

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2報, 流路拡大比を変えた場合について)

親川 兼 勇*¹, 平良 哲 治*², 山里 栄 昭*¹

Studies of Heat Transfer Control by Jet Discharge at
Reattachment Region Downstream of a Backward-Facing Step
(2nd Report, for Various Expansion Ratios)

Kenyu OYAKAWA, Tetsuji TAIRA and Eisho YAMAZATO

Heat transfer downstream of a backward-facing step was controlled using a jet discharged flow from a slit in the duct wall opposite the step. The local heat transfer coefficients were measured for various jet locations, jet velocities and duct expansion ratios. The reattachment region moves upstream and the heat transfer coefficients, which are maximum, increase with jet velocity. The coefficients also increase with the expansion ratio, but to a lesser extent. With appropriate change of the downstream coordinate, the many heat coefficient profiles under various conditions may be normalized to produce a single characteristic curve. The average heat transfer over the peak in each case can be expressed as a function of its maximum.

Key Words: Forced Convection, Heat Transfer Enhancement, Heat Transfer Control, Recirculating Flow, Reattachment Region, Jet, Expansion Ratio, 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、リップおよび突起などの種々の乱流促進体が用いられ、それらの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⁽¹⁾。それらの多くは受動的な伝熱促進法を用いており、主流を変化させることにより伝熱負荷の制御をしなければならない。一定流速のもとで能動的な方法により伝熱負荷を制御することを考えることも重要と思われる。ここでは噴流を付加すること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を対象とした。後ろ向きステップ下流の伝熱特性に関しては種々の研究がある⁽²⁾⁽³⁾。特に森ら⁽²⁾は伝熱特性の時空間的微細構造の解明に関する研究において、導流板の挿入による再付着点揺動の振幅の制御を行い、振幅の減少により時間平均熱伝達率の局所値が増大することを示し、それに基づいて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を再付着点揺動の標準偏

差 σ から求めている。第1報⁽⁴⁾において、ステップ面に対向する面から噴流を主流に垂直に噴出させる(能動的制御)ことによって、噴流背面に形成される循環気泡が、導流板の場合と同様の再付着揺動の制御機構であることが示唆された。すなわち循環気泡のスケールの増大により再付着領域は上流に移動し、その揺動は小さくなり、高い時間平均熱伝達率を有することがわかった。噴流の位置および噴流と主流との速度比 J を変えることにより、再付着領域の局所最大熱伝達率の値およびそれらの位置を変化させることができた。また J を大きくすることにより森らの揺動のない場合の瞬間局所熱伝達率のピーク値より高い局所平均熱伝達率が得られることが知られた。流路拡大比 $ER=1.67$ の場合に、噴流速度比 J に上限が存在し、 $J \leq 2.0$ が適当であり、また噴流位置は $X_j/H=2.1$ が最適であった。その際の最大熱伝達率は噴流を付加していない場合の1.57倍に向上した。これは工学的にはステップ直後の熱伝達率をわずかな運動量の噴流の付加により増大できるという有利さがある。再付着点の揺動がはく離せん断層のせん断渦に大きく影響されることを考えた場合、噴流背面に形成される循環気泡がせん断層にどのような影響を与えているかを知る必要がある。そのために循環気泡とはく離せん断層の空間的位置

* 平成4年5月27日 第29回日本伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 平成5年4月7日。

¹ 正員, 琉球大学工学部 (〒903-01 沖縄県西原町千原1)。

² 学生員, 琉球大学大学院。

を、ステップ高さを一定とし、入口流路高さを変えることにより変化させた。

本報は前報の拡大比 $ER=1.67$ に新たに $ER=1.80, 2.0$ を加えた実験を行い、伝熱特性に及ぼす噴流の条件(位置 X_j/H および速度比 J)および流路拡大比の影響をみる。しかし噴流位置、噴流速度、噴口幅、拡大比等パラメータが多く、実際の応用において不便と思われる。再付着現象の同一性を考慮して、制御噴流を付加した場合の局所熱伝達率分布を局所最大熱伝達率近傍の分布の広がり幅を用いて整理することを考えた。すなわち噴流なしの場合も含めて、すべての拡大比、速度比および噴流位置に対して統一的に記述できる可能性を検討した。これらの結果より、伝熱促進量の目安となる ΔX_m の領域の平均熱伝達率がわかり、応用に供することができる。

記号

- B : 噴口幅
- C : 入口流路高さ
- C_p : 圧力係数 $= (P_x - P_0) / (\rho U_0^2 / 2)$
- ER : 流路拡大比 $= (C + H) / C$
- H : ステップ高さ
- h_x : 局所熱伝達率
- h_{max} : 局所最大熱伝達率
- h_{max0} : 噴流を付加しない場合の局所最大熱伝達率
- \bar{h} : 平均熱伝達率
- J : 噴流と主流の速度比 $= U_j / U_0$
- M : 運動量比 $= J^2 \cdot B / C$
- 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_H : ステップレイノルズ数 $= U_0 \cdot H / \nu$
- U_0 : 主流速度
- U_j : 制御噴流速度
- X : ステップ底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 : 再付着点までの長さ
- X_m : 局所熱伝達率が最大となる位置
- ΔX_m : h_{max} 近傍の分布の広がり幅
- ν : 流体の動粘性係数
- ρ : 流体の密度

2. 実験装置および実験方法

実験はステップ高さ $H=40$ mm を一定とし、循環気泡とはく離せん断層の空間位置が伝熱特性に及ぼす影響をみるために入口流路高さ C を 60, 50, 40 mm

と変化させた。主流速度 $U_0=10, 15, 20$ m/s に対して噴口位置および噴流と主流の速度比 J を変化させた。その際の噴口幅は $B=3$ mm とした。実験装置および方法は前報⁽¹⁾と同じであるので詳細は省略する。実験で用いた座標系および主要記号を図1に、実験条件を表1に示す。

3. 実験結果および考察

3-1 噴流を付加した場合の拡大比の違いによる流れの様子 本実験での流路拡大比 ER はステップ高さ H を一定とし、入口流路高さ C を変化させることで変えた。前報において熱伝達率が最も増大した噴口位置 $X_j/H=2.1$ よりスモークを噴出させた場合の循環気泡の様子を図2に示す。図2中のノズル面側の▽印は循環気泡長さ X_{JR} 、ステップ側の△印は再付着点までの長さ X_R をリングの先に自由に動くように取付けたタフトの動きにより求めた各位置である。図2

表1 実験条件

ER	C mm	U ₀ m/s	Re _H =U ₀ H/ν	J=U _j /U ₀	X _j /H
1.67	60	10	2.5~5×10 ⁴	1.0~2.0	1.1~7.1
1.8	50	15			
2.0	40	20			

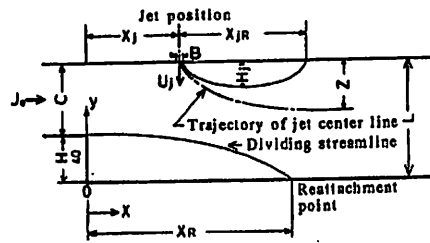


図1 座標系および主要記号

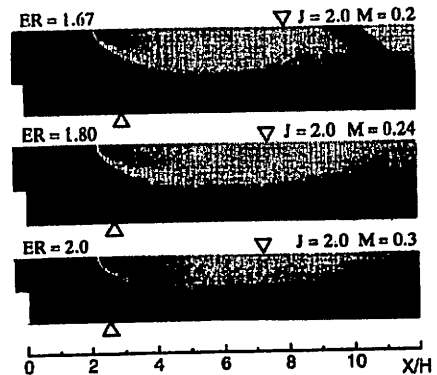


図2 拡大比 ER による循環気泡の流れの可視化

は $J(=U_j/U_0)=2.0$ の場合であるが、 C の変化により運動量比 $M=(J^2 \cdot B/C)$ は図2中にそれぞれ示されるように ER の増大につれて大きくなっている。 X_{JR} の大きさは Chongら¹⁰⁾ のダクト流熱伝達に対する衝突噴流の影響を調べた結果、すなわち循環気泡の深さ H_j/H' (H' :ダクト高さ)は運動量とともに増大し、最大 $H_j/H'=0.7$ となるということに対応して増大するものと思われる。本実験はダクト流れとは異なるが、入口流路高さ C に対する H_j の比 H_j/C は運動量とともに増大している。次に X_{JR} および X_{R} の ER による違いを J を変化させた場合について図3に示す。ある J の値で X_{JR} は急激に大きくなり、それに伴って主流が大きく湾曲し X_{R} は減少する。 $J > 1.25$ では J による X_{JR} 、特に X_{R} の変化の割合は小さい。拡大比の違いをみてみると、 X_{JR}/H の大きさは J の大きいところでは、 $ER=1.67, 1.80, 2.0$ の順となっているが、 $J=1.25$ を境として小さいところでは逆転している。循環気泡発生限界の J の値は ER が大きくなるとより小さくなる。一方 X_{R} は J によらず $ER=1.67, 1.80, 2.0$ の順となる。

3.2 拡大比と J によるステップ底面静圧分布

J および ER を変えた場合の X_{JR} と X_{R} と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4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 $C_p=(P_x-P_s)/(\rho U_0^2/2)$ の流れ方向分布

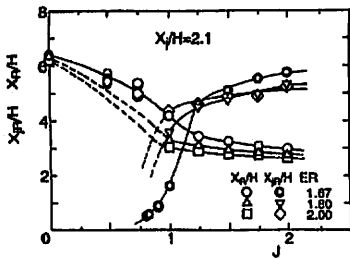


図3 ER による X_{JR} および X_{R} の変化

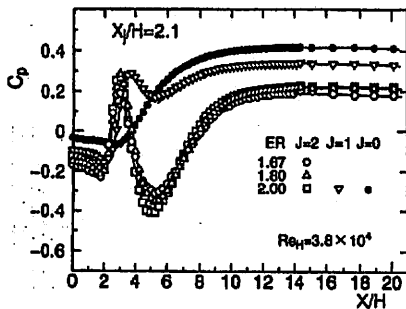


図4 ER によるステップ底面静圧分布の変化

を示す。 $X_j/H=2.1$ において $ER=2.0$ で J を、 $J=2.0$ で ER を変化させた場合である。 J が増大すると $J=0$ と異なり、分布は極大・極小をもち、極大・極小の位置が上流側に移行し、極小値が急激に減少する。またステップ背面および再循環領域内の圧力も下降する。ほぼ再付着点近傍において得られる C_{pmax} の顕在化は、循環気泡の形成による主流の加速効果によるもので、分割流線の再付着効果を強めたものと考えられる。次に J を一定として、 ER を変化させた場合について考える。 ER が減少することは、入口流路高さが大きくなることであり、はく離せん断層への運動量の供給が大きくなることにより、再循環領域内の C_p 値の絶対値が大きくなる。一方極大と極小値との差は ER とともに増大し、それらの位置も上流側に移る。極大の位置移動に比べて極小のそれが大きいのは図2の循環気泡の形成領域からもわかるように、循環気泡の外縁とステップ下流面との間隔が狭くなり湾曲した主流がより加速されるためである。なお C_{pmax} と C_{pmin} の差を $\Delta C_p = |C_{pmax} - C_{pmin}|$ とおくと

$$\Delta C_p = 0.58J - 0.64 \left(2.5 - \frac{1}{ER-1} \right)^{-0.8} \dots\dots(1)$$

で与えられる。 ΔC_p に対しては J の影響が大きく、 ER は二次的なものとなる。

3.3 局所熱伝達率分布 $J=0$ の場合の拡大比

ER の違いによる局所熱伝達率分布を図5に示す。拡大比の小さい $ER=1.67$ の場合に最大熱伝達率およびその下流の分布値は高い。これは ER が小さい場合には、主流からはく離せん断層への運動量の供給が大きくなることによる。また最大熱伝達率の位置は ER とともに若干上流側に移動する。この局所分布の $X/H=0$ から再付着点までの再循環領域における平均熱伝達率を代表長さとしてステップ高さ H をとった平均ヌセルト数 Nu のレイノルズ数による変化を図6に示す。 Nu は ER が小さいと大きくなり、次式で表される。

$$Nu = 0.104 E^{-0.85} Re_b^{0.67} \dots\dots\dots(2)$$

この $Re_b^{0.67}$ ははく離・再付着流れのレイノルズ数の依

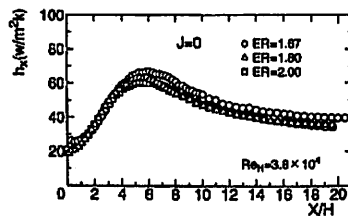


図5 噴流なし($J=0$)での局所熱伝達率分布

存性と一致し⁽⁶⁾、またこの Nu は谷口ら⁽⁷⁾の実験値とほぼ一致する。次に速度比の異なる噴流を付加した場合の流れ場の変化に伴う局所熱伝達率分布の特性の相違をみている。まず $J=2$ とし、 ER の影響を図 7 (a) に示す。図 7 (a) より局所熱伝達率は ER によらず同一な分布となっている。このことは図 5 の $J=0$ の分布と比較すると、 ER の増大とともに付加噴流の効果が大きいことを示している。 ER が大きいとせん断層への運動量の供給は小さいが、循環気泡の流路にしめる割合が大きくなり、主流が加速され再付着効果が大きくなり熱伝達率が增大したと思われる。次に $ER=2.0$ で $X_j/H=2.1$ の場合の J による変化を図 7 (b) に

示す。分布は前報の $ER=1.67$ の J による変化と同様であり、 J の増大とともに最大熱伝達率 h_{max} が増大し、かつその位置が上流側に移行する。これは ER により h_{max} の値およびその位置に多少の差異はあるものの、 J による変化の様子は基本的に ER によらず同一である。なお噴流なしの場合の再付着点近傍において、局所値が J とともに上昇し、膨らみをもった分布となる。この傾向は $ER=2.0$ の場合に顕著である。

3・4 最大熱伝達率 h_{max} およびその位置 X_m/H
 制御噴流を付加することにより、最大熱伝達率の増大およびそれらの位置がどのように変化するかを知る必要がある。 $X_j/H=2.1$ における J の変化による h_{max}/h_{max0} を各 ER に対して図 8 に示す。 J の増加とともに h_{max}/h_{max0} は増大するが、それは $J \geq 1$ より

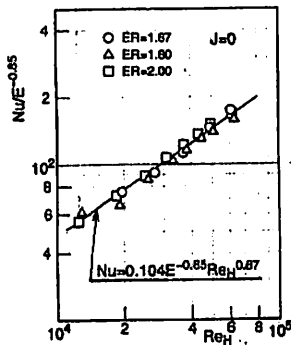


図 6 再循環領域内平均ヌセルト数 Nu の Re_H による変化

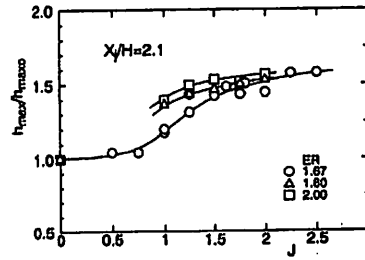
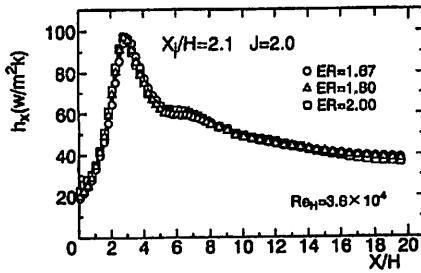


図 8 ER に対する h_{max}/h_{max0} の J による変化



(a) 拡大比 ER による変化

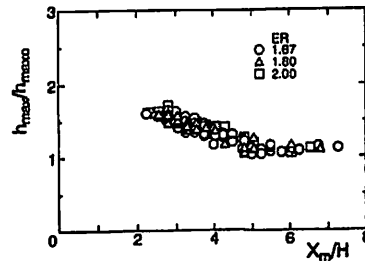
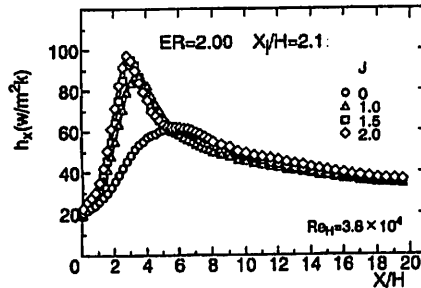


図 9 最大熱伝達率とその位置の関係



(b) J による変化

図 7 局所熱伝達率分布

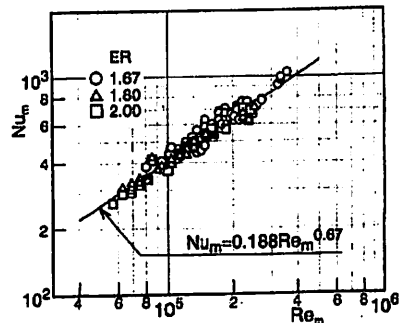


図 10 最大ヌセルト数とレイノルズ数の関係

著しい。ER が大きくなれば増大の度合いは大きくなり、より小さな J で増大するが、 $J \geq 2$ では ER によらずほぼ一定値となり $h_{max}/h_{max0} = 1.55$ が飽和値と思われる。この h_{max}/h_{max0} と最大熱伝達率の位置 X_m/H との関係、噴流条件および流路拡大比に対して示したのが図9である。測定値にばらつきはあるものの h_{max}/h_{max0} は $X_m/H < 5$ で、 X_m/H とともに減少し、 $X_m/H \geq 5$ ではほぼ $h_{max}/h_{max0} = 1$ となる。これら h_{max} と代表長さを X_m とする最大ヌセルト数 $Nu_m (= h_{max} \cdot X_m/\lambda)$ と $Re_m (= U_0 \cdot X_m/\nu)$ との関係を図10に示す。次式で関係づけられる。

$$Nu_m = 0.188 Re_m^{0.67} \dots \dots \dots (3)$$

これは噴流を付加しない場合のヌセルト数とレイノルズ数の関係とまったく同じである。このことは基本的には噴流を付加し、再付着点長さ(再循環領域)を短くさせた場合の熱伝達率特性も噴流なしの場合のステ

ップ下流のはく離・再付着による熱伝達特性と同じであることを示す。次に最大熱伝達率の得られる位置 X_m について、今 $J=2$ とし、各 ER に対して噴流位置 X_f/H を変化させた場合の X_m/H を図11に示す。噴流位置を下流にずらすことにより X_m/H も下流にずれる。その変化は ER にあまりよらないが、 X_f/H が小さい場合と大きい場合とでは変化の様子が異なる。 J による変化を $X_f/H=2.1$ の場合について図12に示す。 $1 \leq J \leq 2$ において ER が大きい場合に X_m/H の値

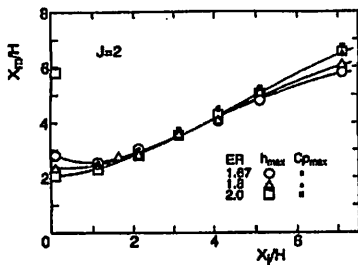


図11 X_m/H の X_f/H による変化

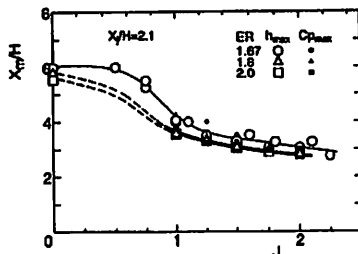


図12 X_m/H の J による変化

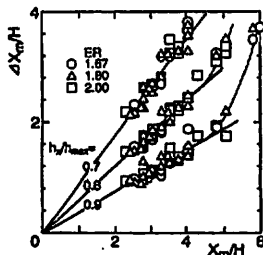
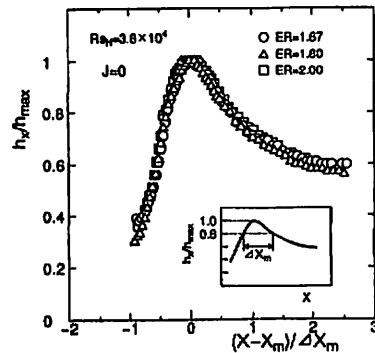
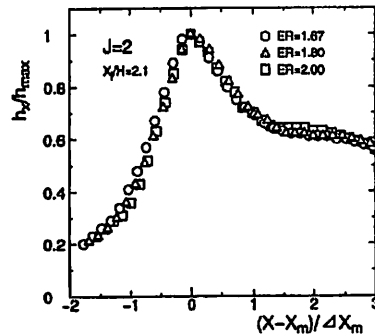


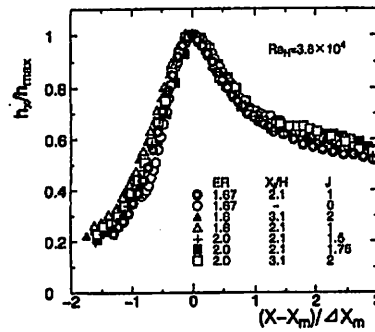
図13 X_m/H と $\Delta X_m/H$ の関係



(a) $J=0$ の場合



(b) $J=2$ の場合



(c) 種々の条件の場合

図14 広がり幅 ΔX_m による局所分布値の整理

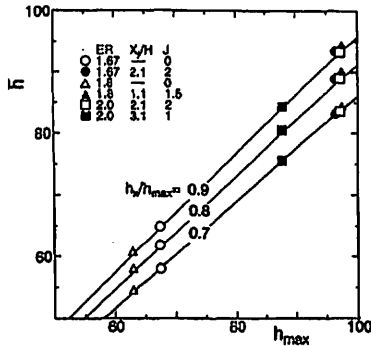


図 15 平均熱伝達率 \bar{h} と最大熱伝達率 h_{max} との関係

は上流側に移行しており、これは前述の付加噴流の効果は ER が大きいほど顕著であることと対応する。前報¹⁾において h_{max} 近傍の h_x 分布の広がり幅 W が再付着点揺動の標準偏差 σ に比例するものと仮定し、 W を $h_z/h_{max}=0.8$ における幅として求め、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 の関係より、 h_{max} の分布形状が互いに相似であることを示した。このことより、 h_{max} 近傍の広がり幅 ΔX_m を用いることにより、付加噴流の有無によらず h_{max} 近傍の局所分布が整理できる可能性を見いだしたい。その準備として、後述の図 14(a) に示される $h_z/h_{max}=0.7, 0.8, 0.9$ のおのおのの幅 $\Delta X_m/H$ と h_{max} の位置 X_m/H との関係求めたものを図 13 に示す。噴流の付加により h_{max} 位置が上流側に移動した場合には、噴流付加条件および拡大比によらず $\Delta X_m/H$ は X_m/H に比例している。なお $X_m/H \geq 5$ で $\Delta X_m/H$ は急激に増大しているが、これは噴口位置が $X_j/H \geq 5.1$ の場合のものである。 X_m/H が噴流なしに比べて小さくなる場合を制御対象と考え、制御対象区域に対しては h_x 分布は X_m とともに h_{max} がおさえられ、幅 ΔX_m が伸長された形状となる。

3.5 局所熱伝達率分布の整理 噴流の付加により、熱伝達特性を制御する場合に最大熱伝達率近傍の局所分布値はどのようになっているか、またそれらが統一的に記述できるのかを知る必要がある。 X_m を中心として、 ΔX_m で基準化した $(X - X_m)/\Delta X_m$ を横軸に、 h_z/h_{max} を縦軸に種々の条件の h_x 分布を整理し、図 14(a)~(c) に示す。ここでは ΔX_m を $h_z/h_{max}=0.8$ の幅として求めた。まず図 14(a) で $J=0$ の場合には拡大比によらず分布は一致し、また図 14(b) に示した $J=2$ で $X_j/H=2.1$ の場合も拡大比によらず分布は一致している。次に種々の条件での場合を図 14(c) に示す。 J の異なりは ER の熱伝達率分布への影響よ

り大きいために、図 14(a), (b) のようなまとまりはないが、上流域を除けばよい一致をしている。なお図 14 に示してないが $h_z/h_{max}=0.7$ の場合もほぼ同程度のまとまりを示す。

3.6 平均熱伝達率 J , X_j/H および ER によらず h_{max} 近傍の h_x 分布は相似であることを述べた。今図 13 に示される $h_z/h_{max}=0.7, 0.8, 0.9$ の h_x 分布のそれぞれの広がり幅 ΔX_m における平均熱伝達率 \bar{h} を求めてみよう。この ΔX_m における平均熱伝達率は制御対象区間での平均熱伝達率とみなしてよい。事実図 13 より知るように $h_z/h_{max}=0.7$ の場合の ΔX_m は X_m の 90% にわたり、十分な領域の広さであると同時に、噴流を付加した場合の最大の h_{max} に対する噴流なしの場合の h_{max0} の値が $h_{max0}/h_{max}=0.645$ であることを考慮すると、 $h_z/h_{max} \geq 0.7$ の ΔX_m における \bar{h} は平均熱伝達率として取扱って妥当と思われる。図 14 の h_x 分布等よりそれぞれの ΔX_m に対応する平均熱伝達率 \bar{h} を求め、実線で示すと図 15 となり

$$\bar{h} = K \cdot h_{max} \dots\dots\dots (4)$$

で表される。 K の値は $K=0.86, 0.915, 0.955$ で ΔX_m がそれぞれ $h_z/h_{max}=0.7, 0.8, 0.9$ に対応する。図 15 中の記号は一例として異なる噴流条件、拡大比について図 5, 7 などに示されている h_x 分布より求めたものであり、実線とのよい一致は h_x 分布が相似であることを改めて示している。図 11, 12 に示した X_m/H および図 8~10 より h_{max} を求めることにより平均熱伝達率 \bar{h} がわかり、実器への応用に役立つ。例えば $X_m/H=3$ となると、ステップ下流 $X_j/H=2\sim 4$ で \bar{h} は噴流なしの最大値 h_{max0} の $\bar{h}=1.42h_{max0}$ となる。なお前報でも述べたが、噴流を付加した場合の X_m は図 12 に示すように最大圧力係数 C_{pmax} とほぼ同位置で得られ、 C_{pmax} の位置よりおおむね X_m/H を知ることもできる。

4. 結 論

後ろ向きステップ流れにおいて、前報の $ER=1.67$ に新たに $ER=1.80, 2.0$ を加え、ノズル面から噴流を噴出させ、ステップ下流の伝熱特性を制御した。得られた結果は次のとおりである。

- (1) 噴流を付加すると ER が大きいほど、同一の J に対して熱伝達率の増大が図られるが、その影響は J のに比べて小さい。最適噴口位置は ER の増大により上流側にわずかに移行するが最適 J はほぼ $J=2.0$ としてよい。
- (2) J および X_j/H により再付着点長さおよび最大熱伝達率位置 X_m/H は変化するが、 h_{max} 近傍の h_x

分布の広がり幅 ΔX_m は X_m に直線的に比例する。

(3) ΔX_m で標準化した局所熱伝達率分布は, ER, J および X_m/H によらず, 上流側の一部を除き同一となる。

(4) ER, J によらず最大ヌッセルト数は, 代表長さを X_m にとると

$$Nu_m = 0.188 \cdot Re_m^{0.67}$$

で表され, 本質的にははく離・再付着流れによる熱伝達特性と同一である。

(5) ΔX_m の区間における平均熱伝達率は最大熱伝達率 h_{max} を知れば式(4)よりわかる。

文 献

- (1) Bergles, A. E., *Techniques to Augment Heat Transfer, Handbook of Heat Transfer Applications*, 2nd ed, (1985), 3, 1-3, 80, McGraw-Hill, New York.
- (2) 森・ほか2名, *機論*, 52-481, B(1986), 3353-3360.
- (3) Vogel, J. C. and Eaton, J. K., *J. Heat Transf.*, 107 (1985), 922-929.
- (4) 新川・ほか2名, *機論*, 59-588, B(1993), 543-549.
- (5) Chong, Y. K., ほか3名, *Proc. 8th Heat Transf. Conf.*, 3 (1986), 1225-1230.
- (6) 太田・西山, 第21回日本伝熱シンポジウム講演集, (1984), 112-114.
- (7) 谷口・ほか3名, 第27回日本伝熱シンポジウム講演集, 1 (1990), 4-6.