

耐火断熱レンガの伝熱機構と熱伝導率に関する考察 (第2報)

高橋 カネ子

CONSIDERATION ON HEAT TRANSFER MECHANISM AND THERMAL CONDUCTIVITY OF THERMAL INSULATION BRICK (2nd)

Kaneko TAKAHASHI

Abstract

The objects of this study are to research heat transfer mechanism in thermal insulation brick and to estimate temperature dependence of thermal conductivity of it. The insulation brick to be studied in this report is composed of aluminum oxide (Al_2O_3) and gases filled in pores.

In the 1st report, a simple model which has narrow contact surface between two Al_2O_3 particles was considered. The results obtained by this model showed fairly good qualitative tendency. However, there was considerable difference between numerical result and measured value informed by request person. From this standpoint, more approximate two dimensional and three dimensional models contained many particles of Al_2O_3 and pores are proposed by observation of section view photograph with SEM, and numerical analysis are investigated on these models. And moreover, experimental results by unsteady hot wire method are obtained over wide temperature range. The numerical results based on three dimensional models and experiments show good agreement at high temperature range.

1. 緒言

エネルギーの有効利用を計る上で、断熱材料の使用は必要不可欠のものであり、工業・民生の分野で大きな役目を果たしている。断熱材料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、使用する上でこれらの情報を十分把握して用いなければならない。

本研究はある企業から、工業炉などに用いられる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。一般に、実用されている断熱材料の性能は材料中の空隙率に大きく依存することはよく知られて^[1,2]いる。しかしながら、これらの多くは実用的な面に重点を置いていることが多く、断熱材の構造(成分粒子と空隙の状況など)と熱移動の検討に関する文献は希少である。また、メーカーのカタログ中においても熱伝導率の温度依存性を明らかにしているものは少ない^[3]。しかし、耐火断熱レンガは広い温度範囲で使用される可能性が大きいので、熱伝導率の温度依存性を明らかにすることは重要な情報であると考えられる。

著者はこの立場から、前報告^[4]で、耐火レンガの熱伝

導率を既存の分散系の推定式で検討するとともに、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。ここでのモデルは二次元温度場内に2粒子のみを考え、空隙の存在と断面縮小に伴う熱流の屈曲による熱抵抗の増大を評価することにより、現象の説明の可否を検討した。その結果、熱伝導率の温度依存性の定性的な傾向は求められたが、定量的にはこの時点で企業から与えられていた実験値(350℃において0.858 [W/(mK)])との相違は大きい結果であった。課題として、提示したモデルと実際の耐火レンガの構造との近似が不十分ではないかと結論した。

本論文は前報告の問題点を踏まえて、始めにレンガを走査電子顕微鏡で観察した後、それを参考として、粒子形状と空隙状態を考慮した多数の粒子を含む二次元モデルを考え検討した。その結果、前報告よりは定量的に良好な結果を得たが実験値との相違は大きかった。さらに、二次元多粒子モデルの結果を踏まえ、より実際に近いと考えられる三次元モデルで数値解析によって考察した。また、実験値が一点しか与えられていないこと、また、

その値が評価に値するか、についての疑問が生じたので、レンガの熱伝導率を非定常熱線法により測定した。これより本報告は数値解析による結果と実験値との比較・考察を行なうことが可能となった。

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 ：空隙率または容積比

2. 検討試料

ここで検討する試料は、前述のような耐火断熱レンガを想定した。耐火レンガの成分及び空隙率については企業から以下のように与えられている。主成分は酸化アルミニウム (99.33%) で、不純物として酸化珪素 (0.57%) と酸化鉄 (0.12%) が含まれている。また、空隙率は0.18～0.22程度と与えられている。これから、成分のほとんどが酸化アルミニウム (Al_2O_3) であり、本報告においてはレンガを固体の Al_2O_3 と空隙率 $\phi = 0.20$ の空間を満たす気体からなる複合材料であると仮定して数値解析を行なうこととする。次に、前報告ではレンガの構造を観察することなく簡単な2次元モデルを仮定して数値解析を行い、350°Cで与えられている実験値 ($\lambda_r = 0.858$ [W/(mK)]) および代表的な複合材料の推定式による値と比較していたが定量的には不十分な値が求められていたといえる。そこで、本報告では走査電子顕微鏡による観察を参考にしたモデルを構築した。観察結果の一例として1000倍の画像をFig.1に示す。 Al_2O_3 の結晶と空隙が混在している様子が観察できる。結晶の形状は形・大きさとも不規則であり、また、結晶間の接触に関わる熱抵抗の有無や数値もまだ不明である。しかしながら、この図を参考に以下のモデル (二次元, 三次元) を構築した。

3. 実験

熱物性値の最も基本的な値といえる熱伝導率の測定方法に対しては多くの方法¹⁵⁾があるが、断熱材に限定してみても定常比較法、定常絶対法など¹⁶⁾が示されている。しかしながら、広い温度範囲、多岐にわたる材質のすべてに対して適用出来る方法は見当たらず、測定試料に合わせた方法を用いるしかないといえる。著者の研究室では定常比較法の装置 (測定温度約10°C～90°C) を保有しており、これまでも多くの成果¹⁷⁾を上げているが、本報告の耐熱レンガに対しては、測定温度範囲の点で使用出来ない。従って、ここでは測定時間も短く、測定試料形状 (巾100mm×厚15mm×長150mm) を考えた非定常熱

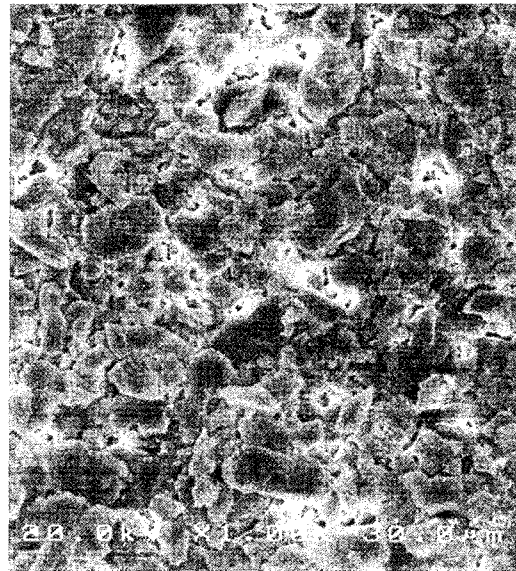


Fig. 1 Photograph of a sample (Brick)

線法を用いることにした。この測定は装置の関係もあり、共同研究として行い、測定理論・結果、測定値の評価などを文献¹⁸⁾で詳細に述べているので、測定結果のみを後に示し、他は省略する。

4. モデルと計算条件

4. 1 二次元モデル

本報告では始めに前報告のモデルを発展させた粒子数を9個とするFig.2のような二次元モデルを想定した。ここで、粒子の接触している表面間の熱抵抗は現時点では評価が困難なため無視している。また、粒子形状とそれに伴う空隙の形状もここではFig.1を参照しながら熱流の縮小と屈曲が実現可能な図に示す形状とした。

次に、数値解析における構成物質の熱物性値などは次のように定めた。 Al_2O_3 の熱伝導率の温度依存性はTPRCのハンドブック¹⁹⁾によりFig.3のように与えられているのでこの図から求めた。また、空隙中の気体は空気であることを基本に計算したが、先に問い合わせのあったユーザーの条件も考慮に入れ、水素・窒素・他の混合ガスの場合も計算した。固体および気体の計算に用いた熱伝導率の値を温度との関係で示すとTable 1 のようになる。なお、単一ガスの熱伝導率は文献¹⁹⁾により、また、混合ガスの場合は混合則を用いて計算した。

数値解析においてFig.2の温度場に対して成立する熱伝導方程式は周知のものであるので省略する。また、境界条件は上下面を等温面、左右面を対称性のある断熱面とした。解法は差分近似を基本とするSOR法²⁰⁾によった。

Table 1 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

4. 2 三次元モデル

後述のように本報告の二次元モデルは前報告よりも良好な結果を得たが実際のレンガは三次元物体であるので、より実際に近いと考えられる三次元モデルをさらに提案した。これをFig.4に示す。温度場全体は27個のAl₂O₃の粒子からなり、その間に熱流方向のみに小さな空間があるとした。結晶間に存在する可能性がある熱抵抗は二次元モデルとの比較のためにもこれを無視した。

また、伝熱メカニズムは伝導のみが関与しているとした。実際には、特に高温の領域においては空隙間の放射伝熱が無視し得ないと推定されるが、これまで解析値が既存の実験値に対して常に大きな値を示していたため、それに近づけようと考えたからである。

熱伝導方程式および境界条件の考え方（上下面等温、垂直面断熱）は二次元と同様である。

数値解析プログラムは自作のものであり、最初はTable 1 に示した特定温度のみの計算を行なったが今後、構成物質の温度依存性を直接微小部分に入れて計算できるように、 λ_s , λ_g の値をT [°C]の関数として評価した。これをTable 2 に示す。

これらの式はTable 1 の値を用いて最小二乗曲線を求めたものである。

なお、モデルのメッシュ数は18**3 個、解法はこれまでと同様にSOR 法によった。

Table 2 Approximate Equation

Material	Equation
Al ₂ O ₃	$1.9 \times 10^{-5} T^2 - 0.04t + 26.67$
λ_{g1} (75H ₂ ,25N ₂)	$2.2 \times 10^{-4} T + 1.69 \times 10^{-1}$
λ_{g2} (40H ₂ ,40N ₂ ,20CO)	$1.4 \times 10^{-4} T + 1.04 \times 10^{-1}$
λ_{g3} (Air)	$-2.06 \times 10^{-8} T^2 + 7.8 \times 10^{-5} T + 2.21 \times 10^{-2}$

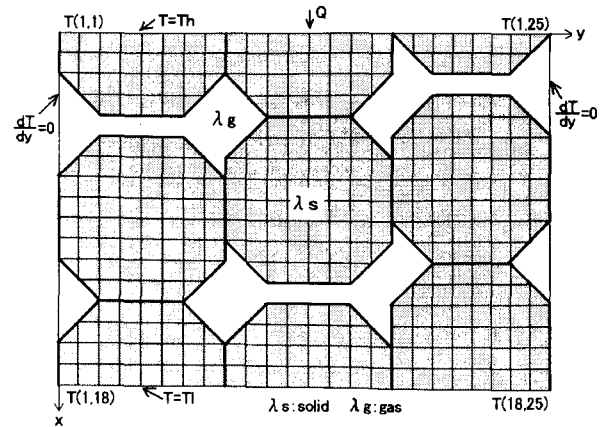


Fig.2 Two dimensional model

Fig.2 Two dimensional model

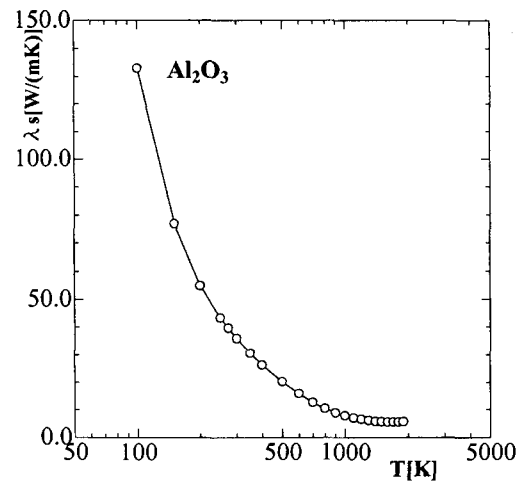
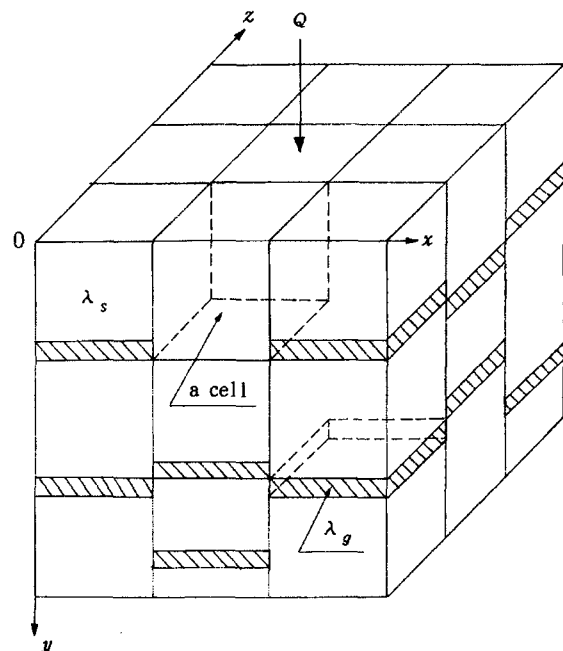
Fig.3 Thermal Conductivity of Al₂O₃

Fig.4 Three dimensional model

5. 結果と考察

5.1 二次元モデル

前節で述べたように、固体は温度依存性を考えた Al_2O_3 を、気体は数種変えてレンガの熱伝導率 λ_r と温度 T との関係を求めた。温度分布の代表例を Fig.5 に示す。固体の熱伝導率 λ_s が気体のそれ λ_g よりも十～数十倍大きいので（この図の場合は約60倍）粒子の中の温度勾配が空隙部分に比して非常に緩やかであることが明らかである。また、このモデルの場合、熱流の流れ方向に左右の粒子間の上方に空隙を仮定したので中央に置かれていた粒子を通った熱が2段目の粒子の左右の接触部を通して屈曲して流れ、これが空隙部分の他に流動抵抗の増加、ひいては全体の熱伝導率の減少につながっていることが理解できる。ただし、本報告では結晶粒子接触面間の熱抵抗を無視しているの、実際にはこれと多少異なる現象を呈することも考えられるが、定性的にはほぼ相違のない様子を示しているものと考えている。

これらの温度分布の計算結果から粒子部分の格子間の温度勾配（本報告のモデルでは下面の格子間）を求め、熱流量が計算できることから、モデル全体の熱伝導率 λ_r が求められる。 λ_r と温度との関係を Fig.6 に示す。図には比較検討のため前報告の計算結果および複合材料の熱伝導率の基本的な式として Maxwell 式・直列の式^[12]の計算結果、さらに、1点だけ与えられていた実験値を示している。本報告のモデルによる値は前報告の値よりも約10%低い値を示し、モデルの改良の効果が現れていると考えられるが、実験値との値の差は大きい。この大きな相違について今後、(1) 実験値の再確認、(2) 温度場を3次元にする、(3) 結晶粒子間の熱抵抗モデルを考慮するなどが必要であると考え、前述の実験および3次元モデルの提案を行った。

5.2 三次元モデル

計算結果の代表例として、中央断面の温度分布を Fig.7 に示す。固体の熱伝導率が気体のそれよりも数十倍大きいので温度勾配の大きいところは気体部分に集中していることが明らかである。また、等温線の屈曲から、熱は粒子の接触部分を通して流れている様子もわかる。三次元モデルでは二次元モデルと異なり粒子の角を落してはいないが定性的な温度分布の様相は Fig.5 と同様と考えてよい。これらの温度分布から場全体の熱伝導率を求めた。

Fig.8 に数値解析結果から得られた熱伝導率 λ_r と温度 T との関係を空隙率 ϕ をパラメーターにして示す。また、比較のために前節の2次元モデルによる結果および非常熱線法によって求められた実験データも併せて示した。

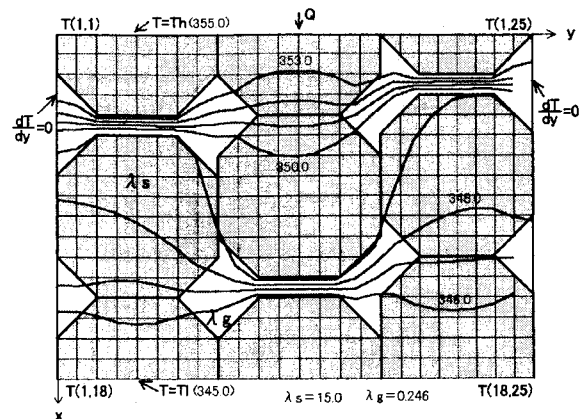


Fig.4 Thermal distribution.

Fig.5 Thermal distribution

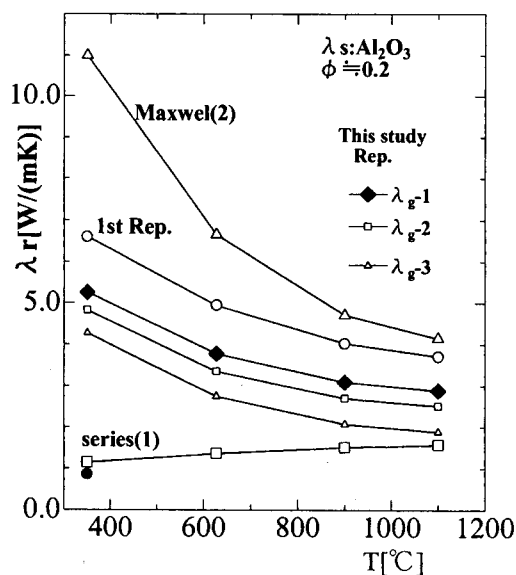


Fig.6 Comparison between Model (Fig.3) and Eq. (1),(2)

この図から以下のことが言える。数値解析・実験のいずれの結果も温度の上昇に伴い、 λ_r は減少する。この原因は Fig.3 に見られる Al_2O_3 の温度依存性に起因している。また、ガスの含有量が多いほど、すなわち ϕ の大きいほど他の条件が同様であれば熱伝導率が小さくなる。また、大きすぎる値を示すと考えられていた2次元モデルの結果は ϕ が小さいにもかかわらず3次元モデルの $\phi = 0.222$ に近い値であったことは予想していなかった。しかし、二次元の空隙は奥行き方向に空間のままであるのに対し、3次元では空間の次に固体が存在する可能性が多く、それが λ_r を大きくするためと考えられる。

一方、実験値はほぼ同様の空隙率を持つ曲線と比較すると特に低温部分では低い値を示すが、実験曲線を外挿すると高温部分では値が近づくと思える。従って、これからの課題は低温領域での解析結果と実験値との大

きな相違の原因を探ることが新たな興味として生じたと考えている。

また、これまでこの研究の端緒になった企業から与えられていた実験値は本研究の値と比較して非常に小さいがこれは相当以前の国の研究機関の実験値であると再確認しており、S I 単位と当時の物理単位との間の記憶違いのように推論される。もし、この推定が正しいとして、桁に問題があるが計算すると $0.858 \times 3.6 \times 1.16 \times \approx 3.59$ となり、測定値に近い結果となる。

6. 結言

本報告は前報に引き続いて耐火断熱レンガの内部構造を考慮しながら数値解析によってモデルの温度分布を計算し、それから熱伝導率を求めて検討を加えたものである。主な結果をまとめると以下のようである。

- (1) 試料の断面を電子顕微鏡で観察し、それに基づいてモデルを改良することが出来た。また、非定常熱線法の実験値とも比較出来た。
- (2) 新たなモデルに対する結果は前報よりも改善されたものといえるが、実験値との低温部分での定量的な相違は大きく、今後さらに検討を加えたい。
- (3) 低温部分の相違が大きいひとつの原因として、固体相をすべて Al_2O_3 とした誤差要因が考えられるので、鋼その他の混合材料を調査し、検討したい。

終わりに、非定常熱線法により熱伝導率を測定して下さったニチアス浜松中央研究所塚原啓二、大村高弘の両氏および試料の断面の走査電子顕微鏡による撮影を下された、秋田県工業技術センター主任研究員菅原靖氏に深く御礼申し上げます。

REFERENCES

- [1] 山田：熱物性, 6-1 (1992), 29-31.
- [2] 沖村他：品川白煉瓦技術報告.44 (2001), 1-8.
- [3] 品川白煉瓦(株)：品川白煉瓦カタログ, 33・45.
- [4] 高橋, 山田：第25回日本熱物性シンポジウム講演論文集, 25 (2004), 201-203.
- [5] 日本機械学会編：熱物性値測定法, 1-48 (1991), 養賢堂, 東京
- [6] 日本熱物性研究会編：熱物性資料集「断熱材編」, 1-7 (1983), 養賢堂, 東京
- [7] 山田, 高橋, 太田：冷凍, 54-626 (1979), 973-982.
- [8] 高橋, 山田, 塚原, 大村：第26回日本熱物性シンポジウム講演論文集, 26 (2005), 138-140.

- [9] TPRC: Thermophysical Properties of Matter, 2 (1970), 119.
- [10] 日本機械学会編：伝熱工学資料 (4), 日本機械学会 (1962), 136-138.
- [11] 赤坂隆：数値解析, コロナ社 (1967), 403-411.

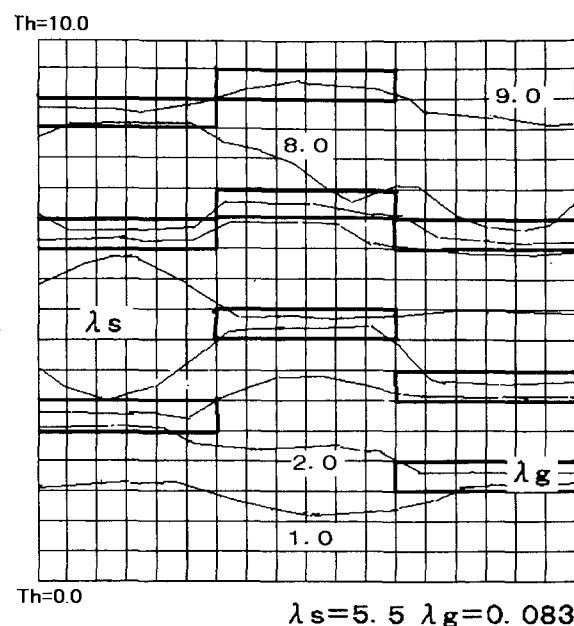


Fig.7 Thermal distribution

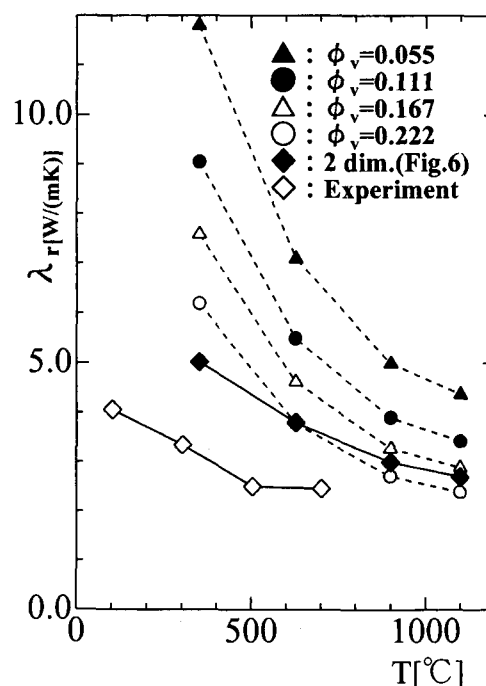


Fig.8 Comparison between Model (Fig.4) and Measurement