

木材の繊維方向における比動的ヤング率と内部摩擦^{*1}

則 元 京^{*2}・田 中 文 男^{*3}
大 釜 敏 正^{*4}・生 宗 里佳子^{*2}

Specific Dynamic Young's Modulus and Internal Friction of Wood in the Longitudinal Direction^{*1}

Misato NORIMOTO^{*2}, Fumio TANAKA^{*3},
Toshimasa OHOGAMA^{*4} and Rikako IKIMUNE^{*2}

(昭和61年8月4日受理)

In the previous papers^{1,3)}, it was reported that specific dynamic Young's modulus and internal friction in the longitudinal direction varied not only among the different wood species but also within the same species and there was a good correlation between these quantities.

The purpose of this investigation is to examine the effects of the cell wall structure including crystallinity, microfibril angle in S_2 layer, proportion of S_2 layer, and values of elastic constants of matrix on specific dynamic Young's modulus and to clarify the mechanism of internal friction in wood. According to the results estimated using a cell-wall model, specific dynamic Young's modulus depended remarkably on microfibril angle in S_2 layer, but slightly on the other factors. Therefore, it was considered that the main reason for the variation of specific dynamic Young's modulus resulted from the variation of microfibril angle in S_2 layer. To ascertain this experimentally, average microfibril angle and dynamic mechanical properties such as dynamic Young's modulus and internal friction of Hinoki wood (*Chamaecyparis obtusa*) from the thinning operation were measured by X-ray diffraction and by a flexural vibration of a free-free beam, respectively, and specific dynamic Young's modulus was plotted against average microfibril angle. The experimental results showed a good agreement with the calculated ones. Furthermore, it was found that there was also a good correlation between internal friction and average microfibril angle in S_2 layer. With reference to these results, it was considered that internal friction in wood resulted from time lag between deformations of framework and matrix in S_2 layer, and the effect of microfibril angle in S_2 layer on internal friction was discussed.

^{*1} 昭和60年度日本木材学会レオロジー研究会シンポジウム（1985年9月，日光）において一部発表した。

^{*2} 木材物理部門（Research Section of Wood Physics）

^{*3} 木材化学部門（Research Section of Wood Chemistry）

^{*4} 千葉大学教育学部（Faculty of Education, Chiba University）

概 要

木材の繊維方向では、比動的ヤング率 E'/γ の対数と内部摩擦 $\tan \delta$ の対数との間に勾配が負の直線関係がある。本研究の目的は、 E'/γ に及ぼす細胞壁構造の影響を明らかにし、内部摩擦の生じる機構を推定すると同時に、 E'/γ と $\tan \delta$ の間に相関関係が存在する理由を明らかにすることである。

モデル解析の結果、 E'/γ の値には S_2 層のマイクロフィブリル傾角が最も大きく影響していることが明らかになった。このことを実験的に確かめるために、ヒノキ間伐材について、X線回折により S_2 層の平均マイクロフィブリル傾角 $\bar{\varphi}$ と、両端自由たわみ振動法により、 E'/γ を求めた結果、 E'/γ と $\bar{\varphi}$ との関係は、計算により推定したものと定量的によく一致した。また、 $\tan \delta$ と $\bar{\varphi}$ の間にも、実験的に高い相関関係が存在した。得られた結果から、木材において内部摩擦の生じる主な機構は、 S_2 層におけるマイクロフィブリルの変形とマトリックスのそれとの間の位相差に基づくものと推定した。

1. 緒 言

先に、木材の繊維方向の動的ヤング率 E' を比重 γ で除した量、すなわち比動的ヤング率 E'/γ と内部摩擦 $\tan \delta$ との間に、次式で示す関係のあることを示した¹⁾。

$$\tan \delta = k_1 (E'/\gamma)^{-k_2}, \quad k_1 > 0, 1 > k_2 > 0 \quad (1)$$

この式より、次式に示す比損失弾性率 E''/γ と E'/γ の関係が導かれる。

$$E''/\gamma = k_1 (E'/\gamma)^{1-k_2} \quad (2)$$

また、繊維方向については、 E'/γ に細胞壁の平均的な比重 $\bar{\gamma}_0$ を乗じたものは細胞壁の平均的な動的ヤング率 $\bar{E}_1$ を近似的に表していることを示した²⁾。同様に、 E''/γ に $\bar{\gamma}_0$ を乗じたものは、繊維方向については、細胞壁の平均的な損失弾性率 $\bar{E}_2$ を近似的に表していることが、同様の考察によって示される。

$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &\simeq (E'/\gamma) \bar{\gamma}_0 \\ \bar{E}_2 &= (E''/\gamma) \bar{\gamma}_0 \end{aligned} \quad (3)$$

(1), (2), (3) 式より、次式が求められる。

$$\begin{aligned} \bar{E}_2 &= k_1 \bar{\gamma}_0^{k_2} (\bar{E}_1)^{1-k_2} \\ \tan \delta &= k_1 \bar{\gamma}_0^{k_2} (\bar{E}_1)^{-k_2} \end{aligned} \quad (4)$$

(1) 式より、 $\tan \delta$ の対数と E'/γ の対数との間に、勾配が負の直線関係の存在することがわかる。実験結果によると、針葉樹材 25 種 1,227 本の試料について、両者の相関係数は $-0.953^{3)}$ 、広葉樹材 30 種 118 本の試料について、 -0.914 の値が得られており¹⁾、高い相関のあることが明らかになっている。

$\bar{E}_1$ と $\tan \delta$ の相関が極めて高いことから、 $\bar{E}_1$ に寄与している木材の構造因子を探ることによって、内部摩擦の生じる機構を明らかにできるものと考えている。本報では、繊維方向に限定して、木材の細胞壁の動的ヤング率と構造の関係を明らかにし、さらに、内部摩擦の生じる機構について考察する。

2. 構造の抽象化

2.1 細胞壁構造の基本要素

細胞壁は、層構造をしていて、標準的な細胞では、細胞の外側から、細胞間層 (M 層)、一次壁 (P 層)、二次壁の外層 (S_1 層)、中層 (S_2 層)、内層 (S_3 層) に分けられる。各壁層は、セルロースの分子が集合して結晶した細長い糸状のマイクロフィブリルという構造物と、それらの間を埋めているヘミセルロースとリグニンよりなるマトリックスで構成されている。細胞壁の繰り返し基本単位として、図 1 に示すものを考えることができる⁴⁾。複合材料の立場から、この基本単位をみると、A と B の部分 (マイクロフィブリル) を骨格、C の部分をマトリックスと見なすことができる。MARK は⁵⁾、マイクロフィブリルの表面に一部のヘミセルロースが、セルロース分子鎖に沿って存在すると考えて、それを含めて骨格と見なしている。その場合、 $S_1 \sim$

S_3 層および $M+P$ 層での骨格の占める体積割合は、0.531 および 0.101 と見積られている。これに対し、骨格がセルロースのみで構成されていると考えた場合、 $S_1 \sim S_3$ 層および $M+P$ 層で、0.507 および 0.096、セルロース結晶領域のみで構成されていると考えた場合、0.269 および 0.051 と見積られる。なお、図 1 に示すマイクロフィブリルの断面は、平行四辺形をしているが、ほとんど正方形に近いものであるので、正方形と近似してヤング率の計算を行う。

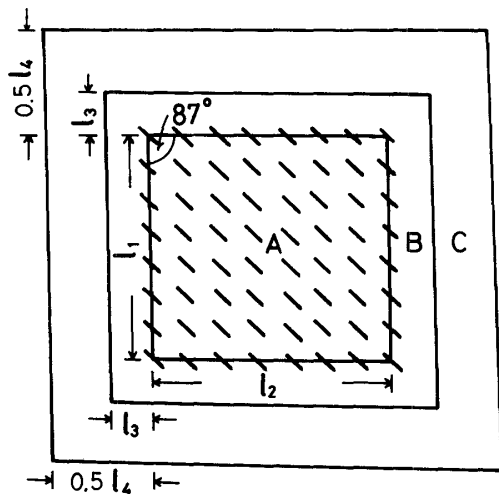


図 1 木材細胞壁の結晶モデル。A：セルロースの結晶領域，B：セルロースの非結晶領域，C：マトリックス， l_1 ：(101) 面方向の結晶幅， l_2 ：(101) 面方向の結晶幅， l_3 ：非結晶幅， l_4 ：結晶間の距離

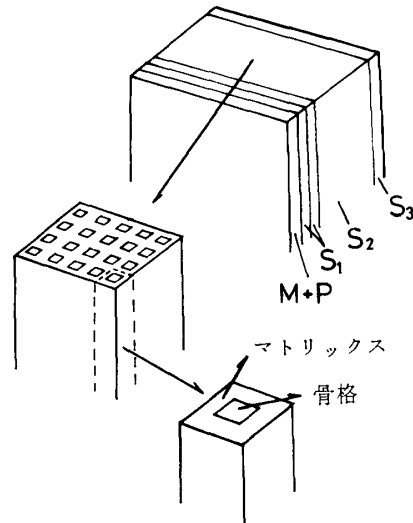


図 2 細胞壁のヤング率を計算するためのモデル

2.2 細胞壁モデル

細胞壁モデルとして、図 2 に示すものを考える。各壁層では、正方形断面を有する骨格に、等厚でマトリックスが取り巻いている基本単位が、壁層面に平行に整然と配列していると仮定する。 S_1 層は、網目構造をしているので、マイクロフィブリル傾角が繊維方向に対して対称な 2 層の積層よりなると考える。骨格とマトリックスの 3 主軸方向の弾性率の値、壁層の割合、各壁層でのマイクロフィブリル傾角等の基本値および壁の弾性定数の算出には、既報の結果を採用する^{2,6)}。

3. 細胞壁の動的ヤング率

3.1 動的ヤング率と比重

木材の繊維方向の動的ヤング率 E' と比重 γ の関係は、(3) 式で表される。針葉樹仮道管の平均的な比重 $\bar{\gamma}_0$ の測定は、1.43～1.46 の範囲に⁷⁾、計算値は、1.46～1.47 であるので、ほぼ一定値をとると考えてよい。(3) 式より、 $\bar{E}_1$ が一定値をとるのであれば、 $\log E'$ と $\log \gamma$ の関係は、傾きが 45 度の一本の直線となるはずである。もし、両者の関係がそのようなになっていない場合は、 $\bar{E}_1$ は、一定値をとらないものと考えられる。図 3 に、ヒノキ間伐材*の 20°C、65% R.H. における E' と γ を対数で目盛った結果を示して

* 奈良県宇陀郡室生村育種園で間伐された吉野ヒノキおよび坂下営林署から入手の木曽ヒノキ 6 本、奈良県東吉野村滝野および四郷、上北山南陵、十津川村山手谷、野迫川村弓手原、桜井市多武峰、川上村東川で間伐された 12 本の計 18 本を試料として用いた。

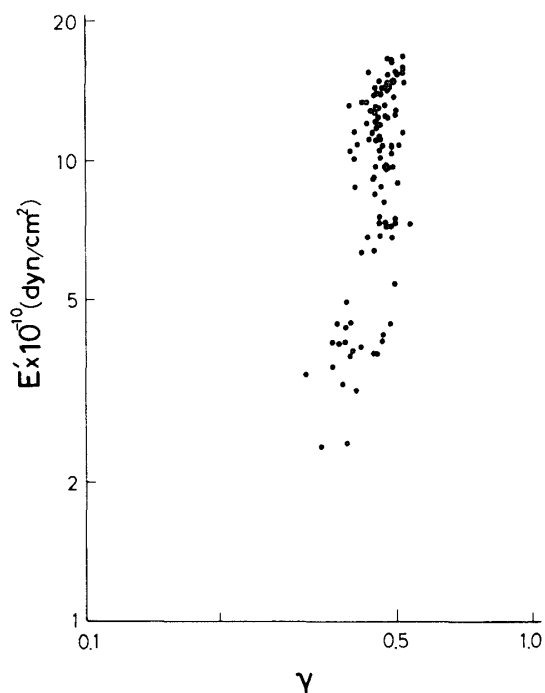


図3 ヒノキ材繊維方向の 20°C, 65% R.H. における動的ヤング率 E' と比重 γ の関係

いる^{*1}。両者の関係は、傾きが45度の一本の直線で表すことができず、狭い比重の範囲において、 E' の値は、大きく変動している。同様の関係は、針葉樹材 25 種²⁾、広葉樹材 24 種¹⁾およびスギ間伐材⁹⁾についても得られている。従って、 $\bar{E}_1$ は、一定値をとらないことが示される。図3の場合、 $\bar{E}_1$ の値は $\bar{\gamma}_0$ を 1.45 とすると、 $9.06 \times 10^{10} \sim 5.00 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$ の範囲で変動している。

3.2 動的ヤング率と壁構造

図4に、計算により求めた繊維方向のヤング率 $\bar{E}_1$ と S_2 層のマイクロフィブリル傾角 φ の関係を示す。 δ は、 S_2 層の占める割合、 α は、 $S_1 \sim S_3$ 層で骨格の占める割合である。マイクロフィブリルにおいて、非結晶領域は、結晶の表面に存在するセルロース鎖の占める領域と考えられており⁴⁾、また、一部のヘミセルロースが非結晶セルロース鎖に平行に隣接しているという報告もなされているので⁵⁾、 α としては、0.531 または 0.507 の値を採用するのが妥当であろう。骨格の占める割合は、樹種等によって、大きく変動しないと考えられているが、X線回析による結果から、極端な場合には、基準値 $\alpha=0.531$ から3割小さい $\alpha=0.372$ 程度の値をとる場合も考えられるので²⁾、結晶化度の寄与という点から、 $\alpha=0.372$ について計算したのが、図4の点線で示す曲線である。図5に、 $\alpha=0.531$ に固定し、 δ を 0.680, 0.744, 0.840 に変化させたときの $\bar{E}_1$ と φ の関係を示す。スギおよびアカマツ材について、 δ は、早材で 0.74~0.79, 晩材で 0.85~0.87 の値が実測されている¹⁰⁾。図から明らかなように、この程度の δ の変動では、 $\bar{E}_1$ へ与える影響は小さい。図6に、 $\alpha=0.531$, $\delta=0.840$ に固定し、マトリックスのヤング率 E_M と剛性率^{*2}を変化させた場合の $\bar{E}_1$ と δ の関係を示す。マトリックスは、無定形の高分子であり、それがガラス状態にある時には、架橋の有無、分子量の差異によらず、 E_M は、 $2 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$ 程度であることが知られているので¹¹⁾、 E_M は、針

^{*1} 長さ 16 cm, 幅 2 cm, 厚さ 0.4 cm の試片の下面に薄い軟鉄片を貼付け、両節点でつるし、一端で励振他端で検出し、その時の一次の共振周波数から E' を、減衰曲線より $\tan \delta$ を求めた。

^{*2} 基準値を $7.70 \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ とし、 E_M と同じ比率で変化させた。

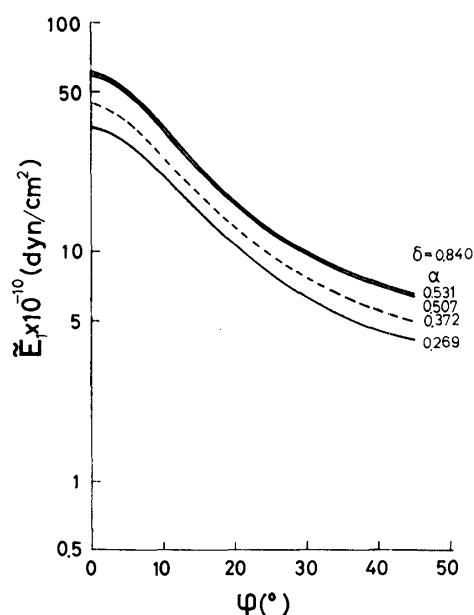


図4 細胞壁の繊維方向のヤング率 $\bar{E}_1$ と S_2 層のマイクロフィブリル傾角 φ の関係。 α ：骨格の占める割合， δ ： S_2 層の壁割合

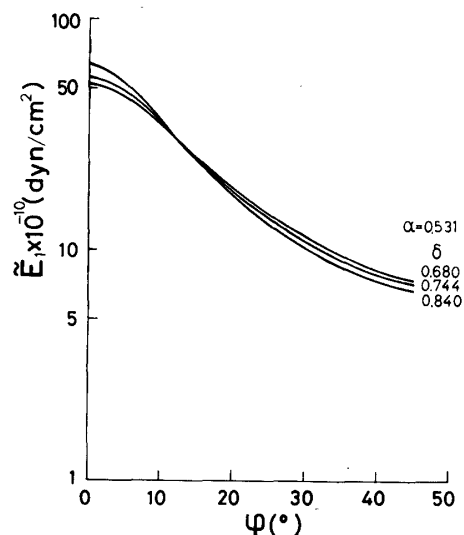


図5 細胞壁の繊維方向のヤング率 $\bar{E}_1$ と S_2 層のマイクロフィブリル傾角 φ の関係。 α ：骨格の占める割合， δ ： S_2 層の壁割合

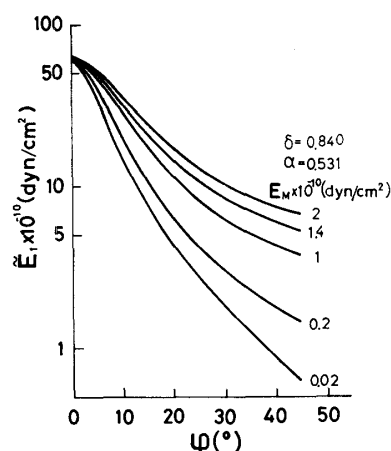


図6 細胞壁の繊維方向のヤング率 $\bar{E}_1$ と S_2 層のマイクロフィブリル傾角 φ の関係。 α ：骨格の占める割合， δ ： S_2 層の壁割合， E_M ：マトリックスのヤング率

葉樹間で、あまり差異がないと考えてよい。 φ が小さい時、 E_M が大きく変化しても、 $\bar{E}_1$ に変化は、ほとんど認められない。 φ が大きい時でも、基準値から3割程度減少しても、 $\bar{E}_1$ には、ほとんど影響が現われない。

以上の結果から、細胞壁のヤング率が著しく変動する原因は、 S_2 層におけるマイクロフィブリル傾角 φ の差異が主であって、骨格の占める割合 α 、 S_2 層の占める割合 δ の寄与は、それらの値が現実に変動する範囲においては、小さいと考えられる。

表1 ヒノキ間伐材の比重 γ , S_2 層の平均マイクロフィブリル傾角 $\bar{\varphi}$, 繊維方向の動的ヤング率 E' , 損失弾性率 E'' , 細胞壁の動的弾性率 $\bar{E}_1$, 損失弾性率 $\bar{E}_2$ 内部摩擦 $\tan \delta$

No.	γ	φ (°)	$E' \times 10^{-11}$	$\bar{E}_1 \times 10^{-11}$	$E'' \times 10^{-8}$	$\bar{E}_2 \times 10^{-9}$	$\tan \delta \times 10^3$
10	0.483	3.8	1.63	4.82	9.67	2.86	5.95
6	0.430	4.0	1.11	3.73	6.92	2.30	6.18
20	0.475	4.0	1.54	4.63	9.19	2.76	5.96
35	0.482	4.0	1.66	4.93	9.69	2.87	5.83
36	0.486	4.2	1.64	4.83	9.67	2.84	5.89
39	0.436	5.0	1.15	3.76	7.51	2.46	6.56
18	0.467	7.0	0.972	2.97	6.84	2.09	7.04
11	0.473	8.5	0.967	2.92	7.05	2.13	7.29
97	0.470	11.5	0.971	2.23	7.43	1.78	7.99
14	0.431	12.4	0.685	2.27	6.09	2.02	8.89
2	0.440	13.0	0.917	2.97	6.75	2.19	7.36
56	0.457	14.3	0.874	2.73	6.74	2.11	7.71
76	0.470	15.0	0.723	2.20	6.43	1.96	8.89
89	0.357	16.3	0.358	1.43	3.85	1.54	10.77
22	0.495	16.4	0.752	2.17	7.33	2.12	9.75
75	0.359	18.6	0.405	1.62	4.17	1.66	10.29
80	0.338	22.0	0.240	1.02	3.11	1.32	12.97
94	0.496	22.2	0.542	1.56	5.86	1.69	10.83
105	0.461	23.2	0.407	1.26	4.83	1.50	11.88
103	0.443	25.0	0.383	1.24	4.04	1.30	10.54
92	0.387	25.9	0.242	0.894	3.48	1.29	14.40

 $E', \bar{E}_1, E'', \bar{E}_2$: [dyn/cm²]

3.3 計算値と実測値の比較

図3で用いたヒノキ間伐材試片の中から, 21試片を選び, X線回析測定を行って*, S_2 層の平均マイクロフィブリル傾角 $\bar{\varphi}$ を測定した。表1に, 結果を $\gamma, E', \bar{E}_1, E'', \bar{E}_2, \tan \delta$ の値とともに, また, 図7に結果の一例を示す。試片 No. 35 および No. 18 では, $\bar{\varphi}$ が小さいので, 二つのピークが重なって, 見掛け上単一のピークをもつ強度曲線を示すが, No. 36 および No. 103 では, 二つのピークに分離した強度曲線を示す。実測された強度曲線を, 二つのガウス分布曲線に分離することにより, $\bar{\varphi}$ を決定した。図8に, (3) 式を用いて求めた細胞壁の動的ヤング率 $\bar{E}_1$ と $\bar{\varphi}$ の関係を白丸印で示している。また, 図中の曲線は, 細胞壁のヤング率の計算値 $\bar{E}_1$ と φ の関係を示すが, aは, $\alpha=0.531, \delta=0.840$, bは, $\alpha=0.372, \delta=0.840$, cは, $\alpha=0.531, \delta=0.680$ の場合の結果である。細胞壁のヤング率が, 同一比重に換算した時異なる原因として, 種々の壁構造が関与しているが, S_2 層のマイクロフィブリル傾角の影響が最も大きいと考えられる。

* 動力学的性質を測定した試片の一端より $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$ の寸法の試片を切出し, それをゴニオメーターに極点図形測定装置を取付け, セルロース微結晶の繊維軸方向に対応する (040) 反射 (MEYER & MISH モデル) の回析方向に, プロポーショナルカウンタを固定し, 対称透過法の配置を保ち, 試料を試料面法線のまわりに 6 deg/min の速度で回転させ, 回析強度を測定し, S_2 層の平均マイクロフィブリル傾角 $\bar{\varphi}$ を求めた。測定条件は, $35\text{ kV}, 20\text{ mA}, \text{Ni-filtered CuK}\alpha, \text{D.S.}=1\text{ deg}, \text{S.S.}=1\text{ deg}, \text{R.S.}=0.6\text{ mm}, \text{Time Const.}=0.5, \text{Range}=1,000\text{ cps}$ であった。

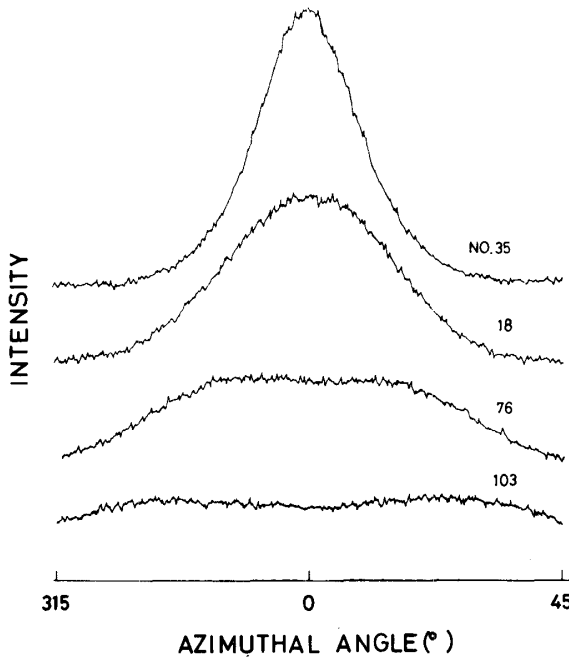
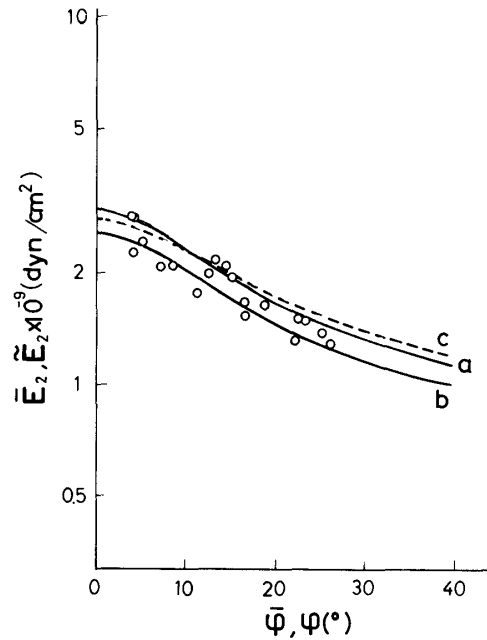


図7 ヒノキ材のX線強度と方位角の関係


 図8 細胞壁の繊維方向のヤング率 $\bar{E}_1$ (実測値, 白丸), $\bar{E}_1$ (計算値, a~c) とマイクロフィブリル傾角 $\bar{\phi}$ (実測値), ϕ の関係。
 a : $\alpha=0.531, \delta=0.840$, b : $\alpha=0.372, \delta=0.840$, c : $\alpha=0.531, \delta=0.680$

4. 細胞壁の損失弾性率および内部摩擦

4.1 損失弾性率および内部摩擦

木材の繊維方向の損失弾性率 E'' と比重 γ の実験的關係は, (3) 式で表される。動的ヤング率の場合と同様, 損失弾性率 $\bar{E}_2$ が一定値をとるのであれば, $\log E''$ と $\log \gamma$ の関係は, 傾きが45度の一本の直線となるはずである。図9にヒノキ間伐材の20°C, 65% R.H. における繊維方向の E'' と γ の関係を対数で目盛った結果を示している。 E'' の値は, γ の増大とともに増大しているようにも思えるが, 傾きは, 45°よりも大きくなっていること, 同一の γ の値で比較した時, E'' の値は, 変動していることが認められる。従って, $\bar{E}_2$ の値は, 一定値をとらないことが示される。図9の結果の場合, $\bar{E}_2$ の値は $9.00 \times 10^8 \sim 2.02 \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ の範囲で変動している。

木材の繊維方向の内部摩擦 $\tan \delta$ と γ の関係は, (3) 式を用いて, 次式で表される。

$$\tan \delta = E''/E' \simeq (\bar{E}_2 \gamma / \bar{\gamma}_0) (\bar{\gamma}_0 / \bar{E}_1 \gamma) = \bar{E}_2 / \bar{E}_1$$

すなわち, $\tan \delta$ は, 比重に無関係な量となる。また, $\bar{E}_1$ の増減に対して $\bar{E}_2$ の増減が比例しているならば, $\tan \delta$ は, 一定値をとるはずである。図10に, ヒノキ間伐材の20°C, 65% R.H. における繊維方向の $\tan \delta$ と γ の関係を示している。 $\tan \delta$ は, γ の変化に対し一定の値を示さず, 広い値の範囲に變動している。 $\tan \delta$ は, γ に依存しない量であるから, $\tan \delta$ が變動しているのは, 壁の構造の差異による。

4.2 比損失弾性率および内部摩擦と動的ヤング率の関係

ヒノキ間伐材の20°C, 65% R.H. における繊維方向の $\log \tan \delta$ と $\log (E'/\gamma)$ の関係を図11に示す。両者の間に, 相関係数 -0.983 の高い相関のある直線関係が存在する。(1) 式の定数 k_1, k_2 は, $10^{4.23}$ および 0.563 である。図12に, E''/γ と E'/γ を対数で目盛った結果を示す。(2) 式が示すように, 両者の間

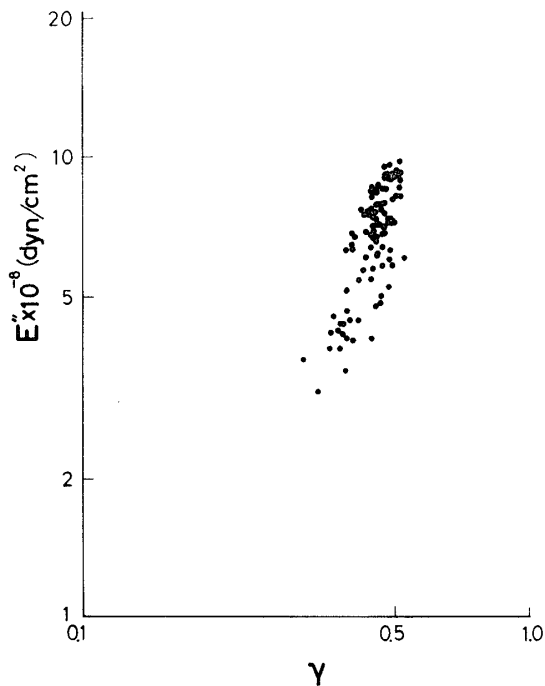


図9 ヒノキ材繊維方向の 20°C, 65% R.H. における損失弾性率 E'' と比重 γ の関係

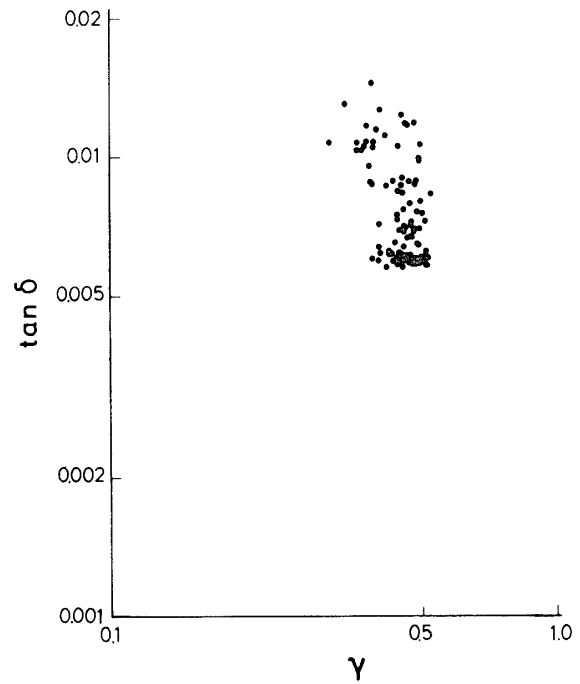


図10 ヒノキ材繊維方向の 20°C, 65% R.H. における内部摩擦 $\tan \delta$ と比重 γ の関係

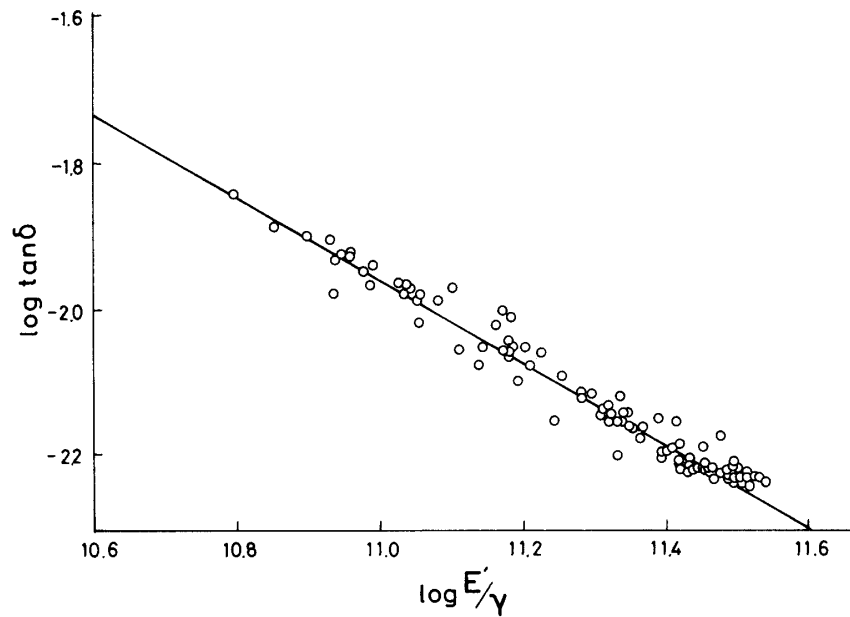


図11 ヒノキ材繊維方向の 20°C, 65% R.H. における $\log \tan \delta$ と $\log E'/\gamma$ の関係

に直線関係が存在する。3.3で $\bar{E}_1$ と γ の関係を明らかにしたので、(4)式を用いて $\bar{E}_2$ および $\tan \delta$ と φ の関係を求めることができる。図13および14に、 $\bar{E}_2$ および $\tan \delta$ と $\bar{\varphi}$ および φ の関係を示す。図中の $a \sim c$ は、図9のそれらと同じである。白丸印は、実測値である。図14から明らかなように、 $\tan \delta$ の大きな変動は、 $\bar{\varphi}$ に基づくものと考えてよい。念のために、 $\bar{\varphi}$ と γ の関係を調べたのが図15である。 $\bar{\varphi}$ は、 γ

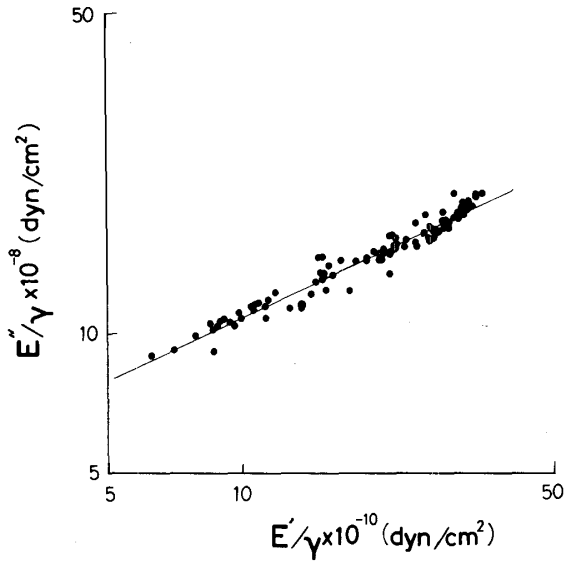


図12 ヒノキ材繊維方向の 20°C, 65% R.H. における $\log E''/\gamma$ と $\log E'/\gamma$ の関係

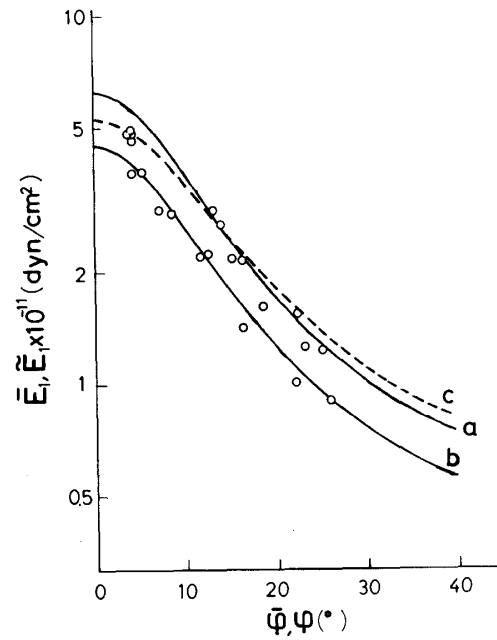


図13 細胞壁の繊維方向の損失弾性率 $\bar{E}_2$ (実測値, 白丸), $\bar{E}_2$ (計算値, a~c) とミクロフィブリル傾角 $\bar{\phi}$ (実測値), ϕ の関係。a~c : 図8 参照

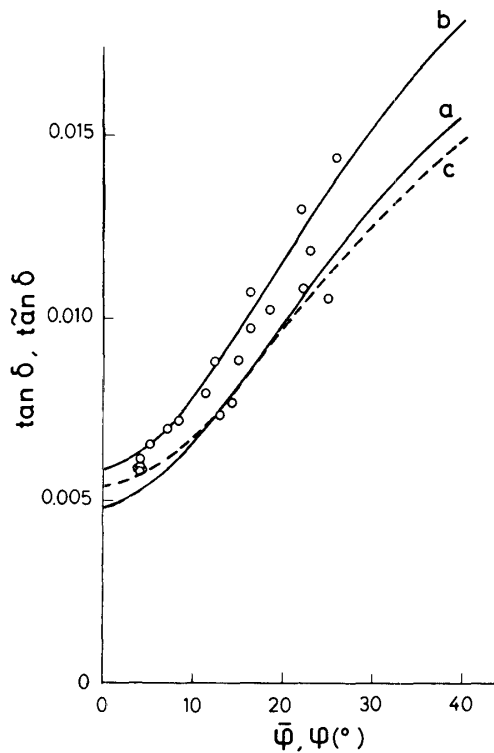


図14 細胞壁の繊維方向の内部摩擦 $\tan \delta$ (実測値, 白丸), $\tan \delta$ (計算値, a~c) とミクロフィブリル傾角 $\bar{\phi}$ (実測値), ϕ の関係。a~c : 図8 参照

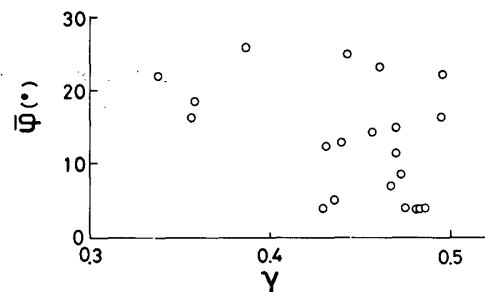


図15 ヒノキ材 S_2 層の平均ミクロフィブリル傾角 $\bar{\phi}$ と比重 γ の関係

の変化に対して、一定の傾向を示さない。

4.3 内部摩擦の機構

木材の繊維方向の内部摩擦が、 S_2 層のマイクロフィブリル傾角とともに増大する機構を定性的に考える。マイクロフィブリルは、前述のように、セルロースの結晶を芯とし、その周囲にヘミセルロースの一部が付着した構造物であって、近似的に弾性体と見なすことができるであろう。一方、マトリックスは、リグニンと一部のヘミセルロースよりなる無定形の粘弾性体と考えることができるが、分子間に架橋が存在すると考えられることから、流動は示さないものと推測される。いま、細胞壁をそのほとんどを占める、 S_2 層で近似的に代表し、マイクロフィブリルとマトリックスが並列に存在する $\varphi=0^\circ$ の場合を考える。これに、振動的な外力が与えられた場合、マトリックスは、粘弾性体であるため、マイクロフィブリルの変形に対し、位相のずれた変形をしようとする。しかし、両者の体積割合が同程度であることと、マイクロフィブリルの弾性率が、マトリックスのそれの 50 倍以上であることから、マトリックスは、それが単独に変形する場合に比べて、著しくマイクロフィブリルの変形に拘束を受け、従って、 S_2 層の変形と外力との位相差は小さいはずである。一方、 φ が増大するにつれて、マトリックスの変形のマイクロフィブリルによる拘束は少なくなり、 $\varphi=90^\circ$ である仮想的な場合には、マトリックスは、外力に対し比較的単独に近い変形をするであろう。その場合、 S_2 層全体としての変形と外力の位相差は、 $\varphi=0^\circ$ の場合に比べてかなり大きくなるはずである。このような機構から、木材の繊維方向における $\tan \delta$ は、 φ とともに増大し、従って、 E'/r との間に極めて高い相関が存在するものと考えられる。以上の考えに基づいて、 $\varphi=0^\circ$ と 90° の仮想的な場合について、力学模型を用いて $\tan \delta$ を量的に求め、位相差へのマトリックスの寄与を定性的に検討してみよう。

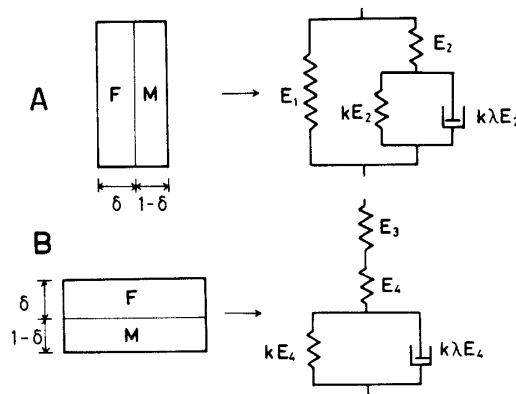


図16 内部摩擦 $\tan \delta$ 計算のためのモデル

図16に示すAおよびBのモデルを考える。マトリックスは、無定形であることから、マトリックスを代表する三要素モデルのスプリングの弾性率比 k およびフォークトモデルの遅延時間 λ は、AとBのモデルで等しいはずである。このような条件のもとに、応力 $\sigma = \sigma_0 e^{i\omega t}$ とひずみ $\varepsilon = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$ の関係を求めると次のようになる。

$$\sigma = (E' + iE'')\varepsilon$$

Aの場合

$$E' = E_1 + \frac{kE_2[1 + k(1 + \omega^2\lambda^2)]}{(1+k)^2 + k^2\omega^2\lambda^2}$$

$$E'' = \frac{kE_2\omega\lambda}{(1+k)^2 + k^2\omega^2\lambda^2}$$

いま、ガラス状態で分散のほとんど生じていない領域を考えているので、 $\omega^2\lambda^2 \gg (1/k+1)^2$ と考えてよい。

この場合,

$$E' = E_1 + E_2$$

$$\tan \delta_A = E_2 / (E_1 + E_2) k \omega \lambda$$

B の場合

$$E' = \frac{k E_3 E_4 [E_3 + k(E_3 + E_4)(1 + \omega^2 \lambda^2)]}{[E_3 + k(E_3 + E_4)]^2 + k^2 (E_3 + E_4)^2 \omega^2 \lambda^2}$$

$$E'' = \frac{k E_3^2 E_4 \omega \lambda}{[E_3 + k(E_3 + E_4)]^2 + k^2 (E_3 + E_4)^2 \omega^2 \lambda^2}$$

$\omega^2 \lambda^2 \gg [E_3 / k(E_3 + E_4) + 1]^2$ に対し,

$$E' = E_3 E_4 / (E_3 + E_4)$$

$$\tan \delta_B = E_3 / (E_3 + E_4) k \omega \lambda$$

$\tan \delta_A$ に対する $\tan \delta_B$ の比を求めると, 次のようになる。

$$\tan \delta_B / \tan \delta_A = E_3 (E_1 + E_2) / E_2 (E_3 + E_4)$$

$E_1 \sim E_4$ を, ミクロフィブリルの分子鎖方向およびそれに直角方向のヤング率 $E_{f\parallel} = 1.34 \times 10^{12}$ dyn/cm² および $E_{f\perp} = 2.72 \times 10^{11}$ dyn/cm², マトリックスのヤング率 $E_M = 2.00 \times 10^{10}$ dyn/cm² およびミクロフィブリルの体積分率 $\delta = 0.531$ を用いて表わすと, 次のようになる。

$$\frac{\tan \delta_B}{\tan \delta_A} = \frac{E_{f\perp} [\delta E_{f\parallel} + (1 - \delta) E_M]}{E_M [(1 - \delta) E_{f\perp} + \delta E_M]} = 71 \gg 1$$

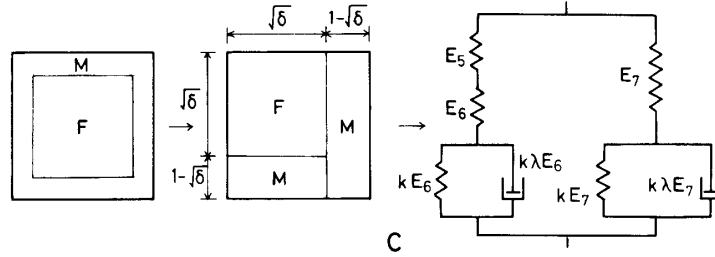


図17 内部摩擦 $\tan \delta$ 計算のためのモデル

A に比べ B の場合, マトリックスが位相差に与える影響は, 大きくなる。しかし, B の場合, 実際には, ミクロフィブリルがマトリックスにより取り囲まれている効果が取入れられてないために, さらに現実に近い図17に示す C のモデルを考える。この場合, E' と E'' は, 次式で示される。

$$E' = \frac{k E_7 [1 + k(1 + \omega^2 \lambda^2)]}{(1 + k)^2 + k^2 \omega^2 \lambda^2} + \frac{k E_5 E_6 [E_5 + k(E_5 + E_6)(1 + \omega^2 \lambda^2)]}{[E_5 + k(E_5 + E_6)]^2 + k^2 (E_5 + E_6)^2 \omega^2 \lambda^2}$$

$$E'' = \frac{k E_7 \omega \lambda}{(1 + k)^2 + k^2 \omega^2 \lambda^2} + \frac{k E_5^2 E_6 \omega \lambda}{[E_5 + k(E_5 + E_6)]^2 + k^2 (E_5 + E_6)^2 \omega^2 \lambda^2}$$

$\omega^2 \lambda^2 \gg (1/k + 1)^2, [E_5 / k(E_5 + E_6) + 1]^2$ に対し,

$$E' = E_5 E_6 / (E_5 + E_6) + E_7$$

$$\tan \delta_C = \frac{E_7 (E_5 + E_6)^2 + E_5^2 E_6}{(E_5 + E_6) [E_7 (E_5 + E_6) + E_5 E_6] k \omega \lambda}$$

$E_{f\parallel}, E_{f\perp}, E_M$ および δ で表すと, 次のようになる。

$$\tan \delta_C = \frac{a}{a + E_{f\perp} [\sqrt{\delta} E_M / (1 - \sqrt{\delta})]^2 k \omega \lambda}$$

$$a = (1 - \sqrt{\delta}) E_M [E_{f\perp} + \sqrt{\delta} E_M / (1 - \sqrt{\delta})]^2 + \sqrt{\delta} E_M E_{f\perp}^2 / (1 - \sqrt{\delta})$$

$\tan \delta_A$ に対する $\tan \delta_C$ の比を求めると 52 となる。C のモデルにおいても, ミクロフィブリルとマトリッ

クスが直列になっている界面での拘束の効果が考えられていないので、実際には、内部摩擦の比は、さらに小さい値となると思われるが、それでも1よりかなり大きな値となるであろう。

以上の定性的な考察から、 φ の増大とともに $\tan \delta$ が増大する原因は、マトリックスの粘弾性変形の $\tan \delta$ に与える影響が大きくなるためと考えることができる。このように内部摩擦の機構を考えると、 E'/η と $\tan \delta$ との間に高い相関の存在することが理解できる。

4.4 内部摩擦とミクロフィブリル傾角との間の実験的關係

図8に示す $\bar{E}_1$ が数式化できれば、(4) 式から、 $\tan \delta$ と $\bar{\varphi}$ との間の実験式を求めることができる。 $\alpha = 0.531$, $\delta = 0.840$ の場合の $\bar{E}_1$ と φ の関係は、次に示す Witch of AGNESI 式によって近似することができる。

$$\bar{E}_1(\varphi) = \frac{(\bar{E}_1(0))^3}{(k_3\varphi)^2 + (\bar{E}_1(0))^2}$$

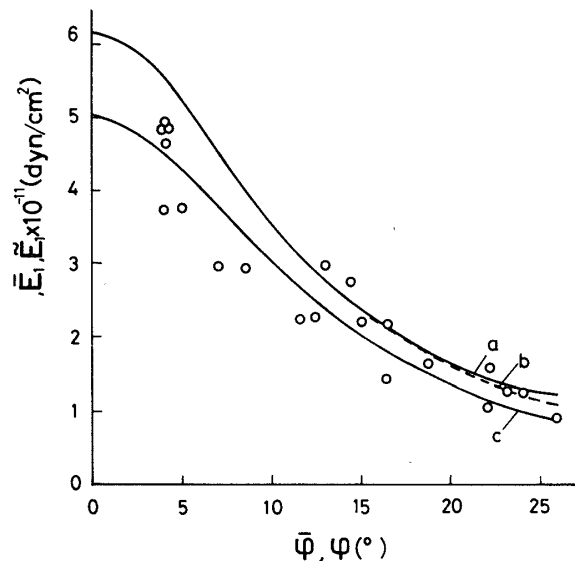


図18 細胞壁の繊維方向のヤング率 $\bar{E}_1$ (実測値, 白丸), $\bar{E}_1$ (計算値) と S_2 層のミクロフィブリル傾角 $\bar{\varphi}$ (実測値), φ の関係。
a : $\alpha = 0.531$, $\delta = 0.840$ の場合の計算値, b, c : Witch of AGNESI 式による実験式

ここに、 $\bar{E}_1(0) = 6.16 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$, $k_3 = 0.528 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$ である。図18に、計算値を近似式と比較しているが、両者は、 $0^\circ \leq \varphi \leq 26^\circ$ の範囲でよく一致している。同図に、実測値 $\bar{E}_1$ と $\bar{E}_1(0) = 5.00 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$, $k_3 = 0.408 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$ として計算した近似式を比較している。(4) 式に上式を代入して、次に示す $\tan \delta$ と $\bar{\varphi}$ との間の実験的關係式が求められる。

$$\tan \delta = k_1 (\bar{\gamma}_0 / \bar{E}_1(0))^{k_2} [(k_3 / \bar{E}_1(0))^2 \bar{\varphi}^2 + 1]^{k_2}$$

最後に、本研究は、文部省科学研究費補助金(特定研究I『森林の生態系維持と森林資源の高度な有効利用に関する研究』: 課題番号 60129042: 代表者九州大学名誉教授 松本 昶)および(一般研究C『木材の内部摩擦の機構解明』: 課題番号 60560181: 則元 京)によったものである。

文 献

- 1) T. ONO and M. NORIMOTO: Rheologica Acta, **23**, 652 (1984)

- 2) 則元 京他 3 名：日本レオロジー学会誌, **9**, 169 (1981)
- 3) T. ONO and M. NORIMOTO: Jpn. J. Appl. Phys, **22**, 611 (1983)
- 4) 則元 京, 高部圭司：木材研究・資料, No. 21, 96 (1985)
- 5) R. MARK: "Cell wall Mechanics of Tracheid", Yale Univ. Press, New Haven, P 59 (1967)
- 6) 大釜敏正, 則元 京：千葉大教研究紀要, **33**, 第 2 部, 127 (1984)
- 7) H. SAKI: Memoirs of the College of Agriculture, Kyoto Univ., No. 96, 47 (1970)
- 8) M. NORIMOTO, S. HAYASHI and T. YAMADA: Holzforsch., **32**, 167 (1978)
- 9) 則元 京, 和田 博：木材研究・資料, No. 18, 93 (1983)
- 10) 佐伯 浩：木材誌, **16**, 244 (1970)
- 11) A.V. TOBOLSKY: "Properties and Structure of Polymers", John Wiley & Sons, Inc. (1960)