

木材の乾燥機構に関する研究

第6報 水分擴散方程式の解

Takeo OGURA: Studies on the mechanisms of drying of wood.
6. On solution of the diffusion equation of moisture in wood.

農林技官 小 倉 武 夫

I ま え が き

この「木材の乾燥機構に関する研究」は樹種、厚さ、外周条件に対して乾燥可能の時間的な限界を求めることにその目標をおいて進めて来たのである。繊維飽和点以下においてはすでに水分伝導度 K の樹種、厚さ、外周条件等との関係を求め乾燥に要する時間を計算によつて求められる見透しをえたのであるが、繊維飽和点以上については従来拡散方程式の適用性は勿論のことその解に至つては Sherwood⁽⁷⁾ 等の報告あるのみで、所要乾燥時間を計算する段階に到達していない。そこで筆者達は生材を数回にわたり一定条件下で乾燥して水分々布の時間的変化を求め拡散方程式適用の可否を検討し、乾燥条件を決めて各段階の解をえたので、乾燥時間算出の緒を見つけることが出来た。こゝに発表して御批判をこう次第である。

尙実験は常に約2週間にわたり晝夜の別なく続行したもので、凡て大沼、梅原両技官の勞を煩わしたものであることを特に附記し、この両君、並に終始御援助を賜つた齊藤木材部長に謹みて謝意を表する。

II 水分擴散方程式と境界条件

(a) 擴散方程式

繊維飽和点以下における水分移動は一般に拡散の問題として取扱われているが、 $\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ の式でも境界条件を表面層の含水率がそのときの乾燥条件に應ずる平衡含水率に達しているとして解けば、この計算式による水分減少経過と実測の結果とはよく一致することをすでに報告した⁽⁵⁾。繊維飽和点以上の水分移動に関しては Hawley⁽¹⁾、Krischer⁽²⁾、Stamm⁽⁹⁾、Kollmann⁽⁴⁾ 等によりいろいろの説が唱えられているが、少くも繊維飽和点以上における水分移動はこれ以下の如き蒸気圧差によるものではないと一般には考えられており、古く Hawley⁽¹⁾は細胞内腔の水分移動を紋孔におけるメニスカスの差にもとづく吸引力によつて液体のかたちで行われるものとし、従つて水分傾斜も滑らかな曲線ではなく、このような移動を行う部分では急峻な曲線をなすものとみなしている。この考え方は現在でも尙支持され、最近 Kröll⁽⁴⁾は織

繊維飽和点以上の水分移動については毛細管力による式を用うべきことを提唱している。たしかにこのような考え方による水分移動はありうるであろうし、水分々布曲線も Hawley のいうごとく一部において急峻となることも多くの実験結果によつて示されている。水分々布曲線が繊維飽和点以上において常にこのようになるのであれば、かゝる水分々布曲線を一つの式で示すことも出来ないし、亦熱伝導の方程式を適用することも出来ないであろう。しかし筆者達がすでに数回にわたつて水分々布の時間的変化を測定した結果によると (Fig. 3, 4, 5 参照), 分布曲線の型式は種々のものがえられ、一部において急峻になるのは乾燥条件がきびしくて表面での蒸発に対して内部における水分移動が追隨し得ないためではないかとも考えられる。現に同一原木から木取りしたブナ板 (厚さ 5 cm) を乾燥条件の異なる二つの場合、即ち温度 50°C, 関係湿度 74% 及び 54% において乾燥させたときの水分々布の時間的変化は (Fig. 3, 4 及び 5 を参照) 明らかに乾燥条件のきびしい場合では分布曲線が一部において急峻になつたが、ゆるい場合には平滑な曲線がえられたのである。この何れが適切であるかは簡単に結論づけられないであろうが、乾燥した結果含水率の多い当初からきびしい条件で乾燥させると表面硬化の徴候がみうけられ、時には表面割れを生ずることもある。従つて少くも含水率の多い材を乾燥させるには一般に行はれているように最初はゆるい条件を用いて水分々布をして平滑ならしめるようにすべきでなかろうか。このやうに水分々布が一部で急峻にならない程度の条件を用いれば平滑な分布曲線を保つたまま乾燥させることが出来るので、このような場合に限つて繊維飽和点以下における拡散と同様な式を用いても差支ないものと思われる。

尙繊維飽和点以上での水分移動は蒸気圧差ではなくて含水率差によるものと考えるべきであるので、含水率差に基く拡散方程式 $\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ を用いても支障ないものと考え、これに対する解を求めた。

(b) 境界条件

この方程式を解くためにはまづ境界条件と初期条件を定めなければならない。

(i) 恒率乾燥時

乾燥速度が減率状態を示すのは表面層の含水率が繊維飽和点以下に低下して、蒸発のため蒸発熱の外に分離熱を要するためであることの見解をすでに報告した⁽⁶⁾。これが正しいとするならば恒率乾燥を示す限りは表面層の含水率は常に繊維飽和点以上であると考えられるが、これの時間的な減少の状態を正確に把握することは容易でない。数回にわたる水分分布の時間的変化を推定した実験結果から表面層含水率の減少状態を求めてみると Fig. 1 の如く全般的には直線的に低下しているものと思われる。

これは、恒率乾燥においては表面蒸発が主体であり、単位時間における蒸発量が等しいからであつて、少くとも表面層の温度がそのときの乾燥条件の湿球温度に達した後は、かゝる状態

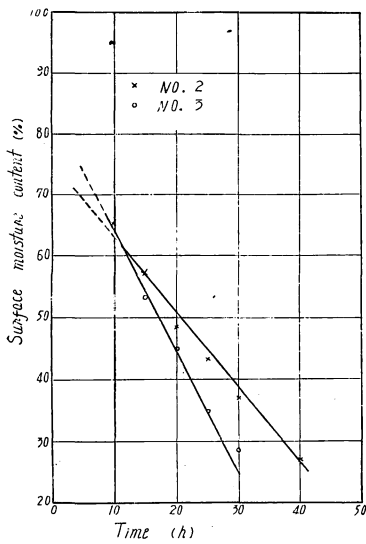


Fig. 1. Decreasing course of surface moisture content at 50°C, 74%.

を呈するものと考えられる。このようであるならば表面での蒸発量は乾燥条件によつて異なるが、樹種、厚さ等の影響はうけないものと思われる。しかし蒸発量でなくて減少した含水率で表わすならば、勿論表面含水率低下の時間的關係はこれらの因子により異なつてくるであろう。従つてこの場合の境界条件を次式の如くした。

$$u_s = At + u_0 \dots\dots\dots (1)$$

但し u_0 : 当初の含水率

A : 条件により異なる常数

尙乾燥初期における水分々布は一樣としたので、初期条件は

$$t=0 \text{ にて } u = u_0 \dots\dots\dots (2)$$

である。

(ii) 第1減率乾燥時

減率乾燥における表面含水率の減少状態はすでに報告した⁽⁶⁾ように、指数曲線的であり、ある時刻における表面含水率 u_s は一般に次式

$$u_s = Be^{-ct} + u_e \dots\dots\dots (3)$$

但し B, C : 条件による異なる常数

u_e : 乾燥条件に対応する平衡含水率

で表わされるので、これを用いた。

尙この場合の初期条件としては、減率になつたときを以てこの段階の初期 ($t=0$) とし、このときの水分々布曲線式を用いることは言うまでもない。

(iii) 第2減率乾燥時

この段階では表面含水率はすでに外周条件に対する平衡含水率になつていていると考えられるので、境界条件は

$$u_s = u_e \dots\dots\dots (4)$$

である。しかし、初期条件に対してはこの段階を第1減率時と區別し、再び $t=0$ に対する分布曲線式を用いると後述するように数値計算上思わしくないので、むしろこの段階は前段階の延長と考え、たゞ境界条件の u_s を時間と共に変化しない値、即ち $u_s = u_e$ の特定値をとるものとした。

Ⅲ 水分拡散方程式の解

(i) 恒率乾燥時

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{境界条件} \quad x=0 \quad u=At+u_0=u_s \\ \quad \quad \quad x=l \quad u=At+u_0=u_s \end{array} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

但し $u_s > 30\%$

$$\text{初期条件} \quad t=0 \quad u=u_0 \dots\dots\dots (7)$$

今 $u = u' + u''$ とおき、 u' 、 u'' は夫々次の条件を満足するものとする。

	$\frac{\partial u'}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 u'}{\partial x^2}$	$\frac{\partial u''}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 u''}{\partial x^2}$
$x=0$	$u' = At + u_0$	$u'' = 0$
$x=l$	$u' = At + u_0$	$u'' = 0$
$t=0$		$u'' = u_0 - u'$

この u' 、 u'' を解くと夫々次の如くなる。

$$u' = \frac{A}{2K_1} \left[\left(x - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} \right] + At + u_0 \dots (8)$$

$$u'' = \sum C_n e^{-K_1 \alpha_n^2 t} \cdot \cos \alpha_n \left(x - \frac{l}{2} \right) \dots (9)$$

$$\text{但し} \quad \alpha_n = \frac{(2n-1)\pi}{l}$$

初期条件を用いて $\sum C_n$ を求めると、

$$\sum C_n = \frac{A}{2K_1} \left(\frac{3}{4\pi} + \frac{1}{\pi^3} \right) l^2 = \frac{A}{2K_1} \frac{3l^2}{4\pi} \dots\dots\dots (10)$$

となるので u の解は

$$u = u_0 + At + \frac{A}{2K_1} \left[\left(x - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} + \frac{3l^2}{4\pi} e^{-K_1 \frac{(2n-1)^2 \pi^2}{l^2} t} \cdot \cos \frac{(2n-1)\pi}{l} \left(x - \frac{l}{2} \right) \right] \dots\dots\dots (11)$$

となり、近似的には

$$u = u_0 + At + \frac{A}{2K_1} \left[\left(x - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} + \frac{3l^2}{4\pi} e^{-K_1 \frac{\pi^2}{l^2} t} \cdot \cos \frac{\pi}{l} \left(x - \frac{l}{2} \right) \right] \dots\dots\dots (12)$$

となる。

亦ある時刻に於ける平均含水率 u_m は

$$u_m = \frac{2}{l} \int_0^{l/2} f(u) \cdot dx = u_0 + At + \frac{A}{K_1} \left(-\frac{l^2}{12} + \frac{3l^2}{4\pi^2} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \right) \dots\dots\dots (13)$$

となる。従つて t に対する u_m を知つて K_1 を求めるには上式が次の如く変形されるので、

$$\left\{ \left[u_m - (u_0 + At) \right] \frac{K_1}{A} + \frac{l^2}{12} \right\} \frac{4\pi^2}{3l^2} = e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \dots\dots\dots (14)$$

両辺は K_1 のみの函数となり、図上で K_1 を求めることができる。

(ii) 第 I 減率乾燥時

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K_2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots\dots\dots (15)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{境界条件} \quad x=0 \quad u = Be^{-ct} + u_e = u_s \\ \quad \quad \quad x=l \quad u = Be^{-ct} + u_e = u_s \end{array} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

初期条件 $t=0 \quad u=f(x)$

$$= \underbrace{At + u_0}_{u_{s0}} + \frac{A}{2K_1} \left[\left(\lambda - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} + \frac{3l^2}{4\pi} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \cos \frac{\pi}{l} \left(\lambda - \frac{l}{2} \right) \right] \dots (17)$$

これを解くと分布曲線は sin 曲線となり、境界面では $u=0$ となり、実際と一致しないので、(16) 式において t を定めると u_s が常に決定されるので、これを常数と見做し、

$$u - u_s = U \dots (18)$$

とおき、 u_s に座標変換をすると、

$$\frac{\partial U}{\partial t} = K_2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \dots (19)$$

となり、境界条件は

$$\left. \begin{array}{l} x=0 \quad u - u_s = U = 0 \\ x=l \quad u - u_s = U = 0 \end{array} \right\} \dots (20)$$

となり、初期条件は

$$t=0 \quad u - u_s = U = (u_{s0} - u_s) + \frac{A}{2K_1} \left[\left(\lambda - \frac{l}{2} \right)^2 - \frac{l^2}{4} + \frac{3l^2}{4\pi} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t_0} \times \cos \frac{\pi}{l} \left(\lambda - \frac{l}{2} \right) \right] \dots (21)$$

(但し $t_0 =$ 恒率乾燥時の最後の時刻)

であるから、この解は

$$U = \frac{2}{l} \sum e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{n\pi}{l} x \int_0^l f(\lambda) \sin \frac{n\pi}{l} \lambda \cdot d\lambda \dots (22)$$

これを計算すると水分分布を示す式として次式がえられる。

$$u = u_s + \frac{2}{l} \sum e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \cdot \sin \frac{n\pi}{l} x \left\{ \left[(u_{s0} - u_s) - \frac{A}{2K_1} \frac{2l^2}{\pi^2} \right] \frac{2l}{\pi} + \frac{A}{2K_1} \frac{3l^2}{4\pi} \cdot \frac{l}{2} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t_0} \right\} \dots (23)$$

亦平均含水率 U_m は

$$U_m = \frac{2}{l} \int_0^l \frac{1}{2} f(x) \cdot dx \dots (24)$$

の式から次の如くなる。

$$u_m = u_s + \frac{4}{\pi} \frac{1}{l} \left\{ \underbrace{\left[(u_{s0} - u_s) - \frac{A}{2K_1} \frac{2l^2}{\pi^2} \right] \frac{2l}{\pi} + \frac{A}{2K_1} \frac{3l^2}{4\pi} \cdot \frac{l}{2} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t_0}}_P \right\} \times \sum e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} \dots (25)$$

これは次の如く書きかえられるので、

$$\frac{U_m \times 2l}{\pi \cdot P} = \frac{8}{\pi^2} \left[e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} + \frac{1}{9} e^{-9K_2 \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 t} + \dots \right] \dots (26)$$

すでに第1報で述べた如く右辺の凡ゆる $\frac{Kt}{(l/2)^2}$ に対する値を予め曲線で表わしておけば、

(26) 式の左辺の値に應ずる $\frac{K_2 t}{(l/2)^2}$ をこの曲線から求められるので、 K_2 を計算することが出来る。

尙この段階における初期の水分分布が (21) のような恒率乾燥からの継続でなくて、単独に最初から或る分布曲線を示している場合の解を附加しておく。分布曲線には種々の型式があるが、(21) 式と極めて良く一致するのは Sonnleithner⁽⁸⁾ の示した Parabola と思われるので、これを用いて解いた。

$$\text{即ち } t=0: \quad u=f(x)=u_m+c\left(x-\frac{l}{2}\right)^2 \dots\dots\dots (27)$$

とすると、(23) 式の代りに

$$u=u_s+\frac{2}{l}\sum e^{-K_2\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin\frac{n\pi}{l} x \cdot \left[u_m+c\left(\frac{l^2}{4}-\frac{2l^2}{n^2\pi^2}\right)\right] \times \\ \frac{2l}{\pi}\left(1+\frac{1}{3}+\frac{1}{5}+\dots\right) \dots\dots\dots (28)$$

が得られる。

(iii) 第2減率乾燥時

$$\frac{\partial u}{\partial t}=K_3 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots\dots\dots (29)$$

この時期では既に表面層の含水率が乾燥条件に対する平衡含水率 u_e に達しているので、前項と同様に $u-u_e=U$ $\dots\dots\dots (30)$

とおけば、境界条件は

$$\left. \begin{array}{l} x=0 \quad U=0 \\ x=l \quad U=0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (31)$$

$$\text{初期条件は } t=0, \quad U=f(x)=U_c \cdot \sin\frac{\pi}{l} x \dots\dots\dots (32)$$

但し $U_c=u_c-u_e$ で、第1減率乾燥の末期における自由中心含水率である。

この解は

$$U=\frac{2}{l}\sum e^{-K_3\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin\frac{n\pi}{l} x \cdot \int_0^l f(\lambda) \cdot \sin\frac{n\pi}{l} \lambda \cdot d\lambda \dots\dots\dots (33)$$

で、近似的には次のようになる。

$$u=u_e+(u_c-u_e) \sin\frac{\pi}{l} x \cdot \sum e^{-K_3\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t} \dots\dots\dots (34)$$

亦平均含水率は

$$u_m=u_e+\frac{2}{\pi}(u_c-u_e) \cdot \sum e^{-K_3\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 t} \dots\dots\dots (35)$$

となり、前項と同様に u_m を知れば K_3 を計算することが出来る。

しかし、実際の数値計算に当つては、この段階において $t=0$ よりはじめると、 $\frac{Kt}{(l/2)^2}$ の値が極めて小さくなり、実際と一致しない。むしろこの段階では第1減率乾燥の延長と考え、境界条件を $u_s=u_e$ とし、第1減率乾燥の特殊な場合として計算するのが妥当であると考えら

れる。それ故計算に当つては、特に本項の解を用いなかつた。

Ⅳ 計算式の検討

(a) 実 験

寸法 25.0×10.0×5.0(cm) のブナ材を温度 50°C、関係湿度 74% の恒湿恒温器の中におき、これに温度分布測定のために熱電対を、水分々布測定のため厚さ方向の 5ヶ所（表面と中心との間で）に針状電極を挿入した。亦別に含水率減少の経過を測定するために同一条件の材を入れ、これをスプリングバランスにて吊し、一定時間毎に重量測定のできるようにした。

含水率減少の経過及び水分々布の時間的变化は夫々 Fig. 2, 3 及び 4 に示すようである。この程度の水分々布曲線であれば水分拡散に関する上式が適用されるものとして、測定結果を上述の計算式に適用して、その適否を検討してみる。尙参考のため

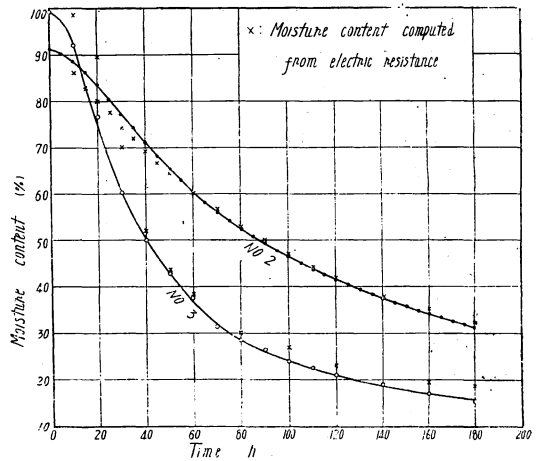


Fig. 2. Decreasing course of averaged moisture content, weighted by spring balance of test piece.

に關係湿度 54% で乾燥させた場合の水分々布曲線の変化を Fig. 5 に示したが、この場合は前述したように水分拡散の基本式は適用されないと思われるので、数値計算を行わなかつた。

(b) 水分伝導率 K の計算

(i) 恒率乾燥時の K

(14) 式を用いて計算されるが、問題になるのは A の値である。この値は乾燥条件、樹種、厚さ等が定まれば特有の数値を与えるものであり、今後の実験、考察によつて定めなければならない。こゝでは水分々布曲線による表面層における含水率の減少経過から No. 2, No. 3 に対し夫々 $A = -1.2, -2.0$ とおいた。更に t にこの期間中の適当な値をとれば、(14) 式の両辺は K のみの函数となるので、 K の値を Table 1 の如く求めることが出来る。

Table 1. Values of K. (cm²/h)

Time	No. 2	Time	No. 3
20 h	0.055	10 h	0.16
30	0.050	20	0.20
40	0.043	30	0.17
Mean	0.0493	Mean	0.177

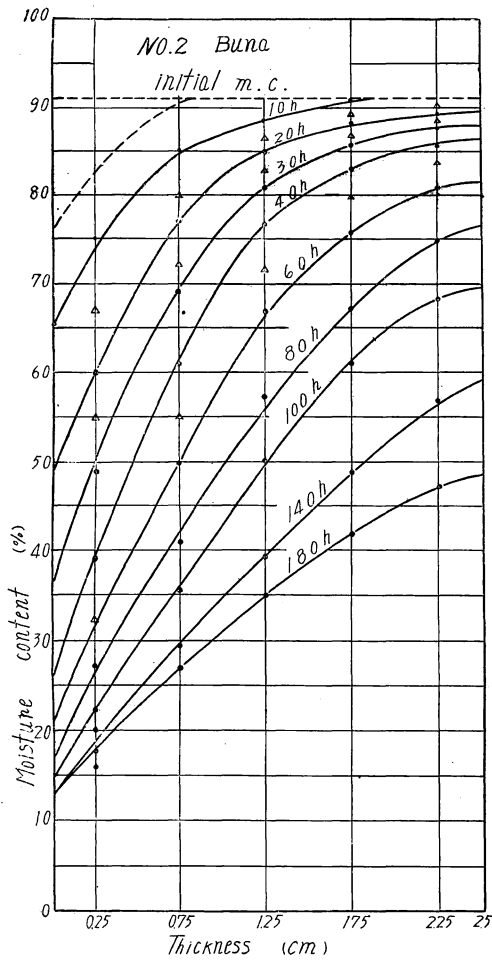


Fig. 3. Moisture distribution in each time, which was computed by electric resistance, in the course of drying at 50°C, 74%. (Heartwood of beech)

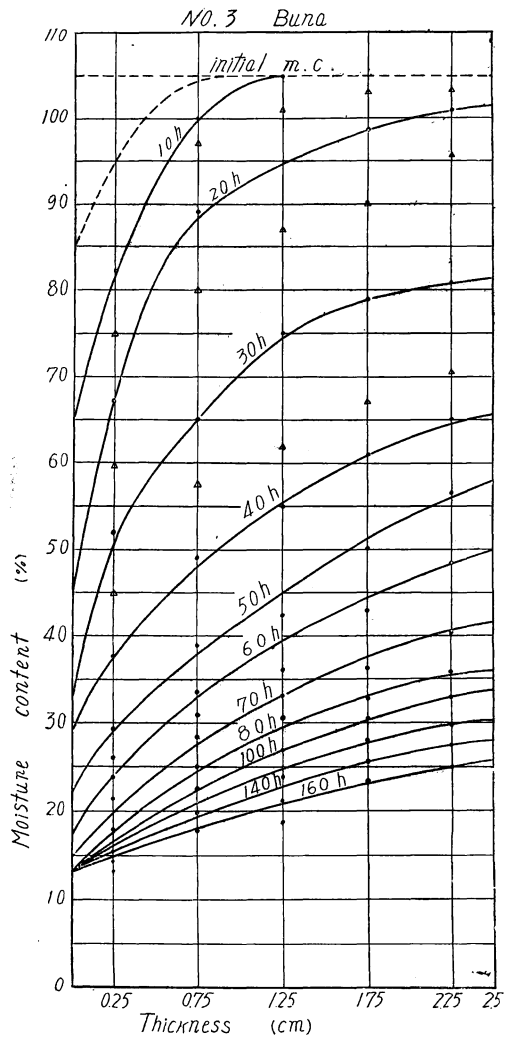


Fig. 4. Moisture distribution in each time, which was computed by electric resistance, in the course of drying at 50°C, 74%. (Sapwood of beech).

(ii) 減率乾燥時の K

第1減率乾燥時の計算にあつても、境界条件たる(16)式の係数 B, C を決めなければならない。これらの係数も乾燥条件、樹種、厚さ等によつて定められるべき値であるが、この場合の計算に用いた恒率末期の表面含水率は何れも約 40% であつたのが、分布曲線の変化から No. 2 は約 100 時間、No. 3 は約 50 時間で表面含水率は夫々平衡に達したものとし、 u_s と時間との間には Fig 6 の如き指數的關係があるものとした。測定して求めた平均含水率 u_m とその時刻に対する u_s を知れば、(26)式を用いて K_2, K_3 を Table 2 の如く計算するこ

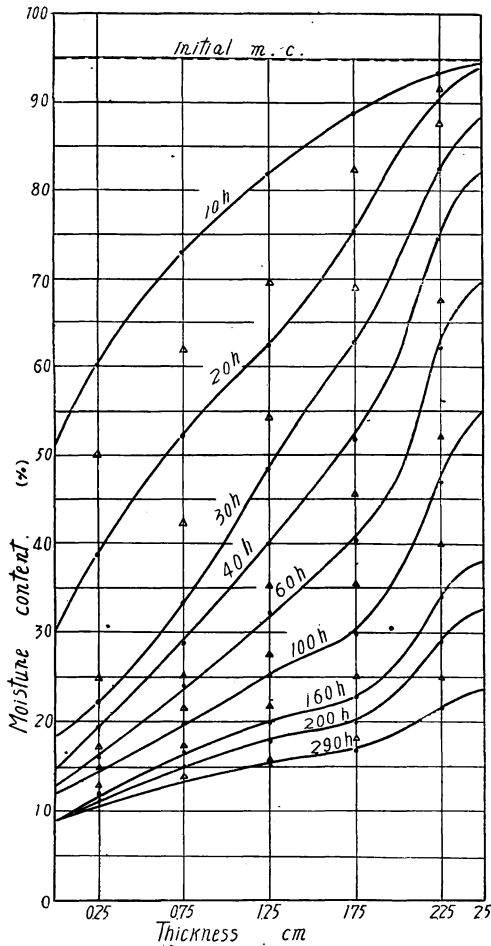


Fig. 5. Moisture distribution in each time, which was computed by electric resistance, in the course of drying at 50°C, 54% (Beech).

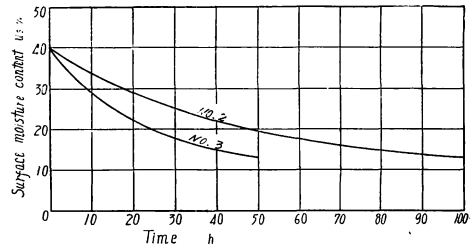


Fig. 6. Decreasing course of surface moisture content during the 1st decreasing rate of drying.

とができる。以上の如く恒率より減率第1, 第2と乾燥速度が遅くなるにつれて水分伝導係数 K は小さくなり, 第2減率の値は恒率の $1/2.7 \sim 1/3.5$ になっている。

(c) 計算値と実測値の比較

上述した計算式の適否を検討するため, 前項で求めた係数 K_1, K_2, K_3 を用いて各時刻における平均含水率を計算し, この値と実測値とを比較してみた。その結果は Table 3 の如くで, 両者は略一致している。従つて K の値を知り, 境界条件が決まれば水分減少の経過を計算することが出来る。

尙水分分布を示す方程式 (12), (23) に夫々 K の値を代入すれば各時刻における分布

曲線が得られる。Fig. 7, 8 がこれである。電気抵抗から推定した分布曲線 (Fig. 3, 4) と比較すると, 各部位の数値は必ずしも一致しているとは言えないが (これには種々の理由が考えられるが), 分布曲線の型式は略一致しているということが出来る。

以上従来繊維飽和点以下でのみ適用されていた拡散方程式を全乾燥期間に拡大して解を求め, 水分伝導度 K の値にもより広範囲の意義をもたせて, これによる計算値の妥当性をのべてきた。しかしこれを解くためには恒率, 第1減率における境界条件の問題が残されており, 今後の研究にまちたい。

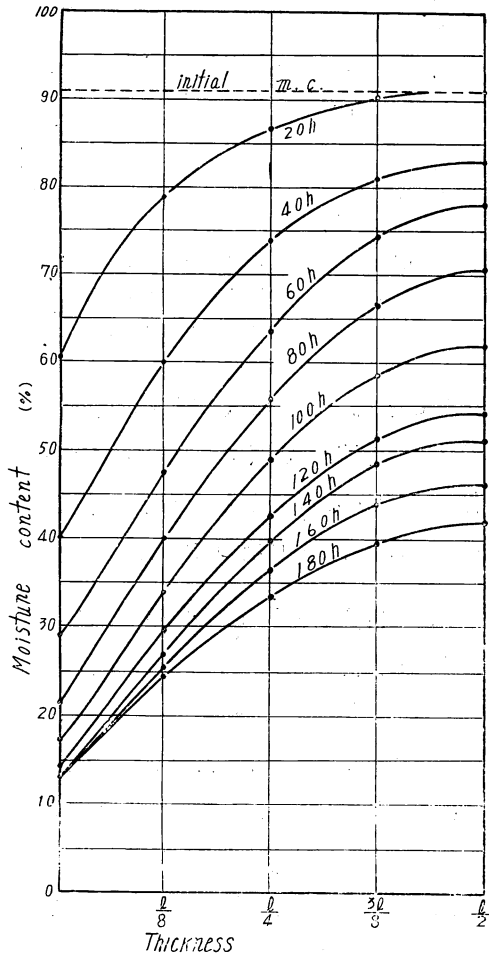


Fig. 7. Moisture distribution in each time, which was calculated from equations, corresponding to No. 2, Beech.

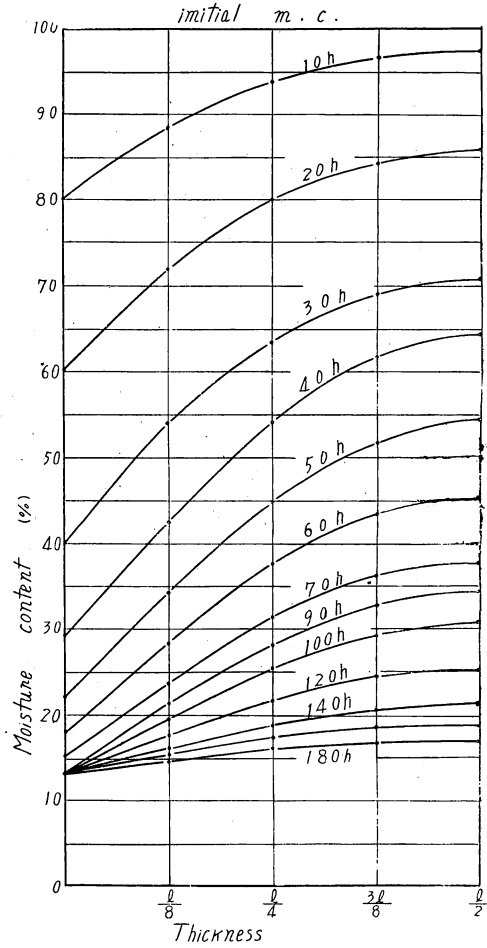


Fig. 8. Moisture distribution in each time, which was calculated from equations, corresponding to No. 3, Beech.

Table 2. Calculation of K_2, K_3 .

Period of decreasing rate	Time from initial t_0 (h)	Time for calculation t (h)	u_m %	u_s %	U_m $=u_m - u_s$	$\frac{U_m \times 2l}{P \cdot \pi}$	$\frac{Kt}{(l/2)^2}$	$\frac{t}{(l/2)^2}$	$K \left[\frac{\text{cm}^2}{h} \right]$
No. 2									
1 st	60	20	60.0	28.5	31.5	0.687	0.078	3.20	0.0243
	80	40	52.0	21.3	30.7	0.579	0.140	6.40	0.0219
	100	60	46.0	17.0	29.0	0.506	0.192	9.61	0.0200
	120	80	41.3	14.2	27.1	0.450	0.238	12.81	0.0186
$K_2 = 0.0212$									
2 nd	140	100	37.5	13.0	24.5	0.398	0.288	16.01	0.0179
	160	120	34.2	"	21.2	0.345	0.346	19.22	0.0180
	180	140	31.1	"	18.2	0.296	0.408	22.40	0.0182
$K_3 = 0.0180$									
No. 3									
1 st	40	10	50.0	29.0	21.0	0.581	0.139	1.60	0.0870
	50	20	43.0	22.0	21.0	0.491	0.203	3.21	0.0633
	60	30	38.0	17.5	20.5	0.431	0.210	4.81	0.0530
	70	40	31.5	14.8	16.7	0.332	0.362	6.40	0.0565
$K_2 = 0.0649$									
2 nd	80	50	28.5	13.0	15.5	0.297	0.407	8.00	0.0508
	80	60	26.4	"	13.4	0.257	0.466	9.60	0.0486
	100	70	24.0	"	11.0	0.211	0.545	1.12	0.0487
	120	90	21.0	"	8.0	0.1535	0.676	1.44	0.0470
	140	110	18.8	"	5.8	0.1113	0.804	1.76	0.0457
	160	130	17.0	"	4.0	0.0759	0.945	2.08	0.0454
	180	150	15.2	"	2.2	0.0422	1.205	2.40	0.0502
$K_3 = 0.0480$									

Table 3. Comparison the values of calculation with that of measurement

K	No. 2				No. 3			
	t_0 (h)	Calculation %	Measurement %	Difference %	t_0 (h)	Calculation %	Measurement %	Difference %
K_1	0	91.0	91.0	0	0	100	100	0
	10	89.0	88.5	+0.5	10	92	92	0
	20	83.7	83.0	+0.7	20	77.5	76	+1.5
	30	76.7	77.0	-0.3	30	60.6	60	+0.6
	40	69.8	71.0	-1.2				
($K_1=0.0493$)				($K_1=0.177$)				
K_2	60	60.1	60.0	+0.1	40	51.6	50.0	+1.6
	80	52.4	52.0	+0.4	50	42.6	43.0	-0.4
	100	45.7	46.0	-0.3	60	35.3	38.0	-2.7
	120	39.8	41.3	-1.5	70	29.4	31.5	-2.1
($K_2=0.0211$)				($K_2=0.0649$)				
K_3	140	37.4	37.5	-0.1	80	29.3	28.5	+0.8
	160	34.2	34.2	0	100	24.2	24.0	+0.2
	180	31.4	31.2	+0.2	120	20.7	21.0	-0.3
					140	18.2	18.8	-0.6
					160	16.6	17.0	-0.4
				180	15.5	15.2	+0.3	
($K_3=0.0180$)				($K_3=0.0480$)				

引用文献

- Hawley, L. F.: Wood-Liquid Relations. U. S. Dept. Agr. Tech. Bull. 248. 1931.
- Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. I Band. 1951.
- Krischer O., Voigt H. und Schauss H.: Die Feuchtigkeitsbewegung bei der Verdunstungstrocknung von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff. Heft. 10. 1940.
- Kröll K.: Die Bewegung der Feuchtigkeit in Nadelholz während der Trocknung bei Temperaturen um 100°. Holz als Roh- und Werkstoff. Heft 5, 6. 1950.
- 小倉武夫: 木材の乾燥機構に関する研究 第1報 林業試験場研究報告 第42号 1949.
- 小倉武夫: 同上 第3報 林業試験場研究報告 第51号 1951.
- Sherwood T. K. and Gilliland E. K.: The drying of solid VI. Ind & Eng. Chem. Vol. 25 No. 10, 1933.
- Soanleithner, E.: Forsch, -Ber, Holz, H. 1. VDI- Verlag 1933.
- Stamm A. J.: Passage of liquids, vapors and dissolved materials through softwoods. U. S. Dept. Agr. Tech. Bull. No. 929. 1946.

Résumé

These studies on the mechanisms of wood drying have been conducted for the purpose of obtaining the limit of time to dry wood for various species, thicknesses and surrounding conditions. As the relations of moisture conductivity K with the conditions described above have been obtained below fibre-saturation point, it could be expected that we could calculate the time for drying of wood from them. But above the fibre-saturation point it is not possible to calculate these times, as the application of the diffusion equation at this stage has not yet been investigated. Therefore, several experiments were conducted to test at 50°C, relative humidity of 50% and 74%, to determine whether the moisture throughout the wood moves on the principle of the diffusion or not. It was found that the moisture moved as the diffusion even above the fibre-saturation point in general conditions, which is much the same condition as in kiln drying of wood, and its moisture distribution could be shown by an equation.

Accordingly, assuming that the moisture moves as shown by the diffusion equation $\frac{\partial u}{\partial t} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ in the case of drying in general conditions, the boundary conditions at each stage of drying were determined according to the reports already published, and they are as follows,

at constant rate of drying.

$$u_s = At + u_0$$

at 1st decreasing rate

$$u_s = Be^{-ct} + u_e$$

and at 2nd decreasing rate

$$u_s = u_e$$

where u_s is the surface moisture content, u_0 the initial moisture content, u_e the equilibrium moisture content, and A, B, C are constants. And the solutions of this equation at each case are as follows respectively,

at constant rate:

$$u = u_0 + At + \frac{A}{2K_1} \left[\left(x - \frac{l}{2}\right)^2 - \frac{l^2}{4} + \frac{3l^2}{4\pi} e^{-K_1 \frac{\pi^2}{l^2} t} \cdot \cos \frac{\pi}{l} \left(x - \frac{l}{2}\right) \right]$$

at decreasing rate:

$$u = u_s + \frac{2}{l} \sum e^{-K_2 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t} \cdot \sin \frac{n\pi}{l} x \left\{ \left[(u_{s0} - u_s) - \frac{A}{2K_1} \frac{2l^2}{\pi^2} \right] \frac{2l}{\pi} + \frac{A}{2K_1} \frac{3l^2}{4\pi} \frac{l}{2} e^{-K_1 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 t_0} \right\}$$

Scrutiny of the equations solved.

The change of weights and moisture distributions of test pieces of beech, which were dried in a condition of temperature 50°C, relative humidity 74%, and whose sizes were 25×10×5 (cm), were measured by means of spring balances and electric resistance, and the results obtained were shown in Fig. 3, 4.

Assuming that the diffusion equations solved above could be applied in the case of such moisture distribution as these, the suitability of the equations solved above was inspected by applying the results obtained to these equations.

Calculation of moisture conductivity K .

The values of K at the stage of constant and decreasing rate of drying were calculated by use of formula (14), and (26). The results obtained were shown in Table 1, 2. As verified in these, it can be recognized that the values

of K become smaller as the stage of drying changed from the constant rate to the decreasing rate, and the drying velocities gradually decreased.

Comparison of the values calculated with that measured.

The suitabilities of equations were inspected by comparing the moisture content calculated by K_1 , K_2 and K_3 , which were obtained above, with that measured in each stage. Both values approximately coincided as is shown in Table 3. Accordingly, if values of K were known, and the boundary conditions were determined, it would be possible to calculate the courses of decreasing moisture. The curves of moisture distribution at each stage can be obtained, moreover, by substituting the values of K to the equations (12), and (23), which give the moisture distribution, as shown in Fig. 7, 8. It can be said that this calculated moisture distribution approximately coincided with that assumed by electric resistance.