

ブナ材のクリープと含水率について

竹村富男・福山万次郎・春名伸哉

(木材加工学研究室)

Tomio TAKEMURA, Manjiro FUKUYAMA and Nobuya HARUNA

Studies on Relationship between Creep and Moisture Content of Wood

木材の曲げクリープに与える温度の影響については既報のようにスギ材を用いて、クリープ量が時間と温度の2因子を変数とする、いわゆる変数分離形であらわされることを示した。¹⁾ このようにある種の物理量が関与因子に関して変数分離される例は S. L. Dart および E. Guth 等の応力緩和実験、^{2,3)} 北原等のクリープ実験⁴⁾ などでも見ることができる。

また線型粘弾性理論をもとに温度—時間重ね合わせの原理を検討した結果、測定時間の全域については原理は成立しないが、時間の巾を微小区間に限れば近似的に成立することが明らかになった。

木材中の水分がクリープにおよぼす影響についてはすでに2, 3の報告があるが、^{4,5)} ここでは上述のような温度効果から類推して水分の効果を論ずることにした。

実験方法

種々の平衡含水率状態にある試片を片持ばりとし、自由端に一定荷重の錘りを負荷して読取顕微鏡(精度1/100 mm)でそのたわみを測定した。

1. 供試材料: ブナ気乾材より柾目木取り(繊維走向は試片の巾方向)、大きさ12.0×1.2×0.14cm(長さ×

巾×厚さ)の試片を作製して5試片1組の組7組を編成した。組分けには気乾比重 $\rho=0.67\sim0.71$ のものをえらび、特に1試片における厚さむら(精度1/100mmのマイクロメータで3ヶ所測定)に留意して各組がほぼ均質になるように試片を配分した。

これら7組のうち6組をクリープ実験に、残り1組を荷重—たわみ曲線の測定に用いた。

2. 装置および条件: 恒温恒湿槽として内径32×36 cmのデシケータ(ジュラルミン製蓋)を用い、その内部温度を水銀—トルエンレギュレータで調節した。湿度は硫酸水溶液の濃度をかえて調湿し、またファンにより器内の空気を攪拌した。

温度: $25\pm0.5^{\circ}\text{C}$

関係湿度: 96, 89, 73, 56, 8%および飽水

一定荷重: 10.0g(縁応力約25.0kg/cm²)

測定時間: 0.5~100分

一定荷重は荷重—たわみ曲線の測定値から比例限界内の小荷重とした。また負荷時に器内の温湿度を変化させないためデシケータの蓋にネジの緩緊によって上下に滑動する金属棒をとりつけ、棒の上下操作によって器外から試片に負荷できるようにした。

各試片の含水率は次表のように、上の温湿度条件から予期される値(林試編: 木材工業便覧)より最大約2%の相違を示した。これは主としてわたみの測定時における器壁への水蒸気の凝着(デシケータの外側に覆う保温用木毛の一部を取除くため)により硫酸水溶液の濃度が所定値よりいくらか変化したためである。

なお、次表で5試片にみえない組があるのはクリープ曲線が他と比較して明らかに異常なものを除いたためである。また平衡含水率値のないものはクリープ実験終了後の試片取出し時に硫酸が附着して測定できなかったものである。

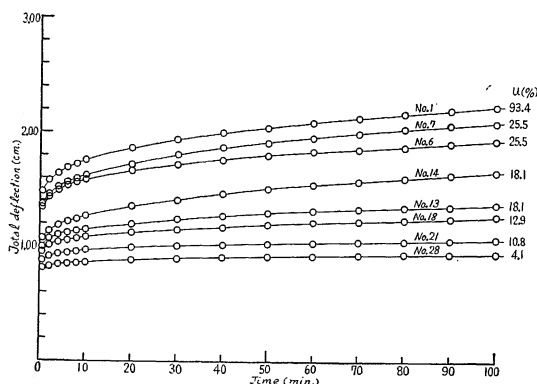


Fig. 1: Examples of creep curves under the constant load (maximum stress 25.0kg/cm²) and various humidified conditions at temperature 25°C.

結果と考察

1. クリープ曲線と含水率 (1)

クリープ曲線は Fig.1 の例に示すように含水率の増加と

Table 1. Moisture contents of test pieces

Test pieces	Air-dry		Humidified conitons		Ave. (%)
	Sp.gr. (g/cm ³)	M. c. (%)	E. m.c. (%)		
No. 1	0.693	16.0	92.0	93.4	
2	0.695	15.8	94.8		
3	0.693	16.0	93.3		
4	0.701	16.0	93.3		
5	0.688	15.8	93.5		
6	0.682	15.8	25.6	25.5	
7	0.683	16.0	25.2		
8	0.690	15.4	25.6		
9	0.688	15.4	25.6		
11	0.682	15.8	18.0	18.1	
12	0.702	16.1	18.0		
13	0.692	15.9	18.3		
14	0.690	—	—		
16	0.686	17.1	13.4	12.9	
18	0.678	15.8	12.4		
19	0.694	15.5	12.9		
21	0.674	15.6	11.3	10.8	
22	0.686	15.1	10.2		
23	0.707	—	—		
24	0.685	—	—		
25	0.687	15.6	10.9		
26	0.682	15.3	4.2	4.1	
27	0.681	15.6	4.3		
28	0.686	15.3	4.1		
29	0.692	15.5	4.1		
30	0.683	14.9	3.6		

共に急昇する。このような含水率の増加にもとづく変形量の増大は無定形高分子物質では、高分子鎖間の相互作用をうち破って低分子(水分子)が侵入し、鎖の間隔を広める、その結果鎖相互間の van der Waals 的な相互作用が弱められ、鎖の運動単位であるセグメントの活動を容易にし、したがって鎖の間隙に水分子が侵入すればするほど鎖の間隔は広められ、外力に対して変形を起こしやすくなると考えられている。⁵⁾ここで温度の場合と同様に鎖の形態変化に対応する遅延時間を考え、各遅延時間が同一の含水率状態ではある含水率状態を基準にとって am 倍だけ伸縮されると仮定すれば濃度-時間重ね合わせの原理が成立することになる。木材の場合、前述の温度効果から推測してこのような簡単な力学的模型によって変形量が記述されるとは考えられないが、水分の効果を定性的に理解する上に役立つと思われる。

次に瞬間的たわみ(負荷後0.5分における)に対するクリープ量の割合 ϵ

$$\epsilon = \frac{y - y_0}{y_0} \quad (1)$$

y : 負荷後の時刻 t におけるたわみ

y_0 : 瞬間的たわみ

をとり、半対数紙上でその経過を示すと、Fig.2 のようになる。ただし図の曲線は各含水率条件ごとの平均値で示した。

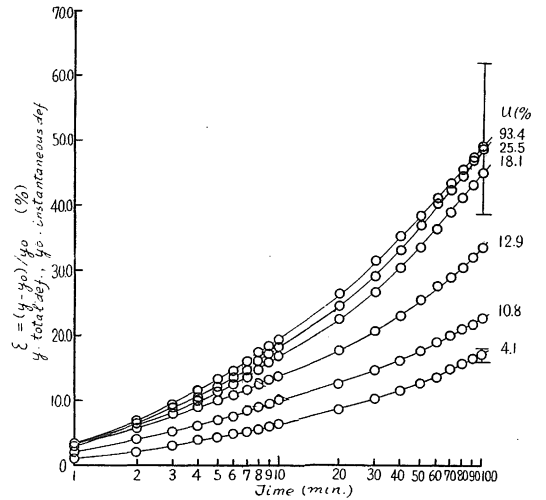


Fig. 2 : Creep curves shown by ϵ , a ratio of creep deformation to instantaneous deformation.

これらの曲線から明らかなのは、変形量が含水率の増加にともなって必ずしも一樣に増加していないことである(Fig. 1でも同様)。これは温度効果の場合と異なって一般に他の力学的な諸性質が繊維飽和点以上の水分増加に無関係なことに対応するものと考えられる。すなわち、これらの図は水分効果に絶乾および飽湿時の両極端が明瞭に存在することをうかがわせる。したがって飽湿あるいは絶乾時の含水率に近いほど、同一含水率における実測クリープ曲線の変動巾は小さくすると予測される。しかるに飽水時および含水率 $u=4.1\%$ について曲線の変動巾を例示すると $t=100$ 分においては Fig. 2 のようになり、飽水時の変動巾は後者の変動巾より著しく大きい(水分効果の特性参照)。

2. 時間因子と水分因子の分離

温度効果の場合クリープによる変形量として(1)式の ϵ をとるとき、時間および温度因子が変数分離されることはすでに述べた通りである。そこで今の場合も ϵ が

$$\epsilon(t, u) = f(t) \cdot g(u) \quad (2)$$

の形で表わされるとすると、各含水率状態の $\epsilon-t$ 曲線を

両対数紙上にえがけば曲線はすべて同じ形となり、含水率の影響は ϵ 軸上の曲線のずれとしてあらわれることになる。Fig. 3はこのことをみたもので、各含水率における $\epsilon-t$ 曲線はほぼ平行にあらわれる。これらの曲線のうち含水率 $u=4.1\%$ の曲線をえらび、他の曲線を縦軸に沿って平行移動しこれに重ね合わせてみる。Fig. 4 は各曲線の $t=10$ 分における ϵ の点が $u=4.1\%$ の曲線上の対応

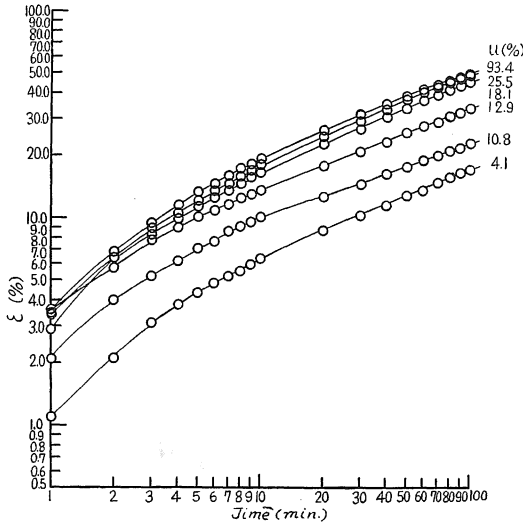


Fig. 3 : Separation of the effect of moisture content upon the ratio ϵ on logarithmic paper (1).

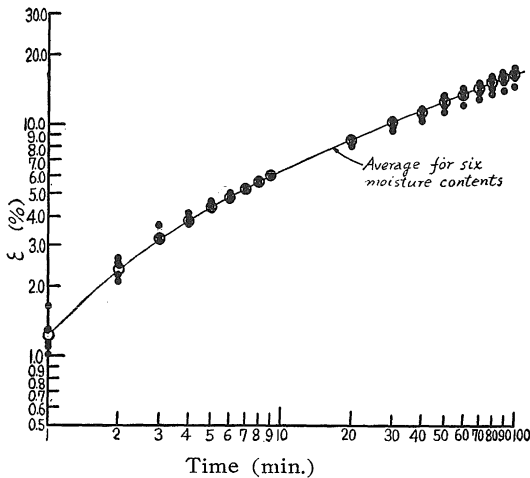


Fig. 4 : Separation of the effect of moisture content upon the ratio ϵ on logarithmic paper (2). Observed points are uniformly removed by shifting along the vertical axis to the curve $u=4.1\%$ in Fig. 3.

点 $\epsilon(10, 6.3)$ に重なり合うまで移動したものである。図から明らかなように各曲線は互いによく合致し(2)式の関係をはばみたすものと考えられる。ただ $u=12.9\%$ 及び $u=10.8\%$ の2曲線はその他のものにらくべや大きな離れをみせる。これは Table 1 に示されるようにこれらの組は試片による平衡含水率差が比較的大きく、しかも組を構成する試片数が少くさらに未知含水率の試片を含む ($u=10.8$) などの諸条件が重なり合ったためと考えられる。なお前の図 (Fig. 3) で $t=1$ 分において互いに交さる曲線がみられるが、これは高含水率の時ほど変形量が大きく初期のたわみ測定に時間ずれが影響するためと思われる。実際、変形速度の比較的小さい低含水率ではこのような曲線の交きはみられない。

含水率の影響が時間の因子と分離される (2) の形であらわされる場合、含水率 u のみの函数 $g(u)$ は温度効果の場合

$$\epsilon(t, \theta) = f_{\theta}(t) \cdot g_{\theta}(u), \quad g_{\theta} = e^{\kappa \lambda \theta} \quad (3)$$

λ : 定数

θ : 温度

κ : 2.3026...

から推測すると、 $g(u)$ として

$$g(u) = e^{\kappa \nu u}, \quad \nu : 定数 \quad (4)$$

の形が予想される。

$g(u)$ がこのような形をとるかどうかは $\epsilon(t, u)/f(t)$ を算出し各時刻について $\log \epsilon/f-u$ の直線性を検討すればよい。しかし実際には Fig. 3 の各曲線間の間隔は時間に無関係に $t=10$ 分における間隔に等しいとみなすことができるので、1時刻に対する $\log \epsilon-u$ の検討で済ませることができる。Fig. 5 の下方の図はこれを示したもので図から明らかなようにプロット点は1直線上になく、 ϵ の値は含水率20%附近から著しく増加の度合いを減少し一定値に近づく。したがって $g(u)$ は温度の場合に見られる (4) の形をとらないことがわかる。これは前述のように含水率の効果が無限に大きくなり得ないことからむしろ当然であろう。しかし含水率の低い範囲 $4 < u < 20\%$ では (4) と同様の指数式を用いて ϵ を次のように近似することができる：

$$\epsilon(t, u) = f(t) \cdot e^{\kappa \nu u}, \quad 0 \leq u < 20 (\%) \quad (5)$$

$$\nu = 0.02997 \div 0.03.$$

3. クリープ曲線と含水率 (2)

以上は全変形量 y に対する時間および含水率の関係ではなく、瞬間的変形量 y に対する y の比 ϵ についての関係であるから、 y についてはさらに瞬間的変形量と水分の関係を検討しておかなければならない。

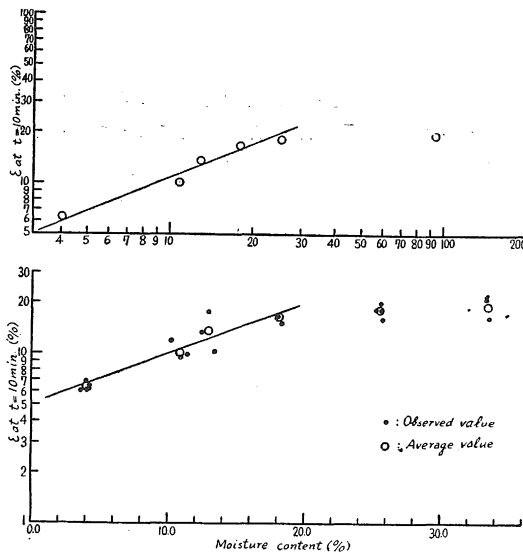


Fig. 5 : Relationship between the ratio ε at $t=10\text{min.}$ and moisture content u .

最初に述べたようにクリープ実験に用いた一定荷重は比例限界内の小荷重であるから

$$y = FPJ(t), \quad F: \text{形状係数} \quad (6)$$

P : 一定荷重

J : コンプライアンス

の関係が成立すると考えられる。ここで左辺の y が含水率 u の函数とすれば J は

$$J = J(t, u) \quad (7)$$

とかきなおさねばならない。したがって瞬間的変形 y_0 を

$$y_0 = FPJ_0(u), \quad J_0 = 1/E, \quad E: \text{弾性係数} \quad (8)$$

で示すと、(1) (8) (2) から任意の時刻におけるたわみ量 y は次式であらわされることになる:

$$\begin{aligned} y &= y_0 (1 + \varepsilon) \\ &= FPJ_0(u) (1 + f(t) \cdot g(u)). \end{aligned} \quad (9)$$

Table 2. Moisture contents of test pieces at saturated water-vapour pressure (25°C)

Number of test pieces	13	25	27	31	32	33
Moisture content (%)	32.34	31.68	31.57	30.60	31.25	31.07
Average m.c.(%)	31.42					

しかるに多くの場合 J_0 の逆数である弾性係数 E は u と直線的な関係

$$E = E_0 - mu, \quad m: \text{定数} (>0) \quad (10)$$

E_0 : 絶乾時の弾性係数

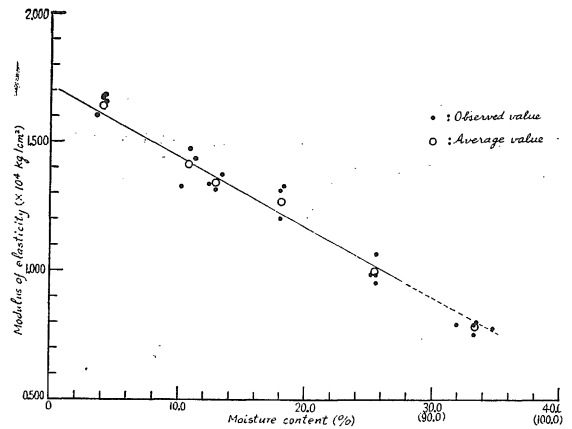


Fig. 6 : Linear relationship between modulus of elasticity E and moisture content u .

が認められている。Fig.6は(8)式に従って求めた E について含水率 u との関係を見たもので、弾性係数は含水率と共にほぼ直線的に減少する。この実験では飽湿時の弾性係数の実測値がないので、図中の直線を延長して飽水時の E の値 $E = 0.7855 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$ に相当する含水率 u を求めると $u = 34.2\%$ となる。この値は実際に測定した飽湿時の試片含水率とほぼ一致せねばならない。

Table 2はクリープ実験に用いた試片の一部および実験に用いなかった2・3の試片を1ヶ月以上飽湿デシケータ内に放置して(室温)平衡含水率を求めたものである。これらの平均含水率 $u = 31.42\%$ は上述の推定値と約2.8%の差異を生ずるが、 E に対して(10)式を仮定すると y は近似的に

$$\begin{aligned} y &= FP (1 + \varepsilon) / E(u) \\ &= FP (1 + f(t) \cdot g(u)) / (E_0 - mu) \end{aligned} \quad (11)$$

ただし、 $E_0 = 1.7155 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$

$m = 2.7202 \times 10^2 \text{kg/cm}^2 \cdot \%$

であらわされる。

結 び (水分効果の特性)

クリープあるいは全変形に対する水分効果について以上のような温度効果と全く類似した結果—ただ温度の場合には水分のように効果の両極限が明瞭でないとおもわれる—をえたので、両効果を総括する意味で上の結果にさらに多少の考察を加える。

(9)式はまた次のように書きかえることができ

$$\begin{aligned} y(t, u) &= y_0(u) (1 + f(t) \cdot g(u)) \\ &= FPJ_0(u) + FPf(t) \cdot G(u) \end{aligned} \quad (12)$$

$G(u) \equiv J_0(u) \cdot g(u)$,

これから全変形量は含水率のみの影響をうける瞬間的変

形と、時間および含水率の影響をそれぞれ独立にうける2函数の積としてあらわされるクリープ変形の和であることがわかる。クリープ変形がこのような形をとることは木材の変形機構を考察する上に重要な意義をもつものとおもわれる。実際たとえば、濃度—時間重ね合わせの原理が成り立たないのもこのためであるし、逆にクリープ変形が(12)の形で与えられるとき上述の重ね合わせの原理が成立するのは $f(t) = at$ (a :定数)の場合に限られる。また上式から容易に察知されるようにクリープ変形は瞬間的変形より著しい水分の影響をうける。すなわち、両変形とも絶乾時を基準にとると $g(u)$ の性質から

$$\begin{aligned} y(t, 0) &= y_0(0)(1+f(t)g(u)) \\ &= y_0(0)(1+f(t)), \quad g(u) \equiv 1, \\ y(t, u) &= y_0(0) \left\{ \frac{y_0(u)}{y_0(0)} \cdot 1 + \frac{y_0(u)}{y_0(0)} \cdot g(u) \right. \\ &\quad \left. \cdot f(t) \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

がえられ、瞬間的変形よりクリープ変形の方が $g(u)$ 倍だけ大きな影響をうけることになる。しかし最も重要なことはクリープ変形が上のように時間および水分(温度)因子に関して変数分離されるため、2つの異なる水分(温度)条件におけるクリープ変形は変形挙動として本質的に同一で、単に変形量の絶対値のみが異なるにすぎないだろうということである。仮りにこのような推測が正しいものとすれば、Fig. 2における曲線の変動巾が高含水率において特に大きくあらわれることを定性的によく説明できる。

さて上述の変数分離性に関しては既往の結果と比較対照せねばならないが、明確な資料がとぼしいので鈴木⁹⁾の結果と対比し間接的にこれを検討する：鈴木はヒノキ試片の曲げクリープ(測定時間20分)と含水率について、負荷完了後の時刻 t における変形増加度 $\alpha(t)$ —⁹⁾ のことと負荷完了後のある時刻 t^* ($t^* = 4$ 分)における $\alpha(t)$

との比 $\alpha(t)/\alpha(t^*)$ が含水率に無関係に時間 t だけの函数であることを報告している。これは(9)式から容易に証明される：

$$\begin{aligned} \alpha(t)/\alpha(t^*) &= \varepsilon(t, u)/\varepsilon(t^*, u) = f(t) \cdot g(u)/f(t^*)g(u) \\ &= 1/f(t^*) \cdot f(t) \quad (14) \end{aligned}$$

となって、 $\alpha(t)/\alpha(t^*)$ が時間 t だけの函数になることがわかる。すなわち、本実験結果と一致することがわかる。

函数 $g(u)$, $E(u)$ についてここでは近似式を便宜的に用いたが、物理的な意義を有するこれらの表示法については $f(t)$ と共に今後明らかにされねばならない問題であろう。なお、 $g(u)$ については Fig. 5 の上図に示すように含水率 u の巾をとり、さきの u の適用上限を幾分広めることもできる：

$$\begin{aligned} y &= \frac{FP}{E(u)} (1+f(t)uq), \quad 0 < u < 25(\%) \quad (15) \\ q &= 0.6618 \approx 0.7. \end{aligned}$$

参 考 文 献

- 1 竹村富男・福山万次郎：島根農大研報，7A，196～200 (1959)。
- 2 S. L. Dart & E. Guth : J. App. phys., 17, 314～318 (1946)。
- 3 S. L. Dart & E. Guth : J. App. phys., 18, 470～473 (1947)。
- 4 R. L. Youngs : Forest Products Lab. (U. S. A.), Report No. 2079 (1957)。
- 5 藤田博：材誌，7，54，126～133 (1958)。
- 6 北原覚一・岡部登：木材誌，5，1，12～18 (1959)。
- 7 山田・竹村・梶田：木材誌(投稿中)。
- 8 鈴木寧：日林誌，31，6，188～189 (1949)。

Résumé

The creep of Buna (*Fagus crenata* Blume) in bending was investigated under the conditions of several relative humidities and the water-saturated condition at temperature 25°C, and the effect of moisture content upon creep or total deformation was discussed being based on the effect of temperature upon them where the two factors, time and temperature, are separable into the form of the product of the two functions which are independent each other in their variables. Such a separation was also found in this case. Thus we obtain the most general equation for creep or total deformations at various moisture contents within the range of the linear relationship between creep and load:

$$y(t, u) = FPJ_0(u) \{1+f(t) \cdot g(u)\}$$

where y is the total deformation as a function of time t and moisture content u ; $f(t)$, $g(u)$ functions of t and u , respectively; F form factor; P load; and J_0 compliance at $t=0$.

This probably means that the creep deformation is essentially determined by the factor t only and the significance of moisture content is multiplying the effect of the former by the latter effect $g(u)$. Since the function $f(t)$ is not linear with t in this equation we cannot draw a master curve for creep. The affection of moisture content upon the creep deformation is greater ($g(u)$ times) than the instantaneous deformation. We think that these are some characteristic properties of creep of wood in comparison with other high polymers.

The function $g(u)$ may be approximately represented by these expressions:

$$g(u) = \exp(k\nu u), \quad 0 \leq u < 20(\%)$$

$$\nu = 0.02997,$$

$$g(u) = u^q, \quad 0 < u < 25(\%)$$

$$q = 0.6618.$$