水平からわずかに傾斜した上向き加熱平板上自然対流の流動と伝熱*

木村文義^{*1}, 吉岡徹治^{*2}, 北村健三^{*3}
山口 學^{*1}, 浅見敏彦^{*1}Fluid Flow and Heat Transfer of Natural Convection Adjacent to
Upward-Facing, Heated Plates Inclined Slightly from HorizontalFumiyoshi KIMURA^{*4} Tetsuji YOSHIOKA, Kenzo KITAMURA,
Manabu YAMAGUCHI and Toshihiko ASAMI^{*4} Himeji Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
2167 Shosha, Himeji, Hyogo, 671-2201 Japan

Natural convective flows over upward-facing, inclined plates were investigated experimentally. The attentions were focused on the opposing flows that will appear over the plates inclined slightly from horizontal. The flow fields over the plates and the surface temperatures of the heated plates were visualized with dye and liquid crystal thermometry. The result showed that both the descending and ascending flows appear over the plates when the inclination angle is less than 15° . These flows collide with each other at certain distance from the leading edge and, then, ascend away from the plate as a plume. It was found that the above distance is determined solely by the inclination angle and is independent of sizes and heat fluxes of the plate. The local heat transfer coefficients of the plates were also measured. The result showed that the heat transfer is enhanced slightly by the occurrence of the descending flows.

Key Words: Heat Transfer, Natural Convection, Flow Visualization, Opposing Flow, Inclined Plate

1. 緒 言

有限な大きさの平板を加熱し、十分広い流体中に静置すると、平板のまわりには自然対流が生じる。著者らは、このような加熱平板まわりの自然対流のうち、加熱面を水平上向きに設置した場合^{(1)~(3)} および上向きに水平から一定角度で傾斜させた場合⁽⁴⁾ について、平板上に生じる自然対流の流動・伝熱を可視化や伝熱実験を通じて探ってきた。その結果によれば、水平上向き加熱面の場合、平板上には図1(a)に模式的に示すように、板の端部から低温周囲流体が流入し、この流体が平板に沿って流れ、平板中央部において他端から来た流れと衝突・合流して、やがてブルームとなって板から離脱・上昇する一連の自然対流が発生すること、一方、平板を水平からある程度以上傾斜させると、図1(c)に示すように、平板の下端側から低温周囲流体が流入し、平板表面に沿って流れ、そのまま平板の上端部から流出する自然対流が生じることを明らかにした。

このうち後者の結果は実験を行うまでもなく、いわば自明の結果であるが、ここで一つの問題が指摘できる。それは、平板を水平からわずかに傾斜させた場合に板上にどのような流れが生じるか、という問題である。つまり平板を水平からわずかでも傾斜させれば、

Fig. 1 Flow fields over horizontal and inclined plates

* 原稿受付 2000年5月18日。

^{*1} 正員, 姫路工業大学工学部(☎ 671-2201 姫路市書写 2167)。^{*2} 姫路工業大学大学院。^{*3} 正員, 豊橋技術科学大学工学部(☎ 441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)。

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

図1(a)に示したような左右対称の流れから、直ちに図1(c)に示すような流れへ移行するのか、それとも水平からの傾斜角がある値以下では、図1(b)に模式的に示すような流れ、すなわち平板の下端から上方に向かう流れ(以下、本報ではこの流れを順流と呼ぶ)に加えて、平板の上端から下降する流れ(以下、逆流と呼ぶ)が発生するかという問題である。そこで、以下この問題に注目しながら、従来の研究成果を振り返ることにする。

さて、傾斜加熱平板上の自然対流についてはさまざまな伝熱機器や我々の身近で遭遇する最も代表的な自然対流の一つであることから、その流動・伝熱を解明すべく今まで数多くの実験や解析が行われている。しかし、それらの研究の多くは、水平からの傾斜角が比較的大きな平板まわりの流動や伝熱を取扱ったもので、上で問題とする水平からわずかに傾斜した平板まわりの自然対流に関しては、ごく少数の研究が行われているにすぎない。そのうち、例えば Hassan-Mohamed⁽⁵⁾, Black-Norris⁽⁶⁾, Al-Arabi-Sakr⁽⁷⁾らは等温加熱傾斜平板の局所あるいは平均熱伝達率を水平から垂直に至る広い範囲で計測している。しかし、彼らの主たる関心は乱流遷移条件や伝熱整理式を得ることにあったため、上述の問題についてはまったく考慮していない。

また Pera-Gebhart⁽⁸⁾は、平板を水平から 6° まで傾斜させた場合、また Cheng-Kim⁽⁹⁾は水平から 20° まで傾斜させた場合について、等温加熱面上空気の温度場および流れ場をそれぞれ Mach-Zender 干渉計や煙を用いた可視化により調べている。しかし、彼らの主たる興味は平板下端部付近に生じる層流境界層流れの安定性や乱流遷移機構にあったため、平板上端側に逆流が発生するかどうかについては検討していない。一方、Fujii-Imura⁽¹⁰⁾は傾斜角を広い範囲で変化させた場合について伝熱実験を行い、その一環として、水平および水平からわずかに傾斜させた平板まわりの流れをアルミニウム粉を用いて可視化している。その結果、平板の傾斜角が水平から 10° 程度以下では伝熱面の上端から下降する流れが発生することを報告している。しかし、彼らの主たる関心もやはり傾斜平板の伝熱特性、とりわけ平板の平均ヌセルト数の整理式を得ることにあったため、上述の逆流については単にその存在を指摘するにとどまっている。

以上の研究状況から明らかなように、水平からわずかに傾斜した加熱平板上の自然対流については、わずかに Fujii-Imura によって逆流の発生が示唆されているだけで、具体的にどのような逆流が発生するか、

また、逆流の発生およびその広がり加熱面の大きさ、加熱条件あるいは傾斜角によってどのような影響を受け、その結果、平板の伝熱特性がどのように変化するかといった基本的かつ重要な問題がまったく不明のまま残されている。そこで、本研究ではこれらの諸問題を解明することを主目的に、平板の大きさ、加熱量、傾斜角を系統的に変化させた実験を行うことにした。実験では、まず傾斜平板上の流動状況を染料を用いた可視化により明らかにするとともに、逆流の発生条件を探ることにした。次いで感温液晶を用いて平板の表面温度分布を可視化し、平板上の流動と局所伝熱特性の対応関係を調べ、併せて逆流域の同定を試みた。さらに加熱平板の局所熱伝達率を定量的に測定し、順流域および逆流域の伝熱特性を明らかにすることにした。

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。実験装置は加熱平板、架台および側板から構成されている。このうち加熱平板は、厚さ $30\mu\text{m}$ のステンレスはくヒータを所定の幅で短冊状に切り、厚さ 15mm の亚克力板表面に貼り付けたもので、はくに交流を通電することにより等熱流束条件で加熱した。実験には幅 W の異なる5種類($W=50, 100, 200, 300, 850\text{mm}$)の加熱平板を製作・使用した。これらの加熱平板の奥行き(スパン)は、幅 $W=50, 100\text{mm}$ および 200mm の平板では 300mm 、 $W=300\text{mm}$ および 850mm の平板では 500mm とした。これらの平板では幅に比べ奥行きが相対的に小さいため、平板側方からの流体の侵入が懸念される。そこで、この流体の侵入を防ぐために高さ 250mm の側板を加熱平板の両側面に設置した。

本実験では試験流体として常温の水を用いることにした。これは水であれば流れの可視化が比較的容易であり、等熱流束伝熱面と組合せて液晶による伝熱面温度の可視化や精度の高い熱伝達率測定が可能となるこ

Fig. 2 Experimental apparatus

とを考慮したためである。この加熱平板は架台に取付けたねじを調節することにより水平 ($\theta=0^\circ$) から $\theta=30^\circ$ の間の任意の角度に設定できる。この傾斜角の設定には精度 $\pm 0.5^\circ$ の傾斜計を用いた。

これらの加熱平板の局所熱伝達率の測定に際しては、線径 $100\ \mu\text{m}$ の C-A 熱電対をはくヒータ裏面にスポット溶接し、壁温測定に用いた。これらの熱電対は平板のスパン方向中心線上、流れ方向に任意の間隔で取付けた。周囲流体温度 T_∞ は、平板下端と同じ高さで、板端から $50\ \text{mm}$ 離れた位置に上と同一線径、素材の熱電対を設置し、測定した。はくヒータから平板裏面へ熱伝導により漏えいする熱量を一次元熱伝導を仮定して見積もったところ、最大でもヒータ加熱量の 4.5% 以下となり、ほぼ無視できることがわかった。そこで伝熱面熱流束 q_w は、ヒータのジュール加熱量を平板表面積で除すことにより求めた。以上の実験装置を水槽内に設置した。この水槽には底面積 $0.75 \times 0.75\ \text{m}^2$ 高さ $0.9\ \text{m}$ 、および底面積 $1 \times 2\ \text{m}^2$ 高さ $1\ \text{m}$ の 2 種類を製作・使用した。前者は $W=300\ \text{mm}$ 以下の平板を用いた実験に、後者は $W=850\ \text{mm}$ の平板を用いた実験に利用した。これらの装置により実現し得た加熱平板幅 W 基準の修正レーレー数 $Ra_w^* (= g\beta q_w W^4 / \lambda \nu)$ は $6 \times 10^7 \sim 8 \times 10^{13}$ の範囲である。なお後述する無次元数中の物性値は体膨張率 β を除いて、いずれも膜温度で評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 傾斜平板上の流れの可視化 本研究では、傾斜平板上の流動状況を把握するため、傾斜角を水平から $\theta=20^\circ$ の範囲で変化させた場合について、まず染料による流れの可視化を行ってみた。その代表例として、幅 $W=50\ \text{mm}$ の平板を $0, 5, 10^\circ$ および 15° 傾斜させたときの可視化結果を図 3 に示す。図 3 は、平板下端および上端に設けたスリットから染料を膜状に流出させ、染料の流れる様子を伝熱面の側方から写真撮影したものである。

まず水平の場合であるが、図 3 (a) に示すように、

平板の両端部から流出した染料は、平板表面に沿って膜状に流れ、平板中央で衝突・合流して、ブルームとなって板から離脱していく。次に平板を 5° 傾斜させた場合であるが、平板の上端から流出した染料は平板表面に沿って下降していく様子が図 3 (b) から読取れる。そして、この染料は平板の上端寄りの地点で下端部から板に沿って上昇してきた流れと衝突・合流し、板から離脱していく。このような平板上端から下降する流れ、いわゆる逆流の発生は図 3 (c) に示した $\theta=10^\circ$ の場合にも認められる。一方、さらに傾斜角を $\theta=15^\circ$ と大きくした図 3 (d) の可視化結果では、逆流は消失し、平板全体が下端部から板に沿って上昇する流れ、順流によって覆われることがわかる。

以上の可視化実験における板幅基準の修正レーレー数 Ra_w^* は 6×10^7 であり、前報⁽³⁾ で明らかにした水平平板上自然対流の乱流遷移レーレー数 $Ra_w^*_{\text{crit}} = 1.6 \times 10^7$ をわずかに上回る程度である。このため平板の大部分は層流によって覆われている。一方、さらにレーレー数が大きくなり、平板の大部分が乱流で覆われるような場合にも上と同様な逆流が発生するか否か、次に調べてみることにした。

その結果の一例を図 4 に示す。図 4 は幅 $W=200\ \text{mm}$ の平板上の流れを可視化したもので、板幅基準の修正レーレー数 Ra_w^* は 1.5×10^{10} である。まず、図 4 (a) の水平平板の結果であるが、平板の両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、平板表面からはく離する。このはく離した染料は、乱れながらもなお平板上を流れ、平板中央に到達し、ここで他端から来た流れと衝突・合流した後、乱流ブルームとなって鉛直上方に流出していく。このうち平板端部近くで染料が表面からはく離するのは、乱流遷移に先だって流れ方向に軸をもつ縦渦が形成されることによるものである⁽³⁾。次に平板を 5° 傾けた図 4 (b) の結果であるが、平板の上端部から流出した染料は平板に沿ってごく短い距離流れた後、はく離し、乱れながらもなお下降していく様子が読取れる。また、この逆流は図 4 (c) の $\theta=10^\circ$ の平板上にも生じている

Fig. 3 Visualized flow fields over horizontal and inclined plates ($W=50\ \text{mm}$, $q_w=1\ 000\ \text{W/m}^2$, $Ra_w^*=6 \times 10^7$)

Fig. 4 Visualized flow fields over horizontal and inclined plates ($W=200$ mm, $q_w=1\,000$ W/m², $Ra_w=1.5\times 10^{10}$)

Fig. 5 Visualized surface temperature of the horizontal and inclined plates ($W=200$ mm, $q_w=3\,500$ W/m², $Ra_w=5.4\times 10^{10}$)

ことがわかる。一方、 $\theta=15^\circ$ になると図4(d)に示すように上端部から流出した染料は、そのまま鉛直上方へ流れ去っていく。これら一連の結果から、 $W=200$ mmの平板では表面の大部分が乱流で覆われるが、逆流の発生状況は平板表面の大部分で層流状態が維持される $W=50$ mmの場合とほぼ同様であることがわかる。なお、本研究ではさらに板幅の大きな $W=850$ mmの平板についても流れの可視化を行っているが、この板上にも図4と同様な逆流が存在することを確認している。

3・2 伝熱面表面温度分布の可視化 さて、以上の流れの可視化結果から、平板の傾斜角がおよそ 15° 以下では平板の大きさを問わず常に逆流が発生することがわかった。しかし、この逆流が平板全体に対してどの程度の割合を占めるか、さらに詳しく調べるには、染料による流れの可視化に頼るだけでは不十分である。そこで、この問題を定量的に取扱うため、平板表面に感温液晶シートを貼り付け表面温度分布の可視化を行ってみた。このような表面温度分布の可視化により、逆流領域の判定が容易になるばかりでなく、平板全体にわたる伝熱特性の把握が可能になるものと思われる。

その代表的な結果を図5に示す。この図5は、幅 $W=200$ mmの平板の表面温度分布を真上から写真撮影したもので、図の左右端がそれぞれ平板の下端およ

び上端に対応している。本実験では伝熱面を等熱流束で加熱しているので、これらの図のうち温度の高い青色(白黒写真上では灰色に見える)の部分は熱伝達率の低い領域を、また温度の低い茶や暗赤色(白黒写真上では黒く見える)の部分は熱伝達率の高い領域を表している。なお、図5では縦方向に一定間隔で低温の線が見られるが、これははくヒータの間げきを表している。

まず図5(a)の水平平板の結果から述べる。伝熱面が水平な場合には、平板中心に対して左右対称な温度パターンとなる。図5(a)から、温度は端部で低く、平板中央に向かって急激に高くなり、そして端から少し離れた地点からすじ状の低温模様が発生しているのがわかる。このすじ状模様は、前述した縦渦の発生に伴って生じる⁽³⁾。このすじ状模様は下流に行くに従って一部は消滅、一部は拡大して、次第に不規則な模様へと変化していく。一方、平板中央付近には不規則な形状をした低温はん点模様が現れている。この模様は平板両端からやってきた流れが衝突、合流する際に生じることを染料による流れの可視化により確認している。

次に平板を 5° 傾斜させた図5(b)の結果であるが、水平の場合に比べ、平板下端部付近の低温すじ状模様の発生位置が下流側に移動し、平板中心に向かって長く伸びること、逆に平板上端部での低温すじは短くな

ることがわかる。そして、この場合平板上端から数えて3番目もしくは4番目のヒータ上に流れの衝突・合流に基づくはん点模様が発生している。さらに傾斜角が大きな $\theta=10^\circ$ の図5(c)の結果では、このはん点模様は最上端部のヒータ上に現れるようになる。一方、 $\theta=15^\circ$ の平板上では衝突・合流による低温はん点模様は見られなくなり、平板上の温度模様はそのどれもが平板の下端から上端に向かって流れていくことを確認した。これより表面全体が順流により覆われていることがわかる。なお、上述した流れの衝突・合流による低温はん点模様の発生は、図5のような静止画中では不明りょうであるが、実際に目視観察してみると温度模様は時々刻々変化しており、模様の動く方向や変化の仕方から、その発生位置を容易に同定することが可能である。そこで、この事実を利用して、本研究では合流・衝突位置を液晶による可視化結果を基に定量的に測定することにした。

3.3 衝突・合流位置 さて、傾斜平板のどの位置で流れが衝突・合流するかは、平板上の順流域、逆流域を特定するうえで重要である。ここで液晶による可視化によれば、特に伝熱面上の流れが乱流へ遷移した場合、衝突・合流位置は時間とともに大きく揺動することを確認している。そこで本研究では、可視化画

像をいったんビデオに収録し、一定時間ごとに再生した画像から衝突・合流位置を求め、それらの平均値で衝突・合流位置を定義することにした。なお、本研究で取扱う傾斜平板上の自然対流に対しては、平板幅、傾斜角および伝熱面熱流束の三つが主に影響すると考えられる。そこで本実験では、これらパラメータを系統的に変化させた場合について衝突・合流位置の計測を試みた。

そのうち熱流束の影響を調べた結果の一例を図6に示す。図6は幅 $W=200$ mmの平板について、熱流束を $1\,000\sim5\,000$ W/m^2 の範囲で変化させた場合の衝突・合流位置を示したもので、縦軸に平板下端から衝突・合流位置までの距離 X_{col} を平板幅 W で無次元化した値(X_{col}/W)をとり、横軸に傾斜角 θ をとって実験値をプロットしている。図6から、衝突・合流位置は傾斜角の増加とともに平板中央から上端側へ移動していき、 θ が 15° 以上では逆流が消失することがわかる。また(X_{col}/W)の値は、若干ばらついているが熱流束に対して明確な依存性を示しておらず、傾斜角によってその値がほぼ決定されるといえる。一方、平板幅の影響を調べた結果を図7に示す。図7では熱流束を一定に保ち、平板の大きさを $50\sim850$ mmの5種類変化させている。この場合も(X_{col}/W)の値は平板幅には依存しておらず、上と同様傾斜角のみに依存することが明らかである。以上の一連の結果から、衝突・合流位置は熱流束および平板幅の大小によらず、傾斜角のみにによって決定されることがわかった。なお、これらの可視化実験は平板幅基準の修正レーレー数 Ra_w^* が $6\times10^7\sim8\times10^{13}$ に及ぶ広い範囲で行ったもので、平板の大部分が層流境界層流で覆われる場合から、十分発達した乱流により覆われる場合までを網羅している。平板上の流れがこのように層流あるいは乱流と大きく異なるにもかかわらず、順流・逆流域の広がりや傾斜角のみにによって決定されるという上の結果は非常に興味深い結果といえる。

3.4 傾斜平板の局所伝熱特性 以上の可視化結果を参考にして、次に傾斜平板の局所熱伝達率を熱電対を用いて定量的に測定してみた。測定は平板幅、熱流束および傾斜角を系統的に変化させた場合について行っているが、その代表例として $W=200$ mm、 $q_w=5\,000$ W/m^2 の結果を図8に示す。図8は、平板下端からの距離 X の地点における局所熱伝達率 h_x を傾斜角 θ をパラメータにとってプロットしたものである。 $X=0$ が平板下端に、 $X=200$ mmが平板上端に当たる。

ここで、局所熱伝達率 h_x は次式で定義した。

Fig. 6 Location of flow collision ($W=200$ mm)

Fig. 7 Location of flow collision ($q_w=3\,000$ W/m^2)

Fig. 8 Local heat transfer coefficients of plate
($W=200$ mm, $q_w=5\,000$ W/m²)

$$h_x = q_w / (T_{wx} - T_\infty) \dots \dots \dots (1)$$

T_{wx} は位置 X における壁温, T_∞ は平板下端に流入する周囲流体温度である。このうち壁温 T_{wx} については、図5に示したように特に低温すじが発生する領域で伝熱面のスパン方向に大きく変化する。そこで本研究では、この領域での壁温をスパン方向に平均した値で定義することにした。その具体的な測定法は前報⁽²⁾⁽³⁾に詳しく記しているので説明を省略する。

さて図8のうち、まず水平平板の結果であるが、熱伝達率は平板中心に対して左右対称な分布となり、その値は平板の両端部で最も高くなる。そして、平板中央に向かって急激に低下し、極小値をとった後、今度は増加に転じ、極大値を示した後、徐々に低下していく。このうち熱伝達率の極小値は、図5に示した低温すじが発生する直前の位置に対応しており、これより平板端から極小値を示す領域までが、いわゆる層流境界層領域に相当することがわかる。一方、極大値は低温すじが平板上に出現し、最も拡大する位置に対応している。熱伝達率が極小から極大となり、平板中央に向かって徐々に低下していく領域が、図5に示した低温のすじが現れる領域に対応しており、この領域が遷移域に相当する。以上の知識を基に、次に傾斜平板の局所熱伝達率について検討する。

さて、図8中には図6で求めた衝突・合流位置を↓印で示した。これよりも X の小さな領域は順流域、大きな領域は逆流域に相当している。このうち逆流域の伝熱特性であるが、平板を水平から傾斜させていくにつれて、平板上端部付近の熱伝達率の極小・極大値が次第に不明りようとなり、全体として熱伝達率が一定値に落ち着く傾向が読取れる。これらは傾斜角の増大につれて低温すじが次第に不明りようとなる図5の可視化結果からも裏付けられる。一方、順流域では傾斜角の増加に伴って熱伝達率の極大・極小位置が平板下端から次第に X の大きな地点へ移動していくことがわかる。これは液晶による可視化で観察されたように、傾斜角の増大につれて低温すじ状模様の発生位置が下流側に移動していくことによる。

さて、図8では特定の大きさおよび熱流束条件下での平板の局所熱伝達率分布を示したが、これら傾斜平板の伝熱特性についてさらに詳しく検討するには、順流域と逆流域の伝熱を分けて考える必要があるだろう。このうち順流域の局所熱伝達率については、傾斜角の大きな場合を中心に今までいくつか研究が行われており、これらの成果を傾斜角の小さな本実験結果に適用することも可能と思われる。そこで、従来の研究成果を紹介し、これらの成果を本実験に適用するに当たっての問題や興味ある点をあらかじめ明らかにしておくことにする。

さて、本研究で対象とする等熱流束条件で加熱された傾斜平板まわりの伝熱については、著者らの一連の研究を含め今までに解析や実験がいくつか行われている。これらの研究はいずれも本報でいう順流域を対象としたものである。そのうち、Chen ら⁽¹¹⁾ は相似変数を用いて層流境界層流れの解析を行い、特に傾斜角 θ が 0° から 15° の範囲において、以下の式で解析結果が整理できることを報告している。

$$Nu_x = C(Ra_x^*/6)^{1/6 + D(\theta)} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 Nu_x および Ra_x^* は平板下端からの距離 X を代表長さとする局所ヌッセルト数 ($Nu_x = h_x \cdot X / \lambda$) および局所修正レーレー数 ($Ra_x^* = g\beta q_w X^4 / \lambda \alpha \nu$) である。また、上式中の C および $D(\theta)$ は、

$$C = Pr^{1/2} / (0.12 + 1.2 Pr^{1/2})$$

$$D(\theta) = 0.038(\sin \theta)^{1/2}$$

で与えられる。ただし Chen らは、上式(2)の適用可能範囲を $10^4 < Ra_x^* < 10^{10}$ としているが、この上限値 $Ra_x^* = 10^{10}$ については、著者らの水平⁽⁹⁾ および $\theta = 15^\circ$ の傾斜平板⁽⁴⁾ の実験で得られた乱流遷移開始レーレー数に比べ3けた程度も高く、その適応範囲については再検討の余地があることを指摘しておく。

一方, Vliet⁽¹²⁾ は常温の水を用いて, 傾斜平板の局所熱伝達率を $\theta > 30^\circ$ の範囲で測定し, 層流および乱流域の局所ヌッセルト数 Nu_x について, 以下のような実験整理式を提案している.

$$(\text{層流域}); Nu_x = 0.60(Ra_x^* \sin \theta)^{1/5} \quad \cdots \cdots (3)$$

$$(\text{乱流域}); Nu_x = 0.30Ra_x^{*0.24} \quad \cdots \cdots (4)$$

さらに著者らは, 傾斜角が 0° および $15 \sim 90^\circ$ の範囲で Vliet と同様な伝熱実験を行い, 式(3)が傾斜角 $\theta > 15^\circ$ の範囲でも成立すること, および乱流域の実験値が Vliet の式(4)と若干異なる以下の式(5)で整理できることを報告⁽⁴⁾している.

$$Nu_x = 0.21Ra_x^{*1/4} \quad \cdots \cdots (5)$$

このうち式(3)は, 板に平行な重力成分 $g \sin \theta$ をとったレーレー数により層流域の局所ヌッセルト数が傾斜角のいかんによらずまとまることを示している. この式が本実験のように傾斜角がさらに小さくなった場合にも果たして適用できるかどうか興味ある問題である. また式(4), (5)は, 乱流域のヌッセルト数が傾斜角に依存しないことを意味しているが, この式が本実験範囲においても成り立つか興味もたれる問題である.

以上の問題および興味を基に, 本研究では, まず図7の可視化実験結果を基に順流域を判別し, 次いで順流域の局所熱伝達率 h_x を, 局所ヌッセルト数 Nu_x , 局所修正レーレー数 Ra_x^* 平面上に整理し直してみた. その結果を図9に示す. 本研究では平板幅, 傾斜角, 熱流束を種々変化させた場合について局所熱伝達率を測定しているが, 紙面の制約上 $W = 850 \text{ mm}$ および 200 mm の局所ヌッセルト数を傾斜角 $\theta = 0, 5, 10, 15^\circ$ についてプロットした結果のみ, 図9に掲げる.

さて, まず図9(a)の水平平板の結果であるが, 図からレーレー数の小さな層流域で Nu_x と Ra_x^* の間に直線関係が成立することがわかる. そして, この領域における実験値は, 先に著者⁽³⁾らが得た水平平板の層流域 ($10^3 < Ra_x^* < 3.6 \times 10^6$) における伝熱整理式

$$Nu_x = 0.66Ra_x^{*1/6} \quad \cdots \cdots (6)$$

と, 値および領域とも良好に一致していることがわかる. これに対して Chen らの式(2)は若干低い値を与えるようである. なお, 図9(a)中に記した Chen らの式は, 本実験における水のプラントル数 $Pr = 6$ を式(2)に代入したものである(他の図中に記した式も同様).

一方, レーレー数 Ra_x^* が上述の値を超えると Nu_x は急激に増加していき, 十分高いレーレー数域で再び Nu_x と Ra_x^* の間に直線関係が成り立つようになる. この Nu_x が急増し, 直線関係が成立するまでの領域

Fig. 9 Local Nusselt numbers of the inclined plates

Fig. 10 Local Nusselt numbers of the inclined plate ($\theta = 5^\circ$)

が遷移域に、また、後者の直線関係が成り立つ領域が発達した乱流域に対応する。このうち乱流域における本実験値は、前報⁽³⁾で報告した水平平板の乱流域 ($Ra_x^* > 8 \times 10^{10}$) に対する伝熱整理式

$$Nu_x = 0.20 Ra_x^{*1/4} \dots\dots\dots (7)$$

と良好に一致し、この式は傾斜平板に対する整理式 (4) と同誤差の範囲内で一致する。

次に傾斜角が 5° の場合であるが、図 9 (b) からわかるように、層流域における本実験値は水平平板の式 (6) および Chen らの式 (2) とほぼ一致するのに対して、傾斜平板の式 (3) とは明らかに一致しない結果を得た。

さらに傾斜角が大きな図 9 (c) の $\theta = 10^\circ$ の結果では、Chen らの式 (2) が本実験値に最も近い値を与え、水平平板の式 (6) がこれに次いでいる。また傾斜平板の式 (3) とは依然として差が認められる。一方、傾斜角が 15° になると、層流域での本実験値は傾斜平板の式 (3) に最もよく一致するようになり、逆に水平平板の式 (6) は実験値とのずれが顕著になってくる。これら図 9 の結果、および図には掲載していないが $\theta = 2.5, 7.5, 12.5^\circ$ および 17.5° の実験値を同様に整理・比較した結果によると、層流域での本実験値は $2.5^\circ < \theta < 15^\circ$ の範囲で全般的に Chen らの式 (2) とよく合うことがわかった。ただし水平の場合に限っては、本実験値は彼らの式 (2) よりも若干高くなった。また、水平平板の式 (6) は傾斜角がおおよそ 10° 以下ならば適用でき、逆に傾斜平板の式 (3) は傾斜角が 15° 以上で適用可能なことがわかった。一方、乱流域の局所ヌッセル数については、本実験傾斜角範囲内 ($0^\circ < \theta < 15^\circ$) において、水平平板の式 (7) が最も良好に実験値を予測し、Vliet の式 (4) は若干高め値を与えるようである。

以上、順流域の伝熱特性について述べたが、本研究では逆流域の伝熱特性についても種々の無次元パラメータを用いた整理を試みた。しかし、順流域のようにデータをまとめることはできなかった。これは可視化実験で明らかにしたように、傾斜角によって逆流域の流れや温度場が非常に複雑に変化するためであると考えられる。そこで、ここでは図 9 に示した順流域の整理法を、そのまま逆流域まで拡大・適用した結果を示すにとどめておく。その代表的な結果として、 $\theta = 5^\circ$ の場合を図 10 に示す。図 10 中の矢印が順流・逆流の合流位置で、これよりもレイレー数が大きな領域が逆流域に相当する。図 10 から、逆流域の局所ヌッセル数は全体的に、順流域の実験値を高レイレー数側に延長した線よりも上側に位置していることがわかる。これと同様な結果は他の傾斜角についても得られた。これらの結果から、逆流が生じる場合、平板の平均熱伝達率は、少なくとも平板全体が順流で覆われると仮定した場合の平均熱伝達率より高くなるといえる。

以上、本研究では水平からわずかに傾斜した加熱平板上に生じる自然対流の流動・伝熱の詳細を可視化および局所熱伝達率の測定により明らかにした。本研究で得られた一連の成果は、前報⁽⁴⁾で得られた $\theta > 15^\circ$ の傾斜平板に対する実験結果と併せて、傾斜平板上に生じる流動・伝熱現象を包括的に理解するうえで重要な資料となるものと考えられる。

4. 結 言

本研究は、等熱流束条件で加熱された上向き傾斜加熱平板まわりに発生する自然対流の流動、伝熱について実験的検討を加えたものである。試験流体に常温の水を用い、特に平板上端から平板に沿って下降する流れ、いわゆる逆流が生じるような傾斜角の小さな場合を中心に、伝熱、流動機構の詳細を流れや伝熱面表面温度分布の可視化あるいは局所熱伝達率の測定により探った。実験は、平板幅基準の修正レイレー数 Ra_w^* が 8×10^{13} に及ぶ領域で、傾斜角を水平から 20° に至る範囲で変化させ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) 平板上の流れおよび平板表面温度分布を可視化したところ、傾斜角が 15° 以下において平板上端から下降する流れ、いわゆる逆流が生じることがわかった。

(2) この逆流域の広がりや傾斜角によって決定され、平板の大きさや伝熱面熱流束には依存しないことがわかった。

(3) 平板の局所熱伝達率を測定し、そのうち順流

域における実験値を局所ヌッセルト数一修正レーレー数平面上に整理したところ、層流域の局所ヌッセルト数は、平板の傾斜角 θ が 2.5° から 15° の範囲で Chen らの層流解析結果、式(2)と良好に一致することがわかった。一方、乱流域の局所ヌッセルト数は、傾斜角のいかんによらず、ほぼ水平平板の式(7)に一致する結果を得た。

文 献

- (1) 北村健三・木村文義, 機論, **58**-556, B(1992), 3715-3722.
- (2) 木村文義・北村健三, 機論, **60**-570, B(1994), 566-573.
- (3) Kitamura, K. and Kimura, F., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **38**-17(1995), 3149-3159.
- (4) 木村文義・ほか 3 名, 機論, **66**-645, B(2000), 1453-1461.
- (5) Hassan, K. L. and Mohamed, S. A., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **13**(1970), 1873-1886.
- (6) Black, W. Z. and Norris J. K., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **18**(1975), 43-50.
- (7) Al-Arabi, M. and Sakr, B., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **31**-3(1988), 559-566.
- (8) Pera, L. and Gebhart, B., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **16**(1973), 1147-1163.
- (9) Cheng, K. C. and Kim, Y. W., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **110**-3(1988), 608-615.
- (10) Fujii, T. and Imura, H., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **15**(1972), 755-767.
- (11) Chen, T. S., ほか 2 名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **29**-10(1986), 1465-1478.
- (12) Vliet, G. C., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 91(1969), 511-516.