

サーモバリアの断熱性能に関する報告書

静岡大学工学部

中山 顕

平成 24 年 3 月 29 日

1. 放射率の測定

放射率の計測には、表 1 に示す仕様を有する京都電子工業株式会社の D and S ARERD 放射率計を用いた。この放射率計は、ヒートシンクの上に測定試料を乗せ、検出器をその試料の上に被せるだけで、短時間内に、放射率の測定を可能にする。図 1 に放射率計の検出部とメーター部を示す。熱容量の大きなヒートシンクは試料温度をヒートシンクと同じ温度に保つために用いられる。検出器の内側上部にはヒータが設置されており、これより放射された赤外線が試料表面で反射される量を計測することで、反射率を直示することができる。

表 1 D and S ARERD 放射率計の仕様

検出器部 (AE)

測定波長領域	3~30 μm
リニアリティ	出力は、 ± 0.01 放射率単位に比例
出力	約2.5mV
応答時間	約10秒
電源	AC100V

メーター部 (RD)

精度	指示値に対して $\pm 0.3\% + 1 \text{ digit}$
使用温度範囲	-10~40 $^{\circ}\text{C}$
外形寸法	本体:80(W)x152(D)x51(H)mm
電源	DC9V
質量	約300g

測定対象波長域は赤外線から遠赤外線にわたる 3 ~ 30 μm である。



図1 D and S ARERD 放射率計の検出部とメーター部

黒色標準板（放射率 0.85）とステンレス板（放射率 0.05）の二枚を用いて事前に校正し、計測を行った。したがって、計測できる放射率の範囲は 0.05 から 0.85 となる。試料がヒートシンク（黒いテーブル）と熱平衡に至るには数分を要することから、5 分程度経過し、メーターの指示が落ち着いた時点の値を持って放射率とした。

図2および3にサーモバリア・スリム（エアキャップなしスリムタイプ）およびサーモバリアW（エアキャップダブルタイプ）を示す。アルミ表面の性状に差が認められる。



図2 サーマバリア・スリム



図3 サーマバリアW

D and S ARERD 放射率計による各試料の放射率の計測結果は，表 2 に示す通りである．

表 2 放射率測定結果

試料	放射率
サーモバリア・スリム	0.05～0.15
サーモバリアW	0.05～0.15
バブルポリエチレン	0.68～0.72

サーモバリア・スリムおよびサーモバリアW，両者共に極めて低い放射率を示している。測定箇所をずらすと，今回の放射率測定範囲の最小限界値に当たる 0.05 からその 3 倍の 0.15 までメーターの指示が変化した。測定点の表面性状の違いに応じて，その測定値に変化が現れたものと思われる。最小値用の校正に用いたステンレス板の放射率が 0.05 であることから，測定値の精度に問題が残る。測定箇所に依っては，放射率が測定範囲外の 0.05 以下である可能性もある。しかし，いずれにせよ，サーモバリア・スリムおよびサーモバリアW，両者共に，放射率は十分に小さく，断熱が期待できる値であることが確認できた。なお，サーモバリアWの間に挟まれているバブルポリエチレンについても放射率を測定した結果，0.7 程度であることが分かった。

2. 熱回路に基づく熱抵抗値の予測

次に，岐阜県生活技術研究所で，J I S 規格 A 1420 に沿い，熱抵抗の計測を行った際の報告書より，サーモバリアの断熱効果を探ってみる。試験体は，図 4 に示す 5 種類である。各種の熱抵抗の測定値を表 3 に示す。

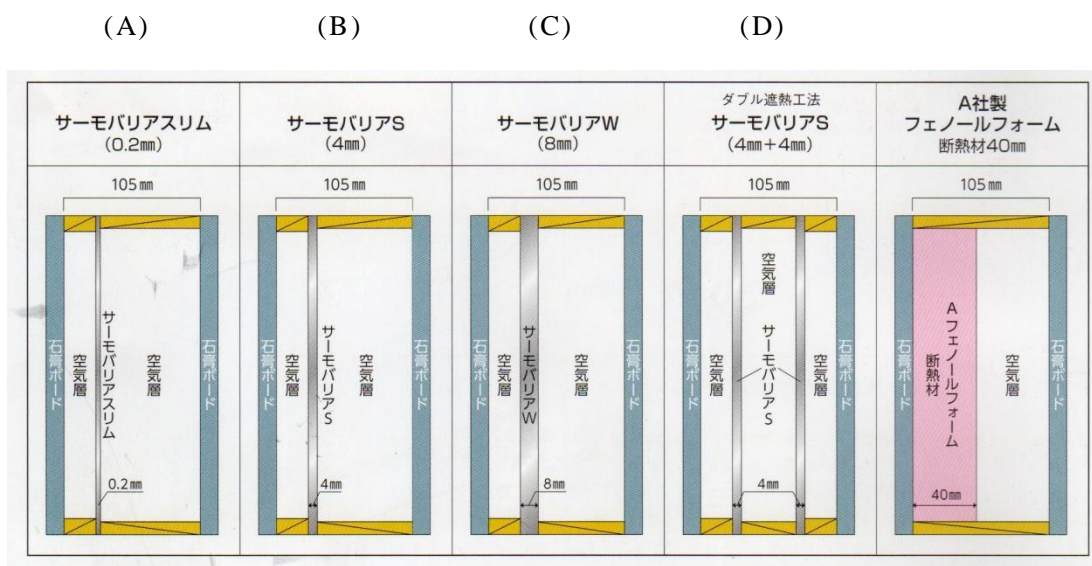


図 4 熱抵抗の測定

表 3 熱抵抗の測定結果

種類	(A) サーマバリアスリム (0.2 mm)	(B) サーマバリアS (4mm)	(C) サーマバリアW (8mm)	(D) サーマバリアS 2枚
熱抵抗 [m ² K/W]	1.68	1.56	1.53	2.75

まず (A) サーマバリア・スリム, (B) サーマバリア S および (C) サーマバリア W の熱抵抗を比較する. 試料が厚くなる程, 熱抵抗が低めを示していることが分かる. すなわち, 熱伝導とは対照的に, 試料 (サーモバリア) が厚くなる程, 熱抵抗が小さくなることを意味している. これは次のような理由に依る.

石膏ボード間の空気層が静止している場合, 空気層中では熱伝導とふく射で熱が移動する. ふく射に対応する熱抵抗は変わらないが, 空気層内の熱伝導に対応する熱抵抗はサーモバリアが厚くなる程 (すなわち本来, 空気が占有する空間を空気より熱伝導の高いバブルポリエチレンが占める程), 全体として小さくなる. これにより, サーマバリアが厚くなる程, 全

体として熱抵抗が低下するものと考えられる。

次に、石膏ボード間の空気層においてふく射と熱伝導のどちらが支配的かを考える。伝導の効果をサーモバリアの厚さを変化させて観察してみる。

(A) サーマバリア・スリム、(B) サーマバリア S および (C) サーマバリア W と変化させても、熱抵抗値が 1.68, 1.56 および 1.53 と変化が少ないことから、空気層の熱移動としては、熱伝導よりもふく射が支配的であることが分かる。そこで、石膏ボード間の空気層における熱移動がふく射のみで生ずるものと単純化し、(B) サーマバリア S および (D) サーマバリア S 2 枚の場合に注目する。これらの 2 ケースについて、図 5 および 6 に熱回路を描いてみる（熱流体力学, pp. 121-122, 中山ら著, 共立出版）。

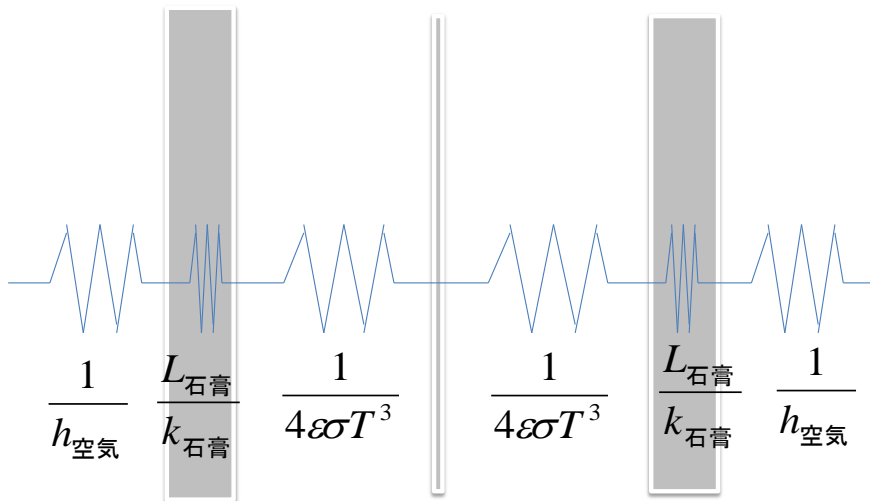


図 5 熱抵抗 (B) サーマバリア S

図中、サーモバリアの放射率を ε 、室内外の空気層の熱伝達率を $h_{\text{空気}}$ 、石膏ボードの熱伝導率および厚さを $k_{\text{石膏}}$ および $L_{\text{石膏}}$ としてある。この時、

(B) サーマバリア S の場合の熱抵抗は

$$R_{(B)} = r + \frac{1}{2\varepsilon\sigma T^3} \quad (1)$$

ここで、 r は石膏ボードと室内外の空気層の合成抵抗である。

$$r = 2 \left(\frac{1}{h_{\text{空気}}} + \frac{L_{\text{石膏}}}{k_{\text{石膏}}} \right), \quad (2)$$

また、 σ はボルツマン定数、 T は空気層の平均絶対温度であり、それぞれ次のような値を取るものとする。

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 K^4], \quad T = 273 + 30 = 303K \quad (3a,b)$$

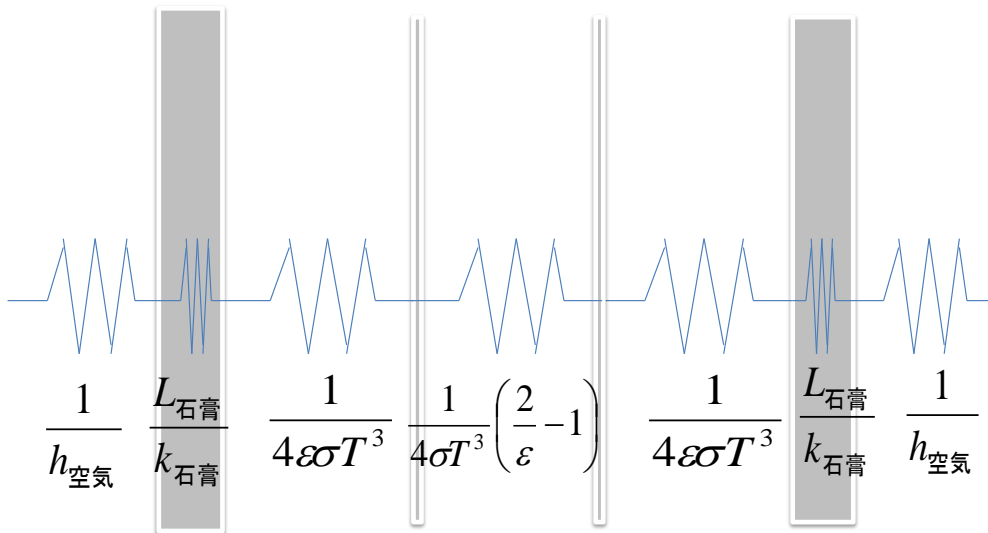


図6 熱抵抗 (D) サーモバリア S 2 枚

したがって、(D) サーモバリア S 2 枚の場合の熱抵抗は、

$$R_{(D)} = r + \frac{1}{2\varepsilon\sigma T^3} + \frac{1}{4\sigma T^3} \left(\frac{2}{\varepsilon} - 1 \right) \quad (4)$$

式（１）と（４）を連立させ、未知数であるサーモバリアの放射率 ε と石膏ボードと室内外の合成低抗 r を次のように求めることができる。

$$\varepsilon = \frac{2}{1 + 4\sigma T^3 (R_{(D)} - R_{(B)})} = \frac{2}{1 + 4 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 303^3 \times (2.75 - 1.56)} = 0.235 \quad (5)$$

$$r = R_{(B)} - \frac{1}{2\varepsilon\sigma T^3} = 1.56 - \frac{1}{2 \times 0.235 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 303^3} = 0.211 \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad (6)$$

この様に、石膏ボード間の空気層における熱移動をふく射のみと近似した場合は、ふく射率が実測値（0.05～0.15）より高めの値（0.235）となる。現実には石膏ボード間の空気層は完全には静止しておらず、対流による熱移動が存在するために放射率が高めにでたと考えられる。したがって、ふく射のみと近似し算出したサーモバリアの放射率 $\varepsilon=0.235$ は対流の影響も加味した「みかけのふく射率」と考えることができる。

表 4 熱抵抗の測定結果と予測の比較

種類	(A) サーモ バリアスリム	(B) サーモ バリアS	(C) サーモバ リアW	(D) サーモバ リアS二枚
熱抵抗 [m ² K/W] 実 測	1.68	1.56	1.53	2.75
予測 $\varepsilon=0.235,$ $r=0.211 \text{ [m}^2\text{K/W]}$	1.56	1.56	1.56	2.75
誤差	7%	0%	2%	0%

石膏ボード間の空気層における熱移動をふく射のみと近似し、見かけの放射率 $\varepsilon=0.235$ を用いて算出した熱抵抗の予測値を、実測値と共に、表 4 に比較してみた。両者の誤差は最大でも 7%と、ほぼ妥当な見積もりが可能であることが分かる。

熱回路に基づく以上の考察より、断熱効果の視点からは、バブルポリエチレンの厚みは薄くした方が良く、また、サーモバリアを 2 枚置くことで（熱抵抗が約 2 倍に増加し）大きく断熱効果が期待できることなどが分かった。空気層の厚さは基本的に放射伝熱に影響しないものの、対流が発生しないように、薄くする方が望ましい。

3. サーマバリアの断熱効果

サーモバリアの厚みによる違いは無視するものとし、石膏ボード間の空気層にサーモバリアを n 枚設置した場合を考える。その際、熱抵抗は、式 (4) より推察できるように以下で与えられる。

$$R_n = r + \frac{1}{2\varepsilon\sigma T^3} + \frac{n-1}{4\sigma T^3} \left(\frac{2}{\varepsilon} - 1 \right) = r + \frac{1 + \left(\frac{2}{\varepsilon} - 1 \right) n}{4\sigma T^3} \quad (7)$$

この時の断熱効果を考えるに当たり、石膏ボード間に厚さ $L_{\text{グラス}}$ のグラスウール断熱材を置いた時の熱抵抗と比較してみる。厚さ 100mm の時には、熱抵抗が 2.0[m²K/W] となることが判明していることから、以下を得る。

$$R_{\text{グラス}} = r + \frac{L_{\text{グラス}}}{k_{\text{グラス}}} = 0.211 + \frac{0.1}{k_{\text{グラス}}} = 2.0 \quad (8)$$

上式を解くことにより、グラスウール断熱材の熱伝導率は $k_{\text{グラス}} = 0.0559$ [W/mK] であることが分かる。ここで、 $R_n = R_{\text{グラス}}$ と置くことで、以下のようにサーモバリアを n 枚設置した場合と同じ断熱効果を得るために要するグラスウール断熱材の厚さ $L_{\text{グラス}}$ [m] を求めることができる。

$$L_{\text{ガラス}} = \frac{k_{\text{ガラス}}}{4\sigma T^3} \left(1 + \left(\frac{2}{\varepsilon} - 1 \right) n \right)$$

$$= \frac{0.0559}{4 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 303^3} \left(1 + \left(\frac{2}{0.235} - 1 \right) n \right) = 0.00886(1 + 7.51n) \quad (9)$$

上式を用い、サーモバリアを1, 2, 3枚と置いた場合のグラスウール断熱材の相当厚さ $L_{\text{ガラス}}$ を表5に示す。

表5 サーモバリアの断熱効果

サーモバリアの枚数 n	1	2	3
$L_{\text{ガラス}}$	75mm	142mm	208mm

サーモバリアSダブル遮熱工法 ($n=2$) を用いると、グラスウール 142 mm 相当の効果が期待できることが分かる。(カタログでは 130 mm となっているが、石膏ボードと室内外の空気層の合成抵抗 r を考慮すると、このようにもっと厚く 142 mm となる。) 大ざっぱには、次式で算出される厚さのグラスウール断熱材に相当すると考えて良い。

$$L_{\text{ガラス}} = \text{サーモバリアの枚数} \times 70 \text{ mm} \quad (10)$$

4. 結び

石膏ボード間の空気層中にサーモバリアを置くことで高い断熱効果が期待できる。空気層ではふく射が支配的であるため、ふく射伝熱のみを考えた熱回路により熱抵抗の予測が可能である。JIS規格に基づく熱抵抗の測定値を用い、熱回路理論に基づき算出される放射率は 0.235 であり、D and S ARERD 放射率計で測った値 0.05~0.15 に比べ高い。これは、空気層の対流を完全に無視したためであるが、それでも、この見かけの放

射率 0.235 を用いる際，式(7)により，ほぼ正確な熱抵抗の予測が可能となる．サーモバリアのバブルポリエチレンの厚さはほとんど放射伝熱に影響しない．すなわち，サーモバリアの枚数が同じであればタイプに依らず同程度の断熱性能（式(7)）が得られる．サーモバリアを設置する空気層の厚さも基本的に放射伝熱に影響しないものの，対流が発生しないように，薄くする方が望ましい．

なお，サーモバリアの断熱性能は $L_{\text{ガラス}} = \text{サーモバリアの枚数} \times 70 \text{ mm}$ 相当のガラスウールに対応すると考えて良い．