

# 含水した断熱材の有効熱伝導率に関する研究

富 樫 雄 矢\*・佐々木 章

## The study of effective thermal conductivity of insulating material contained water

Yuta TOGASHI\* and Akira SASAKI

(2004年11月29日受理)

In this experiment, the effective thermal conductivities of insulating material wetted with water were measured and the effects of vapor diffusion were investigated. As experimental sample, glass wool was used. The values of the bulk density  $\rho$  of the glass wool filled into the acrylic vessel were  $25.2\text{kg/m}^3$  and  $73.5\text{kg/m}^3$ , and the porosities were 0.988 and 0.966, respectively. The temperature range of the sample was from  $10^\circ\text{C}$  to  $60^\circ\text{C}$ , and the percentage of water saturation was in the range from 0 to 100%. We estimate the effective thermal conductivity of insulating material wetted with water by the heat transfer model. The effective thermal conductivity  $\lambda$ , increases with the increasing water content ratio, and the increasing rate of  $\lambda$ , changes at around 20% ( $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ ) and 30% ( $\rho = 73.5\text{kg/m}^3$ ). We predict the thermal critical water content ratio by the heat transfer model and the predicted values agreed with the experimental data. Although the estimated values of  $\lambda$ , at  $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$  agree approximately with the experimental data, the estimated values of  $\lambda$ , at  $\rho = 73.5\text{kg/m}^3$  are more than the experimental data.

### 1. 緒 言

近年、情報通信技術の世界的発達により、24時間稼働のビルが増加傾向にある。それに伴い情報端末機器等の発熱により室内熱負荷が増大し、季節を問わず冷房するという場合が増えてきた。しかし日本のような高温多湿の地域では、空調用冷水配管を囲う断熱材に内部結露が発生し、断熱性能に支障を来す場合が増加傾向にあるという指摘がある。そのため、断熱材内に水分を含んだときの熱特性を明らかにすることが重要となっている。従来、湿った多孔質層の有効熱伝導率に関して、比較的低温の低い場合については棚沢<sup>(1)</sup>の報告が、温度が高く水蒸気拡散の影響が現われる場合については Krischer<sup>(2)</sup>、Nissan<sup>(3)</sup>、大谷<sup>(4)</sup>、斎藤<sup>(5)</sup>、竹越<sup>(6)</sup>の報告がある。大谷らは粒子層の有効熱伝導率を測定し、充填層の有効熱伝導率の理論式を導出して実験値と比較している。斎藤らは試料に木繊維板、砂、

コンクリートを使用して多孔質層の熱伝導率に及ぼす水分の影響を検討している。しかし、いずれの場合も低飽和度領域の有効熱伝導率の推定については詳細に行っていない。また、竹越らは断熱材の有効熱伝導率の測定値から  $0^\circ\text{C}$  の有効熱伝導率の推算値を求め、それに試料の抵抗係数を考慮した水蒸気の相当熱伝導率を加えた推定値と実験値の比較を行っているが、抵抗係数の扱いについて疑問が残る。Krischer<sup>(2)</sup>らは、配列モデルを用いて湿った物質の有効熱伝導率の推定を試みているが、水蒸気拡散の影響を示すパラメータを全て実験値から求める必要があり、一般性に欠けるように思われる。いずれの研究においても、水分及び水蒸気拡散の影響の度合いはある飽和度で変化することが示されているが、この飽和度を明確にし、低飽和度領域での推定値と実験値の差異については検討されていない。本研究ではこの飽和度を以後熱的臨界飽和度と呼ぶこととする。

本研究では、多孔質材料としてグラスウールを使用し、有効熱伝導率に及ぼすかさ密度、飽和度およ

\* 秋田高専専攻科学生

び水蒸気拡散の影響を調べるとともに、単純な伝熱モデルを用いて熱的臨界飽和度を求め有効熱伝導率の推定を行ない、実験値との比較検討を行なった。

#### 主な使用記号

- $d_f$  : 繊維直径 [m]  
 $D$  : 拡散係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $g$  : 重力加速度 [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]  
 $K$  : 透過率 [ $\text{m}^2$ ]  
 $P$  : 圧力 [Pa]  
 $P_0$  : 大気圧 [Pa]  
 $P_s$  : 飽和蒸気分圧 [Pa]  
 $r$  : 蒸気の潜熱 [J/kg]  
 $R_D$  : 蒸気ガス定数 [J/kg · K]  
 $Ra$  : レイレー数  
 $s$  : 多孔質層の厚さ [m]  
 $T$  : 温度 [K]  
 $\beta$  : 体膨張係数 [1/K]  
 $\varepsilon$  : 空隙率 [-]  
 $\theta$  : 温度 [°C]  
 $\kappa$  : 温度伝導率 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $\lambda_a$  : 空気の熱伝導率 [W/mK]  
 $\lambda_d$  : 蒸気の相当熱伝導率 [W/mK]  
 $\lambda_e$  : 有効熱伝導率 [W/mK]  
 $\lambda_g$  : グラスウール繊維 (素材) の熱伝導率 [W/mK]  
 $\lambda_w$  : 水の熱伝導率 [W/mK]  
 $1/\mu$  : 拡散に対する抵抗係数  
 $\nu$  : 動粘性係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $\rho$  : かさ密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\phi$  : 飽和度 [%] [-]  
 $\phi_c$  : 熱的臨界飽和度 [%] [-]

## 2. 実験装置及び実験方法

試料の熱物性値を測定するのに用いた試験部を図1に示す。試料④は内寸法200×200mm、高さ40mmの亚克力製容器③に充填した後、銅製の加熱器・冷却器の間に厚さ1mmのゴム板⑤を介して配置した。有効熱伝導率の測定には定常比較法<sup>(7)</sup>を用い、標準板として亚克力製容器の上下板を用いた。試料の表面および標準板の表面温度測定のため、直径0.2mmのT熱電対を両標準板の上下4カ所にアルミテープで貼り付けた。実験は冷凍機、パイプヒータおよび温度調節器により一定に保たれた加熱・冷却水をそれぞれ加熱器②、冷却器①へ流すことにより開始した。加熱・冷却器の温度差は10°Cとし、試

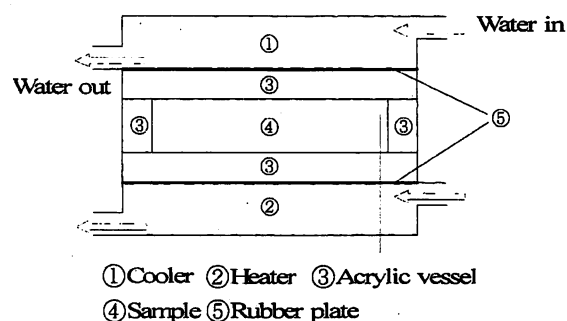


図1 試験部

料の平均温度が10°C、20°C、40°C、60°Cの場合について行なった。実験中は周囲温度の影響をできるだけ軽減するため、厚さ50mmのスタイロフォームで試験部を断熱した。試料には厚さ100mmのグラスウールを使用した。グラスウール繊維の密度は2160 kg/m<sup>3</sup>である。試料を亚克力容器に充填したときの平均かさ密度が25.2kg/m<sup>3</sup> (平均空隙率 $\varepsilon=0.988$ ), 73.5kg/m<sup>3</sup> (平均空隙率 $\varepsilon=0.966$ )の場合について測定を行った。飽和度は空隙に対する水分の体積の割合と定義して、0~100%まで変化させた。

## 3. 水蒸気拡散による伝熱

湿った多孔質物質内に温度差がある場合、高温側で蒸気が発生し、水蒸気分圧差のため高温側から低温側へ水蒸気拡散が起きる。移動した水蒸気は冷却されて凝縮し水滴となり、毛管作用によって高温側へ移動し、再び水蒸気となり拡散を繰り返す。このように、湿った断熱材の内部では、水蒸気拡散と凝縮、毛管作用による水分の移動という循環過程を繰り返しながら熱移動が行われ、有効熱伝導率に大きな影響を及ぼす。水蒸気の相当熱伝導率 $\lambda_d$ はKrischerら、竹越らによると(1)式で示される<sup>(2)(6)</sup>。

$$\lambda_d = \frac{rD}{\mu R_D T} \frac{P_0}{P_0 - P_s} \frac{dP_s}{d\theta} \quad (1)$$

ここでDは拡散係数であり、(2)式のように示される。

$$D = 2.39 \times 10^{-5} \frac{P}{P_0} \left( \frac{T}{273} \right)^{2.3} \quad (2)$$

図2に $1/\mu=1$ として1気圧の大気中で蒸気拡散が行われる場合の温度 $\theta$ と水蒸気の相当熱伝導率 $\lambda_d$ の関係を示す。また、同図に相当熱伝導率を温度の関数として表した近似式を示している。伝熱モデルで推定値の計算を行う際はこの式を用いた。図

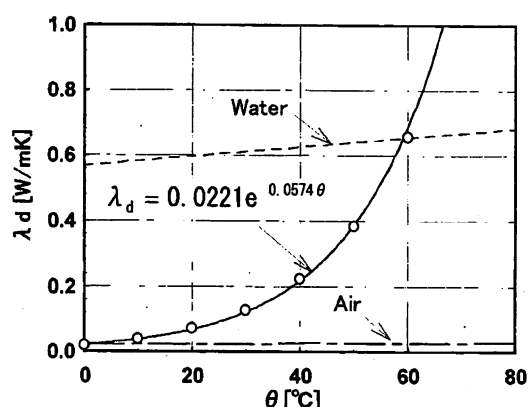


図2 水蒸気の相当熱伝導率の温度による変化

より,  $\theta = 10^\circ\text{C}$ において,  $\lambda_d$ は空気の熱伝導率と同程度の値を示しているが,  $\theta = 60^\circ\text{C}$ においては,  $\lambda_d$ は水の熱伝導率にほぼ等しい値まで増加している。図より,  $\lambda_d$ は $\theta$ が大きくなるほどその増加割合が大きくなることがわかる。

#### 4. 伝熱モデル

断熱材のような多孔質物質は, 構成される固体と空隙の熱伝導率, 配列状態によって熱伝導率が変化する。また, その配列状態は極めて数多くの場合が考えられる。Krischer らは湿った多孔質物質は, 固体, 液体, 気体の三成分の構成物質と考え, その伝熱機構を①固体内の熱伝導, ②液体内の熱伝導, ③空隙内の水蒸気拡散による伝熱, ④空隙内の気体内の熱伝導, に分類して考えている。

本研究では, 気相中では空気と蒸気は混合している状態であると考え, 熱的臨界飽和度 $\phi_c$ 以下の領域ではグラスウール繊維の表面張力により水分が吸着水として存在するものとし, 水蒸気拡散に伴う熱移動量は少ないと考えた。 $\phi_c$ を求めるにあたって, グラスウール繊維は熱流に対して直角に存在していると考え, 図3に示すような伝熱モデル<sup>(8)</sup>を用いた。ここで,  $L$ は伝熱モデル(立方体要素)の一辺の長さを,  $\ell$ は繊維を長方体で表わしたときの縦と横の長さを表わす。図において, 黒い部分が繊維を, 斜線部が水分を表わす。本研究では, 図の斜線部のように隣接する繊維との間に連続した水分層が形成される飽和度を熱的臨界飽和度 $\phi_c$ と定義した。 $\phi_c$ は次式より求められる。

$$\phi_c = \frac{2\sqrt{1-\varepsilon} \cdot (1-\sqrt{1-\varepsilon})}{\varepsilon} \quad (3)$$

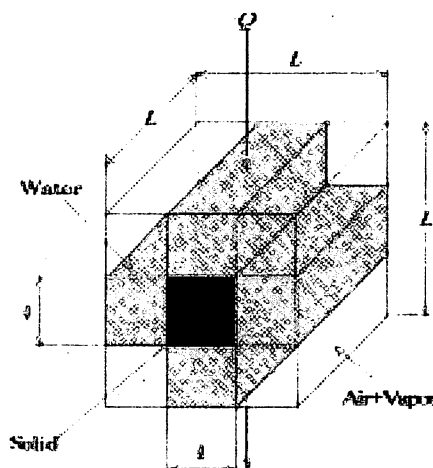


図3 伝熱モデル

ここで, 空隙率 $\varepsilon$ は次式で示される。

$$\varepsilon = 1 - \frac{\ell^2}{L^2} \quad (4)$$

有効熱伝導率を推定するにあたり, 熱的臨界飽和度 $\phi_c$ までは水蒸気の相当熱伝導率は $\phi/\phi_c$ に比例するものとして, 次式で表した。

$$\lambda'_d = \left(\frac{\phi}{\phi_c}\right) \lambda_d \quad (5)$$

図3の伝熱モデルを用いて有効熱伝導率を推定するにあたり,  $\phi < \phi_c$ の場合と $\phi > \phi_c$ の場合に分けて配列モデルを考えた。各モデルの奥行きは $L$ とする。図4に $\phi < \phi_c$ の場合の配列モデルを示す。 $\phi = 0 \sim \phi_c$ まではグラスウール繊維に対して水平方向, 垂直方向のそれぞれ $\ell$ に対して $a$ の割合で水分が増加するものとする。これより,  $\phi < \phi_c$ の場合の有効熱伝導率 $\lambda_e$ は次式で示される。

$$\lambda_e = \frac{a}{\frac{(1-\varepsilon)^{-\frac{1}{2}}-1}{\lambda_w} + \frac{1}{\lambda_g}} + \frac{1-a}{\frac{(1-\varepsilon)^{-\frac{1}{2}}-1}{\lambda_a + \lambda'_d} + \frac{1}{\lambda_g}} + \frac{(1-\varepsilon)^{-\frac{1}{2}}-1}{\frac{a}{\lambda_w} + \frac{(1-\varepsilon)^{-\frac{1}{2}}-1}{\lambda_a + \lambda'_d}} \quad (6)$$

ここで, パラメータ $a$ は $\ell$ に対する水分の割合で次のように表される。

$$a = \frac{\phi}{\phi_c}$$

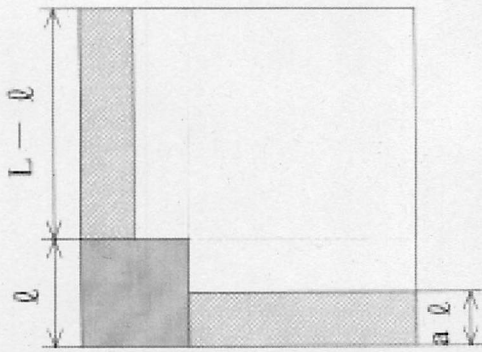


図4 配列モデルⅠ ( $\phi < \phi_c$ )

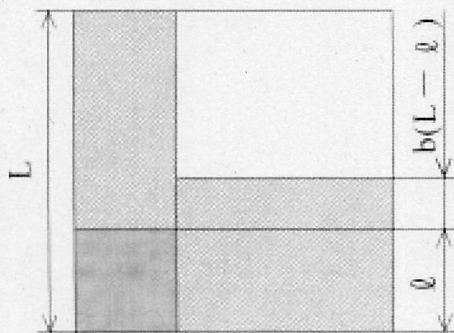


図5 配列モデルⅡ ( $\phi > \phi_c$ )

図5は $\phi > \phi_c$ の場合の配列モデルであり、連続した水分層が形成された $\phi_c$ 以降は水分が熱流に対して直列に増加していくものとする。これより、 $\phi > \phi_c$ の場合の有効熱伝導率 $\lambda_e$ は次式で示される。

$$\lambda_e = \frac{1}{\frac{(1-\varepsilon)^{-\frac{1}{2}} - 1}{\lambda_w} + \frac{1}{\lambda_g}} + \frac{(1-\varepsilon)^{-\frac{1}{2}} - 1}{\frac{1+b\{(1-\varepsilon)^{-\frac{1}{2}} - 1\}}{\lambda_w} + \frac{(1-b)\{(1-\varepsilon)^{-\frac{1}{2}} - 1\}}{\lambda_a + \lambda_d}} \quad (7)$$

ここで、パラメータ $b$ は $(L - \ell)$ に対する水分の割合で次のように表される。

$$b = \frac{\phi - \phi_c}{1 - \phi_c}$$

## 5. 実験結果及び考察

### 5.1 有効熱伝導率に及ぼす自然対流の影響

一般に、定常比較法で有効熱伝導率の測定を行う際には、有効熱伝導率に及ぼす対流の影響を抑える

ために、上側を加熱、下側を冷却することが望ましい。しかし、本研究ではグラスウールの有効熱伝導率に及ぼす水蒸気拡散の影響をより顕著に現すために、下側加熱、上側冷却で測定を行った。そこで、本実験条件における有効熱伝導率の測定に及ぼす自然対流の影響について検討した。水平多孔質層内の自然対流熱伝達について $\phi = 0, 100\%$ での測定条件から多孔質層のレイレー数 $Ra$ を求めた。下方から加熱された水平多孔質層の対流発生の限界レイレー数 $Ra_s$ は次のようになる。<sup>(10)</sup>

$$Ra_s = 4\pi^2 \quad (8)$$

多孔質層の厚さ $s$ を用いた多孔質層のレイレー数 $Ra$ は次式のように表される。

$$Ra = \frac{g\beta(T_h - T_c)Ks}{\nu\kappa} \quad (9)$$

ここで、 $K$ は透過率で繊維多孔質層の場合は次式のように示される。

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{122(1-\varepsilon)^3} \quad (10)$$

(9)、(10)式から、平均空隙率 $\varepsilon = 0.988$ 、温度差 $10^\circ\text{C}$ 、繊維直径 $d_p = 15\mu\text{m}$ として、 $\phi = 0, 100\%$ における温度 $20^\circ\text{C}$ の場合のレイレー数 $Ra$ を求めた。なお、空隙率が $\varepsilon = 0.988$ と非常に大きいことから、多孔質層の熱物性値には空隙に存在する流体の熱物性値を用いた。その結果、透過率 $K$ は $K = 1.2 \times 10^{-8} [\text{m}^2]$ となり、 $\phi = 0\%$ におけるレイレー数は $Ra = 0.523$ 、 $\phi = 100\%$ におけるレイレー数は $Ra = 27.3$ となった。

以上の結果より、 $\phi = 0, 100\%$ における $Ra$ 数は、ともに $Ra < Ra_s$ となっており、本実験条件において、有効熱伝導率に対する自然対流の影響はほとんど無視できるものと考えることができる。

### 5.2 乾燥したグラスウールの有効熱伝導率

図6に乾燥したグラスウールの温度と有効熱伝導率の関係を示す。これより、グラスウールの熱伝導率は温度の上昇につれて増加するということがわかる。また、その温度依存性は既存の結果<sup>(6)(9)</sup>と同様の傾向を示す。これは、グラスウールの空隙率 $\varepsilon = 0.966, 0.988$ とほとんど空隙で構成されているため、空気の熱伝導率の温度依存性を示したものだと思われる。

図7に乾燥したグラスウールのかさ密度 $\rho$ と有効熱伝導率 $\lambda_e$ の関係を示す。既存の結果は繊維径を

パラメータとしている。実験結果は既存の結果の範囲内にあることがわかる。また、グラスウールの熱伝導率はかさ密度がある限度に達するまでは、かさ密度の増加にしたがって有効熱伝導率が減少することがわかる。これは、かさ密度が小さい場合は極端に空隙率が大きくなるため、グラスウール内での輻射による熱移動が影響したものだと考えられる。また、かさ密度が等しい場合、繊維径が小さいほど熱伝導率は小さい値となっている。これは、かさ密度が等しい場合、繊維径が小さいほどグラスウール繊維はより乱雑に存在し、個々の空隙が小さくなるため、輻射の影響が抑えられて熱伝導率は小さくなるものと考えられる。

### 5.3 有効熱伝導率に及ぼす水分の影響

図8に水蒸気拡散の影響がほとんどないと考えられる $\theta = 10^\circ\text{C}$ の場合の有効熱伝導率 $\lambda_e$ と飽和度 $\phi$ の関係を示す。これより、水分のみが増加した場合の有効熱伝導率の変化がわかる。図より、 $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ では $\phi = 20\%$ 付近、 $\rho = 73.5\text{kg/m}^3$ では $\phi = 30\%$ 付近で $\lambda_e$ の増加の割合が変化することがわかる。この飽和度が隣接する繊維間と連続した水分層が形成される熱的臨界飽和度 $\phi_c$ と考えられる。そこで、図5の伝熱モデルを用いて、それぞれの平均空隙率から $\phi_c$ の推定値を求めた結果、 $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ では19.7%、 $\rho = 73.5\text{kg/m}^3$ では31.1%となり、実験結果と良く一致した。 $\phi > \phi_c$ では $\lambda_e$ の増加の割合はいったん緩やかになるが、 $\phi > 60\%$ では水分の増加にしたがって再び $\lambda_e$ の増加の割合は大きくなる。

### 5.4 有効熱伝導率に及ぼす水蒸気拡散の影響

図9にかさ密度 $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ の場合の温度 $\theta$ と有効熱伝導率 $\lambda_e$ の関係を示す。 $\phi = 5\%$ においては、温度が上昇しても $\lambda_e$ の変化は少ない。これは水分がグラスウール繊維に吸着された状態となっており、水蒸気拡散による熱移動が少ないためと考えられる。 $\phi = 10, 20\%$ になると、温度の上昇にともない $\lambda_e$ の増加の割合が大きくなることがわかる。特に $\phi = 20\%$ では、 $\theta = 60^\circ\text{C}$ において水蒸気の相当熱伝導率とほぼ同程度の値を示していることから、空隙内での伝熱はほとんど水蒸気拡散による熱移動が占めているものと考えられる。 $\phi > 20\%$ では温度の上昇にともなう $\lambda_e$ の増加の割合は徐々に小さくなっていき、空隙が全て水で満たされる $\phi = 100\%$ の場合は、水の熱伝導率と同様の温度依存性を示すことがわかる。

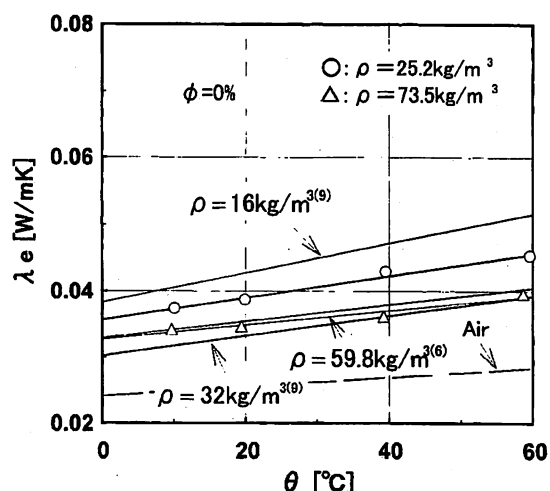


図6 乾燥したグラスウールの $\theta$ と $\lambda_e$ の関係

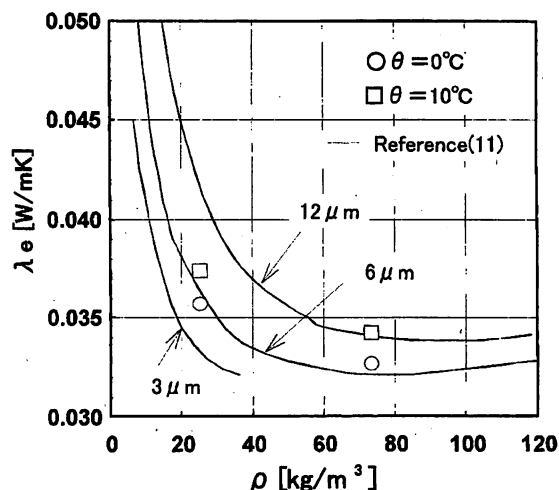


図7 乾燥したグラスウールの $\rho$ と $\lambda_e$ の関係

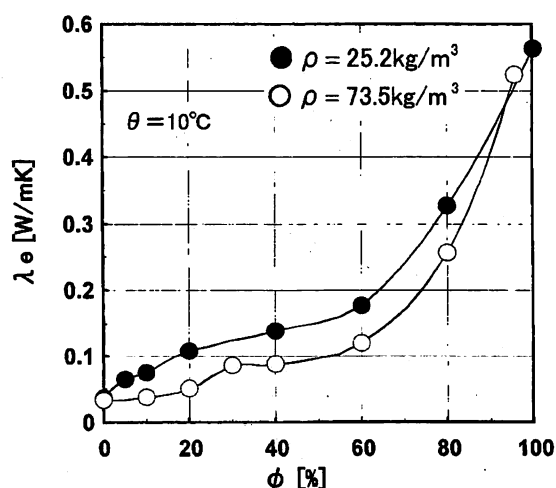


図8  $\lambda_e$ に及ぼす水分の影響

図10にかさ密度 $\rho = 73.5\text{kg/m}^3$ の場合の温度 $\theta$ と有効熱伝導率 $\lambda_e$ の関係を示す。 $\phi = 10\%$ では、温度が上昇しても $\lambda_e$ の変化はほとんど見られない。これは $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ で $\phi = 5\%$ の場合と同じ理由によるものと考えられる。すなわち、 $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ の場合と比較してかさ密度が増加し、グラスウール繊維が増加しているため、より多くの水分を吸着できたために $\phi = 10\%$ でこのような結果が得られたものと考えられる。 $\phi = 20\%$ においても $\phi = 10\%$ の場合と同様に、温度の上昇にともなった有効熱伝導率の増加割合に大きな変化はみられない。 $\phi = 30\%$ になると、温度上昇にともなった有効熱伝導率の増加の割合は急激に大きくなるのがわかる。これより、 $\phi > 30\%$ で空隙内では水蒸気拡散による熱移動が盛んに行われるものと考えられる。そして、 $\phi = 60\%$ までは $\phi = 30\%$ の場合と同様の温度依存性を示し、 $\phi > 80\%$ では $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ の場合と同様に、温度上昇にともなった有効熱伝導率の増加の割合は小さくなっていき、 $\phi = 95.6\%$ では水の熱伝導率と類似した温度依存性を示す。

### 5.5 有効熱伝導率の推定値と実験値の比較

図11に $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ における有効熱伝導率 $\lambda_e$ の図4、5に示す伝熱モデルによる推定値と実験値の比較を示す。図において、シンボル(○, □, △, ▽)は実験値、実線は推定値を示す。 $\lambda_g$ の値には $\lambda_g = 0.744[\text{W/mK}]$ を用いた<sup>(8)</sup>。実験結果は、 $\theta \leq 40^\circ\text{C}$ の場合では、 $\lambda_e$ は熱的臨界飽和度である $\phi = 20\%$ 付近まで増加し、 $\phi > 20\%$ では増加の割合は減少するが、 $\phi > 60\%$ で再び $\lambda_e$ の増加の割合が大きくなるのがわかる。図より、温度が高くなるほど $\phi_e$ まで $\lambda_e$ の増加の割合が大きくなるのがわかる。 $\theta = 60^\circ\text{C}$ においては $\phi > \phi_e$ では $\lambda_e \approx 0.6[\text{W/mK}]$ と一定値を示している。これは $\phi > \phi_e$ における空隙内では水蒸気拡散が十分に行われていること、そして水蒸気の相当熱伝導率 $\lambda_a$ が水の熱伝導率にほぼ等しいためだと考えられる。図14より、推定値は実験値と良く一致しており、 $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ の場合は全ての温度の場合について、伝熱モデルによる推定値は実験結果を良く表すことがわかる。

図12に $\rho = 73.5\text{kg/m}^3$ における有効熱伝導率 $\lambda_e$ の図4、5に示す伝熱モデルによる推定値と実験値の比較を示す。図において、シンボル(○, □, △, ▽)は実験値、実線は推定値を示す。実験結果は、 $\theta = 10^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}$ では $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ の場合と同様に、熱的臨界飽和度 $\phi_e$ まで $\lambda_e$ は増加し、 $\phi > \phi_e$ では $\lambda_e$ の増加の割合が減少して、 $\phi > 60\%$ で水

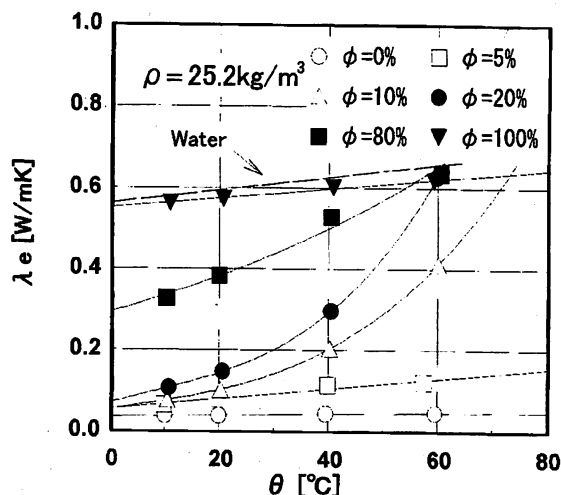


図9  $\lambda_e$ と $\theta$ の関係 ( $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ )

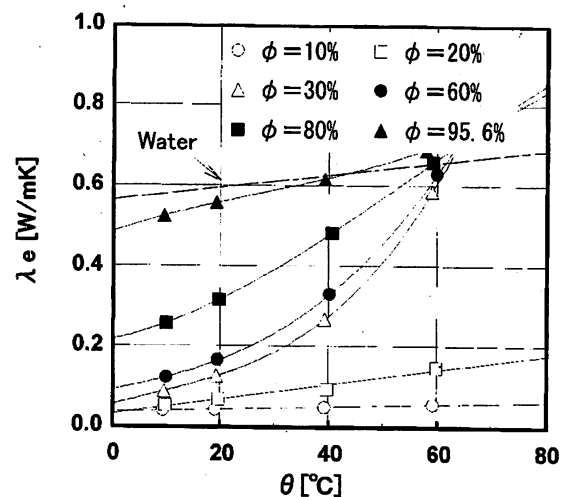


図10  $\lambda_e$ と $\theta$ の関係 ( $\rho = 73.5\text{kg/m}^3$ )

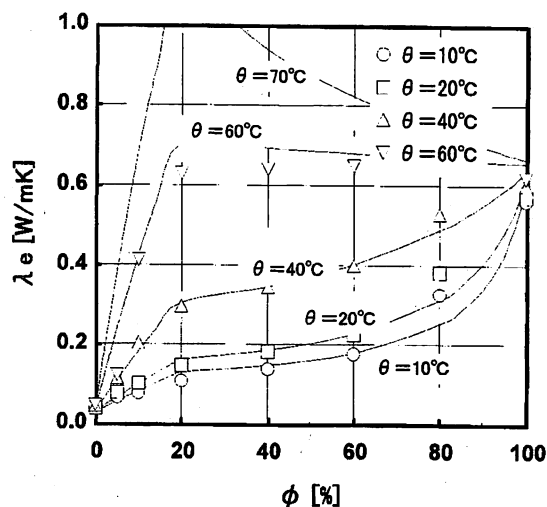


図11 伝熱モデルによる推定値と実験値の比較 ( $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ )

分の増加にともなって再び $\lambda_e$ の増加の割合が大きくなるという結果が得られた。 $\theta = 60^\circ\text{C}$ の場合は、 $\phi = 10\%$ 程度まで $\lambda_e$ の変化はほとんど見られず、 $\phi > 10\%$ になると熱的臨界飽和度である $\phi = 30\%$ まで急激に増加していることがわかる。 $\phi > \phi_c$ では、 $\theta = 60^\circ\text{C}$ の場合は、水蒸気の相当熱伝導率 $\lambda_a$ の影響のためほぼ一定の値を示していることがわかる。全ての温度の場合について、伝熱モデルによる推定値は、 $\phi > \phi_c$ で $\lambda_e$ の増加割合の傾向は良く表しているものの、実験結果に比べやや大きな値を示している。また、 $\phi < \phi_c$ の領域においても推定値は実験値よりも大きな値を示す結果となった。

これより、本研究で提示した伝熱モデルによる有効熱伝導率の推定を行うためには、Krischerモデルのようにパラメータを実験値から求めるという操作なしに、空隙率 $\varepsilon$ と構成物質の熱伝導率が既知ならば可能であることがわかる。

図13に、 $\lambda_e$ の実験値のかさ密度による比較を示す。 $\phi < \phi_c$ の領域では、 $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ の場合は飽和度 $\phi$ が5%から $\lambda_e$ は増加しているが、 $\rho = 73.5\text{kg/m}^3$ の場合は、 $\phi = 20\%$ 付近まで $\lambda_e$ の増加はほとんど見られず、これ以降で $\lambda_e$ の増加の割合が大きくなっていることがわかる。これは、 $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ と比較して $\rho = 73.5\text{kg/m}^3$ の場合の方がグラスウール繊維が多く充填されているため、低飽和度の領域では吸着水として存在できる水分量が多いために水蒸気拡散が起きにくくなったからだと考えられる。また全ての飽和度において、 $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ に比べ $\rho = 73.5\text{kg/m}^3$ の場合の有効熱伝導率 $\lambda_e$ が小さな値を示している。これは、グラスウール繊維の増加により、蒸気による熱移動が行われにくくなったためと考えられる。

図14に伝熱モデルを用いた $\lambda_e$ の推定値のかさ密度による比較を示す。これより、 $\phi > \phi_c$ で $\rho = 73.5\text{kg/m}^3$ の推定値の方が $\rho = 25.2\text{kg/m}^3$ の推定値よりも大きな値を示していることがわかり、実験値とは異なる結果が得られた。これは、推定値を求める際に水蒸気の相当熱伝導率 $\lambda_a$ の式において水蒸気拡散の抵抗係数を $1/\mu = 1$ としたことが原因であると考えられる。大気中で水蒸気拡散が行われる場合が $1/\mu = 1$ であるので、本実験のように密閉された容器内でグラスウールが充填された状態で水蒸気拡散が行われる場合は、グラスウール繊維の存在のため、水蒸気拡散による熱移動は大気中と比較して、少なくなると予想されるため、抵抗係数は $1/\mu < 1$ になると考えられる。さらに、グラスウール繊維が多く存在する $\rho = 73.5\text{kg/m}^3$ の場合の抵抗係数 $1/\mu$

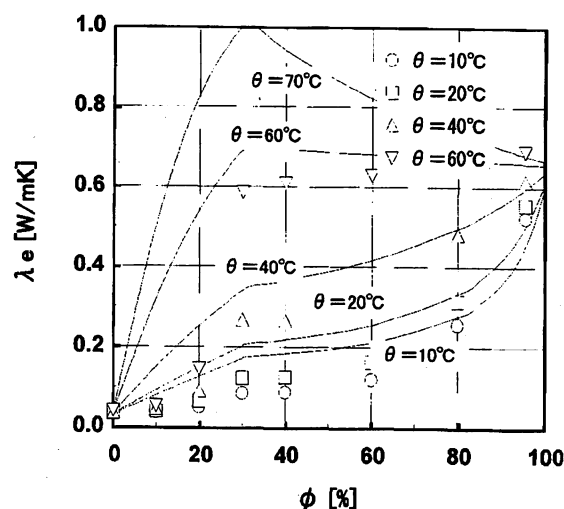


図12 伝熱モデルによる推定値と実験値の比較 ( $\rho = 73.5\text{kg/m}^3$ )

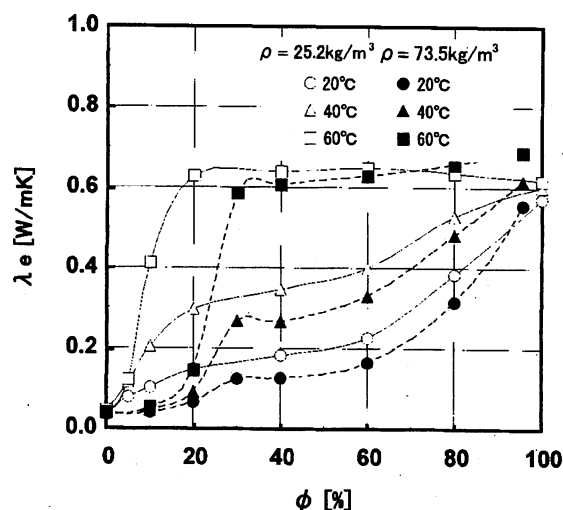


図13  $\lambda_e$ に及ぼすかさ密度の影響 (実験値)

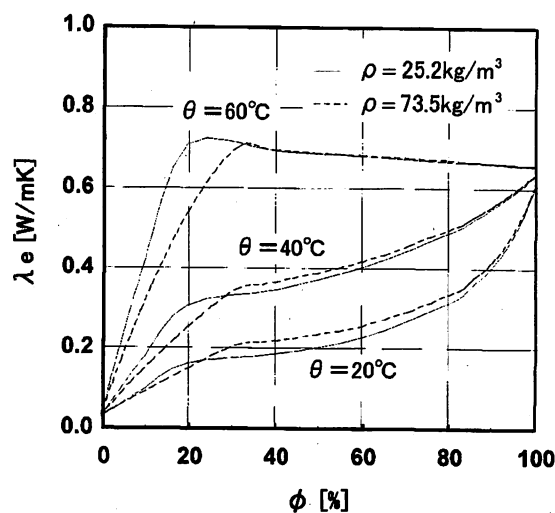


図14  $\lambda_e$ に及ぼすかさ密度の影響 (推定値)



が  $\rho = 25.2 \text{ kg/m}^3$  の場合に比べて小さくなると考えられる。

## 6. 結 言

本研究では、グラスウールの有効熱伝導率に及ぼすかさ密度、飽和度および水蒸気拡散の影響を調べ、熱的臨界飽和度の考えを取り入れた伝熱モデルを用いて有効熱伝導率の推定を行った。その結果、本実験範囲内で以下のことが明らかになった。

- (1) 温度が低く水蒸気拡散の影響が少ない場合、湿ったグラスウールの有効熱伝導率は飽和度の増加と共に増大する。その増加の割合は、熱的臨界飽和度で変化する。
- (2) 本研究で提示した伝熱モデルにより推定した熱的臨界飽和度は、 $\rho = 25.2 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho = 73.5 \text{ kg/m}^3$  のいずれの場合においても実験結果と良く一致した。
- (3) 本研究で提示した伝熱モデルによる有効熱伝導率  $\lambda_e$  の推定値は、 $\rho = 25.2 \text{ kg/m}^3$  の場合の実験結果を良く表す。しかし  $\rho = 73.5 \text{ kg/m}^3$  の場合、推定値は実験値よりも大きな値を示す。
- (4)  $\lambda_e$  の実験結果より、 $\rho = 25.2 \text{ kg/m}^3$  の場合の  $\lambda_e$  よりも  $\rho = 73.5 \text{ kg/m}^3$  の場合の  $\lambda_e$  が小さな値を示す。それに対し、 $\lambda_e$  の推定値は、 $\rho = 25.2 \text{ kg/m}^3$  の場合に比べ  $\rho = 73.5 \text{ kg/m}^3$  の場合の  $\lambda_e$  が大きな値を示す。したがって、 $\lambda_e$  の推定値を求めるには、グラスウール内での水蒸気拡散に対する抵抗係数を考慮する必要がある。

## 参考文献

- (1) 棚沢, 日本機械学会論文集, 1-3, pp. 217, (1935)
- (2) O.Krischer and H.Esdorn, VDI-Forsch., 22-1 (1956), 1.
- (3) A.H.Nissan, D.Hansen and J.L.Waiker, "Heat transfer in porous media containing a volatile liquid" Chem. Eng. Prog. Symp. series, 59-41, pp. 114-121, (1963)
- (4) 大谷, 山川, 遠藤, 「湿った粒子層の有効熱伝導度の測定」熱・温度測定と熱分析1972年版, 科学技術社, pp. 77-92, (1972)
- (5) 斉藤, 岡垣, 「湿った物質の伝熱特性」日本機械学会論文集, 62-484, pp. 742-747, (1959)
- (6) 竹越, 井村, 精広, 平沢, 「含水した多孔質断熱材の有効熱伝導率に関する研究」第1回熱物性シンポジウム, 1, pp. 133-137, (1980)
- (7) JIS A1412
- (8) 関 信弘 編集, 伝熱工学, 森北出版株式会社, (1997), pp. 230
- (9) 日本熱物性研究会 編集, 熱物性資料集断熱編, 養賢堂, (1983), pp. 33
- (10) 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂第4版, (1986), pp. 221
- (11) 田北, 熱物性, 「中・高温用無機質断熱材」日本熱物性学会, 6-2, pp. 118-127, (1992)
- (12) 杉山, 長坂共著, 断熱工学, 槇書店, (1971), pp. 142