

総説 (REVIEW)

木材——樹幹の材料設計を省みる*

山 田 正**

Tadashi YAMADA**

樹木は、高いものでは100 mをこえる自然の構造物であって、樹幹の環境条件を力学的にみれば、自重、風圧、衝撃、振動、その他の外力の作用があり、物理的には圧力、温湿度変化、氷雪、日射、放射線、大気公害などの刺激があり、生物的には虫菌害などがある。これらの諸条件に耐えて形態を保ちながら、水分通導の機能を果たす精巧な樹幹の機能を、材料複合のレオロジー（本稿では主に弾性）の観点から一瞥することにして、ここでは木材の多層構造、細胞壁の多層構造、物性の複合則の順に述べ、複合則の項では、誘電率、弾性率ならびにモデル細胞壁内の応力分布についてふれることとする。

木材（樹幹）の複合構造

ヒノキの力学特性を鋼、軽合金および二、三の最近の複合材料と比較すると表・1のようになって、そのすぐれた座屈特性に気付く。

表 1¹⁾

材 料	比 重 γ	弾 性 率 E (kg/mm ²)	引強 張度 σ_t (kg/mm ²)	比強 度 σ_t/γ (kg/mm ²)	比弾 性 E/γ (kg/mm ²)	座 屈 特 性	
						柱・円筒 $\sqrt{E}/\gamma$	板 $\sqrt[3]{E}/\gamma$
75S-T6 アルミニウム合金	2.8	7,400	64	19.3	2,640	30	6.9
Cr-Mo 鋼	7.8	21,000	90	11.5	2,700	18	3.5
ガラスクロス(#181)6層積層板, 厚さ 1.6 mm $V_f=40\%$, ポリエステル	1.6	1,700	25	15.5	1,060	26	7.5
ガラスローピングFW材エポキシ, $V_f=70\%$	2.1	6,130	136	64.8	2,920	37	8.7
ボロン繊維強化エポキシ— 方向材, $V_f=0.70$ $E_f=4.2 \times 10^4$, $\gamma_f=2.60$	2.17	29,400	196	90.2	13,540	79	14.2
ひのき (桧)	0.5	1,000	7	14	2,000	63.2	20

上表にみるような木材の性質は、かなりの太さに生長した樹幹から切取られた健全な試料についての数値

*第24回木研公開講演（宇治，1972.10.20）において講演

** 木材物理部門 (Division of Wood Physics)

である。一般に与えられた材の物性は樹幹形成過程における試片採取部位の履歴によるところが多い。木材形成の履歴は、それを長く一生にわたる経年変化よりみるときは成熟度、年毎の生長時期よりとらえれば早材晩材、また、生理機能よりは辺材心材の別があり、これに環境因子が複雑に作用しあって種々の材質が形成されることとなる。

材は成熟度より大別して、未成熟材、成熟材および過熟材となる。未成熟材は髓に近い10～15年の部位、過熟材は老令木の周辺部にみられる。髓からの年輪数をパラメーターにとった成熟度と繊維長との関係は図・1にみるように、成熟材部ではほぼ一定値となるが、未成熟材部と過熟材部とで値が小さくなる²⁾。類似の傾向は晩材の比重、セルロース含量、ミセルの長さ、結晶化度、緩和弾性率、強度、圧電率などで測定されている³⁾。一方、髓からの年輪数と平均フィブリル傾角の関係は図・2にみるように成熟材部ではほぼ一定値をとるが、未成熟材部および過熟材部ではやや大きな値となる⁴⁾。類似の傾向は早材の比重、リグニン量、繊維方向の収縮率などにみられる。

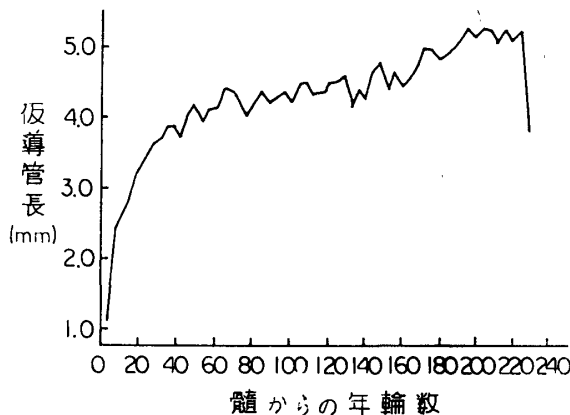


図1 (Tsoumis)

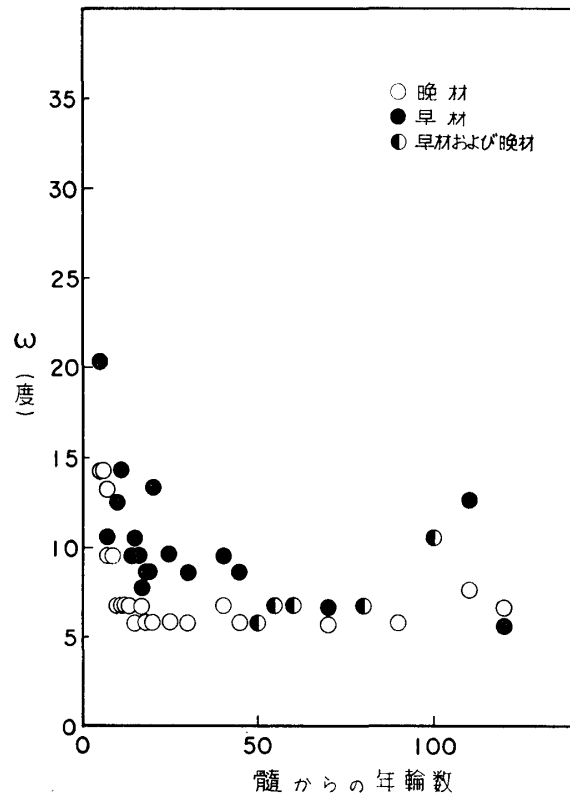


図2 (野村, 山田)

このように、未成熟材部では、中心に近づくにつれて次第に材質が変化するが、さらに中心部の髓の材質をその発芽過程にさかのぼって調べよう。

図・3には、クロマツの種子の発芽後の日数をパラメーターにして、その胚軸の引張緩和弾性率曲線を示す。数日間ほとんど柔細胞であって、みかけの生材状態のヤング率は 0.3 kg/mm^2 程度であり、200分前後から著しい緩和がみられるが、発芽後3週間以上にもなると結晶化や木質化のすすんだ細胞壁を含むようになって、ヤング率も一桁大きくなり、緩和曲線も平均的な未成熟材部のものに似てくる。成熟材のコンプライアンス曲線はブナについて図・4のようであるが、マツについても類似した値となる。なお竹の形成に関して筍の生長日数と表面の三浦式硬度計による硬さとの関係は、図・5のようであるが⁵⁾、このような表層の硬さに比し、内層では組織が疎となって硬さも小さくなる。

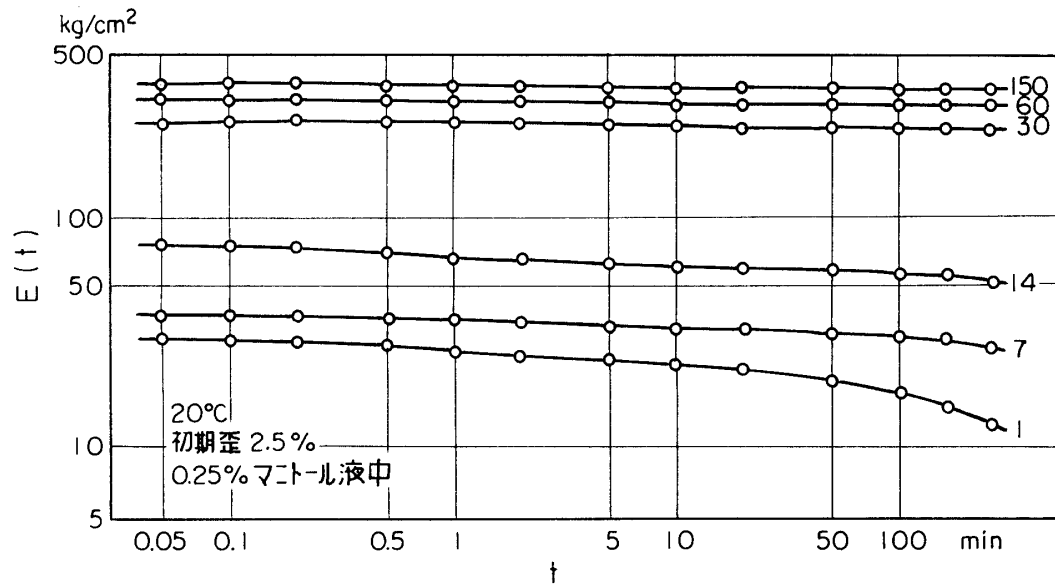
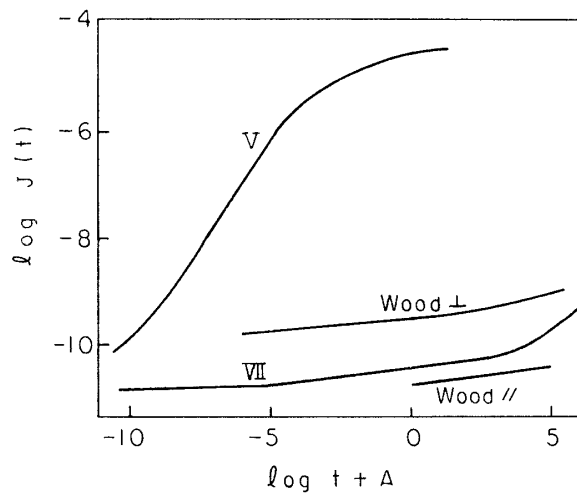


図3 (角谷, 長谷川, 山田)



V : Polyvinyl chloride

VII : Polyethylene

Wood // : ブナ湿潤材 (長軸方向)

Wood ⊥ : ブナ湿潤材 (半径方向)

図4 (CGS 単位)

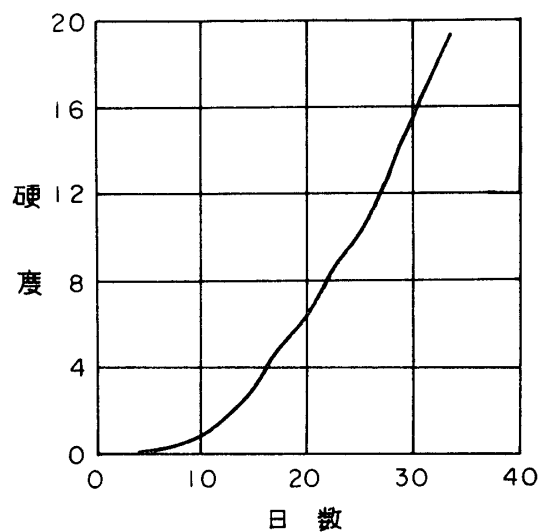


図5 (重松)

年間の生長時期との関連に関しては、1年輪内の物性値の分布に着目すればよい。分布の様式は図・6の模式図に示すように、おおよそ、三つの型に分つことができる。第Ⅰ型の arc tan 則にしたがうものとしては、比重、強度などがあり、第Ⅱ型の parabolic 則にしたがうものにはホロセルロース量、比強度など、第Ⅲ型の parabolic 則にしたがうものにはリグニン量などがある。半径方向の圧縮について強度と応力緩和の実測例を図・7に示す。材は Douglas fir を用い、強度および、ノルマライズされた応力緩和曲線が、早材から晩材にわたる各部位についてみられている。早材では強度も低い、同一応力レベルで比較しても応力の緩和が比較的短時間側に著しいことがわかる。

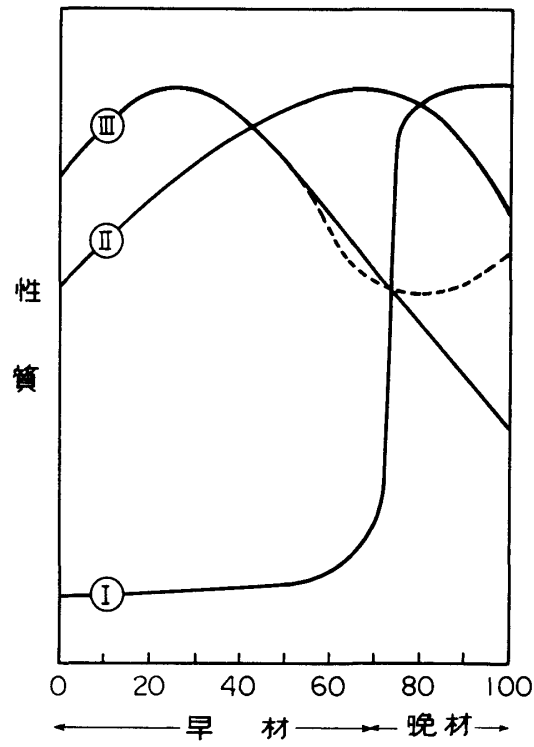


図6 (WILSON 外)

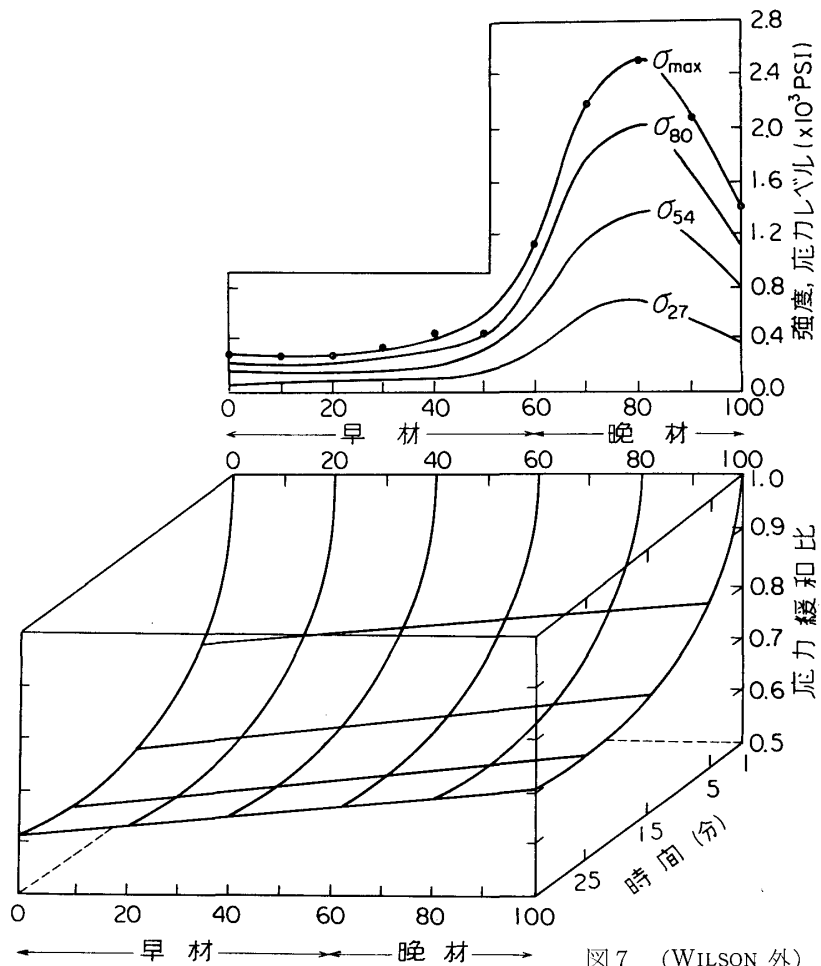


図7 (WILSON 外)

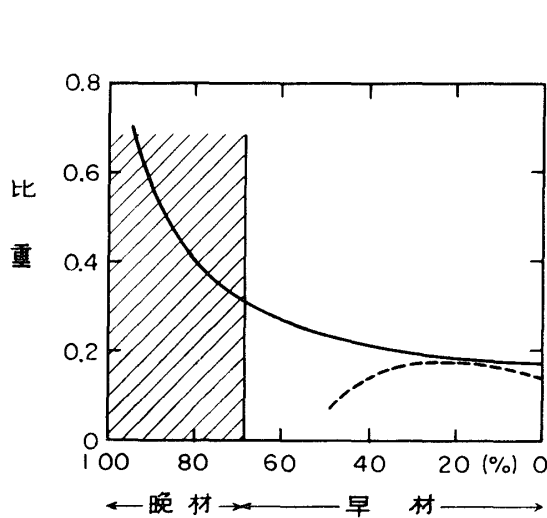


図8 (GROTZDITS & IFJU)

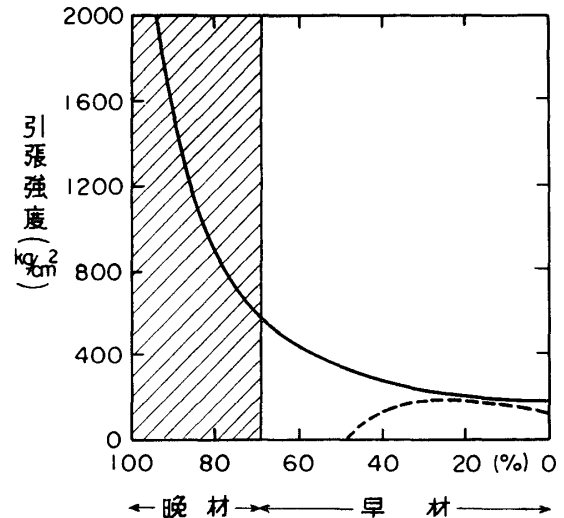
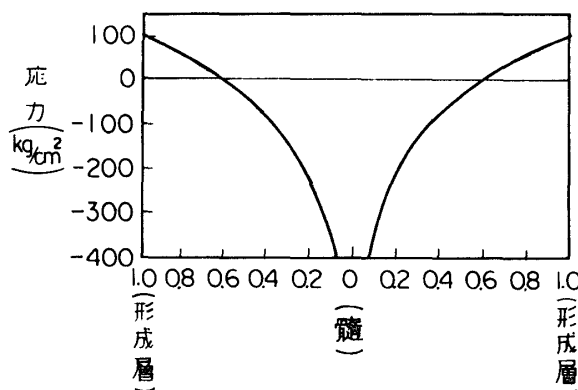


図9 (GROTZDITS & IFJU)

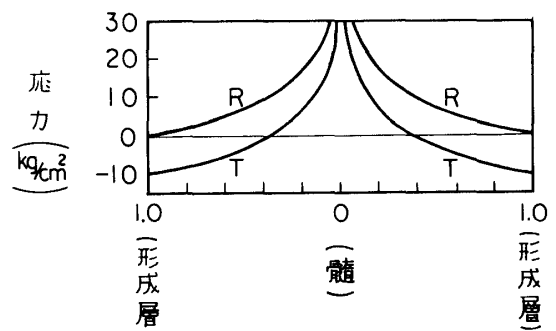
以上は完成した1年輪内の物性であったが、肥大生長中の各部位の物性がどのように変化するかを比重と引張強度について示したものが図・8と9である⁹⁾。形成層活動の盛んな6月に採取された42年生の米トガ材につき、形成層から内方に向って順次切片を切り出して測定した結果が図中の点線に示されていて、セルロース骨格の形成とともに強度は最大となり、その後リグニンが沈着されても強度は増加しない。なお、実線は完成された1年輪内の分布図である。

最後に環境条件の物理的な因子として、外力を取りあげると、その作用下で生成される特異な樹幹の複合構造として、アテの生成がある。すなわち、上方に伸びている樹幹が曲げられた場合、針葉樹ではその下側に、広葉樹ではその上側にアテを生ずる。その材質は、針葉樹アテではリグニンが多く、フィブシル傾角が大きいなど、また、広葉樹アテでは、ほとんどセルロースのみよりなる厚膜層が存在するなどの特異な細胞壁構造をもっている。このような特異な構造発生メカニズムの研究も樹幹にみられる自然の複合法の本質を探る上で重要な分野と考えられる。

竹についても、表皮近くでは維管束が密で内部に入るにつれて疎になり、物性の分布は木材に類似する。



(a) 繊維方向



(b) 半径方向 (R)
接線方向 (T)

図10 (KÜBLER)

このように肉眼的な構造に対応する物性分布より推しても木材や竹の材料設計は、定性的に、硬くて折れにくい日本刀などの構造に通じ、より精巧な点があるが、その性能をさらに樹幹において高めているものは生長応力の存在である。

樹幹内には、主にその肥大生長にともなう歪が積重なって応力場が形造られる。正常な樹幹におけるこの応力を、材の弾性を仮定して樹幹の三軸方向に分解して図示すると、図・10のように、軸方向には外周に引張、中心附近に圧縮の応力が生じており、半径方向には外周で零、中心に向って引張の応力が働いており、また、接線方向には、外周で圧縮、中心に引張となる応力が発生している⁷⁾。これには粘弾性材料としての考察が必要であるが⁸⁾、このような応力は樹木を風圧や凍裂から守る一方、樹木を伐倒し利用する際には heart shake などの障害を生ずる⁹⁾。なお、軸方向に生じている生長応力の大きさと材のヤング率との関係がユーカリについて図・11のように報告されている¹⁰⁾。

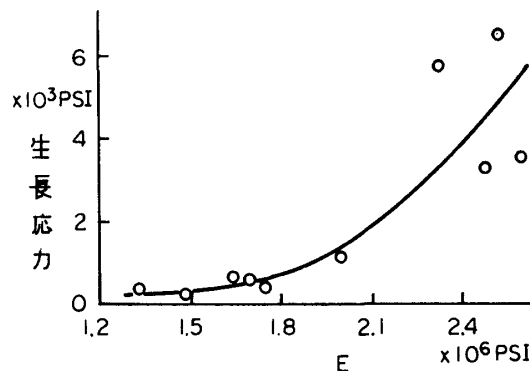


図11 (NICHOLSON 外)

細胞壁の多層構造

以上に、木材の多層構造や応力場の形成が樹幹という一つの構造物のすぐれた材料設計の要点となっている事を定性的にマクロな立場から眺めたのであるが、それを定量的に理解するためには、細胞壁について種々の特性を知るとともに、壁内における応力分布を明らかにするなど、ミクロな力学の研究を進めなければならない。それにはまず、細胞壁の多層構造を思い起す必要がある。

木材の細胞要素の中で、強度を与えるものは針葉樹ではそのほぼ90%を占めている仮道管であり、広葉樹では木繊維である。針葉樹における仮道管の配列や微細構造は模式図¹¹⁾・12にみられるように、半径方向では空孔はほぼ一直線に整列しているのに対して、接線方向では乱列している。そして、空孔の周壁となっている細胞壁は、非常に多くの薄層が重なり合って出来上ったシエルとみなすことができる。そして各薄層はフィラメント状のミクロフィブリルの並列によりなっていて、これらのミクロフィブリルは細胞長軸のまわりに、層毎に軸に対する傾斜を異にしながら、らせん状に配列している。その骨格はセルロースであり、ヘミセルロースやリグニンが等方性のマトリックスとして存在する。すなわちミクロフィブリルは大体、一次膜 (P) では表裏で様相を異にするが、平均して、ほぼ軸に直角に配向しているものとみなされ、二次膜外層 (S_1) では大きい傾角をもって交叉する4~6層よりなり、中層 (S_2) の外側と内側はそれぞれやや大きな傾角の数層、その中間は小さな傾角の30~150層、内層 (S_3) は0~6層よりなる¹³⁾。もっとも中層でも各薄層毎に傾角を少しづつ異にするが、平均的な例をあげると図・13¹³⁾や表・2¹⁴⁾のようになる。したがって、このような構造をもつ木材の物性は、多孔構造の幾何学的な形状と、ちょうど FRP にみられるようなおのおのが均質直交異方性を示す薄層が多く重った細胞壁の積層構造との二つの因子に着目して、その複合則の考察より研究を進められるべきであろう。

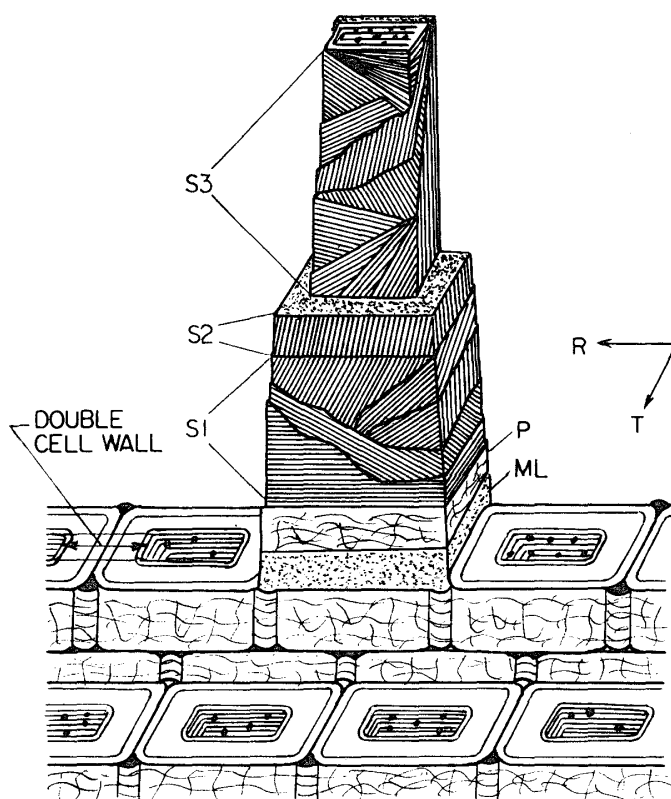


図12 (DUNNING)

複 合 則

i 種類の要素よりなる複合体の物性 ϵ を表現する経験式に LICHENECKER-ROTHER のべき式がある¹⁵⁾。
すなわち、各成分の物性を ϵ_i 、各容積率を θ_i とおくと

$$\epsilon^k = \sum_i \theta_i \epsilon_i^k, \quad -1 \leq k \leq 1. \quad (1)$$

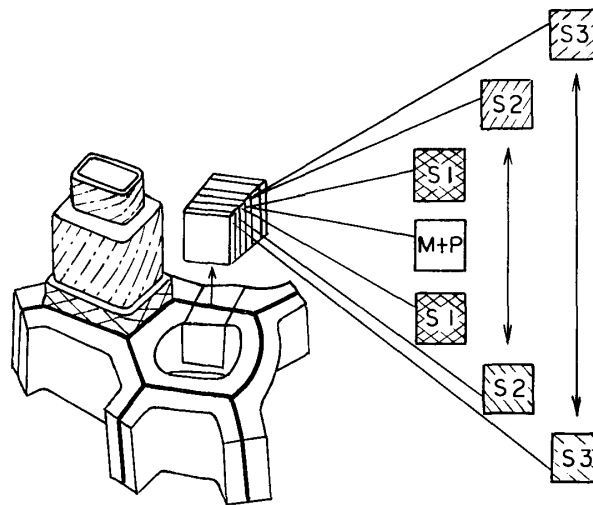
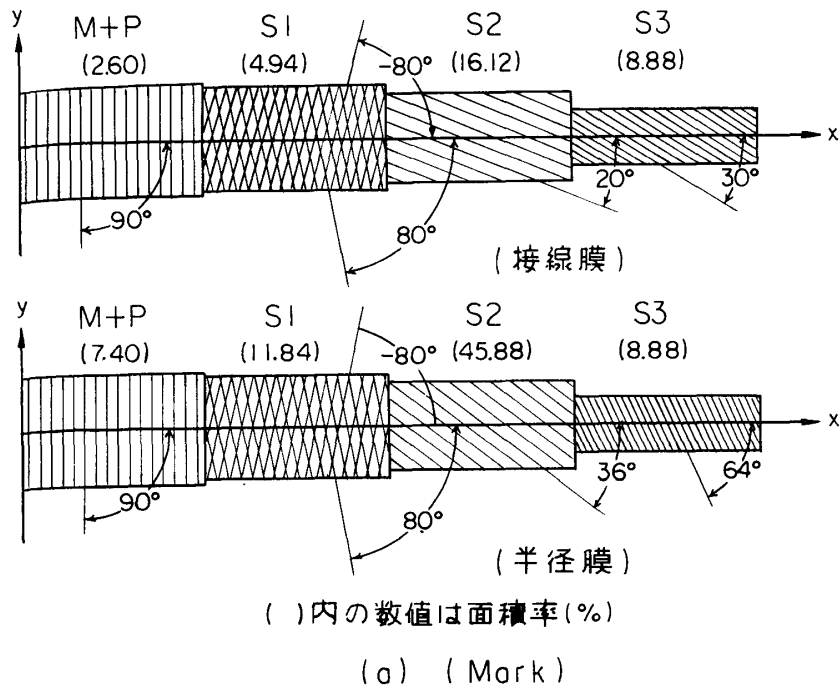
例えば、比重は $k=1$ とおいた相加平均で与えられる。誘電特性について¹⁶⁾も最も簡単な2要素からなる層状混合体に関する WIENER の上限式(層が電場方向に対し並列の場合)および下限式(層が電場方向に対し直列の場合)は、それぞれ上式で $k=1$ とおいた相加平均および $k=-1$ とおいた調和平均の式に一致する。さらに、木材を細胞壁と空気よりなる巨視的複合体とみなすとき、繊維方向における誘電率 ϵ_L' および誘電損率 ϵ_L'' は①式において $k=1$ の場合、すなわち WIENER の上限式を変形した次式で表現できるものと考えられる。

$$\epsilon_L' = \frac{\gamma}{\gamma_\omega} (\epsilon_\omega' - 1) + 1, \quad \epsilon_L'' = \frac{\gamma}{\gamma_\omega} \epsilon_\omega''$$

ここに ϵ_ω' 、 ϵ_ω'' および γ_ω は細胞壁の誘電率、誘電損率および比重であり、 γ は木材の比重で、共に ϵ_L' および ϵ_L'' と比重が直線関係にあることを示している。

このように繊維方向の特性は k を含まない単純な混合則で与えられるが、繊維に直角方向における特性を考えると構造に関する配慮が必要となってきた、種々の取扱いがなされている。

誘電率について $\epsilon_\perp$ を WIENER の下限式で表現しているものや、一方 $\epsilon_\perp'$ と γ の関係が1あたりまで直線で表わせるという報告、さらに木材の現実的な巨視的構造を考慮したもの、あるいはそれを WIENER の上限および下限式の適当な和によって表わせるものと考えた次の実験式などがある。



(b) (Schniewind)

図 13
表 2¹⁵⁾

		$M+P$		S_1		S_2		S_3	
		α	ω	α	ω	α	ω	α	ω
早	材	0.1	90°	0.3	80°	0.2	40°	0.4	70°
移行	材 1	0.0625	90°	0.1875	80°	0.5	40°	0.25	70°
"	2	0.025	90°	0.075	80°	0.8	40°	0.1	70°
"	3	0.025	90°	0.075	80°	0.8	25°	0.1	70°
晩	材	0.025	90°	0.075	80°	0.8	10°	0.1	70°

α : 面積率, ω : ミクロフィブリルアングル

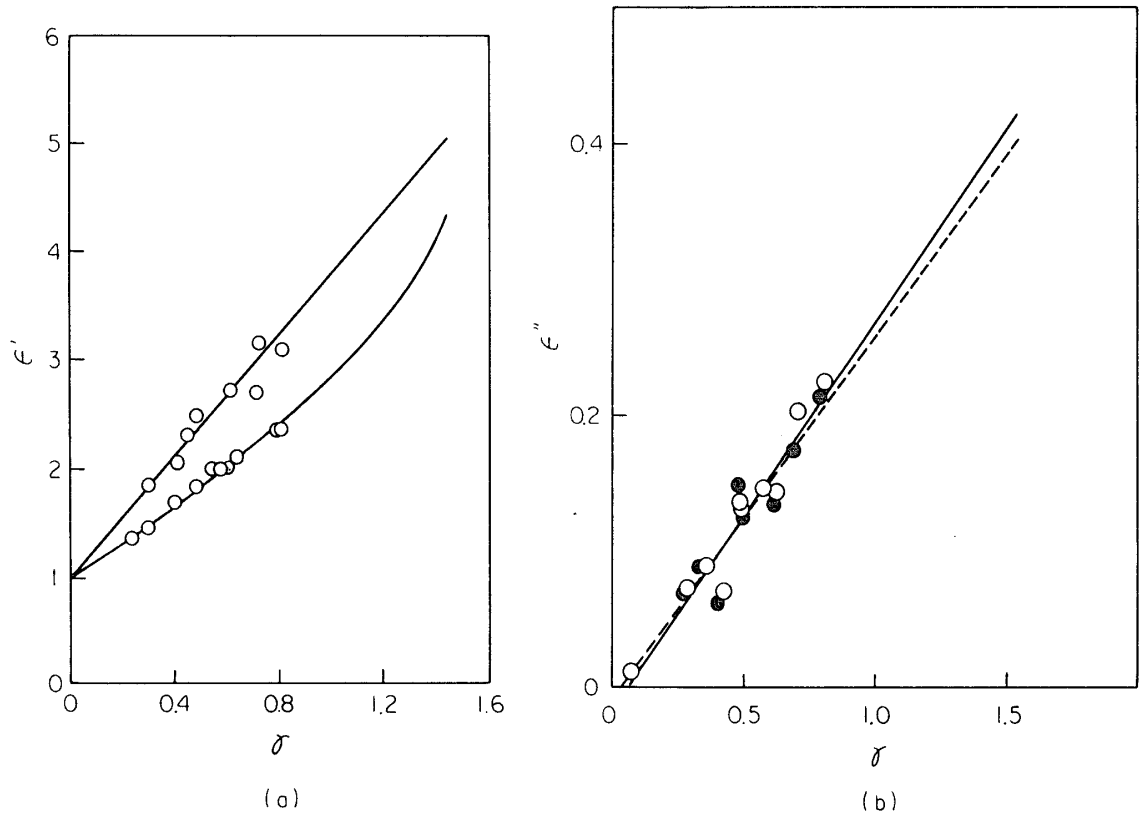


図14 (則元, 山田)

$$\epsilon_{\perp}' = c \left\{ 1 + \frac{\gamma}{\gamma_w} (\epsilon_w' - 1) \right\} + \frac{(1-c)\epsilon_w'}{\epsilon_w' - \frac{\gamma}{\gamma_w} (\epsilon_w' - 1)}, \quad 0 \leq c \leq 1$$

c は空気と細胞壁よりなる層状複合体の並列および直列部分の混和率である。

図・14(a)は 20°C, 1 MHz における繊維およびそれに直角方向の全乾木材の誘電率と比重の関係を, また同図・(b)は 31°C, 1 MHz における木材の繊維方向における誘電損率と比重の関係を示している。

なお k が小さいときには, 指数展開して

$$\epsilon^k = \exp(k \log \epsilon) = 1 + k \log \epsilon$$

したがって式①は容易に次の対数式に変形することが出来る。

$$\log \epsilon = \sum_i \theta_i \log \epsilon_i$$

細胞壁を空気と実質よりなる統計的に均質な微視的複合体とみなすとき, 細胞壁の誘電率を上式で求められる。

KRÖNERは繊維方向の実質の誘電率 ϵ_s' に対して①で $k=1$ の場合を, 繊維に直角方向に対してはRAYLEIGHの円筒式を適用して次式を求めている。

$$\epsilon_{s\perp}' = \epsilon_w' \theta_s + (1 - \theta_s), \quad \epsilon_{s'\perp}' = \frac{\left(\theta_s + \frac{\epsilon_{\perp} - 1}{\epsilon_{\perp} + 1} \right)}{\left(\theta_s - \frac{\epsilon_{\perp}' - 1}{\epsilon_{\perp}' + 1} \right)}$$

弾性率について¹⁷⁾も, マクロ力学の観点から, 上述の誘電特性の場合と同様の複合則を用いた考察がなされているが, より構造の影響が大きく, k のもつ意義の検討が重要となってくる。たとえば肉眼的には, 木材を早材晩材の層状混合体とみなすことが出来るので, そのヤング率をそれぞれの層のヤング率の値から上

記の式①において単純に軸方向では、 $k=1$ 、半径方向では、 $k=-1$ といった試みがなされているが、軸方向では問題はないものの、横方向では実験値に合わないことがある。そのために容積率 θ に他の意義をもたせた補正を行ない形状効果を評価するか、または k の値そのものをパラメーターにした形状効果の評価法を追求する必要が生じてくる。後者の場合 k の逆数 $n=1/k$ を用いて、 n を形状指数とよぶ。

木材の多孔構造の弾性率への寄与を調べるには空隙率または比重がパラメーターとして用いられる。各種の材について、それぞれ測定条件を少しづつ異にする諸研究者のデータをまとめて、軸方向のヤング率 E_L 、半径方向の E_R および接線方向の E_T と比重との関係を両対数グラフにプロットすると図・15のようになり、 n の値は E_L でほぼ 1, E_R で 1.2, E_T で 1.8 程度となる。そして E_R と E_T の両直線を延長して交叉する点に相当する横軸の値は木材実質の比重の値に近い。いいかえれば木材実質の横方向の弾性に異方性はみられないことが推定されるわけで、このときの横方向のヤング率の値はおおよそ $4 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ となる。なお軸方向のこのときの値は約 $4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ となる。この値は、セルロース鎖方向の結晶弾性率として理論的に、あるいは実験的に求められた諸数値の 1/2 ないし 1/3 にあたる。さらに、測定条件を厳密に規制した実験結果によると、動的測定と静的測定とで、 n の値は次のように多少異なる。

測定時間	半径方向	接線方向
60 kHz	1.19	1.77
60 Hz	1.17	1.73
10 秒	1.07	1.53
1000 秒	1.06	1.52

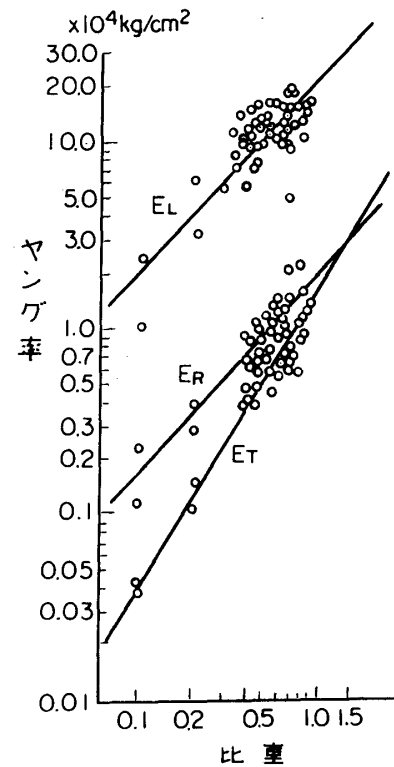


図 15

軸方向については、 $n=k=1$ となることはX線による結晶格子歪と表面引張歪との対応¹⁸⁾などよりみて妥当と考えられる。いま、半径方向と接線方向における n の値の差異について空孔配置より模型的な考察を試みる。図・16に示すような配置で、板に一定数の孔をあけ、その孔径によって比重を調節して、矢印の方向に負荷してみかけのヤング率を測定し n の値を求めると、同図、(a) (b), (c)の順序に大きくなって、上記の E_L, E_R, E_T の n 値の順に対応する。したがって、木材の横方向の弾性異方性はこのような空孔配置に伴う形態の差が重要な因子となっているものと考えられる。ある

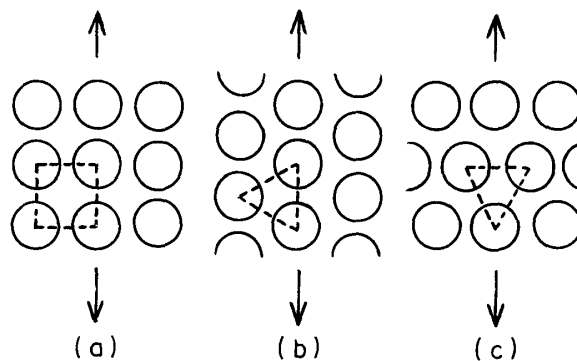


図 16

いは、これを図・13の double cell wall のY型要素の形態上の差におきかえることもできよう。

なお、天然の空孔と人工の空孔による n の値のちがいから壁の弾性率が同じなら、人工空孔では比重が小さい程著しく弾性率は低下してしまうので、人工のものは天然物に到底およばぬ事がわかる。このような欠点は近年のいわゆる合成木材の場合にそのまま通じるものである。

つぎに図・13にみるような細胞壁の構造に立脚してミクロ力学の観点から弾性率の複合則を考察する¹³⁾。

MARK は各層における骨格とマトリックスとに単純な直列ならびに並列模型を仮定して、*Juniperus* 材について例えば弾性常数を次のように与えている。

	$M+P$	S_1, S_2, S_3
E_L ($\times 10^4$ kg/cm ²)	15.671	73.704
E_T ($\times 10^4$ kg/cm ²)	2.251	4.015
G_{LT} ($\times 10^4$ kg/cm ²)	0.856	1.397
μ_{LT}	0.280	0.194
μ_{TL}	0.040	0.00998

ただし、骨格のヤング率：軸方向 1.37×10^6 kg/cm²

横方向 2.77×10^5 kg/cm²

剛性率： 4.49×10^4 kg/cm²

ポアソン比 0.10(LT), 0.011(TL)

マトリックスのヤング率 2.04×10^4 kg/cm²

剛性率 0.785×10^4 kg/cm²

ポアソン比 0.30

とおいた計算値である。

上表は、ミクロフィブリルの方向を L 軸、それに直角方向を T 軸にとっているが、実用の弾性常数は細胞の軸方向（これを x 軸とする）およびそれに直角方向（ y ）に関するものであるから、両者の関連を求めなければならない。それには、近年、FRP などの研究で常用されている以下の関係式を用いる。すなわち各層については、それぞれのミクロフィブリル傾角を ω とすると、弾性係数は¹⁾

$$\begin{aligned} \frac{1}{\bar{E}_x} &= \frac{\cos^4 \omega}{E_L} + \frac{\sin^4 \omega}{E_T} + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\mu_{LT}}{E_L} \right) \sin^2 \omega \cos^2 \omega \\ \frac{1}{\bar{E}_y} &= \frac{\sin^4 \omega}{E_L} + \frac{\cos^4 \omega}{E_T} + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\mu_{LT}}{E_L} \right) \sin^2 \omega \cos^2 \omega \\ \frac{1}{\bar{G}_{xy}} &= \left(\frac{1+\mu_{LT}}{E_L} + \frac{1+\mu_{TL}}{E_T} \right) \sin^2 2\omega + \frac{1}{G_{LT}} \cos^2 2\omega \\ \frac{\bar{\mu}_{xy}}{\bar{E}_x} &= \frac{\bar{\mu}_{yx}}{\bar{E}_y} = \frac{\mu_{LT}}{E_L} (\cos^4 \omega + \sin^4 \omega) + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} \right) \frac{\sin^2 2\omega}{4} \\ m_1 &= \left[\frac{\sin^2 \omega}{E_T} - \frac{\cos^2 \omega}{E_L} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\mu_{LT}}{E_L} \right) \cos 2\omega \right] \sin 2\omega \\ m_2 &= \left[\frac{\cos^2 \omega}{E_T} - \frac{\sin^2 \omega}{E_L} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\mu_{TL}}{E_L} \right) \cos^2 \omega \right] \sin 2\omega \end{aligned}$$

ここに、 m_1, m_2 は x, y 主軸方向に働く垂直応力によって剪断歪を生ずることに関連する係数である。

上式は、各層を一枚の直交異方性板とみなしたときの関係を示しているが、図・13にみるように、 S_1 層はたがいに対称に交叉する。いいかえると、大いさが等しくて符号を異にするミクロフィブリル傾角をもった等しい厚さの2層が接着して剪断が拘束された状態にある。このように剪断が拘束された場合の弾性常数は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\frac{1}{E_x} &= \frac{1}{\bar{E}_x} - m_1 \bar{G}_{xy} \\ \frac{1}{E_y} &= \frac{1}{\bar{E}_y} - m_2 \bar{G}_{xy} \\ \frac{\mu_{xy}}{E_x} &= \frac{\mu_{yx}}{E_y} = \frac{\bar{\mu}_{xy}}{E_x} + m_1 m_2 \bar{G}_{xy} \\ \frac{1}{G_{xy}} &= \frac{1}{\bar{G}_{xy}} - \frac{m_1(m_1 + m_2 \bar{\mu}_{yx})}{1 - \bar{\mu}_{xy} \bar{\mu}_{yx}} \bar{E}_x - \frac{m_2(m_2 + m_1 \bar{\mu}_{xy})}{1 - \bar{\mu}_{xy} \bar{\mu}_{yx}} \bar{E}_y\end{aligned}$$

繊維方向のヤング率と、 S_1 層および S_2 層の ω との関係は図・17のようになる¹⁴⁾。

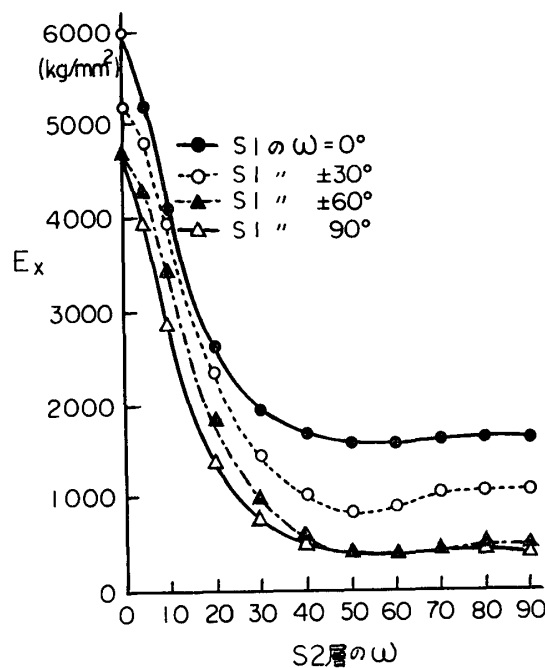


図17 (MARK)

最後に、細胞壁内の応力分布の計算例について簡単にふれよう。

MARK は (1) 各層は力学的に均質であって、系は Hook 則

$$\bar{\epsilon} = \bar{a} \bar{\sigma}$$

②

にしたがう直交異方性体であり、(2) 各層に設定されたすべての要素間にすべりは起らず、(3) 座屈も生じないという仮定のもとに各層に生ずる応力を求め、図・13の模型繊維を軸方向に引張ったときを平面応力問題として取扱い、完全な細胞について図・18のような結果を得ている。その後、TANG¹⁹⁾ は、これを立体応力問題として取扱った応力分布を求めている。このような単繊維の引張においては、上述の弾性率のところであつたように、 S_2 層などに剪断が生ずる。しかし、木材試片を引張るときは、このような単繊維の引張と異なり、double cell wall の集合の引張となる。double cell wall では、中間膜を対称面とした交叉積層構造を仮定しうるので、層間の接着が完全ならば、上記のような剪断はすべて拘束される。SCHNIEWIND はこのような模型に対する二次元応力解析を試み、表・2のモデルについて、表・3のような結果を算出している¹⁴⁾。表の値は、平均応力を基準にしたものであって、表には単繊維の計算例も比較されている。なお②式の弾性常数については、次のように与えられている。(単位は $\times 10^{-4}$ kg/mm²)

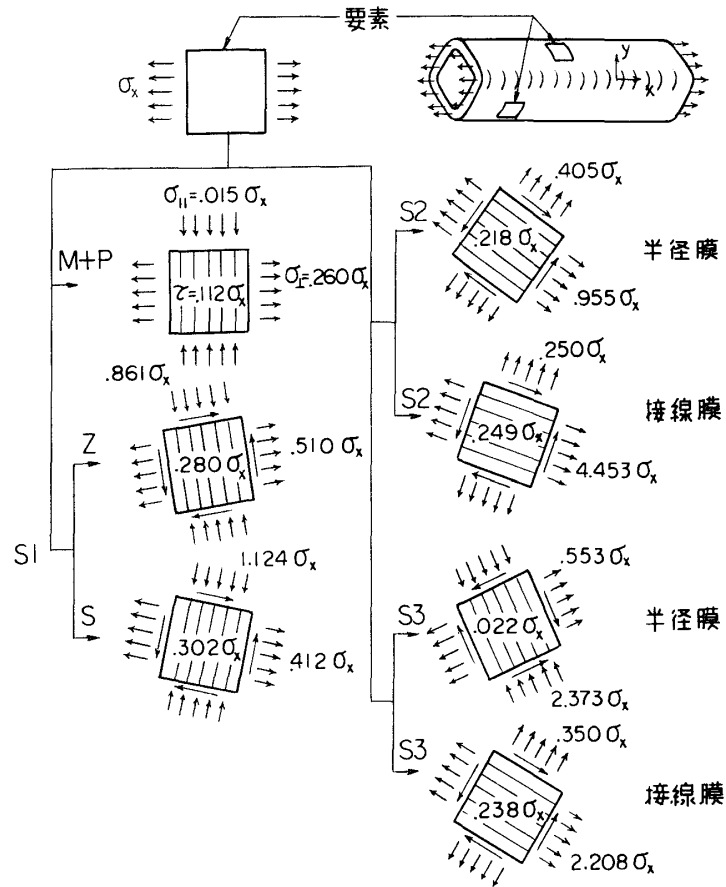


図18 (MARK)

表 3¹⁵⁾

		早材 (S)	早材 (D)	移行材 1	移行材 2	移行材 3	晩材 (S)	晩材 (D)
M+P	$\langle \sigma_{\parallel} \rangle$	-0.24	-1.20	-1.60	-3.15	-1.12	-0.26	0.34
	$\langle \sigma_{\perp} \rangle$	0.66	0.48	0.30	0.26	0.10	0.07	0.12
	$\langle \tau \rangle$	-0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.11
S ₁ (80)	$\langle \sigma_{\parallel} \rangle$	-1.03	-0.89	-1.38	-2.90	-1.03	-0.21	-0.55
	$\langle \sigma_{\perp} \rangle$	0.07	0.47	0.29	0.25	0.10	0.07	0.16
	$\langle \tau \rangle$	-0.04	0.07	0.05	0.06	0.02	0.01	-0.09
S ₁ (-80)	$\langle \sigma_{\parallel} \rangle$	1.30	-0.89	-1.38	-2.90	-1.03	-0.21	1.34
	$\langle \sigma_{\perp} \rangle$	0.59	0.47	0.29	0.25	0.10	0.07	0.08
	$\langle \tau \rangle$	-0.20	-0.07	-0.05	-0.06	-0.02	-0.01	-0.11
S ₂	$\langle \sigma_{\parallel} \rangle$	3.70	4.88	2.71	1.80	1.47	1.27	1.23
	$\langle \sigma_{\perp} \rangle$	0.47	0.21	0.10	0.04	-0.02	0.00	0.09
	$\langle \tau \rangle$	0.26	0.20	0.14	0.16	0.05	0.01	0.11
S ₃	$\langle \sigma_{\parallel} \rangle$	-0.97	0.01	-0.74	-2.17	-0.75	-0.07	-1.22
	$\langle \sigma_{\perp} \rangle$	0.69	0.43	0.26	0.21	0.08	0.06	0.19
	$\langle \tau \rangle$	0.05	0.13	0.09	0.10	0.04	0.02	-0.66

(S) : 単繊維の場合, (D) : 剪断を拘束した場合

	$\bar{a}_{11}$	$\bar{a}_{21}$	$\bar{a}_{31}$
早 材(S)	16.50	-0.49	9.31
〃 (D)	12.42	-1.75	0.0
移行材 1	7.80	-2.24	0.0
〃 2	7.20	-4.34	0.0
〃 3	2.77	-1.55	0.0
晩 材(S)	3.03	0.43	7.60
〃 (D)	1.79	-0.37	0.0

((S), (D) は表・3 と同様の意)

剪断拘束によっても、また S_2 層が厚くなることによっても軸方向に変形し難くなり、ポアソン効果がふえること、 S_2 層のマイクロフィブリル傾角の減少とともに、軸方向の変形も、ポアソン効果も、すべての応力比の値も減少すること、移行材2についてはアテ材に似た特異な様相を示すことなどがこれらの表から理解できよう。

以上に、弾性論にもとづく応力分布の計算例をみたのであるが、時間の経過が重要な因子となる固有応力問題や破壊機構の究明に発展させるためには、そのレオロジー的計算が必要となってくる。そのためには、微細構造と粘弾性量との対応に関する実験結果²⁰⁾の積み重ねと、直交異方性体の粘弾性理論²¹⁾の適用が求められるとともに、さらに、これらの要素模型の分布をどのように取扱うかの問題が残る。稿を改めて検討したい。

取急いだため、文献など書き残した点が多く機会があれば補いたい。なお、木材を樹幹という生体材料の材料設計の観点から眺めると、何故、ホロセルロースやリグニンという素材が選択されて用いられ、どのような情報にもとづいて構造が形造られてゆくのであろうかという素朴な疑問がわいてくる。公害をまきちらす合成材料の氾濫に思を致すとき、一刻も早く、このような機構が解明されて、そのシミュレーションによる材料開発が、自然の調和を保ちながら果されないものかと祈る思いでいる。

文 献

- 1) 林 毅, 複合材料工学 (1971).
- 2) G. TSOUKIS, Wood as Raw Material (1968).
- 3) 例えば 渡辺治人, 樹幹丸太の特性 (1967).
W. A. CÔTÉ, Cellular Ultrastructure of Woody Plants (1965).
V. A. BAZHENOV, Piezoelectric Properties of Wood (1961).
- 4) T. NOMURA and T. YAMADA, Wood Research, No. 50 (1971).
- 5) 竹内叔雄, 竹の研究 (1932).
- 6) G. A. GROZDITS and G. IFJU, Wood Sci., **1**, 137 (1969).
- 7) H. KÜBLER, Holz R. W., **17**, 1, 45 (1959).
- 8) J. D. BOYD and K. B. SCHUSTER, Wood Sci. Tech., **6**, 95 (1972).
- 9) P. P. GILLIS and A. K. BURDEN, Wood and Fiber, **4**, 95 (1972).
- 10) J. E. NICHOLSON, G. S. CAMPBELL and D. E. BLAND, Wood Sci., **5**, 109 (1972).
- 11) 原田 浩, 木材誌, **16**, 357 (1970).
- 12) M. H. ZIMMERMANN, The Formation of Wood in Forest Trees (1964).
- 13) R. E. MARK, Cell Wall Mechanics of Tracheids (1967).
- 14) E. A. JAYNE, Theory and Design of Wood Fiber Composite Materials (1972).
- 15) C. ZWICKER, Physical Properties of Solid Material (1954).
- 16) K. KRÖNER und L. PUNGS, Holzforsch., **6**, 13 (1952).
中戸莞二, 梶田 茂, 日林誌, **36**, 95 (1954).
M. NORIMOTO and T. YAMADA, Wood Research, No. 51 (1971).

- M. NORIMOTO and T. YAMADA, 木材誌, **16**, 364 (1970).
C. SKAAR, New York State College of Forestry, Tech. Pub., No. 69 (1948).
上村 武, 林試報, No. 119, 122 (1960).
17) 栖原二郎, 木材工業, **3**, No. 2 (1948).
A. YLIENEN, Holz. R. W., **12**, 253 (1954).
J. BOUTELJE, Holzforsch., **16**, 33 (1965).
金谷紀行, 山田 正, 木材研究, No. 41 (1967).
大釜敏正, 山田 正, 材料, **20**, 1194 (1971).
山田 正, 木材誌, **17**, 37 (1971).
P. P. GILLIS, Wood Sci. Tech., **6**, 138 (1972).
J. STUPNICKI, Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Eng. and Build. Construction Series, No. 53 (1968).
18) 祖父江信夫, 平井信之, 浅野猪久夫, 材料, **20**, 1181 (1971).
19) R. C. TANG, Wood and Fiber, **3**, 210 (1972).
20) 例えば M. LOTFY, E. EL-OSTA and R. W. WELLWOOD, Wood and Fiber, **4**, 26 (1972).
21) A. P. SCHNIEWIND and J. D. BARRETT, Wood Sci. and Tech., **6**, 43 (1972).