

# 木材の有効熱伝導率におよぼす水分の影響

佐々木 章・福田 浩

Effect of Water Content on Effective Thermal Conductivity of Woods

Akira SASAKI, Hiroshi FUKUDA  
(昭和57年10月30日受理)

This paper presents an experimental investigation of the effective thermal conductivity of hydrous woods. The comparison method by steady heat flow was used for determining the effective thermal conductivity. For experimental samples, a cedar, a pine, a lauan and cork board were used. The temperature range of the experiments was from room temperature to 60°C, and the water content ranged from 0 to 0.80. For the fundamental model of the mechanism of heat transfer, the arrangement proposed by Krischer was used and the predicted values were compared with the present experimental data.

The results are as follows.

- (1) The effective thermal conductivity increases with increasing specific weight in dry and the results agree approximately with the previous data.
- (2) The effective thermal conductivities of a cedar, a pine and a lauan increase with the increment of water content and the increasing rate of it grows large at around the fiber saturation point.
- (3) The effective thermal conductivity of cork board indicates a different tendency to the result of (2) because of the difference of structure and changes in similar way to predicted value.

## 記 号

## 1. 緒 言

$\lambda_e$ :	有効熱伝導率,	Kcal/mh°C
$\lambda_o$ :	標準試料の熱伝導率,	"
$\lambda_s$ :	固体(構成母材)の熱伝導率,	"
$\lambda_w$ :	液体の熱伝導率,	"
$\lambda_a$ :	気体の熱伝導率,	"
$\lambda_v$ :	水蒸気拡散による相当熱伝導率,	"
$d$ :	厚さ	mm
$T(\theta)$ :	温度	°K(°C)
$\epsilon$ :	空げき率	
$\phi$ :	含水率	
$\gamma_o$ :	絶乾比重量	g/cm <sup>3</sup>
$L$ :	蒸発の潜熱	Kcal/kg
$D$ :	水蒸気の拡散係数	m <sup>2</sup> /h
$Rv$ :	水蒸気のガス定数	Kgm/kg°C
$P$ :	全圧力	kg/m <sup>2</sup>
$P_v$ :	水蒸気の分圧	"

近年、エネルギー節約の目的から一般住宅における断熱材の使用が増加している。しかし、断熱材や建築材料などの多孔質材料は、使用中大気に含まれる湿分などを吸収し、水分を含有した状態になることが多い。このような状態では、断熱性に有利に作用していた細孔内滞在の熱伝導率の小さな空気と、その大きい水とが入れかわることになり、断熱性を低下させることになる。しかも、材料内に温度差が存在すると、水蒸気の分圧差によって高温側から低温側への拡散現象がおき、また、毛管作用によって低温側から高温側への水分移動がおきるため、さらにその断熱性能を低下させることになる。

したがって、このような使用状態における多孔質材料に乾燥状態の有効熱伝導率を適用することは、その熱損失を過少評価することになる。また、木材を生材から乾燥する場合、その内部温度傾斜の大小

によって表面割れ、表面硬化、内部割れなどが発生する。これらの現象を防ぐには、材料の熱特性を良く知った上で適切な乾燥条件を決めなくてはならない。湿った多孔質材料の有効熱伝導率については多くの研究があるが、空げき率の大きい場合は、比較的低含水率領域を扱っているものが多いように思われる。<sup>1)~6)</sup> しかも、材料の性状、構造の違いがその伝熱機構に大きく影響することから、これらの結果をそのまま他の材料に適用することはできない。

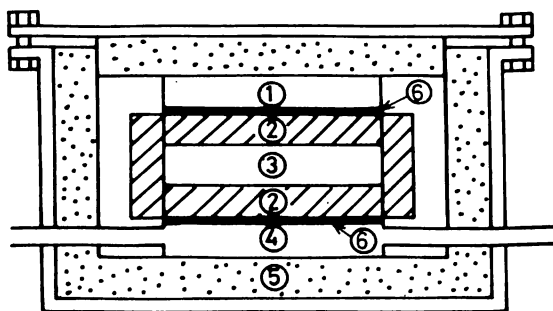
本実験は、多孔質材料として主に木質系試料を使用し、広範囲に含水率を変えて有効熱伝導率を測定することによって、主として含水率の有効熱伝導率におよぼす影響を明らかにすることを試みたものである。また、含水した材料を固体、液体、気体の三成分の構成物質と考え、その伝熱機構の基本的モデルとして Krischer<sup>6)</sup> の配列を選び、実験値と比較検討した。

## 2. 実験装置と方法

(1) 実験装置 有効熱伝導率は、定常熱流を利用する平板比較法を用いて測定した。<sup>8)</sup> この方法は、測定に長時間を要するが、平板状の試料を用いることができ、また、熱量の測定が不要であるなどの利点がある。図1に実験装置の概略を示す。標準試料として、200 mm × 200 mm、厚さ5 mmの亚克力板を用いた。この亚克力板で作成された容器に平板状試料をおさめ、これを加熱器と冷却器の間にはさみ、さらに厚さ1 mmのゴム板をはさんで密着させた。有効熱伝導率は、次式により求めた。

$$\lambda e = \frac{1}{2} \left( \frac{d}{\Delta\theta} \right)_S \left\{ \left( \lambda_0 \frac{\Delta\theta}{d} \right)_U + \left( \lambda_0 \frac{\Delta\theta}{d} \right)_B \right\} \quad (1)$$

ここで、添字 S, U, B はそれぞれ試料、上の標準



- ① Heater                      ④ Cooler
- ② Standard plate              ⑤ Insulation
- ③ Sample plate                ⑥ Rubber plate

図 1

表-1

試 料	$\gamma_0$ g/cm <sup>3</sup>	$\epsilon$
杉	0.30	0.80
松	0.38	0.75
ラワン	0.44	0.70
コルク板	0.21	0.86

試料、下の標準試料を表す。また、外部からの熱影響をなくすため測定部を断熱材で囲んである。

(2) 試 料 実験試料は、木質系材料として杉(厚さ12mm)、松(厚さ12mm)、ラワン(厚さ12mm)、コルク板(厚さ10mm)を選んだ。これらの試料の特性値を表1に示す。空げき率は、次式により求めた。<sup>7)</sup>

$$\epsilon = (1.00 - \gamma_0 / 1.50) \quad (2)$$

(3) 実験方法 試料は100~110℃で乾燥し、重量が変化しなくなったときを乾燥(絶乾)状態とした。この試料を水中に没し、その前後の重量差より含水量を求めた。試料の含水率は、乾燥状態の試料の体積に対する含有水分の体積の比とし、体積含水率で表わした。また、測定中水分の散逸を防ぐため含水した試料をラップで包んだ後亚克力製容器におさめた。含水率は、試料によって異なるが、0から最大で0.80までとした。熱伝導率の計測は、含水率を一定にしておき、室温から約10℃おきに約60℃まで行なった。温度測定には、φ0.1 mmのC-A熱電対を用い、はりつけ位置による影響を防ぐため試料と標準板の間には、密着性の良いアルミはくをはさんだ。本実験の測定精度は、温度測定、測定部からの熱損失、<sup>9)</sup> 試料の寸法測定などによる誤差を考えると6%以内と考えられる。なお、試料への熱流方向は、繊維に対して直角とし、試料の上下面の温度差は、約3℃になるように調節した。

## 3. 伝熱機構

湿った木材は、固体、液体、気体の三成分の構成物質と考えられる。このような物質の伝熱機構を、Krischerらは、<sup>6)11)</sup>つぎのように分類して考えている。

- (1) 固体内の熱伝導
- (2) 液体内の熱伝導
- (3) 細孔内の水蒸気拡散による伝熱
- (4) 細孔内の気体内熱伝導

木材の有効熱伝導率におよぼす水分の影響

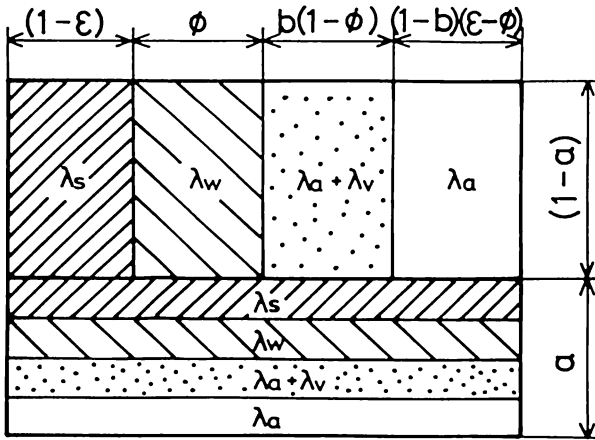


図 2

この他に、放射伝熱、対流による伝熱が考えられる。しかし、放射伝熱は常温では伝導による伝熱にくらべて無視してよく、また、対流による伝熱も細孔が小さく、しかも上方から熱が加えられる場合は考える必要はない。これらの伝熱機構を、図2に示すような熱流方向に対して、それぞれ直列、並列に配列された部分の組合せとして次式を与えている。ただし、直列部分と並列部分の固体、液体、気体の割合は同じであるとする。

$$\lambda e = \{ (1-a) / \lambda_1 + a / \lambda_2 \}^{-1} \quad (3)$$

ここで

$$\lambda_1 = (1-\epsilon)\lambda_s + \phi\lambda_w + b(\epsilon-\phi)(\lambda_a + \lambda_v) + (1-b)(\epsilon-\phi)\lambda_a$$

$$\lambda_2 = \left\{ \frac{(1-\epsilon)}{\lambda_s} + \frac{\phi}{\lambda_w} + \frac{b(\epsilon-\phi)}{\lambda_a + \lambda_v} + \frac{(1-b)(\epsilon-\phi)}{\lambda_a} \right\}^{-1}$$

であり、伝熱機構の水蒸気拡散による相当熱伝導率は、stefan の式より次のように求められる。

$$\lambda v = \left( \frac{L \cdot D}{R v \cdot T} \right) \left( \frac{P}{P - P_v} \right) \left( \frac{dP_v}{dT} \right) \quad (4)$$

ここで、Dは拡散係数であり、次式のように表わされる。

$$D = 0.086 \left( T / 273 \right)^{2.3} (10000 / P)$$

(4) 式によると拡散による相当熱伝導率は、 $\theta = 10^\circ\text{C}$ において、 $\lambda v = 0.04 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ であり、 $\theta = 60^\circ\text{C}$ では、 $\lambda v = 0.56 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ と水の熱伝導率と同程度であることがわかる。

4. 実験結果と考察

(1) 比重量による影響 図3は、乾燥状態における有効熱伝導率と絶乾比重量との関係を示す。図中には、これまで報告されている測定値と、若杉お

よび満久による実験式についても比較して示してある。ここに示された結果より、本実験値は既存値に比較していくぶん小さい値を示しているが、絶乾比重量の増加とともに大きくなり、その傾向は変わらない。これは、(2)式より明らかなように、 $\tau_0$ の増加は空げき率の減少を示すことから、 $\lambda e$ は空げき率の減少によって増大するものである。

(2) 温度による影響 有効熱伝導率と温度との関係を体積含水率をパラメータとして図4~7に示す。図4、5、6、7はそれぞれ杉、松、ラワン、コルク板に対する測定結果である。いずれの試料も乾燥状態の $\lambda e$ の温度による影響は、少ないが、温度の上昇とともにやや増加する傾向にあり、含水状態の場合、 $\lambda e$ は温度上昇とともにゆるやかに増加し、その増加の度合は温度の上昇にとまない増大するように思われる。図4に示される杉の場合特にその傾向が強く、温度 $60^\circ\text{C}$ での $\lambda e$ は温度 $20^\circ\text{C}$ のそれに比較して30~70%程度大きい。ここに示される傾向は試料内部での水蒸気拡散の影響と考えられるが、(4)式で示される $\lambda v$ に比較してその度合はきわめて小さいことがわかる。これは、試料内の細孔が小さく、し

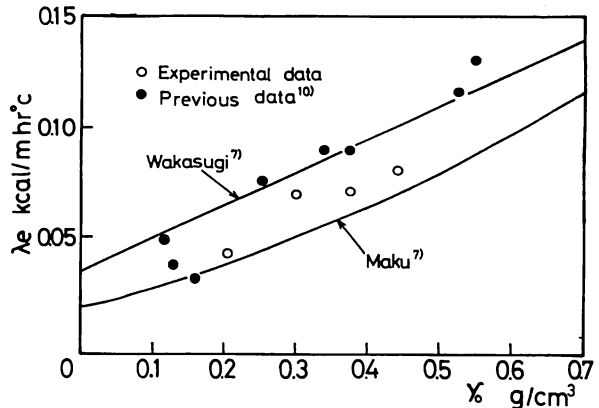


図 3

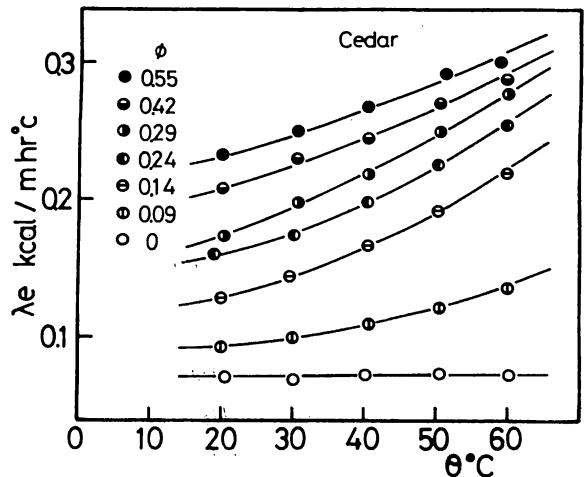


図 4

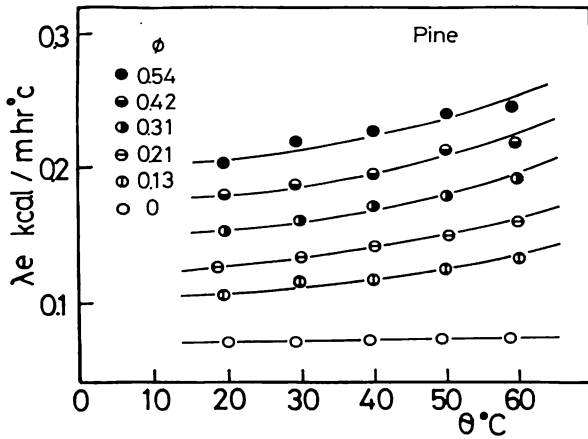


図 5

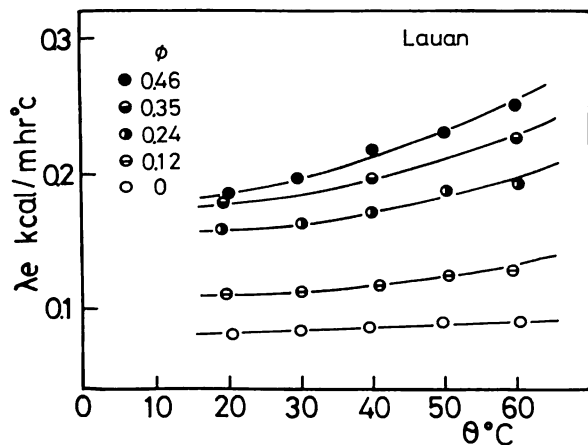


図 6

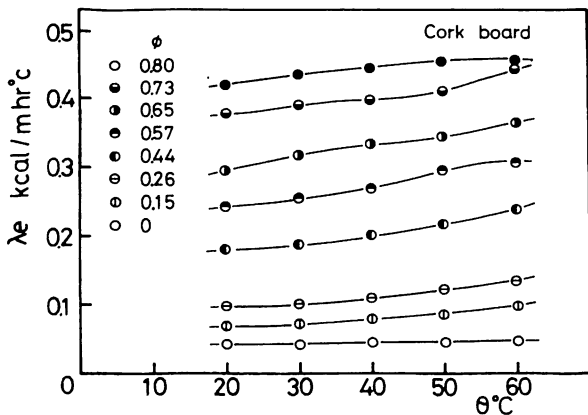


図 7

かも細胞膜でできられていることによって細孔から細孔への蒸気拡散が阻害されるためと推察される。

(3) 含水率の影響 図8～11に有効熱伝導率と含水率との関係を示す。図中の破線は、(3)式より得られた $\theta=20^\circ\text{C}$ の場合に対する推定値を示す。式中の係数 $a$ は、コルク板の乾燥状態における $\lambda_e$ 、および $\phi=0.80$ における $\lambda_e$ を $\phi=0.86$ (空げきが全部水で満たされている状態)での $\lambda_e$ とほぼ等しいと考え、これらの値より逆

算して求め $a=0.2$ とした。また、 $\theta=20^\circ\text{C}$ では $\lambda_v=0.04$  kcal/mh $^\circ\text{C}$ と小さく、しかも、前述のように蒸気拡散の有効熱伝導率におよぼす影響が小さいことから $b=0$ とした。図8より、杉の $\lambda_e$ は含水率10～15%付近(繊維飽和点)でその増加の割合が大きくなるが、それ以後なだらかに増加しつづけるのがわかる。これは、含水率がこの近傍に達すると木材細胞膜内の微小細孔内滞在の空気と水分とが置換されるのと同時に仮道管、細胞などの比較的大きな細孔が水蒸気で満たされるためと考えられる。この傾

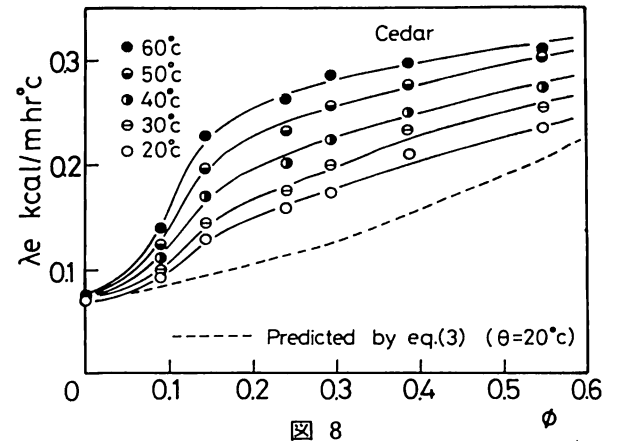


図 8

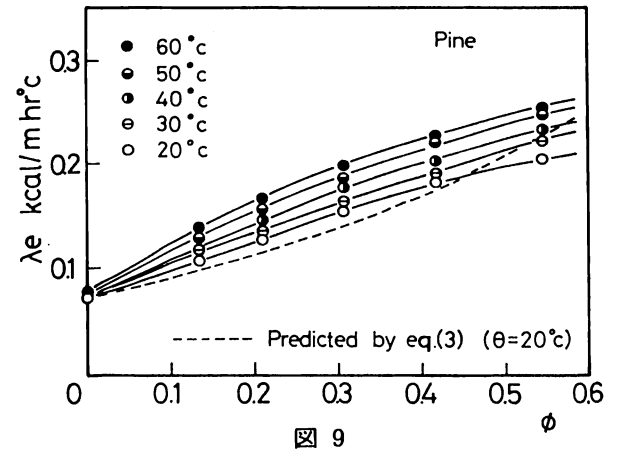


図 9

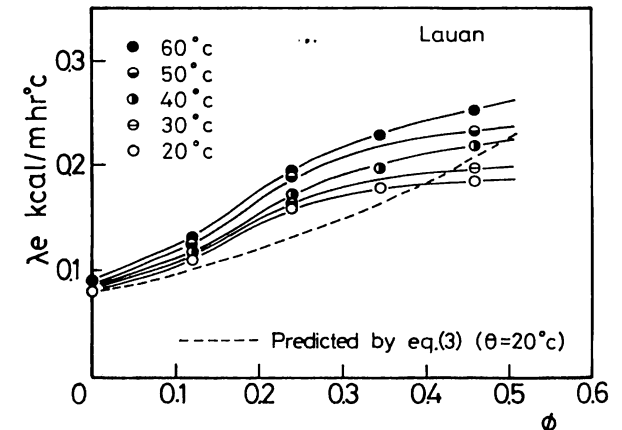


図 10

木材の有効熱伝導率におよぼす水分の影響

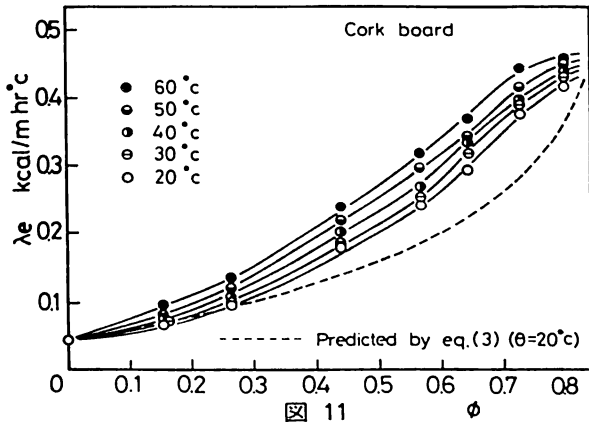


図 11

向は、温度が異なっても同様である。図9に示される松の場合、杉のような繊維飽和点でははっきりした変化は認められないが、含水率の増加とともにゆるやかに増大している。図10に示すラワンの場合には杉と同様の傾向を示しており、含水率15~20%付近で $\lambda_e$ の増加度が大きくなっている。いずれの場合も実験値は推定値と異なる傾向を示すことがわかる。これは、木材細胞膜、仮道管内の微小細孔に滞在する空気が熱の流れに対して直列に配列された状態で熱流を阻害していたのが、水分と置換されることによってその熱抵抗を減少させると同時に伝熱機構の割合をも変化させるためと考えられる。コルク板の場合、図11に示すように $\lambda_e$ は含水率の増加とともに二次関数的に増大するが、その度合は含水率の増加とともに大きくなり、とくに高含水率域で急激である。この傾向は杉、松、ラワンの場合とは異なり、推定値とはほぼ同一である。このことより、前述の伝熱機構の気体内熱伝導および熱流方向に直列な配列の影響が大きく作用しているものと思われる。これは、コルク板がコルク粒子で構成されているためその細孔が比較的大きいこと、また、コルク粒子を結合させている接着剤、粒子自体の樹脂が粒子表面に

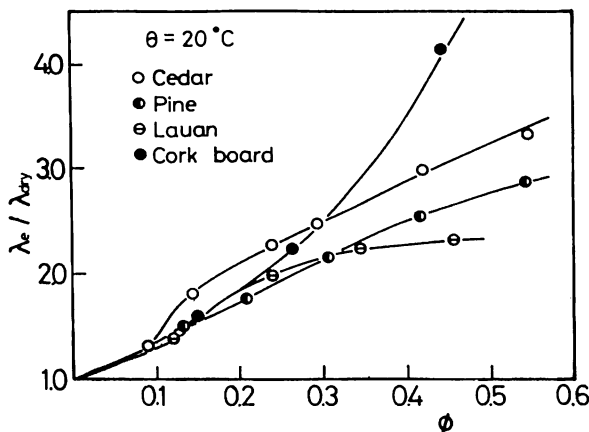


図 12

付着していることによって毛管作用による水分移動が少なく、高温部において乾燥した細孔が生ずるとともに、低温部に水分の蓄積がおこるためと推察される。

(4) 空げき率の影響 図12に、含水率と無次元熱伝導率  $\lambda_e / \lambda_{dry}$  (含水状態の有効熱伝導率と乾燥状態の有効熱伝導率  $\lambda_{dry}$  との比) との関係  $\theta = 20^\circ\text{C}$  の場合について示す。図より含水率の増加とともに試料による違いが現われ、試料の空げき率によって水分の影響の度合が異なることがわかる。無次元熱伝導率におよぼす空げき率の影響を温度と含水率に関連づけてまとめて示したのが図13である。ただし、コルク板は、その構造が杉、松、ラワンと異なると考えられるので除いてある。ここに示された結果から、一般的に空げき率の増加とともに、無次元熱伝導率は増大することがわかる。そして、同一含水率では温度が高いほど、また、同一温度では含水率が高いほどその増加の度合が大きくなる傾向を示している。すなわち、空げき率は、温度が高いほど、また、高含水率であるほどその影響度が大きい。

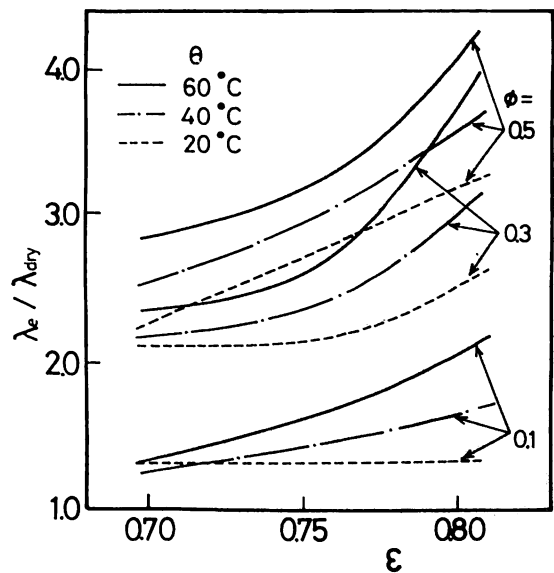


図 13

5. 結 言

多孔質材料である杉、松、ラワン、コルク板の有効熱伝導率を、広範囲に含水率を変えて測定した結果、次のことが得られた。

- (1) 乾燥状態の有効熱伝導率は既存値に比べていくぶん小さい値を示すが、絶乾比重量の増加とともに増大し、その傾向は変わらない。

- (2) 含水状態の有効熱伝導率におよぼす水蒸気拡散の影響は、比較的少ない。
- (3) 杉, 松, ラウンの有効熱伝導率は, 含水率の増加とともに増大するが, 繊維飽和点付近でその増加の割合は大きく表われる。
- (4) コルク板の有効熱伝導率は, (3)とは異なる傾向を示し, 構成母材が同一でも, その構造によって水分の影響は異なる。
- (5) 空げき率が大になるほど, 有効熱伝導率に対する水分の影響度は大きい。

最後に, 本実験を行なうにあたり, 終始協力された当時学生の鈴木正方, 布川惇, 金子浩, 佐々木孝の諸君に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 齊藤, 岡垣, 機械学会誌 62, 741 (1959)
- 2) 森田, 機械学会誌 63, 1177 (1960)
- 3) 菅原, 応用物理 30, 899 (1961)
- 4) 山川他, 化学工学 36, 1342 (1972)
- 5) 竹越他, 第一回熱物性シンポジウム, 129 (1980)
- 6) Krischer, O. and Esdorn, M., VDI-Forsch., 22, 1 (1956)
- 7) 北原, 木材の物理, 森北出版 (1967)
- 8) JIS A 1412
- 9) 抜山, 熱, 養賢堂 (1969)
- 10) 伝熱工学資料, 日本機械学会 (1969)
- 11) Tye, R. P., Thermal Conductivity, Academic Press, (1969), London
- 12) 満久, 木材の研究 9, 1 (1952)