

低温表面の水分吸収と熱伝導

鈴木 正 治⁽¹⁾

Masaharu SUZUKI : Moisture- and Water Absorption and Thermal
Conductivity of Materials in the Temperature Lower than the
Surrounding Atmosphere

要 旨：冬期，住宅の周壁材料の温度は，外気温に引っぱられて，室温よりかなり低いことが多い。室内で水蒸気の発生が多いと，この低温表面の水蒸気吸着が活発となり，ときには結露を生じて，一層多量の水分が材料内部へ吸収される。材料内部で水の保有が多くなると，材料の熱伝導も増大する。本研究は，この一連の現象の機構と定量的意味づけを行なった。低温の材料面への水蒸気の凝縮と結露の現われ方を，親水または疎水性材料面で調べると，木質系素地でも結露生成の遅延現象はあるが微視的観察によって，接触角の小さい水滴の形成とその水膜への発達を観測できた。つぎに，内装用の各木質材料を用い，雰囲気より低温で，暴露水蒸気圧が異なる場合の，材料の片面からの水分吸収量を測定した。露点下の水分吸収は，恒温恒湿下の吸湿とやや異なり，材料の吸水性も関係する。このため，パーティクルボード，ハードボードの吸収量が多くなる。インシュレーションボードはその大きい透湿・吸湿性とは逆に，吸水量が小さい。水蒸気と水が浸透するとき，材料内部の位置別の拡散係数の変動を調べ，24時間までに，拡散係数が $\times 10^{-7}(\text{cm}^2/\text{sec})$ まで低下すること，平均拡散係数の小さい合板類，大きいパーティクルボードなどの材料間の特性が見い出された。水蒸気の凝縮とその浸透状態にある材料の熱伝導率は，水と材料の並列模型に，凝縮熱と吸着熱の効果を含めて理論計算すると，実験値と粗な近似であるが，一致が認められた。

目 次

1. はじめに	112
2. 結露の観察	112
2-1. 実験法	112
2-2. 結果	112
3. 低温表面の水分吸収	115
3-1. 実験法	115
3-2. 結果	117
4. 吸収水分の拡散	129
4-1. 理論	129
4-2. 実験	131
4-3. 結果と考察	132
5. 水蒸気の凝縮過程の熱伝導	139
5-1. 水分吸収と熱伝導率	139
5-2. 凝縮と熱伝導率	141
5-3. 結露下の熱伝導試験	142
5-4. 実験と理論の比較	143
文 献	148
Summary	148

1. は じ め に

住宅内では、天井・壁・床などの位置によって、温度の高低と水蒸気圧差があり、湿気の移動を生じて低温多湿なところが現われる。ここに位置する部材は多量の水蒸気を吸収し、時には結露を生じて、劣化が促進される。既報⁴⁾の結露の予測実験でも、多量の水分を含んだ材料の透湿率と熱伝導率が不明であったので、予測の精度がわるいところがあった。

このため、本報では、雰囲気より低温の内装材料に種々の水蒸気圧の空気が暴露されるとき、水蒸気の吸湿と凝縮、材料内部への浸透と吸水を調べ、材料の熱伝導率の増加への寄与を理論と実験で追求した。

本文、図表中には、紙数の都合で次の略記号を使っている。

略記号 (Symbol)

T_s	材料の表面温度	Surface temperature of material
T_D	露 点	Dew point
p	水蒸気圧	Water vapour pressure
p_s	飽和水蒸気圧	Saturated water vapour pressure
W	水分吸収量	Moisture and water absorption
ρ	気乾比重(または密度)	Specific gravity in air dried (or Density)
l (or L)	試料厚さ	Thickness of sample
S. No.	試料番号	Sample number
[]	試料名略号, Tab. 3 参照	Symbol of material name. See Tab. 3

なお、本稿をまとめる際、ご助力いただいた関係諸氏に深甚の謝意を表します。

2. 結 露 の 観 察

材料表面における水蒸気の凝縮を考えるのに、既報⁴⁾の実験「3」では、結露過程を D_1 , D_2 に区分するマクロな観点で行なった。本報では、表面に水膜の形成を見るまでの過程を次のようにして追跡した。

2-1. 実 験 法

水滴の発生過程を調べるのに、Fig. 1 の装置を用いた。装置外部より、一定温度の冷却水 (5) を銅製の冷却箱 (3) に流す。冷却箱上面に試片 (1) (長さ 50mm : 繊維方向, 幅 40mm : 半径方向, 厚さ 3 mm の桎目板) をネジ止めする。測定箱内の湿度は塩 (KCl) の飽和溶液 (12) で調整し、温度はヒーター (11) に一定電流を通じて保温する。測定箱内の空気はファン (13) によってかく拌され、試料に熱と水蒸気を供給する。試料面に生じた水滴は、小型投光器 (8) と顕微鏡 (9) によって、その直径と高さが測定される。鏡 (2) は試料面にとりつけ、鏡面のくもりから、露点温度までの低下を確認した。観察用窓 (10) は含水率測定プローブの挿入にも用いた。供試料はヒノキ材、カエデ材、ラワン単板、硬質塩化ビニルを用いた。

2-2. 結 果

冷却水の温度を急激に下げていくと、Fig. 2 に示すように、測定箱内の温湿度は当初 (27.2°C, 85% RH) よりしだいに低下し始める。湿度の低下は冷却箱などに水蒸気が凝縮するためであり、熱と水蒸気

- | | | |
|--------------|----------|------------|
| 1. 試料 | 2. 鏡 | 3. 冷却箱 |
| 4. 断熱材料 | 5. 冷却水 | 6. 熱電対 |
| 7. 温度計 | 8. 光源 | 9. 読取顕微鏡 |
| 10. 小窓 | 11. 熱源 | 12. 飽和塩水溶液 |
| 13. かくはん用ファン | 14. 断熱材料 | |

- | | | |
|-----------------------------|------------------|--------------------------|
| 1. Sample | 2. Mirror | 3. Cooling box |
| 4. Thermal insulation | 5. Cooling water | 6. Thermo-couple |
| 7. Thermometer | 8. Light | 9. Travelling microscope |
| 10. Small size window | 11. Heater | |
| 12. Saturated salt solution | | |
| 13. Fan for air circulation | | |
| 14. Thermal insulation | | |

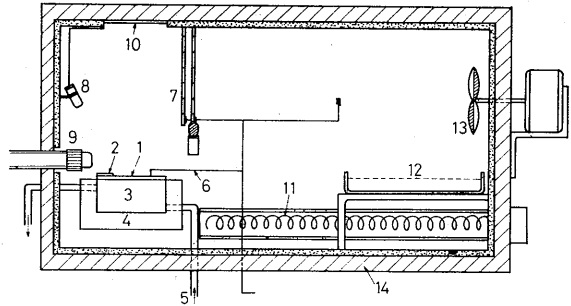


Fig. 1 結露観察用装置

Equipment for observing moisture condensation.

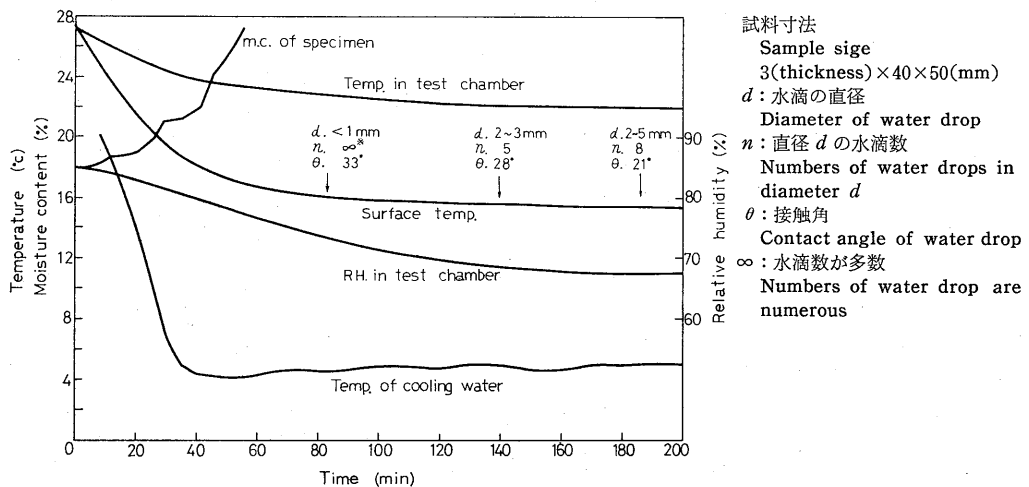


Fig. 2 イタヤカエデ材面の結露プロセス

Moisture condensation process on surface of maple.

の消失と供給とがバランスするのはかなり時間を経てからである。

(i) Fig. 2 は試料がイタヤカエデ材で、試料にとりつけた鏡は、冷却水の温度が約 20°C になると、くもりを生ずる。20分も経過するころには、カエデ材表面は露点になり、含水率も急増し始める（ただし、含水率の測定は抵抗式水分計によった）。80分経過すると、試料表面に顕微鏡下で無数（∞で示す）の細かい水滴を生ずる。水滴の直径（カエデ材の繊維方向に平行に測定）が1mm以下のものの中から、時間が経過すると、直径の大きいものが数個ずつ現われる。カエデ材と水滴との接触角は、直径の大小にあまり関係なく、Fig. 2 の θ が示すように少しずつ小さくなる。そして、200分ころになると、カエデ材柾目では、反射光の具合によっては、試料全面で薄い水膜が浮かび出るように形成される。ヒノキ材面では水滴の状態がカエデ材より長くつづく。

(ii) Fig. 3 は硬質塩化ビニルの場合で、表面は鏡面仕上げしたもので、実験前に表面を清浄した。

(i) とほぼ同じ経過で、Fig. 3 の各曲線も変化するが、水滴の接触角 θ はカエデ材よりはるかに大きく、水滴の上からの形状は、ヒノキ材の長円状に対し、円形に近い。また、ある特定的水滴が、観察中に、しだいに大きくなるのが見られた。

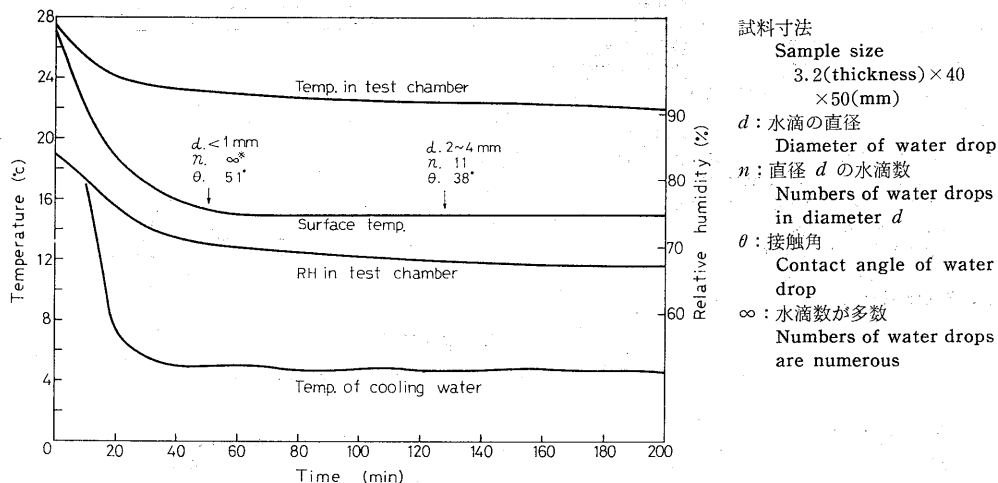


Fig. 3 硬質塩化ビニル板上の結露プロセス

Moisture condensation process on surface of polyvinyl chloride sheet.

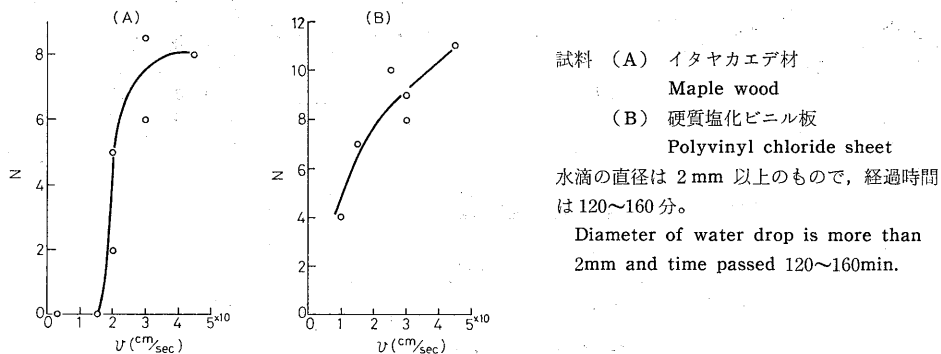


Fig. 4 水滴数 (N) と風速 (v) の関係

Relation between numbers of water drops (N) and speed of air current (v).

(iii) Fig. 4 の実験では、ファンの回転数を変えて、試料近くの風速に変化をもたせ、約 120~160 分後、直径が 2 mm 以上の水滴の数を調べた。

Fig. 4 (A)によると、風速が 20~30 cm/sec 以上になって、初めて水滴ができる。しかし、(B)では風速が 0 より大きくなり始めると、水滴数もふえる傾向を示す。風速の相違を試料面を通過するところの、水蒸気を含む風量の相違とみれば、(A)のカエデ材では、水滴の生成が水蒸気量に関係すると考えられる。(A)と(B)で N の傾向曲線が異なるのは、水蒸気を吸収できる親水性表面と疎水性表面の質的な相違のためであろう。

(iv) Fig. 2, Fig. 3 より、測定時間が160分ころになると、測定箱内の関係湿度がほぼ一定になり、外気の関係湿度に一致してくる。カエデ材柾目、ラワン単板板目では、この時間になると接触角が小さくなり、水膜もしくは水ぬれ状を呈する。

よく知られるように、固体、気体、液体界面の 3 つの界面張力が釣り合った理想の場合

$$\sigma_s = \sigma_l + \sigma_l \cdot \cos \theta \quad \dots \dots \dots (1)$$

が成立する。ここで、 σ_s , σ_i , σ_l は固体-気体, 液体-固体, 液体-気体の界面張力である。材料表面へ水分が吸着, 凝縮して表面エネルギーが低下してくる状態で, 何かの原因で生じた水滴の接触角 θ も, Fig. 2, Fig. 3 のように時間経過によって小さくなるから, 材料表面は Eq. (1) から自由水でおおわれることになる。

上記(i)~(iv)の結果とその検討および既報⁴⁾(3-5の図表)より, 表面が親水性材料では露点后2~3時間, 疎水性材料では1時間以内で, 材料表面が自由水でおおわれるので, 材料の吸水に対する性質が問題になる。

3. 低温表面の水分吸収

ここでは, 雰囲気より低い温度の材料表面に生じる水蒸気の吸着, または凝縮と凝縮水の吸収および主な試料について, 自由水の吸収(吸水)などの実験結果を記述する。なお, 文中には上述の, 水蒸気の吸着・凝縮・吸収をまとめて, 水分吸収と略称している。

3-1. 実験法

実験には結露試験装置(文献⁴⁾, p. 22, Fig. 9)を用いた。試験装置断面図の〔A〕, 〔B〕両室の境界に, 厚さ7mmのアルミニウム製, 試料固定と低温用の金属板をとりつける。〔A〕, 〔B〕両室は独立して温湿度の制御が可能であり, 温度可変範囲は $-30 \sim +60^{\circ}\text{C}$, 湿度可変範囲は 20~95% RH である。

試料は, a) 標準試料: コントロール用として, ヒノキ材胚目板とその塗装(ポリウレタン, 商品名ユーレット), b) 製品試料: 市販の木質材料と無機材料, c) 特殊試料: 製品試料を厚さ約5mmにそろえたもの, などである。試料は板状で, 大きさは $10 \times 14(\text{cm})$, 試料b)の厚さは2.5~10mmの範囲であった。この板の片(側)面を水分吸収面として残し, 他面および厚さ側面をアルミ粉・速乾ニスで目どめ, ポリエステル樹脂を被覆した。厚さ断面が平滑でない試料には溶融パラフィンも併用した。試料c)を供試した理由は, アルミニウム板の表面温度が一定であるため, これに密着させた製品試料の表面温度は, 厚さと熱伝導率の相違より, 少しずつ異なって, 実験条件が一定にできない。また, 厚さが異なると水分吸収量の試料相互の比較も簡単でない。試料c)の作成方法は, たとえば, 厚さの薄い合板類は, 適当な厚さの赤ラワン単板を裏面側に接着した。厚さの厚いインシュレーションボードは適当に切半した。この結果, ほとんどの試料の表面温度を $17 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$, 作成した厚さの範囲は 4.9~5.7mm にまでせばめることができた。

耐湿処理した試料裏面にアルミ箔を接着し, 同種試料を4個ずつ, 金具で低温用アルミ板に十分密着させる。この試料面を〔A〕室側に向けて, 結露試験装置の境界にセットする。一定条件で調湿後, 〔B〕室を -2°C まで急冷させる(所要時間15分)。この際, 〔A〕室の温湿度条件は, 実験の種類によって, Tab. 1, Tab. 2 にあるようにきめている。

ここで, Tab. 1 の区分1では, 〔A〕室の雰囲気と試料を等温下におき, 積分吸湿を行ない, 一定時間後の吸湿量の大小を予備的に調べたものである。Tab. 2 では, 製品試料の数が多いので, 実験を9回に分けた。暴露湿度は50, 70, 80%の各ランクにした。たとえば, Ex. No. 9 では, Tab. 1 の区分3のごとく 21°C , 56~62% RH で調湿し, つづいて〔B〕室を 2°C まで急冷するとともに, 〔A〕室を 22°C , 87% RH にして, 一定時間(Fig. 8 参照)ごとの水分吸収量(調湿重量との差)を測定したものである。

Table 1. 供試料の種類と実験条件
Tested samples and experimental conditions

区分 Class	試 料 Samples	摘 要 References	調 湿 Conditioning	暴露条件 Exposed condition	関係図表 Refer to figs. and tables
1	製品試料 (Manufactured product)	木質材料 (Wood-based material) 等温下の吸湿 (Iso-moisture absorption)	20~21°C 27±5 % RH	20.2~21.0°C 93±3 % RH	Table 3
	標準試料 (Control)	ヒノキ材とヒノキ塗装材 (HINOKI wood and coated HINOKI wood) 等温下の吸湿 (Iso-moisture abs.)	20~21°C 27±5 % RH	20.2~21.0°C 93±3 % RH	Fig. 6-A Fig. 7-A
2	製品試料 (Manufactured product)	木質材料 (Wood-based material) 等温下の吸湿 (Iso-moisture abs.)	温度：関係図 にある (See the temp. of each fig.), 56~62%RH	温度：関係図 にある (See the temp. of each fig.), 88~95%RH	The broken lines in Fig. 8 ~Fig. 15
	標準試料 (Control)	ヒノキ材とヒノキ塗装材 (HINOKI wood and coated HINOKI wood) 等温下の吸湿 (Iso-moisture abs.)	20.2°C 60±3 %RH	20.0°C 90±3 %RH	Fig. 6-A Fig. 7-A
3	製品試料 (Manufactured product)	木質材料 (Wood-based material) 試料面低温 (T_s is lower than T_A)	21.0~22.5°C 56~62%RH	Table 2	Fig. 8 ~Fig. 15 Table 4
4	特殊試料 (Special form)	等厚の木質材料 (Wood-based materi. as same thickness) (4.9~5.7 mm) 試料面低温 (T_s : 16.9~18.0°C)	22.0°C 60±3 %RH	22±0.3 °C a) 68~71%RH b) 88~91%RH	Table 5
	標準試料 (Control)	ヒノキ材とヒノキ塗装材 (HINOKI wood and coated HINOKI wood) 試料面低温 (T_s is lower than T_A)	22.0°C 60±3 %RH	22±0.3 °C a) 68~71%RH b) 88~91%RH	Fig. 6-B, C Fig. 7-B, C

Note) T_s : 試料表面温度 Surface temperature of sample.

T_A : [A] 室 (試験室) の温度 Temperature of A-chamber (Test chamber).

HINOKI wood: Japanese cypress

Table 2. 実 験 条 件
Experimental conditions

実 験 番 号 Ex. No.	温 度 Temp. (°C)	湿 度 RH (%)	低温板上の温度 Surface temp. on cold plate (°C)
1	22.0	55±4	13.5
2	21.5	57±4	13.5
3	22.0	58±4	13.5
4	21.5	72±3	13.5
5	22.0	73±3	13.5
6	22.5	73±3	14.0
7	21.5	84±3	14.0
8	22.0	86±4	14.0
9	22.0	87±4	14.0

試料表面の温度は C-C 熱電対で測定し、試料表面付近の風速は日本科学製風速計 (Model 24-3111) によった。[A]室は位置によって、風速がいくらか異なるので、試料とりつけ位置に風向ガイドをつけ、測定中は風速を 60~80 cm/sec に維持した。この結果、試料近傍の温度降下は、低温用アルミ板からの垂直距離 70mm より生じ、試料表面で 14~21°C、アルミ板表面で 13.5~14.0°C であった。

3-2. 結 果

Table 3. 供試料とその吸湿性
Sample and its moisture absorption

試料 番号 S. No.	試 料 Samples []: Symbol of material name ρ : 密度 Density	厚 さ Thickness (mm)	板片面からの吸湿量 (g/m ²) Moisture absorption on one side of board		
			6 hrs	10 hrs	24 hrs
①	ポリエステル含浸紙オーバーレイ合板 [Pe. S. Pl] Plywood overlaid with polyester impregnated sheet	3.1 Impreg. sheet : 220 μ	3.08	7.27	14.98
②	ポリエステル化粧合板 [Pe. Pl] Plywood overlaid with polyester coated sheet	5.7 Sheet : 100 μ	3.60	9.19	19.55
③	プリント合板 [Pr. Pl] Printed plywood	4.6	8.22	13.87	31.30
④	ポリスチロール フォーム [F. S] Foamed polystyrol, $\rho=0.04$	13.3	4.70	18.49	21.79
⑤	塩ビオーバーレイ合板 [P. C. Pl] Plywood overlaid with polyvinyl chloride sheet	2.8 P. C. sheet : 250 μ	9.42	21.60	33.08
⑥	不透明塗装合板 [Pa. Pl] Painted plywood	2.7 Colour p : 100 μ	23.73	38.61	77.01
⑦	クロス状合成フォーム化粧合板 [Fm. Pl] Foam overlaid plywood	6.0 Urethane foam : 3 mm	23.64	41.35	65.96
⑧	プリント合板 [Pr. Pl] Printed plywood	2.5	27.95	43.08	84.34
⑨	プリント合板 [Pr. Pl] Printed plywood	2.7	32.84	51.60	99.88
⑩	ハードボード [Ha] Hardboard $\rho=1.02$	6.0	61.64	87.25	169.68
⑪	ウォルナット化粧合板 [W. Pl] Plywood with Walnut face coated with lacquer	6.1	62.67	99.25	191.23
⑫	合板 (Type 1) [Pl] Plywood $\rho=0.61$	5.7	72.29	101.46	162.64
⑬	ハードボード [Ha] Hardbord $\rho=1.01$	3.6	78.55	109.17	163.76
⑭	ミズナラ(柾目板) [Mi] Quartersawn board <i>Quercus crispula</i> BLUME $\rho=0.69$	6.4	75.60	119.54	217.91
⑮	合板 (Type 2) [Pl] Plywood $\rho=0.56$	2.7	88.95	123.92	185.41
⑯	石綿スレート板 [As. C] Asbestos cement board $\rho=1.80$	4.5	94.78	137.76	229.68
⑰	アカマツ(柾目板) [Ak] Quartersawn board <i>Pinus densiflora</i> SIEB. et Zucc. $\rho=0.52$	6.4	90.28	145.53	249.44
⑱	パーティクルボード [Pa] Particleboard $\rho=0.70$	10.1	117.12	166.91	278.25
⑲	石こうボード [G] Gypsum board $\rho=0.76$	8.6	145.07	174.85	243.80
⑳	アスベスト板 [As] Asbestos board $\rho=0.78$	5.8	118.18	196.50	390.36
㉑	着色インシュレーションボード [Pa. In] Colour-paint coated insulation board	12.3	157.78	217.57	334.07
㉒	インシュレーションボード [In] Insulation board $\rho=0.28$	9.0	161.31	221.24	341.59

Note) 27 $\pm$ 5 %RH 下で調湿, 93 $\pm$ 3 %RH 下で吸湿 (20.2~21.0°C)。

Conditioning at 27 $\pm$ 5 %RH and moisture absorption under 93 $\pm$ 3 %RH (20.2~21.0°C).

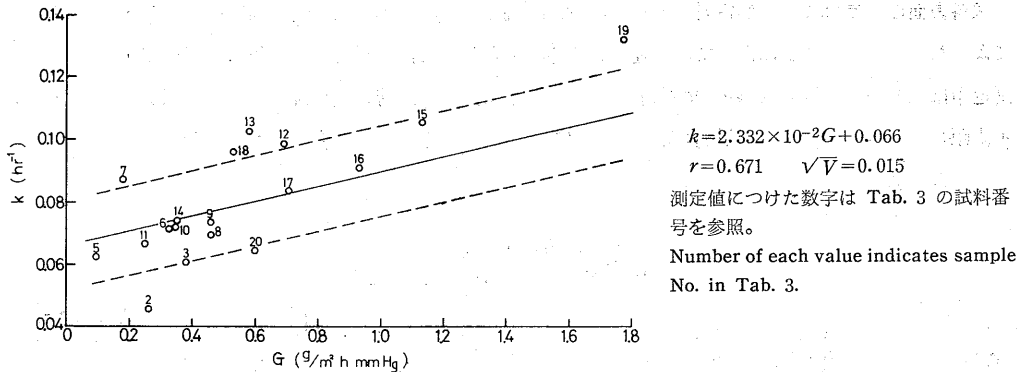


Fig. 5 透湿係数 (G) と吸湿速度定数 (k) の関係

Relation between moisture permeance rate (G) and moisture absorption rate (k).

結果を整理すると次のごとくである。

(i) 予備的検討としての等温下の吸湿量は Tab. 3 のごとくで、試料の並べ方は、吸湿時間が 10 時間における、片面からの吸湿量の小→大の順にした。吸湿量は 3 個の平均である。なお、試料名につけた数字 (試料番号) と英字略号 (Initial) は、以下の図表に用いている。

測定時間は、2, 4, 6, 10, 24 時間であったが、 t 時間と 24 時間の吸湿量を a , a_{24} とすれば、各試料の吸湿経過は、少数の試料を除けば、次式を満足する。

$$a = a_{24}(1 - e^{-kt}) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 k は吸湿速度に関する定数で、 a_{24} は擬似的平衡吸湿量である。

既報の cup 法による透湿係数 G (cup 内 RH 100%, cup 外 RH 50% 程度, Tab. 1~3, Tab. 9)⁴⁾ と k とを対応させたのが Fig. 5 である。 G に対して k は (注) に示した各種の材料で、ほぼ図の回帰直線で表わされる。この図には、インシュレーションボードの実験値だけを省略した。この材料の G は 2.35 (g/m²h mmHg) で、 k は 0.093 (hr⁻¹) であり、図に破線で示した不偏分散の平方根の範囲の外に位置している。 G が大きいわりに k が小さいのである。

(ii) コントロール用のヒノキ材でも (i) と同じ条件で実験して、Fig. 6, 7 の (A) の ×EP 印で示す。また、ここには比較のため、60% RH で調湿した (Tab. 1 の区分 2) 場合も示す。試料厚さすべての吸湿量は曲線の経過よりみて、厚さが大なるほど多い。この様子は Fig. 7 の塗装したものでは一層明りょうである。(B), (C) は Tab. 1 の区分 4 の場合で、(B) は低温表面の吸湿、(C) は低温 (露点) 下の水分吸収である。低温用アルミ板の温度は 13°C、試料の T_s は小数点以下を四捨五入すると図示のごとくである。Fig. 6, 7 の (A)(B) をそれぞれ比較すると、(B) の方が大きく、(B) では厚さが薄いほど吸湿が増すのである。いま、 T_s に対する飽和水蒸気圧 p_s と試験室の水蒸気 p の比: $(p/p_s) \times 100$ は、96% (2.5mm), 90% (5.1mm), 85% (7.5mm) となる。すなわち、測定時間が 8 時間では、 p/p_s の大小が吸湿量に影響するのがわかる。Fig. 7 (B) では W の差が明りょうである。

Fig. 6 (C) では、測定時間が 0~4, 4~8 で、各厚さに対する吸収水分の大きさが逆転するようで、くり返し実験によってその再現性を確かめた。一方、Fig. 7 (C) は、8 時間で、試料の T_s が低いほど水分吸収量は大きくなる。両図の (B) および Fig. 7 (C) では、 T_s つまり p/p_s が大きいことより説明の可能性が見い出されるが、Fig. 6 (C) では、時間が経過すると、厚さすなわち木材の量が水分吸収

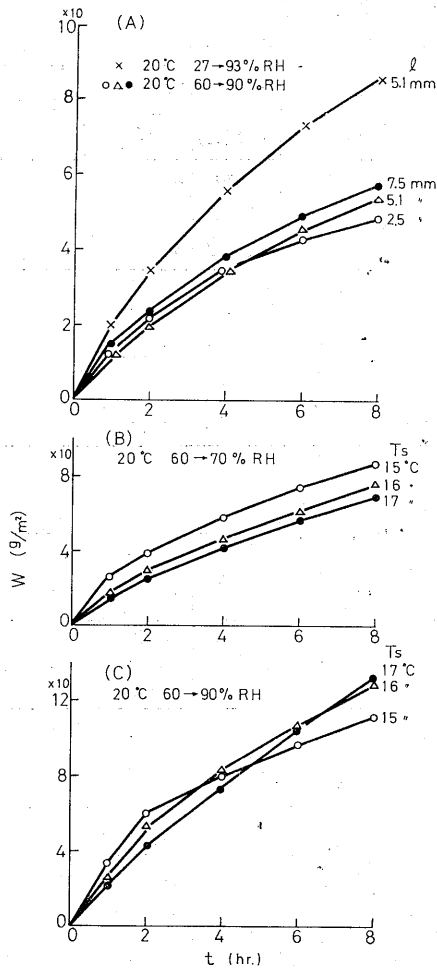


Fig. 6 p/p_s : 0.96(15°C), 0.90(16°C), 0.85(17°C)

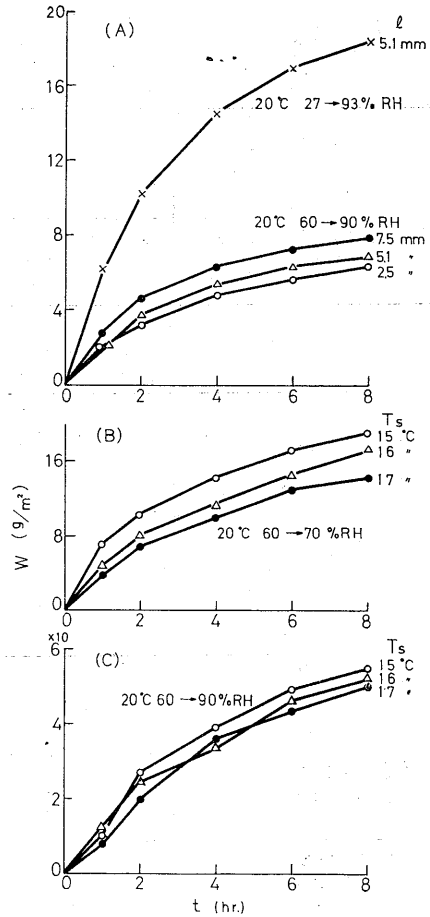
Fig. 7 p/p_s : 1.23(15°C), 1.15(16°C), 1.08(17°C)

() : T_s
Arrow mark : 前処理より試験湿度への変化
Change of RH from precondition to test

l : 試料厚さ Sample thickness

Fig. 6 ヒノキ柃目板片面からの水分吸収量 (W)

Moisture and water absorption by one side of quartersawn board of Japanese cypress.



p/p_s of each temperature : Same to Fig. 6.

Fig. 7 ポリウレタン塗装 (40 μ) ヒノキ柃目板片面からの水分吸収量 (W)
Moisture and water absorption (W) by one side of Japanese cypress board coated with polyurethane resin paint (40 μ).

量に関する。

(iii) (ii) のモデル実験で, p/p_s , 厚さ, 表面処理などが水分吸収に及ぼす効果について推定が立てられたので, Tab. 1 の区分 3 にもとづく実験の, 製品試料で得られた結果が Tab. 4 である。Fig. 8~15 には, 主要な試料の W の増加過程と表面の状態をくわしく表わした。図中の略記号については Fig. 10 の説明と脚注を参照のこと。

Table 4.—(1) 板片面からの水分吸収量 (W)
Moisture and water absorption on one side of board (W)

S. No. 試料 Samples 厚さ [t] (mm) T_s (°C)	Ex. No.	p/p_s $\times 100$	W (g/m ²)		係数 Coefficient of Eqs.		δ (b_1 at $p=p_s$)
			4 hrs	8 hrs	b_1 or (b_2)	d_1 or (d_2)	
① ポリエステル含浸紙 オーバーレイ合板 3.1 14.6	1	88	1.9	3.3	0.79	-0.20	0.80 → Note $1 \leq t \leq 4$
	6	120	9.3	15.2	0.82	0.49	
	9	138	79.1	77.9	(102)	(19.2)	
② ポリエステル化粧合板 5.7 16.0	1	80	2.0	3.3	0.73	-0.13	0.88
	6	109	4.2	8.7	0.95	0.04	
	9	127	40.0	56.2	(54.5)	(6.0)	
③ プリント合板 4.6 16.6	3	81	3.3	7.1	0.87	0.02	0.94
	5	102	4.4	12.3 (9 hrs)	0.96	0.11	
	8	120	57.5	80.3	(48.0)	(11.1)	
④ ポリスチロールフォーム 13.3 21.2	2	58	0.9	0.8			
	4	73	1.6 (4.5 hrs)	1.5			
	7	86	3.1	2.7			
⑤ 塩ビオーバーレイ合板 2.8 14.2	2	90	2.2	3.7	0.81	-0.15	
	4	114	18.4	28.8	(26.6)	(3.0)	
	7	133	50.9	64.4	(52.4)	(17.0)	
⑥ 不透明塗装合板 2.7 14.1	1	90	7.6	13.8	0.88	0.35	0.91
	6	123	25.4	52.6	0.99	0.84	
	9	142	95.3	138.9	(121)	(26.2)	
⑦ クロス状合成フォーム化 化粧合板 6.0 21.2	1	58	7.5	13.5	0.88	0.34	
	6	79	11.6	18.5	0.98	0.42	
	9	91	16.5	33.4	1.06	0.57	
⑧ プリント合板 2.5 14.0	3	96	9.5	17.8	0.82	0.49	
	5	120	21.5	54.2 (9 hrs)	(35.1)	(4.88)	
	8	142	94.2	145.7	(133)	(21.7)	
⑨ プリント合板 2.7 14.0	2	91	7.4	14.1	0.93	0.31	0.92
	4	116	27.4	46.2	0.92	0.85	
	7	135	95.7	103.4	(120)	(22.4)	
⑩ ハードボード 6.1 18.1	1	70	26.2	40.4	0.62	1.04	0.82
	6	96	44.8	75.1	0.66	1.26	
	9	111	107.6	168.3	0.93	1.42	
⑪ ウォルナット化粧合板 6.1 17.3	2	74	12.3	21.8	0.83	0.67	0.88
	4	94	26.1	48.2	0.89	0.88	
	7	109	54.9 (4.5 hrs)	85.6	0.87	1.17	
⑫ 合板 5.7 17.0	3	79	28.9	46.2	0.83	0.93	0.87
	5	100	30.0	60.5	0.80	1.02	
	8	117	76.1	157.1	1.00	1.30	
⑬ ハードボード 3.6 17.5	3	77	38.4	58.0	0.70	1.15	0.95
	5	97	31.9	69.1 (9 hrs)	0.91	0.97	
	8	114	98.1	217.4	1.15	1.31	
⑭ ミズナラ 6.4 18.3	2	70	24.7	36.2	0.63	1.00	0.92
	4	88	52.3	83.1	0.78	1.23	
	7	102	105.2 (4.5 hrs)	142.3	0.95	1.38	
⑮ 合板 2.7 14.1	3	95	36.4	55.7	0.74	1.10	0.78
	5	120	56.6	121.0 (9 hrs)	0.98	1.16	
	8	141	149.6	289.9	1.05	1.51	

Table 4.—(2)

S. No. 試料 厚さ [l] T_s (°C)	Ex. No.	p/p_s ×100	W (g/m ²)		係数 Coefficient of Eqs.		$\bar{b}$ (b_1 at $p=p_s$)
			4 hrs	8 hrs	$b_{1or}(b_2)$	$d_{1or}(d_2)$	
⑯石綿ストレート板 4.5 16.0	2	80	37.5	63.7	0.76	1.12	1.07
	4	102	181.5	373.3	1.10	1.57	
	7	119	315.0	695.0	1.22	1.75	
⑰アカマツ 6.4 18.5	2	69	33.5	53.1	0.72	1.07	0.94
	4	88	70.7	122.9	0.80	1.35	
	7	101	103.1	196.3	0.95	1.43	
⑱パーティクルボード 10.1 19.2	1	65	33.2	53.9	0.64	1.14	0.83
	6	90	54.8	99.0	0.77	1.30	
	9	103	85.1	169.0	0.86	1.41	
⑲石こうボード 8.6 17.0	2	75	38.2	58.0	0.70	1.15	1.07
	4	95	82.2	182.4	1.05	1.29	
	7	111	184.1	350.0	1.13	1.55	
⑳アスベストボード 5.8 16.8	2	76	31.9	48.6	0.599	1.14	1.04
	4	97	94.0	206.0	1.01	1.39	
	7	113	180.0	487.0	1.15	1.58	
㉑着色インシュレーション ボード 12.3 19.9	1	63	31.8	64.1 (9hrs)	0.95	0.91	0.84
	6	86	47.0	78.3	0.81	1.18	
	9	99	86.2	143.6	0.84	1.41	
㉒インシュレーションボード 9.0 19.7	1	63	56.0	80.0	0.67	1.32	0.82
	6	87	86.1	139.5	0.76	1.49	
	9	100	108.0	180.3	0.82	1.54	

Note) $\log W = b_1 \cdot \log t + d_1$ $W = b_2 \cdot \log t + d_2$ $1 \leq t \leq 12$ (hr) p : 試験室の水蒸気圧 Water vapour pressure in test chamber. p_s : T_s (°C) に対する飽和水蒸気圧 Saturated water vapour pressure against T_s .

Tab. 4 の実験は 3-1 で記述した方法で、各時間での測定から、4, 8 時間の実測値 (3 個平均) を掲げた。各時間 t に対する水分吸収量 W をプロットすると、次式で表わすのが適当である。

$$\log W = b_1 \log t + d_1 \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{または} \quad W = b_2 \log t + d_2 \dots \dots \dots (4)$$

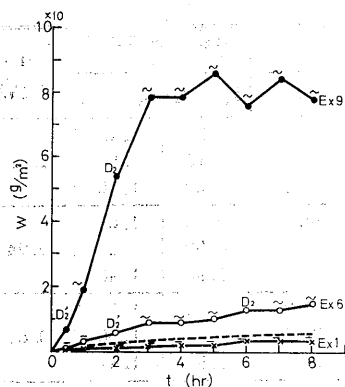
b_1 , b_2 , d_1 , d_2 は同表に示すが、各試料ごとに、 b_1 と p/p_s の関係をグラフ化して、 $p/p_s=1.0$ における b_1 を内挿して求め、 $\bar{b}$ の欄にのせてある。 $\bar{b}$ は水分の凝縮速度に関係する定数と考えられる。

$\bar{b}$ は石綿スレート、石こうボードなどの無機成分を主体にした材料が最も大で、つづいて、アカマツなどの木材素材と表面がプラスチック系の化粧材料がつづき、合板類が小さい値となる。一方、パーティクルボードとインシュレーションは試料が厚く、実験条件が Ex. 9 でも、 $p/p_s \approx 1$ であり、薄い試料に比して、表面では T_s が $\pm 0.3^\circ\text{C}$ のドリフトが観測できる。ドリフトが+側にあるとき、 $T_s > T_D$ で、水蒸気が凝縮しないから、 $\bar{b}$ が小さくなったと考えられる。

一方、 W の値は ①→㉒の順序にそって、大体大きくなる傾向を示すが、かなりこの傾向とずれる材料も見い出せる。これについては (V) で検討する。

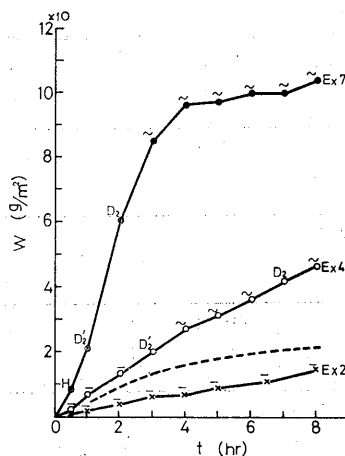
次に、Fig. 8~15 の見方として、Fig. 10*1のアカマツに例をとると、Ex. 7 では、 $t=1$: 表面に変化

* 1 Symbol H denotes "humid surface". D_1 denotes "the surface wetted with free water". D_2 denotes "the moisture-condensed surface covered with liquid water". D_1' or D_2' denotes partly wetted or partly condensed condition respectively.



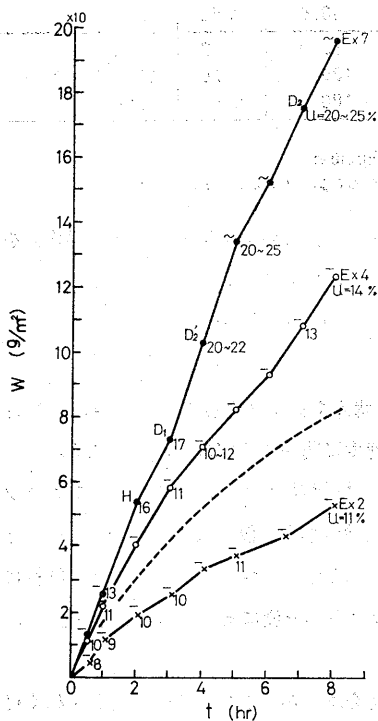
Ex.: Tab. 4—①, ...: W at 92% RH and 14.6°C

Fig. 8 ポリエステル含浸紙オーバーレイ合板の片面水分吸収量 (W)
Absorbed moisture and water (W) by one side of plywood overlaid with polyester impregnated.



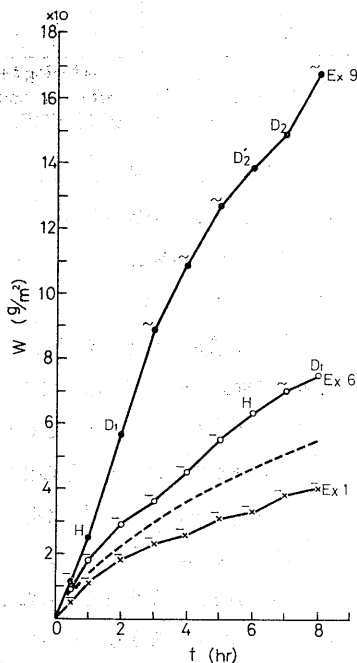
Ex.: Tab. 4—⑨, ...: W at 90% RH and 14.0°C

Fig. 9 プリント合板の片面水分吸収量 (W)
Absorbed moisture and water (W) by one side of printed plywood.



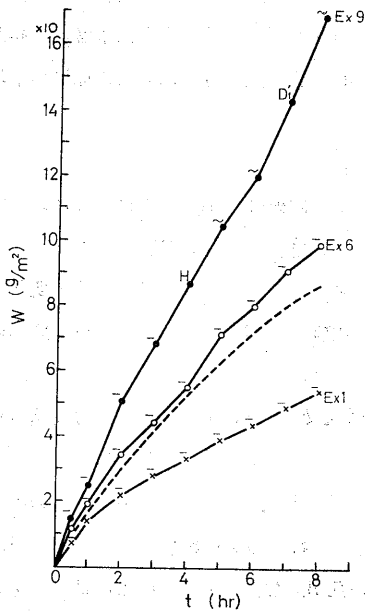
Ex.: Tab. 4—⑭, ...: W at 88% RH and 18.5°C

Fig. 10 アカマツ柾目板の片面水分吸収量 (W)
Absorbed moisture and water (W) by one side of quartersawn board of Japanese red pine.



Ex.: Tab. 4—⑩, ...: W at 90% RH and 18.1°C

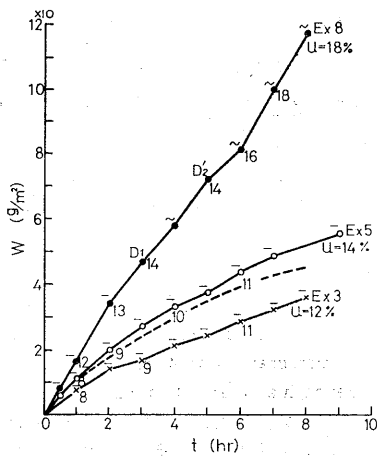
Fig. 11 ハードボードの片面水分吸収量 (W)
Absorbed moisture and water (W) by one side of hardboard.



Ex.: Tab. 4—⑨, ...: W at 90% RH and 19.2°C

Fig. 12 パーティクルボードの片面水分吸収量 (W)

Absorbed moisture and water (W) by one side of particleboard.

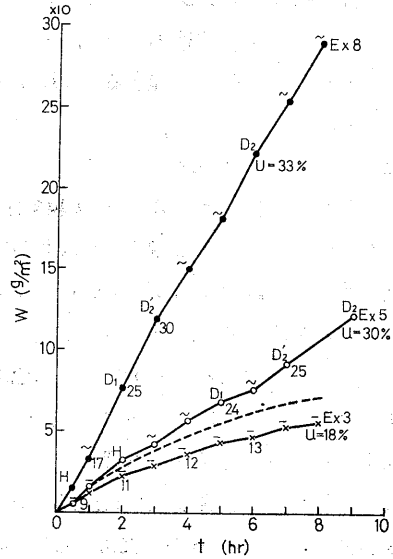


Ex.: p/p_s of Ex. 3, Ex. 5, Ex. 8 become 0.68, 0.85, 1.00

$T_s=19.5^\circ\text{C}$, ...: W at 88% RH and 19.5°C

Fig. 14 12 mm 合板の片面水分吸収量 (W)

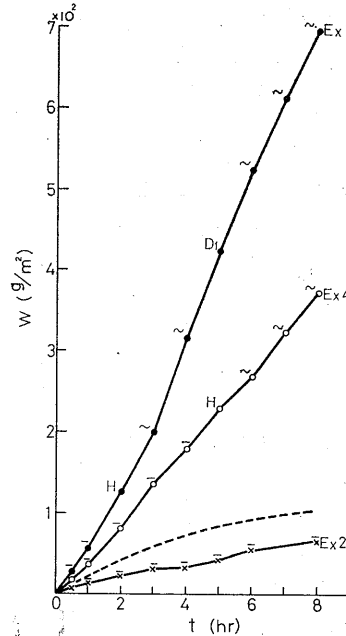
Absorbed moisture and water (W) by one side of 12 mm thick plywood.



Ex.: Tab. 4—⑬, ...: W at 95% RH and 14.1°C

Fig. 13 2.7 mm 合板の片面水分吸収量 (W)

Absorbed moisture and water (W) by one side of 2.7 mm thick plywood.



Ex.: Tab. 4—⑮, ...: W at 90% RH and 16°C

Fig. 15 石綿スレート板の片面水分吸収量 (W)

Absorbed moisture and water (W) by one side of asbestos cement board.

なく (—), $t=2$: 表面がしめり (H), $t=3$: 水蒸気を吸収, 凝縮して, 材面が変色 (D_1), $t=4$: 表面に部分的に結露 (水滴) が現われ (D_2'), $t=5=t=4$ の状態が継続する (—)。 $t=7$: 全面に水滴, 水膜ができて完全な結露状態 (D_2) を呈する。これらの記号のヨコの数字は, 抵抗式水分計による表面層の平均含水率である。

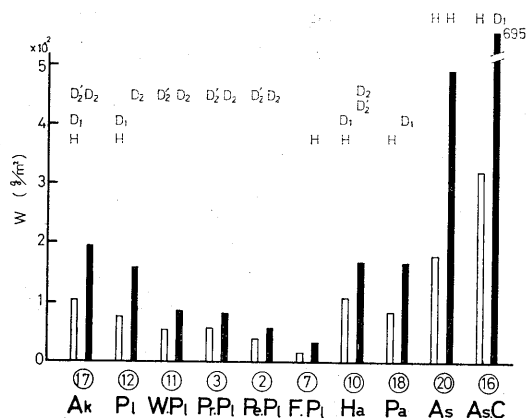
次に Fig. 8~15 の特徴をまとめると

(イ) Fig. 8 の実線は Tab. 2 の実験条件によって求められた。破線は Tab. 1 の区分 2 によって測定された結果である。この曲線形に類似するのが, 試料番号で, ②, ③, ⑤, ⑥の各材料である。これらの材料に共通なのは, 表面がプラスチック系の難透湿性材料といえる。しかし, Ex. 9 の W の変化が示すように, 3時間までは凝縮水が急増して, その後, はば一定の傾向を呈するが, 上記の試料 ②~⑥では, Tab. 4 から知られるように, W は急増後も漸次的増加がつづく。

Fig. 9 はプリント合板で, Fig. 8 に比較すると同形の曲線であるが, W の量は多い。図は同種試料 3 個の測定結果より平均的なものを選んだ。

Fig. 8, Fig. 9 の破線は, 試料と雰囲気が同温度 (Fig. 8: 14.6°C , Fig. 9: 14.0°C) での吸湿経過を表わす。それぞれ RH は, 92%, 90%である。この破線と, Fig. 8 の Ex. 6 または Fig. 9 の Ex. 4 の各曲線との差は, 最小限とはいえないまでも, 比較的小さい基準的な凝縮量とその吸湿量の差を表わし, 材料表面の特性に関係すると考えられる。Fig. 8, 9 の実験例について, 測定時間が 4, 6, 8 時間の W の差を比較すると, ポリエステルオーバーレイ合板では, 5, 8, 9 (g/m^2), プリント合板では, 11, 17, 25 (g/m^2) となる。この相違は両材料の表面層の耐水性能 (透水性) のちがいでよっている。

(ロ) Fig. 10~12 の Ex. 1, 2, 4, 6 の各曲線を 3 つの材料間で比較すると, ハードボードの吸湿量が少なく, アカマツとパーティクルボードが多い。パーティクルボードの Ex. 9 の W の増加が少なく, Ex. 9 の表面状態は $H \rightarrow D_1$ で, H の状態が長く継続するのに対し, Fig. 10 の Ex. 7 では, $H \rightarrow D_1 \rightarrow D_2$ となり, Fig. 11 の Ex. 9 では, $D_1 \rightarrow D_2$ である。これらの理由として, アカマツとハードボードの厚さが 6 mm であるのに対して, パーティクルボードは 10mm で, 粗な削片で構成される (Tab. 7 参照) ため, 表面温度が露点近傍ではかなり揺動して, 凝縮が遅れるためと考えられる。したがって, 基準的な凝縮量は,



①⑦~①⑥ : Sample number

White histogram : 0 to 4 hrs

Blackened histogram : 4 to 8 hrs

p/p_s : 1.01①⑦, 1.17②②, 1.09③③, 1.20④④, 1.26⑤⑤,
0.91⑦⑦, 1.10⑩⑩, 0.95~1.03⑬⑬, 1.12⑭⑭,
1.18⑯⑯, ○ : Sample No.

Fig. 16 各材料の水分吸収量の比較
Comparison of amounts of moisture
and water absorption.

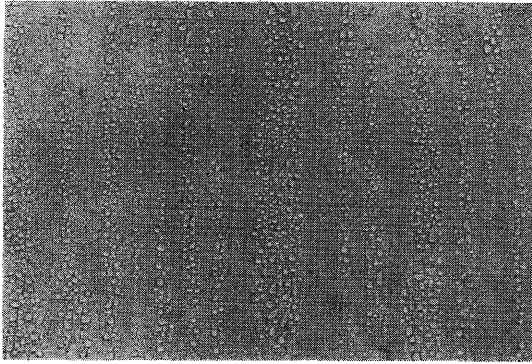


Photo. 1 石こうボード表面（紙質）の結露
Moisture condensation on the surface
(paper sheet) of gypsum board.

4 hrs 6 hrs 8 hrs

試料 No. 17 51 83 114(g/m²) Ex. 7 と破線の差
" No. 10 72 92 112 " Ex. 9 と破線の差
" No. 18 34 48 83 " Ex. 9 と破線の差
となって、No. 10 ハードボードが最も多い。

(ハ) Fig. 13, 14 は合板の薄いものと厚いものを比較した。両者の基準的な凝縮量を比較すると、

	4 hrs	6 hrs	8 hrs	
試料 No. 15	9	14	34(g/m ²)	Ex. 5 と破線の差
試料：合板 5 ply 12mm	29	42	72 "	Ex. 8 と破線の差

となって、厚いほど多くなるのは、吸収母体の量の影響であろう。

Fig. 13 の Ex. 5 と Ex. 8 では、 p/p_s が 1.2 と 1.4 である。Ex. 5 と Ex. 8 の 6 および 8 時間における W を比較すると、Ex. 8 は Ex. 5 の約 3 倍で、水分吸収には p/p_s の効果が強いことがわかる。

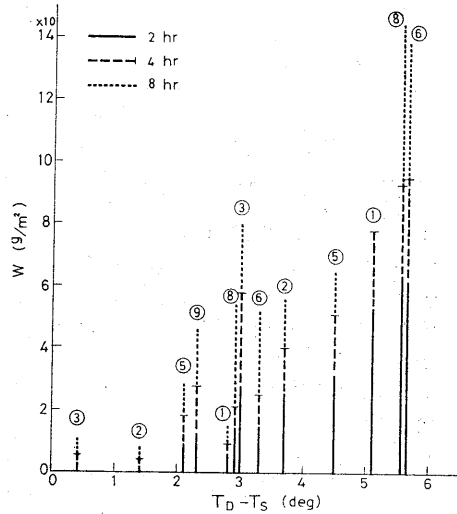
(ニ) 無機材料の 1 例として、Fig. 15 に石綿スレートの W の経過を示す。Ex. 4, Ex. 7 の曲線が示すよう、H と D₁ の状態が継続し、 W の顕著な増加にかかわらず、D₂ の状態に至らない。また、基準的な凝縮量も、測定時間が 4, 6, 8 で、110, 175, 267(g/m²) になり、木質材料よりはるかに大きい。

(IV) Tab. 4 より、厚さの同じものを主体に見やすく書いたのが Fig. 16 である。無機材料は H の状態がつづくが、例外的に石こうボードが 8 時間程度で、Photo. 1 のように結露するのは、表面が紙質のためであろう。

Tab. 4 の表面温度 T_s と露点温度 T_D の差、 $T_D - T_s = T_{Ds}$ と $(p/p_s) \times 100$ の関係を全試料について調べると、次の関係がある。

$$(p/p_s) \cdot 100 = 100 + 6.16(T_D - T_s)^{1.11} \dots\dots\dots (5)$$

T_{Ds} は水蒸気の凝縮の効率に關係する量で、Eq. (5) では、 $T_{Ds} \geq 0$ の場合に限っている。いま、疎水性表面の試料の T_{Ds} と一定時間の水分吸収量の関係を図示すると、Fig. 17 のごとくである。Eq. (5) より、 T_{Ds} は p/p_s に比例するから、Fig. 17 でも、 p/p_s が大きいほど W も増加するといえる。Fig. 8~15 で見い出された、各試料ごとの p/p_s と W の比例的関係は、厚さや表面状態が異なる疎水性表面の材



①~⑨: Sample number
deg = °C

Fig. 17 露点下の表面の水分吸収量
Moisture and water absorption of
each material under dew point.

Table 5. 2種の湿度条件における板片面からの水分吸収量
Amounts of absorbed moisture and water by one side of board at
two kinds of humidity

S. No. 試料 Samples	T_s (°C)	p/p_s ×100	W_1 (g/m ²)		p/p_s ×100	W_2 (g/m ²)	
			4 hrs	8 hrs		4 hrs	8 hrs
①ポリエステル含浸紙オーバーレイ合板	16.8	93	2.0	3.8	124	9.4	12.4
②ポリエステル化粧合板	17.0	93	2.6	5.0	122	19.1	26.4
③プリント合板	17.1	92	4.6	10.2	122	37.3	56.8
④ポリスチロールフォーム	18.0	87	3.4	6.0	115	18.1	22.3
⑤塩ビオーバーレイ合板	16.9	93	3.8	6.8	123	22.4	31.5
⑥不透明塗装合板	17.0	92	6.6	13.5	122	28.4	48.8
⑧プリント合板	16.8	94	8.8	16.7	124	28.5	49.3
⑨プリント合板	16.9	93	9.3	17.8	123	36.2	54.2
⑩ハードボード	16.7	94	38.6	65.3	125	79.8	148.7
⑪ウォルナット化粧合板	17.0	93	25.0	46.8	123	43.7	77.3
⑫合板	17.0	93	32.6	58.0	123	70.5	128.1
⑭ミズナラ	16.8	94	44.9	86.0	124	83.6	141.5
⑮合板	17.1	92	36.0	60.2	122	61.5	101.5
⑯石綿スレート板	16.4	96	78.8	139.5	127	208.3	468.4
⑰アカマツ	17.2	92	53.5	98.7	121	98.5	162.7
⑱パーティクルボード	17.3	91	68.3	126.2	120	168.6	365.0
⑲石こうボード	16.9	93	79.6	149.3	123	196.3	400.5
⑳アスベストボード	16.9	93	83.0	161.5	123	206.2	422.6
㉑着色インシュレーション	17.6	89	61.2	101.4	118	106.4	170.3
㉒インシュレーションボード	17.7	89	82.6	138.5	117	131.2	191.8

Note)

各試料厚さ: 4.9~5.7 mm の間。Thickness of each sample: from 4.9 to 5.7(mm).

W_1 : 22°C, 68~70%RH の試験室における T_s (°C) の表面の水分吸収量。

Amounts of absorbed moisture and water on the surface of T_s in test chamber of 22°C, 68~70%RH.

W_2 : 22°C, 89~91%RH の試験室における T_s (°C) の表面の水分吸収量。

Amounts of absorbed moisture and water on the surface of T_s in test chamber of 22°C, 89~91%RH.

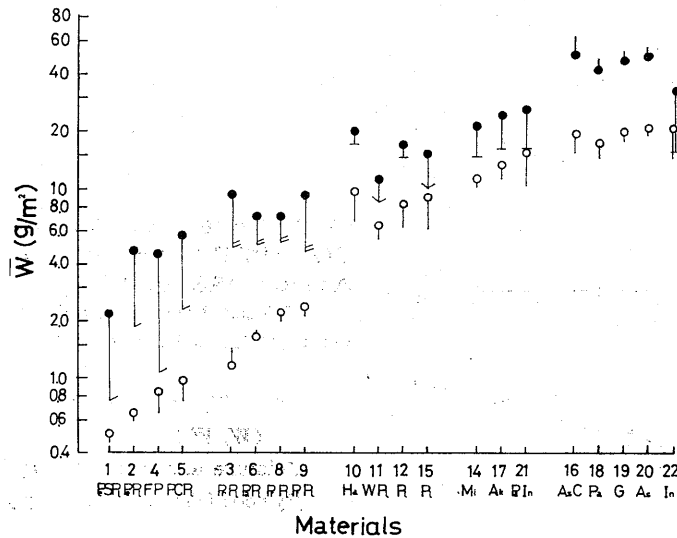
T_s : 試料表面温度 Surface temperature of samples.

料でも成立するのがわかる。一方、表面が素材、木質繊維など、未処理表面の木質材料では、Tab. 4 の試料 No. 10, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 22 を調べると、これらの材料間でも p/p_s と W のだいたいの比例関係が認められる。

(V) 既述した p/p_s のほかに、試料厚さとこれに関係する T_s の大小が W に関係すると考えられる。そこで、試料厚さをほぼ同じにして、 T_s をできるだけ接近させるようにした特殊試料についての結果が Tab. 5 で、各数値は 3 個の平均である。水分吸収量の W_1 は p/p_s が 0.9, W_2 は 1.2 程度である。

一方、Fig. 18 には W_1 , W_2 の 0→4, 4→8 時間における、1 時間あたりの平均として $\bar{W}$ で示す。白マルの $\bar{W}$ (W_1 の 0→4 時間の 1 時間あたりの平均, Tab. 5 参照) に基準をおき、横軸の試料を若干並べかえて、5 つのグループに分けた。各グループでは試料番号の小さい順に並べた。 W_1 の 4→8 時間の平均は白マルより下にくる。白マルと黒マルの相対的位置は、試料 No. 10, No. 22 を除くと、ほぼ均等で横軸に対して増加傾向を示す。

W_2 の 4→8 時間の平均になると、No. 10~15 のグループより、No. 11 と No. 15 が分離して 1 グル



p/p_s	$W(4 \text{ hrs})/4$	$W(8 \text{ hrs}) - W(4 \text{ hrs})/4$
0.9	○	○印の実線の先端 Tip of solid line from ○-mark.
1.2	●	●印の実線の先端 Tip of solid line from ●-mark.

Fig. 18 各材料の1時間あたりの平均水分吸収量 ($\bar{W}$)

Moisture and water absorption (mean) per an hour.

ープになる。そして No. 10, No. 12 と No. 14~21 のグループおよび No. 22 が1つになる。この現象の特徴は、 p/p_s が1.2では、表面が木質、プラスチックを問わず、Fig. 8~15 でも見い出せるごとく、水の凝縮とその吸水を生じる。ハードボードは比較的吸収量が多く、逆にインシュレーションボードは少ない。パーティクルボードは同じグループの無機材料と同じく、吸収量が著しくふえる。

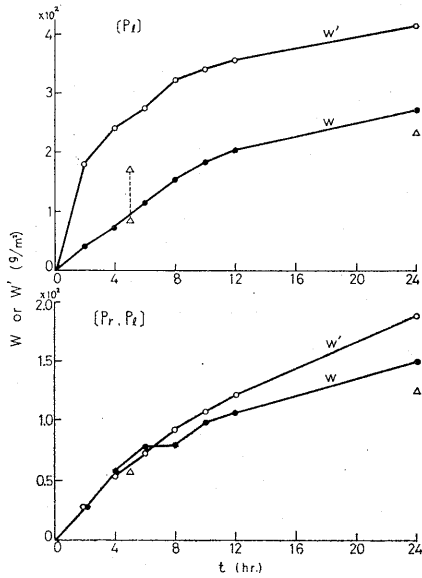
測定時間が8時間における W_2 と W_1 の差を調べると

	S. No.
10~25(g/m²) 合成樹脂系表面	① ② ④ ⑤
30~35(g/m²) プリント合板, 合板	③ ⑥ ⑧ ⑨ ⑪ ⑮
50~70(g/m²) 木材素材, インシュレーションボード	⑭ ⑰ ⑳ ㉒
83 (g/m²) ハードボード	⑩
239 (g/m²) パーティクルボード	⑱
250~330(g/m²) 無機材料	⑯ ⑲ ㉑

この基準の凝縮量も、試料⑭, ⑰, ㉒, ⑩, ⑱はその吸湿性よりも判断できぬ特性を示すので、次にこれらの材料の吸水を調べる。

(VI) 区分3の試料を用いて、吸水試験を行ない、Tab. 4のEx. 8, Ex. 9のデータとあわせて、Fig. 19~21にその数例を示す。ただし、ヒノキとパーティクルボードは、 p/p_s を1.25, 1.18として追試験した結果を図示した。吸水試験は、平底水槽に満たした水に試料片面を接触させた。浸漬深さは1.0~1.5mm、試験室温は最低・最高で20~24°Cであった。

(イ) Fig. 19(B)のプリント合板では、吸水量 W' と W とはあまり差がない。図示しないが、Fig. 8の材料の一定時間の吸水 $\Delta W'$ は、 $\Delta W' = 53 \text{ g/m}^2, 0 \rightarrow 2 \text{ hrs}$, $32 \text{ g/m}^2, 2 \rightarrow 4 \text{ hrs}$ であり、Fig. 8の水分



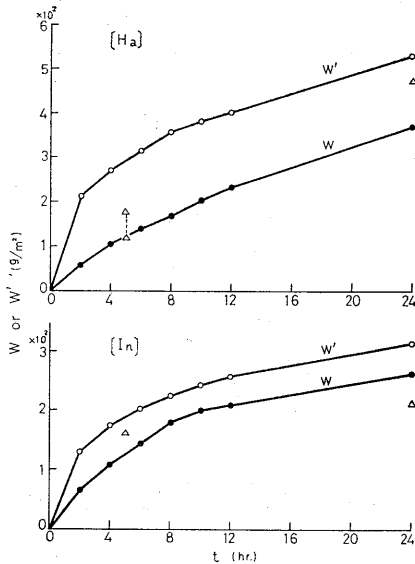
○(W'): 吸水試験 Water absorption test
●(W): 結露試験 Moisture condensation test
△: Tab. 6 の吸水試験式より計算

Calculated from empirical formula in Tab. 6

p/p_s : 1.17 [Pl] ② Ex. 8, 1.20 [Pr. Pl] ③ Ex. 8

Fig. 19 合板, プリント合板の水分吸収量 (W, W')

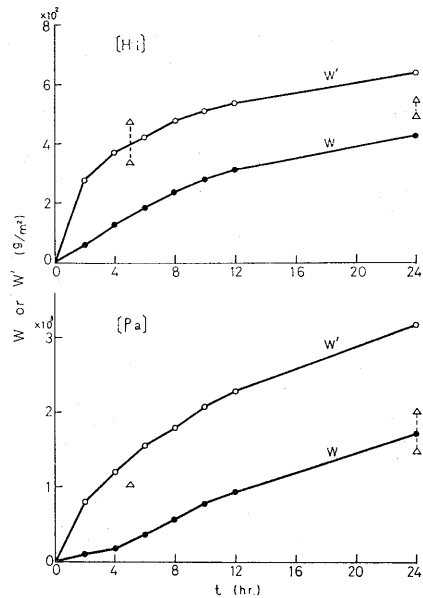
Moisture and water absorption (W, W') of plywood [Pl] and printed plywood [Pr. Pl].



p/p_s : 1.11[Ha] ⑩ Ex. 9,
1.00[In] ② Ex. 9

Fig. 20 ハードボード, インシュレーションボードの水分吸収量 (W, W')

Moisture and water absorption (W, W') of hardboard [Ha] and Insulation board [In].



p/p_s : 1.25[Hi], 1.18[Pa]
Thickness: 7.4mm[Hi], 10.1[Pa]

Fig. 21 ヒノキ, パーティクルボードの水分吸収量 (W, W')

Moisture and water absorption (W, W') of quartersawn board of Japanese cypress [Hi] and particleboard [Pa].

吸収の傾向と一致する。

Fig. 19 (A) では、初期の 0→2 時間の W' は W よりはるかに大きい、その後の両者の増加すなわち曲線の勾配は比較的よく似ている。 W の測定の際、試料表面に水滴が付着しているから、 W' の測定も、試料表面に水が付着したままである。また、Fig. 13 の薄い合板でも、 $W'=260 \text{ g/m}^2$, 0→2 hrs, 80 g/m^2 , 2→4 hrs, 58 g/m^2 , 4→6 hrs であり、2 時間以後で Ex. 8 の結露状態の平均 68 g/m^2 , 2 hrs と勾配がほぼ一致する。

(ロ) Fig. 20 では、ハードボードよりもインシュレーションボードの方が、 W' は W に近い傾向である。後者の W' が前者より小さいのは (V) の結果と矛盾しない。

(ハ) Fig. 21 (A) では、4 時間以後で W' と W の勾配がかなりよく一致する。また、Fig. 10 のアカマツでも、 $W'=380 \text{ g/m}^2$, 0→2 hrs, 60 g/m^2 , 2→4 hrs, 57 g/m^2 , 4→6 hrs であり、2 時間以後は Ex. 7 の結露状態の 60 g/m^2 , 2 hrs と一致する。しかし、Fig. 21 (B) の W は p/p_s の過酷な条件（前述）下の増加状態であるが、 W' とややずれている。

W の測定の際、2～4 時間で試料表面が水膜におおわれると、急激な W の増加を生じると予測できる。しかし、供試した材料の多くの実験結果は特にその傾向が認められない。

初期（2～4 時間）を過ぎたところの増分 ΔW と $\Delta W'$ がほぼ一致してくるのは (イ)～(ハ) で記述した。この機構として、水の材料内部への浸透が W , W' の実験方法によらない、自由な浸透と拡散によると考えられる。

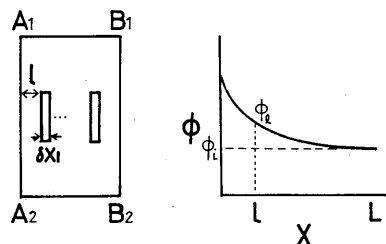
Fig. 19～21 の $\triangle$ 印は、浸漬深さを 1.0 mm 一定に保つため、小型の試料を用いて吸水試験させたものである。その方法は 4-2(ii) に記載のごとくで、5, 24 時間における吸水の実験式より求めた吸水量である。

4. 吸収水分の拡散

4-1. 理 論

疎水性表面の露点下における液滴、水膜の生成時間は、肉眼的に数分、微視的にはさらに短時間になる。親水性の木質材料素地面でも、既報⁴⁾の Fig. 15 [C] の条件下では、1 時間程度、本報の Fig. 2 でも、露点後約 1 時間で、表面に多数の水滴が見い出されている。3-2, (VI) で論述したように、露点下の表面が滴状、膜状に自由水でぬれると、内部への水分の浸透と拡散があり、水分吸収量の時間変化の傾向より、表面の凝縮水の吸収は、通常の吸水試験の傾向と比較的によく似てくる。Fig. 22 のような板材料の一面に水分が接し、内部への浸透と拡散を次のように考える。

水との接触面 A_1A_2 より、深さ l のところに、微小容積（単位断面、厚さ δX_1 ）をとる。 B_1B_2 側は一定の温湿度の雰囲気に接するので、 δX_1 の部分には A_1A_2 側より B_1B_2 側に水流を生じる。水分の拡散係数を D , 水分濃度を ϕ （ここでは、単位容積中の水分量）とすると、位置 l の単位断面に単位時間、 δX_1 部分へ拡散・浸透する水分量は、 $-D(\partial\phi/\partial X)_l$ である。位置 $l+\delta X_1$ の単位断面より B_1B_2 側へ拡散移動す



ϕ : Moisture content (volume basis)
 ϕ_i : Initial moisture content
 L : Thickness

Fig. 22 水分の浸透
 Penetration of moisture and water.

る水分量は、 $-D(\partial\phi/\partial X)_{l+\delta X_1}$ となる。両者の差は δX_1 部分の増加水分量であるから、下のように書ける。

$$-D_1\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_l + D_1\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_{l+\delta X_1} = \left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)\delta X_1 \dots\dots\dots(6)$$

δX 部分は A_1A_2 より B_1B_2 の方向に連なるので、順次 $\delta X_1, \delta X_2, \dots, \delta X_n$ とすると、Eq. (6) と同様に

$$-D_2\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_{l+\delta X_1} + D_2\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_{l+\delta X_1+\delta X_2} = \left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)\delta X_2 \dots\dots\dots(7)$$

⋮

$$-D_n\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_{l+\delta X_{n-1}} + D_n\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_{l+\delta X_n} = \left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)\delta X_n \dots\dots\dots(8)$$

となる。Eq. (6), (7)⋯(8) を加えると

$$-D_1\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_l + D_n\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_{l+\delta X_n} = \sum_1^n \left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)\delta X_i \dots\dots\dots(9)$$

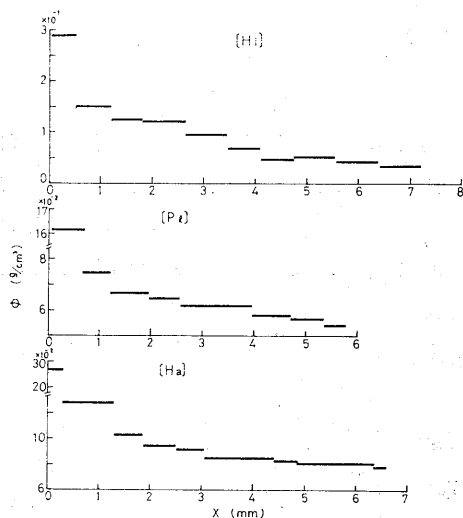
を得る。 D が水分濃度に存在するとすれば、各式の D を $D(X)$ の形にする必要がある。しかし、24時間までの結露現象では、 A_1A_2 側が高濃度に対して、 B_1B_2 側では濃度勾配がほとんどないことが認められるので、 δX_n が B_1B_2 に接するとすれば、Eq. (9) を解くために、左辺の第 2 項を近似的に 0 とおく。 D_1 を一般化して D とし、

$$-D\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_l = \sum_1^n \left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)\delta X_i \dots\dots\dots(10)$$

Eq. (10) より D が求められるが、実験より ϕ と X の関数関係がわかれば

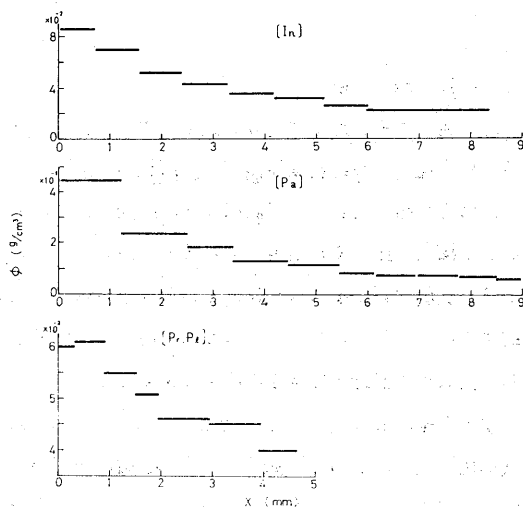
$$D = -\frac{1}{dt}\left(\frac{\partial X}{\partial\phi}\right)_{\phi_l} \left\{ \int_{\phi_i}^{\phi_l} X d\phi - l(\phi_l - \phi_i) \right\} \dots\dots\dots(11)$$

より、位置 l における D が求められる。ここに、 ϕ_i は A_1A_2 が水と接しない初期濃度、 ϕ_l は位置 l に



[Hi] : Japanese cypress, [Pl] : Plywood,
[Ha] : Hardboard

Fig. 23 5時間水浸漬 (片面) による ϕ と X
 ϕ vs. X in dipping one side of board in
water during 5 hrs.



[In] : Insulation board, [Pl] : Particleboard,
[Pr. Pl] : Printed plywood

Fig. 24 5時間水浸漬 (片面) による ϕ と X
 ϕ vs. X in dipping one side of board in
water during 5 hrs.

おける水分濃度である。

Eq. (9) を下記の Eq. (12) に書き直せば, ψ に適当な数値を入れて, 厚さ方向の各位置における D を求めることができる。

$$D \left\{ \psi \left(\frac{\partial \phi}{\partial X} \right)_{l \dots + \delta X_n} - \left(\frac{\partial \phi}{\partial X} \right)_l \right\} = \sum_1^n \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \delta X_i \dots \dots \dots (12)$$

たとえば, 前述の ϕ と X の関係を利用して $\psi=1$, $L=l \dots + \delta X_n$ とおけば

$$D = \frac{\frac{1}{4t} \left\{ \int_l^L \phi dX - \phi_l(L-l) \right\}}{\left(\frac{\partial \phi}{\partial X} \right)_{l \dots + \delta X_n} - \left(\frac{\partial \phi}{\partial X} \right)_l} \dots \dots \dots (13)$$

が得られる。

4-2. 実 験

(i) 凝縮法 試料面に水蒸気を凝縮させる方法で, 結露試験装置の [A], [B] 両室の境界に Fig. 34 に示す試料とその取り付け低温用装置を設置する。試料の大きさは 46×46 (cm) の木質材料で, 裏面を強化耐熱ガラスに密着させる。[B] 室を約 0°C まで冷却することによって, 試料の表面温度を露点下に下げる。この際, [A] 室の温湿度は Tab. 2 の Ex. 9 に示され, 供試料の種類は Tab. 7 のごとくである。露点後, 試料表面に液滴もしくは水膜の生成を確認して, 5 または 24 時間後に, 試料の中央部から, 8×18 (mm) 程度の小片を切り出し, その厚さ方向にそって, スライス片を切り出して重量を測定する。

(ii) 浸漬法 Tab. 7 の木質材料から 5×5 (cm) の小板を切り取り, 厚さ側の 4 断面を溶融パラフィンで密封した。water bath の底面を水で満たし, 試験片の片面 (化粧合板の場合は化粧面) を水に浸して, 20.5°C , 60~70% RH の試験室に置いた。0.5, 5, 24 時間ごとに, 試験片の中央部から, 8×18 (mm) の小片を切り取り, これから, (i) と同様に多数のスライス片を切り出した。

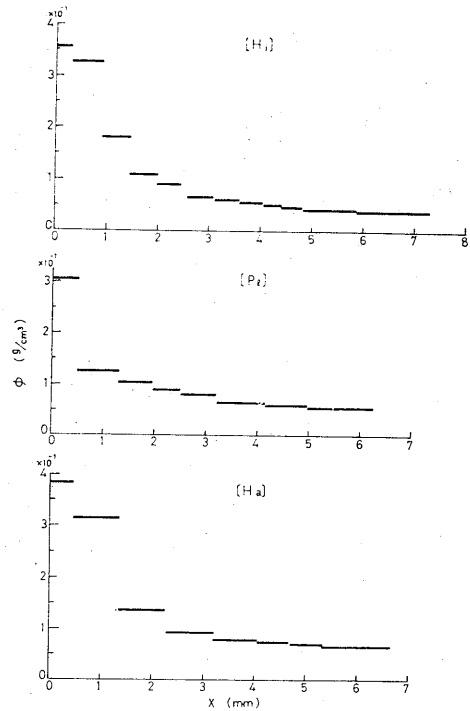


Fig. 25 24時間水浸漬 (片面) による ϕ と X
 ϕ vs. X in dipping one side of board in water during 24 hrs.

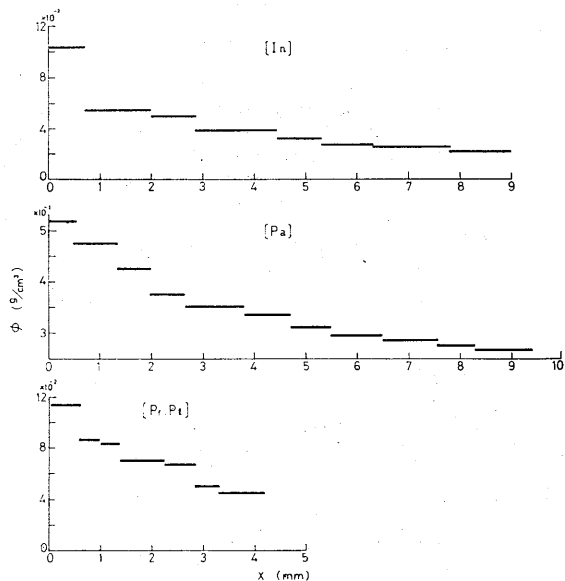


Fig. 26 24時間水浸漬 (片面) による ϕ と X
 ϕ vs. X in dipping one side of board in water during 24 hrs.

Table 6. 材 料 内 部 の
Empirical formula on water

S. No. 試 料 Samples	各実験法と時間の相違による実験式 Empirical formula	
	浸 漬 0.5 時 間 D. t 0.5 hrs	浸 漬 5 時 間 D. t 5 hrs
(I) ヒ ノ キ [Hi]	$\phi = 0.052e^{-0.424x} + 0.045e^{-10.327x}$ $\phi_i = 0.034$	$\phi = 0.265e^{-3.50x} + 0.025$ $\phi_i = 0.033, 0.050$
(II) 合 板 [Pl]	$\phi = 0.076e^{-0.290x} + 0.11e^{-11.11x}$ $\phi_i = 0.057$	$\phi = \frac{0.162e^{4.20x}}{2.89e^{4.20x} - 1.89}$ $\phi_i = 0.040, 0.056$
(III) ハ ー ド ボ ード [Ha]	$\phi = 0.104e^{-0.144x} + 0.140e^{-8.24x}$ $\phi_i = 0.090$	$\phi = \frac{0.270e^{4.89x}}{3.37e^{4.89x} - 2.37}$ $\phi_i = 0.070 \sim 0.080$
(IV) イ ン シ ュ レ ー シ ョ ン ボ ード [In]	$\phi = 0.060e^{-1.67x}$ $\phi_i = 0.011$	$\phi = 0.071e^{-3.47x} + 0.019$ $\phi_i = 0.021$
(V) パ ー テ ィ ク ル ボ ード [Pa]	$\phi = 0.100e^{-0.352x} + 0.170e^{-7.99x}$ $\phi_i = 0.070$	$\phi = 0.412e^{-3.20x} + 0.038$ $\phi_i = 0.055$
(VI) 塗 装 ヒ ノ キ 材 [Pa. Hi]	—	$\phi = -0.022x + 0.047$ $\phi_i = 0.025$
(VII) プ リ ン ト 合 板 [Pr. Pl]	—	$\phi = -0.025x + 0.061$ $\phi_i = 0.036$
(VIII) ポ リ エ ス テ ル 化 粧 合 板 [Pe. Pl]	—	$\phi = -0.012x + 0.044$ $\phi_i = 0.032$
(IX) ア ス ベ ス ト ボ ード [As]	—	$\phi = 0.53$ $\phi_i = 0.028$

Note) ϕ : 容積単位含水率 Moisture content (Volume basis) (g/cm³).

ϕ_i : 初期含水率 Initial moisture content.

$x = l/L$, l : 表面からの深さ Depth from surface, L : 試料厚さ Sample thickness.

D. t: Dipped time in free water. C. t: Moisture-condensed time.

(i), (ii)ともに, 秤量後容積を求め, 全乾にして, 容積単位の含水量 (容積含水率, g/cm³) を算出した。

4-3. 結果と考察

(i) Fig. 23~26 は, 5, 24時間, 水に浸漬して, 吸水と拡散による各木質材料中の容積含水率 ϕ の分布を表わす。水との接触面では ϕ が著しく大きく, 反対側では指数関数的に次第に減少する傾向は, 凝縮法による結果と同じであるが, 凝縮法では浸漬法に比べて, 材料内部の ϕ がかなりばらつく。

Tab. 6 には, 前記(i), (ii)の方法で求めた ϕ の $x(=l/L)$ に対する実験式である。ただし, これらの式は, Fig. 23~26 に見られる階段状 (1段はスライス片の厚さに相当する) の実験値を忠実に表わすものでなく, それらの傾向を示している。各式の下に実験前の容積含水率が初期含水率 ϕ_i として併記してある。

水分吸収量を ΔW とすると, ΔW は ϕ の実験式を用いて次式から計算できる。

水分分布の実験式
distribution in each materials

of two test procedures at each test time		
凝 縮 5 時 間 C. t 5 hrs	浸 漬 24 時 間 D. t 24 hrs	凝 縮 24 時 間 C. t 24 hrs
$\phi = 0.048e^{-0.673x} + 0.100e^{-13.09x}$ $\phi_i = 0.024$	$\phi = 0.328e^{-7.34x} + 0.086e^{-0.914x}$ $\phi_i = 0.030, 0.035$	$\phi = 0.102e^{-0.773x} + 0.305e^{-11.78x}$ $\phi_i = 0.047$
$\phi = 0.0615e^{-0.224x} + 0.100e^{-14.95x}$ $\phi_i = 0.049$	$\phi = 0.255e^{-8.91x} + 0.085e^{-0.390x}$ $\phi_i = 0.057$	$\phi = 0.103e^{-0.813x} + 0.187e^{-8.88x}$ $\phi_i = 0.046$
$\phi = 0.079e^{-0.605x} + 0.060e^{-13.20x}$ $\phi_i = 0.043 \sim 0.044$	$\phi = 0.340e^{-7.74x} + 0.130e^{-0.806x}$ $\phi_i = 0.058$	$\phi = 0.104e^{-0.679x} + 0.275e^{-9.42x}$ $\phi_i = 0.052$
$\phi = 0.039e^{-0.814x} + 0.066e^{-24.66x}$ $\phi_i = 0.016 \sim 0.017$	$\phi = 0.054e^{-15.91x} + 0.066e^{-1.28x}$ $\phi_i = 0.018$	$\phi = 0.066e^{-0.989x} + 0.059e^{-16.79x}$ $\phi_i = 0.024$
$\phi = 0.095e^{-0.937x} + 0.115e^{-15.64x}$ $\phi_i = 0.037$	$\phi = 0.387e^{-0.415x} + 0.580e^{-13.08x}$ $\phi_i = 0.138, 0.190$	$\phi = 0.150e^{-0.932x} + 0.360e^{-7.61x}$ $\phi_i = 0.059$
$\phi = 0.023e^{-2.97x} + 0.030$ $\phi_i = 0.031$	$\phi = 0.110e^{-1.25x}$ $\phi_i = 0.040$	$\phi = 0.070e^{-4.53x} + 0.030$ $\phi_i = 0.0307$
$\phi = 0.030e^{-1.80x} + 0.036$ $\phi_i = 0.041$	$\phi = 0.114e^{-0.856x}$ $\phi_i = 0.048$	$\phi = 0.071e^{-2.08x} + 0.025$ $\phi_i = 0.0338$
$\phi = 0.023e^{-4.30x} + 0.030$ $\phi_i = 0.0303$	$\phi = -0.021x + 0.056$ $\phi_i = 0.035$	$\phi = 0.026e^{-3.15x} + 0.038$ $\phi_i = 0.038$
$\phi = 0.093e^{-0.202x}$ $\phi_i = 0.028$	$\phi = 0.57$ $\phi_i = 0.027$	$\phi = 0.316e^{-0.301x}$ $\phi_i = 0.028$

$$\Delta W = \int_0^L \phi dX - \phi_i \cdot L \dots\dots\dots (14)$$

Fig. 19~21 の△印は、浸漬法の実験式を用いて計算したもので、2つの△印が変動範囲を示す場合は、ヒノキ（5時間）を除いて、●印に近い下側の値が Tab. 6 の実験式に対応している。各図の計算値（△印）が吸水試験による実測量（○印）より小さいのは、スライスの過程で表面の付着水が流失したためと考えられる。ゆえに、Tab. 6 の浸漬法による実験式でも、低温表面で凝縮が生じた状態における、材料内部の拡散係数の推定には有効のようである。

(ii) Fig. 27~30, Fig. 31~33 は Tab. 6 の実験式と Eq. (13), Eq. (11) を用いて算出した材料内部の拡散係数の分布図である。ただし、Eq. (11) を使う場合は、 ϕ と X の関係が精度よく求められず両者の関係を直線式で近似した実験式にのみ適用することとした。この際、実験的には確認できなかったが、 $(d\phi/dX)$ は X が L に近づくにつれて、0 に近づくこと、表面が耐水処理のため、 $X=0$ 付近の ϕ が求めにくい場合は、 $x=0.3 \sim 0.7$ の領域における $\phi-x$ の関係を直線的に外挿して、 $x=0$ の ϕ を求め、

Table 7. 試 料 の 構 造
Structure of samples

S. No. 試料 Samples Symbol	厚さ [l] (mm)	比 重 ρ	備 考 References
(I) ヒノキ材(柾目) HINOKI wood (Japanese cypress) [Hi]	7.4	0.43	丸太直径 68cm Dia. of log : 68cm, Heart-wood at 22cm from pith, [d] : 1.2mm [L. p] 6~8%, [T. d] 23 μ (EW)~14 μ (LW)
(II) 合 板 Plywood [Pl]	5.6 (3 ply)	Face V. (0.9 mm) =0.62 Core V. (3.8 mm) =0.64 av. 0.63	[V. d] of Face V. : 190 μ , [F. d] of Face V. : 17 μ [V. d] of Core V. : 220 μ , [F. d] of Core V. : 19 μ (V : veneer)
(III) ハードボード Hardboard [Ha]	6.3	Face : 1.12 Core : 1.11 av. 1.11	[T. d] : 10~40 μ 厚さ 50 μ の薄片断面の空孔率 Pore per cent of 50 μ slice : 3~10~20%
(IV) インシュレーションボード Insulation board [In]	9.3	Core : 0.27 av. 0.27	[T. d] : 28 μ 厚さ 130 μ の薄片断面の空孔率 Pore per cent of 130 μ slice : 8~23~35%
(V) パーティクルボード Particleboard [Pa]	10.1 (3 layer structure)	Face : 0.73~0.78 Core : 0.63~0.68 av. 0.72	Distribution of chip length [C.l] [C. l] < 5 mm : 37%, 5 < [C. l] < 10 mm : 52%, [C. l] > 10 mm : 11%
(VI) 塗装ヒノキ材 Painted Japanese cypress [Pa. Hi]	7.4	0.44 (Wood only : 0.42)	ラッカー膜厚 [Thickness of N. C. lacquer] : 20~30 μ [d] : 1.25 mm, [L. p] : 6~7%
(VII) プリント合板 Printed plywood [Pr. Pl]	4.5 (3 ply)	0.56 (Plywood only : 0.55)	Printed surface coated with paint
(VIII) ポリエステル化粧合板 Plywood overlaid with polyester coated sheet [Pe. Pl]	5.6 (3 ply)	0.52 (Plywood only : 0.50)	Printed paper + Top coat : 100 μ
(IX) アスベストボード Asbestos board [As]	6.0	0.70~0.79	

Note) [d] : 平均年輪幅 Width of annual ring, [L. p] : 晩材率 Per cent of late wood
[T. d], [F. d], [V. d] : 仮道管, 木繊維, 道管の半径径 Diameter of tracheid, wood fiber and vessel in radial direction.

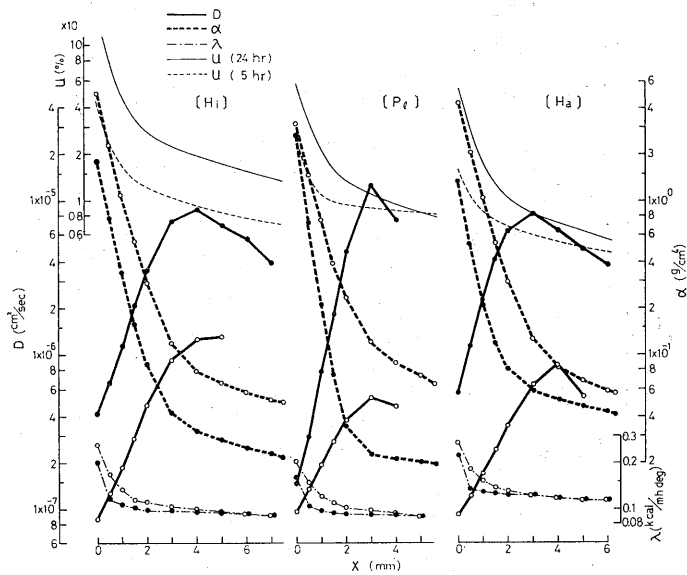
これから D を計算すること, などの前提をおいた。

なお, 各図には, 水分勾配 α , $\alpha = (d\phi/dX)_X$ も求めて, 破線でつないである。

(iii) Fig. 27~28 では, 水と接触する $X=0$ 近傍では D は小さく, X に対して右上りに増加している, 中心部付近でピークのあるヤマ型である。 α は X の小さいところで低下が大きく, 右下がりであるが, 材料内部での単位断面あたりの水分移動量 q は,

$$q = [D]_X(\alpha)_X \cdots \cdots (15)$$

とおけるから, たとえば, Fig. 27 を例にとると, 水との接触面で水の吸収と保有 (ϕ) が大きく, 拡散が小さく, 水分勾配は著しく大きい。内部に進むと (X 増加), ϕ が減じて, 拡散が増加しており, このため水分勾配が小さくなっていく。各位置の単位面積, 単位時間あたりの水分透過量は水分勾配に比例する



u : 含水率 Moisture content D : 拡散係数 Diffusion coefficient
 α : 水分勾配 Gradient of concentration
 λ : 熱伝導率 Thermal conductivity (単位: kcal/m h deg = kcal/m h °C)
 ●: 5hrs, ○: 24hrs

Fig. 27 5, 24時間水蒸気凝縮後の u, D, α, λ の材料内分布
 Distribution of u, D, α and λ in moisture-condensed materials during 5 and 24 hrs.

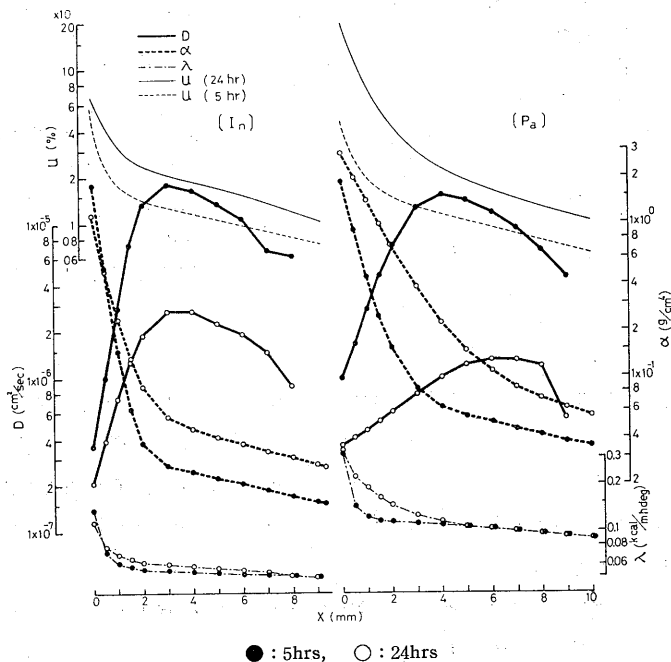
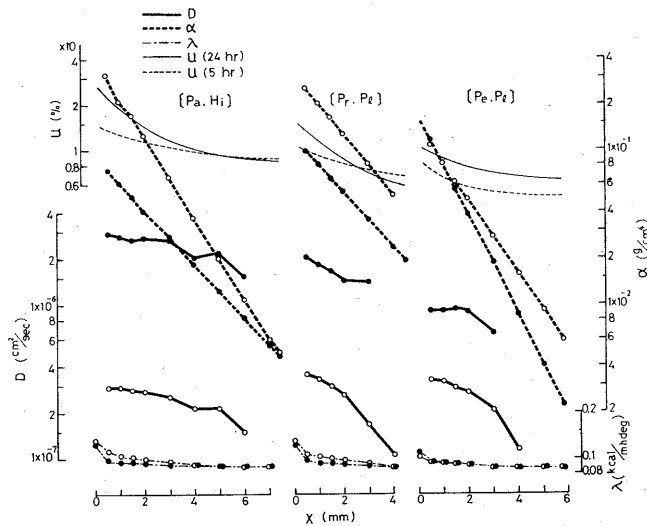
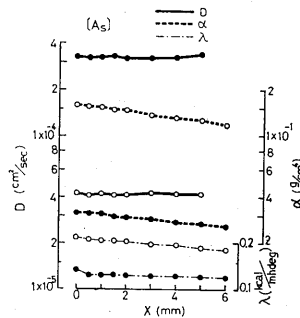


Fig. 28 5, 24時間水蒸気凝縮後の u, D, α, λ の材料内分布
 Distribution of u, D, α and λ in moisture-condensed materials during 5 and 24 hrs.



(Pa, Hi) : 塗装ヒノキ材 (柾目) Painted Japanese cypress (quartersawn b.)
 (Pr, Pl) : プリント合板 Printed plywood
 (Pe, Pl) : ポリエステル化粧合板 Plywood overlaid with polyester coated sheet
 ● : 5 hr, ○ : 24 hrs

Fig. 29 5, 24時間水蒸気凝縮後の u , D , α , λ の材料内分布
 Distribution of u , D , α and λ in moisture-condensed materials during 5 and 24 hrs.



● : 5 hrs, ○ : 24 hrs

Fig. 30 5, 24時間水蒸気凝縮後の D , α , λ のアスベストボード内分布
 Distribution of D , α and λ in moisture-condensed asbestos board during 5 and 24 hrs.

とみてよい。

Fig. 28 では、5, 24 時間とも、 D が材料の中央部で大きく、両面に近いほど、拡散が低下している。

Fig. 29 では、 D は X に対して右下がりの傾向である。これらの表面が耐水性の材料では、表面における水分の浸透が抑えられるので、 X が 0 に近い木材質のところの拡散が優勢なのであろう。

Fig. 30 のアスベストボードは、 D がほぼ一定で、材料内部において均等な拡散性を示す。しかし、 D のオーダーは他材料よりはるかに大きい。

(iv) Fig. 31~33 は浸漬法による結果で、浸漬時間が 0.5, 5, 24 時間のように大きくなるにつれて、 D は小さくなる。(iii) で記述した挙動と異なるのは、ヒノキ、インシュレーションボード、パーティクルボードの 5 時間浸漬の場合で、 X に対して D が右下がりの傾向があり、後出する Tab. 11 に示す前記の材料の吸水量が、合板、ハードボードより多いのと考え合わせ、水との接触面での拡散 (浸透) が優勢

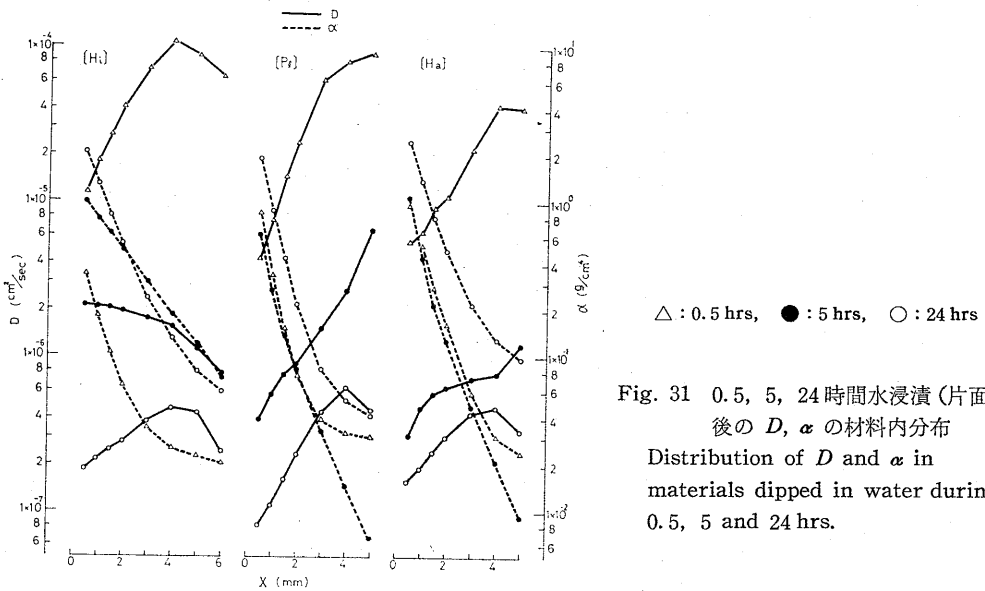


Fig. 31 0.5, 5, 24時間水浸漬（片面）後の D , α の材料内分布
Distribution of D and α in materials dipped in water during 0.5, 5 and 24 hrs.

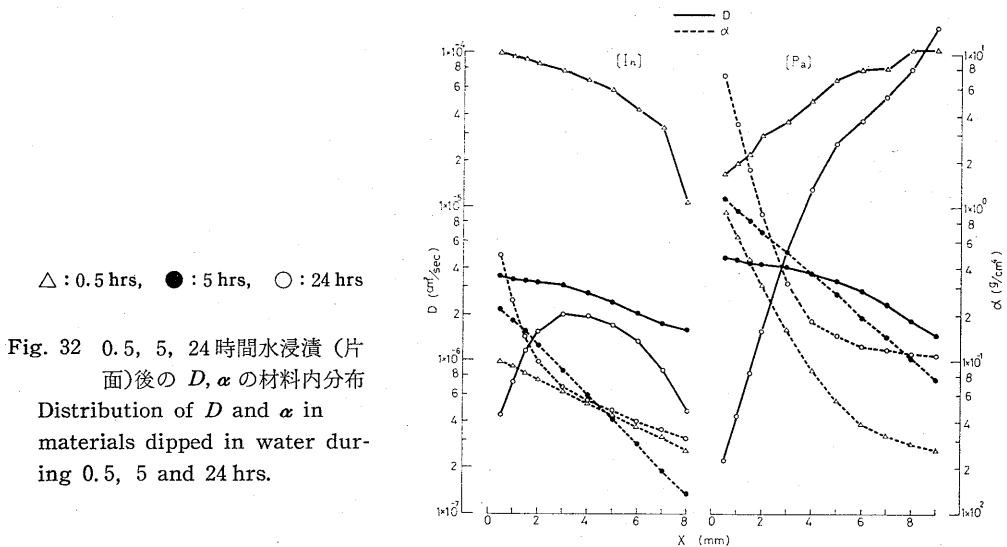
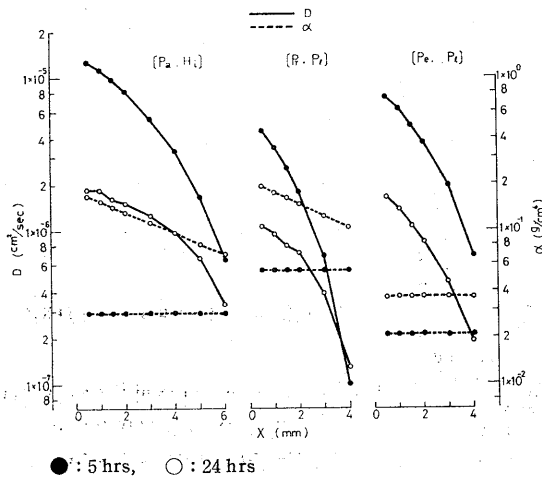


Fig. 32 0.5, 5, 24時間水浸漬（片面）後の D , α の材料内分布
Distribution of D and α in materials dipped in water during 0.5, 5 and 24 hrs.

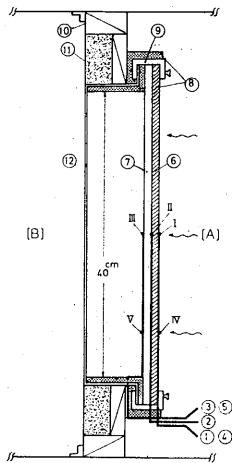
であると考えられる。

パーティクルボード（24時間浸漬）では、Tab. 11 のように吸水量が著しくふえるのに対応して、内部拡散が著増するのが見られる。凝縮法の D の状態と異なる理由は、浸漬法が水と全面的に接していること、実験的には、水の浸透が厚さ膨潤をともなう局所的に強く生じ、 D を著増させたこと、などがあげられる。

(v) Tab. 8, 9 には各材料の拡散係数、水分勾配の平均値 ($\bar{D}$, $\bar{\alpha}$) を掲げる。凝縮と浸漬の両方法の場合も、 $\bar{D}$ はヒノキ、合板、ハードボードに対して、インシュレーションボードとパーティクルボードは、おおむね 2～4 倍で、水分の浸透・拡散が容易であることがわかる。ただし、0.5 時間浸漬の場合は



● : 5 hrs, ○ : 24 hrs
Fig. 33 5, 24時間水浸漬(片面)後の D , α の材料内分布
Distribution of D and α in materials dipped in water during 5 and 24 hrs.



[A][B]: 温湿度制御室 Controlled chamber of temperature and humidity

- ①～⑤: C-C 熱電対 C-C thermo-couple
- ⑥: 試料 Samples Size 46×46 (cm)
- ⑦: 強化ガラス Reinforced glass, Size 46×46 (cm), Thickness 9.9 (mm)
- ⑧: ポリエチレンフォーム Foamed polyethylene
- ⑨: クランプ Clamp
- ⑩: 固定枠 Wood-frame for fixing
- ⑪: ポリスチロールフォーム Foamed polystyrol
- ⑫: アルミニウム板 Aluminium plate, Thickness 4 (mm)

Fig. 34 結露・熱伝導測定部
Equipment of measurement for moisture condensation and thermal conduction.

ハードボードの D が小さいが、ほかはあまり差がない。

一方、 α はインシュレーションボードが最も小で、これは、内部拡散が大きい割に、水との接触面での水の吸収 (uptake) が少ない (Fig. 20 参照) などが原因して、内部での水分分布が均一化されたためである。

表面が耐水性の材料では、凝縮法の場合塗装ヒノキ材の $\bar{D}$, $\bar{\alpha}$ はヒノキ材 (素材) の約 1/2, 1/10 であるが、浸漬法の場合は $\bar{\alpha}$ は約 1/10 であり、 $\bar{D}$ は逆に塗装材の方が大きい。生合板に対して、プリント合板およびポリエステル化粧合板の $\bar{\alpha}$ は、前者の 1/10～3/10 のように小さいが、 $\bar{D}$ は、凝縮法ではほぼ同じか、数分の 1、浸漬法で逆に 2～3 倍大きい。

これらの事実から、耐水性材料の拡散は、表面の耐水層における水の吸収の程度に依存するのがわかる。供試したプリント合板、ポリエステル化粧合板は壁体用で、食卓表面のようなプラスチックシートのオーバーレイ型でない点、耐水性は完全でないが、 D , α の分布は表面が素地材料とかなり異なる。

これらの図の D の分布にも、ある程度の変動の幅があることも注意する必要がある。Eq. (13) は、 X が大きく、 L に近づくほど精度がよく、逆に Eq. (11) は X が小さく、表層ほど精度が上がる。 $X=0$ およびその近傍の D を、Eq. (11), (13) で求めて比較すると、両者は同じでないが、大きな差を示さない。したがって、Eq. (13) で、材料内部すべての D の分布の傾向を判断してもよい。

D の分布状態は、 D を求める式の型よりも、むしろ $\phi(X)$ につよく依存しているといえる。 $\phi-X$ の関係を求める際、実験の困難さから、実測値を並べて、その傾向曲線を導く方法によった。それでも Tab. 6 に示すように、実験式に種類があり、このため、 D の分布状態に、それぞれの特徴が現われて

Table 8. 平均の拡散係数と水分勾配（凝縮法）
Averages of diffusion coefficient and gradient of concentration
(By the method of moisture condensation)

S. No. 試 料 Samples	5 hrs		24 hrs	
	$\bar{\alpha}$ (g/cm ⁴)	$\bar{D}$ (cm ² /sec)	$\bar{\alpha}$ (g/cm ⁴)	$\bar{D}$ (cm ² /sec)
(I) ヒ ノ キ [Hi]	0.304	4.05×10^{-6}	0.872	5.76×10^{-7}
(II) 合 板 [Pl]	0.424	3.94	0.701	2.96
(III) ハードボード [Ha]	0.252	4.20	0.852	3.77
(IV) インシュレーションボード [In]	0.207	8.79	0.183	14.9
(V) パーティクルボード [Pa]	0.292	7.59	0.655	7.92
(VI) 塗装ヒノキ材 [Pa. Hi]	0.036	2.49	0.129	2.52
(VII) プリント合板 [Pr. Pl]	0.062	1.78	0.175	2.73
(VIII) ポリエステルオーバーレイ合板 [Pe. Pl]	0.055	0.88	0.056	2.69
(IX) アスベストボード [As]	0.029	324	0.141	415

Table 9. 平均の拡散係数と水分勾配（浸漬法）
Averages of diffusion coefficient and gradient of concentration
(By the method of contact to water)

S. No. 試 料 Samples	0.5 hrs		5 hrs		24 hrs	
	$\bar{\alpha}$ (g/cm ⁴)	$\bar{D}$ (cm ² /sec)	$\bar{\alpha}$ (g/cm ⁴)	$\bar{D}$ (cm ² /sec)	$\bar{\alpha}$ (g/cm ⁴)	$\bar{D}$ (cm ² /sec)
(I) ヒ ノ キ [Hi]	0.100	5.34×10^{-6}	0.443	1.68×10^{-6}	0.655	3.05×10^{-7}
(II) 合 板 [Pl]	0.216	4.13	0.168	1.95	0.513	3.00
(III) ハードボード [Ha]	0.292	1.99	0.280	0.671	0.788	3.01
(IV) インシュレーションボード [In]	0.060	6.65	0.093	2.73	0.124	12.1
(V) パーティクルボード [Pa]	0.251	5.70	0.475	3.45	1.30	ca. 341
(VI) 塗装ヒノキ材 [Pa. Hi]	—	—	0.030	6.76	0.120	10.2
(VII) プリント合板 [Pr. Pl]	—	—	0.056	2.20	0.152	6.68
(VIII) ポリエステルオーバーレイ合板 [Pe. Pl]	—	—	0.021	4.18	0.036	9.16

いると考えられる。

5. 水蒸気の凝縮過程の熱伝導

5-1. 水分吸収と熱伝導率

3では凝縮過程の水分吸収，4では水分の吸収に伴う材料内部における拡散の考え方について記述した。ここでは，材料表面で凝縮があり，内部で著しい水分傾斜がある場合の，材料の熱伝導率について記述する。

ϕ - x の関係，すなわち，単位容積あたりの水分量と相対位置 $x(=l/L)$ の関係式において，ある dx 部分には，水と材料（空気相も含める）が並列および直列の型で配列していると考えられる。容積分率で表わすと，水が ϕ ，材料が $(1-\phi)$ となる。

材料と水の熱伝導率を λ_m , λ_w とすれば，熱伝導抵抗の成分は

$$\text{並列モデル} \quad \frac{dx}{(1-\phi)\lambda_m + \phi\lambda_w} \dots\dots\dots (16)$$

$$\text{直列モデル} \quad \left(\frac{1-\phi}{\lambda_m} + \frac{\phi}{\lambda_w} \right) dx \dots\dots\dots (17)$$

これらの式に ϕ - x の実験式を代入して、材料全体の等価的な熱伝導率を求めると

$$\text{並列モデル} \quad \lambda = \left\{ \int_0^1 \frac{dx}{\lambda_m + (\lambda_w - \lambda_m)\phi} \right\}^{-1} \dots\dots\dots (18)$$

$$\text{直列モデル} \quad \lambda = \left\{ \int_0^1 \left(\frac{1-\phi}{\lambda_m} + \frac{\phi}{\lambda_w} \right) \right\}^{-1} \dots\dots\dots (19)$$

などが得られる。

材料の熱伝導率は内部の空げき量によって影響を受ける。自由水が浸透して空げきをせばめてくると、乾燥状態で求められた λ_m 自体の値が変わるはずである。

材料の実質率とこの実質の熱伝導率を m , λ_s , 空げき率を C , 空気の熱伝導率を λ_a とすれば

$$\lambda = \lambda_s \cdot m + \lambda_a (C - \phi) + \lambda_w \cdot \phi \dots\dots\dots (20)$$

とおける。これは並列モデルの場合で、材料内部のミクロ、マクロの空げきに介在する水分が、 C に直接的に関係すると考えている。このような状態で、実質と空げきの割合は

$$\frac{m}{m + C - \phi} = \frac{m}{1 - \phi} \dots\dots\dots (21)$$

$$\frac{C - \phi}{m + C - \phi} = \frac{C - \phi}{1 - \phi} \dots\dots\dots (22)$$

また、水が浸透していない、せばめられた空げきと実質部分の熱伝導率を λ_m' とおくと、

$$\lambda_m' = \lambda_s \cdot \frac{m}{1 - \phi} + \lambda_a \cdot \frac{C - \phi}{1 - \phi} = \frac{\lambda_m - \lambda_a \cdot \phi}{1 - \phi} \dots\dots\dots (23)$$

となる。 λ_m が Eq. (23) のように、水の浸透によって λ_m' に変化するとき、材料全体の熱伝導率 λ も、並列モデルの場合、Eq. (18) を用いて下のように書き直せる。

$$\lambda = \left\{ \int_0^1 \frac{dx}{\lambda_m + (\lambda_w - \lambda_a)\phi} \right\}^{-1} \dots\dots\dots (24)$$

Eq. (23) の λ_m' と λ_m の関係を見やすくするため、 $k = \lambda_a / \lambda_m$ とおくと、

$$\lambda_m' = \lambda_m \cdot \theta \cdot (1 + \phi) \dots\dots\dots (25)$$

$$\theta = 1 - k \cdot \phi$$

k が 0.2, さきの実験で $\phi = 0.2 \sim 0.3$ 程度であるから、 θ は 1 に近い数字となる。ゆえに、 λ_m が空げきをせばめられて増加する割合は、およそ ϕ と見当づけられる。なお、Eq. (25) によって Eq. (18) を書き直すと下式になる。

$$\lambda = \left\{ \int_0^1 \frac{dx}{\lambda_m \cdot \theta \cdot (1 - \phi^2) + \lambda_w \cdot \phi} \right\}^{-1} \dots\dots\dots (26)$$

Tab. 6 によると、 ϕ と x の関係式は指数式、ロジスティック式などである。これらの式を Eq. (18) Eq. (26) に代入した解法を次に 2 ～ 3 例だけ示す。

(i) $\phi = a \cdot e^{bx} + \alpha$ を Eq. (18) に代入

$$\text{Eq. (18) の } \{ \} = -\frac{1}{b} \cdot \frac{1}{\lambda_m + \alpha(\lambda_w - \lambda_m)} \left\{ [\ln|t|]_{e^b}^1 - [\ln|1 + \lambda'' \cdot t|]_{e^b}^1 \right\} \dots\dots\dots (27)$$

$$\text{ただし } \left(\begin{array}{l} \lambda'' = a(\lambda_w - \lambda_m) / \lambda_m + \alpha(\lambda_w - \lambda_m) \\ t = e^{bx} \end{array} \right)$$

(ii) $\phi = a \cdot e^{bx} + \alpha$ を Eq. (26) に代入

$$\text{Eq. (26) の } \{ \} = \frac{1}{\theta \cdot \lambda_m \cdot b} \cdot \int_{a \cdot e^{b+\alpha}}^{a+\alpha} \frac{dt}{(t^2 - st - 1)(t - \alpha)} \dots\dots\dots (28)$$

$$\text{ただし } s = \lambda_w / \theta \cdot \lambda_m, \quad t = a \cdot e^{bx} + \alpha$$

s に含まれる θ を定数のように扱って解く。積分の外の θ は、独立変数 λ_m , λ_a , ϕ によってきまるパラメーターとみて、これに種々の値を与えて λ の変化が調べられる。

(iii) $\phi = (a \cdot e^{bx}) / (c \cdot e^{bx} + d)$ を Eq. (18) に代入

$$\text{Eq. (18) } \{ \} = \frac{1}{\lambda_m \cdot b} \left\{ \frac{p-q}{p} [\ln |pt+1|]_e^1 - [\ln |t|]_e^1 \right\} \dots \dots \dots (29)$$

$$\text{ただし } \begin{cases} p = \frac{a\lambda' + C}{d}, & \lambda' = (\lambda_w - \lambda_m) / \lambda_m \\ q = \frac{c}{d}, & t = e^{bx} \end{cases}$$

(iv) $\phi = (a \cdot e^{bx}) / (c \cdot e^{bx} + d)$ を Eq. (26) に代入

$$\text{Eq. (26) の } \{ \} = \frac{1}{\theta \cdot \lambda_m \cdot b} \int_1^e \frac{(ct+d)^2 dt}{(c^2 - a^2 + acs)t^3 + (2cd + ads)t^2 + d^2 t} \dots \dots \dots (30)$$

$$\text{ただし, } s = \lambda_w / \theta \cdot \lambda_m, \quad t = e^{bx}$$

θ については(ii)を参照。なお、(i)~(iv) の ϕ を Eq. (19) に代入する場合、または、その他の $\phi-x$ の関係式を用いる場合も、上記の解の変形であるからここでは省略する。

5-2. 凝縮と熱伝導率

材料表面は、表面温度が露点下になると、水蒸気が凝縮して水膜が形成されるとともに、内部では吸着が進む。したがって、凝縮熱 q_1 と吸着熱 q_2 が発生して、大部分が材料に吸収されていく。この現象がある程度定常的に進む場合、移動熱量 Q は

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dX} - (q_1 \cdot C + q_2 \cdot g) \dots \dots \dots (31)$$

で表わされる。実験との対応を考えて、 q_1 をエンタルピ (潜熱+顕熱) で表現する。 C は凝縮量、 g は拡散する水分量である。

凝縮水が水膜を形成すると、それが一種の遮熱効果を現わし、材料への熱の伝達を遅らせる。ゆえに、材料表面を通過する水蒸気が凝縮熱を放出すると想定して、 C を次式で表現する。

$$C \doteq D_f \cdot \left[\frac{d\phi}{dX} \right]_f \dots \dots \dots (32)$$

ここに、添字 f は表面、すなわち、厚さ無限小の表層における拡散係数と水分勾配を意味する。一方、拡散する水蒸気量 g も、

$$g = D_f \cdot \frac{d\phi}{dX} \dots \dots \dots (33)$$

であるから、薄い表層を通過する熱量は、

$$Q = - \left\{ \lambda + D_f (q_1 + q_2) \frac{d\phi}{dT} \right\} \frac{dT}{dX} \dots \dots \dots (34)$$

と書ける。ここで、 $d\phi/dX$, dT/dX は実験的に求められる関数であるから、 $d\phi/dT$ も算出できる。Eq. (34)で、 $\{ \}$ 内の第2項は、表層の λ の補正項と考えられる。

材料内部では、 $q_1 \doteq 0$ になるから、任意の層を通過する熱量は

$$Q = - \left(\lambda + D \cdot q_2 \cdot \frac{d\phi}{dT} \right) \frac{dT}{dX} \dots \dots \dots (35)$$

となり、 λ には吸着熱 q_2 だけの補正でよい。

次に、 q_2 を求めるために、吸着等温線の相対圧 h と絶対温度 T から次式⁶⁾で計算する。

$$\frac{d \ln h}{d(1/T)} = -\frac{q_2}{R} \cdot M \quad \text{.....(36)}$$

ここに、 R は気体定数 $1.987(\text{cal}/^\circ\text{C mol})$ 、 M は水の分子量である。Sitka spruce の吸着等温線⁸⁾ より、同一含水率における h と $1/T$ より q_2 を求め、 q_2 と含水率の関係を次式 (37) で与えた。繊維状材料に対しては、木材パルプの吸着等温線のデータ¹⁾を用いて、 q_2 を計算し次式で表わした。

$$\text{素 材} \quad \log q_2 = -0.0485 \cdot u + 2.250 \quad (q_2: \text{cal/g}, u: \%) \quad \text{.....(37)}$$

$$\text{木材パルプ} \quad \log q_2 = -0.1127 \cdot u + 2.531 \quad (\quad \quad \quad) \quad \text{.....(38)}$$

この結果、表面に凝縮している状態の材料の熱伝導率は、次の Eq. (39), (40) で λ_m を補正し、

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{表面における補正量} \quad \Delta\lambda = D_f(q_1 + q_2) \frac{d\phi}{dT} \quad \text{.....(39)} \\ \text{内部の任意点の補正量} \quad \Delta\lambda = D \cdot q_2 \cdot \frac{d\phi}{dT} \quad \text{.....(40)} \end{array} \right.$$

補正された λ_m を λ_m'' とおく。並列モデルの場合、 λ_m'' より次式で r を求めるが、この際、材料内部で求めた λ_m'' の数を $2n$ とすると

$$r_i = \frac{1}{\lambda_m'' + (\lambda_w - \lambda_m'')\phi} \quad i=0, 1, \dots, 2n \quad \text{.....(41)}$$

$$r_i = \frac{1}{\lambda_m'' + (\lambda_w - \lambda_a)\phi} \quad i=0, 1, \dots, 2n \quad \text{.....(42)}$$

これから、 λ をたとえば、SIMPSON の公式を用いて、次式で計算することができる。

$$\lambda = \left\{ \int_0^{1(2n)} r dx \right\}^{-1} = \left[\frac{h}{3} \{ (r_0 + r_{2n}) + 4(r_1 + r_3 + \dots + r_{2n-1}) + 2(r_2 + r_4 + \dots + r_{2n-2}) \} \right]^{-1} \quad \text{.....(43)}$$

$$\text{ただし, } h = \frac{1}{2n}$$

直列モデルを用いる場合も同様な計算が可能である。水分が材料の実質の間（空げき）をぬって吸収されるプロセスは、結合モデルとして、やはり並列モデルの方が適正のように考えられる。

5-3. 結露下の熱伝導試験

水蒸気が材料表面に凝縮し、内部へ吸収される過程の熱伝導は、測定上厳密には困難であるが、次の便法によった。

既報⁴⁾ の結露試験装置の [A] [B] 両室間の境界に Fig. 34 に示す断面構造の測定部をとりつける。[A], [B] 両室は独立に温湿度制御がなされる。温度可変範囲は $-30^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 、湿度可変範囲は $20 \sim 95\% \text{ RH}$ である。[A] 室の温度ドリフトは $\pm 0.4^\circ\text{C}$ におさえるよう各調節計を設定した。

Fig. 34 に示すように、46 cm 角、厚さ 9.9 mm の強化ガラス⑦に、木わくを用いて、同寸法の供試板材料⑥を密着させる。[A] 室を 20°C 、 $60 \sim 67\% \text{ RH}$ にして、[B] 室を 2°C に冷却させる。このまま 24 時間コンディショニングしたあと、[A] 室の湿度を $85 \sim 90\% \text{ RH}$ に高めると、試料表面が露点下になり、[A] 室の水蒸気が凝縮し始める。この過程を最細の熱電対 (C-C, テフロン被覆) を用いて、位置 I, II, III の温度差を測定した。温度差は ①, ②, ③ の起電力差を増幅して、精密マイクロボルト計で校正しながら、 0.01°C まで測定した。アルミ板と強化ガラスでかこまれる密閉空気層の温度ドリフトは $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内におさえ、位置 IV, V では、試料クランプの影響は無視できる程度であった。

位置 I と II, II と III の温度差を $\Delta\theta_i, \Delta\theta_g$, 供試材と強化ガラスの熱抵抗を R_i, R_g とすれば,

$$R_i = R_g \cdot \frac{\Delta\theta_i}{\Delta\theta_g} \dots\dots\dots (44)$$

水蒸気の凝縮が生じて、結露が現われるとき、添字 i の代わりに d を用いて,

$$R_d = R_g \cdot \frac{\Delta\theta_d}{\Delta\theta_{gd}} \dots\dots\dots (45)$$

Eq. (44), (45) より

$$\frac{R_i}{R_d} = \frac{(\Delta\theta_i/\Delta\theta_g)}{(\Delta\theta_d/\Delta\theta_{gd})} = N \dots\dots\dots (46)$$

ゆえに、凝縮下の熱伝導率と厚さを λ_d, l_d 当初の前処理状態のそれらを λ_i, l_i とすれば

$$\lambda_d = \lambda_i (l_d/l_i) \cdot N \dots\dots\dots (47)$$

実験では、前処理の状態と凝縮開始後一定時間ごとに、Eq. (46) の各値を測定または記録紙上に走らせ、 N を算出した。 λ_i は定常下の保護熱板法による測定結果を用いた。その結果の概要を示すと、熱板から材料への供給熱量は $133.8 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 。試料両面間の温度差 $\Delta\theta$ の数例をあげると、ポリエステル化粧合板 (5.8mm) は 8.8°C 、パーティクルボード (10.1mm) は 13.8°C 、インシュレーションボード (9.3mm) は 24.9°C である。表面の化粧層の厚さが下地材に比較して薄いと、熱伝導率には影響が出てこない。たとえば、塩ビオーバーレイ合板 (2.9mm) では $\Delta\theta = 4.4^\circ\text{C}$ で、熱伝導率は上記のポリエステル化粧合板とかわらない。ハードボード (6.3mm) は 7.5°C 、アスベストボード (5.8mm) は 7.7°C で、これらは供試材のなかでは、熱伝導率が大いといえる。

5-4. 実験と理論の比較

(i) Tab. 10 は比較法によって求めた、水分凝縮下の λ の実験値 (λ_e) である。 λ_m は含水率が u における保護熱板法で求めた結果である。ただし、ヒノキ材は、既報の u が 8.7% 、 $\lambda_m = 0.085^5$ より、 u が $10 \sim 11\%$ の場合を計算して、 $0.090 (\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C})$ とおいた。また、塗装ヒノキ材は、表面の塗膜厚さが少なく (Tab. 7 参照)、その影響が無視できるとして、ヒノキ未処理材の値を代用した。合板と化粧合板については、増加の程度を比較したいため、約 9% の含水率での $\lambda_m = 0.08 \sim 0.094$ より、平均値 $0.088 (\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C})$ を求めて、これに統一した。この整理は λ_m 自体が、測定上小数点以下 3 けたまで精度を上げるのは種々の要因で困難であったので、ここでは λ_m を基準値として、これに対する実測値 (λ_e) の増加率 $m(\lambda_e/\lambda_m)$ を求めるのに主眼をおいた。

Tab. 10 の m は、化粧合板が小で、パーティクルボードが最大である。 ΔW (水分吸収量) は、材料表面に付着している水滴も含めて重量測定した。この際、1 の位は四捨五入した。文献²⁾より、およそ推定すると、5, 24 時間の順序でヒノキ材の m は 1.12, 1.25, 合板の m は 1.05, 1.16, 化粧合板の m は 1.05, 1.1~1.15, インシュレーションボードの m は 1.1, 1.2 と推定され、Tab. 10 の m の方が大きい。そして、ハードボード、パーティクルボードはここにあげないが、そのずれがさらに大きい。

(ii) Tab. 11 は Eq. (18), Eq. (24) を用い、理論的に計算された λ_e (Eq. (18)), λ_v (Eq. (24), 水によって空けきがせばめられる効果を式に導入) とそれぞれの λ_m に対する増加率 m' を表す。 ΔW は Tab. 6 の実験式 (凝縮と浸漬の場合がある) の積分によって、水分吸収量を計算した。Tab. 11 の (C) (D) の区別は、(C) が凝縮法の ϕ より λ を求め、(D) が浸漬法の ϕ より λ を求めた場合である。

(D) の欄では、試料個体が異なる (採取部位が異なる、別種の板材) ため、水分吸収量がかなりずれた

Table 10. 凝縮時間が 5, 24 時間における熱伝導率
Thermal conductivity in moisture-condensed materials
during 5 or 24 hrs

S. No. 試料 Samples	λ_m	u (%)	5 hrs				24 hrs			
			λ_e	m	n_c/n_v	$\frac{\Delta W}{u}$ (g/m ²) (%)	λ_e	m	n_c/n_v	$\frac{\Delta W}{u}$ (g/m ²) (%)
(I) ヒノキ材 [Hi]	0.090	10~11	0.107	1.19	1.08 1.07	230 18.3	0.118	1.31	1.08 1.07	410 24.4
(II) 合板 [Pl]	0.088	9	0.094	1.07	1.00 0.99	110 12.3	0.113	1.28	1.09 1.07	280 17.3
(III) ハードボード [Ha]	0.112	7.5~8	0.141	1.26	1.08 1.12	190 10.8	0.172	1.54	1.15 1.29	440 14.4
(IV) インシュレーションボード [In]	0.050	5	0.055	1.10	0.98 0.98	130 10.4	0.069	1.37	1.17 1.15	360 19.9
(V) パーティクルボード [Pa]	0.090	9~10	0.112	1.24	1.01 1.02	360 14.7	0.155	1.72	1.34 1.30	1210 26.9
(VI) 塗装ヒノキ材 [Pa. Hi]	(0.090)	10~11	0.098	1.09	1.04 1.04	60 12.5	0.107	1.19	1.04 1.10	140 15.1
(VII) プリント合板 [Pr. Pl]	0.088	9~10	0.093	1.06	1.00 1.00	50 11.6	0.105	1.19	1.08 1.07	90 13.3
(VIII) ポリエステル化粧合板 [Pe. Pl]	0.088	9.5	0.092	1.04	1.08 1.01	30 10.6	0.104	1.18	1.12 1.14	60 11.6
(IX) アスベストボード [As]	0.100		0.124	1.24	1.01 0.98	520	0.160	1.60	0.81 0.74	1310

Note) λ_m : 含水率 u における熱伝導率, λ_m : λ in moisture content u (kcal/m h°C)

$$m = \frac{\lambda_e}{\lambda_m}, \quad n_c = \frac{\lambda_e}{\lambda_c(C)}, \quad n_v = \frac{\lambda_e}{\lambda_v(C)}$$

ΔW : 水分吸収量 Amount of moisture and water absorption.

$\bar{u}$: 平均含水率 Mean moisture content.

ものについては、そのまま2つの値をのせてある。2つの数値の中で、 λ_e , λ_v の計算に使うのは、凝縮法と同種近似の試料の ΔW を用いることに定め、その ΔW は、下側に平均含水率 (u) を記載して区別した。

実測の m に比較して、 $m' = \lambda_c / \lambda_m$ または λ_v / λ_m の凝縮法の値は小さく、むしろ前記した推定値に近接したものが多い。予測されるごとく、 λ_c は λ_v より少し小さい。(D) の欄では、パーティクルボード、アスベストボードの m' が大きいのが目だつ。これは、この材料の吸水量が他の材料に比して、きわめて大きいことに帰因している。

(iii) 凝縮法の λ_c , λ_v の値に対する λ_e の比を n_c , n_v で表わして、Tab. 10 の「 $n_c \cdot n_v$ 」欄に示す。 λ_e と λ_c , λ_v (凝縮法(C)) の計算の基礎である ΔW は、それぞれ異なるので、内部の水分状態は一致していない。このずれを許容して、実測値と計算値の比較を n_c , n_v は表わすものである。この結果は、多くの場合 $\lambda_e > \lambda_c$, λ_v である。とくに、24時間のハードボード、パーティクルボードの n_c , n_v が大きいのは、Tab. 10 と Tab. 11 の ΔW のずれが他の材料より大きいことが考えられる。すなわち、ヒノキ材では ΔW の差は 40(g/m²), 合板 20(g/m²) に対して、ハードボード 110(g/m²), パーティクルボード 340(g/m²) となっている。ゆえに、パーティクルボードでも、 ΔW の差が小さくなれば、 n_c , n_v も小さ

Table 11. 凝縮過程の計算による熱伝導率（浸漬の場合と比較）
Theoretical thermal conductivity during moisture-condensed
process (in comparison with dipping)

S. No. 試料 Samples	試験法 Test procedure	From Eq. 18				From Eq. 24				ΔW (g/m ²) () : $\bar{u}$ (%)	
		5 hrs		24 hrs		5 hrs		24 hrs		5 hrs	24 hrs
		λ_c	m'	λ_c	m'	λ_v	m'	λ_v	m'		
(I) ヒノキ材 [Hi]	C	0.099	1.10	0.108	1.20	0.100	1.11	0.110	1.22	180 (16.6)	370 (23.0)
	D	0.109	1.21	0.118	1.31	0.112	0.24	0.120	1.33	350—480 (26.7)	490—530 (27.1)
(II) 合板 [Pl]	C	0.094	1.07	0.103	1.17	0.095	1.08	0.106	1.20	70 (11.1)	260 (16.7)
	D	0.094	1.07	0.107	1.22	0.096	1.09	0.110	1.25	80—170 (11.4)	230 (15.8)
(III) ハードボ ード [Ha]	C	0.125	1.12	0.130	1.16	0.126	1.13	0.133	1.19	130 (9.9)	330 (12.8)
	D	0.130	1.16	0.150	1.34	0.132	1.18	0.154	1.38	120—190 (9.7)	407 (14.8)
(IV) インシュレ ーションボ ード [In]	C	0.056	1.12	0.059	1.18	0.056	1.12	0.060	1.20	130 (10.4)	190 (13.0)
	D	0.054	1.09	0.059	1.18	0.055	1.10	0.059	1.18	170 (12.0)	210 (13.7)
(V) パーティク ルボード [Pa]	C	0.108	1.20	0.116	1.29	0.110	1.22	0.119	1.32	320 (14.1)	870 (22.0)
	D	0.121	1.34	0.193	2.14	0.125	1.39	0.210	2.34	1080 (25.0)	1500—2030 (31.0)
(VI) 塗装ヒノキ 材 [Pa. Hi]	C	0.094	1.04	0.096	1.07	0.094	1.04	0.097	1.08	50 (12.1)	110 (14.1)
	D	0.095	1.06	0.103	1.14	0.095	1.06	0.105	1.17	80 (13.1)	160—220 (15.8)
(VII) プリント合 板 [Pr. Pl]	C	0.093	1.06	0.097	1.10	0.093	1.06	0.098	1.11	40 (11.2)	100 (13.7)
	D	0.092	1.04	0.101	1.15	0.092	1.05	0.103	1.17	60 (12.0)	130 (15.0)
(VIII) ポリエステ ル化粧合板 [Pe. Pl]	C	0.091	1.03	0.091	1.03	0.091	1.03	0.091	1.03	30 (10.6)	40 (10.9)
	D	0.090	1.02	0.090	1.06	0.090	1.03	0.094	1.07	40 (10.9)	60 (11.6)
(IX) アスベスト ボード [As]	C	0.123	1.23	0.198	1.98	0.127	1.27	0.217	2.17	340	1470
	D	0.302	3.02	0.318	3.18	0.342	3.42	0.362	3.62	2960	3200

Note) $m' = \frac{\lambda_c}{\lambda_m}$, $m' = \frac{\lambda_v}{\lambda_m}$, λ_c , λ_v : (kcal/m h°C)

C : 凝縮 Condensed, D : 浸漬 Dipped, $\bar{u}$: 平均含水率 Mean moisture content.

くなると推定できるので、特殊な場合を除くと、 λ_e と λ_c , λ_v のずれは、5, 24時間の場合、10数パーセント以内と考えられる。特殊な場合として、アスベストボードは n_e , n_v が1以下になる。

(iv) Fig. 35 は ΔW に対する m または $m' (= \lambda_c(C)/\lambda_m)$ の関係を示す。 m , m' のちらばりより、回帰直線での表現が適切である。つぎに、図示していないものも含めて、回帰式を列記すると

$$m = \lambda_e/\lambda_m = 4.617 \times 10^{-4} \cdot \Delta W + 1.106 \quad \sqrt{V} = 0.095 \quad r = 0.879 \dots \dots \dots (48)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1' = \lambda_c(C)/\lambda_m = 5.681 \times 10^{-4} \cdot \Delta W + 1.016 \\ m_2' = \lambda_v(C)/\lambda_m = 6.780 \times 10^{-4} \cdot \Delta W + 1.011 \end{array} \right. \quad \sqrt{V} = 0.069 \quad r = 0.950 \dots \dots \dots (49)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m_3' = \lambda_c(D)/\lambda_m = 6.700 \times 10^{-4} \cdot \Delta W + 1.000 \\ m_4' = \lambda_v(D)/\lambda_m = 8.060 \times 10^{-4} \cdot \Delta W + 0.988 \end{array} \right. \quad \sqrt{V} = 0.086 \quad r = 0.946 \dots \dots \dots (50)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1' = \lambda_c(C)/\lambda_m = 5.681 \times 10^{-4} \cdot \Delta W + 1.016 \\ m_3' = \lambda_c(D)/\lambda_m = 6.700 \times 10^{-4} \cdot \Delta W + 1.000 \end{array} \right. \quad \sqrt{V} = 0.110 \quad r = 0.987 \dots \dots \dots (51)$$

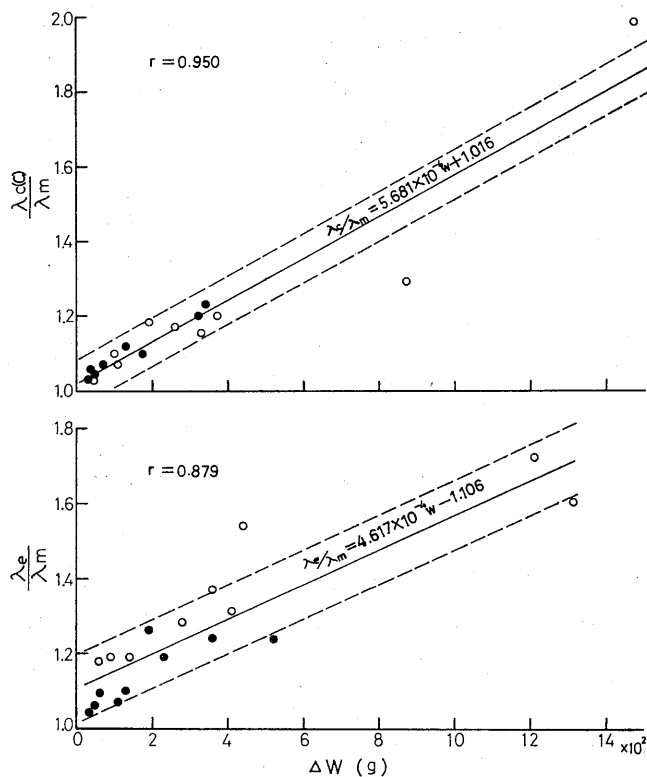
$$\left\{ \begin{array}{l} m_2' = \lambda_v(C)/\lambda_m = 6.780 \times 10^{-4} \cdot \Delta W + 1.011 \\ m_4' = \lambda_v(D)/\lambda_m = 8.060 \times 10^{-4} \cdot \Delta W + 0.988 \end{array} \right. \quad \sqrt{V} = 0.125 \quad r = 0.988 \dots \dots \dots (52)$$

ここで、 $\sqrt{V}$ は不偏分散 V の平方根、 r は相関係数である。 $m_1' \sim m_4'$ の回帰式を同一図にえがくと、

$\Delta W=0$ で $1.0 \sim 1.02$, 各式の $\sqrt{V}$ の範囲 (例 Eq. (52) では, $-0.125 \sim +0.125$) は, $\Delta W=0 \sim 400$ (g/m^2) の範囲では重なって, この偏差の範囲に限る場合, Eq. (49)~Eq. (52) のどの式でもよい。しかも, ΔW の $0 \sim 400$ の範囲には, 供試した多くの材料の水分吸収量が含まれる。一方, m は, その $\sqrt{V}$ の下の範囲 ($-0.095 \sim 0$) が, $\Delta W=0 \sim 400$ で, Eq. (49)~(52) の $\sqrt{V}$ の範囲に重なる。これについて, さらに考察を進めると

$\Delta W=0$ における m_1', m_2' は $1.02, 1.01$ となり, m_3', m_4' が 1.0 であるから, 凝縮法では λ_m について凝縮熱, 吸着熱の補正をしたため, やや大になっている。一方, Eq. (48) の m では, 1.11 となる。

試料 (Fig. 34 の⑥) を 3.2mm の硬質塩化ビニル板にとりかえ, 表面に水蒸気を凝縮させて, 比較法で λ_e を求め, m を算出すると m は, 12時間: 1.04 , 24時間: 1.11 , 36時間: 1.06 , 48時間: 1.08 になる。塩化ビニル自体は, この程度の厚さになると, 熱伝導率に水分の影響は現われないと考えられるので, むしろ, 水滴, 水膜が表面に形成されて, 熱伝達しやすくなり, みかけ上, 塩化ビニルの λ が増加したようになる。これは ΔW が少量でも生起するから, Fig. 35 の回帰線が縦軸と 1.11 で交差するのと有意な関係になる。したがって, m には, 測定法に原因する $4 \sim 11\%$ のずれが材料の熱伝導率に内在し



破線: 不偏分散の平方根 Broken line: Square root of unbiased variance
r: 相関係数 Correlation coefficient

Fig. 35 各材料の水分吸収量 (ΔW) に対する λ_e/λ_m , $\lambda_e(C)/\lambda_m$ の増加
Increase of λ_e/λ_m and $\lambda_e(C)/\lambda_m$ by moisture and water absorption (ΔW) of materials.

ていると考えねばならない。これを吟味するため、次の実験を行なった。

Fig. 34 において、位置 I の熱電対が伝達の影響を受け、試料とある厚さの境界層（境膜）が一体となって、1つの熱伝導係数がきまると仮定する。ゆえに、実験的に境膜の効果を取り除くため、試料の表面に、透湿性のある断熱性発泡体シート（厚さ 5 mm）をピン止めた。強化ガラスとの比較法で、発泡体シートと試料の界面での水の凝縮を確かめてから、同様な方法で m を算出した。その結果は下記のようなものである。

	$m \quad \Delta W(\text{g/m}^2)$			$m \quad \Delta W(\text{g/m}^2)$	
合 板	1.03	86	ハードボード	1.16	128
インシュレーション	1.03	84	プリント合板	1.02	48

この際、凝縮時間は 36～38 時間であった。この m と Tab. 10 の m （5 時間）を各材料で比較すると、確実とはいえないが、前記の仮定が成立すると考えてよい。

硬質塩化ビニルの m を平均すると 1.07 であるので、Fig. 35 の下図 (λ_e/λ_m) の回帰直線および $\sqrt{V}$ を縦軸にそって -0.07 移動させる。この結果、 $\Delta W=400$ 程度までは、実測値の $\sqrt{V}$ と各計算値の $\sqrt{V}$ の範囲が重なってくる。

このように、実験と理論にそれぞれ高い精度は期待できないが、熱伝導の実験値を補正し、平均値からの偏差を許容すると、実験値と理論値は相互に近い値になってくる。

文 献

- 1) 高分子と吸湿委員会：材料と水分ハンドブック，共立，275，(1968)
- 2) KOLLMANN, F. F. P. and W. A. COTE : Principle of Wood Science and Technology. Springer-Verlag, 250, (1968)
- 3) STAMM, A. J. : Wood and Cellulose Science. Ronald Press N. Y., 152, (1964)
- 4) 鈴木正治：建築用木材の部材化に関する研究，林試研報，257, p. 3, 7, 22, 27, (1973)
- 5) ———：木材の表面の物理的性質に関する研究，林試研報，231, p. 38, (1970)
- 6) WAHBA, M. and S. NASHED : Sorption Hysteresis and the Effect of Temperature. J. Tex. Inst., 48. 9, (1967)

**Moisture- and Water Absorption and Thermal Conductivity of Materials
in the Temperature Lower than the Surrounding Atmosphere**

Masaharu SUZUKI⁽¹⁾

Summary

It can be often observed that the temperature of inside walls and floor is lower than the atmosphere surrounding them. When the interior board is exposed to this atmospheric condition, it absorbs moisture until attaining an equilibrium to the lower temperature. If the surface temperature of the interior board is reduced under the dew point, surface condensation may collect on the surface layer of sample and with absorption of condensed water, the thermal conductivity of moist materials must be raised abnormally.

The purpose of this study was to make the basic data on moisture and water absorbability of wood-based materials, the distribution of absorbed water in materials, and the increment of thermal conductivity in process of water penetration.

Fig. 1 shows the apparatus for observing the condensing process of moisture on the cool surface of materials. The relative humidity in the cabinet was controlled by saturated salt solution of potassium chloride. The growth of water drop on samples was observed as shown in Fig. 2 and Fig. 3. Contact angle and number of water drops depended on the difference of surface properties between water-attractive and water-repellent material. Condensation was affected by amounts of the humid air as shown in Fig. 4.

The sample size of each test was 100×140×3~12 (thickness) mm for measurement of moisture and water absorption by one-side face of board. All other sides, except one-side face, were coated with water-proof agents (polyester resin paint and paraffin wax). Tested samples and the experimental conditions are listed in Table 1.

The samples for moisture absorption listed in Table 3, beginning at 27 per cent humidity, were exposed to a forced air circulation at 93±3 per cent humidity. The sample number (S. No.) in the table is decided by the order of 10 hours-absorbed amount. If a and a_{24} indicate

Received July 13, 1974

(1) Wood Technology Division

the amount of moisture absorption at t hrs and 24 hrs respectively, moisture absorption rate k can be determined using Eq. 1 by the experiment of the class 1 in Table 1. Fig. 5 shows the interrelation between k and G (moisture permeance rate)

$$a = a_{24}(1 - e^{-kt}) \dots\dots\dots (1)$$

Moisture- and water absorption test (the classes 3 and 4 in Tab. 1) was conducted under the condition of lower temperature than the environment, using the same apparatus as previous experiment⁴⁾. One side wall made of aluminium in test chamber was cooled to be near 7 degrees less than test chamber. Each sample was tightly fixed to the cooler wall. Humidity in the chamber ranged from 20 to 90 per cent relative humidity by operating a high-accuracy conditioner.

Fig. 6 and 7 show the effects of both sample thickness and the surface temperature (T_s) on moisture and water absorption of Japanese cypress wood and its paint coating. The relative vapour pressure (p/p_s) can be calculated from vapour pressure p in test chamber and the saturated vapour pressure p_s obtained from T_s . The thickness of coated polyurethane may be controlled to ca. 40 μ . Absorbed amounts W of Fig. 6—(B), Fig. 7—(B) and Fig. 7—(C) increase definitely with rise of p/p_s ratio.

Table 4 and Figs. 8~15 show moisture and water-absorbed amount of various wood-based materials under lower temperature. Samples were weighed at absorption time $t=1, 2, 4, \dots$ until 24 hrs and the following empirical equations were derived with respect to p/p_s .

$$\log W = b_1 \cdot \log t + d_1 \dots\dots\dots (2)$$

$$W = b_2 \cdot \log t + d_2 \dots\dots\dots (3)$$

The rates (b_1 or b_2) of moisture- and water absorption become large with rise of p/p_s as shown in Table 4. The $W-t$ curves, as shown in Fig. 8—Ex. 9 and Fig. 9—Ex. 7, illustrate a sharp increasing pattern until 3 hrs. The minimal amounts of condensation of Figs. 8 and 9 are roughly calculated from the broken line and the curve of Ex. 6 (Fig. 8) or Ex. 4 (Fig. 9). The minimal condensation of the printed plywood (Fig. 9) is 2~3 times larger than the polyester-overlaid plywood. The curves of Ex. 4 and Ex. 7 in Fig. 10 indicate a process of moisture condensation. The symbol H denotes "the humid surface". The symbol D_1 denotes "the surface wetted with free water". The symbol D_2 denotes "the moisture condensed surface covered with liquid water". The symbol D_1' or D_2' denotes partly wetted or partly condensed condition respectively. Compared with minimal condensation of Fig. 13 and Fig. 14, that of 12mm thick plywood is clearly larger than 2.7 mm thick plywood.

Fig. 16 shows two kinds of histograms of absorbed moisture and water for 9 samples of almost the same thickness except particleboard. From this Fig. 16 and b_1 of Table 4, it should be noted that the inorganic substances absorb plenty of moisture. Moisture and water absorption of plastic-overlaid material is increased with increase of $T_D - T_s$, where T_D is the dew point of sample surface (Fig. 17).

It is reasonable to suppose that some trouble in the result of Table 4 arose for the variations of thickness of each sample. The supplemental experiments were performed on the condition that samples were trimmed to almost the same thickness. The result is tabulated (Table 5) and absorbed amount per one hour ($\bar{W}$) is shown in Fig. 18.

The values of $\bar{W}$ are divided into the 5 classes: No. 1~5, No. 3~9, No. 10~15, No. 14~21 and No. 16~22, and the order of $\bar{W}$ (white mark) is closely related to that of Table 3. In the case of $p/p_s \approx 1.2$, mean absorption (per one hour) from 4 to 8 hrs is classified as follows:

No. 1~5, No. 3~9, No. (11, 15), No. (10, 12, 14, 17, 21, 22) and No. 16~20. The exceptional examples are observed in hardboard, particleboard and insulation board. Absorption of condensed water to particleboard increases more greatly than other wood-based materials. On the other hand, insulation board uptakes smaller quantities of water than solid wood and hardboard.

Figs. 19~21 show the interrelationship between absorption of condensed water and water uptake by immersing one side into liquid water. There is much uptake of water in the initial region of 0 to 6 hrs for solid wood, plywood and hardboard. It should be noted that there exist no differences between the gradient ($\Delta W/\Delta t$ or $\Delta W'/\Delta t$) measured by the two methods with the passing of time. The two curves of printed plywood present a similar tendency (Fig. 19).

Condensed water or liquid water which contact with one side of board is allowed to penetrate into core part. The distribution of moisture and water in the sample is supposed to be continually changing with time.

If a sample is made of a sheet composite of lots of laminae and there are little quantities of moving water which flow in and flow out from a lamina at the distance l from the surface, the following equation is derived

$$-D_1\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_l + D_1\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_{l+\delta X_1} = \left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)\delta X_1 \quad \dots\dots\dots(4)$$

where ϕ : weight of moisture and free water per unit volume, X : Depth from surface (Distance), t : Time, D : Diffusion coefficient through the horizontal flow as shown in Fig. 22, δX : Thickness of a lamina. The flow equation in the n -th layer can be expressed as

$$-D_n\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_{l+\dots+\delta X_{n-1}} + D_n\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_{l+\dots+\delta X_n} = \left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)\delta X_n \quad \dots\dots\dots(5)$$

The water accumulated in $\delta X_1, \delta X_2 \dots \delta X_n$ is obtained by the summation of Eq. 4~Eq. 5, that is:

$$-D_1\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_l + D_n\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_{l+\dots+\delta X_n} = \sum_1^n \left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)\delta X_i \quad \dots\dots\dots(6)$$

If the relation of ϕ - X as shown in Fig. 22 is measured by a suitable experiment, diffusion coefficient D at $X=l$ is approximately given by the following equations:

$$D_n\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_{l+\dots+\delta X_n} \simeq 0 \quad (\text{the } n\text{-th layer: the opposite side})$$

$$D = -\frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_l \left\{ \int_{\phi_i}^{\phi_l} X d\phi - l(\phi_l - \phi_i) \right\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

or

$$D = \frac{\frac{1}{\Delta t} \left\{ \int_l^L \phi dX - \phi_i(L-l) \right\}}{\left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_{l+\dots+\delta X_n} - \left(\frac{\partial\phi}{\partial X}\right)_l} \quad \dots\dots\dots(8)$$

Figs. 23~26 show the experimental data of ϕ vs. X under the condition of dipping one side of board in water during a constant time interval, thereby, ϕ is determined from moisture content in the sliced laminae.

The empirical equations of ϕ - x ($x=l/L$, L : thickness) are listed in Table 6, where the experiments were performed by the two methods of dipping one side in water and condensing moisture on one side surface. We can get the gradient of concentration from the function of $\phi(X)$.

Figs. 27~30 show the distribution of the diffusion coefficient (D) and the gradient of concentration (α) in the case of condensing moisture. Thickness and specific gravity of the tested samples are listed in Table 7. The moisture content (u) and α near the wetted surface are much higher than the opposite side. The transmitted water may be increased near the surface covered with free water. Diffusion coefficients of plywood and hardboard, using Eq. 8 are plotted and are surely smaller than that of particleboard and insulation board. The figures of particleboard and insulation board form a convex curve in $\phi-X$ relation, and this will suggest that moisture and water movement per unit gradient advance more strongly at the core than at both surface layers.

The diffusion coefficient of the samples coated with synthetic resin shows a decreasing tendency with X (Fig. 29).

Figs. 31~33 show D and α obtained by dipping one side in water during constant time intervals of 0.5, 5 and 24 hrs. The diffusion coefficient in Fig. 33 is calculated by the Eq. 7. With increase of time interval in each figure, the diffusion coefficients are reduced one or two order of magnitude.

Mean values of D and α are listed in Table 8 and Table 9. The mean diffusion coefficients of particleboard and insulation board are larger than those of other materials, and the gradients of concentration of the samples coated with synthetic resin become smaller values than those of untreated samples.

When moisture is condensed on the surface of material, water vapour is transmissive and the pores in the cell are being filled with water. As a result, the thermal conductivity is changed to a large extent. If the two phases of both material (substances with air spaces) and water (bound and free water) are postulated as a parallel model, the resistance of heat conduction in a minute thickness of dx is defined :

$$\frac{dx}{(1-\phi)\lambda_m + \phi \cdot \lambda_w} \dots\dots\dots (9)$$

where λ_m and λ_w are thermal conductivity of material and water respectively. The equivalent thermal conductivity of two-phase mixture is as follows

$$\lambda = \left\{ \int_0^1 \frac{dx}{(1-\phi)\lambda_m + \phi \cdot \lambda_w} \right\}^{-1} \dots\dots\dots (10)$$

Considering that the air space of the pore in the cell and cell wall is decreased by the penetrated water, λ is modified

$$\lambda = \left\{ \int_0^1 \frac{dx}{\lambda_m + (\lambda_w - \lambda_a)\phi} \right\}^{-1} \dots\dots\dots (11)$$

$$\lambda_w = 0.5, \quad \lambda_a = 0.02 \quad (\text{kcal/m h}^\circ\text{C})$$

Condensed moisture will yield the heat of condensation (q_1). Transmitted vapour is adsorbed by the hydroxyl group in cell wall and yields the differential heat of sorption (q_2). These heat energy values should be added to the total quantities of heat. λ_m of Eqs. 10 and 11 must be modified by the following :

$$\text{Increment in surface thin layer} \quad \Delta\lambda = D_f(q_1 + q_2) \frac{d\phi}{dT} \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{Increment in core layer} \quad \Delta\lambda = D_c \cdot q_2 \cdot \frac{d\phi}{dT} \dots\dots\dots (13)$$

where D_f and D_c denote the diffusion coefficient of surface thin layer and of each layer in core. By substituting $\Delta\phi$ (increment from air dried basis) and $\lambda_m (= \lambda_m + \Delta\lambda, \lambda_m$: see Tab.10)

into Eq. 10, thermal conductivities of each layer in sample are calculated and shown in Figs. 27~30.

The measurement of thermal conductivity during moisture condensation process is performed by the method as shown in Fig. 35. A sample fixed to the reinforced glass was exposed to the well-controlled condition of 21°C and 85% RH and the surface temperature of sample becomes dew point by cooling of [B] chamber.

The thermal conductivity λ_d during condensed process against non-condensed λ_i is as follows :

$$\lambda_d = \lambda_i \cdot (l_d / l_i) N \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$N = \frac{(\Delta\theta_i / \Delta\theta_g)}{(\Delta\theta_d / \Delta\theta_{gd})} \quad \dots\dots\dots (15)$$

where l_d or l_i indicates thickness of condensed or initial non-condensed state, $\Delta\theta_d$ or $\Delta\theta_i$ temperature difference of condensed or initial non-condensed state, and $\Delta\theta_{dg}$ or $\Delta\theta_g$ those of reinforced glass. λ_i was measured by the method of the guarded hot plate.

Table 10 shows thermal conductivity in moisture-condensing material the above-mentioned experiment and m is the ratio of λ_c (condensed) to λ_m (non-condensed).

Table 11 shows the calculations of thermal conductivity using Eqs. 10 and 11 and each value of ΔW is obtained by integration of the empirical equations listed in Table 6. The ratio m' of moisture condensed method is smaller than the ratio m and the relation of $\lambda_e > \lambda_c$ and λ_v is recognized in many cases.

Fig. 35 shows the relation between ΔW and the ratios of $m(\lambda_e / \lambda_m)$ and $m'(\lambda_c(C) / \lambda_m)$. The regression lines are expressed as follows :

$$m = \lambda_e / \lambda_m = 4.617 \times 10^{-4} \cdot \Delta W + 1.106, \sqrt{V} = 0.095, r = 0.879 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$m_1' = \lambda_c(C) / \lambda_m = 5.681 \times 10^{-4} \cdot \Delta W + 1.016, \sqrt{V} = 0.069, r = 0.950 \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$m_2' = \lambda_v(C) / \lambda_m = 6.780 \times 10^{-4} \cdot \Delta W + 1.011, \sqrt{V} = 0.086, r = 0.946 \quad \dots\dots\dots (18)$$

V : Unbiased variance, r : Correlation coefficient. It should be noted from the precise test of condensation on polyvinyl chloride that this type of the experiment has an overestimate of about 7 per cent for thermal conductivity in condensed state. If a shift of 0.07 for the regression line of Eq. 16 is done along the ordinate-axis, both limits of $\sqrt{V}$ in each regression line will overlap each other and as a result, the calculated values approximately agree with the experimental values. The distribution of thermal conductivity in material is shown in Figs. 27~30 using Eq. 10.