断熱材における熱伝導率の伝熱要素 ~実用的な伝熱モデルと解析事例~

研究開発本部 試験解析室 熱・耐火試験課 阿 部 直 毅

1.背 景

カーボンニュートラル社会の実現に向けて,省 エネルギーの徹底や再生可能エネルギーの最大 限の導入による持続可能な経済成長が求められ る。省エネについて断熱材は大きな役割を担い, さらなる高性能化,特に低熱伝導率化が期待さ れる。

断熱材の低熱伝導率化には,材料設計が重要 となる。断熱材の材料設計とは,耐熱性,断熱性, 強度などの要求特性を満たすように,材料の種 類や形状(粒子,繊維など),サイズを選定し, 構造(密度,細孔径,材料配置など)を決定す ることである。効率的かつ精度良く断熱性につい て材料設計をするためには,伝熱モデルが構築 され,断熱材の熱伝導率を伝熱要素毎に分離で きることが望ましい。しかし,伝熱モデルの構築 には高度な熱伝導率の測定技術が必要であり, 簡単ではない。そこで,本稿では実用的な伝熱 モデルと,当社の断熱材を用いた解析事例を紹 介する。

2. 無機断熱材の伝熱モデル

2.1 概要

断熱材の低熱伝導率化を目的に,これまで多 くの伝熱モデルが研究されてきた^{1)~7).9).13).14)}。 断熱材内部を流れる熱には多くの伝熱要素があ り,例えば,気体中や固体中を流れる伝導伝熱, 空気流れによる対流伝熱,光や電磁波によるふ く射伝熱があげられる。また,固体中を流れる伝 導伝熱は,自由電子の移動によるものと原子・分 子の格子振動の伝播によるものにわけられる。こ のように,断熱材内部の伝熱は非常に複雑なた め,厳密なモデル化は困難である。しかし,材 料や構造を限定した条件下であれば,簡略化し た伝熱モデルが成立する。

そこで,ここでは電気絶縁性を持つ非晶質無 機材料の断熱材(以下,無機断熱材と呼ぶ)に ついて考える。電気絶縁性であれば自由電子に よる伝導伝熱を無視できる。また,断熱材内部に 対流が発生しない範囲[®]で材料設計することを前 提とすれば,対流伝熱も無視できる。したがって, 無機断熱材内部での伝熱要素は,気体および格 子振動による伝導伝熱と,ふく射伝熱に限定で き,無機断熱材の有効熱伝導率λは,式(1)と 表せる。

ここで、 λ_c は気体伝導による熱伝導率、 λ_s は固体伝導(格子振動)による熱伝導率、 λ_k はふく射の伝熱による熱伝導率を表し、気体・固体・ふく射がそれぞれ独立に並列して伝熱に寄与すると考えた伝熱モデルから得られる。 λ_c は気体伝導と固体伝導が混ざり合った伝熱要素で、ここではカップリング熱伝導率と呼ぶ。断熱材における伝熱要素を図1に示す。 λ_c , λ_s , λ_k については次節以降で詳しく説明する。



図1 断熱材における伝熱要素 (黒矢印:気体伝導,赤矢印:固体伝導,黄矢印:ふく射)

2.2 気体伝導と固体伝導の伝熱

無機断熱材中の伝導伝熱,すなわち気体伝導と 固体伝導は,近似的には大きく3つの伝熱にわけ られる。気体のみを経由して伝わる伝熱,気体と 固体を経由して伝わる伝熱,固体のみを経由して 伝わる伝熱である。この3要素の伝熱モデル化に ついては,古くから半経験論的なアプローチがさ れている^{1)~5)}。かさ密度の低い無機断熱材に限定 すれば,伝導伝熱は下記のように近似することが できる。

$$\lambda_{G} + \lambda_{C} + \lambda_{S} = \lambda_{G}(T) + f(\phi)\lambda_{G}(T) + \lambda_{S}(\rho) \quad \cdots \quad (2)$$

ただし、Tは絶対温度、ρはかさ密度、φは空 隙率、fは伝熱モデルによって異なる関数である。 関数fは空隙の形状、粉体材料の形状、繊維材料 の異方性などの影響を受けるため、汎用的な形 で取り扱うのは難しく、実験による検証が必須 である。

気体伝熱要素の λ_cについては,気体分子運動論から以下のように拡張することも可能である^{9).10)}。

$$\lambda_G(T) = \frac{\lambda_0(T)}{1 + 2\beta K_n} \dots (3)$$

ここで、 λ_0 は静止気体の熱伝導率、 β は気体の 種類によって決まるパラメータ、 K_n はクヌーセン 数である。クヌーセン数 K_n は気体の平均自由行 程Lと断熱材内部の空隙サイズ δ の比で表される。

$$K_n = \frac{L}{\delta}$$
 (4)

式(3) および式(4) より,断熱材内部の空隙 サイズ δ が充分大きければ, $K_n \ll 1$ になり, λ_c は λ_0 と一致する。一方,断熱材内部の空隙サイズ δ が充分小さければ, $K_n \gg 1$ になり, δ が小さくな るほど λ_c はゼロに近づく。空気の熱伝導率とク ヌーセン数の関係を図**2**に示す。



固体伝熱要素のλ_sについては,温度に依存し ない定数として扱って問題ない。厳密には固体成 分の伝導伝熱は温度依存性があるが,非晶質材料 であれば,室温以上の温度範囲での温度依存性は 比較的小さい¹¹⁾。もちろん,無機材料であっても 結晶質であれば大きな温度依存性を持ち,また, 極低温まで温度範囲を広げれば,非晶質であって も温度依存性を無視できなくなる¹³⁾。

2.3 ふく射伝熱

断熱材内部のふく射伝熱については理論的なア プローチがされてきたが,最も単純な Rosseland 拡散方程式¹²⁾ が比較的よく使われている^{13).14)}。

$$\lambda_R = \frac{16\sigma}{3K} T^3 \quad \dots \qquad (5)$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数、Kは Rosseland 平均減衰係数である。Rosseland 平均減 衰係数Kは材料との散乱や吸収でふく射の伝播が 阻害される効果を意味し,材料の充塡率と相関が ある¹⁾。断熱材の材料設計の利便性から,当社は実 験値Bおよびかさ密度ρを用いた以下の単純な式 (6)に縮約してふく射熱伝導率λαを表現してきた⁷⁾。

$$\lambda_R = \frac{B}{\rho} T^3 \cdots (6)$$

2.4 伝熱要素の分離

式 (1), 式 (6) をまとめると, 無機断熱材の 熱伝導率は式 (7) となる。

$$\lambda = \{1 + f(\phi)\} \frac{\lambda_0(T)}{1 + 2\beta K_n} + \lambda_s(\rho) + \frac{B}{\rho} T^3 \quad \cdots \quad (7)$$

なお、気体熱伝導率 λ_c とカップリング熱伝導 率 λ_c は第1項でまとめあげた。実験的な伝熱要素 の分離は、大気圧下と真空下の熱伝導率測定に よって行うことができる。真空下ではクヌーセン 数 K_x が増大し、第1項の気体伝導に関連する伝熱 がゼロになるため、式(7)より真空下の熱伝導 率 λ_c は式(8)で表わせる。

$$\lambda_{v} = \lambda_{S}(\rho) + \frac{B}{\rho}T^{3} \quad \dots \qquad (8)$$

したがって、温度依存性の違いから第1項固体 伝熱要素 λ_s と第2項ふく射伝熱要素 $\lambda_s = \frac{B}{\rho}T^s$ を分離 できる。また式 (9)より大気圧下の熱伝導率 λ と真 空下の熱伝導率 λ_s の差から $\lambda_c + \lambda_c$ を求められる。

$$\lambda - \lambda_v = \{1 + f(\phi)\} \frac{\lambda_0(T)}{1 + 2\beta K_n} \quad \dots \qquad (9)$$

なお, 圧力を変化させた熱伝導率測定を行えば, カップリングの寄与 $f(\phi)$ を検討することも可能で ある。いずれにせよ,大気圧下と真空下で熱伝導 率測定をすることで,断熱材の熱伝導率を気体伝 導に関連する $\lambda_{G} + \lambda_{C}$,固体伝導 λ_{s} ,ふく射 λ_{R} の 3つに分離することができる。

各種断熱材毎に $\lambda_{c} + \lambda_{c}$, λ_{s} , λ_{R} を比較すれば, 熱伝導率に寄与する伝熱要素の影響度合いを確認 できる。もちろん,そのためには大気圧下と真空 下で精度良く熱伝導率を測定できることが絶対の 条件である。

3. 当社における熱伝導率測定

600℃を超える高温熱伝導率測定の一般的な手 法として,熱線法やレーザーフラッシュ法がある。 これら手法は,測定手法の応用により測定条件の 拡大が試みられているが,発展途上にあり,現行 の測定規格では,多孔質で異方性のある断熱材に は不向きである。例えば,断熱材の性能としては, 熱源方向の熱伝導率が重要である。しかし,熱線 法(ISO8894-1)では,原理的に断熱材の全方向 の平均的な熱伝導率が得られ,特定方向の熱伝導 率を測定できない。また,断熱材の気孔率は非常 に高く,90%を超えるものが多い。レーザーフラッ シュ法(ISO18755)では,気孔率10%未満の試 験体が対象となるため,ほとんどの断熱材が対象 外となる(**表1**)。

表1 断熱性能評価方法の特徴

方法		周期加熱法	熱線法	レーザー フラッシュ法
ISO		21901	8894-1	18755
測定方向		特定方向	全方向	特定方向
測定 可否	多孔質 (気孔率)	0	0	× 10%未満が対象
	異方性	0	× 平均が得られる	0
測定 物性	熱伝導率	_	0	_
	熱拡散率	0	—	0

これに対して,当社では1000℃における断熱材 の測定には、当社が実用化した周期加熱法¹⁵ (ISO21901)を適用している。周期加熱法では高 温域における断熱材の熱伝導率を国際規格に準じ て精度良く求めることができる。なお、周期加熱 法では熱拡散率が得られるので,熱伝導率に換算 するために別途,かさ密度と比熱が必要である。 高温の比熱については国際標準化が見込まれる DSC法(ISO/DIS 24144 : 2022年5月16日時点) により実測できる。

4. 測定および解析の事例

断熱材の熱伝導率を測定し、伝熱要素を分離し た解析事例を紹介する。かさ密度の異なる2種類 の低熱伝導ボードを試験体とした。試験体の概要 を表2に、周期加熱法により大気圧下および真空 下で熱伝導率を測定した結果を図3および図4に 示す。

試験体	低熱伝導ボード		
かさ密度 [kg/m³]	240	380	
構成材料	 ・ヒュームドシリカ ・ガラス繊維 ・ふく射散乱材 		
断熱性能 コンセプト	 ・ヒュームドシリカの微細構造により気体 伝導および固体伝導を抑制 ・ふく射散乱材によりふく射を抑制 		









図3および図4より,かさ密度の異なる低熱伝 導ボードの熱伝導率は,大気圧下ではそれほどで はないが,真空下では値が大きく変化しているよ うに見える。そこで,伝熱要素を分離し,詳細に 比較する。

まず,式(9)より,各断熱材の大気圧下と真 空下の熱伝導率差を計算で求めることにより,気 体伝導に関連する熱伝導率λ_c + λ_cを得られる。 次に,真空下の熱伝導率を縦軸,絶対温度の三乗 を横軸にした結果を図5および図6に示す。



図5および図6の直線近似した結果と式(8)より,図中の近似式の第1項が^λ^(^B_pT⁾),第2項(切片)が λ_sとして得られる。図3~6のデータを基に伝熱要素を分離した結果を図7および図8に示す。

図7および図8より、温度上昇とともにふく射

伝熱による熱伝導率は上昇し,全体の熱伝導率に 占める割合が高温ほど増した。一方,固体伝導伝 熱および気体伝導伝熱に関連する熱伝導率はほぼ 一定であった。



ここで、各断熱材の $\lambda_{c} + \lambda_{c}$ を図9に、 λ_{s} を図 10に、 λ_{R} を図11に示して伝熱要素毎に比較する。 低熱伝導ボードは微細構造を制御し、気体伝導 伝熱を抑制する断熱コンセプトとなっている。図9 より、低熱伝導ボードの気体伝導伝熱に関連する 熱伝導率は、静止空気の熱伝導率に比べて低く、 狙いどおり大きく抑制されていることがわかっ た。空気の平均自由行程に比べて低熱伝導ボード の空隙サイズ δ が十分に小さく、クヌーセン数が $K_{n} \gg$ 1となったため、式(9)より $\lambda_{c} + \lambda_{c}$ が大き く低減したと推測される。また、 $\lambda_{c} + \lambda_{c}$ は、かさ 密度240kg/m³よりも380kg/m³の方が低かった。



この理由は,かさ密度380kg/m³の方が,空隙サ イズが小さいため,クヌーセン数が大きかったと 考えられる。 図10より,固体伝導伝熱による熱伝導率λ_sは, かさ密度240kg/m³よりも380kg/m³の方が高かっ た。この理由は,かさ密度の高い方が試験体に占 める固体の割合,つまり,熱伝導のパスが増える ためである。

図11より,温度上昇とともにふく射伝熱による 熱伝導率 λ_R は上昇し,高温ほどかさ密度380kg/ m³よりも240kg/m³の方が高かった。式(6)より, かさ密度の高い方がふく射伝熱は低くなると推測 されるが,その通りの結果であった。

このように伝熱要素の分離をすることで材料設 計の効果を確認することができるため,材料開発 の効率化を図ることができる。また,伝熱要素を 分離するためには,精度良く熱伝導率を実測でき ることが重要となる。

5.おわりに

本稿では低かさ密度の非晶質無機材料断熱材に 対して実用的な伝熱モデルの解析事例を紹介し た。当社では広い温度範囲で精度良く熱伝導率を 測定することができるため,断熱材の伝熱要素を 分離することが可能となる。今後も熱伝導率測定 に関して,測定精度の向上,測定範囲の拡大など の研究を継続的に行い,断熱材のさらなる高性能 化を進め,カーボンニュートラル社会の実現に貢 献していく所存である。

参考文献

- J. D. Verschoor, P. Greebler, Heat transfer by gas conduction and radiation in fibrous insulation, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 74, pp. 961-968 (1952)
- N. E. Hager Jr., R. C. Steere, Radiant Heat Transfer in Fibrous Thermal Insulation, Journal of Applied Physics, 38, 4663-4668 (1967)

- K. Daryabeigi, Heat transfer in high-temperature fibrous insulation, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 17, pp. 10-20 (2003)
- 4) 国井大蔵, 多孔質内の放射伝熱, 日本機械学会誌, Vol. 65, pp. 1447-1453 (1962)
- 5) K. Swimm, G. Reichenauer, S. Vidi, H.P. Ebert, Gas Pressure Dependence of the Heat Transport in Porous Solids with Pores Smaller than 10 μm, International Journal of Thermophysics vol. 30, pp. 1329-1342 (2009)
- 6) R. Arambakam, H.V. Tafreshi, B. Pourdeyhimi, Modeling performance of multi-component fibrous insulations against conductive and radiative heat transfer, International Journal of Heat and Mass Transfer, vo. 71, pp. 341-348 (2014)
- 7) 大村高弘,小野寺正剛,阿部直毅,303 断熱材のふく射に寄 与する熱伝導率と減衰係数,日本機械学会山梨講演会講演 論文集,pp.68-69 (2009)
- 8) ISO10456
- M.G. Kaganer, Thermal insulation in cryogenic engineering, Israel Program for Scientific Translations (1969).
- B. Gebhart, Heat Conduction and Mass Diffusion, McGraw-Hill, New York, 1993.
- R. C. Zeller, R. O. Pohl, Thermal Conductivity and Specific Heat of Noncrystalline Solids, Physical Review B, Vo.4, pp. 2029-2041
- 12) S. Rosseland, Theoretical Astrophysics; Atomic Theoryand the Analysis of Stellar Atmospheres and Envelopes. Clarendon Press, Oxford, 1936.
- 13)小針達也,岡島淳之介,小宮敦樹,円山重直,拡散近似を 用いた高温多孔質断熱材におけるふく射伝熱評価,熱物性, Vol. 28, pp. 179-184 (2015)
- 14) S. Zhao, B. Zhang, X. He, Temperature and pressure dependent effective thermal conductivity of fibrous insulation, International Journal of Thermal Sciences, 48, pp. 440-448 (2009)
- 15) 阿部直毅, ニチアスにおける断熱材の高温熱伝導率測定, ニチアス技術時報, Vol. 385, pp. 11-16 (2019)

筆者紹介



阿部 直毅

研究開発本部 試験解析室 熱・耐火試験課 断熱材の熱伝導率測定に関する研究に 従事