



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	密閉箱内の材料表面と空気との水蒸気交換に関する実験的研究
Author(s)	堀江, 悟郎; Horie, Goro
Citation	北海道大學工學部研究報告, 19, 287-298
Issue Date	1958-08-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40631
Type	departmental bulletin paper
File Information	19_287-298.pdf



密閉箱内の材料表面と空気との水蒸気 交換に関する実験的研究

堀 江 悟 郎

Experiments on the water-vapour exchange between the air and the surfaces of materials in the closed box

Goro HORIE

Abstract

Each of several finishing materials accepted to have a good ability of moisture absorption such as woods, fibreboards etc., was put in the closed box of iron sheet.

After the equilibrium between the humidity of the material and air was obtained, the air temperature was changed following the process expressed by

$$\theta = Me^{-at} + \tau$$

Then the absolute humidity of the air in the box was shifted by the moisture absorption of the material.

It was found that the shifting process of the absolute humidity can be represented by the following equation :

$$\sigma = B + A\tau + AMe^{-at} + Ne^{-a'(e^{\beta t} - e^{-\beta t})}$$

(in heating process, $M < 0$ and $N < 0$, in cooling process, $M > 0$ and $N > 0$), where a , β , A , B and N are the coefficients that can be determined by absorptive rates of materials and the initial conditions of experiments.

§1. は し が き

1-1

従来われわれの生活空間は、木材、紙、土、たたみ等有孔性材料の素材のままの表面でかこまれていたのであるが、近代になつて塗料と硝子が普及し、更に現在はコンクリートやプラスチック、あるいは金属や合成樹脂等の緻密な表面が、われわれの生活空間をかこむ主要な面積をしめるようになつて来た。ところがこのような新しい材料は、腐蝕、磨耗、汚損等に耐える優秀な性質をもつにもかかわらず、あるいはむしろその故に、申し合わせたように吸湿性の少ないものばかりである。いうまでもなく、我國は年間を通じて比較的高湿な気候であり、従来の家屋及びその中で営まれる生活が長いあいだそれに順応して来ていたために、われわれがにわかには吸湿性表面の少ない室内に生活するようになると、いろいろな支障を来すことが知られるようになった。

その最も著しい例が、壁面の結露及び、家具、衣服等の湿潤などであつて、既に指摘したこともあるように¹⁾、全く居住にたえないような状態となることさえある。Fig. 1-1 の a は木造、壁天井は木繊維板塗料なし、床は板貼り、b は練瓦造、壁天井はプラスター仕上げ、床は板貼りの住宅における日々の温湿度変化を示すもので、室容積、窓面積、家族数等はほぼ同じである。a は熱容量が小さいから煖房の消長による温度の変動は著しいが、関係湿度の変動は小さい。これに比し b の方は熱容量が大きいため温度の変動は小さくかつゆるやかであるが、湿度の変動は急激で、振幅も大きい。これは、あたかも熱の場合における同じように、湿気容量ともいうべき概念を導入すれば、a の場合は湿気容量が大きく、b の場合はこれが小さいというように表現することが出来る。住宅においてこの湿気容量がある限度以下になつた場合に、上に述べたような被害がはなはだしくなることは明らかである。したがつて、設計に際しては他の要素、すなわち、壁の断熱性の増加、換気の調節、水蒸気発生抑制などと相俟つて、必要なだけの吸湿性表面を存置し、その湿気容量を予め算定して適切な値をきめるという要にせまれるであろう。そのためには単に材料の吸湿力のみでなく、材料に接する空気湿度変化や、両者の平衡など、未知の資料を多く必要とする。材料の適用の面からは、このような観点に立つてその吸湿性を再検討しなければならない。

The Temperature and Relative Humidity of the Air in the Living Rooms of Tow Houses



Fig. 1-1 a. Wood Coustruction

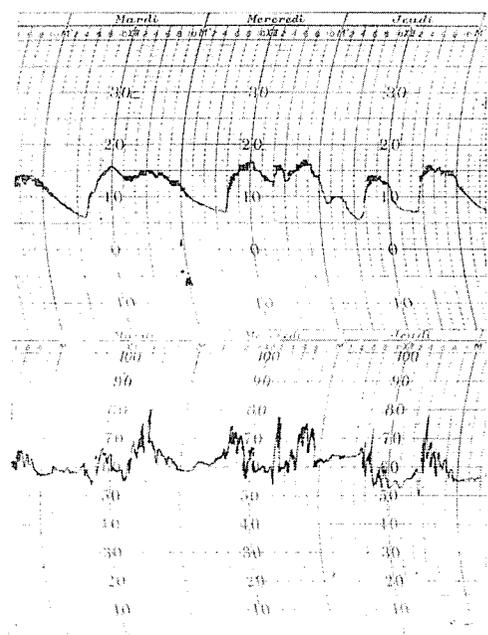


Fig. 1-1 b. Brick Construction

1-2

吸湿性材料は、これに接する空気の一つの温度及び一つの湿度の値に対して一つの平衡含

1) 壁面の結露結霜に関する調査及び研究(堀江悟郎) 北海道住宅改善研究報告書第3号, 昭和28年

湿量(又は平衡含湿率)をもつ。このような平衡点に関する含湿特性に関してはすでに宮部氏をはじめとして多くの研究がなされているが、ここに問題としているのは、材料のそれではなく、空気の湿度である。絶えず変動する室内空気の温度及び湿度に対して、これに接する材料は常に平衡状態にあるわけではなく、又材料が吸湿又は放湿すれば、これに接する空気の湿度もそれに伴つて変化するから、この過程の終結条件を見出すことは、かなり面倒なようにみえる。しかし一次的に空気に与えられる温度及び湿度の変化は独立したものと考え、二次的な変化を材料との水蒸気交換のみに限るとすれば、これを解析することが出来るものと思われる。換気量の少ない場合は実際の住宅等の比較的容積の小さい室ではこのような考え方があてはまる。

§2. 実験方法

2-1

実験は模型によることとし、80×80×80 cm の鉄板製の箱内に材料を入れる。これは完全気密ではないが、箱内における材料と空気との間の湿気交換量に比べて、拡散又は換気による箱内外の水蒸気移動量が充分小さいから、箱内の全水蒸気量(空気中と材料中との水蒸気及び壁面の吸着水分の合計)を一定と見做すことが出来る。

箱内にはミニマ鋭感湿度計5本及び自記温湿度計1基を入れ、材料は46 cm×46 cmの大きさとして、箱内にとりつけた特殊な天秤に吊した。

装置全体は Fig. 2-1 に示すように実験室の中央に置かれ、温度変化は温気或いは冷気の送入によつて与えられる。天秤は2 kg までの材料に対して最大限2 g までの重量変化を外から操作なして読みとるよう設計した。そのため中央及び両端の荷重支持の刃先を正確に一直線上にくるよう調整して、傾角や荷重の相違による読みとりの偏差をなくし、重錘皿の下部に目盛硝子棒を固定してその先を液体中に浸した。硝子棒の太さは、長さ3 cm の浮沈により浮力が約1 g に相当するよう決められた。誤差は10 mg につき2~3 mg であつた。

Fig. 2-2 にその構造を示す。ピーカー中の液体は、箱内水蒸気に影響を与えないために、蒸気圧、親水性共に非常に小さいフタル酸ブチルエステル²⁾を用いた。

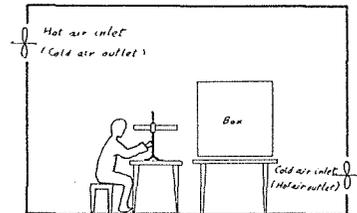


Fig. 2-1

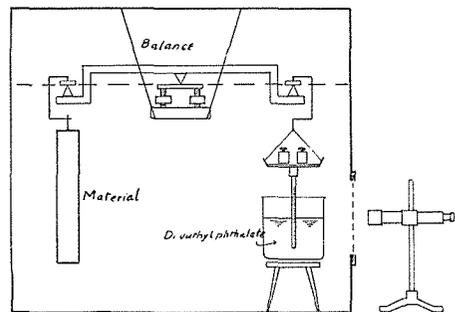


Fig. 2-2. Apparatus and Box used for the Experiments

2) ジブチルフタレート $C_6H_4(COOC_4H_9)_2$, 比重 1.047, 沸点 340°C 凝固点 -35°C 以下。

2-2

箱内の温度と水蒸気量との関係は、前節に述べたように合計量を一定と見做すことが出来るから、これを w gr とし、平衡の状態では空気の保持する水蒸気を w_E gr とすると、 $w - w_E$ は材料等の保持する水蒸気量であり、平衡の状態は各温度に対して一つしかないから、その状態は Fig. 2-3 のように示すことが出来る。ただし

$$s = \frac{w}{V}, \quad s_E = \frac{w_E}{V} \quad (V \text{ は箱容積})$$

として横軸を絶対湿度の単位にあわせてある。 E なる線は各温度における平衡位置を示し、その左側は箱内空気の絶対湿度に相当する。箱内壁、計器等は吸湿性材料を用いていないが、温度により吸着量の相違があり、これと、材料中の水蒸気との合計量が E 線の右側 s 線までの距離にて示される。したがって、 E 線は

$$s_E = f(\theta) \quad (2-1)$$

なる函数であらわされる筈で、この函数は、箱の大きさ、材料の種類と大きさ、箱内の合計水蒸気量 s 等によつて決定せられる。実験によれば、箱内に吸湿性材料を入れないとき (Fig. 3-1 参照) には殆んど直線と考えられ、材料を入れた場合も温度変化の小さい範囲では、これを直線と見ることが出来る。これについては次章 3-1 に述べる。

今、Fig. 2-3 において箱内の絶対湿度が、 $X(\theta, \sigma)$ にて示される状態にあつたとすると、これは平衡状態から外れているから、

$$\sigma = s_E \pm x \quad (2-2)$$

と書くことが出来る。この x なる量の性質を考えると、 θ が一定のとき時間の経過と共に X 点は E に近づき $x \rightarrow 0$ となる筈である。このときの x の減少速度 $\frac{dx}{dt}_{\theta=c}$ は、平衡点からの距離である x が大きいほど大きい値となるのであつて、このような x と $\frac{dx}{dt}$ との関係はいくらでもあつたが、最も単純な場合は

$$\frac{dx}{dt}_{\theta=c} = -bx \quad (2-3)$$

で示されるような比例関係である。

次に温度が一定でない場合、この温度変化が、この系全体の外部から独立して与えられるものとする、その $\frac{d\theta}{dt}$ のベクトルは Fig. 2-3 の中で σ に関係なく θ 軸に平行な向きに示される。ところが E 線は θ 軸に対して傾きをもつので、 $\frac{d\theta}{dt}$ は x を変えることになる。

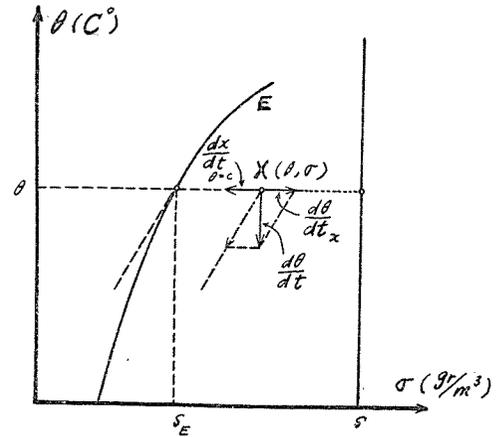


Fig. 2-3

E 上の点 (θ, s_E) における E の切線の方角に対する $\frac{d\theta}{dt}$ の分値を $\frac{d\theta}{dt_E}$ とすると、 x 方向の分値は

$$\frac{d\theta}{dt_x} = \frac{d\theta}{dt} - \frac{d\theta}{dt_E}$$

にて与えられ、 θ が一定でないときの $\frac{dx}{dt}$ は

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dt_{\theta=c}} + \frac{d\theta}{dt_x} \quad (2-4)$$

となる筈である。

(2-3) を (2-4) 式に入れてこれを解くと

$$x = e^{-bt} \left\{ \int e^{+bt} \left(\frac{d\theta}{dt_x} \right) dt + C \right\} \quad (2-5)$$

となるが、この中の $\left(\frac{d\theta}{dt_x} \right)$ は、温度変化の式

$$\theta = \phi(t) \quad (2-6)$$

及び (2-1) 式が与えられていなければならないし、それも積分出来る形でなくては解けない。しかし上述のように E 線は直線と見做しうるので、(2-1) 式は

$$s_E = A\theta + B \quad (2-7)$$

で示され、

$$\frac{d\theta}{dt_x} = -A \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2-8)$$

となる。

$$\left(\begin{array}{l} \frac{d\theta}{dt} \text{ は } \theta \text{ の増加方向に向い正,} \\ \frac{d\theta}{dt_x} \text{ は } \sigma \text{ の増加方向に向い正 とする} \end{array} \right)$$

また、 $\theta = \phi(t)$ については、実験に際して、実生活においてよく起る温度変化として

$$\theta = Me^{-at} + \tau \quad (2-9)$$

なる式で示される形を採ることにした。

したがって

$$\frac{d\theta}{dt} = -aMe^{-at} \quad (2-10)$$

$$\left(\begin{array}{ll} \text{ただし 温度下降のとき} & M > 0 \\ \text{温度上昇のとき} & M < 0 \end{array} \right)$$

故にこれを (2-8) に入れ

$$\frac{d\theta}{dt_x} = a \cdot A \cdot M e^{-at} \quad (2-11)$$

これを (2-5) 式に入れて解くと

$$x = \frac{a \cdot A \cdot M}{b-a} e^{-at} + C \cdot e^{-bt} \quad (2-12)$$

C なる積分常数は始初条件によつて決められるので、実験を常に平衡状態から始めることにすれば $t=0$ において $x=0$ であるから、(2-12) 式は一般に

$$x = N e^{-at} (e^{\beta t} - e^{-\beta t}) \quad (2-13)$$

これと (2-7) 式とを (2-2) に入れると

$$\begin{aligned} \sigma &= B + A\tau + AMe^{-at} + Ne^{-at}(e^{\beta t} - e^{-\beta t}) \\ (M \text{ 及び } N \text{ は温度上昇過程のとき負号, 下降過程のとき正号}) \end{aligned} \quad (2-14)$$

にて任意の時刻における σ を知ることが出来る。次章に示すように、実験結果は、常に (2-14) 式によく合致するので、一応 (2-3) 式及び (2-7) 式のような仮定が、ほぼ実際の場合に近いと思われる。

§3. 実験結果

3-1

箱内に材料を入れない場合の温湿度変化を Fig. 3-1 に示す。この場合は、 (θ, σ) であらわされる箱内空気の温湿度線は $\frac{d\theta}{dt}$ の大きさに拘らず直線変化をし、その傾角は始初条件には関係がないようである。したがつてこのときの絶対湿度の方程式は (2-14) 式に、

$N=0$ $A = \text{Const}$ なる条件を入れ

$$\sigma_N = B + A\tau + AMe^{-at} \quad (3-1)$$

又は $\sigma_N = B + A\theta$

にて与えられる。これは同時に平衡線である。温度上昇過程では $\frac{d\theta}{dt}$ の大きいときわずかに平衡線を離れるようであるが、 N は極く小さい値なので、上式を用いて差支えない。

又 Fig. 3-1 の $N-1$ の下方の傾斜の異なる部分は、箱の内壁に結露はじめて後の過程であつて、 $\frac{d\theta}{dt}$ が非常に小さいときは、平衡状態で直線的に変化するが、 $\frac{d\theta}{dt}$ の大きいときは曲線となり、 $N \neq 0$, $A \neq \text{const}$ で、あたかも吸湿性材料の存在するときと同じような様相をとる。これは壁面が結露のため濡れているからであつて、水面の存在や水蒸気発生のある場合も同様である。

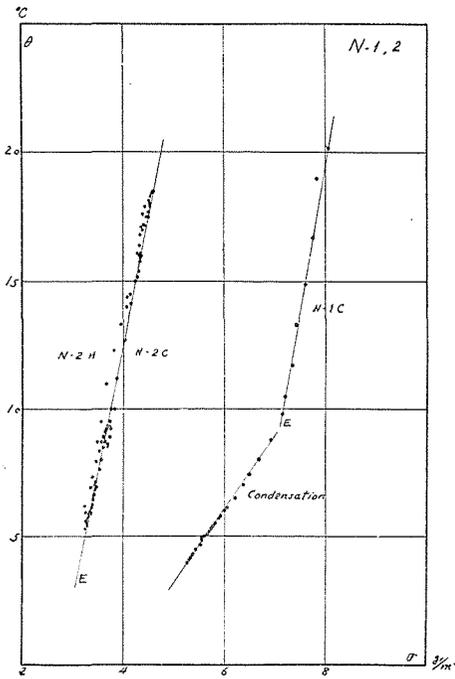


Fig. 3-1 a

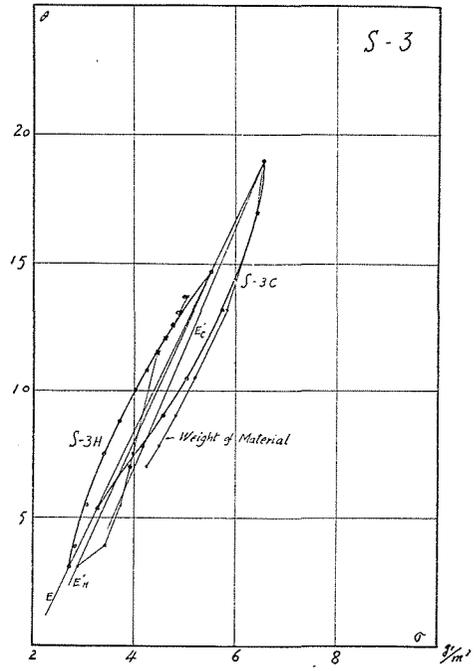


Fig. 3-2 a

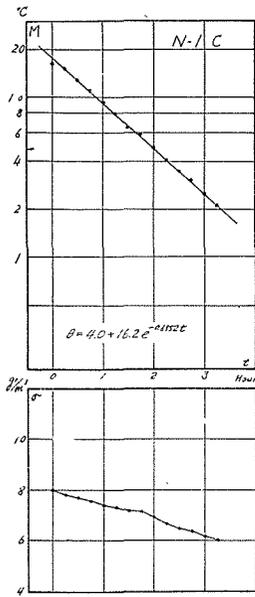


Fig. 3-1 b

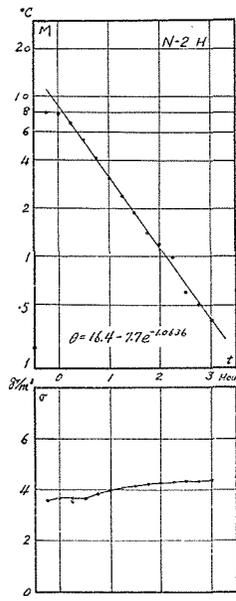


Fig. 3-1 c

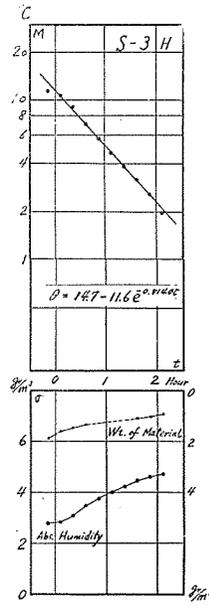


Fig. 3-2 b

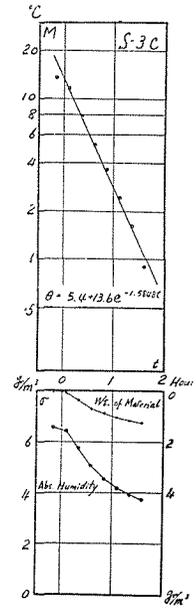


Fig. 3-2 c

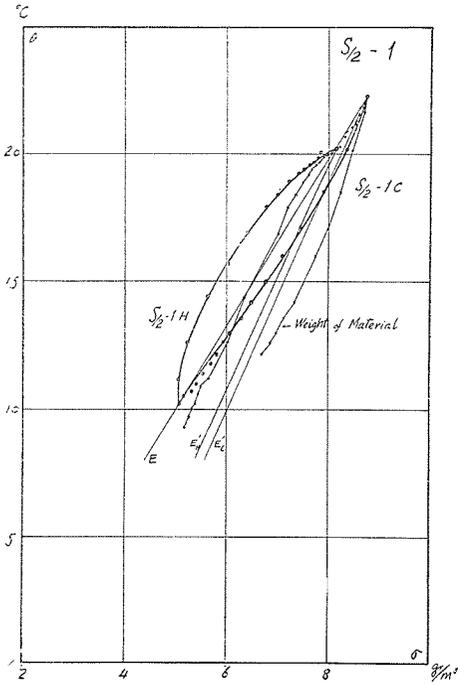


Fig. 3-3 a

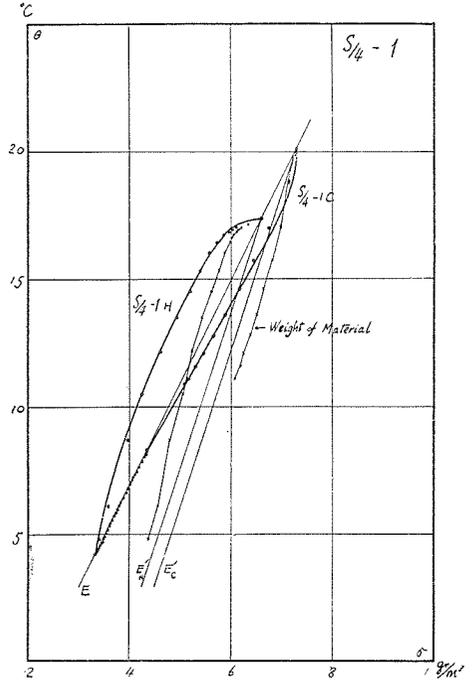


Fig. 3-4 a

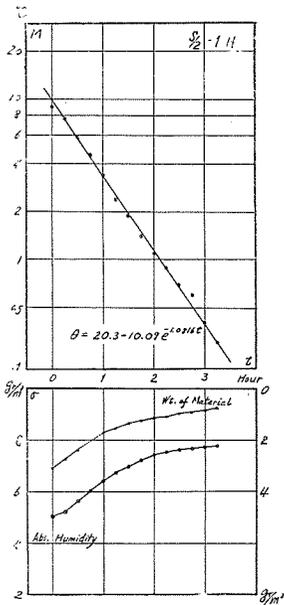


Fig. 3-3 b

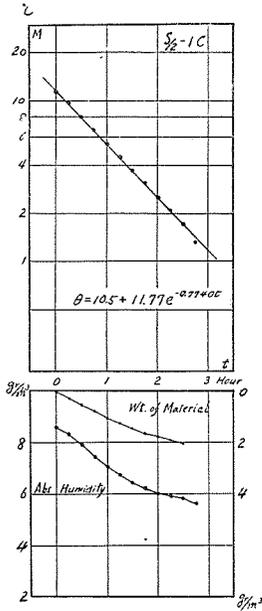


Fig. 3-3 c

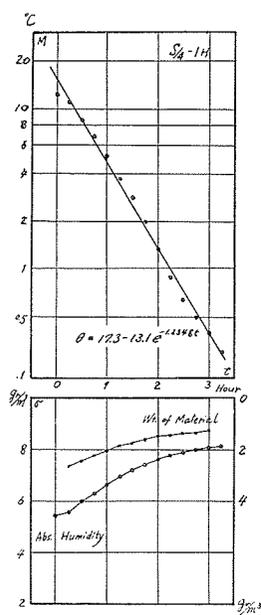


Fig. 3-4 b

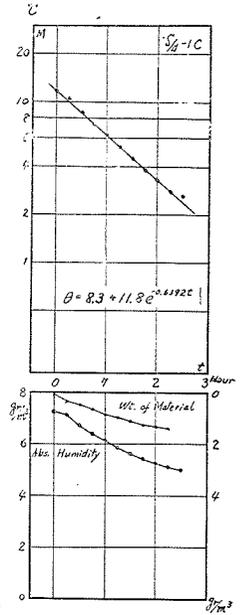


Fig. 3-4 c

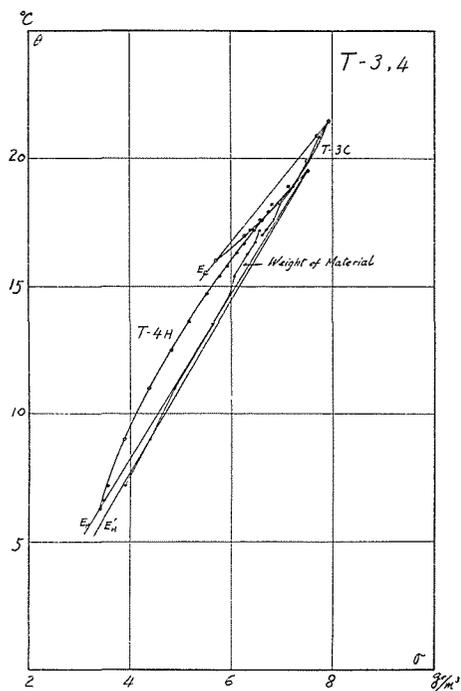


Fig. 3-5 a

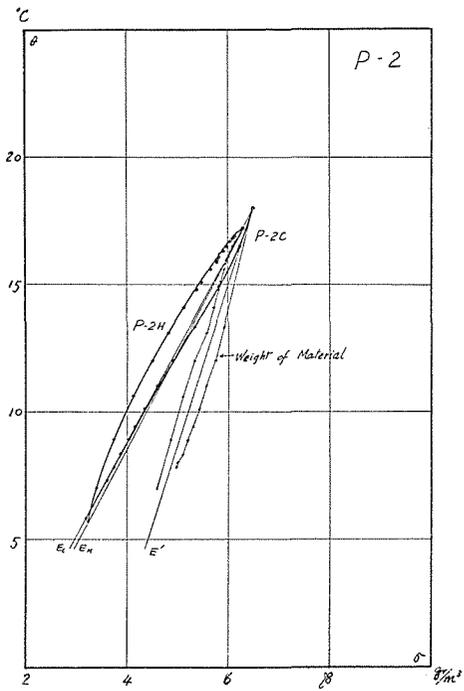


Fig. 3-6 a

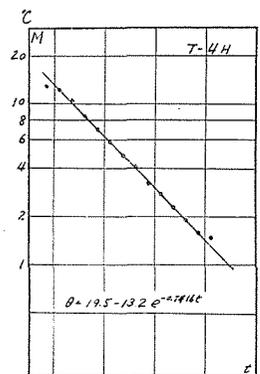


Fig. 3-5 b

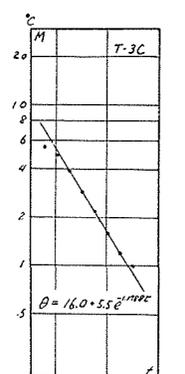


Fig. 3-5 c

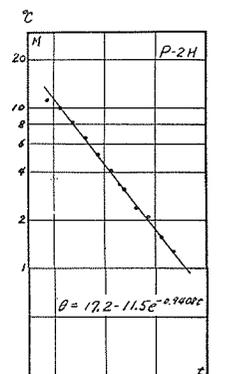


Fig. 3-6 b

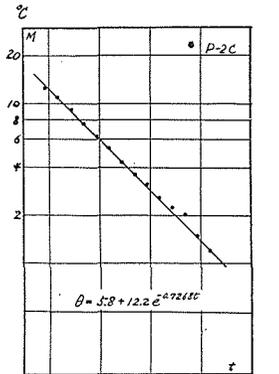
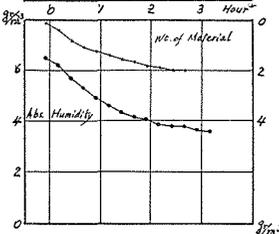
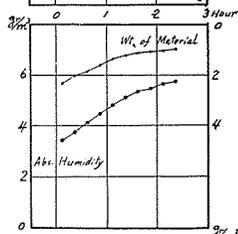
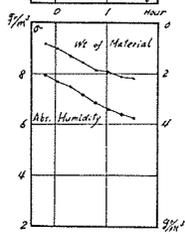
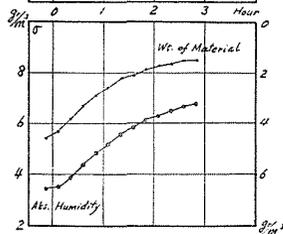


Fig. 3-6 c



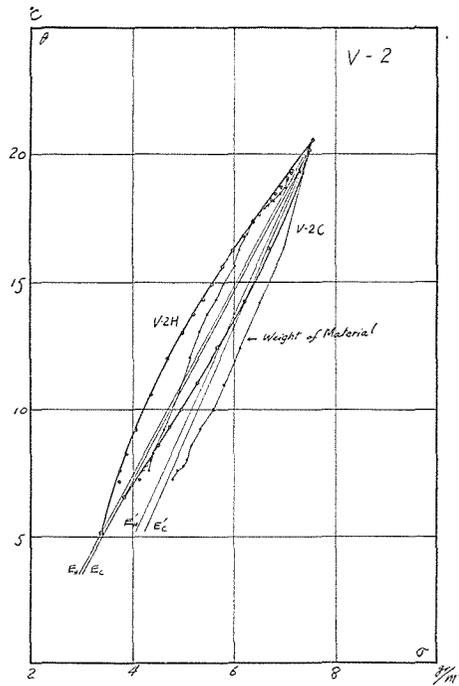


Fig. 3-7 a

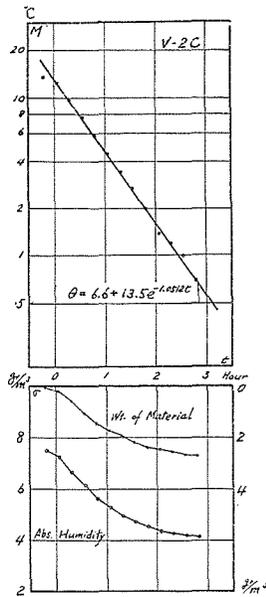


Fig. 3-7 b

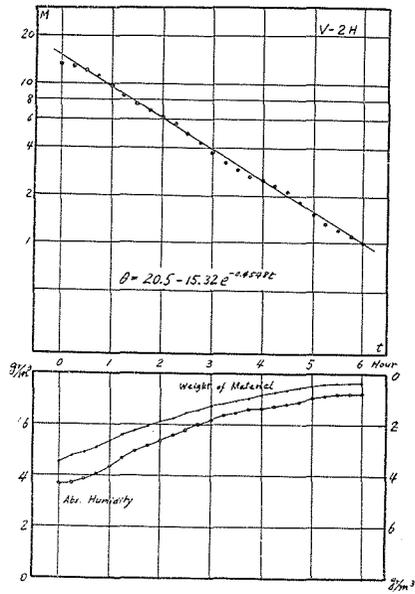


Fig. 3-7 c

3-2

箱内に吊して実験した吸湿材料は次表の通りである。

Table. 3-1

記号	材 料	大 き さ (cm)	厚 さ (mm)	重量 (20°C R.H. 45%) (kg)
S	ハードテックス	46×46	5.0	0.617
S/2	〃	32.5×32.5	〃	0.310
S/4	〃	23×23	〃	0.168
T	ソフトテックス	46×46	7.5	0.525
V	ベニヤ(しな)	〃	4.0	0.445
P	プラスターボード	〃	6.0	1.181

Fig. 3-2 ~ Fig. 3-7 はそれらの実験結果を示すもので、○点は箱内空気の絶対湿度の実測値、太い曲線は(2-14)式による計算値である。又×点は材料の重量変化であるが、これは、箱を閉じてから一定温度に放置して、天秤の読みの変化がなくなつたときを0とし、次に温度変化を与えながら、15分毎に温度関係湿度と共に読みとつた材料の重量増加分(又は減少分)を、箱内空気の容積で除し絶対湿度と同単位にして、 $t=0$ における空気の湿度と同位置から出発して記入したものである。これらの実験値にあてはめた(2-14)式の各係数の表を次に掲げる。

Table. 3-2

Heating Process								
Material	$-M$ (°C)	α (1/h)	A (g/m ³ °C)	$-N$ (g/m ³)	α (1/h)	β (1/h)	B (g/m ³)	ε (°C)
S-3H	11.60	0.8140	0.2416	0.8566	1.5268	0.9320	1.9785	14.7
S/2-1H	10.09	1.0816	0.3042	1.3561	1.9040	1.3040	1.9653	20.3
S/4-1H	13.10	1.2348	0.2496	0.9433	1.7460	1.5680	2.3083	17.3
T-4H	13.20	0.7416	0.3098	0.9355	1.3264	0.9168	1.4587	19.5
V-1H	11.40	0.9700	0.2313	1.0985	1.4656	0.7344	1.6244	20.1
V-2H	15.32	0.4548	0.2700	1.6174	0.8044	0.3468	1.9810	20.5
P-2H	11.50	0.9408	0.2661	0.7383	1.7160	1.1576	1.7031	17.2
N-2H	7.70	1.0636	0.0925	0.0	—	—	2.8000	16.4

Cooling Process								
Material	M (°C)	α (1/h)	A (g/m ³ °C)	N (g/m ³)	α (1/h)	β (1/h)	B (g/m ³)	ε (°C)
S-3C	13.60	1.5848	0.2416	3.1839	2.6152	0.6364	1.9696	5.4
S/2-1C	11.77	0.7740	0.3042	0.9393	1.7524	0.7876	1.9653	10.5
S/4-1C	11.80	0.6392	0.2496	0.4397	3.5236	2.9312	2.2782	8.3
T-3C	5.50	1.1788	0.4052	0.5854	1.9144	1.1128	— 0.7861	16.0
V-1C	8.30	0.8836	0.2313	5.3450	1.4692	0.2088	1.6244	12.1
V-2C	13.50	1.0512	0.2700	0.5394	2.2672	1.4452	2.0597	6.6
P-2C	12.20	0.7268	0.2706	0.6580	8.6660	5.3496	1.6204	5.8
N-1C	16.20	0.6552	0.0925	0.0	—	—	6.2200	4.0
N-2C	11.00	1.0076	0.0925	0.0	—	—	2.8000	6.2

§4. 結果に対する考察

4-1

前節の各図をみてもわかるように(2-14)式は実測値とよく一致する。しかしそれらの係数は、必ずしも(2-12)と(2-13)式との関係を満足するとは限らず、材料の種類や、面積の大小に対してもはつきりした差異を示さない。これはもちろん E 線を直線としたことに直接の原因があり、特に吸湿量の多いソフトテックスなどはそのため係数のばらつきが甚だしい。しかし材料表面及び箱の内壁面に吸着する合計水蒸気量がある一定値とするような傾向が見られ、そのために、各実験における過程は空気の湿度に関する限り似たものとなる。これに反し材料の重量変化の曲線は、各材料についてかなりの差を示すので、材料毎に吸放湿量の大小について序列をつけることが出来る。各材料の重量変化曲線に当ててひいた平衡位置の直線の傾斜 A' を、 20°C の位置に換算して表示してみると次のようになる。

Table. 4-1

Materials	$A'/\sigma (20^{\circ}\text{C})$	$A-A'$	Materials	$A'/\sigma (20^{\circ}\text{C})$	$A-A'$
P-2C	0.0227	0.1108	V-2C	0.0239	0.0547
P-2H	0.0228	0.1061	V-2H	0.0307	0.0435
S/4-1C	0.0227	0.0843	S-3C	0.0312	0.0295
S/4-1H	0.0267	0.0549*	S-3H	0.0337	0.0123
S/2-1C	0.0275	0.0825	T-3C	0.0442	0.0318*
S/2-1H	0.0278	0.0802	T-4H	0.0390	0.0114

この表中 $A-A'$ なる値は、箱の内壁面等材料以外の表面に吸着又はそこから放出された水蒸気量を示す筈のものであつて、これを Table 3-2 N-1, N-2 における A の値と対照してみると、P-2 の場合にこの両者は大体等しく、その他は $A-A'$ の値が小さくて、その減少の序列は、 A' の増加の序列とよく一致する。すなわち吸湿力の強い材料は、それらのみで空気の調湿作用を担当しようという傾向があり、吸湿力の弱い材料は、他の非吸湿性材料の表面とこれを分担しようという傾向が見られる。

4-2

実験回数が少ないので設計用の数値を決定する段階には達していないが、この箱内の温湿度変化は、住宅押入などの温湿度変化とよく似た形をしており、この実験におけると同じ考え方を以つて臨んでよいのではないかということを暗示している。又、室内のふとんや衣類などの吸湿量や、教室における生徒の衣類の含湿量などが、その室の仕上表面に大きい関係をもつことなどが考えられるので、1-1 に述べたように、設計に際してその室の湿気容量を決定し得る程度にまで資料を増してゆきたいと思つている。