

## マカンバ材の熱板乾燥試験

中 嵩 厚  
幡 多 輝 昭

沼 田 征 志  
上 野 英 治

### Press Drying Tests of Birchwood Timber

Atsushi NAKAJIMA  
Teruaki HATA

Masashi NUMATA  
Eiji UENO

Timber of Makanba (*Betula maximowicziana* REGEL) was dried in hot-press under nine conditions which combined platen temperatures of 120, 140, 160 and platen pressures of 3, 6, and 9 kgf/cm<sup>2</sup> and studies was made of techniques for estimating the drying time as well as the characteristics of the timber during drying. The results are summarized as follows :

- (1) To estimate the press drying time, an exponential curve representing moisture content reduction was theoretically obtained by using an exponential function, and the curve was recognized to represent the process of actual moisture content reduction .
- (2) It was easy to estimate the press drying time with the exponential curve when the coefficient *k* affecting the curve was determined for each drying condition in advance .
- (3) Different platen temperatures and pressures caused different estimated drying time, and at moisture contents of 60 to 5 % it was 25 to 129 minutes for 12mm-thick timber, 101 to 384 minutes for 27mm-thick timber, and 207 to 872 minutes for 42mm-thick timber .
- (4) Experiments on press-drying conditions showed that the final moisture content should be less than 5 % to prevent moisture gradients and variances .
- (5) The temperature of the timber rose to more than 100 after the moisture content fell to approximately 7 % .
- (6) Different platen pressures caused different shrinkage, and at a moisture content of 5 %, thickness shrinkage was 11.5 to 15 %, and width shrinkage 1 to 3 % .

Keywords : press drying, presumption of drying time, dried lumber, hot-press

熱板乾燥, 乾燥時間推定, 乾燥材, 熱板

熱板によるマカンバ材の乾燥試験を, 温度120, 140, 160 , 圧縮圧力3, 6, 9kgf/cm<sup>2</sup>の組み合わせ9条件で行い, 乾燥時間の推定方法, 乾燥特性などについて検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 乾燥時間を推定するため指数関数式<sup>①</sup>)を用いて含水率減少曲線を求めると, 測定データとそ

れはよく一致した。

- (2) 含水率減少曲線を決定する係数kをあらかじめ乾燥条件別に求めておけば、乾燥時間は容易に推定できる。
- (3) 含水率60%から5%までの推定乾燥時間は、温度、圧力条件で違いがみられ、材厚12mmで25～129分、材厚27mmで101～384分、材厚42mmでは207～872分の範囲であった。
- (4) 水分むら、水分傾斜を抑制する上で、仕上げ含水率は5%以下が望ましい。
- (5) 材温は含水率が約7%に下がってから100 以上に昇温した。
- (6) 材厚さ、幅寸法の乾燥前に対する歩減り率は、圧力条件で差がみられ、含水率5%時で厚さ方向が11.5～15%、幅方向が1～3%の範囲であった。

### 1. はじめに

熱板による木材乾燥に関する研究は、古くから試みられており、Heebinkら<sup>1)</sup>、Hittmeierら<sup>2)</sup>、Schmidt<sup>3)</sup>などの報告によると、特に(1) 2時間程度の短時間で乾燥が可能、(2)乾燥材の寸法安定性が良い、(3)乾燥による狂いが生じない、(4)幅の減少が少なく面積歩留まりが高い、(5)乾燥性の悪い(チロースの存在など)樹種は内部割れ等の欠点が生じるが、この場合、含水率を30%程度まで下げてから処理すれば防げる、などの特徴が挙げられている。日本では前田ら<sup>4,5)</sup>がカラマツ板材で、また宮島ら<sup>6)</sup>が道産広葉樹板材を用いた実験を行い、乾燥特性、処理条件の適正化などについて述べている。さらに近年では、中小企業事業団委託事業として加速的技術開発支援事業成果報告<sup>7)</sup>のなかで実大装置(10段式ホットプレス装置)を用いた試

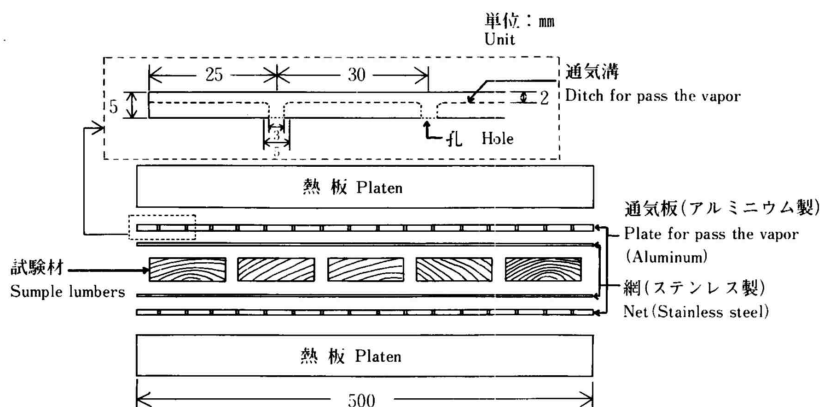
験結果が述べられている。

これらの内容はいずれも先に述べた特徴(1)～(5)が共通して認識されており、ほぼ実用化が図られたものと考えられるが、本報告では主に乾燥時間を決定するための手法、および乾燥特性などについて検討を加えた。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験装置

用いた装置は、電熱式小型ホットプレスで熱板面積は2500cm<sup>2</sup>(50×50cm)のものである。熱板間には第1図に示すように、ステンレス製網(65メッシュ)、アルミ製通気板(孔間隔30mm、孔数16×16個)をそれぞれ挟み込み、それらを介して材料を直接加熱することとした。この通気板は、Heebinkら<sup>1)</sup>の用いたものを参考にして、材料からの蒸発水分を孔溝から逃すため



第1図 熱板試験装置の構成<sup>1)</sup>  
Fig. 1. Constitution of equipment for hot-press drying

取り入れたものである。

## 2.2 供試材料

用いた材料は、過去の報告で内部割れ等の欠点がでづらく比較的乾燥性が良好とされるマカンバ材である。材の寸法は乾燥性比較のため、厚さが12, 27, 42mmの3種類とし、幅90mm、長さ500mmのもので、1回の実験で処理できる供試材数は5体である。また、初期含水率は若干バラツキがあり、おおよそ35～65%の範囲であった。

## 2.3 乾燥条件および測定項目

熱板温度を120, 140, 160℃の3条件、圧縮圧力を3, 6, 9kgf/cm<sup>2</sup>の3条件で組み合わせた9条件で試験を

実施した。含水率は全乾法によりあらかじめ5体の試験材の全乾重量を求めておき、熱板乾燥中（20～40分間隔）に重量を測定し算出した。さらに乾燥後に1体の供試材から試料3片を切断し、全乾法にて含水率を求め、その平均値から各測定時の含水率を逆算し、補正した。

材長中央から切断した試料については、厚さ方向に約5mm間隔でスライスし、全乾法で求めたスライス試片の含水率から材内の水分傾斜を調べた。

また、熱板上に並べた5体の供試材のうち、最外部に置いた一方の材の繊維方向中央部側面から熱電対を深さ4cmまで埋め込み、乾燥中の材温を測定した。

第1表 熱板乾燥試験結果  
Table 1. Results of press drying tests

(Thickness 42mm)				
乾燥条件 Drying condition		初期含水率 Initial m.c (%)	末期含水率 Final m.c (%)	処理時間 Drying time (min.)
温度 platen temp	圧縮圧力 Pressure			
120℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	49.6～54.7(51.6)	10.3～15.3(13.0)	440
	6 "	47.8～52.5(49.3)	11.6～15.9(13.7)	440
	9 "	50.9～64.2(55.3)	14.4～22.7(18.4)	400
140℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	50.6～53.2(51.9)	4.8～ 9.4( 6.3)	400
	6 "	48.5～62.2(52.8)	2.9～11.4( 5.2)	400
	9 "	47.2～60.0(53.8)	2.9～ 8.0( 4.3)	380
160℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	47.2～61.6(53.5)	2.3～ 8.7( 4.6)	300
	6 "	48.5～56.8(52.4)	1.5～ 4.5( 2.8)	300
	9 "	60.5～67.0(63.7)	2.5～ 3.6( 3.0)	240
(Thickness 27mm)				
120℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	33.3～39.6(35.1)	3.4～ 6.0( 5.0)	320
	6 "	30.1～40.1(35.2)	4.1～ 8.3( 6.1)	280
	9 "	35.8～44.6(40.9)	5.1～ 9.1( 7.3)	260
140℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	30.6～54.4(39.7)	2.6～ 7.3( 4.5)	160
	6 "	49.2～68.8(58.4)	2.8～ 5.0( 3.9)	180
	9 "	36.4～51.4(42.1)	3.6～ 8.8( 5.1)	140
160℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	45.9～54.0(51.2)	1.6～ 4.2( 2.6)	140
	6 "	45.1～60.4(52.2)	3.1～ 5.3( 3.0)	120
	9 "	38.7～44.2(41.0)	2.6～ 3.8( 3.0)	100
(Thickness 12mm)				
120℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	54.8～63.4(59.8)	4.4～ 6.3( 5.0)	140
	6 "	59.7～64.5(62.0)	2.8～ 5.8( 4.8)	100
	9 "	56.6～68.2(64.1)	4.5～ 6.1( 5.1)	100
140℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	61.8～66.8(64.6)	2.6～ 5.6( 3.7)	70
	6 "	56.5～73.9(64.2)	1.8～ 6.0( 3.3)	70
	9 "	58.0～69.7(63.4)	2.2～ 2.9( 2.6)	60
160℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	58.2～68.3(62.5)	1.1～ 3.2( 1.9)	50
	6 "	43.8～66.8(56.1)	0.9～ 1.7( 1.1)	40
	9 "	59.8～68.8(65.0)	1.0～ 4.1( 1.8)	40

注) 含水率値は、最小値～最大値（試験材5体の平均値）を示す。  
note) M.C. values min～max. (average of five sampling lumbers).

厚さ、幅方向の寸法変化については、それぞれ材中心部1点をデジタルノギスで1/100mmまで読み、乾燥前の長さを基準とした歩減り率として評価した。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 含水率と水分むら

第1表は、乾燥条件別の初期含水率と末期含水率および乾燥時間を示したものである。乾燥時間の最も短いものは材厚12mmの温度160℃の条件下、40～50分で含水率を約2%まで下げることができた。材厚が厚い42mm材は当然ながら乾燥時間が長く、処理温度120℃では400～440分処理しても末期含水率は13～18%と、まだ乾燥不十分の状態である。

水分むらについては、試験材5体の初期含水率差が仕上がりに影響を与えており、特に末期含水率が高い試験条件ほど大きな含水率差となって現れた。また材内の水分傾斜でも、末期含水率が高い条件ほど差が生じた。温度120℃、圧力9kgf/cm<sup>2</sup>の処理条件で乾燥した42mm厚材では、表層付近が約7%の含水率を示したのに対して中心層が30%と、大きな水分差が認められた。しかし今回の試験では、42mm厚材を温度120℃で乾燥し末期含水率が高かった3つの乾燥条件以外で水分傾斜が特に大きいものはなかった。これらのことから熱板乾燥を行う場合、初期含水率をなるべく揃えること、および仕上げる含水率は通常の乾燥法よりも低め（約5%以下）に設定した方が、均一な乾燥材を得る上で有効であることが確認できた。

なお、品質上問題となるような表面割れ、内部割れは、いずれの乾燥条件においても発生しなかった。

#### 3.2 乾燥時間と乾燥速度

上記の含水率データから、乾燥時間と乾燥速度を求め、乾燥条件（材厚・温度・圧縮圧力）間で比較を行った。すなわち、初期含水率を起点として乾燥末期の平衡含水率（今回の熱板乾燥では0%を想定）に漸近する(1)式で示した指数関数<sup>8)</sup>を用いて、含水率測定値から最小二乗法によって近似させ、含水率減少曲線<sup>9)</sup>を決定した。さらに(1)式を(2)式のように変形し、含水率60%から5%までの乾燥所要時間を推定した。乾燥速

度については、(1)式を時間tについて微分して得られる(3)式に、含水率5%まで乾燥するのに要した時間tを代入して、含水率5%時の乾燥速度として求めた。

$$U - U_e = (U_a - U_e) \text{EXP}^{-kt} \dots \dots \dots (1)$$

$$t = \frac{1}{k} \times \log \frac{(U_a - U_e)}{U - U_e} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\delta u}{\delta t} = -k (U_a - U_e) \text{EXP}^{-kt} \dots \dots \dots (3)$$

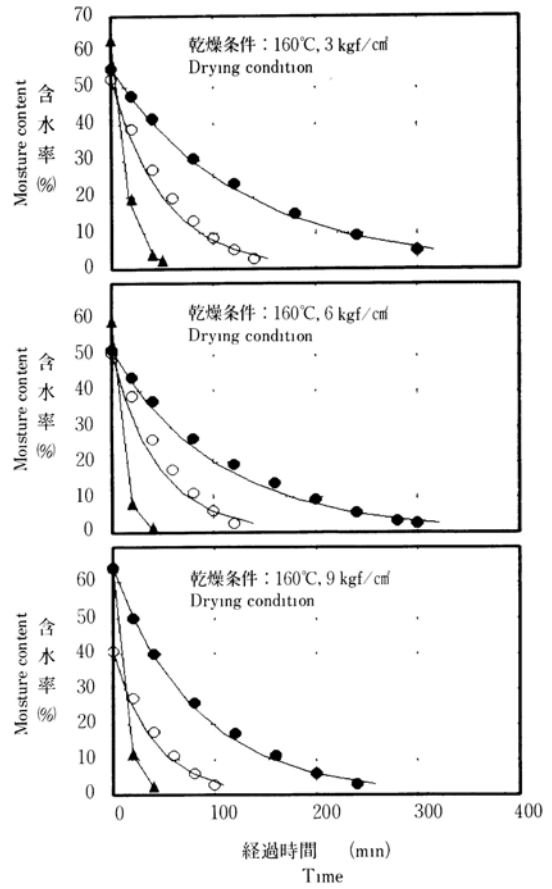
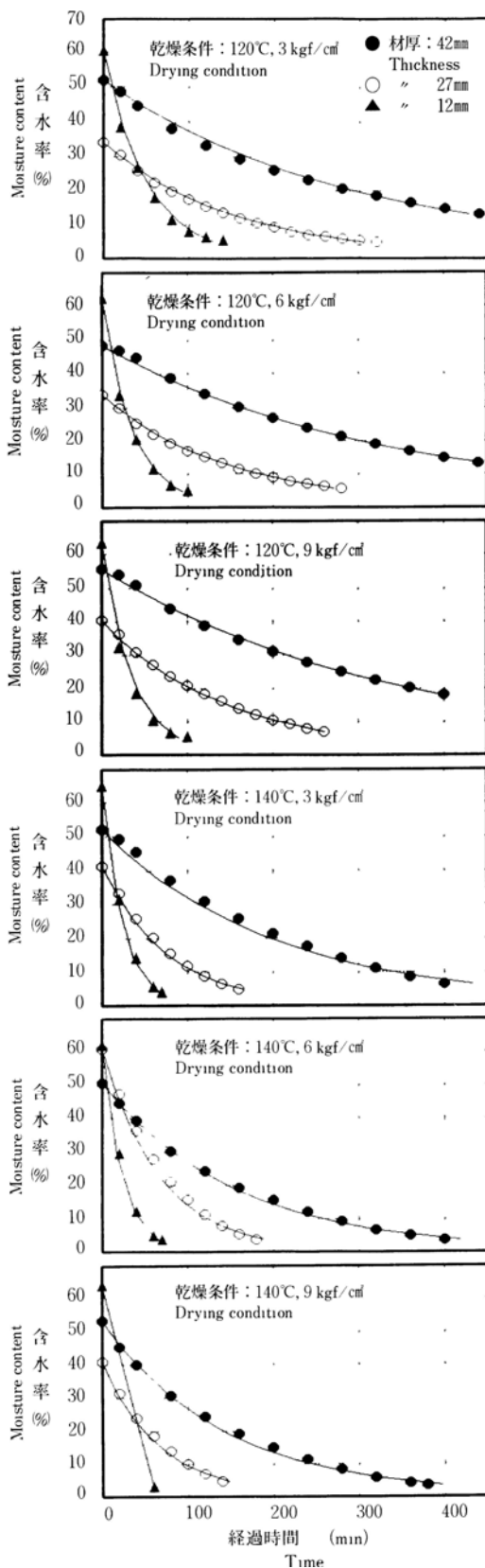
ここで、U：求める含水率（%）、U<sub>a</sub>：初期含水率（%）、U<sub>e</sub>：乾燥末期の平衡含水率（%）、k：最小二乗近似により決まる係数、t：乾燥時間（分）、δu/δt：乾燥速度（%/分）である。

第2図に、各乾燥条件別に上式で求めた含水率減少曲線と測定値を合わせて示した。なお、図中プロットした測定値は、試験材5体の平均含水率値を示す。

これらの図から含水率減少曲線と測定値はよく近似していることがうかがわれ、この曲線からある程度の時間推定が可能と思われる。

第2表は、これらの曲線から求めた含水率60%から5%までの処理時間と、含水率5%時の乾燥速度およびk値（含水率減少係数）を示したものである。乾燥時間は、材厚が薄く処理温度が高いほど当然短く、最低は材厚12mm、温度160℃、圧縮圧力6kgf/cm<sup>2</sup>の25分である。最も長い乾燥時間は42mm厚材の872分であるが、一般的な熱気乾燥法で2週間必要と仮定しても、その約1/23の時間で済むことになる。また、圧縮圧力条件による影響も認められ、材厚42mmの温度120℃条件のみ逆の現象を示したが、その他の乾燥条件では圧縮圧力値が大きいほど時間短縮がみられ、特に3kgf/cm<sup>2</sup>と6kgf/cm<sup>2</sup>の間で速度差が顕著である。この傾向を示さなかった材厚42mm、温度120℃の条件は、いずれも末期含水率が高かったため、含水率減少曲線からの所要時間推定に無理が生じたものと考えられる。

次に乾燥所要時間の推定をある程度、普遍性のあるものとするため、含水率減少係数k値について考察すると第3図に示すとおりである。すなわち、実験データから得られた含水率減少曲線を決定するk値が判明



第2図 乾燥経過と含水率減少曲線

Fig. 2. Drying process of experimental data and theoretical curve

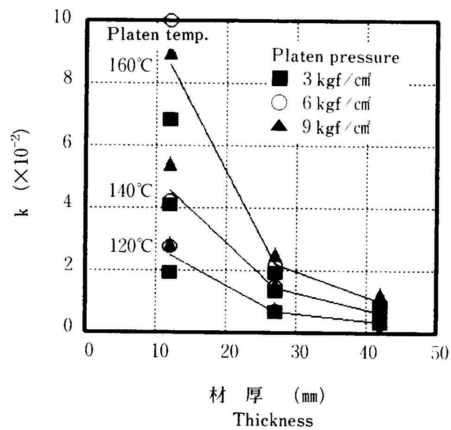
すれば、(2)式にそれを代入することによって時間が推定されるはずである。k値の傾向をみると、厚材<薄材、低温<高温、低圧縮圧力<高圧縮圧力で、材厚と温度の影響が特に大きい。このk値によって、ある程度時間推定が可能と思われる。

### 3.3 材温と含水率の関係

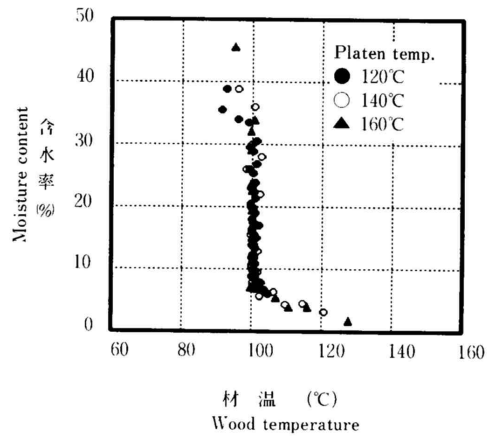
材厚27mmの材温と含水率の関係を第4図に示す。乾燥初期の材温は100°Cまで直線的に上昇し、その間は、各条件で多少差はあるが15~30分の短時間である。その後は含水率が減少するにもかかわらずほぼ100°Cを維持しながら推移し、含水率が約7%に到達してから急速に昇温し始めることが認められた。これはいずれの乾燥条件についても同様の傾向が得られ、含水率との関係が明瞭である。よって、材温測定は乾燥終了時

第2表 熱板乾燥による乾燥時間と乾燥速度の推定  
Table 2 • Presumption of drying time and drying rate by theoretical curve

乾燥条件 Drying condition		乾燥速度 減少係数 Coefficient k of an exponential curve  k (× 10 <sup>-2</sup> )	含水率60%から5% までの推定時間 Presumptive time to dry from 60% m.c. to 5% m. c. (min.)	含水率5%時の 乾燥速度 Drying rate at 5% m.c. (%/min.)
温度 Platen temp.	圧縮圧力 Pressure			
(Thickness 42mm)				
120℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	0.325	764	0.0163
	6 "	0.294	845	0.0147
	9 "	0.285	872	0.0143
140℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	0.488	510	0.0244
	6 "	0.631	394	0.0316
	9 "	0.692	359	0.0346
160℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	0.766	325	0.0383
	6 "	0.941	264	0.0470
	9 "	1.199	207	0.0600
(Thickness 27mm)				
120℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	0.646	384	0.0323
	6 "	0.671	371	0.0335
	9 "	0.672	370	0.0336
140℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	1.301	191	0.0650
	6 "	1.467	169	0.0733
	9 "	1.472	169	0.0736
160℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	1.907	130	0.0953
	6 "	2.166	115	0.1083
	9 "	2.461	101	0.1230
(Thickness 12mm)				
120℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	1.927	129	0.0963
	6 "	2.752	90	0.1376
	9 "	2.790	89	0.1395
140℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	4.087	61	0.2043
	6 "	4.201	59	0.2100
	9 "	5.334	47	0.2667
160℃	3kgf/cm <sup>2</sup>	6.821	36	0.3410
	6 "	9.985	25	0.4993
	9 "	8.928	28	0.4464



第3図 含水率減少係数K値  
Fig. 3. Coefficient k of an exponential curve in reducing m. c.



第4図 材温と含水率の関係 (材厚27mm)  
Fig. 4. The wood temperature related to the moisture content (Thickness 27mm)

期を判断する手段として有効といえる。

熱板乾燥中に含水率を計測する手段として、電気式水分計を用いる方法が考えられるが、高温処理のため温度補正を行う必要があり、測定精度に問題が生じることは明らかである。また、重量測定によって含水率を知る方法は確実ではあるが、プレスを解圧し材を取り出す作業手間があり、メリットは少ないと思われる。これらのことから、前述した含水率減少係数 $k$ 値から乾燥時間を推定し、さらに材温測定を併用すれば、簡単に処理時間を推測することができ、水分むらのない均一な乾燥材を得ることができると思われる。

### 3.4 寸法

熱板乾燥は圧縮しながら乾燥するため、厚さ減りが大きく、逆に幅方向は小さい(面積歩留まりが良い)ことが知られている。今回の実験では、含水率5%時で厚さ方向は約15% (圧縮圧力 $9\text{kgf/cm}^2$ )、約13% ( $6\text{kgf/cm}^2$ )、約11.5% ( $3\text{kgf/cm}^2$ )、幅方向では1~3%程度の歩減り率となり、傾向は一致した。特徴として、圧力条件でその値は影響を受け、今回の実験で適用した $3\sim 9\text{kgf/cm}^2$ の範囲では圧力が大きいほど厚さ減りは大きく、逆に幅の減りは小さくなり、両者は負の相関である。

### 4. まとめ

熱板によりマカンバ材の乾燥試験を温度120, 140, 160°C、圧縮圧力3, 6,  $9\text{kgf/cm}^2$ の組み合わせ9条件で行い、主に乾燥時間の推定方法について検討した。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 含水率測定値を指数関数に当てはめて最小二乗法による近似を行い、含水率減少曲線を求めると、測定データとそれはよく一致した。よって、この曲線により乾燥時間の推定が可能である。
- (2) 含水率減少曲線を決定する含水率減少係数 $k$ 値をあらかじめ乾燥条件別に求めておけば、乾燥時間を推定することができる。
- (3) 含水率60%から5%までの推定乾燥時間は、温度と圧力条件の組み合わせで違いがあり、材厚12mmで25~129分、材厚27mmで101~384分、材厚42mmは207~872分の範囲であった。

(4) 仕上げ含水率は、水分むら、水分傾斜を抑制する上で5%以下が望ましい。

(5) 材温は熱板処理開始後、速やかに100°Cまで達し以後はその温度で推移する。さらに乾燥が進行し含水率が約7%に到達する時点から100°Cで推移してきた材温は熱板温度付近まで昇温し始める。これにより乾燥終了の判断材料として材温測定は有効と思われる。

(6) 乾燥前と後の寸法変化、すなわち歩減り率は圧縮圧力条件で差がみられ、含水率5%時点で厚さ方向が11.5~15%、幅方向が1~3%の範囲であった。

なお、熱板乾燥で得られたマカンバ材の寸法安定性については、熱気乾燥材との比較試験を行い、本誌8巻2号<sup>10)</sup>に掲載したので参照していただきたい。今後は寸度安定化を図る上で有効な熱板温度、圧縮圧力条件等の検討を行う必要がある。

### 文献

- 1) Heebink, B. G. and Compton, K. C. : U. S. For. Serv. Res. Note FPL-0122(1966)
- 2) Hittmeier, M. E., Comstock, G. L. and Hann, R. A. : F. P. J. 18-9, 91-96(1968)
- 3) Schmidt J. : F. P. J. 17-9, 107-113(1967)
- 4) 前田市雄, 鷹栖紀明: 林産試月報, No.223, 11-15(1970)
- 5) 前田市雄, 鷹栖紀明: 林産試月報, No.231, 8-11(1971)
- 6) 宮島 寛, 飯田信男: 日本木材学会北海道支部講演集, No.10, 17-21(1978)
- 7) (社)北海道林産技術普及協会: 加速的技術開発支援事業成果報告書(1991)
- 8) 寺沢 真, 岩下 睦: 林試研報, 81, 87(1955)
- 9) 信田 聡ほか3名: 林産試月報No.392, 1-9(1984)
- 10) 中嶋 厚, 菅谷恵美子: 林産試場報, 8(2), 1-8(1994)

—技術部 乾燥科—  
(原稿受理 H 6. 7. 13)