

遺跡出土木材の乾燥と変形

河越幹男・百村敬一・石垣 昭

1. 緒 言

遺跡出土木材を空气中に放置すると、急速に乾燥して収縮し、はなはだしきは全く原形を留めないまでに変形することすらある。このため種々の保存法がとられており、その中の一つに PEG 含浸法がある。著者らは PEG 含浸法を拡散理論によって解析し、その処理時間の推定を行った(河越・石垣：1990, 同1991, 同1991)。しかし、PEG 含浸処理を施した出土木材でも、長期保存中に変形することが知られている(増澤：1974, Imazuら：1990, Nishiuraら：1990)。また、出土木材によっては、樹種、劣化状態、処理にかかる費用と時間などを勘案して、ときには自然乾燥法による保存法が採られる場合もある(松田：1974, 天野ら1991)。

本研究では、自然乾燥による出土木材の保存処理、及び PEG 含浸処理を施した出土木材の長期保存に関する基礎的知見を得るため、出土木材の乾燥速度と変形を測定し、その挙動について検討した。

2. 実験装置及び方法

図1に実験装置の概略図を示した。乾燥装置は、内部の温度と湿度を一定に保つことができる直径15cm、高さ50cmのガラス製円筒である。円筒内には加熱用電熱線、空気攪拌用ファン、乾球および湿球温度計が設置されている。電熱線は温度調節器に連結され、円筒内部の温度を一定に保つ。湿球温度調節器は乾燥空気の流れ調節用電磁弁に連結されており、湿球温度を設定湿度に対応した一定値に保つ。

この円筒内に試料を懸垂し、乾燥させた。試料は厚さ4~9mmの板状に成形した。試料寸法を測定するためには、試料を筒外に取り出さなければならないので、同一試料を用いて正確な重量と寸法の変化を同時に測定することはできない。本実験では、試料重量の経時

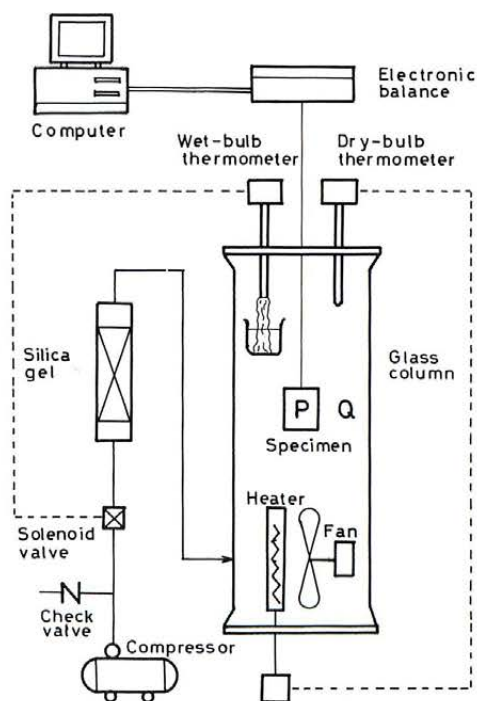


図1 実験装置
Fig.1 Experimental setup

表 1 試料の寸法, 重量, 含水率

Table 1 Dimensions, weight and moisture content of specimens used

樹種	試料番号	測定項目	試料設置場所				初期寸法 [cm]			絶乾寸法 [cm]			重量			温度 [°C]		含水率 [%]	湿度 [%]	かさ密度 [g/cm ³]
			場	所	半径	軸	接線	半径	軸	接線	空气中	水中	絶乾	乾球	湿球	25	18			
広葉	B 1	乾燥速度	中心	3.20	3.56	0.58	1.95	3.30	0.43	6.95	—	0.85			718		0.307			
	B 2			3.06	4.11	0.84	2.13	3.66	0.40	10.992	0.441	1.362	25	18	707	50		0.437		
	B 3	収縮	壁近傍	2.95	3.88	0.86	2.31	3.31	0.34	10.201	0.384	1.122			809			0.437		
樹	B 4	乾燥速度	中心	0.86	3.56	3.00	0.55	3.20	1.95	9.326	0.351	0.980			852		0.289			
	B 5		平衡含水率	中心	0.75	3.39	2.84	0.44	2.90	1.71	6.700	0.245	0.679	35	30	887	70	0.311		
針葉	N 1	乾燥速度	中心	2.49	3.31	0.38	2.13	2.96	0.35	5.00	—	0.70			614		0.317			
	N 2			3.11	3.20	0.56	2.95	2.96	0.40	5.887	0.296	0.877	25	18	571	50		0.254		
	N 3	収縮	壁近傍	3.07	3.29	0.54	2.74	2.92	0.48	5.501	0.272	0.751			632			0.197		
樹	N 4	乾燥速度	中心	0.59	3.00	3.01	0.57	2.90	2.70	5.572	0.294	0.824			576		0.185			
	N 5		平衡含水率	中心	0.47	3.07	2.76	0.45	3.03	2.50	4.228	0.270	0.751	35	30	463		70	0.220	

変化と、寸法の変化は別々の試料を用いて個別に測定した。試料による個体差を小さくするため、各々の試料は出土木材の同一部位から作成した。

試料は、奈良国立文化財研究所から提供された針葉樹と広葉樹の出土材から作成した。表1に、用いた試料の寸法、重量、含水率などを示した。試料 B3 と N3 は収縮率の測定に用い、それ以外の試料は乾燥速度の測定に用いた。筒内の空気はファンによって強制対流しているが、空気流速は筒内均一ではなく、場所によって異なる。そのため、試料の設置場所によって乾燥速度も変化するので、乾燥速度の測定では設置場所も変えた (B2 と N2 の場合は筒の壁近辺、それ以外は筒の中心に設置)。また、乾燥速度に及ぼす湿度の影響を調べるため、湿度が50%の場合と70%の場合について測定した。B5 と N5 が湿度70%で、それ以外が50%である。

3. 乾燥特性

(1)含水率の経時変化：図2に含水率Xと乾燥時間tとの関係を示した。含水率は試料中の含水量を絶乾重量で除した値であり、次式で定義される：

$$X = \frac{M - M_D}{M_D} \quad (1)$$

ここで、 M_D は試料の絶乾重量、 M は乾燥開始t時間後の重量である。図2から分かるように、含水率は乾燥初期には時間と共にほぼ直線的に減少するが、時間が経過するにつれてその減少速度が鈍化し、ついにはある一定値を示すようになる。

(2)乾燥速度曲線：乾燥速度は、試料重量 $M (=M_D (1 + X))$ の時間変化速度である。従って、単位表面積当り乾燥速度Rは、次式で表される。

$$R = -\frac{1}{A} \frac{dM}{dt} = -\frac{M_D}{A} \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

ここで、 A は試料の表面積であり、乾燥による収縮を考慮して各含水率における値を用いた。(2)式から分かるように、乾燥速度Rは図2に示した含水率変化曲線の勾配 ($=dX/dt$) に比例する。

図3に、設置場所が異なる2組の試料について、乾燥速度Rと含水率Xの関係(乾燥速度曲線)を示した。図(a)が広葉樹、図(b)が針葉樹である。いずれの場合にも試料温度が乾燥温度になるのに要する予熱期間(A~B)、乾燥速度が一定になる恒率乾燥期間(B~C)、乾燥の進行に伴って乾燥速度が減少する減率乾燥期間(C~D~E)の3つの期間が存在する。通常、予熱期間は他の乾燥期間に

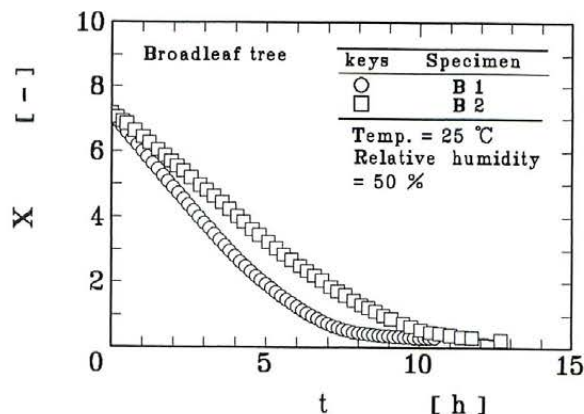


図2 含水率の経時変化
Fig.2 Change of moisture content with time

比べて短いので無視することができる。恒率乾燥から減率乾燥へ移行するC点での含水率を限界含水率 X_c と呼び、乾燥速度が0になり乾燥がそれ以上に進行しなくなるE点の含水率を平衡含水率 X_e と言う。

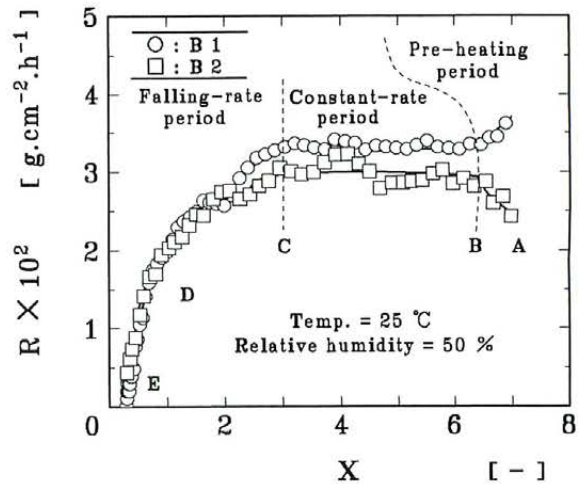
乾燥速度曲線にはいくつかの型がある。木材（現生材）のような細胞質材料の場合には、減率乾燥期間が二段に分かれ、第一段は直線、第二段は下に凸の曲線になることが多い。本実験で得られた図3では、CD間が第一段、DE間が第二段に対応するが、DE間は上に凸の曲線になり、この点が現生材と異なっている。毛管脱水が起こる短繊維材料の場合には、減率乾燥期間全体が上に凸の曲線になる。本実験に使用した出土木材は、現生材に比べると含水率が大きく、劣化がかなり進行しているため、木材内の毛管構造が発達し、細胞質材料と短繊維材料の中間的な特性を示すものと考えられる。

4. 乾燥機構と乾燥速度

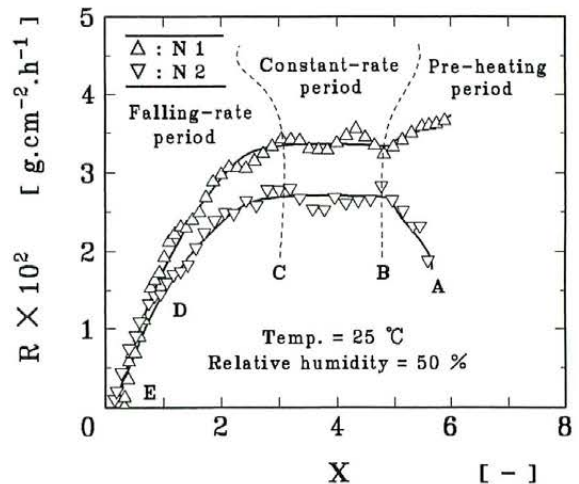
(1)恒率乾燥期間：試料表面に水が十分存在する場合には、乾燥速度は試料表面からの水の蒸発速度に等しいので、空気の温度、湿度、及び試料表面の空気流速が一定であれば、乾燥速度は一定値を示す。この領域が恒率乾燥期間であり、水の蒸発に必要な熱量（蒸発潜熱）は周囲からの伝熱によって供給される。試料表面は十分濡れているので、表面温度は湿球温度 T_w に等しいと見なせる。従って、温度 T の空气中に置かれた試料の恒率期間における乾燥速度 R_c は次式で表される。

$$R_c = \frac{h(T - T_w)}{\lambda_w} \quad (3)$$

ここで、 h は試料表面における伝熱係数、 λ_w は水の蒸発潜熱である。伝熱係数 h は試料表面の空気流速によって決まる（付録2参照）ので、まず、空気の対流の影響について検討した。本実験装置で



(a) 広葉樹の場合
(a) For broadleaf tree



(b) 針葉樹の場合
(b) For needle-leaf tree

図3 出土木材の乾燥速度曲線
Fig.3 Drying rate curve for waterlogged wood

は、空気流速を定量的に変化させることは出来ないので、試料の懸垂場所を変えることによって対流の影響を変化させた。図3に示した2組の試料のうち、(B1, N1)は筒の中心に、(B2, N2)は壁近傍に懸垂した。設置場所以外の条件はすべて同じである。空気の対流速度は中心の方が壁近傍よりも大きいため、中心に懸垂した(B1, N1)の乾燥速度は壁近傍に懸垂した(B2, N2)の乾燥速度よりも大きくなっている。

次に、温度、湿度の影響について検討する。図4に温度、湿度を変化させた場合の乾燥速度曲線を示した。B4とN4の乾燥温度、湿度は25℃、50%、B5とN5のそれは35℃、70%であり、試料はいずれも筒の中心に懸垂した。乾燥条件(温度、湿度)の違いによって2本の乾燥速度曲線が得られた。同一乾燥条件に対する乾燥速度は、樹種の違いに関わらず、全乾燥領域においてほぼ同じ値を示している。この図から、乾燥速度は樹種の影響はほとんど受けず、主に乾燥温度、湿度によって決まることが分かる。

図5に、恒率乾燥速度 R_c を温度推進力(= $T_w - T$)に対してプロットした。原点を通る直線関係が得られ、(3)式が成立することが分かる。勾配から伝熱係数 h が $12 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ と求められた。本実験で得られた h の値は、付録2の(A-3)式によると空気流速が 3.7 m/s の場合に相当する。この値はファンによる空気の対流速度を考えれば妥当な結果である。

(2)減率乾燥期間：この期間の乾燥は、試料内部の水分移動によって支配される。木材内の水分移動は、毛管作用による水分移動と水蒸気の拡散による移動の二つに分けて考えら

れ、繊維飽和点以下の水分は主に拡散により、繊維飽和点以上の水分は毛管作用によって移動する(北原：1967)。ここで、繊維飽和点とは細胞壁からの脱水が起こり始める含水率であり、現生材の場合、繊維飽和点は25~35%である。出土木材の場合、前述の乾燥速度曲線の挙動から、毛管作用が支配的

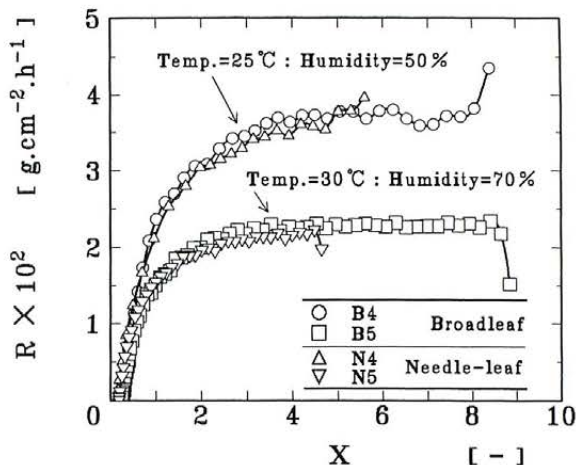


図4 湿度50%及び70%における乾燥速度曲線
Fig.4 Drying rate curve for humidities of 50% and 70%

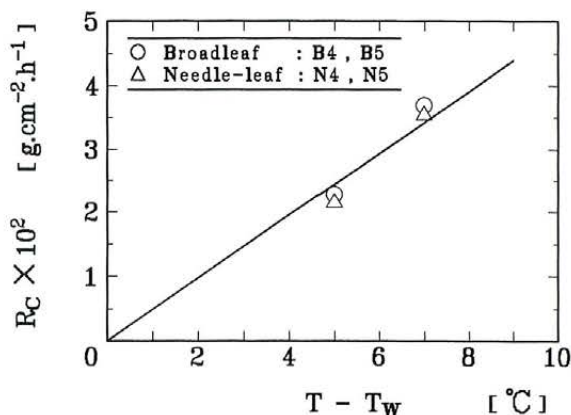


図5 恒率乾燥速度対温度推進力のプロット
Fig.5 Plots of constant drying rate versus temperature driving force

と考えられる。このときの含水率分布は、乾燥材料が板状の場合、次の微分方程式によって表される(北原：1967)。

$$\frac{\partial X_P}{\partial t} = D_w \frac{\partial^2 X_P}{\partial y^2} \quad (4)$$

ここで、 X_P は板の中心軸からの距離 y における局所含水率である。上式を適当な初期条件 ($t=0$ のとき、板内部の X_P は均一で $X_P=X_C$) 及び境界条件 ($t>0$ のとき、表面では $X_P=X_E$) のもとで解く(Crank：1955)と含水率分布が得られ、これから乾燥速度を求めることができる。時間 t が十分大きいときには、乾燥速度は次式で近似できる。

$$R = \frac{\pi^2 \rho_B D_w}{2b} X_F \quad (5)$$

ここで、 b は板厚、 ρ_B は乾燥材料の重量を体積で除したかさ密度、 $X_F (=X - X_E)$ は乾燥によって除去可能な自由含水率である。乾燥末期であるので、 b および ρ_B として絶乾時の板厚およびかさ密度を用いた。(5)式に従って乾燥速度 R 対 X_F/b をプロットし、これを図6に示した。乾燥末期、すなわち原点近傍では直線関係が認められ、(5)式が成立する。直線の勾配に及ぼす乾燥温度の影響は本実験範囲(25~35℃)ではほとんど認められない。

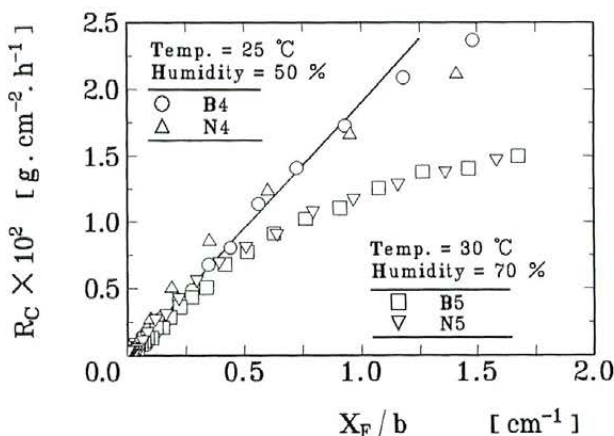


図6 減率乾燥期間における乾燥速度
Fig.6 Drying rate in the falling-rate period

直線の勾配から水分移動係数とかさ密度の積 $\rho_B D_w$ が次のように求められた：

$$\rho_B D_w = 3.85 \times 10^{-3} \quad \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \quad (6)$$

本実験の場合、表1に示したように絶乾時のかさ密度は試料によってかなり変化しているにも関わらず、両者の積はほぼ一定になっている。これは、かさ密度が大きいほど単位移動距離当りの水分の移動抵抗 ($=1/D_w$) が大きくなるためと考えられ、本実験結果は移動抵抗が ρ_B に比例することを示唆している。かさ密度の実測値を用いて D_w を算出すると、 $D_w = 0.012 \sim 0.021 \text{ cm}^2/\text{h}$ である。現生材の場合、 D_w は $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{h}$ のオーダーであり(化学工学便覧：1978)、本実験結果は出土木材と現生材の D_w には大差がないことを示している。

乾燥末期以外の領域では、水分移動の機構が複雑であるため、(5)式は成立しない。これに関してはさらに検討が必要である。

(3)限界含水率：恒率から減率へ移行するC点の限界含水率 X_c は、材質によって大きく影響され、乾燥条件によっても若干変化する。本実験で用いた試料の場合、 $X_c=2.5\sim 3.0$ であった。現生材の松の限界含水率は約1.2であり（化学工学便覧：1978）、出土材の限界含水率はこの値の約2倍である。

(4)平衡含水率：図7に、本実験で測定した出土木材の平衡含水率 X_E と相対湿度との関係を示した。平衡含水率は、相対湿度の増加とともに増大する。また、広葉樹の平衡含水率の方が針葉樹のそれよりも若干大きくなっていることが分かる。温度の影響は、本実験範囲内（25～35℃）では、ほとんど認められなかった。図7には、現生材に対する文献値（化学工学便覧：1978）も破線で示した。出土木材の平衡含水率は、これに比べると2～3倍大きい。

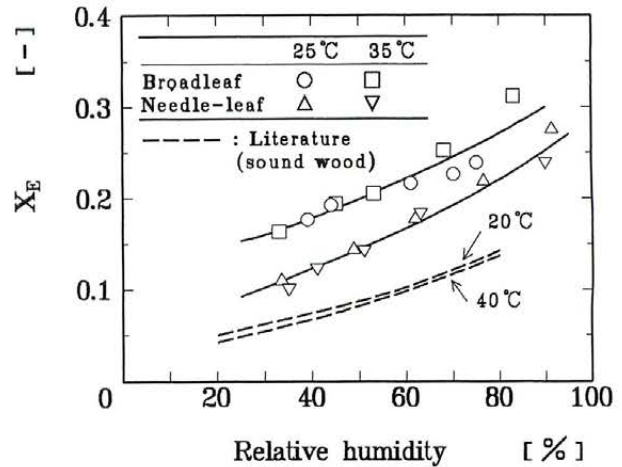


図7 平衡含水率対相対湿度の関係
Fig.7 Relation between equilibrium moisture content and relative humidity

5. 乾燥速度式および乾燥時間

(1)乾燥速度式：減率乾燥期間において上に凸の乾燥速度曲線が得られる場合、同一材料の乾燥速度曲線は相似形になり、 R/R_c 対 X_F/X_{FC} のプロットは1本の曲線で相関できる（化学工学Ⅲ：1963, 化学工学便覧：1978）。ここで、 $X_{FC}(=X_c-X_E)$ は限界自由含水率であり、類似の材質の場合には主に板厚 b によって決まるので、ここでは、 X_{FC} の代わりに b を用い、 R/R_c 対 X_F/b のプロットの相関性を調べた。その結果、良好な相関性が得られたので、相関因子として X_F/b を採用した。図8に、予熱期間を除く R/R_c 対 X_F/b のプロットを示した。全試料のデータは1本の曲線で相関され、次の実験式で表すことができた。

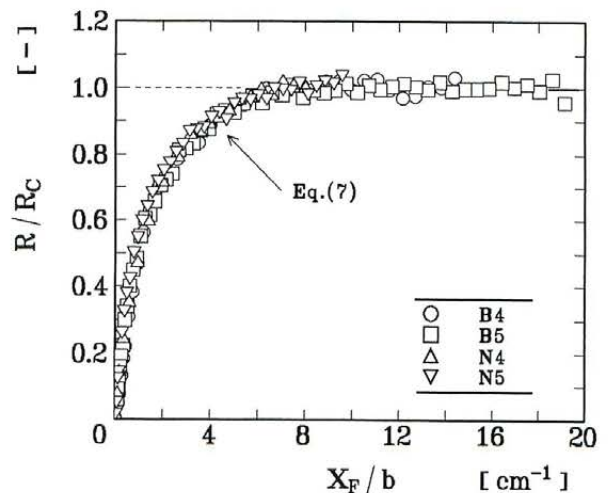


図8 乾燥速度の相関
Fig.8 Correlation of drying rate

$$\frac{R}{R_c} = 1 - \exp\left\{-0.73\left[\frac{X^F}{b}\right]^{0.85}\right\} \quad (7)$$

ここで、板厚 b の単位は cm である。

(2)乾燥時間：自然乾燥処理を行う場合の乾燥処理時間 t_D は、乾燥速度式(2)式を積分することによって次式から計算できる。

$$t_D = M_D \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{AR} \quad (8)$$

ここで、 X_1 及び X_2 はそれぞれ乾燥の開始および終了時の含水率である。乾燥処理は、通常、収縮が小さい出土材に対して適用されるので、乾燥面積 A の変化は小さい。ここでは、簡単化のため乾燥面積は一定と見なし、乾燥前後の平均値 A_{av} を用いる。(7)式を(8)式に代入すると次式が得られた。

$$t_D = \frac{M_D S}{A_{av} R_c} \quad (9)$$

ここで、 S は次式で表される積分値であり、乾燥開始時及び終了時の自由含水率 (X_{F1} 及び X_{F2}) と板厚 b の関数である。

$$S(X_{F1}, X_{F2}, b) = \int_{X_{F2}}^{X_{F1}} \frac{dX_F}{1 - \exp\{-0.73(X_F/b)^{0.85}\}} \quad (10)$$

完全乾燥 ($X_{F2} = 0$) すると乾燥時間が非常に長くなり、実際的ではない。通常、乾燥処理は温度、湿度が一定に保たれていない空気中で行われる。図7から分かるように、相対湿度が10%変化しても平衡含水率は約0.02変化することを考慮すれば、実用的には $X_{F2} = 0.001$ とすれば十分である。図9に、 $X_{F2} = 0.001$ として数値積分によって求めた積分値 S と初期自由含水率 X_{F1} の関係を、板厚 b をパラメータとして示した。 S 値は X_{F1} 及び b の増加と共に増大している。板厚 b が十分小さくなる ($b \rightarrow 0$) と、減率乾燥期間がなくなり全領域が恒率乾燥期間 ($R = R_c = \text{一定}$) になるので、(10)式は $S = X_{F1} - X_{F2} \approx X_{F1}$ となり、原点を通る直線に漸近する。図9に、この漸近線を破線で示した。

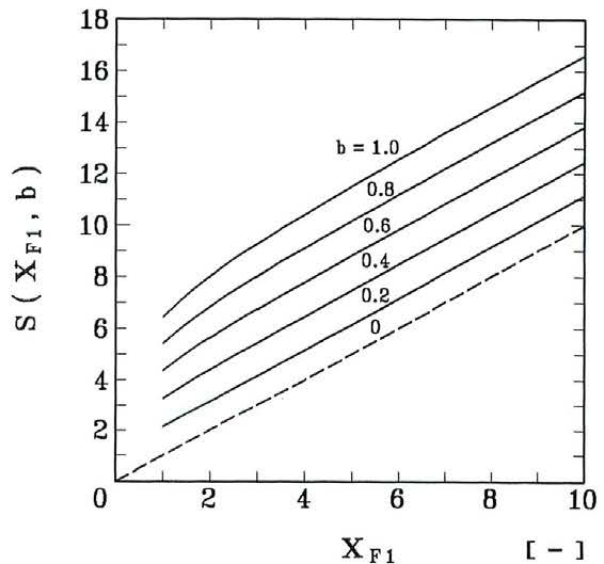


図9 b を助変数とし、 X_{F1} の関数として表した(10)式の積分値
Fig.9 Integral of Eq.(10) as a function of X_{F1} with a parameter of b

6. 収縮と変形

放射, 接線, 軸方向の収縮率 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ を, 初期辺長 L_0 に対する収縮長さの割合として次式で定義する。

$$\delta_i = \frac{L_{i0} - L_i}{L_{i0}} \quad (11)$$

ここで, i ($=X, Y, Z$) はそれぞれ放射, 接線, 軸方向を表す。図10に各方向の収縮率 δ_i と含水率 X の関係を示した。針葉樹の場合, 収縮率は最高で約13%であり, 広葉樹の最高値60%に比べて小さい。また, いずれの樹種でも接線方向の収縮が最も大きく, 軸方向のそれは最も小さい。

変形, 歪には方向による収縮率の差が大きく関係する。各方向の収縮率が同じ場合には, 全体の大きさは変わっても, 元の形と相似形を保つため, 形は変化しない。しかし, 方向により収縮率が異なると, 変形,

歪が顕著になる。広葉樹の場合には, 方向による収縮率の差が特に大きく, 乾燥による保存処理は困難である。針葉樹の場合には, 収縮率も小さく, かつ方向による差も小さいので, 本実験に使用した程度の劣化度の針葉樹であれば, 自然乾燥による保存処理も可能であると考えられる。

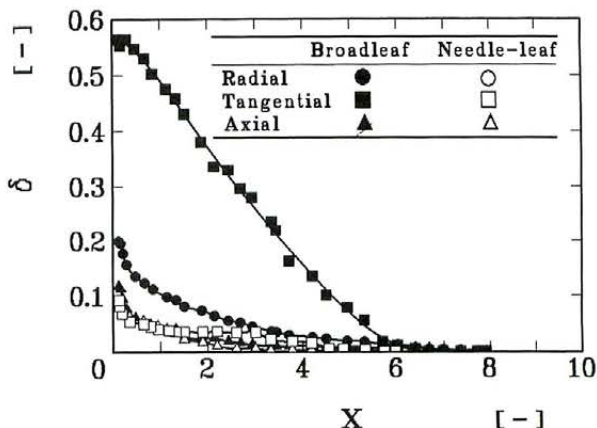


図10 収縮率と含水率の関係

Fig.10 Relation between shrinkage and moisture content

7. 所要乾燥時間の計算例

例として縦, 横とも 100 cm, 厚さ 1 cm, 重量 1044 g の針葉樹の板を, 温度 30°C, 相対湿度 60% (湿球温度 24°C) の室内に放置して乾燥させる場合を考える。水中に浸して測定した板の重量は 36.92 g とする。

処理時間 t_D は, 絶乾重量 M_D , 積分値 S , 平均表面積 A_{av} , 恒率乾燥速度 R_C , および初期自由含水率 X_{F1} が分かれば, (9)式から算出できる。

M_D, X_{F1} の推算: 付録 1 の (A-2) 式及び図 A-1 から, 絶乾重量は $M_D = (2.828)(36.92) = 104.4$ g と求められる。従って, (A-1) 式から $\eta = (1044 - 104.4) / 104.4 = 9.00$ となる。図 7 から, 平衡含水率は $X_E = 0.17$ と求められる。 η は初期含水率 X_1 に等しいから, 初期自由含水率 X_{F1} は $X_{F1} = 9.00 - 0.17 = 8.83$ になる。

A_{av} の推算: 図10によると, 針葉樹の全方向の収縮率は10%と見なせるので, 乾燥終了時の縦, 横の寸法は 90 cm, 厚さは 0.9 cm になる。従って, 側面積を無視すると, 平均面積 A_{av} は板の表裏をあわせ

て(2) $\{(100)^2 + (90)^2\}/2 = 18100 \text{ cm}^2$ になる。

Sの推算： $X_{F1} = 8.83$, $b = 0.9 \text{ cm}$ であるので、(10)式の積分値Sは図9から $S = 14.7$ となる。

R_c の推算：まず、 h を求める。温度推進力 ΔT は乾球温度と湿球温度の差であるから、 $\Delta T = 30 - 24 = 6^\circ\text{C}$ となる。従って、 $L^3\Delta T > 4.4 \times 10^6$ となり、(A-4b)式が適用できるから、 $h = 0.55(6)^{1/3} = 1.00 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ となる。蒸発潜熱 λ_w が 2440 J/g であるので、恒率期間における乾燥速度は、(3)式から $R_c = (1.00)(6)/2440 = 0.00246 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ となる。

t_D の推算：(9)式から、 $t_D = (104.4)(14.7)/\{(18100)(0.00246)\} = 34.5 \text{ h}$ ：すなわち、乾燥処理時間は約35時間となる。

8. 結 言

遺跡出土木材の乾燥特性、収縮、および乾燥処理時間について検討した。乾燥は恒率乾燥期間と減率乾燥期間に大別できた。減率期間の乾燥速度曲線は上に凸の曲線となり、出土木材の乾燥挙動は繊維状材料の特性と類似していることが分かった。乾燥末期の乾燥速度から求めた水分移動係数は現生材の値とほぼ一致した。出土木材の臨界含水率および平衡含水率は、現生材のそれと若干異なっている。

乾燥による収縮は、広葉樹の場合に大きく、針葉樹の場合には比較的小さい。広葉樹の場合には、方向による収縮率の差異が大きいため、変形が著しくなり、乾燥による保存処理は困難である。針葉樹の場合には、収縮率も比較的小さく、かつ方向による差異も少ないので、場合によっては乾燥による保存処理も可能であると考えられる。

乾燥速度を簡単な実験式で整理した。この速度式から、所要乾燥時間の推算式を導き、所要時間の推算が可能であることを示した。

本研究で得た結果は、板状試料に基づいた限られた条件下での結果である。実際の保存処理に適用できる一般的な結論を得るためには、形状や劣化度の異なる種々の出土木材について測定を行うと同時に、乾燥機構や変形についての理論的な解析を行う必要がある。

謝 辞

本実験に使用した出土木材は、奈良国立文化財研究所・沢田正昭氏から提供されたものであります。また、奈良県立橿原考古学研究所・今津節生氏からは貴重な御助言を戴きました。ここに記し、両氏に対して深謝いたします。

〈付録1〉 最大含水率の推定法

出土木材の最大含水率 η は、木材の劣化度の目安となり、保存処理法の決定や処理時間の推定などに欠くことのできない因子で、本文(1)式中のMを乾燥開始前の湿潤重量 M_1 で置換した次式から求め

られる。

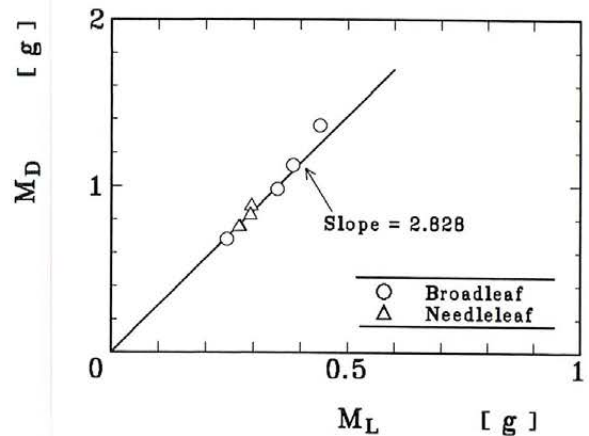
$$\eta = \frac{M_L - M_D}{M_D} \quad (\text{A-1})$$

湿潤重量 M_L は容易に測定できるので、絶乾重量 M_D が推定できれば η の推算が可能になる。非破壊的に含水率を推定する方法の一つに最大含水率法(松田：1988, Kohdzuma：1990)がある。種々の表現式があるが、ここでは最も簡単化した形で表す。

木材内の空隙が全て水で満たされているとする。試料体積を V 、その空隙率を ϵ 、水の密度を ρ_w 、木材実質の密度を ρ_s 、重力の加速度を g とすると、試料の全重量は $\{(1-\epsilon)V\rho_s + \epsilon V\rho_w\}g$ になる。試料を水中に入れたときの重量 M_L は、全重量から浮力 $\rho_w Vg$ を差し引いた値であるので、 $(1-\epsilon)(\rho_s - \rho_w)Vg$ である。一方、絶乾重量 M_D は $(1-\epsilon)\rho_w Vg$ である。従って、 M_D と M_L の比をとれば次式が得られる。

$$M_D = \left[\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \right] M_L \quad (\text{A-2})$$

(A-2)式は M_D 対 M_L が比例関係にあり、その比例定数は木材実質の密度によって決まることを示している。図 A-1 に、本実験で使用した試料に対する M_D 対 M_L の関係をプロットした。プロットの勾配から、比例定数は 2.828 と求められた ($M_D = 2.828 M_L$)。これから、 $\rho_s/\rho_w = 1.547$ (真比重) が得られた。現生材の真比重は樹種に無関係であり、水を溶媒として測定した場合、1.5~1.55 である (右田・米沢・近藤：1968)。本実験は現生材の値と良く一致している。松田ら (1988) は、真比重として 1.5 を採用している。



図A-1 絶乾重量と水中重量の関係

Fig. A-1 Correlation of the weight of dry wood with the one of wood in the water

〈付録2〉 伝熱係数の推算式

平板を対象とする。ファンなどによって空気が平板面に平行に流されている強制対流の場合と、平板を静止空气中に置いた自然対流の場合の推算式を以下に示す。式中使用した長さ、質量、時間、熱量の単位はすべて、cm, g, h, J である。

強制対流のとき：乾燥実験から次の実験式が得られている (化学工学便覧：1978)。

$$h=1.5 \times 10^{-4} u^{0.8} \quad ; \quad u=2.1 \times 10^5 \sim 1.3 \times 10^6 \text{ cm/h} \quad (\text{A-3})$$

ここで、 u は平板に平行に流れている空気の流速である。

自然対流のとき：垂直平板を考え、縦方向の長さを L とする。乾燥実験から直接測定した結果は見あたらないので、伝熱実験から得られている実験式（化学工学便覧：1978）を空気（30℃）の場合について書き直し、それを次に示す。

$$h=1.6(\Delta T/L)^{1/4} \quad ; \quad L^3 \Delta T=10^2 \sim 10^6 \quad \text{cm}^3 \cdot \text{K} \quad (\text{A-4a})$$

$$h=0.55(\Delta T)^{1/3} \quad ; \quad L^3 \Delta T=10^6 \sim 10^{10} \quad \text{cm}^3 \cdot \text{K} \quad (\text{A-4b})$$

ここで、 ΔT は温度推進力であり、恒率乾燥期間では乾球温度と湿球温度の差に等しい。厳密には、放射伝熱も考慮すべきであるが、常温近辺ではこの影響は小さいので、ここでは無視した。

参 考 文 献

- 天野暢保・飯塚朋子・伊藤キミ・大見きよ・加藤美紗・仲野登志子・高取敬子(1991) 六條御殿御用材保存処理奮戦記. 日本文化財科学会会報 第21号：17-28
- 右田伸彦・米沢保正・近藤民雄(1968) 木材化学 共立出版株式会社：27-28
- 化学工学協会編(1978) 化学工学便覧（第4版）丸善：696～711
- 河越幹男・石垣 昭(1990) 遺跡出土木材の PEG 含浸処理に関する理論的考察. 考古学と自然科学 22：95-102
- 河越幹男・石垣 昭(1991) 遺跡出土材への PEG 含浸速度に及ぼす樹種，PEG 濃度，及び温度の影響. 考古学と自然科学 23：1-11
- 河越幹男・石垣 昭(1991) 遺跡出土木材への PEG の含浸速度に及ぼす木目の影響. 考古学と自然科学 24：69-75
- 北原覺一(1967) 木材物理 森北出版株式会社：35-45
- 藤田重文・東畑平一郎編(1963) 化学工学Ⅲ 東京化学同人：310-312
- 増澤文武(1974) PEG 含浸処理した出土木材の経時変化. 元興寺仏教民俗資料研究所保存科学研究室 紀要(3)：52-58
- 松田隆嗣(1974) 出土木材の自然乾燥にともなう内部形態変化. 元興寺仏教民俗資料研究所保存科学研究室 紀要(3)：71
- 松田隆嗣・植田直見(1988) 出土木材の非破壊的含水率推測法について. 日本文化財科学会第5回大会発表要旨集：54-55
- Crank, J. (1955) "The Mathematics of Diffusion", Clarendon Press, Oxford：44-46
- Imazu, S. and T. Nishiura (1990) "A New Freeze-Drying Method Using Mannitol and PEG for

The Preservation of Waterlogged Wood” Preprints of the 9-th Triennial Meeting (Dresden, German), ICOM Committee for Conservation, Vol. 1 : 234-238

Kohdzuma, Y., S. Itakura, K. Minato, Y. Katayama and K. Okamura (1990) “A Trial for Preparation of Artificial Waterlogged Wood I. Comparison of some Characteristics of acid hydrolyzed and decayed woods with those of waterlogged wood” Mokuzaï Gakkaishi, vol. 36, No. 5 : 389-397

Nishiura, T. and S. Imazu (1990) “Experimental Study on the Dimensional Change of Highly Degraded Waterlogged Wood According to Ambient Humidity after Preservation treatment” Proceedings of the 4th ICOM-Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference (Bremerhaven, German) : 107-118

Drying Behavior and Dimensional Change of Waterlogged Wood

Mikio KAWAGOE, Keiichi HYAKUMURA and Akira ISHIGAKI

Department of Chemical Engineering, Nara National College of Technology

22 Yata-machi, Yamato-Koriyama, Nara 639-11, Japan

The drying characteristics of waterlogged woods were investigated to obtain fundamental knowledge on preservation of the waterlogged wood. Two species of wood, broadleaf and needle-leaf trees, were employed as a specimen.

First, Drying rate curve of the waterlogged wood was measured, which was divided into two drying periods, that is, constant-rate drying period and falling-rate drying period. It was found that their drying behavior in the falling-rate period was similar to that for fibrous material. No effect of wood species on the drying rate was found. Critical and equilibrium moisture contents for the waterlogged wood were found to be larger than the ones for sound woods given in literatures.

Second, dimensional change of the waterlogged wood during the drying period was measured in radial, tangential and axial directions. For the broadleaf tree, the maximum change of dimension was found in tangential direction, which was almost 60%. For the needle-leaf tree, the dimensional change was less than 13%. From these results, we concluded that the drying method may be applied to the preservation of the waterlogged wood for needle-leaf trees.

Finally, a method was proposed to estimate the drying time required, using an empirical correlation of drying rate obtained in this experiment.