

# 垂直加熱面上の自然対流

(第1報 熱伝達)

菱田 幹雄・辻 俊博・西 尾 悟

生産機械工学科  
(1978年9月9日受理)

## Natural Convection on a Vertical Heated Surface

(1st Report, Heat Transfer)

Mikio HISHIDA, Toshihiro TSUJI and Satoru NISHIO

Department of Industrial-Mechanical Engineering  
(Received September 9, 1978)

An experimental investigation of natural-convection heat transfer has been conducted with air on a vertical heated surface. To clarify the discrepancies with regard to the heat transfer rates obtained so far, the apparatus is very carefully constructed to eliminate the influences of air currents and temperature fluctuation which exist outside the boundary layer. Local heat transfer rates for Rayleigh numbers up to  $3 \times 10^{11}$  are obtained from the accurate measurements of fluid temperature very near the surface. In the turbulent region, heat transfer coefficients are described well with  $Nux = 0.120 (Gr_x Pr)^{1/3}$ . The results obtained are compared with other experimental ones. Typical profiles of mean temperature and mean velocity in the boundary layer are also presented.

### 1. 緒 言

垂直加熱面上の空気の自然対流に関し、従来数多くの実験および理論が報告されているが、自然対流の乱流域についての研究は比較的少く、その速度分布、温度分布および境界層内の状態についてはまだ明らかではない。殊に基本的な熱伝達についても、Warner<sup>1)</sup>、Cheesewright<sup>2)</sup> および Pirovano ら<sup>3)</sup>の研究があるが、それらの測定結果の間にかかなりの差異が認められ、いずれの実験も不明な点が多い。

本研究は、垂直加熱面上の空気の自然対流について、乱流域の熱伝達に主眼を置いて、 $Gr_x P_r$  が  $3 \times 10^{11}$  までの範囲にわたり、伝熱面温度一様の条件で実験を行ったものである。

### 2. 記 号

$G_{rx}$  : グラシホフ数  $= g\beta(T_w - T_\infty)x^3/\nu^2$   
 $g$  : 重力の加速度  
 $h$  : 熱伝達率

$N_{ux}$  : 局所ヌセルト数  $= hx/\lambda$

$P_r$  : プラントル数

$T$  : 流体の時間平均温度

$T_f$  : 膜温度  $= (T_w + T_\infty)/2$

$T_w$  : 伝熱面温度

$T_\infty$  : 周囲流体温度

$U$  : 流体の時間平均速度

$x$  : 伝熱面に沿う前縁からの距離

$y$  : 伝熱面より垂直方向への距離

$\beta$  : 体膨張率

$\eta$  : 相似変数  $= (y/x) G_{rx}^{1/4}$

$\theta$  : 無次元温度  $= (T - T_\infty)/(T_w - T_\infty)$

$\lambda$  : 熱伝導率

$\nu$  : 動粘性係数

### 3. 実験装置および実験方法

加熱面は、2m×1m、厚さ2mmの銅板を継ぎ合わせた、高さ4m、幅1mの伝熱板で、Fig. 1に示すように、こ

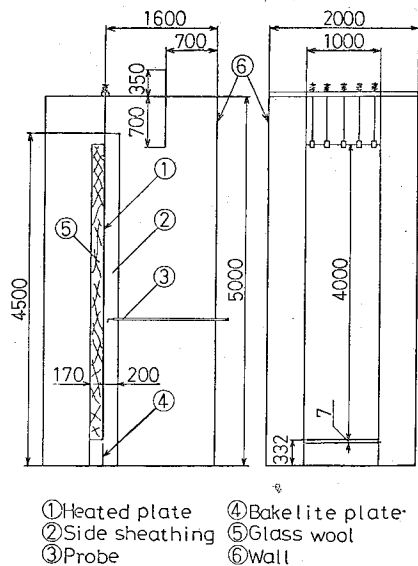


Fig. 1 Experimental apparatus

これを 4.8m×2.6m、高さ 7.5m の室内に垂直に吊り下げた。そして、加熱面上に形成される境界層への外乱を防ぐために、伝熱板の周囲に 2.54m×2m、高さ 5m の囲いを設けた。伝熱板の加熱のために、伝熱板の裏面に厚さ 0.025mm のポリエステルテープで電気絶縁し、その上に 1m×15mm、厚さ 0.03mm のステンレス箔を 3mm の間隔を開けて高さ方向に合計 221 本貼った。そしてそれを 13 分割し、変圧器およびスライド抵抗器を用いてそれぞれへの供給電力を一樣伝熱面温度となるように調整した。伝熱板の裏面からの熱損失防止には、厚さ 170mm のグラスウールを用いた。

伝熱板の幅は高さの 1/4 であるが、伝熱面に沿う上向きの流れが伝熱板の両端より流れを吸込み、上端に近い程吸込み流が大きくなり、2 次元流れが確保できなくなる。それを防ぐために伝熱板の両端に幅 200mm のアクリル製の側壁を取付けた。また囲いの上端では、加熱上昇流と吸込み下降流が互いに干渉して乱流境界層が乱されるのを防ぐために、図のような仕切板を設けた。このような仕切板の影響について、煙により観察した囲い内の流れの様子を Fig. 2 に示した。仕切板が無い状態 (A 図) では、上昇流と下降が干渉して乱流境界層が乱される。B 図のように仕切板を伝熱板下部まで長くすると、乱流境界層への影響は少なくなるが、伝熱板下部の層流境界層が乱される。仕切板の長さを伝熱板の約半分程度にすると (C 図)、層流境界層は安定するが、仕切板の下方で吸込み流が巻込まれ、乱流境界層の発達に影響される。伝熱板全般にわたって最も良好な流れ場が得ら

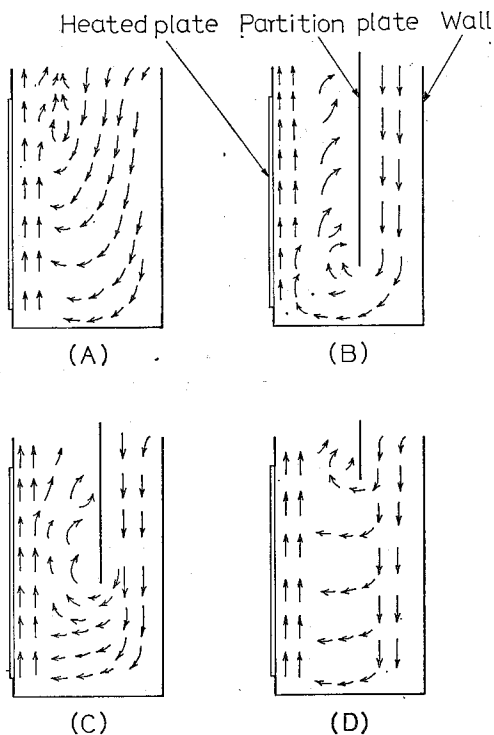


Fig. 2 Effect of the partition plate on the flow pattern around the heated plate

れるのは、D 図のように上方に短い仕切板を付けた場合である。本研究では実験的に最良の状態が得られるように、その長さを決定して Fig. 1 に示したような寸法とした。また、伝熱板の前縁付近の条件は遷移領域の位置や状態を左右し、層流境界層や乱流境界層にも影響を与える。本研究では、前縁から安定した境界層を生ずるように、前縁付近を Fig. 3 のような構造とした。前縁は角度 60° のシャープエッジとして、断熱床面よりの高さを 332mm とし、前縁付近への流れの近寄り速度のために

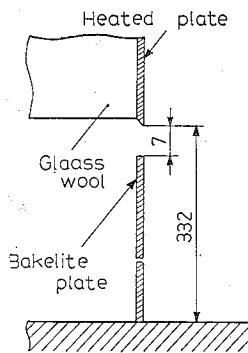


Fig. 3 Detailed structure near the leading edge of the vertical heated surface

層流境界層の発達に影響を受けないように、前縁下方 7 mm の位置まで図のようなベークライト板を取付けた。

伝熱面温度の測定は、線径 0.1mm の銅コンスタンタン熱電対を伝熱板裏面の中央部に 21 箇所、中央部から 350mm 離れた左右の位置に 10 箇所ハンダで埋込んで行った。境界層内の温度測定は、線径 0.025mm の白金-白金ロジウム熱電対を先端の開きが 15mm のホルダに取付け、これを囲いの外に設置した読取顕微鏡に接続し、伝熱板中央部において垂直方向に移動することによって行った。伝熱板は僅かな温度変動でも変形するが、変形による伝熱面の垂直方向の変位は 0.005mm 以下に抑えた。熱電対の起電力はデジタル電圧計を用いて読取った。層流域では 1 秒間隔で 20 秒間、また温度変動幅が大きい遷移および乱流域では時定数 4.7 秒のフィルタをかけた起電力を 5 秒間隔で 2~3 分間読み、平均値で空気温度  $T$  を求めた。この場合、乱流域において、平均値の読取りに影響する温度変動に対し、ペンレコーダに記録したフィルタ使用時の波形がフィルタなしの場合の出力波形に追従することを確認した。またフィルタを用いて算出した平均値と、そのままの起電力を 0.5 秒間隔で 3 分間読取った平均値とは殆ど一致した。なお、境界層内の温度測定時には測定位置における伝熱面温度も 5 秒間隔で平均して求め、周囲流体温度は高さ 4.5m にわたって 7 箇所に配置した熱電対で測定した。

4. 実験結果

実験条件は伝熱面温度  $T_w=100^\circ\text{C}$  および  $60^\circ\text{C}$ 、周囲流体温度  $T_\infty=20^\circ\text{C}$  とした。測定は高さ方向の伝熱面温度および周囲流体温度がほぼ一定であることを確認した上で行った。測定時における伝熱面温度の高さ方向の変化は中央部で約  $1^\circ\text{C}$ 、中央部と中央部から 350mm 離れた左右の位置における温度は約  $1^\circ\text{C}$  であり、周囲流体温度の高さ方向の変化も  $1.5^\circ\text{C}$  程度であった。また測定位置における伝熱面温度の時間変化は遷移および乱流域で  $1^\circ\text{C}\sim 2^\circ\text{C}$  であった。上記の実験条件を得るには、伝熱板の加熱に 3~4 時間要し、測定時間は 1 回のトランプスについて層流域では 30 分、遷移および乱流域では約 1~2 時間であった。物性値は体膨張率  $\beta (=1/(273.15+T_w))$  を除き、すべて膜温度  $T_f$  で評価し、前縁からの距離  $x$  を代表長さとした。

層流境界層における温度分布の測定結果を Fig. 4 に無次元温度  $\theta$  と相似変数  $\eta$  の関係で表した。実線は境界層理論の数値解 ( $Pr=0.71$ ) である。実験値と極めて良く一致しており、安定した境界層が伝熱面前縁から発達していることを示している。

$T_w=100^\circ\text{C}$  における層流域、遷移域および乱流域の代表的な温度分布の例を Fig. 6 に示した。

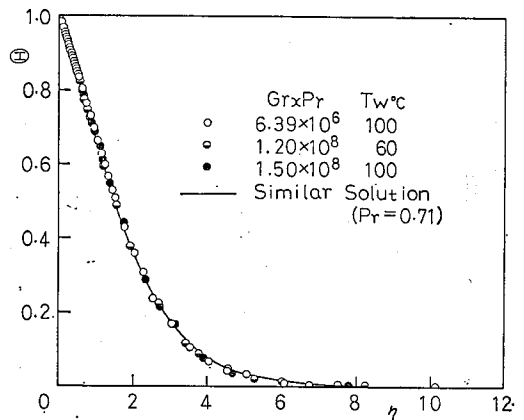


Fig. 4 Temperature profiles in the laminar boundary layer

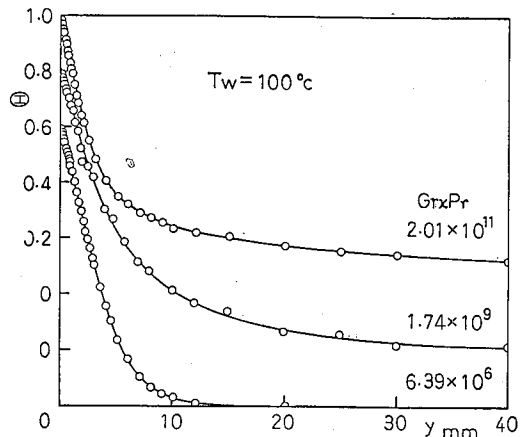


Fig. 5 Temperature profiles in the laminar, transitional and turbulent boundary layer

熱流束の算定は、本実験では、伝熱面近傍の流体の温度勾配の測定値により行った。そのために伝熱面近傍の流体温度は特に留意して詳しく測定した。Fig. 6 は層流、遷移および乱流の各領域における測定の例である。

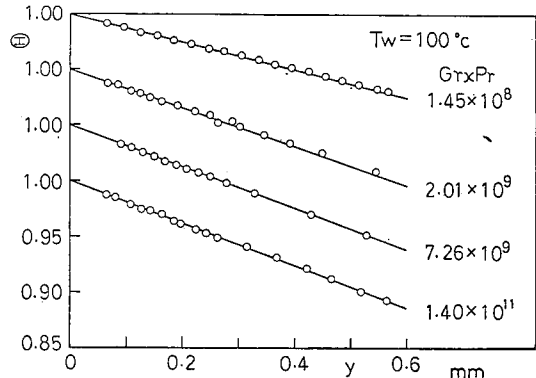


Fig. 6 Temperature profiles near the surface

伝熱面から約 0.3mm までの間の勾配を採り、伝熱面における流体の温度勾配とした。

温度勾配より求めた熱流束による熱伝達率の測定結果を Fig. 7 に局所ヌセルト数  $N_{ux}$  と  $Gr_x Pr$  の関係で表した。層流域における  $N_{ux}$  は理論値 ( $Pr=0.71$ ) と良く一致している。遷移域は  $Gr_x Pr=10^9 \sim 10^{10}$  の範囲で、比較

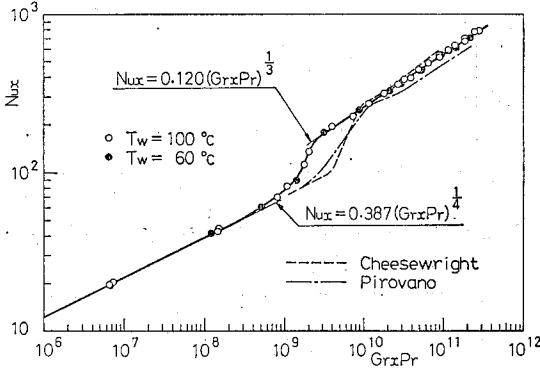


Fig. 7 Local heat transfer rates

のため Cheesewright および Pirovano らの実験結果について本実験の条件に近いものを示したが、遷移域の様相が本実験と異なっている。 $Gr_x Pr > 10^{10}$  における乱流域の  $N_{ux}$  は次式で整理される。

$$N_{ux} = 0.120 (Gr_x Pr)^{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

乱流域における Cheesewright および Pirovano らの実験結果との比較を明確にするため、Fig. 8 に  $N_{ux}/(Gr_x Pr)^{1/3}$  と  $(Gr_x Pr)^{1/3}$  との関係を示した。本実験は Cheesewright と Pirovano らの実験値の中間にあり、高  $Gr_x Pr$  まで  $N_{ux}$  は  $(Gr_x Pr)^{1/3}$  に比例している。 $Gr_x Pr$  の指数 1/3 に

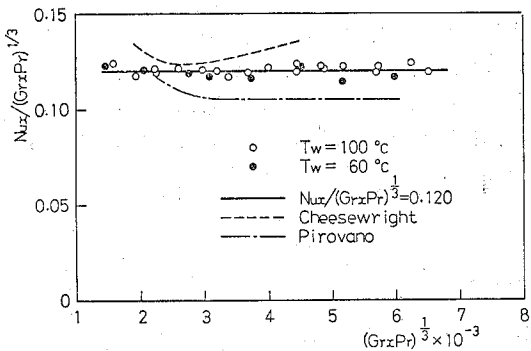


Fig. 8 Local heat transfer rates in the turbulent region compared with other data

ついて、Pirovano らの実験値は一致するが、Cheesewright の実験値は異なっている。なお、Pirovano らの実験では熱伝達率を伝熱板に供給した電力から求めているが、熱損失の考慮が困難で、層流域においても理論値よ

り低い値を示している。乱流境界層も境界層外の流れの様子によりかなり影響を受けるため、本実験では実験装置に細心の注意をして境界層外の流れの条件も調べた。他の研究はこの条件が不明であり、実験装置の違いによる影響も考えられる。また、遷移の影響の存在する  $Gr_x Pr=3 \times 10^9 \sim 10^{10}$  の  $N_{ux}$  についても、本実験値は式(1)で整理され、遷移領域の特徴が  $N_{ux}$  については明確でない。本実験では、熱流束を伝熱板を加熱するのに要した電力からも求めて同様な結果が得られたが、流体の温度測定より求める方が精度は高く、信頼性の高い結果が得られた。

温度補償した熱線風速計を用いて測定した層流および乱流域の速度分布例を Fig. 9 に示した。縦軸は層流境界層の理論に用いられる無次元変数  $(Ux/\nu) Gr_x^{-1/2}$  であり、横軸は熱伝達率に関する無次元変数  $(N_{ux}/x)y$  である。

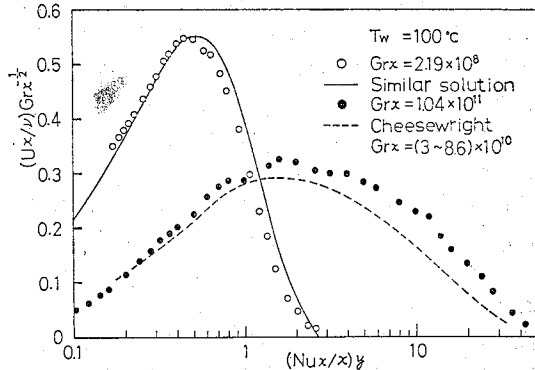


Fig. 9 Velocity profiles in the laminar and turbulent boundary layer

実線は層流境界層理論の数値解であり、便宜的に物性値の代表温度として Sparrow-Gregg<sup>4)</sup> の値 ( $= T_w - 0.38(T_w - T_\infty)$ ) を用いた。本実験との誤差は主に代表温度の採り方によるもので、最大速度および分布形は良く一致している。乱流域については比較のため、Cheesewright の実験結果を破線で示した。乱流域では座標に用いた層流に関する無次元変数が適切であるか疑問であるが、Cheesewright の測定値は  $Gr_x = (3 \sim 8.6) \times 10^{10}$  の範囲ではほぼ一本の線でまとまっており、本実験と比較して最大速度およびその外側の領域でかなり小さい値を示している。このことについて Cheesewright は幅 60cm の狭い伝熱面を使用したこと、測定方法および境界層への吸込みの条件が不明であることなどが考えられる。

自然対流の遷移および乱流域における熱伝達をさらに明らかにし、他の研究との差異を明確にするには、温度分布、速度分布および境界層内の状態を詳しく調べる必要がある。

## 5. 結 言

垂直加熱面上の空気の自然対流に関し、伝熱面温度一様の条件で熱伝達率を実験的に調べた。 $N_{ux}$  は伝熱面近傍の流体温度の勾配より算定した。 $G_{rx}Pr > 10^{10}$ における乱流域の  $N_{ux}$  は、 $N_{ux} = 0.120 (G_{rx}Pr)^{\frac{1}{3}}$  で良く整理された。

## 参 考 文 献

- 1) Warner, C. Y., Ph. D. thesis, University of Michigan, Ann Arbor, Mich., Dec. 1966.
- 2) Cheesewright, R., Trans. ASME, C-90 (1968), 1.
- 3) Pirovano, A., Viannay, S. and Jannot, M., Heat Transfer 1970, IV, NC. 1. 8, Elsevier Amsterdam (1970).
- 4) Sparrow, E. M. and Gregg, J. L., Trans. ASME, 80 (1958), 879.