

建築仕上げ材の吸放湿特性に関する研究

香川職業能力開発短期大学校

宮本 欣明・内間 文顕

Study on Moisture Absorption and Desorption of Building Finishing Materials

Yoshiaki MIYAMOTO, Bunken UCHIMA

要約 建築物の高気密化が進む今、内装仕上げ材の調湿性能を知ることは、快適な室内環境を計画するうえで不可欠なことと思われる。

本研究は、建築仕上げ材の吸放湿特性を知ることが目的とし、6種の素材（普通合板、準不燃石膏ボード、米すぎ、米ひ、モルタルおよび土壁）にて厚さおよび表面仕上げの種類などを変え試験体を作成し、各種環境変化に伴う経過時間ごとの吸放湿量を測定した。実験にて各建築仕上げ材の、1)相対湿度急変に伴う吸放湿特性、2)1日の温湿度変化に伴う吸放湿特性を知ることができた。また、併せて理論解析を行い実験値との良好な一致を確認するとともに、壁体の調湿作用についてのシミュレーションを行った。

I はじめに

古くから我が国の住まいは、高温多湿の夏を旨とし、調湿性能に優れた木材、紙および土などの自然材料を使用してきた。また、通風を良くし多湿を防ぐ目的で高床とし、あるいは間仕切りを少なくし開口部を多く設けるなどきわめて開放的な造りであった。

しかし、最近の住まいは、コンクリート・アルミサッシ・金属パネルなどの普及により、また防音・断熱に対する対策により、外壁の気密性能が向上してきた。一方、内装仕上げ材は、施工性、経済性、美観および維持管理の面から選択され、調湿性能の劣るビニールクロス、石膏ボードおよび表面に樹脂加工を施した建築材料などが多用されるようになってきた。

それに伴い、室内の温度は、冷暖房機器によって容易に調整可能となったが、湿度に関しては無対策で、より湿害の発生しやすい環境になっている¹⁾。内装仕上げ材に大きな調湿効果が期待できれば、より快適な相対湿度の確保が可能であろう。

本研究は、温湿度変化に伴う各種建築仕上げ材の吸放湿特性を実験にて知り、併せて、建築仕上げ材の吸放湿を1次元の物質移動とみなした理論解析法を提示

することを目的とする。

II 実験概要

1. 試験体の種類および形状

試験体の種類を表1に示す。試験体寸法は400mm×250mmとし、小口からの吸放湿防止のために側面にシリコンを塗り、下面はプラスチック板に固定させ上面だけで吸放湿するようにした。

2. 実験方法および実験条件

図1に実験装置を示す。恒温恒湿器内を所定の温度および相対湿度に設定し、電子天秤にて経過時間ごとの試験体の質量を測定した。用いた電子天秤の精度は、0.1gである。

本研究の実験条件は以下の通りである。
実験(1)：温度30℃一定、相対湿度を50%→80%に急変
実験(2)：高松における晴れの日（9月20日～10月10日）
の時刻別平均気温および平均相対湿度に設定
図2に設定温湿度を示す。

なお、実験(1)では30℃50%、(2)では午前0時の温湿度にて、試験体の質量が平衡状態に達した後、実験を開始した。

表1 試験体の種類

	普通合板	P.B	米ひ	米すぎ	モルタル	土壁
厚さ(mm)	4, 12	9, 12	10, 20	10, 20	10	10, 20
表面仕上げ材	ビニールクロス 布クロス 塗装	布クロス	-	-	-	じゅらく(厚 2.5mm)
備考	表2		表3		表4	配合(容積比) 田土:山土:藁すさ 2:1:1

(注) P.B : 準不燃石膏ボード

表2 使用材料

普通合板(4mm)	津田木材 JAS認定P01-94号
普通合板(12mm)	東洋テックス コンクリート型枠用合板
石膏ボード(9・12mm)	パナソニック 準不燃石膏ボード
塗料	大日本塗料 合成樹脂珪藻土塗料 塗装量: 約99g/m ²
布クロス	サンゲツ SG1693 厚0.6mm
ビニールクロス	サンゲツ No. 5541 厚0.4mm
じゅらく	四国化成 ジョラックス・A JIS A 6909

表3 木材の性質

	木目	年輪幅 mm	気乾比重
米ひ 10mm	板目	2.4	0.50
米ひ 20mm	板目	0.8	0.51
米すぎ 10mm	板目	4.2	0.38
米すぎ 20mm	板目	1.8	0.39

表面は、電気かんな仕上げとする

表4 モルタルの性質

容積比	W/C(%)	比重
1:1	28	2.21
1:2	48	2.19
1:3	80	2.10
1:4	109	2.03

比重は、30℃、50%平衡時の値
セメント: 普通ポルトランドセメント
砂 : 表乾比重 2.56
吸水率(%) 2.03
粗粒率 2.51

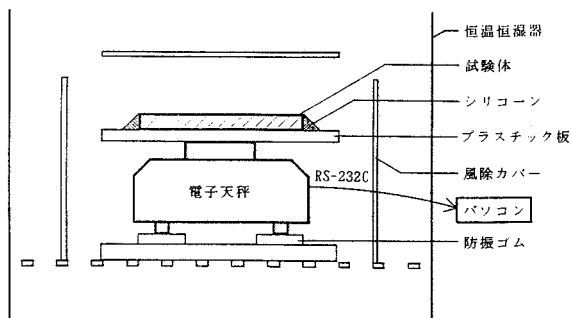


図1 実験装置

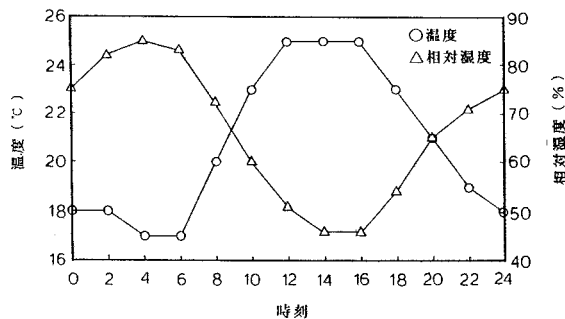


図2 時刻別の設定気温と相対湿度

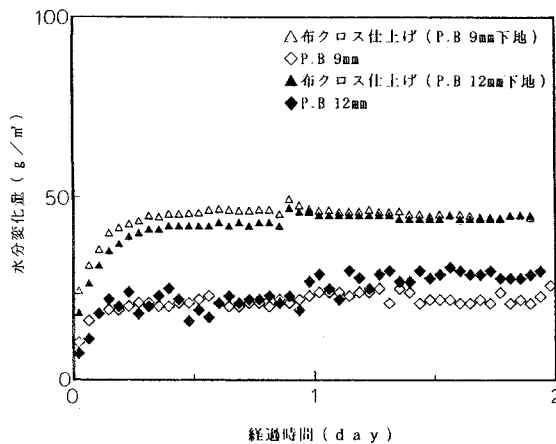


図3 P.Bを用いた仕上げ材の吸湿実験結果

III 実験結果および考察

1. 実験(1)の吸湿特性

1. 1 準不燃石膏ボード (以下P. Bと略記) を用いた仕上げ材の吸湿特性

P. B (9mm、12mm) 素地およびそれらを下地とし布クロス仕上げを施した試験体の実験結果を図3に示す。素地においては、実験開始後2時間での水分変化量は、9mmおよび12mmとも $17\text{g}/\text{m}^2$ となり、4時間後には、ほぼ平衡状態に達した。そして、24時間後には、それぞれ $23\text{g}/\text{m}^2$ の吸湿量を示した。厚さによる特性差はみられず、表面の原紙のみが吸放湿を行い、石膏自体の吸放湿性能はほとんどないといえる。

次に、布クロス仕上げを施した試験体においては、実験開始直後の水分変化量は大きく、2時間後に9mmおよび12mmとも $29\text{g}/\text{m}^2$ となり、8時間後には、ほぼ平衡状態に達した。そして、24時間後には、9mmでは $47\text{g}/\text{m}^2$ 、12mmでは $49\text{g}/\text{m}^2$ の水分変化量を示した。

P. Bを下地とした仕上げは、石膏自体に吸放湿性能がないため、その吸放湿特性は、表面の仕上げ材の吸放湿特性により決まる。

1. 2 米ひおよび米すぎの吸湿特性

米ひ(10mm,20mm)および米すぎ(10mm,20mm)の実験結果を図4に示す。

米ひにおいては、実験開始後2時間での水分変化量は、10mmおよび20mmとも $13\text{g}/\text{m}^2$ とP. B素地より小さい値を示した。また、ほぼ3日までは同じ吸湿特性を示し、厚さの影響が現れるのはそれ以降である。15日経過時点では、10mmでは $180\text{g}/\text{m}^2$ 、20mmでは $248\text{g}/\text{m}^2$ と大きい水分変化量を示し、両者ともまだ平衡状態に達していない。

米すぎにおいては、実験開始後2時間での水分変化量は、10mmおよび20mmとも、 $9\text{g}/\text{m}^2$ と米ひの約7割の値を示した。また、ほぼ5日までは、同じ吸湿特性を示し、厚さの影響が現れるのは、それ以降である。15日経過時点では、10mmでは $81\text{g}/\text{m}^2$ 、20mmでは $122\text{g}/\text{m}^2$ と、米ひの約1/2の水分変化量を示し、20mmはまだ平衡状態に達していない。

米ひは、米すぎに比べ湿度変化後の初期勾配 (単位時間当たりの水分変化量) が大きく、また湿気容量も大きい。

1. 3 普通合板を用いた仕上げ材の吸湿特性

普通合板 (4mm、12mm) 素地およびそれらを下地とし塗装仕上げ、ビニールクロス仕上げおよび布クロス仕上げを施した試験体の実験結果を図5に示す。

素材と布クロス仕上げを比較すると、実験開始後1時間での水分変化量は、下地厚さに関わらず布クロス仕上げでは $18\text{g}/\text{m}^2$ 、素材では $12\text{g}/\text{m}^2$ と布クロスの調湿性能が優れている。24時間経過時での水分変化量は、素材、布クロス仕上げに関わらず厚4mmでは $53\text{g}/\text{m}^2$ 、厚12mmでは $78\text{g}/\text{m}^2$ と同じ値を示し、それ以降は、ほぼ同じ特性を示した。厚4mmは3日時点でほぼ平衡状態に達したが、12mmは6日時点でも吸湿を続けている。

塗装仕上げおよびビニールクロス仕上げでは、実験初期の単位時間当たりの吸湿量は約 $1\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ と少なく、水分変化量に下地厚さの影響が現れるのは、2日目以降と遅い。

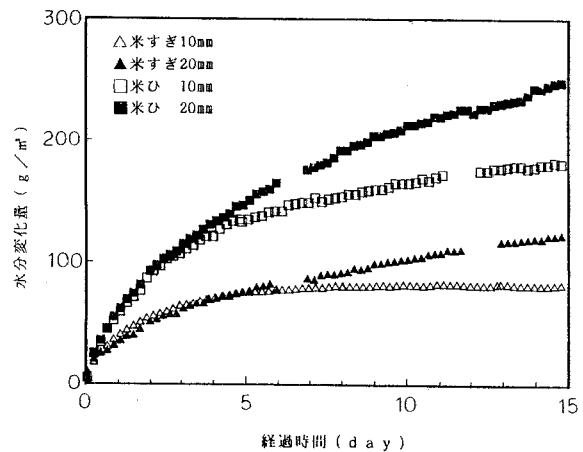


図4 米ひ・米すぎの吸湿実験結果

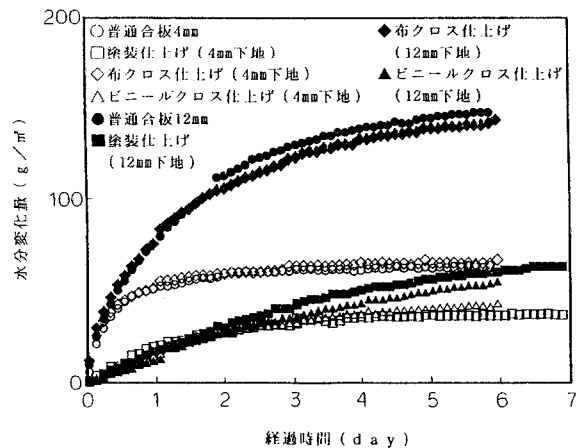


図5 普通合板を用いた仕上げ材の吸湿実験結果

1. 4 モルタルの吸湿特性

モルタル金ごて仕上げ（厚10mm、容積比 1:1 1:2 1:3 1:4）の実験結果を図6、7に示す。

実験開始後2時間での水分変化量は、それぞれ $7\text{g}/\text{m}^2$ 、 $10\text{g}/\text{m}^2$ 、 $11\text{g}/\text{m}^2$ 、 $15\text{g}/\text{m}^2$ 、また24時間で $31\text{g}/\text{m}^2$ 、 $35\text{g}/\text{m}^2$ 、 $36\text{g}/\text{m}^2$ 、 $43\text{g}/\text{m}^2$ と、初期においては砂の容積比率が高いほど、言い換えれば水セメント比が大きい程、高い値を示した。これは、水セメント比が大きい程、空隙率は高くなり、水蒸気の拡散による移動が行われやすいためと考えられる。長期では逆に、水セメント比の小さい試験体の伸びが顕著である。

図8に経過時間ごとの水セメント比と水分変化量の関係を示す。

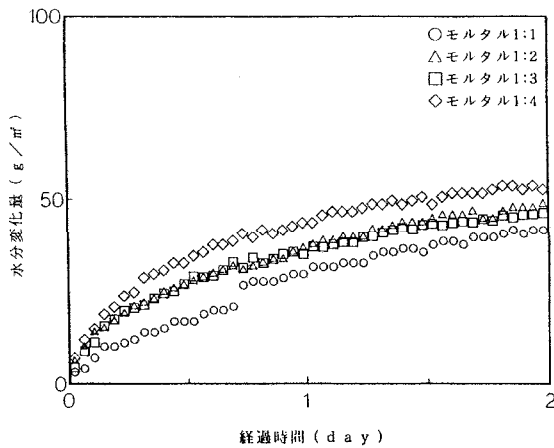


図6 モルタルの吸湿実験結果（短期）

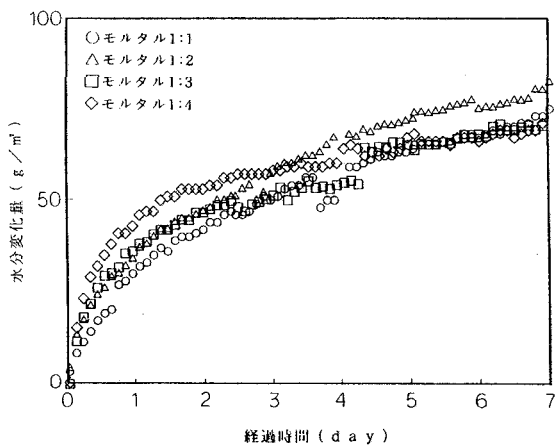


図7 モルタルの吸湿実験結果（長期）

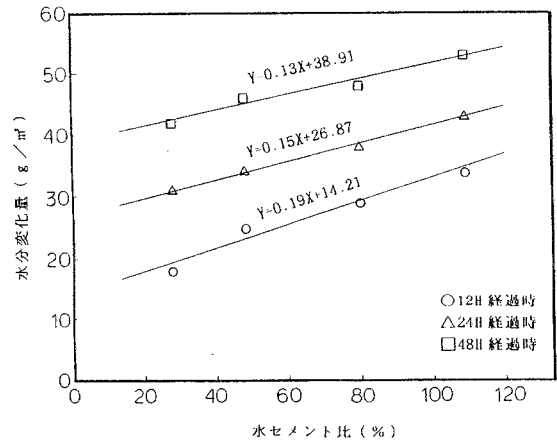


図8 水セメント比と水分変化量の関係

1. 5 土壁を用いた仕上げ材の吸湿特性

土壁(10mm,20mm)素地およびじゅらく仕上げ（土壁10mm,20mm下地）の実験結果を図9に示す。

土壁素地において、実験開始後2時間での水分変化量は $45\text{g}/\text{m}^2$ と、今回実験中最も大きい値を示した。

厚さの影響は約10時間で現れ、10mmは約24時間で、20mmは約72時間でほぼ平衡状態に達した。平衡時の吸湿量は、10mmで $118\text{g}/\text{m}^2$ である。

じゅらく仕上げは、初期勾配が土壁素地に比べ若干小さい。平衡時における土壁との吸湿量の差は、じゅらく部分の吸湿量を示す。

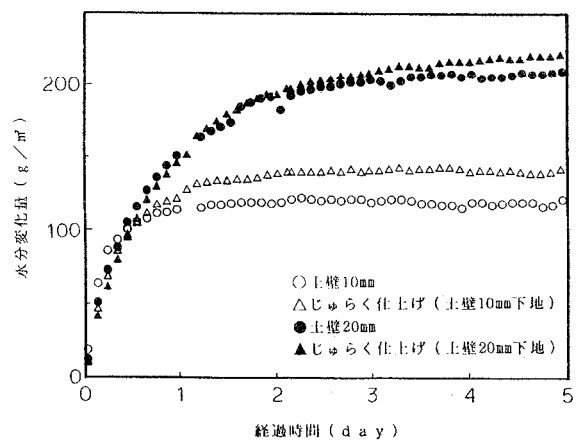


図9 土壁を用いた仕上げ材の吸湿実験結果

1. 6 各仕上げ材の吸湿特性比較

各素材（P.B12mm、普通合板12mm、米ひ10mm、米すぎ10mm、モルタル（1:3）10mm、土壁10mm）、ビニールクロス仕上げ（普通合板12mm下地）および布クロス仕上げ（P.B12mm下地）の相対湿度急変後12時間までの実験結果を図10に、また長期にわたる実験結果を図11に示す。

土壁は、他の材に比べ初期勾配が大きく早期に平衡状態に達し、湿気容量も大きい。木質系の普通合板および米ひは、初期勾配で布クロス仕上げ（P.B下地）に劣るが、長期では土壁の吸湿量を上回っている。しかし、米すぎは、モルタル（1:3）とほぼ同じ吸湿特性しか示さない。P.Bは木質系と同等の初期勾配であるが、早期に平衡に達し、湿気容量の低さが顕著である。

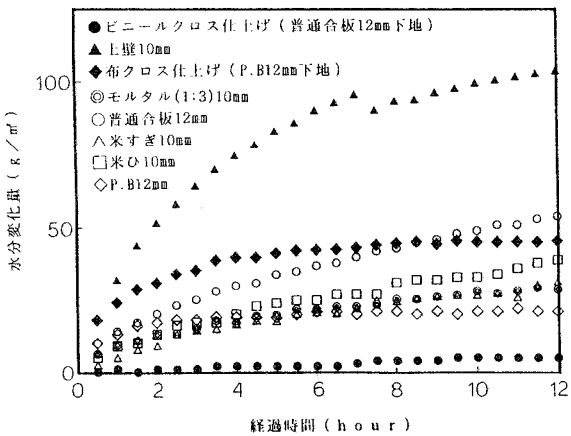


図10 各仕上げ材の吸湿実験結果の比較（短期）

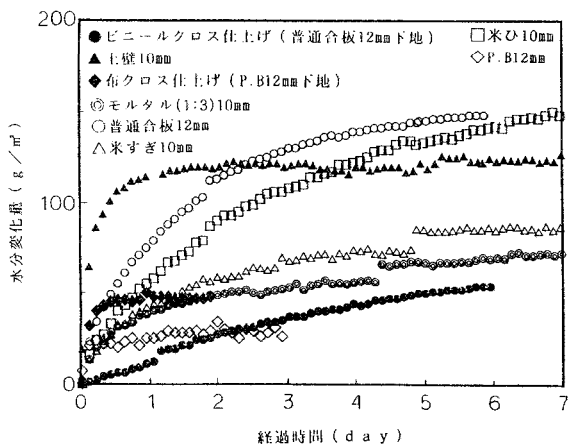


図11 各仕上げ材の吸湿実験結果の比較（長期）

2. 実験(2)の吸放湿特性

P.B、木質系素地、普通合板および土壁での実験結果を図12～15に、各仕上げ材の比較を図16に示す。各材ともほぼ7時から18時にかけて放湿し、18時から7時にかけて吸湿を行い、7時頃に最大吸湿量を、また18時頃に最大放湿量を示している。これは、最高・最低蒸気分圧を示す時刻より約3時間ずれている。

普通合板4mmと12mmに厚さの影響は見られない。また、土壁10mmと20mmも同様である。布クロス仕上げは、P.B下地と普通合板下地にかかわらずほぼ同じ吸放湿特性を示している。

1日の環境変化に対して、最も調湿性能に優れているのは土壁であり、以下布クロス仕上げ、木質系、モルタル、P.Bであり、ビニールクロス仕上げおよび塗装仕上げは、調湿を行わない。

表5に各仕上げ材の1日における吸湿量・放湿量および9時～16時における単位時間当たりの放湿量を示す。

表5 1日における各仕上げ材の吸放湿の特性

	1日における吸湿量および放湿量 (g/m²)	9～16時における単位時間当たりの放湿量 (g/m² h)
土壁 (10mm)	42	16
じゅらく (土壁10mm下地)	33	12
布クロス (P.B12mm下地)	27	8
布クロス (合板12mm下地)	24	8
米ひ (10mm)	21	7
普通合板 (4mm)	18	6
普通合板 (12mm)	17	6
米すぎ (10mm)	17	5
モルタル1:3 (10mm)	14	4
P.B (12mm)	12	4
塗装 (合板12mm下地)	0	0
ビニールクロス (同上)	0	0

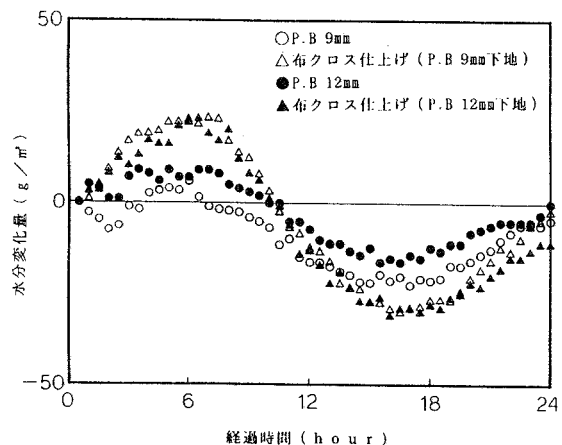


図12 P.Bを用いた仕上げ材の1日における吸放湿実験結果

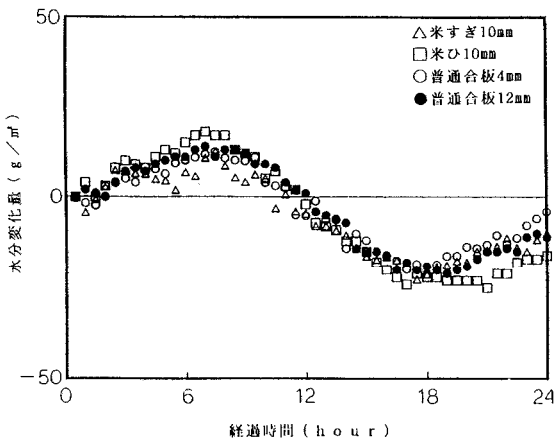


図13 米ひ・米すぎ・普通合板の1日における吸放湿実験結果

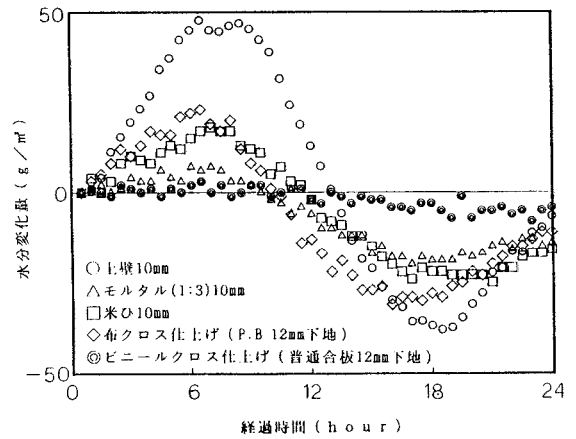


図16 各仕上げ材の1日における吸放湿実験結果の比較

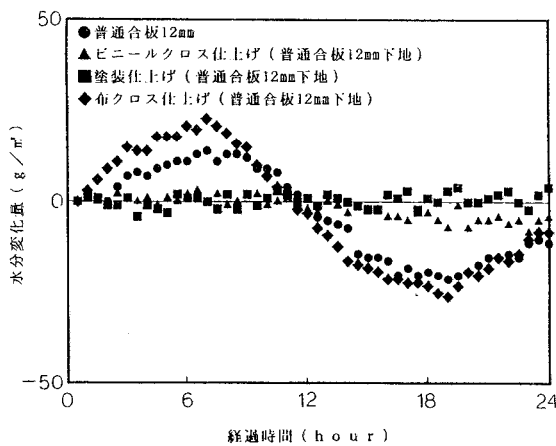


図14 普通合板を用いた仕上げ材の1日における吸放湿実験結果

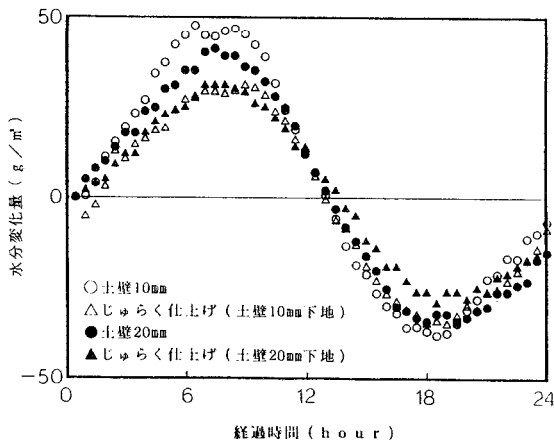


図15 土壁を用いた仕上げ材の1日における吸放湿実験結果

IV 理論解析

1. 物理モデルおよび解析

一般に個体内に含まれる水分量には、液相水分と水蒸気水分に大別できる。更に、液相水分は化学的（吸蔵水）、物理的（吸着水、オスモティック水）、機械的（毛細管水）に小別される。化学的、物理的結合水はその結合エネルギーが極めて高く、特に吸蔵水と吸着水は常温、常圧の下ではほとんど移動することはない。このことから、個体内の水分移動は機械的結合水と個体内の空隙に存在する水蒸気がほとんどである。また、材料の含水率が小さいとき（相対湿度90%以下）固体内の水分移動は水蒸気の拡散が支配的となる¹³⁾。金属・ガラス・プラスチックなどの非透湿材料を除けば、建築材、断熱材の大部分は多孔質材料であるから、それらの材料内の水分移動は水蒸気の拡散が支配的なものと考えてよい。

図17に建築材料内の水分移動の物理モデルおよび座標系を示す。このモデルの水分収支をとるにあたって用いた仮定は以下の通りである。

- (1)材料内部から雰囲気へ移動できる水分は空隙に存在する毛細管水と水蒸気のみ、移動の駆動力は水蒸気圧の内外差とし、1次元の物質移動として取り扱う。
- (2)材料内の毛細管水から水蒸気へ変化する速さは水面から自然蒸発する量の η 倍と仮定した、また逆に水蒸気から毛細管水への凝縮も同等とする。
- (3)水分は材料内に一様に分布するものとする。
- (4)材料表面と雰囲気との物質移動は、対流熱伝達と物質伝達に関するColburnのアナロジーを適用する。

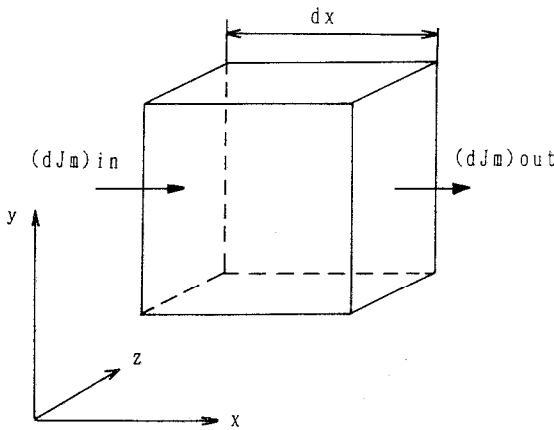


図17 物理モデル

実験(1)で用いた試験体について1次元の物質移動として数値計算を行う。材料内部の蒸気拡散による水分移動の基礎式は次式で表せる。

$$\gamma \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + Q_v \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 λ : 湿気伝導率(kg/m・s・Pa)
 γ : 湿気容量(kg/m³・Pa)
 Q_v : 単位体積単位時間に内部で蒸発または凝縮する水分量(kg/m³・s)
 P : 水蒸気圧(Pa)

また、解析にあたっての境界条件は試験体底部および側部で断湿、試験体表面からの蒸発量 J_o (kg/m²・s)は以下の式で求めた。

$$J_o = \alpha (P_{w_o} - P_o) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 α : 湿気伝達率(kg/m²・s・Pa)
 P_{w_o} : 壁体表面の蒸気分圧(Pa)
 P_o : 雰囲気蒸気分圧(Pa)

なお、 α の値は対流熱伝達と物質伝達に関するColburnのアナロジーから計算する。

湿気伝達率 α と熱伝達率 α_c (W/m²・K)の間には次の関係がある⁽⁴⁾。

$$\alpha = \frac{\alpha_c}{\rho c R T} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ρ : 湿り空気密度(kg/m³)
 c : 湿り空気比熱(J/kg・K)
 R : ガス定数(kg・m/kg・K)

T : 絶対温度(K)

α_c は水平面における推奨式(Nu=0.662Pr^{1/3}Re^{1/2}; 文献(5))から求めた。

個体内部における毛細管水からの蒸発は以下の式で求める。

$$h_d = 0.56 \left(\frac{D}{H} \right) \cdot (Gr \cdot Sc)^{1/4}; \text{文献(6)}$$

$$h_d' = h_d \cdot \eta \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 h_d' : 蒸発速度(m/s)

Sc : シュミット数(=0.6)

D : 拡散係数(m²/h)

H : 試験片高さ(m)

Gr : グラスホフ数

$$Gr = \frac{g \cdot \Delta P}{\nu} \left(\frac{L^3}{\nu^2} \right)$$

g : 重力加速度(m/s²)

L : 代表寸法(m)

ν : 動粘性係数(m²/s)

η は各材料ごとに仮定した。

2. 計算手順

計算は、試験体内部を鉛直方向に50~400メッシュに分割した差分近似を行った。

計算手順は、以下の通りである。

- 1) 初期条件における試験体内部および表面の水蒸気分圧を一定と仮定。
- 2) 式(2)より、雰囲気側から試験体表面への吸湿量の計算
- 3) 式(1)を差分近似により内部圧力を算出。
物性値 λ 、 γ は表6参照。
- 4) 式(4)より、試験体内部における水分の相変化量および水蒸気分圧の再計算。

以下2)~4)を時間刻みごとに繰り返し計算を行った。

3. 計算結果

図18に各仕上げ材に対する解析結果を示す。解析にあたって用いた物性値は、湿気伝導率 λ は文献(2)より、また湿気容量 γ は実験値より定めた。(表6参照)各種材料の解析結果、石膏ボードを除く4種類の材料については実験値と概ね一致したが、石膏ボードに関しては定性的な違いがみられた。これは前節で説

表6 試験体の物性値

	普通合板	P. B	米ひ	米すぎ	モルタル	土壁
湿気伝導率	2.71	2.70	7.29	6.46	6.88	4.1
λ (kg/m·s·Pa)	$\times 10^{-12}$	$\times 10^{-11}$	$\times 10^{-12}$	$\times 10^{-12}$	$\times 10^{-12}$	$\times 10^{-12}$
湿気容量	2.9	2.3	2.2	1.0	1.4	1.8
γ (kg/m ³ ·Pa)	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$

明したようにこの材料は厚さ方向に異なる水分分布を示すのではなく、表面付近に水分が集中するためと思われる。

図19に普通合板を素地とする布クロス、ビニールクロス仕上げ材に関する解析結果を示す。解析は物性値の異なる二層の問題として前述の仮定に素地と仕上げ材の境界を連続体と仮定して解いた。解析結果は実験値と良好な一致を得た。ただ、塗装に関する物性値が得られなかったため、解析ができなかった。また、解

ついでP. Bの順である。換気回数が零の場合、土壁、米ひは材料の湿気容量が大きいので十分室内の湿度を低下させるが、P. Bは湿気容量が小さいため十分な湿度低下は見られない。また、土壁は米ひに比して調湿速度がかなり高い。自然換気がある場合(N=0.3)は換気に伴う外気からの湿気補充のため湿度低下も小さくなっている。

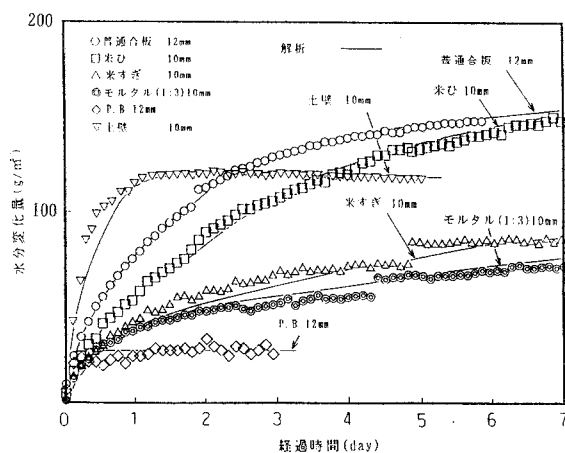


図18 各仕上げ材の吸湿実験結果と解析結果の比較

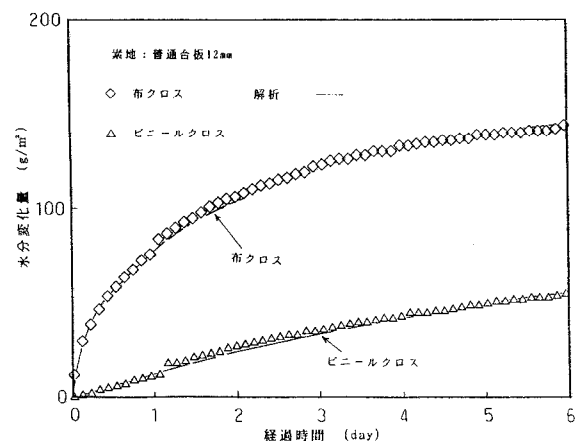


図19 普通合板を用いた各仕上げ材の吸湿実験結果と解析結果の比較

析は吸湿の場合のみに限定したが、放湿の場合も逆の計算が可能である。

4. 壁体の調湿作用としてのシミュレーション

次に壁材としてP. B、米ひおよび土壁を仮定した場合の実用的な部屋の大きさ(2700(D)×3600(W)×2500(H))について調湿効果の違いのシミュレーションを行った。計算に伴う条件は、初期(t=0)において雰囲気側(室内)が $\phi=80\%$ 、壁側が $\phi=50\%$ 、また部屋は自然換気によって外部の空気($\phi=80\%$)が、換気回数N=0.3回/hで換気されるものとする。比較のために換気が零の場合も併せて計算した。計算結果を図20に示す。

まず、3種類の中で調湿効果の高いのは土壁、米ひ、

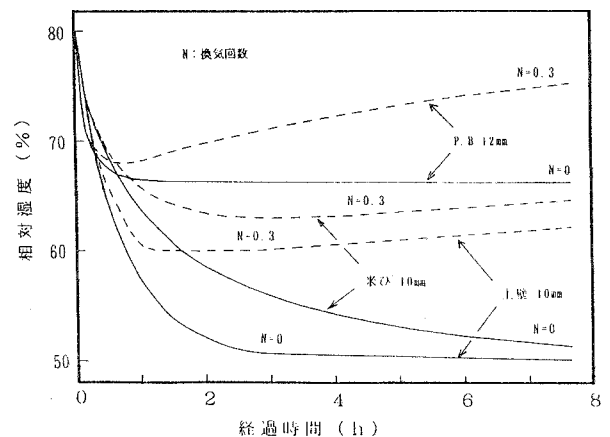


図20 シミュレーション結果

V まとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) P.B素地の湿度変化後の初期勾配（単位時間当たりの吸放湿量）は、木質材料と同等以上である。しかし、表層材のみにて調湿を行うため、早期に平衡状態に達し、その湿気容量は小さい。
- (2) 木質材料の初期勾配は、布クロス仕上げ（P.B下地）より劣るが、長期にわたり調湿を行い、その湿気容量は大きい。また、厚さの影響が出るのは遅く、短周期の湿度変化に対しては、ごく表層にて調湿を行い、1日の環境変化に対しては、普通合板の場合表層から4 mm以内である。
- (3) モルタル金ごて仕上げは、砂の比率が多くなるほど調湿性能は向上する。
- (4) 土壁の初期勾配は大きく、早期に平衡状態に達し、その湿気容量は大きい。
- (5) 1日の環境変化に対しての調湿性能は、各材の湿度急変後の初期勾配で決まり、湿気容量の影響は受けない。
- (6) 室内における湿度の急変を緩和するには、今回の実験中、①土壁が最も優れ、以下②布クロス仕上げ、③木質系、④モルタル、⑤P.Bの順である。
- (7) 1次元の物質移動とみなした本解析は、実験値と良好な一致を得た。また、この手法は材質の異なる、例えば普通合板を下地とし布クロス、ビニールクロス仕上げ材からなる二層の数値計算としても実験値と良好な一致を得た。
- (8) 想定室内での各種壁仕上げ材による調湿効果の定量的な予測が、本解析により可能となった。

【参考文献】

- (1) 渡辺 要、環境計画原論Ⅲ、丸善株式会社、1965年、p157-160
- (2) 空気調和衛生工学会編、空気調和衛生工学便覧Ⅰ、1987年、p1-194
- (3) 松本 衛、建築壁体における熱と水分の同時移動問題、伝熱研究、Vol.31 No121、1992年、p59
- (4) 空気調和衛生工学会編、空気調和衛生工学便覧Ⅰ、1987年、p1-198
- (5) 日本機械学会編、伝熱工学資料（第4版）、1986年、p46
- (6) 甲藤 好郎、伝熱概論、養賢堂、1980年、P76