

噴流による後ろ向きステップ下流の再付着領域の  
熱伝達特性の制御に関する研究\*  
(第1報, 噴流位置および噴流速度の効果について)

親川 兼 勇\*<sup>1</sup>, 小 池 徹\*<sup>2</sup>, 馬 淵 幾 夫\*<sup>1</sup>

Studies of Heat Transfer Control by Using Jet Discharge at Reattachment  
Region Downstream of a Backward-Facing Step  
(1st Report, Effect of Jet Locations and Jet Velocities)

Kenyu OYAKAWA, Toru KOIKE, and Ikuo MABUCHI

The local heat transfer coefficients downstream of a backward-facing step were measured at various jet locations and jet velocities by discharging a jet perpendicularly to the main flow to control the heat transfer characteristics. It was found that flow field is characterized by the formation of a circulating bubble at the rear of a jet port on the opposite wall of the step surface (i. e., the jet port side), where the bubble causes acceleration of the main flow and shortening of the reattachment point length. Furthermore, at the optimum position  $X_j/H=2.1$  ( $X_j$ : location of jet, measured from the step position,  $H$ : the step height), the augmentation of mean heat transfer coefficients can be as much as 1.6 times the value without jet discharge. Thus, by using a jet it is possible to control the heat transfer effectively.

**Key Words:** Forced Convection, Heat Transfer Enhancement, Heat Transfer Control, Recirculating Flow, Reattachment Region, Jet, Flow Visualization

1. 結 言

境界層をかく乱させ対流熱伝達率の増大を図るものとして、リップ、突起などの乱流促進体を用いられ、有効な粗さ形状を求めめるため、従来から数多くの応用的研究が行われてきた<sup>(1)</sup>。これらの研究ははく離せん断層の壁面への再付着領域における高い伝熱特性を利用するものである。しかし、はく離流の再付着点近傍の流れ場は逆流をともなった強い非定常性を有するため、はく離流の熱伝達率を予測する有効な数値モデルは見いだされていないのが現状である。ところで、このような再付着流による伝熱促進は鈴木<sup>(2)</sup>が述べているように、立場を変えれば伝熱制御の試みとみることができなくもない。しかし、伝熱制御の本質からいえば、局所熱伝達率の大きな変化、さらには高い平均熱伝達特性を特色とする再付着流における伝熱負荷それ自体を、目的に応じて制御することがより重要と考えられる<sup>(3)</sup>。

本研究はこのような観点からはく離再付着流の代表的流れ系である後ろ向きステップ下流の伝熱特性の制御を目的とした実験的研究である。この問題に対して鈴木<sup>(4)</sup>は流れの非定常化を伝熱制御の手段の一つとして、ステップ下流の循環領域の伝熱促進の可能性を検討している。すなわちステップ近傍に円柱を挿入し、その背後に発生するカルマン渦の非定常性を利用するもので、ステップレイノルズ数  $Re(=U_0 \cdot H/\nu)=1.4 \times 10^3$  (円柱レイノルズ数 560) の場合について実験し、ステップ下流のステップ高さの17倍の区間平均熱伝達率が10%高くなると結論している。これに対し本研究では、ステップ面に対向する面(以後ノズル面と呼ぶ)から、二次元噴流をステップ面に向け垂直に噴出することにより、はく離せん断層、したがって再循環域分割流線の空間的位置を変化させる方法により、ステップ下流の伝熱負荷を制御しようとするものである。さて、ダクト流熱伝達に対する衝突噴流の影響を調べた Chong ら<sup>(5)</sup>の研究によれば上流断面平均速度に対する噴流速度の比  $J$  が1.5の場合、噴流背面とノズル面に形成されるはく離泡のスケールは小さく、噴流中心線の軌跡は下流にスリーブされる。この結果ダクト流の主流の湾曲が生ずる。したがって、 $J$

\* 平成3年3月14日 九州支部第44期総会講演会において講演、原稿受付 平成4年5月11日。

<sup>1</sup> 正員、琉球大学工学部 (〒903-01 沖縄県西原町字千原1)。

<sup>2</sup> 学生員、(株)東芝 ULSI 研究所 (〒210 川崎市幸区小向東芝町1)。

の比較的小さい範囲で生ずるこの主流の湾曲により、本研究のステップからのはく離せん断層の分割流線の空間的位置、すなわち時間平均的再付着点長さが制御できるものと期待される。最近、森ら<sup>(4)</sup>はステップ下流の伝熱特性の時空間的微小構造解明に関する研究において、導流板の挿入により再付着点揺動の振幅の制御を行っている。主流の湾曲に関していえば、導流板の挿入と噴流の導入による両効果の間には現象論的類似性のあることが示唆される。以上のような考察から、ステップ下流の時間平均的伝熱負荷の制御を考える場合、導流板の挿入による方法に比べて、噴流を用いる方法は系統的に構造が簡単であり、安価に目的を達することができよう。伝熱制御における目的の多様性の点からみても、噴流の特性を変化させる(たとえば、間欠噴流、噴出角度に変動を与える、スロット幅をスパン方向に変化させるなど)ことにより、その目的達成の可能性が期待できよう。本研究は第1プログラムとして、後ろ向きステップ下流の熱伝達特性におよぼす噴流位置、噴流速度の効果について、伝熱制御の視点からの基礎的諸特性を明らかにすることを目的としている。

## 記号

- $B$ : 噴口幅  
 $C$ : 入口流路高さ  
 $C_p$ : 圧力係数  $= (P_x - P_0) / (0.5 \rho U_0^2)$   
 $H$ : ステップ高さ  
 $h_x$ : 局所熱伝達率  
 $h_{max}$ : 最大熱伝達率  
 $h_{max0}$ : 噴流を付加しない場合の最大熱伝達率  
 $h$ : 平均熱伝達率  
 $J$ : 主流と噴流の速度比  $= U_j / U_0$   
 $P_x$ : ステップ底面の圧力  
 $P_0$ : ステップ上流  $X/H = -1.15$  の静圧  
 $Re$ : ステップレイノルズ数  $= U_0 \cdot H / \nu$   
 $U_0$ : 主流速度  
 $U_j$ : 噴流速度  
 $X$ : ステップ面から下流方向への距離  
 $X_j$ : 噴口位置  
 $X_{JR}$ : 循環気泡の長さ  
 $X_R$ : 再付着点の長さ  
 $X_m$ : 熱伝達率が最大となる位置  
 $\nu$ : 流体の動粘性係数  
 $\rho$ : 流体の密度

## 2. 実験装置および実験方法

流路系は吹出し形で、出口断面が  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  の風洞を流路高さ  $C=60 \text{ mm}$ 、スパン幅  $300 \text{ mm}$  に絞り、それより  $300 \text{ mm}$  下流に後ろ向きのステップ高さ  $H=40 \text{ mm}$ 、スパン幅  $300 \text{ mm}$  の断面をもつ長さ  $1070 \text{ mm}$  の拡大流路とした。ステップによる拡大比は  $E. R. = 1.67$  である。再付着領域の空間的スケールの制御を行うために、ステップに対向する壁面(以下ノズル面と呼ぶ)に設置された二次元噴流は噴口幅  $B=3 \text{ mm}$ 、スパン幅は  $300 \text{ mm}$  でその位置  $X_j/H$  は可変である。壁面静圧の測定は鉄製平板の中央部に設けられた65個の静圧孔によった。また、伝熱板はベークライト板に厚さ  $30 \mu\text{m}$  のステンレスはくを接着し、直流電源により通電加熱した熱流束  $q$  一定の条件とした。局所熱伝達率  $h_x$  はステンレスはく裏面にはんだ付けされた91本の銅-コンスタンタン熱電対 ( $\phi 70 \mu\text{m}$ ) による壁面温度と主流温度を用いて算出した。再付着点長さ  $X_R$ 、および循環気泡長さ  $X_{JR}$  はプローブ先端のリング(直径約  $1.5 \text{ mm}$ ) にタフトを取付け、自由に振るようにし、プローブを流れ方向に移動させ、タフトの向きが上流、下流に同程度と思われる位置として求めた。また全体の流れ、噴流の様子をタフト法、スモーク法で可視化した。本実験の実験条件を表1に、また、流れのモデルおよび主要記号、座標系を図1に示す。

## 3. 時間平均流れ特性の結果および考察

3-1 流れの可視化 時間平均的な流れ場、たとえば分割流線などが噴流によりどのように変化するか

表1 実験条件

|                          |   |
|--------------------------|---|
| $U_0$                    | 10, 15, 20 m/s                                  |
| $Re = U_0 \cdot H / \nu$ | $1.25 \times 10^4 \leq Re \leq 5.0 \times 10^4$ |
| $J = U_j / U_0$          | $0 \leq J \leq 2.0$                             |
| $X_j / H$                | $0.1 \leq X_j / H \leq 7.1$                     |

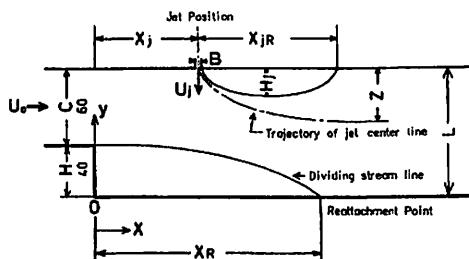


図1 座標系および主要記号

を調べるために、タフトおよび煙による可視化を行った。タフトを植め込んだ平板(厚さ2mm)を測定部側面から10mm浮かして設置した場合、また噴口から噴出させた煙にスリット光をあて、上部側板を通してそれぞれ写真撮影を行った。後述する最適噴口位置  $X_j/H=2.1$ 、 $J=2.0$  の可視化結果を図2(a)、(b)に示す。図2(a)より、ステップ上流からの主流はステップ下流  $X/H=1.5$ 以降、ノズル面での循環気泡のため大きく湾曲し、はく離せん断層がステップ面に押しやられ、再付着領域が著しく縮小していることがわかる。この主流の湾曲は  $J$  の増大とともに大きくなり、再付着位置が上流側に移動する。なお噴流のない  $J=0$  の場合の再付着点長さ  $X_R$  は  $X_R=6.4H$  であり、この値は Vogelら<sup>(7)</sup> の  $X_R=6.7H$ 、熊田ら<sup>(8)</sup> の  $X_R=6.3H$  とほぼ同じであった。図2(b)は噴口下流に生成される循環気泡を示しており、この気泡の大きさ ( $X_{JR}$  および  $H_j$ ) は  $J$  とともに大きくなる。なお図2中の△印はタフトプローブによる  $X_R$ 、 $X_{JR}$  の位置を示す。これら図2(a)、(b)をもとにして描いた推定流線図を図3に示す。また図3にステップ下流  $X/H=8$  における速度分布(熱線風速計による)を示すが、ステップ底面に沿う壁噴流形分布となっている。

3.2 再付着点と循環気泡の長さ 主流の湾曲は循環気泡の大きさのみならず、その位置に依存する。そこで循環気泡の大きさに関与する因子  $J$  が1.5の場合を例にとり、噴口位置  $X_j/H$  による  $X_R$  と  $X_{JR}$  の

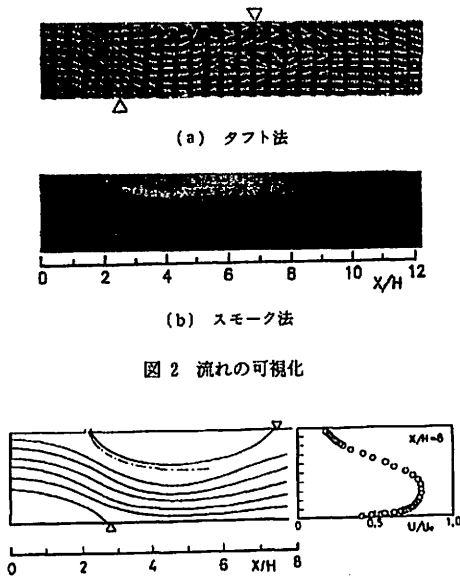


図2 流れの可視化

図3 推定流線図および速度分布

対応関係の変化を図4に示す。 $X_R$ 、 $X_{JR}$  は互いに鏡像関係にある。 $X_R/H$  の最小値は  $1.1 \leq X_j/H \leq 2.1$  で得られ、この範囲で循環気泡は最大となっていることがわかる。すなわち、この  $X_j/H$  の位置で噴流を噴出した場合に主流の湾曲に対し最も効果的といえよう。

つぎに  $X_j/H=2.1$  の場合の、 $X_R$  と  $X_{JR}$  の対応関係を  $J$  の変化に対して図5に示す。 $J$  の変化に対しても、前述と同様に鏡像関係が認められる。ただ  $J$  の小さい場合、 $X_{JR}$  を確認できずほぼ  $J=0.7$  近傍にその発生限界  $J_{cr}$  が存在するようである。 $J < J_{cr}$  では噴流はノズル面に沿ってスweepしているものと考えられ、対応する  $X_R$  の変化は小さい。また  $J$  が大きくなり  $J=2.0$  では  $X_R$  および  $X_{JR}$  の変化は飽和傾向にある。このことは噴流の運動量付加の観点から、 $X_R$  の制御に関して  $J$  の限界を示唆する。

3.3 ステップ底面の静圧分布 噴口位置  $X_j/H$ 、および  $J$  を変えた場合の  $X_R$ 、 $X_{JR}$  の対応関係とステップ底面上の静圧分布との関連を考える。図6、7はステップ上流  $X/H=-1.15$  の静圧  $P_s$  を基準とする圧力係数  $C_p=(P_s-P_e)/(1/2\rho U_0^2)$  の流れ方向分布を示す。

まず図6の  $J=1.5$  で  $X_j/H$  を変化させた場合は、 $J$

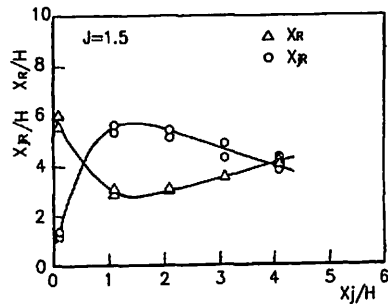


図4 再付着点長さおよび循環気泡の  $X_j/H$  による変化

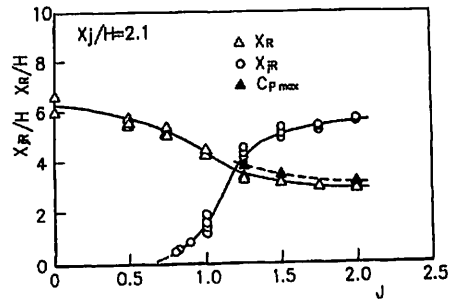


図5 再付着点長さおよび循環気泡の  $J$  による変化

$=0$  の  $X/H=3.2$  で最小値をとり、以降単調な圧力回復を示す分布 (図7) と異なり、分布に極大・極小値をもつ。  $X_j/H$  を  $X_j/H=7.1$  から減少させると  $C_{pmax}$  の位置は上流に移動し、かつステップ直後の  $C_p$  の絶対値 (近似的にステップ面の背圧  $C_{pb}$  に等しい) は大きくなる。この  $C_{pmax}$  の顕在化は、循環気泡の形成による主流の加速によるもので、分割流線外縁速度の再付着 (あるいは衝突) 効果が強められたものと考えられる。ただし、  $X_j/H=0.1$  では分布にピークは存在しない。また図4の  $X_R$  が  $X_j/H=0.1$  で大きくなるのは、図6の  $X_j/H=0.1$  のステップ面の背圧は小さくなるものの、  $C_p$  分布が噴流無しの場合と類似な分布をしていることに対応している。つぎに図7に示すように  $X_j/H=2.1$  で  $J$  を変化させた場合に、ステップ直後の  $|C_p|$  は増加し、また  $J \geq 1.25$  で分布は極大・極小をもつ。  $C_{pmax}$  の位置は  $J$  の増加とともに上流に移動する。またこの  $C_{pmax}$  は図5に示した  $X_R$  よりやや後方にあるが、その差はわずか ( $0.2H$  のオーダー) である。  $J$  による  $C_{pmax}$  の顕在化は前述と同じであり、結果として  $J$  とともに  $|C_{pmax} - C_{pmin}|$  は増大する。また  $C_{pmin}$  の位置は  $J \geq 1.25$  では  $J$  にはよらず  $X/H=5.5$  である。これは循環気泡の最大深さ位置とほぼ等しく、圧力回復がこの断面から始まることに対応しよう。

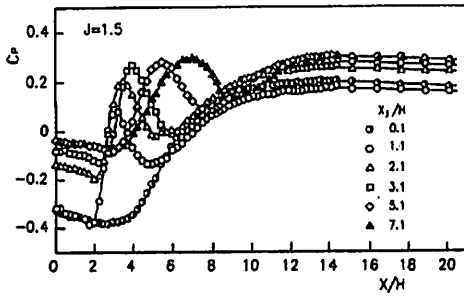


図6 底面の圧力係数の  $X_j/H$  による変化

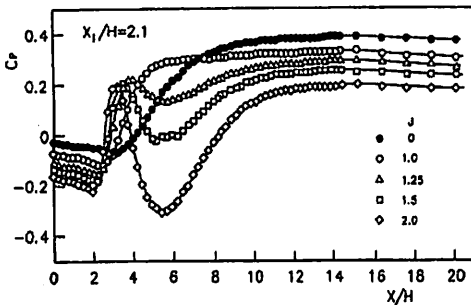


図7 底面の圧力係数の  $J$  による変化

#### 4. 時間平均熱伝達特性の結果および考察

4.1 局所熱伝達特性  $X_j/H, J$  により循環気泡の大きさ、それによる再付着領域の空間的スケールの大きさが変わる。そこで流れ場の変化にともなう時間平均熱伝達率分布の特性の相違を調べる。なお図8に噴流なしの後ろ向きステップ底面の局所熱伝達率  $h_x$  の分布を Vogel ら<sup>(7)</sup> ( $H=38$  mm) の結果と比較したものを示す。ステップの拡大比の違いのため、最大熱伝達率  $h_{max}$ 、それが得られる位置  $X_m$  を基準としたが、両者は一致している。本実験の  $X_m$  は  $X_m/H=5.7$  で再付着点長さ  $X_R/H=6.4$  の約  $2H/3$  上流に位置し、従来の研究結果とほぼ同じである。噴流を付加した場合の例として、  $J=2.0$  で  $h_x$  分布の  $X_j/H$  による相違を図9に示す。  $X_j/H$  の位置により最大熱伝達率の位置  $X_m$  が変化し、かつ  $J=0$  の場合に比べて最大熱伝達率  $h_{max}$  の値が大きくなり、とくに  $X_j/H=2.1$  の場合で最も高い値となる。  $X_j/H$  をそれよりステップ面に近づけた  $X_j/H=1.1$  ではわずかながら減少している。このことと前述の最適噴口位置に関する考察をふまえて、  $X_j/H=2.1$  が最適噴口位置と思われる。そこで  $X_j/H=2.1$  とした場合の、  $J$  による  $h_x$  の変化を図10

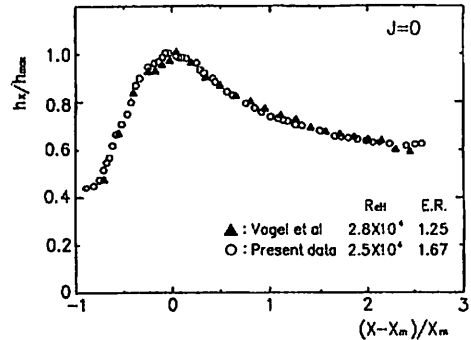


図8 噴流なしの場合の局所熱伝達率分布

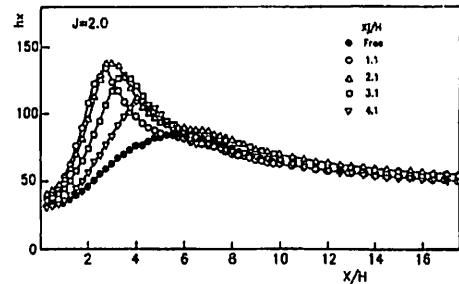


図9 局所熱伝達率分布の  $X_j/H$  による変化

に示す。Jの増大とともに $h_{max}$ は増大するが、 $J \geq 1.75$ になると増大率が減少している。これは $X_R$ が $J \geq 1.75$ であり変化しないことと対応する。またステップすぐ下流でのJによる $h_x$ の変化はあまり大きなものではなく、再付着点の上流域では基本的にはVogelらのいう層流的な流れ挙動になっていると思われる。上述の $J=2.0$ で $X_j/H$ を変化させた場合の局所熱伝達率分布を、噴流による局所熱伝達特性の増大の変化を直接的に表すため $h_x$ を噴流なしの場合の $h_{x0}$ で基準化した増加比 $h_x/h_{x0}$ の分布を図11に示す。噴流なしの場合、再付着点長さは $X_R/H=6.4$ であるので、 $X_j/H=0.1$ を除き熱伝達率の促進は再付着領域内で顕著であることがわかる。また局所増加比は2.4倍にも達する。 $X_j/H=0.1$ では明確なピークはなく増加比も小さいが、 $X/H=6.0$ より下流域での増加比は他の $X_j/H$ の場合より大きい。またこの場合の再付着点長さ $X_R$ は $X_R/H=6.0$ で噴流なしの値( $X_R/H=6.4$ )とあまり変わらない。また $C_p$ 分布も $J=0$ の場合とほぼ同じであることはすでに述べたとおりであるが、これは離せん断流が、噴流の付加によりノズル面に接近したためと推測される。

4・2 最大熱伝達率位置および最大熱伝達率 噴流位置と最大熱伝達率位置との関係をJをパラメータとして図12に示す。 $X_m$ は $X_j/H \geq 2.1$ では、Jによ

る変化はあるもののその差は大きくなく $X_j/H$ の減少とともに減少する。なお $X_j/H \geq 7.1$ では、噴流による制御効果はほとんどない。一方 $X_j/H < 2.1$ では $X_m$ は一般にJにより大きく変化し、Jが大きい場合には小さくなり、Jが小さい場合には $J=0$ とあまり変わらなくなる。とくに $X_j/H=0.1$ の場合は $X_m$ が極端に大きくなり制御位置として不適当である。これよりもJの小さい場合も含めて、 $X_j/H=2.1$ が最適な制御位置と考えられる。つぎに $X_j/H=2.1$ における最大熱伝達率 $h_{max}$ の増加比のJによる変化を噴流のない場合の最大値 $h_{max0}$ を基準として、図13に示す。Jの増大とともに $h_{max}$ は増大するが、 $J \geq 1.75$ では増大率は $1.0 \leq J \leq 1.5$ におけるより小さくなり、 $h_{max}/h_{max0} \approx 1.6$ に漸近する。ところで森ら<sup>(9)</sup>による再付着点の揺動のな

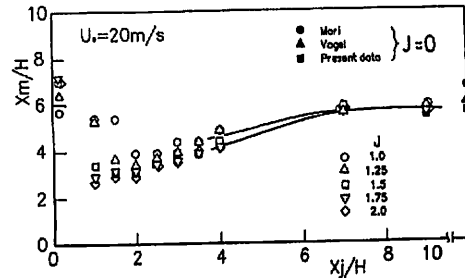


図12 最大熱伝達率の位置

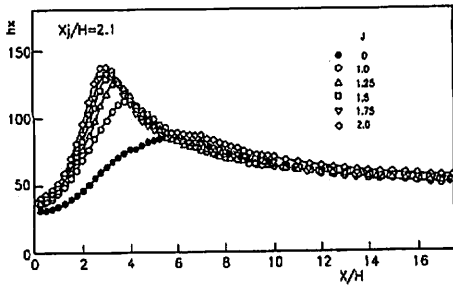


図10 局所熱伝達率分布のJによる変化

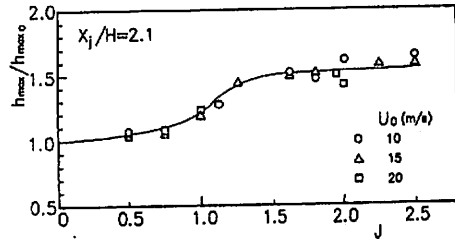


図13 Jによる最大熱伝達率の変化

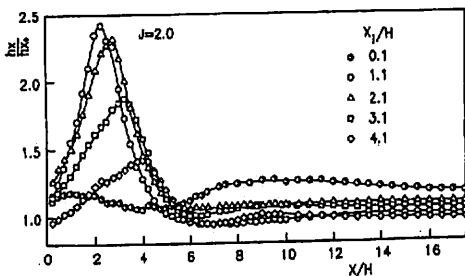


図11 J=0を基準にした局所熱伝達率分布

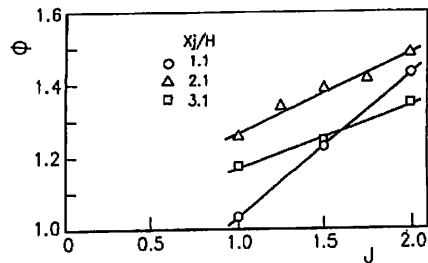


図14 区間平均熱伝達率の増加率のJによる変化

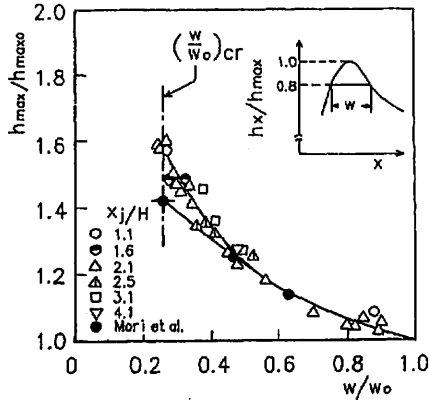


図15 最大熱伝達率と局所分布の広がり関係

い極限の瞬間的熱伝達率の増加比は、 $h_{max}/h_{max0}=1.4$  であり、本実験の結果はその値を超えている。

4.3 平均熱伝達特性 噴流のない場合の再付着領域 ( $X_R/H=0\sim 6.4$ ) を伝熱面の制御対象区間として、平均熱伝達特性を検討する。図11の  $h_x/h_{x0}$  の分布から、区間平均熱伝達率の増加率  $\phi$  を次式で求めた。

$$\phi = \frac{1}{6.4} \int_0^{6.4} \left( \frac{h_x}{h_{x0}} \right) d \left( \frac{X}{H} \right)$$

図14は3種の  $X_j/H$  に対して  $\phi$  の  $J$  による変化を示す。 $X_j/H=1.1$  の場合には、 $0 < J < 1.0$  で  $\phi$  の増加はなく、制御不感帯をもつ。これは  $0 < J \leq 1.25$  で  $X_R$  の減少がほとんど認められないことによる。

4.4 従来の研究との比較 森ら<sup>(6)</sup>は再付着点の揺動のない状態に対応する瞬間局所熱伝達率分布のピーク値  $h_{max}$  を、導流板の挿入により再付着点揺動の制御を行った場合のピーク値  $h_{max}$  と再付着点揺動の標準偏差  $\sigma$  から求めている。いま  $h_{max}$  近傍の  $h_x$  分布の広がり幅  $W$  が  $\sigma$  に比例するものと仮定し、 $W$  を  $h_x/h_{max}=0.8$  における幅として求めた。噴流のない場合の  $h_{max0}$ 、 $W_0$  で基準化した  $h_{max}/h_{max0}$  と  $W/W_0$  の関係を図15に示す。図15中に森らの結果も示す。 $1.0 > W/W_0 > 0.5$  で両者は一致する。これは  $h_{max}$  の分布形状が互いに相似であることを示し、噴流による  $X_R$  の制御が導流板における場合と同様の再付着点揺動の制御機構になっていることが示唆される。一方  $0.25 \leq W/W_0 < 0.5$  の結果は  $J$  の大きい場合に対応するが、先に述べたように循環気泡のため主流の湾曲と加速効果 ( $C_{pmax}$  の顕在化) により、導流板挿入時の  $h_x$  分布より流動特性が影響を受けるため、前述の再付着点の揺動のない場合の  $h_{max}$  より高い  $h_{max}$  が得られたものと考えられる。これに関連して、つぎのことに注目し

表2 平均熱伝達率の増加率の比較

| Inserted cylinder <sup>(4)</sup><br>$Re = 1.4 \times 10^3$ |       |       | Control Jet<br>$Re = 5.0 \times 10^4$ |       |
|--|-------|-------|---------------------------------------|-------|
| Case   | $C_1$ | 2.4%  | $J = 1.0$                             | 10.8% |
|  | $C_2$ | 9.5%  | 1.5                                   | 16.9% |
|  | $C_3$ | 10.7% | 2.0                                   | 23.6% |

たい。 $X_j/H=2.1$  の場合、 $J=2.0$  で  $h_{max}/h_{max0}=1.6$  となり、ほぼ飽和する。このことから、 $J$  の大きい場合に対応する  $W/W_0$  に限界値  $(W/W_0)_{cr}$  の存在が予想される。実験結果はこれを裏付けており、 $(W/W_0)_{cr}=0.25$  である。この限界値は再付着点の揺動のない瞬間局所分布から読取った図15中◆印の値とほぼ一致することは示唆的である。つぎに、再付着点以降も含めた  $J$  による平均熱伝達率の増大を、ステップ下流に円柱を挿入し熱伝達率の増大を図った鈴木ら<sup>(4)</sup>の結果との比較を表2に示す。平均は  $X/H=0\sim 17$  の区間で行った。本実験の結果は  $J=2.0$  で23.6%の増加率となる。制御噴流、円柱挿入による付加流動抵抗を考慮してなく、一概に比較できないが、円柱挿入の場合の10.7%より高い増加率となった。

## 5. 結 論

後ろ向きステップ流れにおいて、ノズル面から噴流を噴出させる方法(能動的制御)は、ステップ下流の伝熱特性を制御するのに有効であることを明らかにした。得られた結果はつぎのとおりである。

- (1) ノズル面に形成される循環気泡の長さと同様に再付着点長さは互いに鏡像関係にある。
- (2) 噴流を噴出させた場合、ステップ底面の圧力分布にピークが顕在化し、その  $C_{pmax}$  の位置はほぼ再付着点位置に同じであり、また熱伝達率が最大となる位置  $X_m$  とも近似的に等しい。
- (3) 制御噴流位置をステップ面近傍、また  $J=0$  の再付着点  $X_R/H=6.4$  以降に設置した場合、再付着領域内熱伝達特性に大きな影響を与えず、最適位置は  $X_j/H=2.1$  である。
- (4) わずかな運動量の噴出により、伝熱制御することが可能であり、また噴出する噴流の  $J$  にも上限が存在し、 $J \leq 2.0$  が適当である。
- (5) 制御噴流により最大熱伝達率 ( $X_j/H=2.1$ ,  $J=2.0$  の場合)  $h_{max}/h_{max0}$  が1.57まで向上する。この値は森らによるはく離せん断層の揺動のない極限の瞬間最大熱伝達率の増加比  $h_{max}/h_{max0}=1.4$  より大きい。
- (6) 噴流のない再付着位置までの平均熱伝達率の増加率  $\phi$  は  $X_j/H=2.1$ ,  $J=2.0$  の場合に50%増となる。

## 文 献

- (1) Bergles, A. E. and Webb, R. L., *Augmentation of Convective Heat Transfer*, (1971) 1, ASME.
  - (2) 鈴木, 機誌, 98-864 (1990), 908, 909.
  - (3) 片岡, 機誌, 98-864 (1990), 910, 911.
  - (4) 鈴木・ほか3名, 日本伝熱シンポジウム講演集, 1 (1990), 10-12.
  - (5) Chong, ほか3名, *Proc. The 8th Heat Transf. Conf.*, 3 (1986), 1225-1230.
  - (6) 森・ほか2名, 機誌, 52-481, B (1986), 3353-3360.
  - (7) Vogel, J. C. and Eaton, J. K., *J. Heat Transf.*, 107 (1985), 922-929.
  - (8) 熊田・ほか3名, 機誌, 54-504, B (1988), 2114-2120.
-