

繊維質断熱材の有効熱伝導率に関する研究

大村, 高弘
ニチアス株式会社浜松研究所

坪井, 幹憲
ニチアス株式会社浜松研究所

小野寺, 正剛
ニチアス株式会社浜松研究所

富村, 寿夫
九州大学機能物質科学研究所

<https://doi.org/10.15017/7953>

出版情報：九州大学機能物質科学研究所報告. 16, pp.13-17, 2002. 九州大学機能物質科学研究所
バージョン：
権利関係：

繊維質断熱材の有効熱伝導率に関する研究

大村 高弘* ・ 坪井 幹憲*
小野 寺正剛* ・ 富村 寿夫

Study on Effective Thermal Conductivity of Fibrous Insulation

Takahiro OHMURA, Mikinori TSUBOI, Masatake ONODERA
and Toshio TOMIMURA

Concerning rock wool insulation, which is a typical example for fibrous insulations, an empirical equation which relates the bulk density ρ and the effective thermal conductivity λ is proposed. The equation is derived based on the thermal conductivity data of only four kinds of specimens with different bulk densities that are obtained by the Cyclic Heat Method under evacuated conditions. The predicted values are shown to agree well with the measured results obtained by the Guarded Hot Plate Method over a wide range of the bulk density ($\rho=30\sim 250\text{kg/m}^3$). Also, a fairly close agreement between the predicted and literature values was obtained. Furthermore, it is shown that the conventional approximation method, in which coefficients included in an empirical equation are simply determined by using measured values, can not predict the effective thermal conductivities within practical accuracy over a wider range of bulk densities.

1. 緒 言

繊維質断熱材は、建築材料、工業用炉材、電力産業、宇宙産業など広い分野で使用されている。その主な理由として、軽くて断熱性能が高く、また安価であるということがあげられる。特に、嵩密度を小さくして断熱性能を上げることが、価格を下げ、施工を容易にすることになるため、嵩密度 ρ と有効熱伝導率 λ の関係は、非常に重要なファクターとなっている。このため、これまでに数多くの嵩密度あるいは空隙率と有効熱伝導率の関係式が提案されている⁽¹⁻⁷⁾。しかし、これらの提案式では専ら繊維質の微細構造を組み込んだ厳密なモデル化が試みられており、現場レベルでは簡単に決定し難い係数が式中に存在したり、使用するには複雑すぎたりする場合が多い。

これに対し、嵩密度と有効熱伝導率との関係を表す最も簡単な経験式として、嵩密度の2次関数近似を利用した式がある。しかし、この場合、近似に用いた嵩密度の範囲内では当然のことながら良好な相関を得ることができるが、範囲外の領域では有効熱伝導率を的確に予測することは非常に難しい。

受理日 2002年9月30日

* ニチアス(株) 浜松研究所

その他の式として、一般に次の形式の経験式が従来から良く利用されている⁽⁸⁻¹⁰⁾。

$$\lambda = A\rho + \frac{B}{\rho} + C \quad (1)$$

ここで、式中の係数 A 、 B および定数 C は、広い嵩密度範囲において得られた多くの測定データから、最小自乗法などに基づいて決められている。しかし、現実的には、製造ロットごとに広い嵩密度範囲にわたって有効熱伝導率を測定することは、コストや時間的制約という点から不可能である。

本研究では、繊維質断熱材の代表例であるロックウール断熱材について、真空下での測定結果に基づき式(1)の定数を決定し、製造ロットなどに依存しない経験式を提案する。さらに、本提案式を用いることにより、広い範囲の嵩密度に対する有効熱伝導率を良好に予測できることを示す。

記 号

A	: 係数, 式(1)	$[\text{W}\cdot\text{m}^2/(\text{K}\cdot\text{kg})]$
B	: 係数, 式(1)	$[\text{W}\cdot\text{kg}/(\text{m}^4\cdot\text{K})]$
B_0	: 係数, 式(5')	$[\text{W}\cdot\text{kg}/(\text{m}^4\cdot\text{K}^4)]$
C	: 定数, 式(1)	$[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$
C_0	: 係数, 式(3)	$[-]$
d	: 試料の厚さ	$[\text{m}]$

g	: 重力加速度 (=9.8[m/s ²])	[m/s ²]
k	: 繊維径と空隙率の関数, 式(7)	[m ²]
L	: 平均自由行程	[m]
M	: 試料の質量	[kg]
Ra	: 修正レイリー数, 式(6)	[-]
Ra_{cr}	: 臨界修正レイリー数	[-]
S	: 試料の断面積	[m ²]
T	: 絶対温度	[K]
t	: 繊維径	[m]

Greek

β	: 体膨張係数	[1/K]
$\Delta \theta$: 温度差	[°C]
ε	: ふく射率	[-]
κ	: 熱拡散率	[m ² /s]
λ	: 有効熱伝導率, 等価熱伝導率	[W/(m·K)]
ν	: 動粘性係数	[m ² /s]
ρ	: 嵩密度	[kg/m ³]
σ	: ステファン・ボルツマン定数	[W/(m ² K ⁴)]
ϕ	: 空隙率	[-]
χ	: 平行平板間の距離	[m]

Subscripts

a	: 空気
e	: 真空条件下
g	: 気体
r	: ふく射
s	: 固体

2. 嵩密度と有効熱伝導率

繊維質断熱材の空隙率は非常に高いため、断熱材内部での熱の移動形態は、繊維を介した伝導伝熱、繊維質空間内でのふく射伝熱、空隙中の気体を介した伝導伝熱の3つの和で表されるとする熱流並列型のモデルが考えられる。その結果、繊維質断熱材の有効熱伝導率 λ は嵩密度 ρ の関数として式(1)のように表される。以下では、式(1)の右辺各項について再検討し、式中の各係数 A , B および定数 C の決定方法を述べる。

2.1 繊維を介した伝導伝熱

繊維質断熱材の繊維を介した熱移動を支配する因子として、繊維の本数や繊維同士の接触点の数がある。これらは嵩密度 ρ に比例すると考えられ、従って、繊維を介した伝導伝熱成分に関する等価熱伝導率 λ_s は、係数 A を用いて次式で表される。

$$\lambda_s = A\rho \quad (2)$$

2.2 繊維質空間内でのふく射伝熱

繊維質断熱材の空間内でのふく射伝熱成分に関する等価熱伝導率 λ_r は次式で与えられる⁽¹¹⁾。

$$\lambda_r = 4C_0 \chi \sigma \varepsilon T^3 \quad (3)$$

ここで、 C_0 は係数、 χ は平行平板間の距離、 σ はステファン・ボルツマン定数、 ε はふく射率、 T は絶対温度である。

一方、試料の質量を M 、厚さを d 、断面積を S とすると、

$$d = \frac{M}{S\rho} \quad (4)$$

となる。従って、試料の厚さ d と平行平板間の距離 χ を等しいとおくと、式(3)と式(4)より、

$$\lambda_r = 4C_0 \frac{M}{S\rho} \sigma \varepsilon T^3 = \frac{B}{\rho} = \frac{B_0}{\rho} T^3 \quad (5)$$

$$B_0 = 4C_0 \frac{M}{S} \sigma \varepsilon \quad (5')$$

を得る。

2.3 空隙中の気体を介した伝導伝熱

繊維質断熱材の空隙に存在する気体を介しての熱移動が高密度の影響を受ける場合として、二つのことが考えられる。一つは、嵩密度が変化することにより自然対流が発生する場合であり、もう一つは、空隙のサイズが気体の平均自由行程と同程度となり、気体の熱伝導率が空隙サイズで決まる場合である。

繊維質断熱材内での自然対流の発生は、次式の修正レイリー数 Ra で検討できる。

$$Ra = \frac{g\beta\Delta\theta d^3}{\nu\kappa} \frac{k}{d^2} \quad (6)$$

ここで、 g は重力加速度、 β は体膨張係数、 $\Delta\theta$ は温度差、 d は試験体の厚さ、 ν は動粘性係数、 κ は流体の温度伝導率である⁽¹²⁾。また、式(6)右辺の k は、 t を繊維径、 ϕ を空隙率とすると次式で与えられる⁽¹³⁾。

$$k = \frac{t^2 \phi^3}{122(1-\phi)^2} \quad (7)$$

以上から、 Ra が臨界修正レイリー数 Ra_{cr} (=48²)より大きくなると、繊維質断熱材内で自然対流が発生することになる。例えば、温度100°C、嵩密度 ρ が30kg/m³、真密度 ρ_t が2900kg/m³、繊維径 t が4×10⁻⁶m、厚さ d が0.04mの繊維質断熱材の場合、空気の体膨張係数 β を1/373K⁻¹、動粘性係数 ν_a を2.32×10⁻⁵m²/s、熱伝導率 λ_a を0.0314W/(m·K)、密度 ρ_a を0.95kg/m³、比熱 c_{pa} を1012J/(kg·K)⁽¹⁴⁾とし、また、熱伝導率を測定する際、試験体に30°C(±15°C)程度の温度差をつけることから、温度差 $\Delta\theta$ を30°Cとすると、式(6)、(7)より、

$$Ra = 0.053 \quad (8)$$

を得る。従って、 $Ra < Ra_{cr}$ (=39.5)となり、繊維質断熱材の内部には自然対流は発生しないことがわかる。

次に、嵩密度 ρ が変化して、空隙のサイズが気体の平均自由行程と同程度となり、気体の熱伝導率が空隙サイズで決まってしまう場合について検討する。まず、大気圧下における空気の平均自由行程 L は、

$$0^\circ\text{C} : L = 6.1 \times 10^{-8} \text{ m}$$

$$100^\circ\text{C} : L = 8.4 \times 10^{-8} \text{ m}$$

$$500^\circ\text{C} : L = 1.7 \times 10^{-7} \text{ m}$$

である⁽¹⁵⁾。これに対し、繊維質断熱材の空隙サイズは、嵩密度が30kg/m³の場合で約1.2×10⁻³m、また100kg/m³の場合で3.5×10⁻⁴mであり⁽¹⁶⁾、約10³~10⁵倍の差がある。従って、嵩密度 ρ が変化することにより、繊維質断熱材の空隙に存在す

る気体の熱伝導率が変化することは考えられない。

以上から、空隙中に存在する気体を介した伝導伝熱成分に関する等価熱伝導率 λ_g は、

$$\lambda_g = C = \lambda_a \quad (9)$$

とおくことができる。ここで、 λ_a は空気の熱伝導率である。

2.4 嵩密度と熱伝導率

以上の結果をまとめると、繊維質断熱材に関する嵩密度 ρ と有効熱伝導率 λ の関係は、式(2)、式(5)および式(9)から、

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_r + \lambda_g = A\rho + \frac{B_0}{\rho} T^3 + \lambda_a \quad (10)$$

で表される。

2.5 係数 A および B_0 の決定法

式(10)に含まれる A および B_0 は、それぞれ、繊維を介した伝導伝熱および繊維質空間内のふく射伝熱に関する係数である。理論的には、前節で検討したように、繊維質断熱材内部で自然対流が発生することはないと予測されるので、大気圧下での測定結果からそれらの係数が決定できると考えられる。しかし、本研究では、その確認の意味も含め、真空中において測定した有効熱伝導率に基づいて係数 A および B_0 を決定することにする。

すなわち、真空中での有効熱伝導率 λ_e は、繊維を介した伝導伝熱成分に関する等価熱伝導率 λ_s と繊維質断熱材の空間内におけるふく射伝熱成分に関する等価熱伝導率 λ_r の和となり、次式で与えられる。

$$\lambda_e = \lambda_s + \lambda_r \quad (11)$$

上式において λ_s は温度に依存しないと仮定すると、 λ_r は式(5)に示したように絶対温度 T の3乗に比例するので、真空中での有効熱伝導率 λ_e を絶対温度の3乗に対してプロットすると直線が得られる。そして、その直線の勾配が B_0/ρ となり、極限 $T \rightarrow 0$ での縦軸との交点すなわち切片が $\lambda_s (=A\rho)$ となる。

2.5.1 係数 A

一連の嵩密度 ρ に対して測定された、真空中での有効熱伝

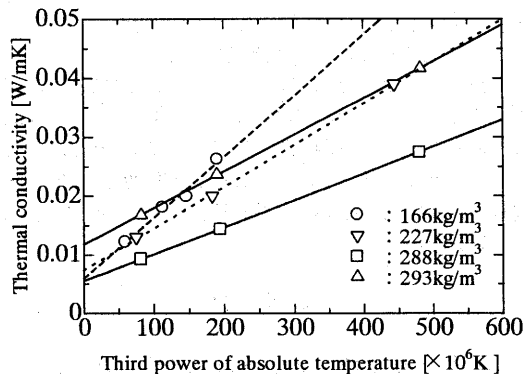


Fig. 1 Thermal conductivity of rock wool insulations in evacuated condition

導率 λ_e の $T \rightarrow 0$ での値を一次式近似し、その勾配 h を求めると、式(2)の関係から、

$$A = h \quad (12)$$

が得られる。

2.5.2 係数 B_0

同様に、各嵩密度 ρ に対し、 T^3 でプロットした真空中での有効熱伝導率 λ_e の勾配 m を求めると、式(5)の関係から、

$$m = \frac{B_0}{\rho} \quad (13)$$

が得られ、嵩密度の逆数 $1/\rho$ に対する m の勾配が B_0 となる。

3. 測定結果

繊維質断熱材としてロックウールを用い、一連の嵩密度 ρ に対し、真空中での有効熱伝導率 λ_e を周期加熱法⁽¹⁶⁾により測定した。その結果に基づき係数 A および B_0 を求め、別途、平板直接法により測定した結果と比較した。

3.1 真空中における測定結果

嵩密度 ρ が異なる4種類のロックウールに関し、真空中で測定した有効熱伝導率 λ_e を絶対温度 T の3乗に対してプロットした結果を Fig.1 に示す。各直線は測定結果の最小自乗法による線形近似結果であり、それぞれ、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \rho = 166 \text{ kg/m}^3: \lambda_e &= 1.090 \times 10^{-10} T^3 + 5.361 \times 10^{-3} \\ \rho = 227 \text{ kg/m}^3: \lambda_e &= 7.089 \times 10^{-11} T^3 + 7.398 \times 10^{-3} \\ \rho = 288 \text{ kg/m}^3: \lambda_e &= 4.572 \times 10^{-11} T^3 + 5.547 \times 10^{-3} \\ \rho = 293 \text{ kg/m}^3: \lambda_e &= 6.212 \times 10^{-11} T^3 + 1.179 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

この結果に基づき、Fig. 2 に切片 λ_s と嵩密度 ρ の関係を示し、また Fig. 3 に勾配 m と嵩密度の逆数 $1/\rho$ の関係を示す。Fig. 2 から得られる勾配 h と式(12)から、

$$A = h = 3.1 \times 10^{-5} \quad (14)$$

が求められる。また、Fig. 3 から得られる勾配 B_0 は、

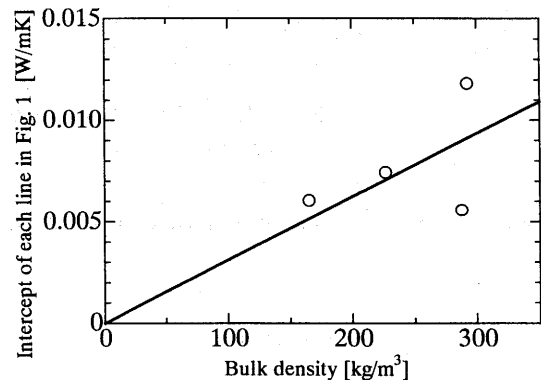


Fig. 2 Intercept of each line in Fig. 1 vs. bulk density

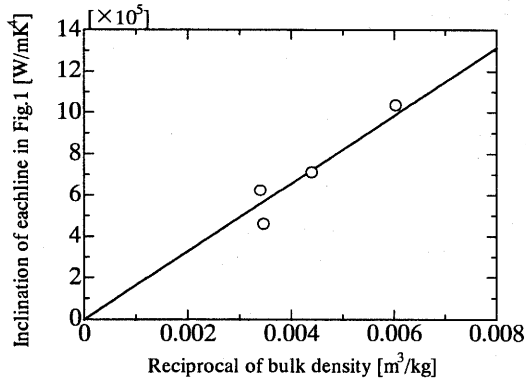


Fig. 3 Inclination of each line in Fig.1 vs. reciprocal of bulk density

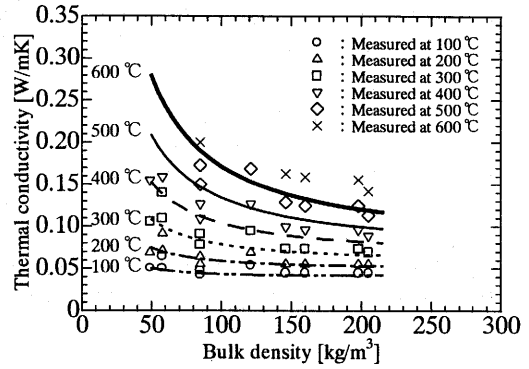


Fig. 6 Comparison of calculated lines with literature values

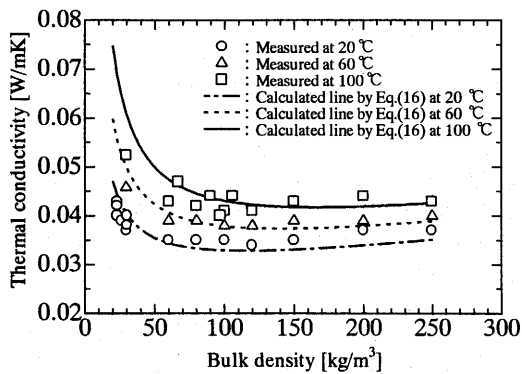


Fig.4 Thermal conductivity of rock wool insulations

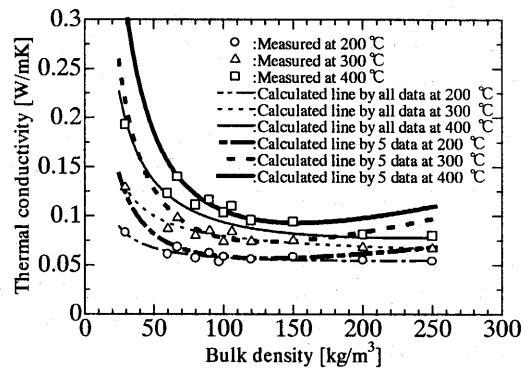


Fig. 7 Comparison of calculated lines obtained by using least squares method with measured values

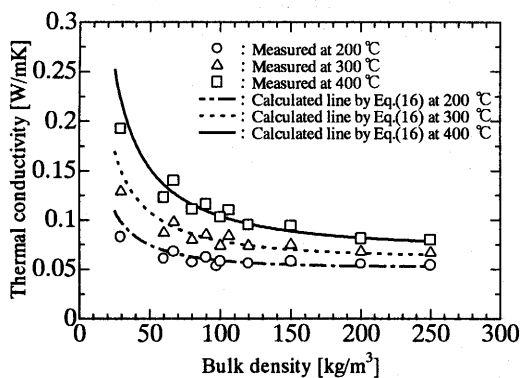


Fig.5 Thermal conductivity of rock wool insulations

$$\lambda = 3.1 \times 10^{-5} \rho + \frac{1.6 \times 10^{-8}}{\rho} T^3 + \lambda_a \quad (16)$$

3.2 平板直接法(GHP法)による測定結果

Fig. 4に、ロックウールの嵩密度 ρ が 25~250kg/m³ の範囲における、温度 100°C以下でのGHP法による測定結果を示す。ここで、記号○は 20°C、△は 60°C、□は 100°Cでの測定結果であり、一点鎖線、点線、実線は、それぞれ、20、60 および 100°Cでの、式(16)による計算結果である。

また、Fig. 5に温度 200°C以上でのGHP法による測定結果を示す。ここで、記号○は 200°C、△は 300°C、□は 400°Cでの測定結果であり、一点鎖線、点線、実線は、それぞれ、200、300 および 400°Cでの、式(16)による計算結果である。なお、いずれの場合も、各温度における空気熱伝導率 λ_a には文献値⁽¹⁶⁾を使用した。

4 考察

4.1 平板直接法(GHP法)による測定結果との比較

Figs.4,5に示したように、GHP法による測定結果と式(16)による計算結果はほぼ良好に一致した。温度 20°C場合に若干のずれが生じているものの、ここで注目すべき点は、嵩密度 ρ が 150kg/m³以下の範囲における測定結果と計算結果の一致

$$B_0 = 1.6 \times 10^{-8} \quad (15)$$

となる。

以上から、嵩密度 ρ と大気圧下での有効熱伝導率 λ の関係は次式で与えられる。

である。すなわち、式(16)は嵩密度 ρ が 160kg/m^3 以上の試料を用いた測定結果に基づいて得られているにもかかわらず、その嵩密度より低密度側での熱伝導率の急激な変化を良好に予想していることがわかる。

4.2 文献値との比較

Fig. 6 に、ロックウール断熱材の有効熱伝導率に関する文献値⁽¹⁷⁾と式(16)による計算結果を示す。ここで、記号○は 100°C 、△は 200°C 、□は 300°C 、▽は 400°C 、◇は 500°C 、×は 600°C での測定結果であり、二点鎖線、一点鎖線、点線、破線、実線、太い実線は、それぞれ、100, 200, 300, 400, 500 および 600°C における計算結果である。温度が 500°C および 600°C でずれが生じているものの、計算結果と測定結果はほぼ一致していると言える。

4.3 最小自乗法との比較

Fig. 7 に、従来の方法に従い、式(1)の係数 A, B および C を最小自乗法により決定した場合の計算結果例を示す。一点鎖線、点線および実線は、それぞれ、温度が 200, 300 および 400°C における全測定結果(GHP 法による測定)を用いて得られた近似曲線である。一方、対応する各太い曲線は、嵩密度 ρ が 67, 90, 100, 120 および 150kg/m^3 の場合の測定結果を用いて得られた近似曲線である。なお、記号○は 200°C 、△は 300°C 、□は 400°C での測定結果である。全測定結果を用いて最小自乗近似すると、当然のことながら、計算結果は全嵩密度範囲で測定値と良好に一致する。しかし、 $67\sim 150\text{kg/m}^3$ の嵩密度範囲における測定結果のみを用いた最小自乗近似では、低嵩密度および高嵩密度の領域で、測定値と遊離する結果となることがわかる。以上から、式(1)の係数 A, B および定数 C を単純に最小自乗法により決定する従来の近似法では、部分的な嵩密度範囲での測定値を用いて得られた相関式で、より広い嵩密度範囲における有効熱伝導率を実用的な精度で予測することは難しいと考えられる。

5. 結 言

繊維質断熱材の代表例であるロックウールに関して、嵩密度 ρ と有効熱伝導率 λ の関係式を提案した。嵩密度が異なるわずか4種類の試料を用い、周期加熱法による真空下での有効熱伝導率 λ_e の測定結果から関係式(16)を決定し、GHP 法による測定結果と広い嵩密度範囲($30\sim 250\text{kg/m}^3$)において良好な一致が得られることを示した。また、その式(16)による計算結果が文献値とも良好に一致することを示した。さらに、

式(1)の係数 A, B と定数 C を単純に最小自乗法により決定する従来の近似法では、部分的な嵩密度範囲での測定値を用いて得られた相関式で、より広い嵩密度範囲における有効熱伝導率を実用的な精度で予測することは難しいことを示した。

文 献

- (1) Kouichi KAMIUTO, Izumi KINOSHITA, Yasuyuki MIYOSHI, Shu HASEGAWA: Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, 19[6], pp.460-468 (June 1982).
- (2) K.KAMIUTO: Energy Vol.16, No.4, pp.701-706, 1991.
- (3) 今駒博信, 尚・善, 岡崎守男: 化学工学論文集: 第15巻 第1号 pp.44-51 (1989).
- (4) W. H. Drescher, J. N. Pike: METALS ENGINEERING QUARTERLY Vol.11 No.3 pp.32-35 Aug (1971).
- (5) M.Bomberg, S.Klarsfeld: J.THERMAL INSULATION Vol.6 (January 1983 p.156 - 173).
- (6) DAVIT A. STEWART, DANIEL B. LEISER: Ceramic Engineering Science Proceedings Vol.6 No.7-8(1) pp.769-792 (1985).
- (7) Kamran Daryabeigi: 37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit AIAA99-1044 January 11-14, 1999 / Reno, NV.
- (8) BRIAN RENNEX, THOMAS SOMERS: Journal of THERMAL INSULATION Vol.8 pp.175-197 (January 1985).
- (9) J.G.Symons, R.E.Clarke: J.V.Peirce: J.THERMAL INSUL. AND BLDG. ENVS. Volume 19 - July 1995 p.72 - 88
- (10) MANUELA CAMPANALE, LORENZO MORO: J.THERMAL INSUL. AND BLDG. ENVS. Volume 21 - October 1997 p.153 - 170.
- (11) Stanley D. Williams, Donald M.Curry: NASA Technical Paper 3276 (1993) p.3.
- (12) 日本熱物性学会編: 熱物性ハンドブック(1990) p.178.
- (13) 日本機械学会: 伝熱工学資料, 改訂第四版(1986), p.221.
- (14) 日本熱物性学会編: 熱物性ハンドブック(1990) p.59.
- (15) J.P.ホールマン; 伝熱工学 p.454 (ブレイン図書出版 1996).
- (16) T.Ohmura, M.Tsuboi: Netsu Bussei 13 [4] p.264-270 (1999).
- (17) T.Fujimoto, T.Katsuno, M.Uezono, K.Machida; The Ninth Japan Symposium on Thermophysical Properties pp.45-48, 1988.