

パーティクルボードの吸放湿特性と  
室内湿度調節性能

朝倉 靖弘

# パーティクルボードの吸放湿特性と 室内湿度調節性能

朝倉 靖弘

## 目次

1. 緒言	1
2. 既往の研究	4
3. 市販木質ボードの吸湿特性	8
3. 1 研究の目的と概要	8
3. 2 実験方法	8
3. 2. 1 試験体の概要	
3. 2. 2 平衡含水率の測定	
3. 2. 3 吸湿実験	
3. 3 結果と考察	14
3. 3. 1 湿気容量性能の比較	
3. 3. 2 吸湿速度性能の比較	
3. 3. 3 湿気伝導率の概算	
3. 4 まとめ	23
4. パーティクルボードの吸放湿性能に及ぼす密度の影響	26
4. 1 研究の目的と概要	26
4. 2 試験体の製造および実験方法	26
4. 2. 1 供試材料	
4. 2. 2 吸湿量の測定	
4. 2. 3 平衡含水率の測定	
4. 2. 4 $\lambda'$ の決定方法	
4. 3 結果と考察	36
4. 3. 1 供試材料の平衡含水率	
4. 3. 2 ボード比重が吸湿性能に及ぼす影響	
4. 3. 3 原料種類が吸湿性能に及ぼす影響	
4. 3. 4 $\lambda'$ の決定	
4. 3. 4 吸湿による内部水分量の変化	
4. 4 まとめ	78
5. 実大空間における木質材料の調湿性能	79
5. 1 研究の目的と概要	79
5. 2 実験方法	79
5. 2. 1 実験室の概要	
5. 2. 2 温湿度条件	
5. 2. 3 実験期間	

5. 3	結果及び考察	8 4
5. 3. 1	室温変動に対する相対湿度変化	
5. 3. 2	評価指数  B  値による調湿性能の評価	
5. 3. 3	RH <sup>*</sup> の算出	
5. 3. 4	内装材料の吸放湿量	
5. 4	まとめ	1 0 3
6.	無機塩含浸ボードの調湿性能	1 0 5
6. 1	研究の目的と概要	1 0 5
6. 2	実験方法	1 0 5
6. 2. 1	試験体の製造	
6. 2. 2	含浸処理	
6. 2. 3	吸放湿試験体の作製	
6. 2. 4	平衡含水率の測定	
6. 2. 5	吸湿による重量変化	
6. 2. 6	乾湿を繰り返し条件下での重量変化	
6. 2. 7	密閉空間における調湿性能	
6. 3	結果および考察	1 1 1
6. 3. 1	平衡含水率と湿気容量値の算出	
6. 3. 2	平衡含水率の履歴	
6. 3. 3	吸湿量の経時変化	
6. 3. 4	乾湿を繰り返し条件下での重量変化	
6. 3. 5	調湿性能の検討	
6. 3. 6	試験体の吸湿量変化のシュミレーション	
6. 4	まとめ	1 2 8
7.	結言	1 3 3
	謝辞	1 3 6
	文献	1 3 7
	付録 A	1 4 1
	B	1 4 8



## 1. 緒言

居住空間の湿度変動の調節（調湿）を内装材の吸放湿性能を利用して行うことは、エネルギーコスト的に有効な方法であるとともに、機器を用いた方法に必要なメンテナンスをほとんど行わなくても良いというメリットがある。木材が調湿材料として有効な内装材料となり得ることは古くから知られており、多くの研究がなされている。また、近年ビニルクロスに変わり吸放湿・透湿性に優れた壁紙が市販されるようになり、内装下地材として木材や木質内装材を施工することによる調湿を期待することが出来るようになってきている。

さて、居住空間の湿度は、天候による外気湿度の変化や入浴や炊事に代表される生活活動による水蒸気発生および冷暖房による温度変化により、比較的短期に急激に変化することが考えられる。このような湿度変化において、調湿材料に求められる性能は、接する空気湿度変動に対する応答性能であるといえる。この性能は材料の吸放湿速度で表されるが、吸放湿速度は湿気の通り易さ（湿気伝導率または透湿率で表される）と温湿度変化時に吸放湿しうる最大水分量（湿気容量）に影響を受けると考えられる。

すなわち、優れた調湿材料とは湿気伝導率と湿気容量が共に高い材料であるといえる。さて、材料内の空隙は湿気の通り道となりうることから、この増加は材内を移動する水分量の増大につながることが考えられる。すなわち、材表面部の水分変化が急速に材内部につたわり、結果として吸放湿に寄与する材料実質が増加することから、材全体の吸湿量の増加がおりうる。しかしながら、空隙の増大は材料実質の減少をともしない、材全体の湿気容量の低下を引き起こすおそれがある。

ここで、パーティクルボードを調湿材料として用いることを考える。パーティクルボードは低比重化によって構成するパーティクル間の空隙を増加させることが可能である。また、製造方法の特徴から、性能改善が比較的行いやすい材料で

あると考えられる。

本論文では、パーティクルボードの調湿材料としての可能性を検討するため、その性能の評価およびシミュレーションによる性能予測を行った。そして、更に調湿性能を増加させるための方法の模索を行った。

以下に各章の概要をしめす。

### 【3. 各種市販木質ボードの吸湿性能】

数種の市販木質ボードの吸湿性能を比較した。パーティクルボードは、吸湿速度、湿気容量および湿気伝導率において高い性能を示し、調湿材料として有効であることが予測された。

### 【4. パーティクルボードの吸湿性能に及ぼす密度の影響】

密度が $0.3 \sim 0.7 \text{ g/cm}^3$ のパーティクルボードを製造し、その吸湿性能を検討した。コンピュータシミュレーションを併用した検討手法により、密度低下による吸湿速度上昇を確認し、またその速度増加には材料の湿気伝導性能の増加が大きく影響を及ぼしていることを示した。

### 【5. 実大空間における木質材料の調湿性能】

4畳半大の高気密な実験室内の壁面にアカマツ板目板およびパーティクルボード（密度 $0.5 \text{ g/cm}^3$ ）を施工し、温度変化時の調湿性能を検討した。木質材料の施工により、室内の湿度変動は抑制され、木質材料の調湿性能が確認された。そして、パーティクルボードはアカマツよりも室内の湿度変化を早期に抑える効果があった。また、両者の調湿性能の差異は、比較的内装面積の小さい場合に顕著であることが判った。

#### 【6. 無機塩含浸ボードの調湿性能】

パーティクルボードに硝酸マグネシウムを含浸させ、乾燥させた後の吸湿性能を測定した。含浸処理により、吸湿速度および湿気容量は増加を示した。また、この吸湿性能は、吸放湿を繰り返したのちでも維持されることが判った。さらに、調湿実験とシミュレーションにより、調湿性能を検討した。

## 2. 既往の研究

居住空間において高湿度状態は、壁体の結露現象を発生させカビや腐れの原因となったり<sup>1)</sup>、アレルギーの原因となりうるダニ等の発生を促進させる可能性がある<sup>2) 3)</sup>。また、過度の乾燥は気管支等を痛める原因となる<sup>4)</sup>。さらに、湿度はリュウマチとの関係もあると言われ<sup>5)</sup>、快適な生活を送るうえで重要な要素であると言える。そしてその値は、おおむね40~50%RHである<sup>6)</sup>と言われている。

吸湿性の材料がその周囲の湿度を調節する働きを調湿作用と呼ぶ。木材および木質材料は吸湿性材料であり調湿作用をもつ材料である。永田は奈良の古寺堂・倉蔵内の気候を調査し、湿度変動に日変動が鉄筋収蔵庫に比べ少なく、また同様の現象が木造の日本建築内で同様に見られることを報告している<sup>7) 8)</sup>。また、東はスギ材の箱の内部湿度が日変化による温度変動にもかかわらず、ほぼ一定の数値を示すことを報告している<sup>9)</sup>が、永田は正倉院宝物収納箱である唐櫃内の湿度が同様な性質を持ち、宝物の保存に重要な意味を持っていることを示唆した<sup>10)</sup>。また、上村は木製および鋼製戸棚内の相対湿度を測定し、木製戸棚内の湿度変動が小さいことを示した<sup>11)</sup>。

木材の吸放湿性が室内湿度に与える影響を説明した初期の研究としては、前田による研究がある<sup>12)</sup>。前田は無換気の木製およびコンクリート製の小型実験箱を用いて、外部から温湿度変動を加えた場合に湿度変動が温度変動に先行する現象について検討し、材料中の吸着水蒸気量を空隙中の水蒸気密度と温度の関数として扱っている。また、堀江は密閉箱内に吸湿材料を封入し、温度変化を与える実験を行い、室内湿度を計算する式を与えている<sup>13)</sup>。また、住宅内の湿度変動は、湿度変動に基づくものが基本であって、室内の生活活動などに

よる水蒸気発生や換気等によるものは、付加的な物と見なして良いと報告している<sup>14)</sup>。則元らは、木質材料の吸放湿性能を小型実験箱と水蒸気発生装置を用いて測定している。また、小型住宅において各種材料を内装し、その湿度変動の測定を行っている<sup>15) 16)</sup>。

また、調湿性能の評価方法については様々な評価方法が提唱されている。宮野らは、室内気温が1℃変化したときに単位面積当たりの内装材料が吸放湿する水分量を調湿力と名付け評価指標としている<sup>17) 18)</sup>。絶対湿度一定の時の相対湿度格差と実際に観測される湿度の格差を比較する調湿率と呼ばれる指標がある<sup>19)</sup>。鈴木は同様の値を湿度調節能：HCSと呼び<sup>20)</sup>、調湿作用の指標としている。また、佐道らは、同様の値を、HSCと呼び評価に用いている<sup>21) 22)</sup>。宮野は八王子に試作された住宅の居住性を多角的に検討する上で調湿効果にもふれているが、その中で空間内の材料を木材と吸湿性の全くない材料の2つから構成されると仮定し、実測値から相当木材量を算出している<sup>23)</sup>。また、この相当木材量（仮想木材量）の調湿性能評価値としての検討も行っている<sup>24)</sup>。

以上のように、調湿作用の評価については、いまだ確立されているとは言えない。そういった中で比較的、木材関連の研究に多く用いられている評価指標として、牧らによって提唱されているB値がある。これは、相対湿度の対数と湿度の関係に一次回帰を行い、得られた直線の傾きを示している。牧らは、実大空間を用いた実験によって、同値が住宅が密閉もしくは規則的な強制換気がある場合に成り立つことを示した<sup>25)</sup>。そして、内装材の種類<sup>26)</sup>や内装面積率<sup>27)</sup>を変化させた実験によって、B値が調湿効果の評価指標として有効であることを示している。また、居住者がいる場合についても調湿性能の測定を行い、同値を用いて検討を行っている<sup>28)</sup>。

岡野は八王子に試作された住宅の居住性を多角的に検討する上で調湿効果にもふれているが、その中で空間内の材料を木材と吸湿性の全くない材料の2つから構成されると仮定し、実測値から相当木材量を算出している<sup>29)</sup>。また、この相当木材量(仮想木材量)の調湿性能評価値としての検討も行っている<sup>30)</sup>。

王らは、小型密閉箱による調湿実験を行い<sup>31) 32)</sup>、内装面積と調湿性能の間に非線形の関係があること、また吸湿量と脱湿量に差があると報告している<sup>32)</sup>。木材の特徴として吸脱湿時のヒステレシスがあり、調湿作用へ影響を与えることが考えられるが、その影響の検討はいまだ不十分であると言えよう。

さて、木質材料が実際に住宅の室内側壁面で使われる場合、その多くは内装下地材としてであると考えられる。大釜は小型実験箱内に内装材料を面積を変化させつつ施工し、その調湿性能の検討を行っている<sup>33)</sup>。その結果、調湿効果は内装率に依存するが、その依存のしかたが壁紙の種類と下地の調湿性能によって異なることを示した。

岡野も述べているが<sup>29)</sup>、壁紙に透湿性のある材料を用いれば、内装下地である木質材料にも湿気が到達する。すなわち、壁紙を考慮することにより、木質材料の調湿性能を発揮させる事が可能であるといえる。

調湿性能を検討する上で重要なのは材料自体の吸放湿性能を明らかにすることである。材料の吸放湿性能は湿気伝導性能と湿気容量の二つの性質から説明することが可能である。湿気伝導性能は湿気伝導率で表現され、その測定方法としてはカップ法<sup>34)</sup>が良く知られている。斉藤は木材および木質材料の透湿率をカップ法で求めており<sup>35) 36) 37) 38)</sup>、建築学の分野で木質材料にはこの数値



が用いられていることが多い。また、鈴木は多くの木質材料に付いてカップ法による測定を行っている<sup>39)</sup>。

その他の測定方法として斉藤の標準透湿試験器による測定<sup>40)</sup>、松本による方法<sup>41)</sup>中尾らによる動的測定法<sup>42)</sup>がある。特に松本の試験は、建築材料の湿気伝導率の測定方法としては、一般的な方法になりつつある。

この方法を用いた測定は、木材<sup>43) 44) 45)</sup>、繊維板<sup>46)</sup>などにおける報告があるが、まだ不十分であると言えよう。

湿気容量性能は材料の平衡含水率(EMC)を求めることによって算出可能である。木質材料のEMCの測定例としては信田の報告<sup>47)</sup>がある。信田は数種の木質材料のEMCを測定し、Hailwood-Horrobin<sup>48)</sup>による吸着等温線を当てはめ、式から得られた定数M値(吸着点の大小を表す)と相対湿度の間に負の相関関係があることを示した。

材料の調湿性能をその材料の吸放湿性から推定する方法については、多くの報告がある。佐道らは、Fickの拡散則を用いて材料の吸放湿特性<sup>49)</sup>、閉鎖された空間の温湿度変化<sup>51)</sup>、換気のある住宅内の調湿作用<sup>52)</sup>について報告している。また、前に述べた堀江<sup>13)</sup>の報告および前田の報告は<sup>12)</sup>それらの先鞭なすものである。これらの研究は松本により、熱湿気同時移動の基礎式としてまとめられた<sup>53)</sup>。松本は、同式を元にしたシミュレーションを用いて木材の非定常吸放湿性について報告している<sup>54)</sup>が、吸湿によって物性値が変化する木材への検討は不十分であると言えた。池田は同式を元にしたシミュレーションをインシュレーションボードの調湿作用に適用しているが、シミュレーションの精度を高めるために材料の物性値を湿度変動に応じて段階的に変化させた<sup>52)</sup>。松尾ら<sup>55)</sup>は、シミュレーション時に逐次物性値を更新する方法を示しているが、



関野の報告によれば、同方法は木材においても有効であった<sup>54)</sup>。また、関野は同報告中で、木材以外にも合板、パーティクルボードの吸湿性能について同式を用いた検討を行っている。また、調湿性能の評価とは異なるが、加藤らはインシュレーションボード、パーティクルボード、ハードボードについて同式を用いた結露予測を行っている<sup>55)</sup>。

熱水分同時移動の基礎式による木質材料の吸放湿および調湿性能の解析手法についてはまだ実施例が少く、また木材が生物材料であることに起因する精度面での問題点を多く内包しているといえ、今後の研究が期待される。

さて、木質材料を元にしてさらに吸放湿性能および調湿性能に優れた材料を開発することも試みられている。近江らは木粉・木質繊維などを器材としたポリウレタン、水性ビニルウレタン、ポリ塩化ビニルなどの樹脂との複合シートを開発し吸湿性能などを検討した結果、木材素材よりも優れた性能を得ている<sup>56)</sup>。また、斉藤ら炭酸ナトリウムを含浸させた後炭化させた木質物の吸放湿特性と調湿性能について検討している<sup>57)</sup><sup>58)</sup>。また、渋谷は塩化カルシウムを含浸させた合板について<sup>59)</sup>、木村らは塩化リチウム含浸合板について吸湿特性を検討している<sup>60)</sup>。また、白石<sup>61)</sup>、藤田<sup>62)</sup>は同様の含浸材料を通気層に用いて室内湿度環境に及ぼす影響を検討している。

また、近年大建工業により、調湿作用を目的とした吸放湿ボードが開発されている<sup>63)</sup>。同ボードは窯業系ボードであり木質材料ではないが、建築材料メーカーによってこのような材料が開発されたことは、内装材料による調湿に期待がかかりつつあることを示していると言えよう。

### 3. 市販木質ボードの吸湿特性

#### 3. 1 研究の目的と概要

木質内装材による室内湿度調節を検討する上で、内装材単体の吸放湿性能を測定することは、内装材料を実際に施工した場合の調湿性能を予測する上で、重要であると考えられる。そこで、現在市販されている木質内装材のうち、内装下地として使用され则认为られる数種の材料について、吸湿量、湿気容量および湿気伝導率を測定・検討した。特に、近年市場に現れた中質繊維板(MDF)、針葉樹合板および配向木片板(OSB)等については、上に示したような検討はされていることが少なく、材料の湿気に対する性能値の蓄積を増やすことは急務であると言えよう。

#### 3. 2 実験方法

##### 3. 2. 1 試験体の概要

使用した試験体は市場に出回っている市販ボードである。材種は、中質繊維板(MDF)、硬質繊維板(HB)、針葉樹合板(PW(Soft.)), 南洋材合板(PW(Hard.)), アスファルト含浸軟質繊維板(IB)、パーティクルボード(PB)、アカマツ板目板(Sold.)の8種である。

まず、入手したボードを $26 \times 26$ cmに裁断し、各種ボードにつき25枚前後の試験体を得た。続いて試験体の寸法および重量を測定し、密度を算出したのち、比較的密度が中庸な試験体を各材種につき4～5枚抽出し、実験に供することとした。なお針葉樹合板については、表層に節などの欠点の無いものを目視により判別し、選出したのち、密度により試験体を選んだ。各材料の平均厚、平均密度および使用接着剤をTable 3.1に示す。IBの接着剤に関しては残念ながら製造元から接着剤について回答を得ることが出来なかった。

Table 3.1. Thickness,Density and Resin.

Specimens	MDF	HB	OSB	PW(Soft.)	PW(Hard.)	IB	PB	Solid.
Thickness(cm)	0.71	0.64	1.1	1.2	0.9	1.2	2.5	1.5
Density(g/cm <sup>3</sup> )	0.73	1.0	0.65	0.59	0.47	0.30	0.50	0.40
Resin used	UMF	PF	PF	UMF	PF	Unknown	IC	None

### 3. 2. 2 平衡含水率の測定

各試験体の平衡含水率を以下のように測定した。吸湿期間の短縮のために、試験体をテーブル丸鋸で切削し、長さ3～5cm程度、厚さ2mm以下の薄片を作成した。そして、得られた試験体を飽和塩水溶液で一定の湿度に保たれた小型デシケーター（寸法25cm×15cm×15cm）内に置いた。デシケーターは恒温恒湿器（LS-2）内に設置しており、一定の湿度に保たれている。温度条件は20℃1条件とした。また、使用した飽和塩をTable 3.2に示した。実験期間は最低10日とし、重量を電子天秤（ザルトリウス社：2001MP2、精度1mg）で測定した後、105℃で24時間乾燥を行い、全乾状態として含水率を算出した。

Table 3.2. Relative humidities over saturated salt solutions.

Salt	Relative humidity(%)	
	Temp.= 20	25
MgCl <sub>2</sub>	33.1	32.8
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	43.3	43.0
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	54.4	52.9
NaBr	58.2	57.3
NaCl	75.5	75.3
KCl	85.1	84.3

### 3. 2. 3 吸湿実験

材料の吸湿性能を検討するために、材周囲の雰囲気急激に変化させた場合の吸湿量の経時変化を測定した。試験体は吸湿面を一面に限定するため、側面と裏面をアルミテープとビニールシートで断湿している。また側面と吸湿面が接する縁からの吸湿を防ぐために、吸湿面に対しても一片につき5mmのアルミテープの回り込みを行っている。結果として吸湿面積は $25\text{cm} \times 25\text{cm} = 625\text{cm}^2$ となった。なお、HBについてはSI(片面サンダー仕上げ)であったので平滑面を吸湿面にした。また、IBについてはアスファルトを含浸していない面を吸湿面とした。

試験体を予め $20^\circ\text{C}$  54%RHに設定された恒温恒湿器(ナガノ科学社:HC-30)内で2週間養生した。その後、 $20^\circ\text{C}$  75%RHに設定された別の恒温恒湿器(タバイエスベック社:LS-2)内の電子天秤上に迅速に設置し、吸湿によって生じる重量変化を経時的に測定した。また、試験体近傍の温湿度をT型熱電対、および静電容量変化型湿度センサー(VAISALA社:精度 $\pm 2\%\text{RH}$ )で測定した。試験装置の概要をFig. 3.1に示す。また、測定間隔は5分、測定時間は6時間とした。

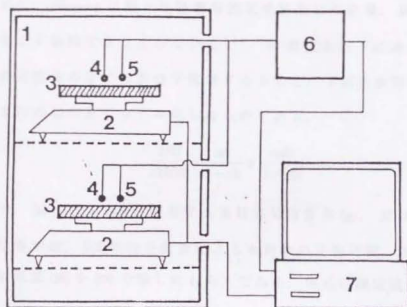


Fig. 3.1. Schematic diagrams of measurement of moisture absorption.

1:Thermo-hygrostat, 2:Balance, 3:Specimen

4:Thermocouples, 4:Humidity sensor,

6:Data logger, 7:Computer.



### 3. 3 結果と考察

#### 3. 3. 1 湿気容量性能の比較

測定の結果得られた平衡含水率 (EMC) (%) を Fig. 3.2 にまとめて示す。また、得られた結果に、Hailwood-Horrobin<sup>4,5)</sup> の吸着等温式 (以降 H-H 式と呼ぶ) を当てはめた。Simpson は様々な吸着等温式を検討した結果、同式が木材の平衡含水率をよく表現できたとしている<sup>6,7)</sup>。H-H 式を以下に示す。同式は水の吸着現象を固溶体の形で多分子吸着するものと、1 価の水和物として単分子吸着するものの和の形でモデル化したものである。

$$\frac{MU}{1800} = \frac{ah}{1-ah} + \frac{a\beta h}{1+a\beta h} \quad (3.1)$$

ここで、M は水 1 mol と吸着する木材実質の質量 (g)、U は EMC(%),  $\alpha$  は固溶体の平衡定数、 $\beta$  は単分子吸着による水和水の平衡定数、h は相対水蒸気圧 (相対湿度 (%) を 100 で除したもの) である。同式の測定結果への適応は Spall<sup>8)</sup> の報告<sup>8,9)</sup> に詳しく示されているため、ここでは割愛する。Table 3.3 に得られた吸着等温式の係数を、また、その軌跡を Fig. 3.2 に示す。

アカマツ板目板 (Solid.) に比べると、木質材料の平衡含水率は全体的に低い値を示す。木質材料は製造時に熱圧を受けるため、吸着点が減少する可能性があることと<sup>6,7)</sup>、木材実質にくらべると吸湿量の低い接着剤が含まれているため<sup>6,7)</sup>と思われる。特に MDF と HB は低い値を示しており、上記の影響が大きい可能性がある。さて、吸着等温線の傾きは、相対湿度が変化した場合にどれだけ多くの水分を吸湿する性能があるかを表している。そこで、この傾きを EMCV と以降呼称し、湿気容量性能の評価指標とする。相対湿度 40, 60, 80% における EMCV を算出し、Fig. 3.3 に示した。Solid. が大きな値を示しているのは、EMCV においても同様であるが、PB が OSB を除く木質材料では最も大きな値を示し

ており、吸湿材料として有効である可能性を示唆している。また、OSBは非常に大きな値を低湿度から高湿度まで発現しているが、その理由については不明であり、今後の検討が必要であろう。

また、材料の湿気容量性能を表す物性値として、 $\kappa$ および $\nu$ がある。

$\kappa$ は湿度変化に対する含湿率 $\theta$  ( $\text{kg/m}^3$ )の変化 ( $\text{kg/m}^3$  ( $\text{kg/kg}$ )) ただし、湿度は $x$ : 重量絶対湿度 ( $\text{kg/kg}$  (air), 以下  $\text{kg/kg}$ ) である。また、 $\nu$ は温度 $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) の変化に対する $\theta$ の変化 ( $\text{kg/m}^3$  ( $^{\circ}\text{C}$ )) である。局所平衡の仮定をおくと材料の $\theta$ は次式で表される<sup>(3.3)</sup>。

$$\theta = f(x, T) \quad (3.2)$$

すなわち

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial \theta}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial x}{\partial t} - \nu \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.3)$$

なお、 $t$ は時間(h)を表す。

本実験で得られた吸着等温式から相対湿度40,60,80%における $\kappa$ を算出し、Fig.3.4に示した。含湿率 $\theta$ は材料の含水率 $u$ と密度 $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ )で表されるため、密度の影響が見られる。その為、高密度であるOSBおよびHBが突出した傾向を示している。同様の理由でIBは最も低い値を示した。その他の木質材料においては、MDFがやや低い以外はPBを含めほぼ同様な値を示している。

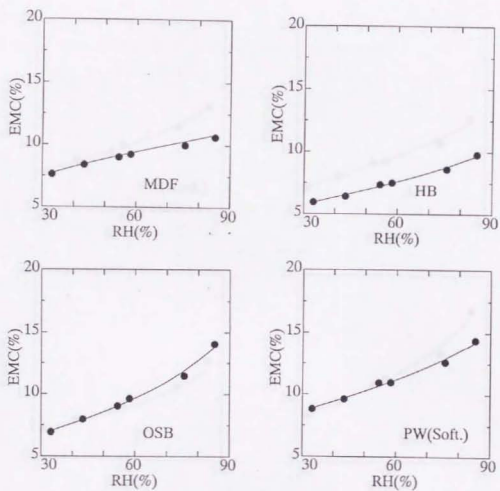


Fig. 3.2. Relationships between relative humidity(RH) and equilibrium moisture content(EMC)(1).

Note: Temperature was 20 ° C.

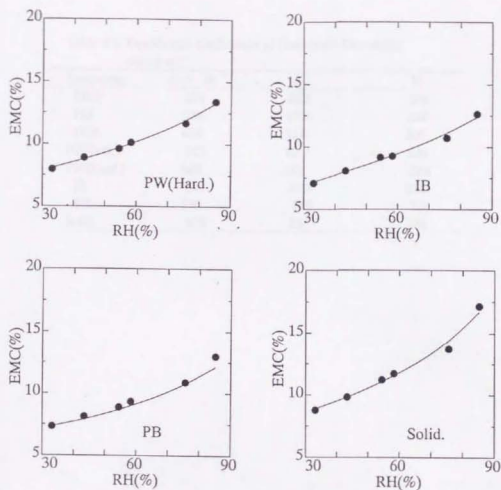


Fig. 3.2. Relationships between relative humidity(RH) and equilibrium moisture content(EMC)(2).

Note: Temperature was 20 ° C.

Table 3.3. Equilibrium coefficients of Hailwood-Horrobin's equation.

Specimens	$\alpha \times 10^{-3}$	$\beta$	M
MDF	275	36.9	204
HB	536	40.6	332
OSB	675	34.6	300
PW(Soft.)	543	62.7	230
PW(Hard.)	585	141	268
IB	567	31.2	272
PB	640	115	330
Solid.	679	124	254

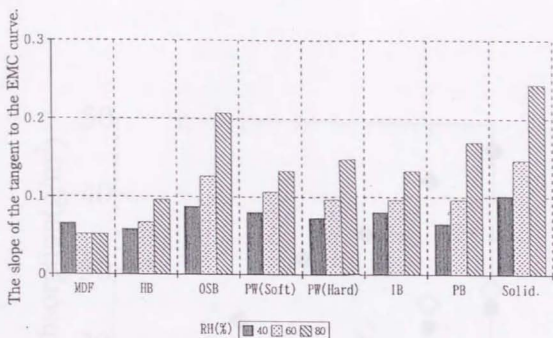


Fig. 3.3. The slope of the tangent to the EMC curve.

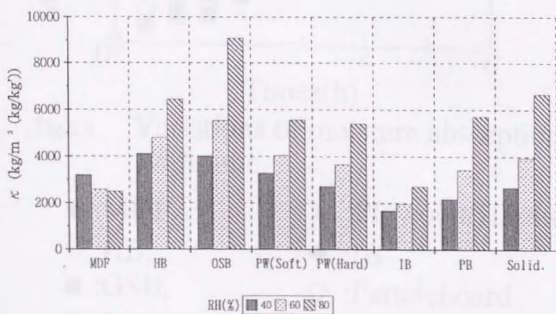


Fig. 3.4. The value of the moisture capacity( $\kappa$ ).

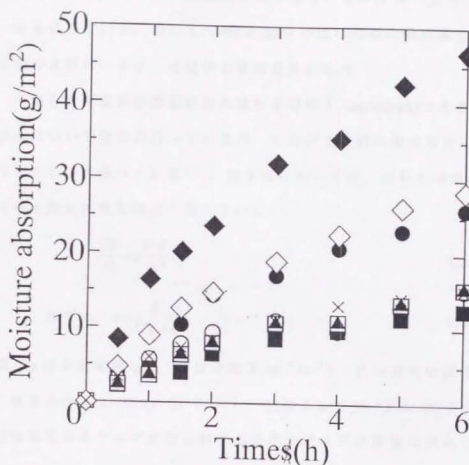


Fig.3.5. Variations of moisture absorption with time.

- :MDF,
- :HB,
- :OSB,
- :Plywood (Softwood)
- ▲ :Plywood(Hardwood)
- ◆ :IB
- ◇ :Partcleboard
- × :Solidwood(Akamatsu)



### 3. 3. 2 吸湿速度性能の比較

Fig. 3.5 に得られた吸湿量の経時変化を示す。吸湿量の大小によって 3 つのグループに大別できる。最も高い吸湿量を示すしているのは IB であり、単独でグループを形成している。続いて、PB と MDF がほぼ同様の吸湿量を示している。その他の木質ボードは、ほぼ同じ吸湿量を示した。

さて、中尾らは平板状の建築材料の湿気伝導率  $\lambda'$  (kg/mh(kg/kg)) を簡易的に測定する方法について検討を行っているが、その中で材料の吸湿量から  $\lambda'$  を推定する方法について述べている<sup>(42)</sup>。同手法においては、材料を半無限体とみなし材料内の水蒸気拡散を次式で表している。

$$\frac{\partial X}{\partial t} = a \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (3.4)$$

$$\text{ただし、} a = \frac{\lambda'}{C' \gamma + \kappa} \quad (3.5)$$

$t$  は時間 (h)  $x$  は位置座標 (m),  $C'$  は空隙率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ),  $\gamma'$  は空気の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) である。境界条件を  $X = \Delta X_0 (x=0, t>0)$  とし、初期条件を  $X=0 (X \geq 0, t=0)$  とする。このとき表面湿度のステップ変化に対する表面湿流の積分値  $W$  は次式で表される。

$$W = \frac{2\lambda' \Delta X_0}{a} \left( \frac{at}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.6)$$

となる。ここで  $A = \frac{2\lambda' \Delta X_0}{a} \left( \frac{a}{\pi} \right)^{1/2}$  とすると、(3.6) は次式で表される。

$$W = A \sqrt{t} \quad (3.7)$$

同式を微分して次式を得た。

$$W' = \frac{A}{2} \times \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (3.8)$$

同式中の  $W'$  は吸湿速度を表し、その係数  $A/2$  は吸湿速度を表す指標として扱う

ことが出来る。そこで A2 を吸湿速度係数と以降呼ぶこととする。W を実験によって得られた  $Wt$  として、最小自乗法によって (3.7) を当てはめ、得られた結果から A2 を求め、試験体間の比較に用いた。

得られた A2 を示したものが Table 3.4 である。IB の吸湿速度係数は 19 と非常に大きな値を示している。また MDF と PB はほぼ同様な数字を示し、Fig. 3.5 で見られた吸湿量の傾向をよく表現しているといえる。

### 3. 3. 3 湿気伝導率の概算

3. 3. 2 において示した中尾らの方法を用いて  $\lambda'$  の算出を試みた。その方法を以下に示す。

(3.5) において、 $C$  は 1 以下であり、 $\lambda'$  は 1.2 であるので、おおむね、2000 ~ 9000 である  $\kappa$  に比べ非常に小さく、無視する事が可能である。すなわち、

$$a = \frac{\lambda'}{\kappa} \quad (3.9)$$

となる。(3.6) に (3.9) を代入し、 $\lambda'$  について解くと次式が得られる。

$$\lambda' = \frac{n}{4\Delta X_0^2 \kappa} \chi \left( \frac{W}{\sqrt{t}} \right)^2 \quad (3.10)$$

$\frac{W}{\sqrt{t}} = A$  であることから、 $A$  と  $\kappa$  を用いて  $\lambda'$  を概算することが可能である。

同式を用いて得られた  $\lambda'$  を Fig. 3.6 に示す。なお、 $\kappa$  には吸湿初期の値を用いると精度が高まる傾向があるため<sup>4,4)</sup>、本研究においても吸湿初期の値を用いた。同図から明らかなように、IB は突出した  $\lambda'$  を持つことから、低密度による  $\kappa$  の低さを補い、高い吸湿速度性能を発現していると言える。また PB と MDF はほぼ同様の  $\lambda'$  を持つことから、PB が MDF に比べ吸湿速度において若干高い性能を示すのは、湿気容量性能によるものであることが明らかとなった。

また、高い $\kappa$ を持ちながら、吸湿速度性能がそれほど大きくない OSB の $\lambda'$ は、一番低い値を示した。

以上から、IB は高い湿気伝導性能を持つことが明らかとなったが、湿気容量性能が小さいため、吸湿可能な水分量が少なく、長期に及ぶ吸湿（もしくは放湿）時に容量が不足する恐れがあり、調湿材料として用いた場合に問題が出てくる可能性がある。一方、PB は IB に次ぐ吸湿速度性能を持ち、湿気伝導性能が比較的高く湿気容量性能も素材並にあることから、調湿材料として有効であると考えられる。また、MDF も PB に近い性能を有する材料であると言える。

4. まとめ

数種の木質材料の吸湿性能を検討し、以下の知見を得た。

- 1) 木質材料の EMC は、素材に比べ概ね低い値を示した。
- 2) 湿気容量性能を示す $\kappa$ は MDF と IB を除いて、素材とほぼ同様の値を示した。特に OSB は素材を大きく上回る値を示した。
- 3) 吸湿量の経時変化から算出した吸湿速度係数は IB が最も大きく、次いで、PB、MDF の順となった。湿気容量 $\kappa$ が極めて大きかった OSB の吸湿速度は、PW や素材と変わらない結果となった。
- 4) 吸湿量の経時変化と $\kappa$ から、湿気伝導率 $\lambda'$ の概算を行った。IB の $\lambda'$ は極めて大きく、湿気容量性能の不足を補い高い吸湿速度性能を生んでいると考えられる。また、PB は MDF とともに他の木質材料より大きな $\lambda'$ を持ち、その湿気容量性能が比較的高いことから、調湿材料として有効であると考えられる。

Table 3.4. The coefficient of moisture absorption speed(A/2).

Specimens	MDF	HB	OSB	PW(Soft.)	PW(Hard.)	IB	PB	Sold.
A/2	5.05	2.97	2.42	2.89	2.98	9.05	5.55	3.13

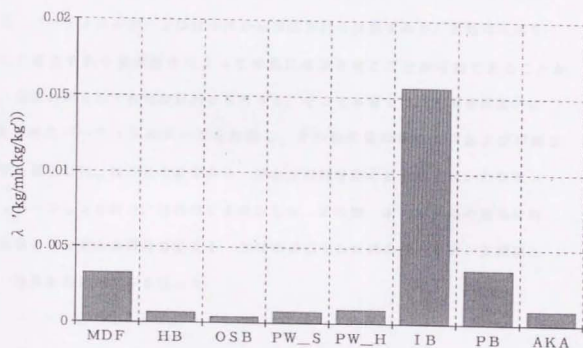


Fig. 3.6. The value of the moisture conductivity( $\lambda'$ ).

#### 4. パーティクルボードの吸放湿性能に及ぼす密度の影響.

##### 4. 1 研究の目的と概要

前章において、各種木質材料の吸湿性能について検討を行ったが、その中で比較的低密度のパーティクルボードが、比重にたいして吸湿性能に優れていることを示した。さて、材料の吸放湿性能を説明する物性値としては、前章で述べた湿気容量値と、湿気伝導率がある、湿気伝導率を高める方法の一つとしては、湿気の通り道となりうる空隙を材料に多数設けることであると考えられる。一方、パーティクルボードは材小片から構成される材料であり、多数の空隙を有し、またそれを低密度化によって容易に増加させることが可能であることから、調湿材料として有効な材料となりうる、そこで本章では、密度を段階的に変化させたパーティクルボードを作製し、その吸湿量の経時変化および平衡含水率を測定した。得られた結果から、熱水分同時移動の基礎式を用いた吸湿シミュレーションを行い、材料の $M'$ を決定した。その際、本来無機系の建築材料を対象とした熱水分同時移動式を、木材に適応するための検討を行い実測値との一致性を高める試みを行った。

##### 4. 2 試験体の製造および実験方法

さて、4. 1で述べたように、パーティクルボードの吸湿性能に影響を与える要因は、大きく分けて、1) パーティクル間の湿気の通り易さ、2) パーティクル内の湿気の通り易さ、3) パーティクルの湿気容量性能の3つに大別できると考えられる。このうち、1) に大きく影響すると思われるボード比重を、0.7付近から0.3付近に変化させた。この時、ボードの湿気容量をほぼ一定として取り扱うために、重量を一定とし、厚さを変えて比重を変化させた。また、

スギの辺材は心材に比べ約2倍の湿気伝導率を持つ(放射、接線方向にて)とされている[13]。そこで、パーティクル原料をスギ心材と辺材の2種類に変化させることにより、2)の影響の検討を試みた。

#### 4. 2. 1 供試材料

##### (1) 原料パーティクル

原料となるパーティクルには、スギの辺材および心材のセミストランド状パーティクル(平均寸法は $10 \times 2 \times 0.5\text{mm}$ )を用いた。心材ボードと辺材ボードの圧縮比(ボード比重/パーティクル比重)を同一とするため、パーティクルの比重が心・辺材間で同一となるように、パーティクル製造時に留意した。

その結果として、原木のスギ間伐材(長さ約100cm、平均直径8.1cm)より、心・辺材とも比重が0.39(含水率14.8%時)のパーティクルを得た。

##### (2) パーティクルボードの製造

ボード目標比重(ボード含水率10%と仮定)と厚さの関係をTable 4.1に示す。

その他の製造条件は以下の通りである。

ボードの寸法 :  $25 \times 30 \times$  ボード厚さ (cm)

接着剤 : 1 液性のMDI系イソシアネート樹脂接着剤(群栄化学工業 : UL-4811)

目標含脂率 : 10% (粘度調整のため、接着剤重量比20%のアセトンを混入)

熱圧温度 :  $160 \pm 5^\circ\text{C}$

圧縮時間 : ボードの種類にかかわらず14分一定。

製板枚数 : 辺心材別、比重別に4枚ずつ、計40枚を製造。

なお、フォーミングは、内寸 $27 \times 32 \times 15\text{cm}$ のフォーミングボックスを用



いて、手まきで行った。熱圧は、平板ホットプレスを用いた一段圧縮方式で行った。

#### 4. パーティクルボードの吸放湿性能に及ぼす密度の影響.

##### 4. 1 研究の目的と概要

前章において、各種木質材料の吸湿性能について検討を行ったが、その中で比較的低密度のパーティクルボードが、密度にたいして吸湿性能に優れていることを示した。さて、材料の吸放湿性能を説明する物性値としては、前章でのべた湿気容量値と、湿気伝導率がある、湿気伝導率を高める方法の一つとしては、湿気の通り道となりうる空隙を材料に多数設けることであると考えられる。一方、パーティクルボードは材小片から構成される材料であり、多数の空隙を有し、またそれを低密度化によって用意に増加させることが可能であることから、調湿材料として有効な材料となりうる、そこで本章では、密度を段階的に変化させたパーティクルボードを作成し、その吸湿量の経時変化および平衡含水率を測定した。得られた結果から、熱水分同時移動の基礎式を用いた吸湿シミュレーションを行い、材料の $\lambda'$ を決定した。その際、従来無機系の建築材料を対象とした熱水分同時移動式を、木材に適用するための検討を行い実測値との一致性を高める試みを行った。

##### 4. 2 試験体の製造および実験方法

さて、4. 1で述べたように、パーティクルボードの吸湿性能に影響を与える要因は、大きく分けて、1) パーティクル間の湿気の通り易さ、2) パーティクル内の湿気の通り易さ、3) パーティクルの湿気容量性能の3つに大別できると考えられる。このうち、1) に大きく影響すると思われるボード密度を、0.7付近から0.3付近に変化させた。この時、ボードの湿気容量をほぼ一定として取り扱うために、重量を一定とし、厚さを変えて密度を変化させた。また、

スギの辺材は心材に比べ約2倍の湿気伝導性能をもつ（放射・接線方向にて）とされている<sup>72)</sup>。そこで、パーティクル原料をスギ心材と辺材の2種類として、パーティクル内の湿気の通り易さ、すなわち2)を変化させた。

#### 4. 2. 1 供試材料

##### (1) 原料パーティクル

原料となるパーティクルには、スギの辺材および心材のセミストランド状パーティクル（平均寸法は  $10 \times 2 \times 0.5\text{mm}$ ）を用いた。心材ボードと辺材ボードの圧縮比（ボード密度/パーティクル密度）を同一とするため、パーティクルの密度が心・辺材間で同一となるように、パーティクル製造時に留意した。

その結果として、原木のスギ間伐材（長さ約100cm、平均直径8.1cm）より、心・辺材とも密度が0.39（含水率14.8%時）のパーティクルを得た。

##### (2) パーティクルボードの製造

ボード目標密度（ボード含水率10%と仮定）と厚さの関係をTable 4.1に示す。

その他の製造条件は以下の通りである。

ボードの寸法 :  $25 \times 30 \times$  ボード厚さ (cm)

接着剤 : 1 液性のMDI系イソシアネート樹脂接着剤（群栄化学工業：UL-4811）

目標含水率 : 10%（粘度調整のため、接着剤重量比20%のアセトンを混入）

熱圧温度 :  $160 \pm 5^\circ\text{C}$

圧縮時間 : ボードの種類にかかわらず14分一定。

製板枚数 : 辺心材別、密度別に4枚ずつ、計40枚を製造。

なお、フォーミングは、内寸  $27 \times 32 \times 15\text{cm}$  のフォーミングボックスを用

いて、手まきで行った。熱圧は、平板ホットプレスを用いた一段圧縮方式で行った。一段圧縮法とは、コールドプレートがディスタンスバーに接触するまで加圧を行い、接触後はそれ以上の加圧および減圧操作を行わない方法である。また、パーティクルに接着剤をスプレーする時は、2枚分を一度に行った。そして得られた2枚の同含脂率と見なせるボードのうち、1枚を吸湿量の測定実験に、もう1枚を平衡含水率の測定実験に用いた。

さて、一般に木材の吸放湿現象にはヒステリシスがみられる<sup>7,8)</sup>。本実験では吸湿性能に対するヒステリシスの影響を排除するために、製板以降のボードは、実験時まで吸湿のみを受けるように注意して取り扱った。

#### 4. 2. 2 吸湿量の測定

吸湿量の測定は、試験体の周囲雰囲気温湿度を急激に変化（21℃, 43.3% RH → 21℃, 62% RH）させ、そのときの試験体重量の増加を経時的に計測することにより行った。

##### （1）パーティクルボードの吸湿量の測定

試験体の概要を Fig.4.1 に示す。

吸湿を側面以外の2面に限定し、しかも材内の湿流、熱流を厚さ方向に限定するため、4周をアルミテープと2.5cm厚の発泡ポリスチレンで断湿・断熱した。試験体の吸湿面積は0.15m<sup>2</sup>となった。試験体を各密度・原料条件ごとに2枚ずつ製作し、飽和塩水溶液（K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>）を用いた調湿槽（21℃ 43.3% RH）内で充分に調湿した。

恒温恒湿室（21℃ 62% RH）内に、Fig.4.2に示す実験装置を設置した。なお、試験体の吸湿面に対し平行に0.1から0.2 m/secの送風を行い、吸湿面に

Table 4.1. Board density and thickness.

Target density (g/cm <sup>3</sup> )	Board thickness (cm)
0.3	2.3
0.4	1.8
0.5	1.4
0.6	1.2
0.7	1.0

接する境界層の熱および湿流伝達条件をほぼ一定とするように努めた。また送風による試験体の微振動がみられたため、重量データーは1分間に100個とり、その平均値を用いた。なお、温湿度および重量の測定は5分間隔で行った。

## (2) パーティクルの吸湿量の測定

ボードを構成するパーティクル自身の吸湿性能に心・辺材間でどの程度差異があるかを、パーティクルの吸湿量を測定することによって検討した。厚さ5mmのアクリル板により、上面が開放された寸法25×30×4cmの箱を作製し、この中にボード製造に使用した半分の重量のパーティクルを入れた。この状態では、パーティクル間の接触性が非常に低い状態にあると考えられる。ゆえに、この試験体の吸湿性能を、パーティクル自体の吸湿性能として考えることは妥当であろう。そこで、この試験体の吸湿量をボード試験体と同様の条件で測定した。

### 4. 2. 3 平衡含水率の測定

パーティクルボードの湿気容量性能を評価するため、ボードおよび原料パーティクルの33%RH付近から85%RH付近までの吸湿過程の平衡含水率曲線を、20℃と25℃で求めた。方法は3. 2. 2に準じているが、今回異なる点を以下に示す。

測定は密度0.3と0.7の心・辺材ボードおよび心・辺材原料パーティクルに対して行った。平衡に達するまでの期間を短縮するため、試験体の形状を小片状にした。ただし、原料パーティクルはそのままの形で用いた。これらの試験体を0.5mmメッシュのステンレス製のカップ(直径6.5cm、深さ4.5cm)に採取を、ボード製造時と同様に手まきによって箱内に堆積した。この状態のパーテ

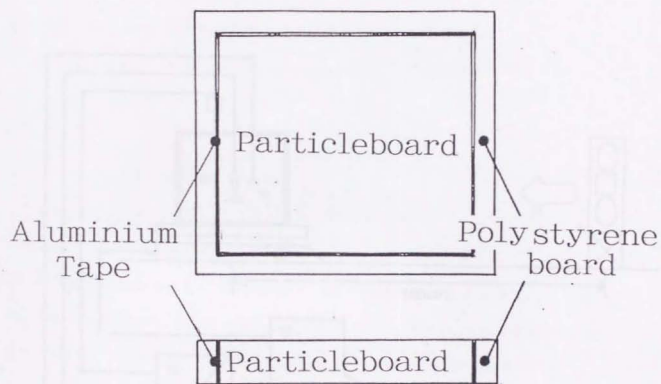


Fig.4.1. Specimens.



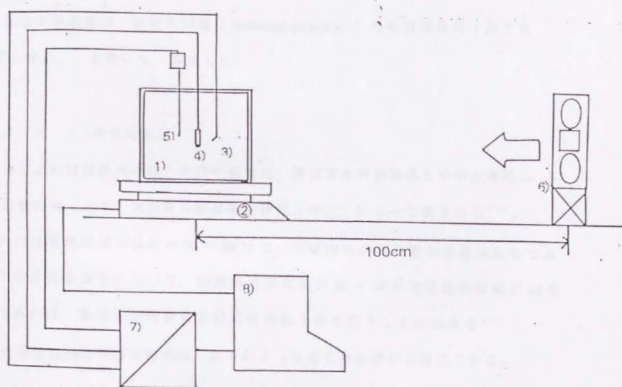


Fig.4.2. Schematic diagrams of Measurement of absorption.

- Legend: 1)Specimen, 2)Electric balance,  
3)Thermo-cuples, 4)Humidity sensor,  
5)velocity meter, 6)Fan, 7)Recorder,  
8)Computer.

し、飽和塩水溶液の入った角形デシケーター（15×20×15cm）内に放置した。これらのデシケーターを恒温恒湿器（いすず製作所：いすず水晶卓上型恒温恒湿器 μ-2001）内で一定の温度条件下に置いた。予備実験の結果、試験体は約10日で充分平衡状態になることがわかったので、調湿期間を10日とした。なお平衡含水率を有効数字3桁で得るために試験体は10g程度とし、重量測定には0.1mg精度の直示天秤（島津製作所 LS-6）を用いた。

平衡含水率曲線は、前章と同様に Hailwood-Horrobin<sup>4,5)</sup>の吸着等温式（以下 H-H式と呼ぶ。）を用いて、算出した。

#### 4. 2. 4 λ'の決定方法

松本によれば材料内の熱と水分の移動は、非定常水分移動式とそれと連結した熱移動の式（以下、熱湿気同時移動方程式と呼ぶ）によって表される<sup>5,6)</sup>。

材料内部空隙の相対湿度が30～80%で、空隙内水分の移動が水蒸気拡散であるとみなされる場合において、相対湿度変化幅が20～30%で温度変化幅が10℃程度であれば、熱湿気同時移動方程式は線形で取り扱うことが出来る<sup>5,6)</sup>。

線形熱湿気同時移動方程式は、以下のような連立の偏微分方程式である。

$$(C' + \gamma' + \kappa) \frac{\partial X}{\partial t} = \lambda' \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$(C_\theta + \gamma + r\nu) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \gamma \kappa \frac{\partial X}{\partial t} \quad (4.2)$$

C' : 空隙率

γ' : 空気密度

X : 重量絶対湿度

θ : 温度

C<sub>θ</sub> : 比熱

λ : 熱伝導率

γ : 材料の密度

r : 吸着熱

kg/m<sup>3</sup>

kg/kg 以下 kg/kg' と示す。

℃

kcal/kg ℃

kcal/mh ℃

kg/m<sup>3</sup>

kcal/kgH<sub>2</sub>O

x : 位置座標  
t : 時間座標

m  
h

同式中で、材料の吸放湿性能に大きく影響するパラメーターとしては、湿気伝導率 $\lambda'$  ( $\text{kg}/\text{mh}(\text{kg}/\text{kg} \text{ dry air})$ )、絶対湿度変化に対する含湿率変化量 $\kappa$  ( $\text{kg}/\text{m}^3(\text{kg}/\text{kg} \text{ dry air})$ ) および温度変化に対する含湿率変化量 $\nu$  ( $\text{kg}/\text{m}^3^\circ\text{C}$ ) の3つがある。 $\lambda'$ は前述のように、材料の湿気の通り易さを表す。また、 $\kappa$ 、 $\nu$ は材料の湿気容量性能を説明するものである。すなわち、これらを明らかにすることにより、ボードの吸湿性能の検討が可能と言える。

そこで、 $\kappa$  および  $\nu$  を H-H 式より算出した。また  $\lambda'$  は、熱湿気同時移動方程式を用いたコンピューターシミュレーションによって決定した。

シミュレーションの手法は差分法によった。詳細は付録 A に示す。

さて、試験体の  $\lambda'$  の決定には、以下のような方法を用いた。

- 1) 文献などから予測される  $\lambda'$  を用いて、吸湿量の測定実験のシミュレーションを行う。
- 2) 得られた  $W_b$  と実測値の自乗平方和 (Mean Squared Deviation: MSD) を算出する。
- 3) 最も小さい MSD が得られるまで、 $\lambda'$  を変えてシミュレーションを繰り返す。

なお、 $\lambda'$  を有効数字 2 桁で得るために、 $\lambda'$  は  $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-8}$  刻みで変化させた。また、試験体の周囲温湿度条件としては、吸湿量の測定実験時の実測値を用いた。

熱湿気同時移動方程式の差分解は、FORTRAN 77 のプログラムによって、若手大学情報処理センターの大型コンピューター (日立製作所:M-260K) で求めた。また、得られた材内の温湿度分布から吸湿量を算出するプログラム



#### 4. 3 結果と考察

吸湿量の測定は心辺材別、比重別に2～3個の試験体を用い、各試験体につき1回ずつおこなった。得られた結果のうち、周囲雰囲気温湿度平均値が近いものを各試験体条件につき1体ずつ選び、考察に使用した。使用した試験体の概要をTable 4.2に、実験時の周囲雰囲気温湿度平均値をTable 4.3に示す。

なお以後、試験体をTable 4.2に示した記号で表記する。また同比重の心・辺材使用ボードを総称して、例えば“03ボード”と呼ぶ。同様に、心材使用、辺材使用ボードを比重によらず総称して、“心材ボード”、“辺材ボード”と呼ぶ。

##### 4. 3. 1 供試材料の平衡含水率

平衡含水率の測定値とH-H式の曲線をFig.4.3に示す。また、平衡含水率の測定値をTable 4.4に、H-H式の平衡定数 $\alpha$ ,  $\beta$ および定数MをTable 4.5に示す。

吸湿実験の周囲雰囲気温度が平均して21℃前後であったため、21℃の平衡含水率曲線を20℃と25℃の曲線から直線補間で求めた。得られた数値をTable 4.5内に示す。なお、以下の考察は21℃の曲線を用いて行った。

ボード化による平衡含水率の低下はFig.4.3より明かである。また07ボードは03ボードより低い値を示している。これは07ボードが薄く、また比重が高いため熱伝導率が高く、熱圧時の熱の影響が大きかったためと考えられる。ボード化による平衡含水率の低下割合を調べるために、相対湿度43,53および62%のパーティクルの平衡含水率に対するボードの平衡含水率の比をとり、Table 4.6に示した。07ボードは03ボードの0.03～0.06低い値をもち、心材ボードは辺材ボードに比べ0.05～0.07低い値をとる。すなわち07SWのボードは最も大きな含水率低下をうけていると言える。

さて、相対湿度が単位変化したときの最大吸放湿量を示す平衡含水率曲線の

Table 4.2. Density, Thickness and Resin content.

Specimens	Symbols	Density g/cm <sup>3</sup>	Thickness cm	Resin content %
Sap wood	03SW	0.290	2.24	9.6
	04SW	0.367	1.74	11.0
	05SW	0.486	1.34	9.4
	06SW	0.586	1.14	10.3
	07SW	0.659	0.964	11.2
Hert wood	03HW	0.297	2.26	10.8
	04HW	0.379	1.75	10.4
	05HW	0.475	1.36	10.4
	06HW	0.561	1.17	9.9
	07HW	0.658	0.978	9.8

Note: Each value was at 20° C 43% RH.

Table 4.3. Temperature and RH of air.

Symbols	Temp.( ° C)	RH(%)
03SW	20.9	61.6
04SW	21.2	66.6
05SW	20.8	60.9
06SW	20.8	60.3
07SW	21.0	61.3
PSW	21.2	62.2
03HW	20.8	62.2
04HW	21.0	61.9
05HW	21.1	61.9
06HW	21.1	62.1
07HW	21.1	62.3
PHW	21.4	62.3

Legend: PSW:Sapwood particle,  
PHW:Heartwood particle.



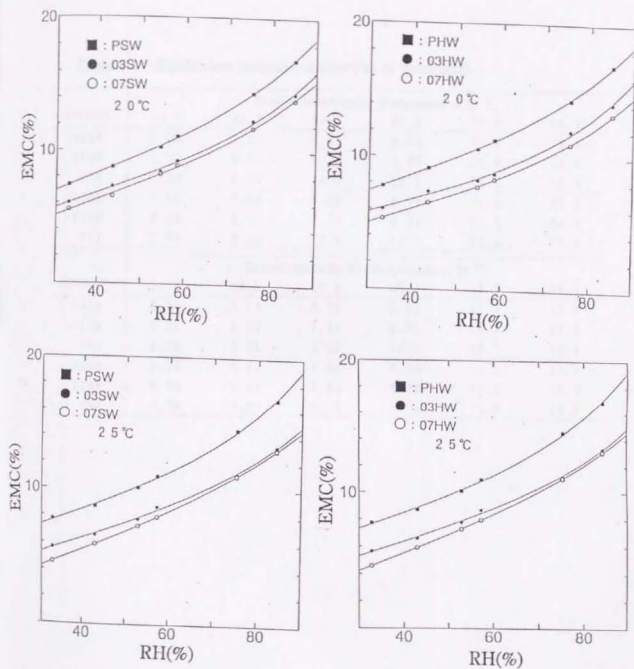


Fig.4.3. Equilibrium moisture contents and Hailwood Horrobin's equation curves.

\*PHW was particle cip(Heartwood), \*PSW was particle cip(Sapwood).

Table 4.4. Equilibrium moisture content(%) of specimens.

Symbols	Relative humidity(%) :Temperature = 20 °C					
	33.1	43.3	54.4	58.2	75.5	85.1
03SW	6.00	7.27	8.41	9.25	12.4	14.4
07SW	5.51	6.53	8.22	8.90	11.8	14.0
PSW	7.37	8.75	10.3	11.1	14.4	16.9
03HW	6.00	7.36	8.26	8.75	12.1	14.2
07HW	5.28	6.52	7.74	8.34	11.1	13.4
PHW	7.76	9.14	10.6	11.3	14.4	17.0

Symbols	Relative humidity(%) :Temperature = 25 °C					
	32.8	43.0	52.9	57.3	75.3	84.3
03SW	5.71	6.64	8.09	8.88	11.9	13.9
07SW	5.16	6.33	7.58	8.21	11.2	13.6
PSW	6.71	7.88	9.35	10.2	13.7	16.6
03HW	5.56	6.62	7.80	8.69	11.2	13.3
07HW	4.59	5.93	7.31	7.98	11.1	13.1
PHW	7.74	8.72	10.1	11.1	14.5	16.3

Table 4.5. Fitted constants and equilibrium constants of Hailwood-Horrobin's equation.

Temp. (°C)	Symbols	Equilibrium constants		
		$\alpha (\times 10^{-3})$	$\beta$	Constants M
20	03SW	7.013	8.149	286.4
	07SW	6.674	4.742	263.3
	PSW	6.792	8.898	234.2
	03HW	7.420	15.16	329.2
	07HW	6.975	6.514	305.0
	PHW	6.706	11.80	233.7
25	03SW	7.006	8.472	365.7
	07SW	7.225	5.999	312.8
	PSW	7.513	10.17	281.2
	03HW	6.933	7.994	302.0
	07HW	6.226	2.395	229.5
	PHW	7.292	18.59	266.0

Table 4.6. The EMC ratio of the particleboards to raw particles(EMC/EMCp) and the EMC changes(dEMC) when RH changed from 43% to 62%.

Symbols	RH (%)	EMC/EMCp				dEMC	dEMC/dEMCp
		43	53	62	Avg.		
03SW	0.83	0.84	0.84	0.84	0.84	2.563	0.87
07SW	0.77	0.79	0.81	0.79	0.79	2.634	0.90
PSW	-	-	-	-	-	2.932	-
03HW	0.77	0.78	0.79	0.78	0.78	2.336	0.83
07HW	0.70	0.73	0.75	0.72	0.72	2.497	0.89
PHW	-	-	-	-	-	2.798	-

接線勾配を、供試材料の H-H 式から算出した。得られた接線勾配と相対湿度の関係を図 4.4 に示す。また相対湿度 43.53 および 62 % のを Table 4.5 内に示した。相対湿度 43 ~ 62 % の領域では接線勾配は相対湿度と共に増加する。ボード化によって接線勾配も平衡含水率と同様に低下しているが、0.7 ボードは 0.3 ボードより高い値を示すことが判った。これは、平衡含水率の値の大小と逆の傾向を示している。すなわち、吸放湿材料として見た場合、0.7 ボードは 0.3 ボードに比べ平衡含水率の絶対値は低下するものの、湿気容量的な性能においてはむしろ優れている可能性を示している。なお、同密度で原料材料間を比較した場合では、辺材ボードは心材ボードに比べ、高い値を示した。これは、平衡含水率の値の大小と同様の傾向である。



Fig. 4.4. Relationship between relative humidity and the slope of the tangent to the EMC curve.

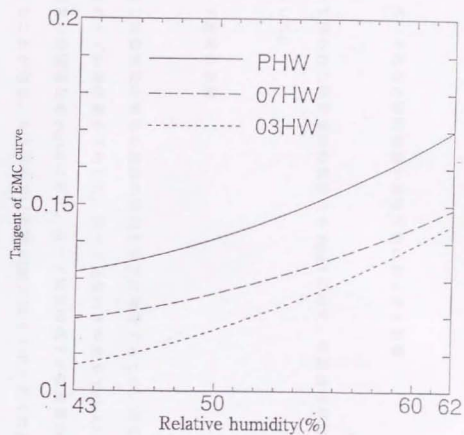
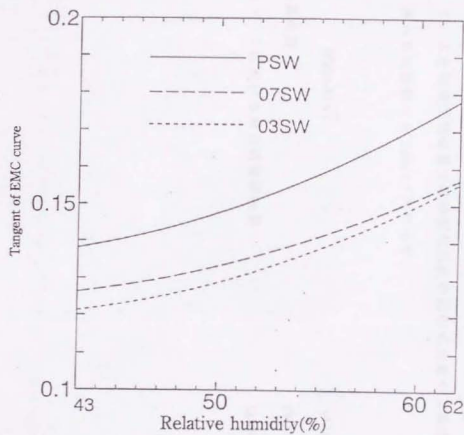


Fig.4.4. Relationship between relative humidity and the slope of the tangent to the EMC curve.

#### 4. 3. 2 ボード比重と原料種類が吸湿性能におよぼす影響

実験によって得られた吸湿量の時間変化を Fig.4.5 に示す。吸湿量は単位面積当りの値で示した。

##### (1) ボード比重の影響

ボード比重と吸湿性能の関係を原料の区別をせずに考察するため、同比重条件の心・辺材ボードの吸湿量を平均した。ボード比重の平均値を Table 4.7 に示す。また吸湿量の時間変化を Fig.4.6 に示す。ボード比重の低下が吸湿量の増大に寄与していることが判る。0.3 ボード（比重 0.294）は 0.7 ボード（比重 0.656）の約 2.3 倍の吸湿を示した。

さて、3. 3. 3 と同様に吸湿量の経時変化に次の近似式を最小二乗法により当てはめ、得られた係数 A を Table 4.7 内に示す。

$$W(t) = Ax\sqrt{t} \quad (4.1)$$

t : 経過時間 (hr)

W (t) : t における単位面積吸湿量 (g/cm<sup>2</sup>)

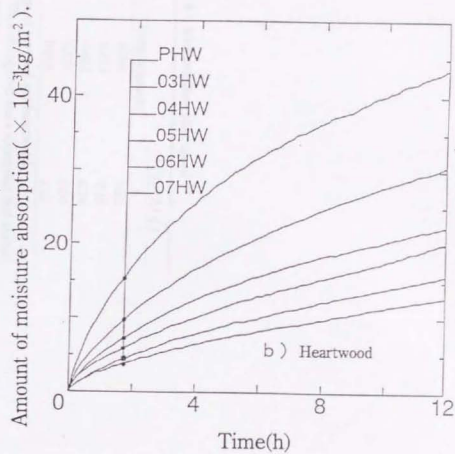
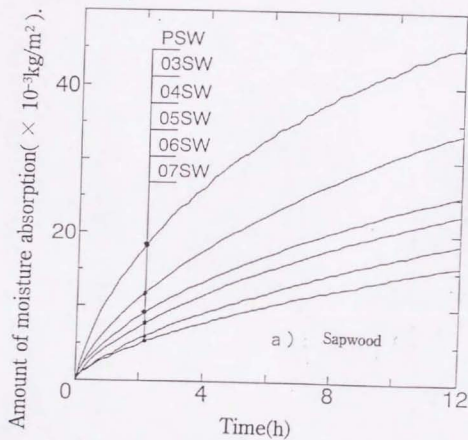


Fig.4.5. Changes of the amount of moisture absorption.



Table 4.7. Moisture absorption speed <sup>1)</sup>

Symbols	Density(g/cm <sup>3</sup> )	$W(t) = A \times \sqrt{t}$
		A
03AVG	0.294	10.2
04AVG	0.373	7.49
05AVG	0.480	6.74
06AVG	0.574	5.54
07AVG	0.659	4.52

<sup>1)</sup> Average of sapwood and heartwood.

Legend: t: Time of required since absorption test started.

W(t): Amount of moisture absorption at t.

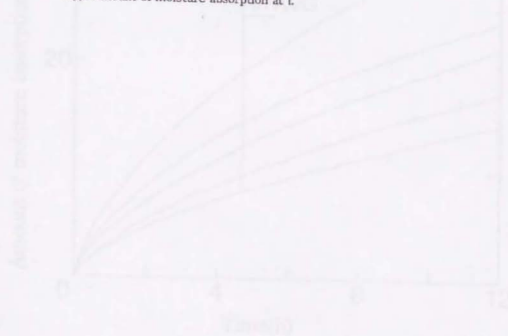


Figure 4. Changes of the amount of moisture absorption.

Note: Amount of moisture absorption was average of sapwood and heartwood.

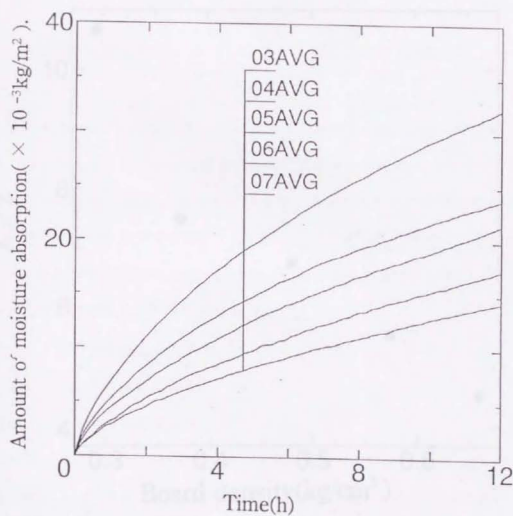


Fig.4.6. Changes of the amount of moisture absorption.

Note: Amount of moisture absorption was average of sapwood and heartwood.

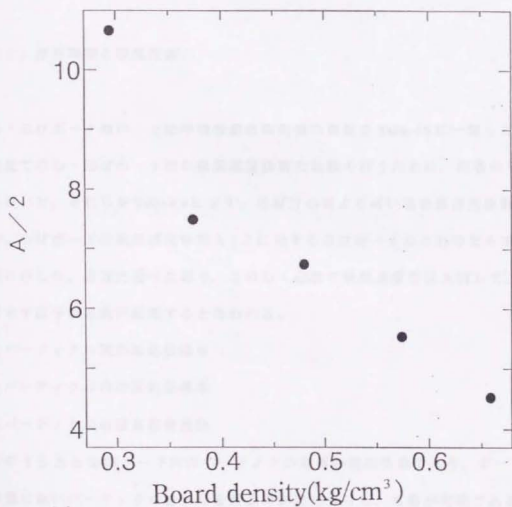


Fig.4.7. Relationship between board density and coefficient of moisture absorption rate(A/2).

また、吸湿速度係数  $A/2$  とボード密度の関係を Fig.4.7 に示す。Fig.4.7 から明らかなように、吸湿速度係数は密度の増加とともに減少する。0.3 ボードは 0.7 ボードにくらべ 2.3 倍の吸湿速度係数を持つことがわかる。吸湿速度係数は 0.4 ボード（密度 0.373）のものを除くと、密度に対してほぼ直線の負の相関が見られる。0.4 ボードでは、Table 4.2 および Table 4.3 から判るように含脂率が若干高いこと、湿度変化幅が他に比べて若干小さいことにより、吸湿速度係数が小さな値をとっていると考えられる。

## （2）原料種類と吸湿性能

心・辺材ボード別の、上記の吸湿量近似曲線の係数を Table 4.8 に一覧した。同密度での心・辺材ボード間の吸湿速度係数の比較を行うために、両者の平均値を用いた。それらを Table 4.9 に示す。辺材は心材より高い吸放湿速度係数をもつ。心材ボードの吸湿速度係数  $A/2$  に対する辺材ボードのその比を求め、同表に示した。緒言に述べた通り、この心・辺材の吸湿速度差は大別して、以下に示す因子の差異に起因すると思われる。

- 1) パーティクル間の湿気伝導率
- 2) パーティクル内の湿気伝導率
- 3) パーティクルの湿気容量性能

このうち 2) と 3) はボード内のパーティクル自体の吸湿性能であり、ボードの状態に無いパーティクル自体の吸湿量の測定によって、考察が可能である。

さて、II. 2. (2) で示したアクリル箱内に堆積した状態のパーティクルは、パーティクル間の接触性が非常に低い状態にある。そのため、この状態で

Table 4.8. The coefficient of moisture absorption rate(A/2).

Symbols	A	A/2
03SW	10.8	5.38
04SW	7.96	3.98
05SW	7.28	3.64
06SW	6.05	3.02
07SW	5.03	2.52
PSW	14.2	7.09
03HW	9.58	4.79
04HW	7.02	3.50
05HW	6.20	3.10
06HW	5.03	2.51
07HW	4.02	2.01
PHW	13.4	6.70

Table 4.9. Interpolation of A/2 and ratio of sapwood to heartwood.

Density(g/cm <sup>3</sup> )	Interpolation of A/2		Sapwood/Heartwood
	Sapwood	Heartwood	
0.294	10.6	9.67	1.10
0.373	7.92	7.21	1.10
0.480	7.31	6.13	1.20
0.574	6.19	4.90	1.26
0.659	5.04	4.12	1.26

の吸湿速度はパーティクル自体の吸湿速度に近いと見なせるであろう。そこでこの場合の吸湿速度の心・辺材間の比較を行った。辺材パーティクルの吸湿速度係数は、心材に比べて6%ほど高い値を示している。さらに上記の2)と3)を分離して考えるために、以下の様な考察を行った。まず、式(3.10)において、

$$z = \frac{\pi}{4\Delta X_0^2} \text{ とおくと } \lambda' \kappa = z A^2 \text{ となる。ここで、 } z \text{ は吸湿量測定時の絶対湿}$$

度変化幅に依って決まる定数であり、本実験の場合ほぼ一定と見なせる。そこで心・辺材間での  $\lambda'$ 、 $\kappa$ 、 $A^2$  の比を取った。辺材の  $A$  を  $A_{SW}$ 、 $\kappa$  を  $\kappa_{SW}$ 、

$\lambda'$  を  $\lambda'_{SW}$  とおき、辺材のそれらを同様に  $A_{HW}$ 、 $\kappa_{HW}$ 、 $\lambda'_{HW}$  とおくと、それらの比は以下になる。

$$\frac{\lambda'_{SW}}{\lambda'_{HW}} = \frac{\kappa_{HW}}{\kappa_{SW}} \cdot \frac{A_{SW}^2}{A_{HW}^2} \quad (4.3)$$

0.3と0.7ボードおよびパーティクルについて、心材に対する辺材の  $A^2$ 、 $\kappa$  の比を取り、 $\lambda'$  の比を算出した。それらを Table 4.10 に示す。なお  $\kappa$  の値は吸湿実験の湿度変化の中央値 53% RH の値を用いた。

パーティクルにおける辺材の  $\lambda'$  は心材より5%高い値を示した。一方、0.7ボードにおいては辺材は心材より50%高い  $\lambda'$  を示している。パーティクルボード単体時には、ほとんど差が発生しなかったパーティクル自身の  $\lambda'$  の心・辺材間の差が、ボード化によってどの様にボードの  $\lambda'$  に影響を与えるかは不明である。が、ボードの  $\lambda'$  が前述の1)と2)から発現されることから、両者を分離するような検討方法により、パーティクル自体の  $\lambda'$  の寄与が明らかとなるであろう。その場合、試験体の透気性測定などによりボード内のパーティクル間の空隙構造の検討を行うことが有効であろうと思われる。

Table 4.10. Comparison of the absorption ability of Sapwood board with Heartwood.

Target Density k/cm <sup>3</sup>	Sapwood/Heartwood		
	A/2	$\kappa$ (kg/m <sup>3</sup> (kg/kg))	$\lambda'$ (kg/mh(kg/kg))
0.3	1.26	1.09	1.16
0.7	1.57	1.05	1.49
Particle	1.12	1.05	1.07



#### 4. 3. 3 吸湿挙動のシミュレーション

##### (1) 基礎式中のパラメーター決定

21℃における $\kappa$ および $\nu$ と相対湿度との関係を Fig.4.8 および Fig.4.9 に示す。 $\kappa$ ,  $\nu$ は相対湿度に対し二次曲線的变化をしている。これよりシミュレーションにおいて $\kappa$ ,  $\nu$ を材内の水分分布に応じて変化させる必要性が考えられる。 $\kappa$ ,  $\nu$ を変動させると、厳密には $\kappa$ ,  $\nu$ を一定と見なした線形熱水分同時移動の基礎式の使用ができなくなり、非線形計算が必要となる。しかしながら、非線形計算は複雑で計算時間が長くなる恐れがある。松尾ら<sup>5,3)</sup>は $\kappa$ ,  $\nu$ を一つ前のステップの湿湿度を用いて逐次更新し、これを用いて線形同時式を解く方法<sup>14)</sup>を示した。本研究においても、同様な方法を用いて $\kappa$ ,  $\nu$ を変化させた。なお、0.4～0.6 ボードの $\kappa$ ,  $\nu$ については、0.3 および 0.7 ボードの値から内挿した値を用いた。

また、シミュレーションに用いるその他の熱湿気物性値を Table 4.11, Table 4.12 の様に設定した。Table 4.11 は本実験では条件に関わらず一定と見なせるもの、また Table 4.12 は条件によって変化するものを示す。また、個々の熱湿気特性値の設定時に考慮した事象について以下に示す。

空隙率 $C'$ および空気比熱 $C_a$  (kcal/kg $^{\circ}$ C) : これらの物性値が関与する変数 $a$ および $b$ では、 $\kappa$ は2000～5000と非常に大きな数値であるが、 $C'$ の値は1.2、であり $C_a$ は1である。このことから $a$ および $b$ に関しては、 $C'$ および $C_a$ は無視してもかまわないと判断した。

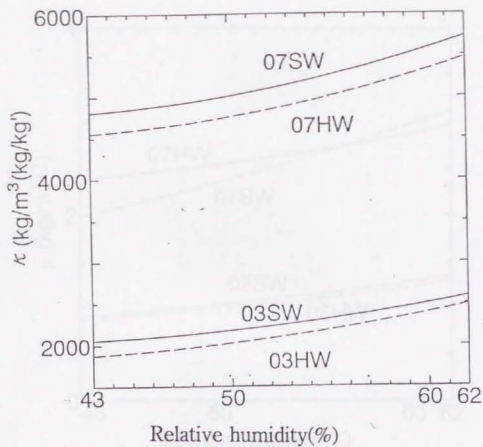


Fig.4.8. Relationships between  $\kappa$  and relative humidity.

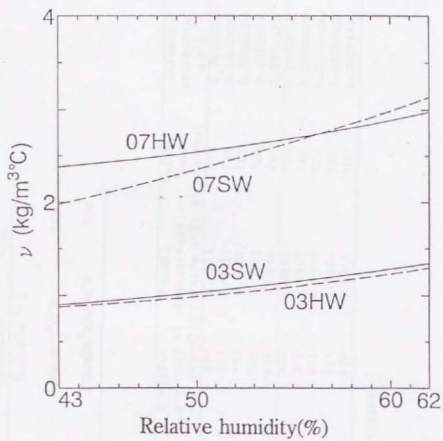


Fig.4.9. Relationships between  $\nu$  and relative humidity.

Table 4.11. The symbols used in simulation models, and their Values.

a)						
Physical property	symbol(unit)	value				
Specific heat	$C_s(\text{kcal/kg } ^\circ\text{C})$	0.30				
Coefficient of heat transfer	$\alpha(\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C})$	14.9				
Coefficient of moisture transfer	$a'(\text{kcal/m}^2\text{h}(\text{kg/kg}'))$	3.64				

b)						
Symbols	Thickness $l(\text{m})$	Specific gravity $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	Thermal conductivity $\lambda$ ( $\text{kcal/m h}^\circ\text{C}$ )	Latent heat $\gamma'$ ( $\text{kcal/kg}$ )	distance increment $\Delta x(\text{m})$	Number of division M
03SW	0.00112	290	0.0514	710	0.0000509	22
04SW	0.000870	367	0.0594	710	0.0000483	18
05SW	0.000670	485	0.0721	720	0.0000479	14
06SW	0.000570	586	0.0832	720	0.0000475	12
07SW	0.000482	659	0.0916	720	0.0000482	10
03HW	0.00113	297	0.0521	730	0.0000514	22
04HW	0.000875	379	0.0606	740	0.0000486	18
05HW	0.000680	475	0.0710	750	0.0000486	14
06HW	0.000585	561	0.0803	750	0.0000488	12
07HW	0.000489	658	0.0913	760	0.0000489	10

\*1: measurement at 21°C43%RH

熱伝導率  $\lambda$  (kcal/m h °C) : 信田<sup>\*)</sup>はラウンパーティクルを用いたパー  
ティクルボードにおいて、ボード比重  $r$  と熱伝導率  $\lambda$  の関係を検討しボード含  
水率 0% と 10% において、次式の関係を得ている。

含水率 0% では

$$\lambda = 0.346 (0.242 \cdot r + 0.022) + 0.645 \frac{0.022}{-0.623 \cdot P + 1} \quad (4.4)$$

含水率 10% では

$$\lambda = 0.346 (0.267 \cdot r + 0.022) + 0.645 \frac{0.022}{-0.653 \cdot P + 1} \quad (4.5)$$

本実験ではパーティクル原料にスギを用いており、この値を用いるには厳  
密に言えば問題があるが、仮値として採用することにした。平衡含水率曲線か  
ら求めたある相対湿度の平衡含水率に対応する  $\lambda$  を、式 (3-5) と式 (3-6)  
から直線補間で算出した。そして、最も  $\lambda$  の影響が大きいと思われる 0.7 ボー  
ドについて、 $\lambda$  を仮値から 20% 程上下に変動させて計算させた結果の  $W, B$   
を仮値での値と比較したところ、最大 0.8% 程度の変化しか見られなかった。  
そこで、 $\lambda$  が結果に与える影響は小さいと見なし、計算には仮値で充分である  
と判断した。

比熱  $C$  (kcal/kg °C) : 比熱は樹種、比重による変化はほとんど無いとされ  
ている。木材において温度と比熱の関係は

$$C = 0.266 + 0.00116 t \quad (4.6)$$

で与えられる<sup>\*)</sup>。

また含水率と比熱の関係は

$$C_u = \frac{u}{u+1} C_w + \left(1 - \frac{u}{u+1}\right) C_o \quad (4.7)$$

$C_u$  : 含水率  $u$  における比熱

$C_w$  : 水の比熱

$C_o$  : 乾燥木材の比熱

で与えられる<sup>70)</sup>。パーティクルボードに使用したイソシアネート樹脂は、硬化後は水分に対して安定であるので、これによる影響は無いと考えると比熱の問題は木材と同様に考えることが可能である。吸湿による比熱の変動に関しては、予備実験の結果、この本実験の含水率変化の範囲では、シミュレーションの結果にほとんど影響を与えなかった（吸湿量にして最大 0.2%）ので、吸湿開始時の値で一定とした。

吸着熱  $r$  (kcal/kg) : ここで吸着熱と呼ばれているのは、微分吸着熱と水の凝縮熱の合計である。微分吸着熱  $\Delta Q$  (cal/g<sub>干燥</sub>) は吸着等量線を用いて Clausius-Clapeyron による次式によって算出できる。<sup>79)</sup>

$$\Delta Q = 0.254 \frac{\theta'_1 \theta'_2 \log(\phi_2 / \phi_1)}{\theta'_2 - \theta'_1} \quad (4.8)$$

$\theta'_1, \theta'_2$  : 吸着等量線であまり隔たっていない 2 点の絶対温度 K

$\phi_1, \phi_2$  :  $T_1, T_2$  に対応する相対湿度 %

本実験では、水の凝縮熱を 590kcal/g(20℃時)とした。また、吸着熱が吸湿によって変化した場合のシミュレーションへの影響が考えられるため、吸着熱を変化させてシミュレーションを繰り返したところ、吸湿開始時の吸着熱の値を用いた結果が最も MSD が小さかった。そこで吸着開始時の値を用いることにした。

湿気伝達率  $\alpha'$  ( $\text{kg/m}^2 \text{ h(kg/kg)}$ ) および熱伝達率  $\alpha$  ( $\text{kcal/m}^2 \text{ h}^\circ \text{C}$ ) :  $\alpha'$  と  $\alpha$  の間にはルイス関係と呼ばれる次の関係がある<sup>7.1)</sup>。

$$\frac{\alpha}{\alpha' \cdot C_a} = 1 \quad (4.9)$$

$C_a$  = 空気の定圧比熱 ( $20^\circ \text{C}$  :  $0.24 \text{kcal/g}$ )

また風速  $0.0, 0.5 \text{m/sec}$  時の湿気伝達率は、それぞれ  $14, 17 \text{kg/m}^2 (\text{kg/kg})$  である<sup>7.2)</sup>。吸湿量測定時における温湿度計測位置の風速は  $0.1 \sim 0.2 \text{m/sec}$  程度であったため、平均値として  $0.15 \text{m/sec}$  の場合における湿気伝達率を直線補間により求めた。またその値から式 (4.9) を用いて熱伝達率を決定した。

## (2) $\lambda'$ の決定

得られた  $\lambda'$  と MSD を Table 4.13 に示す。比重の低下によって  $\lambda'$  は増加している。0.7 ボードに対する 0.3 ボードの  $\lambda'$  の比は、辺材ボードで 15.9 倍、心材ボードで 23.3 倍の値を示した。また心材ボードに対する辺材ボードの  $\lambda'$  の比は、0.3 ボードで 1.28、0.7 ボードで 1.89 であった。III. 2. (2) において、近似式から導いたそれらの比は、0.3 ボードで 1.16、0.7 ボードで 1.49 であった。若干、過小評価であるが、近似式により算出した比はほぼ妥当であったと言える。

そこで、シミュレーションで得られた  $\lambda'$  を用いて、 $\sqrt{\lambda' \cdot \kappa}$  と  $A/2$  の関係を求め、Fig. 4.10 に示した。 $\kappa$  の値には  $21^\circ \text{C} 53\% \text{RH}$  のものを用いた。両者は、ほぼ直線関係にあることが判る。これは本実験において、式 (3-3) による近似が妥当であることを示唆している。すなわち試験体の吸湿速度は  $\lambda'$  と  $\kappa$  で説明が可能である。Fig. 4.11 に見られるように、比重の減少に対し  $\lambda'$  は増加、 $\kappa$  は減少傾向といった逆の変化を示す。 $\kappa$  は、0.7 ボードから 0.3 ボードへの低比重化で、56 ~ 57 % 減少する。しかしながら、 $\lambda'$  は比重に対し指数関数



Table 4.13. Value of  $\lambda'$  and MSD.

Symbols	$\lambda'$ ( $\times 10^{-3}$ kg/mh(kg/kg'))	MSD
03SW	5.5	0.08
04SW	2.3	0.29
05SW	1.3	0.47
06SW	0.58	0.86
07SW	0.35	0.94
03HW	3.8	0.71
04HW	1.6	1.45
05HW	0.8	0.39
06HW	0.43	0.56
07HW	0.23	1.21

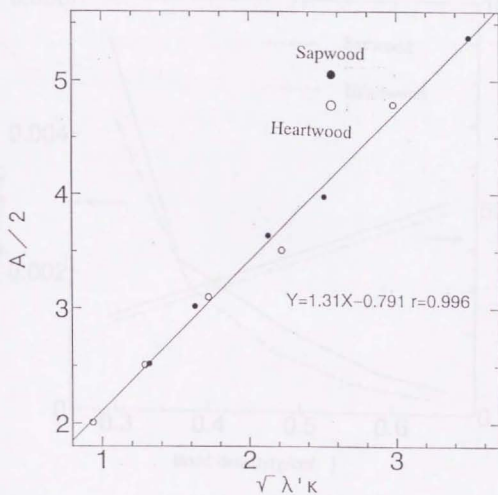


Fig.4.10. Relationships between  $\sqrt{\kappa \cdot \lambda'}$  and  $A/2$ .

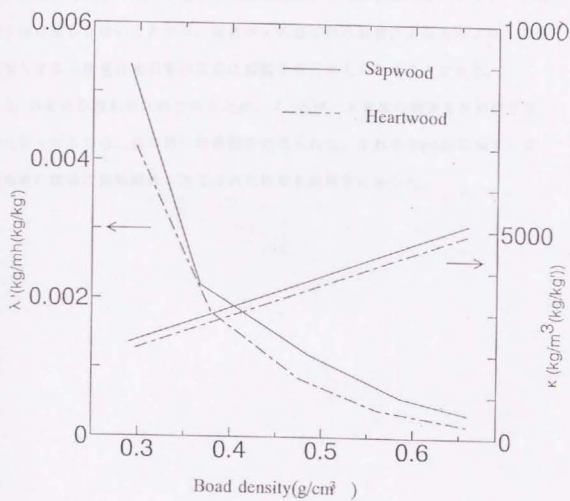


Fig.4.11.  $\kappa$  and  $\lambda'$  vs board density.

的に変化し、0.7ボードから0.3ボードへの変化は前述のように15.9倍（辺材ボード）から23.3倍（心材ボード）という大きな値をとり、結果的に $\lambda/2$ は増加する。以上によりパーティクルボードの吸湿速度性能は、湿気の通り易さ＝湿気伝導率に大きく影響を受けることが判った。ここで注意しなくてはならないのは、先に示した平衡含水率曲線の接線の傾きの差が0.3、0.7ボード間で1割程度しかないことから、両者の $\kappa$ の差が熱の影響によるものより、吸湿に寄与する木質量の絶対量の差異に起因すると考えられることである。

$\lambda'$ の変化が指数関数的であるため、 $\lambda'$ とボード密度の関係を片対数グラフに取ったところ、負の強い相関関係が見られた。それをFig.4.10に示す。また両者の関係に指数関数を当てはめた結果を同図中に示した。



Fig.4.12. Relationship between  $\lambda'$  and Board density.

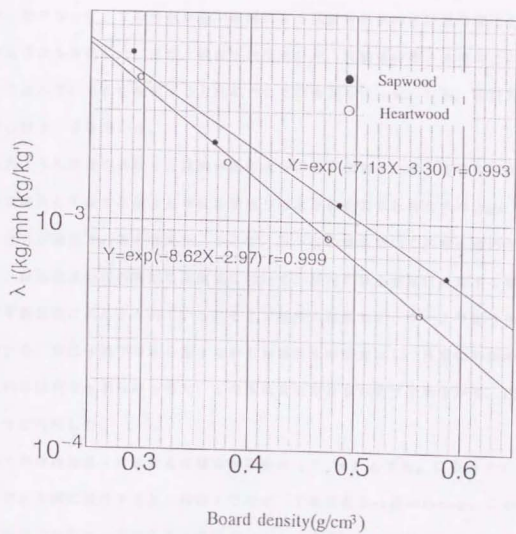


Fig.4.12. Relationship between  $\lambda'$  and Board density.

### (3) 吸湿による内部水分量の変化

シミュレーションによって、任意の時刻の試験体内の温湿度分布を推定することが可能となった。この分布から、吸湿による試験体内部の水分量の変化を推定する方法を検討した。また、吸湿された水分が、試験体の厚さ方向のどの部位まで及んでいるかを推定する方法についての検討を行った。なお、検討対象には心材ボードを用いた。

今回のような密度の異なった試験体間の水分の含有状態を比較する場合、水分量の表現としては含水率より単位体積当りの水分量を表す体積含水率 ( $\text{kg/m}^3$ ) を用いた方が適当であると考えた。そこで、以下この値を用いて考察を進めた。

さて、線形熱水分同時移動の基礎式において、材内の微小領域は相対する空間湿度平衡状態にあるとされている。そこで材内の温湿度データーと平衡含水率曲線から、単位体積中の水分量すなわち体積含水率を算出し、任意の時刻の試験体内の体積含水率分布を得た。この体積含水率分布が妥当であるかを、以下のように考察した。

時刻  $t$  の材内位置  $x$  における体積含水率を  $\omega(t, x)$  とする。この  $\omega(t, x)$  を厚さ方向に積分すると、時刻  $t$  でのボードの含有水分量がわかる。この値から吸湿以前のボードの含有水分量を引くと、吸湿によって増加した水分量がわかる。この吸湿水分量を  $W_m$  とし、ある時刻  $t$  における  $W_m$  を  $W_m(t)$  とおくと  $W_m(t)$  は次式のように表される。

$$W_m(t) = \int_0^L \{ \omega(t, x) - \omega(0, x) \} dx \quad (4.10)$$

得られた  $W_m$  は、あらかじめ得られている  $W_b$  と原則的に一致するはずである。しかしながら実際には両者は一致しなかった。結果の一例を Fig.4.13 に

示す。W<sub>m</sub>についてW<sub>b</sub>と同様に実測値とのMSDを求め、Table 4.14に示した。W<sub>m</sub>のMSDはW<sub>b</sub>より大きく、実測値と間の違いが大きかった。つぎに、W<sub>b</sub>とW<sub>m</sub>のどちらがより実測値に近いかを検討するために、W<sub>m</sub>と実測値のMSDが最小となるように、シミュレーションを行った。得られた $\lambda'$ とW<sub>b</sub>, W<sub>m</sub>のMSDをTable 4.15に示す。Table 4.15のW<sub>m</sub>のMSDに比べ、Table 4.14のW<sub>b</sub>のMSDがほとんどの場合、小さな値を取ることから、W<sub>b</sub>の方が吸湿量をより正確に表現し、またこの場合の $\lambda'$ の方が、妥当な値であると判断した。

そこで、W<sub>m</sub>の誤差の原因が算出に用いた材内の温湿度分布に起因すると考え、その原因を以下のように推定した。

- 1) 吸湿によって体積が変動すること。
- 2) パーティクルボードは材内に厚さ方向の比重分布が見られるが、計算ではこれを無視したこと。
- 3) 比重の分布に応じて、 $\lambda'$ にも厚さ方向に分布があると思われること。
- 4)  $\lambda'$ が温湿度によって変化することを無視したこと。

本研究では、1)と2)について検討を行った。その結果を以下に示す。

まず1)についてであるが、吸湿前後の試験体の体積変化は、最大1%程度であった。そこで、材内の体積増加が一様であると仮定し、体積が計算終了時に1%の増加をするようにシミュレーションを行った結果、計算結果には大きな変化は見られなかった。故に、この要因は以降無視した。

続いて2)についての検討を行う。吸湿実験に使用した心材ボードの試験体を、7.5 × 5.0 × ボード厚さに分割し、比重が中庸と見なせる4試片の厚さ方



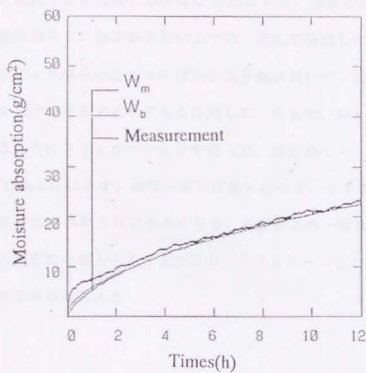


Fig.4.13. Result of simulation.

Note: The MSD was calculated from  $W_m$ .

向の比重分布を測定した。測定は円盤かなな盤を用いて試片表面層より中心部まで約 0.5mm ずつほう削を行い、各厚さでの体積と重量から、比重を算出した。得られた比重分布をボード平均比重に対する比で表したのが、Fig.4.14 である。

さらに、シミュレーションでの取扱いを易くするために、比重分布のモデル化を行った。材内を厚さ方向に等間隔に 10 層にわけ、各層の比重の平均値と層の中心位置の関係を、最密層を境に 2 つの二次式で表現した。

以上の手法により明らかとなった材内の比重傾斜を用いて、比重を厚さ方向に対し逐次変化しつつ計算するモデルを作成した。そして、 $W_b$  と実測値の MSD が最小となるようにシミュレーションを行った。得られた  $\rho'$  と  $W_b$  および  $W_m$  の MSD を Table 4.16 に示す。比重一定の計算に比べて、0.7 ボードを除くほとんどの条件で  $W_m$  の MSD が小さくなり、実測値との一致性が向上したことが判る。比重変動を導入することにより、シミュレーション精度を向上させることが可能であると言える。

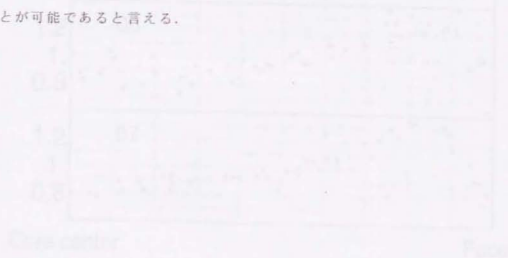


Fig.4.14. The profile of ratio of density through the thickness of square in apparent density.

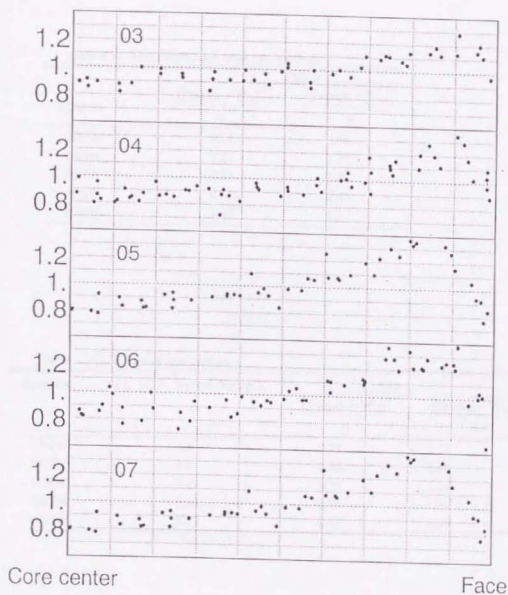


Fig.4.14. The profiles of ratio of density through the thickness of boards to apparent density.

Table 4.14. MSD calculated from two method.

Symbols	MSD	
	$\frac{\sum(\text{meas.} - W_b)^2}{n}$	$\frac{\sum(\text{meas.} - W_m)^2}{n}$
	n	n
03HW	0.14	2.66
04HW	0.27	1.23
05HW	0.33	1.22
06HW	0.83	2.45
07HW	1.35	1.17

Table 4.15. Result of simulations.

Symbols	$\lambda' (\times 10^{-3} \text{ kg/mh}(\text{kg/kg}'))$	MSD	
		$\frac{\sum(\text{meas.} - W_b)^2}{n}$	$\frac{\sum(\text{meas.} - W_m)^2}{n}$
		n	n
03HW	3.8	0.71	2.57
04HW	1.6	1.45	1.60
05HW	0.8	0.39	1.24
06HW	0.43	0.56	1.66
07HW	0.23	1.21	0.62

シミュレーションの結果より、材内の体積含水率の分布を得た。例として、0.4 H Wボードの材内体積含水率分布の時間変化を、Fig.4.15に示す。破線は周囲雰囲気温度とH-H式から算出した平衡体積含水率である。経過時間と共に内部体積含水率が増加しているのが判る。また吸湿大きく寄与する部分が、表層付近であることが明かである。また最表層部付近での体積含水率変化量の増加が、時間の経過と共に少なくなっている。これは12時間後の最表層部は、破線で示す最大吸湿量に達していることから、すでに周囲雰囲気と平衡状態にあるためと考えられる。

またFig.4.16とFig.4.17に温度と絶対湿度の変化を表層と中心部の2つについて示す。Fig.4.16から明らかにように吸湿開始後すぐに厚さ方向の中心部の体積含水率が増加している。これは以下のように考えられる。Fig.4.17から明らかにように吸湿後、材中心部の温度が表層とほぼ同じ大きさで増大している。表層の温度上昇は吸着熱によるものであると考えられるが、中心部の体積含水率の増加の程度から見て、中心部の温度増加は吸着熱に寄るものではなく、表層からの熱伝導に寄るものと考えられる。すなわち、表層で吸湿によって発生した熱が湿気に先行して内部に伝わり、その結果材内部の水分の脱着をひき起こし、発生した水分による水蒸気圧差によって、中心部へ水分が移動する可能性があり、今回の結果はこの現象に寄るものと推測した。

さて、密度の変化が内部水分の変化に、どの様に影響を与えるかを考察するため、12時間後での体積含水率変化を0.3, 0.5, 0.7ボード間で比較した。それをFig.4.18に示す。試験体の厚さが違うため直接の比較は難しいが、密度の低下により湿気伝導率が増し、体積含水率の変化がより内部にまで及んでいることが判る。また、表層部の体積含水率変化は低密度化によって減少しているが、この部分は飽和に達しており、 $\kappa$ の値そのものが低いことから容易に理解できる。

後の状態において、吸湿水分量の 95 % が存在する吸湿面からの距離を  $d_{95}$  とし、各ボードについて算出した結果を Table 4.17 に示す。100 % としなかったのは、前述のように吸湿直後、すでに中心部の含水率が変化しているためである。材厚が異なるため、絶対値による比較は困難であるが、材厚に対する相対値で比較すると、0.7 ボードが材厚の約 4 割であるのに対し、0.7 ボードは 8 割に達している。低比重ボードは材厚を有効に利用していると言える。このことは逆に材を薄くした場合、吸湿に必要な材厚が不足し吸放湿性能が低下する恐れがあることを示唆している。すなわち実際の使用時には、必要とされる吸湿性能から、適切な材厚を設定する必要がある。その場合、今回用いたシミュレーションの手法が有効となるであろう。

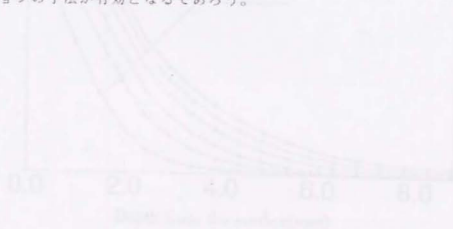


Fig.4.13. Moisture content profiles through the board thickness for the DHIW.

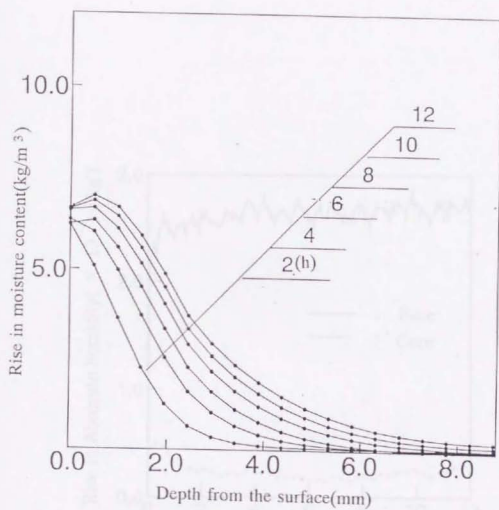


Fig.4.15. Moisture content profiles through the board thickness for the 04HW.



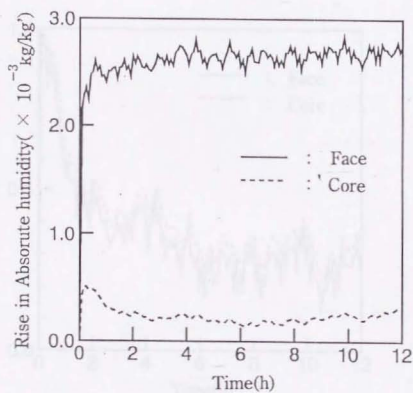


Fig.4.16. Variations in absolute humidities with time for 04HW.

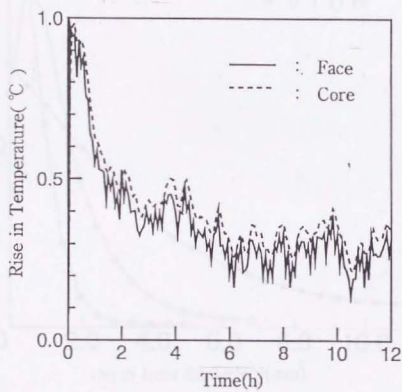


Fig.4.17. Variations in temperature with time for 04HW.

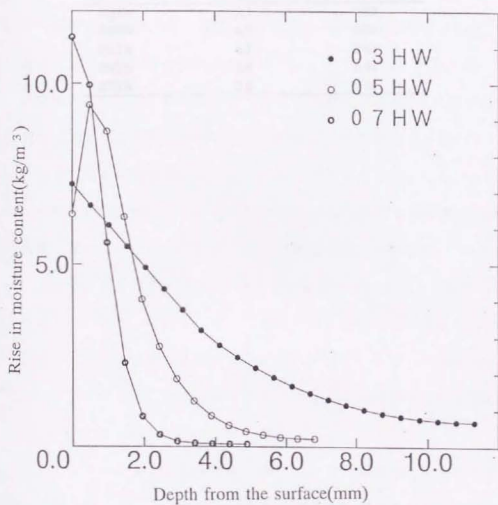


Fig.4.18. Comparison of moisture content profile at  $t=12$  hours among specimens.

Table 4.17. Depth from surface which accounts for 95%  
of all the moisture absorbed(d95).

Symbols	d95(mm)	d95/(Board thickness)
03HW	9.3	0.82
04HW	6.5	0.74
05HW	4.1	0.61
06HW	2.0	0.34
07HW	2.0	0.40

#### 4. 4 まとめ

ボード密度を  $0.3\text{g/cm}^3$  から  $0.7\text{g/cm}^3$  まで変化させたパーティクルボードをスギの心材と辺材それぞれのみを原料として製造し、その吸湿性能を検討した。得られた結果を以下に示す。

1) 供試材料の単位体積あたりの湿気容量を示す平均含水率曲線の勾配 (EMCV) の差異はボード密度、心・辺材の違いによって大きな差は見られず、吸湿性能があまり変わらないことを示した。

2) 吸湿量の経時変化結果から得られた吸湿速度係数  $A_2$  は比重の低下に伴い増大した。また、辺材を使用したボードは心材のものよりも高い  $A_2$  を示した。

3) 吸湿量の経時変化のシミュレーションを行うことによって、供試材料の湿気伝導率  $\lambda'$  を決定した。 $\lambda'$  は比重の減少によって指数関数的に増大し、 $\lambda'$  の対数とボード密度の間には強い負の相関関係が認められた。

4) 辺材を使用したボードの  $\lambda'$  は心材の心材のものよりも全体として高い傾向にあった。また、その差はボード密度が高くなるにつれ顕著となった。

5) ボードの湿気容量は密度の低下によって減少するが、そのその程度は  $\lambda'$  に比べて小さかった、故に低密度化によるボードの吸湿性能の増加は主として  $\lambda'$  に起因するものと考えられた。

6) シミュレーションによって材内の水分分布の経時変化の推定を試みた。推定に当たり、ボード内の厚さ方向の比重分布を考慮することにより、シミュレーション精度の向上出来ることを示唆した。また、得られた結果から低密度ボードにおいて吸湿水分がより内部まで浸透していることが確認された。

## 5. 実大空間における木質材料の調湿性能

### 5. 1 研究の目的と概要

前章までにおいて、木質材料のなかで比較的低比重のパーティクルボード(PB)に注目し、その吸放湿性能を他の木質材料と比較した、さらに、そのボード密度に対する系統的な検討を行った。その結果、吸放湿速度性能に優れ、また周囲湿度変化時の最大吸湿量がその原材料である木材とほぼ変わらないPBは、有効な調湿材料と成りうることが示唆された。

さて、木材が室内湿度調節に有効であることは、多々述べられていることであるが、実際に居住空間でそれを系統的に測定した例はそれほど多いわけではない。また、実験室的に内装材料の調湿性能を測定した例は、その多くが小型の実験箱を用いた実験である。そこで、比較的実用に近い大きさの空間を実験対象に用い、内装材料の調湿性能の検討を行うことを考えた。本章では、実験空間が気密性が高い状態にある場合の、内装木材の調湿性能と内装面積との関係を検討した。また、前章に引き続きPBの調湿材料としての有効性を検証するために、PBを内装した場合の調湿性能を木材のそれと比較を行った。

### 5. 2 実験方法

#### 5. 2. 1 実験室の概要

若手大学(盛岡市)内のRC造平屋建ての建物内に設置された、Fig5.1に示す実験室(気積  $V=18.1\text{m}^3$ )を使用した。実験室は枠組み壁工法により建設され、天井、壁体および床は厚さ100mmの断熱材と合板(天井、壁体は5mm、床は12mm)で構成されている。また、実験室の内面を窓とドアを除いて、厚さ0.15mmのポリエチレンシートで覆い、躯体材料による吸放湿および、換気による湿気の流入出を極力抑えた。その結果、実験室は非常に高気密な性能を有する

こととなった。空間内の湿度は内装材料の吸放湿とともに空間の換気性能によっても大きな影響を受ける。そこで、本実験室の気密性能を、炭酸ガストレーサー法 (JISA1406) を用いて測定した。

実験室内に、温度センサーと連動した電気温風ヒーター (0.5kw)、湿度センサーと連動した超音波加湿器、および攪拌用電気ファンを設置した。また、実験室内外の温湿度を Fig. 5.1 に示す部位にて測定した。測定には T 型熱電対および容量変化型湿度計 (VISALA 社製、精度  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ) を用いて、30 分毎の温度・相対湿度をパソコンに記録した。

試験に供する内装材料としては、

PB (市販製品、厚さ 25mm、密度  $500\text{kg/m}^3$ )、原料：南洋材合板原料端材、イソシアネート系接着剤使用) を用いた。

なお、同試験室においては、過去にアカマツ (*Pinus densiflora*) 材の内装羽目板 (厚さ 15mm、密度  $400\text{kg/m}^3$ ) を施工した場合において、本論文と同様の実験が行われており、比較のために本論文にその結果を引用することとする。さて、内装材施工部分としては壁面を対象とすることとした。窓およびドアを除いた壁面の面積は  $23.1\text{m}^2$  であった。それぞれの材料の内装時において、内装面積  $A(\text{m}^2)$  を段階的に変化させ、調湿性能を測定した。測定した内装条件を Table 5.1 に示す。ここで、以降内装状態を同図内にある、 $A/V(\text{m}^{-1})$  と言う指標で表すこととする。また、各内装状態において行った試験を同表内の表記によって表記するものとする。なお、供試材料は、あらかじめ恒温恒湿室 ( $20^{\circ}\text{C}$  60%RH) 内で、1 ヶ月養生した物を用い、施工する場合には、吸放湿が常に室内側の平面のみによって行われるように、供試材料同士の隙間等を十分に目止めし断湿を行った。

## 5. 2. 2 温湿度条件



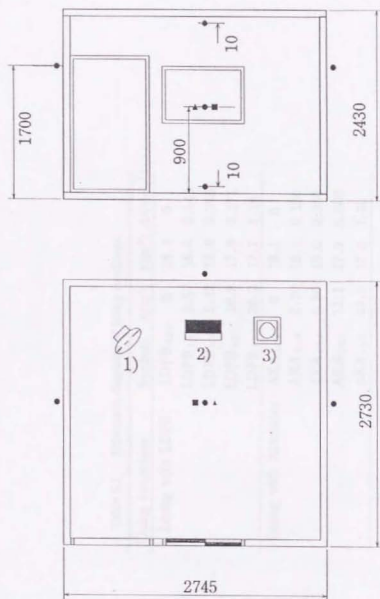


Fig.5.1. Experimental room and measuring point of temperature and humidity.

Legend: 1)Fan,2)Heater,3)Humidifier, ● :Measuring points of temperature and humidity, ■ : Temperature controller, ▲ :Humidity controller.

Table 5.1. Schematic diagrams of lining conditions.

Lining conditions	Symbols	$A(m^2)$	$V(m^3)$	$A/V(m^{-1})$
Lining with LDPB	LDPB <sub>000</sub>	0	18.1	0
	LDPB <sub>015</sub>	2.57	18.0	0.143
	LDPB <sub>030</sub>	5.12	18.0	0.285
	LDPB <sub>060</sub>	10.2	17.8	0.571
	LDPB <sub>120</sub>	20.2	17.7	1.14
Lining with Akamatsu	AKA <sub>000</sub>	0	18.1	0
	AKA <sub>015</sub>	2.70	18.1	0.150
	AKA <sub>030</sub>	5.50	18.0	0.300
	AKA <sub>060</sub>	11.1	17.9	0.600
	AKA <sub>120</sub>	21.5	17.8	1.20

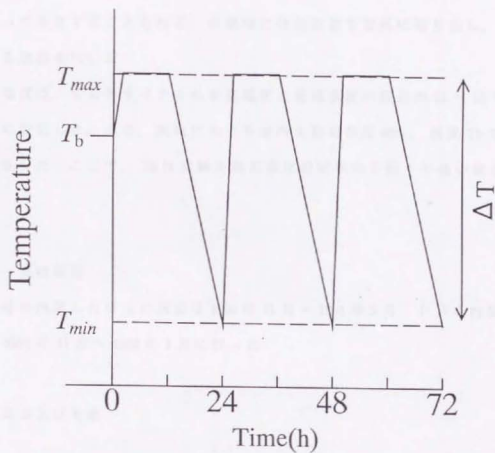


Fig.5.2. Schematic diagram of changes of room temperature.

冬季における居住空間の温度変化を想定し、Fig. 5.2のような温度スケジュールを設定した。すなわち、昼間(9:00～21:00)は一定に暖房を行い、夜間(21:00～9:00)は暖房を切り、翌朝(9:00)再び暖房を行うというサイクルである。本実験ではこのサイクルを3日繰り返すこととした。また、このサイクル中は加湿器による加湿を行わず、室内の相対湿度は、温度変化と内装材料の吸放湿および換気によって変化することとなる。実験時には加湿器を室外に取り出し、自然蒸発による加湿を防いだ。

実験中の温度は、その各サイクルの最高温度と最低温度の格差が11～13℃になるように設定した。また、実験に先立ち室内を相対湿度60%、温度 $T_b$ で3～5日養生した。ここで、 $T_b$ は実験の最高温度設定値から約4℃低い値とした。

### 5. 2. 3 実験期間

アカマツ材を内装した場合の測定は1990年11月～1991年2月、PBを内装した場合は1991年11月～1992年1月に行った。

## 5. 3 結果および考察

### 5. 3. 1 室温変動に対する相対湿度変化

測定された室内外の温度・相対湿度および絶対湿度のうちPB 000とPB 120についての結果をFig. 5.3、Fig. 5.4、Fig. 5.5に示す。室内および室外の温湿度は、それぞれ3測定点のデーターが温度差2℃以内、相対湿度差が3%未満であったため、それぞれ平均した。また、以降特に断りの無い場合、本章で述べる値は2日目と3日目の平均値である。1日目は温度変化パターンが異なるため、考察には用いない。

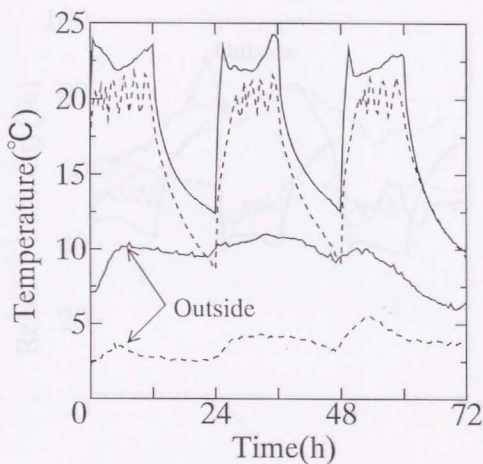


Fig.5.3. Changes of temperature.

Legend: — : LDPB<sub>000</sub> ,  
 - - - : LDPB<sub>120</sub> .

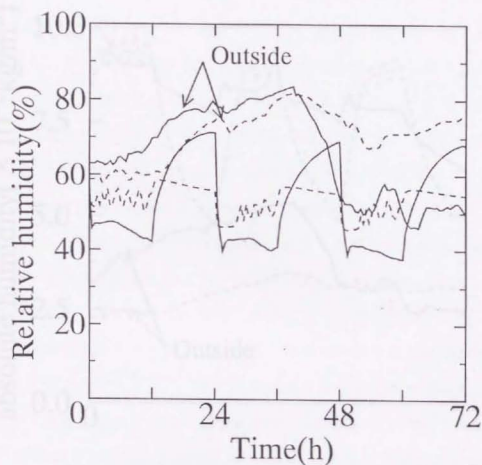


Fig. 5.4. Changes of relative humidity

Legend: — :LDPB<sub>000</sub> ,  
 - - - :LDPB<sub>120</sub> .

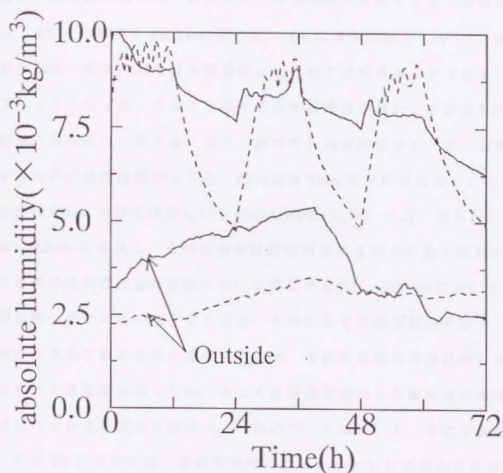


Fig. 5.5. Changes of absolute humidity.

Legend: — : LDPB<sub>000</sub> ,  
 - - - : LDPB<sub>120</sub> .



Fig. 5.3, Fig. 5.4 より以下のことが判った。暖房停止時の室内の相対湿度は、室温の低下により増大した。室内に吸放湿に寄与する内装材が全くない P B 000 では暖房開始直前の最低温度  $T_{min}$  において、最大相対湿度  $RH_{max}$  を示す。しかしながら P B 120 においては  $RH_{max}$  が、小さい値にとどまると同時にその時刻が暖房停止直後に現れた。暖房停止から  $RH_{max}$  が発現するまでの時間を  $\Delta t$  で表し、 $AV$  との関係を Fig. 5.6 に示した。 $AV$  の増大に対して  $\Delta t$  は、減少する傾向を示した。また、内装材の種類による比較では明らかに P B を施工した場合の方が小さくなった。このことは P B の吸湿速度が高いことを示した。第 3 章の結果と定性的に一致する。また、暖房時の相対湿度はヒーターが断続的に稼働するために室内温度が上下し、最大温度  $T_{max}$  明かかではないことから、その最小値  $RH_{min}$  の特定は難しいものの LDPD120 においては、明らかに温度上昇直後に  $RH_{min}$  が発現し、その後相対湿度は増加する傾向が見て取れる。

次に室内の絶対湿度  $g$  の変動について言及すると、LDPD000 において  $g$  は、暖房開始時に若干の増加を示すものの、全体としては減少傾向を示す。全体の減少傾向は換気に寄るものと類推されるが、暖房開始時の増加は何らかの形で室内において吸放湿があったか、もしくは室温変化による換気量の変化に影響を受けたのであるか定かではない。これについては 5. 3. 4 にて検討する。また、P B 120 においては、室温変化時にはっきりとした空間内の水分量の増減が見て取れる。しかしながら、これについても換気の影響が考えられるため、P B 000 の場合と同様に 5. 3. 4 にて検討を行う。

### 5. 3. 2 評価指数 $|B|$ 値による調湿性能の評価

調湿性能の評価指数として  $|B|$  値が提唱されている。これは、室内の相対湿度  $RH$  の対数とそれを発現した時刻での室内温度  $T$  との関係をとり一次回帰式を当てはめた場合の回帰式の傾きの絶対値を指す。

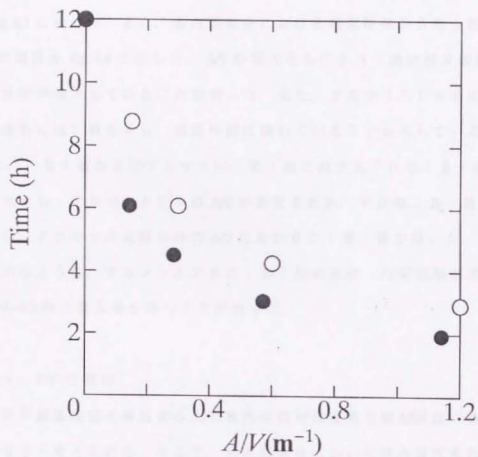


Fig.5.6. Relationships between the times of appearance of  $RH_{\text{max}}$  with  $A/V$

Legend: ○ :Akamatsu, ● :Particle board.

$$\log RH = A + B \times T$$

(5.1)

すなわち、 $|B|$  値が小さいと言うことは、温度変化にたいする相対湿度の変化が小さくなることを示し、調湿性能が高いと評価する事が可能である。なお、吸放湿が全く無い完全な密閉空間において、 $|B|$  値は 0.0245 を示す。例として、P B 000 と P B 120 の 2 日目の測定結果について  $T$  と  $\log RH$  の関係を取り、Fig. 5.7 に示した。また、各内装条件における測定結果から得られた  $|B|$  と  $A/V$  の関係を Fig. 5.8 に示した。 $A/V$  の増大とともに  $|B|$  値は減少傾向を示し、調湿性能が増大していることが判った。また、アカマツと P B を比べると P B が全体的に低い値を示し、調湿性能に優れていることを示している。Table 5.2 に、 $|B|$  値およびアカマツの  $|B|$  値に対する P B の  $|B|$  値の比を示す。ただし、アカマツと P B の  $A/V$  が異なるため、P B の  $|B|$  値の直線補完を行い、アカマツの実験条件の  $A/V$  にあわせた  $|B|$  値を用いた。同表からも明らかなように、アカマツと P B に  $|B|$  値の差は、内装面積が比較的小さい  $A/V=0.3$  時に最大値を持つことが判った。

### 5. 3. 3 RH' の算出

内装材料の調湿性能を検討する上で室内の相対湿度変化幅  $\Delta RH$  は、性能評価の指標となると考えられる。そこで、各内装条件において室内温度変化幅  $\Delta T$  と  $\Delta RH$  を算出し、Table 5.3 に示した。同表において  $\Delta RH$  は  $A/V$  の増加に伴い明らかに減少してことが判るが、各内装条件によって  $\Delta T$  が異なるため、直接の比較は困難である。そこで、以下のような考察を行った。

いま、空間内の温度と相対湿度の関係が (5.1) 式に則って変化すると仮定すると、 $T$  によって得られる相対湿度  $RH'$  は次式で与えられる。

$$RH' = 10^{(A+B \cdot T)}$$

(5.2)

Table 5.2. The value of  $|B|$  and the ratio of LDPB to Akamatsu.

Lining conditions	$A/V(m^{-1})$				
	0	0.150	0.300	0.600	1.200
LDPB	212	138	91	76	49
Akamatsu	215	153	114	83	51
LDPB/Akamatsu	0.99	0.90	0.80	0.92	0.96

Table 5.3. Ranges of temperature and relative humidity of room.

Symbols	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	$\Delta RH(\%)$
LDPB <sub>000</sub>	11.1	29.9
LDPB <sub>015</sub>	15.0	27.9
LDPB <sub>030</sub>	14.2	19.2
LDPB <sub>060</sub>	10.3	16.2
LDPB <sub>120</sub>	10.3	10.9
AKA <sub>000</sub>	12.5	32.1
AKA <sub>015</sub>	12.1	23.1
AKA <sub>030</sub>	16.4	22.4
AKA <sub>060</sub>	12.8	16.9
AKA <sub>120</sub>	10.8	12.0

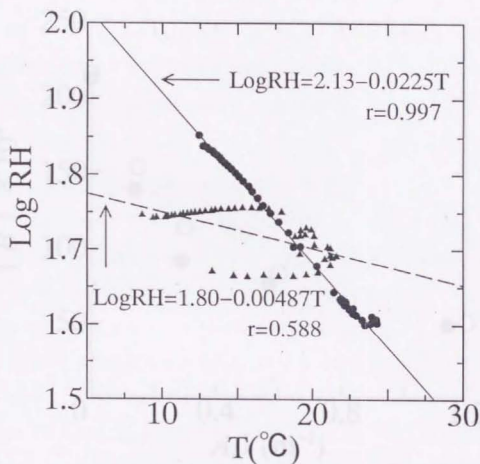


Fig. 5.7. Relationships between the room temperature ( $T$ ) and logarithim of relative humidity( $RH$ ).

Legend: ● — :LDPB<sub>000</sub> , ▲ - - - :LDPB<sub>120</sub> .

Note:  $T$  and  $RH$  was measured in second cycle (24–48 hours).

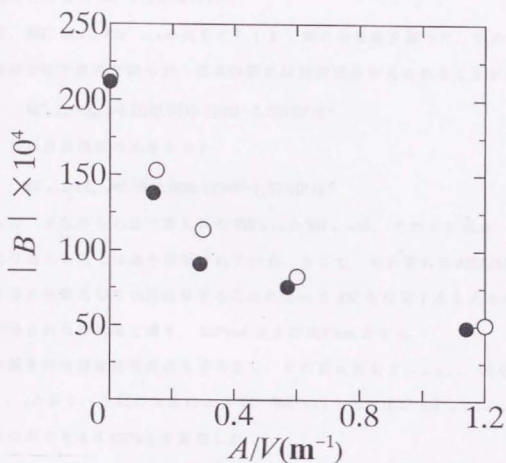


Fig.5.8. Relationships between  $|B|$  and  $A/V$

Legend: ○ :Akamatsu, ● :Particle board.



しかしながら、5. 3. 1に示したように、 $RH_{min}$ および $RH_{max}$ はそれぞれ $T_{min}$ および $T_{max}$ において発現されるわけではない。すなわち、Fig. 5.9で明らかなように $RH'_{max}$ は過小に $RH'_{min}$ は過大となり、その結果、両者の差である $\Delta RH$ は過小もしくは過大に評価される可能性がある。そこで、以下のような補正をくわえた $RH''_{avg}$ を求めた。

まず、 $RH'$ 、 $RH'_{max}$ と $RH'_{min}$ の比をとり $|B|$ 値との関係を調べた。その結果、相関係数0.90で次式が得られ、両者の間には回帰関係が見られることが判った。

$$RH'_{max}/RH'_{min}=1.05+8.55 \times B-120 \times B^2-1.65 \times 10^4 \times B^3 \quad (5.3)$$

また、同様に最低値の比をとると

$$RH'_{min}/RH'_{max}=0.93+2.88 \times B-129 \times B^2-1.37 \times 10^4 \times B^3 \quad (5.4)$$

となった。すなわち(5.2)で得られた $RH'_{max}$ と $RH'_{min}$ は、それぞれ(5.3)、(5.4)の分だけ過大もしくは過小評価されている。そこで、それぞれの $\Delta RH/\Delta RH$ の逆数を補正係数として(5.2)に乗ずることによって $RH'$ を補正することを考えた。ここで得られた相対湿度値を、 $RH''_{max}$ および $RH''_{min}$ とする。

全実験条件の温度経時変化を平均化し、その最大値を $T_{avg, max}$ 、最小値を $T_{avg, min}$ と置く。上記の方法によって、 $RH''_{avg, max}$ および $RH''_{avg, min}$ を求め、その差である $\Delta RH''_{avg}$ を算出した。

Fig. 5.10に $\Delta RH''_{avg}$ と $AV$ の関係を示す。 $AV=0$ で約35%変化していた $\Delta RH''_{avg}$ は、 $AV=0.3 \sim 0.6$ 程度の内装によって約半分にまで低下する。比較的小さな内装条件で大きな調湿性能が見られるのは、小型密閉実験箱での測定結果と定性的に一致し、このような気密性の高い空間の特徴であると言える。また、アカマツとPBの比較においては、PBは常に低い $\Delta RH''_{avg}$ を示し、アカマツの86~95%の値を示している。これを $AV$ との関連で見れば、PBはアカマツの約23の内装面積で、同様の性能を発現したと考えられる。第3章で行っ

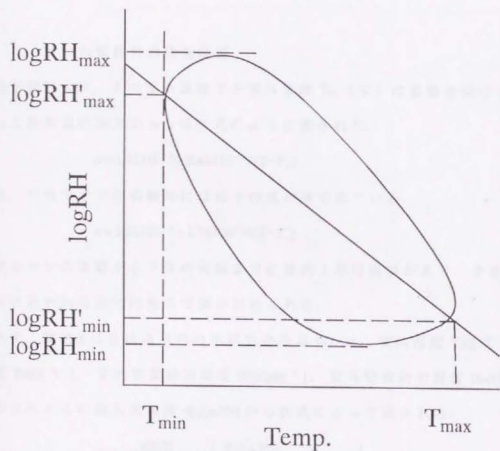


Fig. 5.9. Schematic diagram representing a method modifying the width of RH changes.

た材料単体の吸放湿速度の測定においては、PBはアカマツの1.9倍、吸放湿可能水分量では1.7～2.0倍の性能を有するわけであるが、今回得られた調湿性能はそれほどには大きな差がない。これは、今回の様な高気密状態では材料の吸放湿の駆動力となる、室内湿度が材の吸放湿によって変化しやすく、そのため調湿性能に差異が出難かったのではないかと考えられる。

#### 5. 3. 4 内装材料の吸放湿量

換気回数  $n$  は、その室内温度  $T$  と室外温度  $T_o$  (°C) に影響を受ける。今回行った換気量の測定から  $n$  は次式のように表された。

$$n = 3.31 \times 10^{-3} + 2.45 \times 10^{-3} \times (T - T_o) \quad (5.5)$$

また、アカマツでの実験時には以下の式が得られている。

$$n = 3.25 \times 10^{-3} + 4.74 \times 10^{-3} \times (T - T_o) \quad (5.6)$$

アカマツの実験からPBの実験までには約1年の間隔があり、その間の経時変化と思われる換気回数の増加が認められた。

さて、時刻  $t$  における室内の水蒸気発生量  $G(t)$  は、室内温度  $T(t)$  [°C]、室外温度  $T_o(t)$  [°C]、室内容積絶対湿度  $H(t)$  [g/m<sup>3</sup>]、室外容積絶対湿度  $H_o(t)$  [g/m<sup>3</sup>] および室外からの流入空気量  $v(t)$  [m<sup>3</sup>/h] から次式によって表される。

$$G(t) = V \frac{dH(t)}{dt} + v(t) \left[ \frac{T(t) + 273}{T_o(t) + 273} H(t) - H_o(t) \right] \quad (5.7)$$

ここで  $v(t)$  は、時刻  $t$  における換気回数  $n(t)$  [h<sup>-1</sup>] と気積  $V$  (m<sup>3</sup>) から次式で求められる。

$$v(t) = V \times n(t) \quad (5.8)$$

ゆえに、室内の吸放湿が全て内装材によるものと見なせば、時刻  $t$  において単位時間に単位気積対し内装材が供給する水分量  $g(t)$  [g/hm<sup>3</sup>] は、次式で表すことが出来る。

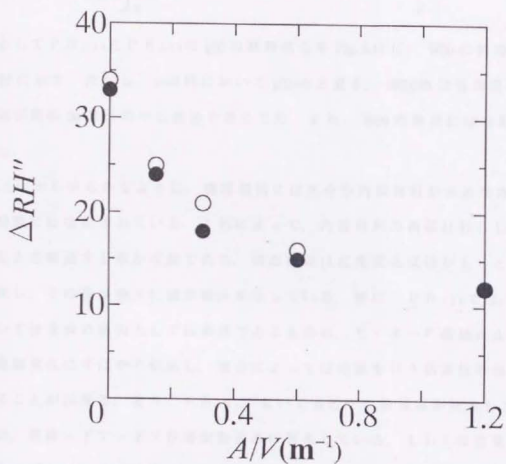


Fig.5.10. Relationships between  $\Delta RH''$  and  $A/V$ .

Legend: ○ :Akamatsu ● :Particle board.

$$g(t) = \frac{dH(t)}{dt} + n(t) \left[ \frac{T(t)+273}{T_a(t)+273} H(t) - H_a(t) \right] \quad (5.9)$$

また、計測開始から時刻  $t$  までに内装材料から室内空間に移動した水分量の単位気積あたりの総和  $W(t)[g/m^3]$  は、次式で表される。

$$W(t) = \int_0^t g(t) dt \quad (5.10)$$

例として  $P B_{000}$  と  $P B_{120}$  の  $g(t)$  の経時変化を Fig. 5.11 に、 $W(t)$  の経時変化を Fig. 5.12 に示す。ただし、 $t=0$  時において  $g(t)=0$  と置き、 $dH(t)/dt$  は各測定データ（測定間隔 30 分）の中心差分で求めている。また、 $W(t)$  の算出には台形則を用いた。

Fig. 5.11 から明らかなように、暖房期間には水分が内装材料から放湿され、冷却期間には吸湿されている。これによって、内装材料の調湿材料としての機能の動きを確認する事が可能である。調湿機能は温度変化直後がもっとも大きく機能し、その後は徐々に減少傾向を示している。特に、 $P B_{120}$  では、暖房時においては全体の傾向としては放湿であるものの、ヒーターの断続による温湿度の微細変化にすばやく対応し、場合によっては吸湿を行う応答性の良さを確認することが出来る。また、 $P B_{000}$  においても若干の吸放湿が発生しており、これは、窓枠・ドア・ドア枠等が吸放湿に寄与している、もしくは湿気が防湿層にあるピンホール等を通じて、躯体内部と吸脱着を行っていることに起因するなどと考えられる。また、Fig. 5.12 では  $W(t)$  の全体的な増加傾向が見て取れるが、これは換気によって室内の水分が室外へ流出が発生しており、それを補う形で内装材料が放湿傾向にあるためと考えられる。これは、Fig. 5.4 において、相対湿度が全体的に低下傾向にあることと定性的に一致する。

次に、計測終了時 ( $t=75$ ) の  $W(t)$  を各内装条件について算出しこれを内装面積  $A$  で除した値を単位内装面積あたりの放出量  $W(72)/A$  とし、Fig. 5.13 に示した。

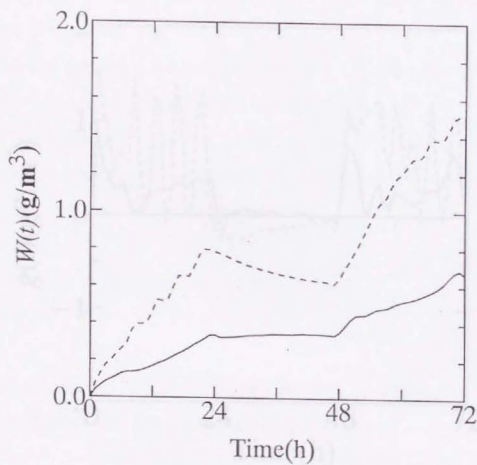


Fig.5.12. Changes of amounts of absorbed or desorbed moisture.

Legend: — :LDPB<sub>000</sub> , - - - :LDPB<sub>120</sub> .

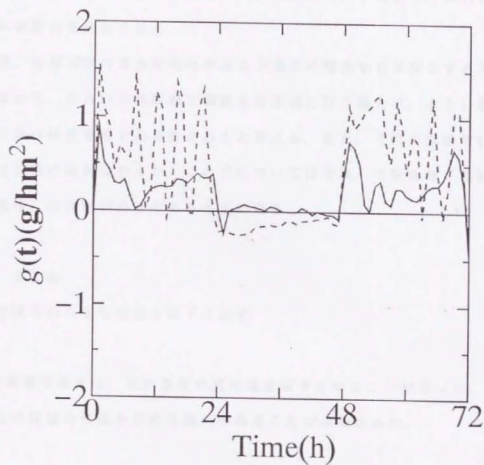


Fig.5.11. Changes of rates of absorbed or desorbed moisture.

Legend: — :LDPB<sub>000</sub> , - - - :LDPB<sub>120</sub> .



$AV$ が小さい場合は、 $W(72)/A$ は大きな値を示している。 $AV$ が減少すると $\Delta RH$ が増大することは先に示した。また、Fig. 5.6で明らかのように、 $AV$ が小さい場合は湿度変化開始時からその極値が発現するまでの時間が長い。すなわち、 $AV$ が小さい条件では、吸放湿の駆動力が高い状態が比較的長く維持されていると考えられる。その場合、表面近くの含水率変化が増大し、材内に高い水分移動の駆動力を発生させる。

その結果、材厚方向の含水率変化のおよぶ深さの増大を引き起こすと考えられる。すなわち、小さい内装面積で調湿を効果的に行う場合は、大きい面積で行う場合に比べ材厚を増す必要があると言える。また、今回の実験では材料間の比較は明確に現れなかった。この点については今後、実験条件（温湿度条件の一定化等）の検討が必要であると思われる。

#### 5. 4 まとめ

本章で得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 内装面積の増大は、室内湿度の変化幅を減少させることが判った。また、湿度変化の極値の発現を早める傾向があることが示唆された。
- 2)  $AV$ が0.3～0.5といった内装面積が比較的小さい場合でも、調湿効果は大きかった。これは密閉空間の特徴であると言える。
- 3) PBを内装材料とした場合、アカマツでの結果と比較して、約2/3の内装面積で調湿性能を発現可能であることが判った。高い吸放湿性能を持つ材料の使用により内装面積の減少が可能であることが示唆された。また、両者の調湿性能の差は内装面積が比較的小さい場合( $AV=0.3$ )で最大となった。

4) 内装材料が単位面積あたりに吸放湿する水分量を求めたところ、内装面積  
が場合には大きな値を示した。このことは小さな面積で十分な調湿性能を発揮  
させるためには、面積の大きな場合に比べ材厚を増す必要があることが示唆さ  
れた。

## 6. 無機塩含浸ボードの調湿性能

### 6. 1 研究の目的と概要

前章までによって、比較的低比重のパーティクルボードは湿気の通り道となる空隙を多数有することから、湿気伝導性能に優れていることが確認された。

さて、パーティクルボードはその製造的特徴および多孔質であるという構造的特徴から、化学処理や異種材料の混合などが比較的しやすく、湿気容量性能を増加させやすい材料であるといえる。そこで本報告では、吸放湿性に優れた材料の開発を目的として、無機塩 ( $Mg(NO_3)_2$ ) を含浸したパーティクルボードを製造し、吸湿性能の検討を行った。

### 6. 2 実験方法

#### 6. 2. 1 試験体の製造

供試材料として、厚さ 1.4cm、目標比重 0.5 のパーティクルボードを製造した。原料は比重 0.39 のスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) を用い、ロータリーリングフレイカー (パルマン社 :PZ-8) にてセミストランド状パーティクルとした。パーティクルの平均寸法は  $10 \times 2 \times 0.5$  mm であった。接着剤としてポリメリック型イソシアネート系接着剤 (群栄化学工業 : UL-4811) を含脂率 10% として用いた。フォーミングは、内寸  $27 \times 32 \times 15$  cm のフォーミングボックスを用いて、手まきで行った。また、熱圧は平板ホットプレスによる一段圧縮法で行い熱板温度は  $160 \pm 5^\circ C$ 、圧縮時間は 14 分とした。

#### 6. 2. 2 含浸処理

無機塩の飽和水溶液は、密閉空間内に置かれるとその空間湿度を塩によって決まった、ある湿度に保つ性質がある。そこで、居住空間における湿度を55%程度に保つことを目的とし、飽和水溶液として20℃において54%の湿度を保つ硝酸マグネシウム ( $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ) を用いた。

6. 2. 1 で得られた供試材料のうち、比較的比重が中庸なものを選び、5x12cmに裁断した。選んだ供試材料の平均厚は1.35cm、比重は0.48であった。その内、約半数を含浸処理試験体、残りを無処理試験体として用いた。含浸溶液として温度約18℃・重量比10%の $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 水溶液を作成し、あらかじめ全乾状態にした含浸処理用試験体を減圧デシケータ内で含浸溶液中に没し、浮き上がりを防ぐために重りをのせた。その後、アスピレーターで大気圧から625mm Hgの減圧を行い、その圧力を保ちながら3時間、除圧後2時間静置した。含浸処理後、網の上に放置し重力による溶液の落下分を除いた後、90℃で24時間、105℃で24時間乾燥を行った。得られた試験体のうちで、重量増加が比較的中庸なものを以降の実験に供した。得られた試験体の個数は12個であり、処理により重量は平均18%増加し、塩の含浸が認められた。また、平均8.8%の体積増加が発生した。

#### 6. 2. 3 吸放湿試験体の作製

以上の処理によって得られた供試材料の吸放湿を、側面以外の2面に限定し材内の湿流を厚さ方向に限定するために、試験体の4周をシリコンコーキング材で断湿した試験体を作成した。その結果、試験体の吸放湿面積は2面あわせて120cm<sup>2</sup>となった。

#### 6. 2. 4 平衡含水率の測定

供試材料を、テーブル丸鋸盤により切削し、5x1.3x0.2cmの試験体を得た。そ

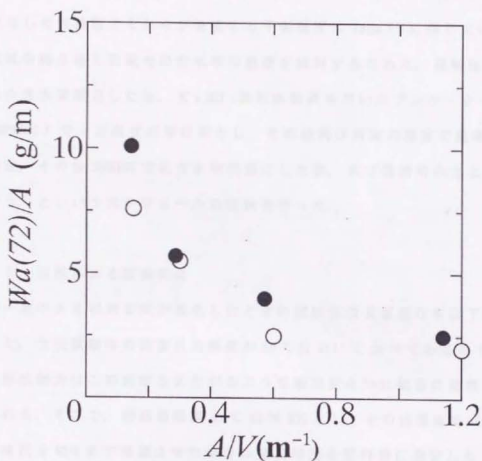


Fig.5.13. Relationships between  $Wa(72)/A$  and  $A/V$ .

Legend: ○ :Akamatsu, ● :Particle board.

の後、試験体約 10g を飽和無機塩溶液の置かれたデシケーター中にて重量が一定となるまで調湿した。デシケーター全体は恒温恒湿器（タバイエスベック社：PL-2）内で所定温度一定に保った。その後、105℃で24時間乾燥して、重量比から試験体の平衡含水率を測定した。測定温度は20℃と25℃の2つとした。また、測定には0.1mg精度の電子天秤（ザルトリウス社：2001MP2）を用いた。使用した無機塩とそれらが発現する平衡湿度はTable 3.2に準じている。また、乾湿を繰り返した場合の含水率の履歴を検討するために、試験体を全乾状態からの含水率測定した後、 $K_2NO_3$ 飽和水溶液を用いたデシケーター内（20℃98%RH）で一旦高含水率状態とし、その後再び所定の湿度で脱湿時の含水率測定、その後33%RHで低含水率状態にした後、再び吸湿時の含水率の測定を行う、というスケジュールの実験を行った。

#### 6. 2. 5 吸湿による重量変化

温度が一定のまま相対湿度が変化したときの試験体の重量変化を以下のように測定した。含浸試験体の調湿目的湿度が20℃において54%であるので、試験体の吸放湿能力はこの湿度をまたがるような湿度変化時に顕著に発現されると考えられる。そこで、初期温湿度20℃43%RHとし、その後温度を一定のまま相対湿度を61%まで増加させた場合の重量増加を経時的に測定した。

また、絶対湿度が一定の状態に温度が変化した時の重量変化を測定するため、恒温恒湿器で20℃54%RHに養生された試験体の周囲温度を、12℃にまで低下させた。この時、恒温恒湿器内の容積絶対湿度がつねに初期状態の7.8kg/m<sup>3</sup>になるように、恒温恒湿器の相対湿度設定を逐次更新しつつ運転を行った。その結果、12℃において、相対湿度は89%となった。

実験に供した試験体は、あらかじめ恒温恒湿器内（ナガノ科学社製：HA-10型）で各実験の初期温湿度で十分に調湿されている。また、試験体の吸放湿に

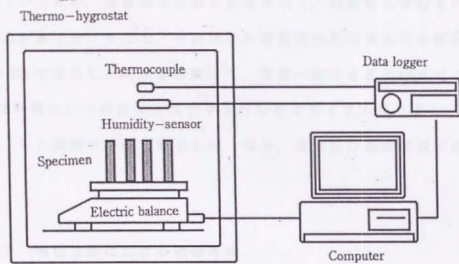


Fig. 6.1. Schematic diagram of measuring ability to control humidity.



よる重量変化を 10mgg 精度の電子天秤 (A&D 社:FX-4000) にて測定した。試験体は 1 実験につき 4 体であり、まとめて重量を測定している (Fig. 6.1 参照)。また重量測定は、初めの 2 時間までは 30 分、その後は 1 時間間隔で行った。なお、計測時間は 6 時間とした。また、試験体の周囲温湿度を、T 型熱電対と容量変化型湿度センサー (VAISALA 社: 精度  $\pm 2\%$  RH) を用いて、測定間隔 5 分で記録した。

#### 6. 2. 6 乾湿を繰り返し条件下での重量変化

従来検討されていた無機塩含浸材料は、塩化カルシウム<sup>5,9)</sup>塩化リチウム<sup>6,9)</sup>を使用していたため、溶液の平行相対湿度が低く、吸湿性に富むものの再現性がない恐れがあった。そこで、今回用いた吸放湿性能の再現性を検討するため、20℃ 54% RH で調湿した試験体を用いて、温度一定のまま 61%RH で 12 時間 → 43%RH で 12 時間という湿度変化スケジュールを 3 サイクル繰り返し、重量変化を 6. 2. 5 と同様の手法で測定した。なお、重量及び温湿度測定は 5 分間隔とした。

#### 6. 2. 7 密閉空間における調湿性能。

本実験にて作製したような試験体は、収蔵庫などの密閉空間で用いることを想定している。そこで、小型密閉空間における調湿性能を以下のように測定した。まず、試験体をデシケーター (内容積:  $2.89 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ) 内に設置し上部を開放状態にしたまま、恒温恒湿器を 20℃ 54%RH で運転し、十分に調湿を行う。その後、迅速にデシケーターを密閉したのち周囲温度を 10℃ まで低下させ、デシケーター内部の温湿度変動を、6. 2. 5 で用いたものと同じ温湿度センサーで測定した。なお、測定間隔は 5 分であり、測定時間は温度変化後 6 時間とした。また、吸湿面積が調湿性能に及ぼす影響を検討するために、吸湿面積を段階的に変えて上記の実験を繰り返した。吸湿面積を 66, 34, 22, 10 の

4段階とし、試験体の吸湿面を目的面積分だけ残して、グリセリンを塗布することで防湿を行った。なお、 $AV(m^{-1})$ はそれぞれ、2.3、1.2、0.75、0.35となった。

## 6. 3 結果および考察

### 6. 3. 1 平衡含水率と湿気容量値の算出

結晶状態にある  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  は結晶水を有する。そのため試験体は乾燥処理を行っても、全乾状態にはならないため全乾重量を得られない。そこで乾燥処理後の試験体内では、 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  は6水塩の結晶状態であると仮定し、乾燥処理試験体の重量から結晶水の重量分を差し引いた値を、試験体の全乾重量とした。得られた平衡含水率を Fig. 6.2 に示す。含浸処理により全体的に含水率は増加しているが、特に相対湿度 54% 以降での増加が著しく、塩による吸湿性能への影響が認められる。また、相対湿度 54% 以下では処理による含水率増加がほぼ一定しているが、これは結晶水による増分であると考えられる。

さて、ここで材料の湿気容量性能の評価値とである、重量絶対湿度 ( $\text{kg/kg}$ ) 変化時の含有水分量変化量  $\kappa$  ( $\text{kg/m}^3$  ( $\text{kg/kg}$ )) および温度変化時の含有水分量変化量  $\nu$  ( $\text{kg/m}^3$   $^{\circ}\text{C}$ ) を算出した。今回の試験体の平衡含水率測定結果に、Hailwood-Horrobin 式、Halsy 式、3 次多項式を最小自乗法を用いて当てはめた結果、3 次多項式が最も高い回帰関係を得られた。そこで、3 次多項式を測定結果に当てはめ、得られた曲線から  $\kappa$  および  $\nu$  を算出した。計算に使用した 3 次多項式の曲線を Fig. 6.2 中に、その係数を Table 6.1 に示す。

得られた  $\kappa$  および  $\nu$  を Fig. 6.3 に示す。 $\kappa$  および  $\nu$  の両者とも、含浸処理により増大を示しており、温度変化と湿度変化時の両条件において、含浸処理試験体が優秀な吸放湿性能を示すことが予測された。

### 6. 3. 2 平衡含水率の履歴

得られた平衡含水率の履歴の様子を Fig. 6.4 に示した。吸湿、放湿、再放湿のどの過程においても、平衡含水率は各測定湿度において、同じの値を示してい

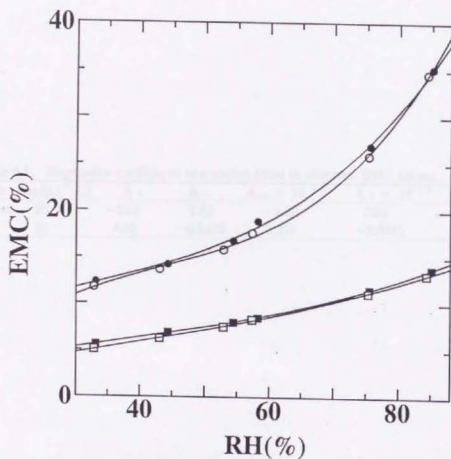


Fig. 6.2. Relationship between EMC with RH.

Legend: • :Treatment(20°C)  
○ :Treatment(25°C)  
■ :Non-treatment(20°C)  
□ :Non-treatment(25°C)

Table 6.1. Regression coefficients of equation fitted to observed EMC values.

Materials	Temp.( ° C)	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> × 10 <sup>-2</sup>	A <sub>3</sub> × 10 <sup>-4</sup>
Treatment	20	-22.2	1.83	-3.33	2.34
nomal	20	4.95	-0.0479	0.328	-0.0641

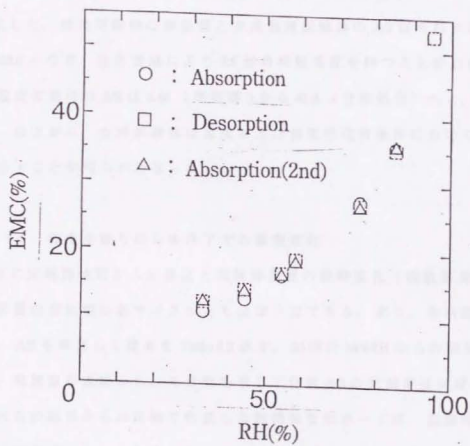


Fig.6.4. Hysteresis of EMC.

る。このことから、含浸試験体の吸放湿性能は乾湿繰り返し時にも安定した性能を示す可能性が示唆された。

### 6. 3. 3 吸湿量の経時変化

重量増加の経時変化  $W$  ( $\text{g/m}^2$ ) の湿度変動時の結果を Fig. 6.5 に、温度変動時の結果を Fig. 6.6 に示す。両実験条件において、含浸処理により  $W_t$  が大幅に増加している。測定結果に、式 (3.7) を最少自乗法にて当てはめ、吸湿速度係数  $A/2$  を算出した。湿度変動時の無処理と含浸処理試験体の  $A/2$  はそれぞれ、3.40 および 25.6 となり、塩の含浸により 7.5 倍の吸湿速度を持つことがわかった。また、温度変動時の  $A/2$  は 5.40 (無処理) から 45.2 (含浸処理) へと、8.4 倍となった。以上から、含浸試験体は温度および湿度変化両条件において高い吸湿性能を示すことが明らかとなった。

### 6. 3. 4 乾湿を繰り返し条件下での重量変化

Fig. 6.7 に実験開始時からの湿度と試験体重量の経時変化 (吸放湿量:  $W_t$ ) を示す。重量の変化幅は各サイクルともほぼ一定である。また、各吸脱湿過程において、 $A/2$  を算出した結果を Table 6.2 示す。初回の 54%RH からの吸湿時の値を除き、吸脱湿両過程とも、3 日間を通じて係数  $A/2$  の絶対値はほぼ一定である。これらの結果から本実験で作成した無機塩含浸ボードは、放湿時にも吸湿時と同じ性能を示し、また乾湿が繰り返された場合でも、安定した吸脱湿性能を維持することが示唆された。

### 6. 3. 5 調湿性能の検討

$A/V=0.35$  における相対湿度の経時変化を Fig. 6.8 に示す。デシケーター内に吸放湿材料が何もない状態を想定した場合、20℃から 10℃への温度低下で相対湿



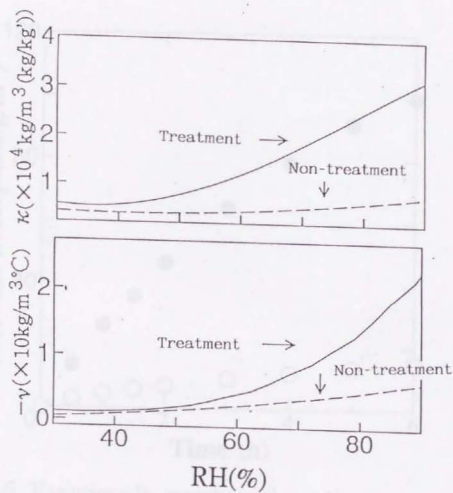


Fig.6.3 Relationships between  $\kappa, v$  with RH.

Note: Temperature was constant.

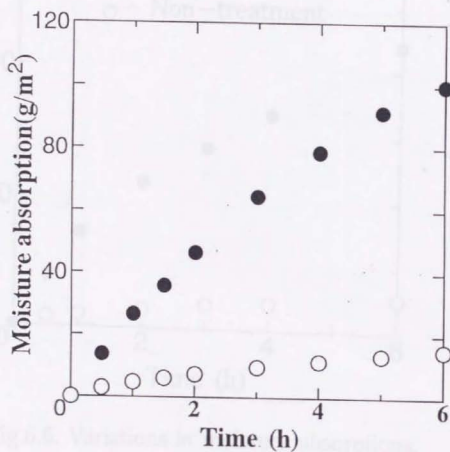


Fig.6.5. Variations in moisture absorptions.

Legend: ● :Treatment, ○ :Non-treatment.

Note: Temperature was constant.

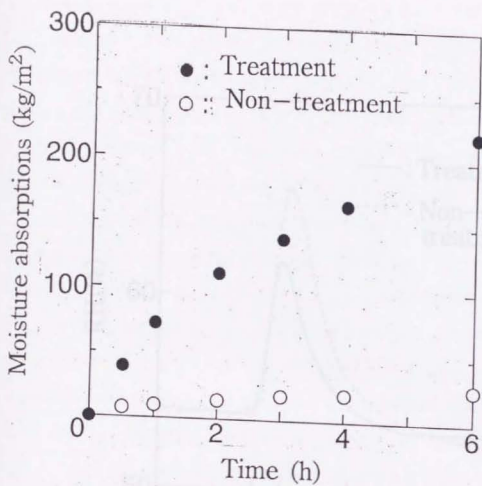


Fig.6.6. Variations in moisture absorptions.

Note: Absolute humidity was constant.

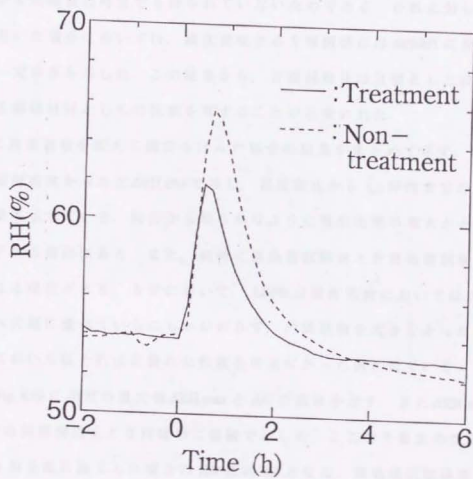


Fig. 6.8. Variations in RH.

度は 54% から約 100% にまで増加する。しかしながら、吸放湿材料を用いた本実験においては 70% 以下に抑えられている。また、含浸試験体は無処理試験体に比べ約 4% 低い最大値を示した。また、温度変化から 6 時間後の時点において、無処理試験体を用いた場合、湿度が低下傾向にあることが見て取れる。これは、温度低下によって試験体の平衡含水率が増加したために周囲雰囲気との平衡状態が 6 時間後の時点でも得られていないためである。それに対し、含浸試験体を用いた場合においては、温度変化から 3 時間後には 54%RH に戻り、その後は一定の値を示した。この結果から、含浸試験体は目標とした設計湿度を発現する調湿材料としての性能を有することが示唆された。

Fig. 6.9 に吸湿面積を変えて測定を行った場合の結果をまとめて示す。縦軸を養生時の相対湿度からの差  $\Delta RH$  (%) で表し、温度変化から 1.2 時間までの比較的初期の結果を示している。同図から明らかなように吸湿面積の増大とともに  $\Delta RH$  は低下する傾向にある。また、同時に無処理試験体と含浸処理試験体の差が小さくなる傾向がある。5 章において、LDPB は吸湿性能においてはアカマツ材に比べ大幅に優れているにもかかわらず、内装面積を大きくとった場合の調湿性能においてはそれほど優れた性能を出来なかった例と似ている。

さて、Fig. 6.10 に  $\Delta RH$  の最大値  $\Delta RH_{max}$  と  $A/V$  の関係を示す。また  $\Delta RH_{max}$  の対数と  $A/V$  の回帰関係をとり同図中に曲線で示した。ここで 8 畳大の空間を想定すると 4 面全面に施工した場合の  $A/V$  は約 1.2 となる。無処理試験体を 4 面に施工すると  $\Delta RH_{max}$  は 10% 程度であると想定されるが、同じ  $\Delta RH_{max}$  を発現するには、 $A/V$  は 6 程度と壁面 2 面程度ですむことがわかる。今回用いた試験体によって、内装面積減らすことが可能であることが示唆された。

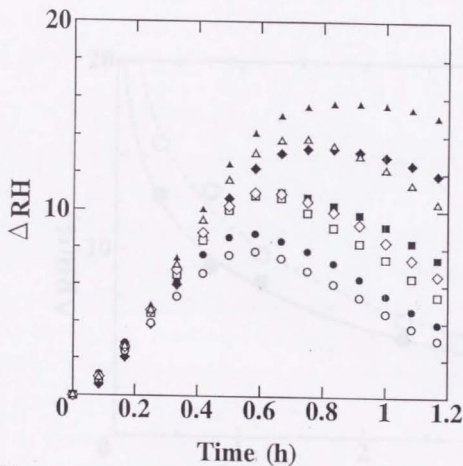


Fig. 6.9. Variations in RH.

Legend:  $\blacktriangle$ : A/V=0.35-Treatment  $\triangle$ : A/V=0.35-Non-treatment  
 $\blacklozenge$ : A/V=0.75-Treatment  $\lozenge$ : A/V=0.75-Non-treatment  
 $\blacksquare$ : A/V=1.2-Treatment  $\square$ : A/V=1.2-Non-treatment  
 $\bullet$ : A/V=2.3-Treatment  $\circ$ : A/V=2.3-Non-treatment

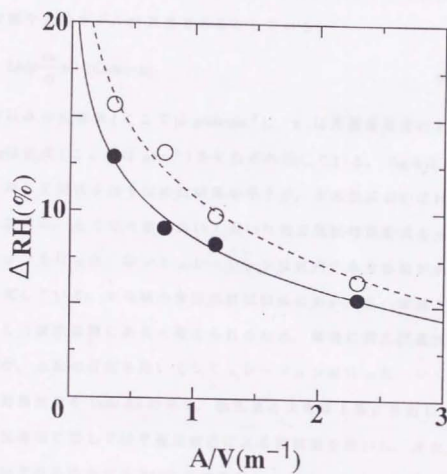


Fig. 6.10. Relationships between  $\Delta RH$  and  $A/V$ .

Legend: ● :Treatment, ○ :Non-treatment.



### 6. 3. 6 試験体の吸湿量変化のシミュレーション

本実験で作製した含浸試験体の実大空間での挙動を予測するための一助として、温度一定で湿度が変化した時の吸放湿量変化のシミュレーション方法について検討を行った。

洪澤は、合板に塩化カルシウムを含浸させた材料の吸放湿性能について検討を行っているが、その中で含浸試験体の吸湿量のシミュレーションにおいて次式に示す集中定数モデルが適当であるとしている。

$$2Ad\rho \frac{du}{dt} = -2KA(u_1 - u) \quad (6.1)$$

ここで、 $K$ は水分伝達率(ここでは  $\text{g/min}\cdot\text{cm}^2$ )、 $u_1$ は周囲温湿度における平衡含水率(%),  $\rho$ は密度(ここでは  $\text{g/cm}^3$ )をそれぞれ示している。Fig. 6.11に本実験の結果に対して同式を当てはめた結果を示すが、本実験においては同式は適当でないと考えた。そこで4章において用いた熱湿気同時移動式を元にしたシミュレーションを行った。本シミュレーションは材内の水分移動が水蒸気拡散に寄ると仮定している。本実験の含浸処理試験体においては、吸湿された水分は塩が溶解した液水状態にあると考えられるため、厳密に言えば適当ではないと思われるが、上記の仮定を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションに用いた物性値をTable 6.3に示す。物性値の決定は4章に準拠したが、本実験では熱伝導率に関しては平板比較法による実測値を用いた。また、4章とは異なりプログラムの全てをBASICにて作製し、パーソナルコンピュータ(日本電気社製: PC-9821Xa13)にて実行した。

シミュレーションによる重量増加の計算値をFig. 6.12に示した。計算値と実測値とは良好な一致が見られた。また、シミュレーションを行う過程で得られた試験体の $\lambda'$ は、無処理試験体が0.012、含浸試験体が0.51となった。処理によ

り42.5倍の増加が認められ、6.3.1に示した湿気容量値の結果と共に、含浸処理試験体の吸湿量増加を説明していると言える。

さて、このシミュレーションを元に実大空間における湿度挙動の予測を行った。室内の容積絶対湿度を $X_r(\text{kg/kg})$ 、外気容積絶対湿度を $X_o$ 、 $a$ を材表面の湿気伝達率 $(\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}(\text{kg/kg})))$ 、材表面の絶対湿度を $X$ 、乾燥空気の比重を $y(\text{kg}/\text{m}^3)$ とみると、換気が全くない室内の微小時間 $dt$ 当たりの室内の絶対湿度増加 $dX$ は次式で表される。

$$VY \frac{dX_r}{dt} = aA(X_r - X_o) \quad (6.2)$$

仮想する空間は5章で用いた4畳半大の空間とした(気積 $V=17.7\text{m}^3$ 、内装材の最大内装面積 $A$ は $20.2\text{m}^2$ )。但し換気は全く無いものとする。想定条件は内部に最大に内装材を施工した場合において、室内の温度が $20^\circ\text{C}$ 一定のまま相対湿度が43%から63%に増大した場合とした。計算結果をFig. 6.13に示す。含浸試験体は無処理試験体に比べ、相対湿度を低下させるスピードが速く、また設計湿度である54%付近に近づいており、調湿性能が現れているといえる。

また、空間に換気がある場合、換気量を $Q(\text{m}^3/\text{h})$ 、外気容積絶対湿度を $X_o$ とみると、次式が成り立つ。

$$VY \frac{dX_r}{dt} = Y(X_r - X_o)Q + aA(X_r - X_o) \quad (6.3)$$

そこで、温湿度条件は空間内を換気がない場合と同様とし、外気の温度を $5^\circ\text{C}$ 、相対湿度が65%で一定であり換気が存在する場合の相対湿度変化を予想した。換気量 $Q$ は0.05、0.5の2条件にとした。結果をFig. 6.14に示す。換気量0.05の場合には換気が無い場合とほぼ同様の挙動を示すが、換気がある場合は、外部の絶対湿度の低い空気が流入するため、相対湿度は大きく低下する。含浸処理試験体を用いた場合でも設計湿度の54%を保つ事は出来ないが、

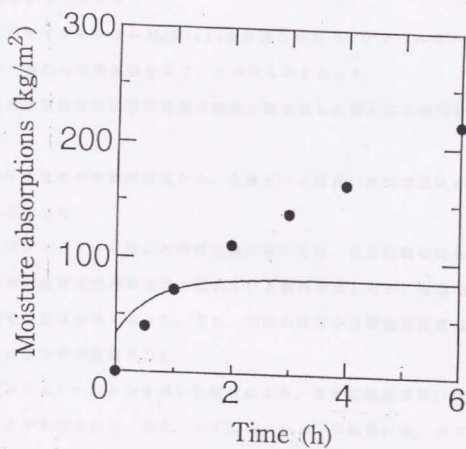


Fig. 6.11. Result of simulations predicting the concentrated constant model.

12時間後において無処理試験体の場合は相対湿度が依然低下状態にあるものの、含浸試験体ではそれを抑制していることがわかる。

#### 6. 4 まとめ

無機塩含浸パーティクルボードの吸放湿性能に関する検討を行った結果以下の知見が明らかとなった。

1) 硝酸マグネシウム  $Mg(NO_3)_2$  を含浸させたパーティクルボードは、無処理に比べ優れた吸湿性能を示すことが明らかとなった。

2) 含浸試験体の吸放湿性能は乾湿を繰り返した場合にも再現性があると言えた。

3) 平衡含水率の測定結果から、含浸ボードは高い湿気容量性能を持つ事が明らかとなった。

4) デシケーターを用いた調湿実験においては、含浸試験体は無処理試験体に比べ相対湿度変化抑制効果に優れている傾向を示したが、吸湿面積が増加すると両者の差は小さくなった。また、空間の湿度を目標設計湿度 (20℃において54%) に保つ事が確認された。

5) シミュレーションを用いた検討により、含浸試験体は高い湿気伝導率を持つことが示唆された。また、シミュレーションの結果には、4) で示された湿度調節機能が現れた。

Table 6.3. The Symbols used in simulation models and their values.

Physical properties	Symbols	Units	Values.	
			Treatment	Non-treatment
Thermal conductivity	$\lambda$	kcal/mh °C	0.095	0.071
Specific heat	$C_S$	kcal/kg °C	0.30	0.30
Latent heat	$\gamma$	kcal/kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	750	730
Coefficient of heat transfer	$a$	kcal/mh °C	3.5	3.5
Coefficient of moisture transfer	$a'$	kg/mh(kg/kg)	14.9	14.9

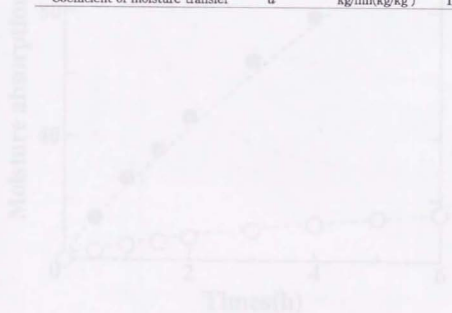


Fig. 6.12. Results of simulations predicting the heat and moisture transfer.

Legend: ● Treatment, ○ Non-treatment.

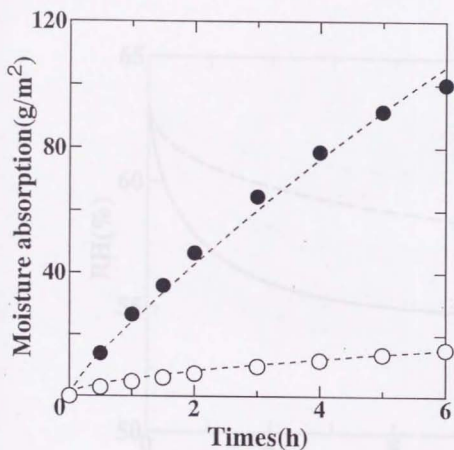


Fig. 6.12. Results of simulations predicting the heat and moisture transfer.

Legend: ● :Treatment, ○ :Non-treatment.

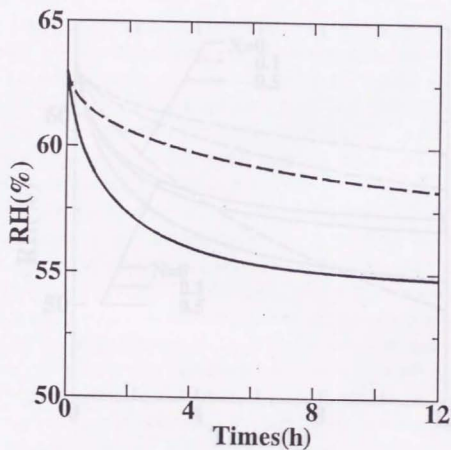
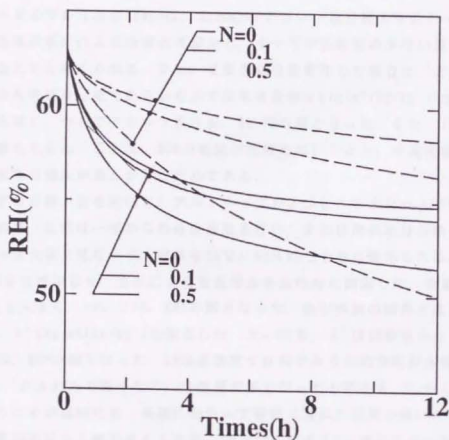


Fig. 6.13. Variations in RH with time as predicted by the simulation.

Legend: — :Treatment, --- :Non-treatment.





**Fig. 6.14. Variations in RH with time predicted by the simulation with various number of air changes**

**Legend:** — :Treatment, ---- :Non-treatment.

**Note:** N was the number of air changes

## 7. 結言

本論分の研究結果をまとめると以下ようになる。

まず、3章では数種の市販木質ボードの吸湿性能について検討を行った。試験に用いたボードは、中質繊維板(MDF)、配向削片板(OSB)、硬質繊維板(HB)、軟質繊維板(IB)、PB、針葉樹合板、南洋材合板およびアカマツ板目板の8種類である。

木質ボードの平衡含水率(EMC)は、おおむねアカマツ板目板より低かった。これは、製造時の熱圧による吸着点の減少と、ボードが吸湿量の少ない接着剤を含んでいるためと考えられる。また、湿度が単位量変化した場合に、どれだけの量の水分を吸放湿可能であることを示す湿気容量値 $\kappa$  ( $\text{kg}/\text{m}^3(\text{kg}/\text{kg}')$ )は、OSBがもっとも高く、ついでアカマツ板目板、HB、PBの順となった。また、IBはもっとも低い値を示した。これは、OSBの密度が比較的高いことと、中高湿度領域での平衡含水率の増加が著しかったためである。

各ボードを片側一面を除いて、アルミテープおよびビニールシートで断湿した。この結果、材料は一面からのみ吸放湿を行い、また材内の水分の動きは材厚方向の一次元流と見なせる。材料を20℃、54%RHで十分に養生した後、周囲湿度を75%まで増加させ、吸湿による重量増加を経時的に測定した。吸湿量はIBがもっとも大きく、ついでPB、MDFの順となった。吸湿実験の結果と湿気容量値 $\kappa$ から、 $\lambda'$  ( $\text{kg}/\text{mh}(\text{kg}/\text{kg}')$ )を推定した。その結果、 $\lambda'$ はIBがもっとも高く、ついで、PB、MDFの順となった。IBは低密度な材料であるため空隙が多数存在し、その結果 $\lambda'$ がきわめて高くなり、吸湿量が多くなったと言える。しかしながら、前述のように $\kappa$ が低いため、長期にわたって吸湿(放湿)状態が続いた場合には湿気容量が不足する事が考えられる。PBはIBに次ぐ $\lambda'$ と素材に近い湿気容量性能を持ち、調湿材料として有効であることが考えられた。

4章ではPBの密度が吸湿性能に及ぼす影響を検討するために、密度が0.3~0.7 $\text{g}/\text{cm}^3$ のボードを製造し、その吸湿性能を検討した。

製造したPBのEMCは原料チップより小さくなった。特に高密度ボードでは、その傾向は顕著であった。これは、高密度であることから熱伝導率が高く、また材厚も高密度の物ほど薄く設定されていたため、製造時に材内部まで熱の影響をうけた結果であると考えられる。また、 $\kappa$ は密度の影響を受けるため、低密度化によって減少を示した。

ボード密度の低下によって吸湿量の増加が見られた。吸湿量の経時変化から

得られた吸湿速度係数は、密度低下に対して直線的に増加した。

熱湿気同時移動の基礎式を用いて、吸湿による重量増加のシミュレーションを行った。その際、シミュレーション結果と実測値の適合を繰り返すことにより、試験体の $\lambda'$ を決定した。得られた $\lambda'$ の対数とボード密度の間には強い回帰関係が見られた。低密度化による吸湿量の増加は、 $\kappa$ の減少を補ってあまりある $\lambda'$ の大幅な増加によることが示唆された。また、厚さ方向の比重分布を考慮することにより、シミュレーションの精度を高めることが可能であった。シミュレーションの結果から、吸湿時の材内水分分布の経時変化を推定した。その結果、低密度ボードは材内のより深部まで吸湿に寄与していることが示唆された。そのため、調湿材料として低密度ボードを使用した場合、その湿気伝導性能をいかに発揮させるためには、材厚を十分にとる必要があるといえる。

5章では4畳半大の高気密空間内の温度を変化させた場合の、木質材料の調湿性能を測定した。実験は冬季に行い、測定期間は3日とした。試験体には、アカマツ板目板およびPB（密度 $0.5\text{g}/\text{cm}^3$ ）を用いた。

木質材料の施工により室内の湿度変動は抑制され、調湿効果が確認された。また、PBはアカマツよりも湿度変化を早期に押さえる効果があった。調湿性能の評価指標であるB値を用いて、評価を行った結果、内装面積が増加するにつれ調湿性能は増加するものの、アカマツ板目板とPB間の差異は小さくなることが判った。さらに、木質材料が吸放湿する水分量を算出した。その結果、内装された木質材料は乾燥傾向にあることが判った。これは、外部の乾燥した空気が流入するためと考えられた。そのため、継続的に調湿性能を得るためには、何らかの方法で水分を補給する必要があることが示唆された。

以上までにより、低密度化によってPBの湿気伝導性能を増加させることが可能であることが判ったが、より調湿性能に優れた材料の開発を目的とした場合、材料の湿気容量を増加させることが考えられる。そこで6章では、PBに無機塩（硝酸マグネシウム： $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ）を含浸させたボードの吸湿および調湿性能を検討した。

密度 $0.5\text{g}/\text{cm}^3$ のPBを硝酸マグネシウム水溶液中に浸漬し、減圧による注入を行った。その後、全乾状態にして測定に供した。処理により、約18%の重量増加が発生し、塩の含浸が認められた。

得られた含浸試験体のEMCは、無処理に比べ全体的に増加した。特に、硝酸マグネシウム飽和水溶液の平衡湿度である相対湿度54%(20℃時)以上の湿度域では、

その増加が著しい。また、同湿度以下の湿度域においても、結晶水によるものと思われる増加が確認された。湿気容量値も相対湿度54%以上の湿度域で大幅に増加した。また、試験体を全乾状態から吸湿させた場合のEMCと、飽和状態から脱湿させた場合のEMCがほぼ同一の値を示したことから、含浸試験体の吸放湿性能が吸放湿を繰り返した場合にも、安定して発現される可能性が予測された。また、含浸処理により吸湿量は著しく増大した。また、その効果が吸放湿を繰り返した場合においても同様に発現され、含浸試験体が安定した吸放湿性能を持つことが確認された。

デシケーター内に試験体を設置し、デシケーター周囲の温度を変化させた場合の内部の湿度変化を経時的に測定した。その結果、含浸試験体は無処理試験体に比べて、温度変化による相対湿度変化幅を小さく押さえることが判った。また、デシケーター内の相対湿度を一定(20℃の場合54%)に保つ作用のあることが判った。

実大空間内の湿度変動をシミュレーションによって予測したところ、含浸試験体が高い調湿性能を示すことが判った。また、デシケーターでの調湿実験時に見られた一定の湿度に保つ作用が、シミュレーションによっても確認された。

本研究によって、比較的低密度のPBが吸湿性能に優れていることを示し、さらに吸放湿性能に優れた材料開発の模索を行った。また、それらの調湿性能を実大空間での実験を交えて検討した。実用に際してはPBは内装下地として用いられ、壁紙等の表面修飾を受けることとなると思われるが、透湿性を持つ壁紙の使用によってその性能を発揮することが可能であると考えられる。

また、今回シミュレーションを用いた材内の水分分布の推定方法とその精度向上について考察を行っているが、同手法は今後の材料設計時に極めて有効な手段であると考えられるため、今後は簡略化を含めた更なる検討が必要であろう。

## 謝辞

本研究を行うに当たり、終始適切な御指導および御助言を下さいました、東京大学大学院農学生命科学研究科 大熊幹章教授、有馬孝礼教授、信田 聡助手、堀本敬大助手に深く感謝の意を表します。また、本論文の第4章および第5章に関しては、岩手大学農学部 沢辺 攻教授、関野 登助教授に御指導を受けました。両先生に深く感謝いたします。

東京大学、岩手大学の両校で、多くの先輩の御助言をいただきました。特に岩手大学62年次卒業の和田洋一さんには、第5章のアカマツのデーターの使用を許諾していただきました。この場を借りて御礼申し上げます。また、両校の同輩および後輩の諸君にも、御礼を述べたいと思います。

なお、パーティクルの製造に際し、森林総合研究所 複合化研究室、海老原 徹室長（当時）、高麗秀明氏および東京ボード工業株式会社、斉藤 吉之氏の御協力をいただきました。有難うございました。

また、実験を進める上で、多くの試験体を提供してくださった関係企業の皆様にもお礼を申し上げたく思います。

文献

- 1) 澤田 茲次: 日本建築学会第21回熱シンポジウム要旨集, 169-177(1991)
- 2) 松田 良夫: 日本建築学会第21回熱シンポジウム要旨集, 151-157(1991)
- 3) 日本家屋害虫学会編: 家屋昆虫, 井上書店(1984)
- 4) C. -E. A. Winslow and L. P. Herrington: 温度と人間, 人間と技術社(1974)
- 5) 山田 正編: 木質環境の科学, 海青社(1987)
- 6) 健康で快適な住宅研究会編: 健康快適住宅宣言, ケイブン出版, (1991), p. 74
- 7) 永田 四郎: 古文化財教育研究報告, 1, 17-25(1972)
- 8) 永田 四郎: 古文化財教育研究報告, 2, 13-19(1973)
- 9) 東 修三: 木材工業, 7, 29, 287-291(1974)
- 10) 永田 四郎: ハウスクリマ研究ノート10, 9-12(1984)
- 11) 上村 武: 木材工業, 25, 29(1970)
- 12) 前田 敏夫: 日本建築学会発表梗概集(近畿), (1952)
- 13) 堀江 吾郎: 建築雑誌, 81, 327(1966)
- 14) 堀江 吾郎: 北大工学部研究報告, 28, 78(1962)
- 15) 則元 京, 山田 正: 木材工業, 7, 29(1974)
- 16) 則元 京, 山田 正: 木材工業, 4, 32(1977)
- 17) 宮野 秋彦, 大澤 徹夫, 稲葉 一八, 神谷 清仁, 水谷 章雄: 空気調和・衛生工学, 7, 61, 1-8(1987)
- 18) 神谷 清仁, 宮野 秋彦, 稲葉 一八: 日本建築学会学術講演梗概集(東海), 877-878(1980)
- 19) 花岡 利昌, 東 修三編: ハウスクリマ, 海青社(1985)
- 20) 鈴木 正治: 東京農工大学農学部演習林報告, 24, 89-99(1986)
- 21) 坂東 慎二, 佐道 健: 京都大学農学部演習林報告, 63, 256-264(1991)



- 22)佐道 健,黒岩真弓:木材学会誌,4.39,412-417(1991)
- 23)岡野 健:木材工業,10.33,413-423(1978)
- 24)岡野 健,三輪雄四郎,三城昭義,浅野猪久夫:木材学会誌,6.25,379-382(1979)
- 25)牧 福美,則元 京,山田 正:木材学会誌,24.797-801(1978)
- 26)牧 福美,則元 京,青木 努,山田 正:木材工業,36.476(1981)
- 27)牧 福美,則元 京,青木 努,山田 正:木材学会誌,12.26,767-772(1980)
- 28)牧 福美,則元 京,青木 努,山田 正:木材学会誌,12.27,828-832(1981)
- 29)岡野 健:木材工業,10.33,413-423(1978)
- 30)岡野 健,三輪雄四郎,三城昭義,浅野猪久夫:木材学会誌,6.25,379-382(1979)
- 31)王 松永,卓 志隆:木材学会誌,6.40,648-655(1994)
- 32)王 松永,卓 志隆:木材学会誌,2.40,220-230(1994)
- 33)大釜敏正, 則元 京,小原二郎:木材工業,1.42,14-18(1988)
- 34)JIS Z 0208
- 35)齊藤平蔵,関根正明,宮路英二:日本建築学会論文報告集,7.No.57,(1957)
- 36)齊藤平蔵:日本建築学会論文報告集,10.No.63,(1959)
- 37)齊藤平蔵:日本建築学会論文報告集,9.No.66,(1960)
- 38)齊藤平蔵:日本建築学会論文報告集,10.No.66,(1960)
- 39)鈴木正治:林試研報,257,1-56(1973)
- 40)齊藤平蔵:日本建築学会論文報告集,10.No.60,(1957)
- 41)財団法人建材試験センター編:建材試験情報,8,32,34-37(1996)
- 42)中尾正喜,大島一夫:日本建築学会論文報告集,5.No.315,(1982)
- 43)松本 衛:日本建築学会大会学術講演会梗概集(環境工学),943(1987)
- 44)加藤幸一,星野敏彦:第38回日本木材学会大会研究発表要旨集(1988)



- 45)坂本雄三,瀬戸祐直,渡辺一正:日本建築学会学術講演梗概集(環境工学),5  
67(1988)
- 46)池田哲朗:日本建築学会大会学術講演会梗概集(環境工学),355(1985)
- 47)信田 聡:木材学会誌,10,37,981-985(1991)
- 48)Hailwood, A. J.; Morrobin, S.: Trans. Faraday Soc. Discussions of the Faraday Soc., 42-B, 84-102(1946)
- 49)佐道 健:京都大学農学部演習林報告,61,310-318(1989)
- 50)松本 衛:学位論文(京都大学)(1978)
- 51)松本 衛,沢田和治:日本建築学会近畿支部研究報告集,101-104(1971)
- 52)池田哲朗,川上 貢:ハウスクリマ,海青社(1985),134-149
- 53)松尾 陽,永田 明寛:日本建築学会環境工学委員会第21回熱シンポジウム要旨集,55-64(1991)
- 54)関野 登:木材学会誌,5,40,519-526(1994)
- 55)加藤幸一,新保和季:第38回日本木材学会大会研究発表要旨集(1988)
- 56)近江正陽,鈴木正治:東京農工大学農学部演習林報告,28,31-45(1990)
- 57)斉藤 勝,駒沢克己:日本木材学会北海道支部講演集,21,79-82(1989)
- 58)斉藤 勝:林産試験場報,5,4,20-23(1990)
- 59)渋谷龍也:学位論文(東京大学),195-234(1994)
- 60)木村健一:財団法人トステム建材産業振興財団第1回研究助成成果発表会資料(1994)
- 61)白石靖幸他4名:日本建築学会大会学術講演会梗概集(環境工学II),301-302(1996)
- 62)藤田哲典他3名:日本建築学会大会学術講演会梗概集(環境工学II),303-304(1996)
- 63)松岡 章:木材工業,6,48,275-277(1993)

- 64) Simpson, W.: Wood and Fiber, 5, 41-49 (1973)
- 65) H. A. Spalt: For. Prod. J., 8, 8, 288-295 (1958)
- 66) 関野 登, マーク・アール: 木材学会誌, 1, 42, 43-50 (1996)
- 67) 関野 登, 朝倉靖弘: 木材学会誌, 10, 39, 1146-1151 (1993)
- 68) 信田 聡, 大熊幹章: 木材学会誌, 26, 112-117 (1981)
- 69) Simpson, W.: For. Prod. J., 21, 48-49 (1971)
- 70) 福山 萬二郎: 改訂基礎木材工学, 文教出版, (1983), p. 75-88
- 71) 松本 衛: 新建築学体系10 (環境物理), 彰国社, p. 127-134
- 72) 齊藤平蔵: 日本建築学会論文集, 59 (1958)

付録 A 熱湿気同時移動方程式の差分解法

(1) 線形熱湿気同時移動方程式

材料内部の相対湿度が 30 % ~ 80 % で水分の移動が水蒸気拡散支配領域 ( 相対湿度変化幅が 20 ~ 30 % 程度、温度変化幅が 10C° 程度 ) の場合、熱湿気同時移動方程式は、線形で取り扱うことが出来るとされている。 [7]

線形熱湿気同時移動方程式は、以下のような連立の偏微分方程式である。

$$(C' \gamma' + \kappa) \frac{\partial X}{\partial t} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (a-1)$$

$$(C_s \gamma + r \nu) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \gamma \kappa \frac{\partial X}{\partial t} \quad (a-2)$$

C' : 空隙率

$\gamma'$  : 空気比重  $\text{kg/m}^3$

X : 重量絶対湿度  $\text{kg/kg}$  以下  $\text{kg/kg}'$  と示す。

$\theta$  : 温度  $^{\circ}\text{C}$

C<sub>s</sub> : 比熱  $\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$

$\lambda$  : 熱伝導率  $\text{kcal/mh}^{\circ}\text{C}$

$\gamma$  : 材料の比重  $\text{kg/m}^3$

r : 吸着熱  $\text{kcal/kgH}_2\text{O}$

x : 位置座標 m

t : 時間座標 h

式(3)は材内空隙の水蒸気移動式であり、式(4)は材内の熱移動式である。

また、境界条件は次式のように示される。

$$-\lambda' \left. \frac{\partial X}{\partial x} \right|_s = \alpha' (X_a - X_s) \quad (a-3)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_s = \alpha (\theta_a - \theta_s) \quad (6)$$

$X_a$ 、 $X_s$  : 空気及び材料表面の重量絶対湿度  $\text{kg/kg'}$

$\theta_a$ 、 $\theta_s$  : 空気及び材料表面の温度  $^{\circ}\text{C}$

$\alpha'$  : 湿気伝達率  $\text{kg/mh}(\text{kg/kg'})$

$\alpha$  : 熱伝達率  $\text{kcal/mh}^{\circ}\text{C}$

## (2) $\kappa$ および $\nu$ の算出方法

材料の湿気容量的性能を示す  $\kappa$  および  $\nu$  の算出方法を以下に述べる。

$\kappa$  は重量絶対湿度変化に対する平衡含湿率変化である。

ここで含水率とは乾量基準含水率  $u$  (%)、すなわち、

$$u = \frac{W_u - W_o}{W_o} = \frac{W_{hu}}{W_o} \quad (a-4)$$

$W_u$  : 含水率  $u$  の木材重量  $\text{g}$

$W_o$  : 全乾重量  $\text{g}$

$W_{hu}$  : 含水率  $u$  の木材に含まれる水分重量  $\text{g}$

で表される値であり、含湿率  $\omega$  ( $\text{kg/m}^3$ ) とは

$$\omega = \frac{W_h}{V} \quad (a-5)$$

W h : 含湿率  $\omega$  の木材に含まれる水分重量 kg

V : 含湿率  $\omega$  の木材容積 m<sup>3</sup>

で表される値である。

また、含水率  $u$  と含湿率  $\omega$  の関係は次式のようになる。

$$\omega = u \frac{1000 \cdot W_o}{V u} \quad (a-6)$$

V u : 含水率  $u$  の木材容積 m<sup>3</sup>

相対湿度  $\phi$  を重量絶対湿度に変換するために、以下の方法を用いた。

飽和水蒸気圧は、次式から求めた。この式は文献 [5] に示された飽和水蒸気圧と温度の関係（温度 15 ~ 25 °C の間）に、4 次多項式を当てはめたものである。

$$P_s = 12.0236 - 1.23155 \theta + 0.132765 \theta^2 - 0.00399798 \theta^3 + 0.0000563401 \theta^4 \quad (a-7)$$

P<sub>s</sub> : 飽和水蒸気圧 mmHg

$\theta$  : 温度 °C

重量絶対湿度と水蒸気圧との間には 1 気圧において次式の関係がある。

$$P = \frac{760 X}{X + 0.622} \quad (a-8)$$

X : 重量絶対湿度 kg/kg'

また相対湿度  $\phi$  (%) は次式で表される。

$$\phi = (P / P_s) \times 100 \quad (a-9)$$

P : 水蒸気圧 mmHg

式 (a-6) と式 (a-8) を式 (a-9) に代入し整理する事により重量絶対湿度は相対湿度と温度から次式で表せる。

$$X = 0.622 / \{ (760 \times 100) / (\phi P_s - 1) \} \quad (a-10)$$

相対湿度を式 (a-10) により重量絶対湿度に変換し、また平衡含水率を式 (a-6) で含湿率に変換することにより重量絶対湿度と平衡含湿率の関係を得た。得られた関係から  $\kappa$  を中心差分で求めた。すなわち温度  $\theta$ 、重量絶対湿度  $X$  の場合の  $\kappa$  を  $\kappa(\theta, X)$ 、含湿率を  $\omega(\theta, X)$  で表し、 $\theta$  の刻みを  $\Delta\theta$ 、 $X$  の刻みを  $\Delta X$  (kg/kg) とすると、以下のように  $\kappa$  は算出される (参照)。

$$\kappa(\theta, X) = \{ \omega(\theta, X + \Delta X) - \omega(\theta, X - \Delta X) \} / 2 \Delta X \quad (a-11)$$

温度変化に対する含水率変化量  $\nu$  は、以下のように算出した。

温度  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  間の重量絶対湿度  $X$  に対する  $\nu$  を  $\nu(X)$  で表すと

$$\nu(X) = \{ \omega(\theta_2, X) - \omega(\theta_1, X) \} / (\theta_2 - \theta_1) \quad (a-12)$$

となる。

### (3) 差分法による数値解法

吸湿現象のコンピュータシミュレーションを行うためには、線形熱湿気同時移動方程式を解く必要がある。連立の偏微分方程式である同方程式を数値解的に解くために差分式による近似解法を用いた。

シミュレーションのモデルを、片面を空気に接した熱湿気伝達条件、もう片面を断熱断湿条件とした。本実験においては、試験体の吸湿面が熱湿気伝達条件に、厚さ方向の中心部が断熱断湿条件に対応する。すなわち、シミュレーションは吸湿面から試験体内部の厚さ方向の中心までの、試験体の半分の部分に対して行われる。

式 (a-1)、(a-2) を以下のように変形する。

$$\frac{\partial X}{\partial t} = a \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + b \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (a-13)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = c \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + d \frac{\partial X}{\partial t} \quad (a-14)$$

ただし、

$$a = \frac{\lambda'}{C' \gamma' + \kappa} \quad (a-15) \quad b = \frac{\nu}{C' \gamma' + \kappa} \quad (a-16)$$

$$C = \frac{\lambda}{C_s \gamma + r \nu} \quad (a-17) \quad d = \frac{r \kappa}{C_s \gamma + r \nu} \quad (a-18)$$

(a-13) 式の左辺を前進差分近似、右辺第 1 項を中央差分近似、第 2 項を前進差分近似し、整理すると次式が得られる。

$$X(m, n+1) - b \theta(m, n+1) = p X(m+1, n) + (1-2p) X(m, n) + p X(m-1, n) - b \theta(m, n) \quad (a-19)$$

ただし  $p' = a \Delta t / \Delta x^2$

同様に (a-14) 式も

$$\theta(m, n+1) - d X(m, n+1) = d \theta(m+1, n) + (1-2d) \theta(m, n) + p \theta(m-1, n) - d X(m, n) \quad (a-20)$$

ただし  $p = c \Delta t / \Delta x^2$

ここで  $\theta(m, n)$ 、 $X(m, n)$  はそれぞれ位置  $x = m \Delta x$ 、時刻  $t = n \Delta t$  における温度と重量絶対湿度である。

湿気伝達境界条件は式 (a-13) の左辺を後退差分すると

$$- \frac{X(0, n) - X(-1, n)}{\Delta x} = \alpha (X(a, n) - X(0, n)) \quad (a-21)$$

これを整理して、

$$X(0, n+1) - b \theta(0, n+1) = p X(1, n) + (1-p-p\Delta h) X(0, n) + p \Delta h X(a, n) - b \theta(0, n) \quad (a-22)$$

ただし  $h = \alpha / \lambda' \lambda$ 、



同様に熱伝達条件は

$$-\lambda \frac{\theta(0,n) - \theta(-1,n)}{\Delta t} = \alpha (\theta_a(n) - \theta(0,n)) \quad (a-23)$$

$$\begin{aligned} \theta(0,n+1) - d X(0,n+1) &= p \theta(1,n) + (1-p - p \Delta h) \theta(0,n) \\ &+ p \Delta h \theta_a(n) - d X(0,n) \end{aligned} \quad (a-24)$$

ただし  $h = \alpha / \lambda$

また断熱断湿部分では

$$-\frac{\partial X}{\partial x} \bigg|_{=n} = 0 \quad (a-25)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial X} \bigg|_{=n} = 0 \quad (a-26)$$

であるから、これを中心差分によって次式の様に近似する。

$$X(M+1,n) = X(M-1,n) \quad (a-27)$$

$$X(M+1,n+1) = X(M-1,n+1)$$

$$\theta(M+1,n) = \theta(M-1,n)$$

$$\theta(M+1,n+1) = \theta(M-1,n+1) \quad (a-28)$$

これを式(a-13), (a-14)で  $m = M$  とし式(a-27), (a-28)を代入すると

$$\begin{aligned} X(M,n+1) - b \cdot \theta(m,n+1) &= (1-2p) X(M,n) + 2p(M-1,n) \\ &- b \theta(m,n) \end{aligned} \quad (a-29)$$

$$\begin{aligned} \theta(M,n+1) - d \cdot X(m,n+1) &= (1-2p) \theta(M,n) + 2p(M-1,n) \\ &- b X(m,n) \end{aligned} \quad (a-30)$$

式(a-19), (a-20), (a-22), (a-24), (a-29), (a-30)の右辺は  $n$  次の値、左辺は  $n+1$  次の値である。したがって  $n=0$  次の初期条件として材内の重量絶対湿度を一定とし、その後逐次右辺の変数を既知として方程式を解くことを繰り返す

て方程式の解を求める。

以上のような数値計算法を陽解法と呼ぶ。陽解法は解法が簡単であるが、解の集束のために時間刻みと空間刻みを小さく取らねばならない。予備実験の結果、本実験では、時間刻み  $5 \times 10^{-4}$  m、空間刻み  $1 \times 10^{-4}$  hr で充分集束することが判ったので、空間刻みがこの近値となるように空間分割数を決定した。

#### (4) 吸湿量の算出

熱湿気同時移動方程式を解いて得られた解は、時刻  $n$  おける材内の座標位置  $m$  の、温度  $\theta$  と重量絶対湿度  $X$  である。これらより境界層の湿流の積分値  $W_b$  をもとめ、これを試験体の吸湿量とした。以下にその方法を示す。

式 (a-21) より、時刻  $t$  の表面湿流の値を  $g(t)$  は次式で表される。

$$g(t) = -\lambda' \frac{\partial X}{\partial x} \Big|_{=0} = \alpha (X_a - X_0) \quad (a-31)$$

ゆえに、時刻  $T$  までの  $W_b$  を  $W_b(T)$  とおくと  $W_b(T)$  は、次式で表される。

$$W_b(T) = \int_0^T g(t) dt = \int_0^T \alpha (X_a - X_0) dt \quad (a-32)$$

付録 B.1 吸湿シミュレーションプログラム (FORTRAN77)

```

C      DOUJ3 AIR REAL TIME DATA
C
      INTEGER IT,IX,M
      INTEGER CO
      REAL PH,PM
      REAL HH,HM
      REAL DT
      REAL DX
      REAL OA,XA
      REAL D,B
      REAL K1,K2
      REAL S1,S2
      REAL SX,SO
      REAL O1(1000),X1(1000)
      REAL AT(200),AX(200)
      REAL AT1,AX1
      REAL AT2,AX2
      REAL KAPPA0,KAPPA1,KAPPA2
      REAL MUU
      REAL RD
      REAL X
      REAL AH
      REAL SH
      REAL SG
      REAL DAMMY

C      DATA READ
C
      READ(20,* ) PH
      READ(20,* ) HH
      READ(20,* ) HM
      READ(20,* ) DT
      READ(20,* ) DX
      READ(20,* ) M
      READ(20,* ) KAPPA0
      READ(20,* ) KAPPA1
      READ(20,* ) KAPPA2
      READ(20,* ) MUU
      READ(20,* ) AH
      READ(20,* ) SH
      READ(20,* ) SG

C      AIR TEMP AND HUME DATA READ
C      CALC TIME 12hr VERSION
      DO 30 I=1,144
        READ(21,* ) AT(I),AX(I),DAMMY
30    CONTINUE

C      DAMMY=DAMMY+0
C      INITIAL AIR DATA SET
C
      CO=0

```

```

L=1
AT1=AT(1)
AT2=AT(2)
AX1=AX(1)
AX2=AX(2)
C
DO 50 I=1,M
  O1(I)=AT(1)
  X1(I)=AX(1)
  OA=AT(1)
  XA=AX(1)
50 CONTINUE
C
DO 100 IX=1,M
C
  WRITE(22,701) O1(IX),X1(IX),OA,XA
100 CONTINUE
C
  MAIN ROOP
C
  ITTE=1.0/dt (hr)   ITE=CALC. TIME
C
  S1=1.0
  S2=2.0
C
DO 110 IT=1,120000
C
  AIR DATA ---) OA, OX
  OA=(AT2-AT1)/833*REAL(CO)
  XA=(AX2-AX1)/833*REAL(CO)
  OA=AT1+OA
  XA=AX1+XA
C
  m=1 (MATORIX:X=0)
  X=X1(1)
  CALL KAPPA(X,KAPPA0,KAPPA1,KAPPA2,KAPPAX)
  CALL PARAM(RD,KAPPAX,DT,DX,MUU,AH,SH,SG,PM,B,D)
  SX=X1(1)
  SO=O1(1)
  K1=S2*PH*O1(2)+(S1-S2*PH-S2*PH*DX*HH)*O1(1)+S2*PH*DX*HH*OA-D*SX
  K2=S2*PM*X1(2)+(S1-S2*PM-S2*PM*DX*HM)*X1(1)+S2*PM*DX*HM*XA-B*S0
  X1(1)=(K1*B+K2)/(S1-B*D)
  O1(1)=K1+D*X1(1)
C
  2<=m<=M-1
  DO 111 I=2,M-1
  X=X1(I)
  CALL KAPPA(X1,KAPPA0,KAPPA1,KAPPA2,KAPPAX)
  CALL PARAM(RD,KAPPAX,DT,DX,MUU,AH,SH,SG,PM,B,D)
  K1=PH*O1(I+S1)+(S1-S2*PH)*O1(I)+PH*O1(I-S1)-D*X1(I)
  K2=PM*X1(I+S1)+(S1-S2*PM)*X1(I)+PM*X1(I-S1)-B*O1(I)
  X1(I)=(K1*B+K2)/(S1-B*D)

```

```

      O1(I)=K1+D*X1(I)
111  CONTINUE
C
C      m=M
      X=X1(M)
      CALL KAPPA(X1,KAPPA0,KAPPA1,KAPPA2,KAPPAX)
      CALL PARAM(RD,KAPPAX,DT,DX,MUU,AH,SH,SG,PM,B,D)
      K1=(S1-S2*PH)*O1(M)+S2*PH*O1(M-S1)-D*X1(M)
      K2=(S1-S2*PM)*X1(M)+S2*PM*X1(M-S1)-B*O1(M)
      X1(M)=(K1*B+K2)/(S1-B*D)
      O1(M)=K1+D*X1(M)
C
      IF (CO.EQ.833) THEN
        CO=0
        L=L+1
        AT1=AT(L)
        AT2=AT(L+1)
        AX1=AX(L)
        AX2=AX(L+1)
C
      DO 120 IX=1,M
C
      WRITE(22,701) O1(IX),X1(IX),OA,XA
701  FORMAT(4F15.7)
120  CONTINUE
      ELSE
        CO=CO+1
      END IF
C
110  CONTINUE
C
C
C      STOP
      END
C
      SUBROUTINE KAPPA(XS,KAPPA0S,KAPPA1S,KAPPA2S,KAPPAXS)
      REAL XS,KAPPA0S,KAPPA1S,KAPPA2S,KAPPAXS
      KAPPAXS=KAPPA0S+KAPPA1S*XS+KAPPA2S*XS*XS
      RETURN
      END
C
C      SUBROUTINE PARAM(RDS,KAPPAXS,DTS,DXS,MUUS,AHS,SHS,SGS,PMS,BS,DS)
      REAL RDS,KAPPAXS,DTS,DXS,MUUS,AHS,SHS,SGS
      REAL PMS,BS,DS
      PMS=RDS/KAPPAXS*DTS/DXS*DXS
      BS=MUUS/KAPPAXS
      DS=AHS*KAPPAXS/(SHS*SGS+AHS*MUUS)
      RETURN
      END

```

付録 B.2 吸湿シミュレーションプログラム ( N88-BASIC )

```

10 'SAVE "DOUJLBAS",A
20 defdbl a-h,j-z
30 DIM O1(2000),X1(2000)
40 DIM O2(150,50),X2(150,50)
45 DIM OA(150),XA(150)
48 dr$="h:"
50 FILES dr$
55 input "air data";fax$
60 INPUT "FIXED DATA ";FX$
65 FaX$=dr$+FaX$+".DAT"
70 FSX$=dr$+FX$+".DAT"
71 open FaX$ FOR INPUT AS #1
73 FOR I=1 TO 200
74 IF EOF(#1) THEN 77
75 INPUT #1,OA(I),XA(I)
76 NEXT I
77 CLOSE #1
80 OPEN FSX$ FOR INPUT AS #1
90 INPUT #1,PH
100 INPUT #1,HH
110 INPUT #1,HM
120 INPUT #1,O0
130 INPUT #1,X0
140 INPUT #1,dt
150 INPUT #1,dx
160 INPUT #1,M
170 INPUT #1,KAPPA0
180 INPUT #1,KAPPA1
190 INPUT #1,KAPPA2
200 INPUT #1,MUU0
203 INPUT #1,MUU1
204 INPUT #1,MUU2
210 INPUT #1,AH
220 INPUT #1,SH
230 INPUT #1,SG
240 INPUT #1,RDH
245 INPUT #1,RDM
250 INPUT #1,ITE 'KEISOKU KAISUU=DATA OUTPUT
260 INPUT #1,ITTE 'KEISOKU KANNKAKU(hr)*ZIKANKIZAMI:DT(hr)
290 '
300 CLOSE #1
310 PRINT ITE,ITTE
320 INPUT "OUTPUT FILE";OD$
330 OD$=dr$+OD$+".DAT"
340 DIM SET
350 FOR I=1 TO M
360 O1(I)=O0
370 X1(I)=X0
380 NEXT I
390 CLS 3:BEEP
400 FOR IT=1 TO ITE

```

```

410 LOCATE 40,10 :PRINT IT
420 FOR ITT=1 TO ITTE
421 'air DATA NO HOKANN
423 OA=(OA(IT+1)-OA(IT))/ITTE*ITT+OA(IT)
425 XA=(XA(IT+1)-xa(IT))/ITTE*ITT+XA(IT)
428 '
430 LOCATE 20,9 :PRINT ITT
431 LOCATE 15,11 :PRINT "OA:";OA
432 LOCATE 30,11 :PRINT "XA:";XA
435 LOCATE 15,12 :PRINT "O(I)";O1(I)
437 LOCATE 30,12 :PRINT "X(I)";X1(I)
438 LOCATE 15,13 :PRINT "O(M)";O1(M)
439 LOCATE 30,13 :PRINT "X(M)";X1(M)
440 LOCATE 15,14 :PRINT "KAPPA";KAPPAX
441 LOCATE 15,15 :PRINT "MUU ";MUUX
442 LOCATE 15,16 :PRINT "PH ";PH
443 LOCATE 15,17 :PRINT "PM ";PM
444 LOCATE 15,18 :PRINT "B ";B
445 LOCATE 15,19 :PRINT "C ";C
446 LOCATE 15,20 :PRINT "D ";D
447 ' M=1 (MATORIX:X=0)
448 O=O1(I)
450 X=X1(I)
460 GOSUB *KAPPA
465 GOSUB *MUU
470 GOSUB *PARAM
480 K1=2*PH*O1(2)+(1-2*PH-2*PH*DX*HH)*O1(1)+2*PH*DX*HH*OA-D*X1(I)
490 K2=2*PM*X1(2)+(1-2*PM-2*PM*DX*HM)*X1(1)+2*PM*DX*HM*XA-B*O1(I)
500 X1(1)=(K1*B+K2)/(1-B*D)
510 O1(I)=K1+D*X1(I)
520 FOR I=2 TO M-1
525 O=O1(I)
530 X=X1(I)
540 GOSUB *KAPPA
545 GOSUB *MUU
550 GOSUB *PARAM
560 K1=PH*O1(I+1)+(1-2*PH)*O1(I)+PH*O1(I-1)-D*X1(I)
570 K2=PM*X1(I+1)+(1-2*PM)*X1(I)+PM*X1(I-1)-B*O1(I)
580 X1(I)=(K1*B+K2)/(1-B*D)
590 O1(I)=K1+D*X1(I)
600 NEXT I
610 ' M=M
615 O=O1(M)
620 X=X1(M)
630 GOSUB *KAPPA
635 GOSUB *MUU
640 GOSUB *PARAM
650 K1=(1-2*PH)*O1(M)+2*PH*O1(M-1)-D*X1(M)
660 K2=(1-2*PM)*X1(M)+2*PM*X1(M-1)-B*O1(M)
670 X1(M)=(K1*B+K2)/(1-B*D)
680 O1(M)=K1+D*X1(M)
690 '
700 NEXT ITT

```



```

710 FOR IX=1 TO M
720 X2(IT,IX)=X1(IX):O2(IT,IX)=O1(IX)
730 NEXT IX
740 NEXT IT
750 '
760 OPEN OD$ FOR OUTPUT AS #1
770 FOR IT=1 TO ITE
780 FOR IX=1 TO M
790 WRITE #1,IT,IX,O2(IT,IX),X2(IT,IX),OA(IT),XA(IT)
800 NEXT IX
810 NEXT IT
820 CLOSE #1
830 '
840 END
850 '
851 *KAPPA
852 '
855 KAPPAX=KAPPA0+KAPPA1*X+KAPPA2*X*X
860 '
870 RETURN
880 END
881 '
882 *MUU
883 MUUX=MUU0+MUU1*X+MUU2*X*X
884 '
885 RETURN
886 END
890 '
900 *PARAM
910 PM=((RDM/KAPPAX)*DT)/(DX*DX)
920 B=MUUX/KAPPAX
925 C=RDH/(SH*SG+AH*MUUX)
930 D=AH*KAPPAX/(SH*SG+AH*MUUX)
935 PH=C*DT/(DX*DX)
940 RETURN
950 END

```

付録 B.3 吸湿シミュレーション, データーセット作成プログラム (N88-BASIC)

```

10 "SAVE "LOADER.BAS",A
20 "*****
30 '      NETU-SIKKE DOUJI IDOU      SIMULATION
40 '      LOADER:DOUJI.FORT          Ver. 1.1      By ASAKURA.N
50 '
60 "*****
70 CONSOLE 0,25,0,1:CLS 3:SCREEN 3
80 "*****
85 defdbl a-s,u-z
90 DIM O1(50)          'O1(m)= Temp. at Member "m" at "t"
100 DIM O2(50)         'O2(m)= Temp. at Member "m" at "t+dt"
110 DIM X1(50)         'X1(m)= Humi. at Member "m" at "t"
120 DIM X2(50)         'X2(m)= Humi. at Member "m" at "t+dt"
130 '
140 DIM O(50,100)      'Temp. at "m" at every 0.1hr to 10hrs
150 DIM X(50,110)      'Humi. at "m" at every 0.1hr to 10hrs
160 '
170 '----- BUSSEITI -----
180 CLS 3
190 PRINT "----- INPUT OF PHYSICAL CONSTANSE-----" :PRINT
195 INPUT "DRIVE" = " ;DRV$
200 INPUT "SAMPLE NAME (FILE NAME ex AKA001)" = " ;SAMPLE$
220 INPUT "THICKNESS(m)" = " ;L
240 INPUT "RAMUDA.M (kg/mh(kg/kg(DA)))" = " ;RAMUDA.M
260 INPUT "RAMUDA.H (kcal/mh * C)" = " ;RAMUDA.H
280 INPUT "KAPPA0 (kg/m3(kg/kg(DA)))" = " ;KAPPA0
281 INPUT "KAPPA1 (kg/m3(kg/kg(DA)))" = " ;KAPPA1
282 INPUT "KAPPA2 (kg/m3(kg/kg(DA)))" = " ;KAPPA2
301 INPUT "MUU0 (kg/m3 * C)" = " ;MUU0
302 INPUT "MUU1 (kg/m3 * C)" = " ;MUU1
303 INPUT "MUU2 (kg/m3 * C)" = " ;MUU2
320 INPUT "SG (kg/m3)" = " ;SG
340 PRINT
350 INPUT "Specific Heat (kcal/kg * C)" = " ;SH
380 INPUT "Heat by AD. (kcal/kg" = " ;AH
410 INPUT "Humi.Trans.(kg/m2(kg/kg(DA)))" = " ;AL.M
440 INPUT "Ther.Trans. (kcal/m2h * C)" = " ;AL.H
480 INPUT "Space Step DX" = " ;DX
510 INPUT "Time Step DT" = " ;DT
520 INPUT "BUNKATYUSUU M" = " ;M
540 '
550 PRINT
560 INPUT "SURE (Y/N)" = " ;A$
570 IF A$="N" OR A$="n" THEN GOTO 180
580 '
590 '----- PARAMETER IN FINE DEFF. Eq.-----
640 HH=AL.H/RAMUDA.H :PRINT "HH=";HH
650 HM=AL.M/RAMUDA.M :PRINT "HM=";HM
680 '----- INITIAL O.X -----
690 INPUT "Push Ret " ;A$
700 CLS 3
710 PRINT "----- INPUT INITIAL CONDITION -----" :PRINT

```

```

720 INPUT 'TEMP. AT AGING (' C) = ";O0
730 INPUT 'RH . AT AGING (%) = ";RH0
745 INPUT 'RH . AT t>0 (%) = ";RH1
750 '
760 O=O0 : RH=RH0 :GOSUB *FROM.O.RH.TO.X
770 X0=X
790 '
800 O=O0 : RH=RH1 :GOSUB *FROM.O.RH.TO.X
810 OA=O0 'OUTSIDE TEMP.
820 XA=X 'OUTSIDE ABS HUMIDITY
830 'OUTSIDE ABS HUMIDITY
840 'OUTSIDE ABS HUMIDITY
850 '*****
860 'LOADER
870 '
880 ' FILEOUT DOUJI DATA for FORTRAN Prog.
890 PRINT "-----"
-----
900 FX$=DRV$+";"+SAMPLE$+".DAT"
910 PRINT "Make:;FX$;" file for FORTRAN prog."
920 PRINT
930 PRINT " HH=";HH
940 PRINT " HM=";HM
980 PRINT " O0=";O0
990 PRINT " X0=";X0
991 PRINT " DT=";DT
992 PRINT " DX=";DX
993 PRINT " M=";M
994 PRINT "KAPPA0=";KAPPA0
995 PRINT "KAPPA1=";KAPPA1
996 PRINT "KAPPA2=";KAPPA2
997 PRINT " MUU0=";MUU0
998 PRINT " MUU1=";MUU1
999 PRINT " MUU2=";MUU2
1000 PRINT " AH=";AH
1010 PRINT " SH=";SH
1040 PRINT " SG=";SG
1020 PRINT " RDH=";RAMUDA.H
1030 PRINT " RDM=";RAMUDA.M
1100 '
1110 OPEN FX$ FOR OUTPUT AS #1
1120 WRITE #1,HH
1125 WRITE #1,HM
1130 WRITE #1,O0
1135 WRITE #1,X0
1170 WRITE #1,DT
1175 WRITE #1,DX
1190 WRITE #1,M
1191 WRITE #1,KAPPA0
1192 WRITE #1,KAPPA1
1193 WRITE #1,KAPPA2
1194 WRITE #1,MUU0
1195 WRITE #1,MUU1

```

```

1196 WRITE #1,MUU2
1197 WRITE #1,AH
1198 WRITE #1,SH
1199 WRITE #1,SG
1200 WRITE #1,RAMUDA.H
1201 WRITE #1,RAMUDA.M
1203 WRITE #1,144
1205 WRITE #1,833
1208 CLOSE #1
1210 INPUT "Hit any key",ZZA$
1220 '
1221 PRINT
1222 PRINT
1223 PRINT
1224 ' FILEOUT DOUJI DATA for BASIC Prog.
1230 FILENAME$=DRV$+"."+SAMPLE$+".FIX"
1240 PRINT "Make ";FILENAME$;" file for Reader prog."
1250 PRINT
1260 PRINT"SAMPLE$, L, RAMUDA.M, RAMUDA.H, SG"
1270 PRINT"SH, AH, AL.M, AL.H"
1280 PRINT"O0, RH0, X0"      "T=0 Temp. RH ABS.X at Room
1300 PRINT"M "
1320 PRINT
1330 PRINT SAMPLE$; L; RAMUDA.M; RAMUDA.H; SG
1340 PRINT SH; AH; AL.M; AL.H
1350 PRINT O0; RH0; X0      "T=0 Temp. RH ABS.X at Room
1380 PRINT M;
1390 '
1391 PRINT
1392 PRINT
1393 PRINT
1394 PRINT
1395 PRINT
1400 '
1410 "*****
1420 OPEN FILENAME$ FOR OUTPUT AS #1
1430 WRITE #1, SAMPLE$, L, RAMUDA.M, RAMUDA.H, SG
1440 WRITE #1, SH, AH, AL.M, AL.H
1470 WRITE #1, OA, RH0, X0
1485 WRITE #1, DX,DT
1490 WRITE #1, M
1500 CLOSE #1
1510 '
1520 INPUT " HIT ANY KEY",DUMMY
1530 END
1540 '
1550 '-----
-----
1555 'SUB ROOTIN
1560 '-----
-----
1570 *FROM.O.RH.TO.X
1580 PS=12.0236-1.23155*O+.132765*O*O-(3.99798E-03)*O*O*O+(5.63401E-05)*O*O*O*O

```

1590 P=PS\*RH/100  
1600 X=.622\*P/(760-P)  
1610 RETURN

1620  
1630  
1640

1650

1660

1670

1680

1690

1700

1710

1720

1730

1740

1750

1760

1770

1780

1790

1800

1810

1820

1830

1840

1850

1860

1870

1880

1890

1900

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

2020

2030

付録 B.4 吸湿シミュレーション解析プログラム (N88BASIC)

1. データセットの読み込み
2. 材内絶対湿度、温度変化の表示
3. 吸湿量の算出
4. 材内水分分布変化の表示

```

10 'SAVE "READER4H.BAS",A
20 '-----
30 '   NETU-SIKKE DOUJI IDOU  SIMULATION LDPB
40 '   DATA READER           L   By ASAKURA
50 '
60 '-----
70 '-----
80 '   DISPLAY OF RESULT
90 '-----
95 'defdbl a-h,o-s,u-z
100 CONSOLE 0,25,0,1
110 CLS 3:INPUT "DRIVE";DRV$:DRV$=DRV$+";"
120 FILES DRV$
130 INPUT "INPUT FILE NAME FIXED DATA  ";FX$
140 INPUT "INPUT FILE NAME OUTPUTDATA  ";FXD$
150 INPUT "INPUT REAL DATA              ";FXR$
160 INPUT "Wo/Vu                          ";RSG
210 FILENAME$=DRV$+FX$+"FIX"
220 OPEN FILENAME$ FOR INPUT AS #1
230 INPUT #1, SAMPLE$, L, RAMUDAM, RAMUDA.H, SG
240 INPUT #1, SH, AH, AL.M, AL.H
250 INPUT #1, O.O, RH.O, X.O      'T=0 Temp. RH ABS.X at Room
260 INPUT #1, DX,DT
270 INPUT #1, M
280 CLOSE #1
290 DIM O(50,150)
300 DIM X(50,150)
310 DIM OA(50,150)
320 DIM XA(50,150)
330 DIM DSG(150)
340 'INITIAL SET----- DATASET NIHA (t=0)NODATA GA HAITTE IMAS
ENN)
350 TT=ITE-1:M=M-1
360 '
370 '
380 TT=144:PX=2.0833333333333333#
390 FILENAME$=DRV$+FXD$+"DAT"
400 OPEN FILENAME$ FOR INPUT AS #1
410 FOR J=0 TO 144
420   FOR I=0 TO M
430     IF EOF(#1) THEN 490
440     INPUT #1,DAMMY,DAMMY,O(I,J), X(I,J),OA(I,J),XA(I,J)

```



```

450 NEXT I
460 '
470 '
480 NEXT J
490 CLOSE #1
492 for I=0 to m
493 O(I,0)=O0
494 X(I,0)=X0
495 NEXT I
500 DIM ROA(150),RHA(150),WEX(150)
510 FILENAME$=DRV$+FXR$+".DAT"
520 OPEN FILENAME$ FOR INPUT AS #1
530 ' INPUT #1, DAMMY1,DAMMY2,DAMMY3
540 FOR J=0 TO 200
550 ' INPUT #1, DAMMY4
560 INPUT #1, ROA(J),RHA(J) , WEX(J)
570 IF EOF(#1) THEN 590
580 NEXT J
590 RDC=J 'RDC=REAL DATA COUNTER
600 CLOSE #1
610 '
680 'LPRINT :LPRINT :LPRINT:LPRINT
690 GOSUB *GRAPH.OX : GOSUB *PLOT2.OX
700 LOCATE 60,23:INPUT "COPY (Y=RetN)";A$
710 IF A$="" THEN COPY 3
720 LOCATE 52,23:INPUT "Push Ret = Draw W.change";A$
730 ' *****
740 GOSUB *GRAPH.W
750 GOSUB *PLOT.W.REAL
760 GOSUB *W.CALC.BOUND
770 GOSUB *PLOT.W.B
780 '
790 GOSUB *W.CALC.MC.CHANGE
800 GOSUB *PLOT.W.MC
810 GOSUB *SUM
820 LOCATE 60,23:INPUT "COPY (Y=RetN)";A$
830 IF A$="" THEN COPY 3
840 LOCATE 51,23:INPUT "Push Ret = Draw MC-Profile";A$
850 ' *****
860 GOSUB *GRAPH.MC.P
870 GOSUB *PLOT.MC.P
880 gosub *wcalc
890 LOCATE 60,23:INPUT "COPY (Y=RetN)";A$
900 IF A$="" THEN COPY 3
910 LOCATE 51,23:INPUT "Push Ret = MENU ";A$
920 '
930 ERASE O, X, W.B, MC, W.MC
940 CLS 3
950 END
960 '
970 '
980 '*****
990 '*****

```



```

1000 *FROM.O.RH.TO.X
1010 PS=12.0236-1.23155*O+.132765*O*O-(3.99798E-03)*O*O*O+(5.63401E-05)*O*O*O*O
1020 P=PS*RH/100
1030 X=.622*P/(760-P)
1040 RETURN
1050 '*****
1060 '*****
1070 '*****
1080 '*****
1090 *GRAPH.OX
1100 CLS 3:SCREEN 3
1110 LINE (40,25)-(340,325),7,B
1120 FOR I=1 TO 5
1130 LINE (40,25+50*I)-(48,25+50*I),7 :LINE (332,25+50*I)-(340,25+50*I)
1140 NEXT I
1150 FOR I=1 TO 6
1160 LINE (40+50*I,25)-(40+50*I,33),7 :LINE (40+50*I,317)-(40+50*I,325)
1170 NEXT I
1180 LOCATE 0,0
1190 PRINT "Diff.O ( ° C) " Diff.X (10 ^ -3kg/kg)"
1200 LOCATE 0,1
1210 PRINT " 3.0"
1220 LOCATE 0,4
1230 PRINT " 2.5"
1240 LOCATE 0,7
1250 PRINT " 2.0"
1260 LOCATE 0,11
1270 PRINT " 1.5"
1280 LOCATE 0,14
1290 PRINT " 1.0"
1300 LOCATE 0,17
1310 PRINT " 0.5"
1320 LOCATE 0,21
1330 PRINT " t= 0 2 4 6 8 10 12 "
1340 LOCATE 0,22
1350 PRINT " TIME (hr)"
1360 '
1370 LOCATE 50,1 :PRINT SAMPLE$
1380 LOCATE 50,2 :PRINT FXD$
1390 LOCATE 50,3 :PRINT "Thickness =" ;L
1400 LOCATE 50,4 :PRINT "RAMUDA.M =" ;RAMUDA.M
1410 LOCATE 50,5 :PRINT "RAMUDA.H =" ;RAMUDA.H
1420 LOCATE 50,7 :PRINT "SG =" ;SG
1430 LOCATE 50,8 :PRINT "Spe.Heat =" ;SH
1440 LOCATE 50,9 :PRINT "Ads.Heat =" ;ALH
1450 LOCATE 50,10 :PRINT "Ther. Tran.=" ;ALH
1460 LOCATE 50,11 :PRINT "Humid.Tran.=" ;ALM
1470 LOCATE 50,12 :PRINT "DX (m) =" ;DX
1480 LOCATE 50,13 :PRINT "DT (h) =" ;DT
1490 LOCATE 50,14 :PRINT "M =" ;M
1500 LOCATE 50,15 :PRINT "Wo/Vu =" ;RSG
1510 LOCATE 50,20 :PRINT "INI.Temp =" ;O0
1520 LOCATE 50,21 :PRINT "OUT.X(t=0) =" ;X0

```

```

1530 '
1540 RETURN
1550 '*****
1560 *PLOT2.OX
1570   PX1=40 : PYOS1=325 : PYOC1=325 : PYXS1=325 : PYXC1=325
1580   FOR I=0 TO TT
1590     PX2=40+I*PX
1600     PYOS2=325-300*(O(0,I)-O(0,0))/3
1610     PYOC2=325-300*(O(M,I)-O(M,0))/3
1620     PYXS2=325-300*(X(0,I)-X(0,0))/0.003
1630     PYXC2=325-300*(X(M,I)-X(M,0))/0.003
1640 '
1650   LINE (PX1,PYOS1-I)-(PX2,PYOS2-I),2
1660   LINE (PX1,PYOS1)-(PX2,PYOS2),2
1670   LINE (PX1,PYOS1+I)-(PX2,PYOS2+I),2
1680 '
1690   LINE (PX1,PYOC1)-(PX2,PYOC2),2
1700 '
1710   LINE (PX1,PYXS1-I)-(PX2,PYXS2-I),5
1720   LINE (PX1,PYXS1)-(PX2,PYXS2),5
1730   LINE (PX1,PYXS1+I)-(PX2,PYXS2+I),5
1740 '
1750   LINE (PX1,PYXC1)-(PX2,PYXC2),5
1760 '
1770   PX1=PX2 : PYOS1=PYOS2 : PYOC1=PYOC2 : PYXS1=PYXS2 : PYXC1=PYXC2
1780 NEXT I
1790 '
1800 LOCATE 0,23:PRINT "Red/Temp. Blue/ABS.X    === m=0, --- m=M"
1810 RETURN
1820 '*****
1830 '*****
1840 *W.CALC.BOUND
1850 'QM1, QM2           'Moisture Flux at m=0 at t and t+0.1hr
1860 'DW.B              'Weight change at m=0 bet. t and t+0.1
1870 'DIM W.B(200)      'Integral W.change from t=0 to t
1880 '
1890 W.B(0)=0
1900 FOR I=1 TO TT
1910   QM1=AL.M*(XA(0,I-1)-X(0,I-1))
1920   QM2=AL.M*(XA(0,I)-X(0,I))
1930   DW.B=(.08333333333333333333333333333333#2)*(QM1+QM2)
1940   W.B(I)=W.B(I-1)+DW.B
1950 NEXT I
1960 '
1970 ' FOR I=0 TO 10           :PRINT I*,W.B(I) :NEXT I
1980 RETURN
1990 '*****
2000 '*****
2010 *GRAPH.W
2020 CLS 3:SCREEN 3
2030 LINE (40,25)-(340,325),7,B
2040 FOR I=1 TO 5
2050   LINE (40,25+50*I*D)-(48,25+50*I),7 :LINE (332,25+50*I)-(340,25+50*I)

```

```

2060 NEXT I
2070 FOR I=1 TO 5
2080 LINE (40+50*I,25)-(40+50*I,33),7 :LINE (40+50*I,317)-(40+50*I,325)
2090 NEXT I
2100 LOCATE 0,0
2110 PRINT "Weight(g/m2) "
2120 LOCATE 0,1
2130 PRINT " 60"
2140 LOCATE 0,4
2150 PRINT " 50"
2160 LOCATE 0,7
2170 PRINT " 40"
2180 LOCATE 0,11
2190 PRINT " 30"
2200 LOCATE 0,14
2210 PRINT " 20"
2220 LOCATE 0,17
2230 PRINT " 10"
2240 LOCATE 0,21
2250 PRINT " 0 2 4 6 8 10 12 "
2260 LOCATE 0,22
2270 PRINT " TIME (hr)"
2280 LOCATE 0,23
2290 PRINT " CALC. by X(----Yellow), MC(===Green) "
2300 '
2310 LOCATE 45,1 :PRINT SAMPLE$
2320 LOCATE 45,2 :PRINT FXD$
2330 LOCATE 43,4 :PRINT "T(hr) REAL(g/m2) W.B(g/m2) W.U(g/m2)"
2340 FOR I=0 TO 12
2350 LOCATE 45,5+I:PRINT USING "##.##";I
2360 NEXT I
2370 RETURN
2380 *****
2390 *****
2400 *PLOT.W.B
2410 PX1=40 : PYW1=325
2420 FOR I=0 TO TT
2430 PX2=40+I*PX
2440 PYW2=325-300*W.B(I)*1000/60
2450 LINE (PX1,PYW1)-(PX2,PYW2),6 'COLOR= Yellow
2460 PX1=PX2 :PYW1=PYW2
2470 NEXT I
2480 '
2490 FOR I=0 TO 12
2500 LOCATE 60,5+I:PRINT USING "##.##";W.B(I)*12*1000
2510 NEXT I
2520 '
2530 RETURN
2540 *****
2550 *****
2560 *PLOT.W.MC
2570 PX1=40 : PYW1=325
2580 FOR I=0 TO TT

```

```

2590     PX2=40+I*PX
2600     PYW2=325-300*W.MC(I)*1000/60
2610     LINE (PX1,PYW1)-(PX2,PYW2),4      'COLOR= GREEN
2620     LINE (PX1,PYW1-1)-(PX2,PYW2-1),4    'COLOR= GREEN
2630     LINE (PX1,PYW1+1)-(PX2,PYW2+1),4    'COLOR= GREEN
2640     PX1=PX2 :PYW1=PYW2
2650     NEXT I
2660 '
2670     FOR I=0 TO 12
2680         LOCATE 67,5+I:PRINT USING "##.##";W.MC(I*12)*1000
2690     NEXT I
2700 '
2710     RETURN
2720 *****
2730 *****
2740 *W.CALC.MC.CHANGE
2750     DIM EMC(50,150)      'MOISTURE CONTENT at m, at every 0.1hr
2760     DIM W.MC(150)      'INTEGRAL W.CHANGE from t=0 TO t
2770 '
2780     FOR I=0 TO M
2790         XX=X(0,0) : TEM=O(0,0)
2810         GOSUB *MC.CALC.LDPB
2820         EMC(I,0)=MC.LDPB
2830     NEXT I
3100         MC.ODD=0
3110         FOR JJ=1 TO M-1 STEP 2
3120             MC.ODD=MC.ODD+EMC(JJ,0)
3130         NEXT JJ
3140         MC.EVN=0
3150         FOR JJJ=2 TO M-2 STEP 2
3160             MC.EVN=MC.EVN+EMC(JJJ,0)
3170         NEXT JJJ
3180 '
3190         MC.INI=(DX/3)*(EMC(0,0)+EMC(M,0))+4*MC.ODD+2*MC.EVN
4000 '
4010     W.MC(0)=0
4020 '
4030     FOR J=1 TO TT
4040         FOR K=0 TO M
4050             XX=X(K,J) : TEM=O(K,J)
4070             GOSUB *MC.CALC.LDPB
4080             EMC(K,J)=MC.LDPB
4090         NEXT K
4100         MC.ODD=0
4110         FOR JJ=1 TO M-1 STEP 2
4120             MC.ODD=MC.ODD+EMC(JJ,J)
4130         NEXT JJ
4140         MC.EVN=0
4150         FOR JJJ=2 TO M-2 STEP 2
4160             MC.EVN=MC.EVN+EMC(JJJ,J)
4170         NEXT JJJ
4180 '
4190         W.MC(J)=(DX/3)*(EMC(0,J)+EMC(M,J))+4*MC.ODD+2*MC.EVN)-MC.INI

```

```

4200 NEXT J
4210 '
4220 RETURN
4230 '*****
4240 '*****
4250 *MC.CALC.LDPB
4260 'F.RH           X,O --- > RH Function
4270 'F.MC           RH,O --- > MC (%) Function
4280 '
4290 F.RH1=760*XX/XX+.622
4300 F.RH2=12.0236-1.23155*TEM+.132765*TEM*TEM-(3.99798E-03)*TEM*TEM*TEM+(5.63
401E-05)*TEM*TEM*TEM*TEM
4310 F.RH=F.RH1/F.RH2
4320 '
4330 F.MC0320=F.RH/(.0152512+.160277*F.RH-.12319*F.RH*F.RH)
4340 F.MC0720=F.RH/(.0323327+.124351*F.RH-.102468*F.RH*F.RH)
4350 F.MC0325=F.RH/(.0269059+.130463*F.RH-.13387*F.RH*F.RH)
4360 F.MC0725=F.RH/(.0603249+.0524062*F.RH-.0691174*F.RH*F.RH)
4370 CSG=RSQ
4380 F.MC20=F.MC0320+(F.MC0720-F.MC0320)*(CSG-277)/(619-277)
4390 F.MC25=F.MC0325+(F.MC0725-F.MC0325)*(CSG-277)/(619-277)
4400 F.MC=F.MC20+(F.MC25-F.MC20)*(TEM-20)/5
4410 MC.LDPB=(F.MC/100)*CSG
4420 '
4430 RETURN
4440 '*****
4450 '*****
4460 *GRAPH.MC.P
4470 CLS 3:SCREEN 3
4480 LINE (40,25)-(340,325),7,B
4490 FOR I=1 TO 9
4500 LINE (40,25+30*I)-(48,25+30*I),7:LINE (332,25+30*I)-(340,25+30*I)
4510 NEXT I
4520 FOR I=1 TO 9
4530 LINE (40+30*I,25)-(40+30*I,33),7:LINE (40+30*I,317)-(40+30*I,325)
4540 NEXT I
4550 LOCATE 0,0
4560 PRINT "MC.Change (EMC(T)-EMC(T=0) ,kg/m3)"
4570 LOCATE 0,1
4580 PRINT "20.0"
4590 LOCATE 0,4
4600 PRINT "12.5"
4610 LOCATE 0,7
4620 PRINT "10.0"
4630 LOCATE 0,10
4640 PRINT "10.0"
4650 LOCATE 0,14
4660 PRINT " 5.0"
4670 LOCATE 0,20
4680 PRINT " 0.0"
4690 LOCATE 0,21
4700 PRINT " x= 0      .2      .4      .6      .8      1.0"
4710 LOCATE 0,22

```

```

4720 PRINT " Face           Thickness           Back"
4730 LOCATE 0,23
4740 PRINT "      12 Curves = Time 1 to 12 hours      "
4750 '
4760 LOCATE 45,1 :PRINT SAMPLE$
4770 LOCATE 45,2 :PRINT FXD$
4780 LOCATE 45,4 :PRINT "Thickness =";L;"(m)"
4790 LOCATE 45,5 :PRINT "INLMC (%)=";:PRINT USING "###.###";EMC(0,0)/SG*100
4800 LOCATE 45,6 :PRINT "      (kg/m3)=";:PRINT USING "###.###";EMC(0,0)
4830 '
4840 RETURN
4850 '*****
4860 '*****
4870 *PLOT.MC.P
4880 '
4890 '
4900   FOR I=12 TO TT STEP 12
4910     PX1=40 :PYMC1=325
4920     FOR J=0 TO M
4930       PX2=40+300*J/M
4940       PYMC2=325-300*(EMC(J,I)-EMC(J,0))/20
4950       LINE (PX1,PYMC1)-(PX2,PYMC2),4          'COLOR= GREEN
4960       PX1=PX2 :PYMC1=PYMC2
4970     NEXT J
4980   NEXT I
4990   LINE (40,25)-(40,325),7
5000 '
5010 RETURN
5020 '*****
5030 '*****
5040 '*****
5050 *PLOT.W.REAL
5060   PX1=40 :PYW1=325
5070   FOR I=0 TO RDC
5080     PX2=40+PX*I
5090     PYW2=325-300*ABS(WEX(I))/60
5100     LINE (PX1,PYW1)-(PX2,PYW2),2          ' COLOR=RED
5110     PX1=PX2 :PYW1=PYW2
5120   NEXT I
5130   FOR I=0 TO 12
5140     LOCATE 53,5+I:PRINT USING "###.###";ABS(WEX(I*12))
5150   NEXT I
5160 RETURN
5170 '*****
5180 '*****
5190 *SUM
5200   SUMW.B=0:SUMW.MC=0
5210   FOR I=0 TO TT
5240     SUMW.B2=SUMW.B2+((WEX(I)-W.B(I)*1000)^2)
5245     SUMBU=SUMBU+((W.B(I)*1000-W.MC(I)*1000)^2)
5250     SUMW.MC2=SUMW.MC2+((WEX(I)-W.MC(I)*1000)^2)
5260   NEXT I
5270   LOCATE 55,20:PRINT "(REAL-W.B)^2: ";:PRINT USING "###.###";SUMW.B2/144

```



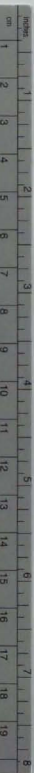
```

5280 LOCATE 55,21:PRINT "(REAL-W.C)^2: ";PRINT USING "####.##";SUMW.MC2/144
5290 LOCATE 55,22:PRINT "(W.B-W.C)^2: ";PRINT USING "####.##";SUMB/144
5310 RETURN
6220 *WCALC
6230 DIM W.MCH(50),W.MCH2(50)
6240 FOR I=1 TO M
6250   W.MCH(I)=(EMC(I,144)-EMC(I,0)+EMC(I-1,144)-EMC(I-1,0))*DX/2
6260   W.MCH=W.MCH+W.MCH(I)
6270 NEXT I
6275 LOCATE 47,17:PRINT "      Wt(6hr):";w.mch
6280 FOR I=1 TO M
6290   W.MCHS=W.MCHS+W.MCH(I)
6295   PRINT I;W.MCHS;"  0.99:";W.MCH*.99
6310   IF W.MCHS>W.MCH*.99 THEN GOTO 6400
6320 NEXT I
6340 BEEP:END
6400 FOR J=0 TO 10
6425   JJ=J*.01
6430   MCC=((EMC(I,144)-EMC(I-1,144))*JJ+EMC(I-1,144))-((EMC(I,0)-EMC(I-1,0))*JJ+EMC
(I-1,0))
6440   W.MCH2(J)=(EMC(I-1,144)-EMC(I-1,0)+MCC)*DX*JJ/2
6450   W.MCHS2=W.MCHS-W.MCH(I)+W.MCH2(J)
6455   PRINT J;MCC;EMC(I,144)-EMC(I,0);W.MCHS2
6460   IF W.MCHS2>W.MCH*.99 THEN D95=(I-1+JJ)*DX:GOTO 6560
6470 NEXT J
6555 LOCATE 47,19:PRINT "W(0.99) Wt(g/m2)=";PRINT USING "###.###";W.MCH*.099
6560 LOCATE 47,20:PRINT "      DEPTH(m)=";PRINT USING "#####";D95
6570 LOCATE 47,21:PRINT "      DEPTH/L=";PRINT USING "###";D95/L
6580 RETURN
6590 END

```







# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



## Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

