

心く射伝熱に基づくガス-ガス熱交換器の伝熱特性： 比較的低温度(750~900[K])の場合

富村, 寿夫
九州大学機能物質科学研究所

藤井, 丕夫
九州大学機能物質科学研究所

小別所, 匡寛
出光興産

鳥尾, 倫彦
九州大学大学院総合理工学研究科

他

<https://doi.org/10.15017/6620>

出版情報：九州大学機能物質科学研究所報告. 7 (1), pp.15-20, 1993-09-30. 九州大学機能物質科学研究所

バージョン：

権利関係：

ふく射伝熱に基づくガス-ガス熱交換器の伝熱特性 (比較的低温度 (750~900[K]) の場合)

富村 寿夫・藤井 丕夫・小別所 匡寛*
鳥尾 倫彦**・越後 亮三***

Heat Transfer Characteristics of a Gas-to-Gas Heat Exchanger Based on Radiative Transfer (In the Case of Relatively Low Temperatures (750~900[K]))

Toshio TOMIMURA, Motoo FUJII, Masahiro KOBESSHO,
Michihiko TORIO, and Ryozo ECHIGO

The heat transfer characteristics of a gas-to-gas heat exchanger with permeable porous media have been investigated theoretically and experimentally. It is shown that in the case of relatively low working gas temperatures, i. e. 750 ~ 900[K], the temperature distributions of the porous media are not affected by the emissive or absorptive powers of the working gas. The values of the overall coefficients of heat transfer are estimated, and even in the relatively low temperatures, the present heat exchanger is shown to have almost the same values as conventional high performance gas-to-gas heat exchangers. Effects of the emissivity and transmissivity of a separating wall on heat transfer are also examined, and by using a black or transparent separating wall the overall coefficients of heat transfer are suggested to increase by about 1.5 or 2.3 times, respectively.

1. 結 言

高空隙率の多孔性媒体に高温ガスを流すと、ガスの顕熱がふく射エネルギーに変換され、ガス温度は急激に低下し、ふく射エネルギーの大部分はガスの流れと逆方

向に指向性を持って伝搬する⁽¹⁾。逆に、高温のふく射場に置かれた多孔性媒体に低温ガスを流すと、媒体に入射するふく射エネルギーがガスの顕熱に変換されるので、ガス温度を急激に上昇させることが可能である。そこで、一対の多孔性媒体を耐熱金属あるいは透明石英ガラスなどの隔壁で隔て、ガス顕熱からふく射エネルギーへの変換を高温側に、媒体に入射するふく射エネルギーからガス顕熱への逆変換を低温側に用いれば、高性能なガス-ガス熱交換器を構成することができる。

この形式のガス-ガス熱交換器に関して、1300[K]

受理日 平成5年6月10日

* : 出光興産

** : 九州大学大学院総合理工学研究科

*** : 東京工業大学工学部機械工学科

ふく射伝熱に基づくガス-ガス熱交換器の伝熱特性

を超える高温域においては、フィン付き管などを用いた従来型の高性能熱交換器と比較して極めて大きな熱通過係数を持つことが谷川ら⁽²⁾によって報告されている。しかし、ガス温度が750~900[K]程度の比較的低温域での評価は全くなされていない。

本報告では、このような低温域における伝熱特性を実験と理論の両面から明らかにするとともに、熱通過係数の値に基づいて伝熱性能を評価し、運転温度の低温域への拡張可能性について検討する。

使用記号

A_p	: 多孔性媒体の等価粒子表面積	[m^2]
c_p	: 作動ガスの定圧比熱	[$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]
d_p	: 多孔性媒体の等価粒子直径	[m]
$E_n(\tau)$: 指数積分関数 ($n = 1, 2, 3$), 式(7)	[$-$]
H	: 無次元正味ふく射熱流束, 式(7)	[$-$]
h_p	: 熱伝達係数	[$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
J_s	: 下流側からの無次元入射ふく射熱流束, 式(7)	[$-$]
J_o	: 上流側からの無次元入射ふく射熱流束, (7)	[$-$]
j_s	: 下流側からの入射ふく射熱流束	[W/m^2]
j_o	: 上流側からの入射ふく射熱流束	[W/m^2]
K	: 熱通過係数	[$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
M	: 無次元数, (7)	[$-$]
N_R	: 伝導-ふく射パラメータ, 式(7)	[$-$]
Nu_p	: ヌセルト数, 式(7)	[$-$]
n_p	: 多孔性媒体の等価粒子数密度	[m^{-3}]
Pr	: プラントル数, 式(7)	[$-$]
q_R	: ふく射熱流束	[W/m^2]
$q_{R,0}$: 正味のふく射熱流束	[W/m^2]
R	: 二酸化炭素の体積濃度	[vol. \%]
Re	: レイノルズ数, 式(7)	[$-$]
r_o	: 多孔性媒体の半径あるいは熱交換器の流路半径	[m]
T	: 絶対温度	[K]
$T_{g,h,o}$: 高温側ガスの入口温度	[K]
$T_{g,l,o}$: 低温側ガスの入口温度	[K]
$T_{g,h,o}(X_o)$: 高温側ガスの出口温度	[K]
u_m	: 作動ガスの平均速度	[m/s]
V	: 作動ガスの体積流量	[Nm^3/h]
X	: 無次元座標, 式(7)	[$-$]

x	: 座標	[m]
x_o	: 多孔性媒体の厚さ	[m]

ギリシャ文字

ϵ_s	: 隔壁のふく射率	[$-$]
θ	: 無次元温度, 式(7)	[$-$]
κ_p	: 多孔性媒体の吸収係数	[m^{-1}]
λ	: 作動ガスの熱伝導率	[$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
μ	: 作動ガスの粘性係数	[$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
ρ	: 作動ガスの密度	[kg/m^3]
σ	: ステファン・ボルツマン定数	[$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$]
τ	: 光学的距離, 式(7)	[$-$]
τ_o	: 光学的厚さ, 式(7)	[$-$]
τ_p	: 光学的厚さ, 式(7)	[$-$]

添 字

g	: 作動ガス
h	: 高温側
l	: 低温側
p	: 多孔性媒体
$+$: 座標の正方向
$-$: 座標の負方向

2. 実 験

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。作動ガスとして空気を用いたが、高温側ガスのふく射性の影響を調べる実験では、空気と二酸化炭素の混合ガスを用いた。高温側ガスは流量計①、混合室②を経て電気ヒータ③に送られ、所定温度に加熱されたのち熱交換器④の高温側に流入する。一方、低温側ガスは流量計⑤を経て熱交換器④の低温側に流入する。熱交換後のガスは、ブロー⑥、⑦からバイパスした空気と混合室⑧で混合され、温度低下したのち大気中に放出される。

Figure 2 に熱交換器の概要を示す。材質は耐熱ステンレス (SUS310S) である。周囲への熱損失を低減するために、熱交換器全体は厚さ約50[mm]の高温用断熱材で覆われている。本体は直径180[mm]の円筒形で、隔壁①を挟んで上部が高温側、下部が低温側である。隔壁は本体と同じ耐熱ステンレス製であり、厚さは2[mm]である。入口部は二重円筒になっており、ガスは内筒の円周上8カ所に設けた直径20[mm]の開口部から熱交換器内部に流入する。図は低温側ガスが隔壁から離れる方向に流れる場合(離反流)の例

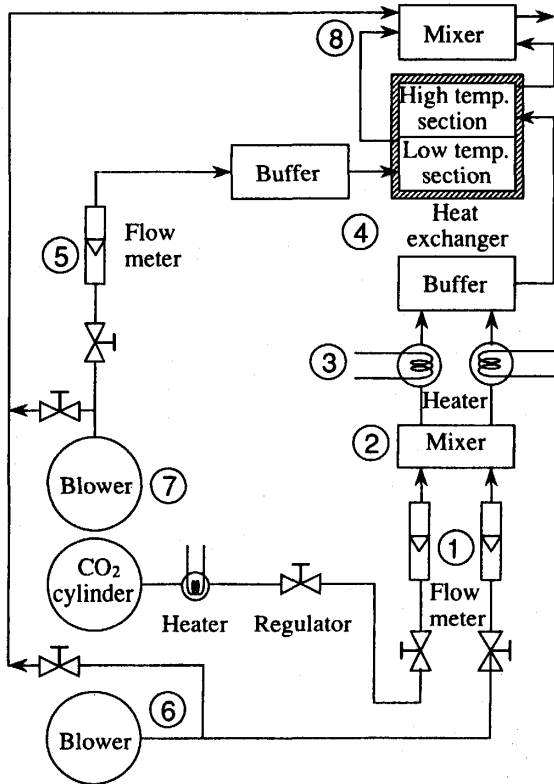


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

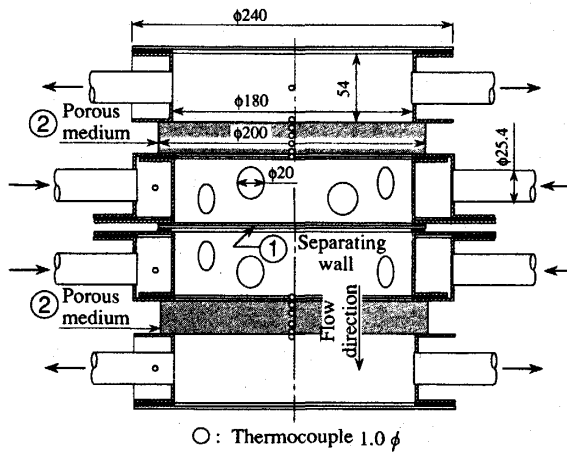


Fig. 2 Schematic of gas-to-gas heat exchanger

であるが、低温側の上下を逆にすることにより、低温側ガスが隔壁に近づく方向に流れる場合（近寄流）の実験も行うことができる。多孔性媒体②としては、厚さ5[mm]、直径200[mm]、空隙率約90[%]のNi-Cr合金製の発泡金属円盤を2枚あるいは5枚積層したものをを用いた。温度測定は、図中に“O”印で示した位置で、直径1[mm] K型シース熱電対を用いて行った。ガスの入口温度は混合室も兼ねた二重円筒部で、

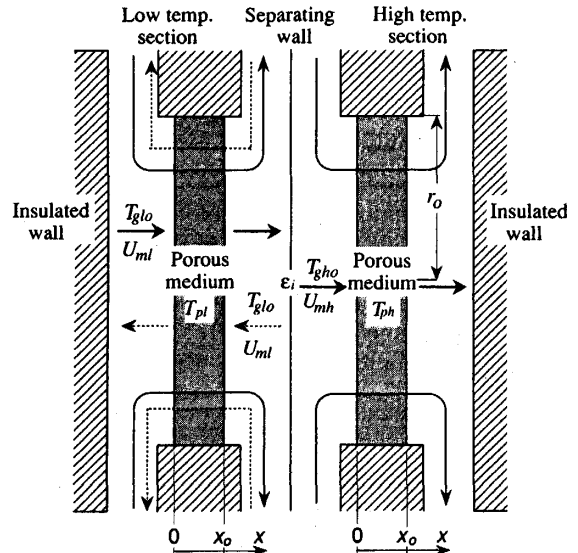


Fig. 3 Physical model

高温側ガスの出口温度はほぼ一様温度とみなせる出口空間部で、低温側ガスの出口温度は近寄流の場合も考慮し、周囲壁からのふく射の影響が少ない排気管部で測定した。多孔性媒体の温度分布は中心線に沿って、入口面、出口面に固定した熱電対および積層面に挿入した熱電対で測定した。なお、使用した媒体の空隙率および平均孔径から、その等価粒子直径はほぼ1[mm]となるので、熱電対は媒体の一部とみなせる。

実験は、高温側ガスの流量 V_{gh} を $30[\text{N m}^3/\text{h}]$ に固定し、入口温度 T_{gho} を $750\sim 900[\text{K}]$ 、二酸化炭素濃度 R を $0\sim 20[\text{vol. \%}]$ 、低温側ガス流量 V_{gl} を $10\sim 30[\text{N m}^3/\text{h}]$ 、多孔性媒体の光学的厚さ τ_o を $2.6, 6.5[-]$ の範囲に変えて行った。

3. 理論解析

実験に対応する一次元の物理モデルを Fig. 3 に示す。半径 r_o 、厚さ x_o の一対の多孔性媒体がふく射率 ϵ_i の隔壁で隔てられ、周囲の壁はふく射断熱されている。隔壁を挟んで右側が高温側、左側が低温側である。温度 T_{gho} の高温ガスは速度 u_{mh} で隔壁側からふく射変換体へ向かって流れる。低温側では、温度 T_{glo} のガスが速度 u_{ml} で隔壁から離れる方向（離反流）、あるいは隔壁に近づく方向（近寄流）に流れる。本解析で用いた仮定は以下のとおりである。(1) 諸物性値は温度によらず一定。(2) 流れは一次元定常流。(3) 系内の伝熱は対流とふく射が支配的で、熱伝導は無視できる。(4) 隔壁ならびに周囲壁とガス間の対流伝熱

は考慮しない。(5) 隔壁は十分に薄く、内部に温度分布は無い。(6) ガスは非ふく射性。(7) 多孔性媒体は等価粒子直径 d_p の微小粒子が一様に分散したモデルで近似できる。(8) 多孔性媒体は灰色であり、吸収と射出のみを考え、散乱は考慮しない。(9) ふく射の輸送は流れ方向の一次元伝搬で近似できる。

以上の仮定から、高温側、低温側ともに、無次元化した基礎方程式は次式のように記述できる。

$$RePr \frac{d\theta_g}{dX} \pm M(\theta_g - \theta_p) = 0 \quad (1)$$

$$M(\theta_g - \theta_p) = \frac{2\tau_p^2}{N_R} \cdot \frac{dH}{d\tau} \quad (2)$$

$$H^+ = \frac{1}{2} [J_o E_3(\tau) + \int_0^\tau \theta_p^4 E_2(\tau - \tau') d\tau'] \quad (3)$$

$$H^- = \frac{1}{2} [J_o E_3(\tau_o - \tau) + \int_\tau^{\tau_o} \theta_p^4 E_2(\tau' - \tau) d\tau'] \quad (4)$$

$$H = H^+ + H^- \quad (5)$$

$$\frac{dH}{d\tau} = \theta_p^4 - \frac{1}{2} [J_o E_2(\tau) + J_o E_2(\tau_o - \tau) + \int_0^\tau \theta_p^4 E_1(|\tau - \tau'|) d\tau'] \quad (6)$$

式(1)~(6)の無次元量は次式で定義される。

$$\left. \begin{aligned} X &= x/r_o, \tau = \kappa_p x, \tau_o = \kappa_p x_o \\ \tau_p &= \kappa_p r_o, \theta = T/T_{g,h_o} \\ H &= q_R / (4\sigma T_{g,h_o}^4), J_o = j_o / (\sigma T_{g,h_o}^4) \\ Re &= \rho u_m 2r_o / \mu, Pr = \mu c_p / \lambda \\ M &= 2Nu_p n_p A_p r_o^2 / d_p \\ Nu_p &= h_p d_p / \lambda, N_R = \kappa_p \lambda / (4\sigma T_{g,h_o}^3) \\ E_n(\tau) &= \int_0^1 \xi^{n-2} \exp(-\tau/\xi) d\xi \\ &(n = 1, 2, 3) \end{aligned} \right\} (7)$$

ここで、 θ_g 、 θ_p はガスと多孔性媒体の無次元温度、 H は正味の無次元ふく射熱流束、 J_o 、 J_o は上流、下流側からの無次元入射ふく射熱流束、 τ は光学的距離、 κ_p は吸収係数、 σ はステファン・ボルツマン定数、 Re はレイノルズ数、 Nu_p はヌセルト数、 n_p と A_p は等価粒子の数密度と表面積、 h_p は熱伝達係数、 N_R は伝導-ふく射パラメータ、 $E_n(\tau)$ は指数積分関数である。

式(1)はガスのエネルギー式、式(2)は多孔性媒体のエネルギー式である。ただし、式(1)の左辺第2項の符号は、低温側ガスが離反流の場合にのみ負であり、その他の場合は全て正である。式(3)と(4)は、それぞれ、 X 軸の正、負方向に伝搬するふく射熱流束 H^+ 、 H^- である。式(5)は正味のふく射熱流束 H で、式(6)はその発散であ

る。基礎式からわかるように、ガスと多孔性媒体のエネルギー式は対流伝熱項 $M(\theta_g - \theta_p)$ を介して連成している。さらに、高温側と低温側の多孔性媒体のエネルギー式は、式(6)の関係により、入射ふく射 J_o あるいは J_o を介して連成している。

境界条件は以下のとおりである。

$$\text{高温側 } X_h = 0 (\tau_h = 0) : \theta_{g,h} = 1 \quad (8)$$

低温側

$$\text{近寄流 } X_l = 0 (\tau_l = 0) : \theta_{g,l} = T_{g,l,o} / T_{g,h,o} \quad (9)$$

$$\text{離反流 } X_l = x_o / r_o = X_o (\tau_l = \kappa_p x_o = \tau_o) : \theta_{g,l} = T_{g,l,o} / T_{g,h,o} \quad (10)$$

本解析では式(1)を差分化し、式(2)は式(6)の指数積分関数 $E_1(|\tau - \tau'|)$ を微小区間で解析的に積分して $\tau' = \tau$ での特異点を除去する⁽³⁾ことにより数値解を求めた。

4. 結果および考察

多孔性媒体の温度分布に及ぼすガスのふく射性の影響を調べるため、高温側ガスに赤外活性な二酸化炭素を混合して実験を行った。その結果をFig. 4に示す。左が低温側、右が高温側である。矢印はガスの流れ方向を示す。二酸化炭素の体積濃度 R を20[vol. %]まで変化させたが、温度分布はほとんど変わらない。図は近寄流の場合であるが、離反流の場合もガスのふく射性の影響は見られなかった。このことは、ふく射性ガスの温度が1200[K]と高い場合には、温度分布に及ぼすガスのふく射性の影響が顕著に見られた数値解析結果⁽³⁾とは大きく異なる。この原因として、実験ではガス温度が低いため、 $T_{g,h}$ に比例して射出されるガスからのふく射エネルギーが極めて少なくなることが考えられるが、今後、低温域でのガスのふく射性を考慮した解析により、この点を明確にする必要がある。

離反流の場合について、多孔性媒体の温度分布に及ぼす高温側ガスの入口温度 $T_{g,h,o}$ の影響をFig. 5に示す。 $T_{g,h,o}$ が高くなるとともに高温側から低温側に伝搬される正味のふく射エネルギーが増大し、低温側の温度も高くなる。近寄流の場合も同様の傾向が見られた。

本実験範囲では、高温側の多孔性媒体の温度分布は、Figs. 4, 5に示したように低温側ガスの流れ方向に関係なくほぼ一様になっている。これに対し、低温側では流れ方向により異なる温度分布が得られた。すなわち、近寄流の場合 (Fig. 4 参照) は、多孔性媒体出

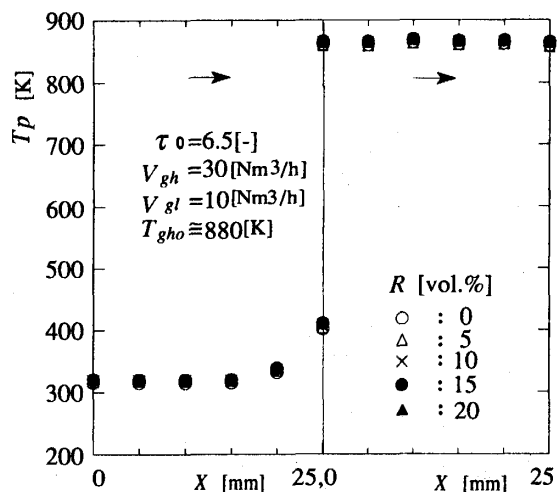


Fig. 4 Effect of gaseous radiation on T_p

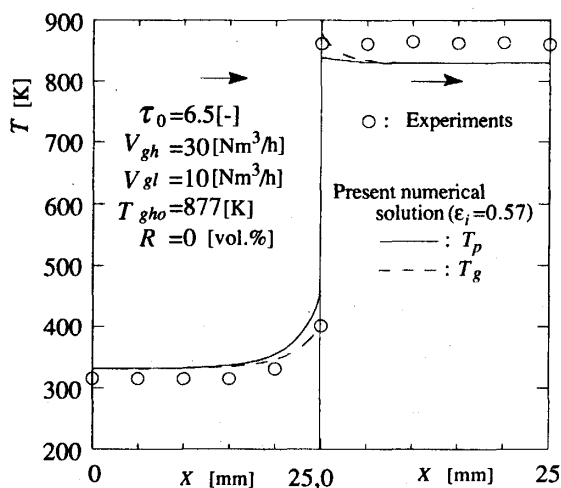


Fig. 6 Comparison of numerical solution with experimental results

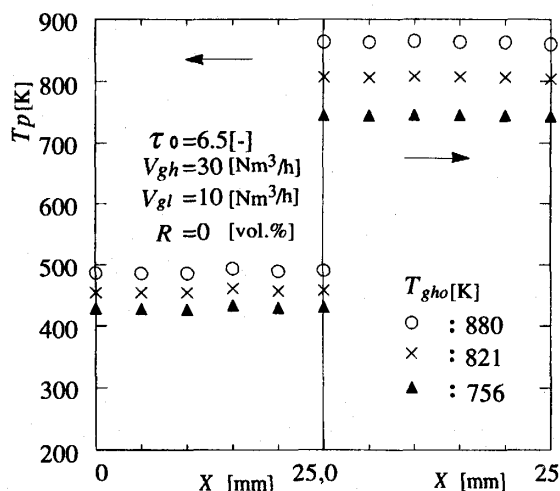


Fig. 5 Effect of inlet gas temperature T_{gho} on T_p

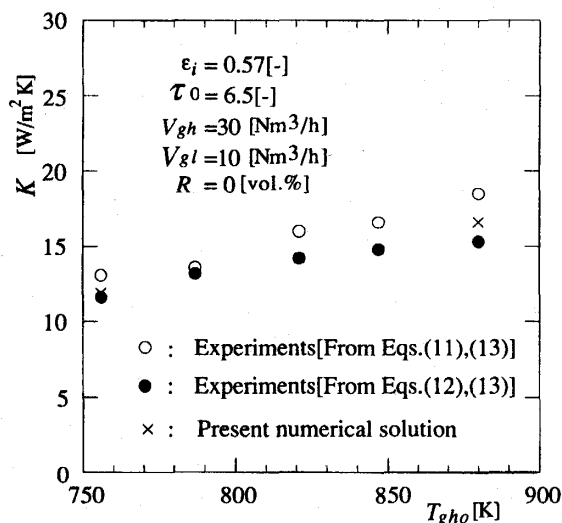


Fig. 7 Effect of inlet gas temperature T_{gho} on K

口近くで高温側からのふく射エネルギーを吸収するため、その領域で急激な温度上昇が見られる。しかし、離反流の場合 (Fig. 5 参照) は、媒体全体にわたってほぼ一様な温度分布が得られている。

多孔性媒体の光学的厚さが十分に厚く、本実験の離反流の場合のように高温側と低温側の温度分布が一致と見なせる場合、低温側に輸送される正味のふく射熱流束 q_{net} は式(3)、(4)の関係を用いて次式で与えられる。

$$q_{net} = (\epsilon_i / 2) \sigma (T_{ph}^4 - T_{pl}^4) \quad (11)$$

ここで、 ϵ_i は隔壁のふく射率、 σ はステファン・ボルツマン定数、 T_{ph} 、 T_{pl} は多孔性媒体の高温側と低温側の温度である。また、式(1)、(2)から次式が得ら

れる。

$$q_{net} = \rho V_{gh} c_p (T_{gho} - T_{gh}(x_o)) / \pi r_o^2 \quad (12)$$

式(11)、(12)に実測値 T_{ph} 、 T_{pl} 、 T_{gho} 、 $T_{gh}(x_o)$ 、 V_{gh} を代入し、密度 ρ には室温での値、また、比熱 c_p には T_{gho} での値を用いて ϵ_i を算出した結果、平均値として $\epsilon_i = 0.57$ が得られた。

Fig. 6 は、このようにして求めた ϵ_i を用いて、一次元の物理モデルに基づき多孔性媒体の温度分布を数値解析した結果を実測値と比較した例である。実線と破線は、それぞれ、多孔性媒体とガス温度の解析結果である。両者はほぼ一致しており、 ϵ_i を適切に見積ることにより、簡単な一次元モデルで本熱交換器の伝熱性能を予測することが可能である。

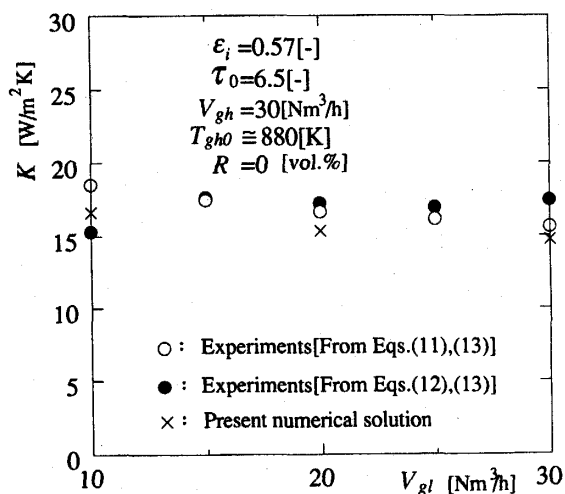


Fig. 8 Effect of flow rate V_{gi} on K

離反流の場合について、次式で定義される熱通過係数 K に及ぼす高温側ガス入口温度 T_{gh0} の影響を Fig. 7 に、また、低温側ガスの体積流量 V_{gi} の影響を Fig. 8 に示す。

$$K = q_{n,ei} / (T_{gh0} - T_{gi0}) \quad (13)$$

ここで、 T_{gi0} は低温側ガスの入口温度である。

記号“○”と“●”は、それぞれ、式(11)、(12)に実測値を代入して算出した結果であり、記号“×”は実験に対応する数値解析結果である。

高温側ガスの入口温度 T_{gh0} が增大するとともに、ふく射伝熱量が増加し、隔壁のふく射率が $\epsilon_i = 0.57$ と小さいにもかかわらず、 K は $12 [W/m^2K]$ から $17 [W/m^2K]$ 程度まで増大している。また、低温側ガス流量を $V_{gi} = 10 \sim 30 [Nm^3/h]$ の範囲で変えた実験では、 K は V_{gi} の影響をほとんど受けず、 $K \approx 17 [W/m^2K]$ であった。なお、数値解析によれば、隔壁が黒体の場合、 K は本実験で得られた値の1.5倍程

度に、さらに透明の場合には2.3倍程度に増大する。フィン付き管などを用いた従来型の高性能ガス-ガス熱交換器が $K = 10 \sim 40 [W/m^2K]$ ⁽⁴⁾ であることを考慮すると、隔壁に黒体塗料を塗布したりあるいはOH基が含まれない透明石英ガラスを用いることなどにより、本熱交換器は $750 \sim 900 [K]$ の比較的低温度においても十分に使用できる。

5. 結 言

多孔性媒体を用いたガス-ガス熱交換器について、理論的、実験的研究を行った。その結果、本実験範囲では、高温側ガスのふく射性は伝熱性能に影響を及ぼさないことを実験的に明らかにした。また、ふく射伝熱に基づく本熱交換器は、 $750 \sim 900 [K]$ の比較的低温度においても、従来型の高性能ガス-ガス熱交換器と同程度の熱通過係数を持つことを示した。おわりに、本研究経費の一部は旭硝子財団研究助成金によった。また、本研究所職員 濱野光司氏 には実験に協力して頂いた。ここに謝意を表します。

引用文献

- (1) 越後, 機論 (B編), 48巻, 435号, 1982, pp. 2315-2323.
- (2) 谷川, 花村, 越後, 富村, 機論 (B編), 57巻, 533号, 1991, pp. 302-308.
- (3) 越後, 富村, 吉澤, 陣内, 九大機能研報告, 2巻, 1号, 1988, pp. 53-66.
- (4) J. P. Holman, HEAT TRANSFER, SI METRIC ED., MCGRAW-HILL, 1989, p. 527.