

## 樹脂—シラスバルーン複合材の熱伝導率について

鈴木 淳

### On the Heat Conductivity of the Resin Composite Filled with Shirasu Balloons

Atsushi SUZUKI

Department of Home Economics, Faculty of Education

Nagasaki University, Nagasaki

#### Abstract

The heat conductivity of the resin composite filled with shirasu balloons was studied on the basis of a heat-resistance model. Equations derived involve such factors as the particle size of shirasu balloons, the wall thickness of shirasu balloons, volume content of shirasu balloons and the rate of breakage of shirasu balloons. The degree of the effects of the above factors on the heat conductivity was estimated by the results calculated from the equations. Results suggested that the medium-sized ones of the existing shirasu balloons approximately ranged from  $70\mu$  to  $600\mu$  in particle diameter were relatively suitable to reduce the heat conductivity in the case of no effect of convection.

#### 1. はじめに

シラスバルーンは南九州の天然の火山噴出物（シラス）を原料にして発泡させた微細中空ガラス球で、安価に大量に得られるために各種のシラスバルーン複合材として、軽量、断熱、難燃、遮音などの目的用途にその性能が検討<sup>1),2)</sup>されている。

しかし、この種の微細中空球を利用した複合材の熱伝導率については末だ情報が少なく体系的にはまとめられていないようである<sup>1)</sup>。一方、繊維集合体や多孔材料の熱伝導率については従来からモデル的ないしは理論的な多くの研究があり、気孔率との関係も比較的よく整理されている<sup>3)~7)</sup>。しかしその場合でも、試料の構造特性が複雑に影響しあい、その解析は一般には容易ではなく、通常は目的的に単純化して解析が行われている<sup>8),9)</sup>。

その一つに、構成要素の伝熱経路を異にするいくつかの熱流束を考えた包括的で簡便な抵抗モデル<sup>3),4)</sup>があり、それによる試算結果は実測値と比較的よい対応を示しているといわれる。

本報告では、樹脂—シラスバルーン複合材の熱伝導率にその考え方を応用し、まず熱伝導率の試算式を求め、つぎにシラスバルーンの粒子径、外殻の厚さ、充てん率、破壊率などのみかけの充てん効果をその試算結果から推定した。なお、ここでは球内の対流効果を無視しているが、高温域では球径が大きくなると対流が無視できなくなる<sup>1)</sup>。

## 2. 試 算 式

対流および輻射の影響がない場合の樹脂—シラスパルーン複合材の熱伝導率についてその抵抗モデルを図1に示す。それは各要素（樹脂，シラスパルーン，破壊されたシラスパルーンのガラ

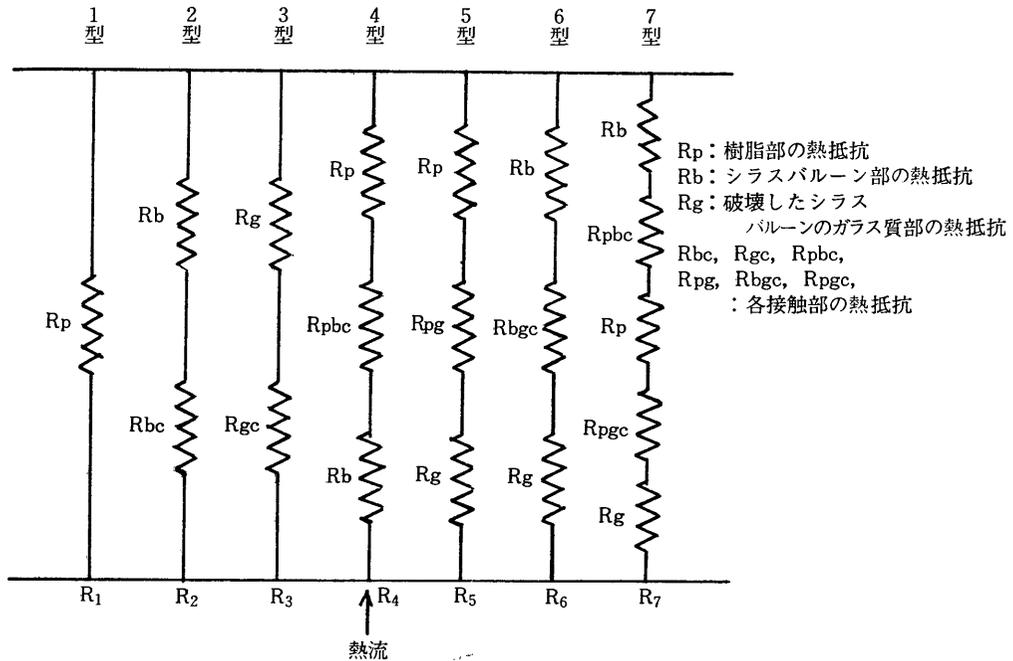


図1. 伝熱抵抗モデル

- 1型：樹脂のみを伝わる熱流
- 2型：シラスパルーンのみを伝わる熱流
- 3型：破壊したシラスパルーンのガラス質のみを伝わる熱流
- 4型：樹脂とシラスパルーンとをシリーズに伝わる熱流
- 5型：樹脂と破壊したシラスパルーンのガラス質とをシリーズに伝わる熱流
- 6型：シラスパルーンと破壊したシラスパルーンのガラス質とをシリーズに伝わる熱流
- 7型：樹脂，シラスパルーンおよび破壊したシラスパルーンのガラス質とをシリーズに伝わる熱流

ス質)を単独およびシリーズに伝わる7つの熱流モデル(1型~7型)から構成(パラレル)される。その場合、各熱流モデルは要素自身の体積分率に依存した伝熱抵抗とその接触による接触熱抵抗とから構成<sup>3),7)</sup>(シリーズ)される。

いま、シラスパルーンの平均半径を  $r$ 、外殻のガラス質の平均厚さを  $d$ 、充てんしたシラスパルーンの体積分率を  $P_b$  とし、成型時の熱プレスによってシラスパルーンの  $\theta$  分率だけが破壊されたとすると、成型後のシラスパルーン複合材の単位体積  $V$  中に占めるシラスパルーンの体積  $V_b$ 、破壊されたガラス質の体積  $V_g$ 、樹脂の体積  $V_p$  はそれぞれつぎのように示される(成型時の気泡はないものとする)。

$$\left. \begin{aligned} V_b &= (1-\theta) P_b V \\ V_g &= [1 - \{(r-d)/r\}^3] \theta P_b V \\ V_p &= [1 - [1 - \{(r-d)/r\}^3 \theta] P_b] V (=V - V_b - V_g) \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

つぎに樹脂，シラスバルーン，ガラス質の熱伝導率をそれぞれ  $\lambda_p$ ， $\lambda_b$ ， $\lambda_g$  とすると，図1における各要素の体積分率に依存した伝熱抵抗  $R_p$  (樹脂)， $R_b$  (シラスバルーン)， $R_g$  (破壊されたガラス質) はそれぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} R_p &= 1/\{(V_p/V) \lambda_p\} \\ R_b &= 1/\{(V_b/V) \lambda_b\} \\ R_g &= 1/\{(V_g/V) \lambda_g\} \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

また，図1における各要素の接触熱抵抗は次のように取り扱う<sup>3),7)</sup>。

まず，樹脂以外の接触の場合にも，各要素が樹脂の薄膜を介して接触するものとし，樹脂の熱伝導率とガラス質の熱伝導率との相加平均が各要素の接触部の熱伝導率  $\lambda_c$  として存在するものとする。

$$\lambda_c = (\lambda_g + \lambda_p)/2 \quad \dots\dots(3)$$

そして，各接触熱抵抗は接触部の熱伝導率  $\lambda_c$  と充てん要素としてのシラスバルーンの体積分率  $V_b/V$ ，あるいは破壊されたガラス質の体積分率  $V_g/V$  (ただし，シラスバルーンと破壊されたガラス質との接触では両者の相加平均) によって次式のように決定されるものとする。

$$\left. \begin{aligned} R_{bc} &= 1/\{(V_b/V) \lambda_c\} \\ R_{gc} &= 1/\{(V_g/V) \lambda_c\} \\ R_{pbc} &= 1/\{(V_b/V) \lambda_c\} \\ R_{pgc} &= 1/\{(V_g/V) \lambda_c\} \\ R_{bgc} &= 1/\{[(V_g + V_b)/2V] \lambda_c\} \end{aligned} \right\} \dots\dots(4)$$

ここで， $R_{bc}$ ：シラスバルーン同志の接触部の熱抵抗， $R_{gc}$ ：破壊されたガラス質同志の接触部の熱抵抗， $R_{pbc}$ ：樹脂とシラスバルーンの接触部の熱抵抗， $R_{pgc}$ ：樹脂と破壊されたガラス質の接触部の熱抵抗， $R_{bgc}$ ：シラスバルーンと破壊されたガラス質の接触部の熱抵抗

また，図1において次式が与えられる。

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R_p \\ R_2 &= R_b + R_{bc} \\ R_3 &= R_g + R_{gc} \\ R_4 &= R_p + R_{pbc} + R_b \\ R_5 &= R_p + R_{pgc} + R_g \\ R_6 &= R_b + R_{bgc} + R_g \\ R_7 &= R_b + R_{pbc} + R_{pgc} + R_g + R_p \end{aligned} \right\} \dots\dots(5)$$

ここで， $R_1 \sim R_7$ ：各熱流束における熱抵抗。

すると，図1において樹脂—シラスバルーン複合材の熱伝導率  $\lambda$  は次式で与えられる。

$$\lambda = 1/R = \sum_{n=1}^7 1/R_n \quad \dots\dots(6)$$

ここで， $R$ ：系の全熱抵抗。

ところで，(2)式におけるシラスバルーンの熱伝導率  $\lambda_b$  については，単一独立気泡を表現する便法として，中空の正6面体の伝熱抵抗から求まる既存の次式<sup>4)</sup>を流用する。

$$\lambda_b = 1/\left[ \{1 - (r-d)/r\} / \lambda_g + \{(r-d)/r\} / [\lambda_g \{1 - \{(r-d)/r\}^2\} + \lambda_a \{(r-d)/r\}^2] \right] \dots\dots(7)$$

ここでは、中空の正6面体の内外の一辺の長さをそれぞれシラスバルーンの 内径および外径の長さで表わしている（この変換による体積誤差は取り扱いの性質上  $\lambda_b$  には影響を及ぼさない）。

以上、(1)式、(2)式、(3)式、(4)式、(5)式、(7)式を(6)式に代入することにより、樹脂—シラスバルーン複合材のみかけの熱伝導率  $\lambda$  が計算される（代入式は繁雑のため省く）。

なお、樹脂—シラスバルーン複合材の単位体積  $V$ 中に占めるシラスバルーンの空気の体積  $V_{ba}$ 、その外殻であるガラス質の体積  $V_{bg}$ 、および樹脂—シラスバルーン複合材の比重  $\rho$  はそれぞれ次式によって与えられる。

$$\left. \begin{aligned} V_{ba} &= \{(r-d)/r\}^3 (1-\theta) P_b V \\ V_{bg} &= [1 - \{(r-d)/r\}^3] (1-\theta) P_b V \end{aligned} \right\} \dots\dots(8)$$

$$\rho = \{\rho_p V_p + \rho_a V_{ba} + \rho_g (V_{bg} + V_g)\} / V \dots\dots(9)$$

ここで、 $\rho_p$ 、 $\rho_a$ 、 $\rho_g$ ：それぞれ樹脂、空気、ガラスの比重。

比重  $\rho$  は(1)式、(8)式の代入によって求まるが、代入式は省く。

### 3. 試算条件

試算に当ってはつぎの諸点に留意した。

1) シラスバルーンの粒子径：現在粒子径として数 $10\mu$ ～数 $100\mu$ の範囲が多い<sup>1),10)</sup>。そこで平均粒子半径として $10\mu$ 、 $50\mu$ 、 $100\mu$ 、 $200\mu$ 、 $300\mu$ 、 $400\mu$ の各大きさを選択した（充てん粒子の粒度分布は考慮せず）。

2) シラスバルーンの外殻の厚さ：粒子径にかかわらず、ほぼ $3\mu$ ～ $7\mu$ の厚さを示すといわれる<sup>2)</sup>。そこで外殻の平均厚さ  $d$  として $3\mu$ 、 $5\mu$ 、 $7\mu$ の各大きさを選択した。

3) シラスバルーンの体積充てん率：最密充てん<sup>11)</sup>に近いほぼ70%（均一粒子径の場合）を目安とし、 $P_a$ として0.3、0.5、0.7（ $\times 10^2\%$ ）の各大きさを選択した。

4) シラスバルーンの破壊率：たとえば、ある条件下（成型）ではシラスバルーンの体積充てん率が50%を越えると粒子が破壊され始めたという<sup>2)</sup>。ここでは破壊率  $\theta$  として0、0.1、0.3、（ $\times 10^2\%$ ）の3つの場合を任意に選択した。

5) 各素材の熱伝導率：樹脂の熱伝導率  $\lambda_p$  はポリスチレンの熱伝導率として  $\lambda_p = 3 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}^{11)-14)}$ （樹脂の熱伝導率はその種類によってほぼ  $3 \sim 12 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}^{12)}$  の範囲の値をとるが、断熱性の観点から低い値を選択した）、シラスバルーンの外殻の熱伝導率  $\lambda_g$  はガラス質の熱伝導率として  $\lambda_g = 25 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}^{15)}$ 、シラスバルーンの気泡部の熱伝導率  $\lambda_a$  は空気の熱伝導率として  $\lambda_a = 0.58 \times 10^{-4} \text{ cal/cm}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}^{3)}$  を利用した。

6) 各素材の比重：ポリスチレン、ガラス質および空気の比重はそれぞれ  $\rho_p = 1.05^{14)}$ 、 $\rho_g = 2^{16)}$ 、 $\rho_a = 0.0012^{3)}$  を利用した。

以上の各設定値を任意に選択し試算した。

### 4. 試算結果および考察

#### 4.1 粒子との関係

図2、図3には主な試算結果としてポリスチレン—シラスバルーン複合材の熱伝導率を示す。

図2では破壊率が零の場合のシラスバルーンの粒子半径、外殻の厚さおよび充てん率などの充てん効果を示され、図3では破壊率との関係が示されている。

図2、図3から判るように熱伝導率は粒子径によって変化し、粒子半径が  $100\mu$  以上では漸減し、 $100\mu$  以下では急増する。これは粒子が小さいと充てん特性上、外殻のガラス質による伝熱効果が大きくなること、および空気の含有量が少くなることなどが考えられる。いま、シラスバ

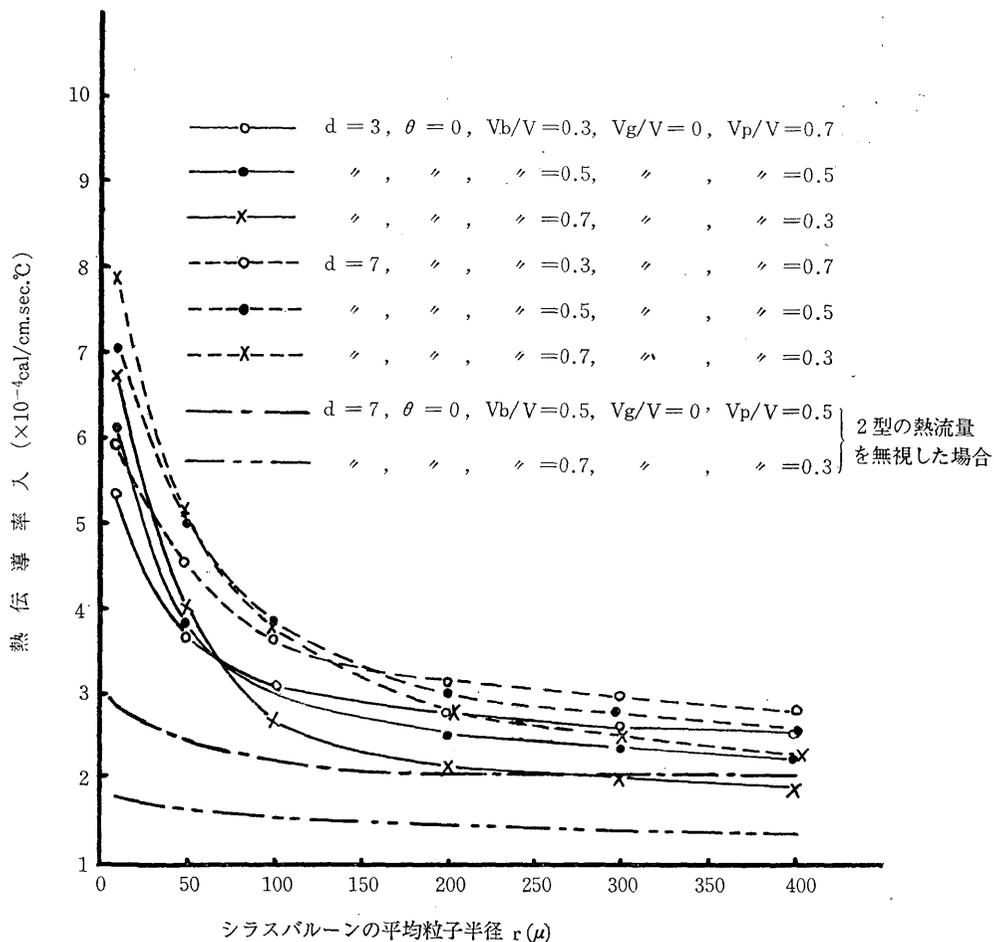


図2. 樹脂-シラスバルーン複合材の熱伝導率の試算結果の1例  
(破壊率0のとき、母材はポリスチレン)

ルーンのみを伝わる2型の熱流モデルを考えると、球による点接触を不問としているので熱伝導率の計算値は実測値より大きくなることが予想される。たとえば、図2の破線は2型の熱流量を無視したときの熱伝導率で粒子が小さいほどその影響が大きいことが判る。また後述の図4で熱伝導率と気泡率との関係が示されるが、点線内のプロットは粒子半径が $10\mu$ の場合で、充てん上気泡率が低く限定されることが判る。ところで、現状のシラスバルーンは $600\mu^{10)}$ 位までの粒子径をもつが、これは試算結果から考えると熱伝導率を低く押えるのに比較的良好な範囲にあるといえよう。また、図2、図3からシラスバルーンの外殻の厚さも熱伝導率にかなりの影響を及ぼすことが予測され、用途とも関連して気泡内に対流が起らない限界での高発泡の粒子径が望まれる。一方また、図3によれば粒子が破壊されると熱伝導率がかなり上昇することも予測され、実験によれば熱プレスによって体積充てん率が50%を越えると破壊が起る可能性もあるという<sup>2)</sup>。そこで、断熱性の面からは破壊のない高充てんの成型法<sup>1)</sup>が望まれる。

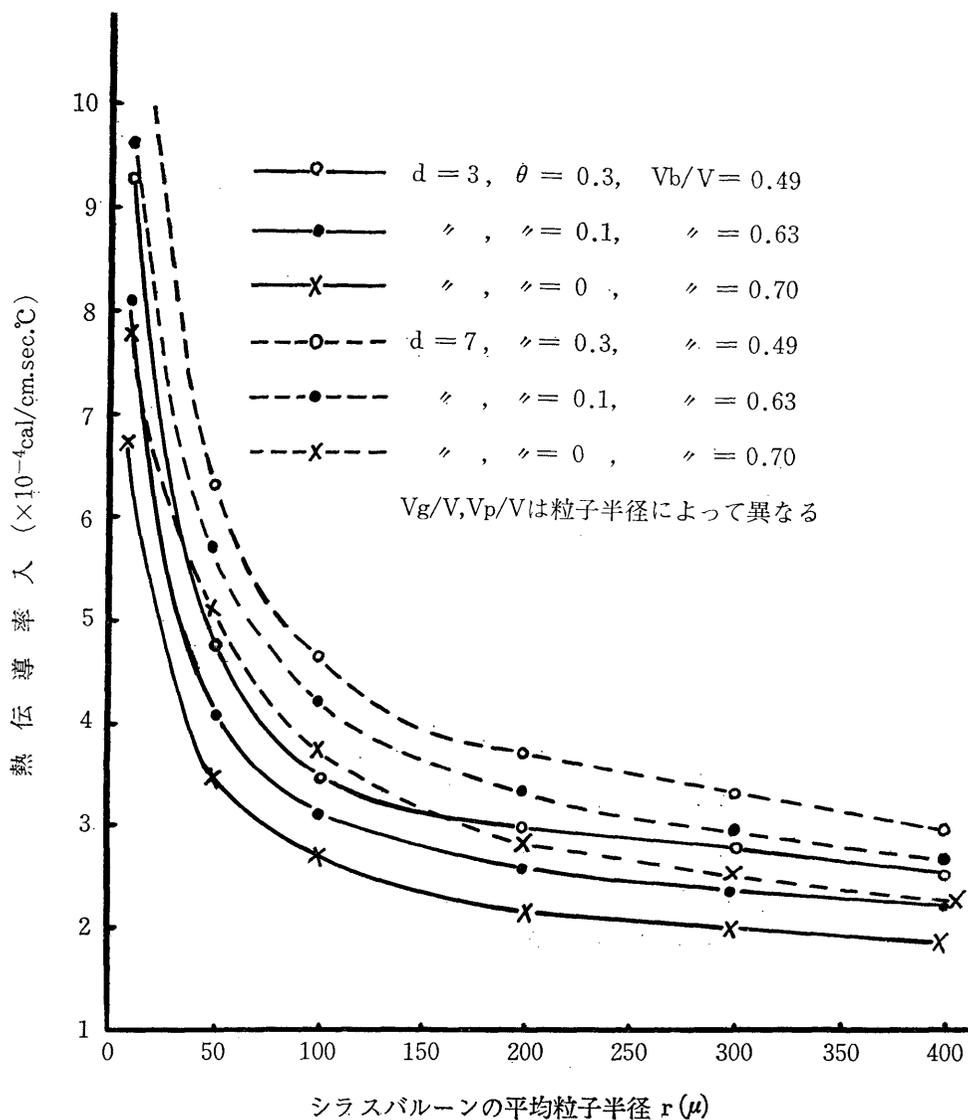


図3. 樹脂-シラスバルーン複合材の熱伝導率の試算結果の1例  
(破壊を伴うとき、母材はポリスチレン)

#### 4.2 気泡率および比重との関係

図4は熱伝導率の試算結果を気泡率および比重に対して見直したものである。一般に対流などの影響がなければ、気泡率が大きくなるに従って、すなわち比重が小さくなるに従って熱伝導率は小さくなる<sup>4),5)</sup>。本結果でもその傾向を読み取ることができるが、構成要素、すなわちシラスバルーンの充てん特性(粒子径、外殻の厚さ、充てん率、破壊率)などによって実際には大きなバラツキを呈している。すなわち、気泡率や、比重のみによって複合材の熱伝導率を一義的に判断することはできないようである。

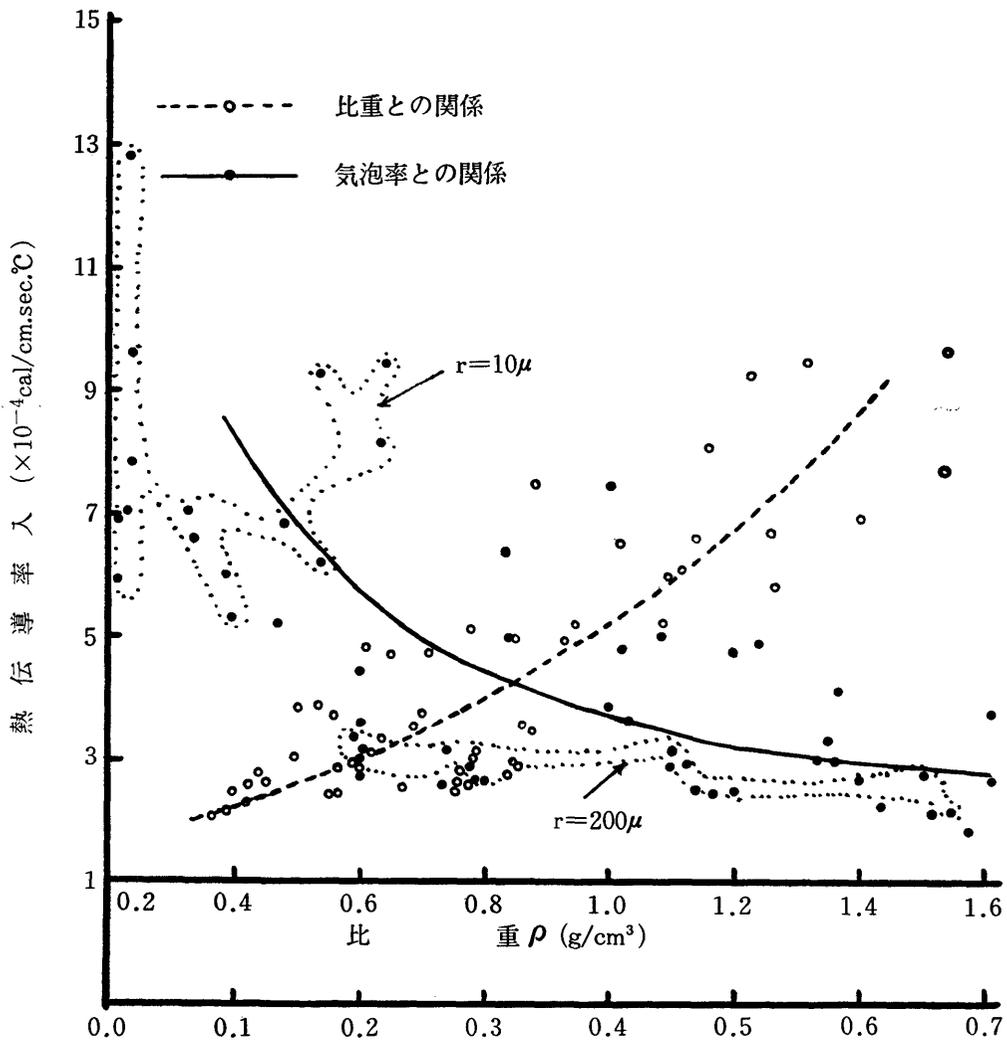


図4. 試算による樹脂-シラスバルーン複合材の熱伝導率と比重および気泡率との関係 (母材はポリスチレン)

## 5. ま と め

以上、樹脂 (ポリスチレン) -シラスバルーン複合材の熱伝導率に対する シラスバルーンの粒子径、外殻の厚さ、充てん率および破壊率などの効果の大きさが、含気体の伝熱モデルの一つとして従来比較的妥当と考えられている伝熱抵抗モデル<sup>3),4)</sup>を用いて検討された。

それによると数 $100\mu^{1),10)}$ の粒子径をもつ現状のシラスバルーンは断熱性の面から、比較的適合した範囲にあることが推察される。その場合、充てん率を大きくとり、かつ成型による破壊がないようにする必要がある。

なお、本研究は繊維高分子材料研究所において得た情報を基礎に検討を加えたもので、ここに感謝申し上げます。

## 文 献

- 1) 日本化学会編：複合材料，p. 120, 1975, 学会出版センター
- 2) 小野岡；ポリマーの友，No. 10, 665(1972)
- 3) 織機学会編；基礎繊維工学[I]，p. 169, 1965, 織機学会
- 4) 渡辺；保温保冷工学，p. 128, 1960, 朝倉書店
- 5) 田中；ケミカル・エンジニアリング，No. 2, 5(1970)
- 6) 仲；繊維工学，21, No. 5, 49(1968)
- 7) 鈴木，大平；織機学会論文集，30, No. 9, T158(1977)
- 8) 堀川，松田；織機学会論文集，29, T84(1974)
- 9) 鎌田；織学誌，31, T317(1975)
- 10) 小野岡，長谷川，小川；第16回材料研究連合会講演会資料，p. 153, 1972
- 11) 桜内；プラスチック材料読本，p. 110, 1971, 工業調査会
- 12) 大阪市立工業研究所プラスチック読本編集委員会・プラスチック技術協会；プラスチック読本，p. 41  
1974, プラスチックエージ
- 13) 織機学会編；繊維便覧，p. 256, 1968, 丸善
- 14) 村橋，小田，井本；プラスチック，p. 903, 1969, 朝倉書店
- 15) 作花，境野，高橋；ガラスハンドブック，p. 711, 1975, 朝倉書店
- 16) 桜内；プラスチック材料読本，p. 95, 1971, 工業調査会