リブ付設による二次元衝突噴流冷却の伝熱促進に関する研究

Enhancement of Two-Dimensional Impingement Jet Heat Transfer with Rib Turbulators Placed in Wall Jet Region

小田 豊*・武石 賢一郎*・杉本 慎祐**
Yutaka ODA, Kenichiro TAKEISHI and Shinsuke SUGIMOTO

(Received July 2, 2013)

The effect of rib installation on heat transfer enhancement of two-dimensional impingement jet has been studied in the wall jet region by mass transfer experiments using a naphthalene sublimation method and numerical simulations with Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) models. The effect of rib-height, rib-location, and distance between the ribs on the heat transfer enhancement was systematically examined. As a result, the rib installation was found to induce flow separation and reattachment behind the rib and to promote heat transfer in the wall jet region. The local peak Nusselt number at the reattachment point attained the highest value when the rib height was as tall as the corresponding boundary layer thickness of a no-rib case at the rib position. There is an optimal rib-height to maximize the area-averaged Nusselt number, which is determined by a trade-off between the peak Nusselt number and heat transfer area enhanced by the rib. From numerical results, it appeared that the Abe-Kondoh-Nagano (AKN) model was found to predict reattachment length best among three RANS models, which then resulted in good agreement of the local Nusselt number distributions between experiments and simulations except the stagnation and reattachment regions, where over- and under-estimation occurred.

Key Words: Impingement Jet Cooling, Heat Transfer, Turbulence Promoter, Naphthalene Sublimation Method, RANS

1. 緒言

衝突噴流冷却/加熱は、衝突噴流の淀み点近傍で得られる高い熱伝達率や物質伝達率を利用した冷却/加熱/乾燥手法である。衝突噴流の熱・物質伝達特性は噴流の速度やノズルの配置などにより容易に制御できるため、工業的な応用の歴史は古く、二次元ノズルからの空気吹き出しを用いた衝突噴流は、板ガラス製造工程における温度調節や製鉄における圧延材の水冷却、紙や塗膜の乾燥などに幅広く利用されている。また、高温ガスタービン静翼の内部冷却では複数の噴流を利用した多孔衝突噴流冷却が行われており、その冷却性能の向上は熱効率向上に直結するため、工学的に重要な課題となっている。

一般に、衝突噴流による冷却では淀み点近傍で非常に高い熱伝達率が得られるものの、淀み点から離れるに従って熱伝達率が急激に低下する欠点がある¹⁻⁵⁾。この場合、冷却対象となる噴流衝突面上で広い領域にわたって高い熱伝達率を維持するためには、短い間隔で多数の噴流孔を設置する必要があるが、これは冷却空気流量の増加につながり、好ましいとは言えない。

そこで近年、この衝突噴流冷却の欠点を補い、従来よりも広い領域で高い熱流束を実現する方法として、衝突面に乱流促進体となるリブやピンフィン、デインブルなどを取り付けて伝熱を促進する手法が研究されている⁶⁻¹³⁾。このうち、本研究で対象とする乱流促進リブについては主流を伴う基本的な内部流（円管内流れや平行平板間流れなど）に対して多くの研究^{14,15)}があり、リブから剥離したせん断層が再付着する付近で高い熱伝達率が得られることが確認されている。しかしながら、衝突噴流場に設置された乱流促進リブの伝熱促進効果を詳細に検討した研究は非常に少ない^{16,17)}。衝突噴流では衝突位置から外側に向けて壁噴流と呼ばれる特徴的な流れが形成される。噴流外縁で自由せん断流れとなる通常の噴流とは異なり、壁噴流はその一部が壁面に付着しているため、内部流に見られる壁面境界層（壁面せん断層）と自由せん断層が共存した流れ場となる。よって、衝突噴流下に形成された壁噴流領域に乱流促進リブを設置した場合には、平行平板間流れなどの内部流れに設置した場合とは異なる伝熱促進特性が得られる可能性がある。

そこで本報では、最も基本的な実験・解析系として二次

* 大阪大学大学院工学研究科 機械工学専攻 (565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering Osaka University (2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan)

** トヨタ自動車㈱ (471-8571 愛知県豊田市トヨタ町 1)

Toyota Motor Corporation (1 Toyota, Toyota, Aichi, 471-8571 Japan)

Fig. 1 Experimental setup for 2-D impingement jet.

Fig. 2 Rib placed on the target plate made of naphthalene.

元ノズルを用いた衝突噴流冷却を対象として、壁噴流が形成される衝突壁面上に乱流促進リブを設置した場合の伝熱促進効果を実験と数値解析により明らかにする。具体的には、熱・物質輸送の相似性に基づくナフタレン昇華法を用いて、局所の時間平均熱伝達率の詳細な分布を得ることにより、リブの高さや設置位置、隣接リブとの距離などのパラメータが伝熱促進に与える影響を考察する。また、渦粘性近似に基づくレイノルズ平均モデルを用いた乱流数値解析により、壁噴流領域に設置された乱流促進リブの基本的な伝熱促進機構を明らかにし、リブの最適な配置に向けた指針を得る。

2. 実験装置および測定手法

2.1 二次元ノズルによる衝突噴流冷却の実験装置

二次元スロットからの噴流とリブ付き衝突面で構成される実験装置の概略を Fig. 1 に示す。圧縮機から出た空気は、乾燥器で水分が除かれた後、浮沈式流量計と圧力計を通過し、幅 $B = 4 \text{ mm}$ 、長さ $L_z = 100 \text{ mm}$ の二次元ノズルから大気中に放出される。ノズル上部のチャンバー内にはハニカム構造体を設けて流れの旋回成分を減少させた。また、その下流には $200/\text{inch}$ のワイヤーメッシュを設置して大きな乱れを取り除いた。さらに、ベルマウス形のノズルを採用して流れを均一にし、乱れ成分を低下させた。以上のノズル構造により、幅および長さ方向に均一な速度分布を持つ二次元噴流を生成した。冷却対象面を想定した噴流衝突面の寸法は $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ であり、ノズル出口からの距離が $H = 40 \text{ mm}$ ($H/B = 10$) となる位置に固定した。この衝突面上に設置する乱流促進体としては、Fig. 2 に示すような一辺の長さ e の正方形リブを噴流淀み点からの距離が L となる位置に設置した。なお、実験に際しては $e = 0.5 \text{ mm}$ の正方形リブを壁噴流領域内の $L = 20 \text{ mm}$ ($L/B = 5$) の位置に設置した条件を基準とし、Table 1 に示す各条件で実験を

Table 1 Experimental conditions

Case	e [mm]	L [mm]	p [mm]
A0	flat surface (no rib)	—	—
A1	0.5, 0.65, 1.5, 2.0 (square rib)	20	—
A2	0.1 – 0.7 (circular rib)		
B	0.5 (square rib)	10, 40	—
C	0.5 (square rib)	20	5, 20

行った。なお、表中の Case A2 ではリブ高さ e が特に低い場合に局所熱伝達率の分布に及ぼす影響を詳細に調べるため、異なる高さのリブが容易に入手できる直径 e の円形リブを用いて 0.1 mm 刻みでリブ高さの影響を調べた。また、Case C では第一リブの先端から下流側に距離 p だけ離れた位置に第二リブを設置した。以上の全条件でノズル幅 B とノズル出口平均流速 U_{in} に基づくレイノルズ数は $Re_B = 5,000$ とした。

2.2 ナフタレン昇華法による局所熱伝達率の測定

局所熱伝達率を測定する手法にはナフタレン昇華法¹⁸⁾を用いた。ナフタレン昇華法は熱・物質伝達の相似性を利用して局所熱伝達率を測定する実験手法である。この方法では、固体ナフタレンで形成した測定面に気流を流すことでこれを昇華させ、実験前後におけるナフタレン表面の変位量 (= 昇華厚さ) に基づいて物質伝達率 h_D を算出し、それを次式により局所熱伝達率 h に変換する。

$$h = h_D \rho C_p (Sc/Pr)^{1-n} \quad (1)$$

ここで ρ は空気密度、 C_p は空気の定圧比熱、 Sc はシュミット数、 Pr はプラントル数である。式中の指数 n は乱流

Fig. 3 Computational domains for the comparison with experiments; the left domain is only for obtaining a nozzle exit profile.

場において検証された値として0.4を用いた¹⁹⁾。なお、式(1)の局所物質伝達率 h_D は、後述の方法で測定した昇華厚さ δ から次式により算出した。

$$h_D = (RT_w/p_w) \cdot (\rho_s \delta / t_e) \quad (2)$$

ここで R は気体定数、 T_w はナフタレンの表面温度、 p_w はナフタレンの飽和蒸気圧、 ρ_s は固体ナフタレンの密度、そして t_e はナフタレン面が気流に曝される時間である。

ナフタレン昇華法における測定面の壁面条件は、伝熱実験における等温壁面に相当するが、伝熱実験では不可避な測定面内の熱伝導誤差が生じない利点をもつ。その一方、ナフタレン昇華法で物質伝達率を精度良く測定するには、ナフタレン基板の表面を滑らかに仕上げる必要があり、その製作には細心の注意を要する。本実験で用いた噴流衝突面はアルミニウム製の鋳型(200 mm × 100 mm × 3 mm)を用いて、以下の手順により鋳造した。まず、純度98%以上のナフタレン合成試薬をIH加熱器で380 Kになるまで加熱し、溶融したナフタレンを330 Kに予熱した鋳型に注ぎ込む。鋳型の一部は、脱着可能な鏡面仕上げの蓋で構成されており、その鏡面部に接するナフタレン表面を局所熱伝達率の測定に用いる。次に、ナフタレンの温度が室温まで低下し、凝固したことを確認した後、ハンマーによる衝撃力を加えて蓋を一気に剥がすことで、滑らかな表面のナフタレン基板を得る。

ナフタレン面の変位量(昇華厚さ)は、レーザ変位計と自動トラバース装置を用いて測定した。このトラバース装置は測定面内のx-y方向に1 μmの位置精度を有し、本実験では0.2 ~ 0.9 mmの間隔でナフタレン基板を移動させて実験前後の表面位置を測定した。なお、レーザ変位計は±1 mmの測長範囲に存在する表面の形状を0.1 μmの精度で測定できる(Keyence LT-9030M)。

本実験では、昇華に伴う表面形状の変化が流れ場に影響することを避けるため、最大昇華厚さが100 μm以下とな

るように気流時間を1時間程度に調整した。また、ナフタレンの物性値には文献値¹⁸⁾を用いた。以下に、本研究における局所ヌセルト数の定義を示す。

$$Nu_B = h \cdot B / k \quad (3)$$

ここで k は空気の熱伝導率、 B はノズル幅である。

3. レイノルズ平均モデルによる数値解析

本研究では、壁噴流領域に設置した乱流促進リブによる伝熱促進機構に関する知見を得るため、汎用熱流体解析ソフトFLUENTを用いた乱流熱流動解析を実施した。解析手法には、レイノルズ平均されたナビエ・ストークス方程式に現れるレイノルズ応力を渦粘性近似に基づいてモデル化し、乱流場の統計量を求めるRANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) による手法を用いた。なお、実験では物質輸送を扱うが、熱・物質輸送の相似性に基づき、本解析ではナフタレンの濃度場を解く代わりに直接温度場の計算を行った。Fig. 3に、本解析の計算領域を示す。実験で使用した二次元ノズルのアスペクト比は25 (= 100/4)と十分に大きく、中央付近の各種統計量は両端の影響を受けず、奥行き方向に一樣と見なせる。よって、本解析では二次元場を対象とした。また、噴流中心での対称性を仮定し、 x が正の領域のみを解析対象とした。計算領域の寸法は、高さ方向に2 H、流れ方向に17.5 Hとした。また、計算を安定に進めるため、ノズル外側の壁面形状を直線で表現し、計算領域の上面は固体壁面とした。ただし、ノズル出口における流速分布および乱流性状を正確に模擬することは、衝突噴流場の伝熱特性を予測する上で重要であるため、予備解析としてFig. 3の左図に示す解析領域を用いてノズル内の流れ場を解き、結果として得られたノズル出口面における平均速度場、乱流エネルギー k 、及びその消散率 ϵ の分布を主解析のノズル出口境界条件として与えた。その際、実験条件である $Re_B = 5,000$ を実現するため、ノズル上部の入

口境界においては一様流速 0.5 m/s、乱れ強さ 0.5 % を与えた。

主解析の計算領域は、リブ周りにおいて十分な格子解像度を実現しつつ、全体の格子数の低減を図るために、必要な解析精度に応じて領域 (A), (B), (C) の三領域に分割し、各領域の格子点数はそれぞれ 360×200 、 100×50 、 100×80 点とした。総格子点数は 85,000 点である。なお、例として y 方向に垂直な壁面を考えると、壁垂直方向の格子幅は第一格子点の y 座標が $y^+ (= yu_\tau/\nu) < 1$ を満たすように設定した。ここで、 $u_\tau (= (\tau_w/\rho)^{1/2})$ は壁面せん断応力と密度で定義される摩擦速度、 ν は動粘性係数である。

上記の解析に使用する乱流モデルとしては、剥離・再付着流れの予測精度が高い低レイノルズ数型 $k-\epsilon$ モデルである AKN モデル²⁰⁾に加えて、Wilcox らの $k-\omega$ モデル²¹⁾、Durbin らの $v2-f$ モデル²²⁾、の計三種類の乱流モデルを適用した。また、乱流熱流束のモデル化に際しては、乱れに伴う運動量輸送と熱輸送の相似性を仮定し、乱流プラントル数に一定値 ($Pr_t = 0.85$) を与えた。運動量およびエネルギーの輸送方程式の対流項の離散化手法には、それぞれ QUICK スキーム、二次精度風上差分を適用し、その他の輸送方程式の対流項には収束性を考慮して一次精度風上差分を適用した。

境界条件としては、 $x = 0$ において対称条件を、 $x = 17.5 H$ において圧力固定の流境界条件を与えた。また、熱・物質輸送の相似性に基づき、ナフタレン層を形成した（リブ表面を除く）噴流衝突面上には等温条件 ($T_w = 330 \text{ K}$) を適用し、リブ表面を含めて他の壁面には断熱条件を課した。ノズル出口の空気温度は $T_m = 300 \text{ K}$ とした。なお、局所熱伝達率は次式により定義した。

$$q = h (T_w - T_m) \quad (4)$$

4. 結果および考察

4.1 リブ設置およびリブ高さの影響

まず始めに、乱流促進リブを設置しない平板面上 (Case A0) における二次元衝突噴流のヌセルト数分布を Fig. 4 に示す。図中の黒色の線がナフタレン昇華法による結果であり、赤色の線が RANS の AKN モデルによる結果を示している。実験結果より、ヌセルト数は淀み点近傍の衝突噴流領域で最も高い値を示し、淀み点からの距離が離れた壁噴流領域において急激に減少することが分かる。一般に、二次元自由噴流のポテンシャルコアはノズル出口から $6B$ の距離まで存在し、それより下流では噴流中心流速が距離の平方根に逆比例して減少する。一方、二次元衝突噴流では $H/B = 9$ 程度で最大の熱伝達率が得られるとされており、これは噴流中心流速の減速がそれほど小さくなく、そのうえ乱れが増加するためである²³⁾。本実験のノズル・衝突面間の距離は $H/B = 10$ であるので、同様の理由で高いヌセル

ト数を得たと考えられる。

次に AKN モデルによる解析結果に注目すると、淀み点近傍において熱伝達率が過大に予測されている点を除けば、RANS 解析によって衝突噴流伝熱のヌセルト数分布を精度良く予測できることが確認できる。淀み点における熱伝達率の過大予測は、 $k-\epsilon$ 型 2 方程式モデルなどの渦粘性型乱流モデルに共通する欠点として知られる衝突領域における乱流エネルギー k の過大評価²⁴⁾が原因と考えられる。

次に、衝突面上の $x/B = 5$ の位置にリブを設置し、リブ高さを $e = 0.5, 0.65, 1.5, 2.0 \text{ mm}$ と変化させて、正方形リブの高さが局所熱伝達率に及ぼす影響を調べた Case A1 の結果を Fig. 5 に示す。なお、リブ設置による伝熱促進効果を検討するため、Case A0 の結果も合わせて示す。図より、壁噴流領域に乱流促進リブを設置することで、リブ下流においてヌセルト数が大きく上昇することが分かる。これはリブ上面で壁噴流が剥離し、その下流で再付着したためである。このリブ下流の再付着位置におけるヌセルト数の極大値はリブ高さ $e = 0.5, 0.6 \text{ mm}$ 付近で最大値を取り、 $e = 1.5, 2.0 \text{ mm}$ では減少に転じている。また、 $e = 0.5, 0.6 \text{ mm}$ の結果を見ると再付着点で一旦上昇したヌセルト数は下流に向けて徐々に減衰し、再び平板面上の値に収束することが分かる。一方、リブの上流側ではリブ前縁付近で極端に大きなヌセルト数が得られると共に、さらに上流では逆に低下する領域が存在している。このヌセルト数の増減は、リブ上流側に生じる循環流がリブ前縁付近では壁面に向かう下降流をもたらす一方で、より上流では壁面から離れる上昇流をもたらすために、各領域で伝熱が促進または抑制されるために生じると考えられる。これらの領域はリブが高くなるほど広く分布しているが、これはリブ上流側に生じる循環領域がリブ高さの増加に伴って大きくなるためである。

次に、リブ設置による正味の伝熱促進効果を調べるため、実験で測定した局所ヌセルト数を $4 \leq x/B \leq 11$ の領域で積分して求めた領域平均ヌセルト数を Fig. 6 に示す。図からリブ高さ $e = 0.65 \text{ mm}$ と 1.5 mm の間で領域平均ヌセルト数が最大値を与えることが分かる。Fig. 5 によると $e = 0.65 \text{ mm}$ では再付着点での極大値が $e = 1.5 \text{ mm}$ よりも高い値を示す一方で、伝熱促進領域が比較的狭い領域に限定されている。他方、 $e = 1.5 \text{ mm}$ では再付着点が下流側に移動すると共に、より広い領域で伝熱促進効果が確認される。これより、再付着位置におけるヌセルト数の極大値と伝熱促進領域の広さにはトレードオフの関係があり、両者による伝熱促進効果が最適に分配されるリブ高さが $e = 0.65 \text{ mm}$ 付近に存在することが示唆される。

このリブ高さと再付着位置におけるヌセルト数の極大値の関係をより詳細に検討するには、数値解析が有効であるため、まず始めに各乱流モデルの予測精度を検討した。Fig. 7 は、単一の正方形リブを設置した代表的な条件とし

Fig. 4 Nusselt number distribution in Case A0.

 Fig. 5 Effect of rib-height on Nu_B distributions in Case A1.

て $e = 0.5$ mm の結果を示したもので、三種類の乱流モデルによる予測結果を実験値と比較している。なお、リブ設置の効果を見るために、リブ無しの条件における AKN モデルの予測結果も図中に黒の実線で示している。いずれの乱流モデルもリブ後方で生じる剥離・再付着がもたらすヌセルト数の上昇自体は予測できているものの、再付着点におけるヌセルト数の極大値を過小評価する傾向にあることが分かる。ただし、ヌセルト数の極大値を与える再付着点の位置については、AKN モデルが高い予測精度を示している。一般に衝突噴流伝熱の予測に適するとされる $v2-f$ モデルは、噴流淀み点における熱伝達率を正確に予測するものの、壁噴流領域では熱伝達率を過小評価しているほか、リブの再付着位置を実験よりもかなり後方に予測している。 $k-\omega$ モデルは淀み点の熱伝達率やリブ後方の再付着点位置を比較的良く予測しているものの、リブ下流における予測性能

 Fig. 6 Effect of rib-height on area-averaged Nu_B ($= Nu_{ave}$).

Fig. 7 Comparison among experiment and RANS models.

は AKN モデルが最も優れている。

Fig. 8 は、CASE A2 における $e = 0.3, 0.6$ mm の乱流促進リブについて、AKN モデルと実験で得た局所ヌセルト数分布を比較したものである。なお、CASE A2 の条件について数値解析では実用性の観点から円形ではなく正方形リブで解析を行った。図より、再付着点位置においてヌセルト数の極大値を過小評価する点を除き、AKN モデルはリブ高さの増減に伴う再付着点位置や伝熱促進領域の変化をうまく捉えており、実験値をよく再現していることが確認できる。なお、実験と解析でリブ形状に差異があるにも関わらず、両者の一致が見られることからリブに誘起される壁噴流の剥離・再付着現象はリブ形状に鈍感であり、リブ高さに強く依存することが示唆される。本論文では、リブの高さや位置、間隔などのパラメータが衝突噴流場の壁噴流領域における伝熱促進に及ぼす影響を検討することに主眼を置いているため、これ以降の解析では、リブによる壁噴流の剥離・再付着に対して最も優れた予測精度を示した AKN

 Fig. 8 Effect of rib-height on Nu_B distributions in Case A2.

モデルを採用した。

Fig. 9 は CASE A2 の実験および AKN モデルによる解析で得られた再付着点でのヌセルト数を、同じ位置における CASE A0 のヌセルト数で規格化した値を示している。実験結果によると、リブ高さが 0.1 mm から徐々に高くなるに従って再付着点でのヌセルト数の増加率は大きくなり、リブ高さが 0.5 mm で最大値を示したのち、徐々に減少することが分かる。Fig. 10 はリブを設置しない平板上の実験である Case A0 において、Case A1 のリブ設置位置である $x/B = 5$ における主流方向速度分布を熱線風速計により測定した結果である。図より、壁噴流の境界層外縁を示す最大流速は壁面からの距離が 0.5 mm 付近で得られており、リブ下流の再付着点が極大値を取る条件と一致している。これより、リブ上面で壁噴流に働く強いせん断力が、リブ下流端から剥離したせん断層内に強い乱れを引き起こし、再付着点での伝熱促進に寄与していると考えられる。他方、AKN モデルでは再付着点のヌセルト数が過少評価されるために、全体的に実験と比べて低い値を示している。また、リブが高くなると僅かに上昇する傾向を示すもののヌセルト数の増加率はほぼ一定値を示しており、実験とは異なる

 Fig. 9 Effect of rib-height on Nu_{rib} / Nu_{no-rib} .

 Fig. 10 Measured u profile in a wall jet on flat surface.

傾向が得られた。再付着点位置におけるヌセルト数過少評価の原因については、現時点で判断が難しいものの、式 (1) 中の指数 n を全領域で一定として与えていることが一因と考えられ、再付着点付近の熱流動現象が他の場所と著しく異なることが影響している可能性がある。また、再付着点付近では非定常性の強い熱流動場が形成されることが知られており、平均場を扱う RANS による予測の限界も理由の一つと考えられる。

Fig. 11 と Fig. 12 は、AKN モデルによる RANS 解析で得られたリブ高さ $e = 0.3, 0.5$ mm における時間平均速度分布と乱流エネルギーの分布を、リブ周辺部について示したものである。なお、 x, y 方向の座標はリブ高さで規格化し、原点をリブ下流端の底部としている。また、 u, k はともに、それぞれ 20 m/s, 20 m^2/s^2 で規格化した値を示しており、各 x/e 位置での横軸の目盛から x/e の値を引くことで値が得られる。Fig. 11 を見ると、リブ左側上方の角に向かう流れが持つ速度勾配 $\partial u / \partial y$ は、 $e = 0.3$ mm の場合に比べて $e =$

 Fig. 11 Profiles of u at $e = 0.3$ and 0.5 mm in Case A2.

 Fig. 12 Profiles of k at $e = 0.3$ and 0.5 mm in Case A2.

0.5 mm の時の方が小さい。これはリブの角に衝突する時点で、 $e = 0.5$ mm の時の方がより強いせん断作用をリブから受けることを意味しており、Fig. 12 で見られるように、剥離せん断層内における強い乱流エネルギーの発生に寄与している。流れの下流側で壁面の段差による流路拡大を伴う、

 Fig. 13 Nu_B distribution at $L = 40$ mm in Case 2.

いわゆるバックステップ流れでは、再付着点に到達する剥離せん断層内の乱れが強いほど、再付着点付近の熱伝達率が大きくなるとされており、リブの場合にもこれが原因となって、リブ高さが大きくなると再付着位置における熱伝達率のピーク位置が大きくなるとともに伝熱促進領域が広がると考えられる。

4.2 リブ位置の影響

Fig. 13 は淀み点からの距離 $L = 40$ mm にリブを設置した際の局所ヌセルト数分布について、実験結果と解析結果を示したものである (Case B)。Fig. 7 に示した $L = 20$ mm の結果と比較すると、リブ設置によって再付着点で生じるヌセルト数の極大値は、リブの位置が淀み点から離れるに従って次第に小さくなることが分かる。これは Fig. 4 から分かるように、壁噴流領域ではそもそも淀み点から離れるに従ってヌセルト数が低下することが原因であるほか、壁噴流を構成する壁面境界層が次第に発達して厚みを増し、リブの左上方の角に衝突する流れが持つ速度勾配 $\partial u / \partial y$ が大きくなるために、前述した剥離せん断層内に生じる乱れが小さくなるためと考えられる。これは、Fig. 14 に示す $L = 40$ mm と $L = 10$ mm に関する時間平均速度と乱流エネルギー分布の解析結果の比較からも確認できる。

4.3 リブ間隔の影響

Case C の実験では、淀み点から距離 $L = 20$ mm の位置にある第一リブから後流側に距離 p だけ離れた位置に第二リブを設置し、第一リブによる伝熱促進効果が減衰しつつある領域での再促進効果を確認する実験および解析を実施した。 $p = 20$ mm と $p = 5$ mm の条件についてナフタレン昇華法によって測定した局所ヌセルト数分布 (黒線) と AKN モデルによる予測結果 (赤線) を Fig. 15 と Fig. 16 にそれぞれ示す。なお、図中に示した青線のデータは、淀み点からの距離 $L = 20$ mm に設置した単一リブに関する AKN モ

 Fig. 14 Profiles of u and k at $L = 10$ and 40 mm in Case 2.

デルの予測結果を比較のために示したものである。

$p = 20$ mm の位置に第 2 のリブを設置した場合、Fig. 15 から明らかなように、第一リブで剥離・再付着した流れは第二リブで再び剥離・再付着し、第二リブが無い場合のヌセルト数に比べて、第二リブ後方の領域で熱伝達が促進されることが分かる。第二リブ設置の効果を定量的に評価するため、影響領域である $5.5 < x/B < 15$ の範囲で領域平均したヌセルト数を算出したところ、第一リブのみの場合と比較して 4.2 % の向上が認められた。また、 $p = 5$ mm の場合には第一リブで剥離した流れが第二リブとの間で再付着することではなく、剥離せん断層内の乱れを保持した状態で第二リブへと流れ、最終的に第二リブから剥離した流れが第二リブ後方に再付着して伝熱を促進していることが分かる。なお、 $p = 20$ mm と同様に領域平均したヌセルト数を算出したところ、第二リブ設置による増加は 3.1 % に留まることが分かった。このように、第一リブで生じた剥離流が再付着できない程度まで近接したリブ配置では、伝熱促進の効果が小さいことが分かる。衝突面に二個のリブが設置されるケースでは、第一リブで剥離した流れが第二リブに影響するため、より複雑な乱流熱流動場になることが予想されるが、本研究で用いた AKN モデルはリブ間隔に関わりなく、第一リブおよび第二リブの後方において局所ヌセルト数の極大値を与える再付着点の位置を正しく予測しており、リブ位置の最適化を考える上では十分な予測精度を有していると考ええる。

5. 結言

本研究では、二次元衝突噴流の冷却対象面上に乱流促進

 Fig. 15 Effect of second rib installation at $p = 20$ mm.

 Fig. 16 Effect of second rib installation at $p = 5$ mm.

リブを設置し、壁噴流の剥離・再付着を促すことで壁噴流領域の伝熱を促進する方法について検討を行った。具体的には、ナフタレン昇華法による詳細な局所熱伝達率の測定実験とレイノルズ平均乱流モデルに基づく熱流動解析により、設置するリブの高さ、位置、および間隔が壁噴流領域の熱伝達に及ぼす影響を検討した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 二次元衝突噴流の壁噴流領域にリブを設置することは伝熱促進において有効な方法であり、単一の噴流より広い領域の冷却が可能となるため、冷却空気量の低減が期待できる。
- 2) リブ後流の再付着点におけるヌセルト数の極大値は、その位置におけるリブ無し流れの境界層厚さとリブ高さが同程度である場合に最大値を示す。
- 3) リブによる伝熱促進領域はリブ高さが高いほど広くなるため、ヌセルト数の極大値との間にはトレードオフの関係があり、領域平均ヌセルト数を最大にする最適ナリブ

高さが存在する。

- 4) 第一リブ下流に第二リブを設置して伝熱促進を行う場合、第二リブの位置は第一リブが剥離・再付着を行うに十分な距離を取って設置することが有効である。

参考文献

- 1) H. Martin: Advances in Heat Transfer, **13** (1977) 1-60.
- 2) K. Jambunathan, E. Lai, M.A. Moss and B.L. Button: Int. J. Heat and Fluid Flow, **13** (1992) 106-115.
- 3) N. Zuckerman and N. Lior: Advances in Heat Transfer, **39** (2006) 565-631.
- 4) R. Gordon and J.C. Akfirat: Int. J. Heat and Mass Transfer, **8** (1965) 1261-1272.
- 5) 熊田雅弥、仲戸川哲人、平田賢：日本機械学会誌, **76** (1973) 822-830.
- 6) C. Gau and C.C. Lee: Int. J. Heat and Mass Transfer, **35** (1992) 3009-3020.
- 7) C. Haiping, Z. Dalin and H. Taiping: ASME Paper 97-GT-331, (1997).
- 8) W.M. Chakroun, S.F. Al-Fahed and A.A. Abdel-Rehman: ASME Paper 97-GT-436, (1997).
- 9) G.S. Azad, Y. Huang and J.C. Han: J. Thermophysics and Heat transfer, **14** (2000) 186-193.
- 10) M.O. Annerfeldt, J.L. Persson and T. Torisson: AMSE 2001- GT-0149, (2001).
- 11) S.V. Ekkad and D. Kontrovitz: Int. J. Heat and Fluid Flow, **23** (2002) 22-28.
- 12) C. Son et al.: ASME Paper 2005-68504, (2005).
- 13) K. Kanokjaruvijit and R.F. Martinez-Botas: ASME Paper GT2005-68823, (2005).
- 14) J.C. Han: Trans. ASME J. Heat Transfer, **110** (1988) 321-328.
- 15) S.V. Ekkad and J.C. Han: Int. J. Heat Mass Transfer, **40** (1997) 2525-2537.
- 16) M. Kubo, K. Takeishi, R. Ito and Y. Oda: Proc. of the Asian Congress on Gas Turbines, Seoul, ACGT2005-087, (2005).
- 17) S. Sugimoto, K. Takeishi, Y. Oda, and T. Harada: Proc. 9th International Gas Turbine Congress (IGTC2007), Tokyo, TS-116, (2007).
- 18) R.J. Goldstein and H.H. Cho: Experimental Thermal and Fluid Science, **10** (1995) 416-434.
- 19) 日本機械学会編：“伝熱ハンドブック”、(1993) 155-157.
- 20) K. Abe, T. Kondoh and Y. Nagano: Int. J. Heat Mass Transfer, **37** (1994) 139-151.
- 21) D.C. Wilcox: Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Inc., La Canada, California (1998).
- 22) P.A. Durbin: AIAA Journal, **33** (1995) 659-664.
- 23) 社河内敏彦：“噴流工学”、森北出版、(2004) 98-100.
- 24) M. Behnia, S. Parneix and P.A. Durbin: Int. J. Heat and Mass Transfer, **41** (1998) 1845-1855.