

平成21年 3月 31日現在

研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18560585  
 研究課題名（和文） 局所水分非平衡理論に基づく熱水分同時移動計算を用いた  
 室内湿度変動予測に関する研究  
 研究課題名（英文） Calculation of indoor humidity fluctuation with simultaneous  
 heat and moisture transfer model theory-based nonequilibrium  
 moisture transfer  
 研究代表者  
 大澤 徹夫 (OHSAWA TETSUO)  
 岐阜工業高等専門学校・名誉教授  
 研究者番号 60024270

## 研究成果の概要：

8種類の木材の吸放湿性能について、その特徴を湿度ステップ変動による実験から数式化することで明らかにした。また、これまで一定値として扱われていた試料表面湿気伝達率を、試料の蒸発潜熱による温度変化を加味した上で実験法を検討・実施し、非線形であることを明らかにした。これら物性値を用い局所非平衡理論に基づいて湿度のステップ変動のシミュレーションプログラムの作成を行い、実験値と推定値への影響を検討した結果、高湿度域では、予測値への影響が認められた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,600,000	0	2,600,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	300,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 ・ 建築環境・設備

キーワード：湿気伝達率，局所非平衡，吸放湿，シミュレーション，湿気容量，木材

### 1. 研究開始当初の背景

近年、空調機器などのエネルギー効率向上などのため、住宅の高気密・高断熱化が進んでいる。また、ビニルクロスなどの吸放湿性の乏しい材料がよく使われるようになり、室内湿度変動の拡大をもたらしている。その結果、室内の過乾燥や結露障害などが発生し、人体や建築躯体に対して悪影響を及ぼすことが指摘されている。そこで、パッシブな湿度調整手法として、高い吸放湿性能を持つ多孔質性建築材料の利用が注目されている。そのため、多孔質吸放湿材料の物性値の整備、より精度の高い室内湿度変動シミュレーション法の開発、さらに材料の吸放湿特性を考慮した湿度変動予測や評価方法の確立の要求が高まっている。

### 2. 研究目的

本研究は、多種類の木材（桧、Red Wood(セコイア)、White Wood(トウヒ)、タモ、米楯、米松、ゴム、アルダー)を対象とし、実験により各湿度域における平衡含水率を求め、そこから平衡含湿率曲線および湿気容量を算出し、材料の特性を把握する。また、実験時の湿度ステップ変動時の応答特性から、材料の吸放湿過程の非平衡性の指標である局所湿気伝達係数について、非線形化するプログラムを構築し、シミュレーションの高精度化を進める。さらに、恒温恒湿槽における実験により、これまで一定値として扱われていた試料表面湿気伝達率の算出を材料の蒸発潜熱による冷却効果を考慮した上で行い、湿度のステップ変動実験を同率を非線形化してシミュレートし、実験値と比較することで、シミュレーション結果への影響について検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 各種木材の吸放湿実験

多種木材の吸放湿特性に関する実験は、図1に示す装置を用い、デシケータ内の相対湿度を各種塩類の飽和水溶液によってステップ変動させ、試験体(9cm×9cm×2cm)を直方体型にし、木口面を主たる2面にとり周囲を4面は防水・防湿アルミテープにより断湿したものを試料とした。試料重量は電子天秤(日本シイベルヘグナー PG803)で計測する。実験は25°Cの恒温室内に設置されたデシケータ内で

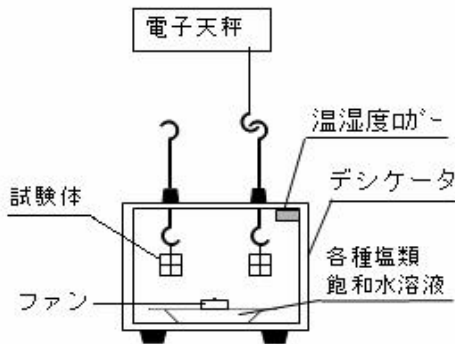


図1 吸放湿実験装置

行い、湿度調整のために6種類の塩基の飽和水溶液を用いて相対湿度を0、11、33、53、75、86、97%の6段階とした。なお、絶乾重量は送風定温乾燥機(東洋製作所 DRM420DA)にて110°Cで保ち、各種木材の重量が平衡に達する段階とした。平衡含湿率は式1に示す式によって算出し、さらに湿気容量も算出する。

#### (2) 試料表面湿気伝達率算出実験

$$Wv = \frac{W - W_0}{V} \quad \begin{array}{l} W_v: \text{平衡含湿率} [\text{kg}/\text{m}^3] \\ W: \text{水分を含む材料質量} [\text{kg}] \\ W_0: \text{材料の絶乾質量} [\text{kg}] \\ V: \text{材料の容積} [\text{m}^3] \end{array}$$

(式1)

試料表面湿気伝達率 $\alpha'$ は、試料表面の濡れ面からの水分蒸発量を計測することで求める。実験装置は図3の分留式精密温湿度発生装置(神栄製 SHR-1R135)を使用した。

試験体は図3に示す通り、水分蒸発時に蒸発潜熱による冷却効果で温度低下するのを防ぐために、ステンレス板で作成した発熱体をラミネートシート、アルミ板、濾紙で挟み込んだものを使用する。なお、サーモグラフィ(IRシステム社 MobIR M4)を用いて、面内温度の一様性を確認している。

発熱用ステンレス板は乾電池と接続し、1.5V~6.0Vまで電圧をかけることができる。濾紙裏には熱電対を取り付け、試料表面温度を確認する。また、濾紙面以外から水分が蒸発するのを防ぐため、試験体側面と水タンク上部はアルミテープで覆うものとする。

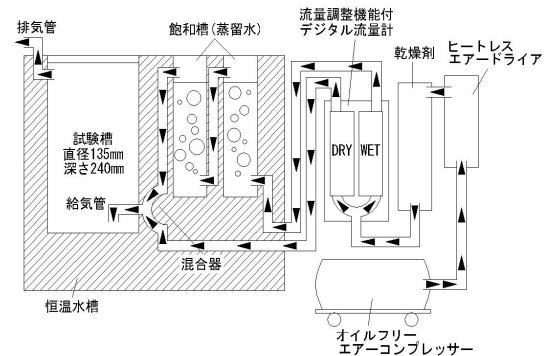


図2 精密温湿度発生装置

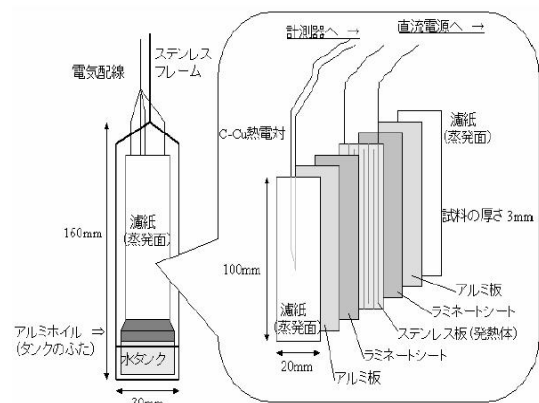


図3 濡れ面試験体

実験方法は槽内温度を23℃に設定し、試験体下部に取り付けられたタンクに水を入れ、濾紙表面を常に湿潤状態(100%RH)となるように保つ。槽内湿度を50、70、80、90、96、97、98、99%RHに設定し、各湿度での重量変化を測定する。その際、槽内温度23℃と差が生じないようにする必要があるので、試験体に取り付けられた熱電対で試料表面温度を確認し、低下した場合は試験体に電圧をかけ、槽内温度と同様になるまで加熱する。

実験槽内、試料表面温度より大澤の飽和水蒸気圧近似式を用いてそれぞれの飽和水蒸気圧を算出する。算出した各飽和水蒸気圧に実験槽内、試料濡れ面(100%RH)の相対湿度を乗じ、各水蒸気圧を算出する。

$$f_{sw} = \{EXP((18.8080 \times \theta_1) / (\theta_1 + 237.54))\} \times 133.32 \quad (式2)$$

$$f_{sa} = \{EXP((18.8080 \times \theta_2) / (\theta_2 + 237.54))\} \times 133.32 \quad (式3)$$

$$fa = (f_{sa} \times RH) / 100 \quad (式4)$$

f<sub>sw</sub>: 濡れ表面飽和水蒸気圧 [Pa]

f<sub>sa</sub>: 外気飽和水蒸気圧 [Pa]

$\theta_1$ : 試料濡れ面温度 [°C]

$\theta_2$ : 実験槽内温度 [°C]

f<sub>a</sub>: 外気水蒸気圧 [Pa]

RH: 実験槽内相対湿度 [%]

単位面積、時間当たりの蒸発量M[g/m<sup>2</sup>・h]を濡れ面の飽和水蒸気圧f<sub>sw</sub>と外気水蒸気圧f<sub>sa</sub>との水蒸気圧差[Pa]で除すことで、試料表面湿気伝達率 $\alpha'$ [g/m<sup>2</sup>・Pa・h]を算出する。

$$\alpha' = M / (f_{sw} - f_{sa}) \quad (式5)$$

$\alpha'$ : 試料表面湿気伝達率 [g/m<sup>2</sup>・h・Pa]

M: 単位時間あたりの平均蒸発量 [g/m<sup>2</sup>・h]

(3) 各種木材の吸湿過程のシミュレーション

木材の吸放湿実験により算出した値を用いて局所湿気伝達係数を非線形化するプログラムを構築し、シミュレーションの高精度化を進める。シミュレーションにはFORTRANを用い、熱伝導及び湿気伝導には以下の1次元熱・水分同時移動方程式及び局所非平衡の式を用いた。これまでは式6に示すように、水分吸着の抵抗を表す局所湿気伝達係数 $\beta$ 、及び指数項を $\varepsilon$ と表し $\varepsilon = 1$ と仮定して計算を行っていた。しかし、吸湿量が高い領域で実験値との微小な誤差が生じていたため、この誤差を減じるために、本研究では $\beta$ と共に $\varepsilon$ の値を変化させ、曲線形状への影響を検討する。式8内の局所湿気伝達係数 $\beta$  [kg/m<sup>3</sup>・h・Pa]と

(熱流方程式)

$$C \frac{\partial \theta}{\partial t} dx = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + r \cdot C \frac{\partial Hm}{\partial t} \quad (式6)$$

(湿気拡散方程式)

$$C' \frac{\partial Hm}{\partial t} + \gamma \cdot Ca' \frac{\partial (Ps \cdot Ha)}{\partial t} = \lambda' \frac{\partial^2 (Ps \cdot Ha)}{\partial x^2} \quad (式7)$$

(局所非平衡を考慮した式)

$$\beta \{Ps \cdot (Ha - Hm)\}^\varepsilon = C' \frac{\partial Hm}{\partial t} \quad (式8)$$

Ha: 材料内空隙部の相対湿度	[RH]
Hm: 材料内実質部の相対湿度	[RH]
Ps: 飽和水蒸気圧	[Pa]
C: 材料の容積比熱	[J/(m <sup>3</sup> ・K)]
C': 材料の湿気容量	[kg/(m <sup>3</sup> ・RH)]
Ca': 材料内空隙部の湿気容量	[kg/(m <sup>3</sup> ・Pa)]
$\lambda$ : 材料の熱伝導率	[W/(m・K)]
$\lambda'$ : 材料の湿気伝導率	[kg/(m・h・Pa)]
r: 水の蒸発潜熱	[J/kg]
$\gamma$ : 材料の空隙率	[N.D.]
$\theta$ : 温度	[°C]
t: 時間	[h]
x: 材料厚さ	[m]
$\beta$ : 局所湿気伝達係数	[kg/(m <sup>3</sup> ・h・Pa)]
$\varepsilon$ : $\beta$ に関わる指数項	[N.D.]

$\beta$ に関わる指数項 $\varepsilon$  [N.D.]は、ともに左辺の空隙部と実質部の水蒸気圧差にかかる係数で水蒸気圧差と実質部水分増加量との関係は非線形性を有するものであると考えられる。これを考慮したものが $\varepsilon$ であり、 $\varepsilon$ の変化により既往の研究により算出されている $\beta$ の値も変化してくる。この組み合わせを解析することで実現象により近似した値を探す。伝熱計算には式6を、水蒸気移動の計算には局所非平衡理論に基づき式7と式8の連立方程式を用いた。これらの計算を中央差分法(クラック・ニコルソン法)で解析し、算出はトーマス法による行列計算で行った。

(4) 試料表面湿気伝達率によるシミュレーション

これまで一定値として扱われてきた線形試料表面湿気伝達率を $\alpha'$  (L)、実験により非線形化した試料表面湿気伝達率を $\alpha'$  (nL)と定義し、非線形化したことによる湿度ステップ変動シミュレーション値への影響について検討する。局所非平衡を表現する局所湿気伝達率係数 $\beta$ を用いて1次元の熱・湿気同時移動方程式を、前述の式8のようにし、境界条件は試料表面では熱湿気とも伝達条件とし、試料中央では断熱・断湿条件とする。今回は、既往の実験により求められた局所湿気伝達係数 $\beta$ を用い、実質部における水分吸着は線形モデルと仮定し、 $\varepsilon$ は1を用いた。 $\alpha'$  (nL)、吸放湿材の湿気容量C' (温度依存性は無視)は非線形係数であり、の各計算時刻での収束計算が必要であり、収束のための計算回数は事前の検討で10回とした。本シミュレーションで用いた計算プログラムのフローチャートを図4に示す。

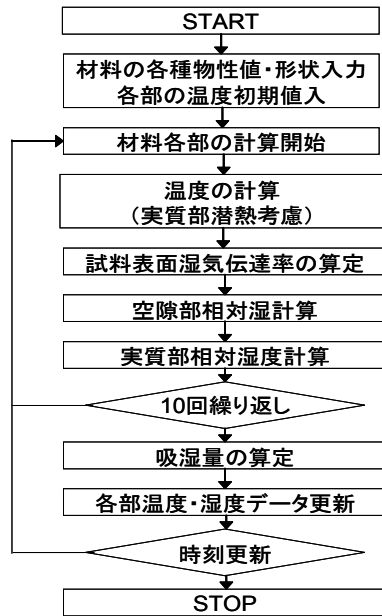


図4 計算プログラム フローチャート

4. 研究成果

(1) 平衡含湿率曲線及び湿気容量曲線の実験値と近似式による近似

相対湿度のステップ変動の実験により求めた各種木材の平衡含湿率のうち、例として4種類の吸湿・放湿過程それぞれについて図5に点で示した。また、その平均値を点線で繋いだ。平衡含湿率曲線より吸湿・放湿過程における湿気容量を算出して、図6に示し、同様に平均値を点線で示した。なお、図5、6には実験値から後述する方法により実験式を作成し、その計算値も示している。図5、6によると湿度域ごとに含湿率曲線の傾きが大きく異なり、常用湿度域では平衡含湿率は直線的な上昇を示すが、高湿度域では含湿率の伸びが大きくなっている。また、放湿過程での平衡含湿率は、吸湿過程に比べて高湿度域での傾きの差がほとんど現れていなかった。図5、6で示した平衡含湿率や湿気容量を近似式で表現できれば、任意の相対湿度においても各値の算出が可能となり、シミュレーションで活用することができる。そこで、実験値に対応する曲線を図7にある3つの曲線式を合成して式9を立てる。さらに、式9を微分して湿気容量の算出式である式10を得る。これらの式を用いて各材種ごとに係数を算出した。実用範囲である5~90%の範囲ではほぼ正確に実験値を通過している。他の材種においても同等の結果を得られており、各材種の係を一覧として表1,2に示す。

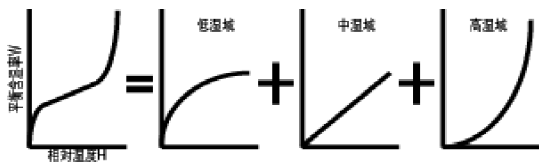


図7 近似式算出のための曲線合成

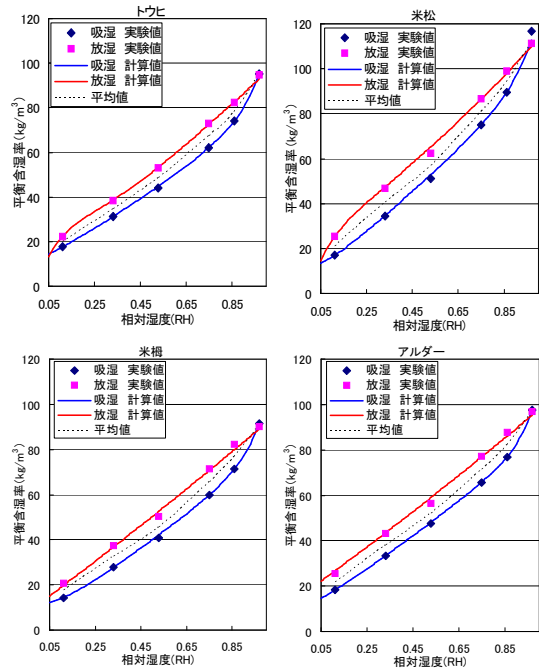


図5 各材料の平衡含湿率の実験値と近似式による計算値

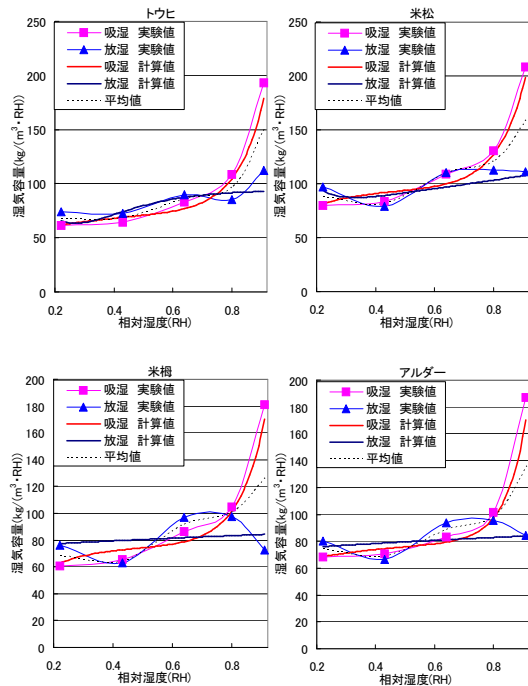


図6 各材料の湿気容量の実験値と近似式による計算値

$$W = A \cdot H + B \cdot H^N (1 - e^{-DH}) + C' (e^{EH} - 1) - m \quad (式9)$$

$$C' = A + B \cdot H^{N-1} (N + (D \cdot H - N) e^{-DH}) + C' \cdot E \cdot e^{EH} \quad (式10)$$

W : 平衡含湿率 [kg/m<sup>3</sup>]

C' : 湿気容量 [kg/(m<sup>3</sup>·RH)]

N, A, B, C, D, E : 材種別係数 [N, D]

H : 相対湿度 [RH]

表1 吸湿過程における材種別平衡含湿率及び湿気容量近似式の係数

	桧	トウヒ	タモ	ゴム
N	-1	-1	-1	-1
A	67.53	76.47	55.83	97.92
B	11.893	2.39	158930	2.0678
C	0.002394	0.000428	0.6389	0.000142
D	1.5	5	0.0001	6.1
E	9	11	4.5	12.2
	米松	米桐	アルダー	セコイア
	-1	-1	-1	-1
	96	76.56	82.45	57.71
	0.9445	0.8056	2.598	189707
	0.0007	0.000234	1.16E-05	0.090016
	12.5	15	4.5	0.0001
	10.5	11.5	14.5	6.1

表2 放湿過程における材種別平衡含湿率及び湿気容量近似式の係数

	桧	トウヒ	タモ	ゴム
N'	-1	1	1	-1
A'	485618.3	500642.2	512430.4	-528232
B'	39.812	-242.405	-308.385	5.46
C'	-8.1E+10	-8.6E+10	-8.5E+10	8.81E+10
D'	0.5	7.5	7.5	3
E'	0.000006	5.82E-06	0.000006	0.000006
	米松	米桐	アルダー	セコイア
	0	-1	-1	0
	-4034739	-1053680	-886091	84.008
	21.91489	9.004652	14.262	18.947
	4.03E+11	1.76E+11	1.48E+11	6.06E-11
	14	1.26	1.3	80
	0.000001	0.000006	0.000006	25.9

(2) 試料表面湿気伝達率の算出

試料表面湿気伝達率  $\alpha'$  と試料表面温度の関係性を槽内相対湿度の各条件で線形的な近似式を求めた(図8) 図中の各回帰直線の 23°C での値が蒸発潜熱による濡れ面の温度低下が無い状態での試料表面湿気伝達率  $\alpha'$  となる。この実験値を用いて試料表面湿気伝達率を算出する。湿気伝達率  $\alpha'$  は式11を用いて算出する。算出した湿気伝達率と水蒸気圧差の関係を図9に示す。95%RH以上(水蒸気圧差 140.5Pa以下)での試料表面湿気伝達率はこれまでの計算予測値とは異なり、水蒸気圧差が0でも0には収束せず、0.06[g/m<sup>2</sup>・h・Pa]周辺に収束するものと思われる。

試料表面湿気伝達率  $\alpha'$  算出式

$$\alpha' = -8.809799/\Delta P + 0.161703 \quad (式11)$$

$\alpha'$  : 試料表面湿気伝達率 [g/m<sup>2</sup>・h・Pa]

$\Delta P$  : 水蒸気圧差 [Pa]

(3) 局所湿気伝達係数の変化

シミュレーションの対象として3章で実験を行った木材の各湿度域でのステップ変動に対する吸放湿応答結果と比較を行う。計算条件は実験環境に基づき外気温度25°C恒温、経過時間は各湿度域での実験期間を用い、時間分割は0.05秒刻みで行う。計算で用いた諸係数の値を表3に示す。また、実験では試料両面を開放して吸放湿実験を行っている。そこで計算には試料厚の半分の値を用い、中央を完全断湿として計算することで実験値との統合を図る。分割数は10分割とした。まず、 $\epsilon = 1$ と固定し、 $\beta$ の値を変化させた吸湿過程変化を図10に示す。これによると  $\beta$ を変化さ

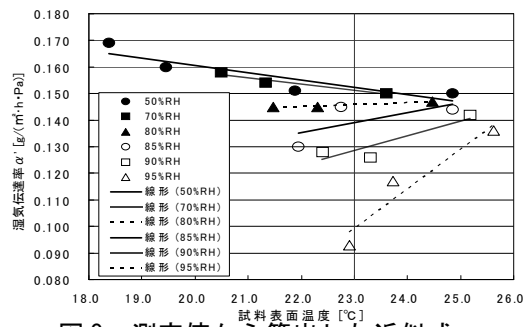


図8 測定値から算出した近似式

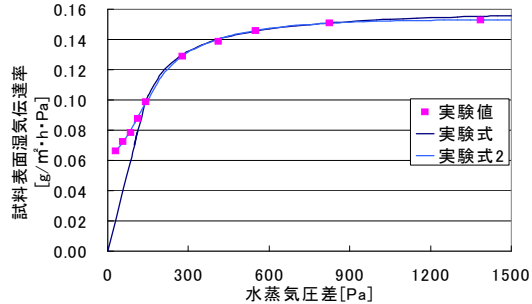


図9 試料表面湿気伝達率と水蒸気圧差

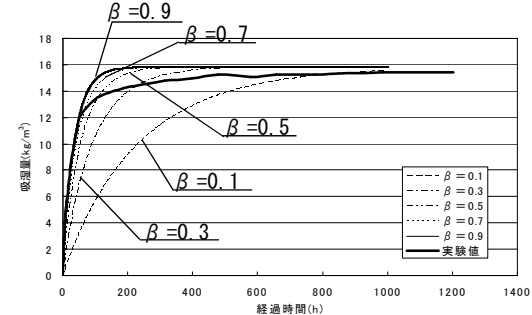


図10 betaの変化と吸湿過程変化(53→75%RH)

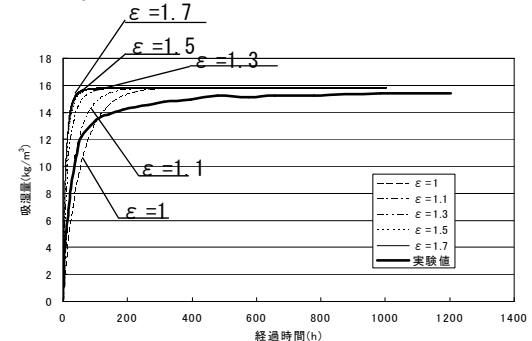


図11 epsilonの変化と吸湿過程変化(53→75%RH)

せると平衡に達するまでの時間が変化し、その変化は累乗の関係にあることがわかる。実験値の傾きに最も近い  $\beta$  を 0.1 [g/m<sup>3</sup>・h・Pa] に固定し、 $\epsilon$  を変化させたものを図11に示す。図11より  $\beta$  を変化させた図と同様の曲線形状の変化が見られる。これは湿度変動に対する応答が水蒸気圧差に依存することは確かであるが、局所非平衡理論下では解析を式6、7、8の連立方程式で繰り返し計算を行う。そのため指数項  $\epsilon$  の変化による影響も同様に現れた。また、 $\beta$  及び  $\epsilon$  と平衡に達するまでの時間との関係を図12、13に示す。図12、13より  $\beta$  及び  $\epsilon$  のどちらの係数も平衡へ達する時間との間には指数関係があることがわかる。

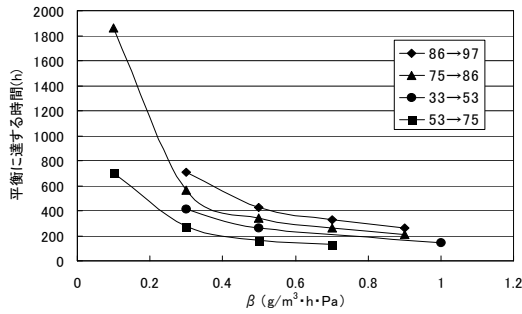


図 12 湿度域別  $\beta$  と平衡に達する時間の関係

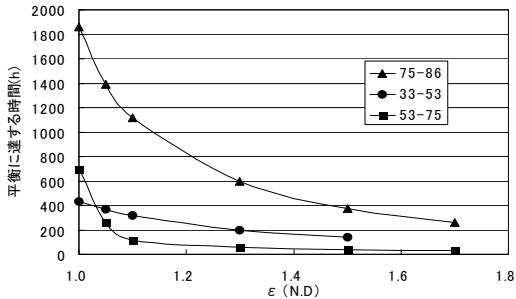


図 13 湿度域別  $\epsilon$  と平衡に達する時間の関係

表 3 計算用係数

表面熱伝達率(室内)	$\alpha$	9.3	[W/m <sup>2</sup> ·K]
表面湿気伝達率	$\alpha'$	0.075	[g/m <sup>2</sup> ·h·Pa]
空隙部湿気容量	$Ca'$	0.00000728	[kg/m <sup>3</sup> ·Pa]
潜熱係数	$\gamma$	0.698	[kcal/g]
空隙率	$r$	0.7	[N.D]
木口面熱伝達率	$\lambda$	0.14	[W/m <sup>2</sup> ·K]
木口面湿気伝達率	$\lambda'$	0.02142	[kg/m <sup>2</sup> ·h·Pa]
容積比熱	$C$	734.7	[kJ/m <sup>3</sup> ·K]

(4) 試料表面湿気伝達率を非線形とした場合の材料内水分吸着量シミュレーション

作成した本シミュレーションプログラムに(2)で求めた  $\alpha'$  (nL) と  $\alpha'$  (L) を用いた場合のそれぞれの解析結果の比較、また、 $\alpha'$  (nL) を用いた場合の解析結果と既往の実験との比較を行う。そのため、シミュレーションでは既往の実験とほぼ同一条件で、厚さ方向の1次元計算を想定したモデルとなっている。計算では、厚さ 0.68 mm の杉板を 10 分割して各要素の温湿度を計算している。空気温度は 25 °C で固定し、吸湿過程の 5 段階 (0 → 20、20 → 40、40 → 60、60 → 80、80 → 95% RH) にステップ変動した場合の材料内実質部における水分吸着量を計算により算出する。これまでは、湿気容量  $C'$  を一定値とし、各相対湿度域での平均湿気容量を採用していたが、本シミュレーションではより実現に近い結果を得るため、直接式に相対湿度を代入することで湿気容量  $C'$  を算出した。なお、クラック・ニコルソン法を用いた本シミュレーション結果の妥当性については、陰解法を用いた解析結果は妥当であると判断している。

各相対湿度ステップ変動区間における  $\alpha'$  (nL) と  $\alpha'$  (L) の水分吸着量の時間経過に伴う差を図 14 に示す。最大差は、0 → 20%RH では 15.2g/m<sup>3</sup>、20 → 40%RH では 4.1g/m<sup>3</sup>、40 → 60%RH では 2.9g/m<sup>3</sup>、60 → 80%RH では 3.2g/m<sup>3</sup>、

80 → 95%RH では 4.7g/m<sup>3</sup> であった。これら水分吸着量差は、 $\alpha'$  (nL) 算出に起因する空気と材料表面の水蒸気圧差の影響と考えられる。特に、水分吸着量差の大きい 0 → 20%RH、80 → 95%RH ステップ区間は、吸放湿性能を示す湿気容量の値が他相対湿度域と比較し、高い値を示している。これは、材料が盛んに水分吸着を行うことを意味し、この水分吸着が材料表面の相対湿度や温度(潜熱の影響による)を変化させ、それらの要因が水蒸気圧差に影響を与え水分吸着量に差が生じたと言える。しかし、他相対湿度域においては上述の相関が見られなかった。

今回行ったシミュレーションの環境下では、温度の変動はないものとして計算を行った。しかし、実現象においては空気の温度や相対湿度は随時変動し、それに伴い水蒸気圧差が変化するため、今回行ったシミュレーション環境下では考慮していない、急激な環境変化が発生する。つまり、実現象で起こりうる急激な環境変化に対しては、 $\alpha'$  (nL) と  $\alpha'$  (L) の差異による水分吸着差を考慮することは精度の高い湿度予測モデル確立に有効であると考えられた。

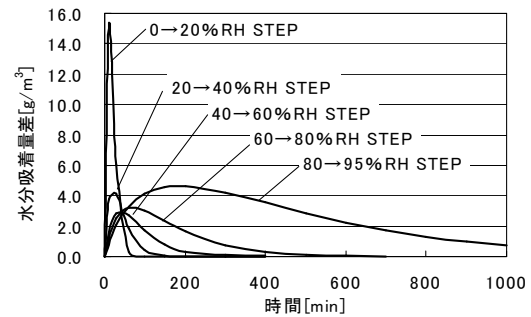


図 14 非線形試料表面湿気伝達率と線形試料表面湿気伝達率の水分吸着量差

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

野瀬 暁則, 大澤 徹夫, 青木 哲: 各種木材木口面の吸湿性能に関する実験的研究、空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会論文集, 第 8 号, pp. 61-64, 2007. 3, 査読無 [学会発表] (計 1 件)

難波 拓也, 大澤 徹夫, 青木 哲, 土川 忠浩, 水谷 章夫, 多孔質建築材料の吸放湿特性に関する研究 試料表面湿気伝達率が吸放湿予測計算に及ぼす影響評価, 日本建築学会, 2009 . 9. 18, 広島大学

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

大澤 徹夫 (OHSAWA TETSUO)

岐阜工業高等専門学校・名誉教授

研究者番号: 60024270

(2) 研究分担者

青木 哲 (AOKI TETSU)

岐阜工業高等専門学校・建築学科・准教授

研究者番号: 80321438