められる。いま J_m を J_o と J_t の2つの成分に分け、これを気乾比重に対してプロットすると Fig. 8 となる。 J_o および J_t の値は気乾比重の増加に伴っていずれも明らかに低下するが、樹種グループによる差異はいずれの場合も認められない。この結果を熱気乾燥の結果とあわせて考えてみると、比較的低温 (60℃以下) の一定温度における水分変化過程のクリープには水分変化の影響が関与して、その効果が主として広葉樹グループに、高温 (100℃付近) 下での水分・温度変化過程のクリープには温度の影響が関与して、その効果が主として針葉樹グループに寄与したことが推測される。この原因の詳細な説明は、後述するセット機構に譲るが、上記のことを例えば細胞壁の構成成分との関係からみると次のように説明できる。木材主要構成成分のうち、セルロースの含有量は針葉樹と広葉樹で大差ないが、リグニンの含有量は針葉樹材の方

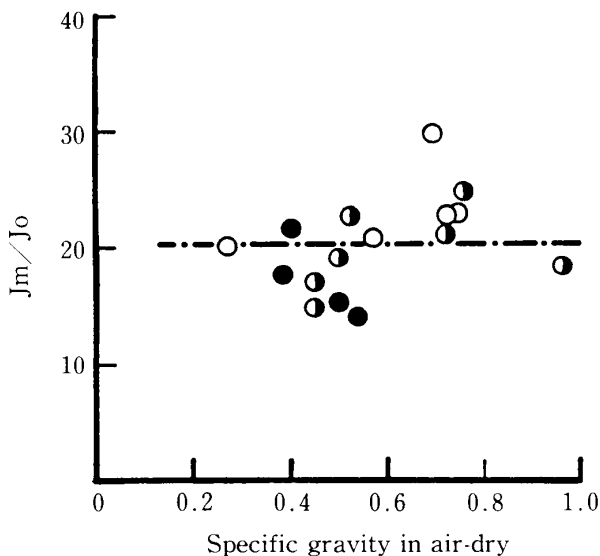


Fig. 7. Relation between J_m/J_o in bending by the microwave heating and the specific gravity in air-dry.

J_m : maximum value of the total creep compliance, J_o : instantaneous elastic compliance, ● : Coniferous wood, ○ : Diffuse-porous hardwood, ○ : Ring-porous hardwood.

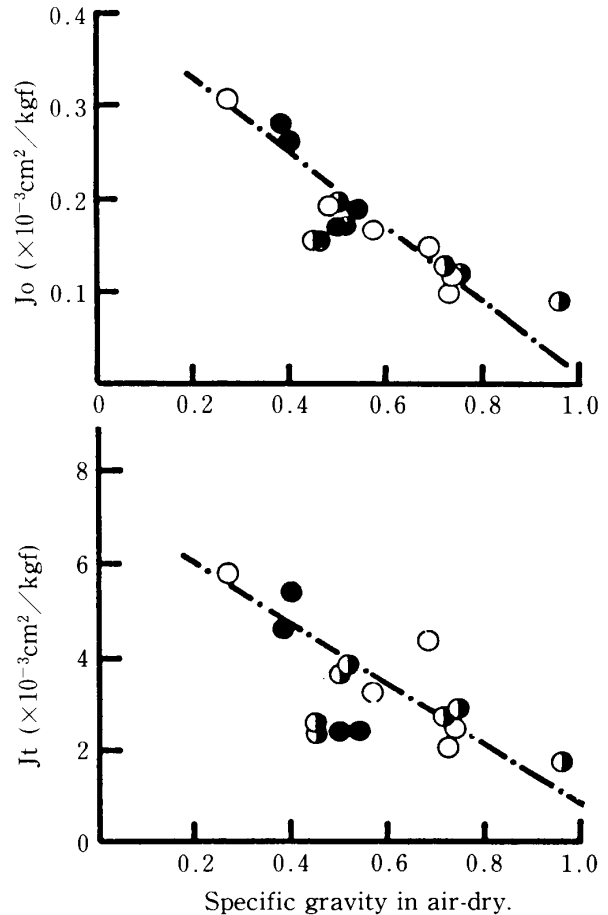


Fig. 8. Relation between J_t or J_o in bending by the microwave heating and the specific gravity in air-dry.

J_t : maximum creep compliance, J_o : instantaneous elastic compliance, ● : Coniferous wood, ○ : Diffuse-porous hardwood, ○ : Ring-porous hardwood.

が広葉樹材よりも約10%多く、ヘミセルロースの含有量は反対に広葉樹材の方が約10%多い²⁶⁾。ヘミセルロースは本来は非結晶性でセルロースよりも吸湿性に富む物質であるため²⁷⁾、この成分を多く含む広葉樹材は針葉樹材よりもより親水性で水分の影響を大きく受け、このことによって広葉樹材において水分効果が明らかに認められたものと考えられる。他方、リグニンは親水性の低い物質であるが70~80℃以上で軟化して可塑性を帯びるため²⁸⁾²⁹⁾、この成分を多く含む針葉樹材は広葉樹材よりも高温でより大きく温度の影響を受けたものと考えられる。

III セットの水分・熱による回復

(1) 熱気乾燥およびマイクロ波乾燥過程で曲げ

処理した材の残留たわみの水分・熱回復

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巧みに応用したものである。従って、曲げ加工過程における変形、および固定された変形の水分・熱による回復を調べることによって、セットの機構を解明する上で重要な示唆を得ることができるものと考えられる。曲げ加工過程の変形の挙動、その樹種特性についてはすでにIIにおいて明らかにしたので、ここでは曲げ処理材の水分・熱回復に限定し、水分と熱による回復の挙動、回復の樹種グループによる特性、両乾燥法による材の回復挙動の相違などについて検討した。

マイクロ波加熱を用いて曲げ加工した残留たわみ約4.0cmのヒノキ、ケヤキについて、たわみ量の水分による回復の様子を Fig. 9 に示す。図中の矢印は各含水率に移行させた順を、また横軸はたわみ測定時の含水率を示す。最初気乾状態にあったものを全乾状態にすると、たわみは増大するが、その量は極めてわずかである。次いで飽湿状態にすると、たわみは著しく減少し、ヒノキでは約3.9 cm から約2.0cm、ケヤキでは約3.7cm から約1.3 cm になる。以後飽湿状態から気乾状態、さらに全乾状態にすると、たわみ量は増大するが、最初のたわみに達することはなく、乾・湿のくり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、さらに若干たわみの回復がみられる。なお、他樹種についても同様のたわみの回復がみられた。吸湿過程におけるたわみの変化を詳しく知るために、気乾状態で約4.0cm のたわみをもつヤチダモおよ

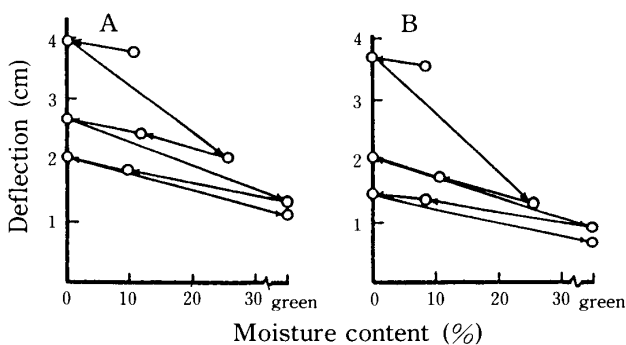


Fig. 9. Changes of deflection of the bent piece recovered by moisture treatment.

A : hinoki wood, B : keyaki wood.

Allows indicate the process of the moisture treatment.

びオニグルミについて、温度20℃、R.H.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。Fig. 10 にたわみ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。次に、Fig. 9 に示した水分回復後の熱による回復の結果を Fig. 11 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℃以上になると再びその程度は緩慢となる。急激にたわみが回復し始める温度は、ヘミセルロースおよびリグニンのガラス転移域²⁸⁾²⁹⁾に相当する。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およびイチョウでもたかだか0.4cm 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といえる。ヒノキとケヤキについて、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 Fig. 12 である。図中下向きの矢印は飽水状態で20℃から100℃まで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する場合、たわみの相対値はヒノキで0.68、ケ

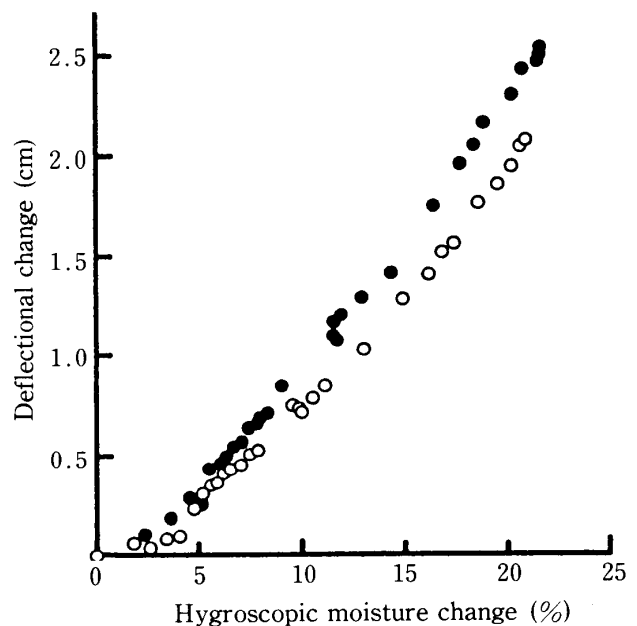


Fig. 10. Relation between the deflectional change and hygroscopic moisture change.

● : yachidamo, ○ : onigurumi.

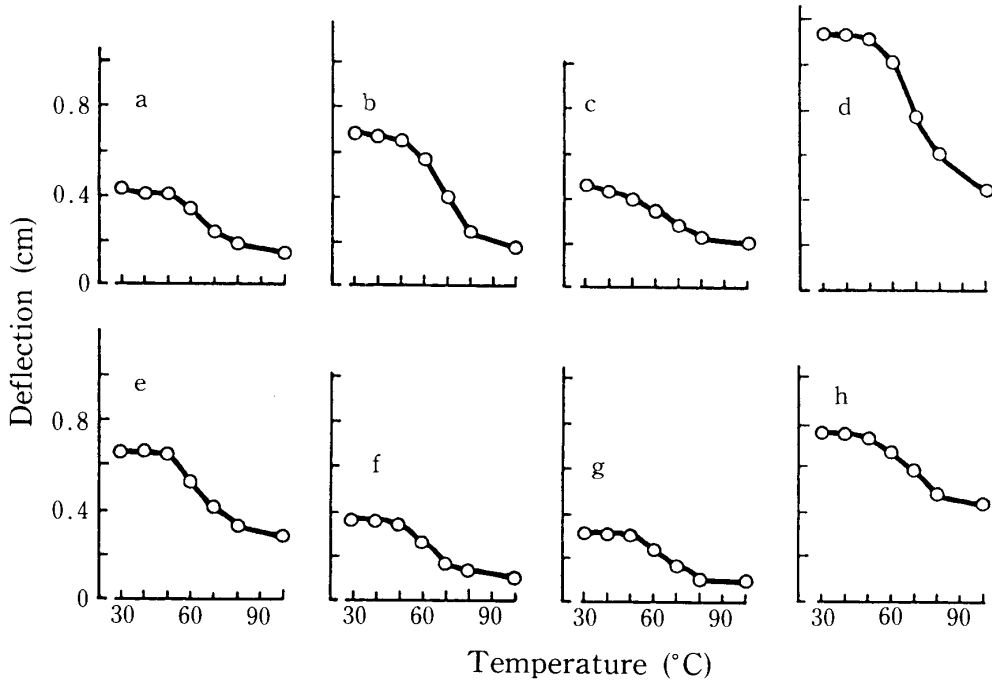


Fig. 11. Recovery of the deflection by heating in water.

Notes : a = hoonoki, b = kusunoki, c = buna, d = hinoki, e = keyaki, f = ya-chidamo, g = mizunara, h = icho.

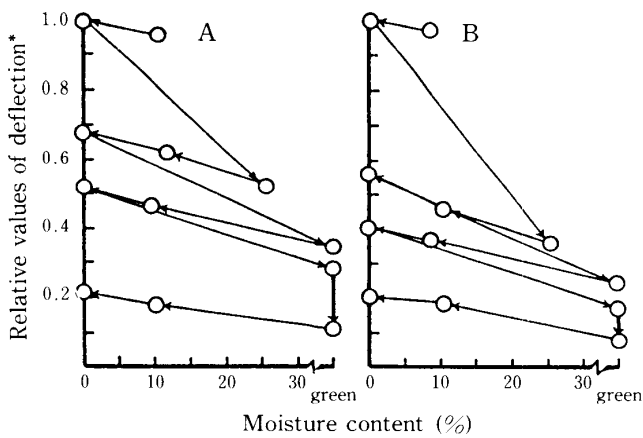


Fig. 12. Relation between the relative values of deflection and moisture content.

* : Ratio of that of each state to the deflection during the first oven-dry state
A = hinoki, B = keyaki.

Allows indicate the transposed process.

ヤキで0.56, 飽水状態にした後全乾状態にする場合, 前者で0.52, 後方で0.40となる。飽水状態で100°Cで熱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処理した材のたわみは, 水分と熱により初期の1/10から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, いわゆるセットの発生機構を考える上で有効な示唆となり, しかも, 細胞・組織に破壊を生じていないことを裏付けている。ヒノキとケヤキの違いについて調べると, 飽水状態にした後全乾状態にするときのたわみの相対値は, ケヤキに比べヒノキで約0.1大きい。しかし, 次の飽水状態で熱処理後全乾状態にするとき, 両樹種でたわみの相対値は等しくなる。Fig. 13は, 水分・熱回復処理前の気乾状態の残留たわみと, 飽水状態で100°C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。湿熱処理によってたわみの著しく回復したことが明確である。

Table 4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は, 広葉樹散孔材と環孔材のグループ間で差がほとんど認められない。飽湿状態または飽

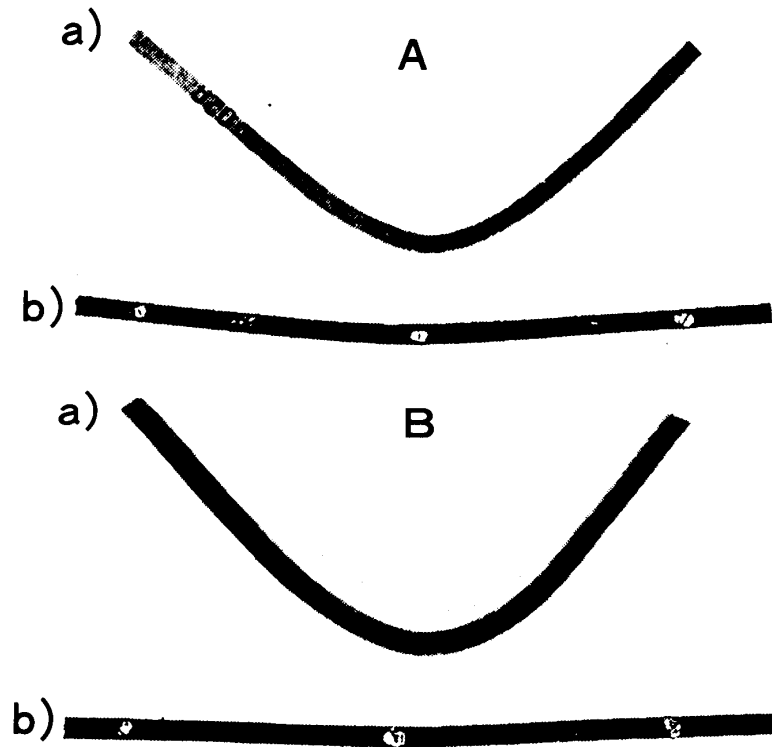


Fig. 13. The changes of deflection by the moisture and heat treatments

a : Air-dry state of the bent piece, b : Bent piece recovered by heating in water of 100°C. A : hinoki, B : buna.

Table 4. The deflectional changes of the bent piece recovered by the moisture and heat treatments.

		O.D. specimen dried after absorption of water vapor.	O.D. specimen dried after soaking in water at 20 °C.	O.D. specimen dried after heating in water.
Bent piece by microwave heating	Coniferous woods	0.64	0.48	0.21
	Diffuse-porous and ring-porous woods	0.54	0.37	0.17
	All species	0.56	0.39	0.18

水状態にした後全乾状態とするときのたわみの相対値は、針葉樹材と広葉樹散・環孔材の間に約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。従って、ヒノキとケヤキで認められた水分・熱回復の違いは、針葉樹材と広葉樹散・環孔材グループに共通したものである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てみると、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。従って、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

処理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を回復すること、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になった。両グループで回復に差異を示す原因は、両グループ間でみられる主成分割合の相違²⁶⁾²⁷⁾と成分の熱軟化温度の差異²⁸⁾²⁹⁾によると考えられる。このことは50℃一定で熱気乾燥することによって得た曲げ処理材の水分・熱回復の結果と比較するとさらに明確になる。

Fig. 14 は、熱気乾燥過程に曲げ処理したヒノキ、ミズナラ、ヤチダモについての水分回復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、これを乾燥後飽水状態にするとたわみがわずかであるが減少する。飽水状態にしたときのたわみの相対値は約0.14 (ヤチダモ) となり、マイクロ波加熱過程で曲げ処理したものに比べて水分による回復が

かなり大きい。全樹種についての水分・熱処理によるたわみの相対値の変化を Table 5 に示す。熱気乾燥過程で、曲げ処理した材の水分・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する場合0.39、飽水状態にした後全乾状態にする場合0.23、飽水状態で熱処理する場合0.15である。従って、飽湿および飽水状態とすることによる回復は、全回復の約91%を占める。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²⁸⁾、従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であると考えられる。一方、マイクロ波加熱過程では、70℃以上の温度になることによって、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と考えられる。このことから熱気乾燥過程で曲げ処理した材では、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処理した材では、水分のみでたわみの回復は不十分で、熱処理

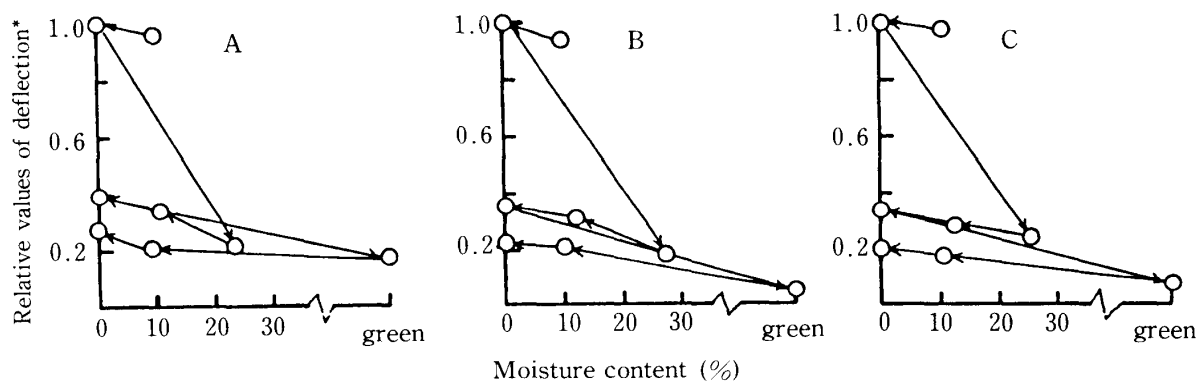


Fig. 14. The moisture-recovery of deflection of the bent piece.

Notes : A = Hinoki, B = Mizunara, C = Yachidamo

* : Ratio of it in the each condition to the deflection of the first oven-dry state.

Table 5. The deflectional changes of the bent piece recovered by the moisture and heat treatments.

	O.D. specimen dried after absorption of water vapor.	O.D. specimen dried after sorking in water at 20°C.	O.D. specimen dried after heating in water.
Bent-piece by microwave heating	0.56 ± 0.06 (53.7%)	0.39 ± 0.06 (20.7%)	0.18 ± 0.04 (25.6%)
Bent piece by hot-air drying	0.39 ± 0.04 (71.8%)	0.23 ± 0.04 (18.8%)	0.15 ± 0.04 (9.4%)

を必要とすると考えられる。

(2) マイクロ波加熱による圧縮処理材セットの水分・熱回復

飽水材にマイクロ波を照射して材温の急上昇をはかった後、繊維に直角方向に圧縮し、その状態で乾燥すると樹種によっては60%以上にも及ぶ大きなセットを発生させることができる。そこで、このように顕著なセットを発生した材を用いて水分・熱によるセットの回復を調べた²⁰⁾。

得られた結果を Fig. 15 に示す。水分および熱による回復は、いずれも発生したセット量に比例し、水分による回復は発生したセット量の約60%、水分と熱によるそれは約87%であった。なお、初期セット量68.4%のラクウショウについて、100°Cで煮沸後マイクロ波加熱処理を行うと、さらにわずかの回復がみられた。

以上のほか圧縮処理材セットの水分・熱回復の検討から、以下のことが認められた。すなわち、吸・放湿、吸水・乾燥によって完全に回復することはなく、ほぼ完全に回復させるためには、曲げ処理材の場合と同様飽水熱処理が必要である。飽

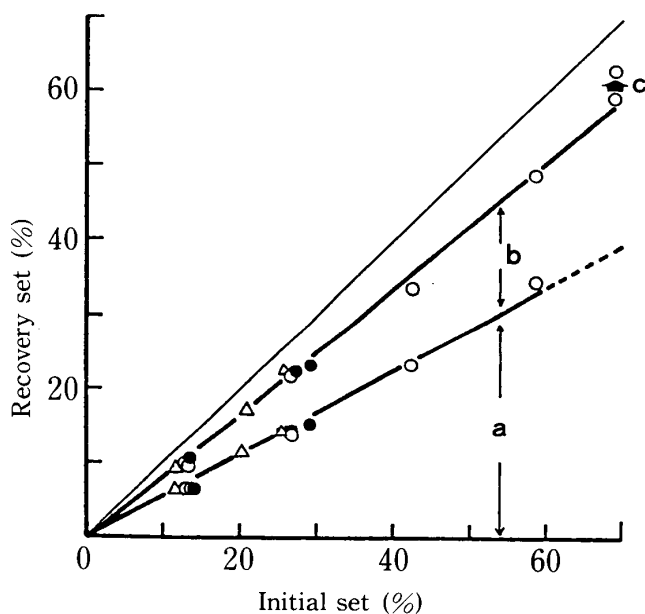


Fig. 15. Relationship between initial amount of compression set and that recovered by moisture and heat treatments for three kinds of wood.

Notes : ○ : Rakuusho, ● : Yachidamo, △ : Buna, a : Recovery by moisture treatment, b : Recovery by heat treatment in water, c : Recovery by microwave heating.

水状態で温度を上昇させると顕著な回復を示すが、温度の下降過程ではセット量の変化はみられない。温度の上昇に伴うセット量の減少経過を樹種間で比較すると、ラクウショウとヤチダモおよびブナの間にはセットが急激に減少する温度域に差がみられ、前者は後者よりも高温側にあるなどである。

以上の結果より、セットが発生した材は乾燥状態を保持する限り安定であるが、これに水分と熱を与えてセットを発生させた条件に再びもっていくとほとんど回復する性質を有する。このことは60%以上にもおよぶセット量のものでいえることが明らかとなった。

IV セット材および回復材の細胞形態

セットの発生機構について、これまで現象面の検討結果に基づいてセルロース非晶領域のすべり、マイクロフィブリル相互間のすべり、細胞相互間のすべりなどに関連して説明している⁹⁾¹⁰⁾³⁰⁾。しかし、これを具体的に立証したものはなく、しかも、細胞形態や細胞壁表面のセットによる変化についてもまだその知見は明らかでない。

そこで、本節ではセットの発生に伴う細胞の変形および細胞壁内表面の変化を調べ、その結果からセットが木材の組織・細胞構造とどのように関係しているかを明らかにしようとした。具体的には極端に大きな変形とセットを生じるマイクロ波加熱による曲げおよび圧縮処理材、ならびにその材に水分・熱処理を施し、セットの回復をおこさせた回復材について細胞形態のSEM観察を行った。

(1) 曲げ処理材の細胞形態

ヤチダモおよびホオノキ曲げ処理材横断面のSEM写真を Fig. 16 と 17 に示す。矢印は引張りまたは圧縮応力の作用方向を示し、図中のAはわん曲部引張り側の横断面、Bは中央部分、Cは圧縮側を示す。細胞横断面の形状は引張り側で伸び、圧縮側で縮んでいる。ヤチダモでは曲げ荷重直下の圧縮側で道管がかなり円くなり、引張り側で長円形となる。圧縮側の変形に類似する細胞変形は、横圧縮の材質試験体でも認められているが、この場合には局所的な道管に集中して生じている³¹⁾。ホオノキの場合、ヤチダモ同様の形態変化が道管にみられるほか木部繊維の変形も認められる。ホオノキの道管壁およびヒノキの仮道管壁の様子を Fig. 18 と 19 に示す。またトラベキュラーの変形の様子を Fig. 20 に示す。壁内表面は複雑に変形して

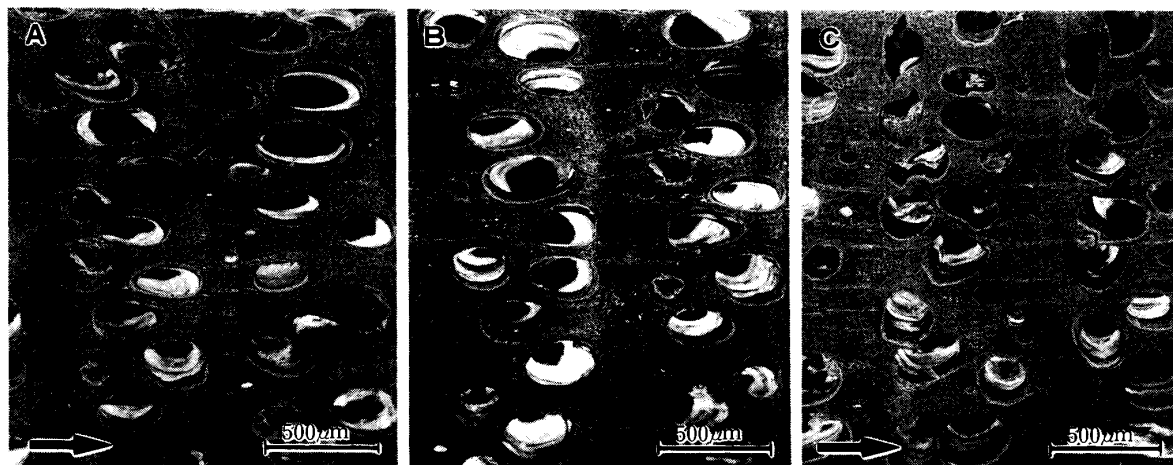


Fig. 16. Scanning electron micrographs of transverse section of the ya-chidamo bent piece.

A : Tension side, B : Center portion, C : Compressive side,

Arrows indicate the direction of the induced tensile and compressive stress.

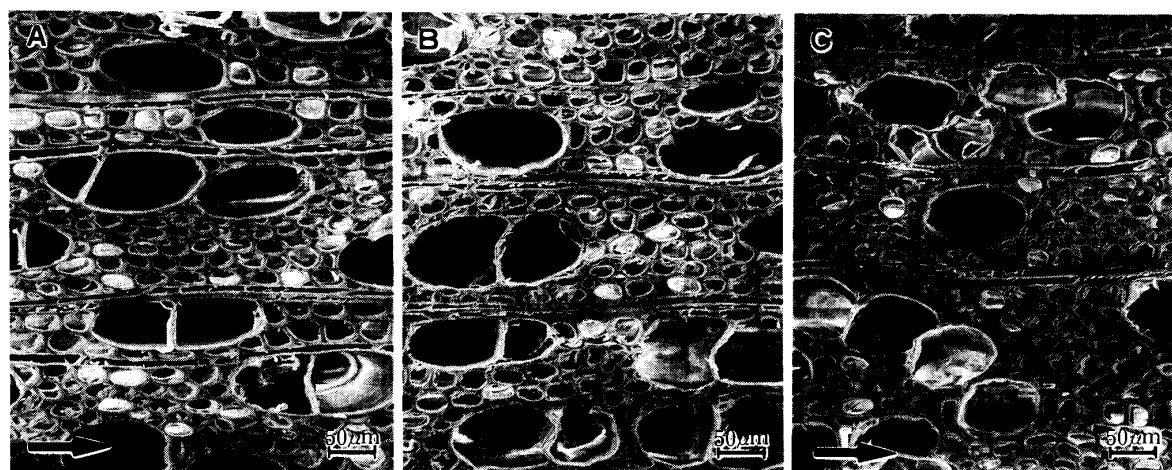


Fig. 17. Scanning electron micrographs of transverse section of the hoonoki bent piece.

A : Tension side, B : Center portion, C : Compression side,

Arrows indicate the direction of the induced tensile and compressive stress.

いるが、破壊は認められず比較的無理なく変形した様子をうかがわせる。

以上の写真より、マイクロ波乾燥過程での外力による変形およびそのセットは、次のように説明できるであろう。飽水状態にある木材にマイクロ波を照射すると発熱し、100℃をこえる温度にもなる。このように材温が急上昇すると、細胞壁においてマイクロフィブリル間隙を埋めているマトリックスは軟化する。このような状態下で外力が作用するとき、圧縮または引張り応力に応じてマイクロ

フィブリル間隙が縮小または拡大する。圧縮応力を受けている場合、マイクロフィブリル間隙がある限度に達すると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マイクロフィブリルを移動させ、壁の内表面にくぼみやふくらみを生じる。この変形は、たとえば Fig. 19 B, C に示すヒノキのわん曲部圧縮側の仮道管半径壁における複雑な変形として認められる。これらの変形は、加熱によって壁全体がかなり柔軟であるときに破壊することなしにみられるであろう。

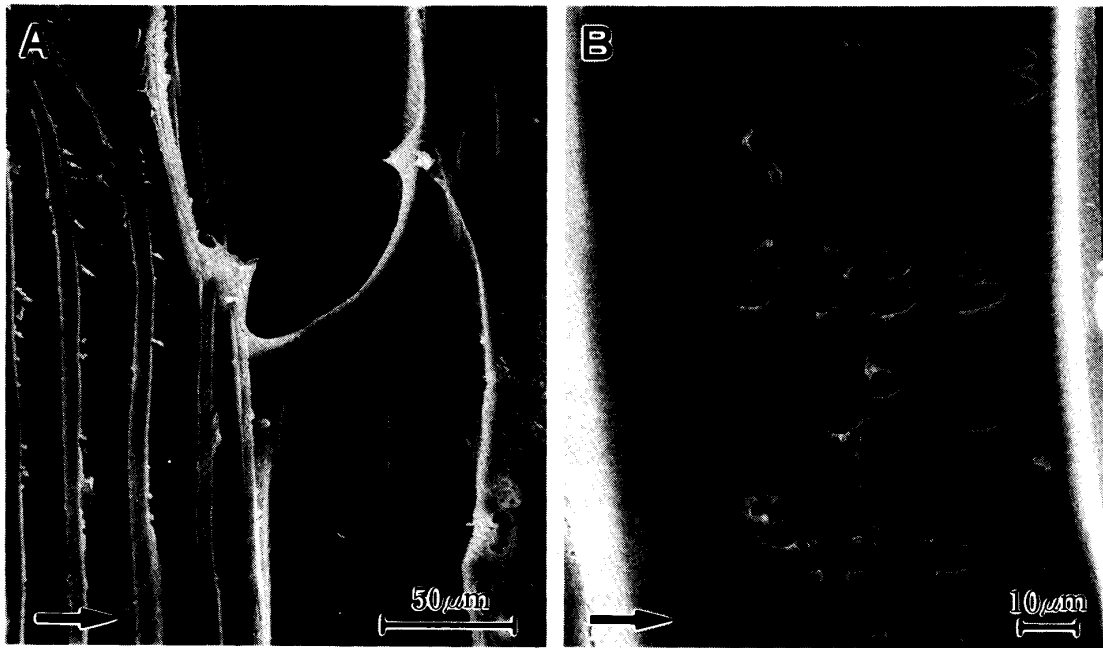


Fig. 18. Scanning electron micrographs of radial section of the hoonoki bent piece.

A, B : Compression side of the bent piece,

Arrows indicate the direction of the induced compressive stress.

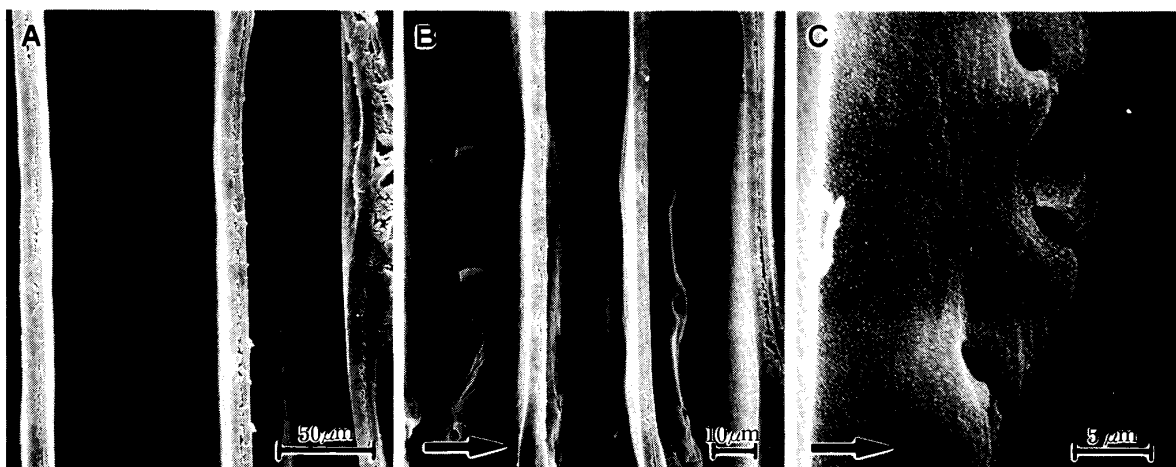


Fig. 19. The shape of the inner surface of trachaid for the hinoki bent piece.

A : Tangential wall of the trachaid on the tension side, B, C : Radial wall of the trachaid on the compression side.

一方、引張り側の仮道管半径壁はかなり伸張しているはずであるが、SEM 観察では壁表面が平滑であるため、その変形挙動は明らかでない。

(2) 圧縮処理材の細胞形態

Fig. 21は、ラクウショウ材の圧縮セット量4段階の細胞形状を示す。セット量は写真のAからDの順に13.0%、26.9%、42.6%、58.4%である。

写真によると、セット量13.0%のものでもすでに細胞配列がかなり大きく乱れ、細胞壁はしゅう曲し、これに伴って細胞内腔は変化し、かなり小さくなっている。セットの進行とともに壁の変形が著しくなり、内腔はさらに小さくなる。セット量58.4%では内腔はほとんど観察されない。Fig. 22は、ヤチダモ (A) およびブナ (B) の細胞変形

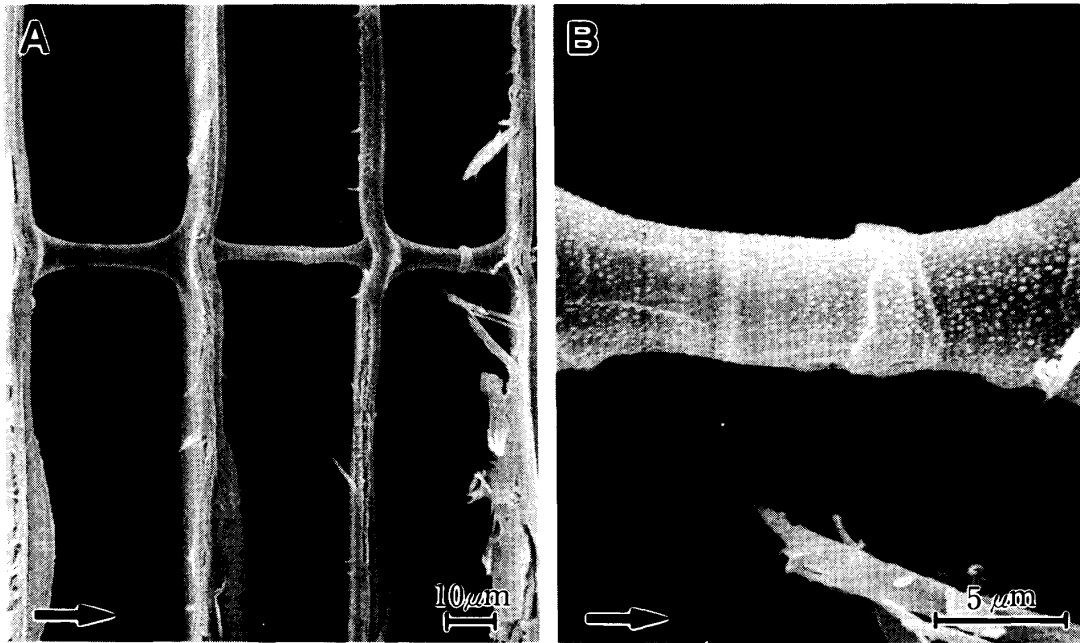


Fig. 20. Scanning electron micrographs of the tracheid showing the deformation of the trabeculae.

A, B : Compression side of the bent piece.

Allows indicate the direction of the induced compressive stress.

を示す。ヤチダモの道管は著しく変形し、内腔がほとんどみられなくなっている。ヤチダモおよびブナの放射組織は著しくしゅう曲し、蛇行している。これらの変形は前述の曲げの場合と同様の理由で説明できる。

(3) 回復材の細胞形態

曲げおよび圧縮処理材に水分・熱処理を施し、セットの回復をおこさせた材について、細胞の形態および壁内表面の変化を調べた。水分・熱回復処理後のラクウショウ材の横断面を Fig. 23 に示す。前記の圧縮処理材 (Fig. 21-D) に比べ、細胞壁の一部になおしゅう曲の残存も認められるが、細胞の形状はセット発生前の正常材の細胞に近い状態にまで回復していることがわかる。この半径壁内表面の SEM 写真を Fig. 24 に示す。圧縮処理材でみられた壁のしゅう曲は認められなくなり、その復元したことがわかる。これらの結果より、セットの回復した材の細胞は、正常材の細胞に近い状態に復元すること、回復材においても細胞・組織の破壊が認められないことが明らかとなった。従って、セットが基本的に水分・熱回復性であることは SEM 観察の結果からもいえる。

V セットの発生と回復の機構

以上においてセットの発生条件とセット量、セットの水分・熱回復、ならびにセット材および回復材の細胞形態などについて検討した。そして、とくに針葉樹材、広葉樹散孔材および環孔材グループについての一連の比較検討、ならびに極端に大きなセットが発生するマイクロ波乾燥法の適用を試みることによって、セットの本質にかかわる多くの結果を見出すことができた。ここではこれらの結果に基づき、木材におけるセットの発生ならびに回復の機構を考察する。

(1) セット機構の考察

一連の検討結果から明らかになったセットの基本的な特性についてまず述べると、木材は水分あるいは水分と温度が変化する乾燥過程で、水分平衡下に比べて著しく大きなひずみとセットを生じる。このセットは乾燥状態を保持する限り非回復性であり、ひずみは固定されたままであるが、再び水分または水分と熱の作用を受けるとほぼ完全に回復するなどのことが明らかとなった。従って、セットの機構はセットの形成のみでなくその回復をも十分説明できるものでなければならない。このような観点に立ち、既往のセットの機構に関する

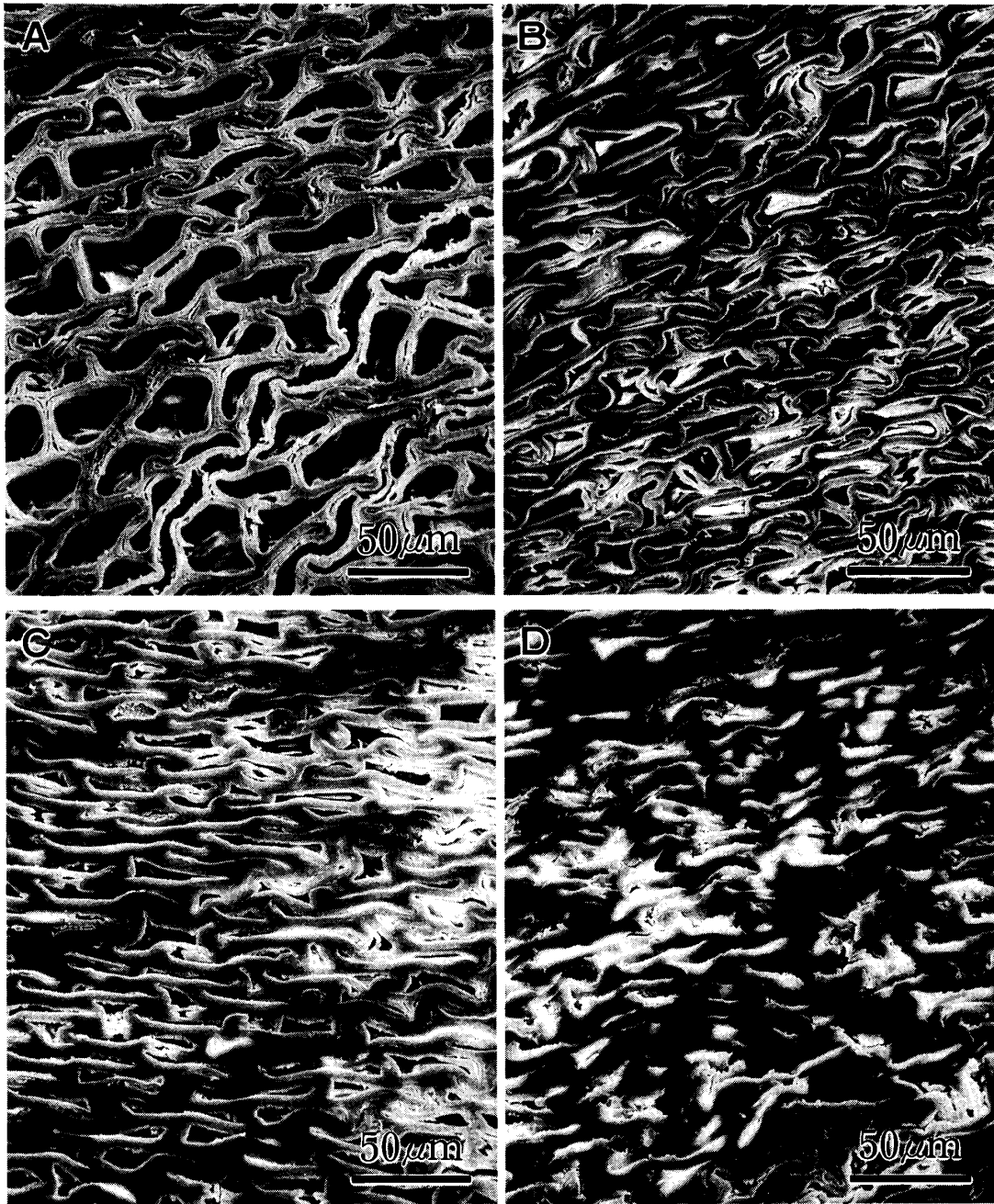


Fig. 21. The transverse section of the rakuusho compressed woods.
The amount of set : A = 12.7%, B = 26.9%, C = 42.6%, D = 58.4%.

成果をみると、なお検討を要することが理解できる。すなわち、Tiemann³⁰⁾は、セットがフィブリル内のミセルの再配列によるものと想定し、セット材はその寸法を基準として正常材と同様の膨潤、収縮を示し、単なる水中浸せきでは回復しえず逆方向の力をかけるか、煮沸により初めて回復するとしている。しかし、前述したIII-1および2の結果によればセット材の膨潤、収縮率ならびにセ

ットの回復は、Tiemannの記述と明らかに異なる。またIIで述べたように負荷下で木材を乾燥すると異常に大きなひずみを生じ、大きなセットを発生するが、この大きな変形とセットに対してこれまで以下のような説明がなされている。すなわち、乾燥過程では水分の離脱に伴い、ある平衡状態から次の平衡状態を獲得するのにある有限の時間を必要とし、その遷移過程において各分子相互

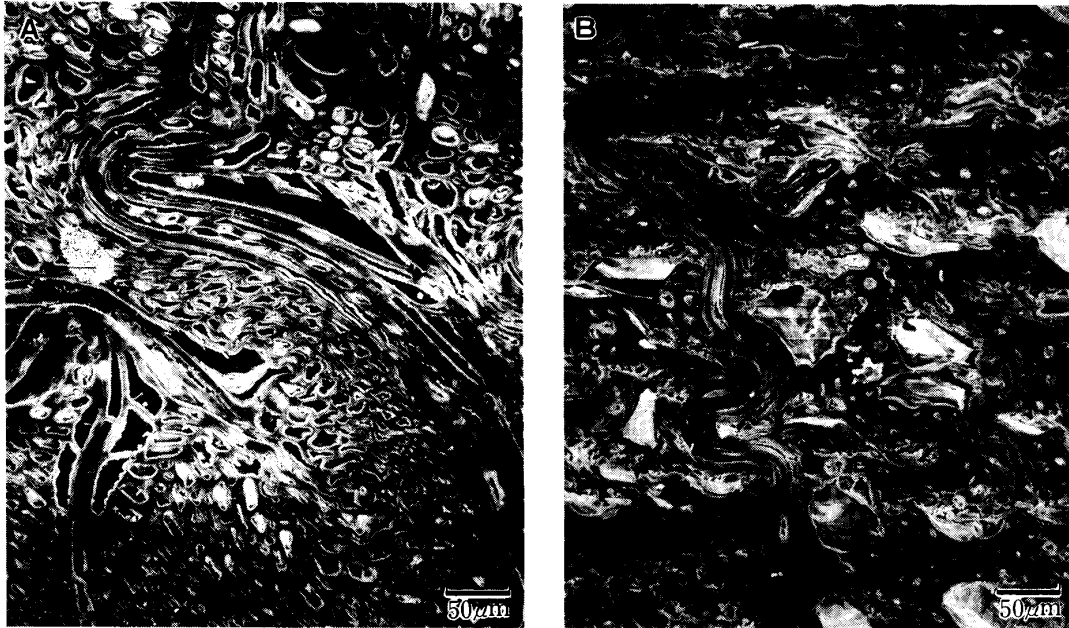


Fig. 22. Scanning electron micrographs of transverse section of the compressed wood for yachidamo (A) and buna (B) showing the deformation of the ray and the vessel.

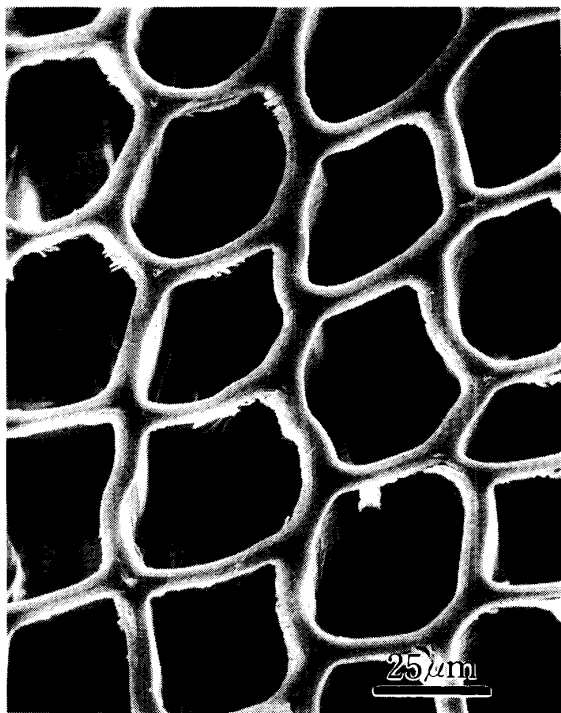


Fig. 23. The cell shape of transverse section of rakuusho compressed wood recovered by the moisture and heat treatments.



Fig. 24. The surface of radial wall of the tracheid after the moisture and heat treatments.

間の凝集力は完全に有効に働かえない状態を生じ、応力による位置転移の可能性が高まり、変形性能が増大する。このような状態のもとで乾燥が進む

と隣接する分子鎖間に再結合が生じ、ひずみの固定がなされセットが発生するものと推論している。しかし、この機構は、Grossman³²⁾が"Requirements

of a Model that Exhibits Mechano-Sorptive Behaviour”の中で述べているように、ひずみ(セット)の水分回復を十分説明できないものである。最近になって徳本³³⁾³⁴⁾はセットの水分回復について検討を加え、実質非晶領域のセルロースのOH基と水分子によって形成される一種のマイクロネットワーク、および結晶領域を結節点とするより広領域に及ぶ2次的ネットワークが、セットの発生によりひずんだまま凍結された準安定構造をとり、一種のポテンシャル・エネルギーを内在していることにより、凍結を解除する手段によって弾性的にセット回復に寄与しうることを推論している。これらに対して土井ら³⁵⁾³⁶⁾は、X線回析法を用いて、セット材ならびに回復材のセルロース結晶の変形を調べ、徳本の推論を支持して同様の機構を述べている。しかし、土井らの用いた材のセット量は最大でも半径方向で4%、接線方向で7%にすぎない。セルロース結晶の変形が、発生したセット量の約1/10程度であることを考えると、さらに大きいセット量のものについて検討することが必要であると思われる。なお、徳本も現時点ではセットの発生に対して細胞・組織のようなより巨視的な構造の寄与についても否定できない³⁷⁾と述べている。セルロースの結晶・非晶領域のような構造単位に限定して展開されているセットの機構は、より高次の構造単位、木材成分などとの関連において、さらに検討の余地がある。

本検討結果によれば従来のセルロースの結晶および非晶領域の構造単位を考えるだけでは説明できない多くの知見がみいだされた。すなわち、針葉樹材と広葉樹材ではセットの発生に及ぼす水分と温度の影響が明らかに異なること、セットは一定温度条件下の熱気乾燥過程においても発生するが、マイクロ波による温度の急上昇と乾燥で顕著に発生し、大きなひずみはむしろ温度の急上昇の過程で認められること、水分・熱による回復はセットを発生させた方法によって異なり、一定温度(50℃)条件下の熱気乾燥によるセットは水分のみでそのほとんどが回復するが、マイクロ波乾燥によるセットは水分のみで不十分で、十分な回復をおこすためには飽水熱処理を必要とする。さらにこれらのほか、水分と熱による回復の程度が針葉樹材と広葉樹材で異なるなども説明できない。従って、これらの結果からもセルロースのほかセットに対するより高次の構造単位の寄与や木材構成成分の果たしている役割などを考えてみるこ

が必要となる。また、セットが回復するための一種のポテンシャル・エネルギーの蓄積が木材構造に関連して、いかなる構造単位によるかを考える必要がある。そこで、まず高次の組織構造のセットへの寄与について考えてみると、道管の配列・大きさに特徴のある広葉樹散孔材と環孔材グループのセット性能は熱気とマイクロ波乾燥のいずれの場合も全く差異が認められないこと、熱気乾燥の場合に認められた針葉樹材と広葉樹材のセット性能の差異が、マイクロ波乾燥の場合に認められないことなどはセットの発生に細胞の種類、配列、形態などよりも細胞壁の構造、構成成分などの寄与が大きいと考えることができる。このことは、熱気乾燥によるセットの発生が吸湿領域の動態水分に関係していることやセットの回復が水分と熱で達成されることから間接的に裏付けられる。このような考え方に立つとき、樹種グループ間におけるセットの発生ならびに回復の差異をよく説明でき、理解することができる。すなわち、一般に針葉樹材は広葉樹材に比べリグニン量が約10%多く、ヘミセルロースが約10%少ない²⁶⁾。ヘミセルロースは吸湿性に富むため²⁷⁾、それを多く含む広葉樹材は針葉樹材に比べて水分の影響を大きく受ける。従って、このことによって熱気乾燥によるセットの発生やマイクロ波乾燥によるセットの水分回復が針葉樹材に比べて広葉樹材が大きいことが説明できる。針葉樹材のセットの発生ならびに回復が温度の影響を大きく受けるのは、高含水状態で70℃以上になるとリグニンが熱軟化するためセットの発生や回復が促進されるが、その程度はリグニン含有量の多い針葉樹材で著しい。これに反して熱気乾燥したときのセットは、リグニンの熱軟化を伴っていないことから主に水分によって発生したものであり、そのために水分のみでそのほとんどを回復することとなる。

これまで、セットの発生機構は動態水分の吸・脱着を中心に展開し、そのためセルロースの結晶・非晶領域に主因を求めていたと思われるが、それだけでは、不十分であり、水分とともに熱の影響を重視しなければならない。飽水状態の木材にマイクロ波を照射すると材温が短時間で上昇し、ときには100℃以上に達する³⁸⁾。高含水率状態でのリグニンの熱軟化温度は70~116℃、ヘミセルロースのそれは20~56℃である²⁸⁾²⁹⁾ので、マイクロ波照射によってマトリックスがガラス状態からゴム状態となる。このような状態で木材に外力がかかると

き、セルロース結晶よりなるマイクロフィブリルは、熱軟化温度が乾・湿の状態で大差なく222~245°Cであり²⁸⁾²⁹⁾、ガラス状態であるが、マトリックスの軟化によって外力に釣り合う状態まで弾性的に変形する。温度の低下と水分の離脱によって主成分の分子間に水素結合が形成されてガラス状態に戻ると、マイクロフィブリルは弾性的に変形したまま固定される、すなわち、セットが生じる。細胞壁中にはマイクロフィブリルの弾性変形によってエネルギーが蓄積されている。従って、マトリックスが再び軟化しない限り、すなわち、乾燥状態に保持する限り、セットは回復しない。しかし、再び水分と熱を与えてマトリックスを軟化させると、マイクロフィブリルの弾性復元力によってセットは回復することとなる。水分のみを与えた場合でも、3主成分の分子間に形成されていた水素結合が切断されて凝集力が低下するので、マイクロフィブリルの弾性変形はある程度回復することになるが、マトリックスはガラス状態であるため、水分のみによるセットの回復は制約される。一方、50~60°C以下でリグニンの熱軟化を伴わない場合は、マトリックスの熱による変化が小さく、リグニンは吸湿性能も小さいのでリグニンはむしろセットの発生に拘束作用を及ぼすものと思われる。そのため熱気乾燥によるセット量は比較的小さく、マイクロ波乾燥のそれが極端に大きくなる。

(2) セット機構の検証

以上において明らかにしたセット機構の解釈は、セット量数%から数10%の説明に耐えうるほかセットの発生と回復の一連の機構を合理的に説明できるものである。しかし、この解釈に対する直接的な裏付けは、なお十分に明らかにしていない。そこで、以下にその検証となる実験を行った。すなわち、前述のセット機構が妥当であるためには、セット回復の駆動力がセット発生過程にマトリックスのガラス状態でマイクロフィブリルに凍結されている。従って、セット発生前に材中に存在する応力の程度と、別にセットの発生した材を用い、セットの回復をおこさせたときのセット回復に基づく応力、すなわちセットの回復応力とは、ほぼ等しいはずである。また、マイクロ波加熱による材温の上昇は、100°C前後の温度である³⁸⁾ので、マトリックスがガラス-ゴム状態間の変化をひきおこすためには、この温度以下に材の軟化点が存在しなければならない。加えて、マトリックスを構成する成分はヘミセルロースおよびリグニンであ

る。マトリックスの熱的性質がセット機構に大きく寄与しているとする解釈は、上記の木材成分、なかでもリグニン含有量と水分・熱による木材の力学的性質の変化との間に密接な関係のあることが予期される。そこで、以上の3つのことさらにについて具体的に実験を行ないその妥当性について確かめた²²⁾²⁵⁾³⁹⁾。すなわち、セットが発生する以前に材中に存在する応力を、湿熱下の応力緩和実験による緩和1時間後に残留する応力として求め、また別に圧縮セットの発生した材を調整し、この材を用いセットの回復をおこさせたときの応力、すなわちセットの回復応力を求めて両応力を比較した。その結果によると、緩和1時間後の応力値 σ_s は決して0になることはなく、初期応力の2/3~1/2の値を示す。また緩和後の除荷で圧縮ひずみはほぼ完全に回復する。所定の圧縮ひずみを与えたまま乾燥すると、ひずみはさらに増大し、ひずみ(収縮ひずみ)は1.5~4.0%を示す。セットの回復応力 σ_r は、セット量の大きいもので大きい、いずれの場合も σ_s よりわずかに小さい値である。 σ_r が σ_s をこえないほぼ近似した値である事実はセット回復の駆動力がセット発生過程に凍結されていたことを示す。次いで、飽水木材繊維直角方向の曲げヤング率を、温度域10~95°Cについて、5または10°Cの温度間隔で求め、温度1°C増加あたりのヤング率の減少量($\Delta E/\Delta T$)と温度(T)との関係から飽水木材の熱軟化挙動、熱軟化温度を検討した。その結果は、供試樹種のうち4樹種を除く19樹種の $\Delta E/\Delta T \sim T$ 曲線にいずれも2つの明瞭なピークが認められ、低温側のピーク(軟化点 TT_1)は39~54°Cの、高温側のそれ(TT_2)は63~80°Cの範囲に存在した。ピークの出現温度域にちがいがあがるが100°C以下に2つの明瞭なピークのあらわれることは Hillis ら⁴⁰⁾⁴¹⁾によっても認められている。加えて、スギ圧縮あて材を用い、あて形成側とその反対側について髓から放射方向に連続して横圧縮試験片、ならびに木粉を採取し、20°C気乾、20°C飽水、95°C飽水の3条件における横圧縮ヤング率 E_{air} 、 E_{20} 、 E_{95} の測定、常法によるリグニン量の定量を行ない、 E_{20}/E_{air} とリグニン含有量、 E_{95}/E_{20} とリグニン含有量の関係を検討した。その結果によると、リグニン量とともに E_{20}/E_{air} はほぼ直線的に増大、 E_{95}/E_{20} は直線的に減少することが明らかとなった。このことはリグニンが水分に対して負に、熱に対して正に影響を及ぼすことを示しており、マトリックス中のリグニン

が水分・熱による木材の力学的性質の変化に直接関係をもつことが知られた。以上において得た検討結果は、いずれも前述したセット機構が妥当なものであることを裏付けている。

最後に、本研究の遂行ならびにとりまとめにあたり、終始懇切なご指導と激励を賜わり、また数々の有益なご助言をいただいた京都大学農学部中戸莞二教授(現、同名誉教授)、京都府立大学農学部福山萬治郎教授ならびに京都大学木材研究所則元京助教授に心から感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 中戸莞二ほか5名：京都大学演習林報告, NO.45, 252-286(1973)
- 2) 大草克己, 林昭三：木材学会誌, 2, 5-7 (1956)
- 3) Armstrong, L.D, Christensen, G.N : Nature, 191, 869-870(1961)
- 4) Armstrong, L.D, Kingston, R, S.T : Austral. J. Appl. Sci. 13, 257-276(1962)
- 5) Christensen, G.N : Austral. J. Appl. Sci. 13, 242-256(1962)
- 6) Hearmon, R.F.S, Paton, J.M : Forest, Prod., J., 14, 357-359(1964)
- 7) Eriksson, L, Noren, B. : Holz als Roh-und Werkstoff 23, 201-209(1965)
- 8) Gibson, E.J : Nature 206, 213-215(1965)
- 9) Takemura, T. : Mem. Coll. Agric., Kyoto Univ., NO.88, 31-48(1966)
- 10) Schniewind, A.P : Holz als Roh-und Werkstoff 24, 87-98(1966)
- 11) 高橋徹：木材工業, 21, 349-353(1966)
- 12) Leicester, R.H : Wood Sci. and Tech., 5, 211-220(1971)
- 13) Narayanamurti, D. Verma, G.M : Holzforschung und Holzverwertung, 24, 83-93(1972)
- 14) 飯田生穂：京都府立大学演習林報告, NO. 21, 14-24(1977)
- 15) 則元京, 和田博, 長谷川憲司, 飯田生穂：日本レオロジー学会誌, 8, 166-171(1980)
- 16) 飯田生穂：木材工業, 36, 335-338(1981)
- 17) 飯田生穂, 則元京：日本レオロジー学会誌, 9, 162-168(1981)
- 18) 飯田生穂, 福山萬治郎：京都府立大学演習林報告, NO.25, 46-53(1981)
- 19) 飯田生穂, 則元京, 今村祐嗣：木材研究・資料, NO.17, 99-111(1983)
- 20) 飯田生穂, 則元京, 今村祐嗣：木材学会誌, 30, 354-358(1984)
- 21) 飯田生穂：中戸莞二編著“新編木材工学”養賢堂, P.352-358(1985)
- 22) 飯田生穂：木材学会誌, 32, 472-477(1986)
- 23) 飯田生穂, 浦上弘幸, 福山萬治郎：京都府立大学演習林報告, NO.30, 17-27(1986)
- 24) 飯田生穂：昭和61年度日本木材学会レオロジー研究会シンポジウム要旨集, P.3-4(1986)
- 25) 飯田生穂, 則元京：木材学会誌(投稿中)
- 26) 右田伸彦, 米沢保正, 近藤民雄：木材化学, 上 共立出版 P.71(1968)
- 27) 梶田茂編：木材工学, 養賢堂 P.108, 182 (1961)
- 28) Goring, D.A.I : Pulp and Paper Magazine of Canada, 64, T 517-527(1963)
- 29) Takamura, N : Mokuzai Gakkaishi, 14, 75-79(1968)
- 30) Tiemann, H.D : Wood Technology, Pitman Publishing Co., N,Y 141-168(1951)
- 31) Bodig, J : For., Prod., J., 15, 197-202(1965)
- 32) Grossman, P.U.A : Wood Sci. and Tech., 10, 163-168(1976)
- 33) 徳本守彦：木材学会誌, 19, 577-584(1973)
- 34) 徳本守彦：木材学会誌, 19, 585-591(1973)
- 35) 土井登, 伏谷賢美, 蕪木自輔：木材学会誌, 24, 217-223(1978)
- 36) 土井登, 伏谷賢美, 蕪木自輔：木材学会誌, 26, 603-607(1980)
- 37) 徳本守彦：材料, 24, 879-884(1975)
- 37) 森光正, 則元京, 脇谷慶之：木材工業, 38, 229-234(1983)
- 38) 飯田生穂, 浦上弘幸, 福山萬治郎：第37回日本木材学会大会研究発表要旨集, P.1 (1987)
- 39) Hillis, W.E., Rozsa, A.N. : Holzforschung, 32, 68-73(1978)
- 40) Hillis, W.E., Rozsa, A.N. : Wood Sci. and Tech., 19, 57-66(1985)

Summary

In the present paper, an interpretation on the mechanism of drying set has been given by investigating the formative and the recoverable conditions of set, the properties of set-woods and these anatomical structures.

The details of contents are as follows ;

1. The amount of set that occurred with accompanied by the reduction of moisture content and the rapid rise of temperature by means of the microwave radiation and those that occurred with only the reduction of moisture content by means of the hot-air drying were compared, and the influence of the moisture and the heat on the development of set were investigated to cover high temperature of about 100°C. The results indicated that the remarkable set is not the results of moisture content change, rather it is the results of heating under the water-saturated state.

2. The many species used a series of the experiments were classified into the groups of the coniferous woods, the diffuse-porous woods and the ring-porous woods. From the comparison of set between those groups, the effects of moisture content change on the set is greatly affected for the both groups of hardwoods having a high hemicellulose content in compari-

son with the group of coniferous woods. And the hygrothermal effect is greatly affected for the group of the coniferous woods having the high lignin content in comparison with the group of hardwoods.

3. The cell shape and the inside surface of the cell wall of the set-woods and the recovered woods were observed to using the scanning electron microscope. The wood cell wall softened by the moisture and heat is able to developed the set without the destruction and the separation of cell wall, and moreover if the set-woods undergo again the moisture and heat treatments, it is recovered the set by the reversible changes.

4. From results obtained, an interpretation on the mechanism of the set is given in terms of the elastic deformation of the microfibriles composed of cellulose and the reversible changes between the grassy state and the rubbery state of matrix composed of lignin and hemicelluloses including the change of cohesive. Furthermore, the results of the inspected experiments also showed a good agreement with the above mentioned interpretation on the mechanism of set.