

木材の熱傳導に關する研究

第 2 報

熱板による板材の加熱に就て

滿久 崇麿 松浦 尚士

(木材物理第2研究室)

Heat Conduction in Wood

II

Interior Temperature of Plate
when heated with Hot Steel Plate

by Takamaro MAKU and Takashi MATSUURA

目 次

緒 言

I 理論解に對する検討

II 實驗方法

(1) 試 驗 片

(2) 實驗方法

III 實驗結果

(1) 木材が水分を含まない場合

(2) 木材が水分を含む場合

(a) 加熱溫度が 100°C 以下の場合

(b) 加熱溫度が 100°C 以上の場合

IV 結 言

緒 言

熱板合板製造に當つてその内部溫度を近似的に算出する爲の資料として含水率が纖維飽和点以下の板の熱板加熱に就て實驗を行ひ溫度算出の方法を導出した。

I 理論解に對する検討

一定の表面溫度 t_1 なる熱板によつて初めの溫度 t_0 なる板を加熱する場合その加熱面積の割合に厚さが薄ければ原則的に 第1報 III. 2 (a) を適用して板の中央面の溫度 t_m は

$$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0} = \frac{4}{\pi} \left\{ e^{-\alpha_1 \left(\frac{\pi}{2a}\right)^2 \theta} - \frac{1}{3} e^{-\alpha_1 \left(\frac{3\pi}{2a}\right)^2 \theta} + \frac{1}{5} e^{-\alpha_1 \left(\frac{5\pi}{2a}\right)^2 \theta} - \dots \right\} \dots \dots \dots (27)$$

によつて求める事が出来る。この解が適用される爲には第1報に於て説明した如く α_L が略 const. なる事が必要であつて加熱中何等かの原因によつて α_L の値が著しく變化しその平均値を用いても省略し得ない様な誤差を生ずる場合には當然上式はその適應性を失ふ事になり例へば加熱中木材の含水率の變化が著しい場合が之に相當する事は既に述べた通りであつて、この様な場合には當然 (27) 式に對して適當な修正を行ふ事が必要となつて来る。

扱て (27) が適用出来るためには先づ次の條件

(1) 均一物質に對する上記の理論式が木材の如き有機多孔物質にも適用出来る事

(2) 境界條件が満足される事

が満足されねばならない必要性から筆者は實驗に先立つて之に關する豫備的な検討を行つた。

即(1)に對しては加熱面積 10×13 , 厚さ 1.5cm の種々な樹種の板目の絶乾材について $t_1 = 130$, $t_0 = 20^\circ\text{C}$ とし且熱板と木材表面との接觸を完全にする爲に壓縮力 10kg/cm^2 として後述する如き實驗方法によつて板を加熱しその厚さの方向に於ける板の中央溫度 t_m を測定し第1報に於ける GURNEY-LURIE 線圖を用ひて α_L を計算し (第1表參照) 之を第1報に示した各種の實驗式を用ひて計算した値と比較すると次の如く兩者はよく一致する事を確認した。

第1表 絶乾材の熱擴散率

樹 種	ナ ラ (厚サ 1.0cm)						ブ ナ (厚サ 1.43cm)					
初めの溫度 t_0 ($^\circ\text{C}$)	20.3						20.0					
$\frac{\theta}{a^2}$	θ	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\alpha_L \frac{\theta}{a^2}$	α_L	θ	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\alpha_L \frac{\theta}{a^2}$	α_L
4	1'	75.5	54.5	0.497	0.380	0.095	2'02"	77.3	52.7	0.479	0.396	0.099
8	2'	106.2	23.8	0.217	0.720	0.090	4'04"	111.1	19.9	0.182	0.792	0.099
12	3'	121.1	8.9	0.0810	1.120	0.093	6'08"	122.6	7.4	0.0670	1.200	0.100
16	4'	126.7	3.3	0.0301	1.520	0.095	8'10"	126.9	3.1	0.0280	1.550	0.097
	平均 (0.093)						平均 (0.099)					

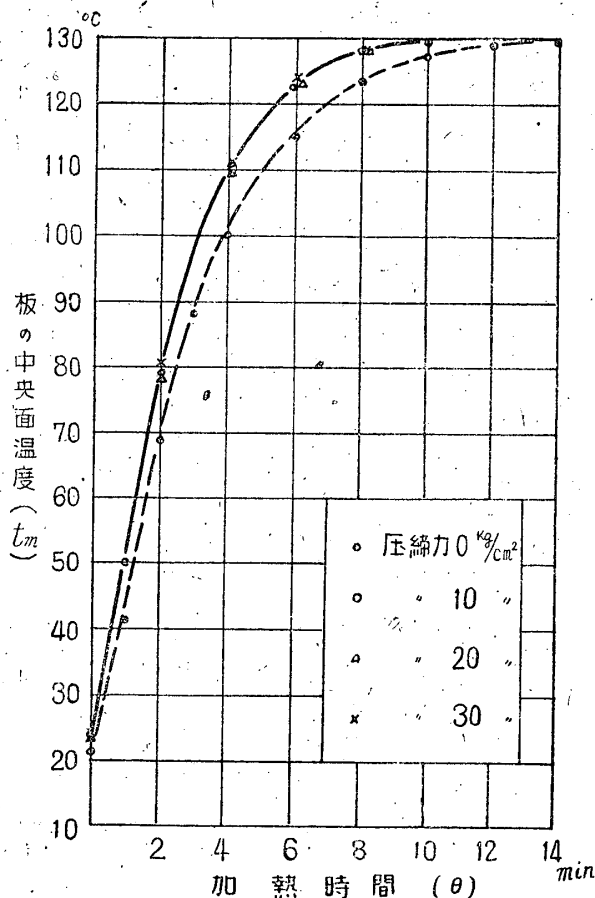
樹 種	タ モ (厚サ 1.17cm)						タ イ ヒ (厚サ 1.50cm)					
初めの溫度 t_0 ($^\circ\text{C}$)	20.0						22.3					
$\frac{\theta}{a^2}$	θ	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\alpha_L \frac{\theta}{a^2}$	α_L	θ	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\alpha_L \frac{\theta}{a^2}$	α_L
4	1'22"	75.8	54.2	0.493	0.384	0.096	2'15"	82.3	47.7	0.443	0.428	0.107
8	2'44"	108.0	22.0	0.200	0.752	0.094	4'30"	112.9	17.1	0.159	0.848	0.106
12	4'06"	120.7	9.3	0.0850	1.10	0.092	6'45"	125.2	4.8	0.0450	1.360	0.113
16	5'28"	127.1	2.9	0.0266	1.57	0.098	9'00"	128.2	1.8	0.0167	1.760	0.110
	平均 (0.095)						平均 (0.109)					

樹 種	スギ (厚サ 1.39cm)						マツ (厚サ 1.49cm)					
初めの溫度 t_0 (°C)	20.0						20.0					
$\frac{\theta}{a^2}$	θ	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\alpha \frac{\theta}{a^2}$	α	θ	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\alpha \frac{\theta}{a^2}$	α
4	1'56"	75.0	55.0	0.500	0.376	0.094	2'13"	80.5	49.5	0.450	0.420	0.105
8	3'52"	107.5	22.5	0.205	0.744	0.093	4'26"	111.5	18.5	0.168	0.824	0.103
12	5'48"	120.7	9.3	0.0850	1.100	0.092	6'39"	123.3	6.7	0.0605	1.240	0.103
16	7'44"	126.5	3.5	0.0321	1.470	0.092	8'52"	127.7	2.3	0.0213	1.660	0.104
20	9'47"	128.3	1.7	0.0152	1.800	0.095	11'05"	128.7	1.3	0.0117	1.920	0.096
	平均 (0.093)						平均 (0.102)					

	ナラ	ブナ	タモ	スギ	タイヒ	マツ
絶乾比重	0.78	0.67	0.59	0.42	0.36	0.31
α (實驗値)	0.093	0.099	0.095	0.093	0.109	0.102
α (實驗式による計算値)	0.100	0.099	0.099	0.102	0.105	0.110

(α の値は板の平均溫度 80°C に對する値である)

第 1 圖



次に(2)は熱板と板との接觸が完全であるか否かといふ技術的な問題に歸する譯であるが之に對しては熱板の壓縮力を 0, 10, 20, 30 kg/cm² として絶乾のブナ材の板の中央溫度を測定比較した。この結果を示すと 第1圖(第2表)の如くであつて之が理論的に熱的平衡に達する時刻 θ_{eq} は第1報第8圖のノモグラフから $\theta_{eq} \approx 10 \text{ min}$ 即ち加熱後約10分で板の中央溫度は略 130°C に到達する筈であり實驗に於ける壓縮力 10kg/cm² 以上の場合と極めてよく一致する。尙此の場合の板の表面溫度は含水率が 0 なる場合は勿論少くとも纖維飽和点以下であれば熱板の接觸後約 1 分位で略熱板の表面溫度に達し加熱直後の板の溫度を問題としない限り第1報 III, 2(a)の境界條件が成立するものと看做して差支ない事を確かめた。

以上の豫備實驗によつて熱板壓縮力を 10kg/cm² 以上として表面接觸を完全ならしめれば等方体に對する理論解が木材の如き多孔物質に對しても完全に適用し得る事を確かめ以下の實驗に着手した。

第2表 壓縮力と板の中央温度との關係

壓縮力 0kg/cm ²		壓縮力 10kg/cm ²		壓縮力 20kg/cm ²		壓縮力 30kg/cm ²	
加熱時間 θ (min)	中央温度 t_m (°C)	加熱時間 θ (min)	中央温度 t_m (°C)	加熱時間 θ (min)	中央温度 t_m (°C)	加熱時間 θ (min)	中央温度 t_m (°C)
0	23.5	0	21.0	0	23.5	0	23.5
1	41.5	1.02	50.0				
2	69.0	2.04	79.2	2.07	78.0	2.04	80.5
3	88.0						
4	100.0	4.09	110.0	4.15	109.5	4.09	111.0
6	115.0	6.13	122.5	6.22	123.0	6.13	124.0
8	123.5	8.18	128.0	8.27	128.5	8.18	128.5
10	127.5	10.2	129.5				
12	129.0						
14	129.5						

ブ ナ：絶 乾 材
比 重：0.65～0.67
厚 さ：1.43～1.45
 t_1 : 130

Ⅱ 實 験 方 法

(1) 試 験 片

試験片は各樹種共加熱面積 10×13cm 厚さ 1.0～2.4cm の板目材とし加熱面は鉋によつて正しく平行2平面に仕上げた後温度測定箇所(板の中央平面)に直径約 1mm, 深さ約5cmの小孔を穿ち之を約2ヶ月間一定湿度のデシケーター中に静置して平衡含水率に達せしめ測定の前日小孔に熱電對を挿入し側面無防濕の試験片はそのまゝ, 側面防濕の試験片は側面に濃厚なゴム糊によつて厚さ約1mmのゴム板を貼付けその上を更にアスベストで覆ひ木枠及金具によつて固く締付けた後デシケーター中に入れ 20°C の恒温槽中におき試験片の温度傾斜, 水分傾斜を出来るだけ防止した。

(2) 實 験 方 法

實驗の手順は豫め表面温度 t_1 が一定になる様に調節檢定せる熱板を小型實驗用プレスに取付け先づデシケーター中の試験片の初めの温度 t_0 を測定した後素早く試験片を熱板の間へ挿入して 10kg/cm²迄壓縮し以後熱板の温度を一定に保ちつゝ板の中央温度 t_m を測定した。

Ⅲ 實 験 結 果

(1) 板が水分を含まない場合

木材中に水分が存在しない場合は第1表及び第2表の實驗結果から明らかな如く板の内部温度は理論解に極めてよく一致する。従つて第1報Ⅱの各實驗式から α_L を算出し GURNEY-LURIE 線圖を用いて板の任意の時刻, 任意の場所に於ける温度 t を容易に計算することが出来る。

扱て第1報(26)式から明らかな様に今厚さ $2a_1, 2a_2$ なる板材を同一の條件で加熱した場合の相似的位置即 $\frac{x_1}{a_1} = \frac{x_2}{a_2}$ なる x_1, x_2 の溫度が相等しくなる爲の加熱時間は

$$\alpha_1 \frac{\theta_1}{a_1^2} = \alpha_2 \frac{\theta_2}{a_2^2} \quad i. e. \quad \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{\alpha_2 a_1^2}{\alpha_1 a_2^2}$$

によつて與へられ厚さの自乗に比例し熱擴散率に逆比例するが若し熱擴散率が同一であれば厚さの自乗のみに比例し或ひは逆に板の相似的位置は同一の $\frac{\theta}{a^2}$ に對して同一の溫度を示すといふ事が出來、任意の厚さの溫度上昇經過が判つておれば異なる厚さのそれはこの關係からも容易に導くことが出来る。

(2) 板が水分を含む場合

(a) 加熱溫度が 100°C 以下の場合

熱板の溫度 $t_1=80^\circ\text{C}$ とし、板の初めの溫度 $t_0=17\sim 20^\circ\text{C}$ 、含水率 $u=25\%$ 、厚さ $2a=1.47\sim 1.5\text{cm}$ のスギの板目材について實驗した結果を示すと第2圖(第3表)の如くである。即ち此の場合の溫度上昇經過は側面の防濕の有無如何に拘らず略同様であつて比較の爲25%に於ける熱擴散率を第1報第3圖から $\alpha_L=0.0792$ とし、 $2a=1.48, t_1=130, t_0=20$ なる場合の溫度上昇經過を Gurney-Lurie 線圖を用ひて求めると圖中の實線の如くなり又その時の溫度平衡に達する時間 θ_{eg} はノモグラフから $\theta_{eg}=13\text{min}$ となり實驗結果とよく一致する事が判る。

即此の場合には側面の防濕の有無に關せず含水率が未だ變化しない内に溫度平衡に達する譯でこの事は第3表の加熱前後に於ける含水率變化が極めて僅少な事からも首肯し得る所である。

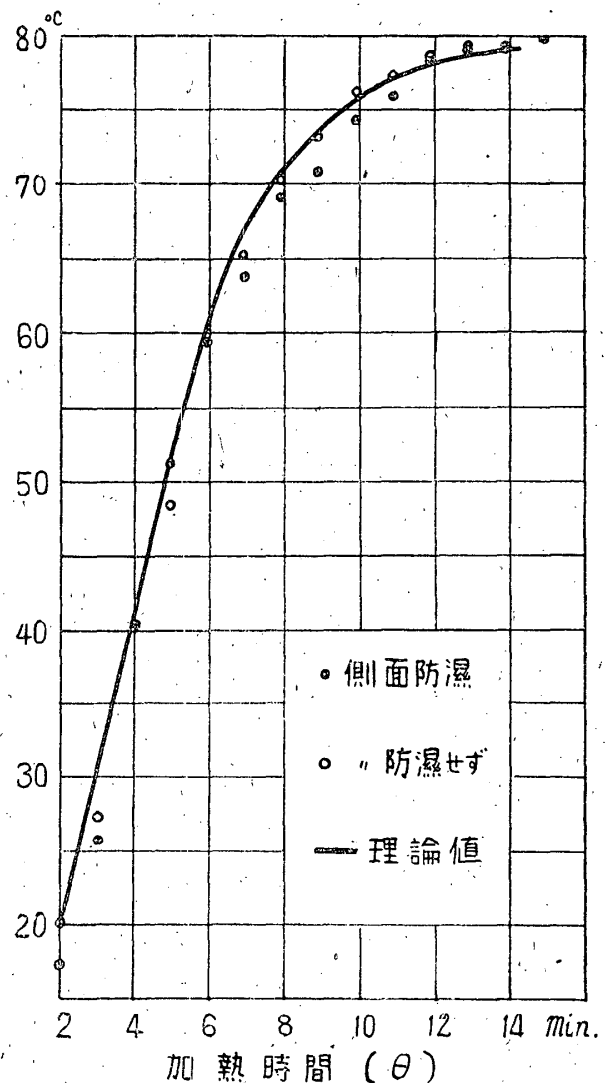
要するに本實驗の結果から木材中に水分があつても加熱溫度が 100°C 以下であれば溫度上昇が水分變化より遙かに先行する爲その上昇經過は理論式とよく一致し實驗(1)に於けると同様の結論を與へることが出来る。

(b) 加熱溫度が 100°C 以上の場合

(i) 理論式との比較

熱板の溫度 $t_1=130^\circ\text{C}$ とし板の最初の溫度 $t_0=20^\circ\text{C}$ 、含水率約14%、厚さ1.4~1.45cm のスギの板目材につき側面防濕及無防濕の場合の加熱實驗の結果を示すと第3圖(第4表)となり比較の爲平均含水率10%、厚さ1.45cm の場合の理論的溫度上昇經過を示すと圖中實曲線となる。これより明ら

第2圖



第3表 熱板溫度 $t_1=80^\circ\text{C}$ なる時の板の中央溫度 (スギ)

加熱時間 θ (min)	板ノ中央溫度 t_m ($^\circ\text{C}$)		
	側面防濕	側面無防濕	理論値
0	17.0	20.0	20
1	25.5	27.0	
2	40.0	40.0	44.0
3	51.0	48.0	
4	59.0	59.0	63.5
5	63.5	65.0	
6	69.0	70.0	71.5
7	70.5	73.0	
8	74.0	76.0	76.5
9	75.5	77.0	
10	78.0	78.5	78.5
11	78.5	79.0	
12	78.5	79.0	79.0
13	79.0	79.0	
加熱前含水率	25.4 %	25.9	
加熱後含水率	23.6	22.9	
平均含水率	24.5	24.4	25.0%
厚サ $\frac{2a}{[\text{cm}]}$	1.50	1.47	1.48

かな如く材の中央溫度が 100°C に達する迄は理論値と實驗値はよく一致するが 100°C 以後に於ては事實上の板の内部溫度上昇は (27) 式による理論的な溫度上昇に比して著しく遅れ最早や正規の経過を辿り得ない。この原因は熱量の大部が水分の氣化潜熱として消費され更に側面防濕の有無に拘らず一部が顯熱として側面より放出されるのを避ける事が出来ない爲で本實驗に於ては側面の防濕に相當の注意を拂つたにも拘らず結果から見て側面防濕をしない場合と殆ど同様の溫度上昇を示している。従つてこの様な場合の熱傳導方程式は基本式 $\frac{\partial t}{\partial \theta} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$ に氣化並に放熱に關する項が加へられる事になり理論的に解を求め得てもその具体的な利用は極めて困難であつて寧ろ實驗的觀察によつて適當な係数を定め (27) 式を修正して利用するのが實用上便利であると考へられる。

第4圖 (第5表) はこの目的の爲に最初の含水率が一定で厚さの異なる板の加熱を各種の含水率に對して行つた實驗結果の一部でこれから明かな如く加熱前の含水率が同一であれば板の中央溫度は厚さの如何に拘らず同一の $\frac{\theta}{a^2}$ に對して同一の値を示し換言すれば此の場合にも熱傳導は相似的であり板の中央部が同一溫度に達する迄の加熱時間は最初の含水率が同一であれば厚さの自乗に比例し理論解と同様の特性を有していることを知る事が出来る。

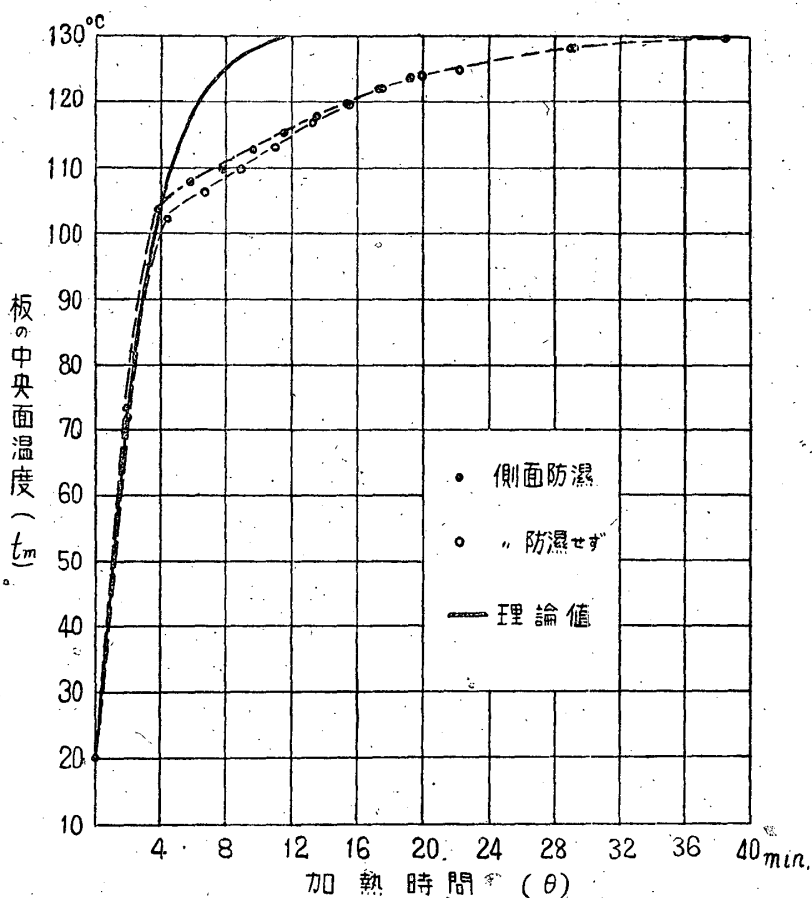
(ii) 理論式の實用化

(i) の實驗結果から 100°C 以上の熱板で板を加熱する場合その内部溫度が 100°C に達した後は氣化熱及側面よりの放熱の爲にその後の溫度に對しては最早や理論式 (27) を適用し得ないが、溫度上昇は依然として相似性を有し (27) 式の特性に類似の性質を有している事を知つた。依て筆者はこの場合の解として熱擴散の抵抗係数とも看做すべき無次元数 k を假定し (27) 式に類似の式

$$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0} = \frac{4}{\pi} \left\{ e^{-\frac{\pi^2 k \alpha \theta}{4 a^2}} - \frac{1}{3} e^{-\frac{9\pi^2 k \alpha \theta}{4 a^2}} + \frac{1}{5} e^{-\frac{25\pi^2 k \alpha \theta}{4 a^2}} - \dots \right\} \dots \dots \dots (1)$$

を實驗式として採用し實驗的に係数 k を決定しようと試みた。但し k は板の最初の含水率並に $\frac{\theta}{a^2}$ によつて變化する値である。

第 3 圖



扱て(1)式を實際に利用するには GURNEY-LURIE 線圖と同様に $\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$, $k\alpha \frac{\theta}{a^2}$ に關する Dimensionless eq. のグラフで表はしておき（このグラフは GURNEY-LURIE 線圖と全く同様で唯横軸の $\alpha \frac{\theta}{a^2}$ の代りに $k\alpha \frac{\theta}{a^2}$ と置き換へればよい）先づ初の含水率が一定で厚さのみ異なる板を同一條件で加熱しその中央溫度 t_m を測定する事によつて $\frac{\theta}{a^2}$ と $k\alpha$ 從つて k との關係を知る事が出来る故同様の事を各種の含水率に對して行ひ豫め $\frac{\theta}{a^2}$ と k の關係を求めておけばよい。即若しある初の含水率の板を一定溫度 t_1 で熱板加熱した場合 θ 分後に於ける中央溫度を求める爲には $\frac{\theta}{a^2}$ が判つて居る故上に得た關係からその含水率並に $\frac{\theta}{a^2}$ に相當する k の値を求めこれを用いて $k\alpha$ 從つて $k\alpha \frac{\theta}{a^2}$ によつて線圖から $\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$ を得與へられた t_0 , t_1 により中央溫度 t_m を求める事が出來實用上極めて便利である。尙この時の α の値としてはそれが const. である限り如何なる場合を標準にとつても差支へないが筆者は便宜上 20°C , 0% の時の値を基準として用ひ附表の k の計算にはすべてこの基準を採用した。

第5圖は各種の樹種、含水率に對して上述の如き實驗を行つて得た $\frac{\theta}{a^2}$ 及び含水率 u と係數 k との關係を示したもので含水率 $u=0$ に於て $k=1$ なる事からこの關係は $k=(u+1)^{-b}$ なる形で表はすこ

第4表熱板溫度 $t_1=130^{\circ}\text{C}$ なる時の板の中央溫度
(スギ)

側 面 防 濕		側 面 無 防 濕		理 論 値	
加熱時間 θ (min)	中央溫度 t_m $^{\circ}\text{C}$	加熱時間 θ (min)	中央溫度 t_m $^{\circ}\text{C}$	加熱時間 θ (min)	中央溫度 t_m
0	20	0	20	0	20.0
1.93	73.5	2.22	71.5	1	38.5
3.86	103.5	4.44	102.0	2	67.5
5.80	107.5	6.66	106.0	3	89.5
7.73	109.5	8.88	109.5	4	102.5
9.66	112.5	11.10	113.0	6	118.0
11.59	115.0	13.32	116.5	8	125.0
13.52	117.5	15.54	119.5	10	127.5
15.46	119.5	17.76	121.5	12	129.5
17.39	121.5	19.98	123.5		
19.32	123.2	22.20	124.5		
28.98	128.0	28.86	128.0		
38.46	129.5				
加熱前含水率		加熱前含水率			
14.1%		13.9%			
加熱後含水率		加熱後含水率			
8.7		3.7			
平均含水率		平均含水率		10%	
11.4		8.8		$\alpha=0.0941$	
厚さ $2a$ [cm]		厚さ $2a$ [cm]			
1.45		1.40		1.45cm	

とが出來定數 b は $\frac{\theta}{a^2} = 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 60, 80, 100$ 及び 120 に對して夫々 $0.102, 0.193, 0.285, 0.354, 0.402, 0.441, 0.468, 0.494, 0.520, 0.550, 0.565, 0.572$ 及び 0.577 となる。

第6圖は同一の結果を使用の便宜上 k と $\frac{\theta}{a^2}$ のグラフとして表はしたものである。

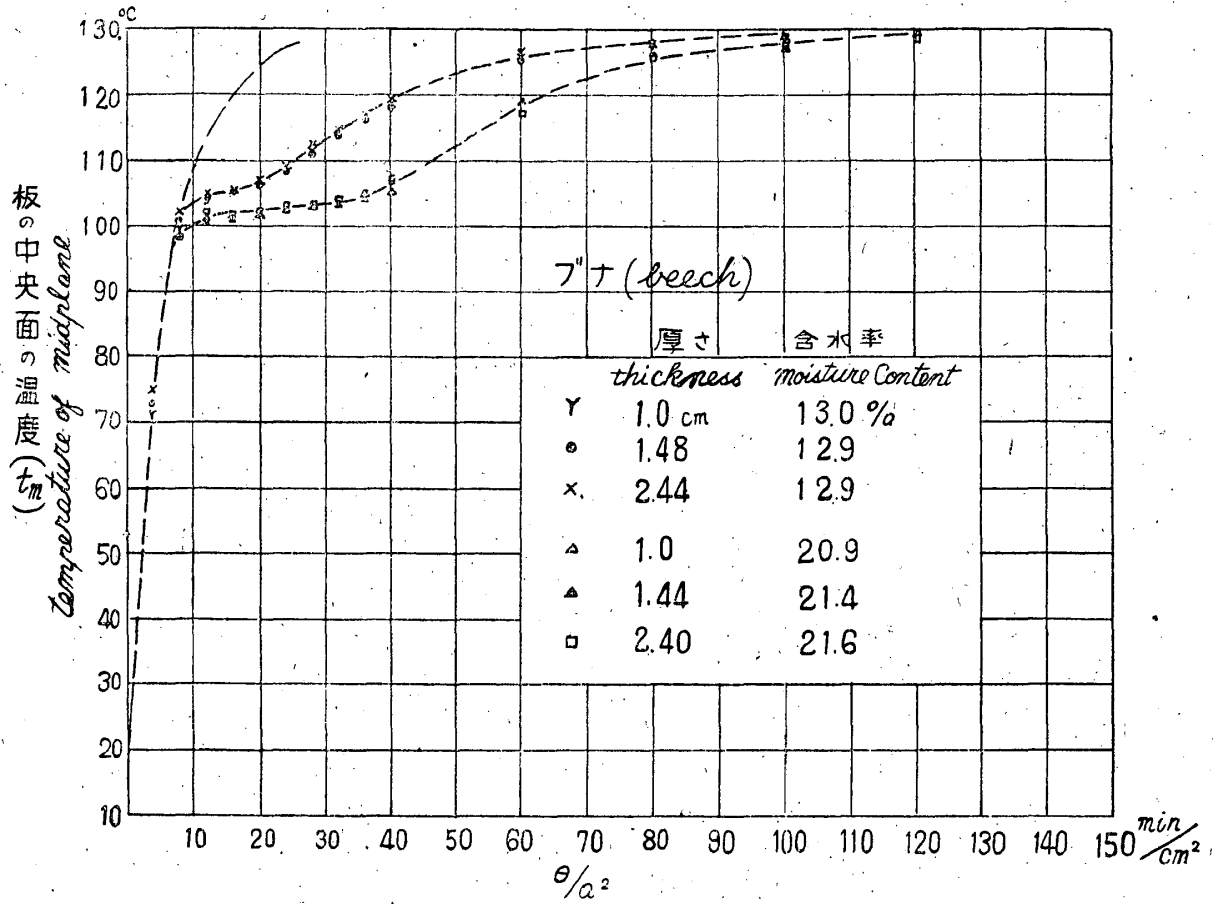
〔計 算 例〕

ブナの單板を厚さ 2cm に推積し表面溫度 130°C の熱板で壓縮加熱した場合 12 分後にその中央面の溫度は何度となるか、但し單板の平均含水率を 25% 、初めの溫度を 18°C とする。又單板の含水率 10% の時は如何、又その時の板の中央面が 120°C に達する時間はどの位か。

簡單の爲接着層の影響を省略して先づ含水率 25% の時の値は第1報第3圖から $\alpha_1=0.079$ とおく。

單板層の中央面が 100°C に達するに要する時間は $\frac{t_1-t_m}{t_1-t_0} = \frac{130-100}{130-18} = 0.268$ 故に GURNEY-LURIE

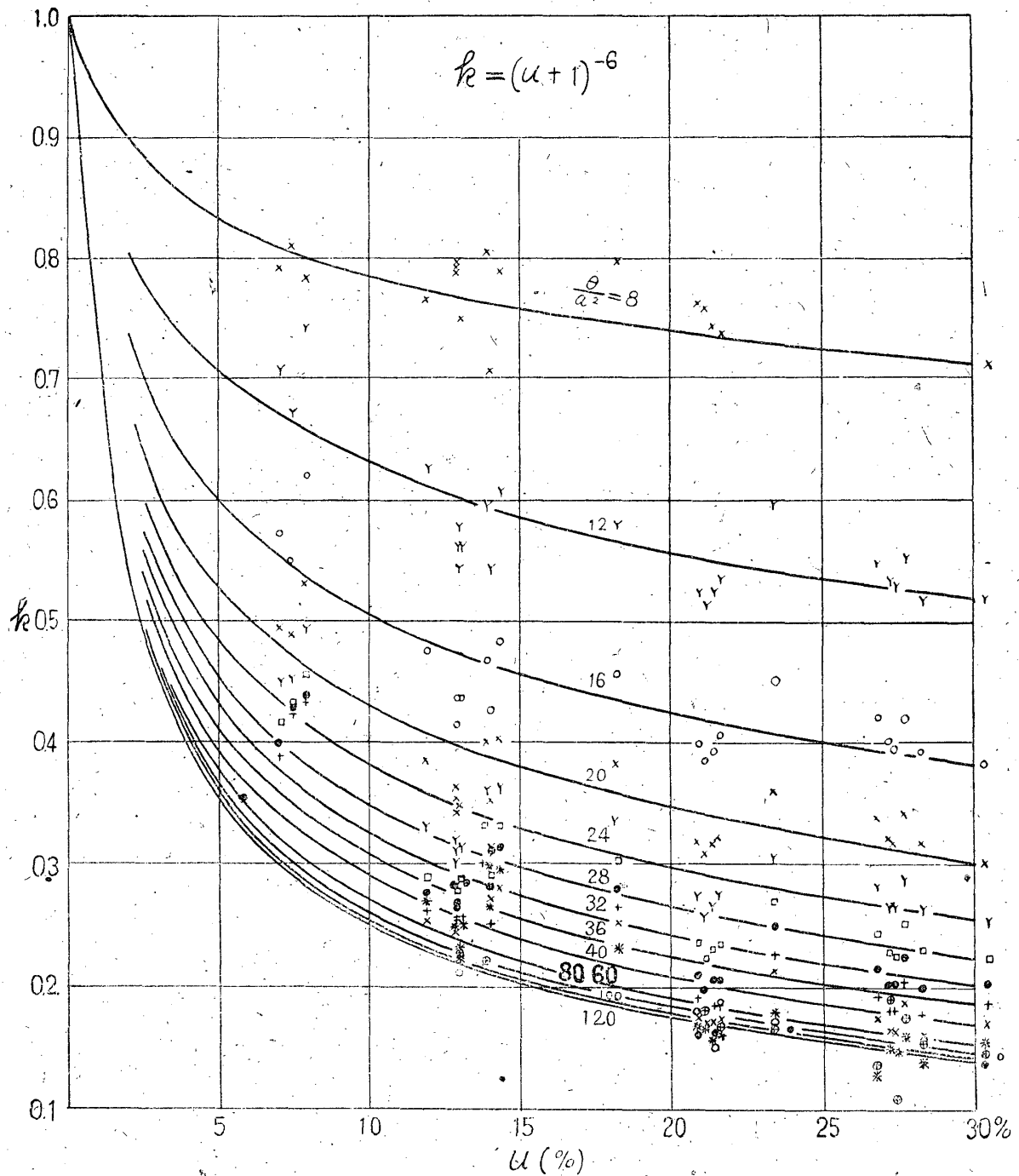
第 4 圖



フナ 第 5 表 各種の厚さの板の中央温度

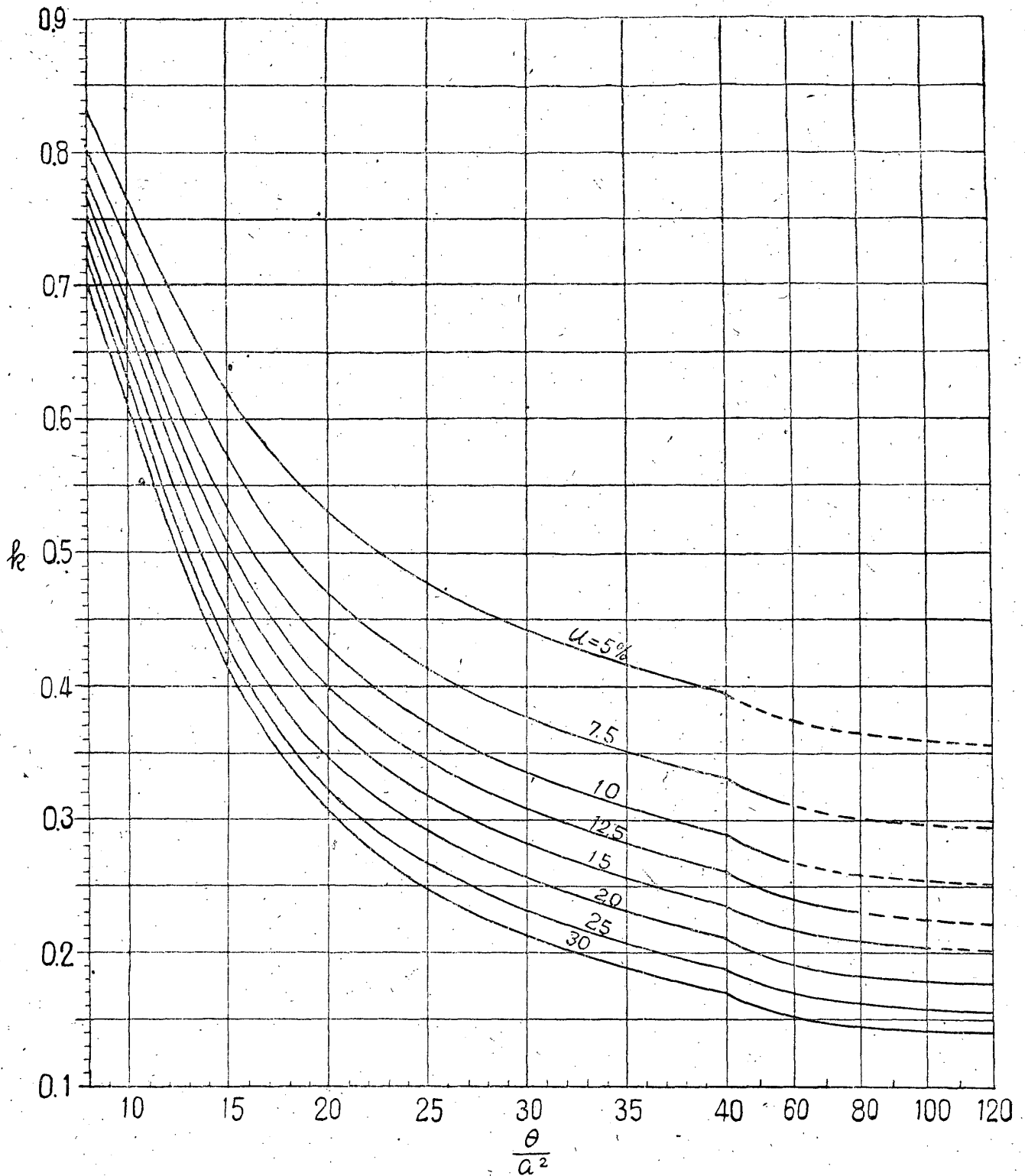
含水率 u (%)	12.9						21.3					
	1.0		1.48		2.44		1.0		1.44		2.40	
厚さ $2a$ (cm)	θ	t_m	θ	t_m	θ	t_m	θ	t_m	θ	t_m	θ	t_m
$\frac{\theta}{a^2}$												
0	0	20.0	0	20.0	0	20.0	0	20.0	0	20.0	0	20.0
4	1	71.0	2.2	72.7	5.95	75.0	1	—	2.07	70.8	5.76	70.0
8	2	98.8	4.4	100.5	11.91	101.8	2	99.3	4.15	98.5	11.52	97.8
12	3	103.8	6.6	104.0	17.86	105.0	3	100.8	6.22	100.7	17.28	101.8
16	4	105.5	8.8	105.0	23.82	105.7	4	101.3	8.29	101.1	23.04	102.2
20	5	106.8	11.0	106.2	29.77	107.3	5	101.8	10.37	101.4	28.80	102.5
24	6	109.0	13.2	108.2	35.72	109.2	6	102.8	12.44	101.8	34.56	102.8
28	7	111.3	15.4	110.8	41.68	112.5	7	103.5	14.51	102.4	40.32	102.8
32	8	114.2	17.6	113.3	47.63	114.7	8	104.2	16.59	102.9	46.08	103.2
36	9	116.5	19.8	116.0	53.59	117.2	9	105.3	18.66	103.5	51.84	104.0
40	10	119.3	22.0	118.3	59.54	119.5	10	107.2	20.74	105.1	57.60	105.5
60	15	126.7	33.0	125.0	89.31	125.8	15	119.2	31.10	116.8	86.40	117.2
80	20	128.5	44.0	127.5	119.08	128.2	20	126.7	41.47	124.5	115.20	125.8
100	25	129.3	55.0	128.3	148.85	128.8	25	128.4	51.84	127.0	144.00	128.8
120							30	129.0	62.21	128.9	172.80	129.8

第 5 圖



線圖から $\alpha_1 \frac{\theta}{a^2} = 0.635$, 故に * $\theta = \frac{0.635 \times 1^2}{0.079} = 8.05 \text{ min}$ 従つて第 6 圖を用ひて $\frac{\theta}{a^2} = \frac{12}{1^2} = 12$ に對する k の値を 25% 線から求めると $k = 0.537$ 故に, $k \alpha_1 \frac{\theta}{a^2} = 0.537 \times 0.102 \times 12 = 0.657$ 再び GURNEY-LURIE 線圖から $k \alpha_1 \frac{\theta}{a^2} = 0.657$ に對する $\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0} = 0.254$, $t_1 = 130$, $t_0 = 18$ を用ひて $t_m = 101.6^\circ \text{C}$ が求める答である。含水率が 10% の時は $\alpha_1 = 0.0937$ として t_m が 100° になる迄の時間は $\theta = \frac{0.635 \times 1^2}{0.0937} = 6.8$. 故に第 6 圖から $\frac{\theta}{a^2} = 12$ に對する k の値を 10% 線から求めると $k = 0.630$, 故に $k \alpha_1 \frac{\theta}{a^2} = 0.630 \times$

第 6 圖



$0.102 \times 12 = 0.771$ から $\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0} = 0.191$ 従つて $t_m = 108.6^\circ\text{C}$ を得る。

次に中央面が 120°C に達するに必要な時間を30分と假定すると $\frac{\theta}{a^2} = \frac{30}{12} = 30$, 故に $k = 0.336$,

$k\alpha \frac{\theta}{a^2} = 1.027$ $\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0} = 0.102$, $t_m = 118.6^\circ\text{C}$ となる。従つて $\theta = 33$ 分に補正すると $\frac{\theta}{a^2} = 33$, $k = 0.$

320 , $k\alpha \frac{\theta}{a^2} = 0.320 \times 0.102 \times 33 = 1.076$ 故に $\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0} = 0.9$ $t_m = 120^\circ\text{C}$ 即ち 33分を要する。

附圖 1~3 はこの方法によつて板の中央面温度が 120°C に達するに要する時間と厚さ及び含水率の關係を熱板温度 $130, 140, 150^{\circ}\text{C}$ に對して求めたものである。

Ⅲ 結 言

(1) 熱板によつて板を加熱する場合その内部温度を豫め算出する目的を以て先づ絶乾にした板に對し第1報に於て與へられた基礎式と境界條件が實際の現象と一致する事を豫備的實驗によつて確かめた。

(2) 次に含水率が0なる場合の板並に含水率が纖維飽和点以下で加熱温度 100°C 以下の場合の板の熱傳導が理論式とよく一致する事を實驗的に確めた。

(3) 板が水分を含み且加熱温度が 100°C 以上の場合の熱傳導は必ずしも理論式と一致しないが之に類似の性質を有する事を見出し實驗的に定めた係數によつて理論式を修正し板の中央温度算出の實際的方法を導き最後にその計算例を示した。

Résumé

As a data to calculate the approximate interior temperatures in plywoods previously when they are manufactured by hot press, we measured the temperature of midplane t_m in wooden plate placed between two electrically, at constant surface temperature $t_1^\circ\text{C}$, heated steel plates.

The experiments were done for the next 3 cases.

1. Wood has no moisture.
2. Wood has moisture below fiber saturated point and heating temperature $t_1 < 100^\circ\text{C}$
3. Wood has moisture below fiber saturated point and heating temperature $t_1 > 100^\circ\text{C}$

For the former two the theoretical solution (27) in Part I of this report can be adopted generally and experiments also good coincided with it, then calculating $\alpha = \frac{\lambda}{cR}$, we can get easily the values of t_m (or if necessary temperatures at any interior point of wood) of different thickness.

Fig 2, for example, shows the temperature change at midplane in cedar plate [Thickness $2a = 1.48$ cm, initial moisture content $u = 0.25$, heating temperature $t_1 = 80^\circ\text{C}$, initial wood temperature : $17 \sim 20^\circ\text{C}$, —theoretical curve obtained by eq. (27)].

In these cases it is evident from eq. (27) that the time required to obtain the same t_m for the different thickness of plate $2a_1$, $2a_2$ under the same heating conditions (t_1 , t_0 and u) are given by,

$$\alpha \frac{\theta_1}{a_1^2} = \alpha \frac{\theta_2}{a_2^2} \quad i, e, \quad \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{a_1^2}{a_2^2}$$

But for the latter, since a part of heat is consumed as a latent heat and (27) can not be adoptable, the theoretical calculation of t_m is very troublesome and may hardly be applied to practice.

Hence basing on experimentally obtained temperature t_m for several thickness and moisture content of wood we contrived the method to calculate t_m in this case as following.

Results

Fig 4, for example, shows t_m after different heating period employed for beech wood plates of different thickness and of same initial moisture content when heated between steel plates at 130°C (t_1) and starting with wood at 20°C (t_0). Wood temperature obtained under same conditions for other species can be found in appendix-table.

The figure shows the change of temperature is the same below 100°C but is abnormal

over 100°C when compared with eq. (27). However, the values of t_m for the same θ/a^2 of different thickness are same under constant initial moisture content, that it, in this case also the time required to obtain the same temperature t_m of the different thickness is proportional to the square of the thickness. This is the same important property of eq. (27).

Hence, for this case we assumed the experimental formula as following

$$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0} = \frac{4}{\pi} \left\{ e^{-k\alpha_1 \left(\frac{\pi}{2a}\right)^2 \theta} - \frac{1}{3} e^{-k\alpha_1 \left(\frac{3\pi}{2a}\right)^2 \theta} + \frac{1}{5} e^{-k\alpha_1 \left(\frac{5\pi}{2a}\right)^2 \theta} - \dots \right\} \dots \dots (1)$$

and determined the values of k by using the t_m obtained in experiment. The figure 6 shows the value of k for initial moisture content 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25 and 30%.

Method of Colculation

1. In the case the heating period θ is given and to know the temperature t_m after θ

Since t_1 , t_0 , $2a$ and initial moisture content u are given, θ/a^2 can be know and we can find the value of k i. e. $k\alpha_1$ by fig. 6, then using the Gurney-Lurie's chart (Fig. 3 in Part I) we can easily determine $\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$, i. e. t_m graphically.

2. In the case the required temperature t_m is given and to know how long the heating period must be taken.

Assume the any θ_x , then by θ_x/a^2 the value of t_{mx} can be similarly determined. If the t_{mx} is not equal to t_m , θ_x must be corrected and calculation be repeated again until they coincide with.

Thus it is possible to compute the approximate temperature t_m to be expected in such material under any given heating conditions.

附表 No. 1

 ナ ($\gamma_0=0.67$) $_{20}\alpha_0=0.102$

含水率 u (%)	13.0						12.9						12.9					
	1:0						1.48						2.44					
	20.0						20.0						20.0					
厚さ $2a$ [cm]	t_m	t_1-t_m	$\frac{t_1-t_m}{t_1-t_0}$	$kd \cdot \frac{\theta}{a^2}$	kd	k	t_m	t_1-t_m	$\frac{t_1-t_m}{t_1-t_0}$	$kd \cdot \frac{\theta}{a^2}$	kd	k	t_m	t_1-t_m	$\frac{t_1-t_m}{t_1-t_0}$	$kd \cdot \frac{\theta}{a^2}$	kd	k
初めの温度 t_0 [°C]	20						20						20					
0	20						20						20					
8	98.8	31.2	0.284	0.610	0.0762	0.747	100.5	29.5	0.268	0.635	0.0794	0.788	101.8	28.2	0.256	0.650	0.0812	0.796
12	103.8	26.2	0.238	0.685	0.0571	0.560	104.0	26.0	0.236	0.685	0.0571	0.560	105.0	25.0	0.227	0.705	0.0587	0.576
16	105.5	24.5	0.223	0.710	0.0444	0.435	105.0	25.0	0.227	0.700	0.0438	0.430	105.7	24.3	0.221	0.710	0.0444	0.435
20	106.8	23.2	0.211	0.730	0.0365	0.348	106.0	24.0	0.218	0.720	0.0360	0.352	107.3	22.7	0.206	0.740	0.0370	0.362
24	109.0	21.0	0.191	0.770	0.0321	0.314	108.2	21.8	0.193	0.760	0.0317	0.311	109.2	20.8	0.189	0.780	0.0325	0.318
28	111.3	18.7	0.170	0.820	0.0293	0.287	110.8	19.2	0.174	0.810	0.0289	0.283	112.5	17.5	0.159	0.851	0.0303	0.297
32	114.2	15.8	0.144	0.885	0.0276	0.270	113.3	16.7	0.152	0.865	0.0270	0.265	114.7	15.3	0.139	0.900	0.0281	0.275
36	116.5	13.5	0.123	0.950	0.0264	0.259	116.0	14.0	0.127	0.940	0.0261	0.256	117.2	12.8	0.116	0.975	0.0271	0.266
40	119.3	10.7	0.0973	1.045	0.0261	0.256	118.3	11.7	0.106	1.01	0.0252	0.247	119.5	10.5	0.0955	1.055	0.0264	0.257
60	126.7	3.3	0.0300	1.520	0.0254	0.249	125.0	5.0	0.0454	1.355	0.0226	0.222	125.8	4.2	0.0382	1.420	0.0237	0.232
80	128.5	1.5	0.0136	1.845	0.0231	0.226												
100	129.3	0.7	0.00636	2.150	0.0215	0.211												
120																		

附表 No. 2

ブナ ($r_0=0.67$) $_{20}\alpha_0=0.102$

含水率 u (%)	20.9						21.4						21.6					
	1.0						1.44						2.4					
$2a$ [cm]	20.0						20.0						20.0					
	t_0 [°C]						t_0 [°C]						t_0 [°C]					
θ $\frac{\theta}{a^2}$	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\frac{\theta}{kd \cdot a^2}$	kd	k	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\frac{\theta}{kd \cdot a^2}$	kd	k	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\frac{\theta}{kd \cdot a^2}$	kd	k
0	20.0						20.0						20.0					
8	99.3	30.7	0.279	0.620	0.0775	0.760	98.5	31.5	0.286	0.605	0.0756	0.741	97.8	32.2	0.293	0.600	0.0750	0.735
12	100.8	29.2	0.265	0.640	0.0533	0.522	100.7	29.3	0.266	0.640	0.0533	0.523	101.8	28.2	0.256	0.655	0.0546	0.535
16	101.3	28.7	0.261	0.645	0.0403	0.396	101.1	28.9	0.263	0.640	0.0400	0.392	102.2	27.8	0.253	0.660	0.0412	0.404
20	101.8	28.2	0.256	0.650	0.0325	0.318	101.4	28.6	0.260	0.645	0.0322	0.316	102.5	27.5	0.250	0.660	0.0330	0.323
24	102.8	27.2	0.247	0.670	0.0279	0.273	101.8	28.2	0.256	0.650	0.0271	0.265	102.8	27.2	0.247	0.670	0.0279	0.273
28	103.5	26.5	0.241	0.675	0.0241	0.236	102.4	27.6	0.251	0.661	0.0236	0.231	102.8	27.2	0.247	0.672	0.0239	0.234
32	104.2	25.8	0.235	0.681	0.0212	0.208	102.9	27.1	0.246	0.670	0.0209	0.205	103.2	26.8	0.244	0.674	0.0209	0.205
36	105.3	24.7	0.225	0.705	0.0196	0.192	103.5	26.5	0.241	0.680	0.0189	0.185	104.0	26.0	0.236	0.685	0.0109	0.186
40	107.2	22.8	0.207	0.720	0.0180	0.176	105.1	24.9	0.226	0.705	0.0176	0.172	105.5	24.5	0.223	0.715	0.0178	0.174
60	119.2	10.8	0.0982	1.045	0.0174	0.170	116.8	13.2	0.120	0.960	0.0160	0.157	117.2	12.8	0.116	0.975	0.0163	0.160
80	126.7	3.3	0.0300	1.520	0.0190	0.186	124.5	5.5	0.0500	1.315	0.0164	0.161	125.8	4.2	0.0382	1.420	0.0178	0.174
100	128.4	1.6	0.0145	1.815	0.0182	0.178	127.0	3.0	0.0273	1.560	0.0156	0.153	128.8	1.2	0.0109	1.932	0.0193	0.189
120	129.0	1.0	0.00909	2.05	0.0167	0.164	128.9	1.1	0.0100	1.97	0.0164	0.161						

附表 No. 3

ナラ ($r_0=0.78$) $_{20}\alpha_0=0.103\text{cm}^2/\text{min}$

含水率 u (%)	7.9						14.3						27.7					
厚サ $2a$ [cm]	1.0						1.0						1.0					
t_0 [°C]	22.3						21.3						20.8					
$\frac{\theta}{a^2}$	t_m	t_1-t_m	$\frac{t_1-t_m}{t_1-t_0}$	$kd \cdot \frac{\theta}{a^2}$	kd	k	t_m	t_1-t_m	$\frac{t_1-t_m}{t_1-t_0}$	$kd \cdot \frac{\theta}{a^2}$	kd	k	t_m	t_1-t_m	$\frac{t_1-t_m}{t_1-t_0}$	$kd \cdot \frac{\theta}{a^2}$	kd	k
0	22.3						21.3						20.8					
8	101.8	28.2	0.262	0.645	0.0806	0.783	101.8	28.2	0.259	0.650	0.0812	0.788						
12	115.3	14.7	0.136	0.915	0.0762	0.740	108.0	22.0	0.202	0.750	0.0625	0.607	104.0	26.0	0.238	0.682	0.0568	0.551
16	118.2	11.8	0.104	1.020	0.0638	0.619	110.2	19.8	0.182	0.795	0.0497	0.482	104.3	25.7	0.235	0.690	0.0431	0.419
20	121.0	9.0	0.0836	1.110	0.0550	0.534	112.0	18.0	0.166	0.830	0.0415	0.403	105.3	24.7	0.226	0.705	0.0352	0.342
24	123.2	6.8	0.0631	1.225	0.0511	0.496	114.8	15.2	0.140	0.900	0.0375	0.364	106.0	24.0	0.220	0.715	0.0298	0.289
28	124.7	5.3	0.0492	1.323	0.0472	0.458	117.0	13.0	0.120	0.960	0.0343	0.333	106.7	23.3	0.213	0.727	0.0260	0.252
32	126.2	3.8	0.0353	1.457	0.0455	0.442	119.2	10.8	0.0994	1.040	0.0325	0.316	107.5	22.5	0.206	0.740	0.0231	0.224
36	127.5	2.5	0.0232	1.625	0.0452	0.438	120.7	9.3	0.0856	1.100	0.0306	0.297	108.3	21.7	0.199	0.755	0.0210	0.204
40							122.0	8.0	0.0736	1.163	0.0291	0.282	109.2	20.8	0.190	0.775	0.0194	0.188
60							128.5	1.5	0.0138	1.835	0.0306	0.297	117.5	12.5	0.114	0.980	0.0164	0.159
80													126.2	3.8	0.0348	1.460	0.0182	0.177
100																		
120																		

附表 No. 4

タモ ($r_0=0.59$) $20\alpha_0=0.102\text{cm}^2/\text{min}$

含水率 u (%)		7.0		11.9		26.8	
厚サ [cm]		1.10		1.17		1.14	
t_0 [°C]		22.8		23.0		21.2	
θ a^2	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$kd \cdot \frac{\theta}{a^2}$	kd	kd	k
0	22.8						
8	101.9	28.1	0.262	0.645	0.0806	0.790	
12	113.7	16.3	0.152	0.865	0.0720	0.706	
16	116.2	13.8	0.129	0.930	0.0581	0.570	
20	118.6	11.4	0.106	1.010	0.0505	0.495	
24	120.9	9.1	0.0849	1.100	0.0459	0.450	
28	122.7	7.3	0.0681	1.190	0.0425	0.417	
32	124.5	5.5	0.0513	1.306	0.0408	0.400	
36	126.0	4.0	0.0373	1.435	0.0399	0.391	
40							
40							
60							
80							
100							
120							

附 表 No.5

タイヒ ($\gamma_0=0.36$) $_{20}\alpha_0=0.109\text{cm}^2/\text{min}$

含水率 u (%)	7.4						14.4					
厚 サ [cm]	1.0						1.5					
t_0 [°C]	22.5						20.0					
$\frac{\theta}{a^2}$	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_k - t_0}$	$kd \cdot \frac{\theta}{a^2}$	kd	k	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$kd \cdot \frac{\theta}{a^2}$	kd	k
0	22.5						20.0					
8	105.8	24.2	0.225	0.705	0.0881	0.801	99.1	30.9	0.281	0.615	0.0769	0.705
12	114.0	16.0	0.149	0.875	0.0729	0.669	105.3	24.7	0.224	0.710	0.0591	0.542
16	116.7	13.3	0.124	0.950	0.0594	0.545	107.3	22.7	0.206	0.740	0.0463	0.425
20	120.0	10.0	0.0930	1.065	0.0533	0.489	108.5	21.5	0.195	0.765	0.0383	0.351
24	122.5	7.5	0.0698	1.180	0.0492	0.451	111.0	19.0	0.173	0.815	0.0340	0.312
28	124.7	5.3	0.0493	1.320	0.0471	0.432	113.9	16.1	0.146	0.885	0.0315	0.289
32	126.5	3.5	0.0326	1.490	0.0465	0.427	117.2	12.8	0.116	0.975	0.0305	0.280
36	127.7	2.3	0.0214	1.670	0.0464	0.426	120.5	9.5	0.0864	1.095	0.0274	0.251
40							122.5	7.5	0.0682	1.190	0.0298	0.273
60							128.9	1.1	0.0100	1.967	0.0328	0.301
80												
100												
120												

附 表 No. 6

タイヒ ($r_0=0.36$) $_{20}\alpha_0=0.109$

含水率 u (%)		27.4				27.2				28.3			
厚 [cm]		α 1.0				1.48				2.44			
t_0 [°C]		23.2				20.0				18.5			
$\frac{\theta}{a^2}$	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$kd \cdot \frac{\theta}{a^2}$	kd	k	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$kd \cdot \frac{\theta}{a^2}$	kd	k	
0	23.2						20.0						
8													
12	105.0	25.0	0.234	0.690	0.0575	0.527	104.7	25.3	0.230	0.698	0.0581	0.533	
16	105.0	25.0	0.234	0.690	0.0431	0.395	104.7	25.3	0.230	0.698	0.0436	0.400	
20	105.0	25.0	0.234	0.690	0.0345	0.316	104.7	25.3	0.230	0.698	0.0349	0.320	
24	105.0	25.0	0.234	0.690	0.0288	0.264	104.7	25.3	0.230	0.698	0.0291	0.267	
28	105.0	25.0	0.234	0.690	0.0246	0.226	104.7	25.3	0.230	0.698	0.0249	0.228	
32	105.5	24.5	0.229	0.700	0.0219	0.201	104.9	25.1	0.228	0.700	0.0219	0.201	
36	106.0	24.0	0.225	0.705	0.0196	0.180	105.2	24.8	0.225	0.705	0.0196	0.180	
40	106.5	23.5	0.220	0.715	0.0179	0.164	106.0	24.0	0.218	0.720	0.0180	0.165	
60	117.3	12.7	0.119	0.965	0.0161	0.148	117.1	12.9	0.117	0.970	0.0162	0.149	
80	128.0	2.0	0.0187	1.715	0.0214	0.256	127.6	2.4	0.0218	1.650	0.0206	0.189	
100													
120													

附表 No.7

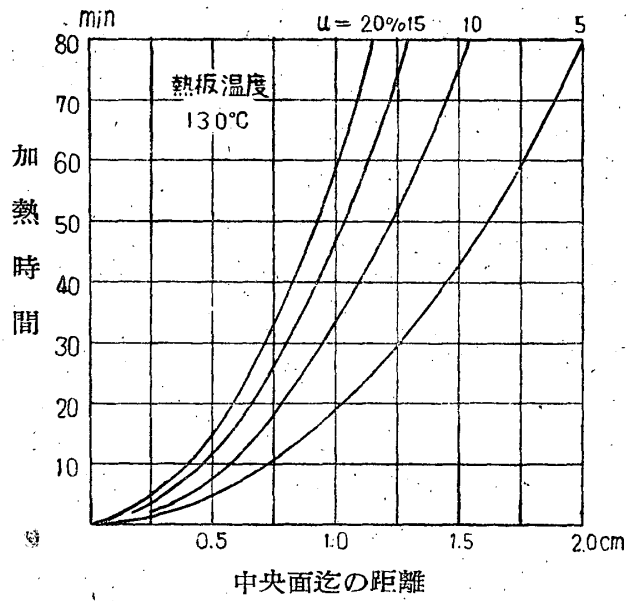
 含水率 $(\tau_0 = 0.42)$ $20\alpha_0 = 0.105 \text{ cm}^2/\text{min}$

含水率 u (%)		13.9										18.2										23.4									
厚サ $2a$ [cm]		1.39										1.38										1.38									
t_0 [°C]		20.0										20.0										20.0									
$\frac{\theta}{a^2}$		t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\frac{\theta}{kd \cdot a^2}$	kd	k	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\frac{\theta}{kd \cdot a^2}$	kd	k	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\frac{\theta}{kd \cdot a^2}$	kd	k	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\frac{\theta}{kd \cdot a^2}$	kd	k	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\frac{\theta}{kd \cdot a^2}$	kd	k
0		20.0						20.0						20.0						20.0											
8		103.5	26.5	0.241	0.675	0.0844	0.804	103.2	26.8	0.244	0.670	0.0838	0.798																		
12		107.7	22.3	0.203	0.750	0.0625	0.595	106.7	23.3	0.212	0.730	0.0608	0.579	107.7	22.3	0.203	0.750	0.0625	0.595												
16		109.7	20.3	0.185	0.785	0.0491	0.468	108.5	21.5	0.195	0.765	0.0478	0.455	108.0	22.0	0.200	0.755	0.0472	0.450												
20		112.3	17.7	0.161	0.840	0.0420	0.400	110.7	19.3	0.175	0.805	0.0403	0.384	108.2	21.8	0.198	0.760	0.0380	0.362												
24		115.0	15.0	0.136	0.910	0.0379	0.361	112.5	17.5	0.159	0.850	0.0354	0.337	108.8	21.2	0.193	0.770	0.0321	0.306												
28		117.5	12.5	0.114	0.980	0.0350	0.333	114.5	15.5	0.141	0.895	0.0320	0.305	110.2	19.8	0.180	0.795	0.0284	0.270												
32		119.5	10.5	0.0955	1.055	0.0330	0.314	116.0	14.0	0.127	0.940	0.0294	0.280	111.2	18.8	0.171	0.840	0.0263	0.251												
36		121.5	8.5	0.0773	1.140	0.0317	0.302	118.0	12.0	0.109	1.000	0.0278	0.265	113.0	17.0	0.155	0.855	0.0238	0.227												
40		123.2	6.8	0.0618	1.230	0.0308	0.293	119.8	10.2	0.0927	1.065	0.0266	0.253	114.0	15.3	0.139	0.900	0.0225	0.214												
60		127.8	2.2	0.0200	1.685	0.0281	0.268	126.2	3.8	0.0345	1.465	0.0245	0.233	121.0	9.0	0.0813	1.115	0.0186	0.177												
80		129.8	0.2	0.00182	2.655	0.0232	0.221							125.7	4.3	0.0391	1.415	0.0177	0.169												
100														128.3	1.7	0.0155	1.790	0.0179	0.170												
120														129.2	0.8	0.00727	2.095	0.0175	0.167												

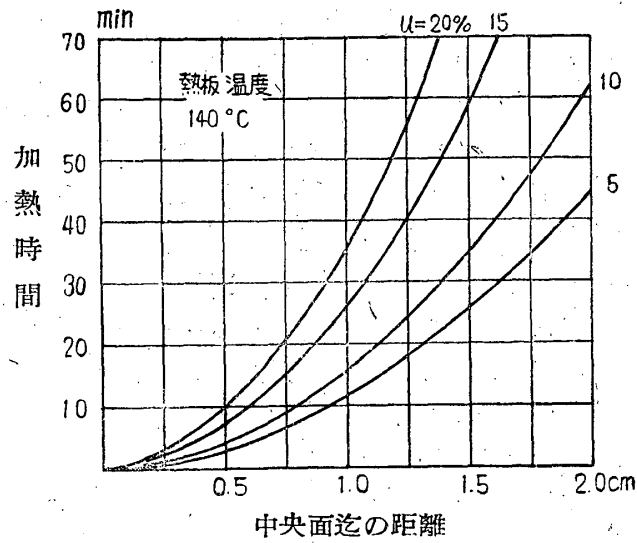
附 表 No. 8

マ ツ ($\gamma_0=0.31$) $_{20}\alpha_0=0.113\text{cm}^2/\text{min}$

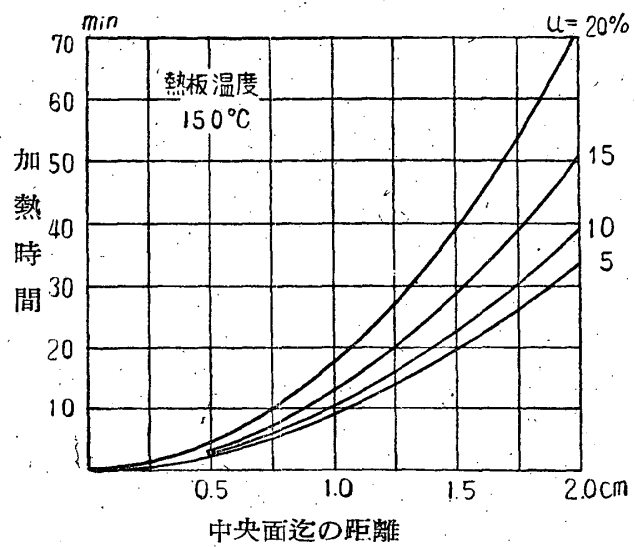
含水率 u (%)	12.9						21.1					
厚 さ $2a$ [cm]	1.48						1.48					
t_0 [°C]	20.0						20.0					
$\frac{\theta}{a^2}$	t_m	t_1-t_m	$\frac{t_1-t_m}{t_1-t_0}$	$kd \cdot \frac{\theta}{a^2}$	kd	k	t_m	t_1-t_m	$\frac{t_1-t_m}{t_1-t_0}$	$kd \cdot \frac{\theta}{a^2}$	kd	k
0	20.0						20.0					
8	105.8	24.2	0.220	0.715	0.0894	0.791	104.2	25.8	0.235	0.685	0.0856	0.758
12	107.0	23.0	0.209	0.735	0.0612	0.541	104.5	25.5	0.232	0.695	0.0579	0.512
16	107.7	22.3	0.203	0.745	0.0466	0.412	104.5	25.5	0.232	0.695	0.0434	0.384
20	108.8	21.2	0.193	0.770	0.0385	0.341	104.6	25.4	0.231	0.695	0.0348	0.308
24	110.8	19.2	0.175	0.810	0.0338	0.299	104.8	25.2	0.229	0.700	0.0292	0.258
28	113.7	16.3	0.148	0.875	0.0312	0.276	105.0	25.0	0.227	0.705	0.0252	0.223
32	116.7	13.3	0.121	0.955	0.0298	0.264	106.1	23.9	0.217	0.720	0.0225	0.199
36	118.8	11.2	0.102	1.030	0.0286	0.253	107.1	22.9	0.208	0.735	0.0204	0.181
40	121.5	8.5	0.0773	1.140	0.0285	0.252	108.9	21.1	0.192	0.770	0.0193	0.171
60	127.8	2.2	0.0200	1.685	0.0281	0.249	121.4	8.6	0.0782	1.135	0.0190	0.168
80							127.9	2.1	0.0191	1.705	0.0213	0.188
100							129.4	0.6	0.00545	2.210	0.0221	0.195
120												



中央面迄の距離
附圖 1



中央面迄の距離
附圖 2



中央面迄の距離
附圖 3