

〈技術レポート〉

断熱材低熱伝導化のためのふく射散乱材設計技術

研究開発本部 C A E 室 安 藤 大 介
研究開発本部 浜松研究所 大 利 大 直 宏

1. はじめに

近年、世界的に環境問題に対する危機意識から、省エネルギー化の要望が急速な高まりを見せている。それにつれて、断熱材には更なる低熱伝導率化とともに、迅速な開発が必要となっている。

断熱材中における熱の移動は固体、気体、対流、ふく射を介するものがあるが、特に高温ではふく射の寄与がきわめて大きい。したがって、高温用断熱材の低熱伝導率化には、ふく射を抑制することが不可欠になる。このような観点から、当社は断熱材にふく射散乱材を含有させることで、高温でもふく射伝熱を抑制できる低熱伝導断熱材 TOMBO™ No.4350「ロスリム®ボード」(以下、ロスリム®ボード)を開発し上市しているが¹⁾、さらなる断熱材の低熱伝導率化と開発の迅速化を目的として、断熱材のふく射理論設計ツールの構築に取り組んできた。その結果、構成材料のサイズと複素屈折率などの材料設計因子から断

熱材の熱伝導率のふく射成分を予測できる推定式を構築することができた。

そこで本稿では、ふく射熱伝導率推定式について報告する。まず、無機多孔質断熱材における伝熱と、構築した推定式について解説し、最後に、推定式の検証結果の一例を紹介する。

2. 無機多孔質断熱材中での伝熱

本章では、まず全般的な伝熱について述べ、次に、無機多孔質断熱材での伝熱について説明する。

伝熱とは空間内を熱が移動する現象で、伝導伝熱、対流伝熱、ふく射伝熱に分類される。伝導伝熱は固体によるものと気体によるものに分けられるが、本稿では前者を固体伝導伝熱、後者を気体伝導伝熱と呼ぶものとする(本稿では液体は考慮しない)。

各伝熱の模式図を図1(a~d)に示す。図中の赤いステージは高温面、青いステージは低温面で、赤線の矢印は熱の流れ、緑丸は固体、青丸

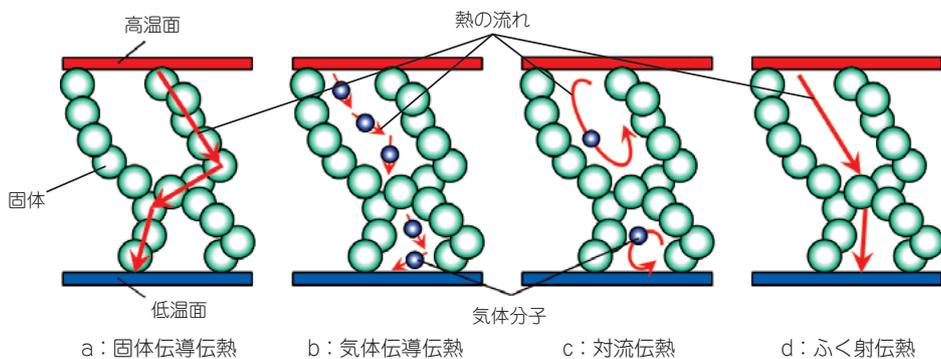


図1 伝熱の種類

は気体分子を意味する。固体伝導伝熱 (図1a) は固体中での伝熱を意味し、格子振動や自由電子が熱のキャリアになる。気体伝導伝熱 (図1b) は気体分子の衝突による伝熱、対流伝熱 (図1c) は気体分子の移動による伝熱を意味する。ふく射伝熱 (図1d) は電磁波による伝熱で、温度依存性が高く、高温での寄与が特に大きい。

本稿で論じる気孔率の高い無機多孔質断熱材中での伝熱は、これらの伝熱形態を組み合わせる必要がある。このとき、断熱材全体の有効熱伝導率 λ は次式で表される (以下、有効熱伝導率を単に熱伝導率と記述する)。

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_G + \lambda_C + \lambda_R \quad \dots (1)$$

ここで、 λ_s は固体が寄与する熱伝導率、 λ_G は気体が寄与する熱伝導率、 λ_C は対流が寄与する熱伝導率、 λ_R はふく射が寄与する熱伝導率である。ただし、通常の多孔質断熱材の場合、微小細孔内で対流が生じることはなく、したがって λ_C は考慮する必要はない。なお、以降、表記の簡略化として、 λ_s 、 λ_G 、 λ_C 、 λ_R それぞれを固体熱伝導率、気体熱伝導率、対流熱伝導率、ふく射熱伝導率と記述する。

3. 熱伝導率推定式

本章では、当社がこれまで提案してきた断熱材の熱伝導率の推定式と、新しく提案する推定式との違いを述べる。

前述したとおり、高温用断熱材における主要な伝熱は、ふく射伝熱であり、本稿ではふく射熱伝導率に着目している。そのため、単純化を目的に、真空下での伝熱を想定し、熱伝導率推定式の検証を行った。すなわち、真空度を十分に高くすることで、気体伝導伝熱は無視することができ、伝熱は固体伝導伝熱およびふく射伝熱のみとなる。結果として、真空下における断熱材の熱伝導率 λ_V (以下、真空熱伝導率と記述する) は次式の通り単純化される。

$$\lambda_V = \lambda_s + \lambda_R \quad \dots (2)$$

3.1 従来の熱伝導率推定式

当社は、過去に断熱材の熱伝導率の推定式を

考案し報告した²⁾。

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

λ は熱伝導率 [W/(m·K)]、 ρ はかさ密度 [kg/m³]、 T は絶対温度 [K] である。未知係数 A 、 B は後述する。式 (3) の右辺第1項、第2項、第3項は、それぞれ固体熱伝導率、ふく射熱伝導率、気体熱伝導率を表している。

また、真空下においては、式 (3) は次式 (4) のように表される。

$$\lambda_V = A\rho + \frac{B}{\rho}T^3 \quad \dots (4)$$

λ_V は真空熱伝導率 [W/(m·K)] である。未知係数 A 、 B は真空熱伝導率測定値 λ_V を従属変数、かさ密度 ρ と温度 T を説明変数とした回帰分析から決定される。

式 (3) や式 (4) は、過去の報告により^{2, 3)}、温度やかさ密度に対する変化に対して、精度のよい推定式であることがわかっている。一方で、各係数を試験体ごとの熱伝導率測定により求める必要があるため、材料設計に応用することはできない。

3.2 断熱材設計のための熱伝導率推定式

本稿で構築した推定式は次式である。

この推定式の右辺第1項および第2項は、それぞれ固体熱伝導率とふく射熱伝導率を表している。

$$\lambda_V = a\rho c(T) + \frac{16\sigma T^3}{3K} \quad \dots (5)$$

ただし、 a は未知の比例係数である。 c は断熱材母材の比熱 [J/(kg·K)] で温度 T に依存する。 K は有効減衰係数 [m⁻¹]、 σ はシュテファン・ボルツマン定数 [5.67×10⁻⁸W/(m²·K⁴)] である。

従来の熱伝導推定式との相違点は、固体熱伝導率に母材の比熱 c による温度依存性を加えた。また、ふく射熱伝導率に有効減衰係数 K という光学特性値を導入した。有効減衰係数 K は、4.1に後述するとおり、材料設計因子から推定することもできる。

4. ふく射熱伝導率の推定

式 (5) より、有効減衰係数 K を求めることができれば、ふく射熱伝導率を予測することができる。

そこで、まず、4.1にて、材料設計因子を用いて有効減衰係数 K を決定する。つぎに、4.2にて、熱伝導率を実測して有効減衰係数 K を決定する。最後に4.3にて、4.1で求めた有効減衰係数 K から得られるふく射熱伝導率と、4.2で求めた実測値とを比較する。両者が一致することを確認することで、材料設計因子からのふく射熱伝導率推定式の妥当性を示す。

4.1 材料設計因子を用いたふく射熱伝導率の推定

ふく射伝熱に関する研究は、天文学や惑星物理学の分野において特に長い歴史をもつ。そこで、星間塵や雲についての散乱計算に使用される電磁波解析⁴⁾や、星間ガス雲についての伝熱計算に使用される輸送方程式⁵⁾をベースにして、ふく射熱伝導率推定のための解析プログラムを構築した。本プログラムは、断熱材中に含有したすべての構成材料（ふく射散乱材や母材等）についての屈折率、形状、体積分率のみならず、粒径の分布といった材料設計因子を考慮することで有効減衰係数 K を推算するものとなっている。推算した K を用いて、ふく射熱伝導率の推定値を求め実測値との比較データとした(図2)。

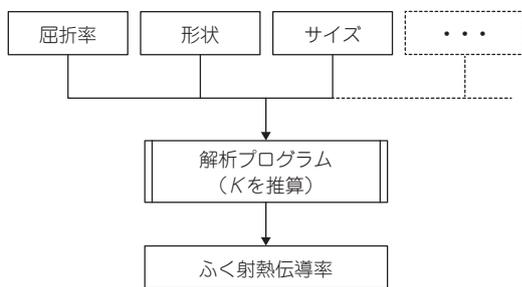


図2 計算フローの概略図

4.2 熱伝導率測定によるふく射熱伝導率の推定

前節4.1では有効減衰係数 K を材料設計因子から解析プログラムを用いて推定したが、本節で

は、試験体の熱伝導率の温度変化を測定し、回帰分析を行うことで、有効減衰係数 K を決定した。回帰関数は式 (5) の熱伝導率推定式、従属変数は真空下の熱伝導率の測定値 λ_v 、説明変数は測定時の温度 T 、フィッティングパラメータは温度に依存しない a と有効減衰係数 K である。

4.2.1 試験体

熱伝導率測定用の試験体には、ふく射散乱材と母材としてフュームドシリカを主要な構成材料とした多孔質体を使用した。当社の低熱伝導率断熱材「ロスリム®ボード」と同系統のモデル材料である。ただし、単純化のため、試験体の配合比、熱伝導率は「ロスリム®ボード」とは異なる点に注意されたい。

試験体はふく射散乱材の材質や粒径の異なるものを多数作製し、推定式の検証に用いた。本稿では、ふく射散乱材として一般的に使用されている炭化ケイ素と酸化チタンを例に説明する。

4.2.2 測定方法

熱伝導率測定は、気体伝導伝熱および対流伝熱を排除するため十分な真空下にて、平板比較法により測定した。また、測定温度は、150°C～400°Cの間で50°C刻みとした。

4.2.3 回帰分析

試験体の真空熱伝導率の実測値と回帰分析による回帰曲線を図3に示す。ふく射散乱材の種類によらず、式 (5) の熱伝導率推定式は実測値をよくフィッティングできていることがわかった。この回帰分析により、実測による有効減衰係数 K が得られた。

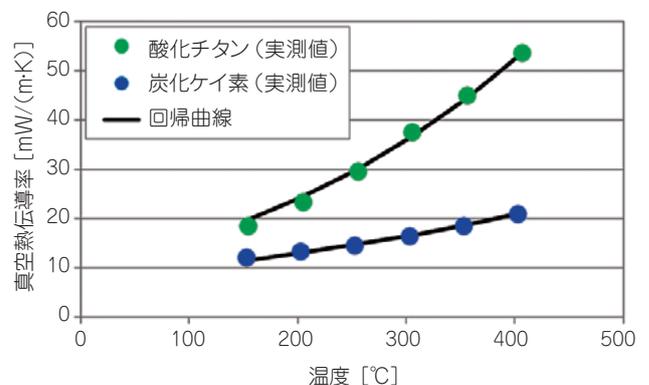


図3 真空熱伝導率の実測値と回帰曲線

4.3 比較検証

4.1において材料設計因子から推定した K を用いて求めたふく射熱伝導率（推定値）と、4.2の熱伝導率測定において実測値の回帰分析から得た K を用いて求めたふく射熱伝導率（実測値）の比較を図4に示す。

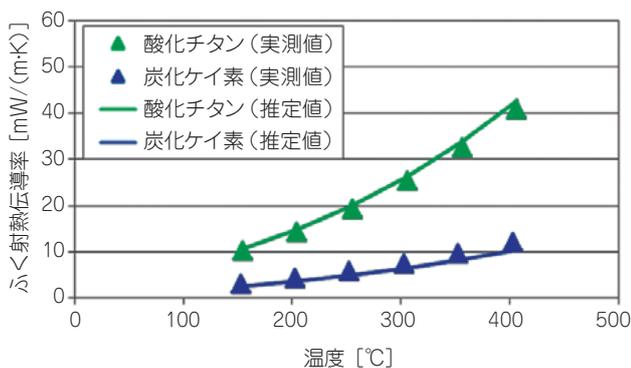


図4 ふく射熱伝導率の推定値と回帰曲線の比較

両者を比較すると、ふく射散乱材の材質によらず推定値と実測値は良く一致している。この結果より、ふく射熱伝導率は、試験体を作製することなく、材料設計因子のみから予測することが可能であることが示された。

5. おわりに

本稿では、断熱材の材料設計因子からふく射熱伝導率を理論予測する推定式を構築し検証を行った。推定式により得られたふく射熱伝導率は、ふく射散乱材の種類によらず、実験値とよく一致した。このことから、試験体を作製することなく、材料の設計因子のみからふく射熱伝導率を推定することが可能となった。

材料開発の立場から見れば、断熱材の配合設計において、構成材料が熱伝導率に与える影響を予測することが容易となった。すなわち、本推定式をもとに構築した解析プログラムを用いることで、断熱材のさらなる低熱伝導率化や配合設計検討の迅速化が期待される。

当社は断熱材のトップメーカーとして、低温から高温までさまざまな断熱材を供給し省エネルギー化の一助を担ってきた。今後も高性能な断熱材の開発を迅速に行っていく所存である。

参考文献

- 1) 高性能超低熱伝導断熱材 TOMBO No.4350「ロスリム®ボード H/GH」, ニチアス技術時報, 358, 14-16 (2012).
- 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) 大村, 断熱材の熱伝導率測定, 伝熱 48(205), 20-25 (2009).
- 4) G. Mie, *Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen*. Annalen der Physik 330 (3), 377-445 (1908).
- 5) S. Rosseland, *Theoretical Astrophysics; Atomic Theory and the Analysis of Stellar Atmospheres and Envelopes* (Clarendon Press, Oxford, 1936).

筆者紹介



安藤 大介

研究開発本部 CAE 室
熱流体解析業務に従事



大利 直宏

研究開発本部 浜松研究所
無機断熱材の研究開発に従事

*「TOMBO」はニチアス(株)の登録商標または商標です。
*「ロスリム」はニチアス(株)の登録商標です。