スリットからの吸込みが強制対流熱伝達に及ぼす影響に関する研究[†]

小森勝夫・稲垣照美

豊田工業高等専門学校 機械工学科^{††}

熱伝達特性に及ぼすスリットからの吸込み効果を明らかにするため、水平平板上に形成された層流境界層内にスリットを設け、主流を吸込む実験を行った。作動流体は空気で、幅160mm、長さ3mmのスリットは平板先端から100mmの位置に主流と直角に配置した実験はレイノルズ数 $Re = 2.0 \times 10^4 \sim 7.0 \times 10^5$ 、吸込み比 $F = 0.01 \sim 0.2$ の範囲で行われた。

その結果、局所熱伝達率はスリット付近で著しく増加し、流れの停滞領域で減少したのち、次第に層流の値に漸近する。吸込みは乱流への遷移を遅らせる効果をもたらす、平均熱伝達率は流れよりもいくぶん早く乱流へ遷移する。境界層内速度は吸込みの影響を強く受け、特にスリット直後の速度は増速が著しく、また乱流への遷移はせん断層外縁から内層領域へ向けて進行する。

緒言

主流の状態を変えないで直接境界層の性質を制御する方法として有効、かつ実用的に広く用いられているものに吹出しおよび吸込み法があり、Schlichting¹⁰⁾、平山ら²⁾がその概要を解説している。吸込みによる方法は境界層の乱流遷移を遅らせて層流域を拡大し、摩擦抗力の増加を防ぐ、あるいははく離を防止することを目的としており、航空機はじめ流体機械や流体機器などの性能向上に適用されてきた。しかし、従来の研究は多くの場合、多孔質平板からの一様吸込み、翼全面からの吸込みが対象とされてきた^{6,9)}。

一方、スリットからの局所吸込みに関しては、圧力が急上昇する位置にスリットを設置すれば、スリット位置までは層流境界層が維持され、その後方でははく離も防止することが可能であること、乱流境界層に対しては、吸込みにより壁面摩擦のわずかな増大を覚悟してはく離の防止をねらうことを目的とした研究がなされてきた。

特に、局所吸込みによる乱流境界層の制御効果と乱流構造については佐野ら^{7,8)}の報告がある。この研究は発達した乱流境界層がスリットからの吸込みによって、非平衡状態となり、以後どのような過程を経て平衡状態に回復していくかを流動特性の測定から明らかにしている。

また、Kinneyら³⁾、Merkineら⁵⁾は円管内の発達した乱流の吸込み効果を、van Driestの減衰係数を導入した混

合長モデルを適用して解析的に明らかにしている。Broshら¹⁾は多孔質管内の発達乱流において、吸込み長さを可変する実験を行い、混合長モデル適用の再検討を促す報告をしている。しかし、これらの研究で熱伝達特性に言及しているのはKinneyらだけである。

そこで、本研究では外部流れを対象とし、水平平板上に形成された層流境界層内にスリットを設置し、壁面からの局所吸込みによってスリット後方の平均流特性および熱伝達特性に与える影響について実験的に明らかにしたので報告する。

1. 実験装置および方法

Fig.1に本実験で使用した装置の概略を示す。この装置は、既報⁴⁾で著者らがスリットからの局所吹出しにより熱伝達促進を図る実験に使用したもので、吸込み用に一部改良した以外は同一であり、詳細は省略する。吸込みスリットは平板先端から100mmの位置に流れと直角に設置し、寸法は幅160mm、長さ3mmである。所要の吸込み流は、吸込み速度の均一化を図るために、フィルタを備えた空気室から浮子式流量計および微調整用ニードル弁を経て真空掃除機によって吸引した。

作動流体は空気を使用し、実験は主として主流速度 $u_\infty = 10 \text{ m/s}$ (乱流強度0.64%) について行った。吸込み比は、吸込み流と主流との速度比 $F = v_0 / u_\infty$ で定義し、 $F = 0.01, 0.05, 0.1$ および 0.2 の4段階に変えて測定した。

伝熱表面温度は、加熱用ステンレス箔の裏面にはんだ付けした熱電対の出力を、デジタルマルチメータからGP-

[†] 1989年4月24日受理

^{††} 〒471 豊田市栄生町2-1

Fig. 1 Experimental apparatus

IB インターフェースを経由して、パーソナルコンピュータ、フロッピーディスクに記録したのちデータ処理した。実験方法の詳細は既報を参照されたい。

2. 実験結果および考察

2.1 流動特性に及ぼす吸込みの効果

スリットからの吸込みが熱伝達特性に及ぼす影響を調べる前に、流動特性を明らかにしておく必要がある。

Fig. 2 は吸込み効果の大きいスリット直後 $x=105\text{ mm}$ ($Re_x = u_\infty \cdot x / \nu = 7.3 \times 10^4$) における速度分布を、無次元距離 η について示したもので、図中の実線はブラジウスの層流速度分布を表す。吸込みのない $F=0$ の速度はブラジウス分布に完全に一致している。吸込み比の小さい $F=0.01$ では、壁面近傍で同一位置での $F=0$ の速度よりわずかに速度の増加がみられるが、顕著な差異ではない。吸込み比をさらに増加すると、境界層厚さは薄くなり、速度は吸込みの影響を強く受けるようになる。

特に、 $\eta \cong 0.5$ ($y \cong 0.2\text{ mm}$) から $\eta \cong 4.0$ ($y \cong 1.55\text{ mm}$) の領域で、速度の増加が顕著である。最も速度が増加する位置は $\eta \cong 1.0$ ($y \cong 0.39\text{ mm}$) であり、 $F=0$ の速度からの増加割合は $F=0.01$ で 12%、0.05 で 78%、0.1 で 94%、0.2 で 106% 程度である。

次に、吸込みがスリット後方位置の速度に及ぼす影響について Fig. 3 に示す。横軸は運動量厚さ θ で無次元化した垂直方向距離である。吸込みのない時、平板上の境界層内速度は層流分布 ($x=290\text{ mm}$) から乱流分布へ遷移しはじめるが、壁面近傍 $y/\theta < 3.8$ ($x=500\text{ mm}$) および $y/\theta < 2.0$ ($x=975\text{ mm}$) で乱流速度分布との相違が認められ、まだ十分に発達した乱流状態にはなっていない。このような流れに対して吸込みをする時、 $x=290\text{ mm}$ の位置では、 $x=105\text{ mm}$ での $F=0$ に対する速度増加に比べて減少するものの、依然として吸込み効果が持続されている。さらに F の増加によって、境界層外縁近傍から乱流への遷移の兆候がみられるようになる。

$x=500\text{ mm}$ では、 $F=0$ における乱流への遷移傾向が吸込みによって抑制され、流れは層流分布の方向へ向う。特に、 $y/\theta < 4.5$ の領域で顕著であり、吸込み比の増加

Fig. 2 The effect of suction on the velocity distribution near the slit

Fig. 3 Velocity distribution with and without suction

による遷移抑制効果は増進の傾向にある。もっと下流の $x=975\text{ mm}$ でも吸込みの影響がわずかながらも作用しており、 $y/\theta < 3.5$ の壁面近傍で遷移を遅らせている。

さて、吸込み効果を境界層特性値の面から調べるため、運動量厚さ θ の変化の様子を、 $F=0.1$ の場合について、Fig. 4 に示す。 $F=0$ では、 θ は層流境界層の特性である $\theta \propto x^{0.5}$ にしたがって増加し、 $x \cong 460\text{ mm}$ で乱流への遷移によって増加割合を増す。スリット付近での θ は $F=0$ における値よりも小さくなっている。これは前述したように、吸込みによって境界層内速度が増加する結果、粘性による運動量の欠損量が小さくなるためである。

スリット後方での θ は次第に増加して $F=0$ の層流時の値に漸近していき、臨界距離 $x_c \cong 460\text{ mm}$ を過ぎても層

Fig. 4 Momentum thickness with and without suction

流の傾向を維持している。 $x \cong 600\text{mm}$ 以降から遷移の兆候を示しはじめるが、 $F=0$ での遷移後の θ の増加傾向にくらべてかなりゆるやかな変化であり、吸込みが影響していることがわかる。

Fig. 5 は代表的な境界層特性値 δ^* および H の流れ方向変化を示す。吸込みによりスリット付近で減少した排除厚さ δ^* は θ と同様に下流方向にその厚さを増していくが、その増加はゆるやかで、乱流への遷移を遅らせる結果となっている。形状係数 H は、層流の $H=2.6$ からスリット近傍で 2.1 まで低下したのち、一度増加して 2.55 まで回復するが、 $x=440\text{mm}$ あたりから徐々に減少して遷移の特性を示すようになる。 $x=975\text{mm}$ での H は 1.6 であり、十分に発達した乱流の値 $H=1.4$ には至っていない。

Fig. 6 は平均摩擦係数 C_f の変化を示す。 $F=0$ では、層流域においてブラジウス理論をよく満足し、 $Re_e \cong 3.2 \times 10^5$ で遷移する。吸込みをする時、スリットより上流の壁面近傍の流れは加速されて速度こう配 $(\partial u / \partial y)_{y=0}$ が増加し、 C_f を上昇させる。 C_f の上昇度は吸込み比とともに増大し、 $F=0.1$ では $Re \cong 6.0 \times 10^5$ ($x \cong 86.25\text{mm}$) で 6.5~24.4% の上昇をもたらす。一方、スリットより下流では、壁面直近の流れは吸込みによって減速され、速度こう配を減少し、 C_f は $F=0$ の値より低下する。

吸込みの影響は下流へいくにつれて衰えるため、速度こう配の低下は抑制される。また、 C_f の低下領域は、前述のように運動量の欠損量が小さくなっている領域に対応している。これは運動量の欠損量は平板表面に作用する力に相当し、 C_f が θ に比例するため、Fig. 4 で示した θ の減少にともなって C_f が低下すると考えられる。 C_f の低下は $Re \cong 8.5 \times 10^4 \sim 9.0 \times 10^4$ で最も大きく、 $F=0.05$ では $Re \cong 2.1 \times 10^5$ 、 $F=0.1$ では $Re \cong 3.5 \times 10^5$ で層流の関係にしたがう傾向をとる。乱流への遷移レイノルズ数 Re_e は、 $F=0$ での $Re_e \cong 3.2 \times 10^5$ よりも下流に移行し、吸込み比の増加にともなって Re_e は上昇する。すなわち、

Fig. 5 Characteristic values of the boundary layer with suction

Fig. 6 Total skin friction factor with suction

$F=0.05$ では $Re_e \cong 4.7 \times 10^5$ 、 $F=0.1$ では $Re_e \cong 5.6 \times 10^5$ で遷移したのち、流れは次第に乱流の性質を帯びてくるが、発達乱流の平衡状態までには達していない。

2.2 熱伝達特性に及ぼす吸込みの効果

平板に沿う局所スタント数 St_x とレイノルズ数 Re_x との関係を Fig. 7 に示す。吸込みのない $F=0$ では、流れの遷移レイノルズ数 $Re_x \cong 3.2 \times 10^5$ よりいくぶん上流の $Re_x \cong 2.9 \times 10^5$ で乱流熱伝達へ遷移する。吸込みをする時、スリット付近の流れは吸込み作用によってスリット内に吸引され、同時に熱を運び去るとともに境界層内の速度が増速されるため熱伝達率が著しく増加するが、スリット後方へいくにしたがって減少する。スリット後方における壁面の極く近傍の流れに与えるスリット方向への吸引力は次第に衰え、逆流から順流へ変わる流れの停滞領域で熱伝達率を最小にし、その後 $F=0$ における層流の値に漸近したのち、乱流への遷移に移行する。

吸込み比の小さい $F=0.01$ では、スリット直後で最大 7% の熱伝達率の増加をもたらすものの、それ以外の領域においては $F=0$ の値と変わらず、遷移レイノルズ数もほぼ同一で熱伝達率に及ぼす吸込みの効果は余りみられな

Fig. 7 Local Stanton number with suction

い。しかし、吸込み比の増加にともなって熱伝達率はスリット直後の $Re_x \cong 7.3 \times 10^4$ ($x \cong 105 \text{ mm}$) で最大値をとり、 $F=0$ の値にくらべ $F=0.05$ で 31%, $F=0.1$ で 59%, $F=0.2$ で 134% 増と局所的には大きな上昇を示し、上昇領域も F が増加するほど広範囲となる。

一方、 $Re_x \cong 1.05 \times 10^5 \sim 1.15 \times 10^5$ ($x \cong 151 \sim 165 \text{ mm}$) で最小値をとり、25~33% 程度低下する。熱伝達の遷移レイノルズ数は吸込みの影響を受け、吸込み比の増加とともに下流方向へ移行するが、吸込みは流れの遷移レイノルズ数に与える効果ほどには大きくない。すなわち、 $F=0.05$ で $Re_c \cong 3.2 \times 10^5$, $F=0.1$ で $Re_c \cong 3.5 \times 10^5$, $F=0.2$ で $Re_c \cong 3.7 \times 10^5$ である。

Fig. 8 は平均スタントン数 St の変化を示す。Fig. 6 の平均摩擦係数 C_f との対比から流れと熱伝達との間に相似性は認められない。スリットより上流では吸込みの影響はほとんど認められず、スリット後方において吸込み比の増加にともなって St の上昇がわずかにみられる。

特に、 $F=0.2$ では $Re \cong 1.0 \times 10^5$ の前後で吸込みによる乱れの増幅によって St が乱流の値に達しているが、次第に乱れは減衰して St を減少させ、層流の値に漸近する。乱流への遷移は吸込みによって遅らされ、 $Re_x \cong 3.1 \times 10^5 \sim 4.5 \times 10^5$ となるが、流れにくらべ熱伝達の方がいくぶん早く遷移しはじめる傾向にある。遷移後、局所的には平板後端で乱流熱伝達の値にはほぼ達する状態にあるものの、平均的には遷移領域にとどまっている。

結 言

水平平板上に形成された層流境界層内にスリットを設置し、壁面から局所吸込みを行うことによって、熱伝達特性および流動特性に与える影響を実験的に調べ、次の結論を得た。

- 1) 局所熱伝達率はスリットより上流では吸込みの影響は余り認められないが、スリット付近で著しく増加し、

Fig. 8 Average Stanton number with suction

流れの停滞領域で減少したのち、次第に層流の値に漸近する。吸込み効果はスリット後方の全領域に及んでいる。

- 2) 平均熱伝達率と平均摩擦係数との間に相似性は認められない。吸込み比の増加によって乱流への遷移を遅らせるが、熱伝達率は流れにくらべいくぶん早く発達する。

- 3) 平均摩擦係数はスリットより上流で壁面近傍の加速流により上昇し、下流で減速流により低下するが、次第に層流の値に漸近する。

- 4) 境界層特性値 δ^* および θ は吸込み効果によって減少をもたらす。

- 5) 境界層内速度は吸込みによって強い影響を受け、特にスリット直後では壁面近傍で増速し、境界層厚さを薄くする。また、乱流への遷移は外層領域から内層領域へ向けて進行する。

Nomenclature

C_f	= skin friction factor	[-]
F	= suction rate	[-]
H	= shape factor	[-]
l	= length of flat plate	[m]
Nu	= Nusselt number	[-]
Pr	= Prandtl number	[-]
q_w	= heat flux	[W/m ²]
Re	= Reynolds number	[-]
St	= Stanton number	[-]
T	= temperature	[°C]
u	= velocity	[m/s]
u_0	= suction velocity	[m/s]
x	= longitudinal distance from the leading edge of flat plate	[m]
y	= vertical distance from the surface of flat plate	[m]

α = heat transfer coefficient [W/(m²·K)]
 δ = displacement thickness [mm]
 η = dimensionless coordinate, $y\sqrt{u_\infty/\nu x}$ [-]
 θ = momentum thickness [mm]
 ν = kinematic viscosity [m²/s]
 ρ = density [kg/m³]

<Subscripts>

c = transition
 x = local
 w = wall
 ∞ = main stream

Literature cited

- 1) Brosh, A. and Y. Winograd: *Trans. ASME, C*, **96**, 338 (1974)
- 2) Hirayama, N. and T. Maeda: *Journal of JSME*, **76**, 1393 (1973)
- 3) Kinney, R.B. and E.M. Sparrow: *Trans. ASME, C*, **92**, 117 (1970)
- 4) Komori, K., A. Iguchi, R. Izumi and T. Inagaki: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **15**, 139 (1989)
- 5) Merkin, L., A. Solan and Y. Winograd: *Trans. ASME, C*, **93**, 242 (1971)
- 6) Sano, M. and N. Hirayama: *Trans. JSME, B*, **50**, 520 (1984)
- 7) idem: *ibid.*, **B**, **50**, 2041 (1984)
- 8) idem: *ibid.*, **B**, **50**, 3166 (1984)
- 9) Schildknecht, M., J.A. Miller and G.E.A. Meier: *J. Fluid Mech.*, **90**, part 1, 67 (1979)
- 10) Schlichting, H.: "*Boundary-Layer Theory*", 6th Ed., p. 367, McGraw-Hill Co., New York (1968)

Effects of Suction through a Slit on Forced Convective Heat Transfer

Katsuo Komori and Terumi Inagaki

Dept. of Mech. Eng., Toyota College of Tech., Toyota 471

Key Words : Heat Transfer, Forced Convection, Suction, Heat Transfer Coefficient, Friction Factor, Transition

Experiments were performed to investigate the effect of suction through a slit on the characteristics of heat transfer. A suction slit 160 mm wide and 3 mm long was arranged in a laminar boundary layer formed on a flat plate and across the main stream at a distance 100 mm downstream from the leading edge of the flat plate. Heat transfer coefficients and characteristics of flow were measured for air flow with a Reynolds number from 2.0×10^4 to 7.0×10^5 and with a suction rate from 0.01 to 0.2.

Conclusions obtained are as follows. The local heat transfer coefficient increases remarkably near the slit, and after a decrease within the stagnant region of the flow it gradually approaches the value at laminar flow.

The starting point of transition from laminar to turbulent tends to shift downstream with the increase in suction rate. The turbulent transition in the average heat transfer coefficient starts somewhat earlier than that in the flow. The velocities in the boundary layer are influenced markedly by suction and are accelerated, especially at the immediate rear of the slit. The turbulent transition in flow develops for the inner layer from the outer edge of the shear layer.

~~~~~