

木材の剛性率および誘電特性におよぼす含水率の影響*

則 元 京**・山 田 正**

Misato NORIMOTO** and Tadashi YAMADA** : The Effect of Moisture Content on Modulus of Rigidity and Dielectric Properties of Wood*

I. 緒 言

木材の弾性率と含水率の関係についてはすでに多くの報告がある^{1,2,3)}。たとえば CARRINGTON は sitka spruce について弾性率および剛性率の含水率依存性を調べ、それらは含水率30%を境にして2本の直線で表わされるが、含水率10%以下では含水率軸に平行になることを示している⁴⁾。KOLLMANN は含水率8~25%の間で弾性率が直線で表わせることを示し⁵⁾、南はカバおよびヒノキの圧縮および捩り測定で、弾性率および剛性率が指数関数で表わせることを示している^{6,7)}。また鈴木等はヒノキの曲げクリープで⁸⁾、筆者等はヒノキの捩りクリープでクリープコンプライアンスが低含水率域で最小値をとることを報告している⁹⁾。以上は静的測定の例であるが、動的測定に関しては、たとえば KOLLMANN が Fichte について繊維方向の弾性率の含水率依存性を調べ、低含水率で弾性率に最大値が現われることを示している¹⁰⁾。また鈴木はヒノキおよびブナについて含水率6%以下の領域で繊維方向の弾性率に最大値が現われるが、半径方向ではそれが現われないことを報告し、さらに MEREDITH および NISSAN の理論によつて弾性率の含水率依存性を定量化しているが、理論の適用される範囲がごくせいまい含水率域に限られることを示している¹¹⁾。以上のように木材の弾性率は繊維方向に関してはいつたん低含水率域で最大値をとり、その後含水率の増加とともに減少して繊維飽和点以上では一定の値となることが知られている。一方弾性率の含水率依存性に対応して強度および対数減衰率においても同様に低含水率で特異な現象が現われることが知られている。強度に関してはたとえば繊維方向の引張、剪断および割裂強度が含水率6~13%の領域で最大値をとることが知られている¹²⁾。また対数減衰率に関しては、たとえば JAMES¹³⁾、PENTONY¹⁴⁾、鈴木¹¹⁾ および松本¹⁵⁾ 等の報告があるが、いずれの報告においても低含水率域で対数減衰率に最小値が現われることが示されている。ただしこれらの粘弾性諸量に現われる低含水率域における特異な点は温度および測定周波数によつて若干変化するように思われる。

一方粘弾性諸量と同様に誘電特性も含水率によつて著しく変化を受ける。木材の誘電特性の含水率依存性に関してはかなり多くの研究があり、たとえば JAMES は 1, 3 および 8.53Gc/s (8.53×10^3 Mc/s) で Douglas-fir の誘電率 ϵ' と誘電正切 $\tan \delta$ を求め、 ϵ' は繊維飽和点以

* 第17回日本木材学会大会 (1967年4月) にて発表

** 木材物理部門 (Division of Wood Physics)

下では含水率の増加とともに凹形に増大することおよび $\tan \delta$ は繊維飽和点まで含水率とともに増大し繊維飽和点以上では減少することを示している¹⁶⁾。竹田は周波数 0.4~300 Mc/s においてシナについて ϵ' の含水率依存性を調べ、 ϵ' の吸水に伴う上昇が含水率 5%からはじまることを示し、5%までの結合水は強固に結合しているためほとんど分極を生じないが、5%以上の結合水はかなり自由に吸着しており自由水に準ずる分極をもつことを示し、また木材の膨脹の実験で、含水率 5%までは木材はむしろ収縮し、5%以上で膨脹してくる事実と対応させて考察している¹⁷⁾。TRAPP と PUNGS は Pine について ϵ' および $\tan \delta$ の含水率依存性について調べ、含水率範囲を絶乾から 5%、5%から 20%および毛管凝縮水の範囲に分け、誘電特性と対応させて考察している¹⁸⁾。この他上村¹⁹⁾、鈴木²⁰⁾、堤^{21,22)}、竹村等の報告がある²³⁾。

筆者等は前報において木材の剛性率および内部粘性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定性的な説明を与えた²⁴⁾。さらに本報ではその考えをもとにして拡大表面による木材の吸着式を用いて剛性率の含水率依存性を表わす計算式を導き、実験値との比較を行なうとともに、誘電特性の含水率依存性について調べた。

II. 実 験

試料として振り剛性率の測定には Fig. 1 a に示す寸法、形状のヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) を、誘電特性の測定には Fig. 1 b に示す寸法形状のベイヒ (*Cupressus Lawsoniana* MURR.) を用いた。

剛性率の測定には Fig. 2 に示す装置を使用した。まず装置の下部チャックに試片の下端を固定、上端をピアノ線に接続している上部チャックに固定し、ピアノ線の上端をハンドルに接続する。その後ハンドルを所定の角度だけ回転し、その時の上部チャックにとりつけてあるミラーの回転角をランプスケールによつて読取り、次式を用いて剛性率を測定する。

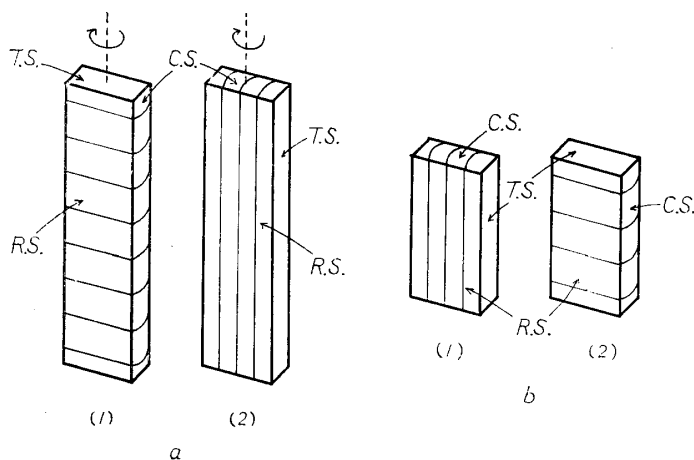


Fig. 1. Shape and dimension of test specimen for measurement of modulus of rigidity (a) and dielectric properties (b).
R. S. : radial section, T. S. : tangential section,
C. S. : cross section

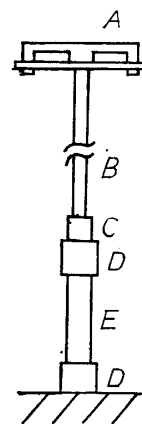


Fig. 2. Schematic diagram for measurement of modulus of rigidity.
A : handle D : clamps
B : piano wire E : specimen
C : mirror

$$G = K \left(\frac{\theta}{\theta'} - 1 \right)$$

$$K = \frac{\pi d^4 l G'}{32 a^3 b f l'} \quad (1)$$

ここに G' , d および l' はそれぞれピアノ線の剛性率, 直径および長さであり, G , a , b , l および f はそれぞれ木材試片の剛性率, 厚さ, 巾, 長さおよび振りに関する形状係数であり, θ および θ' はハンドルの回転角および試片の回転角である。

誘電特性の測定には矩形 TE_{109} 共振器を使用し, 摂動法を用いた^{25,26)}。周波数は 9.4×10^3 Mc/s である。Fig. 3 に装置の略図を示す。誘電率 ϵ' , 誘電損率 ϵ'' および 誘電正切 $\tan \delta$ は次式によつて求めた。

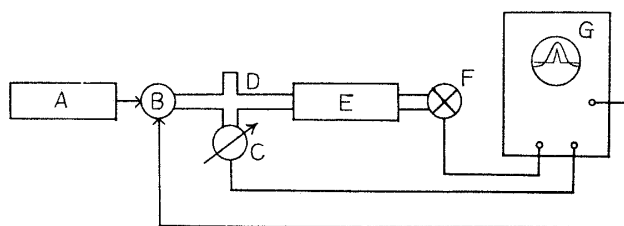


Fig. 3. The apparatus for measurement of the dielectric properties.

A : klystron source E : cavity resonator
B : klystron F : crystal
C : frequency meter G : Q indicator
D : wave guide

$$\epsilon' = \frac{\Delta f}{f} \cdot \frac{V}{\Delta V} + 1 \quad (2)$$

$$\epsilon'' = \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{\Delta V} \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} \right) \quad (3)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4)$$

ここに f および Δf は試片挿入前の共振周波数 および 試片挿入前後の共振周波数の差であり, $\Delta V/V$ は占有率であり, Q_0 および Q は試片挿入前後の共振器の Q 値である。 Q 値は共振曲線の

半値巾 ΔF と共振周波数 F_0 から次式によつて求められる。

$$Q = \frac{F_0}{\Delta F} \quad (5)$$

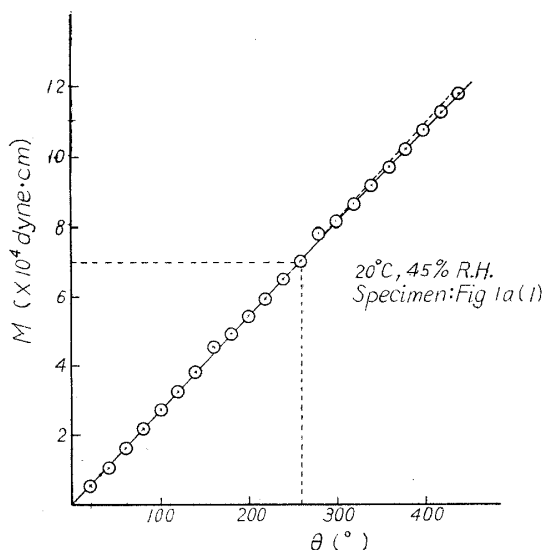


Fig. 4. The relation between moment M and torsional angle of handle θ .

測定温度はすべて 20°C であり, 含水率の調整には五酸化リン, シリカゲル, 塩類の飽和溶液および蒸留水を用いた。

Fig. 4 に温度 20°C , 湿度 45% R.H. における Fig. 1 a の (1) の木取り試片のモーメントと振り角の関係を示している。図からわかるように比例限振り角は 260° である。したがつて本実験では振り角を 80° と定めた。また Fig. 1 a の (2) の木取りに関しては 前報の結果⁹⁾ から 振り角を 120° に定めた。また測定はハンドルを回転してから 30 秒後に行なつた。

III. 結果および考察

木材の吸着に関しては山田, 梶田による

内部表面の拡大を考慮した次の理論式がある^{27,28)}。

$$\frac{\phi}{\phi_m} = \frac{cx}{1+cx} \left\{ 1 + (K+m) \frac{x-x^n}{1-x} \right\} \quad (6)$$

この式は Fig. 5 に示すように、面積 S の内部表面上に S_1 を占めた被吸着分子が弾性的に隣接吸着点を遠ざけて分子の併進移動が可能な間隙すなわち第2次内部表面 KS_1 を形成し、以下同様にして $K_n S_n$ の大いさの第 $(n+1)$ 次面まで形成するものとし、1次面に対しては Hüttig の、2次面以上に対しては B. E. T. の平衡条件を入れて誘導されたものである。上式 (6) で ϕ および ϕ_m はそれぞれ吸着量および第1次面をおおいつくす吸着分子の量であり、 c および x はそれぞれ吸着エネルギーに関する常数および関係蒸気圧であり、 K および m はそれぞれ吸着量一変形量に関する常数および毛管凝縮に関する常数である。

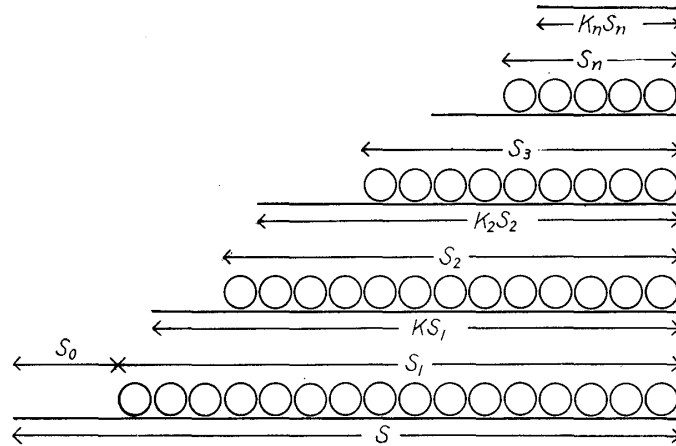


Fig. 5. Spreading surface model of water sorption.
(YAMADA and KADITA)²⁷⁾²⁸⁾

いま1次表面に水分子が吸着し、相隣る糸状分子間の間隔を増大させ、その結果相隣る糸状分子間に存在していた水素結合を切断して新しい内部表面を形成するものと考え。したがって2次面以上に吸着された水分子の量は切断された水素結合の数に比例するものと考えられ、木材の弾性係数を減少させる。一方1次表面に吸着された水分子はその吸着熱が大きいことより木材と強固に水素結合しているものと考えられ、相隣る糸状分子間の間隔を増大させて水素結合を切断する一方糸状分子間の空隙をうめて補強効果を示す。以上のように考えるとき、木材の剛性率 $G(\phi)$ は次のように表わせる。

$$G(\phi) = f_1(\phi) + f_2(\phi) + f_3 \quad (7)$$

ここに $f_1(\phi)$ は1次表面に吸着された水分子による効果を、 $f_2(\phi)$ は2次表面以上に吸着された水分子による効果を示している。 f_3 は水分子によつて影響されない剛性率の部分である。1次表面に吸着される水分子の量を $S_1 V_m$ とし、 $f_1(\phi)$ は単に $S_1 V_m$ に比例するものと仮定すれば A を比例定数とするとき次のように表わされる。

$$f_1(\phi) = A S_1 V_m \quad (8)$$

$f_2(\phi)$ は上述の吸着式 (6) から次のように表わされる。

$$f_2(\phi) = L(a - b(x)) \quad (9)$$

$$b(x) = K(x) \frac{cx\phi_m}{1+cx} \cdot \sum_{n=1}^{n-1} x^n \quad (10)$$

ここに $K(x) \doteq 1$ と考えると式 (10) は次のようになる。

$$b(x) = \frac{cx\phi_m}{1+cx} \cdot \sum_{n=1}^{n-1} x^n \quad (11)$$

式 (9) で a は $x=1$ における $b(x)$ の値である。

いま (12) 式が後述するように成立するならば, $f_1(\phi)$ は式 (13) のように表わされる。

$$\ln \frac{S_1 V_{m\infty} - S_1 V_m}{S_1 V_{m\infty}} = -k\phi \quad (12)$$

$$f_1(\phi) = M(1 - e^{-k\phi}) \quad (13)$$

ここに $M = AS_1 V_{m\infty}$ であり, $S_1 V_{m\infty}$ は ϕ が繊維飽和点になつた時の $S_1 V_m$ の値である。 ϕ の値が大きくなると k の値が大きければ $f_1(\phi) \doteq M$ となり, また ϕ が繊維飽和点以上の値になれば $G(\phi) = f_4 = f_3 + M$ となるので式 (7) は次のように表わせる。

$$G(\phi) = -Me^{-k\phi} + L(a - b(x)) + f_4 \quad (14)$$

(6) より $n \rightarrow \infty$ とすれば次のように表わされる。

$$\frac{\phi}{\phi_m} = \frac{cx}{1+cx} \cdot \frac{1}{1-x}$$

あるいは

$$\frac{x}{\phi(1-x)} = \frac{1}{c\phi_m} + \frac{1}{\phi_m} x \quad (15)$$

宮部の求めたヒノキの 25°C における吸着等温線³⁵⁾ より $x/\phi(1-x)$ と x の関係を示すと

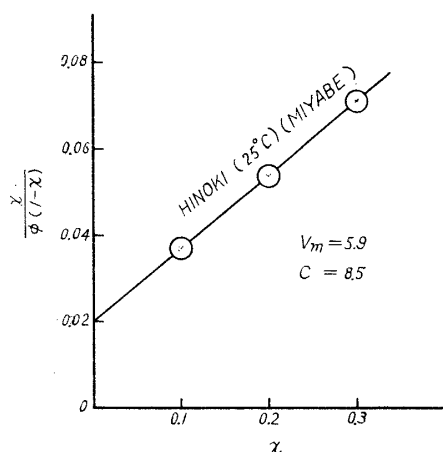


Fig. 6. $\frac{x}{\phi(1-x)}$ vs. x .

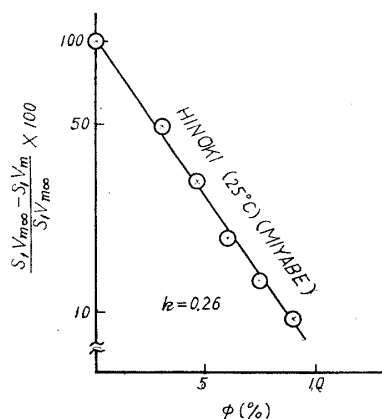


Fig. 7. $\frac{S_1 V_{m\infty} - S_1 V_m}{S_1 V_{m\infty}} \times 100$ vs. ϕ .

Fig. 6 のようになり，したがって $\phi_m \doteq 5.9$, $c \doteq 8.5$ となる。また $\frac{S_1 V_{m\infty} - S_1 V_m}{S_1 V_{m\infty}} \times 100$ と ϕ の関係を示すと Fig. 7 のようになり，したがって次式が成立する。

$$S_1 V_m = S_1 V_{m\infty} (1 - e^{-k\phi}) \quad (16)$$

ここに k の値は 0.26 である。Table 1 に χ , ϕ , $S_1 V_m$, $\sum_{n=2}^4 S_n V_m$ および $a-b(\chi)$ の値を示している。

Table 1. The values of χ , ϕ , $S_1 V_m$, $\sum_{n=2}^4 S_n V_m$ and $a-b(\chi)$ calculated from the isotherm of HINOKI wood at 25°C by using equation (6).

χ	ϕ	$S_1 V_m$	$\sum_{n=2}^4 S_n V_m$	$a-b(\chi)$
0.1	3.0	2.7	0.3	15.6
0.2	4.6	3.7	0.9	15.0
0.3	6.0	4.3	1.7	14.2
0.4	7.5	4.6	2.9	13.0
0.5	9.0	4.8	4.2	11.7
0.6	10.1	4.9	5.2	10.7
0.7	12.5	5.0	7.5	8.4
0.8	15.0	5.1	9.9	6.0
0.9	19.0	5.2	12.7	3.2
0.95	22.0	5.2	14.1	1.8
0.98	24.5	5.3	15.3	0.6
1.0	29.0	5.3	15.9	0

Fig. 8 および Fig. 9 に剛性率と含水率の関係を示しており，Table 2 にそれらの値を示している。いずれの木取りの場合も含水率 5 % 近辺で剛性率は最大値をとる。このことは前報で求めた振りクリープの含水率依存性と一致した傾向であり⁹⁾，また KOLLMANN¹⁰⁾ および梶田²⁹⁾等が求めた繊維方向の動的弾性率と含水率の関係および鈴木³⁰⁾の求めた繊維方向のクリープコンプライアンスと含水率の関に類似している⁸⁾。

直交異方体の弾性の対称軸を x , y および z にとると応力成分 σ および τ と歪成分 ε お

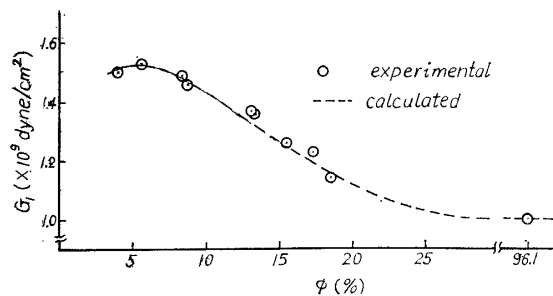


Fig. 8. The relation between the modulus of rigidity G_1 and moisture content ϕ .

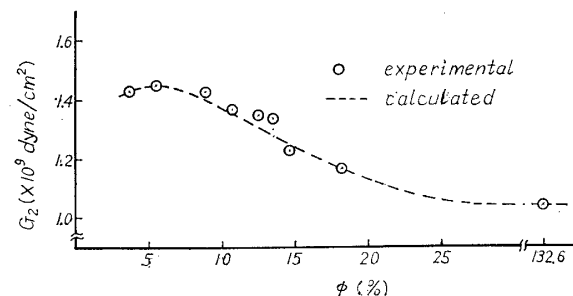


Fig. 9. The relation between the modulus of rigidity G_2 and moisture content ϕ .

Table 2. The relation between the modulus of rigidity G and moisture content ϕ .

ϕ (%)	G_1 (dyne/cm ²)*	ϕ (%)	G_2 (dyne/cm ²)*
4.0	1.50×10^9	3.7	1.43×10^9
5.6	1.53	5.5	1.45
8.4	1.49	8.9	1.43
8.7	1.46	10.7	1.37
13.1	1.37	12.5	1.35
13.4	1.36	13.5	1.34
15.7	1.31	14.6	1.22
17.3	1.23	18.2	1.17
18.5	1.14	132.5	1.04
96.1	1.00		

* The suffix 1 and 2 represent the specimen as shown in Fig. 1a (1) and Fig. 1a (2) respectively.

よび ϕ が次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= a_{11}\epsilon_x + a_{12}\epsilon_y + a_{13}\epsilon_z \\
 \sigma_y &= a_{12}\epsilon_x + a_{22}\epsilon_y + a_{23}\epsilon_z \\
 \sigma_z &= a_{13}\epsilon_x + a_{23}\epsilon_y + a_{33}\epsilon_z \\
 \tau_{yz} &= a_{44}\phi_{yz}, \quad \tau_{zx} = a_{55}\phi_{zx} \\
 \tau_{xy} &= a_{66}\phi_{xy}
 \end{aligned} \tag{17}$$

いま $x = \pm a$, $y = \pm b$ ($a > b$) で定めた直交異方体の矩形棒を単位長さあたり ω だけ振つた場合の振りモーメント M_T は次式で示される³⁰⁾。

$$M_T = a_{55}\omega ab^3 \left\{ \frac{16}{3} - \frac{b\sqrt{a_{55}}}{a\sqrt{a_{44}}} \left(\frac{4}{\pi} \right)^5 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^5} \tanh \frac{(2n+1)\pi a\sqrt{a_{44}}}{2b\sqrt{a_{55}}} \right\} \tag{18}$$

本実験では x , y および z 軸をそれぞれ試片の幅, 厚さおよび長さ方向にとつていたので, 上式からわかるように M_T には a_{55} つまり剛性率 G_{LR} の寄与が最も大きい。 G_{LR} の含水率依存性については CARRINGTON の Sitka spruce についての報告があるが⁴⁾, やはり本実験の結果と同様に含水率 5% 近辺に剛性率の最大値が現われている。

和田は逆 S 字の吸着等温線は親水性高分子に共通で, セロファンの場合 5% 以下の水分は低湿度において, 非晶領域で相互に結合せずに残された OH 基に吸着する水分と考え, この間の水分子は単に分子間を埋め密度を大きくすることを述べ, これ以上の水分では水分子がすでに結合している非晶領域の水素結合を置換し, 分子間を拡げて密度を減少させ, セルロース分子の運動を活発にすることを示している。またこれと対応して水分が 5% 以上ではセロファンの動的弾性率は急激に減少し, 内部摩擦は増大することを報告している^{31, 32)}。HERMANS は種々のセルロース繊維の比重が含水率 5% あたりで最大値をとることを示し, この間の含水率で吸着される水は圧縮されるような水であることを述べている³³⁾。木材の場合も同様に低含水率で吸着する水は非晶領域に存在する糸状分子間の空隙をうめて補強効果を示すことが考えら

れ、含水率5%近辺に剛性率の最大値が現われる原因が説明される。含水率が5%をすぎると図から明らかなように剛性率は急激に減少して繊維飽和点以上で一定の値となる。これは和田等が述べているように非晶領域に存在している水素結合が切断されるためと考えられ、また繊維飽和点以上になると水はもっぱら自由水の状態で存在するので剛性率には影響が現われないものと思われる。したがって山田、梶田による吸着式より求められた剛性率の計算式(14)によつて剛性率の含水率依存性が表わされるものと思われる。今 Fig. 1a の(1)に示す木取りの場合式(14)で $M=0.39 \times 10^9$, $L=4.3 \times 10^7$, $f_4=1.00 \times 10^9$ および $k=0.26$ と定めれば剛性率は Fig. 8 の点線のようなになる。また Fig. 1a の(2)の木取りの場合 $M=0.29 \times 10^9$, $L=3.3 \times 10^7$, $f_4=1.04 \times 10^9$ および $k=0.26$ と定めれば剛性率は Fig. 9 の点線のようなになる。いずれも実測値とよく一致している。ここに M は水分子による空孔の充填効果の目安を与え、 L は水素結合の寄与を表わしている。

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 および Table 3 にベイツの ϵ' , ϵ'' および $\tan \delta$ の含水率依存

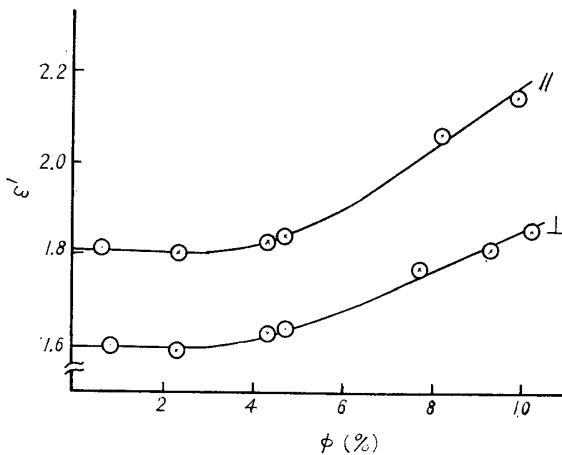


Fig. 10. The relation between dielectric constant ϵ' and moisture content ϕ .

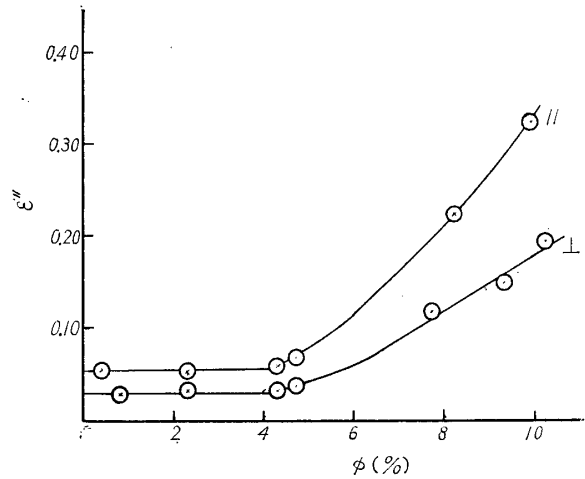


Fig. 11. The relation between dielectric loss ϵ'' and moisture content ϕ .

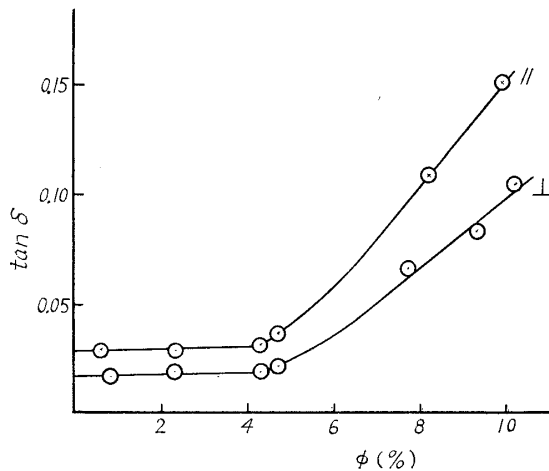


Fig. 12. The relation between loss tangent $\tan \delta$ and moisture content ϕ .

性を示している。図から明らかなように繊維方向の ϵ' , ϵ'' および $\tan \delta$ は半径方向のそれよりも大きな値を示している。 ϵ' , ϵ'' および $\tan \delta$ は含水率の他に温度および周波数によつて著しく変化する³⁴⁾。本実験における測定周波数は約 9.4×10^8 Mc/s であり、この周波数に近い実験例としては JAMES の 8.53×10^8 Mc/s における報告があるが¹⁶⁾、本実験で求められた値と非常に近い値が示されている。また ϵ' は含水率4~5%まであまり変化しないが、5%以上で急激に上昇する。 ϵ'' および $\tan \delta$ も同様に4~5%以上まであまり変化しないが、4~5%以上で急激に上昇する。これらの結果は

Table 3. The relation between the dielectric properties and moisture content.

ϕ (%)	$\epsilon' //$	$\epsilon'' //$	$\tan \delta //$
0.63	1.81	5.38×10^{-2}	2.94×10^{-2}
2.3	1.80	5.24	2.90
4.3	1.83	5.82	3.18
4.7	1.84	6.80	3.68
8.2	2.06	22.4	10.9
9.9	2.14	32.4	15.1
ϕ (%)	$\epsilon' \perp$	$\epsilon'' \perp$	$\tan \delta \perp$
0.83	1.60	2.62×10^{-2}	1.63×10^{-2}
2.3	1.59	3.08	1.94
4.3	1.63	3.04	1.86
4.7	1.64	3.52	2.12
7.7	1.77	11.7	6.60
9.3	1.81	14.9	8.24
10.2	1.85	19.3	10.5

The suffix $//$ and $\perp$ represent the specimen as shown in Fig. 1b (1) and Fig. 1b (2) respectively.

竹田¹⁷⁾, TRAPP と PUNGS¹⁸⁾, 堤²²⁾ および SCHÜTZE³⁴⁾等の結果と一致している。Table 1 から第2次面以上に吸着する水, すなわち分極しやすい水が現われる含水率あたりから ϵ' , ϵ'' および $\tan \delta$ が上昇しはじめ, 第1次面に吸着する水だけが存在するような含水率範囲では ϵ' , ϵ'' および $\tan \delta$ はあまり変化しないことがわかり, 第1次面に吸着する水はセルロース分子と強固に結合している水であると考えられる。

IV. 要 約

本報ではヒノキについて Fig. 2 に示す装置を用いて 20°C における剛性率と含水率の関係を調べ, また別にベイヒについて Fig. 3 に示す装置を用いて 20°C における誘電特性の含水率依存性を調べ両者の比較を行なった。得られた結果は次のとおりである。

① 低含水率域で吸着する水分子は木材と強固に水素結合しているものと考えられ, 非晶領域に存在する相隣る糸状分子間の間隔を増大させ, 糸状分子間に存在していた水素結合を切断して新しい内部表面を形成する一方糸状分子間の空隙をうめて補強効果を示すものと考え, 拡大表面による吸着式から剛性率と含水率の関係を示す式 (14) を導いた。Fig. 8 と 9 に示すように式 (14) より求めた計算式と実測値はよく一致した。

② 誘電率, 誘電損率および誘電正切は含水率 4~5% まであまり変化しないが, 4~5% 以上では急激に増大する。これは上記の吸着式から, 第1次面に吸着する水は木材と強固に水素結合しているので分極しにくいこと, および第2次面以上に吸着する水は分極しやすいことによつて説明される。

Summary

In this paper the effects of moisture content on the modulus of rigidity of HINOKI (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) and the dielectric properties of LAWSON CYPRESS (*Cupressus Lawsoniana* MURR.) were investigated at 20°C. The following results were obtained.

The modulus of rigidity had the maximum value at about 5 % moisture content and decreased with increasing moisture content up to the fiber saturation point. Above the fiber saturation point the value of the modulus of rigidity did not change. The values of the dielectric constant ϵ' , the dielectric loss ϵ'' and the loss tangent $\tan \delta$ at about 9.4×10^3 Mc/s did not change up to about 5 % moisture content and then increased with increasing moisture content.

The following equation on the modulus of rigidity was derived from the surface spreading model of water sorption shown in Fig. 5.

$$G(\phi) = M(1 - e^{-k\phi}) + L(a - b(x)) + f_3$$

where M , L = the constant ;

k = the constant on the amount of water adsorbed on the first layer S ;

a = the value of $b(x)$ at $x=1$;

x = relative vapor pressure ;

$b(x)$ = the summation of the amount of water adsorbed on the second layer KS , the third layer $K_2S_2, \dots$, and the n th layer $K_{n-1}S_{n-1}$.

In this equation the first term represents the contribution of the packing effect of water adsorbed on the first layer and the second term represents the effect of the hydrogen bond in amorphous region. And the third term is independent of moisture content.

The values calculated from this equation agreed considerably well with the experimental values.

文 献

- 1) 山田 正, 角谷和男, 則元 京, 大迫靖雄, 竹村富男, 鈴木正治, 木材研究, No. 34, 205 (1965).
- 2) 山田 正, 角谷和男, 則元 京, 大迫靖雄, 岡 康寛, 金谷紀行, 木材研究, No. 37, 49 (1966).
- 3) 山田 正, 角谷和男, 則元 京, 岡 康寛, 金谷紀行, 大迫靖雄, 木材研究, No. 40, 28 (1967).
- 4) HEARMON, R. F. S., Forest Product Res. Special Rep., No. 7, 21 (1948).
- 5) KOLLMANN, F., Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Ed. 1, Berlin, Springer-Verlag (1951).
- 6) 南 義夫, 木材工業, 5, 78 (1950).
- 7) 南 義夫, 木材工業, 8, 32 (1953).
- 8) 鈴木正治, 中戸莞二, 相川久太郎, 木材誌, 11, 76 (1965).

- 9) 則元 京, 宮野寛文, 山田 正, 木材研究, No. 34, 37 (1965).
- 10) KOLLMANN, F. und H. KRECH, Holz als Roh- und Werkstoff, **18**, 4 (1960).
- 11) 鈴木正治, 京都大学学位論文, (1965).
- 12) 梶田 茂, 木材工学, 223, 養賢堂 (1961).
- 13) JAMES, W. L., Forest Prod. J., **9**, 383 (1961).
- 14) PENTONY, R. E., Composite Wood, **2**, 131 (1955).
- 15) 松本 勲, 九大農学部演習林報告, No. 36, 1 (1962).
- 16) JAMES, W. L., Forest Prod. J., **15**, 51 (1965).
- 17) 竹田政民, 科学, **18**, 21 (1948).
- 18) TRAPP, W. and L. PUNGS, Holzforsch., **10**, 144 (1956).
- 19) 上村 武, 林誌報, No. 119, 95 (1960).
- 20) 鈴木正治, 中戸莞二, 木材誌, **9**, 211 (1963).
- 21) 堤 寿一, 渡辺治人, 木材誌, **12**, 115 (1966).
- 22) 堤 寿一, 九大農学部演習林報告, No. 41, (1967).
- 23) 竹村富男, 三林進, 京大農学部演習林報告, No. 38, 200 (1966).
- 24) 則元 京, 山田 正, 木材研究, No. 38, 32 (1966).
- 25) 小笠原直幸, 鈴木道也, ミリ波, 142, 日刊工業新聞社, (1961).
- 26) 則元 京, 山田 正, 木材研究, No. 40, 18 (1967).
- 27) 山田 正, 梶田 茂, 科学, **23**, 312 (1953).
- 28) 山田 正, 梶田 茂, 木材研究, No. 11, 5 (1953).
- 29) 梶田 茂, 山田 正, 鈴木正治, 木材誌, **7**, 31 (1961).
- 30) 倉西正嗣, 弾性学, 579, 日本機械学会 (1952).
- 31) 和田八三久, 高分子, **12**, 278 (1963).
- 32) 広瀬英典, 柘植健司, 和田八三久, 応用物理, **38**, 417 (1961).
- 33) HERMANS, P. H., Physics and Chemistry of Cellulose Fibers, 206 (1949).
- 34) KOLLMANN, F., Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Bd. 1, 532, Berlin, Springer-Verlag (1951).
- 35) 宮部 宏, 材料の湿气的性能, (1944).