ガスバーナ加熱下の能動熱遮断層内温度分布*

円山重直^{*1}, 清水直孝^{*2}Temperature Distribution in a Layer of Active Thermal Insulation System
Heated by a Gas Burner

Shigenao MARUYAMA and Naotaka SHIMIZU

Temperature distribution in a layer of an active thermal insulation system was measured experimentally. A semitransparent porous layer was heated by a gas burner, and air was injected from the back face of the layer. The temperature in the layer was measured by thermocouples. The temperature distributions were compared with numerical solutions. The thermal penetration depth of the active thermal insulation layer with gas injection can be reduced to 3 mm. The surface temperature of a conventional insulation layer without gas injection reached 1 500 K, and the temperature at the back surface of a 10 mm thick layer reached 600 K. The transient temperature of the active thermal insulation reached a steady state very quickly compared with conventional insulation. These characteristics agreed qualitatively with numerical solutions.

Key Words: Thermal Radiation, Heat Transfer Control, Active Thermal Insulation, Porous Media

1. 緒 言

高温環境からの熱防御は、今後の重要な技術課題の一つである。現在までに、種々の断熱・熱防御技術が開発されており、それらに関する研究も多い。一般に多用されている多孔質体やグラスウールなどの繊維の集合体を用いた従来の断熱法は、壁面が高温にさらされると熱放射による伝熱が増加し、断熱性能が著しく低下する。

円山ら⁽¹⁾は、光学的に半透過性で微細構造を有する繊維の集合体や多孔質体の層に低温ガスを裏面から透過させる能動熱遮断の原理を提唱している。熱放射線で加熱された多孔質層は逆流する低温ガスによって効率よく冷却され、加熱されたガスは系外に排出される。このように、多孔質層とガスの透過を組合せた能動熱遮断の原理を応用することによって、高性能な断熱層ができる可能性がある。矢野ら⁽²⁾は、多孔質体に水を透過させた高性能熱遮断層を防火壁として応用することを試みている。

能動熱遮断の解析は、熱放射・対流・伝導の複合伝熱問題となるが、円山らは、伝熱モデルの定式化と数値解析を行い、能動熱遮断層の非定常特性⁽³⁾や作動ガスの影響⁽⁴⁾について解析した。また、能動熱遮断層を用いた伝熱制御の可能性⁽⁵⁾も明らかにしている。しかし、これらの理論的研究の裏付けとなる実験的研究はいまだ行われていない。

本研究では、能動熱遮断実験の第1段階として、ガスバーナで層前面を加熱した場合の能動熱遮断層内温度分布の定常および非定常特性を測定した。この結果と数値解析結果を比較することによって能動熱遮断の特性を定性的に検証した。

2. 主 要 記 号

A_a, A_{gv} : 対流熱移動, 対流熱伝達の各パラメータ
〔式(2)〕

A_{mc}, A_{gc} : 多孔質体と透過ガスの無次元熱伝導パラメータ〔式(2)〕

c_{pg}, c_s : 透過ガスと多孔質体の比熱

d_p : 多孔質体の等価直径

E_1, E_2 : 入射放射熱流束, $\sigma T_1^4, \sigma T_2^4$

h_e : 多孔質体と透過ガス間の熱伝達率

k_m, k_g : 多孔質体と透過ガスの熱伝導率

* 平成3年11月25日 日本機械学会熱工学講演会において講演, 原稿受付 平成3年12月12日。

*¹ 正員, 東北大学流体科学研究所 (〒980 仙台市青葉区片平2-1-1)。

*² 東北大学工学部 (現: (株)日立製作所日立工場)。

- m_g : 透過ガスの質量速度
 q^+, q^- : 前方および後方放射熱流束
 q_R : 放射熱流束 $= q^+ - q^-$
 q_s : 前表面からの対流による熱流束
 Q : 無次元熱流束 $= q/(E_1 - E_2)$
 T_1, T_2 : 境界における放射熱流束の特性温度
 T_s, T_g : 多孔質層内の固体温度と透過ガス温度
 T_{g1} : ガスバーナの燃焼ガス温度の推定値
 T_c : 層内熱電対の指示値
 t : 時間
 t^* : 無次元時間 [式(1)]
 x : 層表面からの距離
 θ : 無次元温度 $= (T - T_2)/(T_1 - T_2)$
 ρ_s, ρ_g : 多孔質固体とガスの密度
 σ : ステファン・ボルツマン定数
 σ_e : 多孔質体の減衰係数
 τ : 光学厚さ $= x\sigma_e$

3. 実験装置と実験方法

3.1 実験装置 図1に実験装置の概略を示す。能動熱遮断層の透過ガスとして、常温常圧の空気を用いた。ポンプにより供給される空気は、フローメータを通過して測定部へ達し、能動熱遮断層の裏面から前面に向かって透過する。熱遮断層の加熱には、都市ガス用ガスバーナを使用した予混合火炎によって行った。ガスバーナに供給される都市ガスと、ポンプにより加圧された燃焼用空気は、それぞれフローメータに接続されており、流量の調節ができる。また、炎が測定装置の空気噴出部のノズルや側壁を加熱しないようにするた

図1 実験装置と計測システム

め、能動熱遮断層前方に厚さ6mmのカオウル製の防災ついたてを設けた。

層内温度測定にはK熱電対(素線径76 μ m)を用い、多点式デジタルマルチ温度計で測定した。デジタル温度計はGP-IBインタフェースを介してパーソナルコンピュータに接続されており、任意の時間間隔でオンライン測定を行い、測定データをグラフと数値で出力できるように設定した。

図2に測定部詳細図を示す。測定部は、空気を均一に噴出させる空気噴出部と能動熱遮断層に大別される。能動熱遮断層に空気を送り込むための分散板は、縦横50 $\times$ 50mm²、厚さ0.5mmのステンレス製多孔板で、0.2mmの細孔が1.5mm間隔で1089個あけてある。また空気噴出部裏面の空気通路に楔状のスペーサを設けて、空気が均一に吹き出すようにした。防災ついたては、200 $\times$ 200mm²の正方形で中心に直径18mmの円窓を明け、炎が能動熱遮断層前面を加熱するようにした。本報の能動熱遮断層は、一般に熱浸透深さが数mm程度で十分薄いので、熱電対を設置した中心近傍では、温度分布の一次元性は近似的に満足されていると考えられる。

本実験で用いた能動熱遮断層は、市販されているセラミックス繊維状断熱材(カオウル)である。カオウルは、湿潤状態で保管されており、使用する際に任意形状に加工し、乾燥させて使用する。実験には、湿潤状態のカオウル(1枚約6mm)2枚分を重ね合わせ、厚さが10mmになるように金属板ではさみ、加熱乾燥させて作成した。

図2 測定部詳細図

層内の熱電対の位置は図2に示すように、中心軸上に前面より $x=0, 3, 7, 10$ mm の位置にそれぞれの素線が前面に平行となるように過接点を層内に埋め込んだ。このようにして作られた能動熱遮断層を空気噴出部にはめ込み、空気噴出部と能動熱遮断層のすきまより流出する空気を防ぐため、外縁部のすきまをセラミックス接着剤でふさいだ。

3・2 実験方法 本実験では、加熱条件を一定とするために、以下の手法を採用した。後述するように、空気を透過しない場合の層前面温度は数十秒後に定常となる。この状態を基準とするために、熱遮断層に空気を透過しないで加熱したとき、層前面の定常温度が約 1500 K になるように予混合火炎を一定に設定した。すなわち、バーナ先端から熱遮断層前面までの距離を 90 mm、供給都市ガスを $7.6 \times 10^{-5} \text{ Nm}^3/\text{s}$ 、送風空気 $8.8 \times 10^{-4} \text{ Nm}^3/\text{s}$ とした。なお、本実験で用いた都市ガスは密度 $7.2 \times 10^{-1} \text{ kg/m}^3$ で、完全燃焼した場合のガスバーナの発生熱量は 1598 W であった。なお、実験で用いた都市ガスの主成分は水素 (44 vol%) とメタン (20 vol%) であり、ガスバーナの予混合火炎は不輝炎であった。

このような加熱条件のもとで、能動熱遮断層に透過させる空気の質量速度 m_0 を $0 \sim 0.2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ に変化させて実験を行った。つまり、透過させる空気流速を一定にした後、上記の加熱条件に設定したガスバーナに着火する。このとき、ガスバーナ前方に遮へい板を置いて火炎が測定部に当たらないようにする。火炎が安定した後に遮へい板を取り除き、層内の非定常温度変化をその温度分布が定常に達するまで測定間隔 5 s で測定し、パーソナルコンピュータの CRT 上にグラフ表示した後、プリンタに出力した。

4. 数値解析

4・1 数値解析と物理モデル 本実験結果を比較するために、前報⁽³⁾のモデルによる数値解析を行った。まず、温度 T_1 の高温部と温度 T_2 の低温部の間に、光学的に半透過性で厚さ x_l (光学厚さ τ_0) の通気性多孔質層を考える。ここで、多孔質体に質量速度 m_0 、温度 T_2 のガスを裏面から透過させる。前報⁽³⁾と同様に、多孔質体の減衰係数 σ_e の逆数 $1/\sigma_e$ を基本長さとし、 T_1, T_2, E_1, E_2 を用いた式(1)の無次元数と、式(2)で定義の無次元パラメータを導入する。

$$\left. \begin{aligned} \theta_s &= \frac{(T_s - T_2)}{(T_1 - T_2)}, \quad \theta_g = \frac{(T_g - T_2)}{(T_1 - T_2)} \\ Q^+ &= \frac{q^+}{(E_1 - E_2)}, \quad Q^- = \frac{q^-}{(E_1 - E_2)} \\ \tau &= x\sigma_e, \quad E_b = \frac{\sigma T_s^4}{(E_1 - E_2)} \\ t^* &= \frac{t(E_1 - E_2)\sigma_e}{(1 - \phi)\rho_s c_s} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{mc} &= \frac{k_m \sigma_e (T_1 - T_2)}{E_1 - E_2}, \quad A_a = \frac{m_g c_{pg} (T_1 - T_2)}{E_1 - E_2} \\ A_{gc} &= \frac{k_g \sigma_e (T_1 - T_2)}{E_1 - E_2}, \quad A_{gv} = \frac{6(1 - \phi)h_e (T_1 - T_2)}{\sigma_e d_p (E_1 - E_2)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ϕ と d_p は多孔質層の空けき率と等価粒子直径であり、 h_e は多孔質固体-透過ガス間の熱伝達率⁽³⁾である。

したがって、本問題の無次元支配方程式は次式となる。

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial t^*} = A_{mc} \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial \tau^2} - \frac{\partial Q_R}{\partial \tau} - A_{gv}(\theta_s - \theta_g) \dots\dots\dots (3)$$

$$A_a \frac{\partial \theta_g}{\partial \tau} - A_{gc} \frac{\partial^2 \theta_g}{\partial \tau^2} - A_{gv}(\theta_s - \theta_g) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial Q_R}{\partial \tau} = 2(1 - \omega_0)(-Q^+ - Q^- + 2E_b) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、流入ガスの単位体積当たりの熱容量は、多孔質体に比べて $1/100 \sim 1/1000$ 程度である⁽¹⁾ ので、透過ガスの非定常温度変化に対する熱容量は近似的に無視した。さらに、前述のように多孔質層の厚さは数 mm 程度であるので、透過ガスは熱放射に対して透明であると仮定する。

式(5)中の前方および後方無次元放射熱流束 Q^+, Q^- は、既報と同様に次式で示す 2 流束モデル (Shuster-Schwarzschild 近似)⁽⁷⁾ を用いて計算した。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial Q^+}{\partial \tau} &= -(1 - f\omega_0)Q^+ + \omega_0 b Q^- + (1 - \omega_0)E_b \\ -\frac{1}{2} \frac{\partial Q^-}{\partial \tau} &= -(1 - f\omega_0)Q^- + \omega_0 b Q^+ + (1 - \omega_0)E_b \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで ω_0 は、多孔質体のアルベドであり、 f, b は多孔質体の前方および後方散乱成分である。

4・2 境界条件と物性値 計算を行うには、外部特性温度 T_1 と、対流により層前面から流入する対流熱流束 q_s を設定する必要がある。本報の実験ではガスバーナによる加熱を行ったため、前報⁽³⁾で設定した放射加熱のみでなく、層前面からの対流熱流束 q_s も考慮しなければならない。さらに、火炎の温度と放射熱流束 E_1 も設定が難しい。そこで、透過ガス流束零で、加熱条件を等しくしたときの層表面温度の定常値を T_1

として近似的に設定した。

層前面から流入する対流熱流束 q_s は、すでに著者が論じているように⁽¹⁾、層表面での噴出しガス温度と固体温度が等しくないで、その推定は難しい。そこで、近似的に次の状態における q_s を考える。つまり、前面が温度 T_{g1} の燃焼ガス噴流にさらされる場合に、その熱伝達率を h_s として噴流のよどみ点における値を採用する。上記の境界条件に対して $\tau=0$ における無次元温度こう配は、次式で表される。

$$-\frac{\partial \theta_s(0)}{\partial \tau} = \frac{h_s}{k_m \sigma_e} \{ \theta_{g1} - \theta_s(0) \}, \quad \frac{\partial \theta_g(0)}{\partial \tau} = 0$$

.....(7)

ここで、衝突噴流の熱伝達率 h_s は仲戸川⁽⁶⁾の実験式を使用した。

3・2節で述べたように、本実験の予混合火炎は不輝炎である。また、燃焼ガスからの放射は波長依存性が強いが、火炎の厚さはたかだか数 cm であり、この場合の燃焼ガスの放射率は 0.02 以下である。したがって、第 1 近似として、火炎は放射に対して透明であるとして、燃焼ガスからの放射熱流束は無視した。

実験では、熱遮断層が金属多孔体に接触しているが、本実験と解析は、層内への熱浸透が熱遮断層裏面に到達する以前の挙動を明らかにすることを主な目的としている。したがって、熱遮断層裏面 ($\tau = \tau_0$) での境界条件ならびに、初期条件は次式で近似した。

$$\theta_g(\tau_0) = 0, \quad \frac{\partial \theta_g(\tau_0)}{\partial \tau} = 0 \quad \text{.....(8)}$$

$$t^* = 0 \text{ で } \theta_g = \theta_s = 0 \quad \text{.....(9)}$$

本実験で測定した層内温度 T_c は、素線径 76 μm の熱電対の表示温度であり、層内の固体温度と透過ガス温度との間の値を示すと考えられる。なお、数値解析

は、ガスを透過しない場合の層前面温度 $T_s(0) = T_1$ となるように数値計算を反復し、燃焼ガス温度 T_{g1} を推定した。

前報では、放射物性と熱物性が知られているジルコニア多孔質体について解析したが、これは入手不可能であったので、カオウルを使用した。その熱物性値を表 1 に示す。繊維媒体の放射物性値の推定には黒崎らの研究⁽⁹⁾がある。しかし、カオウルの放射物性についてはデータ入手できなかったため、ジルコニア多孔質体の値⁽¹⁰⁾で代用した。また、カオウルの平均繊維径を特性粒子径 d_p として代用した。

5. 結果と考察

5・1 ガスを透過しないときの非定常温度変化

能動熱遮断層の実験に先立ち、ガスを透過しないときの従来形の断熱層の非定常温度変化を本実験装置で測定した。図 3 は、透過ガスの質量速度 $m_g = 0$ のときの層内温度 $T(x)$ の非定常温度変化を示している。従来形断熱層の場合、表面温度は短時間で一定温度になり、その値は、1523 K であった。

本実験条件における衝突噴流の熱伝達率推定値は 182 W/(m²・K) であり、そのとき、4 章の境界条件で燃焼ガス温度 T_{g1} を種々変えて計算した結果、 $T(0)$

表 1 カオウルの物性値 (*はカタログ値)

Chemical composition* (%)	SiO ₂ 72.7	Al ₂ O ₃ 26.2
Melting point*	2033K	
Bulk density	$4.2 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$	
True density ρ_s	$2.6 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	
Boild fraction ϕ	84%	
Average fiber diameter*	2.8 μm	
Average specific heat* c_s	$1.05 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$	
Thermal conductivity* k_m	0.058 W/(m K)

図 3 ガスを透過しない従来形断熱層の層内温度の非定常変化

$=1523\text{ K}$ となる T_{o1} は 1747 K であった。以下、数値解析は上記の条件で行い、データの整理は $T_1=1523\text{ K}$ で行った。なお、実験中の裏面からの透過ガス温度 T_2 は 296 K であった。図3中には、数値解の固体温度も示している。

本実験では、表面温度 $T_c(0)$ が定常に達した後も層内温度は上昇し続け、 $t=200\text{ s}$ を経過した後も熱が層内に浸透しているのがわかる。本実験では、 300 s 後の裏面温度は 578 K に達した。

数値結果はおおむね実験結果と一致するが、裏面 ($x=10\text{ mm}$) の温度は実験値より高い値を示す。実験では裏面が多孔板と接触しているが、数値解析モデルではこれが考慮されていないためと考えられる。

5.2 能動熱遮断層の非定常温度分布 図4は、空気質量速度 $m_g=0.12\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ の層内温度分布を示したものである。実験結果は、層前面より 3 mm 以上離れた各点で、層温度が常温に保たれている。また、加熱開始後約 50 s で層内温度分布がほぼ定常となった。

数値解析も実験とほぼ同様な傾向を示し、短時間に層内温度が定常値に達するが、その値には若干の差異があるのは、層表面熱流束や放射物性に不確定な要素が多いことによる。特に、繊維媒体の減衰係数をジルコニア多孔質体のもの⁽¹⁰⁾ で代用していることの影響が大きいと考えられる。

図5は、 $m_g=0.07\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ の層内温度の変化を示したものである。この実験では、層前面から 7 mm 以降は常温に保たれており、それ以上の熱浸透はない。実験と解析では、実験のほうが定常になるのが遅く、層表面の温度がやや低めに見積もられているが、

図4 $m_g=0.12\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ における能動熱遮断層内温度の非定常変化

実験と数値解析とは、定性的に一致した。これらの結果は、加熱条件は異なるが、著者らの数値解析⁽⁹⁾ を実験的に裏付けるものと考えられる。

5.3 層内定常温度分布 図6は、能動熱遮断層内 ($x=0, 3, 7, 10$) の各点における定常温度分布を図3~5の場合について示したものである。ただし、 $m_g=0$ の場合は $t=100\text{ s}$ の値を示している。

$m_g=0.07\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ の温度分布の実験値は、層前面の温度が $m_g=0$ の場合とほぼ等しいにもかかわらず、 $x=3\text{ mm}$ では低く (473 K) 保たれている。透過ガス流速を増大させると層表面温度が低下し、熱浸透深さも著しく小さくなるのがわかる。つまり、ガスを透過する能動熱遮断層はガスを透過しない従来形の断熱法 ($m_g=0$) に比べて格段に薄い層で、熱遮断が可能

図5 $m_g=0.07\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ における能動熱遮断層内温度の非定常変化

図6 層内温度の定常分布

図 7 層前面無次元温度の対流移動パラメータによる変化

であることが実証された。本実験では、 $m_g=0.12$ kg/(m²・s)での断熱層厚さは3 mm以下にできることが明らかとなっている。

数値解析結果は、固体温度と透過ガス温度が層表面近傍で著しく異なる値を示しているが、実験値の層内温度分布とは定性的に一致していることがわかる。

5・4 層表面温度と透過ガス流速 著者らは、層前面が放射加熱 $E_i=\sigma T_f^4$ を受ける場合、その特性温度 T_f を用いた対流熱移動パラメータ A_a で、その特性が評価できることを示した⁽⁴⁾。そこで、本報のガスバーナによる加熱でも、同様の整理法を試みてみた。ただし、本報では、前述のように特性温度 T_f として、ガスを透過しない場合の層表面温度の定常値を用いている。

図7は A_a をパラメータとし、種々の空気質量速度における能動熱遮断層の層前面温度を示したものである。 A_a が小さいときの層前面温度の実験値は、数値解の固体温度とほぼ一致するが、 A_a が大きくなるにつれて実験値は急激に減少し、数値解の固体温度に比べて小さな値となる。これは、透過ガス速度の増大に伴い、しみ出し冷却効果のために層前面の熱伝達率が推定値に比べて著しく低下することによるものと考えられる。ただし、前報⁽⁴⁾でも議論しているように、固体と透過ガスが層前面において熱平衡でないために、従来のしみ出し冷却の推算式〔例えば文献(11)]を使うことができず、 h_s の推定は困難である。

実験値と数値解には大きな差異が認められるものの、層表面が放射加熱のみを受ける場合に得られたように⁽⁴⁾、能動熱遮断層は $A_a>1\sim2$ で層表面温度の低下に有効であるという結果が、ガスバーナ加熱の場合にも定性的に成立することは興味深い。

本実験で用いたガスバーナによる加熱法は簡便ではあるが、加熱条件に不確定な要素が多く、層前面への

流入熱流束の特定が困難である。さらに、解析に必要な熱遮断層の光学厚さ（または減衰係数）などの放射物性が入手できず、他の材質のものを代用せざるを得なかった。これら流入熱条件や、熱物性・放射物性の測定と導入は、今後の課題である。

6. 結 言

市販されている繊維状断熱材を用いて空気を裏面から透過させる能動熱遮断について、ガスバーナの加熱条件を一定に保ち、層内温度分布の定常特性ならびに非定常特性を測定した。それらの値を数値解析結果と比較した。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 能動熱遮断を用いて、非常に薄い層で約1500 Kの高温環境からの熱を遮断し、裏面を常温に保つことができることを実験により検証した。

(2) 能動熱遮断の断熱層内温度分布が定常に達する時間は、ガスを透過しない従来形断熱層に比べて格段に短いことを実験的に示した。

(3) 層表面温度の透過ガス流速による変化は対流熱移動のパラメータで整理することによって記述でき、その変化は放射加熱のみの場合と定性的に一致した。

(4) 上記の実験結果は数値解析結果と定性的に一致した。

本研究の一部は、文部省科学研究費〔奨励研究(A) 03855035]の補助を受けた。また、実験装置の製作には東北大学流体科学研究所 菊田清技官の助力を得た。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Maruyama, S., ほか2名, *AIAA J. Thermo. Heat Transf.*, **3** (1989), 389.
- (2) Yano, T., ほか2名, *Proc. ASME/JSME Thermal Eng. Joint. Conf.*, **4** (1991), 213.
- (3) 円山・ほか2名, *機論*, **56-524**, B (1990), 1140.
- (4) Maruyama, S., ほか2名, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **11** (1990), 196.
- (5) 円山, *機論*, **58-545**, B (1992), 211.
- (6) Huber, M. L. and Jones, M. C., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **31-4** (1988), 843.
- (7) Menguc, M. P. and Viskanta, R., *J. Quant. Spectrosc. Radiant Transf.*, **29-5** (1983), 381.
- (8) Nakatogawa, *Proc. 4th Int. Heat Transf. Conf.*, **2** (1970), FC5.2.
- (9) Kurosaki, Y., ほか3名, *Proc. ASME/JSME Thermal Eng. Joint. Conf.*, **4** (1987), 319.
- (10) Matthews, L. K., ほか2名, *Trans. ASME, J. Solar Energy Eng.*, **27-4** (1984), 487.
- (11) Torii, K., ほか2名, *Proc. 3rd Int. Heat Transf. Conf.*, **3** (1966), 1.