水平加熱平板上自然対流の伝熱促進法について*

北村 健三*¹, 長江 直行*², 木村 文義*²Enhancement of Natural-Convection Heat
Transfer from a Horizontal Heated Plate

Kenzo KITAMURA, Naoyuki NAGAE and Fumiyoshi KIMURA

A new enhancement technique was developed for natural-convection heat transfer from a horizontal heated plate. The technique aims to increase the heat-transfer rate. For this purpose, rectangular grids of which the upper faces were exposed to an ambient fluid were installed on the heated plate. The grids inhibit the buoyant flow from the edges to the center of the heated plate and promote cellular motion within the grid. These two actions increase the heat-transfer coefficients of the heated plate, in particular, in the central portion of the grid. The maximum and the average heat-transfer coefficients within the grids were increased by 40% and 20%, respectively, compared to those for the smooth plate, when the grids with appropriate size and height were used. Further increase in the heat-transfer coefficients will be feasible by adopting high-conductivity grids.

Key Words: Heat Transfer, Natural Convection, Heat-Transfer Enhancement, Horizontal Plate, Flow Visualization, Extended Surface

1. 緒 言

1・1 本研究の目的・意図 水平な上向き加熱面からの自然対流熱伝達を促進する実用的な手段として、図1に示すように垂直なフィンを基板伝熱面に設置する方法が従来より慣用されている⁽¹⁾。この方法はフィンによって伝熱面積の拡大を図り、基板の通過熱量を増大させることを主眼としたものである。ところで、このフィンからの放熱が効率よく行われるには、図2(a)に示すように、伝熱面の側方から流入した低温周囲流体がフィン表面に沿って流れることが必要で、このためにはフィン高さ H が伝熱面の大きさ(伝熱面の短幅 W)に比べて十分高くなければならない。逆に図2(b)のように、フィン高さが伝熱面の大きさに比べて相対的に低い場合には、フィンは有効に機能しないことになる。このことから、伝熱面上にフィンを設置する方法は、本質的に (H/W) の比が比較的高くとれる小さな伝熱面に向けた方法であるといえる。一方、伝熱面が大きな場合、あるいは設置しうるフィン高さや

伝熱面上の空間に一定の制約がある場合には、本方法を採用することは必ずしも適切とはいいがたい。

そこで本研究では、このような大形の伝熱面あるいは背の低いフィンであっても比較的高い熱通過率が得られる、新たな伝熱促進手段を考案することにした。この自然対流の伝熱促進にはさまざまな方法・手段が考えられるが、ここでは外部から動力の投入を必要としない、いわゆる受動的な伝熱促進法に対象を限ることとした。これは動力不要、無騒音・無振動あるいは停電事故時安全性の高さなど、自然対流のもつ特長を最大限生かすことにもつながる。次に、このような受動的促進法の中でも上述のフィン効果だけに頼らな

図1 垂直フィン付き伝熱面

* 平成5年5月26日 第30回日本伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成5年5月13日.

*¹ 正員, 豊橋技術科学大学エネルギー工学系 (〒441 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1).

*² 正員, 豊橋技術科学大学大学院.

い、つまり、自然対流の熱伝達率自体を増加させるような方法を開発することにした。これは、大きな伝熱面や空間的な制約条件が課された場合には、熱伝達率の向上が必要不可欠と考えられるためである。

1・2 研究の現状 ところで、このような自然対流の熱伝達率そのものを受動的な方法によって促進しようとする試みは、古くより数多くの研究者によって行われてきた。例えば、初期の研究⁽²⁾⁽³⁾では強制対流からの類推に基づき、種々の形状をした微小な粗さ要素を伝熱面上に設置する方法を試みている。しかし、その後行われた一連の追実験⁽⁴⁾⁽⁵⁾によって、この方法では熱伝達率の向上は不可能なことが確認されている。また、最近では、伝熱面上に粗さ要素よりも寸法の大きなく形リブを設置する方法⁽⁶⁾⁽⁷⁾、あるいは伝熱面そのものを波状にしたり、伝熱部と非伝熱部に分割するなどの方法が提案されている。しかし、前者の方法では、顕著な促進効果は得られておらず、また後者の方法では、実用化に難点があるだろう。

これに対して、最近著者の一人は、垂直な加熱平板上に先端を流れ方向に向けたV字形の板を設置すると、伝熱面に沿って上昇してきた高温流体がこの板によって排除され、板背後の熱伝達率が顕著に促進されることを見いだした⁽⁸⁾。また、この板を高熱伝導率の素材で作リ、垂直伝熱面上に格子状に配置したところ、この伝熱面の性能は、同一表面積の従来形の垂直フィン付伝熱面より高くなることを報告した⁽⁹⁾。これらの結果は、自然対流の熱伝達率が実際に増加できることを立証しただけでなく、どうすれば自然対流の熱伝達率が増加できるか、その具体的な指針を与えている点で重要と思われる。

2. 水平伝熱面の伝熱促進について

その指針とは、「自然対流の熱伝達を促進するには、伝熱面に沿って流れる高温流体を排除し、代わりに低温の周囲流体を伝熱面近傍に流入させればよい」というものである。この指針に基づいて、次に本研究の関心の的である水平伝熱面上自然対流の伝熱促進につい

図2 フィンによる伝熱促進の概念

て考察してみる。このためには、まずその基本となる平滑な水平加熱平板上に発生する自然対流の流動と熱伝達について理解しておく必要があるだろう。この平滑面上の自然対流については、先に著者らが詳しい検討⁽¹⁰⁾を行っている。そこで、その結果を引用しながら、考察を加えていくことにする。

先の研究は、図3に示すように、伝熱面の幅 W に対して紙面に直角な方向の奥行きが十分大きな伝熱面を対象としたものである。この場合、伝熱面のまわりには図および以下に記す流れが生じる。まず、I) 伝熱面の両端から低温の周囲流体が流入し、伝熱面に沿って流れる。II) この流体は、やがて伝熱面から三次元的にはく離し、このはく離に伴って伝熱面上の低温流体が伝熱面に向かって侵入する。III) はく離した流体は直ちに鉛直上方へ流れ去らずに、伝熱面近くを伝熱面中央に向かって流れ、伝熱面中央付近からブルーム状に上方へ流れ去る。また、このような一連の流動に伴って、伝熱面の局所熱伝達率は図3に示すような分布となる。特に本研究で対象とする大きな伝熱面の場合には、上記III)の領域が伝熱面全体に対してかなりの割合を占めるようになるため、この領域の熱伝達率を高くすることが、伝熱面全体の伝熱促進につながるものと思われる。

ところで、上述の指針に従うならば、この領域の伝熱促進を行うには、板中心部に向かって流れる上記III)の高温流体を伝熱面近傍より排除すればよいだろう。これを可能とする最も簡便な方法としては、図4(a)に示すように流れに直交して何枚かの垂直な板を伝熱面上に設置する方法が考えられる。しかし、そうすると今度は板に平行な向きに自然対流が誘起されてしまう。これを防ぐには、図4(b)に示すように、板を格子状に組合せればよいだろう。また、この格子も図4(c)に示すように格子の角を流れ方向に向けたほうが、図4(b)のように配置するより高温流体を容易に

図3 水平加熱面上の自然対流

図 4 水平伝熱面の伝熱促進法

排除できるものと思われる。

そこで本研究では、水平伝熱面上にこのような格子を設置した場合に、果たして伝熱が促進できるかどうかまず確認することにした。また、促進されるとすれば、どのような格子のサイズあるいは高さが適当か、そのときどの程度の伝熱促進率が得られるかといった問題について定量的に調べることにした。

3. 実験装置および測定

本実験で用いた伝熱面の構成を図5に示す。本研究では大きな伝熱面の伝熱促進を意図しているため、伝熱面の幅を360 mmとした。この伝熱面の奥行きは160 mmであるが、両側端に高さ160 mmの側板を取付けることにより、流れの主方向が伝熱面の幅方向になるようにしている。基板伝熱面は厚さ20 mmの亚克力板の表面にステンレスはくヒータを張り付けたもので、交流電圧により、等熱流束条件で加熱される。試験流体として、可視化および測定が容易な水を用いた。伝熱面上に設置する格子には、熱伝導率が低い塩化ビニル板を用いた。これは、前述したメカニズムによって自然対流の熱伝達率が向上することを、より直接的に確認することを意図したためである。実験には、高さ H が6 mm一定で、大きさ(対角線長さ p)を10~60 mmの範囲で変化させた格子、および $p=20$ mm一定で、 H を3~20 mmの範囲で変化させた格子、の2とおりを用いた。格子の厚さはいずれも1 mmである。格子内の局所熱伝達率 $h[=q_w/(T_w - T_\infty)]$ を算出するために、伝熱面表面温度 T_w をK形熱電対により測定した。この熱電対は、伝熱面中央部のはくの裏面29箇所にスポット溶接されている。周囲流体温度 T_∞ は、伝熱面と同一水平面上で、伝熱面端部から50 mm離れた位置に設けた熱電対により測定した。また、壁面熱流束 q_w は、はくの通電加熱量を基板表面積で除して求めた。なお、伝熱面裏面への熱損失は試算の結果無視できた。以上の装置全体は底面 $750 \times 750 \text{ mm}^2$ 、高さ750 mmの亚克力製水槽の底

図 5 実験装置

面中央部に水平に設置される。

4. 実験結果および考察

4・1 伝熱面温度分布の可視化 まず、格子により熱伝達が促進されるか否か、定性的な傾向を把握するために、感温液晶シートを伝熱面表面と格子の間に張り付け、伝熱面の温度分布を可視化してみた。その代表的な結果を図6に示す。図6では、格子の高さを一定($H=6 \text{ mm}$)にして、格子の大きさ p を10~60 mmの範囲で変化させている。なお比較のために、平滑面の場合も掲げた。これら一連の可視化実験では、伝熱面熱流束 q_w および周囲温度 T_∞ を一定に保っているため、可視化された表面温度のうち、温度の高い部分は熱伝達率の低い領域を、逆に温度の低い部分は熱伝達率の高い領域を表していると考えてよい。

まず図6(a)に示した平滑面の可視化結果から説明する。本報の白黒写真上では色の違いが定かではないが、伝熱面の最も端の部分は暗赤色で(図6では黒くみえる)温度が低く、そして伝熱面中心に向かって、黄色(白くみえる)、青(暗くみえる)と、急激に温度が高くなっている。この領域よりも下流では、スパン方向に比較的規則正しいピッチで並ぶすじ状の低温模様(白で縁取られた黒い部分)が出現しており、その先端からさらに伝熱面中央側には、不規則な形状をした低温部(白くみえる)が現れている。なお、これらの温度模様の発生メカニズムについては著者らの別報⁽¹⁰⁾に

詳しいので、本報では説明を省略する。この可視化写真で特に注目されるのは、すじ状模様の先端から板中央部にかけての伝熱面温度が相対的に高くなる、つまり熱伝達率が低くなるという事実である。この領域が伝熱面全体に対して占める割合は大きく、この領域の熱伝達率の向上を図ることが伝熱促進のかぎとなる。

さて、伝熱面上に格子を設置した場合であるが、まず格子のサイズ $p=10\text{ mm}$ の場合、図 6 (b) に示したように液晶は伝熱面全体にわたって青色(暗くみえる)、すなわち温度が高くなっており、その熱伝達率は平滑伝熱面よりもかえって低下していることが明らかである。これに対して、図 6 (c) に示した $p=20\text{ mm}$ の場合には、それぞれの格子内に低温部(白く縁取られた黒い部分)が出現し、しかも、格子内のかかなりの面積を占めていることがわかる。この低温模様は、時間によってその位置や大きさが変化しない。一方、さらに格子サイズが大きな $p=60\text{ mm}$ の場合にも、図 6

(d) からわかるように、格子内には低温模様が発生している。しかし、 $p=20\text{ mm}$ の場合と異なり、その形状は不規則で、しかも時間とともに拡大・縮小を繰り返している。

これらの格子付伝熱面の可視化結果を平滑面のそれと比較すると、格子サイズが $p=20\text{ mm}$ 以上あれば、伝熱面中央の広い領域で、格子内の熱伝達は平滑面のそれよりも明らかに促進されていることがわかる。この結果は、水平加熱面からの自然対流熱伝達が促進可能なことを初めて立証した点で重要である。

4・2 格子内の熱伝達率分布 そこで、この伝熱促進効果をさらに定量的に把握するために、伝熱面中央にある格子内の局所熱伝達率を測定してみた。この精密な測定には熱電対を多数、格子内に配置する必要があるが、格子の大きさが限られているため、1 個の格子内に多数の熱電対を配置するのは困難である。そこで、隣接する格子内にも熱電対を配置して(合計 29

図 6 伝熱面温度分布の可視化(格子高さ $H=6\text{ mm}$, 伝熱面熱流束 $q_w=2800\text{ W/m}^2$, $T_\infty=20.0^\circ\text{C}$)

図 7 格子内の局所熱伝達率分布(格子高さ $H=6\text{ mm}$)

箇所)測定を行い、この値を伝熱面中央にある一つの格子に移し替えて、図7に示すような格子内局所熱伝達率の等高線表示を得た。図7の局所熱伝達率は必ずしも対称となっていないが、これは、測定された伝熱面温度が格子ごとに微妙に異なっているためである。したがって、図7の結果はあくまでも伝熱面の中央付近におかれた格子の平均的な局所熱伝達率の分布を表したものと理解いただきたい。また、格子が大きな場合、格子内の表面温度は時々刻々変化するが、この場合には温度の時間平均値をもとに局所熱伝達率を算出している。

さて図7は、図6の可視化と同じ条件、すなわち H を一定($=6\text{ mm}$)とし、 p を 10, 20 mm および 60 mm と 3 段階変化させた場合の局所熱伝達率分布を示している。平滑面の場合についても板中央部の局所熱伝達率 h を測定したが、その値は $h=407\pm10\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ の範囲に納まった。この値は著者らが別報⁽¹⁰⁾で提示した局所熱伝達率の整理式から推算される値とほぼ等しく、妥当な値と考えている。次に、 $p=10\text{ mm}$ の局所熱伝達率であるが、図7(a)から明らかのように、格子内の広い範囲にわたって平滑面よりも低い値を示している。一方、 $p=20\text{ mm}$ になると、格子内の中央部において高い熱伝達率の領域が出現し、その値は最大 $560\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 程度に達している。これに対し、格子のごく近傍での熱伝達率は平滑面の約半分近くにまで低下している。これは格子が熱伝導率の低い素材で作られているために、格子の下にあるヒータで発生した熱が格子のまわりに滞留することが大きく原因しているものと考えている。さらに $p=60\text{ mm}$ の場合、格子内の熱伝達率の極大値は $525\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 程度となって、 $p=20\text{ mm}$ の場合よりも低下するが、格子近傍の伝熱劣下域が相対的に狭くなるため、その平均熱伝達率は依然として平滑面の場合よりも高くなっている。

図8 格子内の平均熱伝達率

次に、これら局所熱伝達率の測定を種々の格子サイズおよび高さについて行い、その測定結果を積分平均して、格子内の平均熱伝達率を算出してみた。その結果を図8に示す。図8から、格子サイズが20~30 mm 前後で格子内の平均熱伝達率が極大となることがわかる。また、 $p=20\text{ mm}$ については格子の高さ H を 3 ~ 20 mm の範囲で変化させているが、図8から明らかなように、 $H=3\text{ mm}$ の場合に最も高い熱伝達率が得られている。これは、格子が低くなるほど格子近傍の伝熱劣下域が縮小することが原因しており、それ以外の領域での局所熱伝達率は、逆に格子が高くなるほど高くなる傾向にある。このように、高さがわずか3 mm という低い格子であっても顕著な伝熱促進効果が得られるという結果は注目値する。なぜならば、この結果は、今後よりコンパクトな伝熱面を開発するうえで非常に好都合な結果と思われるからである。

ここで、以上の実験により得られた格子付伝熱面の平均熱伝達率と平滑面のそれとの比、すなわち伝熱促進率を算出してみると、本実験の範囲内で最大1.21倍となった。この値そのものは決して高くないが、格子を熱伝導率の高い素材、例えば銅やアルミニウムなどで製作することにより、今後大幅に向上できるものと考えている。つまり、今回の実験では塩化ビニル製格子を用いたため格子近傍での伝熱が極端に低下したが、格子を熱伝導率の高い素材で製作すれば、(1)格子直下で発生した熱は直接格子へ伝えられるため、上述した格子近傍の伝熱劣下を防げること、および、(2)格子自体がフィンとして機能するため、放熱面積の拡大が図れること、の二つにより伝熱性能を大幅に改善できるだろう。これに加えて、(3)伝熱面近傍の高温流体と伝熱面上方の低温流体との対流熱交換を格子が促進することも期待できる。なお、これについては4・3節で詳しく述べることにする。

4・3 格子内流れの可視化 次に格子内の流れの可視化結果をもとに、格子による伝熱促進機構に関し

図9 格子内流れの可視化

て考察してみる。図9は、 $p=20\text{ mm}$ の格子について、伝熱面中央付近の格子上方から染料を流出させ、格子内の流れを可視化した結果を示している。図9から、格子上方にある低温流体が格子の中央部付近へ下降し、一方、格子内の高温流体は格子に沿って上方へ排出されたあと、不規則に乱れ、周囲流体と混じり合っている様子が確認できる。この観察結果は、低温流体の流れ込む格子底面中央部の熱伝達率が高く、逆に高温流体が流れ込む格子近傍の熱伝達率が低いという局所熱伝達率の測定結果をよく説明する。なお、格子サイズの小さな $p=10\text{ mm}$ の場合には伝熱が劣下するが、これは前述の上昇流と下降流が干渉し、対流が抑制されたためと理解できる。実際にも、染料は格子内にほとんど侵入しなかった。

問題は、伝熱面上に適当な大きさの格子を設置すると、なぜ前述の流れが生じ、伝熱が促進されるかという点である。これについては、格子の二つの作用を考えている。その一つは、水平加熱面上自然対流のいわば主流とも呼ぶべき流れ、すなわち伝熱面の端部から中央部に向かう流れ、を格子が阻止するという作用である。これによって伝熱面周辺部で加熱され高温となった流体が、直接伝熱面中央部へ流れ込まなくなる。もう一つは、格子が、伝熱面上の流れをいわゆる平板上の自然対流から、それぞれの格子を代表寸法とする上端開放半密閉容器内の自然対流へと変質させる作用が考えられる。この容器に適当な大きさを選べば、容器内にセル状の対流を発生させることができるだろう。上述した格子の二つの作用、すなわち伝熱面中央部直上の流体温度を下げる、および格子内に対流セルの発生を促す、という作用によって伝熱が促進されるものと著者らは推察している。しかし、その詳細については今後さらなる検討が必要であろう。

さて、前述したように格子内には、低温周囲流体が格子中央部に向かって下降し、伝熱面近傍の高温流体が格子に沿って上方へ排出される、という一連の流れが生じる。ここで格子に高熱伝導率の素材を用いれば、格子自体が加熱されて高温となるため、格子に沿う上向きの流れが生じ、格子内の高温流体の排出はより円滑に行われるものと思われる。この点からも高熱伝導率格子の採用は、伝熱促進上極めて有効といえる。この熱伝導率の高い格子を用いた場合については現在実験を進めている段階にあり、その結果は改めて公表する予定でいる。

5. 結 言

本研究は、水平な上向き加熱平板からの自然対流熱

伝達の促進について実験的検討を加えたものである。従来より実用に供されている垂直フィンでは対応できない大きな伝熱面に適した伝熱促進法として、本研究では特に自然対流の熱伝達率そのものを増加させる方法を提案した。そして、この具体的な方策として、伝熱面上に格子を設置する方法を考案した。

まず、本方法によって実際に熱伝達率が促進されることを確認するために、等熱流束で加熱された加熱面上に低熱伝導率の素材で作られた格子を取付け、伝熱面温度分布の可視化を行った。その結果、適当な格子サイズであれば、伝熱面中央部に置かれた格子内の熱伝達は、平滑面のそれより明らかに促進されることを見いだした。

この伝熱促進効果をさらに定量的に把握するために、格子内の熱伝達率を測定してみた。その結果、(1)格子内の平均熱伝達率を極大にする最適な格子サイズが存在し、その大きさは $p=20\sim 30\text{ mm}$ 程度であること、(2)このとき平滑面に対する伝熱促進率として、1.2倍程度の値が得られること、(3)格子が低い場合にも熱伝達率が顕著に増加できることなどを明らかにした。

さらに、これら格子による伝熱促進機構について流れの可視化をもとに考察した。その結果、格子は伝熱面周辺部で高温となった流体が伝熱面中央部に流入するのを防ぎ、伝熱面上の流体温度を下げる、そして、いわゆるセル状対流を格子内に発生させる、という二つの作用を通じて伝熱を促進するとの推論を得るに至った。また、本実験では格子に熱伝導率の低い素材を用いているが、格子を高熱伝導率の素材で製作すれば、上述した格子内の対流を活発化でき、また、このとき格子がフィンとしても機能するため、伝熱性能をさらに向上できる可能性が高いことを指摘した。

本研究の遂行に際して、文部省科研費(No. 04650185)の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 相原, 伝熱工学の進展, 4(1976), 119, 養賢堂.
- (2) Prasolov, R. S., *Inzh-Fiz. zh.*, 4-5(1961), 3.
- (3) Jofre, R. J. and Barron, F., *ASME Paper*, No. 67-WA/HT-38(1967).
- (4) 藤井・ほか2名, 機論, 36-286(1970), 994.
- (5) 部谷・ほか2名, 機論, 44-384(1978), 2789.
- (6) 坪内・ほか2名, 機論, 46-409, B(1980), 1742.
- (7) Bhavnani, S. H. and Bergles, A. E., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 33-5(1990), 965.
- (8) 三角・北村, 機論, 57-536, B(1991), 1365.
- (9) 三角・北村, 機論, 57-543, B(1991), 3867.
- (10) 北村・木村, 機論, 58-556, B(1992), 3715.