

木材の動的振り粘弾性*

則元 京**・山田 正**

Misato NORIMOTO** and Tadashi YAMADA** : Dynamic Torsional Viscoelasticity of Wood*

I 緒 言

木材の粘弾性におよぼす水分の影響についてはかなりの報告がある⁴⁾⁵⁾。たとえば超音波域では鈴木がヒノキおよびブナ材の動的弾性率および対数減衰率について調べ、繊維方向において含水率6%以下の領域で動的弾性率が最大値をとり、対数減衰率が高含水率側から水分の減少とともに減少を示し、含水率8~10%附近で最小値をとり、さらに低含水率で副分散を示すことを報告している⁶⁾。可聴波域では KOLLMANN が Fichte 材の動的粘弾性について調べ、低含水率域で繊維方向の動的弾性率に最大値が、対数減衰率に最小値が存在することを報告し⁷⁾、梶田らはヒノキおよびブナ材の動的弾性率について調べ、繊維方向の動的弾性率が含水率4~5%で最大値をもつのに対し、半径方向のそれが最大値をもたないことを示し、また非晶領域に存在する水素結合の動的弾性率への寄与を NISSAN および MEREDITH の理論によつて定量化している⁸⁾。PENTONY は数樹種について 10~10⁴c/s の周波数範囲で内部摩擦と含水率の関係を求め、低含水率域で内部摩擦が最小値をとることを示し¹⁰⁾、JAMES は Douglas-fir 材の対数減衰率について調べ、室温で存在する低含水率域における対数減衰率の最小値の位置が温度の上昇とともに低含水率側に移動し、また温度および含水率の上昇とともに対数減衰率が増大することを示し、低含水率域と高含水率域における木材の内部摩擦の機構の相違を述べている⁹⁾。さらに低周波域では松本がスギおよびヒバ材の動的剛性率と対数減衰率について調べ、低含水率域で動的剛性率に最大値が、対数減衰率に最小値が現われることを示している¹⁷⁾。一方振りについてはタイムスケールの長い静的測定で著者らが繊維方向におけるヒノキ材のクリープコンプライアンスが湿度の増加とともに単調に増加せず、含水率5~10%のあたりで最小値をとることを示し¹¹⁾、さらにヒノキ材の半径方向の応力緩和測定で、室温において緩和スペクトルが含水率10%あたりで低い値の平坦な形を示し、温度の上昇とともにこの安定状態が低含水率側に移動することを報告している。²⁾

本報では静的粘弾性と動的粘弾性の関係をみる上で有効と思われる低周波領域での測定が可能な振り自由振動法を用いて、木材の動的粘弾性におよぼす水分の影響について報告する。従来木材についてなされてきた振り振動実験では試料に直接付加慣性質量を接続して振動させる方法がとられてきたが、付加質量による引張力が試料に働き誤差の原因となる。従つてこのよ

* 第16回日本木材学会大会(1966年4月)にて発表

** 木材物理研究部門 (Division of Wood Physics)

うな測定法では荷重の影響を取り除くことが望ましい。これに対して HEYBOER らは上端を固定したピアノ線に付加慣性質量を取りつけ、さらにその下に試料を接続して測定する方法を用いたが、これは無荷重状態で測定が可能で補正を必要としない⁹⁾。従つて本実験では HEYBOER らの測定方法を採用した。

II 実 験

Fig. 1 に示すごとき寸法形状のベイヒ (*Chamaecyparis lawsoniana* MURR.) を試料として用いた。測定は温度 20°, 30°, 45° および 60°C につき絶乾状態から湿潤状態まで 6 段階について行なつた。湿度調整にはシリカゲルおよび種々塩類の飽和溶液を使用し、また湿潤状態の試

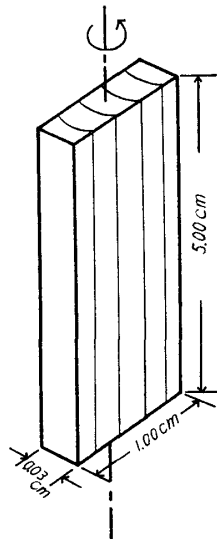


Fig. 1. Specimen.

料は蒸留水中に浸漬したものを用了。

試料を調湿した後 Fig. 2 に示す装置のチャックに固定し、それが所定の温度および湿度条件に平衡したと思われる頃に、上端チャックに接続する付加質量を試料のまわりに回転振動させ、振動周期 T_3 および振巾を測定して式 ⑤、⑦および⑧を用い動的剛性率 G' 、動的粘性率 η' および内部摩擦 $\tan \delta$ を求めた。

Fig. 2 に示す装置で運動方程式は次のように表わせる¹⁰⁾¹¹⁾。

$$I \frac{d^2x}{dt^2} = -(K_1 + K_2 + K_3)x - (H_1 + H_2 + H_3) \frac{dx}{dt} \quad \dots\dots\dots ①$$

ここに x は振子の角変位、 I は振子の慣性能率であり、 K および H は弾力係数および抵抗係数で、サフィックス 1, 2 および 3 はそれぞれ木材試料、ピアノ線およびパラフィンに関する量である。 K_1, K_2 および H_1 は木材試料の長さ、巾、厚さ、形状係数、動的剛性率および動的粘性率をそれぞれ $l, b, h, f(b/h), G'$ および η' とし、ピアノ線の長さ、半径および動

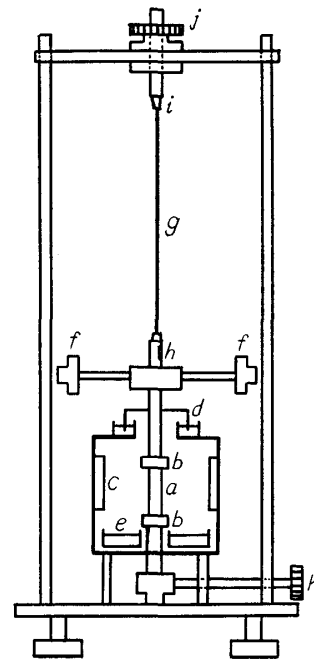


Fig. 2. Experimental apparatus
 a: specimen b: clamp
 c: heater d: liquid paraffin cup
 e: salt solution f: bob
 g: piano wire h: mirror
 i: chuck j: adjustablescrew
 k: handle

的剛性率をそれぞれ l_p, r および G'_p とすれば次式で示される。

$$K_1 = \frac{bh^3 f(b/h)}{3l} \cdot G', \quad K_2 = \frac{\pi r^4}{2l_p} \cdot G'_p, \quad H_1 = \frac{bh^3 f(b/h)}{3l} \cdot \eta' \quad \dots\dots\dots ②$$

いま $H/I=2\epsilon, K/I=n^2$ と置いて微分方程式①を解けば次のようになる。

$$x = x_0 e^{-\epsilon t} \sin(\sqrt{n^2 - \epsilon^2} t + \varphi) \quad \dots\dots\dots ③$$

ここに x_0, φ は初期条件によつて定まる定数である。 T_1, T_2 および T_3 をそれぞれ試料およびパラフィンがない場合、試料がなくパラフィンのある場合および試料およびパラフィンのある場合の周期とすれば K_1 および K_3 は次式で与えられる。

$$K_1 \doteq \frac{4\pi^2 I}{T_3^2} - K_2 - K_3, \quad K_3 \doteq \frac{4\pi^2 I(T_2^2 - T_1^2)}{T_1^4} \quad \dots\dots\dots ④$$

実際に T_1 および T_2 を測定した結果両者はほとんど等しいため、 $K_3 \doteq 0$ となり、木材試料の動的剛性率 G' は次式で示される。

$$G' \doteq \frac{3l}{bh^3 f(b/h)} \left(\frac{4\pi^2 I}{T_3^2} - \frac{\pi r^4 G'_p}{2l_p} \right) \quad \dots\dots\dots ⑤$$

次に式③において減衰振動の振幅を $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$ とすれば次式が成立する。

$$l_n \frac{|x_1|}{|x_3|} = l_n \frac{|x_3|}{|x_5|} = \dots = l_n \frac{|x_2|}{|x_4|} = l_n \frac{|x_4|}{|x_6|} = \dots = \epsilon T_3 = \lambda$$

あるいは
$$l_n x_1 - l_n x_{2n-1} = n\epsilon T_3 = n\lambda \quad \dots\dots\dots ⑥$$

ここに λ は系全体の対数減衰率である。従つて木材試料の動的粘性率 η' は次式で示される。

$$\eta' = \frac{3l}{bh^3 f(b/h)} \left\{ 4.606 I \frac{\log x_1 - \log x_{2n-1}}{n T_3} - (H_2 + H_3) \right\} \quad \dots\dots\dots ⑦$$

また λ_1, λ_2 および λ_3 をそれぞれ木材試料、ピアノ線およびパラフィンの対数減衰率とすれば $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ となり、従つて試料の内部摩擦 $\tan \delta$ は次式で与えられる。

$$\tan \delta = \frac{\lambda_1}{\pi} = \frac{\lambda - (\lambda_2 + \lambda_3)}{\pi} \quad \dots\dots\dots ⑧$$

III 結 果

Fig. 3 に剛性率と含水率の関係を示している。温度 20°C において剛性率は絶乾状態から含水率の増加とともに増大し、含水率 8% 附近に最大値をもち、その後繊維飽和点まで含水率の増加とともに急激に減少し、繊維飽和点以上では変化しない。温度が上昇すると 20°C で見られた低含水率域における剛性率の最大値は現われなくなり、また含水率の増加による剛性率の低下は著しくなる。

Fig. 4 に内部摩擦と含水率の関係を示している。温度 20°C において内部摩擦は絶乾状態から含水率の増加とともに減少し、含水率 8% 附近に最小値をもち、その後含水率の増加とともに急激に増大し高含水率側で最大値をもつ。温度が上昇すると 20°C で見られた低含水率域における内部摩擦の最小値は見られなくなる。また含水率 8% 以上では温度の上昇とともに内

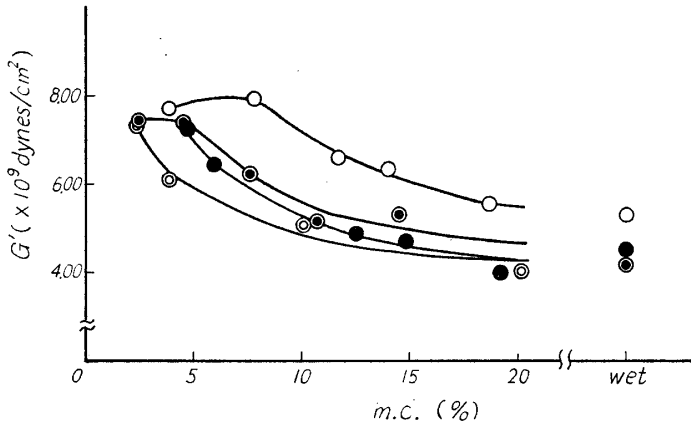


Fig. 3. The relationship between the modulus of dynamic rigidity G' and the moisture content at 20°, 30°, 45° and 60°C
○: 20°C ●: 30°C ◐: 45°C ⊙: 60°C

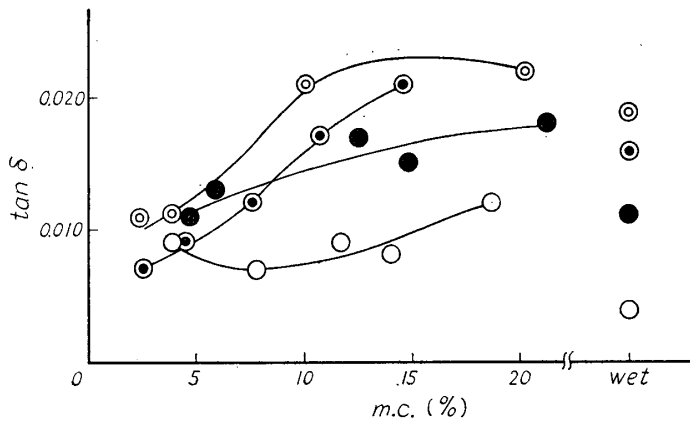


Fig. 4. The relationship between the internal friction and the moisture content at 20°, 30°, 45° and 60°C
○: 20°C ●: 30°C ◐: 45°C ⊙: 60°C

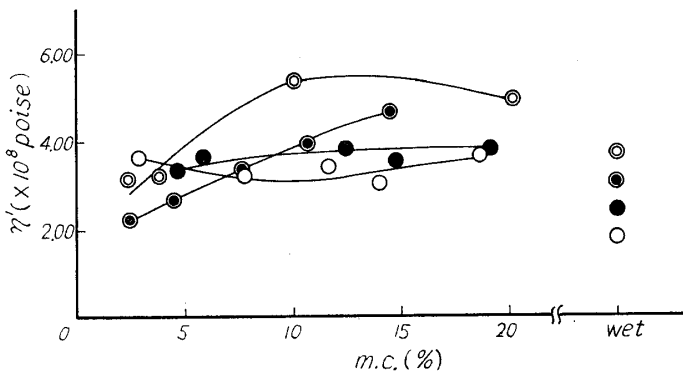


Fig. 5. The relationship between the modulus of dynamic viscosity and the moisture content at 20°, 30°, 45° and 60°C
○: 20°C ●: 30°C ◐: 45°C ⊙: 60°C

部摩擦は増大する。

Fig. 5 に動的粘性率と含水率の関係を示している。木材の粘性率を求めた報告は非常に少ないが、たとえば谷¹²⁾、深田¹³⁾、鈴木¹⁴⁾、山田¹⁵⁾および竹村¹⁶⁾等の報告がある。粘性率は周波数に依存する量であり、鈴木は 44 kc/s で 10^3 poise, 8.5kc/s で 10^4 poise および 130 c/s で 10^6 poise のオーダーの値をとることを示し、深田は 230c/s で 10^6 poise のオーダーの値を、谷は片持自由振動で 10^7 poise の値を報告している。一方竹村および山田はクリープ測定から 10^{15} poise のオーダーの値を求めている。本実験における周波数域、つまり 0.1~0.08c/s では粘性率が 10^8 poise のオーダーの値をとることがわかる。

温度 20°C において動的粘性率は絶乾状態から含水率の増加とともに減少し、含水率 8% 附近に最小値をもち、その後含水率の増加とともに徐々に増大し最大値をとった後高含水率側で急激に減少する。温度が上昇すると 20°C で見られた低含水率域における最小値は見られなくなり、絶乾状態から含水率の増加とともに動的粘性率は急激に増大を示す。また含水率 10% 以上では温度の上昇とともに動的粘性率は増大するが、含水率 10% 以下ではその関係が乱れ、絶乾状態では温度の上昇とともに逆に減少することが予想される。

Table 1 の a~d に温度 20°, 30°, 45° および 60°C における含水率

Table 1. The modulus of dynamic rigidity G' , the modulus of dynamic viscosity η' and the internal friction $\tan \delta$ of LAWSON CYPRESS at various temperatures and moisture contents

(a) 20°C

m. c. (%)	$G'(\times 10^9 \text{ dynes/cm}^2)$	$\eta'(\times 10^8 \text{ poise})$	$\tan \delta$
3.9	7.71	3.65	0.009
7.8	7.92	3.22	0.007
11.7	6.60	3.46	0.009
14.0	6.37	3.06	0.008
18.7	5.58	3.67	0.012
122.4	5.32	1.80	0.004

(b) 30°C

m. c. (%)	$G'(\times 10^9 \text{ dynes/cm}^2)$	$\eta'(\times 10^8 \text{ poise})$	$\tan \delta$
4.7	7.21	3.36	0.011
5.9	6.44	3.65	0.013
12.5	4.88	3.85	0.017
14.8	4.77	3.53	0.015
19.2	3.94	3.82	0.018
144.0	4.59	2.46	0.011

(c) 45°C

m. c. (%)	$G'(\times 10^9 \text{ dynes/cm}^2)$	$\eta'(\times 10^8 \text{ poise})$	$\tan \delta$
2.5	7.45	2.25	0.007
4.5	7.42	2.66	0.009
7.6	6.27	3.37	0.012
10.7	5.16	3.94	0.017
14.5	5.31	4.69	0.021
137.3	4.21	3.09	0.016

(d) 60°C

m. c. (%)	$G'(\times 10^9 \text{ dynes/cm}^2)$	$\eta'(\times 10^8 \text{ poise})$	$\tan \delta$
2.4	7.30	3.16	0.011
3.9	6.07	3.23	0.011
10.1	5.04	5.38	0.021
20.2	4.06	4.99	0.022
195.5	4.64	3.73	0.019

と動的剛性率，動的粘性率および内部摩擦との関係を数値で示している。

IV 考 察

木材の剛性率および内部粘性の定性的な意味について木材実質の非晶領域に存在する水分の状態によつて考察する。絶乾状態の木材が吸湿する場合、まず水分子は非晶領域で結合されずに残されている活性な OH 基と結合するものと考えられるが、これは STAMM のいう構造水、また KOLLMANN のいう化学取着水に相当し、単に分子鎖間に存在する微細な空隙を埋めるだけで膨潤に影響を与えないと考えられる。この含水率域では含水率の増加とともに剛性率は JAMES が水分子の cementing action と述べているように⁹⁾、水分子による空孔の充填効果のために上昇し、内部粘性は水分子の吸着により不自然に屈曲して歪みを生じていた分子鎖の配列が向上するように変化するために減少するものと思われる。さらに吸湿が進むと、水分子は非晶領域における隣接分子鎖間の水素結合を切断して吸着し、結果として水分子によつて鎖間が拡大されて膨潤を起し、新しい吸着点を形成する。この含水率での剛性率および内部粘性率を次のように考える。今 Fig. 6a の状態でお互に鎖状分子間に水素結合が形成されていたと

ころに、水分子が水素結合を切断して鎖間に浸入し Fig. 6b の状態になったとする。剛性率とは外力に対する変形の難易の目安を表わしており、この場合水分子の浸入により外力による変形は容易となり、従つて水分子の浸入する量とともに剛性率は減少する。一方内部粘性率は分子の運動に対する雰囲気の影響の程度を表わしており、木

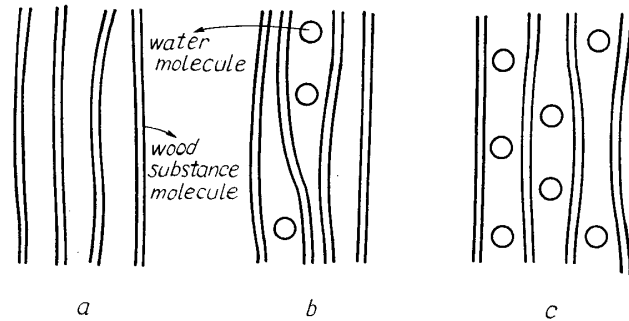


Fig. 6. Schematic diagram of amorphous region

材のように外部から拘束を受けつつ膨潤する物質、つまり有限膨潤する物質では水分子の吸着によつて鎖間が拡大された場合、考えている分子間相互の相対運動は容易になつても雰囲気からの拘束、つまりこの場合周囲に存在する他の鎖状分子からの拘束はかえつて増し、従つて粘性率は含水率とともに増大するものと思われる。さらに水分子が鎖間の水素結合を切断して吸着が進むと Fig. 6c の状態になり、逆に雰囲気による拘束は低下し、鎖状分子のセグメント運動が容易となり、内部粘性率は減少し主分散が現われるものと思われる。

温度 20°C において剛性率は含水率 8% 附近に最大値をもつが、これは KOLLMANN⁷⁾、梶田⁸⁾ および松本¹⁷⁾ 等の結果と類似した傾向である。この原因は上述したように非晶領域において結合せずに残されている OH 基に水分子が吸着することによつて鎖間に存在する微細な空孔が充填補強されるためと、不自然に屈曲していた分子鎖が配列を変化させ、力を受けもつ有効鎖が増加するためと考えられる。温度が上昇するとこの最大値は現われなくなるが、これは自由な OH 基に吸着する水分子の量が温度の上昇とともに減少することから考えて¹⁸⁾、この最大値の位置はさらに低含水率側に移動したためと思われる。

温度 20°C において内部摩擦は含水率 8% 附近に最小値をもつが、これは JAMES⁹⁾、PENTONY¹⁹⁾ KOLLMANN⁷⁾ および松本¹⁷⁾ らの結果と一致した傾向である。この最小値の現われる原因としては上述したように不自然に屈曲していた分子鎖の配列の向上が考えられる。また高含水率側で

現われる最大値は非晶領域に存在する鎖状分子のセグメント運動による主分散であると思われる。

木材の動的粘性率は内部摩擦とほとんど同じ傾向を示し、低含水率では温度の上昇とともに減少し、逆に高含水率では温度の上昇とともに増大する。低含水率域における機構は熱膨脹による鎖状分子間の結合力の減少によつて説明されるが、高含水率域における機構に関しては現在のところ不明であり、今後の問題としたい。

V 要 約

本報では振り自由振動法を用いて木材の動的剛性率、動的粘性率および内部摩擦におよぼす水分の影響について調べた。結果を要約すれば次のとおりである。

① 動的剛性率は温度 20°C において含水率 8% 附近に最大値をもち、その後含水率の増加とともに急激に減少し、繊維飽和点以上ではほとんど変化しない。温度が上昇すると動的剛性率の最大値は現われない。

② 動的粘性率と内部摩擦は温度 20°C において含水率 8% 附近に最小値をもち、含水率の増加とともに増大して高含水率側で最大値をとる。動的粘性率および内部摩擦と温度の関係は低含水率域と高含水率域で異なる挙動をとる。つまり低含水率では温度の上昇とともに動的粘性率および内部摩擦は減少し、高含水率域では温度の上昇とともに増大する。

Summary

In this paper modulus of dynamic rigidity, modulus of dynamic viscosity and internal friction of LAWSON CYPRESS in longitudinal direction were measured by the method of damped free torsional vibration and the effects of moisture content on these dynamic properties were discussed. The results obtained are summarized as follows:

(1) At 20°C the modulus of dynamic rigidity has the maximum value at about 8 percent moisture content and then decreases with increasing moisture content up to fiber saturation point. Above the fiber saturation point the modulus of dynamic rigidity does not change. For the temperature above 20°C the modulus of dynamic rigidity decreases with increasing moisture content and has not the maximum value at low moisture content.

(2) At 20°C the internal friction and the modulus of dynamic viscosity have the minimum value at about 8 percent moisture content and increase with increasing moisture content and then have the maximum value at high moisture content. For the temperature above 20°C the internal friction and the modulus of dynamic viscosity have not the minimum value at low moisture content. The influence of temperature on the viscosity of wood is different at low moisture content and at high moisture content. At low moisture content the viscosity decreases with increasing temperature and at high moisture content it increases with increasing tempera-

ture.

文 献

- 1) 則元, 宮野, 山田, 木材研究, No. 34, 37 (1965).
- 2) 則元, 山田, 木材研究, No. 35, 44 (1965).
- 3) HEYBOER, J., P. DEKKING and A. J. STAVERMAN, Proc. 2nd. Intern. Congr. on Rheology, 123 (1954).
- 4) 山田, 角谷, 則元, 大迫, 竹村, 鈴木, 木材研究, No. 34, 205 (1965).
- 5) 山田, 角谷, 則元, 大迫, 岡, 金谷, 木材研究, No. 37, 49 (1966).
- 6) 鈴木正治, 京都大学学位論文, 14 (1965).
- 7) KOLLMANN, F. und H. KRECH, Holz als Roh-und Werkstoff, 18, 4 (1960).
- 8) 梶田, 山田, 鈴木, 木材誌, 7, 31 (1961).
- 9) JAMES, W. L., Forest Prod. J., 9, 383 (1961).
- 10) 中川鶴太郎, レオロジー, 岩波全書, 85 (1960).
- 11) 則元, 高原, 山田, 木材研究, No. 36, 23 (1965).
- 12) 谷安正, 応用物理, 9, 372 (1940).
- 13) 深田栄一, 小林理研報告, 1, 21 (1951).
- 14) 鈴木, 中戸, 木材誌, 10, 89 (1964).
- 15) 山田正, 京大農学部附属演習林報告, 34, 159 (1963).
- 16) 竹村富男, 京都大学学位論文, 22 (1965).
- 17) 松本勗, 九大農学部演習林報告, No. 36, 1 (1962).
- 18) KADITA, S., Wood Research, No. 23, 1 (1960).
- 19) PENTONY, R. E., Composite Wood, 2, 131 (1955).