

木材の熱傳導に関する研究

第 4 報

纖維に平行方向の熱傳導

溝 久 崇 磨

(木材物理第2研究室)

Takamaro MAKU : Heat Conduction in Wood. IV. Heat Conduction parallel to the Grain.

本報は第1～3報に引続き之と同様の方法により木材の纖維方向の熱傳導に関して考察したものである。

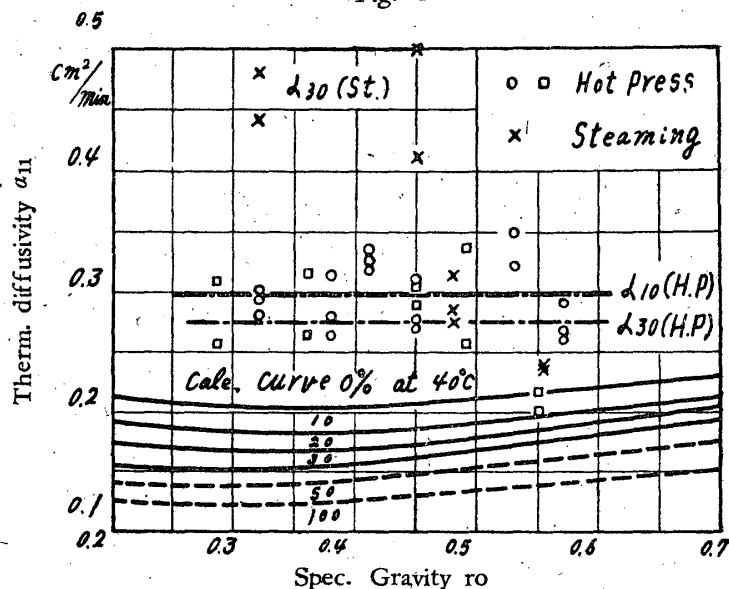
1. 密度と熱擴散率との關係

纖維方向の熱擴散率 α_{11} と密度 R , 温度 t , 含水率 u との關係は従來の實驗式を利用すれば第1報の(3)～(8)式によつて求められる。今これ等の式を用いて計算した R と α_{11} との關係を例示すると第1図中の曲線となり α_{11} は $R=0.2\sim 0.5\text{g/cm}^3$ の範圍では略 const. で以後密度の増加と共に若干増加する傾向を有するがこの程度の変動では実用的には密度従つて樹種に無關係であると考えて差支ない事は $\alpha_{\perp}$ の場合と同様である。これに関し筆者は一定温度 t_1 の蒸氣及び Hot press (此の場合表面温度) により密度の異なる数種の材を加熱してその中央温度 t_m を測定し

$$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} e^{-\alpha_{11} \left(\frac{2n-1}{2a} \pi \right)^2 \theta} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1}$$

の Gurney-Lurie 線図を用いて直接 α_{11} を求めて見た。

Fig. 1



第 1 表

Hotpress

樹 種	加 熱 前 含水率(%)	加 熱 後 含水率	平 均 含水率	熱 拡 散 率 (cm./min)	加 熱 温 度(°C)	厚 (cm.)	サ	絶 乾 比 重	換 算 値 *
ス ギ	15.6	13.7	14.7	0.284	81	3.0	}	0.32	α_{10} 0.301
	15.8	13.5	14.7	0.266	90				0.282
	14.1	12.9	13.5	0.280	"				0.293
マ ッ	12.1	11.0	11.6	0.308	"	4.01	}	0.38	0.313
	12.1	10.5	11.3	0.277	"				0.280
	12.0	10.9	11.4	0.259	"				0.262
ヒ ノ キ	14.3	13.9	14.1	0.322	"	2.99	}	0.41	0.335
	14.5	13.1	13.8	0.313	"				0.326
	15.0	14.7	14.8	0.306	"				0.322
カ ッ ラ	12.9	12.0	12.4	0.266	"	2.97	}	0.45	0.270
	13.0	11.9	12.4	0.306	"				0.310
	12.5	11.8	12.2	0.274	"				0.277
セ シ	13.9	12.8	13.4	0.341	"	3.0	}	0.53	0.348
	14.0	13.0	13.5	0.316	"				0.322
ナ ラ	13.8	13.0	13.4	0.262	"	2.96	}	0.57	0.269
	13.7	12.9	13.3	0.282	"				0.290
	14.8	14.0	14.4	0.252	"				0.261
ス ギ	32.0	30.0	31.0	0.257	99	5.17	}	0.29	α_{30} 0.257
	32.2	30.2	31.2	0.310	"				0.310
サ ハ ラ	27.8	25.2	26.5	0.269	"	4.95	}	0.36	0.264
	27.1	25.9	26.5	0.321	"				0.315
マ ッ	24.9	22.1	23.5	0.295	90	5.92	}	0.45	0.291
	24.9	22.9	23.9	0.311	99				0.306
カ ッ ラ	43.8	41.8	42.8	0.286	"	4.92	}	0.49	0.339
	34.2	32.6	33.4	0.254	"				0.256
ナ ラ	33.0	31.6	32.3	0.218	"	5.98	}	0.55	0.218
	34.0	32.2	33.1	0.199	"				0.200

Steaming

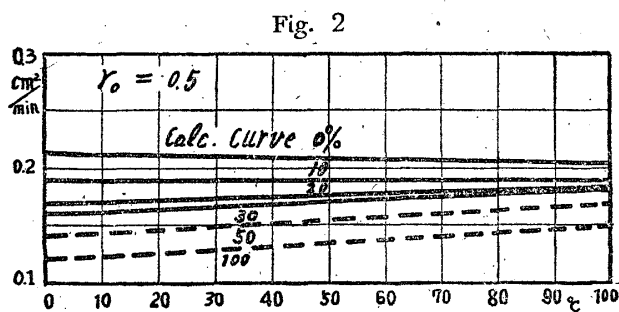
ス ギ	25.3	31.8	28.6	0.483	90	5.17	}	0.32	0.478
	25.8	33.6	29.7	0.442	"				0.442
マ ッ	31.0	39.0	35.0	0.497	"	4.08	}	0.45	0.502
	32.0	39.0	35.5	0.407	"				0.410
カ ッ ラ	29.7	35.4	32.3	0.278	"	4.04	}	0.48	0.284
	28.9	35.0	32.0	0.270	"				0.275
	29.0	35.1	32.1	0.313	"				0.315
ナ ラ	28.0	35.0	31.5	0.236	"	4.06	}	0.58	0.237
	26.1	31.1	28.6	0.238	"				0.237

* 含水率10, 30%に換算せる値

第1表はこれ等の結果を示したものでこれを前の計算値と比較する為第1図中に記入した。この結果を前報の場合と比較して考えて見ると $\alpha_{\perp}$ の場合では計算値と実測値がかなりよく合致していたのに対し本報の場合実測値は計算値より遙かに高い値を示し且つ Hot press によつた場合、樹種並に個体により若干の差異はあるが一般に α_{11} は R の如何に拘らず一定と見做し得るが、これに反し steaming の場合は密度（というよりはむしろ樹類）によつてかなり差異が見られ針葉樹類が闊葉樹類に比して高い値を示している。これは繊維に直角の場合には殆んど認め得られなかつた現象である。この様に繊維に平行な場合熱拡散率の実測値と計算値に著しい差異を生ずる原因については現在明ではないが、これに関しては後節に於て若干考察を行つて見た。

2. 温度と熱拡散率との関係

1と同様 (3)~(8) 式から t と α_{11} との関係を各含水率について計算したものを第2図に例示した。即ち計算値は温度により若干変動するが実用的には const. と見做して差支ない。第2表に実測値の内から特に加熱中含水率の変化の少ない高含水区間のものを例示したが、これから判る



様に実測値は計算値に比して絶対値に於て稍相違するが温度による影響は無視して差支ない程度である。

3. 含水率と熱拡散率との関係

第3図に計算値を例示した。この場合 α_{11} の変化が実際に温度に与える影響は $\alpha_{\perp}$ の場合ほど著しくはないが含水率の増加と共に減少する事及びその程度が繊維飽和点以下に於て著しい事は $\alpha_{\perp}$ の場合と同様である。これに対し筆者が前述の方法によつて厚さ 4~6cm, 各種の含水率の数種の樹材を Steaming して u と α_{11} との関係を求めた結果を図示すると第4図の如くなり比較の為 $r_0=0.5$ の計算値を図中に示した。これ等の結果によつて見ると α_{11} は u の増加につれて最初急激に低下し, $u=0.5$ 附近から漸次緩漫となり針葉樹では $u=1.0 \sim 1.1$, 闊葉樹では $u=0.7 \sim 0.8$ で略 const. となる。又前述した如く $\alpha_{\perp}$ の場合樹種の如何に拘らず計算値と実測値の間に大なる差異が認められなかつたのに対し α_{11} の場合では両者間に著しい相違があり, 且つ針, 闊葉樹類に明瞭な差異が現われこれと計算値との三者の差異が含水率の増加に従つて次第に減じ上述の限界点以上では殆んど negligible になる事が認められる。

この様に繊維に平行な方向の熱拡散率が吸湿区間に於て計算値より相当高い値を示すこと並に樹種によつて明瞭な差異が認められることの原因については現在明らかではないが、少くとも次の事柄がかなり重要な影響を与えているものと想像することが出来る。即ち湿潤な材を加熱した場合若し初めの含水率が一樣であれば加熱直後木材内部に生じた温度勾配によつて高温部の表面

第 2 表

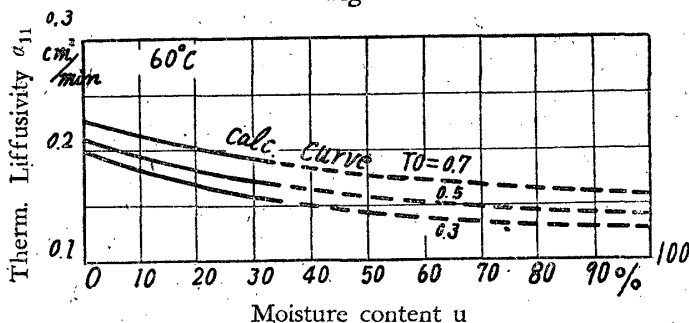
カ ッ ラ

θ	θ/a^2	tm	$t_1 - tm$	$\frac{t_1 - tm}{t_1 - t_0}$	$\alpha_{11} \theta/a^2$	α_{11}	備 考
2'25"	0.6	24.6	65.4	0.908	0.110	0.184	加熱前含水率 54.0%
4'51	1.2	40.2	49.8	0.692	0.245	0.204	" 後含水率 58.1
7'16	1.8	55.0	35.0	0.486	0.387	0.215	平 均 56.1
9'42	2.4	61.6	28.4	0.394	0.475	0.198	
12'06	3.0	74.0	16.0	0.222	0.706	0.235	
14'30	3.6	78.6	11.4	0.158	0.850	0.236	
19'24	4.8	83.2	6.8	0.0944	1.060	0.220	
26'36	6.6	86.3	3.7	0.0514	1.305	0.198	
34'00	8.4	88.6	2.0	0.0277	1.563	0.186	
					$\alpha_{11av}=0.208$		

ス ギ

3'20"	0.5	26.2	63.8	0.930	0.100	0.200	加熱前含水率 99.0
6'40	1.0	32.7	57.3	0.836	1.165	0.165	" 後含水率 92.7
10'00	1.5	45.1	44.9	0.655	0.268	0.179	平 均 95.9
13'19	2.0	54.5	35.5	0.519	0.360	0.180	
20'00	3.0	69.4	20.6	0.301	0.581	0.194	
26'39	4.0	78.9	11.1	0.162	0.830	0.208	
33'18	5.0	84.9	5.1	0.0745	1.151	0.230	
					$\alpha_{11av}=0.194$		

Fig. 3



水分の一部が蒸発して低温部の内層
え向つて拡散移行して凝縮する結果、
局部的に純粋な熱伝導以外の伝熱現
象が現われるがこれに伴つて内部は
水分の増加により熱拡散率が低下、
外層は反対に増加して自動的に異常
な温度上昇を相殺せんとする。然し
その後温度差の減少と共に拡散作用

も減少し逆に濃度差に基く内部水分の表層への移動が起り内部の熱拡散率は増加、表層のそれは
低下せんとして時間的並に場所的に熱拡散率は常に変動せんとする傾向を有している。然して実
際に α が変動するか否か、温度の異常上昇が起るか否かは主として伝熱速度と水分拡散速度の相
対的關係に影響される事になり繊維に直角の方向ではこの關係が平均値的に略平衡状態に達して
いるのではないかと考えられる。Steaming の場合には上記の現象以外に木材表面に於ける水蒸
気の凝縮機構、吸湿速度並に meniscus の数、大きさに影響される毛管凝縮等によつて熱伝導
作用は更に複雑化されるが、Steaming による含水率の変化については板目面並に木口面間に特

に顕著な差異が認められない事から考へてこれ等の因子によつて生ずる現象は纖維方向の如何に
 拘らず一応第1報の $h \rightarrow \infty$ なる假定中に包含されるものと見做して差支ないものと思われる。
 以上の事柄から考へて α_{11} の吸湿区間に於ける異常性は結局主として伝熱速度と内部水分の拡
 散速度との相対的關係に起因するものと見ることが出来る。以下これについて考察して見るに先
 づ纖維方向とこれに直角方向の水分拡散率の關係については特に纖維方向についての研究が少な
 い為にあまり報告されていないが、Egner 氏の Fichte の結合水域に於ける実験結果によれば温
 度及び含水率によつて相違し例えば 60°C 、5%、20%、27%では夫々 $k_{11}/k_r = 65, 7, 10$ (k_{11}, k_r
 は夫々纖維方向並に半径方向の拡散係数)； 80°C 、5%及び20%では夫々100及び10が与え
 られ、筆者がサワラを 55° 、40%、 $0.4 \sim 0.5\text{m/s}$ で定常乾燥せる場合の結果によると含水率に無
 關係に $k_{11}/k_r = 15.7$ 、又 Stamm 氏によれば温度 40°C で纖維飽和点から10%迄乾燥した場合
 の平均の拡散係数の比は湿潤比重 0.365 及び 0.60 で夫々 12.6 及び 23.1 が与えられている。
 Stamm 氏の理論によると比重の小さくなる程両者の比も小さくなる様であるが Kollmann 氏
 によるとすべての場合に於てはめることは出来ないがという條件の下に纖維方向並にこれに直
 角な方向に於て単位時間に単位面積を通過する水分量 q の比が比重の増加と共に減じ例えば比重
 0.4 及び 0.8 で夫々 $q_{11}/q_{\perp} = 7$ 及び 4 としている。これに対し $\lambda_{11}/\lambda_{\perp}$ 又は $\alpha_{11}/\alpha_{\perp}$ は既述せ
 る如く 2.0~2.5 であるから纖維に直角方向に対する平行方向の水分拡散率の増加する割合は熱

第 3 表

ナ		ラ						
θ	θ/a^2	tm	$t_1 - t_m$	$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0}$	$\alpha_{11} \theta/a^2$	α_{11}	備	考
2'02"	0.5	36.1	53.9	0.861	0.138	0.276	加熱前含水率	8.8
4'04	1.0	51.0	39.0	0.625	0.285	0.285	" 後含水率	13.9
6'06	1.5	66.4	23.6	0.378	0.493	0.328	平 均	11.4
8'08	2.0	77.8	12.2	0.195	0.760	0.380		
10'11	2.5	85.2	4.8	0.0769	1.14	0.456		
					$\alpha_{11av}=0.346$			
ス ギ								
1'40	0.25	26.5	63.5	0.940	0.0945	0.378	加熱前含水率	25.8
3'20	0.50	32.4	57.6	0.854	0.150	0.300	" 後含水率	33.6
5'00	0.75	46.7	43.3	0.641	0.273	0.364	平 均	29.7
6'40	1.00	59.8	30.2	0.447	0.420	0.420		
8'20	1.25	68.7	21.3	0.316	0.568	0.454		
10'00	1.50	75.0	15.0	0.222	0.702	0.469		
11'40	1.75	79.7	10.3	0.153	0.855	0.489		
13'20	2.00	83.0	7.0	0.104	1.019	0.508		
16'40	2.50	86.3	3.7	0.0549	1.280	0.512		
20'00	3.00	88.2	1.8	0.0266	1.580	0.526		
					$\alpha_{11av}=0.442$			

拡散率のそのの数倍又は数十倍に達しこの結果、直角方向に於て成立する平衡状態が破れ、水分の拡散による影響が繊維方向に於てかなり強く現われてくる事が想像される。この様な考え方は上述の Egner, Kollmann 氏等が含水率が低い程又比重の小さい程、比が大であるとしている事

Fig. 4

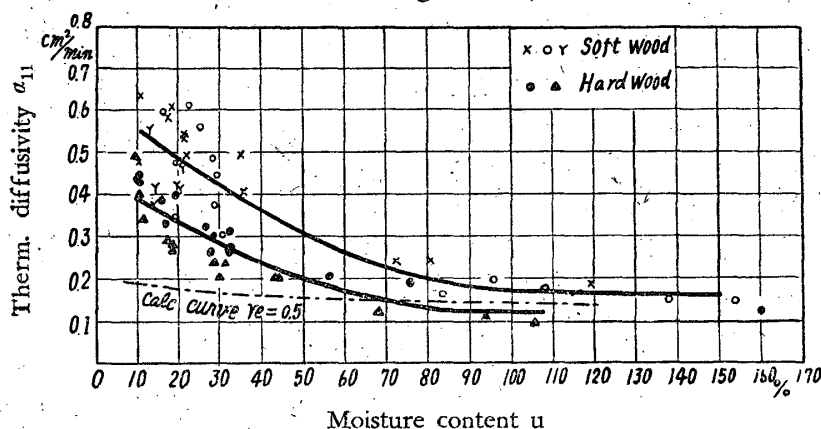
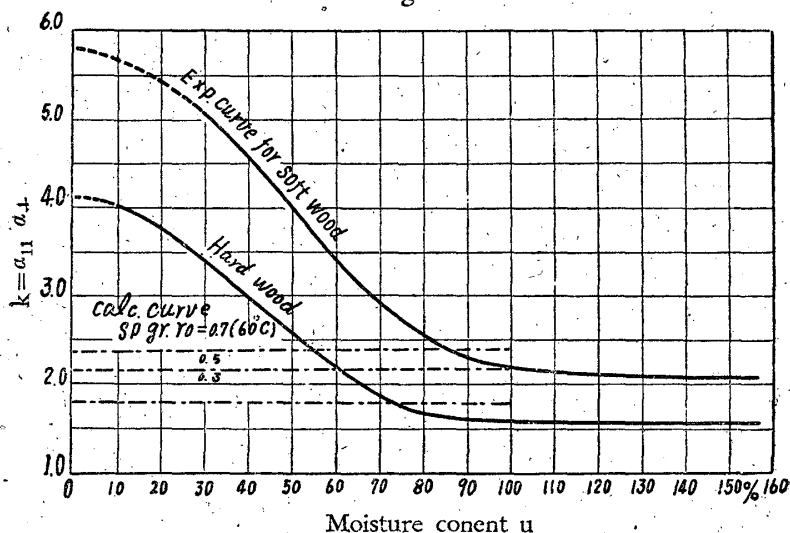


Fig. 5



これを要するに繊維に平行な方向の熱拡散率は比較的低含水率に於ては内部水分の移動等に影響される為定常態に於て求めた熱伝導率をそのまま使用することは不適当であり見掛上の熱拡散率は計算値よりも相当大であることに注意しなければならぬ。

4. α_{11} と $\alpha_{\perp}$ との関係

第4図及び第3報第2図から針、闊両樹類の α_{11} の $\alpha_{\perp}$ に対する比 $k = \alpha_{11} / \alpha_{\perp}$ を各含水率に対して求めると第5図の如くなる。この k を用いて $\alpha_x = \alpha_y = \alpha_{\perp}$, $\alpha_z = \alpha_{11} = k\alpha_{\perp}$ とおき第1報 V, VII の各係数を次の如く書改めると実際の計算に極めて便利となる。

$$\alpha_x \left(\frac{u_m}{a} \right)^2 + \alpha_y \left(\frac{u_m}{b} \right)^2 + \alpha_z \left(\frac{u_p}{c} \right)^2 = \alpha_{\perp} \left\{ \left(\frac{u_m}{a} \right)^2 + \left(\frac{u_m}{b} \right)^2 + k \left(\frac{u_p}{c} \right)^2 \right\}$$

によつて本実験結果に妥当性を与える事になりかくして見掛上の α_{11} は一応略 const. のまゝ計算値より増加するが、極端な場合として初めの含水率が繊維飽和点以下の針葉樹類、10%以下の闊葉樹類の Steaming に於ける共通した現象として α_{11} は加熱時間の経過と共に著しく変動し(第3表参照)、その平均値を用いた場合許容し得ない誤差を生ずるに至る。含水率が増加し細胞腔内が自由水によつて占められる部分が多くなるに従つて圧力差による蒸気の拡散が著しく阻害される事並に水分が増加する割合に熱伝導率が増加しない事等により上述の現象が次第に消失することは容易に首肯される。

第 4 表

Steaming

樹 種	加 熱 前 率	加 熱 後 率	平 均 率	熱 拡 散 率	加 熱 温 度	厚 さ	絶 乾 比 重	備 考
ス ギ	13.1	19.9	16.5	0.597	90	5.17	0.32	
	18.1	26.9	22.5	0.612	"			
	15.9	22.8	19.4	0.477	"			
	16.7	22.1	1.94	0.343	"			
	16.9	23.1	20.0	0.476	"	4.00	0.29	
	25.0	32.5	28.8	0.374	"			
	27.0	34.8	30.9	0.306	"			
	23.8	27.1	25.5	0.561	"			
	84.0	82.5	83.3	0.159	"	5.17	0.32	
	99.0	92.7	95.9	0.194	"			
	112	104	108	0.177	"			
	161	146	154	0.144	"			
	140	128	134	0.163	"			
	146	130	138	0.149	"			
マ ッ	7.9	12.5	10.2	0.479	"	4.08	0.45	
	8.8	13.1	11.0	0.636	"			
	14.3	21.1	17.7	0.584	"			
	14.2	22.1	18.2	0.610	"			
	18.6	24.0	21.3	0.544	"	4.06	0.37	
	19.0	25.0	22.0	0.491	"			
	18.0	24.5	21.2	0.531	"			
	78.0	83.5	80.7	0.240	"			
	68.9	77.9	72.4	0.244	"	4.08	0.45	
	120	118	119	0.185	"			
	164	156	160	0.126	"			
	ヒ ノ キ	10.0	15.9	13.0	0.556			
11.0		17.0	14.0	0.377	"			
11.4		17.8	14.6	0.413	"			
18.0		23.9	21.0	0.462	"	3.96	0.45	
17.0		22.7	19.8	0.420	"			
17.0		23.1	20.1	0.414	"			
カ ッ ラ	8.1	12.8	10.4	0.447	"	4.04	0.48	
	8.0	12.0	10.0	0.431	"			
	7.9	12.1	10.0	0.439	"			
	16.1	23.0	19.6	0.403	"			
	14.0	19.9	17.0	0.336	86			
	13.1	19.1	16.1	0.388	90			
	25.0	30.9	27.9	0.265	"			

	23.9	30.0	26.9	0.326	"			
	26.0	31.9	28.9	0.302	"			
	74.5	76.5	75.5	0.196	"			
	54.0	58.1	56.1	0.208	"			
ナ ラ	8.0	12.9	10.4	0.398	"	4.06	0.58	
	7.1	11.6	9.4	0.491	"			
	8.8	13.9	11.4	0.345	"			
	15.4	21.6	18.5	0.269	"			
	14.9	20.0	17.5	0.289	"			
	15.0	21.9	18.5	0.279	"			
	26.7	33.1	29.9	0.204	"			
	40.9	47.0	43.9	0.204	"			
	39.8	46.8	43.3	0.202	"			
	67.9	68.2	68.0	0.121	"			
	96.9	91.0	94.0	0.108	"			
	108	103	106	0.0930	"			

$$a_x \left(\frac{2n-1}{2a} \pi \right)^2 + a_y \left(\frac{2m-1}{2b} \pi \right)^2 + a_z \left(\frac{2p-1}{2c} \pi \right)^2 = a_{\perp} \left\{ \left(\frac{2n-1}{2a} \pi \right)^2 + \left(\frac{2m-1}{2b} \pi \right)^2 + k \left(\frac{2p-1}{2c} \pi \right)^2 \right\}$$

$$a_{\perp} \left(\frac{\lambda_m}{a} \right)^2 + a_{11} \left(\frac{u_p}{c} \right)^2 = a_{\perp} \left\{ \left(\frac{\lambda_m}{a} \right)^2 + k \left(\frac{u_p}{c} \right)^2 \right\}$$

$$a_{\perp} \left(\frac{\lambda_m}{a} \right)^2 + a_{11} \left(\frac{2p-1}{2c} \pi \right)^2 = a_{\perp} \left\{ \left(\frac{\lambda_m}{a} \right)^2 + k \left(\frac{2p-1}{2c} \pi \right)^2 \right\}$$

5. 摘 要

種々なる含水率の数種の樹材を Hotpress 及び Steaming により加熱し繊維に平行方向の熱拡散率を求め従来の実験式から間接に計算した熱拡散率の値とを比較した結果、

1. 繊維方向の熱拡散率は温度に無関係であり、又 Hot press の場合樹種の如何に拘らず略一定であるが Steaming の場合針葉樹類と闊葉樹類とはかなりの差異がみとめられる。何れの場合も特に低含水率区間に於て、実測値が計算値より甚しく大である故従来 of c , R , λ の実験式から計算した熱拡散率を用いるとかなりの誤差を生ずる。

2. 含水率の増加と共に熱拡散率は初め著しく減少するが、針葉樹では約 100%，闊葉樹では約 80%以上になると略 const. になる。低含水率区間では針、闊及び計算値相互間に著しい差異があるが 100%以上になると 3 者は相接近する。

3. 針葉樹は初めの含水率 30%以下、闊葉樹は 10%以下の場合加熱開始後の熱拡散率の値が変動する為平均値を用いるとかなり温度に誤差を生ずる故注意しなければならない。尚繊維に直角方向の場合にはこの様な考慮を払う必要はない。

4. 短かい角材及び丸太の温度計算を便ならしめる為第 3 報及び本報の結果を用いて $k = a_{11}/a_{\perp}$

を求め第1報の理論解の該当する各係数を書改めた。

最後に応用上の便を計る為第1報(27), (52), (89)式の第1項のみをとつて板, 角材, 丸太を Steaming 又は Hot press により一定温度 t_1 で加熱した場合その中央又は中心温度 t_m が夫々 $t_1 - t_m = 5, 10, 20^\circ\text{C}$ に達する迄の所要時間を求むる Nomograph を附図1~3に示しておいた。これ等は近似的に Cooking の場合に用いても大なる誤差を生じない。

木材の熱処理中最も重要な役を演ずるものは Steaming, Cooking, Hotpress 等であるがこれの際表面に起る凝縮, 吸水, 吸湿又は蒸発等の表面現象が木材の組織学的構造や或いは化学成分等と結びついてどの様な機構の下に行われるかは極めて興味ある問題であるが遺憾乍らこれに関しては現在の所殆んど追究されていない。将来これ等の問題が解明せられたならば, 更に新しい見地の下に樹種の差異についての熱伝導理論を推し進めることが出来るであろうが, 本研究では主として応用的な立場からこれ等微妙な且つ十分に複雑多種多様である表面条件を一応無視して統計的に取扱うことにより主な場合の理論解を導き, これに対する普遍的な資料を与える目的の下に実験結果を考察取纏めたものである。終りに実験に協力された山田, 杉本両君に感謝の意を表す。尙本研究の一部は文部省科学研究費によつたものである。

Résumé

In this report the thermal diffusivity parallel to the grain α_{11} was obtained experimentally by the heating of several wood of various moisture content with steaming and hot press and compared with those calculated from past experimental equations (3)~(8) in Report 3 of this Research.

1. The influence of temperature on α_{11} is negligible and of specific gravity of wood is same when heated with hot press but when heated with steaming, it seems, there is considerable difference between softwood (conifers) and hardwood (broad leaf trees). Since in every case the measured value is considerably higher than calculated one, the error of temperature in wood is not negligible if the latter is used.

2. The value of α_{11} decreases as the moisture content increases but at about 100% in softwood and 80% in hard wood it becomes constant as shown in Fig. 4. The difference between the three, the value of softwood, hardwood and the calculated, are remarkable in low moisture content but little in higher than 100%.

3. At the initial moisture content less than 30% in softwood and 10% in hardwood, the value of α_{11} varies considerably, so it must be notice that in initial heating period the error of temperature in fiber direction is not negligible when

calculated by average value of a_{11} .

4. In fig.5, for practical convenience, the ratios $k=a_{11}/a_{\perp}$ were obtained from the curve in fig.3 in Report 3 and fig.4 in this Report and using this k the coefficient in round bracket in equations in article V and VII of Report 1 were rewritten as follows.

$$\alpha_x \left(\frac{u_m}{a} \right)^2 + \alpha_y \left(\frac{u_m}{b} \right)^2 + \alpha_z \left(\frac{u_p}{c} \right)^2 = \alpha_{\perp} \left\{ \left(\frac{u_m}{a} \right)^2 + \left(\frac{u_m}{b} \right)^2 + k \left(\frac{u_p}{c} \right)^2 \right\}$$

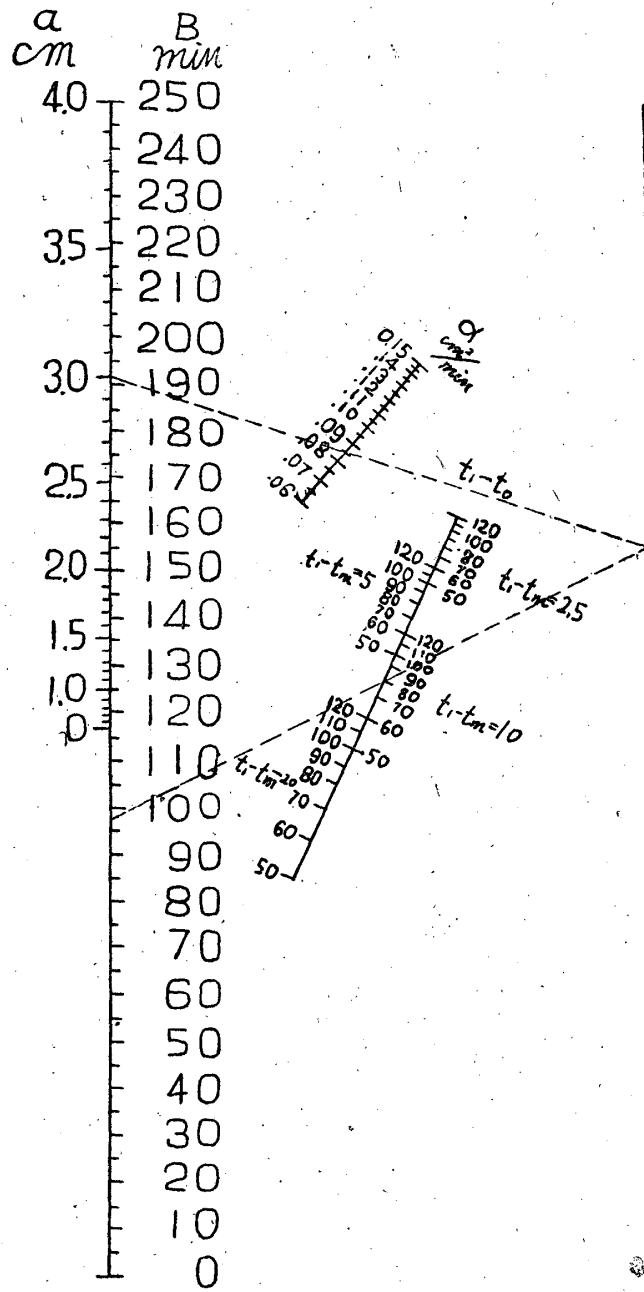
$$\alpha_x \left(\frac{2n-1}{2a} \pi \right)^2 + \alpha_y \left(\frac{2m-1}{2b} \pi \right)^2 + \alpha_z \left(\frac{2p-1}{2c} \pi \right)^2 = \alpha_{\perp} \left\{ \left(\frac{2m-1}{2b} \pi \right)^2 + \left(\frac{2p-1}{2c} \pi \right)^2 + k \left(\frac{2p-1}{2c} \pi \right)^2 \right\}$$

$$\alpha_{\perp} \left(\frac{\lambda_m}{a} \right)^2 + \alpha_{11} \left(\frac{u_p}{c} \right)^2 = \alpha_{\perp} \left\{ \left(\frac{\lambda_m}{a} \right)^2 + k \left(\frac{u_p}{c} \right)^2 \right\}$$

$$\alpha_{\perp} \left(\frac{\lambda_m}{a} \right)^2 + \alpha_{11} \left(\frac{2p-1}{2c} \pi \right)^2 = \alpha_{\perp} \left\{ \left(\frac{\lambda_m}{a} \right)^2 + k \left(\frac{2p-1}{2c} \pi \right)^2 \right\}$$

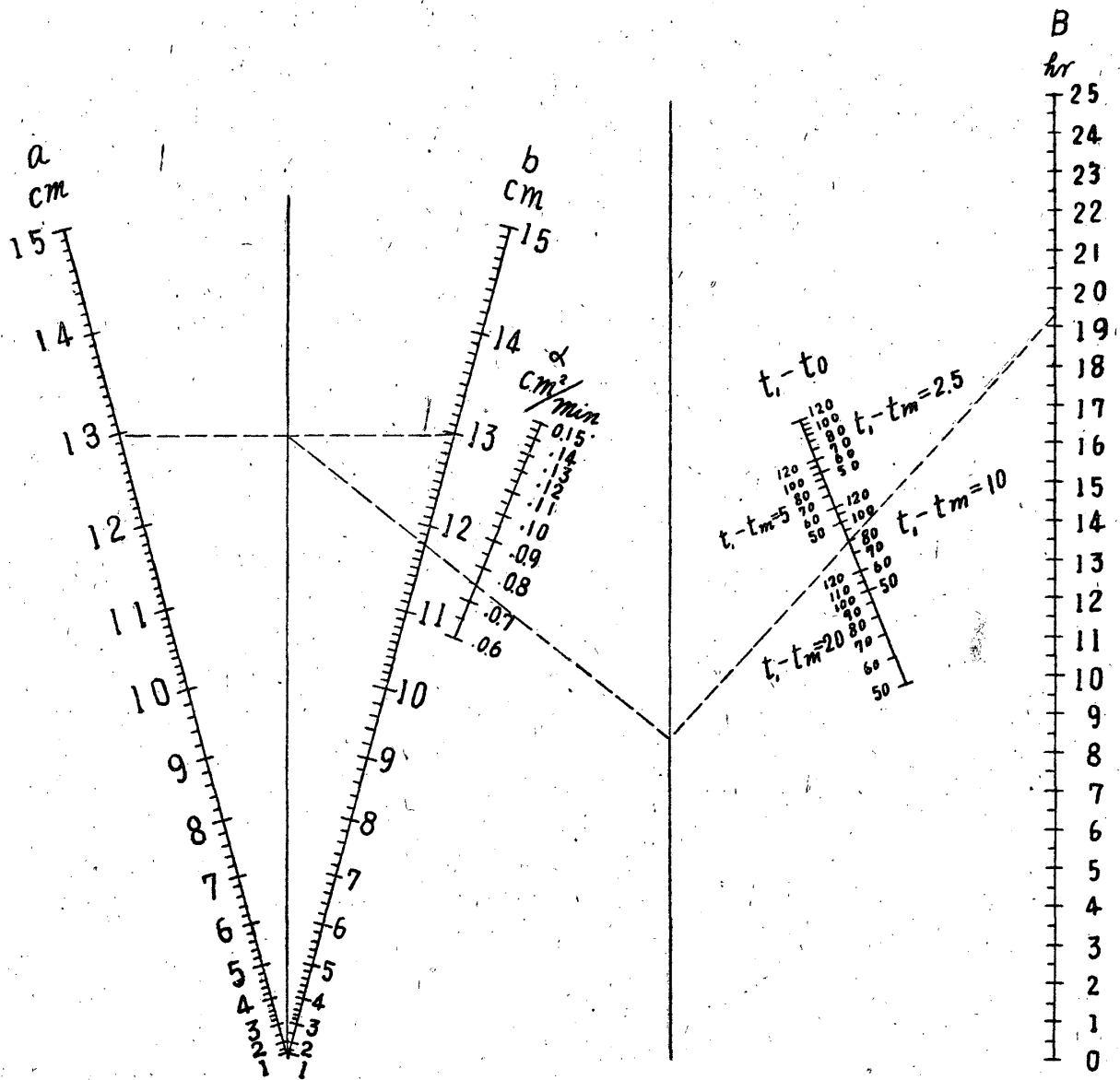
文 献

- 1) 満久崇麿 : 木材研究 **3** (1949)
- 2) 同 上 : 同 上 **6** (1951)
- 3) 同 上 : 木材工業 **4**, 6
- 4) Voigt, H. O. : Holz als Roh-und Werkstoff Jg. **3** H. 10 (1940)
- 5) 武田文哉 : 昭和26年京都大学林学科卒業論文
- 6) Egner, K : Forsch.-Ber. Holz. H. 2 (1934)
- 7) 満久崇麿 : 未発表
- 8) Stamm, A. J. : Techn. Bull. No. 929 U. S. Dept. Agr. Wash. D. C. (1946)
- 9) Kollmann, F : Technologie des Holzes (1936)



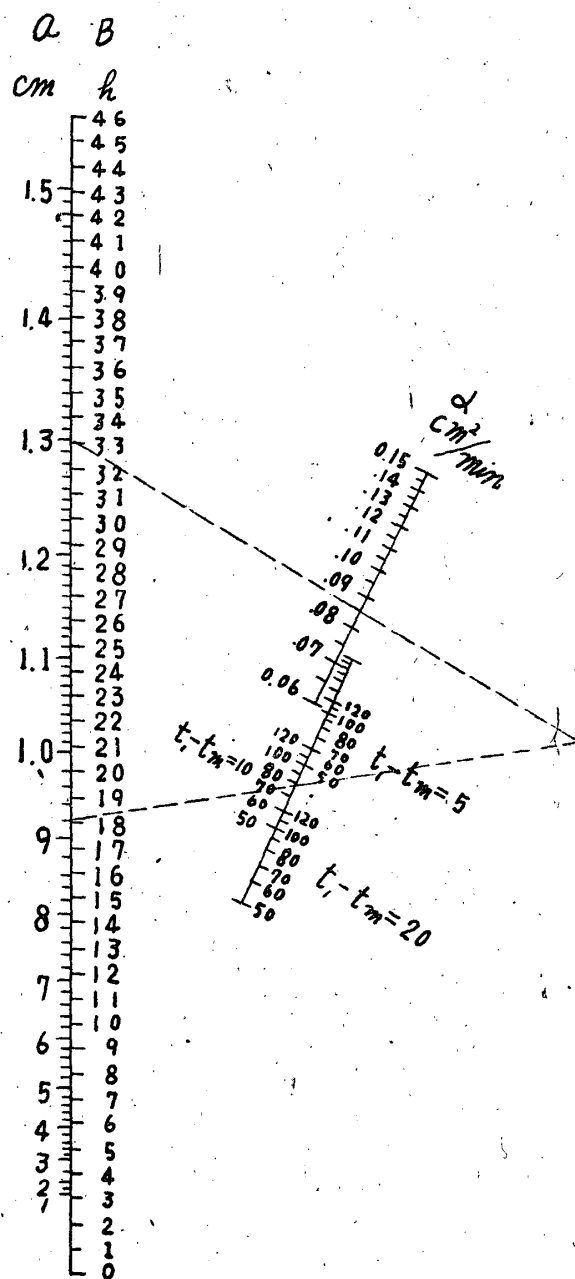
$$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0} = \frac{4}{\pi} e^{-a \left(\frac{\pi}{2a} \right)^2 \theta}$$

Attached plate. 1



$$\frac{t_1 - t_m}{t_1 - t_0} = \left(\frac{4}{\pi}\right)^{2c} - a \left\{ \left(\frac{\pi}{2a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{2b}\right)^2 \right\} \theta$$

Attached plate. 2



$$\frac{t-t_m}{t-t_0} = 2e^{-a\left(\frac{\lambda}{a}\right)^2 \theta} \frac{1}{\lambda_1 J_1^2(\lambda_1)}$$

Attached plate. 3