

空気湿度変化緩和材としての木材の材種による相違

登石健三・見城敏子

1. 緒 言

文化財はそれ自体が木を素材として作られていたり、収蔵とか梱包とかの関係その他で木材をあわせ使用する事が多い。これらの場合、一方では湿度、温度に対して、木材の性質が樹種によりどの様に異っているかを知った上で上手な使い方をし、他方では突発的な事故を最小限度に防せぐよう配慮することが賢明であろう。

木材に関する論文は数多くあるが、文化財保存の観点から見て重要だと思われる事からは常識的程度とされて、あまり研究されていない。我々はそこで種々の木材を用いて、主としてその含水率の温度、湿度による変化を比較的長時間にわたって研究し、木材の含水率がその木材の比重と極めて密接な関係を有し、同一温度、同一相対湿度では比重の大きいものほど含水率が低くなるという興味ある結果を見出した。

また木材の比重が小さい程、吸湿率、放湿率が大きくなる傾向が分った。

実 験 方 法

実験一1 20°C の恒温室内でニッカペレットの吸放湿性を利用し 20, 40, 60, 80, 100% の各相対湿度のデシケーターを作る* まず 20% のデシケーター中で、電気湿度計を用いて正しい湿度が保たれている事を確かめながら、その中に絶対乾燥の木材の各種試料を入れて、一定の時間間隔で各々の重量を測定し、その重量が平衡値に達する迄この測定を続け最終重量を測った。次にこの試料を順次 40%, 60%……の各デシケーターに移し、同様にして各々における平衡重量を測る。更に同様の測定を 25, 30, 35, 40°C において行なう。このような実験方法にしたがってカシ、マツ、キリ、ケヤキ、ブナ、スギ、ヒノキ、ラワン等の樹種につき行ない。図一1より図一8までの等温含水率曲線が求められた。

実験一2 実験一1と同様に含水ゼオライトの恒湿保持性を利用し、温度が変化しても20%を保つようなデシケーターを作り、この中に木材の試料を入れて平衡重量を測る。温度は20°Cから40°Cまで5°Cおきに、湿度は各々について20%, 40%……100%までの20%おきに得られた等温含水率曲線が図一9から図一16までに示してある。この二つの実験の示す測定系で得られるデータは全く無縁のものではない。含水率に関する等湿曲線図(図一9～図一16)で20°Cの縦線が各%の線を切る点を示す含水率は、他方20°Cの等温線上の各湿度における値と一致すべきである。しかし上の説明で分るように等湿曲線を得るときは、段々と空気湿度を上げながら、すなわち木は吸水の方向に変化させ乍らデータを求めたのに、等湿曲線を求

* ニッカペレットはヒステレンスの少いゼオライトである。恒湿槽を簡単に作る方法は前に“古文化財之科学”12号⁹⁾に報告した。この際の科研ゲルと称したものは現在ニッカペレットの商品名で売られているが、これに限らず吸湿曲線勾配の大きいものでかつヒステレンスのないものなら他のシリカゲルでもよい。

める場合は温度を上げ乍ら、すなわち木は放湿の方向に変化させ乍らデーターを求めている。一般に木は吸湿の場合と放置の場合とは十分に平衡となってから含水率を測定しても完全に同一値を示さないのが普通である。これをヒステレシスと称するが、今の二つの含水率の図で一致すべき筈のデーターに少しのくい違いがあらわれるのは、このヒステレシスによるものである。また相対湿度 100%では親水性材質である木材の毛細管には自由水が凝結する筈であって、これが測定値中にマチマチに加算されて測られている可能性がある。100%における測定値点がすべての曲線で大き目で、かつ多少荒れているのはこのためかもしれない。一般に周囲空気の状態が $(T^{\circ}\text{C}, H\%)$ から $(T'^{\circ}\text{C}, H'\%)$ に変化するとき、木からの水分の出入はヒステレシスを無視すれば (T, H) , (T', H') で一義的に定まるのであるから、その途中は如何なる過程を辿ってもよい。すなわち $(T, H) \rightarrow (T', H) \rightarrow (T', H')$ と変化させても $(T, H) \rightarrow (T', H') \rightarrow (T', H')$ と変化させても終点が (T', H') である限りかまわないわけで、この何れの道筋をとったとしても先の二群の含水率曲線が分っていれば、水分出入量は計算出来る筈である。ことさら別の表示形式に分けて表わしたのはこの便のためである。

実験—3 ブリキ密閉かん内 ($12 \times 2.8 \times 4$ cm) に、あらかじめ 20°C の密閉器中で一定相対湿度 (60%) に慣らしたカシ、キリ、ヒノキ、ブナ、マツ、スギ (シラタ)、ケヤキの各々について試料 (長さ $10.5 \times$ 年輪方向 $1.5 \times$ 半径方向 3 cm) とともに電気湿度計ヘッドを挿入し、この容器を急激に 35°C の恒温槽に入れて、器内の湿度の時間的変化を測定し、平衡に達した後、つぎに急に 20°C の恒温箱内に入れて再び時間的変化を追跡した。

結 果

$20, 25, 30, 35, 40^{\circ}\text{C}$ の各恒温における木材の含水率と相対湿度との関係は図—1~8のようになる。

当然なことではあるが木材の種類によらず RH の上昇と共に含水率は上昇しているが、キリ、スギ、ヒノキ等の外観上軽くて、やわらかい木材は RH の上昇と共に含水率が著しく増加し、上に凹の含水率~RH 曲線を示す (図—1~3) のに対し、カシ (図—7) など見かけ上硬くて重い木材及び例外としてラワンの含水率の RH 上昇に伴う増加は、ほぼ直線的でしかもその傾斜は小さい。見かけ上のかたさや重さがこれらの中間にあるとおもわれるケヤキ、マツ、ブナ (図—4~6) などは上の二つの木材群の丁度中間的な含水率~RH 曲線を示す。

一般に一定の RH においては木材の含水率と温度とは直線関係があるといわれている²⁾。

得られた結果から含水率と温度との関係を求めると 図—9~16 となる。これらの図から明らかなように本実験においても一定 RH では含水率~温度はいずれも直線関係を示している。これらの図からは、キリ、スギ、ヒノキ、ケヤキなどは含水率~温度直線の負勾配が RH の増加と共に増加しているのに対し、ブナ、マツ、カシ、ラワンの群では RH の増加により勾配の変化が比較的少ないことがわかる。

実験—3の結果は図—20~26のようになる。試験した試料の寸法ではヒノキ、キリ、スギの場合は、急激な温度上昇および下降に対して、ほぼおなじような速さで水分の放出、吸収を行なうことがわかった。しかし比重の最も軽いキリ、スギは 10~15 分間で吸放湿平衡が成立するが、比重のやや重いヒノキの場合には 40~50 分を要している。比重の重い木材のうちマツ、ブナ、カシの場合は放湿速度は比較的大きく、10~30 分間で平衡状態に達するのに対し、吸湿速度は小さく、ブナでは 55 分、マツでは 70 分、カシでは 240 分以上経過しないと平衡

に達しない。

比重の大きい木材群のうちでケヤキは他のものと異なり放湿速度が比較的小さく（35分で平衡になる）且つ吸湿速度が比較的大きく（約 20 分で平衡に達する）、低比重群の挙動に近い。

考 察

1) 実験—1の結果から明らかなように、木材の比重やかたさがその木材の湿度変化緩和性に大いに関係があるようであり、重くてかたい程緩和能力が小さく、軽くて、軟かいもの程緩和能力が大きいと考えられる。この場合の緩和能力とは同一温度では湿度上昇による含水率増加、同一RHでは温度下降による含水率増加の大きさをいう。すなわち木材が空気と共に密閉せられ、この中の空気湿度が何等かの原因で変化しようとする時、この木材の吸放湿作用により、これが緩和されるが、その能力の大小を意味する。木材の含水機構は次のように考えられている。木材は細胞膜と空隙とから構成されており、飽水状態での木材は水を細胞膜中および細胞腔内に保持している。一般に細胞腔内に含まれる水は自由水（遊離水）と呼ばれ、細胞膜中に含まれる水は木材実質とコロイド状に結合して結合水（吸着水）と呼ばれている。

飽水状態の木材を大気中に放置すると、木材中に含まれる水は蒸発して減少するが、はじめに減少する水は自由水であり、この自由水がなくなるまでは結合水は減少しない。これは細胞膜の周囲の空間、すなわち細胞腔内に自由水が存在する場合はその内部は、飽和水蒸気で満たされているため、飽和水蒸気と接する細胞膜は常に結合水で飽和していることによると考えられている。また自由水の量の変化は木材の重量を増減させ、熱や電気に対する性質には影響をおよぼすが、膨潤、収縮など機械的性質には影響しない。結合水の減少は自由水がなくなった後に始まり、大気の状態に応じた平衡含水率に達したときに終る。逆に完全に乾燥した木材すなわち絶乾木材を大気中に放置すると大気の状態に応じた平衡含水率になるまで吸湿する。一般に大気中（RH 100% 未満）で含水平衡に達した木材中に含まれている水は結合水であって自由水ではないといわれている³⁾ 結合水はRHの上昇と共に増加し、RHが100%に達した時最大となる。自由水が存在せず細胞膜が結合水で完全に飽和された状態を繊維飽和点というが、この繊維飽和点における含水率はすべての木材を通じて、25~35%であり、平均28%であるとされている⁴⁾。木材の種々の物理的性質（例えば容積変化、圧縮強さなど）は絶乾状態から繊維飽和点までは、含水率の変化により著しく変化するが、この点以上の含水率範囲では一定となる。また木材を大気中に放置して大気温度および湿度と平衡にさせた場合の平衡含水率は一般にすべての樹種についてほぼ等しいという説があるが⁵⁾ この点が問題なのである。

本実験の結果を見ると、明らかに軽い木材の平衡含水率は湿度変化により著しく変化するが重い木材の平衡含水率の変化は比較的少ない。このことは上記の繊維飽和点（RH 100%）での含水率に25~35%の間があることからわかるように中間湿度（RH）でも樹種によって含水率の差違があると考えの方が妥当で、すなわち絶乾比重と含水率との間には有意な関係があるべきである。

木材の性質をあらわすものに硬木とか軟木とか表現されるかたさと一方比重とが考えられるが、まずこのうち木材の比重は細胞膜質と空隙との割合で定まるものであり、絶乾比重は次のように求めることが出来る。

$$r = (1 - c) \rho_s \cdots \cdots (1)$$

ここで r は絶乾比重, c は空隙率すなわち細胞腔の容積であり, ρ_0 は乾燥細胞膜本質の比重で木材の種類によらず一般に 1.50 といわれている⁶⁾。本実験に用いた木材の絶乾比重は長方形の試料を真空中で完全に乾燥した後の重量 (W) とその容積 ($V=a \times b \times c$; a, b, c は長方形の各稜の長さ) とから次式により算出し表-1 に示した。

$$\text{絶乾比重 } r = \frac{W}{V} \dots\dots(2)$$

次に(2)式により算出した r の値と $\rho_0=1.50$ を用いて, (1)式から空隙率 c を求め, 表-1 に示した。

表-1

種類	比重(r)	空隙率(c)
キ リ	0.30	0.80
ス ギ	0.49	0.67
ヒ ノ キ	0.59	0.61
クロマツ	0.70	0.53
ブ ナ	0.80	0.47
ケ ヤ キ	0.82	0.45
カ シ	0.97	0.35

次に種々の湿度における含水率と絶乾比重との関係を求めると 図-17~19 となり, 各温度で含水率と絶乾比重との間にはほぼ直線関係がなりたつことがわかる。比重の小さいもの(空隙率の大きいもの)の方が同一温度, 同一湿度では特に湿度の高い時には含水率が大きい。低湿度(RH 40%)以下では比重による含水量の差は殆どないことがわかる。従って比重の小さいものほど湿度または温度変化により, 水分の吸収, 放出の量が大きく, 比重の大きいものほど小さいことになる。

2) 前述のように絶乾比重の小さい木材ほど水分含有率の温度による変化が大きいことがわかったがこれらの結果はいずれも平衡状態における含水率を測定したものであり, 水分の吸収放出の速度については考えなかった。

文化財が何かの容器など閉じた空間に収められる場合は大ていは湿気の出入がほとんどない, すなわち, 内部の総水分量の変化がほとんどない場合が多く, この中で相対湿度の変化がおこるのは大体は周囲温度が変ることによる。例えば気温が上昇すればこの閉空間内に木などの湿度変化緩和材がなければ空気は当然乾くが, 木が存在すればこの乾きに呼応して等温曲線(図-1~8)により, また温度変化に呼応して等湿曲線(図-9~16)により木からは放湿が行なわれ, 内部空気の乾きは緩和される。梱包の場合一般には内部に空間を多く残すことはまれで, 文化財そのもの或はパッド木質等が多量に収められることが多いので, 図-9~16の影響が大きくきいて緩和を通り越しむしろこの場合相対湿度が却って増加することがよくおこる。すなわち緩和材としては等温曲線の効果が大きく, 等湿曲線による吸放湿効果は小さい方が望ましいのであるが, 大てい木は後者の性質を顕著に備えるものである。気温降下の場合には全くこの逆と考えればよい。

このことは一般に緩和のゆきすぎとなるので木材の吸放湿性の大きさを求めることはあまり重要ではなくなり, むしろその作用の早さが実際上必要となる。これが切実となるのはよくおこる「ムレ」の場合であろう。ムレとは上述のような閉空間に多量の木質が収納されて, 一度温度が上り, 木質が含んでいた水分が閉空間内の空中に放出された後に, 気温が下がったときに

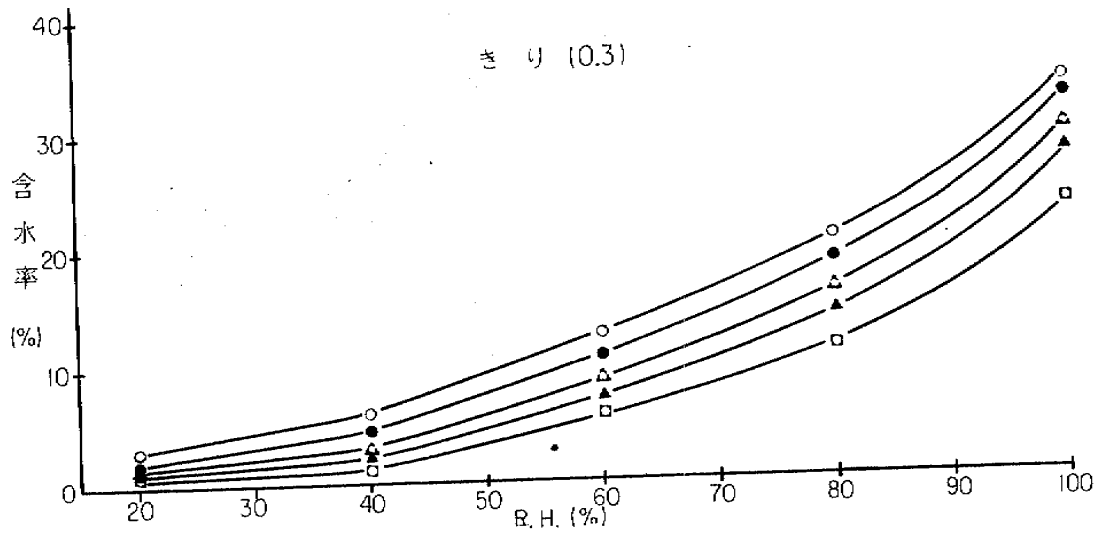


図-1

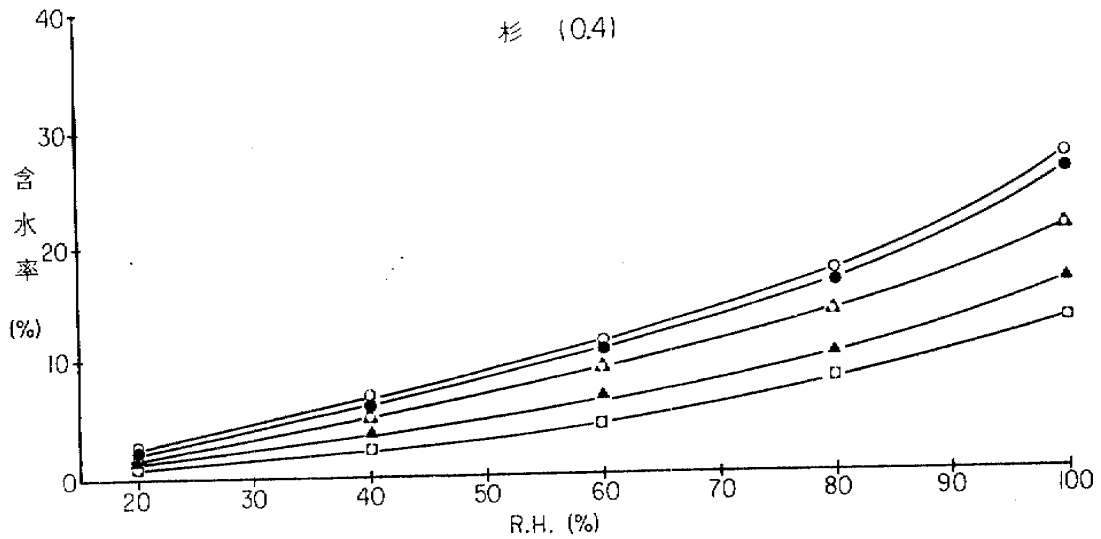


図-2

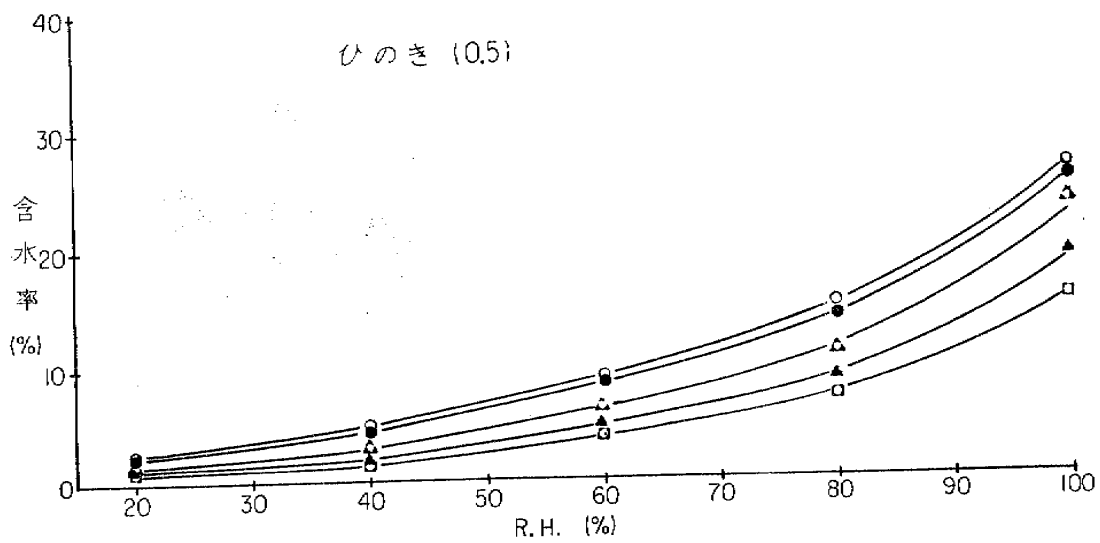


図-3

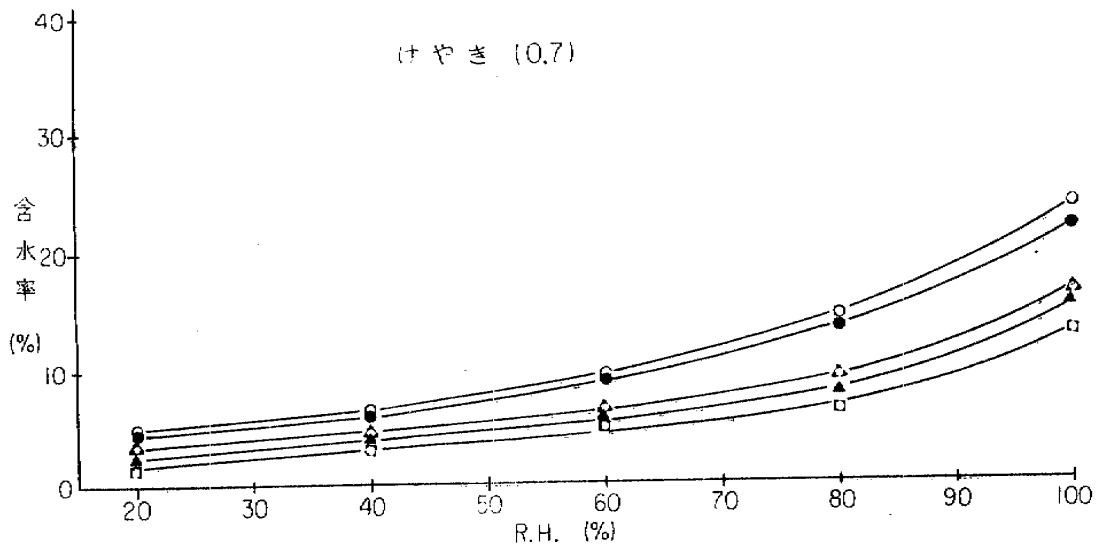


図-4

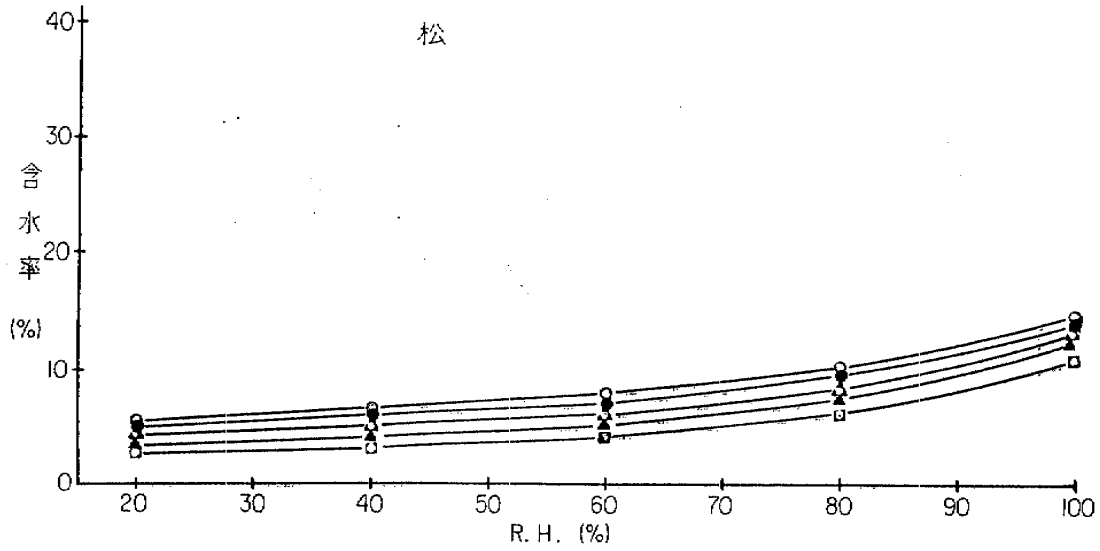


図-5

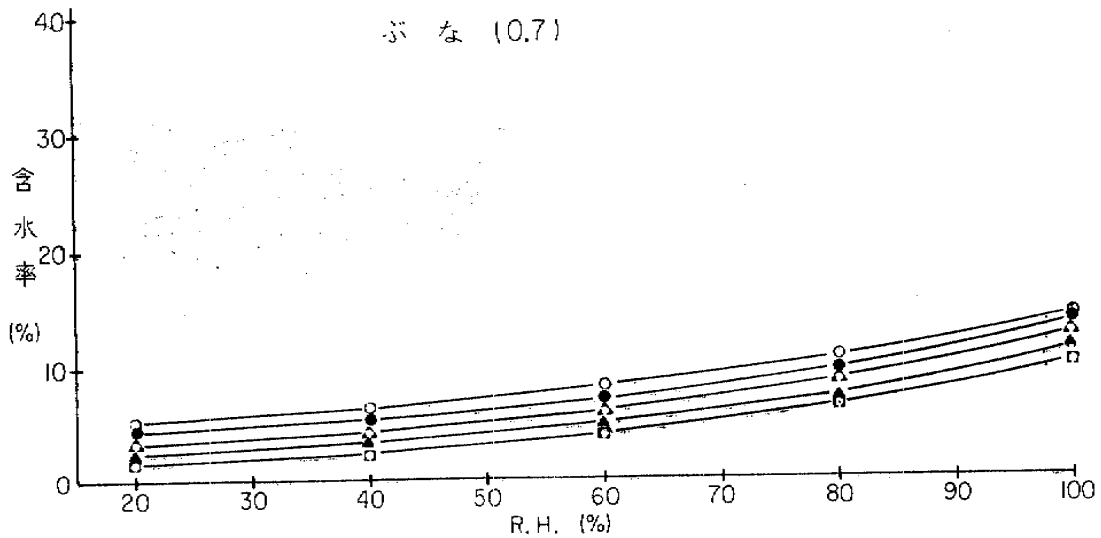


図-6

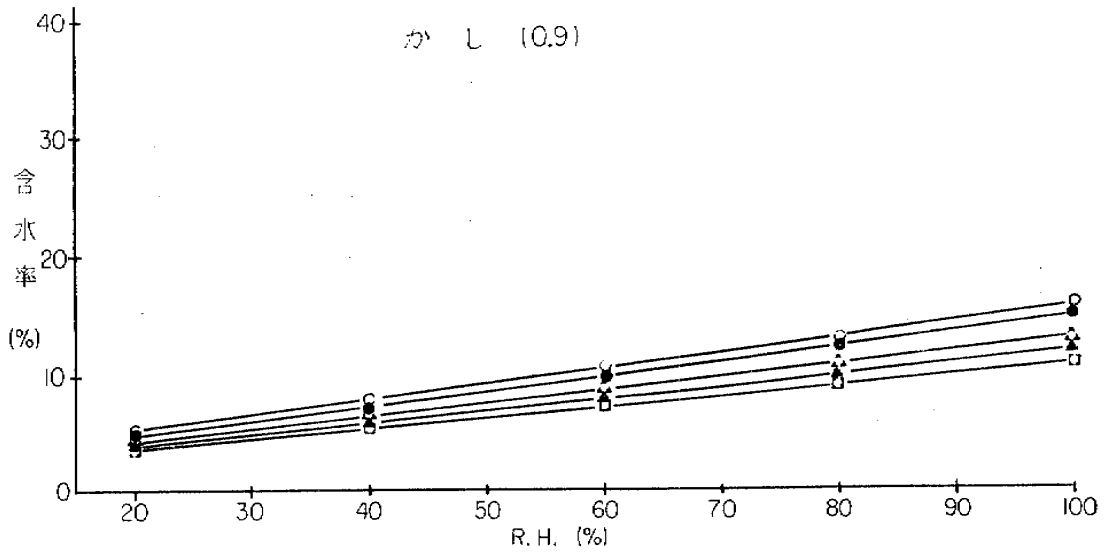


図-7

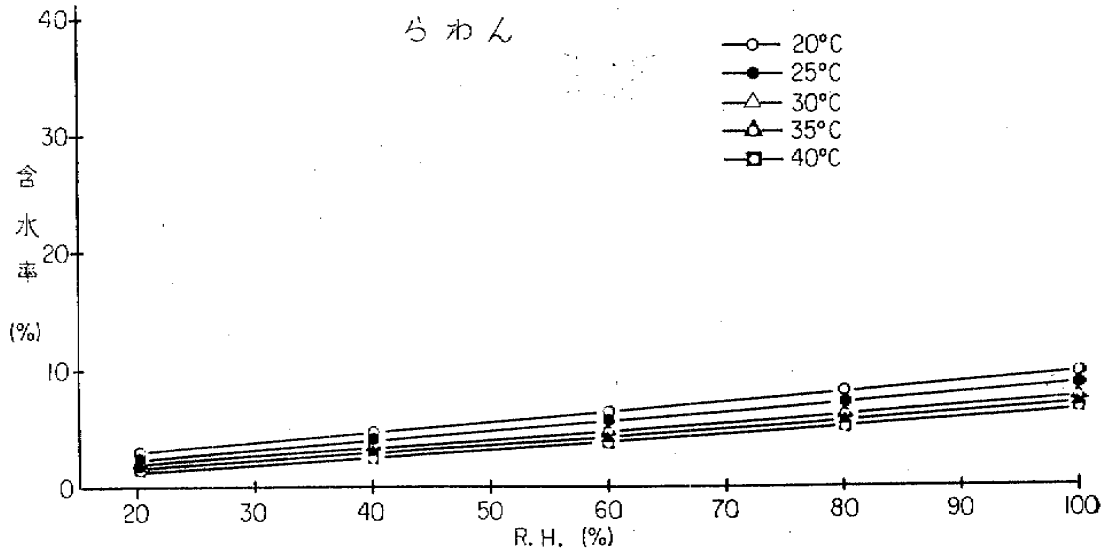


図-8

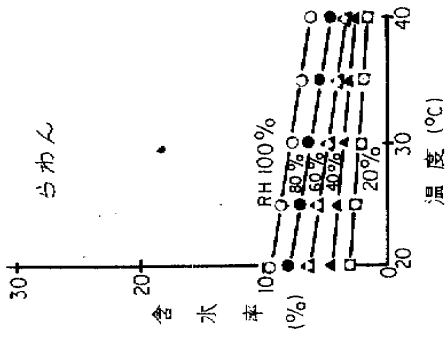


図-16

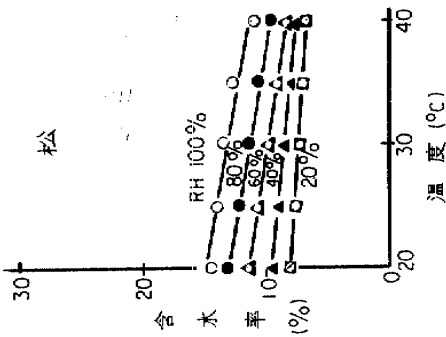


図-15

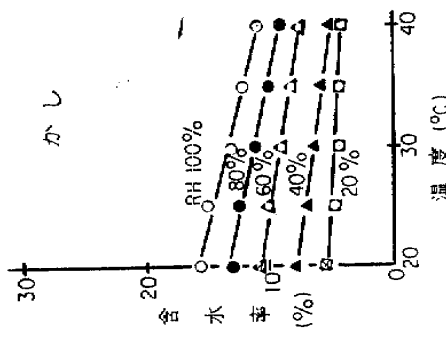


図-14

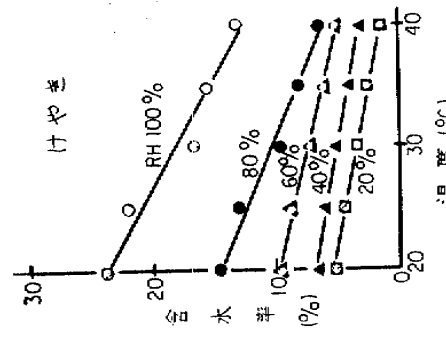


図-13

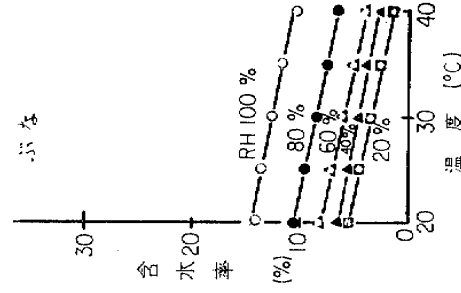


図-12

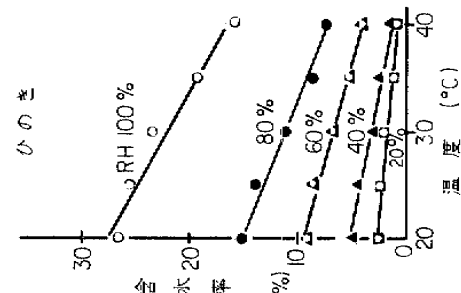


図-11

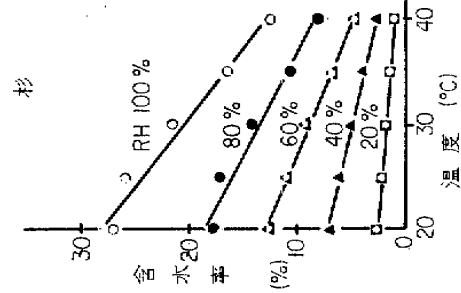


図-10

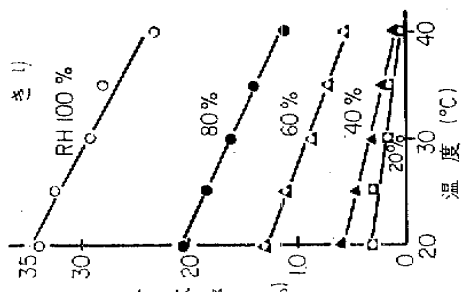


図-9

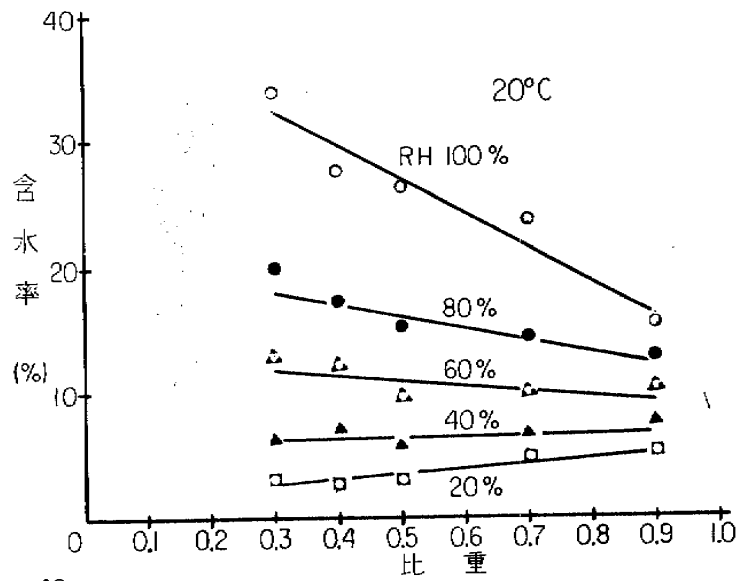


図-17

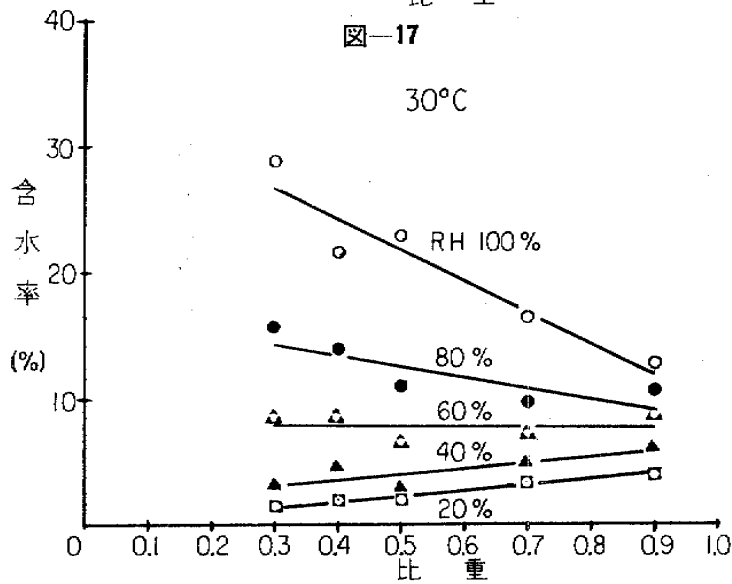


図-18

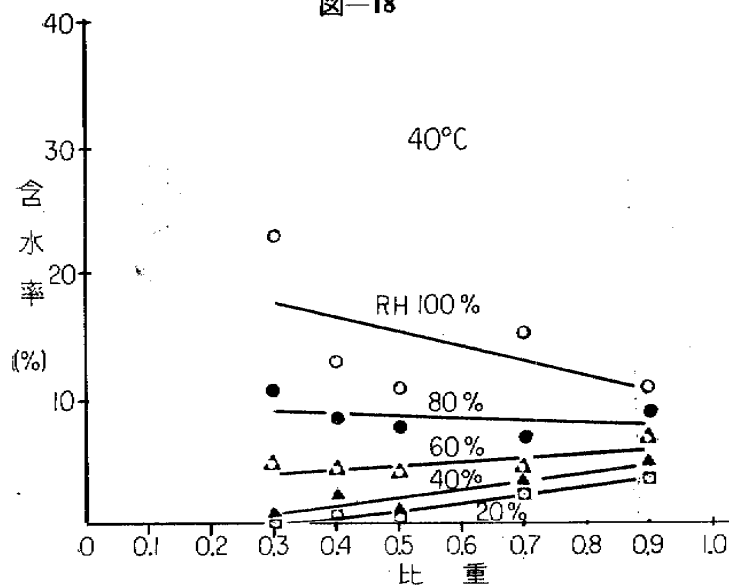


図-19

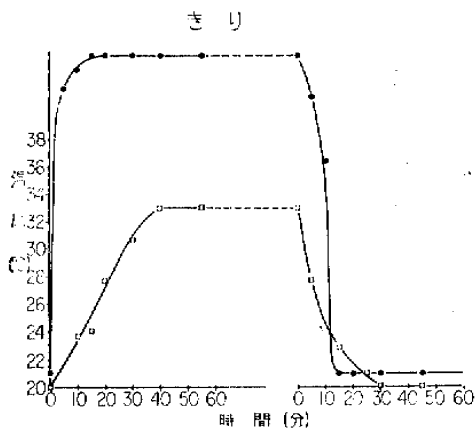


図-20

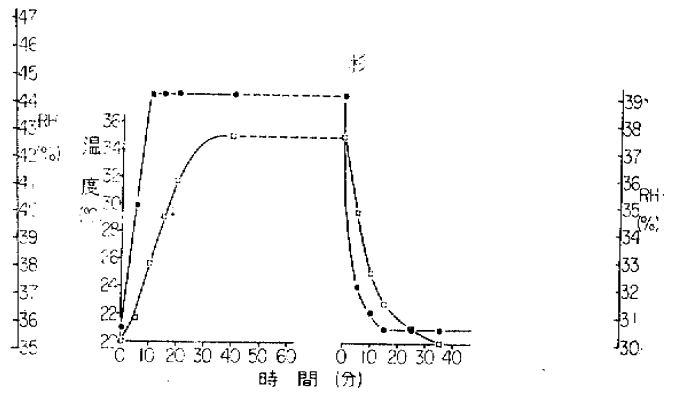


図-21

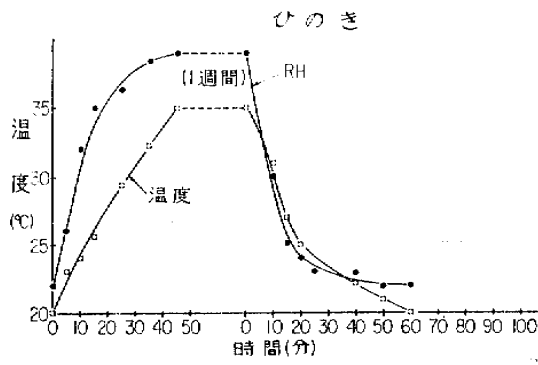


図-22

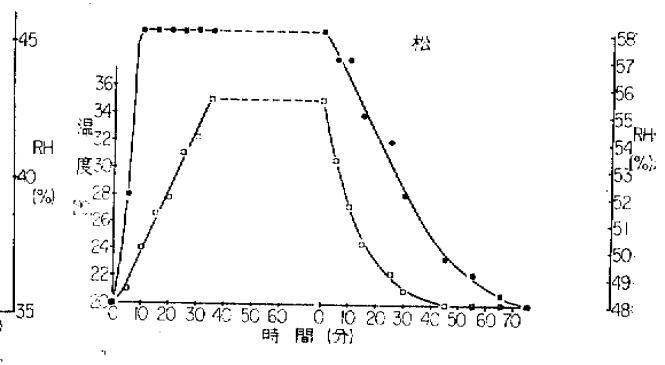


図-23

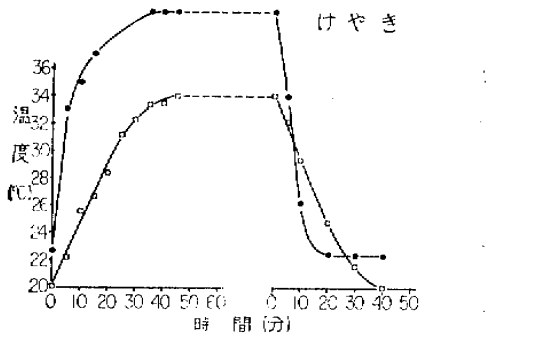


図-24

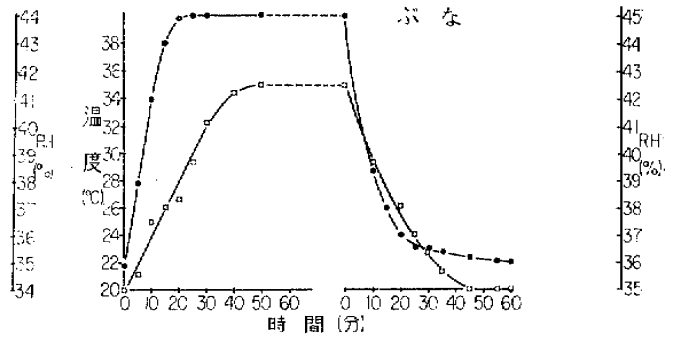


図-25

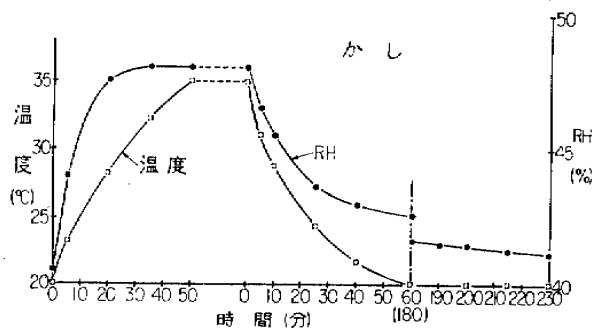


図-26

おこる高湿或は結露のことをいう。特に気温下降のとき緩和材すなわち今の場合木の吸湿速度が遅いときによくおこる現象なのである。

一つの木の吸放湿速度については、一定温度下で周囲相対湿度を変化させたとき吸湿の方が早いものが多いので、一般に吸湿が早く放湿はおそいという通念が存在しているようである。しかし温度変化が伴うときは事態は逆であることが多く、樹種によっては吸湿緩和に非常に時間がかかることがある。勿論樹種のみではなく木の厚さなどは非常に関係があることは明白であろうが、今はこの後の方の条件は問題としないでおこう。吸湿緩和がおそい場合はその間空気の方の高湿は続いているわけで黴の発生などに好都合な状態が実現しているのである。

従ってもしこのようなことがあるとすれば、温度変化の烈しい場所に用いる木材は水分の吸収放出速度を考慮して選ばなければならないであろう。各種の材種についてこの性質につきくわしくしらべておく必要がある。

3) 温度の急変に伴う吸放湿速度は樹種（比重）で大いに差異がある。此所で行なった簡単な実験の規模では低比重木材群（キリ、スギ、ヒノキ）は吸湿および放湿速度がほぼ等しく、高比重木材群（マツ、ブナ、カシ）では放湿速度は比較的大きいが吸湿速度は小さく比重の高いもの程ますます平衡に達する時間は長くなることがわかった。

外国の梱包屋さんはよく木毛をターポリン紙で包んでパッドとして用いる。温度が急に下がったと思われる梱包内からこのようなパッドをとり出して開いてみると、紙上に結露していることがある。木毛はマツで作られることが多いので（外国でも果してマツを用いるのかどうかはあまり確かではないが）このようなとき結露はおこり易いと考えられる。マツを用いないでスギ、キリのような低比重木材を用いる方が急激な温度変化により結露の弊害がなく優れていると考えられるのである。

昔から日本ではキリの箱が用いられてきた。湿度に関する性質のみでなく、軟木の機械的な優秀性を買ってのためもあるであろう。

しかし湿度に関しても、等温線勾配の大きいこと、吸放湿速度の早いことなどよい性質を備えているように見える。恐らく経験上これらの長所が認められて使われ出したものと思う。ヒノキも昔から日本人の好みに合った木のように思われるが、以上の湿度変化緩和性においてはキリにはおよばない。

この報告の第3項目である吸放湿速度に関しては横田・後藤：林業試験場研究報告, No. 217 (1963), p. 45~70 の報告がある。これでは純粹に拡散速度が測られているが、結果においては我々のものと矛盾はない。我々の結果は実際問題に則して行なっており、色々の因子が総合されていて、拡散速度という単純なものではないが、例えば密閉梱包内ではどのようなことがおこるとかというような問題に対しては納得し易いであろう。この意味でこの測定に限り定まった形のサンプルで行なった。従って軽い材質のものが早く感ずるのは当然といえるかもしれない。

一般に木材の吸放湿性はヘミセルローズ中のペントサン量に大きく左右されると考えられており、これと比重とは必ずしも単純な関係にはない。例えばペントサン量からいうと杉 9.6~12.0%, ブナ 21.3~26.2%⁷⁾でブナの方が吸放湿性が大きそうに思えるが、他の因子がからんで逆になるのであろう。我々の行なった樹種は限られた小数のもので、しかもありふれたものばかりであるが、これらについては簡単に比重との関連で扱っても差支ないと思われる。ここに簡便判段法が生まれる。

文 献

- 1) 登石健三, 見城敏子: 密閉梱包の湿度調節. 古文化財之科学, 第12号 (1956), pp. 28~36.
- 2) 宮部 宏: 材料の湿气的性能. 早大理工研報告, 1 (1944).
- 3) 梶田 茂: 木材工学, p. 88.
- 4) " " " .
- 5) Kollman, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, 2Auf. München, 1951.
- 6) 北原覚一: 木材物理, p. 26.
- 7) 右田伸彦: 木材化学 上, p. 72.

Technologie

Résumé

Difference of Wood Materials as Buffer Against Change of Atmospheric Humidity

We studied the change of moisture content capacity of various kinds of wood under different temperature and humidity. The capacity has close connection with the specific gravity of the wood. It has been discovered that under the same temperature and same relative humidity, wood materials of smaller specific gravity (that is, with greater aperture) have greater moisture capacity, and those of greater specific gravity have smaller moisture capacity. Pertaining to practical problems which may occur, for example during transportation, we subsequently measured the speed with which the wood materials absorb or discharge moisture when their temperature is raised quickly from 20°C to 35°C or lowered from 35°C to 20°C. The result of this experiment by no means gives physical quantitative evaluations of simple nature such as, for example, diffusion speed of moisture in a wood material in a certain direction, but is a complex numerical value affected by various factors; however, it probably is more readily applicable to a practical problem as far as matters about cultural properties are concerned.

The result of the experiment proves that woods of smaller specific gravity (lighter in weight) show greater speed of both absorption and discharge of moisture accompanying the rise and fall of temperature; with woods of greater specific gravity (heavier in weight), the speed of discharge is considerably great but that of absorption is very slow. We are led to the conclusion that such woods of smaller specific gravity as the *kiri* (paulownia), *sugi* (cryptomeria) and *hinoki* (Japanese cypress) are more suitable for packing in a sealed package or for buffer against change of humidity indoors when sudden change of temperature is feared.