

木材表層の乾湿に伴う反りについて

岡 康 寛*・山 田 正*

Yasuhiro OKA* and Tadashi YAMADA* : On the Warp with Drying and Wetting of Wood Surface

はじめに

木材の吸湿乾燥にともなう変形—反りは、変形の発生時期、種類、大きさのいかんをとわず、木材利用上色々な形で障害となつているので、これに関連する研究も多い。例えば JOHNSTON^{5,6)}, JOHNSTON と BAUD⁷⁾, STEVENS⁸⁾ は、繊維に平行または垂直の 2 ply 積層材を、一定の乾燥条件の下に放置したときに生ずる反りの経時的变化を測定し、井阪と梅原⁹⁾, 井阪¹⁰⁾ は板目および柃目方向の収縮率を考慮して板目板の反りを理論的に求め、経済的な木取法を見つけた。一方この種の変形の原因となる水分応力について、McMILLEN^{11,12)}, 小倉¹³⁾ はスライス法を用いて乾燥中に発生する収縮歪および乾燥応力を求めようとし、YOUNGS と NORRIS^{14,15)} はこの方法を理論的にまとめて応力値をうるための計算式を求め、高橋と大野¹⁶⁾ は乾燥応力を光弾性応力計を用いて直接求めた。この他、乾燥応力は UGOLJEW¹⁷⁾, SCHNIEWIND^{18,19)}, KÜBLER²⁰⁾, KASS²¹⁾ らによつて研究が進められ、膨潤応力は、NARAYANAMURTI ら^{22,23,24)}, TARKOW と TURNER²⁵⁾, PERKITNY ら^{26,27,28)}, KEYLWERTH^{29,30)}, LAWNICZAK と RACZKOWSKI³¹⁾ らによつて試片の膨潤を阻止して測定され、理論的には BARKAS^{32),33)}, ROSEN³⁴⁾ らによつて研究が進められた。

しかしながら、木材表層の乾湿にともなう反りの力の直接測定に関する報告をみない。筆者等は前報¹⁾ でヒノキ柃目および木口試片の表面に水を塗布したときに生ずる変形—反りおよびそのときに発生する内部応力を経時的に測定し二三の考察を加えた。

本報ではヒノキ板目試片での結果を報告し同時にこの現象を表面歪および理論的に求めた水分量の経時変化との関連から考察する。

実 験

1 : 試料

試片として、反りおよび内部応力の測定にはヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) 心材を、表面歪の測定にはタイワンヒノキ (*Chamaecyparis formosensis* MATSUM.) 心材を使用した。試片の寸法形状は Fig. 1 に示されている。歪ゲージは東京測器研究所の Type L-60 (gage length 60 mm, gage resist. $120 \pm 0.3 \Omega$) を使用した。

* 木材物理部門 (Division of Wood Physics)

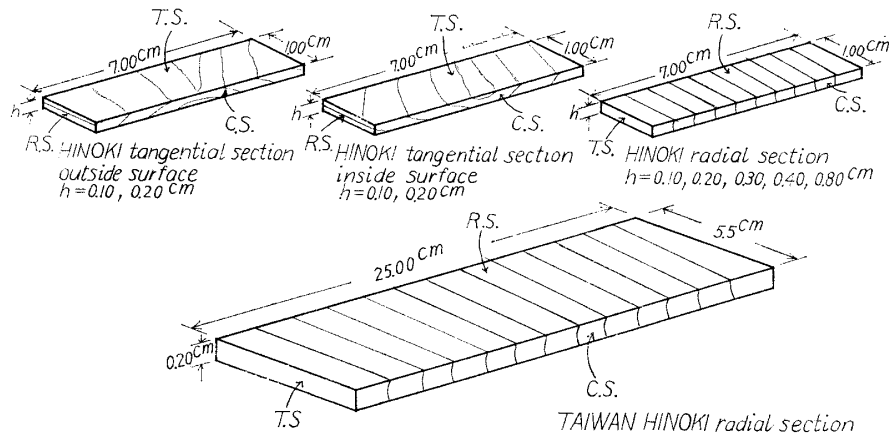


Fig. 1. Specimen.

C. S. : Cross section, R. S. : Radial section, T. S. : Tangential section

2 : 実験 I

内部応力の測定には前報¹⁾で用いたクサリ天秤式片持梁曲げ応力緩和装置を用い、蒸留水を試片表面に毛筆で約 3 mg/cm^2 塗布し温度 20°C 湿度45%の雰囲気中に放置したときの試片の自由端を常に水平の位置に保つに要する荷重 p を測定し、次式で求められた値を内部応力の目安とした。

$$\sigma = \frac{4l}{bh^2} \times p \quad (1)$$

ここに l , b , h はそれぞれ試片の長さ、巾、厚さである。

3 : 実験 II

反りの測定は前報¹⁾と同様試片を片持梁とし、試片表面に蒸留水約 3 mg/cm^2 を塗布し、温度 20°C 湿度45%の雰囲気中に放置したときに生ずる撓み δ を測定し、(2) 式より係数 ϵ を求めた。

$$\epsilon = \frac{h\delta}{l^2} \quad (2)$$

4 : 実験 III

表面歪の測定は 20°C 45%の温湿度で調湿された試片の両面中央部に歪ゲージを貼り、この試片の一端を保持具にて試片が垂直になるよう保持する。

その後試片表面に蒸留水約 5 mg/cm^2 を塗布し温度 20°C 湿度45%の雰囲気中に放置したときに生ずる表裏面の歪および撓み δ を抵抗線歪計および読取顕微鏡で測定した。

実験結果および考察

Fig. 2, 3 は σ および ϵ の経時変化を板目試片について求めた結果である。これから次のことが解かる。

- 1) 板目試片では柾目試片と良く似た傾向を示し数値もほぼ一致する。

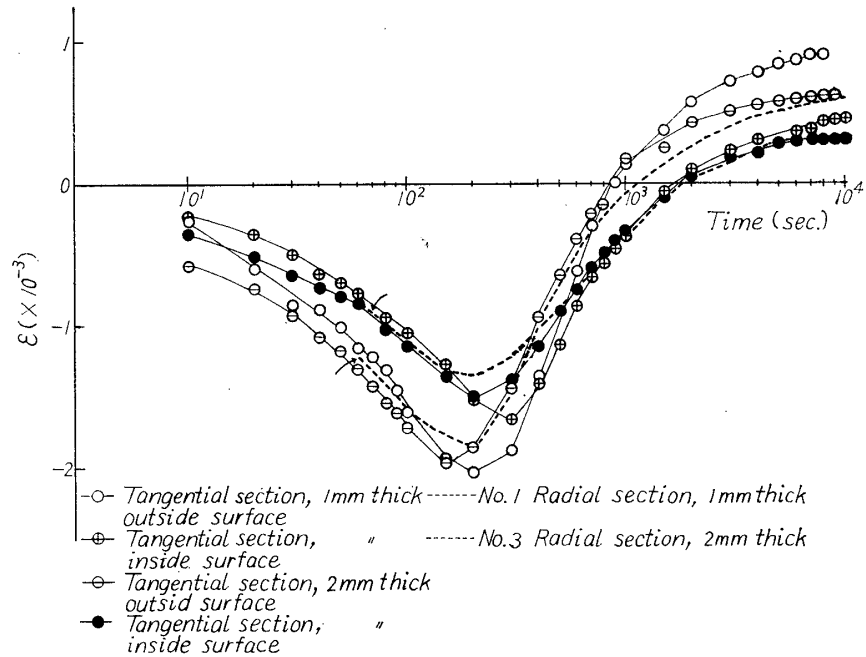


Fig. 2. ϵ vs. time.

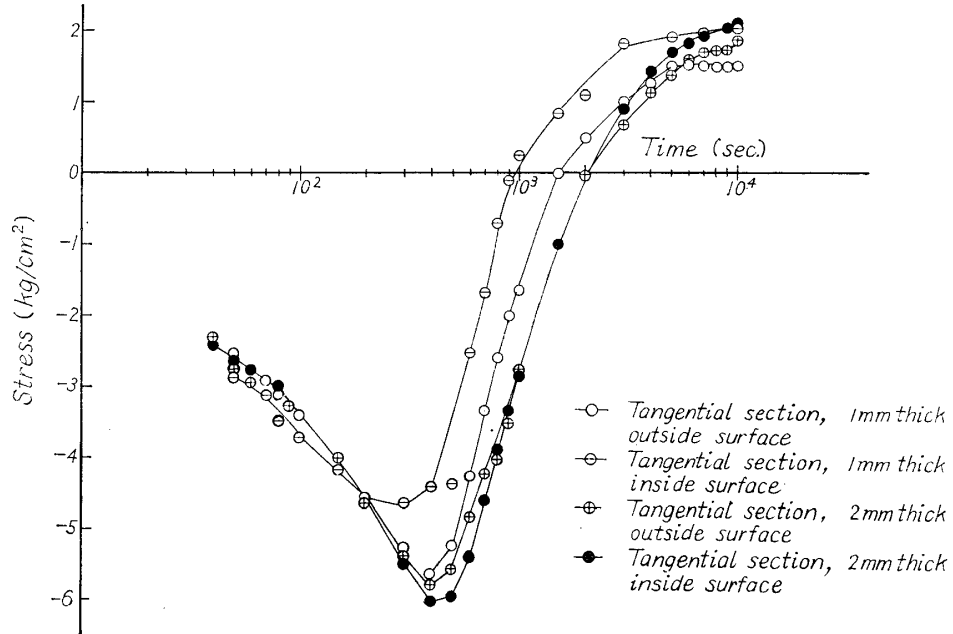


Fig. 3. Stress vs. time.

2) 正の反り—塗布面が凹になる反りは試片の厚さで変り，薄い試片程大きな反りを生ずる。また負の反り—塗布面が凸になる反りが大きいときは正の反りも大きな値をとる。

3) 塗布面が木表の時の反りと木裏の時の反りの比較では余り差が現われなかつたが，むしろ木表の時の反りに大きな値が出る。

以上のように柁目試片および板目試片では長時間域で正の反りが生ずるが，これは負の反り

が最大になるまでに表層に一種の compression shrinkage を生じ、この収縮に原因する応力が正の応力となつて現われ、正の反りを生ぜしめると考えられる¹⁾。

Fig. 4は歪ゲージによる影響が少なくなるように試片寸法および歪ゲージを選んで、表面歪と ϵ を同時に測定した結果である。塗布面の歪と ϵ の値とは負の反りがほぼ最大に達するまでは、おおよそ同じような傾向を示すが、その後両者の間には時間的なずれが現われる。これは歪ゲージが貼られた部分の水分移動が、その余の部分とは違つて時間的な遅れを生ずるためと考えられる。しかし時間が充分に経過すればこの影響も少なくなり塗布面の歪と正の反りはよく一致することを示す。塗布面の歪とその裏面の歪の最終段階での値を見較べれば、さきに述べた“一種の compression shrinkage”は明らかに生じていると考えて良い。なお歪ゲージの接着にともなう拘束を考えに入れば歪の絶対値はこれをうわまわることが予想出来る。

さて以上述べてきた反りは木材内に水分が滲透したり、滲透した水分が失われて行く過程において現われる現象であるから、木材内の水分状態から解析を進める。いま木材内の時間 t における水分分布を $c(x, t)$ 、木材の一面に水分を与える瞬間を $t=0$ としそれからの経過時間を t 、塗布面を $x=0$ としたときの試片厚さ方向の距離を x で表わすと、 t が負のときは木材は雰囲気と平衡を保っているから雰囲気と平衡する水分量 a_2 が木材内に保たれている。この水分は $t=0$ の瞬間から $x=0$ の面である一定の水分量 a_1 に保たれ、 $x=h$ の面で雰囲気と平衡する水分量 a_2 に保たれながら拡散方程式

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3)$$

に従つて内部拡散が行なわれ、同時に表面蒸発係数 k で表面蒸発が行なわれると考える (Fig. 5. 参照)。ここに D は拡散係数を表わす。しかし一定時間後に塗布表面には水分がなくなり

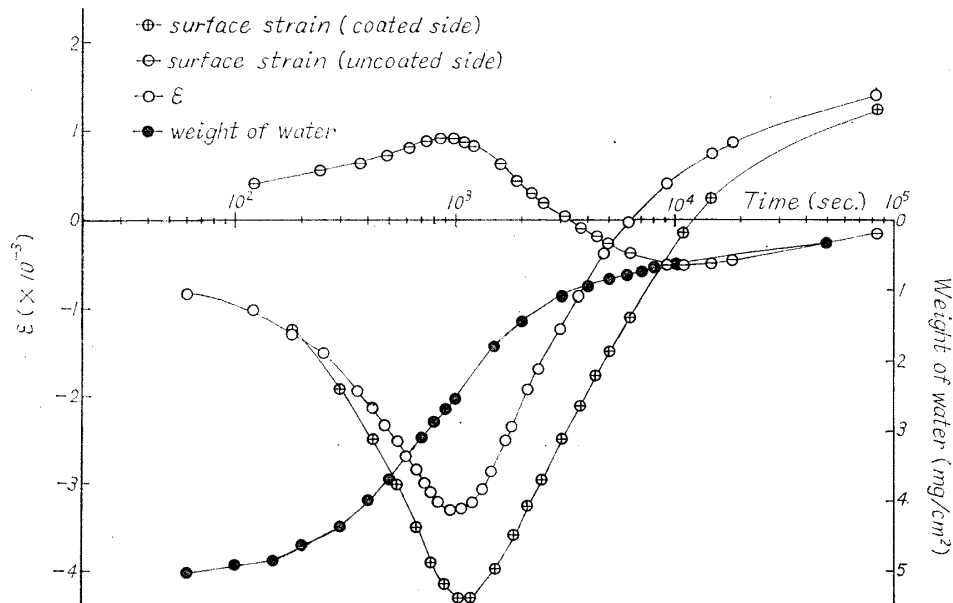
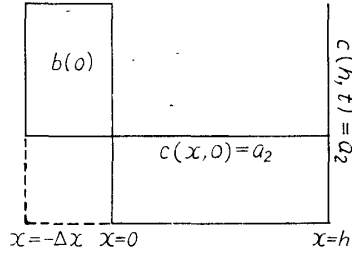
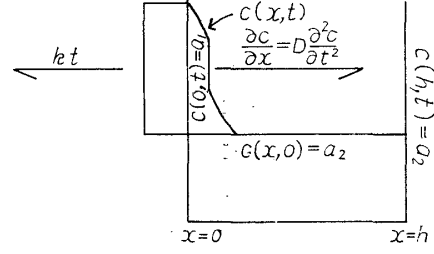


Fig. 4. Surface strain, ϵ , weight of water vs. time.
(*Chamaecy paris formosensis* MATSUM.)

(i) $t=0$

 (ii) $t_1 > t > 0$


$c=a_1$ に保たれなくなる。このときの時間を t_1 で表わすと

 i) $t_1 > t > 0$ では

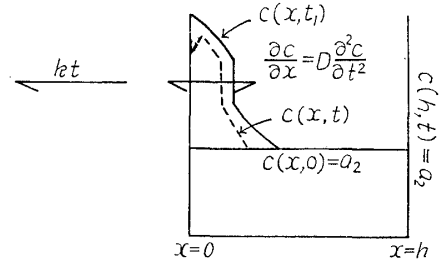
$$h > x > 0 \quad \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

$$\text{初期条件は} \quad c(x, 0) = a_2 \quad (4)$$

$$\text{境界条件は} \quad c(0, t) = a_1 \quad (5)$$

$$c(h, t) = a_2 \quad (6)$$

で表わされ、(3)、(4)、(5)、(6) より水分分布 $c(x, t)$ は、

 (iii) $t \geq t_1$

 Fig. 5. Water distribution at time $t=0$, $t_1 > t > 0$ and $t \geq t_1$.

$$\begin{aligned} c(x, t) = & a_1 + (a_2 - a_1) \frac{x}{h} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_2 \cos n\pi - a_1}{n} \sin \frac{n\pi x}{h} \times e^{-\frac{Dn^2\pi^2 t}{h^2}} \\ & + \frac{4a_2}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin \frac{(2m+1)\pi x}{h} \times e^{-\frac{D(2m+1)^2\pi^2 t}{h^2}} \end{aligned} \quad (7)$$

で表わされる²⁾。従つて時間 t における水分量を M_t で表わすと M_t は、

$$M_t = \int_0^h c(x, t) dx \quad (8)$$

$$= \frac{a_1 + a_2}{2} \times h + \frac{4h(a_2 - a_1)}{\pi^2} \left\{ e^{-\frac{D\pi^2 t}{h^2}} + \frac{1}{9} e^{-\frac{9D\pi^2 t}{h^2}} + \frac{1}{25} e^{-\frac{25D\pi^2 t}{h^2}} + \dots \right\} \quad (9)$$

で表わされる。

 ii) $t \geq t_1$ では、

$$h > x > 0 \quad \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

初期条件は (7) 式で $t=t_1$ とおいたときの水分分布で表わされるから

$$\begin{aligned} c(x, t_1) = & a_1 + (a_2 - a_1) \frac{x}{h} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_2 \cos n\pi - a_1}{n} \sin \frac{n\pi x}{h} \times e^{-\frac{Dn^2\pi^2 t_1}{h^2}} \\ & + \frac{4a_2}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin \frac{(2m+1)\pi x}{h} \times e^{-\frac{D(2m+1)^2\pi^2 t_1}{h^2}} \end{aligned} \quad (10)$$

で表わされる。 $x=h$ の面での境界条件は $t_1 > t > 0$ の場合と同様

$$c(h, t) = a_2 \quad (11)$$

で表わされる。また $x=0$ の面での境界条件は次のようにして求めることが出来る。すなわち $t \geq t_1$ では木材表面の塗布水分は存在しないから水分を塗布された材の重量変化を測定して求めることの出来る水分量 $f(t)$ は、全て木材内部に含まれている水分量と考えて良い。従つて時間 t における水分量は次式で表わされる。

$$\int_0^h c(x, t) dx = f(t) \quad (12)$$

(12) 式を t で偏微分して (3) 式を代入して積分すると

$$\int_0^h \frac{\partial c}{\partial t} dx = f'(t) \quad (13)$$

$$\int_0^h D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} dx = f'(t) \quad (14)$$

$$D \left\{ \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=h} - \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=0} \right\} = f'(t) \quad (15)$$

本実験の場合 $x=h$ の面での水分傾斜はほとんどないと考えると

$$\left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=h} \doteq 0 \quad (16)$$

従つて (15) 式は次式のように書きかえることが出来、この式が求める $x=0$ の面の境界条件である。

$$\left(\frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=0} = -D^{-1} f'(t) \quad (17)$$

(3), (10), (11), (17) 式より水分分布 $c(x, t)$ を求めることが出来³⁾、同時に時間 t における水分量 M_t は

$$M_t = \int_0^h c(x, t) dx$$

で表わされる。ところがさきに述べたように $t=t_1$ 以降の水分量 M_t は式 (12) より $f(t)$ の実測に帰する。すなわち

$$M_t = f(t) \quad (18)$$

で表わされる。

iii) 時間 t_1

時間 t_1 とは $t=t_1$ までに $x=0$ の面から木材内部に拡散した水分量と表面から蒸発した水分量の和が、与えた水分量 $b(0)$ に等しくなる時間であるから次式を満足する。

$$\int_0^h c(x, t_1) dx + kt_1 = b(0) \quad (19)$$

t_1 の解は数学的に (19) 式を解くことより求めることが出来るが、近似的には

$$\overline{M}_t = \int_0^h c(x, t) dx \quad (20)$$

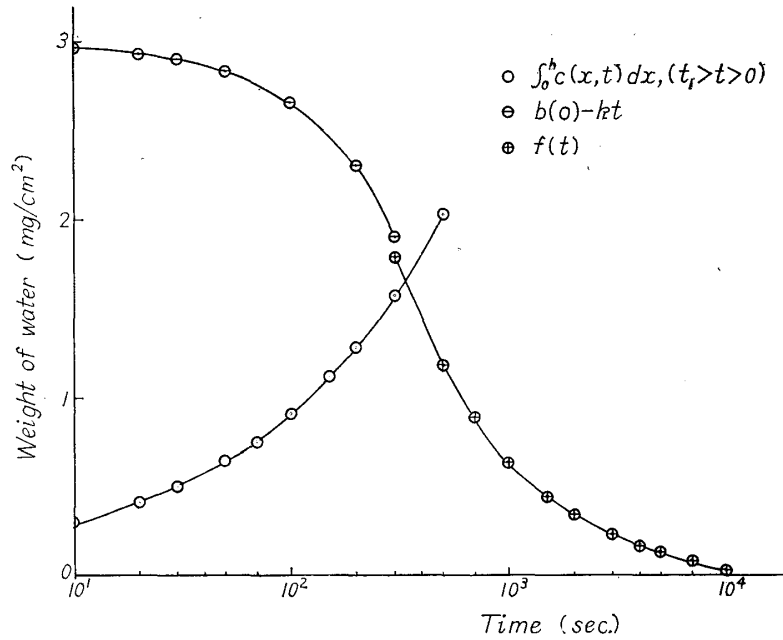


Fig. 6. Weight of water vs. time.

$$\overline{M}_t = b(0) - kt_1 \quad (21)$$

の両曲線の交点から求めることが出来る。

Fig. 6 は $x=0$, $x=h$ における単位体積当りの水分量 a_1 , a_2 , 拡散係数 D , 表面蒸発係数 k , 表面に与えた水分量 $b(0)$ の値をそれぞれ 0.122 g/cm^3 (25% m. c. に相当する), 0.042 g/cm^3 (8.5% m. c. に相当する), $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}$, $3.5 \times 10^{-3} \text{ mg/sec/cm}^2$ (乾球温度, 湿球温度, 風速から計算), 3 mg/cm^2 としたときの木材内の水分量の経時変化を示す。

さて木材が吸湿放湿を行なうと F. S. P. 以下では木材はその水分量に応じて膨脹収縮する。いま板厚方向に垂直な面で厚さ方向に n 等分して出来た厚さ Δh の薄い切片を考えると, $t_1 > t > 0$ ではこの切片に含まれる水分量は,

$$\int_{m\Delta x}^{(m+1)\Delta x} c(x, t) dx$$

で表わされ, この水分量によつて生ずる歪は単位水分当りの収縮率を ϕ で表わすと

$$\phi \int_{m\Delta x}^{(m+1)\Delta x} c(x, t) dx$$

で表わされる。ここで塗布面に生ずる歪を切片の歪の代数和と考えると表面歪は

$$\phi \int_0^h c(x, t) dx$$

で表わされる。しかし各切片は互に拘束しあつているため単純な代数和では表わすことが出来ない。ここに拘束に関する函数 $\Psi(h, M_t)$ を考えると表面歪は

$$\Psi(h, M_t) \phi \int_0^h c(x, t) dx$$

で表わされる。さらにさきに反りに関係する係数として考えた ε は、片持梁において自由端の撓みが δ となるときの表面の歪を表わすから、両者の表面歪を近似的に等しいとおくための係数 α を考えると、 ε は

$$\varepsilon \doteq -\alpha \Psi(h, M_t) \phi \int_0^h c(x, t) dx \quad (22)$$

で表わされる。

なお $t_1 > t > 0$ では表層がうける拘束による compression set が時間とともに増加し（この量は主として $\Psi(h, M_t)$ に関する） $t=t_1$ 以降は表層に生じたこの set が作用し長時間域で正の反りを生ぜしめると考えられる。すなわち $t > t_1$ における ε は

$$\varepsilon \doteq -\alpha \Psi(h, M_t) \phi \int_0^h c(x, t) dx + S \quad (23)$$

で表わされる。ここに S は $t=t_1$ までに生じた compression set の量を表わす。

Fig. 7, 8 はヒノキ柁目試片の表面に約 3 mg/cm^2 の水を与えて温度 20°C 湿度45%の雰囲気に放置したときの ε の経時変化および ϕM_t を示す。両者の間のずれが $\alpha, \Psi(h, M_t), S$ と関係する。拘束に関する函数 $\Psi(h, M_t)$ は h が大きくなればまた M_t が小さくなれば大きくなる函数であり、 S は負の反りが最大となるときの ε の値の約35%を示す。

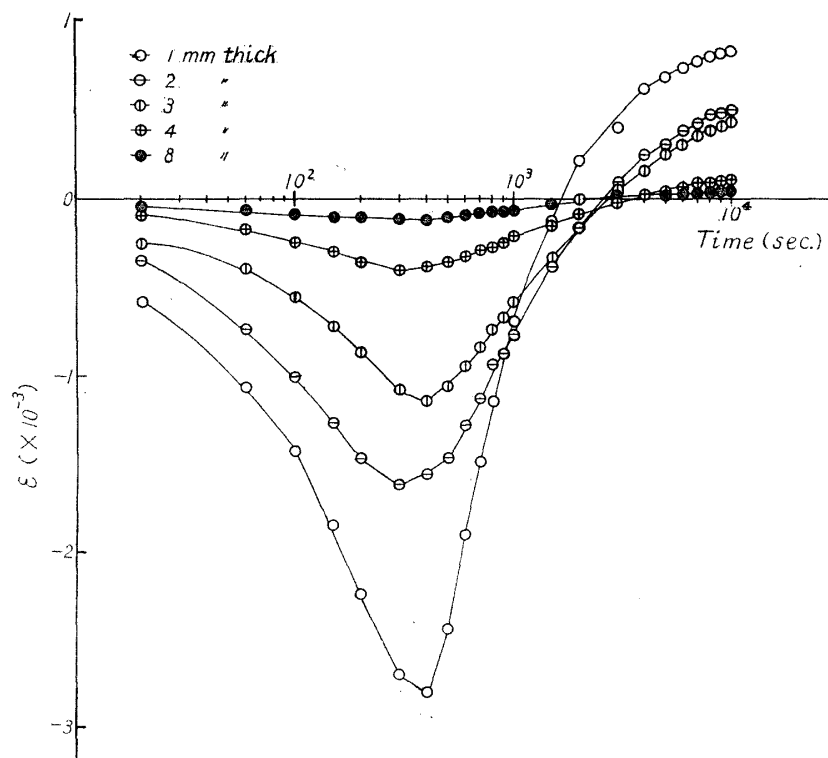


Fig. 7. ε vs. time.

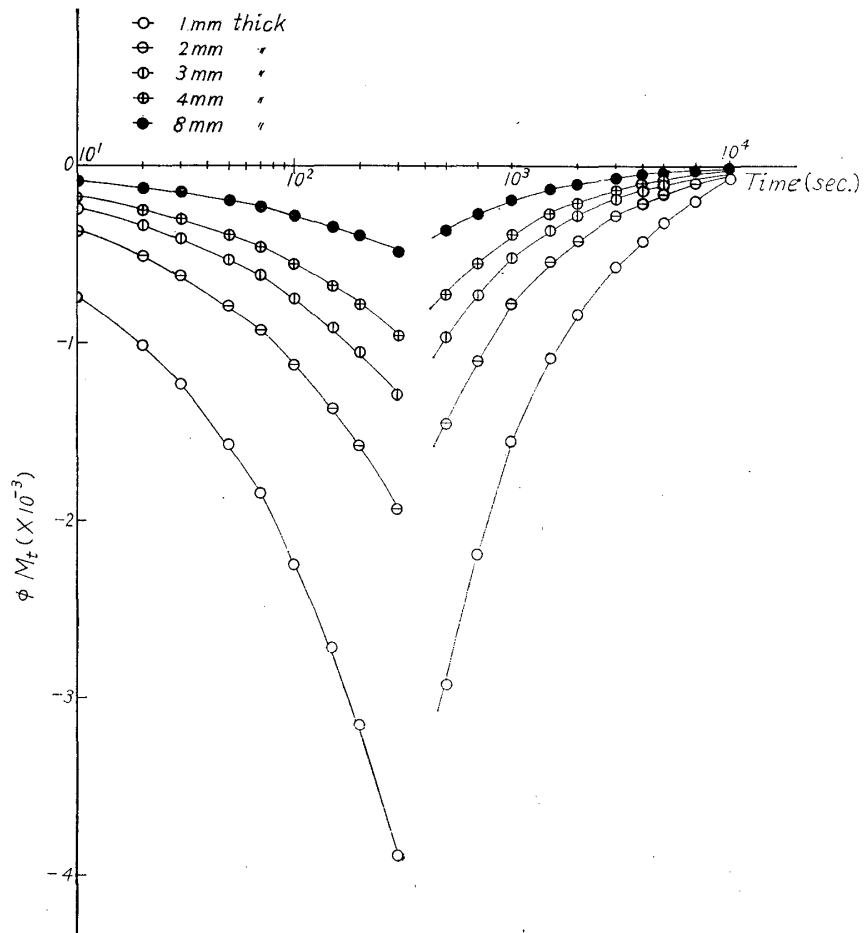


Fig. 8. ϕM_t vs. time.

要 約

調湿された木材の一面に水を塗布し乾燥したときに生ずる反りをヒノキ桎目および板目試片で、そのときの表面歪をタイワンヒノキ桎目試片で測定し、木材内に存在する水分量の時間変化と関連させて考察した。結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 板目試片の反りは桎目試片の反りと同じ傾向を示す。
- (2) 負の反りおよび正の反りの値は試片厚さに依存し薄い試片程大きな値を示す。
- (3) 塗布面の表面歪と ϵ は良く似た傾向を示し一定時間経過後には引張歪は圧縮歪にかわる。従つて長時間域の正の反りは表層の一種の加圧収縮によると考える。
- (4) 木材内の水分量は (9) 式および (18) 式で表わされこれが最大となる時間 t_1 と負の反りが最大となる時間が一致する。また与えられる水分量の大小で負の反りの大きさおよび負の反りが最大となる時間が左右される。
- (5) ϵ は近似的に (22) 式および (23) 式で表わされる。

Summary

When a surface of the air dried specimen shown in Fig. 1 was coated with water and then dried at 20°C 45 % R. H. warp of the specimen and strain on its surface varies with time. In this paper these warp and strain of HINOKI wood were measured by microscope and strain meter, and discussed theoretically.

The results were as follows :

(1) The behaviour of the warp in tangential and radial section showed similar tendency. (Fig. 2)

(2) The value of ε related to the magnitude of warp varied with the thickness of the specimen where $\varepsilon = h\delta/l^2$: δ , h , l are the deflexion, the thickness and the length of the specimen, respectively. (Fig. 2, 7)

(3) The variations of the strain on surface coated showed similar tendency to the variations of ε . (Fig. 4)

Then the authors suggest that the occurrence of the positive warp is attributed to compression shrinkage of the surface layer. Where the warp which occurred in the specimen concaved to the coated side was defined as positive.

(4) The amount of water in the specimen, M_t which is a function of time, t , was given by the following expressions.

(i) $t_1 > t > 0$

$$M_t = \frac{a_1 + a^2}{2} \times h + \frac{4h(a_2 - a_1)}{\pi^2} \left\{ e^{-\frac{D\pi^2 t}{h^2}} + \frac{1}{9} e^{-\frac{9D\pi^2 t}{h^2}} + \frac{1}{25} e^{-\frac{25D\pi^2 t}{h^2}} + \dots \right\}$$

(ii) $t \geq t_1$

$$M_t = f(t)$$

where t_1 = the time when the amount of water on the surface coated come to zero, a_1 and a_2 = the boundary condition concerning the amount of water on the surface coated and the opposite face, $f(t)$ = a function of time and indicates the amount of water which is experimentally measurable, h = the thickness of the specimen, and D = the diffusion coefficient.

(5) The value of ε was given by the following expressions approximately.

(i) $t_1 > t > 0$

$$\varepsilon \doteq -\alpha \Psi(h, M_t) \phi M_t$$

(ii) $t \geq t_1$

$$\varepsilon \doteq -\alpha \Psi(h, M_t) \phi M_t + S$$

where ϕ = the differential shrinkage (%) of wood, S = the amount of compression set,

$\Psi(h, M_t)$ = a function of h and M_t , and indicates the proportion of restraint and α = the coefficient related to ε and strain of the surface coated.

文 献

- 1) 岡 康寛, 則元 京, 山田 正, 木材研究, No. 39, 29 (1966).
- 2) CRANK, J., The mathematics of diffusion, 47, Oxford (1957).
- 3) BUDAK, B. M., A. A. SAMARSKII and A. N. TIKHONOV, A collection of problems on mathematical physics, 371, Pergamon Press (1964).
- 4) 横田徳郎, 後藤君子, 林試報, No. 198, 201 (1967).
- 5) JOHNSTON, D. D., Dept. of Scientific and Industrial Reserch Forest Prod. R. L. Rep.
- 6) JOHNSTON, D. D., Dept. of Scientific and Industrial Reserch Forest Prod. R. L. Rep.
- 7) JOHNSTON, D. D. and M. J. BAUD, Dept. of Scientific and Industrial Reserch Forest Prod. R. L. Rep.
- 8) STEVENS, W. C., Forest Prod. J., **11**, 348 (1961).
- 9) 井阪三郎, 梅原 誠, 林試報, No. 71, 121 (1954).
- 10) 井阪三郎, 林試報, No. 97, 73 (1957).
- 11) McMILLEN, J. M., Forest Prod. J., **5**, 71 (1955).
- 12) McMILLEN, J. M., Forest Prod. J., **5**, 230 (1955).
- 13) 小倉武夫, 林試報, No. 77, 35 (1955).
- 14) YOUNGS, R. L. and C. B. NORRIS, Forest Prod. J. **9**, 367 (1959).
- 15) YOUNGS, R. L. and C. B. NORRIS, U. S. F. P. L. Rep. No. 2133 (1958).
- 16) 高橋 徹, 大野則道, 木材誌, **12**, 67 (1966).
- 17) UGOLJEV, B. N., Holz als Roh-und Werkstoff, **14**, 375 (1956).
- 18) SCHNIEWIND, A. P. and P. C. KERSAVAGE, Forest Prod. J., **11**, 523 (1961).
- 19) SCHNIEWIND, A. P., Forest Prod. J., **13**, 475 (1963).
- 20) KÜBLER, H., Forest Prod. J., **11**, 324 (1961).
- 21) KASS, A. J., Forest Prod. J., **15**, 225 (1965).
- 22) NARAYANAMURTI, D. and R. C. GUPTA, 材料, **10**, 434 (1961).
- 23) NARAYANAMURTI, D., R. C. GUPTA und J. SINGH, Holz als Roh-und Werkstoff, **20**, 89 (1962).
- 24) NARAYANAMURTI, D., and R. C. GUPTA, Holzforschung und Holzverwertung, **14**, 28 (1962).
- 25) TARKOW, H. and H. D. TURNER, Forest Prod. J., **8**, 193 (1958).
- 26) PERKITNY, T., Holz als Roh-und Werkstoff, **16**, 241 (1958).
- 27) PERKITNY, T., M. LAWNICZAK und H. MARCINIAK, Holz als Roh-und Werkstoff, **17**, 54 (1959).
- 28) PERKITNY, T., Holz als Roh-und Werkstoff, **18**, 200 (1960).
- 29) KEYLWERTH, R., Holz als Roh-und Werkstoff, **20**, 292 (1962).
- 30) KEYLWERTH, R., Holz als Roh-und Werkstoff, **22**, 295 (1964).
- 31) LAWNICZAK, M. and J. RACZKOWSKI, C. S. I. R. O. trans. No. 6062, (1962).
- 32) BARKAS, W. W., Dept. of Scientific and Industrial Reserch Forest Prod. R. L. special report No. 6 (1945).
- 33) MEREDITH, R., Mechanical properties of wood and paper, North-Holland Publishing Co. (Amsterdam) (1953).
- 34) ROSEN, B., J. Polymer Sci., **58**, 821 (1962).