九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

自己断熱型ガスーガス熱交換器の数値解析

富村，寿夫
九州大学機能物質科学研究所

呉，萍
(元)九州大学大学院総合理工学研究科

藤井，丕夫
九州大学機能物質科学研究所

越後，亮三
芝浦工業大学

https://doi.org/10.15017/7862

出版情報：九州大学機能物質科学研究所報告. 11 (1), pp.1-5, 1997-07-25. 九州大学機能物質科学研究所
バージョン：
権利関係：

自己断熱型ガス－ガス熱交換器の数値解析

富村寿夫・呉　萍*
藤井丕夫・越後亮三**

Numerical Study on Self-insulated Gas-to-gas Heat Exchanger

Toshio TOMIMURA, Ping WU, Motoo FUJII
and Ryozo ECHIGO

A new self-insulated gas-to-gas heat exchanger is proposed on the basis of the effective energy conversion method between flowing gas enthalpy and thermal radiation. The present heat exchanger consists of three porous media separated by two solid walls. A high temperature (heating) section is put between low temperature (cooling) and heat recovery sections, and this arrangement enables the heat exchanger to be self-insulated. A theoretical analysis is conducted for one-dimensional system. Three sets of coupled energy equations for gas and porous media are solved numerically under the conditions of the inlet gas temperature of the high temperature section T_{gho}=400~1600℃, the optical thickness τ_o=1.25~5.0, the mean working gas velocity u_m=0.15~0.6m/s and the emissivity of the separating wall ε=0.5~1.0. The temperature distributions of each section and the separating wall temperatures are demonstrated, and it is shown that the side wall temperature of the heat recovery section can be maintained at low temperatures (about 50℃ at the highest) for τ_o=2.5~5.0. Furthermore, the present heat exchanger is shown to exhibit high overall heat transmission coefficients.

1．緒　言

高温ガスの顕熱を多孔性媒体により効果的にふく射エネルギに変換し、このふく射エネルギを隔壁を介して設置した多孔性媒体により効率良く低温ガスの顕熱上昇に逆変換する新しい型式の熱交換器が Echigo[1]および谷川ら[2]により提案されている。これまでの一連の理論的・実験的研究から、この型式の熱交換器は、従来のガス－ガス熱交換器と比べて優れた伝熱特性を有すること[2]、また水蒸気改質反応器としても優れた反応特性を有すること[3],[4]などが明らかにされている。

本研究では、この熱交換器に、同じ高空隙率の多孔性媒体で構成される断熱を兼ねた排熱回収部を設置した場合の伝熱特性について、一次元物理モデルに基づく数値解析を行った。ここでは、隔壁のふく射率、多孔性媒体の光学的厚さ、高温部(加熱側)のガス入口温度、ガスの平均流速、低温部(被加熱側)のガスの流れ方向などのパラメータが多孔性媒体内の温度分布、排熱回収部の外壁温度、全熱回収率および熱通過係数に及ぼす影響について検討した結果を報告する。

受理日　1997年4月24日
* 元九州大学大学院総合理工学研究科
**芝浦工業大学

記　号

A_p	：多孔性媒体の等価粒子表面積	[m²]
c_p	：ガスの定圧比熱	[J/kgK]
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_R	：全熱回収率、式(10)	[-]
h_p	：多孔性媒体とガス間の熱伝達係数	[W/m²K]
h_w	：外壁と周囲空気間の熱伝達係数	[W/m²K]
J_e	：下流側からの無次元ふく射熱流束、式(7)	[-]
J_o	：上流側からの無次元ふく射熱流束、式(7)	[-]
j_e	：下流側からの入射ふく射熱流束	[W/m²]
j_o	：上流側からの入射ふく射熱流束	[W/m²]

K	：熱通過係数、式(11)	[W/m²K]
M	：無次元数、式(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	[m³]
Pr	：プラントル数、式(7)	[-]
q_R	：正味のふく射熱流束	[W/m²]
Re	：レイノルズ数、式(7)	[-]
r_o	：流路半径	[m]
T	：絶対温度	[K]
T_{eff}	：有効温度	[K]
T_{gho}	：高温部のガス入口温度	[K]
T_{gle}	：低温部のガス出口温度	[K]
T_w	：排熱回収部の外壁温度	[K]
T_∞	：周囲温度	[K]
u_m	：ガスの平均流速	[m/s]
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	：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	：ガスの熱伝導率	[W/mK]
μ	：ガスの粘性係数	[Pa•s]
ρ	：ガスの密度	[kg/m³]
σ	：ステファン・ボルツマン定数	[W/m²K⁴]
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	：ガス
h	：高温部
$H\text{-}L$	：高温部と低温部間
$H\text{-}R$	：高温部と排熱回収部間
i	：低温部断熱壁
l	：低温部
r	：排熱回収部
p	：多孔性媒体
$s1$	：高温部と低温部間の隔壁
$s2$	：高温部と排熱回収部間の隔壁
w	：排熱回収部外壁
+	：座標の正方向
-	：座標の負方向

2．物理モデル、基礎方程式および境界条件

Fig. 1 に本熱交換器の一次元物理モデルを示す。半径r_o、厚さx_oの3枚の多孔性媒体が、ふく射率ε_{s1}、ε_{s2}の2枚の隔壁で隔てられている。中央が高温部、右側が排熱回収部、左側が低温部である。本解析では、円筒型熱交換器への拡張性も考慮し、低温部左壁を断熱壁(円筒中心軸に対応)、排熱回収部右壁(円筒型熱交換器外壁に対応)をふく射率ε_wの厚さが無視できる壁とし、この壁と周囲空気との間の熱伝達係数を与えた(h_w=15W/m²K)。中央の高温部多孔質媒体内では、温度T_{gho}、平均流速u_{mh}で流入した高温ガスの顕熱が媒体からのふく射エネルギに変換される。このふく射エネルギは左右の隔壁で一旦吸収され、これらの隔壁から右側の排熱回収部と左側の低温部に再射出される。左右の多孔質媒体はこのふく射エネルギを吸収し温度上昇する。一方、温度T_∞の被加熱ガスはまず排熱回収部の多孔質媒体内を平均流速u_{mr}で高温部側に向かって流れ、ここでふく射エネルギからガス顕熱への逆変換作用により加熱された後、低温部に流入する。被加熱ガスの流れをこのようにすることにより、排熱回収部に熱回収機能と同時に断熱機能も持たせることができる。低温部に流入した被加熱ガスは多孔質媒体内を平均流速u_{ml}(=u_{mr})で高温部側に向かって流れ(以後、近寄流と呼ぶ)、さらに温度上昇し熱交換器から流出する。なお、低温部に流入した被加熱ガスが高温部側から離れる方向に流れる場合(以後、離反流と呼ぶ)も検討した。本解析で用いた仮定は以下のとおりである。(1)諸物性値は温度に依らず一定。(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)隔壁は十分に薄く内部に温度分布は無い。(5)ガスは非ふく射性。(6)多孔性媒体は等価粒子直径d_pの微粒子が一様に分散したモデルで近似できる。(7)多孔性媒体は灰色で吸収と射出のみを考え散乱は考慮しない。(8)ふく射の輸送は流れ

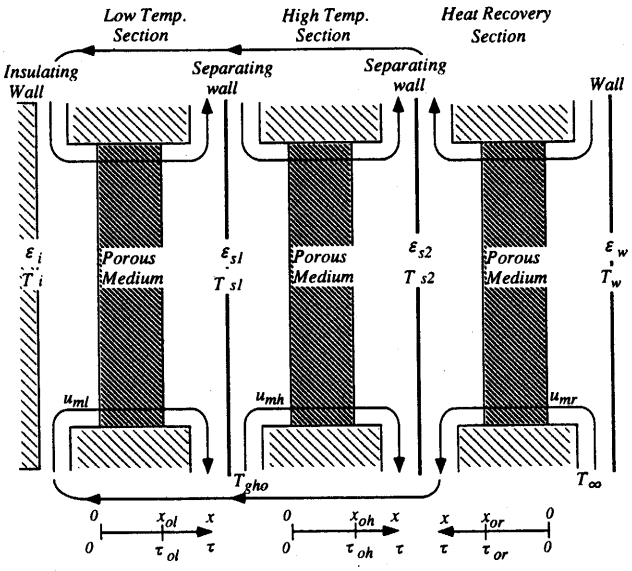

Fig.1　Physical model and coordinate system

方向の一次元伝搬で近似できる。

以上の仮定から、高温部、排熱回収部、低温部のいずれの場合も、無次元化した基礎方程式は次のように記述できる。

$$RePr\frac{d\theta_g}{dX}+M\left(\theta_g-\theta_p\right)=0 \tag{1}$$

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

$$H^+=\frac{1}{2}[J_oE_3(\tau)+\int_0^{\tau}\theta_p^4E_2(\tau-\tau')d\tau'] \tag{3}$$

$$H^-=\frac{1}{2}[J_eE_3(\tau_o-\tau)+\int_{\tau}^{\tau_o}\theta_p^4E_2(\tau'-\tau)d\tau'] \tag{4}$$

$$H=H^+-H^- \tag{5}$$

$$\frac{dH}{d\tau}=\theta_p^4-\frac{1}{2}[J_oE_2(\tau)+J_eE_2(\tau_o-\tau)+\int_0^{\tau_o}\theta_p^4E_1(|\tau-\tau'|)d\tau'] \tag{6}$$

式(1)~(6)の無次元量は次式で定義される。

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

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_eは上流側、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は多孔性媒体の吸収係数、σはステファン・ボルツマン定数、Reはレイノルズ数、Prはプラントル数、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)はガスのエネルギ式、式(2)は多孔性媒体のエネルギ式である。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である。式(5)は正味のふく射熱流束で、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式(1)、(2)は対流伝熱項$M\left(\theta_g-\theta_p\right)$を介して連成している。さらに、高温部、排熱回収部、低温部の多孔性媒体のエネルギ式(2)は式(3)~(6)の関係により、上流側あるいは下流側からの入射ふく射J_oあるいはJ_eを介して三者間で連成している。

上式に対する境界条件は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}&\text{高温部}\quad X_h=0\ \ (\tau_h=0)\ :\ \theta_{gh}=1\\&\text{排熱回収部}\quad X_r=0\ \ (\tau_r=0)\ :\ \theta_{gr}=T_\infty/T_{gho}\\&\text{低温部}\quad X_l=0\ \ (\tau_l=0)\ :\ \theta_{gl}=\theta_{gr}(X_o)\end{aligned} \tag{8}$$

ここで、$\theta_{gr}(X_o)$は排熱回収部のガス出口温度であり、この値は数値計算の反復過程で決まる。

本解析では、式(1)を差分化し、式(2)は式(6)の指数積分関数$E_1\left(|\tau-\tau'|\right)$を微小区間で解析的に積分し$\tau'=\tau$での特異点を除去する[5]ことにより、以下の条件で数値解を求めた。

$$\begin{aligned}&\varepsilon_{s1}=\varepsilon_{s2}=\varepsilon=0.5,\ 0.8,\ 1.0\\&\tau_{oh}=\tau_{or}=\tau_{ol}=\tau_o=1.25,\ 2.5,\ 5.0\\&T_{gho}=400,\ 800,\ 1200,\ 1600°C\\&u_{mh}=u_{mr}=u_{ml}=u_m=0.15,\ 0.3,\ 0.6\text{m/s}\end{aligned} \tag{9}$$

なお、計算領域はパラメータに応じて20~80分割した。その結果、高温作動ガスが系内に持ち込むエネルギ(周囲温度基準)に対する系出口での誤差は、上記の計算条件に関して±3%以内であった。

3．結果および考察

Fig. 2に熱交換器内の温度分布の例を示す。ここで、被加熱ガスの流れは近寄流であり、ε=0.8、τ_o=2.5、T_{gho}=800℃、u_m=0.3m/sである。実線と破線は、それぞれ、ガスと多孔性媒体の温度である。また、記号"A"と"●"は排熱回収部がある場合(*with HRS*)の多孔質媒体内温度と壁温度、記号"B"と"○"は無い場合(*without HRS*)のものである。排熱回収部を設置することにより、低温部の被加熱ガス出口温度T_{gle}が高くなり全熱回収率が向上すること、また排熱回収部の外壁温度T_wが極めて低い温度に保たれることがわかる。

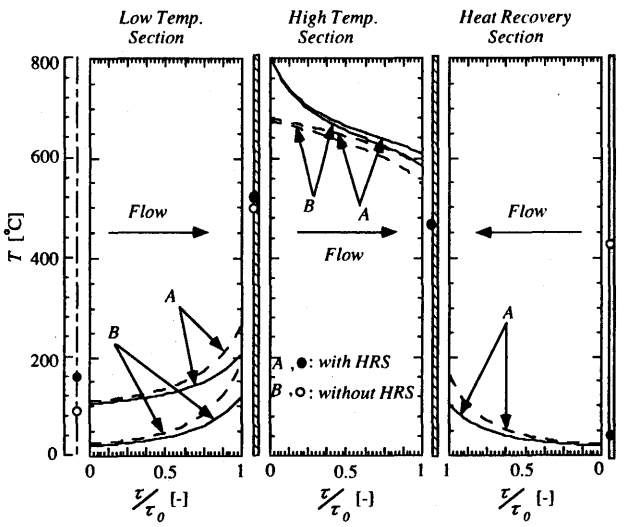

Fig.2 Temperature distributions

Fig.3 に排熱回収部の外壁温度 T_w に及ぼす高温部ガスの入口温度 T_{gho} の影響を示す。ここで、ε=0.8、τ_o=2.5、u_m=0.3m/s であり、被加熱ガスの流れは近寄流である。排熱回収部が無い場合は、高温部右壁が外壁となるので T_w=250~500℃と非常に高くなる。しかし、排熱回収部を設置することにより、T_w をこれより1桁低い25～50℃程度に抑えることが可能である。

Fig.4 に、次式で定義される全熱回収率 H_R(=被加熱ガスが系外に持ち出すエネルギ/高温作動ガスが系内に持ち込むエネルギ、[周囲温度基準])に及ぼす多孔性媒体の光学的厚さ τ_o と高温部ガスの入口温度 T_{gho} の影響を示す。

$$H_R = \frac{\left(\pi r_0^2 u_{ml}\right)\rho c_p\left(T_{gle} - T_\infty\right)}{\left(\pi r_0^2 u_{mh}\right)\rho c_p\left(T_{gho} - T_\infty\right)} \tag{10}$$

ここで、ε=0.8、u_m=0.3m/s であり、被加熱ガスの流れは近寄流である。いずれの場合も、排熱回収部が無い場合と比較して H_R は約2倍に増大することがわかる。参考のため、排熱回収部が有りかつ隔壁が熱ふく射に対し透明な場合の結果を記号"▲"で示したが、この場合の H_R は排熱回収部が無い場合と比較して約 3 倍になっている。なお、被加熱ガスの流れが離反流の結果は近寄流の場合と比較して若干低い程度であった。

Fig.5 に、次式で定義される熱通過係数[2] K に及ぼす高温部ガスの入口温度 T_{gho} の影響を示す。ここで、ε=0.8、τ_o=2.5、u_m=0.3m/s であり、被加熱ガスの流れは近寄流である。

$$K = \frac{q_R}{T_{eff1} - T_{eff2}} \tag{11}$$

上式において、q_R は正味のふく射熱流束、T_{eff1} と T_{eff2} は隔壁を挟む両多孔性媒体の隔壁側の面から射出されるふく射エネルギと等価なエネルギを射出する黒体面の温度(有効温度)である。また、図中の $K_{H\text{-}L}$ および $K_{H\text{-}R}$ は、それぞれ、高温部と低温部間および高温部と排熱回収部間の熱通過係数である。本熱交換器はふく射伝熱に基づい

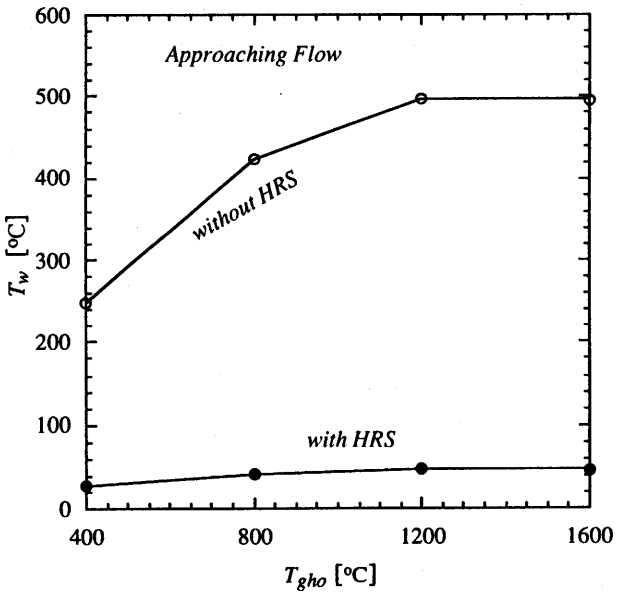

Fig.3 Effect of T_{gho} on T_w

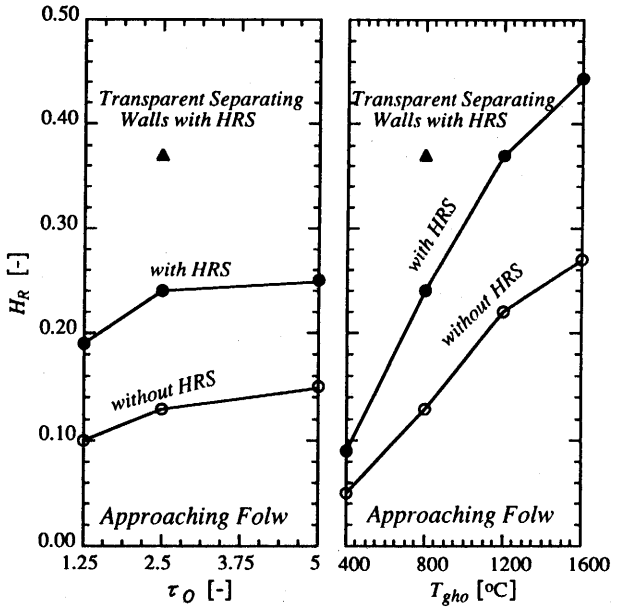

Fig.4 Effects of τ_o and T_{gho} on H_R

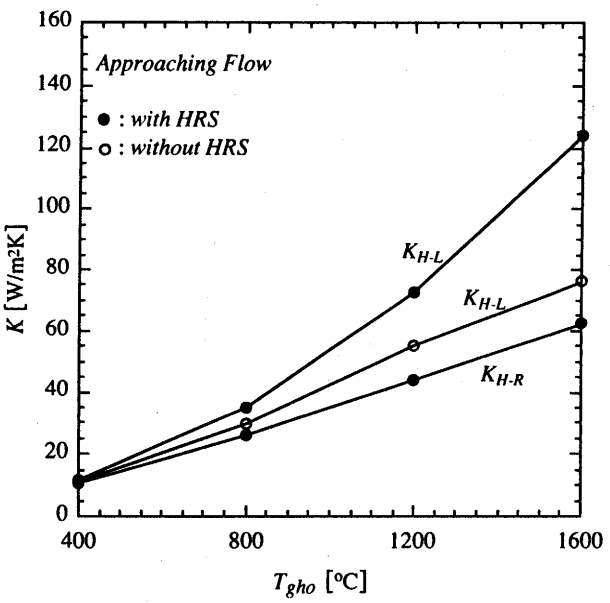

Fig.5 Overall heat transmission coefficient

ているので、ガス温度が 400℃程度の低温域では約 10W/m^{2}K と低い値であるが、温度が高くなると共に増大し、1600℃では $K_{H\text{-}L}$=120W/m^{2}K 程度の高熱通過係数が得られている。

4. 結　言

多孔性媒体を用いたガス－ガス熱交換器に、同じ多孔性媒体で構成される、断熱を兼ねた排熱回収部を設置した場合の数値解析を行った。その結果、排熱回収部を設けることにより断熱機能が著しく向上すること、排熱回収部が無い場合と比較して全熱回収率が 2 倍程度増大すること、さらに本型式の熱交換器では 120W/m^{2}K 程度の高熱通過係数が得られることなどを明らかにした。

最後に、本研究の一部は機能物質科学研究所奨励研究費により行われたものであることを記し謝意を表する。

文　献

(1) Echigo, R., High Temperature Heat Exchangers, Hemisphere Publishing Co. (1986), 230.
(2) 谷川　明、花村克悟、越後亮三、富村寿夫、日本機械学会論文集、**57**-533 (1991)、302.
(3) 越後亮三、吉澤善男、花村克悟、小澤　亘、日本機械学会論文集、**57**-533 (1991)、309.
(4) 花村克悟、斉木直人、林　哲也、越後亮三、日本機械学会論文集、**59**-562 (1991)、2065.
(5) 越後亮三、富村寿夫、吉澤善男、陣内秀信、機能物質科学研究所報告、2-1 (1988)、53.