背の高い加熱平板からの自然対流熱伝達の促進について*

三角利之^{*1}, 北村健三^{*2}Enhancement of Natural Convective Heat Transfer from Tall,
Vertical Heated PlatesToshiyuki, MISUMI^{*3} and Kenzo, KITAMURA^{*3} Kagoshima National College of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
1460-1 Shinko, Hayato-cho, Aira-gun, Kagoshima, 899-5193 Japan

An enhancement technique was developed for natural convection heat transfer from tall, vertical heated plate to water. Rectangular grid fins attached to the base plate were utilized as a heat transfer promoter. These grid fins redirect the high-temperature fluid ascending along the base plate toward the outside of the boundary layer and introduce the low-temperature ambient fluid toward the base plate instead. The heat transfer coefficients of thus-treated surfaces were measured and compared with a non-treated, flat surface and a conventional surface with vertical straight fins. The highest performance was achieved for the experimental surfaces. In particular, the experimental surfaces with 5 mm-high, non-conducting grid fins and with 10 mm-high, conducting grid fins show 27% and 80% higher heat transfer coefficients compared to the turbulent heat transfer coefficients of the non-treated, flat surface, respectively.

Key Words: Heat Transfer, Natural Convection, Heat Transfer Enhancement, Grid Fin, Vertical Plate, Extended Heat Transfer Surface

1. 緒 言

垂直な加熱平板からの自然対流熱伝達を促進する手段として、図1(a)に示すように基板伝熱面上に垂直なプレートフィンを設置する方法が従来から広く採用されている⁽¹⁾。この垂直フィン付き伝熱面は製作が容易なこと、フィン表面積を大きくとりさえすれば顕著な伝熱促進効果が期待できるなどの特長をもっている。一方、この方法は原理的に拡大伝熱面効果を利用したものであり、高い伝熱性能を得るにはフィンを基板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必要がある。このため、本方法により伝熱面の高性能化とコンパクト化を両立させるのは困難である。

このことから、著者らはここ数年来、コンパクトでしかも高い伝熱性能が得られる新たな自然対流用伝熱面の開発に取り組んできた。そして、一連の検討の結果、図1(b)に示すように基板面上にフィンを格子状

に設置する方法を提案した⁽²⁾。この方法は、図1(c)に示すように基板伝熱面に沿って流れる高温流体を格子のせん端部で分断し、格子の背後に低温の周囲流体を流入させることにより熱伝達率そのものを増加することを狙ったものである⁽³⁾。この格子フィン付き伝熱面の伝熱性能を測定したところ、従来型の垂直フィンより低い格子フィンを設置した場合でも、垂直フィン付き伝熱面を上回る高い伝熱性能が得られることがわかった⁽²⁾。また、この格子フィン付き伝熱面は、基板伝熱面が垂直な場合だけでなく、水平な場合にも顕著な伝熱促進効果を示すことを明らかにした⁽⁴⁾。以上の著者らの実験は、いずれも試験流体として常温の水を用いたものであるが、最近佐々木・芦分⁽⁵⁾は、著者らが考案した格子フィン付き伝熱面を電子機器の冷却促進に応用すべく、空気を試験流体とした伝熱性能試験を行っている。その結果、空気では水に比べて伝熱促進に最適な格子サイズが大きくなること、紙製の格子を設置した伝熱面の熱伝達率は、格子を設置しない平滑面の熱伝達率に比べて約20%程度高くなることなどを報告している。

さて、上述した格子フィンによる伝熱促進効果は、いずれも300~400 mm程度の高さの基板伝熱面について確認されたものである。一方、流れが乱流となる

* 原稿受付 1999年6月18日。

^{*1} 正員、鹿児島工業高等専門学校 (☎ 899-5193 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 (☎ 441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)。

E-mail: misumi@kagoshima-ct.ac.jp

Fig. 1 Enhancement techniques for natural convection heat transfer

ような背の高い伝熱面に対しても、果たして同様な伝熱促進効果が得られるか否かという問題は工学的に興味あるばかりでなく、実用上も非常に重要な問題といえる。

例えば次世代の軽水炉開発においては、炉の安全性を確保するために、外部動力の投入を必要としない受動的冷却方式の採用が計画されている。その具体的な例として、格納容器のまわりに水プールを設置しておき、原子炉事故時に格納容器内に発生する崩壊熱を、水の自然対流によって除熱、冷却する方式が挙げられる⁽⁶⁾。このとき、格納容器まわりの自然対流は容器の背が高いため完全に発達した乱流状態となっており、自然対流の乱流域における伝熱促進法の開発が、これら冷却法実用化のための重要な技術課題となっている。また、使用済み核燃料の長期冷却貯蔵に関しても、信頼性や経済性の観点から、貯蔵容器を自然対流冷却する方式が計画されている。この貯蔵容器は数 m 程度の高さであり、容器まわりの自然対流は乱流状態となっている。この貯蔵容器まわりの伝熱が促進できれば、容器を小形化でき、稠密配置が可能になると思われる。しかし、このような乱流自然対流に対する実用的な伝熱促進法は、現在のところまったく開発されていない。これに対して、著者らが先に考案した格子フィン付き伝熱面は、格子が拡大伝熱面として働くだけでなく、プロモータとして機能する。したがって、原理的に基板に沿う流れが乱流となる場合にも応用可能と思われる。かりに格子フィンが乱流域においても顕著な伝熱促進効果を発揮するならば、その実用上の意義は極めて大きいといえる。

以上のことから、本研究では乱流自然対流が実現されるような背の高い基板伝熱面上に格子フィンを設置した場合に、果たして顕著な伝熱促進効果が得られるか否か調べることにした。実験では格子によって実際

に伝熱が促進されるか否かを確認するために、感温液体を用いた伝熱面表面温度分布の可視化を行った。格子の高さを種々変化させた場合について可視化実験を行うことにより、伝熱促進に最適な格子高さを調べた。これらの可視化結果を基に、次に格子フィンを低熱伝導率の塩化ビニル板および高熱伝導率の銅板で、それぞれ製作した場合について、伝熱面の局所および平均熱伝達率の測定を行った。これらの実験により、どの程度高い伝熱促進率が実現できるか調べた。さらに、格子フィン付き伝熱面と同一フィン高さおよび有効伝熱面積を有する従来型の垂直フィン付き伝熱面も併せて試作し、両者の伝熱性能を比較した。

おもな記号

A : フィンを含まない基板伝熱面の表面積

B : 格子フィンの辺長

g : 重力の加速度

h : 熱伝達率 $= q_w / (T_w - T_\infty)$

H : 格子フィン高さ

Nu : ヌッセルト数 $= h \cdot X / \lambda$

P : フィンのピッチ

Q : ヒータのジュール発熱量

q_w : 表面熱流束 $= Q / A$

Ra_x : レーレー数 $= g\beta(T_w - T_\infty)X^3 / \alpha\nu$

Ra_x^* : 修正レーレー数 $= g\beta q_w X^4 / \lambda \alpha \nu$

T : 温度

X : 伝熱面下端からの距離

α : 温度伝導率

β : 体膨張率

λ : 熱伝導率

ν : 動粘性係数

添 字

m : 平均

w : 壁面

∞ : 周囲流体

2. 実験装置および測定

本研究で用いた実験装置の概略を図2に示す。実験装置は基板伝熱面、格子フィンおよび側板から構成されている。本研究では乱流域自然対流の伝熱促進を目的としているため、伝熱面に沿う流れが発達した乱流となる高さ1700 mmの伝熱面を用いた。この伝熱面は、高さ方向340 mmごとに5分割されており、それぞれ独立に加熱できるようになっている。伝熱面の幅は340 mmであり、伝熱面高さに比べ幅が狭いため、伝熱面側面からの流体の侵入を防ぎ、伝熱面上の流れが二次元的となるよう伝熱面の両側面に側板を設けた。基板伝熱面は厚さ3 mmの銅板で製作した。この銅板の裏側には、厚さ30 μm のステンレスはくヒータが電気絶縁用両面粘着テープを介してはられている。五つに分割された各ブロックのヒータ通電量を、それぞれ電圧調整器で独立に調節することにより、基板伝熱面の表面温度が伝熱面全体にわたってほぼ一様になるようにした。また、ヒータの背面には、厚さ10 mmの亚克力板および厚さ10 mmの発泡スチロール製断熱材を取付け、伝熱面裏側への熱損失を防止している。伝熱面の表面温度を測定するために、径100 μm のK型熱電対を各ブロックの基板裏側11箇所(伝

Fig. 2 Experimental apparatus

熱面全体で55箇所)の地点にはんだにより埋め込んだ。これらの熱電対により測定した伝熱面表面温度 T_w のばらつきは、平均壁温 T_{wm} と周囲流体温度 T_∞ との温度差が $\Delta T=10\text{ K}$ のとき $\pm 0.5\text{ K}$ 以内であった。これより伝熱面はほぼ等温状態で加熱されているといえる。試験流体として常温の水を用いた。水の温度 T_∞ は、水槽内鉛直方向340 mmごとに5箇所の地点に設置したK型熱電対により測定した。試験水槽は断面1200 $\times$ 1060 mm²、深さ2300 mmであり、十分大きな容量を有していることもあって、水槽内の鉛直方向温度差を全実験を通じて0.5 K以内に抑えることができた。

次に格子であるが、本研究では格子がプロモータとして作用する場合、および、これに加えて格子自体が拡大伝熱面としても機能する場合の伝熱促進効果を比較・検討することにした。このため、低熱伝導率の塩化ビニル板および高熱伝導率の銅板で格子を製作し、実験を行った。両格子とも板厚は1 mmであり、塩化ビニル製格子は基板伝熱面に接着剤で接着し、また銅製格子は、基板伝熱面に溝を切り、格子をはめ込んだ後、はんだ付けした。格子のサイズは、前報⁽²⁾の層流域における伝熱実験から最も高い伝熱促進効果が認められた辺長 $B=40\text{ mm}$ の格子を用いることにした。また、最適な格子高さを調べるため、高さ H を5, 10, 20 mmの3種類変化させた。さらに、垂直フィン付き伝熱面との性能比較を行うために、銅製格子フィンと同一の高さおよび有効伝熱面積を有する銅板製垂直フィン付き伝熱面も試作、試験した。この垂直フィンの高さは10 mm、フィンピッチ $P=20\text{ mm}$ である。なお、本実験で用いた銅製フィン付き伝熱面の基板およびフィンの有効伝熱面積を表1に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 伝熱面温度分布の可視化 まず、伝熱面上の乱流域に格子フィンを設置することにより、果たして伝熱が促進されるか否か感温液晶シートによる表面温度分布の可視化により調べてみた。この可視化に当

Table 1 Effective surface areas of test plates

	Surface Area of Plates (cm ²)				
	Smooth	Vertical Plate Fin	Grid Fin		
Height	—	10 mm	5 mm	10 mm	20 mm
Base plate	1156	1156	1156	1156	1156
Fin	0	1088	544	1088	2176
Total	1156	2244	1700	2244	3332

たって、図2に示した実験装置と同一寸法の等熱流束加熱伝熱面を試作した。可視化用伝熱面は、厚さ $30\text{ }\mu\text{m}$ のステンレスはくヒータをアクリル板表面にはり付け、通電加熱したもので、ヒータの上に感温液晶シート、熱伝導率の小さい塩化ビニル板製格子フィンの順で接着した。その代表的な結果として、平滑面の可視化結果を図3に、また高さ $H=10\text{ mm}$ および 20 mm の格子フィンを設置した場合の可視化結果をそれぞれ図4、5に示す。図3～5は伝熱面の下端からの高さがそれぞれ、

(a) $X=350\sim 700\text{ mm}$ ($Ra_x^*=1.33\times 10^{12}\sim 2.13\times$

10^{13}),

(b) $X=800\sim 1\,150\text{ mm}$ ($Ra_x^*=3.63\times 10^{13}\sim 1.55\times 10^{14}$),

(c) $X=1\,300\sim 1\,650\text{ mm}$ ($Ra_x^*=2.53\times 10^{14}\sim 6.57\times 10^{14}$)

の領域における可視化結果を示している。図3～5の原図はカラーであり、本図のモノクロ写真上では色彩変化が不明であるが、図中色の暗い部分は実際には青色で最も温度の高い領域に、白い色の部分は実際には黄または緑で中間の温度を表している。また、図4中の特に格子フィンで囲まれた部分では点状に色が

Fig. 3 Visualized surface temperature distributions of smooth plate ($q_w=2\,300\text{ W/m}^2$)

Fig. 4 Visualized surface temperature distributions of the plate with non-conducting grids ($H=10\text{ mm}$, $q_w=2\,300\text{ W/m}^2$)

Fig. 5 Visualized surface temperature distributions of the plate with non-conducting grids ($H=20\text{ mm}$, $q_w=2\,300\text{ W/m}^2$)

黒くなっているが、この部分の実際の色は赤褐色で最も温度が低くなっている。可視化実験では伝熱面を等熱流束条件で加熱しているため、伝熱面温度の高い部分は熱伝達率の低い領域に、伝熱面温度の低い部分は熱伝達率の高い領域に対応することになる。以上のことを参考にして、まず図3の平滑面の結果について述べる。伝熱面下端からの高さ $X=350\sim 700$ mm の可視化写真、図3(a)では、伝熱面の両端付近に薄く低温のはん点模様が現れている。これは乱流遷移に伴うもので、伝熱面上の流れが乱流へ遷移し始めていることを示している。一方、図3(b)の $X=800\sim 1150$ mm および図3(c)の $X=1300\sim 1650$ mm の領域では、時間的・空間的に不規則な低温のすじ状の温度模様が伝熱面全体にわたって現れており、乱流状態となっているのが確認できる。次に、高さ $H=10$ mm の格子フィンを設置した場合の結果であるが、まず、図4(a)の $X=350\sim 700$ mm における伝熱面温度分布から、それぞれの格子内に温度の低い部分が出現し、しかも、この低温部は格子内の広い面積を占めていることがわかる。さらに伝熱面下流側の図4(b)および図4(c)においても、同様な低温模様が格子内に出現している。このことから乱流域を含めた伝熱面全体にわたって伝熱が顕著に促進されていることが確認できる。

一方、格子フィンを $H=20$ mm と高くした場合であるが、図5(a)～(c)から明らかなように、 $H=10$ mm で出現していた格子内の低温部はほとんど見られなくなり、伝熱面全体にわたって温度が高くなっているのがわかる。これは、格子が高くなると格子内に低温の周囲流体が侵入しにくくなるためであると考えられる。

以上の一連の可視化結果から、格子により自然対流の乱流域における伝熱促進が可能であること、および基板伝熱面からの伝熱量を最大にする格子高さが存在することなどが明らかとなった。

3.2 塩化ビニル製格子付き伝熱面の伝熱性能

さて、上述の可視化実験は格子による伝熱促進効果を確認することを主眼としたもので、定量的にどの程度伝熱が促進されるのかについては、別途伝熱実験を行い調べる必要がある。この伝熱実験を等熱流束伝熱面を用いて行くと、可視化実験結果で明らかにしたように、熱伝達率が伝熱面の高さ方向だけでなく、各格子内で局所的に大きく変化するため測定が非常に困難となる。そこで、本研究では等熱流束加熱伝熱面の代わりに等温加熱伝熱面を用いた測定を行うことにした。等温加熱伝熱面であれば、次式(1)で熱伝達率を定義

することにより、比較的容易に熱伝達率を求めることができる。このために、本実験では伝熱面を高さ方向340 mm ごとに5ブロックに分割し、それぞれのブロックを独立に加熱・制御することにより等温条件を満足させた。

$$h_i = q_i / (T_w - T_\infty) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 q_i は各ブロックにおける平均表面熱流束であり、各ブロックの通電加熱量を基板の表面積で除すことにより求めた。なお、 i はブロックの番号(1～5)を示す。

本実験では、まず測定方法の妥当性を検証するために、平滑伝熱面の各ブロックの平均熱伝達率を測定してみた。その結果を図6に示す。この図6の縦軸には、伝熱面の長さ l を代表長さとする平均ヌセルト数 Nu_m を、また横軸には同じく l を代表長さとするレーレー数 Ra_l をとっている。図6中の実線は、藤井ら⁽⁷⁾ による高さ l の等温伝熱面に沿う自然対流の層流域および乱流域を含む領域の平均ヌセルト数の実験式(2)、(3)を表している。これらの式は以下のように与えられる。

$$\text{層流域: } Ra_l < (1.5 \sim 4.0) \times 10^{10}$$

$$Nu_m (\nu_w / \nu_\infty)^{0.21} = 0.60 Ra_l^{1/4} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{乱流域を含む領域: } (1.5 \sim 4.0) \times 10^{10} < Ra_l$$

$$Nu_m (\nu_w / \nu_\infty)^{0.21} = 0.130 Ra_l^{1/3} - (111 \sim 176) \dots\dots\dots (3)$$

図6より高さが $l=680$ mm までの伝熱面の平均ヌセルト数は上の式(2)に一致し、また、 $l=1020$ mm 以上の領域では式(3)に一致していることがわかる。この結果から、本実験装置の測定法がほぼ妥当であることが確認できる。

この結果を踏まえて、次に伝熱面上に低熱伝導率の

Fig. 6 Average Nusselt numbers of smooth plate

Fig. 7 Local averaged heat transfer coefficients of test plates with non-conducting grid fins ($\Delta T=10$ K)

塩化ビニル製格子を設置した場合について、伝熱面を構成する五つのブロックの平均熱伝達率を測定してみた。その一例として、伝熱面温度と周囲流体の温度差 ΔT を 10 K 一定に保った場合の結果を図 7 に示す。図 7 の横軸にはブロック番号を、縦軸にはそのブロックの平均熱伝達率をとっている。比較のため平滑面の値も併記した。まず平滑面の熱伝達率であるが、各ブロックの平均熱伝達率は、ブロック I ($X=0\sim 340$ mm), II ($X=340\sim 680$ mm) と下流に向かうにつれて単調に低下する。そしてブロック III ($X=680\sim 1020$ mm) から増加に転じ、以後ブロック IV ($X=1020\sim 1360$ mm), V ($X=1360\sim 1700$ mm) と比較的高い熱伝達率が維持されている。ブロック III 以降の熱伝達率の急増は乱流遷移によるものである。

これに対して、 $H=5$ mm および 10 mm の格子を伝熱面に設置した場合、熱伝達率はどのブロックにおいても平滑面より高い値を示している。また、この高い値が伝熱面の最上端に至るまで維持されている。特に平滑面上の流れが層流から遷移域に対応するブロック III より上流側の伝熱面では、平滑伝熱面に比較して約 1.5~2.2 倍程度高い熱伝達率が得られている。一方、ブロック IV 以降では平滑面の熱伝達率が乱流遷移に伴って急激に高くなるために、格子付き伝熱面の伝熱促進率は 1.15~1.27 倍程度の値となる。この値は層流域での伝熱促進率に比べれば低いが、乱流域の熱伝達が簡便な方法により促進可能なことを示した点で十分評価できる値であると考えている。

一方、格子の高さが $H=20$ mm になると、 $X=1020$ mm 以下の領域では平滑面よりも高い値が得られる

Fig. 8 Overall heat transfer coefficients of test plates with non-conducting grid fins

ものの、乱流域に相当する領域での熱伝達率は平滑面のそれよりもかえって低下している。これは格子によって伝熱面に沿う流れが抑制されるためである。高すぎる格子はかえって伝熱を抑制することに注意する必要がある。

これらの局所平均熱伝率の測定結果を基に、伝熱面全体の平均熱伝達率を算出した結果を図 8 に示す。図 8 では、縦軸に平均熱伝達率 h_m を、また横軸に伝熱面と周囲流体との温度差 ΔT をとっている。図 8 から明らかなように、格子を設置した伝熱面の平均熱伝達率は温度差 ΔT の増加につれて急激に高くなり、平滑面に対する伝熱促進率も高くなる。特に本実験範囲内においては、格子高さ $H=5$ mm, $\Delta T=10$ K の場合に最大約 1.5 倍の伝熱促進率が得られた。これらの結果を受け、本実験ではさらに高さ 3 mm 程度の格子付き伝熱面の試作、試験をも試みたが、小さな格子を実験室内で精度よく製作するのが非常に困難で、実験を断念した。いずれにしても、5 mm 前後の低い格子でも顕著な伝熱促進効果が得られるという結果は、コンパクトな伝熱面を実現するうえで好都合な結果といえる。

3.3 銅製格子フィン付き伝熱面の伝熱性能 3.2 節では格子に低熱伝導率の塩化ビニル板を用いたが、この塩化ビニル板の代わりに熱伝導率の高い材料で格子を製作すれば、熱伝達率の促進効果に加えて格子自体がフィンとしても機能するため、さらに高い伝熱促進効果が期待できるだろう。このことから、本研究では格子を銅板で製作し、伝熱面にはんだ付けした場合について同様な伝熱性能試験を行ってみた。

その一例として、伝熱面と周囲流体の温度差 $\Delta T=$

Fig. 9 Local averaged heat transfer coefficients of test plates with conducting grid fins ($\Delta T = 6.6$ K)

6.6 K 一定に保ち、伝熱面の高さ方向五つのブロックの平均熱伝達率を測定した結果を図9に示す。図9では、銅製格子フィンの高さ H を 5, 10 mm および 20 mm の3種類変化させている。比較のため、平滑伝熱面および高さ $H=10$ mm の銅製垂直フィン付き伝熱面の測定結果も併記した。ここで、各ブロックの平均熱伝達率であるが、3・2節と同様式(1)で定義することにし、伝熱面表面熱流束 q_i をヒータ加熱量を基板表面積で除すことにより求めた。したがって、図9に示した平均熱伝達率はフィン表面積を含まない見掛けの熱伝達率を表していることを注意しておく。

さて、銅製格子フィン付き伝熱面の見掛けの熱伝達率であるが、伝熱面全体にわたって $H=10$ mm の格子フィンが最も高く、以下 $H=5$, 20 mm の格子フィンの順に低下していく。熱伝達率の高さ方向の変化を見てみると、特に高さ 10 mm および 5 mm の格子フィン付き伝熱面では、平滑面上の流れが乱流となるブロックIV以降の領域において、平滑面に比べ1.6~1.8倍程度高い熱伝達率が実現されていることがわかる。乱流自然対流に対する有効な熱伝達促進手段がまったく開発されていない現状を考慮すれば、この結果は注目値するといえる。一方、高さ 20 mm の格子フィン付き伝熱面では、ブロックIV以降の領域で平滑面の熱伝達率とほぼ同程度の熱伝達率となっている。これは可視化実験および3・2節で明らかにしたように、格子が高くなると格子背後への低温流体の侵入が妨げられ、基板面からの伝熱が劣下するためである。

さらに、本研究では参考までに格子フィンと同一の高さ $H=10$ mm および有効伝熱面積を有する従来型の垂直フィン付き伝熱面についても測定を試みた。図

Fig. 10 Overall heat transfer coefficients of test plates with conducting grid fins

9から明らかなように、この垂直フィン付き伝熱面の熱伝達率は伝熱面上流側でこそ平滑面の熱伝達率より高い値を示すが、基板に沿う流れが乱流となる下流側では平滑面とほとんど変わらない値となった。これは、基板に沿う流れが乱流に遷移すると境界層が急激に厚くなり、10 mm 程度の低いフィンではこの厚い乱流境界層内に埋没してしまうため、フィンとして有効に機能しないことが理由として考えられる。これを防ぐには、フィンを境界層よりなるべく高く突出させることが必要であるが、そうするとフィンは必然的に高くならざるを得ない。また、背の高い伝熱面上にフィンを設置すると、フィン上にも乱流境界層が発達するが、この境界層同士の干渉による流れの閉そくを防ぐためには、フィン間隔をまばらにせざるを得なくなる。しかし、このように高く、しかもまばらなフィンでは、伝熱面のコンパクト化や伝熱性能の向上が見込めないことは明白である。

最後に、これらの局所平均熱伝達率の測定値を基に伝熱面全体の見掛けの平均熱伝達率を算出した結果を図10に示す。図10から明らかなように、伝熱面全体の見掛けの平均熱伝達率は、高さ 10 mm の格子フィンが最も高く、その値は平滑面の約2.1~2.4倍に達している。高さ 10 mm の格子フィン付き伝熱面の有効伝熱面積は表1から平滑面の1.94倍程度であり、これより有効伝熱面積の拡大率よりもさらに高い熱伝達促進率が実現されていることがわかる。また、 $H=5$ mm の格子付き伝熱面でも、有効伝熱面積は平滑面の1.47倍であるのに対して、熱伝達促進率は約1.7~2.3倍となっている。これらのことから、 $H=10$ mm および 5 mm の格子フィン付き伝熱面では、見掛けの熱伝達率だけでなく実質的な熱伝達率も増加しているこ

とがわかる。これに対して、高さ 20 mm の格子フィンおよび高さ 10 mm の垂直フィン付き伝熱面では、有効伝熱面積が上述の格子フィンより同等もしくは大きいにもかかわらず、伝熱促進率はかなり低い値にとどまっている。

以上の伝熱性能試験結果から、著者らが考案した格子フィン付き伝熱面は、格子が低熱伝導率素材の場合には高さがおおよそ 5 mm、高熱伝導率素材の場合には高さがおおよそ 10 mm 前後で最も高い伝熱促進効果を示すことが明らかとなった。この程度の高さの格子であれば、例えば高熱伝導格子の場合には伝熱面と同一の素材でプレスや鋳造で一体製作することが可能である。また、低熱伝導率格子の場合には、あらかじめ別の素材で格子を作っておき、これを既存の伝熱面に接着することも可能と思われる。また、伝熱面のコンパクトさを維持しながら、伝熱促進が可能という本実験結果は、緒言に述べた原子炉格納容器や貯蔵容器の例に限らずさまざまな伝熱機器への利用の途を開くものと考えている。本手法のさらなる応用を図る見地から、今後は水の代わりに空気を試験流体に用いた実験が必要と考えている。

4. 結 言

本研究は、垂直加熱平板に沿う自然対流の伝熱促進法について実験的検討を加えたものである。特に従来まったく手段がなかった、高レーレー数域の乱流自然対流に対する伝熱促進法の開発を試みた。この具体的な方法として、基板伝熱面上に格子フィンを設置する方法を提案し、格子の高さを変化させた場合の伝熱性能を中心に調べた。

(1) まず、格子によって実際に乱流域の伝熱促進が可能なことを確認するために、等熱流束条件で加熱

された伝熱面上に格子を設置した場合について、伝熱面温度分布の可視化を行った。その結果、適当な高さの格子を設置すると、伝熱面からの熱伝達が平滑面の場合よりも明らかに促進されることがわかった。

(2) この格子による熱伝達促進効果をさらに定量的に把握するために、高さ 1.7 m の等温加熱伝熱面上に低熱伝導率の格子を全面にわたって接着した場合について、熱伝達率の測定を行った。その結果、熱伝達を極大にする最適な格子高さが存在し、その高さは $H=5$ mm 程度となった。この格子付き伝熱面の平均熱伝達率は、本実験範囲内において平滑伝熱面の約 1.5 倍となった。

(3) さらに、格子を高熱伝導率の銅板で製作し、格子がフィンとして機能する伝熱面を試作した。この格子フィン付き伝熱面の性能試験を行ったところ、高さ $H=10$ mm の格子フィンを設置した場合に最も顕著な伝熱促進効果が得られた。この格子フィン付き伝熱面の平均熱伝達率は、本実験範囲内において、平滑伝熱面の約 2.4 倍に達した。

以上の結果から、本研究で提案した格子は、背の高い伝熱面からの自然対流伝熱の促進手段として極めて有効であることがわかった。

文 献

- (1) 相原利雄, 伝熱工学の進展, 4(1976), 119-213, 養賢堂.
- (2) 北村健三・ほか 2 名, 機論, 57-543, B(1991), 3867-3872.
- (3) 三角利之・北村健三, 機論, 57-536, B(1991), 1365-1370.
- (4) 北村健三・ほか 2 名, 機論, 61-582, B(1995), 659-664.
- (5) 佐々木重幸・芦分範行, 機論, 64-625, B(1998), 3021-3027.
- (6) Fujii, T., ほか 3 名, *Proc. ARS '94*, 1(1994), 232-239.
- (7) Fujii, T., ほか 4 名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 13(1970), 753-787.