

# 板材の乾燥について

(内部温度の上昇経過と水分々布)

福山 万次郎・竹村 富男 (木材加工学研究室)

Manjiro FUKUYAMA and Tomio TAKEMURA : On the drying of board

(The elevating process of temperature and the moisture distribution in wood)

## 緒 言

空気-蒸気混合媒体内での木材の対流乾燥は、一般に、

- 1) 媒体空気から木材への熱伝達と木材表面から内部への熱伝導、及び
- 2) 木材水分の表面蒸発並びに木材内部から外部への水分傾斜又は蒸気圧傾斜に基づき液状水分又は水蒸気の拡散移動

の両作用によって行われる。特に媒体空気の状態量(乾、湿球湿度)の経過とその流動速度並びに流動方法は、乾燥速度、最終含水率及び被乾燥材料の品質に極めて重要な役割を演ずる。

上記(1)及び(2)の課題に対しては、従来それぞれ単独に多数の実験が行われ厳密な理論式も得られているが、乾燥中における木材内部の熱伝導即ち温度の上昇経過及び温度分布と水分の減少経過或いは水分々布との関係に関しては、余り追求されていない憾みがある。

そこで本実験では、内部水分の拡散移動が乾燥の主要素を占める板材について定常乾燥を行い、木材温度の上昇経過と水分々布について検討した。本報はそれらの結果の報告である。

## 供試材料及び実験方法

1) 供試材料及び試験片：木曽産ヒノキ(*Chamaecyparis obtusa* S et Z)及びヒバ(*Thujopsis dolabrata* S et Z)の辺材部より採取した板目木取の鉋削円板(直径：5.0cm, 厚さ：1.0cm, 側面からの水分蒸発防止の為、尿素系樹脂を4~5回塗布)を蒸溜水中に減圧浸漬(含水率；ヒノキ201~208%, 平均204%, ヒバ210~223%, 平均215%)したものを試験片とした。尙実験に際しては、更に側面を gum tube で被覆して樹脂剝離による側面からの水分蒸発を防止した。

2) 実験方法並びに測定：鳥津製HT-1型恒温恒湿装置を用い、乾燥温度60°C, 湿球温度35°C(関係湿度20%)の定常乾燥を行い、下記事項について測定した。

i) 重量減少経過の測定：乾燥開始より終了時迄の各試験片の重量減少経過を0.1~1.0時間々隔で測定して含

水率及び水分減少量の計算に用いた。

ii) 水分々布の測定：上記測定と並行して、各試験片が所定の平均含水率に到達した際、乾燥室より漸次該試験片を取り出し、秤量後、試験片の中央部から水分々布測定用小片(断面：2.0×2.0cm, 厚さ：1.0cm)を鋸断し、表面から順次0.8~1.1mmの薄片に分割して絶乾法で含水率を決定した。これ等各操作は、試験片からの水分減少を防止する為可及的に速やかに行い、同時に Oil Paper で包む等各種の手段を講じ測定した。

iii) 内部温度上昇経過の測定：予め Calibrate した "銅-コンスタンタン" 熱電対(直径：0.5mm)の hot junction が、試験片中央部において表面からそれぞれ0.5, 3.0, 5.0mm(厚さの中央部)の各深さに達する様に側面から小孔を穿つてこれに挿入し、milivolt meter(鳥津製, 6range, 10mv)で乾燥初期から終了時迄の温度上昇経過を測定した。熱電対の温度(t)と動電力(E)の関係は次の如くである。

thermocouple 1  $t = 7.3 + 2.82E$

thermocouple 2  $t = 7.7 + 2.83E$

thermocouple 3  $t = 7.3 + 2.88E$

## 実 験 結 果

1) 乾燥経過並びに蒸発速度：上記条件によつて乾燥したヒノキ、ヒバ両板目材の乾燥経過〔含水率(u)：乾燥時間(z)〕は Fig. 1, 又同一材料の  $\log u : z$  の関係は Fig. 2 又含水率の時間的減少経過の微分値から求めた単位時間、単位面積当りの蒸発水分量即ち蒸発速度(w.gr/cm<sup>2</sup>.hr)と含水率(u)の関係は、Fig. 3の如くである。

Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3より含水率は何れも乾燥初期より指數的に減少し、恒率期間が存在しないこと、減率第一段の乾燥区間は、Fig. 2 と Fig. 3 で多少異なるが、初期含水率から含水率約30~40%迄以下減率第2段の期間に移ること等が認められる。又  $\log u : z$  の直線部分から

Fig. 1) Drying process (moisture content  $u$  : drying time  $z$ )

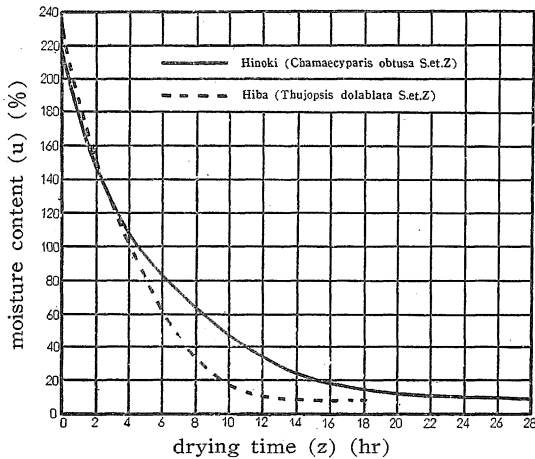


Fig. 2) Relationship between  $\log u$  and  $z$ .

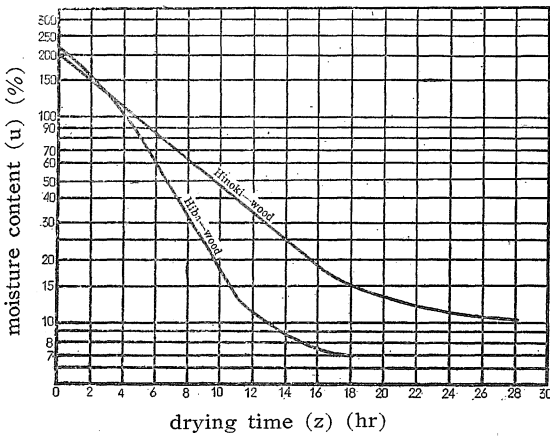
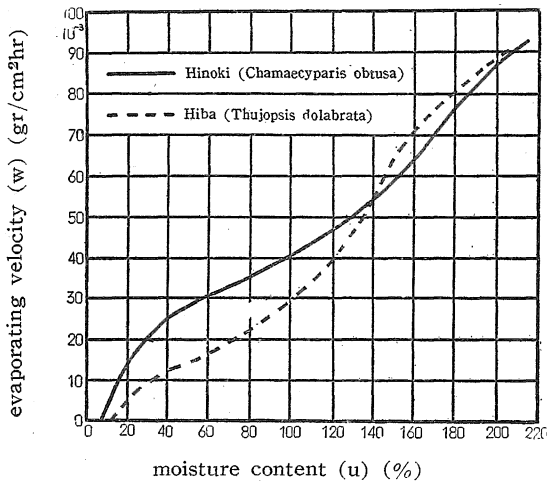


Fig. 3) Relationship between evaporating velocity ( $w$ ) and moisture content ( $u$ ).



$$\frac{du}{dz} = -k(u - u_{eq})$$

但し,  $\frac{du}{dz}$  = 乾燥速度

$u_{eq}$  = 平衡含水率

$k$  = constant (乾燥速度の大小 従つて水分拡散の難易を示す constant)

の乾燥速度式を想定して係数  $k$  の値を求めると

ヒノキ板目材 ;  $k=0.144$  ( $u=200\sim 20\%$ )

ヒバ板目材 ;  $k=0.223$  ( $u=80\sim 15\%$ )

で、ヒバ材の  $k$  は、ヒノキ材の約1.5倍即ちヒバ材の水分減少速度の極めて速やかなることが理解出来る。

以上の事柄は、Fig.3 及び後述の水分拡散率並びに水分拡散係数からも明らかに認められる処である。

2) 水分々布と水分拡散係数: 乾燥中の水分々布の測定結果を各時点、各厚さについて総括して示すとFig.4の如くで、材の中心部から表面に向つて放物線的に低下することが認められる。これ等の水分々布曲線をSine-Curveとして、

$$\frac{\partial u}{\partial z} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \text{ の拡散方程式の解 }^{(1)(6)}$$

$$\frac{V_a}{V_o} = \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 K \cdot Z} \text{Sin} \frac{\pi x}{a}$$

但し,  $V_a = u - u_{eq}$ ,  $V_o = v_o - u_{eq}$ ,  $u_{eq}$  = 平衡含水率

$V_o$  = 初期含水率,  $a$  = 板の厚さ

$z$  = 乾燥時間  $K$  = 水分拡散率

( $\text{cm}^2/\text{hr}.\%$ )

$u$  =  $z$  時間後の表面からの厚さ  $x$  における含水率

従つて、

$$u = u_{eq} + \frac{4}{\pi} (u_o - u_{eq}) e^{-\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 K \cdot Z} \text{Sin} \frac{\pi x}{a}$$

を用い、これに測定値並びに水分拡散率  $K$  (但し、ヒノキ材 ;  $K=0.01314$ , ヒバ材 ;  $K=0.02346$ ) を代入して求めた結果の一例は、Table. 1 の如くで実測値とよく適合することが認められる。

Fig. 4) Moisture distribution during drying.

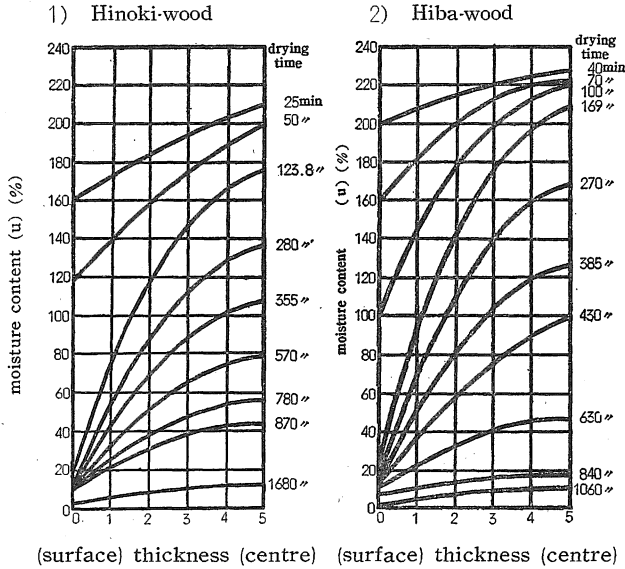


Fig. 4 の如き水分々布曲線から、或る時点の板内の或る厚さの点における水分拡散係数  $\lambda$  ( $\frac{gr}{cm. h. \%}$ ) を「グラフ」上で求める方法が、Egner によつて与えられている。即ち、 $z_1 \sim z_2$  時間内における板内の或る厚さ  $dx$  内の水分減少量を  $m$  とすると

$$m = \frac{r_0}{100} \left[ \int_{z_2}^{z_1} u(z) dx \right] \cdot A \dots (a)$$

但し、 $r_0$  = 板の絶乾比重

$A$  = 断面積

$\left[ \int_{z_2}^{z_1} u(z) dx \right]$  = 水分々布曲線内の面積の時間的变化

$\left[ \int_{z_2}^{z_1} u(z) dx \right]$  を、 $\frac{\partial}{\partial z} \left[ \int u \cdot dx \right]$  で置きかえると、

$$m = \frac{r_0}{100} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \int u \cdot dx \right) \right] A \dots (b)$$

一方、単位時間に面積  $A$  を通過する水分移動量を  $q$  とすると、Fick の拡散法則により

$$q = -\lambda \frac{du}{dx} A \dots (c)$$

但し  $du/dx$  = 水分傾斜

$\lambda$  = 拡散係数  $gr/cm.h.\%$

$$\text{故に、} \frac{r_0}{100} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \int u \cdot dx \right) \right] A = \lambda \frac{du}{dx} A$$

$$\text{従つて } \lambda = \frac{r_0}{100} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left( \int u \cdot dx \right) \cdot \frac{du}{dx} \dots (d)$$

(d)式を用い、ヒノキ材について、2.1hr ( $Z_1$ )、4.6hr ( $Z_2$ )、5.9hr ( $Z_3$ )、13.0hr ( $Z_4$ )、28.0hr ( $Z_5$ )、又ヒバ材について、6.4hr ( $Z_1$ )、10.3hr ( $Z_2$ )、14.0 ( $Z_3$ ) の水分々布曲線から  $\lambda$  を求めると Table 2 の如くである。(但し Table 内の  $x_0 \sim x_5$  は、板の中心から表面に向つて、1mm毎に附した符号)。

Table 2) Diffusion coefficient  $\lambda$  ( $gr/cm.h.\%$ ) of Hinoki-and Hiba-wood.

i) Hinoki-wood

	Diffusion coefficient $\lambda$ ( $gr/cm.h.\%$ )				
	$x_0 \sim x_1$	$x_1 \sim x_2$	$x_2 \sim x_3$	$x_3 \sim x_4$	$x_4 \sim x_5$
	-4	-4	-4	-4	-4
$Z_1$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$
$Z_2$	0.569	0.580	0.594	0.594	0.480
$Z_3$	0.324	0.424	0.442	0.433	0.356
$Z_4$	0.360	0.279	0.474	0.446	0.346
$Z_5$	0.370	0.169	0.438	0.418	0.378
	0.389	0.136	0.460	0.388	0.496

総平均値  $\lambda = 0.414 \times 10^{-4} gr/cm.h.\%$

Table 1) Calculation example of moisture distribution in wood. i) Hinoki-wood.

$u_0 = 219.1\%$     $u_{eq} = 4.0\%$     $z = 28hr$   
 $a = 0.99cm$     $K = 0.01314 cm^2/hr.\%$

$x$ (mm)	$\text{Sin} \frac{\pi x}{a}$	$4/\pi(u_0 - u_{eq})e^{-(\pi/a)^2 K \cdot Z} \text{Sin} \frac{\pi x}{a}$	$u(\%)$
0.5 (centre)	1.000	6.3	10.3
0.4	0.956	6.0	10.0
0.3	0.815	5.1	9.1
0.2	0.542	3.4	7.4
0.1	0.312	1.9	5.9
0 (surface)	0	0	4.0

平均 7.8  
 実測値 8.3

ii) Hiba-wood.

$u_0 = 227.4\%$     $u_{eq} = 3.8\%$     $z = 16.6hr$     $a = 1.0cm$   
 $K = 0.02346 cm^2/hr.\%$

$x$ (mm)	$\text{Sin} \frac{\pi x}{a}$	$4/\pi(u_0 - u_{eq})e^{-(\pi/a)^2 K \cdot Z} \text{Sin} \frac{\pi x}{a}$	$u(\%)$
0.5 (centre)	1.000	8.1	11.9
0.4	0.952	7.7	11.5
0.3	0.809	6.6	10.4
0.2	0.588	4.8	8.6
0.1	0.308	2.5	6.3
0 (surface)	0	0	3.8

平均 8.8  
 実測値 8.0

ii) Hida-wood

	diffusion coefficient $\lambda$ (gr/cm.h.%)				
	$x_0 \sim x_1$	$x_1 \sim x_2$	$x_2 \sim x_3$	$x_3 \sim x_4$	$x_4 \sim x_5$
$Z_1$	$\times 10^{-4}$ 0.544	$\times 10^{-4}$ 0.769	$\times 10^{-4}$ 0.455	$\times 10^{-4}$ 0.319	$\times 10^{-4}$ 0.294
$Z_2$	1.715	1.032	0.958	0.444	0.675
$Z_3$	0.502	1.289	0.392	2.449	1.771

総平均値  $\lambda = 0.907 \times 10^{-4}$  (gr/cm.h.%)

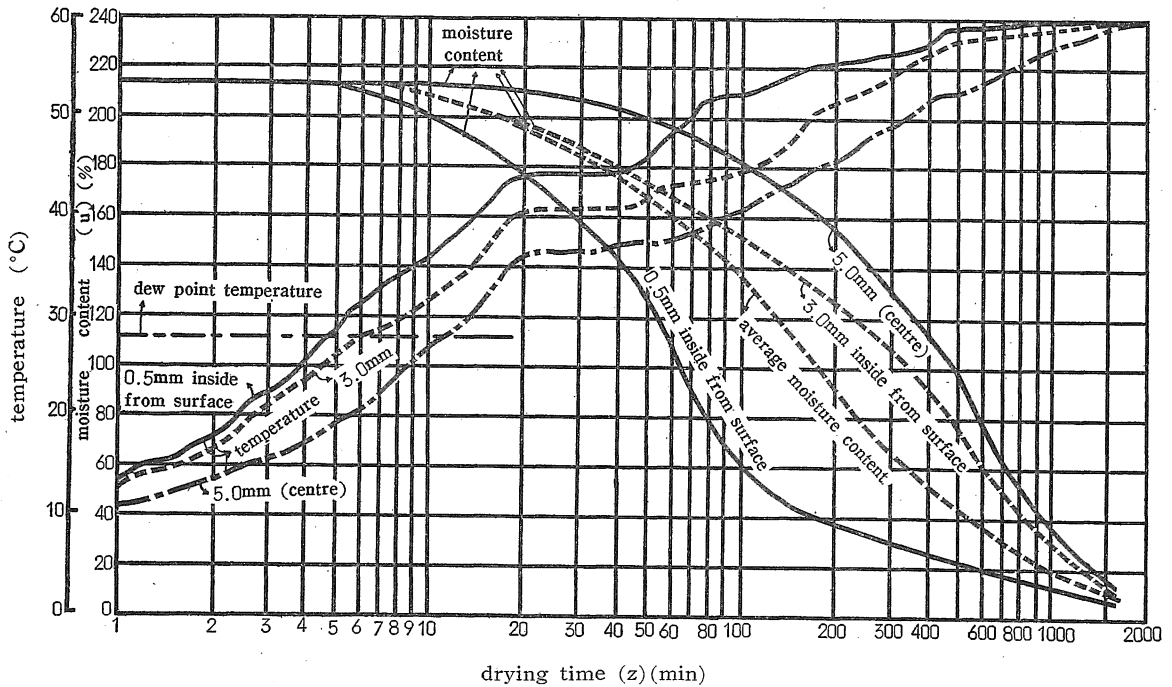
Table 2 の如く、 $\lambda$ の平均値は、ヒノキ材： $0.414 \times 10^{-4}$ 、ヒバ材： $0.907 \times 10^{-4}$  で、後者は前者の約2倍の値を示す。

同様な事柄は、拡散方程式より求めた水分拡散率  $K \left( = \frac{100\lambda}{r_0} \right)$  (ヒノキ材： $K=0.01314$ 、ヒバ材： $K=0.02346$ ) についても認められる如く、同一乾燥条件にも拘らず、両材の乾燥時間に著しい差違 (Fig.1参照) (ヒノキ材：28hr、ヒバ材：16.6hr) の生じたことがうなづかれる。

3) 内部温度の上昇経過：木材の表面からそれぞれ 0.5, 3.0, 5.0mmの深さの点における内部温度の上昇経過と水分々分布曲線 (Fig.4) から求めた該点の含水率の減少経過を両板目材について総括して示すと、Fig.5 及びFig.6 の如くである。これ等の図から内部温度の上昇経過を

Fig. 5) The elevating process of the temperature in the surface and the inner part of board, and moisture distribution in board during drying.

species; Hinoki-wood.



- i) 乾燥初期の加熱(温度上昇)期間
- ii) 加熱(温度上昇)の第2期間
- iii) 乾燥後期の加熱(温度上昇)期間

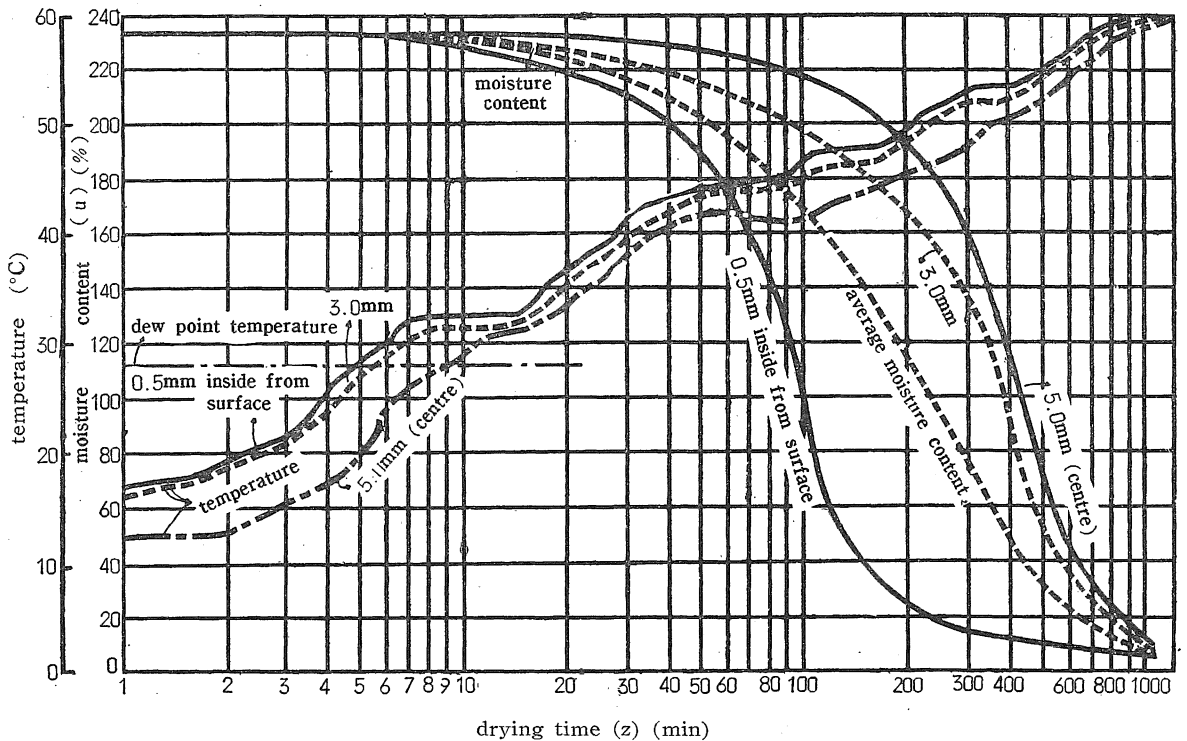
の3期に分けて考察することが出来る。

i) 乾燥初期の加熱(温度上昇)期間；乾燥材の表面温度が当該乾燥条件(60°C, 20%)露点温度(28°C)に達するまでの所謂水分減少が認められない温度上昇時間(両板目材とも乾燥開始後6~7分間迄)で、寧ろ、乾燥室内の水蒸気が蒸気分圧の関係(木材の表面温度；11.5°C, 木材表面の温潤膜内の蒸気圧；11.2mmHg, 乾燥空気

蒸気分圧；29.9mmHg)で、冷却木材表面上に凝縮し、若干の重量増加さえ生ずる期間である。この期間中に、既に木材表面と中心部に相当の温度傾斜が生じ、特にヒノキ材においては、乾燥時間の経過と共に益々その傾斜の増加する傾向が認められる。この期間の終りにおける木材表面と中心部の温度差は、ヒノキ材で約10°C、ヒバ材で約6°Cに達していることが認められる。

ii) 加熱(温度上昇)の第2期間；乾燥材の表面温度が露点温度(28°C)に達して表面層の水分が減少を開始してから、略纖維飽和点に達する迄の含水率低下の最大

Fig. 6) The elevating process of the temperature in the surface and inner part of board, and moisture distribution in board during drying. species ; Hiba-wood.



の期間で、図の如く、表面層から漸次最初は緩慢に、後急激に水分が減少すること並びに表面層の水分減少速度が内層のそれに比較して著しく大きいこと等が認められる。温度上昇経過については、両板目材の内外層とも徐々に上昇を継続するが、ヒノキとヒバ材で少々異なる経過を辿ることが認められる。即ち、ヒノキ材では、露点温度に達した後も略同じ温度差を保持しながら上昇を続け、中心部の水分が減少を開始する頃（乾燥開始後約20分）稍一定温度を示すが、後表面水分の急減（乾燥開始後約50分）に応じて該点の温度が急上昇し、水分傾斜最大の時点（乾燥開始後約100分）で温度傾斜の最大になることが認められる。

他方ヒバ材の場合には、初期の加熱期間に生じた温度傾斜は、内外層が露点温度に達して水分減少を始める頃（乾燥開始後約10分）少々減少し、暫く一定温度を保持した後、水分の減少に応じて同じ温度傾斜を保持しながら上昇を継続する。この水分減少開始時における内外部の温度傾斜の減少は、ヒバ材の内部水分の拡散移動が容易であること及び蒸発水分量が多いこと等によつて説明出来る様に思われる。内外層の水分傾斜が最大の時点（乾燥開始後約110分）で再び温度傾斜が増加し、平均含

水率が繊維飽和点に低下する頃迄、略同じ温度差を保持しながら緩慢な上昇を継続することが認められる。

表面蒸発が乾燥の主要素をなす単板又は薄板の如き材料では、内部温度が露点温度に達して水分減少を開始してから略繊維飽和点に達する迄の間は、一定温度（露点温度）を保持していることが認められているが、内部水分の拡散移動が乾燥の主要素をなす板材の如き厚い材料では、蒸発水分量が少く、而も水分の拡散移動が困難である為、かかる温度上昇経過を示すものと思われる。

iii) 乾燥後期の加熱（温度上昇）期間；木材内部の各層の含水率が繊維飽和点以下に低下してから平衡含水率に達する迄の期間で、Fig. の如く(i)及び(ii)の加熱（温度上昇）期間と異なる特異な温度上昇の傾向を認めることが出来ないが、内外部の温度差が徐々に減少しながら乾球温度に接近すること、乾燥時間の経過に伴つて温度の上昇速度が少々急激になること、及び内外部の温度が乾球温度に達して平衡状態に至ること等が認められる。

以上の如き温度上昇経過から、乾燥初期の加熱期間における木材内外部の温度傾斜を除外すると、表面割れの危険は、最大の温度傾斜が生じた以後の少々温度傾斜の少なくなつた頃であることが推測出来る。

尙乾燥中の水分、水蒸気の拡散移動と熱伝導に関して O. Krischer は、複雑な微分方程式を提示しているが、解を得ることが困難であつたので、本報では特に論じないことにした。

Fig.7 及び Fig.8は、両板目材の蒸発速度 ( $w$ .gr/cm<sup>2</sup> hr) と温度上昇経過の関係を示したものである。これ等の図より、既述の如く恒率期間に応ずる温度上昇経過が認められないこと、表面層と中心部の温度差は乾燥初期の蒸発速度の急減する頃が最大で、それ以後漸減し、平衡状態においてこの温度差が消失して乾球温度に到達すること並びに乾燥速度の小さい従つて水分の拡散移動及び表面蒸発量の少ないヒノキ材において、温度差の大きいことが認められる。

Fig. 7) Relationship between the evaporating velocity and the elevating process of temperature in the surface and inner part of board.  
species ; Hinoki-wood.

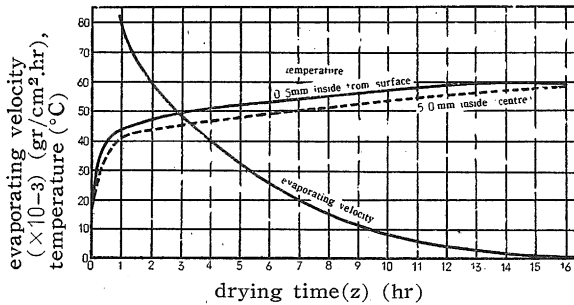
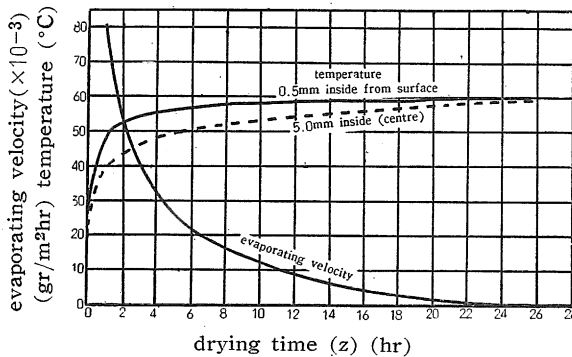


Fig. 8) Relationship between the evaporating velocity and the elevating process of temperature in the surface and inner part of board.  
species ; Hiba-wood.



要 約

以上、ヒノキ、ヒバ、両板目材の定常乾燥実験の結果を簡単に要約すると次の如くである。

i) 両板目材とも恒率乾燥期間がなく、減率第一段(含水率30~40%以上)と第二段(含水率30~40%以下)の2乾燥期間からなる。(Fig. 1, Fig. 2, 及びFig. 3)。

ii) 乾燥速度は、 $du/dz = -k(u - u_{eq})$  で与えられ、ヒバ材の  $k$  ( $=0.223$ ) は、ヒノキ材のそれの ( $k=0.144$ ) 約1.5倍である。

iii) ヒバ材の水分拡散率  $K$  ( $=0.02346 \text{ cm}^2/\text{hr}\%$ ) 及び水分拡散係数  $\lambda$  ( $=0.907 \times 10^{-4} \text{ gr/cm.h}\%$ ) は、ヒノキ材の  $K$  ( $=0.01314$ ) 及び  $\lambda$  ( $=0.414 \times 10^{-4}$ ) の約2倍の値を示す (Table 1 及び Table 2)。iv) 両板目の水分々布曲線は、Sin-curve で現わされる (Table 1)。

v) 板材の場合乾燥初期の加熱(温度上昇) 期間では材の温度が当該乾燥条件の露点温度に達する迄水分の減少が生じない。(Fig. 5, 及びFig. 6)。

vi) 材の温度が露点温度に達して水分の減少が生じた後の加熱(温度上昇) の第2期間においても、温度は緩やかな上昇を継続し、水分傾斜最大の時点において最大の温度傾斜を示す。

vii) 乾燥後期の加熱(温度上昇) 期間では、内外部の温度差を減じつゝ漸次乾球温度に接近し、平衡状態において乾球温度に達する。

viii) 乾燥中の木材内外部の温度傾斜の大小は、蒸発水分量従つて水分拡散の難易に左右される。従つてヒバ材のそれはヒノキ材よりも小さい。

参 考 文 献

- 1) 福山; 島根農大研究報告 6号 P154~158. 1958
- 2) 小倉; 材試報告 42号(1949) 45号(1950) 51号(1950) 54号(1952)
- 3) R. Kerlwerth; Holz als Roh-und Werkstoff 10~3. (1952)
- 4) O. Krischer; Zeitschrift. VDI-Beiheft No.1 (1940)
- 5) 満久; 木材研究 6号P31~70 (1951), 13号P81~120 (1954)
- 6) 福山, 梶田; 木材学会誌 2巻4号 P118~173 (1956)
- 7) 全上; 木材研究 13号 P214~223 (1954)

## Résumé

Under the constant drying condition (dry bulb temp. 60°C, Wet-bulb temp. 35°C, relative humidity 20%) we made experiments on the drying of board (especially the elevating process of temperatures in both the surface and inner part of it and the moisture distribution in board during drying). Test pieces used here are flatsawn-disk (diameter: 5.0cm, thickness: 1.0cm) of Hinoki- (*Chamaecyparis obtusa* S. et Z.) and Hiba-wood (*Thujopsis dolabata* S. et Z.). They were coated with urea-formaldehyde resin to prevent the drying from the sides of them and then soaked in water until saturated (initial moisture content: Hinoki-wood 201~204~208%, Hiba-wood 210~215~223%).

Results obtained are as follows;

1) The drying process (moisture content  $u$ : drying time  $Z$ ), relationships between  $\log. u$  and  $Z$ , and between evaporating velocity ( $w$ ) and moisture content  $u$  are shown in Fig. 1, Fig. 2 and Fig. 3 respectively. From these figures we can obviously recognize two stage of drying i. e. first and second stage of falling rate of drying.

2) As the result of Fig. 2, the drying velocity ( $du/dz$ ) of board in falling rate of drying was given by the following formula;

$$du/dz = -k(u - u_{eq})$$

Coefficients  $k$  of Hinoki-and Hiba-wood are 0.144 and 0.223 respectively.

3) Moisture diffusivity  $K$  (in the diffusion equation  $\frac{\partial u}{\partial z} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ ) of Hinoki-and Hiba-wood are 0.01314 and 0.02346, and diffusion coefficients

$$\left(\lambda = \frac{r_0}{100} \frac{\frac{\partial}{\partial z}(\int u dx)}{\frac{du}{dx}}\right) \text{ are } 0.414 \times 10^{-4} \text{ and}$$

$0.907 \times 10^{-4}$  respectively (Table 1 and Table 2)

4) The moisture distribution in board during drying seems to be indicated by

$$\text{sine-curve } \left[ u = u_{eq} + \frac{4}{\pi} (u_0 - u_{eq}) \cdot e^{-(\pi/a)^2 k \cdot z} \cdot \sin \frac{\pi x}{a} \right].$$

5) The elevating process of the temperatures in the surface and inner part of board and moisture distribution in board during drying are shown in Fig. 5 and Fig. 6. We can recognize three periods concerning elevating process of temperature (i. e. heating period at first stage of drying, second stage of heating period and heating period at late stage of drying)

6) Relationship between evaporating velocity and temperature-elevating are shown in Fig. 7 and Fig. 8.