

木 材 の Hygrostress*

(引 張 圧 縮 の 場 合)

山 田 正**

Tadashi YAMADA** : Hygrostress in Wood*

1. 緒 言

木材をある一定の歪に保つたまま、周囲の湿度を変化させるときには、木材はそれまでとは異つた力学的挙動を示し、生じていた応力に変化を生ずる。この応力変化量を hygrostress とよぶ。hygrostress の概念は、羊毛に関する研究において HALY や FEUGHELMANN らが用いてきているもので、たとえば、ある湿度において試片に引張荷重を加えてある長さまで伸長し、その後、その長さを常に一定に保つと応力緩和現象が生じて試片の応力は次第に減少するが、負荷後ある時間において周囲の湿度を変化させて、かりに湿度を 0% までおとすと、試片は縮もうとして引張応力が発生して図 1 の立上り以後の曲線の経過を辿る。このときの hygrostress を図の σ_H と定める。hygrostress に対して hygrostrain という概念も生れる。それは木材にある一定の荷重を加えたまま周囲の湿度を変化させると、図 2 に見るように、それまでのクリープとは異つた歪挙動を示す。このときの歪変化量 ϵ_H を hygrostrain とよぶ。

上述の hygrostress または hygrostrain の定義は、変化する雰囲気湿度を湿度と限らなければ次のように一般化することもできる。

木材に一定の歪を与えたまま膨潤または収縮させるときには、木材に生じている応力が変化する。この応力変化を hygrostress とよぶ。また、木材に一定の負荷を与えたまま膨潤ま

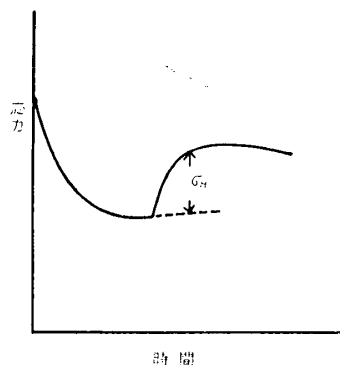


図 1

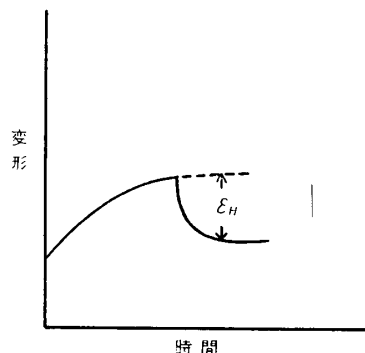


図 2

* 第14回木材研究所公開講演会（昭和42年10月，大阪）にて要旨を発表

** Division of Wood Physics, 木材物理部門

たは収縮させると木材の歪量に変化を生ずる。この歪変化量を hygrostrain とよぶ。この中、とくに膨潤過程において発生する hygrostress を膨潤応力または収着応力とよび、収縮過程におけるそれを収縮応力または脱着応力とよぶ。ときにはこれを乾燥応力とよぶこともあるが、hygrostress は定義にみられるように外部拘束に起因する現象であるから、主として、内部拘束に起因する乾燥応力という語をここに用いることはさけたい。

木材力学は、樹木生長過程、木材の枯化分解過程、および木材の積層、合成過程における力学現象を追究して、木材の形質がどのように発現し、また、物理的、化学的、生物的な環境因子によつてどのように変化するかを明らかにする目的をもつものと考えられるが、非平衡状態における静的粘弾性現象である hygrostress はそのいずれの現象においても要素過程としてあらわれる。とくに身近な問題としては木材の利用加工上しばしばあらわれる反り、狂いを究明する基礎となる研究分野でもある。

hygrostress を外からの力学的な刺激の種類により、引張、圧縮、曲げ、剪断、捩りおよびそれらを組合せた多くの場合に分類できるが、ここには、単純な引張と圧縮の場合に限つて、従来の諸研究にみられる現象を一べつすることにする。

2.1 引張（収縮拘束）状態における hygrostress（脱着応力、収縮応力）

金属などの固体では、熱応力が固有応力問題の主要なものであるが、木材では熱による伸縮は非常に小さく、いわゆる常温の範囲内で 35°C から 5°C になつたときの収縮量は 0.2% を超えることがない。これに比べて、含水率変化にもとづく横方向の自由伸縮は大きく、いわゆる常湿の範囲内においても、たとえばヒノキ切線方向では 2% をこえる。このような水分にもとづく自由伸縮を拘束するとき生ずる応力について考察するとき、この拘束の原因には木材の外的支持条件から生ずる外部拘束と、木材内の水分分布、形状、膨脹係数や粘弾性量の相違や変化にもとづく内部拘束とがある。後者は乾燥応力の問題として現象論的に McMILLEN^{5,6)}, VGOLJEW⁷⁾, 小倉⁸⁾, YOUNGS^{9,10)}, その他多くの、また応力発生機構に関しては SCHNIEWIND^{11,12)} などの研究がよく知られているが、ここにはふれない。

一方、外部拘束により発生する hygrostress の大いさ σ_H には多くの因子、たとえば、時間 t , 含水率（膨潤剤含有量） ϕ , 膨脹率 ε_H , 弾性率 E , 温度 T , 初期荷重 P° などが関与するので

$$\sigma_H = f(t, \phi, \varepsilon_H, E, T, P^\circ, S, R)$$

のようにあらわすことができよう。ここに、 S は材の強度、 R はその他の因子、たとえば材の内部的拘束条件などが関与するものである。

あるいは、hygrostress の現象を一つの粘弾性現象としてとらえ、ある範囲における σ_H を単純に

$$\begin{aligned}\sigma_H &= kE\varepsilon_H \\ &= kE \cdot \beta \phi \\ &= q \cdot E \cdot \phi\end{aligned}\tag{1}$$

k : 常数
 β : 吸湿膨脹係数
 $q = k \cdot \beta$

とおくことができ、 σ_H は E に比例する⁵⁰⁾ことになる。

図3は aspen 材木口切片の切線方向における収縮力を、片持梁式検力計によつて測定されたもので¹³⁾、水分傾斜をさけるために厚さは2細胞長より小さくとられている。図の曲線OABはほぼ繊維飽和点から含水率4%まで乾燥した場合の経過を示し、OAは初期負荷量である。この場合には、ほぼ(1)式が成り立つことがわかる。曲線OCDは生材状態から同じ含水率まで乾燥した場合の経過であつて、この中のOCは、collapse 生成の原因と考えられている毛管力による内部応力を示し、それは毛管半径を r 、液の表面張力を S とすると $\sigma_H = 2S/r$ で与えられる。CDが正常な収縮過程を示すものと KASS は述べている。

図のように σ_H が ε に比例するならば、その経時的な変化は ε の実験式¹⁴⁾より次のように与えられる。

$$\sigma_H = k' E \varepsilon_{\infty} \left[1 + \tanh \left\{ a \left(\frac{t}{t_{\infty}} - \frac{1}{2} \right) \right\} \right]$$

ここに ε_{∞} は乾燥完了時の収縮率、 t_{∞} は ε_{∞} に達する時間、 a は係数である。

KASS が切片切線方向について 85°F の下で曲線 OAB を求めたのに対し、LAWNICZAK らは、断面 5(L)×5(T)mm の厚い試片について半径方向の収縮応力を 100°C で乾燥しながら求めている¹⁵⁾。すなわち、比重 0.4 ないし 0.75 の西アフリカ産 6 種の材について、 σ_H は ϕ に比例し、含水率 1% 変化に対する σ_H の変化量は 0.9~2.2 kg/cm² に達することを見出している。なお、樹種によつて σ_H の最大値が異なるが、これは最大収縮量に関係なく、引張強度に依存すると述べていて、弾性率の測定値は報告されていない。なおこの報文から収縮応力と比重の関係を両対数にプロットすると、図4のようになり、これを木材実質の比重に外挿すると、おおよそ 200 kg/cm² の値をうる。

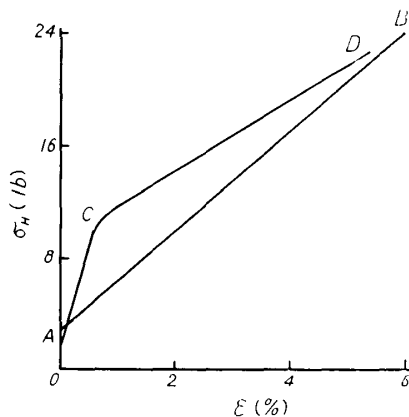


図3 (KASS)

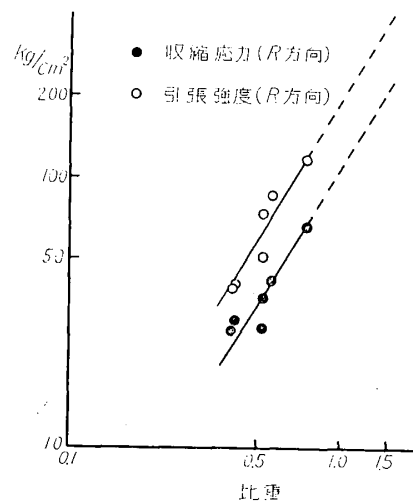


図4 (LAWNICZAK & RACZKOWSKI の測定値より)

2.2 引張下の hygrostrain

木材の横方向の自由膨脹は、繊維飽和点近くまで、ほぼ含水率に比例するが、繊維方向では

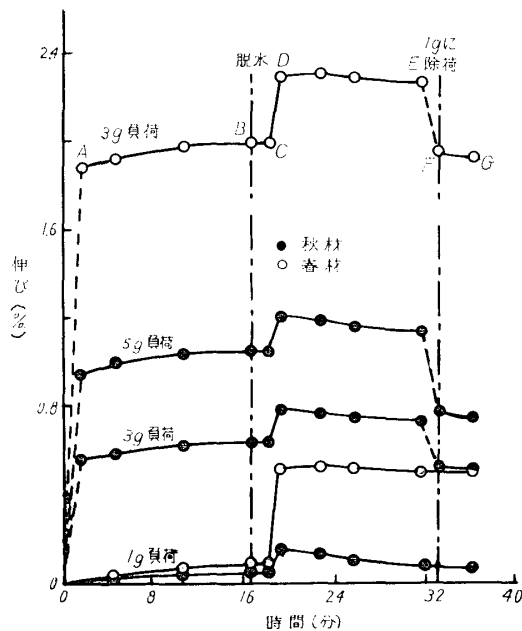


図5 (JENTZEN)

後者の約2倍に達している。

さらに、厚さ 0.4mm の無処理薄片について ERIKSSON と NORÉN がマツ材繊維方向の伸縮を (a) 含水率13%~6%および (b) 19%~16%の範囲にわたる乾湿繰返し実験より求めている²²⁾。その結果によると見かけの伸びは (a) 条件の第一回目の脱湿過程においては、僅か、上記の単繊維の場合に似た挙動を示すものもあるが、(b) 条件ではいずれの試片も単繊維の場合とは異なる挙動を示している。しかし、自由収縮量 (および瞬間弾性歪を) を差引いた純クリープは最初の脱着過程で著しく、以後の吸湿過程でわずかの回復を、また脱着過程でクリープの増加を示している。

また、3/8 インチ角の hoop pine 繊維方向に、生材基準の応力レベルで18~29%の引張応力を加えたときの挙動は湿潤状態から始めて乾湿をくり返すと、含水率30%以下に乾くときに見かけの収縮があらわれ、吸水とともに伸張する。一方、初期含水率11%から生材状態まで乾湿をくり返すとき、第一回目の吸水時に著しい見かけの伸びを生ずるがその後は脱湿時でもほとんど伸びは生じないことが報告されている²³⁾。マツ材について試片寸度によるこのような著しい挙動の差異は (前) 式における因子 R にも関与するものと考えられて興味深い。

横方向については、ヒノキ材半径および切線方向について高橋ら²⁴⁾、また、ヒノキ切片の切線方向について藤田ら^{25~27)}、ヒノキ、ポプラについて角谷ら³⁹⁾の研究があるが、みかけ上初期のクリープ伸びにひきつづいて収縮歪が時間とともに著しくなる正常な hygrostrain の傾向を示し、その大きさは初期荷重 P^0 の増加とともに減少している。また、大草ら²⁸⁾ はスギ心材、半径方向の (a) 生材状態から含水率12%までの脱湿過程 (b) 乾燥状態から含水

含水率12%前後の気乾状態を境にして挙動を異にする場合が知られている^{16~20)}。したがって、この方向における hygrostrain の現われ方には特異性が期待される。

図5は、THOMPSON と KAUSTINEN の方法によつてパルプ化された *Pinus palustris* の早材および晩材の単繊維について、湿潤試片の乾燥中における長さ変化を示している²¹⁾。図において、AB間は湿潤状態におけるクリープを示しており、B点で試片の脱水を開始して、73°F, 50% R. H. の雰囲気中で乾燥を始めると、収縮は起らず却つてCで急に伸びが大きくなりCDEの経過を辿る。E点で除荷するとEFGなる回復の経過を辿るのである。CDEの過程における急激な伸びの大きさは初期荷重には依存しないが、早材と晩材とでは著しく異なり、前者は

引張応力 (kg/cm ²)	0	9	15
(a) 平均収縮率 ($\times 10^3$)	1.21	0.96	0.36
(b) 平均膨張率 ($\times 10^3$)	0.96	1.49	1.69

率12%までの吸湿過程における伸縮におよぼす引張荷重の影響を求めている(上表), 収縮については, 上記と類似の傾向がみられる。

さらに SCHNIEWIND²⁹⁾ はブナ材の脱着過程における横引張クリープ実験から同様の傾向を測定し, かつ, hygrostrain の大きさは, 変化する含水率の巾だけに依存していて, 感湿範囲内での位置や, 収着速度, クリープ履歴, 温度には依存しないことを見出している。

2.3 hygrostress と物性変化

羊毛を 0% R. H. から 65% R. H. まで吸湿させながら, 動的内部摩擦を経時的に測定すると, 吸湿経過とともにその値は次第に大きくなって吸湿前の値の 6 倍程度の最大値をとつた

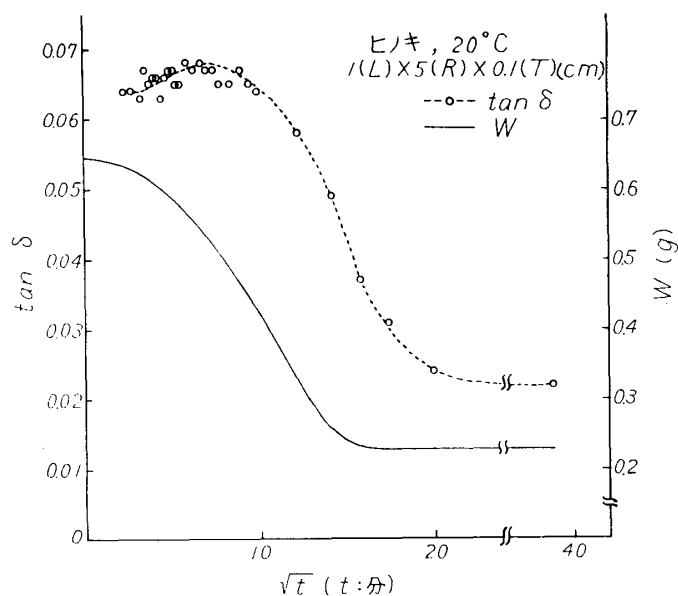


図6 (佐々木)

後, 次第に時間とともに減少して, 吸湿平衡に達したときには初めの値の 3 倍程度に落ち着く。これに対応して, 剛性率は吸湿平衡に達する前に最小値をとる³⁰⁾。同様の傾向はケラチンなどについても測定されている^{31~33)}。木材ではヒノキについて複合振動子法により類似の効果が得られている^{34,35)}。

脱着の場合, 湿潤木材が 45% R. H. の雰囲気乾燥されたときにおこる一時的な内部摩擦の増加を図 6 に示す³⁶⁾。図中の W は試片重量である。

JENTZEN²¹⁾ は図 5 にみるような, 引張荷重下で乾湿を繰返す履歴を与えた繊維の強度変化を晩材繊維について求め次表の結果をえている。

乾燥荷重 (g)	0	1 ^{a)}	3 ^{a)}	5 ^{a)}	5 ^{b)}	5 ^{c)}
ヤング率 (dyn/ μ^2)	3470	5370	6310	5630	4160	6220
引張強度 (dyn/ μ^2)	106.1	129.3	145.1	135.4	107.0	141.5

a = 図 5 の履歴によるもの

b = 5 g の負荷の下で乾燥し, 無負荷の下で吸湿させ, 乾燥させる

c = 無負荷で乾燥させ, 5 g の負荷下で吸水, 再乾燥したもの

表の 5 a) と 5 b) を比較すると初期乾燥効果が、ほとんどなくなつてしまつている。さらに早材繊維については晩材繊維よりも著しい乾燥荷重の影響がみられる。しかし、木材の横方向においては薄片については類似の効果がみられるが³⁸⁾ブロック試片では³⁷⁾このような効果は著しくない。なお上記単繊維の X 線による実験では、乾燥中の負荷により、結晶化が起り、それは晩材に比べて早材にいくらか著しい²¹⁾。

分子構造変化の観測手段としては、赤外吸収が用いられる。角谷ら³⁹⁾が、ヒノキとポプラの切片を、繊維方向一定引張負荷の下で乾湿をくり返したときに常に認められた変化は、リグニンベンゼン核振動にもとづくものと思われる 1490cm^{-1} 、リグニンベンゼン核およびピラン核上の CH_2 変角振動にもとづく $1460, 1445\text{cm}^{-1}$ 、セルロース、ヘミセルロースのブリッジ C-O-C 振動にもとづく 1160cm^{-1} などにおける諸吸収の減少、また、セルロースあるいはキシランの OH 面内振動、あるいはセルロースの CH_2 面外変角振動にもとづく $1340\sim 1320\text{cm}^{-1}$ 、ピラン環特性、結晶性バンドといわれる $1105\sim 1035\text{cm}^{-1}$ における三吸収線などの著しい増加である。これらの変化は、ヒノキとポプラ、板目切片と柾目切片とに共通してあらわれている。その中の 1060cm^{-1} および 1035cm^{-1} における近似吸収強度の変化をクリープ歪と比較し検討すると、柾目切片の繊維方向における見かけの伸びには引張負荷の、また、板目切片のそれには乾湿処理の効果がよりいちじるしい。谷口らは⁴⁰⁾収縮を拘束した乾燥により生ずる結晶性バンドの変化を X 線回析の結果と対応させて検討している。

2.4 hygrostress の解析

上述のような hygrostress の解析には、拡散に支配される応力緩和現象としての取扱い^{41,42)}がそのいとぐちとなるであろう。しかし、Fick 型の拡散式を適用するのでは充分でない⁴⁴⁾。

3.1 圧縮（伸張拘束）状態における hygrostress（膨潤応力、収着応力、膨潤圧）

岩石を割るのに木材の膨潤圧を利用することは古代人の知恵であつたが、この膨潤応力の定量的な測定がなされたのは比較的新しいことである。

膨潤応力は木材の自由膨潤を阻止するに必要な圧縮応力として測定されるが、この膨潤を阻止する方法には、一方向を拘束する場合と二方向を拘束する場合とが報告されていて、三方向を拘束する実験はなされていない。

一軸方向の膨潤応力の測定には、圧縮応力緩和実験装置を用いればよく、素材について SOLNTSEV, HALLAY, GRACHEV, IVANOV^{20,43)}, PERKITNEY および協同研究者^{45~47)}, KEYLWERTH^{48~50)}, 南⁵⁴⁾, NARAYANAMURTI および協同研究者^{51~53)}, パーティクルボードについては DEPPE⁵⁵⁾, OERTEL⁵⁶⁾ などの報告がある。

素材の繊維方向の膨潤は小さく、かつ前にも述べたように特異な挙動を示すにもかかわらず、その膨潤を拘束すると、かなりの収着応力値を示し、かつ、含水率に関して、ほぼ式(1)が用いられることがわかる。

これに対して、横方向の測定は多くなされていて、その時間的な経過を見ると、図 7 にみるように一般に応力は始め急速に増加するが、繊維方向と異なり、その後最大値を示してから再び急に応力は減少する。含水率の依存性も同様に最大値を示す。種々の材の乾燥試片を湿潤させたときに示すこの最大値を比重に対してプロットすると図 8 のようになり、木材実質の比重に外挿しても、得られる値はせいぜい 200kg/cm^2 の程度である。これは、図 4 の収縮応力

の場合とはほぼ一致する。

このように測定された横方向の膨潤応力の値を、いわゆる材の流動限界 σ_{pf} と比較すると、その比は、一般に半径方向が切線方向に比較して小さい⁴³⁾。

一方、熱力学的には膨潤応力は、膨潤の際の自由エネルギー変化にもとづくものであつて、よく知られている KATZ の式によると、蒸気圧 P から飽和蒸気圧 P_s に至るまでの膨潤応力 σ_H は

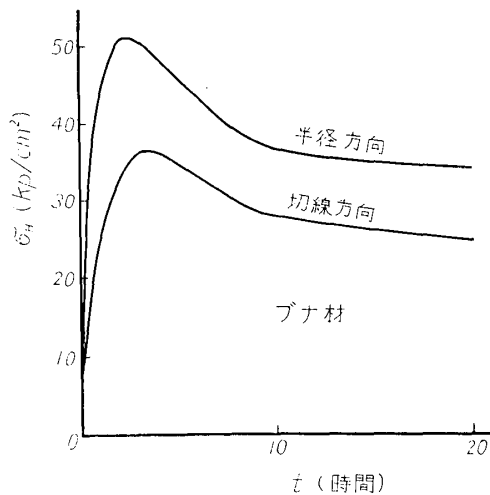


図7 (KEYLWERTH)

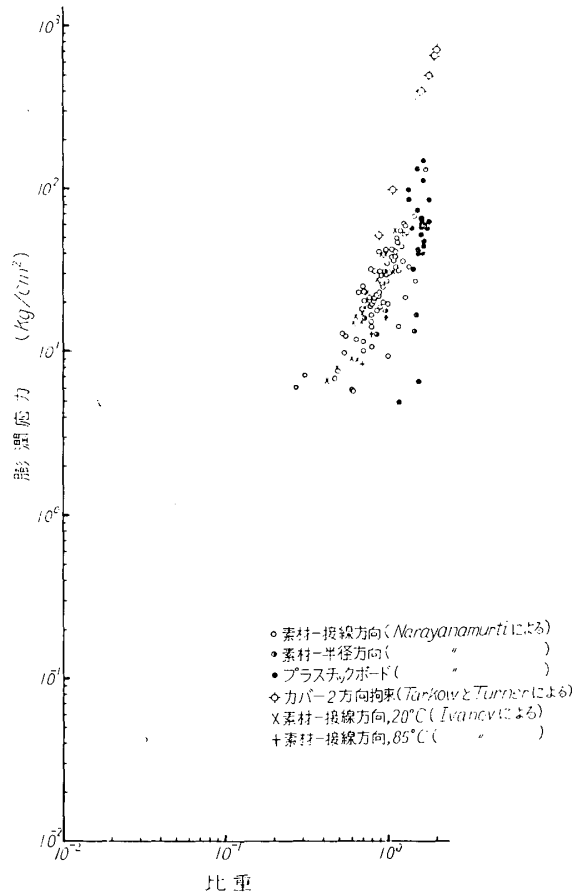


図 8

$$\sigma_H = -\frac{RT}{M} \log \frac{P}{P_s}$$

で与えられる (表1)。ここに R はガス恒数, T は絶対温度, M は水の分子量である。

しかし、実際には表1に見られる数千 kg/cm^2 にも達する応力が木材で測定されてはいない。また上式によるときは膨潤応力は温度の上昇にともなつて増加するはずであるが、*Pinus silvestris* 辺材切線方向の測定値²⁰⁾は 19°C で $19.8\text{kg}/\text{cm}^2$ を示すが 84°C では $9.4\text{kg}/\text{cm}^2$ となつて約半分に低下し、*Fagus orientalis* でも同じく $38.7\text{kg}/\text{cm}^2$ が $18.2\text{kg}/\text{cm}^2$ に低下する。しかもこの時膨潤率は温度によつてほとんどかわらない。また同じ乾燥材を水中に浸漬した場合と、飽和湿気中においた場合とで生ずる膨潤応力の値にはかなりの差がある (表2)。

このように KATZ 式の値が測定から著しくずれる理由の一つは、KATZ の式が材質に関係しないのに対して、実際の測定量は空隙を含む木材の力学的挙動に支配され、木材実質に関する値を求め得ないことにある。したがつて、測定の際の拘束条件が、膨潤応力の値に影響するものと考えられる。

一方向の伸縮を抑制した場合、その拘束条件の一つにあらかじめ試片に与える荷重の大きさ P^0 がある。このような加圧拘束が、膨潤圧におよぼす影響は IVANOV, PERKITNY らが検討し

表1 (KATZ 式)

P/P_s	σ_H (bars)
0	∞
0.1	3117
0.3	1630
0.6	691
0.9	143
0.99	13.6
1.00	0

表2 (PERKITNY)

		σ_H (kg/cm ²)	
		飽湿 (20°C)	水中 (20°C)
Kiefer	T方向	21.0	12.6
	R方向	14.1	9.2
Buche	T方向	41.0	36.0
	R方向	40.2	28.9

ている。IVANOV はマツ辺材切線方向について膨潤応力を測定し、表3のように P° が生材の降伏点 σ_{pf} に達するまではわずかに σ_H は P° の増加とともに低下するが、 σ_{pf} をこえると急に値が小さくなることを示している。しかし、測定直前に乾燥状態の σ_{pf} をこえた圧力を加えた場合には膨潤応力は逆に増加する。

さらに PERKITNY はマツ辺材を水中に浸漬したときの切線方向の膨潤圧について、表4の

表3 (IVANOV)

P° (kg/cm ²)	P°/σ_{pf} (%)	σ_H (kg/cm ²)	%
0.38	3.0	9.65	100.0
0.82	6.4	9.70	
8.05	63.0	9.33	96.5
8.05	63.0	9.13	94.5
12.00	94.0	9.16	94.7
15.80	123.0	7.78	80.7

表4 (PERKITNY)

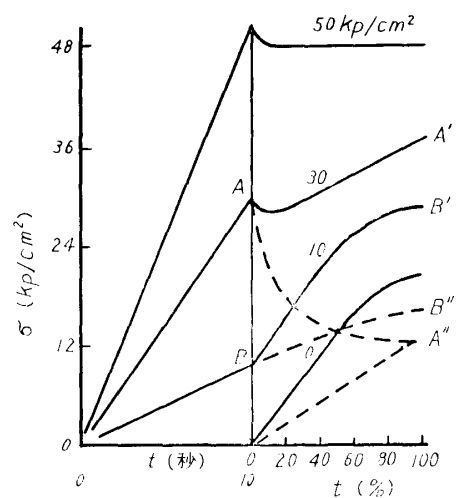
P° (kp/cm ²)	σ_H (kp/cm ²)				
	初含水率	0%	5%	10%	15%
0		13.2	12.9	12.7	10.5
10		16.0	16.3	17.3	12.2
30		13.0	20.0	14.0	15.8

表5 (KEYLWERTH)

樹 種	膨 潤 量 (%)			
	無拘束 α_T	拘束 α_R	半径方向拘束 ϵ_T	切線方向拘束 ϵ_R
Kiefer	8.89	4.57	11.26	5.12
Buche	13.07	5.46	15.99	6.42

うな結果をえている。特にあらかじめ加圧された場合にはそれが比較的大きいときには、飽湿中と水中浸漬の場合で膨潤応力の発生経過に著しい相異がある(図9)。

一方向を拘束して膨潤させると、拘束方向に対して直角な方向の伸びは表5にみるように無拘束の場



マツ辺材切線方向
実線は飽湿、点線は水浸
図9 PERKITNY (1963)

合よりも大きい。

圧縮された素材の二方向を拘束した場合の膨潤応力は ARZUMANYAN, TARKOW らによつて測定されている。

ARZUMANYAN は、マツ辺材を、半径方向に 1/2 の長さになるまで種々に圧縮した乾燥試片に真鍮の細い帯をまいて水中に浸漬した。すると、ある時間を経過するとこの帯が切れる。そのときの帯の強度から膨潤圧を計算して 500kg/cm^2 に近い値を得ている。

TARKOW は 30% R. H. で調湿されたカバ材を鉄製のリングにはめこみ、これを 100% R. H. の大気中おいたとき、リングに生ずる微小な歪を電気抵抗線歪計により測定して膨潤応力を測定している。試料は圧縮された種々の比重のものをを用いて、膨潤応力と比重の関係を求めており、比重 1.44 の場合には約 700kg/cm^2 に達することを見出している。この関係を両対数にプロットすると図 8 のようになって、実質比重に外挿した値は、KATZ 式の値 1630 bar の半ばに近づく。

膨潤応力におよぼす材の蒸煮処理の影響は、PERKITNY, KEYLWERTH らが研究している。Rotbuche 辺材を生材状態で各蒸気圧の下、3 時間にわたつて処理したものについて、切線方

表 6

蒸気圧 (atü)	$\sigma_{H(T)}$ (kp/cm ²)	$\sigma_{H(R)}$ (kp/cm ²)
0	31.4	35.8
1	30.0	32.8
2	28.0	33.8
3	20.8	22.3
無 処 理	37.2	40.6

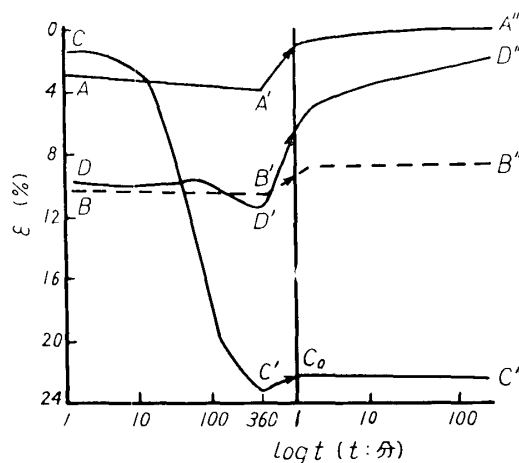
向および半径方向について最大値が次のように報告されている。この最大値に達する時間は、蒸煮材が非常に小さい。

冷凍処理の場合も類似の傾向があらわれ、マツについて $-35^\circ\text{C} \sim -70^\circ\text{C}$ の冷凍処理を三回くり返された結果は、 σ_H は少し低下するが

速度は著しく大きくなり、膨脹量はわずかに増加する²⁰⁾。また、NARAYANAMURTI らは、熱水、アルコールベンゾールおよびエーテル抽出により、膨潤応力の最大値が、低下することを見出している。

3.2 圧縮下の hygrostrain

木材の加圧収縮はよく知られている現象であるが^{61~65)}、さらに、乾燥過程においても一定の荷重を加えておくときは、見かけの材の収縮量は、水分自由収縮量とクリープ量との和よりもはるかに大きな値を示すことがあり、スギ材半径方向について大草、林⁶⁶⁾の、マツ材については PERKITNY⁶⁸⁾の研究がある。PERKITNY は半径、切線両方向について、荷重条件、水分条件を種々に組合せて詳細に比較検討しているが、図10は切線方向に 20kp/cm^2 の圧縮を加えたまま、試片の水分状態を湿潤と全乾の間で四つの経過にしたがわせたときの、みかけの縮み量を示したものである。荷重を 30kp/cm^2 に増



マツ材切線方向圧縮 (20kp/cm^2)
 A A' A'' : 湿潤状態
 B B' B'' : 全乾状態
 C C' : 湿潤→全乾 (360分)
 C' C'' : 全乾状態
 D D' : 全乾→湿潤 (360分)
 D' D'' : 湿潤状態

図10 (PERKITNY)

した場合には A' , C' , D' の値は、図の2倍、あるいはそれ以上に達する。

繊維方向については ARMSTONG²³⁾ らが、hoop pine で、応力レベル38%の圧縮下の乾湿くり返し実験を行い、横方向に比して著しい回復現象を報告している。

なお、材処理の影響については、圧縮下での吸水過程における材蒸煮処理の効果や、加圧前処理の効果について LAWNICZACK の研究がある^{69,70)}。

3.3 圧縮による水分変化

木材の横二方向の膨潤を抑制したときの吸水経過を ARZUMANYAN⁵⁸⁾ は測定して、自由膨潤の場合に比べて含水率の著しい減少をみている。吸湿過程におけるこのような現象は、木材^{74,75)} の外に、繊維材料についても見られるところである^{76,77)}。平衡含水率の外力依存性は膨潤応力の理論的な研究においても検討されている^{72,73,78)}。

文 献

- 1) HALY, A. R. and M. FEUGHELMANN, Textile Res. J., **31**, 131 (1961).
- 2) HALY, A. R., Textile Res. J., **35**, 889 (1965).
- 3) FEUGHELMANN, M., Textile Res. J., **35**, 481 (1965).
- 4) HALY, A. R., Textile Res. J., **35**, 583 (1966).
- 5) McMILLEN, J. M., Forest Prod. J., **5**, 71, 230 (1955).
- 6) McMILLEN, J. M., U. S. Forest Prod. Lab. Report, No. 1652 (1963).
- 7) UGOLJEW, B. N., Holz als Roh-und Werkstoff, **14**, 375 (1956).
- 8) 小倉武夫, 梅原 誠, 小玉牧夫, 林試報, No. 150 (1963).
- 9) YOUNGS, R. L. and C. B. NORRIS, U. S. Forest Prod. Lab. Report, No. 2133 (1958).
YOUNGS, R. L. and C. B. NORRIS, Forest Prod. J., **9**, 367 (1959).
- 10) YOUNGS, R. L. and B. A. BENDTSEN, Forest Prod. J., **14**, 113 (1964).
- 11) SCHNIEWIND, A. P., Holzforschung, **14**, 161 (1960).
- 12) SCHNIEWIND, A. P. and P. C. KERSAVAGE, Forest Prod. J., **11**, 523 (1961).
- 13) KASS, A. J., Forest Prod. J., **15**, 225 (1965).
- 14) 大迫靖雄, 高橋 徹, 山田 正, 木材誌, **14**, 24 (1968).
- 15) LAWNICZAK, M. and J. RACZKOWSKI, Rev. Boi et Forêts des Tropiques, No. 82, 53 (1962) (C. S.-I. R. O. Trans.).
- 16) COCKRELL, R. A., Proc. Forest Prod. Res. Soc., **3**, 455 (1949).
- 17) VINTILA, E., Holz als Roh-und Werkstoff, **2**, 356 (1939).
- 18) KELSEY, K. E., C. S. I. R. O. Division of Forest Products Technology Paper No. 28 (1963).
- 19) SADOH, T. and R. S. T. KINGSTON, Wood Science and Technology, **1**, 81 (1967).
- 20) IVANOV, U. M., Akad. Nauk USSR Inst. Lesa. Trudy, **51**, 107 (1962). (C. S. I. R. O. Trans.)
- 21) JENTZEN, C. A., Forest Prod. J., **14**, 387 (1964).
JENTZEN, C. A., TAPPI, **47**, 412 (1964).
- 22) ERIKSSON, L. und B. NORÉN, Holz als Roh-und Werkstoff, **23**, 201 (1965).
- 23) ARMSTRONG, L. D. and R. S. T. KINGSTONE, Australian J. Appl. Sci., **13**, 257 (1962).
- 24) 高橋 徹, 山田 正, 木材誌, **12**, 6 (1966).
- 25) 藤田晋輔, 高橋 徹, 島根農大報, No. 14, 87 (1965).
- 26) 藤田晋輔, 中戸莞二, 木材誌, **11**, 36 (1965).
- 27) FUJITA, S., 木材誌, **12**, 66 (1966).
- 28) 大草克己, 林 昭三, 小迫恵彦, 島根農大報, No. 4, 93 (1956).
- 29) SCHNIEWIND, A. P., Holz als Roh-und Werkstoff, **24**, 87 (1966).
- 30) MACKEY, B. H. and J. G. DOWNES, J. Appl. Polymer Sci., **2**, 32 (1959).
- 31) ILLERS, K. H. and H. JACOBS, Makro. Chem., **39**, 234 (1960).
- 32) FEUGHELMANN, M., J. Appl. Polymer Sci., **2**, 189 (1959).

- 33) KUBÁT, J. and B. LINDBERGSON, J. Appl. Polymer Sci., **9**, 2651 (1965).
- 34) 山田 正, 佐道 健, 白石信夫, 材料, **11**, 50 (1962).
- 35) SUZUKI, M., 木材誌, **8**, 13 (1962).
- 36) 佐々木徹, 山田 正, 未発表.
- 37) 高橋 徹, 山田 正, 木材研究, No. 37, 46 (1966).
- 38) 藤田晋輔, 高橋 徹, 第18回日本木材学会大会に発表.
- 39) 角谷和男, 山田 正, 茅原正毅, 第18回木材学会大会に発表.
- 40) 谷口 謙, 原田 浩, 吉見 哲, 第18回木材学会大会に発表.
- 41) KISHIMOTO, A. and H. FUJITA, Kolloid Zeitschrift für Polymere **150**, 24 (1957).
- 42) YAMAMURA, H. and N. KURAMOTO, J. Appl. Polymer Sci., **2**, 71 (1959).
- 43) IVANOV, U. M., Composite Wood, **3**, 91 (1956).
- 44) 山田 正, 浦上弘幸, 宮野寛文, 材料, **12**, 69 (1963).
- 45) PERKITNY, T., M. LAWNICZAK und H. MARCINIAK, Holz als Roh-und Werkstoff, **17**, 54 (1959).
- 46) PERKITNY, T., Holz als Roh-und Werkstoff, **18**, 200 (1960).
- 47) PERKITNY, T. und L. HELINSKA, Holz als Roh-und Werkstoff, **21**, 19 (1963).
- 48) PERKITNY, T., Holz als Roh-und Werkstoff, **16**, 241 (1958).
- 49) KEYLWERTH, R., Holz als Roh-und Werkstoff, **20**, 292 (1962).
- 50) KEYLWERTH, R., Holz als Roh-und Werkstoff, **21**, 415 (1963).
- 51) KEYLWERTH, R., Holz als Roh-und Werkstoff, **22**, 295 (1964).
- 52) NARAYANAMURTI, D. and R. C. GUPTA, 材料, **10**, 434 (1961).
- 53) NARAYANAMURTI, D., Holzforschung und Holzverwertung, **14**, 28 (1962).
- 54) NARAYANAMURTI, D. und J. SINGH, Holz als Roh-und Werkstoff, **20**, 89 (1962).
- 55) 南 義夫, 材料連合講演会 (1966).
- 56) DEPPE, H., Holz als Roh-und Werkstoff, **24**, 285 (1966).
- 57) OERTEL, J., Holztechnologie, **8**, 119 (1967).
- 58) ARZUMANYAN, G. A., Akad. Nauk Army. SSR. Doklady, **27**, 251 (1958). (C. S. I. R. O. Trans.).
- 59) TARKOW, H. and B. TURNER, Forest Prod. J., **8**, 193 (1958).
- 60) 岡 康寛, 山田 正, 木材研究, No. 39, 29 (1966).
- 61) PERKITNY, T., Holz als Roh-und Werkstoff, **1**, 53 (1938).
- 62) KNIGHT, R. A. G. and R. J. NEWALL, Forestry, **12**, 125 (1938).
- 63) 小原二郎, 木材工業, **4**, 508 (1949).
- 64) 渡辺治人, 安蘇国猛, 筒本卓造, 日林講, (1951).
- 65) NARAYANAMURTI, D., J. Appl. Sci. Res. 5A, 389 (1956).
- 66) 大草克己, 林 昭三, 木材誌, **2**, 5 (1956).
- 67) PERKITNY, T., Holz als Roh-und Werkstoff, **16**, 410 (1958).
- 68) PERKITNY, T., Holz als Roh-und Werkstoff, **23**, 173 (1965).
- 69) LAWNICZAK, M., Holz als Roh-und Werkstoff, **25**, 58 (1967).
- 70) LAWNICZAK, M., Holz als Roh-und Werkstoff, **25**, 5 (1967).
- 71) KATZ, J. R. Trans. Faraday Soc., **29**, 279 (1933).
- 72) BARKAS, W. W., Forest Prod. Res. Lab., Special Report No. 6 (1945).
- 73) BARKAS, W. W., R. F. S. HEARMON and H. F. RANCE, Mechanical Properties of Wood and Paper, Interscience Pub. (1953).
- 74) KOCH, C. B., Forest Prod. J., **16**, No. 10, 57 (1966).
- 75) BELLO, E. D., Forest Prod. J., **18**, No. 2, 69 (1968).
- 76) KUBÁT, J. and L. NYBORG, Svensk Papperstidn., **65**, 698 (1960).
- 77) TRELOAR, L. R. G., Trans. Faraday Soc., **49**, 816 (1953).
- 78) ROSEN, B., J. Polymer Sci., **58**, 821 (1962).