

木材の静的粘弾性

山田 正*

Tadashi YAMADA*: Review on the static viscoelasticity of wood.

近年、時間を考慮に入れた材料の力学であるレオロジーの発展とともに、木材についても、この方面の研究が、基礎的には木材物理学の一分野として、また、応用面では木性材料の形成加工の立場から強く望まれるようになってきた。このレオロジーの一分野に粘弾性があり、それはクリープや回復の現象がみられること、さらに、クリープ速度と応力との関係を示す流動図が原点を通る直線または曲線となることなどによつて特徴づけられる。

木材がある大きさの荷重を長期間にわたつて受けるときの強度に関する研究は古く、1707年の報文に見られるようであるが、クリープについてはほとんど今世紀に入つて研究がなされている。結果は本号206頁の資料第1表に見るように、クリープや回復の応力依存性に関する報告が多く、厳密な温、湿度依存性に関する研究は比較的少ない。さらに、最近の傾向として、その非平衡状態下における挙動が注目されるようになってきている。また、流動図については、負荷後の時間が比較的短い場合（たとえば南（1949, 1953）, KING（1961））にも、長い場合（たとえば沢田（1957）, （1957）, YOUNGS（1957））にも、変形速度は応力の増加とともに増加する。このような諸実験結果は木材が粘弾性体であることを示しており、さらに、上記の流動図において、比較的小さな応力範囲に限つてみると、変形速度と応力との間に原点を通る直線関係を想定しうるので、NEWTON 則が適用できるものとみなせる。

木材に荷重、あるいは歪——一般的に言えば刺戟（excitation, stimulus）——を与える様式（excitation history）を単純化して分類すると

- (1) 階段型 step-function excitation
- (2) 傾斜型 ramp-function excitation（規格による強度試験がこの例となる）
- (3) 衝撃型 impulse function excitation（衝撃試験などがこれにあたる）
- (4) 多段階型 multiple step-function excitation
- (5) 繰返し型 loading and unloading excitation（たとえばクリープと回復を何度もくり返す試験）
- (6) 正弦波型 sinusoidal excitation（普通用いられている振動実験などがこれにあたる）

などとなる。表題の静的粘弾性はこれらの中の（1）にあたるものとする。すなわち、応力一定の場合のクリープ、あるいは歪一定の場合の応力緩和について、欠点のない健全な木材試片でなされた諸研究の一端をここに紹介することとする。ただし、その理解に必要な他の様式の刺戟にふれることもある。

一定応力の下で生ずる全変形の時間的変化を示す曲線をクリープ曲線とよぶ。この一定に保

* 木材物理研究部門, Division of Wood Physics.

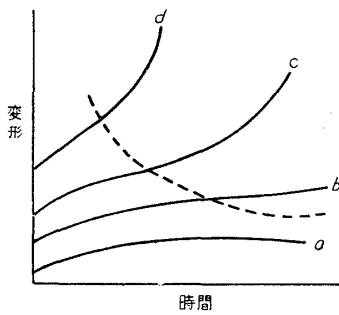


図 1

つ応力の値を次第に大きくしてゆくと、クリープ曲線は一般に図1の曲線群の(a)から(d)にいたる形の変化を示す。すなわち、応力値がごく小さいときにはクリープ速度が時間とともに減少する第1期クリープが次第に飽和する型を示すが、応力が大きくなるとクリープ速度一定の定常クリープが著しくなり、さらに応力が大になると、曲線は変曲点をもつ逆S字型を示して、クリープ速度が時間とともに増大する第3期クリープを経てついにクリープ破壊を起す。これらの各曲線の変曲点を結べば図中点線で示した曲線をうる。その下限値についての実測

値は見出されていない。たとえば、balsa材で DRAFFIN と MUHLENBUCH (1937) が行なつた実験によると、短時間曲げ破壊係数の58%と66%の間に見出されそうであるが、木材の実用的な耐久強度は短時間試験による強度の60%以下、普通は50%前後とされており、また、猪瀬 (1950) によれば縦圧縮の弾性限度は圧縮強度の30%程度と報告されていて、これらの数値の間に木材のクリープに関する臨界的な応力値が考えられ、木材はこの境界値の上下、すなわち、大変形と小変形とでその変形機構に差異を生ずる。縦引張についての KING (1958) の実験結果によると、樹種によつて多少異なるが大体短時間強度を基準とする応力レベル30%乃至50%のあたりから初期歪の大きさに比例する永久歪があらわれ始める。かつ、小応力域では応力とともに直線的に変化する増加クリープ歪はこの応力値から指数関数的に著しく増加し始める。曲げについても同じ傾向が認められる(KINGSTON and CLARKE (1961))。したがつて、この応力以下ではクリープ歪は瞬間弾性歪と第一次クリープ(弾性余効、遅延弾性)歪の和として与えられることになる。ただし、負荷の方法により小応力から永久歪を生ずる場合も報告されている。また、長期間にわたつて大応力を受けていた材と小応力を受けていた材とではその力学的性質を異にすることが報告されている(杉山(1957))。

木材の変形には引張、圧縮、剪断、曲げ、振り、剛体圧入などの種類がある。この中、引張と圧縮とで木材の強度が異なるが、クリープについても比較検討されている(GROSSMAN and KINGSTON, YOUNGS, 南)。結果は、たとえば、引張強度を基準にとつた応力レベル40~90%の範囲における red oak 切線方向の引張クリープと圧縮クリープとでは気乾、湿潤いづれの状態においても同一荷重の下で前者が大きい。しかし、繊維方向に負荷した場合には全く逆の傾向を示す。すなわち、ヒノキ気乾材についての短時間試験結果によれば、表・1に示すように圧縮のクリープ速度がはるかに大きい。曲げの研究にはこれらの効果も予め検討されなければならぬ。

表1 圧縮クリープ速度と引張クリープ速度との比(南, 1947)

応力(kg/cm ²) \ 荷後の時間(分)	1	5	10	50
50	22.5	26.7	29.1	34.8
100	30.7	36.5	39.7	47.2
200	41.5	48.3	51.9	61.3
300	49.5	56.5	59.6	—

圧縮強度 515.5 kg/cm²

本号206頁の表・2にみるように、引張、圧縮、曲げのクリープ実験に比較して、剪断や振りのクリープに関する研究は少ない。plate shear test による剪断クリープについては NORRIS and KOMMERS (1943), HEARMON (1953,

1964) や膨潤圧理論にもとづく GROSSMAN and KINGSTON (1955), 捩りクリープについては KOLLMANN (1937), 短冊状小試片の捩りについて (則元, 山田 (1965)) などの報告がみられる。木材における剛体圧入のクリープは (大迫, 山田 (1964)) まず, その応力状態の理論的検討が問題である。

クリープや回復のデータの解析には大変形, 小変形をとわず $\log t$ 則, power 則その他の実験式を用いる場合が非常に多い。しかし, 小変形では表・2のクリープコンプライアンスを用いて刺戟—応答の線型理論を適用した方が他の諸現象との関連において木材粘弾性を理解するには好都合である。

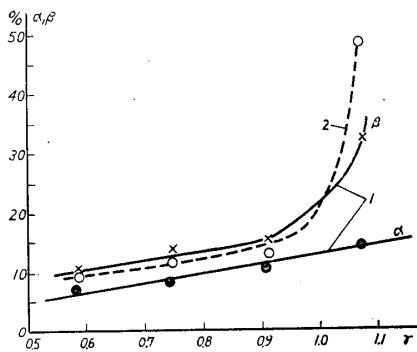


図 2

つぎに, 歪が step-function excitation として与えられる応力緩和現象を上述のクリープと比較する。

KHUKHRYANSKII (1953) が alder について圧縮実験を行なった結果を図・2に示す。図において α は負荷後10分における応力減少量と初期応力との比, β は歪増加量と初期歪との比である。図から明らかなように, クリープの場合には応力が比較的小さい間は増加歪は応力に比例するが, 応力がある値をこえると急に指数関数的に上昇するのに対して, 応力緩和の場合, その減少量は歪に比例する。

したがって, 小変形における粘弾性挙動はクリープ, 応力緩和のいずれであらわしても同様の意義をもつ (表・3参照) もと考えられるが, 大変形の領域で実用上の数値を要求するのではなくて変形機構を知ることが目的である場合にはクリープ実験による方が望ましいと言える。

なお, 応力緩和のデータを整理するのもクリープの場合と同じように \log 則, power 則その他の実験式が用いられている。しかし, 小変形の領域では後出 (表・2) の緩和弾性率を用いた方が物性研究の立場からは望ましい。それと同時に大変形においても小変形における線型刺戟応答理論に相当する体系的な理論の確立が期待される。

上述のように, 木材の変形が小さい範囲内では短時間試験において応力—歪関係に HOOKE 則が, また, 長時間にわたる試験においても応力—歪速度関係に NEWTON 則が近似的に適用できるので, 時間的に測定される変形は両者を組合せた力学模型で記述されている。

HOOKE 弾性体では, 前もつて加えられている荷重の大小にかかわらず一定の荷重変化による伸縮はつねに一定であつて, 応力—歪関係は弾性体の過去の履歴には依存しない。NEWTON 粘性体においても同様に一定の応力変化に対してつねに一定の歪速度変化を伴ない, その挙動は過去の履歴に依存しない。したがって, これらの二種の要素の組合わせとしてあらわれる場合の粘弾性現象は過去の履歴の影響を受けることなく, 以前に何回も変形を受けている場合は各変形の影響は互いに独立である (重ね合わせ原理)。この原理にしたがう粘弾性を線型粘弾性とよぶ。LEADERMAN は物質の変形が重ね合せの原理にしたがうかどうかを loading and unloading excitation の方法で短時間に試験する方法を提案し数種の繊維について実験を行なつている。同じ方法によつて室温, 湿度75%のときのブナ材の曲げを実験した結果は図・3のようである。white pine についても同様の報告があり (PENTONY and

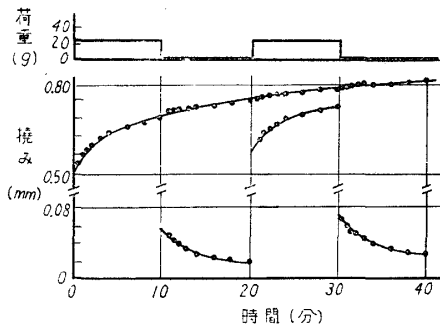


図 3

DAVIDSON (1962)), 小応力の下では近似的に重ね合わせ原理を用いることがわかる。

なお、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 : 正の整数) において物質に加わる力が段階的に $\Delta\sigma_i$ だけ (multi-step function excitation history), あるいは、極限において連続的に変る (ramp-function excitation history) と考えれば、クリープの測定結果から応力—歪の関係式を求めることができるわけで、ブナ材のクリープ実験データからこのよう

にして応力—歪関係を求めると荷重速度が小さくなる程、直線関係からずれて応力—歪図は上に凸な曲線となる。すなわち、実験的に応力—歪曲線が二次曲線であつても重ね合わせの原理は成り立つ。事実、木材の応力—歪曲線が条件によつて小さな応力域においても二次曲線で示されることは知られている。

線型粘弾性物質の挙動を記述する関数について米国レオロジー協会用語委員会の提案の中からその主要なものをとりあげて表・2に示す。そして、これらの間の近似換算式の数例を表・3にまとめておく。表・2の中で静的粘弾性実験から直接求まるものは緩和弾性率 $m(t)$ とク

表 2

現象 函 数	一般的記号	変形様式による記号			
		剪 断	容 積	伸 張	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	$\tan \delta$	$\tan \delta_s$	$\tan \delta_v$	$\tan \delta_t$	
緩和スペクトル	H	H_s	H_v	H_t	
遅延スペクトル	L	L_s	L_v	L_t	

リープコンプライアンス $k(t)$ とであり、両者の関係は表・3の最上段の式で近似的に与えられる。

クリープコンプライアンスは一定応力を与えた後のある時間における歪と一定応力との比で定まる量であつて、湿潤ブナ材を数種の代表的な高分子物質と比較したものが図・4である。非結晶物質の典型的な粘弾性挙動を示す曲線IIにはガラス領域、それから急にコンプライアンスが増大する遷移領域、やや勾配の小さなゴム状高原域およびそれにつづいて急に増大する terminal zone があらわれるのが、低分子量のIでは terminal zone のみが見え、分子間に架橋があるとVのようにこの領域がなくなる。ところが結晶性ポリマーVIIでは全時間域で平坦になり、木材も類似の傾向を示す。

表 3

$$m(t) \doteq \frac{\sin n\pi}{n\pi} \cdot \frac{1}{k(t)}, \quad k(t) \doteq \frac{\sin n'\pi}{n'\pi} \cdot \frac{1}{m(t)}$$

ここに $n = d \log k(t) / d \log t$, $n' = d \log m(t) / d \log t$
 $H \doteq m(t) / d \ln t$, $L \doteq dk(t) / d \ln t$
 $m'(\omega)|_{\omega=1/t} = m(t) + H \cdot B(n)$
 $B(n) = \frac{\pi}{2} \csc \frac{n\pi}{2} - \Gamma(n)$
 ここに n は $-\log H$ vs $\log t$ の勾配
 $k'(\omega)|_{\omega=1/t} = k(t) - t/\eta + L \cdot B'(n)$
 $B'(n) = \frac{\pi}{2} \csc \frac{n\pi}{2} + \Gamma(-n)$
 ここに n は $\log L$ vs $\log t$ の勾配
 $m'(w) = H/B (1 - |n|)$
 $k''(w) = L/B (1 - |n| + \gamma/\eta)$
 $B = \frac{\pi}{2} \sec \frac{n\pi}{2}$
 $\tan \delta = k''/k' = m''/m'$
 $\frac{n\pi}{2} \ll 1$ の時は $\tan \delta \doteq \frac{n\pi}{2}$

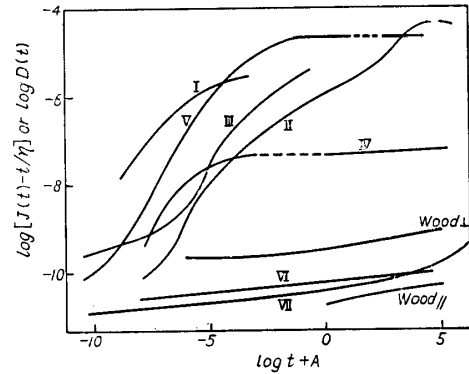


図 4

- I Polyisobutylene
- II Polyvinyl acetate
- III Poly-n-octyl methacrylate
- IV Hevea rubber
- V Polyvinyl chloride
- VI Polymethyl methacrylate
- VII Polyethylene
- VIII Wood プナ湿潤材 (粗近似)

緩和弾性率はある時間における応力と、時間の始めから加えられている一定歪の比で定まる量であつて、その曲線はほぼ、時間軸を鏡軸としたクリープコンプライアンス曲線の鏡像となる。

表・2の貯蔵弾性率から損失正切までの量はおもに振動実験から求めるが、表・3の近似式を用い静的粘弾性のデータから換算することが出来る。この中で損失正切は消散されるエネルギーと貯蔵エネルギーとの比であるが、クリープのデータから表・3の式で計算するときには定常流動を除くクリープ曲線の勾配について求める必要がある。それは、弾性率やコンプライアンスに比較して構造に敏感な量であつて、水分や温度の影響が大きく、木材含水率約18%では50~60°C (DAVIDSON (1962)), 湿潤材ではそれよりやや低い温度で特異な点がある(山田 (1963))。

緩和スペクトルおよび遅延スペクトルは物質の粘弾性挙動を記述するための補助関数であつて、 $m(t)$, $k(t)$ は次式で与えられる。

$$m(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\lambda) \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) d \ln \lambda \quad (\lambda: \text{緩和時間})$$

$$k(t) = \int_{-\infty}^{\infty} L(\tau) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) d \ln \tau \quad (\tau: \text{遅延時間})$$

この H を緩和スペクトル, L を遅延スペクトルとよぶ。図・5は図・4のデータに関する遅延スペクトル曲線であつて、非結晶性物質に比べて結晶性物質では平坦な曲線となり、木材も類似の傾向をとる。

なお、定常クリープ状態ではクリープコンプライアンス $k(t) = D_0 + t/\eta$ において右辺第2項が大きくなってくる。上式を t で微分して $\frac{dD(t)}{dt} = \frac{D(t)}{t} \cdot \frac{d \log D(t)}{d \log t} = \frac{1}{\eta}$ より $\frac{1}{t} \rightarrow 0$ (すな

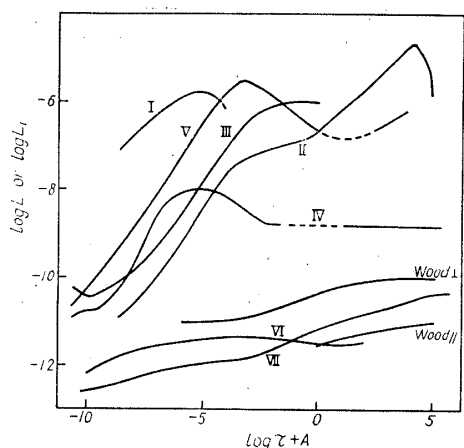


図 5

わち、 $t \rightarrow \infty$ (定常状態) のときの η を求めれば、定常クリープ粘度を求めることができる。ブナ湿潤材ではこの値がおよそ 10^{15} poise の程度となる。ちなみに固体、液体の境界を示す粘度の値は 10^{13} poise 程度といわれている。

なお、クリープコンプライアンスの応力依存性をみると、表・4に示したブナ湿潤材について実験の範囲内では荷重の影響がほとんどみられない。このような関係が保たれる範囲については、ash や pine 材に関する KINGSTON ら(1961, 1962) の報告がある。結果は短期間試験における強度を基準にとるとき応力レベル40乃至50%迄はクリープコンプライアンスは応力に

依存しないが、これより大となると急激に増大して、非線型粘弾性の挙動が顕著になることを示す。

また、クリープコンプライアンス $D_c(t)$ と回復歪から求めたコンプライアンス—回復コンプライアンス $D_r(t)$ とを比較するとブナ湿潤材1,000分迄のクリープにひきつづく回復データから求めたものは表・4のようになつて両者は非常に近い値を示す。応力が大となるとむしろ $D_r(t)$ の方が大きくあらわれる。

表 4

荷重 p (g)	2		6		14		18	
	$D_c(t)$	$D_r(t)$	$D_c(t)$	$D_r(t)$	$D_c(t)$	$D_r(t)$	$D_c(t)$	$D_r(t)$
t (sec)								
10	1,666	1,648	1,831	1,793	1,754	1,748	1,724	1,709
60	1,748	1,729	1,886	1,847	1,811	1,807	1,790	1,776
300	1,834	1,794	1,977	1,931	1,897	1,898	1,899	1,871
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
3000	1,969	1,900	2,156	2,077	2,122	2,029	2,157	2,034
6000	2,010	1,938	2,204	2,105	2,210	2,066	2,289	2,075

$D_c(t)$: クリープ・コンプライアンス ($\times 10^{-4}$ cm²/kg)

$D_r(t)$: 回復コンプライアンス ($\times 10^{-4}$ cm²/kg)

静的粘弾性に及ぼす水分の影響を研究するには先ず次の3つの場合について予め検討しておく必要がある。それは応力 (または歪) σ と湿度 h とをそれぞれ step-function excitation の型で与える方法によるもので、温度一定の下、

- (1) 時間 $t = -\infty$ に一定の h を与えておいて、 $t = 0$ で σ を加える。
- (2) $t = -\infty$ に σ を与えておいて、 $t = 0$ で h を加える。
- (3) $t = 0$ で σ, h を同時に加える。

これらの中、水分平衡状態の条件 (1) の下でなされた従来の研究には湿度を特定な 2, 3 の状態に保つてなされたものが多く、 h を多くの段階に調節しながら求められたデータは少ない。横圧縮大変型の応力緩和を KUNESH は含水率 6, 12, 18 および生材状態に保つて実験し、18%前後に緩和速度が最大となることを見出している。小変型の曲げについても含水率 20%前後に特異な点がみられる (竹村, 福山, 春名 (1961))。すなわち、関係クリープの対数は含水率 4% から 20% のあたり迄は直線的に増加するが、それ以上の含水率域ではこの増加量は小さくなる。かつ、水分、時間両効果を分離した形で記述できる (鈴木 (1949) 竹村外 (1961))。同じく小応力の下で湿度 3% 乃至 95% の範囲にわたる振りクリープの実験結果によると、クリープは湿度増加とともに単調に増加することではなくて、動的測定における $\tan \delta$ の水分依存性と類似して、ある湿度で最小値を示す (則元, 山田 (1965))。したがって、水分—時間の重ね合わせは困難である。

湿度非平衡の条件 (2) および (3) の下での研究は新しく、クリープについて ARMSTONG and KINGSTON (1960, 1962), 応力緩和について LAWNICZAK (1959), 山田, 浦上, 宮野 (1963), 竹村, 福山, 池田 (1963) などがあり、水分平衡の場合に比して著しいクリープや応力緩和が観察されている。

水分のみが平衡状態にある条件 (2) の場合よりも、応力および水分の両者が非平衡状態にある場合 (3) の方が緩和量は大きい。そして、水分移動速度、(木材中の巨視的な水分勾配にとともなう内部応力) よりも、感湿範囲における水分変化の中 (ミクロな内部応力) が、吸着過程と同様に脱湿過程においてクリープ量や緩和量に大きく影響する。なお、吸湿過程と脱湿過程を交互に繰返す場合も報告されていて (KINGSTON (1962), HEARMON and PATON (1964)), このような繰返しにより初めは著しいクリープ現象のみがあらわれていた吸湿過程に、後にはクリープ回復現象があらわれる。

このように水分は歪の回復に寄興するが、その影響は変形が大きい場合には著しい。これは木材などにもみられる現象であつて、とくに飽水状態では高弾性化することが指摘されている。

なお、水分非平衡の理論的解析には化学レオロジーの考え方を入れる必要がある。

温度 θ の影響を研究するときにも、湿度の場合と同様に、まず次の 3 条件の下で検討しておく必要がある。

- (1) $t = -\infty$ で θ (一定) を与えておき、 $t = 0$ で σ を加える。
- (2) $t = -\infty$ で σ を与えておき、 $t = 0$ で θ を加える。
- (3) $t = 0$ で σ, θ を同時に加える。

これらの中、温度平衡条件 (1) の下でなされた研究は、本号、表・1 にみるように湿度平衡の場合に比較して多い。結果は、大変形応力緩和では初期応力は温度上昇にともなつて小となり、クリープ歪は指数関数的に増大する。それにともなつて緩和量は温度上昇につれて減少する。小変形では遅延時間の分布 (または緩和時間の分布) の山が温度上昇につれて短時間側に移行する。大変形における緩和速度はある温度で最大値を示すが、その温度は木材の水分状態により、高含水率になるほど低温側に移行する。

湿潤材で小変形の曲げ応力緩和およびクリープの実験結果から時間—温度の換算を試みて合成曲線を求めると多くの分岐を生じて一般結晶高分子にみられるように厳密な換算則が適用

できない。しかし、それを平滑化して得た曲線の微分曲線は長時間実験から得られた緩和曲線やコンプライアンス曲線の微分曲線と類似の形を示し、そのときの移動量の対数は絶対温度の逆数に対して直線関係となり、緩和クリープと一致する。これに ANDRADE 則を仮定してクリープや応力緩和の活性化エネルギーを求めると約 50 kcal/mol となる。

歪回復に及ぼす温度の影響は大変形において著しく、湿潤材の横圧縮歪は温度 60°C を越えるとほとんどすべて回復する (LAWNICZAK and RACZKOWSKI (1961))。しかし、切線方向と半径方向とで温度効果は傾向を異にし、また、水分状態によつてその程度を異にする。

熱的非平衡状態 (3) における研究は少なく、ヒノキ湿潤材の曲げクリープに関する研究 (北原, 湯川 (1964)) では、その傾向は、水分非平衡時の挙動に似る。さきにある含水率範囲における平衡水分量が温度と同じ傾向の寄与を示すことを知つたが、非平衡水分もまた非平衡状態の温度と類似の寄与を与える。

応力を平衡状態に保つて温度を変化させる条件 (2) において、歪を一定に保つに要する応力の温度依存性が可逆的となるには長時間を要する。ヒノキ湿潤材について約 2 週間、周期的な温度変化をくり返す応力緩和実験によつてほぼ可逆的な荷重—温度特性曲線を得るが、それは、繊維方向、横方向ともに実験された範囲の温度 15° から 70°C の間で負の勾配をとる。これより熱弾性の理論からエネルギー弾性やエントロピー弾性の寄与を知ることが出来る。結果は木材に恒温弾性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貯えられるが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。

σ , h , θ の 3 種の刺戟を与える組み合わせにはいろいろ考えられるが、個々の影響の和よりも同時非平衡の方がクリープは著しい (YOUNGS)。三者同時に種々の excitation history で作用する例の 1 つが乾燥である。刺戟にはこの外に化学的、生物的なものがあつて、これらを総合した粘弾性データの集成が望まれる。

一般に、木材に上述のようないろいろの刺戟を与えて応答をうるまでには木材内部で非常に複雑な要素過程が起つているはずである。これに関与する構造因子は (1) 分子構造 (2) 微細構造 (3) 高次構造 (積層多孔構造) となる。この中の何れかの構造変化に敏感なものもあるが、多くはこれらの諸因子が入り混つて影響する。そして、その混り方の影響に簡単な法則が成り立つ場合もあるが、局部的なストレスがつきまるとつて複雑になる場合が多い。上述の非平衡状態における諸問題がこれにあたるものと考えられる。このような木材の組織構造の知見にもとづいて木材の性質を理解し、さらに環境条件の変化に対する応答を予知しようとするのが狭義の木材物性研究の立場である。物性研究の方法には実験と理論の 2 通りある。前者の例としては圧電気、電子顕微鏡、X線及び電子線回折、赤外および紫外吸収、核磁気共鳴吸収、電子スピン共鳴吸収などである。木材の伸縮変形についてみると、巨視的には細胞構造—多孔体の変形としてあらわれるものも、その際に生ずる圧電気を測定したり、あるいはX線などの分光学的解析によるときは細胞膜の結晶域や非晶域における分子構造に変化が認められるのであつて、最近各国でこの方面の研究に着手されるようになってきた。

すなわち、木材の変形に関する X線的研究には先に北原 (1954) の報告があるが、最近、MURPHEY (1963) は縦引張クリープ過程をX線的に観察していて、配向度は荷重を加えると瞬間的に増加し時間的には変化を生じないことや、除荷とともにその大部分は回復してもとの結晶化度の値に近くなるが、一部は残る。しかもそれは時間的に変化せず、その大きさは負荷重

とともに増大することを見出した。

木材における圧電効果は深田 (1955, 1957, 1959), GALLIGAN and BERTHOFF (1963), BAZHENOV (1961) らによつて研究されている。一般に結晶体を歪ませるときその表面にあらわれる電荷密度の三方向における成分は対称座標軸を 1, 2, 3 とするとき圧電率マトリックス

$$\begin{array}{cccccc} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{array}$$

で与えられるが、木材の測定結果によると弾性域では分極成分と応力との間の直線式が成立し、素材では d_{14} d_{25} のみが変わり、かつ $d_{14} \doteq d_{25}$ となつて、半径方向の圧縮と切線方向の圧縮とで同様の圧電効果を示す。これは両方向における細胞膜実質のヤング率がほぼ等しいことを推定させる。

高次構造の影響をたとえば圧縮についてみよう。木材の縦圧縮においてはかなり高い応力値まで細胞構造の顕微鏡的变化はみられないという。これは縦ヤング率と比重との関係を示す両対数グラフの直線の勾配がほぼ 1 となることと対応している。しかし、横方向においてはヤング率と比重との関係を示すこの直線の勾配は 1 より大きくなつて、半径方向でおよそ 1.2、切線方向でおよそ 1.8 となり細胞要素の顕微鏡的な変形が寄与してくることになる。さらに極端な場合、ヒノキなど針葉樹の木口切片を顕微鏡下で引張りながら観察すると網目構造様の変形が観察され、また、木片について年輪に 45° の方向のポアソン比が 0.9 であるのに対し顕微鏡切片ではそれが、1.5 に近い値をとり、高次構造の変化が大きく試片の変形に寄与することを示す。

一方、理論的な方法としては熱力学、統計力学、反応速度論などが木材の吸湿膨潤応力、粘弾性などの解析に有力な方法として用いられようとしている。(BARKAS (1945), KINGSTON and CLARKE (1961))。

(文献は本号 P. 205 の資料を参照)