



技術レポート

周期加熱法と非定常熱線法による 繊維質断熱材の面内方向熱伝導率の推定方法

浜松研究所 RD部門

大村 高弘

坪井 幹憲

九州大学教授 機能物質科学研究所

富村 寿夫

周期加熱法と非定常熱線法を併用して繊維質材料の面内方向の熱伝導率を推定する方法を提案した。異方性材料である繊維質断熱材に非定常熱線法を適用して得られる熱伝導率 λ_y は、この材料と同じ嵩密度と比熱を持つ等方性材料の熱伝導率と等価であるとする事により、熱伝導率 λ_y が異方性材料の面内方向の熱伝導率 λ_x と厚さ方向の熱伝導率 λ_z の相乗平均 $\lambda_y = \sqrt{\lambda_x \lambda_z}$ で表されることを示した。さらに、繊維質状のアルミナシリカブランケットの場合について、温度範囲 - 140 ~ 300 における熱伝導率 λ_y を非定常熱線法で、 λ_x 及び λ_z を周期加熱法で測定した。そして、相乗平均式から得られる簡単な関係式 $\lambda_x = \lambda_y^2 / \lambda_z$ を用いて推定した面内方向の熱伝導率 λ_x が測定結果と良好に一致することを確認した。

1. 緒言

断熱材は、熱伝導率や温度伝導率が空間的に一様な等方性材料と、方向性を有する異方性材料とに分類される。等方性材料にはポリウレタンフォームや珪酸カルシウム保温材などがあり、異方性材料には繊維質断熱材などがある。なかでも繊維質断熱材は、建築材料、工業用炉材、電力産業、宇宙産業など幅広い分野で使用されており、その使用形態は、断熱材を単に積層する場合や放熱面に対して断熱材を立てて施工する場合など様々である。とりわけ繊維層（フリ-ス）を積層した構造を持つ繊維質断熱材では、断熱材の厚さ方向と面内方向（繊維の配向方向）で熱伝導率が異なるため、施工方法によっては断熱性能が大きく変わってしまう場合がある。従って、異方性断熱材の熱伝導率として厚さ方向のみならず面内方向の値も把握しておく必要がある。しかし、一般的には厚さ方向の熱伝導率に基づいて断熱材の性能が評価されるため、面内方向の熱伝導率に関しては、必要な場合にのみ、短冊状に切り出した材料を90°回転させ繊維の配向方向を変えてその値を測定す

るといふ面倒な作業が行われているのが現状である。しかし、この方法では、試験体の製作が難しいばかりでなく測定に際しても種々の問題が発生する。例えば、断熱材を短冊状に切り出し90°回転させると、その高さが揃わず試験体の厚さが不均一となる。また、材料が繊維質構造であるため、繊維の配向方向を縦にすると剥離性が強くなり試験体としての形状を保持できなくなることもある。更に、90°回転後の試験体厚さの不均一性により嵩密度が変わったり、極端な変形が発生するなどの不具合が生じる場合もある。その上、切り出した短冊状断熱材の接合方法や接合面に残る隙間の解消法なども考えなければならない。

以上のような諸問題に対処するための方法の一つとして、本研究では周期加熱法と非定常熱線法を併用した異方性材料の面内方向の熱伝導率推定法を提案する。すなわち、このような材料に非定常熱線法を適用して得られる、厚さ方向と面内方向（ただし、面内は等方的）の異方性の影響が含まれる熱伝導率 λ_y と周期加熱法により得られる厚さ方向の熱伝導率 λ_z を用いて面内方向の熱伝導率 λ_x を推定する方法であり、本測定では周期加熱法と非

定常熱線法による2種類の測定を一つの計測システムで連続して行う。なお、類似の推定法は Jackson [1]によっても提案されている。しかし、彼らは非定常熱線法のみを用いているため、測定が比較的容易な厚さ方向の熱伝導率 k_z が得られない。そこで熱線を面に垂直方向、すなわち厚さ方向に貫通させて面内方向の熱伝導率 k_x, k_y を測定し、これとは別に測定した k_z とから厚さ方向の熱伝導率 k_z を推定する方法を提案している。その際、熱伝導率 k_x, k_y は k_x と k_y を長軸及び短軸とする楕円の関数 (χ は方位角) の $\chi = 0 \sim \pi/2$ での平均値で表されると仮定し、 k_z と k_x 及び k_y の間の関係式(後述の式(12))を導いている。厚さ方向の熱伝導率 k_z の推定結果は平板直接法による測定結果と比較的良好に一致している。しかし、提案されている関係式には第1種楕円積分が含まれているため計算が煩雑となり、簡単に使用できるものとは言い難い面がある。

2. 面内方向の熱伝導率の推定方法

Fig. 1 に示すように、異方性材料の厚さ方向を y 軸に、面内方向を x - z 平面にとり、熱線は z 軸上に置かれているとする。ここで、 $s = s(x, y, t)$ は時刻 $t = t$ における温度場の外縁である。面内方向は等方的であるとすると、この系に対する熱伝導方程式は次式で与えられる。

$$\frac{T}{t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 T は温度、 t は時間、 k_x, k_y は x -軸、 y -

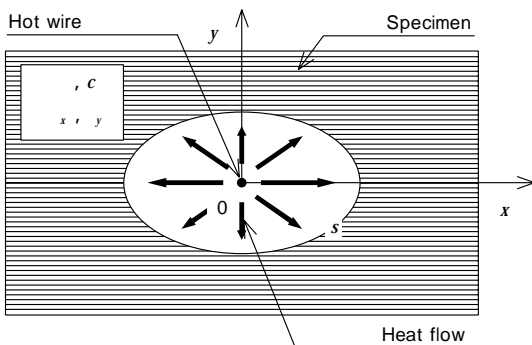


Fig.1 Anisotropic material

軸方向の温度伝導率である。 x -軸、 y -軸方向の熱伝導率を k_x, k_y 、嵩密度を ρ 、比熱を c とすると、式(1)の温度伝導率 k_x, k_y は次式で表される。

$$k_x = \frac{\rho c}{t} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, k_y = \frac{\rho c}{t} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \dots\dots\dots(2)$$

一方、このような異方性材料に非定常熱線法を適用して得られる熱伝導率 k_h は、Fig. 2 に示すように、この材料と同じ嵩密度 ρ と比熱 c を持つ仮想的な等方性材料の熱伝導率と等価であると考えられる。ここで $\tilde{s} = \tilde{s}(\tilde{x}, \tilde{y}, t)$ は、Fig. 1 の場合と同様、時刻 $t = t$ における温度場の外縁である。従って、この等方性材料の厚さ方向を \tilde{y} 軸に、面内方向を \tilde{x} - \tilde{z} 平面にとると、この系に対する熱伝導方程式は次式で与えられる。

$$\frac{T}{t} = k_h \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial \tilde{y}^2} \right) \dots\dots\dots(3)$$

ここで、式(3)右辺の、材料の異方性の影響が含まれる温度伝導率 k_h は次式で表される。

$$k_h = \frac{\rho c}{t} \dots\dots\dots(4)$$

式(1)と式(3)は、熱線の平均温度の経時変化に対しては同じ結果を与え、次式の座標変換で相互変換可能である。

$$\tilde{x} = \sqrt{\frac{k_x}{k_h}} x, \tilde{y} = \sqrt{\frac{k_y}{k_h}} y \dots\dots\dots(5)$$

次に、時間 $t = 0 \sim t$ の間に熱線から発生し材料

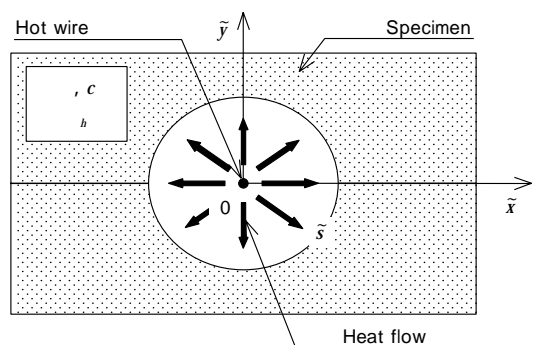


Fig.2 Isotropic material.

に蓄えられる熱量は、Fig. 1の異方性材料の場合とこれに対応するFig. 2の仮想的な等方性材料の場合で同じであるので、

$$\int_s \{ \kappa(x, y, t) - T \} dx dy = \int_s \{ \kappa(\tilde{x}, \tilde{y}, t) - T \} d\tilde{x} d\tilde{y} \dots\dots\dots(6)$$

となる。ここで、 T は時刻 $t = 0$ における初期温度である。式(6)の右辺に式(5)を代入し、 \tilde{x} - \tilde{y} 系を x - y 系に変換すると、

$$\int_s \{ \kappa(x, y, t) - T \} dx dy = \frac{h}{\sqrt{x y}} \int_s \{ \kappa(x, y, t) - T \} dx dy \dots\dots\dots(7)$$

となり、 h と x 及び y の間に次式の関係が得られる。

$$h = \sqrt{x y} \dots\dots\dots(8)$$

なお、上式(8)の関係は、時刻 $t = t$ における温度場の外縁内の面積はFig. 1の異方性材料の場合とFig. 2の仮想的な等方性材料の場合で同じ、すなわち、

$$\int_s dx dy = \int_s d\tilde{x} d\tilde{y} \dots\dots\dots(9)$$

であるとして、式(9)の右辺に式(5)を代入し \tilde{x} - \tilde{y} 系を x - y 系に変換することからも導くことができる。

式(8)に式(2)及び式(4)を代入し整理すると、熱伝導率 h と x 及び y の間に次式、

$$h = \sqrt{x y} \dots\dots\dots(10)$$

の関係が得られる。従って、異方性材料の面内方向の熱伝導率 x は、非定常熱線法で異方性の影響が含まれる熱伝導率 h を、また周期加熱法で厚さ方向の熱伝導率 y を測定すれば、次式を用いて推定することができる。

$$x = \frac{2}{y} \frac{h}{h} \dots\dots\dots(11)$$

3. 測定装置及び測定方法

式(11)の妥当性を実測値に基づいて検証するために、温度範囲 - 140 ~ 300 において、異方性材料の熱伝導率 h を非定常熱線法で、また面内方向と厚さ方向の熱伝導率 x と y を周期加熱法で測定した。100 未満の温度範囲では、周期加熱法、非定常熱線法及びホットディスク法の3種類の測定が一つの計測システムで可能な装置 [2] を用い、100 以上では、先に開発した周期加熱法による装置 [3] を改造し熱線を付け加えて測定を行った。

Fig. 3に3種類の測定が可能な装置 [2] の概要を示す。本装置は、保冷部、測定部、制御部から構成されている。試験体とその周辺部は液体窒素により冷却される。保冷部は、その液体窒素用タンクとそれを取り囲む断熱用ウレタンフォームから構成されている。測定部は、試験体が納められているアルミ製の試験体ボックスと雰囲気温度を形成するための円筒ヒータからなっている。試験体ボックス内には、温度波を発生させるための周期加熱用ヒータ(ファンクションジェネレータによ

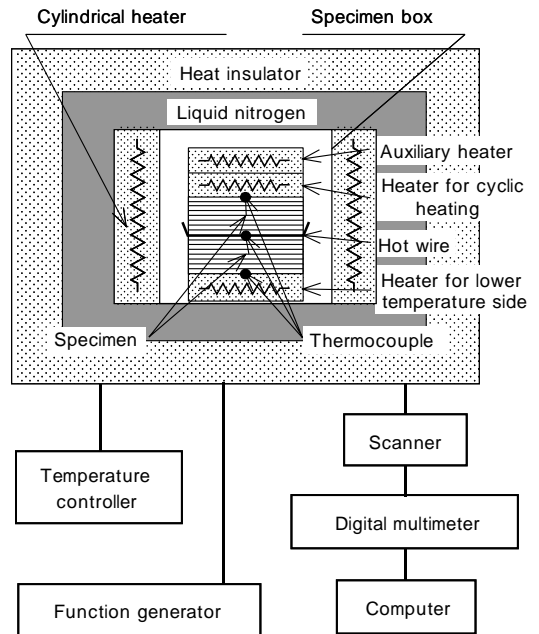


Fig.3 Schematic of measuring apparatus.

り任意波形を発生), その温度波を試験体側へ効率よく伝播させるための補助ヒータ, そして低温側ヒータがある。試験体 (150 × 100 × 20mm) は2枚重ねにして周期加熱用ヒータと低温側ヒータの間に置かれ, 試験体間には熱線 (ニクロム線 0.3mm, 長さ150mm, 抵抗値2.5 Ω) と熱電対 (Kタイプ, 0.1mm) が挟み込まれている。制御部は, 温度コントローラ, ファンクションジェネレータ, デジタルマルチメータ, パワーサプライ, コンピュータから構成されている。周期加熱法による測定では, 周期2時間, 電圧振幅1V (温度振幅4 °C程度) の温度波を発生させ, 非常熱線法では熱線にステップ的に0.5Vの電圧を10分間印加した。100 °C以上で使用した周期加熱法による装置 [3] の構成も Fig. 3 とほぼ同じであり, 試験体の間に上記と同じ熱線を付け加えて測定を行った。なお, 周期加熱法では試験体の比熱が必要となるが, 100 °C未満ではホットディスク法により, 100 °C以上では自作した高温試料投入型の装置 [3, 4] を用いて測定した。

4. 測定結果及び考察

まず, 等方性材料であるポリウレタンフォームと珪酸カルシウム保温材の熱伝導率を周期加熱法と非常熱線法により測定し, 得られた結果に両測定法に起因する差異が無いことを確認した。次に, 異方性材料としてアルミナシリカブランケットを用いた場合について, 面内方向と厚さ方向の熱伝導率 λ_x と λ_y を周期加熱法により測定した。更にこの材料に非常熱線法を適用し, 異方性の影響が含まれる熱伝導率 λ_z を測定した。そして, 面内方向の熱伝導率 λ_x に関して測定結果と式(11)に基づく推定結果とを比較し, 本推定法の妥当性を検討した。

4.1 等方性材料の熱伝導率

Fig. 4 にポリウレタンフォーム (高密度 $\rho = 74 \text{ kg/m}^3$) の熱伝導率測定結果を示す。ここで, 記号 ● と ▲ は, それぞれ, 周期加熱法と非常熱線法による結果である。実線は, 両者を比較し易くするために非常熱線法の測定結果を2次式で最小自乗近似した結果であり, 破線はその実線の $\pm 10\%$ の変化幅を示す。温度範囲 -180 ~ 0 °C に

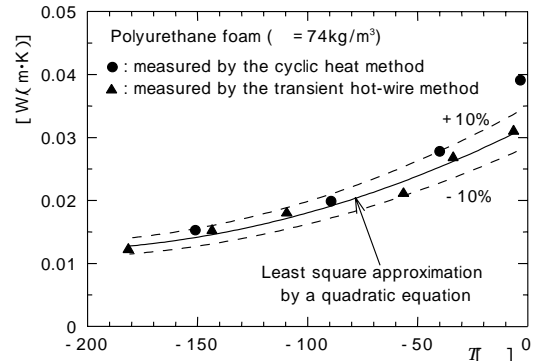


Fig.4 Thermal conductivity [Polyurethane foam ($\rho = 74 \text{ kg/m}^3$)].

おける測定結果は, $\pm 10\%$ 以内で互いに一致しているのがわかる。なお, 0 °C付近において周期加熱法による測定結果が大きく外れているのは, 試験体内に存在する水分の相変化によるものであると考えられる [2]。

Fig. 5 に珪酸カルシウム保温材 ($\rho = 123 \text{ kg/m}^3$) の測定結果を示す。ここで, 各記号と曲線の意味は, 実線が1次式近似であることを除き, Fig. 4の場合と同じである。温度範囲100 ~ 400 °Cにおける両者の測定結果も, 互いに $\pm 10\%$ 以内で一致しているのがわかる。

以上から, 本測定で使用した周期加熱法と非常熱線法に関し, 得られた結果に両測定法に起因する差異が無いことが確認できる。

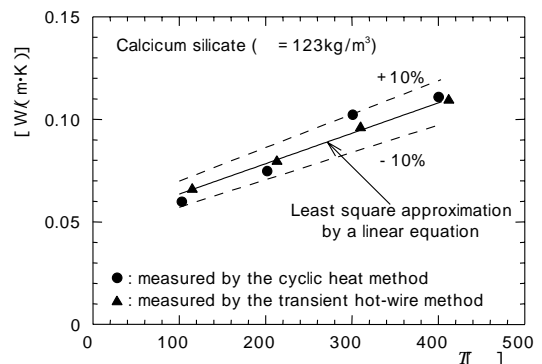


Fig.5 Thermal conductivity [Calcium silicate ($\rho = 123 \text{ kg/m}^3$)].

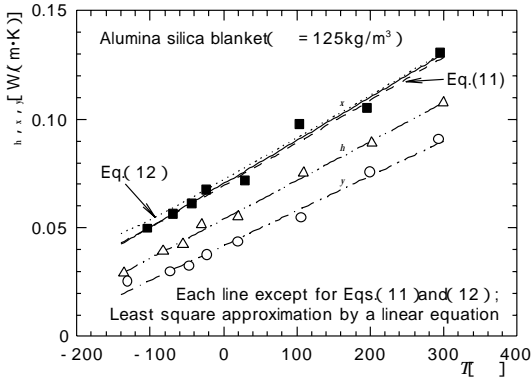


Fig.6 Thermal conductivity, and [Alumina silica blanket (=125kg/m³)].

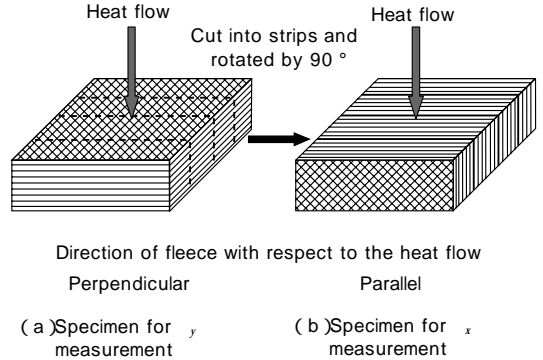


Fig.7 Schematic of fibrous heat insulator.

4.2 異方性材料の熱伝導率

Fig. 6 に異方性材料としてアルミナシリカブランケット (=125kg/m³) を用いた場合の熱伝導率測定結果を示す。ここで、記号 h_y は周期加熱法により測定したブランケットの厚さ方向の熱伝導率、 h_x は非定常熱線法により測定した異方性の影響が含まれる熱伝導率、 h_h は周期加熱法により測定したブランケットの面内方向の熱伝導率である。一方、実線、一点鎖線及び二点鎖線は、それぞれ、 h_x 、 h_y 及び h_h の測定結果を1次式で最小自乗近似した結果であり、破線と点線は、 h_h と h_y の近似結果を式(11)及び次式のJacksonら[1]の提案式(12) 原論文では式(12)の楕円積分の指数が1/2となっているが、正しくは - 1/2である] に代入して得られた h_x の推定結果である。

$$h_h = \frac{2 \cdot h_y}{\pi} \int_0^{\pi/2} (1 - m \sin^2 \theta)^{1/2} d\theta \dots\dots\dots(12)$$

ここで、

$$m = \frac{2 \cdot \frac{h_x}{h_y} - \frac{h_x}{h_y}}{\frac{h_x}{h_y}} \dots\dots\dots(13)$$

なお、周期加熱法による h_x の測定では、Fig. 7 に示すように、ブランケットを短冊状に切り出し90°回転させた後、再度張り合わせて試験体を製作した。その際、短冊状ブランケットの張り合わせには接着剤などを使用せず、試験体周囲を0.3mmの金属ワイヤで巻きつけて一体化した。

図からわかるように、式(11)による推定結果は測定結果の1次式近似値と±1.5%以内で一致しており、ここで提案した推定法は妥当であると言える。なお、Jacksonら[1]の提案式(12)による推定結果は測定結果の1次式近似値と12% (- 140) ~ 0.6% (300) 以内の範囲で一致している。しかし、式(12)には第1種楕円積分が含まれているため式(11)と比較して計算が煩雑となり、現場でも簡単に使用できるものとは言い難い面がある。

5. 結 言

異方性材料に非定常熱線法を適用して得られる熱伝導率 h_h は、面内方向の熱伝導率 h_x と厚さ方向の熱伝導率 h_y の相乗平均 $h_h = \sqrt{h_x \cdot h_y}$ で表される。この関係式及び周期加熱法と非定常熱線法による h_y と h_h の測定結果に基づき、異方性材料の面内方向の熱伝導率 h_x を簡便に推定する方法を提案した。さらに、異方性材料であるアルミナシリカブランケットを用いた測定結果との比較から、本推定法が妥当であることを示した。なお、本研究では異方性材料の厚さ方向の熱伝導率 h_y の測定に周期加熱法を用いたが、平板直接法などの他の方法を用いた場合でも同じように面内方向の熱伝導率 h_x を推定することができる。

【謝辞】

本研究をまとめるに際し、名古屋大学大学院工学研究科応用物理学専攻・八田一郎教授ならびに茨城工業高等専門学校機械工学科・根本栄治教授に有益なご教示を頂いた。ここに記して謝意を表

します。

[転載]

本レポートは、日本熱物性学会誌VOL.15, NO. 2 通巻51号(2001)において発表したものである。

引用文献

- 1) A. J. Jackson, J. Adams, R. C. Millar; "ASTM SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION 660" (ed. R. P. Tye) (1977), 154-171.
- 2) 大村 高弘, 坪井 幹憲; 第21回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (2000), 147-149.
- 3) 大村 高弘, 坪井 幹憲; 熱物性, 13-4 (1999), 264-270.
- 4) 大村 高弘, 坪井 幹憲; ニチアス技術時報, No.317, 1号, (2000), 2-8.

筆者紹介



大村 高弘

浜松研究所 RD部門(音・熱)
副主任研究員 チームリーダー



坪井 幹憲

浜松研究所 RD部門(音・熱)



富村 寿夫

九州大学助教授 機能物質科学研究所

