

コンピュータ・シミュレーションを用いた 木材の調湿機能の解析 ——閉じられた空間の場合——

板東 慎二・佐道 健

Analysis of Humidistat Effect of Wood by Computer Simulation
——Case of Closed Space——

Shinji BANDO, Takeshi SADOH

要 旨

空間内に置かれた木材は、空間内の湿度を緩和する湿度調節機能（調湿機能）をもつ。差分法を用いて外気の温湿度の変動にともなう木材の含水率変動を計算すると、空間内に置かれた木材の吸放湿に伴う湿度変動のシミュレーションを行なうことができ、この方法を用いると木材の調湿機能の解析を比較的少ない手間で行なうことができる。木材の含水率変動の計算において、拡散係数はこの過程での平均温度と平均含水率に対応した一定値を与えるとよい。また、表面伝達係数は適当な値を与えて湿度変動のシミュレーションを行ない、実測の変動幅と比較することによって決めることができた。

本研究は、コンピュータ・シミュレーションを用いて気温の日中の変化に伴う閉じられた空間での相対湿度の変動を、木材がどのように調節することができるかを解析したもので、木材の表面積、木材の厚さ、木材の表面伝達係数が、木材の調湿機能に与える影響を知ることができた。

1. 緒 言

内装に木材を使った住宅は、部屋の湿度が安定しているといわれている。これは木材の吸湿性に由来する。すなわち、木材のような吸湿性材料は、外気の温湿度の変動にともなって外気に含まれる水分を吸放湿するので、居住空間のような限られた空間では、空間内の湿度変動を緩和する調湿機能をもつ。

この木材の調湿機能の評価に関して、内装材料として木材を用いた実大のモデル居住空間、または小密閉箱で湿度を実測する方法により、岡野¹⁾、牧ら²⁾ほか多くの研究者によって報告されている。

本研究では、木材が置かれた閉じられた空間内の湿度変動をコンピュータ・シミュレーションによって解析し、この方法を用いて木材の調湿機能を考察した。

2. シミュレーションの方法

2.1 木材が置かれた密閉空間における湿度変動

単位体積の空間に含まれる水蒸気量（絶対湿度）を h [g/m³], その空間での飽和水蒸気量（飽和絶対湿度）を h_s [g/m³] とすると、相対湿度 H は次の式 (1) で表わされる。

$$H = h / h_s \quad (1)$$

ここで h_s は温度によって決まるので、相対湿度の変動は、温度の変動にともなう飽和絶対湿度の変動と、この空間への水分の流入入による絶対湿度の変動によって生ずる。

2.2 木材の吸放湿挙動のシミュレーション

板状の木材の吸放湿挙動、すなわち外気の温湿度の変動にともなう含水率の変動は、Droin^{3,4)}、佐道⁵⁾などによって報告されたように、木材中の水分移動を拡散によって表現する Fick の拡散式に基づく次の差分法の式 (2) を用いて計算できる。すなわち、板を拡散方向（厚さ方向）に距離 Δx で分割したときの i 番目の位置での時間 t における含水率を $U(i)$ [g/g] とすると、時間 $t + \Delta t$ におけるこの位置での含水率 $U(i)^+$ は拡散係数を D とすると、

$$U(i)^+ = U(i) + K \{U(i-1) + U(i+1) - 2U(i)\} \quad (2)$$

$$K = D (\Delta t / \Delta x^2)$$

で表わすことができる。

また、木材の表面の含水率は必ずしも外気の湿度と平衡しているとはいえず、外気と木材の界面での水分の流れは、表面での含水率と外気との平衡含水率との差によって決まる。Droin³⁾によると、木材表面の含水率は式 (3) で計算できる。

$$U(0)^+ = K \{2L \cdot U_e + (1/K - 2L - 2) \cdot U(0) + 2U(1)\} \quad (3)$$

$$L = S \Delta x / D$$

ただし、 U_e は木材の平衡含水率 [g/g], S は表面伝達係数 [cm/s] を表わす。

閉じられた空間では、木材の吸放湿にともなう空間中の水分量、すなわち絶対湿度が変化する。しかし水分の総量は一定であるから、時間 t における体積 V の空間中の水蒸気量を M_V 、その内部に置かれた質量 M の木材に含まれる水分量を M_W とすると、 $t + \Delta t$ における相対湿度 H^+ は、

$$H^+ = (M_V^+ / V) / h_s$$

$$M_V^+ = M_V - (M_W^+ - M_W) \quad (4)$$

である。ここで M_V^+ , M_W^+ は時間 Δt 後の M_V , M_W の値である。

2.3 拡散係数、表面伝達係数

式 (2), (3) を用いて、外気の温湿度の変動にともなう木材の含水率変動を計算する場合、拡散係数 D と表面伝達係数 S の値を与えなければならない。

Boltzmann の解⁶⁾によると、板状の試験体について式 (5) が $E < 0.6$ の領域で成立するので、これに $E = 1/2$, $t = t_{0.5}$ を代入して得た式 (6) を適用すると、見かけの拡散係数 $\bar{D}$ [cm²/s] が得られる。

$$E = \{m(t) - m(0)\} / \{m(\infty) - m(0)\}$$

$$= (4/L) \sqrt{\bar{D}t / \pi} \quad (5)$$

$$1/2 = (4/L) \sqrt{\bar{D}t_{0.5} / \pi} \quad (6)$$

ここで $m(t)$ は時間 t [s] における木材の含水率 [%], L は試験体の厚さ [cm], $t_{0.5}$ は $E = 1/2$

になるまでの時間 [s] である。

一方, Choong ら⁷⁾によれば, 木材の拡散係数を一定と仮定すると, D , S , $\bar{D}$, および木材の水分移動方向の厚さの $1/2$ ($a = L/2$) の間には式 (7) で示される Newman の解⁸⁾において $S = \infty$, すなわち $H = \infty$ である時 $D = \bar{D}$ であるとして得た式 (8) で表わされる関係が成り立つ。

$$t_{0.5}(D/a^2) = 0.2 + 0.7/(H \times a) \quad (7)$$

$$a/\bar{D} = a/D + 3.5/S \quad (8)$$

ここで H は S/D で表される係数である。したがって, a と $a/\bar{D}$ の間には, 傾き $1/D$, 切片 $3.5/S$ の直線関係が成り立つ。

なお, 拡散係数 D は温度と木材の含水率に依存して変動することが知られている。そこで, 温度, 含水率, 木材の比重に対する依存性に関する Choong⁹⁾のデータを基にして, 佐道⁴⁾によって得られた次の近似式 (9) を用いて, 拡散係数が雰囲気温度, 木材の含水率に依存して変動すると仮定した場合の木材が置かれた空間における湿度変動についても検討した。

$$\log D = 4.07 - \{2544/(T + 273)\} + 3.6U - 5.28R + 3.01R^2 \quad (9)$$

ただし, T は温度 [$^{\circ}\text{C}$], U は木材の含水率 [g/g], R は木材の比重である。

一方, 表面伝達係数 S については, 求め方を後で述べる。

2.4 温度, 飽和絶対湿度, 平衡含水率

温度に関しては, 実際の温度変化を 1 時間単位で測定した結果を用い, 内挿によって任意の時刻の温度を知ることができる。

また, 式 (1) の飽和絶対湿度に関しては, 次の近似式 (10) を用いて各温度における飽和絶対湿度をそれぞれ計算した。

$$h_s = 0.1 \times (0.228T^2 + 0.532T + 52.4) \quad (10)$$

ただし T は温度 [$^{\circ}\text{C}$] である。

平衡含水率 U_e に関しては, 佐道⁴⁾によって報告された次の近似式 (11) を用いた。

$$U_e = (69.1H - 122H^2 + 86.9H^3 - 0.04T - 4.79)/100 \quad (11)$$

ただし H は相対湿度 [g/g] である。

2.5 プログラミングとシミュレーションの実行

以上の過程の主要部分のフローチャートを Fig.1 に示す。

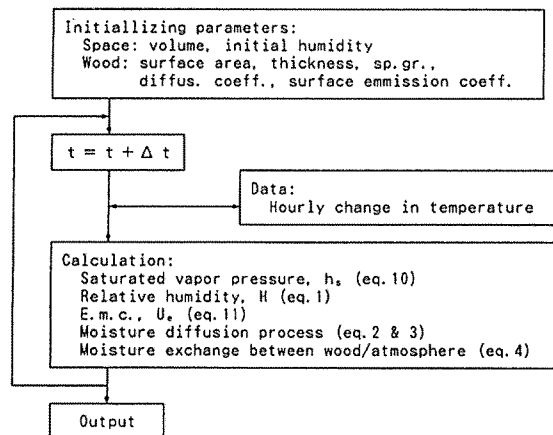


Fig. 1 Flow-chart for simulation of humidity control by wood.

ここではBASICでプログラムを作成し、NECパーソナルコンピュータPC-98系を用いて木材が置かれた空間における湿度変動のシミュレーションを行なった。ここで $\Delta t = 1\text{min}$, $\Delta x = 0.1\text{mm}$ の値を与えている。

3. 木材が置かれた空間における湿度変動の実測

3.1 木材試験体

試験体としてマカンバ（比重；0.66）の辺材部の約 $15\text{cm} \times 20\text{cm}$ （接線方向 $\times$ 繊維方向）の板状試験体を用い、水分の移動方向（半径方向）の厚さが異なる（約0.8, 1, 2, 4, 7, 12 mm）ものをそれぞれ4～5枚用意した。また、厚さ約1 mmのもので接線方向の長さが $1/2$ と $1/4$ （すなわち、吸放湿面の表面積が $1/2$ と $1/4$ ）のものを作成した。試験体の周辺部はビニルテープでシールし、木材中の拡散を板の厚さ方向に限定した。

3.2 測定装置

湿度測定用の密閉空間として約 $30 \times 38 \times 53\text{cm}$ のプラスチック製容器を用いた。なお、密閉箱内の温湿度測定用には小型温湿度記録ユニット（チノー製）を用い、センサは密閉箱の内部に取り付けた。

3.3 測定

雨、風、直射日光が直接当らず、外気の温度変化の影響がある場所（京都大学農学部総合館南棟の北面外側）に、1日以上外気にさらしておいた木材試験体を入れた密閉箱を置き、密閉箱内の温度、湿度を3日間（72時間）にわたって測定した。木材の条件は、厚さが異なるものを入れる他、木材試験体の吸放湿面の面積（両面）を0.015, 0.03, 0.06, 0.12 m^2 と変えた。また、温度の影響を調べるため、4月、9月、12月頃の異なる時期に測定を行った。

4. 木材が置かれた空間における湿度変動のシミュレーション

4.1 拡散係数の与え方

本研究で想定している過程では、気温と木材中の各位置における含水率は刻々と変化している。ここで、2.2で述べたように、木材の拡散係数 D は、温度、木材の含水率に依存して変動する。しかし、 D の値を変動させずに計算することができれば計算時間を短縮することができるので、次のような異なる条件を与えてシミュレーションを行った。ここで D の変動は式（9）に従うものとした。

- ① D を温度および木材内の各点の含水率に応じて変動させる。
- ② D を温度および木材内の平均含水率に応じて変動させる。
- ③ 初期条件の平均平衡含水率に対応した D を与え、以後温度に依って変動させる。
- ④ 平均温度、平均平衡含水率に対応した D の一定値を与える。

以上のような条件で、7 mm厚の木材板について、3日間にわたるシミュレーションを行なった結果、湿度変動幅に関しては、①に対して②1.004, ③1.004, ④0.996であった。また計算時間は、①が32分であったのに対して、②, ③15分, ④14分であった。このことから、シミュレーションを行なう過程の平均気温と平均湿度から求めた平均含水率に対応した D を与えることによって、短い時間ではほぼ正確な結果が得られることがわかった。それゆえ、以下のシミュレーションでは一定の拡散係数の値を用いることにした。

4.2 木材の表面伝達係数の決定

表面伝達係数 S を得るため、初期条件 (40°C , $31\% \text{ RH}$) に調節した水分移動方向の厚さの異なる (約 $0.8, 1, 4, 7 \text{ mm}$) 板状木材試験体を 20°C , $60\% \text{ RH}$ の恒温恒湿室内に置き、木材の吸湿挙動を実測した。

まず得られたデータに式 (6) を適用して $\bar{D}$ を求め、次いで式 (7), (8) を適用した。すなわち, a に対して $a/\bar{D}$ をプロットしたグラフ (Fig. 2) を作製し, 直線の勾配と切片から D と S を計算した結果, $D = 3.95 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, $S = 1.78 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ が得られた。

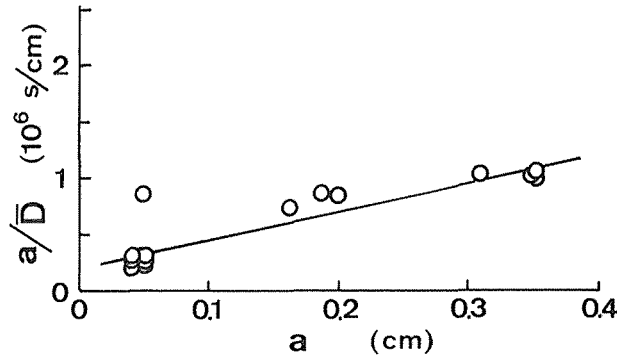


Fig. 2 Relationship of $a/\bar{D}$ vs. a to determine S value.
Temp.: 20°C

ここで, S は風速が大きくなるとともに, 大きくなるのが Rosen ら¹⁰⁾ によって報告されている。したがって, 無風状態の密閉箱内に置かれた木材の S は上に示した吸湿実験 (風速 0.4 m/s) で得られた値より小さい値を示すと考えられる。

まず, S として上で示した値を用いて, 木材が置かれた空間における湿度変動のシミュレーションを行ない, 実測の湿度変動と比較すると, シミュレーションでの変動の方が小さくなった。これは, シミュレーションにおいては S が実際示すと予測できる値より大きい値を与えられているため, 木材の吸放湿量が大きくなった結果, 過大な木材の調湿機能が示されたと考えられる。

そこで S の値として適当な値を与えてシミュレーションを行ない, 実測とシミュレーションの湿度変動幅がよく一致するときの S の値をその試験体の表面伝達係数とすることにした。

このようにして決定した S の値は $5 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ の間にあった。Avramidis ら¹¹⁾ によれば, S は温度, 湿度に影響を受けるが, 本研究でそれぞれの実測に対して先に示した方法で得られた S のバラツキが大きく, 温度, 湿度との間に明白な関係はみられなかったので, ここでは, 得られた S の平均値 ($= 1.48 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$) を以後のシミュレーションに用いた。

表面伝達係数としてこの値を用いて, 密閉箱の湿度変動のコンピュータ・シミュレーションを行ない, 実測とシミュレーションの湿度変動を比較した結果の一例を Fig. 3 に示す。この図から, 実測とシミュレーションの湿度変動は, ほぼ一致しているといえる。

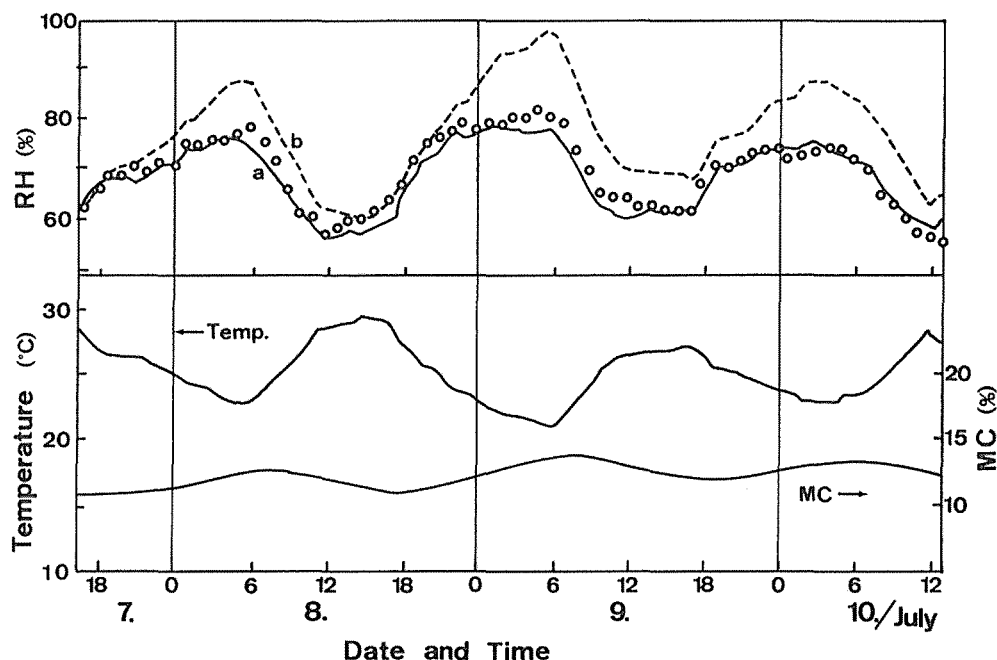


Fig. 3 An example of relative humidity change in closed spaces with and without wood.

Wood: Thickness = 1mm, density = 0.66g/cm^3

$D = 3.95 \cdot 10^{-7}\text{cm}^2/\text{s}$, $S = 1.48 \cdot 10^{-6}\text{cm/s}$, wood ratio = $0.17\text{m}^2/\text{m}^3$

Circle: space with wood (obs.), curve a: space with wood (calc.), b: space without wood

5. 木材の調湿機能

5.1 調湿機能の評価法

本研究では、コンピュータを用いた木材の調湿機能の評価として、木材が置かれた空間においては、木材が存在しない空間よりも湿度変動が小さいことから、調湿係数 HSC を次のように定義した。

$$HSC = \left[1 - \frac{\text{木材が有る場合の湿度の変動幅}}{\text{木材が無い場合の湿度の変動幅}} \right] \times 100 \quad (12)$$

5.2 モデル空間

湿度変化のシミュレーションを行なうモデル居住空間として、6畳間の部屋、すなわち、縦3.6m、横2.7m、高さ2.4mの部屋（体積 23.3m^3 、内部表面積 49.7m^2 、表面積/空間体積 2.13m^{-1} ）を想定し、木材を壁体とすると、これまで述べたマカンバ材の数値を用いた。

5.3 木材面率の影響

上で述べたモデル居住空間において、木材壁の厚さ1.2cmとして、様々な木材面率でモデル居住空間内の湿度変動のシミュレーションを行ない、木材面率（全表面に対する木材面の面積の百分率）または部屋空間当りの木材面率 WA/RV (m^{-1}) と調湿係数の関係を調べた。

Fig. 4 に木材面率と調湿係数の関係を示す。この図から調湿係数は木材面率の増加とともに高

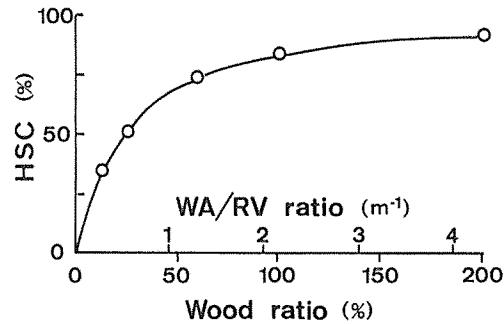


Fig. 4 Change in humidistat coefficient (HSC) with wood ratio (per inner surface area of room) and wood surface area per room volume (WA/RV).
Room size = $3.6\text{m} \times 2.7\text{m} \times 2.4\text{m}$,
wood thickness = 1.2cm

くなり、その増え方は木材面率が増加するとともに小さくなることがわかる。また、木材面率がほぼ100% ($WA/RV \approx 2.1\text{m}^{-1}$) を越えると増加率が小さくなることがわかる。このことより、湿度変動の小さい居住空間を作るためには、この程度の木材面率となるように木材製品（家具など）を置けばよいことがわかる。

5.4 木材の厚さの影響

次に、内装材料として木材を用いる場合、どのくらいの厚さのものを用いればよいかについて検討した。

上で述べたモデル居住空間において、異なる木材面率で、木材面材の厚さを $1\text{mm} \sim 30\text{mm}$ の範囲で変え、モデル居住空間内の湿度変動のシミュレーションを行ない、様々な木材面率での木材の厚さと調湿係数の関係を調べた。結果を Fig. 5 に示す。この図から木材の厚さが 1mm 以上では、1日の温度変化に対応した木材の調湿機能は、厚さによってほとんど変化しないことがわかる。この場合の木材壁の厚さ $1, 5, 10\text{mm}$ のものについて、木材内の含水率分布の変動を示すと、Fig. 6 のようになる。これから、木材内で含水率が変動、すなわち、調湿機能に寄与している部

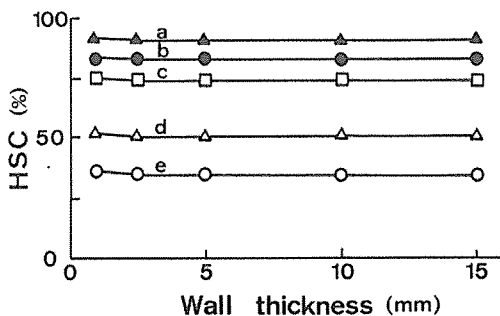


Fig. 5 Change in HSC with wood wall thickness at various WA/RV ratio.
Temp. change: $6.0\text{--}12.4^\circ\text{C}$
 $WA/RV [\text{m}^2/\text{m}^3]$: a: 4.2, b: 2.1, c: 1.3, d: 0.6, e: 0.3

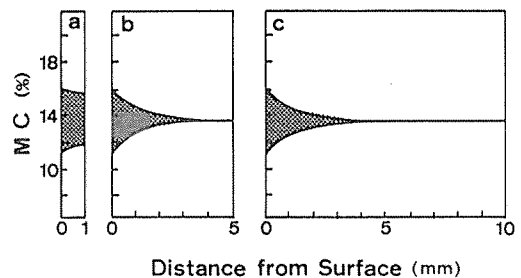


Fig. 6 Range of moisture content oscillation in wood wall.
Temp. change: $6.0\text{--}12.4^\circ\text{C}$
Wall thickness: a: 1mm , b: 5mm , c: 10mm

分は、厚い板であっても表面から3mm程度までであることがわかる。

5.5 表面伝達係数の影響

上で述べたモデル居住空間において、木材面率と木材の表面伝達係数 S の値を変え、空間内の湿度変動のシミュレーションを行ない、様々な木材面率での木材の S と調湿係数の関係を調べた。

結果を Fig. 7 に示す。図から S が大きくなるにしたがって調湿機能は高くなり、また木材面率が小さいときの調湿係数が、木材面率の大きいときの調湿係数に近づくことがわかる。

ここで、前述したように木材の S は雰囲気風の風速に大きく影響を受けるので、空間内に十分な空気の流れを与えると、少ない木材率でも効果的に居住空間の湿度を調節することができるということがいえる。

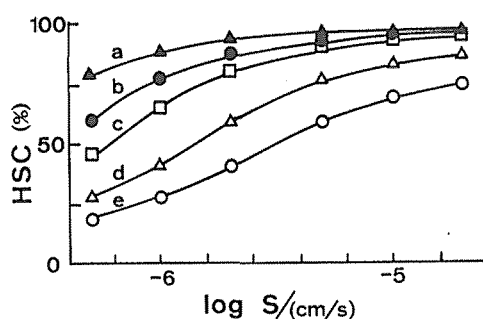


Fig. 7 Change in HSC with surface emission coefficient S at various WA/RV ratio.
Temp. change: 6.0-12.4 °C
 WA/RV [m^2/m^3]: a: 4.2, b: 2.1, c: 1.3, d: 0.6, e: 0.3

6. 結論

木材が置かれた閉じられた空間における短期間（2～3日）の湿度変動は、木材に対して次に示すような条件を与えて、差分法を用いたモデルでシミュレーションを行なうことができる。ここで、木材の拡散係数は初期条件として、この期間での平均温度、木材の平均平衡含水率に対応する一定の値を用いることができる。また、木材の表面伝達係数は雰囲気風の風速の影響を大きく受けるが、空気の動きがない空間では $1.5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ の値を用いるとよい。

木材が置かれた空間と木材が存在しない空間における湿度変動をシミュレーションによって比較すると、空間内に置かれた木材の湿度調節機能を評価することができる。この結果、次のようなことが明らかとなった。

1) 木材の湿度調節機能は、空間に存在する木材の吸放湿面の面積とともに高くなるが、 WA/RV が $3m^{-1}$ 以上になると飽和する傾向にある。

2) 空間内に置かれた木材内で含水率が変動する部分は、空間内に存在する木材の吸放湿面の面積によらず各木材で表面から数mm以内であり、表面からの距離を決まった値以上増しても、木材の湿度調節機能は高くない。

3) 木材の湿度調節機能は、雰囲気風の風速が大きくなるにしたがって高くなり、また木材の吸放湿面の面積が小さいものと大きいものの差が小さくなる。

引用文献

- 1) 岡野 健：木材と居住性—八王子試作住宅の調査から—。木材工業。33(10)。418-423, 1978
- 2) 牧 福美・則元 京・青木 務・山田 正：内装材料の調湿機能の評価。木材工業。36(10)。476-480, 1981
- 3) DROIN, A.; J.L. TAVERDET; J.M. VERGNAUD: Modeling the kinetics of moisture adsorption by wood. Wood Sci. and Technol., 22, 11-20, 1988
- 4) DROIN-JOSSERAND, A.; J.L. TAVERDET; J.M. VERGNAUD: Modeling the adsorption and desorption of moisture by wood in an atmosphere of constant and programmed relative humidity. Wood Sci. and Technol., 22, 299-310, 1988
- 5) 佐道 健：木材の吸・脱湿過程のコンピュータ・シミュレーション：京都大学農学部演習林報告。61。310-318, 1989
- 6) CRANK, J.: The Mathematics of Diffusion. Oxford Univ. Press, pp 186-189, 1956
- 7) CHOONG, E.T.; C. SKAAR: Diffusivity and surface emissivity in wood drying. Wood and Fiber. 4, 80-86, 1972
- 8) NEWMAN, A.B.: The drying of porous solids: Diffusion and surface emission equations. Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 27, 310-333, 1931
- 9) CHOONG, E.T.: Diffusion coefficients of softwoods by the steady-state and theoretical methods. Forest Products J. 15(1), 21-27, 1965
- 10) ROSEN, H.N.: The influence of external resistance on moisture adsorption rates in wood. Wood and Fiber. 10(3), 218-228, 1978
- 11) AVRAMIDIS, ST.; J.F. SIAU: An investigation of the external and internal resistance to moisture diffusion in wood. Wood Sci. and Technol. 21, 249-256, 1987

Résumé

The humidity control function of wood was studied by means of computer simulation based on a numerical method with finite differences, when wood was laid in a closed space. The humidity changes in a closed space were calculated under actual hourly temperature oscillation for 2-3 days. Although the diffusion coefficient of wood, D , changes with temperature and moisture content of wood, we can use a constant value of D corresponding to the average temperature and equilibrium moisture content during the period for the calculation. A good agreement was obtained between experimental and calculated values when a surface emission coefficient, S , of 1.5×10^{-6} cm/s was used under windless condition.

Simulation of humidity changes in a model room of $3.6\text{m} \times 2.7\text{m} \times 2.4\text{m}$ with various area of wood surface was carried out under a condition without ventilation and the humidity changes were compared with that without wood surface. From the comparisons of ranges of humidity change in a day between the rooms with and without wood wall, the humidistat coefficient HSC was calculated for various conditions. The HSC value increases with increasing wood surface area, but tends to saturation over $3\text{m}^2/\text{m}^3$ in wood surface area/room volume (WA/RV) ratio. Wood wall thicker than 1mm is enough to control the humidity change corresponding to daily temperature fluctuation. Air movement in a room accelerates the humidity control function.