有限な水平上向き加熱平板上に発生する
自然対流の流動および熱伝達*北村 健三^{*1}, 木村 文義^{*2}Heat Transfer and Fluid Flow of Natural Convection
over Horizontal, Heated Plate

Kenzo KITAMURA and Fumiyoshi KIMURA

Experimental investigations have been carried out on a natural convection over an horizontal, heated plate facing upward. The plate was heated with a uniform heat flux and was placed in a large water tank. The flow over the plate and the temperature distribution of the test plate were visualized with dye and liquid crystal thermometry, respectively. The local heat transfer coefficients were also measured in the direction from the edge to the center of the plate in the range of the local, modified Rayleigh numbers from 10^2 to 10^{11} . The results revealed that the transitional region appear in between the laminar boundary layer region near the plate edge and the irregular, disturbed flow region near the central part of the plate. The result of the local heat transfer coefficients also confirmed the existence of the above transitional region.

Key Words: Heat Transfer, Natural Convection, Horizontal Plate, Visualization, Laminar Boundary Layer, Flow Separation

1. 緒 言

有限な大きさの加熱平板を十分な広がりをもった流体中に水平上向きに静置すると、板のまわりには自然対流が発生する。このような自然対流は、垂直な加熱平板に沿う自然対流と並んで、我々が身近に遭遇する最も代表的な自然対流の一つであり、その伝熱・流動の解明は工学的にも、また工業的にも重要である。

ところで、水平加熱面上の自然対流は熱的に不安定であり、実用のレイリー数範囲では容易に三次元かつ複雑な流れとなるため、解析的な取扱いは極めて困難である。このため、従来の研究はもっぱら実験によって伝熱・流動を解明することに主眼を置いている。このような実験的研究のうち、代表的なものを抜き出すと表1のようになる。表1には、試験流体、伝熱面の大きさ、伝熱面のまわりに延長板(カラー)や側方からの流体の流入を防ぐ板(フェンス)が設置されているか否か、実験範囲、測定項目と測定法、あるいは板の熱伝達率の測定結果などを詳しく記している。なお、これらの実験は、いずれも等温伝熱面を用いたものであ

る。

まず表1から、初期の研究の関心は伝熱面の平均熱伝達率に向けられていたことがわかる。そして、熱伝達率の測定結果を大きく層流と乱流とに分類し、それぞれについて整理式を導出している。しかし、このような平均熱伝達率の測定だけでは、実用的な意義はともかく、伝熱面上の伝熱・流動に対する本質的な理解は得られないことは明白である。

これに対し、石黒ら⁽⁶⁾の実験以降ようやく伝熱面の局所伝熱特性や、伝熱面上の流動に注目した研究が行われるようになってきた。しかし、石黒らおよびYousefら⁽⁷⁾の実験結果から、たとえば伝熱面上の流動・伝熱機構について具体的なイメージを描くのは困難であるし、流動と局所の伝熱特性との対応関係についても必ずしも明確にされたとは言えない。

以上のことから本研究では、有限な加熱平板上に発生する自然対流の流動および伝熱機構の詳細を、まず染料による流れの可視化と感温液晶による伝熱面温度分布(局所熱伝達率分布)の可視化を通じて把握することにした。また、これら可視化結果を参考にして、局所熱伝達率の定量的測定を行い、伝熱面上の流動と局所伝熱特性の対応関係を探ることにした。

* 原稿受付 平成4年7月16日。

^{*1} 正員、豊橋技術科学大学工学部 (〒441 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)。

^{*2} 学生員、豊橋技術科学大学大学院。

表 1 水平加熱平板上自然対流に関する従来の研究

Reference	Fluid	Test Plate Dimensions $W \times L$ in cm	Collar Fence	Range of Ra No.	Measurements (Technique)	Correlation for Average Heat Transfer
Fishenden and Saunders (1) (1950)	Air	max. 60 x 60 (square)	none	$10^5 < Ra < 3 \times 10^{10}$	Ave. Heat Transf. (?)	laminar: $10^5 < Ra < 2 \times 10^7$ $Nu = 0.54 Ra^{1/4}$ turbulent: $2 \times 10^7 < Ra < 3 \times 10^{10}$ $Nu = 0.14 Ra^{1/3}$
Hassan and Mohamed (2) (1970)	Air	20 x 50.4	none	$1.1 \times 10^3 < Gr < 3 \times 10^4$	Ave. H.T. (Heat flux meter)	$Nu = 0.12 Gr^{1/3}$
Fujii and Imura (3) (1970)	Water	5 x 10 30 x 15	fence	$7 \times 10^4 < Ra < 2 \times 10^6$ $5 \times 10^4 < Ra < 6 \times 10^{10}$	Ave. H.T. (Thermocouples)	$Nu = 0.16 Ra^{1/3}$ $Nu = 0.13 Ra^{1/3}$
Goldstein et al. (4) (1973)	Air	$W = 2.03 - 5.84$ Aspect Ratio = 7	none	$2.8 \times 10^2 < Ra < 9 \times 10^3$	Ave. Mass Transf. (Naphthalene sublimation)	$Sh = 0.59 Ra^{1/4}$ ($Sc = 2.5$)
Al-Arabi and El-Riedy (5) (1976)	Air	15 x (25-60)	none	$2 \times 10^5 < Ra < 10^9$	Ave. H.T. (Amount of condensate)	laminar: $2 \times 10^5 < Ra < 4 \times 10^7$ $Nu = 0.70 Ra^{1/4}$ turbulent: $4 \times 10^7 < Ra < 10^9$ $Nu = 0.155 Ra^{1/3}$
Ishiguro, Abe and Nagase (6) (1977)	Water	0.76 x 8 2.8 x 13 20.5 x 17	collar collar collar+fence	$3 \times 10^5 < Ra < 10^{10}$	Ave. H.T. Local H.T. Visualization	$3 \times 10^5 < Ra < 10^{10}$ $Nu = 0.20 Ra^{1/3}$
Yousef, Tarasuk and McKeen (7) (1982)	Air	10 x 10 20 x 20 40 x 40	collar collar collar	$1.9 \times 10^4 < Ra < 1.7 \times 10^6$	Ave. H.T. Loc. H.T. Fluid Temp. (Mach-Zehnder)	laminar: $3 \times 10^4 < Ra < 4 \times 10^7$ $Nu = 0.622 Ra^{1/4}$ turbulent: $4 \times 10^7 < Ra < 1.7 \times 10^6$ $Nu = 0.162 Ra^{1/3}$

** local-average

2. 実験装置および測定法

本研究で用いた実験装置を図1に示す。装置は、伝熱面と架台から成り立っている。本実験では、感温液晶によって局所熱伝達率分布が可視化できること、および局所熱伝達率の測定が等温伝熱面に比較して容易に行えることなどの理由から、伝熱面を等熱流束条件で加熱することにした。そこで、厚さ 30 μm のステンレスはくヒータを、厚さ 15 mm のアクリル板表面に接着したもの伝熱面として使用した。このヒータを交流により通電加熱する。

また、板まわりの修正レイリー数 $Ra^*(=g\beta q_w W^4 / \alpha \nu x)$ を広い範囲にわたって変化させるため、板幅 W の異なる6種類の伝熱面 $W=20, 30, 50, 100, 150, 250$ mm を試作し、実験に用いた。

本実験のようにく形の伝熱面を用いた場合、伝熱面の四周から板の中心部に向かう自然対流が発生する。したがって、対象とする自然対流の体系をなるべく単純とするには、伝熱面のアスペクト比(長さ L /幅 W)を高くとり、体系の二次元性を確保することが重要となる。このことから、本実験で用いる伝熱面のアスペクト比はいずれも3とし、後述の可視化や測定は伝熱面の長さ方向中央部付近についてのみ行った。

伝熱面表面温度 T_w は、径 70 μm の C-A 熱電対を伝熱面の長さ方向中心線上のはく裏面にスポット溶接し、測定した。周囲流体温度 T_∞ も同一の径および素材の熱電対を用いて測定した。測定点は伝熱面と同一水平面上で、伝熱面端より 50 mm 離れた位置にある。なお、周囲流体温度は伝熱面直上および水面付近を除いて一様であることを確認している。伝熱面表面熱流

図 1 実験装置

束 q_w を算出するために、ヒータから伝熱面裏面へ漏えいする熱量をあらかじめ見積もることにした。その結果、ヒータ表面と伝熱面裏面の温度の実測値をもとに、アクリル板中の熱伝導を一次元と仮定して漏えい熱量を算出したところ、最大でもヒータ発熱量の4%以下であることがわかった。このことから、裏面へ漏えいする熱量を無視し、ヒータ発熱量から表面熱流束 q_w を算出することにした。

試験流体としては、可視化、測定の容易さなどから常温の水を使用した。この水は 750 mm 立方、容量 420 l のアクリル製タンクの9割程度の高さまで蓄えられている。前述の伝熱面を架台に取付け、このタンク底面の中央に設置した。このとき、伝熱面が水平となるよう架台の四隅に取付けたねじで微調整した。

後述する熱伝達率 h の測定に当たっては、流体の物性値変化の影響を極力排除するために、伝熱面温度と周囲流体温度との差 $\Delta T (=T_w - T_\infty)$ を通常 5 K、最大でも 10 K 以下となるよう加熱量を調節した。このため、板まわりのレイリー数は、主に伝熱面の大きさを変化させることで変化した。以上の実験装置で実

現し得た板幅基準の修正レイリー数 Ra^* は、 $10^6 < Ra^* < 10^{12}$ であった。

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、水平加熱面上に発生する自然対流の伝熱・流動の詳細を把握するために、感温液晶シートを伝熱面にはり付け、伝熱面表面温度分布の可視化を行った。その代表的な結果を実験条件とともに図2に示す。図2は、伝熱面を上方から写真撮影したもので、板幅 W を6種類変化させている。なお、これら写真では伝熱面の長さ方向に何本か平行な線が入っているが、これは液晶シートの裏面にあるヒータを分割した線であることを断っておく。また、図2(a)～(e)では、伝熱面の短辺近傍の温度パターンが、その他の部分と異なっているが、これは前述したように短辺からも流体が流入するため生じたものである。この可視化結果から逆に、本伝熱面の長さ（スパン）方向のかなり広い範囲にわたって二次元的な場が実現できていることがわかる。

さて、これら写真の原図はカラーであり、本論文のモノクロ写真上では色が区別できない。このため図2(a)の $W=20$ mm の場合を例にとり説明する。まず、図2(a)の伝熱面長辺側の端部の色は暗赤色（白黒写真では黒く見える）で、最も温度が低く、伝熱面中心へ向かうにつれて、順次色が茶、黄色（白黒写真では白く見える）そして、緑、青色（白黒写真では暗く見える）と変化し、単調に温度が高くなっていく。本実験では

伝熱面は等熱流束条件で加熱しているから、温度の低い部分は熱伝達率の高い、逆に温度の高い部分は熱伝達率の低い領域に対応している。したがって、この場合局所熱伝達率は板の端部で最も高く、板中央に向かって単調に低下することが明らかである。

つぎに $W=30$ mm になると、 $W=20$ mm の場合と同様に伝熱面温度は板端部で最も低く、伝熱面中央へ行くにつれて次第に高くなるが、伝熱面の中央部に低温のはん点状の模様が生じ始めている。このはん点状の模様は、比較的規則正しい周期（およそ3～5 s）で、発生・消滅を繰返しており、このはん点の成因が乱流遷移に基づくものでないことは明らかである。 $W=50$ mm になると、このはん点はさらに明りょうとなり、伝熱面上に定在しはじめる。さらに板幅の大きな $W=100$ mm では、この低温部は伝熱面中心線付近にまで達する細長いすじ状となり、しかも伝熱面のスパン方向に規則正しいピッチで配列するようになる。さらに板幅を大きくした $W=150$ mm では、伝熱面中心部近

表2 図2の実験条件

Fig.	W (mm)	Ra^*
(a)	20	8.2×10^6
(b)	30	3.1×10^7
(c)	50	5.5×10^8
(d)	100	5.9×10^9
(e)	150	3.9×10^{10}
(f)	250	3.1×10^{11}

図2 伝熱面温度分布の可視化

くにすじ模様とは異なるはん点状の低温模様が生じはじめている。このはん点状模様は、時間的、空間的に不規則に発生・消滅を繰り返している。また、 $W=250$ mm では、このはん点状模様の領域はさらに拡大し、個々の不規則模様のスケールも大きくなっている。

3・2 伝熱面上の流れの可視化 以上の温度分布(局所熱伝達率)の可視化結果から、伝熱面のかなり広い領域を低温のすじ状模様が占めることがわかった。なお、このようなすじ状模様は、古く文献をたどれば Husar-Sparrow ら⁽⁸⁾の電解法による流れの可視化結果にも現れている。しかし、彼らはこのすじについては何も言及していない。そこで、このようなすじ状模様がなぜ生じるか、流れの可視化により調べてみた。その結果の一例を、 $W=150$ mm の場合について図3に示す。この写真は、スリット状の染料注入口を、伝熱面の端部に伝熱面と同一水平面となるよう設置し、染料を極めてゆっくりと流出させたときの可視化結果を示したものである。図3(a)から明らかなように、スリットから出た染料は、伝熱面に沿って板の中心方向にしばらく流れたあと、板よりはく離している。このはく離の様子を真上より可視化したのが図3(b)である。染料が三次元的にはく離するとともに、非常に規則正しいピッチで染料の集中が生じていることがわかる。また、このとき、図3(c)に示したように伝熱面の少し上方から染料を流出させると、この染料は、前述の伝熱面に沿う染料がはく離した間げきを縫って、伝熱面近傍へ侵入している様子が観察できる。そして、この染料もしばらく伝熱面に沿って流れた後、はく離している。

なお、これらの流れの可視化によって、伝熱面端部から流入する自然対流は、伝熱面に対して水平に流入することを確認している。このため板上の流れに対して伝熱面の板厚は影響しないものと考えている。

つぎに、これら染料による流れの可視化と伝熱面温度分布の可視化結果を対比したところ、(1)伝熱面端部から流入した流体が伝熱面に沿って流れ、次第に高温となつてはく離に至るまでの領域が、二次元的な温度分布が生じる領域に、また、(2)伝熱面上方の低温流体が、この高温流体のはく離に入れ代わって伝熱面上に侵入する領域が、低温すじ状模様の領域に、それぞれ対応していることが明らかとなった。これらの結果に基づいて、伝熱面上の流動・伝熱を模式的に描いたのが図4である。

さて、この図4に示された流動・伝熱現象のうち、板端部から流入してきた流体がいったいいかなる条件ではく離するか、あるいは、この流体がはく離した後に規則正しいピッチで低温すじ状模様が並ぶがこのピッチにどのような規則性があるか、といった問題は興味がもたれる問題である。そこで、上述の可視化を伝熱面の大きさと熱流束を種々変化させた場合について行い、図4中に示したはく離距離 s および低温すじのスパン方向平均間隔 λ を測定し、無次元整理してみた。

その結果、はく離は板端部からの距離 s を代表長さにとった修正レイリー数 $Ra_s^* (= g\beta q_w s^4 / \alpha \nu x)$ が、ほぼ 2.0×10^6 になると生じること。また、低温すじもスパン間隔 λ を代表長さにとった修正レイリー数 $Ra_\lambda^* (= g\beta q_w \lambda^4 / \alpha \nu x)$ が一定 ($= 1.5 \times 10^5$) となるように配列することが明らかとなった。

以上の可視化結果は、従来の研究者が描いてきた水平平板上自然対流のイメージと異なるように思える。つまり、従来の研究者は、板端部より層流境界層が発達し、この境界層が板からはく離した後の領域では乱流状態が実現されると一般的に理解していた。これに対して本結果は、そのような層流境界層域と乱流域の中間に、定定的かつ規則的なすじ状模様で代表される、いわゆる遷移域とも呼ぶべき領域が現れ、しか

図3 流れの可視化

図4 伝熱面上の流動と熱伝達

もこの領域が伝熱面のかかなりの面積を占めていることを明らかにしている点で重要である。

3・3 局所熱伝達率分布 さて、以上の可視化結果を参考にして、つぎに伝熱面の端から中心に至る方向（以下これを x 方向と呼ぶ）の局所熱伝達率 $h_x [= q_w / (T_{wx} - T_\infty)]$ を定量的に測定してみた。このとき、すじ状模様が生じている領域での局所熱伝達率をどのように求めるかが問題となる。すなわち、この領域では、局所熱伝達率が x 方向だけでなく、伝熱面のスパン方向 (z 方向) にも大きく変化し、しかもこの変化する幅 λ が 5~10 mm 程度と非常に小さいため計測が著しく困難である。そこで、本研究では実験結果の実用性をも考慮して、この領域における局所熱伝達率 h_x を伝熱面のスパン方向に平均した値で定義することにした。この平均値の求め方であるが、伝熱面温度の可視化結果から、このすじ状模様は実験を繰返すごとにスパン方向の位置が変化することを確認している。この事実を利用して、(1) まずヒータに通電加熱して定常状態になるまで待ち、伝熱面のスパン方向中心線上に取付けた熱電対で表面温度を測定する、(2) この測定の後いったんヒータを切り、再度実験を行う、という操作を何度も繰返し、その結果得られた表面温度の平均値 T_{wxm} から局所熱伝達率 h_x を計算することにした。本実験では、この平均値を、20~30 回の測定（熱電対は伝熱面の両側に設置しているので測定値としては 40~60 点得られる）を繰返すことにより求めた。なお、この測定値が正規分布に従うと仮定すれば、上記データ数 N で、真の平均値 T_{wxr} に対し、測定された平均値 T_{wxm} が $\pm 3\%$ の範囲内に 95% の確度で納まることを確認している。

さて、以上の実験により得られた局所熱伝達率分布の一例として、伝熱面熱流束 $q_w = 3000 \text{ W/m}^2$ の場合を図 5 に示す。板端から板中心に向かう距離 x を図 5 の横軸にとっている。また縦軸の局所熱伝達率のうち、とくにすじ状模様領域については平均値のほか、測定された熱伝達率の最大・最小値を併せて記した。まず図 5 から、板幅が十分広い場合には、局所熱伝達率は板端で最も高くなり、 x の増加とともに急激に低下していき、 $x = 10 \text{ mm}$ 前後で極小値をとった後、増加に転じることが明らかである。そして、その後 $x = 20 \text{ mm}$ 付近で極大値を取り、板中心に向かって徐々にではあるが低下していく。一方、板幅が狭い場合には、板幅の広い場合について得られた分布曲線にほぼ沿って熱伝達率が変化していくことがわかる。

これらの局所熱伝達率の測定結果と、前述の伝熱面温度分布や流れの可視化結果を対比したところ、(1)

板の端部付近で熱伝達率が急激に低下する領域は、板端部から流入した流体が伝熱面に沿って流れる領域に、(2) 局所熱伝達率の極小点は、(1) の流体が伝熱面からはく離する直前の位置に、(3) 熱伝達率の極小点から極大点に至る領域は、伝熱面上方にある低温流体が、はく離した高温流体の間を縫って伝熱面近傍に到達し始める領域に、(4) 熱伝達率の極大点は、図 2 で低温すじ状模様がスパン方向に最も拡大したすじの先端部分に、また、(5) 局所熱伝達率の極大値以降の領域は、低温すじの尾部および不規則かつ非定常はん点状模様の領域に、それぞれ対応することがわかった。

ところで、このような局所熱伝達率に関しては、石黒ら⁽⁶⁾ および Yousef ら⁽⁷⁾ が等温伝熱面について測定を行っている。このうち前者の実験は、伝熱面のまわりに延長板を設置した場合を対象としたものであるが、その結果によると本来最も高くなるべき伝熱面端部の熱伝達率が逆に最も低くなっている。これは、このような体系では伝熱面から延長板への熱伝導損失が避けられず、流体が伝熱面に流入する以前に延長板によって暖められてしまったことが原因として考えられる。また、後者は正方形伝熱面を対象としたものであるが、このような体系で彼らのように Mach-Zender 干渉計を用いて熱伝達率を測定することには問題がある。つまり、干渉計では光路平均の熱伝達率が得られるが、伝熱面が正方形の場合には側方からも流体が流入しており、測定された熱伝達率には当然この部分の熱伝達が強く影響しているはずである。以上のこともあって、伝熱面の局所熱伝達率に極小・極大値が現れることを、これら従来の実験では報告していない。

また本実験では、極大点以降の板の中心部においても、熱伝達率が x の増加とともに低下していくことを見いだした。これは図 2 の温度分布の可視化結果にお

図 5 局所熱伝達率の分布

いて低温すじ状模様が板中央にいくにしたがって次第に不鮮明となる結果からも裏付けられるが、この事実は板端部から流入した流れが、なお板中心部の熱伝達に影響を及ぼしていることを意味しており重要である。なお本研究では、非定常でかつ不規則なはん点状模様が生じる板中央の領域については、熱伝達率を測定しただけで伝熱・流動の詳細を明らかにしたとは言い難い。このため、この領域については、今後さらに板幅を広くした場合をも含めて詳しい検討を加える予定である。

さて、以上の局所熱伝達率の測定結果を、局所ヌッセルト数 Nu_x -局所修正レイリー数 Ra_x^* 平面上に描き直してみたのが図6である。これら無次元パラメータによる整理に際しては、物性値を局所の膜温度 $T_{fx}[(T_{wxm} + T_\infty)/2]$ で評価している。なお、本実験では物性値変化の影響を極力排除するために、伝熱面と周囲流体との温度差を小さく抑えている。このため、局所膜温度以外で物性値を評価した場合についても実験値を整理しているが、その結果は上記温度で整理した場合に比べ数%変化するだけであり、実質的には実験誤差の範囲内に納まってしまふことを注記しておく。

さて、図6に示した実験結果から、局所ヌッセルト数 $Nu_x(=h_x \cdot x/x)$ の修正レイリー数 $Ra_x^*(=g\beta q_w x^4/\alpha\nu x)$ に対するこう配が異なる三つの領域が存在することがわかる。それぞれの領域について、つぎの関数関係を仮定し、

$$Nu_x = C Ra_x^{*n} \dots \dots \dots (1)$$

係数 C および指数 n を図6より求めると、以下のようになった。

領域(I) $10^2 < Ra_x^* < 10^6$

$$Nu_x = 0.66 Ra_x^{*1/6} \dots \dots \dots (2\cdot a)$$

領域(II) $10^6 < Ra_x^* < 5 \times 10^7$

$$Nu_x = 0.066 Ra_x^{*1/3} \dots \dots \dots (2\cdot b)$$

領域(III) $5 \times 10^7 < Ra_x^* < 10^{11}$

$$Nu_x = 0.70 Ra_x^{*1/5} \dots \dots \dots (2\cdot c)$$

このうち、領域(I)については、前述のはく離点 ($Ra_x^* = 2 \times 10^6$) よりも板端部寄りの、いわゆる層流境界層領域に対応している。この境界層領域について、Pera-Gebhart⁽⁹⁾ は摂動法により局所ヌッセルト数の解析解を得ている。彼らの結果を、 $Pr=7$ および $Gr_x^* = Gr_x \cdot Nu_x$ として換算すると、つぎのように表せる。

$$Nu_x = 0.607 Ra_x^{*1/6} \dots \dots \dots (3)$$

本実験で得られた局所ヌッセルト数の整理式(2・a)は、式(3)と比較的良好一致していることがわかる。

一方、領域(II)は、図5に示した局所熱伝達率の分布でいうと、熱伝達率の極小値から極大値の間に、また領域(III)は、熱伝達率の極大値から板中心までの部分にそれぞれ対応している。このうち、領域(III)については、式(2・c)に示したように Ra_x^* の指数 n は $1/5$ であり、熱伝達率が板上の位置 x に無関係な $n=1/4$ とならないことが注目される。これは、図5において局所熱伝達率が板中心に向かって減少するためである。なお、さらに板幅が広がった場合には、板中央部の熱伝達率は板の大きさの影響を受けなくなるはずであり、このしきい値が、どのような値となるか興味もたれるところである。この問題については、今後の実験より明らかにする予定である。

3・4 板まわりの平均熱伝達率

さて、3・3節に示した局所熱伝達率の整理式を積分すれば、板まわりの平均熱伝達率 h_m が算出できる。その結果を、板幅 W を代表長さにとった平均ヌッセルト数 $Nu(=h_m W/x)$ と修正レイリー数 $Ra^*(=g\beta q_w W^4/\alpha\nu a)$ を用いて表すと、つぎのようになる。

領域(I) $1.6 \times 10^3 < Ra^* < 1.6 \times 10^7$

$$Nu = 1.25 Ra^{*1/6} \dots \dots \dots (4\cdot a)$$

図6 局所ヌッセルト数と局所修正レイリー数の関係

図 7 伝熱面の平均ヌッセルト数

領域(II) $1.6 \times 10^7 < Ra^* < 8 \times 10^8$

$$Nu = 0.04 Ra^{*1/3} + 9.7 \dots \dots \dots (4 \cdot b)$$

領域(III) $8 \times 10^8 < Ra^* < 1.6 \times 10^{12}$

$$Nu = Ra^{*1/5} - 13.5 \dots \dots \dots (4 \cdot c)$$

これらの整理式と、局所熱伝達率の測定値から板まわりの平均ヌッセルト数を算出した結果を示すと図7のようになる。当然ではあるが、両者は良く一致する。また、等温伝熱面に対する従来の実験式を、 $Ra^* = Nu \cdot Ra$ の関係を用いて等熱流束壁条件に変換し、図7に併記した。図7から本実験値は従来の実験値の最大と最小値の範囲内にほぼ位置することがわかる。

4. 結 言

本研究は、有限幅の水平上向き加熱面上に生じる自然対流の流動・熱伝達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・伝熱機構の詳細を、染料による流れの可視化および感温液晶による伝熱面温度分布の可視化によって明らかにした。また、局所熱伝達率の測定を行い、伝熱面上の流動と局所伝熱特性との対応関係を探った。実験は、等熱流束加熱伝熱面を対象とし、試験流体として水を用いた。板幅 W 基準の修正レイリー数 Ra^* が、 $10^6 < Ra^* < 10^{12}$ 、また、板端からの距離 x を基準とした局所修正レイリー数 Ra_x^* が、 $10^2 < Ra_x^* < 10^{11}$ の範囲で実験を行った。これらの実験により得られた主な結果を記すと、以下のとおりである。

まず、伝熱面温度分布の可視化から、とくに板幅が十分広い場合には、

(1) 伝熱面上には板の端から板の中央に向かうにつれて順に、(i)二次元温度分布、(ii)定在的かつ規則的な低温すじ状模様、および(iii)不規則かつ非定常

な低温はん点状模様の三つの典型的な温度模様が出現すること、が明らかになった。

また、染料による流れの可視化結果から、

(2) 伝熱面上には、(iv)板端部から低温の周囲流体が流入し、伝熱面に沿って流れたあと、(v)板から三次元的にはく離する、(vi)このはく離の間げきを縫って伝熱面上にある低温流体が、伝熱面に向かって侵入する、そして、(vii)この低温流体がはく離した後に、不規則かつ乱れた流れが発生する、ことが明らかになった。

また、温度分布および流れの可視化結果より、

(3) 上記(iv)の領域が(i)に、(vi)の領域が(ii)に、また(vii)の領域が(iii)に、それぞれ対応することがわかった。

これらの可視化結果を参考にして、つぎに伝熱面の端部から中心部に至る方向(x 方向)の局所熱伝達率を測定した。その結果、板幅が十分広い場合には、

(4) 局所熱伝達率分布に極小値と極大値が現れること、また、この極大点以降の板中心部においても熱伝達率は x の増加とともに引き続き低下することを明らかにした。さらに、これら極小値および極大値の成因について、前述の可視化結果をもとに考察した。

最後に、これらの局所熱伝達率の測定結果から、

(5) 局所ヌッセルト数の整理式と、それを積分した伝熱面まわりの平均ヌッセルト数の整理式を導出した。

本研究の遂行に際して、文部省科学研究費の助成(No. 04650185)を受けた。ここに謝意を表する。

文 献

- (1) Fishenden, M. and Saunders, O. A., *An Introduction to*

- Heat Transfer*, (1957), 89, Clarendon Press.
- (2) Hassan, K. E. and Mohamed, S. A., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **13** (1970), 1873.
- (3) Fujii, T. and Imura, H., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **15** (1972), 755.
- (4) Goldstein, R. J., ほか 2 名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **16** (1973), 1025.
- (5) Al-Arabi, M. and El-Riedy, M. K., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **19** (1976), 1399.
- (6) 石黒・ほか 2 名, 機論, **43**-366 (1977), 638.
- (7) Yousef, W. W., ほか 2 名, *Trans ASME, J. Heat Transf.*, **104** (1982), 493.
- (8) Husar, R. B. and Sparrow, E. M., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **11** (1968), 1206.
- (9) Pera, L. and Gebhart, B., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **16** (1973), 1131.
-