

木 材 の 粘 弾 性

山 田 正

Tadashi YAMADA.

Review on the Viscoelasticity of Wood

目 次

1. 序.....	158	5. 要 約.....	180
2. 荷重変形図と環境因子.....	160	文 献.....	181
3. クリープ, 応力緩和.....	163	Résumé	185
4. ヤング率と水分.....	173		

1. 序

木材が構築材や運動具家具などの材料として利用される場合にも, また人造板などの原料として加工される場合にも, その変形に時間の影響が著しくあらわれてくる場合が多い。

一方理論的には, 木材の変形は, 古くから弾性力学の発展とともに, 理論の妥当性を実証するための実験材料としてしばしば用いられてきたが, 近年, 時間を考慮に入れた材料の力学—Rheology—が発展するにつれて, 木材のこの分野に関する研究が色々の面から望まれるようになってきた。このレオロジーで取り扱われる

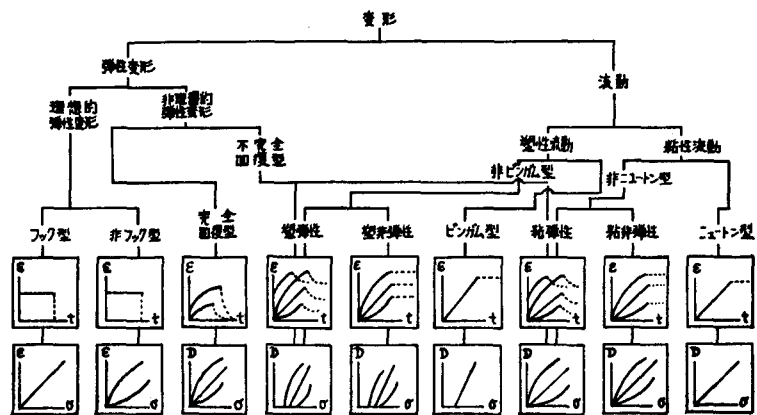
現象の中で最も重要なものの一つに粘弾性がある。

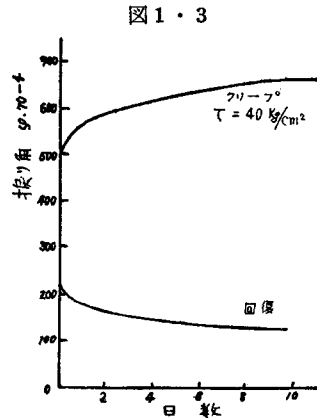
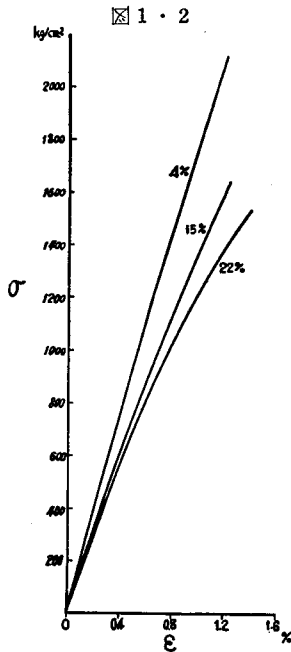
レオロジーとは物質の変形と流動に関する学問と定義されており, その対象となる現象は図1—1のように分類されている。図において σ は応力, ε は歪み, t は時間, D は歪み速度である。木材の応力—歪み図は例えば Esche (*Fraxinus excelsior* L.) の繊維方向の

引張では図1・2のようになる。⁴⁾ 図中の数字(%)は含水率をあらわす。また一定の応力の下では図1・3にみるような挙動を示す。同図は Fichte (*Picea excelsa* L.) の振りのクリープおよび回復を示し τ は剪断応力をあらわす。さらにまた, ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* S. et. z.) などの材の歪み速度 D と応力 σ との間には南により次の如き関係

$$D = a\sigma^{\beta + m} t^{\alpha m - 1} \quad (\text{ここに, } \alpha, l, \beta, m \text{ は定数}) \dots\dots\dots (1 \cdot 1)$$

図 1・1





が報告されており、また類似の式は木材について沢田の研究もある。⁶⁾ 今、木材が示すこのような挙動を図 1・1 を参照して分類するならば、木材は粘弾性体であることがわかる。

図 1・1 の分類図からも明らかに、粘弾性体の変形は弾性変形と流動の組合せよりなる。その中で弾性変形とは、外力の除去とともにもとの状態にもどる変形であって、その理想的な場合に対して、応力—歪み関係に Hooke の法則が成り立ち、弾性率が定義される。それは図 1・1 の左端の場合である。図 1・2 をみると、歪みの小さい範囲内では近似的に木材を弾性体とみなしうる。アカマツ (*Pinus densiflora* S. et. Z.), スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don), ヒノキ, ブナ (*Fagus Crenata* Blume.), カツラ (*Cercidiphyllum japonicum* S. et. Z.) などの材の縦圧縮における詳細な研究によれば、⁷⁾ 弾性限度は実用的には、おおよそ、圧縮強度の 3 割程度とされている。それよりもはるかに小さな変形の範囲で、木材をほぼ理想弾性体と仮定するとき、木材の弾性には異方性が存在する。すなわち、樹心から充分離れた位置で採られた欠点のない木材試片には、互いに直交する三軸、すなわち、繊維方向（これを L 方向とする）、切線方向（ T 方向）及び半径方向（ R 方向）が存在するが、これらを弾性の対称軸にとるべきことは、すでに 130 年も昔に気付かれていて、その後、木材は直交異方性弾性体として取扱われて、多くの研究がなされてきた。⁸⁾ その場合、木材の組織構造上の不均質性は無視されて、金属材料などと同様に等質連続性が仮定されていて、木材の弾性は 3 個のヤング率、3 個のポアソン比、3 個の剛性率によって特性づけられている。一方、外力により生じた変形が、外力を除去してももとにもどらないで、そのまま残るものがある。その理想的な場合を純粘性流動とよび、応力—流動速度に関する Newton の法則が成り立って粘性係数が定義され、流動図は原点を通る直線となる。このような関係を一般化して、物質の歪み速度 D と応力 σ とを比例関係におき、その係数を粘度とよぶことがある。

このように、流動を理想的な、層流に関するマクロ的な Newton の仮定をもとにして考えるのに対して、物質の流動をミクロな立場から眺めると、さきに Andrade は、流動抵抗を、ある層の分子が他の層へ熱振動しつつ移動し、その層中の分子と衝突して運動量を伝達するために生ずるものと

考えて、流体の粘度と温度との関係を論じているが、その後、Eyring は、流動を物体の中に分子または分子の一部（セグメント）が飛びこむことのできる空隙が存在するためであると考え、反応速度理論から粘性を明らかにしている。¹⁰⁾ すなわち、流動の要素過程はセグメントと空隙との位置交換であると考え、この交換過程の起る確率の計算から次の結果を得た。

$$D = K \sinh(\alpha \sigma) \dots\dots\dots (1 \cdot 2)$$

ここに K , α は温度などに依存する常数である。

上述の如く、木材は粘弾性を示し、しかもその大変形は図 1・2 や式 (1・1) あるいは次節にみるように、 $\epsilon - \sigma$ や $D - \sigma$ の関係は直線的でなく、取扱いが複雑となるので、その詳細は将来に期することとして、この綜報ではその基礎となる領域、すなわち、木材の比較的小さな変形の範囲で行われた静的および動の実験の結果の現象論的な表現とともに、上述の粘性流動を生ずる非晶領域の変形が木材の変形に与える寄与を考察することに重点をおくこととする。

2. 荷重—変形図と環境因子

材料が外力に対して示す抵抗を表示するのにいわゆる応力—歪み図を用いる場合が多く、条件を同じくしても材料の種類を異にするとその応力—歪み関係を異にする。木材の粘弾性研究の究極の目的はこの関係を木材の構造にもとづいた理論によって明らかにすることにあるが、その道はまだ遠い。¹²⁾⁽¹⁸⁾ しかし実験的に多くの研究がなされていて、⁴⁾⁽⁷⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ 厳密には批判があるが、¹⁸⁾⁽¹⁹⁾ 大体において比例限度の存在することや明瞭な降伏点をもたないことなどは明らかであり、またそれらの数値的な表現も試みられている。しかし実験には多く容量の大きい万能試験機が用いられ、試験片の形状は比較的大きく、かつ、ほとんど荷重速度一定の実験条件が採用されている。

これに対して木材の物性を明らかにする目的では、小試験片によることが必要な場合が多く、それには小さな荷重を精密に記録し、また、同一試験機で静的粘弾性の測定が行え、さらに、理論的な解析に好都合な一定変形速度の条件下で、環境因子をかなりの精度で制御しながら荷重—変形図を求めることの出来る小型試験機の使用が好都合である。このような目的をもって作製した小型試験機²⁰⁾の原理は、試片の中央に集中荷重を加える曲げ試験によるものであって、加力はスプリングの伸縮による。すなわち、支点上下動用直流モーターを駆動して支点を下降させて試片を撓ませると、接点の可動側の方が下降して固定側の方との間に隙間を生ずる。するとリレーの作動によりスプリング伸縮用直流モーターは、リレーの作動により逆転して荷重を小さくする。これをくりかえして与えられた撓みと平衡を保つもので、ここに曲げ荷重を選んだ理由は、実験上測定が容易であり、微小な弾性歪みの測定精度が高いなどの利点があって、小変形を対象とする研究には有利なためである。なお曲げ式導出の際に用いられる Bernoulli-Euler の仮定は Douglas-fir (*Pseudotsuga taxifolia* Britt.)²¹⁾ の矩形断面梁における伸縮歪みの測定から、木材においてはほぼ成り立つことがあきらかにされている。なお本実験で用いられる中央集中荷重をうける梁の撓みに及ぼす剪断力の影響は $\frac{E}{G} = 20$, $\frac{h}{l} = 80$ ととって約 0.4% となりほとんど無視出来る。

なおこの試験機では応力緩和やクリープの測定も容易であり、かつ測定方法が機械的である故、測定中における条件の変化の影響がみられないことや、従来の試験機では温度湿度その他の条件が試料に及ぼす影響を観察するのに不便な点を改良していることなどの利点がある。この試験機による荷重の方法は中央集中荷重である。これに対して片持梁で曲げのクリープ実験を行うには天秤が用いられる。すなわち、クランプで水平に保持された試片の自由端を天秤（感度 10 mg）の一端から吊されたフックによって吊り上げ、天秤の他端に一定の重量を載荷して自由端の変位量を読取顕微鏡（精度 1/100 mm）で読みとるものである。また曲げ応力緩和を片持梁で行うには Guth らがコルクの圧縮

実験に用いた方法²³⁾に類似の鎖天秤法によった。なお試料についてふれておくと、実験試料として屢々ブナやヒノキなどが用いられるが、これらの材が用いられた理由は単にわが国で使用されている主要な樹種であるということの外に、木材の物性の中でも特に重要な吸湿膨脹性について検討した結果が本邦産主要樹 37 種の中でほぼ標準型の挙動を示すことが明らかのためである。すなわち、全乾比重 r_0 なる木材の吸湿歪み、係数(含水率 1% 変化に対する膨脹収縮量)を β とするとき、 β は含水率 20% 辺り迄は一定値をとる。 β の値をこの範囲から定めるとき、 β と r_0 との比は

$$\frac{\beta}{r_0} = 1 + \delta$$

とおくことが出来る。そして $\delta = 0$ ($\beta = r_0$) とは、木材中に吸収された水分容積量だけがそのまま木材の外形(容積)変化量となってあらわれることを意味し、 $\delta < 0$ ($\beta > r_0$) とは木材の外部容積変化量は吸収水分量よりも小さいことをあらわし、 $\delta > 0$ とは逆に、吸収量よりも大きく膨脹することを示すものである。

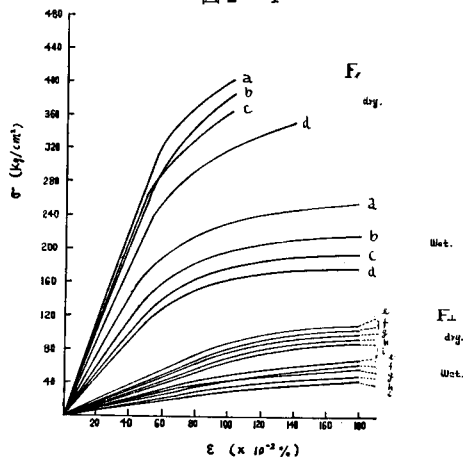
堀岡、宮部らの主要樹 39 種の測定結果から δ と r_0 との関係を求めると、ブナやヒノキでは $\delta \div 0$ 、バルサでは $\delta = 1.23$ ²³⁾、アカガシでは $\delta = -0.34$ になる。なお、Keylwerth の報文では $\delta = -0.16$ という値の報告がある。吸湿量と膨脹量との間にこのような差異を生ずる原因については既に考察したが、要約すれば巨視的構造の因子と微視的構造の因子とが考えられ、後者については非結晶領域にある糸状分子間の凝集状態に関係するものと考えられる。この凝集状態が木材の粘弾性挙動を支配するのであるが、それがヒノキ、ブナなどの材では木材の平均的な性質を示すわけである。したがって、木材の粘弾性の研究にこれらの材を試料に選ぶことは適当と考えられる。

さて、荷重-変形図と環境因子のデータを求めよう。木材の荷重-変形図に影響する外界因子には荷重速度、水分及び温度があげられる。これらについて一瞥する。

i) 荷重速度の影響、木材の強度と荷重速度との関係については研究がなされており、また荷重速度が応力-歪み図に及ぼす影響についても繊維質材料について研究が多い。^{32,33)} ブナ材圧縮応力-歪み曲線に及ぼす荷重速度の影響は図 2・1 のようになり、速度が小さくなるほど曲線は歪みの座標軸に近づく。図中の記号 $F_{\parallel}$ は荷重が繊維方向、 $F_{\perp}$ は半径方向であることを示し数字は荷重速度の値である。

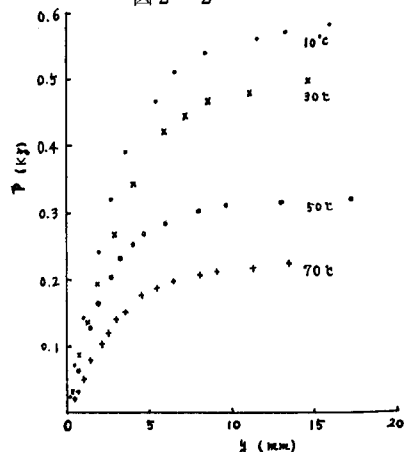
ii) 水分及び温度の影響、木材中の水分が応力-歪み図に及ぼす影響については研究も多く、特に含水率が高い領域に近づくとき応力-歪み曲線は例えば前出の図 1・2 にみるように、含水率増化とともに歪みの軸に近づく。一方、温度の影響をみるため

図 2・1



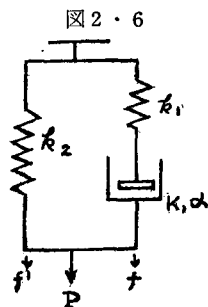
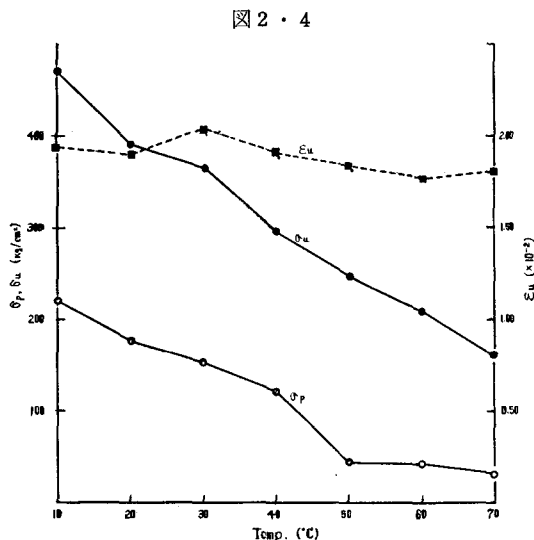
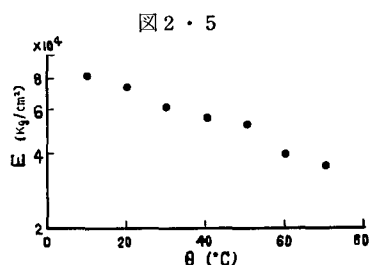
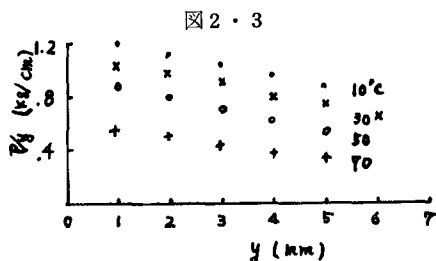
荷重速度 a : 500 kg/min f : 150 kg/min
 b : 100 " g : 30 "
 c : 10 " h : 3 "
 d : 1 " i : 0.3 "
 e : 300 "

図 2・2



に、図2・1—1の装置により試片を恒温水槽中に浸したまま飽湿状態のブナ材繊維方向の曲げ荷重(P)—撓み(y)曲線を求めた結果は図2・2のようになる。試片寸法は高さ(半径方向)0.1cm, 巾(切線方向)1.0cm, スパンは7.20cm, 撓み速度は0.0164cm/分, 弾性式により歪み速度に換算すると0.019%/分である。その平均全乾比重0.57, 年輪密度は6/cmである。

図は各温度10個づつの試片による結果の中で平均的な曲線を求めたものである。これを Hodgkinson の二定数則式によってあらわすと $\frac{P}{y}$ vs y は図2・3のようになる。また破壊係数 σ_u , 比例限度 σ_P および破壊歪み ϵ_u を温度 θ に対してプロットすると図2・4のようになり, 周知の気乾材や全乾材にみられるのと同様の傾向を示す。曲げヤング率 E の対数と温度 θ との関係は図2・5のようになって $d \log E / d\theta = 0.0063$ である。図2・2からも明らかなように荷重—撓み曲線は最初は急な傾斜で始まるが, 外力が大きくなると次第に曲って, 最後に最小の傾斜をもって流動する。この



ような挙動を Eyring らは2個のスプリングと1個のダッシュポットよりなる三要素模型を用いて解析し, 応力—歪みの関係式を誘導している。図2・6において, l なる歪みを生じた模型にかかる全荷重 P は, 左側のスプリングおよび, 右側のスプリングとダッシュポットよりなる要素とに分配される。それぞれのうけもつ力を f' 及び f とすると $P = f' + f$ である。今左側のスプリングの定数を k_2 とすると $f' = k_2 l$ となる。また, ダッシュポットの歪み量を l_1 , ダッシュポットにつらなるスプリングの定数を k_1 とすると

$$f = k_1(l - l_1)$$

となる。歪みを加え始めた瞬間にはダッシュポットは未だ動き始めない故

$$\left(\frac{dP}{dl}\right)_{\text{initial}} = k_1 + k_2 \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

また右側の要素が充分緩和してしまった状態では歪みをうけもつ力は主に左側のスプリングによることになり

$$\left(\frac{dP}{dl}\right)_{\text{final}} = k_2 \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

となる。図2・2の曲線から求めた k_2 vs θ は図2・7のようになる。また $t \rightarrow \infty$ のときの f の値

を a とするとき $a v_s \theta$ をプロットして同図の中に示す。すると図 2・6 のようになる。ダッシュポットが Eyring 粘性にしたがうとすると、応力-歪み関係式は

$$f = \frac{\ln \left\{ \frac{1 + \frac{1+\beta}{\sqrt{1+\beta^2}} \tan h A t}{1 + \frac{1-\beta}{\sqrt{1+\beta^2}} \tan h A t} \right\}}{\ln \left\{ \frac{1 + \frac{1+\beta}{\sqrt{1+\beta^2}}}{1 + \frac{1-\beta}{\sqrt{1+\beta^2}}} \right\}} \dots\dots (2-3)$$

$$\tan h A = \frac{\sqrt{\left(\frac{1+\beta}{\sqrt{1+\beta^2}}\right)\left(\frac{1-\beta}{\sqrt{1+\beta^2}}+1\right)}-1}{\left(\frac{1+\beta}{\sqrt{1+\beta^2}}+1\right)\left(\frac{1-\beta}{\sqrt{1+\beta^2}}+1\right)-1}$$

とおくとき P を荷重速度, t を時間とすると

$$P = k_2 l + f = k_2 p t + f \dots\dots\dots (2-4)$$

となる。図 2・4 から β の値を求めると表 2・1 のようになる。 β の値は完全弾性体では ∞ であり Newton 粘性の場合は無限小となることと比較するとこの領域における流動が温度上昇とともに活潑になることがわかる。なお同表において f_2 は t_2 のときの f の値である。

以上の結果を要約すると、木材の荷重-変形関係に影響する環境因子すなわち、時間、水分及び温度は何れも他の繊維材料にもみられるように類似の効果を示すことが分る。後に述べるように、合成高分子試料については条件によって温度-時間の換算や、水分-時間の換算或いは荷重-時間の換算が行われているが、木材についても結果は複雑となろうが、同様の観点からの研究が期待される。

図 2・7

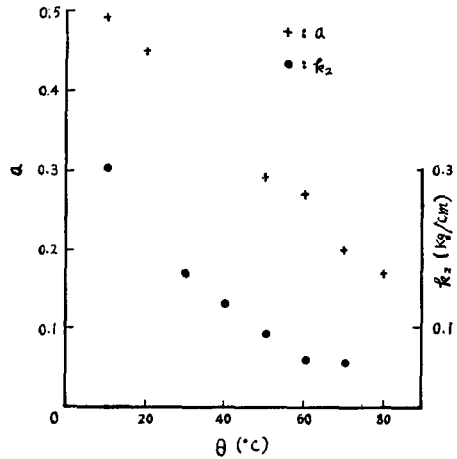


表 2-1

温度(°C)	f_2	β
10	0.82	7
20	0.83	9
30	0.80	4
40	0.82	7
50	0.82	7
60	0.82	7
70	0.80	4
80	0.79	3

3. クリープ, 応力緩和

3・1 クリープ

木材のクリープについては、早く 1880 年頃から研究がなされているが、比較的長期に亘る実験は少ない。その中、例えば Campredon は Beech (*Fagus grandifolia*) 気乾材の曲げを 6 カ月にわたり測定しているが、さらに、Kingston らは曲げ破壊係数の約 45% の応力をうける Tasmanian oak (*Eucalyptus regnans*) の曲げについて、撓みが負荷後 1 年ではほぼ定常になる例を見出しているが、(プラスチックでは定常状態のあらわれないことが報告されている。) また balsa (*Ochroma spp*) の曲げについてなされた実験結果によると、stress level 58% の初期荷重のときには、ある有限時間の後に撓みの増加は止まるが、66% になると撓みは時間の経過と共に逆 S 字型曲線を描いて急に増大してついに破壊する。また木材の比較的大きな変形のクリープ挙動には水分や温度の影響が著しい。なおクリープ破断時の歪みの大いさは red oak (*Quercus rubra*) の横引張りにおいてせいぜい数% であるが、時には、生材の場合でさえも歪みが 1.5% 余りで破壊する例がある。

このように、クリープの現象のあらわれる状態は測定が比較的容易であるが、クリープそのものを厳密に定義することは困難である。しかし変形の回復性、非回復性をとわず、物体に一定の荷重を加えた時の全変形の増加と考えるのが妥当のようであるが、その代りこの定義による場合は物理現象と

しての厳密な解析が困難になる。金属について Orowan は creep を creep strain と sudden creep の和よりなるとしている。高分子物質については Leaderman は瞬間弾性歪みと（第）1次クリープ（遅延弾性歪み、弾性余効歪み）（第）2次クリープ（永久歪み、残留歪み）の和より成るとしている。その中で瞬間弾性歪みの大きさを厳密に定めることは実験上困難であるので、負荷後1分の時の歪みを基準にとり、その後の1次クリープを関係余効歪み（relative deformation）とよんでいる。⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾

木材材料の永久歪みについては比較的に研究が多い。その結果によると、たとえば繊維方向の引張について、応力レベルで30%以上の初期荷重を加えると永久歪みがあらわれてきて、その大きさは荷重の増加とともに増加している。⁽⁴⁷⁾ 繊維方向で永久歪みのあらわれ始めるこの stress level の値は、前にふれた木材の横圧縮の場合の比例限度の値とほぼ一致していて、後に述べる如く木材の粘弾性が線型を示す限度を示す値と考えられる。

クリープの実験式には power 則（ t^n 則）や $\log t$ 則があり、木材についてもこれらの実験式の適用が試みられている。⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾ またこれら兩則相互間の関係も論じられているが、⁽⁵⁰⁾ さらにプラスチックでは $\sinh$ 式も出されている。⁽⁵¹⁾ しかし、普通に測定がなされる長時間にわたるクリープのデータは上述の単純な power 則や $\log t$ 則のみであらわされる場合は少く、両者を組合わせた式が用いられることがある。⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾

ブナ気乾材試片の半径方向の曲げについて実験を行った結果、小さな荷重範囲内では室温 1000 分までのクリープに次の実験式が適合することがわかった。⁽⁵⁴⁾

$$\epsilon = (a + bt + ct^n)\sigma \dots\dots\dots (3-1)$$

ここに a , b , c , n は常数, σ は応力である。

なおこのように応力が小さい範囲ではクリープ歪みが応力に比例することは Douglas-fir などの引張や圧縮でも大凡認められている。⁽⁵⁵⁾

比較的小さな荷重の範囲内では上式にみるようにクリープは応力に比例する。すなわち線型であるが、さらにクリープに及ぼす荷重の影響を吟味するために、Leaderman は scale factor の概念を導入している。⁽⁴⁵⁾ それは負荷後 90 分の時の関係余効歪みを意味し、これと応力との関係を種々の繊維について吟味している。飽湿ブナ及びヒノキ材木口試片半径方向の片持梁についてこの関係を求めて行った実験の結果、小荷重の範囲ではほぼ直線性が成立する。また King が red oak 材などの繊維方向の引張のクリープについて、負荷後 30 分の時の歪みと 2 分の時の歪みとの差 $\Delta\epsilon$ と応力との関係を求めた結果は Stress level 30% 以下では直線になるが、それ以上では指数函数的関係を示す。同様の傾向は Bass wood, Douglas-fir など数種の材にもみられている。⁽⁶¹⁾ このような小さな応力の範囲内では、前に述べたように永久歪みはあらわれないからクリープ歪み $\epsilon(t)$ は瞬間弾性歪みと遅延弾性歪みの和となるが、それを次のようにあらわすのが通例である。⁽⁶²⁾

$$\epsilon(t) = k(t)\sigma_0$$

ここに σ_0 は $t=0$ から加えられた一定の応力の値であり、 $k(t)$ はクリープコンプライアンス (Creep compliance) とよばれる。(その変形様式による記号については後表 3・4 を参照すること)

したがって上式は

$$y = j \cdot k(t)\sigma \dots\dots\dots (3-2)$$

とあらわすことが出来る。 j は形状係数である。ブナ材半径方向の伸縮については、気乾試片で上式が適合することは前述した所から明らかであるが、湿潤状態でも適合することが表 3・1 から分る。さらに同表から明らかなように 1000 分迄のクリープ実験から求めたコンプライアンス $D_0 t$ と、その後回復させたときのコンプライアンス $D_r(t)$ とはほぼ一致する。線型物質のクリープをこのようにクリープコンプライアンス $k(t)$ を用いて表す時は後述の遅延スペクトルを求めたり、またクリープ以外の粘弾性挙動を推定したりするのに好都合である。なお温度及び水分の影響を図 3・1 及び表 3・2

表3-1 $Dt \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{kg}$

$P(\text{g})$ $t(\text{秒})$	2		6		14		18	
	$D_c(t)$	$D_r(t)$	$D_c(t)$	$D_r(t)$	$D_c(t)$	$D_r(t)$	$D_c(t)$	$D_r(t)$
10	1,666	1,648	1,831	1,793	1,754	1,748	1,724	1,709
30	1,729	1,713	1,867	1,824	1,786	1,787	1,757	1,744
60	1,746	1,729	1,886	1,847	1,811	1,807	1,790	1,776
120	1,787	1,762	1,923	1,875	1,844	1,846	1,839	1,816
180	1,794	1,778	1,949	1,900	1,870	1,869	1,859	1,839
240	1,818	1,786	1,960	1,920	1,884	1,885	1,883	1,858
300	1,834	1,794	1,977	1,931	1,897	1,898	1,899	1,871
360	1,850	1,802	1,989	1,939	1,910	1,909	1,914	1,886
420	1,850	1,810	1,994	1,948	1,922	1,917	1,927	1,895
480	1,873	1,810	2,002	1,962	1,933	1,924	1,937	1,902
540	1,891	1,828	2,016	1,964	1,942	1,928	1,949	1,907
600	1,891	1,828	2,022	1,970	1,948	1,932	1,960	1,914
1200	1,915	1,859	2,077	2,028	2,009	1,978	2,037	1,968
1800	1,947	1,884	2,110	2,048	2,053	2,000	2,082	1,998
2400	1,961	1,884	2,134	2,065	2,086	2,014	2,127	2,019
3000	1,969	1,900	2,156	2,077	2,122	2,029	2,157	2,034
3600	1,977	1,900	2,173	2,088	2,146	2,041	2,194	2,047
4200	1,985	1,907	2,182	2,091	2,164	2,049	2,219	2,058
4800	1,993	1,915	2,192	2,102	2,181	2,055	2,243	2,064
6000	2,010	1,938	2,204	2,105	2,210	2,066	2,289	2,075

 $D_c(t)$: creep compliance $D_r(t)$: recovery compliance

に示す。このように気乾材と湿潤材では Compliance に著しい差があるが、関係湿度70%以下ではクリープ曲線に及ぼす湿度の影響は小さい。このことは動的な対数減衰率が含水率10%以上になって急に増し始めることと対応していて、time scale に関せず同様の影響をもつことを示している。 $(k(t)$ と $\tan \delta$ との相互換算式は後表3・4参照)

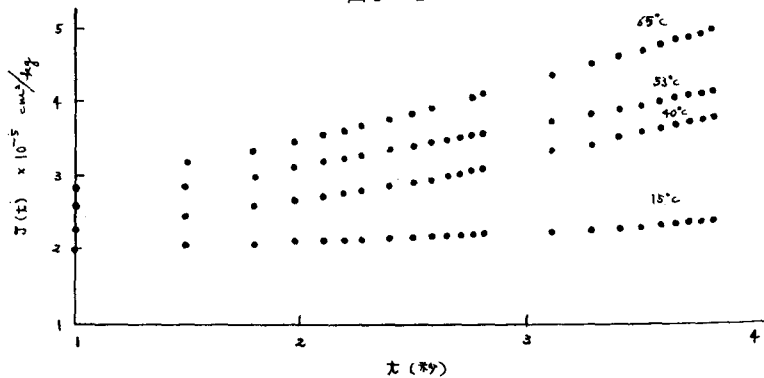
3・2 重ね合わせの原理

前節には過去のある時刻から現在まで、常に一定の荷重をうけた場合の木材の変形の概念を得たが、一般に材料の過去の履歴が現在の変形にどのようにあらわれるかを知ることが重要である。この問題を Boltzman は物体の小さな弾性変形の場合について、明らかにしている⁶⁴⁾。Leaderman は物質の変形が重ね合わせの原理にしたがうかどうか、したがって、線型粘弾性を示すかどうかを短時間で試験する方法を提案し数種の繊維について実験を行っている^{45, 68)}。同じ方法による室温湿度75%の時のプ

表3-2

t (秒)	$D(t)$ (気乾材)		$D(t)$ (湿潤材)	
	繊維方向 $\times 10^{-5}$ cm^2/kg	半径方向 $\times 10^{-4}$ cm^2/kg	繊維方向 $\times 10^{-5}$ cm^2/kg	半径方向 $\times 10^{-4}$ cm^2/kg
10	1.25	1.40	2.01	2.84
30	1.26	1.43	2.06	2.90
60	1.27	1.45	2.10	2.95
90	1.27	1.46	2.12	2.98
120	1.28	1.47	2.13	3.01
150	1.28	1.48	2.14	3.03
180	1.28	1.49	2.16	3.04
240	1.29	1.49	2.17	3.05
300	1.29	1.50	2.18	3.07
360	1.30	1.50	2.19	3.09
420	1.30	1.51	2.20	3.10
480	1.30	1.52	2.21	3.12
540	1.30	1.52	2.21	3.12
600	1.30	1.52	2.22	3.13
1200	1.31	1.56	2.26	3.19
1800	1.32	1.58	2.29	3.24
2400	1.32	1.58	2.30	3.27
3000	1.33	1.59	2.33	3.30
3600	1.33	1.60	2.34	3.31
4200	1.34	1.60	2.35	3.33
4800	1.34	1.61	2.37	3.35
5400	1.34	1.62	2.38	3.37
6000	1.35	1.62	2.39	3.38

図3・1



ナ材の曲げにおける実験例は図3・2のようになる。

材料の変形が重ね合わせの原理にしたがうとき、時間 t_i ($i=1, 2, 3, \dots$) において物質に加わる力が階段的に $\Delta\sigma_i$ だけ、或は極限して連続的に変ると考えればクリープの測定結果から、応力-歪み関係式を求めることができるわけで、木材については⁽⁶⁵⁾ 荷重速度が小さくなるほど直線関係からずれて応力-歪み図は上に凸な曲線となる。

3・3 力学模型

前節に述べた如く、木材の変形には、それが比較的小さな変形であっても、瞬間弾性的なものと流動的なものが組合さっており、その様相は試片自身の条件の外に温度や湿度などでいろいろと異り、数式的な表現は非常に複雑となる。従ってこれを理解しやすい形で一般的に記述しうる概念の導入が要求される。

序章において物質のレオロジー的な性質の分類にふれたが、木材の変形には前述のようにクリープ回復の現象が存在し、かつ、クリープ速度 D と応力 σ との間には式(1-1)の関係が存在する故木材は粘弾性体であることがわかる。物質の実際の粘弾性変形は多くの場合非線型であるが変形が微小な時は近似的に線型を仮定して論ずる。その限界の応力(σ)および歪み(ϵ)は大体次表の⁽³⁷⁾大きさとされている。

前述のように木材の変形が小さい範囲内では

- i) 応力-歪み図が直線となり、
- ii) scale factor は応力にはほぼ比例し、
- iii) 重ね合わせの原理が非常に粗い近似において成立する。

故にこの変形は線型の粘弾性挙動を示すと考えてよい。線型粘弾性体の力学的挙動を直観的に把握するには周知の力学模型⁽⁶²⁾⁽⁷⁶⁾を用いるのが便利である。Kollmann は木材のレオロジー⁽⁶⁹⁾的な性質をマクスウェル模型とフォークト模型を直列に結合した模型で定性的に説明している。しかしこのような取扱いによって定量的な記述を試みるには多くの要素を考える必要があるばかりでなく、たとえ実験結果に⁽⁶²⁾あうように模型を選んでも必ず等価なものが存在していて、分子論との対応が一義的に定まらない。さらに木材などでは、その構造の複雑さから推しても明らかなように、クリープの原因となる分子の熱運動の規模の大小に著しい差異がある故、小数の遅延時間を与えた多要素模型でクリープ曲線を説明しようとするには無理がある。むしろ遅延時間 τ の値は無限に小さいものから、無限に大きいものまで連続的に分布していると考えた方が真に近い。そして遅延時間の分布の形がその物質の粘弾性挙動を特性づけていると考えるのである。すなわち遅延時間の分布——これを遅延スペクトルともよぶ——は、弾性体を特性づける弾性率、粘性体を特性づける粘性率と同様の意義をもつものである。

さて、遅延時間 τ_i が連続的に分布しているとすれば、遅延時間が τ と $(\tau+d\tau)$ との間にあるフォークト要素の受け持つ歪みは $\epsilon(\tau)d\tau$ とあらわされる故全歪み ϵ は

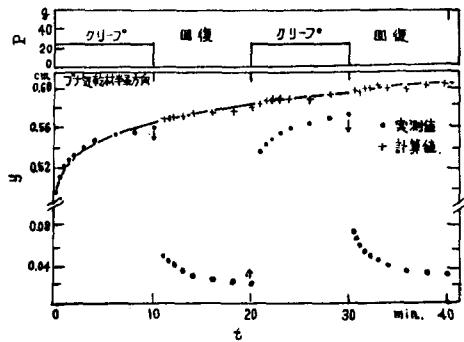
$$\epsilon = \int_0^{\infty} \epsilon(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

という形であらわすことができる。このように一般化されたフォークト模型では次式

$$k(t) = \int_0^{\infty} k(\tau) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) d\tau \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

は creep compliance であり $k(\tau)$ は遅延時間分布とよばれている。遅延時間分布の近似的な求め方

図3・2



	プラスチック	繊維	ゴム
σ (kg/cm ²)	10~100	~ 100 ~	10~100
ϵ (%)	0.1~ 1	~ 1 ~	10~100

図 3・3(a)

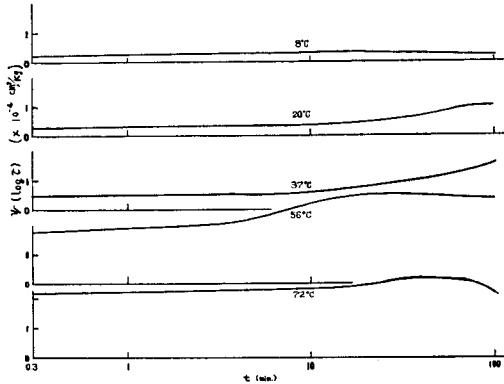
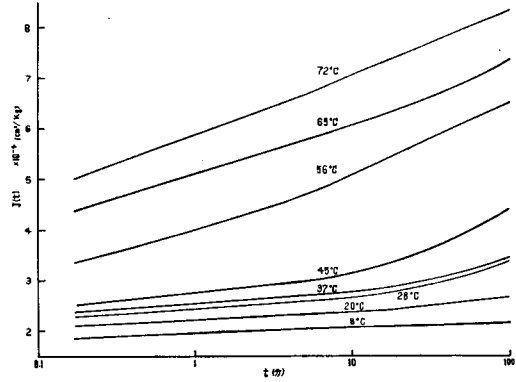


図 3・3(b)



の一つは compliance 曲線の第 1 次微分を求めるものである⁷⁰⁾。このようにして求めた湿潤ブナ材の限られた測定時間に対応する範囲内における分布の模様を示すと、図 3・3 のように温度上昇とともに次第に遅延時間の分布は短時間の側へ移行する。

木材の変形が大きくなると、もはや線型挙動を示さなくなる。非線型の力学模型にはバネの非線型性を仮定する場合と、ダッシュポットの非線型性を仮定する場合とがある。後者は繊維のレオロジー的性質の解明に貢献する処大であり、木材のクリープについてもその適用が試みられているが、線型粘弾性について考究するこの綜説では木材の大変形には触れない。

3・4 応力緩和

以上にみるように、温湿度条件が一定である木材の力学的状態は、応力 σ 、歪み ϵ 及び時間 t によって定まる。すなわち

$$\epsilon = f(\sigma, t)$$

である。さらに歪み一定の場合には上式から

$$\frac{d\sigma}{dt} = - \frac{\frac{\partial f}{\partial t}}{\frac{\partial f}{\partial \sigma}} = - \frac{\frac{\partial \epsilon}{\partial t}}{\frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma}}$$

とあらわせる。しかるに $\frac{\partial \epsilon}{\partial t} > 0$, $\frac{\partial \epsilon}{\partial \sigma} > 0$ であるから、 $\frac{d\sigma}{dt} < 0$ とならなければならない⁸⁶⁾。これは一定歪みを保つに要する応力が時間とともに減少しなければならないことを示す。

応力緩和の実験式にも、クリープの場合のように、 $\log t$ 則や power 則があるが、普通、線型物質の応力緩和の一般的表現には以下に述べるところの緩和弾性率が用いられている。

図 3・4(a)

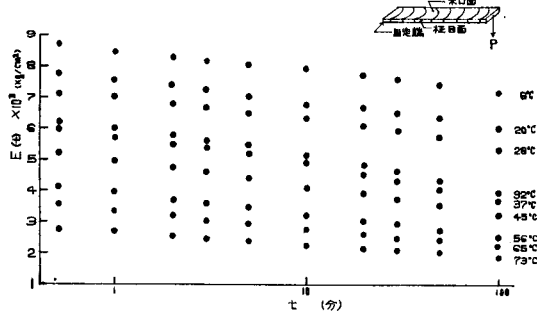
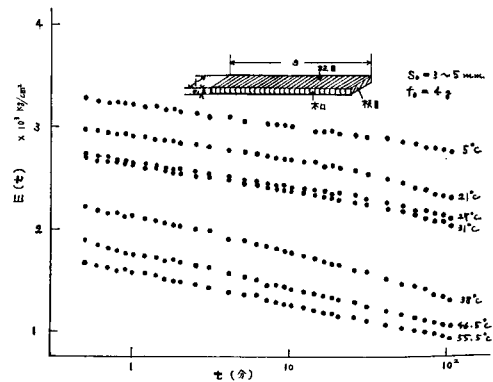


図 3・4(b)



今一定歪みを ϵ_0 とすると時間 t における応力 σ を

$$\sigma = \epsilon_0 \cdot m(t) \quad \dots\dots\dots (3-5)$$

と与えたとき、式中の $m(t)$ を緩和弾性率という。それは温度湿度などの条件が一定であるときは、時間 t のみの函数であって、物質に特有の形を示す。

緩和弾性率に及ぼす一定の初期歪みの影響をブナ湿潤試片について実験した結果、⁶⁰⁾ 前述の creep compliance と同様に実験の範囲(歪み1%以下)ではほとんど撓み量に依存しない。又、その温度による変化は図3・4のようになる。

3・5 緩和スペクトル

線型粘弾性体の力学模型において Maxwell 模型は弾性要素と粘性要素の最も簡単な組合わせ方の一つであって、実際の複雑な粘弾性の応力緩和現象を満足に説明できないのが普通である。それでこれらを数個結合した模型が提案された。しかし前述したように、そのような模型は定量的な記述の方法としてはあまり意味がない。

一般化されたマクスウェル模型において緩和時間 λ の連続分布を考えると $m(t)$ は

$$m(t) = \int_0^\infty m(\lambda) e^{-\frac{t}{\lambda}} d\lambda \quad \dots\dots\dots (3-6)$$

で与えられ、⁶²⁾ $m(\lambda)$ を遅延時間分布とよぶ。瞬間弾性率は上式で $t \rightarrow 0$ とおいて次式であたえられる。

$$m(0) = \int_0^\infty m(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots\dots (3-7)$$

これは一般化されたマクスウェル横型を構成する各緩和要素のスプリングの弾性率の総和を意味し $m(\lambda)d\lambda$ は緩和時間が λ と $\lambda+d\lambda$ との間にある緩和要素の弾性率 $m(\lambda)$ の瞬間弾性率 $m(0)$ への寄与を示す。なお木材などの緩和時間分布は非常に長い λ の範囲にわたる故、 $\log \lambda$ についてスペクトルを考察する方が便利であり、記号は H を用いて普通には $H(\log \lambda)$ を緩和スペクトルとよんでいる。^{35,36)}

緩和弾性率曲線から近似的に緩和時間の分布を求めるには種々の方法がある。^{91)~93)} その最も簡単なものは Alfrey 近似とよばれるものであって、それは緩和曲線の各時間における勾配から求めるものである。この方法によって求めるとブナ湿潤材の限られた時間範囲におけるスペクトル曲線の形は低温では長時間側に増大の傾向をとるが、高温では逆の傾向を辿る。(図3・5—(a)(b) a, bは夫々図3・4—(a)(b)に対応) さらに、長時間にわたる測定の結果の図3・6から明らかなように、緩和スペクトルは温度上昇とともに短い時間の方へ移動する。さらに測定時間が(0.5~100分)の領域では 32°C

図3・5(a)

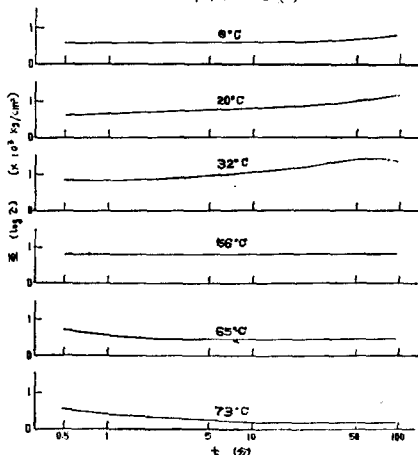


図3・5(b)

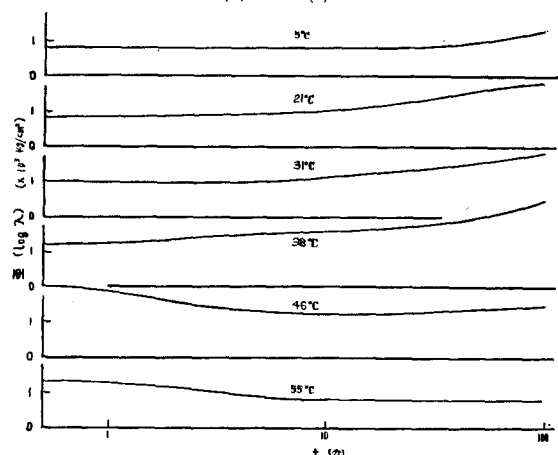
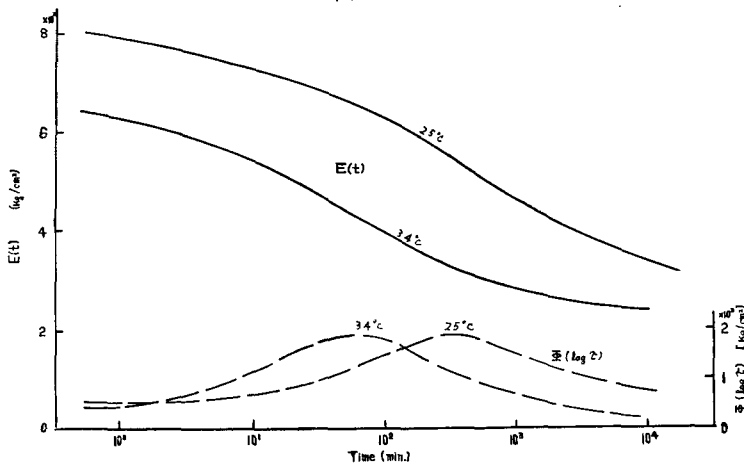


図3・6



温度をかえて多くの測定を行い、得られた曲線群を左右に対数時間軸に沿ってずらし広いタイムスケールの範囲を覆う合成曲線を描くことのできる場合がある。これを合成緩和曲線という。そのとき曲線を水平に移動した距離 a_T を移動係数とよぶ。もしこの移動が完全に行うことが出来れば a_T から次式によって、変形のみかけの活性化エネルギー E を求めることができる。

$$E = R \frac{d \ln a_T}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \dots \dots \dots (3-8)$$

ここに R は気体恒数、 T は絶対温度である。

図3・4—a, bの緩和曲線を基礎にして、基準温度を28°Cにとりこの移動を試みた結果が図3・7である。結果は平行移動した各曲線が連続して一本になることはなく、各曲線の一端又は両端で枝が出る現象がみられる。なおこのときの $\frac{a_T V S}{T}$ を図3・8に示す。なお図3・6のB曲線を強いて平滑化して、粗近似でスペクトルを求めたものが図3・9であって、山の位置は図3・6に近い。

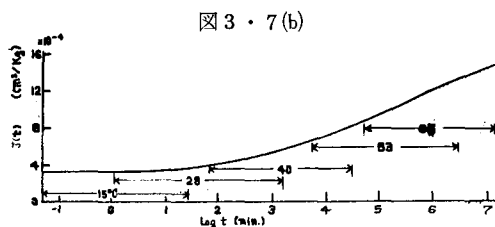
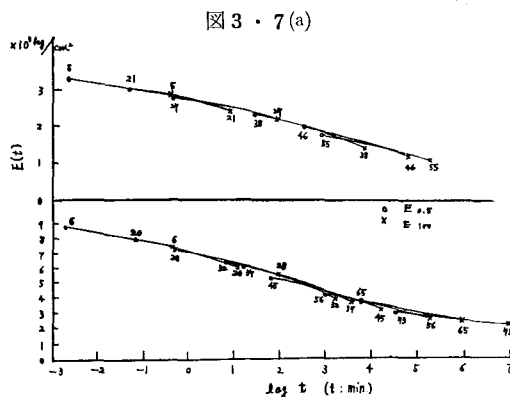


図3・8

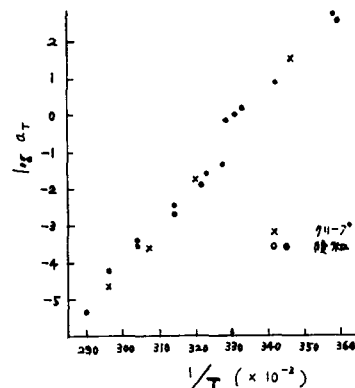


図 3・9

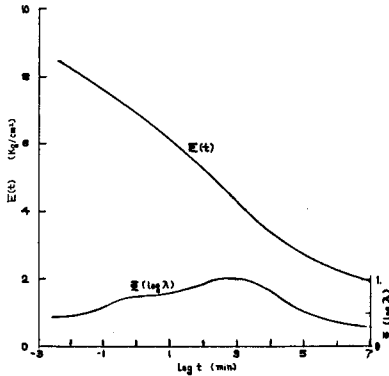
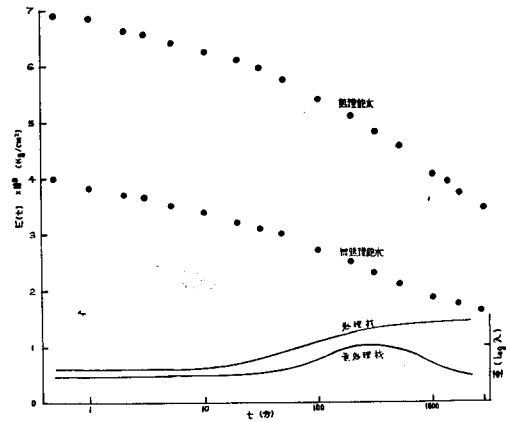


図 3・10



ることはないが、それを強いて平滑化して合成曲

線を求めたときの移動係数と $\frac{1}{T}$ の関係は図 3・8 に×印で示してある。なお移動を横軸方向のみでなく縦軸方向に行う場合もあるが、構造変化を考えない本章ではそのような取扱いは検討しない。なおホルムアルデヒド処理がヒノキ飽水試片の緩和に及ぼす影響は図 3・10 にみるように、スペクトルの山を長時間側に移動させている。

3・6 諸現象函数

上述のように、木材の静的粘弾性をあらわす函数には、実測しうるものにクリープコンプライアンス $k(t)$ と緩和弾性率 $m(t)$ があり、これから誘導される補助函数としては、木材の力学的性質を特性づける函数であるところの遅延スペクトル L と緩和スペクトル H とが得られた。しかし一般に動的粘弾性を含めるときは線型物質の挙動を記述する函数及び常数には、米国レオロジー協会用語委員会の提案によると上記の外に11種にのぼるものがあり、かつ、それらの間の相互換算には厳密な数理論が体系づけられている。それらの中から、主要な函数をとりあげて今、表 3・3 にかかげる。一方これらの間の近似換算式の数例を表 3・4 にまとめておく。図 3・7(a)、図 3・7(b) のデータに、表 3・4 にあげた近似的な換算式を適用して計算し、結果を図示すると図 3・11 のようになる。図における木材以外の物質について曲線は Ferry & Ninomiya の報文による。すなわち図中における記号は、

1 Polyisobutylene ただし、図を同一面内におさめるため図全体を $\log t$ 軸に沿ってずらした shift 量 $A = -4$ の

表 3-3

現象函数	一般的記号	変形様式による記号			
		断剪	容積	伸張	
緩和弾性率	$m(t)$	$G(t)$	$K(t)$	$E(t)$	
クリープ・コンプライアンス	$k(t)$	$J(t)$	$B(t)$	$D(t)$	
貯蔵弾性率	$m'(\omega)$	$G'(\omega)$	$K'(\omega)$	$E'(\omega)$	
貯蔵コンプライアンス	$k'(\omega)$	$J'(\omega)$	$B'(\omega)$	$D'(\omega)$	
損失弾性率	$m''(\omega)$	$G''(\omega)$	$K''(\omega)$	$E''(\omega)$	
損失コンプライアンス	$k''(\omega)$	$J''(\omega)$	$B''(\omega)$	$D''(\omega)$	
損失正切	$\tan \delta$	$\tan \delta_s$	$\tan \delta_v$	$\tan \delta_l$	
緩和スペクトル	H	H_s	H_v	H_l	
遅延スペクトル	L	L_s	L_v	L_l	

表 3-4

$$H \approx -\frac{d m(t)}{d \log t}$$

$$L \approx \frac{d k(t)}{d \log t}$$

$$m'(\omega) \Big|_{\omega = \frac{1}{t}} = m(t) + H \cdot \Psi(n)$$

$$\Psi(n) = \frac{\pi}{2} \csc \frac{n\pi}{2} - \Gamma(n)$$

ここに n は $-\log H$ vs $\log t$ の勾配

$$k'(\omega) \Big|_{\omega = \frac{1}{t}} = k(t) - t/\eta + L \Psi'(n)$$

$$\Psi'(n) = \frac{\pi}{2} \csc \frac{n\pi}{2} + \Gamma(-n)$$

ここに n は $\log L$ vs $\log t$ の勾配

$$m''(\omega) = H/B(1 - |n|)$$

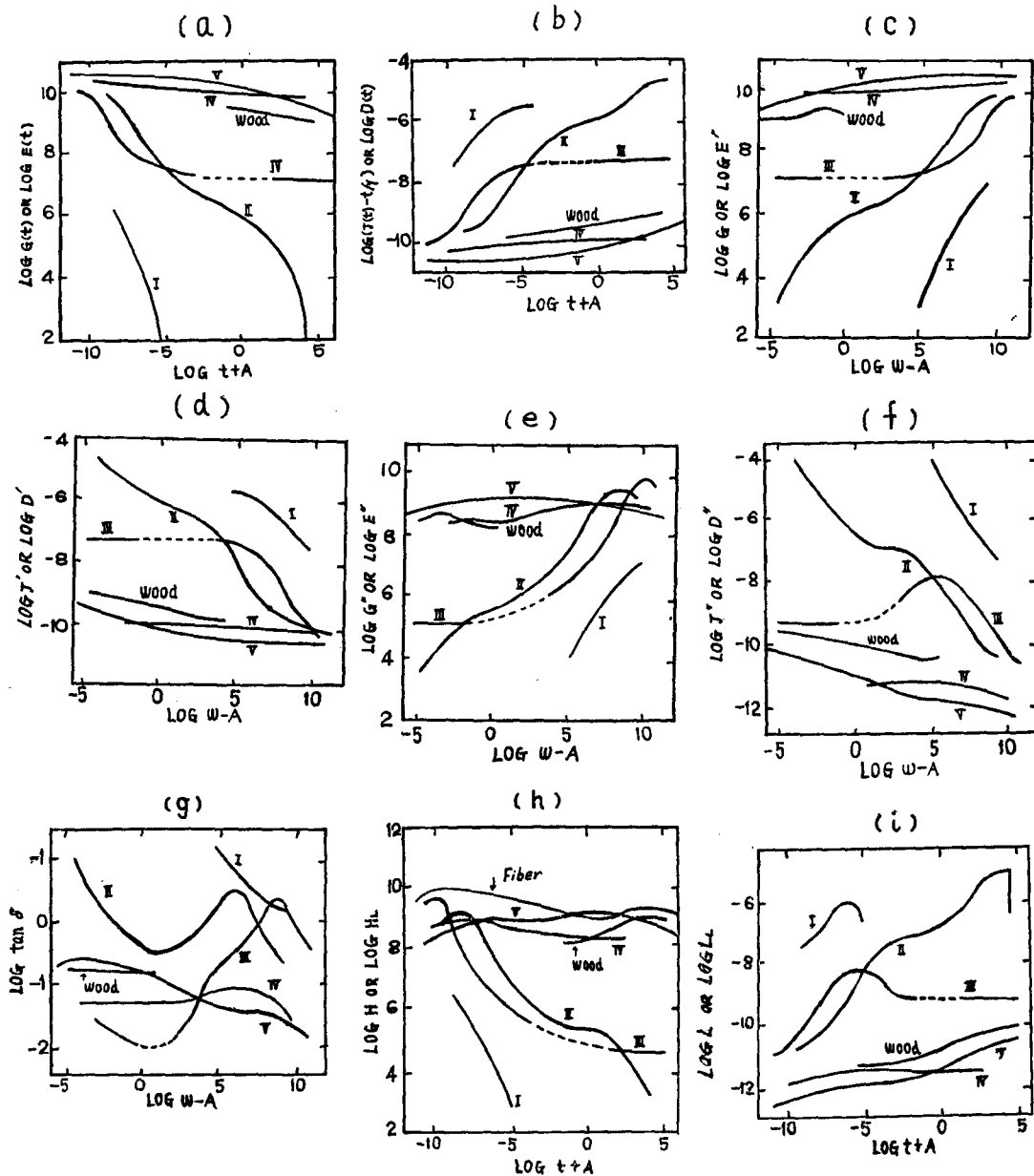
$$k''(\omega) = L/B(1 - |n| + \tau/\eta)$$

$$B = \frac{\pi}{2} \sec \frac{n\pi}{2}$$

$$\tan \delta = k''/k' = m''/m'$$

$$\frac{n\pi}{2} \ll 1 \text{ の時は } \tan \delta \approx \frac{n\pi}{2}$$

図 3・11



ときのもので、基準温度は 25°C

II Polyvinyl acetate ($A=-2$)

高い分子量をもつ非結晶性高分子、基準温度は 75°C

III Hevea rubber ($A=-2$)

鎖間の処々で少し架橋している非結晶性高分子、 25°C に reduce

IV Polymethyl methacrylate ($A=-8$)

非結性高分子ではあるがガラス転移点より下の温度におけるもの、 -22°C に reduce

V Polyethylene ($A=0$)

高度に結晶した高分子物質, 20°C

Wood: プナ湿潤材半径方向に伸縮を生ずる場合の曲げより求めたもの ($A=0$),

図3-11 (a) は緩和弾性率曲線である。ゴム状物質Ⅱでは, 10^{10} dyne/cm² 以上のガラス状領域, 10^{10} から 10^7 におちる遷移領域, やや slope の小さな plateau zone と急激に減少して消失してしまう terminal zone があらわれている。低分子量のⅠでは terminal zone のみがみえ, 架橋が存在するとⅢのようにこの zone がなくなる。さらにガラス状ポリマーⅣや結晶ポリマーになると全タイムスケール領域にわたって plateau zone の挙動を示すように思われるが, 分子的機構からみると, ⅡやⅢにおけるそれとは全く異質のものである。すなわち緩和は主鎖のわずかの運動にもなって起る側鎖の再列によって起ると考えられるわけであって, 木材も同様の機構による挙動を示す。

(b) クリープコンプライアンス曲線であって時間軸を鏡面とする緩和曲線の鏡像にあたる。

(c) 貯蔵弾性率であって正弦振動歪における1サイクル当りに貯蔵されるエネルギーの目安となる。

(d) 損失弾性率で, 1サイクル当りに熱となって消散するエネルギーの目安となる。

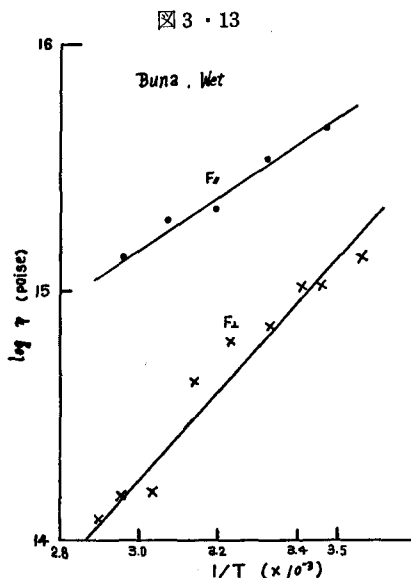
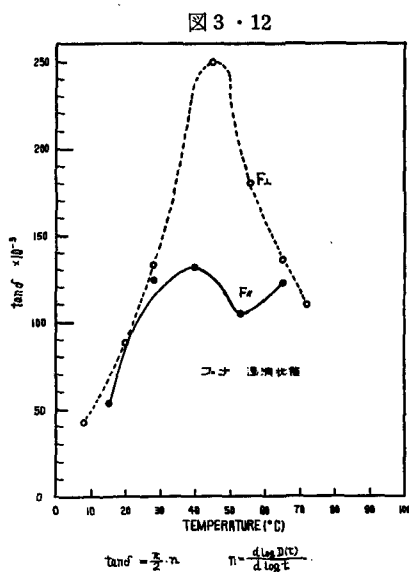
(e) 貯蔵コンプライアンスで1サイクル当りに貯蔵されるエネルギーの目安を与える。

(f) 損失コンプライアンスで消散エネルギーの目安を与える。

(g) 損失正切すなわち消散エネルギーと貯蔵エネルギーの比であって, 無架橋ポリマーⅡでは10よりも大きい場合もあり, これに架橋されると, 特に Plateau zone では0.01よりも小さくなる。ところがガラス状或は結晶化ポリマーでは大体0.1の程度となるが, これについては前述したように周波数と共に小さくなって高周波域では0.01に近づく。

(h) 緩和スペクトル

(i) 遅延スペクトル



木材の動的測定より求めた $\tan \delta$ は普通温度軸に対して最小値を示すのみで最大の山をもたないが, $k(t)$ から換算した場合には明らかに山が存在する。図3-12は湿潤ブナ材についての前出の $D(t)$ 曲線から求めたものである。なお, $\frac{D(t)}{t} \cdot \frac{d \log D(t)}{d \log t}$ vs $\frac{1}{t}$ の関係図を $\frac{1}{t} \rightarrow 0$ に外捜して求めた粘度 η は図3-13のようになる。

4. ヤング率と水分

これまで、比較的小さな変形の範囲における木材の静的粘弾性の現象をみてきたが、最後に、これらの現象を生ずる機構についての知見が要求されてくる。

一般に高分子物質の緩和機構としてTobolskyは次の5種の過程——(1) chemical reaction, (2) viscous flow, (3) crystallization, (4) release of distortion of molecules and crystals, (5) orientation of crystals——をあげている。木材の緩和現象にも、これらの中のいずれかが、またはその中のいくつか相伴って、生じているものと考えられるが、何れにしても序にふれたように、セグメントが空隙と位置を交換しうる非晶領域の変形が木材の変形にどのように寄与しているか、いいかえれば、木材の弾性率に非晶領域の弾性率がどの程度の役割を占めているかを調べることがその第1段階と考えられる。これについて大凡の目安を求める方法を述べてこの綜説を終えたい。順序として、実用弾性率を支配する組織構造上の要因の概要から考究を始めよう。

4・1 実用弾性率

実用弾性率 (technical elastic moduli) とは、ヤング率、ポアソン比及び剛性率の総称であり、序に述べたように直交異方体の弾性は各々3個ずつ合計9個の実用弾性率によって特性づけられる。しかし厳密には木材は直交異方性弾性体ではないので、例えば、 $\frac{E_L}{\mu_{LR}} = \frac{E_R}{\mu_{RL}}$ などの条件が完全に満たされる場合は稀である。また、例えば、 G_{LR} と G_{LT} とは必しも一致せず、本邦産数種の材では平均して $\frac{G_{LR}}{G_{LT}} = 1.36$ に達することが報告されている⁸⁾。以下に個々の弾性率について考察してゆこう。

(1) 剛性率 木材は木材実質と空隙とよりなるが、木材実質の比重は樹種の如何をとわずほぼ一定値をとる故、その割合を示すものは比重である。山井の実験結果によると、バラツキは著しいけれども、大体の傾向として剛性率 G は比重とともに増加している。今、細胞膜の気乾状態における比重を1.54とおさえて容積率 θ を計算し、山井のデータを用いて $\log G$ vs $\log \theta$ の関係を求めると図4・1(b) また、Hearmonの report 中のデータを用いてプロットすると図4・1(a)のようになる。図よりみて一般に

$$G^n = \theta \quad G_s^n \quad (4-1)$$

とおけることがわかる。ここに G_s は木材実質の剛性率であって、剪断力の作用する方向によって多少値は異なるが外推値は、およそ $3 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ となる。この外推が正しいものとするれば、細胞膜実質については予期に反して、繊維方向に平行に剪断力が作用する場合も、繊維に直角方向に剪断力が作用する場合も変形に対する抵抗は同程度の大きさをもつことになる。一方、 n の値は G_{LT} については1に近く、(図には示さないが G_{LR} についてもほぼ同様) G_{RT} については $\frac{1}{4}$ に近い。これは繊維に直角な面に沿っ

図4・1(a)

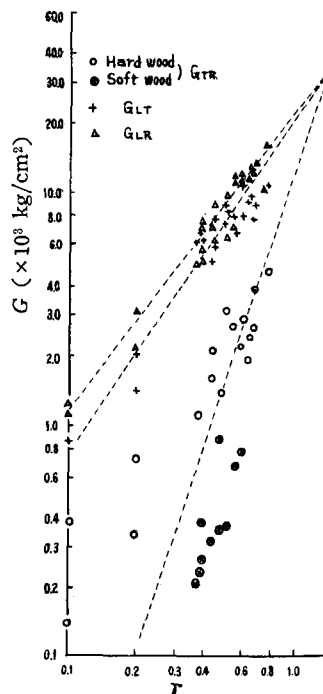
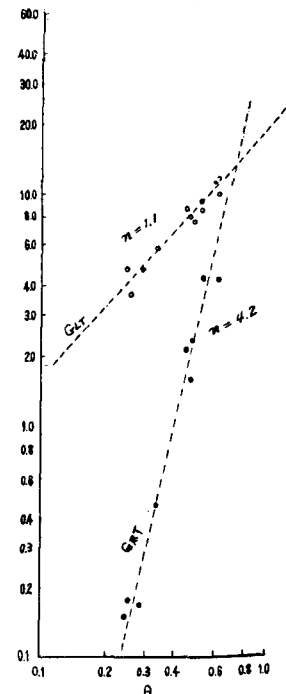


図4・1(b)



た剪断力に対する抵抗力は単純な混合則にしたがう——換言すれば、木材の変形は細胞膜実質の変形を加算したものにはすぎないが、繊維に平行な面に沿って剪断力が半径方向又は切線方向に作用する場合に生ずる木材試片の変形は細胞膜実質の容積率の4乗に比例して変形する——換言すれば、細胞膜実質の変形以外に細胞の形が変ることを考えなければならないことを意味している。すなわち、木材の横方向に力を作用させるときは多孔体の変形を考えなければならない。しかし、何れにせよ G が G_s に比例することに注目しておきたい。

なお、木材の弾性率の測定値は同一樹種、同一比重の試片についても著しくバラつく。その原因は木材の組織構造上の不均質性にもとづくものと考えられている。弾性は強度に比較して材料の組織構造には鈍感な性質とされているが、それにもかかわらず、なおこのようにバラつきの大きいことは木材の特徴といえる。このバラつきは応力緩和などについても存在し、異常なスペクトルをうることになる。

(2) ポアソン比 木材のポアソン比も方向によって著しくその値を異にする。繊維方向に荷重が加わる場合には、生ずる歪が半径方向の場合も切線方向の場合も、その値は比較的似た値をとり0.5に近い。¹⁰¹⁾ 非圧縮性の等方体では0.5となりそれ以上の値は材料の破壊を意味する。¹⁰⁶⁾ しかし異方体では方向により0.5以上の値をとるが、木材では0.9に近い値を示すことがある。これは木材が均質連続性を仮定しうる物質の性質を示すだけではなく、ある形状を有する物体の性質を示す値とみなしうる。たとえば、Price は木材を互いに自由に變形しうる円筒束の模型におきかえて研究し、みかけのポアソン比は0.92に達する場合のあることを計算している。¹⁰⁷⁾ このように考えると木材の変形は、木材実質の微細構造の変形と、巨視的構造の形の変化とよりなる。

(3) ヤング率 上に述べたように Price は木材の細胞構造を円筒束模型におきかえて木材の弾性変形を考察している。すなわち、木材を相互に独立に變形しうる等質等方性の壁よりなる円筒の集りとみなして、円筒の軸方向のヤング率 ($E_{\parallel}$) とそれに直角な横方向のみかけのヤング率 ($E_{\perp}$) を計算し次の結果を得ている。

$$E_{\parallel} = \frac{4ah}{(a+h)^2} E_s \equiv c_1 E_s, \quad c_1 = \frac{4ah}{(a+h)^2} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

$$E_{\perp} = \frac{\pi}{0.696(1-\mu^2)} \left(\frac{h}{a}\right)^3 E_s \equiv c_2 E_s, \quad c_2 = \frac{\pi}{0.696(1-\mu^2)} \left(\frac{h}{a}\right)^3 \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

ここに $2h$ は円筒壁の厚さ、 a はその中央面の半径、 E_s は等方性を仮定した壁のヤング率、 μ はポアソン比である。

ヒノキ春材仮導管の半径方向の径は単位をミクロンにとるときは、(以下同様) 30~50、膜厚は2程度である。¹⁰⁸⁾ 今平均値として、 $a=20$ 、 $h=1$ とおけば

$c_1 \doteq 0.18$ となる。また、 $u \doteq 0.3$ とおけば $c_2 \doteq 6.2 \times 10^{-4}$ となる。

高野産ヒノキに関する井口の測定結果は次のように与えられている。¹⁰⁹⁾

Price の模型を用いて上表より $E_s = \frac{E_{\parallel}}{c_1}$ を求めると

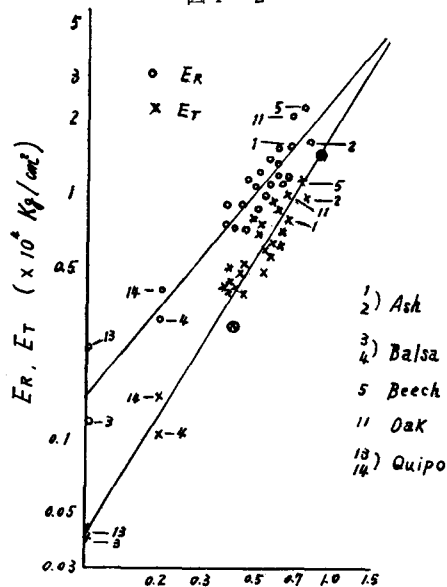
その値はおよそ平均 4400 kg/mm^2 となる。細胞膜が等方体であると仮定して式(4-3)にこの値を用いて $E_{\perp}$ を計算すると春材の $E_{\perp} = 2.7 \text{ kg/mm}^2$ 、秋材の $E_{\perp} = 110 \text{ kg/mm}^2$ となる。¹⁰⁾

因みに木邦産36樹種の乾材のヤング率は $E_{\parallel} = 2.48 \times 10^5 \gamma_{15} \text{ kg/cm}^2$ と報告されており、 $\gamma_{15} \doteq 1.4$ とおくと木材実質の繊維方向ヤングの率の値 $E_{s\parallel} \doteq 5.3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ となって、上述の値 $4.4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ に近い。

Price 模型では円筒壁を等方性物質よりなるものと仮定しているが、横方向のヤング率を比重に対して両対数紙上にプロットすると図4・2のようになり、 E_R 、 E_T とともに $r \doteq 1.4$ では大凡同一の値に

	厚さ(mm)	$E_c(\text{kg/mm}^2)$
一 年 輪	2.92	1190
春 材 部	2.17	940
秋 材 部	0.44	1790

図 4・2



落ちつく傾向を示し、その値 $E_{S1} = 4 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ となる。上記 E_{S11} と比較すると丁度一桁低く、又、 G_S と比較すると同程度の値を示すこととなる。

木材は春材部と秋材部とよりなり、弾性率は一年輪内でも分布しているが、今、この両部のヤング率に関して単純な混合則になり立つものとして計算すると、ヒノキの $E_T = 16.6 \text{ kg/mm}^2$, $E_R = 35.0 \text{ kg/mm}^2$ となり、一方実測値は表 4・1 のような値をとる。表から明らかのように、弾性率に寸法効果の出る傾向があらわれている。

繊維方向と横方向の異方性は Price の模型によっても説明は出来るが木口面の異方性を明らかにすることが出来ないで、Price はこの原因を髄線細胞の存在に求めた。この着想の下に後年 Barkas は計算式をたてて、理論的に計算された髄線量と実測されたその量と比較検討しているが、一方、pine についての研究によると、吸湿膨張の異方性は髄線の有無との関連がないことから髄線の効果は否定されている。

表 4-1

ヒノキ材の横圧縮弾性率

記号*	含水率 (%)	年輪密度	E_R (kg/cm ²)	E_T (kg/cm ²)
A	16.1	8.4	8400	4400
B	19.4	7.9	8100	4200
C	19.2	7.8	7800	3700

※

	荷重方向 (cm)	横断面 (cm × cm)
A	6	3 × 3
B	5	2.5 × 2.5
C	4	2 × 2

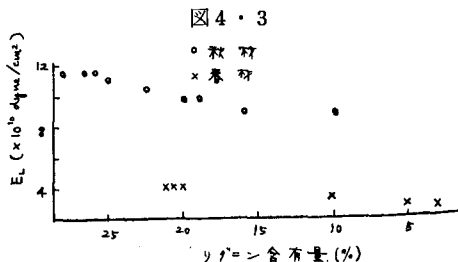
なお沢田は、ミズナラのヌカ目材にみられる異常なヤング率の低下はその導管部分の増加にともな¹¹²⁾って、木材が次第に薄肉円筒束としての特性を示すためと考えている。

このようにみえてくると、木材の弾性を物性として研究することは、一方において多孔体の構造力学によりある係数——容量因子 capacity factor——を定め、他方において木材の微細構造、或は分子構造との関連から木材実質の弾性率 M ——強度因子 intensity factor——を定めることになってくる。そのようにして定められた両量 C と M の積として実際の木材の弾性率 m の値が与えられる。その場合に、この報文において問題にしている変形或は応力の時間的な変化や環境因子による変化を考えると、それらの変化の原因が幾何学的模型によって定まる capacity factor C よりもむしろ intensity factor M に存在するものと考えられる。次節に木材実質の組成成分変化と弾性率との関係を読みよう。

4・2 成分変化と弾性率

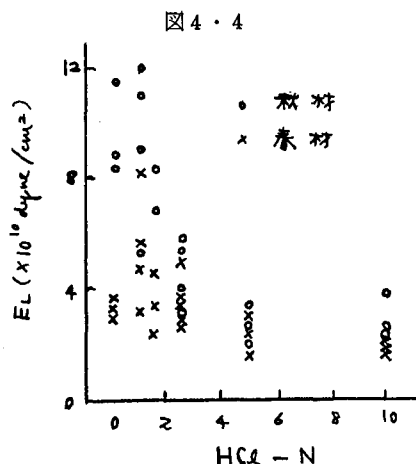
木材の主成分はホロセルローズと、残り約 30% のリグニンよりなる。まず脱リグニン処理のヤング率に及ぼす影響をみると、スギ材薄片で振動リード法により求めた結果はリグニン含有量の減少とともに図 4・3 にみるように緩慢に低下する。

試験片の密度はリグニン含有率の減少によって低下

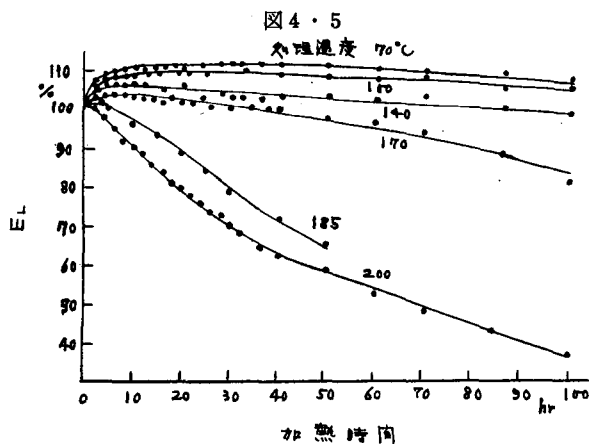


するが密度の低下ほどに弾性率の減少は認められない。このことは次に述べる塩酸処理の結果から考えても、その大部分が複合中間層に存在するリグニン分子は細胞膜の骨格形成にセルロース分子のように寄与していないためこの方向では弾性変形に著しい影響を与えないものと考えられる。

次にセルロース分子を塩酸で処理すると図4・4にみるように1N—HClの処理で動的弾性率が最大値を示し一定の塩酸濃度から急激に低下し秋材では5N—HClから動的弾性率の低下は緩慢になる。これは塩酸濃度が高くなるにつれて低濃度でみられた結晶領域の拡大よりも加水分解によって非結晶部分が分解されてゆく方が著しくなって弾性率の低下をきたし、5N—HCl近辺で非結晶部分の分解が停滞するものと思われる。春材においては構造上の相異からこの経過が速やかに進行するものと考えられる。



熱処理は木材の内部構造を変化させ、したがって木材の吸湿性や機械的性質に影響するが、これについては曲げ弾性係数、曲げ破壊係数、横方向の引張ヤング率や強度などの研究がある。また、筆者らの研究結果を繊維方向の無処理材を基準とした動的ヤング率比と熱処理温度および時間の関係で示すと図4・5のようになる。繊維方向ではいつれの処理材のヤング率も初期に増加するが処理温度の高くなるほど早く減少が現われてくる。また初期の増加率は処理温度が低いほど大きい。また半径方向では185°C、200°Cのものをのぞけば繊維方向と同様の傾向がみられるが、その特徴は185°C、200°Cでは初期の増加がみられないことである。



図より明らかな如く動的ヤング率に及ぼす処理温度の効果は70°C～170°Cのグループ(A)と185°C～200°Cのグループ(B)に分かつことが出来る。

これは熱処理による内部構造の変化がヤング率に敏感に寄与しているためと考えられる。内部構造の変化には非晶域における配列度が高くなるなどして結晶化の効果を示す場合と、熱分解により主鎖の重合度を低下させる効果とが考えられる。低温処理の場合は前者の効果が大きく、高温長時間になると次第に後者が優勢になってくる。これがヤング率に及ぼす熱処理の効果であるが、原理的には前に述べた酸処理と同様である。

このような効果をさらに詳しくみるために熱処理試片の吸湿性を検討する。

木材の吸湿型はS型である。S型等温吸着式の気体論的導出は何れも既存の内部表面上への多分子層吸着模型によってなされ、吸着点と被吸着分子との間のエネルギー状態や被吸着分子間の相互作用に関する条件の如何によって種々の吸着式が得られている。

木材の吸湿は相当高含水率迄分子吸着をすることが知られている。しかし単分子層吸着に関するLangmuirの理論ではS型吸着の説明は出来ぬ。この矛盾を克服するために内部表面を既存のもの

考えないで、吸湿とともに拡がると考えて次の吸着式が筆者らによってたてられ、木材の吸湿に広範囲にわたり適合することが見出された。すなわち吸着量 ϕ は x を湿度とすると、

$$\frac{\phi}{\phi_0} = \theta = \frac{cx}{1+cx} \left(1 + K \frac{x-x^n}{1-x} \right) \quad (4-4)$$

であたえられる。ここに、 ϕ_0 は乾燥状態の内部表面を単分子層でおおうに要する水分量であって、木材を処理することによってこの値が変化すれば、それだけ、吸着の活性化エネルギーの大きな吸着点の数が増減することを意味する。前節でのべた熱処理の場合、条件が 140°C 、10時間処理以下のときには ϕ_0 の値は温度とともに、又、時間とともに減少するが、条件がより酷しくなると ϕ_0 は逆に増大してゆく。¹⁶⁷⁾これは比較的低温短時間での処理は非晶領域の分子間結合を強めて、水に¹⁶⁸⁾accessibleな吸着点が減少することを示す。

n は非晶領域にある相隣る糸状分子間に一並びに並びうる分子数の最大値であって、内部表面の増加、すなわち木材の膨潤量の目安を与えるものである。この n の値は熱処理条件がきびしくなるほど減少する。一方膨脹率も温度とともに減少し、無処理の4.8%から 750°C 処理1.9%迄下る。 $(n$ の値は夫々4.5及び1.5となる。)

C は吸着熱に関する常数であって、やはり処理が進むにつれて、値は小となる。

K は多層吸着に関する常数であって、普通は近似的に $K=1$ としている。

さらに無処理および熱処理された試片を粉碎して、その60 meshの粉末から一般分析法により、 α -セルロースを定量した結果を、無処理材に対する比で表わすと 140°C 処理に最大があらわれる。

熱処理材の吸湿性と弾性が上記のような対応をみ原因は熱処理により結晶領域（水に nonaccessibleな領域の意）が増加したものと推定されるが、¹⁷⁰⁾さらに処理時間に対して動的ヤング率が最大値をもち、ついで減少がみられるのは、前述のごとく組成成分の熱分解、重合度の低下によるものと考えられる。熱分解の効果はA、B両グループとも現われており、図のごとく処理温度と比例的関係にある。このような熱分解の効果は熱処理の効きめにおいても起っているが、この時期では結晶化効果がより優勢であるためみかけ上現われていない。温度と時間に対する結晶化速度と熱分解速度がどのような函数になるかは不明であるが、前者は熱処理初期に寄与することが大きく、後者はシビアな処理に対して寄与することが大きい。

4・3 熱 弾 性

木材の弾性はその成分の中でも主にセルロース糸状分子の分裂や、分子間の挙動に影響されることが分ったが、この影響がどのような機構であられるかについては不明の処が多い。その原因は木材弾性の本質的な特性が明らかでないためである。

木材実質の弾性率の推定値は上述のように $E_{sII} \approx 4 \times 10^5$, $E_{sI} \approx 4 \times 10^4$, $G \approx 10^4 (\text{kg/cm}^2)$ であり、^{4)7)8)10)114~117)}弾性歪みも数%に達することはない。また温度上昇とともにその大いさは小さくなる。その温度依存性は一般には拋物線や三次式であられるが、狭い範囲内では直線とみなしてよい。そのときの温度 1°C 当りに低下する割合は繊維に直角方向の弾性率の方が平行方向のものより大きい。これは糸状分子の運動状態に関係するものと考えられる。

なお、マツ材についてのデータ¹⁷⁾は弾性率が最も水分の影響を受ける温度は室温であることを示す。

ブナ材およびヒノキ材の試片について、負荷後1分のときの緩和弾性率 $E(1)$ と100分のときのそれ $E(100)$ を温度に対してプロットすると両曲線は類似の傾向を示す。このように木材の緩和弾性率 $E(1)$ や $E(100)$ が温度の上昇につれて類似の傾きで低下することは、平衡に近い状態においても一定歪みを生ずる力が温度の上昇とともに減少し、あるいは一定荷重に対する歪みが増加することを意味する。この測定は応力緩和、あるいはクリープ実験の方法でなされ、¹¹⁸⁾¹¹⁹⁾その結果から弾性変形に及ぼすエネルギー項やエントロピー項の寄与を検討しうる。すなわち長さ l の物質を一定温度 $T^\circ\text{K}$ の下

で弾性限界内で可逆的に歪ませた場合に容積にも組成にも変化がないときには、力 f は

$$f = f_v + f_s \quad (4-5)$$

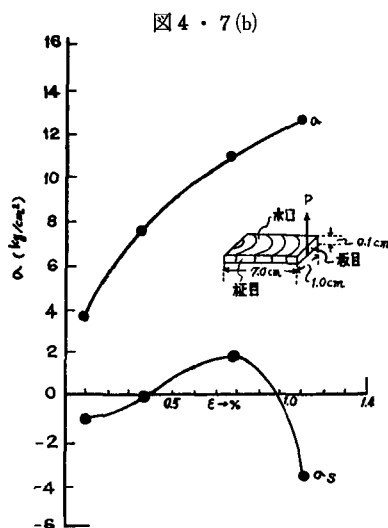
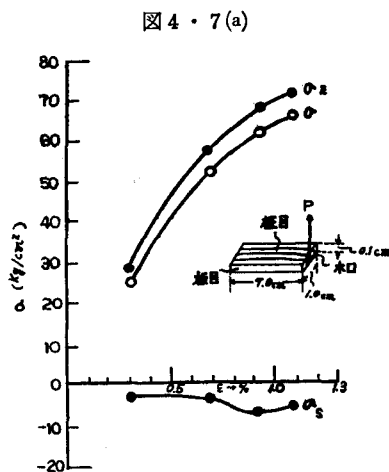
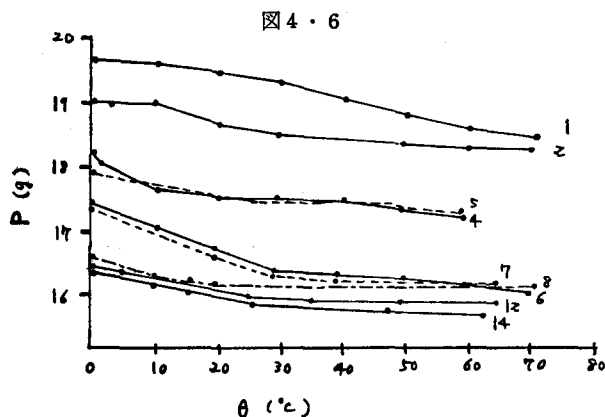
$$f_v = \left(\frac{\partial v}{\partial l} \right)_T$$

$$f_s = -T \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T = T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_l$$

となる。

すなわち、 l を増加するための力 f は内部エネルギー変化の寄与(f_v)と、エントロピー変化の寄与(f_s)の和として与えられ、後者は試片長を一定に保つための引張力の温度勾配に絶対温度を乗じて求める故、この勾配を実測すれば変形に対する両効果の寄与を知ることができる。

繊維材料の引張については Meyer and Lotmar⁽¹²⁰⁾以来、数多くの研究がなされている。^{(121)~(131)}それらの結果によると、天然繊維素繊維では f - T 図は負の勾配を示し、人造繊維や keratin 繊維では条件により正の勾配を示すこともある。圧縮についても同様の式が成り立ち、⁽¹³²⁾コルクについて正の勾配を示す結果が報告されている。弾性曲げにおいても、剪断の影響が無視出来るときは、生ずる応力は引張と圧縮であるから、上述の熱力学的解析の結果を適用しうる。水中に浸漬したままヒノキの荷重-温度特性を求めた結果を図4・7に例示する。⁽¹³³⁾試片寸法は厚さ(半径方向)0.11cm, 巾(切線方向)1.03cm, 自由端と固定点との距離は7.40cm, 撓み量は降させた場合(第1日目の実験)が図中の曲線1, そのまま緩和させておいて翌日温度を下降させた(第2日目の)ものが曲線2, 以下これを繰返したもので、数字は日数を示す。図からも明らかなように二週間目に略可逆的な曲線をうる。なお、この温度変



化の範囲内では撓みの変化は読取顕微鏡(精度(1/100mm))では認められなかった。なお最後の曲線について上式により荷重 f をエネルギー項 f_v とエントロピー項 f_s に解析すると $f_s = -2.46$ g,

$f_E = 18.40 \text{ g}$ となる。また応力-歪み曲線は図 4・8 のようになる。¹³⁴⁾ 厳密には二成分系の理論¹¹⁸⁾¹³⁵⁾により補正項の検討をする必要があるが、弾性率の大きさや温度変化、歪みの大きさなどと上記の結果とを比較検討するならば、木材に恒温弾性変形を生ぜしめるための仕事の大部分は内部エネルギーとして木材内にたくわえられるが、理想的なエネルギー弾性を示すものではなくて、エントロピー減少をとまなう非理想的なエネルギー弾性を示すことがわかる。

4・4 非晶領域の寄与

諸種の有機溶剤を用いて木材を膨潤させた場合、膨脹量が大きいほどヤング率は小さくなる関係が報告されている。¹⁷¹⁾ 膨潤は主に非晶領域において起る故、このようなヤング率の変化から非晶領域が弾性変形に及ぼす寄与を考察しうる。特にセルローズ微結晶体は水分の影響をほとんど受けないから、含水率とヤング率との関係から、これを定量的に求めてみよう。吸湿に伴う細胞内腔の量の変化はないことより推して、木材の横方向のヤング率における平衡含水率は、木材の多孔性物体としての変形の項に大きな影響をもたないものと考えられて、木材実質の分子構造の変形の寄与が大きい¹⁶³⁾が、さらに結晶領域の増加とともにヤング率が大きくなることは、木材の弾性変形が実質の非晶領域の変形にもとづく処が多いことを明らかにしている。結晶領域には、鎖状分子間に水酸基による多くの水素結合が存在しているが、非結晶領域においても隣接糸状分子間の相対的な位置が許すかぎり存在している。¹⁹⁰⁾ しかし、非結晶領域にある水酸基は吸湿の際の吸着点として最も有効に働き、水分が近づいて衝突すると、隣りの鎖状分子との間の水素結合をそのまま形成しようとする傾向よりも、水分子と結合する傾向の方が著しいために、吸湿された水分子は繊維のヤング率に重要な寄与をなす鎖間の結合を切断してしまう。多種の繊維のヤング率と初期の吸着熱との間に密接な関係の存在することや、あるいは表 4・2 にみられるようなフオルムアルデヒド処理の膨潤試片のヤング率に及ぼす影響などは、非結晶領域に存在する水素結合が、材料の弾性に重要

表 4-2

	ヒノキ半径方向のヤング率 ($\times 1.0^{\circ} \text{kg/cm}^2$)	
	含水率 7~10%	飽水状態
処 理 材	6.0	6.0
未 処 理 材	5.8	4.7

な役割を果たしていることを明らかにしている。

表 4-2 はヒノキのクロスセクション (厚 $2 \times$ 巾 $10 \times$ 長 72 (mm)) を塩化水素触媒中に 1 時間曝露した後、7 時間 95°C の下でホルムアルデヒド蒸気中で処理を行った試料を小型曲げ試験機を用いて 0.01641 cm/分 の撓み速度で中央集中荷重を加え、荷重-撓み曲線を記録したデーターから求めたものである。

このような水素結合の役割に着目して繊維の弾性率との関係式を導いたのに前述の Nissan²⁸⁾ やあるいは Meredith¹⁹⁸⁾ の理論がある。Nissan の理論の結論は、

$$E = E_0 e^{xp(-b\phi)} \dots\dots\dots (4-6)$$

となる。ここに $b = \frac{1}{3}\phi_0$ 、 E_0 は ϕ が零のときのヤング率である。セルローズでは $\phi = \frac{1}{3}$ であるから、 $E = E_0 e^{-\phi} = E_0(1-\phi)$ となる。含水率が木材の弾性に及ぼす影響についての研究は多く、その中には上式に類似の実験式となるものもあるが、木材はセルローズのみよりなるものではなく、また木材のヤング率には水素結合以外の寄与もあることを考えに入れて修正する必要がある。

木材のヤング率 E は木材実質中にある水素結合のすべてが寄与する部分 E_h と、その他の結合の寄与する部分 E_n の和となる。すなわち $E = E_h + E_n$ である。もし、 $\phi = 0$ のときの E_h を E_{h0} とし $E_h = E_{h0}(1-a\phi)$ と与えることができるならば

$$E = E_n + E_h - aE_{h0}\phi = E_0 - aE_{h0}\phi$$

となる。ここに E_0 は $E-\phi$ 直線が $\phi=0$ 軸を切る値である。したがって a の値を求めることができる。木材のヤング率に及ぼす水素結合の寄与を考察することができる。

P. Meredith は飽湿状態における弾性率に影響する結合水の量 W_0 を $W_0 = nA \times \frac{18}{M}$ と与えている。ここに、 n はグルコース残基あたりの水酸基の数、 A は Accessible fraction であって、木材と吸湿比のほぼ等しい Fortisan で 0.51 となる。 M はグルコース残基の分子量である。いま $n=3$, $M=162$, $A=0.50$ と仮定すると $W_0=16.7\%$ となる。

Nissan の理論より

$$E_h = E_{h0}e - a\phi = E_h \dots\dots\dots (4-7)$$

ここに、 $a = \frac{1}{300} W_0$, ϕ は含水率 (%) である。 a を求めるために縦波共振法によりなされた実験結果を図 4・8 に示す。 E_u は

含水率が 5~7% 附近で最大値をもつのに対し、静的な Carrington のデータと同様に E_R では最大値は現われない。1960 年 Kollmann⁷⁹⁾ も E_L について最大値があることを報告しており既報のデータと異なる点で注目すべきである。

この原因としては Packing effect (配列の向上) や有効鎖の増加が考えられる。これに反し E_R に最大値が現われないのは、 E_R には水に敏感な反応を示す

水素結合が主体的に関与するためと考えられる。このようにして第一次吸着点が飽和された後に水素結合の数と水分子の数の間に比列関係が生ずるものではないかと推定される故、含水率 5~13% の領域では非結晶域において Nissan の理論が適合できると考え、Meredith の理論より $W_0=0.133$ において E_{n0} および含水率が 6.5% における $E_{n0.5}$ を求めて表 4・3 に示した。

図 4・8

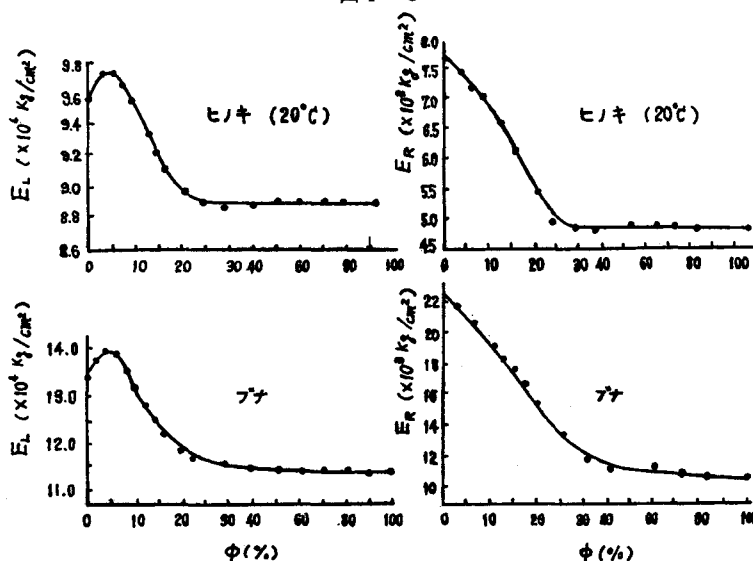


表 4-3

樹 種	ヤ ン グ 率	$E_{\phi=6.5}$ ($\times 10^8 \text{kg/cm}^2$)	E_{h0} ($\times 10^8 \text{kg/cm}^2$)	$E_{h\phi=6.5}$ ($\times 10^8 \text{kg/cm}^2$)	$\left(\frac{E_n}{E}\right)_{\phi=6.5}$
ヒ ノ キ	E_L	96.7	26.5	23.8	23.7
	E_R	7.2	5.5	4.78	66.4
ブ ナ	E_L	137.4	90.2	78.3	57.1
	E_R	20.7	20.0	17.4	84.1

5. 要 約

木材の変形は時間の影響をうけ、クリープや回復の現象があらわれ、その応力-歪み関係は図 2・1 に示したように荷重速度の影響をうける。しかもその流動図は、式 (1-1) より明らかなように

原点を通り、木材のレオロジー的性質は粘弾性を示すことがあきらかである。また木材の応力—歪み曲線は周知のように、他の条件が一定であれば湿度が増加するにつれて歪みの座標軸に近づいてくる。また、図2・1にみるように、曲線は荷重速度が小さくなるほど歪みの軸に近づき、さらに図2・2は温度の上昇が同様の効果を生ずることを示している。すなわち、水分や温度の増加と、時間の増加とは木材の力学挙動に類似の影響を与える。なお、図2・2のデーターの変形の大きい部分に着目して非線型三要素模型により解析して、式(2—4)における常数 β の値を求めると、10に近い値をとり、温度の上昇とともに、その値は小さくなって、流動しやすくなることを示す。しかし、木材の大変形に関するより精密な理論的研究を将来に期するには、まずその基礎となる小変形について理解を深めておく必要がある。

木材の小変形についてその静的粘弾性現象をみると、重ね合わせ試験などの結果から、stress levelにして30%以下、歪みにして0.7~1%以下では線型粘弾性を示すことが分る。それで、実測されたクリープコンプライアンス曲線や緩和弾性率曲線から遅延時間や緩和時間の分布を求めて温度や水分の影響をみると、温度の上昇につれて分布は短時間側に移行するが、時間—温度の換算則は厳密には成立せず、又、非結晶域における鎖状分子間の架橋作用をなして木材の吸湿性を著しく低下させるフォルムアルデヒド処理がスペクトルをより長時間側に移行させることなどが明らかとなって、木材の粘弾性現象が主に木材実質の非晶領域にある鎖状分子の運動にもとづくことや、その運動状態が均一に温度の影響を受けないことが分る。さらに数種の合成高分子材料と比較すると図3・10にみるように、木材は結晶高分子材料と同様の挙動を示す。

木材の変形における非晶領域の寄与を考察するために変形をさらに小さく限って動的ヤング率と水分との関係に着目する。

一般に木材の弾性率は、細胞の変形に関与する項 C と細胞膜実質の弾性率 M との積 CM で与えられるが、環境因子は主に後者に影響するものとみなせる。それでは、組成成分の中の何が最も M に影響するかをみると、種々の化学的処理や熱処理にともなう弾性率変化の検討からそれはセルローズ分子であることが明らかになった。さらに熱弾性に関する実験結果は、木材の弾性がエントロピー弾性ではなくて非理想的なエネルギー弾性であることを示した。

以上の考察に基いて、Nissanの理論における仮定が木材の非晶域において近似的に妥当と考えてその理論を修正し、ヤング率—含水率曲線の勾配から非晶領域にある水素結合のヤング率への寄与を求めた結果は、表4・4にみるように、例えばブナ材半径方向については84%に達している。

文 献

- 1) Eirich, R. : (1956) "Rheology", Vol. 1. Academic Press Inc. New York
- 2) 中川, 神戸 : (1956) "レオロジー" みすず書房, 東京
- 3) Burgers and Scott Blair, (1949) "Report on the Principles of Rheological Nomenclature", North-Holland Pub. Co. Amsterdam
- 4) Kollmann, F. : (1951) "Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe", Springer Verlag, Berlin
- 5) 南義夫 : (1949) 木材工業, 4, 222
- 6) 沢田稔 : (1957) 林試験, No. 98, 85
- 7) 猪瀬理 : (1960) 木材誌, 6, 93
- 8) Hearmon, R. : (1948) "The Elasticity of wood and Plywood" Forest Prod. Res. Sp. Rep. No. 7
- 9) 例えば倉西正嗣 : (昭23) "弾性学" 日本機械学会
- 10) 森芳郎 : (昭32) "レオロジー" 共立出版株式会社
- 11) Halsey, White and Eyring, : (1945) Tex. Res. J. 15. 295
- 12) Ivanov : (1938) Holz R. W. 2, 35
- 13) 北原覚一 : (1951) 東大演習林報告
- 14) 関谷文彦 : (昭22) 木材強弱論, 朝倉書房 (3版)

- 15) Brown, Panshin and Forsaith : (1952) "Textbook of wood Technology" Ⅱ. McGraw-Hill Book Co., Inc., N. Y.
- 16) Wangaard, F. F. : (1950) "The Mechanical Properties of wood" John Wiley & Sons, Inc., N. Y.
- 17) Vorreiter : (1949) "Holztechnologischeshandbuch" Ⅰ Georg Fromme & Co., Wien
- 18) 山井良三郎 : (1959) 林試報, No. 113
- 19) 沢田稔 : (1955) 林試報, No. 77
- 20) 山田・金高・梶田 : (1958) 第9回日本会
- 21) Comben, A. J. : (1957) Forest Prod. Res. No. 12
- 22) 沢田 稔 : (1958) 林試報, No. 108
- 23) Dart and Guth : (1946) J. Appl. Phys. 17, 314
- 24) Stevens, W. C. : (1938) Forestry 12, 38
- 25) 宮部 宏 : (昭19) 材料の湿気的性能
- 26) Wise and Jahn : (1952) "Wood Chemistry" Part Ⅳ Reinhold Pub. Co. N. Y.
- 27) 山田・梶田 : (1952) 木材研究, No. 9
- 28) 堀岡邦典 : (1954) 林試報, No. 68
- 29) Keylwerth : (1951) Holz R. W. 9, 253
- 30) Liska, J. A. : (1950) Forest Prod. Lab. R. 1767
Noren, B. : (1954) A.S.T.M. Bull. Rp. 229
- 31) 杉山 : (1956) 日建会論文集, 85
- 32) Dillon, J. H. : (1950) Advances in Colloid Sci. Ⅲ
- 33) Otto : (1954) "Cellulose and Cellulose Derivatives" Part Ⅲ
- 34) Robinson : (1948) "High Polymer Physics" Remsen Press Division, N. Y.
- 35) Ferry, J. D. : (1961) "Viscoelastic Properties of Polymers" John Wiley & Sons Inc., N. Y.
- 36) Tobolsky, A. V. : (1960) "Properties and Structures of Polymers" John Wiley & Sons, Inc. N. Y.
- 37) Stuart, H. A. : (1956) "Die Physik der Hochpolymeren" Bd. 4. Springer-Verlag, Berlin
- 38) Onogi, S. et al. : (1962) J. Polymer Sci. 58, 1
- 39) Catsiff, E. et al. : (1953) Tex. Res. J., 23, 808
- 40) Meredith, R., : (1953) "Mechanical Properties of Wood and Paper "Part A., North-Holland Pub. Co.
- 41) van Hold : (1957) J. Polymer Sci. 24, 107
- 42) Kollmann, F., : (1952) Holz R. W. 10, 195
- 43) Youngs, R. L., : (1957) Forest Prod. J. 7, 315
- 44) Armstrong and Kingston : (1960) Nature 185, 862
- 45) Leaderman, H., : (1943) "Elastic and Creep Properties of Filamentous Materials and other High Polymers" The Textile Foundation, Washington.
- 46) Marvin, R. S., : (1952) I. E. C. 44, 696
- 47) King, E. G., : (1957) Forest Prod. J. 7, 324
- 48) 岡小天 : (1954) "高分子の粘弾性" 現代物理学講座, 岩波書店
- 49) 南 義夫 : (1949) 木材工業, 4, 123
- 50) 南 義夫 : (1950) 木材工業, 5, 136
- 51) 北原・岡部 : (1960) 木材誌5, 12
- 52) King E. G. : (1960) Forest Prod. J. 11, 156
- 53) 南 義夫 : (1953) 木材工業, 3, 32
- 54) 鈴木 寧 : (1947) 木材工業, 2, 43
- 55) Findley and Kosla : (1955) J. Appl. Phys 26, 821
- 56) Lyons W. J. : (1946) J. Appl. Phys 17, 472
- 57) Busse et. al : (1942) J. Appl. Phys
- 58) 山田・竹村・梶田 : (1961) 木誌, 7
- 59) Wood, in King Forest Prod. J. 7, 324, (1957)
- 60) 山田・佐道・白石 : (1962) 材料試験
- 61) King : (1959) Forest Prod J. 8, 331
- 62) Alfrey : (1948) "Mechanical Behavior of High Polymers" Inter science Pub. Inc. N. Y.
- 63) 小野木 : (1959) レオロジー要論, 槇書房
- 64) 金丸・祖父江 : (昭23) "高分子構造論" (中), 修教社, 東京
- 65) 齊藤信彦 : (昭33) "高分子物理学" 裳華房
- 66) 竹村・山田・梶田 : (1961) 木誌
- 67) Mark and Tobolsky : (1950) Physical chemistry of High Polymeric Systems.
- 68) Meredith 編 : (1956) "Mechanical Properties of Textile Fibers"

- 69) Kollmann, F : (1957) *Forsch, Ing wes* 23, 49
- 70) Rigby, B. J. : (1960) *Brit. J. Appl. Phys.* 11, 281
- 71) Leaderman, H. : (1955) *J. Polymer Sci.* 16, 261
- 72) Tobolsky and Eyring : (1943) *J. Chem. Phys.*
- 73) Kubat, J. : (1953) *K-Z*, 134, 197
- 74) Halsey, et. al : (1946) *Tex. Res. J.* 16, 13, 329
- 75) Stein et. al : (1946) *Tex. Res. J.* 16, 53
- 76) Eyring et. al : (1946) *Tex. Res. J.* 16, 124, 335
- 77) Holland et. al : (1946) *Tex. Res. J.* 16, 201
- 78) Katz et. al : (1946) 16, 378
- 79) Reichardt et. al : (1946) *Tex. Res. J.* 16, 382, 635
- 80) 広瀬, 他 : (1961) *応用物理*, 30, 417
- 81) Pontoney & Davidson : (1962) *Forest Prod. J.* 12, 243
- 82) Davidson, R. W. : (1962) *Forest Prod. J.* 12, 377
- 83) Kingston & Clarke : (1961) *Aust. J. Appl. Sci.* 12, 211
- 84) Kingston & Clarke : (1961) *Aust. J. Appl. Sci.* 12, 227
- 85) Kunesch, R. H. : (1961) *Forest Prod. J.* 6, 395
- 86) 岡小天 : (1956) 岩波現代化学講座 “高分子物性論”
- 87) Sugiyama, H. : (1957) *Trans. Arch. Inst. Jap. No.* 55, 60
- 88) Pentony : (1955) *Composite Wood*, 2, 131
- 89) Kitazawa : (1947) *NewYork tate College of Forestry, Tech. Pub.* 67
- 90) Grossman : (1954) *Nature*, 173, 42
- 91) Alfrey & Doty : (1945) *J. Appl. Phys.* 16, 700
- 92) Schwarzl : (1956) *K-Z*, 148, 47
- 93) 藤田 博 : (1953) *物性論研究*, No. 63, 8
- 94) 永松一夫 : (1959) *材料試験*, 8, 326
- 95) Leaderman : (1957) *Tras. Soc. Rheo.* 1
- 96) Gross : (1953) “Mathematical Structure of the Theories of Viscoelasticity,” Paris, Hermann.
- 97) 山田・鈴木・浦上 : 未発表
- 98) Bergen : (1960) “Viscoelasticity” Academic Press, N. Y.
- 99) 竹村・福山 : (1961) *木誌*, 7, 72
- 100) James : (1961) *Forest Prod. J.*
- 101) 沢田稔 : (1956) *木材誌*, 2, 233
- 102) 松本勗 : (1961) “ ” 7, 90
- 103) Kollmann : (1952) *Holz R. W.* 7, 269
- 104) フロイデンタール 柳島訳 : (昭34) “非弾性挙動” コロナ社, 東京
- 105) Khukhryanskii, P. N. : (1953) *Akad. nauk. SSSR.* 9, 337 (Feigl 訳)
- 106) 浜田稔 : (昭29) *材料試験法*
- 107) Price : (1929) *Phil. Trans.* 1
- 108) 木材加工技術協会, “日本産主要木材”
- 109) 井口常雄 “実験工学講座”
- 110) Buoljouki : (1962) *Holzforschung.* 16, 33
- 111) Barkas, W.W., : (1941) *Trans. Farad. Soc.* 37, 535
- 112) 沢田稔, *林試報*, No. 195
- 113) Houwink : (1958) “Elasticity, Plasticity and Structure of Matter” (2nd Ed.) Dover Pub. Inc. N.Y
- 114) 深田英一 : (1951) *小林理研報*
- 115) 北原・末松 : (1955) *木材誌*, 1, 47
- 116) 松本勗 : (1960) *岩手大農報*, 5, 1
- 117) Kollmann, F. : (1961) *Holz R. W.* 19
- 118) Katz, S. M. : (1955) *Tex. Res. J.* 25, 224
- 119) Flory, P. J. : (1953) “Principles of Polymer Chemistry,” Cornell niv, Press.
- 120) Meyer and Lotmar : (1936) *Helv. Chim. Acta.* 19, 68
- 121) Bull : (1945) *J. A. C. S.* 67, 407
- 122) Woods : (1946) *J. Colloid Sci.* 1, 407
- 123) Hoover et. al : (1948) *Tex. Res. J.* 18, 423
- 124) Hermanne : (1949) *Tex. Res. J.* 19, 61
- 125) Bryant : (1953) *Tex. Res. J.* 23, 788

- 126) Wakeham and Gerrow : (1953) *Tex. Res. J.* 25, 224
- 127) Roseveare and Poore : (1954) *J. Poly. Sci.* 14, 341
- 128) Bryant and Wakeham : (1955) *Tex. Res. J.* 25, 224
- 129) Dart : (1960) *Tex. Res. J.* 20, 372
- 130) Williams : (1960) *Trans. Soc. Rheology* 4, 297
- 131) Zwicker : (1954) "Physical Properties of Solid Materials" Pergamon Press (Lond.)
- 132) Dart and Guth : (1947) *J. Appl. Rhys.* 18, 476
- 133) 難波・山田 : (1961) 日木会
- 134) 浦上・山田 : (1961) 日木会研究会
- 135) Gabrail and Prins : (1961) *J. Poly. Sci.* 51, 279
- 136) 石原・山田 : (1961) 京大演習林報告
- 137) Stamm et. al. : (1946) *I. E. C.* 630
- 138) Mitchel et. al. : (1953) *J. F. P. R. S.* 3, 38
- 139) Seborg et. al. : (1953) *ibid.* 3, 59
- 140) 小林 : (昭33) 木材組織学, 森北出版株式会社
- 141) Anderson, R. B., : (1946) *J. A. C. S.* 68, 686
- 142) Ivanov, Y. M., : (1956) *Akad. nauk. SSSR. Dok.* 111, 777
- 143) Stamm and Harris : (1953) "Chemical Prossesing of Wood"
- 144) Nissan : (1955) *Nature*, 175, 424
- 145) 田中一彦 : (昭34) "材料工学" 共立出版株式会社
- 146) Kubler : (1956) *Hol* 14, 442
- 147) Nissan : (1958) *Trans. Farad. Soc.* 58, 700
- 148) Nissan : (1958) *Trans. Farad. Soc.* 53, 710
- 149) Nissan : (1955) *Tex. Res. J.* 25, 780
- 150) 深田栄一 : (1955) *J. Phys. Soc. Jap.* 10, 149, 高分子 4, 200
- 151) Brunauer : (1945) "The Adsorption of Gases and Vapors," Princeton. Univ. Press.
- 152) Rowen and Simha : (1949) *J. Phys. Colloid Chem.* 53, 921
- 153) Miyahara, Y. : (1948) *Bull. Chem. Soc. Jap.* 21, 37
- 154) Pickett, G. : (1945) *J. A. C. S.* 67, 1958
- 155) 渡辺治人 : (1939) 日林誌, 21, 78
- 156) Stamm, A. J. & L. A. Hasan : (1937) *Ind. Eng. Chem.*, 29, 831
- 157) 芝本・栗山 : (昭27) 木材炭化, 朝倉書店
- 158) Clark, G. L. and Housmon, J. A. : (1946) *I. E. C.* 38, 1257
- 159) 越智・山崎・角谷 : 工化, 40, 455 (1937)
- 160) Wise and John : *Wood Chemistry Vol. 2*, 830 (1952)
- 161) 平井・北原 : (1957) 木材理学, 朝倉書店
- 162) 福山・梶田 : (1951) 日林講
- 163) 小原二郎 : (1958) 千葉大工研報, 9, 15
- 164) Stamm, et. al. : (1946) *Ind. Eng. Chem.* 6, 30
- 165) 北原・中元寺 : (1951) 日林誌, 33, 414
- 166) Stamm, : (1935) *Physics*
- 167) 梶田・山田・鈴木・小松 : (1961) 木誌, 7
- 168) 山田・梶田 : (1954) 木研資料
- 169) 鈴木 : (1961) 木誌
- 170) 荒木綱男 : (1953) 纖維素化学
- 171) Kumar : (1957) *Holz R. W.* 15, 430
- 172) 小松 : 未発表
- 173) Drow and Mc Burney : (1946) *Forest Product Lab. Rep. No.* 1528
- 174) Hill, T. L. : (1946) *J. Chem. Phys.* 14, 263, 441
- 175) Cook, M. A. : (1948) *J. A. C. S.* 70, 2925
- 176) Dole, M. : (1948) *J. Chem. Phys.*, 16, 25
- 177) Walker and Zettlemyer : (1948) *J. Phys. Colloid Chem.* 52, 47
- 178) Ross, S. : (1949) *J. Phys. Colloid Chem* 53, 382
- 179) Theimer : (1952) *Trans Farad Soc.* 48, 326
- 180) Sakai T. : (1952) *Bull. Chem. Soc. Jap.* 72, 62
- 181) Sakai, T. : (1953) *Bull. Chem. Soc. Jap.* 73, 61
- 182) Cassie A. B. B. : (1949) *Trans. Farad. Soc.* 41, 450

- 183) White and Eyring : (1947) *Tex. Res. J.* 17, 523
- 184) Enderby J. A, *Trans. Farad. Soc.* 51, 106
- 185) Barrer and Robins, *Trans. Farad. Soc.* 47, 773
- 186) Barkas W. W. : (1937) *Proc. Phys. Soc.* 49, 237
- 187) 山田・梶田 : (1953) *科学*, 23, 318
- 188) 山田・梶田 : (1953) *木材研究*, No. 11
- 189) Hermans, D. H. : (1949) "Physics and Chemistry of Cellulose Fibers"
- 190) 福原 : (1960) *高分子*
- 191) Kitazawa, : (1952) *F. P. Res. Soc.* 6, 228
- 192) Thunell, : (1941) *Holz R. W.* 4, 15
- 193) 南義夫 : (1950) *木材工業* 5, 98
- 194) 深田栄一 : (1950) *Nature* 166, 772
- 195) 松本勲 : (1958) *岩手大農報* 4, 73
- 196) Kollmann : (1960) *Holz R. W.* 18, 41
- 197) Meredith, : (1957) *J. Tex. Inst.* 48, T 163
- 199) 岡田元 : (1946) *基礎纖維素化学*, 至文堂
- 200) 白樫・石川 : (1961) *材料試験* 92, 428

Résumé

This review involves a present interetation on the viscoelasticity of wood, and the gist is as follows.

(1) Over high strees range, wood appears to follow the Eyrings non-linear three element theory of viscoelasticity qualitatively well.

(2) But within the low stress range, the Leadermans' superposition test is nearly as apt and creep compliance $D(\log t)$, recovery compliance $D(\log t)$ and relaxation modulus $E(\log t)$ are independent of the magnitude of the load. These facts suggest that wood behaves as a linear viscoelastic material.

(3) Translating horizontally along the logarithmic time axis the superposition of the creep compliance curves $D(\log t)$ and relaxation modulus curves $E(\log t)$ that are determined at different temperatures are found incomplete. But when these curves are smoothed out and differentiated by $\log t$, the slope of the curves obtained are analogous to the relaxation time spectra measured for a long time scale.

(4) The phenomenological functions of the viscoelasticity of wood which are derived from the above data of $D(\log t)$ and $E(\log t)$ by the approximate calculation listed in Table 3.4 are compared with those of several polymers in Fig. 3.10. From these figures it is clear that wood exhibits a considerable degree of glass-like behavior. The positive value of the entropy of deformation of wood shows that the above is a fact.

(5) It will be assumed that the technical modulus E consists of two components E_h and E_n , where E_h is contributed with H-bond in the amorphous area, and that the decrease in modulus E will be caused by the breaking of these H-bonds in the intermoecular chains. From these postulations the contribution of H-bond to Young's modul E_L and E_R is quantified.