水平上向き加熱平板上に生じる自然対流の流動と伝熱* (プラントル数の影響)

木村文義^{*1}, 上馬泰広^{*2}, 北村健三^{*3}

Heat Transfer and Fluid Flow of Natural Convection over Heated, Horizontal Plates (Effect of Prandtl Numbers)

Fumiyoshi KIMURA^{*4}, Yasuhiro JOBA and Kenzo KITAMURA

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

Natural convective flows over upward-facing horizontal plates were investigated experimentally. The main concerns were focused on the effects of Prandtl numbers on the flow and heat transfer characteristics, in particular, of the laminar and transitional regions. Air and ethylene glycol were utilized as the test fluid and the test plates were heated with uniform heat flux. The flow and temperature fields over the plates were visualized with smoke and liquid crystal sheet to investigate the turbulent transition process. The result showed that three-dimensional separation of main flow becomes a trigger to turbulent transition and that the onset of the separation is described with the modified Rayleigh numbers as $(3-4) \times 10^6$ for both air and ethylene glycol. The local heat transfer coefficients of the plates were also measured and the results were compared with previous results for water. The comparison showed that the coefficients become higher with the Prandtl numbers. Based on these results, empirical heat transfer correlations that account for the Prandtl number effect were proposed.

Key Words: Heat Transfer, Natural Convection, Horizontal Plate, Longitudinal Vortices, Turbulent Transition

1. 緒言

水平な上向き加熱平板上に発生する自然対流は、垂直な加熱平板に沿う自然対流と並んで我々の身近に遭遇する最も代表的な自然対流の一つであり、様々な伝熱機器における加熱、冷却手段として広く利用されている。このため、その伝熱・流動特性を解明すべく、今まで数多くの実験や解析が行われてきた。しかし、上向き加熱平板上の自然対流は熱的に不安定であり、容易に3次元かつ乱れた流れとなるため、伝熱・流動現象の解明は垂直平板まわりの自然対流に比べてかなり遅れているのが実情である。

このことから、著者らは前報^(1,2,3)において、常温の水を試験流体とした可視化および伝熱実験を行い、伝熱面上の流動と伝熱特性の詳細を探った。実験は伝熱面幅 $W = 20 \sim 1500 \text{ mm}$ 、幅基準の修正レイリー数 Ra_w^* ($= g\beta q_w W^4 / \lambda \alpha$) が $10^6 \sim 10^{15}$ に及ぶ非常に広範な領域をカバーしたもので、伝熱面上に生じる乱流遷移現象の詳細や層流、遷移および乱流各領域の領域判定を試みた。また、可視化と同時に遂行した伝熱実

験結果を基に、伝熱面上の流動と局所の伝熱特性との関連を探った。その結果、ある程度以上大きな伝熱面上では、流れが乱流へ遷移していく過程で幾つか特徴的な流動、伝熱現象が観察されることが分かった。図1は、その例を幅 $W = 150 \text{ mm}$ の伝熱面について示したものである。まず、図1(a)は伝熱面上の流れを染料により可視化した結果であるが、伝熱面端部から染料を流出させると、この染料は伝熱面に沿ってわずかな距離流れた後、3次元的にはく離し、その後乱れながら伝熱面中央部に到達してプルームとなって鉛直上方に流れ去っていく様子が分かる。このとき伝熱面の表面温度分布を感温液晶により可視化したのが図1(b)

Fig.1 Visualized flow field and surface temperature for water

* 原稿受付 2001年10月19日。

^{*1} 正員、姫路工業大学工学部(〒671-2201 姫路市書写 2167)。

^{*2} 豊橋技術科学大学大学院(〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)。

^{*3} 正員、豊橋技術科学大学機械システム工学系。

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

に示す結果である。流れがはく離した後の領域に、筋状の低温模様がスパン方向に比較的規則正しいピッチで発生することが分かる。これらの結果や更に大きな伝熱面の可視化結果から、水平平板上の自然対流が乱流に遷移する際には、まず伝熱面に沿う流れが3次元的是く離し、その後発達した乱流へ移行していくことが明らかとなった。

では、なぜこのようなはく離や低温筋状模様が生じるかという問題であるが、これを更に詳しく調べるために、著者らは3次元非定常の運動量および熱エネルギー式を解くことにより、伝熱面上に生じる流動・伝熱の詳細を探った⁴⁾。その結果、伝熱面上には、まず初めに流れ方向に軸をもつ縦渦が発生し、この縦渦の発生に伴って3次元的是く離や低温筋状模様が生じること、ついで、この縦渦が下流に向かって成長し、ついには伝熱面から離脱、崩壊していく過程を経て、流れが乱流へ遷移していくことを明らかにした。また、解析により得られた縦渦の発生開始位置や縦渦のスパン方向ピッチあるいは局所熱伝達率分布等は実験値と良好に一致することを確認した。

ところで、上述した実験および解析はいずれも常温の水を対象としたものであり、プラントル数の異なる他の流体で、これら乱流遷移過程がどのように変化するか、また、どのような条件下で乱流遷移が生じ、その結果平板まわりの伝熱がどのような影響を受けるかといった問題は、工学的に非常に興味有る問題である。この水以外の流体を対象とした研究の現状であるが、実用上重要な空気については水と並んで比較的多くの実験が行われている。しかし、それらの研究のほとんどは伝熱面の平均熱伝達率を測定したもので、伝熱面の局所伝熱特性については、著者らの知る限りわずかに Yousef ら⁵⁾が Mach-Zender 干渉計を用いて正方形平板の局所熱伝達率を測定した例が挙げられるだけである。しかし、M-Z 干渉計で3次元の遷移、乱流場の伝熱特性が正確に計測できるか疑問である。一方、水平平板上の流動に関しては、Pera & Gebhart⁶⁾、Cheng & Kim⁷⁾らが可視化実験を行っている。これらの研究では、等温加熱面上の流れを煙により可視化し、はく離開始位置や、とくに後者でははく離のスパン方向ピッチ等の測定が試みられている。しかし、彼らの主たる関心は乱流遷移条件を探ることにあつたため、伝熱面上の流動と伝熱特性の関連については一切明らかにされていない。一方、水および空気以外の流体に関しては、著者の知る限り今まで全く実験が行われておらず、伝熱面の伝熱特性あるいは流動の詳細については全く不明のままである。

以上の研究の現状を鑑み、本研究では実用上重要な空気 ($Pr \approx 0.72$) と、代表的な高プラントル数流体であるエチレングリコール液 ($Pr \approx 200$) の2種類の流体を対象に、可視化および伝熱実験を遂行することにした。まず、伝熱面上に生じる流動を可視化することにより、各々の流体の乱流遷移過程および乱流遷移条件を探ると共に、これらの結果および前報の水 ($Pr \approx 6$) の結果から、乱流遷移に及ぼす流体のプラントル数の影響を明らかにした。また、可視化と同一の条件下で伝熱実験を遂行し、伝熱面上の流動と局所の伝熱特性の関連を明らかにすると共に、流体のプラントル数の影響を取り込んだ、より一般的な伝熱整理式を提案することにした。本研究の成果は、今後行なわれるであろう数値解析の比較検証用のデータベースとなるだけでなく、様々な伝熱機器の熱設計用基礎資料として有用であると考えられる。

2 実験装置および測定

本研究で用いた空気およびエチレングリコール用の実験装置の概略を図 2(a),(b)にそれぞれ示す。まず空気用の試験伝熱面であるが、厚さ 3mm、幅 $W=1000$ mm、スパン 700mm のアクリル板の片側表面に短冊状に切ったステンレス箔ヒータを全面に亘って貼り付け、60Hz の交流を通電することにより等熱流束条件で加熱した。この伝熱面の裏面には、厚さ 50mm の発泡スチロール製断熱板が接着されており、裏面への熱伝導損失を防止している。後述の局所熱伝達率の測定に当たっては、線径 $100\mu\text{m}$ の K 型熱電対を伝熱面中心線上の箔裏面に所定の間隔でスポット溶接し、伝熱面表面温度の測定に用いた。また、伝熱面の両側面に高さ 250mm の側板を設けることにより、側面からの流れの侵入を防ぎ、伝熱面上の流れが板幅方向になるようにした。以上の伝熱面を、幅 1.8m 奥行き 1.2m 高さ 3m の測定用小部屋内に水平となるよう設置した。この小部屋は気流乱れを極力抑えるために、床面および天井がパンチドメタル板で製作されており、床面から乱れの無い新気を導入すると共に、伝熱面から立ち昇るブルームを天井面からスムーズに排出する構造となっている。

一方、図 2(b)に示すエチレングリコール用の試験伝熱面であるが、装置の基本的な構成は空気のそれと同様である。厚さ 15mm のアクリル板の片側表面に厚さ $30\mu\text{m}$ のステンレス箔ヒータを貼り付け、この箔ヒータ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 2 種類の伝熱面、 W

= 150, 300mm, を製作, 使用した. この伝熱面のスパンは 400mm あり, 両端部に高さ 240mm の側板を取り付けることにより, 伝熱面上の流れの主方向が板幅方向になるようにしている. また, 本実験では $W=300\text{mm}$ の伝熱面の片側端部を高さ 240mm のアクリル板で封鎖した場合についても実験を行った. このように伝熱面の片側端部を封鎖すると, 開放端から流入した周囲流体は封鎖端部まで流れ, これにより $W=600\text{mm}$ の伝熱面に相当する高レイリー数域の流動・伝熱場が伝熱面上に実現されることを狙ったものである. 以上の試験伝熱面をエチレングリコールで満たされた高さ 500mm, 奥行き 500mm および深さ 500mm の試験容器の底面中央部に水平になるよう設置した. 伝熱面の局所熱伝達率を測定するために, 伝熱面中心の箔ヒータの裏面に線径 $100\mu\text{m}$ の K 型熱電対を所定の間隔でスポット溶接した. これら伝熱面の水平度および平坦度は精度 $\pm 0.5^\circ$ の水準器を用いて確認した.

なお, 後述する伝熱面の局所熱伝達率 hx は, 次式により求めた.

$$hx = q_{\text{conv}} / (T_{wx} - T_\infty) \quad \dots\dots (1)$$

ここで, q_{conv} は伝熱面表面からの対流熱流束, T_{wx} および T_∞ はそれぞれ局所壁温および周囲流体温度である. この対流熱流束 q_{conv} であるが, 空気の場合には伝熱面裏面への熱伝導損失 q_{cond} および伝熱面表面からの放射熱損失 q_{rad} が, 対流熱流束 q_{conv} に比し無視できない値となる. そこで, 実験ではアクリル板表裏面の温度差から一次元熱伝導を仮定して q_{cond} を求め, また表面からの放射損失については, 予めステンレス箔の放射率 ε をサーモカメラを利用して求め, 測定された放射率 $\varepsilon=0.16$ と周囲空気温度 T_∞ から放射熱損失 q_{rad} を次式により算出した.

$$q_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon [(T_{wx})^4 - (T_\infty)^4] \quad \dots\dots (2)$$

ここで, σ はステファン・ボルツマン定数である.

そして, 対流熱流束 q_{conv} をヒータの発熱熱流束 q_j から, これらの熱損失を差し引くことにより求めた.

$$q_{\text{conv}} = q_j - q_{\text{rad}} - q_{\text{cond}} \quad \dots\dots (3)$$

なお, 空気の測定結果によれば, 本実験範囲内において q_{rad} および q_{cond} は q_j に対して, それぞれ 17~22% および 13~15% 程度の割合を占めることが分かった. 一方, エチレングリコールの場合には, 裏面への熱伝導損失は q_j に対して 4% 程度の値となった. なお, 本報では, 以下この対流熱流束 q_{conv} を, 従来の慣例に従い伝熱面熱流束 q_w と呼ぶことにする.

本実験では, この伝熱面熱流束 q_w を空気については $70\sim 210\text{W/m}^2$, エチレングリコールについては, $1000\sim 2000\text{W/m}^2$ の範囲で変化させた. このうちエチ

(a) Experimental apparatus for air

(b) Experimental apparatus for ethylene glycol

Fig.2 Experimental apparatus

レングリコールについては, 温度によって物性値が比較的顕著に変化することから, 本実験では伝熱面と周囲流体の温度差が最大でも 15K 程度以下となるよう加熱量の上限を定めた. 以上により実現される伝熱面幅基準の修正レイリー数 Ra_w^* の最大値は, 空気では 10^{12} , エチレングリコールで 3×10^{12} に達した. なお, 後述の無次元数中に含まれる流体の物性値は壁温と周囲流体温度の算術平均である膜温度で評価した.

3. 実験結果および考察

3.1 平板まわりの流れの可視化

まず、空気の場合について平板上の流動を煙により可視化してみた。その代表的な例として伝熱面幅 $W=1000\text{mm}$ 、伝熱面熱流束 $q_w=77.7\text{W/m}^2$ の結果を図3に示す。この図3は伝熱面まわりの流動状況を真上および側方から写真撮影したものである。伝熱面の端部にスリットを設け、ここから煙を膜状に流出させてやると、煙は最初伝熱面表面に沿って流れる。そして、図3(a)から分かるように、煙はフィラメント状に集中し、伝熱面からはく離する。はく離した後の煙は乱れながら伝熱面中央に向かって流れ、伝熱面中央からブルームとなって鉛直上方に流れ去っていく。図4は上と同じ条件において、流れに直角な断面内の流動をスリット光により切断、可視化した結果を示している。図中 x は伝熱面先端からの流れ方向距離を示している。 $x=10\text{mm}$ の断面では煙は伝熱面に付着しながら流れているのに対し、 $x=30\text{mm}$ では煙に波打ちが生じ、 $x=70\text{mm}$ では煙が伝熱面から離脱し、さらに $x=150\text{mm}$ では煙がマッシュルーム状に変形して、ついには $x=200\text{mm}$ の断面では不規則な乱れた渦へと変化していく様子が、これらの図から読み取れる。これら一連の可視化結果は、前報⁴⁾の水の可視化実験で観察された結果とほぼ同じであり、水と同様な過程により伝熱面上の流れが乱流へ遷移することが分かった。

つぎに、エチレングリコールを試験流体とした場合について、伝熱面の表面温度分布を感温液晶により可視化した結果を図5に示す。図5は伝熱面の真上から

Fig.3 Visualized flow field over heated plate (air)

Fig.4 Flow field in the plane normal to the streamwise direction

Fig.5 Visualized surface temperatures of the heated plate (ethylene glycol, $W=150\text{mm}$)

写真撮影したもので、流れは図の上下端部から中央に向かって流れている。カラーの原図と異なり、図5の白黒写真上では色の識別が困難なため、簡単に図の説明をしておく。まず、図5で伝熱面の端部付近に色の黒い部分が水平方向に広がっているのが分かる。この部分は実際には黒または暗赤色で、最も温度が低い部分を示している。そして、伝熱面中央に向かって急激に温度が高く（原図では緑や黄、白黒写真上では白く

見える) なっていき、伝熱面端部からある距離離れた地点から、今度は暗い筋状の低温模様がスパン方向に規則正しいピッチで出現している様子が読み取れる。この低温筋状模様は伝熱面中央に向かって伸び、あるものは縮小、あるものは拡大し、模様が次第に不規則になっていくことが分かる。本実験では伝熱面を等熱流束条件で加熱しているので、上述した伝熱面温度分布のうち黒や暗色の温度の低い部分は熱伝達率の高い部分を、また色の白い緑や青の温度の高い部分は熱伝達率の低い部分を同時に表しており、伝熱面全体に亘る伝熱特性を把握することが可能である。これら一連の温度パターンは、図1に示した水の温度パターンと良く似ており、エチレングリコールでも水と同様な過程を経て伝熱面上の流れが乱流へ遷移していくことが分かる。

3.2 はく離開始位置およびスパン方向ピッチ

さて、前報の水の可視化実験では染料による流れの可視化と、液晶による伝熱面表面温度分布の可視化を同時に行っている。その結果によれば、伝熱面上に低温筋状模様が現れる位置と、伝熱面に沿う流れが伝熱面からはく離する位置がほぼ一致すること、またははく離のピッチと低温筋状模様のピッチは良好に一致することを確認している。このことから本研究では、図3および図5の可視化結果を基に、空気およびエチレングリコールについて、はく離開始位置およびはく離のスパン方向ピッチを測定してみた。なお、可視化観察の結果によれば、これらの位置およびピッチは時間の経過に伴ってゆっくりと変化することを確認している。そこで、測定に当たっては前報⁴⁾と同様、時間平均値でこれらの値を定義することにした。その結果を前報⁴⁾の水の結果と共に、図6、7にそれぞれ示す。

まず、図6は伝熱面先端からはく離開始位置までの距離 S を、横軸に伝熱面熱流束 q_w をとってプロットしたものである。この図から、本実験範囲内においてははく離距離 S は、空気の場合 70~42mm、エチレングリコールの場合 21~16mm、水の場合 18~12mm 程度となり、その値は伝熱面熱流束 q_w の増加につれて次第に小さくなることが分かる。一方、図7は、はく離のスパン方向ピッチ P を横軸に伝熱面熱流束 q_w をとって示したものである。本実験範囲内ではく離のピッチ P は、空気の場合 28~22mm、エチレングリコールの場合 10~8mm、水の場合 8~5mm 程度となり、その値は q_w の増加と共に単調に減少していくことが明らかである。なお、エチレングリコールについては伝熱面の幅を $W=150, 300$ および 300mm の伝熱面の片側端部を封鎖した場合について測定を行って

Fig.6 Onset of separation

Fig.7 Spanwise pitches of separation

Fig.8 Non-dimensionalized separation points

Fig.9 Non-dimensionalized pitches of separation

いる。その結果、はく離開始位置およびピッチはいずれの場合も等しく、水の結果⁴⁾と同様、伝熱面の大きさに依存しないことが分かった。

さて、前報の水の結果に依れば、はく離距離 S およびはく離のピッチ P を代表長さにとった修正レイリー数 $Ra_S^* (= g \beta q_w S^4 / \lambda \alpha \nu)$ 、 $Ra_P^* (= g \beta q_w P^4 / \lambda \alpha \nu)$ で実験値を整理すれば、 Ra_S^* 、 Ra_P^* は伝熱面熱

流束の如何に依らず一定となることが明らかになっている。このことから、本実験で得た空気とエチレングリコールのはく離距離 S およびはく離のピッチ P についても、前報と同様な無次元整理を行ってみた。その結果を図 8 および図 9 に示す。両図とも横軸には流体のプラントル数 Pr をとっている。まず、図 8 から はく離開始レイリー数 Ra_s^* はプラントル数の如何に依らずほぼ一定値、 $Ra_s^* = (3 \sim 4) \times 10^6$ になることが分かる。また図 9 から、はく離のピッチ P を代表長さにとった修正レイリー数 Ra_P^* も、流体のプラントル数に関わらずほぼ $Ra_P^* = (1.5 \sim 2.1) \times 10^5$ の一定値を示すことが明らかである。このうち、とくに前者のはく離開始レイリー数は、層流の上限、言い換えれば乱流遷移開始レイリー数に対応しており、この遷移開始レイリー数が流体のプラントル数に依らずほぼ一定になる結果は、非常に興味ある結果と言える。

3.3 平板の伝熱特性

さて、以上の可視化結果を参考にして、つぎに平板の伝熱特性を空気およびエチレングリコールの場合について調べてみた。その代表的な例として、平板の流れ方向局所熱伝達率 h_x を空気について測定した結果を、図 10 に示す。なお、図の横軸には伝熱面先端からの流れ方向距離 x を取っている。体系が伝熱面中心線に対して左右対称であることから、板端 $x = 0$ から伝熱面中心 $x = W/2$ までのデータを記した。図は熱流束を変化させた場合の局所熱伝達率を示したもので、どの場合も、熱伝達率は伝熱面端部で最も高い値を示し、以後下流に向かって急激に低下していき、極小値をとった後、増加に転じることが分かる。そして、極大値をとった後、伝熱面中央に向かって徐々に低下していく。また、熱伝達率の極小および極大位置は、伝熱面熱流束の増加に伴って伝熱面の端部側へ移動していくことが明らかである。

つぎに、エチレングリコールについて局所熱伝達率を測定した結果を図 11 に示す。図 11(a) は伝熱面の大きさを一定 $W = 300\text{mm}$ にして熱流束を変化させた場合、図 11(b) は熱流束を一定 $q_w = 1500\text{W/m}^2$ にして、伝熱面の大きさを変化させた場合の結果を示している。図(a)から局所熱伝達率は熱流束の増加に伴って伝熱面全体に亘って高くなることが分かる。一方、図 11(b) に依れば、伝熱面の中央付近を除いて、小さな伝熱面の局所熱伝達率は大きな伝熱面の熱伝達率分布に沿って変化することが明らかである。また、エチレングリコールの局所熱伝達率は水や空気と同様に極小、極大値を示すことが分かる。このうち極小値の位置であるが、図 7 に示したはく離開始位置とほぼ一致して

いる。このことから、平板端部からこの極小値までの領域は層流境界層領域に対応しているとみなせる。また、熱伝達率の極大値は、図 5 に示した液晶による可視化結果で、低温筋状模様の頭部の低温となっている地点に対応すること、さらに、この極大値よりも下流側では熱伝達率が徐々に低下しているが、この領域は低温筋状模様が伝熱面中央に向かって次第に不規則になっていく領域に対応していることを確認している。

さて、前報⁹の水の実験では本実験よりも更に大きな $W = 1500\text{mm}$ の伝熱面を用いて、局所熱伝達率の測定を試みている。その結果によれば、伝熱面中央付近のかなり広い範囲に亘って熱伝達率が場所によらず一定となる領域が存在することを明らかにし、この領域を発達した乱流域と定義した。一方、図 10 および図 11 に示した結果では、伝熱面上に熱伝達率が一定

Fig. 10 Local heat transfer coefficients of plate (air)

(a) $W = 300\text{mm}$, $q_w = \text{variable}$

(b) $q_w = 1500\text{W/m}^2$, $W = \text{variable}$

Fig. 11 Local heat transfer coefficients for ethylene glycol

となる領域はほとんど認められない。このことから、本実験程度の大きさの伝熱面では、発達した乱流状態は未だ実現されていないものと考えられる。

以上は特定の伝熱面幅および熱流束条件下の結果を示したものであるが、つぎにこれらの局所熱伝達率の測定結果を基に、局所ヌセルト数 Nux ($= hx \cdot x / \lambda$) を算出し、局所修正レイリー数 Rax^* ($= g \beta q_w x^4 / \lambda \alpha \nu$) を横軸にとって、全ての測定値をプロットし直してみた。その結果を空気およびエチレングリコールについて、それぞれ図 12 および図 13 に示す。これら両図の局所ヌセルト数分布から、本実験値はレイリー数に対する勾配の異なる 3 つの領域に大きく区分可能なことが分かる。空気およびエチレングリコールの局所ヌセルト数に、つぎの関数関係を仮定し、

$$Nux = C Rax^{*n} \quad \dots\dots (4)$$

本実験値に最も良く合う係数 C および指数 n を求めると、以下のような式が得られた。

(空気)

$$\text{領域(I)} : 10^2 < Rax^* < 3 \times 10^6$$

$$Nux = 0.562 Rax^{*16} \quad \dots\dots (5)$$

$$\text{領域(II)} : 3 \times 10^6 < Rax^* < 5 \times 10^7$$

$$Nux = 0.0315 Rax^{*0.35} \quad \dots\dots (6)$$

$$\text{領域(III)} : 5 \times 10^7 < Rax^* < 8 \times 10^{10}$$

$$Nux = 0.54 Rax^{*15} \quad \dots\dots (7)$$

(エチレングリコール)

$$\text{領域(I)} : 10^2 < Rax^* < 3.6 \times 10^6$$

$$Nux = 0.766 Rax^{*16} \quad \dots\dots (8)$$

$$\text{領域(II)} : 3.6 \times 10^6 < Rax^* < 5 \times 10^7$$

$$Nux = 0.0167 Rax^{*0.42} \quad \dots\dots (9)$$

$$\text{領域(III)} : 5 \times 10^7 < Rax^* < 8 \times 10^{10}$$

$$Nux = 0.813 Rax^{*15} \quad \dots\dots (10)$$

なお、これらの式で表される直線および領域を図中に併記した。一方、前報の水を用いた実験では $Rax^* = 10^{14}$ に及ぶ高レイリー数域での測定を行い、その結果、局所ヌセルト数が以下の式で整理できることを明らかにしている。

(水)

$$\text{領域(I)} : 10^2 < Rax^* < 3.5 \times 10^6$$

$$Nux = 0.660 Rax^{*16} \quad \dots\dots (11)$$

$$\text{領域(II)} : 3.5 \times 10^6 < Rax^* < 5 \times 10^7$$

$$Nux = 0.0169 Rax^{*0.41} \quad \dots\dots (12)$$

$$\text{領域(III)} : 5 \times 10^7 < Rax^* < 8 \times 10^{10}$$

$$Nux = 0.70 Rax^{*15} \quad \dots\dots (13)$$

$$\text{領域(IV)} : 8 \times 10^{10} < Rax^* < 10^{14}$$

$$Nux = 0.20 Rax^{*14} \quad \dots\dots (14)$$

これらの領域のうち、領域(I)は伝熱面先端から極小熱伝達率点までの領域に対応しており、式(5),(8)および(11)は層流境界層流域の伝熱相関式を表している。一方、領域(II)および領域(III)はそれぞれ極小熱伝達率点から極大熱伝達率点までの領域、および極大熱伝達率点よりも下流の熱伝達率が徐々に低下していく領域に対応しており、領域(II), (III)での伝熱相関式は遷移域の伝熱特性を表していると考えられる。さらに水についてはレイリー数 Rax^* がおよそ 8×10^{10} を越えたあたりから局所ヌセルト数 Nux が Rax^* の $1/4$ 乗に比例する、すなわち熱伝達率 hx が位置 x に依らず一定となる結果が得られている。前報では、この領域(IV)を発達した乱流域とみなし、式(14)を乱流域の伝熱相関式として提案した。本実験でのレイリー数の最大値は空気で 8×10^{10} 、エチレングリコールで 3×10^{11} 程度であり、上述した水の領域(IV)のレイリー数から判断すると、発達した乱流状態が実現される前後の値に相当していることが分かる。

さて、最後に以上の空気、エチレングリコールおよび水の実験結果を比較のため同一の $Nux - Rax^*$ 平面上に描いた結果を図 14 に示す。この図から、局所ヌセルト数 Nux は、レイリー数 Rax^* が同じならばプラントル数 Pr が高い流体ほど高くなることが分かる。このように水平上向き平板上自然対流の伝熱特性がプラントル数に依存する結果は、本実験により初めて明らかにされた結果であり重要と思われる。このうち、

Fig.12 Local Nusselt numbers for air

Fig.13 Local Nusselt numbers for ethylene glycol

とくに領域(I)の層流境界層領域については、式(5), (8), (11)に記したように局所ヌセルト数がレイリー数の1/6 乗に比例する関係が得られている。そこで、この領域での伝熱相関式を、以下の式(15)で近似し、

$$Nux = C_1 Pr^m Rax^*{}^{1/6} \quad \dots\dots (15)$$

係数 C_1 および指数 m を求めることにより、プラントル数の影響を取り込んだ伝熱整理式を導出してみた。その結果、空気、水およびエチレングリコールの層流領域の局所ヌセルト数は $\pm 5\%$ 程度のバラツキで、以下の式によりまとめられことが分かった。

$$Nux = 0.58 Pr^{0.054} Rax^*{}^{1/6} \quad \dots\dots (16)$$

ただし、上式(16)の適応範囲は、 $0.7 < Pr < 200$, $10^2 < Rax^* < 3 \times 10^6$ である。

これと同様な伝熱相関式は遷移域(III)についても導出可能であるが、この領域はレイリー数範囲が相対的に狭く、導出に際して誤差が避けられないことから取り止めた。また、図 14 の結果を見ると、乱流域の伝熱に対しても流体のプラントル数が影響していることが予想されるが、本実験で取り扱った空気やエチレングリコールの最大レイリー数は完全に発達した乱流が実現されるレイリー数よりも低く、現状では定かでない。これを明らかにするには更に大きな伝熱面を用いた実験が必要であり、本研究の今後の課題としたい。

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上に生じる自然対流の流動と伝熱について実験的検討を加えたものである。とくに、従来の研究では不明であった伝熱面上の流動および伝熱に及ぼすプラントル数の影響を探った。このためにプラントル数の異なる空気 ($Pr \approx 0.7$) およびエチレングリコール ($Pr \approx 200$) の2種類を試験流体に用いて、伝熱面上の流れと表面温度分布の可視化および伝熱実験を試みた。実験は、伝熱面上に層流境界層流れと遷移流が実現される伝熱面幅基準の修正レイリー数が $Ra_w^* < 10^{12}$ の高レイリー数域を対象とした。これらの実験により、以下のような結果が得られた。

(I)伝熱面上の流れおよび伝熱面表面温度分布を可視化したところ、空気およびエチレングリコール共に、伝熱面上の流れは以下の過程を経て乱流に遷移していくことが分かった。(i)伝熱面の端部付近にまず層流境界層流れが生じる。(ii)この境界層流は伝熱面端からある距離 S 離れた地点で比較的規則正しいピッチ P で3次元的にはく離する。これに伴って伝熱面表面上に低温筋状模様が発生する。(iii)はく離した流れは下

Fig. 14 Comparison of local Nusselt numbers

流に向かうにつれて次第に乱れ始め、発達した乱流へと移行していく。

(2)これら空気およびエチレングリコールの可視化結果は、水の可視化実験で観察されたのと同様であり、流体のプラントル数の如何によらず、ほぼ同様な過程を経て乱流遷移が生じることが明らかとなった。

(3) 上述した境界層流のはく離開始位置 S およびはく離のスパン方向ピッチ P を測定し、 S および P を代表長さとする修正レイリー数で整理したところ、流体のプラントル数の如何に依らず、 $Ra_s^* = (3 \sim 4) \times 10^6$ および $Ra_P^* = (1.5 \sim 2.1) \times 10^5$ のほぼ一定値に収まることが分かった。

(4) 伝熱面の流れ方向局所熱伝達率を測定し、局所ヌセルト数 Nux - 局所修正レイリー数 Rax^* 平面上に実験値を整理したところ、 Nux は Rax^* が同じならばプラントル数 Pr が高い流体ほど高くなることを明らかにした。また、これらの結果を基に、プラントル数の影響を取り込んだ伝熱相関式を提案した。

文 献

- (1) 北村・木村, 機論, 58-556, B(1992), 3175-3722.
- (2) 木村・北村, 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) 北村・ほか2名, 機論, 65-640, B(1999), 4033-4040.
- (5) Yousef, W. W., ほか2名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 104 (1982), 493-500.
- (6) Pera, L. and Gebhart, B., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 16 (1973), 1147-1163.
- (7) Cheng, K. C. and Kim, Y. W., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 110 (1988), 608-615.