端部に垂直壁が設置された水平上向き加熱平板まわりの 自然対流の流動と伝熱*

木村文義^{*1}, 石原 英^{*2}, 北村健三^{*3}

Flow and Heat Transfer of Natural Convection around Upward-Facing Horizontal Plate with a Vertical Plate at the Edge

Fumiyoshi KIMURA^{*4}, Suguru ISHIHARA and Kenzo KITAMURA

^{*4} Department of Mechanical and System Engineering, Himeji Institute of Technology,
2167 Shosha, Himeji-shi, Hyogo, 671-2201 Japan

Natural convective flows around upward-facing horizontal heated plate with a vertical plate at the edge were investigated experimentally. The widths of horizontal heated plates, W , and the heights of vertical plates, H , were varied systematically as $W=100\sim350$ mm and $H=0\sim150$ mm. The flow fields and the surface temperatures of the horizontal plates were visualized with dye and liquid crystal thermometry. The result shows that the vertical plate blocks incoming flow from the edge, and that the flow entering from the open edge covers the whole horizontal surface when the height of the vertical plate exceeds $H/W=0.14$ for the adiabatic vertical plate and $H/W=0.1$ for the heated vertical plate. The local heat-transfer-coefficients of the horizontal plate were also measured. The results show that the vertical adiabatic plate depresses the heat transfer while that the heated vertical plate enhances the heat transfer from the horizontal plates.

Key Words: Natural Convection, Heat Transfer, Visualization, Horizontal Plate, L-shaped Corner, Interaction

1. 緒言

加熱された水平面の端部に垂直壁が設置された場合、あるいは加熱された垂直面の端部に水平面が設置された場合、水平面や垂直面まわりに発生する自然対流の流動や伝熱に対し、隣接する垂直壁や水平面が影響を及ぼすことが知られている。このような体系は、例えば日射で暖められた地表と建物、床暖房された室内と壁、熱交換器や工業炉などのコーナ部など様々な場面で見られる体系であり、また、工学的には自然対流の干渉が最も典型的に現れる体系であることから、研究者の興味を引き、数多くの研究が行われている。

例えば、Rodighiero & deSocio^① は等温加熱された垂直面の下端部に十分広い水平断熱面が接続された、いわゆる L 字型コーナまわりの自然対流について、垂直加熱面の局所熱伝達率を干渉計により測定している。その結果、水平断熱面の存在により垂直加熱面の熱伝達率が単独垂直平板のそれより 25% 程度低下することを報告している。また Ruiz & Sparrow^② は、長さが等しい水平および垂直面からなる等温加熱 L 字型コ

ーナまわりの自然対流について、常温の水を対象に垂直面および水平面の平均熱伝達率の測定と流れの可視化を試みている。その結果、垂直面の平均熱伝達率は単独垂直平板のそれと比べて低下すること、逆に水平面の平均熱伝達率は単独水平平板のそれよりも高くなることを報告している。一方、Angirasa & Mahajan^③ は等温加熱された垂直伝熱面と、断熱あるいは周囲流体温度に等温冷却された水平面からなる L 字型コーナまわりの空気自然対流について、2 次元数値解析を試み、垂直伝熱面まわりの局所および平均熱伝達率の整理式を提案している。さらに、Balaji & Venkateshan^④、および Rao ら^⑤ は、等温加熱された水平伝熱面に垂直なアルミ製フィンを接続した場合について、2 次元数値解析および干渉計を用いた伝熱実験を行い、垂直フィンまわりの伝熱特性に及ぼす対流および放射伝熱の影響を論じている。

これらの研究内容を詳しくみると、従来の研究では、垂直加熱面まわりの伝熱特性に対して、加熱・冷却あるいは断熱された水平面が如何なる影響を及ぼすかが主たる関心事であることが分かる。一方これとは逆、すなわち加熱水平面まわりの自然対流に対して、垂直面がどのような影響を及ぼすかについては、ほとんど検討が行われていないことに気付く。これは一つには、水平伝熱面まわりの自然対流が垂直伝熱面まわりのそれと比べて熱的に不安定であり、容易に複雑かつ 3 次

* 原稿受付 2003 年 2 月 14 日。

^{*1} 正員、姫路工業大学大学院工学研究科(〒671-2201 姫路市書写 2167)。

^{*2} 姫路工業大学大学院。

^{*3} 正員、豊橋技術科学大学機械システム工学系(〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)。

E-mail: kimura@mech.eng.himeji-tech.ac.jp

元的な流れとなるため、実験および解析的な取り扱いが困難であることが理由として挙げられる。

ところで、著者らはこのような水平伝熱面まわりの自然対流の流動と伝熱について一連の検討を行っている⁶⁹⁻⁷⁰。その結果によれば、水平伝熱面が単独で存在する場合、伝熱面上には図 1(a) に示すように、低温の周囲流体が両端部から流入し、伝熱面に沿って流れ、伝熱面中央部で他端から来た流れと衝突、合流し、ブルームとなって離脱・上昇する一連の流れが発生することを明らかにしている。そこで、つぎにこの水平伝熱面の片側端部に垂直伝熱面が設置された場合を想定してみる。例えば水平伝熱面の大きさに比べて十分背

Fig.1 Flow Fields over horizontal plate

Fig.2 Experimental apparatus

の高い垂直壁が設置された場合には、図 1(b) に示すように、水平伝熱面の開放端側から流入した流れは垂直壁に向かって流れ、そのまま垂直壁に沿って流出することが予想される。一方、垂直壁の高さが低い場合には、図 1(c) に示すように、垂直壁側からも周囲流体が流入して、水平伝熱面まわりの流れは、垂直壁を設置しない場合とも、背の高い垂直壁の場合とも異なることが予想される。また、この周囲流体の流れ込みに対しては垂直壁の熱的条件が影響するであろう。しかし、このような水平伝熱面まわりの流れの変化がどのような条件で生じるか、また、この流れの変化により水平伝熱面からの伝熱がどのような影響を受けるかといった問題については、今まで系統的な研究が全く行われておらず不明のままである。

このことから本研究では、有限の大きさの水平上向き伝熱面の片側端部に垂直壁が設置された場合を対象に、水平伝熱面まわりの流動・伝熱に及ぼす垂直壁の影響について実験的に検討することにした。実験は、水平伝熱面の大きさを 3 種類変化させ、垂直壁については断熱および等熱流束加熱した 2 通りの場合を取り扱うことにした。そして、垂直壁を順次高くしていった場合について、まず水平伝熱面上の流動状況を染料による流れの可視化により把握することにした。ついで、水平加熱平板の表面温度分布を感温液晶により可視化し、伝熱面上の流動と局所伝熱特性との関連を探った。さらに、水平加熱平板の局所熱伝達率を定量的に測定し、水平伝熱面の局所伝熱特性に及ぼす垂直壁の影響について論じることにした。本研究の成果は垂直加熱面まわりの伝熱特性に関する従来の研究成果と共に、L 字型コーナ部まわりの伝熱・流動の全体像を理解する上で役立つであろう。

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。試験流体には常温の水を用いた。水平加熱平板は、厚さ 15mm のアクリル板に厚さ 30 μ m のステンレス箔ヒータを貼り付け、交流を通電することにより等熱流束条件で加熱した。垂直壁は、厚さ 1mm の塩化ビニル板の片側表面にステンレス箔ヒータを、また裏面に厚さ 5mm の硬質ウレタンフォーム断熱材を貼り付けた構造となっている。垂直壁を加熱する際には箔ヒータに通電し、水平加熱平板と同一の表面熱流束となるようにした。水平加熱平板の板幅 W は、 $W=100, 200$ および 350mm の 3 種類、垂直壁の高さ H は、 $H=5, 10, 20, 30, 50, 100$ および 150mm の 7 種類変化させた。な

お、水平平板および垂直壁の奥行きは、いずれも 450mm である。伝熱面側方からの流体の流入を防止するために、伝熱面の両側面に側板を取り付けた。これらの装置全体を $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ の水槽底面中央部に設置した。水平加熱平板の局所表面温度 $T_{w,x}$ を測定するために、水平加熱平板奥行き方向中心線上の箔ヒータ裏面に線径 $100\mu\text{m}$ の K 型熱電対を所定の間隔でスポット溶接した。周囲流体温度 T_∞ は、水平加熱平板と同一水平面上で、板端から 50mm 離れた位置に熱電対を設置し、測定した。実験に先立ち、水平平板裏面および垂直壁裏面へ熱伝導により漏洩する熱量を見積もったところ、最大でもヒータ発熱量の 4% 以下であった。そこで、伝熱面表面熱流束 q_w はヒータ裏面への漏洩熱量を無視し、ヒータ発熱量を伝熱面表面積で除すことにより算出した。

なお、これらの装置で実現可能な水平加熱平板の板幅基準の修正レイリー数 $Ra_w^* (= g\beta q_w W^4 / \lambda \alpha \nu)$ は $2 \times 10^9 \sim 2 \times 10^{12}$ であった。

Fig.3 Visualized flow fields of horizontal plate

Fig.4 Visualized flow fields of horizontal plate with adiabatic vertical plate

Fig.5 Visualized flow fields of horizontal plate with heated vertical plate

3. 実験結果および考察

3.1 水平加熱平板まわりの流れの可視化

まず、水平加熱平板の端部に垂直壁を設置しない場合について、水平伝熱面まわりの流動を、染料を用いた流れの可視化により調べてみた。その結果の代表例として、 $W = 350\text{mm}$ の場合を図 3 に示す。なお、この図 3 は水平加熱平板の両端部にスリットを設置し、そこから色の異なる染料を膜状に流出させたときの流動状況を、側方から写真撮影したものである。

図から明らかなように、平板端部から流出した染料は、平板表面に沿ってわずかな距離流れた後、平板からはく離する。これはく離した染料は、乱れながらもなお平板上を流れて平板中央部に到達し、他端からの流れと衝突・合流した後、ブルームとなって鉛直上方へ流れ去っていく。このうち平板端部付近で染料がはく離するのは、乱流遷移に先立って流れ方向に軸を持つ縦渦が形成されることによるものである⁹⁾。なお、これと同様な流れは $W = 100$ および 200mm の伝熱面においても観察された。

つぎに断熱垂直壁を水平加熱平板の片側端部に設置した場合について、水平加熱平板上の流れを可視化してみた。その代表例として、板幅 $W = 350\text{mm}$ の水平加熱平板の右側端部に、高さ $H = 10, 30, 50\text{mm}$ の垂直壁を設置した場合の結果を図 4 に示す。水平平板の左側端部（垂直壁非設置側）と垂直壁上端にスリットを設置し、染料を流出させた。まず、垂直壁高さ $H =$

10mm の場合であるが、図 4(a) から分かるように、垂直壁側から流出した染料は、垂直壁背後で不規則な循環渦を形成しながら水平平板上へ流入し、他端からの流れと衝突・合流してブルームとなって上方へ流れ去っていく。また、その衝突・合流位置は垂直壁が高くなるに従って次第に垂直壁側へ移動していき、図 4(c) の $H=50\text{mm}$ では、垂直壁非設置側からの流れがそのまま垂直壁まで到達し、垂直壁に沿って上方へ流れ去る様子が読み取れる。

一方、垂直壁を加熱した場合の代表的な可視化結果として $W=350\text{mm}$, $H=10, 20, 30\text{mm}$ の場合を図 5 に示す。断熱壁の図 4(a) と同様、垂直壁高さ $H=10\text{mm}$ の場合、図 5(a) に示すように垂直壁側からの流れは垂直壁の背後で不規則な循環渦を形成しながら水平平板上へ流入し、他端から来た流れと衝突・合流して上方へ流れ去っていく。これに対して垂直壁高さ $H=30\text{mm}$ 以上になると、垂直壁非設置側からの流れはそのまま垂直壁まで到達し、垂直壁に沿って上方へ流れ去ることがわかる。

これらの結果から、とくに垂直壁の高さが低い場合には、垂直壁が加熱、断熱を問わず、垂直壁側から水平平板に向かう流体の流れ込みが発生し、この流れ込みによって水平平板上の流れが大きな影響を受ける事実が注目される。

3.2 衝突・合流位置

以上の可視化によって、垂直壁が低い場合、水平加熱平板上には垂直壁非設置側からの流れと、垂直壁側からの流れの 2 つが存在することが分かった。これら 2 つの流れは、水平平板上のある地点で衝突・合流し、上方へ流れ去っていく。そこで本研究では、つぎにこの衝突・合流位置が水平伝熱面の大きさ W 、伝熱面熱流束 q_w 、あるいは垂直壁の高さ H によってどのように変化するのか流れの可視化結果を基に調べてみた。その結果を、垂直壁を断熱および加熱した場合について、図 6 および図 7 にそれぞれ示す。これらの図の縦軸には垂直壁非設置側から衝突・合流位置までの距離 x_{col} を水平平板の板幅 W で無次元化した値 (x_{col}/W) をとり、横軸には垂直壁高さ H と W の比 (H/W) をとって表している。なお、可視化観察の結果によれば、衝突・合流位置は時間の経過に伴ってゆっくりと左右に揺動することを確認している。そこで本実験では、可視化画像をビデオに一旦収録し、一定時間ごとに再生した画像から衝突・合流位置を求め、それらの平均で衝突・合流位置を定義することにした。

まず、垂直壁を断熱した場合であるが、図 6 より、無次元の衝突・合流位置 x_{col}/W は、データに若干の

Fig.6 Location of collision point for adiabatic vertical plate

Fig.7 Location of collision point for heated vertical plate

ばらつきが見られるものの、本実験範囲内においては熱流束や水平平板の大きさに明確な依存性が見られず、 H/W が大きくなるにつれて垂直壁側へ移動していくことが分かる。そして、 H/W がおよそ 0.14 になると、垂直壁側からの流れ込みが無くなり、開放端側からの流れが直接垂直壁まで到達することが分かる。

一方、垂直壁が加熱された場合であるが、図 7 から、本実験範囲内で衝突・合流位置は H/W の増加につれて急速に垂直壁側へ移動していき、伝熱面熱流束 q_w や水平伝熱面の大きさ W の如何に依らず、 H/W がほぼ 0.1 程度になると開放端側から流入した流れが直接垂直壁まで到達することが明らかである。また、この $H/W=0.10$ は断熱垂直壁に対する値 $H/W=0.14$ に比べて小さく、垂直壁が加熱された方が断熱された場合よりも垂直壁側からの流れ込みが弱くなることが分かる。これは加熱垂直壁まわりに鉛直上向きの流れが発

生し、この流れが垂直壁側からの周囲流体の流れ込みを阻止するためと考えられる。

3.3 水平加熱平板表面温度分布の可視化

以上の流れの可視化結果から、水平伝熱面の端部に垂直壁を設置することにより、水平伝熱面上の流れが大きく変化することが分かった。そこで、これらの流れの変化が水平伝熱面まわりの伝熱特性にどのような影響を及ぼすか、つぎに伝熱面表面温度分布を感温液晶シートによって可視化することにより調べてみた。

まず垂直壁を設置しない場合について、水平伝熱面の温度分布を可視化した結果を図8に示す。図8は $W=350\text{mm}$ の水平加熱平板の温度分布を鉛直上から写真撮影したものである。この写真の原図はカラーであり、モノクロの本図では色の識別が困難である。そこで、可視化写真の見方について説明しておく。本実験で使用した感温液晶は、温度の高いとき青色（白黒写真ではグレーに見える）に、温度が低くなるにつれて、順次、緑、黄（白黒写真では白く見える）、暗赤色（白黒写真では黒く見える）へと色が変化する。

Fig.8 Visualized surface temperatures of horizontal plate without vertical plate ($W=350\text{mm}$)

Fig.9 Visualized surface temperatures of horizontal plate with adiabatic vertical plate ($W=350\text{mm}$)

Fig.10 Visualized surface temperatures of horizontal plate with heated vertical plate ($W=350\text{mm}$)

本実験では水平平板を等熱流束条件で加熱しているので、図中温度の高い領域（グレーに見える）は熱伝達率の低い領域を、温度の低い部分（黒く見える）は熱伝達率の高い部分を表している。なお、図8の縦方向に一定間隔で低温線が見られるが、これは液晶シートの裏面にある箔ヒータの分割線であることを断っておく。

さて、水平加熱平板単独の場合、図8から分かるように、平板の温度分布は平板中心線に対して左右対称となる。その温度変化であるが、まず平板左右端部付近で温度は平板の奥行き（スパン）方向に様となり、この領域での温度は端部から平板中央に向かって急激に高くなる。そして、板端から少し離れた地点から筋状の低温模様が発生していることが分かる。この低温筋状模様は、流れ方向に軸を持つ縦渦の発生に伴って生じるものである⁹⁾。また、この筋状模様は板中央に向かって伸び、次第に不規則な低温模様へと変化していく様子が読み取れる。さらに板中央部付近では、細かで不規則な低温模様が発生している。この細かな低温模様は伝熱面両端から来た流れが衝突・合流する際に生じるもので、本図のような静止写真上では不明瞭であるが、ビデオ動画像上では比較的明瞭に識別できる。なお、これら一連の温度模様の成因等については著者らの先の報告⁹⁾に詳しく述べているので、本報では説明を省略する。

さて、つぎに水平加熱平板の端部に断熱垂直壁を設置した場合について、水平伝熱面の表面温度分布を可視化してみた。その代表例として、 $W=350\text{mm}$ の水

水平平板の右側に高さ $H=10, 30, 50\text{mm}$ の非加熱垂直壁を取り付けた場合の可視化結果を図 9 に示す。この図 9 のうち、まず開放端側の温度模様であるが、図 8 に示した単独水平加熱平板と同様な温度模様が出現していることが分かる。そして、垂直壁が高くなるに従って、とくに低温筋状模様の領域が垂直壁側へ伸びていく結果が目される。一方、垂直壁側の温度模様であるが、垂直壁が低い $H=10\text{mm}$ の場合、図 9(a) に示すように垂直壁側に不規則でかなり大きなスケールの低温模様が出現している。この低温模様の領域は、前節の流れの可視化結果によると、垂直壁側から低温流体が侵入し、垂直壁背後で不規則な循環渦を形成しながら流れる領域に対応しており、このような渦運動に伴って低温模様が生じたものと考えられる。なお、この大きなスケールの低温模様は、図 9(b) に示すように、垂直壁が高くなるに従って次第に不明瞭となり、垂直壁側からの流れ込みが無くなる $H=50\text{mm}$ では観察されなくなった。なお、図 9(c) では垂直壁近傍に細かな模様が出現しているが、これは開放端側から流入した流れが垂直壁に衝突する際に生じることを確認している。

つぎに、垂直壁を加熱した場合について水平伝熱面の表面温度分布を可視化してみた。その代表例として、 $W=350\text{mm}$ の水平伝熱面について、加熱垂直壁高さを $H=10, 20, 30\text{mm}$ としたときの結果を図 10 に示す。この図 10 と、図 9 の断熱垂直壁の可視化結果を詳しく比較してみると、例えば $H=30\text{mm}$ の断熱垂直壁では、図 9(b) に示すように垂直壁近傍に垂直壁側からの流体の侵入に伴う大きなスケールの低温模様が発生しているのに対して、同じ高さの加熱垂直壁では、図 10(c) に示すように大きなスケールの温度模様が観察

されないなどの差異がみられる。これは垂直壁側からの流体の流入が垂直面の加熱条件によって変化するためである。しかし、これらの点を除けば、水平伝熱面の温度模様の変化は、加熱垂直壁と断熱垂直壁の場合とで基本的に変わらないことが分かる。

3.4 水平加熱平板の伝熱特性

以上の可視化結果を参考にして、つぎに熱電対を用いて水平加熱平板の局所熱伝達率を定量的に測定してみた。この水平加熱平板の局所熱伝達率 h_x であるが、次式により求めた。

$$h_x = q_w / (T_{w,x} - T_\infty) \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 q_w は伝熱面表面熱流束、 $T_{w,x}$ は水平加熱平板の局所表面温度、 T_∞ は周囲流体温度である。図 8~10 の伝熱面表面温度分布に示したように、開放端側のとくに低温筋状模様が発生する領域では、局所熱伝達率が平板のスパン方向に大きく変化する。そこで本研究では、局所熱伝達率をスパン方向に平均した値で定義することにした。その具体的な測定方法については、前報⁹⁾に詳しく記しているので省略する。

さて、その代表的な例として、水平伝熱面の幅 $W=350\text{mm}$ 、熱流束 $q_w=2500\text{W/m}^2$ の結果を、図 11(a) および図 11(b) に示す。図 11(a) は断熱垂直壁を、また図 11(b) は加熱垂直壁をそれぞれ設置した場合の結果を示したもので、両図とも、横軸には開放端から垂直壁設置側に向かう流れ方向の距離 x を、縦軸には局所熱伝達率 h_x をとっている。なお可視化により求めた衝突・合流位置を参考までに、図 11 中に↓印で示した。

まず、垂直平板を設置しない $H=0\text{mm}$ の結果であるが、図 11(a) に示すように、局所熱伝達率は水平加熱平板の中心線に対して左右対称な分布となり、その

(a) with adiabatic vertical plate

(b) with heated vertical plate

Fig.11 Local heat transfer coefficients of the horizontal plate ($W=350\text{mm}$, $q_w=2500\text{W/m}^2$)

値は伝熱面両端部で最も高く、伝熱面端部から少し離れた位置で極小値を示した後、今度は増加に転じ、極大値を示した後、平板中央に向かって緩やかに低下していくことが分かる。このうち熱伝達率の極小値は、伝熱面端部から流入した低温周囲流体が伝熱面表面に沿って流れ、伝熱面からはく離し始める直前の位置に対応しており、層流境界層流域の終端に、また局所熱伝達率の極大値は、図8の温度分布の可視化で低温筋状模様が最も拡大した位置に対応していることを確認している⁹⁾。

これに対して、伝熱面右側端部に垂直断熱壁を設置すると、図11(a)中↓印で示した衝突・合流地点から垂直壁までの領域で、一般的に局所熱伝達率が大きく低下する結果が目される。この領域の局所熱伝達率を詳しく見てみると、垂直壁が $H=5, 10, 20\text{mm}$ と高くなるにつれて、単独水平平板で見られた極小・極大値が次第に不明瞭となり、 $H=50\text{mm}$ 以上になると熱伝達率分布に極小・極大値が現われなくなることが分かる。これは垂直壁が高くなるにつれて、垂直壁側からの周囲流体の流れ込みが弱まるため、図9に示した温度分布の可視化結果とも符合する。

一方、水平平板の開放端から衝突・合流位置までの局所熱伝達率であるが、垂直壁高さ H の如何に依らず、その分布は垂直壁の無い場合のそれに一致することが分かる。この結果は、開放端側の伝熱特性に対して、断熱垂直壁が実質的に影響を及ぼさないことを示しており興味ある結果といえる。そこで、この開放端から図中↓印で示した衝突・合流域までの局所熱伝達率 h_x について、開放端からの距離 x を代表長さとする局所ヌッセルト数 Nu_x ($=h_x \cdot x / \lambda$)を算出し、同じく x を代表長さにとった局所修正レイリー数 Ra_x^* ($=g \beta q_w x^4 / \lambda \alpha \nu$)を用いてプロットし直してみた。その結果を図12に示す。著者ら⁹⁾は先に、本実験よりも更に板幅の大きな単独水平加熱平板について局所ヌッセルト数の測定を行い、その結果を基に実験整理式を提案している。その結果を図12中に実線で示した。この図12から明かなように、開放端から衝突・合流地点までの局所ヌッセルト数は、単独水平平板のそれと良好に一致している。また垂直壁高さ $H=50\text{mm}$ 以上の本実験値については、開放端から垂直壁に至る全てのデータを図に記したが、その結果は従来の単独水平平板の整理式に良好に一致している。このことから断熱垂直壁が十分高い場合には、開放端から垂直壁までの伝熱特性は、開放端から垂直壁までの距離を半幅とする単独水平加熱平板の局所ヌッセルト数にはほぼ一致することが分かる。

Fig.12 Local Nusselt numbers of horizontal plate (from open edge to collision points)

Fig.13 Comparison of overall heat transfer coefficients

つぎに垂直壁を加熱した場合の局所伝熱特性について述べる。図11(b)から、加熱垂直壁を $H=5, 10, 20\text{mm}$ と次第に高くしていくと、開放端側の局所熱伝達率は全般的に高くなり、逆に垂直壁側の局所熱伝達率は低下していく様子が読み取れる。このうち垂直壁側の熱伝達率が低下するのは、垂直壁側からの周囲流体の流入が弱まるためであり、前述した断熱垂直壁の場合と同様な理由による。一方、開放端側の熱伝達率が増加するのは、加熱垂直壁によって高温流体の排出が促進され、この流れを補うように水平伝熱面の開放端側からより多くの低温流体が流れ込むためと考えられる。このような加熱垂直壁による流れの誘引効果が、本実験で用いたような $W=350\text{mm}$ という大きな水平伝熱面まわりの伝熱に対して無視し得ない影響を及ぼすという事実は、垂直伝熱面の影響がかなり上流側にまで及ぶことを示唆しており、注目すべき結果であるといえる。

最後に以上の局所熱伝達率の測定結果から、参考までに水平加熱平板全体の平均熱伝達率 h_m を求めて

みた。その代表例として、幅 $W=350\text{mm}$ の水平伝熱面の平均熱伝達率を断熱および加熱垂直壁の場合について比較した結果を図 13 に示す。なお、図中の実線は垂直壁の無い単独水平加熱平板の平均熱伝達率を示している。この図 13 より、断熱垂直壁を設置した場合、水平伝熱面の平均熱伝達率は垂直壁が高くなるにつれて緩やかに低下していき、垂直壁側からの流れ込みが無くなる $H=50\text{mm}$ 以上では、一定の値を示すことが分かる。一方、加熱垂直壁を設置した場合の平均熱伝達率は、 H が大きくなるにつれて緩やかに増加していくことが分かる。これは前述した垂直加熱壁による誘引効果によって伝熱が促進されるためである。このように、垂直壁を断熱した場合と加熱した場合とで水平伝熱面まわりの伝熱特性が大きく異なる結果は今まで全く報告されておらず興味深い結果といえる。

4. 結 言

本研究は、等熱流束条件で加熱された水平上向き加熱平板の片側端部に垂直壁を設置した、いわゆる L 字型コーナまわりの自然対流の流動と伝熱について実験的に検討したものである。試験流体に常温の水を用い、垂直壁が断熱された場合、および水平加熱平板と同一の熱流束で加熱された場合のそれぞれについて、とくに水平加熱平板まわりの伝熱・流動を中心に、流れと表面温度分布の可視化実験および伝熱実験により探った。実験は水平加熱平板の板幅 W を 100, 200 および 350 mm の 3 種類変化させ、垂直壁の高さを 5~150mm まで順次系統的に変化させていった場合について行った。これらの実験により、以下のような結果が得られた。

- (1) 垂直壁が低い場合、垂直壁設置側から周囲流体が流れ込み、垂直壁背後で不規則な渦を形成して水平加熱平板上へ進入し、垂直壁非設置側からの流れと衝突・合流し、ブルーム状となって上方へ流れ去る一連の流れが生じることを確認した。また、水平伝熱面上の衝突・合流位置は、垂直壁が高くなるにつれて次第に垂直壁側へ移動することが分かった。
- (2) 垂直壁がある程度以上高くなると、水平伝熱面の開放端側から流入した流れは、そのまま垂直壁まで到達し、垂直壁に沿って上方へ流れ去ることを確認した。また、この流れが実現される条件は、垂直壁高さ H と水平伝熱面の大きさ W との比 HW によって与えら

れ、断熱垂直壁の場合、 $HW=0.14$ 、加熱垂直壁の場合 $HW=0.1$ 程度の値となる。

- (3) 断熱垂直壁を設置した場合について、水平加熱平板の流れ方向局所熱伝達率を測定したところ、垂直壁近傍の熱伝達率は垂直壁が高くなるにつれて次第に低下する結果が得られた。また、この熱伝達率の低下は垂直壁によって水平伝熱面に向かう低温流体の流れ込みが抑制されるために生じることを確認した。一方、水平伝熱面の開放端から衝突・合流位置までの局所熱伝達率は、単独水平平板の局所熱伝達率に一致し、垂直壁の影響を受けないことが分かった。

- (4) 加熱垂直壁を設置した場合について水平加熱平板の局所熱伝達率を測定した。その結果、垂直壁近傍の熱伝達率は垂直壁が高くなるにつれて低下する一方、開放端側の局所熱伝達率は単独水平平板のそれよりも顕著に増加することを明らかにした。とくに後者の熱伝達率の増加が、加熱垂直壁による流れの誘引効果によることを指摘した。

- (5) 上述した局所熱伝達率の変化により、断熱垂直壁を設置した場合の水平加熱平板まわりの平均熱伝達率は、単独水平平板の平均熱伝達率よりも低くなること、逆に加熱垂直壁を設置した場合の平均熱伝達率は、単独水平平板のそれより高くなることが分かった。

文 献

- (1) Rodighiero, C. and deSocio, L. M., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 105 (1983), 212-214.
- (2) Ruiz, R. and Sparrow, E. M., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 30 (1987), 2539-2548.
- (3) Angirasa, D. and Mahajan, R. L., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 115 (1993), 149-157.
- (4) Balaji, C. and Venkateshan, S. P., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 118 (1996), 222-225.
- (5) Rao, V.R., Balaji, C. and Venkateshan, S.P., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 40 (1997), 2941-2947.
- (6) 北村・木村, 機論, 58-556, B (1992), 3715-3722.
- (7) 木村・北村, 機論, 60-570, B (1994), 566-573.
- (8) Kitamura, K. and Kimura, F., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 38-17, (1995) 3149-3159.
- (9) 北村・ほか 2 名, 機論, 65-640, B (1999), 4033-4040.
- (10) 木村・ほか 2 名, 機論, 68-669, B (2002), 1515-1522.