



Title	スラットを用いた後向きステップ下流の再付着領域の熱伝達促進
Author(s)	親川, 兼勇; 齊藤, 武史; 照屋, 功; 馬淵, 幾夫
Citation	日本機械学会論文集. B編 = Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B, 61(592): 194-199
Issue Date	1995-12-25
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/241
Rights	Copyright (c) 1995 日本機械学会



スラットを用いた後向きステップ下流の 再付着領域の熱伝達促進*

親川 兼 勇^{*1}, 齊藤 武 史^{*2}
照屋 功^{*1}, 馬 淵 幾 夫^{*3}

Heat Transfer Enhancement Using Slat at Reattachment Region Downstream of Backward-Facing Step

Kenyu OYAKAWA, Takeshi SAITOH,
Isao TERUYA and Ikuo MABUCHI

The effects on the local heat transfer and pressure coefficients of a slat downstream of a backward-facing step were investigated. The inclinations of the slat placed on the wall opposite the step were varied in the range of $\theta=10\sim60^\circ$ for both slat lengths of 20 mm and 30 mm, with the aim of augmenting and controlling the heat transfer characteristics. The reattachment region of the main flow shifted upstream due to the increase of the amount of circulating bubbles formed behind the slat when the inclination angle was increased, which enhanced the heat transfer in the recirculating region. These tendencies are marked with a large expansion ratio. It was also found that the performance ratio η (the ratio of averaged heat transfer with a slat to that without a slat under the condition of equivalent pumping power) is larger than unity.

Key Words: Forced Convection, Heat Transfer Enhancement, Separation, Shear Flow, Expansion Ratio, Reattachment Region, Pressure Loss, Performance Ratio

1. 結 言

はく離せん断層の壁面への再付着は高い熱伝達率が得られることより、種々の視点から研究がなされている。その中で後向きステップ流れは、はく離泡が大きく、はく離位置が明確であること、またステップ高さが流れの再付着位置など流動特性をほぼ決めるということより、再付着現象の把握が簡明となるために多くの研究がなされてきた⁽¹⁾⁽²⁾。この流動場は実器においても多くみられ、伝熱促進、特に最近では伝熱制御の観点から研究も進められている。例えば、鈴木ら⁽³⁾は流れの非定常化を伝熱制御の一手段として、ステップ下流の再循環領域の伝熱促進の可能性を検討している。また森ら⁽⁴⁾は、ステップ下流に2種の導流板を挿入し、再付着点揺動の振幅の制御を行い、揺動しない場合に相当する瞬間的伝熱特性を求め、それにより再付着点近傍の時間平均的熱伝達率分布を算出している。この導流板は再付着をより上流で行わせることに

より、揺動の振幅が小さくなることを示しており、伝熱制御が容易に行えることを示唆する。

著者らはステップ下流の再付着領域の伝熱特性の制御の観点から、ステップ面に対向する面より噴流を噴出させることにより、噴流下流に循環気泡を形成させ、それによって主流を大きく湾曲させ、再付着位置を上流に移動させた。わずかな運動量の付加により最大熱伝達率の位置およびその値が制御できた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

本研究はステップ面に対向する面に二次元のスラットを主流に対して迎え角をもたせて設置することにより、主流をステップ面に押しやるようにする。スラットの背面に上記の噴流の場合と同様の循環気泡の形成により主流を湾曲させ、上流域で再付着させようとするものである。上流域での再付着は最大熱伝達率が上流域に移行し、再循環領域内の局所値が著しく増大することを意味する⁽⁷⁾⁽⁸⁾。スラットは既報⁽⁹⁾の最速噴流の場合と同じ位置に設置し、長さおよび迎え角を変化させる。

後向きステップの流力および伝熱特性を決める主因子はステップ高さである。すなわち内部、外部流れのいずれであろうと、はく離せん断層の渦の放出・合体など大規模渦の基本的現象は同一と考えられ、流れが普遍的な性質を有すると思われる。ここではスラット

* 1994年5月20日 第31回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 1995年2月20日。

^{*1} 正員、琉球大学工学部 (〒903-01 沖縄県中頭郡西原町字千原1)。

^{*2} 学生員、琉球大学大学院。

^{*3} 正員、(自宅: 〒464 名古屋市中区月ヶ丘2-1-11)。

による熱伝達率の増大と、一方では形状抵抗による圧力損失の増大を考慮した熱的性能評価を念頭において、内部流れの場合を取扱った。同一流路形状での最適なスラットの設置を論ずるかわりに、2種類のスラット長さに対してステップ高さ H を一定とし、入口流路高さを変化させ、流路拡大比の違いによる伝熱促進の効果を知ることを目的とした。

記号

- C : 入口流路高さ
- C_p : 圧力係数 $= (P_x - P_0) / (\rho U_0^2 / 2)$
- C_{pr} : 圧力回復係数
- C_R : 圧力回復効率 $= C_{pr} / (1 - 1/ER^2)$
- 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} : 最大熱伝達率
- h_{max0} : スラットなしの場合の最大熱伝達率
- \bar{h}_x : ステップ入口から下流 X までの平均熱伝達率
- L : スラット長さ
- 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 : 入口主流速度
- X : ステップ面から下流方向への距離
- X_m : 最大熱伝達率の位置
- X_p : スラット位置
- X_{pr} : 循環気泡の長さ
- X_R : 再付着点までの長さ
- ζ : 損失係数
- ζ_{in} : 理論損失係数
- η_1 : 再循環領域内の熱伝達増加比
- η_2 : 圧力回復領域内の熱伝達増加比
- θ : スラットの角度
- λ : 流体の熱伝導率
- 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

流路は吹出し形で、ステップ高さ $H=40$ mm に対して入口流路高さ C を 60, 50 mm および 40 mm とした。対応する拡大比 ER はそれぞれ 1.67, 1.80, 2.00 となる。ステップ面に対向する面にステップよりその 2.1 倍下流に、長さ $L=20$ mm または $L=30$ mm のスラットを設置した。主流に対する角度 θ は $10 \sim 60^\circ$ の範囲で変化させた。主流速度を $U_0=10, 15, 20$ m/s と変化させたが、ステップ・レイノルズ数 $Re_H = 2.5 \times 10^4 \sim 5.1 \times 10^4$ である。なお主流乱れ強さは 0.5%、および速度境界層の厚さは $\delta=5.6$ mm であった。実験装置の概略、座標系および主要記号を図 1 に、実験条件を表 1 に示す。流れ場および熱伝達特性に関する実験方法の詳細は既報⁽⁵⁾と同じであるので省略する。

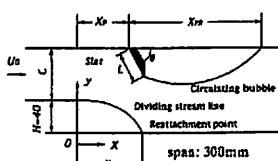
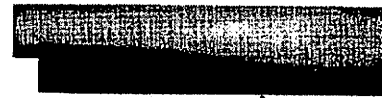


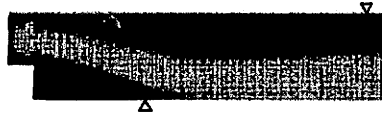
Fig. 1 Experimental apparatus, dimensions and symbols

Table 1 Conditions of experiment

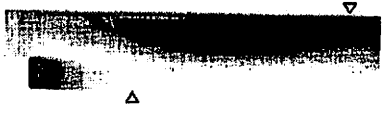
ER	1.67	1.80	2.00
C (mm)	60	50	40
U_0	10, 15, 20	m/s	
Re_H	$2.5 \sim 5.1 \times 10^4$		
θ°	10, 20, 30, 40, 45, 50, 60		
L (mm)	20, 30		



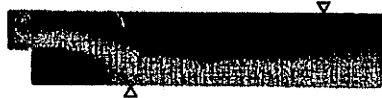
(a) $ER=1.67, \theta=0^\circ$



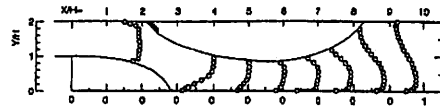
(b) $ER=1.67, \theta=45^\circ$



(c) $ER=1.80, \theta=45^\circ$



(d) $ER=2.00, \theta=45^\circ$



(e) $ER=2.00, \theta=45^\circ$

Fig. 2 Flow visualization

3. 実験結果および考察

3・1 スラットを置いた場合の拡大比の違いによる流れの様子 各拡大比に対してスラットを置き、入口流路よりドライアイスを出させた場合の主流の流脈と速度分布を図2(a)~(e)に示す。図2(a)は $ER=1.67$ のスラットなしの場合であり、主流はステップ面の対向壁に沿って流れており再循環領域が大きい。図2(b)~(d)は、スラットの背面に生成される循環気泡のために、主流が大きく湾曲し、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。それは ER が大きいほど顕著である。この主流の湾曲、それを引き起こす循環気泡の大きさは、 θ とともに大きくなり、再付着位置を上流側に移動させる。また、図2(e)には、 $ER=2.0$ のスラットありの場合のステップ入口から下流の速度分布を示している。再付着点下流で壁噴流形の分布を呈し、その後流路内流れへと移行している。なお、図2中のステップ面側の Δ 印は再付着点までの長さ X_R 、ステップ対向面側の ∇ 印は循環気泡長さ X_{DR} を示す。この X_{DR} および X_R は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が、それらとスラット角 θ の相関関係を図3に示す。 $\theta=10^\circ$ ですでに大きな気泡が形成され、それにより再付着点は上流に移動している。 X_{DR} は $\theta < 30^\circ$ で θ につれて急に増大し、その後一定値に近づく。同様に X_R も θ とともに急減し、その後わずかながら減少する。また ER が大きくなると X_{DR} 、 X_R も小さくなる傾向を示す。 $ER=1.67$ の場合には $L=30\text{ mm}$ も示してあるが、 $L=20\text{ mm}$ に比較して、より大きな θ の範囲まで X_{DR} は増加している。その反面 X_R はスラットが長くなったために主流がより大きく湾曲させられ、 θ の増大とともに減少するものの、その減少割合は小さい。これら X_{DR} 、 X_R に

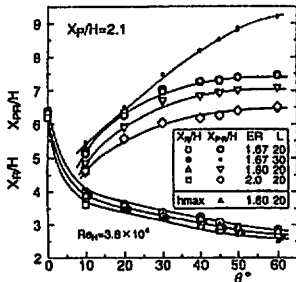


Fig. 3 Changes of length of circular bubble and recirculating region with slat angle θ

及ぼす θ の影響は著者ら⁽¹⁾⁽⁶⁾ の噴流を噴出させた場合の噴流と主流の速度比による影響と現象論的には類似しており、背面に生成される循環気泡の大きさの程度、すなわち、気泡とステップ面との距離によって、主流の再付着位置が決まると思われる。

3・2 流れ方向の壁面圧力分布および圧力回復係数

スラットによる上流での再付着は、伝熱促進の観点から利点が多いものの、同時に流動損失を伴う。図4にスラットの長さ $L=20\text{ mm}$ と 30 mm の場合のステップ面およびスラット設置面(対向面)の流れ方向の壁面圧力分布を示す。なお比較のためスラットなしの場合も $\theta=0^\circ$ として示した。まず $L=20\text{ mm}$ について、スラット側の圧力係数 C_p はステップ位置での $C_p=0$ より上昇し、スラットの上流でせき止め効果により極大となる。背面の循環気泡のため $X/H=2.5\sim 5.5$ で極小をとり、のち上昇する。 $X/H=8$ で $C_p=0$ となるが、この位置は図3で示した X_{DR} と一致し、循環気泡の時間平均的な終端と対応している。一方、ステップ面では $X/H \approx 2$ が再付着領域の渦中心とみられ、ここでは負の極大値をもつ。再付着点で極大となり、以後極小値を経て圧力回復する。両面における値はほぼ $X/H=14$ より下流で一致する。 $L=30\text{ mm}$ では、スラ

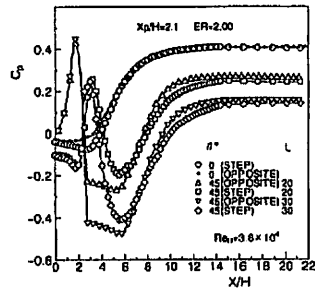


Fig. 4 Streamwise pressure distributions on walls of step and opposite step varying slat length

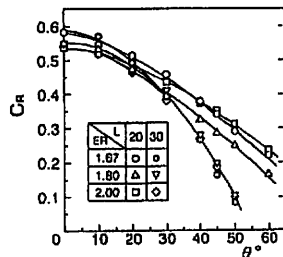


Fig. 5 Variation of recovery efficiency with θ for varying both expansion ratio and slat length

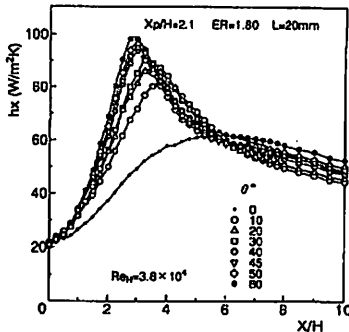
ット設置面の分布は気泡が大きいために極小値の範囲が広く、かつその値も低くなっている。また圧力回復後の C_p 値の流動損失の増大により $L=20\text{ mm}$ に比べて小さいが、流れ方向の変化の様子には両者とも差異はない。

次に各 ER に対して、流動損失の目安となる圧力回復効率 C_R が θ にどのように依存するかを図5に示す。スラットなしの $C_R=0.55\sim 0.6$ から θ の増大とともに C_R は単調に減少する。 $L=20\text{ mm}$ に比べて $L=30\text{ mm}$ の場合は減少の割合が大きい。ここで ER に注目してみると、 $L=20\text{ mm}$ に対して C_R の大きさは $\theta < 40^\circ$ では $ER=1.67$ が最も大きく、 $2.0, 1.8, \theta > 40^\circ$ では $ER=2.0, 1.67, 1.8$ の順となる。また $L=30\text{ mm}$ の場合には $\theta > 40^\circ$ で $ER=1.8, 2.0, 1.67$ の順となる。すなわち拡大比が小さい場合は流路拡大のための損失が小さく下流でも運動エネルギーが大きいために θ が小さく流動抵抗の少ないスラットを設置したほうがよく、一方 ER が大きいものは下流では運動エネルギーが小さいので、大きい θ で多少抵抗が大きいうように設置してもよいようである。このことは

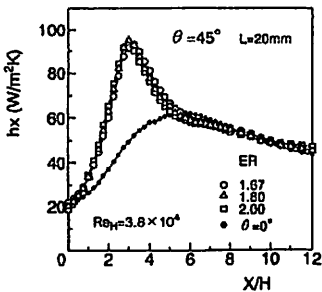
ER に対して適当なスラット角 θ 、長さ L があることを示しており、抵抗が大きくても基本的にはスラット設置に伴う損失を減じさせることが望ましいと考えられる。

3.3 局所熱伝達特性 拡大比 ER 、スラットの角度 θ および長さ L によって循環気泡の大きさ、それによる再付着領域の空間的スケールの大きさが変化する。 θ による変化の例として、 $ER=1.80, L=20\text{ mm}$ の場合について図6(a)に示す。 θ の増大に伴い、熱伝達率分布はその局所値を増大させつつ、上流側に移動する。また、 ER に対しては図6(b)にみられるように、 ER が大きいほど、最大値がわずかに上流側に位置するようにみられる。基本的には、 $L=30\text{ mm}$ も同じである。これらの最大値をスラットなしの場合の値を基準にして示すと図7となる。 θ とともに h_{max}/h_{max0} は増大する。 $L=20\text{ mm}$ では $ER=1.80$ が大きな値をとっており、これは図5の圧力回復効率が他に比べて小さい場合に対応する。この h_{max}/h_{max0} と C_R からみると $ER=2.0$ が伝熱促進効果が大きいと推測される。 $L=30\text{ mm}$ の場合も示してあるが $h_{max}/h_{max0}=1.6$ に漸近しており、この値は既報の結果⁽⁸⁾⁽⁹⁾ともほぼ同じである。

一般にはく離・再付着流れ場での最大熱伝達率 h_{max} はその得られる位置 X_m と大きく関係している。そこ



(a) Effect of θ



(b) Effect of ER

Fig. 6 Effects of θ and ER on streamwise local heat transfer coefficients

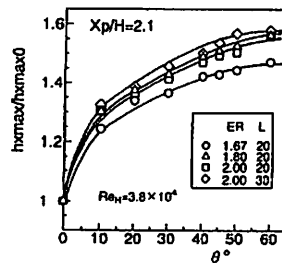


Fig. 7 Change of maximum heat transfer coefficients with θ for various flow situations

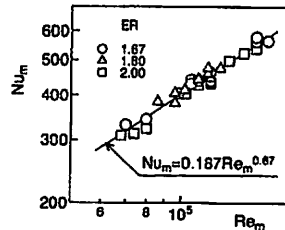


Fig. 8 Arrangement of maximum Nusselt number for various flow situations

で、 X_m を代表長さとした最大ヌセルト数 $Nu_m (= h_{max} \cdot X_m / \lambda)$ とレイノルズ数 $Re_m (= U_0 \cdot X_m / \nu)$ で整理すると、 ER 、 θ および L によらず図8に示されるように、次で関係づけられる。

$$Nu_m = 0.187 Re_m^{0.67} \dots\dots\dots (1)$$

これは内部・外部流れなど種々の流れ場における、はく離・再付着流れの最大熱伝達率を整理した太田ら⁽⁷⁾の結果ともよく一致する。

3・4 平均熱伝達率 伝熱促進の観点からステップ入口から任意の X/H までの平均熱伝達率 \bar{h}_x が θ によってどのように変化するか知る必要がある。 $ER=2.0$ を例にとり、 $L=20\text{ mm}$ および $L=30\text{ mm}$ の場合をそれぞれ図9(a)、(b)に示す。スラットなしに比べて、再循環領域で著しく高い値を示し、かつ θ とともに増大する。例えば $X/H=4$ までの \bar{h}_x はスラットなしのほぼ1.5倍以上となる。はく離・再付着熱伝達率が高い値をもつのは再付着領域であり、ステップ下流の再循環領域では壁面近傍流れは基本的には層流的で⁽⁸⁾、それゆえに低熱伝達率域となるので、この領域の伝熱的な改善が必要となる。本報では再付着点を上流に移動させることにより、この低熱伝達率域の著しい改善ができることがわかった。 \bar{h}_x は再付着点下流で極大をとり、その後 X/H の増大とともにわずかながら減少する。スラットなしの場合の再付着点までの平均ヌセルト数 $Nu_0 (= \bar{h}_{x0} \cdot H / \lambda)$ は代表長さをステップ高さ H にとると

$$Nu_0 = 0.104 \cdot Re_H^{0.67} ER^{-0.85} \dots\dots\dots (2)$$

で表される⁽⁶⁾。ここで Re_H はスラットなしの場合のレイノルズ数を示す。この値は谷口ら⁽⁹⁾の同様な実験および数値解析の結果と合致する。また圧力回復がほぼ終了したと思われる $X/H=14$ までに対しては、式(2)と同様に次で表される。

$$Nu_0 = 0.108 \cdot Re_H^{0.67} ER^{-0.85} \dots\dots\dots (3)$$

$L=30\text{ mm}$ の場合には下流域でも高い値を示してお

り、特に、 $\theta=60^\circ$ では下流方向へあまり減少しない。

3・5 熱的性能比 スラットを用いることにより上述のように平均熱伝達率の著しい増加が得られるが、同時に流動損失も増大する。流路拡大の場合の熱的な評価についてはあまり示されていないが、ここではポンプ動力および伝熱面積が一定とした場合の熱伝達率の増加比を検討する。スラットのある場合の Re_H のスラットなしの Re_{H0} の関係は、スラットある、なしの圧力損失係数を ζ および ζ_0 とすると次のようになる。

$$Re_{H0} = Re_H (\zeta / \zeta_0)^{1/3} \dots\dots\dots (4)$$

ζ / ζ_0 を求め、式(4)より対応するスラットなしの Re_{H0} に対する Nu_0 を式(2)または式(3)から求め、スラットありの Nu との比、すなわち熱伝達率増加比

$$\eta = h_x / h_{x0} = Nu / Nu_0 \dots\dots\dots (5)$$

を算出する。なおここでの熱伝達率増加比は流路形状の C を含まず、各 ER に対して単独の流路として取扱った。急拡大の場合には、入口部の運動エネルギーが下流で圧力エネルギーに変換されるために、流動の損失は次のようになる。

$$\Delta P_{loss} = \rho(U_1^2 - U_2^2) / 2 + P_1 - P_2 = \zeta \cdot \rho U_0^2 / 2 \dots\dots\dots (6)$$

ここで添字の1、2は入口および下流を示す。 P_2 を圧力回復を終えた位置での圧力とすると

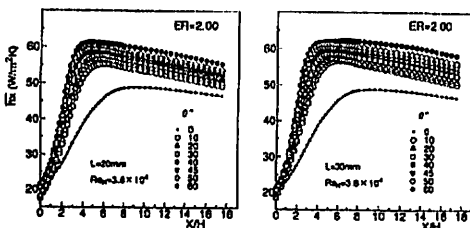
$$\zeta = (1 - 1/ER^2) - C_{DR} \dots\dots\dots (7)$$

また、急拡大部の理論圧力損失は次となる。

$$\zeta_{th} = (1 - 1/ER)^2 \dots\dots\dots (8)$$

この ζ_{th} は流路入口部の速度境界層が薄く、一様速度分布を呈している場合に実際の流れと合致する。本実験値はスラットなしで $ER=1.67, 1.8, 2.0$ のときそれぞれ $\zeta_0 / \zeta_{th} = 1.6, 1.52, 1.35$ となった。 ζ_0 に実験値ではなく理論値 ζ_{th} を使うと

$$\zeta / \zeta_{th} = [(1 - 1/ER^2) - C_{DR}] / (1 - 1/ER)^2 \dots\dots (9)$$



(a) For $L=20\text{ mm}$ (b) For $L=30\text{ mm}$
 Fig. 9 Averaged heat transfer coefficients from step entrance to X/H for varying θ

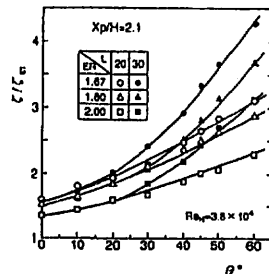


Fig. 10 Dependency of θ on ratio of pressure losses with slat to theoretical pressure losses without slat ζ / ζ_{th}

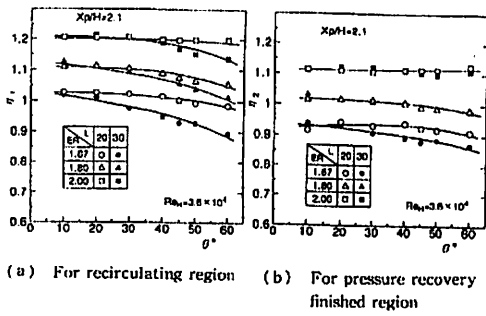


Fig. 11 Relation between thermal performance ratio and slat angle θ

となる。この値を各 ER , θ , L に対して算出した。なお ξ/ξ_{th} は各 ER , θ に関して、レイノルズ数によらずおのおの一定値となる。 ER , L をパラメータとして、 ξ/ξ_{th} の θ による変化を図 10 に示す。 ξ/ξ_{th} は θ とともに増大する。また ER が小さいほど大きくなる。これは分母の ξ_{th} が、 ER とともに大きくなることに大きく起因している。スラットによる ξ の値は ER の小さいほうが小さいが、スラットが主流に対して設置されているために ER による差は小さく、特に $ER=1.8$ と 2.0 では θ が大きい場合にほぼ等しくなるためである。この傾向は $L=20, 30$ mm のいずれの場合にもみられる。ただ θ の影響は、 $L=30$ mm の場合に θ の増大に伴って急増する。まず再付着領域内の熱伝達率増加比 η_1 は、スラットなしの再付着領域内の平均ヌッセルト数 Nu_0 を式(2)より、この領域の Nu を図 9 より算出し、 $\eta_1 = Nu/Nu_0$ を求めた。さて、実際には ξ/ξ_{th} は回復が完了した場合の値であり、再付着点下流 $X/H=14$ で成り立つ。式(3)の平均ヌッセルト数を用いて $X/H=0 \sim 14$ の範囲における熱伝達率増加比 η_2 を求めた。これらの η_1 , η_2 が θ によってどのように変わるかを ER , L をパラメータとして図 11(a), (b) に示した。なおレイノルズ数に対しては η_1 , η_2 もほぼ一定であった。まず $L=20$ mm の場合、 η_1 は θ とともにわずかに減少する傾向をもち、 ER が高いほど大きい値となる。また、 $ER=1.67$ の大きな θ を除いて $\eta_1 > 1$ であり、特に $ER=2.0$ では $\eta_1 > 1.2$ と高い。 $L=30$ mm ではいずれの ER でも θ の増大で η_1 は減少する。これは図 10 にみられるように ξ/ξ_{th} が θ の増大とともに急激に増大することによる。また η_2 は η_1 の値を小さくさせた分布をしており、 $ER=1.67$ では $\eta_2 < 1$ となっている。一方 $ER=2.0$ では $\eta_2 \geq 1.1$ であり、

$X/H=14$ の非常に広い領域にわたって熱伝達率の増進が図られていることがわかる。拡大比が大きい場合に理論圧力損失も大きいので、スラットをより最適に設置することによって、スラットによる圧力損失を小さく抑えることが可能であり、熱的性能比からも望ましいものとなろう。なお実際には ξ_{th} の値に実測値を入れたほうが ξ/ξ_{th} は小さくなり、熱伝達率増加比はより大きくなるとの結果を導けるが、拡大流路への一般的な評価を考え ξ_{th} の値を用いた。

4. 結 言

後向きステップ下流の再付着領域の熱伝達の促進および制御を目的として、ステップ面に対向する面にスラットを設置した実験を行った。得られた結果は次のとおりである。

(1) スラット背面に循環気泡が形成され、それにより主流が湾曲し、再付着点が上流に移動する。再付着点長さ X_R は θ の増大につれて小さくなり、 ER が大きいほどその効果は大きい。また最大熱伝達率は再付着点で得られる。

(2) 平均熱伝達率は再循環領域でスラットなしの 1.5 倍となり、低熱伝達率域での著しい伝熱促進が得られた。

(3) 圧力損失係数 ξ/ξ_{th} は θ とともに増大し、 ER が大きいほど小さい値となる。

(4) 再循環領域内での熱的性能比 η_1 は 1 以上となる。また ER が大きいほど大きな値となり $\eta_1 \geq 1.2$ となる。

ER が大きい場合には流路拡大に伴う損失が大きいが、適切にスラットなどを挿入し主流を沿わせることにより挿入による損失は軽減し、そのために ξ/ξ_{th} もあまり小さくならなく、伝熱促進としては効果的と思われる。

文 献

- (1) 木谷・宮越, 機論, 53-485, B(1987), 88-95.
- (2) 馬淵・ほか 2 名, 機論, 52-479, B(1986), 2619-2625.
- (3) 鈴木・ほか 3 名, 機論, 57-536, B(1991), 1410-1415.
- (4) 森・ほか 4 名, 機論, 52-481, B(1986), 3353-3361.
- (5) 親川・ほか 2 名, 機論, 59-558, B(1993), 543-549.
- (6) 親川・ほか 2 名, 機論, 60-569, B(1994), 248-254.
- (7) 太田・西山, 第 21 回日本伝熱シンポジウム論集, (1984), 112-114.
- (8) Vogel, J. C. and Eaton, J. K., *J. Heat Transf.*, 107(1985), 922-929.
- (9) 谷口・ほか 3 名, 第 27 回日本伝熱シンポジウム論集, 1(1990), 4-6.