

木材の吸・脱湿過程のコンピュータ・シミュレーション

| | |
|-------|--------------|
| 誌名 | 京都大学農学部演習林報告 |
| ISSN | 0368511X |
| 著者 | 佐道, 健 |
| 巻/号 | 61号 |
| 掲載ページ | p. 310-318 |
| 発行年月 | 1989年12月 |

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



木材の吸・脱湿過程の コンピュータ・シミュレーション

佐 道 健

Computer simulation of sorption process of wood.

Takeshi SADOH

要 旨

木材中の水分の拡散が Fick の法則に従うと仮定して、木材の吸・脱湿過程を有限差分法を用いてシミュレーションを行ない、平均拡散係数の推定、拡散係数を用いた吸・脱湿平衡時間の算出、木材表面上に湿気の伝達層を仮定した場合の見掛けの拡散係数の意義についての検討を行った。

1) 木材表面では瞬間的に外気と水分平衡に達すると仮定した場合：含水率依存性の拡散過程について、初期および平衡含水率に対応するそれぞれの拡散係数と平均拡散係数 \bar{D} の関係を求め、吸・脱湿いずれの場合も平均拡散係数 \bar{D} の値には初期含水率に対応する拡散係数の寄与が大きいことを明らかにした。ここで含水率依存性の拡散過程と平均拡散係数を用いた拡散過程とを比較すると、それぞれの過程の終期において吸湿では含水率依存性の拡散過程が速やかに進行し、脱湿では逆に平均拡散係数を用いた拡散過程の方が速やかに進行する。次いで、木材の吸・脱湿平衡時間を知るため、吸・脱湿量が平衡量の 0.5、および 0.99 に達する迄の時間 $t_{0.5}$ および $t_{0.99}$ を算出した結果、 $t_{0.99}/t_{0.5}$ の値は相対湿度の変動範囲 40～80% で、吸湿で 6.5～8.5、脱湿で 10.0～13.0 の範囲にあることが分かった。

2) 木材表面上に湿気の伝達層を仮定し、この層を通しての湿度平衡の容易さを表わすパラメータ（表面伝達係数、 K ）を定義した場合：密度および厚さが異なる木材の吸湿過程で、表面伝達係数を変化させた場合に見掛けの拡散係数 D_{ap} がどのように変化するかを算出した。次いで、見掛けの拡散係数を用いた吸湿過程と表面伝達層を考えた場合の吸湿過程を比較し、両曲線は $t_{0.5}$ で交叉するが、吸湿の初期および終期では両曲線の差は K の値が小さいほど大きくなることを明らかにした。

1. 緒 言

湿度が変動する空間に置かれた木材の寸法変化や調湿作用は、木材の吸湿能力（平衡含水率）と水分の拡散速度がわかり、材料の寸法や空間の温・湿度などの条件が与えられると、コンピュータを用いてシミュレートすることができ、この方法を用いて木材の寸法安定性や調湿機能を評価することができる。

この場合、木材の吸・脱湿過程のコンピュータ・シミュレーションについては、基本的には有

限差分法を用いて、吸・脱湿過程に互って順次計算を行えばよい^{1,2)}。しかし、その適合性は木材中の水分の拡散機構をどのように考えるか、木材表面における水分の授受をどのように仮定するかによって決定される。

一般に拡散は Fick の法則に従うとされるが、木材中の水の拡散に Fick の法則を適用するにはいくつかの問題点がある^{3,4)}。しかし、理論的に適用が容易であり、近似的に実験結果と一致するので、しばしば木材の吸・脱湿を初め、木材中の水分移動の解析にこの法則が適用される。このように木材の吸・脱湿過程が基本的に Fick の拡散式に支配されると考えた場合でも、この式の適用に当たっていくつかの問題点がある。すなわち、木材中の水分の拡散を考えると、拡散係数は温度、含水率によって変化する。吸・脱湿過程では厚さ方向で水分傾斜が存在するとともに、この分布が時間とともに変化し、拡散係数が時間と位置によって変化していると考えなければならない。また、表面がどのような速さで外気と平衡に達するかも重要な問題である。しかし、ある木材の吸・脱湿過程をコンピュータでシミュレートするに当たって、その木材の拡散係数の含水率依存性、温度依存性、さらに表面での水分平衡条件をあらかじめ求めておくことは困難である。

本論文では以上の点を考慮しながら、平均拡散係数の推定、拡散係数を用いた吸・脱湿平衡時間の算出、木材表面上に湿気の伝達層を仮定した場合の見掛けの拡散係数の意義について検討することによって、比較的簡単な実験で求めた木材の拡散係数（見掛けの拡散係数）を用いた吸・脱湿過程のシミュレーションの可能性について考察する。

なお、本論文では次のような記号および単位を使用する。

θ : 温度[°C]

h : 相対湿度[1]

R : 木材の密度 [$\text{g}_{\text{wood}}/\text{cm}^3_{\text{wood}}$]

u : 木材の含水率 [$\text{g}_{\text{water}}/\text{g}_{\text{wood}}$]

$u_e = f(h)$: 相対湿度 h における平衡含水率

C : 木材中の水分濃度 [$\text{g}_{\text{water}}/\text{cm}^3_{\text{wood}}$], $C = R \cdot u$

D : 木材中の水の拡散係数 [cm^2/min]

2. 拡散過程のシミュレーション

2.1. Fick の拡散式を用いたシミュレーション

上に述べたように、木材中の水の拡散に Fick の法則を適用するにはいくつかの問題がある。とくに拡散の駆動力は濃度勾配ではなく、化学ポテンシャル勾配であると考えられる²⁾ので、Fick の拡散式を適用することには問題がある。しかし、ここでは取り扱いを簡単にするために木材中の拡散が Fick の法則に従うと仮定する。

Fick の法則によれば、水分濃度勾配が dC/dx の 2 点間を断面 A を横断して時間 t の間に質量 m の水分が拡散するとき、次の 2 式が成立する。

$$dm/dt = -D \cdot A \cdot dC/dx \quad (1)$$

$$dC/dt = d(D \cdot dC/dx)/dx \quad (2)$$

ここで、 D は拡散係数である。

したがって、吸・脱湿過程を有限差分法でシミュレートするに当たっては、Fig. 1-a に示すように、拡散方向に距離 Δx に分割した層を想定し、次式を用いて、時間を追って水分変化を逐次計算すればよい。

$$C(i)' = C(i) + D \cdot (\Delta t / \Delta x^2) \cdot (C(i-1) + C(i+1) - 2 \cdot C(i)) \quad (3)$$

ここで $C(i)$ は i 番目の分割点の含水率, $C(i)'$ は時間 Δt 後の i 番目の分割点での水分濃度である。なお, ここで境界条件は, 後に述べるように木材表面で外気の湿度とどのような水分平衡条件が成立すると仮定するかによって異なる。

いま, 密度 R の木材が含水率 u のとき $u = C/R$ の関係があるとして, (3) 式は

$$u(i)' = u(i) + D \cdot (\Delta t / \Delta x^2) \cdot (u(i-1) + u(i+1) - 2 \cdot u(i)) \quad (4)$$

と書くことができる。ここで $u(i)$ は i 番目の分割点の含水率, $u(i)'$ は時間 Δt 後の i 番目の分割点での含水率である。

シミュレーションを行なうに当っては計算の過程で外部および内部条件に応じた木材の平衡含水率, および拡散係数を求める必要がある。そこで, ここでは既存のデータのうち, シミュレーションで使用する範囲の密度 ($0.3 \sim 0.8 \text{ g/cm}^3$), 温度 ($10 \sim 30^\circ\text{C}$), 相対湿度 ($0.20 \sim 0.95$), および含水率 ($0.05 \sim 0.25 \text{ g/g}$) の数値を用いて, 次の重回帰式を得た。なお, 用いたデータは平衡含水率については木材工業ハンドブック⁵⁾に記載してある平衡含水率図表, 拡散係数(繊維直角方向)の密度, 温度, および含水率依存性については, Choong⁶⁾によって報告されている3者の関係を示す図表から得た数値である。

$$u = (69.1 \cdot h - 122 \cdot h^2 + 86.8 \cdot h^3 - 0.040 \cdot \theta - 4.79) / 100 \quad (5)$$

$$\log D = 5.43(2544 / (\theta + 273)) + 3.60 \cdot u - 5.28 \cdot R + 3.01 \cdot R^2 \quad (6)$$

なお, 以下のシミュレーションは全て温度 20°C で繊維直角方向に水分が拡散するとして行なったものである。

2. 2. 平均拡散係数

Fick の法則を適用するに当たって, 表面では瞬間的に外気の湿度と平衡すると仮定すると, 木材中の水の拡散係数は吸・脱湿速度の測定から求めることができる。すなわち, 厚さが l の板が吸・脱湿するとき, 平均拡散係数 \bar{D} は Boltzmann の解⁷⁾を用いて計算することができる。すなわち, 時間 t における水分量を $m(t)$ としたとき,

$$E = [m(t) - m(0)] / [m(\infty) - m(0)] = (4/l) \cdot (\bar{D} \cdot t / \pi)^{1/2} \quad (7)$$

の関係が $E < 0.6$ の範囲で成立するので, この範囲で, 時間の平方根 $t^{1/2}$ と吸湿量の関係が直線となる。したがって吸・脱湿実験から吸・脱湿による全水分量変化の $1/2$ だけ変化するに要する時間 $t_{0.5}$ を求め,

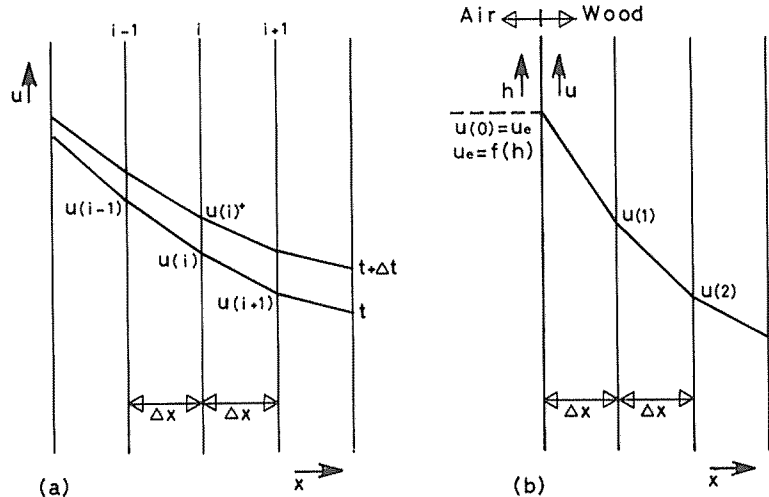


Fig. 1 Schematic diagram to explain a) diffusion of moisture through wood and b) boundary as wood surface equilibriate immediately with humidity of surrounding atmosphere.

$$0.5 = (4/l) \cdot (\bar{D} \cdot t_{0.5}/\pi)^{1/2} \quad (8)$$

の関係によって \bar{D} を算出することができる。

先に述べたように、拡散係数は同一温度、比重条件であっても、含水率によって変化し、繊維直角方向の拡散では含水率の増加に従って増大する。吸・脱湿過程では厚さ方向で水分傾斜が存在するとともに、この分布が時間とともに変化するので、拡散係数が時間と位置によって変化していると考えなければならない。ここでは、板材が吸・脱湿する際の平均拡散係数が初期および平衡含水率とどのような関係にあるかを知るため、まず(7)式を誘導した条件、即ち Fig. 1-b のような境界条件でシミュレーションを行ない、(8)式の関係から平均拡散係数を求めた。

Fig. 2 に初期含水率に対応する拡散係数 D_i 、平衡含水率に対応する拡散係数 D_f 、および平均拡散係数 \bar{D} の関係を示す。吸・脱湿温度を 20°C とし、板の比重、厚さ、初期含水率、平衡含水率を種々変化させてシミュレーションして平均拡散係数を求めると、等しい平均拡散係数の点が $\log D_i$ と $\log D_f$ を軸とするグラフで、勾配 -2.78 の直線上に乗る。このことは温度 20°C で

$$\log \bar{D} = (2.78 \cdot \log D_i + \log D_f) / 3.78 \quad (9)$$

の関係があることを示し、いずれの場合も初期含水率に対応する拡散係数の寄与が大きいことが分かる。

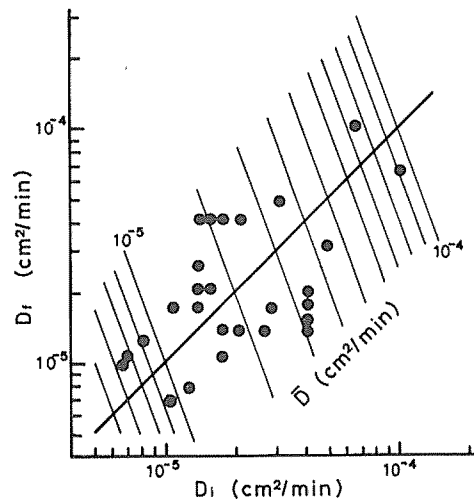


Fig. 2 Average diffusion coefficient (\bar{D}) calculated from diffusion coefficient at initial and final conditions (D_i , D_f).

2. 3. 真の拡散過程と平均拡散係数を用いた拡散過程

木材の吸・脱湿過程をコンピュータでシミュレートするに当たっては、その材料の(8)式で求めた平均拡散係数を用いてシミュレーションを行なうのが便利である。そこで、拡散係数の含水率依存性があるものとしてシミュレーションした場合(真の拡散過程)と平均拡散係数を用いた拡散過程とを比較した。この結果は Fig. 3 に示すよ

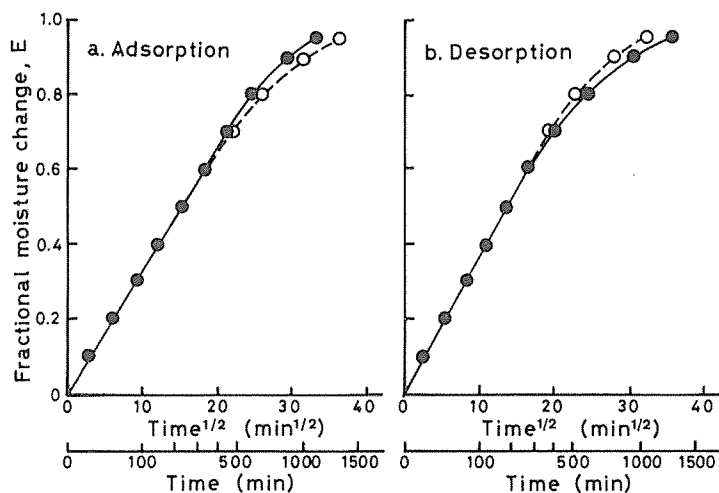


Fig. 3 Calculated sorption processes.
a. adsorption, 60% to 80% RH
b. desorption, 80% to 60% RH
○ with moisture content dependent diffusion coefficient
● with constant diffusion coefficient (\bar{D})

Table 1 Ratio of half sorption time ($t_{0.5}$) to equilibrium time ($t_{0.99}$)

| | Density [g/cm ³] | Thickness [mm] | RH range [%] | $t_{0.5}$ [min] | $t_{0.99}$ [min] | $t_{0.99}/t_{0.5}$ |
|------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Adsorption | 0.3 | 3 | 60→80 | 60 | 436 | 7.3 |
| | | | 40→60 | 79 | 642 | 8.1 |
| | 0.5 | 3 | 60→80 | 225 | 1640 | 7.3 |
| | | | 40→60 | 296 | 2412 | 8.1 |
| | | | 40→80 | 266 | 1740 | 6.5 |
| | 0.7 | | 60→80 | 486 | 3538 | 7.3 |
| | | | 40→60 | 636 | 5204 | 8.2 |
| | 0.5 | 2 | 60→80 | 100 | 729 | 7.3 |
| | | | 4 | 400 | 2918 | 7.3 |
| | | | 6 | 898 | 6574 | 7.3 |
| Desorption | 0.3 | 3 | 80→60 | 48 | 552 | 11.5 |
| | | | 60→40 | 71 | 720 | 10.1 |
| | 0.5 | 3 | 80→60 | 180 | 2078 | 11.5 |
| | | | 60→40 | 266 | 2708 | 10.2 |
| | | | 80→40 | 191 | 2472 | 12.9 |
| | 0.7 | | 80→60 | 388 | 4884 | 11.6 |
| | | | 60→40 | 570 | 5842 | 10.2 |
| | 0.5 | 2 | 80→60 | 80 | 923 | 11.5 |
| | | | 4 | 320 | 3696 | 11.6 |
| | | | 6 | 718 | 8326 | 11.6 |

うに、吸・脱湿を問わず、 $E < 0.6$ では両過程は一致するが、 $E < 0.6$ では吸湿では含水率依存性がある真の拡散過程が平均拡散係数を用いた拡散過程に比較しては速やかに進行し、脱湿では逆に平均拡散係数を用いた拡散過程の方が速やかに進行する。これは拡散の後期過程で平衡含水率付近の含水率に対応する拡散係数の寄与が大きくなるからである。

2. 4. 木材の吸・脱湿平衡時間

木材の吸・脱湿過程をコンピュータ・シミュレーションによって求め、これから木材の吸・脱湿平衡時間を求めた。真に平衡するまでには無限大の時間が掛かるので、ここでは $E = 0.5$ に達する迄の時間 $t_{0.5}$ と $E = 0.99$ に達する迄の時間 $t_{0.99}$ を算出し、 $t_{0.99}/t_{0.5}$ を求めた。なお、 $t_{0.5}$ と平均拡散係数の間には (8) 式の関係がある。

結果は Table 1 に示すように、 $t_{0.99}/t_{0.5}$ の値は相対湿度の変動範囲 40～80% で、吸湿で 6.5～8.5、脱湿で 10.0～13.0 の範囲にあり、比重や板厚さに拘らず、平衡湿度が高くなるほど小さくなる傾向にある。これらの結果を利用すれば、木材の拡散係数から吸・脱湿平衡に要するおおよその時間が推定できる。

3. 表面伝達層

3. 1. 木材表面における境界条件

以上の議論はシミュレーションに拡散法則を適用するに当たって、表面では瞬間的に外気の湿度と平衡するという境界条件を用いている。しかし、実際には板の表面付近ではこのようなことは起こらないと考えられる。すでに、木材乾燥速度の解析に当たって小倉⁹⁾は木材表面での水分移動に表面蒸発抵抗圧を、満久¹⁰⁾は木材表面上に fluid film を仮定し、この層を水分が通過する場合の速度定数 (coefficient of surface evaporation, 表面蒸発係数 [g/cm²・s]) を導入して

いる。また、Skaar¹⁰⁾ は水分移動の表面抵抗の指標としての surface emission coefficient [cm/s] を用いている。コンピュータ・シミュレーションにおいても Droin ら¹¹⁾、Droin-Josserand ら¹²⁾ は coefficient of moisture transfer [cm/s] を用いて木材表面の境界条件を定めている。

ここでは表面伝達層についてのモデルとして、満久⁹⁾が乾燥速度の解析に用いたと同様の境界条件を考える。すなわち、外気から界面までの間に湿度が変化する薄い層（表面伝達層）を考えたモデルを提案する。このような層を考えると、実測した吸・脱湿過程から $t_{0.5}$ を求め、(8) 式に代入して得た \bar{D} 、すなわち見掛けの拡散係数 D_{ap} は実際の値よりもやや小さくなる。このような場合に、この層をどのように数値化すればよいか。この点について検討する。

このモデルでは Fig. 4 に示すような厚さ Δx_b [cm] の表面伝達層 ($a \sim 0$) を考える。この表面伝達層における相対湿度勾配、および平衡含水率勾配による水蒸気の拡散係数をそれぞれ D_h^* 、 D_u^* とすると、時間 Δt の間の $a \rightarrow 0$ への水分の流入量 F_{a0} は

$$F_{a0} = D_h^* \cdot \frac{h - h(0)}{\Delta x_b} \cdot \Delta t = D_u^* \cdot \frac{u_e - u(0)}{\Delta x_b} \cdot \Delta t \quad (10)$$

この間の $0 \rightarrow 1$ への水分の移動量 F_{01} は

$$F_{01} = D \cdot \frac{C(0) - C(1)}{\Delta x} \cdot \Delta t = D \cdot R \cdot \frac{u(0) - u(1)}{\Delta x} \cdot \Delta t \quad (11)$$

また、厚さ $\Delta x/2$ の最表層の平均含水率 u_0 は

$$u_0 = u(0) - \{u(0) - u(1)\}/4 = \{3 \cdot u(0) + u(1)\}/4 \quad (12)$$

$$u(0) = \{4 \cdot u_0 - u(1)\}/3 \quad (13)$$

一方、時間 Δt の間の最表層の平均含水率の増加量 Δu_0 は

$$\begin{aligned} \Delta u_0 &= \frac{F_{a0} - F_{01}}{R \cdot (\Delta x/2)} = \left[\frac{D_h^*}{\Delta x_b} \cdot \{h - h(0)\} - \frac{D \cdot R}{\Delta x} \cdot \{u(0) - u(1)\} \right] \cdot \frac{\Delta t}{R \cdot (\Delta x/2)} \\ &= \left[\frac{D_u^*}{\Delta x_b} \cdot \{u_e - u(0)\} - \frac{D \cdot R}{\Delta x} \cdot \{u(0) - u(1)\} \right] \cdot \frac{\Delta t}{R \cdot (\Delta x/2)} \\ &= \frac{2 \cdot \Delta t}{\Delta x} \cdot [K \cdot \{u_e - u(0)\}/R - D \cdot \{u(0) - u(1)\}/\Delta x] \end{aligned} \quad (14)$$

となり、表面伝達層における湿度平衡に対する容易さを表わすパラメータ K (表面伝達係数) が定義される。 K は満久⁹⁾による表面蒸発係数と基本的に同じで、式 (10)、(14) から分かるように、 $D_u^*/\Delta x_b$ [g/(min · cm²)] である。また、 K/R が Skaar¹⁰⁾ の surface emission coefficient, S に対応する。なお、 K がどの程度の値をとるかは不明であるが、Choong ら¹³⁾によって S が $0.9 \times 10^{-1} \sim 1.9 \times 10^{-1}$ cm/s の範囲にあると報告されているので、 $S = K/R$ と仮定すると、 K の値として $2 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-2}$ g/(min · cm²) に対応する。

3. 2. 見掛けの拡散係数に及ぼす表面伝達係数の効果

上にも述べたように表面伝達係数が一定であれば、見掛けの拡散係数は実際の値よりも小さくなる。ま

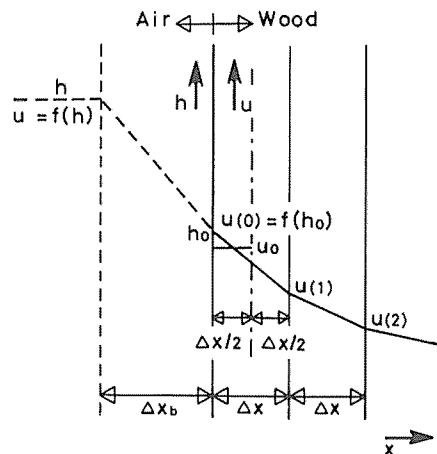


Fig. 4 Schematic diagram to explain surface transmission layer on wood-air boundary.

Table 2. Apparent diffusion coefficient (D_{ap}) for different surface transmission coefficients (K) (40→60%RH)

| Density [g/cm ³] | $D \times 10^6$ [cm ² /min] | Thickness [mm] | $K \times 10^3$ [g/(cm ² ·min)] | | | | |
|---------------------------------|---|-------------------|--|------|------|------|------|
| | | | 0.1 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 |
| 0.4 | 27.0 | 1.0 | 3.08 | 8.94 | 13.3 | 17.8 | 21.4 |
| | | 1.3 | 3.85 | 10.5 | 15.0 | 19.3 | 22.5 |
| | | 2.0 | 5.46 | 13.3 | 17.8 | 21.5 | 23.9 |
| | | 4.0 | 8.94 | 17.8 | 21.4 | 23.9 | 25.5 |
| | | 10.0 | 14.8 | 22.4 | 24.6 | 25.9 | 26.6 |
| 0.5 | 14.9 | 1.0 | 2.33 | 6.28 | 8.70 | 11.0 | 14.9 |
| | | 1.3 | 2.87 | 7.14 | 9.60 | 11.7 | 13.1 |
| | | 2.0 | 3.98 | 8.70 | 11.0 | 12.7 | 13.8 |
| | | 4.0 | 6.18 | 11.0 | 12.7 | 13.7 | 14.4 |
| | | 10.0 | 9.48 | 13.1 | 14.0 | 14.6 | 14.8 |
| 0.6 | 9.48 | 1.0 | 1.84 | 4.55 | 6.12 | 7.44 | 8.34 |
| | | 1.3 | 2.25 | 5.15 | 6.66 | 7.86 | 8.58 |
| | | 2.0 | 3.04 | 6.12 | 7.44 | 8.40 | 8.94 |
| | | 4.0 | 4.54 | 7.44 | 8.34 | 8.94 | 9.24 |
| | | 10.0 | 6.60 | 8.58 | 9.06 | 9.36 | 9.36 |
| 0.7 | 6.90 | 1.0 | 1.52 | 3.59 | 4.73 | 5.62 | 6.24 |
| | | 1.3 | 1.84 | 4.03 | 5.09 | 5.88 | 6.36 |
| | | 2.0 | 2.47 | 4.72 | 5.62 | 6.24 | 6.60 |
| | | 4.0 | 3.59 | 5.62 | 6.24 | 6.60 | 6.78 |
| | | 10.0 | 5.04 | 6.36 | 6.66 | 6.84 | 6.90 |

た、板の厚さが大きくなるとともに見掛けの拡散係数は実際の拡散係数に近付き、厚さが無限大に外挿したときの見掛けの拡散係数が実際の拡散係数の値を示すことになる。

そこで木材の拡散係数として含水率変動範囲での平均拡散係数 \bar{D} を用い、表面伝達係数 K が一定であると仮定し、木材の密度 R を0.4～0.7 g/cm³、厚さ d を1～10 mmに変化させた場合の見掛けの拡散係数 D_{ap} を20℃、40% RH～60% RHの吸湿過程でのシミュレーションによって求めた。ここで、上述のSの範囲から $K > 0.1 \times 10^{-3}$ g/(min·cm²)の範囲で、また \bar{D} は式(5)、(6)、(9)を用いて算出した。得られた結果をTable 2に示す。また、Fig. 5に密度0.4および0.7 g/cm³の場合の $d^{-1/2}$ と $\log D_{ap}$ の関係で示す。この図から $d = 1 \sim 10$ mmの範囲で、 K が一定の場合には $d^{-1/2}$ と $\log D_{ap}$ の間にはほぼ直線関係があり、この直線の勾配は K が大きくなるにしたがって小さくなることがわかる。しかし、この直線は $d > 10$ mmで上にやや凸になり、直線部をそのまま

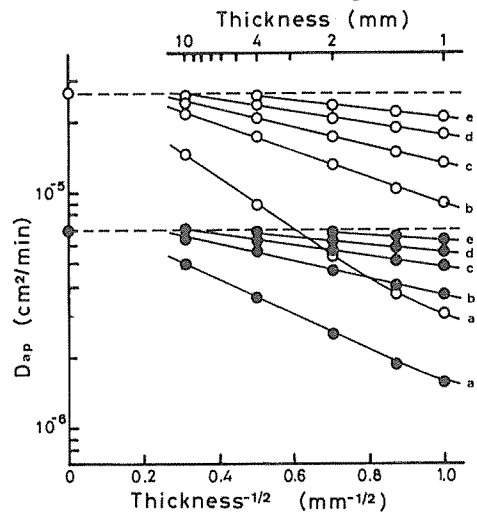


Fig. 5 Calculated apparent diffusion coefficient (D_{ap}) of wood at different surface transmission coefficient (K) and thickness.

Density: ○ 0.4g/cm³, ● 0.7g/cm³
 K : a, 0.1; b, 0.4; c, 0.8; d, 1.6;
 e, 3.2×10^{-3} g/(min·cm²)

$d = \infty$ に外挿すれば平均拡散係数 \bar{D} よりも大きめの値を与える。

3. 3. 見掛けの拡散係数を用いた吸・脱湿過程のシミュレーション

湿度が変動する空間に置かれた木材の寸法変化や調湿作用をシミュレーションによって予測するに当たって、板状材料の吸湿性能や拡散係数を求めるためには、この材料の吸・脱湿の経過の測定を行ない、(8)式を用いて見掛けの拡散係数 D_{ap} を求めるのが最も簡便である。ここでは D_{ap} を用い、さらに表面が直

ちに外気と平衡すると仮定して木材の吸湿過程をシミュレートした場合の吸湿経過曲線を、表面伝達層を考えた場合の経過曲線と比較した。結果の一例をFig. 6に示す。この例は密度 0.5 g/cm^3 、厚さ 2 mm の板を相対湿度 40% で平衡にした後、相対湿度 60% の大気中で吸湿させた場合について、 K を $0.1 \times 10^{-3} \text{ g/(min} \cdot \text{cm}^2)$ 、 $0.4 \times 10^{-3} \text{ g/(min} \cdot \text{cm}^2)$ および ∞ としてその過程をシミュレートしたものである。

この図からも分かるように、表面伝達層を考えた場合、表面が瞬間的に水分平衡に達すると考えた場合($K = \infty$)に比較して吸湿速度が低下する。一方、 D_{ap} を用い、表面が直ちに外気と平衡すると仮定して得た木材の吸湿曲線は、 $E = 0.5$ すなわち $t_{0.5}$ で表面伝達層を考えた場合の吸湿曲線と交叉するので、両曲線は比較的一致する。しかし、この吸湿の初期および終期では両曲線に不一致がみられ、 K の値が小さいほど両曲線の差は大きくなる。なお、ここでは脱湿過程については示していないが、脱湿過程でも吸湿過程と同様の影響が見られる。

4. 結 び

木材の寸法変化や調湿作用のコンピュータ・シミュレーションを行なうに当たっては、木材表面での水分平衡速度と木材中の水分拡散速度が必要である。この両者を同時に表現できる一つのパラメータとして見掛けの拡散係数 D_{ap} が使用できるならば、シミュレーションの実用化が促進される。今後、本研究の結果をもとにしてこれらの問題点を検討したい。

引用文献

- 1) MOSCHLER, W. W. and MARTIN, R. E.: Diffusion equation solutions in experimental wood

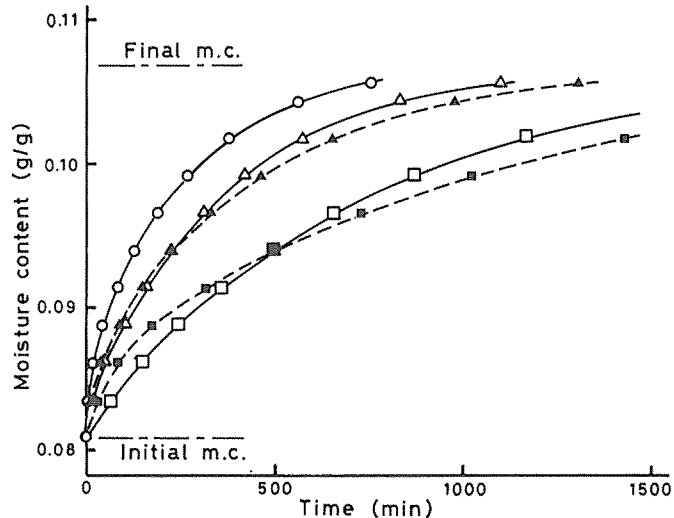


Fig. 6 Calculated adsorption processes (40% to 60% RH)

- with surface transmission coefficient, K
 ---- with apparent diffusion coefficient
 ○ $K = \infty$; △, ▲ $K = 0.4 \times 10^{-3} \text{ g/(min} \cdot \text{cm}^2)$;
 □, ■ $K = 0.1 \times 10^{-3} \text{ g/(min} \cdot \text{cm}^2)$

- drying, Wood Sci., 1 (1), 47-57 (1968)
- 2) KAWAI, S., NAKATO, K., and SADOH, T.: Moisture movement in wood below the fiber saturation point, Mokuzai Gakkaishi, 24 (5), 273-280 (1978)
 - 3) 佐道 健: 伏谷賢美ほか編「木材の物理」, 文永堂, 1985, p.42-57
 - 4) 佐道 健: 木材学会誌, 32 (7), 485-491 (1986)
 - 5) 林業試験場監修: 改定3版 木材工業ハンドブック, 丸善, 1982
 - 6) CHOONG, E. T.: Diffusion coefficients of softwoods by steady-state and theoretical methods, Forest Prod. J., 15 (1), 21-27 (1965)
 - 7) CRANK, J.: "The Mathematics of Diffusion", Oxford Univ. Press, 1956
 - 8) 小倉武夫: 木材の乾燥機構に関する研究, 第3報 木材水分の蒸発速度について, 林業試験場報告, No.51, 61-75 (1951)
 - 9) MAKU, T.: Studies on the drying of wood, Wood Research, No.13, 81-120 (1954)
 - 10) SKAAR, C.: Analysis of methods for determining the coefficient of moisture diffusion in wood, J. Forest Prod. Res. Soc., 4 (6), 403-410 (1954)
 - 11) DROIN, A., TAVERDET, J. L. and VERGNAUD, J. M.: Modeling the kinetics of moisture adsorption by wood, Wood Sci. Technol., 22, 11-20 (1988)
 - 12) DROIN-JOSSERAND, A., TAVERDET, J. L. and VERGNAUD, J. M.: Modeling the absorption and desorption of moisture by wood in an atmosphere of constant and programmed relative humidity, Wood Sci. Technol., 22, 299-310 (1988)
 - 13) CHOONG, E. T. and SKAAR, C.: Diffusivity and surface emissivity in wood drying, Wood and Fiber, 4 (2), 80-86 (1972)

Resume

The moisture sorption processes of wood were simulated by a numerical method with finite differences under simple and transmissible boundary conditions.

First, mathematical simulations were carried out under a simple boundary condition that the moisture content of wood surface reaches at the equilibrium immediately after the sorption starts. The average diffusion coefficients (\bar{D}) for sorption processes with moisture content dependent diffusion were calculated, and the numerical relation among \bar{D} and diffusion coefficients at initial and final stages was obtained. The sorption process calculated with \bar{D} proceeds apart from moisture content dependent diffusion process above 60% of total moisture change, where the moisture dependent sorption goes ahead of the constant diffusion process for adsorption, but conversely for desorption. An equilibrium time was calculated to be 6.5 to 8.5 times of the half-sorption time for adsorption, and 10.0 to 13.0 times for desorption.

Using a model with transmission layer on the wood surface, sorption processes of wood of various densities and thicknesses were simulated at different surface transmission coefficients (K). For each case, apparent diffusion coefficient (D_{ap}) of wood was calculated, and the sorption processes simulated with K and \bar{D} were compared with the simple boundary process using D_{ap} .