壁面噴流による平板上の熱伝達制御*

島田了八^{*1}, 橋本 剛^{*2}, 足立岳志^{*1}
小菅健男^{*3}, 熊谷 哲^{*4}

Control of Heat Transfer on Wall with Wall Jet

Ryohachi SHIMADA, Tsuyoshi HASHIMOTO, Takeshi ADACHI,
Takeo KOSUGE and Satoshi KUMAGAI

An experiment of heat transfer on a wall in a laminar flow was performed by using a wall jet. The wall jet was generated by a flow control plate which was inserted into the wall. The heat transfer coefficients were measured by Mach Zehnder interferometer. The flow pattern and velocity were measured by a smoke wire method and laser doppler velocimeter, respectively. The height of plates (h) was varied from 2 to 8 mm. The spaces between wall and plate (c) were varied from 0 to 7.6 mm. The inclined angles of plate (θ) were varied from 60 deg to -60 deg at the constant front projected height. The following results were obtained. The large plate height gave a large local heat transfer coefficient. The local heat transfer coefficients were enhanced about 7-fold of without plate at $h=8$ mm, $\theta=30$ deg, and $c/(c+h)=0.15$. The optimum inclined angle of control plate for maximum local heat transfer was 30 deg, and the optimum wall jet generator angle for heat quality was -30 or -45 deg.

Key Words: Convective Heat Transfer, Forced Convection, Wall Jet, Heat Transfer Control, Enhancement of Heat Transfer

1. 緒 言

空冷の機器などで、負荷の一時的、部分的な増大のため局所的熱除去の必要となることがある。著者らはさきに回転円柱や回転円板に伝熱面との間に隙間を設けた凸起をつけて熱伝達の促進をはかった⁽¹⁾⁽²⁾。この実験で局所的な熱伝達率分布を見ると凸起により剥離した流れが再付着する位置以外でも凸起の直下の熱伝達が縮流により良くなる事がみられた。ところで、平板上の流れが比較的低速な層流状態の流れ場の場合、流れの再付着位置はかなり後方となり流路方向に長い伝熱面でないと熱伝達の良いところを利用できない。短い流路で流れのある事を利用し他の動力を用いずに一時的熱負荷の増大の予想される局所で冷却を行う

ため、壁面噴流を発生させそれを用いる事が一つの手段になると考えられる。さらに、流れ方向に長い流路では流動抵抗の増大は大きな問題となるが短い流路では抵抗の増大を問題にするよりも熱伝達性能の向上の方がより重要になる場合もあり得る。高野ら⁽³⁾は、乱流状態の流れ場において、伝熱面との間に隙間のある乱れ促進体を用いて熱伝達促進の研究を行っているが、局所的熱伝達率の向上は認められるものの平均ヌセルト数は隙間の無い場合と同じであると報告している。また、藤田ら⁽⁴⁾は伝熱面上に直接接触させないで小さな隙間を設けて2次元障害物を流れの中に設置した場合に障害物を直接接触させた場合より熱伝達率がかかなり増大する事を報告している。しかしいずれの場合も乱流での研究であり層流状態のような低速の流れでは行われていない。本実験では、層流平板上に伝熱面と隙間を設けた流れ制御板を近付け、壁面噴流を発生させ、局所熱伝達の促進と制御を目的とし、制御板近傍の流れをスモークワイヤ法により、熱伝達率をマッハツェンダー干渉計を用いて流れ場と温度場の

* 1994年9月21日 東北支部石巻地方講演会において講演、原稿受付 1995年1月26日。

^{*1} 正員、石巻専修大学理工学部(〒986 80 石巻市南境新水)。

^{*2} 山形日本電気(〒990 山形市北町4-12-12)。

^{*3} 三菱重工業(株)(〒455 名古屋市港区大江町10)。

^{*4} 正員、東北大学工学部(〒980 77 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

可視化をしながら測定した。

記号

- U_{∞} : 主流速度
 X : 平板前縁からの距離
 h : 制御板の前面投影高さ
 c : 制御板と平板の間のすきま
 p : 制御板間のピッチ
 Nux : 局所ヌセルト数
 θ : 傾斜角
 Rex : X を代表寸法とした平板のレイノルズ数
 Reh : 制御板高さ h を代表寸法としたレイノルズ数
 Nus : 制御板のない場合の平板の局所ヌセルト数
 Nux_{max} : 局所最大ヌセルト数

2. 実験装置および方法

実験に用いた装置の概略と座標を図1に示す。風洞は吹き出し形で吹き出し口を100x100mmに絞って断面が150x150mm長さ800mmの測定部に導いてある。主流の乱れ度は0.5%以内で吹き出し幅の90%で一様流速である。熱伝達率はマッハツェンダー干渉計を用いて測定し干渉縞の解析はW. Haufら⁽⁵⁾の方法によった。干渉縞の一例を図2(a)に示す。平板上の境界層内速度分布はBrasiusの解と $\pm 2\%$ 以内で一致しており層流境界層になっている事を確認した。また、熱伝達率も $Nux = 0.458 Rex^{1/2} Pr^{1/3}$ ($0.5 < Pr$) の等熱流束層流熱伝達の式に Rex が $10^3 \sim 10^4$ の範囲では $\pm 1\%$ 以内で一致している事を確認した。制御板を入れた場合の熱伝達率の誤差は速度変動分を考慮しても $\pm 5\%$ 以下である。供試平板は幅100mm、長さ700mm、厚さ10mmで先端は 23° のナイフエッジになっている。平板は風洞吹き出し口中心より20mm下方にほぼ水平に設置されている。平板には厚さ $10\mu m$ のニクロム箔が張り付けられておりこれを加熱する事で等熱流束の伝熱面とした。伝熱面との間にすきまを設けるために挿入した流れ制御板は、厚さ0.3mm長さ140mmの真鍮板にシリコンコーティングしたものを吹き出し口の幅よりも外側に設けた支持棒で釣り下げられている。制御板の高さは、2~8mmで、ブロックエッジの影響も考慮している。また、すきまは0~7.6mmの間変化させた。制御板の傾きは-60度から60度で前面投影面積が一定になるようにして7通り変化させた。流れの速度分布はスモークワイヤー法により求めた。平板近傍の流れには逆流が生じたりするため、 $50\mu m$ の太さのニクロム線の流れ方向に16mm間隔

Fig.1 Schematic of apparatus and coordinates

Fig.2 (a) An interference fringe and (b) a composite photograph of flow pattern by smoke-wire method

に5本挿入し、順次発煙させ100Hzのストロボ光により写真撮影した。図2(b)にそれらの合成写真の一例を示す。また、制御板直下の隙間の速度は、レーザードップラ流速計で計測した。

3. 結果および考察

3.1 制御板高さの影響 図3は、 $X=5 \times 10^{-2} m$ に制御板の流れに直角 ($\theta = 0deg$) に挿入したときの局所ヌセルト数分布を示してある。それぞれの制御板の高さにおいて平板と制御板の隙間を変化させてある。 $X=7 \times 10^{-2} m$ よりも後方の干渉縞は、ビデオでの観察によると時間的空間的に変動している。制御板の高さ h が高いほど最大ヌセルト数は大きくなっており、隙間が広いほど熱伝達の良い範囲も広がっている。また、最大値をとる前縁からの距離 X の位置は隙間 c が大きく

なるほど後方へ移動している。ただし、ほとんどの制御板高さで板の近傍のみの熱伝達が良く、少し離れた前方後方ともに熱伝達は制御板のない場合よりも低下している。図4に $h=8\text{mm}$ で隙間を変えたときの流れの

Fig.3 Distributions of local Nusselt number

様相を示す。図4の実線の矢印は速度ベクトルを示し、二点鎖線はスモークワイヤ法により速度を測定する事が出来なかった部分の流れの方向のみを示している。破線は流れの領域を示している。左には制御板のない場合の層流境界層内の速度分布も示してある。平板上の流れは、挿入された制御板により上下に分けられ、下に向かった流れは制御板と平板の隙間を流れるもの

Fig.4 Flow pattern and vector of velocity

と平板に沿って逆流する流れとにさらに分かれる。この逆流する流れはゆっくりとした流れである。図2(a)で制御板前方の干渉縞の間隔が広がっていることからわかるが、暖められた空気の一部が停滞し熱伝達を低下させている。隙間を通過した流れは、比較的速く($c=1.6\text{mm}$ で 0.6m/s)いったん平板上に沿って流れその後平板上の大きな逆流とぶつかり平板上から剥離する。この比較的是やい流れ(壁面噴流)が発生しているところで熱伝達が最も良くなっており、剥離する位置では熱伝達は低下している。制御板の上部で剥離した流れは、渦を形成しこの渦は流れに乗って後方へ移動していく。ヌセルト数分布と流れの様相は比較的よく一致している。図5に局所熱伝達率の最大値の増加割合を示す。すきま近傍の最大値を制御板の無い場合と比較したものである。制御板の無い平板上の熱伝達率を1とする。また、 $c/(c+h)=0$ は制御板と平板の間に隙間がない場合を、 $c/(c+h)=1$ は平板上に制御板がない場合を示している。各制御板高さで隙間が1.8mm近傍で最も熱伝達率が増加する。これは図4の制御

Fig.5 Increase in maximum local Nusselt number versus ratio of space

Fig.6 Increase in maximum local Nusselt number versus Reynolds number (Reh)

板直下の速度が $c=1.6\text{mm}$ で最も速くなっていることから推測できる。 $h=8\text{mm}$ の場合局所的に4倍の熱伝達率が得られており、板の高さが高いほど熱伝達率は大きくなる。また、 $h=8\text{mm}$ などでは $c=0.4\text{mm}$ とかなり小さな隙間でも熱伝達率の向上が得られる。図6に制御板高さを代表寸法としたレイノルズ数と最大ヌセルト数の増加割合の関係を示す。この図で同一の隙間の傾きが $Reh=180\sim 200$ で変化している。この部分は制御板高さでは3~4mmの間となり、制御板が挿入されていない場合の $X=5\times 10^{-2}\text{m}$ での速度境界層厚さが4.3mmであることを考慮すると、制御板の高さが境界層よりも高く主流に飛び出ると主流の空気を壁面噴流に導入する量が増え熱伝達が良くなると考えられる。

3.2 傾斜角の影響 傾斜角の影響について前面投影面積が同じになるように投影高さ h を8mmに固定して各傾斜ごとに隙間を変化させた実験を行った。また、制御板を挿入した位置が $X=50\text{mm}$ でも 90mm でも、制御板を挿入しない状態では平板上が層流になっており、 $\theta=90^\circ$ の場合のみではあるが、局所熱伝達増加割合分布はほぼ同じとなっていることを確認している。ただし、一致するのは制御板近傍のみで、熱伝達率の値は異なる。そこで、 $X=90\text{mm}$ 近傍に制御板を挿入したときの局所熱伝達増加割合を図7に示す。ここで図中の制御板の位置は各傾斜角において最も平板に近い位置を示し、制御板を挿入しない状態の熱伝達率割合を1とした。

いずれの傾斜角でも制御板を挿入した近傍で熱伝達増加割合の最大値をとっているが、最大値は制御板と平板との隙間 c が広くなるにしたがって流れの後方に移動している。最大値の値は隙間 c が1.3mmから1.8mmにかけて大きく、隙間 c が大きくなるにつれて値も小さくなり山もなだらかとなる。これは壁面噴流は隙間が大きくなるにしたがい後方まで壁面に沿って流れることに起因していると考えられる。

制御板を挿入した近傍での局所ヌセルト数の最大値と隙間比の関係を図8に示す。 $c/(c+h)=0.15$ 付近で最大値を取り、 $c/(c+h)$ が0.25より大きくなると θ が正と負の場合ではその減少する割合が異なり、負の場合の方が隙間が大きくなっても減少する割合は小さい。これは傾斜角が負の場合には流れを吸い込むような形となり隙間が広がっても大量の空気を壁面近傍に吸い寄せられるためと考えられる。

制御板直下で平板表面より0.5mm上方の位置での制御板を挿入しない場合を基準として比較した速度比を図9に示す。傾き角が負の方が流れを吸い込むように

Fig.7 Distributions of increase in local Nusselt number

Fig.8 Increase in maximum local Nusselt number versus ratio of space

なり壁面噴流の流速も速くなっている。また、各傾斜角で隙間が狭いほど速度比が大きくなっている。この速度比と熱伝達比の最大値を示す隙間はほぼ同じとみられるが、 $\theta = -60^\circ$ では $c/(c+h) = 0.16$ で速度比は約6.5倍、熱伝達比は約3.5倍、 $\theta = 30^\circ$ ではそれぞれ約3倍と約7倍というように速度比が大きいからといって熱伝達比が大きいとは限らない。流れの様相や干渉縞より考察してみると $\theta = -60^\circ$ では制御板前方で暖められた空気を多量に吸い込む形となりそのため流速が速い割には熱伝達が良くならない。また、 $\theta = 30^\circ$ では制御板前方にできた温度境界層がはぎ取られる形となるために熱伝達が良くなると考えられる。

熱伝達増加割合の値は大きい狭い範囲があるいは

Fig.9 Increase in velocity under the control plate

Fig.10 Increase in heat quantity

値はあまり大きくないが比較的広い範囲かを比較するため熱量がどれだけ増加したかを図10に示す。この図は制御板のない場合を1とした局所の熱伝達増加割合を示した図7の $Nux/Nus=1$ 以上の面積の大きさを比較したものである。傾斜角 $\theta = -30\text{deg}$ を除いて、 $c/(c+h)$ が0.15から0.2にかけて伝熱量が増加しているが、こ

れは面積は狭いが熱伝達率が高いためである。また、0.4から0.5にかけて再び増加しているのは、熱伝達率はそれほど高くないが広い面積で熱伝達率が向上しているためである。

4. 結 言

層流境界層の発達している平板上に壁面噴流をつくるような制御板を挿入した実験 ($h=2\sim 8\text{mm}$, $c=0\sim 7.6\text{mm}$, $\theta=-60\text{deg}\sim 60\text{deg}$) を行い以下の事がわかった。

1. 壁面噴流を用いる事により、 $h=8\text{mm}$, $\theta=30\text{deg}$, $c/(c+h)=0.15$ で局所的に7倍以上の熱伝達率の増加を得る事が出来る。
2. 熱伝達比と流速比や流れの様相は定性的には相関関係があるが定量的には一致しない。
3. 制御板の高さは本実験の範囲では高いほど局所の熱伝達率の最大値は大きくなる。また、傾斜角 $\theta = 30\text{deg}$ で熱伝達率の最大値が得られる。

文 献

- (1) 島田了八・熊谷哲・武山斌郎, スリット付き乱流プロモータによる回転円柱の伝熱促進, 機論, 52-474, B (1986), 636-643
- (2) 島田了八・内藤昭二・熊谷哲・武山斌郎, タービュレンスプロモータによる回転円板の伝熱促進, 機論, 53-487, B (1987), 984-990
- (3) 高野清・棚沢一郎・西尾茂文, 伝熱面との間に間げきのある乱れ促進体による強制対流熱伝達の促進に関する研究, 機論, 53-487, B (1987), 980-983
- (4) 藤田秀臣・高浜平七郎・浴寿美, 壁面近傍におかれた二次元円柱が平板強制対流熱伝達におよぼす影響, 機論, 47-414, B (1982), 317-325
- (5) Hauf, W. and Grigull, U., *Optical methods in Heat Transfer*, Adv. Heat Transfer, 6 (1970), 133-366