

# 614 ステップを有する平板上の強制・自然複合対流熱伝達に関する研究 (循環領域内に垂直制御板を挿入した場合)

A Fundamental Study on Combined Free and Forced Convective Heat Transfer  
from a Vertical plate followed by a Backward Step.  
(Setting Vertical Control Plate in Circulating Flow Region)

八田 政治, 宮西 広樹, 鈴木 淳, 岸浪 紘機, 戸倉 郁夫 (室蘭工業大学)

Masaharu Hatta, Hiroki Miyanishi, Jun Suzuki, Koki Kishinami, Ikuo Tokura, Muroran Institute of Technology

## 1. 縮言

ステップを有する垂直面上の強制・自然複合対流熱伝達現象は、はく離・循環・再付着を伴い、その熱伝達挙動は浮力と慣性力の相互干渉の結果、形状因子等と重なり複雑なものとなり、ある特定の条件においては流れの不安定自励振動的挙動を生ずることが判明している。本研究は、従来のはく離・循環・再付着を伴う複合対流熱伝達に関する研究を基にし、ステップ面上に生じる循環領域が対流挙動に大きな影響を与えることから、簡易な制御板をステップ面循環領域内に挿入した場合の熱伝達制御の可能性について、理論的・実験的な見地から、明らかにすることを目的とする。

### 使用記号

$d$ : ステップ長さ,  $L$ : 代表長さ,  $L_c$ : 制御板長さ,  $h$ : 熱伝達率,  $t$ : 温度,  
 $u$ :  $x$ 方向速度成分,  $v$ :  $y$ 方向速度成分,  $x$ :  $x$ 方向距離,  $y$ :  $y$ 方向距離,  
 $g$ : 重力加速度,  $\alpha$ : 熱拡散率,  $\beta$ : 体積膨張率,  $\nu$ : 動粘度,  $\omega$ : 渦度,  $\tau$ : 時間  
 $\psi$ : 流れ関数,  $\lambda$ : 熱伝導率,  $\rho$ : 密度,  $w$ : 壁面,  $\infty$ : 境界層外

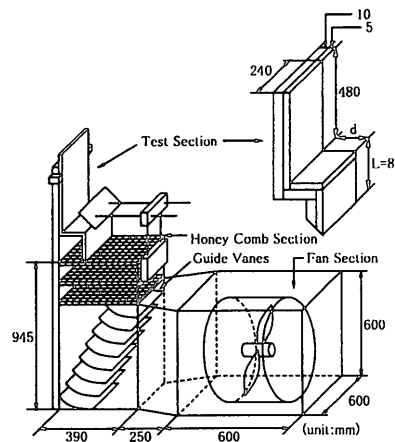


Fig.1 Experimental Apparatus

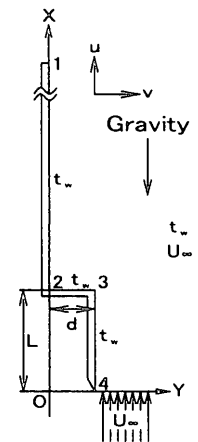


Fig.2 Physical Model

## 2. 伝熱モデル及び基礎方程式

Fig.1 に実験装置概要及び Fig.2 に物理モデルを示す。図中 X 軸は重力と平行に、Y 軸は垂直方向にとる。伝熱面全面は  $t_w$  に等温加熱され、主流速度  $U_\infty$  に置かれている。後段垂直部 (2-1 面) は、ステップ高さ  $d$  及び前段長さ  $L$  に比べて十分長いものとする。なお、壁面からの放射熱流は鏡面壁として考慮しないものとする。本研究において取り扱う無次元変数を、以下のように定義する。

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{u}{U_\infty}, V = \frac{v}{U_\infty}, T = \frac{t - t_\infty}{t_w - t_\infty}$$

$$\Omega = \frac{L\omega}{U_\infty}, \Psi = \frac{\psi}{U_\infty L}, \tau^* = \frac{\tau U_\infty}{L}, Pr = \frac{\nu}{\alpha}, Re_L = \frac{U_\infty L}{\nu}$$

$$Gr_L = \frac{g\beta(t_w - t_\infty)L^3}{\nu^2}, Nu_L = \frac{hL}{\lambda} = -\left(\frac{\partial T}{\partial Y}\right)_{Y=0}$$

過度法に依る渦輸送方程式及びエネルギー式に、上の強制対流型無次元変数を導入すれば、次の基礎方程式が得られる。

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0, U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}, V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X}, \Omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau^*} + U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} = \frac{1}{Pr Re_L} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau^*} + U \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \frac{Gr_L}{Re_L^2} \frac{\partial T}{\partial Y} + \frac{1}{Re_L} \left( \frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right)$$

## 3. 実験装置及び実験概要

Fig.1 より、伝熱面は、厚さ 5mm のアルミ板と、裏面厚さ 10mm のベークライト板から成り、前段部、ステップ部、後段部の 3 部に分割し、後段部は更に 4 分割し電気通電により加熱した。その際、直径 0.26mm のニクロム線をアルミ板とベークライト板の間に交互列状に 6 ケ所取り付け付けた。主流速度は可変速モータ直結のプロペラ駆動により得られ、整流板を通した。壁面温度測定の場合は直径 0.1mm 熱電対をアルミ板表面に計 6 ケ所設置し測定した。

## 4. 結果の検討・考察

### 4.1 本複合対流熱伝達モデルに対する数値解析

数値解析を行なうにあたり、人工粘性 (数値粘性) は慣性対流項の風上差分を実施する場合に必ず伴う誤差である。本研究では、この人工粘性問題がかなりの程度で回避でき、計算費用、精度、安定性を考慮した上で、最適と考えられるべき乗法を適用した。また、流れの解析に用いる対流方程式は非線形性が強く、繰り返し計算において直接予測値を用いれば不安定になりやすい。これを回避し、収束解を得るため、緩和因子  $\omega$  を導入して収束を加速した。時間進行  $\Delta \tau$  における収束条件は、 $m$  回目の計算値と  $m+1$  回目の計算値との最大誤差を  $\pm 3.0 \times 10^{-2}$  に設定した。また、本年度の数値解析では、制御板上の流れ関数の与え方を厳密化した。その結果、対流挙動の振動を抑制し、早い時間で収束解を得ることで、計算時間が短縮された。

### 4.2 複合対流因子 $Gr_L / Re_L^2$ による複合対流熱伝達特性

ここで、 $Gr_L / Re_L^2 = g\beta(t_w - t_\infty)L / U_\infty^2$  は、強制対流と自然対流の影響の比を表すパラメータであり、この値が小さいほど強制対流が、大きいほど自然対流が支配的な場となることを表している。Fig.3 は、本複合対流熱伝達において、強制対流が支配的な場合から、自然対流が支配的な場合へ移行したときの流線分布を示している。また、これらの条件に対応する温度分布を Fig.4 に、局所熱伝達率分布を Fig.5 に示す。Fig.3 より、強制対流が支配的な場合 (a) では、壁面に沿う時計回りの渦流が大きく、自然対流が支配的な場合 (c) では、主流に沿う反時計回りの渦流が大きくなる。これに対し、強制対流と自然対流の影響がほぼ同等である場合 (b) では、この二つの逆まわりの渦流は、殆ど同じ割合でステップ面上に存在する。また、自然対流の影響が強くなる程慣性力が小さくなるので、再付着点がステップ面方向に移動して循環領域を狭める方向に作用している。Fig.4 より、 $Gr_L / Re_L^2$  が大きくなれば、循環領域内に存在する渦流が強くなり、ステップ面上と後段垂直面上の等温線の間隔が狭くなる。Fig.5 は局所熱伝達率分布を示すが、一般に等温線の間隔が広い部分では熱伝達率が低くなり、狭い部分では高くなるので、 $Gr_L / Re_L^2$  の大きい程局所熱伝達率は大きくなる。

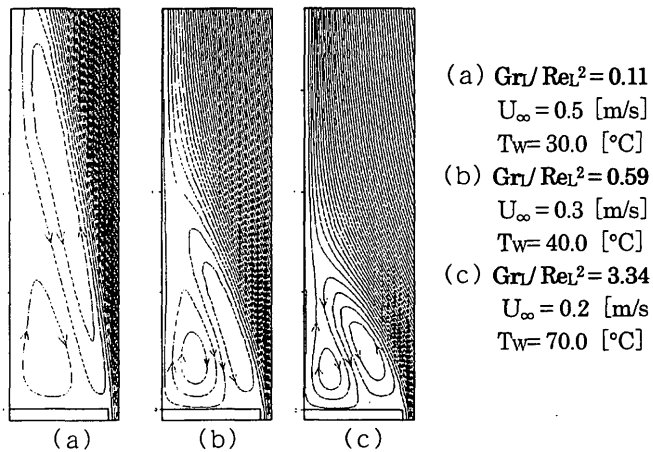


Fig.3 Stream Line

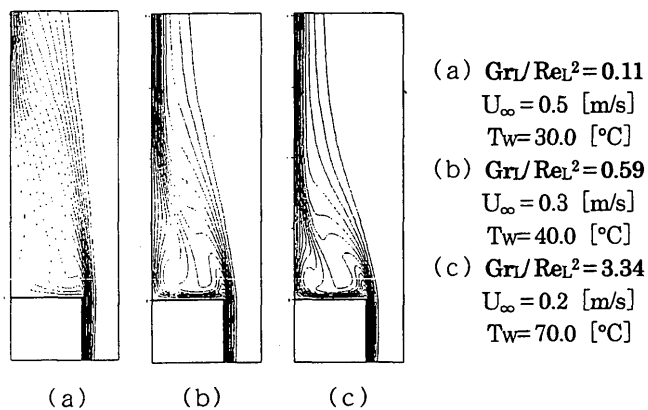


Fig.4 Temperature Field

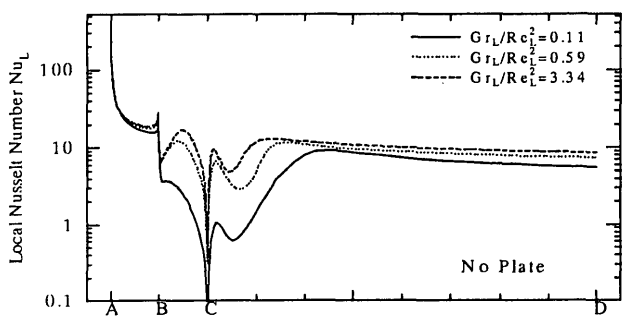


Fig.5 Distribution of Local Nusselt Number

これは、制御板を設置による粘性増大効果により渦流の不安定さが抑制され、最も対流挙動が振動しやすい  $Gr_L/Re_L^2 = 0.59$  の条件でも安定した熱伝達挙動となるが、必ずしも系全体の熱伝達の改善につながるとは限らない。

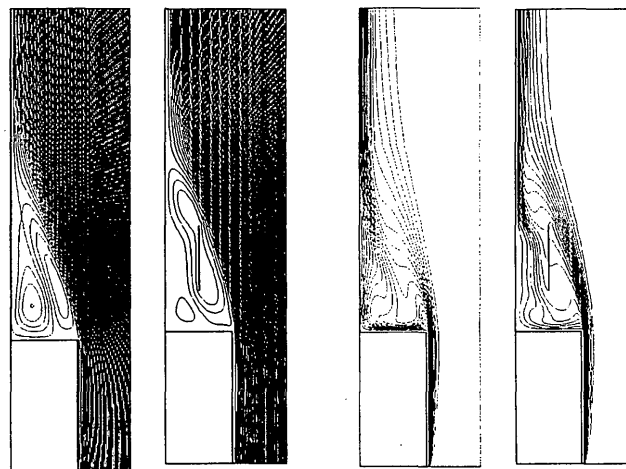


Fig.6 Stream Line

Fig.7 Temperature Field

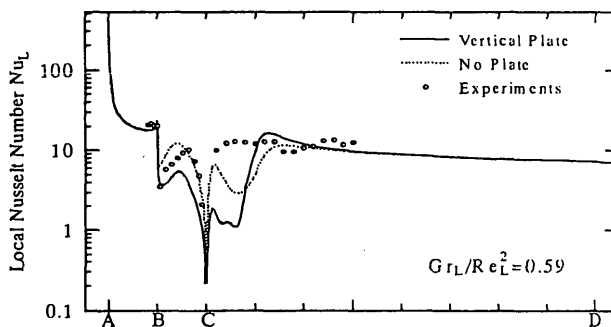


Fig.8 Distribution of Local Nusselt Number

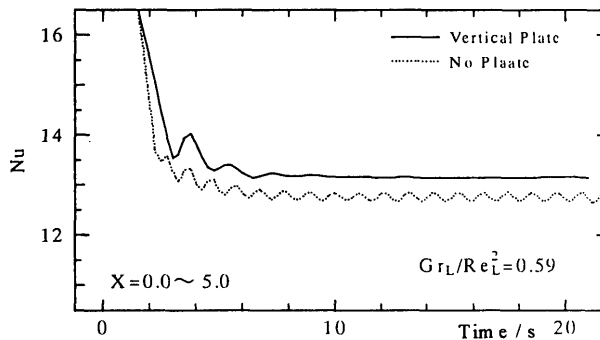


Fig.9 Average Nusselt Number

### 4.3 垂直制御板を設置した複合対流熱伝達特性

Fig.6は、 $Gr_L/Re_L^2 = 0.59$ 、 $U_\infty = 0.3$  [m/s]、 $T_w = 40.0$  [°C]の条件における、制御板のない場合と、ステップ面から制御板下端までのX方向無次元距離  $I_Z = 0.3$ 、後段垂直面から制御板側面までのY方向無次元距離  $J_Z = 0.5D/L$ の位置に長さ  $L_c = 0.5$ の垂直制御板を設置した場合の流線分布を示している。同様に温度分布をFig.7に、局所熱伝達率分布をFig.8に示す。Fig.6より、ステップ面中心上への垂直制御板の設置により、主流の影響が制御板内側に伝わりにくく、制御板内側で流れが緩慢となる。これに対し、主流に沿う反時計回りの渦流は制御板を取り込む様に流れる。結果、渦流は大きくなる。Fig.7より、制御板の設置により制御板内側とステップ面上で等温線間隔が広がる。これは、制御板を設置すると制御板内側とステップ面上では流れが弱まり、更に、制御板の存在が流れを遮蔽して熱を通さず、加熱平板より発する熱が制御板内側でのみ循環するため、制御板内側の領域が高温化する。これより、局所熱伝達率はFig.8に示すように、制御板内側とステップ面上では低い熱伝達率となる。Fig.9に、同一条件における、制御板のない場合と設置した場合の平均熱伝達率を示す。図より、制御板のない場合では振動的であるが、制御板の設置によりその挙動は安定化する。

### 5. 結言

本研究により得られた結果を以下に記す。

- (1) 複合対流因子  $Gr_L/Re_L^2 = 0.59$  近傍の条件では、自然対流と強制対流の影響がほぼ均衡しており、そのどちらかの影響が強い状態に推移しやすい不安定な状態なため、再付着点近傍に大きな不安定挙動が現れ、全体としても周期的に変動する熱伝達挙動となる。
- (2) 垂直制御板の設置により、制御板内側では遮蔽効果と粘性増大効果があり、渦流の強さが軽減・安定化され、緩慢な流れ場となり、結果として高温域となり、ステップ面上及び制御板内側の局所熱伝達率はかなり低下する。また、垂直制御板の設置により、局所的に熱伝達を促進させることは可能であり、渦流の強さが抑制され、熱伝達挙動は一般的に安定したものとなる。

### 参考文献

- [1] 岸浪, 梅木・他, International Journal of Methods for Heat & Fluid Flow Vol. 8 No. 6 (1998) pp.717-736.