

木材の乾燥応力について

福 山 万 治 郎

MANJIRO FUKUYAMA : On the drying stresses in wood

摘 要 本実験は、本邦産のヒノキおよびブナ材を用いて乾燥ひずみの変移や大きさを slice method で測定し、あわせて乾燥応力と木材の物理的、機械的諸性質との関連性を検討したもので、主な結果は次のとおりである。

1) 最大引張ひずみと最大圧縮ひずみはほぼ同じ時期にあらわれ、それぞれの大きさは樹種や乾燥条件に関係なくほぼ等しい (Fig. 4, Table 3)。

2) set の大きさや変移は Fig. 6, Table 5 のとおりで、tension set は compression set よりも、またブナ材の set はヒノキ材のそれよりも大きい。

3) 最大乾燥応力と静的強度 (木材繊維直角方向) との関係は Table 6 のとおりで、表面層の引張応力は横引張 0.5 % 一応力にほぼ等しいが、中心層の圧縮応力は横圧縮比例限度力よりも著しく小さいので、set 発生の可能性が考えられない。したがって set の推定法についてはさらに検討されねばならない。

4) 木材表面の局部的乾燥、横引張比例限度力および弾性係数から考察すると、表面層の最大引張ひずみの発生は表面層の set ないしは塑性の完了状態に対応すると考えられる。

緒 言

人工乾燥の際木材内部に発生する乾燥応力は、被乾燥材料に各種の損傷を与える原因となつてその品質を低下させるほか、時にはその使用を不可能にすることがある。

一般に人工乾燥では、乾燥時間の短縮と損傷の軽減を目的として乾燥スケジュールの作成を重要な課題の一つとしているが、既往のスケジュールは水分分布などを基礎にして多くは経験的に作られているので、改良すべき点があると考えられる。U. S. A. Forest Products Laboratory ではすでに 1924 年以降乾燥応力に関する研究、また最近では乾燥応力を考慮したスケジュールの作成なども行なっているが、本邦産材に関してはこれらの研究が極めて少ない。

そこで本実験では本邦産の代表的な針・広葉樹各 1 樹種を用いて各 2 条件で乾燥した際のひずみの変移や大きさを slice method で測定し、あわせて木材の物理的、機械的諸性質との関連性について検討したので、それらの 2～3 の結果を報告する。

I. 乾燥応力の変移、大きさおよびドラインゲ・セット

木材の乾燥応力は、H. D. TIEMANN (1919)¹⁾, E. C.

PECK (1924)²⁾, J. M. McMILLEN (1955, 1958)¹⁾, 小倉 (1955)³⁾, R. L. YOUNGS and C. B. NORRIS (1959)⁴⁾ などによつて詳細に検討され、応力や set の発生経過、外気条件の影響などが明らかにされた。一般に slice method は slice 前後の長さから弾性回復ひずみとして応力の種類や大きさを推定する方法であるが、測定に誤差を伴う危険があり、しかも slice 前後の応力や水分分布には変化がないことを仮定しなければならない。しかし本法以外に現在適当な測定法が認められていないので、本実験でも本法を用いることにした。

実 験 方 法

1) 供試材料および試験片 : 供試材料はヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* S. et Z.) およびブナ (*Fagus crenata* BLUME) 生材の正板目本取、無欠点の鉋削試験材 (Fig. 1) 各 4 本で、あらかじめ図のようにマークし (マーク数は 1 試験材に約 13 コ)、供試するまで散水した新聞紙とビニール布で包み、低温飽和室 (5°C) に貯蔵した。

2) 実験装置 : 実験には一定温、湿度の空気が絶えず室内を循環する送風式木材乾燥機 (風速 : 55 ~ 65 cm/sec) を用いた。

3) 実験方法 : まずひずみ試験片 (Fig. 1) の生材

Table 1. Values of E and u_{eq} in drying condition A

Hinoki-wood				Buna-wood			
E	u_{eq} (%)	E	u_{eq} (%)	E	u_{eq} (%)	E	u_{eq} (%)
1.00~0.93	14.0	0.25~0.18	6.5	1.00~0.89	16.9	0.31~0.24	5.3
0.93~0.75	12.1	0.18 以下	4.0	0.89~0.76	13.0	0.24~0.18	4.4
0.75~0.41	10.4			0.76~0.41	8.7	0.18 以下	4.0
0.41~0.25	8.8			0.41~0.31	7.2		

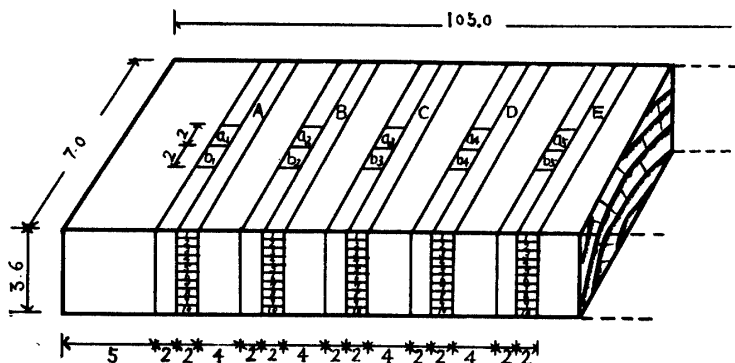


Fig. 1. Drying test specimen.

(単位:cm)

A~E: Specimens of strain measurements

a₁~a₅: Specimens of moisture distributionb₁~b₅: Specimens of average moisture content

巾をマークに沿って測長（マイクロメータ，1/100 mm）したのち，別に採取した含水率推定試験片（長さ約30 cm）とともに生材重量を測定し，4側面に融点62~65℃の硬質パラフィンを塗布して側面の水分蒸発を防止した。前記各操作の場合には，散水した新聞紙で絶えず表面をカバーし，水分の蒸発防止に努めた。試験材の初期含水率は，ヒノキ材：80~85%，ブナ材：70~77%であった。乾燥条件は，(a)乾球温度60℃一定で湿球温度を低下させる条件（乾燥条件A）(b)乾球温度60℃，関係湿度60%の一定条件（乾燥条件B）の各2条件とし，(a)では従来のスケジュールを参考にして(1)式とTable 1から決定した。

$$E = \frac{u_m - u_{eq}}{u_0 - u_{eq}} \quad (1)$$

ここに u_0 は初期含水率(%), u_m は測定時の平均含水率(%), u_{eq} は平衡含水率(%)である。

実験に際しては，前記条件に対し各2本あて試験材の長さ方向を送風方向に平行に入れ，同時に含水率推定試験片をフックに吊し，外部から物理天秤（精度1/20 g）で絶えず秤量した。試験片の含水率が5~10

%低下するごとに試験材を取り出し，秤量後3試験片を切断（Fig. 1）し，残部木口面にパラフィンを塗布して再び乾燥を継続した。なお(1)式の E と u_m が所定の値に達しているときは，関係湿度をTable 1にしたがつて低下させた。

i) 平均含水率，水分分布の測定：前者は試験片の中央部から小片を採取して，後者は試験片中央部をベニヤ・ソーで表面から10等分して全乾法で含水率を決定した。

ii) 乾燥ひずみの測定：まず乾燥直後の巾をマークに沿って測長（マイクロメータ，1/100 mm）し，次いでベニヤ・ソーで10等分して各薄片の巾と重量を決定した。特に巾の測定では反りによる誤差を防ぐため，2枚のガラス板に挟み軽く押えて測長し，応力の大きさは(2)式で乾燥ひずみとして，また応力の種類は(2)式の符号（正符号：引張応力，負符号：圧縮応力）で判断した。

$$\text{乾燥ひずみ} = \frac{\text{slice 前の長さ} - \text{slice 後の長さ}}{\text{slice 前の長さ}}$$

(cm/cm)(2)

測定後ひずみ試験片10枚を1組にして両端および中央部を軽く縛り，5日間の室内乾燥後，60℃で48時間乾燥し，最後に全乾にして重量，巾，厚みを測定した。前記各操作では水分の変動をできるだけ防止するように努めた。

実験結果および考察

Fig. 2 は乾燥経過，Fig. 3 は乾燥速度曲線である。乾燥経過はいずれの場合もほぼ同様で，乾燥初期には緩慢な，その後急激な，乾燥後期において再び緩慢な含水率低下を示す。Fig. 3 をみるとヒノキ材の乾燥条件Aはやや緩慢であるが，いずれにしてもヒノキ材の乾燥はブナ材よりも容易である。なおTable 2 はK. EGNERの図的解法⁷⁾を用いて得た水分拡散係数入(g/cm²・hr・%)であるが，同一樹種でも乾燥条件によ

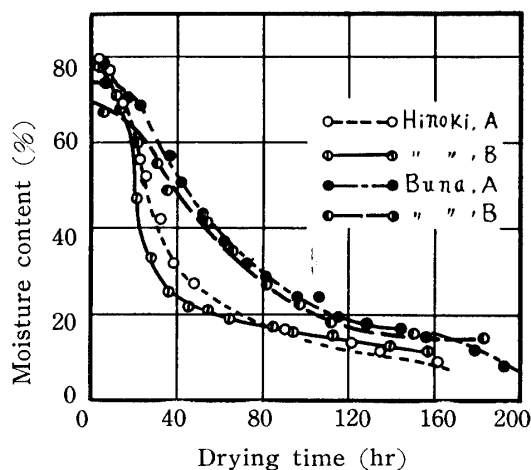


Fig. 2. Drying process.

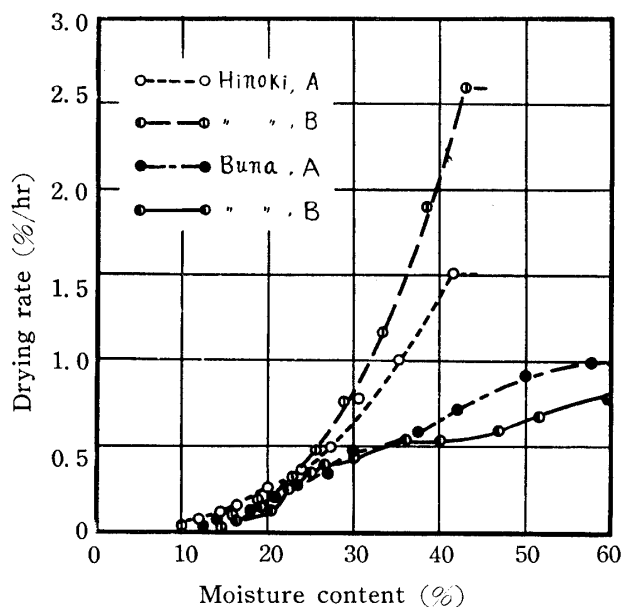


Fig. 3. Relation between drying rate and moisture content.

Table 2. Values of diffusion coefficients (λ)

Species	Drying condition	λ (g/cm. hr. %)	
Hinoki	A	0.50×10^{-4}	$\gamma_0 = 0.46$
	B	1.13×10^{-4}	
Buna	A	1.09×10^{-4}	$\gamma_0 = 0.66$
	B	0.58×10^{-4}	

つて大きく変動し、特にヒノキ材の乾燥条件Aでは値が低い、これらの値を既往のそれに^{5),6),7)}比較するといずれもほぼ妥当なものと考えられる。

1) 乾燥ひずみの変移: Fig. 4は乾燥ひずみと薄片含水率の時間的変移の一例で、図の1・10, …5・6の符号はそれぞれ表面薄片…中心薄片というように (Fig. 1 参照), 厚み中央の分割鋸断面に相対する2コの薄片の平均値を示したものである。図のように乾燥ひずみの変移の傾向は各乾燥条件においてほぼ等しく、既往の red oak 材のそれに類似する^{1),3)}。

Table 3は最大ひずみがあらわれる時期とその平均含水率を表面および中心薄片について示したもので、最大ひずみの時期は後者がやや早く、その平均含水率もやや高いが、両者に著しい差異がなく、一般にヒノキ材では繊維飽和点付近、ブナ材ではそれよりもやや高含水率で最大ひずみに達する。この結果を red oak のそれに^{1),3)}に比較すると、本実験では最大ひずみの発生時期がいずれもおそく、その平均含水率も低い、著者等のスギ⁸⁾およびクロマツ材⁹⁾の実験においても平均含水率20~30%で最大ひずみの発生が認められ、引張応力の発生機構から考えても当然予想されるところである。また中心薄片の最大圧縮ひずみの時期に関しては、最大引張ひずみのそれよりもかなり遅

Table 3. Drying strain and moisture content at time of maximum strain in outer and center slices

Slice	Species	Drying condition	Drying time to max. strain (hr)	Max. drying strain (cm/cm)	Average moisture content (%)
Outer	Hinoki	A	52.0	+0.0051	25.5
		B	54.0	+0.0048	21.0
	Buna	A	63.0	+0.0049	34.0
		B	44.0	+0.0059	42.6
Center	Hinoki	A	50.0	-0.0027	27.5
		B	38.0	-0.0028	26.0
	Buna	A	62.0	-0.0027	34.2
		B	37.0	-0.0028	48.6

Note: Sign (+) indicates the tension strain and (-) the compression strain.

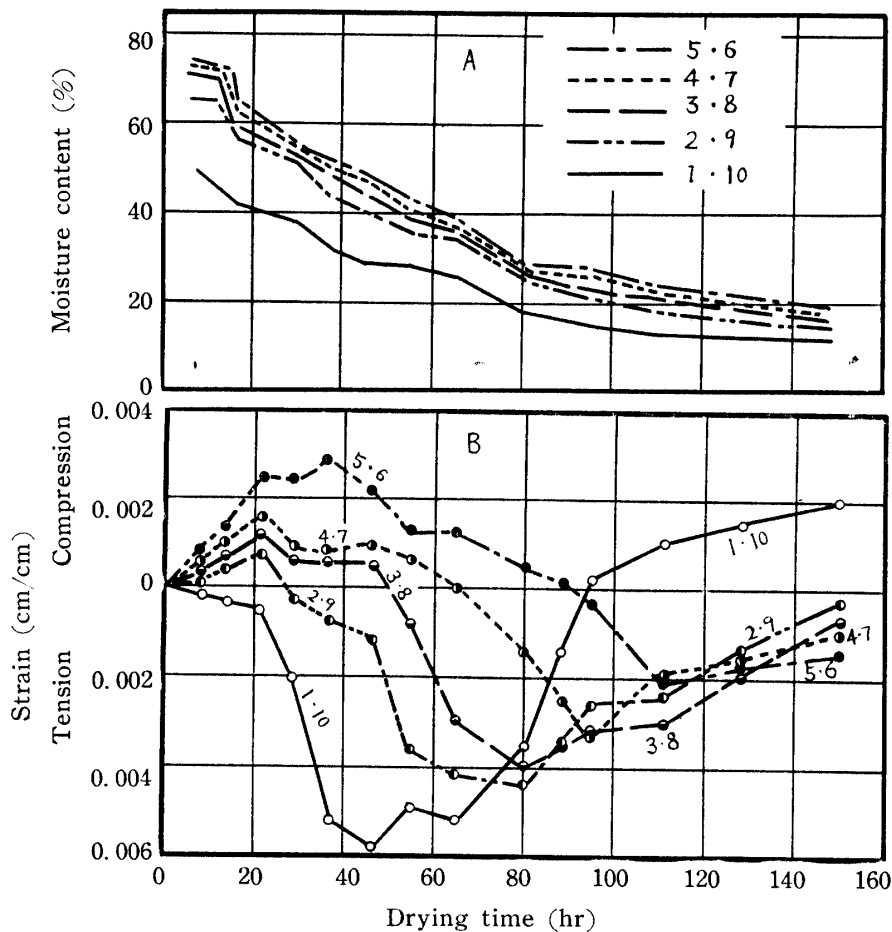


Fig. 4. Moisture content (A) and strain (B) of slices to drying time.
(Buna, drying condition B)

れるという説があるが、前記著者等の以前の実験^{8),9)}においても本実験と同じ結果が得られ、圧縮ひずみの発生原因から考えても不都合ではないと思われる。なお最大引張ひずみの時期における乾燥速度は、ヒノキ材：0.40および0.27%/hr、ブナ材：0.59および0.57%/hr、またred oak材の95°Fおよび110°F乾燥では1.8%/day、125°Fおよび140°F乾燥では6.0%/dayで⁹⁾、同一材料で乾燥条件に著しい差異がない場合には、木材表面がほぼ同じ乾燥程度に達するときあらわれることを意味すると考えられる。

Table 4は表面薄片の引張ひずみが逆転する時期とその平均含水率で、乾燥時間にはかなりの差異があるが、平均含水率はいずれも繊維飽和点以下で同一樹種ではほぼ等しい。既往red oakのそれは⁹⁾平均含水率30±3%、著者等のクロマツ材のそれは⁹⁾平均含水率が14.0%であつた。すなわち表面層のひずみの逆転は中心層の収縮によつてあらわれ、乾燥容易な材ほど低含水率におよぶ。他方中心薄片のひずみの逆転は表面薄片の逆転の時期にほぼ等しく、逆転後は複雑な経

過をたどるが、後者の傾向はred oak材の場合にも認められ¹¹⁾、その理由の一つにひずみ測定誤差が考えられる。すなわち、ひずみ測定は木表から行なわれるので(Fig. 1)、測定に若干の時間を要し、試験片の冷却、水分蒸発、弾性余効回復などが不可避であり、かつ乾燥にともない収縮変形があらわれることによる。

2) 最大ひずみおよびひずみ逆転時における水分分布：表面薄片の最大引張ひずみの時期およびひずみ逆転時の水分分布はFig. 5のとおりである。引張ひずみ最大時の水分傾斜は急で、ヒノキ材で17～20%、ブナ材で27～40%の差異があり、かなりの収縮応力が存在する。またひずみ逆転時では、中心層はすでに繊維飽和点以下にあり、表面層もほぼ外気の平衡条件に達しているが、なおヒノキ

材で7.0～7.5%、ブナ材で18～20%の差異がある。

3) 最大乾燥ひずみ：測定結果はTable 3のとおりで、表面薄片の最大引張ひずみはヒノキ材で0.0048～0.0051 cm/cm、ブナ材で0.0049～0.0059 cm/cmで、red oak材の値0.0031～0.0046 in/inにほぼ近似し⁹⁾、測定精度を考えると樹種や乾燥条件に関係なくほぼ等しい。他方中心薄片の最大圧縮ひずみは、いずれも0.0027～0.0028 cm/cmで樹種や乾燥条件に無関係にほぼ等しく、red oak材の値0.0030～0.0033 in/in⁹⁾に類似する。なお表面および中心薄片の最大ひずみの絶対値では後者はやや小さいが、同様な傾向はred oak材⁹⁾および著者等の以前の実験^{8),9)}においても認められるので、このように結論してさしつかえないと考えられる。またひずみ逆転後の最大値は、Fig. 4のように逆転前のそれにはいずれの場合も達しない。

4) ドライング・セット：上記のように表面および中心薄片はかなり大きなひずみを長時間受けるので、setになることが予想される。このsetの推定法であ

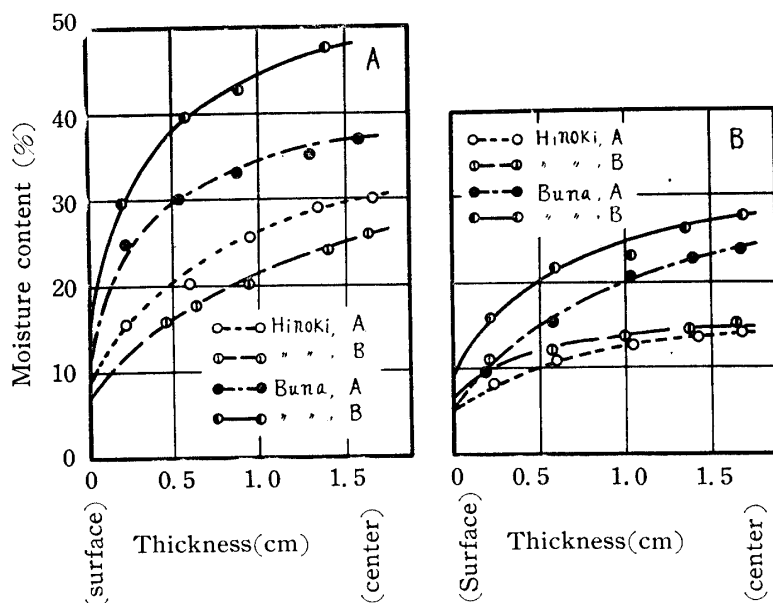


Fig. 5-A Moisture gradients at time of max. tension strain in outer slices.

-B Moisture gradients at time of strain reversal in outer slices.

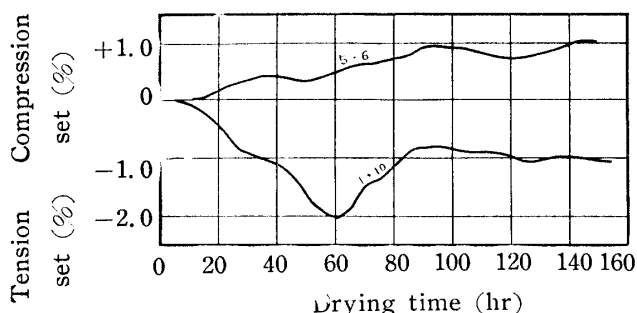


Fig. 6. Set in outer and center slices to drying time.
(Buna, drying condition B)

Table 4. Drying time and average moisture content at time of strain reversal in outer slices

Species	Drying condition	Drying time (hr)	Average moisture content (%)
Hinoki	A	114.0	13.5
	B	131.0	13.8
Buna	A	103.5	21.8
	B	94.0	23.0

るが、既往の研究によれば正常木材と set になった材の収縮率には差異があるので、この方法で示すのが妥当と思われる。

すなわち本実験では、ひずみ試験片の生材時寸法と各薄片を全乾にしたときの全収縮から、McMILLENの方法¹⁾に準じて、各薄片の測定時の収縮率とその時の

薄片 2・9 の収縮率との差をもつて set の程度をあらわすことにした。本法は絶対的なものでないが、ある程度 set 変移の状態を示すと思われる。この点に関しては後述する。

Fig. 6 はこの方法による表面および中心薄片の set の時間的変移の一例であるが、この変移の傾向は red oak 材^{1),3)}のそれに類似する。set が図のようにひずみの逆転後も増加するのはひずみの残留に起因する。

Table 5 は set の最大値を示したものであるが、tension set は compression set よりも、またブナ材のそれはヒノキ材よりも大きい。なお乾速燥度が大いいと tension set は大きくなるが、compression set ではこの傾向が明らかでない。

II 乾燥応力と木材の物理的、機械的性質との関係

前記乾燥応力の測定結果と木材の物理的、機械的性質の温度や含水率による変化についての実験結果から両者の関係について考察してみる。後者の詳細は他の部分^{10),11),12)}で発表したのでここでは省略する。

1) 乾燥応力と木材の収縮：まず乾燥初期（含水率：ヒノキ 80～85%，ブナ 70～77%）におけるひずみの発生は (Fig. 4)，薄い木口面試験料の乾燥の場合平均含水率 70～80

Table 5. Values of maximum set

Species	Drying condition	Tension set (%)	Comp. set (%)
Hinoki	A	0.8	0.8
	B	1.5	0.8
Buna	A	2.3	1.3
	B	2.0	1.0

%で収縮が開始されることから理解できる。

なお表面最大引張ひずみの時期における表面層の推定平均収縮率は、繊維飽和点をヒノキ材 23.0%，ブナ材 28.0%¹²⁾、全収縮率をヒノキ材 6.0%，ブナ材 10.0%とすると¹²⁾、Fig. 5 よりヒノキ材では乾燥条件 A で 3.8%，乾燥条件 B で 4.3%，ブナ材では乾燥条件 A で 6.4%，乾燥条件 B で 5.6%となり、いずれも

Table 6. Relation between maximum drying stress and static strength perpendicular to grain
A) Outer slice

Species	Drying condition	Max. drying strain (cm/cm)	Moisture content (%)	Max. drying stress (kg/cm ²)	Static strength perpendicular to grain $\sigma_{pt}^{1)}$	$\sigma_{0.5}^{2)}$	$\sigma_{max}^{3)}$
Hinoki	A	+0.0051	16.0	+20.5	9.0	20.5	31.7
	B	+0.0048	16.0	+19.1	9.0	20.5	31.7
Buna	A	+0.0049	26.0	+23.0	8.0	28.1	43.5
	B	+0.0058	30.0	+24.0	8.0	20.0	40.0
B) Center slice					$\sigma_{pc}^{4)}$	$\sigma_{2.5}^{5)}$	$\sigma_{5.0}^{6)}$
Hinoki	A	-0.0027	33.0	-2.1	10.0	15.0	18.0
	B	-0.0028	43.0	-2.2	10.0	15.0	18.0
Buna	A	-0.0027	53.0	-3.2	16.2	25.2	33.7
	B	-0.0028	60.0	-3.4	16.2	25.2	33.7

Note: 1) Stress at proportional limit in tension. 2) Stress at 0.5%-strain in tension.
3) Maximum stress in tension. 4) Stress at proportional limit in compression.
5) Stress at 2.5%-strain in compression 6) Stress at 5.0%-strain in compression.

全収縮率の約60~70%に達する。この場合の収縮応力によるひずみはヒノキ材ではそれぞれ0.025 および0.026 cm/cm, ブナ材では0.041 および0.053 cm/cmで、例えばヒノキ材についてこのひずみに対応する表面層の引張応力を、引張応力下における収縮率から推定すると約13kg/cm²となる。この値はTable 6のそれよりもやや低い。これらの応力はいずれも静的横引張比例限度応力を超えているので、クリープ変形や弾性余効回復があらわれたことに起因すると考えられる。

2) 乾燥応力と木材の静的強度および弾性係数：ここでは特に被乾燥材料の表面割れ、内部割れおよび乾燥後の材の変形に関係がある最大乾燥応力と drying set の場合について考察する。

Table 6 は、表面および中心薄片の最大乾燥ひずみ (Table 3) とそれに対応する乾燥応力 (stress-strain curve から推定)^{10),11)} ならびに木材繊維直角方向の静的強度 (引張, 圧縮)^{10),11)} との相互関係である。表のように表面最大引張応力は横引張比例限度応力よりも著しく大きく、ほぼ横引張0.5%一応力に等しいので、測定時の若干の弾性余効回復を考慮しても、すでに表面層に tension set の発生していることが予想される。この値は red oak 材の計算値49.9 kg/cm² よりもかなり低い⁹⁾。後者は平衡水分を仮定して応力函数から求めたものであり、前者は厚さ2.7 mm の平均応力であることによる。例えば水分傾斜より最表面の応力を推定するとヒノキ材で約30 kg/cm² ($\sigma_{max}=43\text{kg/cm}^2$)、ブナ材で約50 kg/cm² ($\sigma_{max}=98\text{kg}$

/cm²) となり、後者の値は red oak 材のそれに類似する。次に tension set 発生の時期を推定するため両供試材の弾性係数 (ヒノキ: 2881 kg/cm², ブナ: 4885 kg/cm²)^{10),11)} と比例限度応力 (ヒノキ: 6.0 kg/cm², ブナ: 8.0 kg/cm²)^{10),11)} から比例限ひずみ量 (ヒノキ: 0.00208 cm/cm, ブナ: 0.00164 cm/cm) をもとめると、ヒノキ材ではそれぞれ11時間および12時間後、ブナ材では40時間および25時間後 set を生じることになり、Fig. 6 のそれにほぼ適合する。このことは(3)において再び論じる。

他方中心薄片の最大圧縮応力は、表のとおり横圧縮比例限度応力よりも著しく小さいので compression set の発生が考えられない。前記と同様に生材の値を用いて比例限ひずみ量を求めると、ヒノキ材で0.0129 cm/cm, ブナ材で0.0135 cm/cm となり、中心層の最大圧縮ひずみ量よりも著しく大きい。したがって McMILLEN の set の推定法¹⁾ はその妥当性について検討する必要があると思われる。

3) 乾燥応力とクリープおよび応力緩和：前記乾燥ひずみの測定は弾性回復ひずみを基準としているので、直接クリープや応力緩和のデータに関係させることは困難である。ここでは (i) 表面層が塑性域に入っていると考えられるのに引張ひずみが漸増する現象 (ii) 最大引張ひずみに達して引張ひずみが漸減し逆転する現象、(iii) ひずみの漸減および逆転にもかかわらず set が増加する現象などについて考察する。

まず (i) に関しては次のように説明できる。木材の弾性係数や比例限度応力は含水率の減少とともに一定

の傾向で増加するが、比例限ひずみ量には一定の傾向が認められない。したがって生材乾燥の際、(2)で述べた比例限ひずみ量に達すると表面層は塑性域に入るが、既述のように表面層の乾燥は決して一様でなく、局部的に乾燥した収縮部分が隣接非収縮部分と相互作用を保持しつつ塑性化し、湿潤部分の収縮に伴って応力の増加が生じると考えられる。換言すると表面最大引張ひずみの発生は、表面層の塑性化の完了に対応する。

(ii) の現象については、乾燥木材(水分非平衡状態)の応力緩和実験¹²⁾ から明らかなように応力の弛緩が進行し、表面層以下の層の収縮によつてより急速となり、中心層の収縮によつて応力の逆転が生じると考えられる。(iii) は set になつた部分が残留ひずみとして残ることによる。

参 考 文 献

1) McMILLEN, J. M. (1955) : Forest Prod. J.

5, No. 1, 71.

2) PECK, E. C. (1940) : Southern Lumberman Dec. 15.

3) 小倉武夫(1955) : 林試報告, No. 77, 35~68.

4) YOUNGS, R. L. and NORRIS, C. B. (1959) : Forest Prod. J. 9, No. 10, 367

5) 福山, 竹村(1959) : 島根農大研究報告, No. 7, 189,

6) 梶田 茂(1961) : 木材工学, 301.

7) EGNER, K. (1951) : Holz als Roh-und Werkstoff. 9, 84.

8) 福山, 竹村(1958) : 日林関西支部講演集, No. 8, 108,

9) " " (1958) : 未発表

10), 11) 福山, 竹村(1962) : 木材誌. 8 No. 4, 170, No. 5, 185.

12) 福山万治郎(1962) : 京府大学報・農14(投稿中)

Summary

This paper deals with the investigations on the general patterns of drying strain developed in wood by means of slicing technique and the relations of drying stresses to physical and mechanical properties of wood. The specimens of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) and Buna (*Fagus crenata*) were used (Fig. 1), and moisture contents of the specimens were 80~85% and 70~77% respectively. The investigations were conducted on two kinds of relative humidities (A : determining from equation (1) and Table 1, B : 60% constant) under the temperature of 60°C.

The results obtained are as follows :

1) The figures showing the variations of drying strain with drying process were approximately same for the all conditions, and the maximum compression strain is occurred at the observed time of the maximum tension strain. The magnitudes of the maximum drying strain in outside and interior slices respectively, were

approximately constant in spite of the difference of species and drying conditions.

2) The magnitude of tension set was somewhat greater than that of compression, and the values of Buna were greater than Hinoki (Table 5).

3) The relations between the maximum drying stresses and the static strength (perpendicular to grain) are shown in Table 6. It is supposed that the compression set does not occur in interior slices, as the maximum compression stress in interior slices is considerably smaller than the stress at proportional limit in compression.

4) Considering the partial drying of surface layer, modulus of elasticity and stress at proportional limit in tension of wood, it may be postulated that the occurrence of the maximum tension strain in outside slices is probably corresponding to the completion of plasticity in surface of dried-wood.