自然対流の伝熱促進法と高性能伝熱面の開発*

三角利之^{*1}, 北村健三^{*2}

Heat Transfer Enhancement of Natural Convection and Development of High-Performance Heat Transfer Plate

Toshiyuki MISUMI and Kenzo KITAMURA

A new enhancing technique was developed for a natural convection adjacent to a vertical, heated plate. In order to enhance the heat transfer, V-shaped diverter plates of which the edges faced upstream, were attached onto the vertical plate in a staggered layout. These plates work not only as the extended surface but also as the heat transfer promoter. The overall heat transfer coefficients of the above enhanced surface were measured and compared with the nontreated, flat surface and the conventional finned surface. The results show that the highest heat transfer performance is achieved for the present surface and that the heat transfer coefficient becomes 40% higher than that of the conventional finned surface with the same total surface area and fin height.

Key Words: Heat Transfer, Natural Convection, Heat Transfer Enhancement, Heat Exchanger, Finned Surface, Diverter Plate

1. 自然対流の伝熱促進法について

強制対流の伝熱促進に関しては従来より、乱れ、先端効果、電場などさまざまな手段や効果を利用した促進法が開発されており、これらは現実にも熱交換器の高性能化・コンパクト化に役立っている。これに対して、自然対流の伝熱促進手段として実用に供されているのは、拡大伝熱面効果を利用したフィン付伝熱面だけであると言ってよい。たとえば、本研究で取扱う垂直加熱平板の伝熱促進については、従来より図1に示したような垂直フィン付伝熱面が多用されている。しかし、このフィン付伝熱面は、本質的に熱伝達率自体を増加させることを目的としたものではない。また高い伝熱促進効果を得るには、フィンを伝熱面上に発達する境界層よりもなるべく高く突出させることが必要である。したがって、必然的にフィン高さあるいはフィン表面積を大きく取らざるを得ず、この方法によって伝熱面の高性能化とコンパクト化を同時に達成するには限界がある。このためには、フィン効果だけに頼

らない、つまり熱伝達率そのものを増加させるような自然対流の伝熱促進法の開発が必要不可欠である。

このような自然対流の熱伝達率そのものを促進しようとする試みは、じつは、古くより数多くの研究者が取り組んできたテーマでもある。以下に述べる研究の中には、直接には伝熱促進を目的として唱えていないものもあるが、たとえば伝熱面上にリブ⁽¹⁾や粗さ要素⁽²⁾⁽³⁾を設置する方法、あるいは伝熱面を波状にしたリブ⁽⁴⁾⁽⁵⁾、伝熱部と非伝熱部に伝熱面を分割する方法⁽⁶⁾などさまざまな自然対流の伝熱促進法が試みられている。しかし、それらは結論的に言えば、ほとんど顕著な促進効果を得ていないか、あるいは得たとしても実用の伝熱面として実現の可能性が低いものがほとんどで

図1 垂直フィン付伝熱面

* 原稿受付 平成3年4月24日。

^{*1} 正員、鹿児島工業高等専門学校 (〒899-51 鹿児島県始良郡隼人町真孝1460-1)。^{*2} 正員、豊橋技術科学大学工学部 (〒440 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)。

ある。したがって、現在でもフィン付伝熱面に匹敵するほどの性能をもった自然対流伝熱面、あるいは伝熱促進手段はほかに考案されていないと言ってよい。

この現状からわかることは、自然対流の伝熱促進が強制対流に比べ非常に困難であるということである。この大きな原因の一つには、自然対流では強制対流に比べ流速が圧倒的に遅いため、はく離や乱れを人為的に発生させるのが困難なことが挙げられる。またその背景には、従来の自然対流の伝熱促進の基本的な考え方として、図1に典型的に示されているように、できる限り自然対流の通路を確保して、煙突効果を利用したほうが、下手に流れをさえぎってよどみによる熱伝達の劣化を招くより、はるかに得策であると長い間信じられていたことが挙げられる。

ところで、著者らはここ数年来、垂直加熱平板上にステップ⁽⁷⁾⁽⁸⁾や水平仕切板⁽⁹⁾を設けた場合の自然対流について実験的検討を行ってきた。その結果、ある条件下でこれら設置物体後方の熱伝達率が促進される場合があることを見いだした。この条件をよく調べてみるといづれも、「垂直平板により加熱された高温流体がこれら物体によってさえぎられ、物体後方に直接流れ込まないとき」に限って伝熱が促進されることがわかった。これより、自然対流の伝熱促進の鍵は、「上流側で発生した高温流体を伝熱面近傍から排除し、代わりに低温の周囲流体をいかにして伝熱面近くへ持ってくるか」にあるとの推論を得るに至った。

ここで、この上流側で発生した高温流体の排除先および排除法としてつぎの二つが考えられる。その一つは、図2(a)に示したように伝熱面上に水平な仕切板を設け、高温流体を境界層の外側に排除する方法である。しかし、著者らの実験結果⁽⁹⁾によると、この方法

で高温流体を排除するには、少なくとも境界層厚さの数倍から十数倍程度の高さを有する仕切板が必要ながわっている。したがって、この方法では仕切板前方の流れのよどみに伴う伝熱劣化は避けられず、また伝熱面のコンパクト化も困難であろう。一方、もう一つの方法は、図2(b)に示したように伝熱面上にスパン方向に有限な長さの分流板を置き、分流板の側方に高温流体を排除する方法である。この方法をさらに改良し、たとえば図2(c)に示すようなV字形をした分流板を用いると、高温流体をすみやかに側方へ排除でき、しかも分流板前方での流れのよどみも最小限に抑えられるだろう。このことから、著者らは前報⁽¹⁰⁾で、実際に水平およびV字形分流板を垂直加熱平板上に設置した場合について、分流板まわりの伝熱・流動特性を実験的に調べてみた。その結果、V字形分流板を用いると、板の高さが垂直伝熱面に沿う境界層厚さと同程度か、それ以下であっても、十分な排除効果があり、しかも分流板背後で高い熱伝達率が得られることを見いだした。したがって、この結果をうまく利用すれば、高性能で同時にコンパクトな伝熱面が開発できる可能性が高いと思われる。

2. 本研究の目的・意図

さて、前報⁽¹⁰⁾の実験は、垂直な伝熱面上に断熱素材(アクリル薄板)からなる分流板を1個設置した場合を対象としたものであった。ここで、この分流板を図3に示したように、伝熱面上に多数個千鳥状に配置した場合を想定してみる。すると図3に記したように、垂直加熱面に沿う高温流体は、分流板のせん端で分岐し、側方へ排除されるだろう。また、排除された高温流体は、下流にある分流板のせん端に到達し、以後次々と

図2 伝熱促進体

分流, 排除されるだろう。そしてこの高温流体の分流, 排除に入れ替わって, 分流板背後には低温の周囲流体が流れ込み, この部分で高い熱伝達率が実現できるものと思われる。また, 分流板をV字形にすることにより, 分流板前方での流れのよどみが解消でき, この部分での伝熱劣化を最小限に抑えることができる。さらに, この分流板を高熱伝導率の素材で製作すれば, 分流板そのものがフィンとしても機能する。すると, 前述した高温流体の排除による伝熱促進に加え, フィンからの伝熱も期待できる。以上の諸点を考慮すると, V字形分流板を伝熱面に設置することにより, 垂直フィン付伝熱面よりも, さらに高性能でコンパクトな伝熱面が開発できるものと思われる。

このことから本研究では, まず上記の考えに基づいて実際にV字形分流板付伝熱面を試作し, その伝熱特性を調べることにした。またこの伝熱面と, 現在実用になっている垂直フィン付伝熱面について, 同一フィン高さおよびフィン表面積条件の下で熱伝達率の測定を行い, 両伝熱面の性能比較を試みた。さらに, V字形分流板付伝熱面の実用化に際しての問題点などを抽出し, 検討を加えた。

図3 V字形分流板付伝熱面

3. 実験装置および測定

本研究では, 図4に示す平滑伝熱面, V字形分流板および垂直フィン付伝熱面の3種類の伝熱面を試作し, 実験に用いた。これらの分流板やフィンは, いずれも幅280 mm, 高さ240 mm, 厚さ2 mmの銅製基板伝熱面上に, はんだにより接着されている。この基板伝熱面の裏側全面には, 厚さ30 μm , 幅13 mmのステンレスはくが, 電気絶縁用両面粘着テープを介して水平にはられている。このはくは, 高さ方向60 mmごとに大きく4分割されており, それぞれ独立に通電加熱される。基板伝熱面温度が伝熱面全体にわたってほぼ一様となるように, この四つのブロックの通電量をそれぞれ電圧調節器により調整した。また, このヒータの背面には, 厚さ10 mmの亚克力板および厚さ20 mmの発泡スチロール断熱材を取付け, 伝熱面裏側への熱漏洩を防止している。

伝熱面温度測定のために, 径100 μm のC-A熱電対を基板伝熱面の裏側46箇所の地点に埋設した。この熱電対は伝熱面温度の一様性が調べられるよう, とくに分流板やフィンのまわりには密に配置した。また, これら伝熱面の両側面には, 流体の浸入を防ぐために側板を設けた。そして伝熱面全体を底面600×600 mm², 高さ900 mmの水槽中に沈めた。試験流体としては常温の水を用い, 気泡の伝熱面への付着を防ぐため, いったん沸騰・脱気させたあとを使用した。

さて, 基板伝熱面上に設置した分流板やフィンであるが, まずV字形分流板については図4(b)に示すように, 開口角90°, 辺長 $B=20$ mm, 厚さ1 mmの銅製分流板を用いた。この分流板の高さ H は, 5, 10 mmおよび20 mmの3とおり変化させ, それぞれについて84個の分流板を試作した。そして, これを図4(b)に示したように千鳥状に配置した。この分流板の水平方向ピッチ $s_h=40$ mm, また垂直方向ピッチ $s_v=40$ mm, である。一方, 図4(c)の垂直フィンについては,

図4 供試伝熱面

V字形分流板との性能比較を行うために、高さは分流板と同じ10 mm、また総フィン表面積が分流板の表面積と同一となるように、そのフィンピッチは $s_f=18.6$ mmとした。これらの伝熱面の有効伝熱面積、すなわち基板伝熱面表面積+フィンもしくは分流板の総表面積は表1に示したとおりである。なお、このフィンおよび分流板表面積の中には端部の表面積は算入していない。実験では、伝熱面温度と周囲流体との温度差 $\Delta T=2.5, 5.0$ Kおよび 7.5 Kの3とおりに設定した。このとき、伝熱面温度の均一度は、 $\Delta T=7.5$ Kに対し ± 0.4 K以下であった。この値から、伝熱面はほぼ等温とみなせるものと考えている。

4. 実験結果および考察

まず、上記3種類の伝熱面について、その平均熱伝達率を測定した結果を図5に示す。図5の縦軸はフィンや分流板を伝熱面積に算入しない、いわゆる基板伝熱面の見掛けの熱伝達率 h_m であり、次式で定義した。

$$h_m = Q/A_b(T_w - T_f) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 Q : ヒータ総加熱量、 A_b : 基板伝熱面表面積、 T_w : 伝熱面温度、 T_f : 周囲流体温度

一方、横軸には伝熱面温度と周囲流体温度との差 ΔT をとった。また、このときの伝熱面高さ基準のレイリー数 Ra を参考までに併記した。また図5には、高さ l の等温加熱垂直平板の平均熱伝達率に対する層流解⁽¹⁾を実線で示した。この式を表記すると、

$$Nu_m (= h_m l / \lambda) = 0.60 Ra^{1/4} \quad \dots\dots\dots (2)$$

図5から平滑伝熱面の平均熱伝達率は、上記層流理論解に良好に一致していることがわかる。これより本装置および測定法に本質的な誤りがないことが確認できる。

さてフィンや分流板を設置すると、伝熱面の平均熱伝達率は平滑面のそれに比べ明らかに高くなる。平滑面に対する促進率をこれらの結果を基に算出すると、フィン高さ $H=10$ mmの垂直フィン付伝熱面の場合、平均約1.7倍、高さ $H=5, 10$ mmおよび 20 mmの分流板付伝熱面では、それぞれ、平均約1.9, 2.4倍および2.9倍となった。このうち $H=5$ mmおよび 10 mmの分流板付伝熱面の有効伝熱面積は、表1に示したように平滑伝熱面のそれぞれ1.5, 2倍である。これに対し、1.9および2.4倍という高い熱伝達率が得られた事実は、V字形分流板によって熱伝達率が実質的に促進されたことを示す一つの証拠といえる。

また、 $H=10$ mmの分流板付伝熱面の結果を垂直フィン付伝熱面と比較してみると、両者は高さおよび有効伝熱面積が同一であるが、伝熱促進率はそれぞれ

1.7倍(垂直フィン)および2.4倍(分流板)となっている。これより、V字形分流板付伝熱面では垂直フィン付伝熱面に比べ約40%程度高い熱伝達率が達成できたことがわかる。従来、垂直フィンに匹敵するほどの伝熱性能をもった伝熱面が存在しなかったことを考慮すると、この結果は画期的といえる。また、 $H=5$ mmの分流板でも $H=10$ mmの垂直フィン付伝熱面よりさらに高い伝熱促進率が得られており、この事実は今後自然対流伝熱面のコンパクト化、省資源化を推進する上で貴重であると考えている。

さて、このような伝熱面の性能評価に当たっては、over-allの伝熱だけでなく、局所的な特性をもう少し詳しく調べる必要があると思われる。本実験では、伝熱面の高さ方向60 mmごとにヒータを4分割しているが、このそれぞれのブロックについて平均熱伝達率が測定可能である。そこで、この結果を基に局所的な伝熱特性を検討してみた。なお、各ブロックの平均熱伝達率 $h_i (i=1\sim 4)$ は、次式で求めた。

$$h_i = Q_i/A_i(T_w - T_f) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

Q_i : i 番めのブロック通電加熱量

A_i : i 番めの基板伝熱面の表面積

その代表的な結果として、 $\Delta T=5$ Kの場合を図6に示す。なお、フィンおよび分流板の高さ H はいずれも

表1 供試伝熱面の有効伝熱面積

H	Surface area of plates (cm ²)				
	Flat	Vertical plate fin 10mm	V-shaped diverter plate		
			5mm	10mm	20mm
Base plate	672	672	672	672	672
Fin or Diverter plate	0	672	336	672	1344
Total	672	1344	1008	1344	2016

図5 伝熱面全体の平均熱伝達率

図 6 供試伝熱面の局所伝熱特性

図 7 V字形分流板と垂直フィンの配置

10 mm であり、有効伝熱面積も同一である。

図 6 から明らかなとおり、平滑伝熱面の熱伝達率は、いずれの高さにおいても最も低い値を示している。つぎに、垂直フィンおよび V 字形分流板付伝熱面の熱伝達率であるが、両者は伝熱面先端付近の 0~60 mm では、ほぼ同程度の値を示すのに対し、それ以降の熱伝達率低下の傾向はかなり異なる。すなわち、垂直フィン付伝熱面では、熱伝達率が 60 mm 以降で急激に低下するのに対し、V 字形分流板付伝熱面では伝熱面先端部の約 9 割程度の高い熱伝達率が、伝熱面上部においても維持されている。この垂直フィンの熱伝達率低下は、フィンおよび伝熱面に沿う境界層の発達にその原因があり、フィン付伝熱面では必然的に生じる現象である。これに対し、V 字形分流板付伝熱面の場合には分流板によって伝熱面に沿う境界層が分断され、分流板背後で境界層の更新が行われる結果、伝熱面のかなり下流においても高い熱伝達率が実現できる。したがって V 字形分流板付伝熱面では、伝熱面高さが高くなればなるほど、垂直フィン付伝熱面に比べ相対的に高い熱伝達率が得られると言える。

5. V 字形分流板付伝熱面に関する諸検討

前述の実験結果から、本研究で考案した V 字形分流板付伝熱面は、いくつかの点で垂直フィン付伝熱面よりも優れた伝熱特性を有することが確認できた。しかし、この分流板付伝熱面を現実の熱交換器に適用するに当たっては、実用化に付随するいくつかの問題点を取り上げ、検討を加えておく必要があるものと思われる。そこで、これについてつぎに記す。

まず、容易に指摘できる問題点は、V 字形分流板付伝熱面は垂直フィン付伝熱面に比べ構造が複雑となるため、製作が困難であるという点であろう。しかしこの欠点は、分流板が垂直フィンに比べはるかに背が低い場合にも伝熱促進効果が高い、という利点によって大幅に減殺されると考えている。つまり、本伝熱面では数 mm からせいぜい十数 mm 程度の背の低い分流板であっても高い伝熱促進効果が得られるが、この程度の高さならば、プレスなどで容易に製作できる。

つぎの問題は、分流板の配置に関する問題である。垂直フィンの設計法に関しては、すでに相原⁽¹²⁾により詳しく検討されている。その結果によると、垂直フィンはフィン上に発達する境界層厚さのオーダー、すな

わち具体的な数値で言うと数 mm から十数 mm 程度、の狭い間隔で設置することが可能である。このように密に配置された垂直フィン付伝熱面に匹敵しうる性能をもつ伝熱面が、果たしてV字形分流板付伝熱面でも実現できるかという問題である。

この問題を考えるために、図7に示したような正方形の伝熱面上に、垂直フィンと分流板を配置した場合を想定する。比較のため図7(a)の垂直フィンと同じ水平方向ピッチ s_h で、開口角 90° のV字形分流板を伝熱面上にすきまなく配置したとすると図7(b)のようになる。図7(a), (b)を比較して直ちにわかることは、分流板の総辺長が垂直フィンのそれより、図7(b)の場合には $2\sqrt{2}$ 倍、長くなることであろう。この結果はとりもなおさず、基板単位表面積あたりに大きなフィン表面積がとれることを意味している。したがって、かりに伝熱面上に垂直フィンと同程度のピッチでV字形分流板が設置できるならば、垂直フィン付伝熱面よりもさらにコンパクトな伝熱面を開発できる可能性が高い。

一方、垂直フィンと等しい総辺長となるよう分流板を配置した場合が図7(c)である。図7(c)のように基板が正方形の場合には、分流板のピッチは垂直フィンのピッチに比べ $2\sqrt{2}$ 倍広くとれる。したがって、かりに分流板が垂直フィンよりも粗いピッチでしか設置できないとしても、そのピッチが垂直フィンの2~3倍にとどまるかぎり、フィン表面積は垂直フィンより著しく低下することはないと言える。これらV字形分流板をさらに密に配置した場合の伝熱性能については、現在実験を行っている段階である。

上記問題以外にも、本伝熱面の実用化に向けて直面する問題は数多くあるものと思われる。その一つは、実用の自然対流熱交換器では多くの場合空気を加熱、冷却流体として想定しているが、流体が空気の場合に果たして本伝熱面が利用できるかという問題である。もちろん作動流体が水であれ空気であれ、本伝熱促進の基本的な考えは十分通用しうらと思われるが、伝熱促進に必要な分流板の高さや配置が実用的な範囲内に納まるか否かが熱交換器開発のかぎとなる。この点を明らかにするために、空気の実験が是非必要と考えている。

6. ま と め

本研究では、「伝熱面上流側で発生した高温流体を伝熱面から排除し、代わりに低温の周囲流体を伝熱面近傍へ流入させることによって、自然対流の伝熱促進が可能である」という、伝熱促進の基本的な指針を提示した。そして、この指針に基づく伝熱促進の具体的な方策としてV字形分流板付伝熱面を考案し、その伝熱性能を実験により調べた。その結果、この伝熱面は現在実用に供されている垂直フィン付伝熱面に比較して、(1)背の低い分流板であっても顕著な促進効果が得られる。(2)伝熱面のかかなり下流においても高い熱伝達率を実現できる、などの優れた特徴をもつことを明らかにした。従来のフィンによる伝熱促進法では、伝熱面に沿う自然対流をなるべく妨害しないようフィンを設置するのが常識であった。これに対し、本研究で考案した方法は、むしろ積極的に自然対流を遮断し、境界層の更新を図ろうとするところに特色がある。上述の結果をも考え併せると、このような方法を採用することによって、現在使用されているフィン付伝熱面よりもさらにコンパクトな自然対流伝熱面を開発できる可能性がある。

また、本論文で展開した自然対流の伝熱促進に関する基本的な考え方は、垂直な加熱平板に沿う自然対流のみならず、たとえば垂直円筒あるいは水平伝熱面まわりの自然対流に対しても適用可能と考えている。それぞれの体系についてこの指針を参考にすれば、コンパクトでかつ高性能な自然対流伝熱面が開発しうるものと期待される。

文 献

- (1) Hung, Y. H. and Shiau, W. M., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **31**-6(1988), 1279.
- (2) 藤井・ほか2名, 機論, **36**-286(1970), 994.
- (3) Bhavnani, S. H. and Bergles, A. E., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **33**-5(1990), 965.
- (4) Ghosh Moulic, S. and Yao, L. S., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **111**(1989), 1106.
- (5) Yao, L. S., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **105**(1983), 465.
- (6) 岸浪・斉藤, 機論, **51**-471, B(1985), 3772.
- (7) 三角・北村, 機論, **53**-487, B(1987), 1072.
- (8) 三角・北村, 機論, **56**-521, B(1990), 115.
- (9) 三角・北村, 機論, **54**-504, B(1988), 2083.
- (10) 三角・北村, 機論, **57**-536, B(1991), 1365.
- (11) 藤井・ほか3名, 機論, **35**-280(1969), 2381.
- (12) 相原, 伝熱工学の進展, **4**(1976), 119, 養賢堂.