



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	含水多孔物質の熱傳導率
Author(s)	大賀, 憲二; Ohga, Tokuji; 岡垣, 理 他
Citation	北海道大學工學部彙報, 6, 219-232
Issue Date	1952-09-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40492
Type	departmental bulletin paper
File Information	6_219-232.pdf



含水多孔物質の熱傳導率

大 賀 惠 二

岡 垣 理

(昭和 27 年 3 月 6 日受理)

Thermal Conductivity of Porous Materials with Moisture Content

Tokuji OHGA

Osamu OKAGAKI

Abstract

In order to clarify the insulating effect of moisture content on porous materials such as insulating and building materials, the thermal conductivity of wood fibreboard (trade name TOMATEX) was measured under conditions of different moisture contents and at the range of temperature $50^{\circ}\text{C}\sim -10^{\circ}\text{C}$, and results are given as follows:

1) For low temperatures below about 0°C , the measured values show good agreement with the calculated values treated as triple compound material where globular ice grains and air cells are distributed uniformly in the wooden base.

2) For temperatures above about 0°C , it is recognized that these values increase remarkably with increasing moisture content owing to heat transfer by diffusion within the porous materials in addition to pure conduction.

3) At the melting point of moisture contained within materials an evident discontinuous change of the thermal conductivity to the temperature is observed.

目 次

I. 緒 言	220
II. 低温域における含水多孔物質の熱傳導率	220
1. 概 説	220
2. 實 験 装 置	221
3. 實 験 方 法	222
4. 實 験 結 果	222
5. 實験結果の検討	224
a. 含水率の影響	224
b. 温度の影響	225
III. 常温域における含水多孔物質の熱傳導率	226
1. 概 説	226
2. 實験装置並びに方法	226
3. 實 験 結 果	227
4. 實験結果の検討	228

a. 純傳導による熱移動	228
b. 物質移動に伴う熱移動	228
c. 見掛けの熱傳導率	230
IV. 結 言	231
V. 文 献	231

I. 緒 言

一般工業用保溫材、または建築用材などの所謂、多孔物質の熱傳導率に関する研究は種々あるが、その殆どが大氣乾燥状態におけるものである。しかし、一般使用状態においては保溫材、建築用材などに雨露が直接浸透したり、冷蔵庫用斷熱材又は建築用材などでは、その壁面が周圍温度より低いため、大氣中の含有濕分を凝縮、吸収するなど、かなりの含水状態で使用されることがある。水の熱傳導率は約 $0.5 \text{ kcal/h}\cdot\text{C}\cdot\text{m}$ であり、一般保溫材のそれに比し約 10 倍の値となり、少量の含有水分が斷熱効果に及ぼす影響は極めて大きい。また水が氷の状態になると氷の熱傳導率は約 $1.8 \text{ kcal/h}\cdot\text{C}\cdot\text{m}$ となるので、同一の含水割合であつても、氷點を境として熱傳導率は不連続な變化を示すこととなる。これらの諸點は工學上遭遇する極めて重要な問題であるにも拘らず、これについての研究は餘り行はれていない。

本研究は、これらの點を明らかにするために、多孔物質の 1 例として纖維板をとり、含有水分が凍結状態にある 0°C 以下の低温域と、液体状態にある 0°C 以上の常温域とにつき、夫々含有水分の熱傳導率に及ぼす影響につき實驗的研究を行つた。低温域においては、水は氷として固体の状態が存在するので、單に混合体の熱傳導率として取り扱われるが、常温域においては、液状の水は高温側で蒸發し低温側に移動し凝結し、物質移動に基く熱移動を伴うなど、傳熱機構が著しく相違するので、ここでは兩者を區別して考察する。

II. 低温域における含水多孔物質の熱傳導率

1. 概 説

冷蔵庫用の斷熱材、或は建築用材などが濕つたままの状態次第に温度が低下し、その中の水分がすべて氷結の状態になつた場合につき考えると、この含水物質は、主構成物質（木纖維板であれば木質部分）と空隙を満たす空氣と氷との 3 体混合物質と看做される。一般に使用状態にある斷熱材、建築用材などでは、空隙の中の空氣は極めて狭い空間に閉ぢ込められている場合が多いので、近似的には空隙内の空氣對流は無視することができ、従つて、かかる場合の熱傳導率は、敘上の 3 つの成分物質の夫々の熱傳導率により定まるものと考えられる。

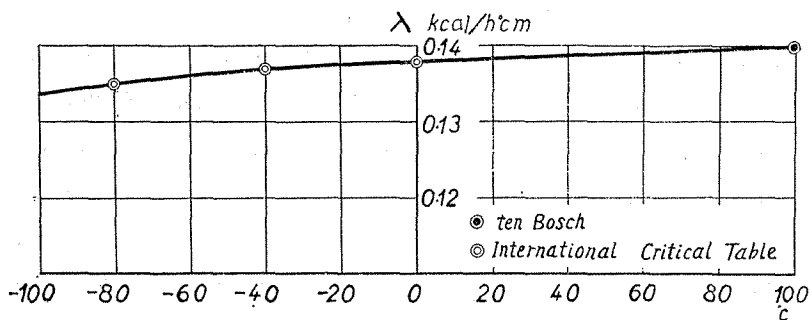
ここでは多孔物質として木纖維板をとり、水が氷結状態にある場合につき、熱傳導率に及ぼす、含水率及び温度の影響を實測し、多孔物質を構成する 3 成分の混合状態を假定して求めた計算結果と比較検討した。

2. 實驗裝置

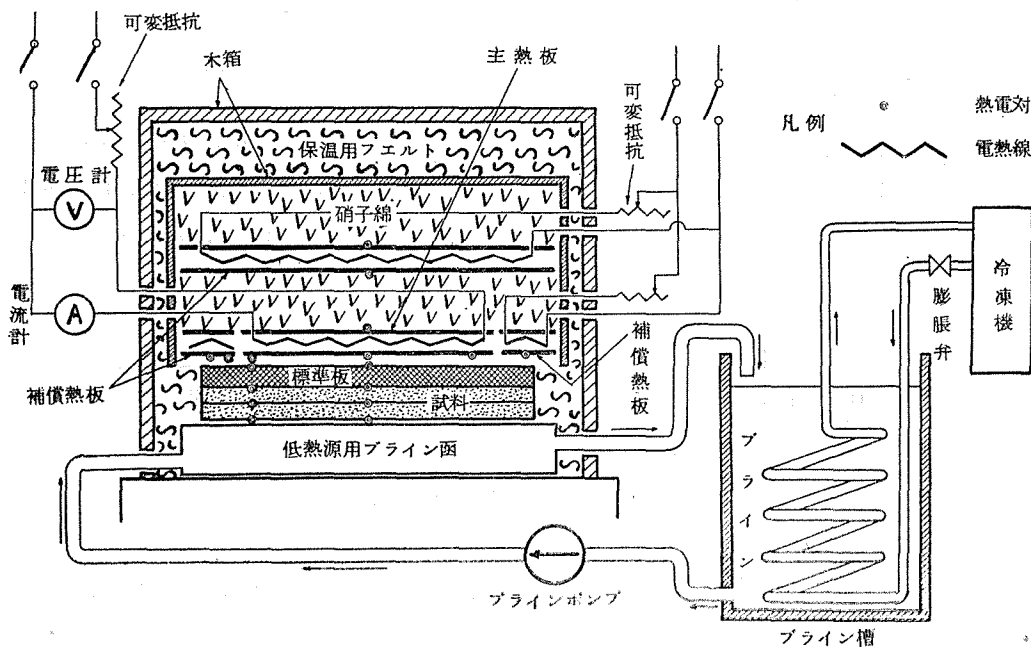
熱傳導率の決定には、平板試料を用い、熱傳導率既知の標準板と重ね、その一面を冷却し、熱流が定常状態となつたとき、試料及び標準板兩面の溫度差を測り、次式より算出する所謂、比較法によることとした。

$$\lambda = \lambda_E \frac{\Delta t_E \cdot \delta}{\Delta t \cdot \delta_E} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 λ , λ_E =試料並びに標準板の熱傳導率 [kcal/h \cdot °C \cdot m]. δ , δ_E =試料並びに標準板の厚さ [m]. Δt , Δt_E =試料並びに標準板の兩面における溫度差 [°C]. なお、 λ_E の値としては、ten Bosch¹⁾ 並びに International Critical Tables から第1圖のごとき關係を求め、これを採用した。



第1圖 エボナイトの熱傳導率



第2圖 實驗裝置略圖

第2圖は、實驗裝置の概略を示す。試料は縦横30cmの正方形で、試料内の熱對流を防ぐため、試料の下方を低温側、上方を高温側とした。低熱源にはブラインを用い、これは冷凍機により常に一定温度に保たれたブライン槽からブラインポンプにより送られる。高熱源には、裝置としては、縦横20cmの正方形の主熱板と、その上側に熱放散を防ぐための縦横30cmの正方形の補償熱板と主熱板を圍む幅5cmの中空枠形の補償熱板とよりなる電氣的加熱裝置を設けた。しかし、低温域にて行う本實驗では加熱裝置には電流を通ぜず、大氣をそのまま高熱源とした。この際、とくに周壁より侵入する熱量が熱傳導率測定に及ぼす誤差²⁾を考慮して、周壁にフェルト布數層を巻き充分斷熱した。これら高低兩熱源、試料並びに標準板(エポナイト板)の各中央部又は周邊に温度測定のための熱電對を挿入した。

3. 實驗方法

試料には、木纖維板トマテックス(北海道王子製紙苫小牧工場製)を用いた。大氣乾燥状態で、厚さ約12mm、比重350kg/m³、空隙率77%である。この試料を縦横各々30cmに切り、噴霧器で所要の水分を與え、恒濕槽において1日放置し、水分を均等に含ませた。このようにした2枚の試料を標準板とともに、その各中央表面及び周邊面に熱電對を挿入して第2圖に示すように裝置した。次に冷凍機を始動し、適時これを調整し、ブライン温度を所定の温度に保ち、各測定個所の温度が時間的に變動のない、所謂、定常状態に達した時、熱電對により温度測定を行い、測定後直ちに試料を取り出し、その重量並びに寸法を計測し、基準乾燥状態におけるものと比較して、次式より含水率を算定した。ここで基準乾燥状態とは、試料を105°Cに保つた電氣乾燥器内において乾燥し、重量變化を認めなくなつた状態をいう。

$$\varphi_1 = \frac{W - W_0}{\tau_1 \cdot \delta \cdot A} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 φ_1 =含水率(体積基準)、 W =定常状態における試料重量[kg]、 W_0 =基準乾燥状態における試料重量[kg]、 δ =定常状態における試料の厚さ[m]、 A =熱流に垂直な試料の斷面積[m²]、 τ_1 =氷の比重量[kg/m³]。ここで、氷の比重量にはDorsey⁴⁾より次表の數値を採用した。

第1表 氷の比重量

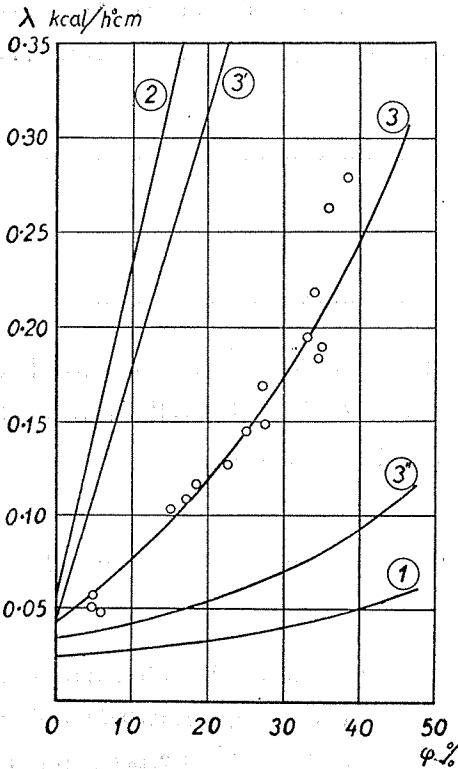
t [°C]	0	-5	-10	-15	-20
τ_1 [kg/m ³]	916.8	929.7	939.7	944.4	948.1

4. 實驗結果

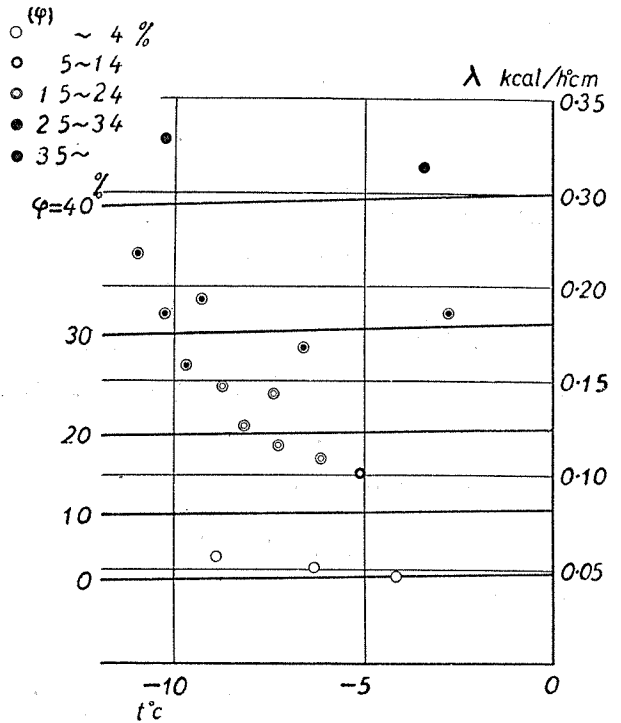
上述のようにして求めた實驗結果を示せば、第2表のごとくに、またこれを圖示すれば第3圖及び第4圖のごとくなる。即ち、第3圖は「熱傳導率-含水率」の關係、第4圖は「熱傳導率-温度」の關係を表わす。試料には始め均等に水分は分布しているが、温度差を生ずるに従い水分は移動し、低温側は高温側に比し含水率が多い状態となり、そのまま凍結するので、1枚の纖維板の中でも當

第 2 表

試料 番號	試 料								標 準 板			試料の 熱傳導率 [kcal/ h·°C·m]	
	厚さ [mm]	重量 [g]	基準乾 燥重量 [g]	含水率 [%]	高溫測 溫度 [°C]	低溫測 溫度 [°C]	溫度差 [°C]	平均溫度 [°C]	厚さ [mm]	溫度差 [°C]	平均 溫度 [°C]		
1	12.0	359	308	4.9	-6.75	-11.10	4.35	-8.93	10.0	1.50	-0.75	0.138	0.057
2	12.0	363	304	5.7	-1.56	-6.75	5.19	-4.16					0.048
(平均)	24.0	722	612	5.3	-1.56	-11.10	9.54	-6.33					0.052
3	14.0	587	287	27.9	-7.80	-9.75	1.95	-8.78	10.0	1.50	-6.75	0.138	0.148
4	14.2	740	298	38.5	-9.75	-10.80	1.05	-10.28					0.279
(平均)	28.2	1327	585	33.2	-7.80	-10.80	3.00	-9.30					0.194
3	14.5	674	287	34.8	-9.00	-10.50	1.50	-9.75	10.0	1.20	-8.10	0.138	0.159
4	14.5	695	298	34.2	-10.50	-11.60	1.10	-11.05					0.218
(平均)	29.0	1369	585	34.5	-9.00	-11.60	2.60	-10.30					0.183
3	14.5	675	287	34.7	-1.35	-3.00	1.65	-2.18	10.0	1.20	-0.75	0.138	0.145
4	14.5	680	298	35.5	-3.00	-3.90	0.90	-3.45					0.264
(平均)	29.0	1355	585	35.1	-1.35	-3.90	2.55	-2.82					0.187
5	13.7	468	306	15.0	-3.90	-6.30	2.40	-5.10	10.0	1.30	-3.00	0.138	0.120
6	13.7	495	298	18.7	-6.30	-8.40	2.10	-7.35					0.118
(平均)	27.4	963	599	16.9	-3.90	-8.40	4.50	-6.15					0.109
5	14.5	564	306	22.6	-7.35	-9.00	1.65	-8.18	10.0	1.05	-5.20	0.138	0.128
6	14.0	591	293	27.2	-6.00	-7.35	1.35	-6.60					0.168
(平均)	28.5	1155	599	24.9	-6.00	-7.35	3.00	-7.39					0.145



第 3 圖 低溫域における熱傳導率と含水率との關係



第 4 圖 低溫域における熱傳導率と溫度との關係

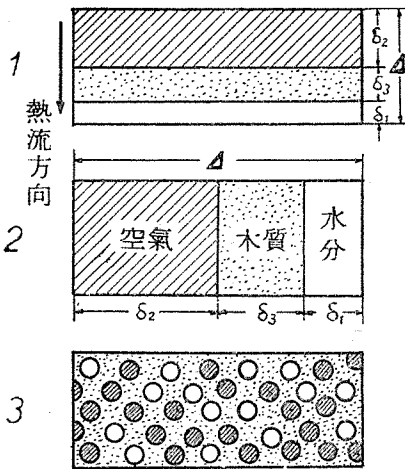
然、温度及び含水率の傾斜がある。ここで、含水率及び温度とは夫々の繊維板における平均値を示す。実験範囲は含水率 0~40%、温度 0~-12°C である。

5. 実験結果の検討

a. 含水率の影響

前述のように含有水分が氷結状態にある多孔物質の傳熱機構は、純傳導の型をとると看做されるので、熱傳導率と含水率との關係を解析するためには、

定常状態における、水分、木質部分並びに空氣の 3 構成物質の分布状態を知ることが必要であり、このため、いま次の 3 つの分布状態を假定する。第 5 圖はその模型圖である。



第 5 圖 試料構成物質の分布状態

- [1] 3 構成物質が熱流に對して垂直に層狀分布をなす場合。
- [2] 3 構成物質が熱流に對して平行に層狀分布をなす場合。
- [3] 3 構成物質のうち 2 物質が他物質中に夫々均等に粒狀分布をなす場合。

ここで [1] 並びに [2] は、3 体混合物質の熱傳導率の兩極限を示すものであり、熱傳導の一般式より次の如くに

求められる。即ち、[1] に對しては、

$$\lambda_m = \frac{A}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

[2] に對しては、

$$\lambda_m = \frac{\delta_1 \lambda_1 + \delta_2 \lambda_2 + \delta_3 \lambda_3}{A} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 λ は熱傳導率 [kcal/h·°C·m]、 δ は層の厚さ [m]、添字 1, 2, 3 は、夫々氷、空氣、木質部を表わし、 A は試料の厚さ [m] を示す。 δ の値は各含水時における 3 構成物質の体積含有割合より求められ、 δ_1 は前述の式 (2) の φ_1 より、 δ_2, δ_3 は夫々次の如く φ_2, φ_3 より求まる。

即ち、木質部の体積比率 φ_3 は、

$$\varphi_3 = \frac{W_0}{\tau_0 \cdot \delta \cdot A} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 τ_0 = 木質部の比重量 [kg/m³].

ここで木質部の比重量は次のようにして求めた。即ち、基準乾燥状態においては、試料は木質部と空氣のみより成ると看做し、その重量 W_0 [kg] を測り、次で繊維板を水中に長時間浸し、水分をこれ以上含み得ないという状態にして、その際を木質部と水のみより成るものと看做し、体積 V [m³]、重量 W [kg] を測り、これより木質部の比重量を次式により求めた。

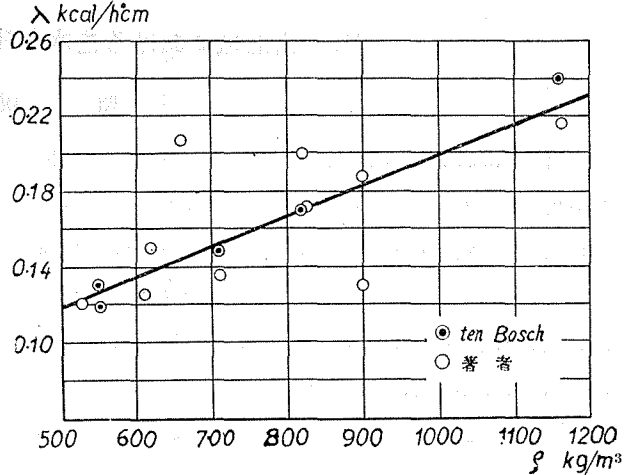
$$r_3 = \frac{W_0}{V - (W - W_0)v} \quad [\text{kg/m}^3]$$

ただし、 v は氷の比体積 $[\text{m}^3/\text{kg}]$ とする。このような測定結果、木質部の比重量 $r_3=900 [\text{kg/m}^3]$ を得た。

含有空気の体積比率 φ_2 は

$$\varphi_2 = 1 - (\varphi_1 + \varphi_3)$$

また、氷の熱傳導率には Dorsey⁵⁾ より、 $\lambda_1 = 1.7975(1 - 0.0017t) [\text{kcal}/\text{h}\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{m}]$ を用い、木質部の熱傳導率 λ_3 としては、第 6 圖のごとく、ten Bosch⁶⁾ 並びに著者⁷⁾ の諸表にある各種乾燥木材の比重量に対する熱傳導率の値から、比重量 $900 [\text{kg/m}^3]$ に対する、 $\lambda_3 = 0.183 [\text{kcal}/\text{h}\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{m}]$ を採用した。また空気の熱傳導率には、著者⁸⁾ の $\lambda_2 =$



第 6 圖 乾燥木材の熱傳導率

$0.0207(1 + 0.003t) [\text{kcal}/\text{h}\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{m}]$ を用いた。

上の諸関係より $t = -10^\circ\text{C}$ における諸値を求め、式 (3)、(4) を計算すれば、その結果は第 3 圖中の曲線 1 及び 2 のごとくに表示される。實驗値は當然この兩極限界内にあることが判かる。

次に 2 つの構成物質が、他の 1 つの構成物質中に均等に分布をなすと考える [3] の假定につき考慮する。このような均等に粒狀分布をなす場合の平均熱傳導率算定については、Eucken⁹⁾ が電氣傳導率に関する Maxwell の式を引用し、次式を與えている。

$$\lambda_m = \lambda_3 \frac{1 - 2\left(\varphi_1 \frac{\lambda_3 - \lambda_1}{2\lambda_3 + \lambda_1} + \varphi_2 \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{2\lambda_3 + \lambda_2}\right)}{1 + \left(\varphi_1 \frac{\lambda_3 - \lambda_1}{2\lambda_3 + \lambda_1} + \varphi_2 \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{2\lambda_3 + \lambda_2}\right)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 φ は各構成物質の体積基準の混合比で、 λ は熱傳導率を表わし、添字 3 で示される物質中に、添字 1, 2 で示される物質が夫々均等に粒狀分布をなす場合を表わす。

上式に $t = -10^\circ\text{C}$ として、各含水率に対する諸値を入れて計算を行うと、第 3 圖中の曲線のように示される。即ち、圖中曲線 3 は基礎物質として一様に存在する木質部の内に、氷と空気が夫々均等に粒狀分布をなす場合であり、曲線 3' では水を、曲線 3'' では空気を夫々基礎物質としたときの計算結果を表わす。圖より明らかなように、實測値は曲線 3 の場合、即ち、木質部の中に氷と空気が均等に分布すると考えた計算値によく一致することを知る。

b. 温度の影響

熱傳導率に及ぼす温度の影響は、上述の式 (7) から求められる。即ち、第 4 圖の 5 本の曲線は

含水率 ϕ_1 が夫々 0, 10, 20, 30, 40% に對する計算値を表わす。圖で明らかなように温度による影響は、含水率の熱傳導率に及ぼす影響に比べて極めて僅少なことを知る。従つて、本實驗の如き 0 ~ -12°C の温度範囲内においては、實驗値よりこの傾向を求めることは難しい。

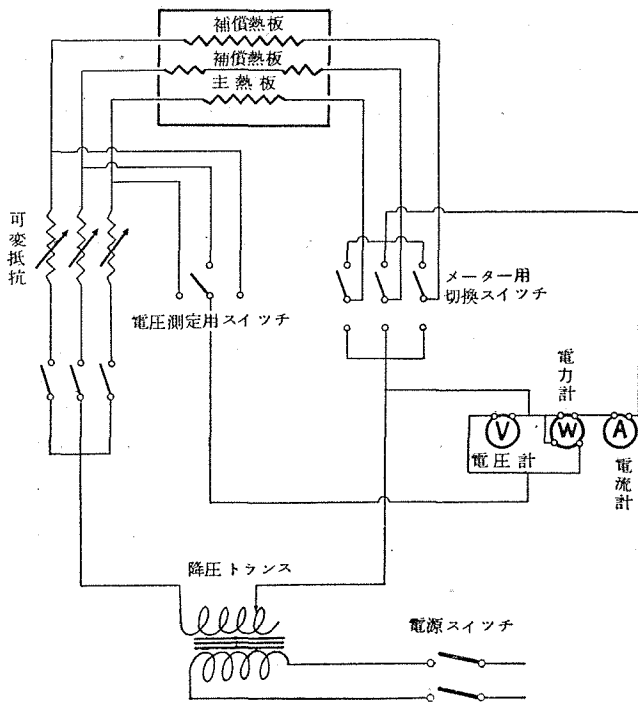
III. 常温度域における含水多孔物質の熱傳導率

1. 概 説

常温度域において含有水分が液状にある場合は、低温域において、既述のように含有水分が總て氷結状態にあり、傳熱が傳導のみによると考え得るときとは異り、流動状態にある水分は一部が蒸氣擴散による物質移動を生じ、このための熱移動が加わるため、傳熱機構は更に複雑となる。即ち、この場合には熱傳導率は所謂、見掛けの熱傳導率として求められる。このため、前述の低温域における場合と同様、木質部、空氣、水の 3 体混合物質としての純傳導による傳熱に加えて、物体内の温度差による水蒸氣分壓の相違に基く蒸氣擴散量を考慮し、各種の含水率及び温度における熱傳導率の實驗測定値と比較して、このような濕つた物質内における傳熱の機構を明らかにせんとした。

2. 實驗装置並びに方法

實驗装置並びに方法は、前述の低温域における場合と同じである。ただこの場合は、高熱源の温度を高めるため、電氣的加熱装置を用いた。試料には前同様纖維板(トマテックス)を用い、噴霧



第 7 圖 電氣的加熱装置の配線圖

器により均等に濕分を保持したものを 4 枚重ね、含有水分の外部への逸散を防ぐため、防濕塗料を施した木の箱に密封した。標準板にエポナイト板を用いたことも前同様である。第 7 圖は加熱装置の配線圖を示す。即ち、100 ボルトの交流を降壓トランスで 10 乃至 20 ボルトに下げ、更に主熱板並びに主熱板の上部又は周圍に設けられた補償熱板の可變抵抗を適宜調整し、主熱板よりの熱流が上部又は周圍へ逸散するのを防いだ。この場合の各熱板の電力は約 5 ~ 15 ワットである。

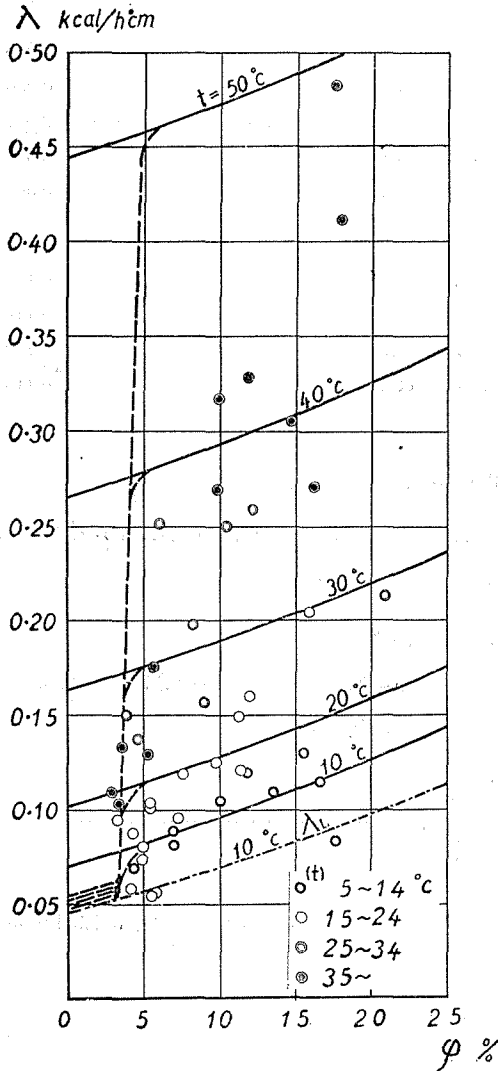
このような装置で、高熱源側にスイッチを入れ、低熱源に貯槽内のブラインをポンプで循環し一定温度

(この場合 0°C 以上) に保つようにすれば、試料内で始め均等に含まれていた水分は、次第に低温側に移動し、あるところで平衡の状態を保つ。測定はこのような平衡状態において行つた。このために試料を装備してから測定値を採るまでかなり長時間を要するので、實驗は多く夕刻に試料を装置し、1夜放置して翌朝より實測を行うようにした。

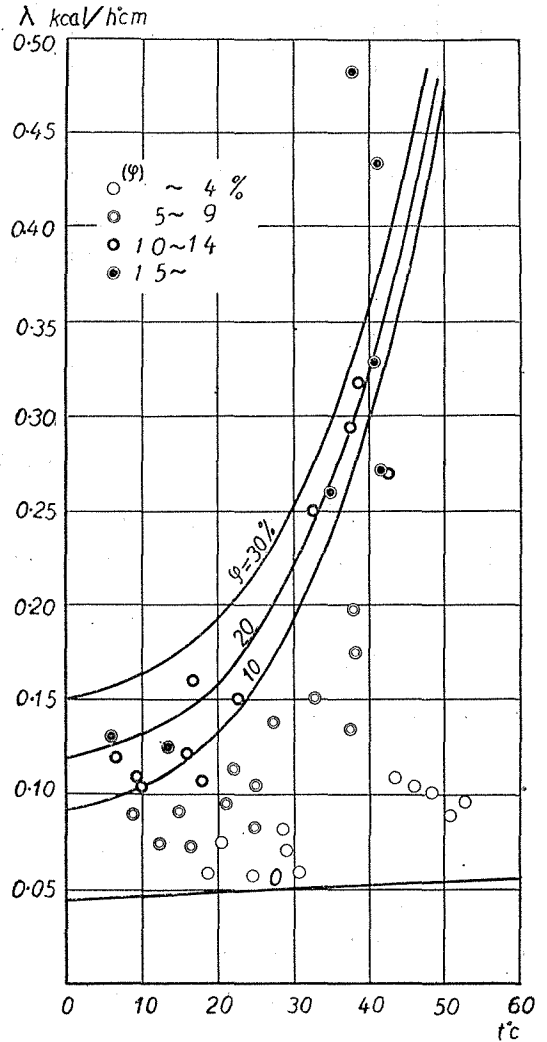
溫度測定後、試料をとり出し、1枚毎に重量と寸法とを測り、1枚宛の平均含水率を求めた。本實驗の溫度範圍は 5~53°C、含水率範圍 3~21% (体積比率) である。

3. 實驗結果

このようにして求めた熱傳導率測定値を第 3 表、第 8 圖、第 9 圖に示す。第 8 圖は「熱傳導率 -



第 8 圖 常溫域における熱傳導率と含水率との關係



第 9 圖 常溫域における熱傳導率と溫度との關係

含水率」第9圖は「熱傳導率-溫度」の關係を示しており、前記の低溫域におけるこれらの關係とは著しく相違することを知る。

第 3 表 (測定値の二,三を例示する)

試料 番號	試 料								標 準 板				試料の 熱傳導率 [kcal/ h·°C·m]
	厚さ [mm]	重量 [g]	基準乾 燥重量 [g]	含水率 [%]	高溫測 溫度 [°C]	低溫測 溫度 [°C]	溫度差 [°C]	平均 溫度 [°C]	厚さ [mm]	溫度差 [°C]	平均 溫度 [°C]	熱傳導率 [kcal/ h·°C·m]	
1	12.7	319	285	3.0	46.8	40.2	6.4	43.5					0.109
2	12.5	327	289	3.7	40.2	35.0	5.2	37.6					0.133
3	12.4	321	279	4.0	35.0	30.6	4.6	32.8	10.0	3.9	53.3	0.139	0.149
4	13.6	351	293	4.7	30.6	24.8	5.8	27.7					0.136
(平均)	51.2	1318	1146	3.9	46.8	24.8	22.0	35.8					0.130
1	13.3	313	285	4.2	33.8	27.8	5.9	30.8					0.058
2	13.4	329	289	5.8	27.8	21.5	6.2	24.7					0.056
3	13.1	348	279	7.9	21.5	15.8	5.9	18.7	10.0	1.8	36.8	0.139	0.057
4	13.9	394	293	17.6	15.8	14.5	4.3	15.1					0.083
(平均)	53.7	1384	1146	8.9	33.8	14.5	22.2	24.2					0.062
1	14.0	429	285	11.4	17.8	14.6	3.2	16.2					0.120
2	14.0	481	289	16.6	14.6	11.2	3.4	12.9					0.114
4	13.4	459	293	13.6	11.2	7.7	3.5	9.4	10.0	2.0	20.7	0.138	0.110
5	14.4	482	280	15.6	7.7	4.7	3.1	6.2					0.130
(平均)	55.8	1851	1147	14.3	17.8	4.7	13.1	11.2					0.118

4. 實驗結果の検討

實驗結果を検討するため、まず常溫域においては純傳導による傳熱の外に、試料内の溫度差に基づく蒸氣擴散による傳熱が加わるので、夫々の場合につき考察する。

a. 純傳導による熱移動

傳導に對しては、試料を、木質部を基礎物質としその内に水分と空氣とが均等に粒狀分布をなす3体混合物質と看做し、既述の Eucken の式 (7) を引用する。即ち、

$$\lambda_L = \lambda_3 \frac{1 - 2 \left(\varphi_1 \frac{\lambda_3 - \lambda_1}{2\lambda_3 + \lambda_1} + \varphi_2 \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{2\lambda_3 + \lambda_2} \right)}{1 + \left(\varphi_1 \frac{\lambda_3 - \lambda_1}{2\lambda_3 + \lambda_1} + \varphi_2 \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{2\lambda_3 + \lambda_2} \right)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

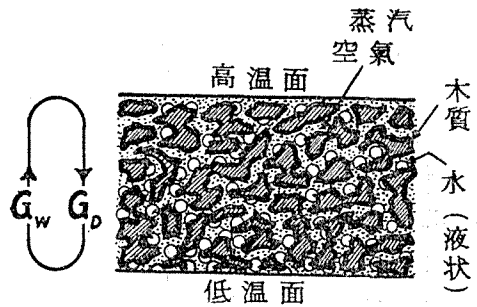
ここで、添字 1, 2, 3 は夫々水、空氣及び木質部を表わす。液狀の水の熱傳導率には Jakob¹⁰⁾ による次式にて與えられる値を採る。

$$\lambda_1 = 0.477 (1 + 0.00298 t) \quad [\text{kcal/h} \cdot \text{°C} \cdot \text{m}]$$

b. 物質移動に伴う熱移動

試料内に溫度差があると、高溫側の水膜に接した空氣中の蒸氣壓力は低溫側の水膜に接した蒸

氣壓力より高いため、蒸氣壓力の低い方に蒸氣擴散を起し、低温側で冷却され、凝結熱を放出して凝結し水滴となる。凝結した水は毛管作用によつて含水率の低い高温側に吸上げられ、そこで再び熱を得て蒸氣となり擴散を繰返すことになる。即ち、試料内の水分は、擴散—凝結—毛管作用—蒸發—擴散という循環過程を繰返しつつ熱移動を行うことになる。この場合、擴散蒸氣量 G_D と毛管作用により吸上げられる水の量 G_W とは等しい筈である。第 10 圖は、その模型を示す。勿論、この過程は定常状態におけるもので、過渡状態におけるものではない。過渡状態においては $G_D > G_W$ となり、特に試料内の毛管作用が可能になるまでは、低温側の凝結水は増加の一途を進ると考えられる。長時間後、定常状態に達した時、水分分布は低温側に進むに従い増加するような、ある勾配をもち、その勾配のもとで $G_D = G_W$ なる循環過程が繼續されることとなる。



第 10 圖

さて、蒸氣擴散に關する一般式は Stefan¹¹⁾ により次式のように與えられる。

$$G_D = - \frac{k}{\mu R_D T} \frac{P_0}{P_0 - P_s} \frac{dP_s}{dx} \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}] \quad \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 G_D = 擴散蒸氣量 [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$]、 P_0 = 大氣壓力 [kg/m^2]、 P_s = 蒸氣壓力 [kg/m^2]、 R_D = 蒸氣のガス恒數 = $47.06 \text{ [m} \cdot \text{kg/kg} \cdot \text{K}]$ 、 T = 平均溫度 [$^{\circ}\text{K}$]、 x = 擴散方向にとつた距離 [m]、 μ = 擴散に對する抵抗係數、 k = 擴散係數 [m^2/h]。

なお、式中右邊の負の符號は、蒸氣壓力の低減方向に蒸氣が擴散することを表わす。

故に擴散蒸氣の運ぶ熱量 Q_D は、蒸氣が飽和状態で存在すると看做し、 ρ を蒸氣の潛熱 [kcal/kg]、 P_s を飽和蒸氣の壓力 [kg/m^2] として、次式で表わされる。

$$Q_D = G_D \cdot \rho = - \frac{\rho \cdot k}{\mu R_D T} \frac{P_0}{P_0 - P_s} \frac{dP_s}{dx} \quad [\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}] \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここで、擴散による熱移動を當量熱傳導率にて表わし、これを λ_D とすれば、厚さ Δx [m]、溫度差 Δt [$^{\circ}\text{C}$] では、

$$\lambda_D = Q_D \frac{\Delta x}{\Delta t} = - \frac{\rho k}{\mu R_D T} \frac{P_0}{P_0 - P_s} \frac{dP_s}{dx} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad [\text{kcal/h} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}] \quad \dots \dots \dots (11)$$

となり、 Δx を充分微小にとれば、近似的に次式が得られる。

$$\lambda_D \doteq - \frac{\rho k}{\mu R_D T} \frac{P_0}{P_0 - P_s} \frac{dP_s}{dt} \quad [\text{kcal/h} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}] \quad \dots \dots \dots (12)$$

上式において、蒸氣潛熱 ρ および、飽和溫度 t に對する飽和蒸氣壓力 P_s は蒸氣表により與えられ、これより dP_s/dt は圖式的に求められる。擴散係數については Schirmer¹²⁾、Mache¹³⁾、Krischer-Rohnalter¹⁴⁾ の理論値、實驗値があるが、ここでは Krischer-Rohnalter の示す値を採る。即ち、

$$k = 0.086 \frac{10000}{P_0} \left(\frac{T}{273} \right)^{2.3} \quad [\text{m}^2/\text{h}]$$

抵抗係数 μ は 1 より小さな値で、自由な空気中で $\mu=1$ となる。

これらの諸値を代入すれば λ_d は求めることが出来、温度と共に著しく増加することを知る。

c. 見掛けの熱伝導率

傳導による傳熱量と擴散による傳熱量の和が試料を通る總熱量に等しいと考えると、試料の見掛けの熱傳導率 λ は、前述の純傳導による熱傳導率 λ_L と擴散による當量熱傳導率 λ_d との和として、

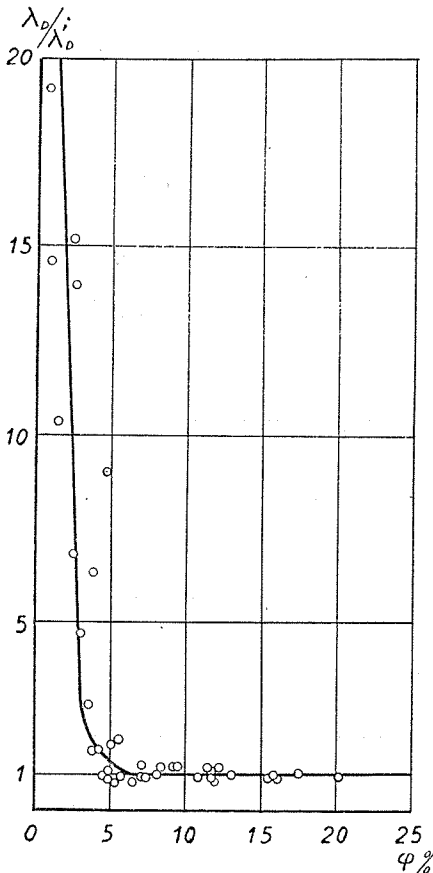
$$\lambda = \lambda_L + \lambda_d \quad \dots\dots\dots (13)$$

にて表わされる。上記の諸關係に基き、温度を 10, 20, 30, 40°C のように一定に保つたときの各含水率に對する見掛けの熱傳導率を算出すれば、第 8 圖中の曲線のように示される。實驗値と比較すれば約 5% 以下の低含水率域を除けば略計算値に一致することを知る。即ち、見掛けの熱傳導率は温度と共に著しく高まり、含水率と共に増加する。なお、圖の最下位の鎖線で示す曲線は、10°C における蒸氣擴散を伴わない、即ち、純傳導のみによる値 λ_L を示す。實線 10°C の見掛けの熱傳導率

を示す曲線と、この鎖線との間が擴散による當量熱傳導率 λ_d 値を示す。

また、温度に對する影響をみるため、熱傳導率 - 温度曲線を求めると、第 9 圖のように示される。即ち、温度が上るに従い擴散現象は著しく活潑となり、見掛けの熱傳導率は急激に高まり、この傾向は實測値とよく一致する。ここで式 (12) の擴散に對する抵抗係数 μ の値には 1 を採つた。

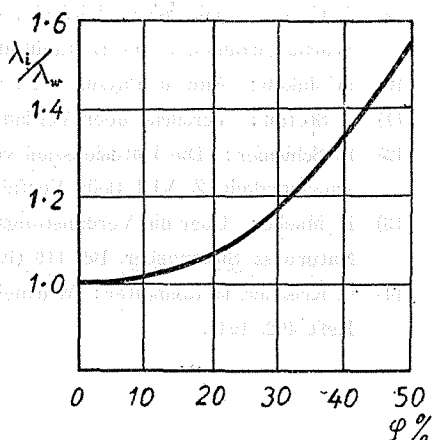
なお、理論値と實測値との比較を行うために、式 (12) から得られる當量熱傳導率 λ_d と實驗によつて得た見掛けの熱傳導率から式 (8) によつて求め得る純傳導による熱傳導率 λ_L を差引いた當量熱傳導率 λ'_d との比を求めれば、第 11 圖の如くなり、この種の物質については含水率約 5% 以上の範圍で、前述の理論値が實測値とよく一致する結果を示している。含水率 5% 以下の低含水率の場合はこの比率は著しく大となり、このことは擴散の現象が理論式の示すものより僅少なことを表わす。このような含水率の低い範圍においては高温側の試料内部に局部乾燥が起り、式 (12) における擴散係数が Krischer らの實驗結果からも明らかのように急激に低下し、その結果



第 11 圖

見掛けの熱傳導率は低減すると考えられる。

敘上の常溫域における場合と、前編にて求められた低溫域における場合とを綜合すれば、同一含有水分であつても、これが氷の状態におけるときと水の状態におけるときとは、熱傳導率自体に著しい差のあるほか、傳熱機構自体にも相違があるので、含有水分の氷點を境として熱傳導率は温度に對し不連続な變化を示す。即ち、供試纖維板について、氷點における含有水分が氷の状態にあるときの熱傳導率 λ_i と水の状態にあるときの熱傳導率 λ_w との比をとつて比較すれば、第 12 圖のようになり、この相違は水分の増加と共に著しくなることを知る。



第 12 圖

IV. 結 言

多孔物質の 1 例として木纖維板を選び、これに水分を含ませ、水が氷結の状態にある低溫域と、流動の状態にある常溫域とについて夫々含水率及び温度の熱傳導率に及ぼす影響を實測し、理論値と比較を行つた結果、この種の纖維板については、次の結論を得た。

(1) 水が氷結の状態にある場合には、空氣と氷とが均等に粒狀分布をなすと看做して求めた計算式が、實測値とよく一致する。このため熱傳導率は含水率に大きく影響されるが、温度による差違は僅少である。

(2) 水が流動の状態にある常溫域では、傳熱過程は純傳導の外に、物質移動に基く熱移動がこれに加わり、見掛けの熱傳導率は含水率の大なるほど、特に温度の高まるにつれ著しく増大する。この関係は含水率約 5% 以上の範圍では、3 体混合物質の熱傳導率及び一般蒸氣擴散の式から求めた理論式にてよく表わされる。

本實驗は、齋藤武助教授の協力に負う點が多い、特記して謝意を表わす。

V. 文 献

- 1) M. ten Bosch: Die Wärmeübertragung. Springer, 1936.
- 2) Int. Crit. Tables. Vol. II. 1927. P. 321.
- 3) 小野寺眞作: 熱傳導率測定の誤差に關する一計算. 北海道大學工學部彙報, 第 4 號, 昭和 25-3. 頁 69-80.
- 4) N. E. Dorsey: Properties of Ordinary Water-Substance. 1940, P. 466.
- 5) 前掲 4). P. 482.
- 6) 前掲 1).
- 7) 大賀憲二: 傳熱諸論と其の適用. 岩波. 1931. 諸表 6 頁.
- 8) 大賀憲二: 熱及熱力學通論, アルス. 昭和 19, 頁 287.

- 9) A. Eucken : Die Wärmeleitfähigkeit keramischer feuerfester Stoffe. Ihre Berechnung aus der Wärmeleitfähigkeit der Bestandteile. VDI-Forsch-Heft 353, 1932.
- 10) M. Jakob : Ann. d. Physik. 1920, S. 537.
- 11) J. Stefan : Versuche über Verdampfung. Math. Naturwiss. Sitzungsber, Bd. 98 (1889), S. 1418.
- 12) R. Schirmer : Die Diffusionszahl von Wasserdampf-Luft-Gemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit. Z. VDI Beih. Verfahrenstechnik, 1938, Nr. 6, S. 170.
- 13) H. Mache : Über die Verdunstungsgeschwindigkeit des Wassers in Wasserstoff und Luft. Math. Naturwiss. Sitzungsber. Bd. 119 (1910), S. 1399.
- 14) O. Krischer, H. Rohnter : Wärmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gütern. VDI-Forsch-Heft 402, 1940.