

457 直交流型熱交換器に関する研究

(伝熱ダクト内にスリット付挿入板を設置した場合)

Experimental Study on A Cross Flow Type of Heat Exchanger
(Setting An Inserted Plate with Slit Holes in Ducts)

佐藤 和彦 (ダイワ冷設) 大西 覚 (ダイワ冷設) Himsar Ambarita (室蘭工大)

小川 光一, 黒谷 博史, 鈴木 淳, 岸浪 紘機 (室蘭工大)

Kazuhiko SATO*, Himsar Ambarita, Koichi Ogawa, Hiroshi KUROTANI, Jun SUZUKI and Koki Kishinami**,

*DIWA Refrigeration Ltd, 1-3-9 Hinode-cho, Muroran 050-0081,

**Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Muroran 050-8585.

Cross/counter flow types of heat exchanger seem likely to have superior characteristics in regard to design a large heat transfer surface area per unit volume by alternately laminating the elements. In this paper, a cross flow type of heat exchanger are examined by experiment, and inserted plate with/without slit holes setting in ducts are proposed to be up the exchanging heat performance from the view point of the enhancement of heat transfer coefficient and pressure loss decreasing, substituting the conventional heat transfer surface increasing technique. Experimental results for 4 cases (CFHE without inserted plate, and inserted plate with/without slit holes) are discussed as a relation of temperature effectiveness and number of heat transfer unit and exergy transfer, referred to the numerical results taking the effect of the inserted plate with/without slit holes on flow, heat transfer behaviors and pressure decreasing into consideration.

Keywords: Temperature Efficiency, Number of Heat Transfer Units, Exergy, Pressure Loss.

1. 緒言

現在我々の生活の中で最も身近なエネルギー資源は、石油、石炭など化石エネルギーである。しかし、化石エネルギーは埋蔵量に限りがある上、燃焼等に伴い有害物質や温室効果ガスなどを排出するため、世界規模で地球環境に与える影響が大きな問題となっている。そこで、化石エネルギーに変わる代替エネルギーの開発、及び日々使用するエネルギーの有効利用の活用度を向上させて環境負荷の軽減を図る事が重要である。

本研究では、熱回収を目的とした熱交換器は温度差が大きいほど、その温度差に比例した交換熱流が得られコストパフォーマンスが良くなる。従って、低温度差域で作動させる熱交換器は何よりもまず高性能(コストも含め)であらねばならない。そのため、低温度差用の直交流型熱交換器の性能向上を目指し、当研究室により開発した熱伝達促進用の挿入板を設置、さらに圧力損失低減を目的としたスリット付挿入板を提案し、廃熱の有効利用と低温度差域での熱回収を可能とする新型直交流型熱交換機を二種用意し、これまでの熱交換器とあわせ関連するパラメーターの下で実験を行い、数値解析による結果と併せ検討・考察した結果を報告する。

2. 実験装置及び実験方法

Fig.1 に本実験装置の概要を示す。実験装置は熱交換器エレメントが挿入される熱交換器ユニット、ファン、暖気を発生させるヒーター、スライダック (変圧器) 及びパソコン (温度検出・記録用)、配電盤、流量調整弁、12箇所に設置されたクロメル-アルメル熱電対で構成される。実験パラメーターは3個のスライダックにより廃熱源、受熱流体の流量調整と廃熱源温度調整を行う。

熱交換器ユニットを直交して流れる加熱・受熱流路に設置されたファンにより、一方の流体はヒーターにより加熱され、廃熱源とする。スライダックにより受熱と加熱の温度、流量比を決められた値に設定した後、流体が熱交換器ユニットに入り内部のダクト壁を通して熱交換が

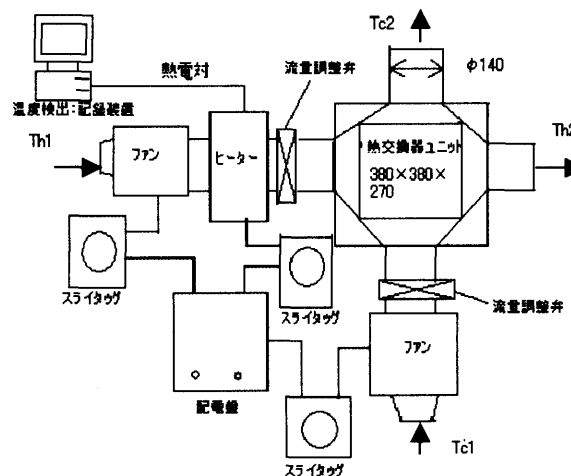


Fig-1 Out line of Experimental Apparatus

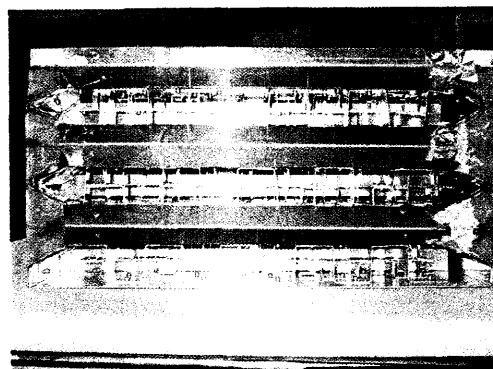


Fig-2 Photo of Cross flow type of Heat Exchanger

行われる。ここで、14cm φ 径入口、出口ダクト内平均流速は熱交換器内で 1/3.8 に減速されている。

廃熱源温度 Th_1 を一定として流量条件を変え、定常に達した後ユニットの出口で 5 箇所の温度と、流速を測定し、その平均値を採用した。なお、温度測定にはクロメル-アルメル熱電対、流量の測定には熱線流速計を用いた。

Fig.2 は本実験で用いたアルミ型フィン熱交換器の正面写真であり、ダクト内に挿入板が設置されている。

本実験では挿入板を直交流型熱交換器に設置した場合、その挿入板に 1.5[mm]、又は 3.5[mm]のスリットを設け(参照 Fig.3)熱交換器内に設置したもの及び挿入板無しの場合での熱交換器の温度効率、交換熱量、さらにその圧力損失並びに熱伝達率について実験を行った。

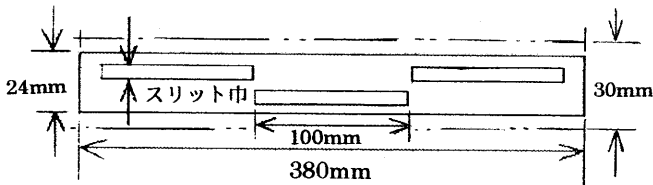


Fig.3 Slit Arrangement of Inserted Plate

3. 数値解析によるダクト内対流空気流

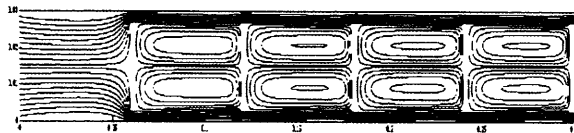


Fig.4 Stream lines for Duct of no Inserted plate at $U=0.5$ [m/s]

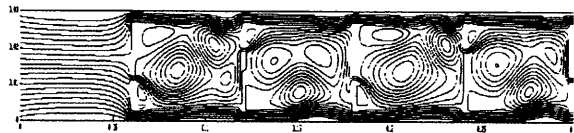


Fig.5 Stream lines for Duct of Inserted plate with 1.5mm slits at $U=0.5$ [m/s]

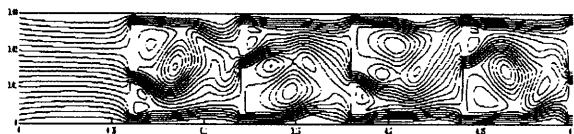


Fig.6 Stream lines for Duct of Inserted plate with 3.5mm slits at $U=0.5$ [m/s]

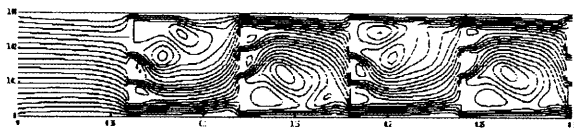


Fig.7 Stream lines for Duct of Inserted plate with 1mm slits at $U=0.5$ [m/s]

ここで、先ず直交流型熱交換器の要素となるダクト内の対流熱伝導挙動を、挿入板の有無、挿入板にスリットを設置した場合などに対し数値解析を行い、その効果を等温度加熱壁と単純化した場合に対し解明してみる。

Fig.4 は高さ $H=30$ mm、 $L=380$ mm 全長の本実験条件のダクトに高さ 24mm の挿入板を 76mm 間隔毎に 5 枚設

置した場合の流線図である。Fig.5 は同様の条件下の挿入板に 1.5mm のスリットを交互に配置した場合、Fig.6 は同条件下で挿入板に 3.5mm のスリットを交互に配置した場合、Fig.7 は挿入板を 2mm と 4mm の隙間配列として、1mm スリットを 2 個設置した場合の流線分布である。

いずれもダクト内の空気流速 $V=0.5$ m/s としてあるが、挿入板のみでは流れ全体に大きな渦領域が存在し大きな圧力損失となるが、スリットを入れることで、そして 1.5mm より 3.5mm とすることで渦領域が小さくなり上下隙間部での大きな流速場は上下壁上で熱伝達促進を生成している。Fig.7 は挿入板を交互に寄せ、2 個のスリットをつけた場合を示すが、渦のない流線が大きな割合を占め、圧力損失は Fig.4 の場合の 50% に低下する。

Fig.8 はこれらの場合に対し流速 0.5 m/s~ 1.5 m/s 域で圧力損失と交換熱量の傾向(ほぼ平均熱伝達率に比例)を示している。 50°C の等温加熱壁条件として、適切な挿入板とスリットの設置により圧力損失は挿入板のみの Fig.4 の場合に対し 50% 以下、熱伝達率は 85~115% を保持する事を示している。これらの結果は全てダクト高さ 30mm の条件であるが、図中には挿入板を設置しないダクト高さ 10mm の場合を与えるが圧力損失は極めて小さく、熱伝達率は 40% に低下しても伝熱面積は 3 倍となるため単位体積あたりの交換熱量 Q は Fig.4 の場合に対応している。

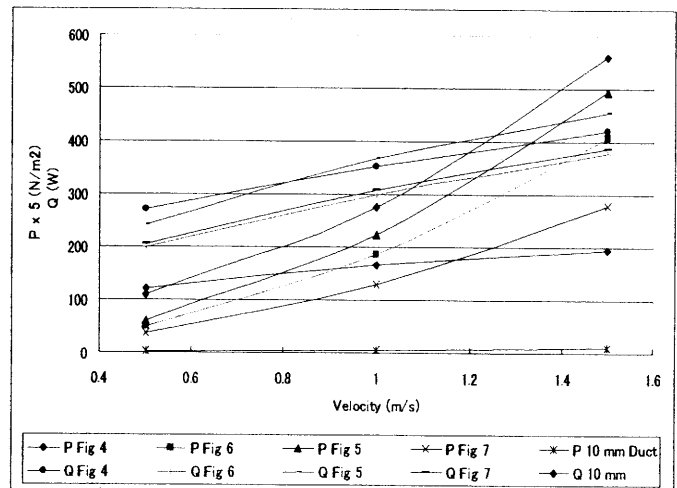


Fig.8 Pressure loss ΔP and Exchanged Heat Quantity Q

4. 実験結果及び検討・考察

4-1 伝熱ユニット数

熱交換器の性能をあらわすものとして伝熱ユニット数 S 、温度効率 η_T があり、以下のように表される。

$$Q = k\Delta T_m A \quad (1)$$

$$\eta_T = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} \quad (2)$$

$$\frac{kA}{mC_p} = S \quad (3)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{l}{\lambda} \quad (4)$$

A : 伝熱面積, C_p : 空気の比熱, m : 受熱側の質量流量, h_1, h_2 : 熱伝達率, k : 熱貫流率, l : アルミの厚さ, ΔT_m : 対数平均温度差, η_T : 温度効率, λ : 熱伝導率

4-2 温度効率と伝熱ユニット数

伝熱ユニット数は熱交換器の性能を表す指標であり、流量を小さくすることは S を上げることになり、同一温度差の下で流量が低下した分出口温度が上昇し温度効率

は上昇する。この実験では伝熱面積 A が一定のまま流速だけを落としたが逆に、流速が一定のままとすれば伝熱面積 A が大きくなることに対応し、相似パラメータである Fig.9 に本実験で得られた各場合の流速と伝熱ユニット数の関係を与える。基本的に同一寸法の直交流式熱交換器を用いた本実験では挿入板を設置した方が挿入板の無い場合と比べて S が高くなって、 η_T もかなり大きく、高性能化している。Fig.10 には S と η_T の、Fig.11 には V と S の関係を与えるが、 S と η_T はほぼ同一直線上にあり、性能評価の目安を与える。 η_T が最も高い場合は、いずれの流速においてもスリット無しの挿入板の場合、次に

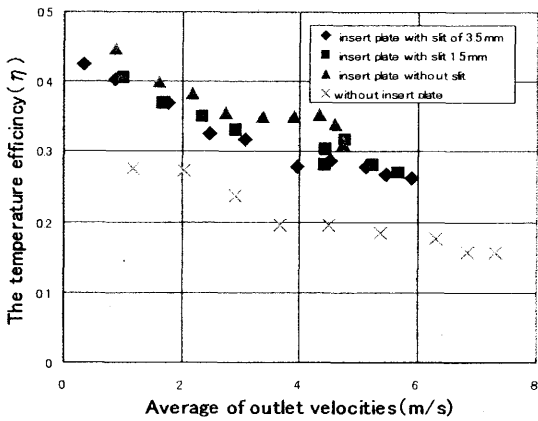


Fig-9 Temperature Efficiency and outlet average velocities

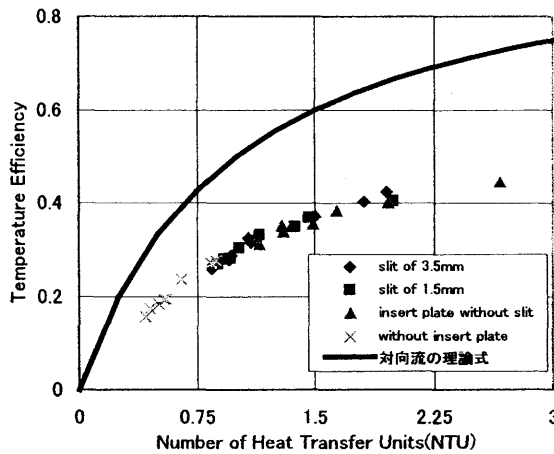


Fig-10 Temperature Efficiency and Number of heat Transfer Unit

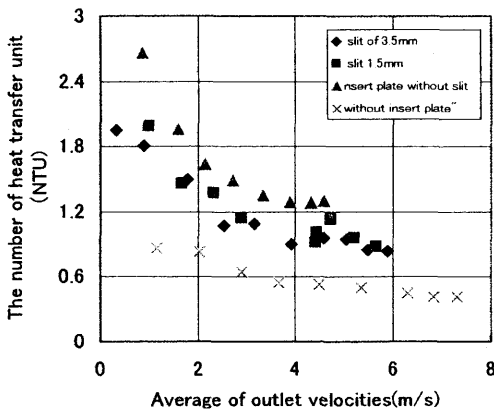


Fig-11 Number of Heat Transfer Units and Duct outlet Velocity

1.5[mm]のスリットを入れた場合、3.5[mm]のスリットを入れた場合へと続き、最後に挿入板無しのものとなった。温度効率を比較すると、挿入板無しの熱交換器と挿入板を入れた熱交換器では2倍程、スリット無しの挿入板入り熱交換器とスリットを入れたものでは10%程、温度効率が低下し流速は20%前後向上し、平均流速が増すほど伝熱ユニット数は減少することがわかる。

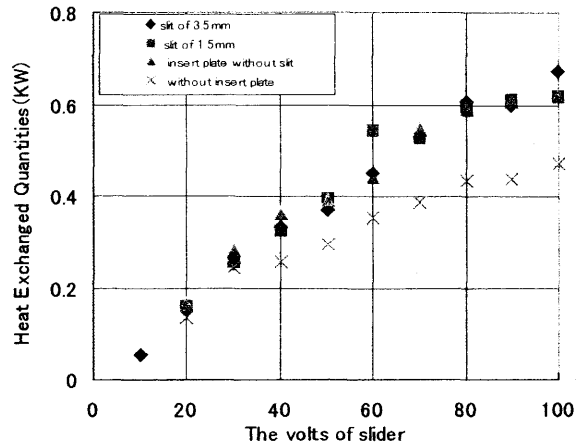


Fig-12 Heat Exchanged Quantities and volts of slider for Temperature difference $\Delta T(Th1-Tc1)=20^{\circ}C$

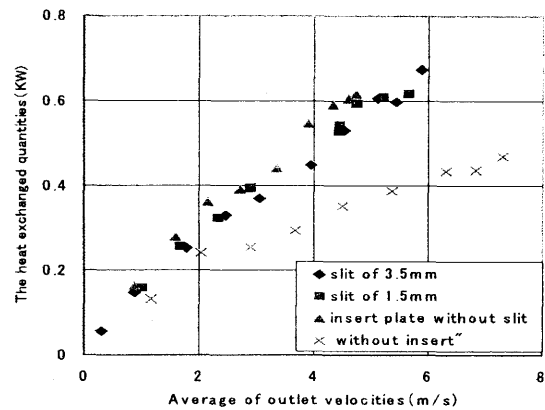


Fig-13 Heat Exchanged Quantities and Average Outlet Velocity for Temperature difference $\Delta T=20^{\circ}C$

4-3 交換熱量と平均流速の関係

Fig-12 はファンのスライダック入力と交換熱量の関係を Fig-13 は平均流速と交換熱量の関係を示している。送風機のファン入力を大きくして流速を上げるに依り、スリット無しの交換熱量にスリットに挿入板を設置した場合の交換熱量が近づき、ファン入力を最大にした場合、3.5[mm]のスリットを挿入板に設置したものはスリット無しものを上回り、1.5[mm]のスリットを設けたものでもスリット無しものと同程度の交換熱量を得た。その場合3.5[mm]のものは交換熱量が挿入板無しの場合と比べて約30%増加し、1.5[mm]のスリットを設けた挿入板の場合は交換熱量が20%程増加となった。先の実験から、温度効率が一番大きいのはスリット無し挿入板を設置した場合であるが、3.5[mm]のスリットを入れた場合が交換熱量が最大となり、スリットを入れることで圧力損失が少なくなった分、流量が増したことによる。

実験上ダクト内に流れ方向のフィンが設置されているため、スリットの設置による横方向の渦流は抑制できても奥行方向のフィン間の渦流が存在するため、圧力損失

の低減効果は解析値に到っていない。

4-4 エクセルギと平均流速の関係

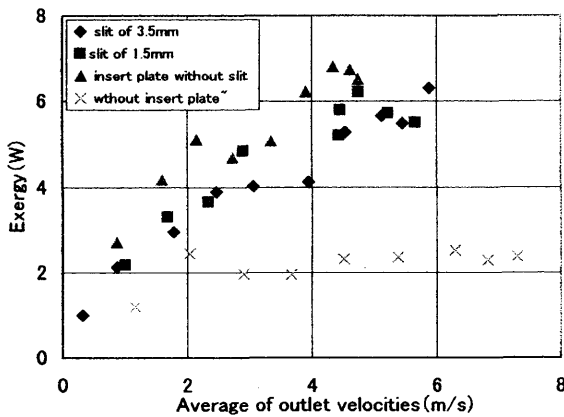


Fig-14 Exergy and Average Outlet Velocity for $\Delta T(\text{Th1-Tc1})=20^\circ\text{C}$

エクセルギとは作動媒体の温度が放熱源の温度から見て相対的な有効エネルギーの尺度となる量で、この値が高いほどエネルギー的に価値がある。Fig-14 は平均出口流速とエクセルギの関係を示している。スリット無しの挿入板を設置した場合が最もエクセルギが高い結果になった。ついで 1.5[mm]のスリットを入れた場合、3.5[mm]のスリットを入れた場合、そして挿入板無しの場合となった。しかし 3.5[mm]スリット挿入板はファン入力を 80[W]以上として風速 4.8[m/s]とすればまだ向上することが予想され、逆にスリット無しでは流速 4.5[m/s]以上では内部の渦流が著しく増大しエクセルギ性能は低下している。要するにスリット無し挿入板の場合、流速 4.5[m/s]以上では他に比べ性能低下は著しく、内部流れの急激なる変化(層流→乱流)を示唆する。ここで、ダクト出口の流速 4.5m/s とは熱交換器の中では 1/3.8 に減速され、1.2m/s 程度である。

4-5 圧力損失と熱伝達率

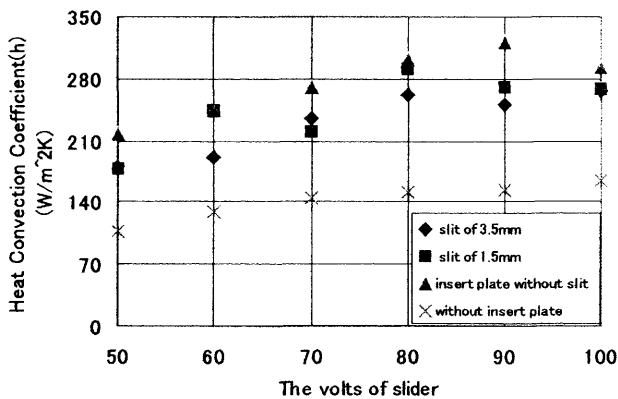


Fig-15 Heat Convection Coefficient for $\Delta T=20^\circ\text{C}$

挿入板の有無は熱交換器の性能向上に大きく貢献するが、一方、著しい圧力損失をもたらす。挿入板にスリットを設置すれば解析結果及び実験結果双方に著しい圧力損失の低減が見られる。そこで、圧力損失と熱伝達率の傾向を調べてみる。熱交換器内の圧力損失の計算は以下の式を用いた。また熱伝達率は (3), (4) 式を用いて

算定した。

$$L_{motor} = \gamma_{air} \times \xi_T \times \frac{v_1^3}{2} \times A_1 \quad (5)$$

A_1 : 熱交換器の入口面積 L_{motor} : ファンモータ入力
 v_1 : 出口平均流速 γ_{air} : 空気比重量 ξ_T : 全損失係数

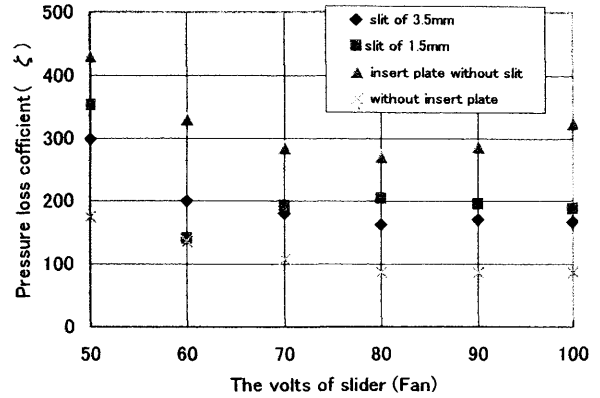


Fig-16 Pressure Loss Coefficient

Fig-15 及び Fig-16 は本実験でのファン入力に対しての熱伝達率と圧力損失係数を示すが、同一入力では損失係数が大きい程熱伝達率は大きい。h 及び η_T の最大の条件はスリットが無い挿入板を設置した場合、ついで 1.5[mm]のスリットを入れた挿入板を設置した場合、3.5[mm]のスリットを入れた挿入板を設置した場合とつづき、最後に挿入板無しの熱交換器となる。そしてスリット無しの挿入板を設置した場合と挿入板無しの場合と比較すると 2 倍から 3 倍圧力損失と熱伝達率が増加し、さらにスリットを入れた場合と挿入板無しの場合と比べると 1.5[mm]の場合では 10 から 20%、3.5[mm]の場合では 20 から 30%圧力損失が低下し、スリットの存在が有効な事を示している。

5. 結言

本論はこれまでの熱交換器の伝熱面積増加方式に代えて熱伝達増大方式とした新形式を提案し実験を行ったものである。以下、得られた結論を列記する。

1. 挿入板入りの熱交換器と挿入板無しのものではスリットある無しに関わらず熱伝達率は 1.5 から 2 倍ほど違い温度効率、交換熱量の値が 1.5 から 2 倍ほど違う。
2. 流速を落としても伝熱面積を増やしても伝熱ユニット数が増加するため、温度効率は増大する。熱交換器の伝熱面積を 2 倍(長さと同幅が 1.41 倍)とすれば S は 2 倍となると考えられる。
3. 挿入板を設置する本形式の熱交換器は、同一能力の他形式と比べ材料費と重量節減に大きな効果を発揮する。

参考文献

(1) 佐藤和彦,黒谷博史,Himsar Ambarita, 岸浪紘機,他二名,“直行列型熱交換器に関する研究”,第14回環境工学総合シンポジウム語論,No.04-10(2004),pp.331-334.
 (2) 黒谷 博史「クロスフロー型熱交換器の実験的研究」卒業論文 平成15年度 室蘭工業大学