

加熱平板上に生じる自然対流の
流動および熱伝達

1995年1月

博士(工学)

木村文義

豊橋技術科学大学

加熱平板上に生じる自然対流の 流動および熱伝達

1995年1月

博士（工学）

木村 文義

豊橋技術科学大学

論文要旨

加熱平板上に発生する自然対流は、数有る自然対流の中でも最も我々の身近に遭遇する流れであり、その伝熱・流動に関する知識は工学や工業分野のみならず、気象学や地球物理学に至る広い分野で必要とされている。このため、古くより数多くの研究が行われているが、その大部分は実験によって伝熱面の平均熱伝達率を求めたものや、伝熱面のごく端部に現われる層流境界層流を解析的に解いたに過ぎず、伝熱面全体にわたる流動状況の詳細、あるいはこれらの流動により伝熱面の局所伝熱特性がどのように変化するかといった、基本的な問題が依然として不明のまま残されている。これらの実情を考慮し、本研究では主に水平および水平からわずかに傾斜した上向き加熱平板上の自然対流の流動・伝熱機構を実験的に解明することにした。

まず、比較的小さな有限幅の水平加熱平板上に生じる自然対流について実験的検討を行った。とくに、従来不明であった伝熱面上の流動と局所伝熱特性との関連を、伝熱面表面温度および流れの可視化と局所熱伝達率の測定により探った。その結果、(1)伝熱面の流入端ごく近傍に層流境界層流が形成されること、(2)この境界層流は三次元的にはく離すること、(3)このはく離後の領域では、遷移流と呼ぶべき、準定常かつ三次元的な流れが発生することなどの事実が明らかにされた。

つぎに、従来全く検討が行われていない、高レイリー数域における水平加熱平板上自然対流の流動・伝熱を実験により解明した。上記と同様な可視化および局所熱伝達率の測定を非常に大きな伝熱面について行った結果、(4)遷移域が伝熱面全表面に対してかなり広い領域を占めること、(5)この遷移域の後方に、乱流域および衝突流域と呼ぶべき二つの領域が発生すること、また、(6)本実験で用いたような非常に大きい伝熱面であっても、伝熱面上には伝熱面端部から中央に向かう、自然対流の主流とも呼ぶべき流れが存在することなどが明らかとなった。さらに、(7)上述の各領域のしきい値を明らかにするとともに、それぞれの領域に対する局所熱伝達率の整理式を提示した。

また、水平からわずかに傾斜した加熱平板上の自然対流の流動・伝熱についても実験的に検討した。その結果、(8)伝熱面上には伝熱面下端側から流入し伝熱面に沿って上昇する流れの他に、伝熱面傾斜角が 12.5° 以下であれば、上端側から流入し伝熱面に沿って下降する逆流が常に発生することを明らかにした。そして、(9)この逆流の発生、消滅によってとくに伝熱面上端側の伝熱が顕著な影響を受けることを確認した。

以上、本実験で得られた一連の結果は、加熱平板上自然対流の流動・伝熱機構に関して新たな理解をもたらすものと思われる。

Fluid Flow and Heat Transfer of Natural Convection
over Upward-Facing Heated Plates

Fumiyoshi Kimura

Department of Comprehensive Energy Engineering
Toyohashi University of Technology

ABSTRACT

Although natural convective flows over upward-facing, heated plates appear in a variety of industrial equipment as well as in many natural circumstances, they have not been as extensively studied as flows adjacent to vertical plates. This is mainly due to the fact that the flow over heated, horizontal plate is unstable and becomes unable to be treated two-dimensionally, hampering the analytical study. In order to obtain basic information on the flow and heat transfer of the natural convections, experimental investigations are indispensable. Hence several experiments have been done on the flow mostly by measuring the overall heat transfer coefficient. So that one cannot figure out the detailed profile of the flow over the horizontal plates.

The present author has carried out visualization experiments on the flow and temperature fields in order to obtain a basic information on the fluid flow and heat transfer of natural convections, where water was used as a test fluid, the test plate was heated with a uniform heat flux. The local heat transfer coefficients of the plate was also measured. The width of the test plate was varied from 20mm to 1500mm so that the modified Rayleigh number ranged widely from 10^6 to 10^{15} . The maximum Rayleigh number of the present experiments was two or three orders of magnitude larger than that of the previous experiment.

The following results were obtained from the experiments.

- (1) The flow profile of the half side over the horizontal plate can be divided into four specific regions according to the distance from the leading edge:
 - (i) the laminar boundary layer region in the vicinity of the leading edge,
 - (ii) the transitional region characterized by the three-dimensional separation

and by the streaky and steady low-temperature patterns, (iii) the fully developed turbulent flow region and (iv) the collision region near the centerline of the plate. Among these, the regions (ii) and (iv) were found to exist first by the present study. Furthermore, the critical Rayleigh numbers at the lower and upper boundaries of each region were elucidated.

(2) It was found that the minimum and maximum local heat transfer coefficients appear near the plate edges and they are closely connected with the separation of boundary layers. It was also found that the local heat transfer coefficient in the transitional region decreases proportionally to the distance from the leading edge. The region covers a considerable portion of the total surface of the plate, so that the overall heat transfer coefficient becomes dependent on the width of the plates even at the highest Rayleigh number of the present experiments. Empirical correlations of the local and the overall Nusselt numbers of the plate were proposed in the present study.

On the basis of the above results, the attention was focused on the fluid flow and heat transfer of natural convections over the plate slightly inclined from the horizontal. Special interests were directed toward the downward flow from the upper edge of the plate. The following results were obtained from the visualizations and the temperature measurements.

(3) When the inclination angle is less than 12.5° from the horizontal, the downward flow appears and significantly influences on the local heat transfer, in particular, of the upper portion of the plate, where the local heat transfer coefficient decreases monotonously with the inclination angle.

It is hoped that the present study will provide valuable information about the fluid flow and heat transfer of natural convections over heated plates.

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	2
1.2 上向き加熱面上の自然対流について	6
1.2.1 水平な伝熱面の場合	6
1.2.2 水平からわずかに傾斜した伝熱面の場合	13
1.3 本研究の目的および論文の構成	16
第2章 有限な水平加熱平板上に生じる自然対流の流動および熱伝達	25
2.1 緒言	26
2.2 実験装置および測定法	27
2.2.1 実験装置	27
2.2.2 感温液晶による伝熱面温度分布の可視化	28
2.2.3 流れの可視化	29
2.2.4 温度測定	31
2.2.5 熱伝達率の測定	32
2.3 実験結果および考察	34
2.3.1 伝熱面温度分布の可視化	34
2.3.2 伝熱面上の流れの可視化	36
A. 伝熱面上の流動	36
B. はく離距離および低温すじ間隔	39
2.3.3 局所熱伝達率	41
2.3.4 平均熱伝達率	46
2.4 第2章のまとめ	48
第3章 高レイリー数域における水平加熱平板上自然対流の 流動および熱伝達	68
3.1 緒言	69
3.2 実験装置および測定法	71
3.2.1 実験装置	71
3.2.2 伝熱面表面温度分布の可視化および流れの可視化	72
A. 感温液晶による伝熱面表面温度分布の可視化	72
B. 流れの可視化	72
3.2.3 温度測定および熱伝達率の測定	73
3.3 実験結果および考察	75
3.3.1 伝熱面温度分布の可視化	75
3.3.2 伝熱面上の流れの可視化	77
3.3.3 局所熱伝達率	79
3.3.4 平均熱伝達率	84
3.4 第3章のまとめ	86

第4章 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 流動および熱伝達	101
4.1 緒言	102
4.2 実験装置および測定法	104
4.2.1 実験装置	104
4.2.2 伝熱面温度分布の可視化および流れの可視化	105
A. 感温液晶による伝熱面表面温度分布の可視化	105
B. 流れの可視化	105
4.2.3 温度測定および熱伝達率の測定	106
4.3 実験結果および考察	107
4.3.1 伝熱面温度分布の可視化	107
4.3.2 伝熱面上の流れの可視化	110
4.3.3 局所熱伝達率	113
4.3.4 平均熱伝達率	115
4.4 第4章のまとめ	116
第5章 結論	131
参考文献	138
謝辞	146
「付録」 水平平板上自然対流の伝熱促進	148
1. 緒言	149
1.1 はじめに	149
1.2 自然対流の伝熱促進について	150
1.3 本研究の意図および目的	152
2. 実験装置および測定法	154
2.1 実験装置	154
2.2 温度および熱伝達率の測定	155
3. 実験結果および考察	157
3.1 伝熱面温度分布の可視化	157
3.2 格子内の局所熱伝達率	158
3.3 格子内の平均熱伝達率	159
3.4 格子内流れの可視化	160
3.5 伝熱性能試験	161
A. 格子フィン付伝熱面の伝熱特性	162
B. 垂直フィン付伝熱面との性能比較	163
4. 「付録」のまとめ	166

記号表

英大文字

A : 伝熱面表面積

E : 電圧

I : 電流

S : はく離距離

T_f : 膜温度 [= ($T_w + T_\infty$) / 2]

T_w : 伝熱面温度

T_∞ : 周囲流体温度

W : 伝熱面の板幅、伝熱面長さ (第4章)

英小文字

g : 重力加速度

h_m : 平均熱伝達率

h_x : 局所熱伝達率

l : 筋スパン

q_w : 伝熱面熱流束

x : 板端からの距離、伝熱面下端からの距離 (第4章)

ギリシア文字

α : 水平からの傾斜角度

β : 体膨張係数

κ : 温度伝導率

λ : 熱伝導率

ν : 動粘性係数

ρ : 密度

添字

f : 膜

m : 平均

w : 伝熱面

x : 局所

∞ : 周囲流体

無次元数

- $G r$: グラスホフ数 $[= g \beta (T_w - T_\infty) W^3 / \nu^2]$
 $G r_x$: 局所グラスホフ数 $[= g \beta (T_w - T_\infty) x^3 / \nu^2]$
 $G r^*$: 修正グラスホフ数 $[= g \beta q_w W^4 / \lambda \nu^2]$
 $G r_x^*$: 局所修正グラスホフ数 $[= g \beta q_w x^4 / \lambda \nu^2]$
 $N u$: 平均ヌッセルト数 $[= h_m W / \lambda]$
 $N u_x$: 局所ヌッセルト数 $[= h_x x / \lambda]$
 $P r$: プラントル数 $[= \nu / \kappa]$
 $R a$: レイリー数 $[= G r \cdot P r]$
 $R a^*$: 修正レイリー数 $[= G r^* \cdot P r]$
 $R a_x^*$: 局所修正レイリー数 $[= G r_x^* \cdot P r]$

第1章

序論

1. 1 はじめに

流体中に温度差や濃度差があり、それが重力の作用する地上に置かれていれば、自然対流 (Natural Convection) あるいは人によって自由対流 (Free Convection) と呼ぶ流れが発生する。この自然対流は強制対流と並んで、我々が最も身近に、そして頻繁に遭遇する流れであり、小はコーヒー・カップ中の流れから、暖冷房時の室内の流れ、大は地球を取り巻く大気の流れや海流、さらにはプレートやマグマの運動に至るまで、自然対流の生じる場は数限りなく多い。また、工業的にも暖房、給湯、乾燥、あるいは各種工業機器の加熱・冷却など、およそ熱交換を必要とする場面では必ずといってよいほど自然対流が利用されている。これらの例からもわかるように、自然対流の関わる分野は多岐にわたり、また現象そのものが我々の生活や地球環境に重大な影響を及ぼすような流れは自然対流をおいて他にないだろう。

さて、このような自然対流についての研究は18世紀半ば、主に気象学の分野から始まったといわれている。そして工学あるいは工業分野で自然対流が取り上げられるようになったのは、今から130年余り前のグラスホフらによる煙突の吸引力に関する研究以来である。それ以後、数多くの研究者が様々な体系下で生じる自然対流現象について実験、解析の両面から研究を行なって来た。これらの研究の成果は、たとえば最近では Kakacら⁽¹⁾、Gebhartら⁽²⁾の手によって1000ページを越える大部の成書としてまとめられている。また我が国でも、藤井⁽³⁾あるいは相原⁽⁴⁾らによって詳しいレビューがなされている。これらの書を一読した限りでは、例えば単純な2次元物体まわりの自然対流問題についてはもはや研究し尽くされ、新たに興味をそそるような研究対象は見いだせないかのような印象を受ける。しかし、子細にこれらの記事を読んでいくと、単純な2次元物体まわりの自然対流であっても、物体まわりのおよその熱伝達率の測定結果が掲載されているだけで、その物体のまわりに一体どのような自然対流が生じているのか詳しく述べられていない

体系が少なからずあることに気付く。その代表的な体系の一つが、本研究で取り上げる、水平あるいは水平からわずかに傾斜した上向き加熱平板まわりの自然対流である。

ところで、この上向き加熱平板まわりの自然対流が現われる場合は、非常に多岐にわたっている。例えば、我々の身の回りでは調理用の鍋やヤカンの中の対流、あるいは床暖房時に生じる室内の対流などが挙げられる。また、工業用の伝熱機器では、小は半導体素子の冷却に使用されるヒートシンクまわりの流れから、ソーラコレクタや大は乾燥機に至るまで、この加熱平板上の自然対流が利用されている機器は数多い。また、建築分野でも暖房や日射によって暖められた屋根からの放熱などに関連して、上記自然対流が問題となる。さらに目を自然界に転じると、もっと大きなスケールの自然対流が重要となる。例えば気象学における海陸風の問題、あるいは、日射を受けた山の斜面まわりの対流問題はその最も典型的な例である。さらに、前述した地球物理学分野におけるマグマやプレートの運動についてもこの自然対流が密接に関わっている。このように加熱平板まわりの自然対流の流動や伝熱に関しては、様々な分野でその詳細な知識が必要とされているが、一方で、次節で述べるように詳しい流動や伝熱の実体がこれほど解っていない流れも他には無いように思われる。

さて、ここで加熱平板まわりの自然対流について簡単に説明をしておく。強制対流の場合には、流れが平板に沿って流れている限り、平板が上向き、横向きあるいは下向きのいずれであっても、平板まわりの流動や伝熱は変化しない。これに対して、自然対流の場合には重力の方向に対する伝熱面の相対的な姿勢が、伝熱面上の流動・伝熱に重大な影響を及ぼすのである。たとえば、ここに有限な大きさの平板があって、その片面が加熱されている場合を想定する。この板を、流体中に垂直に立てた場合、加熱面側を下にして水平に置いた場合、加熱面側を上にして水平に置いた場合、あるいは斜めに置いた場合のそれぞれの場合について、

板のまわりに生じる自然対流の流動は大きく異なり、従って、板からの伝熱も大きな影響を受けるのである。

まず、垂直な加熱平板の場合であるが、自然対流の駆動力である浮力と伝熱面の向きが同一であるため流動は伝熱面に沿って起きる。このとき、平板まわりの流れは熱的に中立安定であり、比較的乱流に遷移しにくい流れが実現される。また、この流れに対しては、主として強制対流の分野で発展、利用されてきた境界層近似や相似解法などの解析手法がわずかな手直しをすることで適用可能である。このため、古くより数多くの研究者達によって精力的な研究がなされ、乱流域を含め、その流動・伝熱の詳細について最も理解が進んでいると言って良い。つぎに下向き加熱平板まわりの自然対流であるが、平板のまわりに生じる流体層は熱的に安定した状態にあるため、よほど平板が大きい場合を除いて、乱流に移行することはない。従って我々が通常目にし、また問題とする程度の大きさの平板上での流れは大部分層流となり、従ってその解析的取扱いも比較的容易である。実際にも本体系については、今までかなりの数の解析的研究が行われているが、それらの解析結果は実験結果を十分精度良く予測している。

これに対し、上向き加熱平板上の流体層は、下向き加熱の場合とは逆に、熱的に不安定な状態にある。このため、この不安定を解消する方向、すなわち板から鉛直上方に向かう流れが生じる。従って、浮力とこれを押し止める粘性力の比を表すグラスホフ数が少し高くなると、伝熱面上には鉛直上方へ向かう流れ、すなわち、はく離する流れが生じる。また、同時に伝熱面上の熱的不安定は乱流遷移を早めるため、伝熱面の流れは低いグラスホフ数でも容易に乱流となる。このような対流場の解析的取扱いは、場が本質的に不安定なため、極めて困難であり、このため伝熱面上の流動・伝熱機構の解明は専ら実験に頼らざるを得ないのが実情である。しかし、次節で詳しく述べるように、上向き加熱平板上には上述のはく離や乱流遷移に加えて流れの3次元性が強く現われ、この3次元

性を考慮に入れた実験を適切に遂行することは極めて困難である。

最後に、傾斜平板まわり自然対流に関しては、水平な加熱平板まわりの自然対流と同様に、上向き加熱と下向き加熱によって事情が大きく異なる。下向き加熱の場合、自然対流は平板に沿って流れ、流体層は安定な状態にあるため、垂直平板の場合よりもさらに乱流遷移し難い。このため解析的取扱いは垂直平板の場合に比べむしろ容易とさえ言える。これに対して、上向き加熱の場合には、流体層は熱的に不安定であり、とくに伝熱面の傾斜が水平に近づくほど、流れのはく離や乱流遷移が生じ易くなることが予想される。その場合には、解析的にも実験的にも取扱いは極めて困難になるだろう。

以上、本節では単純な2次元平板まわりの自然対流であっても、平板の姿勢によって平板のまわりに生じる流動や伝熱が大きく変化すること、とくに加熱面が水平上向きあるいは水平からわずかに傾斜した場合には、その流動・伝熱は非常に複雑となり、解析・実験とも著しく困難になることを述べた。そこで、次節では焦点を水平あるいは水平からわずかに傾斜した上向き加熱面上の自然対流に絞って、もう少し詳しく現在までの研究状況を振り返ることにする。そして、現在までに何が解り、何が問題として残されているか明らかにする。

1.2 上向き加熱面上の自然対流について

1.2.1 水平な伝熱面の場合

本節では、まず初めに水平上向き加熱面上の自然対流に関する研究の現状を述べるが、その前に、上向き加熱面上にどのようなメカニズムで流れが生じるかについて簡単に説明しておく。

いま、図1-1に示すように、有限な大きさの加熱平板が加熱面側を上側にして、ほぼ無限と見なせる広がりをもった温度 T_∞ の流体中に静置された場合を考える。ここで簡単のため、紙面に直角な方向の平板の奥行きは、平板の幅 W に比べて十分大きく、平板上には2次元の流れが実現されているとする。また、平板上の流れは層流であると仮定する。このとき、図に示したように、板に平行な向きに x 、板に直角な向きに y 座標をとり、それぞれの方向の速度を u 、 v とすると、板上の流れを記述する Navier-Stokes 式はつぎのようになる。

$$(x \text{ 方向}) \quad \rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (1.1)$$

$$(y \text{ 方向}) \quad \rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \rho g \beta (T - T_\infty) \quad (1.2)$$

ここで、水平な平板上にも垂直平板に沿う自然対流と同様な境界層流れが生じ、この境界層厚さ δ が平板の幅 W に比べて十分薄い ($\delta \ll W$) と仮定 (境界層近似) すると、上式はつぎのように簡略化できる。

$$(x \text{ 方向}) \quad \rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1.3)$$

$$(y \text{ 方向}) \quad 0 = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g \beta (T - T_\infty) \quad (1.4)$$

このうち、式(1.4)から、浮力 $\rho g \beta (T - T_{\infty})$ は平板上の圧力 p に影響を及ぼし、平板に直角な方向に圧力変化が生じる。そして、この圧力変化は、式(1.3)を介して間接的に平板に平行な x 方向の圧力変化を生ぜしめ、この圧力変化によって x 方向の流れが誘起されるのである。

これをもう少し直感的に解りやすく説明すれば、つぎのようになる。つまり、平板上の流体は伝熱面によって暖められ、密度が小さくなる。すると加熱板に作用する圧力(静水圧) p は密度が小さくなった分だけ、板のまわりの同一水平面上での圧力 p_{∞} よりも低くなる。この圧力差 $(p_{\infty} - p)$ が駆動力となって、水平平板に沿う流れが誘起されるのである。

さて、上述した式のうち、境界層近似後の式(1.3)、(1.4)を解析により初めて解いたのが、1973年の Pera & Gebhart⁽⁵⁾である。彼らは上式を常微分化する適当な相似変数を導きだし、いわゆる相似解法によって境界層流の速度や温度分布を求めている。またその結果を基に、例えば伝熱面の流入端からの距離が x の地点における局所ヌッセルト数 Nu_x $(= h_x \cdot x / \lambda)$ が、

$$Nu_x = C Gr_x^{1/5} \cdot Pr^{1/4} \quad (1.5)$$

で表せることを明らかにしている。ここで C は定数であり、伝熱面の加熱条件、すなわち等温加熱および等熱流束加熱かによってその値が定まる。ここで注意しておかねばならないのは、彼らの解析は、あくまでも平板上に層流境界層流が実現されることを前提としたものであり、この前提が果して正しいか否かについては議論の余地が残されている。

一方、式(1.3)、(1.4)でなく、境界層近似前の式(1.1)、(1.2)を直接数値解法によって解く試みも何人かの研究者によって行われている。例えば、阿部・石黒⁽⁶⁾、石黒ら⁽⁷⁾は、無限に広いと見なせる断熱水平平板上に帯状の等温加熱面が同一水平面上に埋め込まれた場合について、加熱面まわりの流動・伝熱場を、差分法による2次元数値解析で解いている。また、Goldstein & Lau⁽⁸⁾は、有限な大きさの等温伝熱面のまわ

りに任意の長さの断熱平板（カラー）を取付けた場合の伝熱・流動について、同様な差分法による2次元解析を行っている。さらに、石黒ら⁽⁹⁾は円形の水平伝熱面まわりの自然対流場を、軸対称流れを仮定して数値解析により解いている。また、体系は若干異なるが、竹内ら⁽¹⁰⁾は長方形の加熱物体まわりの自然対流を2次元数値解析により解き、とくに物体上面からの伝熱について言及している。これらの状況から明らかのように、従来行われている水平な上向き加熱面上自然対流の解析では、予め伝熱面上の流れを層流かつ2次元と仮定している。しかし、いくら解析の対象を低いグラスホフ数や2次元的な体系に限ったとしても、加熱面上の自然対流は本質的に不安定であり、流れは容易に3次元でしかも乱れた状態になる可能性が高い。従って、これら2次元解析はその適応限界を明らかにすることが重要であるし、また、得られた結果が実際の流れや伝熱現象を模擬しているか、常に実験と対比しながら解析を進めていく必要がある。なお、最近の計算機や計算技術の進歩を考えれば3次元解析も視野の中に入って来つつあるが、本体系のような熱的に不安定な場を解析するのは、現在はもちろん近い将来においても極めて困難と言わざるを得ない。つまり、熱的に不安定な場は数値解析上も不安定であり、この数値計算上の不安定を抑えつつ3次元計算を遂行するのは容易でない。実際に、上向き加熱平板まわりの自然対流が今まで3次元解析によって解かれて来なかったのは、このような困難が主に原因しているものと考えている。

上述の事情を考慮すると、上向き加熱面上に発生する自然対流の流動・伝熱機構の解明に当たっては、現時点では専ら実験に頼らざるを得ないだろう。そこで、つぎに従来行われて来た実験的研究を振り返り、その問題点を明らかにしていく。

さて、上向き加熱面上の自然対流に関する実験的研究は、解析的研究よりかなり早い時期から行われている。そして、実験結果が記載された最も古い文献は Fishenden & Saunders⁽¹¹⁾ の教科書にさかのぼる。彼

らの教科書には、彼ら自身が得た正方形の加熱平板から空気への自然対流熱伝達の実験データが記載されている。それは板の平均熱伝達に関するもので、板上の流れを大きく層流と乱流とに分類し、板の平均ヌッセルト数 Nu ($= h_m \cdot W / \lambda$) が、板幅基準のレイリー数 Ra ($= g \beta \Delta T W^3 / \alpha \nu$) の関数として次のように表されている。

$$Nu = C \cdot Ra^n \quad (1.6)$$

ここで、 C 、 n はそれぞれ実験により定まる定数および指数であり、彼らは層流に対しては $C = 0.54$ 、 $n = 1/4$ を、また、乱流に対しては $C = 0.14$ 、 $n = 1/3$ なる値を推奨している。ただ、彼らは上の実験データをどのような方法で得たかについては一切言及していないので、その詳細については議論のしようがない。

彼らの実験の後、1970年前後を中心に数多くの伝熱実験が行われるようになった。その実験の大部分は等温もしくは等温に近い条件で伝熱面を加熱し、伝熱面から周囲流体への局所あるいは平均熱伝達率を測定したものである。伝熱面として、円板（例えば、Wragg⁽¹²⁾、Wragg & Loomba⁽¹³⁾、Lloyd & Moran⁽¹⁴⁾など）、正方形板、あるいは矩形平板などが実験対象に選ばれている。このうち円板の実験については、体系が複雑になることに加え、今まで行われてきた実験に見るべきものがほとんど無いので詳しい説明を割愛することとし、ここでは、主として正方形もしくは矩形伝熱面からの熱伝達に焦点を絞って議論を進めることにする。

さて、このような伝熱面からの熱伝達を取り扱った研究のうち、主なものを表にして示すと表1-1のようになる。この表には、試験流体の種類、伝熱面の寸法、伝熱面のまわりに断熱板（カラー）や、側方からの流体の流入を防ぐための板（フェンス）が設置されているか否か、実験範囲、測定項目や測定法、および得られた主要な結果等が記されている。なお、これらの実験では、いずれも伝熱面は等温もしくは準等温条件で加熱されている。

まず Hassan & Mohamed⁽¹⁵⁾ の実験であるが、彼らは比較的大きな板から空気への熱伝達率を熱流束計を用いて測定し、板まわりの平均熱伝達率を求めている。しかし、矩型伝熱面上には通常短軸方向に向かう流れが発生するのに対して、彼らは熱流束計を伝熱面の長軸中心線上に設置している。従って、彼らが得た測定データには明らかに誤りがあると言わざるを得ない。つぎに Fujii & Imura⁽¹⁶⁾ は、準等温状態に加熱された矩形伝熱面から水への平均熱伝達率を熱電対を用いて測定している。実験は主として乱流域で行なわれているが、平均熱伝達率を求めるには測定点の配置があまりに粗すぎることで、あるいは得られた平均ヌッセルト数の相関式が伝熱面の大きさによって異なるなど、実験精度上の疑問が残る。Goldstein et al.⁽¹⁷⁾ は、ナフタリン昇華法を使ってレイリー数の低い層流域の物質伝達率を測定している。彼らの実験の目的は、先に述べた層流解析解との整合性を検証することにあつたが、実験結果によれば、解析解と実験値の一致は必ずしも良くない。なお、工学的にはこの実験は十分意義が認められるが、非常に低いレイリー数を対象としたもので実用的価値は少ないといえる。つぎの Al-Arabi & El-Riedy⁽¹⁸⁾ の実験は、平板から空気への熱伝達率を蒸気の凝縮量から求めたものである。伝熱面を小さなブロックに分割し、各ブロック毎の凝縮量を測定して伝熱面全体の平均熱伝達率を算出している。しかし、この方法は簡便ではあるが、今日では精度的に劣ることが知られている。

以上の実験は、主に伝熱面全体の平均熱伝達率の測定を目的としたものであつたが、Ishiguro et al.⁽¹⁹⁾ 以後、伝熱面の局所熱伝達率に注目した実験が行われるようになった。まず、Ishiguroらは、広い水平平板の一部が帯状に加熱された体系について平均熱伝達率および局所熱伝達率を測定し、併せて Mach-Zender 干渉計を用いて伝熱面上の温度場を可視化している。しかし、局所熱伝達率は低温の周囲流体が流れ込む伝熱面の端部で本来最も高くなるはずであるのに、彼らの測定結果では、逆に端部で最も低くなるなど、奇異と思われるデータが少なからずある。

一方、Yousef et al.⁽²⁰⁾ は試験流体に水を用いて、正方形伝熱面の局所熱伝達率を Mach-Zender干渉計により測定している。しかし、Mach-Zender干渉計は本来2次元的な体系に適用して初めてその精度が保証されるものである。四周から流れ込みのあるような正方形伝熱面上の流体の温度分布を、本干渉計で求めることは無謀としか言いようが無い。

以上述べてきたように、この表の中には測定結果の信頼性の観点から必ずしも妥当といえない実験が幾つか含まれている。しかし、それらを割り引いたとしても、従来の伝熱実験に関しては、つぎのような問題点が指摘できるだろう。その一つは、従来の実験者は伝熱面上の流れを大きく層流と乱流とに分割し、それぞれについて伝熱相関式を求めているが、果して実際の流れがそれほど単純明確に層流と乱流とに区別できるのだろうか、という問題である。強制対流の乱流遷移現象からも推察できるように、層流から発達した乱流に移行するにはある程度の遷移距離ないし区間が必要である。水平平板上の自然対流といえども層流からいきなり発達した乱流に移行するとは考えられない。水平平板上で、この遷移区間がどの程度の拡がりをもつものか、従来の実験的研究では全く不明である。

二つめの問題は乱流域の伝熱相関式である。表1-1にも記した通り、従来の実験者は乱流域の伝熱相関式として、いずれも

$$Nu = C Ra^{1/3} \quad (1.7)$$

なる式を提唱している。ここで比例定数Cは、実験者によってC=0.12~0.16程度のバラツキがあるものの、レイリーの指数は全ての研究者が共通して1/3を提唱している。この指数1/3はとりもなおさず、乱流域では熱伝達率が伝熱面の幅Wによらず一定ということの意味している。この式が導出された背景には、例えば図1-2に模式的に示すように、伝熱面が十分に大きければ水平平板上の流れは、周囲流体が流れ込む板のごく周辺部を除いて完全に乱れた状態になること、そして、この伝熱面中央の乱流域の流動・伝熱は、下面加熱、上面冷却の水平流体層、い

いわゆる Benard 型対流における乱流域のそれと同一となるはずであり、従って熱伝達率は伝熱面上の位置に依らず一定になる、という思い込みが支配的であったことが挙げられる。実際、このような考えは数多くの伝熱学の教科書やハンドブック、例えば甲藤⁽²¹⁾、Rohsenow et al.⁽²²⁾などで繰り返し述べられている。しかし、上向き加熱面上の乱流が水平流体層の乱流と同じであるという確認は未だ誰も行っていないのである。また、上記相関式の根拠となった水平平板上自然対流の乱流域の熱伝達率の測定結果についても、前述したように多くの問題点を抱えている。それらの問題点のうち最大のものは、従来の伝熱実験では単に熱伝達率を測定するだけで、伝熱面上に一体どのような流れが生じ、それが熱伝達率にどのような影響を及ぼすかといった、いわゆる流動・伝熱のメカニズムがほとんど明らかにされていないという点であろう。この問題については、従来伝熱面上の流れを可視化によって調べようとした実験例が、わずかであるが報告されている。そこで、これについてつぎに紹介する。

さて、水平な加熱面上に発生する自然対流を可視化した最初の例として Husar & Sparrow⁽²³⁾の実験が挙げられる。彼らはチモールブルー溶液が pH によって色が変わる現象を利用して、矩形加熱平板上の自然対流を可視化している。その結果、伝熱面上には電解液が集中して流れる筋状の部分が生じ、それが伝熱面の中央部にまで達していることを報告している。この筋の発生は、本論文で後述するように非常に重要な意義をもつ現象であるが、彼らはそれが何故現われるかについて何も明らかにしていない。Rotem & Claassen⁽²⁴⁾は Semifocusing Schlieren 法によって伝熱面の流入端近傍の温度場を可視化し、伝熱面の端部に層流境界層流が存在することを明らかにした。この境界層流は伝熱面に沿ってわずかな距離流れたあと、不規則に乱れることを報告している。一方、Pera & Gebhart⁽²⁵⁾は、伝熱面の流入端近傍に生じる層流境界層流の温度分布を Mach-Zender 干渉計により可視化し、層流境界層流域の局所熱

伝達率を求めている。また、可視化結果からこの層流境界層が伝熱面からはく離すること、このはく離は伝熱面端部からの距離 x を代表長さにとったグラスホフ数 $Gr_x (= g \beta \Delta T x^3 / \nu^2)$ が、ほぼ $Gr_x^{1/3} = 80$ で生じることを明らかにしている。これらの一連の可視化結果より、伝熱面の流入端近傍には層流境界層が形成されること、および、この境界層は伝熱面からはく離することなどは、今日ほぼ定説として認められたとあってよい。しかし、それでははく離したあと、どのような流れとなるのか、あるいは Husar & Sparrow が見いだした筋との関連はどうなるのか、といった問題については依然として不明のままである。すなわち、はく離以降の流動については全く何も明らかになっていないのである。我々が通常取り扱う大きさの平板では、上述の層流境界層は平板のごく端部に現われるだけで、その他の平板の大部分ははく離流れ以降の領域で占められている。従って、この領域の流動・伝熱を明らかにしない限り、加熱平板上の自然対流が完全に理解できたとはいえないだろう。

1.2.2 水平からわずかに傾斜した伝熱面の場合

さて、つぎに伝熱面が水平からわずかに傾斜した場合の自然対流に関する従来の研究状況を紹介し、その問題点を明らかにする。

まず、この傾斜伝熱面上の自然対流についての研究報告は、数だけ言えば上述の水平伝熱面のそれよりはるかに多いことを指摘しておく。しかし、それらの研究は大部分が伝熱面の傾斜角度が比較的大きな場合、すなわち水平からの傾斜角度 α でいえば $15 \sim 20^\circ$ 以上を対象としたもので、研究の興味も例えば垂直からわずかに傾斜した加熱平板上自然対流の乱流遷移機構を垂直平板のそれと比較し異同を論じたもの^(26~30)、種々の傾斜角度に設置された加熱平板からの層流あるいは乱流熱伝達の測定に重点を置いたもの^(31~34) など多岐にわたっている。これに対して、本研究で対象とする水平からわずかに傾斜した加熱平板まわりの自

然対流については、ほんの数例の研究報告が散見されるに過ぎない。なお、本研究では水平からわずかに傾斜した平板と、一般的な傾斜平板の場合を区別している。この区別が何に基づくかについては後で次第に明らかにしていくが、一応ここでは伝熱面上に生じる一連の現象が水平伝熱面のそれと同じか極めて類似していることを判断基準に、水平からわずかに傾斜したという言葉を使うことにする。

さて、このような水平からわずかに傾斜した伝熱面まわりの伝熱・流動を取り扱った研究として、Black & Norris⁽³⁵⁾、Al-Arabi & Sakr⁽³⁶⁾らの伝熱実験が挙げられる。彼らの実験は、空気を試験流体として傾斜平板からの局所および平均熱伝達率を傾斜角度の広い範囲にわたって測定したもので、たまたま実験の一環として、水平からの傾斜角度が 10° ないし 15° の場合を対象にしたといった方が正確かもしれない。このため、彼らの論文では単に実験データを提示しているだけで、詳しい議論は全くなされていない。

水平からわずかに傾斜した加熱平板からの自然対流熱伝達を、傾斜角を比較的細かく変化させて調べたものに藤井・井村⁽³⁷⁾の実験がある。伝熱面の平均熱伝達率の測定結果から、彼らは伝熱面の傾斜角度 α が 30° よりも小さい場合には、傾斜板のとくに乱流域での伝熱特性は水平平板のそれと変わらないと結論付けている。しかし、彼らの実験では測定点の間隔が粗く、しかもその測定点から得た平均値で議論しているため、果して彼らの得た結論が正しいかどうか早計に判断できない。一方、Pera & Gebhartは、水平および水平から6度まで傾斜した等温伝熱面まわりの空気の自然対流について、伝熱面先端付近に生じる層流境界層流れの伝熱⁽⁵⁾および安定性⁽³⁸⁾について解析および実験を行っている。そのうち、実験は Mach-Zender干渉計を用いて伝熱面の局所熱伝達率と境界層のはく離開始位置について主に測定したものである。それによると、層流域の局所熱伝達率は彼ら自身の得た解析結果よりも高くなること、はく離開始位置の局所グラスホフ数 Gr_x は傾斜角の増加につれて

単調に高くなるなどの結果を得ている。しかし、これらの検討はあくまでも伝熱面の流入端近傍の流動・伝熱に限ったもので、はく離以降の領域については全く何も明らかになっていない。結局のところ、水平からわずかに傾斜した伝熱面上の流動・伝熱についても、水平加熱面の場合と同様、その詳細は依然として不明のまま残されているとあってよいだろう。

さて、これら水平からわずかに傾斜した伝熱面と前述した水平面上の自然対流を対比してみたとき、一つの興味ある問題が浮かび上がってくる。それは、水平な伝熱面上では図1-3(a)に示すように、伝熱面に平行な方向の圧力差によって、伝熱面の両端部から中心に向かう流れが発生するが、伝熱面が傾斜した場合にこの流れがどのように変化するだろうかという問題である。すなわち、伝熱面が水平からわずかでも傾斜していれば、図1-3(b)に示すように伝熱面上には、下端から上端に向かう流れのみが発生するのか、それとも傾斜角度が小さい場合には、図1-3(c)に示すように、伝熱面の下端から流入する流れに加えて、伝熱面上端から流入し、伝熱面に沿って下降する流れ（以下、本研究ではこれを逆流と呼ぶことにする）が生じるのかという問題である。この問題に関して、最近 Lewandowski⁽³⁹⁾は有限な大きさの傾斜平板からの自然対流熱伝達を評価するに当たっては、逆流の存在を考慮する必要が有ると主張している。そして、彼はプロフィール法を用いた簡単な熱伝達の解析を傾斜加熱円板について行っている。この主張は傾聴に値するが、彼の解析では逆流が伝熱面の傾斜角度のいかんによらず常に発生することを前提としており、この前提は従来の実験事実と照らし合わせても明らかに破綻している。しかし、伝熱面の傾斜角度によっては逆流が存在する可能性も依然として残されており、逆流が存在するかどうか、また存在するならばどのような条件下で存在し、その結果伝熱面からの伝熱特性がどのように変化するか、などといった問題の解明がとくに水平からわずかに傾斜した伝熱面上の自然対流に関連して重要と思われる。

1.3 本研究の目的および論文の構成

さて、前2節では、上向き加熱平板上の自然対流の流動・伝熱に関する知識が様々な分野で必要とされていること、しかし、研究の現状はそれら流動・伝熱の完全な理解には、なお程遠いことを明らかにした。本節では、とくに前節で述べた従来の研究の問題点を踏まえて、上向き加熱面上自然対流の流動・伝熱の理解に当たって、まずどのような課題が解明されなければならないかを明らかにし、併せて本研究の目的と論文の構成を述べることにする。

さて、まず水平な上向き加熱面上の自然対流の流動・伝熱に関しては、つぎのような課題が挙げられる。それらを伝熱面上の流動現象に応じて箇条書きに列挙すると以下のようなになる。

まず、伝熱面の流入端近傍に形成される層流境界層流については、

(1)境界層域の熱伝達は、果して層流解析解で表せるのか？

(2)層流境界層流がどこまで維持されるのか？

という問題が依然として不明のままである。

つぎに、境界層のはく離に関しては、

(3)それがどのような種類のはく離なのか？

(強制対流と同様なメカニズムに基づくはく離なのか否か。)

(4)はく離の発生開始条件は？ またはく離を支配するパラメータは何か。

(5)はく離と、Husar & Sparrow が見いだした筋との関連。

(6)はく離域の伝熱特性。

などが疑問点として残されている。

一方、このはく離流れ以降の流動・伝熱に関しては、前述したようにその詳細は全く不明とあって良く、ざっと掲げただけでも以下のような課題が指摘できる。

(7)はく離後、流れは直ちに乱流へと遷移するのか否か？

(8)いわゆる遷移域は存在するのか？ 存在するとすれば、それはどれだ

けの拡がりをもつか？ また、その熱伝達は？

(9) 発達した乱流がどのような条件下で実現されるのか？

(10) 加熱平板上の乱流は、下面加熱、上面冷却のいわゆる Benard 対流場の乱流と同じなのか、違うのか？

(11) 乱流域の局所熱伝達率は、従来言われているように伝熱面上の位置によらず一定となるのか？

ところで、これらの問題点を解明するには、なるべく対象とする体系が単純で、しかも得られる結果が普遍的であることが望ましい。このためには伝熱面上の流れが単純となる 2 次元平板、具体的には 2 次元とみなせるほどアスペクト比の高い矩形平板を対象とするのが適当である。正方形や円形の平板では 4 辺や円周から流体が流れ込むため、流れが複雑になる可能性が高い。つぎの問題は伝熱面の大きさである。上述した伝熱面上の流動・伝熱問題を一挙に扱うには、伝熱面は出来るだけ大きい方が望ましい。しかし、伝熱面が大きくなるほど実験操作や取り扱いが困難となる。たとえば、伝熱面が大きくなると必然的に加熱量が増え、伝熱面まわりの自然対流強さが増す。これは、本来温度が一様で、しかも静止しているはずの周囲流体中に乱れや温度成層が生じる原因ともなる。従って、伝熱面上に生じるどのような流れを対象にするか、たとえば伝熱面流入端近傍の層流境界層流に注目するのか、それとも大きな伝熱面の中央に生じる乱流に注目するのかよって、伝熱面の大きさを変えることが実際には必要である。このような伝熱面の大きさを変えることは、とくに伝熱面上の流れが伝熱面の大きさの影響を受けない放物型か、それとも影響を受ける楕円型の流れかを知る上でも重要である。

さて、上述した諸問題を解明する上で、最も手取り早くしかも確実な方法は、伝熱面上の流れ場や温度場を可視化し、実際に起きている現象を観察することだろう。このことから本研究では、まず可視化によって伝熱面上の流動と伝熱を定性的に把握することにする。そのうち、流れの可視化に当たっては 3 次元流れの様子が比較的捕らえやすく、しかも取扱いが容易な染料注入法による流れの可視化を採用することにした。

とくに三角⁽⁴⁰⁾によって開発された、染料を2次元的な開口部をもつスリットからシート状に流出させる方法は、自然対流の3次元的な構造を明らかにする上で非常に有力な手段となっており、本研究でもこの方法を採用することにした。ところで本方法によって伝熱面上の流れが把握できたとすると、つぎの関心は、このような伝熱面上の流れが伝熱面の伝熱特性、とくに局所の伝熱特性にどのような影響を及ぼすかという問題に移るだろう。つまり流動と伝熱との関連である。これを明らかにするためには、伝熱面全体にわたる熱伝達率の分布がたとえ定性的であれ、把握できることが望ましい。このような局所的な熱伝達率の分布を調べる手段として、本研究では感温液晶による伝熱面温度分布の可視化法を採用することにした。この方法は、温度によって色が変わる液晶を加熱面上に貼り付け、加熱面表面の温度分布を色の違いによって可視化するもので、その詳細は笠木⁽⁴¹⁾に詳しい。この液晶を熱流束一定で加熱された伝熱面上に貼り付ければ、温度の高いところが熱伝達率の低いところに、また温度の低いところが熱伝達率の高いところに対応し、局所的な熱伝達率の高低が色の変化によって可視化できる。なお、これら可視化法の採用により、実験体系は自ずと定まってくる。すなわち、試験流体は水であり、伝熱面は等熱流束条件で加熱することになる。

さて、これらの可視化により、上述した諸課題のうち(2)~(5)、(7)~(10)については、相当程度明らかにできるものと思われる。一方、伝熱面の伝熱特性に関連した(1)、(6)、(8)および(11)の課題については、感温液晶シートにより定性的な傾向は把握するものの、定量的な議論は困難である。そこで本研究では、これらの可視化結果を参考にしながら、熱電対により伝熱面の局所熱伝達率を定量的に測定することにした。測定に当たっては、伝熱面の端部から伝熱面中心に至るいわゆる流れ方向の局所熱伝達率だけでなく、同時に流れの3次元性による伝熱への影響を調べるため、流れに直角なスパン方向の局所熱伝達率の測定も行うことにする。

一方、水平からわずかに傾斜した加熱面上の自然対流の流動および熱伝達に関しては、上述の水平平板での諸課題(1)～(11)に及ぼす傾斜角度の影響を明らかにすることに加えて、傾斜平板に固有な以下の問題点を解明する必要がある。

(12) いわゆる逆流は存在するのか、否か？

(13) 存在するとすれば、一体どのような条件(角度、伝熱面熱流束)下で存在可能か？

(13) 逆流の発生により、伝熱面の伝熱特性はどのように変化するか？

これら数多くの課題全部について、しらみつぶしに調べていくのは時間的な制約もあり不可能に近い。そこで、本研究では主に課題(12)～(13)を中心に詳しい実験的検討を加えることとし、課題(1)～(11)については、単に水平平板との定性的な異同を論じるだけにとどめる。このため実験に供する伝熱面は、伝熱面上に層流境界層流、はく離流れおよび乱流の全てが実現できる大きな伝熱面ただ一種類とする。

実験は、まずこの伝熱面上に生じる流動・伝熱場の可視化から始める。そして、この可視化結果を参考にして熱電対による局所熱伝達率の定量的測定を行ない、伝熱面の局所伝熱特性を明らかにする。なお、実験方法および測定法は、ほとんど水平伝熱面のそれと同様である。

以上述べたように、本研究では水平および水平からわずかに傾斜した伝熱面上に生じる自然対流の流動・熱伝達について主に実験的検討を加えていくが、これら実験に必要な伝熱面、装置および測定法の詳細については本論文の第2章以降のそれぞれの章で記すことにする。また、水平伝熱面上の自然対流のうち、とくに層流境界層流域およびはく離域の流動・伝熱に関する実験結果および考察を第2章で、また遷移域を一部含む乱流域の流動・伝熱についての実験結果および考察を第3章でそれぞれ詳しく述べる。さらに第4章には、水平からわずかに傾斜した伝熱面上の流動・伝熱に関する実験結果および考察を記すことにする。第5章は、以上の上向き伝熱面上の自然対流に関する結果のまとめである。

なお、本研究で明らかになった上向き加熱平板上の流動・伝熱を参考にすれば、水平加熱平板からの自然対流熱伝達を促進する新たな方法が開発可能である。その具体的な方法として、本研究では伝熱面上に適切なサイズおよび高さの板を設置し、伝熱面を格子状に区切る方法を提案した。そして、この伝熱面の伝熱性能試験を行った結果、この伝熱面は従来より慣用されている垂直フィン付伝熱面よりも高い伝熱性能を発揮することを見いだした。そこで本研究の具体的な成果の一例として、この伝熱促進法と主要な結果を本論文の「付録」に掲げた。

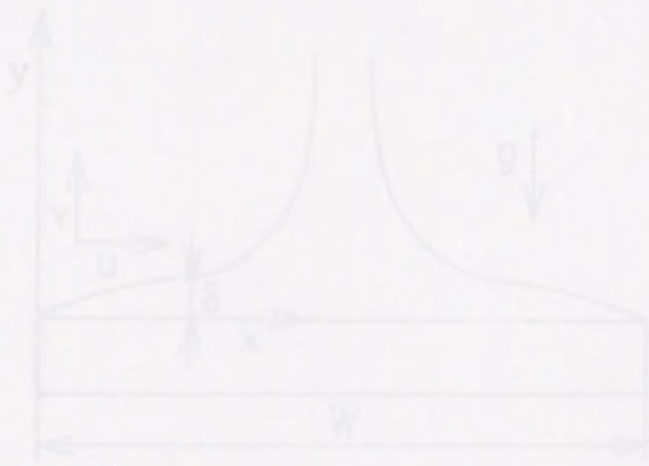


図1-1-1 水平加熱平板上の自然対流促進法

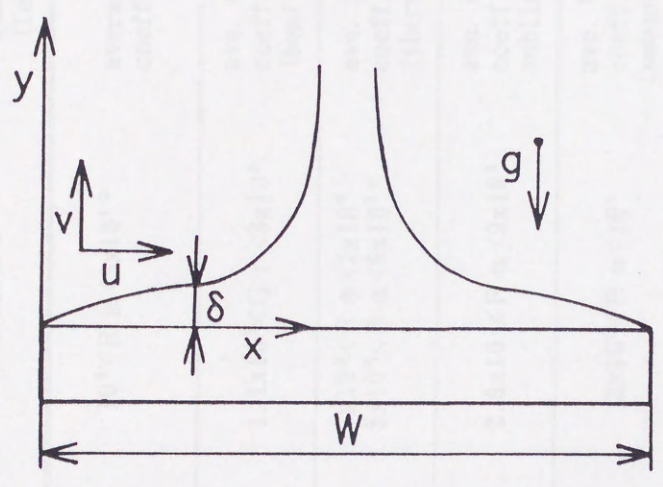


図 1 - 1 水平上向き加熱面上の自然対流

表 1 - 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 x L in cm ²	Collar* /Fence	Range of Ra numbers	Measured quantities (Technique)	Heat transfer correlations
Fishenden and Saunders (11) (1957)	air	max. 60x60 (square)	none	$10^5 < Ra < 3 \times 10^{10}$	average heat trans. coeff. (?)	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 (15) (1970)	air	20x50.4	none	$1.1 \times 10^3 < Gr < 3 \times 10^8$	ave. heat transf. coeff. (heat flux meter)	$Nu = 0.12 Gr^{1/3}$
Fujii and Imura (16) (1972)	water	5x10 30x15	fence	$7 \times 10^6 < Ra < 2 \times 10^8$ $5 \times 10^8 < Ra < 6 \times 10^{10}$	ave. heat transf. coeff. (thermocouples)	$Nu = 0.16 Ra^{1/3}$ $Nu = 0.13 Ra^{1/3}$
Goldstein, Sparrow and Jones (17) (1973)	air	W=2.03-5.84 aspect ratio=7	none	$2.8 \times 10^2 < Ra < 9 \times 10^3$	ave. mass transf. coeff. (Naphthalene sublimation)	$Sh = 0.59 Ra^{1/4}$ (Sc=2.5)
Al-Arabi and El-Riedy (18) (1976)	air	15x(25-60)	none	$2 \times 10^5 < Ra < 10^9$	ave. heat transf. coeff. (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 (19) (1978)	water	0.76x8 2.8x13 20.5x17	collar collar collar+fence	$3 \times 10^5 < Ra < 10^{10}$	ave. h.t. coeff. local h.t. coeff. visualization	$Nu = 0.20 Ra^{1/3}$
Yousef, Tarasuk and Mckeen (20) (1982)	air	10x10 20x20 40x40 (square)	collar collar collar	$1.9 \times 10^6 < Ra < 1.7 \times 10^8$	ave. h.t. coeff. loc. h.t. coeff. fluid temp. (Mach-Zender)	laminar: $3 \times 10^6 < Ra < 4 \times 10^7$ $Nu = 0.622 Ra^{1/4}$ turbulent: $4 \times 10^7 < Ra < 1.7 \times 10^8$ $Nu = 0.162 Ra^{1/3}$

*) collar stands for the insulated extension plate upstream the test plate.

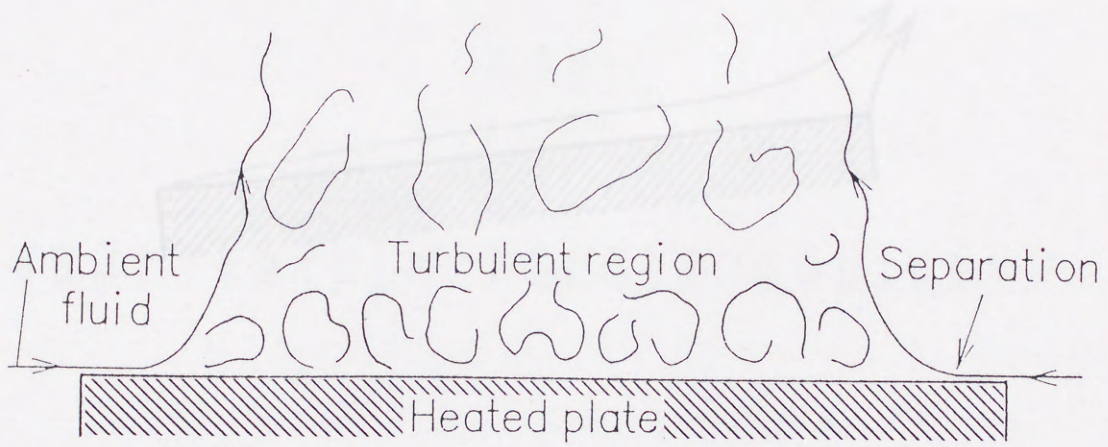
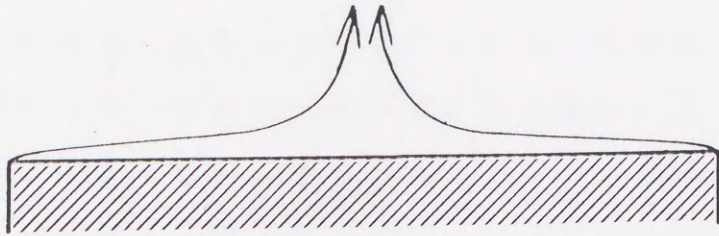
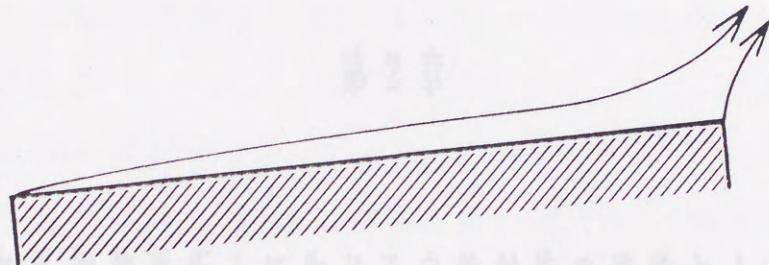


図 1 - 2 従来の水平加熱平板上自然対流の概念

(a)



(b)



(c)

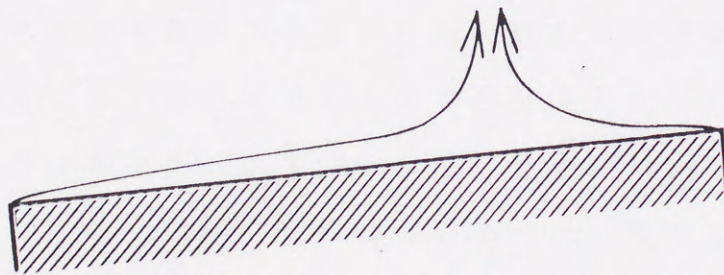


図 1 - 3 加熱平板上の流動

本章では、水平な上向き加熱平板上に生じる自然対流の流動・熱伝達
については、従来より数多くの研究が展開されたものの、実験の精度が
低いことを認め、なお完全な理解には遠くのことであるとして、
今後明らかになるべき具体的な問題を列挙した。本章では、これらの問題
のうち、とりわけ熱伝達の流入層近傍に生じる層流境界層、はく離流、
および遷移流の発生条件を定めて、以下に述べた問題について系統的に解
明することにした。

- (1) 境界層近傍領域の流動特性が従来の層流解をどの程度支えるか。
- (2) 境界層流がどこまで維持されるのか。
- (3) 境界層のはく離はどのようなメカニズムで起るのか。
- (4) はく離の発生条件。
- (5) はく離と伝熱との関連。

第 2 章

有限な水平加熱平板上に生じる自然対流の流動および熱伝達

この章で、これらの問題境界層流のはく離などについて、従来の解法では
扱えないような現象は、より高度な計算機を用いた数値計算によって
明らかにされてきた。したがって、実験上は、境界層流が停止し、外流が強い方が望まし
い。このためには伝熱面の大きさを、自然対流を抑制しておく水層の大き
さの相対的な比がなるべく大きい、若い熱流が水層の大きさに比べ
て伝熱面が十分小さい体系で実験を行う必要がある。また境界層流のは
く離流は伝熱面の端付近に発生するので、伝熱面が小さくとも上流の流
動について検討することが可能である。そこで、本章ではよく知られた平
面対流の小さな有限領域の場合について、自然対流の流動および熱伝
達の問題を系統的に検討することにした。

2.1 緒言

前章では、水平な上向き加熱平板上に生じる自然対流の流動・熱伝達については、従来より数多くの研究が解析および実験の両面からなされているにも関わらず、なお完全な理解には程遠いことを述べた。そして、今後解明されるべき具体的な課題を列挙した。本章では、それらの課題のうち、とくに伝熱面の流入端近傍に生じる層流境界層流、はく離流、および遷移流に焦点を絞って、以下に述べる課題について実験的に解明することにした。

- (1) 層流境界層領域の伝熱特性が従来の層流解析解で表せるかどうか。
- (2) 境界層流がどこまで維持されるのか。
- (3) 境界層のはく離はどのようなメカニズムで生じるのか。
- (4) はく離の発生条件。
- (5) はく離と伝熱との関連。
- (6) 境界層はく離域以降の流動・伝熱特性。とくに、境界層がはく離した後、直ちに乱流に遷移するのか否か。

ところで、これらの層流境界層流やはく離流などは、周囲流体中に含まれるわずかな外乱によって大きな影響を受けるものと予想される。したがって実験上は、なるべく周囲流体が静止し、外乱が無い方が望ましい。このためには伝熱面の大きさと、周囲流体を貯めておく水槽の大きさの相対的な比ができるだけ大きい、言い換えれば水槽の大きさに比べて伝熱面が十分小さい体系で実験を行う必要がある。また境界層流やはく離流は伝熱面の端部近くに生じるので、伝熱面が小さくとも上述の課題について検討することが可能である。そこで、本章ではとくに加熱平板が比較的小さな有限幅の場合について、自然対流の流動および伝熱機構の詳細を実験的に検討することにした。

2. 2 実験装置および測定法

2.2.1 実験装置

本実験で使用した実験装置の概略を図2-1に示す。装置は伝熱面と架台から構成されている。伝熱面には、厚さ15mmの亚克力板表面に厚さ $30\mu\text{m}$ のステンレスはくヒータを接着したものを使用した。この伝熱面まわりの修正レイリー数 Ra^* 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 $W = 20, 30, 50, 100, 150$ および 250mm を試作し、実験に用いた。

ところで、本実験のように矩型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/幅)を高くとり、体系の2次元性を確保することが必要である。このことから、本研究で用いる伝熱面のアスペクト比はいずれも3とした。この伝熱面のヒータに交流定電圧電源(YAMABISHI, AUTO-VOLT, TAD-2K)を介して交流を通電し、等熱流束条件で加熱できるようにした。また、伝熱面からの熱伝達に対して、流体の物性値変化が極力影響しないよう、伝熱面温度と周囲流体との温度差 $\Delta T (= T_w - T_\infty)$ が通常5K、最大でも10K以下となるよう、加熱量をスライダック(YAMABISHI, VOLT-SLIDER, TYPE S-130-20)によって調節した。

これら伝熱面を各々の寸法に応じた架台に取りつけ、底面 $750 \times 750\text{mm}^2$ 、深さ 750mm の亚克力製水槽の底面中央部に設置した。このとき、伝熱面が水平となるように架台の四隅に取付けたねじで微調整した。試験流体には、可視化および熱伝達率の測定の容易さなどから、常温の水を用いた。

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。なお、本実験条件を伝熱面の寸法とともに表2-1に示す。

2.2.2 感温液晶による伝熱面温度分布の可視化

さて、上述した有限幅の伝熱面からの伝熱特性を把握する最も手取り早く、確実な方法は、伝熱面の表面温度を直接可視化することであろう。このような伝熱面の温度分布を可視化する方法として、温度によって色が変わる感温液晶シートを伝熱面に貼り付ける方法が、最近広く利用されるようになって来た。この感温液晶シートを、とくに一様な熱流束で加熱した伝熱面に貼り付けると、熱伝達率が高い部分が温度の低い部分に、逆に熱伝達率が低い部分が温度の高い部分に対応するため、伝熱面の局所的な熱伝達率の高低が色の変化によって可視化できることになる。この感温液晶シートによる可視化法は、既に北村ら^(42~45)によって様々な自然対流場に適用され、その有効性が確かめられている。

これら伝熱実験において使用される液晶は、一般にコレステリック液晶と呼ばれるもので、主として鳥賊の内蔵から抽出される。このコレステリック液晶は化学的に不安定であり、ゴム等で出来た小さなカプセル中に封じ込め、安定化を図っている。液晶シートは、この液晶をポリエチレン製シート上に塗布し、裏側を黒い塗料で覆ったものである。液晶の色彩変化は可逆的であり、温度の時間変化に伴う応答性は比較的早く、本実験で用いたシートでは1秒程度の周期で変化する温度を追従できると言われている。

本研究でも、伝熱面上の局所熱伝達率分布を定性的に把握するため、この感温液晶シートを用いることにした。なお、本研究で使用した感温液晶シートは、日本カプセルプロダクツ(株)製のもので、シートの厚さは0.3mmである、また温度が27.1℃から36.1℃の範囲で、低温から高温にかけて色が順次、暗赤、茶、橙、黄、緑、青と変化する。

2.2.3 流れの可視化

流れを可視化するに当たっては、流体の種類、流速、流れの形態等に
応じて様々な方法が今までに開発・考案されている⁽⁴⁶⁾。本研究では、
水平な伝熱面上に生じる自然対流の流動を可視化するが、この自然対流
は、(a)流速が極めて小さいこと、(b)わずかな密度の差や外乱によって
流れが乱されやすいこと、および、(c)伝熱面上の熱的不安定によって
3次元的な流れが出現しやすいことなどの特徴を有している。このよう
な流れの特徴を考慮して、本研究では染料による流れの可視化を行うこ
とにした。この方法は、添加する染料の濃度をごく薄く調節すること
により、密度的に中立な染料を作り出せること。染料のヘッドを加減す
ることにより、極めてゆっくりと流れ場中に染料を注入可能なこと。およ
び3次元的な流れの構造を、工夫さえすれば比較的容易にとらえること
ができるなどの利点を有しており、自然対流の可視化法として最適な方
法といえる。

さて、伝熱面上には節1.2で説明したように、伝熱面の端部から周囲
流体が伝熱面に沿って流入し、伝熱面の中心もしくは中心付近からプ
ーム状に流出する一連の自然対流が発生することが予想できる。これら
の流れを可視化するために、本実験では、伝熱面の流入端部に2次元
的な開口部を有するスリットを設け、ここから染料を流出させること
にした。なお、この開口部は伝熱面表面と同一水平面上に設置されて
いる。このように開口部をスリット状にしたのは、ここからシート状に
染料を流出させることによって、流れの3次元的な構造を明らかにし
ようとしたものである。また、局所的な流れの様子を把握するために、
本実験では細いステンレス製のパイプから染料を流れの中に注入す
る方法も一部採用した。

染料は図2-2に示すように、リザーバである注射筒に蓄えられ、ビ
ニール・チューブを介して伝熱面端部に設けたスリットあるいはステン
レス・パイプ(外径0.88mm、内径0.58mm)へと導かれる。本実験で使用

した染料は、いずれも蛍光性の染料で、食紅として利用されるローダミン B ($C_{28}H_{31}ClN_2O_3$) および浴用染料であるウラニン ($C_{20}H_{10}Na_2O_5$) の 2 種類である。これらは、光を受けるとそれ自身が蛍光を発し、非常にコントラストの高い可視化像を得ることができる。また、毒性が無く下水中へ廃棄することが可能である。

なお、伝熱面の流入端部に設けたスリットの構造を、図 2-3 に示す。このスリットは 2 枚の亚克力薄板 (厚さ 1mm)、両面粘着テープ (厚さ 0.3mm)、2 本のステンレス・パイプ (外径 0.88mm、内径 0.56) から成り立っている。そして、染料が 2 本のパイプより流入し、薄板の隙間を満たした後、スリットの上開口部からシート状になってゆっくりと伝熱面に沿って流れ出る仕組みとなっている。このようなスリットを伝熱面の大きさに応じて製作し、可視化に用いた。

2.2.4 温度測定

本実験では、伝熱面の局所熱伝達率を定量的に求めるために、伝熱面各部の表面温度および周囲流体温度を測定した。このうち、伝熱面表面温度は、図2-4に示すように素線径 $70\mu\text{m}$ のK型(クロメル-アルメル)熱電対を、伝熱面長さ方向中心線上のステンレスはくヒータ裏面にスポット溶接して測定した。なお、表2-2にこれら熱電対の取り付け位置の詳細を示す。また、周囲流体温度も同一の径および素材の熱電対を用いて測定した。その測定点は伝熱面と同一水平面上で、伝熱面端より 50mm 離れた位置にある。なお、水槽内に満たされた周囲流体の温度は伝熱面直上および水面のごく近傍を除いて、ほぼ同様であることを確認している。

これら伝熱面表面および流体中に設置された多数の熱電対からの出力は、入力点数30点のマルチチャンネル・デジタル・レコーダ(ADVANT EST, TR2724)で読取られ、GP-IBインターフェイスを介して、パーソナル・コンピュータ(NEC, PC-9801DX)へと送られる。これらの計測は半自動的に行われ、測定時間間隔、データ個数などはGP-IBコードおよびBASICによるプログラムによって制御される。なお、後述べる局所熱伝達率は、大部分が5秒間隔で100回スキャンした伝熱面表面温度の平均値をもとに算出した値である。なお、これらの半自動測定によって得られた表面温度は、ペン・レコーダ(YOKOGAWA ELECTRIC WORKS, TYPE3056)によって測定した比較的長い時間にわたる平均表面温度と、ほぼ一致することを確認している。

なお、後述するはく離域での局所熱伝達率の測定に際しては、スパン方向に平均した局所熱伝達率を求める必要があり、この場合には、以上の測定を通常20~30回繰り返した。

2.2.5 熱伝達率の測定

伝熱面の局所熱伝達率 h_x は、伝熱面熱流束 q_w 、熱電対によって測定された伝熱面表面温度 T_{wx} および周囲流体温度 T_∞ を用いて、つぎのように定義される。

$$h_x = q_w / (T_{wx} - T_\infty) \quad (2.1)$$

なお、伝熱面熱流束 q_w を求めるには、伝熱面裏面への熱伝導による熱損失およびふく射による熱損失を考慮する必要がある。自然対流によって伝熱面から周囲流体へ奪われる熱流束 q_w は、図 2-5 に示すように、ヒータからの総熱流束を q 、熱伝導による伝熱面裏面側への損失熱流束を q_c 、ふく射による損失熱流束を q_r とすると、

$$q_w = q - (q_c + q_r) \quad (2.2)$$

で表わされる。

本実験では、ステンレスはくヒータを直接通電加熱し、スライダックによって伝熱面の加熱量を調節しているため、総熱流束 q はステンレスはくヒータに印加される電圧 E および電流 I から、次式によって求められる。

$$q = E \cdot I / A \quad (2.3)$$

ここで、 A : 伝熱面全表面積

なお、電圧と電流は、それぞれデジタル・マルチメータ (ADVANTEST, TR6845)、電流計 (YOKOGAWA ELECTRIC WORKS, CLASS 0.5) で測定した。

まず、熱伝導による伝熱面裏面への損失熱流束 q_c について検討する。熱伝導による熱損失は、アクリル板中の熱伝導を一次元と仮定すると、熱伝導による損失熱流束 q_c は次式で表わされる。

$$q_c = K (T_w - T_\infty) \quad (2.4)$$

ここで、 K は伝熱面裏面側の熱通過率を表しており、次式で表される。

$$K = 1 / ((\delta / \lambda) + (1 / h_b)) \quad (2.5)$$

ただし、 δ : アクリル板の厚さ、 λ : アクリル板の熱伝導率、

h_b : 伝熱面裏面の熱伝達率

なお、ここで伝熱面裏面側の熱伝達率 h_b は、下向き加熱平板まわりの自然対流熱伝達に関する従来の経験式、

$$Nu (= h_b \cdot W / \lambda) = 0.6 Ra^{1/5} \quad (2.6)$$

を基に見積もった。その結果、実験範囲内での損失熱流束 q_c は最大でも、 $q = 5000 [W/m^2]$ のとき、 $q_c = 176.4 [W/m^2]$ 程度となり、伝熱面の総熱流束 q に対する比は、 $q_c / q = 0.0353$ となった。

つぎに、ふく射による損失熱流束 q_r について検討する。このふく射による損失熱流束 q_r は次式で求められる。

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon (T_w^4 - T_\infty^4) \quad (2.7)$$

ここで、 σ : ステファーン-ボルツマン常数 ($= 5.669 \times 10^{-8} [W/m^2K^4]$)、

ε : 伝熱面表面のふく射率

伝熱面表面のふく射率 ε を、よく磨いたステンレス鋼の値 $\varepsilon = 0.2$ で代表させ、最大損失熱流束 q_r を見積もると、

$q = 5000 [W/m^2]$ のとき、 $q_r = 18.5 [W/m^2]$ 、 $q_r / q = 0.0037$ となって、ふく射による熱損失は非常に小さいことがわかった。

以上の結果より、本実験装置では伝熱面裏面への熱伝導およびふく射による熱損失は、最大でも伝熱面熱流束の 4% 以下であることが予想された。このことから、本実験ではこれら熱伝導およびふく射熱損失を無視し、伝熱面熱流束 q_w はヒータ加熱量を表面積で除した値 q で求めた。

なお、平均ヌッセルト数や修正レイリー数などの無次元数を算出する際の流体の物性値は膜温度 $T_f [= (T_w + T_\infty) / 2]$ で評価し、体膨張係数 β は、次式で求められる平均体膨張係数で算出した。

$$\beta = (\rho_\infty - \rho_f) / \{ \rho_f \cdot (T_w - T_\infty) \} \quad (2.8)$$

ここで、 ρ_∞ : 周囲流体温度における密度

ρ_f : 膜温度における密度

2. 3 実験結果および考察

2.3.1 伝熱面温度分布の可視化

水平加熱面上に発生する自然対流の局所伝熱特性を定性的かつ包括的に把握するため、感温液晶シートを伝熱面に貼付け、伝熱面表面温度分布の可視化を行なった。その代表的な結果の一例を図2-6に示す。この図は伝熱面を真上から写真撮影したもので、板幅を6種類変化させている。なお、これらの写真では伝熱面のスパン方向に何本か平行な線が認められるが、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(a)~(e)では伝熱面短辺側の端面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に生じたものである。この可視化から、同時に本伝熱面のスパン方向中央のかなり広い範囲にわたって2次元的な場が実現できていることがわかる。ところで、本実験に用いた感温液晶シートは、 $27.1\sim 36.1^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で呈色し、低温から高温の温度変化に対応して色が、暗赤、茶、橙、黄、緑、青と漸次変化する。本実験では伝熱面は等熱流束条件で加熱し、周囲流体温度は一定に保っているので、これらの可視化結果のうち温度の低い部分は熱伝達率の高い領域に、逆に温度の高い部分は熱伝達率の低い領域をそれぞれ表していると考えてよい。

さて、まず伝熱面幅 W が 20mm の場合であるが、図(a)から明らかのように、伝熱面の両端部で最も温度が低く、伝熱面中心へ向かうにつれて単調に温度が高くなっている。したがって、局所熱伝達率は板の端部で最も高く、板の中央に向かうに従って単調に低下することがわかる。つぎに $W = 30\text{mm}$ になると、 $W = 20\text{mm}$ 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、新たに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 $3\sim 5$ 秒)で消滅・発生を繰り返すことを観察している。このため、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 = 50mmになると、このはん点はさらに明瞭となり、伝熱面上に定在するようになる。さらに板幅の大きなW = 100mmでは、この低温部は伝熱面中心付近にまで達する細長い筋状となり、しかも伝熱面のスパン方向に比較的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 = 150mmでは、伝熱面中心部近くに、この筋状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・消滅を繰り返すことを確認している。また、W = 250mm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ことが注目される。

これら伝熱面表面温度分布の可視化は本実験により始めて試みられたものであるが、伝熱面上には特徴的な幾つかの温度パターンが現われることが明らかとなった。このうち、低温の筋状模様は、かつて Husar & Sparrow⁽²³⁾がチモールブルー法によって見いだした筋状の流れと何らかの関連が有るように思われる。そこで、このような筋状模様を含めて一連の温度パターンが何故生じるかについて、つぎに伝熱面上の流れを可視化することにより調べてみることにする。

2.3.2 伝熱面上の流れの可視化

A. 伝熱面上の流動

さて、前節の伝熱面温度分布の可視化結果より、伝熱面表面に2次元的な温度分布、ほぼ周期的な低温はん点状模様、定常な低温筋状模様および非定常不規則低温模様が現れることが明らかになった。そこで、これら温度模様と伝熱面上の流動との対応関係を調べるため、流れの可視化を行うことにした。ところで、伝熱面上には伝熱面の端部から周囲流体が流入し、伝熱面中央部からプルーム状に流出する一連の自然対流が生じることが予想される。そこで、伝熱面と同一水平面となるよう伝熱面の端部にスリットを設置し、ここから赤色の染料（ローダミンB）を帯状に流出させて、伝熱面に沿って流入する自然対流の様子を観察することにした。また併せて、上述の低温筋状模様および定常はん点状模様の成因を探るため、伝熱面上の局所的な流体の動きを染料により可視化した。このために、伝熱面の少し上方に細いステンレス・パイプを3本設置し、ここから緑色の染料（ウラニン）を流出させた。なお、これらの流れの可視化から、伝熱面端部から流入する自然対流は、伝熱面に対してほぼ水平に流入することを確認している。このため、伝熱面上の流れは伝熱面の板厚によって大きく変化しないと考えている。

さて、伝熱面幅 $W = 20\text{mm}$ の場合の可視化結果を図2-7に示す。これらの写真は伝熱面を真上および側方から撮影したものである。この図から明らかのように、伝熱面の端部に設けたスリットから流出した染料は、伝熱面に付着しながら伝熱面中央に向かって流れ、伝熱面の中心線上で直角に折れ曲がってほぼ直線的に鉛直上方へと流れ去る様子が観察できる。さらに、伝熱面の少し上方から緑色の染料を流出させると、この染料も伝熱面に沿って流れ、赤色の染料に接触することなくやがて鉛直上方に流れ去る。

つぎに $W = 30, 50\text{mm}$ の可視化結果を図2-8および図2-9にそれぞれ示す。これらの写真も図2-7と同様な方向から撮影したものである。

まず $W = 30\text{mm}$ の場合、伝熱面端部のスリットから流出した赤色の染料は伝熱面に沿って中央に向かって流れ、伝熱面中心より少し手前の位置から規則正しい周期（ほぼ3～5秒）で3次元的にはく離する。そして、はく離した後は鉛直上方に流れ去っていくことを確認した。さらに、伝熱面の少し上方より緑色の染料を注入すると、この染料は赤色の染料がはく離した間隙を縫って伝熱面に向かって侵入する。この緑色染料の侵入は、上述したはく離の周期に従って間欠的に生じることが観察できた。一方、 $W = 50\text{mm}$ の場合、赤色の染料は常に3次元的にはく離し、緑色の染料は赤色の染料がはく離した間隙を縫って伝熱面に向かって侵入する様子が、図3-9から読取れる。これらの可視化写真から、 $W = 30\text{mm}$ の場合、端部より流入した周囲流体が伝熱面に沿って流れるうちに、次第に高温となり、規則正しい周期で（3～5秒）伝熱面から3次元的にはく離すること。そして、このはく離した後の領域には伝熱面の上方にある低温流体が侵入し、その結果、前述した低温はん点模様が周期的に発生・消滅することがわかった。一方、 $W = 50\text{mm}$ の場合には、はく離は定常的に生じており、伝熱面上にある低温流体がこのはく離域後方に侵入する結果、定在的な低温はん点模様が生じることが明らかである。

つぎに、図2-10に $W = 150\text{mm}$ の場合の可視化結果を示す。これらの写真は、伝熱面を真上および側方より撮影したものである。図から明らかのように、スリットから出た赤色の染料は、伝熱面上を板の中心に向かってしばらく流れた後、伝熱面から3次元的にはく離している。そして、はく離した後の染料は一ヵ所に集中して流れている様子がわかる。また、この染料の集中はスパン方向に比較的規則正しいピッチで生じていることが伺える。このとき、伝熱面の少し上方から緑色の染料を流出させると、図に示すように、この染料は赤い染料がはく離した間隙を縫って、伝熱面近傍へと侵入している。そして、この染料も伝熱面に沿ってしばらく流れた後、はく離し、赤色の染料とともに不規則に乱れて鉛直上方へ流れ去っていく。なお、これらの流動状況は伝熱面幅 W の異

なる $W = 100\text{mm}$ および 250mm の伝熱面上においても同様に観察された。

以上の流れの可視化結果から、とくに伝熱面の幅が比較的広い場合には、伝熱面端から流入した低温周囲流体は伝熱面の端部付近で層流境界層を形成すること、この境界層流は3次元的にはく離すること、そして、このはく離に伴って伝熱面上の低温流体が伝熱面近傍へ侵入すること、また、その後染料は不規則に乱れて伝熱面中央部からプルーム状に流れ去っていくことなどが明らかにされた。このうち、水平平板に沿う自然対流境界層流が3次元的にはく離する現象は、本可視化によって初めて観察されたものであり、自然対流のはく離が、強制対流のはく離と異なるメカニズムで生じることを確認した点で極めて重要な知見であるといえる。また、はく離した後染料は集中して流れるが、このような染料の集中は Husar & Sparrow⁽²³⁾ によって見いだされた現象と同様であり、このような染料の集中が、自然対流のはく離の結果生じることを明らかにした点に、本可視化の意義が認められる。なお、このような3次元はく離およびそれに引き続く染料の集中は、流れ方向に軸をもつ縦渦の存在を示唆しており、層流から乱流への遷移がいわゆる Tollmien-Schlichting 型の不安定に依るものでなく、Gortler 型の不安定によって引き起こされることを暗示している。

最後に、以上の流れの可視化と前節で述べた伝熱面温度分布の可視化結果を比較・対照したところ、以下のような対応関係が明らかとなった。

- (1) 伝熱面両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、2次元的な温度分布の生じる領域に対応する。
- (2) 伝熱面上方の低温流体が、この高温流体に入れ代わって伝熱面に侵入する領域が、低温の筋状模様の領域に対応する。
- (3) この低温流体がはく離し、高温流体とともに不規則に乱れて鉛直上方に流れ去っていく領域が、不規則かつ非定常なはん点状模様の領域に対応する。

なお、以上の可視化結果に基づいて、伝熱面上の流動・伝熱を模式的に描くと図 2 - 1 1 のようになる。

B. はく離距離および低温筋間隔

さて、この図 2 - 1 1 に示された流動・伝熱現象のうち、伝熱面の端部から流入してきた低温周囲流体が一体如何なる条件で伝熱面からはく離するのか、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筋状模様が並ぶが、このピッチにどのような規則性があるのか、といった問題は、工学的に非常に興味を持たれる点である。そこで、上述したのと同様な可視化を、伝熱面の大きさおよび伝熱面熱流束を種々変化させた場合について行ない、はく離開始位置および低温筋のスパン方向ピッチを求めてみた。このうち、はく離開始位置については、はく離が 3 次元的に生じるので、その位置を厳密に特定するのは困難であるが、ここでは、図 2 - 1 1 に示したように、はく離し始める最も先端の位置 S をはく離開始位置とした。また、低温筋のスパン方向ピッチについても個々の筋間で微妙にその間隔が異なっている。そこで、本実験では少なくとも 20 ~ 30 個の筋間隔を測定し、その平均値で筋間隔 l を定義することにした。なお、後述するはく離開始位置 S および筋間隔 l は、主に染料による流れの可視化結果から求めたものであるが、感温液晶による伝熱面表面温度分布の可視化結果から求めた値と完全に一致することを確認している。

さて、まずはく離開始位置に関する測定結果を図 2 - 1 2 に示す。この図の縦軸には、板端からはく離開始位置までの距離 S を、また横軸には伝熱面熱流束 q_w をとっている。なお、図中には次章で取り扱う大きな伝熱面 $W = 850\text{mm}$ についての測定結果も併せて掲載している。この図から明らかなように、はく離は板幅の影響を若干受けるものの、伝熱面端からほぼ 10 ~ 20mm の間で起こり、伝熱面熱流束の増加に伴って次第にはく離に至る距離が短くなる。本研究では、このはく離開始位置を基に、

幾つかの無次元パラメータを用いた整理を試みたが、一般的には離開始条件を得るまでには至らなかった。これは、本実験では伝熱面を等熱流束条件で加熱しているため、無次元数中の物性値が伝熱面上の位置によって微妙に変化することが、結果的に無次元整理を困難にしたものと考えている。しかし、はく離距離 S を代表長さにとった修正レイリー数 $R a_s^*$ で表わせば、はく離開始位置は $1.5 \times 10^6 < R a_s^* < 4.0 \times 10^6$ の比較的狭い範囲にまとまることがわかった。

つぎに、低温筋間隔の測定結果を図 2-13 に示す。図の縦軸には低温筋のスパン方向平均間隔 l を、また横軸に伝熱面熱流束 q_w をとって表わした。なお、図 2-12 と同様板幅の広い $W = 850 \text{ mm}$ の結果も併せて載せている。この図より、低温筋の平均間隔 l は、いずれの板幅においても、ほぼ $5 \sim 10 \text{ mm}$ 程度の値となり、その間隔は伝熱面熱流束の増加に伴って狭くなることがわかった。また、これらの結果を低温筋間隔 l を代表長さとした修正レイリー数 $R a_l^*$ で表わすと、その値は $1.0 \times 10^5 < R a_l^* < 1.5 \times 10^5$ の範囲に納まった。このことから、低温筋はレイリー数もしくはグラスホフ数が一定となるように配列されることが明らかになった。

2.3.3 局所熱伝達率

以上の伝熱面温度分布および流れ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、これを主流もしくは x 方向と呼ぶ）の局所熱伝達率 $h_x [= q_w / (T_{wx} - T_\infty)]$ を測定してみた。このとき、定在的な筋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 l が $5 \sim 10\text{mm}$ 程度と非常に狭い。このため熱伝達率の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、伝熱面表面温度の可視化結果から、この筋状模様は実験を繰り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、再度実験を行なう、という操作を何度も繰り返し、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、 $20 \sim 30$ 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点としては $40 \sim 60$ 点得られる）を繰り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。

以上の実験によって測定された局所熱伝達率を、伝熱面熱流束を一定 $q_w = 1000, 3000$ および 5000W/m^2 に保ち、伝熱面幅を変化させた場合について、それぞれ図2-14、図2-15および図2-16に示す。これらの図の縦軸には局所熱伝達率 h_x を、また横軸には板端から板中心に向かう距離 x をとっている。また、図2-15には、縦軸の局所熱

伝達率のうち、とくに筋模様領域について平均値の他に、測定された熱伝達率の最大・最小値を併せて記した。まず、これらの図から、板が十分に広い場合には、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、 $q_w = 1000\text{W/m}^2$ の場合には $x = 15\text{mm}$ 前後で、また $q_w = 3000\text{W/m}^2$ の場合には $x = 12\text{mm}$ 前後で、そして $q_w = 5000\text{W/m}^2$ の場合には $x = 10\text{mm}$ 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 $q_w = 1000\text{W/m}^2$ の場合には $x = 25\text{mm}$ 付近で、 $q_w = 3000\text{W/m}^2$ の場合には $x = 23\text{mm}$ 付近で、そして $q_w = 5000\text{W/m}^2$ の場合には $x = 20\text{mm}$ 付近でそれぞれ極大値をとり、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。

また、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、伝熱面の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2-6で低温筋状模様がスパン方向に最も拡大した筋の先端部分に、また、(5)局所熱伝達率の極大値以降の領域は、低温筋の尾部および不規則かつ非定常なはん点模様の領域にそれぞれ対応していることがわかった。

ところで、このような局所熱伝達率に関しては、Ishiguro et al.

(19) および Yousef et al. (20) が等温伝熱面について測定を行なっている。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、その結果によれば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無理がある。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。

一方、本実験では極大点以降の伝熱面中心部においても、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 2-6 の温度分布の可視化結果において、低温筋模様が板中央にいくにしたがって次第に不鮮明に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。

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 2-17 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、伝熱面と周囲流体の温度差を小さく抑えている。このため、局所の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 2-17 に示した実験結果から、局所ヌッセルト数 Nu_x ($= h_x \cdot x / \kappa$) の修正レイリー数 Ra_x^* ($= g \beta q_{wx}^4 / \lambda \nu \kappa$) に対する勾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、次の関数関係を仮定し、

$$N u_x = C R a_x^{*n} \quad (2.9)$$

係数 C および指数 n を図 2-17 から求めると、以下のようになった。

$$\text{領域 (I)} \quad 10^2 < R a_x^* < 10^6$$

$$N u_x = 0.66 R a_x^{*1/6} \quad (2.10)$$

$$\text{領域 (II)} \quad 10^6 < R a_x^* < 5 \times 10^7$$

$$N u_x = 0.066 R a_x^{*1/3} \quad (2.11)$$

$$\text{領域 (III)} \quad 5 \times 10^7 < R a_x^* < 10^{11}$$

$$N u_x = 0.70 R a_x^{*1/5} \quad (2.12)$$

このうち、領域 (I) については前述のはく離位置 ($1.5 \times 10^6 < R a_x^* < 4 \times 10^6$) 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⁽⁵⁾ 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 $P r = 7$ および $G r_x^* = G r_x \cdot N u_x$ として換算すると、つぎのように表わせる。

$$N u_x = 0.607 R a_x^{*1/6} \quad (2.13)$$

本実験で得られた局所ヌッセルト数の整理式 (2.10) は、式 (2.13) と勾配が一致し、係数も比較的近い値を示していることがわかる。このことから、伝熱面端部には層流境界層流れが実現されていると断言してさしつかえ無いだろう。

一方、領域 (II) は、図 2-14 ~ 図 2-16 に示した局所熱伝達率分布でいうと、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 (2.12) に示したように $R a_x^*$ 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 2-14 ~ 図 2-16 において局所熱伝達率が極大値以降も板中心に向かって減少することによる。従来の実験者によれば、領域 (III) に相当するレイリー数では、伝熱面上の流

れは乱流となっており、その熱伝達率は位置 x に無関係に一定となるはずである。ところが、本実験結果を見る限り、そのような熱伝達率一定の領域は伝熱面上にほとんど存在しないことが明らかである。なお、さらに伝熱面の幅が広がった場合に、伝熱面中央部の熱伝達率がどのようなになるか、果して一定になるか否か、という問題は非常に興味のもたれるところである。そこで、この問題については次章で詳しく検討することにした。

$$N_{eff} = 1.25 R x^{0.25} \quad (9)$$

領域 (II) $0.15 \times 10^3 < R x^{0.25} < 0.4 \times 10^3$

$$N_{eff} = 0.25 R x^{0.25} + 0.1 \quad (10)$$

領域 (III) $0.4 \times 10^3 < R x^{0.25} < 1.0 \times 10^3$

$$N_{eff} = 0.25 R x^{0.25} - 0.1 \quad (11)$$

これらの実験式と、理論熱伝達率の測定値から算出される平均ヌセルト数を算出した結果を、図 2-1-1 に示す。図 2-1-1 では、図 2-1-1 が、図 2-1-1 によく一致する。また、等温伝熱面に対する理論熱伝達率式、 $N_{eff} = 0.25 R x^{0.25}$ の関係を用いて等温熱伝達率を算出し、図 2-1-1 に計測した。この結果から、本実験値は従来の実験値の最大と最小値の範囲内にはほぼ位置することがわかる。しかし、ここで従来の実験式と本研究で提案する実験式とは、以下の点が大きく異なることを注意しておく必要がある。

その一つは領域の区分である。従来の実験者は伝熱面上の流況を層流と乱流とに分け、それぞれについて実験式を算出している。ところが本研究では、層流と乱流との間に過渡域が存在する領域がかなり見られることによって存在することを明らかにしている。この過渡域の存在を全く考慮していない従来の実験式は、たとえそれほど近い値を算出しようとも間違っていると考えられる。もう一つは式 (9) の関係は、水平伝熱面上の乱流に関するものである。従来の実験者は、伝熱

2.3.4 平均熱伝達率

ところで、前節2.3.3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 ($= h_m \cdot W / \kappa$) と修正レイリー数 Ra^* ($= g \beta q_w W^4 / \lambda \nu \kappa$) を用いて表わすと、つぎのようになる。

$$\begin{aligned} \text{領域 (I)} \quad & 1.6 \times 10^3 < Ra^* < 1.6 \times 10^7 \\ Nu &= 1.25 Ra^{*1/6} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \text{領域 (II)} \quad & 1.6 \times 10^7 < Ra^* < 8 \times 10^8 \\ Nu &= 0.04 Ra^{*1/3} + 9.7 \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \text{領域 (III)} \quad & 8 \times 10^8 < Ra^* < 1.6 \times 10^{12} \\ Nu &= Ra^{*1/5} - 13.5 \end{aligned} \quad (2.16)$$

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2-18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整理式を、 $Ra^* = Nu \cdot Ra$ の関係を用いて等熱流束条件に変換し、図2-18に併記した。この図から、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。しかし、ここで従来の実験式と本研究で提案する整理式とは、以下の点が大きく異なることを注意しておく必要がある。

その一つは領域の区分である。従来の実験者は伝熱面上の流れを単純に層流と乱流とに分け、それぞれについて実験整理式を提案している。ところが本研究では、層流と乱流との間に遷移域とも呼ぶべき領域がかなりの拡がりをもって存在することを明らかにしている。この遷移域の存在を全く考慮していない従来の実験整理式は、たとえどれほど近い値を与えようとも間違っていると看做されるを得ない。もう一つの大きな問題は、水平伝熱面上の乱流に関するものである。従来の実験者は、伝熱

面上にどのような流れが実現されているか確認しないまま、以下の仮定のもとで実験整理式を提案してきた。すなわち (1)伝熱面がある程度大きければ伝熱面上の流れは大部分乱流となるはずである、(2)その熱伝達は下面加熱・上面冷却の水平流体層内の乱流と類似したものになるはずである、(3)従って熱伝達率は伝熱面上の位置に依らず一定となるはずである、(4)よって平均熱伝達率も伝熱面の大きさに依存しないはずである。しかし、伝熱面上で生じている現実の現象は、上記仮定とは全く異なっている。すなわち、本実験で用いたような大きさの伝熱面あるいはレイリー数域では、伝熱面上のほとんどがいわゆる遷移域で占められており、乱流域はその存在さえあいまいである。したがって、この乱流域の存在を確認しないまま提案された従来の実験式は、間違いであるばかりでなく、研究者に誤った自然対流のイメージを植えつけてきたといっても過言では無い。

それでは、水平伝熱面上に乱流が一体どういう場合に存在し得るのか？、また、存在するとすれば、その流動や熱伝達はどのようなものか？という疑問がつぎに当然湧いてくるはずである。そこで、次章ではこの乱流を伝熱面上に実現するため、さらに大きな伝熱面を用いた実験を行うことにした。

2. 4 第2章のまとめ

本章では、有限幅の水平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。とくに、伝熱面の流入端近傍に生じる層流境界層流、はく離流およびはく離域後方の遷移流について集中的な検討を行い、流動・伝熱機構の詳細を明らかにした。

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が、 $10^2 < Ra_x^* < 10^{11}$ の範囲で実験を行なった。

まず、伝熱面全体にわたる流動・伝熱を定性的に把握するために、染料による流れの可視化および感温液晶による温度分布の可視化を行った。まず、伝熱面の表面温度分布を可視化した結果、

(1) 伝熱面の表面には、板の端から板の中央に向かうにつれて順に、2次元温度分布、定在的かつ規則的な低温筋模様、および不規則かつ非定常な低温はん点状模様、の三つの特徴的な温度模様が現われることが明らかとなった。

つぎに、伝熱面上の流れを可視化したところ、

(2) 伝熱面端部から低温の周囲流体が流入し、伝熱面に沿ってわずかな距離流れたあと、伝熱面から3次的にはく離する、このはく離の間隙を縫って伝熱面上にある低温の流体が、伝熱面に向かって侵入する、そして、この低温流体もやがて伝熱面からはく離した後に、不規則かつ乱れた流れが発生する、などの一連の現象が観察された。また、これらの両可視化結果から、

(3) はく離は強制対流のそれと違い、3次的なはく離であること。

(4) はく離の開始位置 S (もしくは境界層流の終端位置) は、 S を代表長さとする修正グラスホフ数 Gr_s^* が $Gr_s^* = 1.5 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$ で与えられること。

(5) はく離後、流れは直ちに乱流とならずに、遷移流とも呼ぶべき定常

かつ 3 次元的な流れが相当な拡がりをもって発生すること。

などの事実が明らかとなった。

また、以上の可視化結果を参考に、流れ方向の局所熱伝達率の測定を行なったところ、

(6) 伝熱面端部の 2 次元温度分布域の局所熱伝達率は、従来の層流解析解と比較的良く一致しており、この部分に層流境界層流が生じること、

(7) 3 次元的なはく離および低温周囲流体の侵入に伴って、はく離域の熱伝達率は顕著に増加すること、

(8) 遷移域の熱伝達率は、伝熱面中心に向かって単調に低下していくこと、このため本実験で用いた幅 $W = 250\text{mm}$ の伝熱面でも、熱伝達率が一定となる領域はほとんど存在しないこと、

などが明らかとなった。

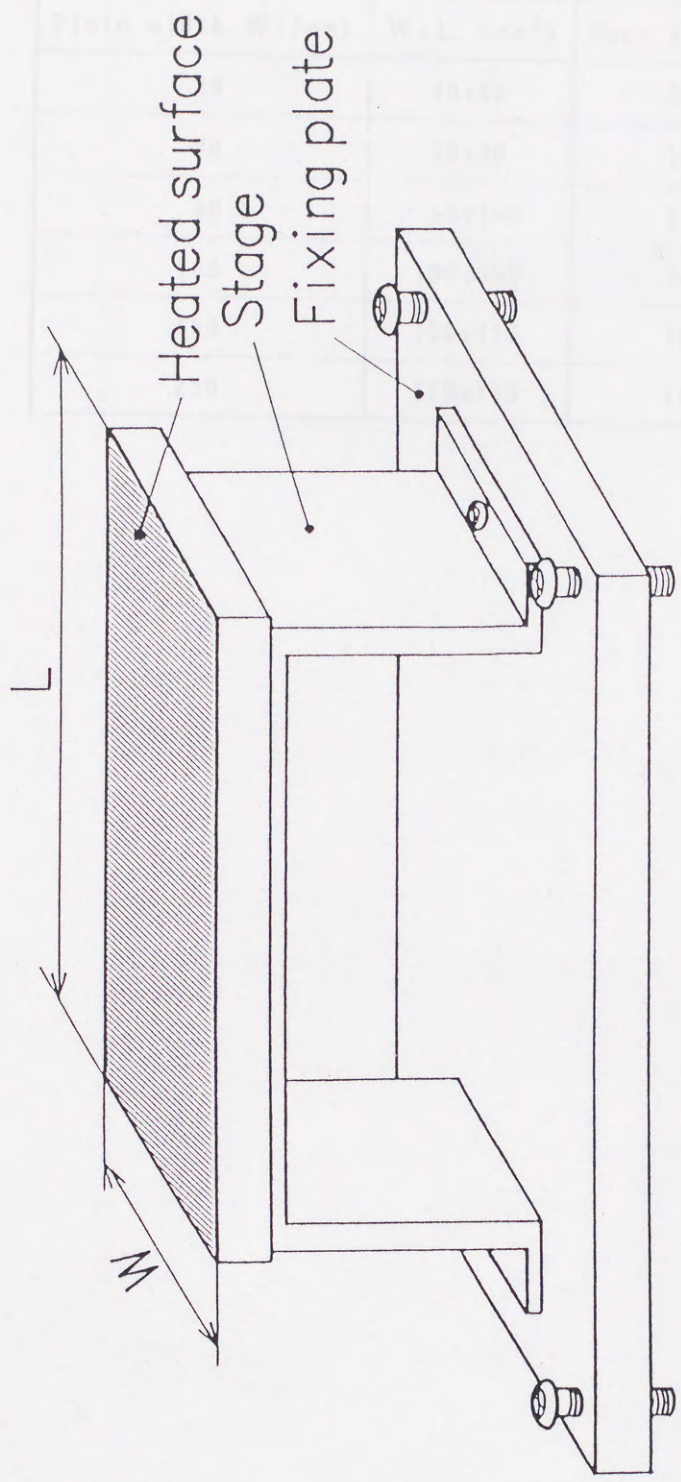


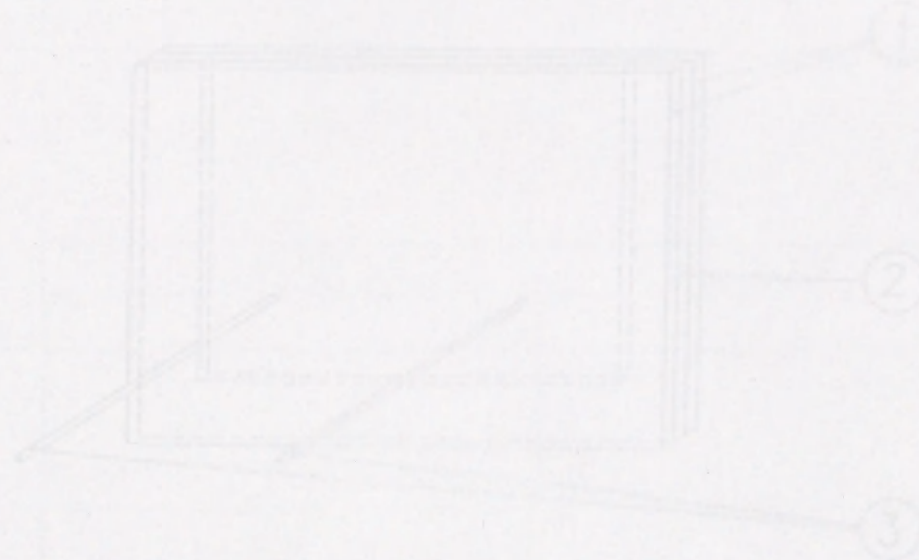
图 2 - 1 实验装置

表 2 - 1 実験条件

Plate width W (mm)	W x L (mm ²)	Heat flux q_w (W/m ²)
20	20x60	1000 ~ 5000
30	30x90	1000 ~ 5000
50	50x150	1000 ~ 5000
100	100x300	1000 ~ 5000
150	150x450	1000 ~ 5000
250	250x750	1000 ~ 5000

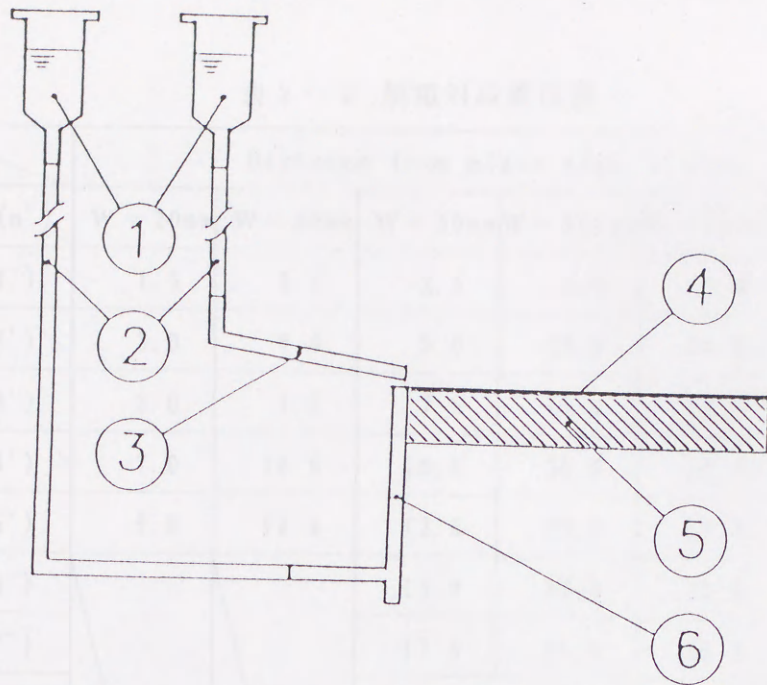
1. Heater coil
 2. Glass tube
 3. Stainless steel plate
 4. Water surface
 5. Heating coil plate

図 2-1 実験装置の概略図



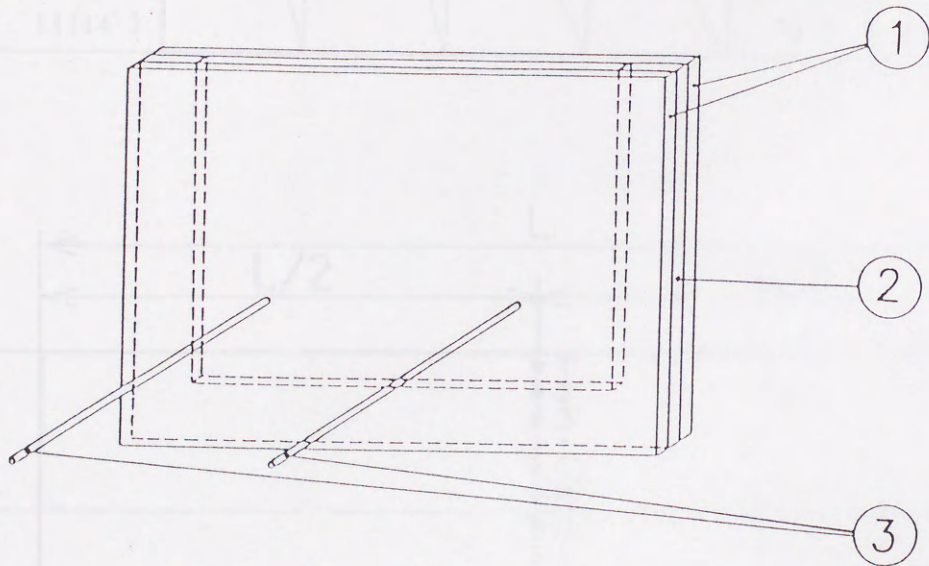
1. Heating coil
 2. Both inner and outer glass
 3. Stainless steel plate

図 2-2 実験装置の概略図



- | | |
|-------------------------|------------------------|
| 1. Reservoir | 4. Heated surface |
| 2. Vinyl tube | 5. Acrylic resin plate |
| 3. Stainless steel pipe | 6. Dye Injection slit |

図 2 - 2 流れの可視化方法



- | |
|-----------------------------|
| 1. Acrylic resin plate |
| 2. Both faces adhesive tape |
| 3. Stainless steel pipe |

図 2 - 3 可視化用スリット詳細

表 2 - 2 熱電対設置位置

No. n(n')	Distance from plate edge x (mm)					
	W = 20mm	W = 30mm	W = 50mm	W = 100mm	W = 150mm	W = 250mm
1(1')	1.5	2.5	2.5	5.0	5.0	15.0
2(2')	3.0	5.0	5.0	10.0	10.0	28.0
3(3')	5.0	7.5	7.5	15.0	15.0	40.0
4(4')	7.0	10.0	10.0	20.0	20.0	55.0
5(5')	9.0	12.5	12.5	23.0	23.0	66.0
6(6')		15.0	30.0	28.0	76.0	
7(7')		17.5	35.0	33.0	83.0	
8(8')		20.0	40.0	38.0	90.0	
9(9')		22.5	45.0	43.0	96.0	
10(10')		48.0	48.0	102.0		
11(11')		55.0	107.0			
12(12')		60.0	112.0			
13(13')		65.0	117.0			
14(14')		70.0	122.0			

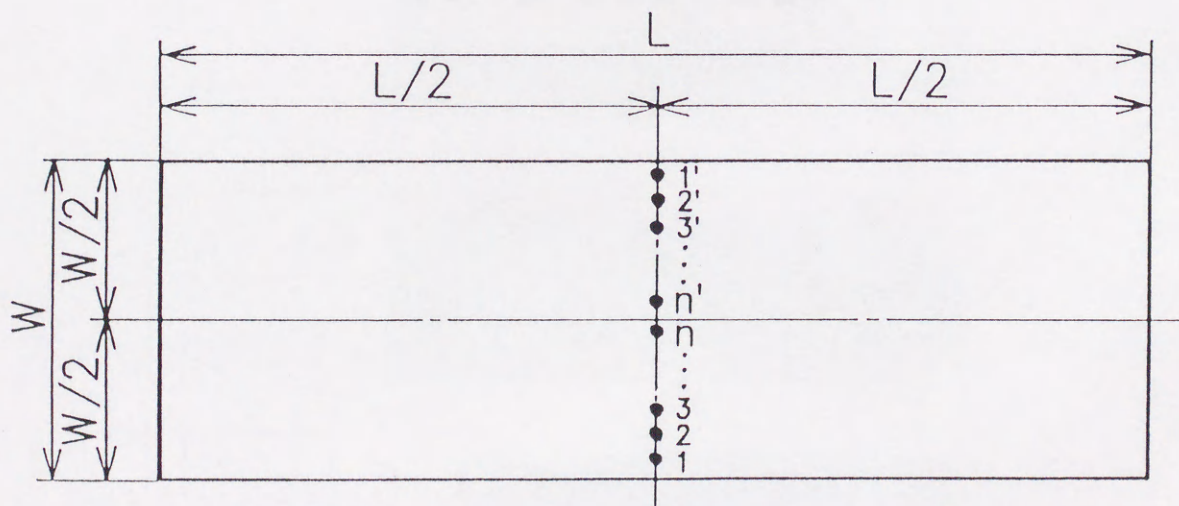


図 2 - 4 熱電対設置位置の概略

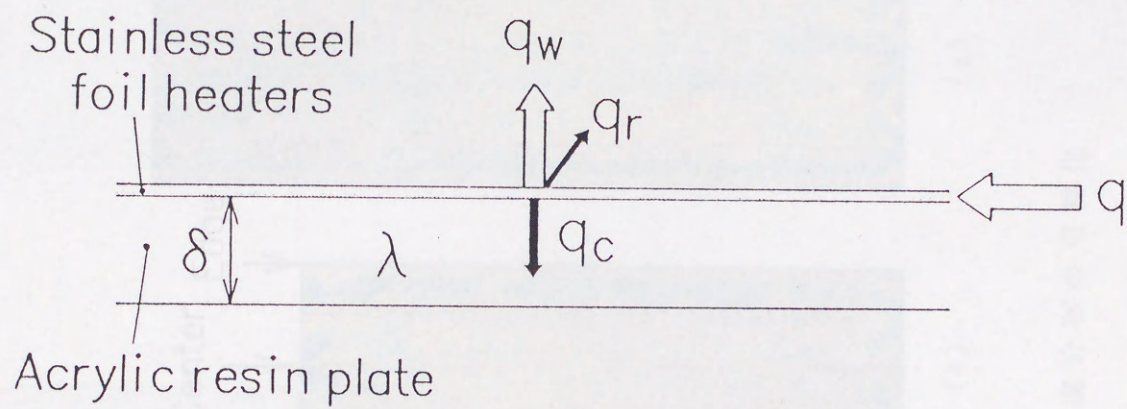


図 2 - 5 伝熱面の熱損失

Fig.	W (mm)	R a *
(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}

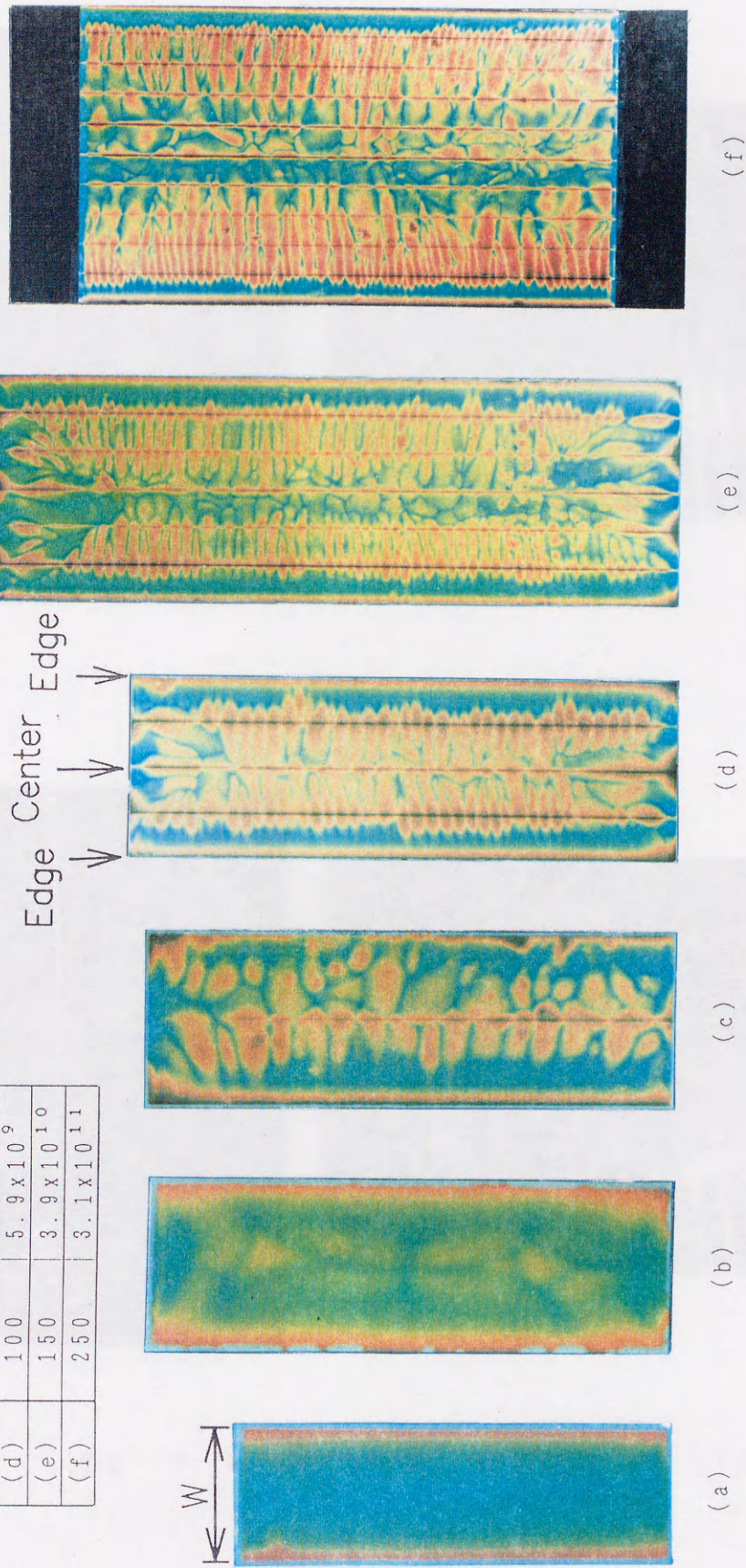


图 2 - 6 伝熱面表面温度分布の可視化

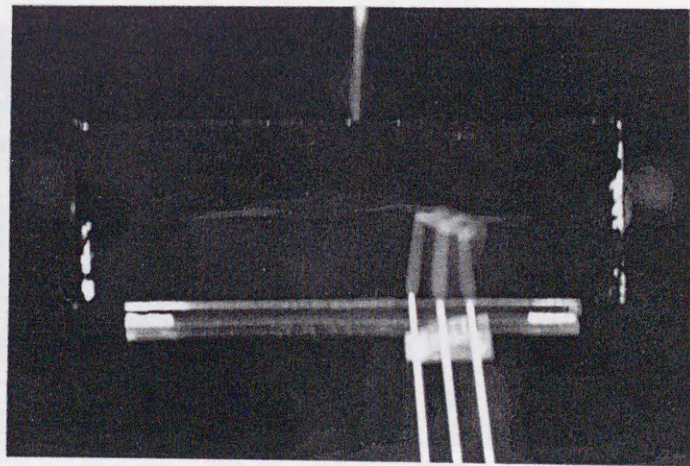
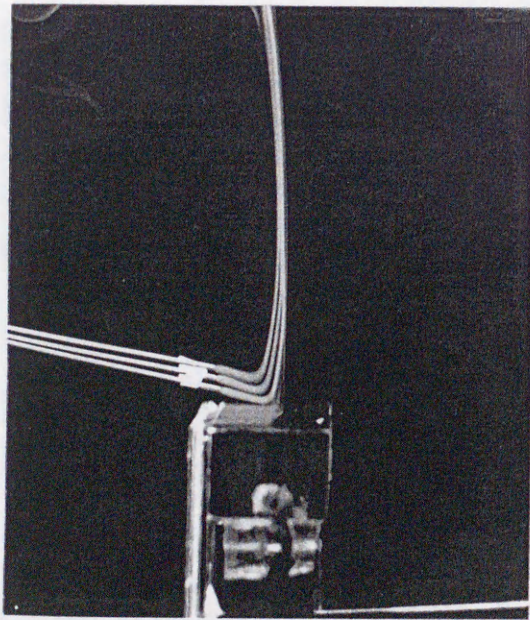
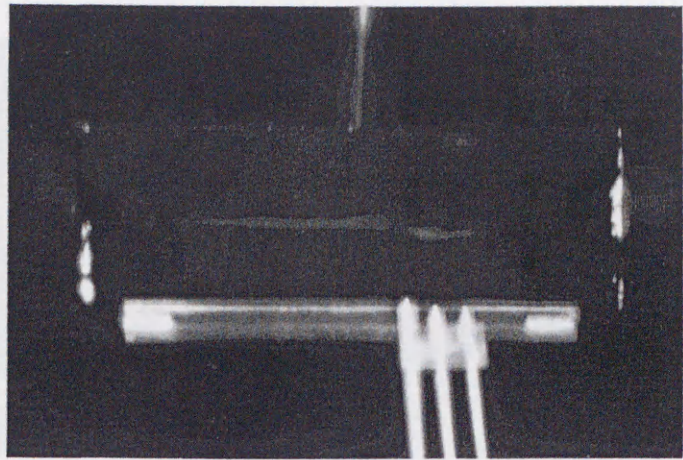
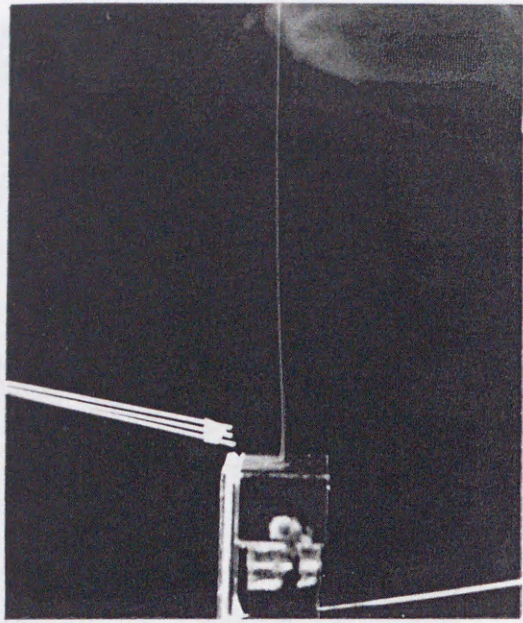


図 2 - 7 伝熱面上の流れの可視化 ($W = 20\text{mm}$)

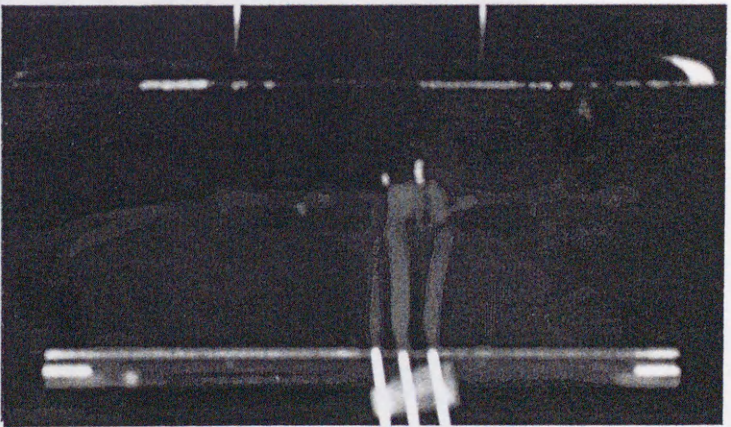
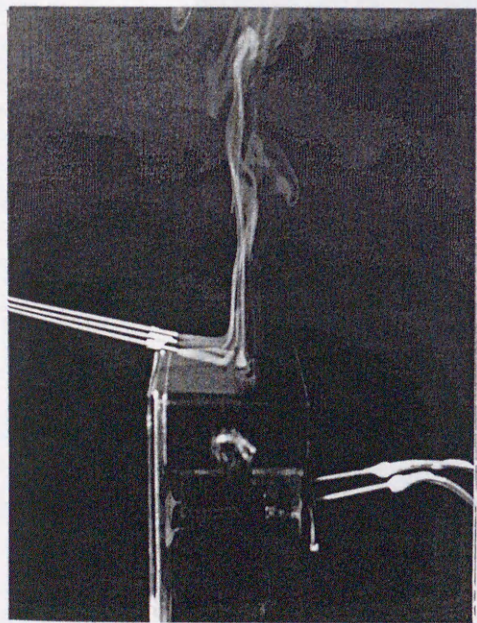
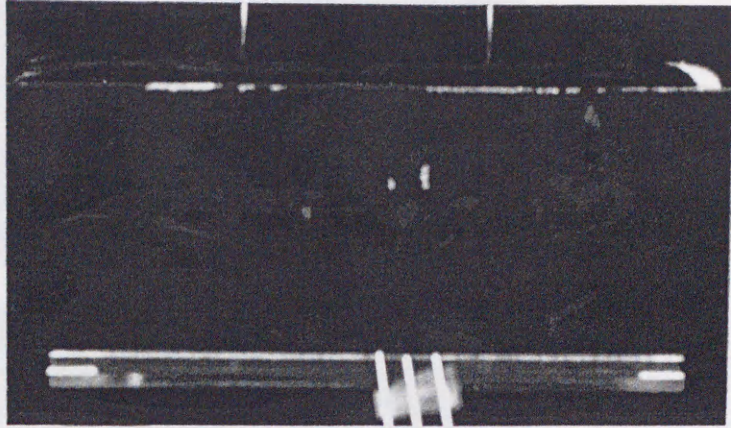
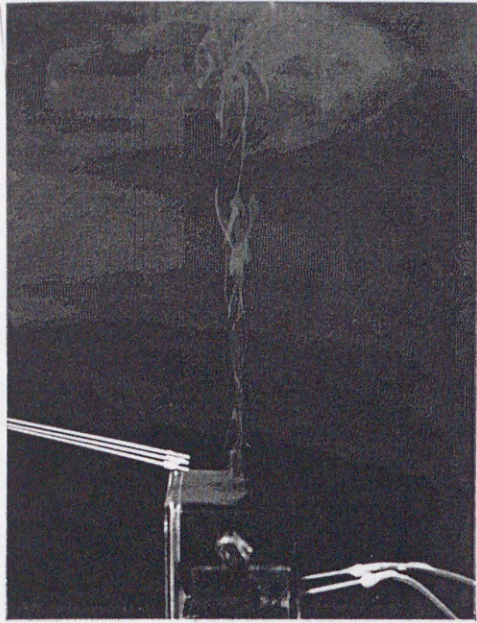


図 2 - 8 伝熱面上の流れの可視化 ($W = 30\text{mm}$)

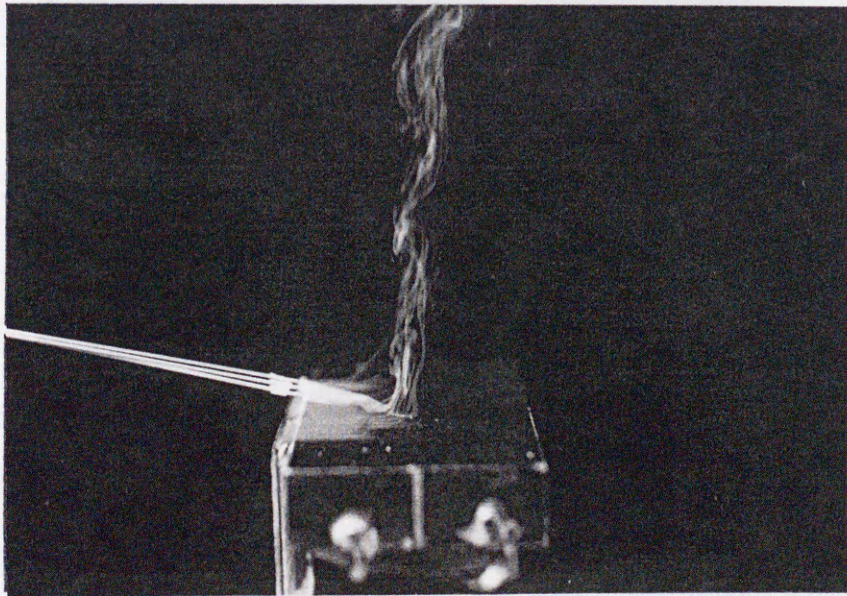
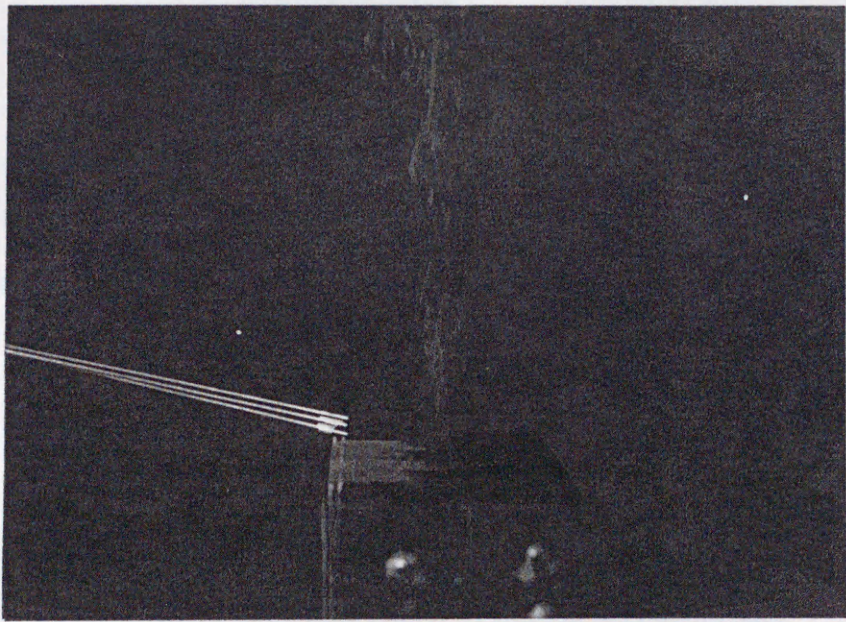
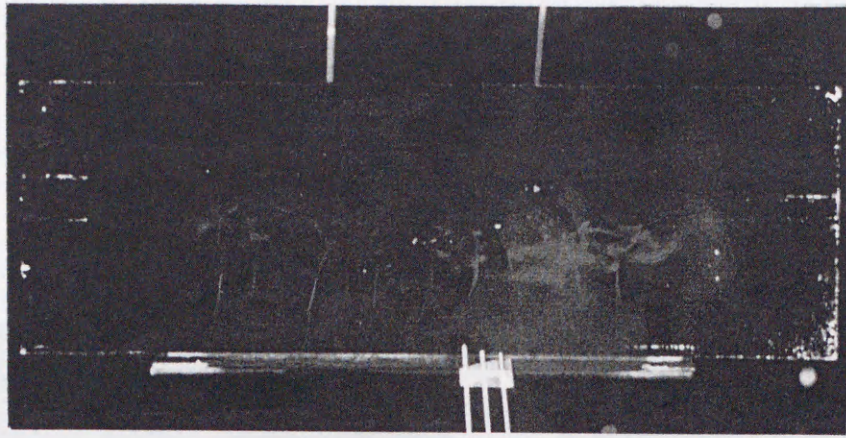


図 2 - 9 伝熱面上の流れの可視化 (W = 50mm)

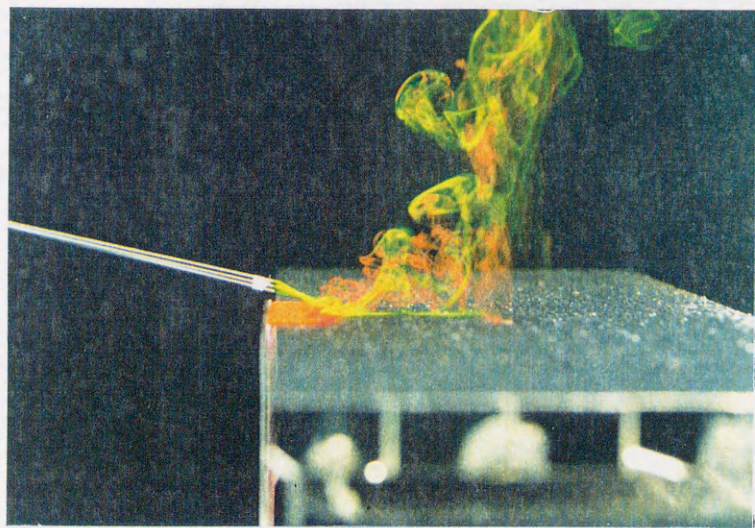
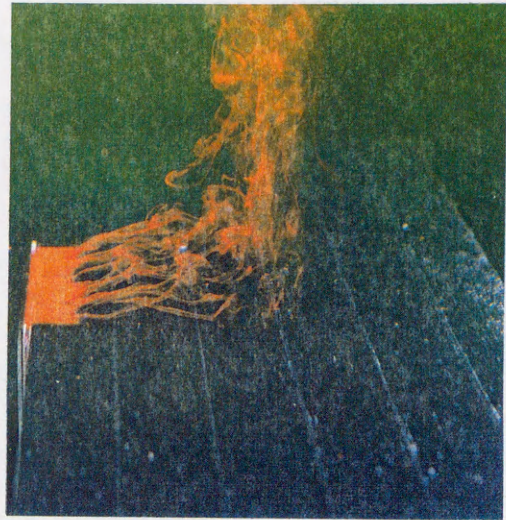


図 2 - 1 0 伝熱面上の流れの可視化 (W = 150mm)

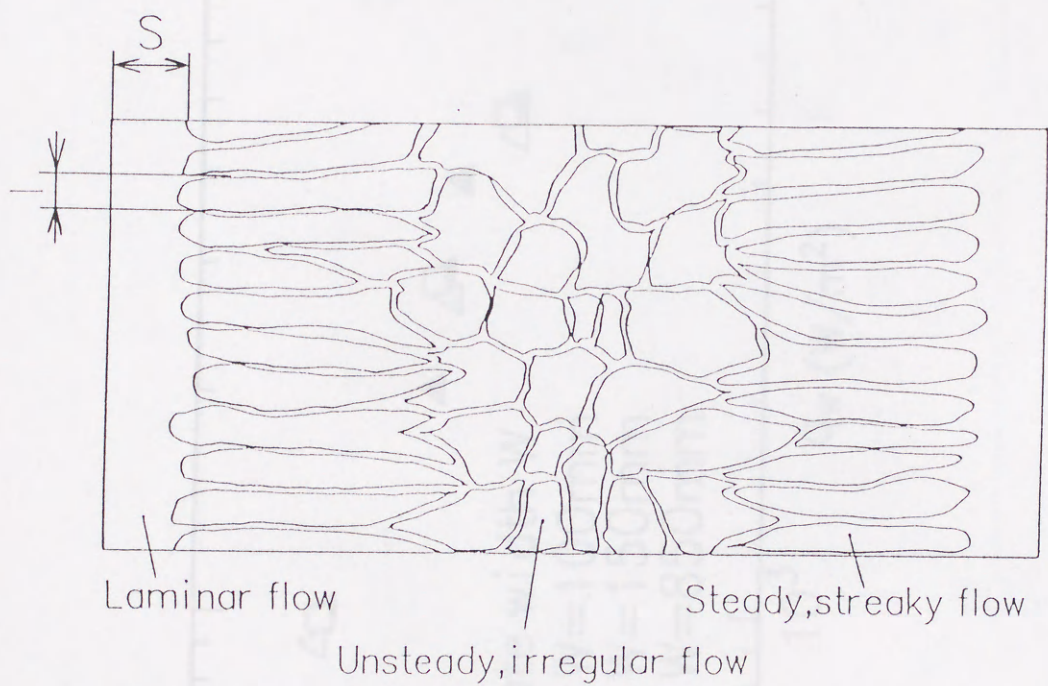
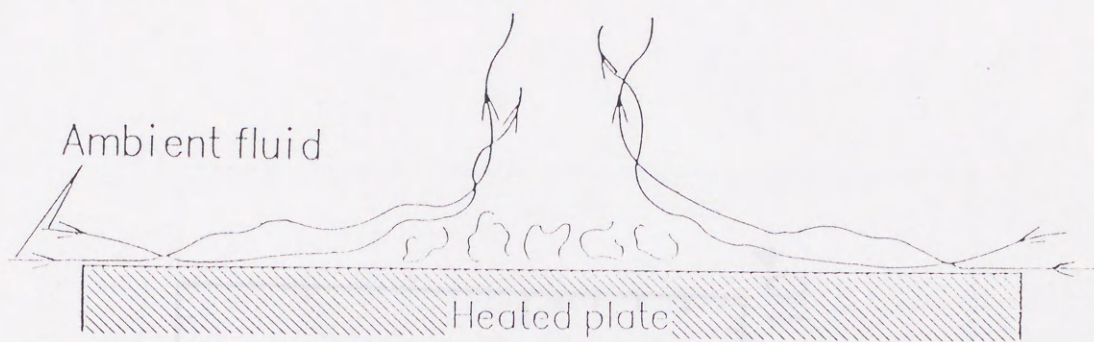


図 2 - 1 1 伝熱面の流動と熱伝達

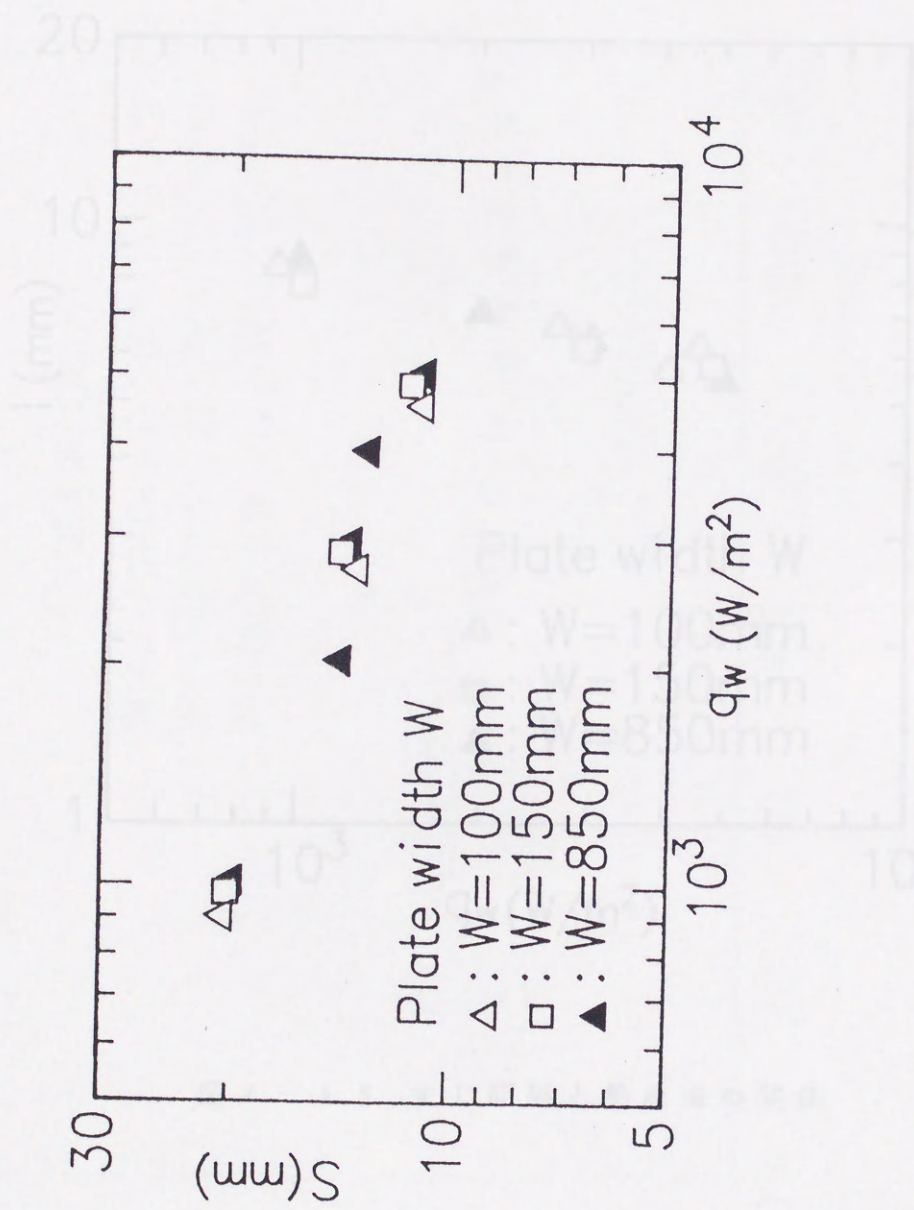


図 2 - 1 2 はく離距離と熱流束の関係

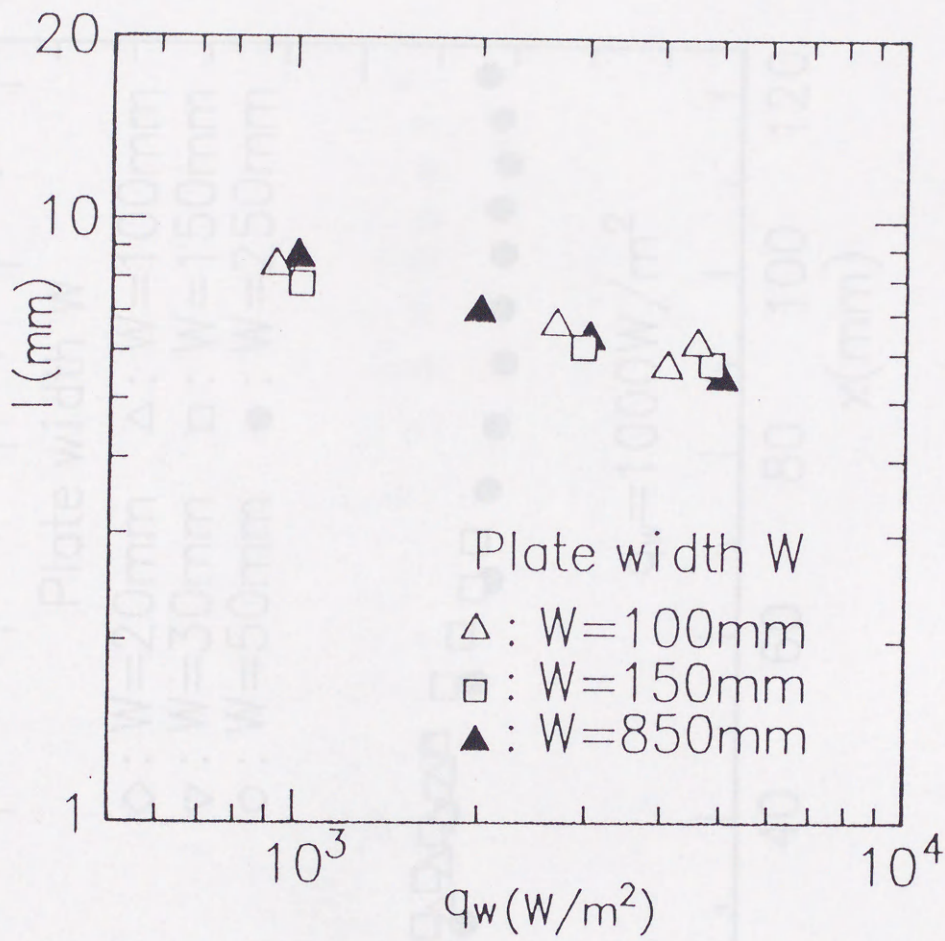


図 2 - 1 3 すじ間隔と熱流束の関係

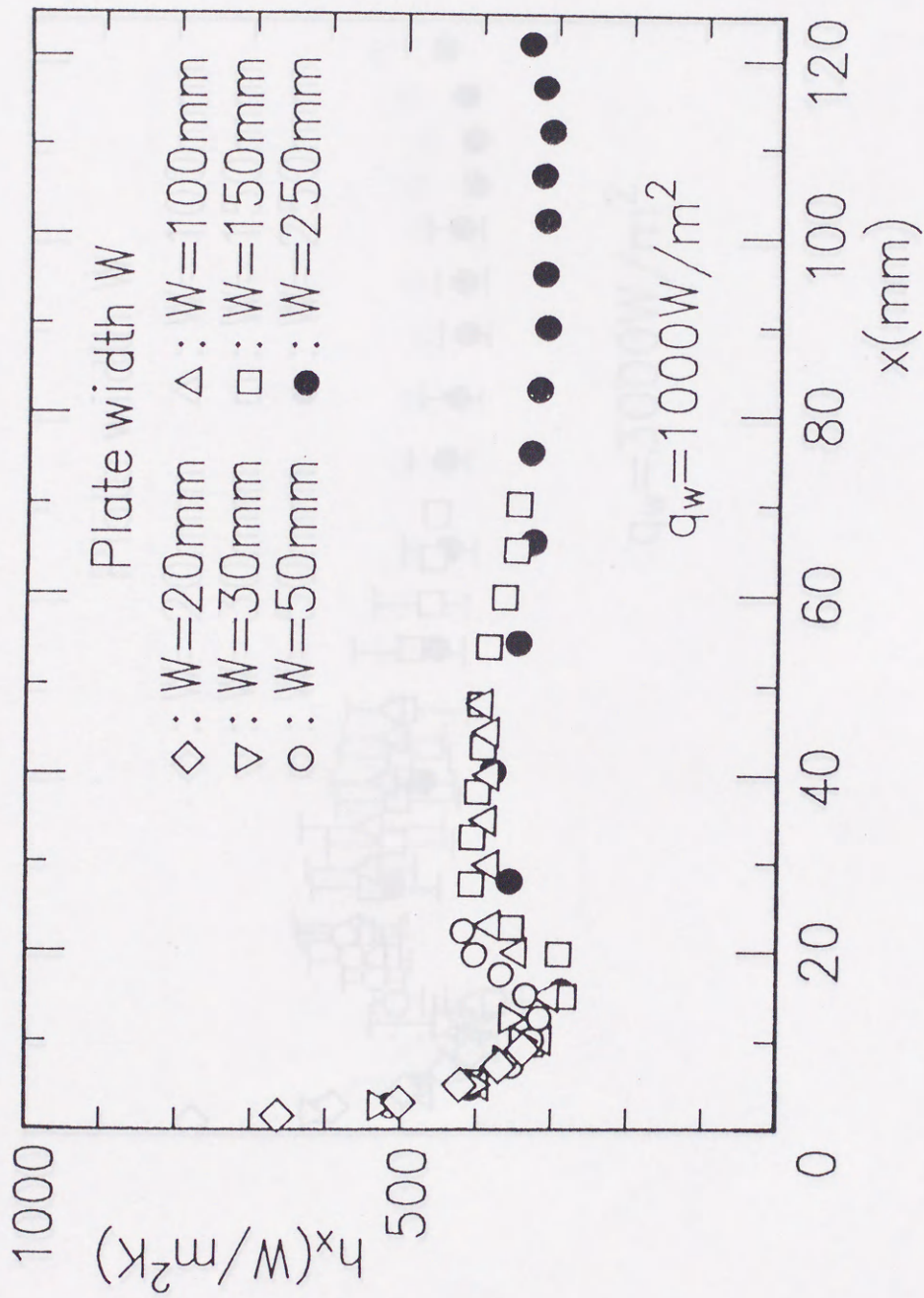


图 2-1-4 局所熱伝達率分布 ($q_w = 10000 \text{ W/m}^2$)

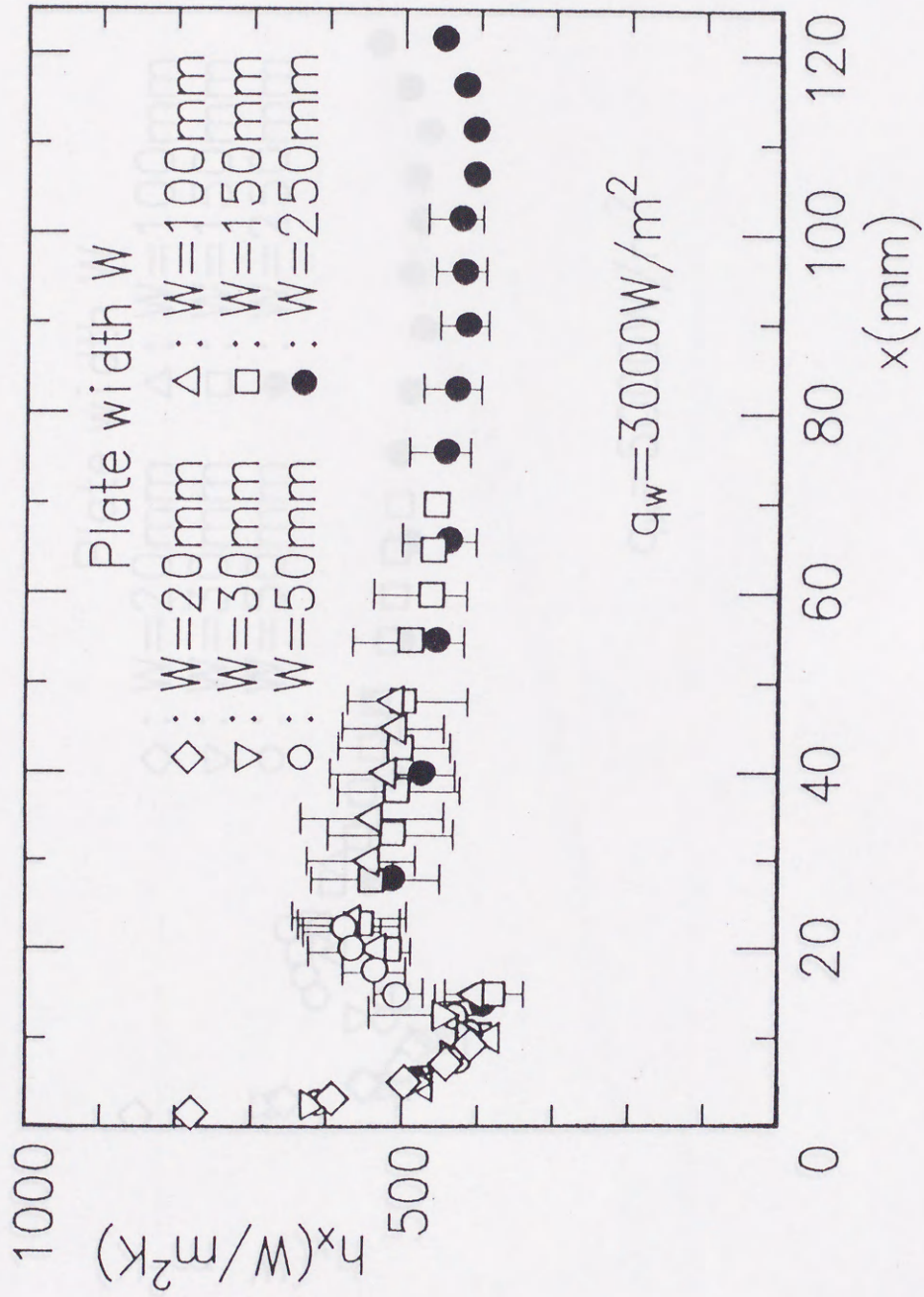


图 2-15 局所熱伝達率分布 ($q_w = 3000\text{W/m}^2$)

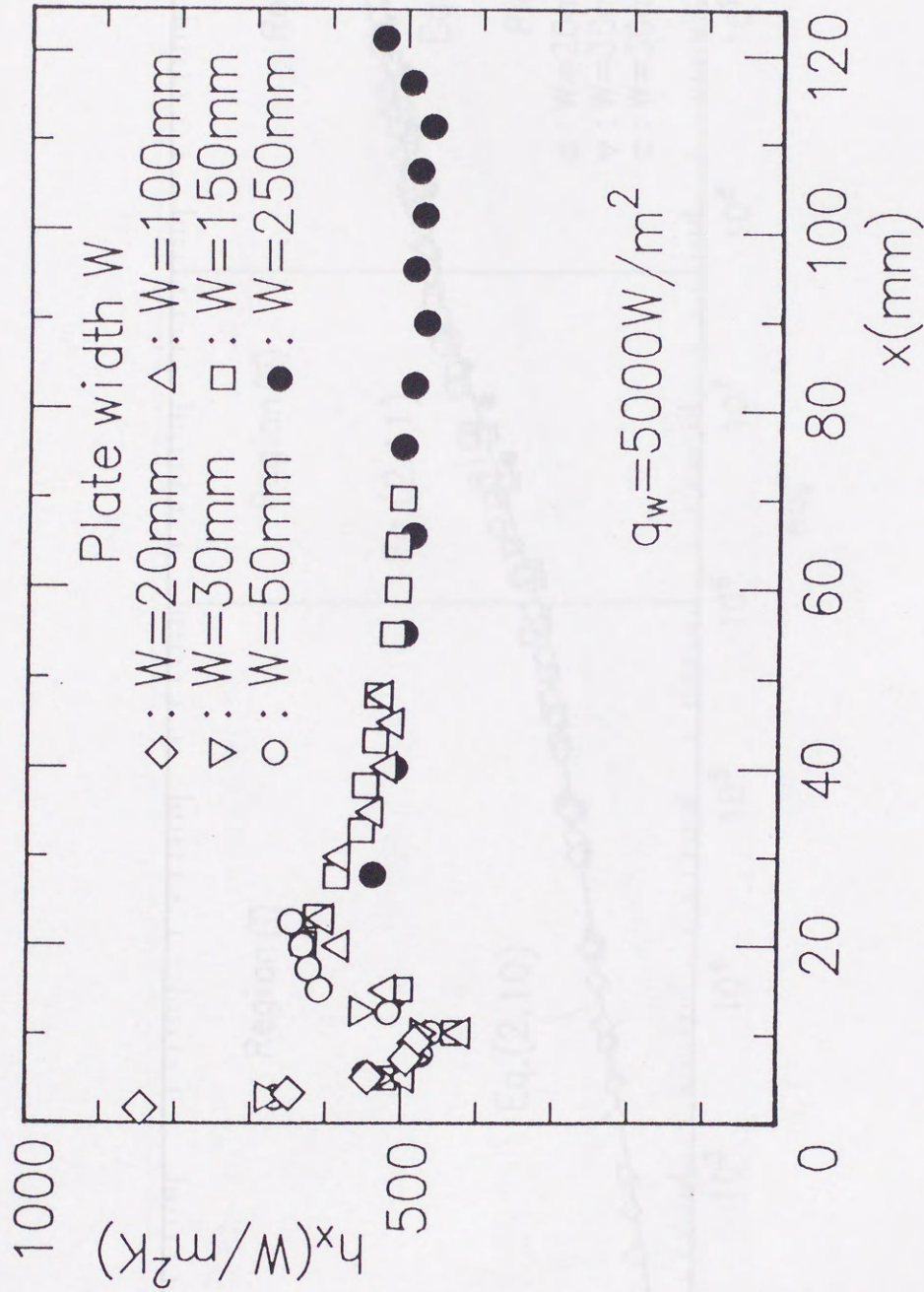


图 2-1-6 局所熱伝達率分布 ($q_w = 50000 \text{ W/m}^2$)

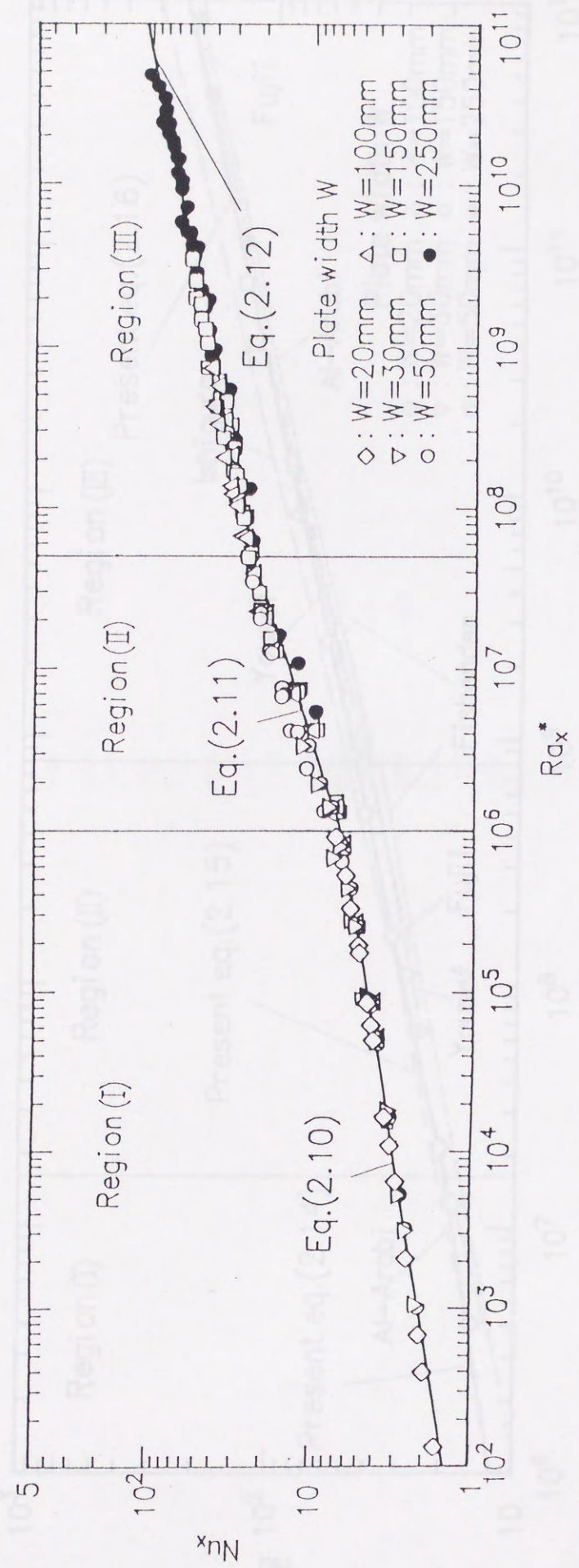


図 2-17 局所ヌッセルト数と局所修正レイリー数の関係

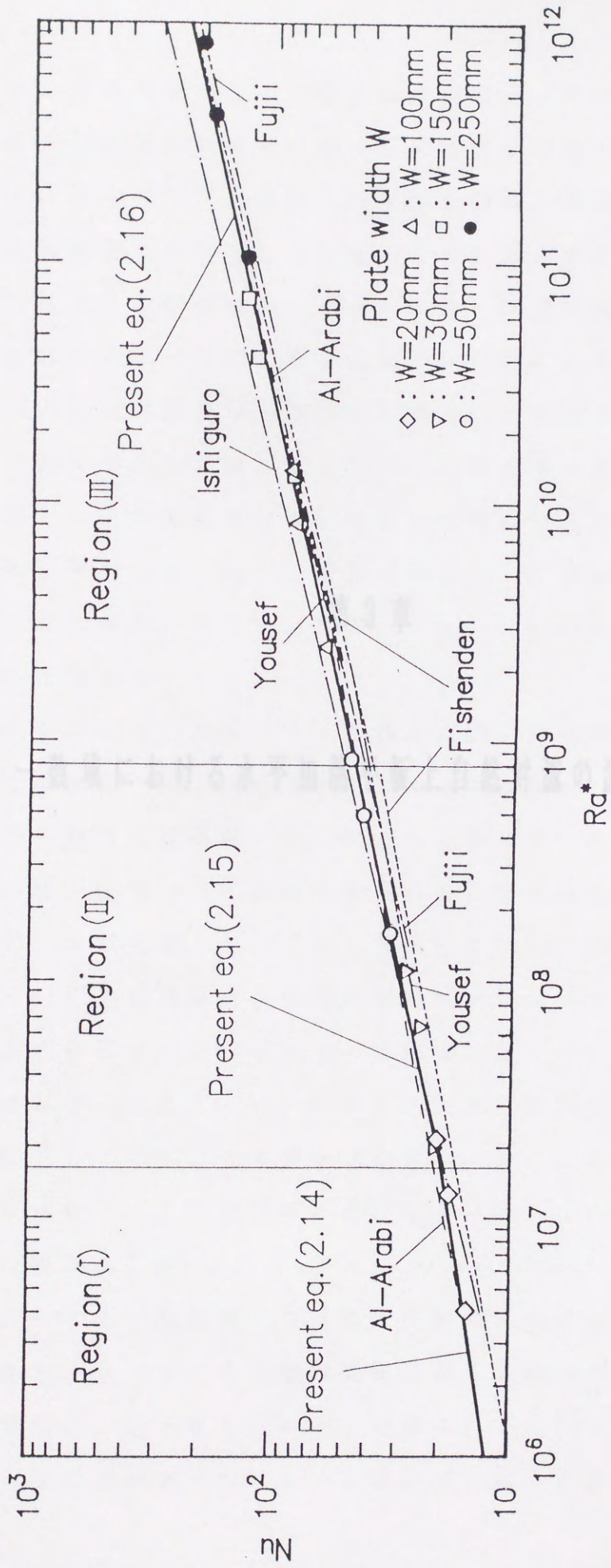


図 2-18 伝熱面の平均ヌッセルト数

本章では、等熱伝達条件で加熱された流体層 (厚さ $H = 10 \sim 210 \text{ cm}$) の水平加熱面まわりの自然対流の流動 (流動機構) および熱伝達係数を扱った可視化による研究、および流況遷移の定量的測定を通じて流況の相対的熱伝達係数からなる。その結果によると、とくに加熱面が比較的大きな領域では、図 3-1 (b) の模式的に示すような一層の流動が観察された。それらを図 3-1 (b) に記すと以下のとおりである。

まず、(i) 加熱面直下の流体層から流入し、表面に沿ってしばらく流れた後、二次元的に流く。このことは、図 3-1 (b) の模式図から見て、(ii) のように流体層の上にある流体層から二次元的に流入する。(iii) のように流体層もすべてはく離し、流体層から流入して流体層ととも、不規則に流れるが、加熱面中央部には、(iv) のように流体層からブーム状に流出していく。

第 3 章

高レイリー数域における水平加熱平板上自然対流の流動および熱伝達

一方これらの流れを対応して、加熱面直下の流体層には図 3-1 (b) のような一層の流動機構、(ii) のような二次元的な流動機構、および、(iii) の時間的・空間的に不規則な流動機構など一連の複雑なパターンが出現した。このうち、とくに (i)、(iv) の流動機構と (ii)、(iii) の流動機構との中間に遷移域と呼ぶべき (ii)、(iii) の領域が加熱面上にかなりの広がりをもって出現すること、しかもこの領域の熱伝達係数は、図 3-1 (b) に示すように、加熱面からの距離 y とともに距離に低下していくことを明らかにしたが、この事実は非常に重要である。なぜなら、この遷移域の存在によって、たとえば加熱面でのレイリー数 $Ra = (g\beta\Delta T H^3 / \nu^2)$ が 10^8 に達する非常に高い場合であっても、加熱面上の大部分の領域における自然対流の熱伝達係数の関数となり、またその平均熱伝達率も従来のいわれているように熱伝達率に無関係に一定とならなからいからである。

さて、上述の遷移域とも呼ぶべき領域が、さらに加熱面が大きくなると、

3. 1 緒言

前章では、等熱流束条件で加熱された有限幅 ($W = 20 \sim 250 \text{ mm}$) の水平加熱面まわりの自然対流の流動・伝熱機構を染料および感温液晶を用いた可視化によって探り、併せて局所熱伝達率の定量的測定を通じて伝熱面の局所伝熱特性を明らかにした。その結果によると、とくに伝熱面の幅が比較的大きな場合には、図 3-1 (a) に模式的に示すような一連の流れが観察された。それらを箇条書きに記すと以下のとおりである。

まず、(i) 低温周囲流体が端部から流入し、表面に沿ってしばらく流れた後、3次元的にはく離する。(ii) このはく離の間げきを縫って、今度は伝熱面上にある低温流体が、伝熱面近傍に侵入する。(iii) この侵入した流体もやがてはく離し、端部から流入した流体とともに、不規則に乱れながら伝熱面中央部に達する。そして、(iv) 伝熱面中央部からブルーム状に流出していく。

一方これらの流れに対応して、伝熱面表面温度分布には図 3-1 (b) に模式的に示すように、伝熱面の端部から中央に向かって順に、(v) スパン方向に一様な温度模様、(vi) 定在的な低温筋状の温度模様、および、(vii) 時間的・空間的に不規則な低温はん点状の温度模様など一連の特徴的なパターンが出現した。このうち、とくに(i)、(v)の層流境界層域と(iii)、(vii)の乱流域との中間に遷移域と呼ぶべき(ii)、(vi)の領域が伝熱面上にかなりの広がりをもって出現すること、しかもこの領域の局所熱伝達率は、図 3-1 (c) に示すように、板端からの距離 x とともに単調に低下していくことを前章で指摘したが、この事実は非常に重要である。なぜなら、この遷移域の存在によって、たとえば板幅基準の修正レイリー数 $R a^* (= g \beta q_w W^4 / \lambda \nu \kappa)$ が 10^{12} に達する非常に高い場合であっても、伝熱面上の大部分の領域における局所熱伝達率は距離 x の関数となり、またその平均熱伝達率も従来いわれているように板幅 W に無関係に一定とならないからである。

さて、上述の遷移域とも呼ぶべき領域が、さらに伝熱面が大きくなっ

た場合にどのように変化するか、具体的にいうと (1)伝熱面が大きくなればこの領域も拡大するのか否か、また、(2)その局所熱伝達率は板端からの距離 x に依存して低下していくのか否か、といった問題は興味もたれるところである。さらに、この遷移域よりも下流側の伝熱面中央部には、いわゆる乱流域が出現することが予想されるが、(3)この乱流域がどのような条件下で実現されるか、また、(4)その局所熱伝達率は果して伝熱面上の位置に無関係に一定になるか、といった疑問も生じる。そこで、これらの疑問点を明らかにするために、本章では前章で用いた伝熱面 ($W_{max} = 250\text{mm}$) よりも、さらに大きな伝熱面 $W = 850\text{mm}$ および 1500mm を用いて、高レイリー数域の伝熱・流動特性、とくに遷移域および乱流域の伝熱・流動特性、を中心に実験的に解明することにした。

3.2 実験装置および測定法

3.2.1 実験装置

本実験で用いた実験装置の概略を図3-2に示す。装置の基本的な構成は前章のそれとほぼ同じであるので、詳細な説明は省く。試験流体には可視化および測定の容易さなどから、水を採用した。伝熱面は、厚さ20mmの亚克力板表面に厚さ30 μ mのステンレスはくヒータをはり付けたものである。このヒータに定電圧電源(YAMABISHI, AUTO-VOLT, TYPE TAD-5K)を介して交流を通電することにより等熱流束条件で加熱した。また、伝熱面の熱流束はスライダック(YAMABISHI, VOLT-SLIDER, TYPE S-130-100)で調節した。伝熱面には高レイリー域を実現するために、板幅Wの異なる2種類W=850mmおよび1500mmのものを用いた。伝熱面の寸法が大きいこと、および伝熱面を設置する水槽の大きさに一定の限界があることから、本実験では伝熱面の奥行き(スパン)を、幅Wに比べ十分大きくとることができなかつた。そこで伝熱面のスパンは500mmとし、伝熱面の両側面に高さ250mmの側板を取付けることにより、伝熱面側方からの流体の流入を防いだ。この側板によって伝熱面上には2次元の流れが実現されるようにした。この伝熱面を架台に取り付けて、装置全体を幅1m \times 長さ2m、高さ1m、容量2tonという非常に大きな亚克力製水槽の底面中央部に設置した。なお、伝熱面が水平となるよう、架台四隅に設置したボルトにより微調整した。

以上の実験装置で実現可能な板幅基準の修正レイリー数 Ra^* は最大 10^{15} に達した。本実験では伝熱面を等熱流束条件で加熱しているため、従来の等温伝熱面を用いた実験とは直接比較できないが、 $Ra = Ra^* / Nu$ の関係を用いて変換すると、本実験の最大レイリー数は従来の実験のそれよりも約2けた程度高い値となった。

なお、本実験で試みた実験条件を表3-1に示す。

3.2.2 伝熱面表面温度分布の可視化および流れの可視化

A. 感温液晶による伝熱面表面温度分布の可視化

前節でも述べたように、低温筋状模様で代表される遷移領域が、伝熱面が大きくなった場合にどのように変化するか、また、それより下流にいわゆる乱流域が出現すると思われるが、その伝熱特性は？といった基本的な問題を包括的に把握するために、本実験では、まず感温液晶による伝熱面表面温度分布の可視化を試みた。なお、本実験で使用した感温液晶シートは、前章で使用した感温液晶と同様のものであり、呈色温度範囲が 27.1°C から 36.1°C までの 9°C の間で、低温から高温の温度変化に対応して色が、暗赤、茶、橙、黄、緑、青と順次変化する。

B. 流れの可視化

伝熱面の局所伝熱特性（温度模様）と伝熱面上の流動との関連を調べるために、図3-3に示すような可視化用装置を用いて、染料による流れの可視化を行なった。前章の場合と同様、本実験体系では伝熱面上の流動が容易に3次元流れに移行するため、板の端面にスリットを板と同一水平面上に設け、このスリットから染料を伝熱面に沿って帯状に流出させて伝熱面まわりの流動を観察できるようにした。このスリットは、図3-4に示すように2枚の亚克力薄板（厚さ1mm）、両面粘着テープ（厚さ0.3mm）および5本のステンレス・パイプ（外径0.88mm、内径0.58mm）から構成されている。また、染料には赤色蛍光性染料のローダミンB（ $\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$ ）0.2wt%水溶液を用いた。この染料は図3-3に示したように、リザーバである注射筒に蓄えられ、ビニール・チューブを介してスリットから流出される。なお、染料を流出する際には、まずその準備段階でビニール・チューブおよび可視化用スリット内に空気泡がないことを確認し、染料流出時に伝熱面まわりの流動をできるだけ乱さないように、リザーバ内の染料の水位と水槽内の水面とのヘッド差をごくわずかにして静かに染料を流出させた。

3.2.3 温度測定および熱伝達率の測定

伝熱面表面温度 T_w は、前章同様、図 3-5 に示すように、素線径 $70 \mu\text{m}$ の K 型（クロメル-アルメル）熱電対を伝熱面スパン方向中心線上のステンレスはくヒータ裏面にスポット溶接し、その熱起電力を測定することにより求めた。表 3-2 に熱電対取付け位置の詳細を示す。また、周囲流体温度も同一の径および同一の素材の熱電対を用いて測定した。その測定位置は伝熱面と同一水平面上で、伝熱面の端から 50mm 離れた位置にある。なお、本実験では非常に大きな水槽を用いているため、周囲流体温度は伝熱面の直上および水面のごく近くを除いて一様であることを確認している。

温度測定には、前章と同じく GP-IB インターフェイスを介して、パーソナル・コンピュータ（NEC, PC-9801DX）とマルチチャンネル・デジタル・レコーダ（ADVANTEST, TR2724）を利用した半自動測定を行なった。この測定は GP-IB コードおよび BASIC によるプログラムによって制御される。なお、得られた温度出力データは、5 秒間隔で 100 回スキヤニングを行なった平均値である。この測定を通常 20~30 回繰り返した。

伝熱面の局所熱伝達率 h_x は、伝熱面熱流束 q_w 、熱電対によって測定された伝熱面表面温度 T_w および周囲流体温度 T_∞ を用いて、次式で定義した。

$$h_x = q_w / (T_w - T_\infty) \quad (3.1)$$

また、伝熱面熱流束 q_w について、前章と同様の方法で裏面への熱伝導損失およびふく射損失を見積もったところ、これらの損失熱流束は最大でも、伝熱面総熱流束の 3% 以下と試算された。このことから伝熱面熱流束は、この熱損失を無視して、次式で求められるヒータ入力熱流束 q から算出することにした。

$$q_w = E \cdot I / A \quad (3.2)$$

ここで、 E : 電圧、 I : 電流、 A : 伝熱面表面積

なお、ヒータ入力電圧と電流は、それぞれデジタル・マルチメータ (ADVANTEST, TR6864) および電流計 (YOKOGAWA ELECTRIC WORKS, CLASS 0.5) を用いて測定した。

また、修正レイリー数 Ra^* 、平均ヌッセルト数 Nu などの無次元数中の物性値は前章と同様膜温度 T_f で評価し、体膨張係数 β には式 (2.8) で求められる平均体膨張係数を用いた。

3. 3 実験結果および考察

3. 3. 1 伝熱面温度分布の可視化

伝熱面の局所熱伝達率分布の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に貼付けて表面温度分布の可視化を行なった。その結果を $W = 850\text{mm}$ 、 1500mm の場合について実験条件と共に図 3 - 6 に示す。なお、比較のため前章の $W = 250\text{mm}$ の結果も併せて載せた。これらの写真はいずれも伝熱面の真上から撮影したもので、実際の伝熱面に対する縮尺が同一となるように写真の大きさを揃えている。

本実験で使用した感温液晶は、 $27.1 \sim 36.1^\circ\text{C}$ の温度範囲で呈色し、低温から高温への温度変化に対応して、色が暗赤、茶、橙、黄、緑、青へと順次変化する。図 3 - 6 に示した一連の可視化写真では、伝熱面はいずれも熱流束一定で加熱され、周囲流体温度は一定に保たれていることから、写真の温度の低い、暗赤、茶などの部分は熱伝達率が高い領域を、逆に温度の高い青い部分は熱伝達率の低い領域を、それぞれ表わしているとみなしてよい。

さて、図 3 - 6 (b) に示した $W = 850\text{mm}$ の結果であるが、まず板のごく端部には、(1)伝熱面のスパン方向に一様な温度分布が現れ、板中央に向かって急激に温度が高くなっていく様子が伺える。そして、その後方には、(2)スパン方向に比較的規則正しいピッチで並ぶ低温の筋状模様が現れている。この筋状模様は時間とともにその発生位置が変化しない定在的なものである。そして、板中央に向かうにつれて、この筋は徐々に細くなり、スパン方向にゆっくりと揺動、分裂し始める。この筋状模様の領域よりもさらに伝熱面中央寄りの領域では、(3)不規則な形状をした低温模様が発生している。この低温模様は、発生・消滅を繰り返しながら、全体として伝熱面中心に向かってゆっくりと移動していく。また、伝熱面中央付近では、(4)これとは異なる不規則かつ細かな模様が密に発生していることが明らかである。なお、(4)の低温模様は、伝熱面中心線を挟んで、時間とともに伝熱面の左右に大きくゆっくりと移

動することを確認している。

一方、図 3 - 6 (c) に示した $W = 1500\text{mm}$ においても、上述した (1) ~ (4) の領域が観察できるが、とくに、(1) の 2 次元温度模様、および (2) の低温筋状模様の拡がりは両者の間でほとんど変化が無いのに対して、 $W = 1500\text{mm}$ の方が、(3) の不規則低温模様の領域がかなり拡大していること、さらに、(4) の低温模様の領域が $W = 850\text{mm}$ に比べやや不鮮明になっていることが注目される。また、これら二つの結果を、板幅の狭い $W = 250\text{mm}$ の結果、図 3 - 6 (a)、と比べてみると、(1) の占める領域はほとんど変わらないのに対して、(2) および (3) の領域は伝熱面が大きい今回の可視化結果の方が明らかに拡大していることがわかる。以上の可視化結果より、伝熱面がある程度以上大きくなれば、(1)、(2) の領域の拡がりは一定となることが確認できた。また、本実験よりも更に大きな伝熱面を用いれば、おそらく (3) の領域のみ拡大すると予想できる。

3.3.2 伝熱面上の流れの可視化

前節の伝熱面温度分布の可視化結果から、伝熱面上には板端から中央に向かって順に、(1)スパン方向に一様な温度分布、(2)スパン方向に比較的規則的に並ぶ低温筋状模様、(3)不規則低温模様、および、(4)不規則かつ細かな低温模様が現れることが明らかになった。このうち(3)および(4)の領域は、本可視化実験によって初めてその存在が見い出されたものである。そこで、これらの温度模様が伝熱面上の如何なる流動の結果生じるかについて調べるために、染料を用いた伝熱面上の流れの可視化を行ってみた。その代表的な結果として、 $W = 850\text{mm}$ の場合を図3-7に示す。図3-7は、伝熱面の端部にスリットを伝熱面と同一平面となるように設けて、赤色の染料(ローダミンB)を帯状に流出させ、その流脈を側方および真上から撮影したものである。

この図から明らかのように、スリットから流出した染料は伝熱面に沿ってわずかな距離流れた後、3次元的にはく離している。これに伴って、比較的規則正しいピッチで染料の集中が生じている。その後、染料はスパン方向に揺動しながら徐々に分裂・崩壊し、不規則に乱れて伝熱面中央へと達している。そして、板のほぼ中心から鉛直上方へ乱流プルーム状に流れ去っていく。同様な流動パターンは、さらに板幅の広い $W = 1500\text{mm}$ の伝熱面上においても観察された。

これらの流れの可視化結果のうち、伝熱面端部付近での境界層の形成、3次元はく離の発生とそれに引き続く染料の集中等の現象については前章で詳しく取り上げたので、ここでは説明繰り返さない。本章で注目するのは、この染料の集中以降の流れである。染料が集中した以降の領域では、染料は非常に不規則に混じり合い、一部伝熱面からプルーム状に立ち上がりながらも、全体として伝熱面中央部まで達している。この事実、およびこの部分に対応する伝熱面温度分布パターンに全く規則性が認められないことを考え併せると、上記(3)の領域では流れは完全に乱れた状態になっているものと思われる。さらに、これら染料はその後伝

熱面中央付近にまで達して、ここから鉛直上方へ流れ去って行くが、伝熱面の対称性を考慮すると、伝熱面の他端から発生した自然対流も、やはり乱れながら伝熱面中央部へ到達し、伝熱面中央部で互いに衝突して鉛直上方へ流れ去っていくと考えられる。実際、本実験では他端にもスリットを設け、ここから染料を流出させた場合についても可視化を行っているが、その結果によれば、染料は、もう一方の伝熱面端から来た染料と伝熱面中央部で互いに混じり合っ、鉛直上方へ流れ去ることを観察している。また、本実験では、これら伝熱面の両端からやって来た自然対流が衝突する領域と、(4)の温度模様が発生する領域がちょうど対応することを確認した。すなわち、伝熱面中央部に現われる細かく密な温度模様は、両端からやって来た自然対流同士が衝突する結果生じる。

さて、これらの流れの可視化結果の中で最も注目されるのは、本実験のように伝熱面が非常に大きな場合にも、なお伝熱面上には端部から中央に向かう、いわば水平平板上自然対流の主流とも呼ぶべき流れが厳然と存在するという事実である。しかも、この流れは乱流となった後も、伝熱面に沿って流れ、乱流境界層流的な挙動を示す。この事実は、従来の研究者が抱いてきた水平加熱平板上の自然対流のイメージと大きく異なっている。すなわち、従来の研究者は水平平板上の流れは一旦乱流になってしまえば、下面加熱・上面加熱の水平流体層内の乱流と同じと考えていたが、後者の場合主流と呼べる流れが存在しないのに対し、前者の場合には主流が存在し、しかも、この主流の存在が伝熱面の局所伝熱特性に重大な影響を及ぼすのである。本可視化結果は、このような水平平板上自然対流に対する従来のイメージを改めるばかりでなく、今後水平加熱平板上の自然対流をとくに解析的に取り扱う上で、重要な示唆を与えるものと考えられる。

3.3.3 局所熱伝達率

さて、以上の温度および流れ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に至る方向（以下、 x 方向と称す）の局所熱伝達率を測定してみた。この測定は、伝熱面の局所伝熱特性のうち、とくに上記(3)の乱流域および(4)の衝突域の伝熱特性を明らかにすることを主眼にしたものである。なお、(2)の低温筋状模様域の局所熱伝達率については前章で述べたのと同様な測定法を採用し、伝熱面のスパン方向に平均した値で局所熱伝達率を定義することにした。

この局所熱伝達率分布の測定結果の代表的な例として、伝熱面熱流束 q_w を一定（ $=3000\text{W/m}^2$ ）とした場合について、図3-8に示す。図の縦軸には局所熱伝達率 h_x を、また横軸には伝熱面端部から伝熱面中央に向かう距離 x をとっている。参考のため前章の $W=250\text{mm}$ の結果も併記した。なお、縦軸の局所熱伝達率のうち、とくに筋状模様の領域については平均値のほかに測定された熱伝達率の最大・最小値も併せて記している。まず、伝熱面の幅 W が 850mm の場合の結果であるが、図から明らかのように、局所熱伝達率は板の端部付近で急激に減少し、 $x=10\text{mm}$ 前後で極小値をとる。そして増加に転じ、 $x=20\text{mm}$ 前後で極大値を示したあと、 $x=250\text{mm}\sim 300\text{mm}$ にかけて徐々に低下していく、そして、その後伝熱面中央に向かってわずかであるが増加していく。

一方、 $W=1500\text{mm}$ の場合には、板端部から $x=250\sim 300\text{mm}$ にかけての局所熱伝達率分布は $W=850\text{mm}$ のそれとほぼ同一であるのに対し、それよりも伝熱面の中央側では、 $W=850\text{mm}$ の場合と異なり熱伝達率がほとんど一定になっていることが注目される。

図3-9および図3-10には伝熱面熱流束 q_w を一定、 1000W/m^2 および 5000W/m^2 、としたときの局所熱伝達率分布をそれぞれ示す。これらの結果と上述の図3-8とを対比すると、板端から伝熱面中央に向かう熱伝達率分布の変化は同様であるが、熱流束の増加とともに熱伝達率の極小・極大値の位置が板端側に移動し、熱伝達率の絶対値自身も伝熱面

全体にわたって高くなることがわかる。

これらの局所熱伝達率分布のうち、板の端部近くになぜ熱伝達率の極小・極大値が生じるかについては、前章で詳しく述べているのでここでは説明を省略する。本章でとくに注目するのは、極大値以降の局所熱伝達率分布である。そこで、これについて $q_w = 3000 \text{ W/m}^2$ の場合を例にとって以下検討・考察を加える。

まず、いずれの伝熱面においても、極大値以降、 $x = 250 \sim 300 \text{ mm}$ に至る領域では、熱伝達率は x の増加とともに単調に低下している。このような熱伝達率の低下は、前節 3.1 の図 3-6 に示した温度分布の可視化結果からも明らかである。つまり、熱伝達率が低下する領域は、図 3-6 で、低温筋が発生し、この筋が伝熱面の中央に向かって次第に細かくなつて間隔がまばらになっていく領域に対応している。この結果は重要と思われる。なぜなら、水を用いた従来の実験^(16, 19)では、第 1 章でも述べたようにせいぜい $W = 200 \sim 300 \text{ mm}$ 程度の小さな伝熱面を用いて熱伝達率を測定している。しかし、そのような小さな伝熱面では、表面のほとんどが図 3-6 に示した低温筋状模様で覆われており、熱伝達率は x に強く依存しているはずと思われるからである。にも関わらず、従来の実験者は、伝熱面の平均ヌッセルト数 Nu とレイリー数 Ra の関係を、 $Nu = C Ra^{1/3}$ で与えている。この式は、とりもなおさず伝熱面の平均熱伝達率が伝熱面の大きさ W とは無関係に一定値となることを意味しているが、本実験結果に照らし合わせると明らかに間違っていると言わざるを得ない。

もう一つは、この熱伝達率の低下域よりもさらに伝熱面中央側の局所熱伝達率に関するものである。この領域の熱伝達率は、 $W = 850 \text{ mm}$ の場合若干ではあるが伝熱面中央に向かって増加している。この熱伝達率の増加の原因として、前節で述べた衝突領域の存在が挙げられる。すなわち、この衝突域の熱伝達率は図 3-6 (b) からわかるように、そのまわりの領域に比べて高くなること、および、この領域は伝熱面中央部のか

なり広い範囲を揺動していることを確認している。この結果から、この衝突領域が滞在する確率の高い伝熱面中央部のほうが、確率の低い周辺の領域よりも熱伝達率が高くなるものと解釈できる。これは、衝突域が伝熱面中心にほぼ固定されている $W = 250\text{mm}$ の場合に、伝熱面中央での熱伝達率が顕著に高くなる図 3 - 8 の結果とも符合する。一方、このような衝突領域における熱伝達率の増加は板幅が大きくなるにつれて判然としなくなり、 $W = 1500\text{mm}$ の場合には、熱伝達率は x が 300mm 以上の領域でほとんど一定とみなして差し障り無くなる。これは板幅が大きくなるにつれて主流の衝突速度が低下し、これによる熱伝達率の促進効果が次第に弱まることが原因していると考えられる。いずれにしても衝突領域の存在は、水平加熱面の伝熱特性を非常に複雑にしており、とくに $W = 850\text{mm}$ と板幅が広い場合においても、伝熱面上には熱伝達率一定となる領域がほとんど存在しないという事実は注目に値する。

さて、上述の伝熱面の局所熱伝達率の測定結果を詳しく見ると、局所熱伝達率は全体として、最も板幅の広い $W = 1500\text{mm}$ の場合を包絡線とする曲線を描くことがわかる。そして、この包絡線よりも上にあるデータはいずれも伝熱面中央付近のデータであることから、前述した主流の衝突によって高くなったと考えることができる。したがって、この領域さえ除外して考えれば、すべての実験値はこの包絡線、言い換えれば $W = 1500\text{mm}$ の測定値に一致するものと思われる。そこで、まず $W = 1500\text{mm}$ の板について図 3 - 8 ~ 図 3 - 10 に示した局所熱伝達率の測定結果を無次元表示し、これを局所ヌッセルト数 Nu_x および局所修正レイリー数 Rax^* 平面上に描いてみた。

その結果を図 3 - 11 に示す。この結果は、いわば水平平板上自然対流の局所熱伝達率分布の基準とも言うべきものである。そこで本実験の $W = 850\text{mm}$ および前章の $W = 20 \sim 250\text{mm}$ の測定結果のうち、明らかに衝突領域に相当しないと思われるものを抜き出して同様な整理を行ない、 $W = 1500\text{mm}$ のそれと比較した結果を同じく図 3 - 11 に掲げた。図 3 -

11 から、板幅が $W = 20 \sim 1500 \text{ mm}$ と大きく異なる場合であっても、衝突域を除外したすべてのデータは一本の線上にまとまることが明らかである。この結果は、衝突域よりも上流側の伝熱面からの熱伝達に相似則が成り立つこと、したがって下流側の条件が上流側の伝熱・流動に顕著な影響を及ぼさないことを同時に意味している。

また、これらの局所ヌッセルト数の分布から、伝熱面上には大きく分けて勾配の異なる四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、次の指数関係を仮定し、

$$Nu = C Ra_x^{*n} \quad (3.3)$$

係数 C および指数 n を求めると、以下のようになった。

$$\text{領域 (I)} \quad 10^2 < Ra_x^* < 10^6$$

$$Nu_x = 0.66 Ra_x^{*1/6} \quad (3.4)$$

$$\text{領域 (II)} \quad 10^6 < Ra_x^* < 5 \times 10^7$$

$$Nu_x = 0.066 Ra_x^{*1/3} \quad (3.5)$$

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

$$Nu_x = 0.70 Ra_x^{*1/5} \quad (3.6)$$

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

$$Nu_x = 0.20 Ra_x^{*1/4} \quad (3.7)$$

このうち、式 (3.4) ~ (3.6) については、前章で得た式と同一であるが、領域 (III) については、その上限を与える局所修正レイリー数の値が若干小さくなっている。これは、前章においては衝突領域の存在を考慮しないまま実験値を整理したためである。また、本章では新たに領域 (IV) について整理式 (3.7) を提案するが、この式は局所熱伝達率が伝熱面の位置 x に無関係に一定となることを意味している。

さて、以上の局所熱伝達率の測定結果に従えば、伝熱面上に生じる流れを以下のように区分できる。すなわち、上記の領域 (I) は層流境界層

流域に、領域(II)ははく離域に、領域(III)は遷移域に、そして、領域(IV)は乱流域にそれぞれ相当する。そして、この区分によれば、とくに層流域の上限は $R a_x^* = 10^6$ で、また遷移域の上限すなわち乱流開始点は $R a_x^* = 8 \times 10^{10}$ で与えられることになる。そして、両者の中間である $10^6 < R a_x^* < 8 \times 10^{10}$ の領域が、はく離域および遷移域に相当する。

これらの領域区分は、局所熱伝達率の測定結果だけでなく伝熱面温度分布および流れの可視化結果からも裏付けられたものであり、このように現実に伝熱面上に生じている現象を参照しながら、明確な領域区分を試みた例は本研究の他に見当たらない。このことから、本実験結果は今後様々な大きさの伝熱面上に一体どのような流れが生じているか予測する上で、非常に重要な手掛かりを与えるものと思われる。

3.3.4 平均熱伝達率

前節 3.3.3 で得られた局所熱伝達率の測定結果を基に、本節では伝熱面の平均熱伝達率について議論を展開する。そこで、まず前節の局所ヌッセルト数の整理式(3.4)~(3.7)を積分することにより、伝熱面の平均熱伝達率 h_m を算出し、これを板幅 W を代表長さにとった平均ヌッセルト数 Nu で表し、同じく板幅 W を代表長さとする修正レイリー数 Ra^* の関数として求めてみると、その結果は以下のようなになった。

$$\text{領域 (I)} \quad 1.6 \times 10^3 < Ra^* < 1.6 \times 10^7$$

$$Nu = 1.25 Ra^{*1/6} \quad (3.8)$$

$$\text{領域 (II)} \quad 1.6 \times 10^7 < Ra^* < 8 \times 10^8$$

$$Nu = 0.04 Ra^{*1/3} + 9.7 \quad (3.9)$$

$$\text{領域 (III)} \quad 8 \times 10^8 < Ra^* < 1.3 \times 10^{12}$$

$$Nu = Ra^{*1/5} - 13.5 \quad (3.10)$$

$$\text{領域 (IV)} \quad 1.3 \times 10^{12} < Ra^* < 1.6 \times 10^{15}$$

$$Nu = 0.20 Ra^{*1/4} + 37 \quad (3.11)$$

これらの式を $Nu - Ra^*$ 平面上に描くと、図 3-12 に示す実線のようにになる。一方、局所熱伝達率の測定値をもとに直接伝熱面の平均ヌッセルト数を算出した結果を、図 3-12 中に記号で示す。図 3-12 からわかるように、実験から直接求めた値と上式から求めた値との間には若干の誤差が生じているが、その差はわずかであり、上式(3.8)~(3.11)によって十分平均熱伝達率の算出が可能と思われる。

これらの式のうち、式(3.8)~(3.10)は、前章で提案された式(2.14)~(2.16)と全く同じである。ただし、領域(III)の上限を与える修正レイリー数 Ra^* が本章の方が若干高めになっている。この理由は前節で述べたのと同じであるので説明を省く。従って、本章の実験によって初めて提案された式は、式(3.11)ということになる。この式は伝熱面上に

乱流が実現される場合の伝熱面平均の熱伝達率を与える式である。式の形を見てもわかるとおり、この式は厳密に言えば $R a^* \rightarrow \infty$ のとき、

$$N u = 0.20 R a^*{}^{1/4} \quad (3.12)$$

に初めて一致し、伝熱面の平均熱伝達率が伝熱面の大きさに依らず一定となることを意味している。しかし、 $R a^*$ が 10^{15} 程度になると、式(3.11)の右辺第2項が第1項に比べて約3.3%の大きさとなり、実用上は上式(3.12)で近似しても差し障りなくなる。しかし、これ以下のレイリー数では、第2項は第1項に比べ相対的に無視し得なくなる。この結果は、本実験で用いたような大きな伝熱面でようやく実現できる高いレイリー数で、初めて伝熱面の平均熱伝達率が板幅 W に無関係に一定とみなせることを意味している。

最後に、従来何人かの研究者が提案した実験整理式と、本実験式を比較してみる。このため、従来の実験整理式を図3-12に示す。従来の実験では伝熱面を等温加熱しているので、本実験結果と比較するため、 $R a^* = R a \cdot N u$ の関係を用いて従来の実験結果を等熱流束加熱条件に変換している。この図から明らかなように、従来の実験整理式は一見したところ、本実験値にかなり近い値を与えるように見える。しかし、ここで注意しておかなければならないのは、従来の実験は図に示したように、いずれも修正レイリー数 $R a^*$ が最大でも 2×10^{13} 以下で行われているという事実である。つまり、上述した本実験結果を参考にすれば、従来の実験では伝熱面上にほとんど乱流が現われておらず、大部分は遷移流で覆われているのである。それにも関わらず、従来の実験者は何ら確認することなく、頭から伝熱面上の流れは乱流になっていると信じ、 $N u = C R a^*{}^{1/4}$ (等温面では、 $N u = C R a^{1/3}$) なる関係を、半ば前提として実験値を整理している。従って、従来の実験式がたとえ本実験結果に近い値を与えるとしても、そのような式は物理的に不適切であるばかりでなく、長年にわたって誤った自然対流のイメージを読者に植え付けてきた点で、その罪は極めて重いと云わざるを得ない。

3.4 第3章のまとめ

本章では、大きな水平加熱平板上に発生する自然対流の流動および伝熱について実験的に検討を加えた。とくに、従来の研究では不明であった高レイリー数域における伝熱面上の流動・伝熱機構を、感温液晶による伝熱面表面温度分布の可視化と染料による流れの可視化によって明らかにした。また、局所熱伝達率を測定し、これと伝熱面上の流動との対応関係を探った。試験流体として水を用い、板幅 W 基準の修正レイリー数が $10^{13} < Ra^* < 10^{15}$ 、また、板端からの距離 x を基準の局所修正レイリー数が $10^4 < Ra_x^* < 10^{14}$ の範囲で実験を行なった。なお、これらのレイリー数は、従来行われた実験のそれよりも約2けた程度高い値である。その結果、以下に述べる知見を得た。

(1) 伝熱面端部から流入した周囲流体がはく離した後、伝熱面上には定常かつ3次元的な遷移流れとも呼ぶべき流れが発生する。この遷移領域の局所熱伝達率は、伝熱面端部からの距離 x の増加に伴って単調に減少する。この領域の下限および上限は、伝熱面端部からの距離 x を代表長さにとった修正レイリー数 Ra_x^* が、それぞれ $Ra_x^* = 5 \times 10^7$ および 8×10^{10} で与えられる。

(2) 上記遷移域の後方には、乱流が実現される。この乱流域の局所熱伝達率は位置 x に無関係に一定となる。また、この乱流域は、 x を代表長さとする修正レイリー数 Ra_x^* が、 $Ra_x^* > 8 \times 10^{10}$ になって初めて現われる。

(3) 本実験で用いたような板幅の広い伝熱面であっても、伝熱面の両端部から伝熱面中央部に向かう、いわば水平加熱平板上自然対流の主流とも呼ぶべき流れが存在する。この主流は伝熱面のほぼ中央部で互いに衝突し、伝熱面上にいわゆる衝突領域を形成する。この衝突域の熱伝達率は、そのまわりの乱流域の熱伝達率よりも高くなる。

(3) 上記流れのうち、(1)の遷移流および(3)の衝突流は本実験によって初めてその存在が確認されたものである。このうち遷移域は伝熱面上の

かなり割合を占め、しかも、この領域での局所熱伝達率は位置 x に依存する。このため、伝熱面全体の平均熱伝達率は、本実験の最大レイリー数 $Ra_x^* = 10^{15}$ においても、なお伝熱面幅 W の影響を受けることを明らかにした。

(4)局所熱伝達率の測定結果に基づき、本章では伝熱面の局所ヌッセルト数および平均ヌッセルト数を予測するための実験整理式を新たに提案した。この実験整理式は、伝熱面上に実際に生じている現象を基に領域を四つに分割し、そのそれぞれについて整理式を提案したものである。これらの式は、層流および乱流の二つに大きく領域を区分する従来の実験整理式の不備を指摘するだけでなく、様々な大きさの伝熱面上にどのような流れが生じているか予測する上で極めて有用と思われる。

表 3 - 1 実験条件

Plate width W (mm)	Heat flux q_w (W/m^2)
850	1000 ~ 5000
1500	1000 ~ 5000

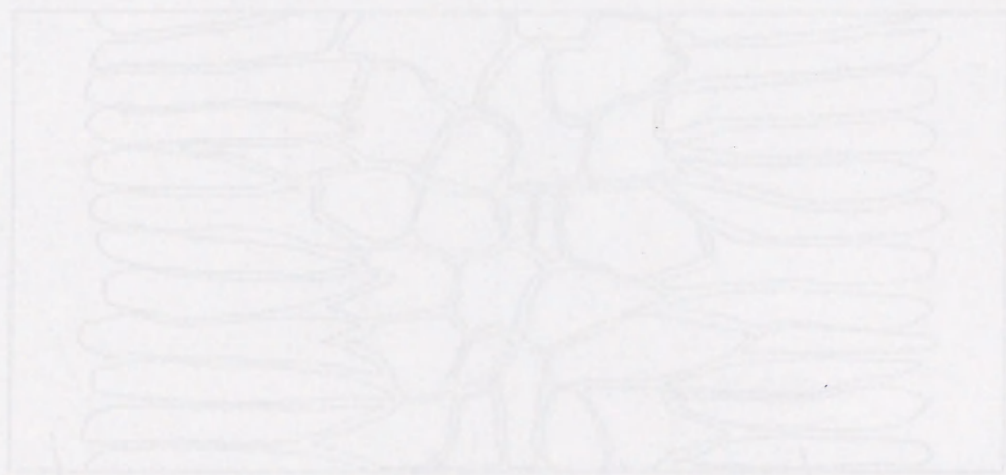
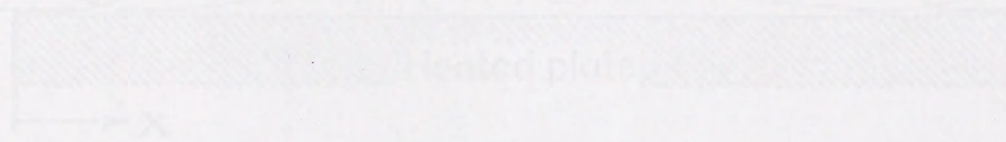


図 3 - 1 板面上の境界から起る自由対流の発達図

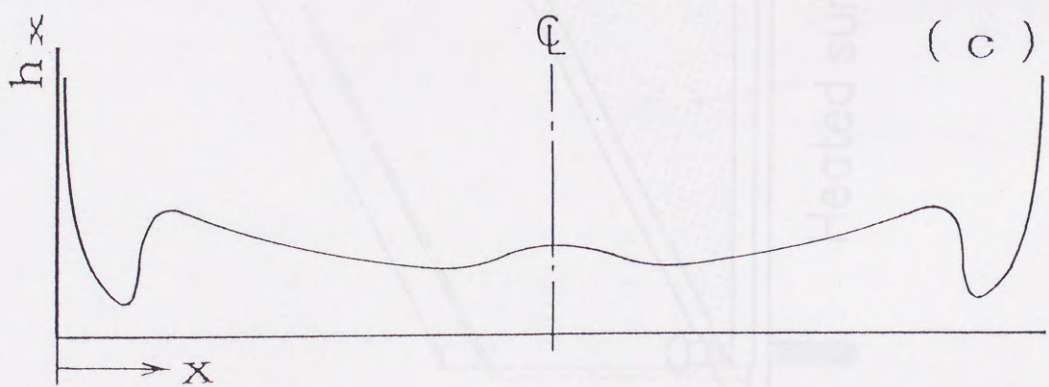
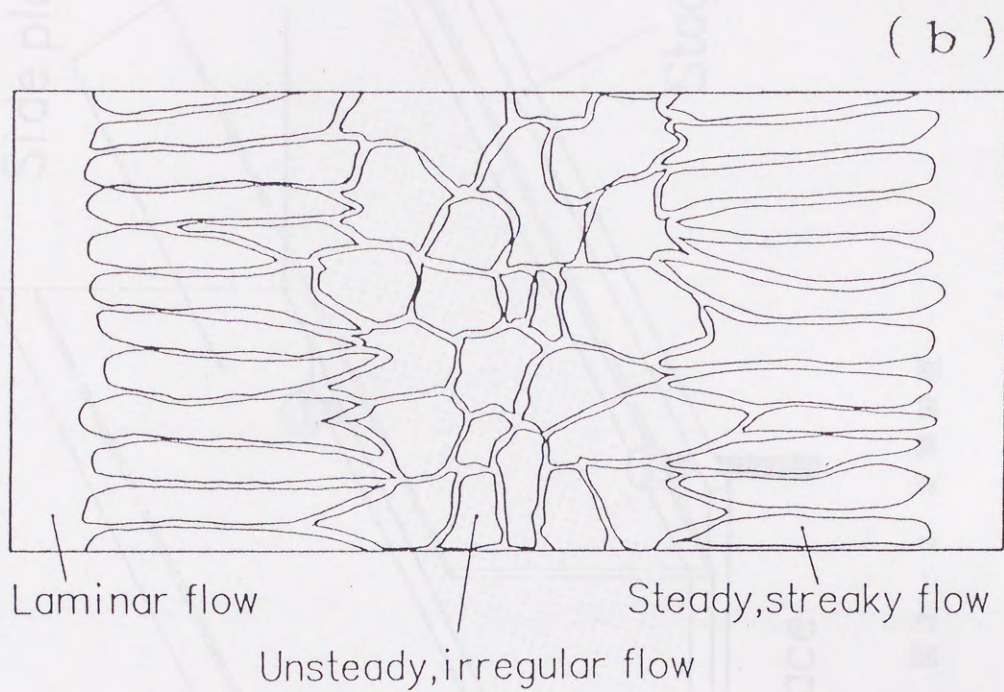
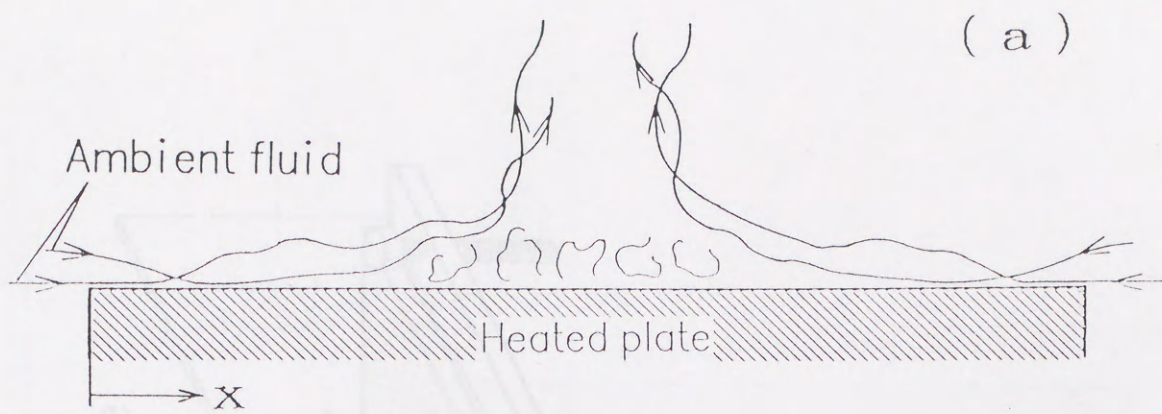


図 3 - 1 前章の結果から描いた自然対流の模式図

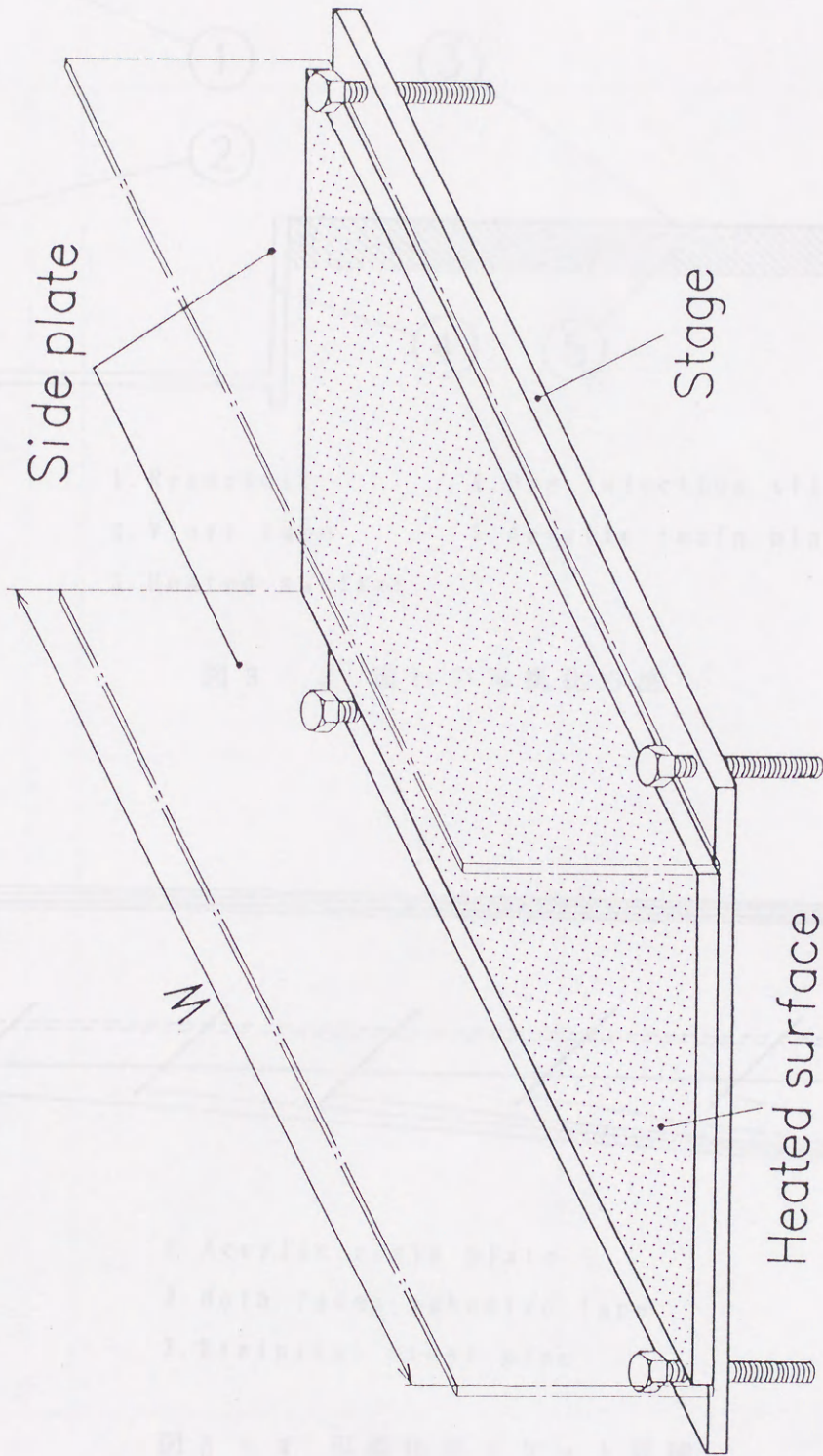
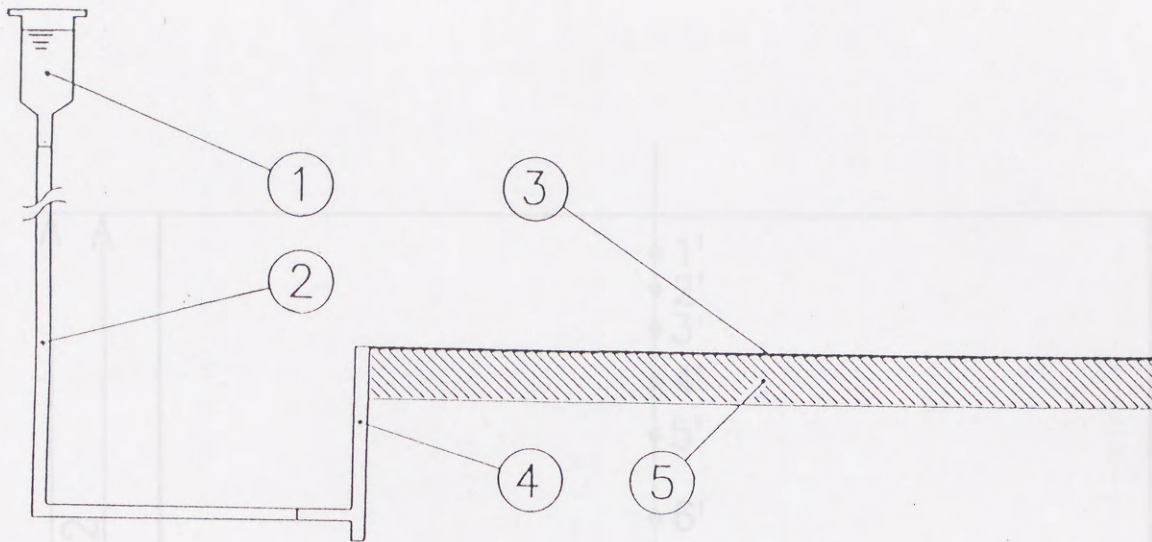
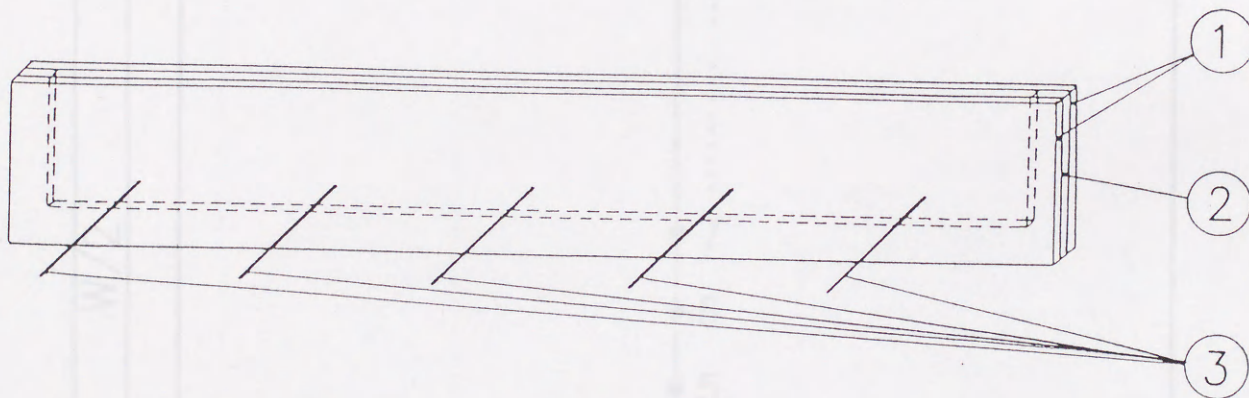


图 3 - 2 实验装置



- | | |
|-------------------|------------------------|
| 1. Reservoir | 4. Dye Injection slit |
| 2. Vinyl tube | 5. Acrylic resin plate |
| 3. Heated surface | |

図 3 - 3 流れの可視化方法



- | |
|-----------------------------|
| 1. Acrylic resin plate |
| 2. Both faces adhesive tape |
| 3. Stainless steel pipe |

図 3 - 4 可視化用スリット詳細

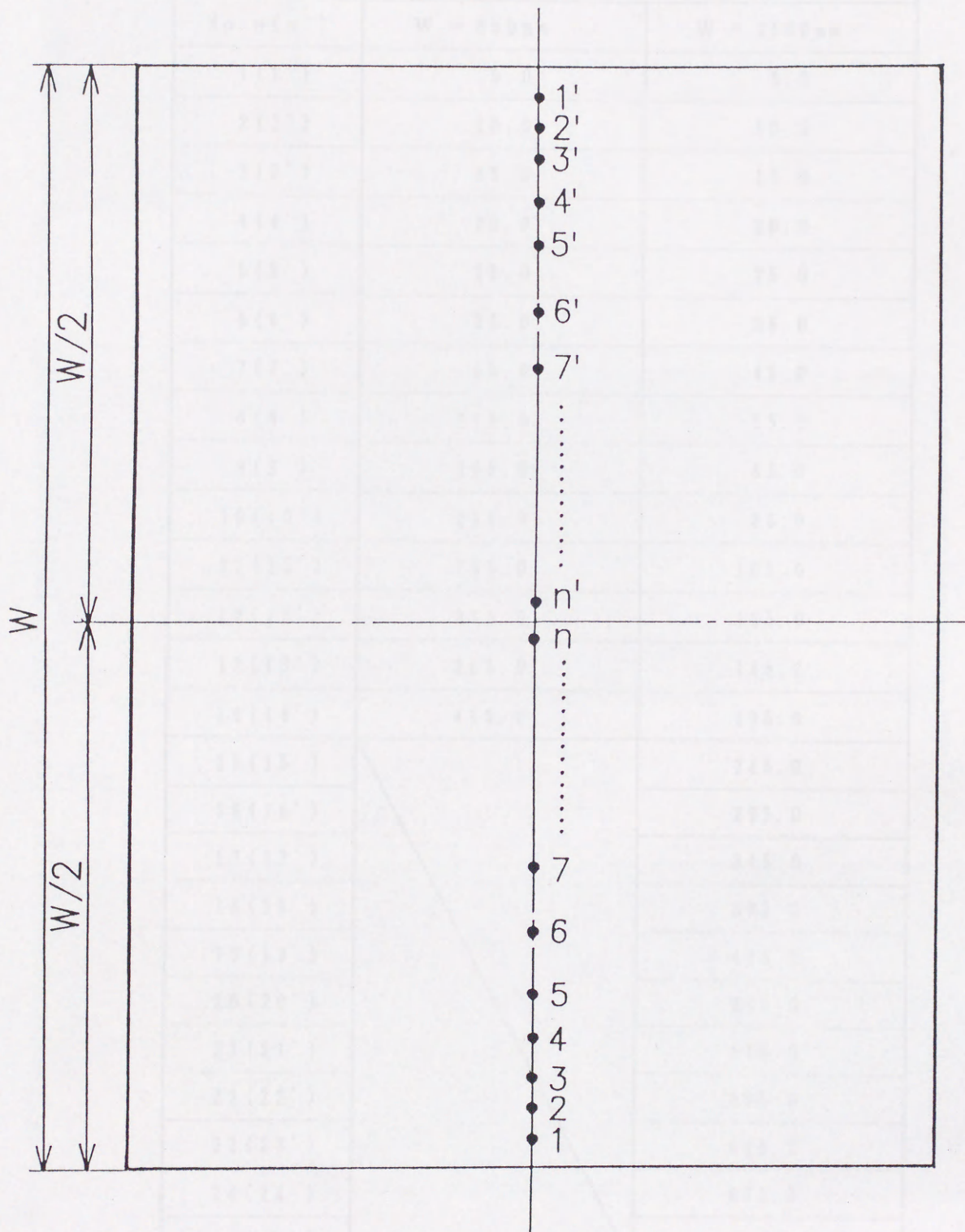


図 3 - 5 熱電対設置位置の概略

表 3 - 2 熱電對設置位置

No. n (n')	Distace from plate edge x (mm)	
	W = 850mm	W = 1500mm
1 (1')	5.0	5.0
2 (2')	10.0	10.0
3 (3')	15.0	15.0
4 (4')	20.0	20.0
5 (5')	25.0	25.0
6 (6')	35.0	35.0
7 (7')	65.0	45.0
8 (8')	115.0	55.0
9 (9')	165.0	65.0
10 (10')	215.0	85.0
11 (11')	265.0	105.0
12 (12')	315.0	125.0
13 (13')	365.0	145.0
14 (14')	415.0	195.0
15 (15')	Center (=W/2)	245.0
16 (16')		295.0
17 (17')		345.0
18 (18')		395.0
19 (19')		445.0
20 (20')		495.0
21 (21')		545.0
22 (22')		595.0
23 (23')		645.0
24 (24')		695.0
25 (25')		745.0

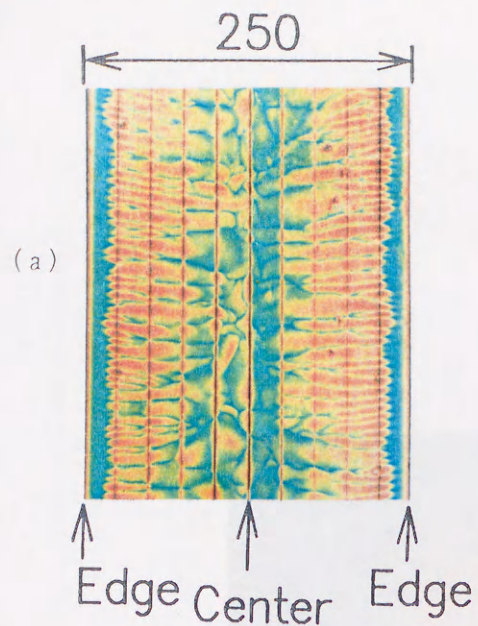


Fig.	W (mm)	$R a^*$
(a)	250	3.1×10^{11}
(b)	850	4.3×10^{13}
(c)	1500	4.3×10^{14}

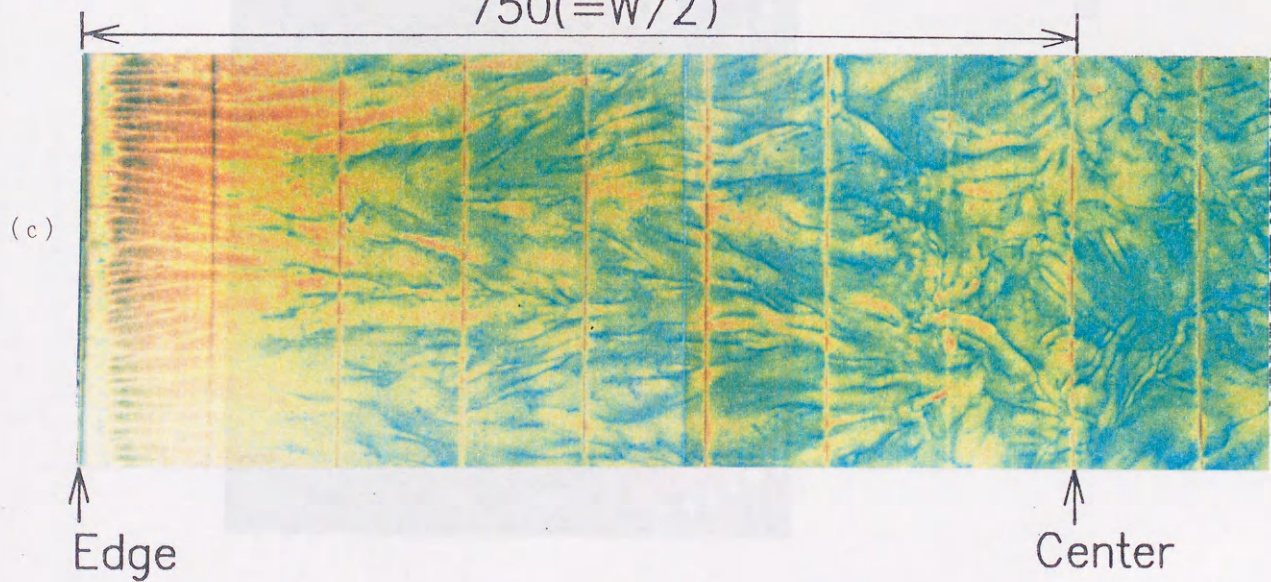
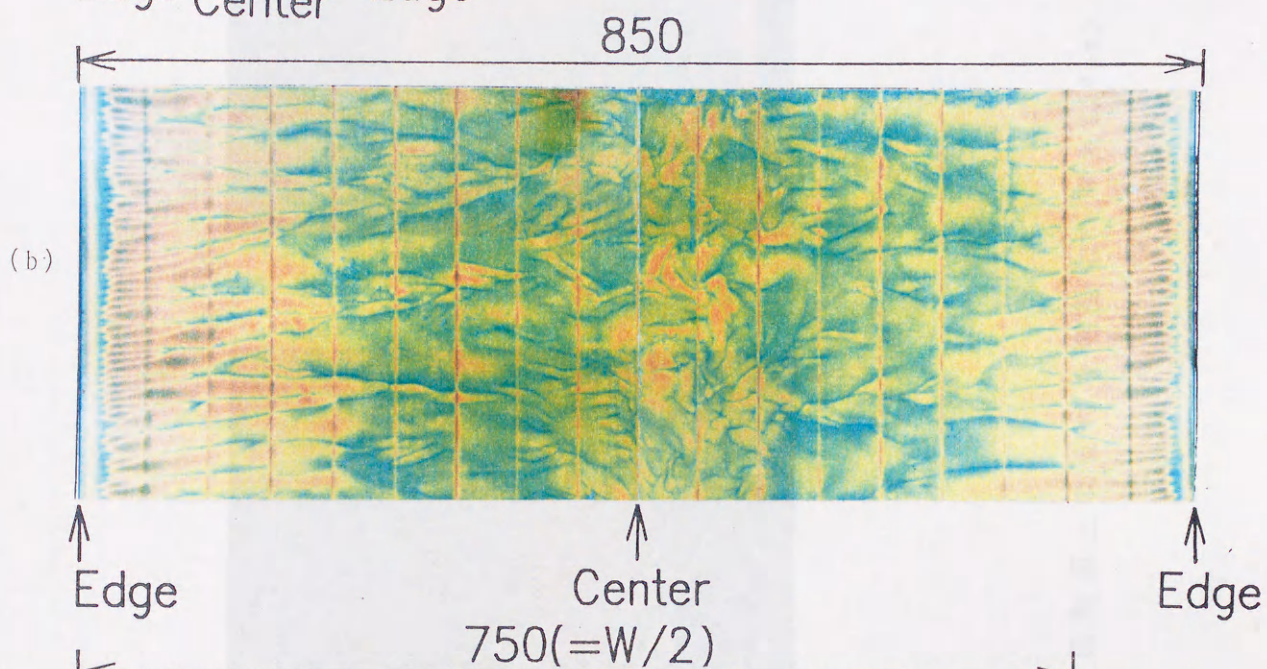


図 3 - 6 伝熱面表面温度分布の可視化

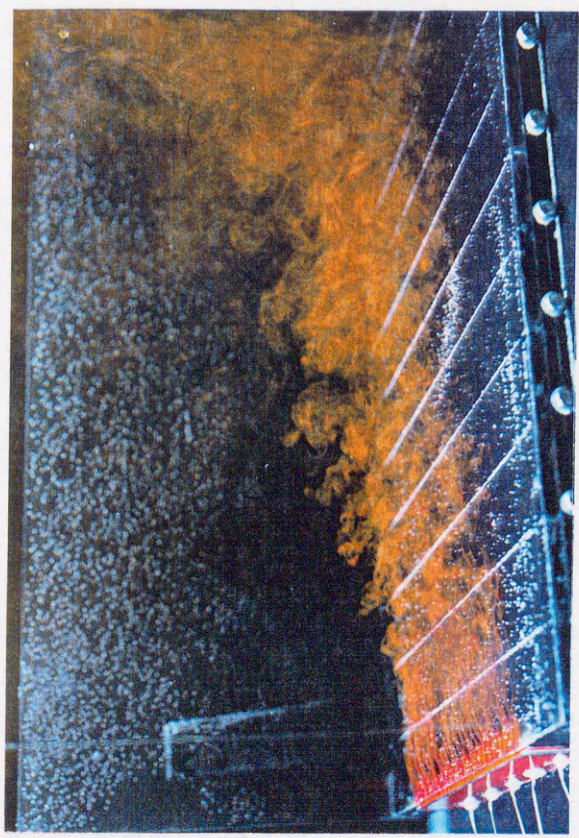
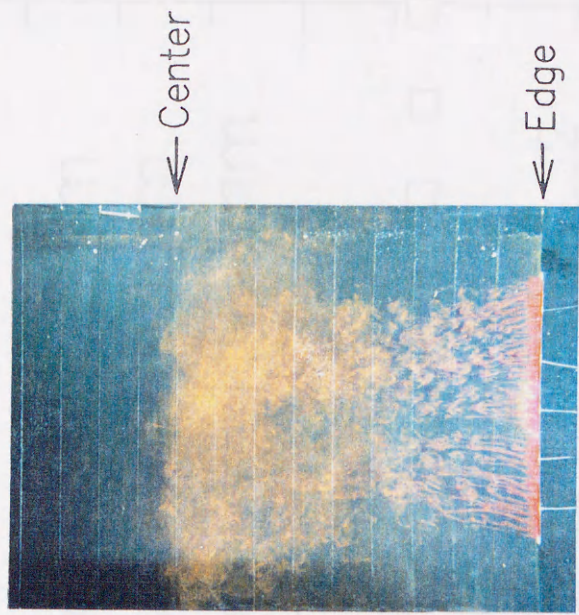


図 3 - 7 伝熱面上の流れの可視化 ($W = 850\text{mm}$)

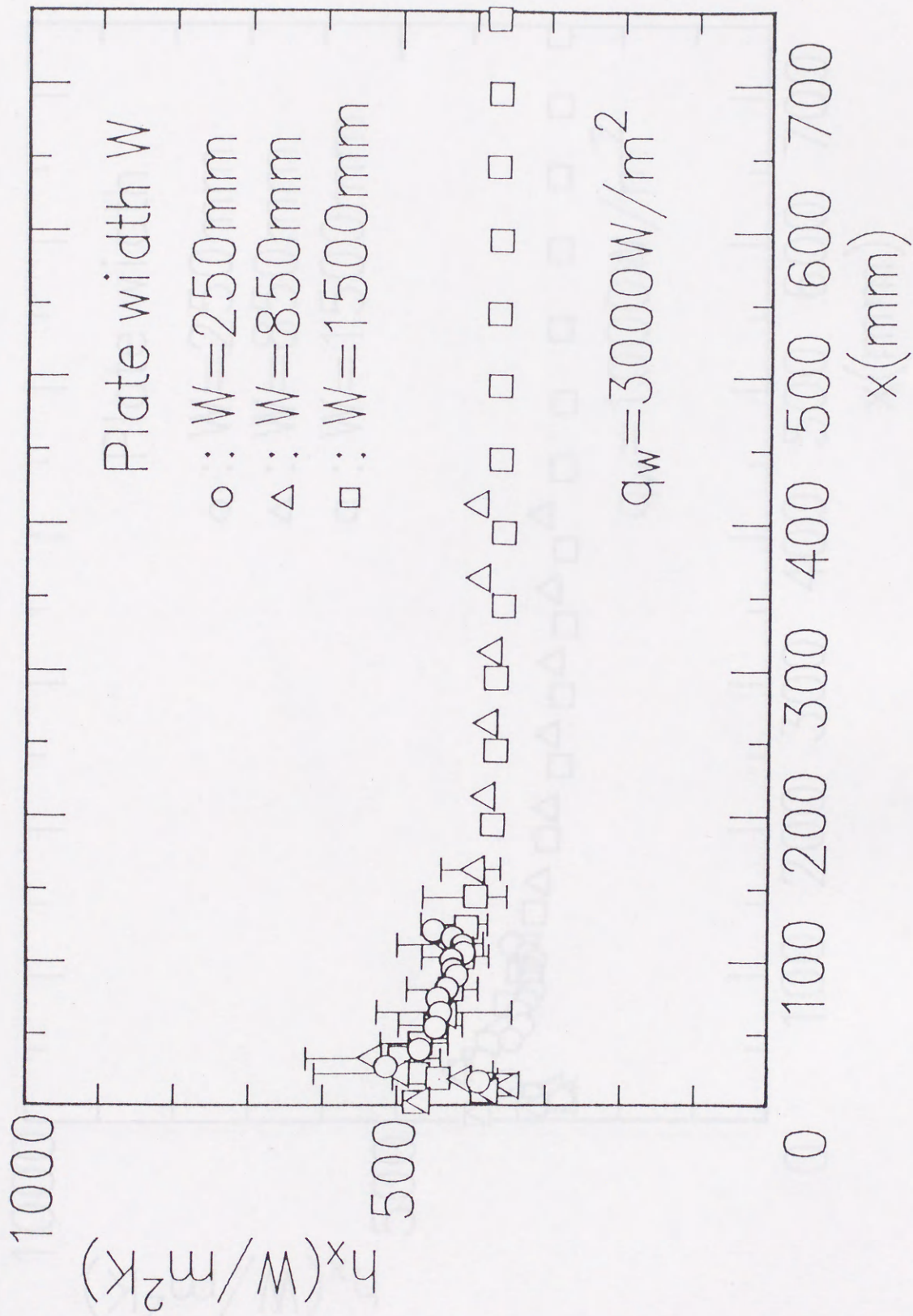


图 3-8 局部热传递率分布 ($q_w = 3000\text{W/m}^2$)

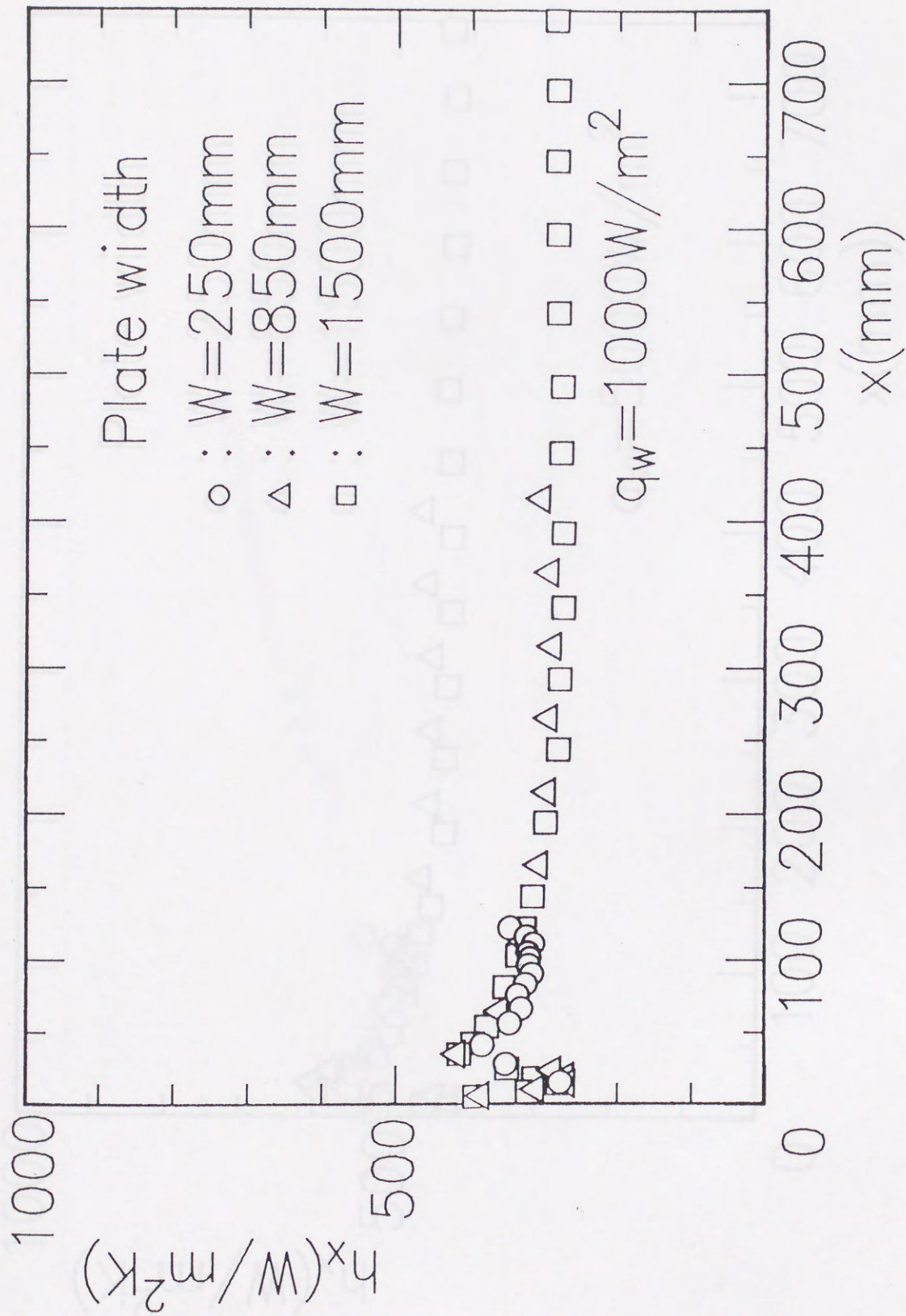


图 3-9 局所熱伝達率分布 ($q_w = 1000 \text{ W/m}^2$)

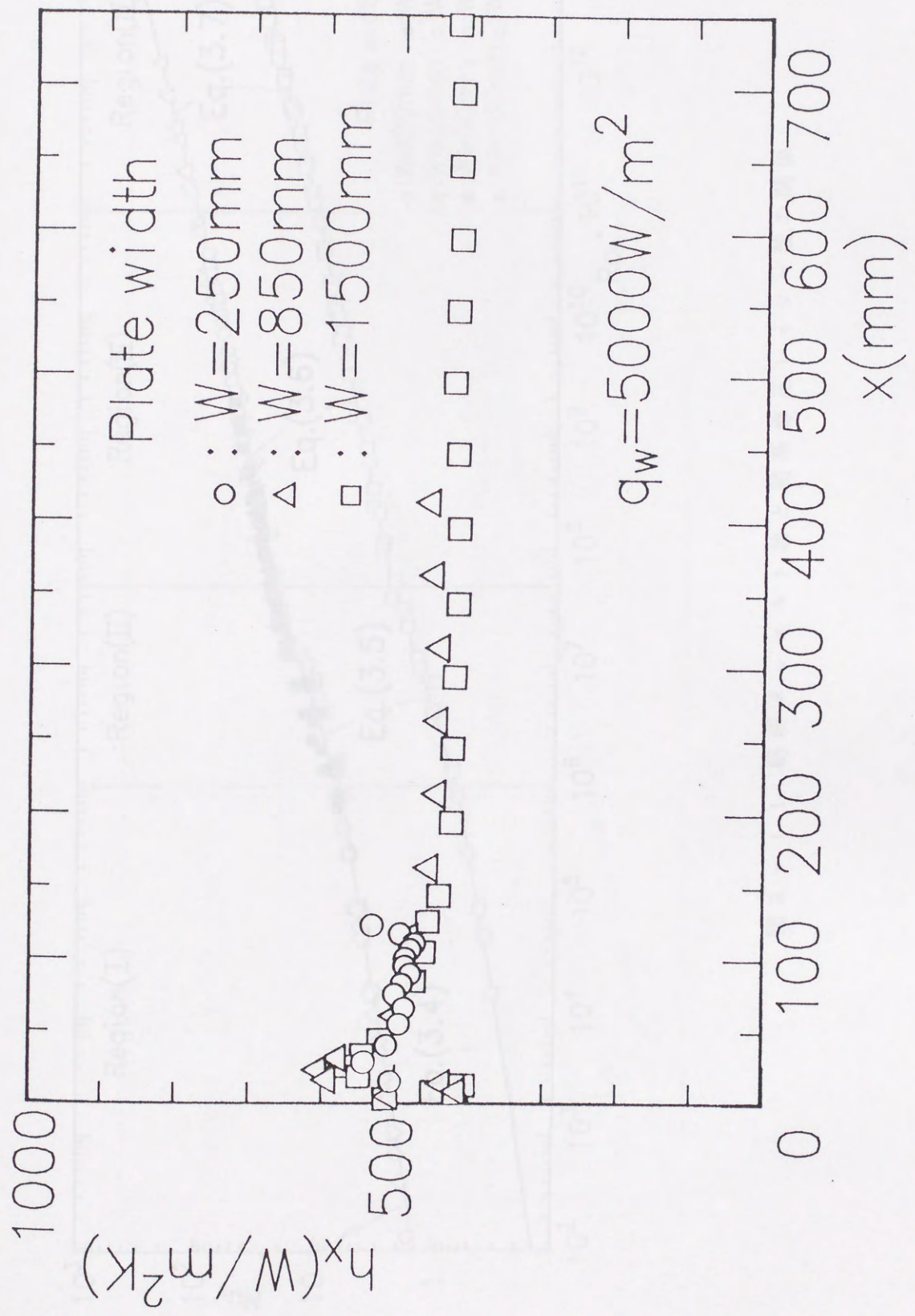


图 3-10 局所熱伝達率分布 ($q_w = 5000 \text{ W/m}^2$)

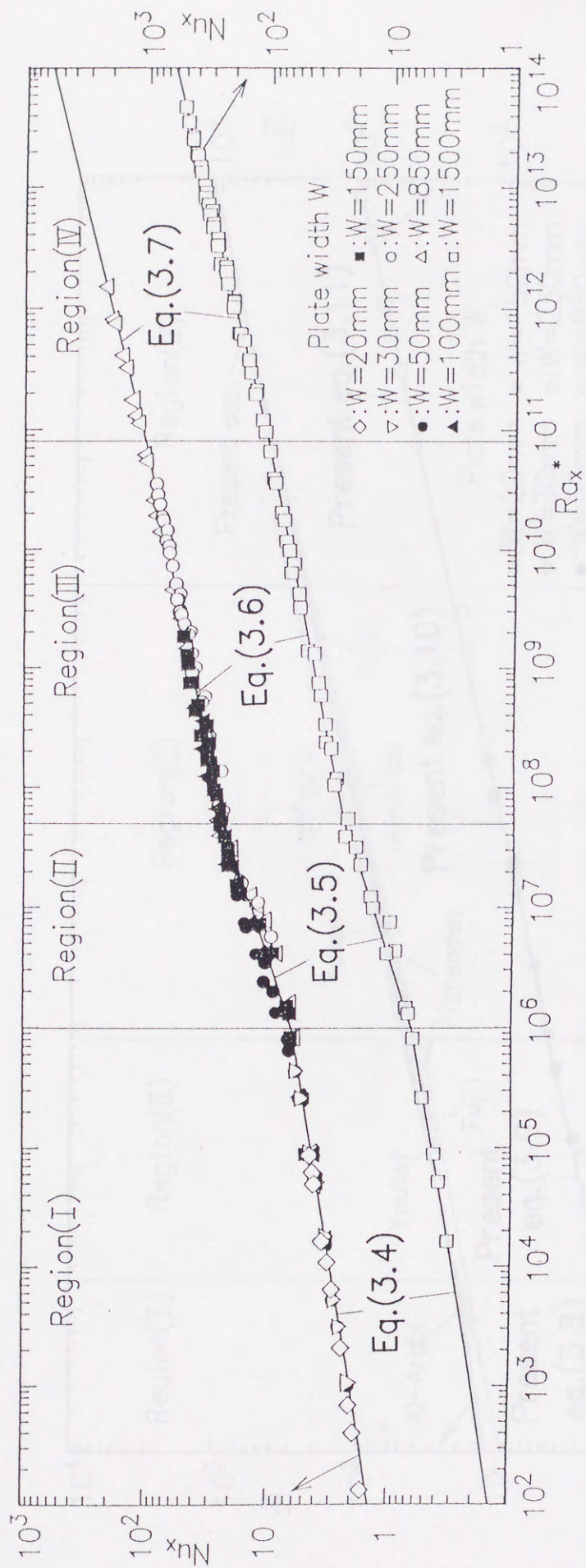


図 3-1-1 局所ヌッセルト数と局所修正レイリー数の関係

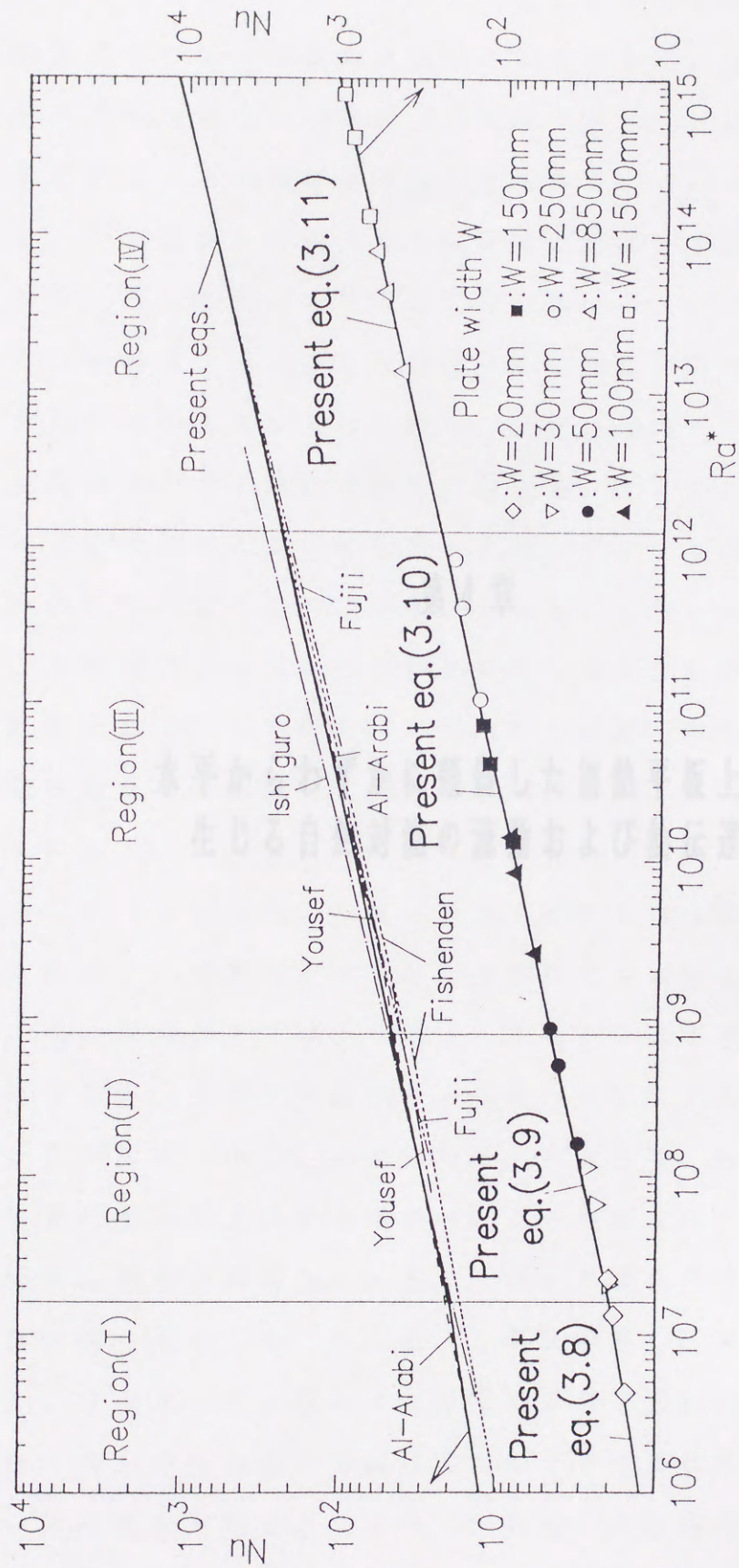


図 3-1-2 伝熱面の平均ヌッセルト数

3. 概言

第2章および第3章では、水平加熱平板上に生じる自然対流の流動および熱伝達について実験的に検討を加えてきた。このうち、とくに加熱面が十分大なる場合の加熱面上には式(4-1)に模式的に示す自然対流が発生することが実験された。すなわち、この自然対流を簡易的に記すと、(1)加熱面の下部から加熱面の上部へ流入し、(2)加熱面をめぐって、(3)加熱面上方にある流体が加熱面近傍に侵入する。加熱面への侵入した流体もやがては冷却し、加熱面から侵入した流体と混合し、不透明には見ながら加熱面中央部に達する。そして、(4)加熱面の上部からやがてまた加熱面と互いに衝突して、ブルーム状に上方へ噴き出していく、という循環の流れていく。

第4章

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および熱伝達

さて、ここでこの加熱平板を水平から傾斜させた場合について考えてみる。このとき、加熱面が水平からわずかに傾斜していれば、加熱面上には、単に加熱面の下部から流入し上部から流出する自然対流が発生するだけなのか、それとも加熱面の傾斜がもたらせば、水平面と同様、たとえば式(4-1)に模式的に示すような、加熱面の下部から流入し加熱面に沿って上昇する流れ(以下、本章ではこれを主流とす)と、加熱面上部から加熱面に沿って下降する流れ(以下、逆流とす)の二つが発生するのだろうか、という疑問が湧く。もし仮に前者であるとすると、主流および逆流によって支配される加熱面下部および上部での伝熱・流動特性は大きく異なるものと予想される。また、この場合とは、一様流流がどのような条件(加熱面の傾斜角、加熱面熱流率など)で発生するか、そして逆流が支配する領域が加熱面上部からどの程度

1. 緒言

第2章および第3章では、水平な加熱平板上に生じる自然対流の流動および熱伝達について実験的に検討を加えてきた。このうち、とくに伝熱面が十分大きな場合、伝熱面上には図4-1(a)に模式的に示す自然対流が発生することが確認された。すなわち、これらの流れを簡条書きに記すと、(i)低温の周囲流体が伝熱面の端部より流入し、伝熱面に沿ってしばらく流れた後、3次元的にはく離する、(ii)このはく離の間隙をぬって、伝熱面上方にある低温流体が伝熱面近傍に侵入する、(iii)この侵入した流体もやがてはく離し、端部から流入した流体とともに、不規則に乱れながら伝熱面中央部に達する、そして、(iv)伝熱面の他端からやって来た流れと互いに衝突した後、プルーム状に上方へ流れ去っていく、という一連の流れである。そして、これら流れの観察結果から、伝熱面上に乱流域がかなりの拡がりをもって存在し得るような非常に大きな伝熱面上にも、なお伝熱面の両端から伝熱面中央に向かう、いわば水平加熱平板上自然対流の主流とも呼ぶべき流れが厳然と存在することを明らかにした。

さて、ここでこの加熱平板を水平から傾斜させた場合について考えてみる。このとき、伝熱面が水平からわずかでも傾斜していれば、伝熱面上には、単に伝熱面の下端から流入し上端から流出する自然対流が発生するだけなのか、それとも伝熱面の傾斜がわずかであれば、水平面と同様、たとえば図4-1(b)に模式的に示すような、伝熱面の下端から流入し伝熱面に沿って上昇する流れ(以下、本章ではこれを主流と呼ぶ)と、伝熱面上端から伝熱面に沿って下降する流れ(以下、逆流と呼ぶ)の二つが発生するのだろうか、という疑問が湧く。もし仮に後者であるとすると、主流および逆流によって支配される伝熱面下端および上端部での伝熱・流動特性は大きく異なるものと予想される。また、この場合には、一体逆流がどのような条件(伝熱面の傾斜角度、伝熱面熱流束など)で発生するか、そして逆流が支配する領域が伝熱面上端からどの程

度下流にまで及ぶか、さらには逆流の発生によって、主流側の流動・伝熱がどのような影響を受けるかなど、実に様々な疑問が湧いてくる。

一方、仮に逆流が全く生じない場合でも、例えば前章で明らかにした流れのはく離や乱流遷移が伝熱面の傾斜角度によってどのように変化するか、あるいは局所熱伝達率が傾斜角度によって如何なる変化を示すかといった点など、大いに関心のもたれる問題が山積している。

ところが、このような水平からわずかに傾斜した加熱面上の自然対流については、第1章でも述べたように、従来ほとんど研究らしい研究が行われておらず、逆流が発生するのか否かといった最も基本的な問題さえも依然として未解決のまま残されている。

以上のことを鑑み、本研究では傾斜平板上の自然対流のうち、とくに傾斜角度の小さな平板まわりの自然対流の流動・熱伝達について、実験的検討を加えることにした。

4. 2 実験装置および測定法

4.2.1 実験装置

本実験で用いた実験装置の概略を図4-2に示す。本装置は、前章で使用した水平伝熱面を任意の角度に傾斜できるように改良したもので、基本的な装置の構成はほとんど同じである。試験流体には、可視化および測定の容易さなどから水を用いた。伝熱面が十分大きければ、水平からわずかに傾斜した伝熱面上にも前章の水平伝熱面と同様な四つの流れ、すなわち(i)層流境界層流、(ii)はく離および遷移流、(iii)乱流、および(iv)衝突流が観察できるであろう。そこで本研究では、これらの流れが全て現われると思われる長さ850mmの伝熱面を用いることにした。この伝熱面の奥行き(スパン)は500mmである。伝熱面側方からの流体の流入を防ぎ、体系を2次元とするために、伝熱面の両側面には高さ250mmの亚克力製の側板を取り付けている。伝熱面は厚さ20mmの亚克力板表面に厚さ30 μ mのステンレスはくヒータを貼付けたもので、このヒータに定電圧電源(YAMABISHI, AUTO-VOLT, TYPE TAD-2K)を介して交流を通電することにより等熱流束加熱壁条件とした。この伝熱面は、蝶番を介して架台に取り付けられている。伝熱面の傾斜角度 α は、気泡式傾斜計(精度 $\pm 1/4^\circ$)によって読みとり、伝熱面と架台との間に設置した2本のねじによって所定の傾斜角度に設定した。これら装置全体は、前章で用いた幅1m \times 長さ2m、深さ1mの亚克力製水槽の底面中央部に設置される。

また、流体の物性値変化が熱伝達率に及ぼす影響を極力小さくするために、伝熱面表面温度と周囲流体との温度差を通常10K以下、最大でも15K以下となるようにスライダック(YAMABISHI, VOLT-SLIDER, TYPE S-130-20)によって伝熱面熱流束を調節した。実験は、伝熱面長さ W を代表長さにとった修正レイリー数 Ra^* が $10^{13} < Ra^* < 10^{14}$ 、傾斜角 $\alpha = 0 \sim 15^\circ$ の範囲で行った。

なお、本実験条件を表4-1に示す。

4.2.2 伝熱面温度分布の可視化および流れの可視化

A. 感温液晶による伝熱面表面温度分布の可視化

前節でも述べたように、逆流発生の有無、および伝熱面の局所熱伝達分布を包括的に調べるために、感温液晶を伝熱面に貼付けて表面温度分布の可視化を行なった。本実験で使用した感温液晶シートは、前章で使用した感温液晶と同様のものであり、呈色温度範囲が 27.1°C から 36.1°C までの 9°C の間で、低温から高温の温度変化に対応して色が、暗赤、茶、橙、黄、緑、青と順次変化する。

B. 流れの可視化

伝熱面上に逆流が発生するか否か、あるいは感温液晶によって可視化された伝熱面の局所伝熱特性と流動との関連などを調べるために、染料による流れの可視化を行なった。この可視化の方法は前章のそれとほとんど変わらないので詳しい説明は省略する。

このうち、伝熱面の下端側の流動については、図4-3(a)に示すような可視化用装置を用いた。板の下端に伝熱面と同一水平面となるようスリットを設置して、染料を伝熱面に沿って帯状に流出させることにより流れを可視化した。伝熱面上の局所的な流動の可視化には、細いステンレス・パイプ(外径 0.88mm 、内径 0.58mm)を用いた。染料には、赤色蛍光染料のローダミンB($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$) 0.2wt%水溶液と、緑色蛍光染料のウラニン($\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{Na}_2\text{O}_5$) 0.5wt%水溶液を使用した。また、伝熱面上端側の流動については、図4-3(b)に示すように板の上端に可視化用スリットを下端側と同様に設けて染料を流出させ、伝熱面上端からの流入する流体の動きを観察できるようにした。

4.2.3 温度測定および熱伝達率の測定

伝熱面の表面温度 T_w を測定するために、素線径 $100\mu\text{m}$ の K 型熱電対を、伝熱面中心線上のステンレスはくヒータ裏面 28 個所の地点にスポット溶接した。その熱電対取付け位置の詳細を表 4-2 および図 4-4 に示す。周囲流体温度 T_∞ も、同一素材および同一径の熱電対を用いて測定した。この熱電対は、伝熱面と同一面上で下端および上端から 50mm 離れた 2ヶ所に設置している。なお、本実験で用いた水槽は容量が大きいこともあって、測定時における水槽内の温度成層は水槽表面から 10cm 程度の区間に限られた。このため、2対の周囲流体温度測定用熱電対の出力にはほとんど差が無かった。

各点の温度は、水平平板の場合と同様、GP-IB インターフェイスを介して半自動的にパソコンのフロッピーに取り込まれる。測定法および測定手順については前章と全く同じであるので説明を省く。また、伝熱面の局所熱伝達率 h の算出法についても前章と同じであることから、説明を省略する。

4. 3 実験結果および考察

4.3.1 伝熱面温度分布の可視化

本実験では、まず水平からわずかに傾斜した伝熱面の局所熱伝達率を包括的に把握するために、感温液晶シートを伝熱面に貼付けて、伝熱面の表面温度分布を可視化してみた。その代表的な結果を伝熱面の傾斜角度 α が 5° 、 10° および 15° の場合について、それぞれ図 4-5 (b), (c), (d) に示す。なお比較のため、図 4-5 (a) に前章で得た水平な伝熱面 ($\alpha = 0^\circ$) の可視化結果も併せて掲載した。これらの写真は、いずれも伝熱面に正対する位置から撮影したものである。なお、図 4-5 の一連の可視化実験では、いずれも伝熱面を一樣な熱流束で加熱し、周囲流体温度も一定に保っているため、これら写真のうち温度の低い茶や黄色の部分は熱伝達率が高い部分を、また温度の高い青の部分は熱伝達率が低い部分をそれぞれ表わしていると考えて良い。

さて、まず図 4-5 (b) に示した伝熱面傾斜角 $\alpha = 5^\circ$ の結果であるが、図 4-5 (a) の水平伝熱面 ($\alpha = 0^\circ$) と同様、板の最下端にはスパン方向に一樣な低温部が現われ、下流に向かって急激に温度が高くなっていくことがわかる。そして、その下流にスパン方向に比較的規則正しく並んだ低温の筋状模様が発生している。また、それよりも後方には、不規則な低温模様が発生し、この模様が伝熱面のかなり広い部分を覆っている。この模様は不規則に合体・分裂を繰り返しながら、全体として下流側へと流れていく。そして、伝熱面の中央から少し上側には、不規則でしかも細かな低温模様が密集して現われている様子が伺える。一方、伝熱面の上端側であるが、上端のごく近傍に低温の筋状模様が生じている。この低温筋状模様は、下端側のそれよりもかなり短いことがわかる。さらに、この筋状模様の下側には、不規則な低温模様が現われている。この模様は、上述した不規則かつ密な低温模様の領域に向かってゆっくりと移動していく。

つぎに図 4-5 (c) に示した $\alpha = 10^\circ$ の結果であるが、まず伝熱面下

端側の低温筋状模様は、 $\alpha = 5^\circ$ の場合に比べやや下流側の位置から発生し始めており、形状も太くまた筋同士の間隔も大きくなって、しかもより下流にまでこの筋が伸びている様子が観察できる。また、その後方には不規則な低温模様が現われ、この領域が伝熱面の過半を占めている。一方、伝熱面の上端側であるが、板端付近に細かな低温斑点が出現している。そして、その後方には不規則で密な低温模様が発生している。なお、下端側に生じた不規則な低温模様は、この密な部分に向かってゆっくり移動していくことを確認している。

つぎに図4-5(d)に示した $\alpha = 15^\circ$ の場合であるが、伝熱面下端における低温筋状模様は $\alpha = 10^\circ$ よりもさらに下流の位置から発生し始めており、筋の太さおよび長さとも $\alpha = 10^\circ$ に比べて細くかつ短くなっていることがわかる。そして、その下流には不規則な低温模様が発生しており、この低温模様はそのまま合体・分裂しながら、全体として伝熱面の上端にまで到達していることが観察された。またこの場合、図(a)~(c)に比べて、伝熱面の上端側にいくほど色が青みがかっており、伝熱面温度が高くなっていくことがわかる。このため、上端側では熱伝達率がかなり低下していることが予想できる。

さて、これらの可視化によって観察された低温模様の動きを見る限り、少なくとも傾斜角度 α が 10° よりも小さな伝熱面上には、伝熱面の上端側から伝熱面に沿って下降する流れ、すなわち逆流が発生していることが予想される。そして、この逆流の発生によって、とくに伝熱面の上端側の熱伝達が大きな影響を受けていることが明らかである。一方、伝熱面下端側の熱伝達の変化は、上端側の変化に比べるとはるかに小さいが、それでも、これらの可視化写真を詳しく調べてみると以下に述べるような変化が読取れる。その一つは、伝熱面の最下端部に発生するスパン方向に一様な温度分布を示す領域の拡がりに関するものである。すなわち、この領域は伝熱面の傾斜角度が大きくなるに従って伝熱面の上方にまで伸びてくる。この領域は前章までの結果によると層流境界層領域

に対応しており、伝熱面の傾斜角度が大きくなるにつれて、この層流境界層の占める領域が次第に拡大することを意味している。この結果はまた、境界層のはく離が傾斜角の増加によって、より下流側で生じると言い換えることもできる。もう一つは、3次元はく離とそれに引き続く低温流体の侵入によって生じる低温筋の形状と拡がりに関するものである。すなわち、これらの図を見てもわかるとおり、低温筋は伝熱面の傾斜角度 α が 0° から 10° まで増加するに伴って、より太くしかもより下流へと伸びて来る。しかし $\alpha = 15^\circ$ では、この低温筋は不明瞭かつ短くなっている。このことから、 $\alpha = 10^\circ$ と 15° の間ではく離機構に何らかの変化が生じていることが予想できる。この問題は工学的には興味ある問題であるが、本研究の主要な関心事である逆流発生の問題とは少し懸け離れるので、これ以上の追究は行わなかった。

4.3.2 伝熱面上の流れの可視化

さて、上述したような一連の温度模様が、どのような伝熱面上の流動の結果生じるかについて、染料による流れの可視化により調べてみた。まず、伝熱面下端側の流動状況を可視化した結果の代表例として、傾斜角 $\alpha = 10^\circ$ の場合を図 4-6 に示す。この写真は伝熱面の下端に、伝熱面と同一面上にスリットを設け、このスリットから赤色の染料を流出させたときの結果を示している。スリットから流出した赤色染料は、伝熱面に沿ってしばらく流れた後、スパン方向に比較的規則正しいピッチで 3 次元的にはく離している。このとき伝熱面の上方に置いたステンレスパイプから緑色染料を流出してやると、染料は、はく離の間隙をぬって伝熱面へと下降していき、伝熱面に衝突した後、スリットから出た赤色染料とともに不規則に乱れながら下流へと流れていく。これら一連の流動状況は、第 2 章および第 3 章で明らかにした水平伝熱面のそれと基本的に同一であり、前述の (i) スパン方向に一様な温度分布、(ii) 低温筋状模様、(iii) 不規則低温模様は、それぞれ、前章で明らかにした (I) 層流境界層流域、(II) はく離および 2 次流れ域、および (III) 乱流域に対応していることが明らかである。なお、図 4-6 には示していないが、これら染料はその後、伝熱面中央よりもかなり上端側に寄った地点から鉛直上方へブルーム状に流れ去っていくことを確認している。この領域は、ちょうど図 4-5 (c) で、低温模様が不規則かつ密に寄り集まっている部分に対応している。

一方、伝熱面上端側に設けたスリットから緑色染料を流出させたときの可視化写真を、伝熱面傾斜角 $\alpha = 5, 10, 15^\circ$ の場合について図 4-7 (a)、(b)、(c) にそれぞれ示す。まず $\alpha = 5^\circ$ の場合であるが、図 4-7 (a) に示すように、染料は伝熱面の端部付近で 3 次元的にはく離している。そして、はく離した後の染料は、なお伝熱面に沿って下降していく。そして、伝熱面上のある特定の地点からブルーム状に鉛直上方へと流れ去っている。この伝熱面からブルームとなって立ち上がる部分は

かなりの拡がりをもっていることがわかる。つぎに、図4-7(b)に示した傾斜角 $\alpha = 10^\circ$ の場合であるが、伝熱面上端から流出された染料は伝熱面に沿って下降していくものの、プルームとなって伝熱面から立ち上がる地点は、 $\alpha = 5^\circ$ の場合に比べてかなり上端側に寄っていることが明らかである。さらに傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ の場合になると、図4-7(c)に示すように、染料は逆流することなく、伝熱面端部からそのまま鉛直上方に向かって立ち上がり、やがて上端よりも下流側へと流れ去る。これらの可視化結果より、少なくとも伝熱面傾斜角度 α が 10° までは伝熱面上端側から流入し、伝熱面に沿って下降する逆流が生じることが明らかとなった。このような水平からわずかに傾斜した伝熱面上に逆流が生じることが、従来全く報告されていない。そこで、本実験ではもう少し傾斜角度を細かく変えることにより、この逆流が一体どの程度の傾斜角度まで存在するか調べることにした。その結果、伝熱面傾斜角度 α が 12.5° 以下では常に伝熱面上に逆流が生じること、一方 α が 15° 以上では全く逆流が発生しないことがわかった。そして、中間の $12.5^\circ < \alpha < 15^\circ$ では、時間とともに間欠的に逆流が発生することを見いだした。このことから、逆流発生のおしきい値は $\alpha = 12.5^\circ$ で与えられることがわかる。

さて、本実験では伝熱面上端と下端の両方から同時に染料を流出させた場合についても可視化観察を行っている。それによると、伝熱面傾斜角 α が 12.5° 以下では、両端から流出した染料は伝熱面上で互いに衝突し、プルーム状となって伝熱面から鉛直上方へと流れ去る結果を得ている。この主流と逆流とが衝突する領域は、前項4.3.1で明らかにした細かく密な低温模様の発生する領域に対応していることを確認した。そこで、上述した伝熱面温度分布および流れの可視化結果をもとに、主流と逆流が衝突する平均的な位置を求めてみた。その結果を図4-8に示す。図の縦軸には、伝熱面上端を起点とした衝突位置までの距離 $x_{c,1}$ を、また横軸には伝熱面熱流束 q_w をとっている。なお、この衝突域は

上述したようにかなりの幅をもっているので、その変動幅も併記した。
この図から明らかなように、平均的な衝突点の位置は伝熱面傾斜角 α が
大きくなるにつれて、伝熱面中央から伝熱面上端側へと移動し、 $\alpha =$
 2.5° では $x_{c.o.1} = 350\text{mm}$ 前後、 $\alpha = 12.5^\circ$ では $x_{c.o.1} = 30\text{mm}$ 前後の値
となる。また、これら衝突点の位置は伝熱面熱流束に無関係に定まるこ
とが、この図からわかる。

以上述べてきたように、伝熱面の傾斜角が水平から 12.5° 以下では伝
熱面上には逆流が発生する。このような逆流の発生は、とくに伝熱面上
端側の伝熱特性に重大な影響を及ぼし、ひいては伝熱面全体の熱伝達に
も影響するだろう。そこで、次項では水平からわずかに傾斜した伝熱面
の局所伝熱特性について熱電対を用いた測定を試み、もう少し定量的な
議論を行うことにした。

4.3.3 局所熱伝達率

さて、以上の温度および流れの可視化結果を参考にしながら、本項では伝熱面の流れ方向の局所熱伝達率の測定結果を基に、傾斜伝熱面の局所熱伝達特性を論じる。なお、伝熱面温度分布の可視化結果によれば、傾斜伝熱面上には前報の水平伝熱面の場合と同様な低温筋状模様が発生し、この筋は、いったん発生すれば同じ位置に定常的に存在し続けることを確認している。そこで、この筋領域の局所熱伝達率はスパン方向に平均した値で定義した。

水平からわずかに傾斜した伝熱面の局所熱伝達率の測定を行った結果の代表的な例として、伝熱面熱流束を一定、 $q_w = 3000 \text{ W/m}^2$ に保ち、伝熱面の傾斜角度 α を 0° (水平) から 15° まで変化させた場合について図4-9に示す。この図の縦軸には、流れ方向の局所熱伝達率 h_x を、また、横軸には伝熱面下端からの距離 x をとっている。なお、図では各傾斜角度における熱伝達率分布を見易くするために、縦軸の値を $200 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ づつずらして描いている。まず、伝熱面下端側の局所熱伝達率分布について注目する。傾斜角 $\alpha = 2.5^\circ$ の場合、図から明らかなように局所熱伝達率は $x = 15 \text{ mm}$ 付近で極小値、 $x = 35 \text{ mm}$ 付近で極大値を示し、伝熱面中央に向かって緩やかに減少していく。なお、この極小値は伝熱面端から流入した流体がはく離する直前の位置に、また、極大値は伝熱面上方にある低温流体がはく離の間げきをぬって伝熱面上に到達する位置にそれぞれ対応していることを可視化により確認している。これら極小および極大値の位置は、傾斜角 α が大きくなるにつれて若干ではあるが下流側へと移動していく。また、極小および極大値の差は伝熱面の傾斜角度が増加するにつれて次第に小さくなっていく傾向が伺える。これらの結果は、図4-5に示した一連の伝熱面温度分布の可視化結果からも裏付けられる。

一方、伝熱面上端側の局所熱伝達率であるが、まず傾斜角 $\alpha = 2.5^\circ$ の場合には、 $x = 840 \text{ mm}$ (上端から 10 mm) 付近で極小値を示し、 $x = 830$

mm (上端から20mm) 付近で極大値をとることがわかる。そして、傾斜角 α が 5、7.5、10° と増加していくにつれて、これら熱伝達率の極小および極大点は次第に不明瞭となり、とくに極大点における熱伝達率の低下が顕著となる。さらに $\alpha = 12.5^\circ$ になると極大点が、また $\alpha = 15^\circ$ では極小点がそれぞれ消失する。そして、とくに $\alpha = 15^\circ$ の場合には、 $x = 250\text{mm}$ 以降伝熱面上端に至るまで熱伝達率はほぼ一定となることが注目される。また、伝熱面中央部の熱伝達率は伝熱面の傾斜角度が大きくなるにしたがって、わずかではあるが低下する傾向にある。以上の結果をまとめてみると、伝熱面の傾斜は、伝熱面下端の熱伝達率分布には顕著な影響を及ぼさないのに対し、伝熱面上端側の熱伝達に重大な影響を及ぼし、全般的に伝熱を劣下させる方向に働くことがわかる。

なお、以上述べたのと同様な結果が伝熱面熱流束が変化した場合についても成り立つことを確認している。図4-10および図4-11は、それぞれ伝熱面熱流束 q_w を一定、 $q_w = 1000$ および $5000\text{W/m}^2\text{K}$ 、としたときの局所熱伝達率の測定結果を示したものであるが、これらの図から明らかのように、伝熱面の傾斜角度の増加に伴って、伝熱面下端部における熱伝達率の極大・極小値の位置が下流側に移動する現象、あるいは伝熱面上端部での熱伝達率の極小・極大点が消滅する現象などが、いずれの伝熱面熱流束においても共通して認められる。

4.3.4 平均熱伝達率

さて、前節で述べた局所熱伝達率の測定結果を基に、つぎに伝熱面全体の平均熱伝達率 h を算出してみた。図 4-12 は、その平均熱伝達率を伝熱面長さを代表長さにとった平均ヌセルト数 Nu で表し、横軸に伝熱面長さ基準の修正レイリー数 Ra^* をとってプロットしたものである。伝熱面の傾斜角 α をパラメータにとっている。比較のため水平伝熱面 ($\alpha = 0^\circ$) の場合も併記した。

この図から明らかのように、伝熱面の全体の平均ヌセルト数は、傾斜角 α が増加するに従ってほぼ単調に低下し、とくに傾斜角 $\alpha = 15^\circ$ の場合、伝熱面の平均ヌセルト数は水平伝熱面のそれよりも約 10% 程度低い値を示している。このような平均熱伝達率の低下は、主に前項 4.3.3 で明らかにした伝熱面上端側の局所熱伝達率の低下によるものである。本実験で用いたような大きな伝熱面では、伝熱面の大半は乱流域で占められているが、この乱流域の熱伝達は、図 4-8 ~ 11 の局所熱伝達率の測定結果からもわかるように、比較的傾斜角度の影響を受けにくい。このため、伝熱面全体の平均熱伝達率は本実験に限って言えば、伝熱面の傾斜角度によってそれほど大きく変化しないといえる。しかし、伝熱面が本実験で用いたよりもさらに小さくなれば、層流域や遷移域が伝熱面全体に占める割合が増加する。しかも、これらの流れは伝熱面の傾斜の影響を顕著に受けることが予想される。このことから、小さな伝熱面では伝熱面上端での熱伝達率変化が平均熱伝達率に対して大きく影響するものと思われる。このような伝熱面の大きさが変化した場合に、たとえば逆流の発生や局所伝熱特性がどう変化するかという問題は非常に興味をもたれる点であり、今後さらに検討を加える必要がある。

4. 4 第4章のまとめ

本章では、水平からわずかに傾斜した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実験的検討を加えた。まず、伝熱面上の伝熱・流動特性を感温液晶による表面温度分布の可視化および染料による流れの可視化によって把握した。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な測定を行ない、伝熱面上の流動と局所伝熱特性との対応関係を探った。

実験には等熱流束条件で加熱した長さ850mmの伝熱面を用い、試験流体には水を使用した。伝熱面長さ基準の修正レイリー数が $10^{13} < Ra^* < 10^{14}$ 、伝熱面傾斜角度が $0^\circ < \alpha < 15^\circ$ の範囲で実験を行なった。

これらの実験結果から、以に記す主要な知見が得られた。

(1) 伝熱面の傾斜角度が水平から 12.5° 以内では逆流、すなわち伝熱面上端から流入し伝熱面に沿って下降する流れ、が発生する。一方、傾斜角が 15° 以上になると逆流は認められなくなる。また、逆流の到達する範囲は伝熱面の傾斜角によってほぼ決定され、伝熱面熱流束には依存しない。

(2) 伝熱面の傾斜角度は、この逆流の発生および拡がりを介して、伝熱面のとくに上端側の熱伝達に顕著な影響を及ぼす。一方、伝熱面下端側の流動・伝熱に及ぼす傾斜角度の影響は、上端側のそれに比べるとはるかに小さい。

(3) 伝熱面上端側の局所熱伝達率は、伝熱面の傾斜角度が大きくなるにしたがって次第に低下していく。一方、伝熱面下端側の局所熱伝達率は、傾斜角の増加によって極小および極大点が若干下流側に移動するものの、水平伝熱面の場合とほぼ同様な変化および値を示す。このため、伝熱面全体の平均熱伝達率は、傾斜角度が大きくなるとともに単調に低下していく。

表 4 - 1 実験結果

Inclination angle α (deg)	Heat flux q_w (kcal/m ² h)
0	1400 ~ 1600
5	1400 ~ 1600
10	1400 ~ 1600
15	1400 ~ 1600
20	1400 ~ 1600

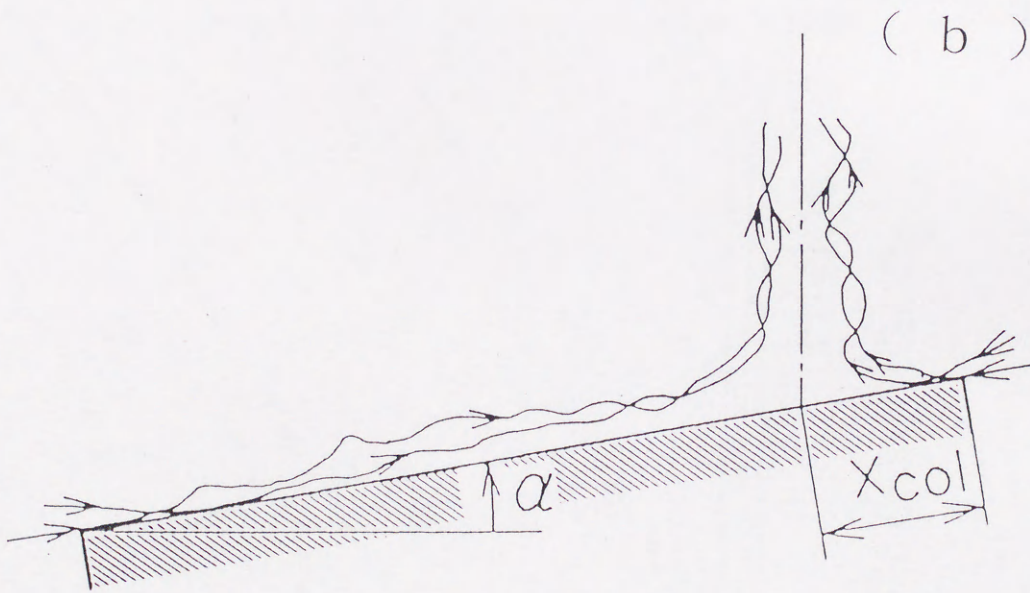
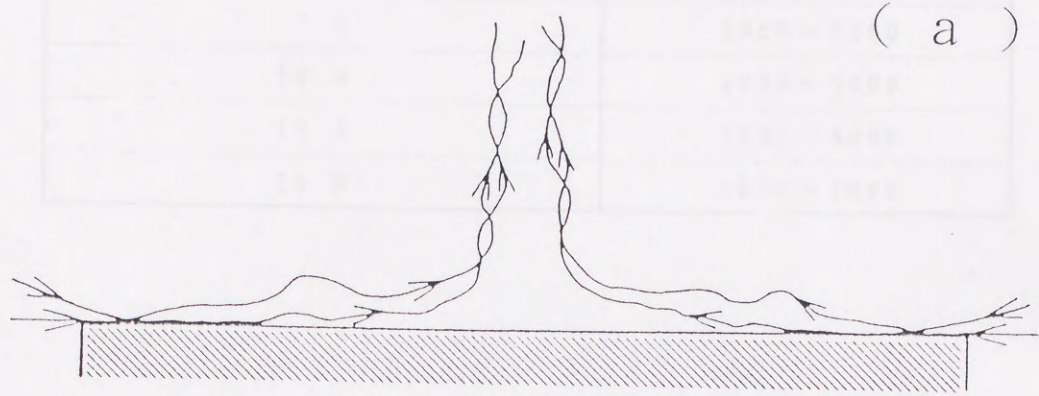


図 4 - 1 水平および傾斜平板上自然対流の模式図

表 4 - 1 実験条件

Inclination angle α (deg.)	Heat flux q_w (W/m^2)
2.5	1000 ~ 5000
5.0	1000 ~ 5000
7.5	1000 ~ 5000
10.0	1000 ~ 5000
12.5	1000 ~ 5000
15.0	1000 ~ 5000

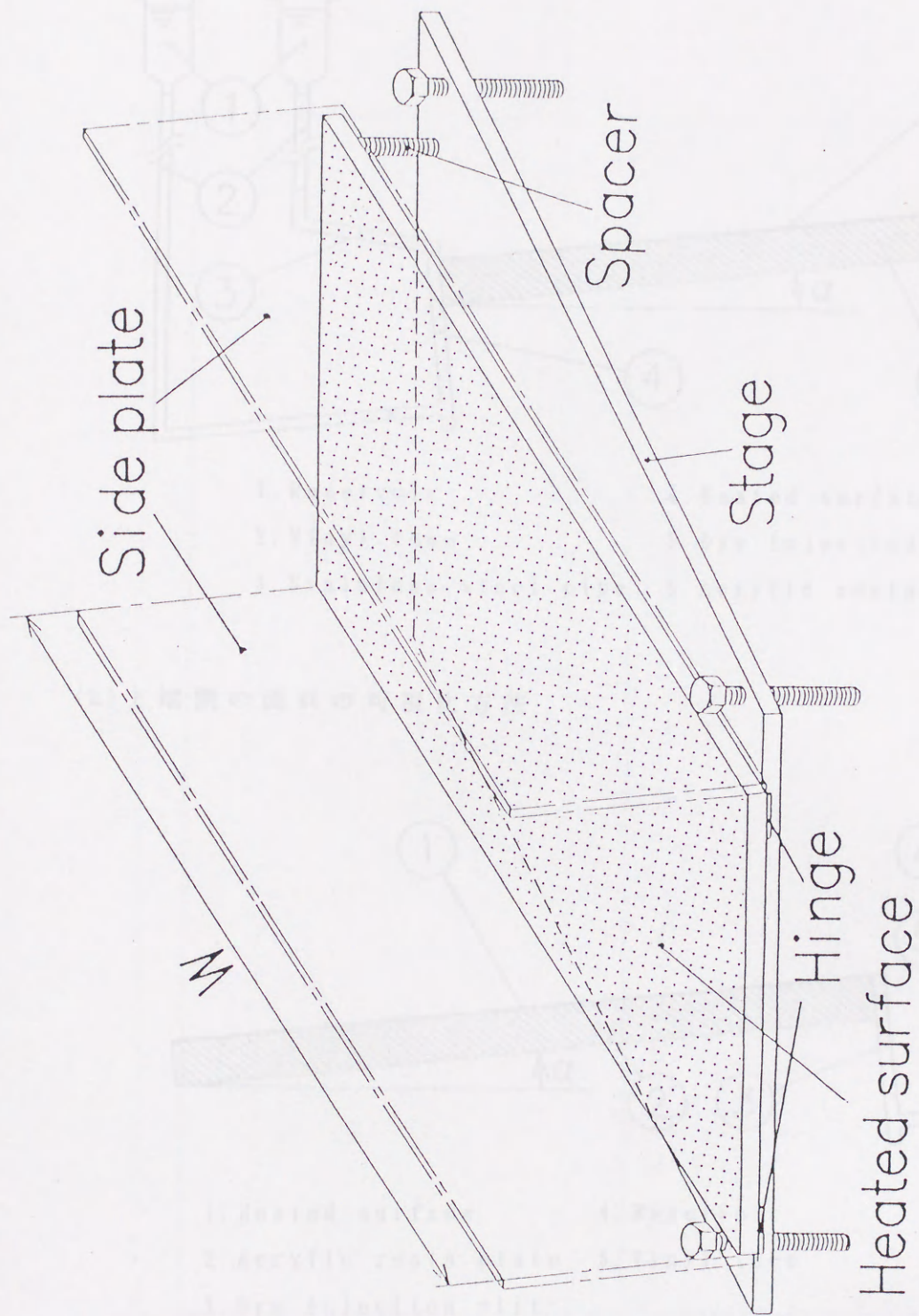
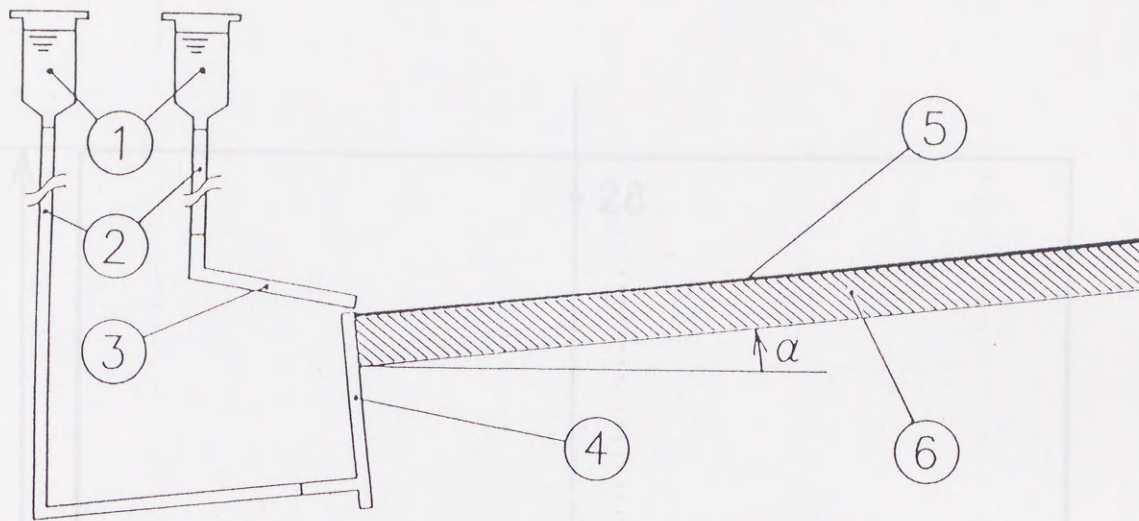


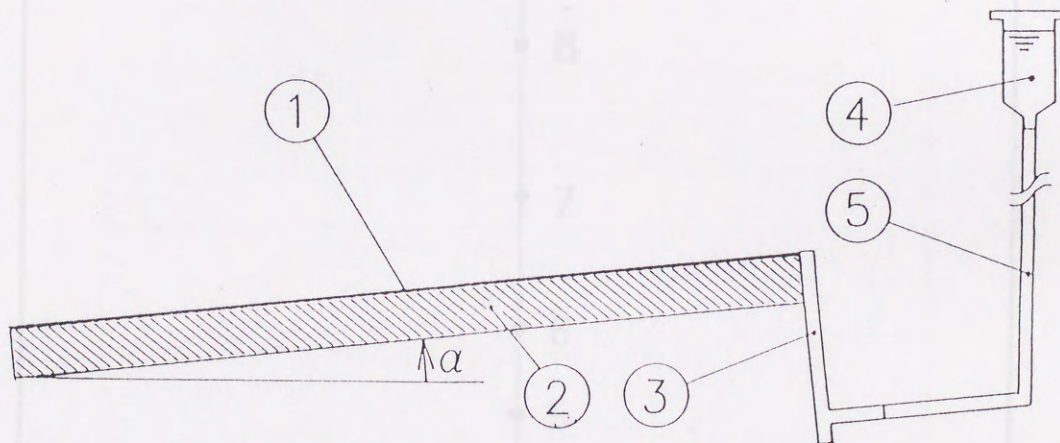
图 4 - 2 实验装置

(a) 下端側の流れの可視化方法



- | | |
|-------------------------|------------------------|
| 1. Reservoir | 4. Heated surface |
| 2. Vinyl tube | 5. Dye Injection slit |
| 3. Stainless steel pipe | 6. Acrylic resin plate |

(b) 上端側の流れの可視化方法



- | | |
|------------------------|---------------|
| 1. Heated surface | 4. Reservoir |
| 2. Acrylic resin plate | 5. Vinyl tube |
| 3. Dye Injection slit | |

図 4 - 3 流れの可視化方法

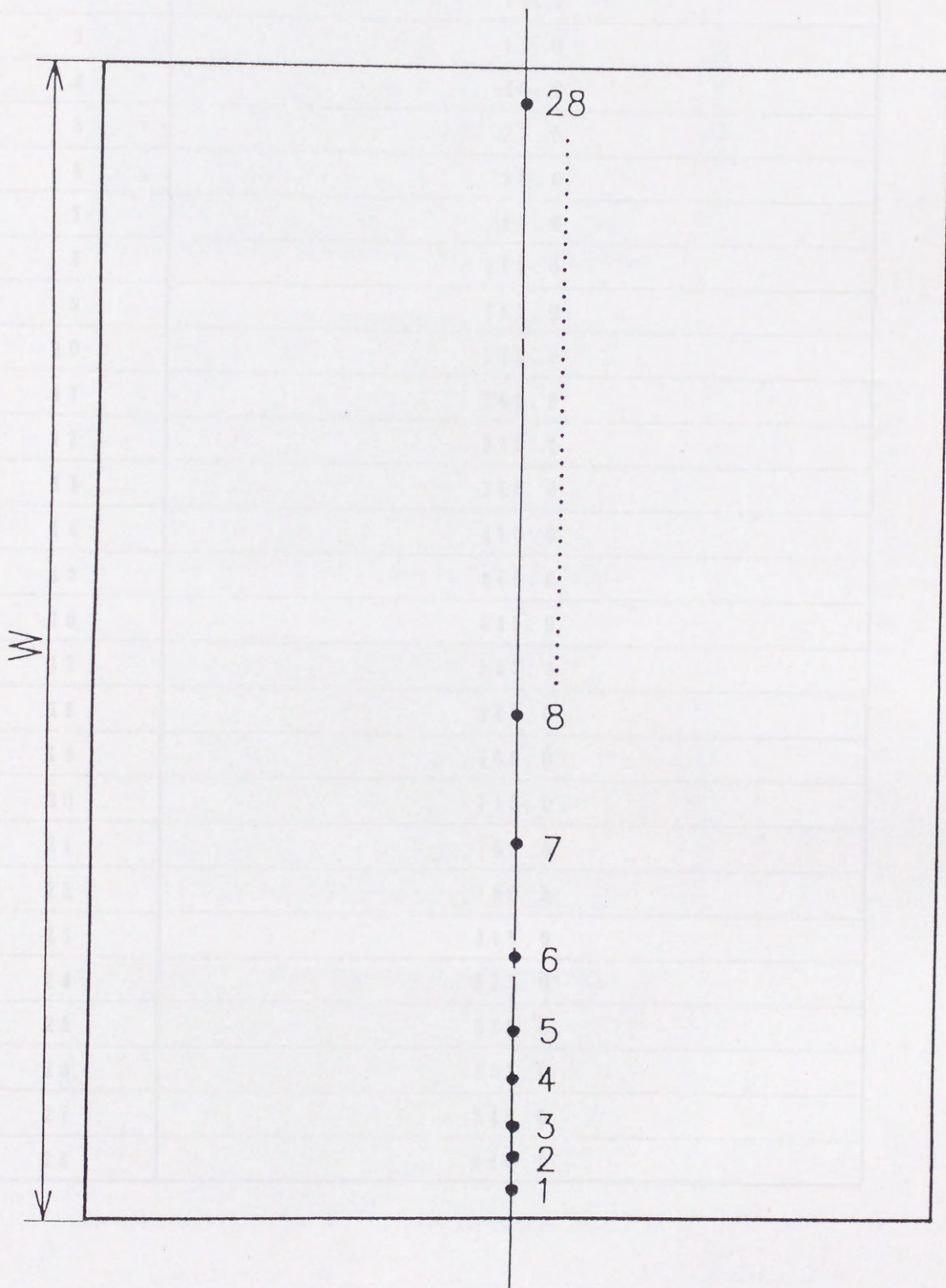


图 4 - 4 热电对设置位置

表 4 - 2 熱電対設置位置

No.	Distance from lower edge of plate x (mm)
1	5.0
2	10.0
3	15.0
4	20.0
5	25.0
6	35.0
7	65.0
8	115.0
9	165.0
10	215.0
11	265.0
12	315.0
13	365.0
14	415.0
15	465.0
16	515.0
17	563.0
18	613.0
19	665.0
20	715.0
21	765.0
22	790.0
23	815.0
24	825.0
25	830.0
26	835.0
27	840.0
28	845.0

↑
Upper edge

↑
Lower edge

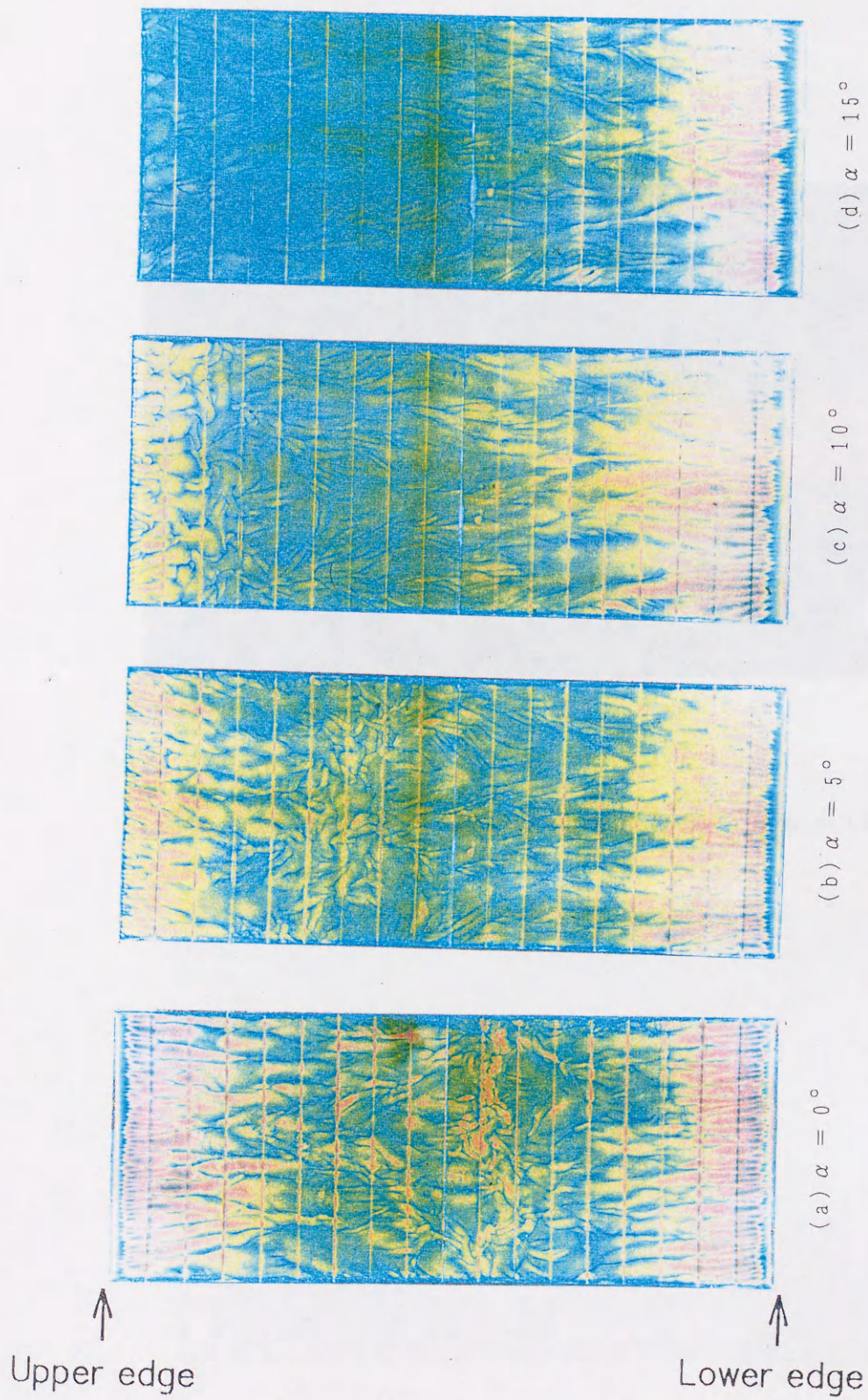


図 4 - 5 伝熱面表面温度分布の可視化

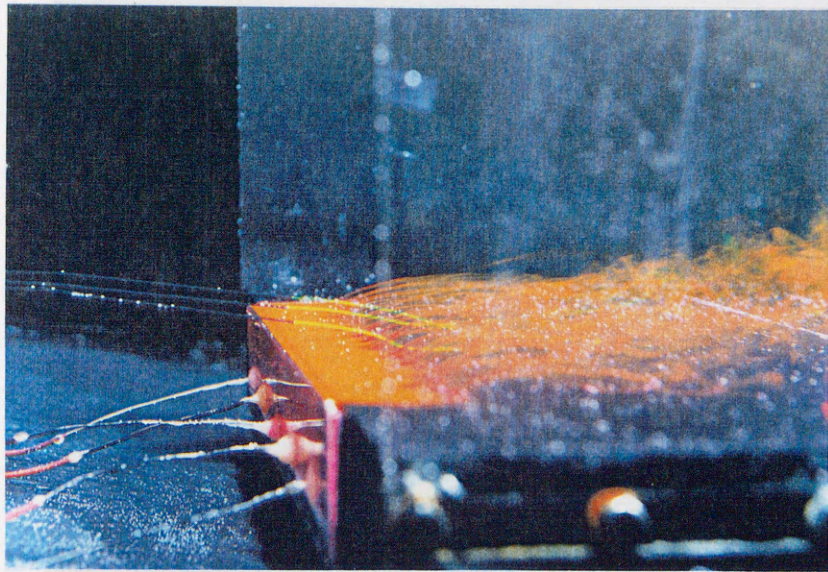
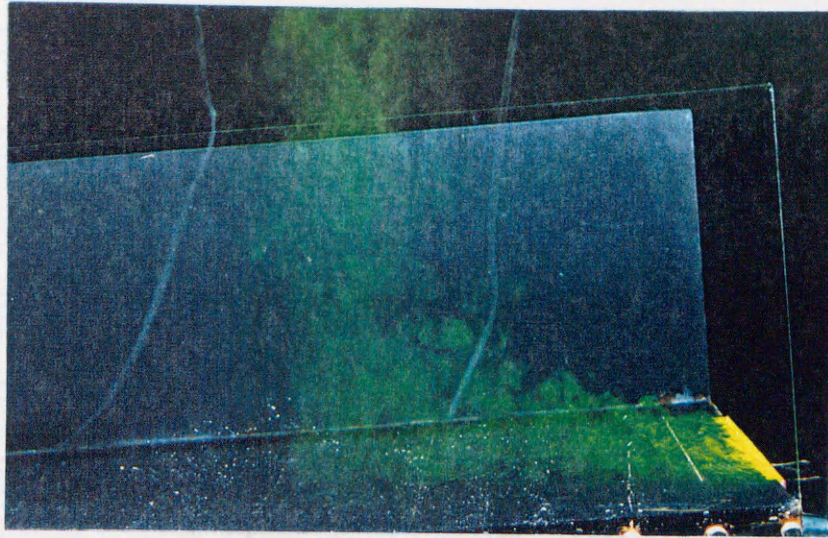
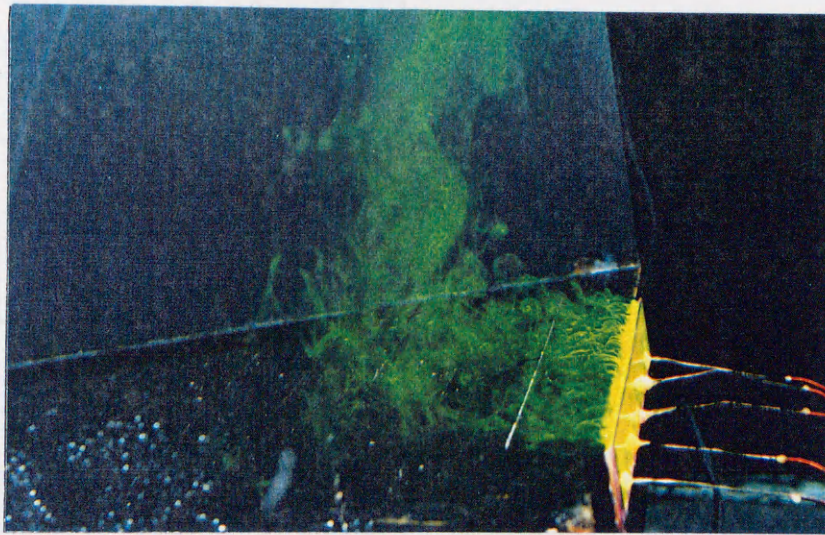


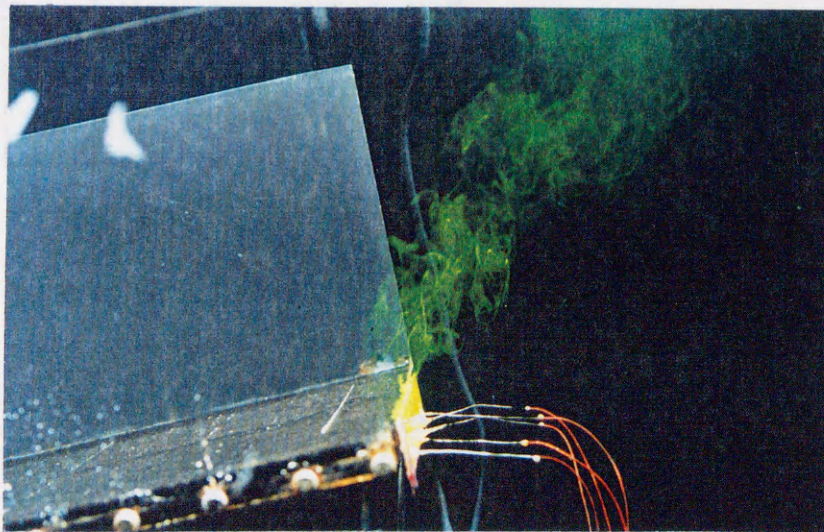
図 4 - 6 伝熱面下端側の流れの可視化 ($\alpha = 10^\circ$)



(a) $\alpha = 5^\circ$



(b) $\alpha = 10^\circ$



(c) $\alpha = 15^\circ$

図 4 - 7 伝熱面上端側の流れの可視化

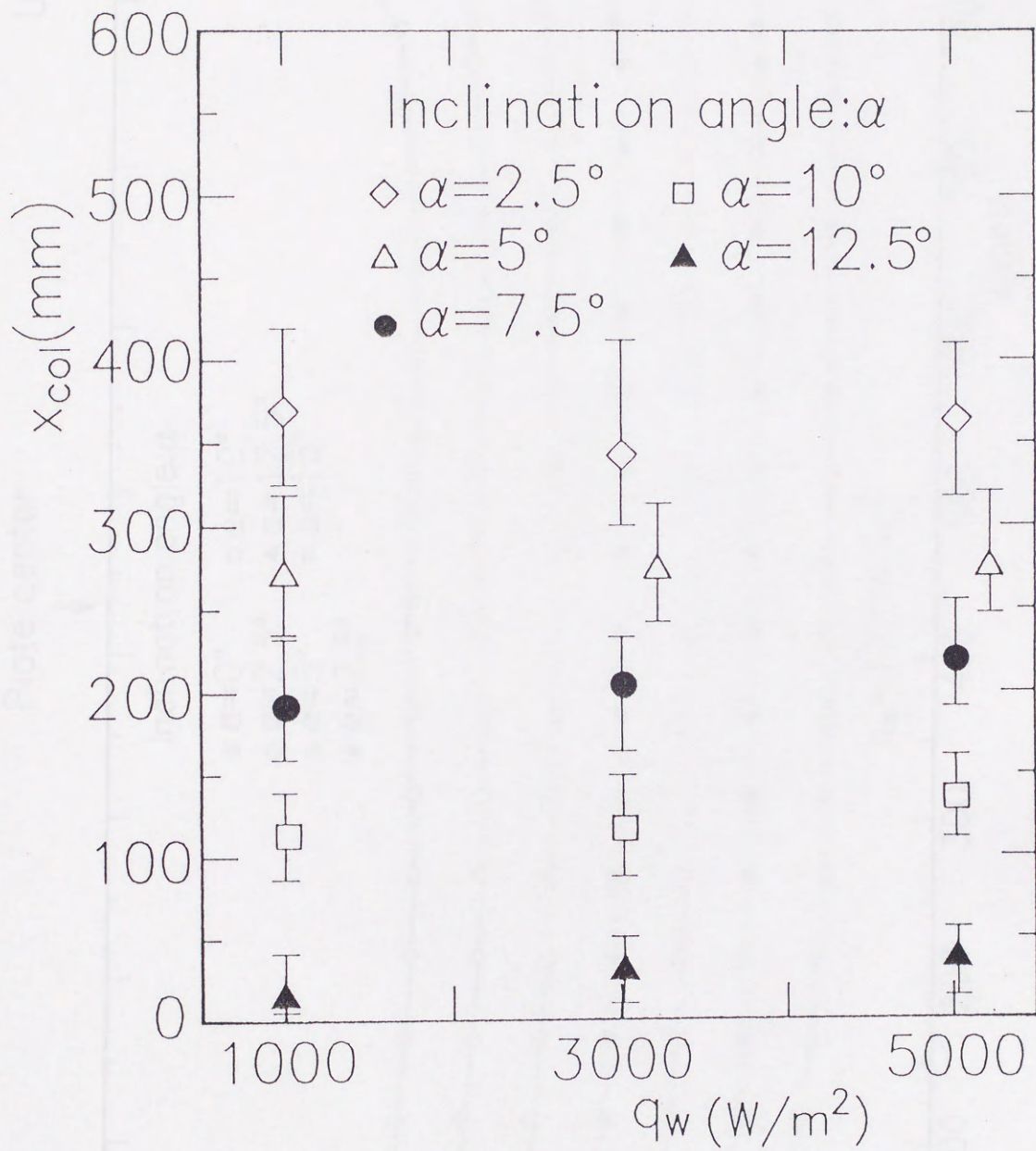


図 4 - 8 衝突点の整理

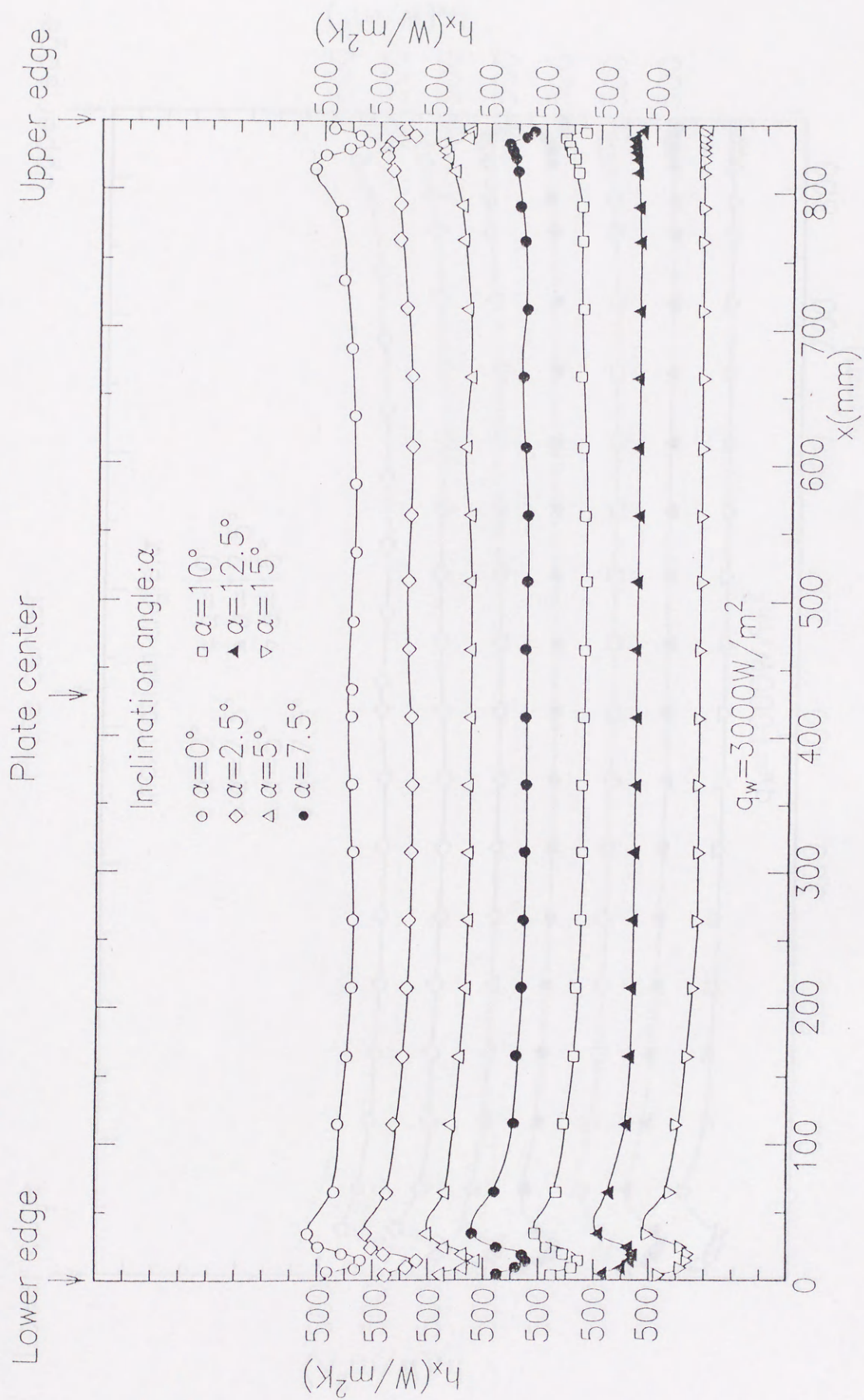


图 4-9 局所熱伝達率分布 ($q_w = 3000 \text{ W/m}^2$)

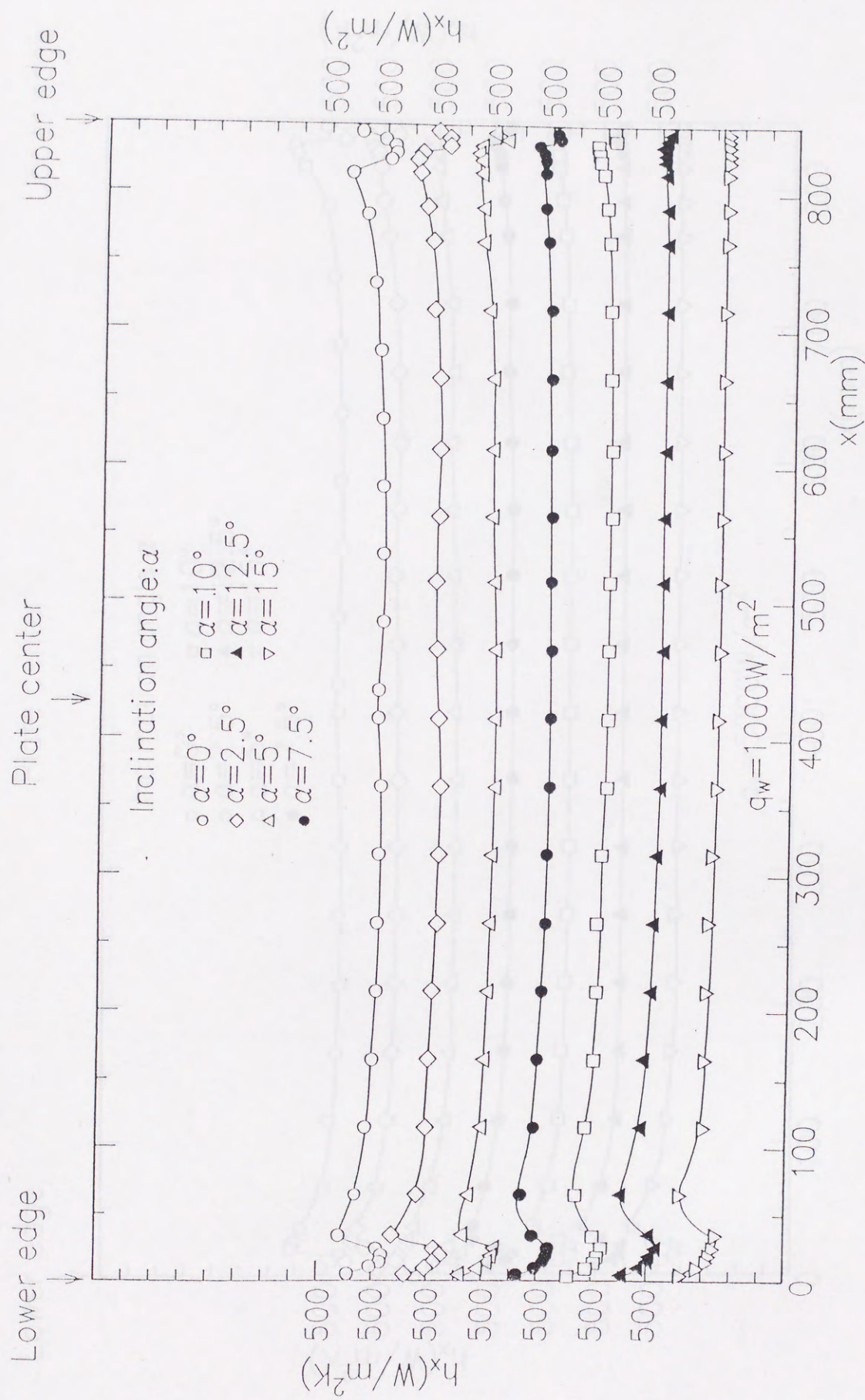


图 4-10 局部热传递率分布 ($q_w = 10000 \text{ W/m}^2$)

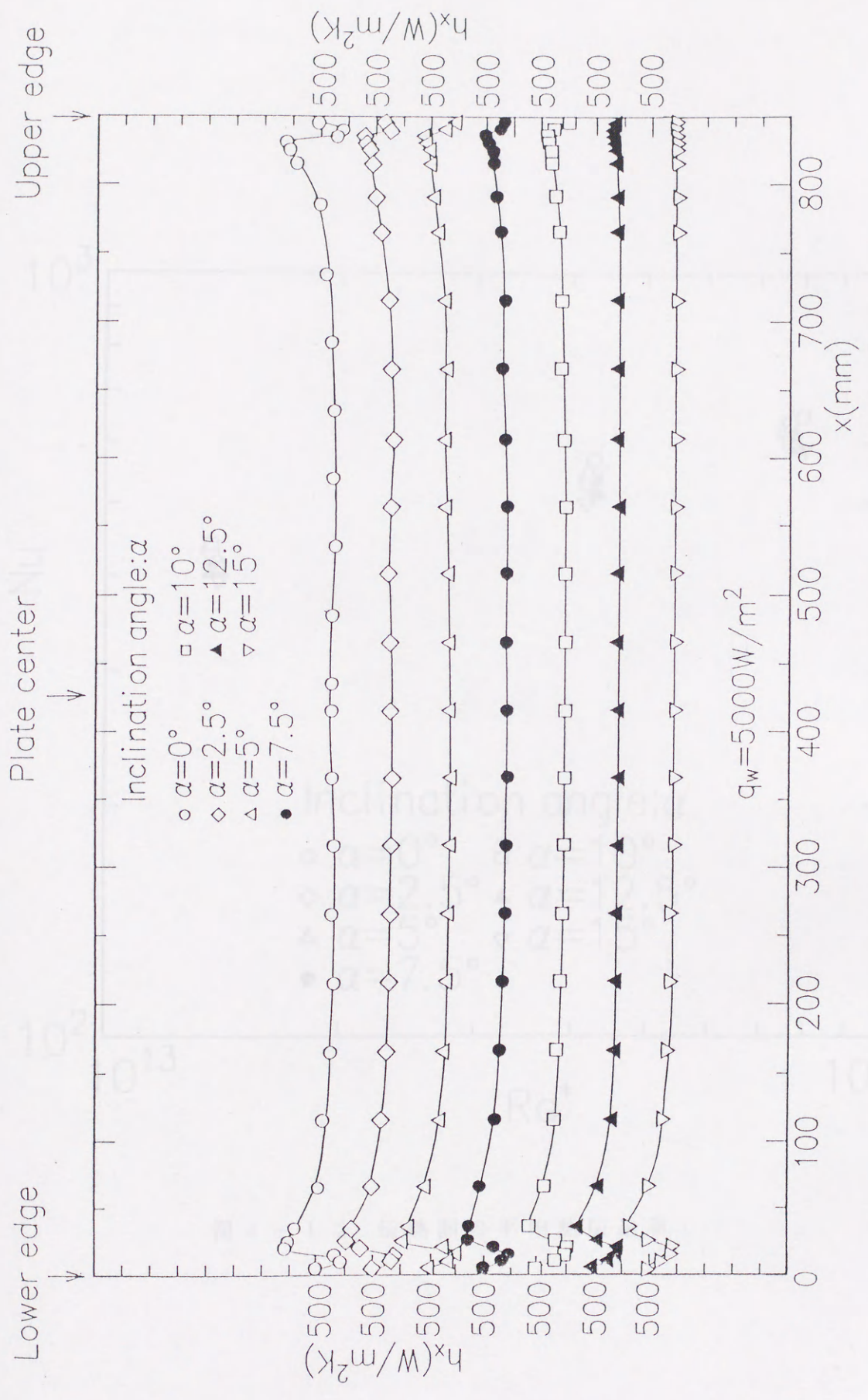


图 4-1-1 局部热传递率分布 ($q_w = 5000 W/m^2$)

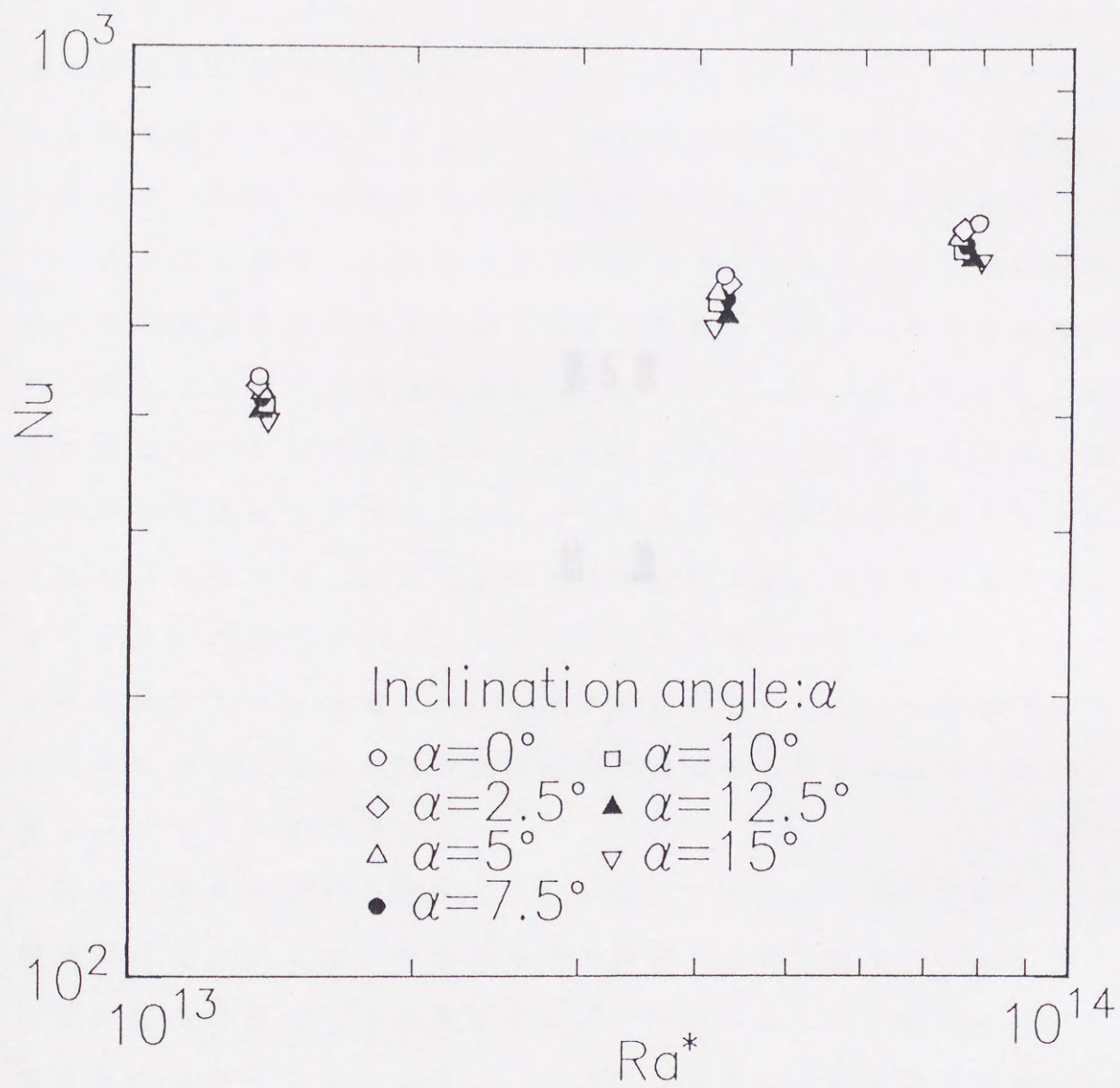


図 4 - 1 2 伝熱面の平均熱伝達率

本研究は、水平あるいは水平からわずかに傾斜した上向き傾斜平板上に発生する自然対流の流動と伝熱について実験的な検討を述べたものである。

このうち、水平傾斜平板上に生じる自然対流については、既述の自然対流の中でも、傾斜した傾斜平板に於ける自然対流と異なり、基本的な流れの方向も異なる。しかも、水平傾斜平板上の自然対流は傾斜した傾斜平板に於ける自然対流と異なり、熱的に不安定で、容易に二次元から二次元の流れへと移行するため、熱伝達係数は極めて低くなる。このため、伝熱・流動機構の解明は従来困難に逢うざるを得ない。そこで、従来行われてきた実験的研究を振り返って見ると、従来の実験の大部分は伝熱面の平均温度分布を測定したものであり、その結果も伝熱面上の流れを大きく影響する結果を導き出さなかった。また、伝熱面上の流れを測定した結果に基づいて伝熱・流動の機構を推定したものは無い。従って、この問題を解決するためには、伝熱面上の流動を詳細に測定し、その結果をもとに伝熱・流動機構を推定する必要がある。

第 5 章

結 論

以上の研究の現状を踏まえ、本研究ではまず可視化によって、水平傾斜平板上に生じている自然対流の流動と伝熱を調べることにした。従来の伝熱面上に生じている自然対流・伝熱・流動を調べるには、体系は伝熱面側の流動の方が望ましい。そこで、本研究では最も単純な体系と考えるガラス水槽と比較大規模な実験とを兼ねる自然対流が最も容易に観察できることと、可視化の原理を最もよく表す自然対流を調べることにし、伝熱面側の流動を調べることにした。また、伝熱面上に生じている自然対流を調べるには、対象とする現象のスケールに合わせて伝熱面を大

本研究は、水平あるいは水平からわずかに傾斜した上向き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実験的な検討を加えたものである。

このうち、水平加熱平板上に生じる自然対流については、数ある自然対流の中でも、垂直な加熱平板に沿う自然対流と並んで最も基本的でしかも重要な流れの一つである。しかし、水平加熱平板上の自然対流は垂直加熱平板に沿う自然対流と異なり、熱的に不安定で、容易に3次元かつ複雑な流れへと移行するため、解析的な取扱いは極めて困難となる。このため、伝熱・流動機構の解明は専ら実験に頼らざるを得ない。そこで、従来行われてきた実験的研究を振り返って見ると、従来の実験の大部分は伝熱面の平均熱伝達率を測定したものであり、その結果も伝熱面上の流れを大きく層流と乱流とに分け、そのそれぞれについて伝熱整理式を提案しているに過ぎない。しかも、それらの実験では実際に伝熱面上の流れを観察した結果に基づいて層流、乱流の領域判別を行ったものではない。従って、これら従来の実験結果から、水平な加熱平板上に一体どのような流れが生じているか、その具体的イメージを描くことは全く不可能である。極言すれば、水平な伝熱面上に生じる自然対流の流動・伝熱については、概略の熱伝達率が求められている以外、ほとんど何も解っていないのである。

以上の研究の現状を踏まえて、本研究ではまず可視化によって、水平加熱平板上に生じている自然対流の流動と伝熱を探ることにした。実際に伝熱面上に生じている現象を把握・理解するには、体系は出来る限り単純な方が望ましい。そこで、本研究では最も単純な体系と考えられるアスペクト比の大きな、2次元とみなせる矩形加熱平板を実験対象に選定した。また、可視化の容易さおよび後述する熱伝達率測定の容易さ等を考慮して、試験流体には常温の水を採用することとし、伝熱面は等熱流束条件で加熱することにした。さらに、伝熱面上に生じている流動・伝熱を観察するには、対象とする現象のスケールに合わせて伝熱面の大

きさを変えていく方が、観察が効率的かつ容易に行える。そこで、本研究では伝熱面の幅を 20mm から 1500mm まで変化させ、伝熱面の端部に生じる現象については小さな伝熱面を、また伝熱面の中央部に生じる現象については大きな伝熱面を利用することにした。なお、これらの伝熱面によって実現し得た伝熱面幅基準の修正レイリー数 Ra^* は、 $10^6 < Ra^* < 10^{15}$ 、また、伝熱面流入端からの距離 x を代表長さとした局所修正レイリー数 Rax^* は、 $10^2 < Rax^* < 10^{14}$ に及んだ。なお、このように非常に広いレイリー数範囲をカバーした実験は、本実験の他には見当たらない。

さて、これら伝熱面を利用してまず伝熱面の表面温度分布を感温液晶によって可視化することにより、伝熱全体にわたる伝熱特性を把握することにした。その結果、

(I) 伝熱面上には、伝熱面の端部から伝熱面中央に向って順に、(i) 伝熱面のスパン方向に一様な温度を示す 2 次元温度分布、(ii) 定在的かつスパン方向に規則的に並ぶ低温筋状模様、(iii) 不規則かつ非定常な低温はん点状模様、および、(iv) 伝熱面中央部に細かく密集した低温模様、で代表される四つの典型的な温度模様が出現することが明らかとなった。

これらの温度模様の成因を探るため、伝熱面上の流れを染料によって可視化してみた。その結果、

(II) 伝熱面上には、(v) 伝熱面の端部から水平に低温周囲流体が流入し、伝熱面に付着して流れたあと、(vi) 伝熱面から 3 次元的是はく離する、

(vii) このはく離の間隙を縫って伝熱面上にある低温流体が、伝熱面近傍へ侵入する、そして、(viii) この低温流体がはく離した後、伝熱面上の流れは不規則かつ乱れた状態になる、そして、(ix) 伝熱面の中央部で伝熱面の他端からやって来た流れと衝突し、鉛直上方に向きを変え、伝熱面から流れ去っていく、という一連の流れが観察された。

そして、これら両可視化結果を対比・総合してみた結果、

(III) 伝熱面上には、伝熱面端部から伝熱面中央に向かって順に、(a) 層

流境界層域、(b)はく離および遷移域、(c)乱流域 および(d)衝突域とも呼ぶべき四つの領域が形成されることが明らかとなった。このうち(b)のはく離および遷移域、(d)の衝突域の存在は、本実験で初めて明らかにされたものである。

また、これに付随して、

- (1)水平平板上に生じる層流境界層流のはく離は、3次元的是はく離であり、強制対流のはく離とは異なるメカニズムではく離が生じている可能性が高いこと、
- (2)層流域と乱流域との間に、いわゆる遷移域とも言うべき領域が相当な拡がりをもって存在すること、
- (3)乱流が実現されるような非常に幅の広い伝熱面上においても、伝熱面上には、なお水平平板上自然対流の主流とも呼ぶべき流れが存在すること、

などの事実が明らかにされた。これらの事実は、従来の研究者が漠然と抱いていた水平平板上自然対流についてのイメージ、すなわち「伝熱面上には層流と乱流とが実現され、境界層流がはく離したあとは、流れは直ちに乱流となり、この乱流は下面加熱・上面冷却の水平流体層内の乱流とほぼ同じ挙動を示す、」を明白に否定するものである。

これらの可視化結果を踏まえて、つぎに、本研究では伝熱面の流れ方向の局所熱伝達率を、熱電対を用いて定量的に測定してみた。測定は、伝熱面の幅 $W = 20\text{mm} \sim 1500\text{mm}$ の等熱流束伝熱面を対象としたもので、その実験範囲は上述したとおりである。なお、測定に当たっては、流体の物性値変化が、顕著な影響を及ぼさないよう伝熱面加熱度を出来る限り小さく保った。これらの実験の結果、

(IV)伝熱面が十分大きな場合には、伝熱面の局所熱伝達率は、(x)伝熱面の流入端で最も高い値を示したあと、伝熱面端部からの距離 x が増加するにつれて急激に低下し、(xi) x のある値で極小値をとること、その後 (xii)増加に転じ、極大値をとること、そして、(xiii)極大値をとっ

たあと緩やかに減少し、やがて、(xiv)一定値に漸近すること、(xv)伝熱面中央部では、この一定値よりも若干高い値を示すこと、が明らかとなった。

また、これらの熱伝達率分布と可視化結果を比較・対照したところ、伝熱面端から上記(xi)の熱伝達率の極小値までが層流境界層域に、(xii)および(xiii)の領域がはく離および遷移域に、(xiv)の領域が乱流域に、また、(xv)の領域が衝突域に、それぞれ対応することがわかった。このうち、

(4)境界層流の3次元はく離によって、伝熱面上の低温流体が伝熱面近

傍に流入し、その結果はく離域の熱伝達が顕著に促進されること、

(5)このはく離域後方の遷移域では、熱伝達率が伝熱面端からの距離 x の増加に伴って単調に低下すること、

(6)伝熱面の両端から発達した主流が、伝熱面中央で互いに衝突する結果、この部分の伝熱が促進されること、

などの事実は、本伝熱実験により初めて明らかにされたものであり、重要と思われる。

つぎに、これらの局所熱伝達率の測定結果を基にして、本研究では水平加熱平板上に生じる自然対流の領域区分を行った。その結果、

(7)層流境界層流域の終端もしくは、はく離開始点は、伝熱面端からの距離 x を代表長さとする局所修正レイリー数がほぼ $R a_x^* = 5 \times 10^7$ で与えられること、

(8)遷移域の終端、従って乱流開始点は、上記局所修正レイリー数が $R a_x^* = 8 \times 10^{10}$ で与えられること、

(9)上の中間のレイリー数、 $5 \times 10^7 < R a_x^* < 8 \times 10^{10}$ が、はく離域および遷移域に相当すること、

を明らかにした。

さらに、本研究では、

(V)伝熱面上の各領域における局所ヌッセルト数の実験整理式を提案し

た。
なお、伝熱面上に生じている現象を詳細に観察し、その現象に応じて領域区分を行い、それぞれについて整理式を提案した研究例は、本研究の他に無いことを断っておく。

最後に、本研究では、これら局所熱伝達率の測定結果をもとに、(V I)伝熱面全体の平均ヌッセルト数を予測するための実験整理式を提示した。

また、これらの実験整理式によれば、従来の実験者はいわゆる遷移域に相当する領域で伝熱実験を行っていること、にもかかわらず、彼らは流れを乱流とみなした整理式を提案していること、従って従来の平均ヌッセルト数の整理式は明らかに間違いであることを、本研究で指摘した。

さて、上述したように、水平な伝熱面上には伝熱面の両端から伝熱面中央に向かう自然対流の主流とも呼ぶべき流れが発生する。このような流れは、伝熱面を水平からわずかに傾斜させた場合にも発生することが想定される。つまり、伝熱面上には板の下端から流入し伝熱面に沿って上昇する流れ（主流）に加えて、上端から流入し伝熱面に沿って下降する流れ（逆流）が発生する可能性がある。そして、かりに逆流が発生するならば、とくに伝熱面上端部での流動・伝熱特性は、この逆流によって大きな影響を受けるものと思われる。しかし、このような逆流が果して伝熱面上に発生するのか否か、もし仮に発生するならば、どのような場合に発生するのかといった問題については、現在まで全く不明のままである。このことから、本研究では上述の水平伝熱面上の自然対流についての結果を踏まえて、つぎに伝熱面が水平からわずかに傾斜した場合の自然対流について実験的検討を加えることにした。実験の主眼を上記逆流の存在の有無を明らかにし、併せて、水平からわずかに傾斜した加熱平板上に発生する自然対流の流動と伝熱機構の詳細を探ることに置いた。実験には、伝熱面上に層流、遷移流、乱流などの全てが現われる

と思われる大きな伝熱面 $W = 850\text{mm}$ を用い、伝熱面上の流れや温度の可視化および局所熱伝達率の測定を行った。

その結果、以下に述べる主要な知見を得た。

- (10) 伝熱面の傾斜角度が水平から 12.5° 以内では、伝熱面上端から流入し、伝熱面に沿って下降する、逆流が発生する。
- (11) この逆流の到達する範囲は、伝熱面の傾斜角によってほぼ決定され、伝熱面熱流束には依存しない。
- (12) 伝熱面の傾斜角度の影響は、逆流の発生および拡がりを介して、とくに伝熱面上端側の熱伝達に顕著な影響を及ぼし、その熱伝達を劣下させる。
- (13) 一方、伝熱面下端側の局所熱伝達率は、傾斜角の増加によって極小および極大点が若干下流側に移動するものの、水平伝熱面の場合とほぼ同様な変化および値を示す。

これらの結果は、いずれも本研究により初めて見いだされたものである。

以上、本研究では水平および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・伝熱について、主として実験的検討を加えて来た。本研究で得られた一連の研究結果から、少なくともこれら加熱平板上にどのような自然対流が生じ、また、伝熱面各部の伝熱がどのような特性を示すかに関しては、かなりの程度の理解が得られたように思う。これらの成果は、工業分野における各種伝熱機器の熱設計や性能評価のための基礎資料となるばかりでなく、自然対流の知識を必要とする建築環境学や気象学などをはじめとする様々な分野で、有効に活用されるものと期待される。

(1) Taylor, G. I., Gortler, F., and Miksa, R.,

'Natural Convection',

Tellusphere, (1955).

(2) Gebhart, B., Jovanović, V., Karle, P. L., and Tamplin, B.,

'Buoyancy-Induced Flow and Transfer',

Tellusphere, (1974).

(3) 櫻井, 哲, 佐藤, 隆夫, 山崎, 隆夫, 山崎, 隆夫,

'伝熱工学の基礎 3. 自由対流熱伝達の基礎',

実業堂, (1974).

参 考 文 献

(4) 相澤利雄, 山崎隆夫, 山崎隆夫,

'伝熱工学の基礎 4. 予熱をともなう自由対流熱伝達',

実業堂, (1974).

(5) Pece, L., and Gebhart, B.,

'Natural Convection Boundary Layer Flow Over Horizontal and Slightly Inclined Surfaces',

Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 11 (1968), 1121.

(6) 河部俊夫, 石島善二,

'加熱された水平上向き面上の自然対流',

(第1巻, 基礎研究)

日本機械学会論文集(第2部), 第41巻291号(1973), 2477.

(7) 石島善二, 河部俊夫, 長瀬洋徳,

'加熱された水平面上面上の自然対流',

(第2巻, 流体熱伝達と熱伝達)

日本機械学会論文集(第2部), 第43巻319号(1975), 434.

- (1) Kakac, S., Aung, W. and Viskanta, R.,
 'Natural Convection', *Natural Convection Over Horizontal Plate and Hemisphere*, (1985)
- (2) Gebhart, B., Jarulia, Y., Marjan, R. L. and Samakia, B.,
 'Buoyancy-Induced Flow and Transfer',
Hemisphere, (1988)
- (3) 藤井 哲,
 '伝熱工学の進展 3, 自由対流熱伝達の基礎',
 養賢堂, (1976)
- (4) 相原利雄,
 '伝熱工学の進展 4, 干渉をともなう自由対流熱伝達',
 養賢堂, (1976)
- (5) Pera, L. and Gebhart, B.,
 'Natural Convection Boundary Layer Flow Over Horizontal and Slightly Inclined Surface',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 16 (1973), 1131.
- (6) 阿部俊夫, 石黒亮二,
 '加熱された水平上向き面上の自然対流',
 (第1報, 数値解析)
 日本機械学会論文集 (第2部), 第41巻352号 (1975), 3577.
- (7) 石黒亮二, 阿部俊夫, 長瀬秀俊,
 '加熱された水平加熱面上の自然対流',
 (第2報, 流れ場の乱れと熱伝達)
 日本機械学会論文集 (第2部), 第43巻366号 (1977), 638.

- (8) Goldstein, R. J. and Lau, K. E.,
'Laminar Natural Convection From Horizontal Plate and
Influence of Plate-edge Extensions',
J. Fluid Mech. Vol. 129 (1983), 55.
- (9) 石黒亮二, 小沢郁夫, 熊坂勝行,
'加熱された水平上向き面上の自然対流',
(第4報、周期流れの不安定化に関する検討)
日本機械学会論文集 (B編), 第50巻456号 (1984), 1904.
- (10) 竹内正紀, 部谷尚道, 木村照夫, 田中義樹,
'断面長方形の物体からの自然対流熱伝達',
日本機械学会論文集 (B編), 第51巻462号 (1985), 647.
- (11) Fishenden, M. and Saunders, O. A.,
'An Introduction to Heat Transfer',
Clarendon Press, (1957), 89.
- (12) Wragg, A. A.,
'Free Convection Mass Transfer at Horizontal Electrodes',
Electrochimica ACTA, Vol. 13, (1970), 439.
- (13) Wragg, A. A. and Loomba, R. P.,
'Free Convection Flow Patterns at Horizontal Surfaces with
Ionic Mass Transfer',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 13 (1970), 439.
- (14) Lloyd, J. R. and Moran, W. R.,
'Natural Convection Adjacent to Horizontal Surface of
Various Planforms',
Trans. ASME, J. Heat Transfer, (1974), 443.

- (15) Hassan, K. E. and Mohamed, S. A.,
'Natural Convection from Isothermal Flat Plate',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 13 (1970), 1873.
- (16) Fujii, T. and Imura, H.,
'Natural Convection Heat Transfer From a Plate Arbitrary
Inclination',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15 (1972), 755.
- (17) Goldstein, R. J., Sparrow, E. M. and Jones, D. C.,
'Natural Convection Mass Transfer Adjacent to
Horizontal Plate',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 16 (1973), 1025.
- (18) Al-Arabi, M. and El-Riedy, M.,
'Natural Convection Heat Transfer From Isothermal Horizontal
Plates of Different Shapes',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 19 (1976), 1399.
- (19) Ishiguro, R., Abe, T., Nagase, H. and Nakanishi, S.,
'Heat Transfer and Flow Stability of Natural Convection
Over Upward-Facing Horizontal Surfaces',
Proc. 6th Int. Heat Transf. Conf., Vol. 2 (1978), 229.
- (20) Yousef, W. W., Tarasuk, J. D. and Mckeen, W. J.,
'Free Convection Heat Transfer From Upward-Facing Isothermal
Horizontal Surface',
Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol. 104 (1982), 493.
- (21) 甲藤好郎,
'伝熱概論',
養賢堂 (1964)

- (22) Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P. and Ganic, E. M.,
 'Handbook of Heat Transfer—Fundamentals' 2nd ed.,
 McGraw-Hill (1985)
- (23) Husar, R. B. and Sparrow, E. M.,
 'Pattern of Free Convection Flow Adjacent to Horizontal
 Heated Plate',
 Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 11 (1968), 1206.
- (24) Rotem, Z. and Classen, L.,
 'Natural Convection above Unconfined Horizontal Surfaces'
 J. Fluid Mech. Vol. 39 (1969), 173.
- (25) Pera, L. and Gebhart, B.,
 'Natural Convection Boundary Layer Flow Over Horizontal and
 Slightly Inclined Surface',
 Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 16 (1973), 1131.
- (26) Sparrow, E. M. and Husar, R. B.,
 'Longitudinal Vortices in Natural Convection Flow on
 Inclined Plates',
 J. Fluid Mech. Vol. 37 (1969), 251.
- (27) Lloyd, J. R. and Sparrow, E. M.,
 'On the Instability of Natural Convection Flow on
 Inclined Plates',
 J. Fluid Mech. Vol. 42 (1970), 465.
- (28) Lloyd, J. R., Sparrow, E. M., and Eckert, E. R. G.,
 'Laminar, Transition and Turbulent Natural Convection
 Adjacent to Inclined and Vertical Surfaces',
 Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15 (1972), 457.

- (29) Lloyd, J. R., and Gebhart, B.,
 'Vortex Wavelength in the Transition Flow Adjacent to
 Upward Facing Inclined Isothermal Surfaces',
 Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf., Tokyo, Vol. 3 (1974), 34.
- (30) Shaukatullah, H. and Gebhart, B.,
 'An Experimental Investigation of Natural Convection Flow
 on an Inclined Surface',
 Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21 (1978), 1481.
- (31) Rich, B. R.,
 'An investigation of Heat Transfer from an Inclined
 Flat Plate in Free Convection',
 Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol. 75, No. 2 (1953), 489.
- (32) Vliet, G. C.,
 'Natural Convection Local Heat Transfer on
 Constant-Heat-Flux Inclined Surfaces',
 Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol. 91, No. 4 (1969), 511.
- (33) Vliet, G. C. and Ross, D. C.,
 'Turbulent Natural Convection on Upward and Downward
 Facing Inclined Constant Heat Flux Surfaces',
 Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol. 97, No. 4 (1975), 549.
- (34) Hassan, M. M. and Eichhorn, R.,
 'Local Nonsimilarity Solution of Free Convection Flow and
 Heat Transfer from an Inclined Isothermal Plate',
 J. Heat Transfer, Vol. 101. (1979), 642

- (35) Black, W. Z. and Norris, J. K.,
'The Thermal Structure of Free Convection Turbulence
From Inclined Isothermal Surface and Its Influence
on Heat Transfer',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18 (1975), 43.
- (36) Al-Arabi, M. and Sakr, B.,
'Natural Convection Heat Transfer From Inclined
Isothermal Plates',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31 (1988), 559.
- (37) 藤井 哲, 井村英昭,
'傾斜平板および水平平板からの自然対流熱伝達の実験',
日本機械学会論文集 (B編), 第37巻301号 (1971), 642.
- (38) Pera, L. and Gebhart, B.,
'On the Stability of Natural Convection Boundary Layer
Flow over Horizontal and Slightly Inclined Surface',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 16 (1973), 1147.
- (39) Lewandowski, W. M.,
'Natural Convection Heat Transfer From Plates of
Finite Dimension',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34 (1991), 875.
- (40) 三角利之,
'自然対流の伝熱促進法と高性能伝熱面の開発',
豊橋技術科学大学, 博士論文 (1992)
- (41) 笠木伸英,
'伝熱実験における液晶の応用',
日本機械学会誌, 第87巻783号 (1984), 31.

- (42) Kitamura, K., Koike, M., Fukuoka, I. and Saito, T.,
'Large Eddy Structure and Heat Transfer of Turbulent
Natural Convection along a Vertical Flat Plate',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, No. 4. (1985), 837.
- (43) Kitamura, K. and Inagaki, T.,
'Turbulent Heat and Momentum Transfer of Combined Forced
and Natural Convection along a Vertical Flat Plate
- Aiding Flow',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 1. (1987), 23.
- (44) 三角利之, 北村健三,
'ステップ後方はく離を伴う自然対流の流動および熱伝達',
日本機械学会論文集 (B編), 第53巻487号(1987), 1072.
- (45) 稲垣照美, 北村健三,
'垂直な平板に沿う強制-自然共存対流の乱流熱伝達
(対向流の場合)',
日本機械学会論文集 (B編), 第54巻499号(1988), 675.
- (46) 流れの可視化学会 編
'新版 流れの可視化ハンドブック',
朝倉書店(1986).

本論文は、著者が豊橋技術科学大学大学院在学中の研究成績をまとめたもので、この間多くの方々より御支援、御指導を賜りました。ここに深く感謝致します。

なかでも、豊橋技術科学大学エレクトロニクス系村松三郎教授には、著者の5年間における研究・生活の両面において親切丁寧なる御指導・御鞭撻ならびに御助言を賜わり、貴重な研究環境を御供していただきました。ここに心から感謝の意を表します。

本研究を支えとる方に限し、貴重な御指導と御助言を賜りました豊橋技術科学大学エレクトロニクス系准教授三田地純史教授、中川勝文助教授に深く感謝致します。

同族兄弟の御支援に当たり、大兄研究者である（株）中島ホム（元豊橋技術科学大学エレクトロニクス系大学院生）長江の御指導に心より感謝致します。

謝 辞

本論文の作成や印刷製本の助けおよび印刷の遂行に当たり、多大な御助力をいただきました豊橋技術科学大学エレクトロニクス系北村研次郎の方々に心から御礼を表します。

また、印刷製本の製作等に当たり、豊橋技術科学大学エレクトロニクス系鈴木孝司助手ならびに三田地純史の方々に御助力をいただきました。ここに心から御礼を表します。

最後に、このような書に研究に打ち込める機会と貴重な時間を与えていただきました両親に感謝致します。

本論文は、著者が豊橋技術科学大学大学院在学中の研究成果をまとめたもので、この間多くの方々より御支援・御指導を賜りました。ここに深く感謝致します。

なかでも、豊橋技術科学大学エネルギー工学系北村健三助教授には、著者の5年間にわたる研究・生活の両面において懇切丁寧なる御指導・御鞭撻ならびに御助言を賜わり、最適な研究環境を提供していただきました。ここに心から感謝の意を表します。

本研究をまとめるに際し、貴重な御指摘と御教示を賜りました豊橋技術科学大学エネルギー工学系後藤圭司教授、三田地紘史教授、中川勝文助教授に深く感謝致します。

伝熱促進の研究遂行に当たり、共同研究者である(株)中部ガス(元豊橋技術科学大学エネルギー工学系大学院生)長江直行君に心より感謝致します。

本論文の作成や実験装置の製作および実験の遂行に当たり、多大な御協力をいただきました豊橋技術科学大学エネルギー工学系北村研究室の方々に心から謝意を表します。

また、実験装置の製作等に当たり、豊橋技術科学大学エネルギー工学系鈴木孝司助手ならびに三田地研究室の方々に御協力をいただきました。ここに心から謝意を表します。

最後に、このような真に研究に打ち込める機会と貴重な時間を与えてもらいました両親に感謝致します。

1. 総論

1.1 はじめに

本論文の著者等および著者等は、水平加熱平板上に存在する自然対流の流動と熱伝達について実験的に検討を加え、その結果によるより大きな伝熱面上には付図1(a)に示すような自然対流が生じることが明らかとなった。すなわち、まず、伝熱面の両端部から伝熱の熱源流体が流入し、伝熱面に沿って流れる。この熱源流体は、やがて伝熱面から二次元的に流れて、この流を帯びて伝熱面全体の伝熱流体が伝熱面に向かって侵入する。この流れは伝熱面直ちに隔壁上方に流れ流るすべし、伝熱面直ぐを伝熱面が共に流れて流れ、伝熱面中央付近からブルーム状に上方へ流れ流る。また、このような一連の運動に伴って伝熱面の両端部伝熱面直ぐを伝熱面が共に流れて流れ、伝熱面中央付近からブルーム状に上方へ流れ流る。また、このような一連の運動に伴って伝熱面の両端部付近で局所的に高く、伝熱面中央付近で低い値を示すことがあつた。このように伝熱面中央付近で高い熱伝達率しか得られないのは、伝熱面の両端部から侵入した熱源流体が伝熱面に沿って流れ流る。また、このような一連の運動に伴って伝熱面の両端部付近で局所的に高く、伝熱面中央付近で低い値を示すことがあつた。このように伝熱面中央付近で高い熱伝達率しか得られないのは、伝熱面の両端部から侵入した熱源流体が伝熱面に沿って流れ流る。

「付録」

水平加熱平板上自然対流の伝熱促進

さて、三角・丸柱・円柱・正方形・長方形加熱平板に於ける自然対流の伝熱を促進するには、伝熱面に沿って上昇してきた熱源流体を、伝熱面上に設置した高度な障害物によって伝熱面直ぐを伝熱面が共に流れて流れ、伝熱面中央付近からブルーム状に上方へ流れ流る。また、このような一連の運動に伴って伝熱面の両端部付近で局所的に高く、伝熱面中央付近で低い値を示すことがあつた。このように伝熱面中央付近で高い熱伝達率しか得られないのは、伝熱面の両端部から侵入した熱源流体が伝熱面に沿って流れ流る。

そして、もし仮にこのような方法によって伝熱が促進できるならば、本論文の結果が長期的に有効なものであることは確かである。実用的な観点からその意義は非常に大きいといえる。

1. 緒言

1.1 はじめに

本論文の第2章および第3章では、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実験的に検討を加えた。その結果によると、大きな伝熱面上には付図1(a)に示すような自然対流が生じることが明らかとなった。すなわち、まず、I)伝熱面の両端部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3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に流れ去らずに、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付図1(b)に模式的に描いたように、伝熱面の両端部付近で相対的に高く、伝熱面の中央部で低い値を示すことがわかった。このように伝熱面の中央部で低い熱伝達率しか得られないのは、伝熱面の端部に流入した流体が、伝熱面上を流れる間に伝熱面によって加熱され、高温となって伝熱面中央部に流れ込むためである。

さて、三角・北村^(A.1)は最近、垂直な加熱平板に沿う自然対流の伝熱を促進するには、伝熱面に沿って上昇してきた高温流体を、伝熱面上に設置した適当な障害物によって伝熱面近傍から排除し、代わりに低温の周囲流体を伝熱面近傍へ導入させればよい、との伝熱促進に関する基本方針を提示した。彼らの方針が正しいとするならば、本研究でその存在を明らかにした水平伝熱面に沿う主流についても、伝熱面上に適当な流動障害物を設置し、これによって高温となった主流を伝熱面近傍から排除してやれば、熱伝達率の低いとくに伝熱面中央付近の伝熱性能が改善できるものと思われる。

そして、もし仮にこのような方法によって伝熱が促進できるならば、本論文の成果が具体的に活かされたことになるばかりでなく、実用的な観点からもその意義は非常に大きいといえる。

1.2 自然対流の伝熱促進について

ところで、このような自然対流の伝熱を促進させ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。これらの研究のうち本節では、外部からの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のみ焦点を絞って従来の研究を振り返る。これは、受動的伝熱促進法の対極にある能動的な伝熱促進法（すなわち外部から動力を投入して伝熱を促進させる方法）が、自然対流の優れた特長である動力不要、無騒音、無振動、停電事故時の安全性の高さなどを根底から否定するものであり、自然対流の伝熱促進法として採用されるべきではないと考えるからである。

さて、このような受動的伝熱促進法のうち、とくに伝熱面基板が水平の場合について現在のところ唯一実用になっているのは、付図2に示すように垂直なフィンを取付ける方法ぐらいである(A.2)。この方法の基本的な考え方は、フィンによって有効伝熱面積を拡大することであり、このフィンからの放熱が効率良く行われるためには、付図3(a)に示すように、伝熱面の側方から低温の周囲流体が流れ込み、フィンに沿って流れることが必要である。このためには、フィン高さ H が伝熱面の大きさ W （伝熱面の短幅）に比べてある程度以上高くなければならない。逆に付図3(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、小さな伝熱面に向いた方法であると言える。一方、伝熱面が大きな場合、あるいは伝熱面上に設置するフィンが空間的な制約から高くできない場合には、この方法を採用することは必ずしも適当とはいえない。このような大きな伝熱面やあるいは伝熱面上の空間に一定の制約条件が有る場合には、上述の拡大伝熱面効果だけに頼らない伝熱促進法を採用する必要がある。そのような伝熱促進法として、もっとも有望なものに自然対流の熱伝達率を増加させる方法が挙げられる。

しかし、このような自然対流の熱伝達率を増加させる方法については、今まで数多くの研究者が様々な方法や手段を試みて来たが、結論的に言えばいずれも十分な成果を得るに至っていない。例えば、初期の研究では強制対流の伝熱促進法からの類推に基づき、伝熱面上に種々の形状をした粗さ要素を設置する方法が提案され、実際に顕著な伝熱促進効果が得られたとの報告がなされている（例えば Prasolov^(A.3)、Jofre & Barron^(A.4)）。しかし、彼らの報告はその後相次いで行われた追実験によって完全に否定されている（例えば、Fujii et al.^(A.5)、Heya et al.^(A.6)）。一方、これらの小さな粗さ要素よりも、もっと寸法の大きなリブを伝熱面上に取付ける方法も、例えば坪内ら^(A.7)や Bhavnani et al.^(A.8)によって試みられている。しかし、彼らの結果を子細に検討すると、確かに局所的には伝熱は促進されているものの、かえって伝熱が劣化した部分もあり、伝熱面全体で見ると全く伝熱促進になっていないのが実情である。この他にも、伝熱面を波状にしたり^(A.9)、加熱部と非加熱部に分割する方法^(A.10)が提案されているが、前者の方法では伝熱面の単位表面積当たりの伝熱量はかえって低下しており、また後者でも非加熱部を含む総面積当たりの伝熱量は低下している。また、これらの方法は実用化の観点からも大いに問題がある。

このような現状に対して、最近、三角・北村は、自然対流のはく離とくに3次元はく離を利用した新たな伝熱促進法の可能性を検討している。それによると、垂直な加熱平板上に薄い平板状の流動障害物を水平に設置してやると、平板の背後に3次元的是く離が生じ、平板背後の伝熱面近傍に低温周囲流体が流れ込む結果、この部分の伝熱が顕著に促進される結果を得ている^(A.11)。また、この平板状障害物の代りに、V字型の板を設置すれば、垂直伝熱面に沿って上昇してきた高温の自然対流が側方に排除され、分流板背後の伝熱が顕著に促進されることを見だし^(A.12)、これらの結果から、「自然対流の伝熱を促進するには、伝熱面に沿って流れる高温の流体を排除し、この代りに低温の周囲流体を伝熱

面近傍に導入すれば良い、」との、いわば伝熱促進の基本指針を提示するに至っている^(A.1)。しかし、彼らの指針はあくまでも垂直加熱平板に沿う自然対流について見いだされた指針であり、その他の体系における自然対流の伝熱促進にも適用できるかどうか現時点では不明である。

1.3 本研究の意図および目的

さて、上述の三角・北村らの指針が、本研究で対象とする水平加熱平板上の自然対流にも適用できると仮に仮定しても、実際に伝熱を促進するためには、多くの問題を解決する必要がある。その最大の問題は、どのようにして水平な伝熱面に沿って流れる高温の自然対流を伝熱面近傍から排除するかという問題である。そこで、これについてつぎに考える。

さて、三角・北村らの指針に従えば、具体的には水平伝熱面上に適当な流動障害物を設置して高温流体を排除することになる。しかし、この障害物の形状として様々なものが考えられる。そのうち、最も簡便かつ現実的な流動障害物としては、付図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だろう。しかし、この方法では、障害物である板に平行な向きに自然対流が誘起されてしまう。従って、これを防ぐには付図4(b)に示すように、板を格子状に組み合わせればよいだろう。また、この格子も付図4(c)に示すように格子の角を流れ方向に向けた方が、高温流体をさらに容易に排除できるものと思われる。

このことから本研究では、まず水平伝熱面上に格子状に組んだ板を設置した場合に果して伝熱が促進可能かどうか調べることにした。上述の原理によって伝熱が促進されることを確認するために、格子は低熱伝導率の素材で製作することとし、この格子のサイズや高さを種々変化させた場合について伝熱面表面温度分布の可視化を試みた。そして、これらの実験によって、伝熱が実際に促進可能であることを確認した後、どのような高さおよびサイズの格子が伝熱促進上最も効果があるかについて

明らかにする。これらの結果を基に、つぎに格子を高熱伝導率の素材で製作し、伝熱面にはんだ付けした場合について伝熱性能試験を行った。これは、格子をいわゆるフィンとして利用した方が高い伝熱促進率が得られるため実用的と思われるからである。そして、この格子の高さとサイズを種々変化させた場合について試験を行い、その結果を同一のフィン高さおよびフィン表面積を有する従来型の垂直フィン付伝熱面の伝熱性能と比較する。そして、本研究で提案する格子フィン付伝熱面の特徴を明らかにすることにした。

2. 実験装置および測定法

2.1 実験装置

まず、格子を用いることによって実際に伝熱が促進されるか否かを調べるために、等熱流束伝熱面と感温液晶シートによって伝熱面の局所熱伝達率を可視化し、伝熱促進の様子を定性的に把握することにした。この可視化用実験装置の概略を付図5に示す。装置は、伝熱面、側板および架台から構成されている。本研究では、とくに大きな伝熱面の伝熱促進を意図しているため、伝熱面の板幅 W は 360mm とした。なお、この伝熱面の奥行き(スパン)は 160mm であるが、両側端に高さ 160mm 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 20mm の亚克力板表面に、厚さ $30\mu\text{m}$ のステンレスはくヒータを貼付けたもので、定電圧電源を介した交流を通電することにより、等熱流束条件で加熱される。

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、前節で述べ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。実験では、高さ H が 6mm で、大きさ(対角線長さ p)を $10\sim 60\text{mm}$ の範囲で変化させた格子、および $p = 20\text{mm}$ 一定で、 H を $3\sim 20\text{mm}$ の範囲で変化させた格子、の二通りを用いた。格子の厚さはいずれも 1mm である。

つぎに伝熱性能試験に用いた実験装置の概略を付図6に示す。伝熱面および側板の寸法は $W = 360\text{mm}$ 、スパンが 160mm 、側板の高さは 160mm でこれらの寸法諸元は付図5に示した等熱流束伝熱面と同一である。伝熱面基板は厚さ 2mm の銅板製であり、その裏面に厚さ $30\mu\text{m}$ のステンレスはくヒータが電気絶縁用両面接着テープを介して貼付けられている。さらにこのヒータの裏面には、厚さ 10mm の亚克力板および厚さ 20mm の発泡スチロール断熱材が張り合わされており、裏面側への熱漏洩を防止している。一方、ヒータは伝熱面の幅方向 120mm ごとに3分割され、それぞれのブロックごとに独立した交流電源により通電加熱される。そして

各ブロックの通電加熱量をスライダックによって調節した。なお、基板の平均伝熱面温度 T_{wm} と周囲流体温度 T_{∞} との温度差 $\Delta T (= T_{wm} - T_{\infty})$ が 10K のとき、温度のばらつきは $\pm 0.75K$ 程度であった。これより、伝熱面はほぼ一様な温度で加熱されるとみなしてよい。

なお、この伝熱面上に設置する格子および垂直フィンは、いずれも厚さ 1mm の銅板で製作し、基板伝熱面に溝を切りフィンをはめこんだ後、はんだ付けした。本実験では 8 種類の格子および垂直フィン付伝熱面を試作したが、それらフィンの寸法諸元および基板やフィンの有効伝熱面積を付表 1 に示す。ここで、格子フィンのサイズ p は格子の対角線長さで代表した。また、高さが同じ格子および垂直フィン付き伝熱面については、その有効伝熱面積が同一となるように垂直フィンの間隔を選定した。

以上の装置は、それぞれ底面 $750 \times 750 \text{mm}^2$ 、高さ 750mm のアクリル製水槽の底面中央部に設置される。このとき伝熱面が水平となるように架台の四隅に取付けたネジで微調整した。なお、本実験では試験流体として可視化および測定が容易な常温の水を用いた。

2.2 温度および熱伝達率の測定

まず、付図 5 の等熱流束伝熱面の表面温度 T_w は、素線径 $70 \mu\text{m}$ の K 型熱電対を、伝熱面中央付近のステンレス箔ヒータ裏面 29 箇所にスポット溶接し、その出力から求めた。熱電対の取り付け位置の詳細を付図 7 および付表 2 に示す。周囲流体温度 T_{∞} は、同一素材および同一径の熱電対を用い、伝熱面と同一水平面上で、伝熱面端から 50mm 離れた位置において測定した。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。

この伝熱面の局所熱伝達率 h_{loc} は、これらの伝熱面表面温度 T_w 、および周囲流体温度 T_{∞} の測定結果をもとに次式によって求めた。

$$h_{loc} = q_w / (T_w - T_{\infty}) \quad (1)$$

ここで、 q_w は伝熱面熱流束である。

本実験では、伝熱面裏面への熱伝導損失を見積もっているが、この損失熱量は最大でもヒータ総発熱量の3%以下となった。そこで、この損失熱量を無視し、伝熱面熱流束 q_w はヒータ発熱量を伝熱面表面積で除すことにより求めた。

一方、付図6の等温伝熱面の温度であるが、素線径 $100\mu\text{m}$ のK型熱電対を銅基板裏面16箇所埋め込んで測定した。その取付け位置の詳細を付図8に示す。また、周囲流体温度 T_∞ は上と同様な位置にて測定した。

この温度をもとに、格子および垂直フィン付伝熱面のみかけの熱伝達率 h を、次式により求めた。

$$h = Q / A (T_w - T_\infty) \quad (2)$$

ここで、 Q はヒータの通電加熱量、 A は基板の表面積である。上の定義からもわかるように、みかけの熱伝達率 h とは、フィンを伝熱面積に算入しない基板伝熱面の熱通過率のことである。この伝熱面の裏面側への伝導熱損失について見積もったところ、熱損失量は最大でも通電加熱量の1%以下となった。この結果から、裏面への熱損失を無視して、式(2)では、 Q にヒータのジュール加熱量を採用した。

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等熱流束伝熱面を用いて、感温液晶シートを伝熱面表面と格子の間に貼付け、伝熱面表面温度分布の可視化を行なった。その代表的な結果を付図9に示す。この図では、格子の高さを一定 ($H = 6\text{mm}$) にして、格子の大きさ p を $10 \sim 60\text{mm}$ の範囲で変化させている。なお、比較のために格子を設置していない平滑な水平伝熱面の場合の可視化結果も掲げた。これらの写真はいずれも伝熱面を真上から撮影したものである。

まず付図9(a)に示した平滑伝熱面の可視化結果から説明する。伝熱面の最も端の部分では温度が低く、そして伝熱面中央に向かって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筋状の低温模様が出現しており、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模様が現れる。なおこれら温度模様の発生メカニズムについては第2章で詳しく述べているので、本節では説明を省略する。この可視化写真で注目されるのは、筋状模様の先端から板中央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鍵となる。

つぎに伝熱面上に格子を設置した場合であるが、まず格子サイズ $p = 10\text{mm}$ の場合、付図9(b)に示したように液晶は伝熱面全体にわたって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、付図9(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が出現し、しかも、この低温部が格子内の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、付図9(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 $p = 20\text{mm}$ の場合とは異なり、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。

これら格子付伝熱面の可視化結果と平滑伝熱面のそれと対比してみると、格子サイズが $p = 20\text{mm}$ 以上であれば、伝熱面中央の広い領域で、格子内の熱伝達は、平滑伝熱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、格子により水平加熱面からの自然対流熱伝達が促進できることを初めて立証した点で重要である。

3.2 格子内の局所熱伝達率

さて、前節で明らかにした伝熱促進効果を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た。この局所熱伝達率を精密に測定するには、一つの格子内に熱電対を多数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箇所）測定を行ない、この値を伝熱面中央にある一つの格子に移し替えて、付図10に示すような格子内局所熱伝達率の等高線表示（A.13、A.14）を得た。なお、付図10に示した結果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、図の結果はあくまでも伝熱面の中央付近に置かれた格子の平均的な局所熱伝達率分布を表わしたに過ぎないことを断っておく。また、格子サイズ p が大きな場合、格子内の表面温度は時々刻々と変化するが、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た。

さて、付図10は、付図9と同一条件、すなわち格子高さ $H = 6\text{mm}$ 一定とし、格子サイズ p を10、20mm および 60mm 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。なお、平滑伝熱面の場合についても板中央部の局所熱伝達率を測定したが、その値は $h = 407 \pm 10\text{W/m}^2\text{K}$ の範囲に納まった。この値は、第3章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、妥当な値であると考えている。

まず格子サイズ $p = 10\text{mm}$ の場合であるが、付図 10 (a) から明らかなように、格子内の広い範囲にわたって平滑伝熱面よりも低い値を示している。一方、付図 10 (b) の $p = 20\text{mm}$ になると、格子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 $560\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 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伝熱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、付図 10 (c) の $p = 60\text{mm}$ では、格子内の局所熱伝達率の最大値は $525\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 程度となって、 $p = 20\text{mm}$ の場合よりも低下しているが、格子近傍の伝熱劣化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伝熱面の場合よりも高くなっている。

3.3 格子内の平均熱伝達率

前節で述べた格子内の局所熱伝達率測定を種々の格子サイズおよび高さについて行ない、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。その結果を付図 11 に示す。この図より、格子サイズ p が $20 \sim 30\text{mm}$ 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 $3 \sim 20\text{mm}$ の範囲で変化させているが、図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、格子が高くなるほど格子近傍の伝熱劣化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 H が 3mm 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ことは注目に値する。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であるからである。

ここで、以上の実験により得られた格子付き伝熱面の平均熱伝達率と平滑伝熱面のそれとの比、すなわち伝熱促進率を算出してみると、本実

験の範囲内では最大1.21倍となった。この値自体はさほど高くはないが、格子を高熱伝導率の素材、例えば銅やアルミニウムなどで製作すれば、大幅に向上できると考えられる。つまり、高熱伝導率の格子を用いることで、(1)格子直下で発生した熱が直接格子へと伝えられるため、前節で述べた格子近傍の伝熱劣化が防げること、および(2)格子自体がフィンとして機能するため、放熱面積が拡大すること、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、これについては次節で詳しく述べることにする。

3.4 格子内流れの可視化

つぎに格子内の流れの可視化結果を述べるとともに格子による伝熱促進機構に関して考察する。付図12は、 $p = 20\text{mm}$ の格子について、伝熱面中央付近の格子上方のステンレス・パイプから緑色の染料を流出させ、格子内の流れを可視化したものである。この図から、格子上方にある低温流体が格子の中央付近へ下降し、一方、格子内の高温流体は格子に沿って上方へ流出されたあと、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格子内局所熱伝達率の測定結果とも符合する。なお、格子内の流動と伝熱の様子を付図13に模式的に示す。また、格子サイズの小さな $p = 10\text{mm}$ の場合には伝熱が劣化するが、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 $p = 10\text{mm}$ の格子についても可視化を行って見たが、染料は格子内にほとんど侵入しなかった。

ところで、本可視化実験で注目する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、水平加熱平板上自然対流のいわば主流ともいうべき流れ、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で加熱され高温となった流体が、直接伝熱面中央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。したがって、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促進されるものと推察される。しかし、その詳細については、今後更なる検討が必要である。

3.5 伝熱性能試験

前項で述べたように、格子内には低温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なわれるものと思われる。そこで本項では、つぎに付図6に示した伝熱性能試験用の実験装置を用いて、熱伝導率の高い素材の格子（格子フィン）を伝熱面に設置した場合の伝熱性能を調べた。また、この伝熱面と現在実用されている垂直フィン付伝熱面を、同一フィン高さおよび同一フィン面積の条件下で性能比較を行なうことにした。また、本研究では、とくに大きな伝熱面の伝熱促進法の開発に主眼を置いていることから、本項では伝熱面中央部の伝熱特性、具体的には120mmごとに3分割されたヒータ・ブロックのうち中央ブロックの伝熱特性を主に論じることとする。そして、伝熱面端部の伝熱特性については本項B.の最後にまとめて述べる。

A. 格子フィン付伝熱面の伝熱特性

格子フィンを設置した伝熱面からの熱伝達に対しては、伝熱面と周囲流体との温度差 ΔT の他に、格子サイズ p および高さ H が主たる影響を及ぼす。そこで、まず格子のサイズによって伝熱面の熱伝達率がどのように変化するかを調べてみた。付図 1 4 は、格子の高さを一定 $H = 10\text{mm}$ にして、格子サイズ p を、20、40、60mm と変化させた場合について、伝熱面中央ブロックにおけるみかけの熱伝達率を測定した結果を表わしたものである。なお、縦軸には基板面温度 T_w と周囲流体温度 T_∞ との温度差 $\Delta T (= T_w - T_\infty)$ をとっている。ここで、伝熱面中央部のみかけの熱伝達率 h とは、式 (2) において伝熱面中央ヒータ・ブロックの通電加熱量熱量 Q_c および、伝熱面中央ヒータ・ブロック基板表面積 A_{bc} を用いたもので次式で表わされる。

$$h = Q_c / A_{bc} (T_w - T_\infty) \quad (3)$$

また、付図 1 4 には、比較のために平滑伝熱面の中央ブロックにおける熱伝達率を測定した結果も併せて掲げた。なお、この平滑伝熱面の熱伝達率については第 3 章で提示した実験整理式から推算される値とほぼ一致することを確認している。さて、この図から明らかなように、格子フィン付伝熱面のみかけの熱伝達率は、格子サイズが小さくなるほど単調に増加し、とくに $p = 20\text{mm}$ の格子では $h = 840 \sim 1330\text{W/m}^2\text{K}$ と平滑伝熱面の熱伝達率 $300 \sim 440\text{W/m}^2\text{K}$ に比べ約 2.8 ~ 3.0 倍程度高い値が得られている。なお、この伝熱面中央部で得られた $h = 1000\text{W/m}^2\text{K}$ 前後という熱伝達率は、例えば常温の水を 0.6m/s 程度の速さで平滑伝熱面に沿って強制的に流した場合の層流熱伝達から予測される値にほぼ匹敵する (A.15) ことに注意する必要がある。自然対流といえども適当な伝熱促進手段さえ施せば強制対流に匹敵する高い熱伝達率が得られることにもっと関心が払われて良いようにも思う。

一方、サイズが大きな $p = 60\text{mm}$ の格子フィンであるが、そのみかけの

熱伝達率は $h = 580 \sim 870 \text{ W/m}^2\text{K}$ と平滑伝熱面の 1.9倍以上の値が実現されている。この伝熱面の有効伝熱面積は、付表2に記したように平滑伝熱面の1.93倍であり、この拡大率に見合った高い熱伝達率が得られていることが注目される。

つぎに、格子のサイズを一定 ($p = 20 \text{ mm}$) にして、格子高さ H を 3、5、10、20 mm と四段階変化させた場合について、伝熱面中央部のみかけの熱伝達率を測定した結果を付図15に示す。横軸には付図14と同様に温度差をとっている。まず、付図15で注目されるのは、格子高さが最も低い $H = 3 \text{ mm}$ の結果である。つまり付表1からわかるように $H = 3 \text{ mm}$ の格子フィン付伝熱面の有効伝熱面積は、平滑伝熱面の1.82倍であるのに対し、みかけの熱伝達率は図から明らかなように、 $h = 630 \sim 950 \text{ W/m}^2\text{K}$ と平滑伝熱面の 2.1倍程度の値が得られている。つまりこの場合、伝熱面積の拡大率よりもさらに高い熱伝達率を実現されたことになる。この結果は、格子によって自然対流の熱伝達率を実質的に増加することを示しており、今後コンパクトで高性能な自然対流伝熱面を開発する上で非常に重要な意義をもつものと考えられる。

一方、格子高さ H を 3、5、10 mm と次第に高くしていくと、付図15から明らかなようにみかけの熱伝達率 h はほぼ単調に増加していく。しかし、 $H = 20 \text{ mm}$ では有効伝熱面積が最も大きいにもかかわらず、熱伝達率は $H = 10 \text{ mm}$ の場合よりもかえって低下している。このような伝熱劣化が生じる原因として、格子がある程度以上高くなると、格子面に沿う自然対流境界層が互いに干渉し合い、格子上方からの低温流体の侵入を阻止することが考えられる。

B. 垂直フィン付伝熱面との性能比較

付録の1.2節で述べたように、本研究で考案した格子フィン付伝熱面と従来型の垂直フィン付伝熱面では伝熱促進の基本的な考え方、あるいは対象とする伝熱面の大きさなどが異なっている。このため、単純な性

能比較はあまり意味をなすものではないが、参考までに格子フィン付伝熱面の伝熱性能と垂直フィン付伝熱面のそれと比較してみた。その結果の一例を付図16に示す。格子サイズ $p = 20\text{mm}$ 、高さ $H = 5, 10\text{mm}$ の格子フィン付伝熱面、およびそれと同一の有効伝熱面積を有する垂直フィン付伝熱面の基板中央ブロックにおけるみかけの熱伝達率を図に掲げた。また、 $H = 3\text{mm}$ の格子フィン付伝熱面のみかけの熱伝達率も併記した。

さて、この図からわかるように、格子フィン付伝熱面では、同一フィン高さおよび同一表面積の垂直フィン付伝熱面と比較して、 $H = 5\text{mm}$ の場合 $30 \sim 35\%$ 、 $H = 10\text{mm}$ の場合 $25 \sim 35\%$ 程度高い熱伝達率が実現されている。また、とくに $H = 3\text{mm}$ の格子フィン付伝熱面のみかけの熱伝達率は、有効伝熱面積が約1.3倍大きい $H = 5\text{mm}$ の垂直フィン付伝熱面のそれよりも明らかに高くなっている。これらの結果から、格子フィンを採用すれば、従来型の垂直フィンと同一もしくは少ないフィン材料でより高い伝熱性能が実現できることがわかる。とくに、 $H = 3\text{mm}$ の格子フィン付伝熱面の結果は、背が低くても高い熱伝達率が得られるという格子フィンの特長を明らかにしている。この格子フィンの特長が生かせれば、今まで高さの制約からフィンの採用が見送られてきた体系においても、伝熱促進が可能になることが期待される。

以上、本項では伝熱面中央部の伝熱性能を中心に述べてきたが、最後に格子および垂直フィン付伝熱面の局所熱伝達率の測定結果を基に、両伝熱面の特性を論じることとする。付図17は、伝熱面の端部ブロックのみかけの熱伝達率を付図16と同一の条件下で測定し、伝熱面中央部のそれと比較したものである。なお、付図17では、伝熱面中央におけるみかけの熱伝達率を白抜きの記号で、伝熱面端部におけるそれらを黒塗りの記号でそれぞれ表わした。また、伝熱面端部のみかけの熱伝達率は、式(3)において伝熱面中央ブロックの Q_c および A_{bc} の代わりに伝熱面端部ブロックのそれらを用いて算出したものである。なお、伝熱面上の流れが対称なこともあって、本実験で得た伝熱面端部ブロックの

みかけの熱伝達率は、伝熱面の左右端でほぼ完全に一致していることを確認している。

さて、この図から垂直フィン付伝熱面のみかけの熱伝達率は伝熱面両端部の方がはるかに高いことがわかる。伝熱面端部においてこのように高い熱伝達率が得られるのは、低温周囲流体が伝熱面の端部から流入し、基板やフィンから熱を奪うためである。一方、この低温流体が侵入しない伝熱面中央部では熱伝達率は低くなる。付図18はその証拠写真というべきもので、垂直な塩化ビニル板を等熱流束伝熱面上に設置したときの、伝熱面の表面温度分布を感温液晶によって可視化したものである。この図から、低温の周囲流体が流れ込む伝熱面の両端部には低温部が発生しており、高い熱伝達が実現されていることが推測されるのに対し、伝熱面の中央部には低温部がほとんど現れず、伝熱が顕著に劣化している様子が観察できる。この付図18および付図17の結果から、垂直フィンを設置する方法は伝熱面が小さな場合にはかなり有効であること、しかし伝熱面が大きくなるに従って垂直フィンの効果は急激に減じることがわかる。一方、格子フィン付伝熱面の場合であるが、付図17に示したように、みかけの熱伝達率は伝熱面の端部と中央部でほとんど変わらない。これは、付図9の伝熱面温度分布の可視化写真において、格子内の低温部の発生状況が伝熱面の端部と中心部でほとんど変化がない事実からも裏付けられる。このように伝熱面全体にわたって一様な熱伝達率が得られるのは、格子フィンでは垂直フィンとは異なり、伝熱面の上方に存在する低温流体と基板伝熱面との間で熱交換が行なわれることが理由として挙げられる。なお参考までに、これら伝熱面両端部の熱伝達率をも含めた伝熱面全体のみかけの熱伝達率は、格子フィン付伝熱面の方が垂直フィン付伝熱面よりも7~18%程度高い値が得られていることを付記しておく。前述した垂直および格子フィン付伝熱面の局所伝熱特性の違いを考慮すれば、この差は伝熱面が大きくなればなるほどさらに拡大するだろう。

4. 「付録」のまとめ

以上「付録」では、水平上向き加熱平板からの自然対流熱伝達を促進する方法について実験的に検討した。とくに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の伝熱促進を意図して、自然対流の熱伝達率そのものを増加させるような伝熱促進法を新たに考案した。そして、そ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提案した。まず、本方法により実際に伝熱が促進されることを、感温液晶による格子内温度分布の可視化、格子内局所熱伝達率分布の定量的な測定によって明らかにした。また、この格子による伝熱促進機構を流れの可視化によって探った。つぎに、この伝熱促進法の実際への応用を考慮して、格子自体を拡大伝熱面いわゆるフィンとしても利用する方法を提案した。そして、高熱伝導率素材（銅）からなる各種の格子フィン付伝熱面を試作し、伝熱性能試験を行なった。また、従来より慣用されている垂直フィン付伝熱面も併せて試作、試験を行ない、両者の伝熱性能および特性比較を行なった。

その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 格子が適当なサイズおよび高さであれば、伝熱面中央部におかれた格子内の熱伝達率は平滑伝熱面のそれより明らかに促進される。
- (2) 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。このときの平滑伝熱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。
- (3) 格子高さが低い場合にも熱伝達率が顕著に増加できる。
- (4) 格子は、(a)伝熱面周辺部で加熱され高温となった主流が伝熱面中央部に流入するのを阻止する、(b)セル状対流を格子内に発生させる、という二つの作用によって伝熱を促進させる。
- (5) 高熱伝導率の格子フィン付伝熱面のみかけの熱伝達率は、本実験範囲内において、格子サイズ $p = 20 \text{ mm}$ 、格子高さ $H = 10 \text{ mm}$ のとき極大となり、その値は温度差 $\Delta T = 10 \text{ K}$ で最大 $1330 \text{ W/m}^2\text{K}$ に達した。こ

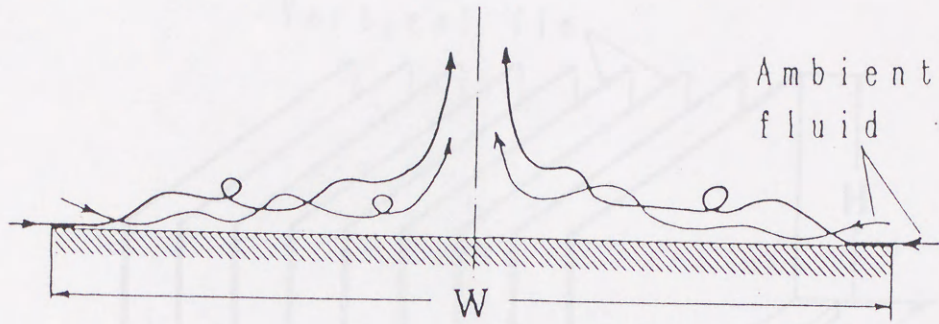
の値は、同一温度差条件下における平滑伝熱面の熱伝達率に比べ約3.0倍程度高い。

(6) 格子フィンのサイズおよび高さを適切に選択することによって、フィンによる有効伝熱面積の拡大率よりもさらに高い熱伝達率が促進できた。これは格子フィンによって実質的に熱伝達率が促進されていることを意味している。

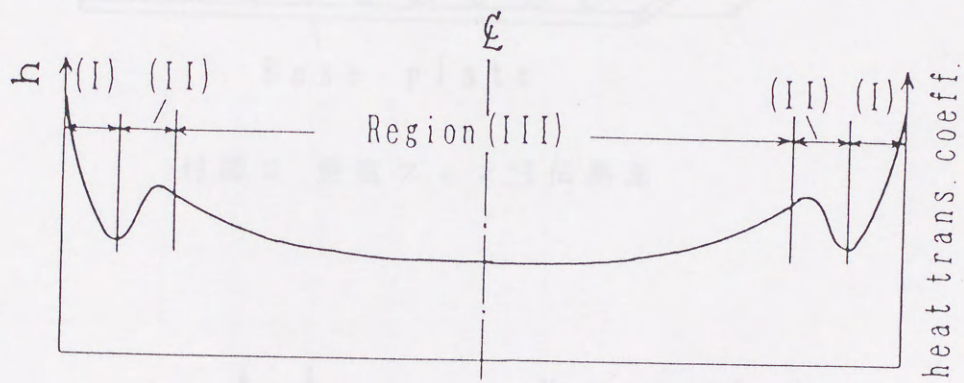
(7) 本実験範囲内に置いて、格子フィン付伝熱面の伝熱面中央部におけるみかけの熱伝達率は、同一フィン高さおよび表面積を有する従来型の垂直フィン付伝熱面よりも30%程度高い値が得られた。

以上の結果は、格子フィンが水平伝熱面とくに大きな伝熱面からの自然対流熱伝達を促進する上で非常に有効であることを示している。この結果を利用すれば、今後コンパクトでしかも優れた伝熱性能を有する自然対流伝熱面が開発できるものと期待できる。また、以上の結果は本論文の一つの具体的な成果であるともいえる。

(a)

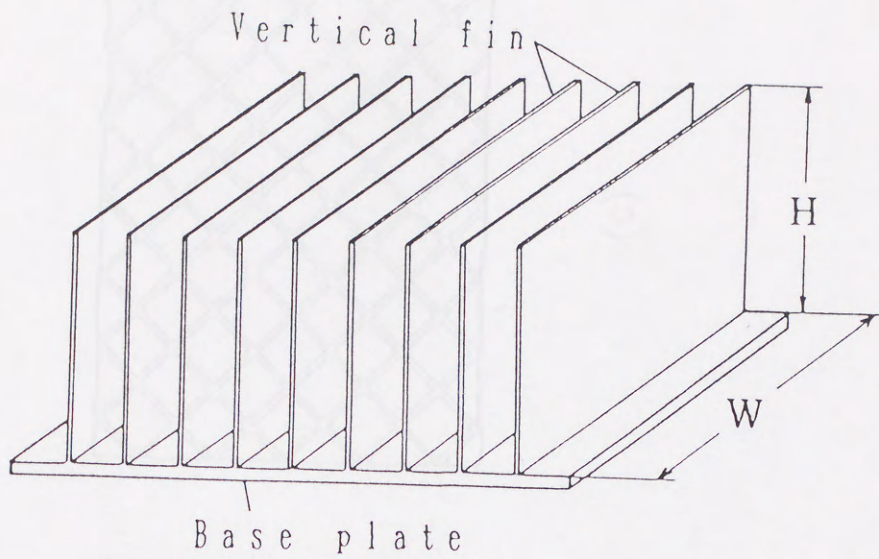


(b)

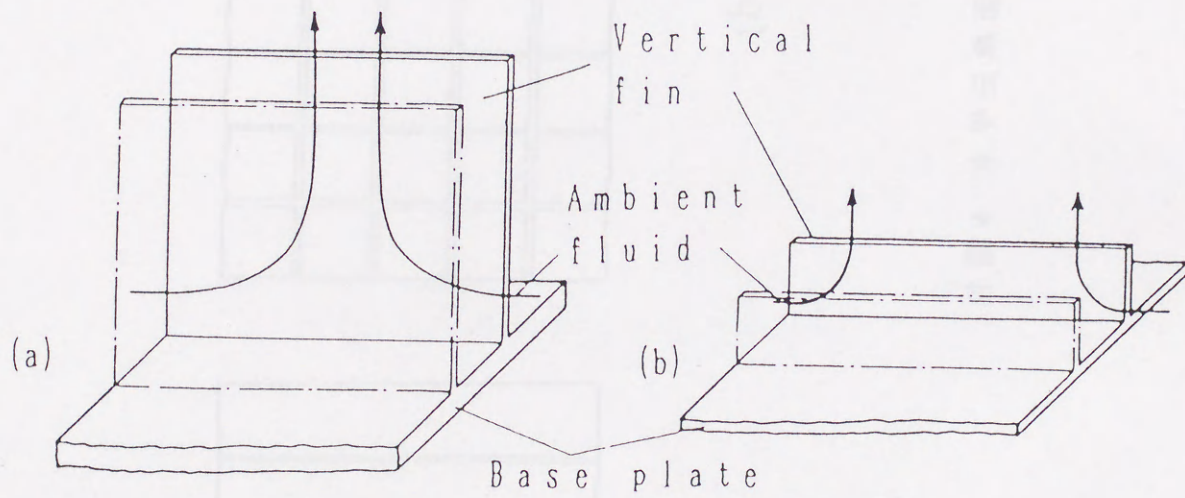


- Region(I) Laminar flow
- Region(II) Steady, streaky flow
- Region(III) Unsteady, irregular flow

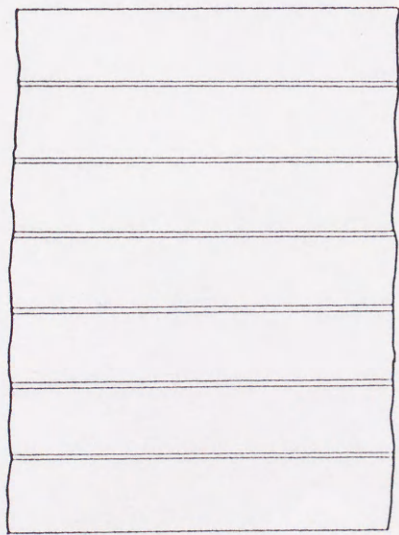
付図 1 水平加熱平板上の自然対流



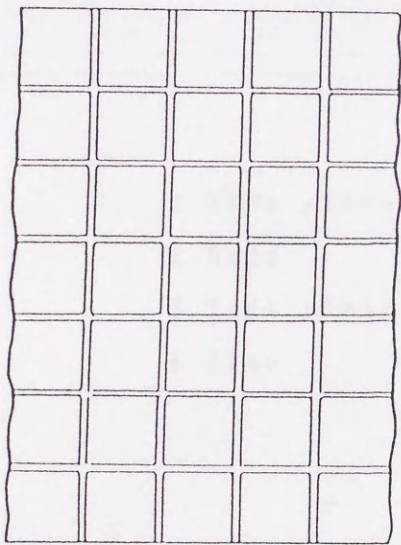
付図2 垂直フィン付伝熱面



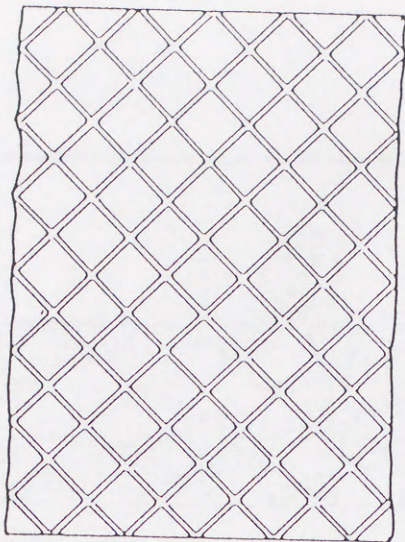
付図3 フィンによる伝熱促進の概念



(a)

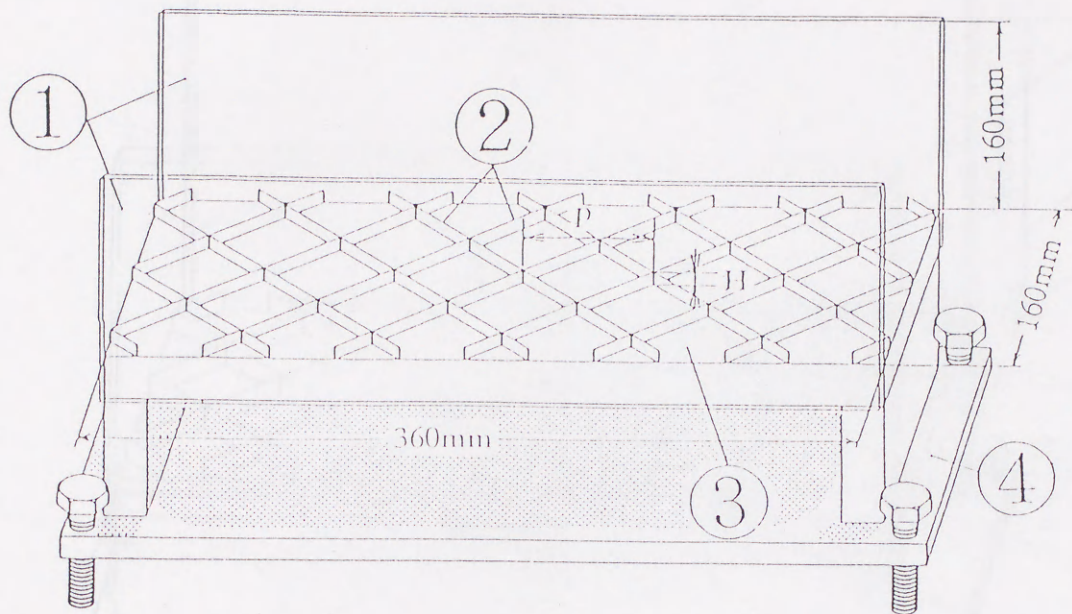


(b)



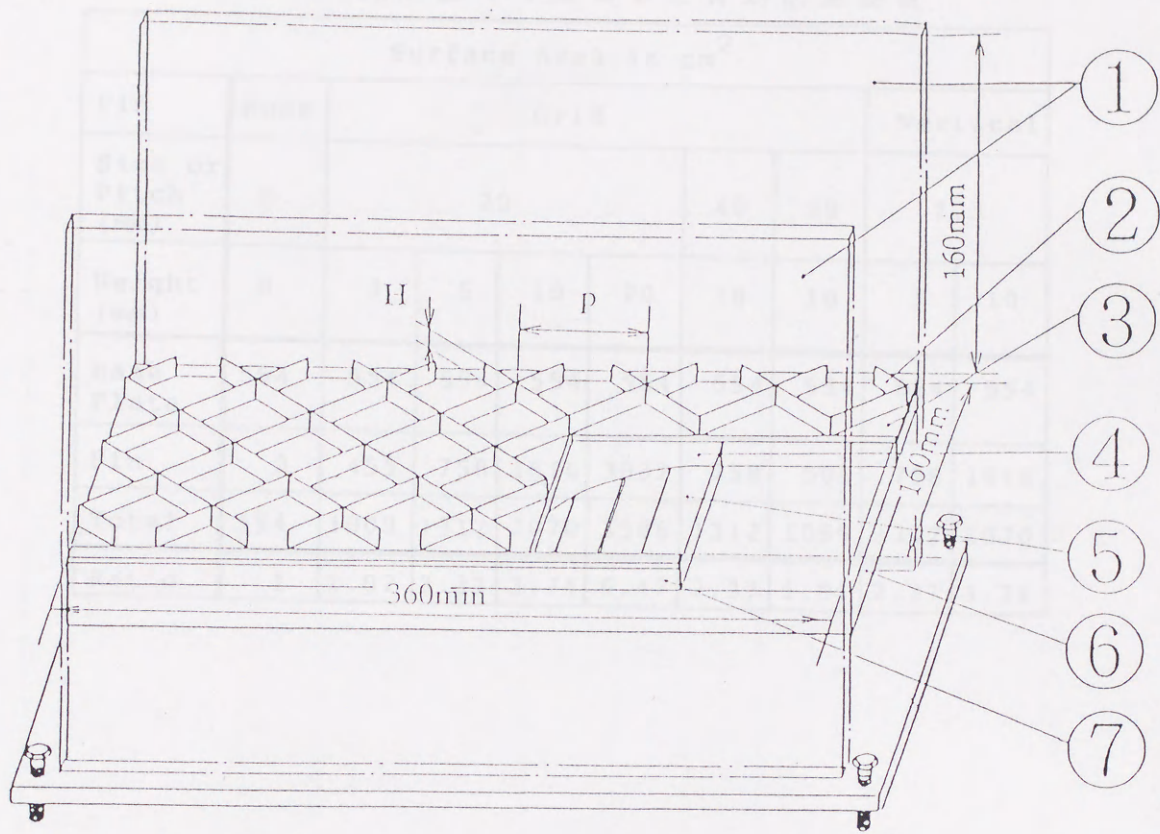
(c)

付図4 水平伝熱面の伝熱促進法



- 1. Side plate
- 2. Grid
- 3. Test plate
- 4. Base

付図5 等熱流束伝熱面実験装置

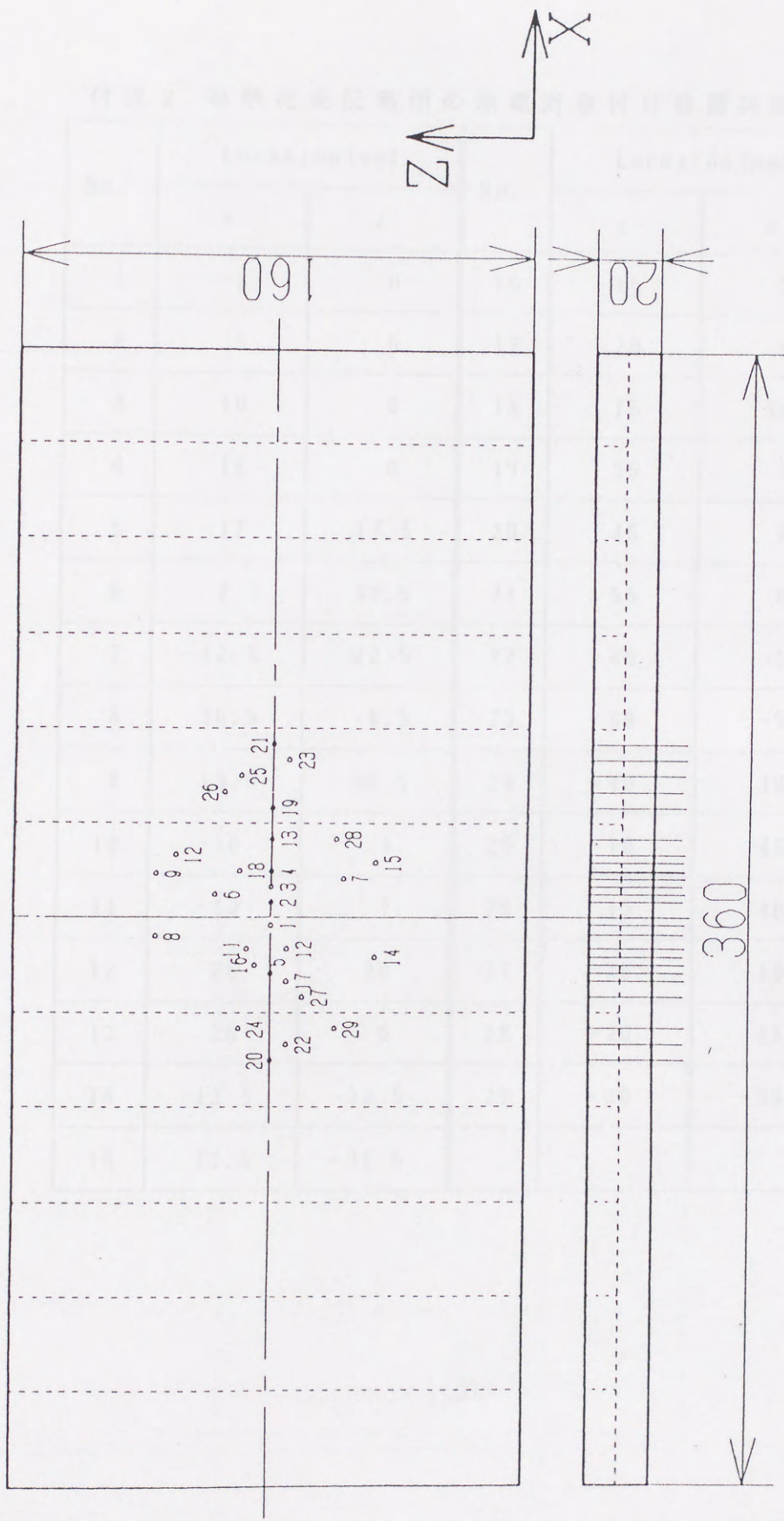


1. Side plate
2. Grid
3. Base Plate
4. Adhesive tape
5. Heater
6. Insulation
7. Acrylic resin plate

付図 6 伝熱性能試験用実験装置

付表1 供試伝熱面の寸法および有効伝熱面積

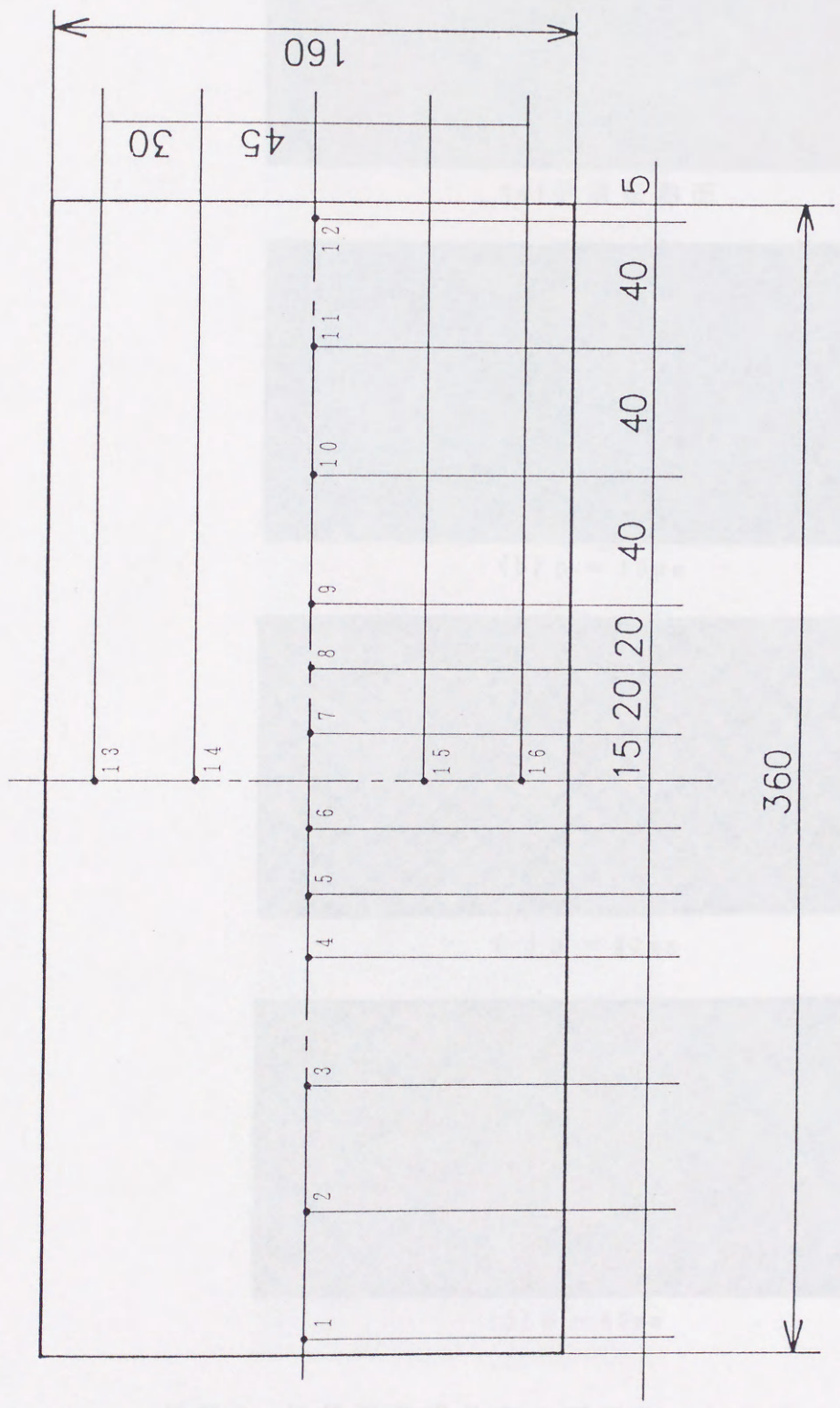
Surface Area in cm ²									
Fin	None	Grid						Vertical	
Size or Pitch (mm)	0	20				40	60	7.3	
Height (mm)	0	3	5	10	20	10	10	5	10
Base Plate	554	554	554	554	554	554	554	554	554
Fin	0	455	758	1516	3032	758	505	758	1516
Total	554	1009	1312	2070	3586	1312	1059	1312	2070
Ratio	1	1.82	2.37	3.74	6.47	2.37	1.91	2.37	3.74



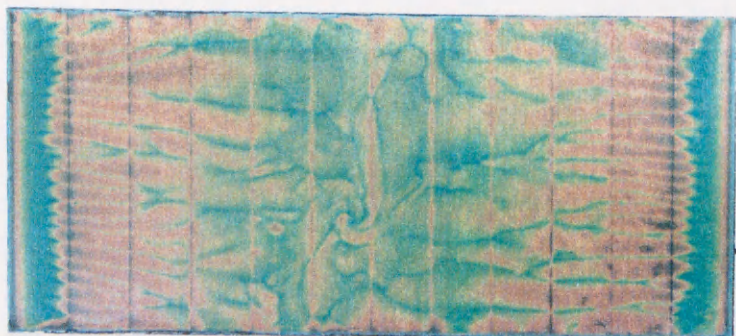
付図 7 等熱流束伝熱面の熱電対取付け位置

付表 2 等熱流束伝熱面の熱電対取付け位置詳細

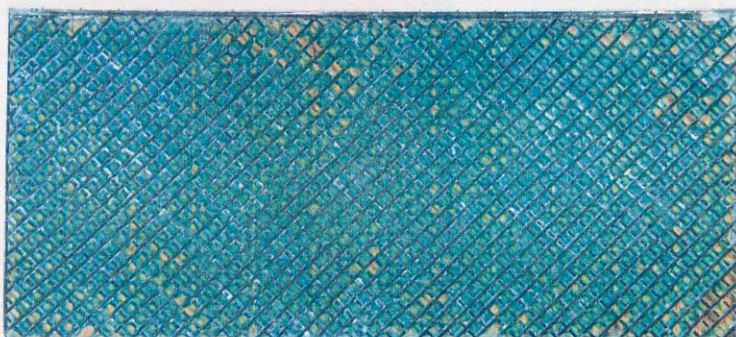
No.	Location (mm)		No.	Location (mm)	
	x	z		x	z
1	-3	0	16	-15	5
2	5	0	17	-20	-5
3	10	0	18	15	10
4	15	0	19	35	0
5	-17	17.5	20	45	0
6	7.5	22.5	21	55	0
7	-12.5	22.5	22	-40	-5
8	36.5	-6.5	23	50	-5
9	13.5	36.5	24	-40	10
10	-10	-5	25	10	45
11	-10	7	26	15	40
12	20	30	27	-25	-10
13	25	0	28	-20	25
14	-12.5	-32.5	29	-20	-35
15	17.5	-32.5			



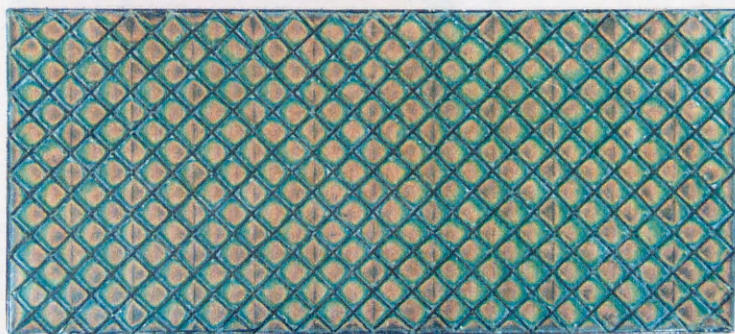
付図 8 伝熱性能試験用伝熱面の熱電対取り付け位置



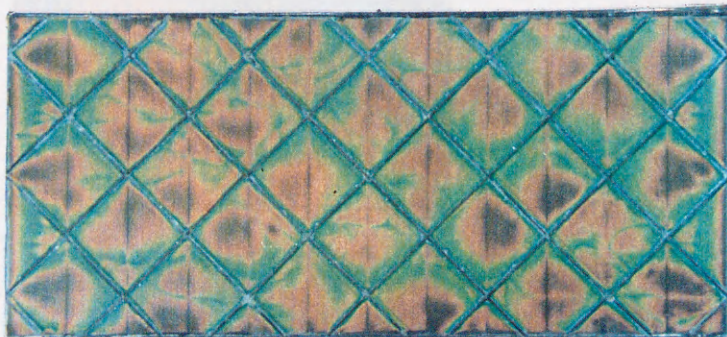
(a) 平滑伝熱面



(b) $p = 10$ mm

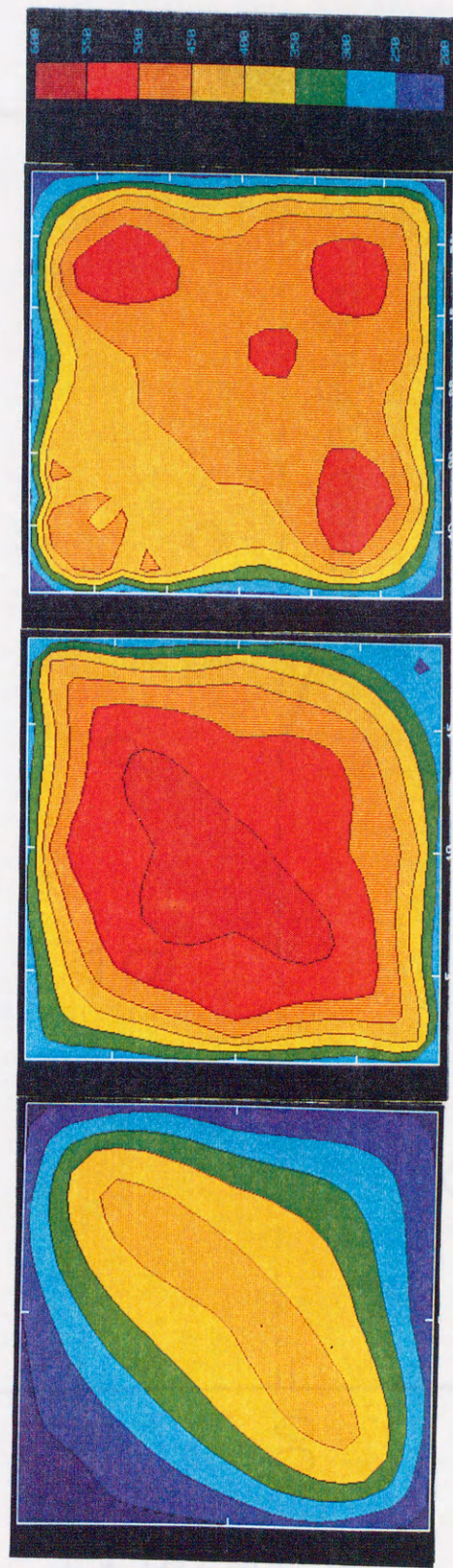


(c) $p = 20$ mm



(d) $p = 60$ mm

付図9 伝熱面温度分布の可視化 (格子高さ $H = 6$ mm一定)

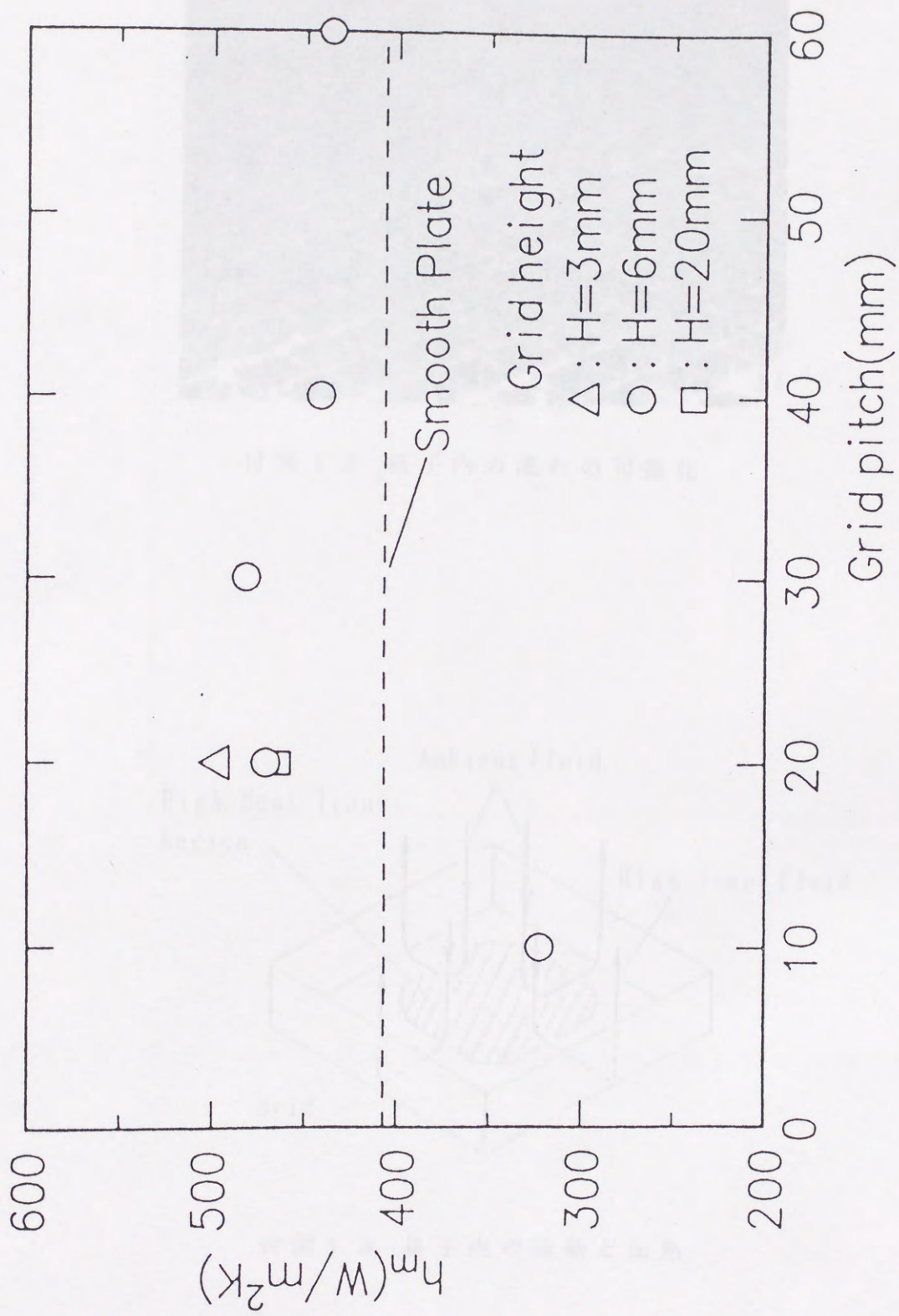


(c) $p = 60\text{ mm}$

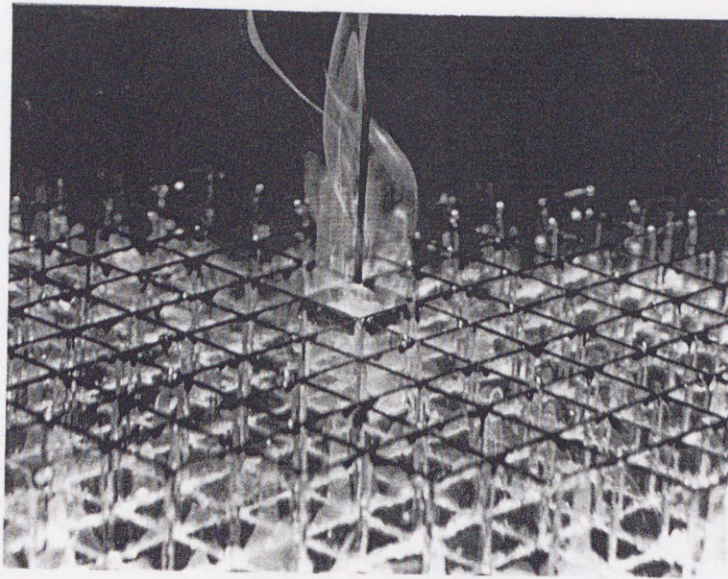
(b) $p = 20\text{ mm}$

(a) $p = 10\text{ mm}$

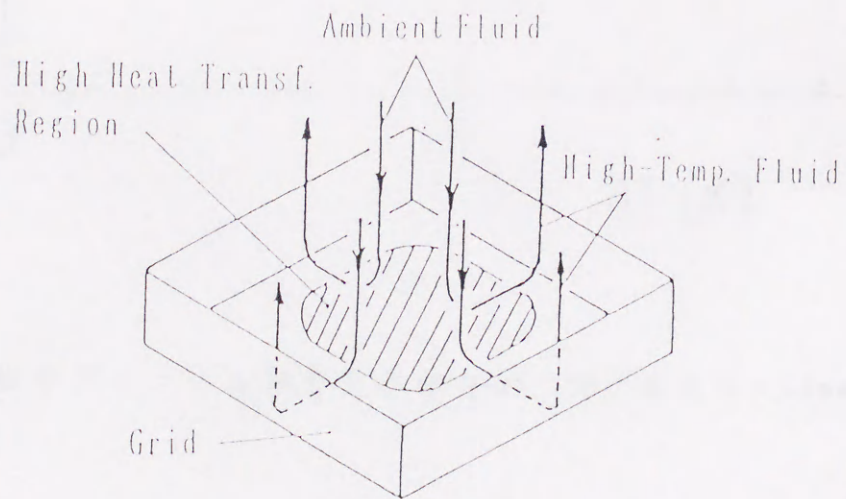
付図 1 0 格子内の局所熱伝達率分布 (格子高さ $H = 6\text{ mm}$ 一定)



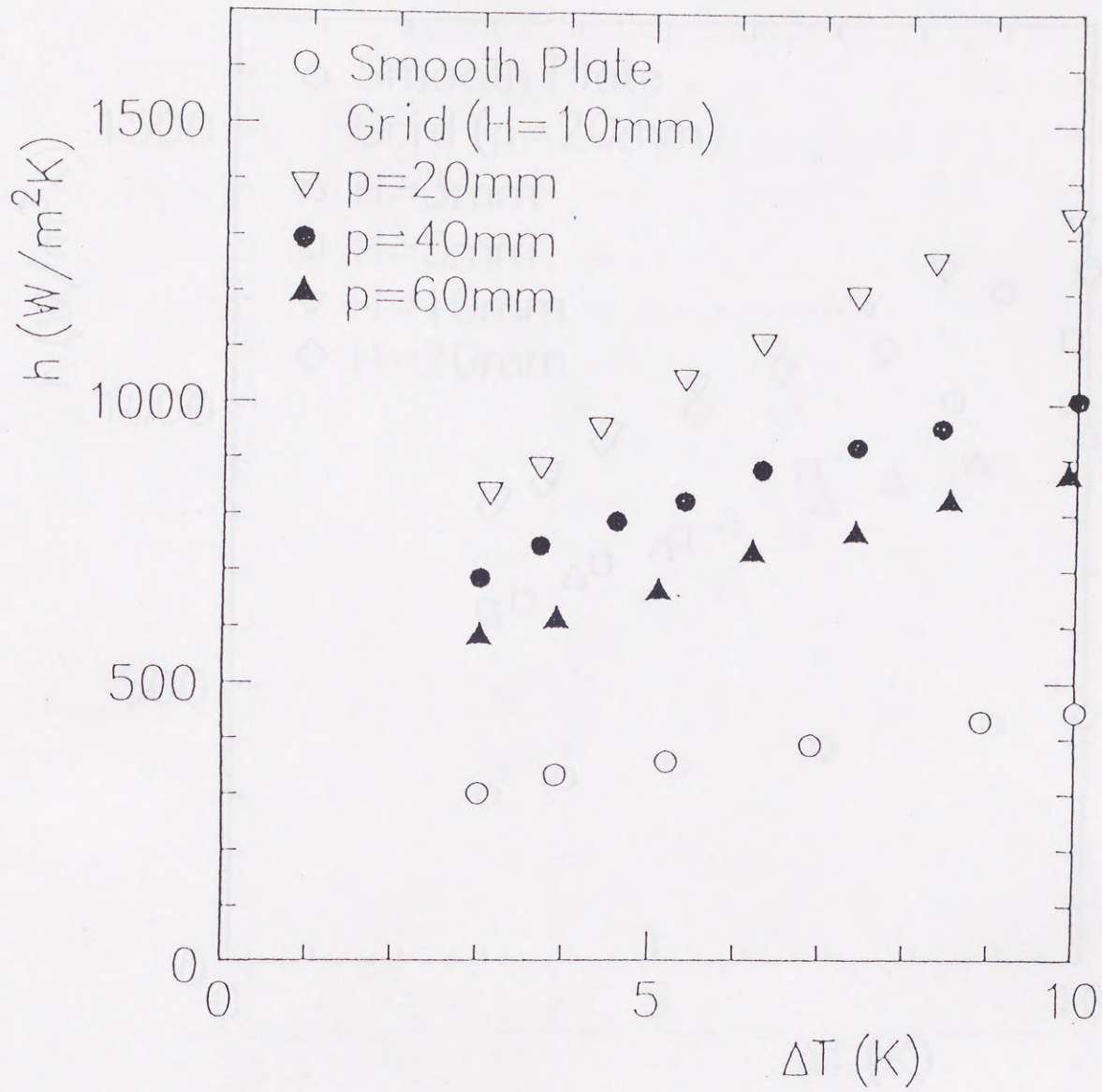
付図11 格子内の平均熱伝達率



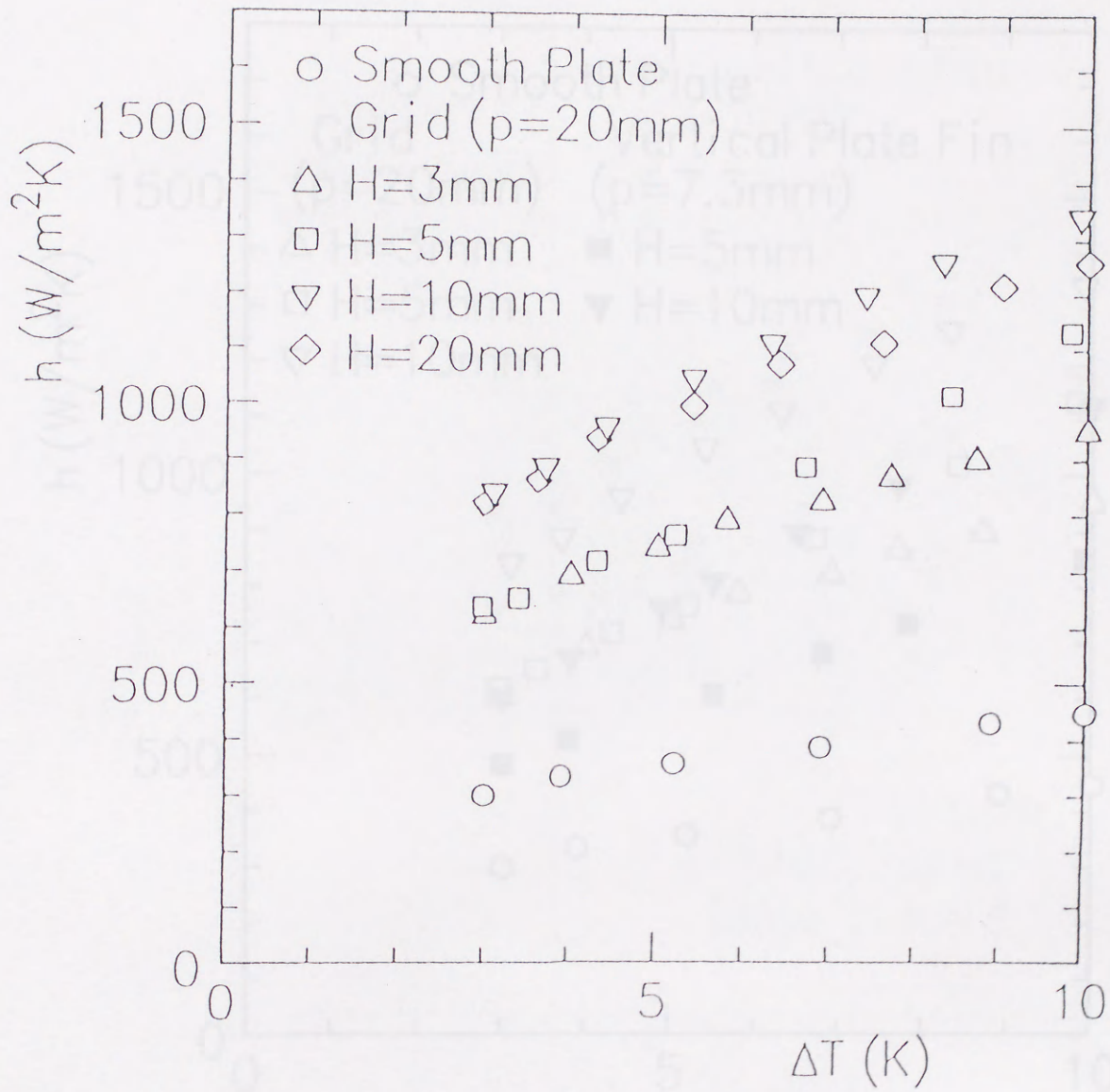
付図 1 2 格子内の流れの可視化



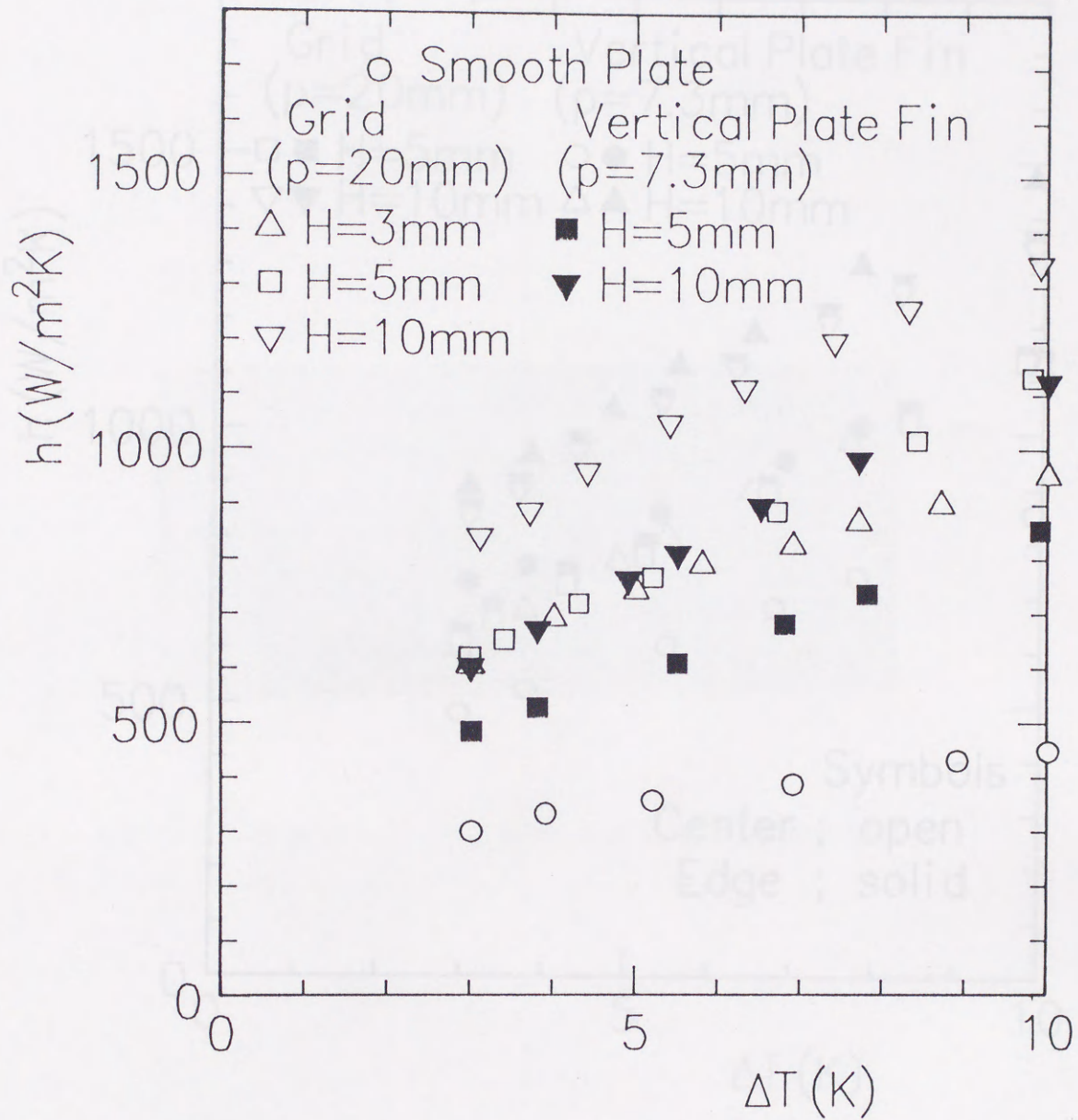
付図 1 3 格子内の流動と伝熱



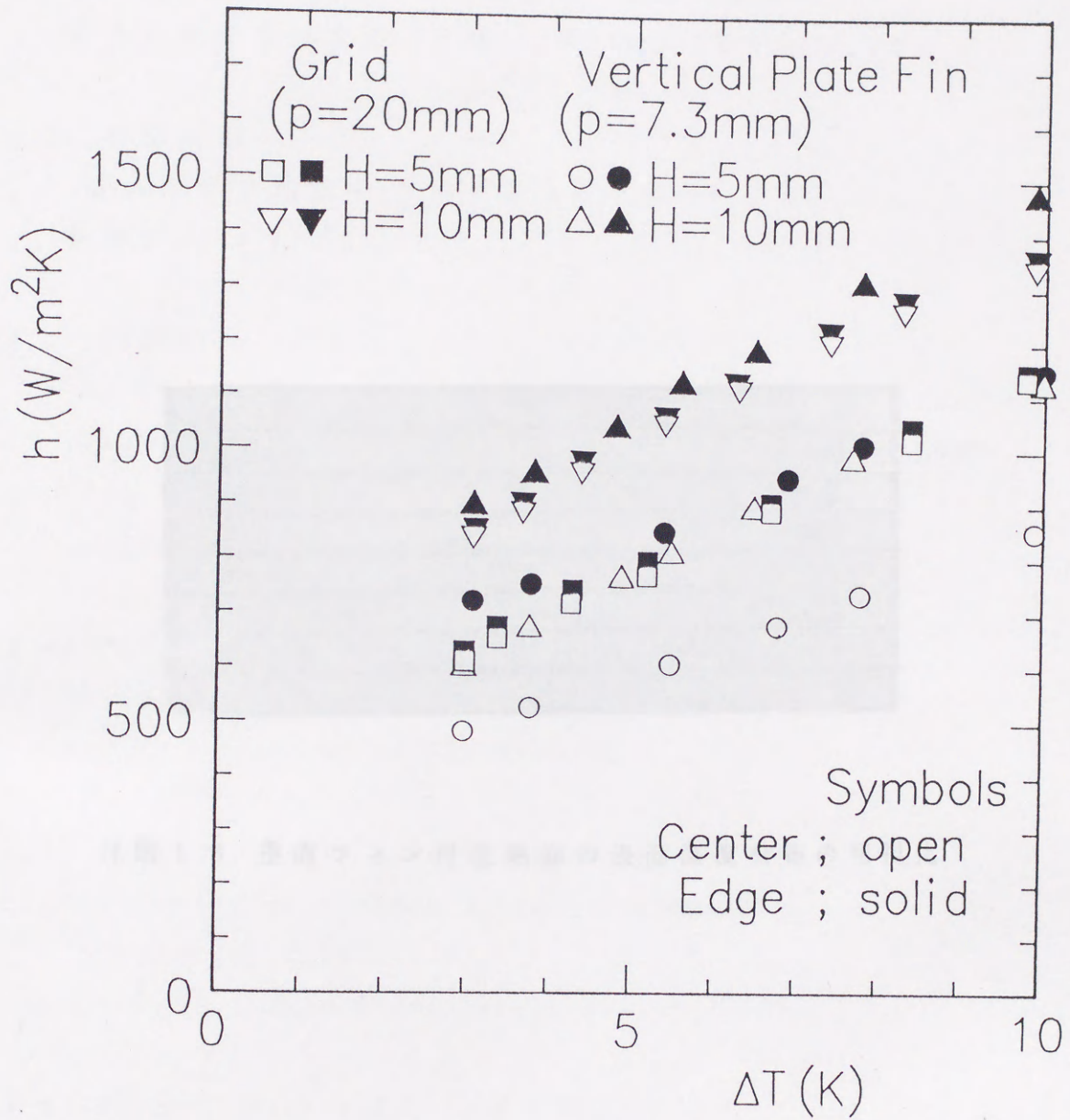
付図 1 4 格子フィン付伝熱面の伝熱性能 (格子高さ $H = 10\text{mm}$ 一定)



付図 1 5 格子フィン付伝熱面の伝熱性能 (格子サイズ $p = 20\text{mm}$ 一定)



付図 1 6 格子および垂直フィン付伝熱面の性能比較



付図 1 7 格子および垂直フィン付伝熱面の局所伝熱特性

付 録 参 考 文 献

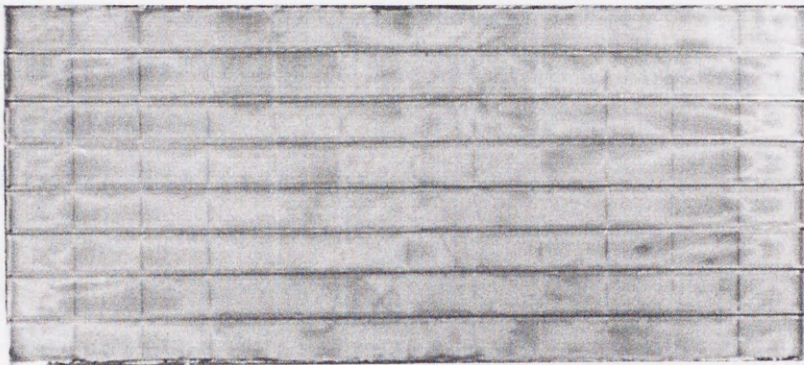
(A. 1) 三好 隆之, 志村 隆三

「自然対流中伝熱面温度分布と垂直フィン効果の測定」,
日本機械学会論文(日誌), 第11巻109号(1915), 3110

(A. 2) 野田 直雄

「自然対流中伝熱面温度分布と垂直フィン効果の測定」,
論文誌, (1915)

(A. 3) Prandtl, L.



(A. 4) 山本 隆

「自然対流中伝熱面温度分布と垂直フィン効果の測定」,
論文誌, (1915)

(A. 5) 付図 1 8 垂直フィン付伝熱面の表面温度分布の可視化

「Visualization of surface temperature distribution
of vertical finned heat transfer surface」,
Heat Transfer, vol. 13(1975), 218

(A. 6) Taya, K., Takahashi, Y. and Fujii, T.

「Influence of Surface Roughness on Heat Transfer
Heat Transfer From Vertical Cylinders」,
Chem. Eng. J., Vol. 10(1972), 134

(A. 7) 山本 隆, 志村 隆三, 三好 隆之

「自然対流中伝熱面温度分布と垂直フィン効果の測定」,
日本機械学会論文(日誌), 第11巻109号(1915), 3110

付録参考文献

- (A.1) 三角利之, 北村健三,
'自然対流の伝熱促進法と高性能伝熱面の開発',
日本機械学会論文集 (B編), 第57巻543号 (1991), 3867.
- (A.2) 相原利雄,
'伝熱工学の進展4, 干渉をともなう自由対流熱伝達',
養賢堂, (1976)
- (A.3) Prasofov, R. S.,
'On The Effects of Surface Roughness on Natural-Convection
Heat Transfer From for Horizontal Cylinders to Air',
(in Russian)
Inzh-Fiz. zh. 4(5) (1961), 3.
- (A.4) Jofre, R. and Barron, F.,
'Free-Convection Heat Transfer to A Rough Plate',
ASME, Paper, No. 67-WA/HT(1967), 38.
- (A.5) Fujii, T., Fujii, M. and Takeuchi, M.,
'Influence of various Surface Roughness
on Natural Convection',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 16 (1973), 629.
- (A.6) Heya, N., Takeuchi, M. and Fujii, T.,
'Influence of Surface Roughness on Free Convection
Heat Transfer From Horizontal Cilinder',
Chem. Eng. J., Vol. 23 (1982), 185.
- (A.7) 坪内為雄, 藤田尚毅, 渡辺 徹,
'ステップおよび突起からのはく離をともなう自然対流熱伝達
(等温壁)',
日本機械学会論文集 (B編), 第46巻409号 (1980), 1742.

- (A.8) Bhanvnani, S. H. and Bergles, A. E.,
'Effect of Surface Geometory Orientation on Laminar
Natural Convection Heat Transfer From A Vertical
Flat Plate with Traverse Roughness Element',
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33 (1990), 965.
- (A.9) 岸浪 紘 機, 齊藤 図, 戸倉 郁 夫,
'凸面あるいは凹面部から加熱される垂直浪状面からの
自然対流熱伝達',
日本機械学会論文集 (B編), 第53巻486号 (1987), 1072.
- (A.10) Keyhani, M., Prasad, V. and Coy, R.,
'An Experimental Study of Natural Convection in
Vertical Cavity with Discrete Heat Transfer',
J. Heat Transfer, Vol. 110 (1988), 616.
- (A.11) 三角 利 之, 北村 健 三,
'水平仕切板を設置した垂直伝熱面の自然対流熱伝達について',
日本機械学会論文集 (B編), 第54巻504号 (1988), 2083.
- (A.12) 三角 利 之, 北村 健 三,
'V字形分流板を用いた自然対流の伝熱促進について',
日本機械学会論文集 (B編), 第57巻536号 (1991), 1365.
- (A.13) 塩野 清 治, 升本 眞 二, 弘原 海 清,
'B A S I Cによるコンターマップ I. 基礎編',
共立出版 (1988)
- (A.14) 塩野 清 治, 升本 眞 二, 弘原 海 清,
'B A S I Cによるコンターマップ II. 応用編',
共立出版 (1988)

本研究に関連して公表した論文および講演発表

公表論文

- (1) 北村健三・木村文義、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、日本機械学会論文集（B編）第58巻556号、3715-3722（1992-12）
- (2) 北村健三・長江直行・木村文義、水平加熱平板上自然対流の伝熱促進法について、日本機械学会論文集（B編）第60巻569号、270-275（1994-1）
- (3) 木村文義・北村健三、水平加熱平板上に生じる自然対流の流動および熱伝達（高レイリー数域の伝熱・流動特性）、日本機械学会論文集（B編）第60巻570号、566-573（1994-2）
- (4) 北村健三・長江直行・木村文義、格子状フィンを用いた水平加熱平板上自然対流の伝熱促進、日本機械学会論文集（B編）第61巻582号、（1995-2）（印刷中）
- (5) Kenzo Kitamura and Fumiyooshi Kimura, Heat Transfer and Fluid Flow of Natural Convection Adjacent to Upward-Facing Horizontal Plates, International Journal of Heat and Mass Transfer（掲載可）
- (6) 木村文義・北村健三、水平からわずかに傾斜した加熱平板上自然対流の流動および熱伝達、日本機械学会論文集（投稿中）

講演発表

(1)木村文義・北村健三、水平加熱平板上自然対流の流動および熱伝達、第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集、328-329(1992-5)

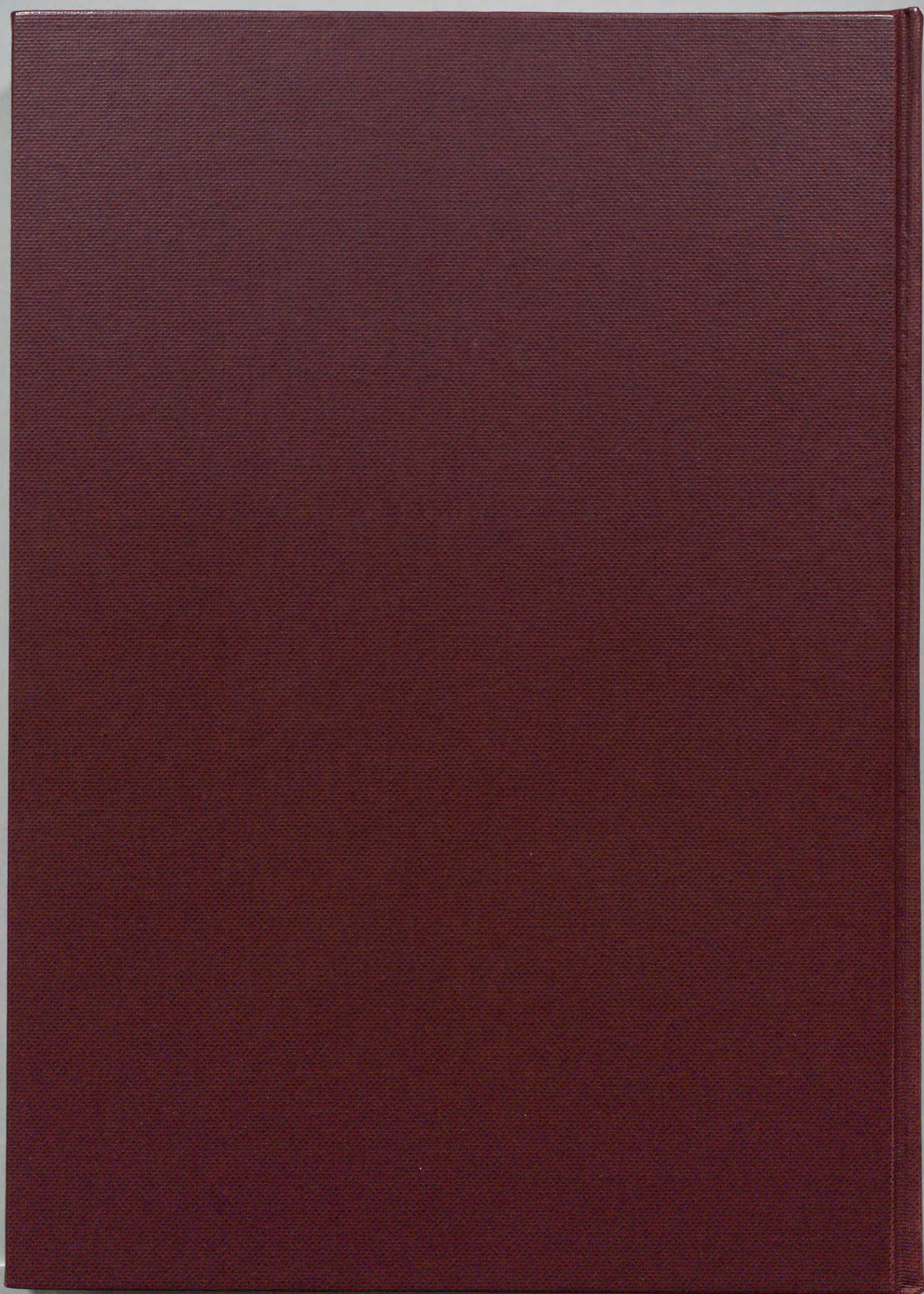
(2)木村文義・北村健三、水平加熱平板上に生じる自然対流の流動および熱伝達(高レイリー数域の伝熱特性)、第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集、157-159(1993-5)

(3)北村健三・長江直行・木村文義、格子による水平加熱平板上自然対流の伝熱促進、第30回日本伝熱シンポジウム講演論文集、154-156(1993-5)

(4)木村文義・北村健三、傾斜平板に沿う自然対流の流動および熱伝達、第31回日本伝熱シンポジウム講演論文集、211-213(1994-5)

(5)北村健三・長江直行・木村文義、格子状フィンによる水平加熱平板上自然対流の伝熱促進、第31回日本伝熱シンポジウム講演論文集、214-216(1994-5)

(6)木村文義・北村健三、水平傾斜平板まわりの自然対流の流動および熱伝達、日本機械学会九州支部・中国四国支部合同企画北九州地方講演会講演論文集、185-187(1994-11)



inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

