

建築用木材の部材化に関する研究 第1報

木質パネルの透湿と結露

鈴木 正 治⁽¹⁾

Masaharu SUZUKI: Studies on Wood-based Components for
Prefabrication of Residential House (Report 1)
Studies on moisture permeation and moisture condensation
of wood-based panels

要 旨: 住宅の近代的生産と性能向上のための部材化研究の一環として、木質パネルの透湿と耐結露について実験した。パネル用素材料としての木質材料およびこれに複合できる無機材料、有機材料の透湿率、湿気貫流率を透湿カップ法および湿度計法によって測定した。透湿性を大より小に並べると、素材・無機材料・合板>ハードボード>各種化粧合板・木質系複合材料>ルーフィング・塗料・高分子耐湿フィルムである。透湿量は実験の湿度条件が強く関係し、防湿層を有する試料パネルでは、防湿層の高湿度側に対する関係位置などの影響を受ける。湿度計法では、中空構造の中の関係湿度の経時変化を指示・記録する。これから各パネルにつき湿気貫流率 J の算出式を導き、透湿過程の J の経時変化を求めた。中空パネルの結露試験装置を試作し、住宅内外に類似する温湿度条件下で、モデルパネルの透湿・結露実験をおこなった。各パネル断面各部の温湿度、含水率、表面固有抵抗を連続記録し、これらと表面結露および内部結露の関係、結露の予測について検討した。表面結露は表面材料の吸湿性、疎水性と関係があり、パネルの断熱化も耐結露性を向上させる。内部結露は防湿層、断熱層の有無につよく依存している。パネルを防湿材料、断熱材料で複合化するほど、計算による結露の予測は容易になる。木質パネルの中空部の関係湿度は、Fig. 20~34のような非定常状態では、出入する水蒸気量、中空内壁の吸湿量などに依存すると考え、表面パネルの湿気貫流率を計算した。この計算値は、透湿カップ、湿度計の2つの方法による測定値の中間になり、木質中空パネルの透湿の特性が把握され、木質系壁パネルの居住設計に有用となる。

目 次

1. はじめに	2
2. パネル素材料と複合パネルの透湿	5
2-1. 透湿の測定	5
2-1-1. 透湿カップ法	5
2-1-2. 湿度計法	5
2-2. 透湿カップ法の測定結果	6
2-3. 湿度計法による測定結果	16
3. 木質中空パネルの透湿と結露	22
3-1. 結露試験装置	22
3-2. 結露の検出法	24
3-3. 表面含水率の測定	24
3-4. 木質中空パネル	25
3-5. 透湿と結露の測定結果	25
3-5-1. 定常状態における結露の予測	25
3-5-2. 複合化中空パネルの透湿と結露	30
4. まとめと問題点	49
文 献	51
Summary	52

1973年6月19日受理

(1) 木 材 部

1. は じ め に

木質系プレハブ住宅、近年の wood frame 構法の住宅でも、ある 1つの性能は住居を構成する部材要素の個別的な性能、もしくはそのいくつかの集成的性能に依存するもので、部材要素の性能評価は部材設計につながる重要な課題である。

部材パネルの居住的性能の 1つの耐結露性は、住居の耐久性など、いわゆる湿害につながるもので、これまで木質系パネルについての研究はきわめて少ない。本報は結露と関係の深い透湿を含めて、木質パネルの透湿・結露性を調べたもので、その主要項目は

(1) パネル素材料と複合パネルの透湿率の測定

(2) 木質中空パネルの透湿・結露現象の解析

である。ここでは、特定の性質の追求をさけ、パネル全体の総合的な性質の把握と現象の意味づけを重視して、現場への応用を目標とした。このため、たとえば透湿などにおける細部の研究には今後期したいところがある。

本文、図表中の専門語、材料名は次の附表の略号で表わすことが多い。数式中の記号の説明も、本文中で一部省略しているので、同表を参照されたい。

実験装置を作成する際、物理研究室 齊藤寿義氏のご援助を受けた。その他、物理研究室の諸氏にもお世話になった。防湿材料をご提供いただいた東セロ商事 K. K. 企画課 川井氏、東大総合試験所の大関八枝氏らに深謝の意を表します。なお、本実験の過程で、建築用木材の部材化研究の P. L である上村部長、山井科長らと意見交換も行なわれた。

付 表

略記号 (Symbol)	述 語 (Technical terms)
r_a	気 乾 比 重 Specific gravity in air dry
u	含 水 率 Moisture content
l	試 片 厚 さ Thickness of specimen
T	温 度 Temperature
T_D	露 点 (温 度) Dew point
p	水 蒸 気 圧 Water vapour pressure
p_s	飽和水蒸気圧 Saturated water vapour pressure
h	関 係 湿 度 Relative humidity
σ	容積単位絶対湿度 Absolute humidity (per unit volume)
Q	熱 量 Quantity of heat
λ	熱 伝 導 率 Thermal conductivity
k	熱 伝 導 係 数 Thermal conductance
r	熱 伝 導 抵 抗 Resistance of heat conduction
K	熱 貫 流 率 Heat transmission coefficient
R	熱 貫 流 抵 抗 Resistance of heat transmission
α	熱 伝 達 率 Heat transfer coefficient
r_{sh}	熱 伝 達 抵 抗 Resistance of heat transfer
r_{ah}	中空層の等価熱伝導抵抗 Resistance of equivalent heat conduction in hollow core

略記号 (Symbol)	述 語 (Technical terms)
W	水分量(水蒸気量) Amounts of water (or water vapour)
η (η')	透湿率(同近似値) Moisture permeability constant (Approximate value)
G	透 湿 係 数 Moisture permeance rate
r_m	透 湿 抵 抗 Resistance of moisture permeance
J	湿 気 貫 流 率 Moisture transmission coefficient
R_m	湿 気 貫 流 抵 抗 Resistance of moisture transmission
β	湿 気 伝 達 率 Moisture transfer coefficient
r_{sm}	湿 気 伝 達 抵 抗 Resistance of moisture transfer
r_{am}	中空層の透湿抵抗 Resistance of moisture permeance in hollow core
S	表面抵抗(湿気または熱の場合がある) Surface resistance (S indicates the surface resistance of moisture or heat)
D_u	水分の拡散係数 Diffusion coefficient of moisture
ρ	絶 縁 抵 抗 Insulation resistance
A	中 空 層 Hollow core (Air space)
$S_1 \sim S_7$	中空パネル断面の位置 Each part in the cross-section of hollow core panel (See Fig. 10)
h_i	透湿カップ内湿度 Relative humidity inside the cup for measuring moisture permeability
h_o	透湿カップ外湿度 Relative humidity outside the cup for measuring moisture permeability
C	冷 却 開 始 時 間 Denoting the time when one side of panel is cooled
D	露 点 致 着 時 間 Denoting the time when temperature is coming to dew point
H	材料面がしめる Showing that the surface of material is moist
D_1	材料面が変色(水ぬれ状) Showing that the surface of material is wet and stained with water
D_1'	材料面が部分的に変色 Showing that the surface of material is partly wet and stained with water
D_2	材料面に水の凝縮(結露) Moisture condensation are observed in all parts of surface area
D_2'	材料面に部分的に水の凝縮(結露) Moisture condensation are observed in 20~30% of surface area
d_1	中空パネル内面の変色 Stains with water on the inner face of hollow core panel
d_2	中空パネル内面の結露 Moisture condensation on the inner face of hollow core panel

略記号 (Symbol)	材 料 名 (Material name)
M	材 料 (一 般) Material
H_I	ヒ ノ キ HINOKI (Japanese cypress)
A_K	ア カ マ ツ AKAMATUS (Japanese red pine)
B	ブ ナ BUNA (Beech)
M_I	ミ ズ ナ ラ MIZUNARA (White oak)
P	合 板 Plywood

略記号 (Symbol)	材 料 名 (Material name)
$P_R. P$	プリント合板 Printed plywood
$N. P$	ラッカー塗装合板 Plywood coated with N. C. lacquer
$P_E. P$	ポリエステル塗装合板 Plywood coated with polyester resin paint
$W. P$	ウォルナット化粧合板 Plywood with fancy walnut face
$C_L. P$	クロス合板 Cloth overlaid plywood
$P. P$	不透明塗装合板 Painted plywood (plywood coated with colour paint)
$E. P$	外装合板 Exterior plywood
$P_E. S. P$	ポリエステル化粧合板 (ポリエステル含浸紙オーバーレイ合板) Polyester resin sheet overlaid plywood
$P. C. P$	塩ビオーバーレイ合板 Polyvinyl chloride sheet overlaid plywood
$D. P$	Dap 樹脂オーバーレイ合板 Plywood overlaid with diallyl phthalate impregnated sheet
$F_M. P$	フォームオーバーレイ合板 Foam overlaid plywood
H_A	ハードボード Hardboard
$P. H_A$	不透明塗装ハードボード Painted hardboard
$C_L. H_A$	クロス貼りハードボード Cloth overlaid hardboard
P_A	パーティクルボード Particleboard
$P. C. P_A$	塩ビオーバーレイパーティクルボード Polyvinyl chloride sheet overlaid particleboard
I	インシュレーションボード Insulation board
$P. I$	不透明塗装インシュレーションボード Painted insulation board
$W. P +$ $M. P. S +$ $F. E$	ウォルナット化粧合板+防湿シート+ポリエチレンフォーム Composite panel Plywood with fancy Walnut face + Moisture proof sheet + Foamed polyethylene
$P. C. P_A +$ $F. E$	塩ビオーバーレイパーティクルボード+ポリエチレンフォーム Composite panel Polyvinyl chloride overlaid particle board + Foamed polyethylene
$P_R. P + G$	プリント合板+石こうボード Composite panel Painted plywood + Gypsum board
G	石こうボード Gypsum board
A_S	アスベスト板 Asbestos board
$A_S. C$	石綿スレート板 Asbestos cement board
$C. E$	木毛セメトン板 Cemented excelsior board
R_O	ルーフィング Roofing
$M. P. C$	防湿セロファン Moisture-proof cellophane
C	セロファン(防湿性) Cellophane (Moisture resistive type)
$M. P. S$	防湿シート(複合フィルム) Moisture proof sheet (Composite film)
$F. S$	ポリスチロールフォーム Foamed polystyrol
$F. E$	ポリエチレンフォーム Foamed polyethylene
$N. C. L$	ニトロセルロースラッカー Nitro-cellulose lacquer

2. パネル素材料と複合パネルの透湿

2-1. 透湿の測定

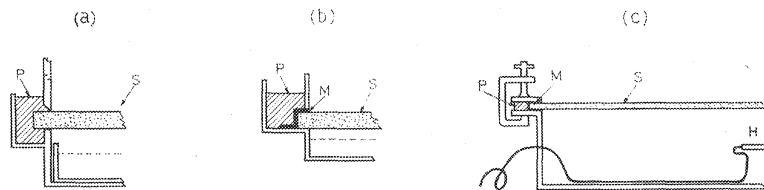
2-1-1. 透湿カップ法

既往の透湿度測定法 (JIS Z 0208, 1504, ASTM D 988-51T) を参考にして, Fig. 1 の透湿カップを使用した。(a) は標準型より封ろうする部分の高さが高いもの (試片直径 6.5 cm), (b) は角型で, 角形 (6.5 cm²) の試片, 表面に凹凸のあるものに通している。多孔性の材料では, 端面より溶融パラフィンが内部に浸入するので, 防湿フィルムをはって遮断した。カップ内の湿度は, 住居の室内側が対応するとすれば, 比較的高い湿度であり, 結露過程の透湿を考慮して, R. H. を 76, 86, 100% などにした。試片をとりつけたカップを恒温恒湿槽内に入れ, 風速 60~80 cm/sec における, 一定の温湿度で定常状態における透湿量を測定した。Fig. 2 は実験開始後, 24~32 時間における槽内へのつり下げカップの重量を床下天びんで連続して追跡したもので, この時間経過では透湿の定常性が認められる。これより, 本実験では, 24~48 時間における重量減少量を測定して透湿率を計算した。

2-1-2. 湿度計法

カップの重量は 0.1 mg まで測定できるので, 透過水分量もこれに近い精度で求められる。しかし, 透過した水蒸気による中空層などの空間の湿度の変化を, 直接与えるものではない。

中空層への透湿, すなわち, 中空層の関係湿度の増加を測定するため, Fig. 1 (c) にその側面を示す



Note) P: パラフィン (Paraffin), S: 試片 (Specimen),
M: 防湿フィルム (Moisture proof film), H: 湿度計 (Hygrometer)

Fig. 1 透湿カップ (a) (b) と透湿箱 (c)

The cup (a) (b) and the aluminium box (c) for measuring moisture permeability.

Note) 試料: 2.7 mm 厚合板
(Test sample: 2.7 mm
thick plywood)
 $h_i=100\%$, $h_o=50\%$,
20°C.

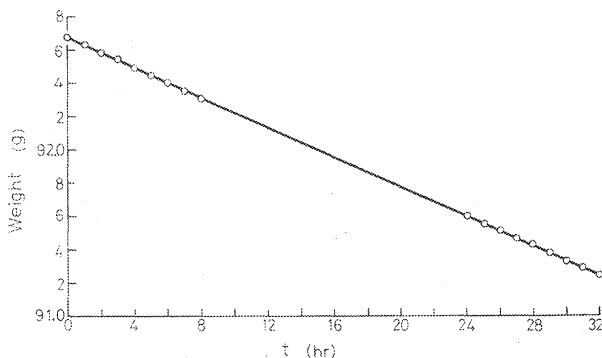


Fig. 2 透湿によるカップの重量減少

The weight loss of cup during moisture permeation.

アルミ製の透湿箱（内法 $40 \times 40 \times 7$ [高さ] (cm)，内容積 $1.12 \times 10^4 \text{ cm}^3$ ）の上面に試片をとりつけ，透湿箱中央に自記湿度計の感湿素子を固定した。透湿箱を恒温恒湿槽に入れ，箱内外の湿度を一定にしてから，外囲の恒温恒湿槽内の湿度を急増させ，これによる透湿箱内の関係湿度の変化を自記させた。

2-2. 透湿カップ法の測定結果

カップ内の水蒸気は試料に吸収され，試料中を拡散して，試料他面より蒸発する。試料を界して両空間の水蒸気圧差を Δp とすれば，定常下で，単位時間，単位面積あたりの透過水蒸気量 W は

$$W = J \cdot \Delta p \equiv J_{\text{cup}} \cdot \Delta p \quad \dots\dots\dots (1)$$

を満足するといわれる。ここに， J_{cup} はカップ法による湿気貫流率を指す。Fig. 3 は湿気貫流抵抗 R_m

$$R_m = 1/J = \Delta p/W \quad \dots\dots\dots (2)$$

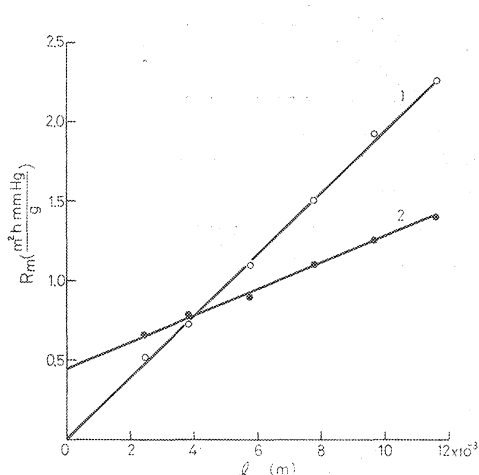
を試片の厚さ (l) べつにとり，縦軸に外そうした。〔1〕はほぼ原点を通るが，〔2〕は， $l=0$ でも， $R_m \neq 0$ で，未知抵抗の存在を表わしている。この一連の実験に関する限り， $l=0$ で抵抗が残存するのは，透湿カップの外囲湿度 h_o の小さいものに多く (Fig. 4 も参照)， h_o が約 50% 程度に増大してくると， $R_m=0$ になる場合が多くなる。

試料面内外の湿気伝達率を β_i, β_o ，複合構造の透湿係数を G （中空層のそれは G_a ）とすると

$$R_m = \left(\sum \frac{1}{G_i} + \frac{1}{G_a} + \frac{1}{\beta_i} + \frac{1}{\beta_o} \right) = \frac{\Delta p}{W} \quad \dots\dots\dots (3)$$

である。

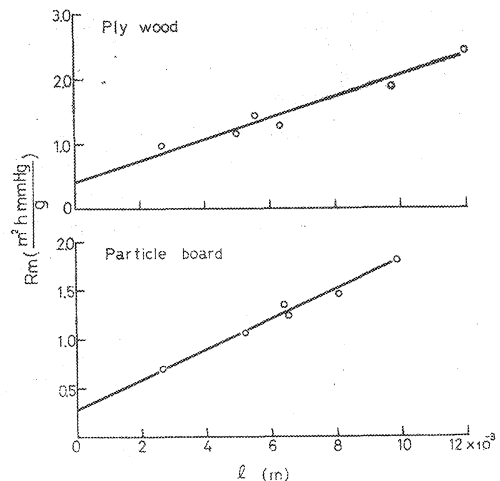
齊藤⁹⁾³⁾によると，表面境界空気層（境膜）の透湿抵抗は，その厚さを 1 cm 程度と考え， 20°C で，無風： $0.08 (\text{m}^2\text{h mmHg/g})$ ，風速：30 cm/sec： $0.06 (\text{m}^2\text{h mmHg/g})$ ，50 cm/sec： $0.05 (\text{m}^2\text{h mmHg/g})$ ，



Note) 1.: $h_i=100\%$, $h_o=51\%$.
2.: $h_i=100\%$, $h_o=20\%$.

Fig. 3 ヒノキ材の湿気貫流抵抗 (R_m) と厚さ (l) の関係

Relation between Resistance of moisture transmission (R_m) and thickness of HINOKI wood (l).



Note) 合板 (Plywood): $h_i=100\%$, $h_o=20\%$, 19.0°C . パーティクルボード (particle board): $h_i=100\%$, $h_o=20\%$, 19.5°C .

Fig. 4 合板，パーティクルボードの湿気貫流抵抗 (R_m) と厚さ (l) の関係
Relation between Resistance of moisture transmission (R_m) and thickness of plywood and particle board (l).

100 cm/sec : 0.04 (m²h mmHg/g) としている。静止空気の透湿率を 0.1 (g/mh mmHg) とすると⁴⁾, 境界層の透湿抵抗は 0.1 (m²h mmHg/g) になる。これらの数値から, 透湿カップの両面の湿気伝達抵抗の和は 0.1~0.2 (m²h mmHg/g) と推定できる。この推定値と Fig. 3, 4 の外そう値を比較すると前者が小さいので, 両表面層の吸脱着に関する未知抵抗 r_m'' を考え, eq. (3) を次のように書きなおす。簡単のため, 1 枚の平板では

$$R_m = r_m' + r_m'' + r_{sm} = r_m' + S \quad \text{.....(4)}$$

$$r_m = r_m' + r_m'' = \frac{1}{G} \quad \text{.....(5)}$$

ここに, r_{sm} は湿気伝達抵抗の和であり, S はやはり未知因子で, ここでは表面抵抗としておく。平板の透湿抵抗 r_m は板固有の抵抗 r_m' と前述の r_m'' の和で示す。Fig. 3, 4 では, R_m と l の関係は直線性を示すので, その勾配を g とすると

Table 1. 木材の透湿率 (接線方向)
Moisture permeability constant of wood along tangential direction

材 料 [M]	温 度 [T] (°C)	$h_o - h_i$ (%)	透 湿 率 (η) (g/mh mmHg)	表 面 抵 抗 [S] (m ² h mmHg/g)	厚 さ [l] (mm)	測定数 [n]	備 考 References
ヒノキ・心材 [Hi]	20.0	20—100	4.25×10^{-3}	0.45	2.5~11.6	6	$r_a = 0.44$
	21.0	51—100	5.26 "	0		6	
	20.0	75—100	7.00 "	0		6	
	21.0	83—100	1.11×10^{-2}	0		6	
ヒノキ・心材 [Hi]	21.0	38— 76	1.34×10^{-3}	0.8	2.6~ 3.9	5	$r_a = 0.43$
	23.0	51— 76	2.22 "	1.0		5	
ヒノキ・辺材 [Hi]	21.0	43—100	8.01×10^{-3}	0.25	2.5~ 9.9	5	$r_a = 0.40$
	21.0	67—100	1.54×10^{-2}	0.20		5	
アカマツ・心材 [Ak]	19.8	20—100	4.35×10^{-3}	0.45	2.4~ 9.9	10	$r_a = 0.52$
	20.7	48—100	5.00 "	0.20		10	
	19.8	65—100	5.22 "	"		10	
	19.8	89—100	6.67 "	"		8	
アカマツ・心材 [Ak]	21.0	39— 76	9.50×10^{-4}	0.20	2.8~ 5.8	10	$r_a = 0.53$
	19.0	56— 76	2.00×10^{-3}	0.15		6	
	19.0	56— 86	2.60 "	0		6	
ブ ナ・心材 [B]	20.0	20—100	2.40×10^{-3}	0.15	2.0~ 7.0 2.0~ 8.3 2.0~ 8.3 2.0~ 8.2	10	$r_a = 0.62$
	20.0	51—100	2.50 "	0		10	
	20.0	63—100	3.33 "	0		9	
	20.5	80—100	4.00 "	0		9	
ブ ナ・心材 [B]	20.0	38— 76	1.02×10^{-3}	1.0	2.5~ 7.9	6	$r_a = 0.59$ $r_a = 0.61$
	20.0	52— 76	2.06 "	0.9		6	
ミ ズ ナ ラ [Mi]	21.5	15—100	1.55×10^{-3}	0.20	2.5~ 9.8 2.5~ 9.8 2.5~ 8.3 2.5~ 6.2	10	$r_a = 0.70$
	21.0	49—100	1.67 "	0.02		10	
	20.0	61—100	2.27 "	0		9	
	20.0	87—100	2.86 "	0		9	
ミ ズ ナ ラ [Mi]	20.0	38— 76	7.05×10^{-4}	1.0	2.5~ 6.0 2.5~ 6.0	9	$r_a = 0.70$
	20.5	54— 76 56	7.70 "	1.2		9	

Table 2. 木質材料の透湿率
Moisture permeability constant of wood based materials

材 料 (M)	温度 [T] (°C)	h_o-h_i (%)	透湿率 (η) (g/mh mmHg)	表面抵抗 [S] (m ² h mmHg/g)	湿気貫流率 [J] (g/m ² h mmHg)	厚 さ [l] mm	測定数 [n]	備 考 References
合 板 (1) [P]	19.0	20—100	5.3×10^{-8}	0.40		2.6—12.6	6	$r_a=0.56 \sim 0.65$ 3~5 ply
	20.0	50—100	4.7 "	0.30		"	7	
	19.0	66—100	5.0 "	0.30		"	7	
	20.0	88—100	5.0 "	0.20		"	7	
合 板 (2) [P]	19.0	15— ⁷⁶ ₈₆	3.7×10^{-8}	0.95		2.5—12.1	6	$r_a=0.56 \sim 0.65$ 3~5 ply
	21.0	40— ⁷⁶ ₈₆	3.8 "	0.75		2.6—12.1	10	
合 板 (3) [P]	19.0	58—100	$\eta'=3.7 \times 10^{-8}$		0.64—0.69—0.74	5.4—5.6	5	$r_a=0.63$ 3 ply $r_a=0.58$ 3 ply
	19.0	53—100	$\eta'=3.4$ "		0.92—1.13—1.50	3.02—3.06	5	
合 板 (4) [P]	0.5	44—100	$\eta'=1.03 \times 10^{-8}$		0.18	5.7	3	$r_a=0.56 \sim 0.65$ 3~5 ply
	2.5	55—100	$\eta'=1.45 \sim$ 1.57×10^{-8}		0.26—0.28	5.6	6	
	10.0	"	2.5 "	0.2		5.1—12.1	7	
	20.0	"	3.4 "	0.4		2.6—12.1	7	
	30.0	"	4.8 "	0.4		"	7	
	40.0	"	6.2 "	0.2		"	7	
ハ ー ド ボ ー ド (1) [HA]	2.5	55—100	$\eta'=3.72 \sim$ 4.30×10^{-4}		0.061—0.070	6.1	5	f_{in} " " " $r_a=1.02$
	19.0	27—100	1.43×10^{-8}	0.1		1.2—6.1	5	
	21.0	57—100	1.43 "	0		"	5	
	20.5	76—100	1.43 "	0		"	5	
ハ ー ド ボ ー ド (2) [HA]	20.5	41—100	2.0×10^{-8}		0.500—0.578—0.670	3.5—3.7	8	f_{in} " " " $r_a=1.02$ ~1.08
	22.5	46—100	1.1 "		0.310	3.5	3	
	24.0	50—76	2.1 "		0.319—0.340—0.357	6.2—6.4	5	
	24.0	50—76	1.0 "		0.165—0.240	5.9—6.3	5	
イ ン シ ュ レ ー シ ョ ン ボ ー ド (1) [I]	2.5	55—100	$\eta'=1.55 \sim$ 1.62×10^{-2}		1.70—1.78	9.1	6	$r_a=0.269$
	24.0	20—100	4.3×10^{-2}	0.28		1.2—8.8	7	
	18.5	49—100	3.7 "	0.26		"	7	
	22.0	72—100	3.7 "	0.26		"	7	
イ ン シ ュ レ ー シ ョ ン ボ ー ド (2) [I]	20.0	44—100			2.35	9.1	3	$r_a=0.270$
	24.0	45—76			1.27	9.0	3	
パ ー テ ィ ク ル ボ ー ド (1) [PA]	2.5	55—100	$\eta'=1.50 \times 10^{-8}$		0.156	9.6	4	$r_a=0.727$
	19.5	20—100	5.8×10^{-8}	0.26		2.7—9.9	6	
	20.0	53—100	5.5 "	0		"	6	
	20.0	76—100	5.6 "	0		"	6	
	20.0	90—100	5.8 "	0		"	6	
パ ー テ ィ ク ル ボ ー ド (2) [PA]	20.0	44—100	$\eta'=5.2 \times 10^{-8}$		0.475—0.525—0.545	9.9	6	$r_a=0.727$
	24.0	35—76	$\eta'=3.4 \times 10^{-8}$		0.340	10.0	3	
パ ー テ ィ ク ル ボ ー ド (3) [PA]	20.0	42—100	$\eta'=3.5 \sim$ 3.9×10^{-8}		0.230—0.255	15.4	5	$r_a=0.710$
	24.0	45—76	$\eta'=3.7 \sim$ 4.1×10^{-8}		0.240—0.267	15.4	5	

Note) f_{in} : ハードボードの平滑面が h_i 側 (カップ内高湿度側) にある。

This symbol shows that the smooth side of hardboard faces h_i (higher humidity).

Table 3. 化粧合板の透湿係数
Moisture permeance rate of decorative plywood

材 料 [M]	温 度 [T] (°C)	h_o-h_i (%)	透湿率 [γ] (g/mh mmHg)	透湿係数 [G] (g/m ² h mmHg)	厚さ [l] (mm)	測定数 [n]	備 考 References
プリント合板 [Pr. P]	20.0, 21.5	41—100 45	12.2×10^{-4}	0.366 ~0.469 ~0.527	2.6	6	f_{in}
	24.0	51—100		0.303	2.7	3	f_{ot}
	23.0	51—76		0.423	2.7	3	f_{in}
	24.0	51—76		0.305	2.7	3	f_{ot}
プリント合板 [Pr. P]	23.0	51—100	17.7×10^{-4}	0.385	4.6	3	f_{in}
	23.0	51—76		0.435	4.6	3	f_{in}
ポリエステル 樹脂オーバー レイ合板 [Pe. S. P]	20.0, 22.5	41—100 46	3.41×10^{-4}	0.065 ~0.110 ~0.222	3.1	8	f_{in} } Polyester resin impregnated sheet : $l_{\frac{1}{2}} 220 \mu$
	24.0	51—100		0.036	3.1	3	f_{ot} }
	23.8	50—76		0.095	3.0	3	f_{in} }
	23.8	50—76		0.034	3.0	3	f_{ot} }
ポリエステル 樹脂オーバー レイ合板 [Pe. S. P]	19.0, 20.6	40—100 46	14.8×10^{-4}	0.19 ~0.26 ~0.35	5.7	8	f_{in} } Polyester resin impregnated sheet : $l_{\frac{1}{2}} 100 \mu$
	24.0	51—100		0.063	5.7	3	f_{ot} }
	23.8	50—76		0.214	5.7	3	f_{in} }
	23.8	50—76		0.056	5.7	3	f_{ot} }
Dap樹脂オー バーレイ合板 [D. P]	23.0	51—100	5.00×10^{-4}	0.167	3.0	8	f_{in} } Diallyl phthalate impregnated sheet : $l_{\frac{1}{2}} 110 \mu$
	24.0	51—100		0.161	3.1	3	f_{ot} }
	23.0	51—76		0.152	3.0	3	f_{in} }
	24.0	51—76		0.083	3.0	3	f_{ot} }
不透明塗装合板 [P. P]	20.0, 21.5	41—100 44	8.12×10^{-4}	0.164 ~0.325 ~0.452	2.5	8	f_{in} } Colour paint : $l_{\frac{1}{2}} 100 \mu$
	24.0	51—100		0.496	2.6	3	f_{ot} }
	23.0	51—76		0.333	2.6	3	f_{in} }
	24.0	51—76		0.426	2.6	3	f_{ot} }
塩ビオーバー レイ合板 [P. C. P.]	21.0, 22.5	41—100 46	2.74×10^{-4}	0.078 ~0.098 ~0.114	2.8	8	f_{in} } Polyvinyl chloride sheet : $l_{\frac{1}{2}} 250 \mu$
	24.0	51—100		0.098	2.9	3	f_{ot} }
	23.0	51—76		0.090	2.9	3	f_{in} }
	24.0	51—76		0.048	2.9	3	f_{ot} }
ウオルナット 化粧合板 [W. P]	23.0	58—100	15.0×10^{-4}	0.239 ~0.251 ~0.264	6.0	5	f_{in} Coated with N. C. lacquer
外 装 合 板 [P. P]	23.0	60—100	6.56×10^{-4}	0.130	5.05	8	f_{in} } used for outside of house
	23.0	60—100		0.124	5.1	3	f_{ot} }
	23.0	56—76		0.069	5.1	3	f_{in} }
	23.0	56—76		0.071	5.1	3	f_{ot} }
フォームオー バーレイ合板 [Fm. P]	19.0, 20.6	40—100 46		0.180	6.0	6	f_{in} } l [P] = 2.7mm
	23.0	51—76		0.172	5.8	3	f_{in} }
	24.0	51—76		0.129	5.9	3	f_{ot} }

Note) f_{in} : 化粧面が h_i 側にある。Decorative side faces h_i (higher humidity).

f_{ot} : 化粧面が h_o 側にある。Decorative side faces h_o (lower humidity).

$$g = \frac{1}{\eta} \dots\dots\dots (6)$$

より、透湿率 η が計算できる。

r_{sm} が R_m に対して無視できる程度の大きさのとき

$$R_m \simeq r_m \quad J \simeq G \dots\dots\dots (7)$$

となり、湿気貫流率 J を G で代用してもよいことになる。この eq. (7) を使いうる基準として、試料が均一層で、5% 以下の誤差内では R_m が 4 (m²h mmHg/g) 以上であることが必要であろう。

R_m 対 l の直線関係が実験的に求めがたい場合、eq. (5), (7) より η の推定値 η' を得たいときは

$$\eta' = G \cdot l \dots\dots\dots (8)$$

より近似的に求めた。

これらの考え方で、各材料について、 η , η' , G , J , S を計算した結果を Table 1~9 に示す。

Table 1 は素材の透湿率で、広葉樹材は樹幹半径の 1/2 の部位より採取した。 $h_i=100\%$ の場合を見ると、 h_o が低いほど透湿率は小さい傾向がある。また、 $h_i=100\%$ は 76%, 86% に比較して、 η の値が大きいようである。それぞれについて針葉樹材と広葉樹材を比較すると、後者が小さいことがわかる。

Table 2 の合板 (1), (2), (4) は厚さの異なる市販品で、厚さ 2.6 mm のものが 2 類合板、他は 1 類合板である。合板 (3) は同一厚さのものの平均、合板 (4) は測定温度が異なる場合である。

パーティクルボードは針葉樹材程度の $\eta (=5 \times 10^{-3})$ で、ハードボードは $\eta = 1 \sim 2 \times 10^{-3}$ のように小さい。 J もハードボード (厚さ 3.6 mm) の値は合板 (厚さ 5.6 mm) に匹敵する。この表でも、 $h_i=76\%$

Table 4. 塗料皮膜の透湿係数
Moisture permeance rate of paint film

塗膜の種類 Kinds of paint films	温度 [T] (°C)	h_o-h_i (%)	透湿率 [η'] (g/mh mmHg)	透湿係数 [G] (g/m ² h mmHg)	厚さ [l] (μ)
ラッカー塗膜 N. C. lacquer	19.0~20.7	32—100	4.70×10^{-6}	0.0758	av. 62 (60~63 μ)
		44—100	4.31 "	0.0695	
		52—100	5.46 "	0.0881	
		65—100	5.52 "	0.0890	
		86—100	6.57 "	0.106	
	22.0	51— 76	4.41×10^{-6}	0.0711	av. 62 (60~63 μ)
		65— 76	4.40 "	0.0710	
	19.0~20.7	32—100	3.78×10^{-6}	0.0189	av. 200 (180~215 μ)
		44—100	3.35 "	0.0168	
		52—100	4.40 "	0.0220	
		65—100	4.30 "	0.0215	
		86—100	6.36 "	0.0318	
ポリエステル塗膜 Polyester resin paint	19.0~20.7	32—100	3.78×10^{-6}	0.0189	av. 200 (180~215 μ)
		44—100	3.35 "	0.0168	
		52—100	4.40 "	0.0220	
		65—100	4.30 "	0.0215	
		86—100	6.36 "	0.0318	
	22.0	51— 76	3.30×10^{-6}	0.0165	av. 200 (180~215 μ)
		65— 76	3.60 "	0.0180	
アミノアルキッド塗膜 Amino-alkyd resin paint	19.0~20.7	32—100	1.60×10^{-5}	0.103	av. 155 (150~160 μ)
		44—100	1.91 "	0.123	
		52—100	2.26 "	0.146	
		65—100	2.69 "	0.174	
		80—100	4.83 "	0.312	
ポリウレタン塗膜 Polyurethane resin paint	19.0~20.7	32—100	3.65×10^{-6}	0.0589	av. 62 (61~63 μ)
		52—100	4.60 "	0.0742	
		86—100	6.32 "	0.102	

の値は $h_i=100\%$ の場合より、 η および J はともに小さい。

Table 3 の各種の化粧合板では、ポリエステル樹脂、Dap 樹脂、塩ビオーバーレイなどの η' は小さく、未処理合板の 1/10 程度になる。プリント系は化粧合板の中では大きい値になる。化粧面が透湿カップの内側または外側、すなわち h_i に面する (f_{in} と略す) かまたは h_o に面する (f_{ot} と略す) かによって、 J の値が異なる。総体的に、 f_{ot} が f_{in} より、 J 値は小さい傾向にある。しかし、 $h_i=76\%$ で f_{in} の場合の J が、 $h_i=100\%$ で f_{ot} の場合より小さい Dap 合板、塩ビオーバーレイ合板などのケースもある。

防湿層の特性を知るため、木材用塗料皮膜の透湿係数を Table 4 に示す。皮膜はガラス板上で、ナイフコーターを用いて均一厚さに仕上げた。Table 5 は厚さ 2.6 mm 合板に塗料を重ねぬりする各過程での J の変化を示すもので、N. C ラッカーでは、 $J=0.1$ のオーダーまで容易に下げられる。Table 5 の $J=0.15$ (g/m²h mmHg) の場合を、eq. (3) によって Table 2, 4 のデータを用いて計算する。

$$2.6 \text{ mm 厚合板の } r_m = \frac{2.6 \times 10^{-3}}{4 \times 10^{-3}} = 0.65 \text{ (m}^2\text{h mmHg/g)}$$

$$\text{N. C ラッカーの } r_m = \frac{81 \times 10^{-6}}{5 \times 10^{-6}} = 16.2 \text{ (m}^2\text{h mmHg/g)}$$

Table 5. 塗膜厚さと湿気貫流率の関係
Relation between thickness of paint layer and moisture transmission coefficient

材 料 [M]	温 度 [T] (°C)	h_o-h_i (%)	塗 膜 厚 さ Paint thickness (μ)	湿気貫流率 [J] (g/m ² h mmHg)
ラッカー塗装合板 (2.6 mm 厚) 2.6 mm thick plywood coated with N. C. lacquer	21.0	50—100	0	1.00
	"	"	29	0.30
	"	"	43	0.25
	"	"	61	0.18
	"	"	81	0.15
ポリエステル塗装合板 (2.6 mm 厚) 2.6 mm thick plywood coated with polyester resin	20.8	55—100	0	1.43
	"	"	42	0.45
	"	"	63±8	0.34
	"	"	90	0.25

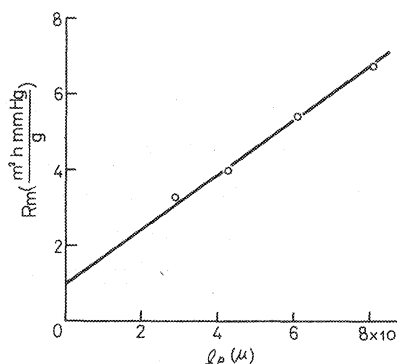
Note) 塗膜厚さの変動範囲 (Both limit of paint thickness) $\pm 5 \mu$

Table 6. 木材上の塗膜層の透湿率
Moisture permeability constant of the paint layer on wood

材 料 [M]	温 度 [T] (°C)	h_o-h_i (%)	透 湿 率 [η, η'] (g/mh mmHg)	備 考 References
ヒノキ材上の N. C. ラッカー N. C. lacquer layer on HINOKI wood	23.0	48—76	$2.8 \sim 3.2 \times 10^{-5}$	f_{in} l (N. C. L) = 120 μ f_{ot}
	23.0	48—76	1.1×10^{-5}	
ブナ材上の N. C. ラッカー N. C. lacquer layer on BUNA wood	23.0	48—76	$2.4 \sim 2.6 \times 10^{-5}$	f_{in} l (N. C. L) = 96 μ f_{ot}
	23.0	48—76	$7.2 \sim 7.5 \times 10^{-6}$	
ミズナラ材上の N. C. ラッカー N. C. lacquer layer on MIZUNARA wood	23.0	52—76	1.8×10^{-5}	f_{in} l (N. C. L) = 105 μ f_{ot}
	23.0	52—76	$7.1 \sim 7.3 \times 10^{-6}$	
合板上の N. C. ラッカー N. C. lacquer on plywood	21.0	50—100	1.4×10^{-5}	f_{in}, l (N. C. L) = 29~81 μ f_{ot}, l (Polyester) = 42~90 μ
	20.8	55—100	2.5×10^{-5}	

Note) 下地材料: 2.6mm 厚合板 (Base material: 2.6mm thick plywood), 塗料: N. C ラッカー (Paint: N. C. lacquer), $h_i=100\%$, $h_o=50\%$, 21.0°C .

Fig. 5 塗装合板の湿気貫流抵抗 (R_m) と塗膜厚さ (l_p) の関係
Relation between Resistance of moisture transmission (R_m) of painted plywood and thickness of painted layer (l_p).



ゆえに、塗装合板の $J \approx \frac{1}{16.9} = 0.06 \text{ (g/m}^2\text{h mmHg)}$ 以下、これは実測値の $1/2.5$ である。Fig. 5 は重ねぬりによる R_m の増加と塗膜厚さの関係で、両者に直線性が認められる。この直線の勾配より η を計算したのが Table 6 の最下段にあるよう、Table 4 の 5×10^{-6} に比して 1.4×10^{-5} のように大きくなり、これを用いて上の計算をやり直すと、 $J \approx 0.15$ となり、実測値と一致する。合板上の塗膜層の透湿性の増大の一因として、合板上では塗膜層の不均一な厚さのため、透湿しやすいところが存在し、その影響が現われることが考えられる。

ラワン (合板) に比べて、表面状態がちなヒノキなどについて、同様な調査をした結果を Table 6 の上・中段に示す。ラッカー塗装面が h_i に面する (f_{in}) 場合、Table 6 の 3 樹種で、 $\eta' = 1.8 \sim 3.2 \times 10^{-5}$ であり、Table 4 のラッカー皮膜の $\eta' = 4.4 \times 10^{-6}$ の約 6 倍である。しかし、塗装面が h_o に面する (f_{ot})

Table 7. 高湿度に対する塗膜層の位置と湿気貫流率
Moisture transmission coefficient related to the location of the painted layer against higher humidity

材 料 [M]	温度 [T] (°C)	h_o-h_i (%)	湿気貫流率 [J] (g/m²h mmHg/g)	湿気貫流抵抗 [Rm] (m²h mmHg/g)	厚さ [l] (mm)	測定数 [n]	備 考 References
[ラッカー塗膜層] + [ヒノキ] [N. C. lacquer layer] + [HINOKI wood]	23.0	48—76	0.167	6.0	4.2	5	f_{in} l [N. C. L] =120 μ f_{ot}
	"	"	0.147	6.8	4.8	"	
	"	"	0.139	7.2	7.8	"	
	"	"	0.072	13.8	5.8	"	
[ポリエステル塗膜層] + [アカマツ] [Polyester resin layer] + [AKAMATSU wood]	21.0	40—76	0.204	4.9	2.5	5	f_{in} l [polyester] =78 μ
	21.5	66	"	"	"	"	
	"	"	0.147	6.8	5.1	"	
[ラッカー塗膜層] + [ブナ] [N. C. lacquer layer] + [BUNA wood]	23.0	48—76	0.189	5.3	3.0	5	f_{in} l [N. C. L] =96 μ f_{ot}
	"	"	0.167	6.0	4.1	"	
	"	"	0.145	6.9	6.0	"	
	"	"	0.069	14.4	3.0	"	
[ラッカー塗膜層] + [ミズナラ] [N. C. lacquer layer] + [MIZUNARA wood]	23.0	52—76	0.141	7.1	2.7	5	f_{in} l [N. C. L] =105 μ f_{ot}
	"	"	0.132	7.6	3.2	"	
	"	"	0.114	8.8	5.2	"	
	"	"	0.060	16.6	3.2	"	
	"	"	0.057	17.5	5.2	"	

Note) 1. f_{in} : 塗膜層が h_i 側にある。Painted side faces h_i (higher humidity).

f_{ot} : 塗膜層が h_o 側にある。Painted side faces h_o (lower humidity).

2. 木材中の水分の拡散方向: 接線方向。Moisture movement is along tangential direction of wood.

Table 8. 防湿材料の透湿率
Moisture permeability constant of moisture proof materials

材 料 (M)	温 度 [T] (°C)	h_o-h_i (%)	透 湿 率 (η') (g/mh mmHg)	透 湿 係 数 [G] 湿 気 貫 流 率 [J] (g/m ² h mmHg)	厚 さ [l] (μ)	測定数 [n]
セロファン [C] (防湿性)	19.0 20.0	50—100 75—100		$J=5.03\sim5.28\sim5.53$ $J=5.09$	25~27 25~27	8 4
防湿セロファン MST (M. P. C)	18.0 20.0 20.0	23—100 56—100 62—100 89—100	2.70×10^{-6} (2.77 3.65 5.41	$G=0.087$ " (0.089 0.118 0.175	30~33	6 6 6
ビニール フィルム Vinyl film	18.5 19.0	56—100 75—100	5.22×10^{-7} 5.61 "	" 0.0127 " 0.0137	40~42	4 4
防湿シート I *1 (M. P. S-I)	17.0 20.0	26—100 62—100	1.52×10^{-7} 1.73 "	" 0.0021 " 0.0024	72~75	5 5
防湿シート II *2 (M. P. S-II)	17.0 20.0	26—100 62—100	1.75×10^{-6} 1.73 "	" 0.0140 " 0.0158	110	5 5
アルミ蒸着ポリプロ レン膜*3	18.0 20.0	23—100 62—100	6.65×10^{-8} 3.53 "	" 0.0030 " 0.0016	22	6 6
ルーフィング (Ro)	18.5 20.0	56—100 75—100	3.30×10^{-5} 3.05 "	" 0.035 " 0.032	ca. 0.95 (mm)	5 5
木目印刷紙*4	18.0 21.0	56—100 58 74—100		$J=4.90\sim5.09\sim5.36$ $J=3.77\sim4.02\sim4.29$	106~108	6 6
ポリエステル含浸印刷 紙*5	20.0 19.0 21.0	18—100 57—100 74—100		$G=$ 0.028~0.038~0.055 0.036~0.039~0.057 0.035~0.047~0.059	ca. 200	6 6 6
Dap 樹脂含浸印刷紙*6	20.0 19.0 21.0	18—100 57—100 74—100		$G=$ 0.13 ~0.16 ~0.20 0.22 ~0.24 ~0.28 0.18 ~0.22 ~0.28	ca. 204	6 6 6

Note) *1 Composite sheet (KOP+PE+CP), KOP: 延伸ポリプロピレン Stretched polypropylene, PE: ポリエチレン Polyethylene, CP: 未延伸ポリプロピレン Unstretched polypropylene.

*2 Composite sheet (OP+PE+VF+PE), OP: ポリプロピレン Polypropylene, PE: ポリエチレン Polyethylene, VF: ビニロン Vinylon.

*3 Polypropylene vacuum-evaporated with Al.

*4 Wood-grain printed paper.

*5 Printed paper impregnated with polyester resin.

*6 Printed paper impregnated with diallyl phthalate.

場合は、ラッカー皮膜の値にかなり接近する。

Table 7 は厚さを異にする木材の、塗膜層の位置が f_{in} , f_{ot} の場合の J , R_m を測定した結果である。これらの片面塗装材は、 $h_i=100\%$ にすると「そり力」が強く、カップとの結合が不良であった。表より明らかなごとく、 f_{ot} の R_m は f_{in} の約2倍であり、透湿量に影響するのがわかる。

Table 8 は各種の防湿材料、化粧材料の透湿率表である。建築用にはルーフィングの利用が盛んであるが、複合フィルムの中には、これ以上の防湿性能 ($\eta'=10^{-7}\sim10^{-8}$) をもち、かつ、強じん性もすぐれて

Table 9. 各種材料の湿気貫流率
Moisture transmission coefficient of each kind material

材 料 (M)	温度 {T} (°C)	h_o-h_i (%)	湿気貫流率 {J} (g/m ² h mmHg)	厚 さ {l} (mm)	測定数 {n}	備 考 References
ウォルナット化粧合板+ 防湿シート+ポリエチレ ンフォーム (W. P+M. P. S+F. E)	22.8	46—100	0.008~0.012 0.012~0.015	10.1 (P:6.1, F, E:4.0)	6 6	M. P. S-I f_{in} M. P. S-II
ク ロ ス 合 板 (C. P)	23.0 23.0	60—100 60—100	1.05~1.23 0.46~0.51	2.8~3.1 5.7~5.9	6 6	f_{in} , $r_a(P)=0.58$ ~0.62
プリント合板+石こうボ ード (Pr. P+G)	24.0	51—100	0.36	11.8 (P:2.6, G:9.2)	4	f_{in}
塩ビオーバーレイパーテ ィクルボード (P. C. PA)	24.0	51—100	0.072	8.7~8.9	4	f_{in} , $r_a=0.76$
塩ビオーバーレイパーテ ィクルボード+ポリエチ レンフォーム (P. C. PA+F. E)	24.0	46—100 51—100	0.010~0.013 0.021	12.4 (P. C. PA:8.7, F. E:3.7)	6 4	f_{in} , $r_a(PA)=0.75$
クロス貼りハードボード (C. HA)	23.0 23.0	60—100 60—100	0.21~0.47 0.11~0.17	3.8~4.0 6.3~6.6	6 6	f_{in} , $r_a(HA)=1.01$
アスベスト板 [As]	21.5	44—100	0.42~0.60~0.75	5.5~5.7	6	$r_a=0.79$
石綿スレート板 [As. C]	20.6	46—100	0.76~0.93~1.19	4.5~4.8	6	$r_a=1.84$
石 こう ボ ー ド [G]	23.0	60—100	1.77	9.4~9.6	5	$r_a=0.76$
木毛セメント板 [C. E]	19.0	40—100	2.5	10~12	5	$r_a=0.56$
ポリスチロールフォーム (F. S)	19.0 20.5	44—100 65—100	0.33 0.35	10.4~10.6 10.5~10.6	5 5	$r_a=0.018$
ポリエチレンフォーム (F. E)	22.8	46—100	0.022~0.024	4.0~4.2	6	$r_a=0.042$

いるものもある。樹脂含浸紙は、化粧板の製造工程と同じ条件で前処理されたものである。

Table 9 は木質系の複合材料、無機材料の湿気貫流率を示す。複合したウォルナット化粧合板について、構成より J を計算すると

(Table 3 より) 化粧合板の $r_m=1/0.25=4$ (m²h mmHg/g)

(Table 8 より) 防湿シートIIの $r_m=1/0.016=62.5$ (m²h mmHg/g)

(Table 9 より) ポリエチレンフォームの $r_m=1/0.024=41.6$ (m²h mmHg/g)

ゆえに $J=1/108=0.0093$ (g/m²h mmHg)

実測値は0.012~0.015 (Table 9) であるから、シート状の dry type の防湿層でも、計算値と実験値のずれを生じる。

Table 10 は素材料の η , G (または J) より、塗装型、オーバーレイ型、複合型などのラミネート構造の J を計算で求めて、実験値と比較した。計算にはこれまでの各表を用い、 h_i は50%前後、 h_o は100%に限っている。合板の表面抵抗は一律に0.3を用いた。ここで、 m を下のように定める。

$$m = \text{計算値} / \text{実験値}$$

表において、[4]を除くと、 m の値は0.9~1.18の間にあり、ほぼ一致する。Table 10 以外のラミネ

Table 10. 湿気貫流率の実験値と計算値の比較
Comparison of experimental values and calculative values of
moisture transmission coefficient

種 類 Class	材 料 Material name	構成要素の透湿抵抗 r_m of structural member	計 算 値 Calculative values		実 測 値 Experimental values (J) (g/m ² h mmHg)
			Σr_m (m ² h mmHg/g)	$1/\Sigma r_m$ (g/m ² h mmHg)	
塗 装 型 Painted type	1. ウォルナット化粧合板 [W. P]	合 板 6.6mm $r_m = \frac{6.0 \times 10^{-8}}{4.7 \times 10^{-8}} + 0.3 = 1.6$ ラッカー塗膜 約 30 μ $r_m = \frac{30 \times 10^{-6}}{1.4 \times 10^{-5}} = 2.1$	3.7	0.27	0.23~0.26
	2. ポリエステル塗装合板 [P.E. P]	合 板 2.6mm $r_m = \frac{2.6 \times 10^{-8}}{4.7 \times 10^{-8}} + 0.3 = 0.85$ ポリエステル塗膜 約 90 μ $r_m = \frac{90 \times 10^{-6}}{2.5 \times 10^{-5}} = 3.6$	4.45	0.224	0.25
オーバーレイ型 Overlaid type	3. Dap 樹脂 オーバーレイ合板 [D. P]	合 板 2.8mm $r_m = \frac{2.8 \times 10^{-8}}{4.7 \times 10^{-8}} + 0.3 = 0.90$ Dap 樹脂含浸紙 約 200 μ $r_m = \frac{1}{0.24} = 4.2$	5.1	0.19	0.167
	4. ポリエステル樹脂 オーバーレイ合板 [P.E. S. P]	合 板 2.9mm $r_m = \frac{2.9 \times 10^{-8}}{4.7 \times 10^{-8}} + 0.3 = 0.92$ ポリエステル含浸紙 約 200 μ $r_m = \frac{1}{0.0391} = 25.6$	26.5	0.038	0.065~0.22
複 合 型 Composite type	5. プリント合板+石こう ボード [Pr. P+G]	プリント合板 2.6mm $r_m = \frac{1}{0.469} = 2.13$ 石こうボード 9.4mm $r_m = \frac{1}{1.77} = 0.56$	2.69	0.372	0.362
	6. 塩ビオーバーレイパー ティクルボード+ポリ エチレンフォーム [P. C. Pa+F. E]	塩ビオーバーレイパー ティクルボード 8.7mm $r_m = \frac{1}{0.0722} = 13.8$ ポリエチレンフォーム 4mm $r_m = \frac{1}{0.023} = 43.5$	57.3	0.0174	0.0131~0.0207

r_m : m²h mmHg/g

ート型の材料（おもに Table 3, 7, 9）について、 $h_i=70\%$, 100% における f_{in} または f_{oi} の場合の、実験値と計算値を比較すると、若干のものを除いて

$$m=0.7\sim 1.3 \quad (\text{Table 1}\sim 9 \text{ より上例のごとく計算})$$

になる。この範囲外にあるのは、 $h_i=76\%$, 厚さ 3.0 mm のポリエステルオーバーレイ合板 (Table 3), M. P. S-I で複合したウオルナット化粧合板 (Table 9) などである。ポリエステル合板の場合は素材料を異にする市販品との比較であるから、 m が上記の範囲外であるのも十分考えられる。したがって、 h_i が 76% で、 f_{oi} の場合を特に注意するならば、実測した素材料の η , G , J に、 m の変動を考慮して適当な幅をもたせることによって、実験値を推定することが可能である。

素材料、複合材料の測定値 (η , G , J) と eq. (3) を用いて、3-5 で記述するように、結露の予測をおこなうのであるが、この際、中空パネルの透湿という条件下で、計算値の妥当性を再度検討する。

2-3. 湿度計法による測定結果

Fig. 6 は試片をとりつけた透湿箱を、Table 11 に示す約 30% の初期湿度 h_{i0} に保ってから、外囲の恒温恒湿槽の湿度を急激に h_{t1} まで増湿したときの、50 時間における透湿箱中の関係湿度の増加曲線を示す。また、Fig. 7, 8 は、 $h_{i0}=60\%$ 程度に保たれていた透湿箱の外囲湿度を、 $h_{t1}=90\%$ 程度まで増湿し、そのまま 24 時間経過後、 $h_{t2}=50\%$ 程度まで脱湿する過程の透湿箱中の関係湿度の変化曲線を示す。槽内の湿度変化の time lag は、湿度上昇の場合、数分で 90% 近くまで上昇し、平衡に達するのに約 30 分、湿度低下の場合は、約 20 分で 60% 程度まで低下し、1~2 時間後に平衡に達する。Fig. 6~8 の試料名と実験条件を Table 11 にまとめて示す。合板 12 mm, ハードボード 6.4 mm になると透湿量が少なくなり、さらに、防湿層をもつ Fig. 8 の No. 4, No. 6 の透湿量は極度に少ない。

定常状態において、試片の有効な透湿面積 Δa を、 Δt 時間に通過する水蒸気量 W は、内外の水蒸気圧を p_i , p_o とすると

$$W = J \cdot (p_o - p_i) \cdot \Delta a \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots (9)$$

同時間 Δt における内容積 V の透湿箱中の関係湿度の増加 ($h_{i1} \rightarrow h_{i2}$) および容積単位絶対湿度 σ より

$$W = (h_{i2} - h_{i1}) \cdot V \cdot \sigma \quad \dots\dots\dots (10)$$

h_{i1} , h_{i2} の差が小さいとき

$$\frac{h_{i1} + h_{i2}}{2} = h_m \quad \dots\dots\dots (11)$$

とおくと、湿気貫流率 J は eq. (9), eq. (10) より

$$J = \frac{h_{i2} - h_{i1}}{\Delta t} \cdot \frac{1}{h_t - h_m} \cdot \frac{\bar{d} \cdot \sigma}{p_s} = J_{P.B} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 h_t は槽内の関係湿度、 $\bar{d}$ は透湿箱の内法深さ、 p_s は飽和水蒸気圧である。

Fig. 6~8 に示す関係湿度の増加の傾向はロジスティク型であり、時間によって J の値が異なる。Table 12 に示す h_m における J を図解法で求めて、同表の右欄にのせてある。これと前掲のカップ法による J と比較すると、明らかに湿度計法の値は小さい。たとえば、湿度計法を $J_{P.B}$ (eq. 12), 透湿カップ法を J_{CUP} として区別すると、ハードボード (厚さ: 6.4 mm) では、 $J_{P.B}=0.0016$, $J_{CUP}=0.165$, Dap 樹脂オーバーレイ合板では、 $J_{P.B}=0.0011$, $J_{CUP}=0.152$, ウオルナット化粧合板では、 $J_{P.B}=0.0024$, $J_{CUP}=0.251$ のごとくである。

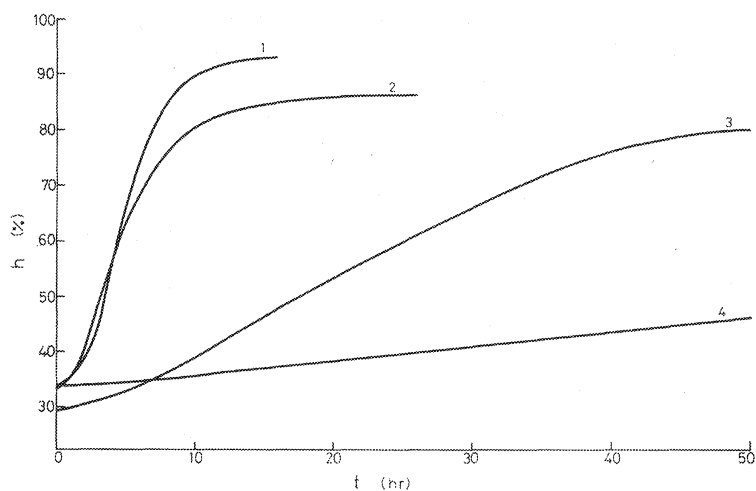
$h_i(t)$ を透湿箱内の関係湿度の時間変化を示すとすれば

Table 11. 湿度計法の実験条件
Experimental condition of the hygrometer method

図 Figs.	試料 番号 No.	材 料 (M)	厚さ [<i>l</i>] (mm)	実 験 湿 度 (%) Experi. condition: R. H.			備 考 References
				h_{t0}	h_{t1}	h_{t2}	
Fig. 6	1	ヒ ノ キ [Hi]	3.1	33.5	97		$r_a=0.42$
	2	合 板 [P]	2.7	34	89		$r_a=0.56$, 3 ply
	3	合 板 [P]	5.7	30	89		$r_a=0.63$, 3 ply
	4	合 板 [P]	12.1	33.5	88		$r_a=0.65$, 5 ply
Fig. 7	1	合 板 [P]	2.6	59	88	54	$r_a=0.57$, 3 ply
	2	合 板 [P]	5.7	64	91	51	$r_a=0.62$, 3 ply
	3	合 板 [P]	12.0	59	95	50	$r_a=0.66$, 5 ply
	4	ハードボード [HA]	3.6	61	93	51	$r_a=1.02$
	5	ハードボード [HA]	6.4	65.8	95	60	$r_a=1.07$
	6	パーティクルボード [PA]	10.0	64.5	93	50	$r_a=0.73$
Fig. 8	1	プリント合板 [Pr. P]	2.6	57	92	48	$r_a=0.61$
	2	Dap 樹脂オーバーレイ合板 [D. P]	3.1	58	95	54	l [Dap impregnated sheet] = 110 μ
	3	ウォルナット化粧合板 [W. P]	6.0	58	95	49	Walnut veneer coated with N. C. lacquer
	4	ウォルナット化粧合板+防湿シート+ポリエチレンフォーム [W. P+M. P. S-I + F. E]	10.4	62	93	49	$\begin{cases} l \text{ [W. P]} = 6\text{mm} \\ l \text{ [F. E]} = 3.8\text{mm} \\ l \text{ [M. P. S-I]} = 75\mu \end{cases}$
	5	プリント合板+石こうボード [Pr. P+G]	11.8	65.7	95	50	$\begin{cases} l \text{ [Pr. P]} = 2.7\text{mm} \\ l \text{ [G]} = 9.1\text{mm} \end{cases}$
	6	塩ビオーバーレイパーティクルボード+ポリエチレンフォーム [P. C. PA+F. E]	12.3	64.5	95	50	$\begin{cases} l \text{ [P. C. PA]} = 8.8\text{mm} \\ l \text{ [F. E]} = 3.5\text{mm} \end{cases}$
	7	アスベスト板 [As]	5.7	62	95	47	$r_a=0.78$

h_{t0} : 初湿度 Initial relative humidity.

h_{t1} : 吸湿過程 Adsorption process, h_{t2} : 脱湿過程 Desorption process.

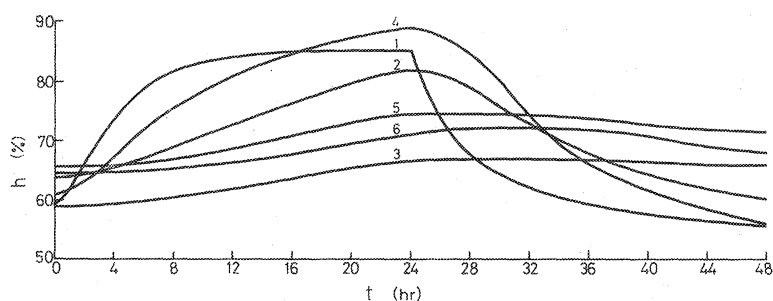


Note) 供試片 (No.) と実験条件は Table 11 を参照。

(Test samples (No.) and experimental conditions are listed on Table 11).

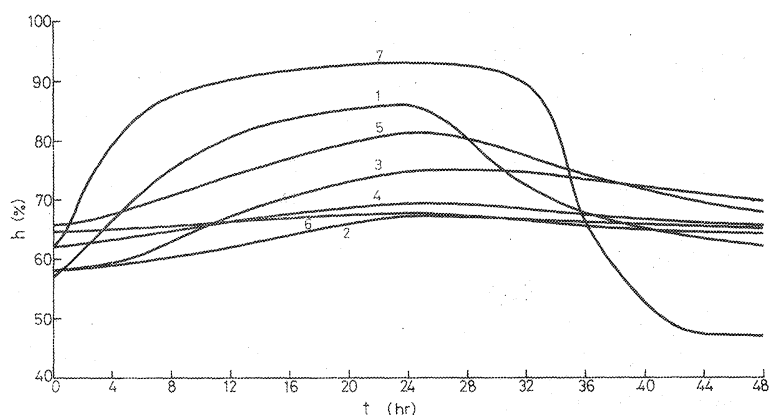
Fig. 6 透湿による透湿箱内の関係湿度の増加 (20.5°C)

Increase of relative humidity in the permeation box during moisture permeation at 20.5°C.



Note) 供試片 (No.) と実験条件は Table 11 を参照。
(Test samples (No.) and experimental conditions are listed on Table 11).

Fig. 7 透湿による透湿箱内の関係湿度の変化
Changes of relative humidity in the permeation box
during moisture permeation.



Note) 供試片 (No.) と実験条件は Table 11 を参照。
(Test samples (No.) and experimental conditions are listed on Table 11).

Fig. 8 透湿による透湿箱内の関係湿度の変化
Changes of relative humidity in the permeation box
during moisture permeation.

$$J_t = \frac{dh_i(t)}{dt} \cdot \frac{1}{h_t - h_i(t)} \cdot \frac{\bar{d} \cdot \sigma}{p_s} \dots (13)$$

より、任意時間の $J \equiv J_t$ が求められる。eq. (13) を確認するため、次の湿度変化を仮定する。

$$h_i(t) = h_i(\infty) \cdot (1 - e^{-kt}) \dots (14)$$

$$\frac{dh_i(t)}{dt} = k \cdot h_i(\infty) \cdot e^{-kt} \dots (15)$$

これらを eq. (13) に代入すると

$$J_t = \frac{k \cdot \bar{d} \cdot \sigma}{p_s} \dots (16)$$

をうる。eq. (12) にて、 t , $(t + \Delta t)$ における湿度変化から J を求めると

$$J = \left(\frac{1}{e^{kt}} - \frac{1}{e^{k(t+\Delta t)}} \right) \cdot \bar{d} \cdot \sigma / \Delta t \cdot \exp(kt) \cdot p_s$$

$$\frac{k}{1 + k \cdot \Delta t} \cdot \frac{\bar{d} \cdot \sigma}{p_s} \dots (17)$$

Table 12. 各材料の透湿による R. H. の増加曲線式
Empirical formula of increasing R. H. by moisture
transmission of every material

材 料 (M)	厚さ [l] mm	実 験 式 Empirical formula (h_i : (%)) ($0 \leq t \leq 24$ or 50 hr)	eq. 12 より計算 from eq. 12 湿気貫流率 h_m (%) ($J_{P.B}$) (g/m ² h mmHg)	
			h_m (%)	$J_{P.B}$ (g/m ² h mmHg)
Fig. 6				
① ヒ ノ キ (Hr)	3.1	$h_i = \frac{17.02e^{0.481t}}{0.183e^{0.481t} + 0.817} \quad t > 2$	57	0.0181
② 合 板 (P)	2.7	$h_i = \frac{28.28e^{0.396t}}{0.328e^{0.396t} + 0.672} \quad t \geq 1$	56.5	0.0147
③ 合 板 (P)	5.7	$\begin{cases} h_i = (29.0e^{0.06t}) / (0.363e^{0.06t} + 0.637) & t < 26 \\ h_i = 16.0(1 - e^{-0.106(t-30)}) + 66.0 & t \geq 30 \end{cases}$	55.5	0.0027
④ 合 板 (P)	12.1	$h_i = 0.264t + 33.1 \quad t \geq 4$	—	—
Fig. 7				
① 合 板 (P)	2.6	$h_i = \frac{58.5e^{0.28t}}{0.686e^{0.28t} + 0.314} \quad —$	70	0.0153
② 合 板 (P)	5.7	$h_i = 64.2e^{0.0117(t-2)} \quad t \geq 2$	74.5	0.0038
③ 合 板 (P)	12.0	$h_i = 59.3e^{0.006(t-4)} \quad t \geq 4$	64	0.0010
④ ハードボード (HA)	3.6	$h_i = \frac{57.4e^{0.119t}}{0.627e^{0.119t} + 0.372} \quad —$	70	0.0059
⑤ ハードボード (HA)	6.4	$h_i = 66.2e^{0.0063(t-5)} \quad t \geq 5$	72	0.0016
⑥ パーティクルボード (PA)	10.0	$h_i = 64.8e^{0.0046(t-6)} \quad t \geq 6$	69.5	0.0015
Fig. 8				
① プリント合板 (Pr. P)	2.6	$h_i = \frac{57.0e^{0.143t}}{0.647e^{0.143t} + 0.351} \quad —$	66.5	0.0064
② Dap樹脂オーバーレイ合板 (D. P)	3.1	$h_i = 58.8e^{0.0071(t-4)} \quad t \geq 4$	63.5	0.0011
③ ウオルナット化粧合板 (W. P)	6.0	$h_i = \frac{53.9e^{0.063t}}{0.632e^{0.063t} + 0.368} \quad t \geq 5$	67	0.0024
④ ウオルナット化粧合板+防湿シート+ポリエチレンフォーム (W. P+M. P. S-II+F. E)	10.4	$h_i = 62.0e^{0.0056t} \quad t \leq 20$	66.5	0.0008
⑤ プリント合板+石こうボード (Pr. P+G)	11.8	$h_i = 65.6e^{0.0096t} \quad t \leq 22$	75	0.0026
⑥ 塩ビオーバーレイパーティクルボード+ポリエチレンフォーム (P. C. PA+F. E)	12.3	$h_i = 0.134t + 64.5 \quad —$	66.3	0.0003
⑦ アスベスト板 (As)	5.7	$\begin{cases} h_i = 31.5(1 - e^{-0.195t}) + 62.0 & t \leq 12 \\ h_i = (64.6e^{0.193t}) / (0.689e^{0.193t} + 0.311) & t \geq 12 \end{cases}$	75	0.0164

Note) 1. 0~50 hr (Fig. 6), 0~24 hr (Figs. 7, 8) におけるアルミ製透湿箱 ($1.12 \times 10^4 \text{ cm}^3$) 内の R. H. の増加。
Increasing R. H. in Al-perm. box ($1.12 \times 10^4 \text{ cm}^3$) during 0~50 hr or 0~24 hr.

2. 湿気貫流率 ($J_{P.B}$) は eq. 12 より概算。

Moisture transmission coefficient ($J_{P.B}$) is approximately calculated from eq. 12.

すなわち、 dt を微小にとると eq. (16) に一致し、eq. (13) の妥当性が知られる。

eq. (13) を計算する上に便のため、Table 12 に Fig. 6~8 の関係湿度の増加過程の実験式を示す。各曲線はシグモイドであるが、この中には、初期の立上りの緩慢なもの、変曲点が明白でなかったり、その時間が遅れるものでは、指数式あるいは直線式の方がよく実験値に近似する。

曲線の一般式を

$$h_t(t) = \frac{a \cdot e^{ct}}{b \cdot e^{ct} + c} \dots\dots\dots (18)$$

または

$$h_t(t) = a \cdot e^{ct} \dots\dots\dots (19)$$

とおけば、 J_t は下式になる。

$$J_t = \frac{a \cdot c \cdot \varepsilon \cdot e^{ct}}{h_t(b \cdot e^{ct} + c)^2 - a \cdot e^{ct}(b \cdot e^{ct} + c)} \cdot \frac{\bar{d} \cdot \sigma}{p_s} \dots\dots\dots (20)$$

$$J_t = \frac{a \cdot \varepsilon \cdot e^{ct}}{h_t - a \cdot e^{ct}} \cdot \frac{\bar{d} \cdot \sigma}{p_s} \dots\dots\dots (21)$$

J_t の時間変化の一例を示すと

ヒ ノ キ (3.1 mm 厚)		ハードボード (3.6 mm 厚)	
時間 (hr)	J (g/m ² h mmHg)	時間 (hr)	J (g/m ² h mmHg)
1	0.0149	2	0.00527
4	0.0181	4	0.00598
6	0.0217	6	0.00588
8	0.0201	12	0.00630
12	0.0078	24	0.00528

上記のように曲線の形に対応して、 J_t も初期で小、中期で大、終期で小になる。Dap 樹脂オーバーレイ合板のように、指数式に近似できる J は

Dap 樹脂オーバーレイ合板 (3.0 mm 厚)

時間 (hr)	J (g/m ² h mmHg)
4	0.00079
8	0.00085
12	0.00093
16	0.00101
20	0.00110

このように時間とともに増加をたどる。各値を平均して代表値が得られるが、eq. (21) において、ある時間範囲 ($t_1 \rightarrow t_2$) における平均値を J_{av} とすると

$$J_{av} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{a \cdot \varepsilon \cdot e^{ct}}{h_t - a \cdot e^{ct}} \cdot K \cdot dt = \frac{K}{t_2 - t_1} \left[l_n |a \cdot e^{ct} - h_t| \right]_{t_1}^{t_2} \dots\dots\dots (22)$$

$$K = \frac{\bar{d} \cdot \sigma}{p_s}$$

となるので、上例の Dap 合板では、 $t_1=4$ hr、 $t_2=20$ hr を代入すると

$$J_{av} = \frac{1}{16} \int_4^{20} \frac{0.588 \times 0.0071 \cdot e^{0.0071t}}{0.95 - 0.588 \cdot e^{0.0071t}} \times 0.0684 dt = 0.00093$$

となつて、12 hr における値と一致する。

一般に dt 時間の J_{av} は

$$J_{av} = \frac{1}{dt} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dh_i(t)}{dt} \cdot \frac{1}{h_i - h(t)} \cdot \frac{\bar{d} \cdot \sigma}{p_s} dt \dots\dots\dots (23)$$

一方、 dt 時間の透湿箱中の関係湿度の増加 Δh_i は箱内・外の湿度差より

$$\Delta h_i \cdot \sigma \cdot V = J \cdot (h_i - h(t)) p_s \cdot \bar{a} \cdot dt \dots\dots\dots (24)$$

これより $t_1 \rightarrow t_2$ における平均の J は

$$J_{av}' = \frac{\Delta h_i}{\int_{t_1}^{t_2} \Delta h_i dt} \cdot \frac{\bar{d} \cdot \sigma}{p_s} \dots\dots\dots (25)$$

$$\Delta h_i = h_i - h(t)$$

たとえば、前例の Dap 樹脂オーバーレイ合板では、 $t_1=4$ hr, $t_2=20$ hr, $h_i=0.95$, $a=0.588$, $\varepsilon=0.00714$ を用いて

$$J_{av}' = \frac{\Delta h_i}{h_i(t_2 - t_1) + \frac{a}{\varepsilon}(e^{at_1} - e^{at_2})} \cdot \frac{\bar{d} \cdot \sigma}{p_s} = 0.00092 \dots\dots\dots (26)$$

となり、前例の計算値と一致する。

各試料の実験式 (Table 12, 注: h_i を % で表わすため、 a を 100 倍してある) を用いて、 J_i , J_{av} の計算が上述の例のごとく可能であるが、紙数の都合で割愛した。Fig. 6~8 の実験曲線の正確さは自記湿度計の精度に強く依存している。本実験に先だち、自記湿度計の性能チェックをおこなった。その詳細は 3-1 で記述する。

前述のごとく、 $J_{P.B}$ は J_{CUP} に対してかなり小さい。Table 13 は厚さ 5.7 mm の合板の、透湿カップ法と湿度計法の各場合の透過水蒸気量 (J_{CUP} , $J_{P.B}$) をそれぞれ示す。

$$\frac{J_{P.B}}{J_{CUP}} \sim \frac{J_{P.B}}{J_{CUP}} \dots\dots\dots (27)$$

であるから、透過水蒸気量の相違はおのおの湿気貫流率の大小に依存している。透湿カップの場合、透過

Table 13. 合板の透過水蒸気量 J (5.7 mm 厚)
Amount of transmitted water vapour J through
5.7mm thick plywood

湿度計法 Method of permeation box			透湿カップ法 Method of permeation cup		
h_i (%)	$J_{P.B}$ (g/m ² h mmHg)	$J_{P.B}$ (g/m ² h)	h_o (%)	J_{CUP} (g/m ² h mmHg)	J_{CUP} (g/m ² h)
30	1.32×10^{-3}	1.67×10^{-2}	20	0.678	8.936
39	1.71 "	1.88 "	—	—	—
50	1.98 "	1.79 "	50	0.661	5.798
76	3.11 "	1.35 "	66	0.694	3.890
80	1.56 "	0.56 "	88	0.746	1.570

温度 (Temperature) : 19.0~20.5°C

湿度計法の環境湿度 (R.H. in environmental atmosphere for permeation box) = 89%

透湿カップ法のカップ内湿度 (R.H. (h_i) inside of permeation cup) = 100%

した水蒸気が槽内を流れる強制気流によって直ちに除去され、試料表層で水分勾配が形成されて蒸発が促進される。透湿箱では、箱内に強制気流がなく、透湿による水蒸気圧の増加が透湿量を低減させる。これは3で記述する中空パネルの透湿でも同じ考え方ができる。

3. 木質中空パネルの透湿と結露

3-1. 結露試験装置

結露試験法について一定のものではなく、この実験では、中空構造のパネルの透湿・結露を測定するため Fig. 9 の装置を試作した。図のように左右が [A], [B] の2室に分かれ、それぞれ温・湿度が制御できる。試験用パネルは [A], [B] 両室の境界に垂直にとりつけてある。各室の大きさは、内法寸法 $60 \times 60 \times 60$ (cm), 温度範囲は [A] 室 $5 \sim 60^\circ\text{C}$, [B] 室 $-30 \sim 20^\circ\text{C}$, 湿度範囲は約 $20 \sim 95\%$ R. H., 温・湿度の精度は境界の試料の種類と制御器に与えた制御条件によって異なる。一例を示すと、5.6 mm 合板両面張り、厚さ 7.2 cm の中空パネルでは、[A] 室: $20 \pm 0.4^\circ\text{C}$, [B] 室: $-0.5 \pm 0.8^\circ\text{C}$, 関係湿度は $\pm 2 \sim 4\%$ である。中空層では $\pm 0.2^\circ\text{C}$, $\pm 2\%$ R. H. のように、[A], [B] 室に比して温・湿度の変動が少ない。[A] 室のパネル表面の温度を露点近くに設定したいときは、Fig. 9 の ⑮～⑰の容量を適当に調節し、温・湿度の変動を少なくした。[A], [B] 両室、中空層の各位置の温・湿度などを、以後の説明に便

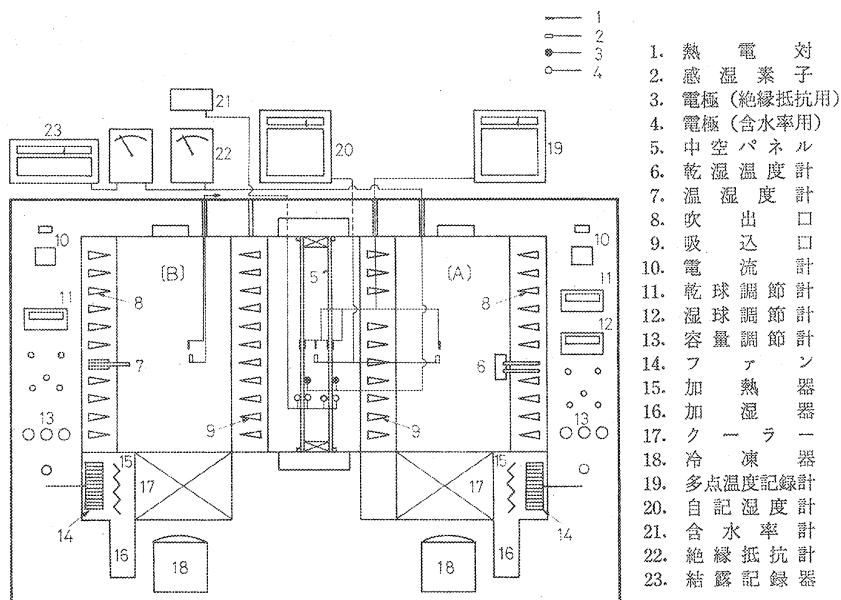


Fig. 9 パネル結露試験装置

The apparatus for measuring moisture condensation to panels.

1. Thermocouple, 2. Sensitive element to humidity, 3. Electrode for measuring insulation resistance, 4. Electrode for measuring moisture content, 5. Hollow core panel, 6. Wet and dry bulb thermometer, 7. Thermo-hygrometer, 8. Outlet, 9. Inlet, 10. Ammeter, 11. Dry bulb conditioner, 12. Wet bulb conditioner, 13. Capacity adjuster, 14. Fan, 15. Heater, 16. Boiler, 17. Cooler, 18. Refrigerator, 19. Multi-temperature recorder, 20. Auto-recording hygrometer, 21. Moisture meter, 22. Insulation resistance meter, 23. Moisture condensation recorder

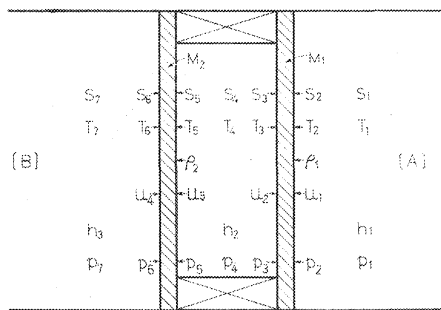
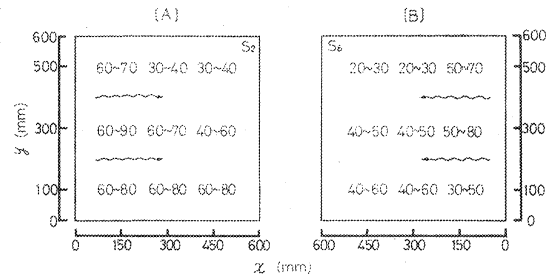


Fig. 10 中空パネル断面の位置記号
Symbol within cross-section of Hollow core panel.



矢印：風の方角, Arrow mark: The direction of air current. 単位 (Unit): cm/sec.

Fig. 11 パネル表面の風速の分布
Distributions of air current on surface of panel.

のため Fig. 10 の記号で表わす。

[A], [B] 両室内は吹出し ⑧ より吸込み ⑨ へ循環する気流でかくはんされて、均一な温度に保たれようとする。しかし、各部の風速には変動があり、Fig. 11 はパネルの S_2 , S_6 面より、10~20 mm 離れた位置のパネル面に沿う、矢印の方角の風速の分布を示す。中空パネルになると S_2 , S_6 の点 ($x=0$, $y=0$)、または点 ($x=600$, $y=600$) がそれぞれ向かい合う。図の矢印の方角に対して、白金抵抗線を直角に置くので、面に平行に流れる層流の速度を表わしている。次に述べる各検出器の取り付け位置は、 $x=300\sim450$ mm, $y=170\sim300$ mm で囲む範囲である。この部分は、 S_2 , S_6 面に向かって流れる風の速さが比較的均一 (40~70 cm/sec) であり、建築物の室内側の標準的風速条件に近い。

温度測定は、 x , $y=300$ の位置で、測温はフィリップス製 Pr 型 C-C 熱電対 (応答時間 50 ms) を用いた。 S_2 面より種々の垂直距離における温度と [A] 室中央の温度との差を Table 14 に示す*1。

関係湿度の測定は、感湿素子、変換器、記録計よりなるエース製湿度記録装置を用いた。湿度範囲は約 20~90% R. H. ($\pm 3\%$, ただし $0\sim40^\circ\text{C}$)、感湿素子は $12\times 25\times 4$ (厚さ) mm の極小形で、中空層内部での測定が可能である。本装置の性能検査を飽和塩溶液、硫酸水溶液を用いて行なった結果を Table 15

Table 14. パネル表面から距離 l における温度 T_l と T_1 (A室中央) の差 (deg)
Temperature difference (deg) between T_1 (center of A-chamber)
and temperature T_l at the distance l from panel surface.

パネル構造 Panel structure		l (mm)	0	1	5	10	20	30	50	70	100
Panel 1 [P]5.6+[A]60+ [P]5.6	max.		2.45	0.92	0.65	0.42	0.30	0.17	0.11	0.10	0.07
	min.		2.35	0.76	0.41	0.18	0.10	-0.03	-0.03	-0.08	-0.09
	av.		2.40	0.84	0.53	0.30	0.20	0.07	0.04	0.01	-0.01
Panel 21 [P. C. P _A]8.7+ [F. E]4.0+[A]60 +[P]5.7	max.		1.76	0.53	0.38	0.22	0.18	0.14	0.11	0.10	0.05
	min.		1.60	0.39	0.20	0.07	0.02	-0.02	-0.01	-0.02	-0.09
	av.		1.68	0.46	0.29	0.15	0.10	0.06	0.05	0.04	-0.02

測定条件 (Experimental condition)

$T_1=20\pm 0.4^\circ\text{C}$ (30.5cm from S_2 face), $T_7=0\pm 0.8^\circ\text{C}$.

*1 温度差の測定は、C-C 熱電対により、両者の起電力差を増幅して、 $0.1\mu\text{V}$ まで測定した。
起電力の校正は精密マイクロボルト設定器を用いた。

Table 15. 自記湿度計のデシケーター中における検定
Check of the auto-recording hygrometer in the desiccator

温度 Temp. °C	R. H. % (文献値, cited from literatures)	自記湿度計による R. H. % R. H. by auto-recording hygrometer	
		I	II
20	34, MgCl ₂ aq. sol.	35.5	35
22	40, H ₂ SO ₄ aq. sol.	41.5~43	—
20	45, KNO ₃ aq. sol.	47.5	46~47.5
22	58, H ₂ SO ₄ aq. sol.	60~62.5	59
20	66, NaNO ₂ aq. sol.	68	67.5
20	76.5, NaCl aq. sol.	76	76
3→31	78→74.9, NaCl aq. sol.	76.5→74.5	—
20	86, KCl aq. sol.	89	88
22	88, H ₂ SO ₄ aq. sol.	89~92	89

Note) I : 湿度の増加過程 Increasing process of R.H.

II : 湿度の減少過程 Decreasing process of R.H.

に示す。記録計への（出力）電圧を V とすると、関係湿度 h は下式で求められる。

$$h = 18.3V + 10.5 \quad 20\% \leq h \leq 90\%, V : mV$$

実際の測定には温度差のあるパネル内外で同時に実施しており、この場合の温度補償も正確であった。

3-2. 結露の検出法

木材表面が露点になり、吸湿量の増加と結露の生じる過程を木材表面の絶縁抵抗の変化で追跡した。川口電気製 NA-10E, NA-10S を用い、Fig. 12 のような平行電極（主電極長さ 60 mm, 対電極長さ 100 mm, 電極間隔 20 mm）を用いて、表面固有抵抗を測定した。露点後の表面の水分の増加によって、抵抗がしだいに低下し、やがて電極間に水脈が走ると、リークして、抵抗値が著しく低下するのを利用した。

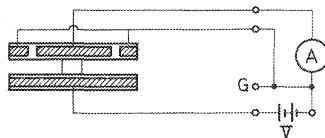


Fig. 12 結露検出器
Detector for moisture condensation.

印加電圧 V の影響をみるため、端子間電圧が 0.5, 6, 50, 68 V の場合を検討すると、高電圧の方が電流値の変化が大きく、結露の検出には有利とみられた。結露過程を自記するため、電流変化を出力端子間回路で電圧変化に変換し、記録紙上に表わした。これから表面固有抵抗を計算するが、これと表面含水率（3-3 を参照）の増減の傾向は定性的によい一致を示すことが予備実験で確かめられた。なお、電極は $x=400$, $y=200$ mm に取り付けられた。

3-3. 表面含水率の測定

直径 3 mm の棒状の平行電極（電極の長さ 30 mm, 電極間隔 10 mm）を中空パネルの各位置に固定し、これと外部の水分計を接続して、メーターの指示値と別に求めた補正曲線から表面の含水率を近似値として求めた。その方法の概要は次のごとくである。デシケーターの中で種々の含水率に調整したスライド単板、ロータリー単板の全乾法含水率と棒電極によるメーター指示値をプロットすると、Fig. 13 のごとくである。厚さが異なる同種試料を 75% R. H. 中より順次とり出し、その片面（15×30 mm）にピペットで水を 1 滴落とす。直ちに水滴を拡張させ、一定時間後の浸透をまって、棒電極でメーターの指示を読み、全乾法含水率を測定する。厚さとメーター指示値の関係を Fig. 14 の「白マル」で示す。測定点に付した数字は全乾法含水率である。図によると、厚さが異なっても指示値があまりかわらない。Fig.

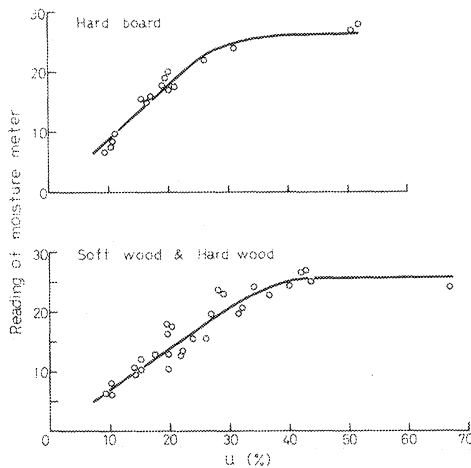
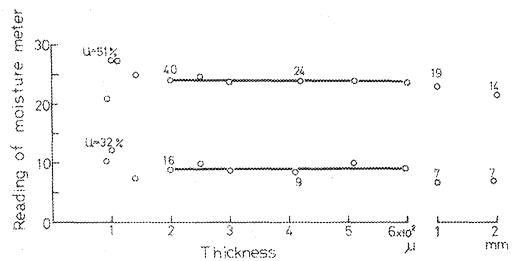


Fig. 13 含水率 u (全乾法) と水分計の指示値の関係
Relation between moisture content u (oven drying method) and readings of moisture meter.



Note) 試料 (Sample): ヒノキ材 (Japanese cypress),
 u : 全乾法含水率 (moisture content by oven drying method)

Fig. 14 表面をしめらせた各種厚さの試片の含水率
Moisture content of each sample surface of which is moist.

13 の下図より、メーターの指示値24の含水率は37%である。Fig. 14でこれに近いものは含水率40%(厚さ: 200 μ) であるから、棒状電極による含水率の測定深さは表層の約 200 μ 程度と推定できる。

Fig. 14の下図 (白マル) は、36% R. H. で調湿した同じ試料をしめりガーゼで2回拭き、上図と同じ測定をして図に示した。メーターの指示値9は Fig. 13 の含水率13% に対応し、Fig. 14 でこれに近いのは 300 μ 程度と考えられる。これらの検討から、パネルの各位置に取りつけた棒状電極は、木材表面の数百ミクロン (200~300 μ) までの含水率を主に指示しているようである。この電極をパネル各部の $x=300$ mm, $y=170$ mm に取りつけ、含水率の変化を順次測定した。なお、Fig. 13 の上図はハードボードの場合で、下の素材とは少し異なった傾向を示す。

3-4. 木質中空パネル

パネルは市販の製品をできるだけ避け、素材料より作り上げる過程に重点を置いた。60×30 (mm) の桧木で 600×600 のわくを作り、中空層を 60 mm、両面に表面材料を木ネジで固定した。桧木と表面材料の接合部より水蒸気の侵入を避けるため、端面をビニールで被覆した。

3-5. 透湿と結露の測定結果

3-5-1. 定常状態における結露の予測

Fig. 10 の M_1 , M_2 として 5.6 mm の合板を用い、中空層 60 mm の中空パネルを結露試験装置に固定する。20.2°C, 約 60% R. H. の当初の状態より [A] 室を 20.5°C, 84% R. H., [B] 室を -0.6°C, 60% R. H. に制御すると、Fig. 20 のごとく、時間が経過すると $\log p$, u , h (Chap. 1 略記号参照) はしだいに平坦化して、中空パネルは温・湿度に関して定常性を表わす。

定常状態の熱量 Q は、Fig. 10 の T_3 に着目した場合

$$Q = (T_1 - T_3) \cdot \frac{1}{r_{sh} + r_1} \quad (28)$$

$$= (T_1 - T_7) \cdot \frac{1}{R} \quad (29)$$

ここに, r_{sh} , r_1 , R は熱伝達, M_1 の熱伝導, 熱貫流の各抵抗である。この式より T_8 を求めると

$$T_8 = T_1 - (T_1 - T_7) \cdot \frac{r_{sh} + r_1}{R} \quad \dots\dots\dots (30)$$

一般に, T_8 に対して T_x を用いると

$$T_x = T_1 - \frac{\Delta T}{R} \cdot R(x) \quad \Delta T = T_1 - T_7 \quad \dots\dots\dots (31)$$

T_x は原点 ($x=0$) より距離 x 隔てた位置の温度を示す。 $x=0$ は [A] 室の温度が M_1 の表面近くで, 低下しはじめる始点である。 $R(x)$ は x までの熱抵抗である。

水蒸気の定常流 W についても, Fig. 10 の p_8 に着目して

$$W = (p_1 - p_8) \cdot \frac{1}{r_{sm} + r_{m1}} \quad \dots\dots\dots (32)$$

$$= (p_1 - p_7) \cdot \frac{1}{R_m} \quad \dots\dots\dots (33)$$

ここに, r_{sm} , r_{m1} , R_m は湿気伝達, M_1 の透湿, 湿気貫流の各抵抗である。この式より p_8 を求めると

$$p_8 = p_1 - (p_1 - p_7) \cdot \frac{r_{sm} + r_{m1}}{R_m} \quad \dots\dots\dots (34)$$

一般に

$$p_x = p_1 - \frac{\Delta p}{R_m} \cdot R_m(x) \quad \Delta p = p_1 - p_7 \quad \dots\dots\dots (35)$$

p_x は原点より距離 x 隔てた位置の水蒸気圧を示す ($x=0$ は熱の場合と同じく, 水蒸気圧の低下し始めるところである)。 $R_m(x)$ は x までの湿気抵抗を示すもので, その total の湿気貫流抵抗を

$$R_m = r_{sm}' + \sum \frac{l}{\eta} + r_{am} + r_{sm}'' \quad \dots\dots\dots (36)$$

とおく。 r_{am} は中空層の透湿抵抗であり, r_{sm} を M_1 側と M_2 側の2つの成分 (r_{sm}' , r_{sm}'') に分けた。eq. (31), eq. (35) および eq. (36) の考え方によると, 任意点 x の結露の予測がある程度可能である。eq. (31) より x 点の飽和水蒸気圧 p_s が定まるから, これとこの位置の p_x (eq. (35)) の大小関係を調べればよい。 $p_x \geq p_s$ であれば露点に達し, 結露条件を満たすが, $p_x < p_s$ であれば露点に達しない。

このような式が実験的に満足されるかどうかを次に調べる。表・裏板が合板 (5.6 mm 厚), 中空層 60 mm の中空パネル (Table 17, パネル 1) を標準の初期条件下に置き, [A] 室の関係湿度を短時間 (約 5 分) 内に h_1 まで高める。 h_1 の値, 位置 S_2 の含水率 u と表面固有抵抗 $\log \rho$ の経時変化を Fig. 15~17 の各図に示す。C 点で [B] 室を急冷すると (Table 17 の実験条件を参照), 中空パネルの断面で温度勾配を生じ, 図中の記号 D の指す時間で S_2 面が計算によって露点に達する。Fig. 15 (a) では, C より 195 分後に, S_2 面が D_2 (結露, Chap. 1 参照) の状態にいたることを表わす。 D_2 に至った時点では, eq. (31), eq. (35) による結露の予測が実験的に確証されるわけであり, Fig. 15 (b), (c) では, C より D_2 に至る時間が短くなっている。 D_2 の状態になるには, S_2 面の含水率がこの図より 20% を越えることが必要で, $\log \rho$ も 6~8 Ω に低下している。このような現象が D_2 の前に先行するので, 換言すれば, 木材素地面が露点に達しても, ただちに肉眼的には結露を見ない。この意味で eq. (31), eq. (35) は一般性を欠く。露点後いくらかの間, 肉眼的な結露の出現が遅れるのは親水性表面の特性といえるが, この細部は後報で述べる。

Fig. 16 は h_1 が低くなった場合で, (d) は結露条件を満たすが, (e) は満たさない。(e) は長時間の

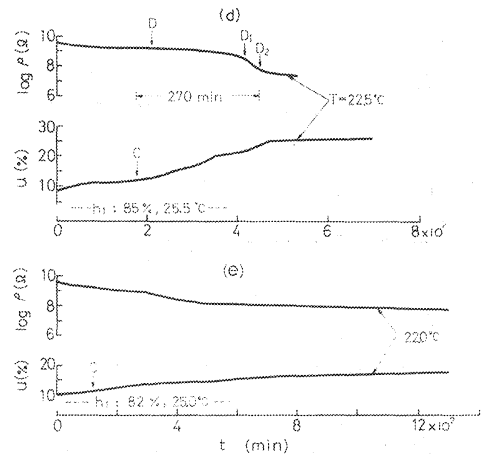
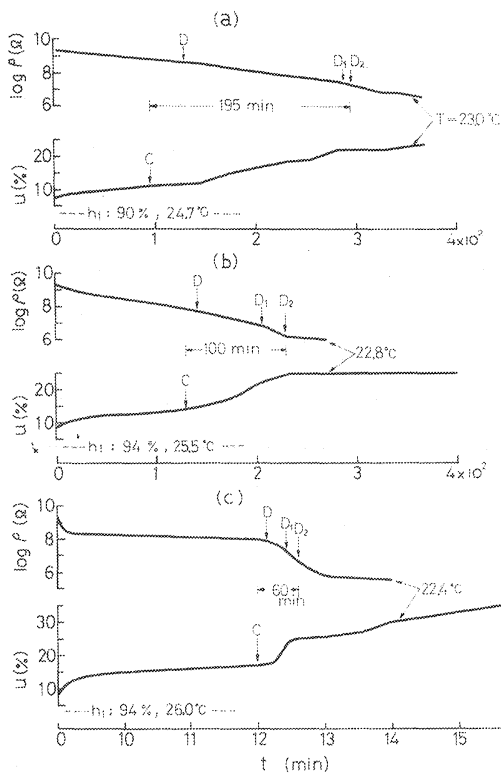


Fig. 16 パネル 1 (合板型) の $\log p$ と u の時間変化
Time plots of $\log p$ and u in Panel 1 (P-type).

Fig. 15 パネル 1 (合板型) の $\log p$ と u の時間変化
Time plots of $\log p$ and u in Panel 1 (P-type).

実験で、含水率の増加が20%近くまでなり、 $\log p$ も平衡状態になっているが、実験的に結露しないことが認められる。

Fig. 17 はパネル中空部の各位置の含水率と結露の状態 (有無) を示している。含水率の測定位置は S_2 (u_1 で示す), S_3 (u_2 で示す), S_5 (u_3 で示す) の前記の所定位置と、その他 S_5 では、コーナー ($x=100$ mm, $y=150$ mm) でも測定した。この位置は [B] 室の吹出口からの冷風が衝突するところで、温度低下があり、図ではその含水率を破線 (---) で表わしている。Fig. 17 (f), (g) では、 u_3 が20%を越えており、1,600 分後にパネル内部を調べると S_5 面に結露が確かめられた。この場合、結露の発生時間が不明であるため、パネル内部を調査した時間位置に、 D_2 と区別して d_2 小文字で表わした。

eq. (31), eq. (35) の考え方で、Fig. 15 (c), Fig. 17 (f), (g), (h) を温度—熱抵抗、水蒸気圧—湿気抵抗に書き直したのが Fig. 18 (a), (b) である。この際、横軸は両式の $R(x)$, $R_m(x)$ を各層ごとに区切って、[A] 室側より順次並べたものである。すなわち、

Fig. 18 (a) : $R(x) \equiv r_{sh}', r_1(M_1), r_{ah}, r_2(M_2), r_{sh}''$

Fig. 18 (b) : $R_m(x) \equiv r_{sm}', r_{m1}(M_1), r_{am}, r_{m2}(M_2), r_{sm}''$

であり、各層に略記号 (1. 付表) を用いてその名称を示し、下に概算した熱抵抗値および湿気抵抗値を付した。縦軸は、(a) では温度、(b) では水蒸気圧で、(c) は (a) の各温度に対する飽和水蒸気圧をプロットして得た曲線に (b) の水蒸気圧線を重ねたものである。

(a) に見られるように、 S_2 , S_6 の温度が [A], [B] 室の温度に近いのは、[A], [B] 室が恒温恒湿型で、おたがいに独立して温度制御し、前述したように室内空気がよくかくはんされて、 S_2 面への熱の供

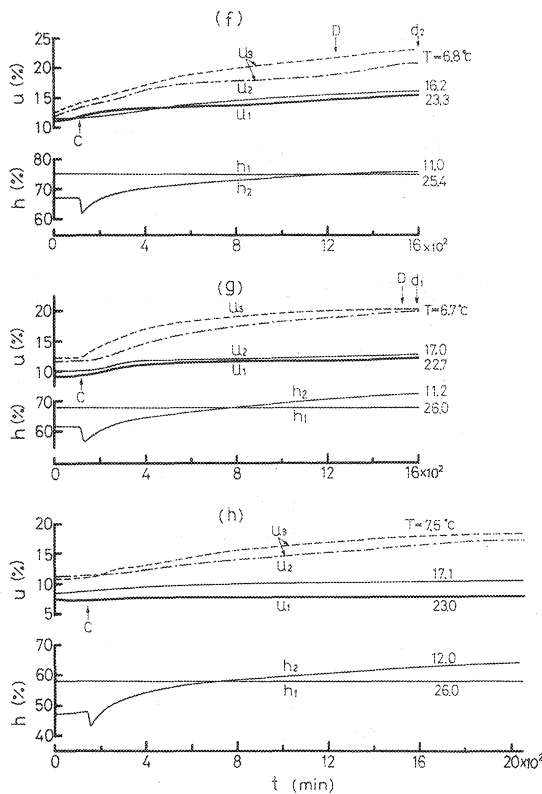


Fig. 17 パネル 1 (合板型) の u と h の時間変化
(破線 (---) は S_6 のコーナーの含水率)
Time plots of u and h in Panel 1 (P-type)
(Broken line (---) shows moisture content
of the corner on S_6).

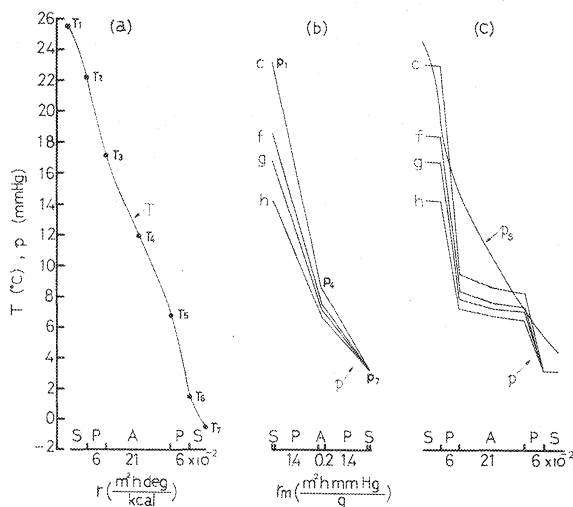


Fig. 18 Fig. 15 (c) と Fig. 17 (f~h) の結露の予測図
Prediction diagram of moisture condensation
on Fig. 15 (c) and Fig. 17 (f~h).

給, S_6 面からの熱の消散の能率がよいた
めと考えられる。

したがって, r_{sh} は通常, 50 cm/sec の
風速下では 0.10 ~ 0.14 であるが, 本報で
は下の値を用いた。

$$r_{sh} = 0.06 \sim 0.12 \text{ m}^3 \text{ h deg/kcal}$$

r_{ah} はすでに多くの実験資料¹⁸⁾があり, 中
空層が 6 cm の場合は, $r_{ah} = 0.21 \text{ m}^3 \text{ h}$
deg/kcal を用いた。

r_{sm} , r_{am} は測定者によって相違がある
が, 一般に認められている斉藤の提案値⁸⁾
によった。

風速 50 cm/sec の表面境界空気層

$$r_{sm} = 0.05 \text{ m}^3 \text{ h mmHg/g}$$

温度差のある中空層 (平均温度 10°C)

$$r_{am} = 0.24 \text{ m}^3 \text{ h mmHg/g}$$

図 (b) では, 中空層で実測した水蒸気
圧を用いたので, 水蒸気圧線は折線型とな
る。図 (a) の $T_1 \sim T_7$ も実測値である。前
述の方法で得た p_s 線と p 線を比較する
と, p_s 線より上に位置する p 線の部分は
結露条件になる。 S_2 面では (c), S_6 面で
は (c), (f), (g) がこの条件を持つ。すな
わち, この予測図は Fig. 15, 17 の実験結
果と一致している。

eq. (31), eq. (35) は変数 $R(x)$, R_m
(x) の一次式である。たとえば $R_m(x) =$
0 のとき, $p_x = p_1$ であり, $R_m(x) = R_m$
のとき, $p_x = p_7$ となる。したがって, 図
(b) では p_1 と p_7 を直線で結んでパネル
断面の水蒸気圧の分布が定まるはずであ
る。いま, 図 (b) の各折線の両端を結ぶと,
明らかに中空層の水蒸気が非常に大きくな
り, 実測値とはもちろんずれる。これを図
(c) に重ねると, たとえば他に比べて値が
小さい (h) の p 線でも S_6 で 8.4 mmHg
となり, p_s の 7.0 mmHg より大きく結露

条件になり、実験結果に反する。

平均 50 cm/sec 程度の風速下では、住居の室内側の熱伝達抵抗 $0.12 \text{ m}^2\text{h deg/kcal}$ も意味がある。図 (a) の T_3, T_4, T_5 (Table 10 の位置記号参照) の関係がだいたい直線性を示すので、両側に延長して、 T_1, T_7 でとめると、 r_{sh} は $0.12 \text{ m}^2\text{h deg/kcal}$ 程度になる。このようにして図 (a) の曲線を直線化するとすれば、たとえば T_2 は約 20°C に低下するから、その p_s も 20.0 mmHg (22.2°C) より 17.5 mmHg (20°C) に低下して、(f) の S_2 における $p=18.3 \text{ mmHg}$ の下になり結露条件を満たす。これは実験とは相反することである。このようにパネル断面内の実測値を用いない場合は、予測図と実験結果に相違があり、これを追求するため次の実験を行なった。

30 mm の厚さの桧木の両側に厚さ 5.6 mm の合板を固定する。中空層の厚さは 30 mm である。Table 16 の実験 No. 1, No. 8 の制御温度 (T_1, T_7) を与えたときの温度分布—熱抵抗を Fig. 19 (a), (b) に示す。前例のように T_3, T_4, T_5 の直線性を利用して、両側に延長して r_{sh} を求めると、大きいものでは 0.12 程度になる。Fig. 19 のように、 S_2, S_6 における予測温度を T_2', T_6' 、実測温度を T_2, T_6 とすると、 $T_2-T_2', T_6'-T_6$ が求められる。[A], [B] 両室間の温度差を種々にかえた場合を実験し、温度—熱抵抗の図を作り、前述の外挿法で、 $T_2-T_2', T_6'-T_6$ を求めて、[A] 室の実験湿度 h_1 とともに Table 16 に示す。この表によると、 T_1-T_7 が大きくなると、 $T_2-T_2', T_6'-T_6$ も大きくなる傾向がある。 S_2 における露点温度 T_D を計算して、 T_2' との大小を比べると、No. 1~No. 8 のすべてについて $T_2' < T_D$

Table 16. パネル 2 の表面結露
Surface moisture condensation of Panel 2

測定因子 Measured factor	Ex. No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
T_1 ($^\circ\text{C}$)		18.2	18.6	21.0	20.0	20.4	20.9	21.5	22.0
T_7 "		2.0	2.0	1.5	-5.0	-4.6	-5.2	-5.0	-5.0
T_1-T_7 (deg)		16.2	16.2	19.5	25.0	25.0	26.1	26.5	27.0
T_3 ($^\circ\text{C}$)		13.2	13.5	14.5	11.6	11.8	11.6	12.0	12.4
T_4 "		9.8	9.8	10.4	7.0	7.2	7.0	7.0	7.8
T_5 "		6.8	6.5	7.1	2.5	3.0	2.7	3.0	3.0
T_2 ($^\circ\text{C}$)		17.1	17.4	19.2	18.4	18.5	18.5	19.5	20.0
T_2' "		15.2	15.8	17.1	14.8	14.5	14.7	15.1	15.8
T_2-T_2' (deg)		1.9	1.6	2.1	3.6	4.0	3.8	4.4	4.2
T_6 ($^\circ\text{C}$)		3.0	3.0	3.0	-3.0	-3.0	-3.5	-3.0	-3.0
T_6' "		4.5	4.2	4.2	-0.4	0.1	0	-0.5	-0.2
$T_6'-T_6$ (deg)		1.5	1.2	1.2	2.6	3.1	3.5	2.5	2.8
h_1 (%)		94	93	83	82	84	70	68	74
$T_D(S_2)$ ($^\circ\text{C}$)		17.3	17.4	17.9	16.9	17.7	15.3	15.4	17.2
$\log \rho_1$		drop at 300 min	drop at 200 min	decrease	decrease	drop at 400 min	a little decrease	a little decrease	decrease
$u_1(\text{max})$ (%)		ca. 30	ca. 30	ca. 20	23	ca. 30	14	13	17
S_2		D_2	D_2	D_1'	D_1'	D_2	—	—	D_1'

Note) 実験条件は T_1, T_7, h_1 で示され、その結果を $\log \rho_1, u_1, S_2$ で表す。

T_2', T_6' については Fig. 19 を参照、実験時間 $0 \sim 3 \times 10^3 \text{ min}$ 。

Experimental conditions are given by T_1, T_7 and h_1 . The results are shown in the column of $\log \rho_1, u_1$ and S_2 . T_2' and T_6' refer to Fig. 19. Experimental period: $0 \sim 3 \times 10^3 \text{ min}$.

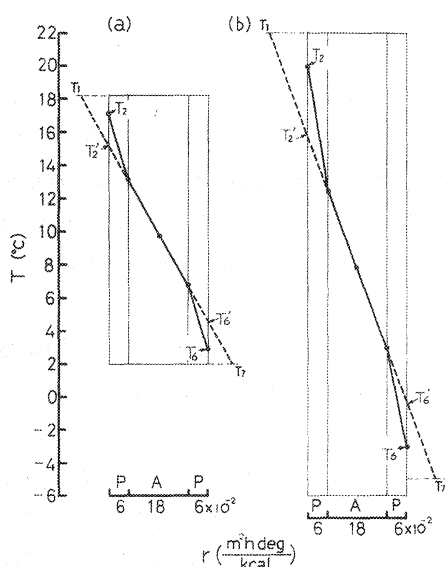


Fig. 19 パネル 2 (合板型) の温度分布
(Table 16 参照)

Temperature distribution in Panel
2 (P-type) (see Table 16).

3-5-2. 複合化中空パネルの透湿と結露

ここでは、主に合板素地に塗装したり、断熱材料を重ねるなど、順次新しい条件を付加することによる透湿、結露の前段からの変化と相違を見い出そうとした。作成したパネルの構造を Table 17 にまとめて示す。

Fig. 20 は以下の各パネルに対するコントロールとして、I 類合板の両面張り中空パネルの場合である。内部結露も検知するため、 S_5 にも電極を取りつけ、 $\log p_2$ で表わした。 h_1, h_2, h_3 は [A] 室、中空層、[B] 室の関係湿度であり、図の最下段は位置 $S_1 \sim S_7$ の各温度である。

eq. (35) より、 S_2 と S_7 の水蒸気圧差を求めると

$$p_2 - p_7 = \Delta p \left(1 - \frac{r_{sm}'}{R_m} \right) \dots \dots \dots (37)$$

この中空パネルの R_m の成分は、

$$\begin{aligned} R_m &= r_{sm}' + r_{m1} (\text{合板}) + r_{am} (\text{中空層}) + r_{m2} (\text{合板}) + r_{sm}'' \\ &= 0.06 + 1.4 + 0.24 + 1.4 + 0.06 = 3.16 \text{ (m}^2\text{h mmHg/g)} \end{aligned}$$

ゆえに、
$$\frac{r_{sm}'}{R_m} = \frac{0.06}{3.16} = 0.019$$

これを eq. (37) に代入すると

$$p_2 - p_7 \div p_1 - p_7 \dots \dots \dots (38)$$

となり、 S_2 面における S_1 に対する水蒸気圧低下はほとんどないといえる。[A] 室の水蒸気圧 (p_1) は、 $18,085 \times 0.84 = 15,191 \text{ mmHg}$ で、この露点温度は 17.7°C である。水蒸気圧降下が少なく、 $T_2 = 18.0^\circ\text{C}$ であるから、 S_2 面は結露条件に非常に近い。観察によれば、 S_2 面は 1,500 分付近で D_1 の状態になる。

となり、 S_2 において表面結露が現われるはずである。この実験では、 S_2 面の結露の有無を観察するとともに、 S_2 面にとりつけた絶縁計と含水率計によって、結露の状態を追跡した。この結果は同表の $[\log p]$ 、 $[u_1]$ 、 $[S_2]$ の欄に示す。すなわち、結露を生じた No. 1, 2, 5 を除くと、部分的に変色（ここでは小面積）のあるもの No. 3, 4, 8, 結露、変色のないものは No. 6, 7 であった。この実験結果は、 T_D と T_2 の大小関係より、ほぼ推定がつく。また、中空パネルが薄くなると、熱抵抗に対する温度分布が非直線化し、[A]、[B] 両室間の温度差が大きになると、この傾向が強くなるから、計算による結露の予測には不一致が多くなる。このような単純な両面張り中空パネルの結露の予測と [A]、[B] 両室を厳密に温度制御する実験との対応には、いくつかの疑問点が見い出される。

次にパネルを複合化する過程で、この問題を検討する。

中空層の中心では, $h_2=76\%$ になると, $p_4=6.63 \text{ mmHg}$ で, 露点温度は 5.2°C である。一般に

$$\frac{p_x - p_7}{\Delta p} = \frac{R_m - R_m(x)}{R_m} \dots (39)$$

であるから, $p_7=2.63 \text{ mmHg}$ とすると, 上述の $R_m=3.16$, $R_m(x)=1.70$ の値を用いて $p_5=8.43 \text{ mmHg}$ と計算できる。この露点温度は 8.7°C である。Fig. 20 より $T_5=5.0^\circ\text{C}$ であるから, これは結露条件を完全に満たす。中空層内部の水蒸気圧の分布を実験的に求められなかったので, p_4 から計算した露点温度 5.2°C を結露の予測のために用いた方が安全といえる。

Fig. 20 の D はこれを考慮して, 2,330 分付近に記してある。観察の結果はこの図に示されるごとく, 4,000 分後, パネル内部を調べると, S_5 面では d_2 の状態であった。

Fig. 20 で, h_1 の急増するところで, $\log p_1$ と u_1 の変化の対応がよいことは, 表面固有抵抗と補正含水率の関係が密接であることを示している。 $\log p_1$ の 1,500 分付近で, 表面にきわめて薄い着色があったので, その部分に厚さの薄い鏡 ($4 \times 3 \text{ (cm)}$) をはりつけ, スポットライトの反射を観察すると, 全面で「くもり」が見い出された。露点近くでは, 表面温度が T_D 以上でも, 材色の変化など結露に類する現象を生じる。

中空パネル断面の各位置における温度差 ΔT は, $(T_6 - T_7)$ で最小, 次に $(T_1 - T_2)$, $(T_2 - T_3) \approx (T_5 - T_6)$, 最大は $(T_3 - T_8)$ である。各層を通して流れる熱量は, $Q = k_i \Delta T$ であるから, k_i は ΔT に反比例する。したがって, 中空層内の対流, 放射を考慮すると, 中空層の熱コンダクタンスが最も小さいこと, これと対照的に, 中空層の透湿性は大きい。このため中空層の温度勾配が大きく, 中空層へ浸入した水蒸気は容易に S_5 面に達し, 内部結露の発生に関係すると考えられる。

Fig. 21 は Fig. 20 の合板 (M_1) の S_3 面に防湿セロファン 30μ を貼った場合である。冷却後の u_1 の立上りは h_1 に対応して急であるが, h_2 の増加は Fig. 20 に比してやはり押えられる。この図で注意すべきは, $\log p_1$ に D 以後急激な変化が現われて, この曲線の特徴から結露の生成がよくわかる。 D_1' , D_2 はもちろん, 目視観察の結果である。 $T_1 \sim T_7$ の分布状態は Fig. 20 に類似するので, 以後の各図で省略することが多い。

Fig. 20, 21 についての結露の予測を Fig. 22 に示す。図 (a) では各測定点に適した関係直線を引き, この直線の示す温度から p_s を求めた。図 (b), (c) より各位置の p を求め, 図 (a) に重ね合わせてある。この予測図と Fig. 20, 21 の実験結果はだいたい一致している。しかし, 図 (b) の予測線と実測値 (白マル) は, h_2 が平衡に達していても, 両者に相違が認められる。これに対して図 (c) では, 実測値に予測がよくあてはまる。

S_2 面で p_1 と p_s が交差する結果になるが, Fig. 18 の場合より, 予測を直線化しても, その結果に妥

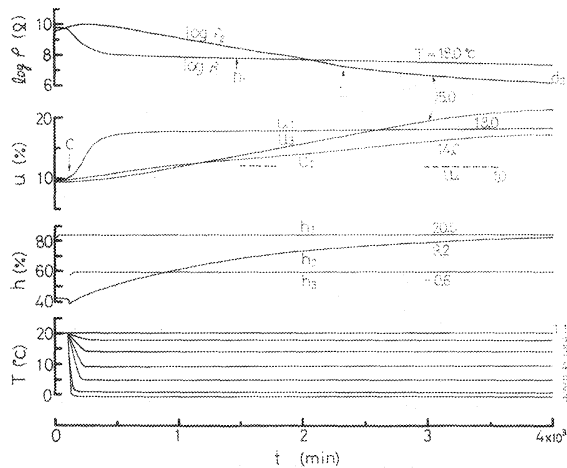


Fig. 20 パネル1(合板型)の $\log p, u, h, T$ の時間変化
Time plots of $\log p, u, h$ and T in Panel 1 (P-type).

Table 17. 中空パネルの構造と実験条件
The structures of hollow core panel and experimental conditions

パネル番号 Panel No.	関係図表 Figs. and Table	構 成 Structure	前 処 理 Preconditioning		実 験 温 度 Temperature	
			T (°C)	R.H. (%)	T ₁ (°C)	T ₇ (°C)
1	(a)	合板(P)5.6+中空層(A)60+合板(P)5.6	24.0 ~25.5	55~65	24.7	3.5
	15 (b)	"			25.5	4.0
	(c)	"			26.0	-0.3
1	(d)	合板(P)5.6+中空層(A)60+合板(P)5.6	25.0	55~60	25.5	0.5
	16 (e)	"			25.0	4.0
1	(f)	合板(P)5.6+中空層(A)60+合板(P)5.6	25.0 ~26.0	65~70	25.4	0
	17 (g)	"			26.0	0
	(h)	"			26.0	0
2	19	合板(P)5.6+中空層(A)30+合板(P)5.6	19.0 ~21.5	60~70	see Tab. 14	see Tab. 14
1	20	合板(P)5.6+中空層(A)60+合板(P)5.6	20.5	45~50	20.5	-0.6
3	21	合板(P)5.6+防湿セロファン(M. P. C)30 μ +中空層(A)60+合板(P)5.6	20.6	55~60	20.8	0
4	23	合板(P)5.6+防湿セロファン(M. P. C)30 μ +ポリスチロールフォーム(F. S)13.6+中空層(A)60+合板(P)5.6	20.0	55~60	20.0	-1.0
5	(a)	ポリエステル塗装合板(P _E . P)5.7 (P _E : 60 μ)+中空層(A)60+合板(P)5.6	19.5	65~70	20.3	0
	24 (b)	"	20.5	70	21.6	0
6	25	ポリエステル塗装合板(P _E . P)5.7 (P _E : 60 μ)+ポリスチロールフォーム(F. S)10.5+[A]49.5+合板(P)5.6	20.0	65~70	21.0	0
7		ポリエステル塗装合板(P _E . P)5.7 (P _E : 60 μ)+防湿性セロファン(C)25 μ +ポリスチロールフォーム(F. S)10.5+[A]49.5+合板(P)5.6	20.5	55~60	21.0	0

8	28		ポリエステル塗装合板[Pr. P]5.7 (PE:120 μ) + ポリスチロールフォーム (F. S)10.5 + 中空層[A]39 + ポリスチロールフォーム (F. S)10.5 + 合板[P]5.6	20.0	75~83	20.5	-0.3
9			" + 防湿セロファン + ポリスチロールフォーム (F. S)10.5 + [M. P. C]30 μ "	20.5	70	20.5	0
10	31	(a)	合板[P]2.7 + 中空層[A]60 + 合板[P]5.6	20.5	65~70	21.7	0
11		(b)	ダップ樹脂オーバーレイ合板[D. P]3.0 + 中空層[A]60 + 合板[P]5.6	20.5	60~65	20.5	0
12	32		パーティクルボード[Pa]15.4 + 中空層[A]60 + 合板[P]5.6	20.0	55~60	21.0	0
12	33		パーティクルボード[Pa]15.4 + 中空層[A]60 + 合板[P]5.6	21.0	50~55	21.7 22.0	-0.5
13	34		ハードボード[Ha]6.4 + 中空層[A]60 + 合板[P]5.6	20.5	60~65	20.5	0
14	35	(a)	ハードボード[Ha]3.6 + 中空層[A]60 + ハードボード[Ha]6.4	20.0	65~70	19.5	1.5
		(b)	"	21.5	65~73	22.0	1.5
15	36	(a)	不透明塗装ハードボード[P. Ha]3.6 + 中空層[A]60 + ハードボード[Ha]6.4	19.0	65~70	19.0	1.5
		(b)	"	20.0	65~70	19.0	0.5
16	Tab. 22		プリント合板[Pr. P]2.6 + 中空層[A]60 + 合板[P]5.65	20.5	66	20.5	-0.3
17	Tab. 22		塩ビオーバーレイ合板[P. C. P]2.9 + 中空層[A]60 + 合板[P]5.65	20.0	66	20.0	0
18	Tab. 22		ウォルナット化粧合板[W. P]6.0 + 中空層[A]60 + 合板[P]5.65	21.0	60~66	21.0	0
19	Tab. 22		プリント合板[Pr. P]2.6 + 石こうボード[G]9.6 + 中空層[A]60 + 合板[P]5.65	20.5	60~65	20.5	0
20	Tab. 22		ウォルナット化粧合板[W. P]6.0 + 防湿シート[M. P. S]0.08 + ポリエチレンフォーム[F. E]4.0 + 中空層[A]60 + 合板[P]5.65	20.5	65~68	21.0	-0.5
21	Tab. 22		塩ビオーバーレイパーティクルボード[P. C. Pa]8.7 + ポリエチレンフォーム[F. E]4.0 + 中空層[A]60 + 合板[P]5.65	20.0	60~63	20.5	0

Note) 1. 中空パネルの構造 (Structure of hollow core panel) : 材料名 [M₁] / + 中空層 [A] / + 材料名 [M₂] /
 2. [M₁] l, [A] l, [M₂] l : [Symbol of material name] thickness (mm).

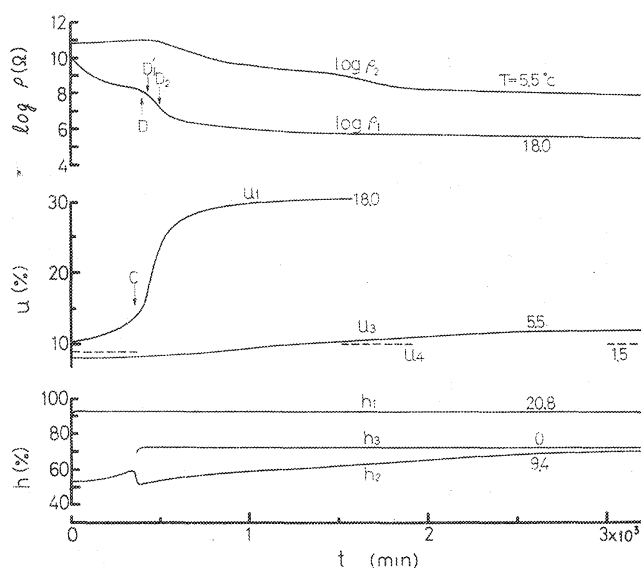
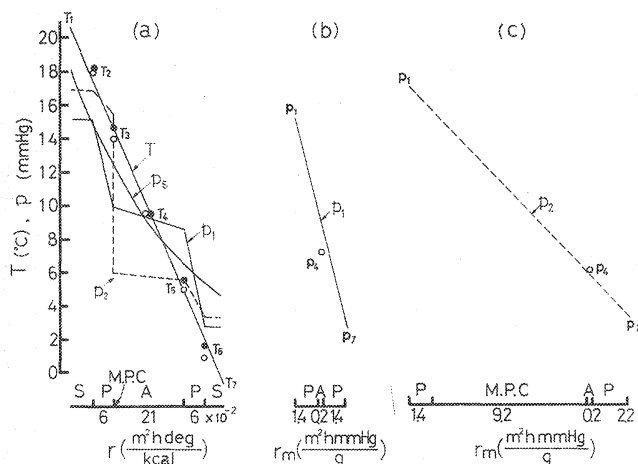


Fig. 21 パネル 3 (合板・防湿セロ型) の $\log \rho$, u , h の時間変化

Time plots of $\log \rho$, u and h in Panel 3 (P·M·P·C-type).



Note) (a) ○, (b)→Fig. 20; (a) ●, (c)→Fig. 21.

Fig. 22 Fig. 20 と 21 の結露の予測図

Prediction diagram of moisture condensation on Figs. 20 and 21.

た。図 (a) は h_1 が高い場合で、冷却すると露点 (18.6°C) 以下になり、短時間で水滴が生じ、電極間に水脈が走ってリークする。 $\log \rho_1$ はこの様子を示したもので、水滴が流れ落ちると、もとの抵抗値に回復する。 $\log \rho_1$ の「急低下」と「急上昇」の周期は $0.5\sim 3$ 分程度に頻繁に生じるから、測定器のメーター、記録計をそこなうため、途中で $\log \rho_1$ の測定を中止している。

$\log \rho_2$ も一様な低下が認められ、Fig. 23 の $\log \rho_2$ とは異なった挙動になる。これは合板上のポリエステル樹脂の膜厚が均一でなく、透湿量も単離状態の塗膜に比して大きくなるためであろう (Table 4, 6

当性を有するのは、[A], [B] 室間の温度差が Fig. 18 より小さいこともその一因であろう。

Fig. 23 は Fig. 21 の防湿セロファンの上に、厚さ 13.6 mm のポリスチロールフォームを木わくで固定した場合である。Fig. 20, 21 と異なるのは、温度分布の状態、 h_2 の増加が少ないことなどである。Fig. 20 と Fig. 23 の T_1 は、 20.5°C , 20°C であるのに対して、(T_2 と T_3) は、Fig. 20 : (18°C , 14°C) に対して Fig. 23 : (18.5°C , 17°C) である。このように Fig. 23 の T_2 , T_3 は高い。一方、(T_4 と T_5) は、Fig. 20 : (9°C , 5°C), Fig. 23 : (5°C , 3°C) である。 T_3-T_4 は、Fig. 20 : 5°C , Fig. 23 : 12°C のごとく、断熱材料の両側の温度差が大きくなる。これは S_2 面の防露上不利である。しかし、 T_2 は高くなるから S_2 面の防露には効果があり、表面の結露が露点に達するとすぐ現われるような非親水性の材料には特に有利といえよう。次にこの例を示す。

Fig. 24 は前回の M_1 パネルから、防湿セロファンとスチロフォームをとり去り、 S_2 面に 60μ 程度のポリエステル塗装を行なっ

参照)。しかし、図 (b) のごとく露点に達しない場合は、 $\log p_2$ の減少も些少で、 u_3 の増加も大くない。

Fig. 25 (a) では、 h_1 は Fig. 24 (a) に同じであるが、 S_3 面にとりつけた断熱材料によって T_2 を 19.0°C まで高めた。しかし、露点は 19.2°C で T_2 にほとんど同じであるから、塗装面は著しく結露して、Fig. 24 (a) と同じリーク現象を生じる。

Fig. 25 (b) では、 M_1 の塗装合板とスチロフォームの間に、防湿性セロファンをはさみ込む。 T_2 は図 (a) より 0.5°deg 高くなり、露点温度 19°C より高いため、 S_2 面への保温効果によって、結露は生じないことがわかる。複合化の際のラミナの固定には前述のごとく木わくを用いており、接着剤は用いていない。

T_2 の温度は eq. (31) より

$$T_2 = T_1 - \frac{\Delta T}{R} \cdot r_{sh} \quad \dots\dots\dots (40)$$

T_2 が露点温度 T_D に等しいときの R を R_D とすると

$$R_D = \frac{r_{sh} \cdot \Delta T}{T_1 - T_D} \quad \dots\dots\dots (41)$$

r_{sh} は一般に $0.12 \text{ m}^2 \text{ h deg/kcal}$ 、 $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ 、 T_1 と関係湿度より T_D を求めて、 R_D が計算できる。したがって、 S_2 面での結露を防ぐには、適当な熱伝導抵抗 ($1/\lambda$) を有する断熱材料を低温側に複合して、熱貫流抵抗を次の形にしておく必要がある。

$$R_D + (1/\lambda) = R \quad \dots\dots\dots (42)$$

上式より明らかなごとく、 λ の小さいものほど 1 も小さくてすむ。Fig. 25 の複合化はこ

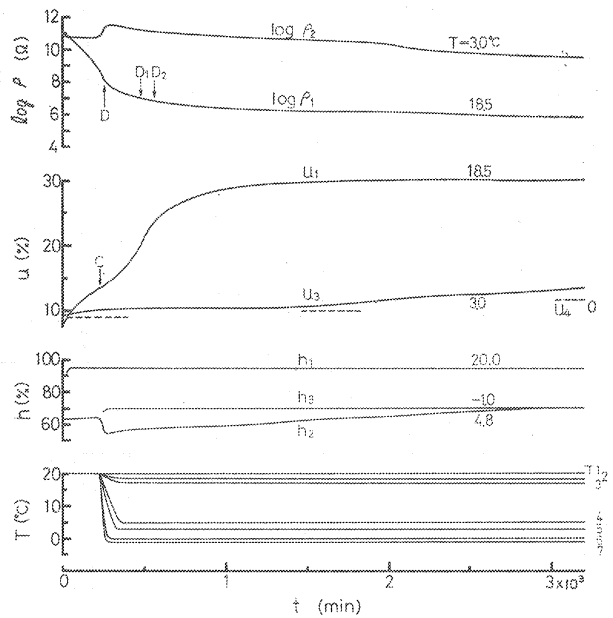


Fig. 23 パネル 4 (合板・防湿セロ・スチロ型) の $\log p$, u , h , T の時間変化
Time plots of $\log p$, u , h and T in Panel 4 (P・M・P・C・F・S-type).

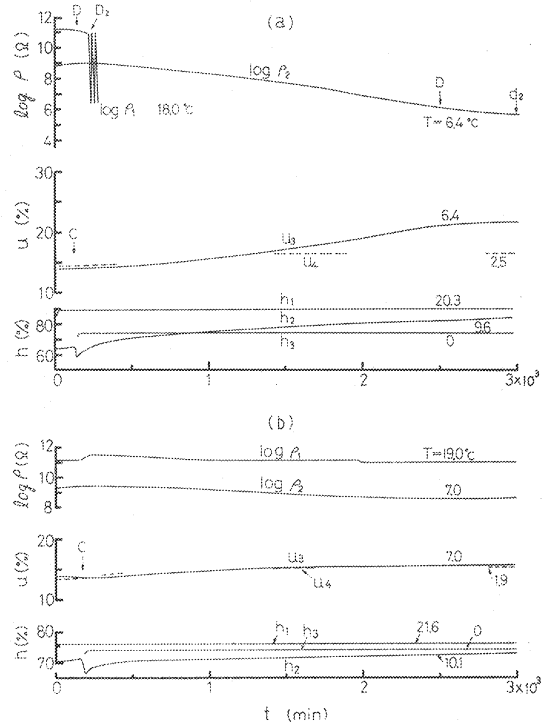


Fig. 24 パネル 5 (ポリエス塗装型) の $\log p$, u , h の時間変化
Time plots of $\log p$, u and h in Panel 5 (Pe. P-type).

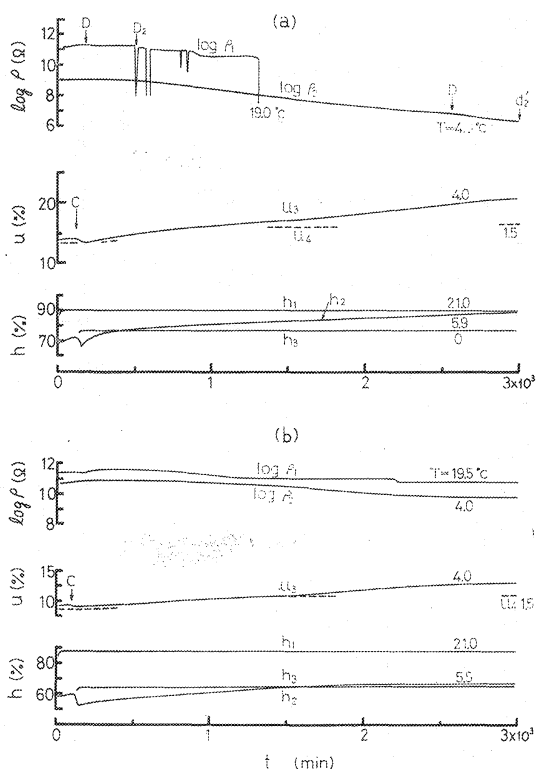
これらの関係を具体的に利用したものである。

Fig. 26, 27 は Fig. 23, 25 の結露の予測図である。おのおのの図 (a) は Fig. 22 に比較すると、温度の実測値は T_6 を除くとほぼ直線になっている。また、水蒸気圧分布も、中空層では実測値と予測値が合致しているといえる。 h_2 の時間変化の推移から推定して、実験終了後も h_2 の若干の増加は考えられる。しかし、この予測と実験との一致性から、 3×10^3 分は予測の time scale として一応の意味をもつ。 S_6 で結露条件を満足しないものは、Fig. 23, 25 の $\log p_2$ の減少変化も少なく、絶縁性の測定から裏づけられている。

Fig. 26, 27 よりわかることは、予測と実験が一致するときは断熱層、防湿層が複合されたパネルである。既述したように、複合しない単純な構造の場合、中空層が薄い場合、温度差が大きい場合には両者の一致が不十分で、予測に修正を加える必要があった。次に、複合化についてさらに調べる。

Fig. 28 は前回の中空パネルの S_2 にポリエステル樹脂を重ねぬりして、 S_5 面にもスチロールフォームを複合した (Table 17 参照)。Fig. 29 はこのパネルの結露の予測図で、 $T_2 \sim T_6$ の間でだいたい直線化ができる。Fig. 28 の h_2 も時間が経過すると平衡になり、 $\log p_1$ および $\log p_2$ も一定になっている。温度、水蒸気圧分布の予測の確実性は複合化するとかなりよくなる。

Fig. 28 の S_2 の露点温度は 19.3°C で実測した T_2 と全く一致する。しかし、Fig. 24 のように、水滴がたれることなく、部分的に水ぬれ状 (D_1') を呈する。これは 2 重のスチロールフォームによる保温効果によるといえる。



Note (a)→panel 6; (b)→panel 7

Fig. 25 パネル 6 (ポリエステル塗装・スチロール型)、パネル 7 (ポリエステル塗装・防湿セロ・スチロール型) の $\log p$, u , h の時間変化

Time plots of $\log p$, u and h in Panel 6 (P.E. P.F. S-type) and Panel 7 (P.E. P.M.P.C.F. S-type).

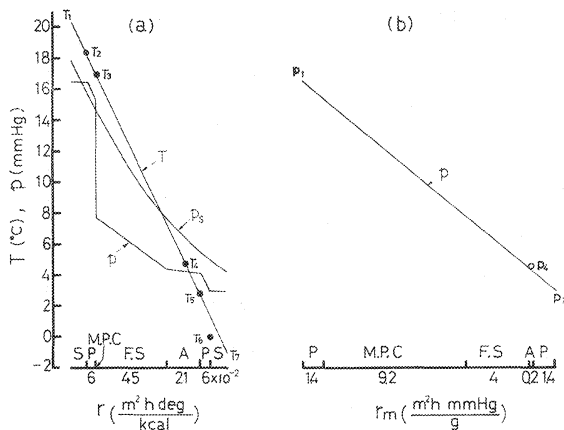


Fig. 26 Fig. 23 の結露の予測図
Prediction diagram of moisture condensation
on Fig. 23.

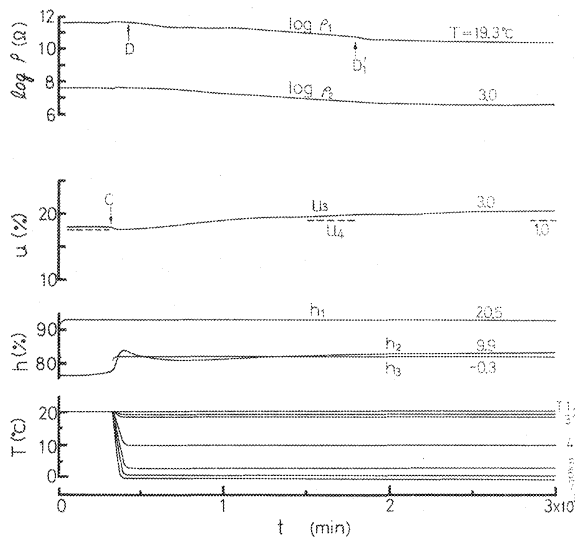
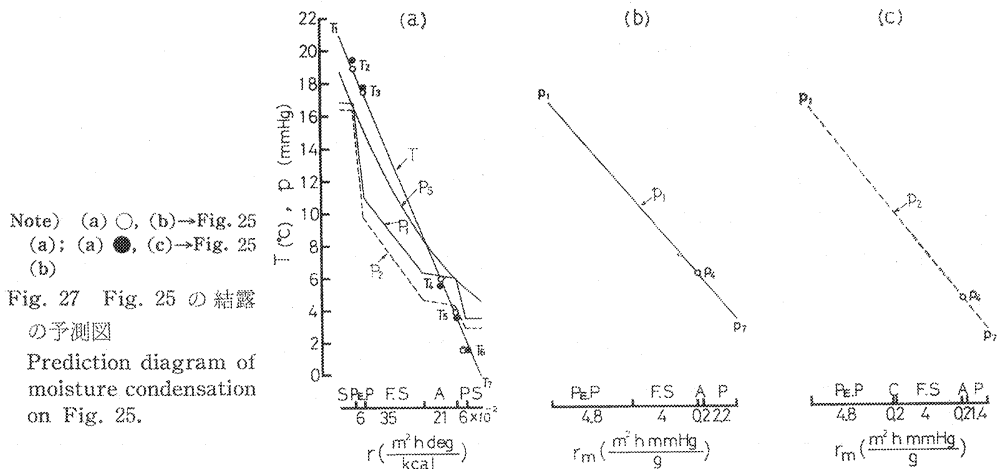
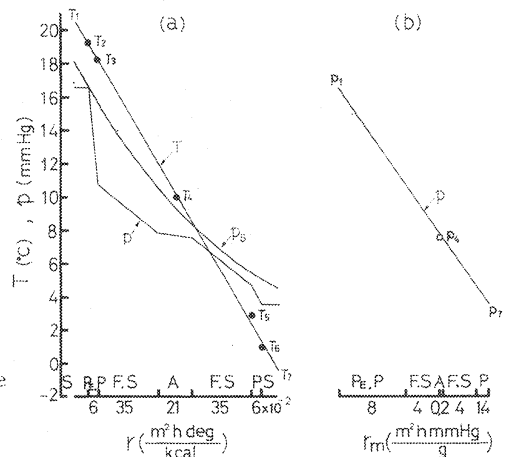


Fig. 28 パネル 8 (ポリエス塗装・スチロ型) の $\log p$, u , h , T の時間変化
Time plots of $\log p$, u , h and T in Panel 8 (P.E. P.F. S-type).

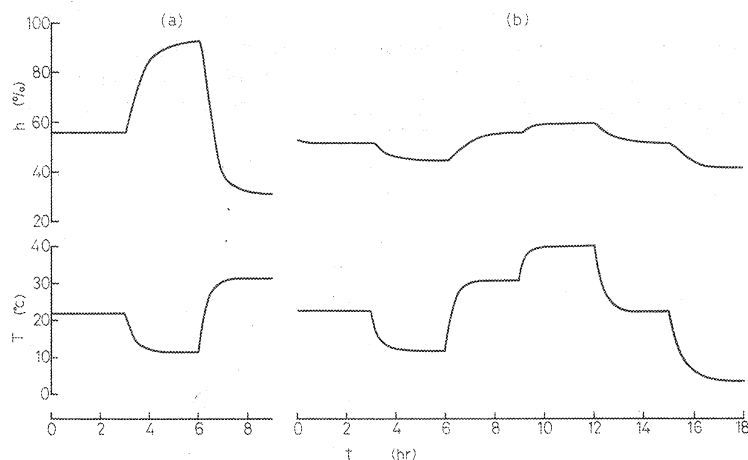
Fig. 29 Fig. 28 の結露の予測図
Prediction diagram of moisture condensation on Fig. 28.



中空層の中央では、水蒸気圧は 7.6 mm であるから、露点は 7.2°C である。もしも S_5 面にこの水蒸気量が流れ込むと、 S_5 面はただちに結露する。実際はスチロールフォームがあるので、水蒸気の流れが遮断されており、実験開始時に、 $u_3=18\%$ のように高い含水率に調整しても、実験終了時には、わずかに増加して $u=20.5\%$ に至る程度である。この事実から、 S_5 面のいわゆる内部結露の防止にも、その上に防湿層を重ねると有効である。市販のスチロールフォームは種類が多く、透湿率も ($\times 10^{-8}$) のオーダーであるが、ポリエチレンの低発泡では ($\times 10^{-8}$) のオーダーで、防湿と保温の 2 つの機能を持っている (Table 9 参照)。 S_5 面に、非親水性の防湿層、または断熱と防湿をかねる層を積層するか、親水性の木質材料素地面のいずれにするかは重要な問題で、次にその検討を進めるが、Fig. 28 に限る場合は、 M_1 に断熱材料が複合されているから、 S_5 の温度低下が大きく ($[B]$ 室の温度に近づく)、このため、保温効果のみの未加工の鉱物繊維 (ガラス繊維、岩綿)、フェルト類では、長期間では S_5 面に結露を生じることが考えられる。

Fig. 28 で注目すべきは h_2 の挙動である。これまでの各図では、冷却開始の直後、 h_2 の急な低下があり、やがて低下がとまると増加しはじめる。これに対して、Fig. 28 の h_2 は、冷却開始とともに急増加して極大値をなし、時間経過によって、わずかな減少とゆるやかな増加がつづく。 3×10^3 分ではほとんど一定となる。この現象を調べるため、次の実験を行なった。

3.2 l 入りの円筒型のデシケーターに、 22°C 、56% R. H. の空気を入れ密閉する。これを 22°C の恒温恒湿槽内に入れる。Fig. 30 に示すように、3 時間後、恒温恒湿槽の温度を低下させる。図 (a) のごとく、デシケーター中の関係湿度は急上昇して 93% にも達する。関係湿度の測定にはエース感湿素子を用いており、 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$ の間では温度補正が可能である。デシケーター中の水蒸気量は一応変化がないと考えられるので、温度低下によって関係湿度が高まったことになる。したがって、次の 3 時間後に温度を



Note) デシケーター中が (a) カラ、(b) 木材試片 16 個

(a) Nothing in desiccator, (b) Containing 16 wood samples in it.

デシケーターの容積 (Volume of desiccator): 3.2 l, 試片の大きさ

(Size of wood sample): $10 \times 10 \times 0.5$ (cm).

Fig. 30 外気温の変動とデシケーター中の関係湿度の変化

Changes of relative humidity in desiccator as the environmental temperature changes.

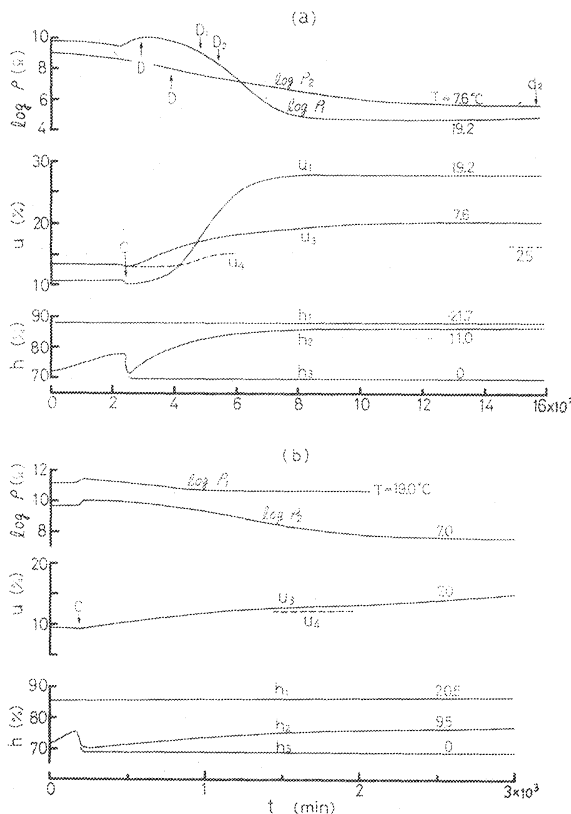
Table 18. デシケーター中の水蒸気量
Amount of water vapour in desiccator

時間(t) hr	0~3	3~6	6~9	9~12	12~15	15~18
木材試片を含まず No wood samples	34.8×10^{-8}	30.4×10^{-8}	32.2×10^{-8}	—	—	—
木材試片を含む Containing wood samples	33.5×10^{-8}	14.9×10^{-8}	56.3×10^{-8}	98.2×10^{-8}	32.1×10^{-8}	8.0×10^{-8}

単位 (unit) : gr.

31°C まで上げると、逆に関係湿度は低下する。図 (b) はデシケーター中に、スギ、カツラ、ケヤキ、シオジの柾目板、10×10 (cm)、厚さ 5 mm をおのおの 4 枚、計 16 枚を側壁に立てかけた。外周温度を前述のごとく変化させると、デシケーター中の関係湿度は、木材を含まない図 (a) の場合とは全く逆の湿度変化を表わす。

この相違は次のように説明できる。図 (b) においては、温度が下がると木材が吸湿して、デシケーター



Note) (a)→panel 10; (b)→panel 11

Fig. 31 パネル 10 (合板型)、パネル 11 (Dap 合板型) の $\log p$, u , h の時間変化

Time plots of $\log p$, u and h in Panel 10 (P-type) and Panel 11 (D. P-type).

ー中の湿度が下がり、温度が上がると木材が放湿して、デシケーター中の湿度を高める。木材を含まない図 (a) では、ガラス壁面への少量の吸脱着だけであるから、図 (b) のような現象は起こらない。Table 18 に 2 つの場合のデシケーター中の水蒸気量の変化を掲げる。水蒸気量の変化に対して、木材の含水率はほとんど変化しないと考えられる。たとえば、基準状態の 0~3 hr に対する 15~18 hr の水蒸気量の差は $(33.5 - 8.0) \times 10^{-8} = 25.5 \times 10^{-8}$ である。試料 1 個あたり $1.6 \times 10^{-8} \text{ g}$ のようにきわめて小さい吸湿量になる。

デシケーターの中に、木材がない場合が Fig. 28 のパネル中空層と類似する。疎水性スチロールフォームで S_8 および S_9 面が被覆されるので、冷却による温度降下によっても、中空層内の水蒸気が吸収されず、合板素地面 (S_8) の吸湿と透湿が遮断されるので、 h_2 が上昇してくる。デシケーターの中に木材がある場合が、たとえば、Fig. 24 のような、冷却によって h_2 が急低下するものに対応

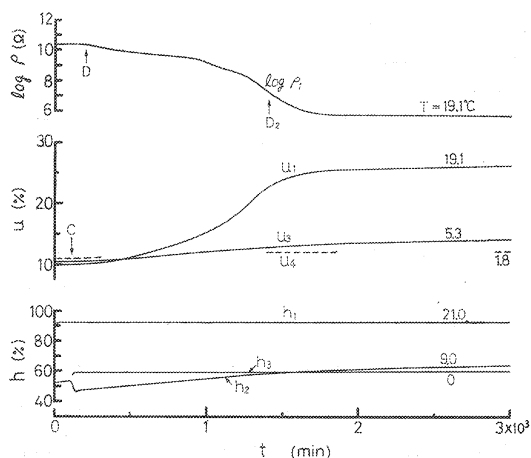


Fig. 32 パネル 12 (パーティクルボード型) の $\log \rho$, u , h の時間変化
Time plots of $\log \rho$, u and h in Panel 12 (PA-type).

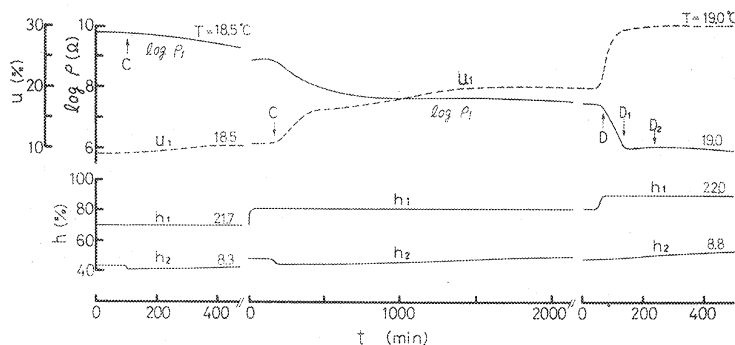


Fig. 33 パネル 12 (パーティクルボード型) の $\log \rho$, u , h の時間変化 (h_1 の階段的増加)
Time plots of $\log \rho$, u and h in Panel 12 (PA-type) (Step increment of h_1).

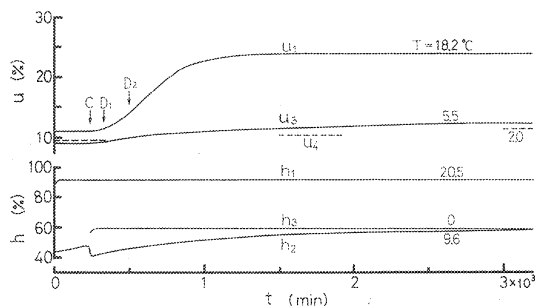


Fig. 34 パネル 13 (ハードボード型) の u , h の時間変化
Time plots of u and h in Panel 13 (HA-type).

する。すなわち、 S_5 の温度低下によって、中空層の水蒸気が吸収され、湿度の急低下を生じる。水蒸気の吸収には、このほかに、栈木面の吸湿、 M_2 と栈木との接合部分からの消失も関与すると考えられる。

これまでの検討で、複合化と結露の予測の可能性、 S_2 面の表面結露と保温、 S_5 面の内部結露と防湿などを記述してきた。そして、 h_2 の挙動は表面材料 M_1 の透湿性以外に、中空層の状態、他面の M_2 によって影響を受けることも認められた。 h_2 の変化をさらに調べるため、 M_1 を種々にかえた場合を検討する。

Fig. 31 (a) はこれまでの一連の 5.6 mm

合板パネルを 2.7 mm 合板にとりかえた場合で、 h_2 は 10^8 分以内に一定化し、 u_3 もよく似た傾向を示す。 $\log \rho_2$ も 5 以下になり、早い時期に内部結露を生じたのであろう。 $\log \rho_1$ の冷却後に見られるピークは M_1 の温度低下のためと推定される。

Fig. 31 (b) は 2.7 mm

合板を Dap 合板にとりかえた。厚さが 3 mm にもかかわらず、透湿量が少ないことを示している。

Fig. 32 は M_1 を厚さ 15 mm のパーティクルボードにとりかえた場合である。この場合、含水率の補正は Fig. 13 の下図によるので、その正確さには問題があるが、 u の傾向は表わされている。 D 点では露点 19.6°C よりやや低くなるにもかかわらず、 D_2 に至るのに 1,200 分以上を要している。パーティクルボード素地面は露点後も結露が遅れ、しだ

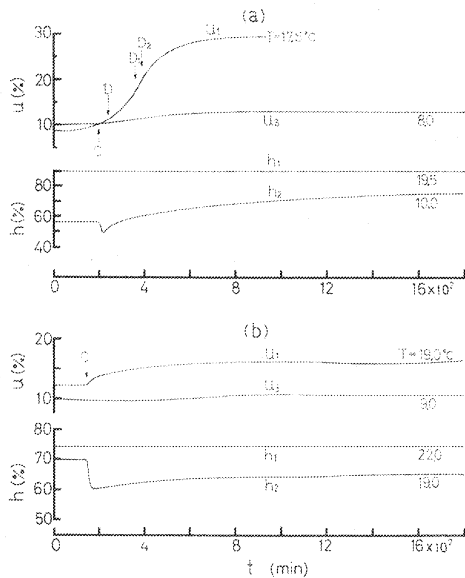


Fig. 35 パネル 14 (ハードボード型) の u, h の時間変化
Time plots of u and h in Panel 14 (HA-type).

分で9%の含水率増を生じる。冷却したまま $h_1=85\%$ に高めると、短時間内で結露を生じる。Fig. 32, Fig. 33 から、パーティクルボードが結露する前は、含水率の増加が先行するが、透湿率が大きく (Table 2), 厚さが厚くて、熱容量が大きいので、 T_2 が露点近傍では、合板素地面に比して、結露まで長い時間を要するのであろう。

Fig. 34 は M_1 に厚さ 6.4 mm のハードボードを使った場合である。ハードボードの場合、絶縁抵抗の測定ができず、 u の変化のみを示してある。ハードボードの含水率の補正には Fig. 13 の上図を用いた。ハードボードの表面は露点に達すると、比較的早く D_1 (変色), D_2 の状態になりやすい。しかし、 h_2 の増加は $0 \rightarrow 3 \times 10^8$ 分で $44 \rightarrow 59\%$ R. H., Fig. 20 の合板では $43 \rightarrow 80\%$ R. H. であり、透湿量が小さい (Table 2)。

Fig. 35 は中空パネルの両側、つまり M_1, M_2 をハードボードにした場合である。ただし M_1 は厚さが 3.6 mm である。図 (a) では、 S_2 面は変色をともなって結露を生じるが、Fig. 34 より h_2 の増加が大きく、1,800 分で $56 \rightarrow 74\%$ R. H. に達する。

このパネルで図 (b) に示すように h_1 が小さいとき、冷却開始とともに h_2 の低下が大きいので、 M_2 のハードボードと桟木の接合端面にビニールを貼ったのが Fig. 36 である。また、 S_2 面に市販の耐水塗料を塗布した。 h_2 の低下は前回よりわずかに小さいが、これから、 S_2 面 (網目) の吸湿能は素地木材程度を示す。図 (a) で注意すべきは、露点下で S_2 面の結露はきわめて短時間で起こり、全体が著しく水ぬれ状態になるが、 h_2 の増加が 4×10^8 分で、 $68 \rightarrow 77\%$ R. H. であるから、厚さが薄くても非透湿性のパネルとして有用である。図 (b) は h_1 が 81% の場合で、 h_2 の変化は非常に少ない。

Fig. 37 は Fig. 31 の結露の予測図である。断熱層がないので、パネル内の温度は実測温度を用いて、既述のように曲線化することによって、図 (c) のように実験と一致させることができる。熱伝達抵抗を

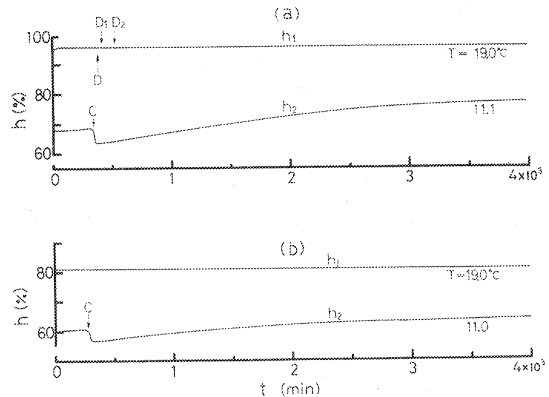


Fig. 36 パネル 15 (塗装ハードボード型) の h_2 の時間変化
Time plots of h_2 in Panel 15 (P. HA-type).

いに含水率の増加を生じる。

Fig. 33 では、 $h_1=70\%$ 、480 分後でも含水率が 11% であったので、 h_1 を 80% に高めて冷却した。

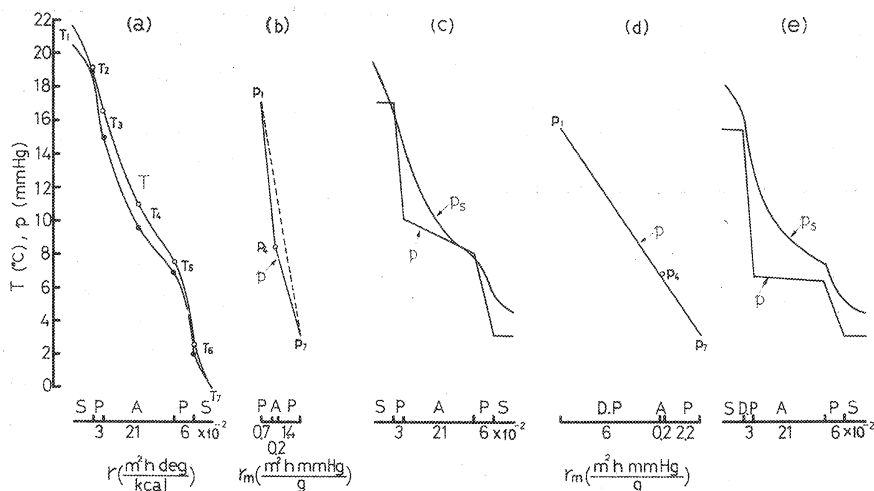
$S_2=18.5^\circ\text{C}$ で、露点温度は 18.1°C になり、 2×10^8

0.06 (m²h deg/kcal) 程度と考えて、白マルの実測値には合う直線式を導く。

$$T = -49.2r + 21.4 \quad (43)$$

この直線の示す S₂, S₆ の温度は 18.4, 3.6°C で、実測の T₂ より小、実測の T₆ より大になる。

S₂, S₆ における p_s は、曲線化によって求めると、16.5, 7.8 mmHg であり、eq. (43) の直線によって求めると、15.9, 7.3 mmHg となる。すなわち、S₂, S₆ で p 線と交差する量は Fig. 37 (c) より多くなるはずである。一方、図 (b) の破線を用いて p を表わすとすれば、図 (b) より明らかなごとく、各位置の水蒸気圧は折線の場合より高いから、図 (c) の p_s に重ねると、曲線または直線による p_s 線のいずれにおいても、交差する量が増大する。



Note (a) ○, (b), (c)→Fig. 31 (a); (a) ●, (d), (e)→Fig. 31 (b).

Fig. 37 Fig. 31 の結露予測図

Prediction diagram of moisture condensation on Fig. 31.

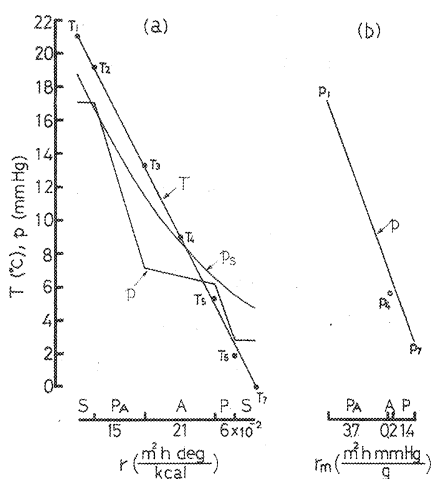


Fig. 38 Fig. 32 の結露の予測図

Prediction diagram of moisture condensation on Fig. 32.

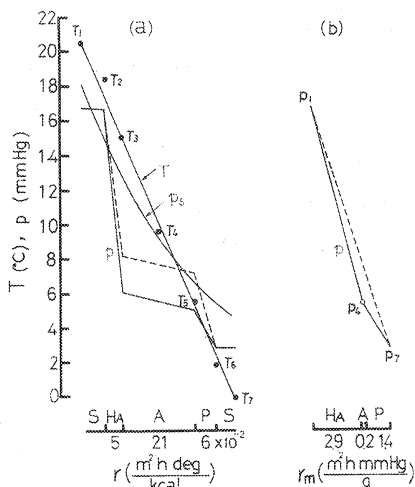


Fig. 39 Fig. 34 の結露の予測図

Prediction diagram of moisture condensation on Fig. 34.

Fig. 31 (b) では、温度の曲線化によって、図 (e) のように結露しない結果になる。しかし、黒マルの実測温度を次の直線式で近似させると、

$$T = -47.5r + 20.3 \quad \dots\dots\dots(44)$$

これより S_2 の p_s は 14.9 mmHg ($T_2=17.4^\circ\text{C}$) となり、 p 線の 15.4 mmHg と交差する。一方、 S_8 では直線化によって、 p_s は 7.0 mmHg (6.0°C) で、 p は 6.4 mmHg であるから、両者は交差しないが接近する。

Fig. 38 は Fig. 32 のパーティクルボードの場合で、実測値は直線にのりやすい。中空層の水蒸気圧は直線よりずれて小さいが、その量はわずかであるから、 p_s と p を重ねると Fig. 32 の実験結果と一致する。

これに対して Fig. 39 は Fig. 34 のハードボードの場合で、 T_2 は直線よりずれを生じる。水蒸気圧は実測値を用いた直線と破線の場合をとり、それぞれの p 線を図 (a) に重ねている。破線では、 S_8 で結露条件をみだが、実際は Fig. 34 に示すように S_8 で結露せず、 u_8 も 13% 程度である。

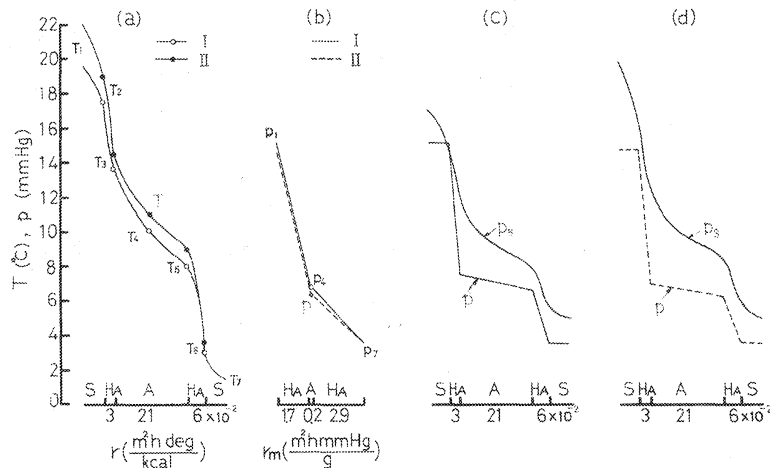
Fig. 40 は Fig. 35 の両面がハードボードの場合で、図 (a), (b) を直線化するのは困難であるから、温度、水蒸気圧の実測値を用いると、図 (c), (d) の予測図が得られる。これは実験結果と一致する。

Fig. 39 の水蒸気圧を直線化すると実験と一致せず、また、Fig. 40 になるとほとんど直線化の意味がなくなる。これらの中空層の h_2 、つまり p_4 は予測値まで増加する必要はないはずである。

Table 19 にこれまでの各予測図の p_1 , p_4 , p_7 (各実験値) と直線化した場合の中空層中央の予測水蒸気圧 p_P を示す。また、各パネルの湿気貫流抵抗 R_m (r_{sm} は小さいので無視した) と S_2 より S_4 にいたる湿気抵抗 $r_m(a)$ もあわせて示す。Table 19 より、

$$\frac{r_m(a)}{R_m} > 0.73 \quad \text{ならば、} \quad \frac{p_P}{p_4} = 0.93 \sim 1.0, \quad \therefore p_P \approx p_4 \quad \dots\dots\dots(45)$$

$$\frac{r_m(a)}{R_m} < 0.72 \quad \text{ならば、} \quad \frac{p_P}{p_4} = 1.01 \sim 1.59, \quad \therefore p_P > p_4 \quad \dots\dots\dots(46)$$



Note) (a) ○, (b) solid line (I), (c)→Fig. 35 (a);
(a) ●, (b) broken line (II), (d)→Fig. 35 (b)

Fig. 40 Fig. 35 の結露予測図
Prediction diagram of moisture condensation on Fig. 35.

Table 19. 中空層の水蒸気圧の実測値と予測値
Experimental and predicted values of water vapour
pressure in hollow core

予測図 Predic. diagram	パネル 番号 Panel No.	防湿層 Moisture proof layer	p_1 (mmHg)	p_7 (mmHg)	R_m ($\frac{\text{m}^2\text{h}}{\text{mmHg/g}}$)	$r_m(a)$ ($\frac{\text{m}^2\text{h}}{\text{mmHg/g}}$)	p_4 (mmHg)	p_P (mmHg)	$r_m(a)$ R_m	$\frac{p_P}{p_4}$
18	1	—	23.0	3.2	3.0	1.5	8.6	13.0	0.50	1.51
			18.4				7.5	10.8		1.41
			16.6				7.2	10.0		1.39
			14.2				6.7	8.8		1.31
22	1	— M. P. C	15.2	2.7	3.0	1.5	7.2	9.0	0.50	1.25
	3		16.9	3.2	13.0	10.7	6.0	5.9	0.82	0.98
26	4	M. P. C+F. S	16.5	3.0	16.2	14.7	4.5	4.2	0.91	0.93
27	6	P.E. P+F. S	16.7	3.4	11.2	8.9	6.2	6.2	0.80	1.00
	7	P.E. P+C+F. S	16.4	2.9	10.6	9.1	4.6	4.6	0.86	1.00
29	8	P.E. P+F. S	16.6	3.6	17.6	12.1	7.6	7.7	0.69	1.01
37	10	— D. P	17.1	3.2	2.3	0.8	8.5	12.2	0.35	1.44
	11		15.5	3.2	8.4	6.1	6.9	6.7	0.73	0.97
38	12	—	17.1	2.7	5.3	3.8	5.6	6.5	0.72	1.16
39	13	—	16.7	2.8	4.5	3.0	5.3	7.7	0.67	1.45
40	14	—	15.2	3.5	4.8	1.8	6.8	10.5	0.38	1.54
			14.6	3.5	4.8	1.8	6.4	10.2	0.38	1.59

Note) 1. p_1, p_4, p_7 : 水蒸気圧・実験値 (Water vapour pressure, experimental value)
 2. p_P : 中空層中央の水蒸気圧の予測値 (Predicted water vapour pressure in middle part of hollow core)
 3. $r_m(a)$: S_2 面より中空層 (S_4) までの湿気抵抗 (Moisture resistance from S_2 to S_4)

であるから、防湿層のあるものは eq. (45)、ないものは eq. (46) である。

Fig. 37 の (b), (d) を比較すると、(b) は折線型、(d) は直線である。後者には防湿層として、Dap 樹脂が比較的大きな透湿抵抗を示すので、横軸の r_m 軸に対して、中空層の位置は右よりとなる。これは実測値と予測値を一致させる原因である。

Fig. 18~40 の各予測図で、それぞれの場合に説明した方法によって、結露の予測は可能であった。その方法を分類すると、

- ① T : 直線化, p : 直線化とできるものは, Fig. 22 (ただし, Fig. 21 の予測), Fig. 26, Fig. 27, Fig. 29, Fig. 38 などであり, T_2 と T_6 のうち, あるものは直線よりずれる。
- ② T, p のいずれかを直線化できる。他は曲線 (T) または折線 (p) となる。これには, Fig. 37 (ただし, Fig. 31 (b) の予測), Fig. 39 がある。
- ③ T : 曲線化, p : 折線化とすることがあり, これには, Fig. 18, Fig. 19, Fig. 37 (ただし, Fig. 31 (a) の予測), Fig. 40 などがある。

この中で③は、予測に際していくつかの実験値 (T_2, T_4, T_6, h_2) が必要であり、既述したように、①の方法で予測すると実験と一致しない。

③の中空パネル構造の特徴は、

- (i) パネルが薄い。たとえば、中空層が 30 mm。
- (ii) パネル両側での温度差が大きい。たとえば 20°C 以上。
- (iii) パネルの両表面材料が一重で薄い。たとえば、厚さ 6 mm 以下の合板、ハードボードなど。
- (iv) 防湿層、断熱層のないもの。

などがこの実験からあげられよう。したがって、予測を行なうには、少なくとも T_2 , T_4 , T_5 および h_2 (p_4) の各実験値が既知であることが望ましい。

Fig. 20~34 の中空パネルの M_2 は厚さ 5.6 mm の合板で、 M_1 には各種のものをを用いた。したがって、中空層の関係湿度の増加は、 h_1 の大きさ、 M_1 の種類に依存するのは当然である。すでに 2-3 では、中空層が一面以外は、非透湿性のアルミニウムの場合の関係湿度の変化を調べた。ここで、Fig. 20~34、つまり中空層が吸湿性の合板 (M_2) と桧木の場合の湿度増加への影響を考察する。

中空パネルを用いた実験では、[A] 室と中空層で温度差があるので

$$J = \frac{U + (h_{t2} - h_{t1}) \cdot \sigma \cdot V}{(p_t - p_m) \cdot \Delta t \cdot \Delta a} = J_{n. c. p} \quad (47)$$

$$J = \frac{U + \Delta h \cdot \sigma \cdot V}{\left(\int_{t_1}^{t_2} \Delta p \, dt \right) \cdot \Delta a} \quad (48)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

ここに、 U は合板 (M_2) と桧木の表面から吸湿と透湿にもとづく、中空層の水蒸気減少量である。 p_t , p_m は h_t , h_m に対応した水蒸気圧である。実験当初、位置 S_1 , S_4 , S_7 の関係湿度はほぼ同一であるが、 h_1 を 90% 程度まで高めると、水蒸気は M_1 を透過して中空層へ浸入し始める。この過程で、一定時間後 [B] 室を冷却すると合板 M_2 の湿度が下がり、中空層の水蒸気を吸湿し始める。このため S_5 面の含水率は漸増してゆく。

S_5 面、桧木表面の含水率の増加を Δt 時間に Δu 、増加水分量をそれぞれ、 ΔW_L , ΔW_S とすれば、両者の和 ΔW_2 は

$$\Delta W_2 = \Delta W_L + \Delta W_S = \Delta u \cdot (W_{L0} + \theta \cdot W_{S0}) \quad (49)$$

ここに、 W_{L0} , W_{S0} は合板 M_2 (ラワン) と桧木 (スプルース) の全乾重量である。 θ は桧木の含水率増加に対する補正係数で 1 以下と考えられ、以下の計算には 0.5 を用いた。 W_{L0} , W_{S0} は

$$W_{L0} = a \cdot \gamma \cdot r_0 = 2,916 \times 0.02 \times 0.55 = 32.076 \text{ (g)} \quad (50)$$

$$W_{S0} = b \cdot \gamma \cdot r_0 = 1,296 \times 0.02 \times 0.41 = 10.628 \text{ (g)} \quad (51)$$

ここに、 a は S_5 面の中空層に接する面積、 b は同様に桧木内側の面積、 γ は不確定値であるが、水分計の感応範囲として、表層厚さ 200 μ (3-3 参照) を用いた。 r_0 は全乾比重で、同種試料の 10 個平均である。

S_5 面に吸着された水分は合板内部へ浸透し、やがて [B] 室へ蒸発する。合板中の含水率勾配を du/dx とすると、拡散水分量 ΔW_3 は

$$\Delta W_3 = D_u \cdot \frac{du}{dx} \cdot \Delta a \cdot \Delta t \quad (52)$$

D_u は拡散係数で、同種の合板について測定すると下記のごとくである。

$$D_u = 0.25 \times 10^{-4} \text{ g/cm h \%} \quad (52')$$

eq. (52) の代わりに、合板 M_2 の湿気貫流率 J_{M_2} を用いると

$$\Delta W_3 = J_{M_2} \cdot (p_4 - p_7) \cdot \Delta a \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots (53)$$

M_2 は Panel 1~13 では、厚さ 5.6 mm の合板で、 $J_{M_2}=0.26 \text{ g/m}^2\text{h mmHg}$ (2.5°C)、 $\Delta a=0.2916 \text{ m}^2$ 、Panel 16~21 では、厚さ 5.7 mm の合板で、 $J_{M_2}=0.18 \text{ g/m}^2\text{h mmHg}$ (0.5°C)、 $\Delta a=0.2862 \text{ m}^2$ などの実測値が用いられる (Table 2)。

いま、eq. (52) を用いる場合

$$U = \Delta W_2 + \Delta W_3 \quad \dots\dots\dots (54)$$

であるから、eq. (47), (49), (52) より、中空パネルの M_1 の非定常状態の湿気貫流率が計算できる。具体的には Fig. 20~34 において、 $t=1,500$ 分 (ただし、Fig. 31 (a) では $t=500$ 分) を中心として、前

Table 20. 中空パネル内装材 (M_1) の湿気貫流率 [$J_{H.C.P}$]
Moisture transmission coefficient [$J_{H.C.P}$] of the interior board
(M_1) in hollow core panels

パネル番号 Panel No.	関係図 Figures	湿気貫流率 [J] ($\text{g/m}^2\text{h mmHg}$)	$[h_1]$ (%)	S_2 面の状態 Appearance of S_2 face	S_5 面の状態 Appearance of S_5 face
1	20	0.122	84	D_1'	d_2
3	21	0.033	92	D_2	—
4	23	0.031	94	D_2	—
5	24(a)	0.066	85	D_2	d_2
6	25(a)	0.051	90	D_2	d_2'
7	25(b)	0.012	88	—	—
8	28	0.030	96	D_1'	—
10	31(a)	0.234	88	D_2	d_2
11	31(b)	0.048	86	—	—
12	32	0.044	92	D_2	—
13	34	0.044	92	D_2	—

Note) J は eq. (47) より計算。 J are calculated from eq. (47).

Table 21. ΔW (eqs. 47, 49, 52, 53)

パネル番号 Panel No.	ΔW_1 (g)	ΔW_2 (g)	ΔW_3 (g)	
			from eq. (52)	from eq. (53)
1	0.0038	0.2318	0.8441	0.8480
3	0.0022	0.1526	0.2110	0.5477
4	0.0012	0.0822	0.2954	0.2711
5	0.0019	0.2468	0.3380	0.9013
6	0.0010	0.1270	0.4221	0.5464
7	0.0012	0.1345	—	0.3513
8	0.0007	0.0748	0.2110	—
9	0.0011	0.0748	—	—
10	0.0088	0.7477	1.2660	1.2410
11	0.0006	0.1121	0.2954	0.8913
12	0.0022	0.0971	0.4220	0.6047
13	0.0013	0.0748	0.4221	0.5459
16	0.0021	0.1496	0.5148	0.7005
17	0.0014	0.0747	0.2742	0.6422
18	0.0022	0.1496	0.3375	0.6133
19	0.0019	0.1696	0.4715	0.5406
20	0.0004	0.0747	0.2141	0.6667
21	0.0006	0.0747	0.1717	0.5407

Table 22. パネル 16~21 の透湿実験
Experimental data of moisture permeation on each panel

温度または関係湿度 Temp. or R. H.	パネルの構造 Panel structure					
	Panel 16 {Pr. P}2.6 +[A]60+ {P}5.7	Panel 17 {P. C. P}2.9 +[A]60+ {P}5.7	Panel 18 {W. P}6.0 +[A]60+ {P}5.7	Panel 19 {Pr. P}2.6+ {G}9.6+[A]60+ {P}5.7	Panel 20 {W. P}6.0+ {M. P. S}+[F. E]4.0+[A]60+ {P}5.7	Panel 21 {P. C. Pa}8.7 +[F. E]4.0+ {A}60+{P}5.7
T_1 (°C)	20.5	20.0	21.0	20.5	21.0	20.5
h_1 (%)	88	88	90	90	89	86
T_4 (°C)	11.0	10.7	9.8	9.2	8.1	7.8
$1 \times 10^8 \text{ min}$	68	68	80	66	67.5	62
h_2 (%)	74	72	73	72	69	64
$2 \times 10^8 \text{ min}$	78	74	84	77	71	66
$3 \times 10^8 \text{ min}$	78	74	84	77	71	66
u_3 (%)	16.0	12.0	16.0	14.0	13.0	11.0
$1.5 \times 10^8 \text{ min}$	17.2	12.7	17.8	15.1	13.5	11.4
$2 \times 10^8 \text{ min}$	18.0	13.0	18.0	16.0	14.0	12.2
$3 \times 10^8 \text{ min}$	17.5	13.5	20.0	18.0	15.3	13.5
u_4 (%)	16.0	12.0	17.0	14.0	13.0	11.0
$1.5 \times 10^8 \text{ min}$	15.5	12.0	17.5	15.0	13.0	12.5
$3 \times 10^8 \text{ min}$	15.5	12.0	17.5	15.0	13.0	12.5
T_7 (°C)	-0.3	0	0	0	-0.5	0
h_3 (%)	64	65	74	65	69	65

後の $\Delta t = 200$ 分間の h , p の変化量を求め, J を計算したのが Table 20 である。同表には S_2 面, S_5 面の結露状態も併記してある。

また, eq. (53) による ΔW_3 を eq. (52) と比較したのが Table 21 である。 ΔW_1 は eq. (47) の $(h_{12} - h_{11}) \cdot \sigma \cdot V$ である。この表には, Panel 16~21 の実験データ (Table 22) も含めて計算した。これから, J の成分として ΔW_3 の影響が大きいことがわかる。eq. (52) と (53) による ΔW_3 は, だいたい等しいものも多いが, 後者が 2~3 倍大きくなるものもある。eq. (53) では, $p_4 - p_7$ を用い, かつ, h_1 が 100% の際の J の実験値を用いている点, 若干の疑問が残ろう。

ΔW_3 の影響が大きいことから, たとえば Table 20~34 で, 3×10^8 分付近を, h_2 の状態より定常状態とすれば

$$J_{M1} = J_{M2} \cdot \frac{\Delta p_{M2}}{\Delta p_{M1}} \quad (55)$$

が成立する。添字は M_1 , M_2 の J とその両サイドの水蒸気圧差 Δp である。

$$\Delta p_{M1} \doteq p_1 - p_4 \quad (56)$$

$$\Delta p_{M2} \doteq p_4 - p_7 \quad (57)$$

とおけば, J_{M2} が知れる場合, 近似的に J_{M1} が計算できる。 J_{M2} は eq. (53) のところで記述した値が用いられる。

eq. (55) の代わりに

$$J_{M1} = \frac{1}{\Delta p_{M1}} \cdot D_u \cdot \frac{du}{dx} \quad (58)$$

も成立する。 D_u は前述の 0.25×10^{-4} g/cm h %, du/dx は概略値として, M_2 の両側の含水率差を用いる。

Table 23. 中空パネルの M_1 の湿気貫流率の比較
Comparison of moisture transmission coefficient of M_1 in
hollow core panels

材 料 (M)	厚 さ [I] (mm)	透湿カップ Perm. cup J_{cup}	中空パネル Panel		Hollow core $J_{H.C.P.}$		透湿箱 Perm. box $J_{P.B.}$
			eq.(47) "(52) "(54)	eq.(47) "(53) "(54)	eq.(55)	eq.(58)	
1 合 板 [P]	2.7	1.13	0.23	0.23	0.17	0.20	0.015
2 合 板 [P]	5.6	0.69	0.12	0.12	0.15	0.44	0.0033
3 ハードボード [H]	6.4	0.34	0.044	0.055	0.062	—	0.0016
4 パーティクルボード [Pa]	15.6	0.36	0.044	0.058	0.066	0.076	0.0010
5 ウォルナット化粧合板 [W. P]	6.0	0.25	0.062	0.097	0.13	0.13	0.0024
6 プリント合板 [Pr. P]	2.6	0.47	0.084	0.107	0.15	0.11	0.0064
7 Dap 樹脂オーバーレイ合板 [D. P]	3.1	0.17	0.048	0.110	0.11	0.10	0.0011
8 塩ビオーバーレイ合板 [P. C. P]	2.9	0.10	0.043	0.090	0.13	0.08	0.0006
9 合板+防湿セロファン [P+M. P. C]	5.6	0.10	0.033	0.063	0.072	0.083	0.0012
10 合板+防湿セロファン+ポリ スチロールフォーム [P+M. P. C+F. S]	19.2	0.08	0.031	0.029	0.034	0.075	0.0011
11 ポリエステル塗装合板 [Pe. P]	5.7	0.12	0.066	0.130	0.13	0.26	0.0016
12 ポリエステル塗装合板+ポリ スチロールフォーム [Pe. P+F. S]	16.2	0.10	0.051	0.063	0.068	0.17	0.0010
13 ポリエステル塗装合板+防湿 セロファン+ポリスチロールフ ォーム [Pe. P+M. P. C+F. S]	16.2	0.03	0.012	0.041	0.036	0.075	0.0008
14 ポリエステル塗装合板+ポリ スチロールフォーム [Pe. P+F. S]	16.2 (Pe: 120 μ)	0.06	0.030	—	—	0.072	0.0005
15 プリント合板+石こうボード [Pr. P+G]	11.8	0.36	0.070	0.077	0.11	0.14	0.0026
16 ウォルナット化粧合板+防湿 シート+ポリエチレンフォーム [W. P+M. P. S.-II+F. E]	10.1	0.015	0.027	0.048	0.065	0.094	0.0008
17 塩ビオーバーレイパーティク ルボード+ポリエチレンフォー ム [P. C. Pa+F. E]	12.4	0.012	0.025	0.043	0.057	0.044	0.0003

Table 24. 月べつの平均温度と平均水蒸気圧
Monthly mean temperature and water vapour pressure

地 区 District	2 月 February		5 月 May		8 月 August		11 月 November	
	T	p	T	p	T	p	T	p
札幌 SAPPORO	-4.7	2,426	11.3	7,230	21.7	15,964	3.6	4,389
新潟 NIIGATA	1.8	3,966	15.3	9,778	25.8	19,930	9.8	6,905
東京 TOKYO	4.3	3,738	17.6	11,017	26.4	20,391	11.3	7,130
大阪 OSAKA	4.9	4,794	18.3	11,040	27.8	20,736	11.9	7,837
鳥取 TOTTORI	4.5	4,802	16.7	10,549	26.0	20,416	11.5	7,734
福岡 FUKUOKA	5.7	4,877	17.8	11,769	26.8	21,405	12.2	8,100

Note) T (°C) : 平均温度 Mean temperature.

p (mmHg) : 平均水蒸気圧 Mean water vapour pressure.

eq. (52) または eq. (53) の場合および eq. (55) または eq. (58) の各場合について計算した Panel 1 ~ 21 の湿気貫流率を Table 23 に示す。この表には、透湿カップ法、湿度計の測定結果も併記してある。これらの式の中で、比較的妥当性のある eq. (52), (55) によって求めた J を調べると、各材料で、厚さ、耐湿性の程度、防湿層の有無によって湿気貫流率に相違を生じるようである。3つの測定法とも、材料間で、その傾向の定性的な類似性が認められる。1連の測定値では、透湿箱による値が最も小さく、中空パネルの非定常、定常の順序で大きくなり、透湿カップ法による値に近づく。透湿カップ法は過酷な湿度条件、透湿箱は緩和な湿度条件での結果で、実際のパネルではその中間的なものが予測される。しかし、定常法による M_1 の J の計算にはいくらかの欠点を伴う。

巨視的な観点では、eq. (52), (55) にもとづき、中空パネル全体の透湿現象を次のように考えることもできる。

Fig. 10 のような中空構造のパネルにおいて、 M_1 , 中空層, M_2 の透湿係数を G_1 , G_a , G_2 , 各層の水蒸気圧差を $p(M_1)$, $p(a)$, $p(M_2)$ とし、中空パネル全体の透湿係数を G とすれば、定常状態において

$$G_1 \cdot p(M_1) = G_a \cdot p(a) = G_2 \cdot p(M_2) = G \{p(M_1) + p(a) + p(M_2)\} \cdots (59)$$

であるから、 G は G_1 , G_2 , G_a のいずれよりも小さくなる。 G_a は平均温度 10°C , 中空層 60 mm で 4.1 ($\text{g}/\text{m}^2\text{h mmHg}$), また、文献⁹⁾によると、 $0 \sim 20^\circ\text{C}$, 中空層が 10 mm 以上では $3 \sim 9$ ($\text{g}/\text{m}^2\text{h mmHg}$), 91 mm で 0.95 ($\text{g}/\text{m}^2\text{h mmHg}$) などが示されている。これらは G_1 , G_2 に比してかなり大きい値である。 M_2 は外壁に対応するが、従来、外壁は耐火、耐久、耐水性は高度に要求されるが、透湿性については中程度とされている。したがって、内壁 (M_1) の G_1 が他に比較して小さいと考えられ、 G_1 の大小が中空パネルの透湿につく影響する。 G_1 は M_1 の構造がきまると、あとは雰囲気条件にかなり影響される。すなわち、

- i) カップ法のように、試片の一面が液面に近く、他面に強制気流があると、 G_1 は大きい。
- ii) 透湿箱のように、密閉した内部空間に強制気流がなく、内壁面が非透湿性であると、 G_1 は小さい。
- iii) 中空パネル構造では、木材積木、内壁面の種類によって、計算式で与えられるよう G_1 に相違を生じる。おおむね、iii) の G_1 は i), ii) の値の間になる。

このように G_1 は i) ~ iii) のようにかわるから、中空パネルの G は、やはり i) ~ iii) に対応するとみられ、それぞれについての計算からある程度まで推定が可能である。

Table 24 は日本の主要地域の年間の水蒸気圧である。室内が理想的条件、 22°C , R. H. 65%, すなわち、水蒸気圧が $12,888$ mmHg であれば、これと Table 24 の水蒸気圧との差、および前掲の各表の透湿係数 (または湿気貫流率) を用いて、任意のパネルの透過水蒸気量が求められる。この量によって、室内における水蒸気発生の制御 (脱湿, 増湿, 空調) と換気などの、いわゆる居住設計が可能となろう。

4. まとめと問題点

高層住宅のコンクリートを主体とした周壁に対して、独立住宅では各種の平面材料を複合して、特種な性能を有する周壁をデザインすることができる。本報では、後者の住宅において、木質材料をパネルのベースとしたときの温度・湿度に対する性質、特に透湿性と耐結露性を調べ、その特性と改良を追求した。結露は現在、プレハブ住宅でも、その住宅の耐久性と関係が深く、対策が急がれている。

- 1) パネル構成材料の木質材料とこれに複合できる無機、有機材料の透湿率を2つの方法で測定した。

透湿カップ法は各実験において一定の測定条件とデータの再現性が得やすく、材料間の比較には適したもので、Table 1~9 の結果を得た。透湿率 (g/mh mmHg) を比べると、(10^{-8}) のオーダーには針葉樹材、パーティクルボード、合板、スチロールフォーム、透湿性のある複合材料、石棉系材料、広葉樹材、ハードボード、(10^{-8}) と (10^{-4}) の境には、プリント合板、簡単な塗装合板、(10^{-4}) のオーダーには、耐水性ペイント塗装の合板、含浸型またはオーバーレイ型の合板類、非透湿性の複合材料、(10^{-8}) のオーダーには、ルーフィング、ポリエチレン発泡、(10^{-6}) より小さいものは防湿フィルムなどである。透湿率は実験の温・湿度条件の影響を受けて異なる。下地が木材の塗膜層の透湿率は単離塗膜のそれよりかなり大きい。カップの低湿度側に防湿層があるラミネート構造では、その逆の高湿度側にある場合より、湿気貫流率は顕著に小さくなる。複合したパネルの湿気貫流率の実験値と計算値を比較すると、Table 10 のような程度で一致する。

2) パネル材料を通して、密閉空間に透過した水蒸気によるその空間内の関係湿度の増加を、直接測定する湿度計法は、実際のパネルの透湿現象に適合している。密閉空間への透湿過程、またはそれからの脱湿過程の R. H. 変化曲線は Fig. 6~8 のごとくで、実験式は Table 12 である。透湿過程の各時間ごとの湿気貫流率は eq. (20), eq. (21) で示され、任意時間の平均は eq. (23), eq. (25) で計算できる。湿度計法で求めた湿気貫流率 (Table 12) が、透湿カップ法のそれに比して小さいのは、実験条件の相違のためと考えられる。カップ表面では、内部より透過してきた水蒸気が強制気流によって直ちに持ち去られるのに対して、湿度計法では、アルミ製透湿箱の内部は強制気流がなく、水蒸気が浸入する場合、内部の水蒸気圧の上昇は一層、透過水蒸気量を低減させると考えられる。これらの 1), 2) で求めた基礎データは、次に記述する結露の予測の際に利用される。

3) 上述の板状パネルの透湿に対して、中空構造をもつ現実の壁、天井に近いパネルの透湿と結露について、実験と理論を対比して追求した。透湿と結露の測定のための試験装置は [A], [B] の 2 室よりなり、その境界に試験パネルを入れる。住宅の場合を想定して、中空パネルの両側で温度差と水蒸気圧差を与えると、熱流と水蒸気の流れがパネルを通して生じる。この過程を中空パネル断面内の各位置で、温度、関係湿度、含水率の経時的測定より追跡した。木質材料の表面温度が露点になっても、含水率の増大が先行し、数時間後に結露が現われることが多い。木材表面の結露は、湿り、水ぬれ状、水滴の生成などの種類があり、その検出には表面固有抵抗の測定が比較的有利であった。中空パネル断面内の温度と水蒸気圧の分布の測定より、特定点の結露を予測することが可能である。しかし、両表面材料が薄い単純な中空パネルでは、実測の温度、水蒸気圧に対して計算による予測がずれてくる。この場合は 2~3 の実測値を用いて、予測線を補正する。中空パネルが積層された、いわゆる複合構造になると、結露の予測と実験結果が比較的よく一致してくる。この場合、パネルは防湿層、断熱層の積層型で、実験結果は横軸に熱抵抗、湿気抵抗をとった予測図によく適合してくる。高温・高湿側のパネルに防湿層を加えると、中空層の湿度の増加が押えられる。この防湿層に断熱層を重ねると、低温側のパネルの温度が低下し、ここに内部結露を生じることがある。このため低温側の中空層にも防湿層をとりつける。このような中空層の構造は非透湿性という点でアルミ製透湿箱に類似する。この中空パネルの [B] 室を冷却すると、中空層の R. H. が増加する。これに対して、中空層の内壁が吸湿・透湿性の木質材料素地では、[A] 室より透過してきた水蒸気は中空層の R. H. を高め、内壁面に吸収される。特に [B] 室が冷却されると、この現象が明瞭に現われる。この影響は高温側のパネルの湿気貫流率に現われ、その関係は eq. (47) で表わされる。eq. (47)

を用いて、各種のパネルの湿気貫流率を計算して Table 20 に示す。これと他の測定値との比較が Table 23 で、その大きさはカップ法と透湿箱法の間である。これは実際の木質系中空パネルの透湿の特性を表わすものと考えられ、また中空パネル全体の透湿と結露を左右する重要な因子で、木造建築の壁パネルの居住設計のポイントであろう。

4) 今後の問題点 木質系中空パネルは、透湿・結露性について他材料によるパネルと異なるところが見い出され、結露予測にも従来の考え方¹⁴⁾がよくあわない点もあった。本実験で使われた装置は、パネルを界して2室の温度制御を独立して行なうものであるが、実際の住宅では、結露の生じる夜間、室内温度がしだいに外気温に引っぱられて低下する現象があり、温度差が小さく、eq. (31) も成立することも考えられる。このような経過の実験的検討も今後必要であろう。

本報で透湿率、湿気貫流率を各種の方法で求めてきたが、測定条件に非常に影響を受ける量で、水分・温度の依存性を示す以外に気流の影響も重要である。建築材料の透湿の測定法はいろいろ考案されているが⁷⁾⁸⁾¹⁰⁾、相互関係、現実の非定常的な透湿現象に関して、まだ不鮮明のところが多い。

結露現象は表面仕上げ材料の耐露特性として重要であるが、建築の分野でもこの研究⁵⁾¹¹⁾は少ない。これに関連して木質材料で調べた結果は後報にゆずる。

パネルの結露試験は各種の試料パネルと測定条件が考えられる。ここでは最小限のモデルパネルと測定条件の結果から、他のパネルへの応用もほぼ可能となったが、まだ不明なところも多い。実験的には、計測の自記装置の改良も必要である。

補足的な問題として、結露を地域気候と Building element との関係¹²⁾で調べること、実際の住宅における調査¹³⁾¹⁶⁾、換気、構造、施工などと関連づけて追求すること、などは木質系住宅では資料が不足している。

文 献

- 1) DUFF, J. E.: Moisture Distribution in Wood-Frame Walls in Winter, F. P. J., 18, 60, (1968)
- 2) 江口和雄・野村 豪: RC 住宅の結露対策のための温湿度の実測, 建学論報 (号外), 468, (1965)
- 3) 建築設備編集委員会編: 建築設備大系 1, 彰日社, 251, (1965)
- 4) 前田敏男・松本 衛: 材料空隙の湿気伝導率の計算と実験, 建学講要旨, 208, (1962)
- 5) 前田敏男・水畑雅行: 吸放湿材料面への結露について, 建学論報, 103, 315, (1964)
- 6) 前田敏男・中村泰人・池田哲朗: 某プレハブ住宅における結露実態調査, 建学論報 (号外), 499, (1967)
- 7) 宮野秋彦・大沢徹夫・稲葉一八・加藤叙治: 建築材料の透湿測定装置に関する検討, 建学論報 (号外), 79, (1966)
- 8): 建築材料の湿気透過について, 建学論報 (号外), 497, (1967)
- 9) 齊藤平蔵・関根正明・桑村重徳: 建築材料の透湿性に関する実験的研究, 建学論報, 59, 110, (1958)
- 10) 齊藤平蔵: 建築材料の透湿性に関する実験的研究, 建学論報, 97, 141, (1957)
- 11) 齊藤平蔵・大関八枝・樋口誠六: 結露防止のための仕上材特性の一知見, 建学論報 (号外), 466, (1965)
- 12) 沢田誠二: 計算による結露現象の解析, 建学論報 (号外), 550, (1965)
- 13) 渡辺 要: 防寒構造, 理工図書, 152, (1957)
- 14) 渡辺 要ほか: 建築設備ハンドブック, 朝倉, 39, (1970)

Studies on Wood-based Components for Prefabrication of Residential House (Report 1)

Studies on moisture permeation and moisture condensation of wood based panels

Masaharu SUZUKI⁽¹⁾

Summary

When the house is exposed to cold weather conditions, we always observe the water dripping on the inner surface of the windows, the walls and the ceiling. The moisture condensation in the wooden house comes to produce the cup or the bow of the structural panels and results in stained finish and decay of its members. As moisture sometimes condenses on the face below the dew point inside the wall or the roof, this research was conducted to confirm the prediction of moisture condensation, which would be very important for designing the house components.

1. The measurements of moisture permeability. The cup method and the hygrometer method were adopted. The cup had no edge leakage of moisture (see Fig. 1) and it was confirmed to reach the equilibrium state by weighing at the constant time interval (see Fig. 2).

In the case of a composite wall panel, for example, in which the steady state of moisture gradient is attained, the resistance of moisture transmission R_m is written as follows:

$$R_m = \left(\sum \frac{1}{G_i} + \frac{1}{G_a} + \sum \frac{1}{\beta} \right) = \frac{\Delta p}{W} \quad (1)$$

where G_i signifies the moisture permeance rate of every solid layer, G_a that of the inner air space, Δp the difference of the water vapour pressure on both sides, β , W : (see Chap. 1). In the case of a single sheet material,

$$R_m = \frac{l}{\eta} + r_m'' + r_{sm} = \frac{l}{\eta} + S \quad (2)$$

$$(R_m = r_m' + r_m'' + r_{sm} = r_m + r_{sm})$$

where r_m'' is the moisture resistance of the surface skin in material, l , η , $r_{sm} = \sum \frac{1}{\beta}$: (see Chap. 1). Figs. 3 and 4 show the straight line relation between R_m and l and the value of η can be calculated from the gradient of the straight line. Extrapolating to $l=0$, S is also obtained. If the linearity of R_m vs. l can not be confirmed, we get

$$R_m = \frac{1}{J} = r_m + r_{sm} = \frac{1}{G} + r_{sm} \quad (3)$$

and if $r_m \gg r_{sm}$ (for instance, r_{sm} is below 5 per cent of R_m), then

$$R_m \approx r_m \quad J \approx G \quad (4)$$

and also obtain the following approximation

$$r_m = \frac{l}{\eta'} \quad (5)$$

where η' is the approximate value of moisture permeability constant. The coefficients from the eqs. 2~5 are listed in Tables 1~9. The inside face of the specimen is exposed to the higher humidity, simulating the actual moisture condensation.

Received June 19, 1973

(1) Wood Technology Division

From Tables 1 and 2, the values of η really depend on the water vapour pressure inside and outside the cup. When h_o (the R. H. in the outer atmosphere) is lowered, η is relatively small (Table 1). The η values of hard board are less than those of particle board which are corresponding to soft woods and rather permeable to moisture. The η values of the decorative plywood (overlaid type) are reduced to about one-tenth of the base-plywood (Tables 2 and 3). The fancy side facing h_o , the η values of some samples are somewhat less than the opposite condition of the fancy side. Generally, the values of J are also concerned with the atmospheric conditions.

Table 5 shows the gradual decrease of J caused by the increasing thickness of the painted layer (also see Fig. 5). The η value estimated from Fig. 5 is really larger as compared to the quantities of Table 4 (see Table 6). Table 7 shows that J had a close relation to the location of the painted layer (the upside or the downside of wood). Fig. 8 shows the moisture permeance rate of various kinds of moisture-proof sheet materials.

The moisture transmission coefficient by the hygrometer method is measured using the auto-recording hygrometer and the permeation box (Fig. 1 (c)). When R. H. in the chamber of the permeation box is sharply raised, the transmitted water vapour through specimen increases R. H. in the inner air space of the box, and the amount of it may depend on the moisture resistance of intervening sheet material and the difference in water vapour pressure on both sides. Table 11 shows the tested samples and the experimental conditions. The samples of No. 4 (Fig. 6), No. 3, 6 (Fig. 7) and No. 4, 6 (Fig. 8) show small amounts of the water vapour transmitted.

From the increment of relative humidity Δh with time Δt , J is given by the following equation

$$J = \frac{(h_{i2} - h_{i1})}{\Delta t} \cdot \frac{1}{h_t - h_m} \cdot \frac{\bar{d} \cdot \sigma}{p_s} = J_{P. B} \quad (6)$$

where $\Delta h = h_{i2} - h_{i1}$, h_t the relative humidity of the chamber, $h_m = (h_{i1} + h_{i2})/2$, $\bar{d}$ the depth of the permeation box. σ , p_s : (see Chap. 1). The calculations of eq. 6 at a given h_m are listed in Table 12. If the change of relative humidity is expressed by the empirical formula as shown in Table 12, J at time t is derived

$$J_t = \frac{dh_i(t)}{dt} \cdot \frac{1}{h_t - h_i(t)} \cdot \frac{\bar{d} \cdot \sigma}{p_s} \quad (7)$$

If

$$h_i(t) = \frac{a \cdot e^{\varepsilon t}}{b \cdot e^{\varepsilon t} + c} \quad (8)$$

from eq. 7 and eq. 8

$$J_t = \frac{a \cdot c \cdot \varepsilon \cdot e^{\varepsilon t}}{h_t(b \cdot e^{\varepsilon t} + c)^2 - a \cdot e^{\varepsilon t}(b \cdot e^{\varepsilon t} + c)} \cdot \frac{\bar{d} \cdot \sigma}{p_s} \quad (9)$$

where a , b , c and ε are the constant by samples, for instance on 3.6 mm thick hard board of Fig. 7-No. 4 and the decorative plywood of Fig. 8-No. 2

J (g/m ² h mmHg)		J (g/m ² h mmHg)	
time (hr)	H. board	time (hr)	D. plywood
4	5.9×10^{-3}	4	7.9×10^{-4}
12	6.3 "	12	9.3 "
24	5.2 "	20	1.1×10^{-3}

Taking the average of J during $\Delta t = t_2 - t_1$

$$J_{av} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{a \cdot \varepsilon \cdot e^{at}}{h_t - a \cdot e^{at}} \cdot \frac{\bar{d} \cdot \sigma}{p_s} dt \quad \dots\dots\dots (10)$$

Substituting $t_1=4$ and $t_2=20$ of the decorative plywood to eq. 10, we can obtain $J_{av}=9.3 \times 10^{-4}$ which is equal to the above list.

2. In order to measure the moisture transmission and the moisture condensation, the apparatus as shown in Fig. 9 was made. The test panel is installed at the boundary of A- and B-chamber, the atmospheric conditions of which are maintained at constant temperature and humidity respectively. The test panel is a hollow core type and constructed with wooden frame and the sided sheathing of plywood, composite board, etc. The electrode of the insulation resistance meter is attached to one side of the board and the meter indicates the changeable resistance with increasing moisture content. And producing moisture condensation, the amount of leak current becomes much, and electrical resistance falls abruptly.

Figs. 15~17 show the time plots of $\log \rho$, u and h under the experimental conditions of Table 17 (see the meaning of the symbols in Chap. 1 and Fig. 10). The experiments of these figures are conducted as follows: at first A- and B-chamber is maintained at about 60% R. H. and h_1 is suddenly raised by the conditioner. After some regular interval, B-chamber is cooled (see the symbol C) and from Fig. 15 (a)~(c), the time interval from C to D_2 is observed to be short in (c). In Fig. 17, we can see the remarkable increase of h_2 in the inner air space and the inner moisture condensation.

In order to predict the inner moisture condensation, the following equations can be derived

$$T_x = T_1 - \frac{\Delta T}{R} \cdot R(x) \quad \Delta T = T_1 - T_7 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$p_x = p_1 - \frac{\Delta p}{R_m} \cdot R_m(x) \quad \Delta p = p_1 - p_7 \quad \dots\dots\dots (12)$$

where T_x , p_x are the temperature and the water vapour pressure in distance x ($x=0$: the terminal of the boundary layer on S_2 face (warm side)), $R(x)$ or $R_m(x)$ the resistance of heat conduction or moisture permeance respectively. From eqs. 11 and 12, we can get saturated water vapour pressure p_s at each point of the panel section and compare p_x with p_s (if $p_x \geq p_s$, then producing the moisture condensation, if $p_x < p_s$, then no moisture condensation). Eqs. 11 and 12 represent a straight line. The prediction for Figs. 15 and 17 by these eqs. indicates a disagreement with the experimental data. Using each experimental data as shown in Fig. 18 (a) (b), we get to Fig. 18 (c) and it shows good agreement with really existing moisture condensation.

Fig. 20 shows the close correlation among $\log \rho$, u and h and it is clear that the thermal conductance of the hollow core indicates a minimum, though the moisture permeation of the hollow core is recognized as a large amount. As shown in Fig. 21, the presence of moisture-proof cellophane prevents increasing of h_2 . The temperature of the cold side of heat insulating material is considerably lower (Fig. 23). As soon as T_2 on the painted surface becomes dew point by cooling, the effective moisture condensation is produced and it comes to cause the sudden decrease of $\log \rho$ as shown in Fig. 24 (a). This is a characteristic of the moisture-proofing surface as compared with wooden surface. The prediction diagrams of Figs. 26 and 27 show a good agreement with the experiment in Figs. 23 and 25. Though T_2 of Fig. 28 is raised by the heat insulating effect and almost equal to the dew point, there is no profuse moisture condensation. The inner moisture condensation in this panel does not occur. Fig. 30 shows the effect of temperature on R. H. in a desiccator, whether wood is contained in it or

not. If the temperature of the desiccator is reduced, R. H. increases without wood samples. It seems to be the same phenomena as h_2 in Fig. 28. In the case of containing wood samples, reduced temperature brings on the decrease of humidity as shown in Fig. 30 (b), caused by adsorption of water vapour to wood.

Replacing the plywood panel of M_1 with other panels, a few examples are given by Figs. 31~34. The moisture content of particle board increases to 23~30% before moisture condensation (Fig. 32, Fig. 33), and these may have a close connection with moisture permeability of the tested particle board. The long-term test of the hard board panel was conducted under severe conditions, but the moisture condensation in the inside face could not be found (Fig. 35, Fig. 36). Eq. 11 and eq. 12 can not be directly applicable to the prediction diagram of Fig. 40.

From Figs. 18, 19, 37, 39 and 40, it will be difficult to predict the moisture condensation for the following cases :

- (a) A hollow core panel both sides of which are made of a simple sheathing. The thickness of the inner air space is not very large.
- (b) The used siding boards do not have the characteristics of heat insulation and resistance to moisture.
- (c) There is a large difference of temperature between the warm side and the cold side.

On the other hand, the prediction diagrams show good agreement with the experimental results as shown in Figs. 26, 27 and 29. These panels form the composite structure with some heat insulating material and the moisture barrier. The increase of h_2 in the hollow core depends on h_1 , J of the warm side board (M_1) and the capacity of moisture adsorption and permeation of the cold side board (M_2) and wooden frame. If U denotes the amount of water vapour lost by adsorption and permeation of them, moisture transmission coefficient ($J_{H. C. P}$) of M_1 is expressed as follows, using eq. 6.

$$J_{H. C. P} = \frac{(h_{i2} - h_{i1}) \cdot \sigma \cdot V + U}{(p_t - p_m) \Delta t \Delta a} \quad (13)$$

$$p_t = h_t \cdot p_s, \quad p_m = h_m \cdot p_s$$

where Δa is the permeation area, V the inner volume of the permeation box. We take as instances the panels of Figs. 20~34 which are constructed with M_2 (5.6 mm thick plywood) and the frame (spruce wood). Estimation of the approximate adsorbed water ΔW_2 on S_5 face of plywood and on the surface of spruce wood is possible by use of the following equation during increasing process of h_2

$$\Delta W_2 = \Delta u (W_{L0} + \theta \cdot W_{S0}) \quad (14)$$

where ΔW_2 is the amount of water to increasing moisture content Δu in a certain period of time, W_{L0} and W_{S0} the dried weight of the surface layer of plywood and spruce wood respectively, θ the parameter.

The amount of transmitted water vapour through M_2 is expressed as follows :

$$\Delta W_3 = D_u \cdot \frac{du}{dx} \cdot \Delta a \cdot \Delta t \quad (15)$$

where D_u is diffusion coefficient, du/dx moisture gradient. Then U becomes

$$U = \Delta W_2 + \Delta W_3 \quad (16)$$

From eq. 13 and eq. 16, we can calculate $J_{H. C. P}$ of M_1 during the process of moisture condensation (see numerical value of eqs. 50, 51 and 52' in Chap. 3-5-2 and Table 21). Table 20 shows the calculated results of $J_{H. C. P}$ at $t=1500$ min of each figure (except for Fig. 31, $t=500$

min). The order of these calculated values is the following relation (see Table 23).

$$J_{\text{CUP}} > J_{\text{H. C. P}} > J_{\text{P. B}} \dots\dots\dots (17)$$

In the equilibrium state of water vapour pressure in the panels of Figs. 20~34, the next equation is assumed

$$J_{M1} = J_{M2} \cdot \frac{p_4 - p_1}{p_1 - p_4} \dots\dots\dots (18)$$

where J_{M1} and J_{M2} are the moisture transmission coefficient of M_1 and M_2 . J_{M2} is the experimental value (0.268 g/m²h mmHg) of 5.6 mm thick plywood. The calculated values of J_{M1} are shown in Table 23. The phenomena on the moisture transmission of hollow core panel seem to be expressed by the above-mentioned mechanism.