

〈技術レポート〉

断熱材の熱伝導率解析に関する研究

浜松研究所 研究開発部門 大村 高弘

1. はじめに

近年の断熱材の性能向上には目覚ましいものがある。特に、真空断熱材やナノ粒子を使った断熱材など、従来の断熱材の十倍程度の性能を持つものさえ商品化されている。そのため、今後新たに計画される建造物や保温保冷を必要とする設備などに、これらの新しい断熱材がより積極的に利用されることが期待されている。ところが、このような断熱材の高性能化の一方で、断熱材内部の微構造が断熱性能にどのような影響を与えるかについては、十分に把握できていない。断熱材を構成する材料、すなわち繊維や粒子、バインダーなど、さまざまな材料と熱伝導率との関係や、空隙のサイズあるいはかさ密度と熱伝導率の関係など、定性的な側面からは多くの考察がなされてはいるが、定量的な観点からの十分な検討がなされてきたとはいえない。

当社では、断熱材の熱伝導率の温度およびかさ密度依存性から、その熱伝導率を固体・ふく射・気体に寄与する伝熱に分離し、精度の高い熱伝導率推定式を考案した¹⁻³⁾。そして、その推定式を使って、断熱材の伝熱メカニズムを解明する試みを行ってきた。

本稿では、断熱材開発を支える基礎技術として断熱材の熱伝導率の解析事例を紹介する。

2. 熱伝導率推定式

断熱材の熱伝導率 λ と、そのかさ密度 ρ および絶対温度 T の推定式として、次式を提案する¹⁻³⁾。

この式は、断熱材の熱伝導率が固体、ふく射、気体のそれぞれが寄与する熱伝導率の和であることを仮定して導かれたものである。

$$\lambda = A\rho + \frac{B}{\rho} T^3 + \lambda_g \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 λ は熱伝導率 [W/(m・K)]、 ρ はかさ密度 [kg/m³]、 T は絶対温度 [K] であり、係数 A 、 B は実験結果から決定される。この推定式(1)の右辺第1項および第2項は、それぞれ固体とふく射が寄与する熱伝導率を表しており、第3項の λ_g は気体が寄与する熱伝導率を表している。

ここで、式(1)の右辺第1項の固体による熱伝導率が温度に依存しないとしたのは、断熱材は高い空隙率を持つため、固体による伝熱の占める割合が非常に小さいためである。また、固体による熱伝導率がかさ密度 ρ に比例するとしたのは、かさ密度が増加すれば、固体部分が増えると共に、固体同士の接点数も増加し、熱伝導率が大きくなるためである。

一方、かさ密度が増加すれば、ふく射を遮蔽する効果が増すため、ふく射による伝熱は減少する。そこで第2項のふく射による熱伝導率はかさ密度に反比例するとした。

気体が寄与する熱伝導率 λ_g は、次式のように近似した。

$$\lambda_g = (C \cdot T + D) \lambda_f \dots\dots\dots (2)$$

ここで、係数 C と D は実験結果から決定され、 λ_f は静止気体の熱伝導率 [W/(m・K)] を表している。

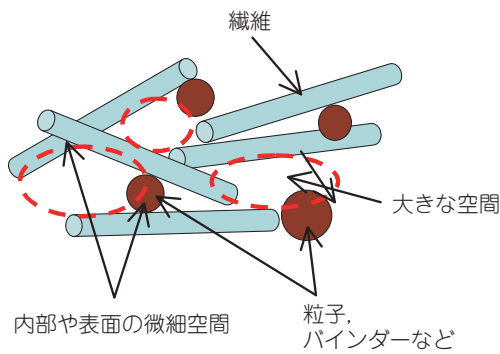


図1 断熱材内部の空隙(大きな空間と微細空間)のイメージ図

係数 C と D は断熱材内部の空隙に関係する。この断熱材内部の空隙は、図1に示すように次の二つに分類できる。一つは、断熱材のほとんどを占める非常に大きな空間であり、もう一つは固体同士の接触部分に生じる微細な空間、あるいは固体表面の凹凸によって作り出される空間や、固体内部の微細な空間である。大きな空間における伝熱は、主に気体の伝導伝熱に支配されており、その熱伝導率は静止気体の熱伝導率 λ_f と一致する。一方、微細空間に存在する気体は、固体の接触熱抵抗に影響を及ぼす。したがって、気体に寄与する熱伝導率 λ_g は、各種断熱材の空隙の様子を反映させた式にしなければならないため、常に同じ形の式で近似できるわけではない。式(2)は絶対温度 T の一次式で近似したが、後述するナノ多孔質断熱材では、ナノ粒子が作り出す特殊な空隙により気体の熱伝導率が温度によらず一定となってしまうため、 λ_g を定数としている^{4, 5)}。

式(2)では、断熱材中における気体の熱伝導率 λ_g と静止気体の熱伝導率 λ_f の比を、絶対温度 T の一次関数で近似している。したがって、もし断熱材中に微細空間が無く、大きな空間のみであれば、断熱材内部の熱伝導率は静止気体の熱伝導率と一致するため、 $\lambda_g/\lambda_f = CT + D = 1$ となり、 $C = 0$ 、 $D = 1$ となる。一方、微細空間が存在する場合は、その空間サイズや数、形状などに依存して温度の関数となるため、 $C \neq 0$ 、 $D \neq 1$ となる。

次に係数 A 、 B 、 C 、 D の決定方法について述べる。係数 A 、 B 、 C 、 D の決定には、真空下での熱伝導率測定が必要となる。真空下での熱伝導率を λ_v とすると、 λ_v は、式(1)から気体が寄与す

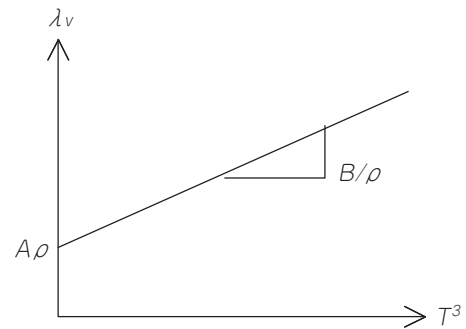


図2(a) 絶対温度 T の3乗と真空下の熱伝導率

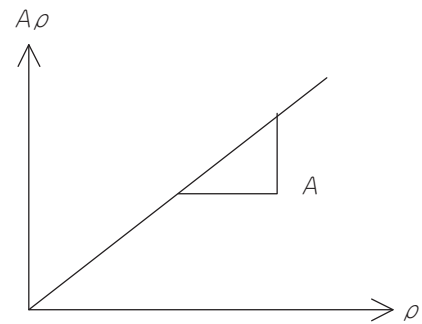


図2(b) かさ密度 ρ と切片 $A\rho$ の関係

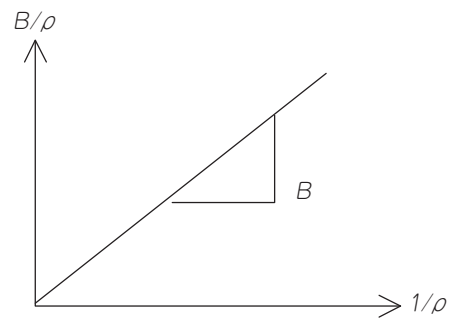


図2(c) かさ密度の逆数 $1/\rho$ と傾き B/ρ の関係

る熱伝導率を差し引くため、固体部分が寄与する熱伝導率とふく射が寄与する熱伝導率の和となる。したがって、

$$\lambda_v = A\rho + \frac{B}{\rho} T^3 \dots\dots\dots (3)$$

と表される。よって、図2(a)に示すように、 λ_v を絶対温度 T の3乗を横軸としてプロットすれば直線が得られ、その切片が $A\rho$ 、傾きがふく射成分 B/ρ となる。そして、さらに数種類のかさ密度 ρ の試験体に対して λ_v を測定し、得られた切片 $A\rho$ を、 ρ を横軸としてプロットすれば原

点を通る近似直線が得られ、その傾きが係数Aとなる(図2(b))。同様に、得られた傾き B/ρ を、 $1/\rho$ を横軸としてプロットすれば原点を通る近似直線が得られ、その傾きが係数Bとなる(図2(c))。

次いで係数C, Dを決定する。式(1), (2), (3)より、大気圧下の熱伝導率 λ から真空下の熱伝導率 λ_v を差し引き、静止空気の熱伝導率 λ_f で除することで、次式が得られる。

$$\frac{\lambda - \lambda_v}{\lambda_f} = C \cdot T + D \dots\dots\dots (4)$$

そこでTに対して $(\lambda - \lambda_v) / \lambda_f$ をプロットし、一次式に近似することで係数CとDが求まる。

実際の例として、ロックウール断熱材の熱伝導率を示す。

図3に、周期加熱法⁹⁾により真空下で測定した

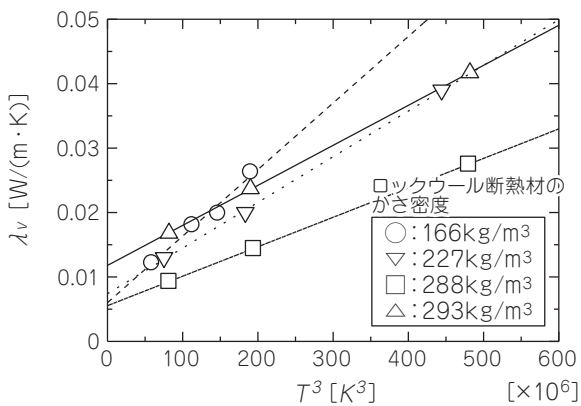


図3 絶対温度の3乗 T^3 に対する真空下の熱伝導率 λ_v

熱伝導率 λ を、絶対温度Tの3乗に対してプロットした結果を示す。使用したロックウール断熱材のかさ密度は、166, 227, 288, 293 kg/m^3 の4種類である。図3中の直線は、上記の結果から最小自乗法により求めたものである。

図4に、横軸にかさ密度 ρ 、縦軸に図3中の直線の切片 $A\rho$ をプロットした結果を示す。直線は、最小自乗法により求めた原点を通る直線である。この直線の傾きが、係数Aとなる。

図5に、かさ密度の逆数 $1/\rho$ に対する図3に示す直線の傾き B/ρ をプロットした結果を示す。直線は、最小自乗法により求めた原点を通る直線である。この直線の傾きが、係数Bとなる。

図6に、絶対温度Tに対する、式(4)に示す左辺 $(\lambda - \lambda_v) / \lambda_f$ の関係を示す。ここで、 λ_f は静止空気の熱伝導率である。直線は、最小自乗

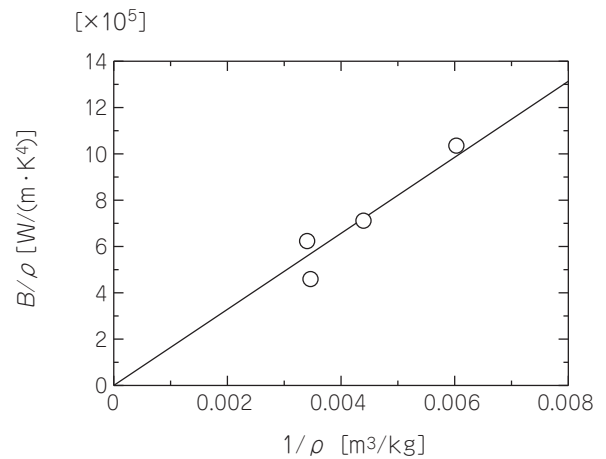


図5 かさ密度の逆数 $1/\rho$ に対するふく射に寄与する成分 B/ρ

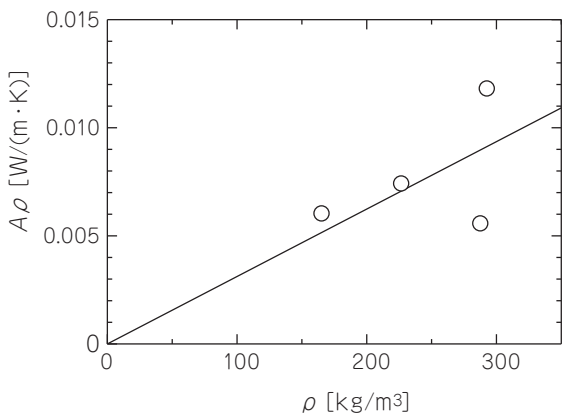


図4 かさ密度 ρ に対する固体に寄与する熱伝導率 $A\rho$

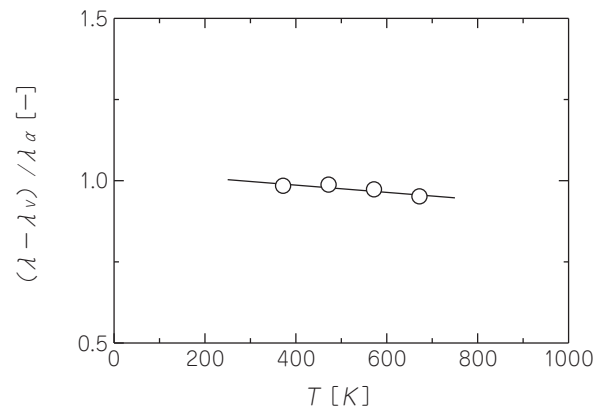


図6 絶対温度Tに対する、試験体内部における空気の熱伝導率と静止気体の熱伝導率の比

法により求めた直線であり、傾きが係数C、切片が係数Dである。

以上の結果から得られたロックウール断熱材の熱伝導率推定式は、

$$\lambda = 3.1 \times 10^{-5} \rho + \frac{1.6 \times 10^{-8}}{\rho} T^3 + (-1.1 \times 10^{-5} T + 1.0) \lambda_f \dots (5)$$

となる^{2, 3)}。

式(5)を使って熱伝導率を推定した結果と、GHP法により測定した結果との比較を図7と図8に示す。ただし、図中には係数を決定するために使った4つの試験体の熱伝導率は含まれていない。図7と8より、測定結果と推定結果が、広いかさ密度範囲で非常に良く一致しているのが分かる。特に、高かさ密度側(166~293kg/m³)の熱伝導率を使って作った推定式が、100kg/m³以下

の低かさ密度側の値を精度よく推定しているのが分かる。

この式が、かさ密度が低い側の熱伝導率を精度よく推定する理由は、測定結果に対する単なる近似式ではなく、大気圧下と真空下の熱伝導率を使って固体、ふく射、気体が寄与する熱伝導率に分離し、それぞれ独立な係数として求めているためである。それ故、例えば図4に示すように、固体が寄与する係数Aを求める際のAρに比較的大きなばらつきがあったとしても、図5に示すようにふく射が寄与する係数Bのばらつきが小さければ、ふく射伝熱の占める割合が大きいかさ密度が低い側の熱伝導率を精度よく推定できるのである。したがって、この推定式を利用すれば、測定した温度範囲や使用した試験体のかさ密度の範囲外における熱伝導率を外挿により推定することが可能である³⁾。

3. 熱伝導率から推定できること

3.1 ふく射の減衰係数

高温下で断熱材を使用する場合、熱ふく射を如何に減衰させるかが課題となる。その際、ふく射の減衰係数を知ることが重要となる。

空隙率が高い多孔質体におけるふく射の等価熱伝導率λ_rは、γを厚さに対する減衰係数、nを屈折率、σをステファン・ボルツマン定数とすると、

$$\lambda_r = \frac{16n^2\sigma}{3\gamma} T^3 \dots (6)$$

となる⁶⁾。従って、式(1)の第2項と式(6)より次式が求まる⁷⁾。

$$\frac{\gamma}{\rho} = \frac{16n^2\sigma}{3} \frac{1}{B} \dots (7)$$

式(7)の左辺のγ/ρは、単位かさ密度あたりの厚さに対する減衰係数であり、すなわち面重量当たりの減衰係数を表している。よって、式(7)を使うことで、材料自身の熱伝導率から、その減衰係数を求めることができる。

つまり、式(1)で定義した係数Bを使うと、断熱材のかさ密度とは無関係に、材料内部におけるふく射の散乱や吸収の様子を表現できるが、減

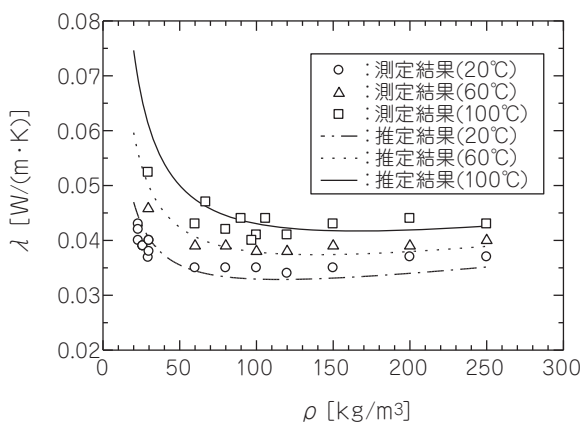


図7 ロックウール断熱材の熱伝導率 (測定結果と推定結果の比較)^{2, 3)}

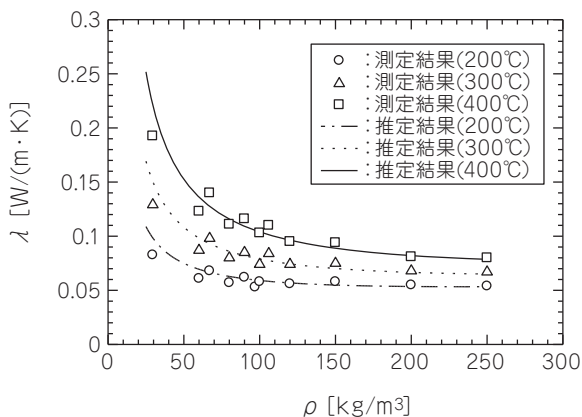


図8 ロックウール断熱材の熱伝導率 (測定結果と推定結果の比較)^{2, 3)}

表1 断熱材の減衰係数 γ / ρ ⁵⁾

| | 推定式 | 透過率測定装置 |
|---------------------|-----|-------------------------------|
| ロックウール断熱材 | 18 | 24 |
| アルミナ-シリカ系 繊維質断熱材 | 23 | 14, 40 14~19 ⁸⁾ |
| グラスウール断熱材 | 23 | 8.7~11 ⁸⁾ |

(単位: m²/kg)

表2 熱伝導率推定式の係数

| | A | B | C | D |
|---------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----|
| ロックウール 断熱材 | 3.6×10^{-5} | 1.7×10^{-8} | -1.1×10^{-5} | 1.0 |
| アルミナ系 断熱材 | 6.9×10^{-5} | 1.5×10^{-8} | -2.1×10^{-5} | 2.0 |
| ナノ多孔質 断熱材 | 5.1×10^{-5} | 4.7×10^{-9} | 9.3×10^{-3} | |

衰係数 γ / ρ を評価することで、かさ密度や重量の増減効果、あるいは試料厚さの違いによる効果が検討できる。

一般的に、ふく射の減衰係数を測定するには、透過率測定装置が用いられる。そこで、各種断熱材に対して、式(7)を使って得られた減衰係数と、当社で開発した透過率測定装置で測定した結果を表1に示す^{7, 8)}。両者には多少のずれはあるが、比較的良好に一致しているのが分かる。

3.2 断熱材の伝熱解析

表2に、三種類の断熱材(ロックウール断熱材、アルミナ系断熱材、ナノ多孔質断熱材)に対する推定式(1)の係数A, B, C, Dを示す。ただし、ナノ多孔質断熱材では、空気分子がその平均自由行程よりも小さな空間に閉じ込められるため、気体に寄与する熱伝導率は一定となり、推定式は次式のようになる。

$$\lambda = 5.1 \times 10^{-5} \rho + \frac{4.7 \times 10^{-9}}{\rho} T^3 + 9.3 \times 10^{-3} \dots\dots (8)$$

表2のCとDの欄には式(8)の右辺第3項を記した。

これらの推定式から得られる熱伝導率を図9に示すとともに、以下に、これらの断熱材の固体、ふく射、気体の伝熱に関する考察を述べる。

(1) 固体伝熱

固体伝熱は、試験体を構成する素材(繊維や粒

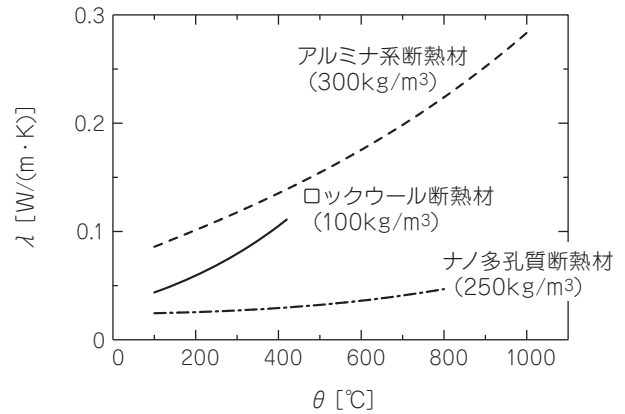


図9 各種断熱材の熱伝導率(推定式)

子など)の熱伝導率や素材同士の接触熱抵抗、さらには素材の凝集状態や大きさなど、固体に関連するさまざまな要因を反映している。

表2に示すように、アルミナ系断熱材の係数Aが、最も大きな値を示している。したがって、係数Aの比較から、他の二つの断熱材に比べてアルミナ系断熱材を構成している素材の熱伝導率が高い、あるいは素材同士の接触が強固で接触熱抵抗が小さいなどと推測できる。

また、図9に示すようにナノ多孔質断熱材の熱伝導率は非常に低いにもかかわらず、その係数Aは、ロックウール断熱材のそれよりも高く、むしろアルミナ系断熱材の係数に近い値となった。したがって、ナノ多孔質断熱材を構成する固体の熱伝導率や接触熱抵抗は、他の断熱材のそれらとほとんど差は無く、低熱伝導率化にはほとんど寄与していないと推定できる。

(2) ふく射伝熱

表2に示すように、ロックウール断熱材とアルミナ系断熱材の係数Bは、ほぼ同じ値であった。したがって、見た目も硬さも全く違う断熱材であるにもかかわらず、内部を伝播するふく射の減衰効果は、ほぼ同等であると言える。

一方、ナノ多孔質断熱材の係数Bは、他の二つに比べて約1/3程度になっている。これは、断熱材中に含まれているふく射散乱材(SiC粒子)が、ふく射の散乱効果に大きく寄与しているためである。

(3) 気体伝熱

表2に示すように、ロックウール断熱材とアルミ

ナ系断熱材については、係数 C は D に対して 10^{-5} 倍程度であり、温度の対する依存性の項は非常に小さく、ほとんど無視できることがわかる。したがって、断熱材内部の空気と静止空気の熱伝導率比に温度依存性はほとんど無く、よって、大きな空間はもとより、微細空間における空気の熱伝導率の温度依存性も、静止空気のそれとほぼ同じであることが分かる。

係数 D は、ロックウール断熱材とアルミナ系断熱材では2倍ほどの差がある。ロックウール断熱材の係数 D は1であるから、気体が寄与する伝熱は、大きな空間内にある静止空気の熱伝導率に依存していると推測できる。一方、アルミナ系断熱材では係数 D が2であり、静止気体による伝導伝熱とは別に、熱伝導に寄与している要因があることが予想される。その一つとして、固体同士の接触部分やバインダーに存在する微細空間内の空気の影響が考えられる。図10 (a) と (b) に、そ

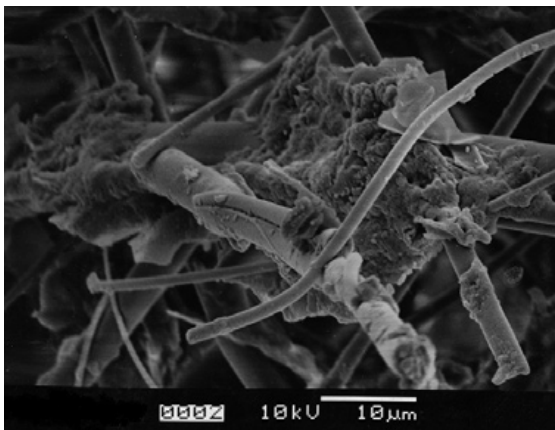


図10 (a) アルミナ系断熱材の電子顕微鏡写真

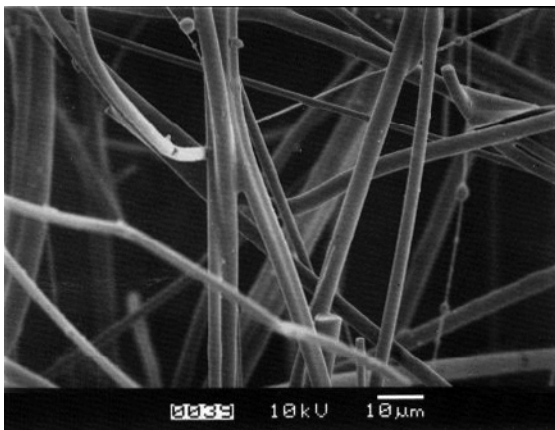


図10 (b) ロックウール断熱材の電子顕微鏡写真

れぞれアルミナ系断熱材とロックウール断熱材における固体同士の接触部分の写真を示す。アルミナ系断熱材では、繊維同士の間には存在するバインダーが多孔質体であるため、気体が内部に入り込める微細な空間が多数存在する。それ故、繊維-バインダー間の熱伝導に気体が大きく影響しているものと考えられる。一方、ロックウール断熱材では、バインダーが、繊維を全面的に被覆しており、繊維同士の接触部分に空気がほとんど関与していない状態と考えられる。

このように、固体同士の接触状況やバインダーの様子、その他、接触熱抵抗に関する事象を係数 D を使って推測することができる。

一方、ナノ多孔質断熱材の場合は、気体分子が、その平均自由行程よりも小さな空間に閉じ込められるため、気体が寄与する熱伝導率は一定となり、温度に依存せずに低熱伝導率を保つことができる。

また、逆に未知の材料に対して、その内部の気体の熱伝導率がもし一定であれば、気体はその平均自由行程よりも小さな空間に閉じ込められている可能性があるかと推定できる。

3.3 固体、ふく射、気体の伝熱成分比

推定式 (1) を使って、断熱材の熱伝導率を固体、ふく射、気体に寄与する要素に分離できることから、各要素が全体の熱伝導率に対してどの程度の割合を占めているかを簡単に推定できる。ロックウール断熱材の例を以下に示す。

ロックウール断熱材の推定式は、式 (5) に示す通りである。仮に、かさ密度 ρ が 100kg/m^3 、温度が 100°C 、 400°C で計算すると、表3のようになる。

100°C の場合に比べて、 400°C ではふく射伝熱の比率がかなり高くなっているのが分かる。

このように、熱伝導率の推定式を使った解析方法を述べたが、この解析では、先にも触れたように、熱伝導率は、固体、ふく射、気体のそれぞれが寄与する熱伝導率の和であることを仮定してい

表3 ロックウール断熱材の各要素の割合 [%]

| | 固体伝熱 | ふく射伝熱 | 気体伝熱 |
|-------|------|-------|------|
| 100°C | 7 | 20 | 73 |
| 400°C | 3 | 48 | 49 |

(かさ密度: 100kg/m^3 , 湿度: 100%)

る。すなわち，固体，ふく射，気体を並列とした等価回路が想定できる断熱材を対象としている。そのため，例えば，閉気孔で構成される断熱材（ウレタンや発泡スチロールなど）は固体，ふく射，気体それぞれ単独に熱が伝わると仮定できず，むしろ並列と直列を組み合わせたような等価回路となるため，推定式（1）は，適用できない。したがって，断熱材の構造の推定や，熱伝導率の予測には，断熱材の内部構造に十分な注意を払って，推定式を使用する必要がある。

4. おわりに

ここで示した推定式（式（1））は，各物質に対する固有の式ではなく，断熱材の構造体としての式である。そのため，同じ種類の材料を使った断熱材だとしても，繊維径や粒子径，バインダーなどが違う場合や，配合比率が異なる場合など，それぞれの場合に応じて式中の係数が変わる。それ故，この係数を比較することで，その断熱材における固体，ふく射，気体の熱伝導率に与える影響を定量的に知ることが可能となる。

熱伝導率測定に基づく断熱材の伝熱解析は，断熱材の性能向上の一助となる。当社では，時代のニーズに応える断熱材の開発に，熱伝導率の測定・解析技術を活用していく所存である。

参考文献

- 1) 大村：断熱材の熱伝導率測定，伝熱 48 [205] 20-25 (2009)。
- 2) 大村，坪井，小野寺，富村：繊維質断熱材の有効熱伝導率に関する研究，九州大学機能物質科学研究書報告，16，13-17 (2002)。

- 3) T. Ohmura, J. Nyumura, K. Tsukahara: Study on Improvement of Reliability for Effective Thermal Conductivity of Thermal Insulation with Low Bulk Density, *Proceedings of the 8th Asian Thermophysical Properties Conference (ATPC)*, Paper No.038 (2007).
- 4) 大村，阿部，伊藤，佐藤，阿部，内藤：ナノ粒子／繊維複合粒子による多孔質材料の作製とその特性評価，粉体工学会誌 Vol. 46, No.6, 57-62 (2009)。
- 5) 大村，伊藤，阿部，阿部，内藤：ナノ粒子／繊維複合粒子による高温断熱材の作製とその特性評価，粉体工学会誌 Vol. 46, No.11, 4-10 (2009)。
- 6) 円山，光エネルギー工学，養賢堂，第1版 (2004)，122。
- 7) T. Ohmura, M. Onodera, and M. Naito: Estimation Method for Attenuation Coefficient of Thermal Radiation in Thermal Insulators by Using Thermal Conductivity, *Jpn. J. Appl. Phys.* 50 (2011) 11RE03.
- 8) H. Reiss, *Springer Tracts in Modern Physics*, Vol. 113, P.147 (1988)。
- 9) T. Ohmura: Study on Comparison of Thermal Conductivities of Thermal Insulations Using Different Measurement Methods in Wide Range of Temperature, *Proceedings of the 7th ASME-JSME Thermal Engineering Conference and the ASME Summer Heat Transfer Conference (7th AJTEC-SHTC07 Symposium)*, Paper No. HT2007-32746 (2007)。

筆者紹介



大村高弘

浜松研究所 研究開発部門