

乾燥応力に関連する木材の物理的、機械的性質

福山 万治郎

MANJIRO FUKUYAMA : Physical and mechanical properties of wood related to drying stresses

摘要 本実験は本邦産ヒノキおよびブナ材を用いて、乾燥応力の発生原因となる木材の物理的性質やその発達に寄与する機械的諸性質の温度および含有水分による変化を検討したもので、主な結果は次のとおりである。

1) 木材の正常収縮あるいは膨脹率の温度による変化は、K. Ludwig の結論にほぼ一致する (Fig. 1)。また収縮あるいは膨脹率と温度との関係は(1)式で (Fig. 2)、温度および含水率との関係は(2)式で与えることができる (Fig. 4)。

2) 生材乾燥では平均含水率 70~80% で収縮が始まり (Fig. 5)、その収縮速度は水分傾斜による収縮抵抗と乾燥速度の相互作用に依存する。

3) クリープ・コンプライアンスの時間的経過は(4)式で与えることができ、そのパラメータ J_0 および a は含水率に比例して直線的に増加する (Fig. 6)。

4) 乾燥試験片の応力緩和は平衡水分のそれに比較して著しく進行するが、この現象は表面層の set ないしは塑性に起因すると考えられる。

緒 言

木材乾燥においては通常水分傾斜ないしは木材組織固有の収縮差に起因して乾燥応力が発生するが、この応力の時間的変移や大きさは、主として木材繊維直角方向の静的強度、弾性的性質あるいは粘弾性的性質などに依存する。木材の静的強度や弾性的性質は、発生した応力の瞬時的なエフェクトを決定するが、木材内部の各層に発生した引張および圧縮応力は、乾燥経過に伴って漸次発達して各層に長時間作用し、クリープおよび応力緩和の現象をおこす。したがって乾燥応力の理解には、木材の乾燥機構以外に、応力発生の原因である木材の物理的性質ならびに前記機械的諸性質の温度や含有水分による変化を検討する必要がある。

本実験では、この意味から本邦産の代表的な針、広葉樹各 1 樹種について前記諸性質の変化を検討したので、それらについて報告する。ただし、静的強度と弾性的性質はすでに木材学会誌に掲載 (8 巻 4 号および 5 号)⁸⁾したので、本報ではこれら以外について報告する。

I 乾燥応力に関係する木材の物理的性質と温度および含有水分

1) 木材の収縮率と温度および含有水分：平衡含水率下における木材の膨脹性の温度による変化に関しては、例えば、針葉樹材では変化しないが、広葉樹材で

は若干増減する⁹⁾、年輪に接線方向の膨脹率は、任意含水率では増減するが最大膨脹率では変化しない¹⁰⁾、長さの膨脹率は任意含水率の場合のみならず最大膨脹率の場合も温度に比例する¹¹⁾、など種々の説がある。本実験ではまずこれらの点について検討した。

実験方法

i) 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) 材の巾 (放射方向) 1.5 cm、長さ (接線方向) 6.5 cm、厚さ (繊維方向) 0.15 cm の木口面木取の試験片である。試料には年輪巾や年輪曲率のほぼ等しい試験片を選び、実験前巾の中央部で年輪に対して正確に接線方向に、しかも縁辺に平行に長さ約 5.0 cm の標線を引き供試した。

ii) 実験装置および実験方法：実験は減圧下 (10^{-3} mmHg) で収着実験類似の装置を用いて行なった。関係湿度の調節には硫酸水溶液を用い、その濃度は全乾~繊維飽和点の含水率範囲を 5~6 段階に区分できるように決定し、また含水率の測定には石英のスプリング (精度 0.005 g) を用いた。実験温度は 30, 45, 60°C の 3 条件で、まず全乾時の基準寸法と重量の測定後、全乾→最高含水率→全乾のプロセスで関係湿度を漸次変化させ、測長と秤量はすべて平衡条件下で行ない、全乾時の寸法と重量を基準とする収縮率あるいは膨脹率ならびに含水率を求めた。

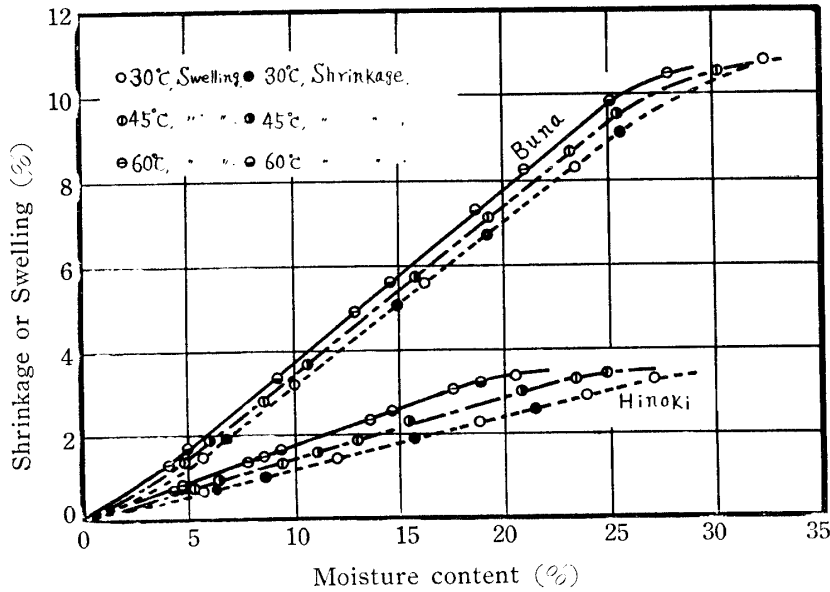


Fig. 1. Relation between shrinkage or swelling and moisture content.

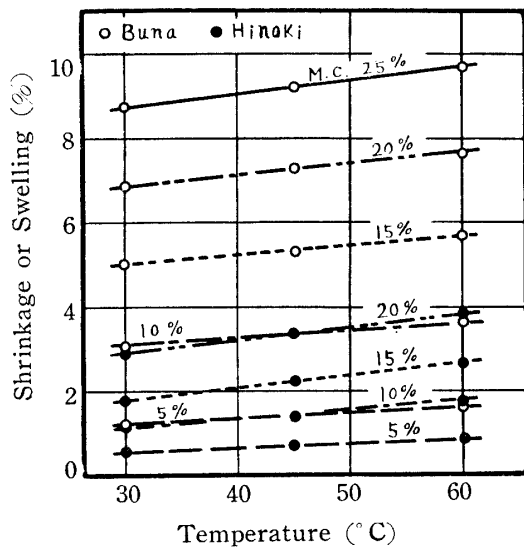


Fig. 2. Relation between shrinkage or swelling and temperature. (M. C. : Moisture content)

実験結果および考察

Fig. 1 は各温度における収縮あるいは膨脹曲線を各点3コノ平均値で示したものであるが、いずれの場合にもヒステレシスがなく、また温度に関しては任意含水率の収縮あるいは膨脹率は増加するが、その最大値が変化しないとした K. LUDWIG の結論²⁾ に一致する。収縮あるいは膨脹率の温度による差異は 15°C あたり 0.4~0.5% で K. LUDWIG の値 (Rotbuche, 約 2.3%)²⁾ よりも小さく、B. MARSCHALECK の値 (Rotbuche, 0.3~0.4%)²⁾ に近似する。温度による膨脹率の差異に関して、膨潤物質の溶解、軟化現象に起因

するとなす説²⁾、成長応力の熱回復に起因するとなす説³⁾ などがあがるが、収縮とくにヒステレシスがなない場合にも両説が適用できるかどうかについては疑問がある。たとえ後説が適用できるとしても熱回復量は 15°C あたり 0.05% 以下でその寄与が小さく、しかも本実験ではその一部が相殺されるので (実験方法参照)、他の原因例えば木材-水分結合下での熱膨脹における何等かの差異、高温下での吸着面積拡大にともなう熱膨脹の増加、あるいは高温下における結晶領域内への水分子の浸入の可能性などが考えられるが、これら

の妥当性に関しては今後の検討にまたねばならない。

Fig. 2 は収縮あるいは膨脹率と温度との関係であるが、いずれも直線となり、次式が成立する。

$$a_2 = a_1 + a(\theta_2 - \theta_1) \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 a_1, a_2 は温度 θ_1, θ_2 °C に対応する収縮あるいは膨脹率 (%), a は収縮あるいは膨脹率に関する温度係数である。

Fig. 3 はこの a の含水率による変化を、対応する全乾木材の熱膨脹係数とともに示したものであるが、含水率とともに放物線的に増加する曲線が得られる。なお、Fig. 2 から得た 0°C の値と含水率との関係をみると直線関係となるので (Fig. 4)、本実験条件 (含水率: ヒノキ 5~20%, ブナ 5~25%) における収縮あるいは膨脹率は次式で与えることができる。

$$a = a_0 + \beta\mu + a\theta \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 a_0 は温度 0°C, 含水率 0% に対応する収縮あるいは膨脹率, β は含水率 1% あたりの収縮あるいは膨脹率, μ および θ は含水率と温度である。本実験値から得た (2) 式のパラメータは、ヒノキ材: $a_0 = -0.40\%$, $\beta = 0.095$, ブナ材: $a_0 = -1.10\%$, $\beta = 0.36$, また a は Fig. 3 のとおりである。

2) 乾燥中の木材の収縮経過, 収縮速度と温度および含有水分: 乾燥中の木材の収縮は正常収縮と異なるので、本実験では乾燥木材の表面層を仮定した極めて薄い木口面木取の試料について、その収縮経過や収縮速度の温度および含有水分による変化を検討した。

実験方法

i) 供試材料および試験片: 樹種, 試験片の形状および寸法は前実験のそれと同様で、試験片を生材 (含

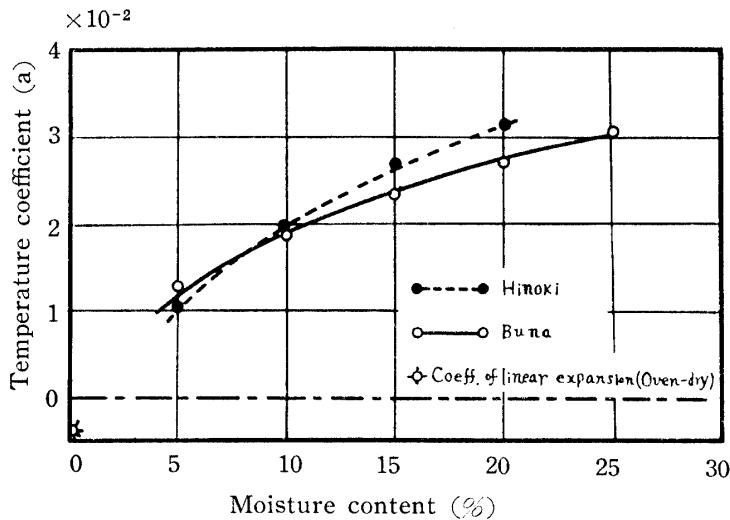


Fig. 3. Relation between temperature coefficient and moisture content.

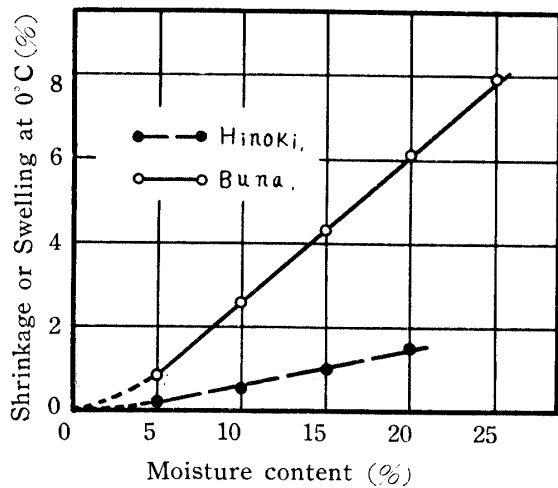


Fig. 4. Relation between shrinkage or swelling at 0°C and moisture content.

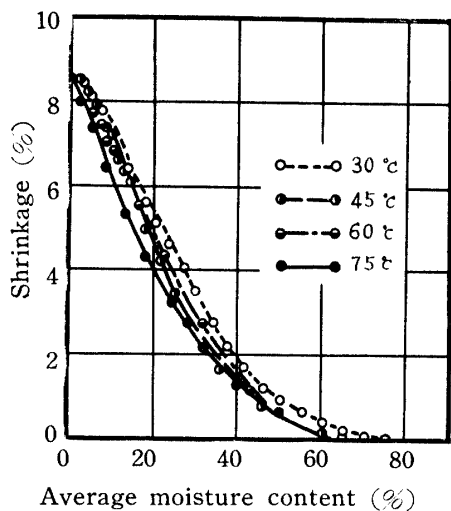


Fig. 5. Relation between shrinkage and average moisture content during drying (Buna).

水率：ヒノキ160~170%，ブナ120~130%）および飽温（含水率：ヒノキ23.7~24.3%，ブナ27.5~28.3%）の2条件に調湿した。

ii) 実験装置および実験方法：実験には仕切板下部に粒状カセイソーダ（乾燥剤）を入れた密閉ガラス容器（断面：15×15cm²，高さ：25cm）を用い、ふたには試験片吊り下げ用のフックおよび水蒸気の凝縮防止用のヒータを設備した。実験温度は30, 45, 60, および75°Cの4条件で、実験に際しては同時に3コの試験片を吊し、2コは収縮率、1コは含水率（石英製スプリング使用）の測定に供し、収縮率および含水率は、初期の寸法と全乾重量を基準にして求めた。

実験結果および考察

乾燥試験片の収縮曲線（収縮率—平均含水率）の一例は Fig. 5 のとおりで、生材では平均含水率70~80%で試験片の一部が局部的に繊維飽和点以下に達して収縮を開始するが、その経過（収縮率—時間）は飽湿試験片のそれに等しく、高温度の場合ほどすみやかに収縮し、はやく最終値に達する。また初期含水率の高いヒノキ生材の収縮開始時点はブナ材のそれよりもおくれるが、前者は減率乾燥速度が大きいので、後者よりもすみやかに最終値に至る。なおヒノキ材では温度による収縮曲線の差異の傾向が明らかでないが、これはヒノキ試験片の個体差に起因すると思われる。

Table 1 は乾燥試験片の最大収縮率、最大収縮速度とその比、最大収縮速度に達する乾燥時間などを示したものであるが、最大収縮速度に関しては飽湿試験片の値が生材のそれよりも、また低温度乾燥条件の値は高温度のそれよりもやや低い。これは前者では初期の寸法に、後者では最終含水率に差異があるためである。しかし後者の場合収縮率の差異が0.3~0.6%程度であるから有意なものとは考えられない。なお乾燥試験片の最大収縮率を正常収縮のそれ（ヒノキ：3.4%，ブナ：9.8%）に比較すると、前者の値はヒノキ材では高く、ブナ材ではやや低いが、これらの差異は供試材料の差異に起因すると思われる。他方最大収縮速度に関しては、飽湿試験片の値が生材のそれよりも、またブナ生材の値がヒノキ材のそれよりも高いが、飽湿試験片の場合には両樹種に大差がない。これらの現象はいずれも試験片内部の水分傾斜に基づく収縮抵抗と乾燥速度の相互作用に依存する。このことはヒノキ飽湿試験片の最大収縮速度の比が高温になるほど高くなるが、それ以外ではほぼ等しいという現象に

Table 1. Maximum rate of shrinkage, maximum shrinkage and dring time under several drying temperatures

Specimen	Species	Drying temperature (°C)	Max. rate of shrinkage		Time to Max. Shrinkage (min)	Max. Shrinkage (%)
			Value (%/min)	Ratio		
Green	Hinoki	30	0.092	1.0	167.5	5.9
		45	0.190	2.1	92.5	5.9
		60	0.275	3.0	57.0	6.2
		75	0.375	4.1	34.0	6.2
	Buna	30	0.140	1.0	97.5	8.0
		45	0.266	1.9	65.5	8.5
		60	0.412	2.9	38.0	8.6
		75	0.550	3.9	26.0	8.6
Humidified	Hinoki	30	0.158	1.0	12.5	4.8
		45	0.366	2.3	7.5	5.1
		60	0.580	3.7	5.0	5.1
		75	0.815	5.2	3.0	5.3
	Buna	30	0.182	1.0	22.5	7.2
		45	0.312	1.7	10.0	7.2
		60	0.515	2.8	9.0	7.5
		75	0.870	4.8	5.0	7.6

についても適用できる。

II 乾燥応力に関係する木材の機械的諸性質と温度および含有水分

本報ではクリープおよび応力緩和に関する実験結果について述べる。

1) 木材のクリープと温度および含有水分：木材のクリープと温度あるいは含水率との関係に関しては、温度や含水率に比例してクリープ変形量が増加し⁴⁾、しかもクリープ変形率と温度との間には勾配一定の直線が得られる⁵⁾ ことなどが認められている。本実験ではこれらの点を曲げクリープの場合について検討した。

実験方法

i) 供試材料および試験片：供試材料は前実験と同様で、試験片は長さ（放射方向）：ヒノキ 9.0 cm, ブナ 12.0 cm, 巾（接線方向）：1.2 cm, 厚さ（繊維方向）：ヒノキ 0.14 cm, ブナ 0.20 cm の木口面木取とした。試料には厚さや年輪巾の等しい試験片を選び、硫酸水溶液と蒸留水のデシケータ内で約1カ月間数条件の含水率に調湿した。

ii) 実験装置および実験方法：仕切板下部に硫酸水溶液（濃度は試験片の含水率と温度から決定）を入れた前記密閉ガラス容器を用い、片持梁の自由端にバランス法（精度 20 mg）で一定荷重（10 g, 生材試験片

の比例限度荷重）を負荷し、撓み量の時間的変化を顕微鏡（精度：1/100 mm）で測定した。実験温度はヒノキ材4条件（30, 45, 60, 75°C）、ブナ材1条件（25°C一定）とし、約1時間加熱後実験を開始した。生材試験片は所定温度の蒸留水中で測定を行なった。

実験結果および考察

片持梁のクリープ・コンプライアンス $J_t(\text{cm}_2/\text{kg})$ は、次式で与えられる。

$$J_t = \frac{y_t}{FP} = \frac{3I}{Pl^3} \cdot y_t = \frac{bh^3}{4Pl^3} \cdot y_t \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 P は荷重 (kg), y_t はクリープの全変形量 (cm), F は形状係数（片持梁： $F = \frac{l^3}{3I}$ ）、 I は慣性モーメント (cm^4), l はスパン (cm), b および h は試験片の巾と高さ (cm) である。この J_t の時間的経過は、クリープ曲線のそれに類似し次式で与えることができる。

$$J_t = J_0 + a \log t + bt^n \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 J_0 は瞬間変形量 y_0 (ここでは1分) に対応するコンプライアンス (cm^2/kg), t は時間 (分), a, b, n は常数である。Fig.6 は、(4)式の J_0 と a の含水率による変化であるが、温度の場合も同様に直線比例関係が存在する。また(4)式の係数 b は、低温度で

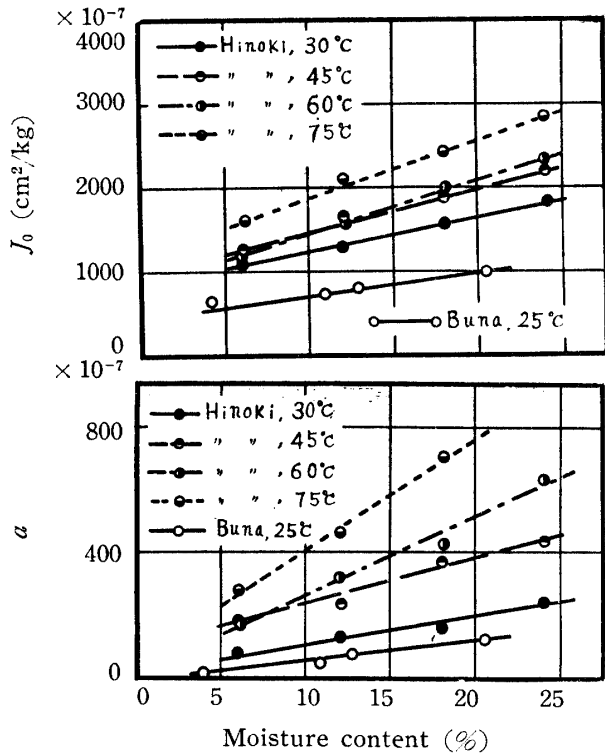


Fig. 6. Relation between J_0 or α and moisture content.

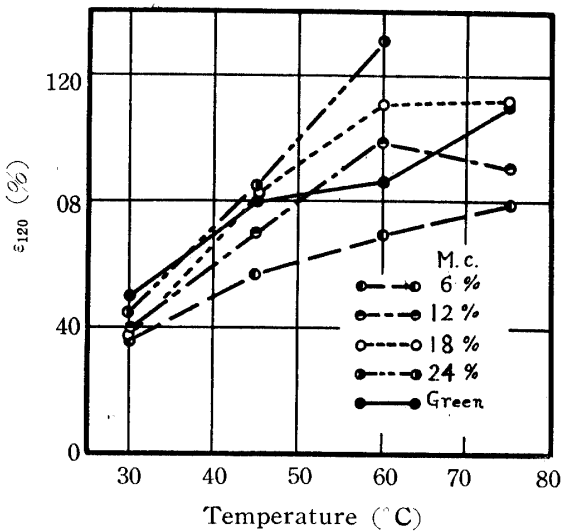


Fig. 7. Relation between ϵ_{120} and temperature.

(M. C. : Moisture content)

は不規則に変化するが、温度上昇とともに強く増加し、指数 n は温度や含水率に規則的な影響を受けない。

一般に J_t は(3)および(4)式のとおり形状係数の影響を受けるので、この影響をある程度消去できるクリープ変形率の場合について検討してみる。クリープ変形率は

$$\epsilon = \frac{y_t - y_0}{y_0} = \frac{P \cdot F \cdot J_t}{P \cdot F \cdot J_0} - 1 = \frac{J_t}{J_0} - 1 \quad \dots(5)$$

で与えられ、その時間経過は J_t のそれにはほぼ類似するが、負荷後 120 分の値 (ϵ_{120}) の温度による変化の一例は Fig. 7 のとおりである。すなわち繊維飽和点以下では含水率に比例してほぼ直線的に増加するが、飽水状態では変化しないか、あるいはやや減少し、また温度に関しては 60°C 付近までは比例的に増加するが、60°C 以上では傾向が明らかでない。これは高温、高含水率で y_0 が強く増加するためである。

2) 乾燥中における木材の応力緩和：水分非平衡状態のクリープ変形率が平衡時のそれよりも強く増加すること⁶⁾が認められているので、本実験ではこの関係を応力緩和の場合について検討した。

実験方法

i) 供試材料および試験片：供試材料はブナ材で、試験片は長さ(放射方向)：12.5 cm、巾(接線方向)：2.0 cm、厚さ(繊維方向)：0.22 cm の木口面木取とし、気乾比重(0.603~0.606)や年輪巾の等しいものを選び、生材(25°C の蒸留水中に浸漬)および気乾(25°C の食塩飽和溶液上に放置)の 2 条件に調湿した。

ii) 実験装置および実験方法：実験にはヒータとファンを有する恒温、恒湿容器(関係湿度は食塩の飽和溶液で調節)を用い、試験片にはバランス法で中央集中荷重を加え、荷重の調節はスパークレス・リレーの接点により、ランプの点滅で行なうようにした。気乾および乾燥試験片の応力緩和は温度 25°C、関係湿度 81~82% で、生材試験片のそれは 25°C の蒸留水中で行ない、いずれも初期荷重 140 g (飽水試験片の比例限度荷重)を加え、緩和の程度を初期荷重 P_0 と測定時の荷重 P_n の比 P_n/P_0 (%) で示した。なお生材試験片では浮力を減じ真の荷重を求めた。

実験結果および考察

Fig. 8 は気乾、生材および乾燥試験片の応力緩和曲線、Fig. 9 は乾燥試験片の乾燥速度と含水率との関係曲線である。気乾および生材試験片は実験終了時までほぼ等しい応力弛緩を示すが、乾燥試験片では約 600 分(含水率約 50%)頃から応力の弛緩が進行し、800~1000 分(含水率 32~22%)で急激となり、のち徐々に最終値に至る。含水率 50% は減率第 2 段の乾燥期間にあるので(Fig. 9)、乾燥試験片の特異な応力の弛緩は次のように説明できる。

乾燥下の木材は外力が作用しない状態においても収縮差に起因して引張および圧縮応力が発生し、drying set の状態になる。本実験の乾燥試験片は、収縮開始前にすでに比例限度力に近い縁辺応力を受けているの

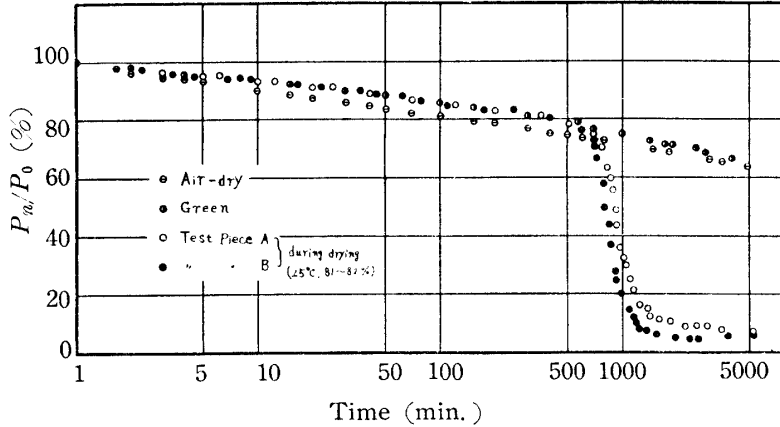


Fig. 8. Stress relaxation curve (Buna)

P_0 : Initial load P_n : Load at time of measurements

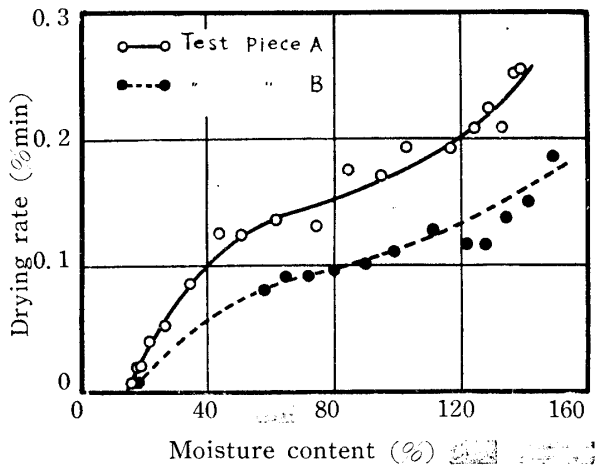


Fig. 9. Relation between drying rate and moisture content (Buna).

で表面層が収縮を開始すると引張側では tension set, 圧縮側では compression set をおこすような状態になると考えられる。すなわち引張側では収縮率が減少の方向に、圧縮側では収縮率が增加の方向に働き、その結果撓み量を増加させる。

Summary

The variation and the magnitude of drying stress during kiln drying depend on the changes of physical and mechanical properties of wood with drying process. This investigation was made on the effects of the temperatures and the moisture contents on physical and mechanical properties of wood related to the drying stress. The specimens of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) and Buna (*Fagus crenata*) were used. The results obtained are as follows :

1) The changes of the normal shrinkage (and

Fig. 5 からも明らかなように、応力の弛緩が進行を始める平均含水率 50% 付近では、表面含水率が繊維飽和点以下に達して収縮を開始し、前記効果があらわれ始めたものと推測される。しかもこの効果は乾燥の進行に伴ってその程度を増し、応力の弛緩が急速に進行する平均含水率 32~22% では、表面含水率がすでに外気の平衡条件に達し、表面層の塑性化ないしは set が相当進行した状態にあると考えられる。鈴木⁶⁾および大草⁷⁾は、クリープの著しい増加に対して木材内部構造の弛緩ある

いは分子凝集力の転移可能性を仮定しているが、前記のような説明もできると考えられる。

参考文献

- 1) WISE, L. E. (1946) : Wood Chemistry 449.
- 2) VORREITER, L. (1955) : Holz als Roh-und Werkstoff. 13, 309.
- 3) 横田徳郎 (1962) : 林試報告, No. 135, 73~87.
- 4) YOUNGS, R. L. (1957) : Forest Prod. J. 7 No. 10, 315.
- 5) 竹村, 福山 (1959) : 鳥根農大研究報, No. 7, 196.
- 6) 鈴木 寧 (1952) : 日林大会講演集, No. 61, 210.
- 7) 大草, 林 (1956) : 鳥根農大研究報告, No. 4 93.
- 8) 福山, 竹村 (1962) : 木材学会誌, 8, No. 4, 170, No. 5, 185.

or swelling) with temperatures are consistent with K, LUDWIG's result (Fig. 1). The relations between shrinkage (and or swelling) and temperatures, moisture contents are expressed by the equation (1) and (2).

2) The shrinkage of green wood in drying process occurred below the average moisture contents of 70~80%, and the rate of shrinkage is surely influenced by the relations between the rate of drying and the moisture gradient.

3) The time dependence of creep compliance

are given by equation (4), parameters (J_0, a) in equation (4) increase almost linearly with increment of moisture contents (Fig. 6).

4) As shown in Fig. 8, the stress of the dry

specimen decreases markedly with drying process as compared with air dry and green, so it is supposed that this phenomenon is presumably caused by the setting on wood-surface.