



# 入門講座

伝熱工学-10

## 断熱材の熱伝導率評価方法（最新の研究から）

Thermal Conductivity Evaluation Method for  
Thermal Insulations from the Latest Research

大村高弘  
Takahiro Ohmura

和歌山工業高等専門学校  
知能機械工学科  
教授

### 1 はじめに

近年、地球温暖化が原因と思われる災害が世界中で頻発するようになった。その地球温暖化の原因として、フロンガス放出やエネルギーの大量消費、自然破壊など、様々な要因が挙げられるため、ほぼ全ての産業で対策を立てなければ、この大きな問題を解決できない状況である。断熱材はその中でも省エネの要になる材料と位置づけられ、従来の繊維質断熱材や発泡系断熱材などに加えて、ナノ粒子断熱材<sup>16)</sup>や真空断熱材<sup>7,8)</sup>など、従来の性能をはるかに凌駕する断熱材が開発されるようになってきた。それに伴い、断熱材の評価技術が注目されるようになり、従来の測定精度を向上させる試みや新しい測定方法の開発などが盛んにおこなわれている。さらに、高温領域での測定精度向上を目的に、周期加熱法をISOの国際標準測定法<sup>9)</sup>に提案する等、従来の保護熱板法<sup>10)</sup>との測定比較による精度向上を試みるようになりつつある。ここでは、その代表的な測定方法と新しい測定方法について簡単に解説する。

### 2 保護熱板法 (GHP法)

保護熱板法 (GHP法)<sup>10)</sup>は、ISOやJIS, ASTMなど、従来から世界中で広く利用されている測定方法である。熱流計法などに使用される標準板の熱伝導率についても、この方法で標準値となる値を決定されることが多く、非常に重要な測定方法と位置付けられている。

#### 2.1 測定原理

試験体内に一次元定常熱流を実現させ、その時の熱流 $Q$ 、熱流面積 $S$ 、試験体厚さ $d$ 、試験体の両面間の温度差 $(\theta_h - \theta_c)$ から、熱伝導率 $\lambda$ を次式より求める方法である<sup>10)</sup>。

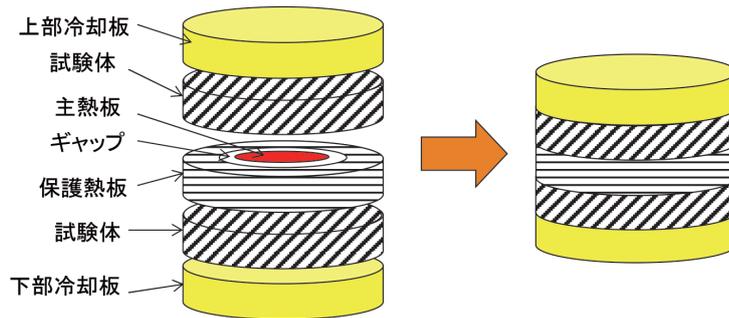
$$Q = \lambda \frac{\theta_h - \theta_c}{d} S \dots\dots\dots (1)$$

図1 (a) ~ (c) に装置の模式図を示す。図1 (a) は3次元模式図で、分かり易くするためにヒータ板、試験体等の間をあけて描いた。測定には試験体一枚方式と二枚方式があり、一枚方式では試験体を一枚用意し、加熱板（主熱板+保護熱板）を中心にして、試験体を設置する側の反対に熱が流れないように、断熱材と熱板を設ける方式である（図1 (b)）。上部加熱板の温度は、主熱板のそれと同じになるように温度制御されている。一方、二枚方式では、同質同厚の試験体を二枚使用し、加熱板を試験体で挟んだ状態にする。すると、主熱板で発生した熱流は2分されてそれぞれの試験体を通過し、冷却熱板に吸収される（図1 (c)）。このとき、上部冷却熱板と下部冷却熱板は同じ温度に制御されている。

GHP法による測定装置は、主熱板とその周囲側面を取り囲む保護熱板、及び冷却熱板からなり、主熱板と保護熱板の間には数mm幅のギャップが存在し、両者を熱的に絶縁している。保護熱板は、主熱板と同じ温度になるように温度制御されるため、主熱板で発生した熱は、加熱板と冷却熱板によってはさまれた板状試験体の内部を、定常状態の一次元熱流として流れる。

#### 2.2 測定例

アルミナ繊維質断熱材の測定例を図2に示す。GHP法との比較として、後述する周期加熱法の測定結果も併せて示した。ここで使用した装置は、GHP法と周期加熱法の両方を使用できるものであり、全く同じ試験体（120×120×厚さ約20mm、かさ密度205 kg/m<sup>3</sup>）が、同じ装置内で測定できるようになっている。大気圧下と真空下（0.1Pa）の測定を100～1300℃の温度範囲で実施した。図中の実線は、GHP法による測定結果を使って最小自乗法により求めた近似二次曲線であ



(a) 二枚法の場合の模式図

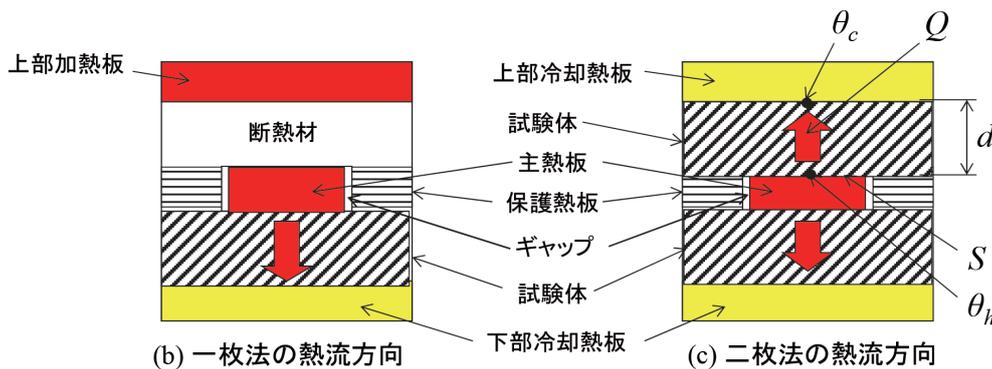


図1 保護熱板法 (GHP 法) の測定原理<sup>11)</sup> (Online version in color.)

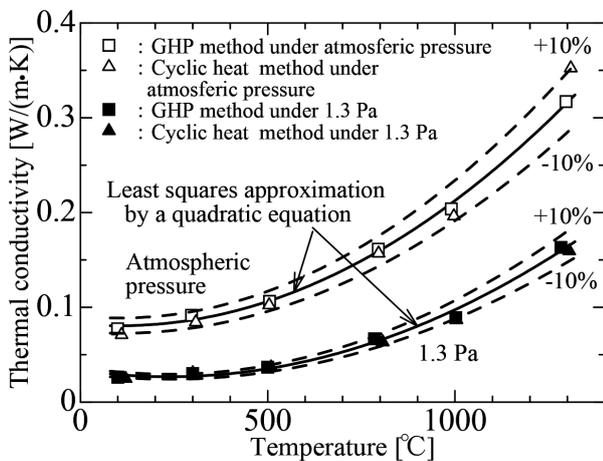


図2 アルミナ繊維質断熱材の熱伝導率<sup>12)</sup>

り、破線は実線に対する $\pm 10\%$ を示している。両雰囲気下において、GHP法と周期加熱法による測定結果が、 $\pm 10\%$ 以内で一致することが分かる<sup>12)</sup>。

### 3 周期加熱法

周期加熱法<sup>9,13)</sup>は、非定常法による熱拡散率測定の一手法である。この測定では、平板状の試験体の片面を三角関数的に加熱することより周期的な温度変化(温度波)を発生させ、

それによって熱が試験体内部に向かって一次的に伝播していくと仮定している。そして、周期的に加熱される試験体表面側と内部の任意の位置における両温度波の位相差あるいは振幅の減衰比から熱拡散率を求める方法である。

断熱材の熱伝導率測定では、定常法が用いられるのが一般的である。その理由としては、非定常法では熱源近傍の温度上昇から熱拡散率を求めるため、断熱材のような90%近くが空隙では、加熱される近傍付近の構造に大きく影響され、断熱材全体での熱拡散を把握できないと考えられるからである。ところが、この周期加熱法では、周期が約1時間と非常に長い時間をかけて温度を変化させるため、断熱材内部の様子を、空隙を含めて連続体あるいは均質な材料と見なすことができ、それ故、断熱材の熱拡散率測定に利用できるのである。

#### 3.1 測定原理

周期加熱法の模式図を図3に示す。図に示すように、 $x$ 軸方向への1次元熱流を仮定し、その $x$ 軸を試験体の厚さ方向にとり、試験体の厚さを $d$ 、原点に試験体の放熱面、 $x = d$ に試験体加熱面があるとする。図4に、試験体の加熱面および内部の温度変化の様子を模式的に示す。図中の $\eta$ は任意の位相である。

原点に位置する放熱面の温度 $\theta_2$ は常に一定に保持され、 $x = d$ で温度は $\theta_0 \sin(\omega t + \eta)$ で周期的に変化していると仮

定して、一次元熱伝導方程式を解くと、次式が導き出される。

$$A_m = \frac{|\sinh kx(1+i)|}{|\sinh kd(1+i)|} = \left( \frac{\cosh 2kx - \cos 2kx}{\cosh 2kd - \cos 2kd} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\phi = \arg \left\{ \frac{\sinh kx(1+i)}{\sinh kd(1+i)} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$k = \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} = \sqrt{\frac{\pi}{f \cdot \kappa}} \quad (\text{ただし、}\omega = 2\pi/f) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $k$ は熱拡散率に寄与する係数、 $\kappa$ は熱拡散率、 $\omega$ は角振動数、 $f (= 2\pi/\omega)$ は周期、 $A_m$ は周期加熱面（図3では $x=d$ ）と試験体内部の任意の位置における温度波の振幅比、 $\phi$ は位相差、 $i$ は虚数単位である。また、 $x$ は試験体内部の厚さ方向（ $x$ 軸）の任意の位置であり、図3では $x=x_m$ である。

周期加熱法で熱伝導率を求めるには二つの方法がある。一つは、加熱面と試験体内部の両温度波の振幅比から熱伝導率を求める方法である。測定で得られた振幅比 $A_m$ を式(2)に代入することで $k$ を求め、その値を式(4)に代入して熱伝導率 $\kappa$ を求める方法である（振幅法）。もう一つは位相差を使った方法であり、測定で得られた位相差 $\phi$ を式(3)に代入して $k$ を求め、その値と式(4)から熱伝導率 $\kappa$ を求めるものである（位相差法）。いずれの方法でも、熱伝導率 $\lambda$ は別途測定した密度 $\rho$ と比熱 $c$ を以下の式に代入することで得られる。

$$\lambda = \rho c \kappa \dots\dots\dots (5)$$

3.2 使用上の注意

試験体の側面からの熱流入があるような場合は、位相差法による測定を推奨する。振幅法では、熱流入出により温度波の振幅測定に大きな誤差が生じてしまう可能性があり、その誤差の大きさは、試験体の種類や大きさなどに影響される。一方、位相差法では温度波の時間的ずれのみを利用するため、熱損失による影響はほとんど受けず、高温下のような過酷な温度場における環境や、面内方向への熱伝導率が高く

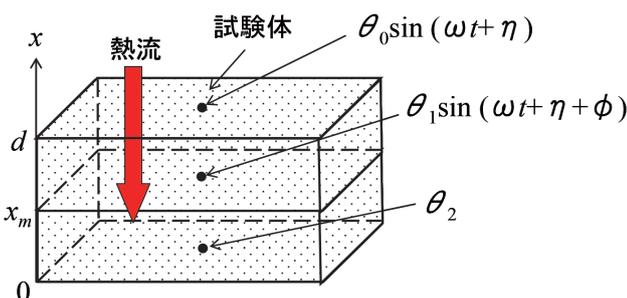


図3 周期加熱法の模式図<sup>11)</sup> (Online version in color.)

て側面からの熱損失が大きな試験体などに対しても、比較的精度良く測定可能である。因みにISO 21901は位相差法による測定である。

しかしながら、位相差法であっても試験体を取り巻く周囲雰囲気温度が周期的に変化してしまう場合は要注意である。特に、試験体を取り巻く雰囲気温度を制御するための電気炉がある場合は、その電気炉温度制御による周期的な温度変化が試験体内を伝播する温度波と重なってしまい、大きな誤差になってしまうことがある。出来るだけ一定電圧かそれに近い状態で雰囲気用電気炉の温度を制御することを推奨する。

3.3 測定例

測定例については、図2と図7、図8に、それぞれGHP法および次節で示す熱流分離法、GHP法の誤差低減法の測定結果と併せて示す。いずれも、他の測定方法と±10%以内で一致していることが分かる。

4 最近の興味深い研究

4.1 熱流分離法

この測定方法は、後述するGHP法の誤差低減方法から着想を得たものである。ただし、GHP法のような複雑な構造の装置を必要とせず、平板ヒータの上に試験体を重ねて設置するだけで、断熱材の熱伝導率を簡単に測定できる方法である。

(1) 測定原理

本測定方法は、図5に示すように、試験体をヒータで上下から挟み、定常状態において試験体の厚さ方向の熱伝導率を推定する方法である。ヒータからの熱流は、試験体の厚さ方向を含めあらゆる方向に向かっており、その熱流に対してフーリエの式を当てはめて熱伝導率を求めると大きな誤差を含んでしまう。そこで、試験体に流入する熱流を厚さ方向とそれ以外に分離することで、試験体の厚さ方向の熱伝導率を

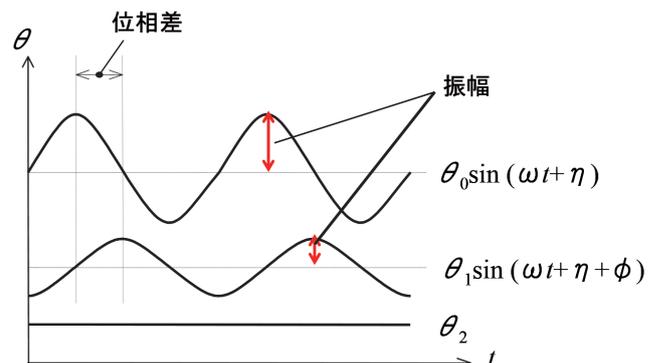


図4 周期加熱法の位相差と振幅<sup>11)</sup> (Online version in color.)

推定している<sup>14-16)</sup>。

図5に示すヒータ1とヒータ2の温度が等しくなる ( $\theta_{h1} = \theta_{h2}$ ) ようにヒータ2の温度を制御すると、ヒータ1で発生した熱流  $Q$  がおよそ全て試験体内に流入すると仮定できる。さらに、その熱流  $Q$  が、試験体の厚さ方向 (低温側へ向かう方向) に流れる熱流  $Q_t$  と、試験体内部で厚さ方向以外の方向へ放散する熱流  $Q_{loss}$  の和になっていると仮定すれば、

$$Q = Q_t + Q_{loss} \dots\dots\dots (6)$$

と表すことができる。このとき、試験体の厚さ方向における熱伝導率を  $\lambda_t$ 、厚さを  $d$ 、熱流通過面積を  $S$ 、試験体の主熱板側の表面中央の温度を  $\theta_{h1}$ 、冷却熱板側の表面中央の温度を  $\theta_{h3}$  とすると、

$$Q_t = \lambda_t \frac{\theta_{h1} - \theta_{h3}}{d} S \dots\dots\dots (7)$$

となる。また、面内方向への温度勾配を  $\Delta\theta_{loss}$ 、 $H$  を係数として、試験体側面側への熱流  $Q_{loss}$  を、

$$Q_{loss} = H(\Delta\theta_{loss})^2 \dots\dots\dots (8)$$

と置く。ここで、 $\Delta\theta_{loss}$  は加熱面の中央温度  $\theta_h$  と加熱面温度分布関数の積分平均温度の差である。

一方、熱流  $Q$  に対してフーリエの式と同じ式を当てはめ、 $\lambda_c$  を係数として次式のように置く。

$$Q = \lambda_c \frac{\theta_{h1} - \theta_{h3}}{d} S \dots\dots\dots (9)$$

式 (7)~(9) を式 (6) に代入すると、

$$\lambda_c = \lambda_t + \frac{H \cdot d (\Delta\theta_{loss})^2}{S \Delta\theta} \dots\dots\dots (10)$$

が得られる。ここで、

$$\Delta\theta = \theta_{h1} - \theta_{h3} \dots\dots\dots (11)$$

と置いた。さらに、

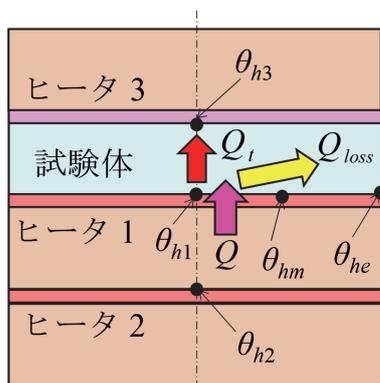


図5 測定原理の概念図<sup>16)</sup> (Online version in color.)

$$\alpha = \frac{H \cdot d}{S} \dots\dots (12), \Theta = \frac{\Delta\theta_{loss}}{\Delta\theta} \dots\dots (13), x = \Delta\theta \cdot \Theta^2 \dots\dots (14)$$

とおくと、式 (10) は、

$$\lambda_c = \lambda_t + \alpha x \dots\dots\dots (15)$$

となる。よって、横軸を  $x$ 、縦軸を測定した係数  $\lambda_c$  にとって、 $x$  に対する  $\lambda_c$  をプロットすれば直線関係が得られ、その直線の切片が試験体の厚さ方向の熱伝導率  $\lambda_t$  となる。 $x$  を変化させるには、周囲ヒータの設定温度を変えて  $\Delta\theta_{loss}$  を変化させる、あるいは  $\Delta\theta (= \theta_{h1} - \theta_{h3})$  を変化させるだけで可能である。図6にそのイメージを示し、さらに図7に測定例を示す。測定の精度確認として、周期加熱法の測定結果も合わせて示す。図7より、周期加熱法の結果と±10%以内で一致していることが分かる<sup>16)</sup>。

#### 4.2 GHP法の測定誤差低減に関する研究

GHP法は熱伝導率測定方法の国際標準規格として位置付

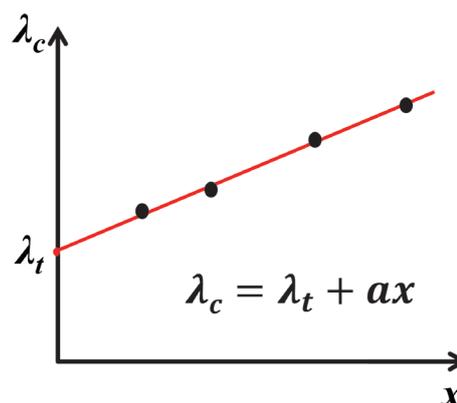


図6 厚さ方向の熱伝導率を導くイメージ図<sup>16)</sup> (Online version in color.)

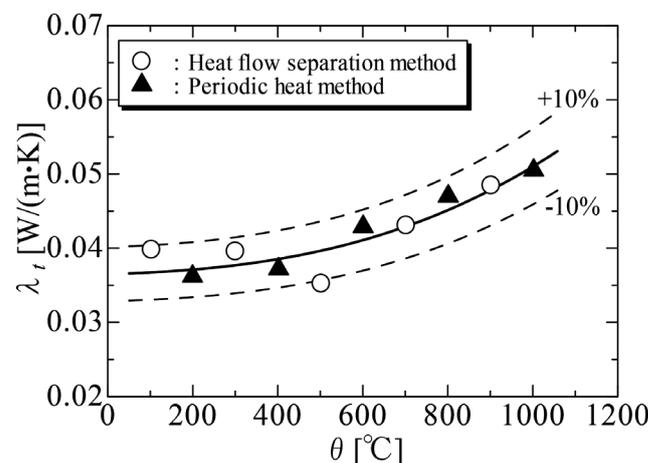


図7 熱流分離法の測定例 (フェームドアルミナ断熱材の熱伝導率)<sup>16)</sup>

けられてはいるが、世界的に行ったラウンドロビン試験では、非常に大きなばらつきのあることが報告されている<sup>12,17)</sup>。その原因の一つとして、GHP法の原理を実現するための複雑な構造が考えられる。特に、試験体の側面からの熱の流入出や、冷却熱板の温度分布による熱の流入出が、大きな影響を及ぼしていると考えられるが、これらを完全に無くすることは不可能であり、むしろこれらに起因する誤差をどこまで小さくできるかが課題である。

近年、試験体側面からの熱の流入出に着目し、測定誤差低減として試験体の厚さ方向の熱伝導率を推定する研究がなされるようになった<sup>18,19)</sup>。そこでは、試験体内部を伝播する熱流が、試験体の厚さ方向とそれ以外の方向の2成分の和であると仮定し、さらに、試験体の周囲雰囲気温度を段階的に変えて熱伝導率を測定し、熱伝導率を試験体の面内方向の温度分布の関数として表すことで、厚さ方向の熱伝導率を正確に推定する方法を提案している。この推定方法は、熱流分離法とほぼ同じで前節に示す通りであるが、むしろこの推定方法をヒントに熱流分離法が提案されている。

測定例として、主熱板や保護熱板、冷却熱板など、全ての熱板がセラミックスヒータで構成された、自作のGHP法装置による測定結果について述べる。熱板が金属製でないため、加熱面や冷却面の温度の均一性が極めて悪く、周囲ヒータの設定温度を変えるだけで、得られる熱伝導率は $\pm 20\%$ 程度の範囲で容易に変化してしまう装置である。装置の測定部の大雑把な寸法は、主熱板が $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 、ギャップが $2\text{mm}$ 、加熱板（主熱板+保護熱板）の寸法は $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ である。試験体としてアルミナシリカ系繊維質断熱材（かさ密度 $130\text{kg/m}^3$ 、サイズ $300 \times 300\text{mm}$ 、厚さ約 $15\text{mm}$ を2枚重ね）を使用した。

図8に厚さ方向の熱伝導率 $\lambda_t$ を示す。○が冷却熱板上の温度分布を使用した場合、△が試験体の中央面（試験体2枚の重ね面）の温度分布を使用して得た結果、◆が周期加熱法による装置で測定した結果である。また、実線は周期加熱法による結果に対する近似曲線であり、破線は実線に対する $\pm 10\%$ を示している。図8より、温度分布をとる面を冷却熱板にとった場合でも、試験体中央面にとった場合でも、両者はほぼ一致し、また、周期加熱法で得た結果とも $\pm 10\%$ 以内で一致することが分かる<sup>18)</sup>。

## 5 おわりに

断熱材の熱伝導率測定は古くからなされているが、ほとんどがGHP法によるものであり、GHP法により得られた標準板に基づく熱流計法（HFM法）が簡易測定法的な位置づけで使用されている。世界的規模でGHP法が使用され、既に

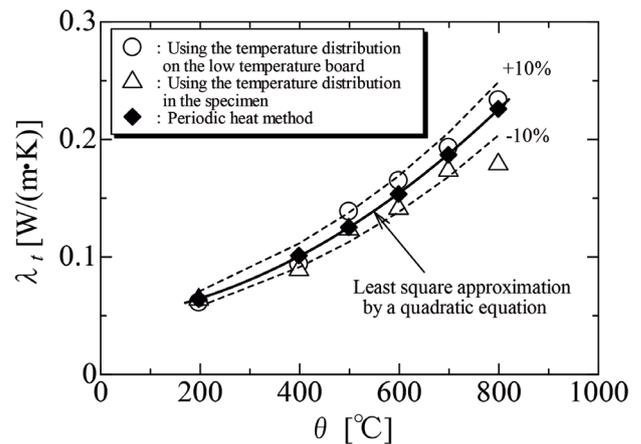


図8 GHP法誤差低減方法による厚さ方向の熱伝導率 $\lambda_t$ の測定例（アルミナシリカ系繊維質断熱材）<sup>18)</sup>

確立した熱伝導率測定方法であることは間違いないが、世界的な規模でその値を俯瞰すると、ばらつきが大きいのも事実である<sup>17)</sup>。実際に使用してみて初めて気付くことのひとつが、試験体を取り巻く雰囲気温度の管理あるいは設定の難しさである。例えば $500^\circ\text{C}$ で測定する場合、試験体の側面温度を $500^\circ\text{C}$ に設定するのが当然と考えられるが<sup>10)</sup>、実際に試験体の側面を均一に $500^\circ\text{C}$ にすることは出来ず、ましてや装置が老朽化などしていたら設定値を少々変えることで、測定結果を簡単に $10\%$ 以上変化させてしまうこともある。このような問題を解決する方法の一つとして、少々面倒ではあるが、複数の全く異なる測定方法で熱伝導率を測定し、相互比較するという考えがある。そのためには、GHP法以外の測定方法が世界標準規格である必要があるが、2021年度に周期加熱法がISO 21901として世界標準規格となり、ようやく断熱材の熱伝導率測定比較を標準測定方法で行うことができるようになってきた。しかしながら、周期加熱法にも当然のことながら測定誤差があり、GHP法との差をどう扱うかがこれからの問題となる。今後、新たな測定方法がさらに提案され、さらにはGHP法の誤差低減方法が確立され、断熱材の性能評価が、どの国であっても、どのような機関であっても正確に評価される日がくることを期待して、この章を締めくくりたいと思う。

## 参考文献

- 1) 大村高弘, 阿部勇, 伊藤泰男, 佐藤和好, 阿部浩也, 内藤牧: 粉体工学会誌, 46 (2010) 6, 461.
- 2) 大村高弘, 伊藤泰男, 阿部勇美, 阿部浩也, 内藤牧男: 粉体工学会誌, 46 (2010) 11, 806.
- 3) 大村高弘, Tseng-Wen Lian, 近藤光, 早坂良, 後藤志宏, 藤本哲夫, 内藤牧男: 粉体工学会誌, 55 (2018) 3, 153.

- 4) 田坂太一, 大村高弘, 萩原伸治, 近藤光, 内藤牧男: 粉体工学会誌, 57 (2020) 12, 612.
- 5) T.-W.Lian, A.Kondo, T.Kozawa, T.Ohmura, W.-H.Tuan and M.Naito: *Ceramics International*, 41 (2015), 9966.
- 6) T.-W.Lian, A.Kondo, T.Kozawa, M.Akoshima, H.Abe, T.Ohmura, W.-H.Tuan and M.Naito: *Journal of Asian Ceramic Societies*, 5 (2017) 2, 118. <https://doi.org/10.1016/j.jascr.2017.03.003>.
- 7) 大村高弘, 田坂太一, 小川光恵, 阿子島めぐみ, 藤本哲夫: 熱物性, 30 (2016) 2, 92.
- 8) JIS A 9539, 建築用真空断熱材.
- 9) ISO 21901, Thermal insulation-Test method for thermal diffusivity-Periodic heat method, (2021).
- 10) JIS A 1412-1, 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率測定方法, 第1部: 保護熱板法 (GHP法), (2016).
- 11) (株) R&D 支援センター, 伝熱工学の基礎と熱物性測定・熱対策事例, 第1刷発行 ISBN 978-4-905507-31-4 C3043, (2019).
- 12) 大村高弘: 熱物性, 21 (2007) 2, 86.
- 13) 大村高弘, 坪井幹憲: 熱物性, 13 (1999) 4, 264.
- 14) 大村高弘, T.-W.Lian, 近藤光, 早坂良, 内藤牧男: 熱物性, 31 (2017) 4, 166.
- 15) 大村高弘, 田坂太一, 石井健登, 辻大河, 南出瑞穂, 早坂良, 近藤光, 内藤牧男: 粉体工学会誌, 56 (2019) 2, 74.
- 16) 大村高弘, 石井健登, 田坂太一, 近藤光, 内藤牧男: 熱物性, 34 (2020) 4, 137.
- 17) J.G.Hust and D.R.Smith: Round-Robin Measurements of the Apparent Thermal Conductivity of Two Refractory Insulation Materials, Using High-Temperature Guarded-Hot-Plate Apparatus, NBSIR 88-3087, (1988).
- 18) T.Ohmura: Measurement Error Reduction Method for Thermal Conductivity of Thermal Insulations Using GHP Method, Proc. 3rd International Forum on Heat Transfer, (2012).
- 19) 富岡孝太, 大関駿太郎, 太刀川純孝, 大村高弘, 長坂雄次: 熱物性, 32 (2018) 3, 104.

(2021年9月27日受付)