

# 水分非平衡と応力緩和

竹村富男・福山万次郎・池田 豊

(木材加工学研究室)

T. TAKEMURA, M. FUKUYAMA and Y. IKEDA

Stress Relaxation in Relation to the Non-equilibrium State in the Wood-water System

## まえがき

木材の力学的な性質は、多くの場合、材の含水率および温度が一定なものとして論じられる。したがってこれらの条件が時々刻々に変化する状態での木材の力学的性質については、不明なことが多く、またその研究も比較的少ない。しかしこの場合、木材の性質が平衡時のそれと著しく異なることは容易に想像される。<sup>(1)</sup>

ここでは、特にこのような非平衡が木材の可塑性を増大させるという予想のもとに、飽水状態から気乾状態にいたる放湿条件下で、ブナ材の曲げ一応力緩和実験をおこなった。<sup>(1)(2)</sup> 実験を特に曲げにした理由は、負荷時、試片の放湿が比較的均等におこなわれることを考慮したからである。また放湿条件は、収縮による内部応力の影響<sup>(3)</sup>を不必要に大きくしないために、自然乾燥に近い温湿度とした。

このようにして、もし上の推測が正しければ、この緩和実験で木材は異常な応力の緩和をおこし、またそれにとまって著しい可塑性の変形の増大を示すはずである。この報告では、これらの点を実験的に確かめるとともに、さらにすゝんでその機構を明らかにするために、水分減少経過と緩和曲線との関係を若干、検討考察した。

## 実 験

### 1. 実験材料

樹 種 : ブナ (辺材部)

気乾比重 : 0.60~0.61

平均年輪巾 : 約2.1mm

試片寸法 : 約12.5×2.0×0.2cm (R-, T-,  
L-方向の順)

### 2. 負荷方法

緩和実験は次の2つの負荷方法でおこない、これに用いた試片の長さはそれぞれのスパンに応じて上記の材料寸法から下のように短縮調整した。

(1) 両端支持ばり (中央集中荷重, 試片数4本)

試片寸法 : 約11.3×2.0×0.2cm

スパン : 約10.5cm

初期荷重 : 約150g

温湿度 : (25±0.5)°C, R. H. (80±2.5)%

なお、両端の支点には直径4mmの鋼棒を使用した。

(2) 片持ばり (自由端集中荷重, 試片数5本)

試片寸法 : 約9.3×2.0×0.2cm

スパン : 約8.0cm

初期荷重 : 約40g

温湿度 : (30±0.5)°C, R. H. (80±2.5)%

### 3. 装 置

装置の概略を示すと Fig 1 (a)のとおりである。その主要部は負荷部、試片の支持部およびたわみ測定部の3部である。

支持台①は恒温恒湿槽②におかれたガラス・バット③内にあり、その左右の支柱にはネジで固定できる支点部④がある。支点部はまた (c) 図のように試片⑥を上下にはさんで片持ばりにも使用できる。

両端支持ばりでは、中央に水平な孔をもつ鉄片 (厚さ1.5mm) に試片をとおし、図のようにスパン中央を天秤 (感量20mg) でつりあげて負荷する。このとき初期荷重は所定のたわみに対しより大きめにし、負荷後約0.5分でおよそそのつりあい荷重を見出し、1分の時正確な荷重を測定する。荷重の測定は秤量皿⑤上で1g以上を、それ以下を鎖⑥の上下によって測定する。また鎖の昇降はネジ棒⑦の回転 (手動) によってえられる。

片持ばりでは、直角におりまげた鉄片で試片の自由端をつりあげ、上と同様負荷測定する。

なおこの実験中、試片にあてる一定たわみは、支持部④の上下移動と天秤のアームにとりつけられた電気接点Sの位置とによってあらかじめ調節できるようにした。与えた一定たわみはガラス壁⑧を透して読取顕微鏡⑨で100mmまで測定される。

電気接点Sはまた天秤のつりあいを検出するために用いられる。すなわち、接点Sは (b) 図のスパークレス・リレー回路につらなり、その開閉によって他の接点Tを動作さす。その結果ランプLの回路が開閉され、ランプLが点滅して天秤のつりあいを知ることができる。このとき肉眼では天秤の振動は全く認められない。

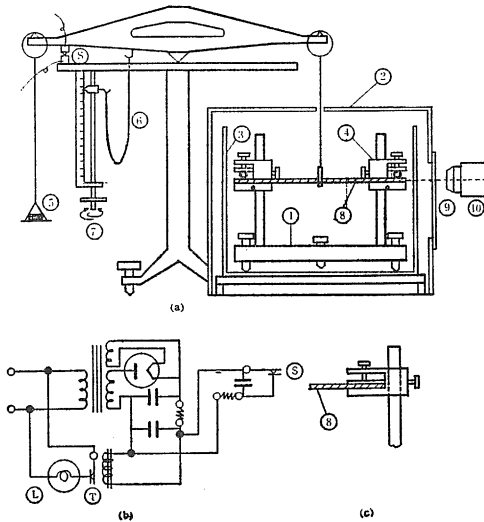


Fig. 1 Apparatus

- (a) Outline of the apparatus
  - ⑧ : specimen      ⑩ : comparator
  - ⑨ : electrical contact point
- (b) Electrical circuits for measuring relaxation loads by a lamp ⑪
  - ⑨ : sparkless relay connecting with the electrical contact point ⑨ in (a)
  - ⑫ : other relay for the lamp ⑪
- (c) Fixed end of a cantilever

恒温恒湿槽は水銀—トルエン・レギュレーターで温度、飽和食塩水で湿度を調節した。また槽内の空気はたえずファンで攪拌し、乾湿球温度計で常にその温湿度を観測した。なお、試片の取り付けによる温湿度変化は約5分で復元した。

4. その他の実験

放湿時の緩和実験に関連して次の3つの実験をおこなった。装置は上記のものをそのまま転用した。

- (1) 荷重—たわみ曲線の測定 (試片数5本)
  - 条件：25°±0.5°Cの飽水および気乾状態 (R. H. 80±2.5%，両端支持ばり)
- (2) 水分平衡時の応力緩和 (試片数4本)
  - 条件：(1)と同じ
- (3) 乾燥経過の測定 (試片数9本)
  - 条件：25°および30°±0.5°C, R. H. 80±2.5%，無負荷の飽水試片

結果と考察

1. 荷重—たわみ曲線

水分の非平衡に起因する異常な応力緩和の存在をたし

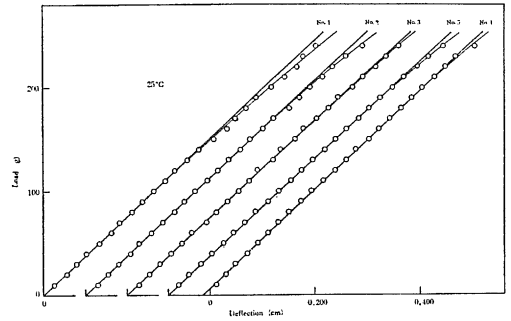


Fig. 2 Load-deflection curves in water (25°C)

かめるためにはなるべく小荷重を用い、大変形による塑性変形の影響をさけることが実験の前提条件となる。しかし他方、あまりに荷重が小さいと必然的に変形も小さく、また緩和荷重も小さいので、測定上誤差の割合が大きくなる。

これらたがいに相反する2点を考慮して、荷重—たわみ曲線からまずその比例限度荷重をもとめ、比例限内なるべく大きな変形を与える荷重を決定することにした。Fig. 2は水中でもとめた飽水試片の荷重—たわみ曲線で、気乾状態でもこれに似た直線にちかいカーブがえられる。これらの各試片について始原接線あるいはそれに準ずる方法 (Fig. 2参照) で曲線に接線をひき、両者のなれる点を比例限度として比例限度応力および弾性係数を求めると Table 1 のとおりである。

比例限度力は明らかに気乾時が高く、また弾性係数に比べちらばりが大きい。図からあきらかなように実験の範囲内では荷重—たわみ曲線はすべての試片を通じて直線に近い曲線型を示すから、こゝでは一応飽水時の平均 24.19 kg/cm<sup>2</sup> を比例限度応力とみなすことにする。これに比する荷重は両端支持ばりでは約 174.87g、片持ばりでは約 43.72g である。それゆえ両端支持ばりでは初期荷重を約 150g (最大応力 20.75kg/cm<sup>2</sup>, 最大ひずみ 0.4033%)、片持ばりでは約 40g を用いることにした。

2. 水分平衡時の応力緩和

両端支持ばりによる水 (25°C) 中および大気 (25°C, R. H. 80±2.5%) 中における緩和曲線を示すと Fig. 3 のようになる。その形状はいずれの場合にも、直線に近いやゝ上にとつなカーブで、したがって緩和初期 (時間 t < 10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup>min.) の曲線は Kitazawa<sup>(3)</sup> が示したように log t の直線式

Table 1. Modulus of elasticity and proportional limit by load-deflection curve at 25°C  
 E : Modulus of elasticity  
 $\sigma_p$  : Proportional limit

Waterlogged			Air dry		
Specimen	E × 10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_p$ kg/cm <sup>2</sup>	Specimen	E × 10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_p$ kg/cm <sup>2</sup>
1	5.3041	16.73	6	9.6346	25.17
2	5.3514	23.93	7	10.3212	29.66
3	5.1901	24.91	8	9.7201	24.49
4	4.9599	29.15	9	9.9311	33.81
5	5.2360	26.25	10	9.6903	28.80
ave.	5.2083	24.19	ave.	9.8595	28.39

$$\sigma/\sigma_1 = 1 - m \log t \quad (1)$$

$\sigma, \sigma_1$  : 時刻tおよび1 min. おける応力

m : 定数

で充分近似し得る。しかしさらに長時間の曲線に対しては、緩和スペクトルを用いるのが一般的であろう。P. Grossman<sup>(4)</sup> は hoop pine による 10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup>min. の測定結果からすでにこのことを指摘している。しかし緩和曲線の形そのものに関しては、あて材 (Compression wood) をふくむ試片を除き、上図と全く同様なカーブをえている。また、Red oak の横引張、横圧縮による、R. L. Youngs<sup>(5)</sup> の結果も同様な曲線をえがくことが確かめられる (図参照)。

これらのことから、ブナ材の半径方向の曲げ応力に対する、Fig. 3 の緩和曲線は正常な木材にみられる曲線型と考えられる。

### 3. 水分非平衡時の応力緩和

Fig. 4 は既述の放湿条件下でおこった応力緩和の測定結果を例示したものである。これらの曲線は Fig. 3

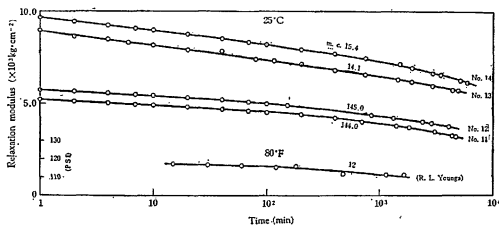


Fig. 3 Stress relaxation curves both in water and air (25°C)

Relaxation modulus : 10<sup>3</sup>kg·cm<sup>-2</sup>

と同様、緩和弾性率で示した。また比較のために前図の水中における緩和曲線をそえた。

#### (1) 両端支持ばりによる緩和

この場合緩和曲線は飽水状態の曲線と著しくことなることがわかる。すなわち、緩和初期では飽水試片と全く同様なカーブをえがくが、t = 600min. 附近から曲線は急激に下降しはじめ、さらに t = 1,500min. 附近では再び徐々に減少する曲線に移行する。さらにこれ以後の部分では、測定値の変動がいく分大きいだが、曲線は下降の傾向を示し、緩和はなお進行しつゝあるように思われる。しかし緩和の進行速度は飽水あるいは気乾時のそれよりはるかに小さく、ここでの緩和に平衡値の存在することが推測される。

このような放湿時の著しい応力緩和の程度をゆるため、緩和曲線がふたたびゆるやかになったとみられる点 (t = 1,500min.) と緩和初期 (t = 1 min.) とにおける緩和弾性率の比をみると Table 2 のようになる。ただし表では同じことなので ((2)式参照) それぞれの時刻に応ずる荷重の比によって示し、また水分平衡時の値をもあげることにした。

表によると飽水および気乾時の緩和弾性率の比はともに大差なく、両者を一括平均すると 72.27% である。これに対し放湿時の平均は 10.13% で、前者との差は 62.14% である。しかし放湿時の値には試片によって相当大きな開き (5.25~14.79%) があるので、この点注意を要する。

次にこのような異常な応力の緩和と可塑的変形との関係を追究せねばならないが、この実験では Fig. 1 (a) から明らかなように、負除荷に際し試片のたわみを正確に測定することが困難である。特に除荷時には荷重の除去と同時に試片が装置からはなれるので、スプリング・バ

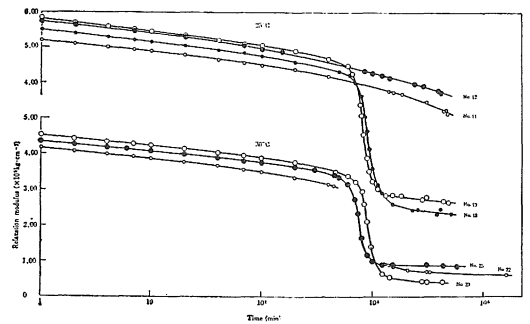


Fig. 4 Stress relaxatin curves during seasoning

Table 2. Relaxation loads at one minute and near the end of drying

Loading method : simple beam for 25°C and cantilever for 30°C

 $P_1, P_t$  : load at time 1 and t min., respectively $u_e$  : moisture content at the end of the relaxation experiment, being nearly equal to the equilibrium m. c. except the transient at 30°C

Moisture condition	Specimen	$P_1$ g	$P_t$		$P_1/P_t$ %	$u_e$ %	
			t min.	P g			
Constant (25°C)	Waterlogged { Air dry R. H. 80}	11	139.90	1,500	101.08	72.25	144.0
		12	140.58	1,400	102.05	72.59	145.0
		13	147.93	1,440	104.08	70.36	14.1
		14	144.94	1,480	107.07	73.87	15.4
	ave.	—	—	—	—	72.27	—
Transient (25°C)	R. H. 80	16	137.50	1,500	13.14	9.56	15.4
		17	147.59	1,450	7.75	5.25	14.5
		18	137.96	1,500	15.09	10.94	14.3
		19	146.01	1,500	21.59	14.79	14.2
	ave.	—	—	—	—	10.13	14.6
Transient (30°C)	R. H. 80	21	36.81	1,500	5.17	14.05	17.9
		22	38.51	1,500	7.54	19.58	17.0
		23	37.96	1,400	4.48	11.80	17.4
		24	38.81	1,500	6.76	17.42	18.0
		25	38.16	1,500	7.90	20.70	16.7
	ave.	—	—	—	—	16.71	17.4

Table 3. Constant deformations during relaxation and residual deformations after deloading

 $y_o$  : Constant deflection ,  $y_s$  : Spring back when deloading $y_r$  : Residual deflection ,  $P_e$  ; Load at the end of the relaxation experiment

Moisture condition	Specimen	$y_o$ cm	$y_s$ cm	$y_r$ cm	$y_r / y_o$ %	
Transient (30°C)	R. H. 80	21	0.579	0.042	0.537	92.75
		22	0.670	0.062	0.608	90.75
		23	0.563	0.035	0.528	93.78
		24	0.649	0.065	0.584	89.98
		25	0.583	0.071	0.512	87.82
	ave.	—	—	—	91.02	
Transient (25°C)	R. H. 80	16	0.244	0.016*	0.228	93.44
		17	0.257	0.006*	0.251	97.67
		18	0.253	0.010*	0.243	96.05
		19	0.261	0.020*	0.241	92.34
	ave.	—	—	—	94.87	
Constant (25°C)	Waterlogged { Airdry R. H. 80}	11	139.90	86.09	53.81	38.46
		12	140.58	91.58	49.00	34.86
		13	147.93	94.05	53.90	36.44
		14	144.94	91.67	53.27	36.75
	ave.	—	—	—	36.63	

\* Values calculated from an average  $1/E$  (Table 1),  $P_e$  and a form factor.

ックの量を正しく求めることはほとんど不可能である。

また両端の支点はともに固定されているから、これと試片との間に摩擦力が働き、これが放湿にともなう試片の収縮を阻止しようとする傾向をもつ。その結果試片の収縮力が緩和に影響をおよぼすことが考えられる。このおそれについては、しかし簡単な計算によって無視できる程度のものであることがわかる。いま摩擦力を  $F$ 、収

縮力を  $T$  とすれば、

$$F = P(1)/2, P(1) : t = 1 \text{ min. の荷重}$$

$$T = A \cdot E \alpha, A = 2 \times 0.2, \alpha = 5.10^{-2} \times \frac{15}{30}$$

ここで、摩擦角  $0^\circ$ 、全収縮率 5%、繊維飽和点の含水率 30%、この場合の平衡含水率 15% を仮定し、また  $A, E$  および  $\alpha$  はそれぞれ試片断面積、弾性係数および収縮率

をあらわす。上式に Table 1, 2 の数値を代入すると

$$F/T < 10^{-3} \sim 10^{-5} \ll 1.$$

したがって両端支持ばりのものつこれら 2 つの欠点のうち、前者がより重大な意義をもつことは明らかであろう。いずれにせよ、これら実験上の短所をおぎう目的で次に試片の一端を固定した片持ばり (Fig. 1 (c)) で放湿中の緩和曲線を求めることにした。しかしこの場合、固定端における試片蒸発面の縮小はさけることができない。

(2) 片持ばりによる緩和

この緩和曲線は Fig. 4 の下方に示す通りで、両端支持ばりの場合と全く同じタイプの曲線がえられる。ことなる点は放湿にともなう異常緩和の程度がいく分低いことで、Table 2 の緩和弾性率比は 11.80~20.70 (平均 16.71) % である。また著しい緩和のおこり始める時期が両端支持ばりよりいくらか早いものがある (t=500~600min.)。

これらの相違は上述の理由から、主として放湿条件の相違にもとづくものと考えられる。事実、試片固定端の影響は実験終了時における試片含水率の相違に見出すことができる。すなわち、両端支持ばりの平均 14.6% に対し、片持ばりでは平均 17.4% でその差の 2.8% 高含水率である。これは温度条件から期待されることがらと全く反対の結果である。また片持ばりの実験終了時におけるスパン中央部と固定端との含水率差は 0.02~0.15% で、わずかであるが、各試片とも固定端が高い。

しかし固定端から自由端にむかっの水分傾斜は、別報<sup>(6)</sup> のようにあまり大きくないと考えられる。それは、第 1 に試片の木取りと、第 2 に無負荷の片持ばりにおける収縮経過がスパン全長と中央部とでほとんど差のないことから間接的にしられる。また片持ばりと両端支持ばりの緩和曲線がおのおの同様な減少経過をたどることも、逆にこのことを証するものと考えられる。

次に著しい応力緩和をおえたのちのスプリング・バックと残留変形の測定結果を示すと Table 3 のようになる。たゞし除荷までの緩和時間は t=5,000min. 前後で試片によっていくらか差があるが、前述のようにこの部分での緩和曲線はゆるやかな勾配をもつから、結果にそれほど影響しないと思われる。表から一定たわみに対する残留変形の割合をもとめると 87.82~93.78 (平均 91.02) % で、これを 25°C の水分平衡時の値 36.63 (推定値の平均) % とくらべると、平均値の差で 54.39% 大きいことがわかる。またおなじく 25°C 放湿時の緩和試片について残留変形の推定値を算出すると、表のように平均 94.87 % の値がえられる。ここで推定値の算出は、前者では応力緩和が線型

$$P = y_0 KE (t)$$

P : 時刻 t における荷重

y<sub>0</sub> : 一定たわみ

K : 形状係数

E(t) : 緩和弾性率

と考えれば、荷重の比は直ちに瞬間的たわみの比を与えることから、また後者ではさらに気乾時の弾性係数 E の平均値 (Table 1) と試片の平均寸法にもとづく形状係数の値を用いて求めることができる。

残留変形は一般に弾性余効変形と塑性変形とからなると考えられるから、<sup>(7)</sup> 残留変形の増大と塑性変形の増大とは必ずしも同義でないことは注意を要する。また塑性変形をうけたはりのスプリング・バックは、残留応力

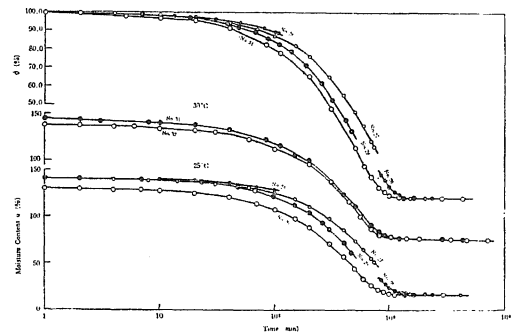


Fig. 5 Drying processes by u and  $\phi$   
u is the moisture content and  $\phi$  is the ratio of the moisture being still able to evaporate to one desorped by equilibrium.

のために正しい瞬間的弾性変形をしめさないことが理論的にしられている。<sup>(8)</sup> これらのことから上にみた著しい残留変形の増大は、緩和後に残留応力がなく、かつ気乾時と等しい弾性余効を示すような場合にのみ、そのまゝ塑性変形の増大を意味することになる。

4. 乾燥経過と応力緩和

(1) 乾燥経過

飽水試片を細い針金でつるし、水分の減少経過を測定した結果を示すと Fig 5 のとおりである。測定終了時の含水率は、それぞれ 25°C : 15.8~17.1 (平均 16.25) %, 30°C : 14.6~16.1 (平均 15.44) % で、これらの値はおのおのの条件に対する平衡含水率を示すものと考えられる。<sup>(9)</sup> 含水率が平衡に達する時刻は 25°C では比較的早く、t = 1,500 min. 前後とみられる。30°C では試片が縦につるされた関係上、これ以後なお若干含水率は減少するが、その変化は極めて小さく 1% 以下である。当然のことながらここで興味あることは、25°C の平衡含水率が 30°C のそれより高い (平均値の差で 0.81%) こ

とで、従って前述の緩和実験で片持ばり試片の含水率はさらに下がらねばならぬことになる。また 25°C の場合から、緩和荷重による平衡含水率の変化をすることができ。すなわち、負荷一、無負荷試片の含水率はそれぞれ平均値で 14.6 (Table 2), 16.25% で、その差は負荷時が約 1.6% 低いことになる。

(2) 乾燥経過と応力緩和

木材の乾燥現象は複雑であるが、いまこれが Fick の拡散法則<sup>(6)</sup>に従うものとして、拡散方程式

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \Delta \phi \quad (3)$$

$\phi$  : 拡散可能な水分 ( $0 \leq \phi \leq 1$ )

$D$  : 拡散係数

$\Delta$  : ラプラシアン ( $x$  方向のみ)

を次の条件

$$\left. \begin{aligned} \text{境界条件 : } (\phi)_{x=\pm \frac{h}{2}} &= 0 \\ \text{初期条件 : } (\phi)_{t=0} &= 1 \end{aligned} \right\}$$

$h$  : 試片厚

でとくとき、試片厚に対する  $\phi$  の平均値  $\bar{\phi}$  は

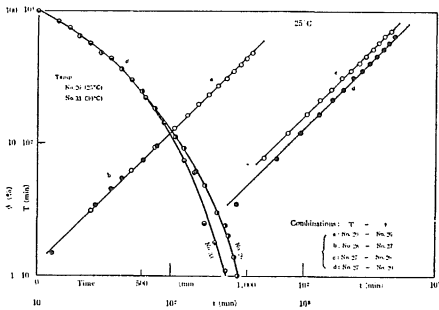


Fig. 6 Curves  $\log \bar{\phi} - t$  do not lie on any straight lines expected from a solution for the Fick's equation of diffusion (left). Linear relationships between  $t$  and  $T$ , which are times necessary to reach an equal value of  $\phi$  in two specimens, respectively, are seen. (right).

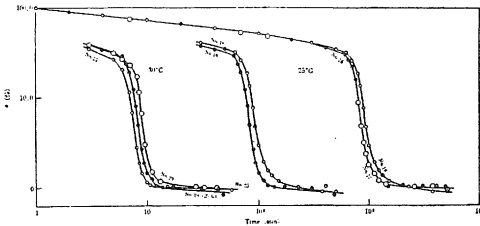


Fig. 7 The relationship similar to that of curves  $\phi - \log t$  is seen in the relaxation during seasoning.

$$\left. \begin{aligned} \bar{\phi} &= \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ - \left( \frac{2n+1}{h} \pi \right)^2 D t \right] \\ &\approx \frac{8}{\pi^2} \exp (-t/\tau), \quad (0.15 < t/\tau) \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\tau : \frac{h^2}{\pi^2 D}$$

で与えられる。<sup>(6)</sup>したがって

$$\log \bar{\phi} = \text{const.} - k' t/\tau, \quad k' = \log e. \quad (5)$$

$\bar{\phi}$  はまた平均含水率  $u$  と次の関係

$$\bar{\phi} = \frac{u - u_e}{u_i - u_e}, \quad (6)$$

$u_i$  : 初期含水率

$u_e$  : 平衡含水率

$u$  : 時刻  $t$  における平均含水率

があるから、右辺の実測値からこれをもとめ、半対数紙上で上式に示した  $\log \bar{\phi} - t$  間の直線関係を検討することができる。Fig. 6 左方の曲線はこれをみたもので、明らかに上の直線関係は認められない。その理由として拡散係数の含水率依存性、境界条件の時間的変化、水分保持および移動機構の多様性などがあげられよう。しかしこれらの点で上式の解が不適なことはむしろ当初から明瞭なことである。従って扱ひ方の粗雑さはまぬがれないが、上式を木材中の水分が単純に高含水率側から低含水率側へ向かって移動することだけをあらわすものと解して、時間  $t$  と移動可能な水分量  $\bar{\phi}$  との関係に注目すれば、(4)式から

$$\bar{\phi} \approx \bar{\phi}(at), \quad a = \text{const.} \left( = \frac{1}{\tau} \right). \quad (7)$$

これから材料の種類と形状の相違は単に乾燥時間のスケールのみをかえて  $\bar{\phi}$  のかん数形に影響をおよぼさないことがわかる。Fig. 6 は Fig. 5 の  $\bar{\phi}$  が急減する部分から、適当な 2 曲線の組み合わせについて同じ  $\bar{\phi}$  の値に対する時刻  $T, t$  の対応関係

$$T = at \quad (8)$$

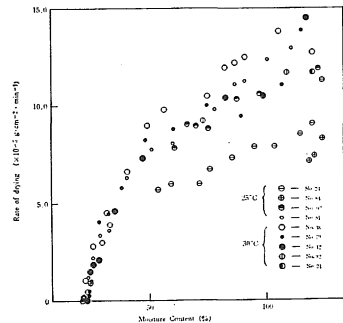


Fig. 8 Relationships between rates of drying and moisture contents

を両対数紙上で検討したものである。すなわち、 $T, t$  によって定まる点は勾配1の直線上にのらねばならない。試片の組み合わせによっては、いく分この関係からずれるものもあるがその差は小さく、かつ別の組み合わせをとればその差はほとんどみられない。したがって  $\bar{\phi}$  の曲線形はいく分試片によってかわるが、上式の関係はすべての  $\bar{\phi}$  についてほぼ満足されるものとみなすことができよう。このことはまた Fig. 5 の  $\bar{\phi}$  曲線の形に大差がなく、かつ曲線の急斜角がほぼ平行に走ることから推測される。

またこの関係は Fig. 5, 4 から放湿温度のことなる  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$  の曲線間にも認めうることも明らかである。したがってこの実験では、同一温度内およびことなる温度間における乾燥経過の相違は、乾燥機構の本質的な相違によるものでないことが推論できる。

放湿ともなう異常緩和が試片の乾燥経過に直接影響されるものとすれば、緩和の進行過程は乾燥経過と同様な関係によって支配されると考えられる。前述のように放湿下の緩和曲線は完全に平衡値に達してはいないが、その存在は充分予想されるので、放湿による異常緩和がゆるやかに始まる点  $t=1,500\text{min}$ . 附近よりさらに若干経過した  $t=3,000\text{min}$ . 附近の値を平衡値とみなせば、 $\bar{\phi}$  に対応して緩和量  $\bar{\Phi}$  を定義することができる：

$$\bar{\Phi} \equiv \frac{P(t) - P_e}{P_i - P_e} = \frac{E(t) - E_e}{E_i - E_e}, \quad 0 \leq \bar{\Phi} \leq 1 \quad (9)$$

添字  $i, e$  : initial, equilibrium を指す。

$\bar{\Phi}$  によって Fig. 3 の緩和曲線を示すと Fig. 7 のとおりである。(a) はそれぞれことなる時間域に測定値のない2曲線が1つに重なり、しかもそれかほぼ平行に他の曲線とならぶことを示す。(b) は同じく  $25^{\circ}\text{C}$  の他の2曲線の組み合わせについて、(c) はことなる温度間の曲線についてそれぞれ横軸方向の移動による曲線の重ね合わせが可能なることをあらわす。それゆえ  $\bar{\Phi}$  についても  $\bar{\phi}$  と同様次の関係式がえられる。

$$\bar{\Phi} = \bar{\phi}(ct), \quad c = \text{const.} \quad (10)$$

このような意味で乾燥と緩和の進行は併行しておこる

と考えられる。しかし緩和の進行が最も著しいのは、前述のように  $t=500\sim 600\text{min}$ . 以後  $t=1,500\text{min}$ . の間である。その間含水率は  $u=60\sim 40\%$  よりほぼ平衡値の  $15.6\%$  近くまで変化する (Fig. 5)。またこの時期は乾燥速度曲線 (Fig. 8) からちょうど減率乾燥第2段に相当することがわかる。したがって減率乾燥第2段と応力の異常緩和との関係が次に重要な課題となる。

これについてはまた別に考察することにして、以上のことからこの報告の主な目的である、水分非平衡にもとづく異常な応力緩和の生起とそれともなう可塑的変形の増大に関して若干の手がかりがえられたとおもわれる。

なお、本研究と関連して一部科学研究費の援助をえたので、ここに附記して感謝の意を表す。(1962. 9)

### 引用文献

1. 竹村富男・福山万次郎：第11回木材学会大会要旨，43-44(1961)。
2. Mc Millen, J. M. : U. S. Dept. Agr., For. Prod Lab. Rep. No. 1652(1958)。
3. Meredith, R. : Mechanical Properties of Wood and Paper, Amsterdam, 40(1953)。
4. Grossman, P. : Nature, 173, 423-43(1954)。
5. Youngs, R. L. : For. Prod. J., 7, 315-324(1957)。
6. 竹村富男：第12回木材学会大会要旨，25-26(1962)。
7. Kollmann, F. : Holz als Roh-und Werkst., 19, 73-80(1961)。
8. 益田森治・室田忠雄：工業塑性力学，50-51(1961)。
9. 農林省林業試験場編：木材工業ハンドブック(1958)。
10. Crank, J. : The Mathematics of Diffusion, Oxford, 4(1956)。
11. Jost, W. : Diffusion in Solids, Liquids, New York, 35-38(1960)。
12. Armstrong, L. D. and Kingston, R. S. T. : Nature, 185, 862(1960) ; Armstrong, L. D. and Christensen, G. N. : *ibid.*, 191, 869-870(1961)。

### Summary

The stress relaxation of Buna under constant deflection has been investigated in the conditions of both moisture transient and equilibrium states. The transient conditions are almost nearly equal to natural seasonings in the atmosphere ( $25^{\circ}\text{C}$  and  $30^{\circ}\text{C}$ , R. H. 80).

The relaxations during drying from the waterlogged to the above air dry conditions were found to be increased enormously (Fig. 3) at a course of drying. This conspicuous phenomenon of the relaxation seems to be followed with an extraordinary increase in residual deformation when deloaded. This was confirmed in Table 3 and its magnitude was as large as 90 per cent or more of the constant deformation given at first.

Over the range studied here, the rate of drying does not affect the course of relaxation but changes its time scale (Fig. 7). It was then concluded that the stress relaxation during drying went on in accordance with the progress of drying of wood. And the great increase in relaxation occurred in the second decreasing rate of drying (Fig. 8). A further research for the plastic deformation due to the non-equilibrium state in moisture will be desired.