

(Memoirs of the Faculty of Education and Human Studies)
 (Akita University (Natural Science))
 59, 11-15 (2004)

耐火断熱レンガの伝熱機構と熱伝導率に関する考察

高橋 カネ子

Consideration on Heat Transfer Mechanism and Thermal Conductivity of Thermal Insulation Brick

Kaneko TAKAHASHI

Abstract

The objects of this study are to estimate the thermal conductivity of thermal insulation brick and to examine heat transfer mechanism in it. The specimen to be considered is high aluminum oxide (Al_2O_3) insulation brick having 0.2 volume fraction of pore. The standard (actual) value for comparison with predicted values is 0.858 [$\text{W}/(\text{mK})$] at 350[$^{\circ}\text{C}$]. The recommended values of thermal conductivity of Al_2O_3 and gases filled in brick's pore are obtained by TPRC and JSME Heat Transfer Handbook, respectively.

The predict equations of thermal conductivity selected in this paper are the ones containing spherical particle into the matrix. There are considerable differences between predicted values and actual data. Therefore, two dimensional simple model as first approximation is proposed to investigate on bending and narrow down phenomena of heat flow. The numerical analysis based on finite difference method is used to obtain the solution of heat conduction equation. The results acquired by this scheme are not enough in quantitatively, but a few interest knowledge are found for next report.

1. 緒言

現在、我々が置かれている地球環境に関して多くの解決すべき問題点があることは周知のことである。新エネルギーの開発や省エネルギーは上記の問題点の大きな役割を果たす解決策の一つと言ってよい。これらを進めるのにはシステムの開発はもちろんであるが熱に関連する工業材料が大きな役割を果たすものと予想される。この中で、耐火断熱材は廃棄物の高温燃焼によるダイオキシン生成の防止や高効率パワープラントにおける熱損失の減少に特に役立つ材料である。

一般に、実用されている断熱材料には多くの種類があるが、その断熱性能を保つあるいは向上させる役目はこの中に含まれる気体の容積に大きく依存することはよく知られて[1]いる。さらに、気体の容積が同一でも空隙の寸法・形状が熱伝導率に影響する[2]という報告も見られる。また、断熱材内部の伝熱メカニズムに関して文献[3,4]がある。

断熱材はそれぞれ異なった熱物性値および利用上の特

性を持ち、これを使用する上でこれらの情報は必要不可欠である。しかしながら、熱物性値のうち、特に比熱容量・温度伝導率は未知の場合が多く、JISで規定され情報量が多いと思われる熱伝導率についても広い温度範囲にわたる温度依存性は示されていないことが多い。この研究はある企業から、耐火断熱レンガの熱伝導率の温度依存性について質問されたことが端緒になっているが、検討を進めるうちに新たな疑問や興味が生じて来たことにより発展したものである。

本論文は始めに対象物体のレンガを分散系として捉え、既存の分散系の熱伝導率の推定式との比較を行った。次に、この比較結果が満足出来るものではなかったので、分散系内の熱抵抗を模擬できる簡単な二次元モデルを考え、これを対象にした数値解析によって熱流の屈曲・絞りに伴う熱抵抗の影響を考察した。検討に用いたモデルはまだ不十分な点が多いが、今後の研究の進展のための第一次近似モデルとしていくつかの知見を得た。

主な記号

T: 温度[°C]

λ_g : 気体の熱伝導率[W/(mk)]

λ_r : レンガの熱伝導率[W/(mk)]

λ_s : 固体の熱伝導率[W/(mk)]

ϕ : 空隙率あるいは容積比

2. 検討試料の条件

ここで検討する試料は、前述のように質問を受けた高アルミナ質耐火断熱レンガを想定した。空隙率 ϕ は 0.18 ~ 0.22 程度といわれていたので平均値を取って $\phi = 0.20$ と仮定して考察を試みる。試料のレンガの成分表は Table 1 のように与えられている。

Table 1 Constituent of Brick

	%
Al ₂ O ₃	99.31
SiO ₂	0.57
Fe ₂ O ₃	0.12

固体部分の大部分を占める酸化アルミニウム (Al₂O₃) の熱伝導率は文献[5]に推奨値が温度の関数として Fig. 1 のように与えられているのでこれを使用した。また、空隙を満たす雰囲気ガスは実際に炉で使用されている 2 種類の混合ガス (λ_{g-1} , λ_{g-2}) 標準気体としての空気 (λ_{g-3}) の 3 種について検討した。構成ガスの熱伝導率は文献[6]により求めた。また、混合ガスの値は混合則により計算した。これらを合せ Table 2 に示す。なお、表に示された温度は必要温度範囲である 350 ~ 1100 [°C] をほぼ等分する値として選択した。また、与えられている基準データは名古屋工業試験所において実験により得られたもので 350 [°C] で $\lambda_r = 0.858$ であり、この値を基準的なものとして推定式およびモデルの評価を行う。

3. 既存の分散系の推定式との比較・検討

3. 1 既存の推定式 試料のレンガの組織を考えると、固体が連続相を構成し気体はその内部に粒子状に分散している複合材料と考えるのが最も一般的であると思われる。複合材料はその形態からいくつかに分類される[7]が、上記の考えは試料のレンガを分散系とみなすことになると言ってよい。

分散系の熱伝導率に関してはこれまで多くの研究がなされており、著者の研究[8,9]もそれらの一つである。

また、これに伴って熱伝導率の推定式も多く提案され、それらに対する評価の総説[10]も見られる。これらを総合すると多くの推定式はそれぞれ長所・欠点を持っており、試料のレンガに対しても決定的に適用可能であると

Table 2 λ_r of λ_s and λ_g

T [°C]	350	627	900	1100
λ_s [W/(mk)]	15.0	9.0	6.3	5.5
λ_{g-1} : 75% H ₂ , 25% N ₂	0.246	0.313	0.376	0.411
λ_{g-2} : 40% H ₂ , 40% N ₂ , 20% CO	0.153	0.196	0.236	0.258
λ_{g-3} : Air	0.047	0.063	0.076	0.083

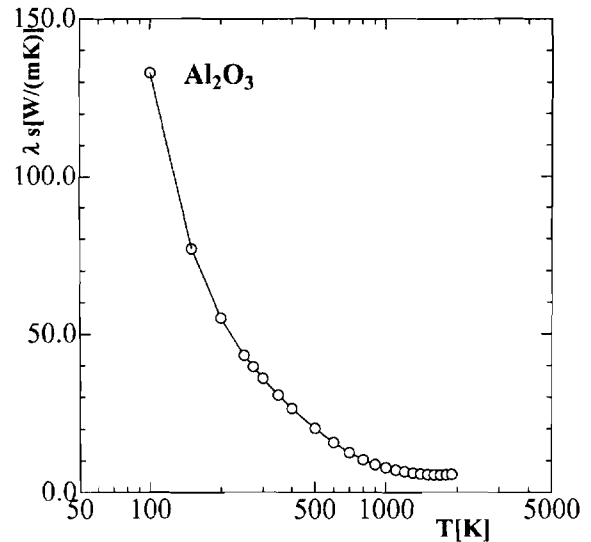


Fig.1 Thermal Conductivity of Al₂O₃

いうべき式は見当たらないと結論した。

従って、この論文では以上の文献を参考にし、以下のようないくつかの式を用いて比較・検討を行う。即ち、複合材料に対して最も基本的な式の一つであり、分散系にたいしては比較的近い値を与えると評価されている式は直列式 (1) である。この式と同様に基本的な式である並列式は積層系やカーボンファイバー強化プラスチックなどの連続繊維系のような複合材料の特定方向の物性評価以外には適用が困難であるのでここでは省いた。また、Maxwell の式 (2) は気体 (気孔) の形状が不明であるので、分散相が球状であるとして提案され、最も基本的な推定式であることで知られている。次に Maxwell の式 (2) を発展させた Meredith の式 (3) および Bruggeman の式 (4) [11] を採用した。さらに、粒子が互いに接触し気体その中に満たされる充填層は性状がレンガと類似していると考えられたのでこれについての矢木・国井の式 (5) [12] とも比較した。これらの各式 (1) ~ (4) を以下に示す。

$$\lambda_r = \frac{\lambda_g \cdot \lambda_s}{\phi \lambda_s + (1 - \phi) \lambda_g} \quad (1)$$

$$\lambda_r = \frac{2\lambda_s + \lambda_g - 2\phi(\lambda_s - \lambda_g)}{2\lambda_s + \lambda_g + \phi(\lambda_s - \lambda_g)} \quad (2)$$

$$\lambda r = \frac{(2+\chi\phi)(2+(2\chi-1)\phi)}{(2-\chi\phi)(2-(\chi+1)\phi)} \lambda_s \quad (3)$$

$$\chi = \frac{\lambda_g - \lambda_s}{\lambda_g + 2\lambda_s}$$

$$\lambda r^{1/3}(1-\phi) = \frac{\lambda_r - \lambda_g}{\lambda_s - \lambda_g} \quad (4)$$

3. 2 固体を母材とした場合 最初に述べた試料のレンガの一般的な概念から、固体を母材（連続相）、気体を分散相として前節の式（1）から（4）を計算した。その結果をまとめて示すと Table 3 のようである。表から、式（1）の直列の式による値を除いて比較すべき基準データ（ $\lambda r = 0.858$ ）との間に大きな相違があることが明らかである。この原因は連続相を熱伝導率の高い固体としているので、レンガの熱伝導率 λr は固体の熱伝導率 λ_s に依存した高い値になるためと考えられる。次に、基準データ（ $\lambda r = 0.858$ ）との相違を説明するためにさらに次の考察を行う。

3. 3 母材を気体とした場合 前節と逆に母材を気体と仮定した場合を考える。実際のレンガは全体として固体で構成されているので、この仮定は実際の状態と異なるものではあるが先の熱伝導率の大きな相違を説明する手段として採用する。推定式の計算においては差し支えが生じない。また、充填層はこの仮定の構成と合致する系であるので、この推定式も含めた式（1）から（5）までの値を求めた。雰囲気ガス（ $\lambda_{g-1}, \lambda_{g-2}, \lambda_{g-3}$ ）の場合の結果を Fig. 2 示す。明らかに Table 3 に示した値よりも基準データ（ $\lambda r = 0.858$ ）に近くはなっているが現象を説明できる値とは考え難い。また、この仮定は前述のごとく試料のレンガが全体として固体で構成されていることを考慮すると無理のある設定といえる。そこで、これまでの著者らの研究を検討し、新たなモデルを用いて検討する。

4. 熱流の屈曲・収縮・拡大現象を伴う熱抵抗の考慮

4. 1 複合材料における熱流の屈曲・収縮現象

試料のレンガは前述のように固体中に気体が気泡状あ

るいは脈流状に分散している物質と考える。この場合、固体の熱伝導率 λ_s と気体の熱伝導率 λ_g との値の相違が大きいほどレンガの内部を流れる熱流線は構造に依存して屈曲・収縮・拡大を繰り返す、この現象が熱抵抗を増大させてレンガ全体の熱伝導率を低下させると考えら

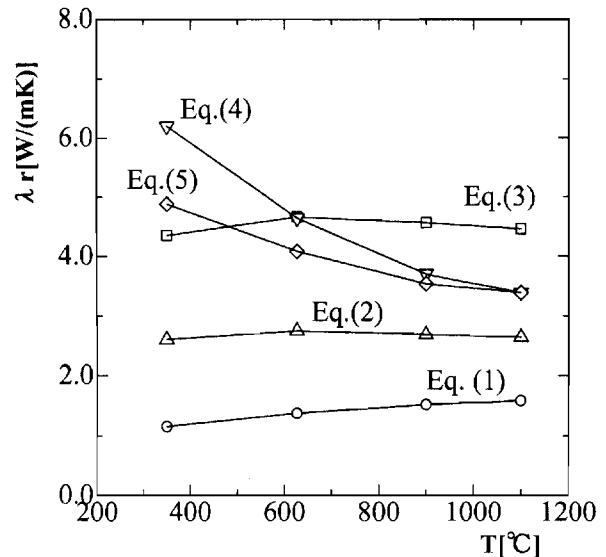


Fig.2 Calculation results of various equation

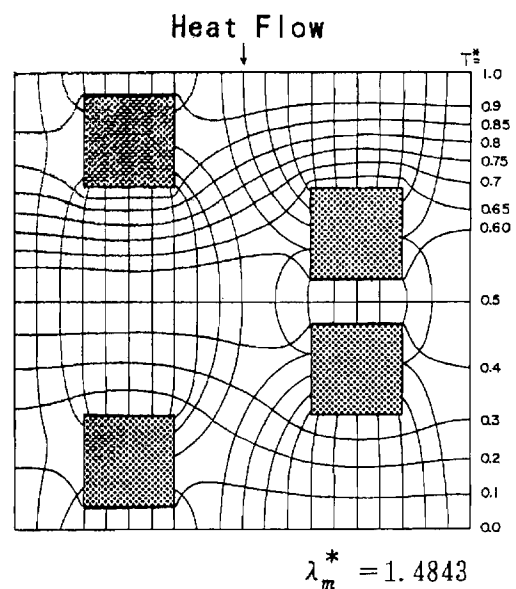


Fig.3 Temperature distribution for nearness cubic particles.

Table 3 λr for various Eq.

T [°C]	350		627		900		1100	
	λ_{g-1}	λ_{g-2}	λ_{g-1}	λ_{g-2}	λ_{g-1}	λ_{g-2}	λ_{g-1}	λ_{g-2}
Eq-(1)	1.154	0.735	1.37	0.902	1.518	1.026	1.582	1.086
Eq-(2)	11.00	10.97	6.66	6.62	4.72	4.67	4.15	4.09
Eq-(3)	10.92	10.88	6.61	6.57	4.68	4.63	4.12	4.06
Eq-(4)	10.60	10.60	6.48	6.48	4.60	4.54	4.07	4.02

れる。著者らはこれまでほとんど分散系について研究しており、固体粒子が接触する場合の検討は行っていないが、一つの推定現象例として熱伝導率が異なる分散系（粒子の位置を不規則においた場合）の温度分布と熱流線を Fig.3[10] に示す。この図から先に述べた推定の妥当性が明らかであると言えよう。

この図を参考例として、レンガの場合に適用できる簡単なモデルを想定する。

4. 2 新しいモデルの提案 レンガの構造において、レンガ全体は見かけ上固体として存在しているが、断熱性を高めるため、固体は粒子状の状態では接触界面が互いに圧着されその結果内部に気体が混在していると考えられる。性能に関して、気体が固体内部に閉じ込められた独立気泡の状態であるか、外部と開放状態にあるかは重要な因子であるが、ここではこの因子は考慮せず空隙率 ϕ のみを考えて検討する。

以上の観点から、本論文では第一次近似モデルとして Fig.4 に示す二次元温度場を考え、これを対象に数値シミュレーションによって温度分布を計算し、それから温度場の熱伝導率を求めた。計算手法は差分近似を利用した SOR 法[13] による。この方法は良く知られた方法であり、SOR 法の最適緩和パラメータに関しても著者らの報告[14] があるので詳細は省略する。

差分格子は図に示したように正方形であり、粒子 2 個の下および上半分を中央で完全接触した形を想定している。熱流は巨視的に上から下に 1 次的に流れる。境界条件は図に示しているが、上下面は等温、側面は左右対称と考え断熱、粒子接触面以外の気体部分是对流および放射はなく伝導のみで熱が伝わると仮定して計算を行った。

4. 3 結果と考察 計算結果の一例を Fig.5 に示す。即ち、等温線とそれに直交する熱流線（後者是对称なので 1/4 断面のみ）を描いたものである。図から熱流線は固体の接触部に集中していることが認められる。このモデルは単純なものであるがレンガ内部の固体の接触状態はランダムで複雑なものであると予想されるので熱流の屈曲・収縮は非常に複雑になり、全体の熱抵抗は大きくなり、結果として熱伝導率は減少することになると推定される。

求められた Fig.4 の温度場の熱伝導率を先の式 (1) および (2) の計算結果とも合せて Fig.6 に示す。図から明らかなように Table 3 に示した値よりは基準データに近づいてはいるが、まだ相違は大きい。この原因を上げると、実際の 3 次元現象を 2 次元で定量的に説明しようとしていることが考えられる。非常に大胆な仮定で

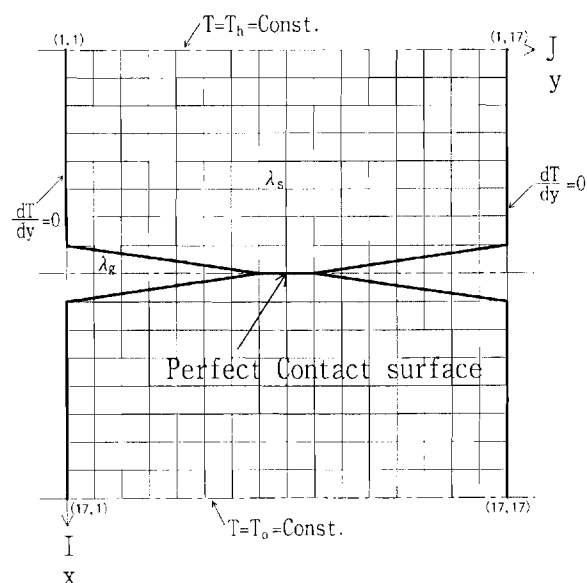


Fig.4 Two dimensional model

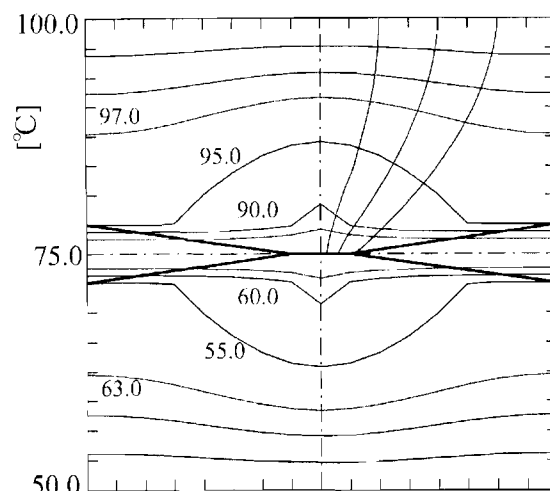


Fig.5 Temperature distribution and heat flow line for model.

あるが、350[°C]における λ_s から λ_r の減少率の 2 乗が 3 次元現象の場合適用できると仮定すると λ_r の値は 2.9[W/(mk)] になりさらに現実に近づく。また、レンガの固体粒子の結びつきは Fig.4 のモデルのような熱流に垂直方向のみに存在するとは限らず、熱流の屈曲はより複雑であり、全体の熱抵抗はさらに大きなものになると考えられる。さらに、Fig.4 のモデルは定常温度場の計算の性質から、寸法の絶対値が規定されていないことである。従って、レンガの全体の厚さと考える粒子の寸法との比によって、この比が大きいくほど、即ち、組織が微細なほど Fig.4 に示したような熱の屈曲・収縮現象に遭遇する機会が多くなり、結果として全体の熱伝導率が低下することが考えられる。

5 結論

耐火断熱レンガの熱伝導率を既存の分散系あるいは複合材料の有効熱伝導率の推定式で推定できないか検討した。次に、第一次近似モデルとして簡単な二次元モデルで数値解析によって考察した。本論文ではモデルがまだ簡単すぎるために、これ以上の推測は述べず、次報に検討を続けるが、今後、上記の要素因子を加えた第二次近似モデルの提案と計算・考察を行う予定である。

REFERENCES

- [1] 山田悦郎：熱物性,6-1 (1992),29-31.
- [2] 鳥越,星山,野村：第70回耐火物部会報告集 (2),70(2001), 1-9.
- [3] 山田悦郎：熱物性,6-2 (1992),112-113.
- [4] 田北善暉：熱物性,6-2 (1992),118-127.
- [5] TPRC: "Thermophysical Properties of Matter", 2 (Thermal Conductivity)(1970),119.
- [6] 日本機械学会編：伝熱工学資料 (4), 日本機械学会 (1992),328-329.
- [7] 藤井,座占：複合材料の破壊と力学,実共出版 (1978),2.
- [8] 山田,高橋：日本鋳業会誌,91 (1975),577-582.
- [9] 山田,高橋：日本機械学会論文集 (No.2),44 (1978), 1644-1652.
- [10] 山田悦郎：資源と素材,119-1 (2003),1-8.
- [11] 山田悦郎：熱物性,3-2 (1989),78-83.
- [12] 日本機械学会編：伝熱工学資料 (4),日本機械学会 (1962),136-138.
- [13] 赤坂 隆：数値解析,コロナ社 (1967),403-411.
- [14] 山田,高橋：空気調和・衛生工学会論文集,49 (1992), 403-411.

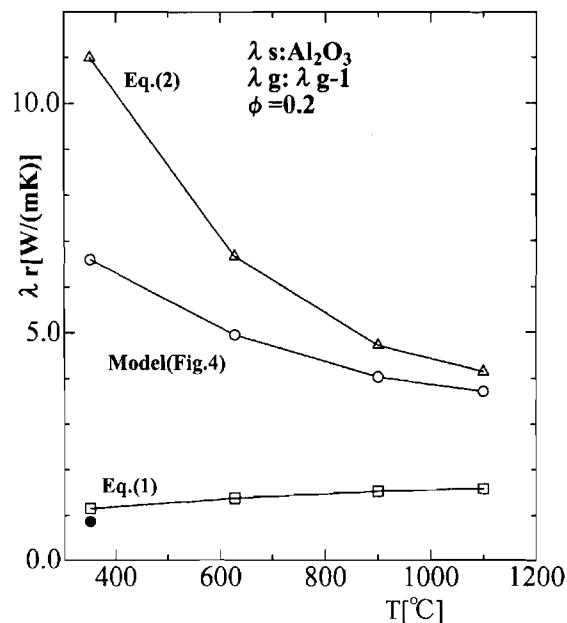


Fig.6 Comparison between Model(Fig.4) and Eq(1),(2)