

木材の熱傳導に関する研究

第 3 報

繊維に直角な方向の熱傳導と含水率の關係

満 久 崇 麿

(木材物理第 2 研究室)

Takamaro MAKU : Heat Conduction in Wood III Relation between the Moisture Content and the Heat Conduction vertical to the Grain.

筆者は先に従来の実験式を用いて普通に存在する樹種を 100°C 以下の温度で熱処理した場合に熱拡散率 α は樹種及び温度の変化に対して実用上略 const. と見做して差支ないが加熱（又は冷却）中含水率が著しく変化する場合特に繊維飽和点以下に於いて α の変動が大きい為平均値を用いても尙相当大なる誤差を免れる事が出来ない事並びに含水率と熱拡散率の關係については実験資料が極めて少ない為明瞭な結論を下すことが出来ない事を述べたが、本報告は之に関する実験結果の一部で種々の含水率の数種の板材を 97~100°C 及び 65°C で、夫々 steaming 及び boiling しこの 2 方法から含水率と繊維に垂直な方向の熱拡散率の關係を明らかにすると共に、boiling の場合従来全く知られて居なかつた熱伝達率の概略の値を求めた。

1. Boiling の 実 験 例

厚さ $2a$ の板を一定温度 t_1 の温水によつて加熱した場合の中央面温度 t_m は

$$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha_{\perp} \left(\frac{u_n}{a} \right)^2 \theta} \frac{\sin u_n}{u_n + \sin u_n \cos u_n} \quad \text{---(1)}$$

t_0 : 板の初めの温度

α_{\perp} : 繊維に垂直方向の熱拡散率

θ : 加熱時間

u_n : $\cot u = \frac{u}{h_{\perp} a}$ の第 n 番目の実根

$h_{\perp} = h' / \lambda_{\perp}$

λ_{\perp} : 繊維に垂直な方向の木材の熱伝導率

h' : 熱伝達率

によつて求められ、計算の便を計る為各種の $h a$ に対する線図が与えられている事は既に述

1) べた. 従つて t_1 , t_0 , ha 及び θ と t_m の関係が判れば上式から α_{\perp} を求める事が出来るが, 此の場合 h' 従つて ha が不明である為直接計算することが出来ない故, 次の様にして ha 従つて h' 及び α_{\perp} を決定した.

供試材として気乾状態のスギ, ブナの心材から厚さ 2cm, 幅及び長さ夫々 10 及び 15cm の板 (追粧) を作り, 一部を軽く乾燥又はデシケーター中に入れて吸湿させ繊維飽和点以下で 3 種の含水率段階を設け, 又一部は 2, 3 日真空デシケーター中で真空にした後水を注入放置し, 適宜取出して 2, 3 の高含水率段階の試片とし全表面を鉤仕上げして厚さを正しく 2cm に揃へ, 第 1 図に示す如く一側面中央部の $x=0, 0.4a, 0.8a$ なる点に深さ 4cm, 直径 1.5mm の 3 個の小孔をあけ温度測定点を作り, thermo-couple を挿入した後, 全側面にゴムテープ, ゴム板及び木枠を当て金具によつて堅く締付け, この試片を 65°C の恒温水槽中に浸して thermo-couple を挿入した側面が丁度水面と一致する様に維持し, 内部温度を電位差計式温度計によつて測定した.

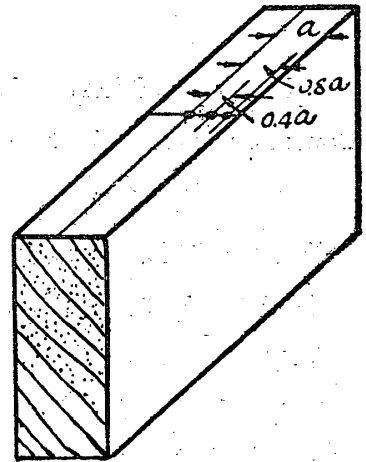


Fig. 1

この様にして求めた中央面温度 t_m (各試片 3 個の平均値) を用いて (1) 式の線図から, 第 1 表の如く各種の ha に対して夫々 $\alpha_{\perp} \frac{\theta}{a^2}$ 従つて α_{\perp} を求めその平均値 α_{av} を計算する. 次に α_{av} に夫々 $\frac{\theta}{a^2}$ を乗じて $\alpha_{\perp} \frac{\theta}{a^2}$ と $\alpha_{av} \frac{\theta}{a^2}$ の偏差の和の最小なる場合の ha を以て第 1 順位とする. 第 2 表はこの方法を各種の含水率の場合に対して行つて得た ha の順位表で, 之から ha の最も probable な値を求めると,

スギに対し $ha = 100$ ブナに対し $ha = \infty$

第 1 表 ブ ナ (2 cm),

θ	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$ha = \infty$				100			
				$\alpha_{\perp} \frac{\theta}{a^2}$	α_{\perp}	$\alpha_{av} \frac{\theta}{a^2}$		$\alpha_{\perp} \frac{\theta}{a^2}$	α_{\perp}	$\alpha_{av} \frac{\theta}{a^2}$	
0	3.3										
2	13.7	51.3	0.831	0.165	0.0825	0.143	-0.022	0.167	0.0825	0.144	-0.023
4	25.7	39.3	0.637	0.280	0.0700	0.285	-0.005	0.284	0.0710	0.288	0.004
6	36.2	28.8	0.467	0.405	0.0675	0.428	0.023	0.413	0.0688	0.432	0.019
8	44.8	20.2	0.327	0.548	0.0685	0.570	0.022	0.557	0.0696	0.576	0.019
10	51.3	13.7	0.222	0.706	0.0706	0.710	-0.007	0.716	0.0716	0.721	0.005
12	55.5	9.5	0.154	0.856	0.0713	0.855	-0.001	0.865	0.0712	0.865	0
14	58.2	6.8	0.110	0.995	0.0711	0.998	0.003	1.005	0.0718	1.009	0.004
16	60.6	4.4	0.0713	1.174	0.0734	1.140	-0.034	1.183	0.0739	1.153	-0.03
18	61.4	3.6	0.0583	1.255	0.0697	1.280	0.028	1.267	0.0704	1.297	0.03
20	62.2	2.8	0.0454	1.360	0.0680	1.425	0.065	1.373	0.0687	1.441	0.068
				$\alpha_{av} = 0.0713$			+0.096	$\alpha_{av} = 0.0720$			+0.096

となり熱伝達率はスギの場合 $a=0.01$, $r_0=0.4$ として $\lambda_1=0.08$ を用いると $h'=h_1\lambda_1= \frac{100}{0.01} \times 0.08 = 800 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$, プナの場合は $h'=\infty$ となる. 何れにしても boiling の場合鉤断面に対する ha は極めて大きく 実用上には近似的に steaming の場合と同様に取扱つても差支ないと考えられる.

扱て木材に此の種の熱処理を行うと加熱中水分の増減を生じ, 一般に纖維飽和点以下の木材を steaming した場合吸湿して含水率が増加し, 纖維飽和点以上の場合には反対に含水率が低下することが知られている. 本実験の steaming 及び boiling の場合は単に加熱前後の含水率を測定したに過ぎないが矢張り同様の傾向が認められ, 唯その変位点即, この種の熱処理によつて含水

率に変化を生じない点は纖維飽和点ではなく, 之よりかなり高い点に存在することが推定される. 加熱中の水分増減の現象の詳細に関しては別の機会にゆずることとして, 何れにしても一般に含水率が変化する. 従つて含水率の基準をどこにとるかという事が一応問題となるが, 本実験の場合は加熱前後の含水率の平均値を用いた方が実情に則するものと考えて, この値を採用した. かくして求めた含水率と熱拡散率

第 2 表

ブナ

含水率 (%)	ha= ∞	100	50	20	10
4.1	1	2	3	4	5
24.6	1	2	3	4	5
25.2	3	4	1	2	5
54.7	1	1	4	5	3
86.1	1	2	3	5	4

スギ

含水率 (%)	ha= ∞	100	50	20	10
3.9	3	5	1	2	4
20.7	1	2	4	5	3
31.3	2	1	3	4	5
55.2	5	4	3	1	2
71.2	4	1	2	5	2

5.4.7%, boiling の一例

50				20				10			
$\alpha_1 \frac{\theta}{a^2}$	α_1	$\alpha_{av} \frac{\theta}{a^2}$		$\alpha_1 \frac{\theta}{a^2}$	α_1	$\alpha_{av} \frac{\theta}{a^2}$		$\alpha_1 \frac{\theta}{a^2}$	α_1	$\alpha_{av} \frac{\theta}{a^2}$	
0.175	0.0875	0.149	0.026	0.185	0.0925	0.158	0.027	0.20	0.100	0.171	0.029
0.295	0.0738	0.297	0.002	0.315	0.0788	0.315	0	0.335	0.0838	0.342	0.007
0.425	0.0708	0.446	0.021	0.452	0.0753	0.473	0.021	0.490	0.0817	0.513	0.023
0.575	0.0719	0.594	0.019	0.610	0.0763	0.631	0.021	0.657	0.0821	0.684	0.027
0.735	0.0735	0.743	0.008	0.778	0.0778	0.788	0.010	0.847	0.0847	0.855	0.008
0.888	0.0740	0.892	0.004	0.942	0.0785	0.946	0.004	1.027	0.0856	1.026	0.001
1.030	0.0736	1.040	0.010	1.096	0.0780	1.104	0.008	1.193	0.0852	1.194	0.001
1.210	0.0756	1.189	0.021	1.285	0.0803	1.261	0.024	1.40	0.0875	1.364	0.036
1.297	0.0721	1.338	0.041	1.375	0.0764	1.419	0.044	1.502	0.0834	1.540	0.038
1.406	0.0703	1.486	0.080	1.487	0.0744	1.577	0.090	1.625	0.0813	1.711	0.086
$\alpha_{av}=0.0743$			+0.130	$\alpha_{av}=0.0788$			+0.147	$\alpha_{av}=0.0855$			+0.124

の関係を第2 図中に示す。

2. Steaming の 実験例

厚さ $2a$ の板を一定温度 t_1 の飽和蒸気で steaming した場合の中央面の温度 t_m は

$$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha_{\pm} \left(\frac{2n-1}{2a} \pi \right)^2 \theta} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \quad (2)$$

によつて与えられ、(1) 式の $ha = \infty$ の場合に相当する。この場合の試片はブナ、スギ、ナラ、カツラ等の心材部から厚さ 2~3cm、幅及び長さ夫々 10, 15cm の板(追柁)を作り、1 と同様の方法で含水率を調整し、厚さ 3cm のものに対しては $x=0, 0.4a, 0.6a, 0.8a$ の 4 個の温度測定点を設け 97~100°C の一定温度の飽和蒸気中で steaming し、各点の温度を測定 t_m と θ の関係から $ha = \infty$ の線図によつて α_{av} を計算し(第3表)、この値を第2 図中に示した。尚第2

第3表 ナラ (3cm), 99.5%, steaming の一例

θ min	t_m	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\alpha_{\pm} \frac{\theta}{a^2}$	$\frac{\theta}{a^2}$	α_{\pm}
0	13.0					
5	26	71.0	0.845	0.155	2.22	0.0700
10	50.0	47.0	0.56	0.33	4.44	0.0742
15	70.0	27.0	0.321	0.565	6.66	0.085
20	81.0	16.0	0.190	0.775	8.88	0.0873
25	87.5	9.5	0.113	0.99	11.1	0.089
30	91.0	6.0	0.0715	1.17	13.3	0.088
35	93.2	3.8	0.0452	1.36	15.6	0.087
40	94.5	2.5	0.0298	1.525	17.8	0.0865
50	96.0	1.0	0.0119	1.89	22.2	0.085
				$\alpha_{av} = 0.0835$		

1). した曲線で、本実験の結果に極めてよく一致している。第3 図は平均含水率夫々 17.0, 29.1, 43.7 % のブナ材を 97°C で steaming した場合の実験値と各含水率に対し $\alpha = 0.092, 0.083, 0.078$ を近似曲線から求めて計算した $t_m - \theta$ 曲線で α がある程度変化しても実際に温度に与

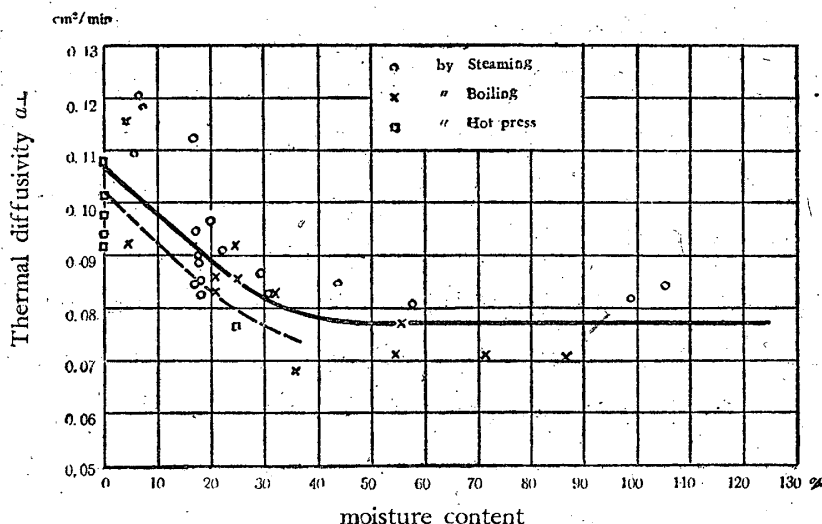


Fig. 2 Relation between the moisture content and thermal diffusivity.

図中には第1, 2 報の熱板加熱の data から同様にして計算した熱拡散率の値も示してある。之等の値の近似曲線を求めると図中の実線となり、熱拡散率は含水率の増加と共に最初急激に減少するが繊維飽和点附近では次第に緩慢となり 50 % 以上で略一定の値を保つと見做すことが出来る。図中の破線は c, R, λ に関する従来の実験式を用いて $\alpha = \frac{\lambda}{cR}$ から算出

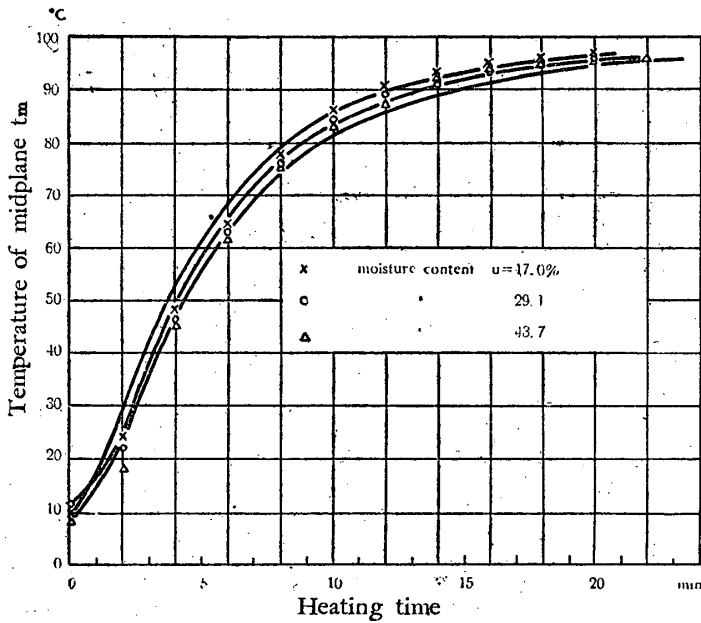


Fig. 3 Temperature change in 2cm thick beech plate, steaming at 97°C

える影響はそれ程著しくない事が首肯される。又温度平衡に達する迄の時間を第1報の Nomograph から求めると夫々 $\theta_{eq} \approx 20, 22.5, 24$ min. となり、実験結果とよく一致することが認められる。第4図、第5図は同じくスギの boiling, プナの steaming の温度傾斜の計算値と相当する実験値を比較例示したものである。

3. 木材の表面状態が熱擴散率に及ぼす影響

一般に熱傳導 h' は被加熱物体の表面の状態によつても影響をうけるとされているが之を検討する為 bandsaw で切削したままの試片を用い、1と同様な boiling の実験を行つた。

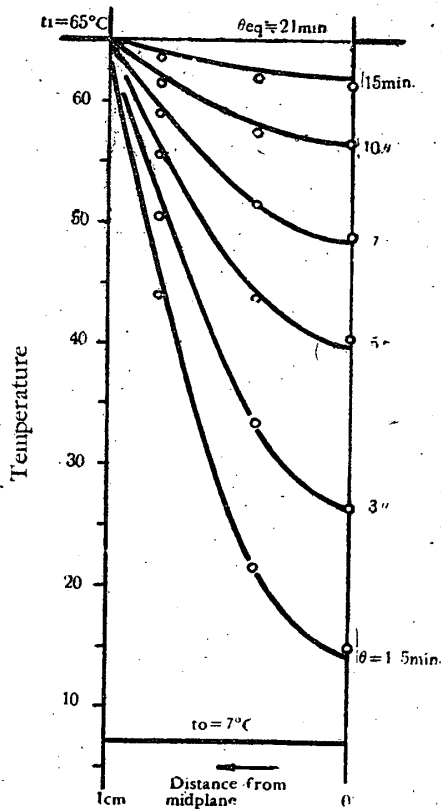


Fig. 4 Temperature distribution in cedar plate, boiled at 65°C water. Thickness : 2cm moisture content : 20.7%

之等の data から計算して得た ha の順位を第4表に示す。即ち、 ha の最も probable な値はスギに対して20、ブナに対して100 となり両者に夫々 $a=0.01, r_0=0.4,$

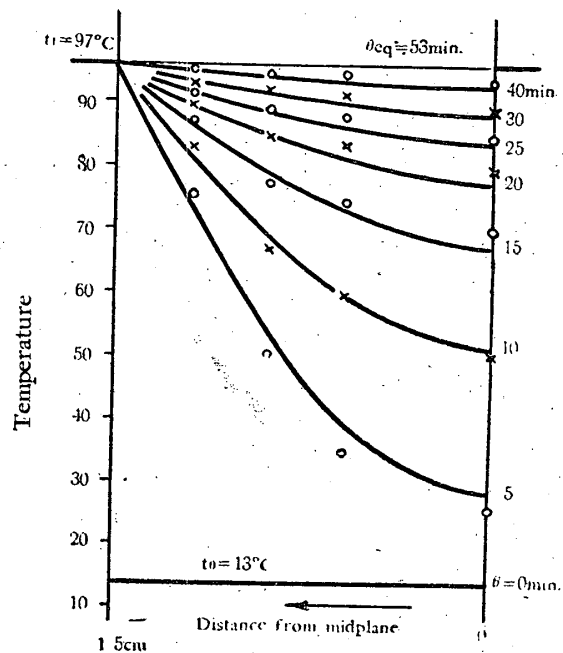


Fig. 5 Temperature distribution in beech plate, steamed at 97°C. Thickness : 3cm moisture content : 99.5%

第 4 表

ha	∞	100	50	20	10	5
スギ (24.0%)	2	—	4	1	3	5
ブナ (20.6%)	3	1	2	4	5	—

$\lambda=0.03$; $a=0.01$, $r_0=0.63$, $\lambda=0.11$ とおく
と熱伝達率は夫々約160及び1100kcal/m²h°C
となり、鉋削面に比してかなり減することが認められる。又鉋削、鋸断面共にブナの場合がスギに対して大きいことは樹種、特にその細胞学的

的影響が存在するのではないかと考えられるが、data が少ない為に結論を与えることは出来ない。第5表に実験結果を総括して示す。

Steaming

第 5 表

樹 種	加 熱 前 含水率(%)	加 熱 後 含水率	平 均 含水率	熱 拡 散 率 (cm ² /min)	加 熱 温 度 (°C)	厚 さ (cm)	絶 乾 比 重	備 考
ブ ナ	4.6	9.8	7.2	0.119	97	2	0.63	特記なきものは何れも鉋削面
	15.2	18.7	17.0	0.0955	"	"		
	26.9	31.2	29.1	0.0874	"	"		
	43.6	43.8	43.7	0.0850	"	"		
	117.9	93.5	105.7	0.0842	"	"		
ス ギ	1.5	9.7	5.6	0.110	"	3	0.40	
	16.4	23.3	19.9	0.0977	"	"		
ナ ラ	3.1	9.1	6.1	0.121	"	3	0.61	
	22.0	24.8	23.4	0.0768	"	2		
	57.9	57.9	57.9	0.0814	"	"		
	100.3	96.1	99.5	0.0835	"	3		
カ ッ ラ	20.6	23.6	22.1	0.0915	"	2	0.48	
	28.5	32.0	30.3	0.0831	"	"		
タ ブ	14.8	19.8	17.3	0.0823	100	3	0.61	
ブ ナ	15.1	20.1	17.6	0.0908	"	"	0.67	
ヒメシヤラ	13.9	18.9	16.4	0.0856	"	"	0.71	
アカマツ	14.8	19.8	17.3	0.0891	"	"	0.72	
ウラジロガシ	13.4	22.4	17.9	0.0862	"	"	0.78	
ナ ラ	13.6	18.6	16.1	0.0856	"	"	0.76	
エゾマツ	13.9	19.1	16.5	0.113	"	"	0.35	

Boiling

ブ ナ	1.6	6.6	4.1	0.093	65	2	0.63	
	18.4	30.7	24.6	0.0863	"	"		
	32.4	38.0	35.2	0.0689	"	"		
	54.0	55.3	54.7	0.0712	"	"		
	86.7	85.5	86.1	0.0706	"	"		
ス ギ	0.7	7.1	3.9	0.116	"	"		
	17.5	23.9	20.7	0.0867	"	"		

スギ	29.7	32.9	31.3	0.0834	"	"	} 0.43	
	53.8	56.6	55.2	0.0774	"	"		
	69.1	73.3	71.2	0.0702	"	"		
スギ	20.8	27.2	24.0	0.0924	"	"	0.42	鋸断面
ブナ	16.9	24.2	20.6	0.0837	"	"	0.64	鋸断面

Hot press

ナラ	0	0	0	0.093	130	1.0	0.78	
ブナ	"	"	"	0.099	"	1.43	0.67	
タモ	"	"	"	0.095	"	1.17	0.59	
スギ	"	"	"	0.093	"	1.39	0.42	
マツ	"	"	"	0.102	"	1.49	0.36	
タイヒ	"	"	"	0.109	"	1.50	0.31	
スギ	24.5	24.4	24.4	0.077	80	1.48	0.41	

4. 摘 要

1. 種々の含水率の板を steaming 及び boiling して熱拡散率と含水率の関係を求めた。即ち、熱拡散率は初め含水率の増加と共に急激に減するが繊維飽和点附近で次第に緩漫となり 50% 以上では略 const である。
2. 鉋削面の板を boiling した場合の熱伝達率は極めて大きく、実用上には steaming の場合と同様に取扱つても近似的に差支ない。
3. 鋸断面の場合の熱伝達率は鉋削面より小さい様であるが data が少なく断定し得ない。

Résumé

Investigations were done to determine the relation between the moisture content and the thermal diffusivity of wood when heated with steaming (at 90~100°C) and with boiling (65°C) and the approximate value of coefficient of heat transfer in boiling.

1. Thermal diffusivity obtained from the data decreases as the moisture content increases below the fiber saturation point, but is constant about 50% or higher as shown in solid curve in figl. Dotted curve shows the calculated values. The agreement between the two curves is good.

2. The value of coefficient of heat transfer is so large in boiling of wood with

planed surface that the interior temperature in boiling is approximately equal to that of in steaming in practice.

参 考 文 献

- 1) 満久崇麿 (1949) 木材研究 3